

## 島根原子力発電所 2 号炉

### 建物の地震応答解析モデルについて

(建物基礎底面の付着力及び 3 次元 F E M  
モデルの採用)

## 目 次

1. はじめに
2. 検討方針及び妥当性確認
  - 2.1 基礎浮上り評価法に関する既往の知見
  - 2.2 低接地率となる地震応答解析結果の妥当性確認について
    - 2.2.1 廃棄物処理建物に関する検討
    - 2.2.2 制御室建物に関する検討
3. まとめ
4. 参考文献

添付資料－1 建物基礎底面の付着力に関する検討

添付資料－2 廃棄物処理建物の地震応答解析

添付資料－3 制御室建物の地震応答解析

参考資料－1 付着力を考慮した3次元FEMモデルの適用性について

参考資料－2 付着力の考慮の有無による建物応答への影響の検討

参考資料－3 岩盤－レベルコンクリート間における付着力試験実施後の破断面について

参考資料－4 設定付着力に関する統計的な考察について

参考資料－5 試験地盤と建物直下地盤の同等性について

補足資料－1 既工認実績における付着力試験方法との比較

補足資料－2 既工認実績における設定付着力との比較

補足資料－3 島根原子力発電所 敷地の地質・地質構造について

補足資料－4 建物直下地盤周囲の地盤状況について

## 1. はじめに

島根原子力発電所の建設時の工事計画認可申請書（以下「既工認」という。）では、原子炉建物等の地震応答解析における基礎浮上り評価について、線形地震応答解析又は浮上り非線形地震応答解析を実施している。

今回の工事計画認可申請（以下「今回工認」という。）では、入力地震動の増大に伴い、基準地震動  $S_s$  による検討においては、一部解析結果で浮上り非線形地震応答解析を適用できる接地率に満たない可能性が高いことから、個別に解析の妥当性を確認した上で採用する解析手法を選定する予定である。

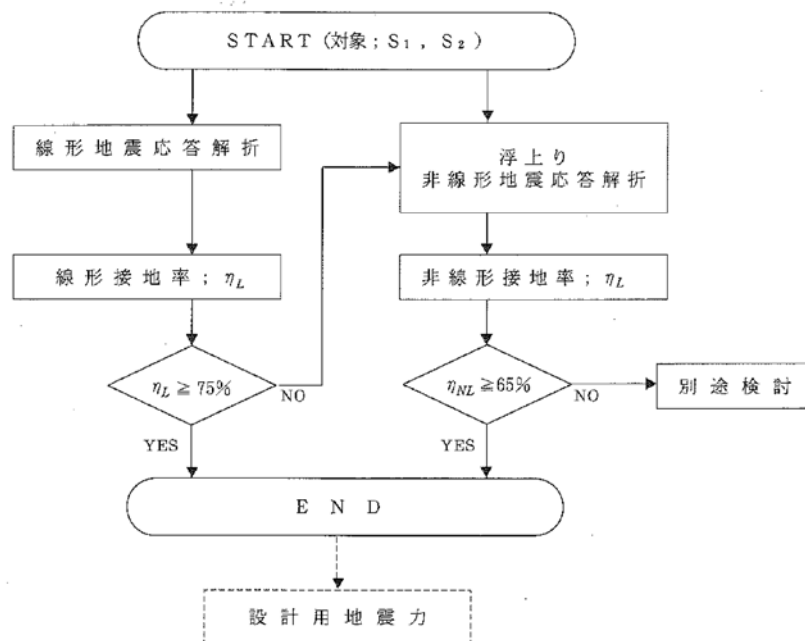
本資料は、低接地率となる見込みの解析結果について個別に解析の妥当性を確認し、採用する地震応答解析モデル（基礎浮上り評価法）について説明するものである。

## 2. 検討方針及び妥当性確認

基礎浮上り評価法に関する既往の知見を整理し、低接地率となる見込みの解析結果について個別に解析の妥当性を確認する。これらを踏まえて採用する地震応答解析モデルについて検討を行う。

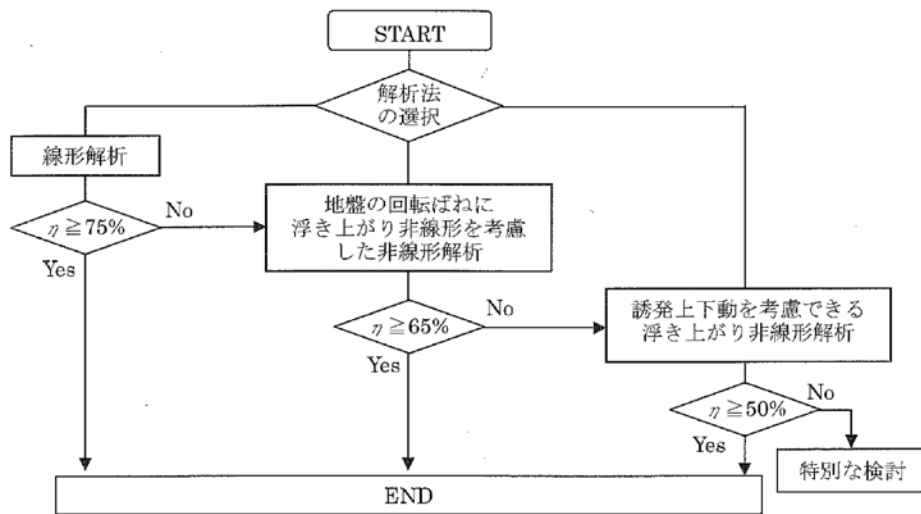
### 2.1 基礎浮上り評価法に関する既往の知見

島根原子力発電所2号炉（以下「島根2号炉」という。）の地震応答解析に当たっては、建物形状に応じ、建物と地盤の相互作用を考慮することとしている。「原子力発電所耐震設計技術指針J E A G 4 6 0 1（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）-1987」においては、建物と地盤の相互作用の影響を適切に考慮できるモデルとしてSRモデルや離散系モデル（FEMモデルを含む）が列挙されている。また、「J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」においては、接地率に応じた地震応答解析手法の適用性が示されており、接地率 $\eta_{NL} < 65\%$ の場合は別途検討となっている（第2-1図参照）。



第2-1図 基礎浮上り評価フロー  
（「J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」より抜粋）

参考として、接地率 $\eta_{NL} < 65\%$ となる場合の別途検討の手法として、「原子力発電所耐震設計技術規程J E A C 4 6 0 1-2008（以下「J E A C 4 6 0 1-2008」という。）」では、誘発上下動を考慮したSRモデルや、特別な検討としてジョイント要素を用いた3次元FEMモデルが提案されている（第2-2図参照）。



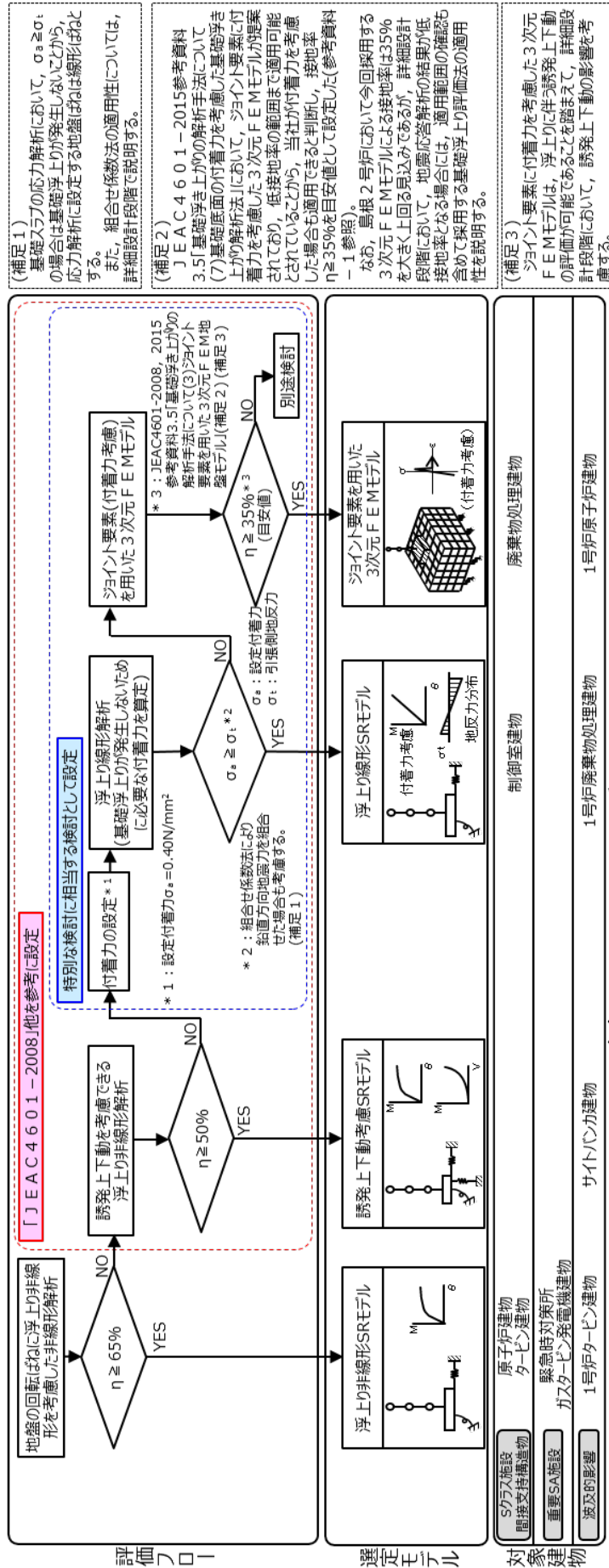
第2-2図 基礎浮上り評価フロー  
 (「J E A C 4 6 0 1 - 2008」より抜粋)

## 2.2 低接地率となる地震応答解析結果の妥当性確認について

### (1) 基礎浮上り評価方針

島根2号炉の建物・構築物は「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に示される浮上り非線形地震応答解析により基準地震動 $S_s$ に対して接地率を算定することを基本とする。接地率 $\eta < 65\%$ となる場合の別途検討は、「J E A C 4 6 0 1 -2008」及び「J E A C 4 6 0 1 -2015」の評価フローを参考とした。

上記を踏まえた島根2号炉における各建物(重要SA施設及び波及的影響に係る施設を含む)の地震応答解析モデル(基礎浮上り評価法)の選定フローを第2-3図に示す。



第2-3 図 島根2号炉における各建物の地震応答解析モデルの選定フロー

## (2) 採用する地震応答解析モデルの選定

制御室建物、廃棄物処理建物等は誘発上下動を考慮できる浮上り非線形解析において、接地率  $\eta < 50\%$  となる見込みであることから、第2-3図に示す「特別な検討に相当する検討」として、建物の基礎底面の付着力を考慮した地震応答解析等を行い、その適用性を確認した上で、採用する地震応答解析モデルを選定する。

建物の基礎底面と地盤間の付着力は、島根原子力発電所における付着力試験の結果に基づき  $0.40\text{N/mm}^2$  とした。(添付資料-1 参照)

なお、本資料では制御室建物及び廃棄物処理建物の検討結果を示すこととし、これら以外の建物において付着力を考慮する場合に採用する基礎浮上り評価法の適用性については、詳細設計段階にて説明する。

また、島根2号炉において今回採用する3次元FEMモデルによる接地率は35%を大きく上回る見込みであるが、詳細設計段階において、地震応答解析の結果が低接地率となる場合には、適用範囲の確認も含めて採用する基礎浮上り評価法の適用性を説明する。

## (3) 建物基礎底面の付着力有無による建物応答への影響検討

建物基礎底面の付着力は、地震応答解析における解析精度の確保（接地率の改善）を目的として設定したものであり、建物基礎底面の付着力の考慮の有無による建物応答への影響を把握するため、第2-3図において、付着力を考慮しない地震応答解析モデルを採用する建物のうち、建物・内包する施設の重要度及び接地率を踏まえ、原子炉建物を代表として、付着力を考慮していないモデルと付着力を考慮したモデルを用いた地震応答解析を行った。その結果、付着力により接地率は改善され、両モデルとも同等の応答値を示した。このことから付着力の考慮の有無による建物応答への影響は軽微であることを確認している。(参考資料-2 参照)

なお、今回の検討において、一部周期帯で付着力考慮モデルの応答が付着力考慮なしモデルの応答を僅かに上回っていることから、詳細設計段階において、付着力を考慮しない建物のうち、建物・内包する施設の重要度、それらの許容限界に対する裕度、及び接地率を踏まえた上で、代表とする建物を選定し、付着力を考慮した場合の建物・設備への影響を確認する。



## 2.2.1 廃棄物処理建物に関する検討

### (1) 検討概要

廃棄物処理建物は建物が比較的小規模で、基準地震動 $S_s$ に対する接地率が小さい（接地率 $\eta < 50\%$ ）ため、接地率 $\eta < 65\%$ となる場合の別途検討手法として先行プラントの既工認で適用実績のあるジョイント要素（付着力考慮）を用いた3次元FEMモデルによる地震応答解析を行い、接地率が適用範囲内（ $\eta \geq 35\%$ （目安値））であることを確認する。

### (2) 検討結果

廃棄物処理建物について、ジョイント要素を用いた3次元FEMモデルによる地震応答解析を行った結果を添付資料-2に示す。

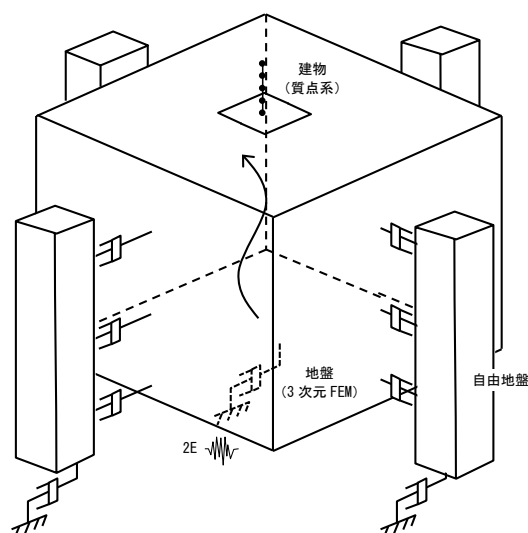
検討の結果、ジョイント要素を用いた3次元FEMモデルによる接地率（最小値）は98.8%（ $S_s-D$ , NS方向）、93.9%（ $S_s-D$ , EW方向）であり、解析の適用性を確認した。

### (3) 採用する基礎浮上り評価法

廃棄物処理建物はジョイント要素（付着力考慮）を用いた3次元FEMモデルの適用範囲を確認した上で、地震応答解析に際しては、ジョイント要素を用いた3次元FEMモデルを採用することとする。

なお、ジョイント要素を用いた3次元FEMモデルは、先行審査（高浜3, 4号炉中間建屋）の地震応答解析で適用実績がある。

ジョイント要素を用いた3次元FEMモデルを第2-4図に示す。



第2-4図 ジョイント要素を用いた3次元FEMモデル

## 2.2.2 制御室建物に関する検討

### (1) 検討概要

制御室建物は建物が小規模であることから、基準地震動  $S_s$  に対する接地率が小さい（接地率  $\eta < 50\%$ ）ため、建物基礎の接地状況を踏まえた検討を行う。

制御室建物について「J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版」に示される浮上り線形地震応答解析を実施し、基礎浮上りが発生しないために必要な付着力の算定を行う。

検討の結果、基礎浮上りが発生しないために必要な付着力が、島根原子力発電所における付着力試験の結果に基づき設定した値を超えないことを確認する。

### (2) 検討結果

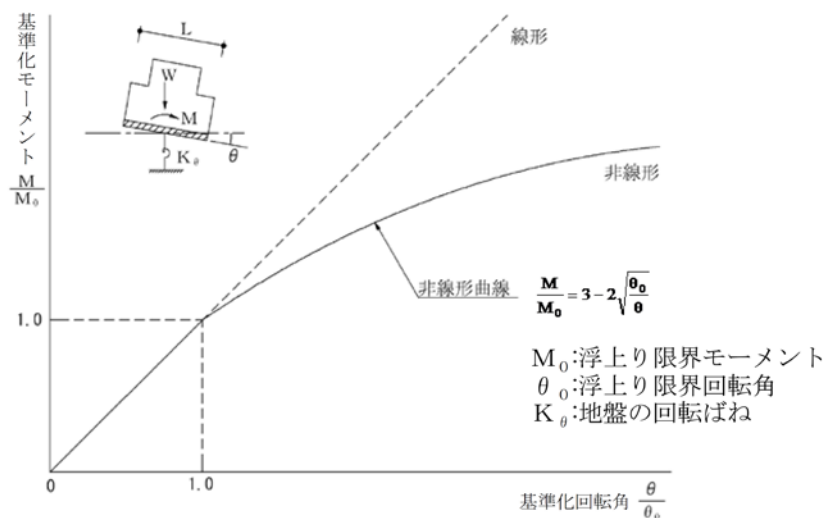
制御室建物について「J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版」に示される浮上り線形地震応答解析を実施し、基礎浮上りが発生しないために必要な付着力の算定を行った結果を添付資料-3に示す。

検討の結果、基礎浮上りが発生しないために必要な付着力（最大値）は  $0.32 \text{ N/mm}^2$  ( $S_s - D$ ,  $NS$  方向) であることから、島根原子力発電所における付着力試験の結果に基づき設定した値 ( $0.40 \text{ N/mm}^2$ ) を超えないことを確認した。

### (3) 採用する基礎浮上り評価法

制御室建物は基礎浮上りが発生しないことを確認した上で、地震応答解析に際しては、浮上り線形地震応答解析を採用することとする。

なお、建物基礎底面の付着力の考慮は、先行審査（高浜3，4号炉中間建屋，川内1，2号炉ディーゼル建屋，主蒸気管室建屋）の地震応答解析で適用実績がある。



第2-5 図 地盤の回転ばねのモーメントー回転角関係

### 3. まとめ

基礎浮上り評価法に関する既往の知見を整理し、低接地率となる見込みの解析結果について個別に解析モデルの適用性を確認し、今回工認で採用する地震応答解析モデルについて検討を行った。

検討の結果、島根2号炉の今回工認で採用する建物・構築物の地震応答解析モデルは、第3-1表の通りとする予定である。

第3-1表 採用する地震応答解析モデル（基礎浮上り評価法）

建 物	採用する地震応答解析モデル (基礎浮上り評価法)	備 考
廃棄物処理建物	ジョイント要素を用いた3次元FEMモデル	個別に解析の妥当性確認を実施 (添付資料-2参照)
制御室建物	SRモデル(浮上り線形地震応答解析)	個別に解析の妥当性確認を実施 (添付資料-3参照)
1号炉原子炉建物	ジョイント要素を用いた3次元FEMモデル	個別に解析の妥当性確認を実施 (詳細設計段階にて説明する)
1号炉廃棄物処理建物	SRモデル(浮上り線形地震応答解析)	個別に解析の妥当性確認を実施 (詳細設計段階にて説明する)

注1：原子炉建物及びタービン建物は浮上り非線形解析を採用し、接地率 $\eta \geq 65\%$ の見込み。

ただし、材料物性等の不確かさを考慮した地震応答解析の結果、接地率 $\eta < 65\%$ となる場合、先行審査を含めた既工認で適用実績のある手法による解析を採用する。

注2：上記以外の波及的影響に係る施設及び新設のSA施設の地震応答解析に当たっては、接地率 $\eta$ 及び接地圧の値に応じて、浮上り線形地震応答解析、浮上り非線形地震応答解析、誘発上下動を考慮したSRモデル又はジョイント要素を用いた3次元FEMモデル等の先行審査を含めた既工認で適用実績のある手法による解析を採用する。

#### 4. 参考文献

- (1) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987
- (2) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版
- (3) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1 -2008
- (4) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1 -2015

## 建物基礎底面の付着力に関する検討

### 1. 概要

本資料は、建物・構築物の地震応答解析モデルの基礎底面に設定した付着力に関して、その設定の妥当性について説明する。

### 2. 検討方針

地震応答解析に考慮する付着力について、既往の知見及び島根原子力発電所で実施した付着力試験の結果を踏まえて設定する。

### 3. JNES 報告書による付着力に関する研究

建物基礎と地盤間の付着力に関しては系統だった研究はあまり行われておらず、知見も限られる状況の中、「(独)原子力安全基盤機構の報告書<sup>(1)</sup>」(以下「JNES 報告書」という。)では付着力について試験及び解析的検討が実施され、次の知見が得られたとされている。

- ・直接引張による付着力試験結果を用いたシミュレーション解析により、面的な広がりをもつ試験体の基礎浮上り挙動をよく再現できた。
- ・基礎浮上り評価においては、実際の発電所サイトの岩盤やレベルコンクリートの状況から付着力を推定する、あるいは試験等で付着力を確認することによって、基礎浮上りの評価に付着力を考慮することが可能と考えられる。

これらの知見の島根原子力発電所への適用性の確認と、「JNES 報告書」の試験方法を参考とした試験計画の策定を目的として、「JNES 報告書」の研究内容を確認した。

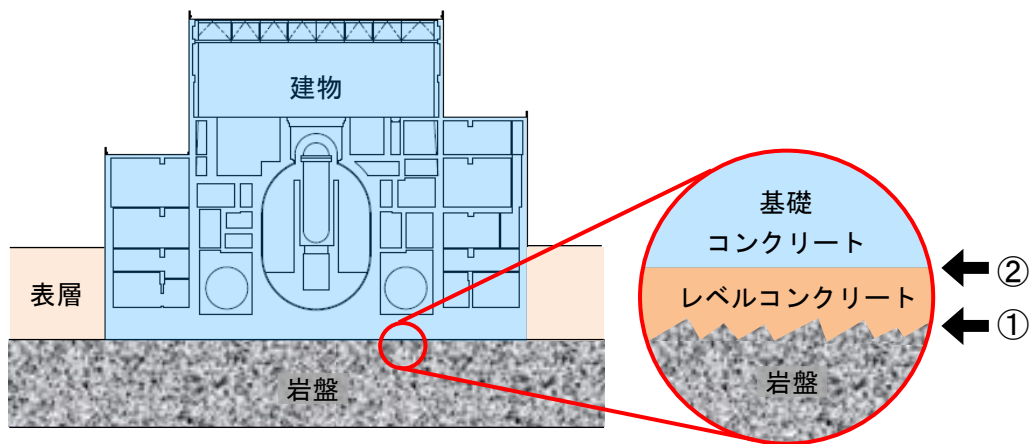
以下に「JNES 報告書」の概要を示す。

### 3.1 研究概要

既往の原子炉施設は、第 3-1 図に示すように岩盤に直接支持されており、表層土を掘削した後、岩盤上に直接コンクリートを打設するのが一般的である。この場合コンクリートと岩盤の境界面には付着力が生じていると予想され、地震時の基礎浮上り挙動に影響を与えると考えられる。しかし、付着力に関しては系統だった研究は少なく、知見が十分ではないことから、建物基礎-岩盤間の付着力把握試験及び解析を実施し、実際の原子炉施設において付着力が基礎浮上り性状に与える影響を検討するための基礎データを取得することを目的として、本検討が実施された。

第 3-1 図に示すように岩盤と基礎との間にはレベルコンクリートが打設されるため、接合面としては、岩盤とレベルコンクリート間(第 3-1 図の①)、及びレベルコンクリートと基礎コンクリート間(第 3-1 図の②)が存在する。本検討では、①を模擬した 10cm×10cm の接合面での付着力を検討する要素試験体による直接引張試験及び曲げ引張試験と、①、②を模擬した 150cm×150 cm の接合面で付着力を検討する中規模試験体による静的引き上げ実験及び 3 次元 FEM 解析を用いた解析的検討が行われた。

検討の結果、3次元 FEM 解析に設定する付着力の材料特性値としては、要素試験体による直接引張試験結果が適切と考えられるとしている。



第 3-1 図 原子炉施設の建物基礎と岩盤

## 3.2 要素試験

### 3.2.1 実験因子と水準

要素試験の実験因子と水準を第 3-1 表に示す。岩盤種類は硬岩として花崗岩，軟岩として凝灰岩，硬岩と軟岩の中間的な一軸圧縮強度レベルとして砂岩としている。岩盤の表面は自然破断面としている。レベルコンクリートの強度は，代表的なレベルコンクリート（推定強度 180kg/cm<sup>2</sup>）と同程度と考えられる呼び強度 15N/mm<sup>2</sup>としている。

第 3-1 表 実験因子と水準

実験因子	水準
岩盤の種類	①花崗岩（圧縮強度 150N/mm <sup>2</sup> 程度） ②砂 岩（圧縮強度 100N/mm <sup>2</sup> 程度） ③凝灰岩（圧縮強度 20N/mm <sup>2</sup> 程度）
岩盤の表面粗さ	平滑面（自然破断面：凹凸 10～20mm 程度）
コンクリート強度	呼び強度 15N/mm <sup>2</sup>

### 3.2.2 試験方法

#### (1) 岩盤の物性

岩盤の物性は，一軸圧縮強度（J G S 2 5 2 1 -2000），圧裂引張強度（J G S 2 5 5 1 -2000），及び超音波伝播速度（J G S 2 1 1 0 -1998）を測定している。

#### (2) コンクリートの物性

コンクリートの物性は，材齢 28 日及び直接引張試験材齢における圧縮強度と割裂引張強度を測定している。

#### (3) 直接引張試験

試験体寸法は 60cm×10cm×20cm とした。高さ 10cm の岩盤の上部にコンクリートを厚さ 10cm で打設し，湿布養生を行ったとしている。

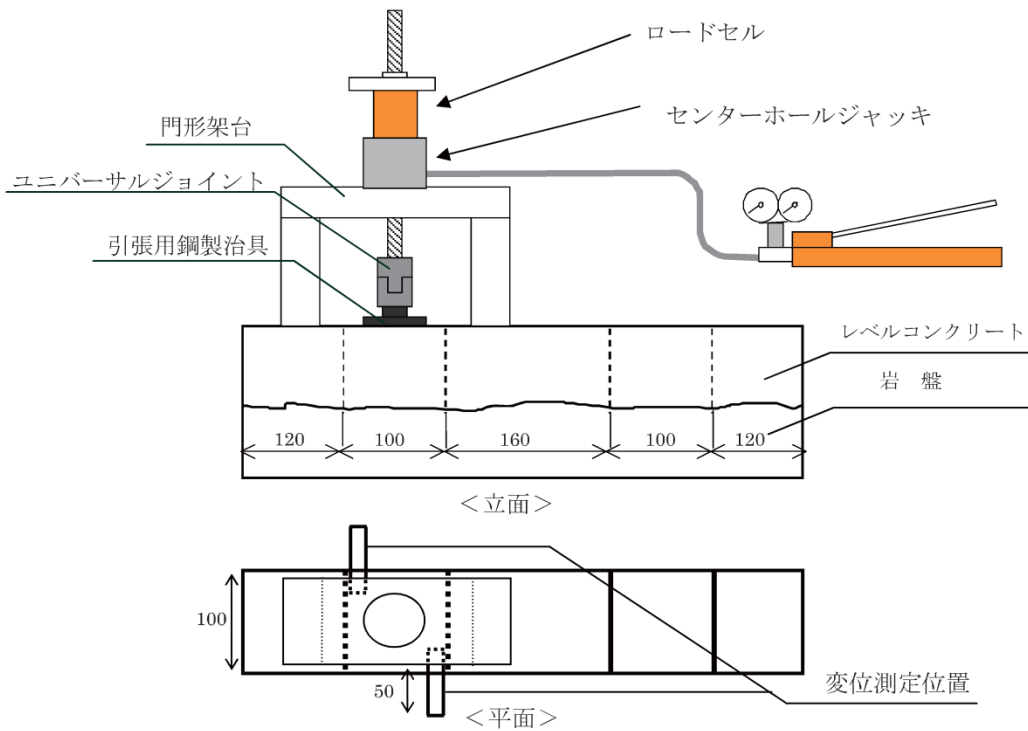
試験体は 1 種類の岩盤に対して 6 体作製し，1 試験体について 2 箇所実施している。試験体にはあらかじめ下部の岩盤に達するまでの切れ込みをコンクリートカッターで入れたとしている。加力箇所上面には 10cm×10cm の鋼製治具をエポキシ樹脂で接着したとしている。加力は第 3-2 図に示す方法で行い，岩盤とコンクリートの界面が剥離破壊するまでの荷重を測定している。直接引張試験による付着力  $F_t$  は，下式より算定している。

$$F_t = \frac{P}{A}$$

ここで、 $F_t$  : 付着力 ( $N/mm^2$ )

$P$  : 最大荷重 (N)

$A$  : 破断面積 ( $mm^2$ )



第 3-2 図 直接引張試験方法

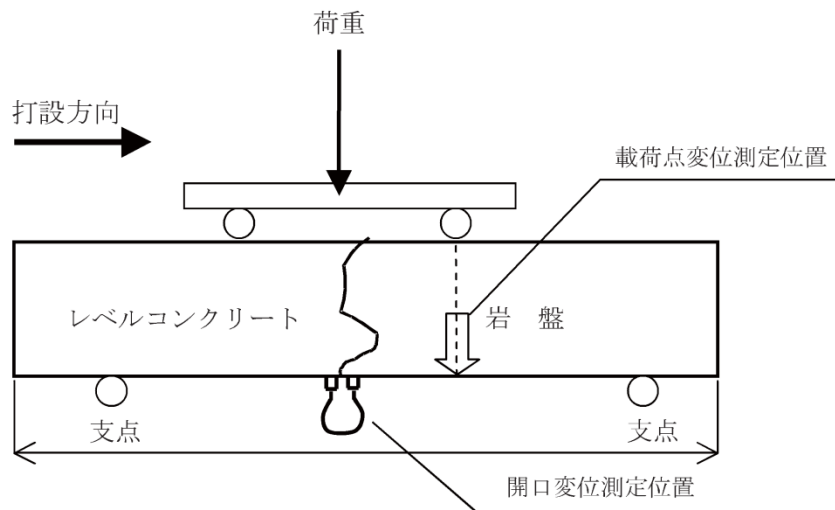


(4) 曲げ試験

試験体寸法は長さ 40cm×幅 10cm×高さ 10cm としている。長さ 20cm の岩盤を縦に設置し、その上部にレベルコンクリートを厚さ 20cm で打設して湿布養生を行ったとしている。加力は第 3-3 図に示す方法で行い、界面が剥離破壊するまでの荷重を測定している。曲げ試験による付着力  $F_b$  は、下式より算定している。

$$F_b = \frac{P L}{B H^2}$$

- ここで、  $F_b$  : 付着力 ( $N/mm^2$ )  
P : 最大荷重 (N)  
L : 支点間距離 (300mm)  
B : 破断面幅 (mm)  
H : 破断面高さ (mm)

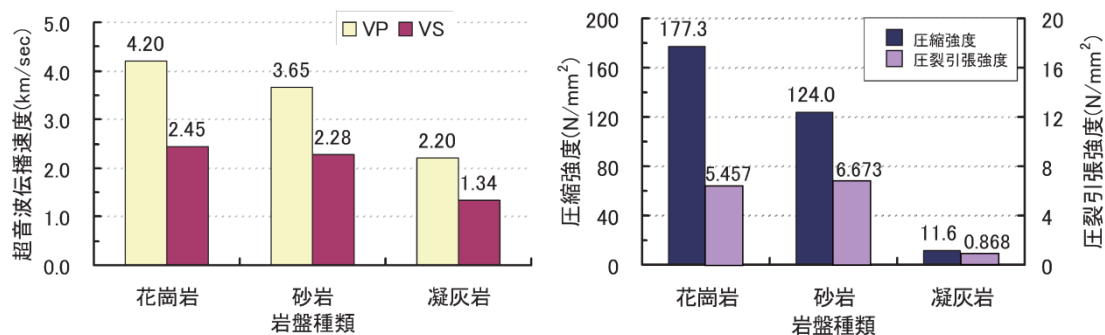


第 3-3 図 曲げ引張試験方法

### 3.2.3 実験結果

#### (1) 岩盤の物性

岩盤の超音波伝播速度測定結果及び圧縮強度と圧裂引張強度試験結果を第3-4図に示す。



(a) 超音波伝播速度

(b) 強度試験

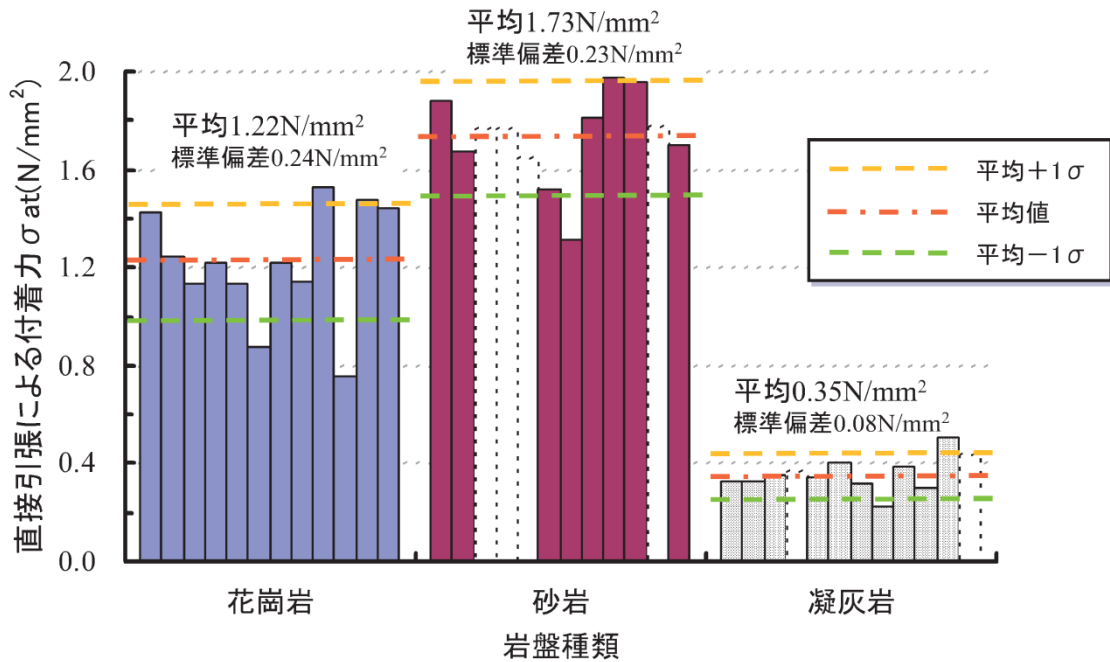
第3-4図 岩盤の試験結果

#### (2) コンクリートの物性

レベルコンクリートの圧縮強度は、材齢28日では平均 $21.9\text{N/mm}^2$ 、直接引張試験と曲げ試験を実施した材齢30日では平均 $24.7\text{N/mm}^2$ であったとしている。また、割裂引張強度は材齢28日では平均 $2.25\text{N/mm}^2$ 、材齢30日では平均 $2.38\text{N/mm}^2$ であり、圧縮強度の約1/10であったとしている。

(3) 直接引張試験

第3-5図に直接引張試験結果を示す。界面で破壊しなかった結果は点線で示している。付着力の平均値は、砂岩 ( $1.73\text{N/mm}^2$ ) > 花崗岩 ( $1.22\text{N/mm}^2$ ) > 凝灰岩 ( $0.35\text{N/mm}^2$ ) となった。岩盤の圧裂引張強度は、砂岩 ( $6.7\text{N/mm}^2$ ) > 花崗岩 ( $5.5\text{N/mm}^2$ ) > 凝灰岩 ( $0.9\text{N/mm}^2$ ) の順となっており、付着力は岩盤の圧裂引張強度の順と同じ傾向となったとしている。



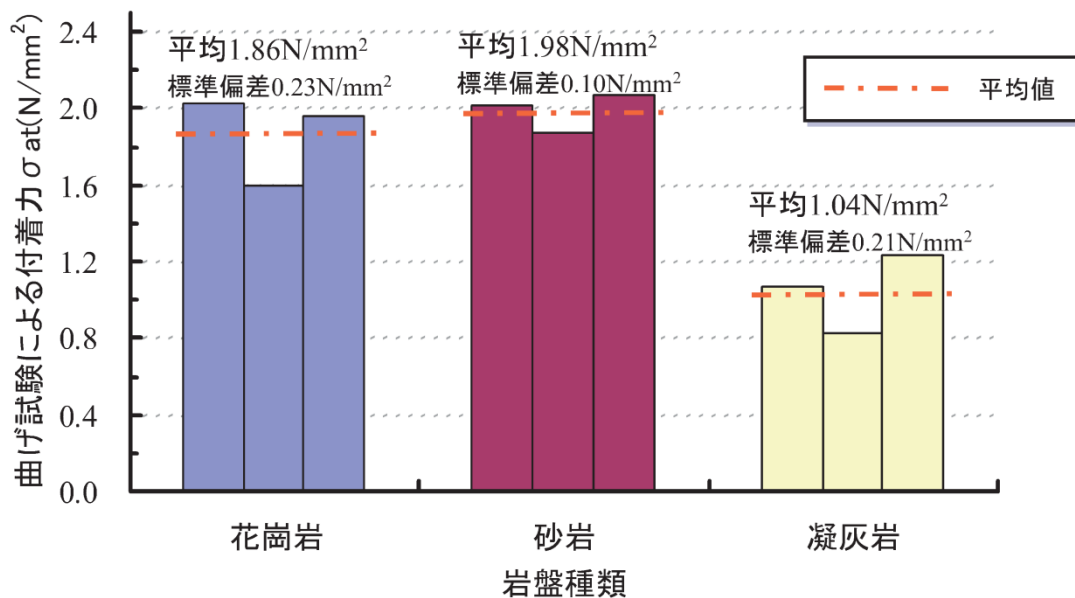
※破線のデータは、岩盤がスリットから斜めに破壊した値を示す。(平均値からは除外)

第3-5図 直接引張試験による付着力

#### (4) 曲げ試験

第3-6図に曲げ試験結果を示す。付着力の平均値は、砂岩 ( $1.98\text{N/mm}^2$ ) > 花崗岩 ( $1.86\text{N/mm}^2$ ) > 凝灰岩 ( $1.04\text{N/mm}^2$ ) となったとしている。付着力は岩盤の圧裂引張強度の順と同じ傾向にあり、これは直接引張試験の場合と同様であるとしている。

直接引張試験による付着力に対する曲げ試験による付着力の比は、花崗岩では1.5、砂岩では1.15、凝灰岩では3.0となったとしている。コンクリートでは一般的に曲げ強度は引張強度の1.2倍～3倍程度とされており、今回の試験結果は概ね同じ程度であったとしている。



第3-6図 曲げ試験による付着力

### 3.3 中規模試験

#### 3.3.1 実験因子と水準

中規模試験シリーズの実験変数を第3-2表に示す。岩盤とレベルコンクリート間を対象としたRCシリーズでは、岩盤を花崗岩とし、その表面は粗面と平滑面の2種類の自然破砕面としている。粗面及び平滑面の最大凹凸差は、それぞれ、80mm程度と20mm程度としている。また、レベルコンクリートと基礎コンクリート間を対象としたCBシリーズでは、実施工の状況を考慮し、レベルコンクリートの表面を木ごて仕上げとし、レイタンスの除去等の処理を施さない状態で接合面に基礎コンクリートを打設したとしている。試験体は各試験シリーズにつき3体としている。岩盤は「3.2 要素試験」と同一種類の花崗岩を使用している。

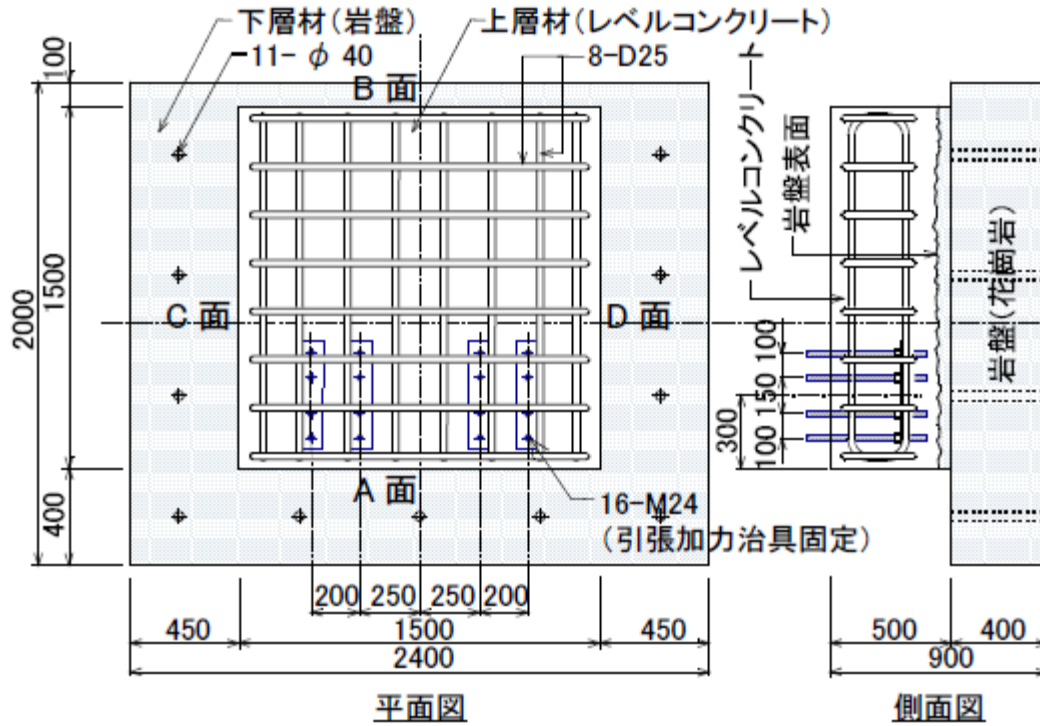
第3-2表 中規模試験体シリーズ

試験シリーズ	下層材	上層材	下層材表面
RC-N	花崗岩 (圧縮強度 150N/mm <sup>2</sup> 程度)	レベルコンクリート (呼び強度 15N/mm <sup>2</sup> )	粗面 (凹凸 80mm 程度)
RC-F	花崗岩 (圧縮強度 150N/mm <sup>2</sup> 程度)	レベルコンクリート (呼び強度 15N/mm <sup>2</sup> )	平滑面 (凹凸 20mm 程度)
CB	レベルコンクリート (呼び強度 15N/mm <sup>2</sup> )	基礎コンクリート (呼び強度 30N/mm <sup>2</sup> )	木ごて仕上げ

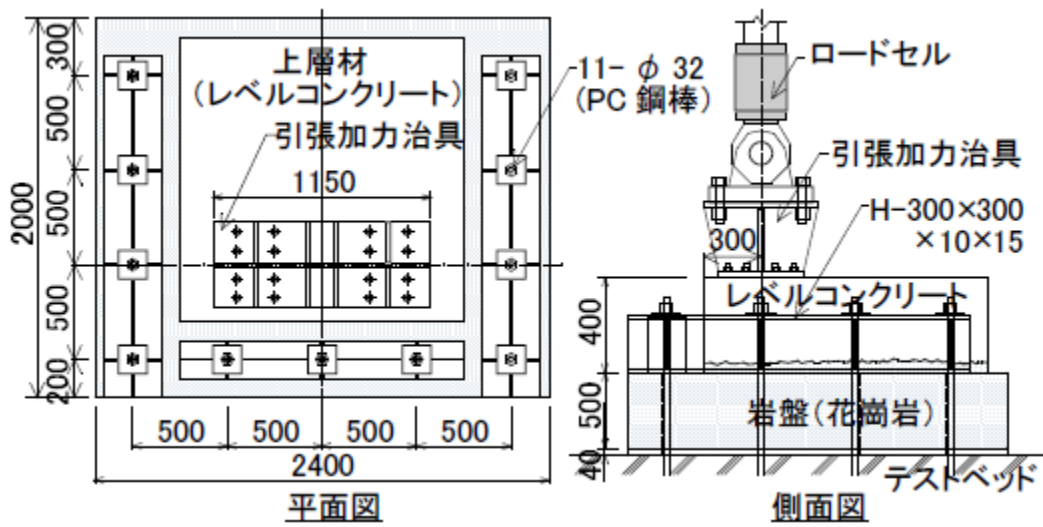
#### 3.3.2 試験方法

RCシリーズの形状・寸法を第3-7図に示す。接合面の寸法は、1.5m×1.5mであり、接合面は、岩盤下面から400mm～480mm程度の高さに位置している。CBシリーズ試験体では、下層材と上層材の厚さを400mmとし、他の形状寸法はRCシリーズと同一としている。

第3-8図に加力方法を示す。下層材の3辺をPC鋼棒により反力床に固定し、基礎浮上がり時における付着力の応力勾配を模擬するため、上層材の偏心位置に引張力を载荷したとしている。



第3-7図 試験体形状・寸法 (RCシリーズ)



第3-8図 加力方法

### 3.3.3 実験結果

各試験シリーズのコンクリートの強度試験結果を第3-3表に示す。

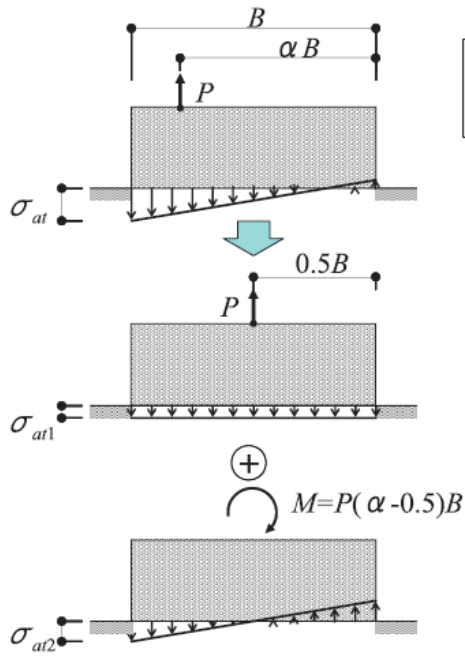
第3-3表 コンクリートの強度試験結果

試験シリーズ	部位	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
RC-N	レベルコンクリート	19.5	1.96	2.26×10 <sup>4</sup>
RC-F	レベルコンクリート	20.7	1.89	2.28×10 <sup>4</sup>
CB	レベルコンクリート	20.5	2.19	2.27×10 <sup>4</sup>
	基礎コンクリート	33.6	2.68	2.84×10 <sup>4</sup>

実験結果の一覧を第3-4表に示す。最大荷重は上層材と加力治具の重量を差し引いた値としている。また、付着力は、偏心引き上げ荷重に対して接合面の付着応力分布を線形と仮定して力のつり合いより評価した値であるとしている（第3-9図）。こうした評価方法による付着力は、花崗岩とレベルコンクリート間で花崗岩表面の粗度によらず、0.5N/mm<sup>2</sup>程度となり、また、レベルコンクリートと基礎コンクリート間で0.6N/mm<sup>2</sup>程度となったとしている。

第3-4表 実験結果

試験体	最大荷重 (kN)	付着力 (N/mm <sup>2</sup> )	平均付着力 (N/mm <sup>2</sup> )
RC-N 1	360.9	0.45	0.53
RC-N 2	462.9	0.58	
RC-N 3	447.1	0.56	
RC-F 1	437.0	0.54	0.54
RC-F 2	442.8	0.55	
RC-F 3	415.5	0.52	
CB-W 1	550.8	0.69	0.63
CB-W 2	404.3	0.50	
CB-W 3	572.3	0.71	



- 線形付着応力分布の仮定
- レベルコン・加力治具重量補正

$$P = P_{\max} - W_D$$

$P_{\max}$ : 最大荷重

$W_D$ : レベルコン・  
加力治具重量

$$\sigma_{at} = \sigma_{at1} + \sigma_{at2} = (3\alpha - 1) \frac{2P}{B^2}$$

$$\sigma_{at1} = \frac{P}{B^2}$$

$$\sigma_{at2} = \frac{M}{Z} = \frac{6P(\alpha - 0.5)}{B^2}$$

第3-9図 中規模試験による付着力評価方法



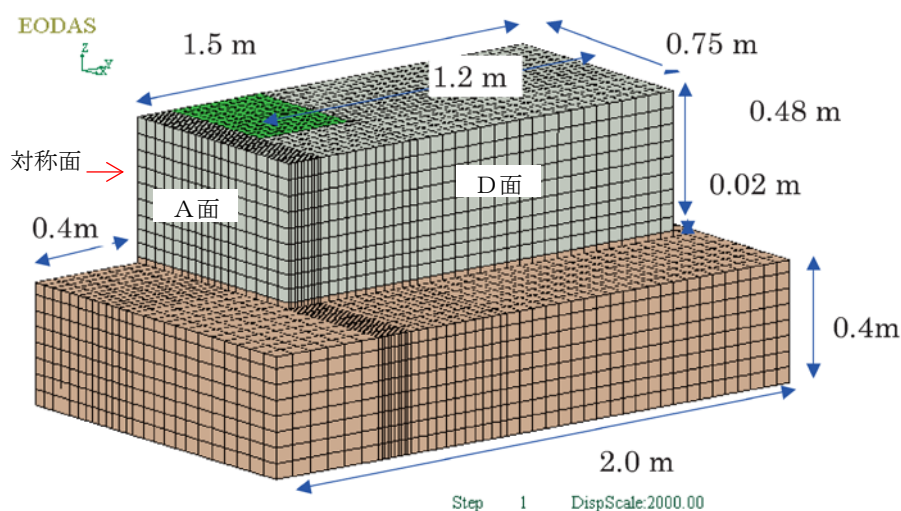
### 3.4 中規模試験体を対象とした3次元FEM解析

#### 3.4.1 解析概要

花崗岩とレベルコンクリートの付着力は、直接引張試験では平均値が  $1.2\text{N/mm}^2$  程度であり、偏心引き上げ荷重に対して付着応力に線形分布を仮定した場合の中規模試験結果は  $0.5\text{N/mm}^2$  程度となったとしている。両者による付着力の評価結果の差を検討するため、RCシリーズ試験体を対象に、接合面の付着特性をジョイント要素でモデル化した3次元FEM解析を実施している。

第3-10図に解析モデルを示す。対称性を考慮し、試験体の半分を解析モデルとしている。

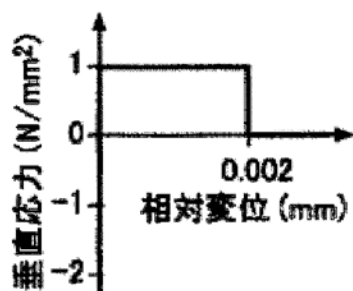
花崗岩とレベルコンクリートはソリッド要素、両者の界面はジョイント要素でモデル化したとしている。花崗岩とレベルコンクリートは弾性体とし、弾性定数は第3-5表に示す材料試験結果を用いたとしている。また、ジョイント要素は、第3-11図に示すように相対変位が  $0.002\text{mm}$  までは付着力を保持するものとし、この付着力は直接引張試験結果を参考に  $1\text{N/mm}^2$  としたとしている。



第3-10図 解析モデル（「JNES報告書」記載図に一部加筆）

第3-5表 弾性定数

材料	ヤング係数 ( $\text{N/mm}^2$ )	ポアソン比
レベルコンクリート	$2.3 \times 10^4$	0.18
花崗岩	$4.45 \times 10^4$	0.24



第3-11図 ジョイント要素の特性

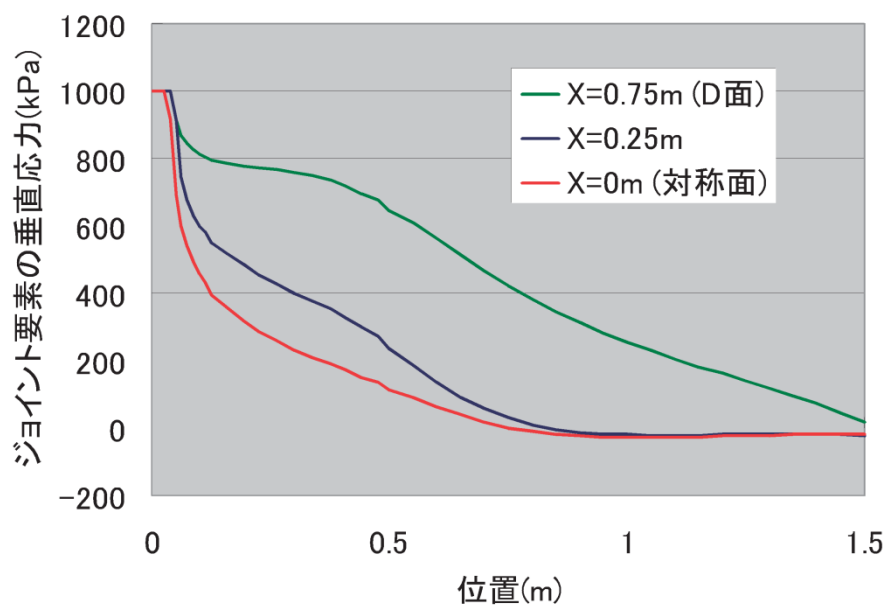
### 3.4.2 解析結果

解析の結果、引き上げ荷重が448kNで接合面前面に剥離が生じ、最大荷重に達したとしている。RCシリーズ試験体の最大荷重は361kN～463kN（第3-4表）であり、最大荷重の解析結果は中規模試験結果と概ね良好に対応したとしている。

最大荷重時のジョイント要素の、対称面（ $x=0\text{m}$ ）とD面（ $X=0.75\text{m}$ ）、及び加力治具近傍の $X=0.25\text{m}$ での垂直応力分布を第3-12図に示す。

レベルコンクリート側面（D面）におけるジョイント要素の垂直応力分布はほぼ線形と見なせるものの、中心軸近傍では、加力点側の端面（A面）に大きな垂直応力が生じる非線形分布を呈している。

中規模試験と直接引張試験による付着力の評価結果の差は、接合面の付着応力分布の評価方法に起因していると考えられ、付着力の材料特性値としては、直接引張試験による値がより適切と考えられるとしている。



第3-12図 ジョイント要素の垂直応力分布（断面）

### 3.5 まとめ

「JNES 報告書」の知見の島根原子力発電所への適用性の確認と、「JNES 報告書」の試験方法を参考とした4章の試験計画の策定を目的として、「JNES 報告書」の研究内容を確認した。

確認の結果、「JNES 報告書」で対象としている岩盤は実機と同程度の硬岩であり、レベルコンクリートは一般的な強度のものを用いていることから、その知見は島根原子力発電所において適用することが可能と考えられる。

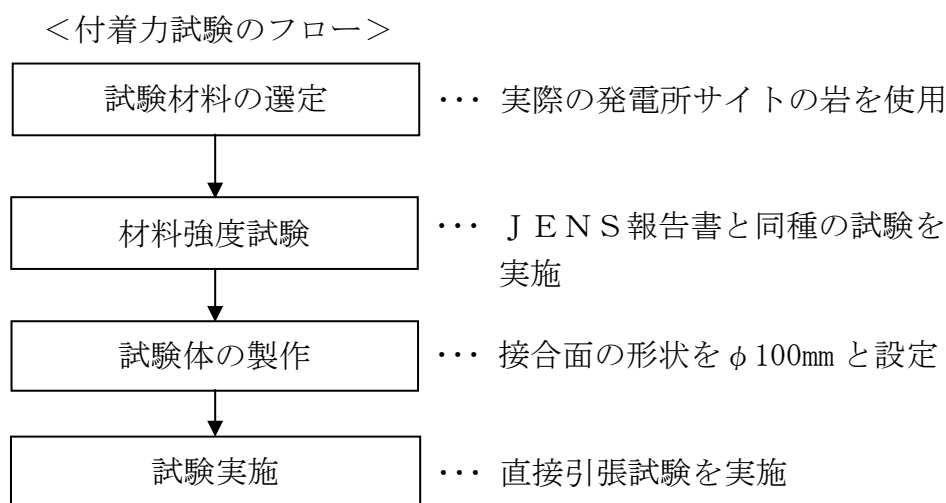
また、4章の試験計画の策定にあたっては、「JNES 報告書」の知見を踏まえた考察を行った。

「JNES 報告書」では以下の知見が得られたとされている。

- ・面的な広がりをもつ中規模試験体の試験及びそのシミュレーション解析結果から、基礎浮上り挙動時の建物―地盤間の接合面の付着応力分布は、基礎浮上りが生じている側の端面に大きな垂直応力が生じる非線形分布となる。
- ・付着力として設定する値として、接合面を100mm×100mmとした直接引張による付着力試験結果を用いることで基礎浮上り挙動をよく再現できた。これに対し、以下の考察を行い、4章の試験計画を策定した。
- ・実際の建物・構築物は面的な広がりをもつことから、基礎浮上り挙動時の建物―地盤間の接合面の付着応力分布は、中規模試験体と同様に、基礎浮上りが生じている側の端面に大きな垂直応力が生じる非線形分布となると考えられる。
- ・基礎浮上り挙動の接合面の応力状態は、各要素レベルでは上向きの引張応力に対し付着力が抵抗する状態となることから、解析においては、接合面の各要素レベルに設定する付着力の値は単純引張の応力状態での試験結果に基づく必要があると考えられる。
- ・単純引張の応力状態を試験体で再現するにあたっては、試験体のスケールが大きいとせん断や曲げが生じやすく、また、スケールが小さいと粗骨材等の影響を受け試験結果が安定しないことから、試験体形状を適切に設定しなければならないと考えられる。「JNES 報告書」の直接引張試験の結果は、中規模試験体の基礎浮上り挙動をよく再現できていることから、直接引張試験体の接合面（100mm×100mm程度）は単純引張の応力状態を測定するにあたり、適切なスケールであると考えられる。

#### 4. 付着力試験

「JNES 報告書」の結果を踏まえて、実際の建物・構築物の建物－地盤間に設定する付着力として、直接引張試験結果を用いることとする。よって、島根原子力発電所の地震応答解析モデルに設定する付着力の値を求めるため、発電所サイトの岩を用いた付着力試験を実施した。付着力試験方法の策定にあたっては、強度試験の項目・試験内容及び接合面の形状（スケール）について、「JNES 報告書」を参考とした。付着力試験方法の策定概要を第 4-1 図に示す。



##### 4.1 試験概要

建物の建設にあたっては、施工精度確保の観点から岩盤上にコンクリート（レベルコンクリート）を打設し基礎底面を平坦にした後、基礎コンクリートの打設を行っている。

そこで、建物基礎底面と地盤（岩盤）間に生じる付着力を把握するため、岩盤－レベルコンクリート間、及びレベルコンクリート－基礎コンクリート間を模擬した試験体を用いて付着力試験を行った。なお、岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験は、敷地の岩盤状況の影響を考慮するため敷地内の岩盤上で実施する。

地震応答解析に用いる付着力はこれらの試験結果に基づき設定する。

##### 4.2 岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験

###### 4.2.1 使用材料の概要

###### (1) 岩盤の種類

島根原子力発電所の耐震上重要な建物が設置されている岩盤（以下「建物直下地盤」という。）と同種の岩を用いることとし、付着力試験に用いた岩盤の種類を第 4-1 表に示す。いずれも岩盤の表面は自然面とした。

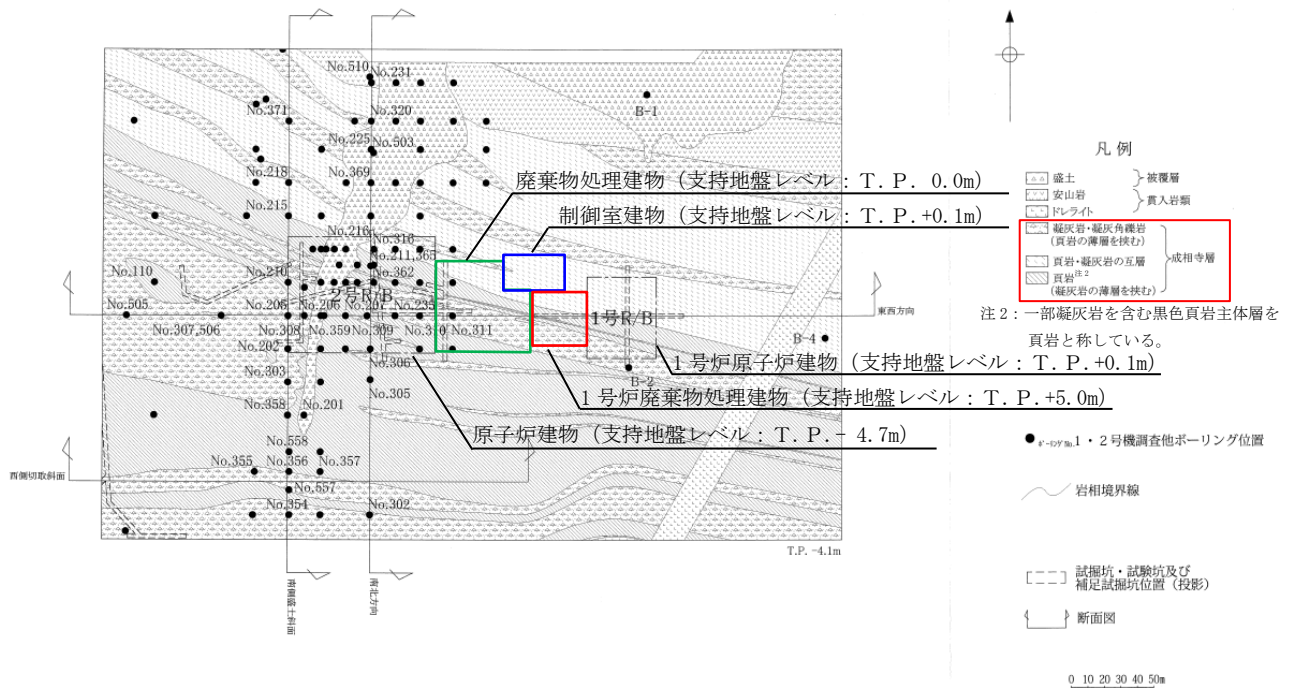
敷地の地質水平断面図を第 4-2 図に、地質鉛直断面図を第 4-3 図に示す。

建物直下地盤は主に黑色頁岩、凝灰岩及びこれらの互層から構成されている。

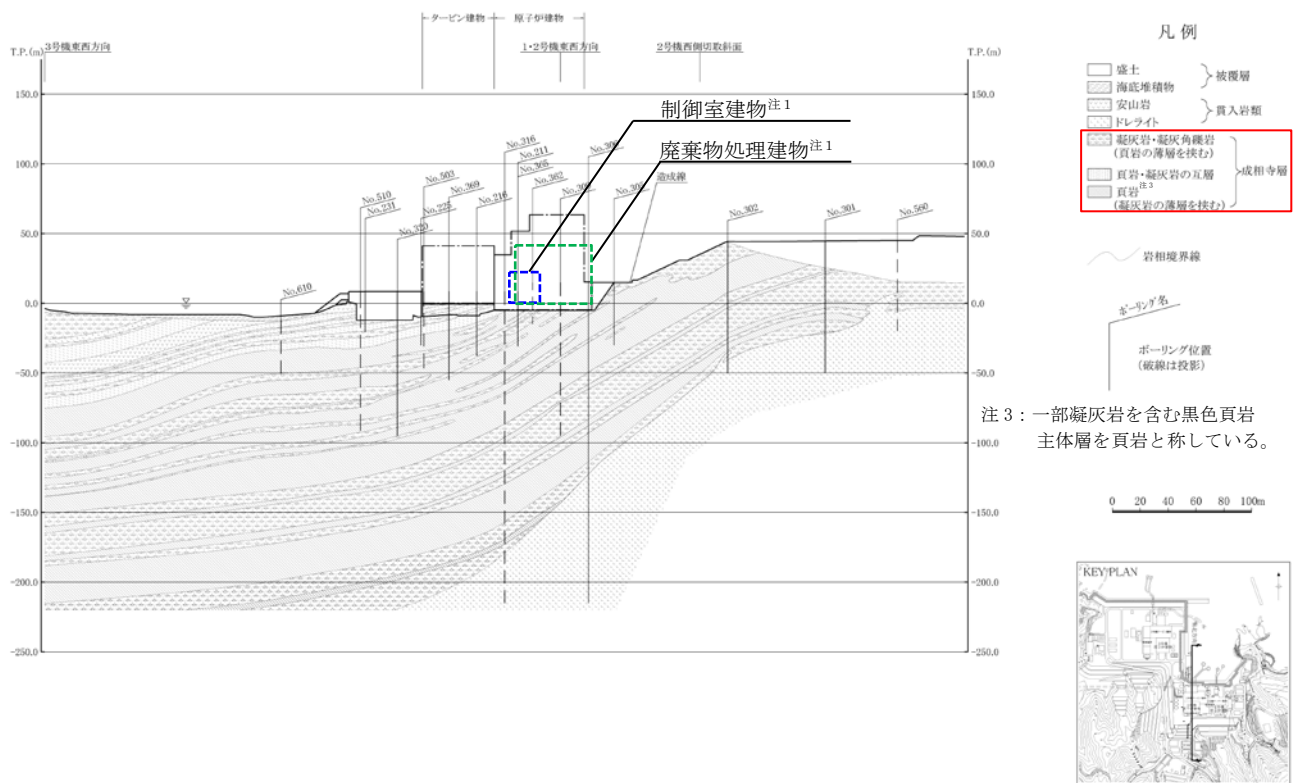
第 4-1 表 岩盤の種類

No.	岩盤種類	岩盤表面の状態	試験(付着力試験種別)
①	黑色頁岩	自然面：比較的平滑	現地試験 <sup>注1</sup>
②	凝灰岩	自然面：凹凸数 mm 程度	現地試験 <sup>注1</sup>

注 1：敷地内の岩盤に直接コンクリートを打設

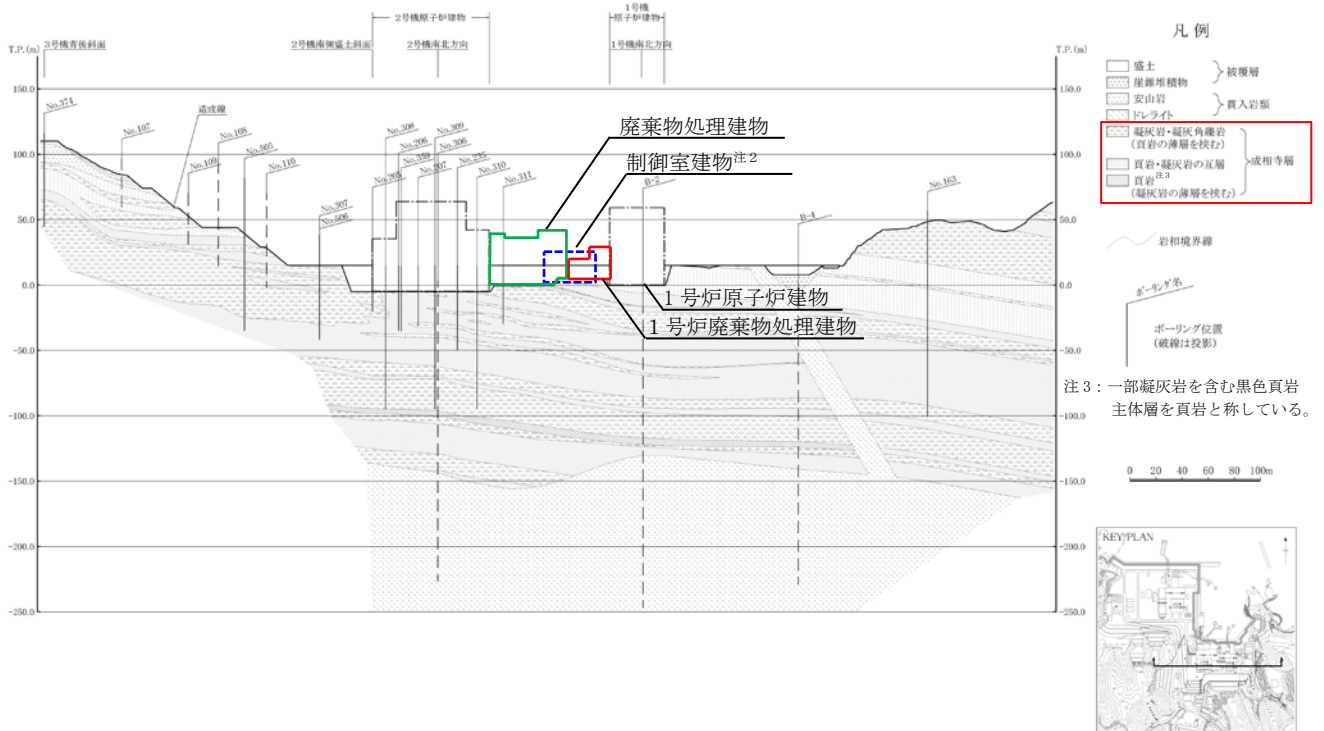


第 4-2 図 地質水平断面図 (2号炉)



注1：制御室建物，廃棄物処理建物位置を投影

第4-3(1)図 地質鉛直断面図（南北方向）（2号炉）



注2：制御室建物位置を投影

第4-3(2)図 地質鉛直断面図（東西方向）（2号炉）

- (2) レベルコンクリートの強度  
レベルコンクリートの強度は、 $18\text{N}/\text{mm}^2$ とした。

#### 4.2.2 岩盤及びレベルコンクリートの強度試験

##### (1) 岩盤の強度試験

岩盤の強度試験として、地盤工学会の「地盤工学関係規格・基準<sup>(2)</sup>」に基づき、圧縮強度、圧裂引張強度の測定を行った。

##### (2) コンクリートの強度試験

コンクリートの強度試験として、付着力試験材齢における圧縮強度（JIS A1108）と割裂引張強度（JIS A1113）の測定を行った。

#### 4.2.3 付着力試験

試験は、建物直下地盤と同等な岩盤を対象に、敷地内の岩盤（黒色頁岩及び凝灰岩）上に $\phi 100\text{mm}$ 、高さ約 $100\text{mm}$ のコンクリートを直接打設した。試験位置を第4-4図に、試験位置付近の地質断面図（水平、鉛直）を第4-5図に、試験体の概要を第4-6図に、岩盤の状況を第4-7図に示す。第4-5図は、敷地地盤の傾斜から試験位置の地質を推定したものであり、第4-7図のスケッチ図と比較的整合していることが分かる。

試験体は試験材齢前に型枠を脱型し、上部の引張治具をロードセルに接続し、岩盤とコンクリート境界面が剥離破壊する際の最大荷重を測定した。

付着力試験装置の概要を第4-8図に示す。既工認実績における付着力試験方法との比較を補足資料-1に示す。

付着力 $F_t$ は下式により算出した。

$$F_t = \frac{P}{A}$$

ここで、 $F_t$ ：付着力（ $\text{N}/\text{mm}^2$ ）

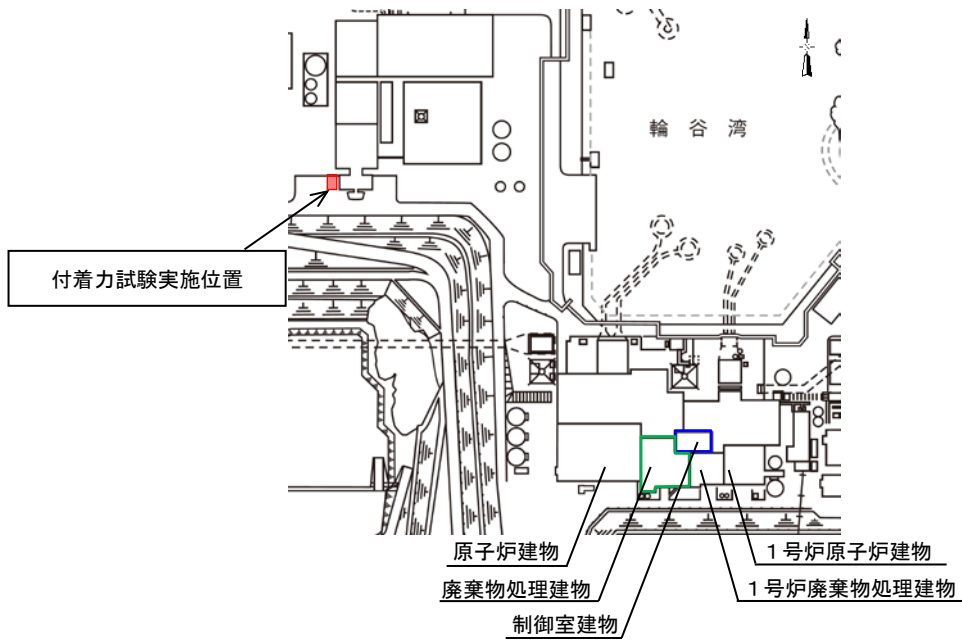
$P$ ：最大荷重（ $\text{N}$ ）

$A$ ：断面積（ $\text{mm}^2$ ）

標本数は、JNES報告書と同様に1岩種あたり12個とし、全部で24個の試験体を用いて付着力試験を実施した。なお、標本数の妥当性について、他の原位置試験における標本数を確認すると、土木学会指針<sup>(3)</sup>に規定されている原位置における岩盤試験の標本数は、3ないし4個以上<sup>注1</sup>とされており、地盤工学会の「岩盤の原位置一軸引張り試験方法」<sup>注2</sup>においても3個以上とされていることから、これらと比べても十分な標本数といえる。

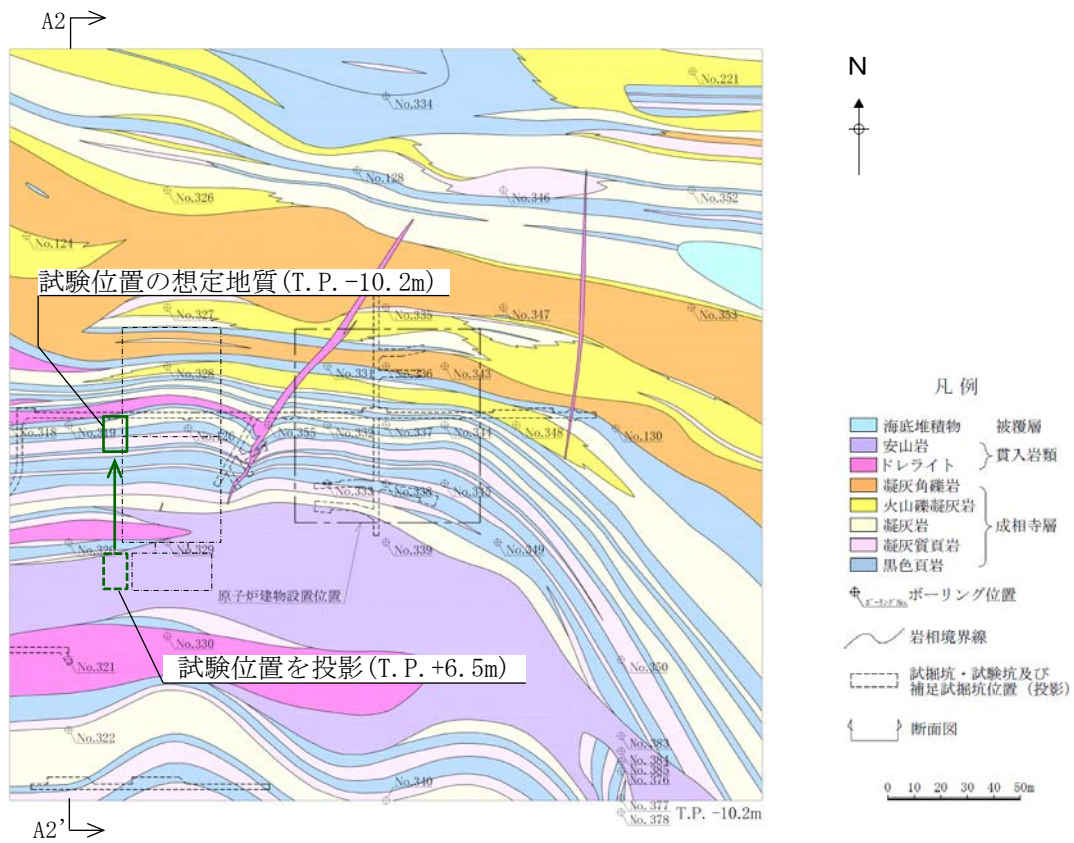
注1：土木学会指針に規定された試験の標本数（原位置岩盤の平板載荷試験：3個以上、  
原位置岩盤のせん断試験：4個以上、岩盤の孔内載荷試験：3点以上）

注2：令和元年6月末で公示終了

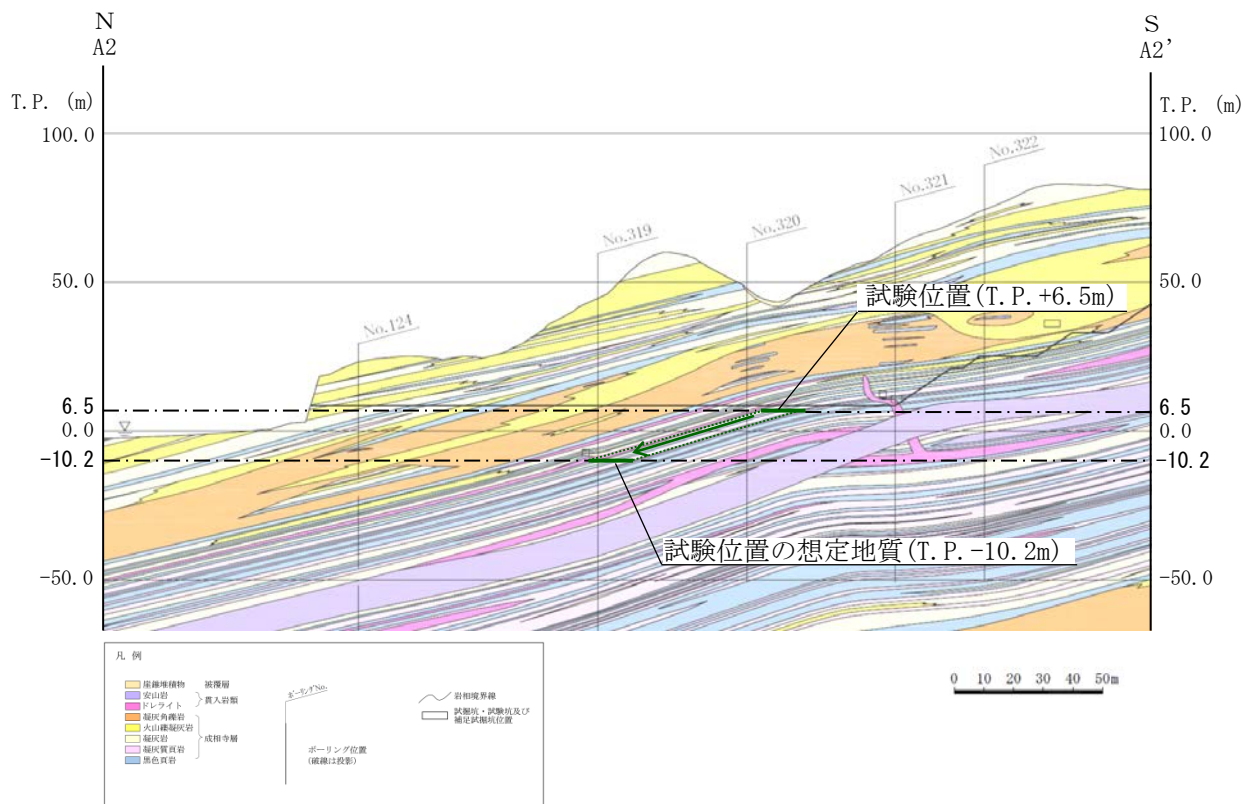


第4-4図 試験位置

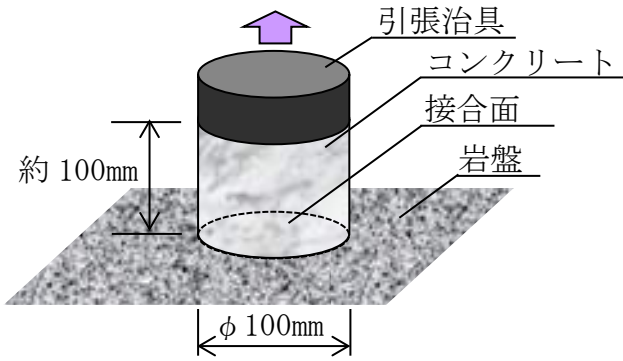




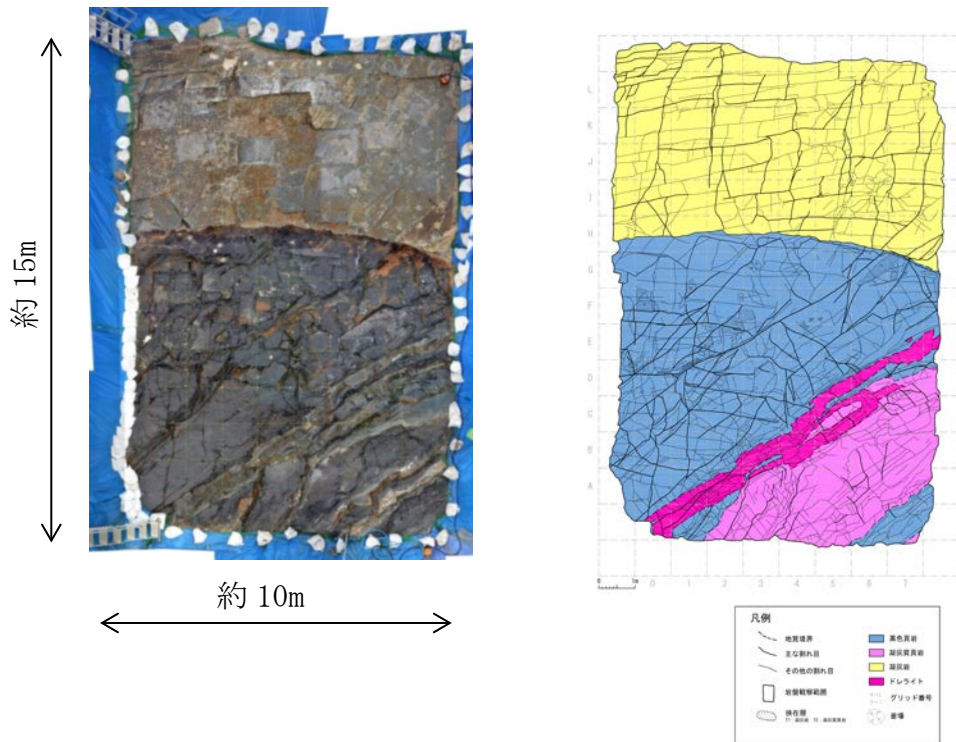
第4-5(1)図 試験位置付近の水平地質断面図(T.P. -10.2m)



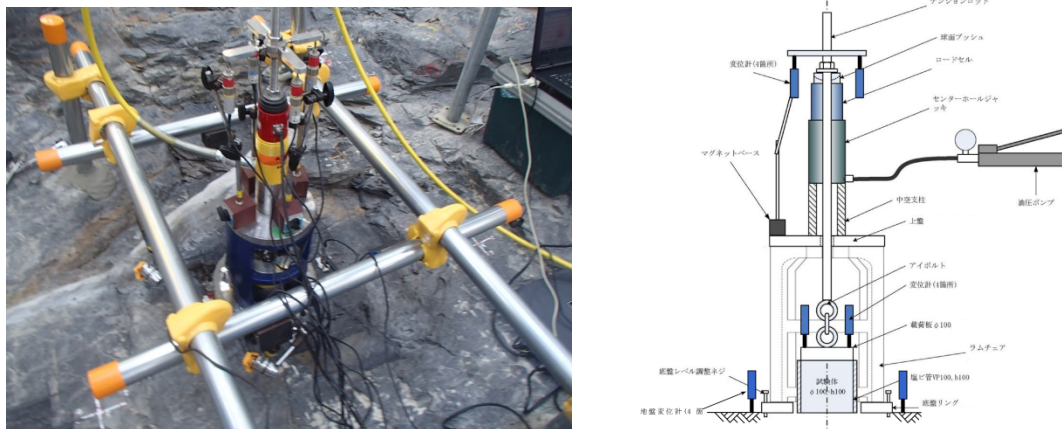
第4-5(2)図 試験位置付近の鉛直地質断面図(A2-A2' 断面)



第4-6図 試験体の概要 (直接引張試験)



第4-7図 岩盤の状況 (直接引張試験)



第4-8図 付着力試験装置の概要 (直接引張試験)

#### 4.2.4 試験結果

##### (1) 岩盤の強度

試験に用いた岩盤の圧縮強度及び圧裂引張強度の試験結果を第4-2表に示す。

第4-2表 岩盤の物性試験結果<sup>注1</sup>

岩盤種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
黒色頁岩	47.6	7.14
凝灰岩	49.1	9.36

注1：試験体6本の平均値

##### (2) コンクリートの強度

試験に用いたコンクリートの圧縮強度及び割裂引張強度を第4-3表に示す。

第4-3表 コンクリートの物性試験結果<sup>注2</sup>

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
7	26.5	2.52

注2：試験体6本の平均値

##### (3) 付着力

付着力試験の結果を第4-4表、第4-9図に示す。

建物直下地盤は主に黒色頁岩と凝灰岩で構成されていることを踏まえ、岩盤全体として評価した付着力の平均値は0.98N/mm<sup>2</sup>(標準偏差:0.30N/mm<sup>2</sup>)となった。

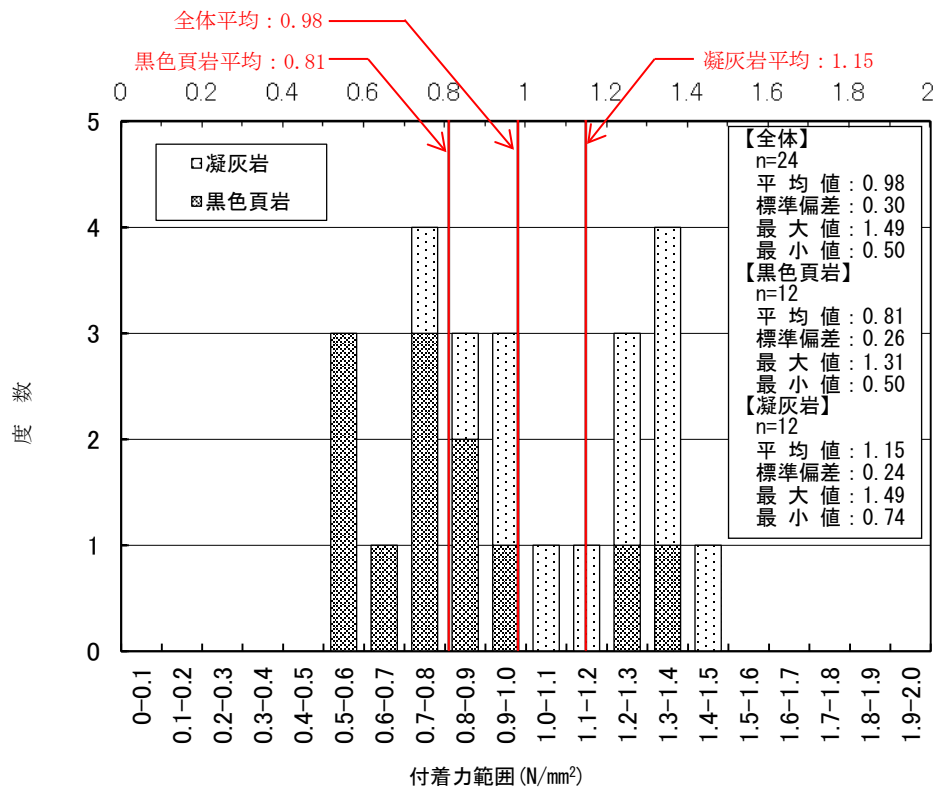
なお、個々の岩盤における付着力の平均値は、黒色頁岩0.81N/mm<sup>2</sup>(標準偏差:0.26N/mm<sup>2</sup>)、凝灰岩1.15N/mm<sup>2</sup>(標準偏差:0.24N/mm<sup>2</sup>)であった。

第4-4表 付着力試験の結果(岩盤-レベルコンクリート)

試験体の種類		平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	
岩盤-レベルコンクリート			
	黒色頁岩-レベルコンクリート	0.81	0.98
	凝灰岩-レベルコンクリート	1.15	

岩盤－レベルコンクリート間における付着力試験実施後の破断面の状況を、参考資料－3 に示す。

なお、凝灰岩－レベルコンクリート間の付着力は、J N E S 報告書に比べて大きな値となっている（島根：1.15N/mm<sup>2</sup>，J N E S 報告書：0.35N/mm<sup>2</sup>）が、J N E S 報告書では、「直接引張試験による付着力は岩盤の圧裂引張強度の順と同じ傾向となった。」と報告されていることを踏まえ、付着力と圧裂引張強度に関係性があると判断し、両者の圧裂引張強度を比較すると、島根がJ N E S 報告書に比べて約11倍大きな値（島根：9.36N/mm<sup>2</sup>，J N E S 報告書：0.868N/mm<sup>2</sup>）となっていることから、この差は凝灰岩自体の物性（圧裂引張強度）の違いによるものである。



第4-9図 付着力試験の結果（岩盤－レベルコンクリート）

#### 4.3 レベルコンクリートー基礎コンクリート間の付着力試験

##### 4.3.1 レベルコンクリート及び基礎コンクリートの強度

レベルコンクリートの強度は  $18\text{N/mm}^2$  とし、基礎コンクリートの強度は  $21\text{N/mm}^2$  とした。

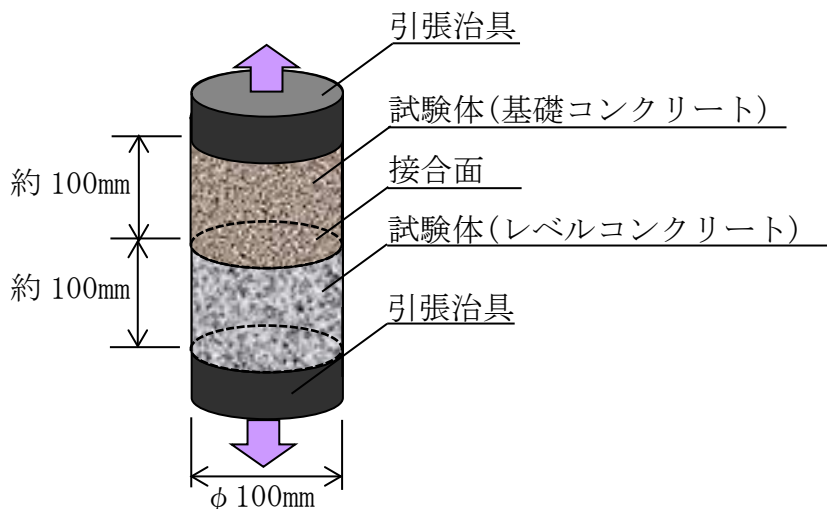
##### 4.3.2 コンクリートの強度試験

コンクリートの強度試験として、付着力試験材齢における圧縮強度（JIS A1108）と割裂引張強度（JIS A1113）の測定を行った。

##### 4.3.3 付着力試験

試験体は、高さ約  $100\text{mm}$  に打設したレベルコンクリートを7日間養生した後、高さ約  $100\text{mm}$  の基礎コンクリートを打設し、 $\phi 100\text{mm} \times$  高さ  $200\text{mm}$  の試験体を作製し、さらに7日間養生した後試験を実施した。レベルコンクリートの接合面の状態は木ごて押えとした。

付着力は、岩盤ーレベルコンクリート間の付着試験と同様に、コンクリート相互の境界面が剥離破壊する際の最大荷重を測定し算出した。試験体及び付着力試験方法の概要を第4-10図に示す。



第4-10図 試験体及び付着力試験方法の概要（室内試験）

#### 4.3.4 試験結果

##### (1) コンクリートの強度

コンクリートの圧縮強度及び割裂引張強度の試験結果を第4-5表に示す。

第4-5表 コンクリートの物性試験<sup>注1</sup>

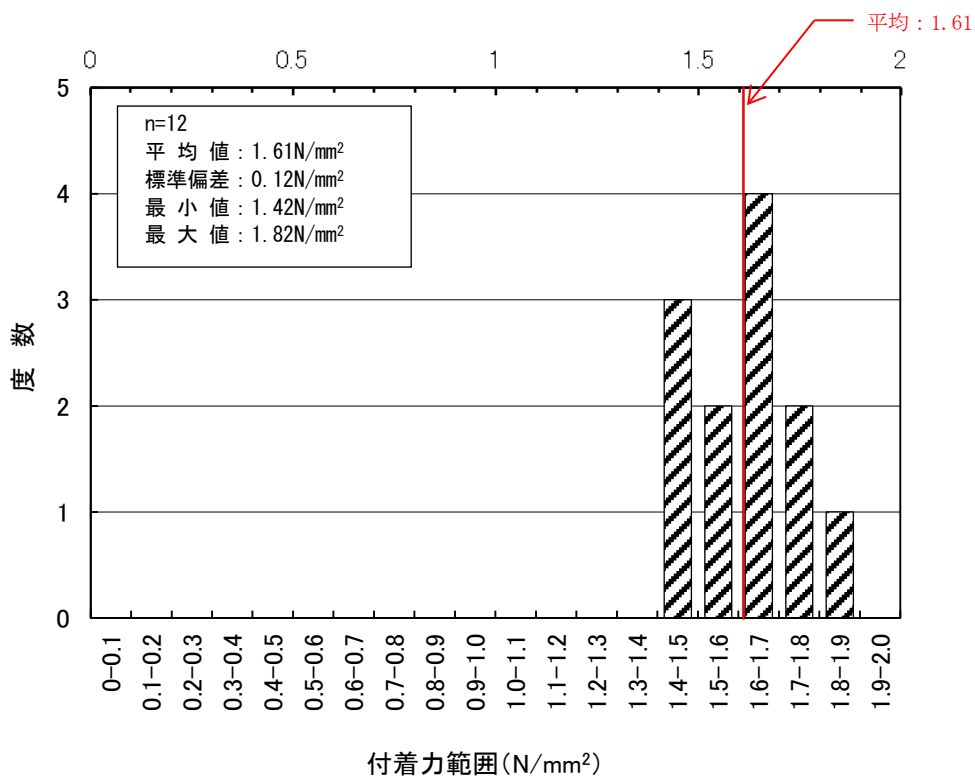
種類	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
レベルコンクリート(F c 18)	14	33.3	3.04
基礎コンクリート(F c 21)	7	27.2	2.79

注1 試験体3本の平均値

##### (2) 付着力

付着力試験の結果を第4-11図に示す。

付着力の平均値は、1.61N/mm<sup>2</sup>（標準偏差：0.12N/mm<sup>2</sup>）であった。



第4-11図 付着力試験の結果  
(レベルコンクリート-基礎コンクリート)

## 5. 地震応答解析に用いる付着力の設定

「岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験」及び「レベルコンクリート－基礎コンクリート間の付着力試験」の結果並びに設定付着力を第5-1表に示す。「岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験」の付着力の方が小さいことから、「岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験」の付着力試験結果より、地震応答解析に用いる付着力を設定する。

第5-1表に示す通り、地震応答解析に用いる付着力は、2種の岩種のうち平均値の小さい黒色頁岩の平均値  $0.81\text{N/mm}^2$  に対して2倍の安全率を考慮し  $0.40\text{N/mm}^2$  を採用することとした。

第5-1表 付着力試験の結果及び設定付着力

試験	試験体の種類	平均値 ( $\text{N/mm}^2$ )	設定付着力 ( $\text{N/mm}^2$ )
原位置 試験 <sup>注1</sup>	岩盤－レベルコンクリート	0.98	0.40 <sup>注2</sup>
	黒色頁岩－レベルコンクリート		
	凝灰岩－レベルコンクリート	1.15	
室内 試験	レベルコンクリート－基礎コンクリート	1.61	

注1：直接引張試験

注2：各試験のうち、平均値の小さい黒色頁岩の平均値に対して2倍の安全率を考慮

ここで、付着力として設定した  $0.40\text{N/mm}^2$  という値について、定量的な評価を行い、その保守性を確認する。

第5-1表に示す通り、「岩盤－レベルコンクリート」の付着力の平均値は  $0.98\text{N/mm}^2$  となっている。また、岩種別の平均値では、黒色頁岩は  $0.81\text{N/mm}^2$ 、凝灰岩は  $1.15\text{N/mm}^2$  となっており、黒色頁岩は凝灰岩より付着力の平均値が小さくなっている。

岩盤物性を用いる解析では一般に試験結果の平均値を用いるが、今回実施した付着力試験は試験方法が標準化されていない<sup>注1</sup>ことから、物性値のばらつき、原位置試験の不確実性を踏まえて、平均値をそのまま用いるのではなく、保守性を考慮し、平均値に対して2倍の安全率を考慮した。

また、建物直下地盤は主に黒色頁岩、凝灰岩及びこれらの互層から構成されているが、実際の建物直下地盤における黒色頁岩と凝灰岩の構成割合を定量的に確認できないこと、建物毎でその構成割合が異なることを踏まえ、付着力の設定には、岩盤全体の平均値ではなく、保守的に値の小さい黒色頁岩のみ建物直下地盤を構成するものと見なして黒色頁岩の平均値  $0.81\text{N/mm}^2$  に2倍の安全率を考慮した  $0.40\text{N/mm}^2$  を採用した。なお、設定した付着力は、試験結果の最低値  $0.50\text{N/mm}^2$  を下回る値となっている。

設定付着力に関する統計的な考察を参考資料-4 に示す。設定付着力  $0.40\text{N/mm}^2$  は、岩盤全体の平均値  $0.98\text{N/mm}^2$  に対して  $-1.93\sigma$ 、黒色頁岩の平均値  $0.81\text{N/mm}^2$  に対して  $-1.58\sigma$  に相当する。

なお、設定した付着力は、既工認実績と比較しても試験結果に対して十分な保守性を考慮した値である（補足資料-2 参照）。

以上より、地震応答解析に用いる付着力  $0.40\text{N/mm}^2$  は十分に保守的な値である。

注1：地盤工学会において、「岩盤の原位置一軸引張り試験方法」（令和元年6月末公示終了）が定められ、その適用範囲に「岩盤とコンクリートの付着強さを求める場合にも適用できる。」されている。今回実施した付着力試験は、本基準に示されているものと同等の試験方法となっていることを確認した。



## 6. 適用性の確認

付着力について、島根原子力発電所の建物・構築物への適用性を以下の通り検討した。

### 6.1 材料条件

#### 6.1.1 岩盤

建物直下地盤及び試験地盤における岩盤物性を第6-1表に示す。

物性値を比較すると建物直下地盤と試験地盤はほぼ同等と見なせることから、地盤の差異による試験結果への影響はない。

両者の比較の詳細を参考資料-5に示す。

第6-1表 建物直下地盤及び試験地盤における岩盤物性

	建物直下地盤 <sup>注2</sup>	試験地盤
岩種	主に黒色頁岩,凝灰岩及びこれらの互層から構成される	黒色頁岩, 凝灰岩
岩の状態	岩盤分類：大部分がC <sub>H</sub> 級及びC <sub>M</sub> 級 <sup>注1</sup>	亀裂, 風化等がないことを目視で確認
弾性波速度 (建物直下地盤：P S 検層 試験地盤：超音波速度測定)	黒色頁岩 縦波：約 4.4km/s 横波：約 2.1km/s 凝灰岩 縦波：約 4.2km/s 横波：約 2.0km/s	黒色頁岩 縦波：約 3.8km/s 横波：約 2.3km/s 凝灰岩 縦波：約 2.9km/s 横波：約 1.5km/s
圧裂引張強度	黒色頁岩：8.82N/mm <sup>2</sup> 凝灰岩：9.03N/mm <sup>2</sup>	黒色頁岩：7.14N/mm <sup>2</sup> 凝灰岩：9.36N/mm <sup>2</sup>

注1：電研式岩盤分類（田中治雄 土木技術者のための地質学入門，1966）による。

C<sub>H</sub>級：造岩鉱物及び粒子は石英を除けば風化作用を受けてはいるが、岩質は比較的堅硬である。一般に褐鉄鉱などに汚染せられ、節理あるいは亀裂間の粘着力はわずかに減少しており、ハンマーの強打によって割れ目に沿って岩塊が剥脱し、剥脱面には粘土質物質の薄層が残留することがある。ハンマーによって打診すれば、少し濁った音を出す。

C<sub>M</sub>級：造岩鉱物及び粒子は石英を除けば風化作用を受けて多少軟質化しており、岩質も多少軟らかくなっている。節理あるいは亀裂間の粘着力は多少減少しており、ハンマーの普通程度の打撃によって割れ目に沿って岩塊が剥脱し、剥脱面には粘土質物質の層が残留することがある。ハンマーによって打診すれば、多少濁った音を出す。

注2：島根2号炉原子炉建物位置のボーリング孔から採取した試料による試験。

（島根原子力発電所原子炉設置許可変更申請書（平成25年12月25日））

### 6.1.2 レベルコンクリート

レベルコンクリートの強度は、「JNES 報告書」を参考に、代表的なレベルコンクリート（推定強度  $180\text{kg}/\text{cm}^2$ ）と同程度の呼び強度  $18\text{N}/\text{mm}^2$  としたことから、レベルコンクリート強度による試験結果への影響はない。

### 6.1.3 基礎コンクリート

基礎コンクリートの強度は、試験においては  $21\text{N}/\text{mm}^2$ 、実機においては  $23.5\text{N}/\text{mm}^2$ （ただし制御室建物は  $22.1\text{N}/\text{mm}^2$ ）であり、試験と実機は同程度であることから、基礎コンクリート強度による試験結果への影響はない。

## 6.2 試験体

### 6.2.1 岩盤－レベルコンクリート間

試験体形状については、接合面寸法は  $\phi 100\text{mm}$  とし、表面形状は黒色頁岩、凝灰岩共に凹凸  $10\text{mm}$  程度とした。

これは、「3. JNES 報告書による付着力試験に関する研究」の「3.2 要素試験」の直接引張試験とほぼ同一の接合面寸法としている。

一方、表面形状は JNES 報告書に比べて平滑であるが、「3.3 中規模試験」によると、表面粗度によらず同程度の付着力が得られている。以上より、試験体による影響はない。

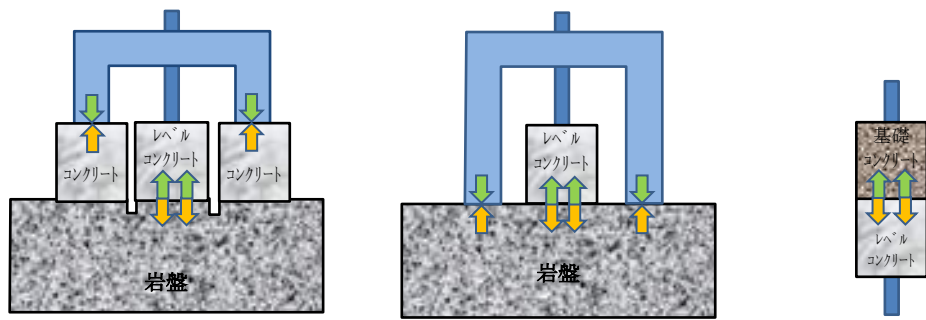
### 6.2.2 レベルコンクリート－基礎コンクリート間

接合面寸法は、 $\phi 100\text{mm}$  とした。表面形状はレベルコンクリートの標準的な仕上げである木ごて仕上げとした。

これは、「3. JNES 報告書による付着力試験に関する研究」の「3.2 要素試験」の直接引張試験とほぼ同一の接合面寸法及び表面形状であることから試験体による影響はない。

### 6.2.3 試験方法の違いについて

「JNES 報告書」による直接引張試験及び本章の付着力試験（直接引張試験及び室内試験）の試験方法の違いを第 6-1 図に示す。各試験方法は反力の取り方は異なるが、接合面はほぼ同一形状であり、接合面の応力状態も同一である。また、付着力に対して、コンクリート及び岩盤の引張強度及び圧縮強度は十分に大きいことから、基本的には接合面以外での破壊は生じない。以上より、それぞれの試験から求まる付着力について、試験方法の違いによる影響はない。



(A) 「JNES 報告書」による  
直接引張試験

(B) 直接引張試験

(C) 室内試験

第 6-1 図 試験方法の違い

### 6.3 設計用付着力としての信頼性，保守性及び地盤のばらつきを踏まえた網羅性・代表性について

5. 及び 6.1 のとおり，建物基礎底面の付着力として設定した値に十分な保守性・妥当性があると判断しているが，試験地盤と建物直下地盤が離れており，建物直下地盤近傍での直接的な付着力試験データが得られていないため，設計に用いる付着力について，信頼性，保守性及び地盤のばらつきを踏まえた網羅性・代表性に対する説明性を向上させる観点から，1，2号炉建物近傍において追加試験を実施する。追加付着力試験の方針を 6.4 に示す。

また，詳細設計段階において，追加試験結果も踏まえ，建物基礎底面の付着力として設定した値の保守性・妥当性を説明する。

### 6.4 追加付着力試験の方針

#### 6.4.1 追加試験の目的

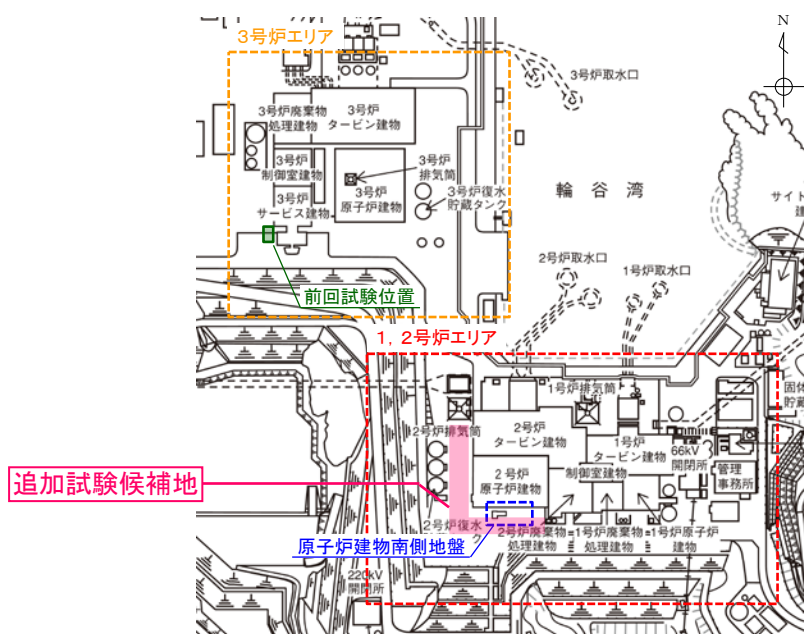
設計に用いる付着力について，説明性を向上させる観点から，1，2号炉建物近傍において追加試験を実施する。

#### 6.4.2 試験場所の選定

1, 2号炉エリアを対象に, 耐震上重要な建物が設置されている岩盤と同様な岩盤とする。また, 追加試験の目的, 3号炉エリアで実施した試験(以下, 「前回試験」という)条件を踏まえて, 以下の岩相, 岩級が確認される場所を選定する。追加試験の候補地を第6-2図に示す。

- ・岩相: 黒色頁岩
- ・岩級: CH級

なお, 1, 2号炉エリアでは, 所定の岩盤が出現するまでに相当程度の掘削が必要であることから, 工事で掘削済みの箇所を中心に候補地を選定した。



第6-2図 追加試験の候補地

#### 6.4.3 試験方法

前回試験と同様の試験方法(原位置試験(直接引張試験))を基本とする。(4.2を参照)

#### 7. 参考文献

- (1) 独立行政法人 原子力安全基盤機構:平成18年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 原子力施設の非線形地盤・構造物相互作用試験及び基準整備 基礎浮上り評価手法の調査に関する報告書, 2007
- (2) 地盤工学会:地盤工学関係 規格・基準  
JGS 2521-2009 岩石の一軸圧縮試験方法  
JGS 2551-2009 圧裂による岩石の引張り強さ試験方法
- (3) 土木学会:原位置岩盤試験法の指針, 2000

## 廃棄物処理建物の地震応答解析

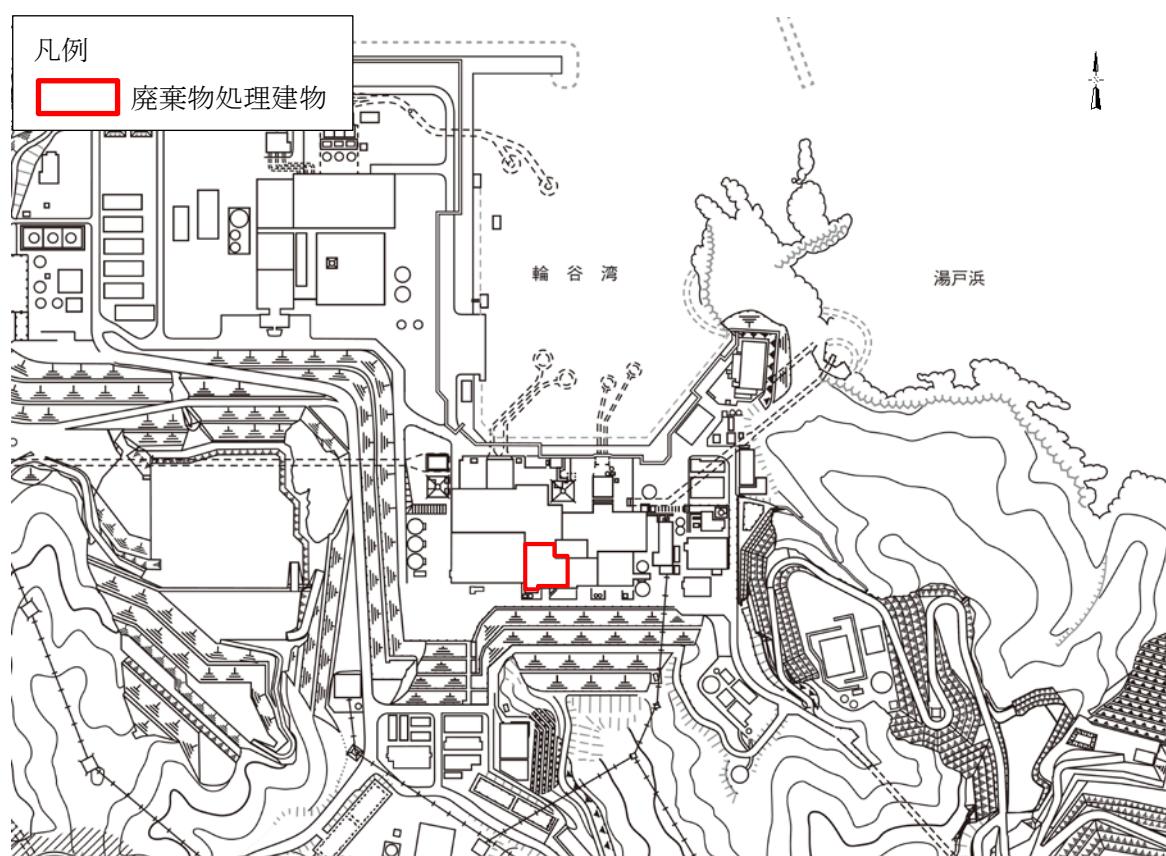
## 1. 概要

本資料は、廃棄物処理建物の地震応答解析に採用するジョイント要素を用いた3次元FEMモデルによる地震応答解析について、解析結果が解析モデルの適用範囲内に収まることを確認した結果について説明する。

## 2. 廃棄物処理建物の概要

## 2.1 位置

廃棄物処理建物の設置位置を第2.1-1図に示す。



第2.1-1図 廃棄物処理建物の設置位置

## 2.2 構造概要

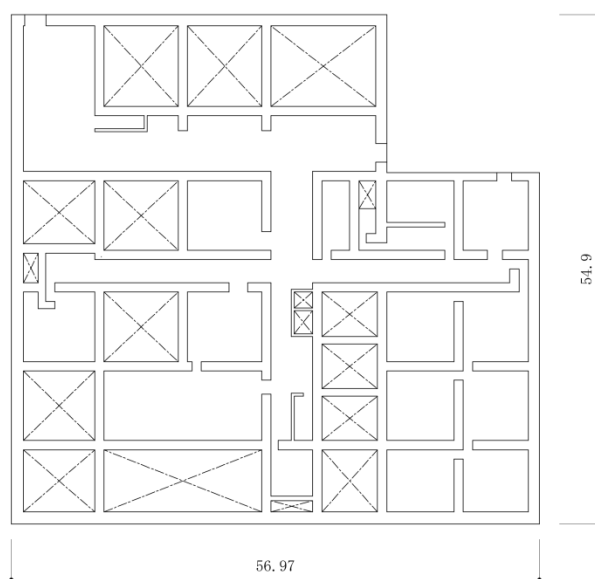
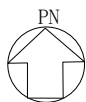
廃棄物処理建物は、地上5階、地下2階建の鉄筋コンクリート造の建物である。

廃棄物処理建物の平面寸法は、54.9m（一部37.86m）<sup>注1</sup>（NS）×56.97m（一部40.5m）<sup>注1</sup>（EW）である。基礎スラブ底面からの高さは42.0mである。また、廃棄物処理建物は隣接する他の建物と構造的に分離している。

廃棄物処理建物の概要を第2.2-1図及び第2.2-2図に示す。

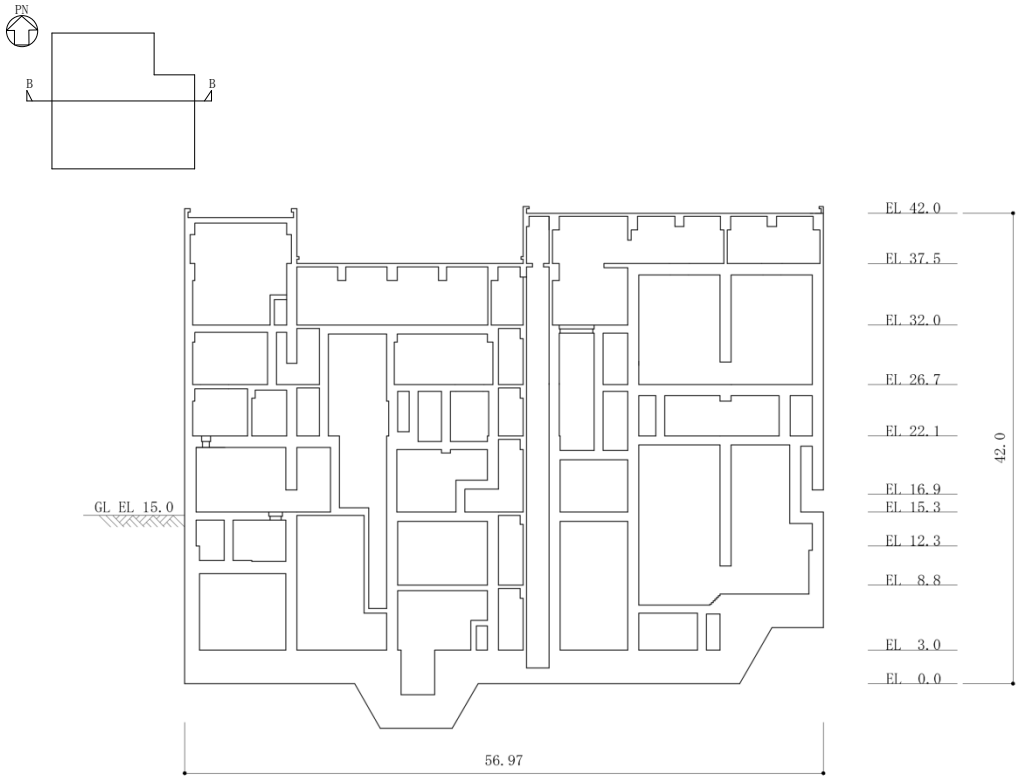
廃棄物処理建物の基礎は厚さ3.0mのべた基礎で、岩盤に直接設置している。建物に加わる地震時の水平力はすべて耐震壁に負担させている。

注1：建物寸法は壁外面寸法とする。

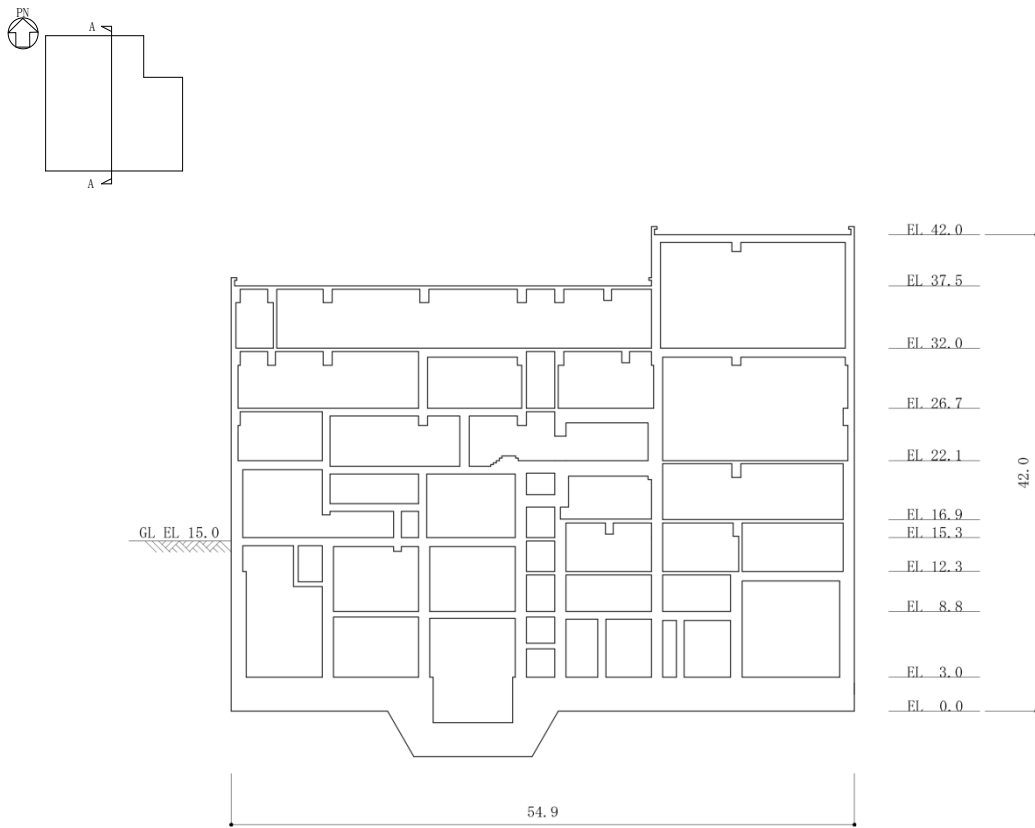


第2.2-1図 廃棄物処理建物の概要（平面図）（E L 8.8m<sup>注2</sup>）（単位：m）

注2：「E L」は東京湾平均海面（T. P.）を基準としたレベルを示す。



(E W断面)



(N S断面)

第 2.2-2 図 廃棄物処理建物の概要 (断面図) (単位 : m)

### 3. 検討用地震動

検討に用いる地震動は、基準地震動  $S_s - D$ 、 $S_s - F1$ 、 $S_s - F2$ 、 $S_s - N1$  及び  $S_s - N2$  とする。

### 4. 地震応答解析

#### 4.1 入力地震動の算定

水平方向の入力地震動は、建物直下地盤を水平成層にモデル化した実地盤モデルを用いた一次元波動論によって算定する。

まず、解放基盤表面 (T. P. -10m) で定義される基準地震動  $S_s (2E_0)$  を用いて、T. P. -10m 以浅の地盤を取り去った解放地盤モデルで一次元波動論による応答解析を行い、実地盤モデル下端位置 (T. P. -215m) への入力地震動 ( $2E_1$ ) を算定する。次に、この地震動を用いて、T. P. -10m 以浅の地盤を考慮した実地盤モデルで一次元波動論による応答解析を行い、建物基礎下端位置 (T. P. 0.0m) における応答波 (E+F) を求め、これを建物モデルへの入力地震動とする。この時、底面切欠き力も併せて考慮する。

表層は、拘束圧依存性と「せん断剛性-せん断ひずみ関係 ( $G/G_0 - \gamma$  曲線)」及び「減衰定数-せん断ひずみ関係 ( $h - \gamma$  曲線)」を基に、地震時のひずみレベルを考慮した等価な剛性と減衰を設定している。

水平方向の入力地震動作成の概要を第 4.1-1 図に、地盤各層の物理定数を第 4.1-1 表に示す。

なお、地盤を 3次元 FEM でモデル化することから、基礎底面レベルにおける地盤の応答が基礎底面切欠き力を考慮した入力地震動と一致するように補正した地震動を、3次元 FEM 地盤モデルの底面に入力する。

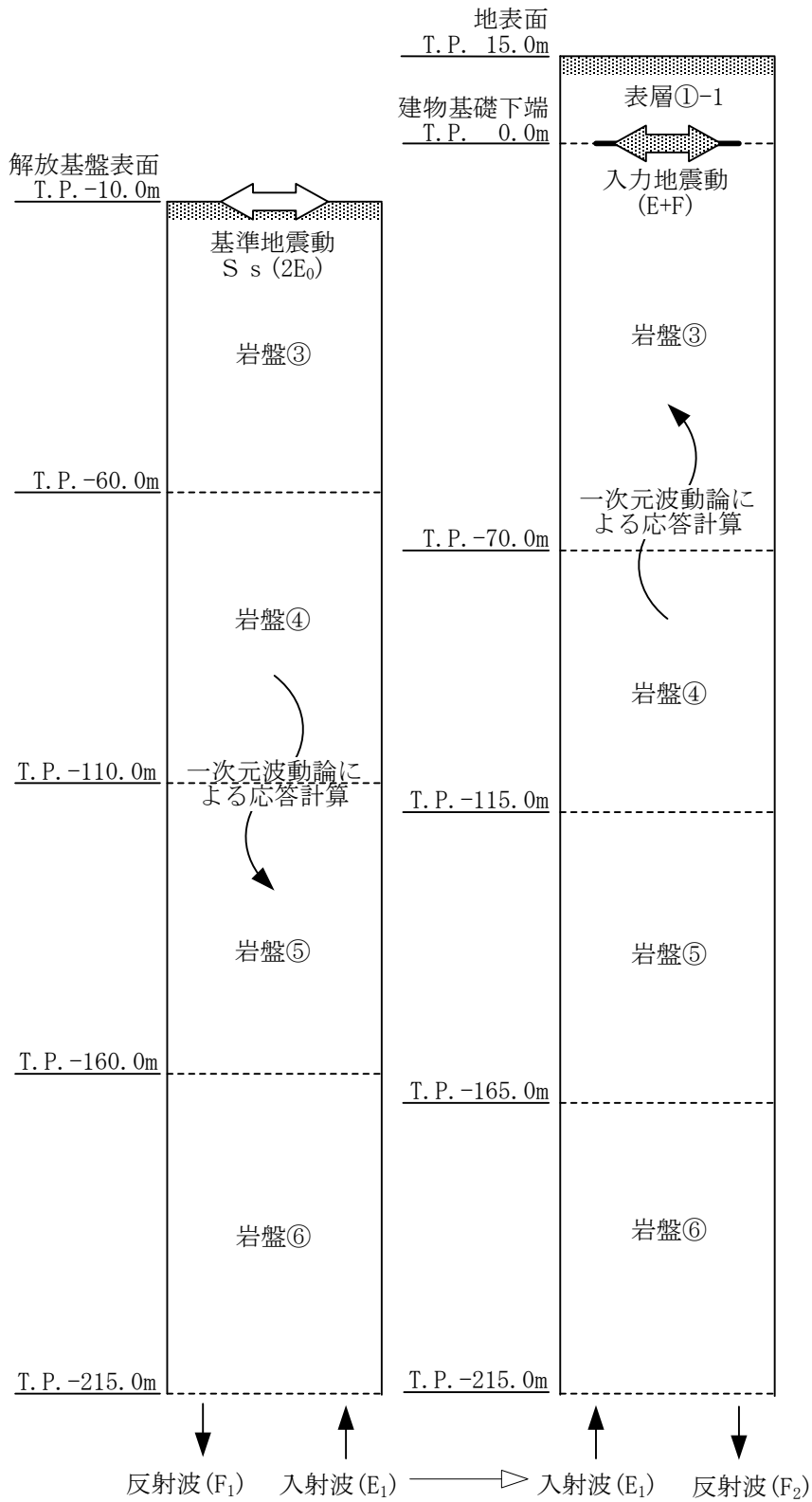
建物への入力地震動 (E+F) の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトルを第 4.1-2 図～第 4.1-6 図に示す。

入力地震動の算定には解析コード「SHAKE」を用いる。



[解放地盤モデル]

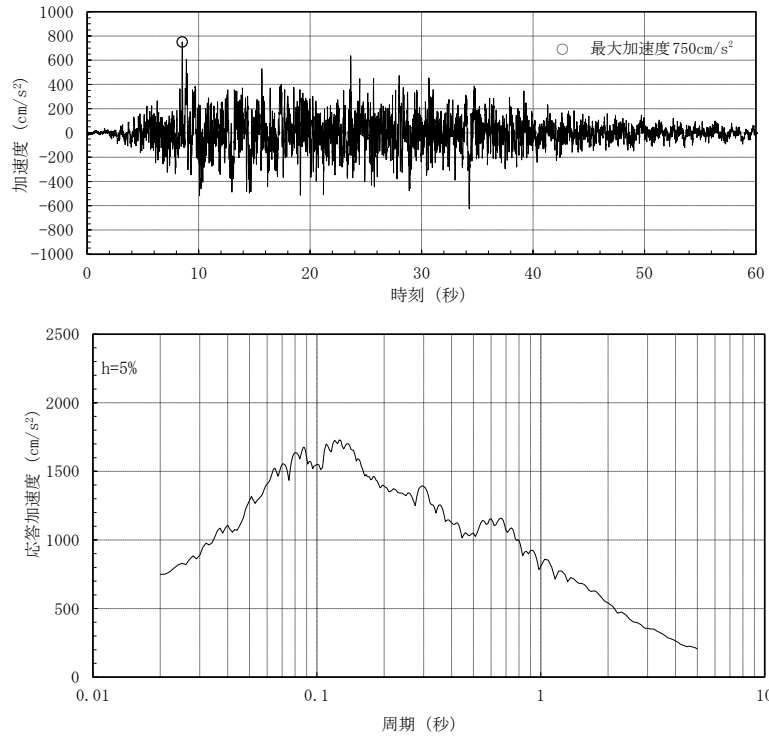
[実地盤モデル]



第 4.1-1 図 入力地震動作成の概要 (水平方向)

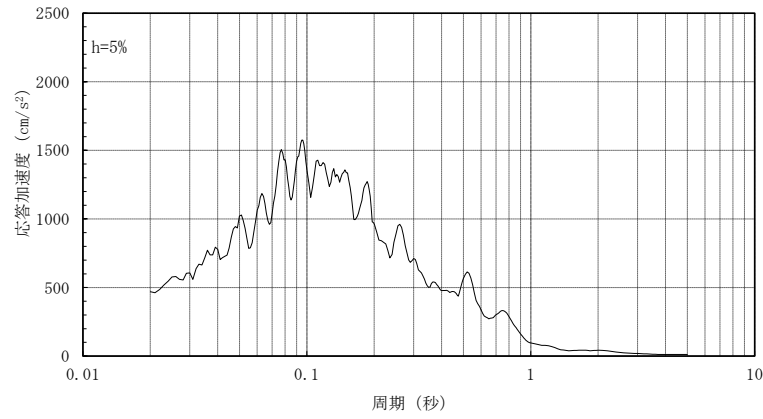
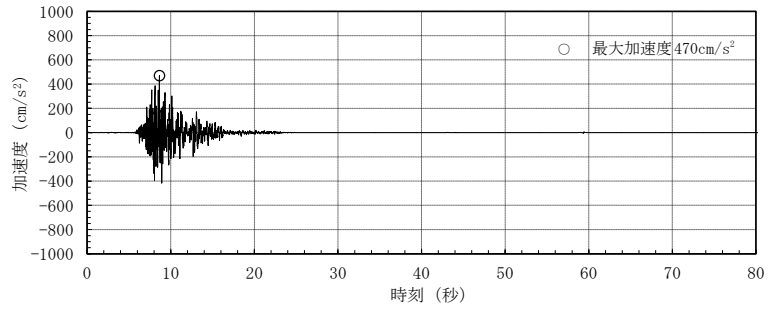
第 4.1-1 表 地盤の物理定数

層 番号		S波 速度 V <sub>s</sub> m/s	P波 速度 V <sub>p</sub> m/s	単位体積 重量 γ kN/m <sup>3</sup> (tf/m <sup>3</sup> )	ポアソン 比 ν	ヤング 係数 E ×10 <sup>5</sup> kN/m <sup>2</sup> (×10 <sup>4</sup> tf/m <sup>2</sup> )	せん断 弾性係数 G ×10 <sup>5</sup> kN/m <sup>2</sup> (×10 <sup>4</sup> tf/m <sup>2</sup> )	減衰 定数 h %
表層 ①-1	S <sub>s</sub>	127	422	20.7 (2.11)	0.45	0.99 (1.01)	0.341 (0.348)	8
岩盤③		1600	3600	24.5 (2.50)	0.377	176.5 (180.0)	64.0 (65.3)	3
岩盤④		1950	4000	24.5 (2.50)	0.344	256.0 (261.0)	95.1 (97.0)	3
岩盤⑤		2000	4050	26.0 (2.65)	0.339	283.4 (289.0)	105.9 (108.0)	3
岩盤⑥		2350	4950	27.9 (2.85)	0.355	427.6 (436.0)	157.9 (161.0)	3

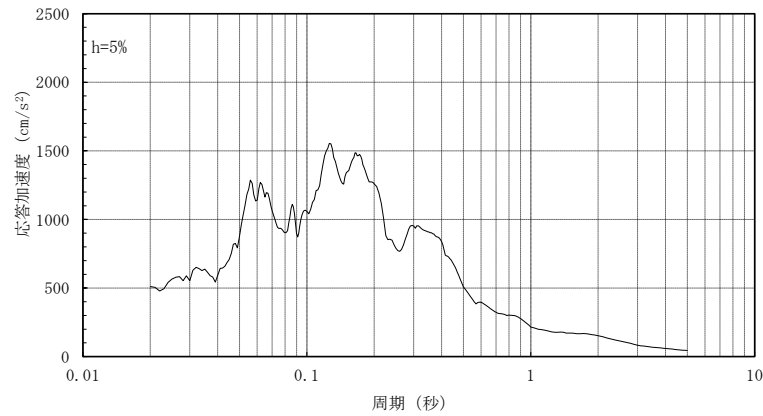
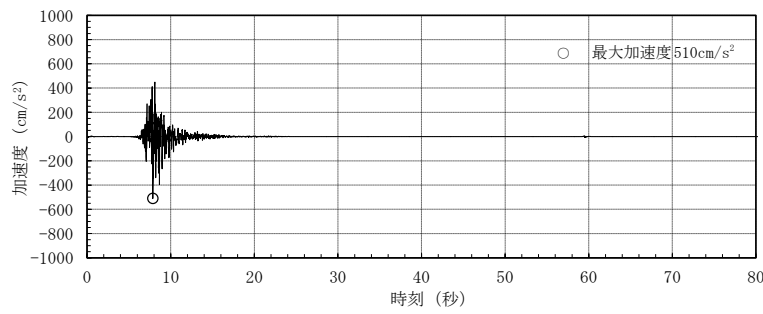


(S s - DH : 水平方向)

第 4.1-2 図 入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトル  
(基準地震動 S s - D)

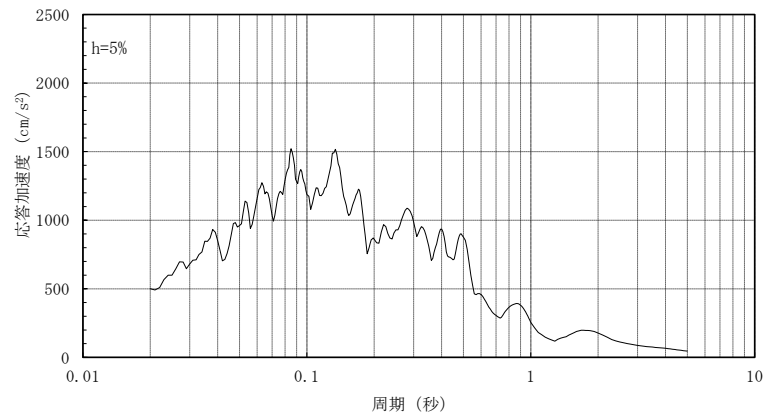
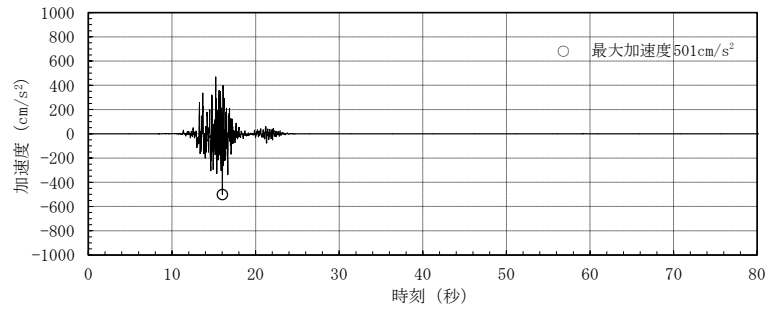


(S s - F 1 H (NS成分) : NS方向)

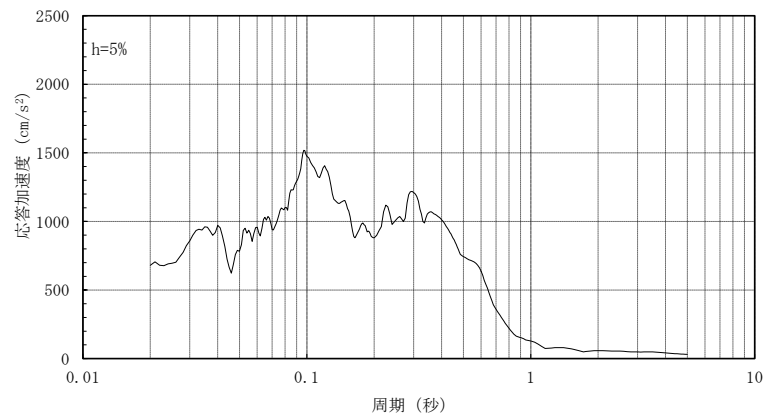
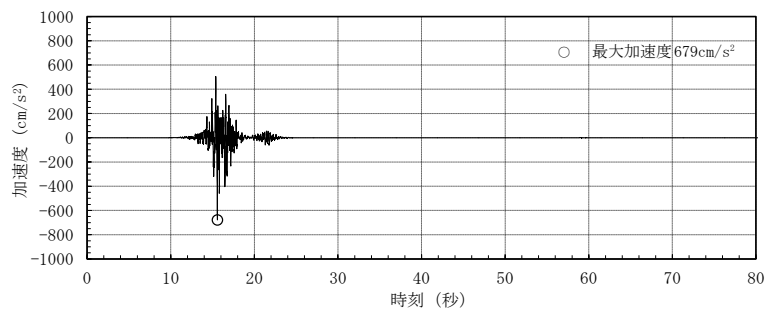


(S s - F 1 H (EW成分) : EW方向)

第 4.1-3 図 入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトル  
(基準地震動 S s - F 1)

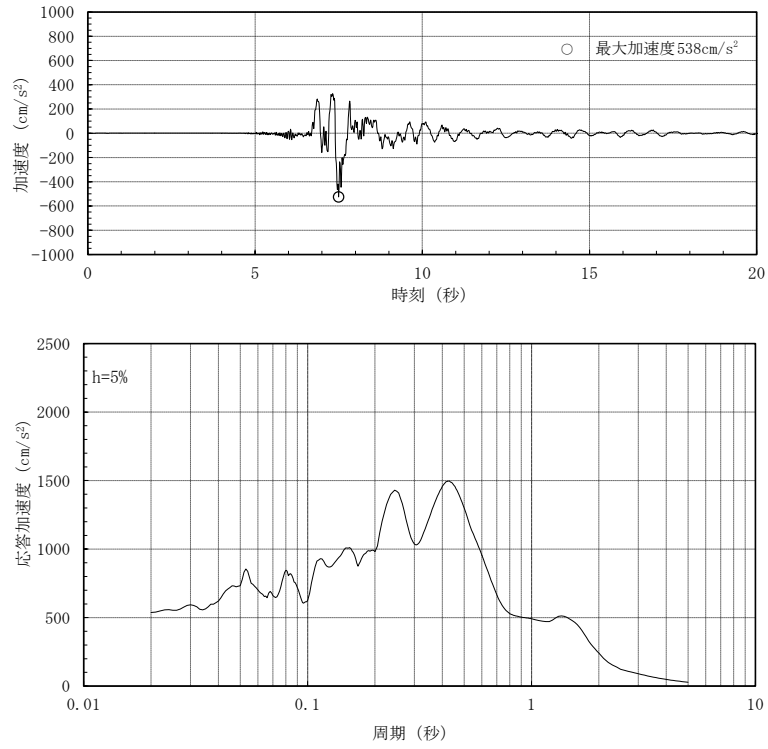


(S s - F 2 H (NS成分) : NS方向)



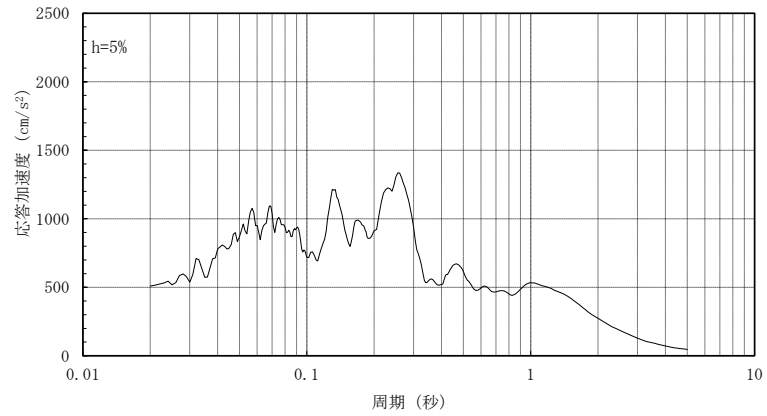
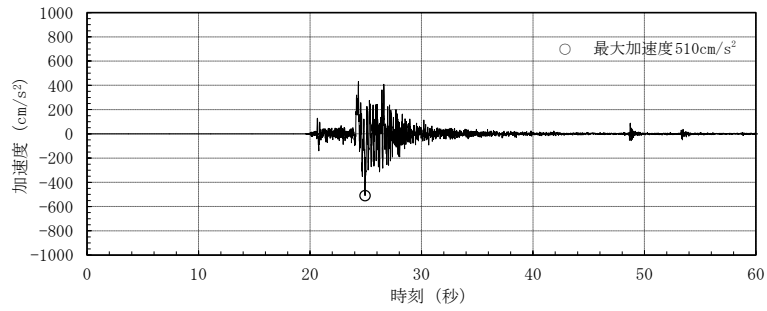
(S s - F 2 H (EW成分) : EW方向)

第 4.1-4 図 入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトル  
(基準地震動 S s - F 2)

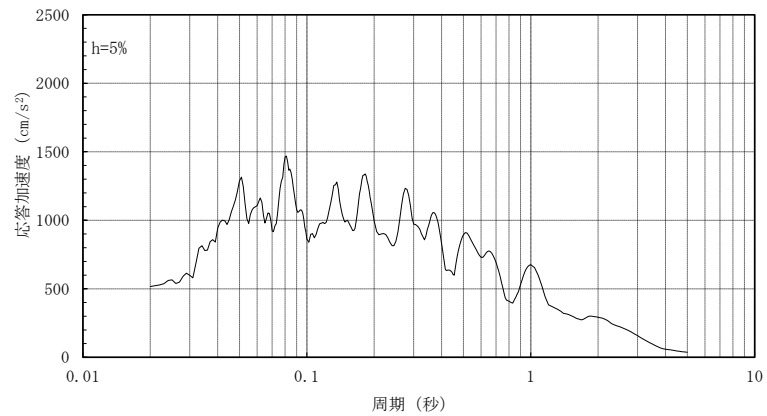
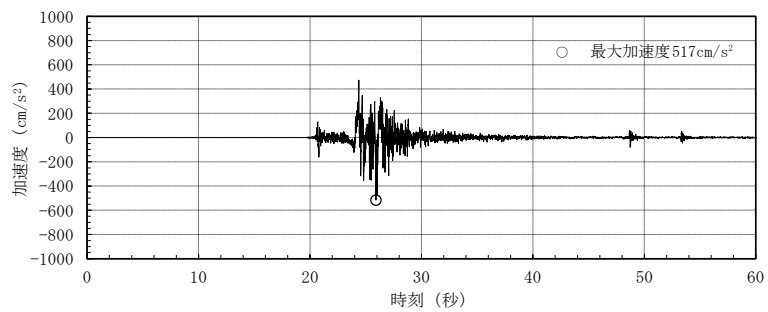


(S s - N 1 H : 水平方向)

第 4.1-5 図 入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトル  
(基準地震動 S s - N 1)



(S s - N 2 H (N S成分) : 水平方向)



(S s - N 2 H (E W成分) : 水平方向)

第 4.1-6 図 入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトル  
(基準地震動 S s - N 2)

## 4.2 ジョイント要素を用いた 3次元 FEMモデルによる地震応答解析

### (1) 地震応答解析モデル

廃棄物処理建物は、建物と地盤との相互作用、基礎浮上り非線形及び基礎と岩盤との付着力を考慮した、建物を質点系、地盤を 3次元 FEMでモデル化した地震応答解析モデルにより、地震応答解析を行う。

水平方向の建物の地震応答解析モデルは、主要な耐震壁を曲げ・せん断部材に置換し、重量を各階床位置に集中させた 1軸多質点系モデルとする。なお、回転慣性重量は基礎下端に集約して評価する。

建物の減衰はモード減衰とし、各次のモード減衰定数は建物のひずみエネルギーに比例した値として算定する。建物の鉄筋コンクリート部分については減衰定数を 5%とする。

建物の非線形特性については、「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に基づき鉄筋コンクリート部には最大点指向型のトリリニア・スケルトン曲線を設定する。

地盤は、建物基礎下端以下を実地盤モデルに基づき成層地盤とし、「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」により、成層補正を行ったのち、等価な一様地盤としての物性値を定め、3次元 FEMを用いてモデル化する。3次元 FEM地盤モデルと建物基礎底面の間には、島根原子力発電所における付着力試験の結果に基づき設定した付着力  $0.40\text{N/mm}^2$  を考慮する。

建物の基礎浮上り非線形については、建物基礎と 3次元 FEM地盤モデルとの間に設定した付着力を超える引張力を負担しないジョイント要素<sup>注1</sup>を用いることにより、浮上りを評価する。

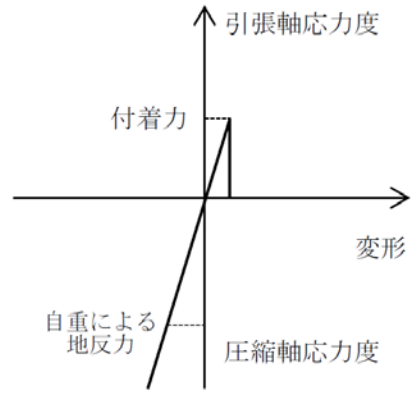
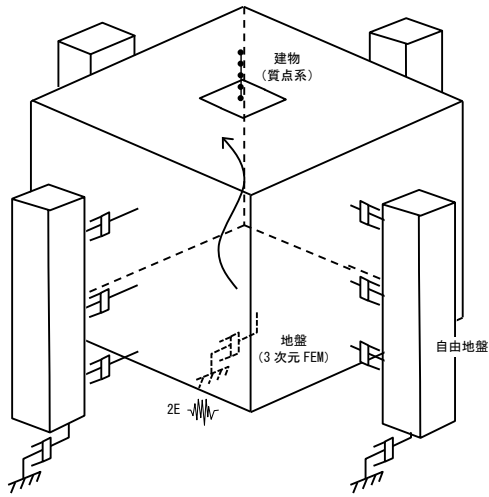
地盤モデル底面及び側面は粘性境界を設けることにより、遠方地盤への波動の逸散を考慮する。

地震応答解析は、上記復元力特性を用いた弾塑性時刻歴応答解析とし、地震応答解析モデル（水平方向）を第 4.2-1 図に、建物質点系モデルの諸元を第 4.2-2 図及び第 4.2-3 図に示す。

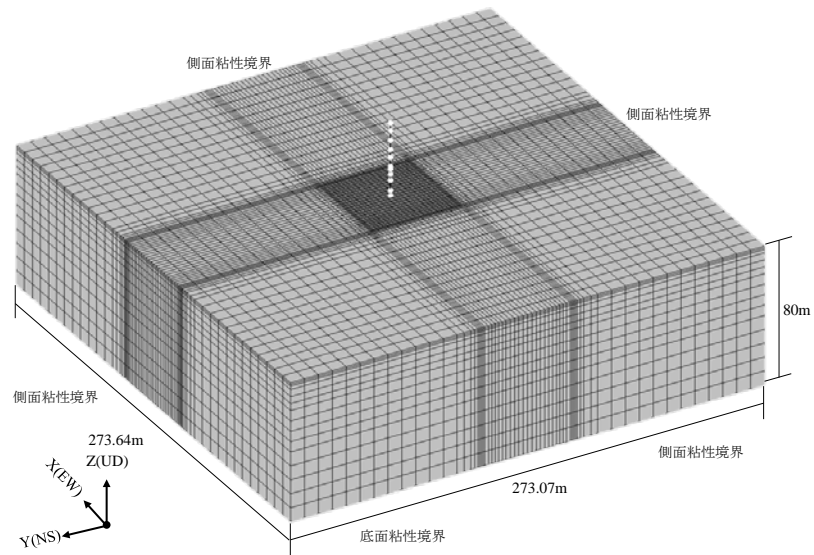
地震応答解析には解析コード「N A P I S O S Ver.2.0」を用いる。

注1：建物モデルの自重によりジョイント要素に発生する応力（地反力）を算定し、これを地震応答解析の初期応力とする。

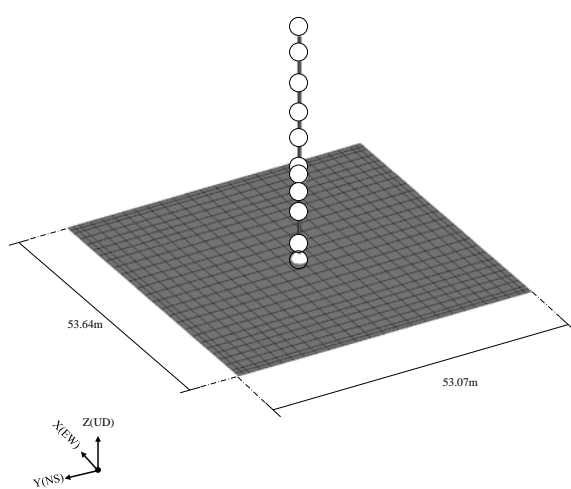




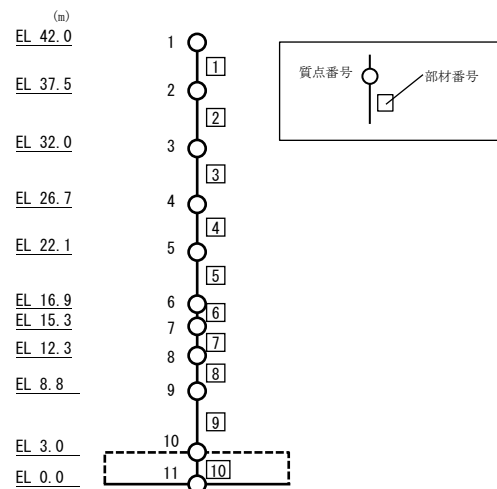
(付着力を考慮したジョイント要素の応力-変形関係)



(全体)

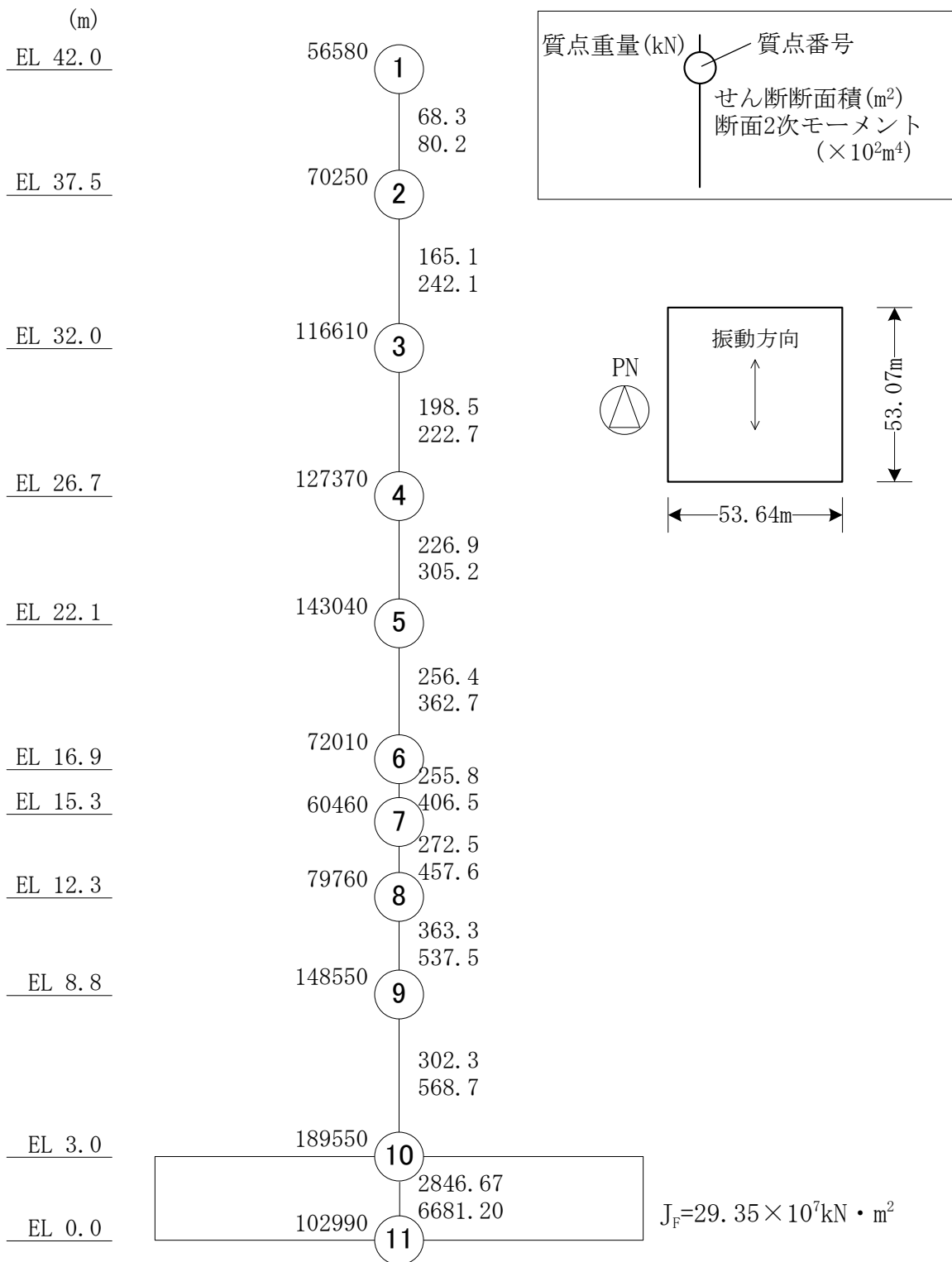


(建物)

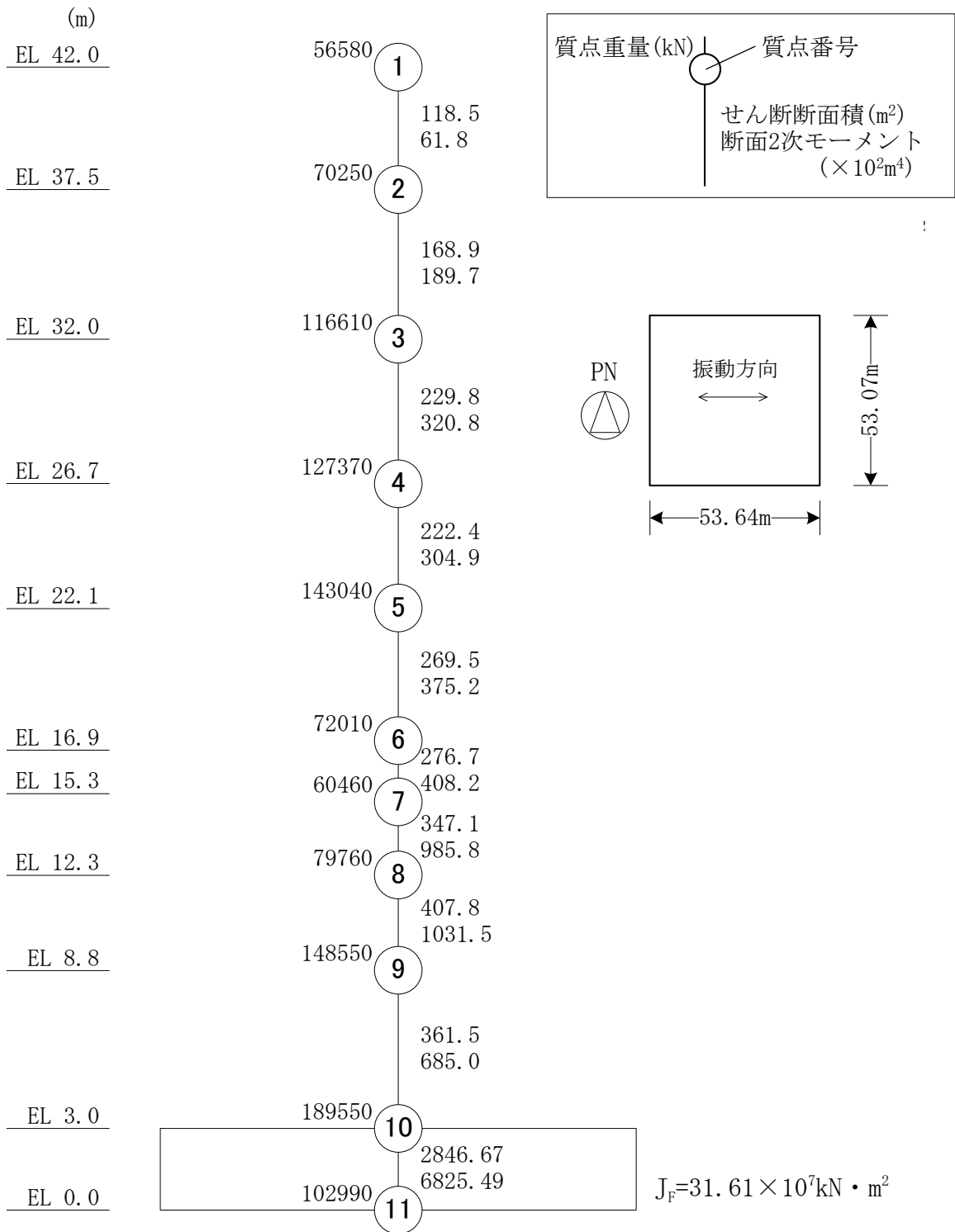


(質点番号及び部材番号)

第 4.2-1 図 廃棄物処理建物の地震応答解析モデル (水平方向)



第 4.2-2 図 建物質点系地震応答解析モデルの諸元 (NS 方向)



第 4.2-3 図 建物質点系地震応答解析モデルの諸元 (EW方向)

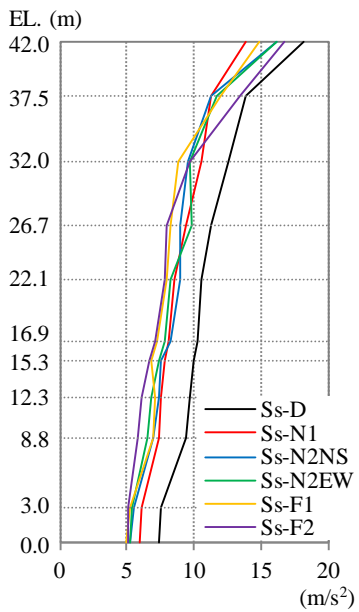
(2) 地震応答解析結果

基準地震動  $S_s-D$ ,  $S_s-F1$ ,  $S_s-F2$ ,  $S_s-N1$  及び  $S_s-N2$  (水平動) による最大応答値を第 4.2-4 図～第 4.2-9 図に示す。最大接地圧及び最小接地率を第 4.2-1 表に示す。

参考として、耐震壁の最大応答せん断ひずみは、最大で  $0.51 \times 10^{-3}$  ( $S_s-DH$ , NS 方向) であり、評価基準値 ( $2.0 \times 10^{-3}$ ) に対して十分な余裕があることを確認している。

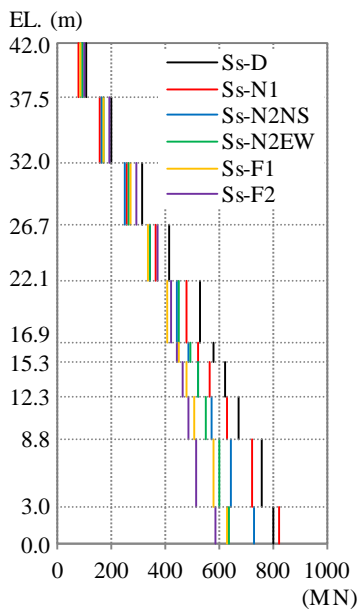
検討の結果、ジョイント要素を用いた 3 次元 FEM モデルによる最小接地率は 98.8% ( $S_s-DH$ , NS 方向), 93.9% ( $S_s-DH$ , EW 方向) であり、「J E A C 4 6 0 1-2008」で適用範囲の目安とされている 35% を上回っていることから、解析結果が解析モデルの適用範囲内に収まることを確認した。

以上のことから、廃棄物処理建物の地震応答解析にジョイント要素を用いた 3 次元 FEM モデルを採用する。



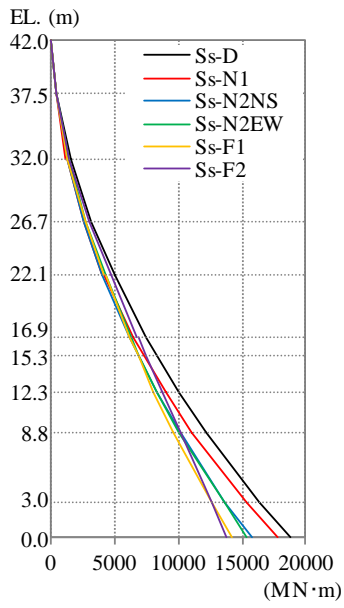
質点 番号	最大応答加速度 (m/s <sup>2</sup> )					
	Ss-DH	Ss-F1H (NS成分)	Ss-F2H (NS成分)	Ss-N1H	Ss-N2H (NS成分)	Ss-N2H (EW成分)
1	18.2	13.8	16.1	16.1	14.8	16.7
2	13.9	11.3	11.2	11.7	12.0	13.4
3	12.5	10.6	9.59	9.73	8.87	9.67
4	11.2	9.46	8.98	9.88	8.22	8.01
5	10.6	8.51	8.90	8.25	8.00	7.81
6	10.2	8.12	8.31	7.75	7.31	7.07
7	10.0	7.89	7.59	7.41	6.76	6.62
8	9.66	7.56	7.36	6.88	7.13	6.05
9	9.43	7.36	6.89	6.54	6.98	5.77
10	7.52	6.04	5.58	5.40	5.17	5.14
11	7.46	5.89	5.30	5.26	5.01	5.09

第 4.2-4 図 最大応答加速度 (NS 方向)



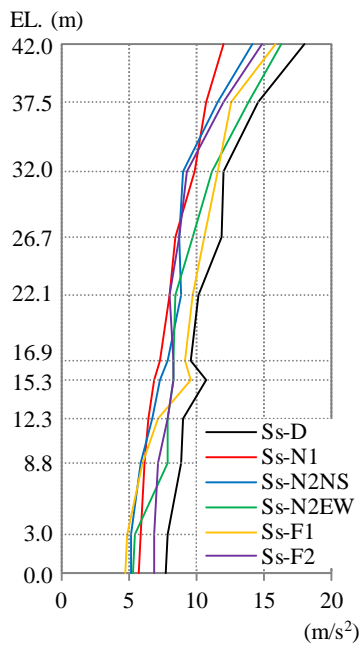
部材 番号	最大応答せん断力 (MN)					
	Ss-DH	Ss-F1H (NS成分)	Ss-F2H (NS成分)	Ss-N1H	Ss-N2H (NS成分)	Ss-N2H (EW成分)
1	103	79.5	92.0	91.4	84.7	96.5
2	197	159	165	172	167	189
3	312	256	250	266	269	294
4	416	367	343	341	338	368
5	527	481	445	452	407	420
6	577	525	484	493	447	442
7	624	568	525	522	476	464
8	674	627	569	550	510	484
9	757	724	647	600	576	515
10	803	820	727	637	632	585

第 4.2-5 図 最大応答せん断力 (NS 方向)



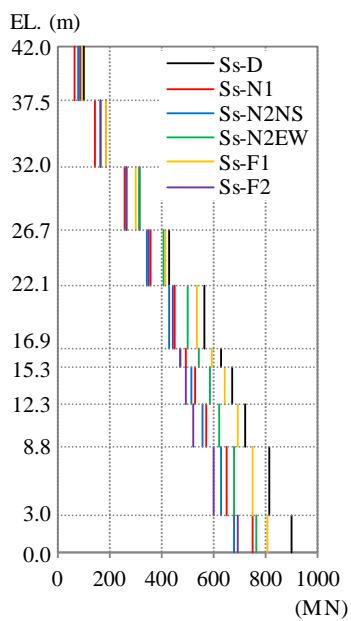
部材 番号	最大応答曲げモーメント (MN・m)					
	S s -DH	S s -F 1 H (NS成分)	S s -F 2 H (NS成分)	S s -N 1 H	S s -N 2 H (NS成分)	S s -N 2 H (EW成分)
1	511	387	432	450	414	459
2	1550	1230	1320	1400	1300	1490
3	3200	2580	2580	2770	2690	3040
4	5060	4090	4000	4280	4240	4710
5	7480	6470	6140	6300	6210	6820
6	8360	7320	6860	6950	6850	7490
7	10100	8990	8290	8270	8070	8690
8	12200	11100	10200	10100	9590	10200
9	16400	15300	13700	13600	12600	12600
10	18800	17800	15800	15400	14200	13800

第 4.2-6 図 最大応答曲げモーメント (NS方向)



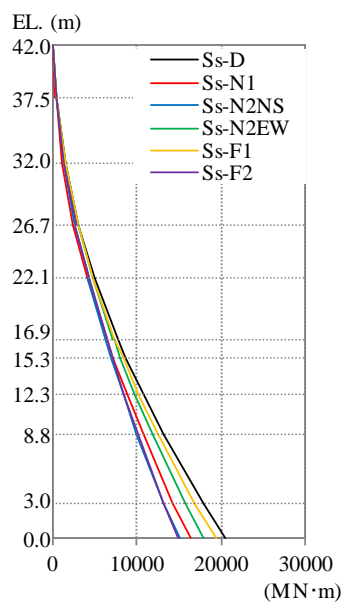
質点 番号	最大応答加速度 (m/s <sup>2</sup> )					
	S s -DH	S s -F 1 H (EW成分)	S s -F 2 H (EW成分)	S s -N 1 H	S s -N 2 H (NS成分)	S s -N 2 H (EW成分)
1	17.9	12.0	14.1	16.3	15.8	14.8
2	14.6	10.7	11.6	13.9	12.6	12.0
3	12.0	9.79	9.06	11.1	11.6	9.28
4	11.8	8.50	8.73	9.73	10.6	8.68
5	10.2	7.96	8.90	8.39	9.68	7.94
6	9.60	7.33	7.90	8.34	9.16	8.34
7	10.7	6.91	7.25	8.33	9.58	8.29
8	9.06	6.43	6.79	7.87	7.14	7.81
9	8.86	6.20	5.86	7.91	6.08	7.15
10	7.84	5.82	5.17	5.39	4.86	6.89
11	7.75	5.75	5.15	5.26	4.74	6.89

第 4.2-7 図 最大応答加速度 (EW方向)



部材 番号	最大応答せん断力 (MN)					
	S s -DH	S s -F 1 H (EW成分)	S s -F 2 H (EW成分)	S s -N 1 H	S s -N 2 H (NS成分)	S s -N 2 H (EW成分)
1	98.7	69.2	81.6	94.2	92.7	86.7
2	190	142	165	189	185	164
3	316	257	263	316	302	268
4	432	357	341	406	415	349
5	568	452	427	499	536	443
6	626	493	471	545	593	473
7	671	529	515	583	645	495
8	724	569	558	619	692	519
9	817	653	630	682	750	601
10	897	749	675	762	807	695

第 4.2-8 図 最大応答せん断力 (EW方向)



部材 番号	最大応答曲げモーメント (MN・m)					
	S s -DH	S s -F 1 H (EW成分)	S s -F 2 H (EW成分)	S s -N 1 H	S s -N 2 H (NS成分)	S s -N 2 H (EW成分)
1	487	340	398	450	443	409
2	1530	1110	1300	1480	1470	1330
3	3080	2430	2690	3070	2970	2720
4	4970	4060	4230	4840	4710	4270
5	7710	6400	6250	7230	7400	6390
6	8710	7180	6950	8050	8340	7100
7	10700	8750	8330	9650	10200	8470
8	13100	10700	10000	11800	12600	10100
9	17800	14300	13100	15700	16900	13200
10	20500	16400	15000	17900	19300	14900

第 4.2-9 図 最大応答曲げモーメント (E W方向)



第 4.2-1 表 最大接地圧及び最小接地率

	N S 方向					
	S <sub>S</sub> -DH	S <sub>S</sub> -F1H (NS 成分)	S <sub>S</sub> -F2H (NS 成分)	S <sub>S</sub> -N1H	S <sub>S</sub> -N2H (NS 成分)	S <sub>S</sub> -N2H (EW 成分)
最大接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )	6457	5389	5728	6059	5856	5743
最小接地率 (%)	98.8	100.0	100.0	99.0	100.0	100.0
	E W 方向					
	S <sub>S</sub> -DH	S <sub>S</sub> -F1H (EW 成分)	S <sub>S</sub> -F2H (EW 成分)	S <sub>S</sub> -N1H	S <sub>S</sub> -N2H (NS 成分)	S <sub>S</sub> -N2H (EW 成分)
最大接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )	6828	6221	5760	5834	5916	6183
最小接地率 (%)	93.9	98.5	100.0	100.0	100.0	99.0

## 制御室建物の地震応答解析

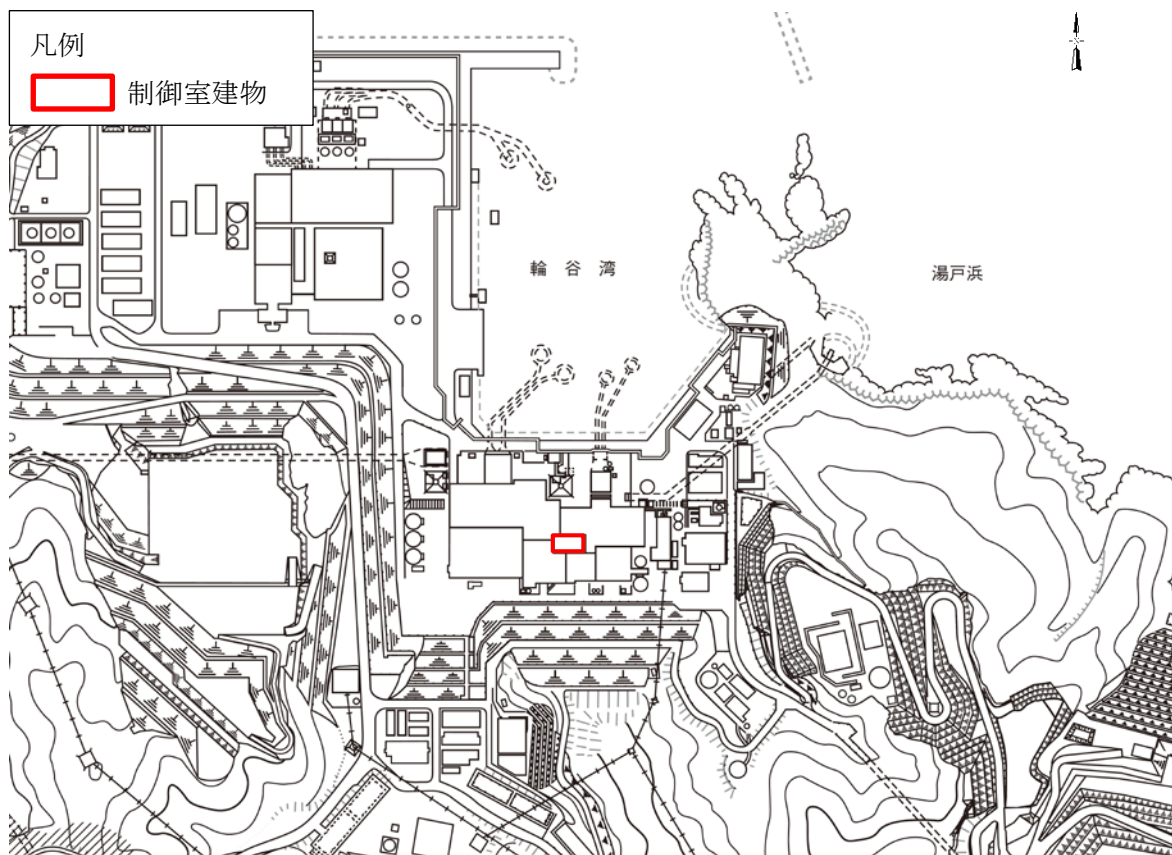
## 1. 概要

本資料は、制御室建物について「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に示される浮上り線形地震応答解析を実施し、基礎浮上りが発生しないために必要な付着力が、付着力試験に基づき設定した値を超えないことを確認した結果について説明する。

## 2. 制御室建物の概要

## 2.1 位置

制御室建物の設置位置を第 2.1-1 図に示す。



第 2.1-1 図 制御室建物の設置位置

## 2.2 構造概要

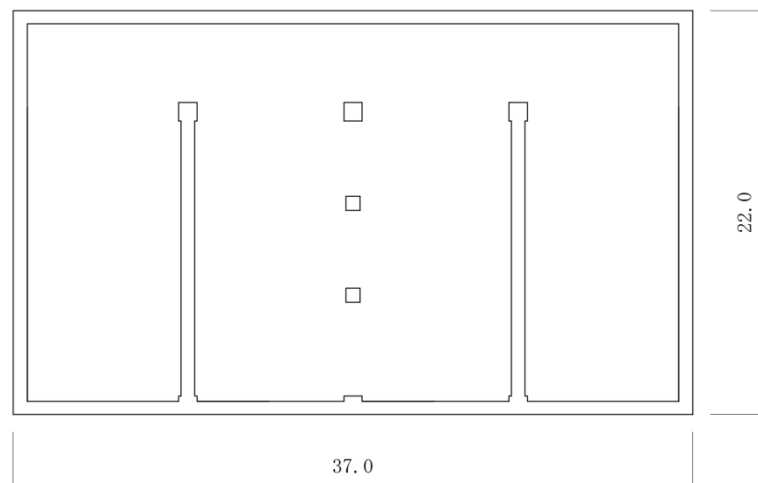
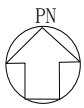
制御室建物は、4階建の鉄筋コンクリート造の建物である。

制御室建物の平面寸法は、22.0m<sup>注1</sup>（NS）×37.0m<sup>注1</sup>（EW）の矩形を成している。基礎スラブ底面からの高さは21.95mである。また、制御室建物は隣接する他の建物と構造的に分離している。

制御室建物の概要を第2.2-1図及び第2.2-2図に示す。

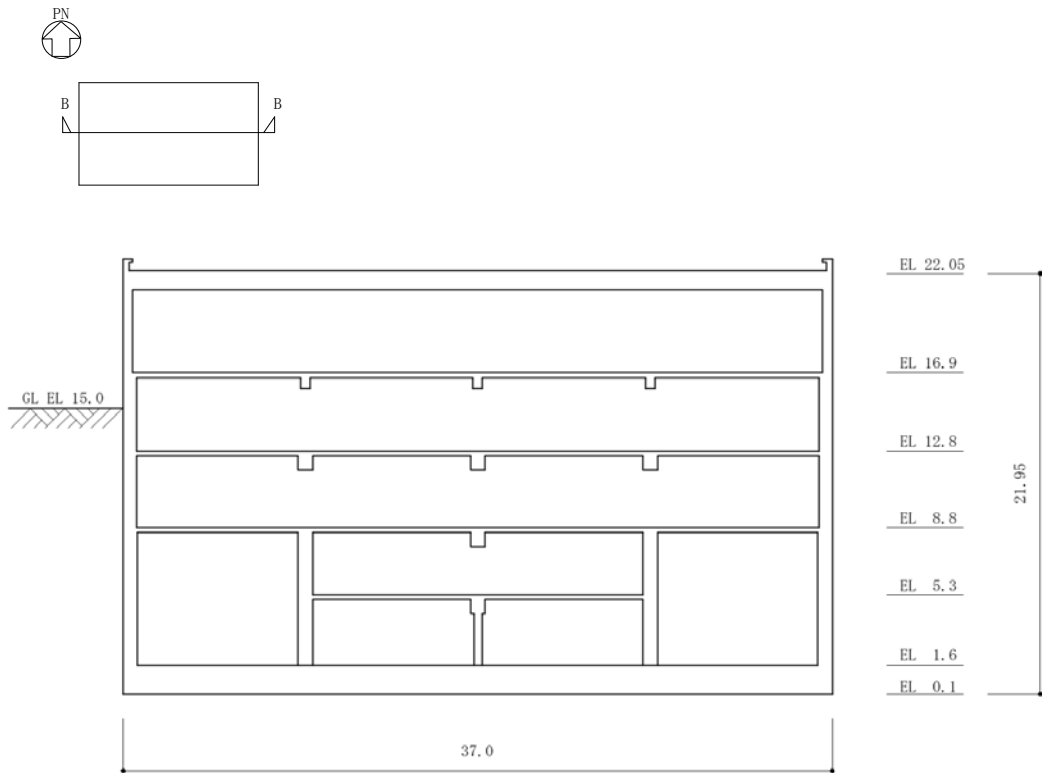
制御室建物の基礎は厚さ1.5mのべた基礎で、岩盤に直接設置している。建物に加わる地震時の水平力はすべて耐震壁に負担させている。

注1：建物寸法は壁外面寸法とする。

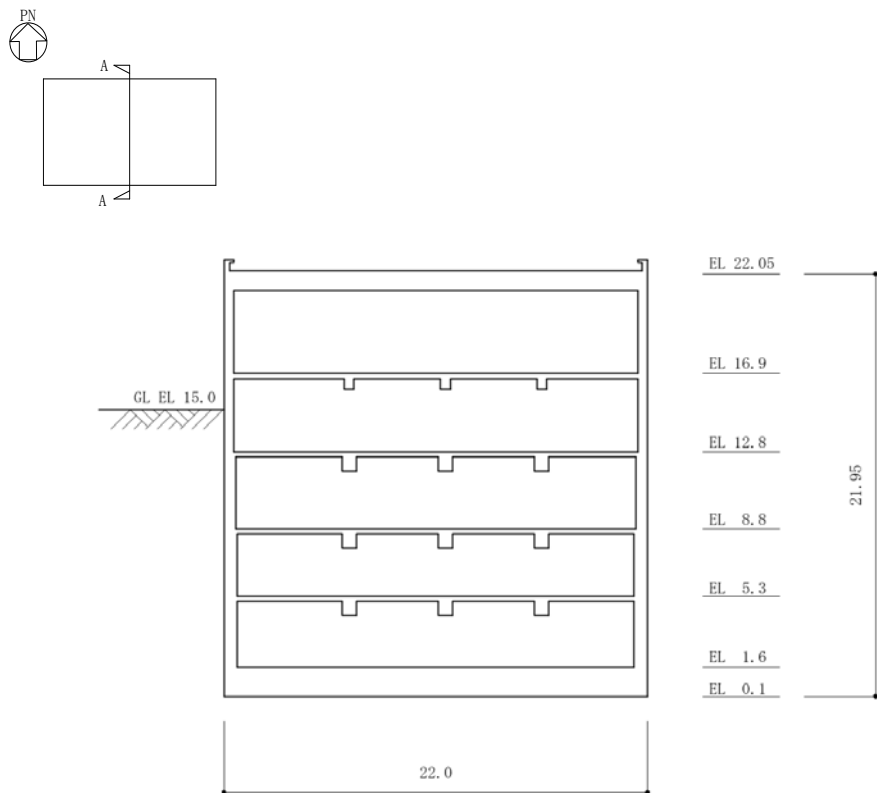


第2.2-1図 制御室建物の概要（平面図）（E L 1.6m<sup>注2</sup>）  
（単位：m）

注2：「E L」は東京湾平均海面（T.P.）を基準としたレベルを示す。



(E W断面)



(N S断面)

第 2.2-2 図 制御室建物の概要 (断面図) (単位 : m)

### 3. 検討用地震動

検討に用いる地震動は、基準地震動  $S_s - D$ 、 $S_s - F1$ 、 $S_s - F2$ 、 $S_s - N1$  及び  $S_s - N2$  とする。

### 4. 地震応答解析

#### 4.1 入力地震動の算定

水平方向の入力地震動は、建物周辺地盤の状況を適切に考慮した二次元 FEM 地盤モデルによって算定する。

まず、解放基盤表面 (T. P. -10m) で定義される基準地震動  $S_s (2E_0)$  を用いて、T. P. -10m 以浅の地盤を取り去った解放地盤モデルで一次元波動論による応答解析を行い、二次元 FEM 地盤モデル下端位置 (T. P. -215m) への入力地震動 ( $2E_1$ ) を算定する。次に、この地震動を用いて二次元 FEM 地盤モデルによる地盤応答解析を行い、建物基礎下端位置 (T. P. 0.1m) における応答波 ( $2E$ ) を求め、これを建物-地盤連成モデルへの入力地震動とする。

なお、二次元 FEM 地盤モデルの側面はエネルギー伝達境界、底面は粘性境界を設けることにより、遠方地盤への波動の逸散を考慮する。

表層は、拘束圧依存性と「せん断剛性-せん断ひずみ関係 ( $G/G_0 - \gamma$  曲線)」及び「減衰定数-せん断ひずみ関係 ( $h - \gamma$  曲線)」を基に、地震時のひずみレベルを考慮した等価な剛性と減衰を設定している。

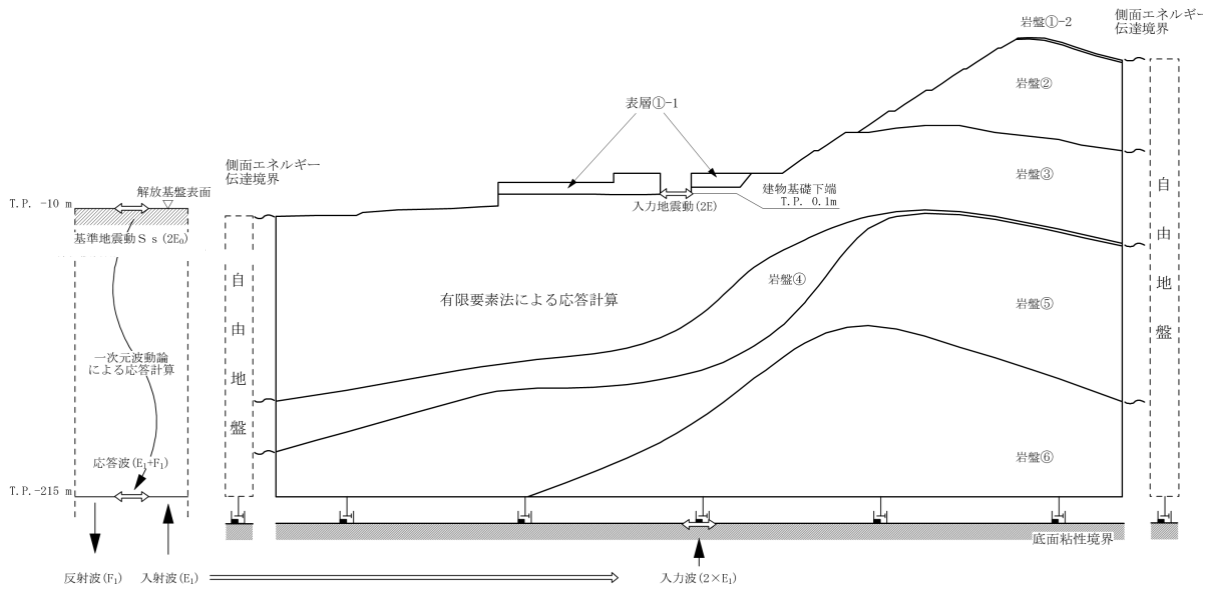
水平方向の入力地震動作成の概要を第 4.1-1 図に、地盤各層の物理定数を第 4.1-1 表に示す。

建物-地盤連成モデルへの入力地震動 ( $2E$ ) の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトルを第 4.1-2 図~第 4.1-7 図に示す。

入力地震動の算定には解析コード「SHAKE」及び「SUPERFLUSH」を用いる。

[解放地盤モデル]

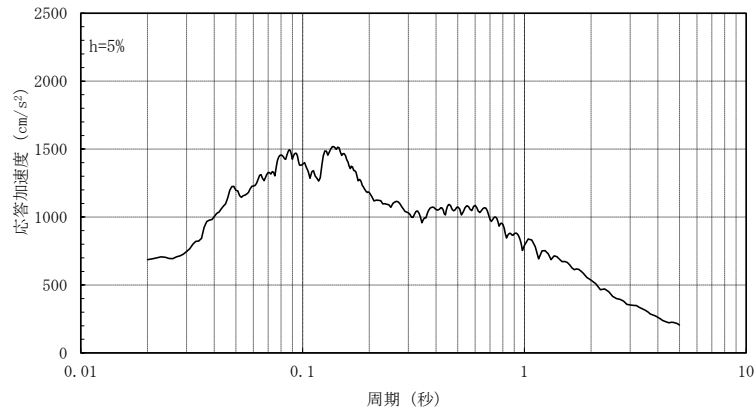
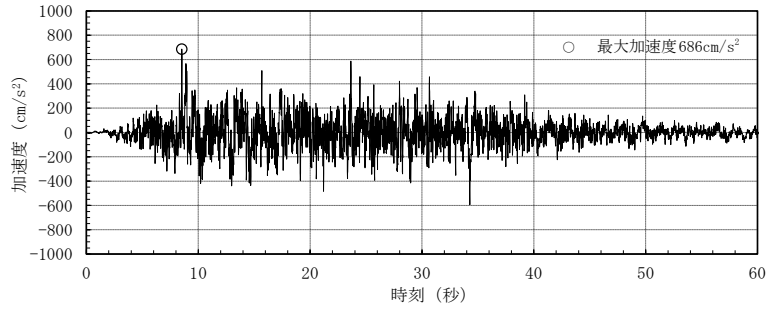
[二次元FEM地盤モデル]



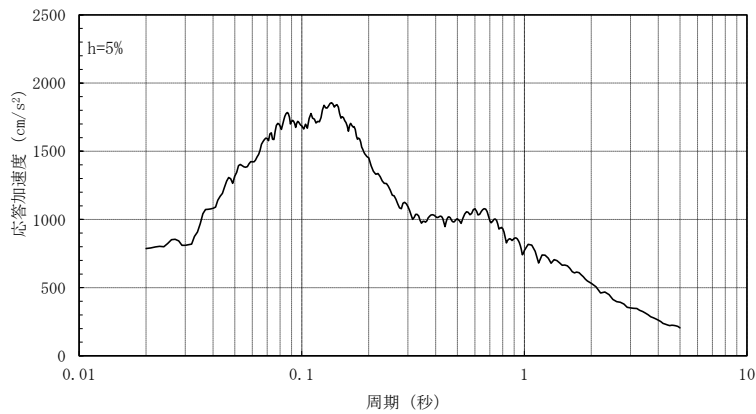
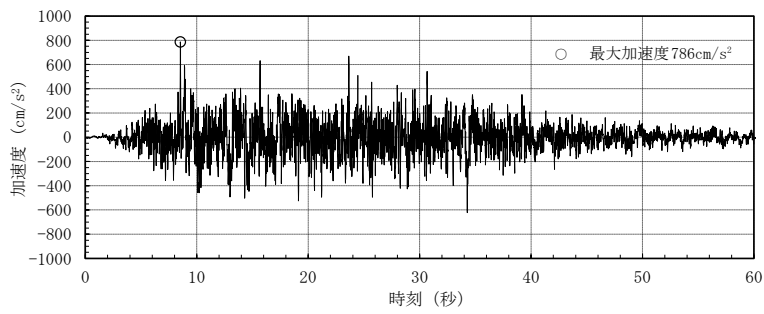
第 4.1-1 図 入力地震動作成の概要 (水平方向)

第 4.1-1 表 地盤の物理定数

層 番号	S波 速度 $V_s$ m/s	P波 速度 $V_p$ m/s	単位体積 重量 $\gamma$ kN/m <sup>3</sup> (tf/m <sup>3</sup> )	ポアソン 比 $\nu$	ヤング 係数 $E$ $\times 10^5$ kN/m <sup>2</sup> ( $\times 10^4$ tf/m <sup>2</sup> )	せん断 弾性係数 $G$ $\times 10^5$ kN/m <sup>2</sup> ( $\times 10^4$ tf/m <sup>2</sup> )	減衰 定数 $h$ %
表層 ①-1	$S_s$ 127	422	20.7 (2.11)	0.45	0.99 (1.01)	0.341 (0.348)	8
岩盤①-2	250	800	20.6 (2.10)	0.446	3.80 (3.88)	1.31 (1.34)	3
岩盤②	900	2100	23.0 (2.35)	0.388	52.9 (53.9)	19.0 (19.4)	3
岩盤③	1600	3600	24.5 (2.50)	0.377	176.5 (180.0)	64.0 (65.3)	3
岩盤④	1950	4000	24.5 (2.50)	0.344	256.0 (261.0)	95.1 (97.0)	3
岩盤⑤	2000	4050	26.0 (2.65)	0.339	283.4 (289.0)	105.9 (108.0)	3
岩盤⑥	2350	4950	27.9 (2.85)	0.355	427.6 (436.0)	157.9 (161.0)	3

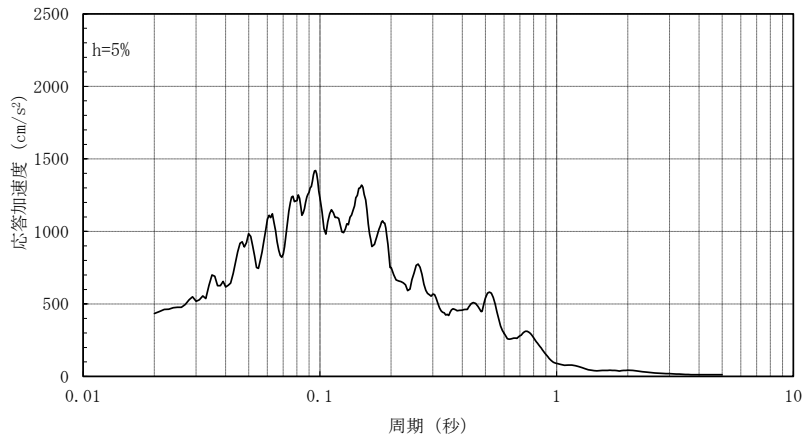
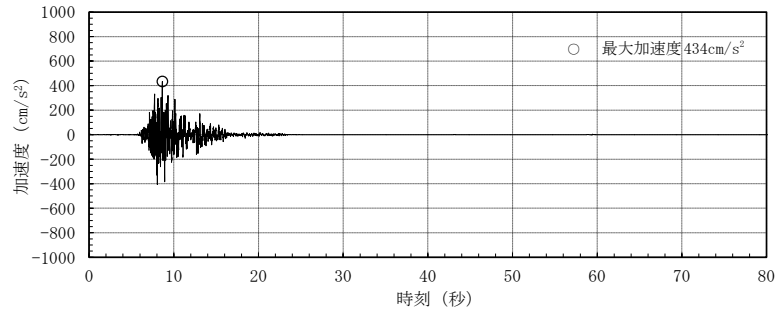


(S s - DH : NS方向)

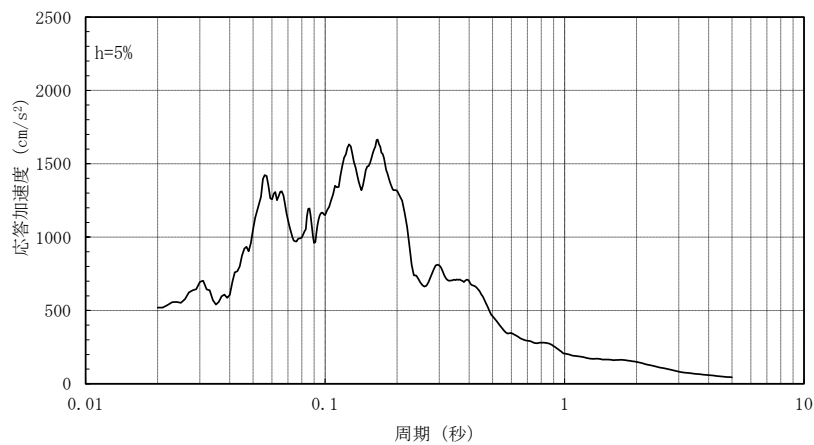
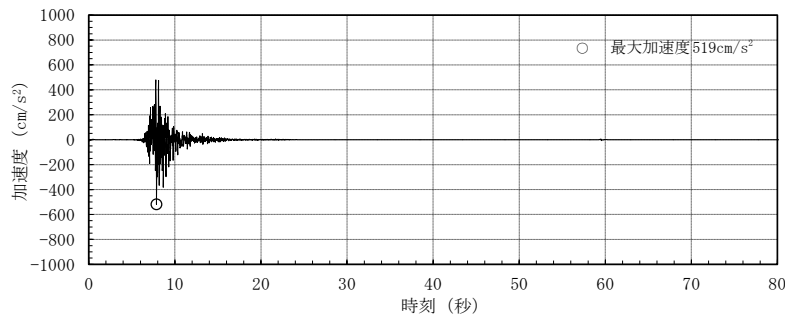


(S s - DH : EW方向)

第 4.1-2 図 入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトル  
(基準地震動 S s - D)



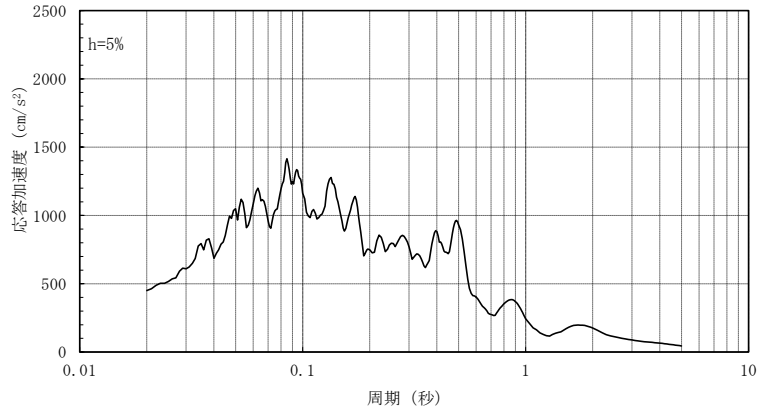
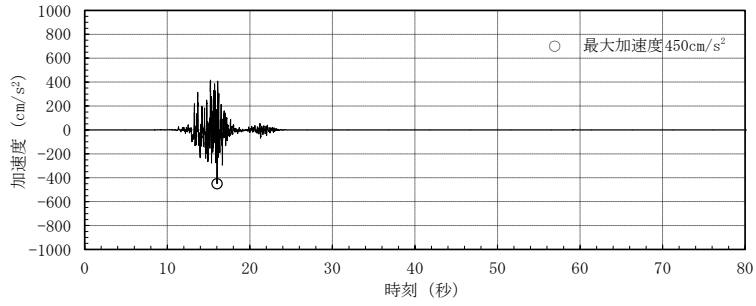
(S s - F 1 H (NS成分) : NS方向)



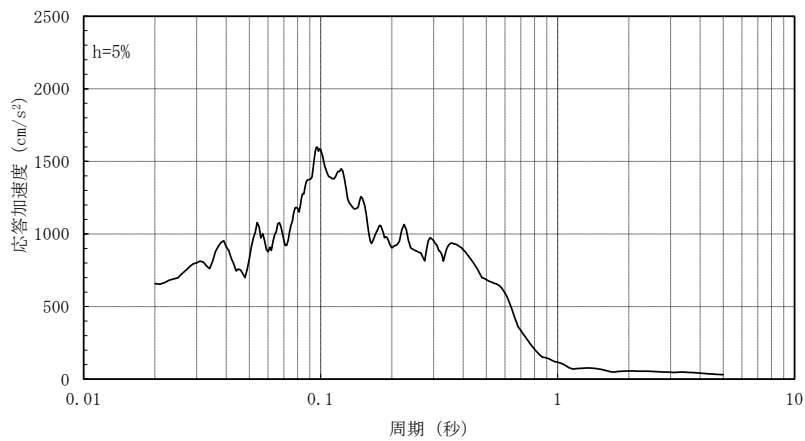
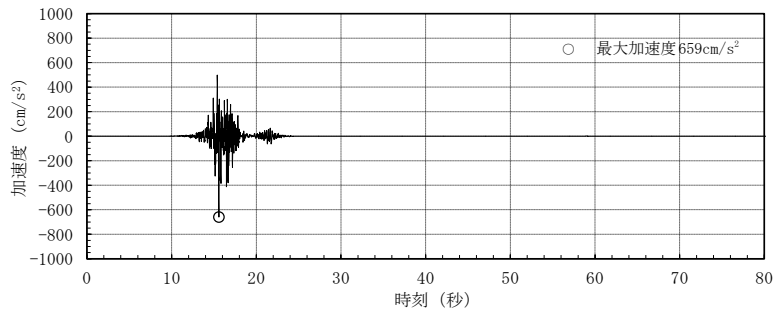
(S s - F 1 H (EW成分) : EW方向)

第 4.1-3 図 入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトル  
(基準地震動 S s - F 1)



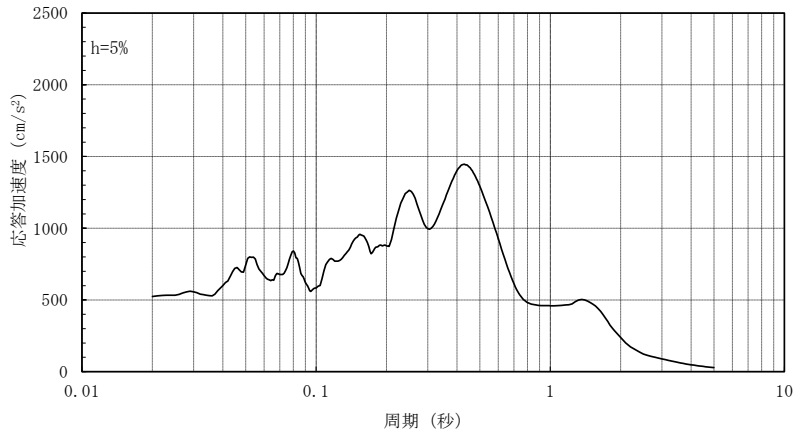
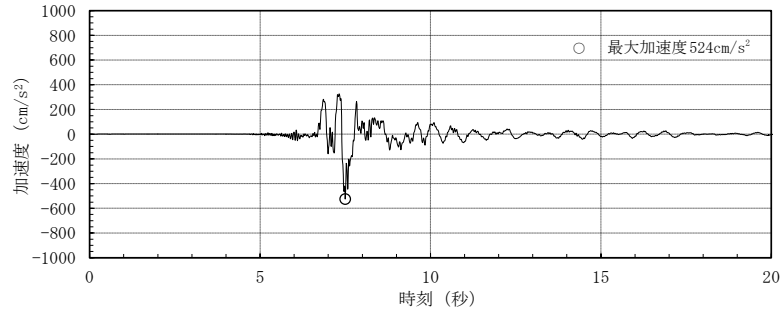


(S s - F 2 H (NS成分) : NS方向)

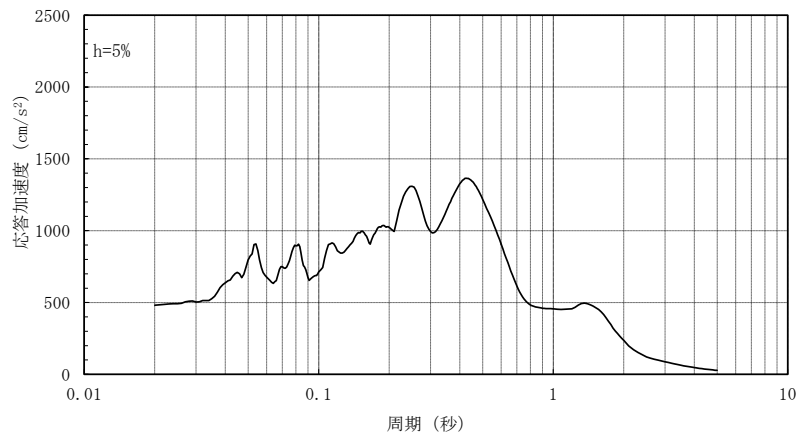
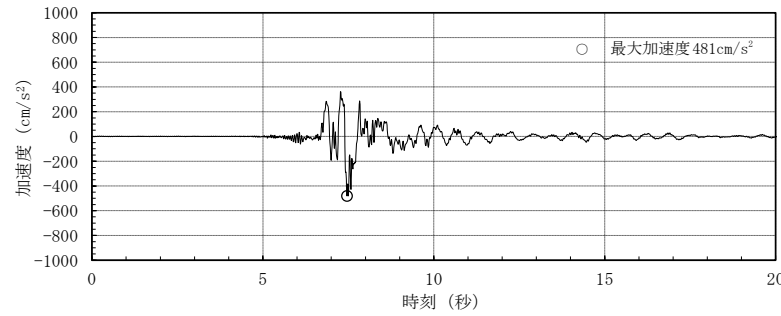


(S s - F 2 H (EW成分) : EW方向)

第 4.1-4 図 入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトル  
(基準地震動 S s - F 2)

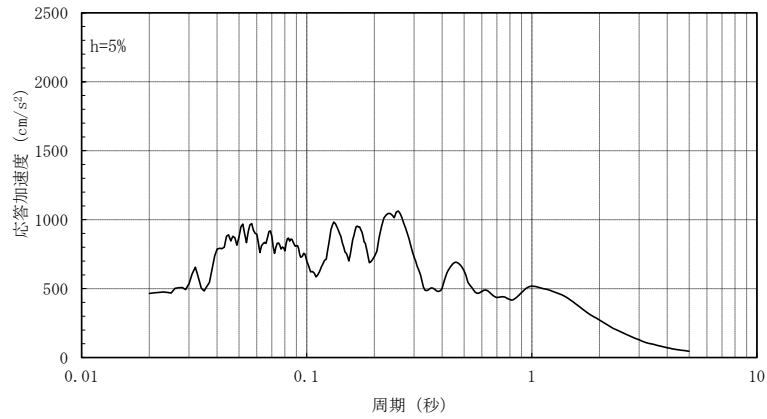
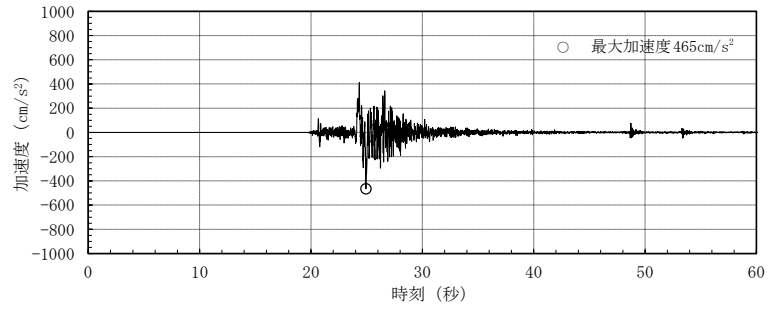


(S s - N 1 H : NS方向)

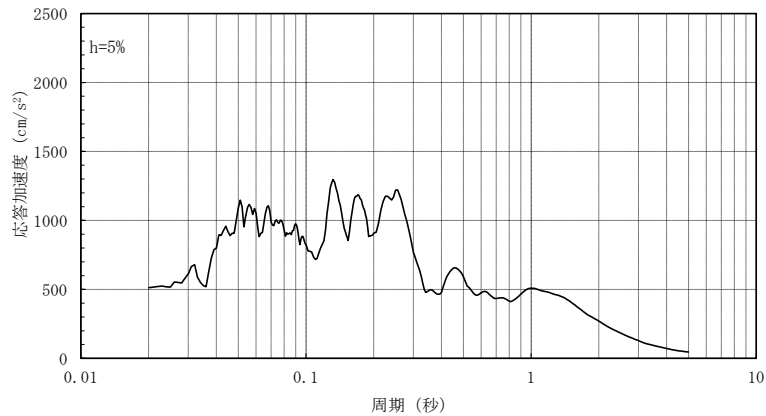
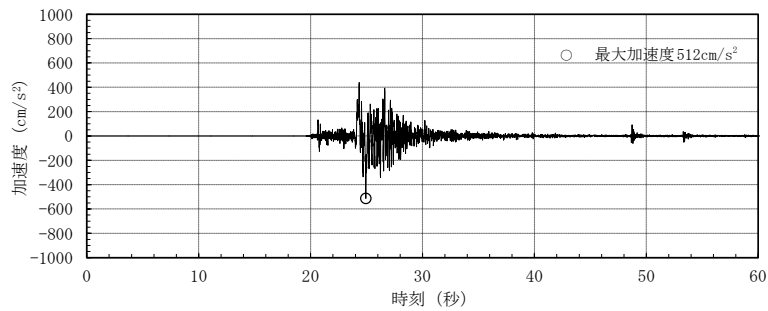


(S s - N 1 H : EW方向)

第 4.1-5 図 入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトル  
(基準地震動 S s - N 1)

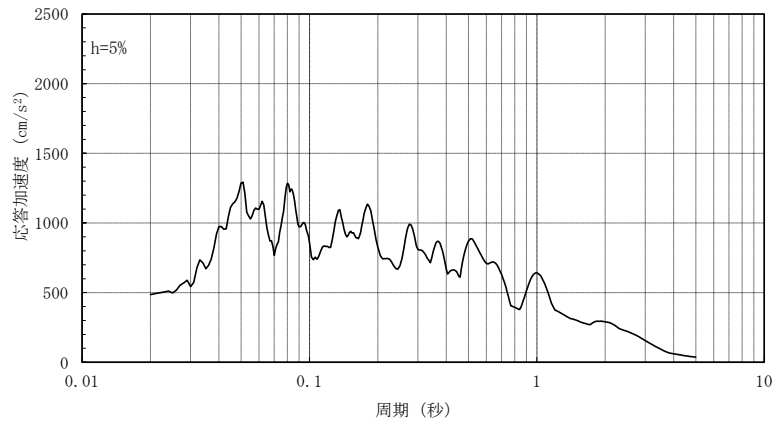
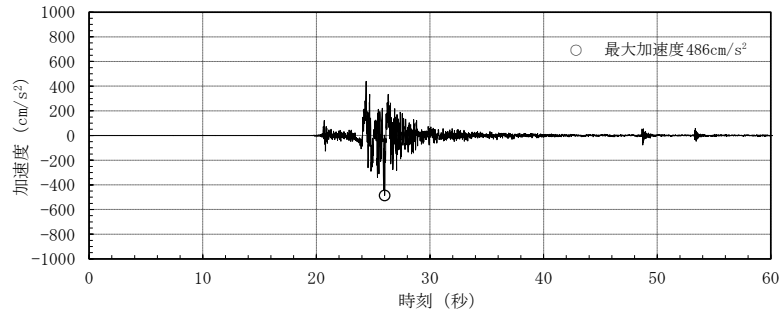


(S<sub>s</sub>-N2H (NS成分) : NS方向)

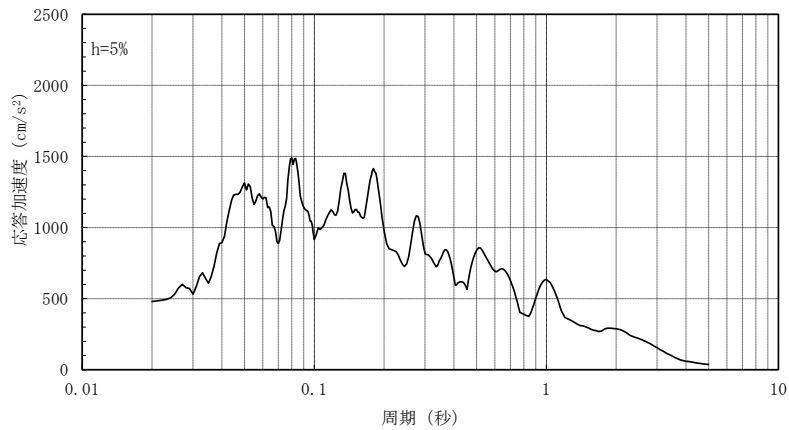
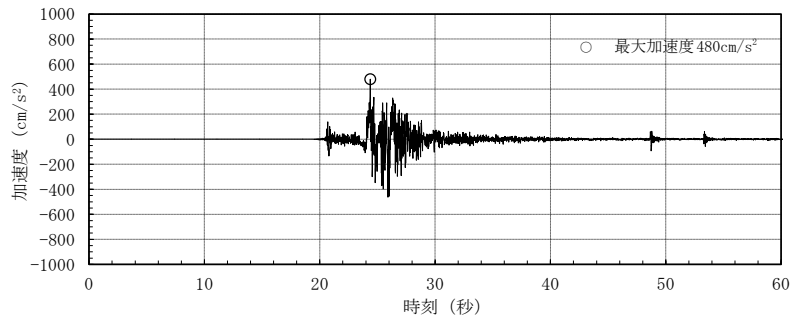


(S<sub>s</sub>-N2H (NS成分) : EW方向)

第 4.1-6 図 入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトル  
(基準地震動 S<sub>s</sub>-N2)



(S s - N 2 H (EW成分) : NS方向)



(S s - N 2 H (EW成分) : EW方向)

第 4.1-7 図 入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトル  
(基準地震動 S s - N 2)

## 4.2 地震応答解析モデル

水平方向の地震応答解析モデルは、主要な耐震壁を曲げ・せん断部材に置換し、重量を各階床位置に集中させた多質点系のスウェイ・ロッキングモデルとする。なお、回転慣性重量は基礎に集約して評価する。

建物と地盤の相互作用は、基礎スラブ底面を等価な地盤ばね（水平・回転）に置換して評価する。建物底面に付く地盤ばねは、振動アドミタンス理論により求めた振動数依存の複素ばねを、剛性は0 Hz での実部の値（静的ばね値）で、減衰係数は建物－地盤連成系の1次固有振動数での虚部の値と原点とを結ぶ直線の傾きで、それぞれ近似する。

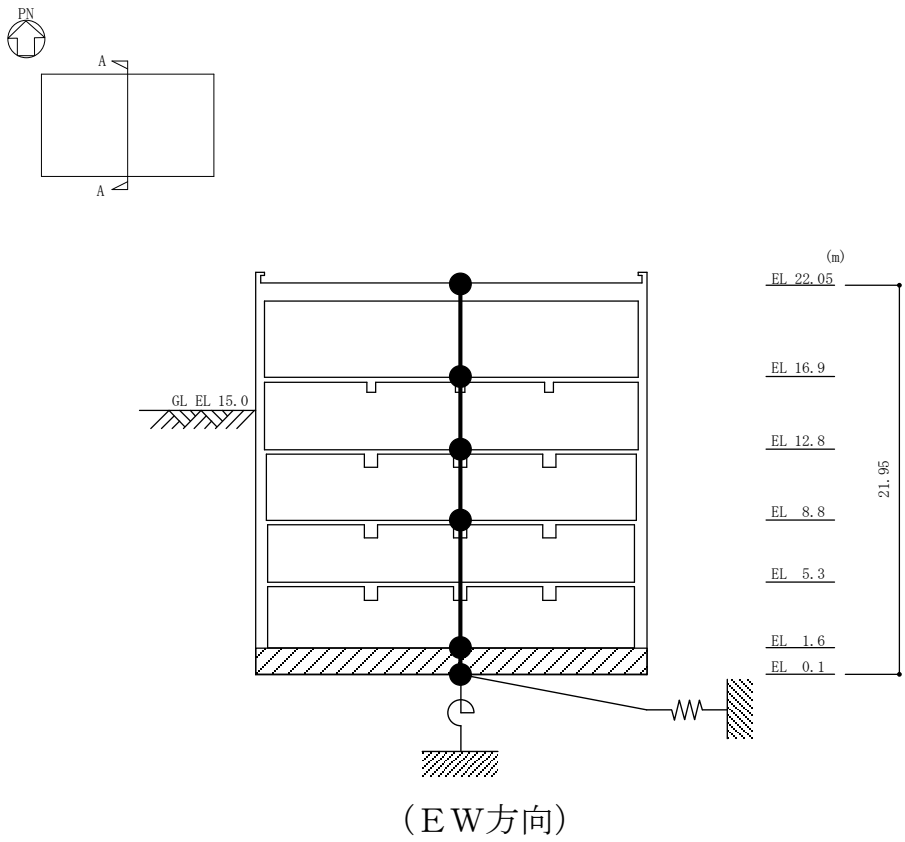
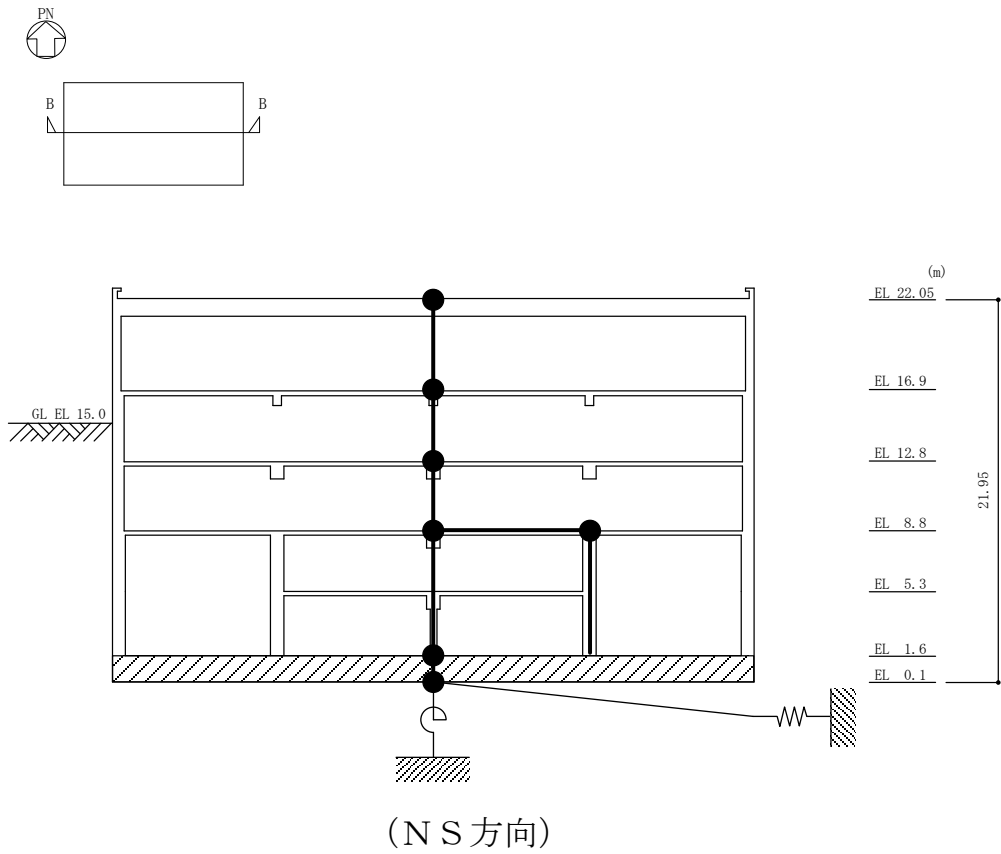
建物の減衰はモード減衰とし、各次のモード減衰定数は建物のひずみエネルギーに比例した値として算定する。建物の鉄筋コンクリート部分については減衰定数を5%とする。

建物の非線形特性については、鉄筋コンクリート部には最大点指向型のトリリニア・スケルトン曲線を「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に基づき設定する。

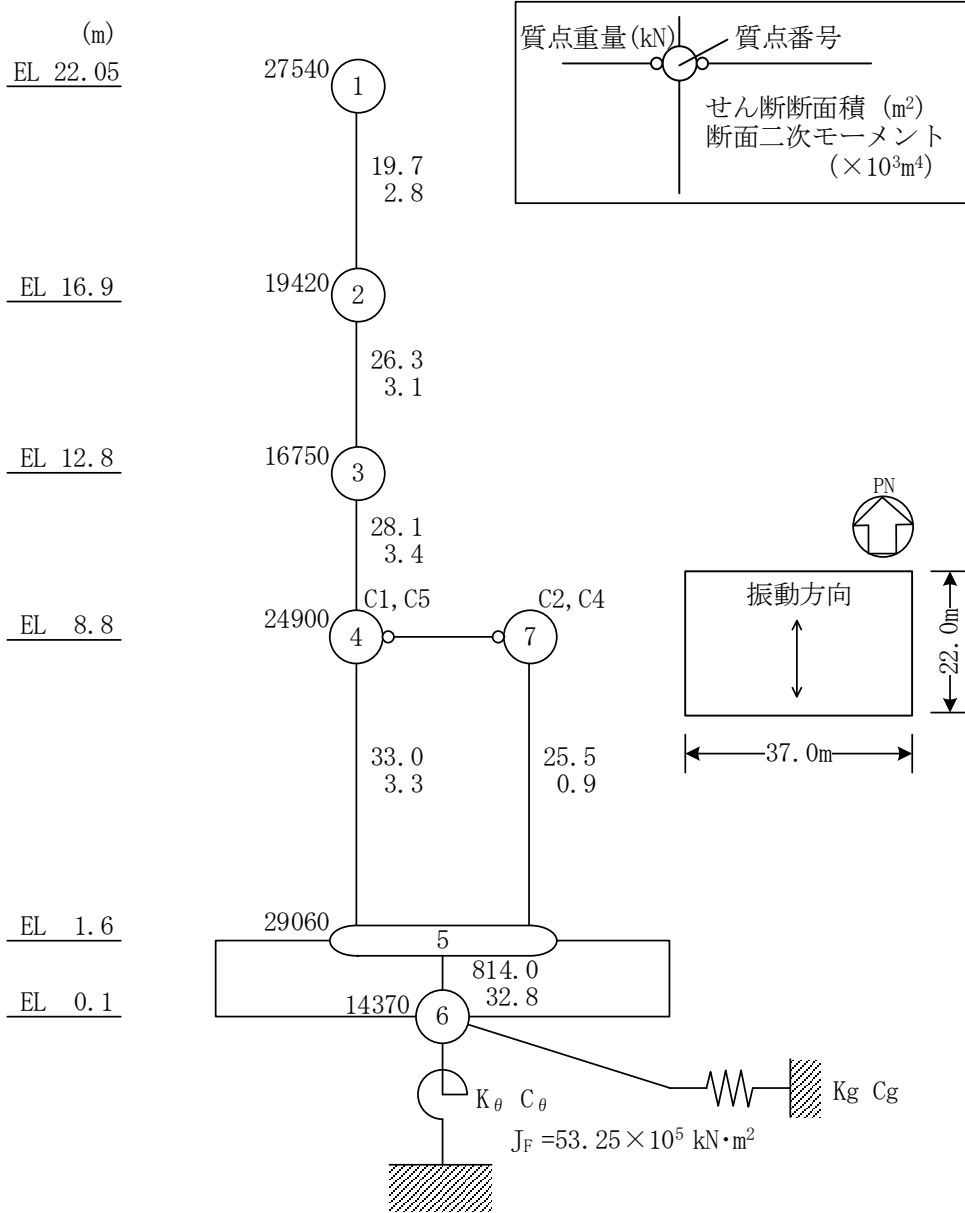
基礎底面回転ばねは線形とした。

地震応答解析は、上記復元力特性を用いた弾塑性時刻歴応答解析とし、地震応答解析モデル（水平方向）を第4.2-1図に、解析モデルの諸元を第4.2-2図及び第4.2-3図に、地盤のばね定数と減衰係数を第4.2-1表に示す。

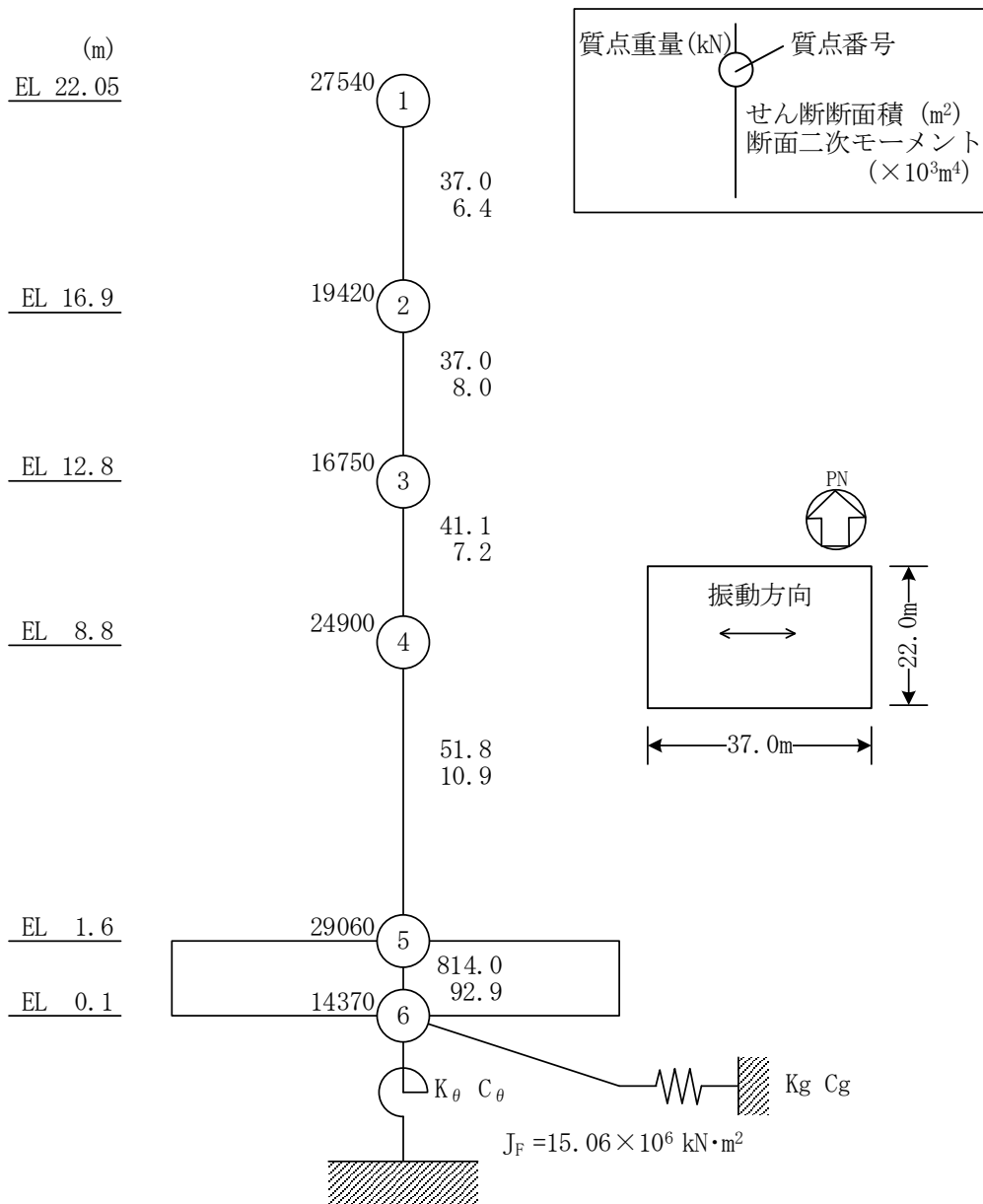
地震応答解析には解析コード「NUPP4」を用いる。



第 4.2-1 図 制御室建物の地震応答解析モデル



第 4.2-2 図 地震応答解析モデルの諸元 (NS 方向)



第 4.2-3 図 地震応答解析モデルの諸元 (EW方向)



第 4.2-1 表 地盤のばね定数と減衰係数

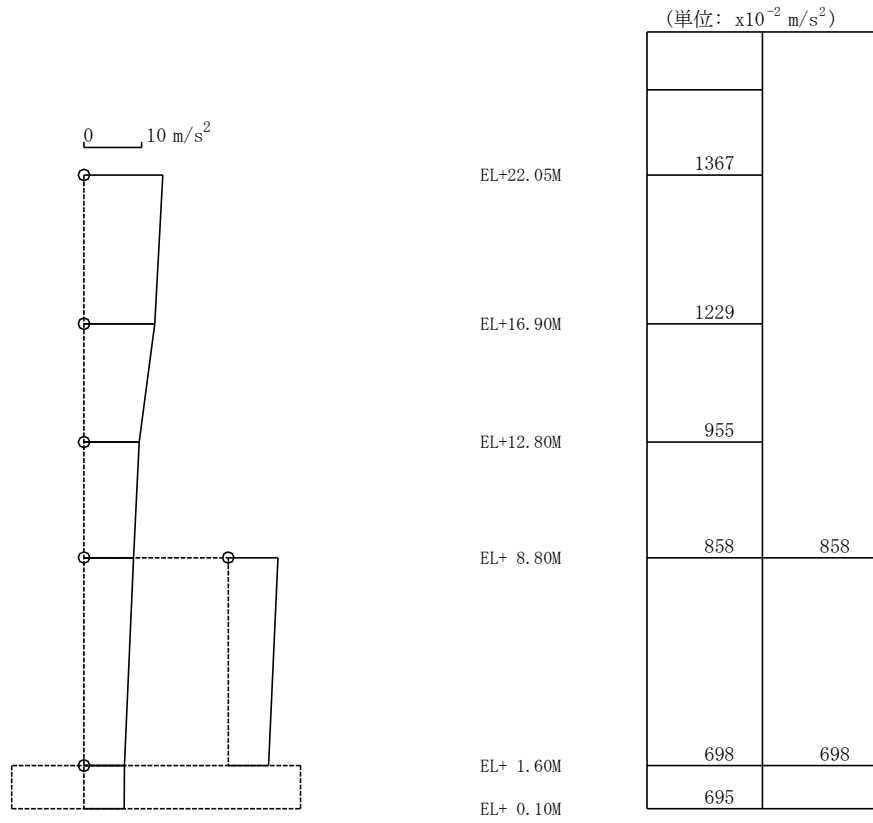
地盤ばね	方向	ばね定数	減衰係数
基礎底面 水平ばね( $K_g, C_g$ )	N S	$5.10 \times 10^8$ (N/mm)	$2.84 \times 10^6$ (N·s/mm)
	E W	$4.86 \times 10^8$ (N/mm)	$2.58 \times 10^6$ (N·s/mm)
基礎底面 回転ばね( $K_\theta, C_\theta$ )	N S	$7.45 \times 10^{16}$ (N·mm/rad)	$2.13 \times 10^{13}$ (N·mm·s/rad)
	E W	$1.57 \times 10^{17}$ (N·mm/rad)	$1.19 \times 10^{14}$ (N·mm·s/rad)

### 4.3 地震応答解析

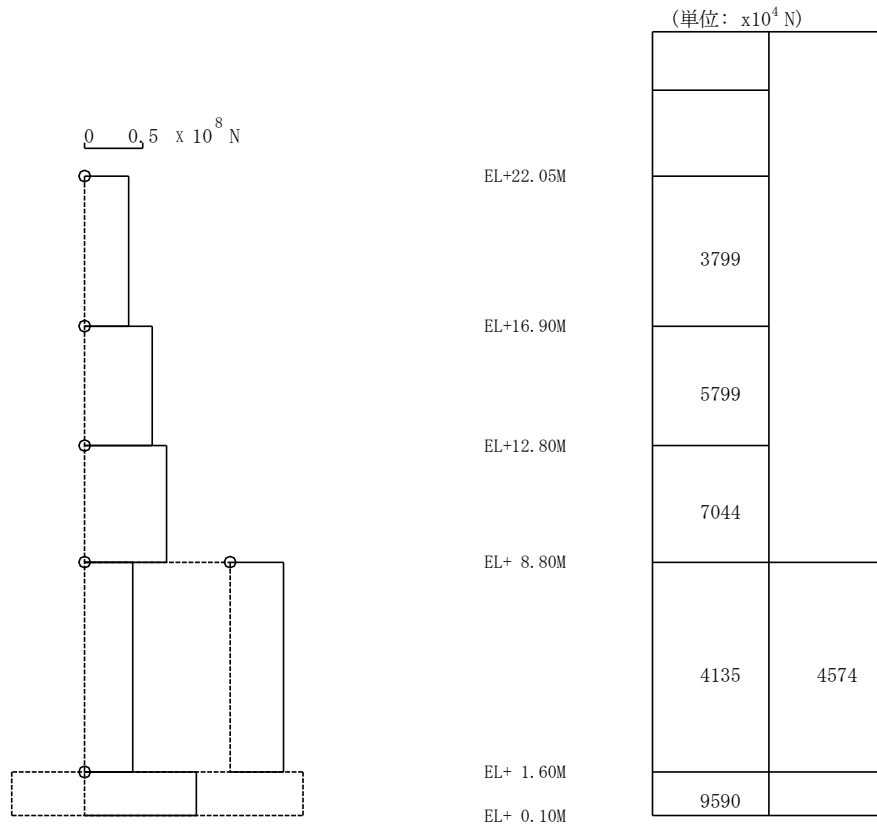
#### (1) 地震応答解析結果

基準地震動  $S_s - D$ ,  $S_s - F 1$ ,  $S_s - F 2$ ,  $S_s - N 1$  及び  $S_s - N 2$  (水平動) による最大応答値を第 4.3-1 図～第 4.3-36 図に示す。

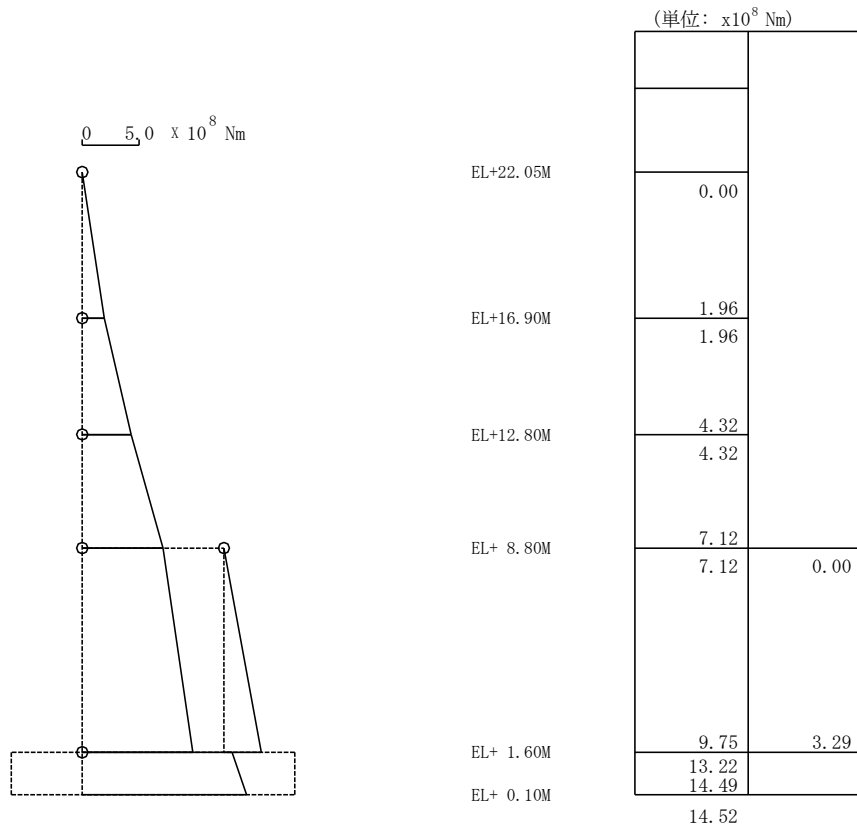
参考として、耐震壁の最大応答せん断ひずみは、最大で  $0.55 \times 10^{-3}$  ( $S_s - DH$ ,  $NS$  方向) であり、評価基準値 ( $2.0 \times 10^{-3}$ ) に対して十分な余裕があることを確認している。



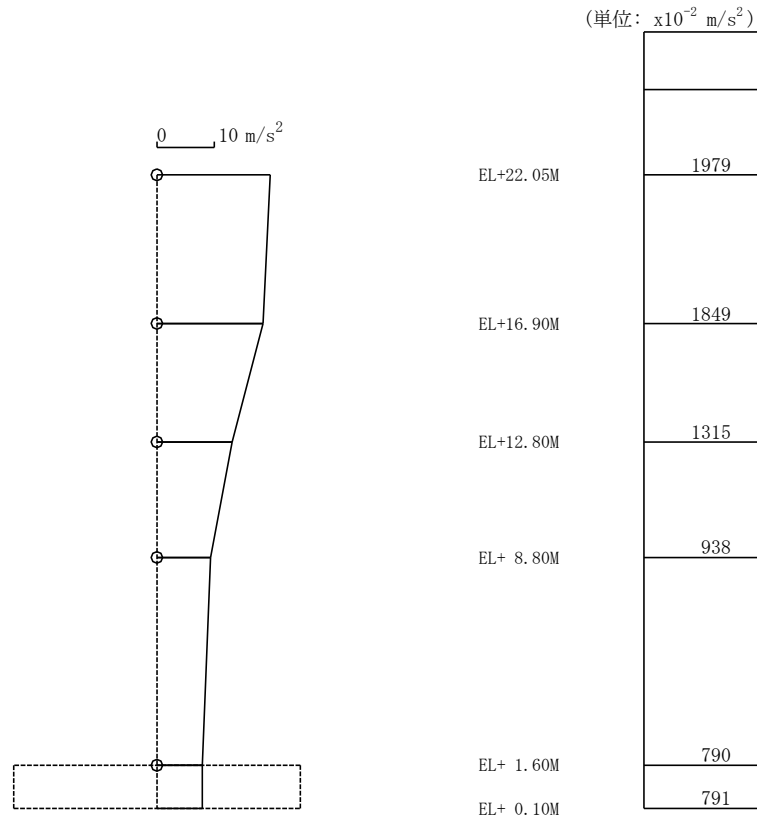
第 4.3-1 図 最大応答加速度 (NS 方向) 基準地震動  $S_s - DH$



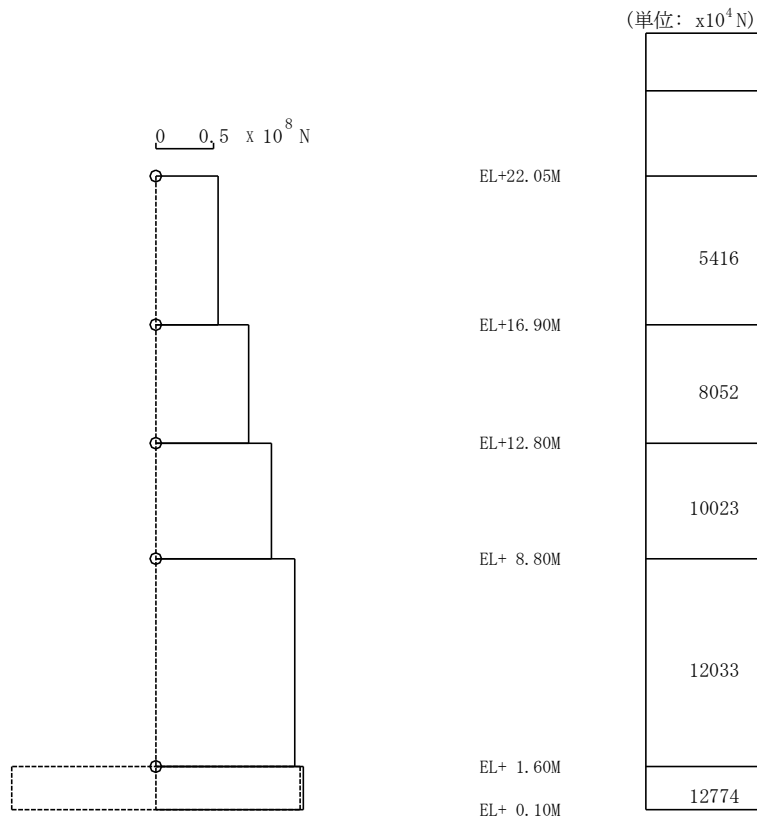
第 4.3-2 図 最大応答せん断力 (NS 方向) 基準地震動  $S_s - DH$



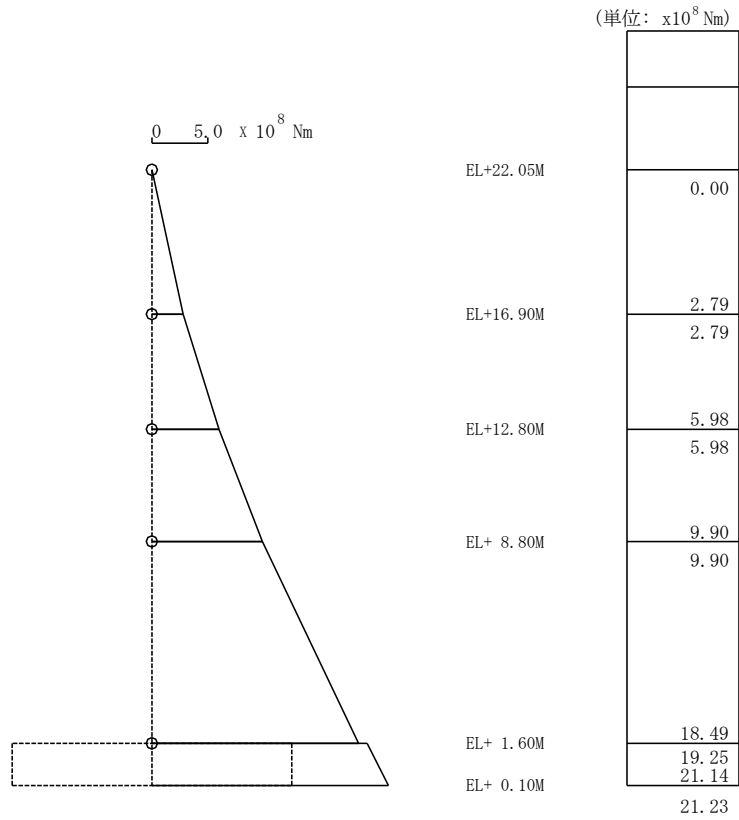
第 4.3-3 図 最大応答曲げモーメント (NS 方向)  
基準地震動  $S_s - DH$



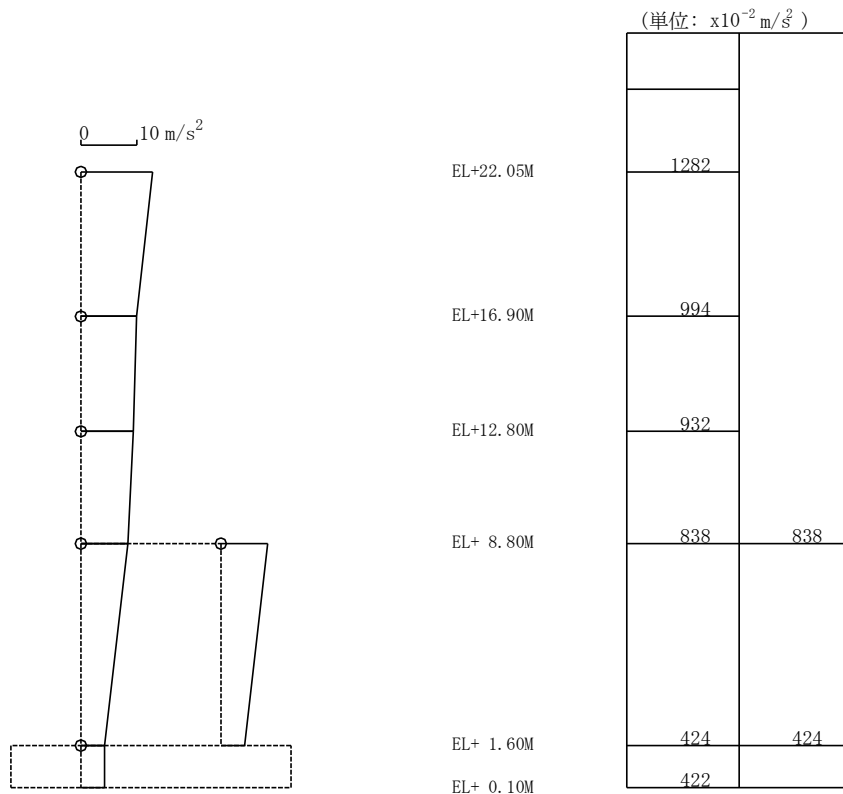
第 4.3-4 図 最大応答加速度 (E W方向) 基準地震動  $S_s - DH$



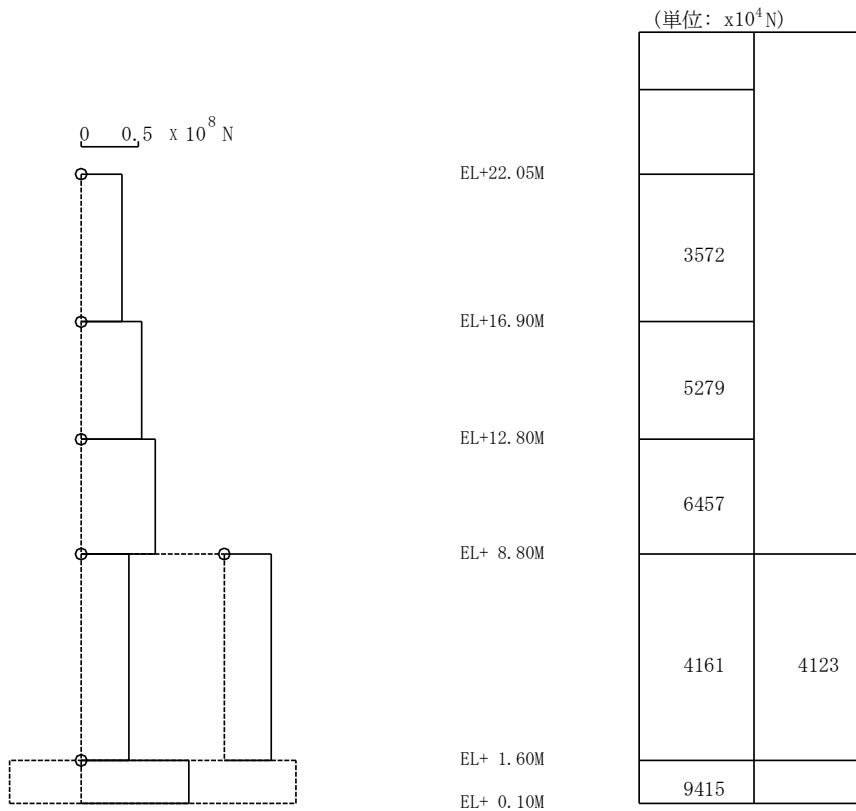
第 4.3-5 図 最大応答せん断力 (E W方向) 基準地震動  $S_s - DH$



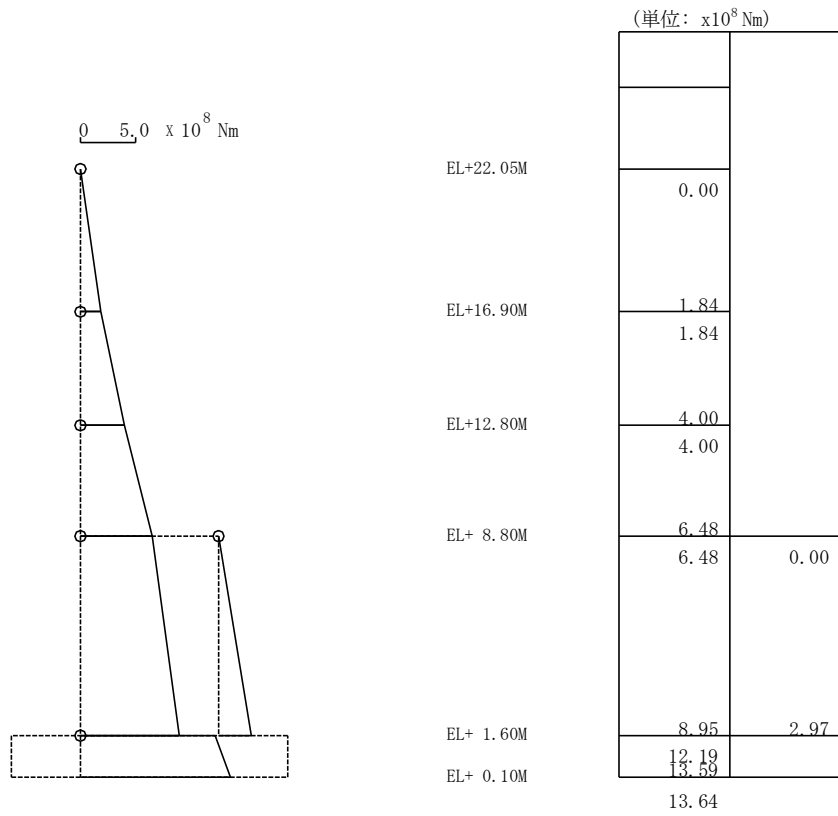
第 4.3-6 図 最大応答曲げモーメント (E W 方向)  
基準地震動 S s - D H



第 4.3-7 図 最大応答加速度 (NS 方向)  
基準地震動 S s - F 1 H (NS 成分)

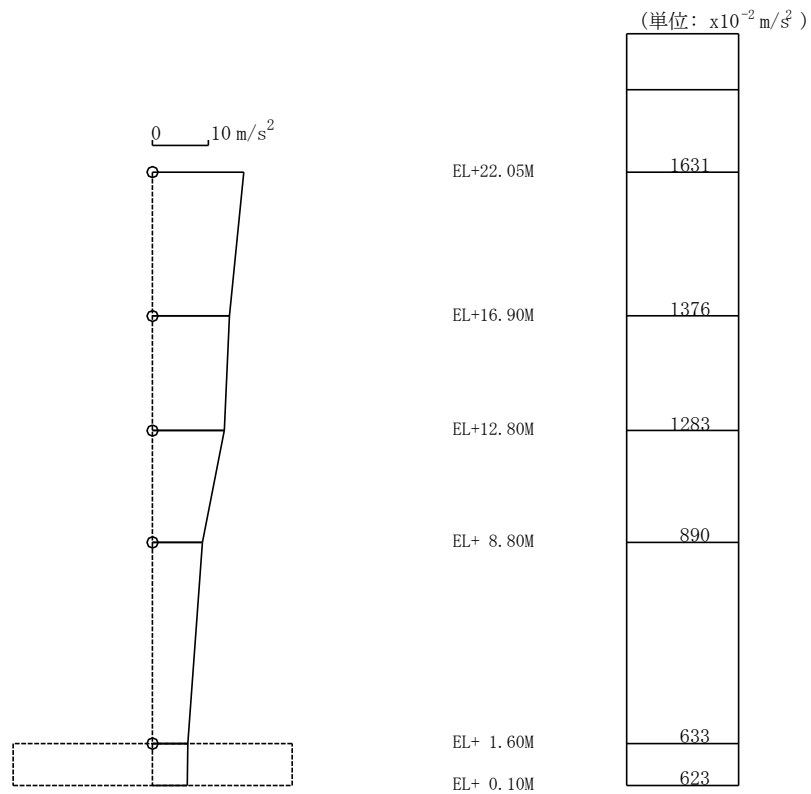


第 4.3-8 図 最大応答せん断力 (NS 方向)  
基準地震動 S s - F 1 H (NS 成分)

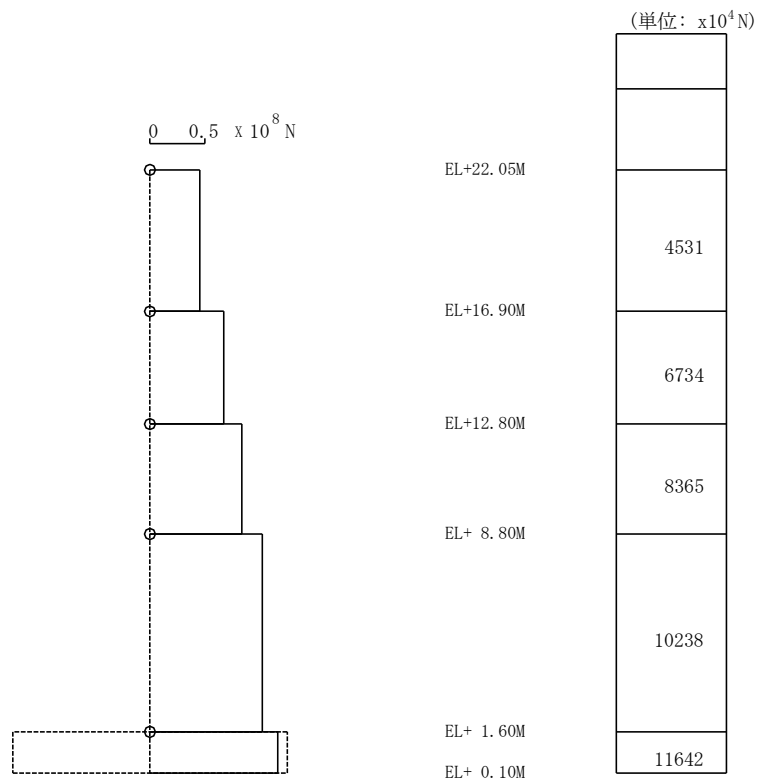


第 4.3-9 図 最大応答曲げモーメント (NS 方向)  
基準地震動  $S_s - F1H$  (NS 成分)

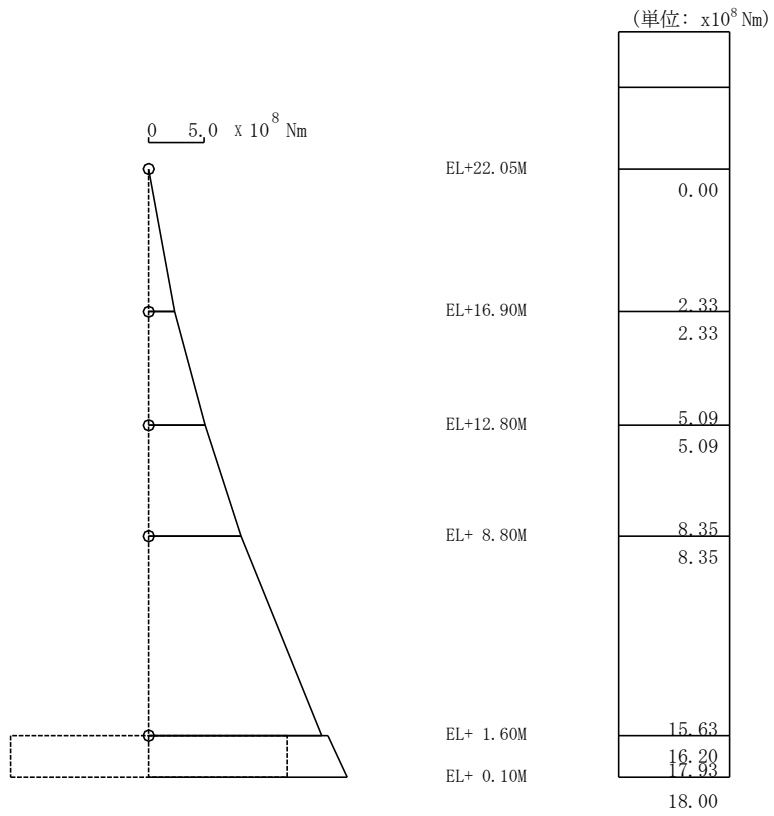




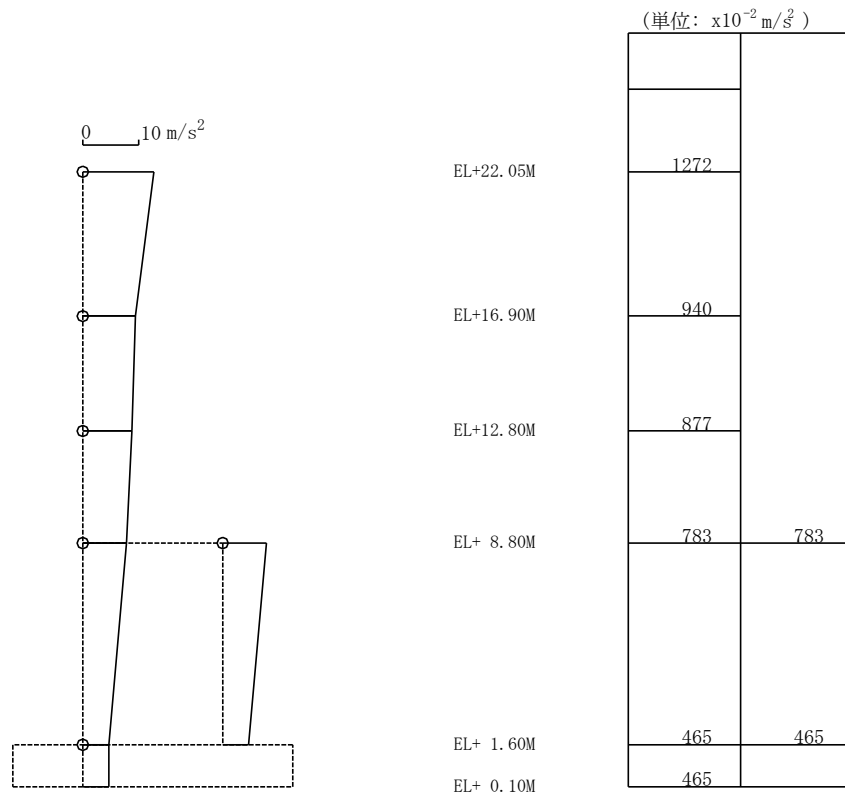
第 4.3-10 図 最大応答加速度 (E W方向)  
基準地震動 S s - F 1 H (E W成分)



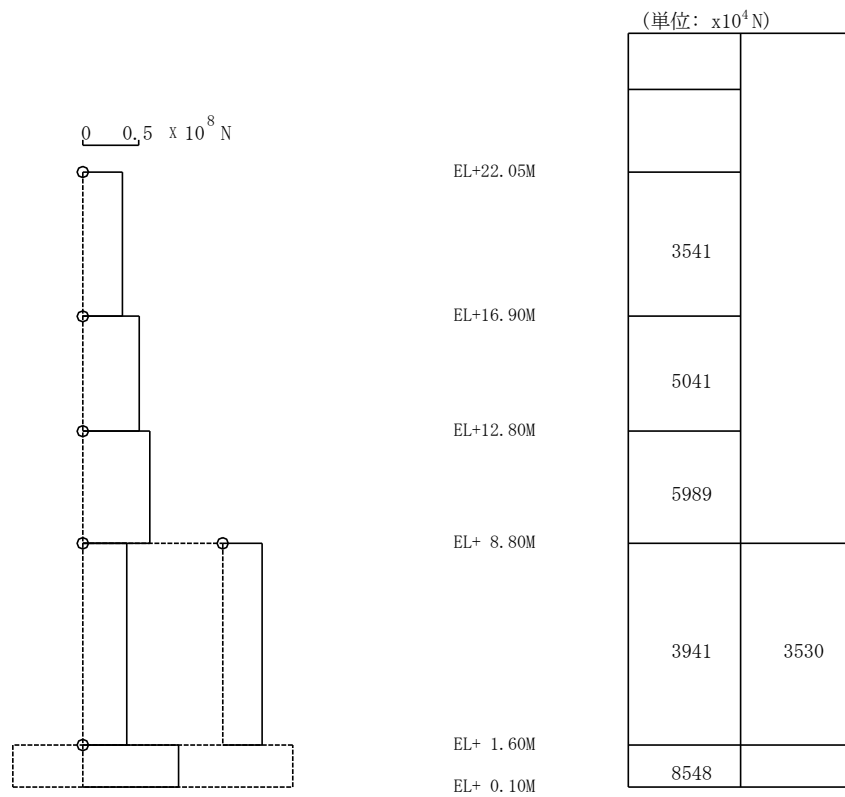
第 4.3-11 図 最大応答せん断力 (E W方向)  
基準地震動 S s - F 1 H (E W成分)



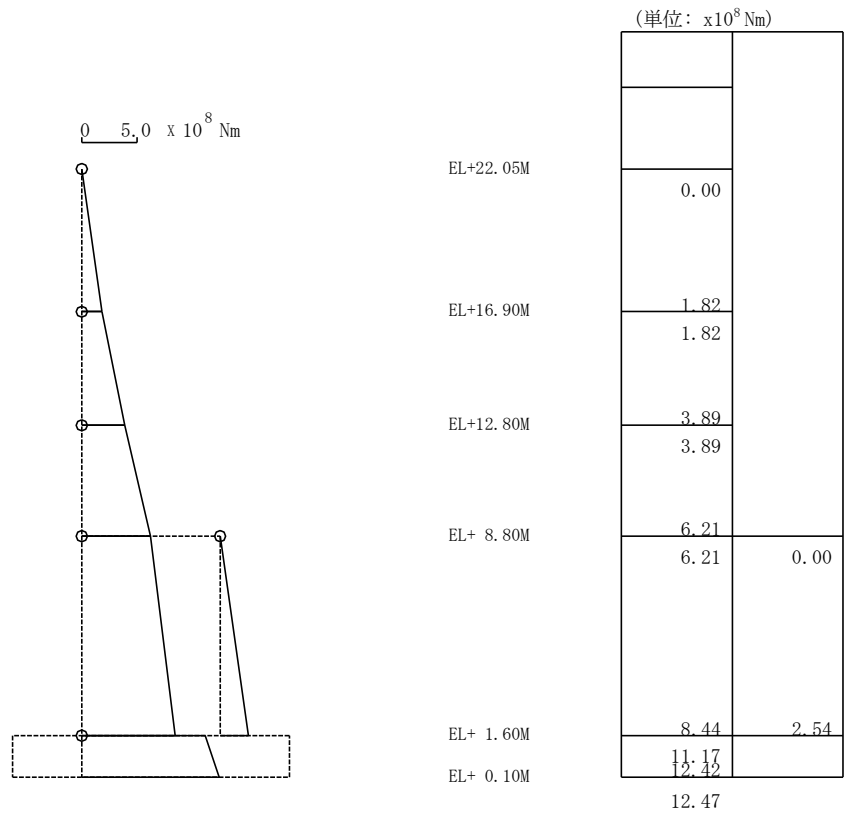
第 4.3-12 図 最大応答曲げモーメント (E W 方向)  
基準地震動 S s - F 1 H (E W 成分)



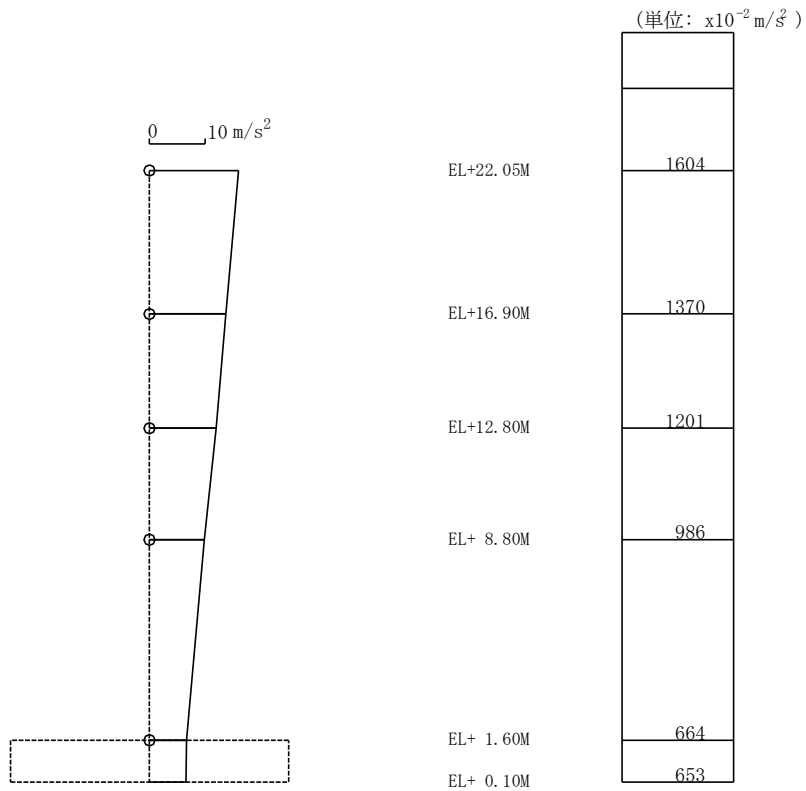
第 4.3-13 図 最大応答加速度 (NS 方向)  
基準地震動  $S_s - F2H$  (NS 成分)



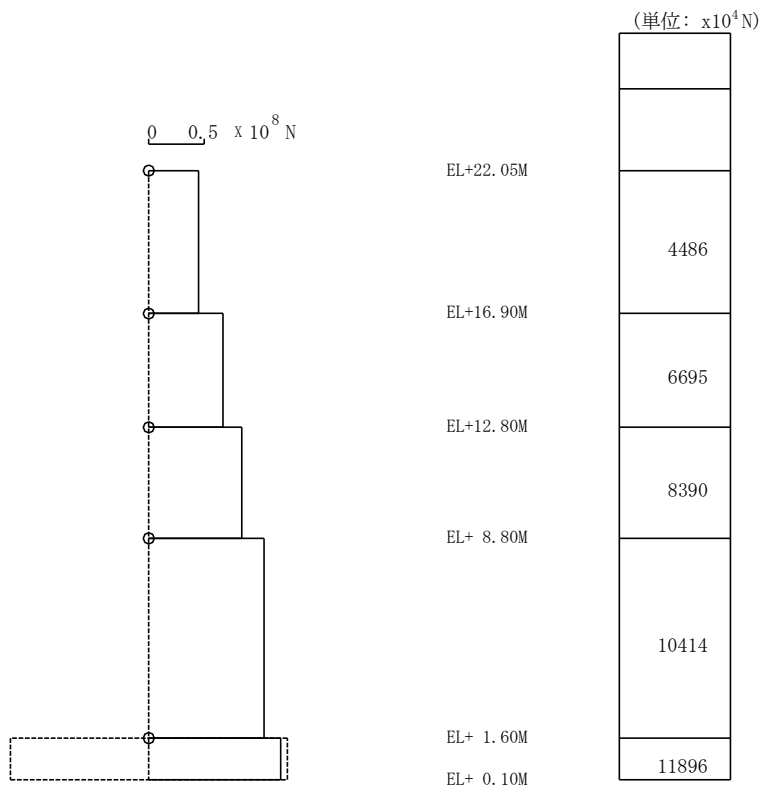
第 4.3-14 図 最大応答せん断力 (NS 方向)  
基準地震動  $S_s - F2H$  (NS 成分)



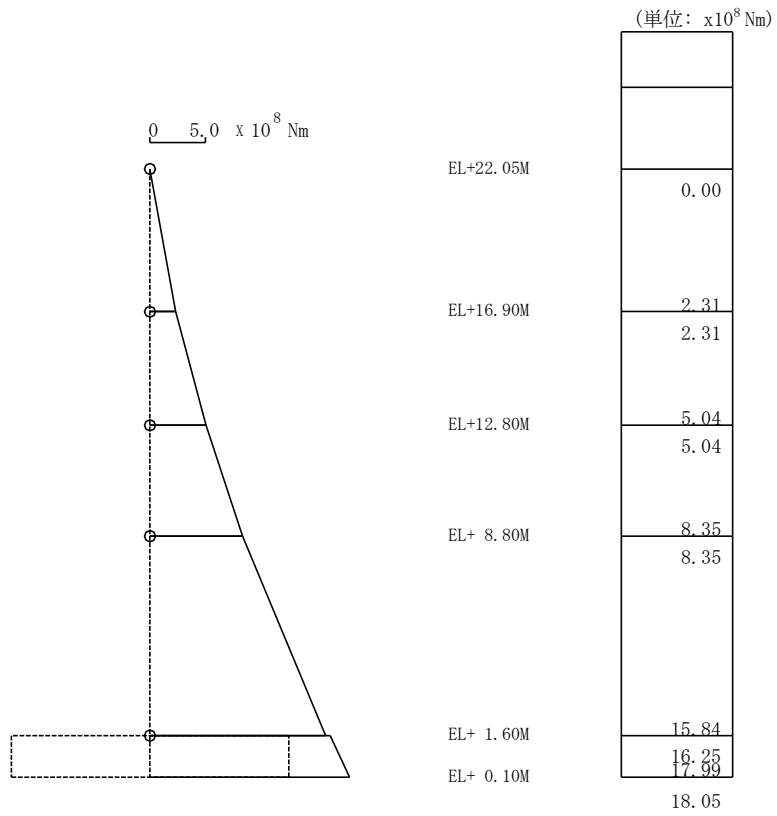
第 4.3-15 図 最大応答曲げモーメント (NS 方向)  
基準地震動 S s - F 2 H (NS 成分)



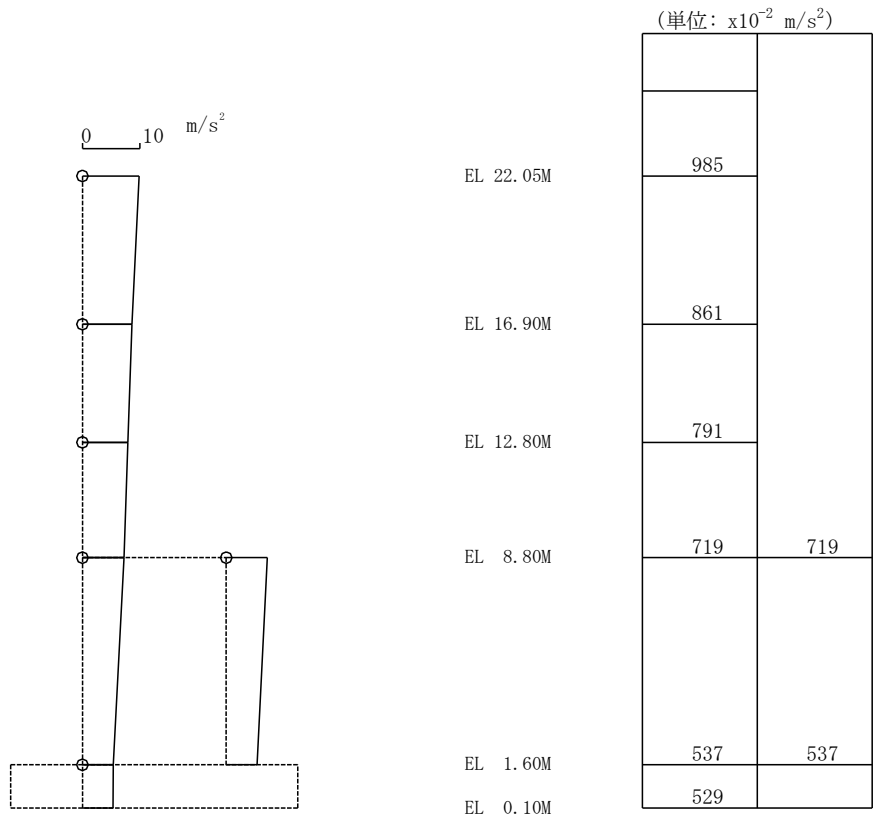
第 4.3-16 図 最大応答加速度 (E W 方向)  
基準地震動 S s - F 2 H (E W 成分)



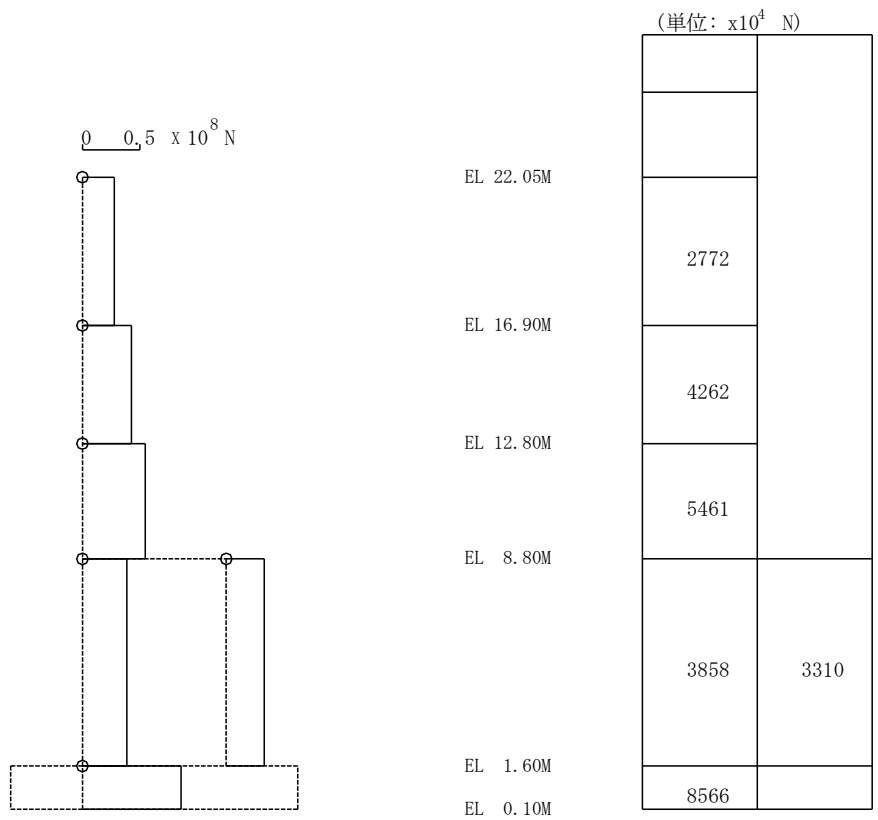
第 4.3-17 図 最大応答せん断力 (E W 方向)  
基準地震動 S s - F 2 H (E W 成分)



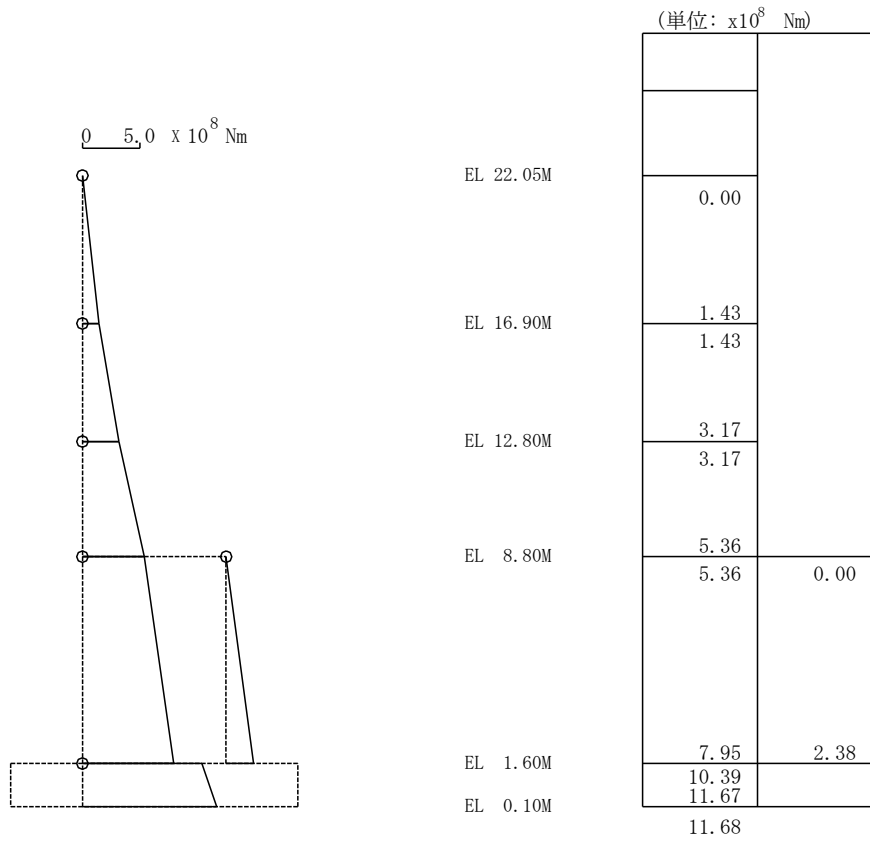
第 4.3-18 図 最大応答曲げモーメント (E W 方向)  
基準地震動 S s - F 2 H (E W 成分)



第 4.3-19 図 最大応答加速度 (NS 方向) 基準地震動 S<sub>s</sub>-N1H

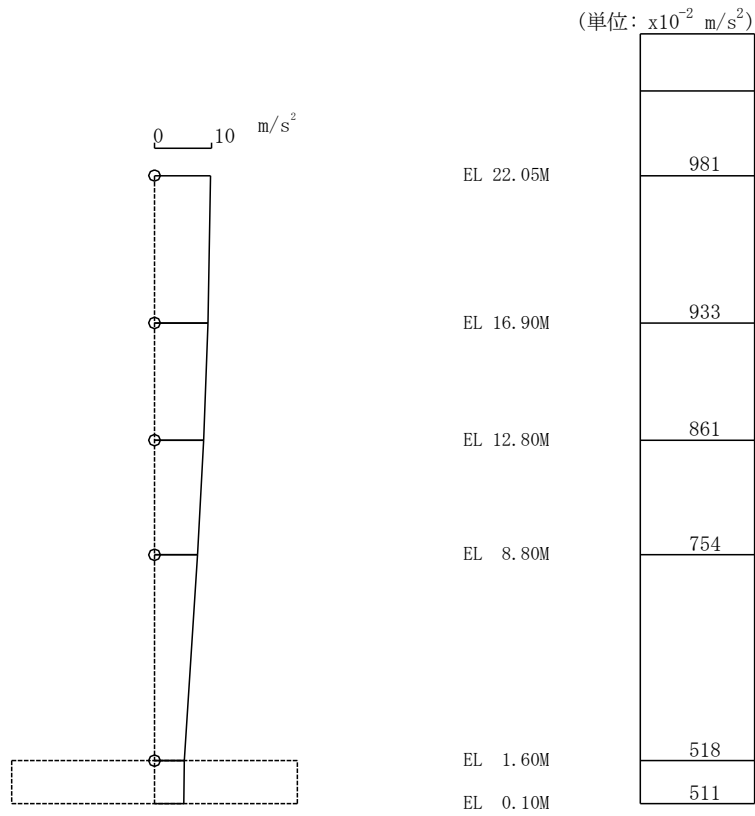


第 4.3-20 図 最大応答せん断力 (NS 方向) 基準地震動 S<sub>s</sub>-N1H

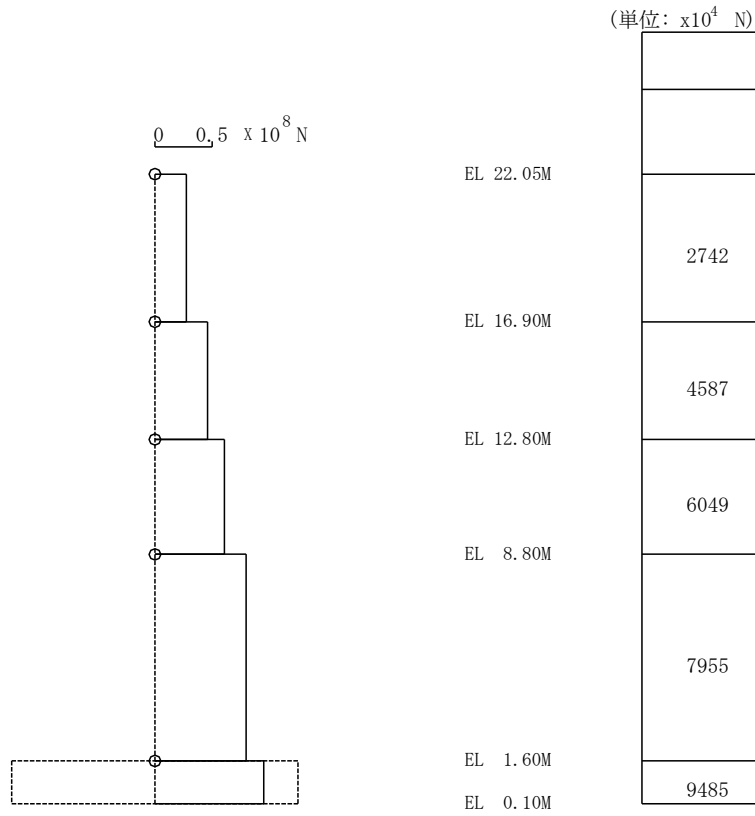


第 4.3-21 図 最大応答曲げモーメント (N S 方向)  
基準地震動 S s - N 1 H

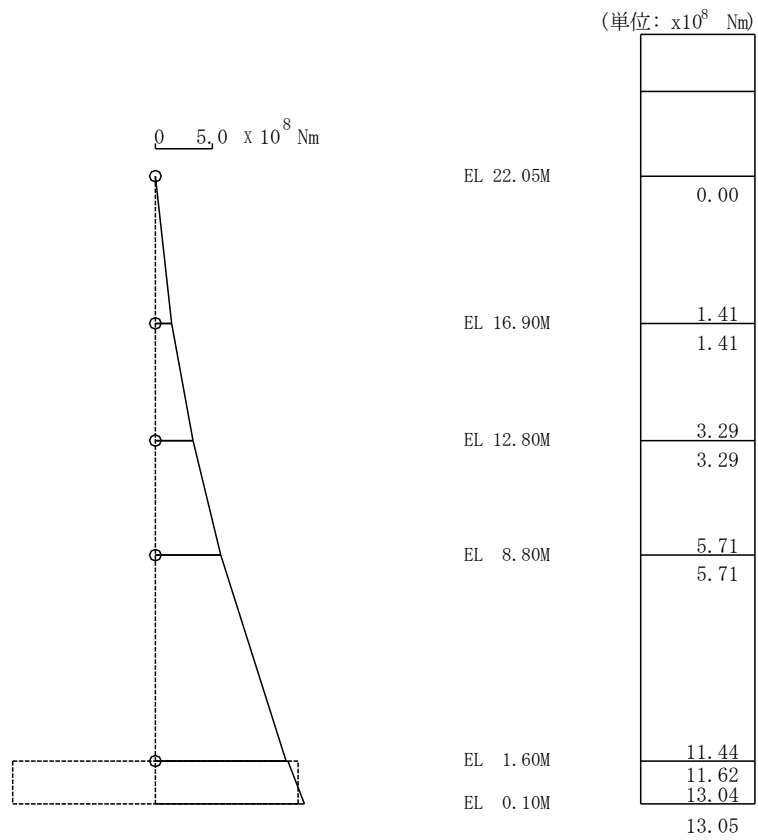




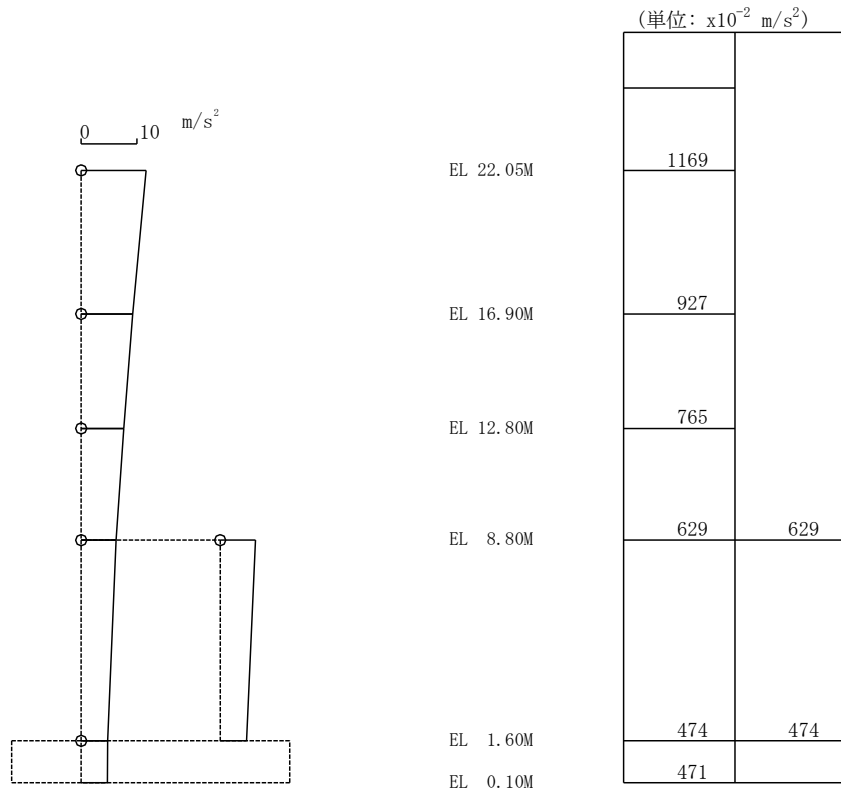
第 4.3-22 図 最大応答加速度 (E W方向) 基準地震動 S s - N 1 H



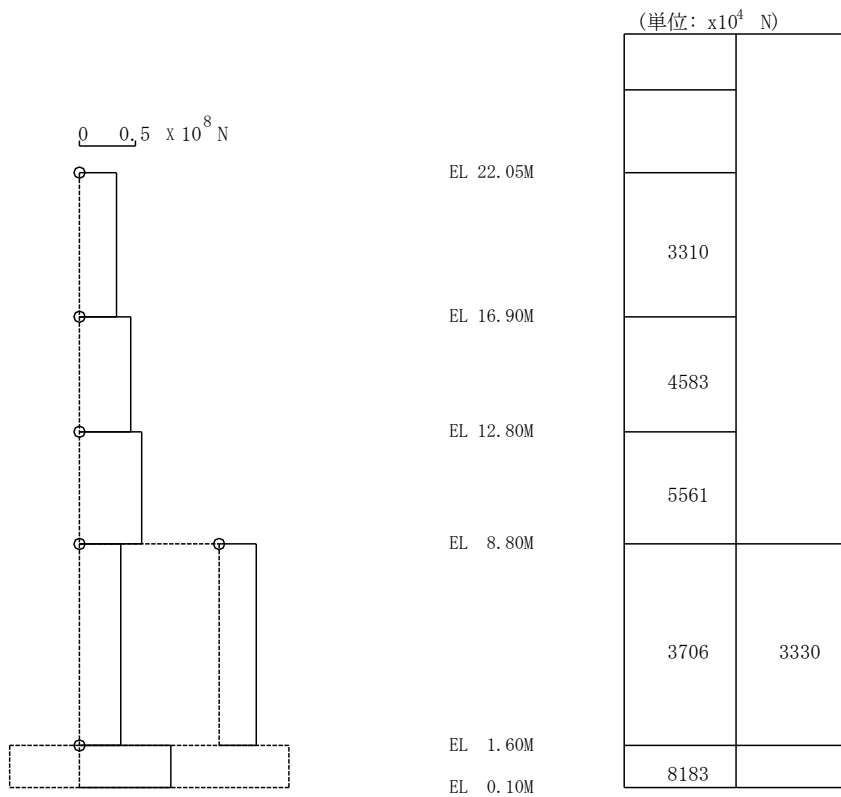
第 4.3-23 図 最大応答せん断力 (E W方向) 基準地震動 S s - N 1 H



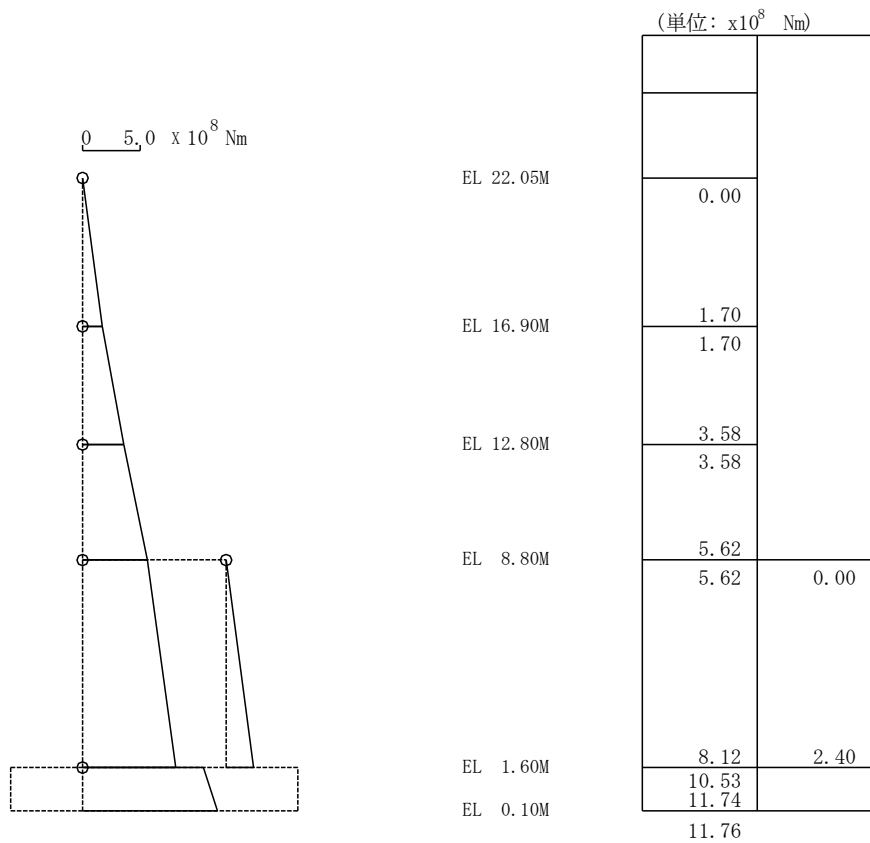
第 4.3-24 図 最大応答曲げモーメント (EW方向)  
基準地震動 S s - N 1 H



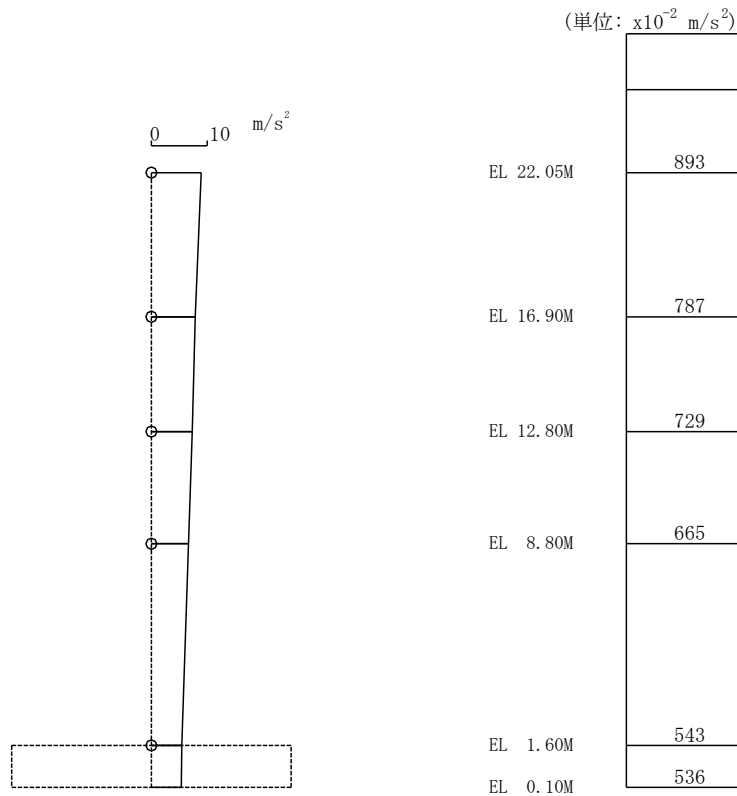
第 4.3-25 図 最大応答加速度 (NS 方向)  
基準地震動 S s - N 2 H (NS 成分)



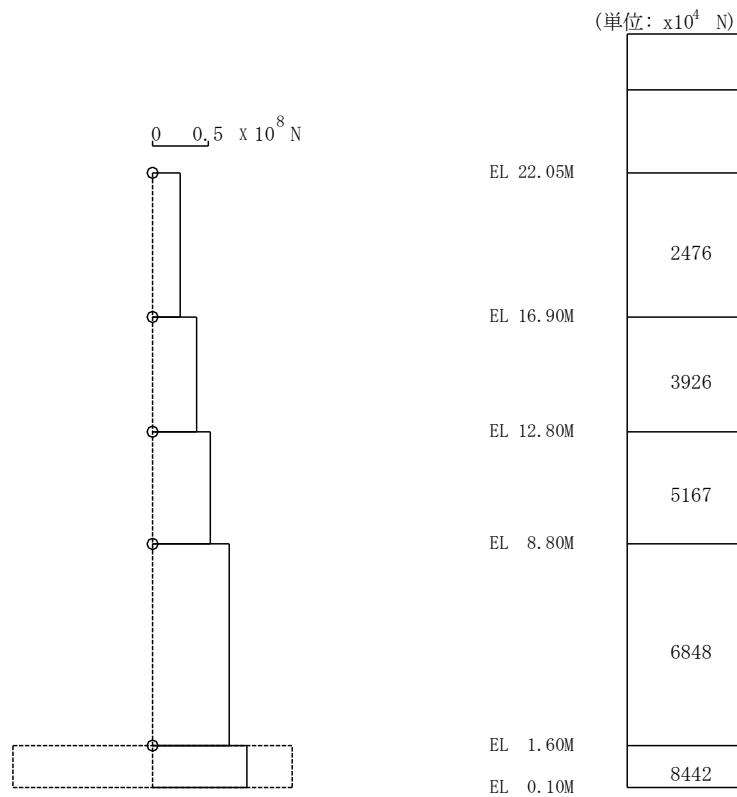
第 4.3-26 図 最大応答せん断力 (NS 方向)  
基準地震動 S s - N 2 H (NS 成分)



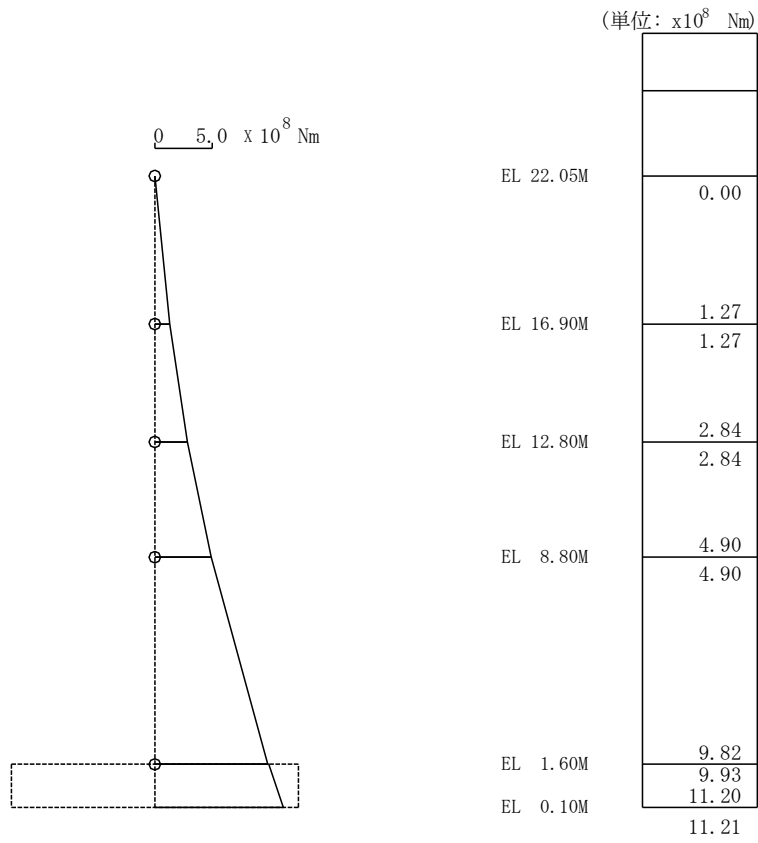
第 4.3-27 図 最大応答曲げモーメント (NS 方向)  
基準地震動  $S_s - N2H$  (NS 成分)



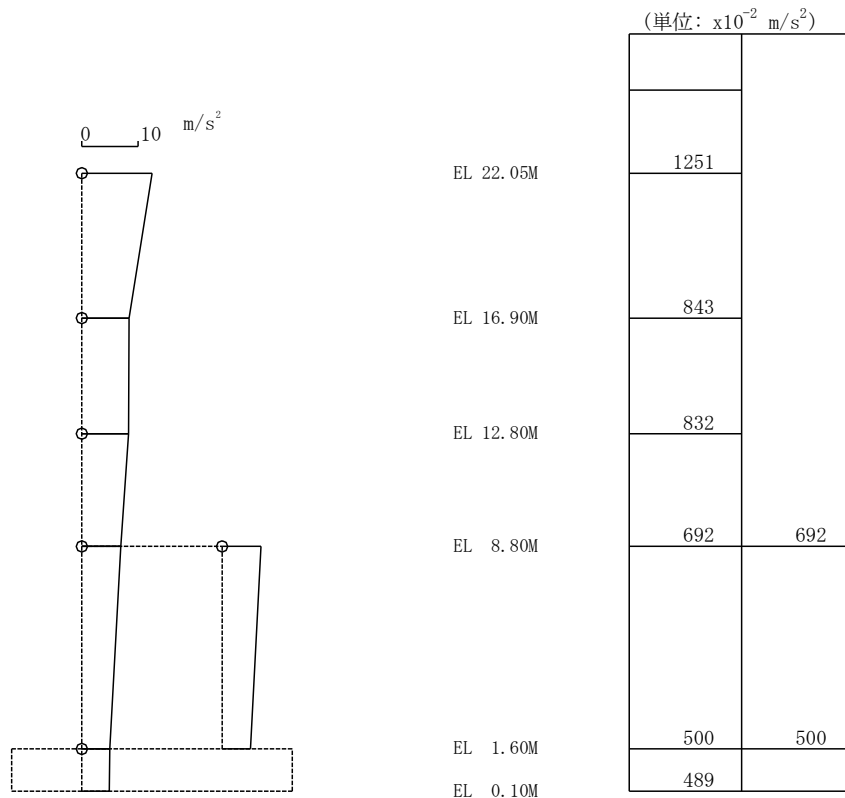
第 4.3-28 図 最大応答加速度 (E W方向)  
基準地震動 S s - N 2 H (N S成分)



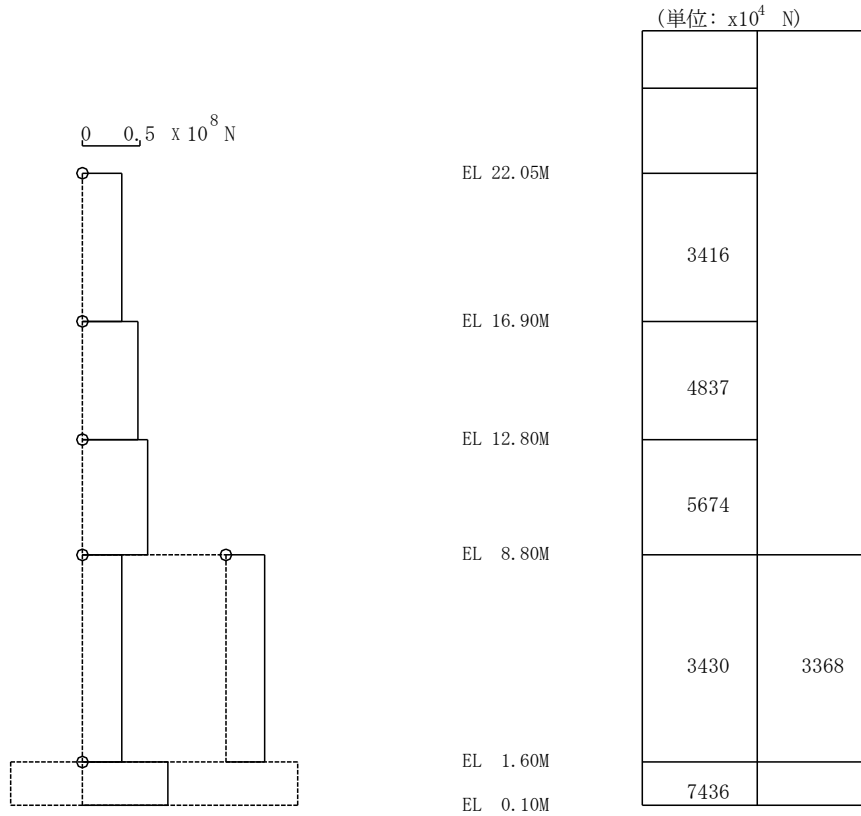
第 4.3-29 図 最大応答せん断力 (E W方向)  
基準地震動 S s - N 2 H (N S成分)



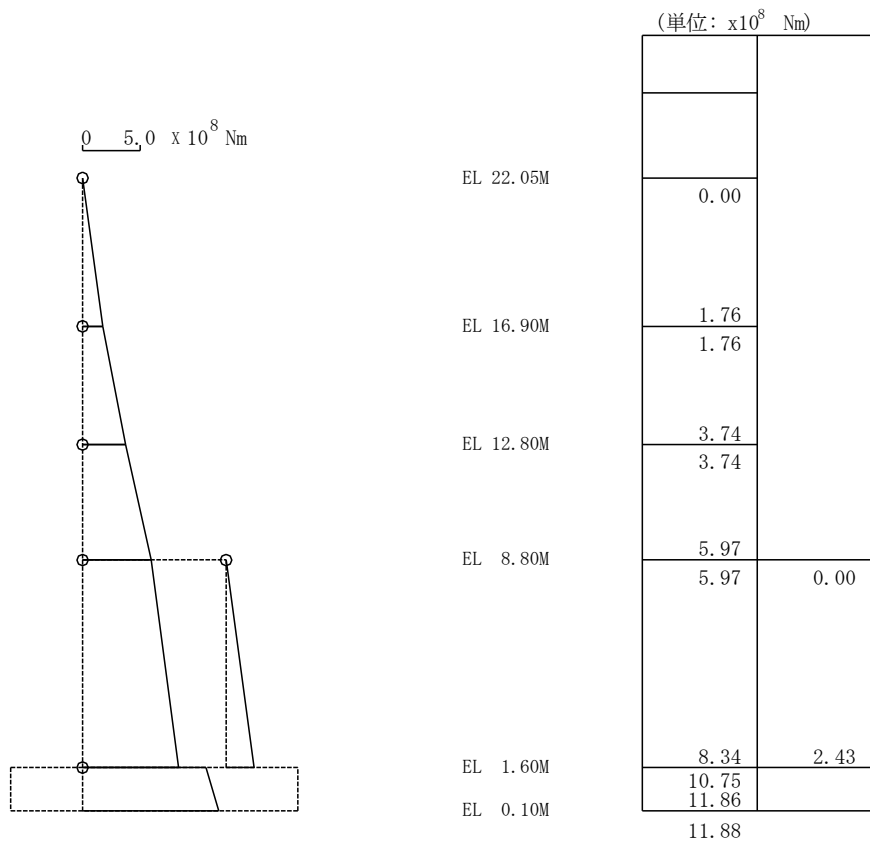
第 4.3-30 図 最大応答曲げモーメント (EW 方向)  
基準地震動  $S_s - N2H$  (NS 成分)



第 4.3-31 図 最大応答加速度 (N S 方向)  
基準地震動 S s - N 2 H (E W 成分)

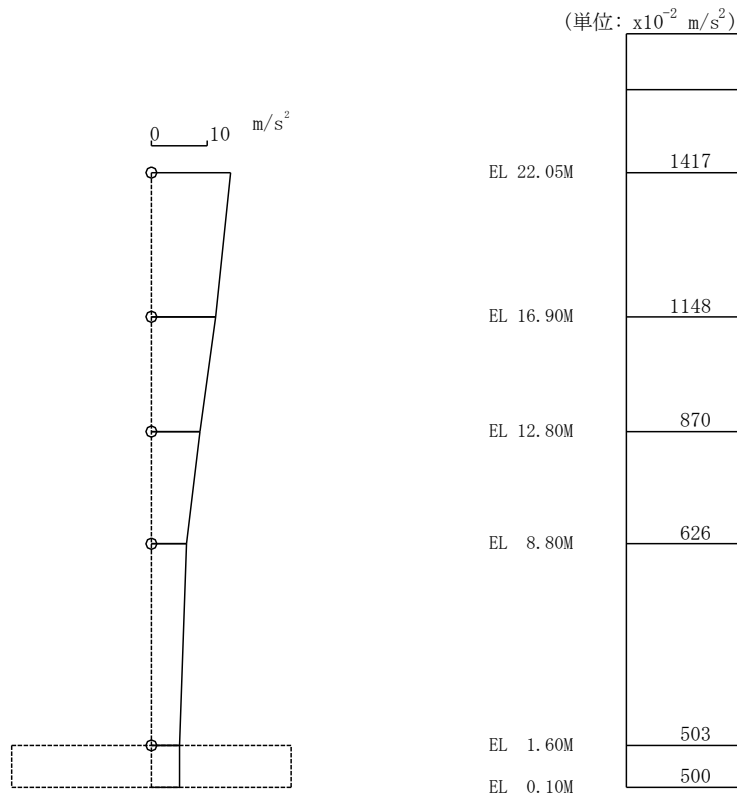


第 4.3-32 図 最大応答せん断力 (N S 方向)  
基準地震動 S s - N 2 H (E W 成分)

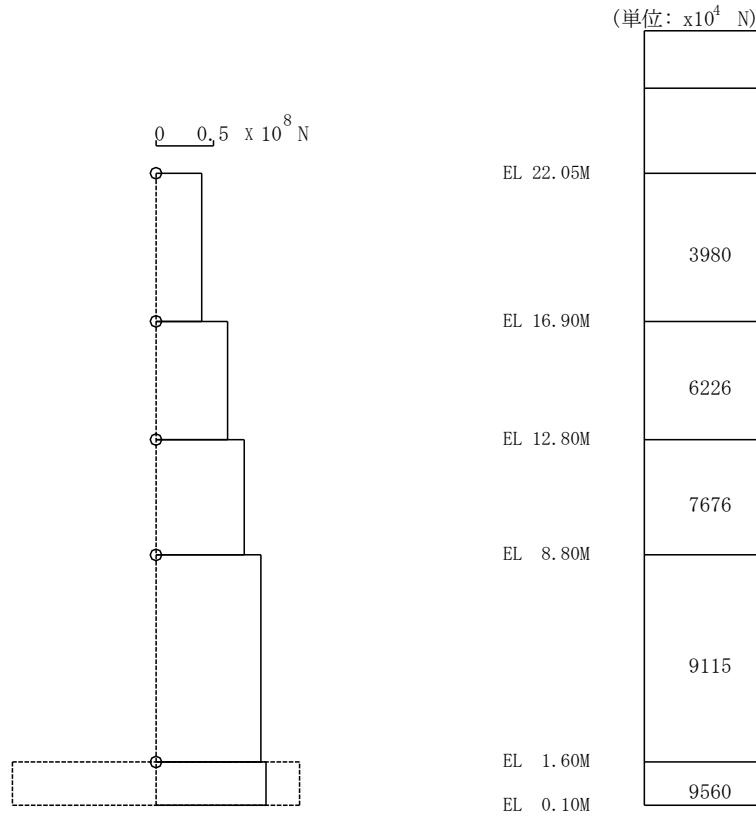


第 4.3-33 図 最大応答曲げモーメント (N S 方向)  
基準地震動 S s - N 2 H (E W 成分)

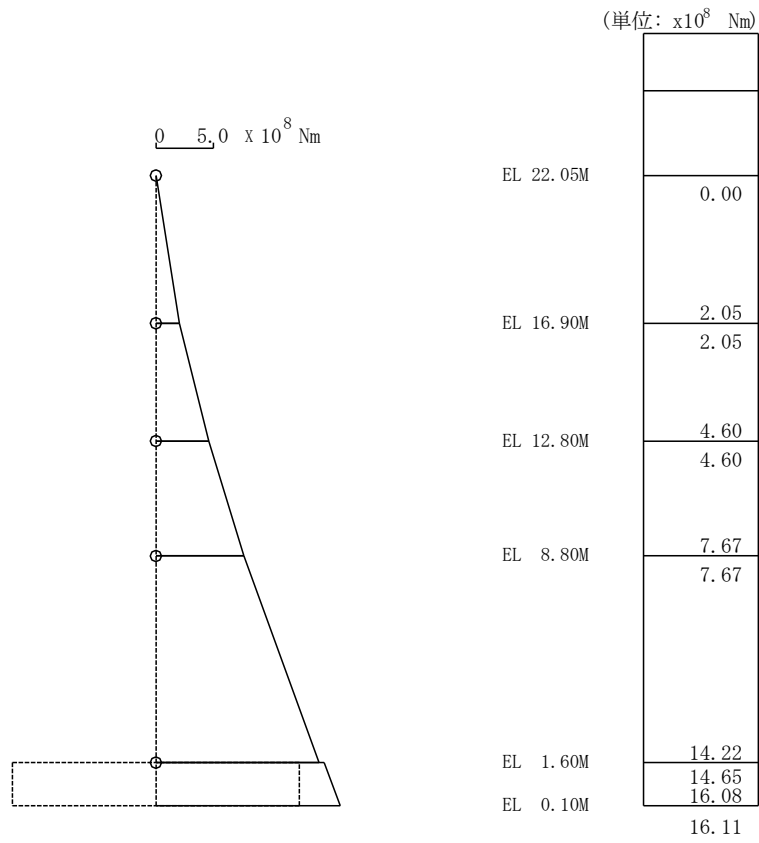




第 4.3-34 図 最大応答加速度 (E W 方向)  
基準地震動 S s - N 2 H (E W 成分)



第 4.3-35 図 最大応答せん断力 (E W 方向)  
基準地震動 S s - N 2 H (E W 成分)



第 4.3-36 図 最大応答曲げモーメント (EW 方向)  
基準地震動  $S_s - N2H$  (EW 成分)

(2) 基礎浮上りが発生しないために必要な付着力の算定

a. 算定方法

地震応答解析結果の最大転倒モーメントが浮上り限界モーメントを上回るときに基礎浮上りが発生する。

浮上り限界モーメントは、「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」より以下の式で表される。

$$M_0 = WL / 6 \quad (\text{kN} \cdot \text{m})$$

ここで、

$M_0$  : 浮上り限界モーメント (kN・m)

$W$  : 建物の総重量 (kN)

$L$  : 建物の基礎幅 (m)

基礎浮上りが発生しないために必要な単位面積当たりの付着力は以下の通りである。

$$M = \sigma_{at} A L / 6 + M_0 \quad (\text{kN} \cdot \text{m})$$

$$\sigma_{at} = 6 (M - M_0) / A L \quad (\text{kN}/\text{m}^2) = 6 (M - M_0) / 1000 A L \quad (\text{N}/\text{mm}^2)$$

ここで、

$M$  : 最大転倒モーメント (kN・m)

$\sigma_{at}$  : 単位面積当たりの付着力 (kN/m<sup>2</sup>)

$A$  : 基礎底面積 (m<sup>2</sup>)

b. 算定結果

基礎浮上りが発生しないために必要な付着力の算定結果を第 4.3-1 表に示す。

検討の結果、基礎浮上りが発生しないために必要な付着力の最大値は 0.32 N/mm<sup>2</sup> であることから、島根原子力発電所における付着力試験の結果に基づき設定した値 (0.40N/mm<sup>2</sup>) を超えないことを確認した。

以上のことから、制御室建物の地震応答解析に基礎浮上り線形解析を適用する。

第 4.3-1 表 基礎浮上りが発生しないために必要な付着力

地震動	方向	W ( $\times 10^3 \text{kN}$ )	L (m)	A ( $\text{m}^2$ )	M ( $\times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}$ )	$M_0$ ( $\times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}$ )	$\sigma_{at}$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
S s - DH	NS	132.04	22	814	14.52	4.84	0.32
	EW		37	814	21.23	8.14	0.26
S s - F 1 H (NS成分)	NS	132.04	22	814	13.64	4.84	0.29
S s - F 1 H (EW成分)	EW		37	814	18.00	8.14	0.20
S s - F 2 H (NS成分)	NS	132.04	22	814	12.47	4.84	0.26
S s - F 2 H (EW成分)	EW		37	814	18.05	8.14	0.20
S s - N 1 H	NS	132.04	22	814	11.68	4.84	0.23
	EW		37	814	13.05	8.14	0.10
S s - N 2 H (NS成分)	NS	132.04	22	814	11.76	4.84	0.23
	EW		37	814	11.21	8.14	0.06
S s - N 2 H (EW成分)	NS	132.04	22	814	11.88	4.84	0.24
	EW		37	814	16.11	8.14	0.16

付着力を考慮した 3次元 FEMモデルの適用性について

1. 「J E A C 4 6 0 1－2015」における 3次元 FEMモデルの適用性について
  - (1) ジョイント要素（付着力無視）を用いた 3次元 FEMモデルの適用範囲及び適用性

「J E A C 4 6 0 1－2015 参考資料 3.5(3)」及び引用している既往論文<sup>(1)</sup>によると、時間領域のグリーン関数法の地震応答解析結果との比較を行い、接地率  $\eta$  が 30%程度まで時間領域のグリーン関数法の結果と概ね一致するとされている。この結果を基に、ジョイント要素を用いた 3次元 FEMモデルの適用範囲として接地率  $\eta \geq 35\%$ を提案している。「J E A C 4 6 0 1－2015 参考資料 3.5(3)」を補足 1 に示す。

既往論文の解析条件と、島根 2号炉において 3次元 FEMモデルを採用する廃棄物処理建物の解析条件の比較を第 1 表に示す。基礎底面の付着力以外は、実際の建物の大きさや解析モデル規模も含めて、ほぼ同じ解析条件となっている。

- (2) ジョイント要素（付着力考慮）を用いた 3次元 FEMモデルの適用性

「J E A C 4 6 0 1－2015 参考資料 3.5(7)」及び引用している既往論文<sup>(1)</sup>では、上記(1)のモデルをベースに更に現実に近い解析条件を設定した検討として、建物基礎底面の付着力を考慮した検討を実施し、最大加速度が 900Gal の地震波を入力した際に、基礎底面の付着力として  $0.49\text{N/mm}^2$  を考慮した時の接地率は約 30～50%となっていることが示されている。既往論文における 3次元 FEMモデルの応答解析結果を第 1 図に示す。

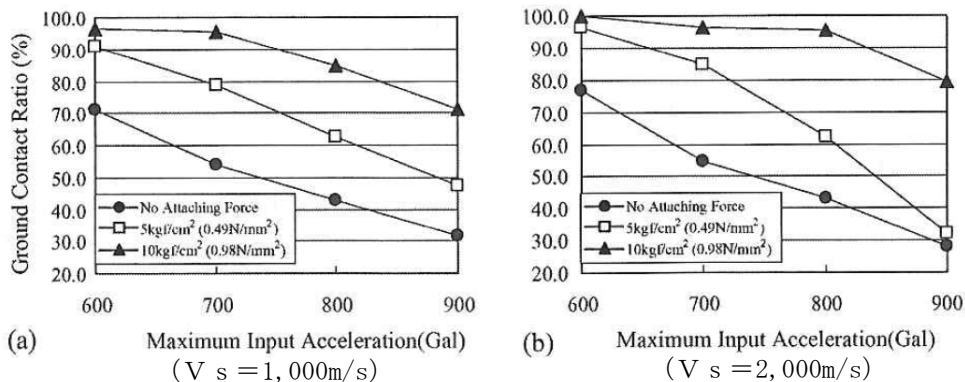
「J E A C 4 6 0 1－2015 参考資料 3.5(7)」において、ジョイント要素に付着力を考慮した 3次元 FEMモデルは、低接地率の範囲まで適用可能とされている。「J E A C 4 6 0 1－2015 参考資料 3.5(7)」を補足 2 に示す。

第1表 3次元FEMモデルの既往論文との解析条件の比較

項目		既往論文	評価対象建物
対象建物		PWR 原子炉建屋	BWR 2号炉廃棄物処理建物
建物モデル		多軸多質点系モデル	単軸多質点系モデル
地盤のせん断波速度		1,000m/s 及び 2,000m/s	約 1,660m/s (標準地盤の等価せん断波速度)
基礎浮上り		ジョイント要素で考慮	ジョイント要素で考慮
基礎幅		約 60m	N S : 53.07m E W : 53.64m
地盤モデル化 範囲	水平	基礎幅の 5 倍	基礎幅の約 5 倍
	鉛直	基礎幅の 1.5 倍	基礎幅の約 1.5 倍
基礎底面の付着力		無視 <sup>※1</sup> , 考慮 <sup>※2</sup>	考慮

※1 : 接地率の適用範囲に関する検討 (「1. (1)ジョイント要素(付着力無視)を用いた3次元FEMモデル」に対応)

※2 : 現実に近い解析条件を設定した検討 (「1. (2)ジョイント要素(付着力考慮)を用いた3次元FEMモデル」に対応)



第1図 既往論文における3次元FEMモデルの応答解析結果

2. 島根2号炉における3次元FEMモデルの適用性について

島根2号炉において採用した3次元FEMモデルは、既往論文における接地率の適用範囲に関する検討及び基礎底面に付着力を考慮した検討とほぼ同じ解析条件となっている。

「J E A C 4 6 0 1 - 2 0 1 5」において、ジョイント要素に付着力を考慮した3次元FEMモデルが提案されており、低接地率の範囲まで適用可能とされていることから、当社が付着力を考慮した場合も適用できると判断し、接地率  $\eta \geq 35\%$  を目安値として設定した。

なお、島根2号炉において今回採用する3次元FEMモデルによる接地率は35%を大きく上回る見込みである。

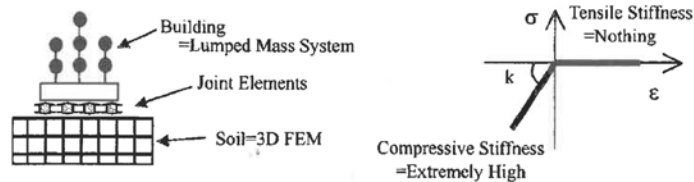
3. 参考文献

- (1) Nakamura, N. et al. : An estimation method for basemat uplift behavior of nuclear power plant buildings, Nuclear Engineering and Design, Vol. 237, 2007. 7, pp. 1275-1287

「J E A C 4 6 0 1 - 2 0 1 5 参 考 資 料 3.5(3) ジョイント要素を用いた 3 次 元 F E M 地 盤 モ デ ル」 (※ 1. (1) へ の 引 用 箇 所 を 下 線 で 示 す)

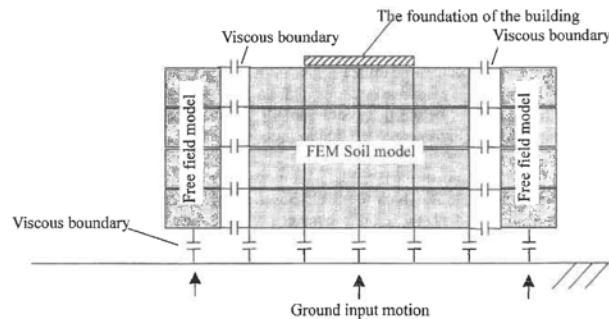
(3) ジョイント要素を用いた 3 次 元 F E M 地 盤 モ デ ル (参 3.5-3)

参 図 3.5-9 ~ 参 図 3.5-11 に 提 案 さ れ た モ デ ル の 概 要 を 示 す 。 地 盤 は 3 次 元 の F E M で モ デ ル 化 し ， 建 物 は 質 点 系 で モ デ ル 化 し て い る 。 基 礎 底 面 と 地 盤 と の 間 に 引 張 り を 負 担 し な い ジョ イ ン ト 要 素 を 用 い る こ と に よ り ， 浮 き 上 が り を 評 価 し て い る 。 ま た ， 参 図 3.5-10 に 示 す よ う に ， 時 間 領 域 で の 解 析 で あ る た め ， 地 盤 の 各 境 界 に は 粘 性 ダ ン パ を 設 け て い る 。

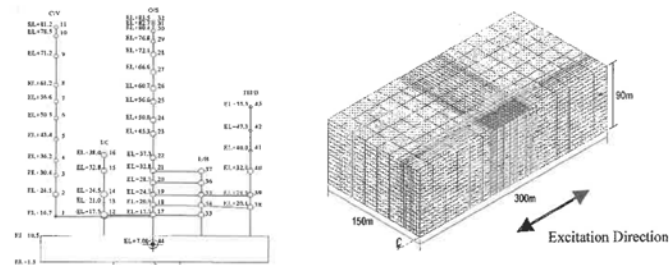


(a) 提 案 モ デ ル の 概 念 (b) ジョ イ ン ト 要 素 の 概 念

参 図 3.5-9 提 案 さ れ た 3 次 元 F E M モ デ ル の 概 念 (参 3.5-3)

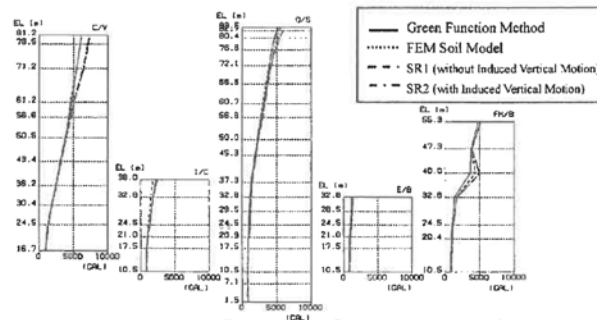


参 図 3.5-10 地 盤 モ デ ル の 境 界 条 件 (参 3.5-3)



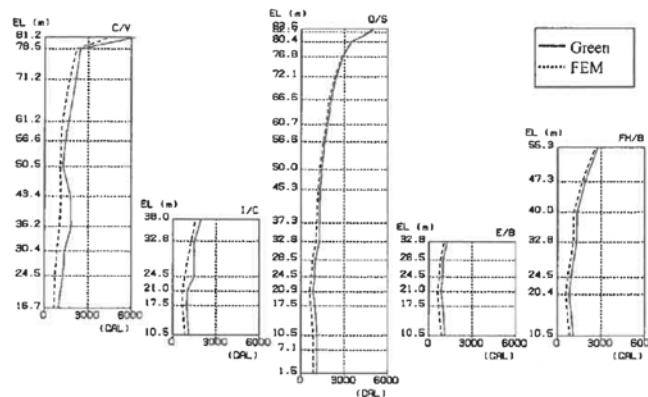
参 図 3.5-11 建 物 と 地 盤 の 3 次 元 モ デ ル (参 3.5-3)

参図 3.5-12 に接地率が 30%程度の場合について、時間領域のグリーン関数法、3次元 FEM モデル、従来モデル（誘発上下動を考慮しない地盤の回転ばねに浮き上がり非線形を考慮したモデルで図中では SR1 と標記）、誘発上下動考慮の SR モデル（図中では SR2 と標記）の水平応答加速度を比較して示している。4 つの手法による応答結果はよく対応している。



参図 3.5-12 各解析法による水平応答加速度の比較 ( $\eta=30\%$ )

参図 3.5-13 に接地率が 30%程度の場合について、時間領域のグリーン関数法と 3次元 FEM モデルの鉛直応答加速度（誘発上下動）を比較している。両者はよく対応している。



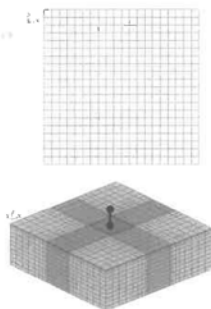
参図 3.5-13 グリーン関数法と 3次元 FEM モデルによる鉛直応答加速度（誘発上下動）の比較 ( $\eta=30\%$ )

ジョイント要素を用いた 3次元 FEM モデルの応答結果は、接地率 $\eta$ が 30%程度まで時間領域のグリーン関数法の結果と概ね一致する。この結果をもとに文献（参 3.5-3）ではジョイント要素を用いた 3次元 FEM モデルの適用範囲として $\eta \geq 35\%$ を提案している。



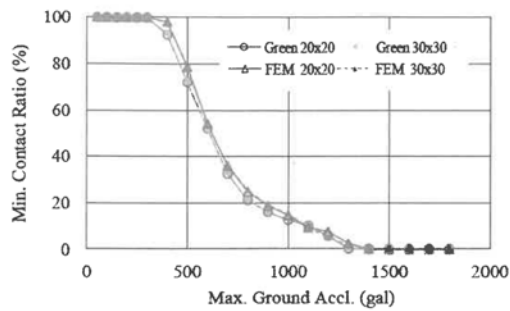
最新の研究では、低接地率時 ( $\eta \leq 35\%$ ) における 3 次元 FEM モデルの妥当性について検討されている。硬質岩盤上に立つ原子炉建屋を模擬した基礎-上部建物の 1 質点系モデルを対象として、グリーン関数法および地盤の 3 次元 FEM モデルによる地震応答解析が行われ、両者の応答性状を比較することで低接地率時の 3 次元 FEM モデルの適用範囲が検討されている (参 3.5-4)。

グリーン関数法及び 3 次元 FEM モデルともに、参図 3.5-14 のように基礎部のメッシュ分割を均等 20 分割及び 30 分割とした 2 つを解析ケースとしている (検討結果において、Green20×20 : グリーン関数法で 20 分割, Green30×30 : グリーン関数法で 30 分割, FEM20×20 : FEM モデルで 20 分割, FEM30×30 : FEM モデルで 30 分割と記載)。

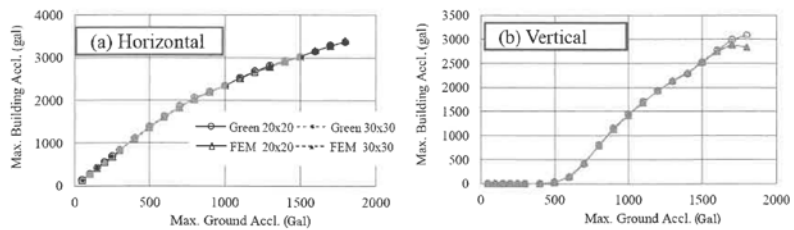


参図 3.5-14 検討モデル図 (20 分割の例 上 : 基礎部拡大, 下 : 全体鳥瞰図)

参図 3.5-15~参図 3.5-17 に各応答の結果を比較して示している。参図 3.5-16 の鉛直応答 (入力 1700Gal 以降) にやや差異が現れるものの、3 次元 FEM モデルのそれぞれの応答結果は、時間領域のグリーン関数法の結果と概ね対応している。この結果をもとに文献 (参 3.5-4) では、低接地率時 ( $\eta \leq 35\%$ ) において完全に剥離 ( $\eta = 0\%$ ) する場合を除き、3 次元 FEM モデルとグリーン関数法の両者の応答が良く対応することを示している。



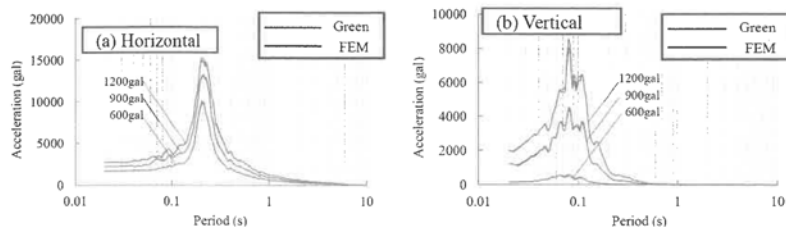
参图 3.5-15 最小接地率と地表最大加速度の比較



水平応答

鉛直応答

参图 3.5-16 入力加速度と建物最大応答加速度



水平応答

鉛直応答

参图 3.5-17 建物加速度応答スペクトル ( $h=5\%$ )

(20×20 分割:  $\eta=55\%$  (600Gal 入力), 15% (900Gal 入力), 5% (1200Gal 入力) の比較)

## 「J E A C 4 6 0 1 - 2015 参考資料 3.5(7) 基礎底面の付着力を考慮した基礎浮き上がり解析法」 (※ 1. (2)への引用箇所を下線で示す)

## (7) 基礎底面の付着力を考慮した基礎浮き上がり解析法

基礎底面と地盤間の付着力を考慮した基礎浮き上がり解析法として、現在以下の方法が提案されている。

- ①付着力をジョイント要素で考慮した3次元 FEM 地盤モデルによる方法 (参 3.5-3)
- ②付着力を離散化した地盤ばねに考慮した方法 (参 3.5-8)
- ③付着力を SR モデルの回転地盤ばねに考慮した方法 (参 3.5-9)

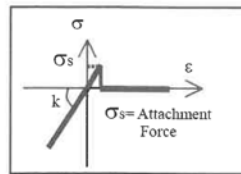
基礎底面の付着力はいずれの方法においても浮き上がりに対する引張抵抗としてモデル化されているが、地盤のモデル化方法や基礎浮き上がりの考慮方法などは各方法にそれぞれの特徴があり、浮き上がりを考慮した非線形地震応答解析としての適用範囲も異なっている。

①の方法は、地盤を3次元 FEM でモデル化し、基礎地盤間の剥離・滑り現象や付着力の影響をジョイント要素で考慮する方法である(本参考資料(3)参照)。②の方法は、地盤をウィンクラ型の離散化ばねでモデル化し、剥離現象や付着力の影響を離散化ばねに考慮する方法である(本参考資料(6)参照)。③の方法は、地盤を集約した地盤ばね(水平ばね、回転ばね)でモデル化し、剥離現象や付着力の影響を基礎底面の回転地盤ばねに考慮した方法である。

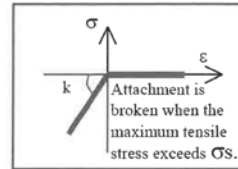
①、②の方法は付着力の考慮に加えて浮き上がりに伴う誘発上下動の評価が可能であり、これらの解析法は低接地率の範囲まで適用可能である。③の方法は浮き上がりに伴う誘発上下動が考慮されていないため、その適用範囲は誘発上下動の影響が大きくない範囲(目安として接地率 65%以上)と考えられる。

これらの解析法の中では、①の方法が基礎浮き上がり現象や付着力の影響を最も詳細にモデル化した方法と考えられ、これまでの検討例も多い。以下に、この解析法による PWR 型原子炉建屋を対象とした付着力の影響に関する解析例を示す。

参図 3.5-35 は、付着力を考慮したジョイント要素の特性を示している。付着力を超える引張応力が作用した以後は付着力が失われるモデルとなっている。参図 3.5-36 は付着力の違いによる接地率の比較を示し、参図 3.5-37 は付着力による最大応答値(水平加速度、鉛直加速度)の影響について示している。付着力は接地率や浮き上がりに伴う鉛直方向加速度(誘発上下動)に大きく影響するが、水平応答への影響は小さいことが示されている。

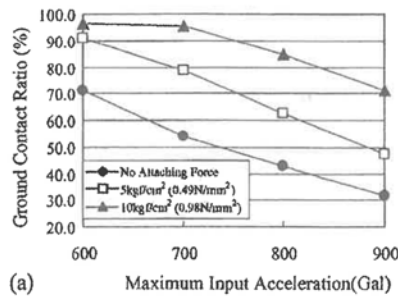


(a) 付着力が切れる前の特性



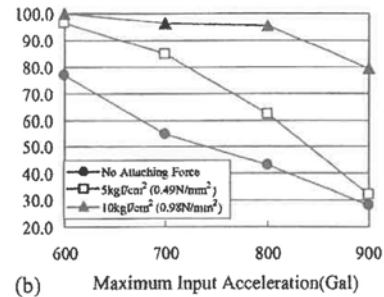
(b) 付着力が切れた後の特性

参図 3.5-35 付着力を考慮したジョイント要素 (参 3.5-3)



(a)

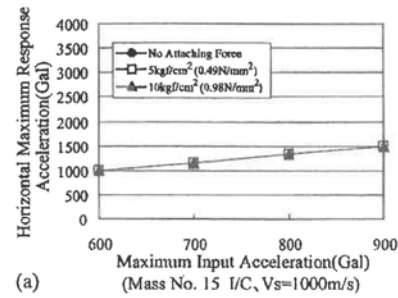
(a)  $V_s=1000\text{m/s}$  地盤



(b)

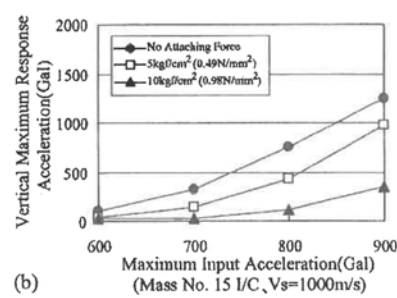
(b)  $V_s=2000\text{m/s}$  地盤

参図 3.5-36 付着力の違いによる接地率の比較 (参 3.5-3)



(a)

(a) 水平加速度



(b)

(b) 鉛直加速度

参図 3.5-37 付着力の違いによる最大応答値の比較 (参 3.5-3)

付着力の考慮の有無による建物応答への影響の検討

1. 概要

1.1 検討概要

島根原子力発電所 2 号炉の建物の地震応答解析には、SRモデル、ジョイント要素を用いた 3 次元 FEMモデル及び基礎固定モデルを用いている。今回工認で採用する地震応答解析モデルにおける付着力の考慮の有無を第 1.1-1 表に示す。

付着力試験結果を踏まえ、建物の基礎底面と地盤間には付着力が存在すると考えられることから、今回、ジョイント要素を用いた 3 次元 FEMモデル及び SRモデル（浮上り線形地震応答解析）では付着力を考慮することとした。一方で、SRモデル（浮上り非線形地震応答解析）については、既工認でも実績のある手法として、付着力を考慮していない。また、基礎固定モデルについては、建物と地盤の相互作用を考慮していない。

以上を踏まえ、付着力を考慮していない SRモデル（浮上り非線形地震応答解析）について、付着力の考慮の有無による建物応答への影響の検討を行う。

検討は、建物の重要度、内包する施設の重要度及び接地率を踏まえ、原子炉建物を代表として、今回工認で採用する地震応答解析モデル（以下「今回工認モデル」という。）と、今回工認モデルに基礎底面の付着力を考慮したモデル（以下「付着力考慮モデル」という。）を用いた地震応答解析を行い、解析結果の比較を行う。

第 1.1-1 表 地震応答解析モデルにおける付着力の考慮の有無

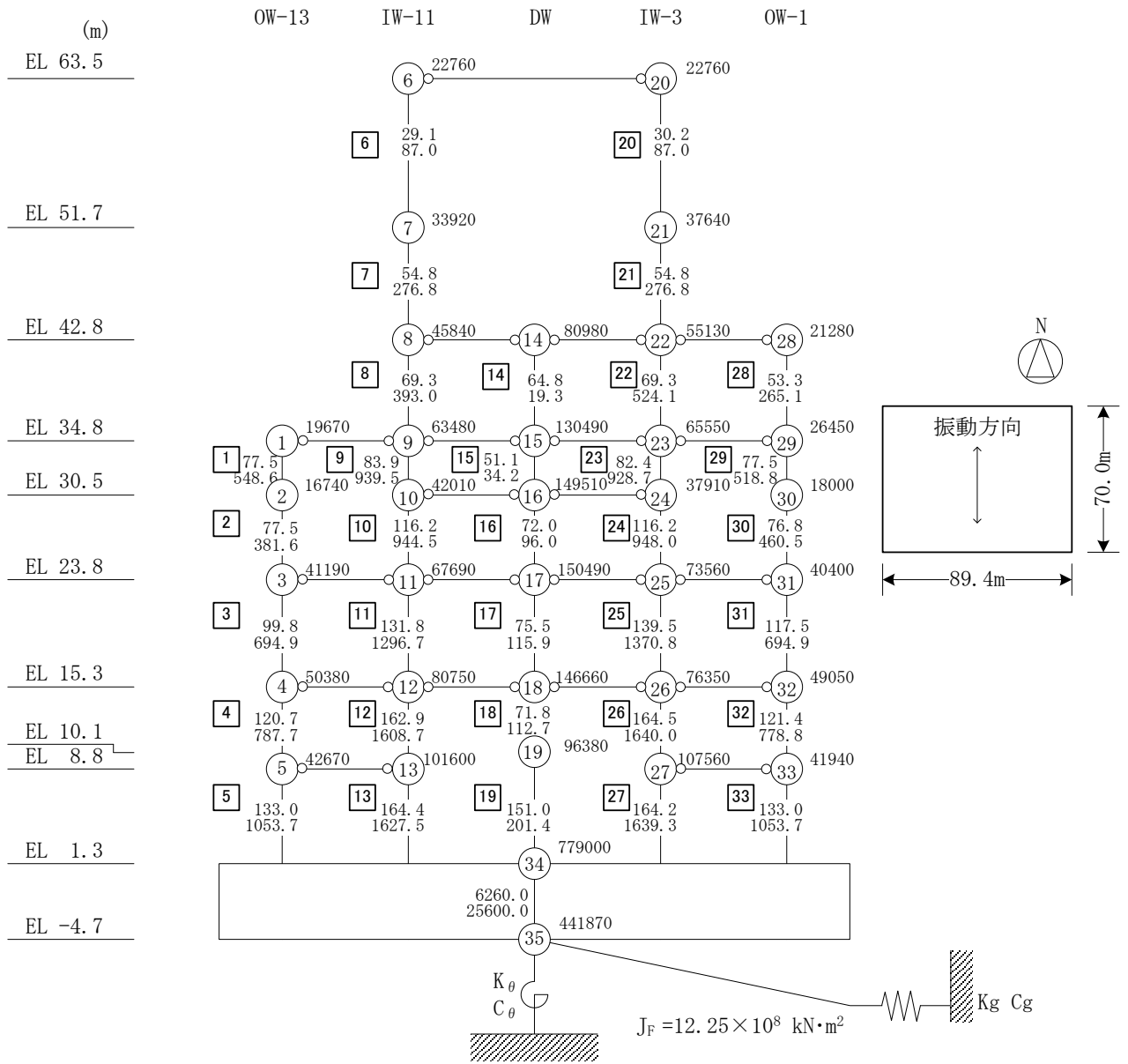
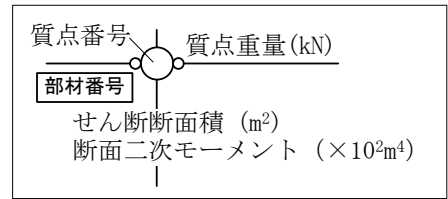
採用する地震応答解析モデル (基礎浮上り評価法)	建物名	付着力の考慮
ジョイント要素を用いた 3次元FEMモデル	廃棄物処理建物, 1号炉原子炉建物	考慮する
SRモデル (浮上り線形地震応答解析)	制御室建物, 1号炉廃棄物処理建物	考慮する <sup>注1</sup>
SRモデル (浮上り非線形地震応答解析)	原子炉建物, タービン建物, ガスタービン発電機建物, 緊急時対策所, 1号炉タービン建物, サイトバンカ建物	考慮しない
基礎固定モデル	サイトバンカ建物(増築部), 2号炉排気筒モニタ室, 燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備	—

注 1：基礎浮上りが発生しないために必要な付着力が、付着力試験に基づき設定した値を超えないことを確認する。

## 2. 解析モデル

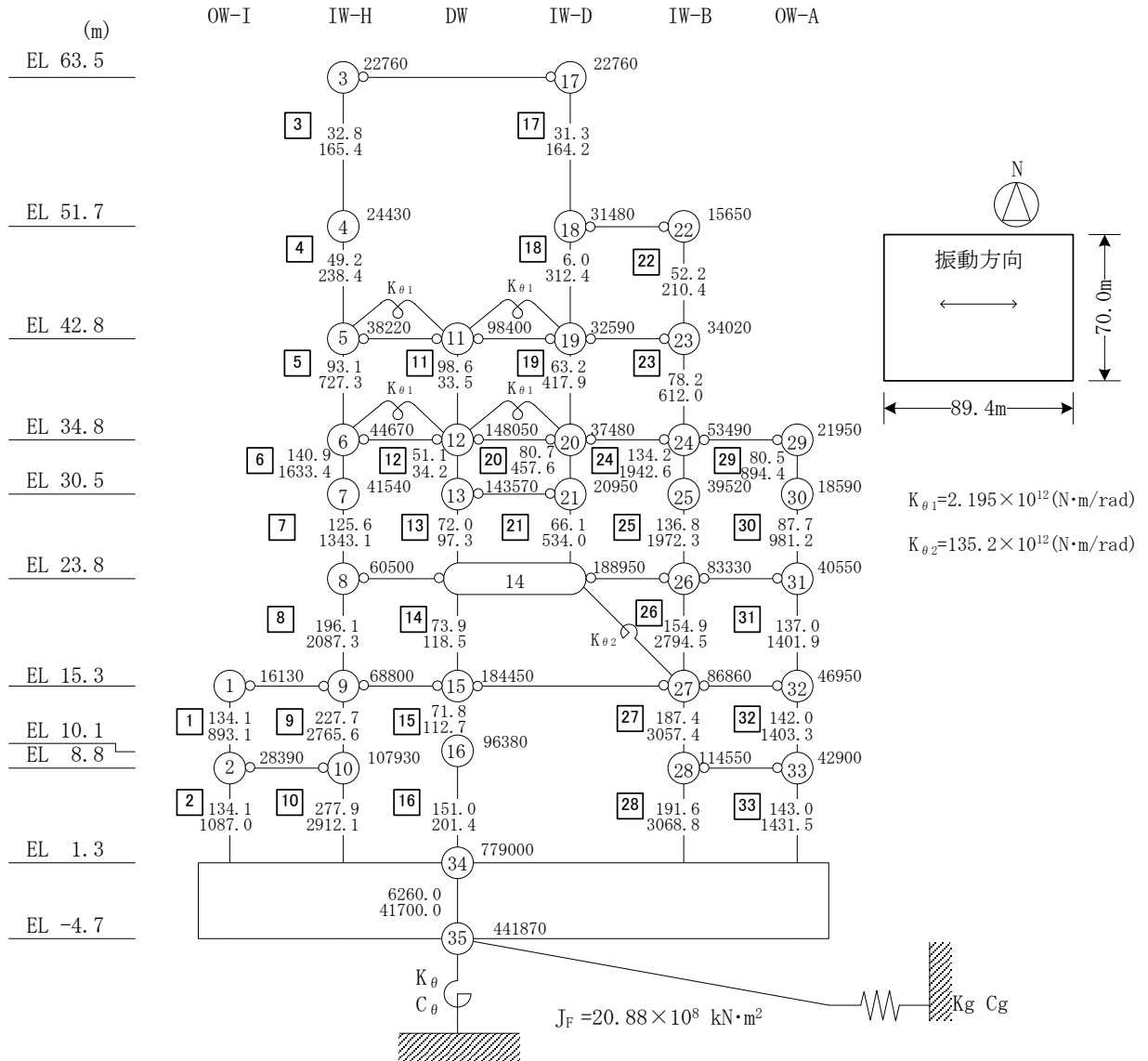
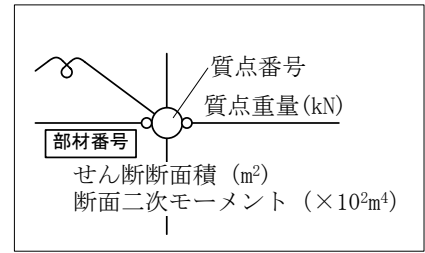
### 2.1 今回工認モデル

今回工認モデルは、SRモデル（浮上り非線形地震応答解析）とし、地震応答解析モデルを第2.1-1図及び第2.1-2図に示す。



地盤ばね	ばね定数	減衰係数
基礎底面水平ばね (Kg, Cg)	$1.55 \times 10^{12}$ (N/m)	$2.23 \times 10^{10}$ (N·s/m)
基礎底面回転ばね (Kθ, Cθ)	$2.13 \times 10^{15}$ (N·m/rad)	$4.32 \times 10^{12}$ (N·m·s/rad)

第 2.1-1 図 原子炉建物の地震応答解析モデル (NS 方向)



地盤ばね	ばね定数	減衰係数
基礎底面水平ばね ( $K_g, C_g$ )	$1.51 \times 10^{12} \text{ (N/m)}$	$2.13 \times 10^{10} \text{ (N}\cdot\text{s/m)}$
基礎底面回転ばね ( $K_{\theta}, C_{\theta}$ )	$3.02 \times 10^{15} \text{ (N}\cdot\text{m/rad)}$	$9.01 \times 10^{12} \text{ (N}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad)}$

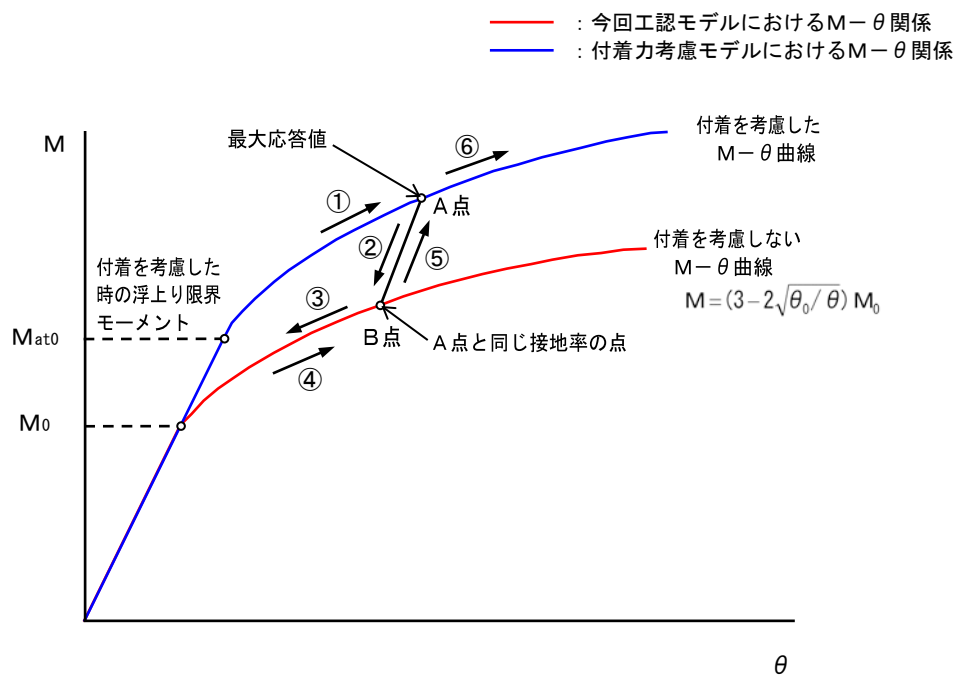
第 2.1-2 図 原子炉建物の地震応答解析モデル (EW方向)



## 2.2 付着力考慮モデル

付着力考慮モデルは、今回工認モデルを基本とし、田中ほか<sup>(1)</sup>に基づき、基礎底面と地盤間における付着力を考慮した基礎浮上り特性によるSRモデルとする。

付着力を考慮した基礎浮上り特性について、基礎下の転倒モーメントMと回転角 $\theta$ の関係を第2.2-1図に示す。なお、付着力は島根原子力発電所における付着力試験結果に基づき設定した $0.40\text{N}/\text{mm}^2$ （添付資料-1参照）を用いた。



第2.2-1図 基礎下の転倒モーメントMと回転角 $\theta$ の関係

### 3. 検討用地震動

検討に用いる地震動は、基準地震動S<sub>s</sub>-Dとする。

### 4. 地震応答解析結果

#### 4.1 最大応答加速度

最大応答加速度を第4.1-1表及び第4.1-2表に示す。

第 4.1-1 表 原子炉建物の最大応答加速度 (NS 方向)

質点 番号	最大応答加速度 (m/s <sup>2</sup> )		比率 (付着力考慮モデル/今回工認モデル)
	付着力考慮モデル	今回工認モデル	
1	10.2	10.2	1.00
2	10.1	10.2	0.990
3	8.71	8.58	1.02
4	8.61	8.61	1.00
5	8.02	8.02	1.00
6	24.0	24.1	0.996
7	16.6	16.8	0.988
8	12.4	12.5	0.992
9	10.2	10.2	1.00
10	9.39	9.39	1.00
11	8.71	8.58	1.02
12	8.61	8.61	1.00
13	8.02	8.02	1.00
14	12.4	12.5	0.992
15	10.2	10.2	1.00
16	9.39	9.39	1.00
17	8.71	8.58	1.02
18	8.61	8.61	1.00
19	9.93	9.37	1.06
20	24.0	24.1	0.996
21	17.4	17.6	0.989
22	12.4	12.5	0.992
23	10.2	10.2	1.00
24	9.39	9.39	1.00
25	8.71	8.58	1.02
26	8.61	8.61	1.00
27	8.06	8.06	1.00
28	12.4	12.5	0.992
29	10.2	10.2	1.00
30	10.2	10.1	1.01
31	8.71	8.58	1.02
32	8.61	8.61	1.00
33	8.06	8.06	1.00
34	6.91	6.91	1.00
35	6.76	6.76	1.00

第 4.1-2 表 原子炉建物の最大応答加速度 (E W方向)

質点 番号	最大応答加速度 (m/s <sup>2</sup> )		比率 (付着力考慮モデル/今回工認モデル)
	付着力考慮モデル	今回工認モデル	
1	8.39	8.39	1.00
2	8.26	8.26	1.00
3	26.9	27.0	0.996
4	17.9	17.9	1.00
5	13.7	13.7	1.00
6	11.3	11.3	1.00
7	12.6	12.2	1.03
8	8.61	8.67	0.993
9	8.39	8.39	1.00
10	8.26	8.26	1.00
11	13.7	13.7	1.00
12	11.3	11.3	1.00
13	11.7	11.6	1.01
14	8.61	8.67	0.993
15	8.39	8.39	1.00
16	9.42	9.42	1.00
17	26.9	27.0	0.996
18	17.2	17.2	1.00
19	13.7	13.7	1.00
20	11.3	11.3	1.00
21	11.7	11.6	1.01
22	17.2	17.2	1.00
23	13.7	13.7	1.00
24	11.3	11.3	1.00
25	11.1	10.4	1.07
26	8.61	8.67	0.993
27	8.39	8.39	1.00
28	8.44	8.44	1.00
29	11.3	11.3	1.00
30	10.0	10.8	0.926
31	8.61	8.67	0.993
32	8.39	8.39	1.00
33	8.44	8.44	1.00
34	7.65	7.65	1.00
35	7.52	7.52	1.00

#### 4.2 最大応答せん断ひずみ

最大応答せん断ひずみを第 4.2-1 表及び第 4.2-2 表に示す。

第 4.2-1 表 原子炉建物の最大応答せん断ひずみ (NS 方向)

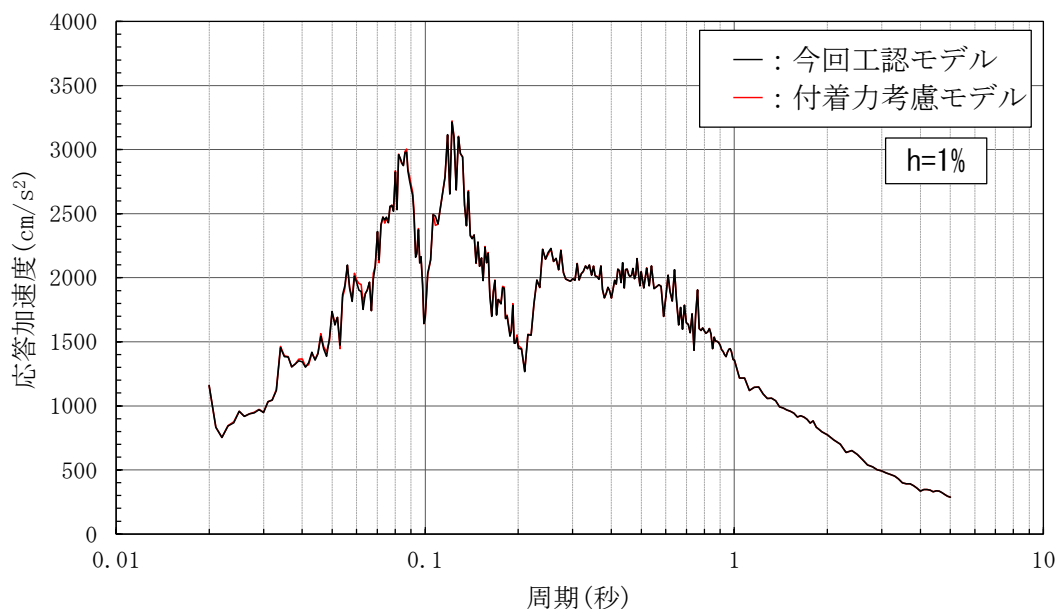
部材 番号	最大応答せん断ひずみ ( $\gamma$ ) ( $\times 10^{-3}$ )		比率 (付着力考慮モデル/今回工認モデル)
	付着力考慮モデル	今回工認モデル	
1	0.289	0.280	1.03
2	0.357	0.349	1.02
3	0.355	0.356	0.997
4	0.370	0.364	1.02
5	0.434	0.406	1.07
6	0.281	0.268	1.05
7	0.307	0.293	1.05
8	0.335	0.324	1.03
9	0.330	0.316	1.04
10	0.327	0.324	1.01
11	0.353	0.355	0.994
12	0.368	0.363	1.01
13	0.432	0.405	1.07
14	0.115	0.115	1.00
15	0.148	0.139	1.06
16	0.155	0.156	0.994
17	0.215	0.218	0.986
18	0.659	0.609	1.08
19	0.201	0.197	1.02
20	0.253	0.235	1.08
21	0.360	0.361	0.997
22	0.337	0.327	1.03
23	0.330	0.316	1.04
24	0.327	0.324	1.01
25	0.353	0.355	0.994
26	0.355	0.355	1.00
27	0.446	0.413	1.08
28	0.341	0.330	1.03
29	0.266	0.259	1.03
30	0.344	0.337	1.02
31	0.344	0.346	0.994
32	0.351	0.350	1.00
33	0.445	0.413	1.08

第 4.2-2 表 原子炉建物の最大応答せん断ひずみ (EW方向)

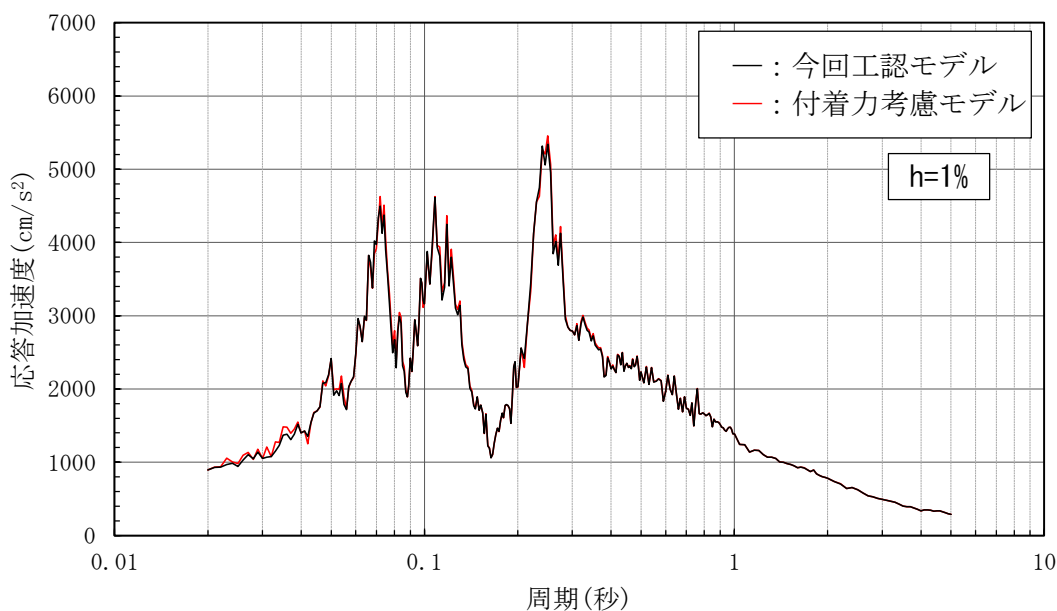
部材 番号	最大応答せん断ひずみ( $\gamma$ ) ( $\times 10^{-3}$ )		比率 (付着力考慮モデル/今回工認モデル)
	付着力考慮モデル	今回工認モデル	
1	0.322	0.324	0.994
2	0.226	0.226	1.00
3	0.284	0.293	0.969
4	0.374	0.368	1.02
5	0.187	0.186	1.01
6	0.181	0.181	1.00
7	0.392	0.389	1.01
8	0.484	0.477	1.01
9	0.309	0.312	0.990
10	0.221	0.221	1.00
11	0.0818	0.0818	1.00
12	0.0644	0.0648	0.994
13	0.257	0.255	1.01
14	0.353	0.347	1.02
15	0.288	0.287	1.00
16	0.160	0.163	0.982
17	0.231	0.234	0.987
18	0.431	0.433	0.995
19	0.169	0.168	1.01
20	0.173	0.172	1.01
21	0.389	0.387	1.01
22	0.455	0.458	0.993
23	0.202	0.201	1.00
24	0.252	0.262	0.962
25	0.361	0.351	1.03
26	0.487	0.481	1.01
27	0.219	0.218	1.00
28	0.299	0.303	0.987
29	0.315	0.325	0.969
30	0.322	0.315	1.02
31	0.488	0.481	1.01
32	0.219	0.218	1.00
33	0.298	0.303	0.983

### 4.3 床応答スペクトル

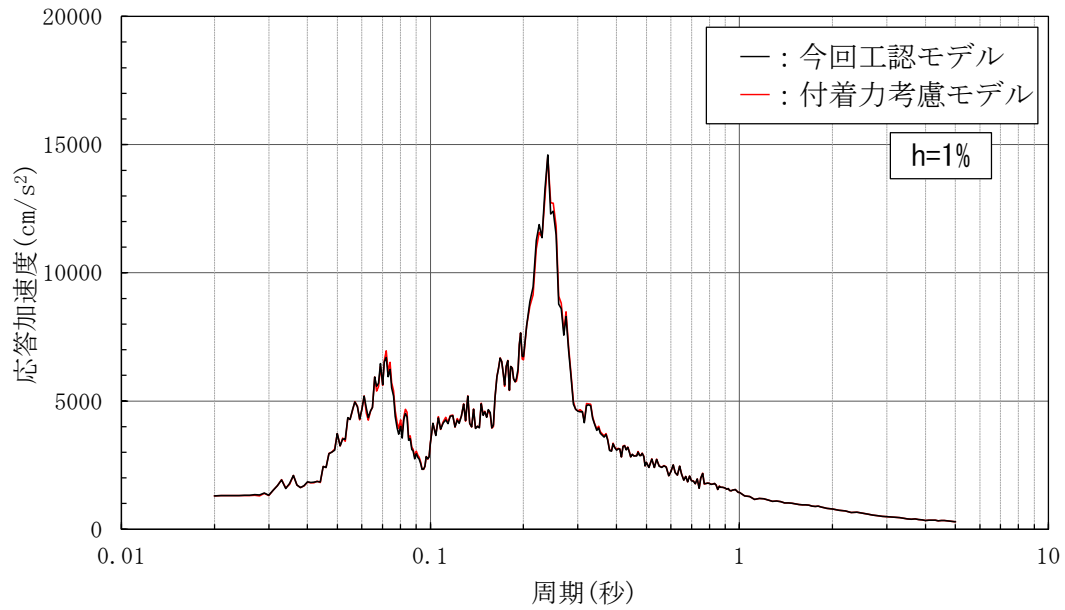
床応答スペクトル ( $h = 1\%$  及び  $h = 5\%$ ) の比較を第 4.3-1 図～第 4.3-16 図に示す。



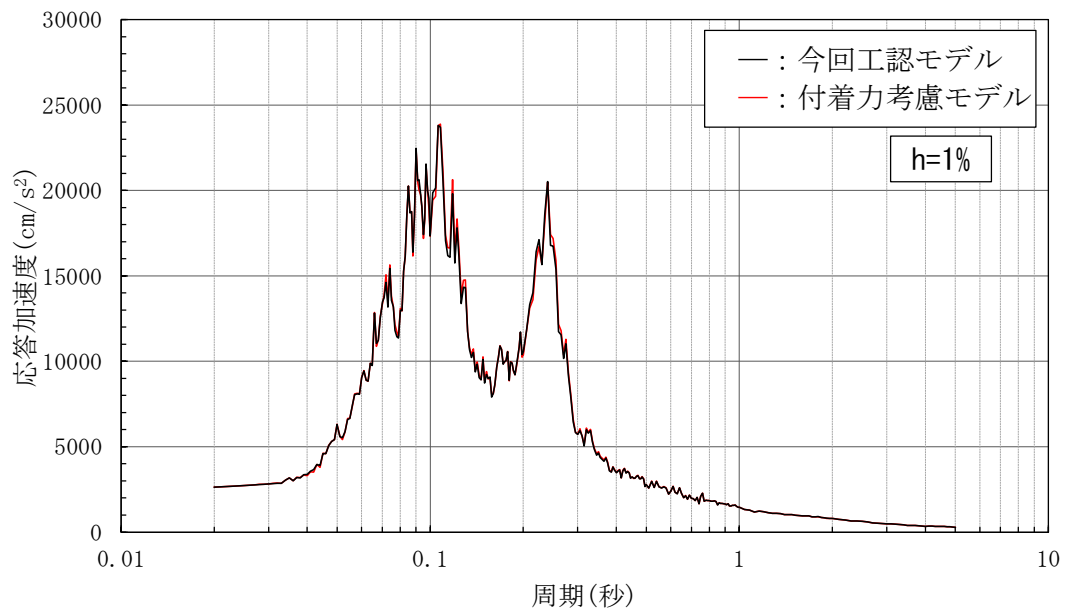
第 4.3-1 図 床応答スペクトル ( $h=1\%$ ) の比較  
(NS方向 EL 1.3m (質点番号 34) )



第 4.3-2 図 床応答スペクトル ( $h=1\%$ ) の比較  
(NS方向 EL 15.3m (質点番号 4) )

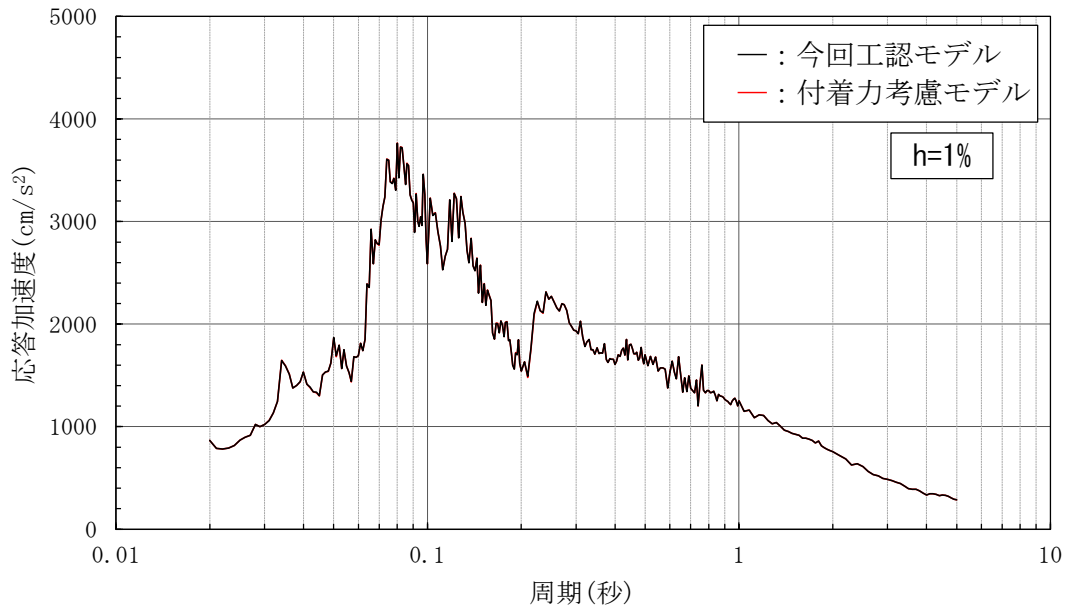


第 4.3-3 図 床応答スペクトル (h=1%) の比較  
(NS方向 E L 42.8m (質点番号 8) )

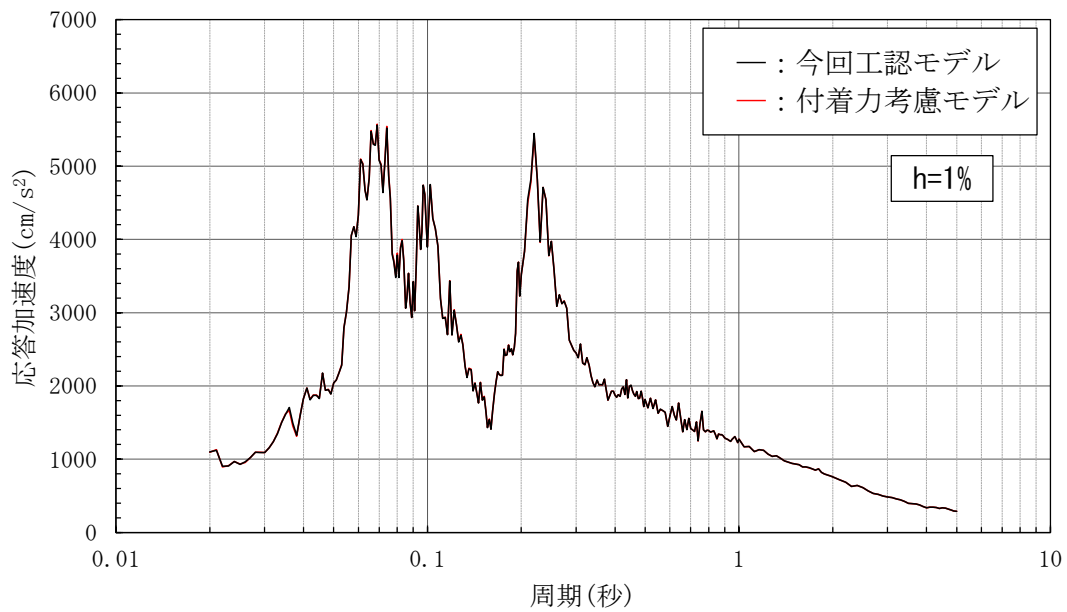


第 4.3-4 図 床応答スペクトル (h=1%) の比較  
(NS方向 E L 63.5m (質点番号 6) )

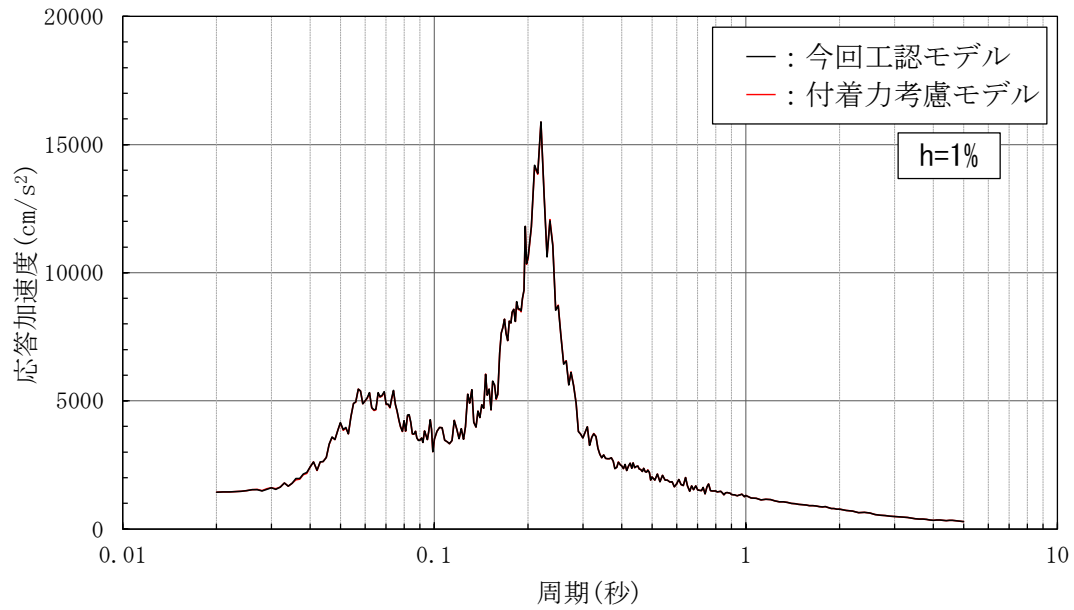




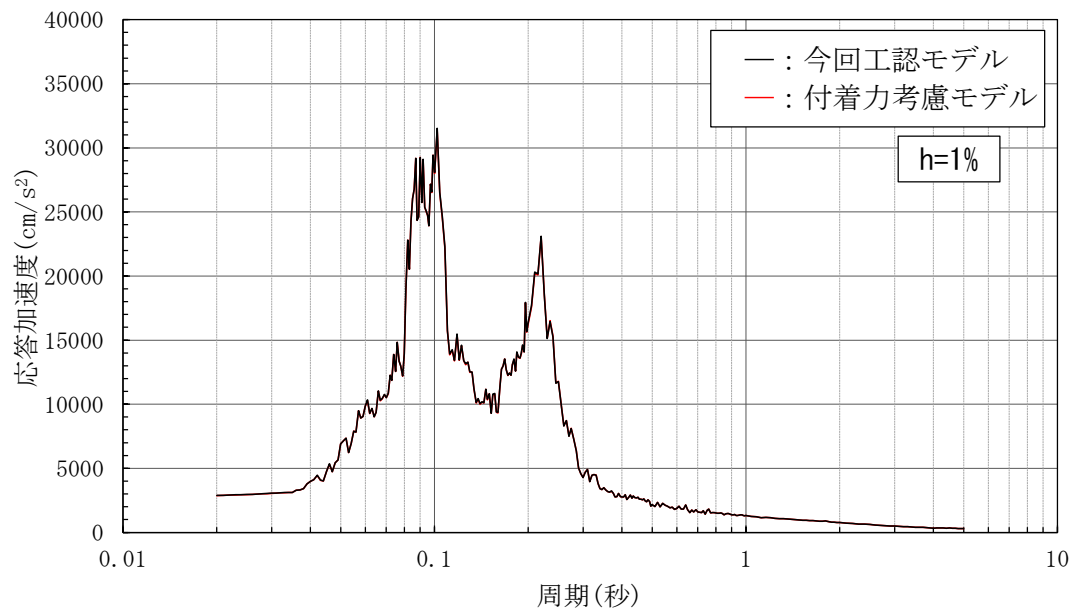
第 4.3-5 図 床応答スペクトル (h=1%) の比較  
(EW方向 EL 1.3m (質点番号 34) )



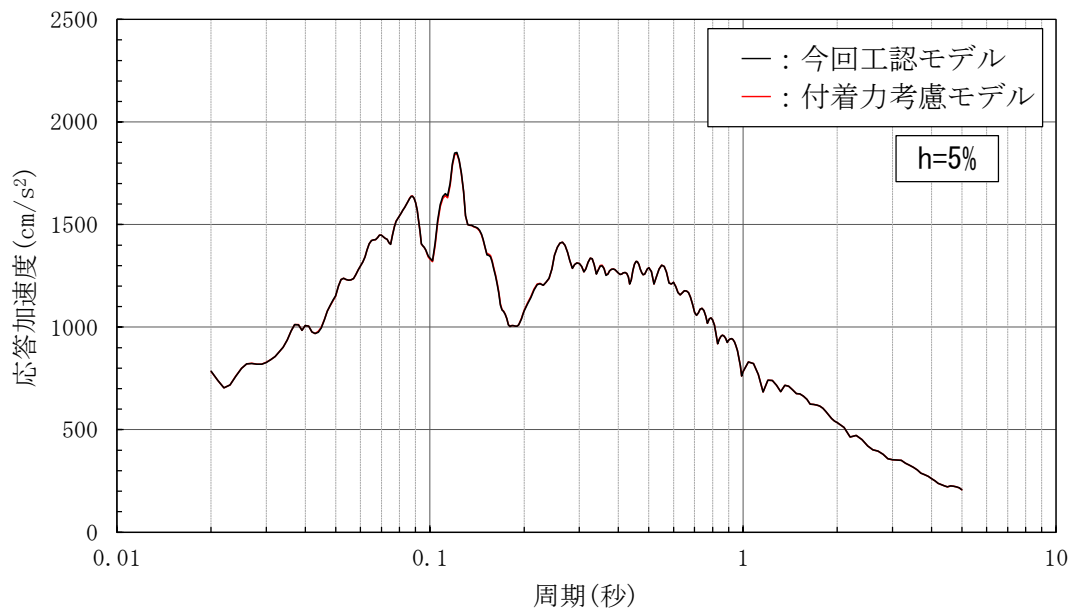
第 4.3-6 図 床応答スペクトル (h=1%) の比較  
(EW方向 EL 15.3m (質点番号 1) )



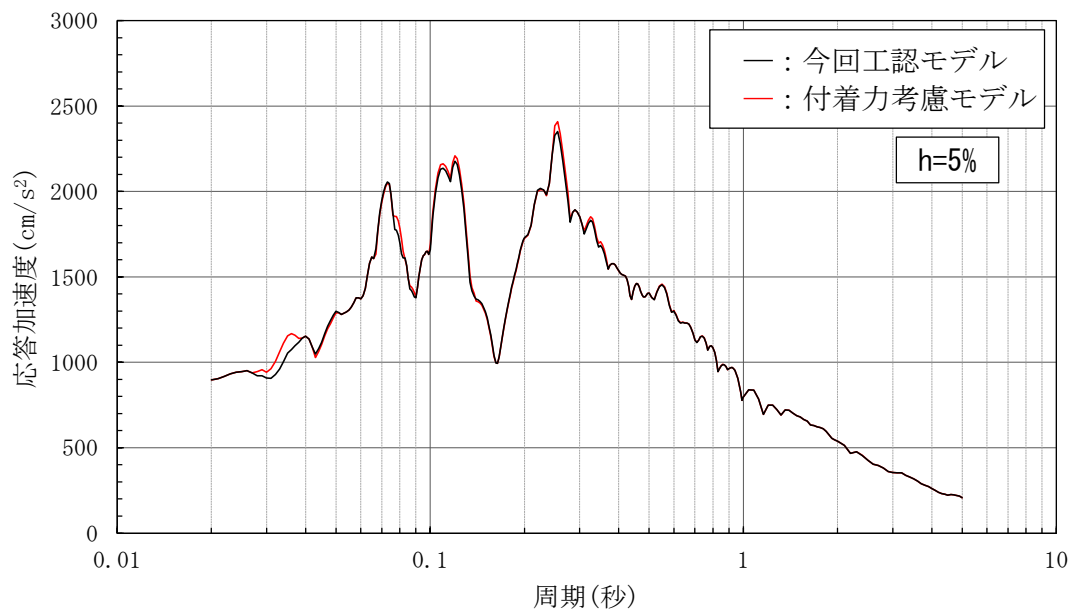
第 4.3-7 図 床応答スペクトル (h=1%) の比較  
(EW方向 E L 42.8m (質点番号 5) )



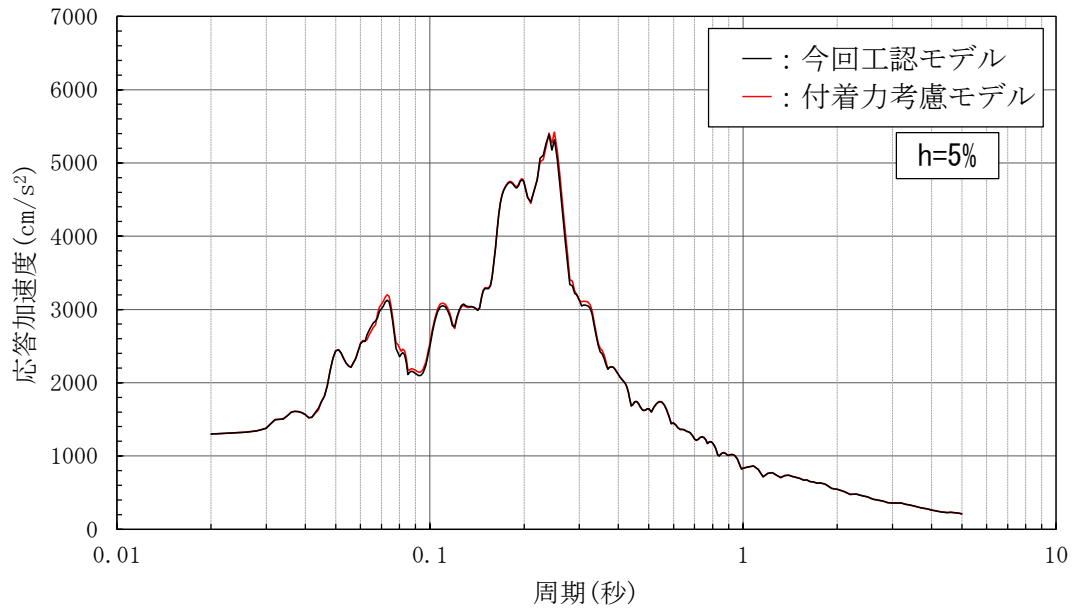
第 4.3-8 図 床応答スペクトル (h=1%) の比較  
(EW方向 E L 63.5m (質点番号 3) )



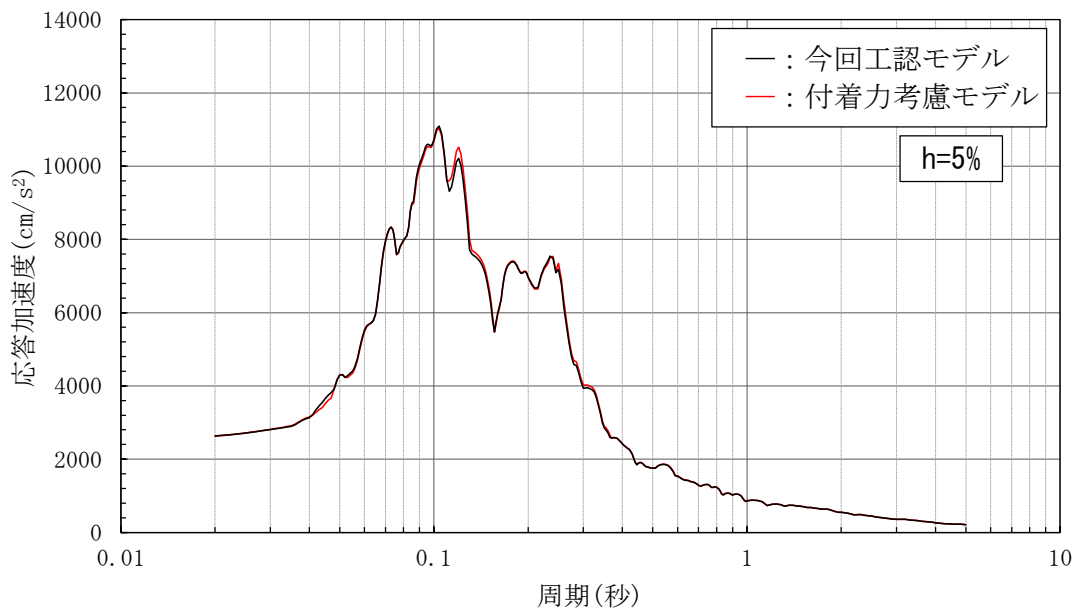
第 4.3-9 図 床応答スペクトル (h=5%) の比較  
(NS方向 EL 1.3m (質点番号 34) )



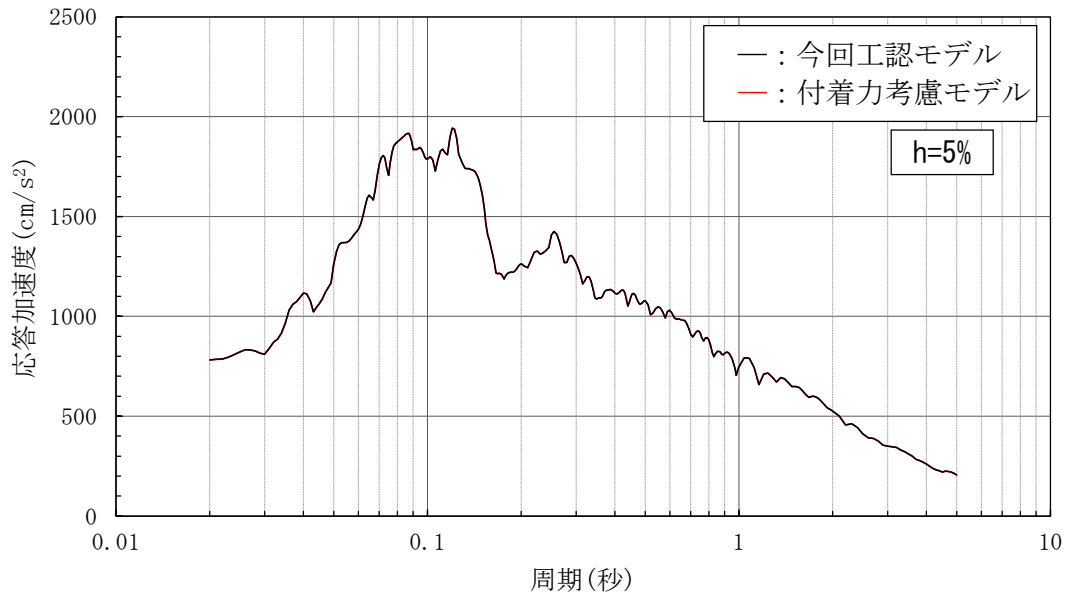
第 4.3-10 図 床応答スペクトル (h=5%) の比較  
(NS方向 EL 15.3m (質点番号 4) )



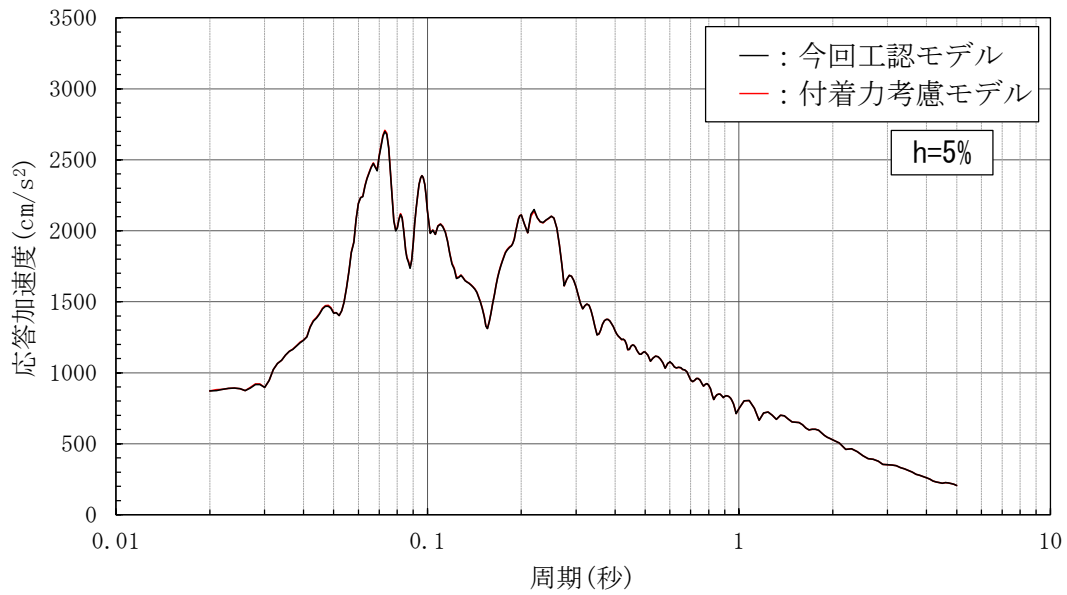
第 4.3-11 図 床応答スペクトル (h=5%) の比較  
(NS方向 EL 42.8m (質点番号 8) )



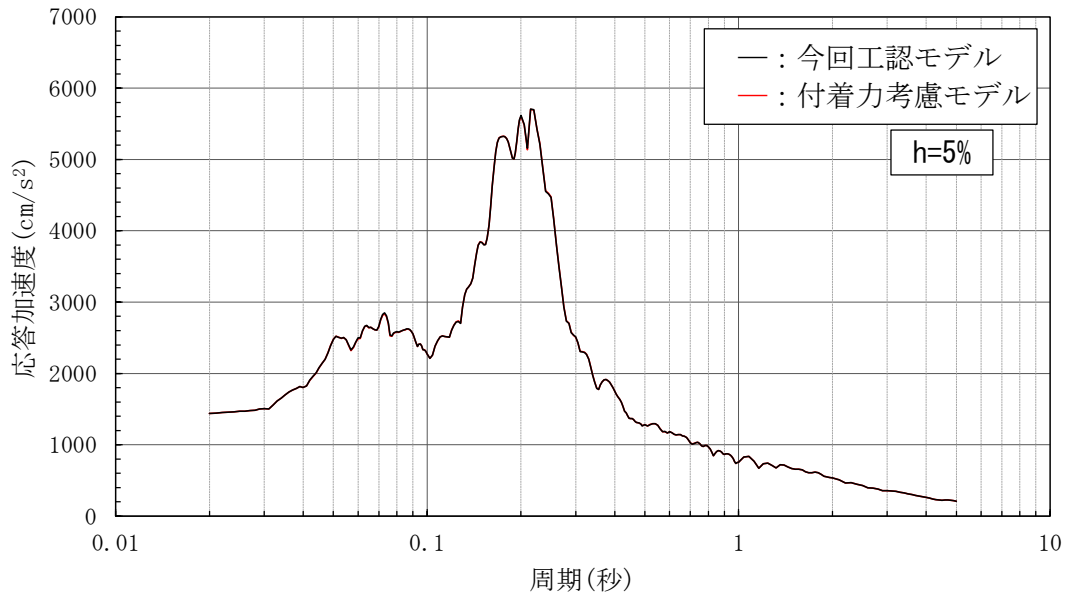
第 4.3-12 図 床応答スペクトル (h=5%) の比較  
(NS方向 EL 63.5m (質点番号 6) )



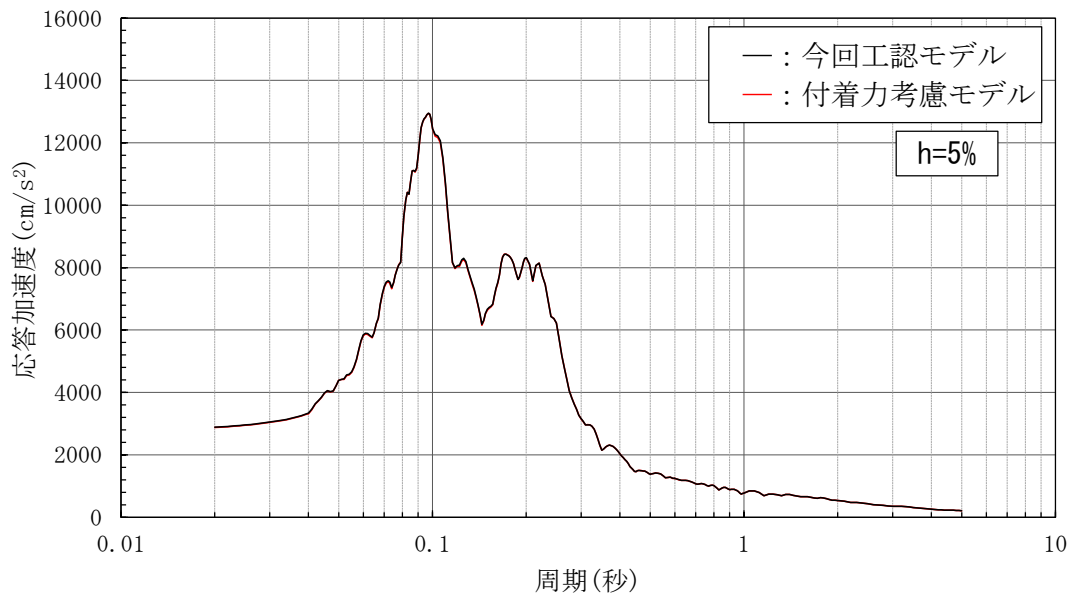
第 4.3-13 図 床応答スペクトル (h=5%) の比較  
(EW方向 EL 1.3m (質点番号 34) )



第 4.3-14 図 床応答スペクトル (h=5%) の比較  
(EW方向 EL 15.3m (質点番号 1) )



第 4.3-15 図 床応答スペクトル (h=5%) の比較  
(EW方向 EL 42.8m (質点番号 5) )



第 4.3-16 図 床応答スペクトル (h=5%) の比較  
(EW方向 EL 63.5m (質点番号 3) )

#### 4.4 接地率の比較

接地率の比較を第 4.4-1 表に示す。

第 4.4-1 表 接地率の比較

地震応答解析モデル	接地率 $\eta$ (%)	
	N S 方向	E W 方向
今回工認モデル	68.9	82.3
付着力考慮モデル	100	100

#### 5. 付着力の考慮の有無による建物応答への影響の検討結果

原子炉建物を対象とし、今回工認モデルと付着力考慮モデルを用いた地震応答解析を行った結果、付着力により接地率は改善され、両モデルとも同等の応答値を示した。このことから、付着力の考慮の有無による建物応答（水平方向）への影響は軽微である。

#### 6. 参考文献

- (1) 田中英朗ほか：基礎底面の付着力を考慮した基礎浮き上がり解析法，日本建築学会学術講演梗概集（中国），2008年9月，pp.1069-1070

岩盤－レベルコンクリート間における付着力試験実施後の破断面について

1. 概要

岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験実施後の破断面の写真及びスケッチ図に基づき考察を行う。

2. 岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験実施後の破断面の状況

第2-1図、第2-2図に黒色頁岩－レベルコンクリート間及び凝灰岩－レベルコンクリート間における付着力試験後の破断面の状況（写真及びスケッチ図）を示す。

岩種に関わらず、岩盤面には薄いコンクリートの層が広く付着しているが、破断位置はいずれも岩盤とレベルコンクリートの境界面であったことから、試験値は岩盤とレベルコンクリート間の付着力を示しているといえる。



	写真	スケッチ
試験体側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート</li> <li>岩片</li> <li>骨材</li> <li>空洞痕</li> </ul>
岩盤側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>岩盤</li> <li>コンクリート片</li> <li>コンクリートが薄く付着</li> <li>空洞痕</li> </ul>

第2-1図(1) 付着力試験後の破断面の状況  
(黒色頁岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		
岩盤側		

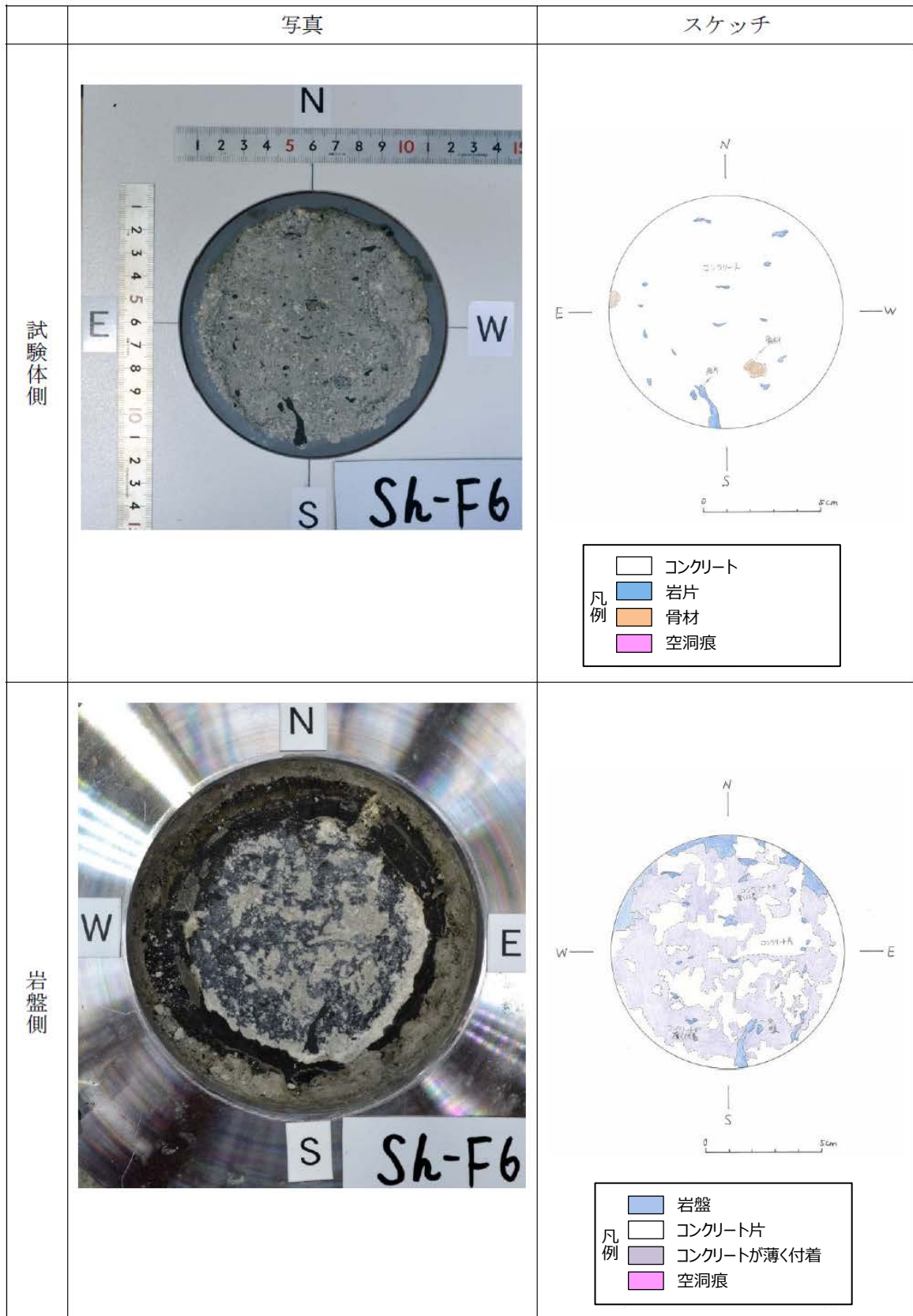
第2-1図(2) 付着力試験後の破断面の状況  
(黒色頁岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		
岩盤側		

第2-1図(3) 付着力試験後の破断面の状況  
(黒色頁岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		
岩盤側		

第2-1図(4) 付着力試験後の破断面の状況  
(黒色頁岩-レベルコンクリート)



第2-1図(5) 付着力試験後の破断面の状況  
(黒色頁岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		
岩盤側		

第2-1 図 (6) 付着力試験後の破断面の状況  
(黒色頁岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ コンクリート</li> <li>■ 岩片</li> <li>■ 骨材</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>
岩盤側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 岩盤</li> <li>□ コンクリート片</li> <li>■ コンクリートが薄く附着</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>

第2-1図(7) 付着力試験後の破断面の状況  
(黒色頁岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		
岩盤側		

第2-1 図 (8) 付着力試験後の破断面の状況  
(黒色頁岩-レベルコンクリート)



	写真	スケッチ
試験体側		
岩盤側		

第2-1 図 (9) 付着力試験後の破断面の状況  
(黒色頁岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		
岩盤側		

第2-1 図 (10) 付着力試験後の破断面の状況  
(黒色頁岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		
岩盤側		

第2-1図(11) 付着力試験後の破断面の状況  
(黒色頁岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		
岩盤側		

第2-1 図 (12) 付着力試験後の破断面の状況  
(黒色頁岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ コンクリート</li> <li>■ 岩片</li> <li>■ 骨材</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>
岩盤側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 岩盤</li> <li>□ コンクリート片</li> <li>■ コンクリートが薄く付着</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>

第2-2図(1) 付着力試験後の破断面の状況  
(凝灰岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ コンクリート</li> <li>■ 岩片</li> <li>■ 骨材</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>
岩盤側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 岩盤</li> <li>□ コンクリート片</li> <li>■ コンクリートが薄く附着</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>

第2-2図(2) 付着力試験後の破断面の状況  
(凝灰岩-レベルコンクリート)

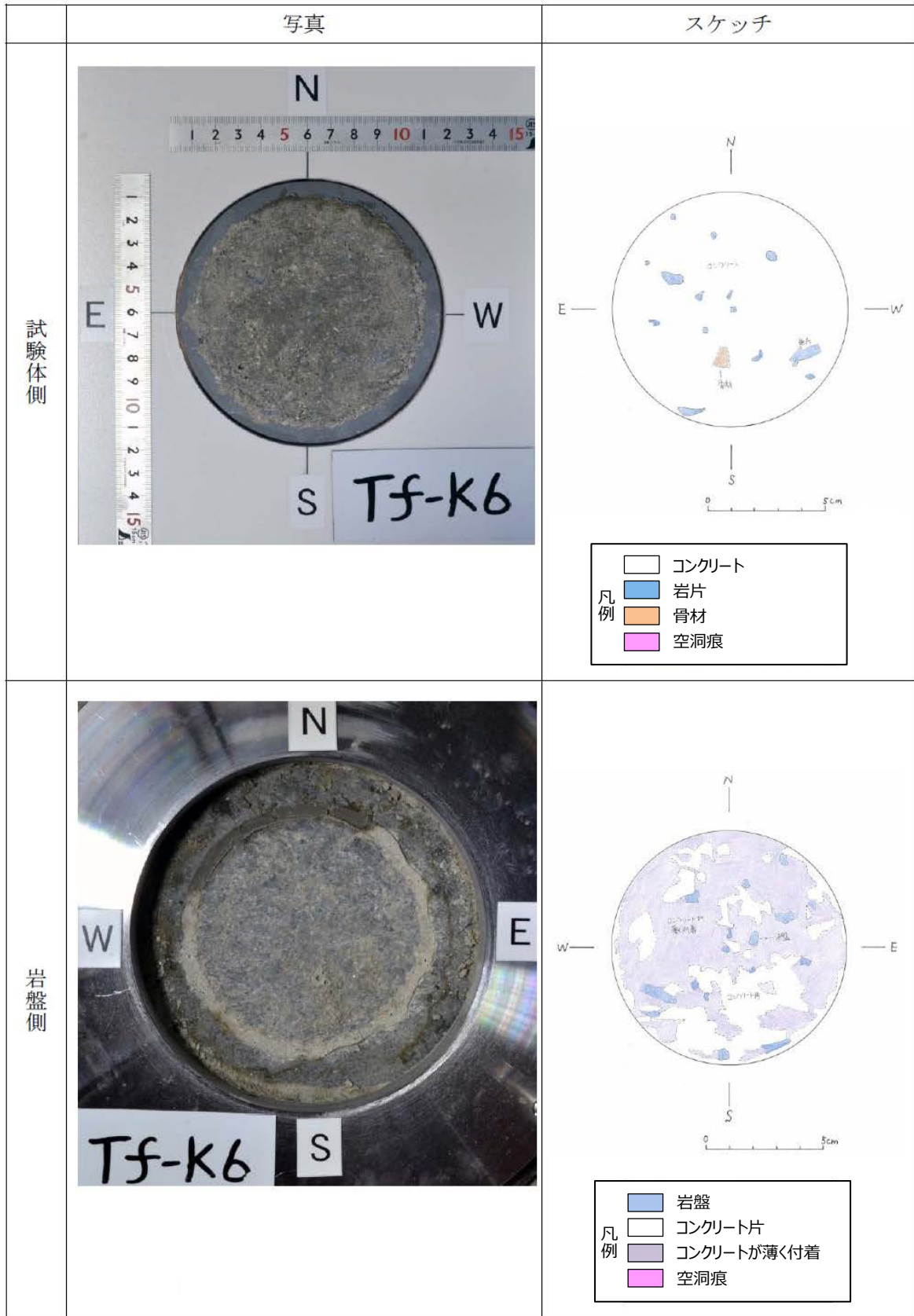
	写真	スケッチ
試験体側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ コンクリート</li> <li>■ 岩片</li> <li>■ 骨材</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>
岩盤側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 岩盤</li> <li>□ コンクリート片</li> <li>■ コンクリートが薄く附着</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>

第2-2 図 (3) 付着力試験後の破断面の状況  
(凝灰岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート</li> <li>岩片</li> <li>骨材</li> <li>空洞痕</li> </ul>
岩盤側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>岩盤</li> <li>コンクリート片</li> <li>コンクリートが薄く付着</li> <li>空洞痕</li> </ul>

第2-2図(4) 付着力試験後の破断面の状況  
(凝灰岩-レベルコンクリート)





第2-2 図 (5) 付着力試験後の破断面の状況  
(凝灰岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ コンクリート</li> <li>■ 岩片</li> <li>■ 骨材</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>
岩盤側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 岩盤</li> <li>□ コンクリート片</li> <li>■ コンクリートが薄く付着</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>

第2-2 図 (6) 付着力試験後の破断面の状況  
(凝灰岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		
岩盤側		

第2-2図(7) 付着力試験後の破断面の状況  
(凝灰岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		
岩盤側		

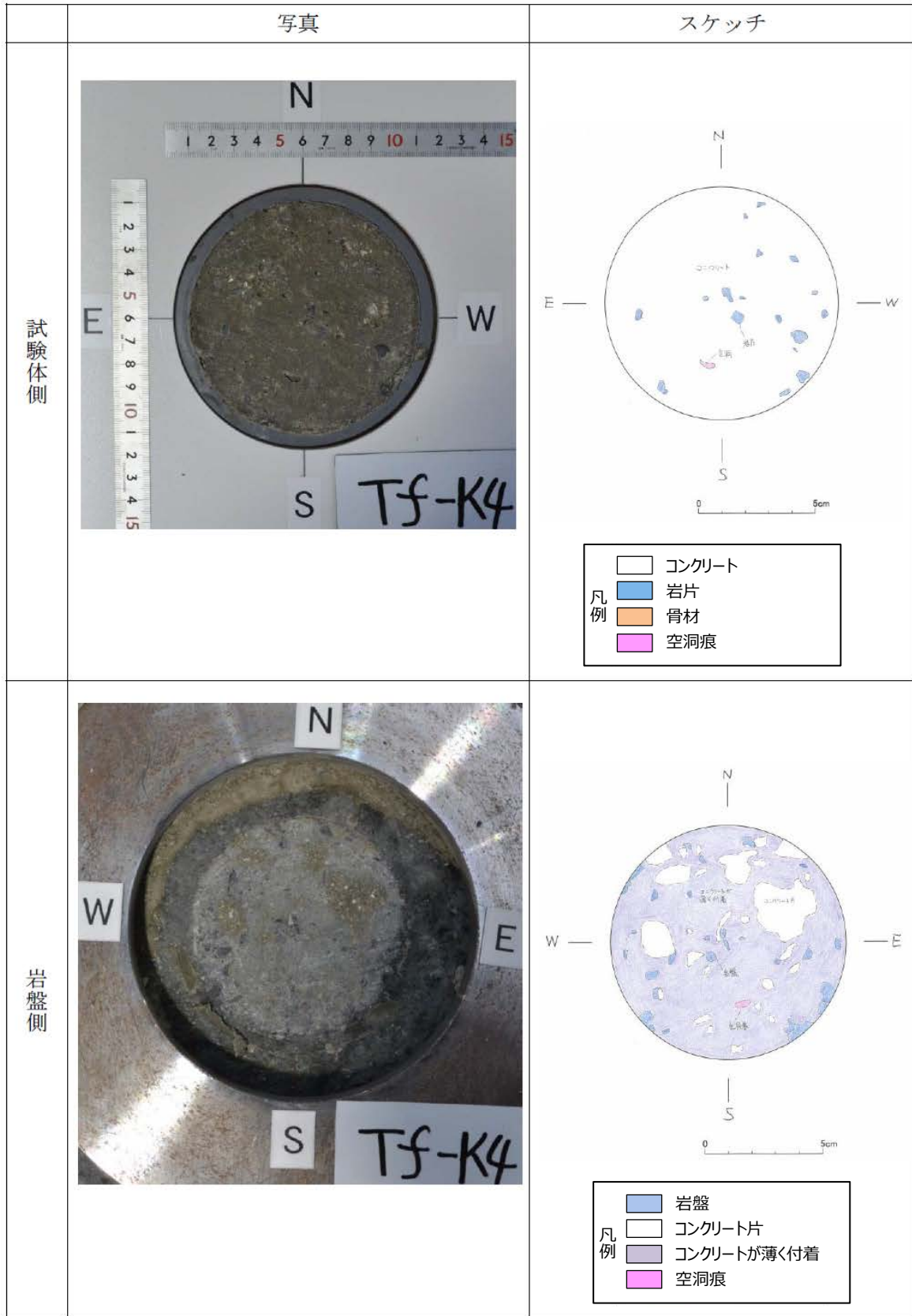
第2-2 図 (8) 付着力試験後の破断面の状況  
(凝灰岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ コンクリート</li> <li>■ 岩片</li> <li>■ 骨材</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>
岩盤側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 岩盤</li> <li>□ コンクリート片</li> <li>■ コンクリートが薄く付着</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>

第2-2図(9) 付着力試験後の破断面の状況  
(凝灰岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ コンクリート</li> <li>■ 岩片</li> <li>■ 骨材</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>
岩盤側		<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 岩盤</li> <li>□ コンクリート片</li> <li>■ コンクリートが薄く付着</li> <li>■ 空洞痕</li> </ul>

第2-2図 (10) 付着力試験後の破断面の状況  
(凝灰岩-レベルコンクリート)



第2-2図 (11) 付着力試験後の破断面の状況  
(凝灰岩-レベルコンクリート)

	写真	スケッチ
試験体側		
岩盤側		

第 2-2 図 (12) 付着力試験後の破断面の状況  
(凝灰岩-レベルコンクリート)



設定付着力に関する統計的な考察について

1. 概要

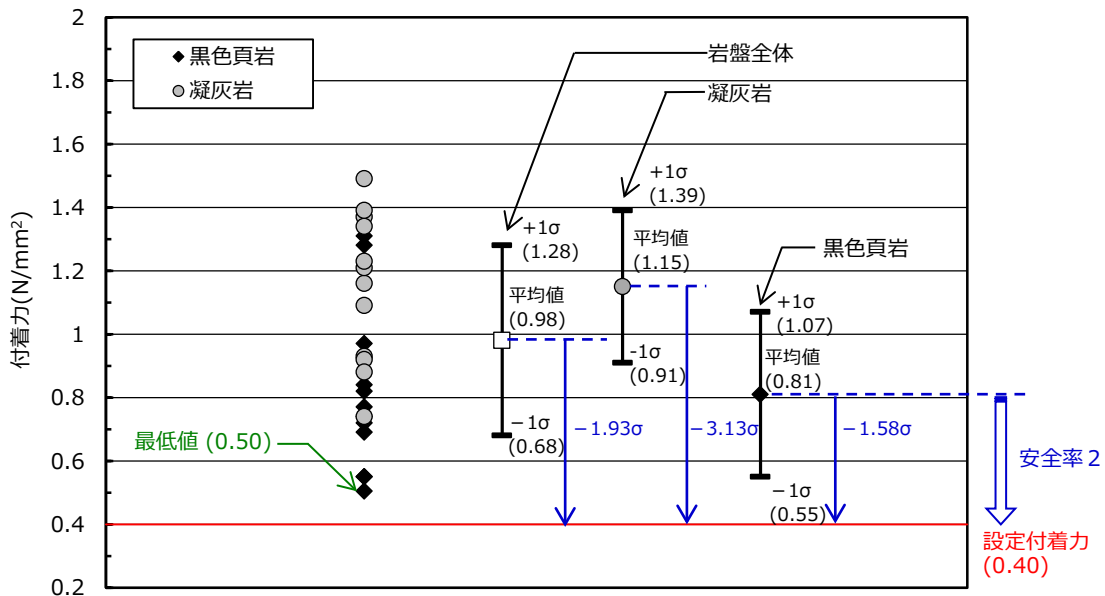
今回設定した付着力について統計的な観点も含めた考察を行う。

2. 岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験結果と設定付着力の関係

第2-1図に岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験結果と設定付着力の関係を示す。

設定付着力 ( $0.40\text{N/mm}^2$ ) は、平均値の小さい黒色頁岩の平均値 ( $0.81\text{N/mm}^2$ ) に対して  $-1.58\sigma$  に相当する。参考として、凝灰岩の平均値 ( $1.15\text{N/mm}^2$ ) に対して  $-3.13\sigma$ ，黒色頁岩と凝灰岩を合わせた全体の平均値 ( $0.98\text{N/mm}^2$ ) に対して  $-1.93\sigma$  となる。

なお、試験結果のばらつきについて、岩種毎に評価した場合は試験によるものであるが、岩盤全体として評価した場合には試験によるものと岩種の違いによるものが含まれている。



第2-1図 岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験の結果と設定付着力の関係

試験地盤と建物直下地盤の同等性について

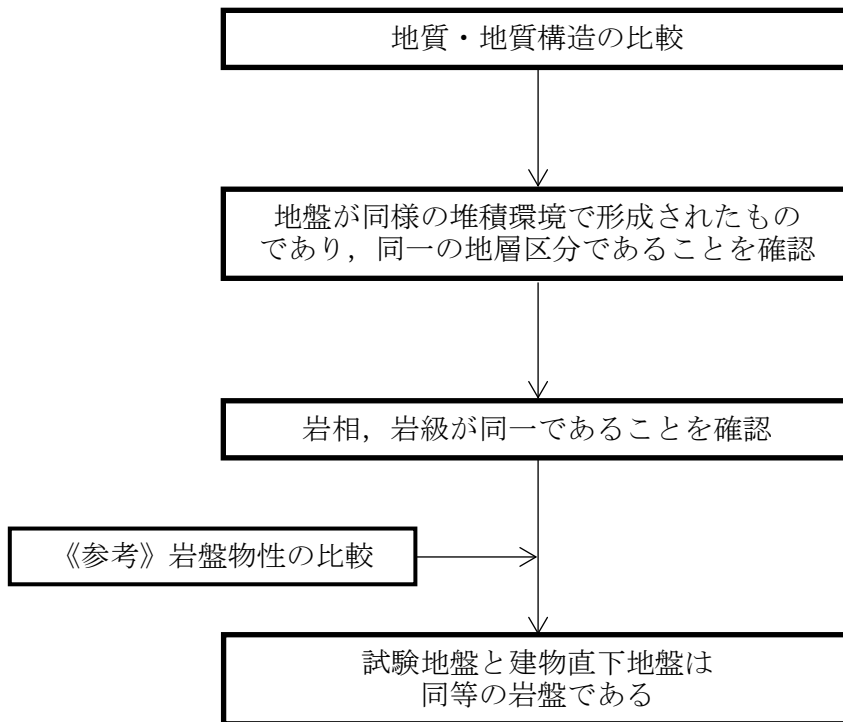
1. 概要

試験地盤は、建物直下地盤から離れているため、両者の同等性を確認し試験地盤における付着力試験結果を基に設定した付着力を建物直下地盤に適用することの妥当性を以下に示す。

2. 検討方法

試験地盤と建物直下地盤の同等性について、地質・地質構造の観点から比較を行う。また、参考に岩盤物性の観点からも比較を行う。

試験地盤と建物直下地盤の同等性確認の流れを第2-1図に示す。



第2-1図 試験地盤と建物直下地盤の同等性確認の流れ

### 3. 試験地盤と建物直下地盤の地質・地質構造の比較

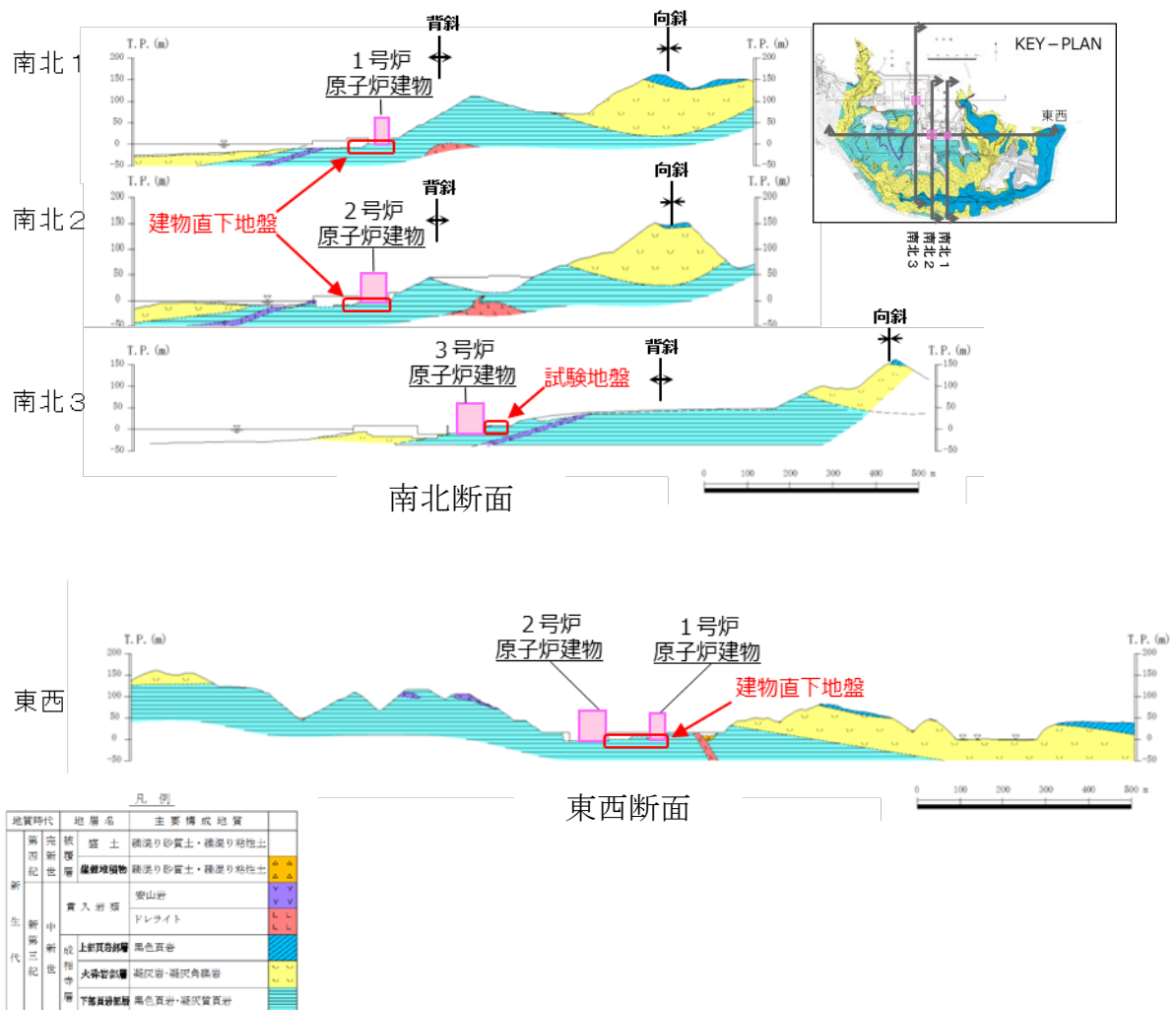
#### 3.1 敷地地盤について

敷地地盤における地質断面図を第3-1図に示す。また、2号炉エリア（1号炉エリア含む）及び3号炉エリアの地質・地質構造を補足資料-3に示す。

敷地地盤は、新第三紀中新世の堆積岩類から成る成相寺層と貫入岩類から構成されており、2号炉及び3号炉原子炉建物基礎地盤周辺は北に向かって約10～30°傾斜している。

これまでのボーリング調査の結果、成相寺層中において、連続性の高い堆積層（フローユニット）が、2号炉エリア（1号炉エリア含む）から3号炉エリアまで連続していることを確認しており、試験地盤及び建物直下地盤を構成する地質は、いずれもこの連続性の高い堆積層の上位に位置し、同一の「下部頁岩部層」に区分される。

このことから、試験地盤及び建物直下地盤の地質は、同様の堆積環境で形成されたものであり、岩相及び岩種が同一であれば、両者の岩盤は同等であると判断する。



第3-1図 敷地地盤における地質断面図

### 3.2 試験地盤と建物直下地盤の岩相及び岩級について

試験地盤と建物直下地盤の岩相及び岩級の比較を行う。

#### (1) 岩相の比較

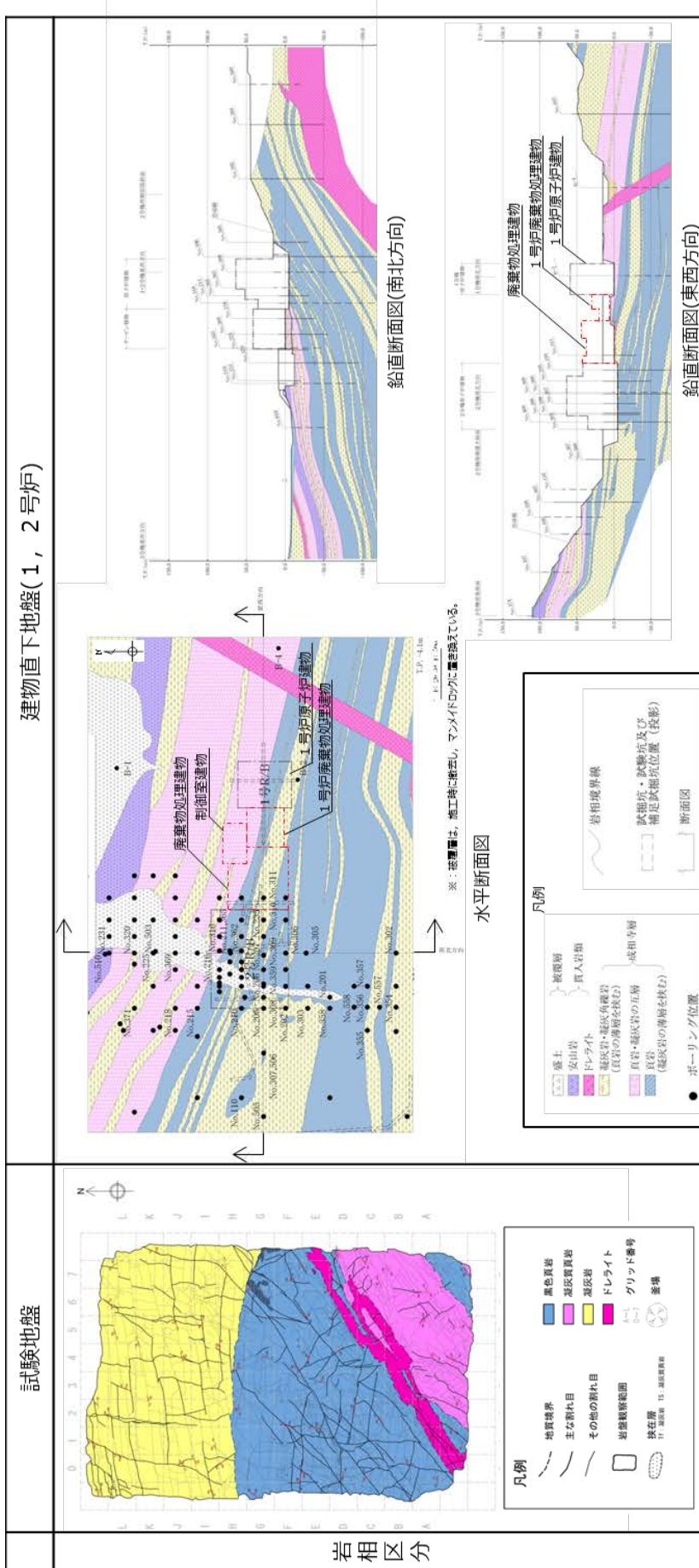
試験地盤と建物直下地盤における岩相の比較を第3-2図に示す。

試験地盤は黒色頁岩及び凝灰岩で構成されており、建物直下地盤は試験地盤と同様に黒色頁岩、凝灰岩及びこれらの互層が広く分布している。

また、試験地盤が局所的であるため、試験地盤を含む建物直下地盤（3号炉）及び原子炉建物南側に隣接する原子炉建物南側地盤における岩相区分の比較を行う。第3-3図にそれぞれの地盤における岩相区分及び位置関係を示す。

いずれの地盤においても主に黒色頁岩及び凝灰岩から構成されている。

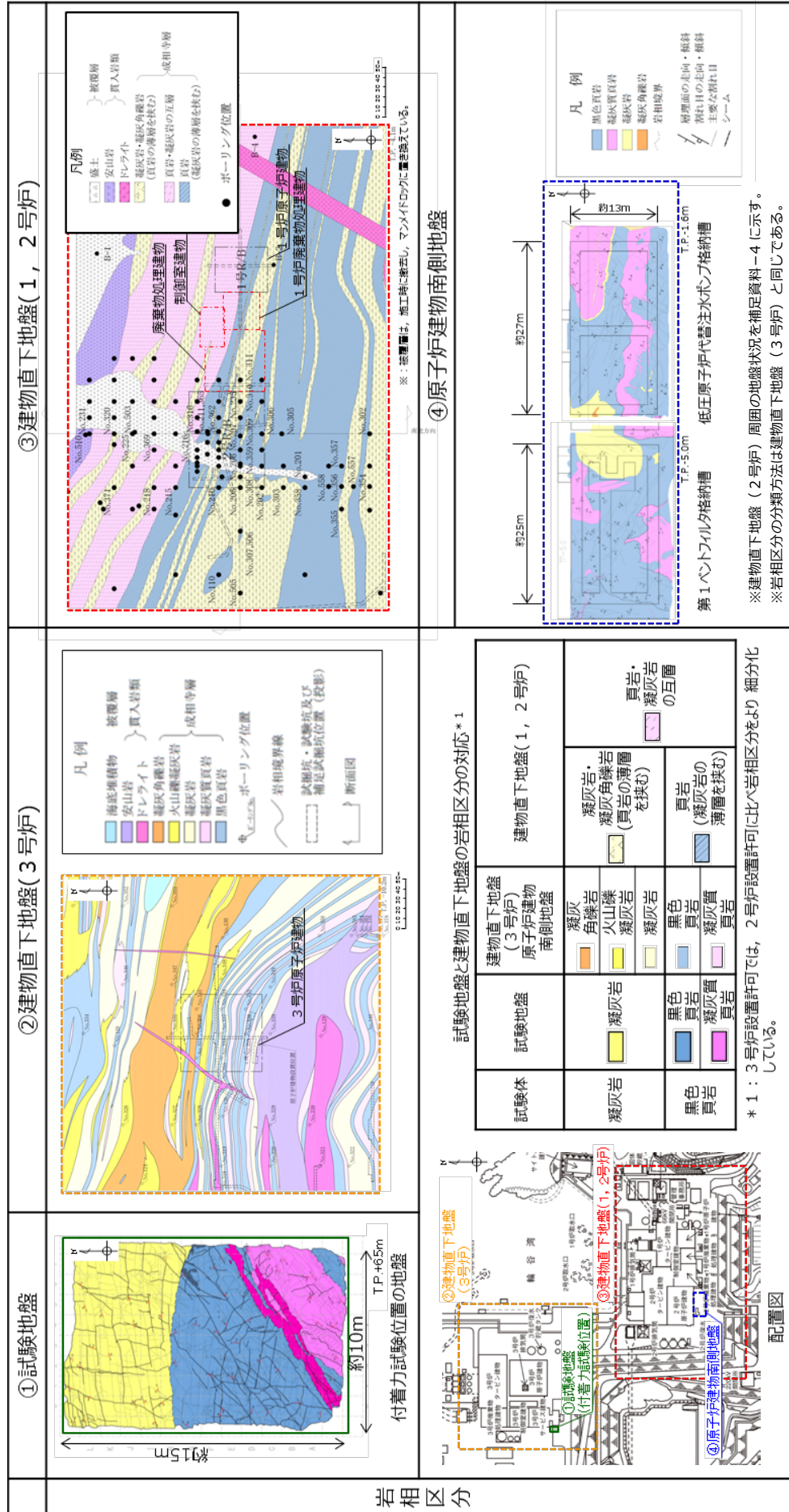
第 3-2 図 試験地盤と建物直下地盤における岩相の比較



試験地盤と建物直下地盤の岩相区分の対応

試験体	試験地盤	建物直下地盤(1, 2号炉)
凝灰岩	凝灰岩	凝灰岩・凝灰角礫岩 (頁岩の薄層を挟む)
黒色 頁岩	黒色頁岩 凝灰質頁岩	頁岩 凝灰岩の薄層を挟む
		頁岩・凝灰岩 の互層

第3-3 図 試験地盤と建物直下地盤における岩相区分の比較及び位置関係



## (2) 岩級の比較

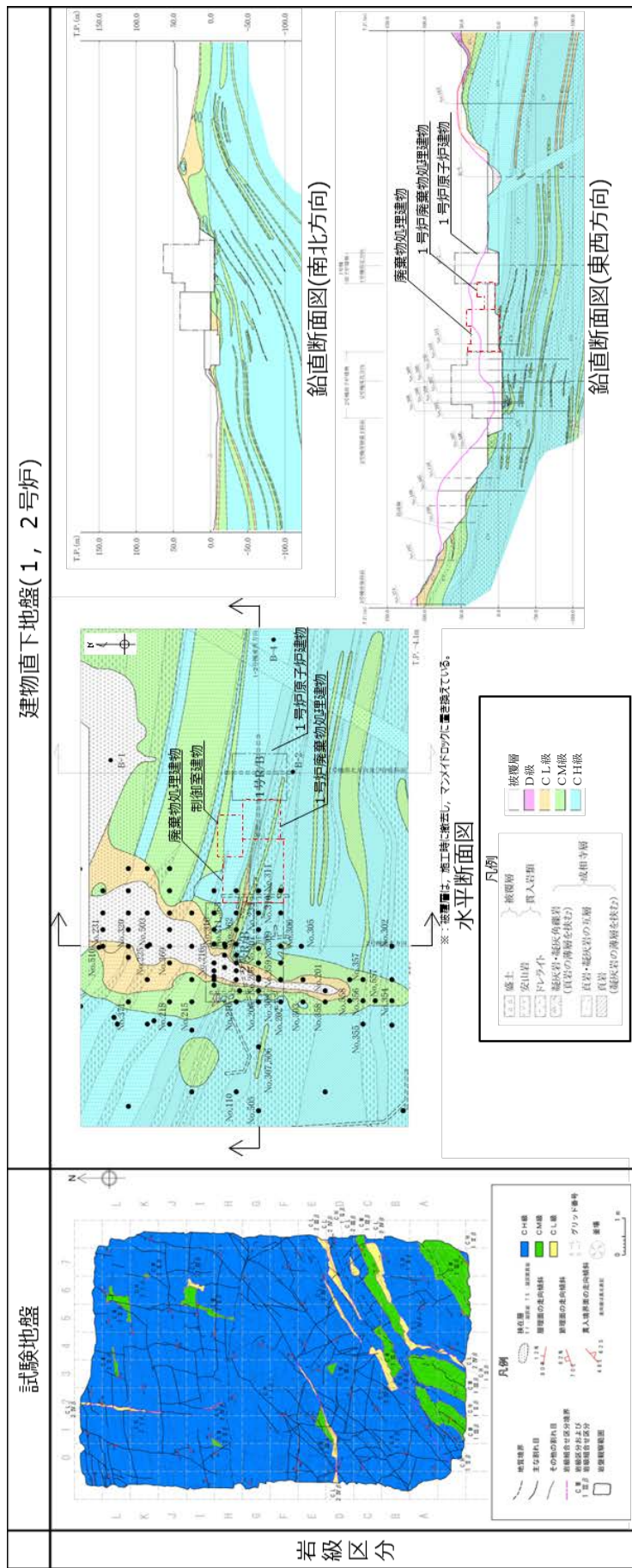
試験地盤と建物直下地盤における岩級区分の比較を第3-4図に示す。

試験地盤における岩級は主にCH級であり、建物直下地盤における岩級は試験地盤と同様に主にCH級である。

また、試験地盤が局所的であるため、試験地盤を含む建物直下地盤(3号炉)及び原子炉建物南側に隣接する原子炉建物南側地盤における岩級区分の比較を行う。第3-5図にそれぞれの地盤における岩級区分及び位置関係を示す。

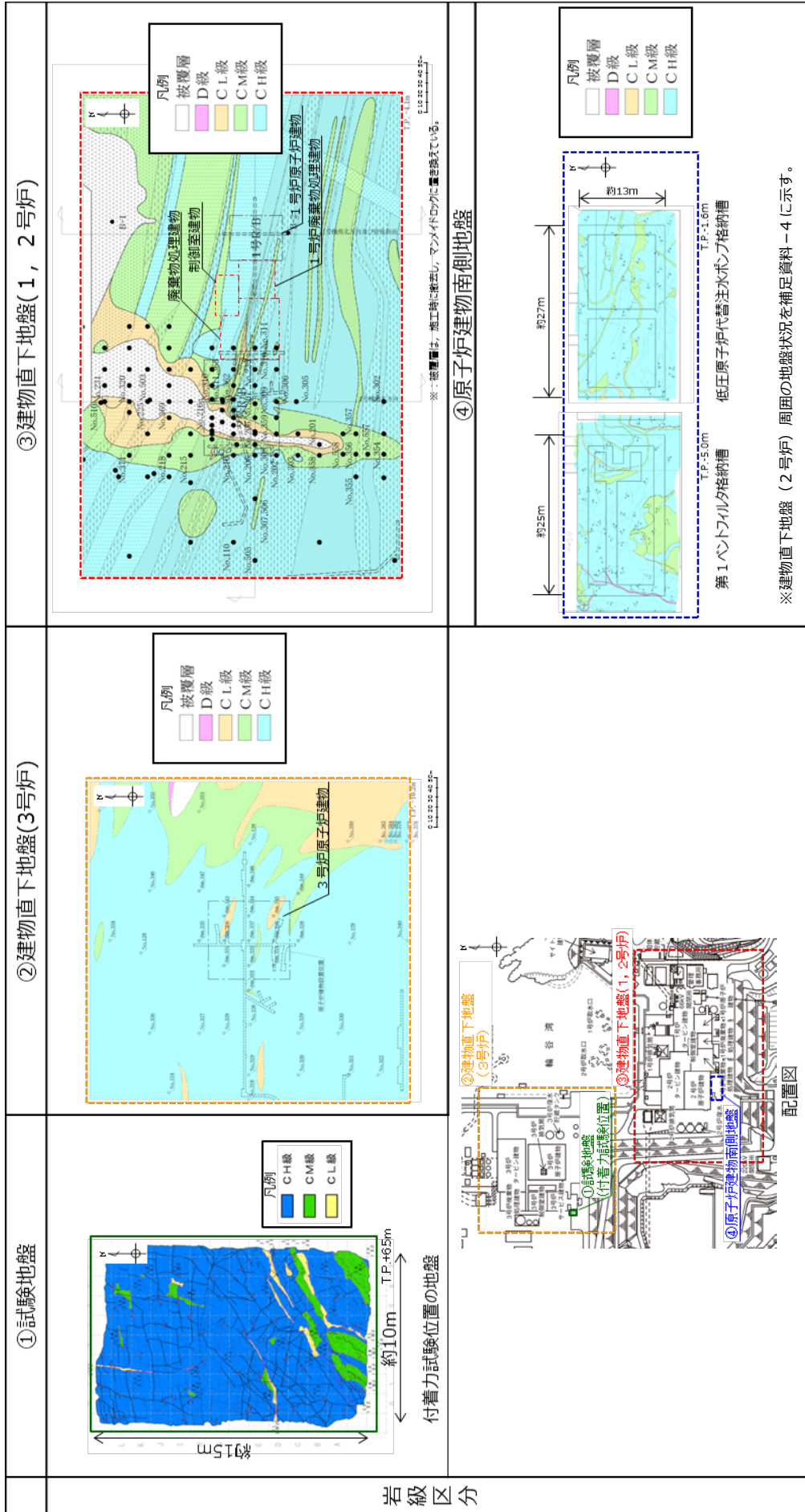
いずれの地盤においても岩級は主にCH級である。

第3-4図 試験地盤と建物直下地盤における岩級の比較





第3-5 図 試験地盤と建物直下地盤における岩級区分の比較及び位置関係



※ 建物直下地盤 (2号炉) 周囲の地盤状況を補足資料-4 に示す。

#### 4. 試験地盤と建物直下地盤の岩盤物性値の比較

参考として、試験地盤と建物直下地盤（2号炉）の岩盤物性値の比較を行う。

岩盤物性値については、「JNES報告書」によると、「直接引張試験による付着力は岩盤の圧裂引張強度の順と同じ傾向となった。<sup>注1</sup>」とされていることから、付着力は岩盤の圧裂引張強度と関係性があると判断し、ここでは試験地盤と建物直下地盤（2号炉）における圧裂引張強度<sup>注2</sup>の比較を行う。併せて3号炉原子炉建物直下地盤における圧裂引張強度<sup>注3</sup>も示す。

第4-1図に試験地盤及び建物直下地盤（2号炉及び3号炉）における圧裂引張強度の比較を示す。

黒色頁岩、凝灰岩とも試験地盤の圧裂引張強度の平均値は、建物直下地盤（2号炉）の圧裂引張強度の平均値と同程度であり、試験地盤の個々の圧裂引張強度も建物直下地盤（2号炉）の $\pm 1\sigma$ の範囲内に概ね収まっていることから、試験地盤と建物直下地盤（2号炉）は同等の岩盤である。また、3号炉建物直下地盤の値とも同程度であることを確認した。

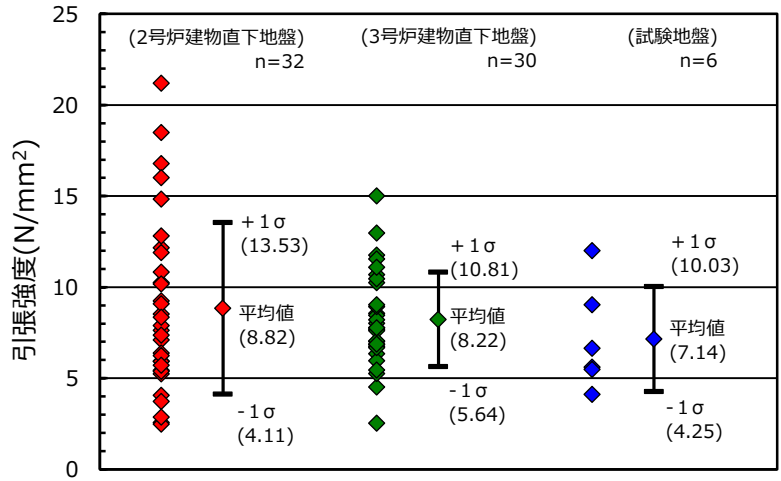
注1：「JNES報告書」では、岩盤物性試験として、一軸圧縮強度、圧裂引張強度、超音波伝播速度を計測しており、このうち圧裂引張強度の順と付着力の順が同じ傾向（砂岩>花崗岩>凝灰岩）となったことが示されている。

注2：島根2号炉原子炉建物位置のボーリング孔から採取した試料による試験。

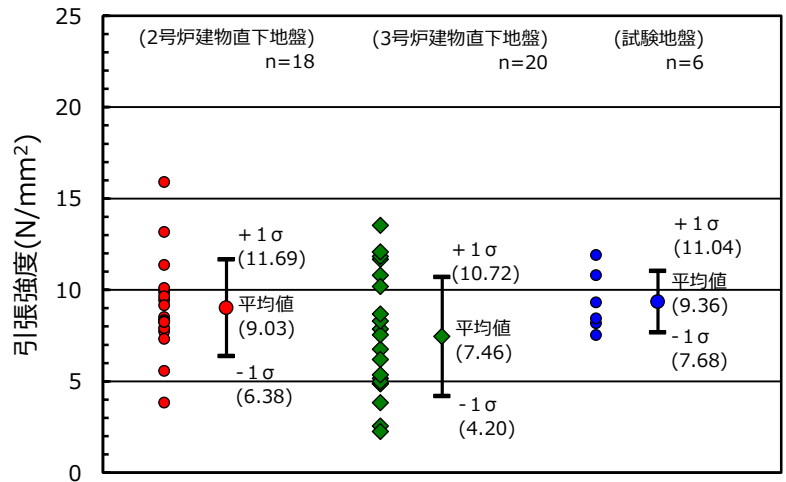
（島根原子力発電所原子炉設置許可変更申請書（平成25年12月25日））

注3：島根3号炉原子炉建物位置のボーリング孔から採取した試料による試験。

（島根原子力発電所原子炉設置許可変更申請書（平成17年4月26日））



第4-1図(1) 試験地盤及び建物直下地盤(2号炉及び3号炉)における岩盤の圧裂引張強度の比較(黒色頁岩)



第4-1図(2) 試験地盤及び建物直下地盤(2号炉及び3号炉)における岩盤の圧裂引張強度の比較(凝灰岩)

## 5. まとめ

試験地盤と建物直下地盤の同等性を地質・地質構造の観点から確認した。

試験地盤と建物直下地盤の地質が同様の堆積環境で形成されたものであり、同一の地層区分であることを確認した。

試験地盤と建物直下地盤の岩相は主に黒色頁岩及び凝灰岩で構成されていること、及び岩級はCH級であり、岩相及び岩級が同一であることを確認した。

また、参考として、試験地盤と建物直下地盤の岩盤物性値（圧裂引張強度）を比較し、同程度であることを確認した。

以上より、試験地盤と建物直下地盤は同等のものであり、試験地盤における付着力試験結果を基に設定した付着力を建物直下地盤に適用することは妥当であると判断する。

## 既工認実績における付着力試験方法との比較

島根サイトと既工認実績における付着力試験方法を第1表に示す。なお、参考に「JNES報告書」及び地盤工学会の「岩盤の原位置一軸引張り試験方法」の試験方法も同表に示す。

第1表 島根サイトと既工認実績における付着力試験方法の比較

サイト	試験体形状	接合面の凹凸の状態	レベルコンクリート		対象岩種等	標本数	
			圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	養生日数			
島根	直円柱 <sup>①</sup> (φ10 cm)	10mm 程度 <sup>②</sup>	18 <sup>③</sup>	7日 <sup>④</sup>	黒色頁岩, 凝灰岩	24 <sup>⑤</sup> (1岩種当り12)	
既工認実績	高浜	直四角柱 (10 cm×10 cm)	10～20mm 程度	15	27日	流紋岩	27
	大飯	直四角柱 (10 cm×10 cm)	10～20mm 程度	15	28日	石英閃緑岩	19
	美浜	直四角柱 (10 cm×10 cm)	10～20mm 程度	15	28日	花崗岩	15(現地)+25(室内)
	川内*1	直四角柱 (150 cm×150 cm)	木ごて仕上げ	15 30	62～68日 31～37日	レベルコンクリート 基礎コンクリート	3
参考	JNES 報告書	直四角柱 (10 cm×10 cm)	10～20mm 程度	15	28日	花崗岩, 砂岩, 凝灰岩	36(1岩種当り12)
		直四角柱 (150 cm×150 cm)	粗面(80mm 程度) 平滑面(20mm 程度)	15	28日	花崗岩	6(1水準当り3)
	地盤 工学会	直円筒, 直円柱, 直四角柱 (100～1000mm)	規定なし	規定なし	規定なし	軟岩から硬岩まで を対象	3以上
<p>《既工認実績と異なる方法を採用した理由》</p> <p>① コンクリートの充填性を考慮し試験体形状を直円柱とした。なお、地盤工学会の試験方法では直円柱も採用されている。</p> <p>② 「JNES報告書」によると、「岩盤表面の凹凸状況の差が接合面の剥離性状にほとんど影響を及ぼしていないことが認められた。」とあることから、接合面の凹凸による付着力への影響は軽微であると考え10mm程度に設定した。</p> <p>③ 市中生コンプラントで調達可能で最も低いF<sub>c</sub>=18N/mm<sup>2</sup>とした。</p> <p>④ 養生期間を短縮するため、早強コンクリート(調合材齢7日)を採用した。</p> <p>⑤ 標本数は、「JNES報告書」を参考に1岩種当り12個とした。なお、地盤工学会の試験方法では3個以上とされている。</p>							

\*1：「JNES報告書」のレベルコンクリートと基礎コンクリート間の付着力試験結果を用いている。

注：他サイトの情報等に係る記載内容については、公開資料を基に当社の責任において記載したものです。

## 既工認実績における設定付着力との比較

島根サイトと既工認実績における設定付着力の比較を第1表に示す。

島根サイトの建物直下地盤は主に黒色頁岩、凝灰岩及びこれらの互層から構成されており、実際の建物直下地盤における黒色頁岩と凝灰岩の構成割合を定量的に確認できないこと、建物毎でその構成割合が異なることから、付着力の設定には、岩盤全体の平均値(0.98N/mm<sup>2</sup>)ではなく、保守的に値の小さい黒色頁岩の平均値(0.81N/mm<sup>2</sup>)に基づき設定した。また、物性値のばらつき、原位置試験の不確実性を踏まえて、平均値をそのまま用いるのではなく、保守性を考慮し、平均値に2倍の安全率を考慮し、かつ試験結果の最低値を下回るよう設定した。

よって、島根サイトの設定付着力は、岩盤全体の平均値(0.98N/mm<sup>2</sup>)に対して2倍以上の余裕があることから、既工認実績と比較しても遜色なく、試験結果に対して十分な保守性を考慮した値である。

第1表 島根サイトと既工認実績における設定付着力の比較

サイト	建物	採用する地震 応答解析モデル (基礎浮上り評価法)	付着力の設定			
			試験の平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	試験の 最小値 (N/mm <sup>2</sup> )	設定 付着力 (N/mm <sup>2</sup> )	保守性の考え方等
島根	廃棄物処理建物	ジョイント要素を用いた3次元FEMモデル*1	1.15(凝灰岩) 0.81(黒色頁岩)	0.50	0.40	2種の岩種のうち平均値の小さい黒色頁岩の平均値に対して2倍の安全率を考慮するとともに最小値0.50を下回るよう設定
	制御室建物	SRモデル*2 (浮上り線形地震応答解析)				
既工認実績	高浜	中間建屋	0.92	0.55	0.3	平均値に対して十分な余裕を考慮するとともに最小値0.55を下回るよう設定
	大飯	制御建屋	0.71	0.44	0.3	平均値に対して十分な余裕を考慮するとともに最小値0.44を下回るよう設定
	美浜	原子炉建屋	0.91	0.57	—	補足説明資料において工認ケースとの比較ケース(側面回転ばね非考慮モデル)に平均値(0.91N/mm <sup>2</sup> )を設定*3
	川内	ディーゼル建屋, 主蒸気管室建屋	基礎固定モデル*2	0.63	0.50	0.18 (必要付着力)

\*1：ジョイント要素に付着力を考慮。

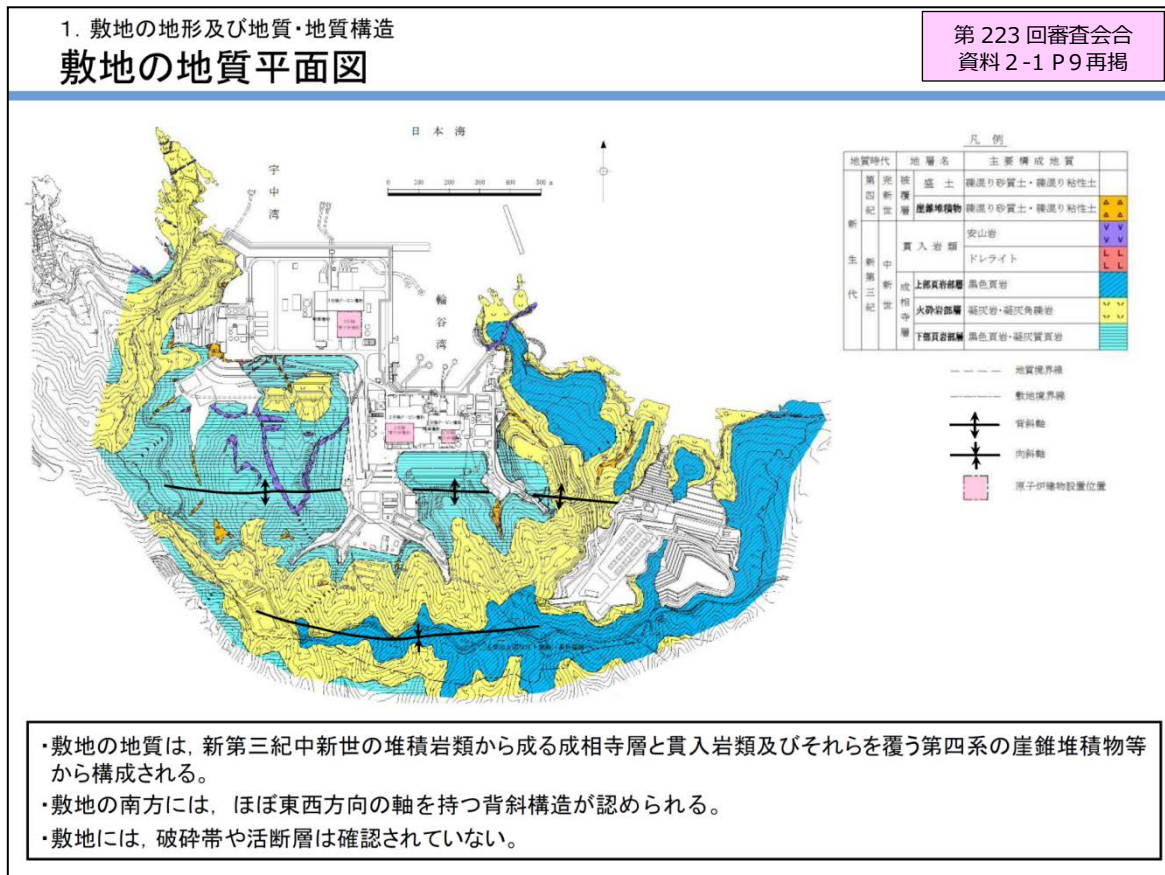
\*2：基礎浮上りが発生しないために必要な付着力が設定付着力を超えないことを確認。

\*3：工認ケースにおいては、付着力を考慮していない。

注：他サイトの情報に係る記載内容については、公開資料を基に当社の責任において記載したものです。

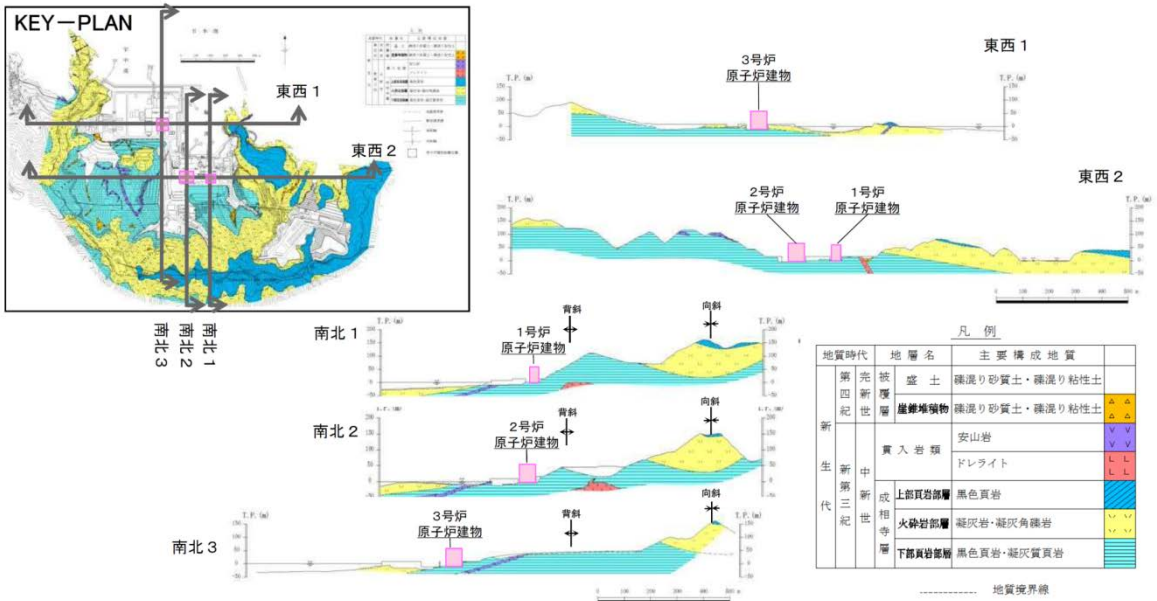
島根原子力発電所 敷地の地質・地質構造について  
(第 223 回審査会合資料再掲)

以下に、島根原子力発電所の 2 号炉エリア（1 号炉エリア含む）及び 3 号炉エリアの地質・地質構造を示す（第 223 回審査会合，資料 2-1 の再掲）。



1. 敷地の地形及び地質・地質構造  
敷地の地質断面図

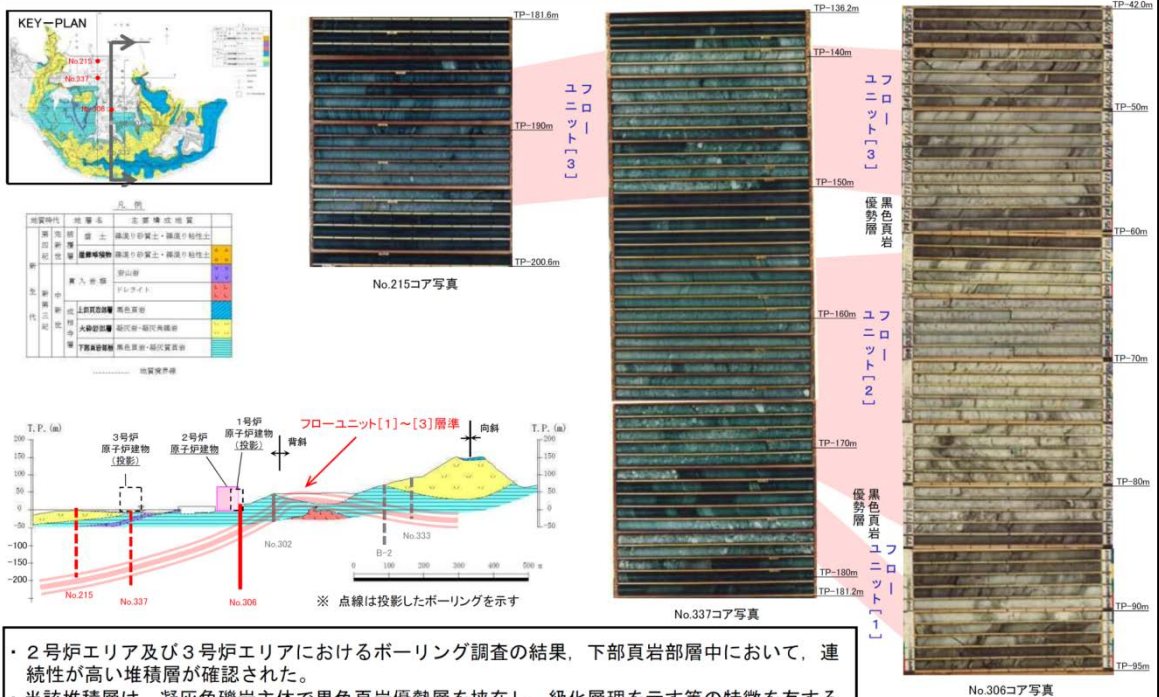
第 223 回審査会合  
資料 2-1 P10 再掲



- 敷地に分布する成相寺層は、下位より下部頁岩部層、火砕岩部層、上部頁岩部層の3つの部層に区別される。
- 1～3号炉原子炉建物基礎地盤においては、主として黒色頁岩、凝灰質頁岩より成る「下部頁岩部層」が広く分布する。

1. 敷地の地形及び地質・地質構造  
敷地に分布する鍵層①

第 223 回審査会合  
資料 2-1 P11 再掲

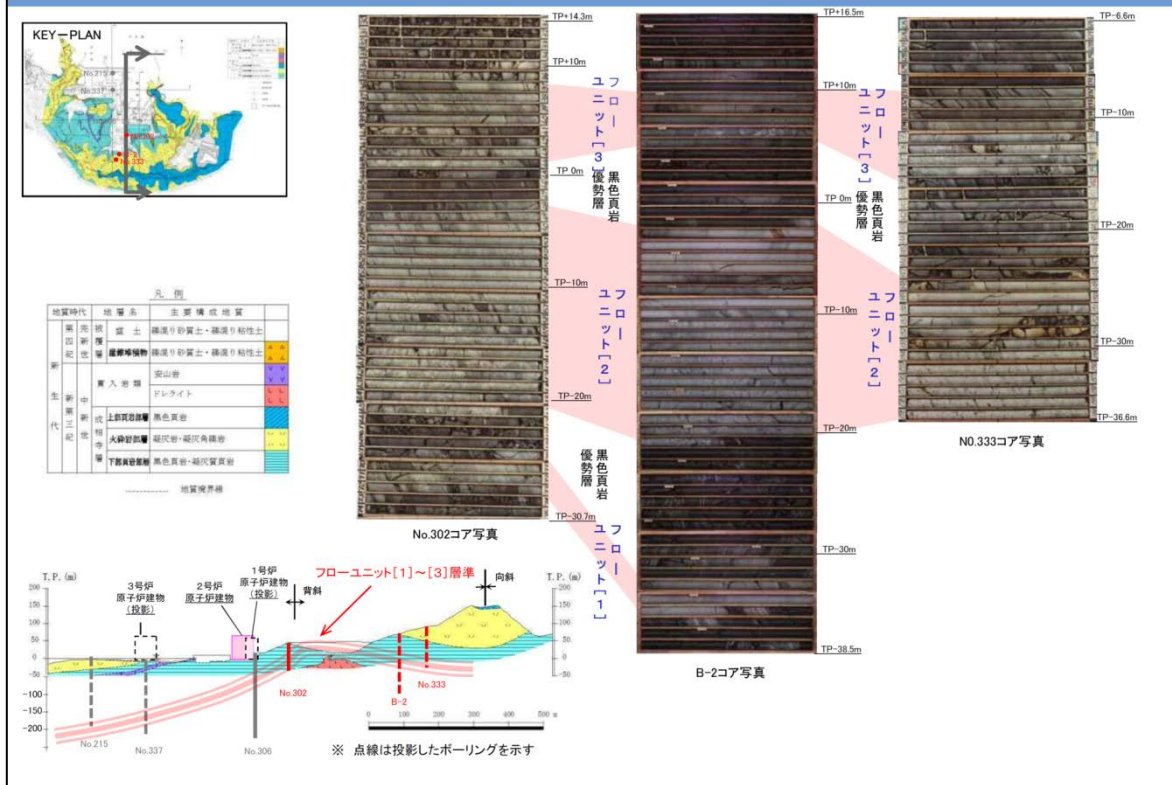


- 2号炉エリア及び3号炉エリアにおけるボーリング調査の結果、下部頁岩部層中において、連続性が高い堆積層が確認された。
- 当該堆積層は、凝灰角礫岩主体で黒色頁岩優勢層を挟み、級化層理を示す等の特徴を有することから、水中火砕流により堆積したものと考えており、フローユニットと呼称している。
- 当該フローユニットは、地層の対比がし易いため、敷地の地質構造把握において鍵層となる。



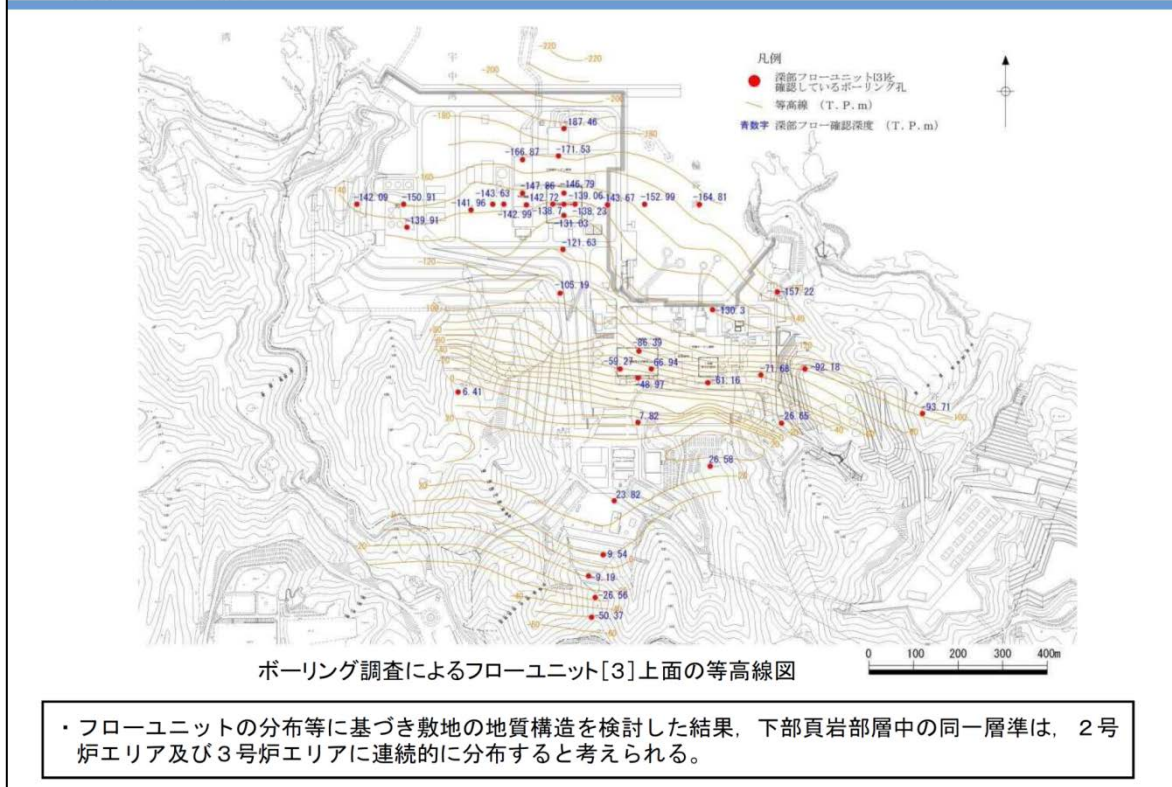
1. 敷地の地形及び地質・地質構造  
敷地に分布する鍵層②

第 223 回審査会合  
資料 2-1 P12 再掲



1. 敷地の地形及び地質・地質構造  
鍵層の連続性

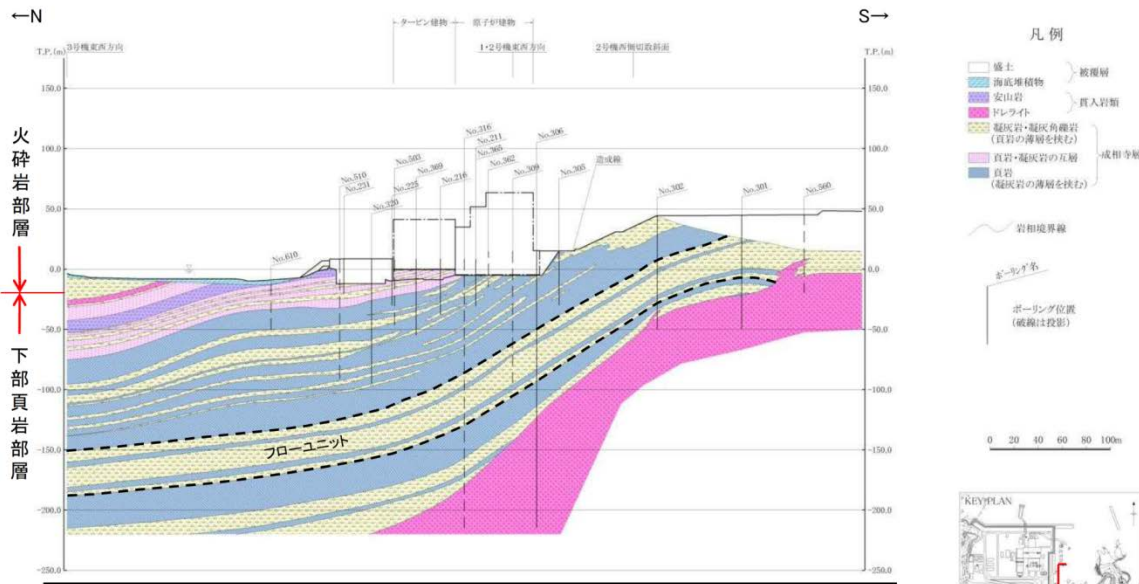
第 223 回審査会合  
資料 2-1 P13 再掲



1. 敷地の地形及び地質・地質構造

地質鉛直断面図(2号炉原子炉建物基礎地盤)

第 223 回審査会合  
資料 2-1 P15 再掲



- ・2号炉原子炉建物基礎地盤には、主として下部頁岩部層、貫入岩類が分布する。
- ・下部頁岩部層は、頁岩(黒色頁岩及び凝灰質頁岩)を主体とし、凝灰岩及び凝灰角礫岩並びにこれらの互層から構成される。
- ・成相寺層の構造は、概ね西北西-東南東の走向を示し、北へ向かって約10° ~ 30° 傾斜している。

1. 敷地の地形及び地質・地質構造

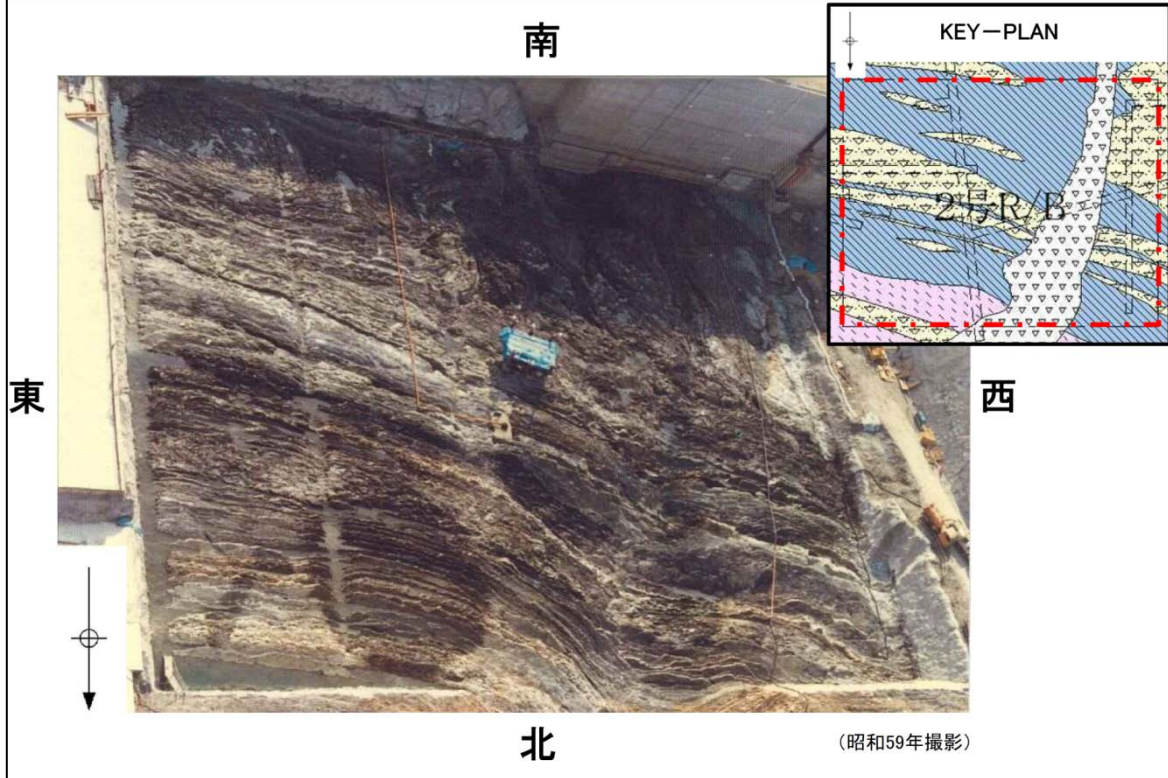
地質水平断面図(1・2号炉原子炉建物基礎地盤)

第 223 回審査会合  
資料 2-1 P17 再掲

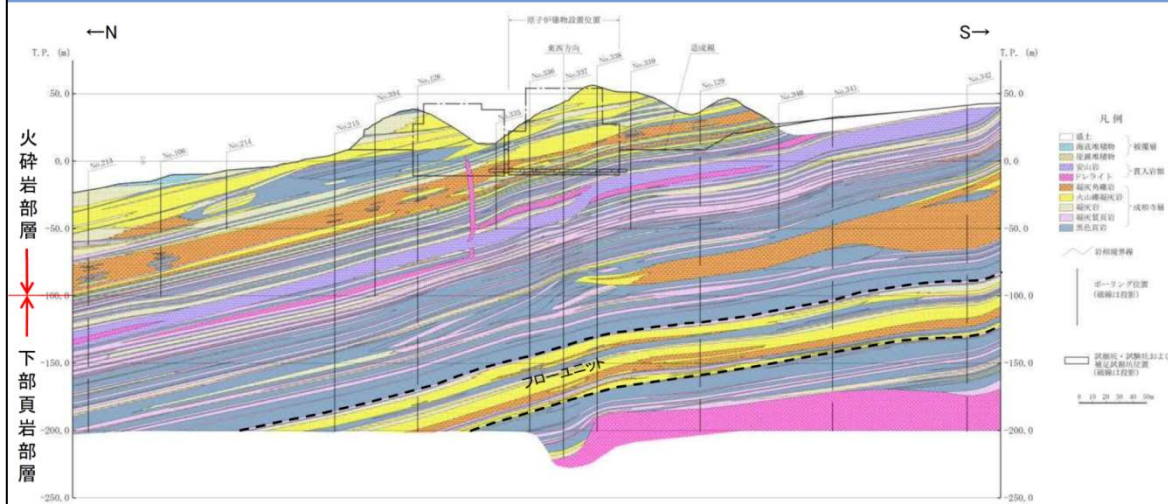


- ・成相寺層の構造は、概ね西北西-東南東の走向を示す。

底面付近写真(2号炉原子炉建物基礎地盤)



地質鉛直断面図(3号炉原子炉建物基礎地盤)



- ・3号炉原子炉建物基礎地盤には、成相寺層(下部頁岩部層、火砕岩部層)及び貫入岩類が分布する。
- ・下部頁岩部層は、頁岩(黒色頁岩及び凝灰質頁岩)を主体とし、凝灰岩、火山礫凝灰岩及び凝灰角礫岩並びにこれらの互層から構成される。
- ・火砕岩部層は、主として凝灰岩、火山礫凝灰岩及び凝灰角礫岩から構成される。
- ・成相寺層の構造は、ほぼ東西方向の走向を示し、北へ向かって約10°～20° 緩く傾斜している。



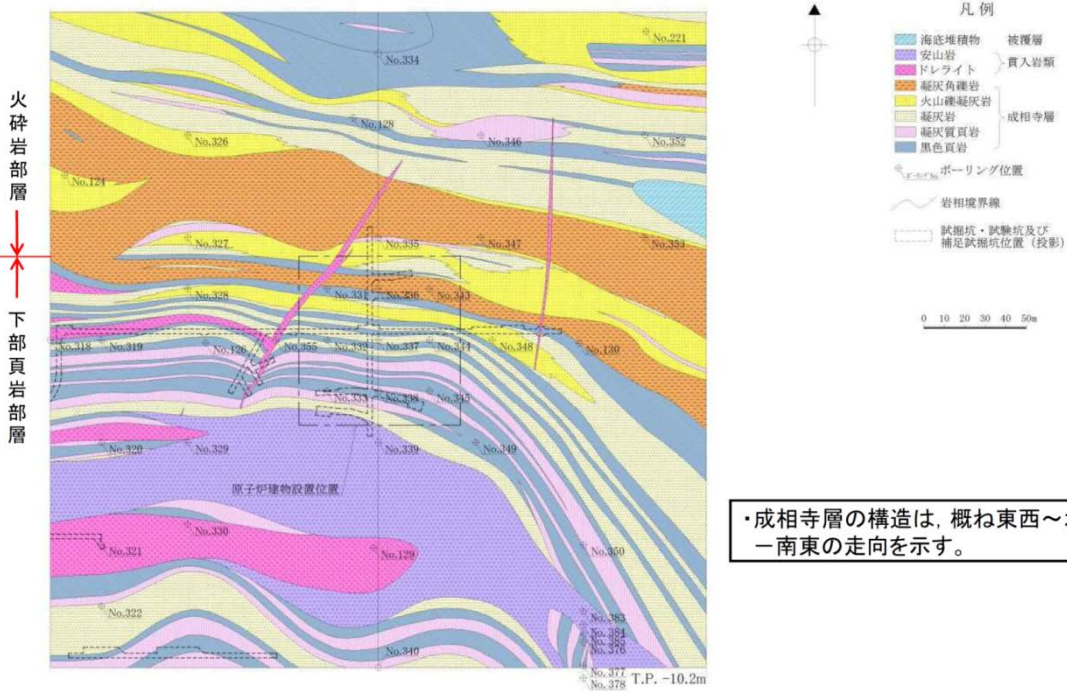
※ BTV解析結果は補足説明資料「BTV解析による見掛けの傾斜(3号炉南北断面)」参照

注：3号炉の地質断面図では、2号炉の地質断面図で互層として区分していた地質を細分している。

1. 敷地の地形及び地質・地質構造

地質水平断面図(3号炉原子炉建物基礎地盤)

第 223 回審査会合  
資料 2-1 P21 再掲



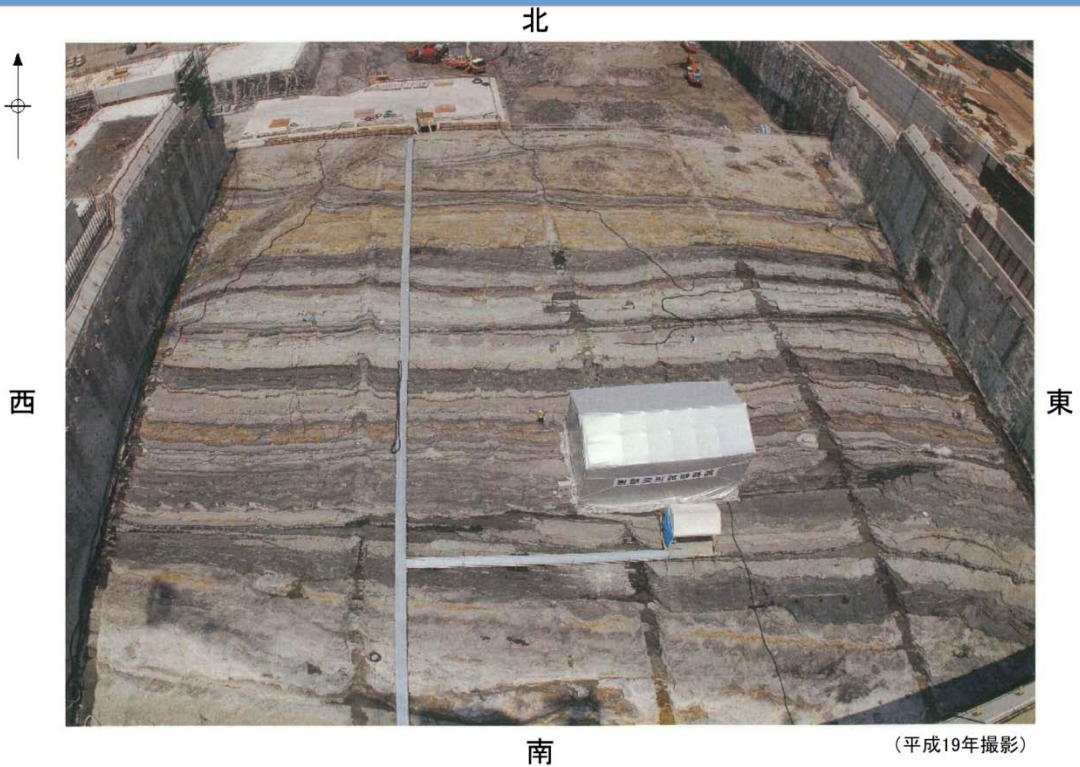
・成相寺層の構造は、概ね東西～北西-南東の走向を示す。

注：3号炉の地質断面図では、2号炉の地質断面図で互層として区分していた地質を細分している。

1. 敷地の地形及び地質・地質構造

底面付近写真(3号炉原子炉建物基礎地盤)

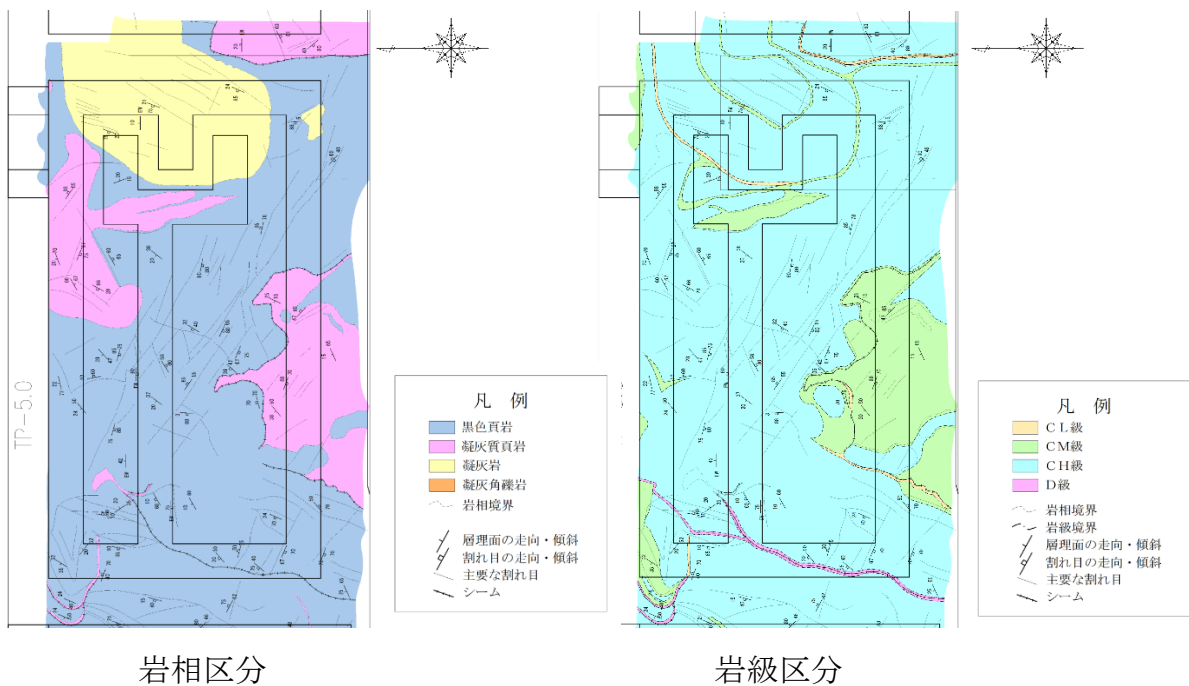
第 223 回審査会合  
資料 2-1 P22 再掲



建物直下地盤周囲の地盤状況について

建物直下地盤周囲の地盤状況として、原子炉建物南側に隣接した土木構造物（第1ベントフィルタ格納槽及び低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽）の設置地盤における岩相区分及び岩級区分を第1図に示す。

建物直下地盤周囲における岩相は黑色頁岩（一部凝灰質頁岩）及び凝灰岩が確認され、岩級は主にCH級であることから、試験地盤は建物直下地盤と同等の地盤である。



岩相区分

岩級区分



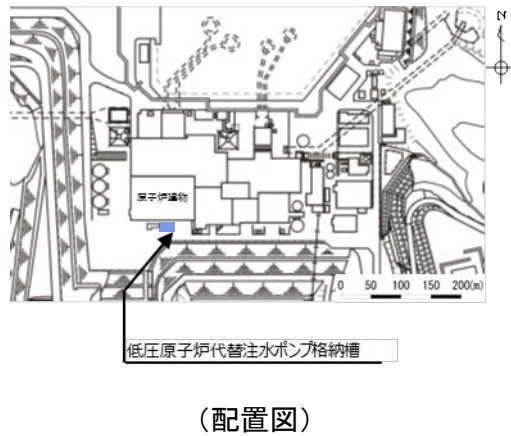
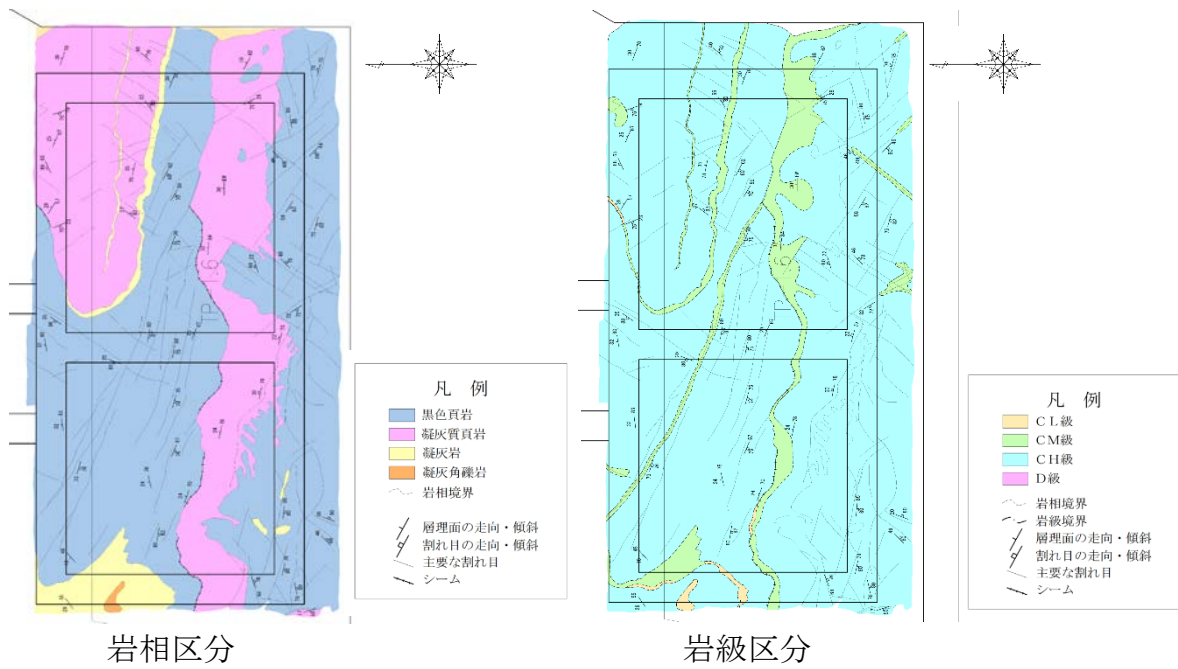
掘削面 (T. P. -5.0m)

(第1ベントフィルタ格納槽)



(配置図)

第1図(1) 原子炉建物南側に隣接する土木構造物の設置地盤における岩相区分及び岩級区分



※：岩相区分及び岩級区分と方位を合わせるため、  
写真を180°回転させている。

掘削面 (T. P. -1.6m)

(低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽)

第1図(2) 原子炉建物南側に隣接する土木構造物の設置地盤における  
岩相区分及び岩級区分

# 島根原子力発電所2号炉

土木構造物の解析手法及び  
解析モデルの精緻化について

## 1. 屋外重要土木構造物等<sup>\*</sup>の評価手法の概要

屋外重要土木構造物等の耐震安全性評価について、島根原子力発電所2号炉の今回の工事計画認可申請書（以下「今回工認」という。）では、屋外重要土木構造物等の変位や変形をより実状に近い応答に精緻化することを目的に、評価手法の高度化として、解析手法と減衰定数の変更及び隣接構造物のモデル化を予定している。島根原子力発電所2号炉の建設時の工事計画認可申請書（1984年2月）（以下「既工認」という。）と今回工認との手法の比較を第5-1-1表に示す。

※設計基準対象施設のうち屋外重要土木構造物、重大事故等対処施設のうち土木構造物及び波及的影響を及ぼすおそれのある施設のうち土木構造物を「屋外重要土木構造物等」という。

既工認との相違点のうち、解析手法として適用している「時刻歴応答解析、限界状態設計法」は、新規制基準施行後の工事計画認可にて適用例がある手法である。

なお、コンクリート強度は、既工認と同じく設計基準強度を採用する方針とする。

評価対象設備について、要求性能、解析手法、解析モデル及び許容限界を整理した。既工認の整理結果を第5-1-2表に、今回工認の整理結果を第5-1-3表に示す。また、評価対象設備の配置図を第5-1-1図に示す。

既工認では、各評価対象施設に求められる要求性能（支持性能、通水性能）を考慮し、構造部材の曲げについては終局強度、せん断については許容せん断力に対して妥当な裕度を持つことを確認することを基本としていた。

今回工認では、各評価対象施設に求められる要求性能（支持性能、通水性能、貯水性能、止水性能及び遮蔽性能）を考慮し、構造部材の曲げにおいては「限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ」、「圧縮ひずみ：コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ、主筋ひずみ：鉄筋の降伏強度に対応するひずみ」、「曲げ耐力」、「許容応力度」又は「全塑性モーメント」から、せん断においては「せん断耐力」又は「許容応力度」から適切に選定する。

第5-1-1表 既工認と今回工認との手法の比較

	解析手法	解析モデル	減衰定数	コンクリート強度	隣接構造物
既工認	時刻歴応答解析及び周波数応答解析 許容応力度法等	ばね質点系モデル及び地質データに基づく水平成層地盤モデル	構造物の減衰5%	設計基準強度	地盤としてモデル化
今回工認	時刻歴応答解析 限界状態設計法	地質データに基づくFEMモデル	構造物の減衰2% +履歴減衰	設計基準強度	等価剛性でモデル化
比較結果	●異なる	●異なる	●異なる	○同じ	●異なる
適用例	○あり	○あり	○あり	○あり	○あり



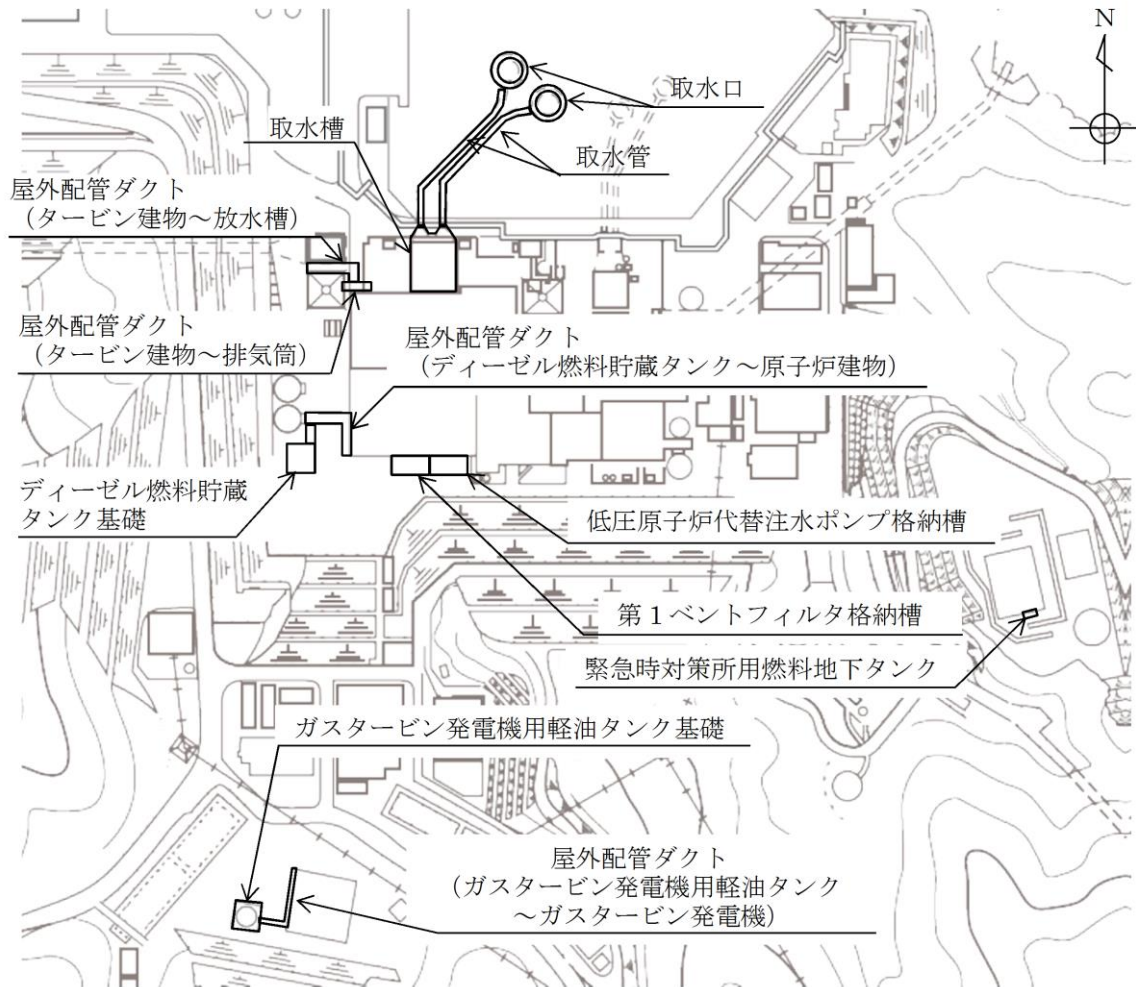
第 5-1-1-2 表 耐震評価条件整理一覧表 (既工認)

分類	設備名称	要求性能	要求性能に対する 目標性能	許容限界		解析手法	解析モデル
				曲げ	せん断		
設計基準対象施設のうち 屋外重要土木構造物	取水槽	通水性能 間接支持性能	終局状態に至らない	終局強度	許容せん断力	時刻歴応答解析	ばね質点系モデル
	屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)	間接支持性能	終局状態に至らない	終局強度	許容せん断力	周波数応答解析	地質データに基づく水平成層地盤モデル (1次元波動論による)

第5-1-3表 耐震評価条件整理一覧表（今回工認）

分類	設備名称	要求性能	要求性能に対する目標性能	許容限界		解析手法	解析モデル	
				曲げ	せん断			
設計基準対象施設のうち 屋外重要土木構造物	取水槽	通水性能	終局状態に至らない	限界層間変形角又は圧縮線 コンクリート限界ひずみ	せん断耐力	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	
		止水性能	鉄筋が降伏しない 発生せん断力がせん断耐力以下	圧縮ひずみ；コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ 主筋ひずみ；鉄筋の降伏強度に対応するひずみ	せん断耐力 層間変形角（面内）			
	支持性能	終局状態に至らない	限界層間変形角又は圧縮線 コンクリート限界ひずみ	せん断耐力	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル		
	支持性能	終局状態に至らない	限界層間変形角又は圧縮線 コンクリート限界ひずみ	せん断耐力	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル		
	支持性能	終局状態に至らない	限界層間変形角又は圧縮線 コンクリート限界ひずみ	せん断耐力	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル		
	支持性能	終局状態に至らない	限界層間変形角又は圧縮線 コンクリート限界ひずみ	せん断耐力	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル		
	支持性能	終局状態に至らない	限界層間変形角又は圧縮線 コンクリート限界ひずみ	せん断耐力	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル		
	通水性能	終局状態に至らない	許容応力度	許容応力度	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル		
	通水性能	終局状態に至らない	許容応力度	許容応力度	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル		
	支持性能 遮蔽性能	第1ベントフィルタ格納槽	支持性能 遮蔽性能	終局状態に至らない	限界層間変形角又は圧縮線 コンクリート限界ひずみ	せん断耐力	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル
重大事故等対処施設のうち 土木構造物※1	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	支持性能	終局状態に至らない	限界層間変形角又は圧縮線 コンクリート限界ひずみ	せん断耐力	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	
		貯水性能	鉄筋が降伏しない 発生せん断力がせん断耐力以下	圧縮ひずみ；コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ 主筋ひずみ；鉄筋の降伏強度に対応するひずみ	せん断耐力			
	緊急時対策所用燃料地下タンク	非常用発電装置に係る燃料の貯蔵※2	支持性能	鉄筋が降伏しない 発生せん断力がせん断耐力以下	圧縮ひずみ；コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ 主筋ひずみ；鉄筋の降伏強度に対応するひずみ	せん断耐力	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル
	ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	支持性能	終局状態に至らない	曲げ耐力	せん断耐力	時刻歴応答解析	【タンクモデル】水平；多軸多質点系 【曲げせん断棒モデル、鉛直；多質点系棒モデル】 【相互作用】SRモデル	
	屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）	支持性能	終局状態に至らない	限界層間変形角又は圧縮線 コンクリート限界ひずみ	せん断耐力	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	
	免震重要棟遮蔽壁	波及的影響	終局状態に至らない	壁；限界層間変形角又は圧縮線 コンクリート限界ひずみ	せん断耐力	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	
				杭基礎；全塑性モーメント	せん断耐力	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	
					—	時刻歴応答解析		

※1 設計基準対象施設と兼用する重要SA施設のうち、設計基準対象施設の評価手法と相違がない施設は設計基準対象施設の一覧表に代表して記載。  
※2 コンクリート躯体内側のライナ（鋼製タンク）においても要求性能を確保する設計とする（許容限界は許容応力度とする）。



第5-1-1 図 評価対象設備 配置図

貯水性能及び止水性能が要求される構造部材については、漏水が生じるような顕著な（部材を貫通するような）ひび割れが発生しないよう、目標性能としては鉄筋が降伏しないこと及び発生せん断力がせん断耐力以下になることが求められるため、構造部材の曲げ照査においては「コンクリート標準示方書[構造性能照査編]（土木学会，2002年制定）」において応力ひずみ関係として示された「圧縮ひずみ：コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ（ $2000\mu$ ），主筋ひずみ：鉄筋の降伏強度に対応するひずみ（ $1725\mu$ （SD345の場合）」に対して十分な安全余裕を持つことを確認する。また、せん断照査においては「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005）」に規定された「せん断耐力」に対して妥当な安全余裕を持つことを確認する。

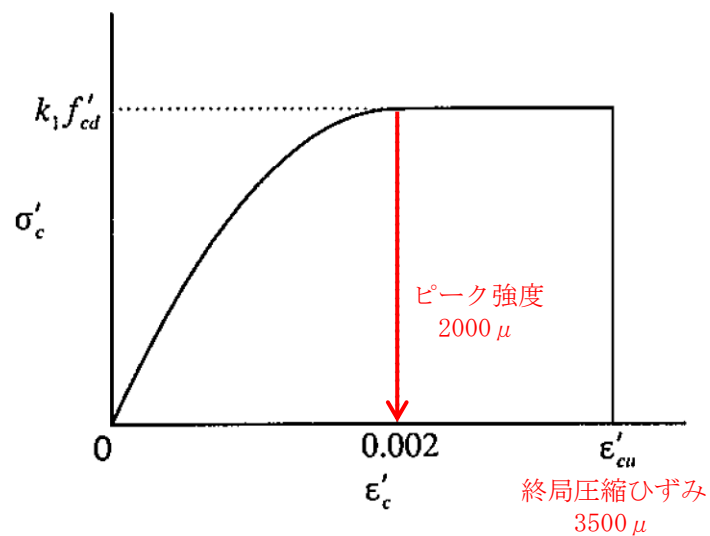
面内変形に対しては、JEA4601-1991に規定されている層間変形角がスケルトンカーブの第1折れ点以下であることを許容限界とした耐震評価を行うこととし、これについても、耐震壁のせん断変形に対する水密性評価の許容限界として既工認実績がある（第5-1-4表参照）。

支持性能、通水性能及び遮蔽性能が要求される構造部材については、目標性能としては部材が終局状態に至らないことが求められるため、構造部材の曲げ照査

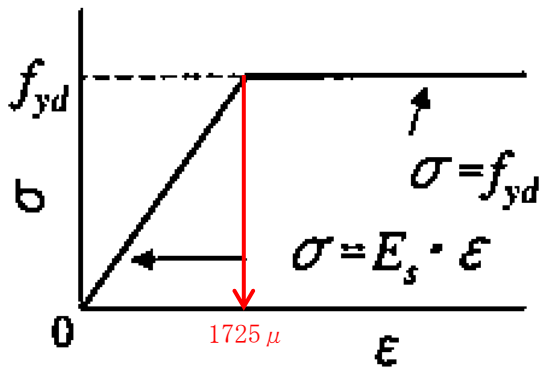
においては「限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ」, 「曲げ耐力」, 「許容応力度」又は「全塑性モーメント」, せん断照査においては「せん断耐力」又は「許容応力度」に対して妥当な安全余裕を持つことを確認する。

第5-1-4表 貯水性能及び止水性能の許容限界

変形モード	許容限界		既工認実績
	指標	許容値	
曲げ	圧縮ひずみ	2000 $\mu$	本許容値はコンクリート標準示方書2002において、応力-ひずみ関係として示されており、概ね弾性範囲の状態である(第5-1-2~3図参照)。概ね弾性範囲の状態は止水機能に対する許容限界として既工認実績がある。なお、この許容限界は水道施設耐震工法指針・解説2009に規定されている照査基準と同じレベルの許容値である(第5-1-5表参照)。
	主筋ひずみ	1725 $\mu$ (SD345の場合)	
せん断	層間変形角(面内)	第1折点 ( $\gamma_1$ ) 以下	JEAG4601-1991に規定されており、耐震壁のせん断変形に対する水密性評価の許容限界として既工認実績がある。
	発生せん断力	せん断耐力	土木学会マニュアル2005に規定されており、屋外重要土木構造物の貯水機能の許容限界として既工認実績がある。



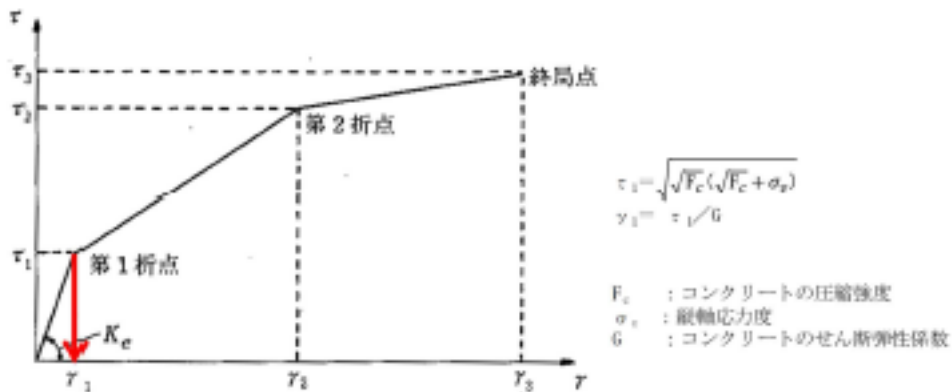
第5-1-2図 コンクリートの応力-ひずみ曲線



SD345 の場合

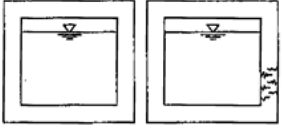
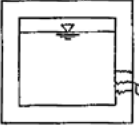
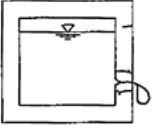
$E_s$	: 200kN/mm <sup>2</sup>
$f_{yd}$	: 345N/mm <sup>2</sup>
$\epsilon_{sy}$	: 1725 μ

第5-1-3図 鉄筋及び構造用鋼材の応力-ひずみ曲線



第5-1-4図 トリリニア・スケルトンカーブと評価式

第5-1-5表 池状構造物 (RC 構造物) の耐震性能と照査基準

耐震性能	耐震性能 1	耐震性能 2	耐震性能 3
限界状態 <sup>*1</sup>	限界状態 1 (降伏耐力以下)	限界状態 2 (最大耐荷力以下)	限界状態 3 (終局変位以下、せん断耐力以下)
損傷状態	 無被害又はひび割れは生じるが漏水は生じない。修復の必要ない。	 軽微なひび割れから漏水は生じるが地震後に早期に修復可能である。	 ひび割れ幅が拡大し、漏水が生じるが施設全体が崩壊しない。修復可能。
照査項目例 <sup>*2</sup>	断面力 (曲げ、せん断)、応力度	断面力 (曲げ、せん断)、塑性率	変位量、曲率、断面力 (せん断)
照査用限界値例 <sup>*3</sup>	断面力 (曲げ) ≤ 降伏曲げ耐力 断面力 (せん断) ≤ せん断耐力 応力度 ≤ 許容応力度	断面力 (曲げ) ≤ 最大曲げ耐力 断面力 (せん断) ≤ せん断耐力 塑性率 ≤ 許容塑性率	変位量 ≤ 終局変位量 曲率 ≤ 終局曲率 断面力 (せん断) ≤ せん断耐力

## 2. 解析手法

屋外重要土木構造物等の耐震安全性評価について、既工認では、地震応答解析手法として時刻歴応答解析及び周波数応答解析を採用し、構造部材の曲げについては終局強度、せん断については許容せん断力に対して妥当な裕度を持つことを確認することを基本としていた。

今回工認では、屋外重要土木構造物等の地震応答解析手法として時刻歴応答解析を適用した限界状態設計法による設計を採用する。減衰定数は、構造物の減衰2%及び履歴減衰とする。構造部材の曲げについては「限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ」、「圧縮ひずみ：コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ、主筋ひずみ：鉄筋の降伏強度に対応するひずみ」、「曲げ耐力」、「許容応力度」又は「全塑性モーメント」に対して十分な安全余裕を持つこと、せん断については「せん断耐力」又は「許容応力度」に対して妥当な安全余裕を持つことを確認することを基本とし、各設備の要求性能（支持性能、通水性能、貯水性能、止水性能、遮蔽性能）を踏まえて照査項目・内容を追加する。

貯水性能及び止水性能が要求される構造部材については、漏水が生じるような顕著な（部材を貫通するような）ひび割れが発生しないよう、目標性能としては鉄筋が降伏しないこと及び発生せん断力がせん断耐力以下になることが求められるため、構造部材の曲げ照査においては「圧縮ひずみ：コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ、主筋ひずみ：鉄筋の降伏強度に対応するひずみ」、せん断照査においては「せん断耐力」に対して妥当な安全余裕を持つことを確認する。

支持性能、通水性能及び遮蔽性能が要求される構造部材については、目標性能としては部材が終局状態に至らないことが求められるため、構造部材の曲げ照査においては「限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ」、「曲げ耐力」、「許容応力度」又は「全塑性モーメント」、せん断照査においては「せん断耐力」又は「許容応力度」に対して妥当な安全余裕を持つことを確認する。

以下では、「耐震設計に係る工認審査ガイド」において、適用実績のある耐震設計に関連した規格及び基準等で示されていないが、先行サイトの審査で実績のある「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会、2005）」（以下「土木学会マニュアル」という。）の適用性について検討を行う。

## 2.1 曲げ照査に係る土木学会マニュアルの適用性について

土木学会マニュアルでは、構造物の曲げ系の破壊については限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみに対して妥当な裕度を持つことを確認することを基本としており、今回工認における曲げに対する照査は、圧縮縁コンクリート限界ひずみによる方法を採用し、照査用圧縮縁コンクリートひずみが、限界圧縮縁コンクリートひずみを超えないことを確認する。

「コンクリート標準示方書【構造性能照査編】(土木学会, 2002)」(以下「コンクリート標準示方書 2002」という。)では、構造部材の終局変位は、部材の荷重-変位関係の骨格曲線において、荷重が降伏荷重を下回らない最大の変位として求めてよいとしている。コンクリート標準示方書 2002 による構造部材の終局変位の考え方を第 5-2-1 図に示す。

一方、土木学会マニュアルでは、以下の考え方に基づいている。

屋外重要土木構造物を模したラーメン構造の破壊実験の結果より、かぶりコンクリートが剥落すると荷重が低下し始める。圧縮縁コンクリートひずみが 1% に至る状態は、まだ応力を負担することができ、かぶりコンクリートの剥落が発生する前の状態であることを確認しており<sup>1)2)</sup>、荷重が低下しない範囲にある。当該限界値を限界状態とすることで、構造全体としての安定性が確保できるものとして設定されたものである。コンクリートの圧縮試験の例を第 5-2-2 図に示す。

したがって、土木学会マニュアルによる曲げ照査手法は、コンクリート標準示方書 2002 による照査よりも安全側の評価を与えるため、適用性を有している。

さらに、土木学会マニュアルでは「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説(日本建築学会, 1997)」(以下「日本建築学会」という。)にて記載されている設計限界変形 1/100、終局限界変形 1/80 等を基準値として参照している。

対象は同じラーメン構造であり、軸力比(軸応力度/コンクリート圧縮強度比)は建築物よりも屋外重要土木構造物の方が小さいと考えられることから、変形性能がより大きくなる傾向にあり、層間変形角 1/100 は限界値として安全側であると考えられる。土木学会マニュアルでは、層間変形角が 1/100 以下であれば、圧縮縁コンクリートひずみ 1% の基準を保証したものとみなすと示されており、機能維持確保の観点からも耐荷性能が確保されることが担保できるため限界値として適切である。

参考に、日本建築学会における曲げ降伏先行型の部材について、復元力特性と限界状態(損傷度)の関係の概念図を第 5-2-3 図に、土木学会マニュアルにおける鉄筋コンクリートはり部材の荷重-変位関係と損傷状態に対する概念図を第 5-2-4 図に示す。日本建築学会と土木学会マニュアルにおいて概ね対応が取れており、土木学会マニュアルの各損傷状態の設定は妥当であると考えられる。第 5-2-4 図において圧縮縁コンクリートひずみ 1% は第 4 折れ点よりも手前にあり、屋外重要土木構造物の限界状態に至っていないと考えられる。また、第 3 折れ点は圧縮縁コンクリートひずみ 1% よりもさらに手前にある。

耐震安全性評価では、当該許容限界値に対して、十分な安全余裕を確保するため、構造部材の照査の過程において複数の安全係数を考慮する。安全係数は、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数及び構造物係数の5種に分けられる。それぞれの安全係数の考え方を第5-2-5図に示す。また、地盤物性のばらつきの考慮として、周辺地盤の変形特性について、平均値を基本ケースとした場合に、平均値 $\pm 1.0 \times$ 標準偏差( $\sigma$ )のケースにおける影響の程度を安全係数として考慮した照査を、工事計画認可段階において実施する。

曲げに対する照査において考慮している安全係数は第5-2-1表に示すとおり、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数、構造物係数がある。これらの安全係数は土木学会マニュアルにおいて以下の考えにより定められている。

#### (1) 材料係数

コンクリート強度の特性値は、製造において、その値を下回る強度が発現する確率が5%以内となるように設定する。また、鉄筋の機械的性質の特性値に関しても、日本工業規格(JIS)の規格範囲の下限値を設定してよいとしている。このように、双方とも特性値の段階で実強度に対して小さい値を設定しており、応答値・限界値ともに安全側の照査がなされているため、材料係数は1.0としている。

#### (2) 部材係数

安全側に配慮した設定を行っていることから、部材係数は1.0としている。

#### (3) 荷重係数

地震の影響以外の荷重の評価精度は、かなり高いものと考えられ、地震の影響については入力地震動そのものが最近の研究成果に基づいて設定されるため、荷重係数は1.0としている。

#### (4) 構造解析係数

限られた条件での実験であること、地盤パラメータの設定が応答解析結果に及ぼす影響などを考え併せて、構造解析係数は1.2以上を標準としている。

#### (5) 構造物係数

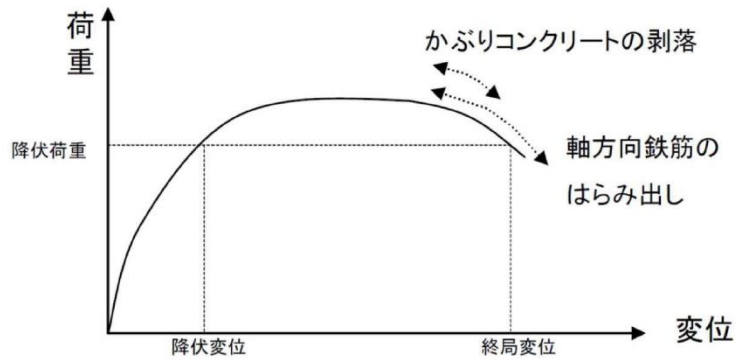
屋外重要土木構造物は重要度毎に適切な地震動が設定される。従って、構造物係数によりさらに構造物の重要性を考慮する必要はなく、耐震性能照査における構造物係数は1.0としている。

以上のことから、土木学会マニュアルによる曲げ照査手法は、コンクリート標準示方書2002による照査よりも安全側の評価を与えるため、技術的妥当性及び適用性を有するとともに適切な余裕が確保されていると判断できる。

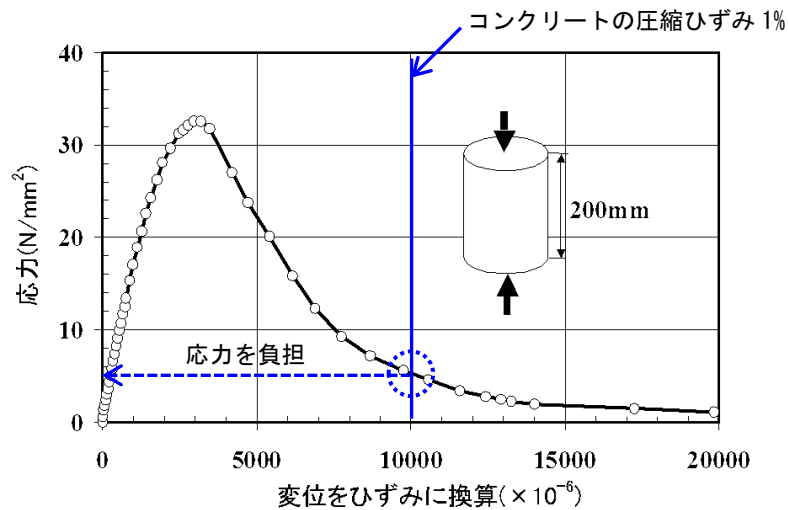


第5-2-1表 曲げ評価において考慮している安全係数

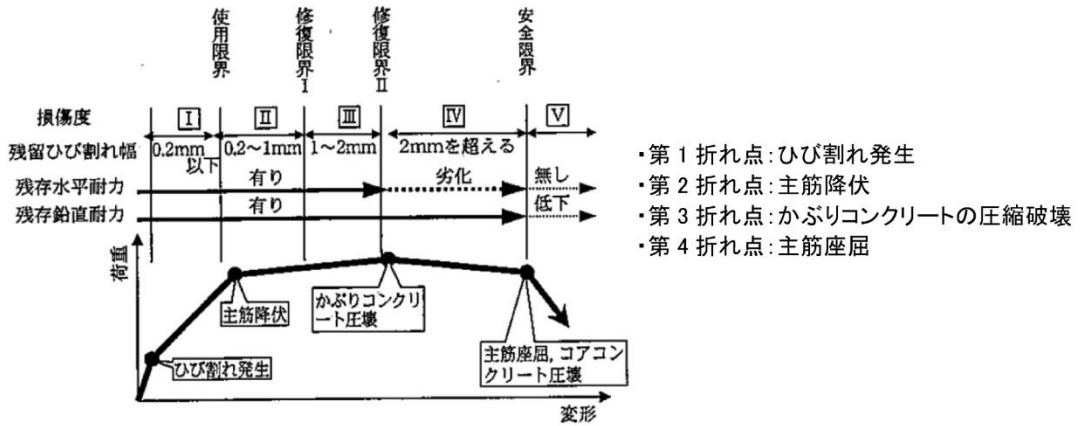
安全係数		曲げ照査	
		応答値算定	限界値算定
材料係数	コンクリート	1.0	1.0
	鉄筋	1.0	1.0
	地盤	1.0	—
部材係数		—	1.0
荷重係数		1.0	—
構造解析係数		1.2	—
構造物係数		1.0	



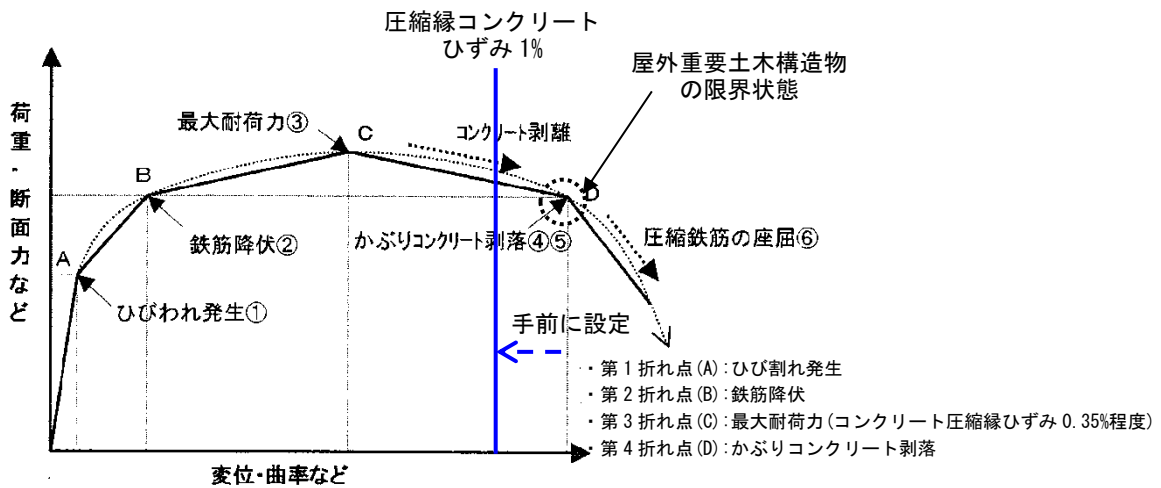
第5-2-1図 コンクリート標準示方書2002による構造部材の終局変位の考え方



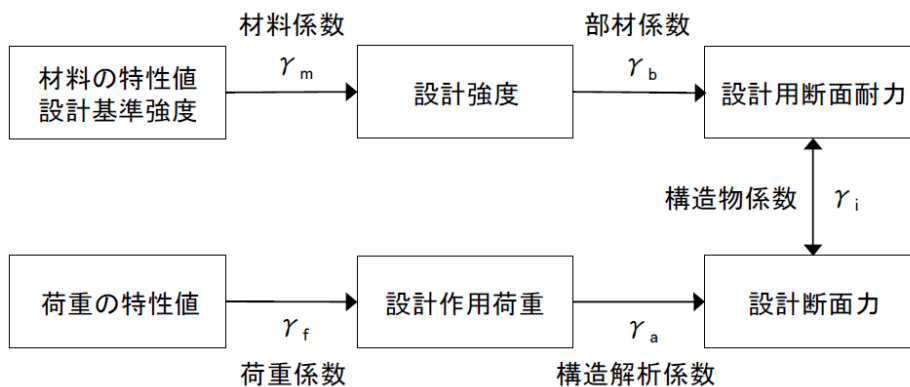
第5-2-2図 コンクリートの圧縮試験例<sup>3)</sup>



第5-2-3図 曲げ降伏先行型の部材の復元力特性と限界状態（損傷度）の関数の概念図（日本建築学会）



第5-2-4図 鉄筋コンクリートはり部材の荷重-変位関係と損傷状態に対する概念図（土木学会マニュアル）



※上記に加えて、地盤物性のばらつきに関する安全係数を考慮する

第5-2-5図 安全係数の考え方

【参考文献】

- 1) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル，2005
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書【構造性能照査編】，2002
- 3) 松尾豊史・金津努・大友敬三・福本彦吉：コンクリート製地中構造物の合理的な耐震性能評価指標に関する検討，土木学会地震工学論文集，2003

## 2.2 せん断照査に係る土木学会マニュアルの適用性について

今回工認におけるせん断に対する照査は、土木学会マニュアルに基づき、照査用せん断力が、せん断耐力を下回ることを確認する。

### 2.2.1 せん断破壊に対する照査

応答せん断力とせん断耐力の比に構造物係数を乗じた数値が、1.0を下回ることを確認をもってせん断破壊に対する照査とする。せん断耐力は、以下の3つの選択肢のいずれかを用いて評価する。

(1)せん断耐力評価式

(2)分布荷重を受ける部材のせん断耐力評価法\*

分布荷重を受ける部材については、せん断耐力評価式を応用して、より合理的な評価を行うことができる。土木学会マニュアルでは、「等価せん断スパン比を用いた方法(第5-2-6図)」と「線形被害則を用いた方法(第5-2-7図)」の2法を示す。

(3)材料非線形解析を用いる方法

ここでいう材料非線形解析とは、せん断耐力を求めるために用いる解析法を指し、応答解析で用いる解析とは区別している。部材が複雑な形状を有するなどの場合、これを選択できる。

(1)で全部材の照査を行った後、不合格と判定される部材だけを取り出して(2)や(3)で再照査を行う。

※(2)の中の「等価せん断スパン比を用いた方法」と「線形被害則を用いた方法」を同一構造物の異なる部材に対して使い分けることはできない。

### 2.2.2 せん断耐力評価式

コンクリート標準示方書2002では、棒部材及びディープビームについて第5-2-2表に示すとおりせん断耐力式を定義している。このうち、ディープビームについては、コンクリート標準示方書2002及び土木学会マニュアルにおいて同様の評価式となっている。

土木学会マニュアルでは、コンクリート標準示方書2002におけるせん断耐力式のうち棒部材式において、等価せん断スパンにより設定可能な係数 $\beta_a$ を考慮している。これは屋外重要土木構造物が地中に埋設されたラーメン構造で、土圧、水圧、地震時慣性力等の多数の分布荷重が作用していることによる分布荷重が卓越し、スパン内に反曲点が存在する等の載荷形態にある条件下では、せん断耐力が増大するという実験的知見を踏まえ、コンクリート標準示方書2002のせん断耐力式を精緻化したものである。当該せん断耐力式は、第5-2-6図に示すとおり、屋外重要土木構造物を模した破壊試験より得られるせん断耐力と整合的であり、合理的な評価が可能であることが確認されている<sup>1)2)</sup>。

また、これら多数の荷重の複合作用を個々に分解することは困難であることから、せん断耐力の算定時に個々の荷重作用を区分せず最終的な設計用断面力分布を用いてせん断耐力を算定することとしている<sup>1)</sup>。

耐震安全性評価では、当該許容限界値に対して、妥当な安全余裕を確保するため、構造部材の照査の過程において複数の安全係数を考慮する。安全係数は、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数及び構造物係数の5種に分けられる。それぞれの安全係数の考え方を第5-2-8図に示す。また、地盤物性のばらつきの考慮として、周辺地盤の変形特性について、平均値を基本ケースとした場合に、平均値 $\pm 1.0 \times$ 標準偏差( $\sigma$ )のケースにおける影響の程度を安全係数として考慮した照査を、工事計画認可段階において実施する。

せん断に対する照査において考慮している安全係数は第5-2-3表に示すとおり、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数、構造物係数がある。これらの安全係数は土木学会マニュアルにおいて以下の考えにより定められている。

#### (1) 材料係数

応答値算定時に適用する材料係数は、コンクリートと鉄筋の物性値が、特性値の段階で実強度に対して小さい値を設定していることから安全側の照査がなされているため1.0としている。限界値算定時に適用する材料係数はコンクリート標準示方書2002に準拠して、コンクリートに対して1.3、鉄筋に対して1.0としている。

#### (2) 部材係数

コンクリート標準示方書2002に準拠して、コンクリート寄与分に対して1.3、鉄筋寄与分に対して1.1としている。

#### (3) 荷重係数

地震の影響以外の荷重の評価精度は、かなり高いものと考えられ、地震の影響については入力地震動そのものが最近の研究成果に基づいて設定されるため、荷重係数は1.0としている。

#### (4) 構造解析係数

変形に関する応答値の評価精度に比較して、断面力に関する応答値の評価精度は高いと考えられることから、変形照査の場合より低減させて1.05としている。

#### (5) 構造物係数

基準地震動は地点毎にサイト特性を考慮して設定され、重要度分類に対応して入力地震動が選定される。したがって、構造物係数により更に構造物の重要性を考慮する必要はなく、耐震性能照査における構造物係数は1.0としている。

以上のことから、土木学会マニュアルによるせん断照査手法は、屋外重要土木構造物の構造的特徴を踏まえ設定された手法であるため、技術的妥当性及び適用性を有すると判断できる。

第5-2-2表 せん断耐力式の比較表

	コンクリート標準示方書2002	土木学会マニュアル
棒部材	$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$ $V_{yd}$ : せん断耐力 $V_{cd}$ : コンクリート負担 $V_{sd}$ : せん断補強筋負担 $V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_d, \beta_p$ : 構造寸法や鉄筋量で決まる係数 $\beta_n$ : 発生曲げモーメントで決まる係数 $f_{vcd}$ : 設計基準強度、安全係数等で決まる $b_w$ : 腹部の幅 $d$ : 有効高さ $\gamma_b$ : 安全係数	$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$ $V_{yd}$ : せん断耐力 $V_{cd}$ : コンクリート負担 $V_{sd}$ : せん断補強筋負担 $V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_d, \beta_p$ : 構造寸法や鉄筋量で決まる係数 $\beta_n$ : 発生曲げモーメントで決まる係数 $\beta_a = 0.75 + \frac{1.4}{a/d}$ $f_{vcd}$ : 設計基準強度、安全係数等で決まる $b_w$ : 腹部の幅 $d$ : 有効高さ $\gamma_b$ : 安全係数
	せん断スパンより設定される係数 $\beta_a$ を考慮し コンクリート標準示方書のせん断耐力式を精緻化	
デーパープリーム	$V_{ydd} = V_{cdd} + V_{sdd}$ $V_{ydd}$ : せん断耐力 $V_{cdd}$ : コンクリート負担 $V_{sdd}$ : せん断補強筋負担 $V_{cdd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_a = \frac{5}{1 + (a_v/d)^2}$ $a_v$ : 荷重作用点から支承前面までの距離 $f_{dd}$ : 設計基準強度、安全係数等で決まる	$V_{ydd} = V_{cdd} + V_{sdd}$ $V_{ydd}$ : せん断耐力 $V_{cdd}$ : コンクリート負担 $V_{sdd}$ : せん断補強筋負担 $V_{cdd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_a = \frac{5}{1 + (a_v/d)^2}$ $a_v$ : 荷重作用点から支承前面までの距離 $f_{dd}$ : 設計基準強度、安全係数等で決まる
	同一の評価式	

○ コンクリート標準示方書におけるせん断耐力式

$$V_{yd} = \beta_a \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$$

2点載荷の単純はりの実験結果に基づいた単純な載荷形態あるいは単純な断面力分布は精度良くせん断耐力を評価する。  
 (問題点)

分布荷重が卓越する場合、支点付近に大きな荷重が加わる場合及び支点反力が大きい場合において、せん断耐力を過小評価する。

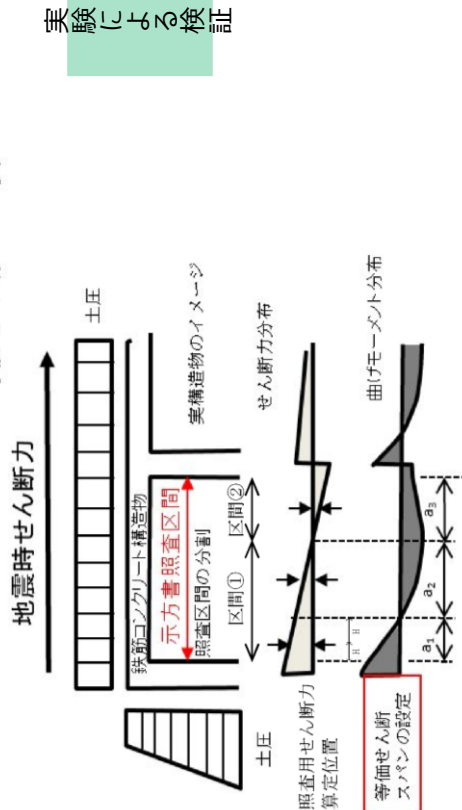
○ 地中構造物を模擬した実験によるせん断耐力評価式  
 地中に埋設されたラーメン構造で、分布荷重が卓越、スパン内に反曲点が存在する等複雑な載荷形態を考慮してせん断耐力を評価する。

合理的なせん断耐力評価式の提案(土木学会マニュアル)<sup>1)</sup>

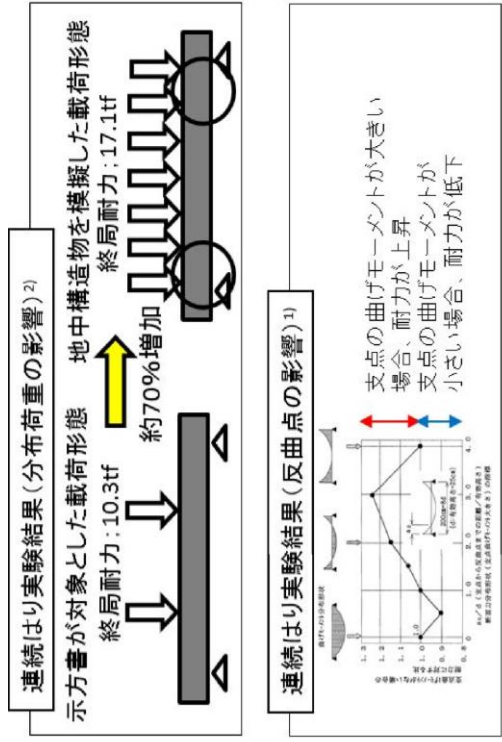
$$V_{cd} = \beta_a \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot \frac{d}{\gamma_b}$$

$$\beta_a = 0.75 + 1.4 / (a/d)$$

a: 等価せん断スパン長



実験による検証



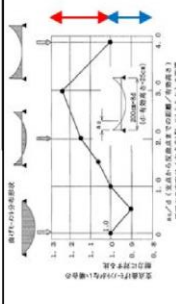
連続はり実験結果(分布荷重の影響)<sup>2)</sup>

示方書が対象とした載荷形態 地中構造物を模擬した載荷形態

終局耐力: 10.3tf 終局耐力: 17.1tf

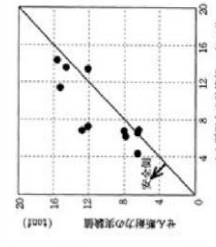
約70%増加

連続はり実験結果(反曲点の影響)<sup>1)</sup>

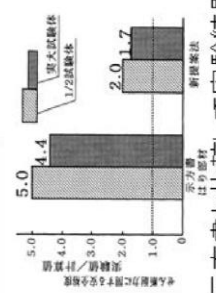


支点の曲げモーメントが大きい場合、耐力が上昇  
 支点の曲げモーメントが小さい場合、耐力が低下

連続はり実験結果による検証<sup>1)</sup>



概ね安全側の評価



示方書と比較して実験結果に整合する合理的な評価

1) 原子力土木委員会・限界状態設計部会：原子力発電所・鉄筋コンクリート製屋外重要土木構造物への限界状態設計法の適用－安全性照査マニュアルの提案－，土木学会論文集No.442/V-16, pp23-33, 1992.2  
 2) 遠藤達巳・青柳征夫・松村卓郎：鉄筋コンクリート製地中構造物の限界状態設計に用いるせん断耐力評価法，電力中央研究所報告，平成4年3月

○応答解析の結果得られた断面力分布を基に耐力を算定する。

a. 部材の分割

応答せん断力分布を見て、部材中にせん断力の反転する点がある場合は、その点で領域分割する。照査は双方の領域に対して行う。

b. 荷重分布の設定

応答せん断力分布から、それと同じ状況を再現できる荷重分布を求める。部材非線形解析で応答を求めると、節点位置で階段状にせん断力が変化する。この変化分を着目節点位置に作用する荷重とすればよい。a. の操作による分割点における変化分は両側の領域に配分する。

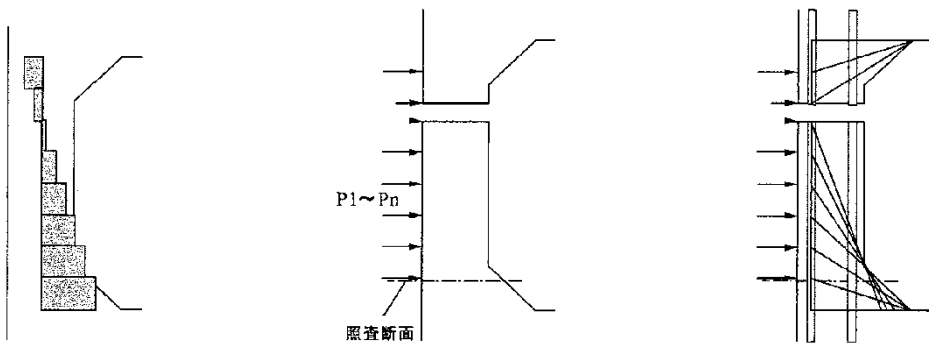
c. 照査断面の設定

照査断面は、せん断応力度（応答せん断力を断面積で除した値）が最大となる断面とする。

d. 線形被害則の適用

個々の作用  $P_j$ （応答値側の安全係数を含む）に対するせん断耐力  $V_j$ （限界値側の安全係数を含む）を評価し、作用力とせん断耐力の比の総和に構造物係数を乗じた値が 1.0 以内であることを確認を行う。

$$\gamma_i \cdot \sum_j \frac{P_j}{V_j} \leq 1.0$$



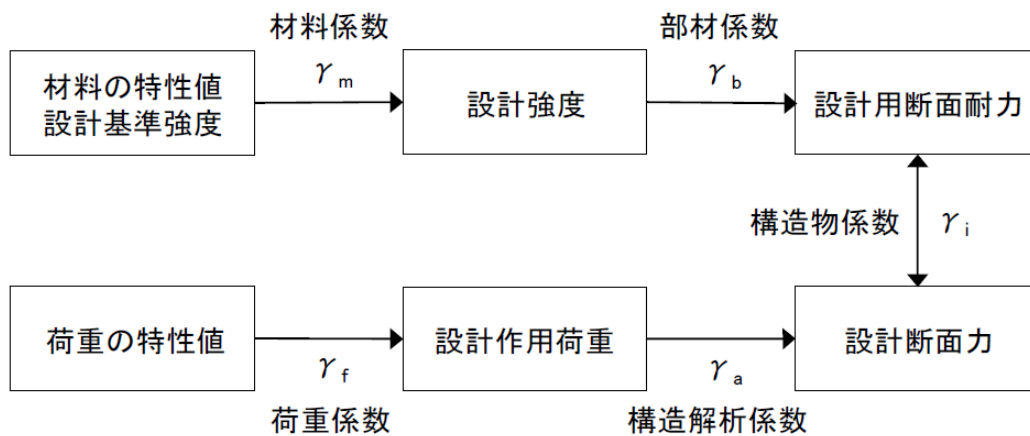
(a) 応答せん断力分布

(b) 外力分布の設定

(c) 作用点毎の a/d の設定

第 5-2-7 図 線形被害則を用いたせん断耐力評価法





※上記に加えて、地盤物性のばらつきに関する安全係数を考慮する

第5-2-8図 安全係数の考え方  
(第5-2-5図の再掲)

第5-2-3表 せん断耐力評価において考慮している安全係数

安全係数		せん断照査	
		応答値算定	限界値算定
材料係数	コンクリート	1.0	1.3
	鉄筋	1.0	1.0
	地盤	1.0	—
部材係数	コンクリート	—	1.3
	鉄筋	—	1.1
荷重係数		1.0	—
構造解析係数		1.05	—
構造物係数		1.0	

(6) 安全上適切と認められる規格及び基準を用いた評価について

屋外重要土木構造物の耐震安全性については、屋外重要土木構造物の構造上の特徴を踏まえ、土木学会マニュアルに基づき評価を実施しているが、当該マニュアルについては「耐震設計に係る工認審査ガイド（原子力規制委員会，2013）」（以下「工認審査ガイド」という。）において「安全上適切と認められる規格及び基準等」として取り扱われていない。このため代表構造物について、工認審査ガイドにおいて「安全上適切と認められる規格及び基準等」として適用可能な規格及び基準等に準拠した評価を実施し、土木学会マニュアルの評価結果と比較することで、現在の評価が妥当であることを確認する。

評価項目のうち、構造部材の曲げについては、工認審査ガイドにおいて「安全上適切と認められる規格及び基準等」として取り扱われているコンクリート標準示方書2002よりも保守的な手法を用いていることから、今回工認では、耐震裕度が厳しい構造部材のせん断に対して検討を実施する。

検討では、基準地震動  $S_s$  による地震応答解析により得られた応答値を用い、「安全上適切と認められる規格及び基準等」として、工認審査ガイド記載の「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（日本建築学会，2005制定）」（以下「建築学会基準」という。）によるせん断照査結果と比較を行うことで、土木学会マニュアルによるせん断照査が妥当であることを確認する。

【参考文献】

- 1) 原子力土木委員会・限界状態設計部会：原子力発電所・鉄筋コンクリート製屋外重要土木構造物への限界状態設計法の適用－安全性照査マニュアルの提案－，土木学会論文集 No. 442/V-16，pp23-33，1992. 2
- 2) 遠藤達巳・青柳征夫・松村卓郎：鉄筋コンクリート製地中構造物の限界状態設計に用いるせん断耐力評価法，電力中央研究所報告，平成4年3月
- 3) 日本建築学会：原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2005

### 2.2.3 材料非線形解析を用いたせん断耐力評価

構造部材の照査において発生するせん断力が、(1)せん断耐力評価式及び(2)分布荷重を受ける部材のせん断耐力評価法によるせん断耐力を上回る部材については、以下で示す材料非線形解析を用いたせん断耐力評価を実施する。

#### (1) 評価条件

2.2.2 で示したせん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断照査を行う。

材料非線形解析は、90年代までに、ひび割れの進展モデルや破壊エネルギーの概念等、基本となるモデルが提示され、様々な問題に適用されながら有効性と信頼性を高めており、「コンクリート標準示方書 設計編（土木学会、2012）」（以下「コンクリート標準示方書 2012」という。）や土木学会マニュアル等で取り扱われている。

材料非線形解析にて用いる鉄筋コンクリートの構成則については種々あるが、ここでは、現在までに実務でも使用され、適用性と信頼性が確認されており、コンクリート標準示方書 2012 において標準とされる以下の手法とする。

- ①鉄筋とコンクリートとの一体性を前提とする分散ひび割れモデルにてモデル化する。
- ②鉄筋との複合作用が支配的な鉄筋周辺のコンクリートについては、平均化構成則を用いる。
- ③鉄筋との複合作用が及ばない領域では、コンクリートの破壊力学の概念を導入する。

なお、材料非線形解析の適用にあたっては、当該構造物の構造的な特徴や荷重条件が類似する既往の実験等から得られたせん断耐力と、材料非線形解析によるせん断耐力を比較し、その適用性を判断したうえで、モデル化や各種パラメータの設定に係る解析者の差を考慮した安全係数を設定する。

参考として、耐震性能照査における応答値の評価に用いる解析手法を第5-2-4表及び第5-2-5表に示す。

第5-2-4表 耐震性能と地震応答解析手法との対応

区分	限界状態	選択される標準的な解析手法と耐震性能に用いる物理量	
1	構造物の部材が降伏に至らない	①	① 線形解析 ・鉄筋及びコンクリートの最大応力 ・最大せん断応力
		②	② 等価線形解析 ・鉄筋及びコンクリートの最大応力 ・最大せん断応力、最大せん断力 ・最大曲げモーメント
2	構造物が最大耐力に至らない	③	③ 部材非線形解析 ・最大曲げモーメント ・最大曲率、最大変位 ・最大層間変形角、最大せん断力
		④	④ 材料非線形解析 ・最大変位 ・最大層間変形角 ・最大ひずみ、最大せん断力
3	構造物が崩壊しない		

- ・地震応答解析手法の使用に当たっては、新設土木構造物は、①線形解析を基本とする。
- ・また、既設構造物は、③部材非線形解析の使用を基本とするが、部材によっては、④材料非線形解析を用いる場合もある。

第5-2-5表 解析モデルの分類

	部材非線形解析	材料非線形解析		
モデル化	骨組モデル	有限要素		
解析次元	1次元		2次元	3次元
構成則	M-φ, M-θ 等	応力-ひずみ関係		
要素	はり要素	ファイバー要素	平面ひずみ要素	立体要素
特徴	(汎用性) (解析時間)	狭い	← →	広い 長い

1) 適用基準

材料非線形解析については、土木学会マニュアル、コンクリート標準示方書2012等に基づき実施する。

第5-2-6表に参考とする主な基準・文献を示す。

第5-2-6表 参考とする主な基準等

項目	参考とする主な基準等	備考
材料定数・材料特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート標準示方書2012</li> <li>・土木学会マニュアル</li> </ul>	—
許容限界	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・既往文献等により設定した許容限界（破壊基準）が、部材係数の設定における材料非線形解析にて、実験結果と整合的であることを確認。</li> </ul>

2) 材料定数

耐震安全性評価に用いる材料定数は、設計図書及び文献等を基に設定する。コンクリート及び鉄筋の材料定数を第5-2-7表及び第5-2-8表に示す。

第5-2-7表 コンクリートの材料定数

	設定値	諸元
単位体積重量	0.0kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
圧縮強度	18.1N/mm <sup>2</sup>	設計基準強度（設計図書23.5N/mm <sup>2</sup> ） ／材料係数（ $\gamma_{mc}=1.3$ ）
引張強度	1.45N/mm <sup>2</sup>	引張強度／材料係数
圧縮ピークひずみ	0.15%	コンクリート標準示方書2012
ひび割れ－せん断 伝達係数	1.0	コンクリート標準示方書2012
破壊エネルギー	0.0754N/mm	コンクリート標準示方書2012

第5-2-8表 鉄筋の材料定数

		設定値	諸 元
単位体積重量		0.0kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
ヤング係数		200kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書2012
降伏 強度	主鉄筋	1000N/mm <sup>2</sup>	せん断破壊先行型の破壊形態となるよう 曲げ耐力が増大するように設定
	せん断 補強筋	345N/mm <sup>2</sup>	設計図書

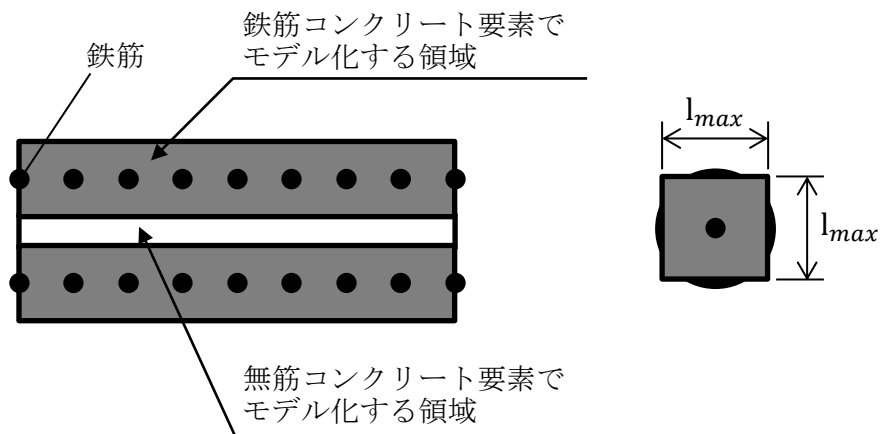
### 3) 解析モデルの要素分割

材料非線形解析の対象とする構造部材を平面ひずみ要素でモデル化する。構造部材のモデル化にあたっては、第5-2-9図に示すとおり、鉄筋の付着が有効な領域を鉄筋コンクリート要素としてモデル化し、付着の影響が及ばない領域を無筋コンクリート要素としてモデル化する。

部材厚方向の要素分割数については、鉄筋を含む要素と無筋要素を明確に指定できる分割数が望ましいこと及び3層以上の分割数をとる場合、解析結果に大きな差異が生じないことから3層以上に設定することとする。

具体的には、鉄筋を含む要素は、鉄筋を中心としてかぶり厚さの2倍とし、無筋領域については、要素形状が極端に扁平とならないように分割する。

なお、対象とする構造部材に接合する部材は、弾性要素でモデル化し、モデル端部を固定境界とする。



$$l_{max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} D_b \sqrt{\frac{f_y}{f_t}}$$

ここに、 $l_{max}$  : 鉄筋一本当たりの付着有効面積を正方形で考えた場合の一辺の長さ

$D_b$  : 鉄筋の直径

$f_y$  : 鉄筋の降伏強度

$f_t$  : コンクリートの引張強度

第5-2-9図 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の概要

#### 4) コンクリートの非線形特性

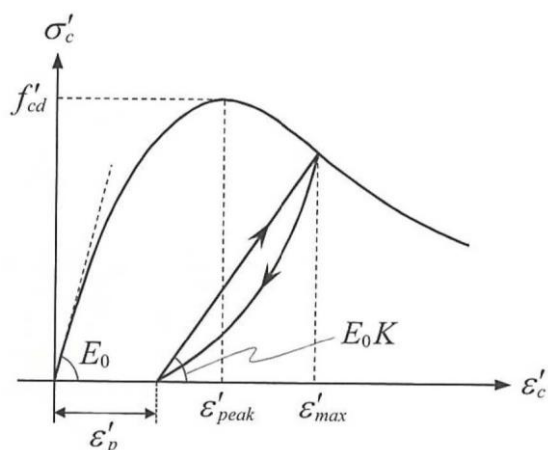
耐震安全性評価に用いる要素は鉄筋コンクリート要素及び無筋コンクリート要素に分類されるが、それぞれの非線形特性は同一の考え方で表される。

##### ・圧縮応力下における応力-ひずみ関係

第5-2-10図における一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。

圧縮応力下の応力-ひずみの骨格曲線は、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を越えた軟化域で表され、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を考慮している。

また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、第5-2-11図に示す、低減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮する。



$$\sigma'_c = E_0 K (\varepsilon'_c - \varepsilon'_p) \geq 0$$

$$E_0 = \frac{2 \cdot f'_{cd}}{\varepsilon'_{peak}}$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \left( 1 - \exp \left( -1.25 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right) \right\}$$

$$\varepsilon'_p = \varepsilon'_{max} - 2.86 \cdot \varepsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp \left( -0.35 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right\}$$

ここに、 $f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_{mc}$

$\varepsilon'_{peak}$  : 圧縮強度に対応するひずみ (一般に、0.002としてもよい)

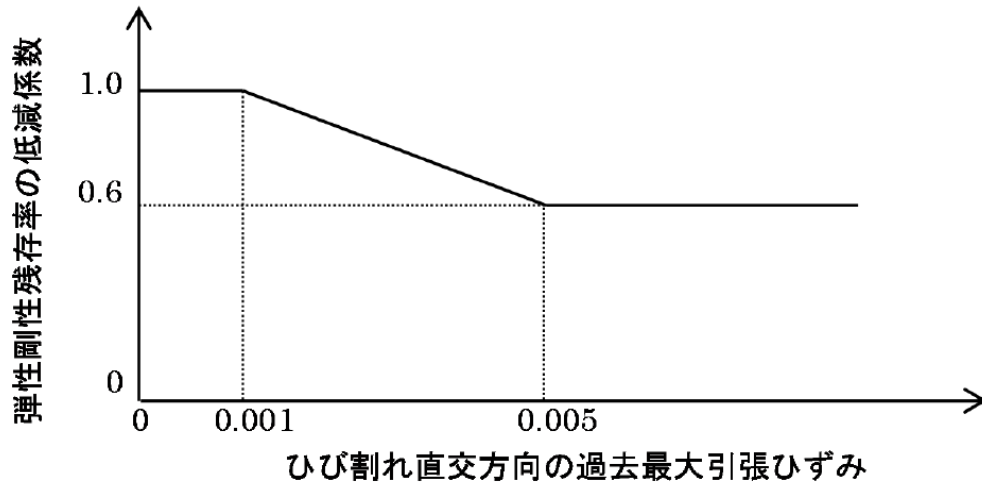
$\varepsilon'_{max}$  : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

$\varepsilon'_p$  : 塑性ひずみ

$K$  : 弾性剛性残存率

第5-2-10図 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性



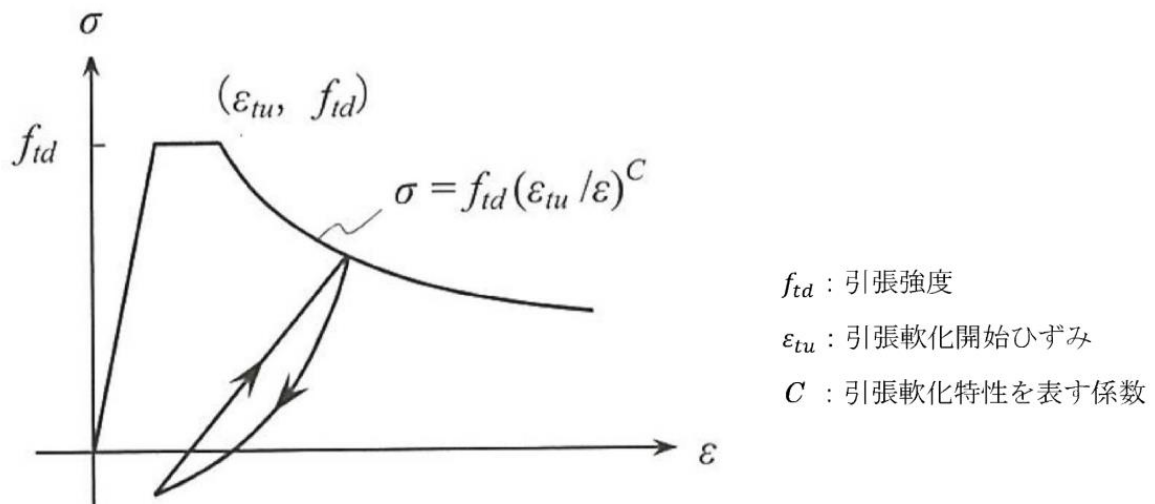


第5-2-11図 弾性剛性残存率の低減係数

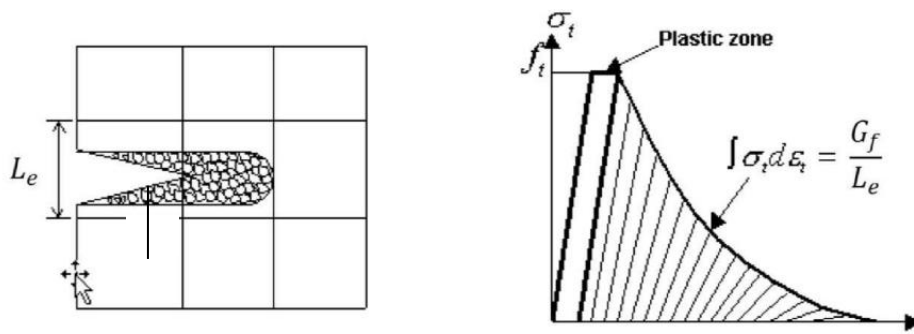
・引張応力下における応力-ひずみ関係

引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、第5-2-12図に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

引張力を受ける無筋コンクリート要素では、引張軟化挙動は、破壊エネルギー  $G_f$  によって定義する。引張軟化挙動の考慮にあたっては、第5-2-13図に示すひび割れ発生後の軟化曲線とひび割れ発生点からの除荷曲線とで囲まれる面積が  $G_f/L_e$  (要素寸法) に一致するように、軟化特性を表す係数  $C$  を用いる。



第5-2-12図 引張応力下における鉄筋とコンクリートの付着効果を考慮した  
応力-ひずみ関係

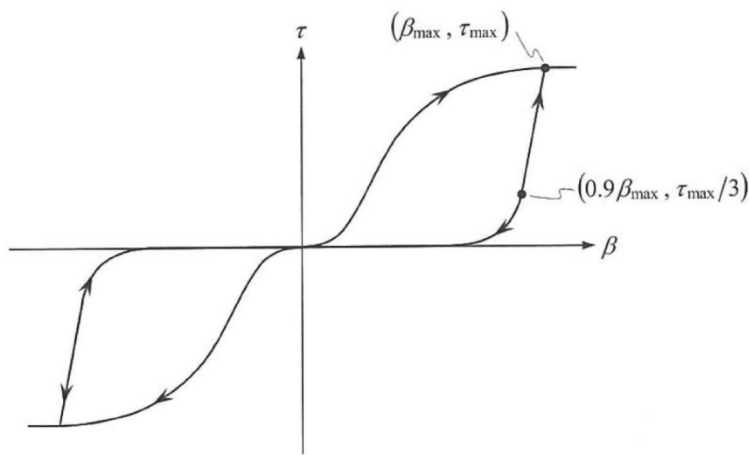


第5-2-13図 応力-ひずみ曲線と破壊エネルギー $G_f$ の関係

・ひび割れ面でのせん断伝達関係

コンクリートのひび割れ発生後にひび割れ角度を固定する固定ひび割れモデルでは、ひび割れ面のずれによるせん断応力伝達特性を考慮する必要がある。

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、第5-2-14図に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比 $\beta$ をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。

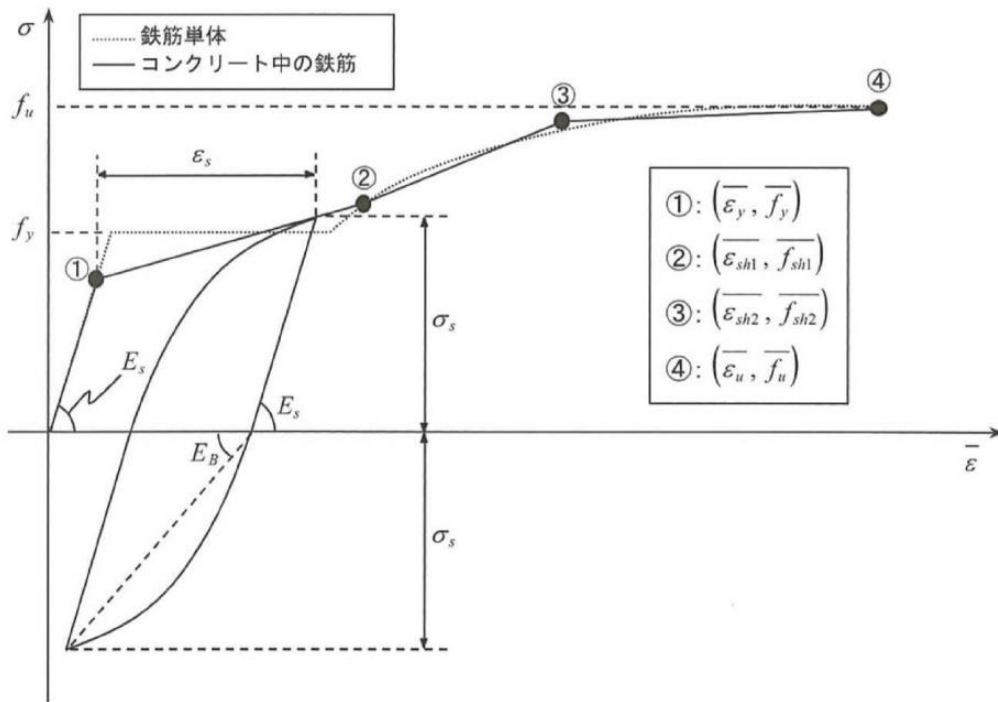


- $\beta$  : ひび割れ面におけるせん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比( $\gamma/\varepsilon$ )
- $\tau$  : ひび割れ面でのせん断応力
- $\tau_{max}$  : 除荷開始時せん断応力
- $\beta_{max}$  : 除荷開始時せん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比

第5-2-14図 ひび割れ面でのせん断伝達モデル

5) 鉄筋の非線形特性

ひび割れを複数含む領域におけるコンクリート中の鉄筋の平均応力ー平均ひずみ関係は、単体鉄筋の応力ーひずみ関係と異なり、第5-2-15図に示すひずみ硬化特性を考慮する。



第5-2-15図 ひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の平均応力ー平均ひずみ関係

6) 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

コンクリートと鉄筋の界面の付着特性をテンションスティフニング効果(引張特性が硬化する現象)として、鉄筋コンクリート要素の中に取り込むことにより、鉄筋コンクリートの構成則を直接与える。

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は、以下の式で表される。

$$\bar{\sigma}_{RC} = \frac{A_s}{A_{RC}} \bar{\sigma}_s + \frac{A_c}{A_{RC}} \bar{\sigma}_c$$

ここに、 $\bar{\sigma}_s$ 、 $\bar{\sigma}_c$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの平均応力

$A_s$ 、 $A_c$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの断面積、 $A_{RC} = A_s + A_c$

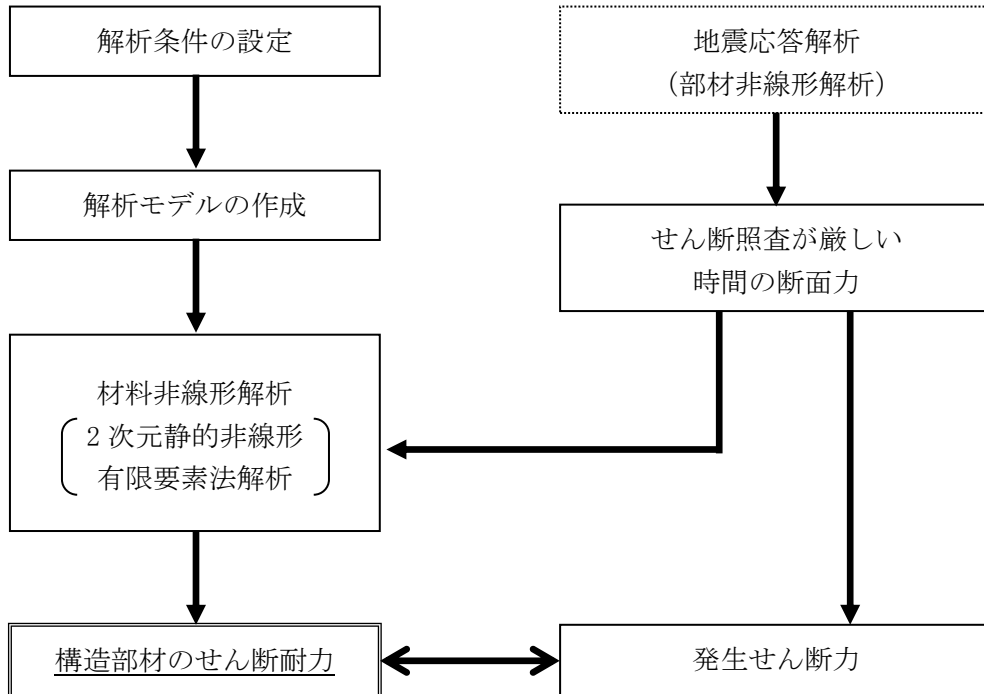
7) 荷重の組合せ

材料非線形解析においては、地震応答解析(部材非線形解析)により得られた荷重を用いることから、荷重の組み合わせは、地震応答解析と同様である。

(2) 評価方法

1) 耐震安全性評価フロー

材料非線形解析を用いたせん断耐力評価の評価フローを第5-2-16図に示す。



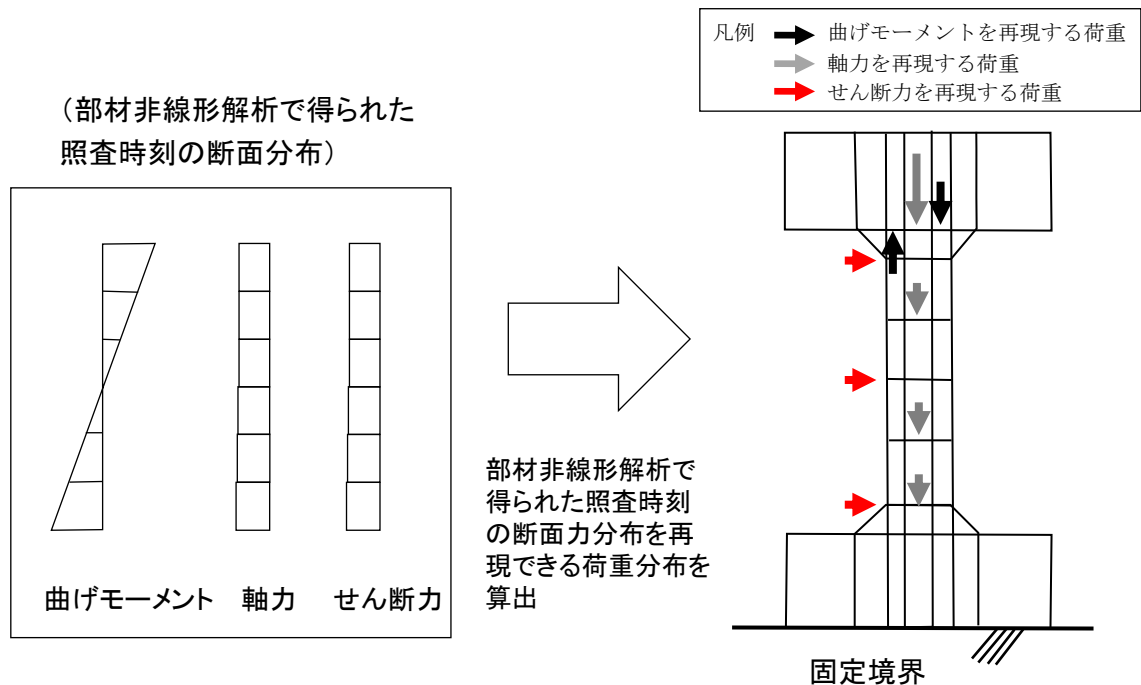
第5-2-16図 材料非線形解析の耐震安全性評価フロー

2) 荷重の設定

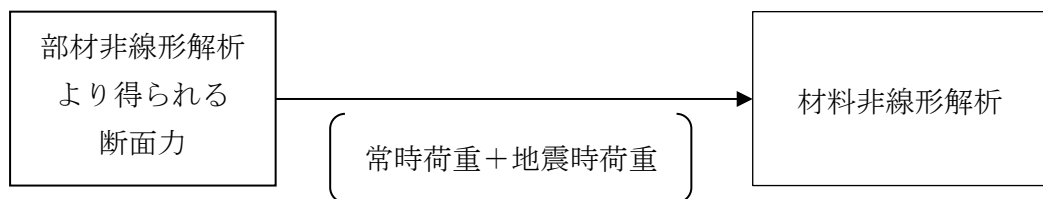
材料非線形解析にて考慮する荷重は、地震応答解析（部材非線形解析）から得られる荷重を考慮する。具体的には、地震応答解析（部材非線形解析）で評価対象部材のせん断照査結果が厳しくなる時刻における断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析モデルに第5-2-17図に示すとおり作用させる。

材料非線形解析では、地震応答解析（部材非線形解析）で得られた照査時刻の断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重比率を維持しながら漸増載荷する。

作用荷重は第5-2-18図に示すとおり、常時荷重と地震時荷重を足し合わせ、材料非線形解析を実施する。



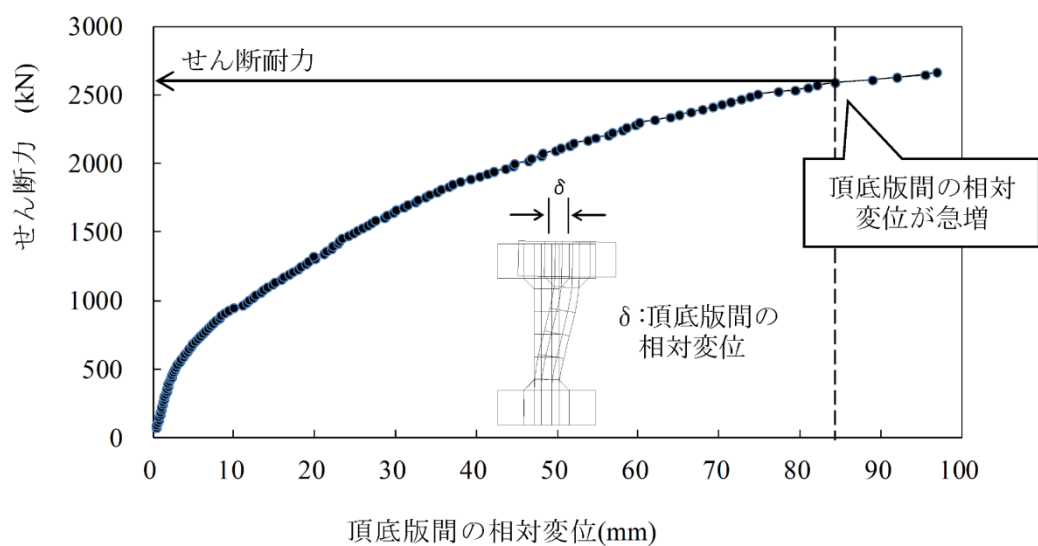
第5-2-17図 材料非線形解析における载荷状況



第5-2-18図 荷重の作用手順

### 3) せん断耐力

材料非線形解析を用いたせん断耐力は、材料非線形解析におけるせん断力－相対変位関係や要素ひずみの応答から設定する。具体的には、第5-2-19図に示す例のとおり、せん断力－相対変位関係においてせん断力の増分に対して相対変位が急増する点又はせん断力が最大となる点を部材のせん断耐力と判断する。



第5-2-19図 材料非線形解析を用いたせん断耐力の設定例

#### 4) 安全係数の設定

材料非線形解析では、地震応答解析（部材非線形解析）で得られる断面力  $P_0$ （曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析に作用させた時のせん断力  $V$  と材料非線形解析で得られるせん断耐力  $V_y$  に、下記の通り部材係数  $\gamma_{b1}$ 、 $\gamma_{b2}$ 、構造解析係数  $\gamma_a$ 、構造物係数  $\gamma_i$  を考慮し、照査用せん断力  $V_d$ 、設計せん断耐力  $V_{yd}$  を算定する。

$$V_d = \gamma_i \cdot \gamma_a \cdot V$$

$$V_{yd} = V_y / (\gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2})$$

考慮した安全係数を第5-2-9表に示す。ここで、部材係数  $\gamma_{b1}$  については、実験又はせん断耐力式により得られるせん断耐力と材料非線形解析により得られるせん断耐力との比率により設定することとし、解析における構成則の相違や、要素の種類、要素分割、材料物性の設定、入力増分等、多岐にわたる解析者間の差を考慮する。

具体的には、土木学会マニュアルに示される17ケースの材料非線形解析を実施し、実験又はせん断耐力との差が最も大きいCase No. 8の部材係数1.15を設定する（第5-2-10表）。

第5-2-9表 考慮した安全係数

安全係数		値	設定根拠
部材係数	$\gamma_{b1}$	1.15	別途実施する材料非線形解析により設定
	$\gamma_{b2}$	1.00	地震応答解析による層間変形角より設定
構造物係数	$\gamma_i$	1.00	構造物の重要度は、基準地震動 $S_s$ により評価することで包絡されると判断
構造解析係数	$\gamma_a$	1.05	各種文献より保守的に設定
材料係数	$\gamma_{mc}$	1.3	各種文献より設定

第5-2-10表 部材係数  $\gamma_{b1}$  の設定

Case No.	実験結果	解析結果	部材係数 (解析結果/ 実験結果)
	せん断耐力 (kN)	せん断耐力 (kN)	
1	475	461	0.97
2	1,187	1,167	0.98
3	324	363	1.12
4	294	314	1.07
5	581	510	0.88
6	329	343	1.04
7	1,587	1,716	1.08
8	350	402	1.15
9	855	863	1.01
10	165	108	0.65
11	333	346	1.04
12	127	105	0.83
13	188	128	0.68
14	163	120	0.74
15	273	188	0.69
16	356	324	0.91
17	432	252	0.58
平均	—	—	0.91
標準偏差	—	—	0.18



### 3. 屋外重要土木構造物の減衰定数

#### (1) 減衰の設定について

今回工認で採用している時刻歴応答解析において、地盤及び構造物の減衰は、粘性減衰と履歴減衰とで考慮している。

粘性減衰による減衰は、固有値解析にて求められる固有周期と各材料の減衰比に基づき、質量マトリックス及び剛性マトリックスの線形結合で表される以下のRayleigh減衰を解析モデル全体に与える。なお、卓越する基準モードについては解析モデル全体の固有値解析において、卓越するモードを選定している。

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$

[C]：減衰係数マトリックス，[M]：質量マトリックス

[K]：剛性マトリックス， $\alpha$ ， $\beta$ ：係数

係数 $\alpha$ ， $\beta$ は、解析モデル全体系の固有値解析において、卓越するモードの減衰とRayleigh減衰が一致するように、以下の式により決定する。

$$h_n = \alpha / 2 \omega_n + \beta \omega_n / 2$$

$h_n$ ：固有値解析により求められたn次モードの減衰定数

$\omega_n$ ：固有値解析により求められたn次モードの固有円振動数

卓越するモードは、全体系の固有値解析における刺激係数及びモード図にて決定する。

設定したRayleigh減衰の一例（取水槽）を第5-3-1図に、Rayleigh減衰の設定のために実施した固有値解析結果を第5-3-1表に、固有値解析のモード図を第5-3-2図に示す。

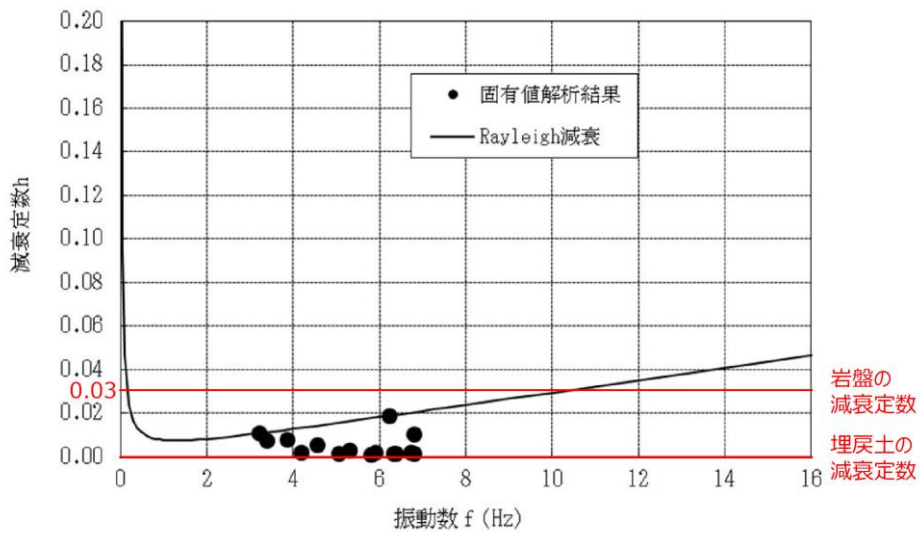
取水槽の固有値解析結果によると、各モード次数の減衰定数は0～2%程度となっている。これは取水槽周辺の表層地盤に埋戻土（減衰定数0%）が分布していることが影響していると判断した。

Rayleigh減衰の設定に際しては、加振方向に振動するモードの刺激係数の大きさ及びモード図を選定の指標とした。

取水槽の場合、刺激係数の値及びモード図より1次モード及び10次モードを選定した。

1次及び10次モードは全体系で大きく振動しており、その他のモードは表層地盤（埋戻土）が局所的に振動していることから、モード図からも主要なモードは1次及び10次モードであると判断した。

履歴減衰による減衰は、構造部材の部材非線形性（ファイバーモデルのコンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ関係）における非線形の程度に応じた値となる。



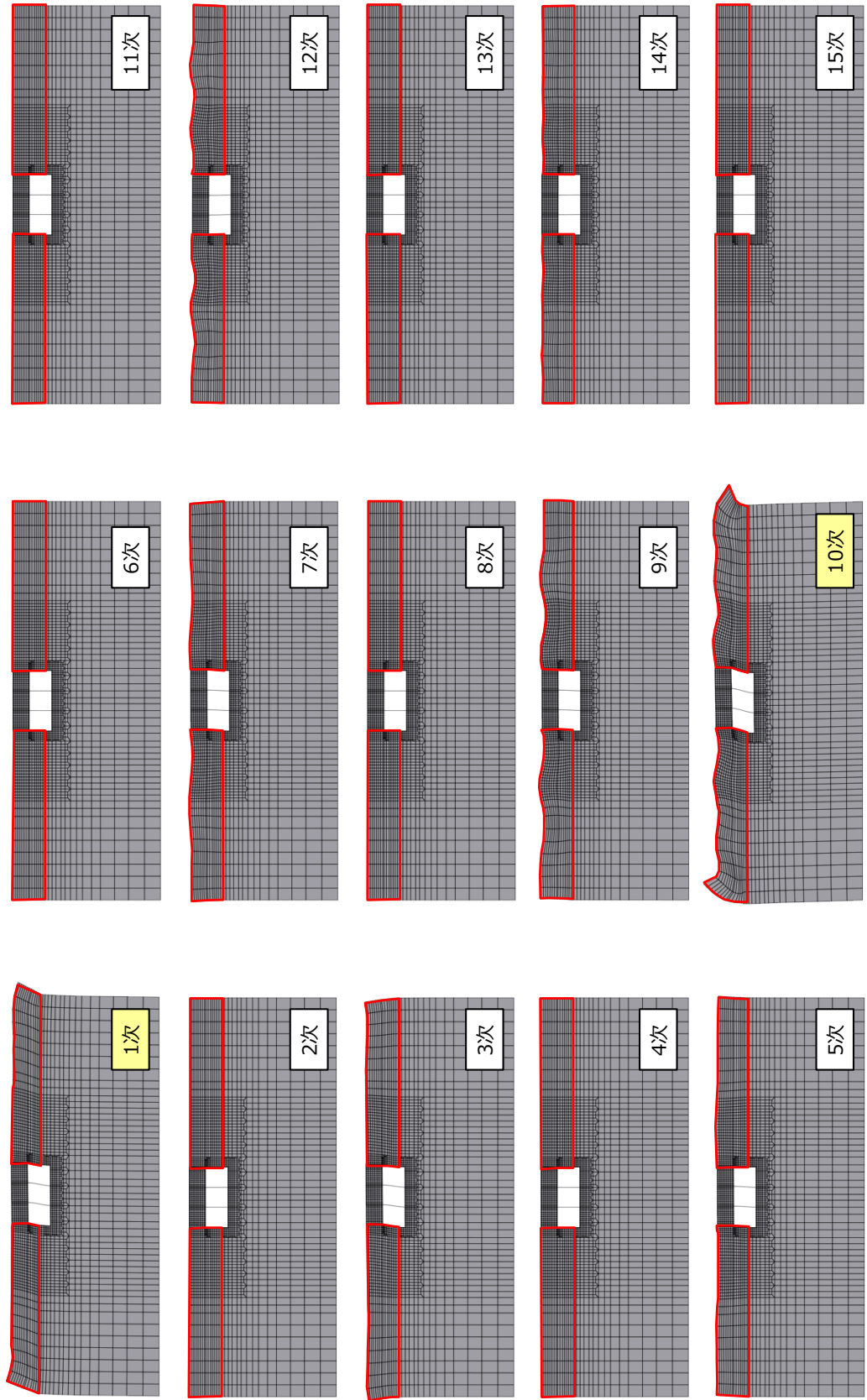
第5-3-1図 設定したRayleigh減衰（取水槽の例）

第5-3-1表 固有値解析結果（取水槽の例）

モード 次数	固有円振動数 $\omega$ (rad/s)	固有振動数 F (Hz)	固有周期 T (s)	減衰定数 h	刺激係数(水平) $\beta$
1	20.275	3.227	0.310	0.0108	3159.600
2	21.257	3.383	0.296	0.0072	0.000
3	24.272	3.863	0.259	0.0079	922.350
4	26.316	4.188	0.239	0.0021	0.000
5	28.729	4.572	0.219	0.0051	348.170
6	31.765	5.056	0.198	0.0012	0.000
7	33.307	5.301	0.189	0.0028	383.250
8	36.410	5.795	0.173	0.0011	0.000
9	37.161	5.914	0.169	0.0020	603.040
10	39.201	6.239	0.160	0.0188	-3412.700
11	39.702	6.319	0.158	0.0013	0.000
12	40.138	6.388	0.157	0.0014	-423.950
13	42.302	6.733	0.149	0.0017	0.000
14	42.692	6.795	0.147	0.0012	-150.580
15	42.748	6.804	0.147	0.0103	0.000

■ : Rayleigh減衰のフィッティングに用いた次数

凡例  
 埋戻土



第5-3-2図 固有値解析のモード図

## (2) 既工認と今回工認との相違について

今回工認において、固有値解析における減衰定数は、岩盤は減衰3%、埋戻土は減衰0%、構造部材は減衰2%とした。

既工認では、時刻歴応答解析及び周波数応答解析における構造部材の減衰定数は5%を用いた（J E A G 4 6 0 1 -1987 記載）。

非線形解析における粘性減衰による減衰の値は、道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（平成14年3月）<sup>1)</sup>において、構造部材の非線形性を非線形履歴モデルで表した場合には、この部材の履歴減衰は履歴モデルによって自動的に解析に取り入れられるため、非線形履歴モデルを用いて表した部材の減衰定数は、コンクリート部材は2%（0.02）程度、鋼部材は1%（0.01）程度とするのがよいとされている。

最新の道路橋示方書・同解説（平成29年11月）<sup>2)</sup>においても、構造部材の非線形性を非線形履歴モデルで表した場合の減衰定数について、鉄筋コンクリート橋脚は2%（0.02）とされている。

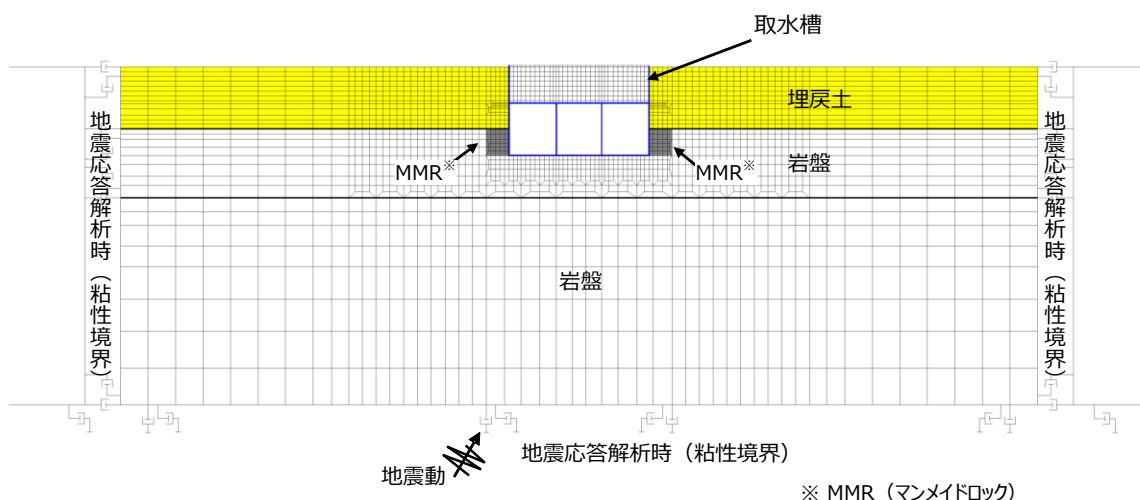
以上のように、粘性減衰の減衰定数は、履歴減衰が生じない状態等における解析上の安定のために設定される値であるため、構造物の減衰について減衰2%を採用していることは、技術的妥当性を有するものと判断した。

## (3) 構造物の減衰定数の影響

解析モデルの例を第5-3-3図に示す。解析モデルの中で構造物の占める割合は小さいため、構造物の減衰の影響は小さいと考えられる。

既工認と同様に、岩盤は減衰3%、埋戻土は減衰0%、構造部材は減衰5%に設定した固有値解析における解析モデル全体の一次モード減衰を確認したところ、比率（既工認/今回工認）は1.06であった。

以上のことから、地盤の減衰の影響が支配的であり、構造物の減衰の影響は小さいと考えられる。



第5-3-3図 解析モデル（取水槽の例）

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 平成 14 年 3 月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 平成 29 年 11 月

#### 4. 耐震性能照査の手順

機器・配管を支持する屋外重要土木構造物の照査では、想定される荷重条件に対して機器・配管の機能を維持することが主たる目的となる。このため、土木学会マニュアルでは、機器・配管を支持する屋外重要土木構造物の耐震性能評価においては、機器・配管の機能維持のために屋外重要土木構造物に求められる制約条件を与条件としている。

屋外重要土木構造物の耐震性能の照査に当たっては、地盤と構造物の連成解析を行い、床応答や変位を算定する。機器・配管の耐震安全性は、当該構造物を支持する屋外重要土木構造物の床応答や変位を用いて、別途確認を行う。第 5-4-1 表に対象構造物の例を示す。

第5-4-1表 検討対象構造物の例

屋外重要土木構造物	機器・配管
取水槽	原子炉補機海水ポンプ 原子炉補機海水ストレナ 原子炉補機海水系配管
屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	非常用ガス処理系配管 非常用ディーゼル発電設備配管

## 5. 隣接構造物のモデル化

既工認では、簡便かつ保守的に評価する観点から、評価対象構造物に隣接する建物等（以下「隣接構造物」という。）は地震応答解析モデルでは地盤としてモデル化していた。今回工認では、評価対象構造物に隣接する構造物の影響を考慮した現実的な挙動特性を把握する必要がある場合について、隣接する構造物を等価剛性でモデル化する。

### 5.1 隣接構造物のモデル化方針

評価対象構造物と隣接する構造物が接している場合、又は評価対象構造物と隣接する構造物が近接している場合においては、隣接する構造物の挙動を含めた応答を正しく評価する必要がある。したがって、隣接構造物の種類、規模及び設置箇所における地盤状況を考慮し、隣接構造物が評価対象構造物の地震時応答に与える影響及び間接支持する設備がある場合はその設備（以下、「収納設備」とする。）の地震時応答に与える影響を踏まえ、モデル化要否を検討する。

隣接構造物をモデル化する場合には、隣接構造物を等価剛性でモデル化する。モデル化対象は、岩盤上に設置されており、評価対象構造物と同等以上の大きさで耐震性を有する建物・構造物（原子炉建物等）とする。なお、評価対象構造物が隣接構造物へ及ぼす影響については、評価対象構造物の規模、構造及び応答特性等を踏まえ、詳細設計段階において影響検討を実施する。

隣接構造物のモデル化方針を以下に示す。

#### ①評価対象構造物と隣接構造物が接している場合

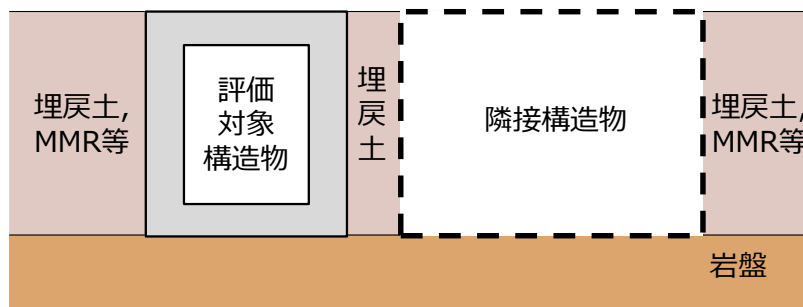
評価対象構造物及び収納設備の地震時応答に与える影響が大きいことから、隣接構造物をモデル化するとともに、評価対象構造物と隣接構造物との相互影響について別途確認する。評価対象構造物と隣接構造物が接している場合の概略図を第5-5-1図に示す。



第5-5-1図 評価対象構造物と隣接構造物が接している場合 概略図

②評価対象構造物と隣接構造物との間が埋戻土の場合

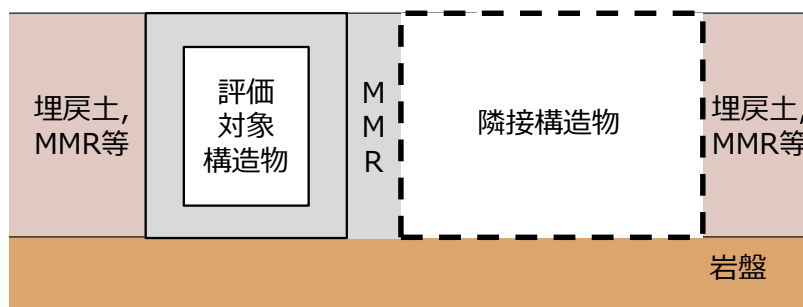
評価対象構造物と隣接構造物の間が埋戻土を介しており、評価対象構造物と隣接構造物が近接している場合は、埋戻土よりも剛性の大きい隣接構造物をモデル化することにより、解析モデルの固有周期が短くなる等、評価対象構造物及び収納設備の地震時応答に与える影響が大きいことから、隣接構造物をモデル化するとともに、評価対象構造物と隣接構造物との相互影響について別途確認する。評価対象構造物と隣接構造物との間が埋戻土の場合の概略図を第5-5-2図に示す。



第5-5-2図 評価対象構造物と隣接構造物との間が埋戻土の場合 概略図

③評価対象構造物と隣接構造物との間がMMRの場合

評価対象構造物と隣接構造物の間がMMRを介している場合は、隣接構造物をモデル化することにより、解析モデルの固有周期が短くなる等、評価対象構造物及び収納設備の地震時応答に与える影響が大きいことから、隣接構造物をモデル化するとともに、評価対象構造物と隣接構造物との相互影響について別途確認する。評価対象構造物と隣接構造物との間がMMRの場合の概略図を第5-5-3図に示す。

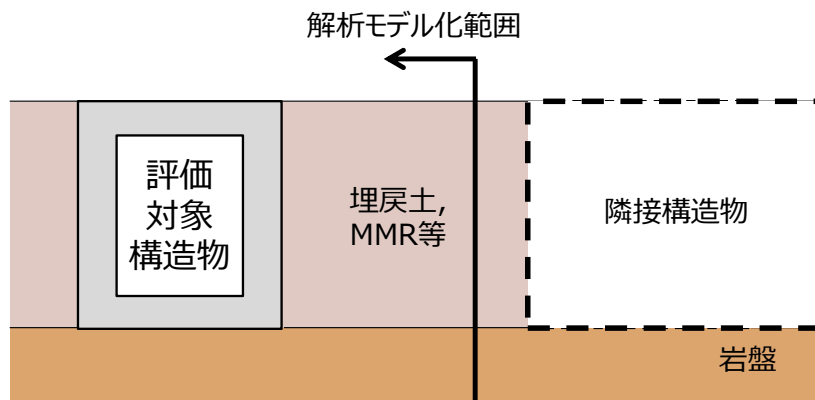


第5-5-3図 評価対象構造物と隣接構造物との間がMMR（マンメイドロック）の場合 概略図



④-1 評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合又は十分な離隔を有する場合（隣接構造物が評価対象構造物の解析モデル範囲外にある場合）

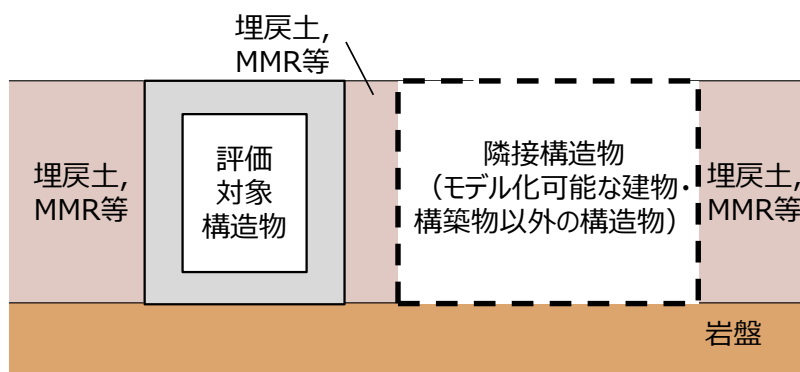
評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合、又は評価対象構造物と隣接構造物の間が十分な離隔を有する場合、隣接構造物の応答が評価対象構造物の地震時応答に与える影響は小さいことから、隣接構造物をモデル化しない。評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合又は十分な離隔を有する場合の概略図を第5-5-4図に示す。



第5-5-4図 評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合又は十分な離隔を有する場合 概略図

④-2 評価対象構造物の周辺にモデル化対象の建物・構築物以外の構造物が隣接する場合

評価対象構造物の周辺に、モデル化対象の建物・構築物（原子炉建物等）以外の構造物が隣接する場合、隣接構造物をモデル化しない。概略図を第5-5-5図に示す。

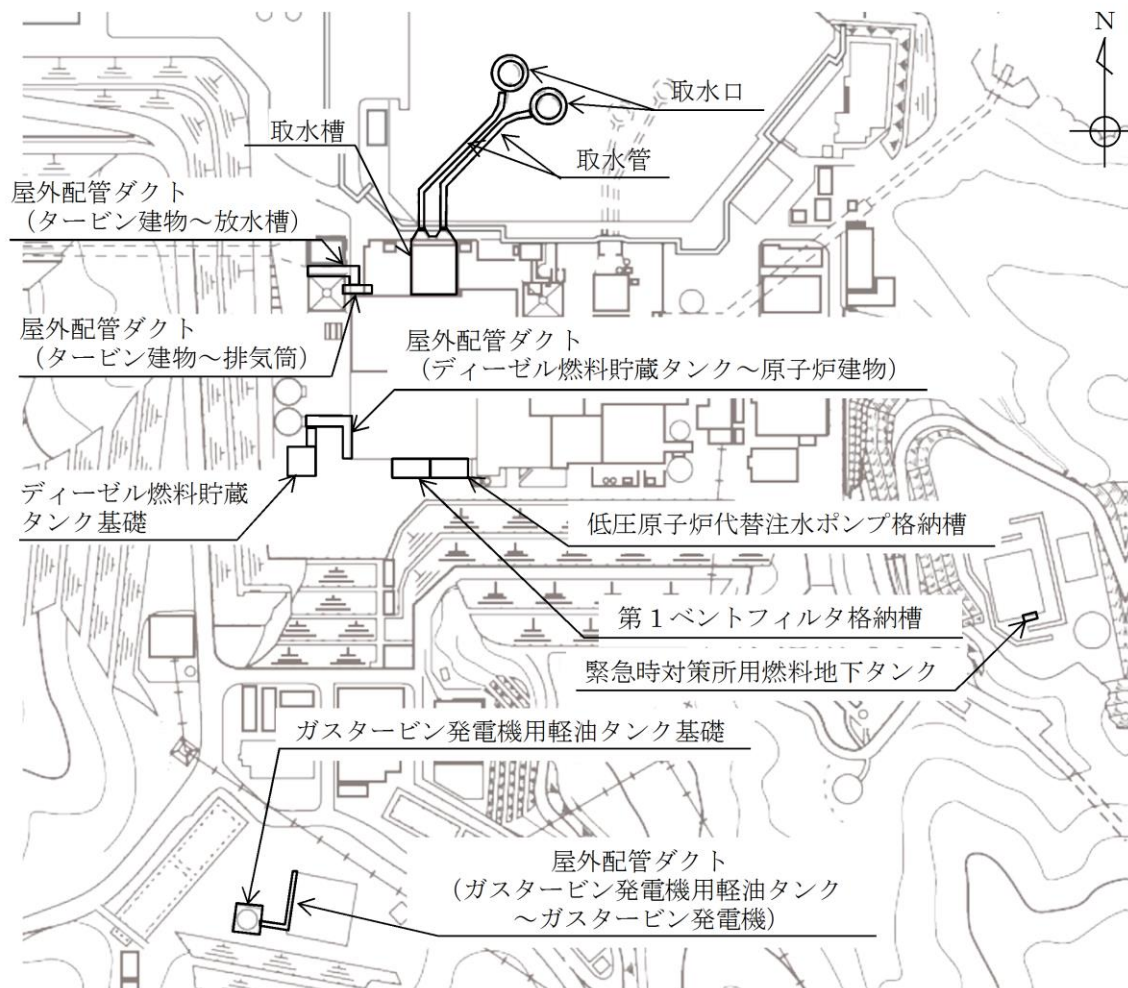


第5-5-5図 評価対象構造物の周辺にモデル化対象の建物・構築物以外の構造物が隣接する場合 概略図

## 5.2 隣接構造物のモデル化

評価対象設備の配置図を第5-5-6図に示す。

隣接構造物のモデル化方針を踏まえ、各評価対象設備について隣接構造物のモデル化を検討した。隣接構造物のモデル化（例）を第5-5-1表に示す。



第5-5-6図 評価対象設備 配置図

第5-5-1表 隣接構造物のモデル化 (例)

分類	設備名称	隣接構造物のモデル化方針*	モデル化方針選定の理由	隣接構造物のモデル化
設計基準対象施設のうち 屋外重要土木構造物	取水槽	①	南側にタービン建物が隣接している。	する
	屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)	②	南側に埋戻土を介してタービン建物が隣接している。	する
	屋外配管ダクト (タービン建物～放水槽)	①	南側に排気筒が隣接している。	する
		③	西側にMMRを介して排気筒が隣接している。	する
	④-2	北側に放水槽が隣接しているが、耐震性を有しないことから、モデル化しない。	しない	
	ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	③	東側にMMRを介して原子炉建物が隣接している。	する
	屋外配管ダクト (ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物)	②	東側に埋戻土を介して原子炉建物が隣接している。	する
	取水管	④-1	解析モデル範囲内に隣接構造物が存在しない。	しない
	取水口	④-1	取水口Iの南側、取水口IIの西側に取水管が隣接しているが、取水口と取水管は可撓ジョイントで接続されており、取水管の影響を受けないことから、隣接構造物が存在しない場合と整理した。	しない
	第1ベントフィルタ格納槽	③	北側にMMRを介して原子炉建物が隣接している。また、西側にMMRを介して補助消火水槽が隣接している。	する
重大事故等対処施設のうち 土木構造物*1	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	③	西側にMMRを介して第1ベントフィルタ格納槽が隣接している。また、北側にMMRを介して原子炉建物が隣接している。	する
	緊急時対策所用燃料地下タンク	④-2	北側に免震重要棟が隣接するが、免震重要棟は免震装置を有しており、その影響を受けないことから、モデル化しない。	しない
	ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	④-1	解析モデル範囲に屋外配管ダクト (ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機) 及び常設代替交流電源設備建物が存在するが、地表面付近の岩盤上に設置され、ガスタービン発電機用軽油タンク基礎へ与える影響は小さいことから隣接構造物が存在しない場合と整理した。	しない
	屋外配管ダクト (ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)	④-1	解析モデル範囲に常設代替交流電源設備建物が存在するが、地表面付近の岩盤上に設置され、屋外配管ダクト (ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機) へ与える影響が小さいことから、隣接構造物が存在しない場合と整理した。	しない
波及的影響を及ぼすおそれのある施設のうち土木構造物	免震重要棟遮断壁	④-1	解析モデル範囲に緊急時対策所が存在するが、地表面付近の岩盤上に設置され、免震重要棟遮断壁へ与える影響は小さいことから隣接構造物が存在しない場合と整理した。	しない

\* ① 評価対象構造物と隣接構造物が接している場合

② 評価対象構造物と隣接構造物との間が埋戻土の場合

③ 評価対象構造物と隣接構造物との間がMMRの場合

④-1 評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合又は十分な距離を有する場合 (隣接構造物が評価対象構造物のFEMモデル化範囲外にある場合)

④-2 評価対象構造物の周辺にモデル化対象の建物・構築物以外の構造物が隣接する場合

#### 6. 3次元静的材料非線形解析の適用性

島根原子力発電所2号炉の屋外重要土木構造物等のうち取水槽の構造解析に用いる，既工認，並びに先行プラントも含めた旧規制及び規制下における工認実績のない3次元静的材料非線形解析を採用する。

3次元静的材料非線形解析の評価方法及び適用性については，「別添－6 島根原子力発電所2号炉 屋外重要土木構造物等の耐震評価における断面選定について」において説明する。

免震重要棟遮蔽壁のモデル化方針

屋外の上位クラス施設である緊急時対策所の周辺には、波及的影響を及ぼすおそれのある下位クラス施設である免震重要棟遮蔽壁が位置する。

免震重要棟遮蔽壁は、免震重要棟廻りに延長約 300m に亘り、岩盤上に設置される鉄筋コンクリート造の遮蔽壁であり、このうち緊急時対策所に影響を及ぼすおそれのある範囲は直線状の区間 (36m) である。また、免震重要棟遮蔽壁は、地盤面からの高さが 9.4m、厚さは 50cm 以上であり、杭基礎 (鋼管杭) 構造である。

平面図を図 1 に、断面図を図 2 に示す。

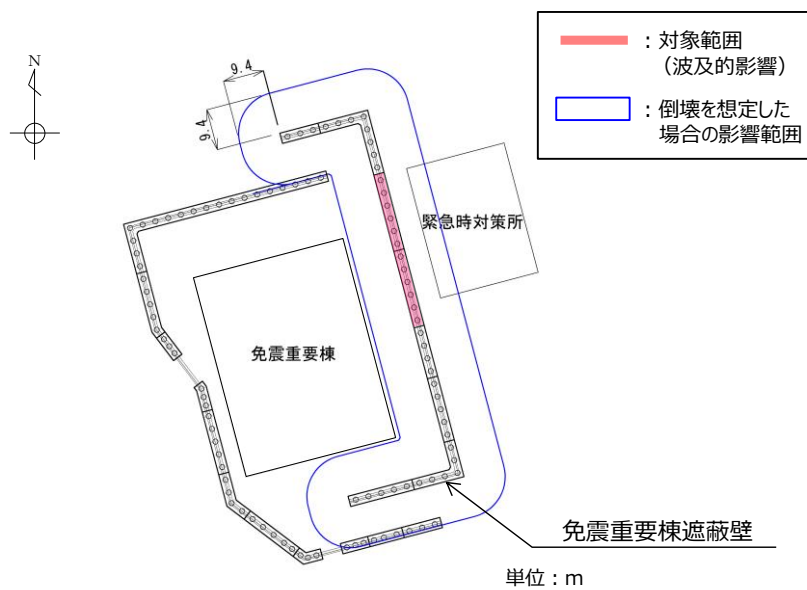


図 1 免震重要棟遮蔽壁の平面図

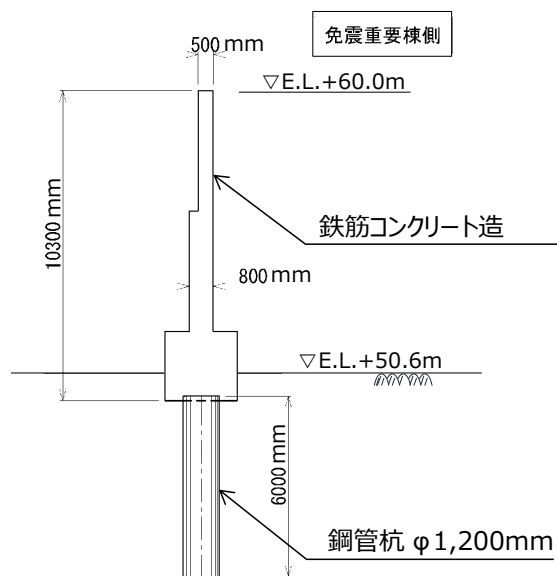


図 2 免震重要棟遮蔽壁の断面図

免震重要棟遮蔽壁は、地盤～杭基礎のモデルをSRモデル、遮蔽壁を質点系モデルとした地盤～杭基礎～遮蔽壁の連成系モデルにより地震応答解析を行う方針とし、「乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程 JEAC4616-2009」に準拠し、杭基礎と地盤の相互作用を考慮できる薄層要素法で地盤ばねを評価することとしていた。

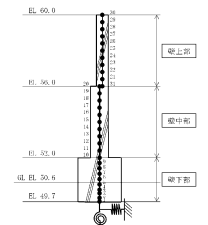
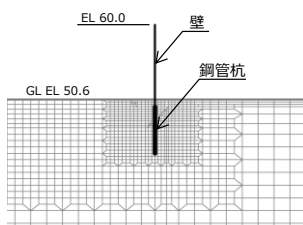
免震重要棟遮蔽壁の底面は解放基盤相当の岩盤が出現していることから、SRモデルに適合する地盤である。また、免震重要棟遮蔽壁は、基礎幅に比べて壁の高さが高く、構造物下端のモーメントが大きいいため、基礎の安定性を考慮して杭基礎を採用し、基礎幅は狭いものの、奥行き方向に杭が複数存在する構造としている。

目地間の標準的な1ブロックは、奥行き方向に5本の杭で構成されている。SRモデルでは地盤ばねを設定する必要があるが、薄層要素法による地盤ばねの算出方法は、群杭と地盤の相互作用が評価可能であることから、本構造物基礎の1×5の杭配置に関しても適用可能と判断していた。

しかしながら、薄層要素法は杭と地盤の相互作用や群杭の影響を考慮するために用いられる一般的な手法（入門・建物と地盤と動的相互作用 日本建築学会1996）であるが、準拠した「乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程 JEAC4616-2009」を用いて、免震重要棟遮蔽壁のように基礎幅に比べて壁の高さが高く、岩盤に杭を設置する構造物の既工認実績はない。

したがって、「乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程 JEAC4616-2009」の適用に関して、本構造物の設置環境及び構造的特徴を踏まえ、先行炉審査実績を有する2次元FEMモデルによる地震応答解析に見直す。

表1 免震重要棟遮蔽壁のモデル化方針の比較

解析モデル(例)		
モデル化方針	地盤～杭：SRモデル 壁：質点系モデル	2次元FEMモデル (鋼管杭及び壁：梁要素，地盤：平面ひずみ要素)
設計概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>「乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程JEAC4616-2009」に記載の「地盤～杭基礎～建屋連成系の地震応答解析モデル」に準拠して設計する。</li> <li>地盤ばね（水平・回転）は、薄層要素法に基づく評価を実施したうえで、「原子力発電所耐震設計審査指針 JEAG4601-1991追補版」の近似法により設定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼管杭が設置される断面（3m間隔）における2次元FEM解析を実施し、鋼管杭及び壁に作用する断面力を算出する。</li> <li>免震重要棟遮蔽壁の要求性能を踏まえ、鋼管杭及び壁に作用する断面力に対して、目標性能（終局状態に至らない）を満足する設計とする。</li> </ul>
評価	○	◎

## 島根原子力発電所 2 号炉

屋外重要土木構造物等の耐震評価に  
おける断面選定について

## 屋外重要土木構造物等の耐震評価における断面選定の考え方

### 1. 方針

本資料では、屋外重要土木構造物等<sup>※1</sup>の耐震評価における断面選定の考え方について示す。なお、津波防護施設については「島根原子力発電所2号炉 津波による損傷の防止」に示す。

※1 屋外重要土木構造物及び重大事故等対処施設のうち土木構造物を「屋外重要土木構造物等」という。

本資料で記載する屋外重要土木構造物等の一覧を第6-1-1表に、屋外重要土木構造物等に設置される主要な設備一覧を第6-1-2表に、全体配置図を第6-1-1図に示す。

第6-1-1表 評価対象構造物一覧

分類	設備名称	構造形式
屋外重要土木構造物等	・取水槽	箱型構造物
	・ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	
	・低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	
	・第1ベントフィルタ格納槽	
	・緊急時対策所用燃料地下タンク	
	・屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	線状構造物
	・屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）	
	・屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）※	
	・屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）	
	・取水口	円筒状構造物
	・ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	直接基礎
	・取水管	管路構造物

※ 燃料移送系配管ダクトと屋外配管ダクト（復水貯蔵タンク～原子炉建物）を屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）に統一



第6-1-2表 評価対象構造物に設置される設備一覧

設備名称	屋外重要 土木構造物	常設重大 事故等対 処設備	常設重大 事故等対 処施設	設置される設備				
				名称	耐震	耐津波		常設重大 事故等対 処設備
						浸水防止 設備	津波監視 設備	
取水槽	○	○※1	○	原子炉補機海水ストレーナ	○	-	-	○
				高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ	○	-	-	○
				原子炉補機海水系配管・弁	○	-	-	○
				高圧炉心スプレイ補機海水系配管・弁	○	-	-	○
				高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ	○	-	-	○
				原子炉補機海水ポンプ	○	-	-	○
				除じん機エリア防水壁	-	○	-	-※2
				除じん機エリア水密扉	-	○	-	-※2
				取水槽床ドレン逆止弁	-	○	-	-※2
取水槽水位計	-	-	○	-※2				

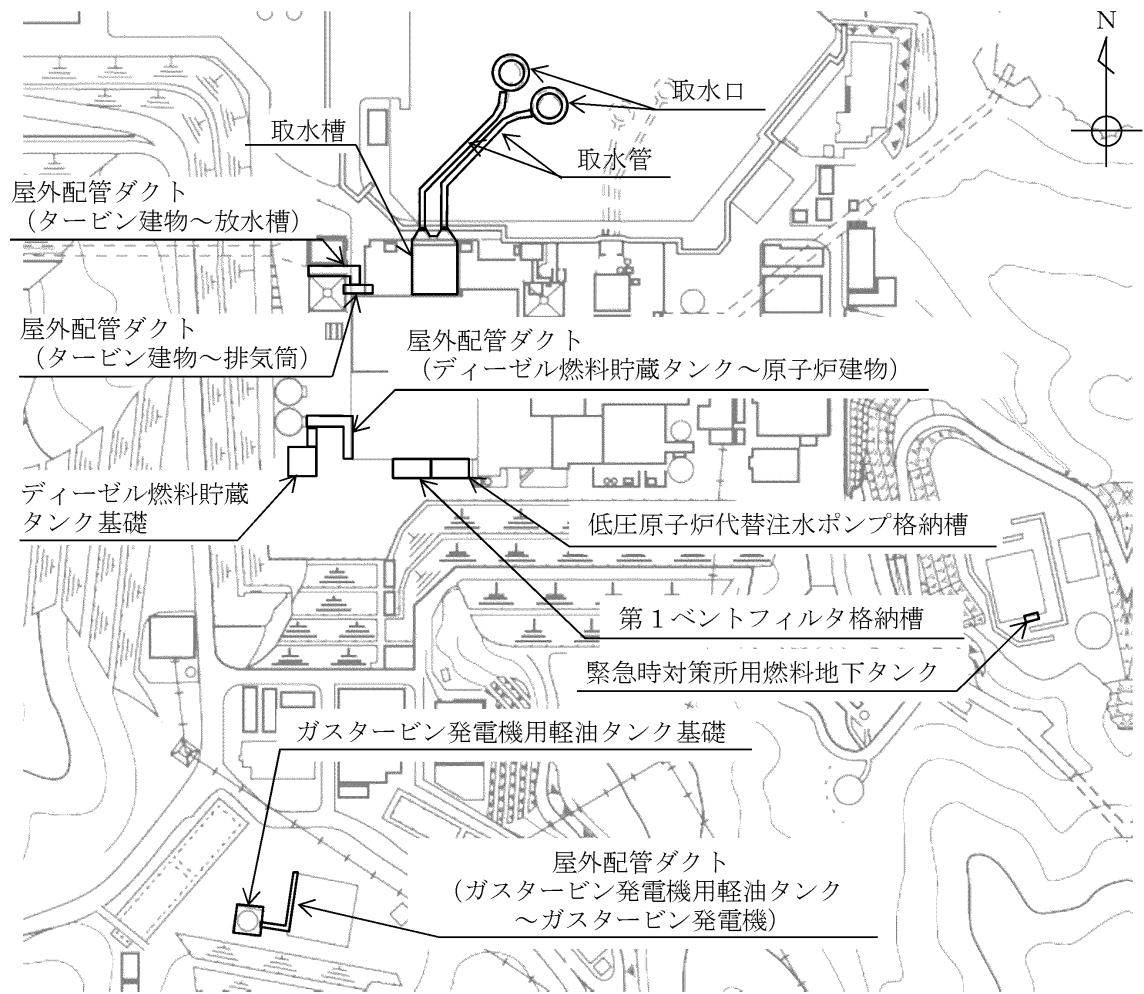
屋外重要土木構造物：耐震上重要な機器・配管系の間接支持機能。若しくは非常用における海水の通水機能を求められる土木構造物  
 常設重大事故等対処設備：常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故緩和設備又は常設重大事故防止設備（設計基準拡張）  
 常設重大事故等対処施設：常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故緩和設備又は常設重大事故防止設備（設計基準拡張）が設置される重大事故等対処施設  
 （特定重大事故等対処施設を除く）  
 耐震：耐震重要施設（浸水防止設備、津波監視設備を除く）  
 ※1：非常用取水設備  
 ※2：常設重大事故等対処設備に対する浸水防止設備、津波監視設備

設備名称	屋外重要 土木構造物	常設重大 事故等対 処設備	常設重大 事故等対 処施設	設置される設備				
				名称	耐震	耐津波		常設重大 事故等対 処設備
						浸水防止 設備	津波監視 設備	
ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	○	-	○	非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ	○	-	-	○
				非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク	○	-	-	○
				非常用ディーゼル発電設備燃料移送系 配管・弁	○	-	-	○
低圧原子炉代替注水ポンプ 格納槽	-	-	○	低圧原子炉代替注水ポンプ	-	-	-	○
				低圧原子炉代替注水系 配管・弁	-	-	-	○
第1ペントフィルタ格納槽	-	-	○	第1ペントフィルタスクラバ容器	-	-	-	○
				第1ペントフィルタ銀ゼオライト容器	-	-	-	○
				圧力開放板	-	-	-	○
				格納容器フィルタペント系配管・弁	-	-	-	○
緊急時対策所用 燃料地下タンク	-	○	-	-	-	-	-	-

屋外重要土木構造物：耐震上重要な機器・配管系の間接支持機能。若しくは非常用における海水の通水機能を求められる土木構造物  
 常設重大事故等対処設備：常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故緩和設備又は常設重大事故防止設備（設計基準拡張）  
 常設重大事故等対処施設：常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故緩和設備又は常設重大事故防止設備（設計基準拡張）が設置される重大事故等対処施設  
 （特定重大事故等対処施設を除く）  
 耐震：耐震重要施設（浸水防止設備、津波監視設備を除く）

設備名称	屋外重要 土木構造物	常設重大 事故等対 処設備	常設重大 事故等対 処施設	設置される設備				
				名称	耐震	耐津波		常設重大 事故等対 処設備
						浸水防止 設備	津波監視 設備	
屋外配管ダクト（タービン建物～ 排気筒）	○	-	○	非常用ガス処理系配管・弁	○	-	-	○
				非常用ディーゼル発電設備燃料移送系 配管・弁	○	-	-	○
				高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料移送系 配管・弁	○	-	-	○
屋外配管ダクト（タービン建物～ 放水槽）	○	-	-	原子炉補機海水系配管	-	○	-	-
				タービン補機海水系配管・弁	-	○	-	-
				液体廃棄物処理系配管・弁	-	○	-	-
屋外配管ダクト（ディーゼル燃 料貯蔵タンク～原子炉建物）	○	-	○	非常用ディーゼル発電設備燃料移送系 配管・弁	○	-	-	○
屋外配管ダクト（ガスタービン発 電機用軽油タンク～ガスタービ ン発電機）	-	-	○	ガスタービン発電機用燃料移送系配管・弁	-	-	-	○
取水口	○	○※1	-	-	-	-	-	-
ガスタービン発電機用 軽油タンク基礎	-	-	○	ガスタービン発電機用軽油タンク	-	-	-	○
取水管	○	○※1	-	ガスタービン発電機用燃料移送系配管・弁	-	-	-	○
取水管	○	○※1	-	-	-	-	-	-

屋外重要土木構造物：耐震上重要な機器・配管系の間接支持機能。若しくは非常用における海水の通水機能を求められる土木構造物  
 常設重大事故等対処設備：常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故緩和設備又は常設重大事故防止設備（設計基準拡張）  
 常設重大事故等対処施設：常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故緩和設備又は常設重大事故防止設備（設計基準拡張）が設置される重大事故等対処施設  
 （特定重大事故等対処施設を除く）  
 耐震：耐震重要施設（浸水防止設備、津波監視設備を除く）  
 ※1：非常用取水設備



第6-1-1図 評価対象構造物 全体配置図

島根原子力発電所の屋外重要土木構造物等は、箱型構造物、線状構造物、円筒状構造物、直接基礎及び管路構造物の5つの構造形式に分類され、構造上の特徴として、明確な強軸及び弱軸を有するものと、強軸及び弱軸が明確でないものが存在することから、構造的特徴を踏まえて、2次元地震応答解析により耐震評価を行う構造物と、3次元モデルにより耐震評価を行う構造物に分けられる。

通水方向及び配管の管軸方向と直交する断面に構造部材の配置が少なく、明確に通水方向及び配管の管軸方向と直交する断面が弱軸となる構造物は、2次元地震応答解析により耐震評価を行う。よって、耐震評価上厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。なお、弱軸方向断面と強軸方向断面が明確な線状構造物については、弱軸方向断面を耐震評価候補断面とするが、床応答の観点において強軸方向断面も含めて選定する。

また、以下に示す構造的特徴を有する構造物は、3次元モデルを用いて水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響を考慮して耐震評価を行う。よって、3次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を直交する2方向から評価対象断面として選定する。

①強軸及び弱軸が明確でない構造物

②複雑な構造を有する構造物

- ・弱軸方向断面において加振方向と平行に配置される壁（以降、妻壁と呼ぶ）を複数有する構造物
- ・複数の構造物が一体化している構造物

第6-1-3表に示すとおり、屋外重要土木構造物等の耐震設計における解析手法は、既工認実績を有する手法を用いるが、取水槽における3次元静的非線形解析は既工認実績がないことから、審査実績がある先行サイト（女川2号炉）との比較を行い、適用性について確認する。

第6-1-3表 屋外重要土木構造物等の構造的特徴及び解析手法の整理

構造形式	設備名称	耐震評価候補断面	構造的特徴		妻壁のモデル化の有無	解析手法		既工認実績
			弱軸・強軸の有無	複雑な構造の有無		地震応答解析	構造解析	
箱型 構造物	取水槽	弱軸方向	有り (複数の妻壁 ※を有する)	有り	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	3次元FEMモデルによる静的非線形解析	無	
		強軸方向						
	ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	弱軸方向(地中部・半地下部)	無し	無し	無し	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	有
		強軸方向(地中部・半地下部)						
	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	弱軸方向	無し	無し	無し	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	有
		強軸方向						
第1ベンチリタ格納槽	弱軸方向	無し	無し	無し	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	有	
	強軸方向							
緊急時対策用燃料地下タンク	弱軸方向	明確な強軸及び弱軸断面を有する。	無し	無し	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	有	
	強軸方向							
線状 構造物	屋外配管ダクト(タービン建物~放水槽)との一体化部	弱軸方向	有り (他ダクトと一体化)	無し	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	3次元FEMモデルによる静的線形解析	有	
		強軸方向						
	屋外配管ダクト(タービン建物~放水槽)	弱軸方向	無し	無し	無し	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	有
		強軸方向						
	屋外配管ダクト(ディーゼル燃料貯蔵タンク~原子炉建物)	弱軸方向	無し	無し	無し	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	有
		強軸方向						
屋外配管ダクト(ガスタービン発電機用軽油タンク~ガスタービン発電機)	弱軸方向	無し	無し	無し	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	有	
	強軸方向							
円筒状 構造物	取水口	構造物中央を通る断面	無し	無し	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	3次元FEMモデルによる静的線形解析	有	
		上記の直交方向						
直接 基礎	ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	構造物中央を通る断面	無し	無し	SRモデルによる時刻歴応答解析	3次元FEMモデルによる静的線形解析	有	
		上記の直交方向						
管路 構造物	取水管	管軸方向	無し	無し	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	2次元FEMモデルによる時刻歴応答解析	有	
		管軸直交方向						

※ 弱軸方向断面において加振方向と平行に配置される壁

箱型構造物に分類される評価対象構造物は、鉄筋コンクリート造で構成されており、主に海水の通水機能や配管等の間接支持機能を維持するため、通水方向や間接支持する配管の管軸方向に対して空間を保持できるように構造部材が配置されている。通水方向や配管の管軸方向と直交する方向には構造部材の配置が少ないことから、構造上の特徴として、明確に通水方向や配管の管軸方向が強軸に、通水方向や配管の管軸方向と直交する方向が弱軸となる。通水以外の要求機能が求められる箱型構造物は、加振方向と直交する方向の構造物の長さに対する加振方向に平行に配置される壁の厚さの割合が小さい方が弱軸となり、大きい方が強軸となる。箱型構造物の設計方針として、強軸方向の地震時挙動は、弱軸方向に対して顕著な影響を及ぼさないが、強軸方向断面についても、弱軸方向と同じように要求機能があり、間接支持する機器・配管の有無や浸水防護壁等の応答影響評価の必要性があることから、耐震評価候補断面に追加する。弱軸方向断面では、配筋を含め構造的特徴が概ね同様である範囲から代表となる範囲を耐震評価候補断面とする。ただし、加振方向と平行に配置される壁が多数ある構造物については、加振方向と平行に配置される壁の影響を考慮するため、必要により壁間の幅を耐震評価候補断面とする。また、強軸方向断面では、加振方向と平行に配置される壁の影響を考慮するため、構造物の奥行幅を耐震評価候補断面とする。箱型構造物の評価対象断面は、以上の理由により構造の安全性に支配的な弱軸方向及び強軸方向から、後述する評価対象断面の選定の流れに基づき選定する。取水槽は、複数の妻壁を有する複雑な構造となっていることから3次元モデルで耐震評価を実施する。3次元モデルに入力する地震時荷重は、2次元地震応答解析により算定することとし、2次元地震応答解析を実施する断面を、構造的特徴等を踏まえて選定する。

線状構造物に分類される評価対象構造物は、鉄筋コンクリート造で構成されており、主に海水の通水機能や配管等の間接支持機能を維持するため、通水方向や間接支持する配管の管軸方向に対して空間を保持できるように構造部材が配置されている。通水方向や配管の管軸方向と直交する方向には構造部材の配置が少ないことから、構造上の特徴として、明確に通水方向や配管の管軸方向が強軸に、通水方向や配管の管軸方向と直交する方向が弱軸となる。線状構造物は、加振方向と平行に配置される壁部材が少ない方が弱軸となり、多い方が強軸となる。強軸方向の地震時挙動は、弱軸方向に対して顕著な影響を及ぼさない。弱軸方向断面では、配筋を含め構造的特徴が概ね同様である範囲から代表となる範囲を耐震評価候補断面とする。線状構造物の評価対象断面は、以上の理由により構造の安全性に支配的な弱軸方向から、後述する評価対象断面の選定の流れに基づき選定する。屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は、部位の一部が他の構造物の部位の一部と一体化している複雑な構造を有していることから3次元モデルで耐震評価を実施する。3次元モデルに入力する地震時荷重は、2次元地震応答解析により算定することとし、2次元地震応答解析を実施する断面を、構造的特徴等を踏まえて選定する。

円筒状構造物及び直接基礎に分類される評価対象構造物は、鋼製及び鉄筋コンクリート造の構造物であり、円筒状及び正方形であるため、箱型構造物や線状構造物と比較して、強軸及び弱軸が明確ではない。評価対象断面の選定においては、構造物中央を通る断面及びその直交方向断面から、後述する評価対象断面の選定の流れに基づき選定する。円筒状構造物である取水口及び直接基礎であるガスタービン発電機用軽油タンク基礎は、強軸及び弱軸が明確でないことから3次元モデルで耐震評価を実施する。3次元モデルに入力する地震時荷重は、取水口は構造物を質点系モデルとした2次元地震応答解析により算定、またガスタービン発電機用軽油タンク基礎はSRモデルによる地震応答解析により算定することとし、地震応答解析を実施する断面を、構造的特徴等を踏まえて選定する。

管路構造物に分類される評価対象構造物は、海水の通水機能を維持するため、通水方向に対して空間を保持できるように構造部材が配置されていることから、構造上の特徴として、明確な弱軸、強軸を有する。評価対象構造物は、鋼製部材で構成されており、管軸方向が強軸方向となり、管軸直交方向が弱軸方向となる。強軸方向の地震時挙動は、弱軸方向に対して顕著な影響を及ぼさない。弱軸方向断面では、延長方向の構造的特徴が一様であることから、代表となる範囲を耐震評価候補断面とする。管路構造物の評価対象断面は、構造の安全性に支配的な弱軸方向から、後述する評価対象断面の選定の流れに基づき選定する。なお、「水道施設耐震工法指針・解説（日本水道協会，1997）」に基づき、一般的な地中埋設管路の設計で考慮される管軸方向断面についても検討する。

また、評価対象断面の選定の流れを以下に示す。

#### (1) 耐震評価候補断面の整理

評価対象構造物の以下の観点から耐震評価候補断面を整理する。

##### ①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況

- ・要求機能に各候補断面で差異がある場合、要求機能に応じた許容限界が異なり、評価対象構造物の耐震評価に影響することから、要求機能の差異の有無により候補断面を整理する。
- ・間接支持する機器・配管系の種類及び設置状況に各候補断面で差異がある場合は、構造物に作用する荷重及び床応答特性が異なり、評価対象構造物及び機器・配管系の耐震評価に影響することから、間接支持する機器・配管系の種類や設置状況に係る差異の有無により候補断面を整理する。

##### ②構造的特徴（部材厚、内空断面、断面急変部、構造物間の連結部等）

- ・構造的特徴に各候補断面で差異がある場合は、構造物に作用する土圧等の荷重及び床応答特性が各断面で異なり、評価対象構造物及び機器・配管系の耐震評価に影響することから、構造的特徴の差異の有無により候補断面を整理する。

##### ③周辺状況（上載荷重、土被り厚、周辺地質、周辺地質変化部、隣接構造物、地下水位<sup>※</sup>）

- ・周辺地質や周辺地質変化部に各候補断面で差異がある場合は、構造物に作用する土圧等の荷重、地震波の伝搬特性及び床応答特性が異なり、評価対象構造物

及び機器・配管系の耐震評価に影響することから、周辺地質の差異の有無により候補断面を整理する。

- ・MMR（マンメイドロック）は、構造物を支持する又は構造物の周囲を埋め戻すコンクリートである。MMRの分布により、構造物に作用する土圧等の荷重、地震波の伝搬特性及び床応答特性に影響を与えることから、周辺地質の中で整理する。なお、MMRは直下の岩盤の物性値を設定することを基本とする。
  - ・隣接構造物による影響については、2次元FEMにてモデル化する隣接構造物の有無や種類に各断面で差異がある場合、構造物に作用する土圧等の荷重及び床応答特性が異なり、評価対象構造物及び機器・配管系の耐震評価に影響することから、モデル化する隣接構造物の差異の有無により候補断面を整理する。
- ※ 地下水位は解析等による地下水位に係る検討結果を踏まえて詳細設計段階で設定する。

#### ④地震波の伝搬特性

- ・地震波の伝搬特性は、周辺状況のうち評価対象構造物下部の岩盤やMMR等の周辺地質の状況により異なることから、観点③の整理を踏まえ、地震波の伝搬特性に係る差異の有無により候補断面を整理する。

#### ⑤床応答特性

- ・観点①～③の整理を踏まえ、床応答特性の差異の有無及び間接支持する機器・配管系の設置状況により候補断面を整理する。

### (2) 評価対象断面の選定

#### ⑥耐震評価候補断面の選定

- ・(1)にて整理した耐震評価候補断面に対して、①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況、②構造的特徴、③周辺状況を考慮し、耐震評価上厳しいと考えられる断面を選定する。

#### ⑦耐震評価候補断面の絞り込み

- ・複数の観点から異なる耐震評価候補断面が複数抽出される場合は、詳細設計段階で実施する浸透流解析結果を踏まえ、地震応答解析を実施して耐震評価候補断面の絞り込みを行う場合もある。

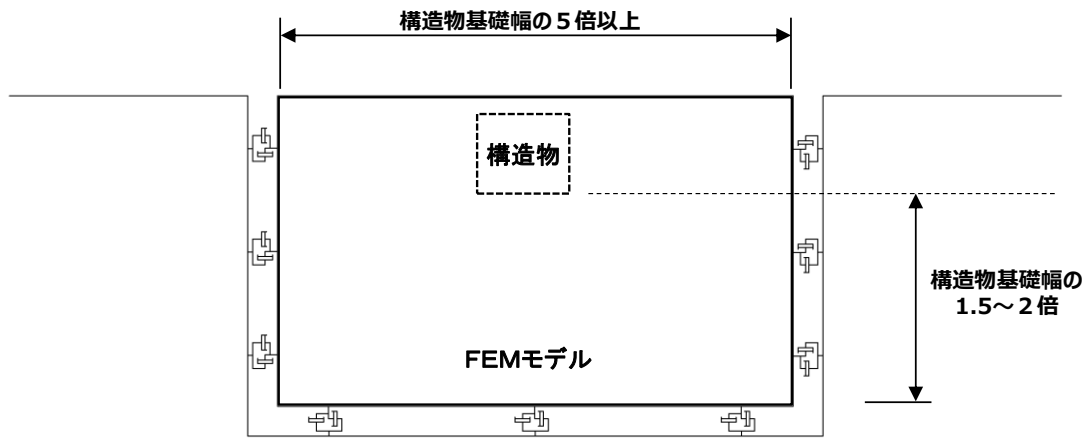
#### ⑧床応答算出用の断面の選定

- ・耐震評価上の観点以外に機器・配管系の応答加速度及び応答変位の観点から、床応答算出用の断面を選定する。
- ・線状構造物については、強軸方向断面も含めて選定する。

評価対象断面のモデル化範囲（2次元FEM解析モデル）については、以下に考え方を示す。

2次元FEMによる地震応答解析モデルの範囲が、地盤及び構造物の応力状態に影響を及ぼさないよう、十分広い領域とする。具体的には、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」を適用し、以下に示すとおりモデル幅を構造物基

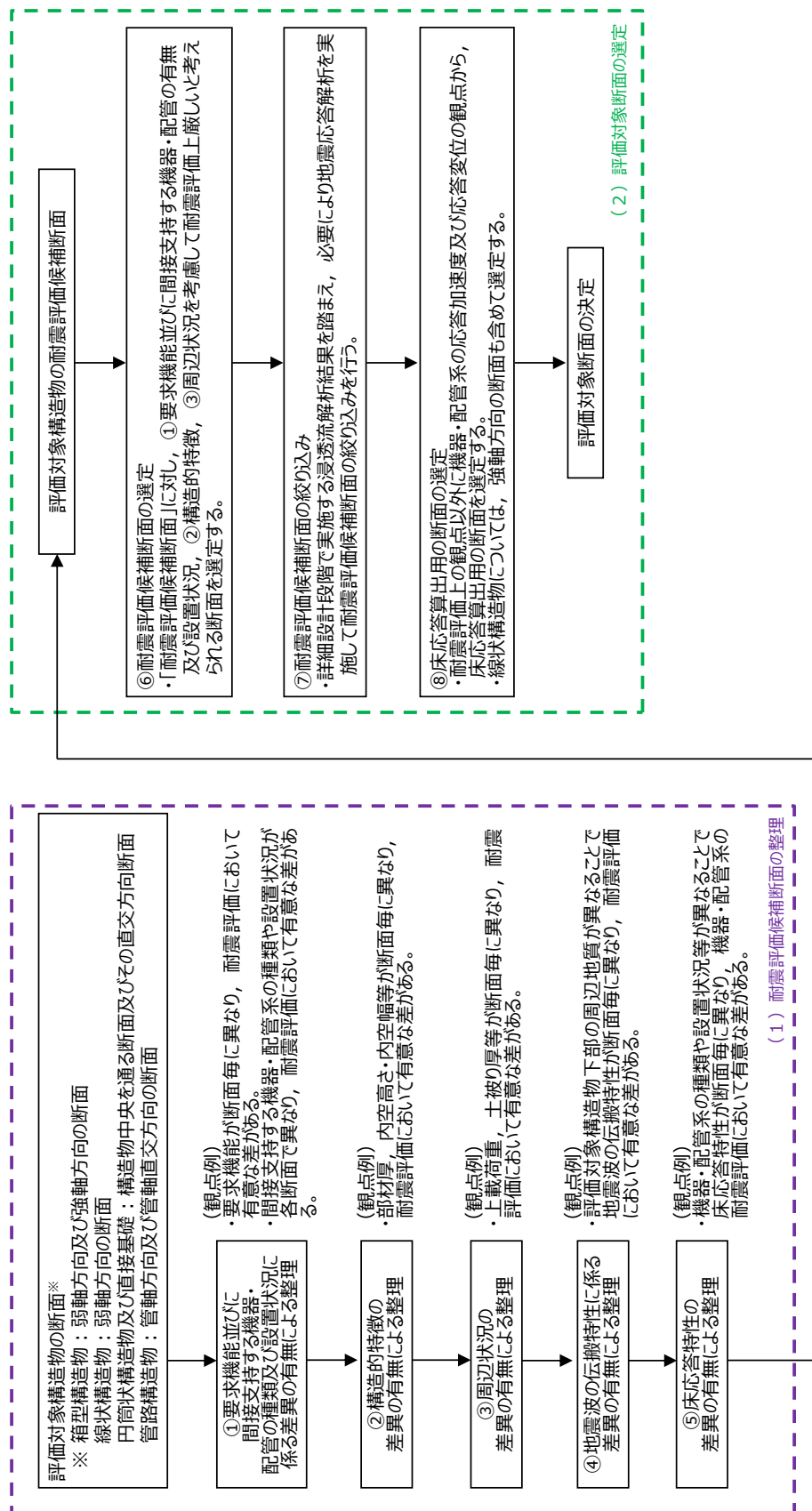
礎幅の5倍以上，地盤モデルの入力基盤深さを構造物基礎幅の1.5～2倍確保する。  
2次元FEMにおけるモデル化範囲の考え方を第6-1-2図に示す。



第6-1-2図 2次元FEMにおけるモデル化範囲の考え方



屋外重要土木構造物等について、耐震評価候補断面の整理及び評価対象断面の選定フローを第6-1-3図に示す。



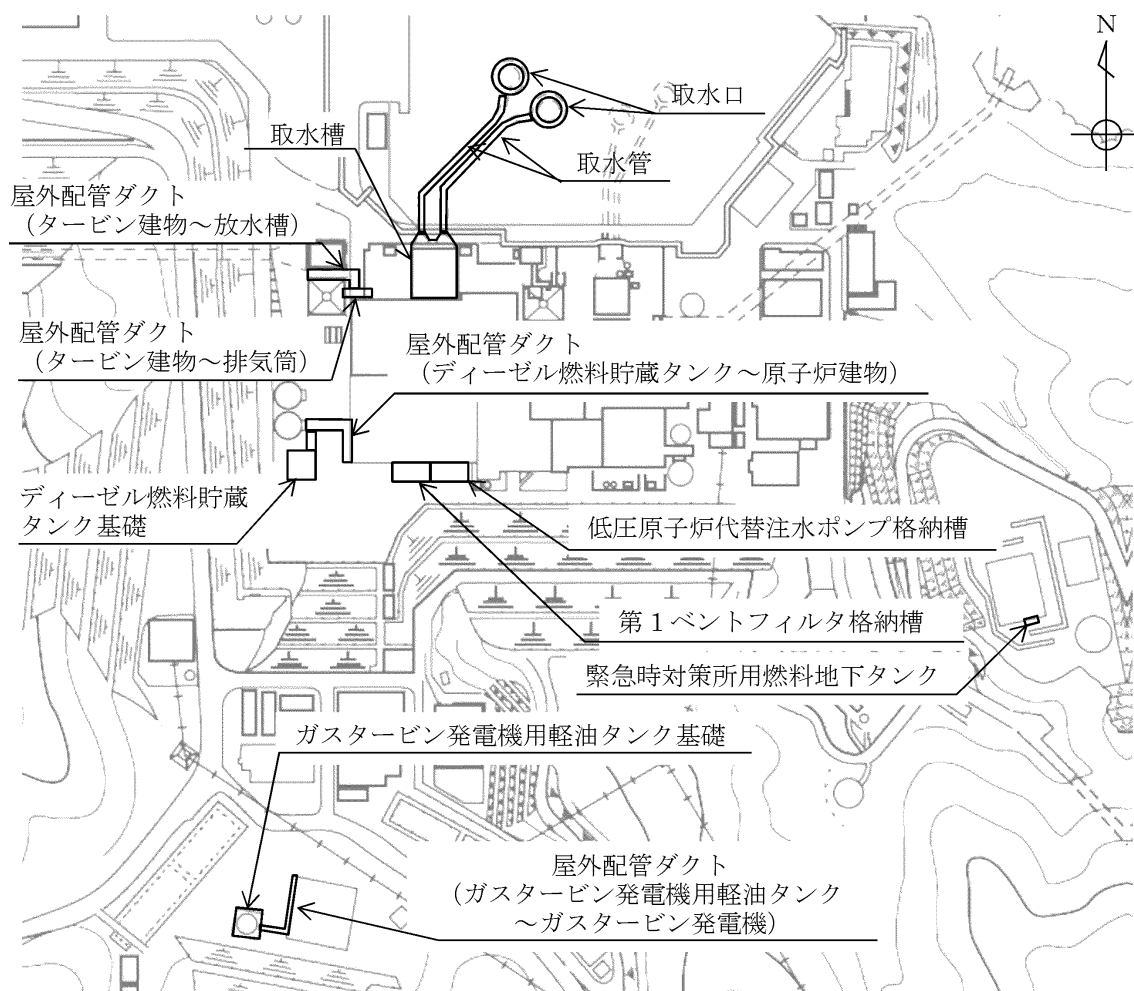
第6-1-3 図 耐震評価候補断面の整理及び評価対象断面の選定フロー

## 2. 屋外重要土木構造物等の耐震評価における断面選定の考え方

### 2.1 各施設の配置

本章では屋外重要土木構造物等である，取水槽，ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎，低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽，第1ベントフィルタ格納槽，緊急時対策所用燃料地下タンク，屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒），屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽），屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物），屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機），取水口，ガスタービン発電機用軽油タンク基礎及び取水管の断面選定の考え方を示す。

第6-2-1-1図に屋外重要土木構造物等の全体配置図を示す。



第6-2-1-1図 屋外重要土木構造物等 全体配置図

## 2.2 取水槽

取水槽の配置図を第6-2-2-1図に、設置される浸水防止設備や津波監視設備の配置図を第6-2-2-2図～第6-2-2-3図に、平面図を第6-2-2-4図に、縦断図を第6-2-2-5図に、断面図を第6-2-2-6図～第6-2-2-9図に、地質断面図を第6-2-2-10図～第6-2-2-11図に、岩級断面図を第6-2-2-12図～第6-2-2-13図にそれぞれ示す。

取水槽は、Sクラス設備である原子炉補機海水ポンプ等の間接支持機能と、非常用取水設備としての通水機能及び浸水防護重点化範囲の保持及び内部溢水影響評価から止水機能が要求される。

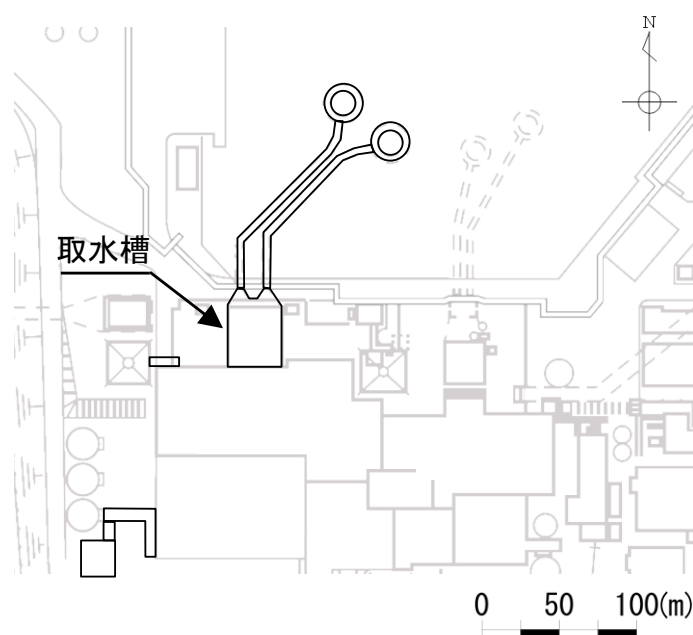
浸水防護重点化範囲を保持するために止水機能が求められる部位は、ポンプ室に設置される中床版 (EL. +1.1m)、スクリーン室に設置される中床版 (EL. +4.0m) 及びスクリーン室南側の除じん機エリア防水壁の位置に設置される中壁 (EL. +1.1m～EL. +8.8m) である。また、内部溢水影響評価から止水機能が求められる部位は、ポンプ室の海水ポンプエリア水密扉を設置する中壁 (EL. +1.1m～EL. +8.8m) である。

取水槽はストレーナ室、ポンプ室、スクリーン室及び漸拡ダクト部に大別される、延長47.25m、幅34.95m、高さ20.5mの鉄筋コンクリート造の地中構造物である。

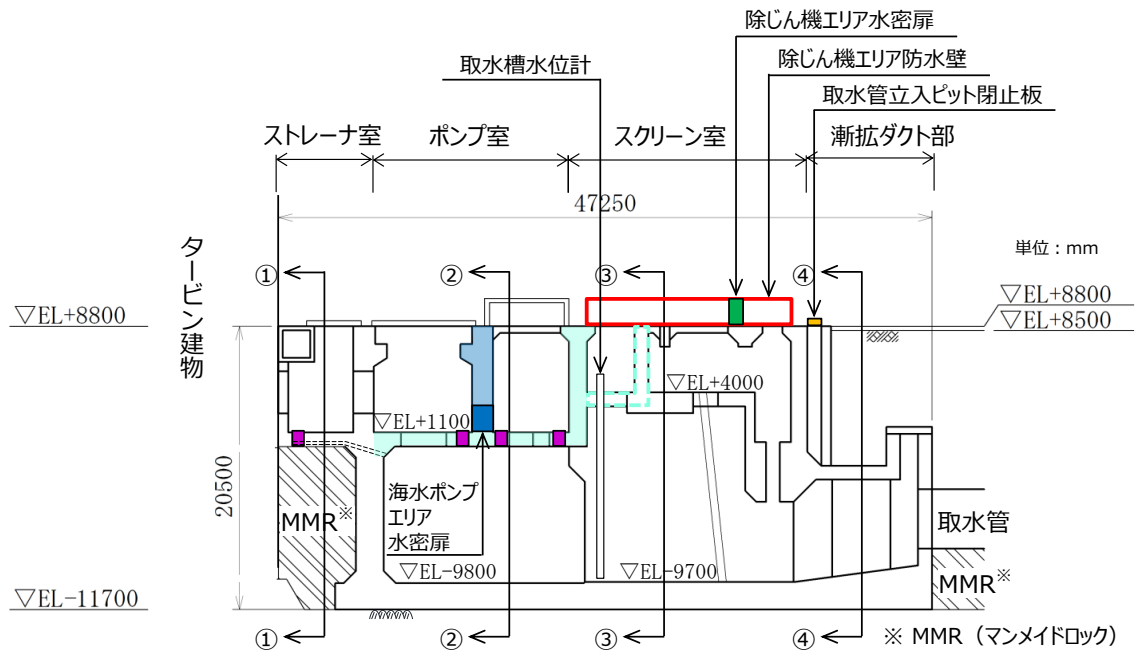
取水槽はC<sub>M</sub>級以上の岩盤に直接支持されている。

取水槽は、通水方向と平行に配置される壁部材が多いため、通水方向が強軸となり、通水直交方向が弱軸となる。

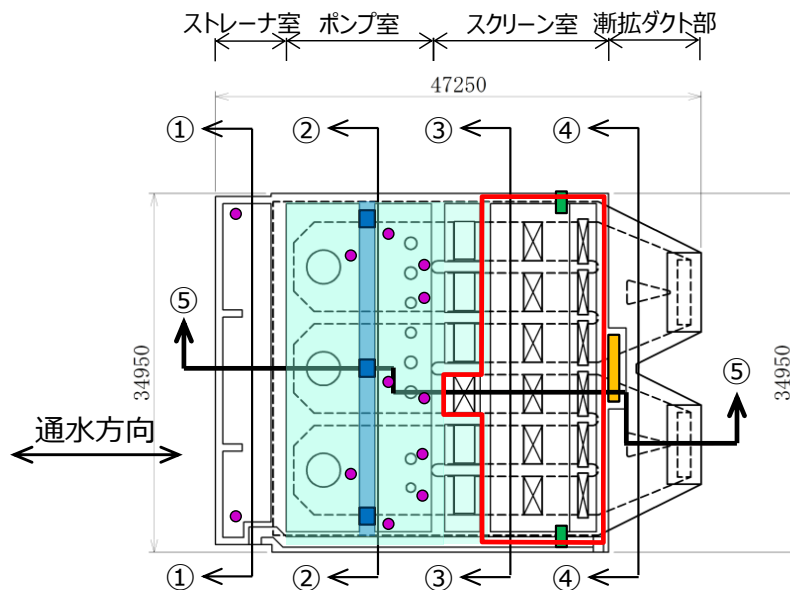
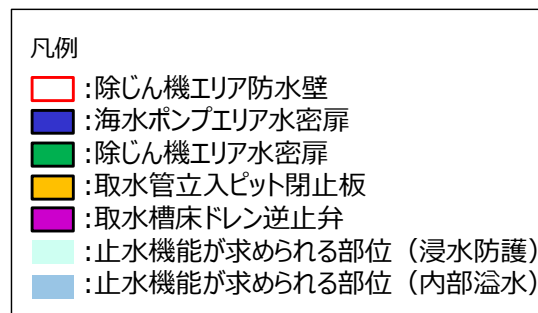
取水槽の弱軸方向断面では、配筋を含め構造的特徴が概ね同様である範囲を踏まえ、加振方向と平行に配置される壁の影響を考慮するため、壁間の幅を耐震評価候補断面とする。



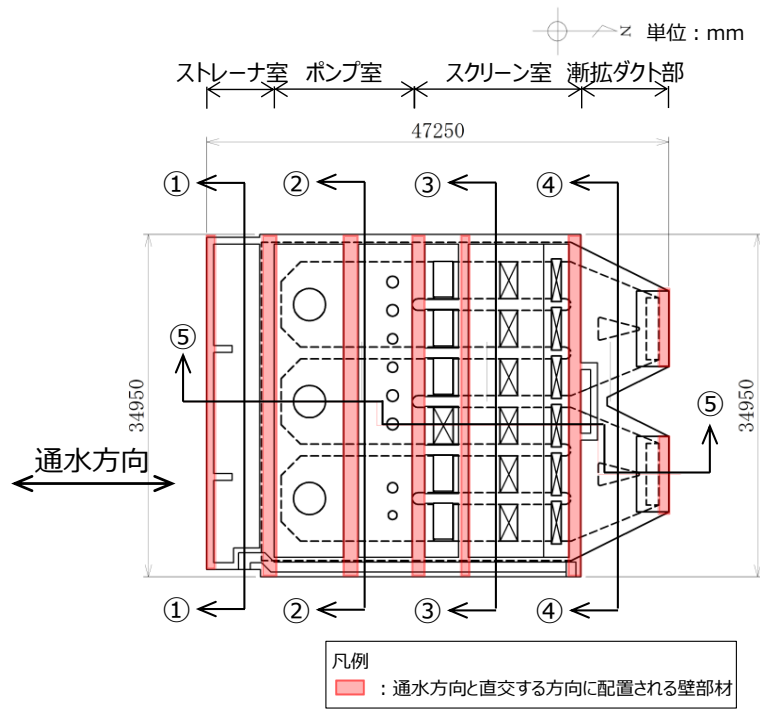
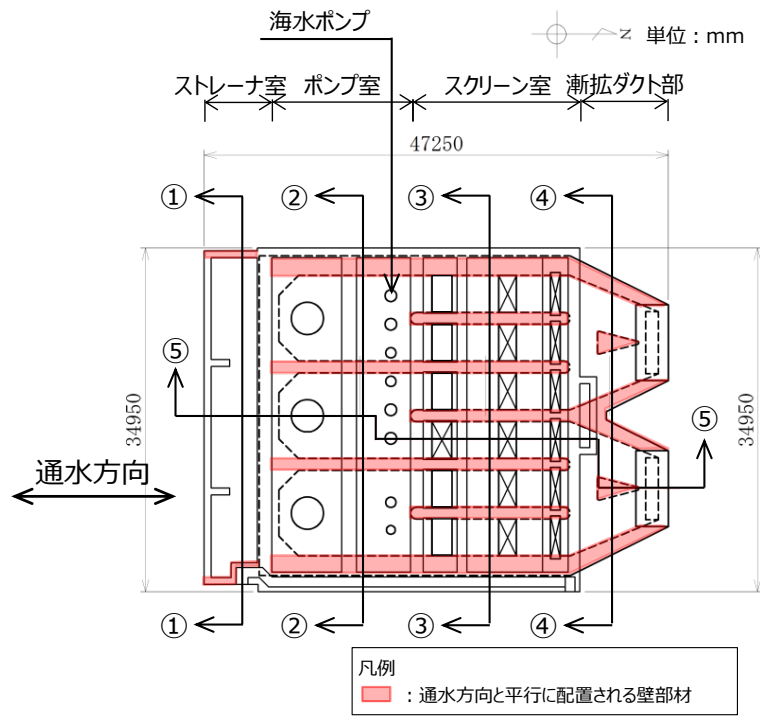
第6-2-2-1図 取水槽 配置図



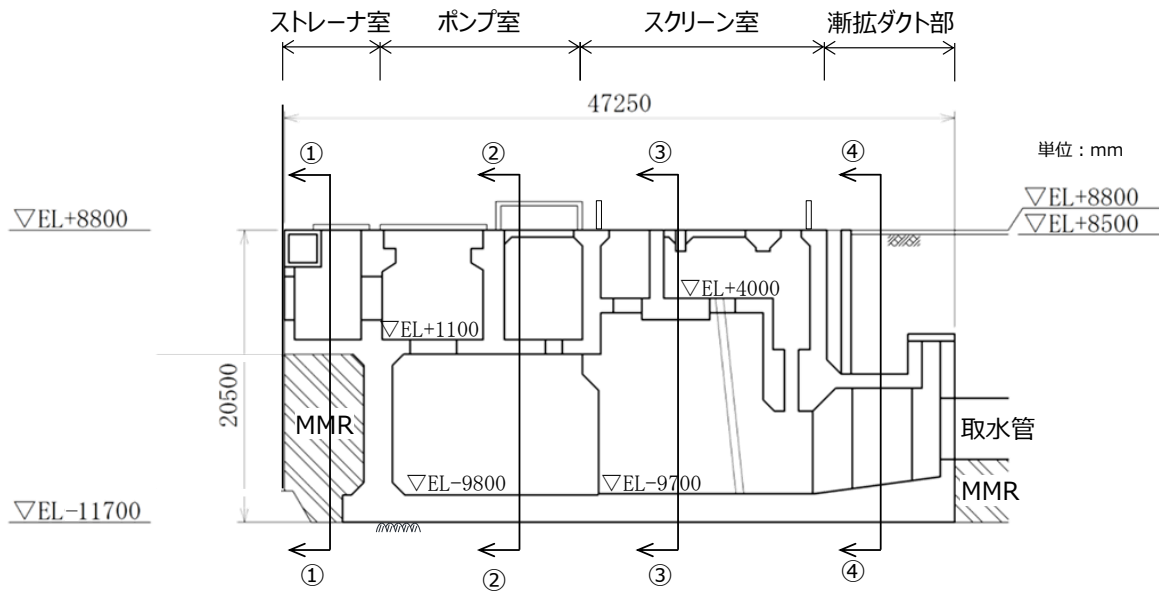
第6-2-2-2 図 取水槽 設置される設備の配置図 (縦断図)



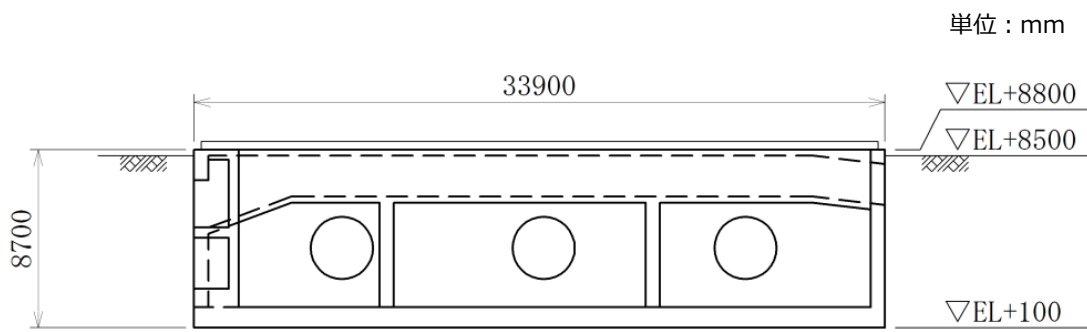
第6-2-2-3 図 取水槽 設置される設備の配置図 (平面図)



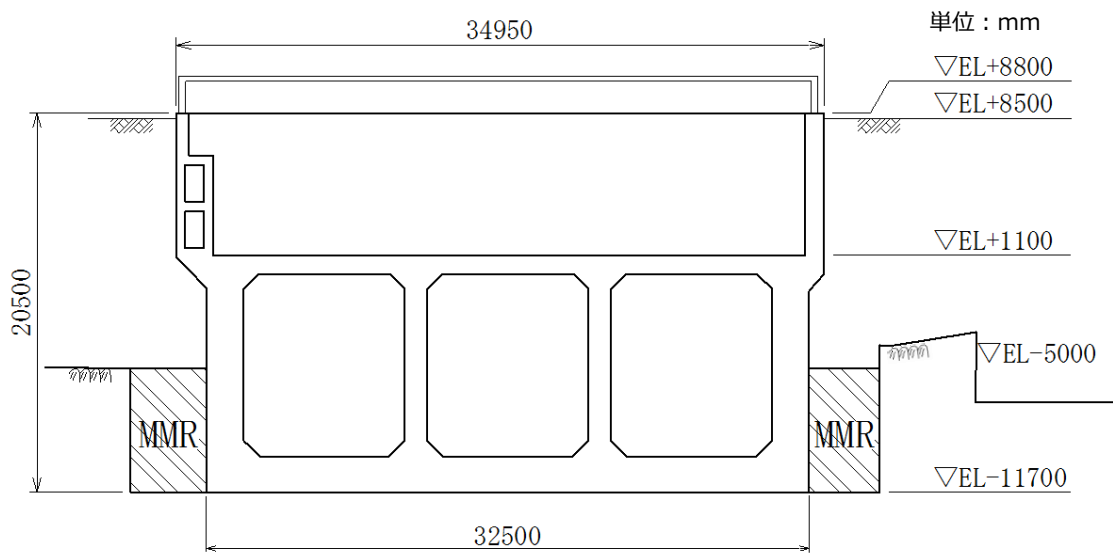
第6-2-2-4 図 取水槽 平面図



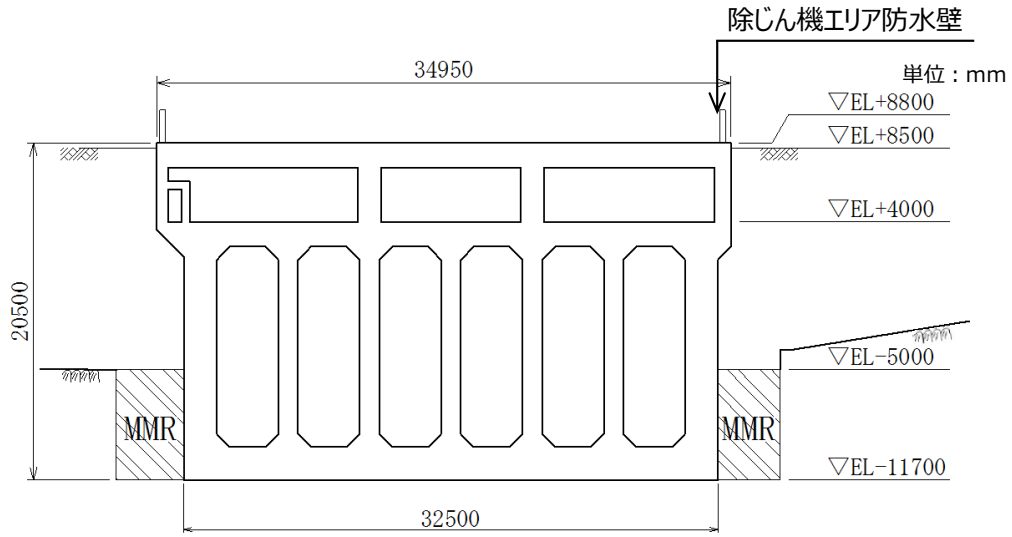
第6-2-2-5図 取水槽 縦断面図 (⑤-⑤断面)



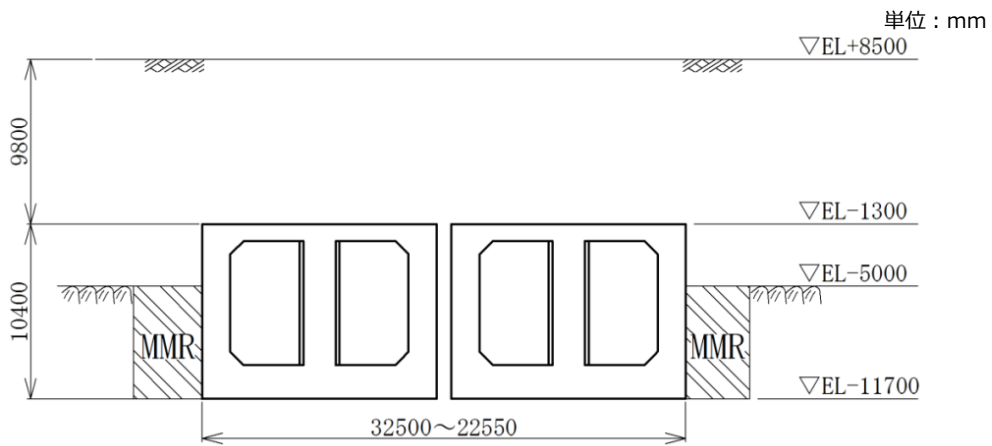
第6-2-2-6図 取水槽 断面図 (①-①断面)



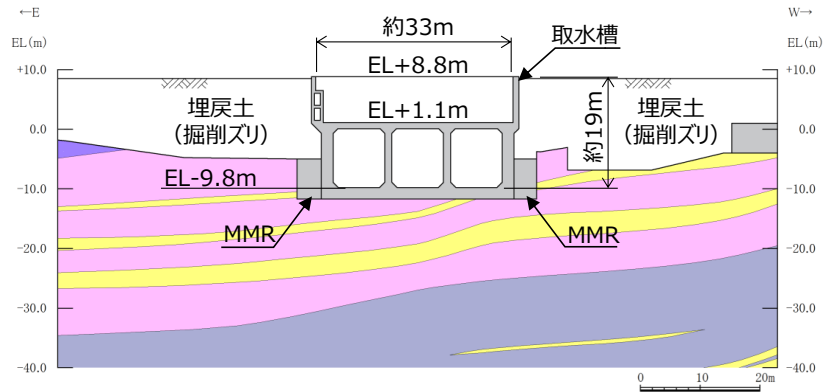
第6-2-2-7図 取水槽 断面図 (②-②断面)



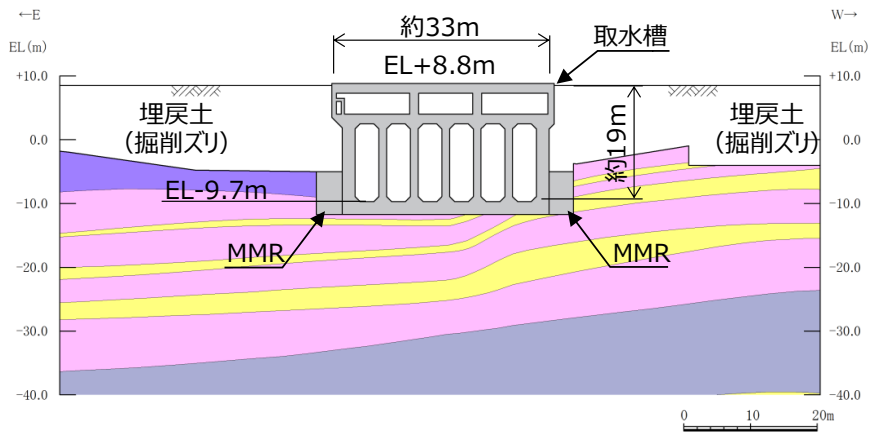
第6-2-2-8 図 取水槽 断面図 (③-③断面)



第6-2-2-9 図 取水槽 断面図 (④-④断面)

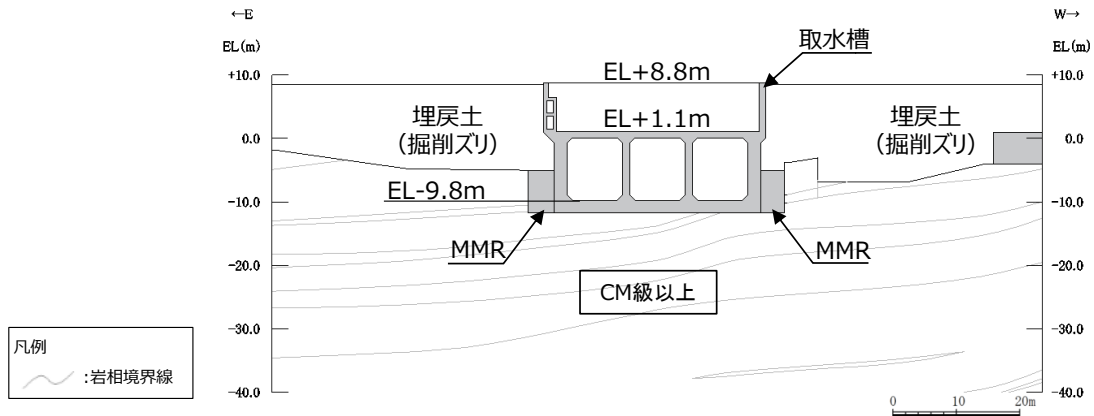


第6-2-2-10 図 取水槽 地質断面図 (②-②断面)

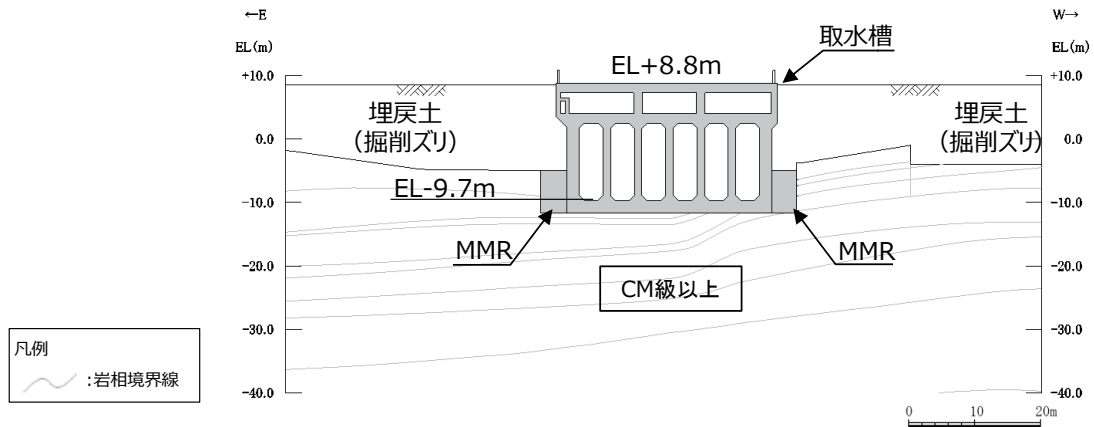


第6-2-2-11 図 取水槽 地質断面図 (③-③断面)





第6-2-2-12図 取水槽 岩級断面図 (②-②断面)



第6-2-2-13図 取水槽 岩級断面図 (③-③断面)

取水槽について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震力特性等の観点を踏まえた耐震評価候補断面を整理した (第6-2-2-1表)。

第6-2-2-1表 耐震評価候補断面の整理 (取水槽) (1/3)

観点		取水槽				
		①-①断面	②-②断面	③-③断面	④-④断面	⑤-⑤断面
①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況	要求機能	・間接支持	・通水 ・間接支持 ・止水	・通水 ・間接支持	・通水	・通水 ・間接支持 ・止水
	間接支持する設備	・原子炉補機海水ストレーナ ・高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ ・原子炉補機海水系配管・弁 ・高圧炉心スプレイ補機海水系配管・弁 他	・高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ ・原子炉補機海水ポンプ ・原子炉補機海水系配管・弁 ・高圧炉心スプレイ補機海水系配管・弁 ・海水ポンプエリア水密扉 他	・取水槽水位計 ・除じん機エリア防水壁 ・除じん機エリア水密扉 他	・なし	・①-①断面～③-③断面において間接支持する設備
	設置状況	・設備毎に異なる			-	・設備毎に異なる

第6-2-2-1表 耐震評価候補断面の整理（取水槽）（2/3）

観点		取水槽				
		①-①断面	②-②断面	③-③断面	④-④断面	⑤-⑤断面
②構造的 特徴	形式	・弱軸方向断面				・強軸方向断面
		・鉄筋コンクリート造の地中構造物				
		・ストレナ室により構成される	・上部のポンプ室及び下部の3連のボックスカルパートにより構成される	・上部のスクリーン室及び下部の6連のボックスカルパートにより構成される	・2連のボックスカルパートにより構成される	・ストレナ室、ポンプ室、スクリーン室及び取水管取合部により構成される
	・中床版に開口部が存在しない	・中床版に開口部が存在する	・中床版に開口部が存在する	・開口部が存在しない	・中床版に開口部が存在する	
	寸法	・幅33.90m, 高さ8.70m	・幅32.50~34.95m, 高さ20.50m		・幅22.55~32.50m, 高さ10.40m	・幅47.25m, 高さ20.50m
妻壁※のモデル化の有無	有り	有り	有り	有り	-	

※ 弱軸方向断面において加振方向と平行に配置される壁

第6-2-2-1表 耐震評価候補断面の整理（取水槽）（3/3）

観点		取水槽					
		①-①断面	②-②断面	③-③断面	④-④断面	⑤-⑤断面	
③周辺 状況	周辺 地質	構造物 下部	・CM級以上の岩盤に直接支持されている ・①-①断面はMMRを介してCM級以上の岩盤に支持されているが、MMRの周辺地質が岩盤であり、②-②~⑤-⑤断面との差異は小さいと判断する				
		構造物 側部及び上部	・埋戻土（掘削スリ）が分布している	・埋戻土（掘削スリ）及びMMRが分布している ・MMRは高さ約6.7mで、矩形である			・埋戻土（掘削スリ）及びMMRが分布している ・MMRは高さ約4.4m及び1.8mで台形状である
		地質 変化部	・なし				
	地下水位	・解析結果等を踏まえて整理する。					
	モデル化する隣接構造物	・なし				・タービン建物	
④地震波の伝搬特性		・観点③での整理のとおり、構造物下部の周辺地質は各断面で概ね同様であり、地震波の伝搬特性は概ね同様である					
⑤床応答特性		・観点①での整理のとおり、①-①~③-③及び⑤-⑤断面に間接支持する設備がある ・観点①~③での整理のとおり、間接支持する設備の種類及び設置状況、構造的特徴並びに周辺状況に差異があることから、各断面の床応答特性が異なる					

以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、構造的特徴、周辺状況、地震波の伝搬特性等を考慮して、3次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を直交する2方向から評価対象断面として選定する。なお、詳細設計段階において設定する地下水位等、各断面で異なる要因があれば、その観点で整理を行い、評価対象断面を選定する。

#### 【取水槽の3次元モデルによる耐震評価の目的と適用性】

取水槽は複数の妻壁を有する構造物であることから、妻壁による拘束効果が距離や非線形性に応じて減少すること、妻壁と接合する部位への応力集中及び支持される設備への影響評価や要求機能に応じた耐震評価について精緻に評価するため、3次元モデルによる耐震評価を実施する。

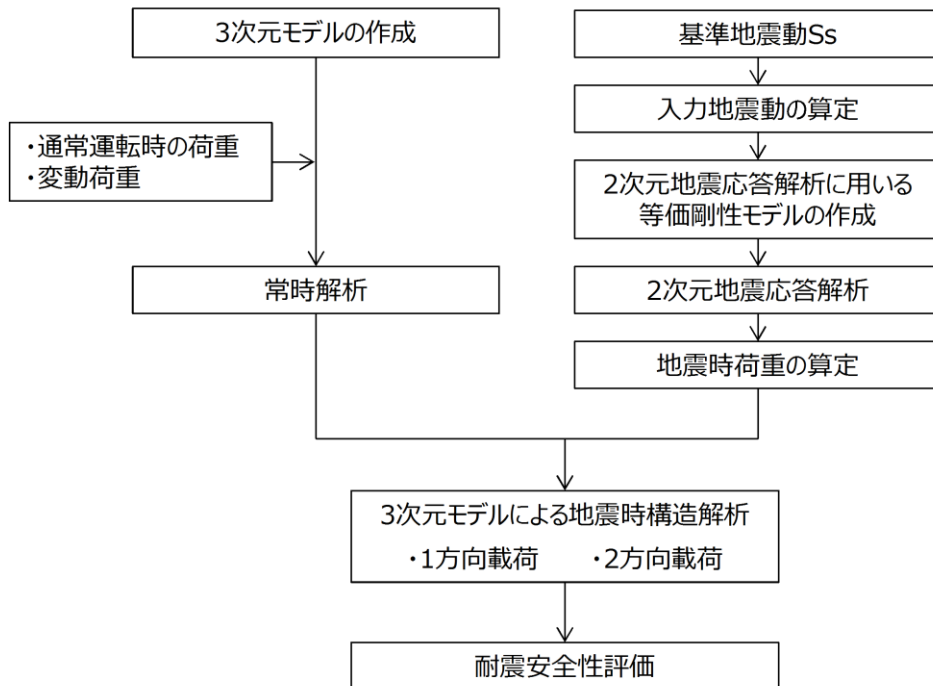
取水槽における3次元モデルによる耐震評価の適用性について、審査実績を有する先行サイト（女川2号炉）の海水ポンプ室等との比較を行った結果、第6-2-2表に示すとおり、構造的特徴や3次元モデルによる耐震評価に差異はないことから、適用性があると判断する。

第6-2-2-2表 先行サイトとの比較結果

項目	女川2号炉（海水ポンプ室等）	島根2号炉（取水槽）	女川2号炉と島根2号炉の差異の有無及び差異がある場合の島根2号炉への適用性
構造的特徴	<p>【海水ポンプ室】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>箱型構造物</li> <li>幅32.5m, 延長77m, 高さ約28m</li> <li>地下2階構造で上部は開放された3部屋, 下部は延長方向に4連又は2連のカルバート構造</li> </ul>	<p>箱型構造物</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>幅約33m, 延長約47m, 高さ20.5m</li> <li>地下2階構造で上部は開放された3部屋, 下部は3連, 6連又は2連のカルバート構造</li> </ul> <p>・同左</p>	<p>女川2号炉と島根2号炉の差異の有無及び差異がある場合の島根2号炉への適用性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>構造形式が同一で, 構造物の寸法や形状が概ね同様であることから, 構造的特徴に差異はないと判断する。</li> </ul>
2次元有限要素法による地震応答解析	<p>【海水ポンプ室】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>延長方向のエリア毎に3分連し, 実構造物と等価な剛性とした2次元等価剛性モデルを作成し, エリアごとの荷重を評価</li> <li>構造物を等価剛性モデル（線形）とし, 地盤-構造物連成（地盤は非線形）の2次元時刻歴非線形解析（構造物線形）により評価</li> </ul>	<p>・同左</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>延長方向のエリア分割の考え方が同様で, 構造物のモデル及び解析方法が同一であることから, 2次元有限要素法による地震応答解析に差異はないと判断する。</li> </ul>
3次元有限要素法による構造解析	<p>【共通】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>鉄筋コンクリートの非線形性を評価可能な前川モデルを用いた材料非線形モデル</li> </ul> <p>【海水ポンプ室】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>非線形ソリッド要素でモデル化した静的解析を行い, 応答値（変形, 断面力）を算出</li> </ul> <p>【軽油タンク室等】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>非線形シェル要素でモデル化した静的解析を行い, 応答値（変形, 断面力）を算出</li> </ul>	<p>・取水槽を非線形シェルまたはソリッド要素でモデル化した静的解析を行い, 応答値（変形, 断面力）を算出</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>非線形シェルまたはソリッド要素を用いた解析は, 構造物のモデル及び解析方法が同一であることから, 3次元有限要素法による構造解析に差異はないと判断する。</li> <li>非線形解析におけるシェル要素に対するソリッド要素の差異は, 部材のひび割れ状況を精緻に評価可能のため漏水量を評価することができる。</li> <li>取水槽は非線形シェル要素で解析を行うが, 止水機能を要求される壁にひび割れが卓越し漏水が懸念される場合には, 非線形ソリッド要素にて解析を行うこととし, 詳細な解析方法については, 詳細設計段階において決定する。</li> </ul>
耐震安全性評価	<p>【共通】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>地震時の安全性評価として, 曲げ系の破壊は部材の要求機能に応じた許容限界（層間変形角, 鉄筋・コンクリートのひずみ）に対して照査</li> <li>せん断耐力評価式により照査</li> </ul>	<p>・同左</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>部材の要求機能に応じた許容限界による照査は同様であることから, 耐震安全性評価に差異はないと判断する。</li> </ul>

### 【取水槽の3次元モデルによる耐震評価フローと照査体系】

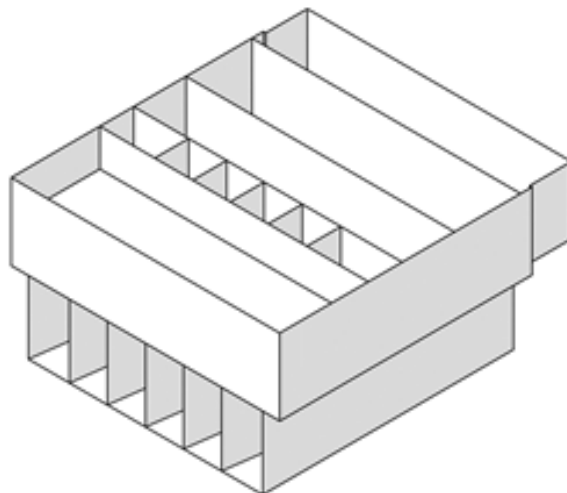
取水槽の3次元モデルによる耐震評価は第6-2-2-14図に示すフローのとおり、基準地震動 $S_s$ による2次元地震応答解析により得られる地震時荷重（土圧，加速度）を3次元モデルへ作用させて、耐震安全性評価を行う。以降、評価フローにおける内容を記載するが、詳細については詳細設計段階にて検討する。



第6-2-2-14図 3次元モデルによる耐震評価フロー

#### (1) 3次元モデルの作成

- ・構造物をシェル又はソリッド要素，地盤をばね要素でモデル化し，3次元モデルを作成する。参考として，取水槽のイメージ図を第6-2-2-15図に示す。



第6-2-2-15図 取水槽イメージ図

(2) 常時解析

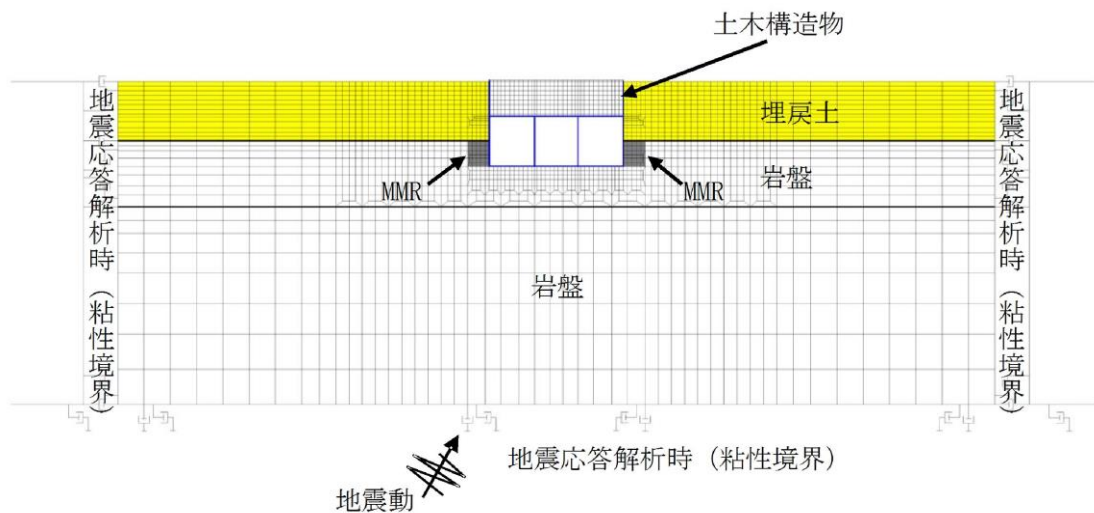
- ・ 3次元モデルに通常運転時の荷重及び変動荷重を載荷して常時の応力状態を再現する。
- ・ 静止土圧は2次元地震応答解析における常時応力解析により設定し、分布荷重として載荷する。

(3) 2次元地震応答解析に用いる等価剛性モデルの作成

- ・ 地震時荷重の算定に用いる2次元地震応答解析の構造物モデルは、構造物と地盤の相互作用により発生する土圧を正しく評価するため、妻壁の剛性を考慮し、実構造と等価な剛性を持つ2次元等価剛性モデルとする。
- ・ 各エリアの構造の相違に起因する地震時荷重を正しく算定するため、エリアごとに等価剛性モデルを作成する。
- ・ 2次元等価剛性モデルと3次元モデルに同じ荷重を作用させ、2次元等価剛性モデルの変位が3次元モデルの変位と等しくなるように剛性を設定する。
- ・ 等価剛性モデルは、地震時荷重を保守的に評価するよう線形モデルとする。

(4) 2次元地震応答解析

- ・ 2次元地震応答解析は、地盤の非線形性を考慮した地盤－構造物連成の時刻歴非線形解析により行う。2次元地震応答解析のモデル図を第6-2-2-16図に示す。
- ・ 等価剛性モデルの構造物モデルは、線形モデルとする。
- ・ 埋戻土については、非線形性を考慮する。



第6-2-2-16図 2次元地震応答解析 (解析モデル図：ポンプ室エリア)

(5) 地震時荷重の算定

- ・2次元地震応答解析において要求機能に対応する着目部位の変位や断面力が大きくなり、照査上厳しくなる時刻を選定し、地震時増分土圧と応答加速度を算定する。
- ・慣性力は、応答加速度を基に応答震度を算定する。
- ・地震時荷重の抽出は、要求機能を有する各部位の想定される損傷モード(曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊)に応じた時刻の荷重を抽出する。

(6) 3次元モデルによる地震時構造解析(1方向載荷)

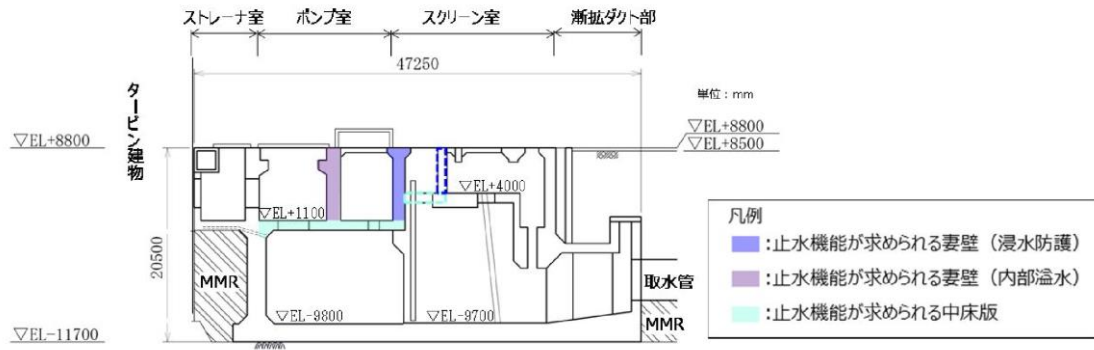
- ・2次元地震応答解析において選定した時刻の慣性力及び地震時増分土圧等を地震時荷重として3次元モデルに載荷する。
- ・慣性力及び地震時増分土圧は、エリア毎に奥行方向に一樣な荷重として作用させる。

(7) 3次元モデルによる地震時構造解析(2方向載荷)

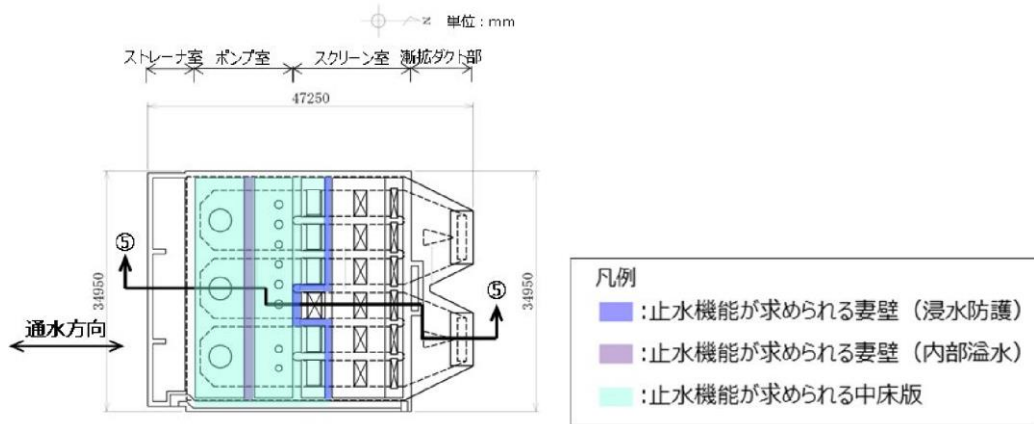
- ・水平2方向載荷に対する検討として、地震時解析(1方向載荷)に、縦断方向の地震時荷重を同時に載荷する。
- ・縦断方向の土圧は妻壁と地盤の相互作用により発生するが、妻壁の挙動は構造物全体の挙動とは異なり、部材としての応答となるため、等価剛性とはせず鉄筋コンクリート部材の剛性を考慮する。
- ・縦断方向の地震時荷重は、水平2方向載荷の影響が大きい部材のうち、1方向載荷時の照査値が最も厳しい部材・時刻に対し、同時刻の縦断方向の地震時荷重を、位相を変えた地震動により算出して用いる。

(8) 耐震安全性評価

- ・地震時荷重を載荷した構造物の変形が、部材ごとに要求される機能に応じた許容限界を上回らないことを確認する。
- ・各部位の許容限界について、取水槽には第6-2-2-17, 18図に示すとおり止水機能が求められる部位があり、その他の部位では通水機能や支持機能が求められ、部位ごとに要求機能が異なる。したがって、各要求機能に対する目標性能を第6-2-2-3表のとおり整理し、目標性能毎に許容限界を設定する。
- ・なお、妻壁を耐震壁とみなし、JEAG4601-1987に基づいた耐震評価を行う。同基準において、耐震壁の終局時の変形として層間変形角4/1000が規定されており、これに安全率2を有する層間変形角2/1000は、耐震壁の通水機能や支持機能の許容限界として既工認実績がある。なお、止水機能が要求される部位については、JEAG4601-1991に規定されている層間変形角がスケルトンカーブの第1折れ点以下であることを許容限界とした耐震評価を行うこととし、これについても、耐震壁のせん断変形に対する水密性評価の許容限界として既工認実績がある。



第6-2-2-17図 取水槽 止水機能が求められる部位 (縦断面図 (⑤-⑤断面))



第6-2-2-18図 取水槽 止水機能が求められる部位 (平面図)

第6-2-2-3表 要求機能に応じた許容限界

要求機能	要求機能に対する 目標性能	許容限界	
		曲げ	せん断
通水機能	終局状態に至らない	限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ	せん断耐力 (面外), 層間変形角2/1000' (面内)
止水機能	鉄筋が降伏しない 発生せん断力がせん断耐力以下	圧縮ひずみ: コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ 主筋ひずみ: 鉄筋の降伏強度に対応するひずみ	せん断耐力 (面外), 層間変形角第1折れ点 (面内)
支持機能	終局状態に至らない	限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ	せん断耐力 (面外), 層間変形角2/1000 (面内)



### 2.3 ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎

ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎（地中部及び半地下部）の配置図を第 6-2-3-1 図に、平面図を第 6-2-3-2 図に、縦断図を第 6-2-3-3 図に、断面図を第 6-2-3-4 図～第 6-2-3-5 図に、地質断面図を第 6-2-3-6 図に、岩級断面図を第 6-2-3-7 図にそれぞれ示す。

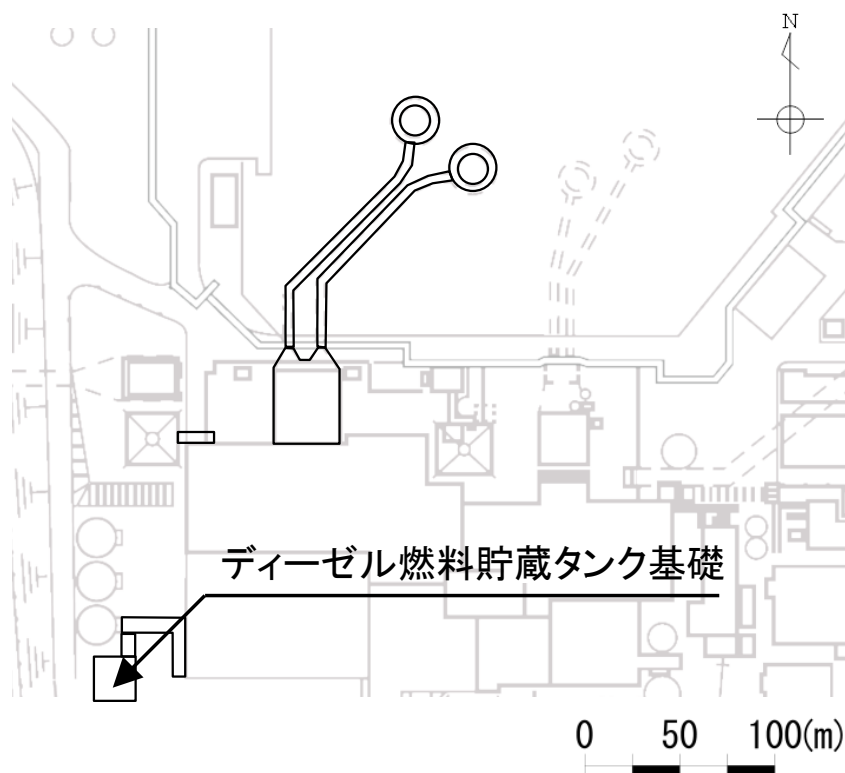
ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎は、Sクラス設備である非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク等の間接支持機能が要求される。

ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎は、延長約 20m、幅約 19m、高さ約 7m の鉄筋コンクリート造の地中及び半地下構造物である。

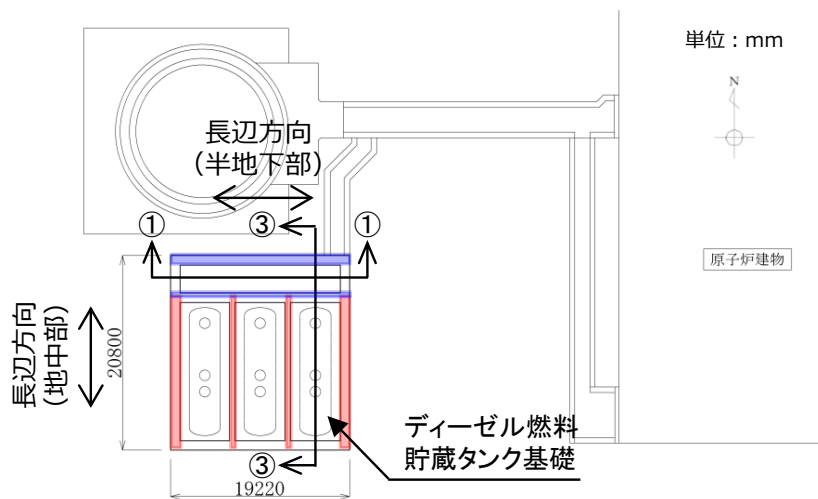
ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎は、 $C_M$ 級以上の岩盤に直接支持されている。

長辺方向（地中部は南北方向，半地下部は東西方向）に加振した場合は，加振方向に直交する方向の構造物の長さに対する加振方向と平行に配置される壁の厚さの割合が大きくなるので，長辺方向が強軸となり，短辺方向（地中部は東西方向，半地下部は南北方向）が弱軸となる。

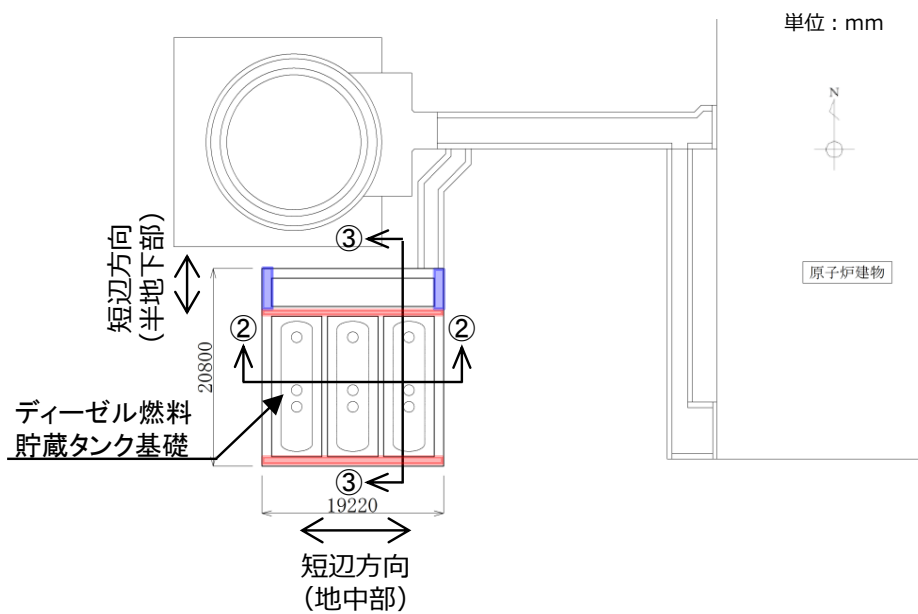
ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎の弱軸方向断面では，配筋を含め構造的特徴が概ね同様である範囲から代表となる範囲を耐震評価候補断面とする。



第 6-2-3-1 図 ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎 配置図

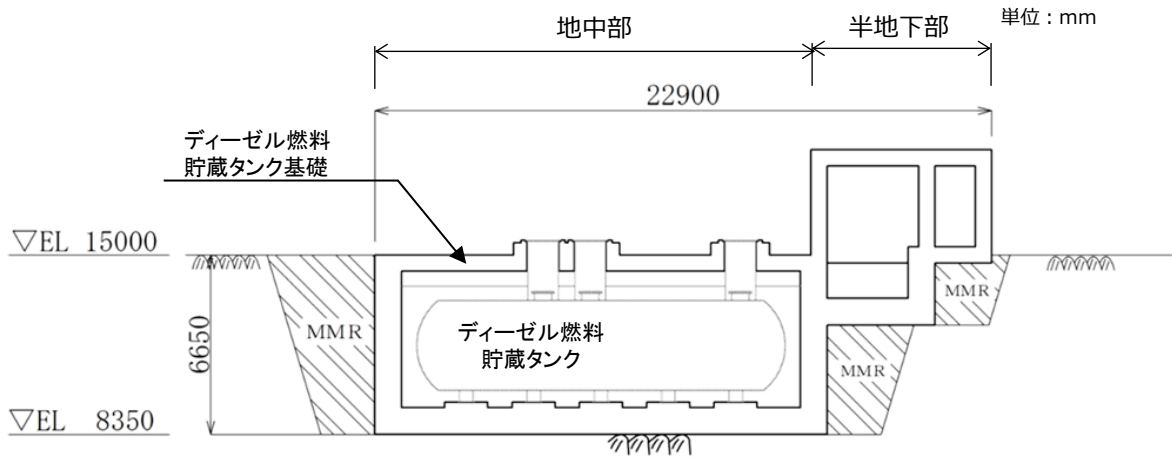


- 凡例
- ① : 加振方向と平行に配置される壁部材 (地中部)
  - ② : 加振方向と平行に配置される壁部材 (半地下部)

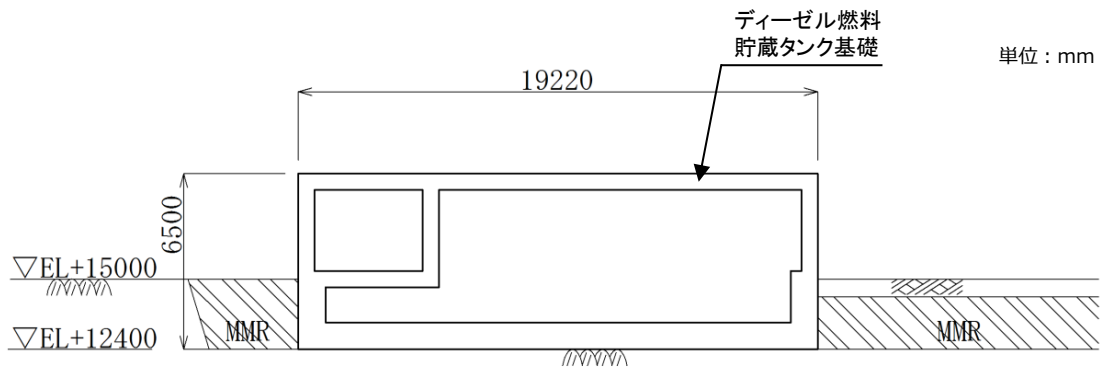


- 凡例
- ③ : 加振方向と平行に配置される壁部材 (地中部)
  - ④ : 加振方向と平行に配置される壁部材 (半地下部)

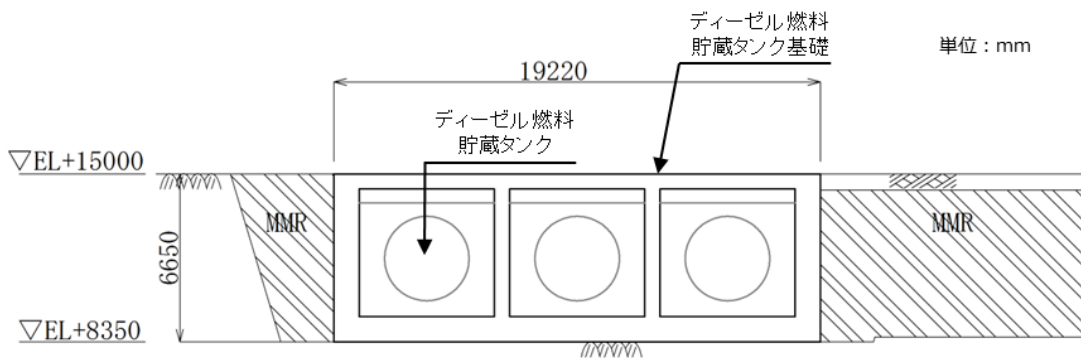
第6-2-3-2図 ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎 平面図



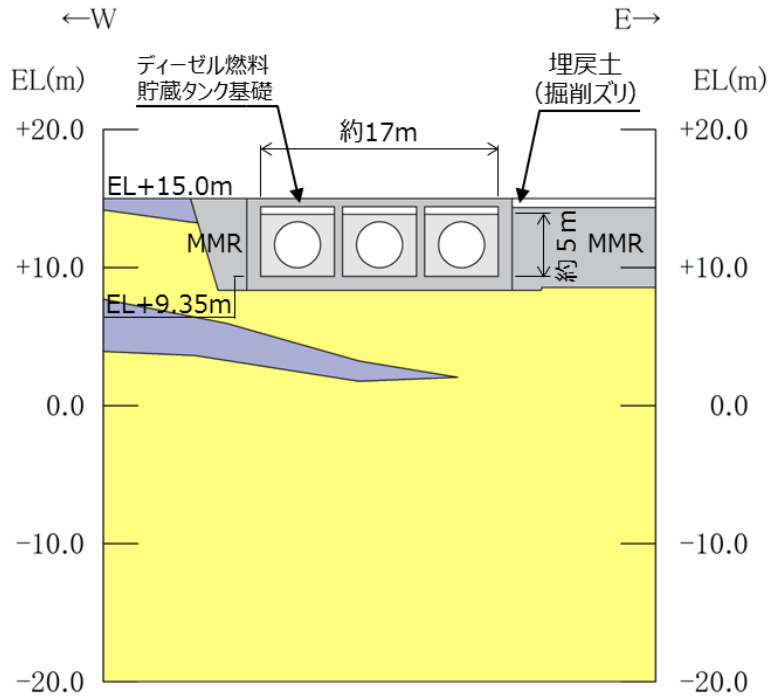
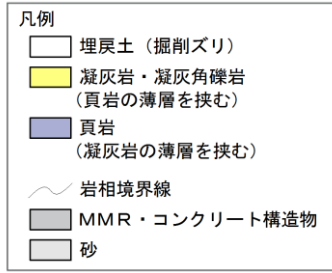
第6-2-3-3図 ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎 縦断図 (③-③断面)



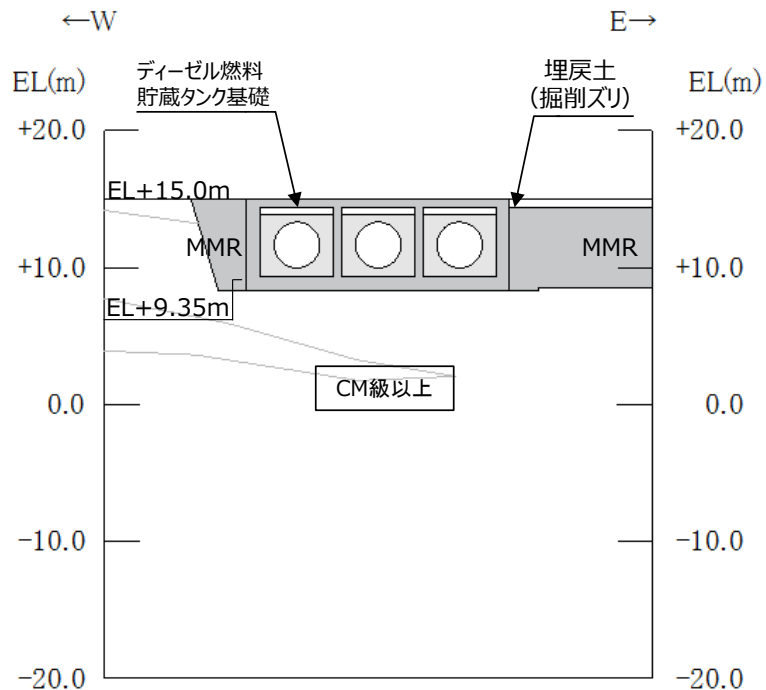
第6-2-3-4図 ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎 断面図 (①-①断面)



第6-2-3-5図 ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎 断面図 (②-②断面)



第 6-2-3-6 図 ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎 地質断面図（②-②断面）



第 6-2-3-7 図 ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎 岩級断面図（②-②断面）

ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震力特性等の観点を踏まえた耐震評価候補断面を整理した（第6-2-3-1表）。

第6-2-3-1表 耐震評価候補断面の整理（ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎）  
(1/2)

観点		ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎		
		①-①断面	②-②断面	③-③断面
①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況	要求機能	・間接支持		
	間接支持する設備	・非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ ・非常用ディーゼル発電設備燃料移送系配管・弁 他	・非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク ・非常用ディーゼル発電設備燃料移送系配管・弁 他	・非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク ・非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ ・非常用ディーゼル発電設備燃料移送系配管・弁 他
	設置状況	・設備毎に異なる		
②構造的特徴	形式	・強軸方向断面（半地下部）	・弱軸方向断面（地中部）	・強軸方向断面（地中部） ・弱軸方向断面（半地下部）
		・鉄筋コンクリート造の半地下構造物	・鉄筋コンクリート造の地中構造物	・鉄筋コンクリート造の地中構造物及び半地下構造物
		・隔壁及び中床版を有する	・3連のボックスカルバート（タンク格納槽）により構成される	・地中部及び半地下部により構成される
	寸法	・幅19.22m, 高さ6.50m	・幅19.22m, 高さ6.65m	・幅22.90m, 高さ4.20m, 6.50m及び6.65m

第6-2-3-1表 耐震評価候補断面の整理（ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎）  
(2/2)

観点		ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎		
		①-①断面	②-②断面	③-③断面
③周辺状況	周辺地質	構造物下部	・CM級以上の岩盤に直接支持されている ・③-③断面はMMRを介してCM級以上の岩盤に支持されているが、MMRの周辺地質が岩盤であり、①-①～②-②断面との差異は小さいと判断する	
		構造物側部及び上部	・埋戻土（掘削スリ）及びMMRが分布している ・MMRの周辺地質が岩盤であり、各断面で差異は小さいと判断する	
		地質変化部	・なし	
	地下水位	・解析結果等を踏まえて整理する。		
	モデル化する隣接構造物	・原子炉建物	・なし	
④地震波の伝搬特性		・観点③での整理のとおり、構造物下部の周辺地質に差異がなく、地震波の伝搬特性は一樣である		
⑤床応答特性		・観点①での整理のとおり、各断面に間接支持する設備がある ・観点①～③での整理のとおり、間接支持する設備の種類及び設置状況、構造的特徴及び周辺状況に差異があることから、各断面の床応答特性が異なる		

以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、地震応答解析により耐震評価を行ううえで、構造物の応答が耐震評価上厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。なお、詳細設計段階において設定する地下水位等、各断面で異なる要因があれば、その観点を整理を行い、評価対象断面を選定する。

## 2.4 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の配置図を第6-2-4-1図に、平面図を第6-2-4-2図に、縦断面図を第6-2-4-3図に、断面図を第6-2-4-4図～第6-2-4-5図に、地質断面図を第6-2-4-6図～第6-2-4-7図に、岩級断面図を第6-2-4-8図～第6-2-4-9図にそれぞれ示す。

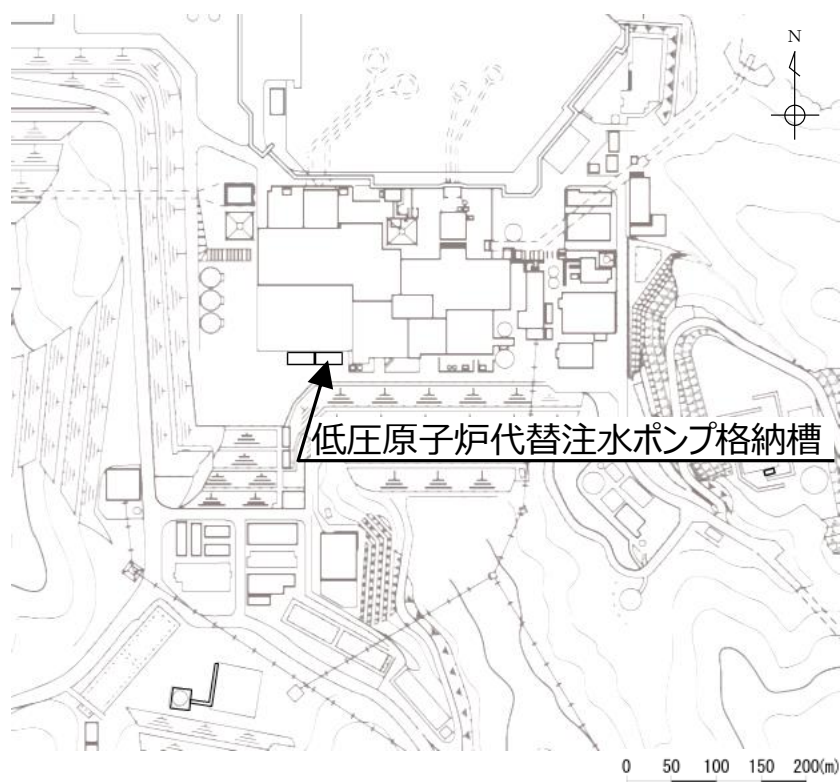
低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽は、常設重大事故等対処設備である低圧原子炉代替注水ポンプ等の間接支持機能が要求される。

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽は、延長26.6m、幅13.4m、高さ16.0m又は19.6mの鉄筋コンクリート造の地中構造物である。

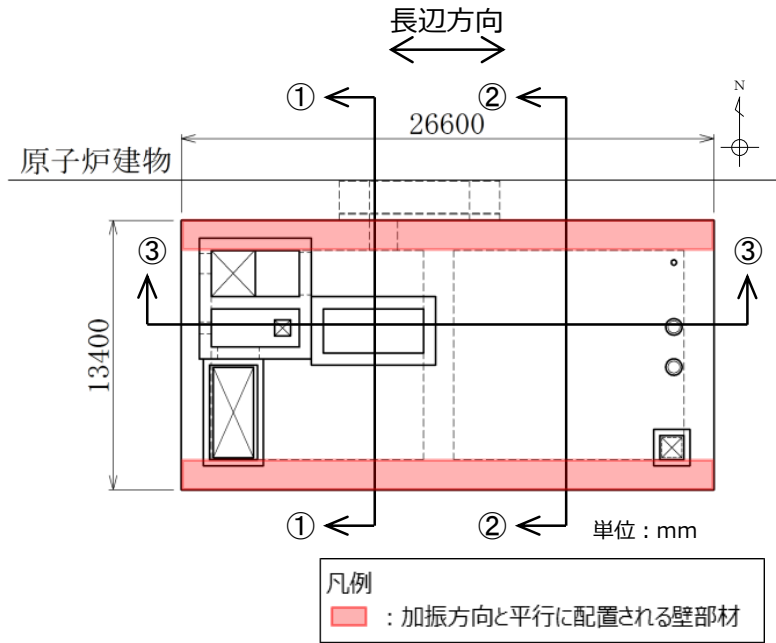
低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽は、 $C_M$ 級以上の岩盤に直接支持されている。

長辺方向（東西方向）に加振した場合は、加振方向に直交する方向の構造物の長さに対する加振方向と平行に設置される壁の厚さの割合が大きくなるので、長辺方向が強軸となり、短辺方向（南北方向）が弱軸となる。

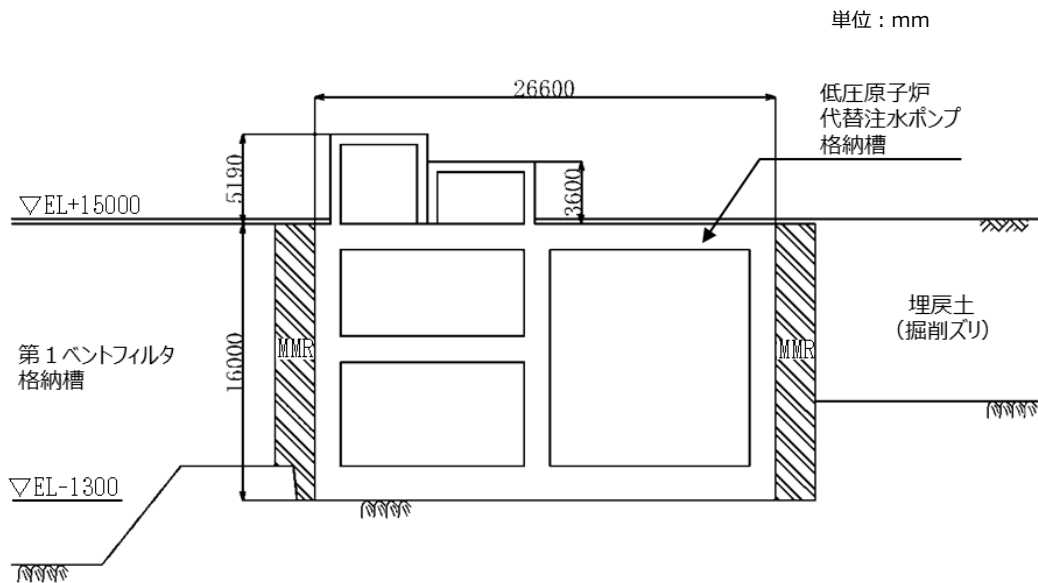
低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の弱軸方向断面では、配筋を含め構造的特徴が概ね同様である範囲から代表となる範囲を耐震評価候補断面とする。



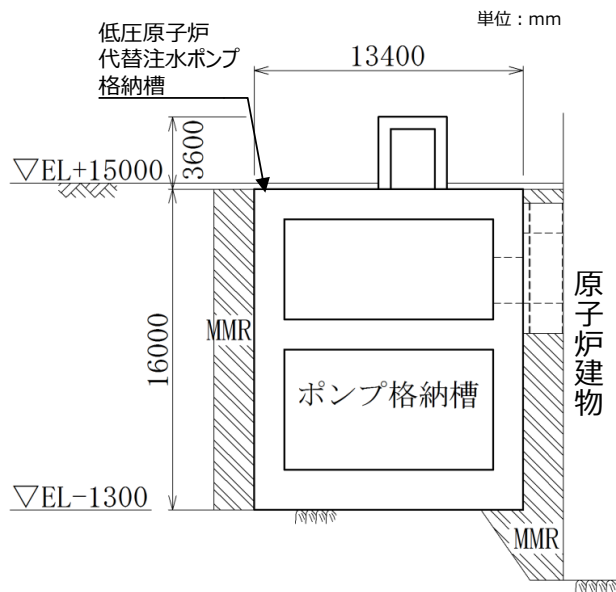
第6-2-4-1図 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 配置図



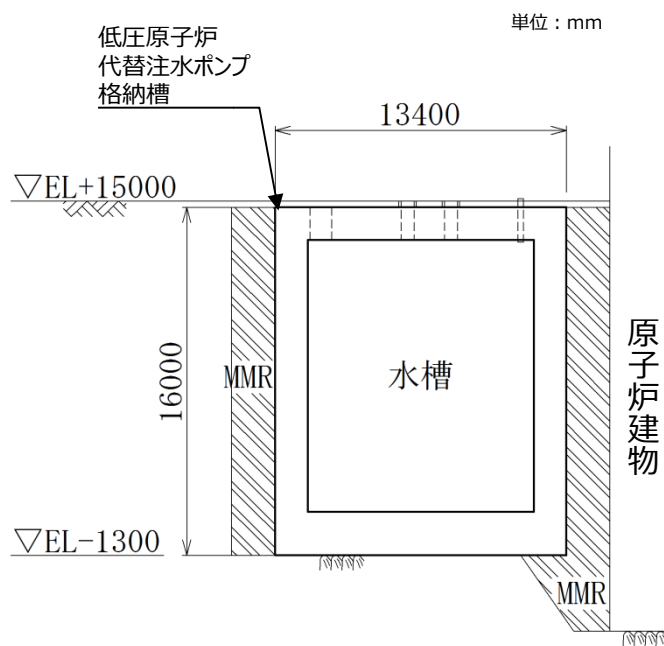
第6-2-4-2 図 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 平面図



第6-2-4-3 図 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 縦断図 (③-③断面)

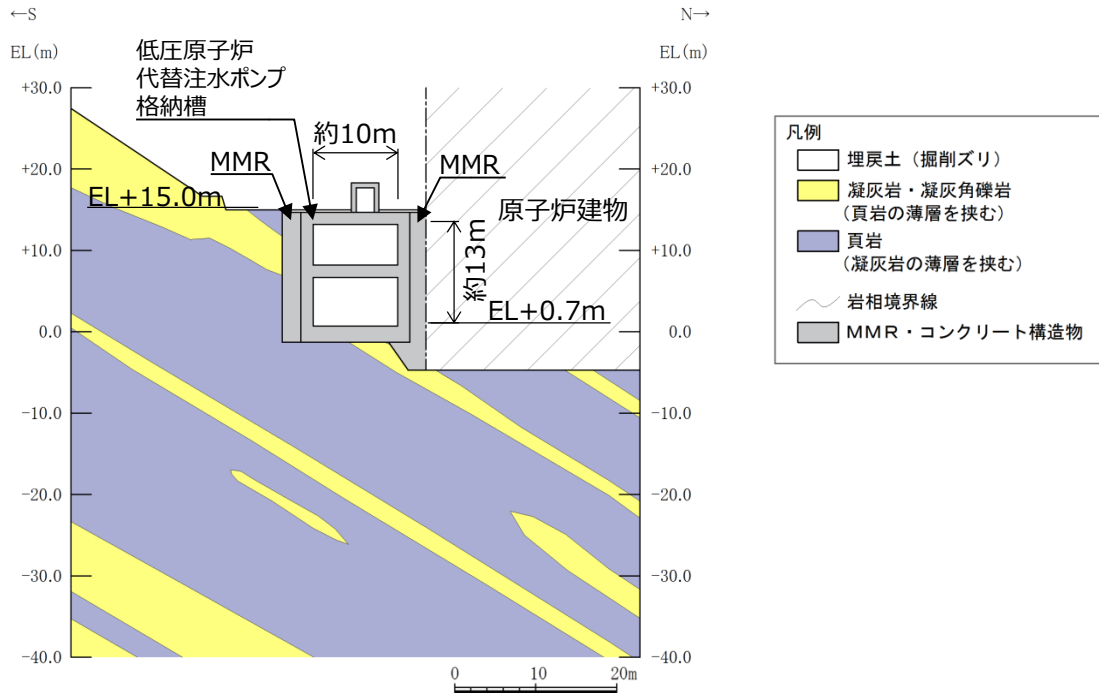


第 6-2-4-4 図 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 断面図 (①-①断面)

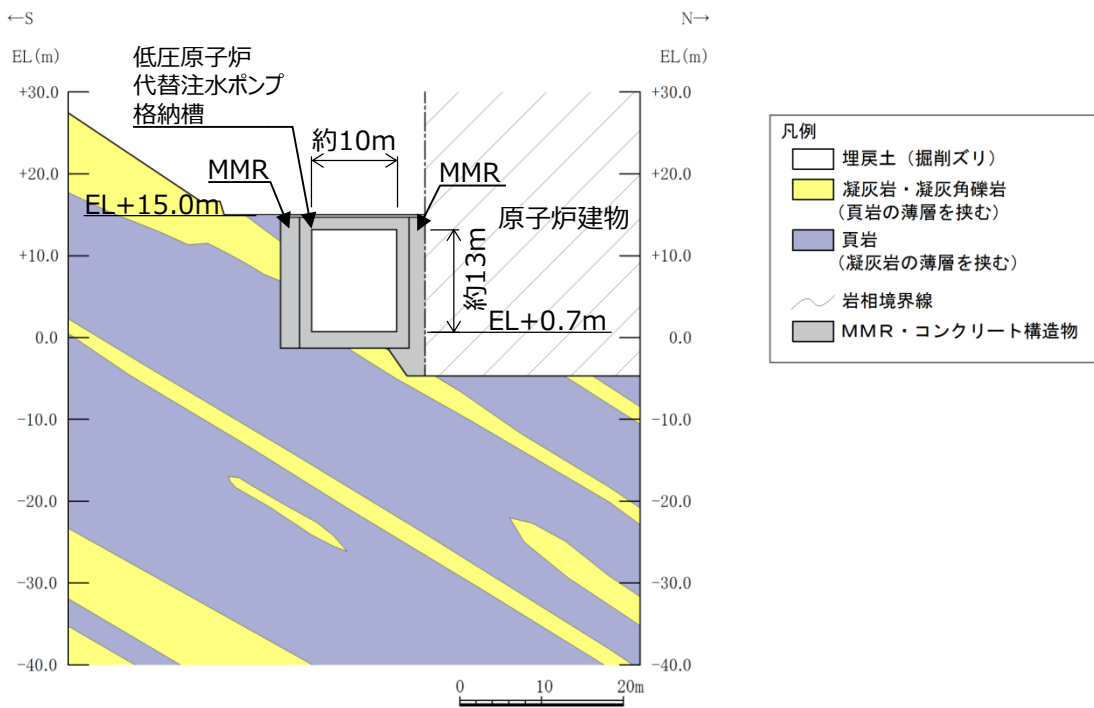


第 6-2-4-5 図 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 断面図 (②-②断面)

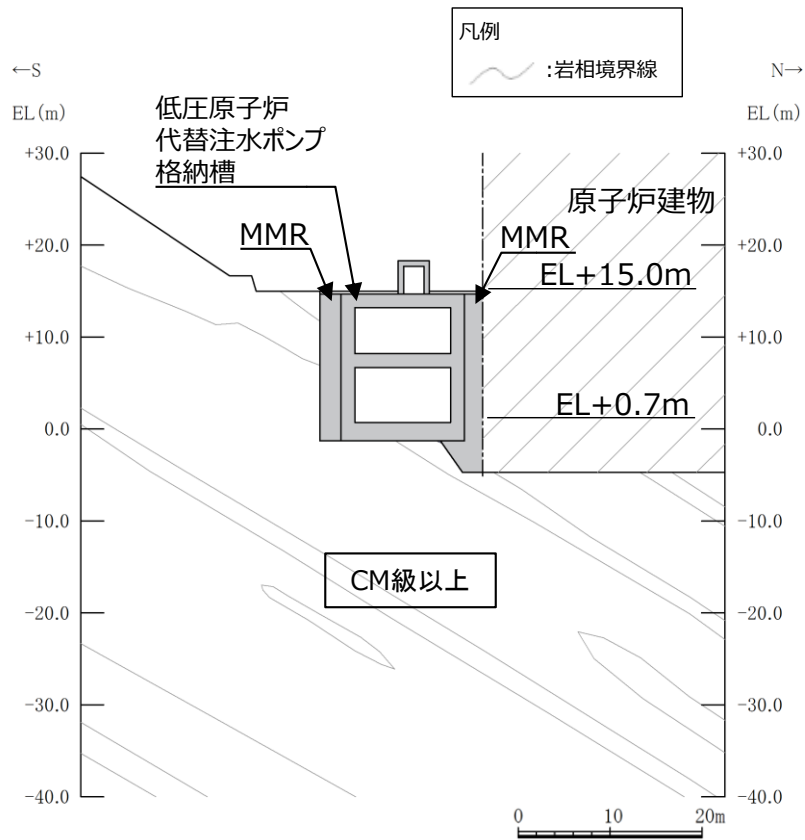




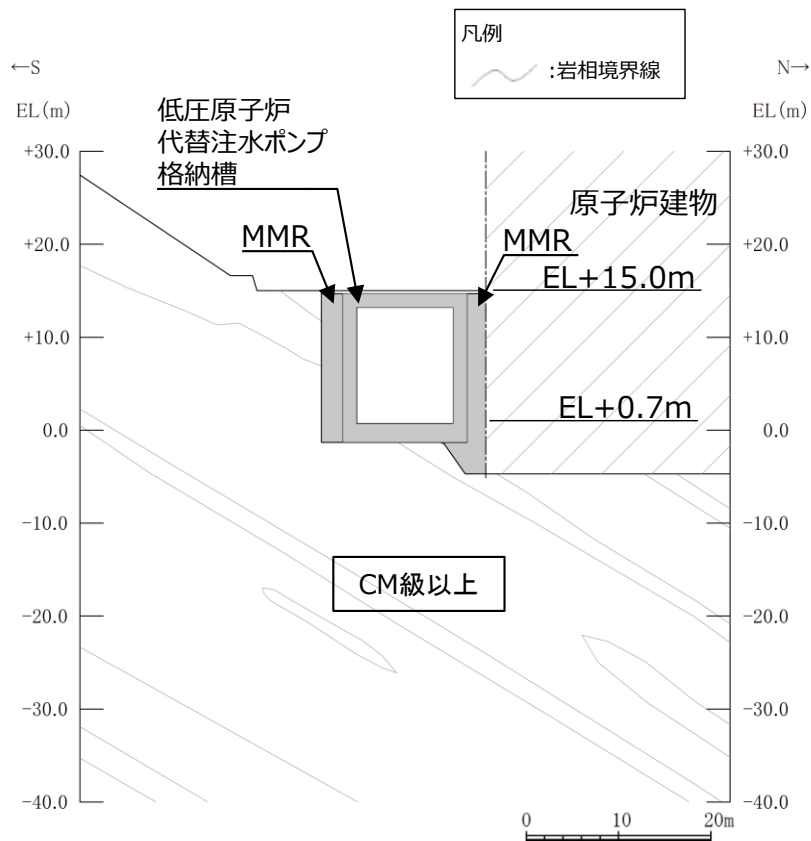
第6-2-4-6 図 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 地質断面図 (①-①断面)



第6-2-4-7 図 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 地質断面図 (②-②断面)



第6-2-4-8図 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 岩級断面図 (①-①断面)



第6-2-4-9図 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 岩級断面図 (②-②断面)

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震力特性等の観点を踏まえた耐震評価候補断面を整理した（第6-2-4-1表）。

第6-2-4-1表 耐震評価候補断面の整理（低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽）  
（1/2）

観点		低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽			
		①-①断面	②-②断面	③-③断面	
①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況	要求機能	・間接支持	・貯水	・間接支持 ・貯水	
	間接支持する設備	設備	・低圧原子炉代替注水ポンプ ・低圧原子炉代替注水系 配管 弁 他	・なし	・低圧原子炉代替注水ポンプ ・低圧原子炉代替注水系 配管 弁 他
		設置状況	・設備毎に異なる	-	・設備毎に異なる
②構造的特徴	形式	・弱軸方向断面		・強軸方向断面	
		・鉄筋コンクリート造の地中構造物			
		・中床版を有する	・水槽により構成される	・隔壁及び中床版を有する	
	寸法	・幅13.40m, 高さ16.00～19.60m	・幅13.40m, 高さ16.00m	・幅26.60m, 高さ16.00～21.19m	

第6-2-4-1表 耐震評価候補断面の整理（低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽）  
（2/2）

観点		低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽		
		①-①断面	②-②断面	③-③断面
③周辺状況	周辺地質	構造物下部	・CM級以上の岩盤に直接支持されている	
		構造物側部及び上部	・周辺に埋戻土（掘削スリ）及びMMRが分布している	
			・MMRは高さ約16.0mで、概ね矩形である	
	地質変化部	・なし		
	地下水位	・解析結果等を踏まえて整理する。		
モデル化する隣接構造物	・原子炉建物	・第1バントフィルタ格納槽		
④地震波の伝搬特性	・観点③での整理のとおり、構造物下部の周辺地質に差異がなく、地震波の伝搬特性は一樣である			
⑤床応答特性	・観点①での整理のとおり、①-①及び③-③断面に間接支持する設備がある ・観点①～③での整理のとおり、間接支持する設備の種類及び設置状況は一樣であるが、構造的特徴及び周辺状況に差異があることから、各断面の床応答特性が異なる			

以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、地震応答解析により耐震評価を行ううえで、構造物の応答が耐震評価上厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。なお、詳細設計段階において設定する地下水位等、各断面で異なる要因があれば、その観点を整理を行い、評価対象断面を選定する。

## 2.5 第1ベントフィルタ格納槽

第1ベントフィルタ格納槽の配置図を第6-2-5-1図に、平面図を第6-2-5-2図に、縦断面図を第6-2-5-3図に、断面図を第6-2-5-4図～第6-2-5-5図に、地質断面図を第6-2-5-6図～第6-2-5-7図に、岩級断面図を第6-2-5-8図～第6-2-5-9図にそれぞれ示す。

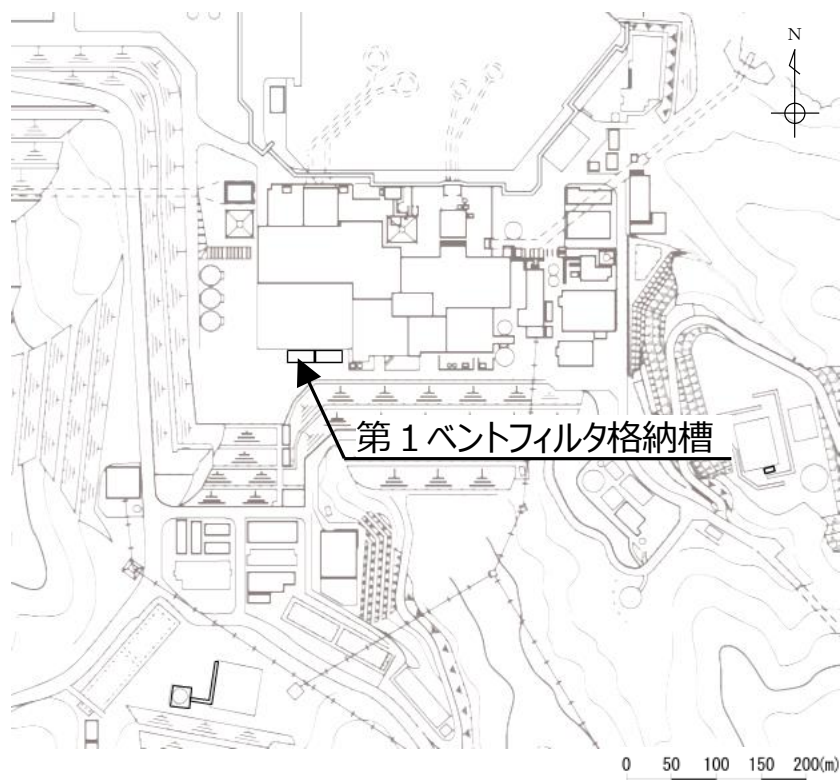
第1ベントフィルタ格納槽は、常設重大事故等対処設備である第1ベントフィルタスクラバ容器等の間接支持機能及び遮蔽機能が要求される。

第1ベントフィルタ格納槽は、延長24.6m、幅13.4m、高さ14.0m～18.7mの鉄筋コンクリート造の地中構造物である。

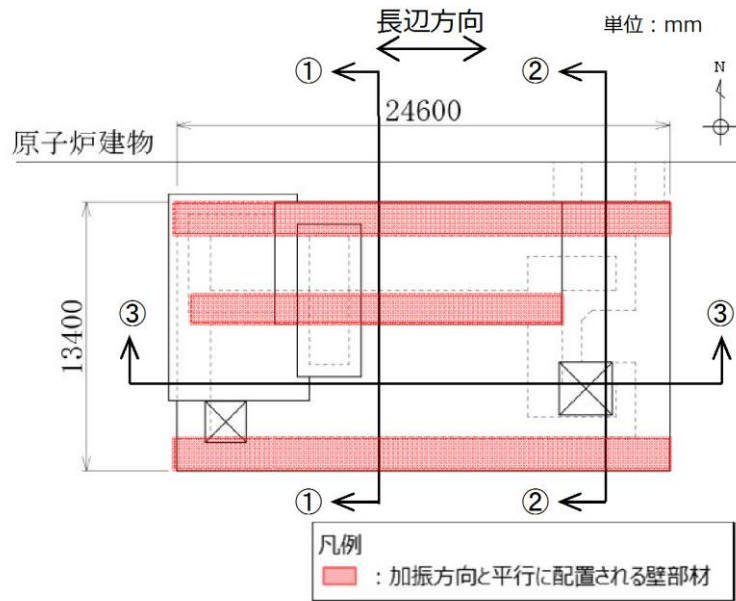
第1ベントフィルタ格納槽はMMRを介して $C_M$ 級以上の岩盤に支持されている。

長辺方向（東西方向）に加振した場合は、加振方向と直交する方向の構造物の長さに対する加振方向に平行に配置される壁の割合が大きくなるので、長辺方向が強軸となり、短辺方向（南北方向）が弱軸となる。

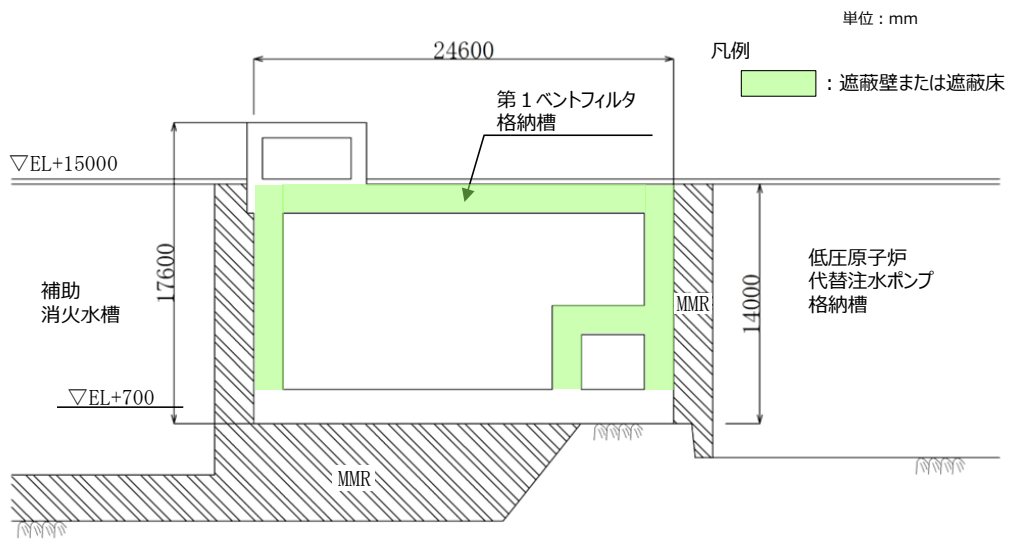
第1ベントフィルタ格納槽の弱軸方向断面では、配筋を含め構造的特徴が概ね同様である範囲から代表となる範囲を耐震評価候補断面とする。



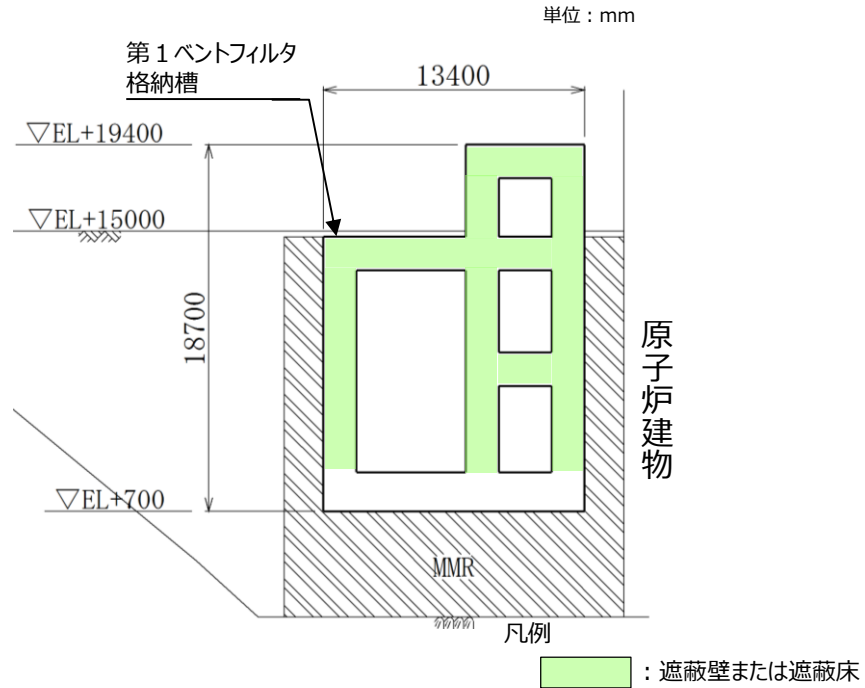
第6-2-5-1図 第1ベントフィルタ格納槽 配置図



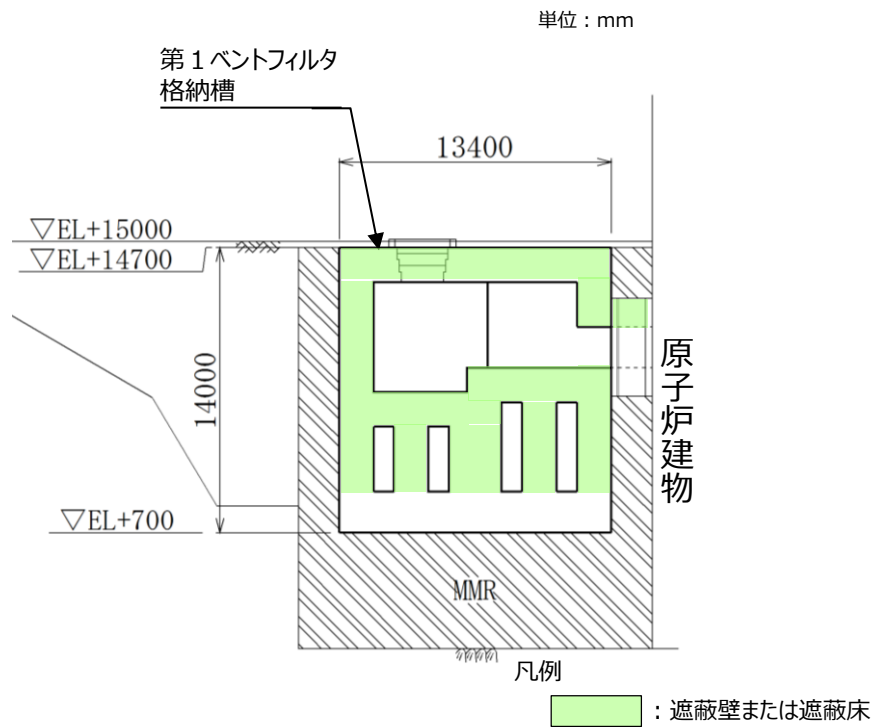
第6-2-5-2 図 第1 ベントフィルタ格納槽 平面図



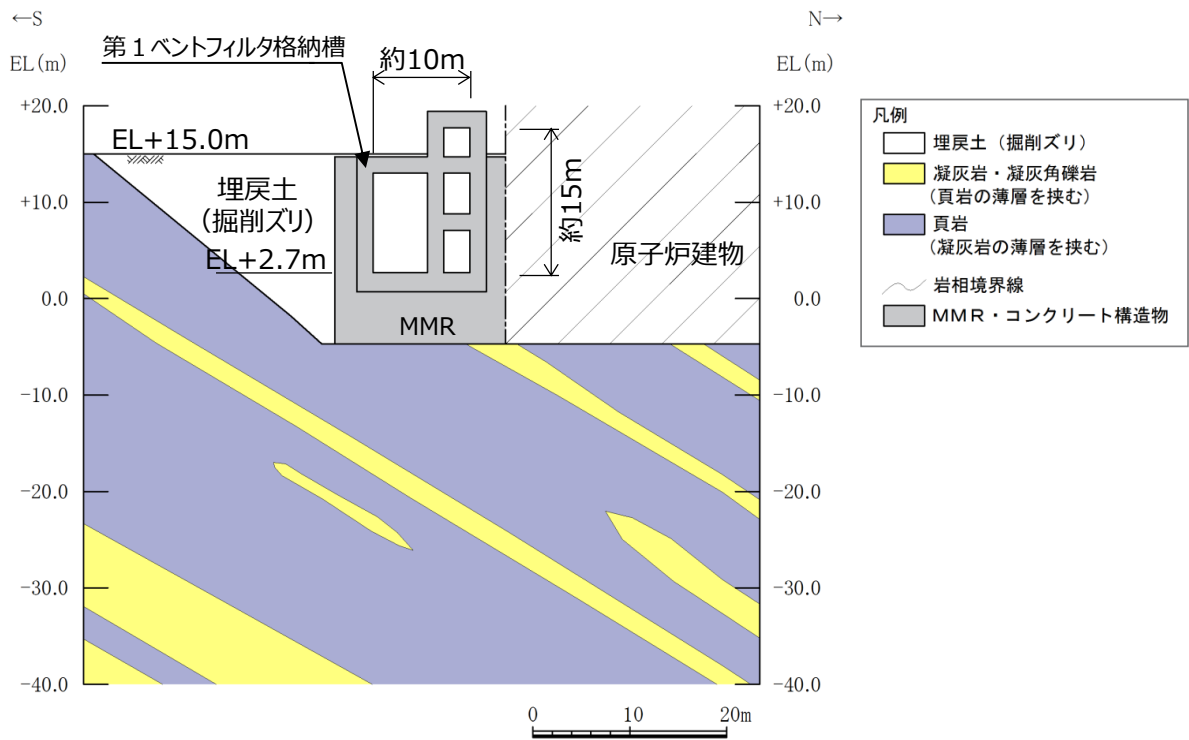
第6-2-5-3 図 第1 ベントフィルタ格納槽 縦断図 (③-③断面)



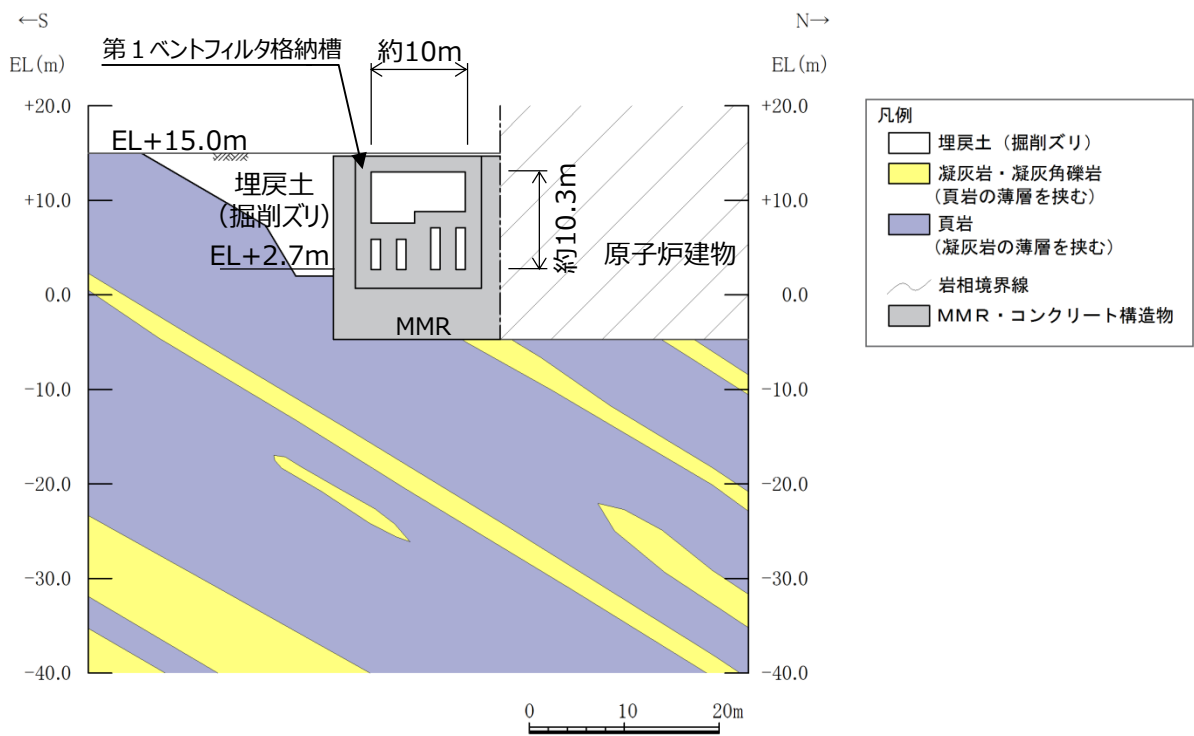
第6-2-5-4図 第1ベントフィルタ格納槽 断面図 (①-①断面)



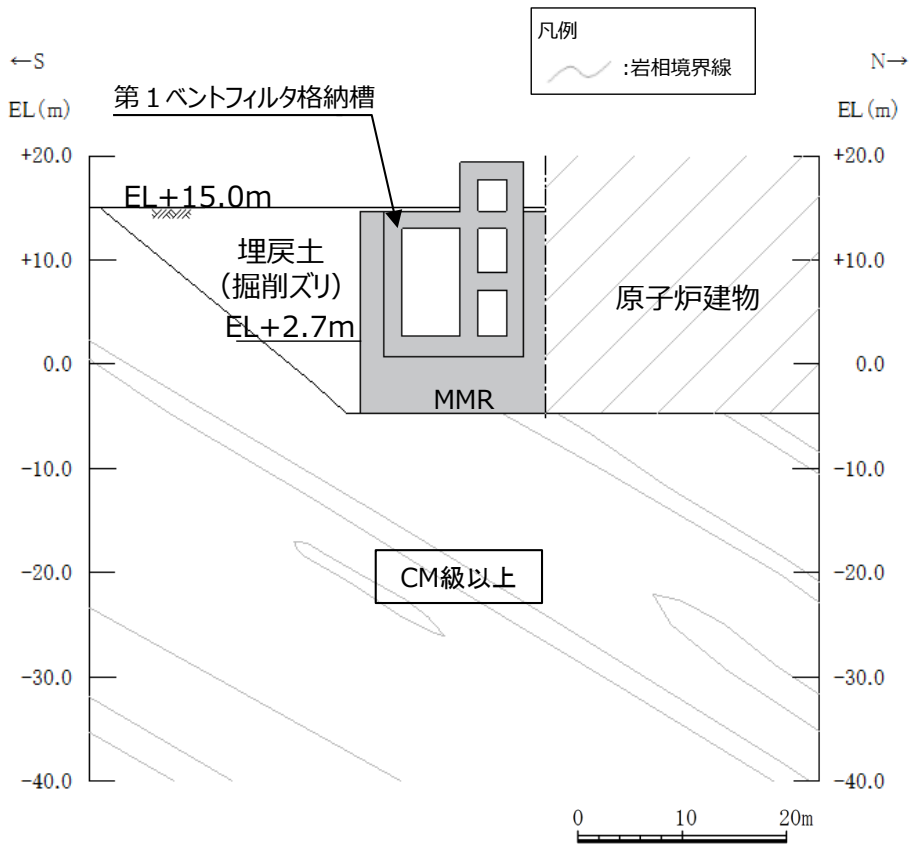
第6-2-5-5図 第1ベントフィルタ格納槽 断面図 (②-②断面)



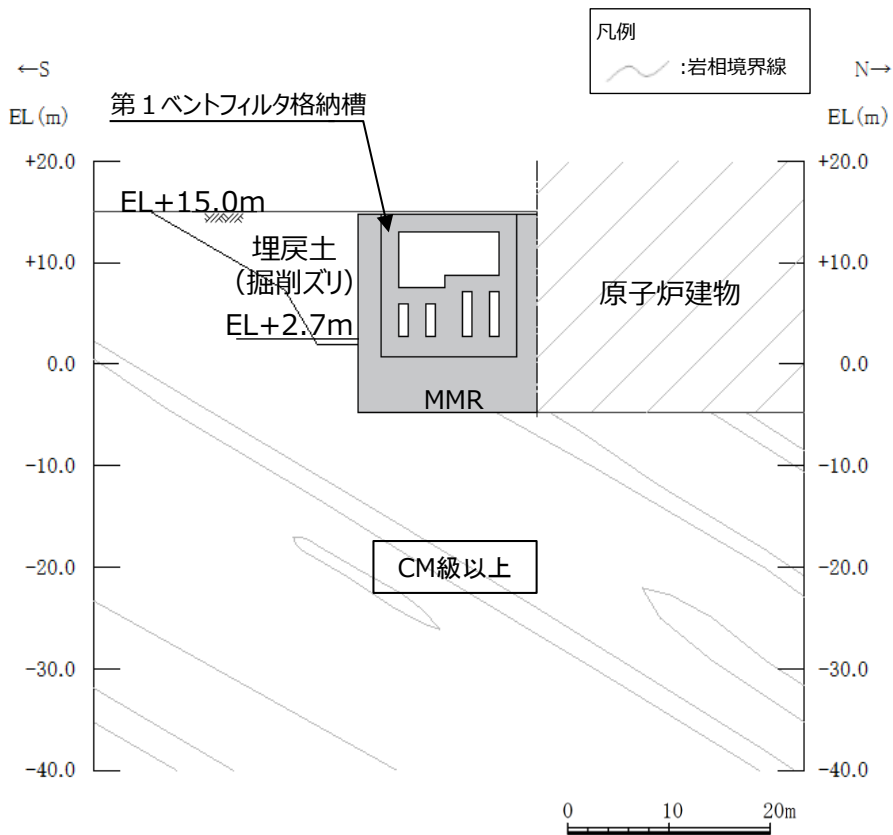
第6-2-5-6 図 第1ベントフィルタ格納槽 地質断面図 (①-①断面)



第6-2-5-7 図 第1ベントフィルタ格納槽 地質断面図 (②-②断面)



第6-2-5-8図 第1ベントフィルタ格納槽 岩級断面図 (①-①断面)



第6-2-5-9図 第1ベントフィルタ格納槽 岩級断面図 (②-②断面)



第1 ベントフィルタ格納槽について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震力特性等の観点を踏まえた耐震評価候補断面を整理した（第6-2-5-1表）。

第6-2-5-1表 耐震評価候補断面の整理（第1 ベントフィルタ格納槽）（1/2）

観点		第1 ベントフィルタ格納槽		
		①-①断面	②-②断面	③-③断面
①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況	要求機能	・間接支持 ・遮蔽		
	間接支持する設備	・第1 ベントフィルタスクラバ容器 ・圧力開放板 ・格納容器フィルタベント系配管・弁 他	・第1 ベントフィルタ銀ゼオライト容器 ・格納容器フィルタベント系配管・弁 他	・第1 ベントフィルタスクラバ容器 ・圧力開放板 ・格納容器フィルタベント系配管・弁 ・第1 ベントフィルタ銀ゼオライト容器 他
	設置状況	・設備毎に異なる。		
②構造的特徴	形式	・弱軸方向断面		・強軸方向断面
		・鉄筋コンクリート造の地中構造物		
	寸法	・幅13.40m, 高さ14.00～18.70m	・幅13.40m, 高さ14.00m	・幅24.60m, 高さ14.00～17.60m

第6-2-5-1表 耐震評価候補断面の整理（第1 ベントフィルタ格納槽）（2/2）

観点		第1 ベントフィルタ格納槽		
		①-①断面	②-②断面	③-③断面
③周辺状況	周辺地質	構造物下部	・MMRを介してCM級以上の岩盤に支持されている	
		構造物側部及び上部	・MMRは高さ約5.7mで矩形及び台形状である	
		地質変化部	・埋戻土（掘削スリ）及びMMRが分布している	
			・MMRは高さ約14.0m～19.7mで矩形である	
	地下水位	・解析結果等を踏まえて整理する。		
	モデル化する隣接構造物	・原子炉建物	・補助消火水槽 ・低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	
④地震波の伝搬特性	・観点③での整理のとおり、構造物下部の周辺地質に差異がなく、地震波の伝搬特性は一樣である			
⑤床応答特性	・観点①での整理のとおり、各断面に間接支持する設備がある ・観点①～③での整理のとおり、間接支持する設備の種類及び設置状況、構造的特徴並びに周辺状況に差異があることから、各断面の床応答特性が異なる			

以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、地震応答解析により耐震評価を行ううえで、構造物の応答が耐震評価上厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。なお、詳細設計段階において設定する地下水位等、各断面で異なる要因があれば、その観点を整理を行い、評価対象断面を選定する。

## 2.6 緊急時対策所用燃料地下タンク

緊急時対策所用燃料地下タンクの配置図を第6-2-6-1図に、平面図を第6-2-6-2図に、縦断図を第6-2-6-3図に、断面図を第6-2-6-4図に、地質断面図を第6-2-6-5図に、岩級断面図を第6-2-6-6図にそれぞれ示す。

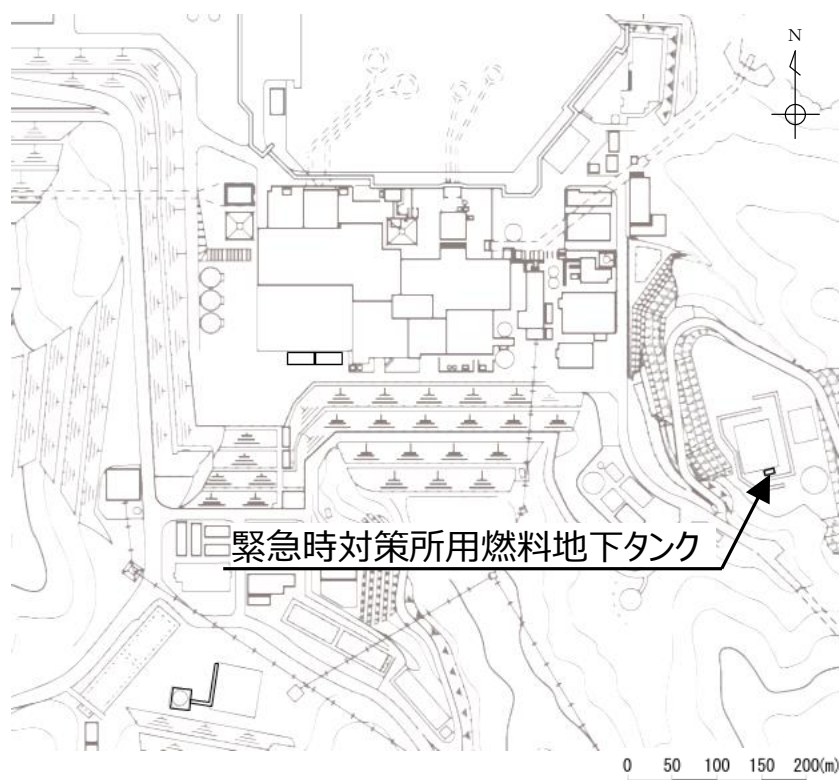
緊急時対策所用燃料地下タンクは、常設重大事故緩和設備であり、鉄筋コンクリート躯体及びライナ（鋼製タンク）で構成され、非常用発電装置に係る燃料の貯蔵が要求される構造物である。なお、要求性能を期待する部位は、鉄筋コンクリート躯体及びライナ（鋼製タンク）である。

緊急時対策所用燃料地下タンクは、延長12.8m、幅3.85m、高さ3.9mの鉄筋コンクリート造の地中構造物である。

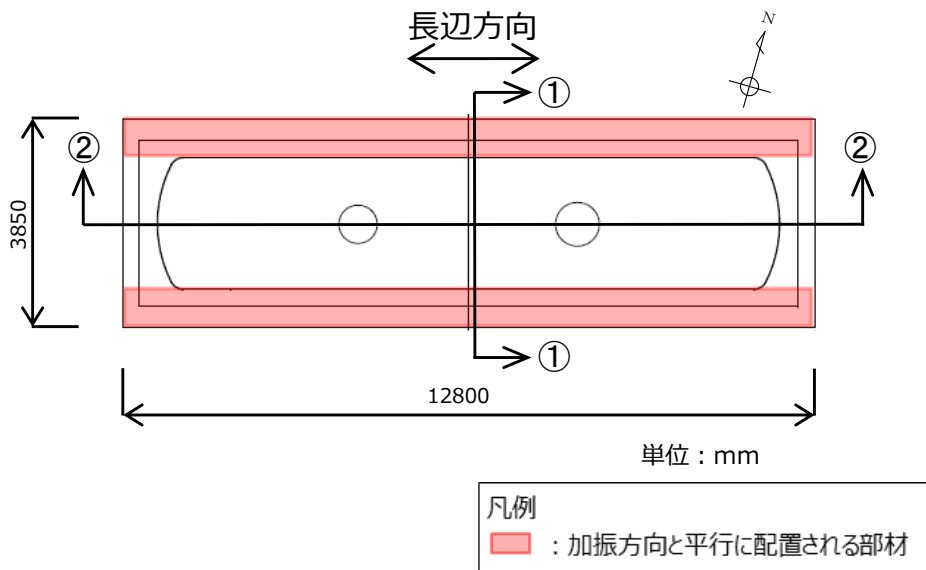
緊急時対策所用燃料地下タンクは、 $C_M$ 級以上の岩盤に直接支持されている。

長辺方向（東西断面）に加振した場合は、加振方向と直交する方向の構造物の長さに対する加振方向と平行に配置される壁の割合が大きくなるので、長辺方向が強軸となり、短辺方向（南北方向）が弱軸となる。

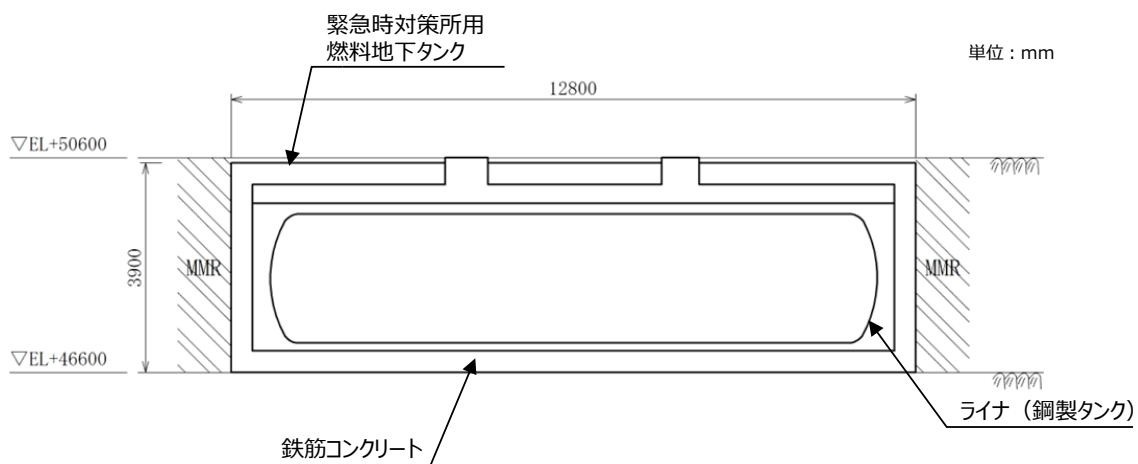
緊急時対策所用燃料地下タンクの弱軸方向断面では、配筋を含め構造的特徴が概ね同様である範囲から代表となる範囲を耐震評価候補断面とする。



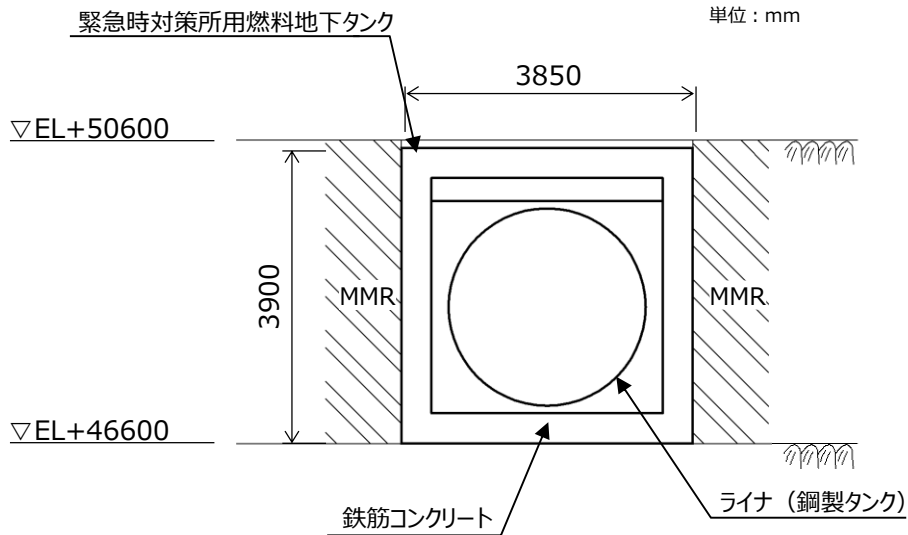
第6-2-6-1図 緊急時対策所用燃料地下タンク 配置図



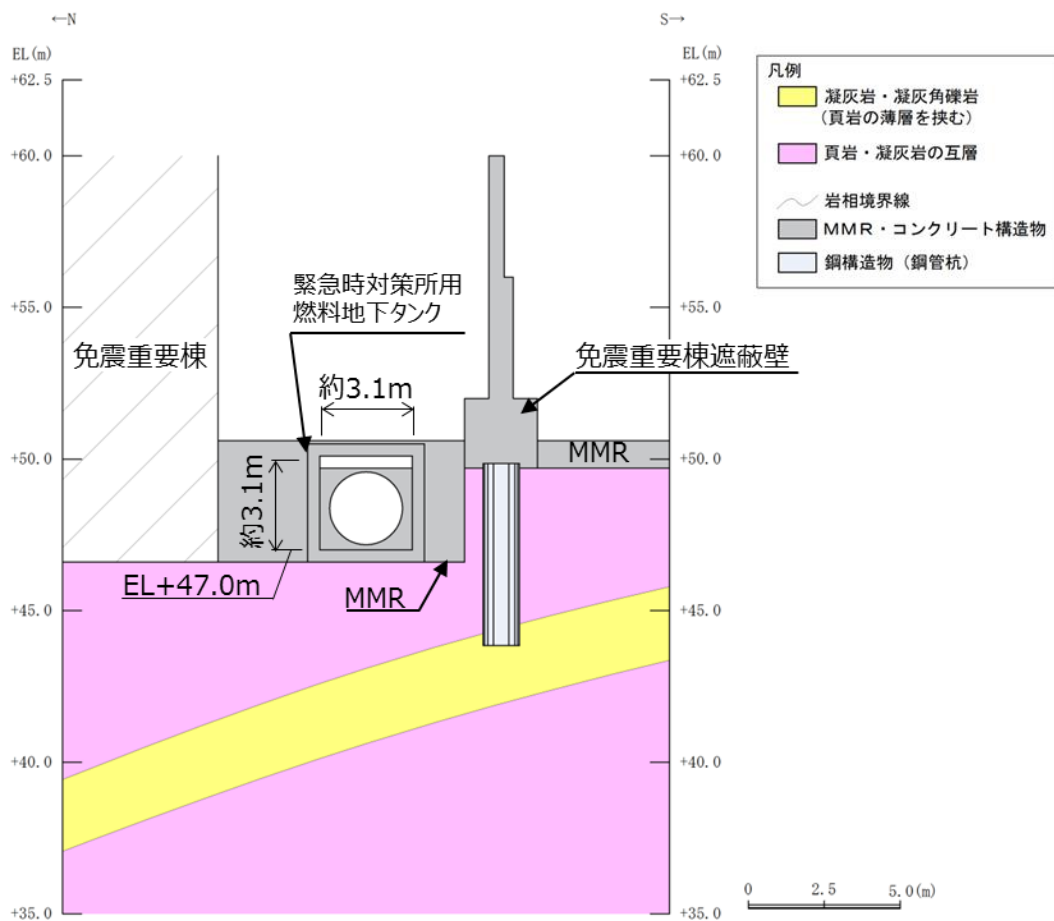
第 6-2-6-2 図 緊急時対策所用燃料地下タンク 平面図



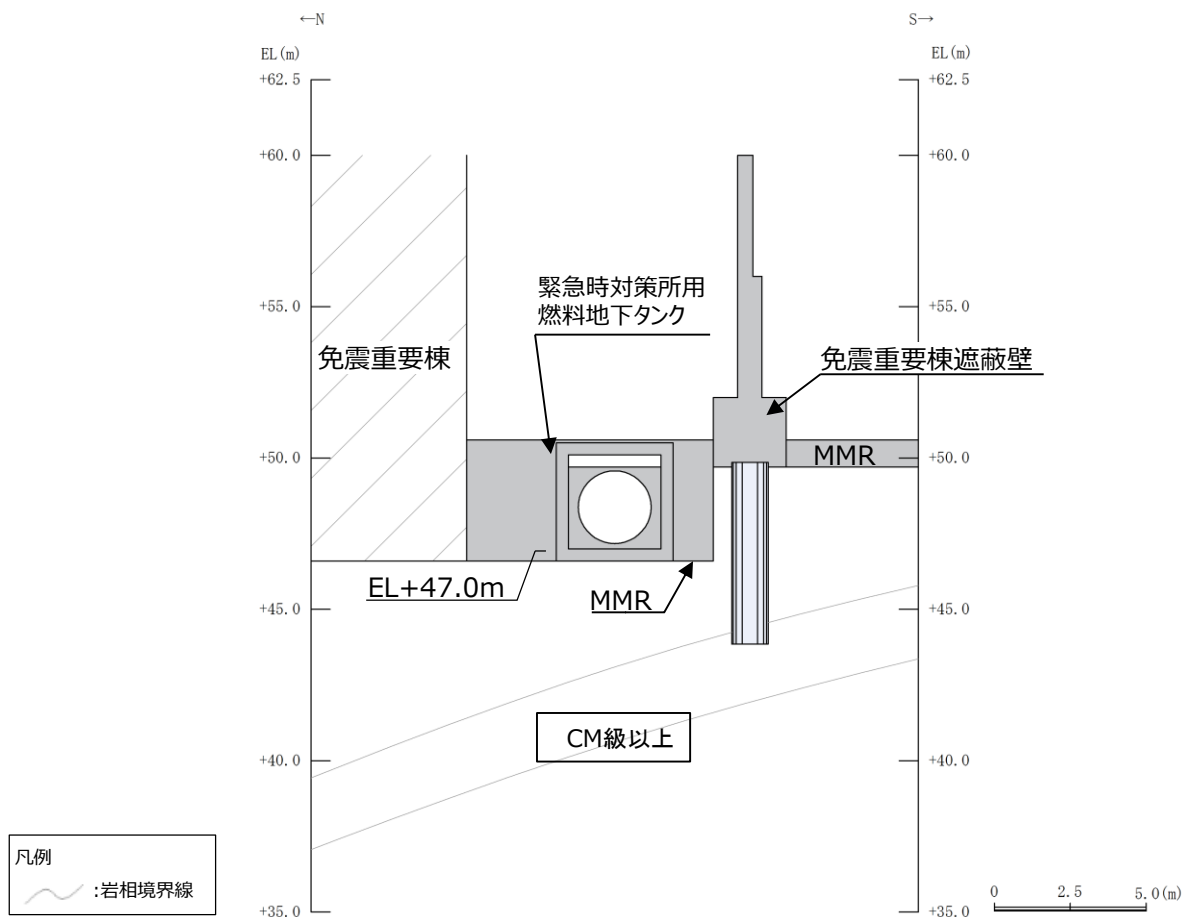
第 6-2-6-3 図 緊急時対策所用燃料地下タンク 縦断図 (②-②断面)



第6-2-6-4 図 緊急時対策所用燃料地下タンク 断面図 (①-①断面)



第6-2-6-5 図 緊急時対策所用燃料地下タンク 地質断面図 (①-①断面)



第 6-2-6-6 図 緊急時対策所用燃料地下タンク 岩級断面図 (①-①断面)

緊急時対策所用燃料地下タンクについて、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震力特性等の観点を踏まえた耐震評価候補断面を整理した（第6-2-6-1表）。

第6-2-6-1表 耐震評価候補断面の整理（緊急時対策所用燃料地下タンク）（1/2）

観点			緊急時対策所用燃料地下タンク		
			①-①断面	②-②断面	
①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況	要求機能	・非常用発電装置に係る燃料の貯蔵			
	間接支持する設備	設備	・なし		
		設置状況	-		
②構造的特徴	形式	・弱軸方向断面		・強軸方向断面	
		・鉄筋コンクリート造の地中構造物			
	寸法	・幅3.85m, 高さ3.90m		・幅12.80m, 高さ3.90m	

第6-2-6-1表 耐震評価候補断面の整理（緊急時対策所用燃料地下タンク）（2/2）

観点			緊急時対策所用燃料地下タンク		
			①-①断面	②-②断面	
③周辺状況	周辺地質	構造物下部	・CM級以上の岩盤に直接支持されている		
		構造物側部及び上部	・MMRが分布している		
			・MMRは高さ約4.0mで、矩形である		
	地質変化部	・なし			
	地下水位	・解析結果等を踏まえて整理する。			
	モデル化する隣接構造物	・なし			
④地震波の伝搬特性		・観点③での整理のとおり、構造物下部の周辺地質は概ね一様であり、地震波の伝搬特性は一様である			
⑤機器・配管系の振動特性		・観点①での整理のとおり、間接支持する設備がない			

以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、地震応答解析により耐震評価を行ううえで、構造物の応答が耐震評価上厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。なお、詳細設計段階において設定する地下水位等、各断面で異なる要因があれば、その観点を整理を行い、評価対象断面を選定する。

## 2.7 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）

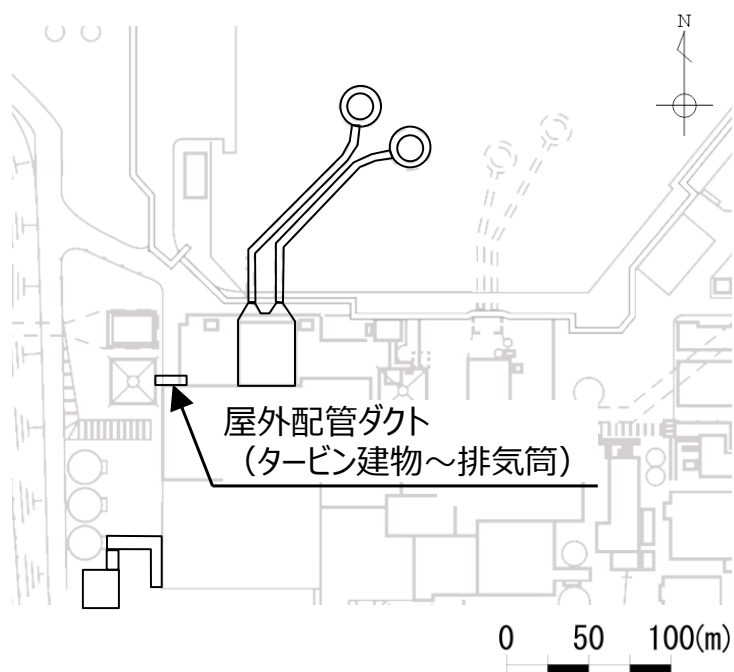
屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の配置図を第6-2-7-1図に、平面図を第6-2-7-2図に、縦断図を第6-2-7-3図に、断面図を第6-2-7-4図～第6-2-7-7図に、地質断面図を第6-2-7-8図に、地質縦断図を第6-2-7-9図に、岩級縦断図を第6-2-7-10図にそれぞれ示す。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は、Sクラス設備である非常用ガス処理系配管・弁等の間接支持機能が要求される。

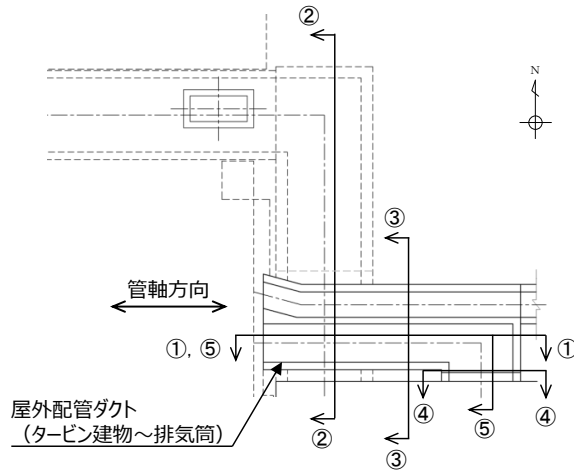
屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は、延長約20mの鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、幅6.7m、高さ3.1mの2連のボックスカルバート構造、幅6.2m、高さ3.6mのボックスカルバート構造に大別される延長方向に断面の変化が小さい線状構造物である（第6-2-7-4図～第6-2-7-7図）。

間接支持する配管の管軸方向と平行に配置される壁部材が多いので、間接支持する配管の管軸方向が強軸となる。

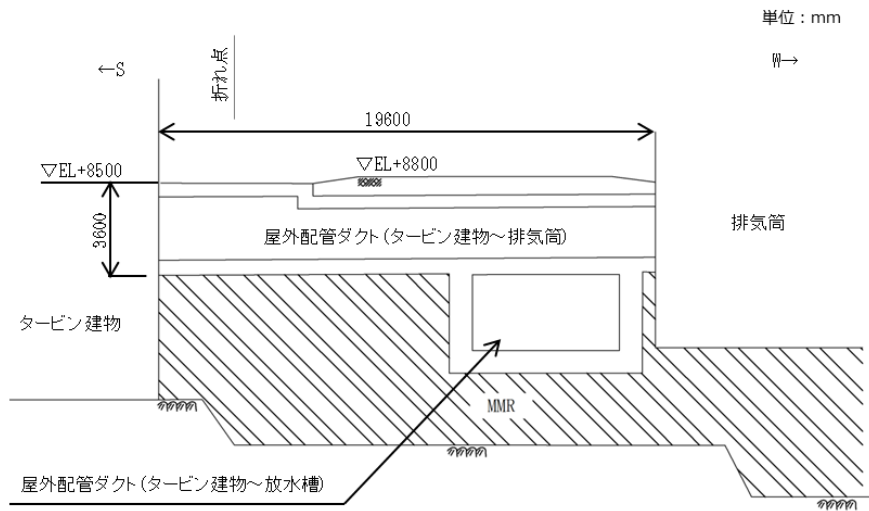
屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）はMMRを介してC<sub>M</sub>級以上の岩盤に支持されている。



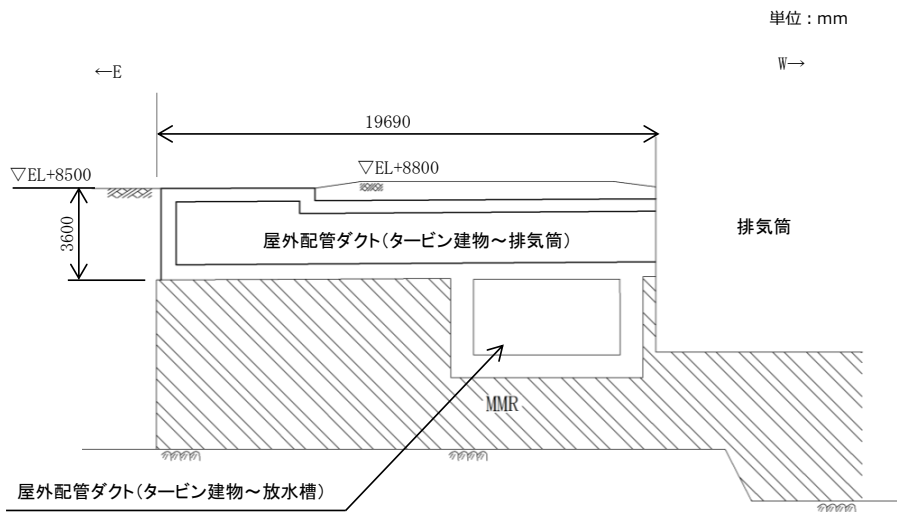
第6-2-7-1図 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 配置図



第6-2-7-2図 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 平面図

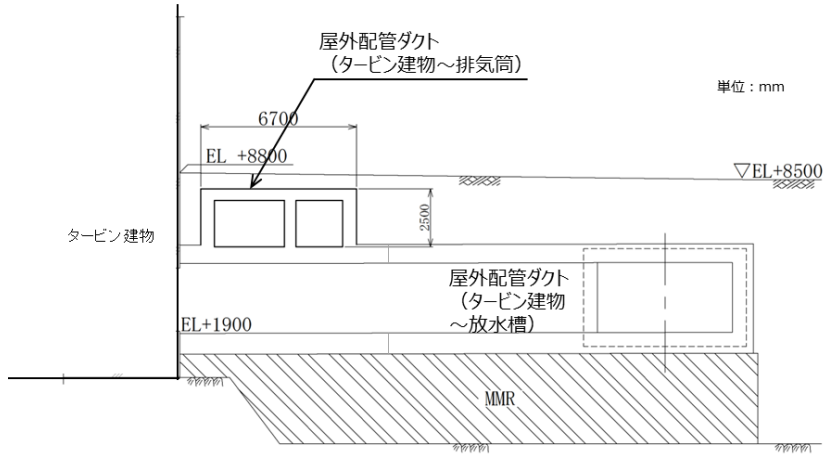


第6-2-7-3図 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 縦断面図 (⑤-⑤断面)

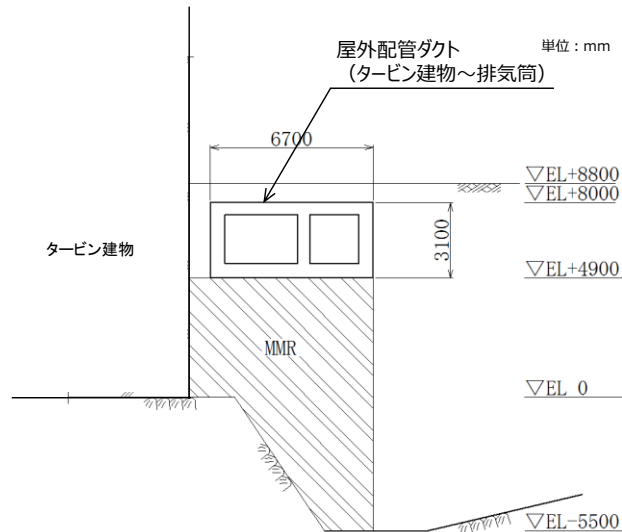


第6-2-7-4図 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 縦断面図 (①-①断面)

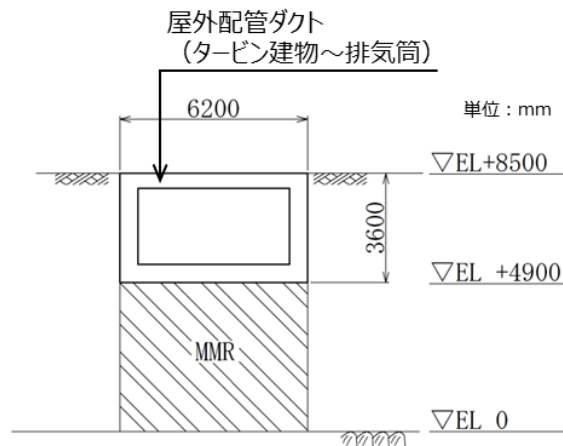




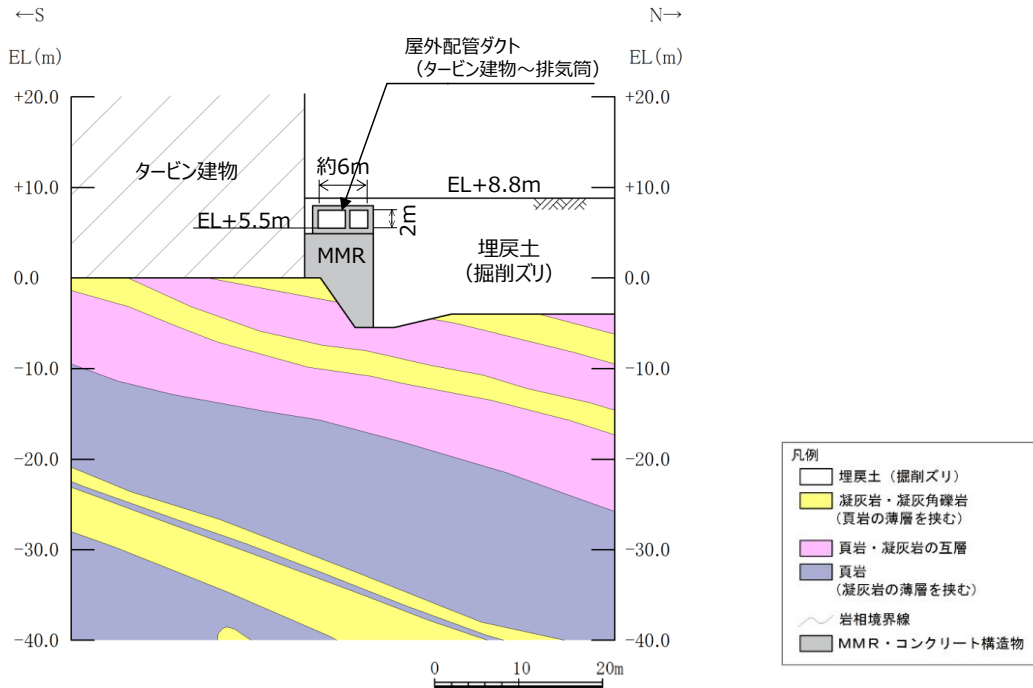
第6-2-7-5図 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）断面図（②-②断面）



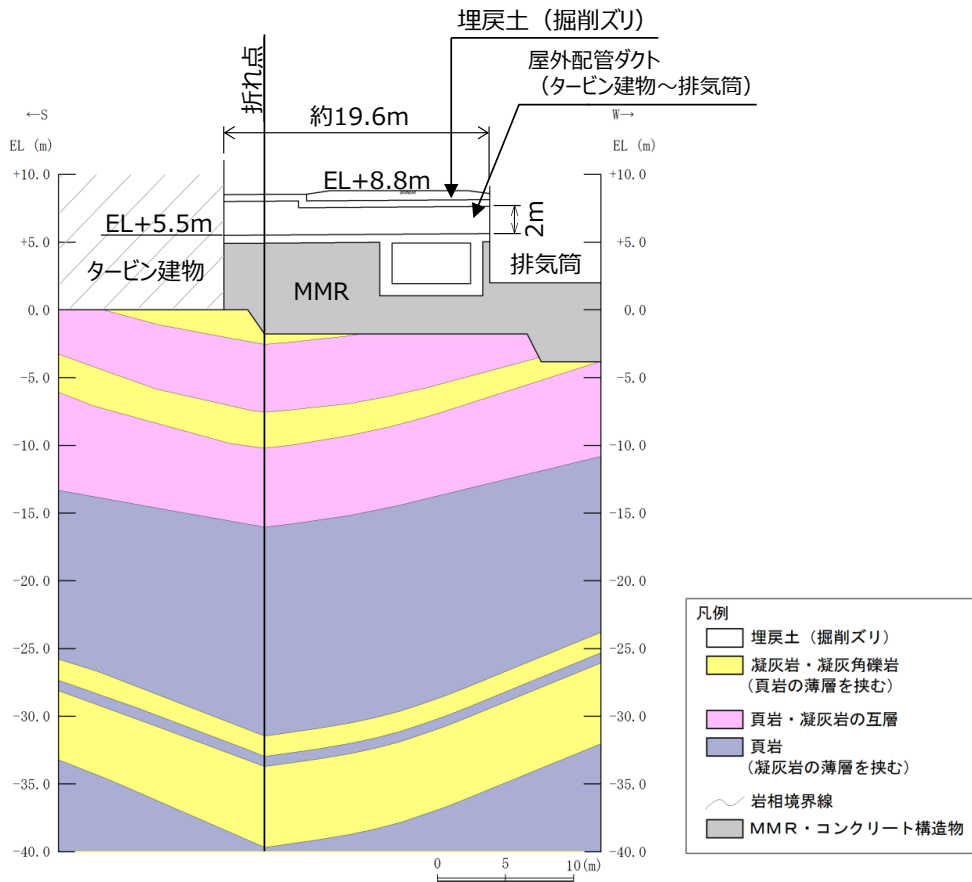
第6-2-7-6図 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）断面図（③-③断面）



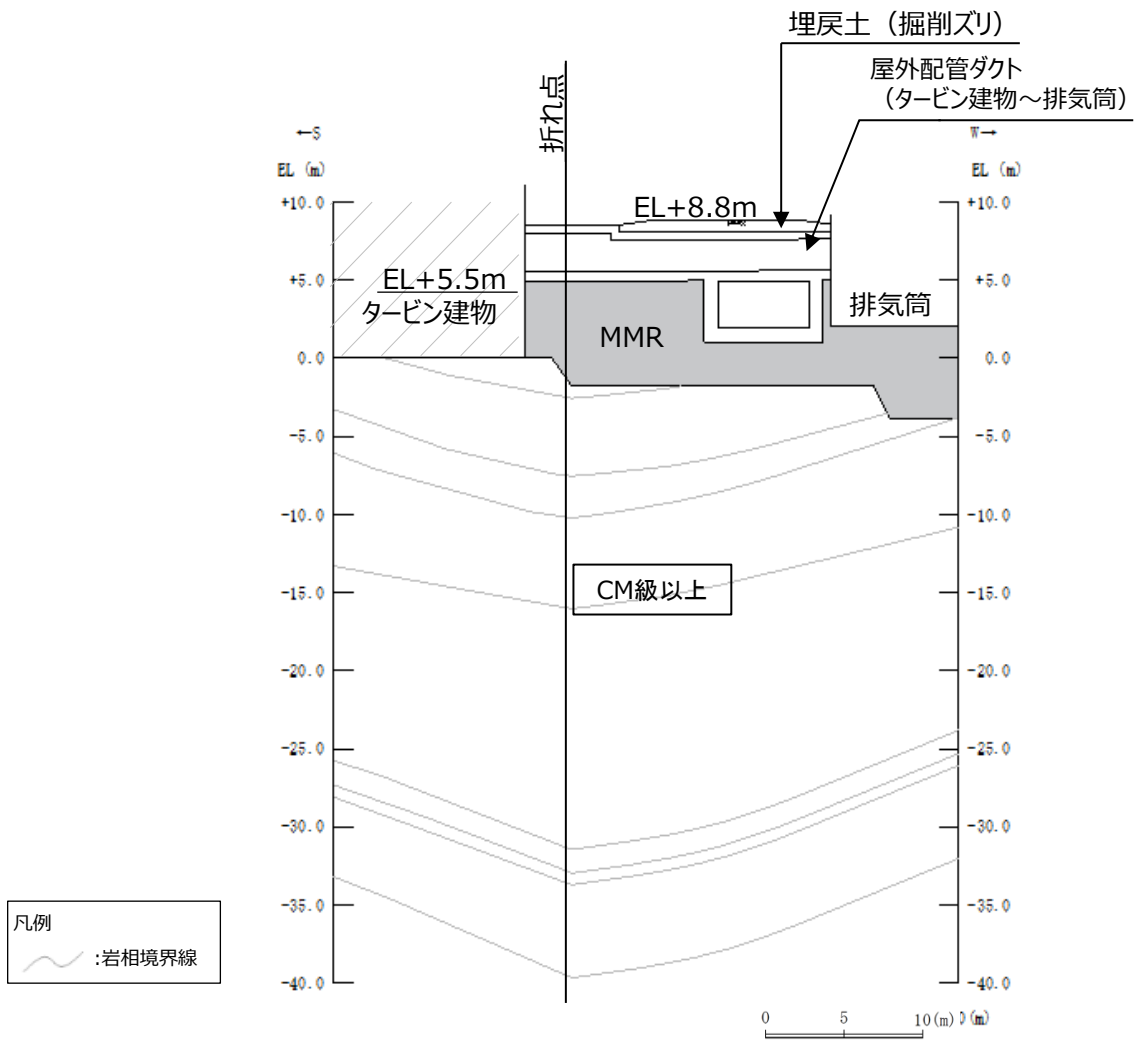
第6-2-7-7図 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）断面図（④-④断面）



第6-2-7-8図 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）地質断面図（③-③断面）



第6-2-7-9図 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）地質縦断面図（⑤-⑤断面）



第6-2-7-10図 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）岩級縦断図（⑤-⑤断面）

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震力特性等の観点を踏まえた耐震評価候補断面を整理した（第6-2-7-1表）。

第6-2-7-1表 耐震評価候補断面の整理  
（屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒））（1/2）

観点		屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）			
		①-①断面	②-②断面	③-③断面	④-④断面
①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況	要求機能	・間接支持			
	間接支持する設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非常用ガス処理系 配管, 弁</li> <li>・非常用ディーゼル発電設備燃料移送系 配管, 弁</li> <li>・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備燃料移送系 配管, 弁</li> </ul>			
	設置状況	・延長方向に一樣に配置されている			
②構造的特徴	形式	・強軸方向断面	・弱軸方向断面		
		・鉄筋コンクリート造の地中構造物			
		・ボックスカルバート	・2連のボックスカルバート		・ボックスカルバート
	・底板が、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）弱軸方向断面の頂版の一部と一体化している	・底板が、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）強軸方向断面の頂版の一部と一体化している	—		
寸法	・幅19.60m, 高さ3.60m	・幅6.70m, 高さ2.50m	・幅6.70m, 高さ3.10m	・幅6.20m, 高さ3.60m	

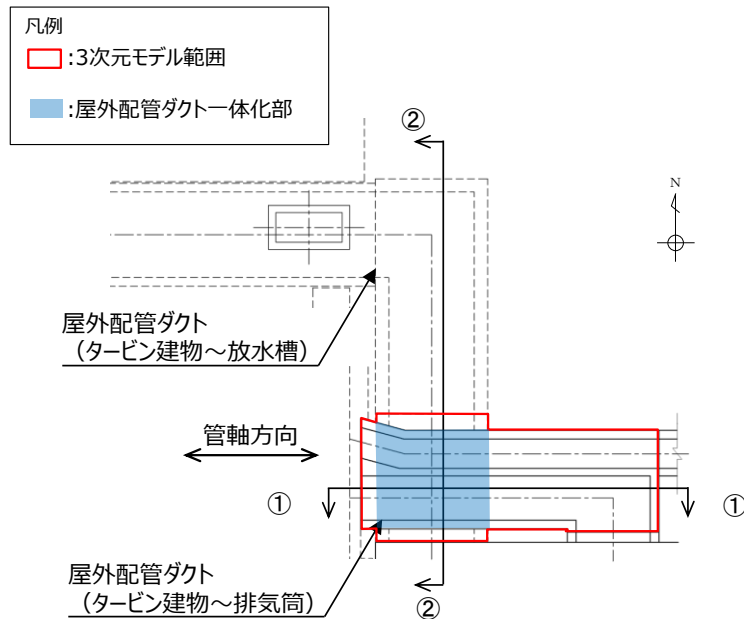
第6-2-7-1表 耐震評価候補断面の整理  
（屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒））（2/2）

観点		屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）				
		①-①断面	②-②断面	③-③断面	④-④断面	
③周辺状況	周辺地質	構造物下部	・MMRを介してCM級以上の岩盤に支持されている			
		構造物側部及び上部	・MMRは高さ約3.9～6.8mで、断面方向に一樣に分布している	・MMRは高さ約1.0～3.9mで、断面方向に一樣に分布している	・MMRは高さ約4.9m～10.4mで、構造物直下に分布している	・MMRは高さ約4.9mで、構造物直下に分布している
	地質変化部	・埋戻土（掘削スリ）が分布している				
	地下水位	・解析結果等を踏まえて整理する。				
	モデル化する隣接構造物	・屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は排気筒と構造目地で接続されており、排気筒の影響を受けないことから、モデル化する隣接構造物はない	・タービン建物		・なし	
④地震波の伝搬特性	・観点③での整理のとおり、構造物下部の周辺地質が各断面で異なり、地震波の伝搬特性が異なる					
⑤床応答特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・観点①での整理のとおり、各断面に間接支持する設備がある</li> <li>・観点①～③での整理のとおり、間接支持する設備の種類及び設置状況は一樣であるが、構造的特徴及び周辺状況に差異があることから、各断面の床応答特性が異なる</li> </ul>					

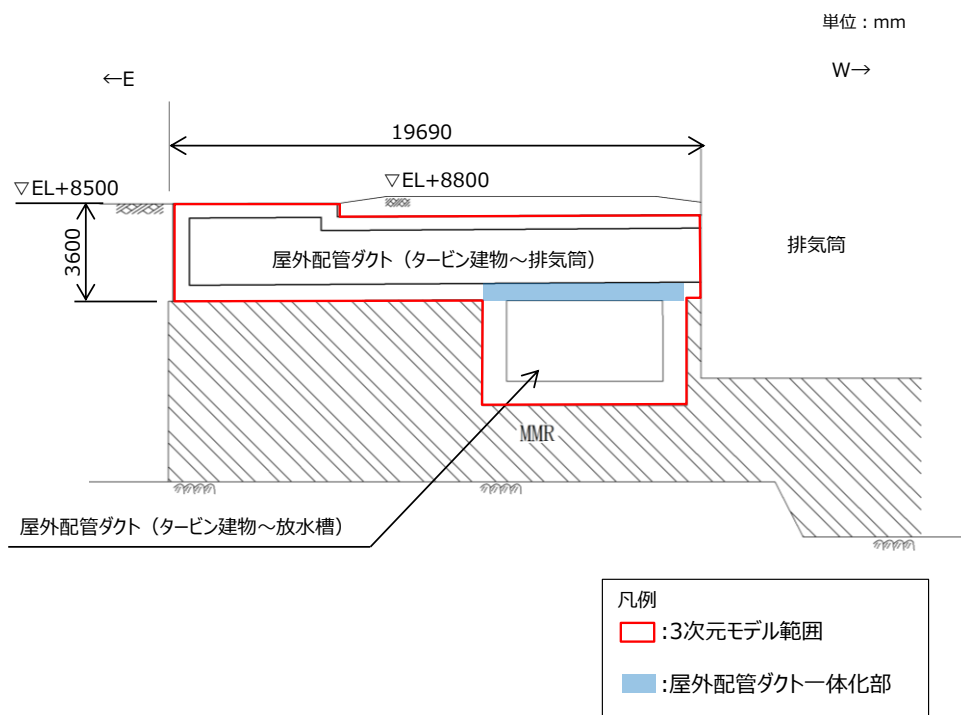
以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、構造的特徴、周辺状況、地震波の伝搬特性等を考慮して、3次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を直交する2方向から断面を評価対象断面として選定する。なお、詳細設計段階において設定する地下水位等、各断面で異なる要因があれば、その観点で整理を行い、評価対象断面を選定する。

【屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の3次元モデルによる耐震評価】

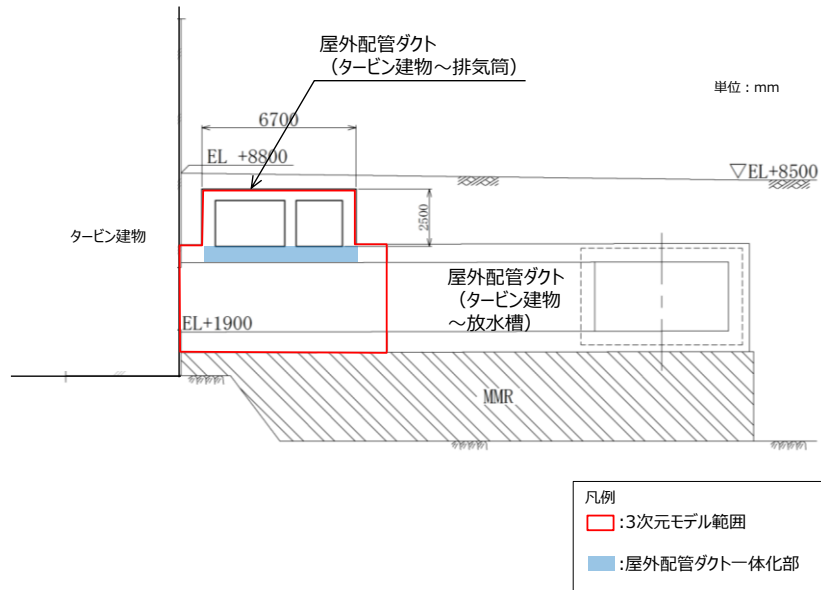
第6-2-7-11図～第6-2-7-13図に示すように、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の底版の一部が、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の頂版の一部と一体化している範囲があることから、当該部位のような複雑な構造における立体的な作用荷重を精緻に評価するため、2次元FEMモデルによる耐震評価に加えて、3次元モデルによる耐震評価を実施する。



第6-2-7-11図 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）平面図



第6-2-7-12図 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）断面図（①-①断面）



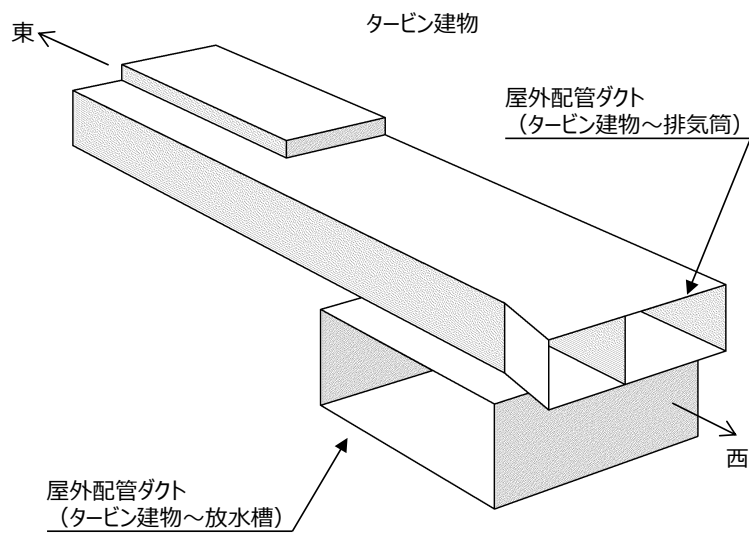
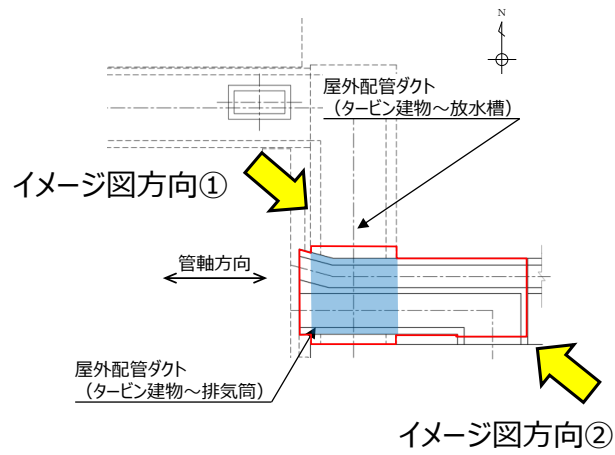
第6-2-7-13図 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）断面図（②-②断面）

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の一体化部は、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）を間接支持する構造物であることから、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）と同じ要求機能を満足することを確認する。屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の一体化部の要求機能、目標性能、許容限界等を第6-2-7-2表に示す。

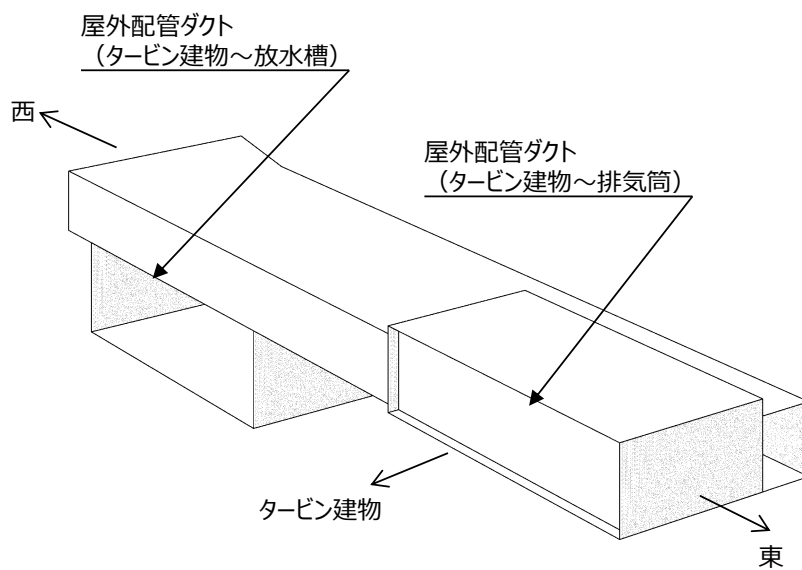
第6-2-7-2表 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の一体化部における耐震評価条件

要求機能	要求機能に対する目標性能	許容限界		解析手法	解析モデル
		曲げ	せん断		
支持機能	終局状態に至らない	限界層間変形角 又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ	せん断耐力	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル

3次元モデル範囲は、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）と屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）のそれぞれの構造目地間とし、イメージを第6-2-7-14図に示す。なお、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）における耐震評価は、3次元FEMモデルによる静的線形解析により評価を行う。



(イメージ図方向①)



(イメージ図方向②)

第6-2-7-14図 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) イメージ図

## 2.8 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）

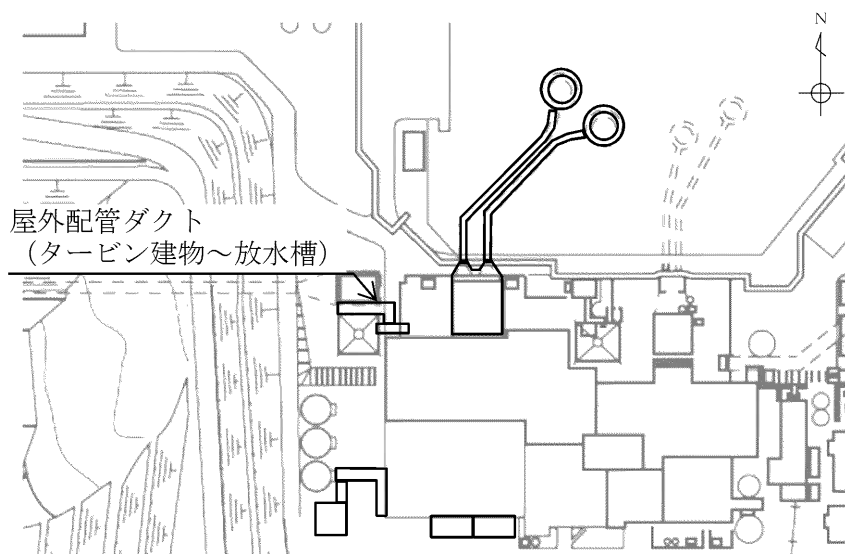
屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の配置図を第6-2-8-1図に、平面図を第6-2-8-2図に、縦断図を第6-2-8-3図に、断面図を第6-2-8-4図～第6-2-8-5図に、地質断面図を第6-2-8-6図に、地質縦断図を第6-2-8-7図に、岩級縦断図を第6-2-8-8図にそれぞれ示す。

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）は、Sクラス設備である原子炉補機海水系配管等の間接支持機能が要求される。

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）は、延長約49mの鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、幅7.6m、高さ4.7mのボックスカルバート構造、幅7.0m、高さ4.2mのボックスカルバート構造に大別される延長方向に断面の変化が小さい線状構造物である（第6-2-8-4図～第6-2-8-5図）。

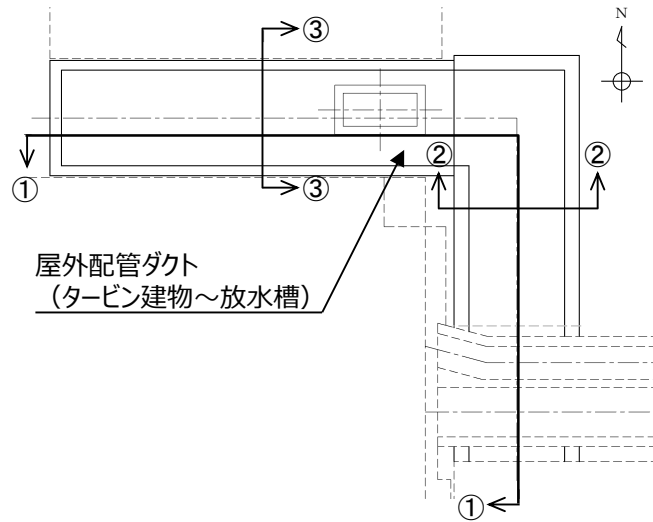
間接支持する配管の管軸方向と平行に配置される壁部材が多いので、間接支持する配管の管軸方向が強軸となる。

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）はMMRを介してC<sub>M</sub>級以上の岩盤に支持されている。

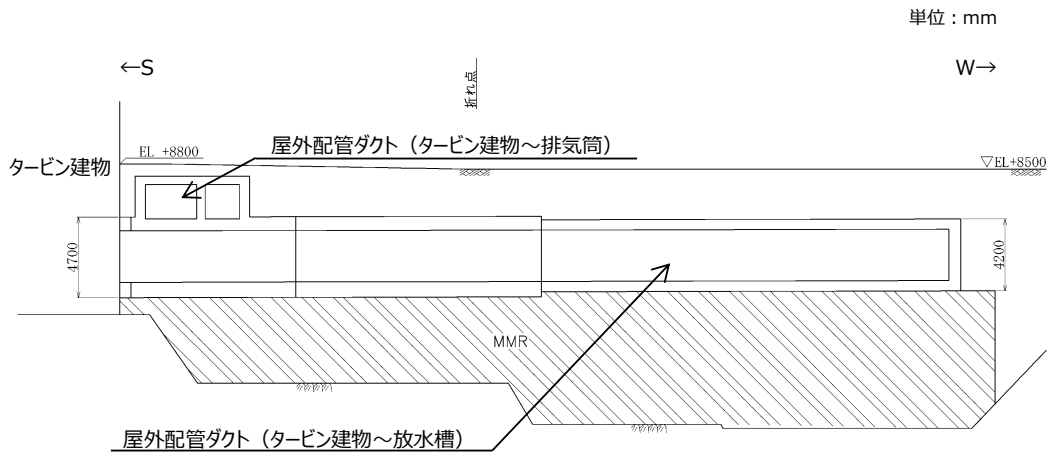


第6-2-8-1図 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽） 配置図

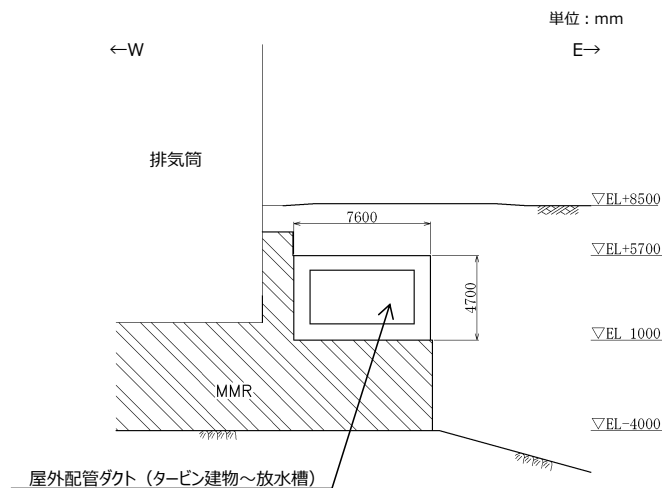




第6-2-8-2図 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽） 平面図

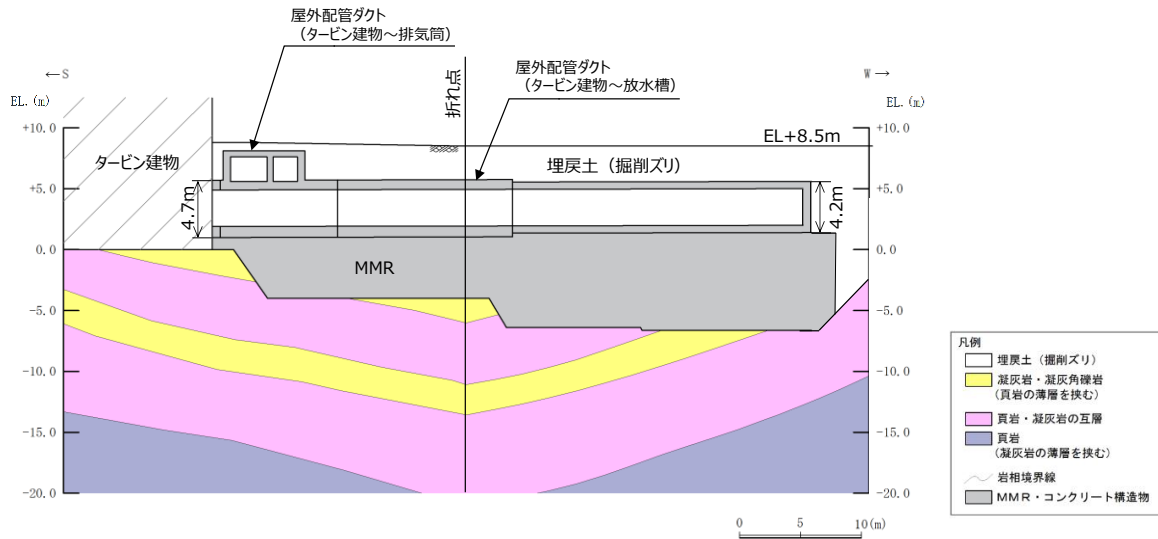


第6-2-8-3図 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽） 縦断面図（①-①断面）

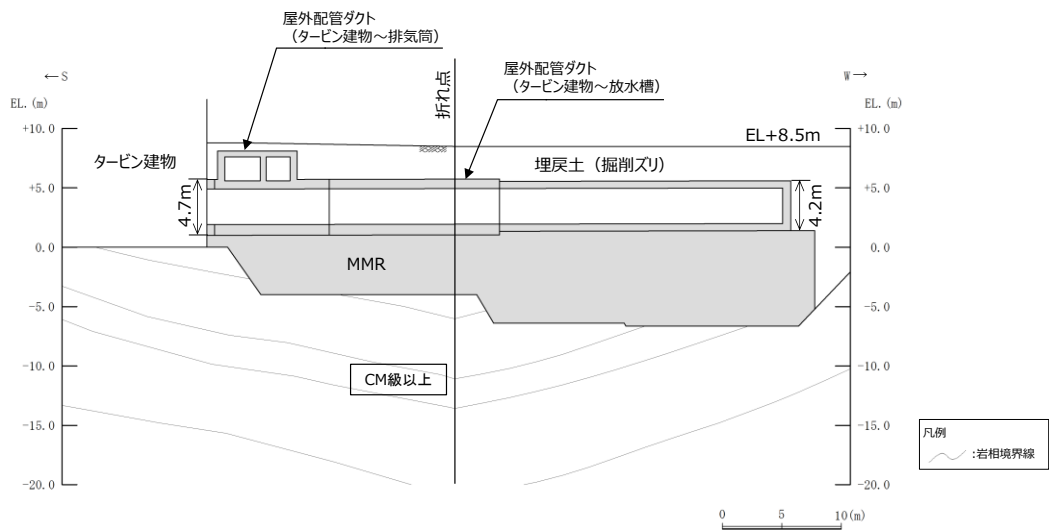


第6-2-8-4図 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）断面図（②-②断面）





第6-2-8-7 図 屋外配管ダクト (タービン建物～放水槽) 地質縦断面図 (①-①断面)



第6-2-8-8 図 屋外配管ダクト (タービン建物～放水槽) 岩級縦断面図 (①-①断面)

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震力特性等の観点を踏まえた耐震評価候補断面を整理した（第6-2-8-1表）。なお、①-①断面のうち屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）との一体化部については、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）における評価対象候補断面として整理する。

第6-2-8-1表 耐震評価候補断面の整理  
（屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽））（1/2）

観点		屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）	
		②-②断面	③-③断面
①要求機能並びに 間接支持する機器・配管の有無及び設置状況	要求機能	・間接支持	
	間接支持する設備	設備	・原子炉補機海水系 配管 ・タービン補機海水系 配管, 弁 ・液体廃棄物処理系系 配管, 弁
		設置状況	・延長方向に一樣に配置されている
②構造的特徴	形式	・弱軸方向断面	
		・鉄筋コンクリート造の地中構造物	
		・ボックスカルバート	
寸法	・幅7.60m, 高さ4.70m	・幅7.00m, 高さ4.20m	

第6-2-8-1表 耐震評価候補断面の整理  
（屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽））（2/2）

観点		屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）	
		②-②断面	③-③断面
③周辺状況	周辺地質	構造物下部	・MMRを介してCM級以上の岩盤に支持されている
		構造物側部及び上部	・MMRは高さ約5.0mで、構造物直下に分布している
		地質変化部	・埋戻土（掘削スリ）が分布している
	地下水位	・解析結果等を踏まえて整理する。	
	モデル化する隣接構造物	・排気筒	・排気筒
④地震波の伝搬特性		・観点③での整理のとおり、構造物下部の周辺地質が各断面で異なり、地震波の伝搬特性が異なる（MMR高さ確認）	
⑤床応答特性		・観点①での整理のとおり、各断面に間接支持する設備がある ・観点①～③での整理のとおり、間接支持する設備の種類及び設置状況は一樣であるが、構造的特徴及び周辺状況に差異があることから、各断面の床応答特性が異なる	

以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、地震応答解析により耐震評価を行ううえで、構造物の応答が耐震評価上厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。なお、詳細設計段階において設定する地下水位等、各断面で異なる要因があれば、その観点で整理を行い、評価対象断面を選定する。

## 2.9 屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）

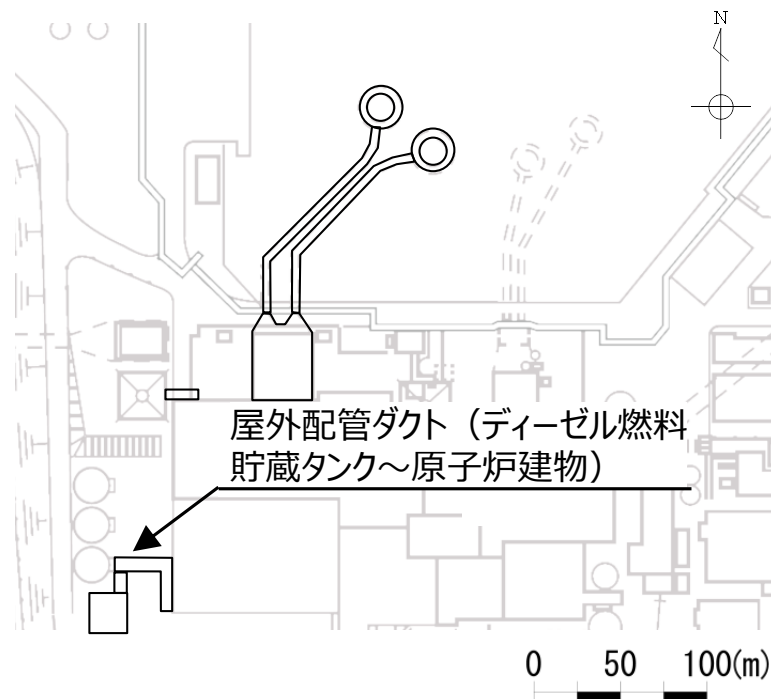
屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）の配置図を第6-2-9-1図に、平面図を第6-2-9-2図に、縦断図を第6-2-9-3図～第6-2-9-4図に、断面図を第6-2-9-5図～第6-2-9-10図に、地質断面図を第6-2-9-11図～第6-2-9-13図に、地質縦断図を第6-2-9-14図～第6-2-9-15図に、岩級縦断図を第6-2-9-16図～第6-2-9-17図にそれぞれ示す。

屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）は、Sクラス設備である非常用ディーゼル発電設備燃料移送系配管・弁の間接支持機能が要求される。

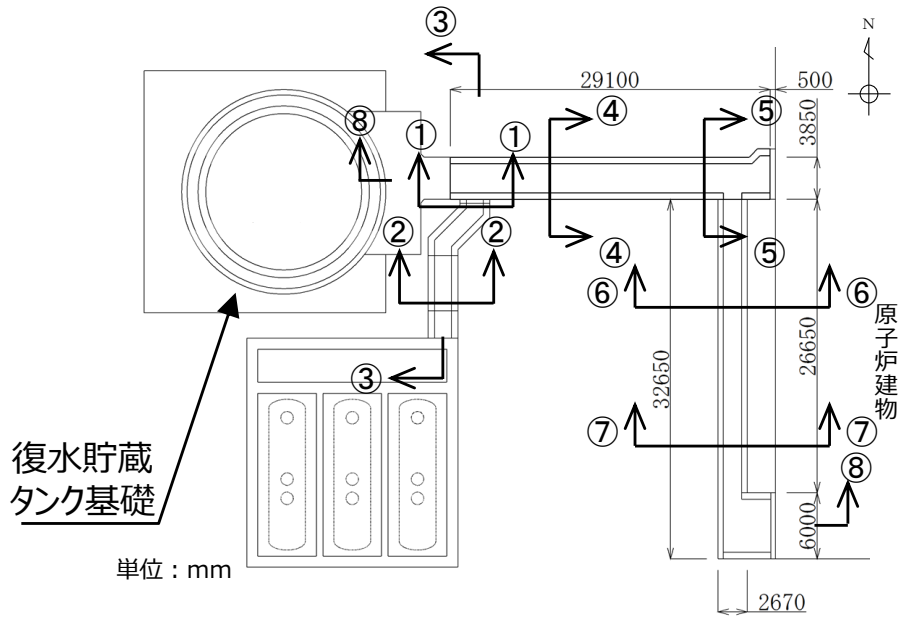
屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）は、延長約75mの鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、幅2.67m～3.85m、高さ3.55～4.25mのボックスカルバート構造の延長方向に断面の変化が小さい線状構造物である（第6-2-9-5図～第6-2-9-10図）。

屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）は、一部MMRを介してC<sub>M</sub>級以上の岩盤に支持されている。

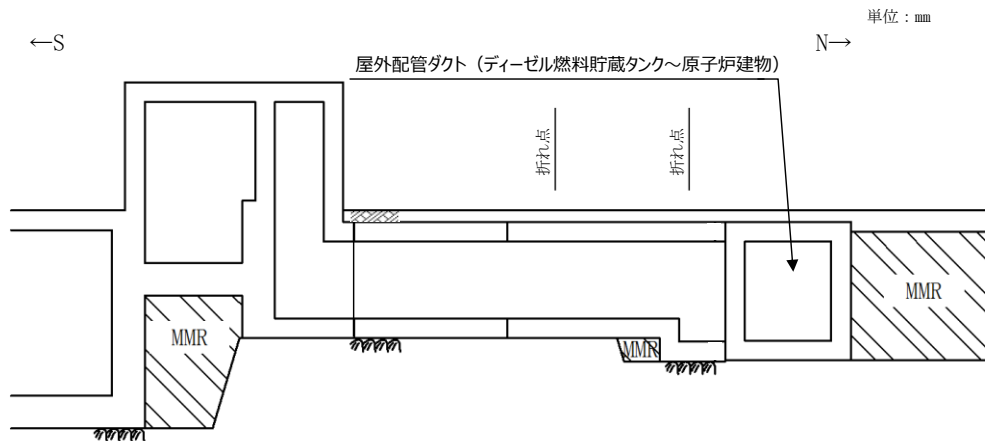
間接支持する配管の管軸方向と直交する方向に配置される壁部材が少ないので、間接支持する配管の管軸方向が強軸となり、管軸直交方向が弱軸となる。



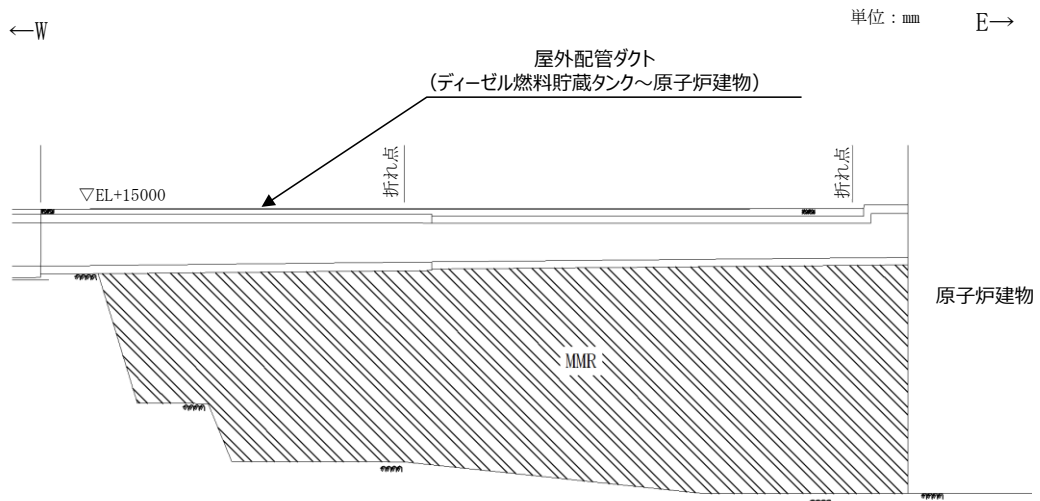
第6-2-9-1図 屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）配置図



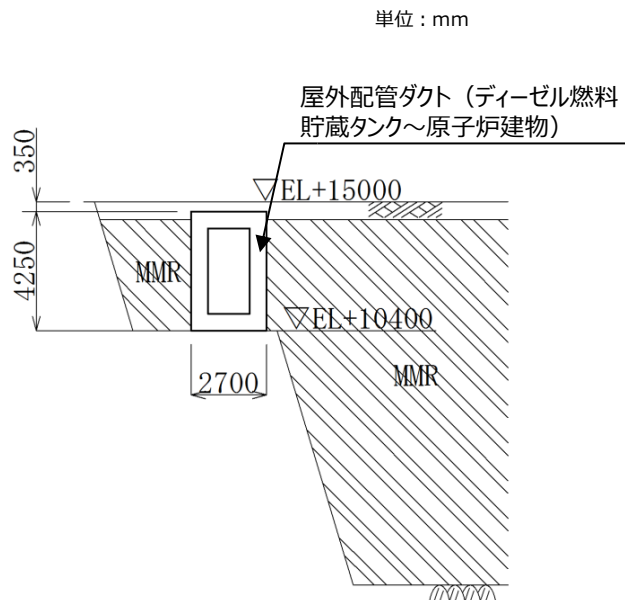
第6-2-9-2図 屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物） 平面図



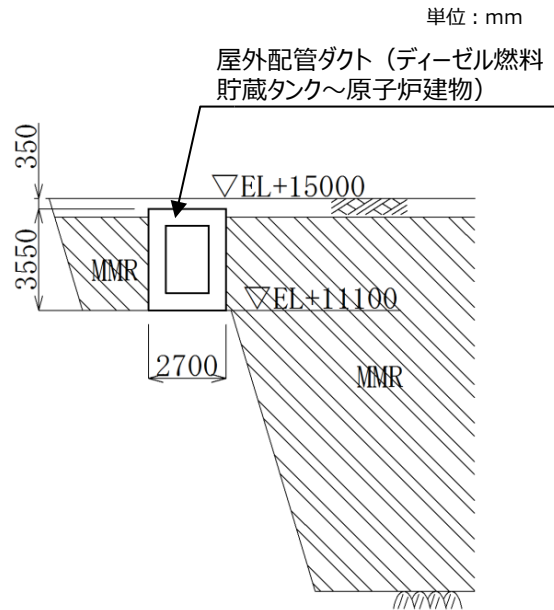
第6-2-9-3図 屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物） 縦断図（③-③断面）



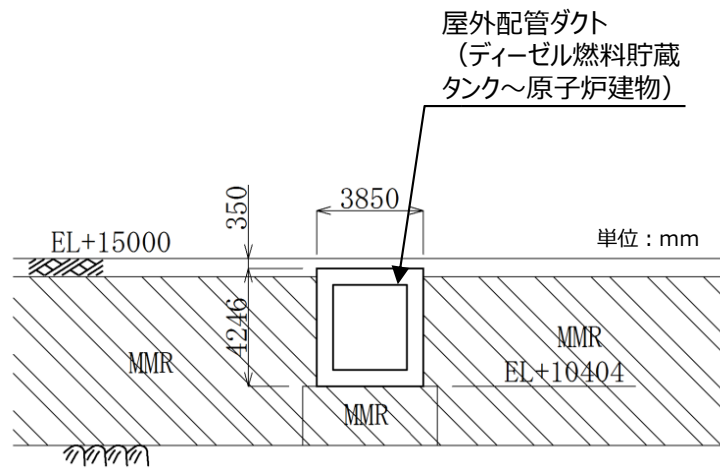
第6-2-9-4図 屋外配管ダクト (ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物) 縦断面図 (⑧-⑧断面)



第6-2-9-5図 屋外配管ダクト (ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物) 断面図 (①-①断面)

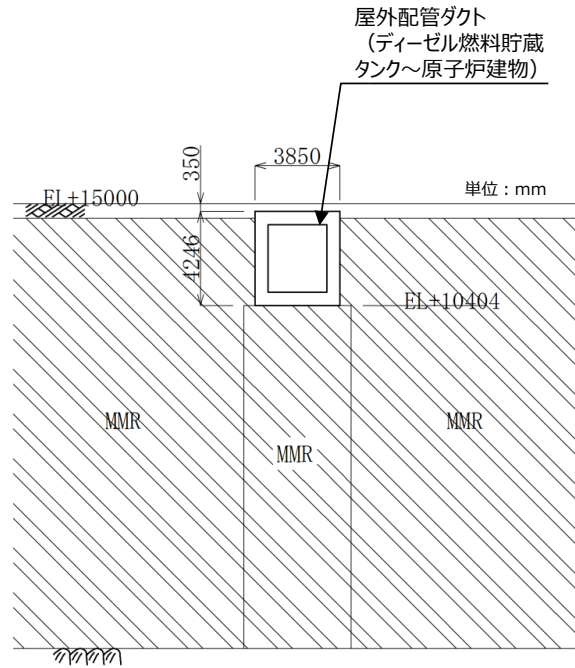


第6-2-9-6図 屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物） 断面図（②-②断面）

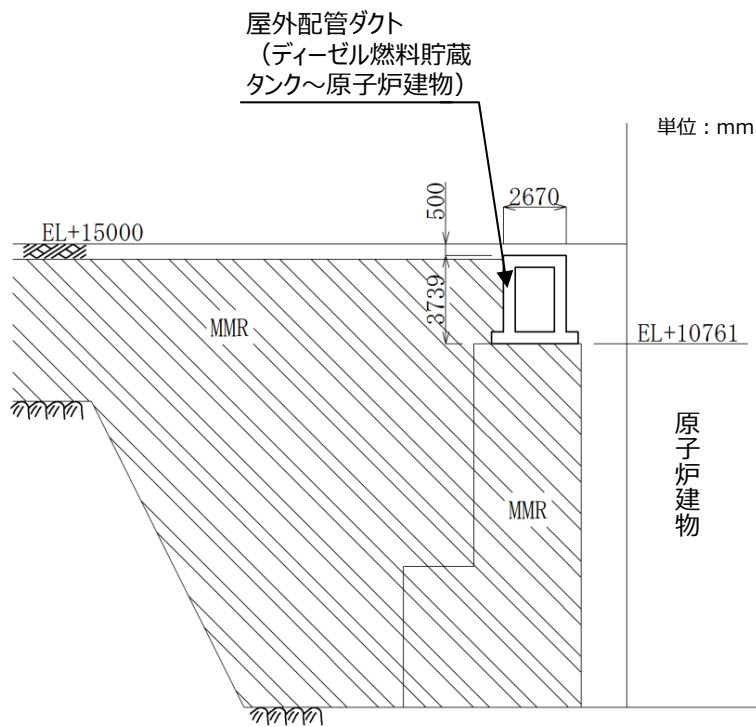


第6-2-9-7図 屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物） 断面図（④-④断面）

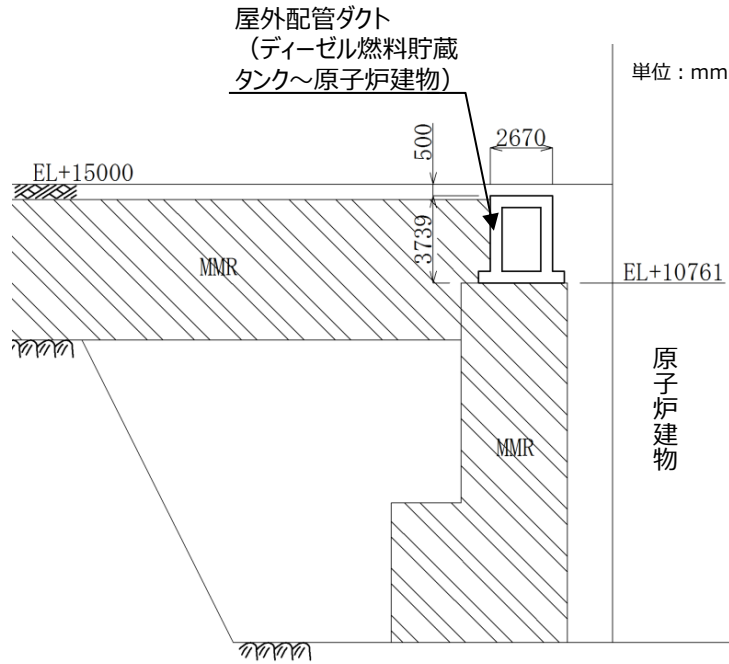




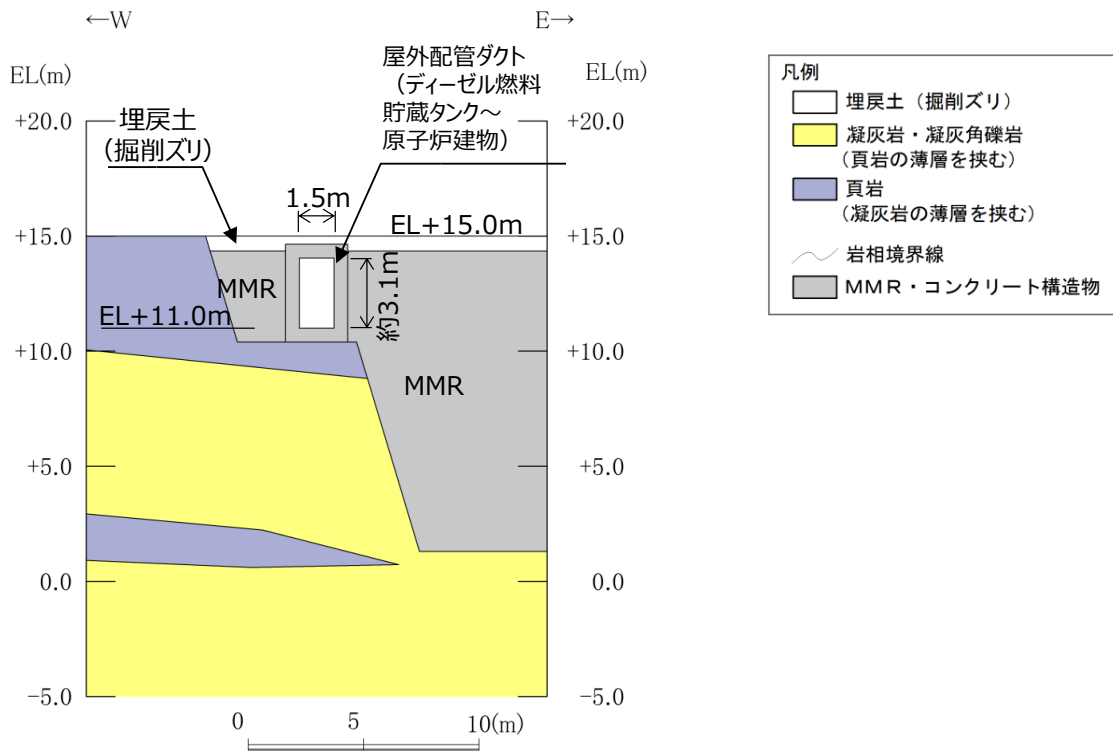
第6-2-9-8図 屋外配管ダクト (ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物) 断面図 (⑤-⑤断面)



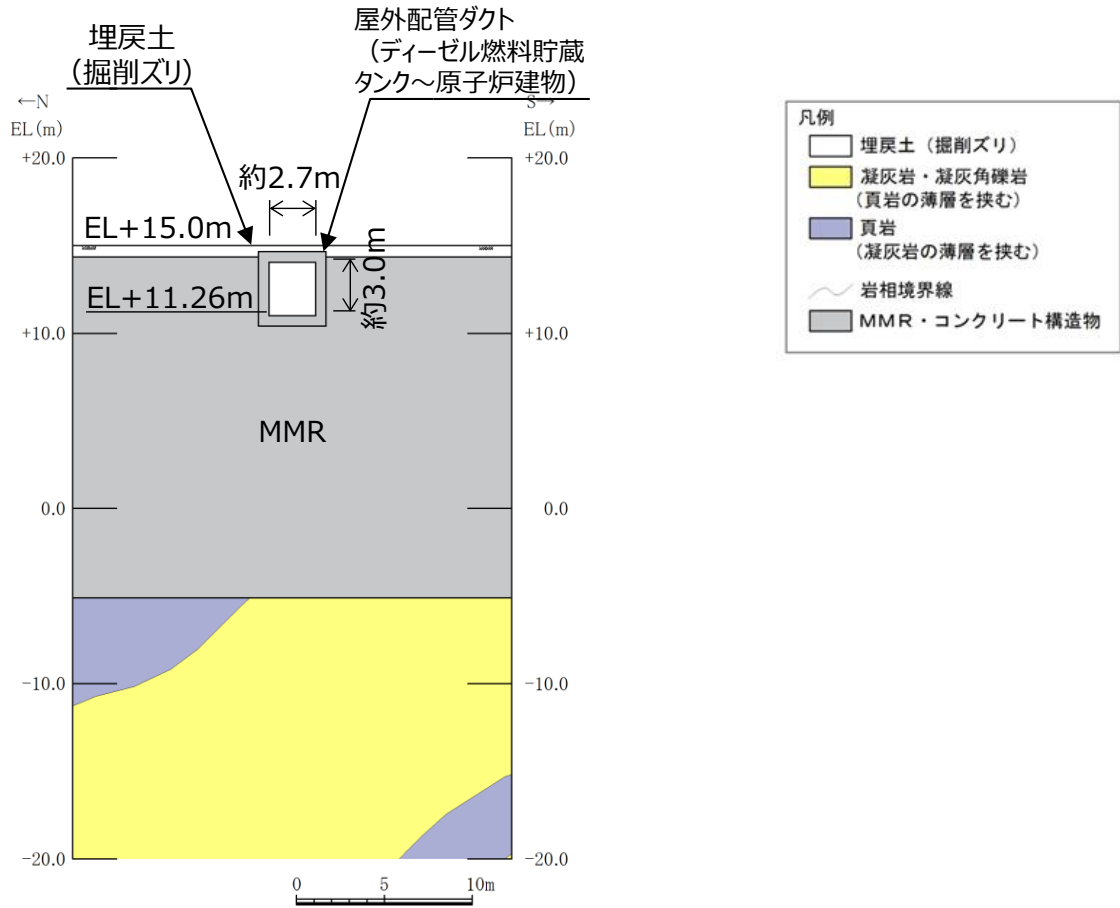
第6-2-9-9図 屋外配管ダクト (ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物) 断面図 (⑥-⑥断面)



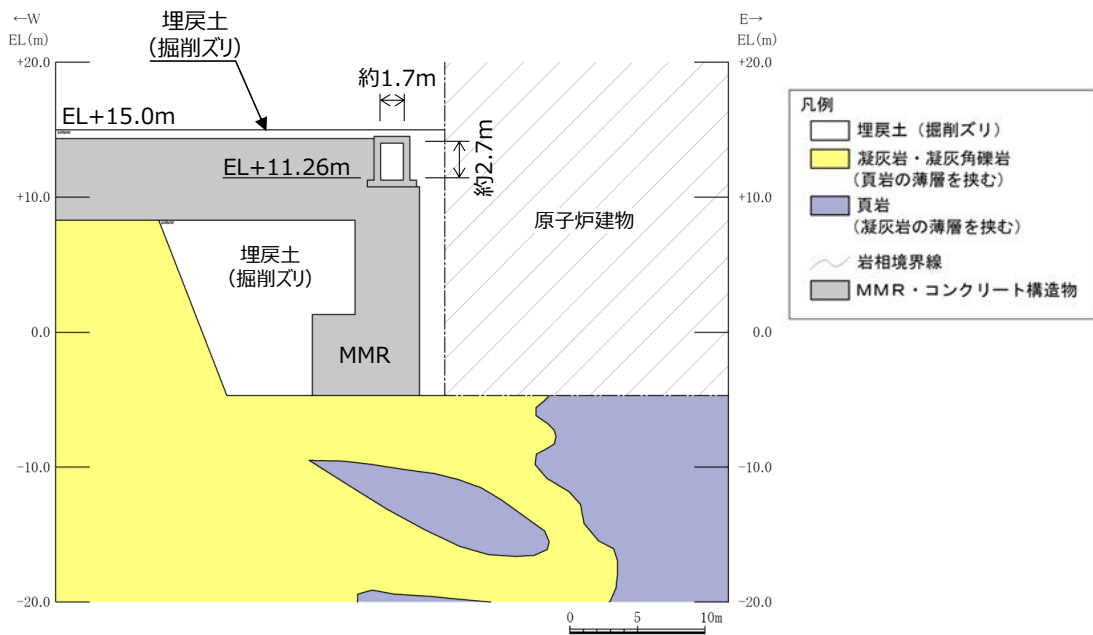
第6-2-9-10図 屋外配管ダクト (ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物)  
断面図 (⑦-⑦断面)



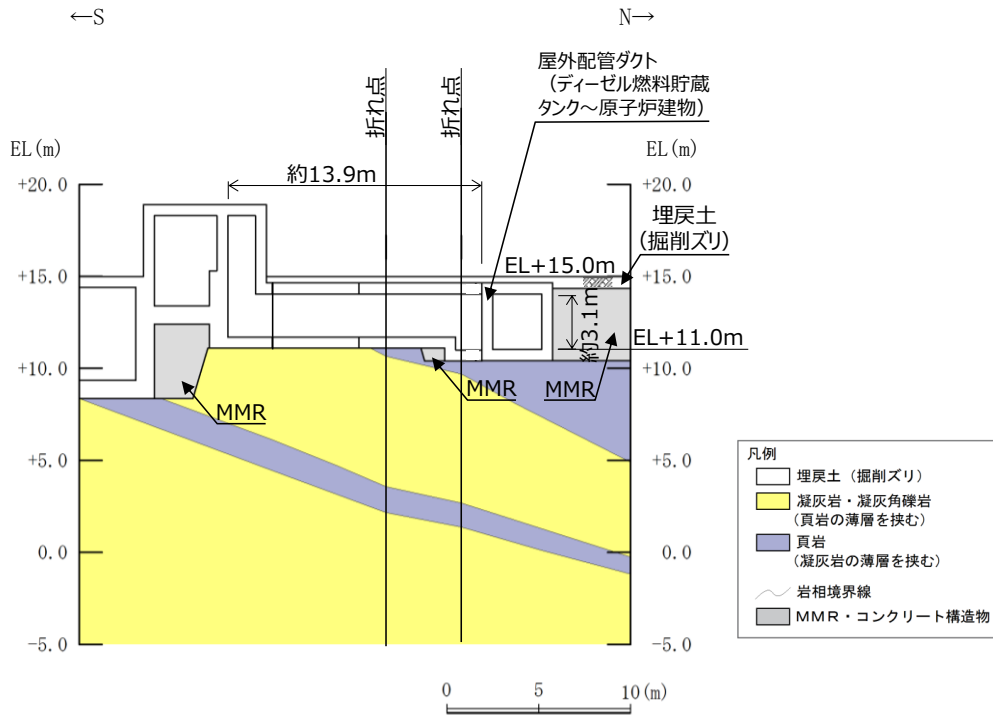
第6-2-9-11図 屋外配管ダクト (ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物)  
地質断面図 (①-①断面)



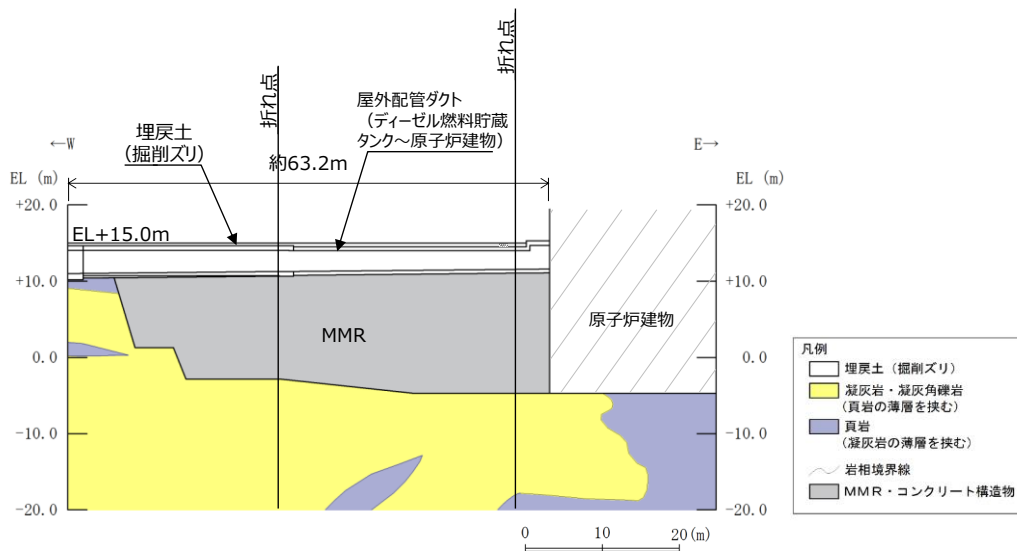
第6-2-9-12図 屋外配管ダクト (ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物)  
地質断面図 (⑤-⑤断面)



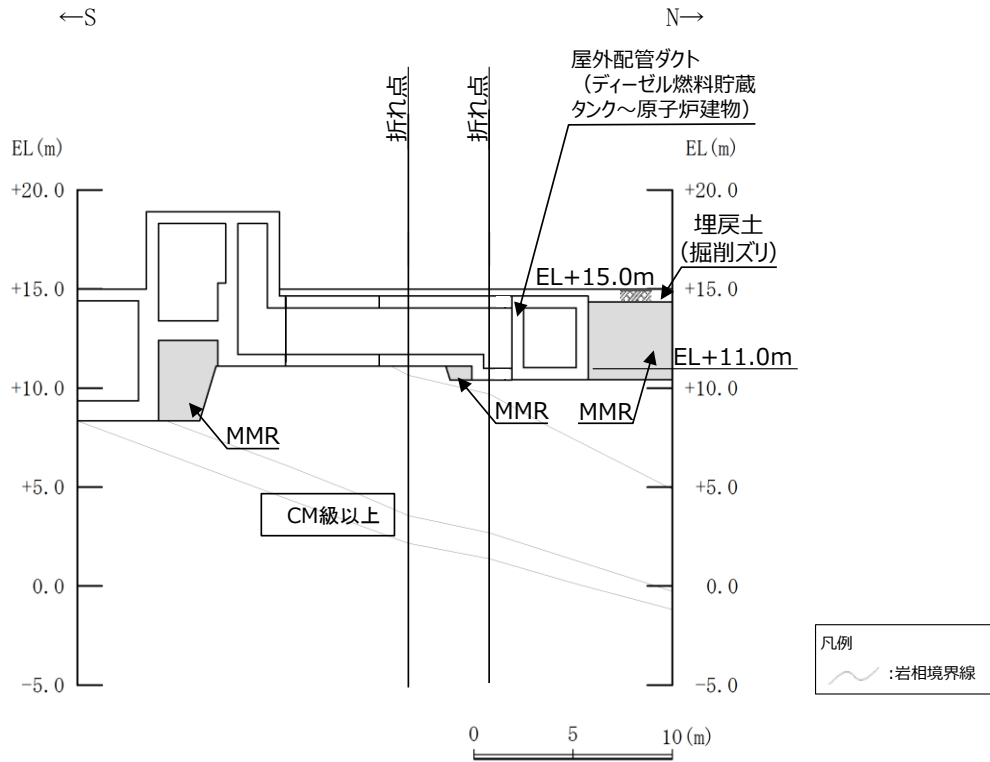
第6-2-9-13図 屋外配管ダクト (ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物)  
地質断面図 (⑦-⑦断面)



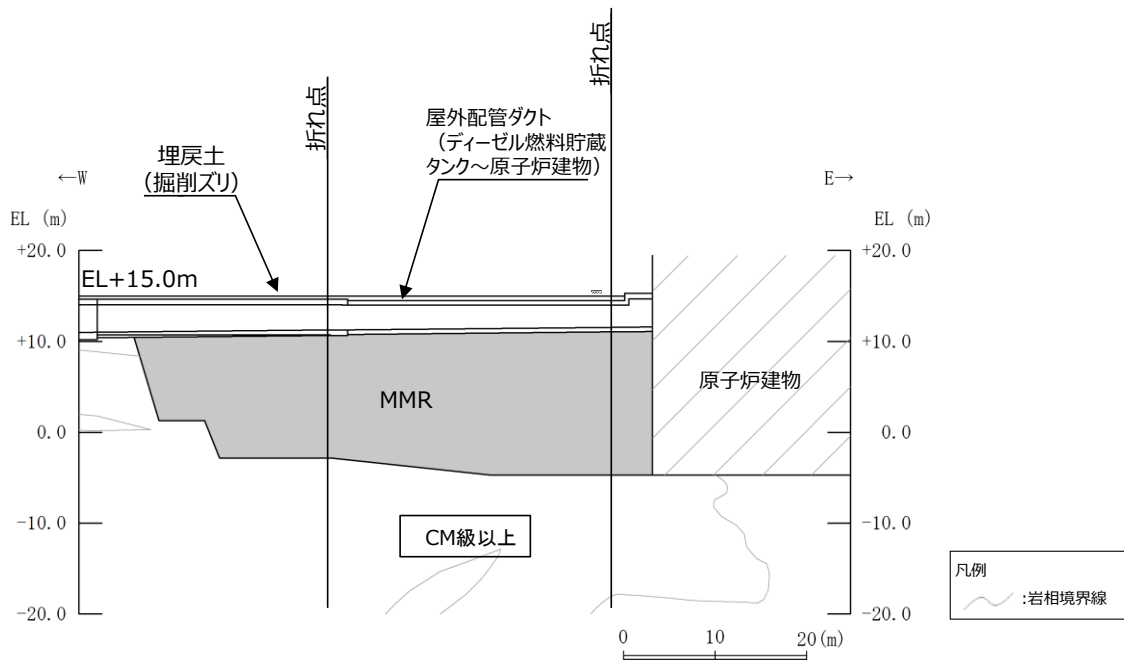
第6-2-9-14図 屋外配管ダクト (ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物)  
地質縦断面図 (③-③断面)



第6-2-9-15図 屋外配管ダクト (ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物)  
地質縦断面図 (⑧-⑧断面)



第6-2-9-16図 屋外配管ダクト (ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物)  
岩級縦断面図 (③-③断面)



第6-2-9-17図 屋外配管ダクト (ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物)  
岩級縦断面図 (⑧-⑧断面)

屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震力特性等の観点を踏まえた耐震評価候補断面を整理した（第6-2-9-1表）。

第6-2-9-1表 耐震評価候補断面の整理（屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物））（1/3）

観点			屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）	
			①-①断面	②-②断面
①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況	要求機能		・間接支持	
	間接支持する設備	設備	・非常用ディーゼル発電設備燃料移送系 配管・弁	
		設置状況	・延長方向に一樣に配置されている	
②構造的特徴	形式		・鉄筋コンクリート造の地中構造物 ・ボックスカルバート	
	寸法		・幅2.70m, 高さ4.25m	・幅2.70m, 高さ3.55m
③周辺状況	周辺地質	構造物下部	・一部MMRを介してCM級以上の岩盤に支持されている	
		構造物側部及び上部	・周辺に埋戻土（掘削スリ）及びMMRが分布している	
			・MMRは高さ約3.6m～13.1mで、台形状である	
	地質変化部	・なし		
	地下水位	・解析結果等を踏まえて整理する。		
モデル化する隣接構造物	・なし			
④地震波の伝搬特性			・観点③での整理のとおり、構造物下部の周辺地質に差異はなく、地震波の伝搬特性は一樣である	
⑤床応答特性			・観点①での整理のとおり、各断面に間接支持する設備がある ・観点①～③での整理のとおり、間接支持する設備の種類及び設置状況並びに周辺状況は一樣であるが、構造的特徴に差異があることから、各断面の床応答特性が異なる	

第6-2-9-1表 耐震評価候補断面の整理（屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物））（2/3）

観点			屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）			
			④-④断面	⑤-⑤断面	⑥-⑥断面	⑦-⑦断面
①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況	要求機能		・間接支持			
	間接支持する設備	設備	・非常用ディーゼル発電設備燃料移送系 配管・弁			
		設置状況	・延長方向に一樣に配置されている			
②構造的特徴	形式		・鉄筋コンクリート造の地中構造物 ・ボックスカルバート			
	寸法		・幅3.85m, 高さ4.25m		・幅2.67m, 高さ3.74m	

第6-2-9-1表 耐震評価候補断面の整理（屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物））（3/3）

観点		屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）				
		④-④断面	⑤-⑤断面	⑥-⑥断面	⑦-⑦断面	
③周辺状況	周辺地質	構造物下部	・MMRを介してCM級以上の岩盤に支持されている			
		構造物側部及び上部	・MMRは高さ約2.1m及び15.5mで一樣に分布している	・MMRは高さ約15.5mで西側に一樣に分布している	・MMRは高さ約15.5mでL字形である	
			・埋戻土（掘削スリ）及びMMRが分布している		・埋戻土（掘削スリ）及びMMRが分布している	
		地質変化部	・なし			
	地下水位	・解析結果等を踏まえて整理する。				
	モデル化する隣接構造物	・なし		・原子炉建物		
④地震波の伝搬特性		・観点③での整理のとおり、構造物下部の周辺地質が各断面で異なり、地震波の伝搬特性が異なる				
⑤床応答特性		・観点①での整理のとおり、各断面に間接支持する設備がある ・観点①～③での整理のとおり、間接支持する設備の種類及び設置状況は一樣であるが、構造的特徴及び周辺状況に差異があることから、各断面の床応答特性が異なる				

以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、地震応答解析により耐震評価を行ううえで、構造物の応答が耐震評価上厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。なお、詳細設計段階において設定する地下水位等、各断面で異なる要因があれば、その観点で整理を行い、評価対象断面を選定する。

## 2.10 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）

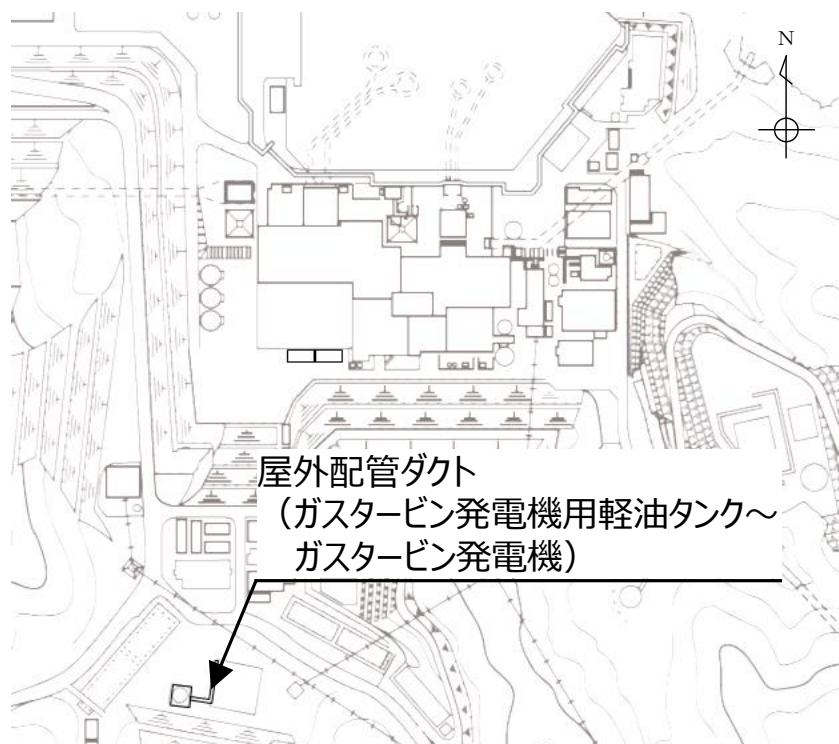
屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の配置図を第6-2-10-1図に、平面図を第6-2-10-2図に、縦断図を第6-2-10-3図に、断面図を第6-2-10-4図～第6-2-10-6図に、地質断面図を第6-2-10-7図に、地質縦断図を第6-2-10-8図に、岩級縦断図を第6-2-10-9図にそれぞれ示す。

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）は、Sクラス設備であるガスタービン発電機用燃料移送配管・弁の間接支持機能が要求される。

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）は、延長58.32m、幅2.8m、高さ1.8mの鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、延長方向に断面の変化がない線状構造物である（第6-2-10-4～第6-2-10-6図）。

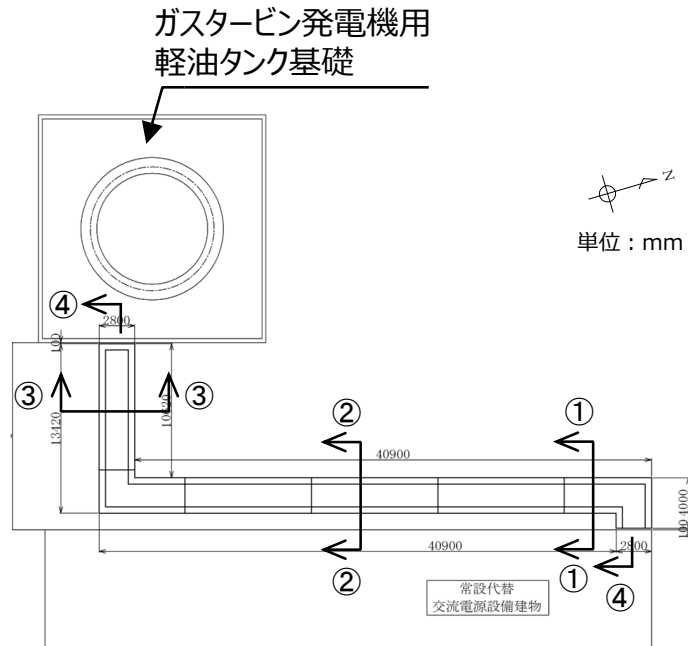
屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）は、MMRを介してC<sub>M</sub>級以上の岩盤に支持されている。

間接支持する配管の管軸方向と直交する方向に配置される壁部材が少ないので、間接支持する配管の管軸方向が強軸となり、管軸直交方向が弱軸となる。

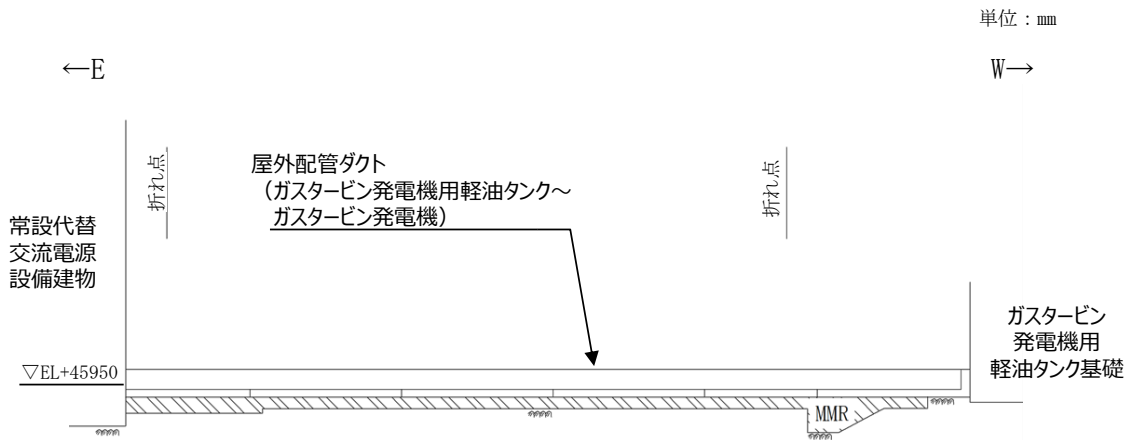


第6-2-10-1図 屋外配管ダクト  
（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機） 配置図

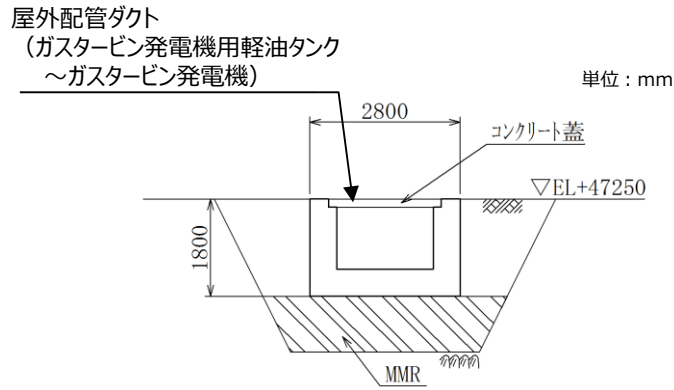




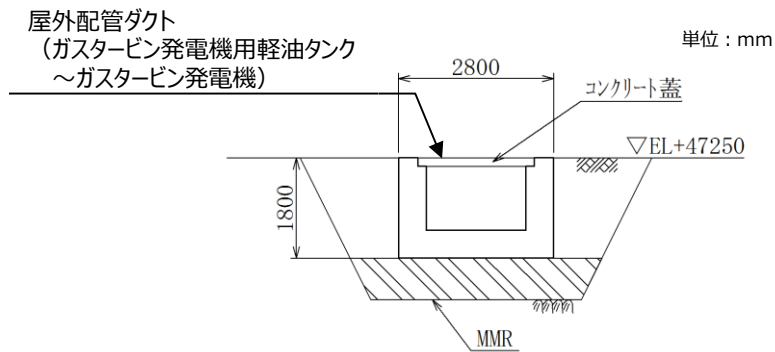
第6-2-10-2図 屋外配管ダクト  
(ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)  
平面図



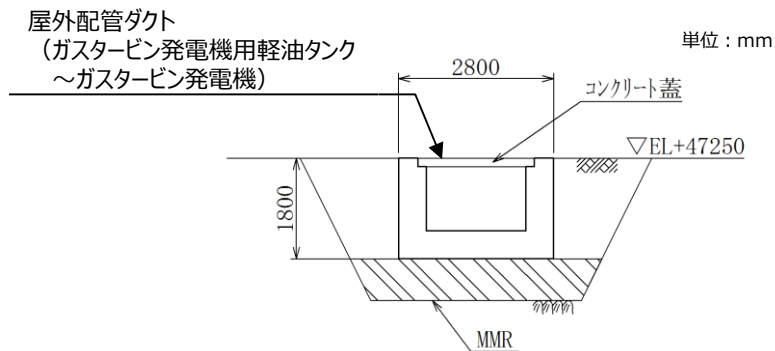
第6-2-10-3図 屋外配管ダクト  
(ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)  
縦断図 (④-④断面)



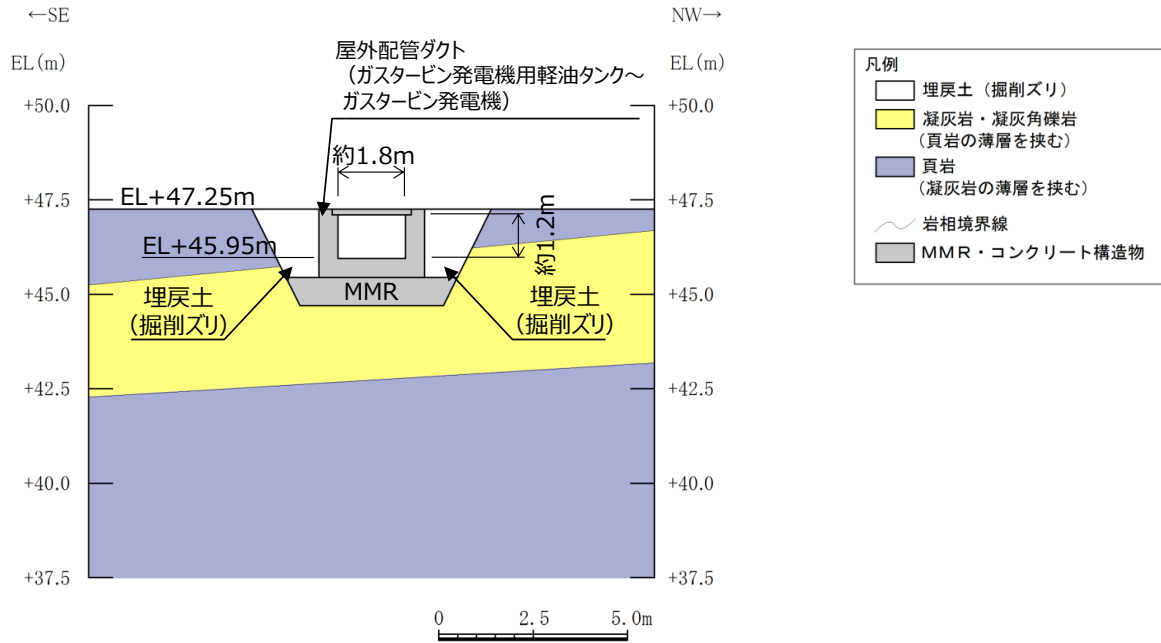
第6-2-10-4図 屋外配管ダクト  
(ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)  
断面図 (①-①断面)



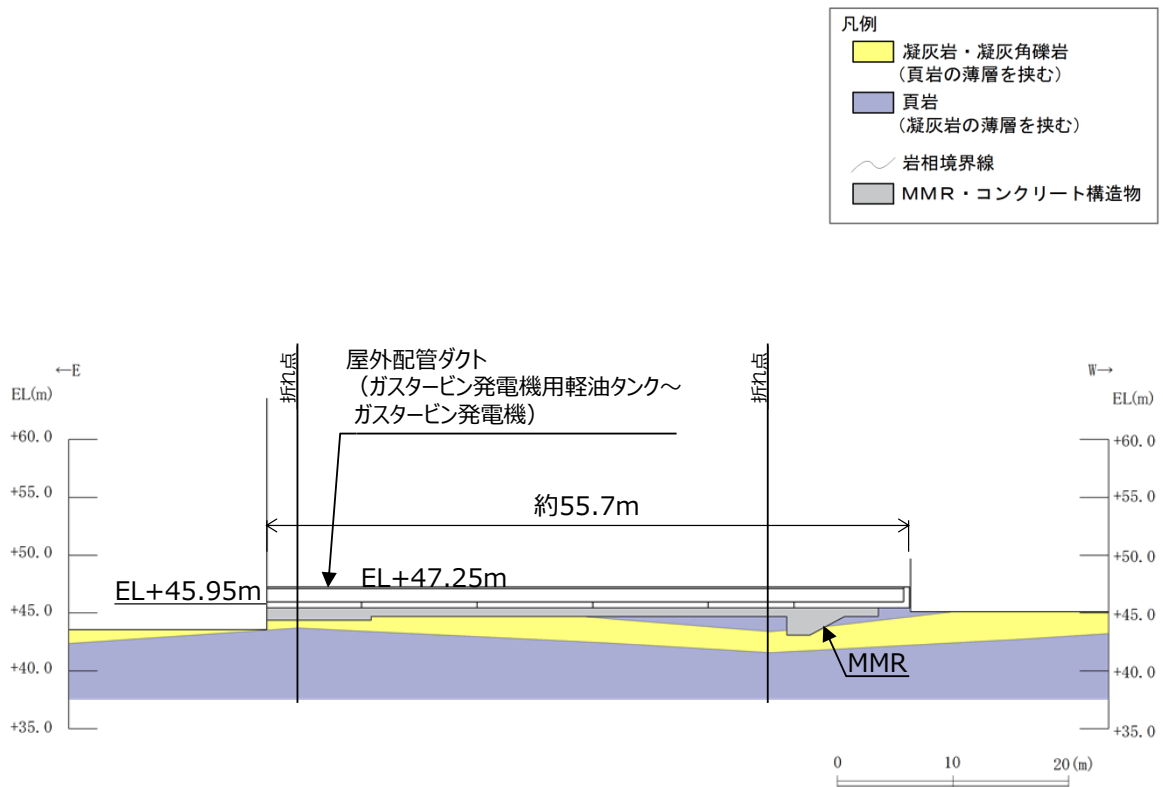
第6-2-10-5図 屋外配管ダクト  
(ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)  
断面図 (②-②断面)



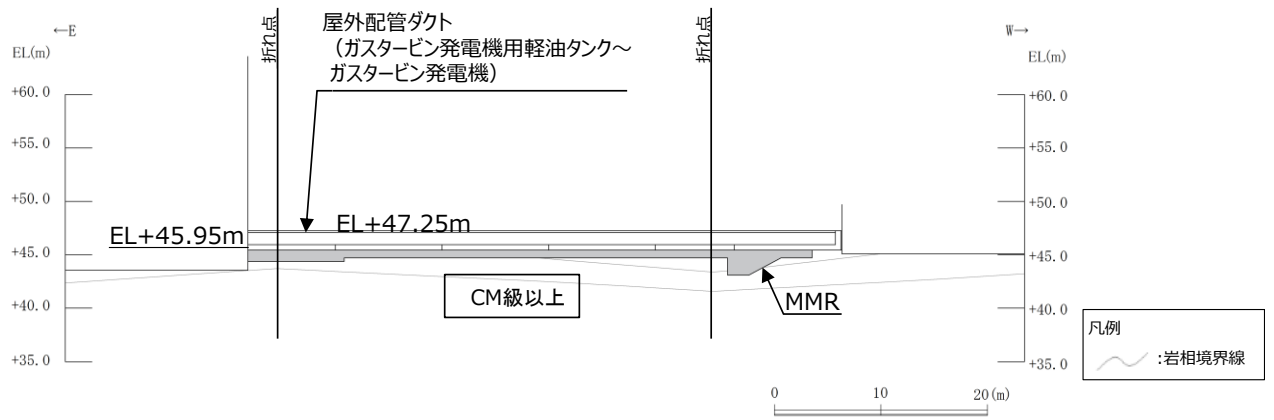
第6-2-10-6図 屋外配管ダクト  
(ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)  
断面図 (③-③断面)



第6-2-10-7図 屋外配管ダクト  
(ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)  
地質断面図 (②-②断面)



第6-2-10-8図 屋外配管ダクト  
(ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)  
地質縦断面図 (④-④断面)



第6-2-10-9図 屋外配管ダクト  
(ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)  
岩級縦断面 (④-④断面)

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震力特性等の観点を踏まえた耐震評価候補断面を整理した（第6-2-10-1表）。

第6-2-10-1表 耐震評価候補断面の整理

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）

観点		屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）		
		①-①断面	②-②断面	③-③断面
①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況	要求機能	・間接支持		
	間接支持する設備	設備	・ガスタービン発電機用燃料移送配管・弁	
		設置状況	・延長方向に一樣に配置されている。	
②構造的特徴	形式	・鉄筋コンクリート造の地中構造物		
	寸法	・幅2.80m, 高さ1.80m		
③周辺状況	周辺地質	構造物下部	・MMRを介してCM級以上の岩盤に支持されている ・MMRは高さ約0.8～1.0m程度で台形状である。	
		構造物側部及び上部	・埋戻土（掘削スリ）が分布している。	
	地質変化部	・なし		
	地下水位	・解析結果等を踏まえて整理する。		
	モデル化する隣接構造物	・なし		
④地震波の伝搬特性		・観点③での整理のとおり、構造物下部の周辺地質に差異はなく、地震波の伝搬特性は一樣である		
⑤床応答特性		・観点①での整理のとおり、各断面に間接支持する設備がある ・観点①～③での整理のとおり、間接支持する設備の種類及び設置状況は一樣であり、構造的特徴及び周辺状況も一樣であることから、各断面の床応答特性に差異はない		

以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、地震応答解析により耐震評価を行ううえで、構造物の応答が耐震評価上厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。なお、詳細設計段階において設定する地下水位等、各断面で異なる要因があれば、その観点を整理を行い、評価対象断面を選定する。

## 2.11 取水口

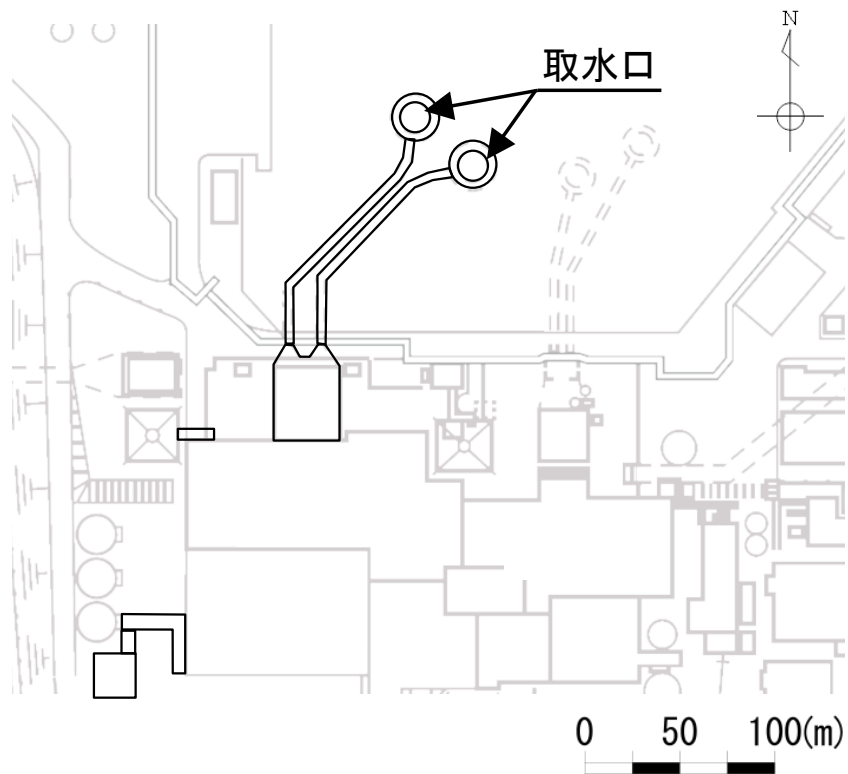
取水口の配置図を第6-2-11-1図に、平面図を第6-2-11-2図に、断面図を第6-2-11-3図～第6-2-11-4図に、地質断面図を第6-2-11-5図～第6-2-11-6図に、岩級断面図を第6-2-11-7図～第6-2-11-8図にそれぞれ示す。

取水口は、非常用取水設備であり、通水機能が要求される。

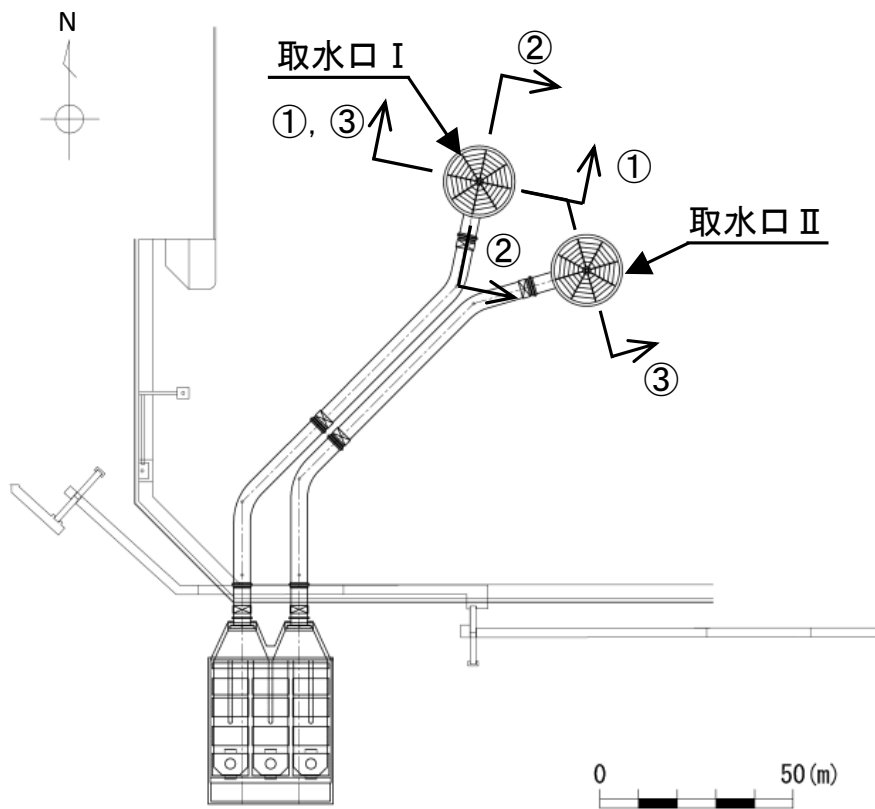
取水口は、直径18.6m、高さ13mの基部をアンカーコンクリートで巻き立てられた鋼製の構造物である。

取水口はC<sub>M</sub>級以上の岩盤に直接支持されている。

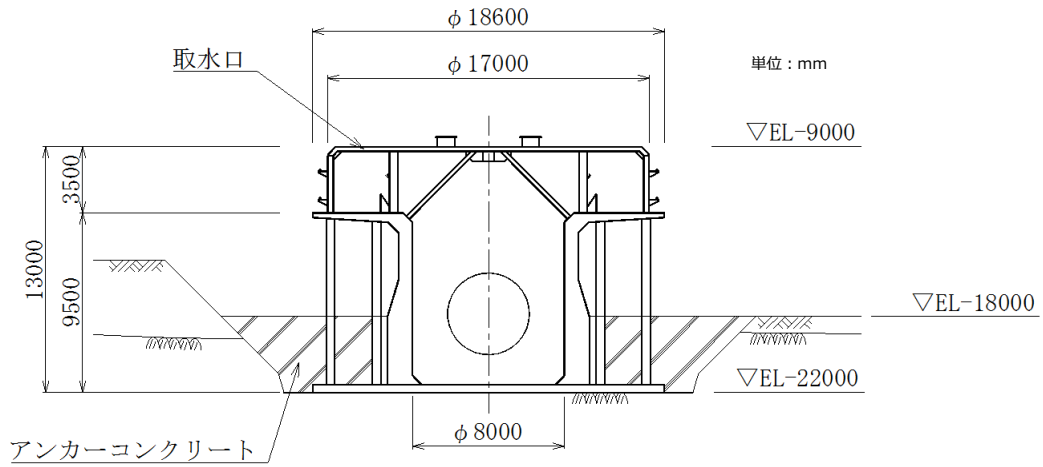
取水口は円筒状構造物であるため、強軸及び弱軸が明確ではない。



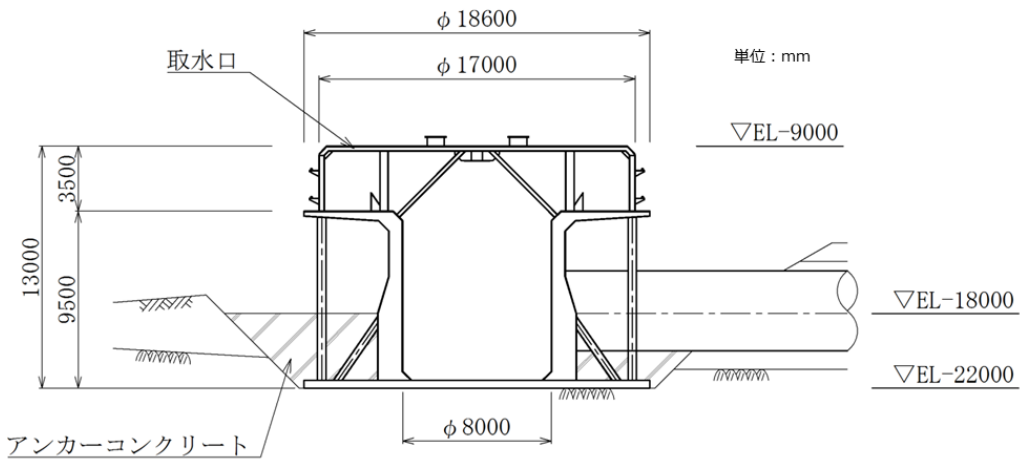
第6-2-11-1図 取水口 配置図



第6-2-11-2図 取水口 平面図

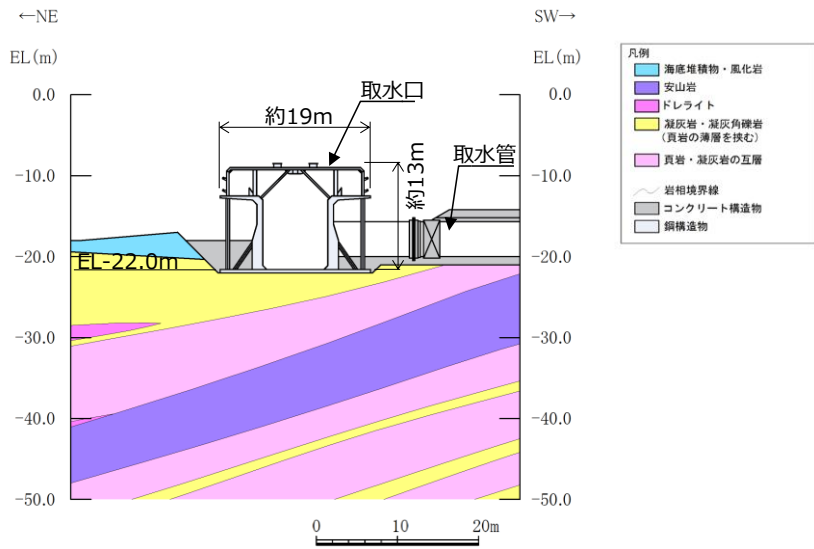


第6-2-11-3 図 取水口 I 断面図 (①-①断面)

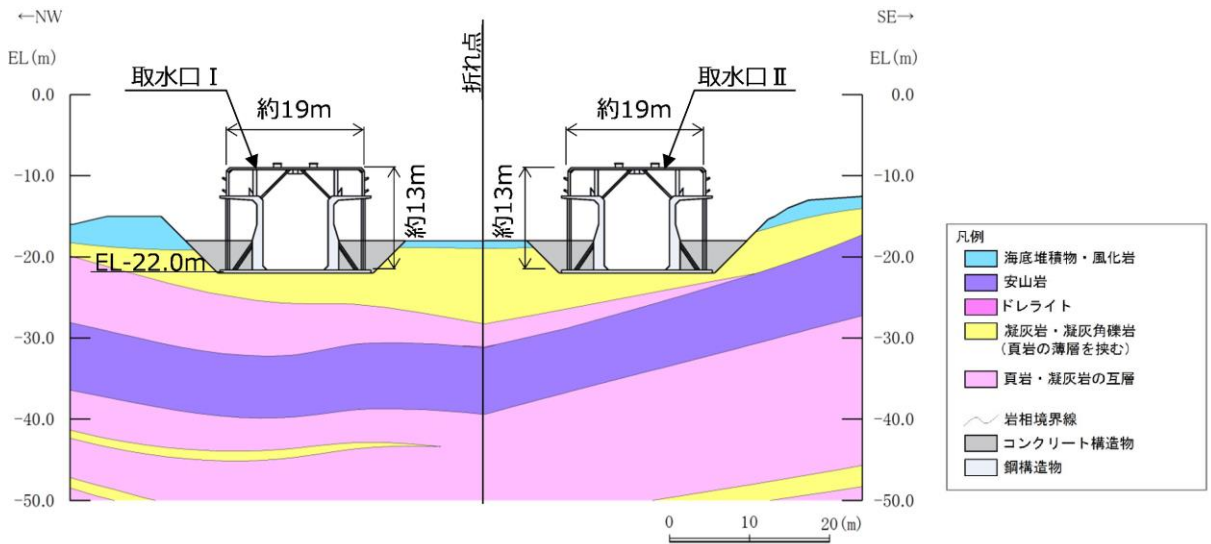


第6-2-11-4 図 取水口 I 断面図 (②-②断面)

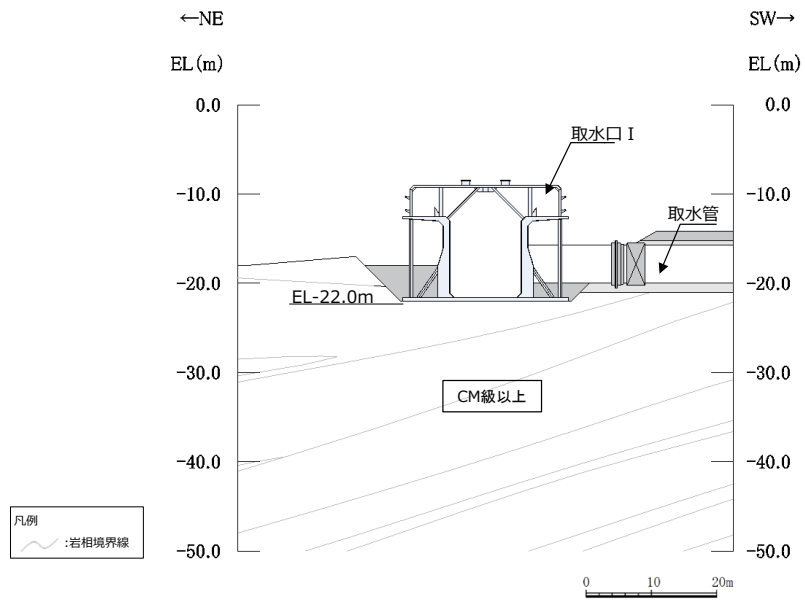




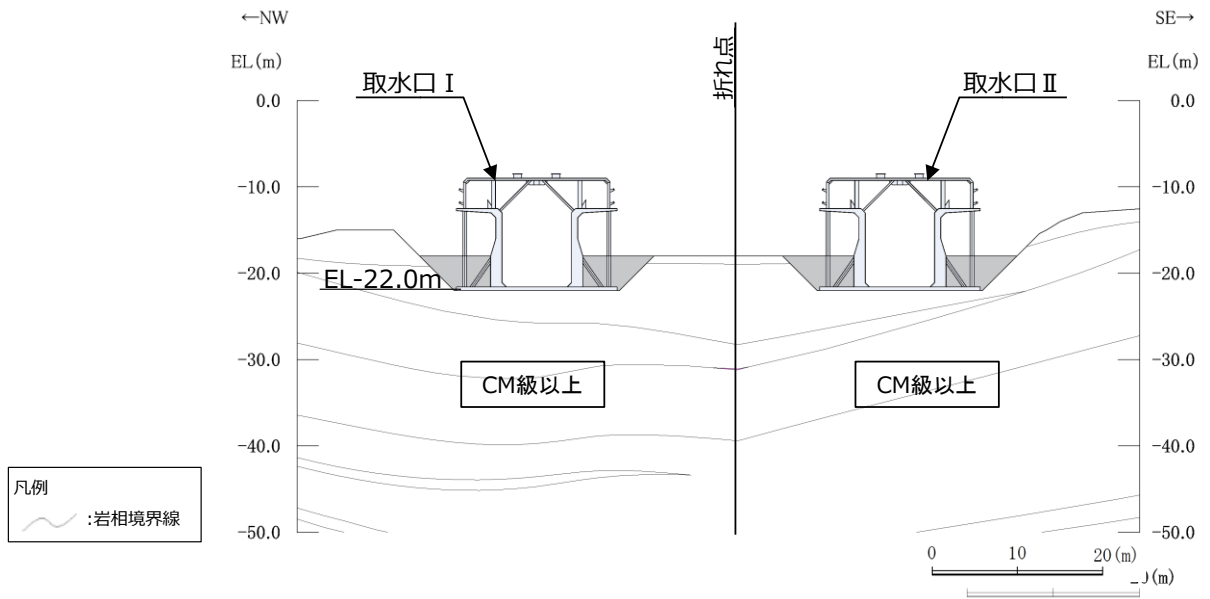
第6-2-11-5図 取水口 地質断面図 (②-②断面)



第6-2-11-6図 取水口 地質断面図 (③-③断面)



第6-2-11-7図 取水口 岩級断面図 (②-②断面)



第6-2-11-8図 取水口 岩級断面図 (③-③断面)

取水口について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震力特性等の観点を踏まえた耐震評価候補断面を整理した（第6-2-11-1表）。

第6-2-11-1表 耐震評価候補断面の整理（取水口）

観点		取水口	
		①-①断面, ③-③断面	②-②断面
①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況	要求機能	・通水	
	間接支持する設備	設備	・なし
		設置状況	-
②構造的特徴	形式	・鋼製の円筒状構造物	
	寸法	・Φ18.60m, 高さ13.00m	
③周辺状況	周辺地質	構造物下部	・CM級以上の岩盤に直接支持されている
		構造物側部及び上部	・アンカーコンクリート及び海底堆積物・風化岩が分布している
		地質変化部	・なし
	地下水位	-（水中構造物）	
	モデル化する隣接構造物	・なし	・取水口は取水管と可撓ジョイントで接続されており、取水管の影響を受けないことから、モデル化する隣接構造物はない
④地震波の伝搬特性		・観点③での整理のとおり、断面位置により周辺状況に差異がなく、地震波の伝搬特性は一樣である	
⑤床応答特性		・観点①での整理のとおり、間接支持する設備がない	

以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、構造的特徴、周辺状況、地震波の伝搬特性等を考慮して、3次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を直交する2方向から評価対象断面として選定する。なお、詳細設計段階において設定する地下水位等、各断面で異なる要因があれば、その観点で整理を行い、評価対象断面を選定する。

## 2.12 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎

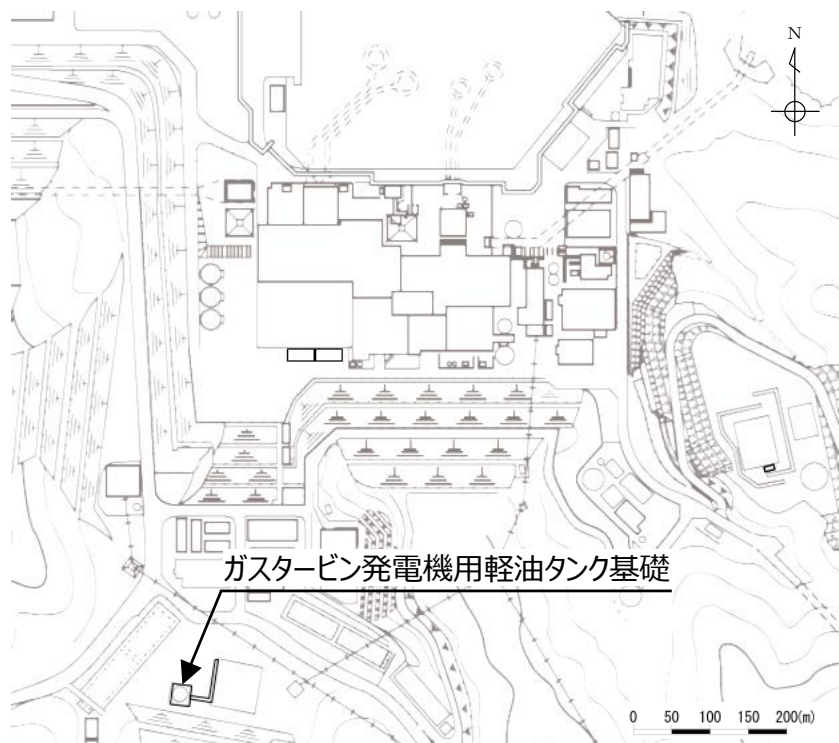
ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の配置図を第6-2-12-1図に、平面図を第6-2-12-2図に、断面図を第6-2-12-3～第6-2-12-4図に、地質断面図を第6-2-12-5図に、岩級断面図を第6-2-12-6図にそれぞれ示す。

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎は、常設重大事故等対処設備であるガスタービン発電機用軽油タンク等の間接支持機能が要求される。

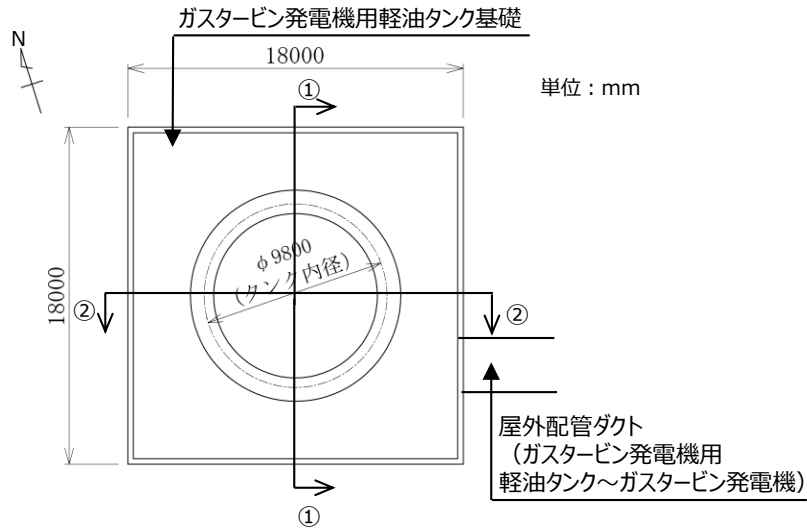
ガスタービン発電機用軽油タンク基礎は、幅18m×18mの鉄筋コンクリート造の構造物である。

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎は、MMRを介してC<sub>M</sub>級以上の岩盤に支持されている。

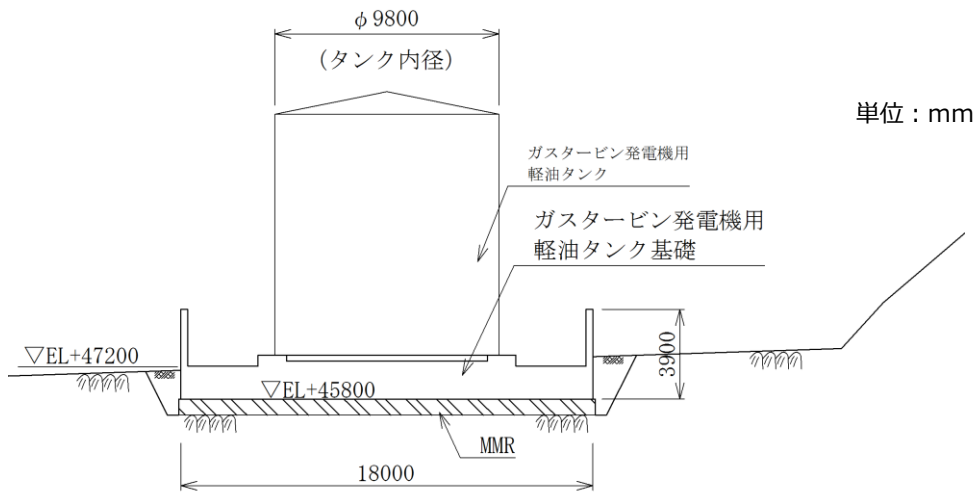
ガスタービン発電機用軽油タンク基礎は正方形の直接基礎であるため、強軸及び弱軸が明確ではない。



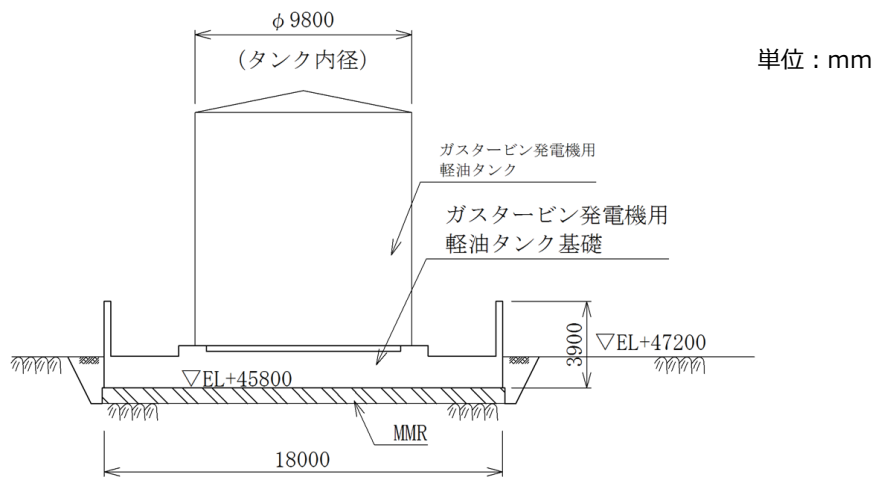
第6-2-12-1図 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 配置図



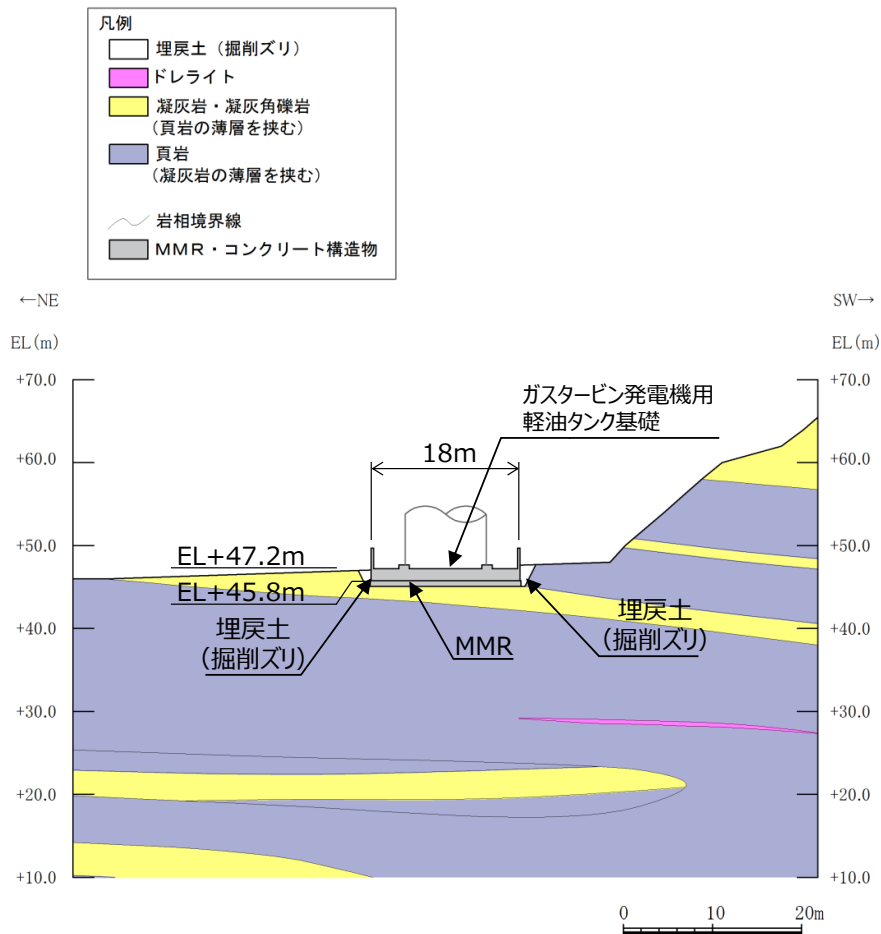
第6-2-12-2図 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 平面図



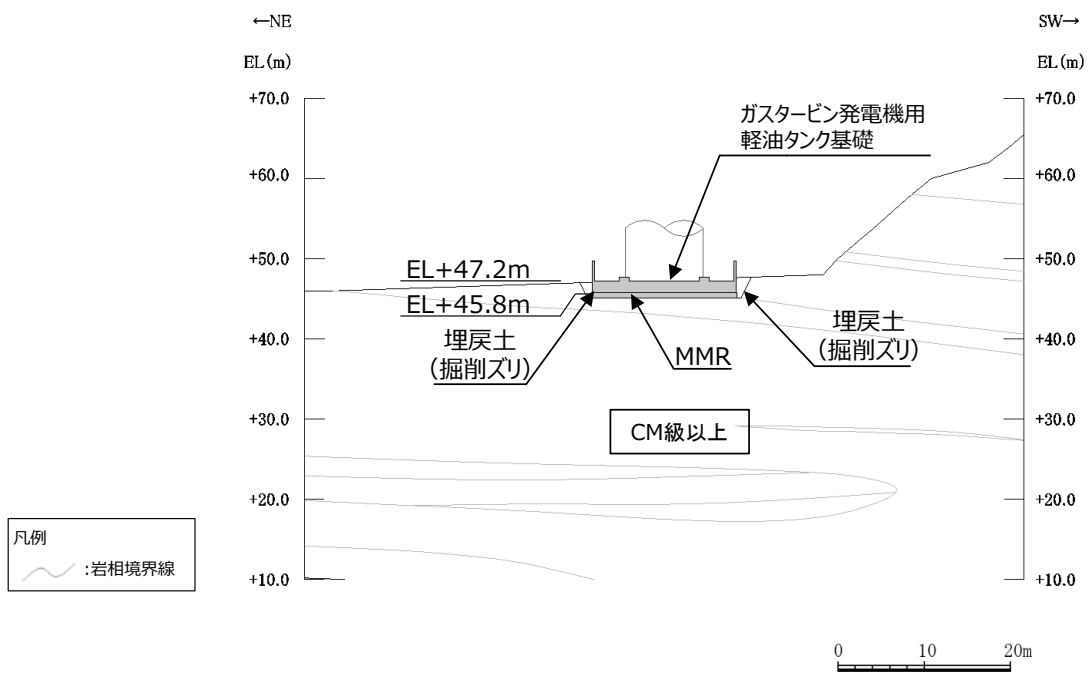
第6-2-12-3図 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 断面図 (①-①断面)



第6-2-12-4図 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 断面図 (②-②断面)



第6-2-12-5図 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 地質断面図 (①-①断面)



第6-2-12-6図 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 岩級断面図 (①-①断面)

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震力特性等の観点を踏まえた耐震評価候補断面を整理した（第6-2-12-1表）。

第6-2-12-1表 耐震評価候補断面の整理（ガスタービン発電機用軽油タンク基礎）

観点		ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	
		①-①断面	②-②断面
①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況	要求機能	・間接支持	
	間接支持する設備	設備	・ガスタービン発電機用軽油タンク ・ガスタービン発電機用燃料移送配管・弁
		設置状況	・一様に配置されている
②構造的特徴	形式	・鉄筋コンクリート造の地中構造物 ・断面急変部は存在しない	
	寸法	・幅18.00×18.00m	
③周辺状況	周辺地質	構造物下部	・MMRを介してCM級以上の岩盤に支持されている ・MMRは高さ約0.7mで、矩形である
		構造物側部及び上部	・岩盤及び一部に埋戻土（掘削スリ）が分布している
		地質変化部	・南側に岩盤斜面が存在する ・なし
	地下水位	・解析結果等を踏まえて整理する。	
モデル化する隣接構造物	・なし		
④地震波の伝搬特性		・観点③での整理のとおり、構造物下部の周辺地質に差異がなく、地震波の伝搬特性は一樣である	
⑤床応答特性		・観点①での整理のとおり、各断面に間接支持する設備がある ・観点①～③での整理のとおり、間接支持する設備の種類及び設置状況並びに構造的特徴は一樣であるが、周辺状況に差異があることから、各断面の床応答特性が異なる	

以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、構造的特徴、周辺状況、地震波の伝搬特性等を考慮して、3次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を直交する2方向から評価対象断面として選定する。なお、詳細設計段階において設定する地下水位等、各断面で異なる要因があれば、その観点で整理を行い、評価対象断面を選定する。

## 2.13 取水管

取水管の配置図を第6-2-13-1図に、平面図を第6-2-13-2図に、縦断図を第6-2-13-3図に、輪谷湾周辺の底質分布を第6-2-13-4図に、平面図（詳細図）を第6-2-13-5図に、断面図を第6-2-13-6図～第6-2-13-7図に、地質断面図を第6-2-13-8～第6-2-13-11図に、地質縦断図を第6-2-13-12図に、岩級縦断図を第6-2-13-13図にそれぞれ示す。

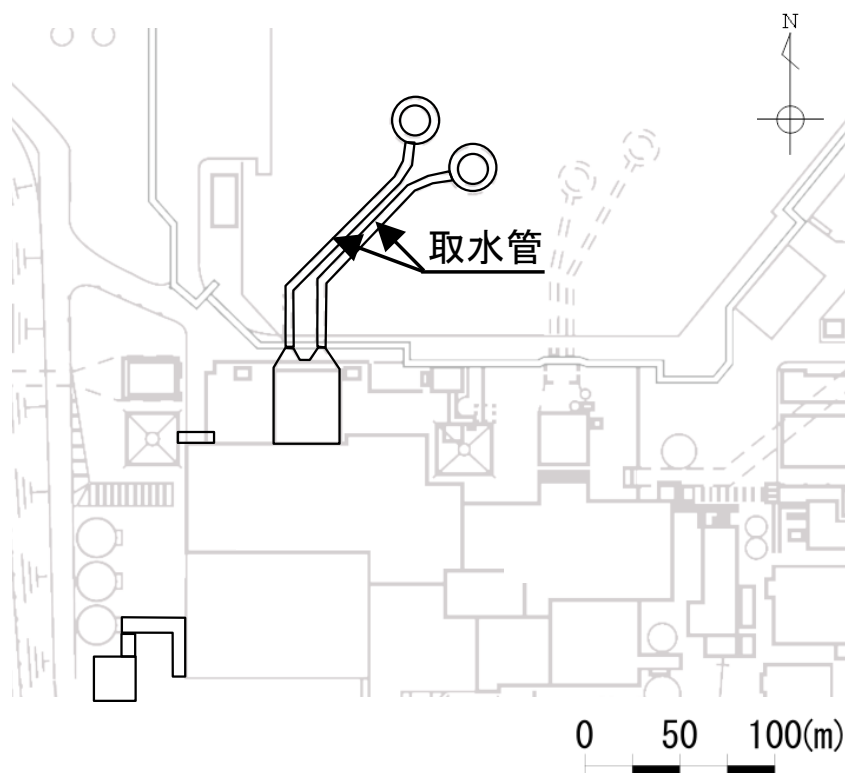
取水管は、非常用取水設備であり、通水機能が要求される。

取水管は、取水口と取水槽を結ぶ、管径 $\phi 4,300\text{mm}$ の鋼製の構造物であり、北側より、③-③断面（碎石）、①-①断面（巻立コンクリート）により構成され、通水方向に対して一様の断面形状を示す管路構造物である（第6-2-13-6図～第6-2-13-7図）。

取水管の縦断方向（通水方向）は、通水方向に対して空間を保持できるように構造部材が配置されていることから強軸となり、横断方向（通水方向に対する直交方向）が弱軸となる。

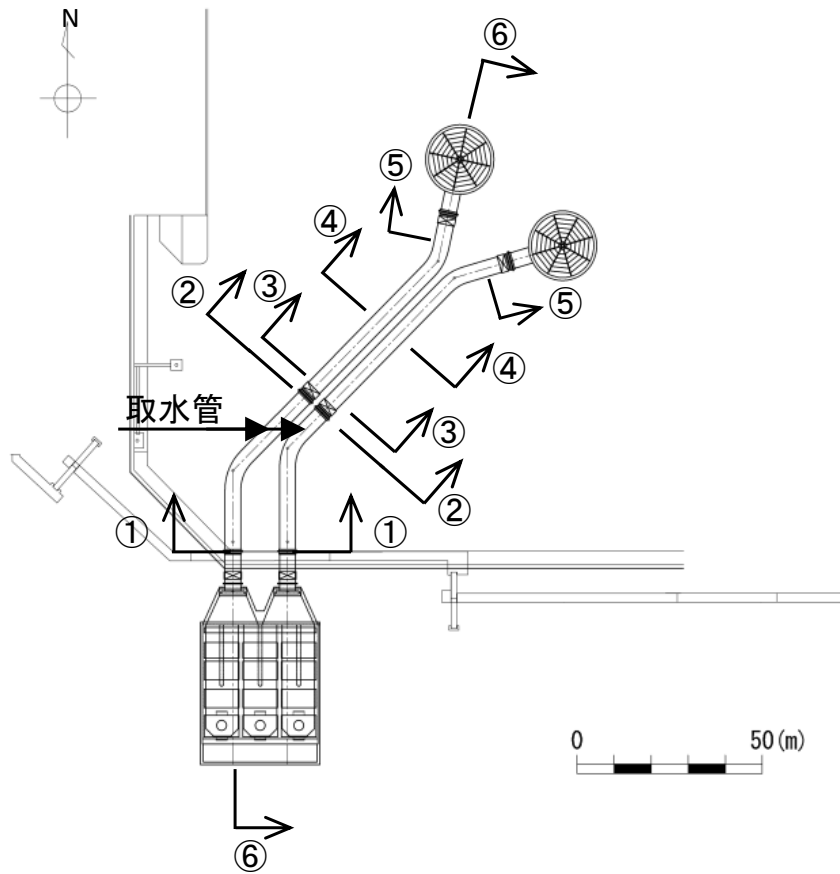
輪谷湾の底質土砂は、岩及び砂礫で構成されているが、島根2号炉の取水口・取水管が設置される周辺は、岩が分布している（第6-2-13-4図）。

取水管は、岩盤掘削した中に碎石またはコンクリートを介して $C_M$ 級以上の岩盤に支持されている。

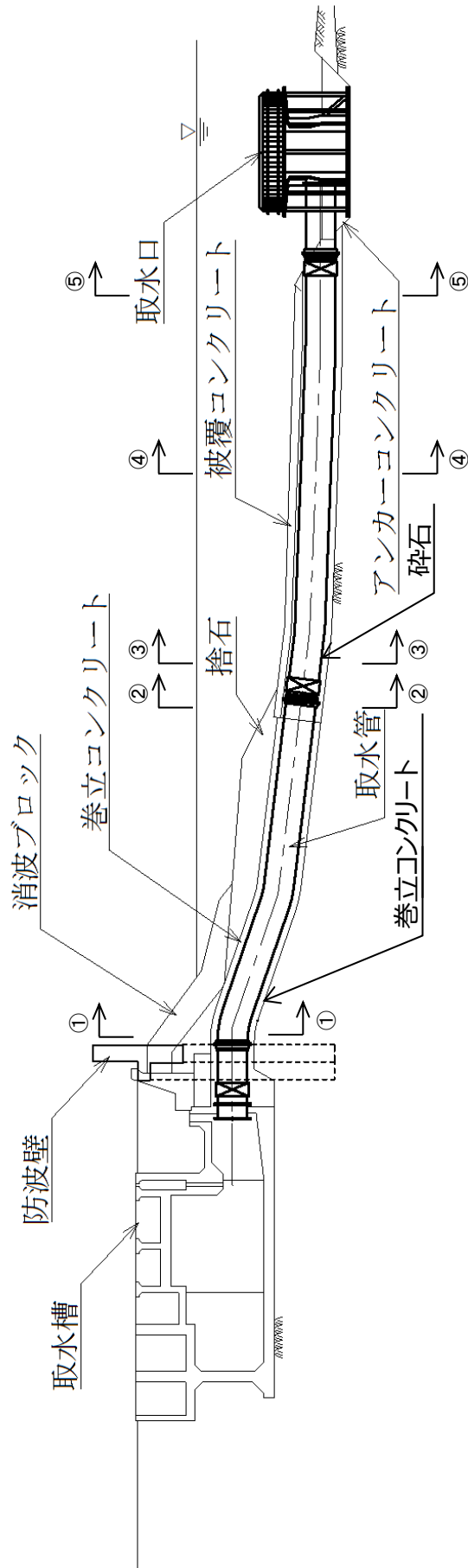


第6-2-13-1図 取水管 配置図

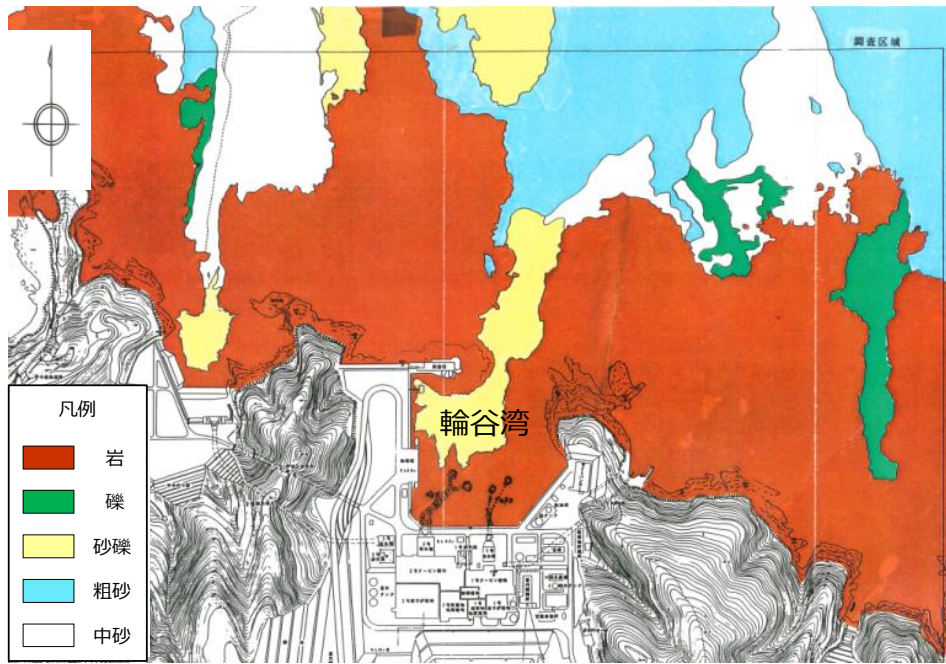




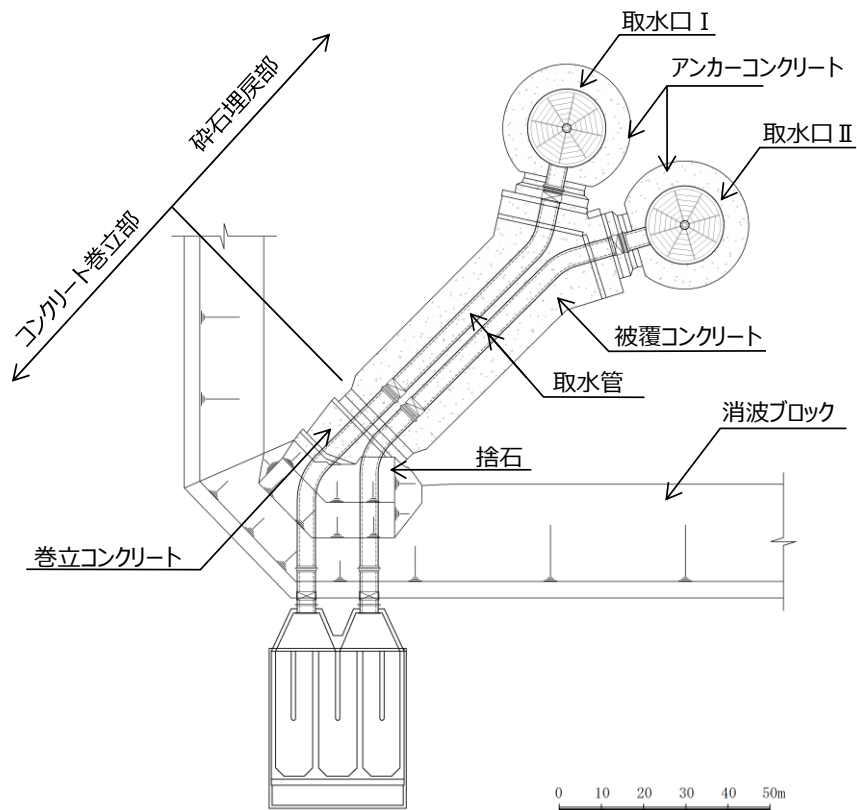
第 6-2-13-2 図 取水管 平面図



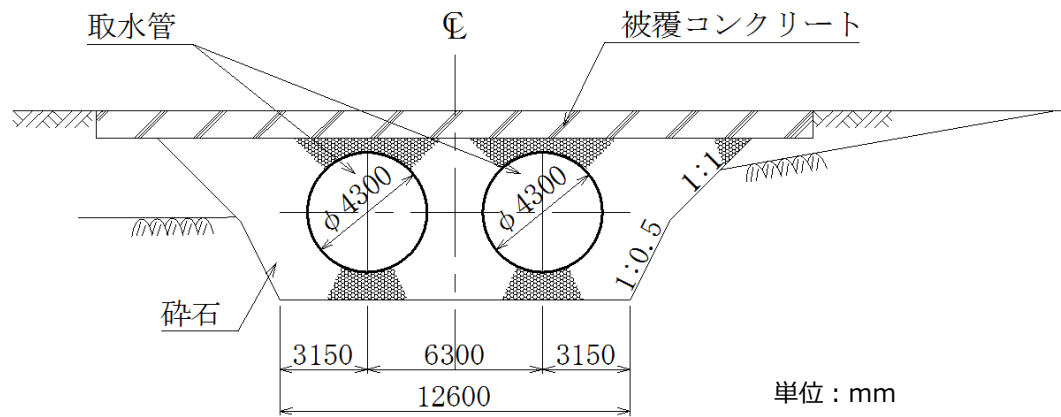
第6-2-13-3図 取水管 縦断面図 (⑥-⑥断面)



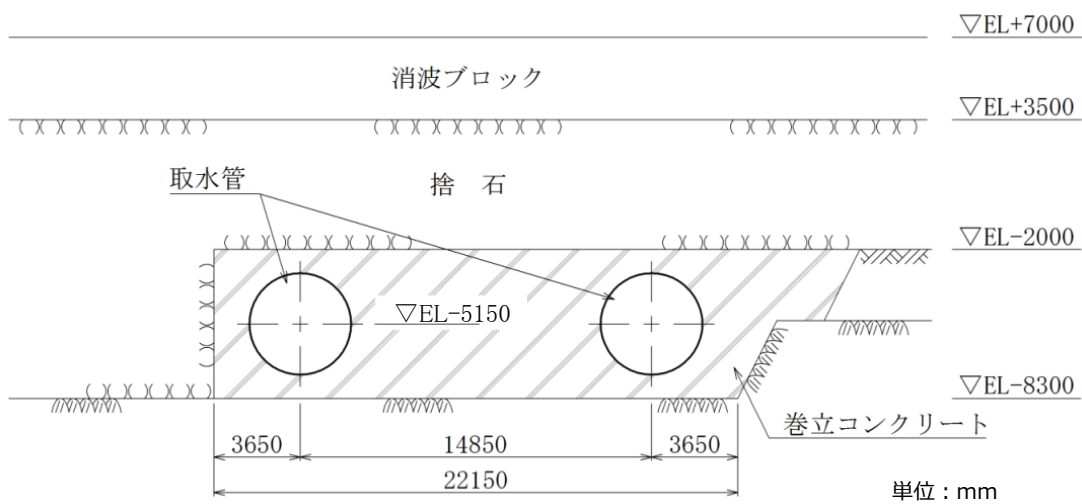
第6-2-13-4図 輪谷湾周辺の底質分布 (自社調査 (1995))



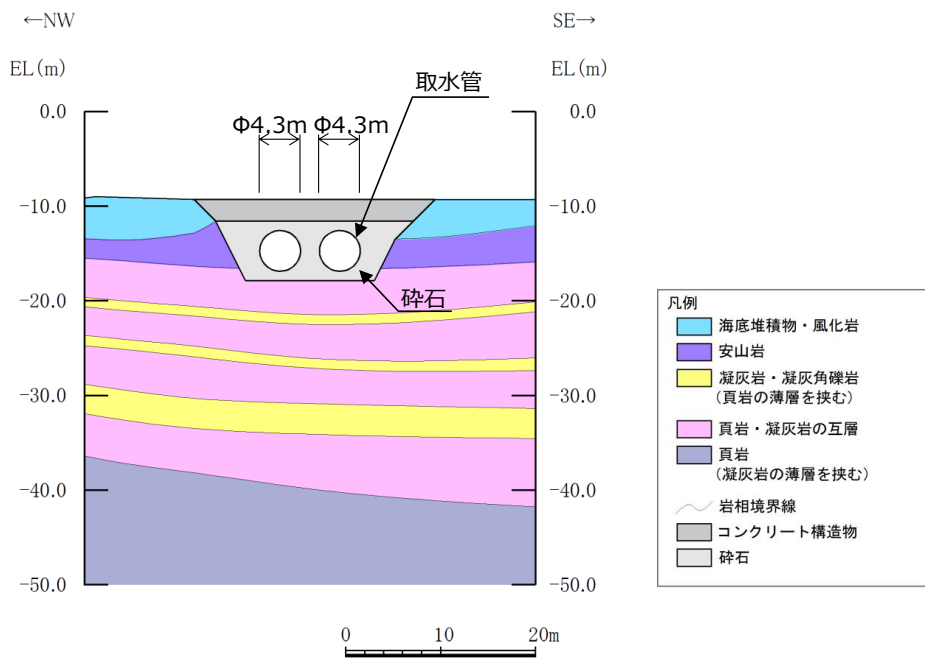
第6-2-13-5図 取水管 平面図 (詳細図)



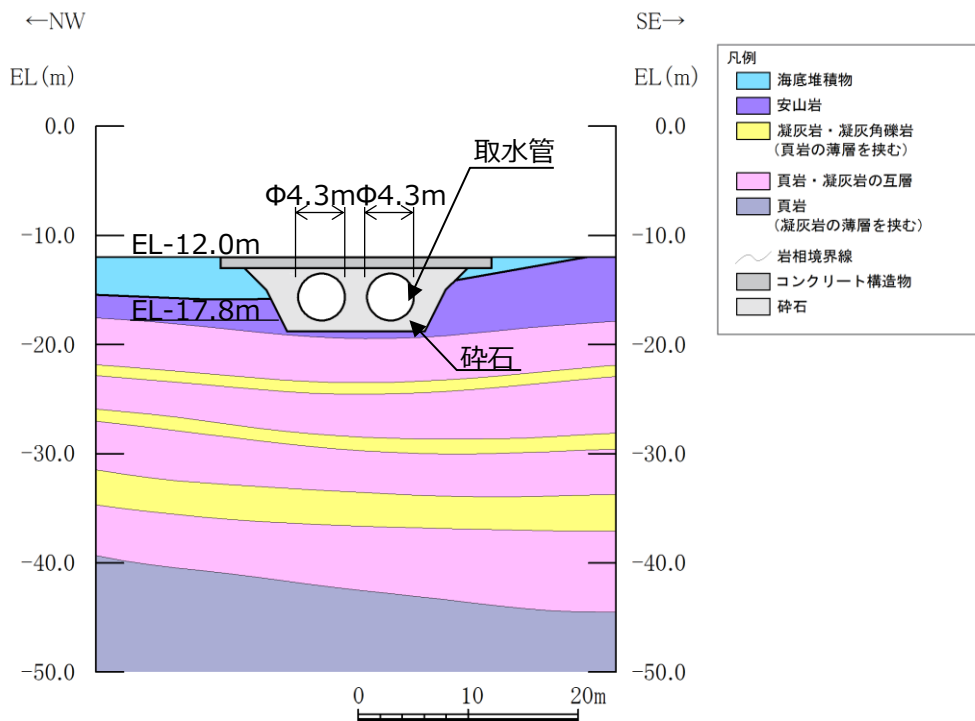
第6-2-13-6図 取水管 断面図 (③-③断面)



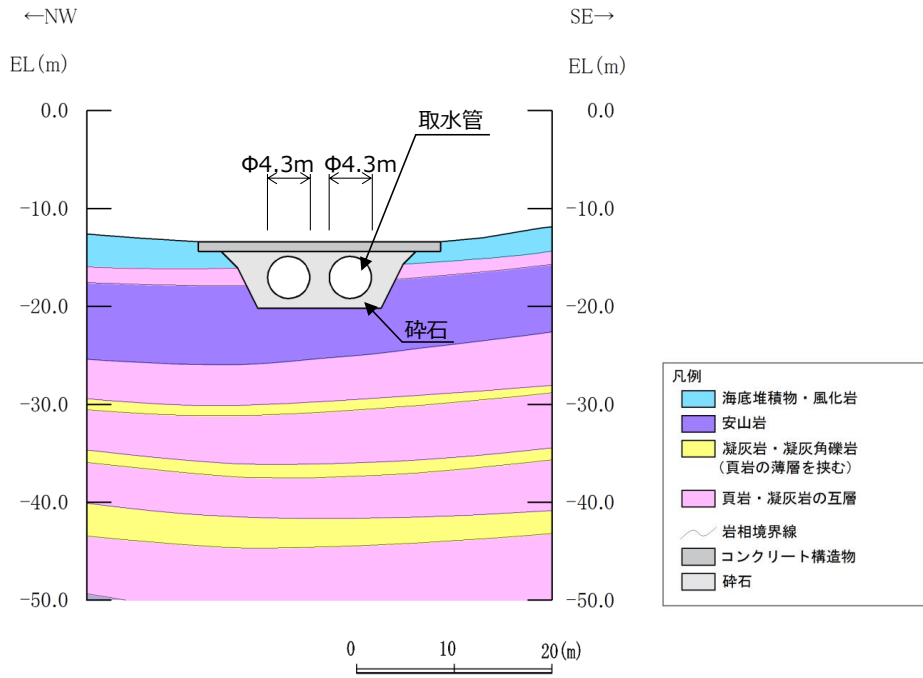
第6-2-13-7図 取水管 断面図 (①-①断面)



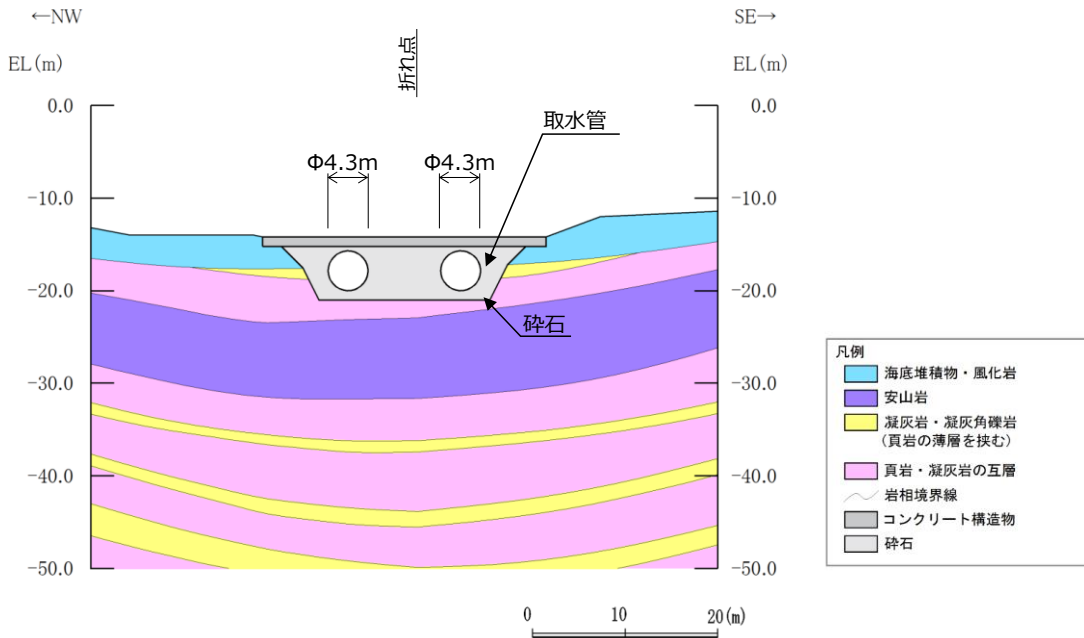
第6-2-13-8図 取水管 地質断面図 (②-②断面)



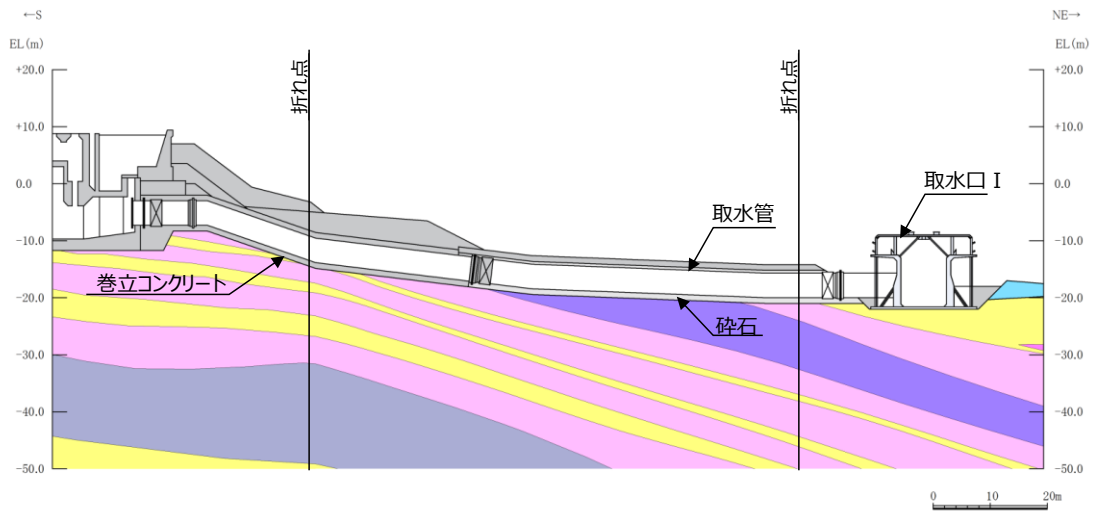
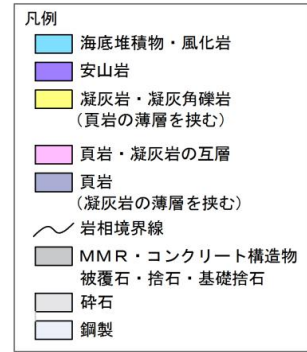
第6-2-13-9図 取水管 地質断面図 (③-③断面)



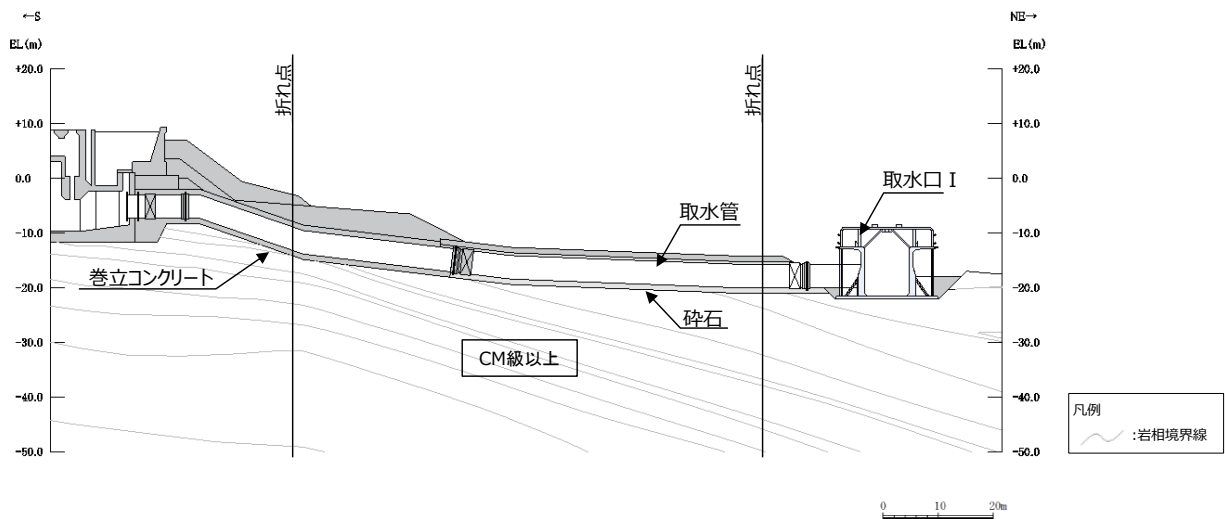
第6-2-13-10図 取水管 地質断面図 (④-④断面)



第6-2-13-11図 取水管 地質断面図 (⑤-⑤断面)



第6-2-13-12図 取水管 地質縦断面図 (⑥-⑥断面)



第6-2-13-13図 取水管 岩級縦断面図 (⑥-⑥断面)

取水管について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震力特性等の観点を踏まえた耐震評価候補断面を整理した（第6-2-13-1表）。

第6-2-13-1表 耐震評価候補断面の整理（取水管）

観点		取水管					
		①-①断面	②-②断面	③-③断面	④-④断面	⑤-⑤断面	⑥-⑥断面
①要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況	要求機能	・通水					
	間接支持する設備	設備	・なし				
		設置位置	-				
②構造的特徴	形式	・弱軸方向断面				・強軸方向断面	
		・通水方向に対して一様の断面形状を示す鋼製の構造物					
	寸法	・管径Φ4.30m（2連）					
③周辺状況	周辺地質	構造物下部	・コンクリートを介してCM級以上の岩盤に支持されている	・砕石を介してCM級以上の岩盤に支持されている			・コンクリート及び砕石を介してCM級以上の岩盤に支持されている
		構造物側部及び上部	・コンクリートが分布している	・砕石が分布している			・コンクリート及び砕石が分布している
		地質変化部	・なし				
	地下水位	-（水中構造物）					
	モデル化する隣接構造物	・なし					
④地震波の伝搬特性		・観点③での整理のとおり、構造物下部の周辺地質が各断面で異なり、地震波の伝搬特性が異なる					
⑤床応答特性		・観点①での整理のとおり、間接支持する設備がない					

以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、地震応答解析により耐震評価を行ううえで、構造物の応答が耐震評価上厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。なお、詳細設計段階において設定する地下水位等、各断面で異なる要因があれば、その観点を整理を行い、評価対象断面を選定する。



## 島根原子力発電所 2 号炉

機器・配管系における手法の変更点  
について

## 目 次

1. はじめに
2. 手法の相違点
3. 手法の変更項目に対する島根 2 号炉への適用性

添付資料-1 原子炉建物天井クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用について

添付資料-2 取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用について

添付資料-3 ポンプ等の応答解析モデルの精緻化について

添付資料-4 容器等の応力解析への F E Mモデルの適用について

添付資料-5 原子炉建物-大型機器連成解析モデルの変更について

添付資料-6 最新知見として得られた減衰定数の採用について

添付資料-7 水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根法による組合せについて

添付資料-8 等価繰返し回数の評価方針について

添付資料-9 多入力の時刻歴応答解析の適用について

## 1. はじめに

機器・配管系の耐震評価において既工認から評価手法を変更するものについて、「別紙－1 設置変更許可申請における既許可からの変更点及び既工認との手法の相違点の整理について」の整理結果を踏まえ、手法の相違点及び島根2号炉としての適用性の確認結果を示す。

## 2. 手法の相違点

### (1) クレーン類への非線形時刻歴応答解析の適用

原子炉建物天井クレーン及び取水槽ガントリクレーンの解析では、より詳細な手法を用いる観点から、すべり及び浮上りの条件を考慮した非線形時刻歴応答解析にて評価を実施する。クレーン類への非線形時刻歴応答解析の適用は、他プラントを含む既工認あるいは補正工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-1 参照）。なお、取水槽ガントリクレーンについては、既工認の実績として参照した大間1号炉建設工認の原子炉建屋天井クレーンと主要構造に差異がある（詳細は添付資料-2 参照）。

### (2) ポンプ等の応答解析モデルの精緻化

最新の工認実績を踏まえ、ポンプ等の一部設備に対して応答解析モデルの変更を行う。応答解析モデルの変更については、他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-3 参照）。

### (3) 容器等の応力解析へのFEMモデルの適用

既工認において、公式等による評価にて耐震計算を実施していた設備について、3次元FEMモデル等を適用した耐震評価を実施する。FEMモデルを用いた応力解析手法は、他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-4 参照）。

### (4) 原子炉建物－大型機器連成解析モデルの変更

原子炉本体及び炉内構造物の水平方向応答解析モデルについて、既工認では建設工程の関係上、原子炉格納容器－原子炉压力容器モデルと原子炉压力容器－炉内構造物モデルの2種類のモデルを用いていたが、今回工認では、原子炉格納容器－原子炉压力容器－炉内構造物モデルを用いる。これに合わせて、原子炉压力容器スタビライザ及び原子炉格納容器スタビライザのばね定数算出方法について、最新の工認実績を踏まえた算出方法に変更する。本手法は、他プラントを含む既工認あるいは補正工認において適用実績がある手法である。

また、鉛直方向に動的地震力が導入されたことから、原子炉本体及び炉内構造物について、鉛直方向の応答を適切に評価する観点で、水平方向応答解析モデルとは別に鉛直方向応答解析モデル（原子炉压力容器－原子炉格納容器－炉内構造物モデル）を新たに採用し、鉛直地震動に対する評価を実施する。鉛直方向応答解析モデルは、他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-5 参照）。

### (5) 最新知見として得られた減衰定数の採用

配管系，原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機について，最新知見として得られた減衰定数を採用する。その値は，振動試験結果等を踏まえ，設計評価用として安全側に設定した減衰定数を採用したものである。また，鉛直方向の動的地震力を適用することに伴い，鉛直方向の設計用減衰定数についても新たに設定している。

上記の減衰定数の設定は，他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-6 参照）。

(6) 水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根法による組合せ

鉛直方向の動的地震力が導入されたことから，水平方向と鉛直方向の地震力の組合せとして，既往の研究等に基づき二乗和平方根（以下「S R S S」という。）法を用いる。S R S S法による荷重の組合せは，他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-7 参照）。

(7) 等価繰返し回数の評価方針

基準地震動の見直しに伴い，耐震評価における疲労評価に適用する等価繰返し回数を見直す。適用する等価繰返し回数の設定法は他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-8 参照）。

(8) 多入力の時刻歴応答解析手法の適用

三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析において，多入力の時刻歴応答解析手法を適用する。なお，本解析手法は，原子炉建物等の建物・構築物の地震応答解析において，他プラントを含む既工認にて適用実績がある（詳細は添付資料-9 参照）。

3. 手法の変更項目に対する島根 2 号炉への適用性

手法の変更点について，以下に示す 3 項目に分別した上で，島根 2 号炉としての適用性を示す。

(1) 先行プラントの知見反映を基本として変更する手法

先行プラントで適用されている知見を反映する変更項目については，評価対象施設に応じて質点系モデル，F E Mモデル等により適切にモデル化し，適切な解析手法を用いて地震応答解析を実施することから，島根 2 号炉への適用に際して問題となることはない。

- ・ クレーン類への非線形時刻歴応答解析の適用
- ・ ポンプ等の応答解析モデルの精緻化
- ・ 容器等の応力解析への F E Mモデルの適用
- ・ 原子炉建物－大型機器連成解析モデルの変更
- ・ 等価繰返し回数の評価方針

(2) 鉛直方向地震の動的な取扱いを踏まえて適用する手法

平成 18 年 9 月の耐震設計審査指針改訂から鉛直方向地震力に対する動的な取扱いがされており，大間 1 号炉建設工認及び P W R プラントの新規制基準工認で適用実績があり，島根 2 号炉への適用に際して問題となることはない。

- ・水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根による組合せ
- ・原子炉建物－大型機器連成解析モデルの変更

(3) より現実的な応答を模擬する観点から採用する手法

a. 最新知見として得られた減衰定数の採用

配管系，原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機の減衰定数は，振動試験結果等を踏まえて設定した減衰定数を採用する。

配管系については，PWRプラントの新規制基準工認で適用実績があり，また炉型，プラントごとによる設計方針について大きな差はない。また，最新知見として採用する減衰定数の設定の検討に際して，BWRプラントの配管系を踏まえた検討も実施しており，適用に際して問題となることはない。

原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機の減衰定数の設定に際しては，振動試験を用いた検討を実施している。振動試験の試験体は，実機と同様の振動特性である試験体を用いることにより，減衰定数のデータを採取している。島根2号炉の原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機は，振動試験に用いた試験体と同様の構造，仕様であることを確認しており，最新知見として得られた減衰定数の適用に際して問題となることはない（試験等の詳細は，添付資料-6 に記載）。なお，本減衰定数の適用は大間1号炉建設工認及びPWRプラントの新規制基準工認において適用実績がある。

b. 多入力の時刻歴応答解析手法の適用

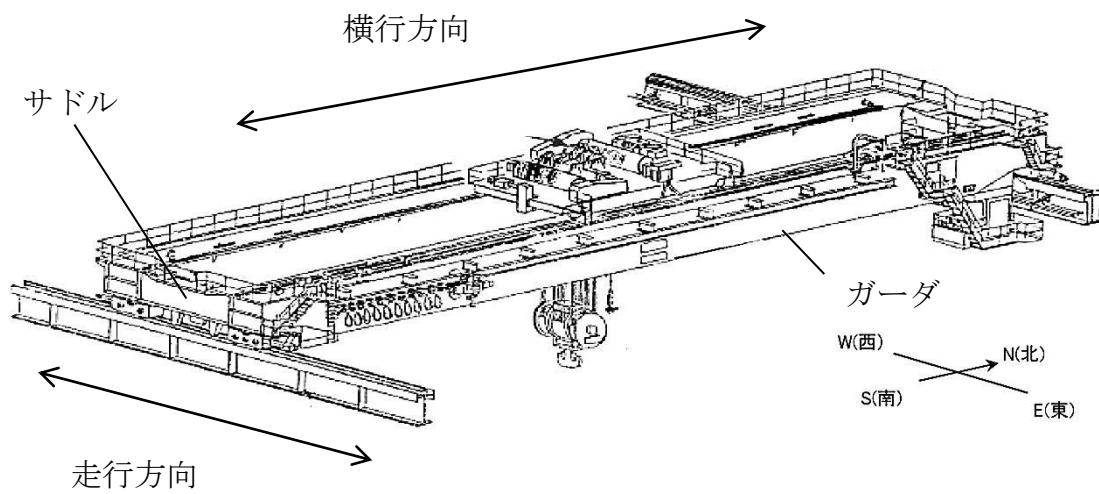
三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析において，多入力の時刻歴応答解析手法を適用する。本解析手法は，原子炉建物等の建物・構築物の地震応答解析において，他プラントを含む既工認にて適用実績がある。

## 原子炉建物天井クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用について

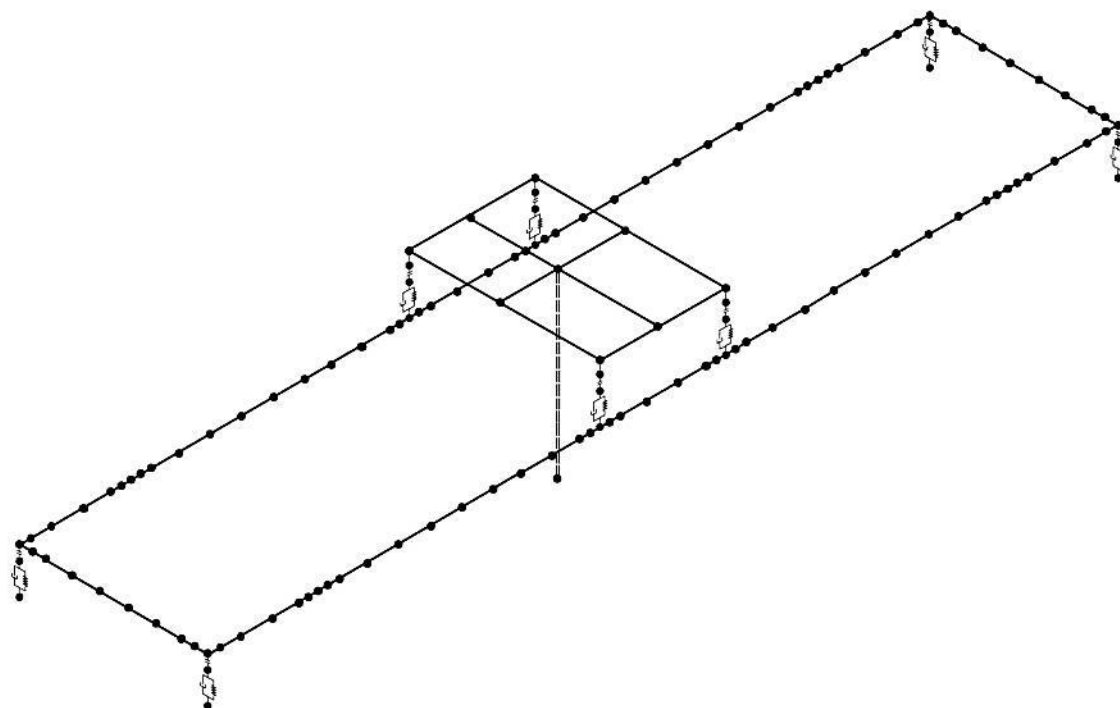
### 1. 概要

島根2号炉原子炉建物天井クレーン（以下「天井クレーン」という。）（第1-1図）の耐震評価は、既工認では、鉛直方向について静的地震力のみ考慮していたことから手計算により評価を実施していた。今回工認では、鉛直方向について動的地震力を考慮する必要があること及びクレーンがレール上に固定されていないという構造上の特徴を踏まえ、鉛直方向地震力に対する車輪の浮上り挙動を考慮した解析モデル（第1-2図）を用いた非線形時刻歴応答解析により評価を実施する。

なお、天井クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用は大間1号炉建設工認、東海第二において適用実績がある。



第 1-1 図 原子炉建物天井クレーン概要図



第 1-2 図 原子炉建物天井クレーンの今回工認における  
解析モデル

## 2. クレーン構造

### 2.1 原子炉建物天井クレーンの構造

島根2号炉と大間1号炉の天井クレーンは、第2-1図に示す通り原子炉建物に設置された走行レール上をガーダ及びサドルが走行し、ガーダ上に設置された横行レール上をトロリが横行する同様の構造となっており地震力に対し以下の挙動を示す。島根2号炉原子炉建物天井クレーンの主要諸元については添付資料(1-1)に示す。

#### (1) 走行方向の水平荷重

- a. 天井クレーンは走行レール上に乗っており固定されていないため、走行方向の水平荷重が天井クレーンに加わっても、天井クレーンは走行レール上をすべり、天井クレーン自体には走行レール-走行車輪間の最大静止摩擦力以上の荷重は作用しない。
- b. 天井クレーンの走行車輪は、駆動輪及び従動輪である。
- c. 走行車輪の駆動輪は、電動機及び減速機等の回転部分と連結されているため、最大静止摩擦力以上の地震慣性力が車輪部に加わった場合、回転部分が追従できず、走行レール上をすべる。

#### (2) 横行方向の水平荷重

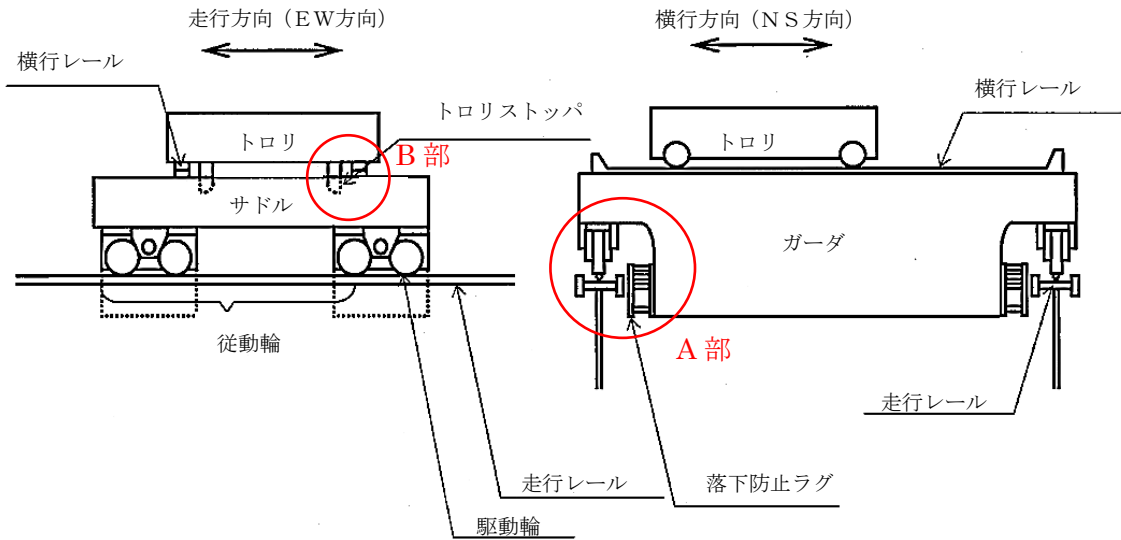
- a. ガーダ関係
  - (a) 横行方向は、走行レールに対して直角方向であり、ガーダは横行方向が走行レールにより拘束される。このため横行方向の地震慣性力が、そのままガーダに作用する。
- b. トロリ関係
  - (a) トロリはガーダの上に乗っており、ガーダとは固定されていないため、横行方向の荷重がトロリに加わっても、トロリは横行レール上をすべり、トロリ自体には横行レール-横行車輪間の最大静止摩擦力以上の荷重は作用しない。
  - (b) トロリの横行車輪は、駆動輪及び従動輪である。
  - (c) トロリの駆動輪は、電動機及び減速機等の回転部分と連結されているため、最大静止摩擦力以上の地震慣性力が車輪部に加わった場合、回転部分が追従できず、横行レール上をすべる。

#### (3) 鉛直荷重

- a. 島根2号炉天井クレーンは、トロリストoppa及び落下防止ラグにより浮上りを防止する構造としていたが、鉛直方向に動的な地震動を考慮することにより鉛直方向地震力が大きくなったことから、浮上りを許容することで耐震性を確保する構造に変更した。これにより、トロリ及びガーダは、レールと固定されていないことから、鉛直方向の地震力によって



レールから浮き上がる可能性があるが、車輪周りのトロリストッパ及び落下防止ラグの間の取合い構造は、許認可実績のある大間1号炉の原子炉建屋天井クレーンと同様の構造となっていることから、車輪周りを含めた応答解析モデルは大間1号炉と同様にモデル化することができる。島根2号炉天井クレーンの構造変更の概要を添付資料(1-2)に示す。



	大間1号炉	島根2号炉
A部		
B部		

第2-1図 車輪周りの構造比較

### 3. 解析評価方針

#### 3.1 原子炉建物天井クレーンの評価方針

##### (1) 評価方法

既工認，今回工認及び大間1号炉建設工認の評価方法を第3-1表に示す。今回工認では，鉛直方向の動的地震力を考慮する必要があること及びレール上に固定されていないという構造上の特徴を踏まえ，鉛直方向の地震力に対する車輪部の浮上り挙動を考慮した3次元FEM解析モデルを用いた非線形時刻歴応答解析により評価を実施する。

第3-1表 島根2号炉既工認，今回工認及び大間1号炉建設工認の評価方法の比較

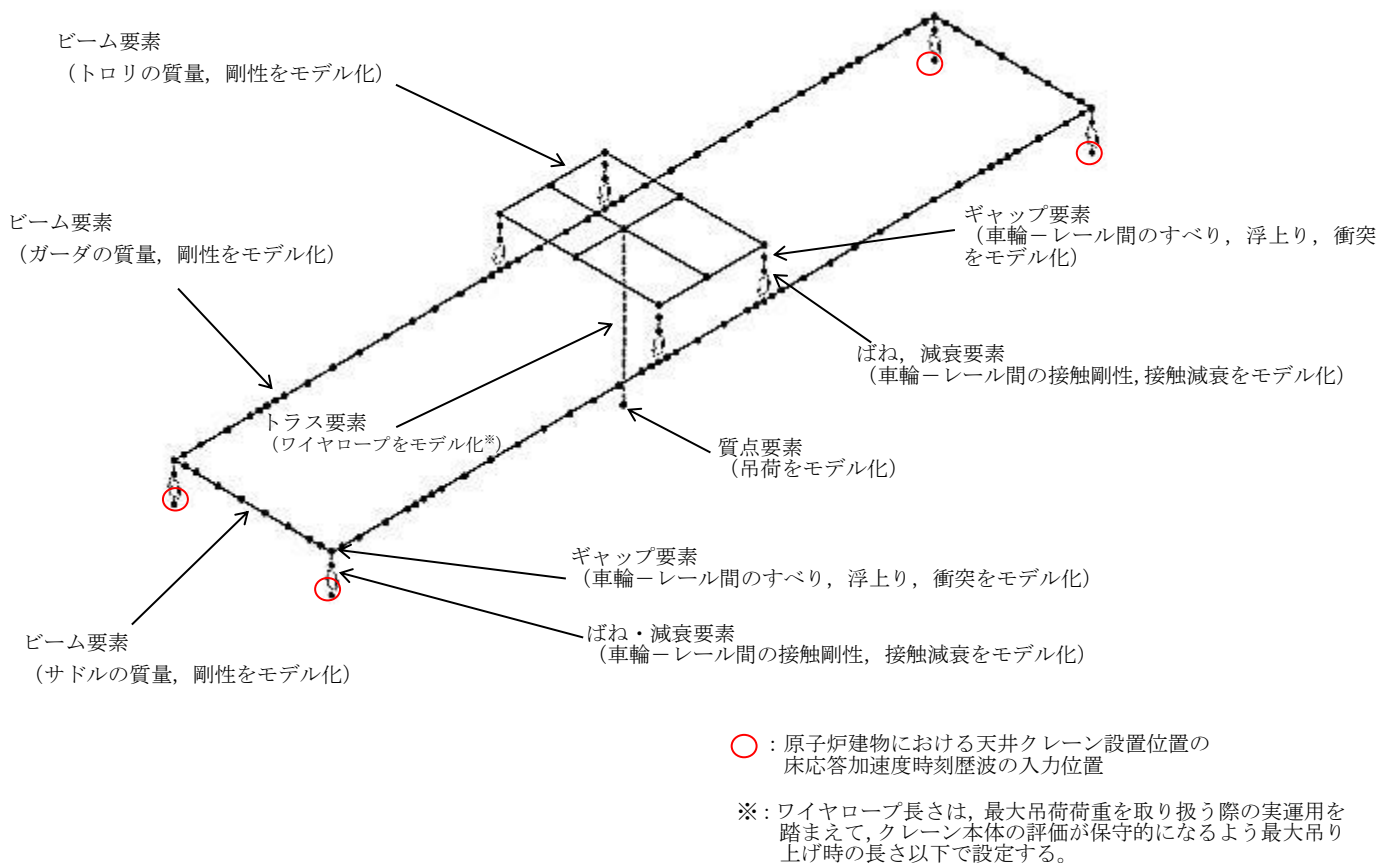
項目	大間1号炉	島根2号炉	
		既工認	今回工認
解析手法	非線形 時刻歴応答解析	手計算による 評価	非線形 時刻歴応答解析
解析モデル	3次元FEM解析 モデル	—	3次元FEM解析 モデル
車輪—レール間の 境界条件	すべり，浮上り， 衝突考慮	すべり考慮	すべり，浮上り， 衝突考慮
地震力	水平	動的地震力	動的地震力
	鉛直	動的地震力	静的地震力
入力地震動	原子炉建物における クレーン設置位置の 床応答加速度	原子炉建物における クレーン設置位置の 床応答加速度	原子炉建物における クレーン設置位置の 床応答加速度
減衰 定数	水平	2.0%	1.0% <sup>注1</sup>
	鉛直	2.0%	—
解析プログラム	ABAQUS (Ver. 6.5-4)	—	ABAQUS (Ver. 6.11-1)

注1：既工認では剛であることを確認した上で動的震度を適用しているため，減衰定数は評価には使用していない。

注2：添付資料-6「最新知見として得られた減衰定数の採用について」において適用性を説明する。

## (2) 地震応答解析モデル

天井クレーンを構成する主要部材はビーム要素でモデル化する。車輪部はレールに乗っており、すべり及び浮上り等の非線形挙動が生じる構造であることから、ギャップ要素、ばね要素及び減衰要素でモデル化する。天井クレーンの解析モデルを第3-1図に示す。なお、今回工認の天井クレーンのモデル化は、大間1号炉建設工認と同様の設定方法である。車輪部の非線形要素については添付資料(1-3)に示す。



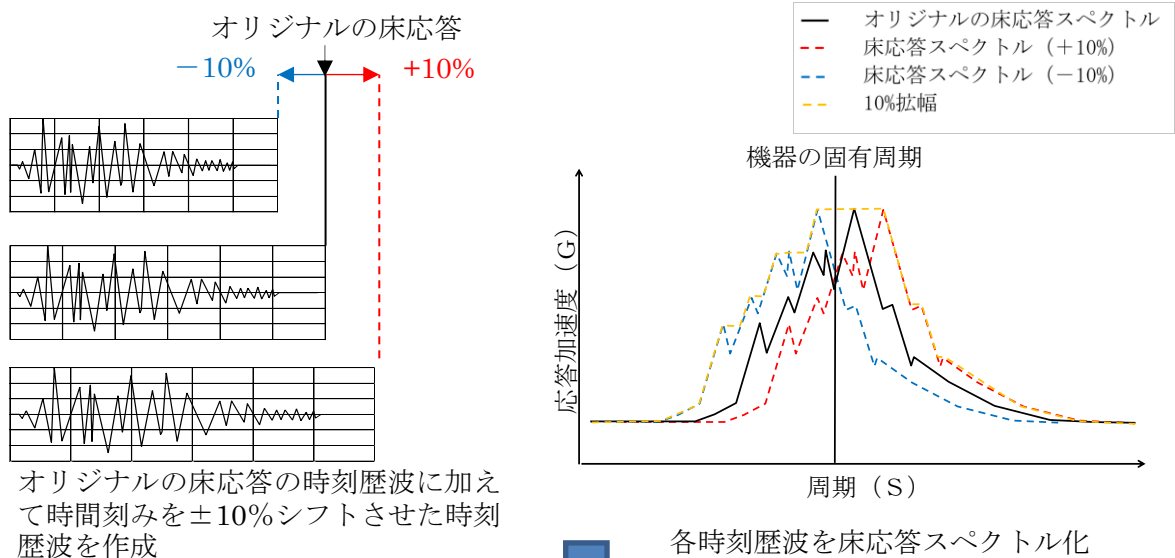
第3-1図 原子炉建物天井クレーン解析モデル

### 3.2 地盤物性等の不確かさに対する検討方針

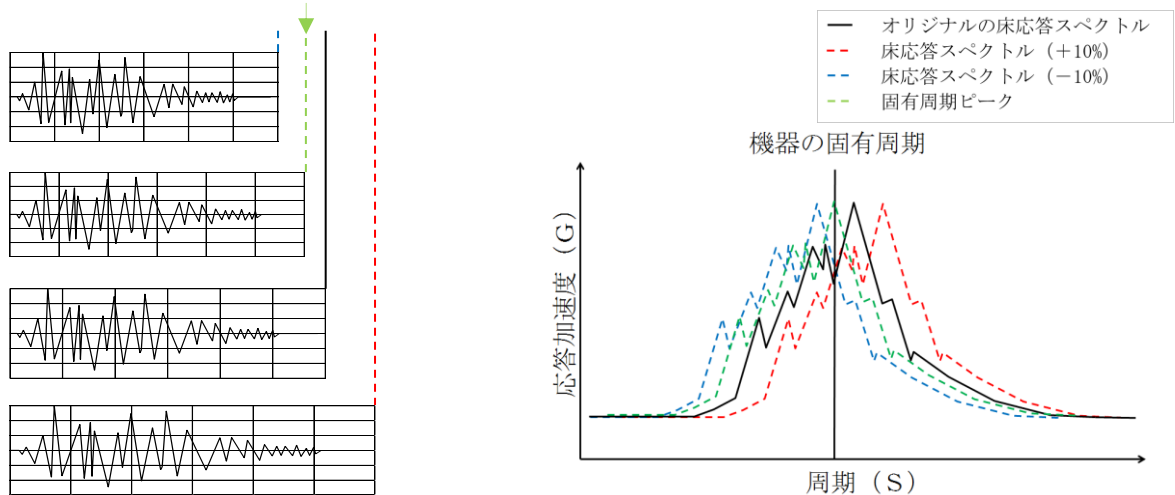
スペクトルモーダル解析では、床応答加速度は地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動を考慮して周期方向に±10%拡幅した設計用床応答曲線を用いている。

本評価では、時刻歴応答解析を採用することから、今回工認では地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動の影響を考慮し、機器評価への影響が大きい地震動に対し、ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION1 –NONMANDATORY APPENDIX N (ARTICLE N-1222.3 Time History Broadening) に規定された手法等により検討を行う。Time History Broadening の概念を第3-2図に示す。

なお、上記変動を考慮した設計用床応答曲線の谷間にクレーンの固有周期が存在する場合は、ASMEの規定に基づき、ピーク位置が固有周期にあたる場合の検討も行う。



固有周期と合致するよう調整した時刻歴波



機器の固有周期が床応答スペクトルピークの谷間に存在する場合、ピークと合うような時刻歴波を作成し、時刻歴応答解析を実施する。

第3-2図 Time History Broadening の概念図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

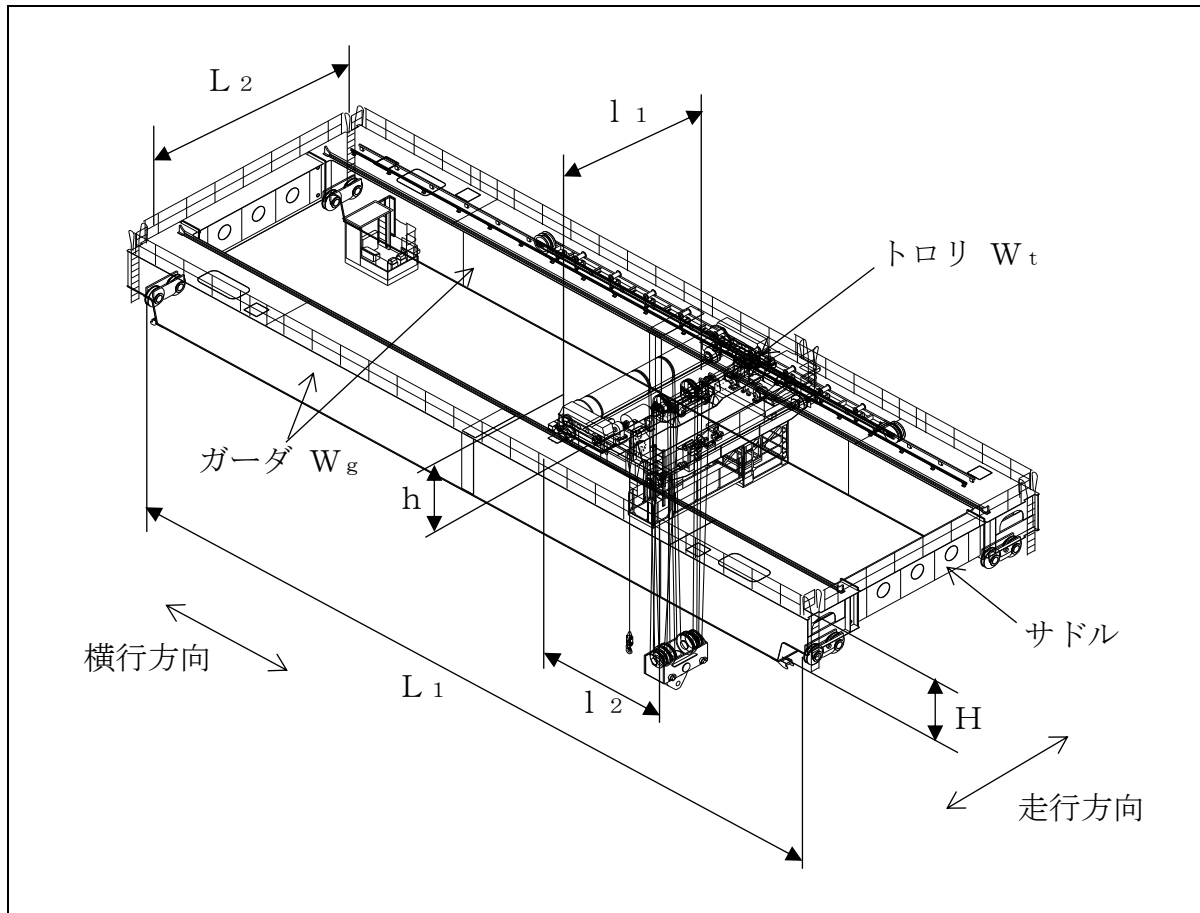
#### 4. 添付資料

- (1-1) 島根2号炉原子炉建物天井クレーンの主要諸元
- (1-2) 島根2号炉原子炉建物天井クレーンの構造変更
- (1-3) クレーン車輪部の非線形要素（摩擦，接触，減衰）
- (1-4) クレーンの地震時挙動に関する補足説明

#### 5. 参考文献

- (1) 平成19年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 動的上下動耐震試験（クレーン類）に係る報告書（08 耐部報-0021，（独）原子力安全基盤機構）
- (2) 平成20年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 動的上下動耐震試験（クレーン類）に係る報告書（09 耐部報-0008，（独）原子力安全基盤機構）

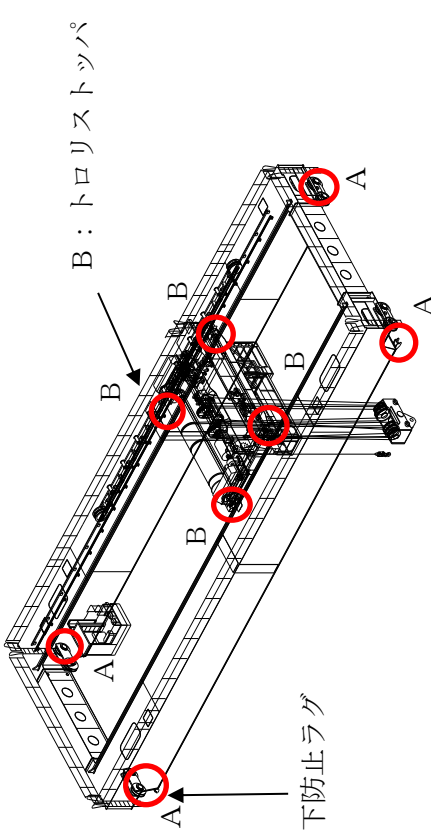
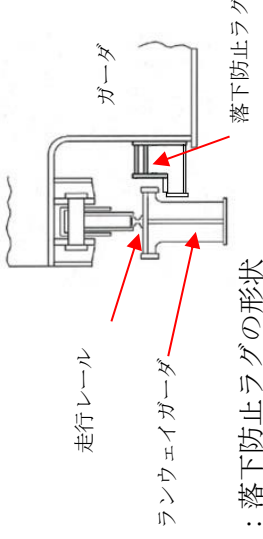
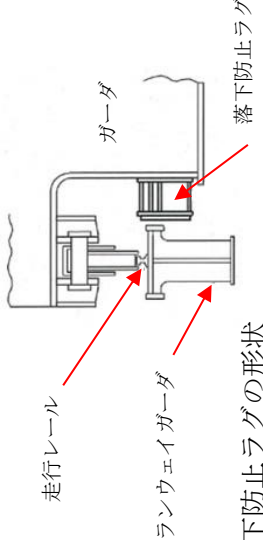
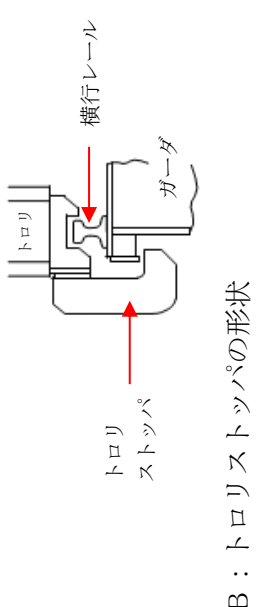
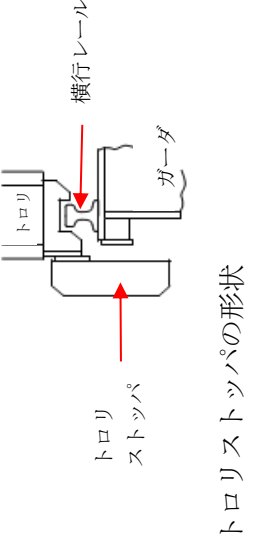
添付資料(1-1) 島根2号炉原子炉建物天井クレーンの主要諸元



仕様		大間1号炉	島根2号炉
トロリ	質量 $W_t$ (ton)	80	56
	高さ $h$ (m)	2.8	3.4
	スパン $l_1$ (m)	7.7	5.6
	スパン $l_2$ (m)	4.6	4.9
ガーダ	質量 $W_g$ (ton)	190	149
	高さ $H$ (m)	2.5	2.4
	スパン $L_1$ (m)	34.9	34.9
	スパン $L_2$ (m)	9.4	7.3
総質量 $W$ (ton)		270	205

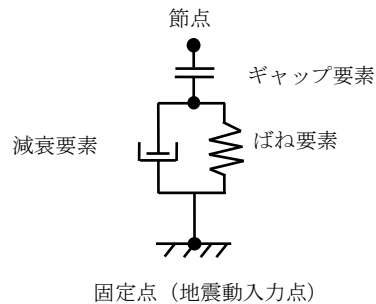


添付資料(1-2) 島根2号炉原子炉建物天井クレーンの構造変更

 <p>A : 落下防止ラグ</p> <p>B : トロリストップ</p>	<p>落下防止ラグ及び トロリストップの 形状を変更</p>
<p>変更前</p>  <p>A : 落下防止ラグの形状</p>	<p>変更後</p>  <p>A : 落下防止ラグの形状</p>
 <p>B : トロリストップの形状</p>	 <p>B : トロリストップの形状</p>

添付資料(1-3) クレーン車輪部の非線形要素（摩擦，接触，減衰）

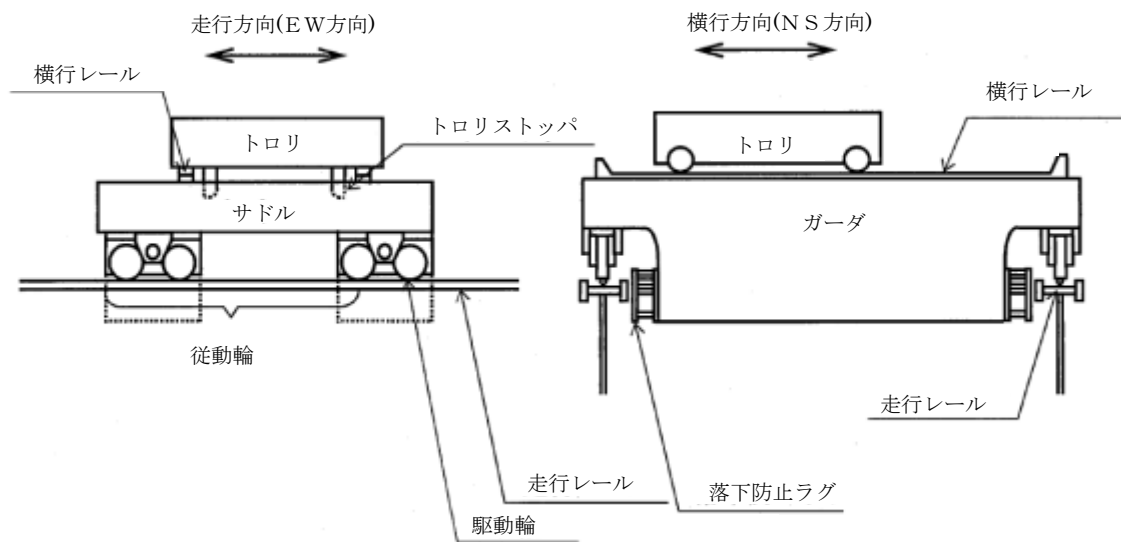
クレーン車輪部のモデル化では，すべり，浮上り及び衝突の挙動を模擬するためギャップ要素を用いる。また，接触部位の局所変形による接触剛性をばね要素で，衝突による減衰効果を減衰要素で模擬し，第3-1添図に示すように，ギャップ要素と直列に配置する。



第3-1添図 車輪部の非線形要素

1. 車輪とレール間の摩擦特性

クレーンの車輪には電動機及び減速機等の回転部分と連結された駆動輪と，回転部分と連結されていない従動輪の2種類がある。第3-2添図に天井クレーンの概要図を示す。このうち駆動輪は回転が拘束されているため，最大静止摩擦力以上の地震慣性力が加わった場合，レール上をすべる挙動を示す。ここで，摩擦係数は既工認と同様の0.3を用いる。



第3-2添図 天井クレーンの概要図

2. 車輪とレールの接触剛性

接触剛性は「平成20年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 動的上下動耐震試験(クレーン類)に係る報告書(09耐部報-0008, (独)原子力安全基盤機構)」を参照し，車輪とレールの衝突時の剛性を模擬したばね

要素を考慮し、クレーン質量で構成される1自由度系の固有振動数が20Hz相当になるように設定する。

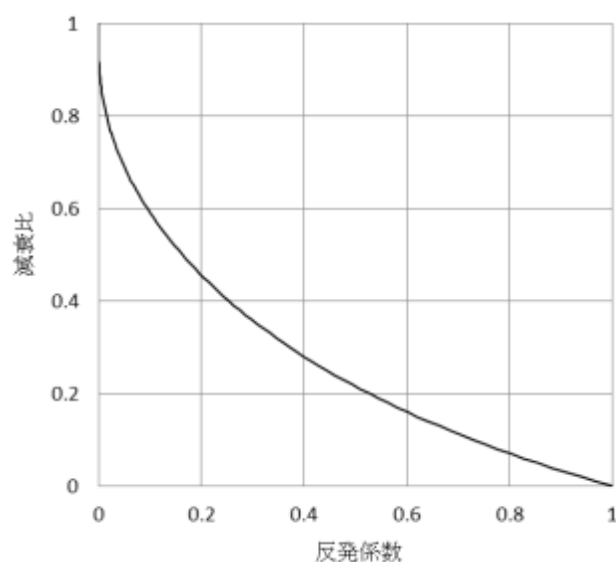
### 3. 車輪とレール間の衝突による減衰

衝突による減衰は「平成19年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 動的上下動耐震試験(クレーン類)に係る報告書(08耐部報-0021, (独)原子力安全基盤機構)」にて実施した要素試験のうち、車輪反発係数試験結果より評価した反発係数から換算する。なお、減衰比と反発係数の関係式には次式を用いる。

$$e = \exp\left(-\frac{h\pi}{\sqrt{1-h^2}}\right)$$

ここで、 $e$ は反発係数、 $h$ は減衰比である。

上記の式で表される反発係数と減衰比との関係を第3-3添図に示す。



第3-3添図 反発係数と減衰比の関係

## 添付資料(1-4) クレーンの地震時挙動に関する補足説明

### 1. 車輪とレールとの摩擦力及び落下防止部材との接触による摩擦力の考慮について

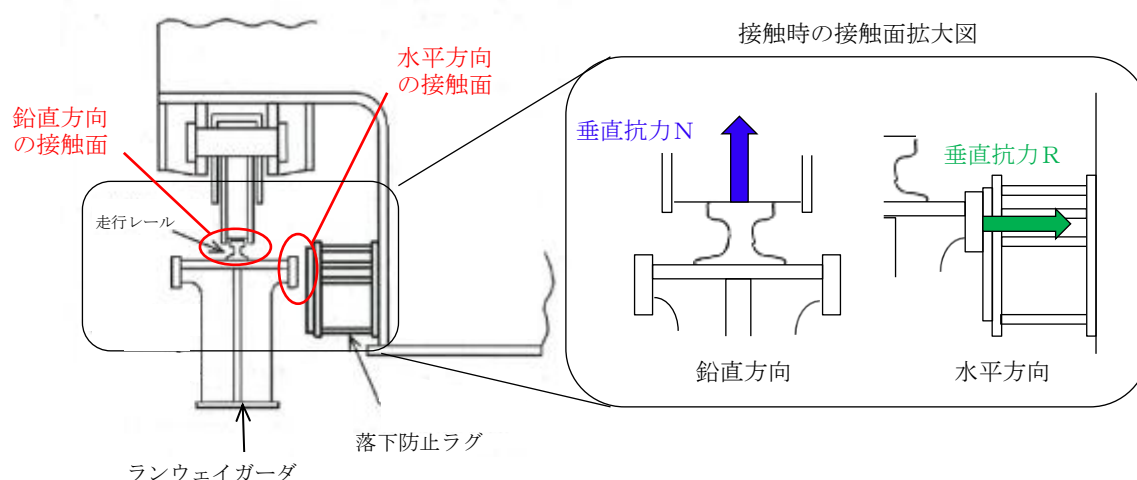
クレーンはレール上を車輪で移動する構造であるため、地震時にはレールに沿う方向にすべりが発生し、最大静止摩擦力以上の荷重を受けない構造である。

天井クレーン本体とランウェイガード間の取合い部を例とすると、すべりを想定する面としては、鉛直方向（車輪-レール間）及び水平方向（落下防止ラグ-ランウェイガード間）が挙げられる（第4-1添図）。

鉛直方向には、自重が常時下向きに作用し、地震による応答加速度が1Gを上回りクレーン本体が浮き上がるわずかな時間帯を除き、常に車輪はレール上面に接触し垂直抗力 $N$ が発生する。したがって、摩擦係数 $\mu$ （ $=0.30$ ）一定の条件下、垂直抗力 $N$ を時々刻々変化させた摩擦力 $f$ （ $=\mu N$ ）を考慮している。

これに対し、水平方向には常時作用する荷重はなく、水平方向（横行方向）の地震力が作用し落下防止ラグがランウェイガード側面に接触する際にのみ垂直抗力 $R$ が発生する。しかし、地震力は交番荷重であり、接触後も部材間の跳ね返りが発生することから、側面の接触時間はごくわずかな時間となる。また、大きな摩擦力が発生するためには、横行方向の地震力により瞬間的に垂直抗力 $R$ が発生する間に、走行方向に大きな地震力が同時に発生することが必要であることから、各方向地震動の非同時性を考慮し、側面の接触による摩擦力は考慮しない。側面の接触による摩擦力の影響については詳細設計段階で確認を行う。

なお、基準地震動 $S_s$ による地震力に対して、駆動輪に接続される電動機及び減速機等の回転部分が破損し、駆動輪が自由に回転する可能性も考えられるが、その場合は駆動輪が回転することにより摩擦力は低減する。したがって、上記のような摩擦力を考慮した評価を行うことで保守的な評価になる。



第4-1添図 鉛直方向と水平方向の接触面

## 2. レール等の破損による解析条件への影響について

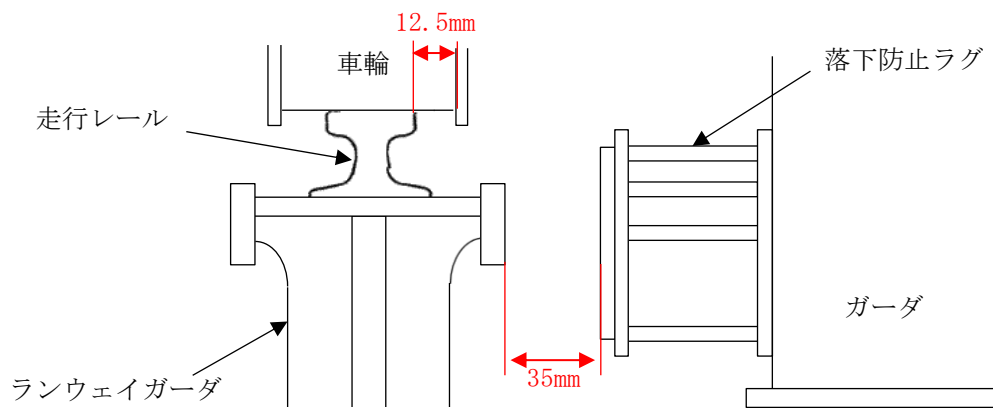
クレーンのモデル化に当たり、車輪がレール上にあり、レール直角方向に対し落下防止ラグあるいはトロリストッパの支持機能が維持されていることを前提としている。

本項では、地震応答解析モデルの前提としている「レール上に車輪がある」ことが、落下防止ラグあるいはトロリストッパの健全性を確認することで満足されることを天井クレーン本体とランウェイガーダ間の取合い部を例として示す。

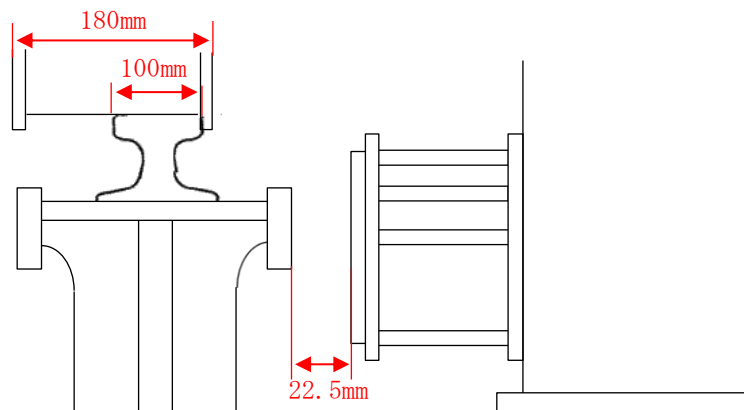
天井クレーン横行方向に地震力が作用するときは、車輪がレール上に乗り上がる挙動が想定されるが、落下防止ラグがランウェイガーダに接触することにより横行方向の移動量は制限される。落下防止ラグは構造強度部材として基準地震動  $S_s$  により生じる地震力に対して耐震性が成立する設計としており、地震で破損することはないため、落下防止ラグとランウェイガーダ間のギャップに相当する移動量となった場合でも構造上車輪がレールから落下することはない（第 4-2 添図参照）。

また、落下防止ラグとランウェイガーダが接触する前に車輪からレールに荷重が伝わることとなるが、車輪のつばとレールが接触（移動量 12.5mm）してから落下防止ラグとランウェイガーダが接触（移動量 35mm）し移動が制限されるまでの移動量は 22.5mm 程度であることから、落下防止ラグが接触して機能する前に鋼製部材であるレールが大きく破損することはないと考えられる。

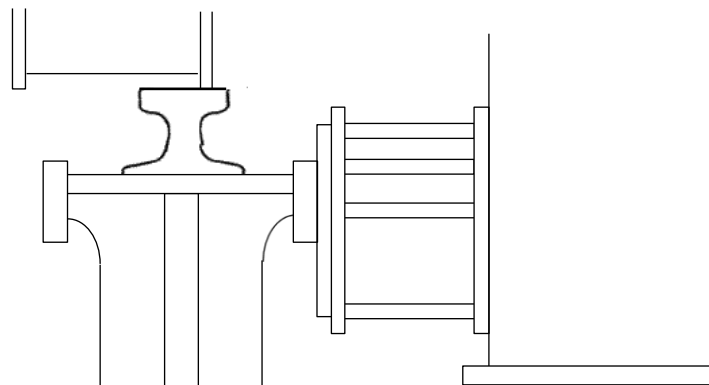
以上より、地震時に落下防止ラグがランウェイガーダに接触して機能する前に、車輪がすべり面であるレールから落下することやレールが大きく破損することがないことから、落下防止ラグが機能する前に地震応答解析モデルの前提を満足しなくなるおそれはないと考えられるが、地震時に落下防止ラグがランウェイガーダに接触して機能する前の車輪とレールの接触による影響については、詳細設計段階にて念のため確認を行う。



(a) 通常時



(b) 水平方向地震力により車輪のつばがレールに接触（水平移動量 12.5mm）



(c) 水平方向地震力により落下防止ラグとランウェイガードが接触  
（水平移動量 35mm）

第4-2 添図 天井クレーンの落下防止の概念図<sup>注1</sup>

注1 本図は車輪がレールから外れないことを示すための概念図であり、構造物の大きさや間隙については実物とは異なる。

取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用について

目 次

1. はじめに
2. 基本方針
  - 2.1 要求事項
  - 2.2 構造の概要
    - 2.2.1 取水槽ガントリクレーンの主要構造
    - 2.2.2 単軸粘性ダンパ
    - 2.2.3 転倒防止装置の構造
    - 2.2.4 トロリストッパ
    - 2.2.5 ホイストレール・車輪
  - 2.3 評価方針
  - 2.4 適用規格
3. 応答解析の方法
  - 3.1 解析方法及び解析モデル
    - 3.1.1 解析方法の詳細
    - 3.1.2 解析モデル及び諸元
    - 3.1.3 解析モデルの境界条件
  - 3.2 入力地震動
4. 耐震評価の方法
  - 4.1 評価方針
  - 4.2 荷重の組合せ
  - 4.3 評価対象部位
  - 4.4 許容限界
    - 4.4.1 許容応力
    - 4.4.2 許容浮上り量
    - 4.4.3 吊具の許容荷重
    - 4.4.4 単軸粘性ダンパの許容限界
  - 4.5 各部の評価方法
    - 4.5.1 取水槽ガントリクレーン本体，転倒防止装置，走行レール，単軸粘性ダンパブレース及び単軸粘性ダンパクレビス部の応力評価方法
    - 4.5.2 トロリの浮上り評価方法
    - 4.5.3 吊具の荷重評価方法
    - 4.5.4 単軸粘性ダンパの変位及び荷重評価方法

## 5. 評価条件・評価結果

### 5.1 評価条件

### 5.2 評価結果

#### 添付資料

- (2-1) 取水槽ガントリクレーンの改造箇所
- (2-2) 取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用性
- (2-3) 取水槽ガントリクレーンの解析ケースの設定
- (2-4) 取水槽ガントリクレーン車輪部の非線形要素（摩擦，接触，減衰）
- (2-5) 取水槽ガントリクレーン本体及びトロリのすべりの影響について



## 1. はじめに

設計基準対象施設のうちSクラスに属する施設, その間接支持構造物及び屋外重要土木構造物(以下「Sクラス施設等」という。)が下位クラス施設の波及的影響によってその安全機能を損なわないこと, また, 重大事故等対処施設のうち常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備並びにこれらが設置される常設重大事故等対処施設(以下「重要SA施設」という。)が下位クラス施設の波及的影響によって重大事故等に対処するために必要な機能を損なわないことについては, 「別紙-9 下位クラス施設の波及的影響の検討について」(以下「波及的影響検討」という。)において確認している。

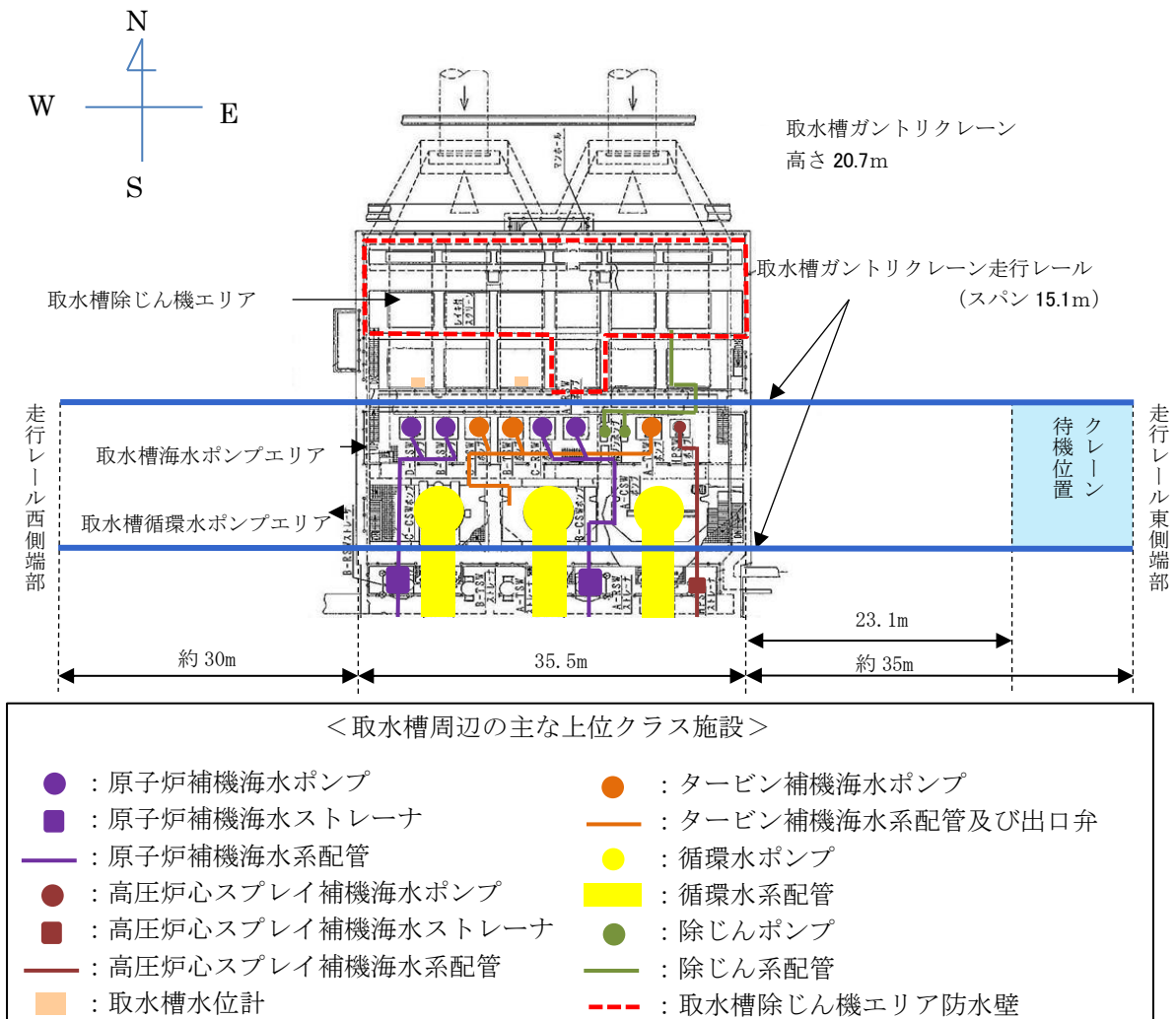
波及的影響検討において抽出された下位クラス施設のうち, 島根2号炉の取水槽ガントリクレーンの耐震評価について, 取水槽ガントリクレーンがレール上に固定されていないという構造上の特徴を踏まえ, 鉛直方向地震力に対する車輪の浮上り等の挙動を考慮した応答解析の方法及び耐震評価の方法について示す。また, 耐震評価を実施し, 構造成立性を見通しを示す。なお, 取水槽ガントリクレーンに設置する単軸粘性ダンパの詳細については, 「別紙-18 機器・配管系への制震装置の適用について」に示す。

## 2. 基本方針

### 2.1 要求事項

取水槽ガントリクレーンは, 取水槽海水ポンプエリア及び取水槽循環水ポンプエリアを跨いで設置されており, 原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンスに使用される設備である。取水槽ガントリクレーンの設置位置について第2-1図に示す。

発電所の運転中など原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンスを実施しない期間は, 取水槽ガントリクレーンは待機位置に待機しており, 周辺の上位クラス施設とは十分な離隔距離があることから波及的影響を及ぼすおそれはない。一方で, 定期検査中など原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンスを実施する期間には, 上位クラス施設が設置されている取水槽海水ポンプエリア付近に位置することとなるため, 取水槽ガントリクレーンが地震に伴う損傷, 落下によって上位クラス施設へ波及的影響を及ぼさないことが要求される。



第2-1図 取水槽ガントリクレーンの設置位置及び  
取水槽周辺の上位クラス施設概要

## 2.2 構造の概要

### 2.2.1 取水槽ガントリクレーンの主要構造

取水槽ガントリクレーンの主要な構造部材としては、脚、ガーダ、トロリ、ホイスト、単軸粘性ダンパがある。構造を第2-2図に示す。

脚はガーダを支持し、下部には走行車輪が設置されている。ガーダは脚の上部にあり、その上面にトロリが移動するための横行レールが設置されており、下部にはホイストレールが設置されている。原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンス時には、トロリに設置された巻上げ装置（主巻）、又はホイストを使用して、ワイヤロープ及びフックを介し、吊荷の吊上げ、吊下げ、移動等の作業を実施する。

取水槽ガントリクレーンは大型の構造物であり、制震装置の設置による地震荷重の低減が耐震性向上に有効である。取水槽ガントリクレーンの応答は、走行レールの直交方向に脚が変形する振動モードが支配的であり、ガーダと脚の

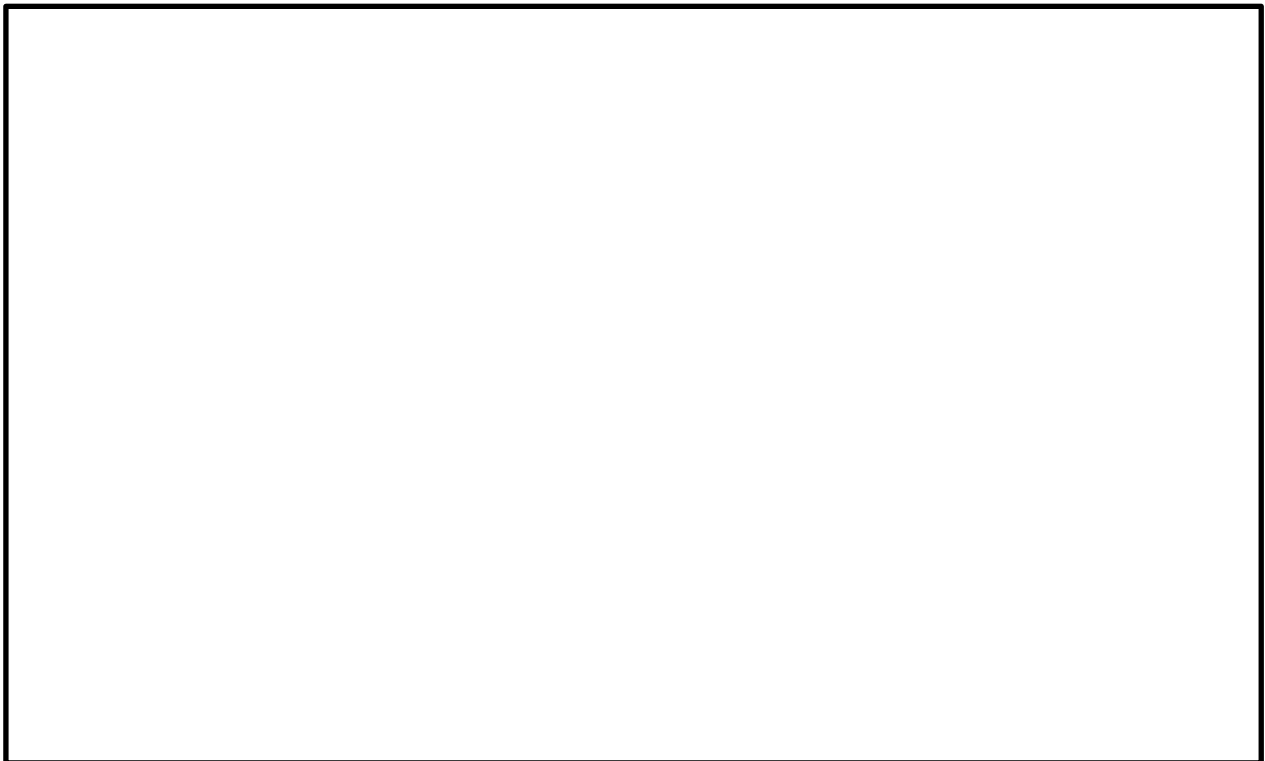
間にブレースを介して単軸粘性ダンパを制震装置として設置する。

単軸粘性ダンパ取付部の構造を第2-3図に示す。ダンパ本体の長さは標準設計の約1.5mとし、これに約10mのブレースを接続している。単軸粘性ダンパとガーダの接続、ブレースと脚の接続部にはクレビスと呼ぶ回転部を設けている。このクレビスは単軸粘性ダンパの伸縮方向と直交する一方向にはピンを軸として自由に回転可能となっている。また、ピンの軸受部は球面軸受となっており、クレビスの回転方向以外の方向にも約3度の許容回転角度を有することで、単軸粘性ダンパに伸縮方向以外の荷重が加わらない構造としている。

単軸粘性ダンパ及び取付部材の質量は適切に地震応答解析モデルに反映する。

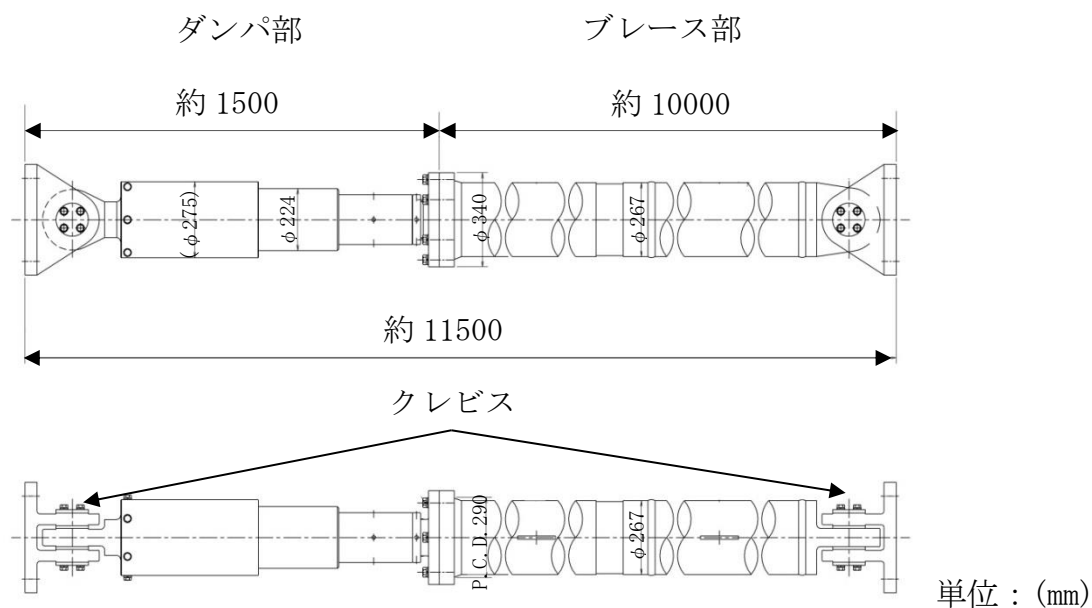
取水槽ガントリクレーン本体は、取水槽海水ポンプエリアの北側と取水槽循環水ポンプエリア南寄りに敷設された走行レール上を脚下部にある走行装置及び車輪によって東西方向に移動する。トロリは、ガーダ上面の横行レール上を横行装置及び横行車輪によって南北方向に移動する。ホイストは、ガーダ下に設置されたホイストレールに沿って、南北方向に移動する。また、取水槽ガントリクレーン本体の地震による転倒を防止するため、本体下部に転倒防止装置が設置されており、地震時に浮上りが生じた場合でも転倒しない構造となっている。トロリにはトロリストoppaを設置しており、浮上りによる脱線・落下を防止する構造となっている。

なお、本資料で示す取水槽ガントリクレーンの構造は、改造後の状態のものである。改造箇所の概要を添付資料(2-1)に示す。

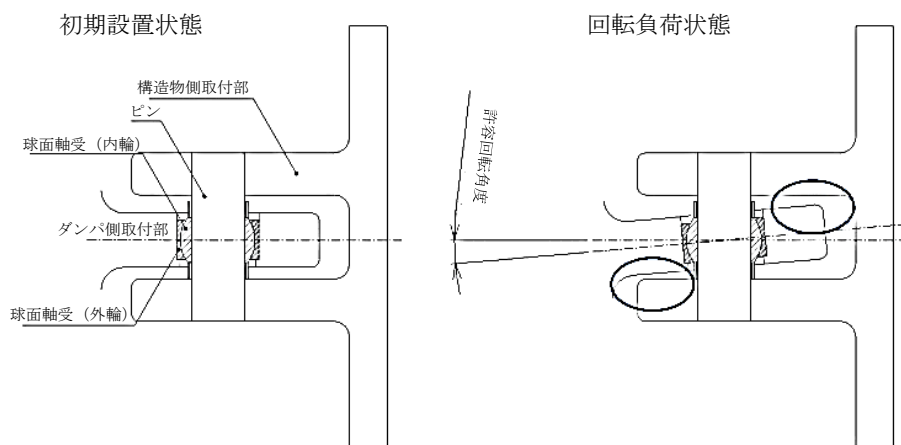


第2-2図 取水槽ガントリクレーンの構造

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



単軸粘性ダンパ及びブレースの構造



クレビス部詳細

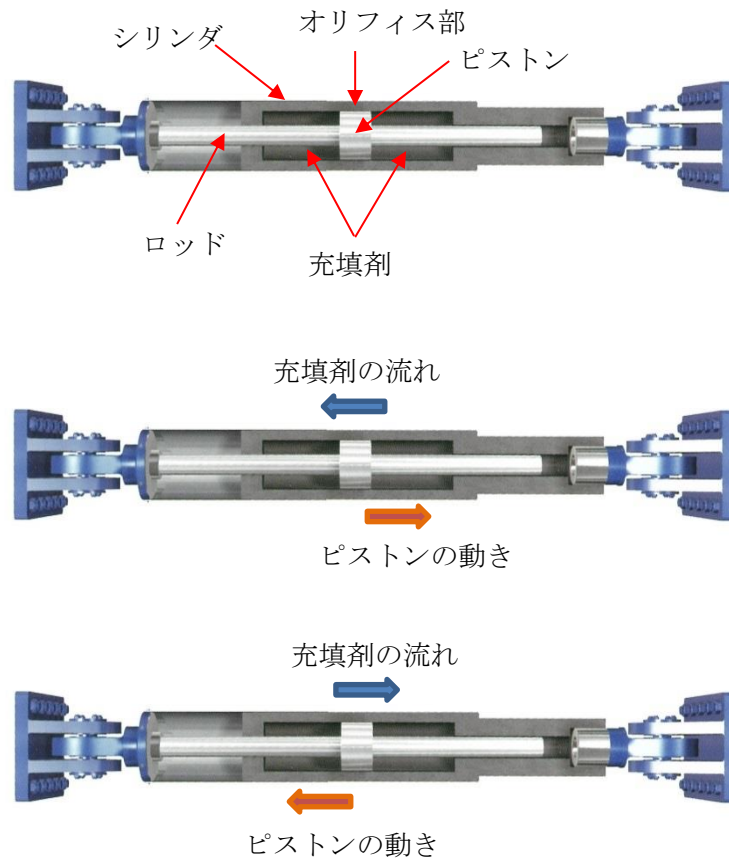
第2-3図 単軸粘性ダンパ取付部の構造

### 2.2.2 単軸粘性ダンパ

単軸粘性ダンパの仕様を第2-1表に示す。単軸粘性ダンパの基本構成、動作を第2-4図に示す。単軸粘性ダンパは、ピストン、ロッドが軸方向に移動することにより、シリンダ内面とピストンの外面の間に形成されるオリフィス部を粘性流体が流れ、その抵抗力により減衰性能を発揮するものである。単軸粘性ダンパの粘性体は化学的に安定であり、消防法で定められている危険物に該当しない。

第2-1表 単軸粘性ダンパの仕様

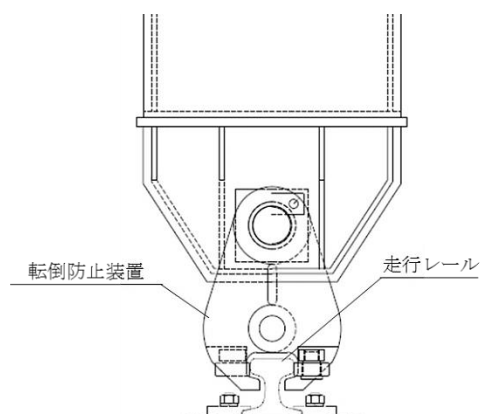
定格荷重 (kN)	全長 (mm)	外径 (mm)	質量 (kg)	許容荷重 (kN)	許容変位 (mm)
220	1535	224	533	300	100



第2-4図 単軸粘性ダンパの動作原理

### 2.2.3 転倒防止装置の構造

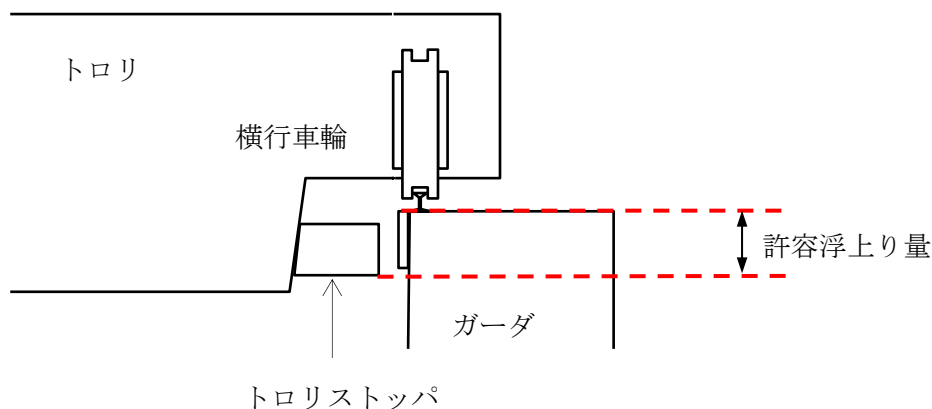
取水槽ガントリクレーン本体車輪部には、地震によって浮上りが発生した場合でも転倒しないように転倒防止装置が取り付けられており、浮上りによる脱線・転倒を防止する構造となっている。転倒防止装置の構造を第2-5図に示す。



第2-5図 転倒防止装置の構造

### 2.2.4 トロリストoppa

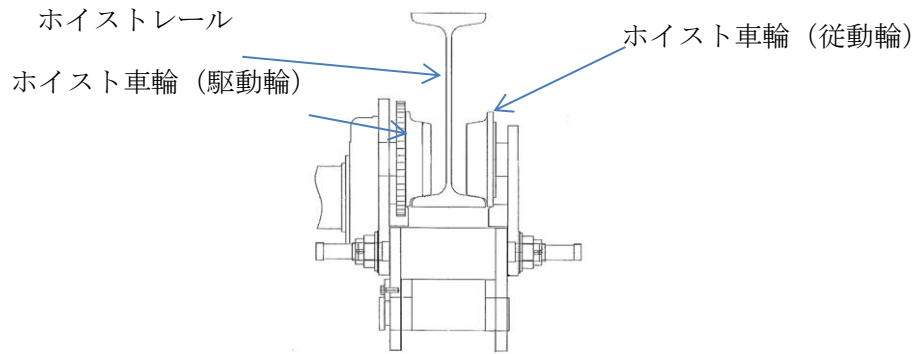
トロリの車輪部には、地震によって浮上りが発生した場合でも落下しないようにトロリストoppaを設置し、浮上りによる脱線・落下を防止する構造とする。トロリストoppaの概略構造を第2-6図に示す。



第2-6図 トロリストoppaの概略構造

### 2.2.5 ホイストレール・車輪

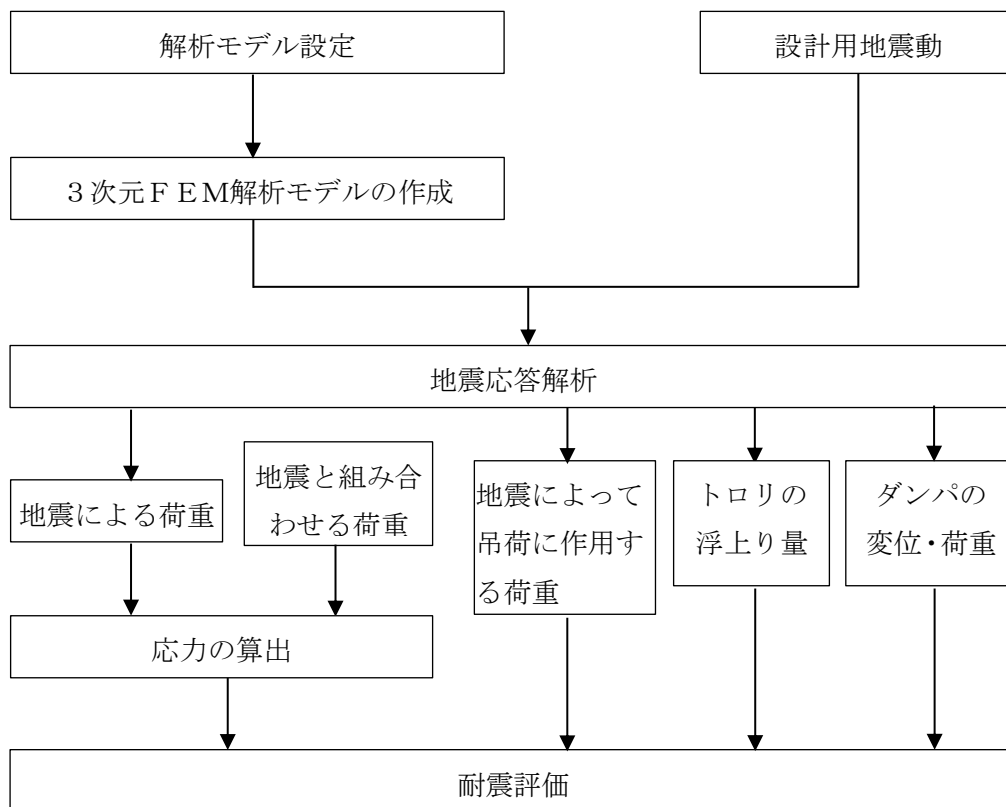
ホイストは、ホイスト車輪がホイストレールを挟み込むことにより懸架されている。ホイストレール及びホイスト車輪の構造を第2-7図に示す。



第 2-7 図 ホイストレール及び車輪の構造

### 2.3 評価方針

取水槽ガントリクレーンの耐震評価にあたっては、「2.2 構造の概要」にて示した取水槽ガントリクレーンの構造を踏まえ作成した「3.1 解析方法及び解析モデル」に示す解析モデルを用いて地震応答解析を行う。解析によって得られた結果を用いて「4. 耐震評価方法」に示す方法により応力、荷重等が許容限界以内であることを確認する。取水槽ガントリクレーンの耐震評価フローを第 2-8 図に示す。



第 2-8 図 取水槽ガントリクレーンの耐震評価フロー

### 2.4 適用規格

取水槽ガントリクレーンの設計には、以下の規格（以下「J E A G 4 6 0 1 等」という。）を適用する。

- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」 (社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984」(社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」(社) 日本電気協会
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2005年版(2007年追補版を含む)) <第I編 軽水炉規格> JSME S NC1-2005/2007」(日本機械学会)

### 3. 応答解析の方法

#### 3.1 解析方法及び解析モデル

取水槽ガントリクレーンの地震応答解析方法及び解析モデルについて以下に示す。

##### 3.1.1 解析方法の詳細

- (1) 取水槽ガントリクレーンは、地震時に浮上りが発生する可能性があり、浮上り状況を適切に評価するために3次元FEM解析モデルによる非線形時刻歴応答解析を適用する。取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用性については添付資料(2-2)に示す。
- (2) 取水槽ガントリクレーン本体及びトロリの車輪部はレール上に乗っており固定されていないため、すべりが発生する構造であることから、解析にあたっては車輪、レールのすべり状況を考慮する。
- (3) 吊具の評価を行う場合は、トロリに設置された主巻、ホイストレールに設置されたホイストにワイヤロープを模擬したトラス要素と吊荷を模擬した質点を設けて地震応答解析を実施し、吊具に発生する張力を算出し、これを用いて評価を行う。また、ワイヤロープについては、引張方向(鉛直下向き)にのみ荷重を受け、圧縮方向(鉛直上向き)の荷重を受けない設定とする。
- (4) 単軸粘性ダンパの減衰性能は、抵抗力が速度の0.1乗に比例するダッシュポットとばねを直列に接続したMaxwellモデルでモデル化する。単軸粘性ダンパのMaxwellモデルを第3-1図に示す。なお、単軸粘性ダンパの減衰性能とモデル化の詳細については、別紙-18「機器・配管系への制震装置の適用について」に示す。
- (5) 減衰定数については、既往の研究等によって妥当性が確認され、クレーン類に適用実績のある値として水平、鉛直方向ともに2.0%とし、レイリー減衰を設定する。レイリー減衰は、質量マトリクス及び剛性マトリクスの線形結合により、以下の式で表される。



$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$$

[C] : 減衰マトリクス  
[M] : 質量マトリクス  
[K] : 剛性マトリクス  
 $\alpha, \beta$  : 係数

係数 $\alpha, \beta$ は、取水槽ガントリクレーンの固有振動数において、適用する減衰定数とレイリー減衰が一致するように以下の式で求める。

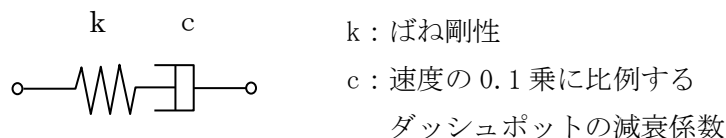
$$h = \frac{\alpha}{2\omega_n} + \frac{\beta\omega_n}{2}$$

$h$  : 減衰比

$\omega_n$  : 固有値解析により求められた $n$ 次モードの固有円振動数

具体的には、取水槽ガントリクレーンの固有値解析の結果から、NS方向の1次固有振動数(1.97Hz)及び鉛直方向の1次固有振動数(4.48Hz)において減衰比が2.0%となるように係数 $\alpha, \beta$ を設定する。設定したレイリー減衰の各固有振動数における減衰比を第3-2図に示す。

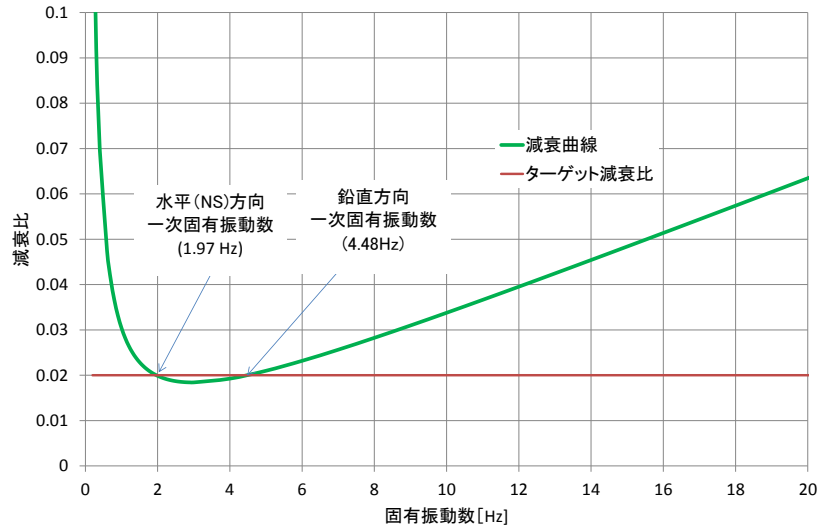
- (6) 解析コードはABAQUS (Ver. 6.11-1)を使用する。
- (7) 地震応答解析にあたっては、トロリ及びホイストの位置や吊荷の有無によって地震時の応答が変化する可能性があるため、トロリ及びホイストの位置並びに吊荷の有無を考慮し解析ケースを設定する(添付資料(2-3))。トロリとホイストを同時に使用することはないため、いずれかが吊荷有りの場合は、もう一方は待機位置で吊荷なしとする。なお、吊荷の質量はそれぞれの最大質量を設定する。解析ケースを第3-1表に示す。
- (8) 耐震評価に用いる寸法は公称値を使用する。



第3-1図 単軸粘性ダンパのMaxwellモデル

第3-1表 取水槽ガントリクレーンの解析ケース

ケース	トロリ		ホイスト	
	位置	吊荷有無 (質量)	位置	吊荷有無 (質量)
1	待機位置	なし	待機位置	なし
2	中央	有り (50t)	待機位置	なし
3	待機位置	なし	中央	有り (17t)



第3-2図 設定したレイリー減衰の各固有振動数における減衰比

### 3.1.2 解析モデル及び諸元

取水槽ガントリクレーンの解析モデルは、取水槽ガントリクレーン本体を質点及びはり要素でモデル化した3次元FEM解析モデルとする。取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデルの概要を第3-3図に示す。取水槽ガントリクレーン諸元及び解析モデル諸元を第3-2表及び第3-3表に示す。



第3-3図 取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル

第3-2表 取水槽ガントリクレーン諸元

部位	質量 (t)
取水槽ガントリクレーン本体 (脚, ガーダ等含む)	162.5
トロリ	17.8
吊具 (主巻ワイヤ, フック)	2.0
ホイスト	3.5
吊具 (ホイストワイヤ, フック)	0.7
吊荷 (最大荷重)	50
合計	236.5

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第3-3表 取水槽ガントリクレーン解析モデル諸元

部材	縦弾性係数 (MPa)	断面二次モーメント (mm <sup>4</sup> )		断面積 (mm <sup>2</sup> )
		Iz	Iy	
ガーダ	202000			
脚	202000			
ガーダ継ぎ	202000			
脚下部継ぎ	202000			

### 3.1.3 解析モデルの境界条件

走行車輪（駆動輪，従動輪）と走行レール，横行車輪（駆動輪，従動輪）と横行レール，ホイスト車輪（駆動輪，従動輪）とホイストレールにおける解析モデルの境界条件をそれぞれ第3-4表，第3-5表，第3-6表に示す。

走行車輪においては，EW方向（クレーン本体走行方向）及び鉛直方向について，それぞれすべり，浮上りを考慮しているため，非拘束条件としている。また，NS方向（クレーン本体走行方向に直交する方向）については，走行車輪と走行レールとの間隙（片側約13mm）が小さく，地震時には走行車輪と走行レールが接触して荷重が伝達されるため，すべりを生じない拘束条件としている。

横行車輪においては，NS方向（トロリ横行方向）及び鉛直方向について，それぞれすべり，浮上りを考慮して非拘束条件としている。また，EW方向（トロリ横行方向に直交する方向）については，横行車輪と横行レールの間隙（片側約9mm）が小さく，地震時には横行車輪と横行レールが接触して荷重が伝達されるため，すべりを生じない拘束条件としている。

ホイスト車輪においては，NS方向（ホイスト横行方向）及び鉛直方向について，それぞれすべり，浮上りを考慮して非拘束条件としている。また，EW方向（ホイスト横行方向に直交する方向）については，ホイスト車輪とホイストレールの間隙（片側約5mm）が小さく，地震時にはホイスト車輪とホイストレールが接触して荷重が伝達されるため，すべりを生じない拘束条件としている。

走行車輪，横行車輪及びホイスト車輪の構造概要を第3-4図に示す。

第3-4表 境界条件（走行車輪（クレーン本体車輪）と走行レール）

部位 <sup>注1</sup>	NS方向 (クレーン本体走行方向の 直交方向)	EW方向 (クレーン本体走行方向)	鉛直方向
駆動輪	【拘束】 走行レールによる 拘束	【非拘束】 すべり考慮 $\mu = 0.3$	【非拘束】 浮上り考慮
従動輪		【非拘束】 追従による移動 $\mu = 0$	

注1：部位については、第2-3添図参照

$\mu$ ：摩擦係数

第3-5表 境界条件（横行車輪（トロリ車輪）と横行レール）

部位 <sup>注1</sup>	NS方向 (トロリの横行方向)	EW方向 (トロリ横行方向の 直交方向)	鉛直方向
駆動輪	【非拘束】 すべり考慮 $\mu = 0.3$	【拘束】 横行レールによる 拘束	【非拘束】 浮上り考慮
従動輪	【非拘束】 追従による移動 $\mu = 0$		

注1：部位については、第2-3添図参照

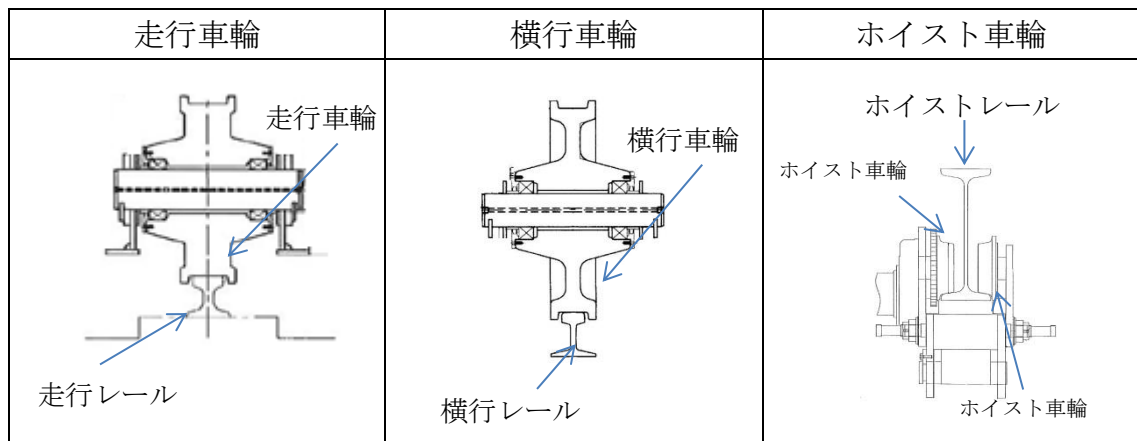
$\mu$ ：摩擦係数

第3-6表 境界条件 (ホイスト車輪とホイストレール)

部位 <sup>注1</sup>	NS方向 (ホイストの横行方向)	EW方向 (ホイスト横行方向の 直交方向)	鉛直方向
駆動輪	【非拘束】 すべり考慮 $\mu = 0.3$	【拘束】 ホイストレール による拘束	【非拘束】 浮上り考慮
従動輪	【非拘束】 追従による移動 $\mu = 0$		

注1：部位については、第2-7図参照

$\mu$ ：摩擦係数



第3-4図 走行車輪，横行車輪及びホイスト車輪の構造概要図

### 3.2 入力地震動

取水槽ガントリクレーンの地震応答解析に適用する地震動に係る事項を以下に示す。

#### (1) 適用する地震動

取水槽ガントリクレーンの地震応答解析に適用する地震動は基準地震動  $S_s$  とし、取水槽ガントリクレーン走行レールの設置位置を考慮して取水槽最上部の節点より求められる応答加速度時刻歴を適用する。取水槽のNS断面の地震応答解析モデルを第3-5図に示す。この解析モデルより求めた基準地震動  $S_s - D$  のNS方向、鉛直方向の入力加速度時刻歴波形を第3-6図、第3-7図に、床応答スペクトルを第3-8図に示す。なお、地震応答解析においては、南北レール位置の床応答スペクトルがほぼ同等のため、取水槽ガントリクレーンの固有周期における応答加速度が大きい南側レール位置（節点10095）の加速度時刻歴を用いる。また、取水槽EW断面の地震応答解析モデルにより求めたEW方向の入力加速度時刻歴波形を第3-9図に示す。

(2) 地震動の入力方向

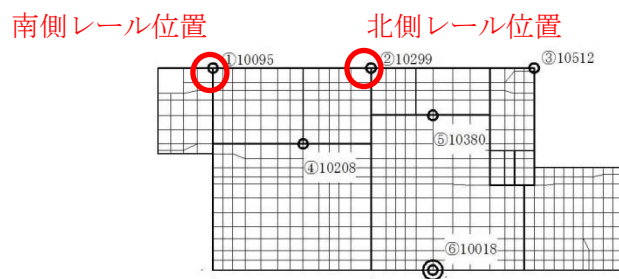
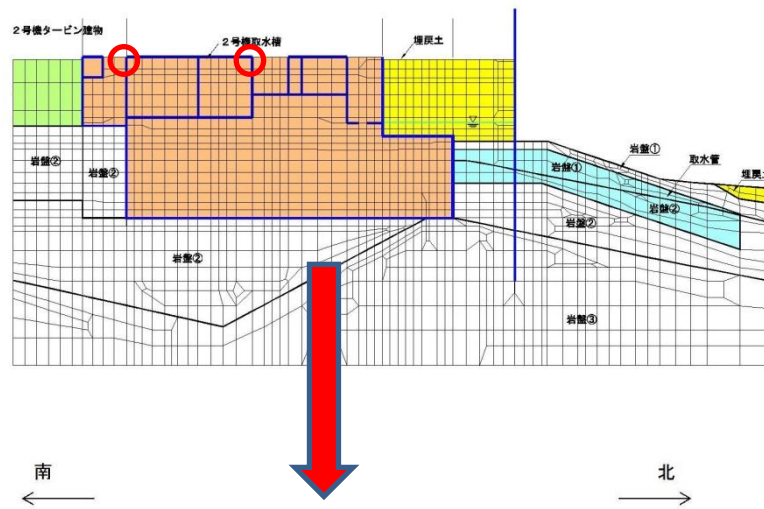
水平2方向及び鉛直方向の3方向同時入力（NS方向，EW方向，鉛直方向）により評価を実施する。

なお，クレーン本体の走行車輪と走行レールは固定されていないため，走行方向においては，各時刻における最大静止摩擦力以上の地震慣性力が加わった場合，クレーン本体は走行レール上をすべる。

(3) 地盤物性等の不確かさに対する検討方針

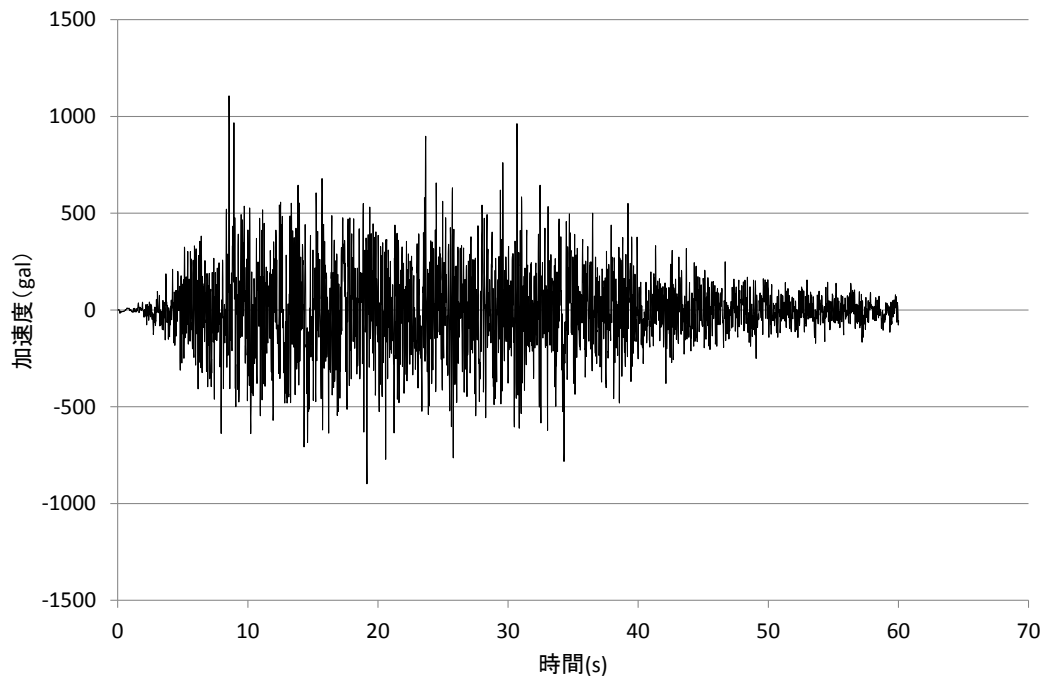
スペクトルモーダル解析では，床応答加速度は地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動を考慮して周期方向に±10%拡幅した設計用床応答曲線を用いる。取水槽ガントリクレーンの地震応答解析では，設計用床応答曲線を用いない時刻歴応答解析を採用するが，制震装置により取水槽ガントリクレーンに付与される減衰が大きくなるため，地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動の影響は軽微であると考えられる。詳細設計段階において，ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III，DIVISION1—NONMANDATORY APPENDIX N（ARTICLE N-1222.3 Time History Broadening）に規定された手法を踏まえ，影響を確認する。

Time History Broadening の概念を第3-10 図に示す。

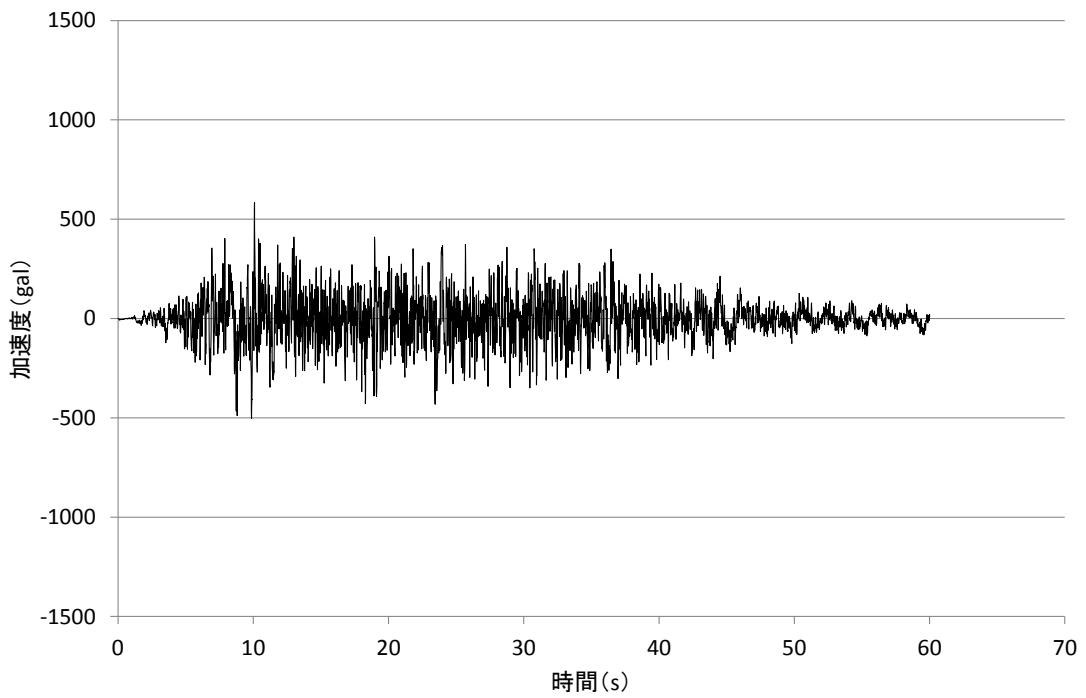


第 3-5 図 取水槽の地震応答解析モデル図 (N S 断面)



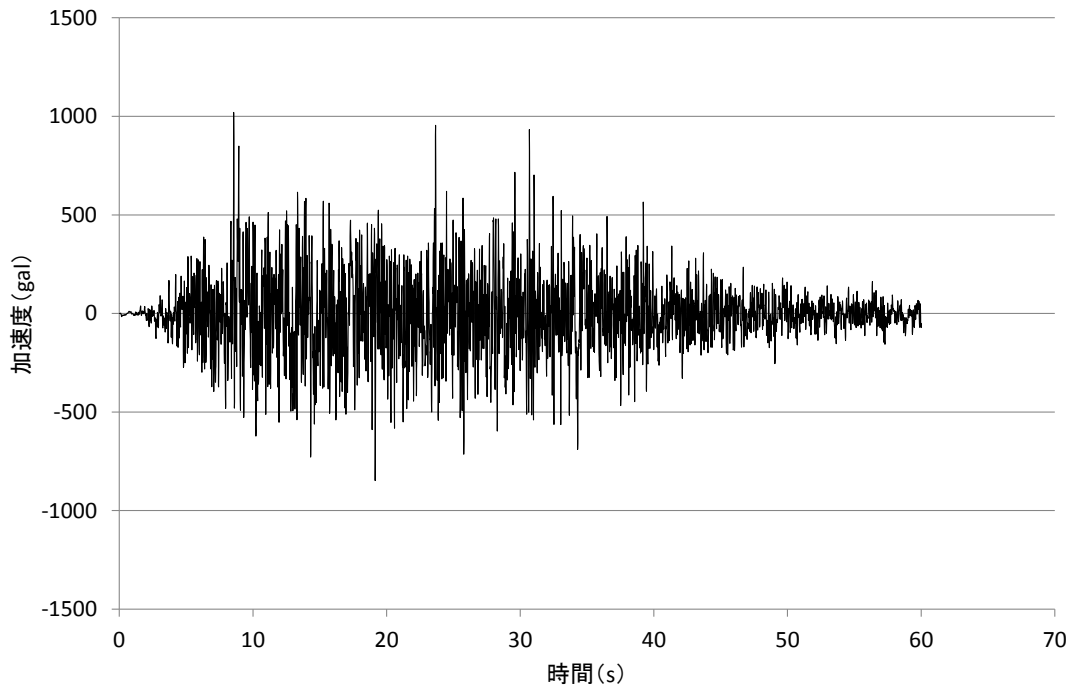


水平方向（N S）

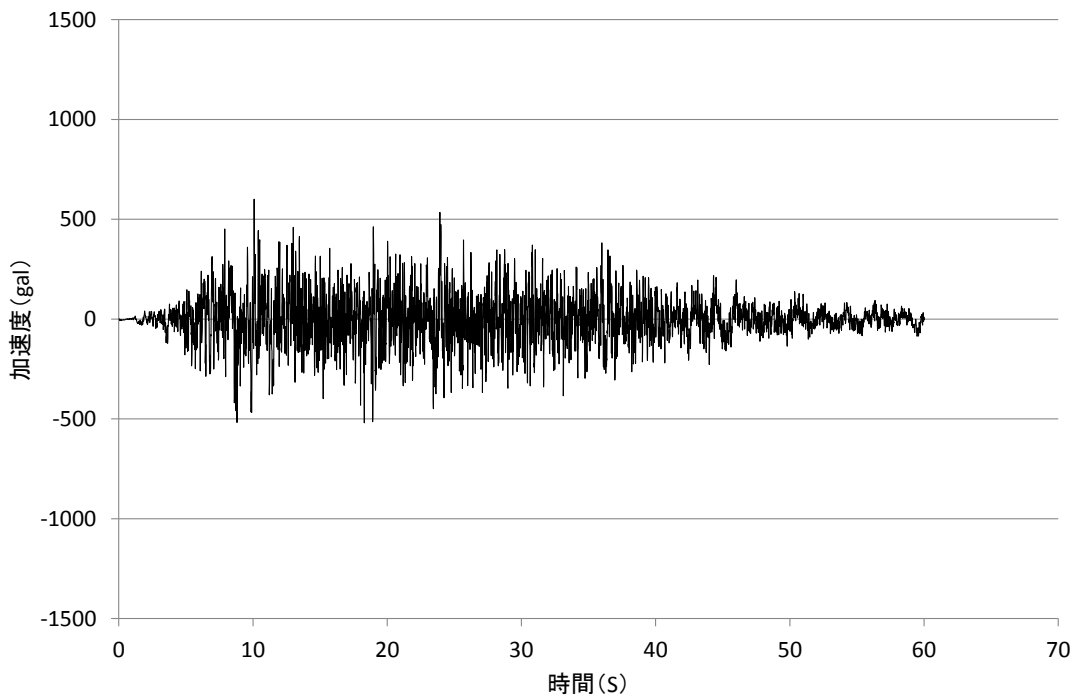


鉛直方向

第3-6図 入力加速度時刻歴波形  
 (S s - D 南側レール位置 (節点 10095))

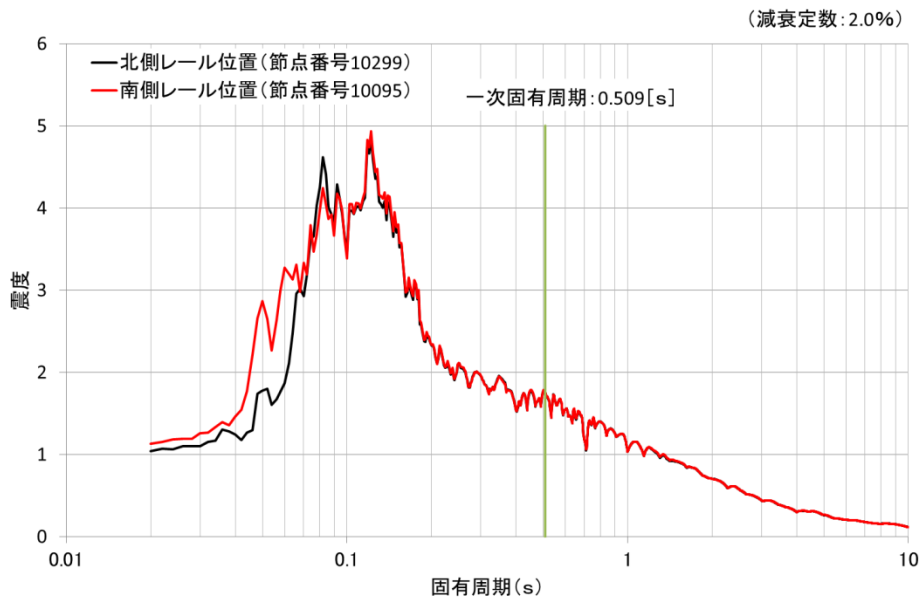


水平方向 (N S)

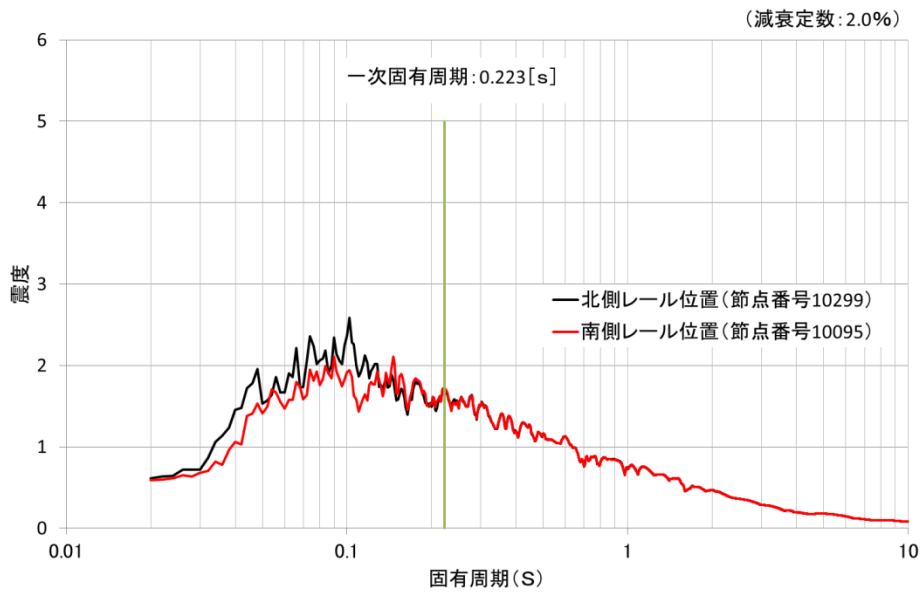


鉛直方向

第 3-7 図 入力加速度時刻歴波形  
(S s - D 北側レール位置 (節点 10299))

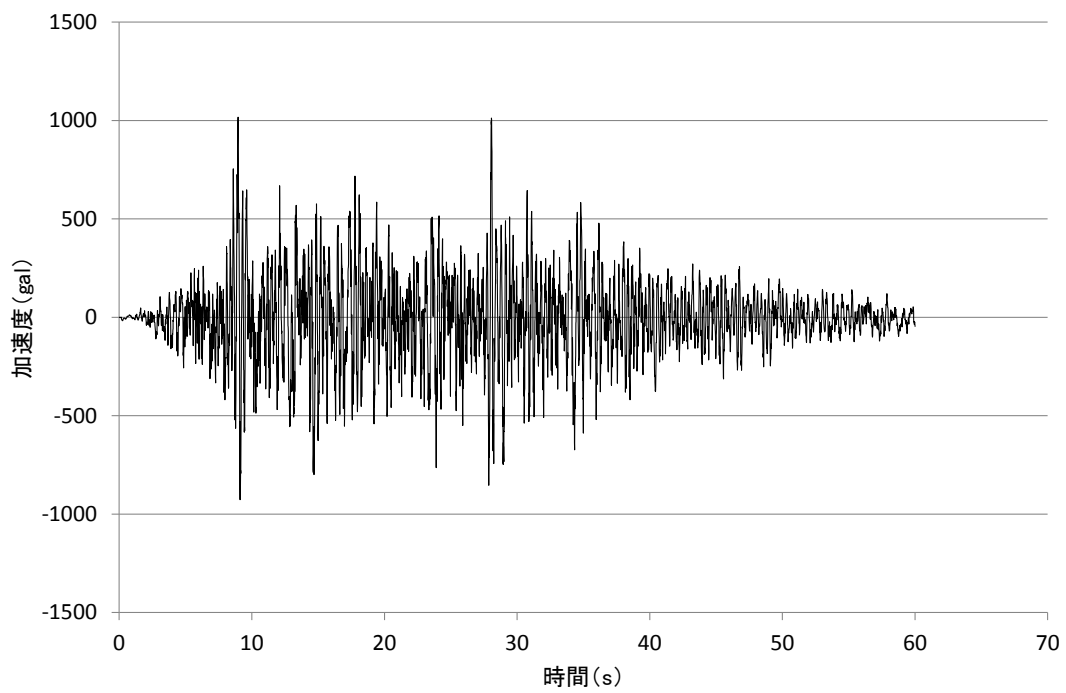


水平方向 (NS)

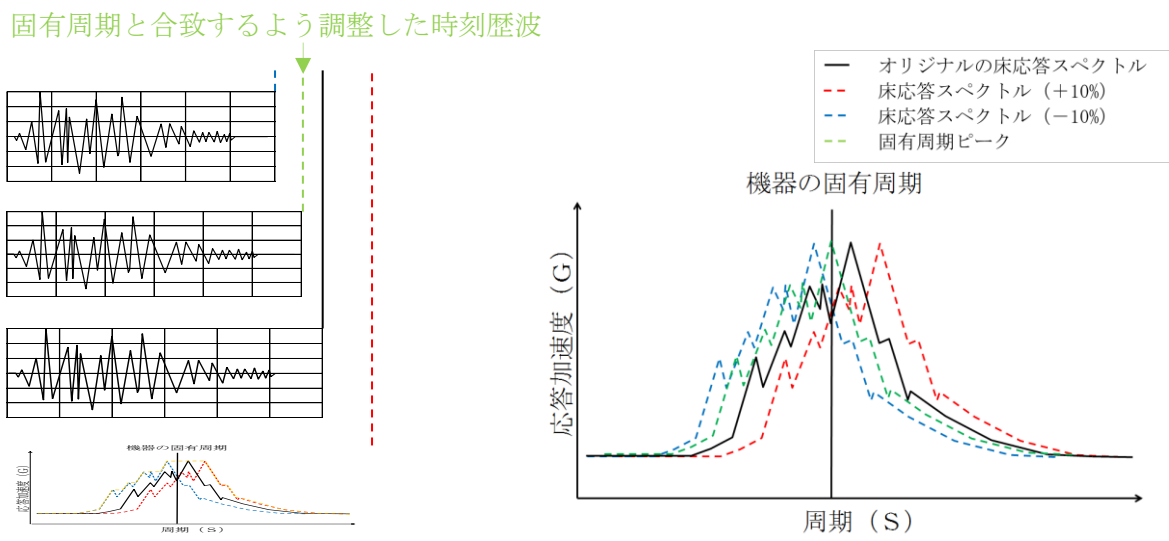
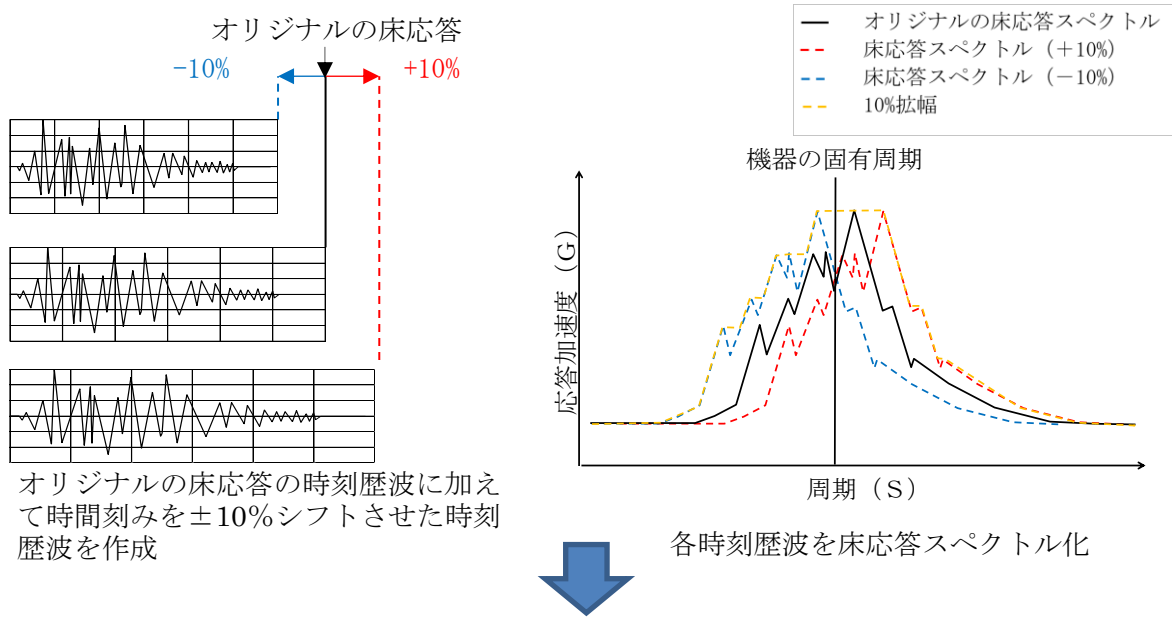


鉛直方向

第 3-8 図 南北レール位置における床応答スペクトル



水平方向 (EW)  
第 3-9 図 入力加速度時刻歴波形 (S s - D)



機器の固有周期が床応答スペクトルピークの谷間に存在する場合、ピークと合うような時刻歴波を作成し、時刻歴応答解析を実施する。

第3-10図 Time History Broadening の概念図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 4. 耐震評価の方法

### 4.1 評価方針

取水槽ガントリクレーンは、「3. 応答解析の方法」に記載の地震応答解析によって得られた各部位の荷重及び浮上り量を用いて評価する。各部位の応力は荷重を用いて公式により計算する。応力の許容限界については JSME S NC1-2005/2007 及び JEAG4601 を参照し、その他の支持構造物の許容応力を適用する。評価に適用する温度条件は、設備の使用環境を考慮して設定する。また、地震応答解析により算出したトロリの浮上り量、単軸粘性ダンパの変位及び荷重、並びに吊具の荷重がそれぞれの許容限界以下であることを確認する。

### 4.2 荷重の組合せ

取水槽ガントリクレーンの耐震評価にあたっては、地震荷重と組み合わせる荷重として以下を考慮する。

- ・自重
- ・積雪荷重

### 4.3 評価対象部位

取水槽ガントリクレーンの耐震評価は、取水槽ガントリクレーン運転時において本体の損傷、転倒及び吊荷の落下により原子炉補機海水ポンプ等の上位クラス施設が損傷することを防止するため、以下を評価対象部位として選定し、評価を実施する。

#### (1) 取水槽ガントリクレーン本体

取水槽ガントリクレーン本体については、ガーダ、脚、ガーダ継ぎ、下部脚継ぎの応力評価を実施する。

#### (2) 転倒防止装置、走行レール、トロリ

取水槽ガントリクレーンの本体の転倒を防止する転倒防止装置の応力評価を実施する。また、走行車輪からクレーン走行方向と直交する方向の荷重並びに転倒防止装置から上方向の荷重を受ける走行レールの応力評価を実施する。なお、トロリストoppaとホイストレールについては、詳細設計中のため、詳細設計段階において評価を実施する。

トロリの落下防止の観点から、トロリの浮上り量を算出し、許容浮上り量と比較する。

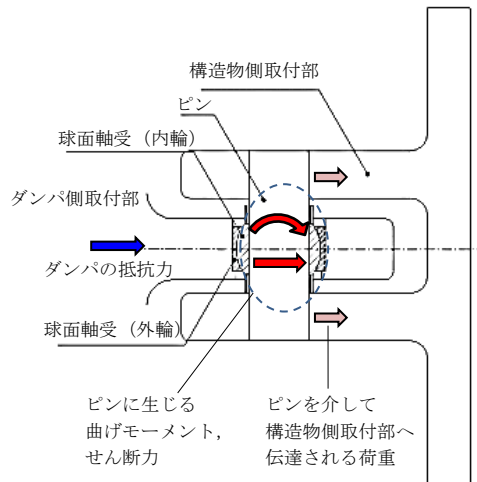
#### (3) 吊具

吊具については、トロリ主巻のワイヤ及びフックの荷重評価を実施する。なお、ホイストワイヤ及びフックについては詳細設計中のため、詳細設計段階において評価を実施する。

(4) 単軸粘性ダンパ

単軸粘性ダンパについては、ダンパに生じる最大荷重、最大変位を許容限界と比較する。

また、取付部であるブレースとクレビス部の応力評価を実施する。クレビス部については、断面積が小さくダンパの抵抗力により曲げモーメントとせん断力を受けるピンを評価部位とする（第4-1図）。



第4-1図 クレビス部の荷重伝達

4.4 許容限界

4.4.1 許容応力

取水槽ガントリクレーンの各部位の評価に用いる許容応力を第4-1表に示す。

第4-1表 許容応力（その他の支持構造物）

許容応力状態	許容応力 (ボルト以外)				
	一次応力				
IVAS	引張	せん断	圧縮	曲げ	支圧
	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_c^*$	$1.5 \cdot f_b^*$	$1.5 \cdot f_p^*$

注記：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対しても評価を行う。

$f_t, f_s, f_c, f_b, f_p$ は、 $F$ 値を $F = \min[S_y, 0.7S_u]$ として、 $F$ 値より算出した値

$f_t^*, f_s^*, f_c^*, f_b^*, f_p^*$ は、上記 $F$ 値の $S_y$ を $1.2S_y$ と読み替え算出した値

$S_y$ ：材料の設計降伏点

$S_u$ ：材料の設計引張強さ

#### 4.4.2 許容浮上り量

トロリ（横行車輪）の許容浮上り量を第4-2表に示す。

第4-2表 トロリの許容浮上り量

	許容浮上り量 (mm)
トロリ（横行車輪）	150 <sup>注1</sup>

注1：トロリストッパの形状設計中のため暫定値

#### 4.4.3 吊具の許容荷重

トロリ主巻のワイヤ及びフックの許容荷重を第4-3表に示す。

第4-3表 吊具の許容荷重

	許容荷重 (kN)
主巻ワイヤ	$4.08 \times 10^3$
主巻フック	$4.98 \times 10^3$

#### 4.4.4 単軸粘性ダンパの許容限界

単軸粘性ダンパの許容限界を第4-4表に示す。

第4-4表 単軸粘性ダンパの許容限界

許容変位	許容荷重
100mm	300kN

#### 4.5 各部の評価方法

##### 4.5.1 取水槽ガントリクレーン本体，転倒防止装置，走行レール，単軸粘性ダンパブレース及び単軸粘性ダンパクレビス部の応力評価方法

###### (1) 引張応力

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A_t}$$

$$\sigma_t \leq f_t$$

$F_t$ ：部材に発生する引張荷重

$A_t$ ：引張荷重が作用する断面積

$\sigma_t$ ：部材に発生する引張応力

$f_t$ ：部材の許容引張応力 (=1.5・ $f_t^*$ )



(2) 圧縮応力

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A_c}$$

$$\sigma_c \leq f_c$$

$F_c$  : 部材に発生する圧縮荷重

$A_c$  : 圧縮荷重が作用する断面積

$\sigma_c$  : 部材に発生する圧縮応力

$f_c$  : 部材の許容圧縮応力 (座屈) ( $=1.5 \cdot f_c^*$ )

ここで、 $f_c$  の算出方法を示す。

a. 圧縮材の細長比が限界細長比以下の場合

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu}$$

$f_c$  : 許容圧縮応力

$\lambda$  : 圧縮材の有効細長比

$$\lambda = \frac{l_k}{i}$$

$l_k$  : 座屈長さ

$i$  : 座屈軸についての断面二次半径

$\Lambda$  : 限界細長比

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}$$

$F$  : 材料の設計降伏点, 設計引張強さにより定まる値

$E$  : 材料の縦弾性係数

$\nu$  : 以下の式により計算した値

$$\nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

b. 圧縮材の細長比が限界細長比を超える場合の場合

$$f_c = 0.277F \left( \frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2$$

$\lambda$  及び  $\Lambda$  : a. と同様

許容圧縮応力の算定諸元を第 4-5 表に示す。

第4-5表 許容圧縮応力の算出諸元

評価部位	座屈長さ			断面二次半径 選定断面
	対象長さ $l$	回転に対する 条件*	座屈長さ $l_k$	
ブレース	ダンパと ブレースの 合計長さ	両端自由	$l$	ブレース部の 断面
脚	脚長さ	1端自由 他端拘束	$0.8l$	脚断面 (最小断面)
ガーダ継ぎ	ガーダ継ぎ長さ	両端拘束	$0.65l$	ガーダ継ぎ 断面
脚下部継ぎ	脚下部継ぎ長さ	両端拘束	$0.65l$	脚下部継ぎ 断面

※移動に対する条件は全て拘束とした。

(3) 曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

$$\sigma_b \leq f_b$$

$M$  : 部材に発生する曲げモーメント

$Z$  : 曲げモーメントが作用する断面の断面係数

$\sigma_b$  : 部材に発生する曲げ応力

$f_b$  : 部材の許容曲げ応力 ( $=1.5 \cdot f_b^*$ )

(4) せん断応力

$$\tau = \frac{Q}{A_s}$$

$$\tau \leq f_s$$

$Q$  : 部材に発生するせん断荷重

$A_s$  : せん断荷重が作用する断面積

$\tau$  : 部材に発生するせん断応力

$f_s$  : 部材の許容せん断応力 ( $=1.5 \cdot f_s^*$ )

(5) 組合せ応力

引張応力と曲げ応力の組合せ応力

$$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{f_t} \leq 1$$

圧縮応力と曲げ応力の組合せ応力

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1$$

垂直応力とせん断応力の組合せ応力

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \leq f_t$$

$\sigma_x, \sigma_y$  : 互いに直交する垂直応力

$\tau_{xy}$  :  $\sigma_x, \sigma_y$  の作用する面内のせん断応力

(6) 支圧応力

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_p}$$

$$\sigma_p \leq f_p$$

$F_p$  : 部材に発生する支圧荷重

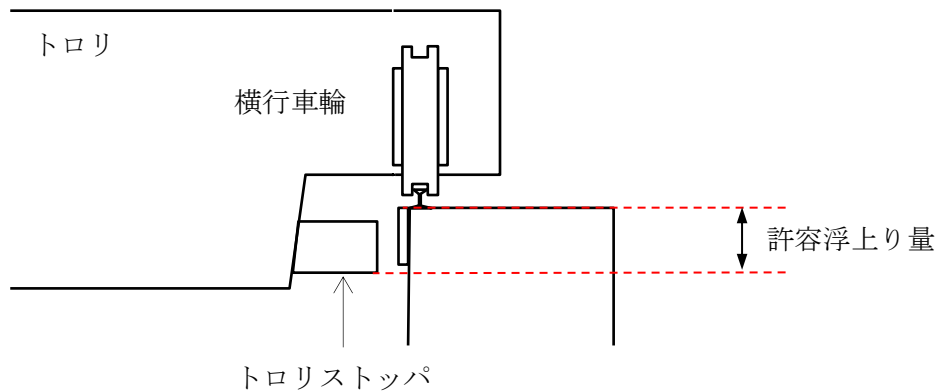
$A_p$  : 支圧荷重が作用する断面積

$\sigma_p$  : 部材に発生する支圧応力

$f_p$  : 部材の許容支圧応力 ( $=1.5 \cdot f_p^*$ )

4.5.2 トロリの浮上り評価方法

トロリに浮上りが生じても落下しないことを評価するため、地震応答解析にて算出したトロリの浮上り量が許容浮上り量以下であることを確認する。許容浮上り量の概念図を第4-2図に示す。



第4-2図 許容浮上り量の概念図

#### 4.5.3 吊具の荷重評価方法

吊具の荷重評価では、地震応答解析によって得られる吊具部分の最大荷重が許容荷重以下であることを確認する。

主巻のワイヤロープに作用する荷重は、ロープに取り付けられたエコライザシーブ（平衡装置）とクラブシーブ（滑車）の回転により自動的に荷重を釣り合い状態に保つため、12本掛けのワイヤロープに均等に荷重が作用するものとして評価する。ホイストのワイヤロープについても同様に評価する。

ワイヤロープは長さを長く設定すると固有周期が大きくなり、短く設定すると固有周期が小さくなるという特徴を踏まえ、地震応答との関係から、吊具に対して応答が厳しくなる最大吊り上げ時のワイヤロープ長さでの地震応答解析結果を用いて荷重評価を実施する。

#### 4.5.4 単軸粘性ダンパの変位及び荷重評価方法

単軸粘性ダンパの変位及び荷重評価は、地震応答解析によって得られる最大変位及び最大荷重が許容限界以下であることを確認する。

## 5. 評価条件・評価結果

### 5.1 評価条件

地震応答解析の条件を第5-1表に示す。入力地震波として、取水槽ガントリクレーンの固有振動数において床応答加速度の大きい基準地震動 $S_s-D$ を用い、解析ケースは吊荷荷重が最大となる第3-1表のケース2とした。また、ダンパ性能のばらつきとして $\pm 20\%$ を考慮し、ダンパ性能標準、 $+20\%$ 、 $-20\%$ の3ケースを実施した。

第5-1表 応答解析の条件

項目	内容
入力地震波	基準地震動 $S_s-D$
取水槽ガントリクレーンの解析ケース	トロリ位置中央 吊荷あり (50t) ホイスト待機位置 吊荷なし (第3-1表のケース2)
ダンパ性能	ダンパ性能標準, $\pm 20\%$ (3ケース)

### 5.2 評価結果

固有値解析の結果を第5-2表に、振動モードを第5-1図に示す。なお、固有値解析は、単軸粘性ダンパを初期剛性と等しいばねに置き換えて実施した。

耐震評価の結果を第5-3表に示す。各評価部位の発生値が許容限界を下回っていることから、取水槽ガントリクレーンは、島根2号炉の基準地震動 $S_s$ に対して損傷・落下せず上位クラス施設へ波及的影響を及ぼさないことの見通しを得た。なお脚において裕度が比較的小さい部位が存在するが、当該部位は断面の補強を計画しており、詳細設計を反映して、追加の補強を検討する。裕度が小さい脚下部の補強について、第5-2図に示す。

詳細設計段階においては、第3-1表のすべてのケースについて、基準地震動 $S_s$ の5波に対する耐震評価を実施して、地震による波及的影響を及ぼさないことを確認する。評価の際には、地盤の不確かさも考慮し、時刻歴応答解析の保守性に配慮した詳細な検討を行う。

第5-2表 取水槽ガントリクレーンの一次固有周期

水平方向	鉛直方向
0.509s (1.97Hz)	0.223s (4.48Hz)



水平一次モード

鉛直一次モード

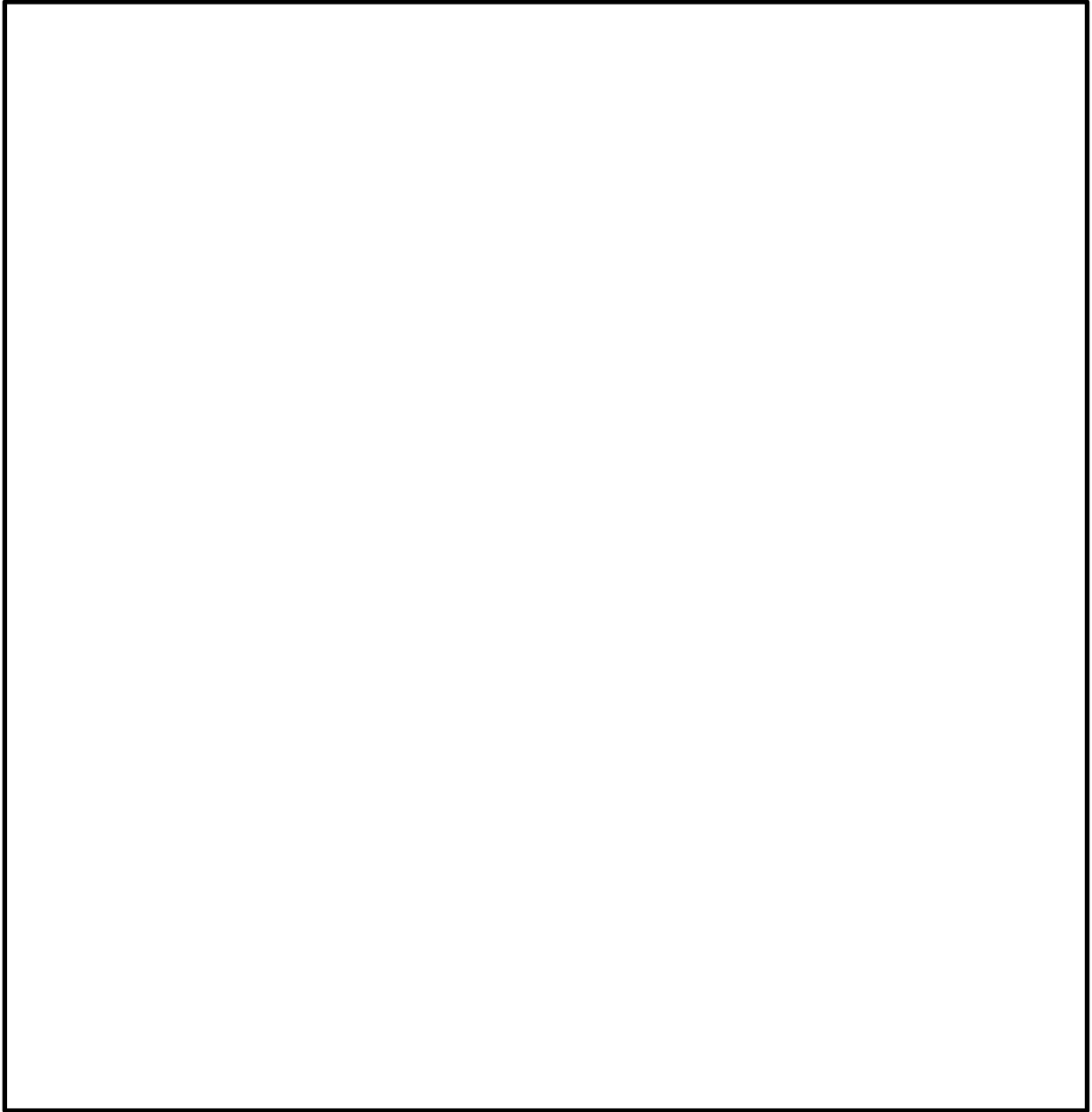
第5-1図 振動モード図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第5-3表 取水槽ガントリクレーンの耐震評価結果

評価部位		評価項目	発生値	許容限界
取水槽ガントリクレーン本体	ガーダ	曲げ応力	111 (MPa)	280 (MPa)
		せん断応力	29 (MPa)	161 (MPa)
	脚	引張応力	4 (MPa)	280 (MPa)
		圧縮応力	43 (MPa)	226 (MPa) ※
		曲げ応力	214 (MPa)	280 (MPa)
		せん断応力	61 (MPa)	161 (MPa)
		組合せ応力 (垂直+せん断)	253 (MPa)	280 (MPa)
		組合せ応力 (曲げ+圧縮)	0.93 (-)	1 (-)
	ガーダ継ぎ	引張応力	4 (MPa)	280 (MPa)
		圧縮応力	5 (MPa)	279 (MPa) ※
		曲げ応力	101 (MPa)	280 (MPa)
		組合せ応力 (曲げ+圧縮)	0.36 (-)	1 (-)
	脚下部継ぎ	引張応力	11 (MPa)	280 (MPa)
		圧縮応力	22 (MPa)	263 (MPa) ※
		曲げ応力	219 (MPa)	280 (MPa)
		せん断応力	36 (MPa)	161 (MPa)
		組合せ応力 (垂直+せん断)	229 (MPa)	280 (MPa)
		組合せ応力 (曲げ+圧縮)	0.81 (-)	1 (-)
転倒防止装置		組合せ応力	70 (MPa)	357 (MPa)
走行レール		組合せ応力	360 (MPa)	546 (MPa)
トロリ		浮上り	2.8 (mm)	150 (mm)
吊具	ワイヤロープ	荷重	$1.35 \times 10^3$ (kN)	$4.08 \times 10^3$ (kN)
	主巻フック	荷重	$1.35 \times 10^3$ (kN)	$4.98 \times 10^3$ (kN)
単軸粘性ダンパ	本体	変位	41 (mm)	100 (mm)
		荷重	261 (kN)	300 (kN)
	ブレース	圧縮応力	18 (MPa)	74 (MPa) ※
	クレビス部 (ピン)	曲げ応力	264 (MPa)	651 (MPa)
		せん断応力	93 (MPa)	375 (MPa)
組合せ応力 (垂直+せん断)		309 (MPa)	651 (MPa)	

※座屈評価

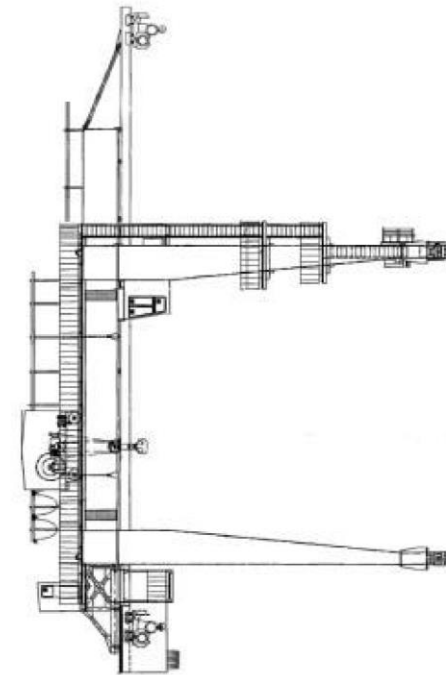
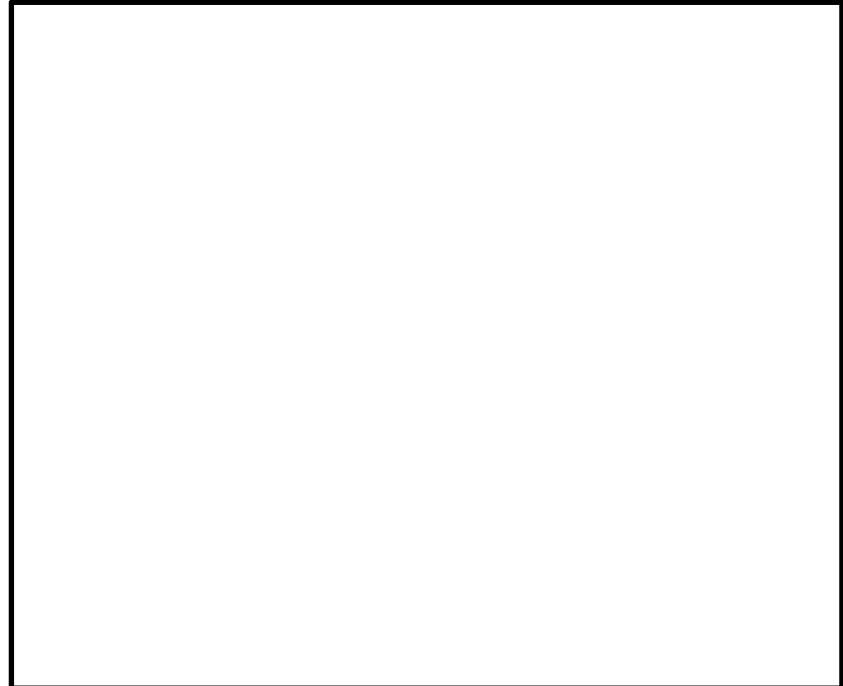


第5-2 図 裕度が小さい脚下部の補強計画

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

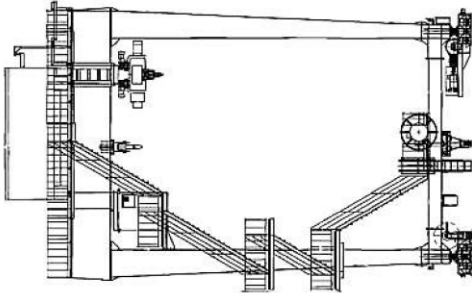



添付資料(2-1) 取水槽ガントリクレーンの改造箇所

取水槽ガントリクレーンの改造箇所 (1/2)	改造前	改造後	改造内容 単軸粘性ダンパ の設置, 脚下部の 補強
			

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

取水槽ガントリクレーンの改造箇所 (2/2)

改造前	改造後	改造内容
		脚下部継ぎの補強, ホイストの交換

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 添付資料(2-2) 取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用性

### 1. 概要

取水槽ガントリクレーンの耐震評価にあたっては、当該クレーンがレール上に固定されていないという構造上の特徴を踏まえ、水平方向へのすべりと鉛直方向の車輪部の浮上りを考慮した解析モデルによる非線形時刻歴応答解析を適用する。構造図を第2-1添図に、解析モデルの概要を第2-2添図に示す。

本資料では、先行審査実績のあるクレーン類と構造、評価方法等の比較を行い、取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用性を示す。



第2-1添図 取水槽ガントリクレーン構造図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 第2-2添図 非線形時刻歴応答解析に用いる解析モデル概要図

### 2. 先行審査実績のあるクレーン類との構造比較

取水槽ガントリクレーンに非線形時刻歴応答解析を適用するにあたって、クレーン類に非線形時刻歴応答解析を適用した先行審査実績として大間1号炉原子炉建屋天井クレーン（以下「原子炉建屋天井クレーン」という。）及び設置変更許可審査中である女川2号炉海水ポンプ室門型クレーン（以下「海水ポンプ室門型クレーン」という。）があるため、それぞれの構造や特徴を比較し、適用性について確認する。

#### 2.1 全体構造について

##### (1) 構造概要

原子炉建屋天井クレーンは、トロリ式天井クレーンに分類されるものであり、2本のレール上を走行する方式である。走行レール間はガーダと呼ばれる部材が渡された桁構造で、ガーダ下部に設けられている車輪を介して走行レール上に設置されている。また、ガーダ上部には横行レールとトロリが設置され、吊荷の吊上げ、吊下げ及び移動が行われる。

海水ポンプ室門型クレーン及び取水槽ガントリクレーンは、トロリ式橋型クレーンに分類されるものであり、2本のレール上を走行する方式である。走行レール間はトロリ式天井クレーンと同様にガーダが渡された桁構造となっている。ガーダ下部には脚が設けられており、この脚の下部の車輪を介して走行レール上に設置されている。ガーダ上部にはトロリ式天井クレーンと同じく横行レールとトロリが設置され、吊荷の吊上げ、吊下げ及び移動が行われる。

これらの設備の概要図について第2-3添図に示す。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## (2) 全体構造

原子炉建屋天井クレーンの本体構造はガーダ、サドルと呼ばれる鋼構造物が主体となっている。トロリ本体も同様に鋼構造物で構成されている。ガーダは走行レール上に、トロリは横行レール上とともに4箇所にある車輪を介して固定されずに設置されており、地震時には水平方向にすべり、鉛直方向に浮上りが発生する可能性がある。

海水ポンプ室門型クレーンの本体構造はガーダ及び脚と呼ばれる鋼構造物が主体となっている。トロリ本体も同様に鋼構造物で構成されている。脚は走行レール上に、トロリは横行レール上とともに4箇所にある車輪を介して固定されずに設置されており、地震時には水平方向にすべり、鉛直方向に浮上りが発生する可能性がある。

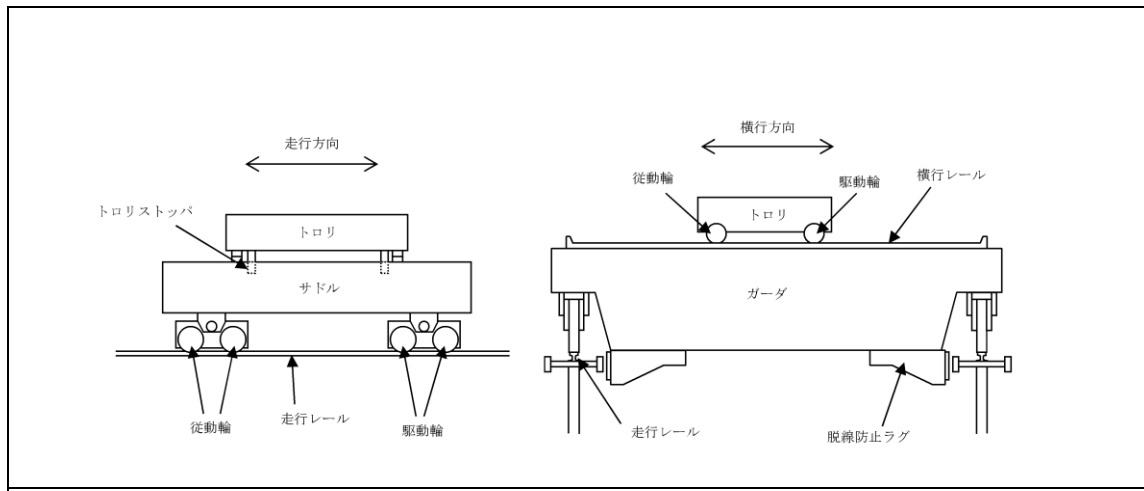
取水槽ガントリクレーンの本体構造はガーダ及び脚と呼ばれる鋼構造物が主体となっている。トロリ本体も同様に鋼構造物で構成されている。脚は走行レール上に、トロリは横行レール上とともに4箇所にある車輪を介して固定されずに設置されている。取水槽ガントリクレーンは、走行方向の駆動輪、従動輪の間に転倒防止装置が設置されているが、地震時には原子炉建屋天井クレーンと同様、車輪は水平方向にすべり、鉛直方向に浮上りが発生する可能性がある。

## (3) 構造の特徴比較

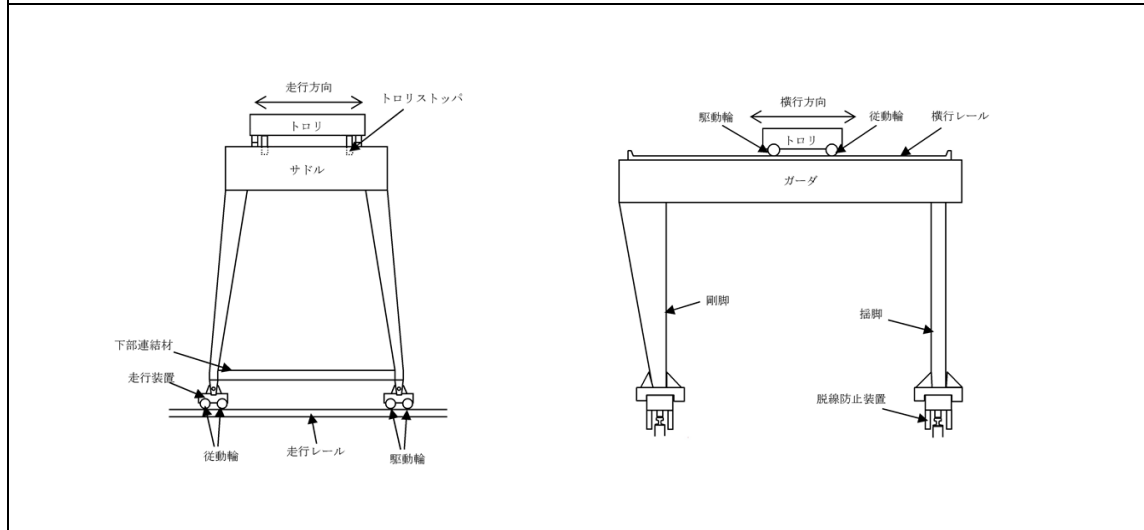
原子炉建屋天井クレーン、海水ポンプ室門型クレーン及び取水槽ガントリクレーンの構造について特徴を比較した結果を第2-1添表に示す。

原子炉建屋天井クレーンと取水槽ガントリクレーンの違いは脚及び単軸粘性ダンパの有無が挙げられる。また、原子炉建屋天井クレーンでは、レールが破損した場合でも脱線防止ラグがガーダに当たって脱線を防ぐ構造であるのに対し、取水槽ガントリクレーンの転倒防止装置では、レールを掴むことで転倒を防止する構造になっている点が異なっている。なお、取水槽ガントリクレーンの転倒防止装置の構造は、伊方3号炉海水ピットクレーンの浮上り防止装置と同等の構造である。それ以外の構造物としての特徴は類似しており、レールと4箇所の車輪が固定されずに接触し、水平方向にすべり、鉛直方向に浮上りが発生する挙動も両クレーンで類似している。

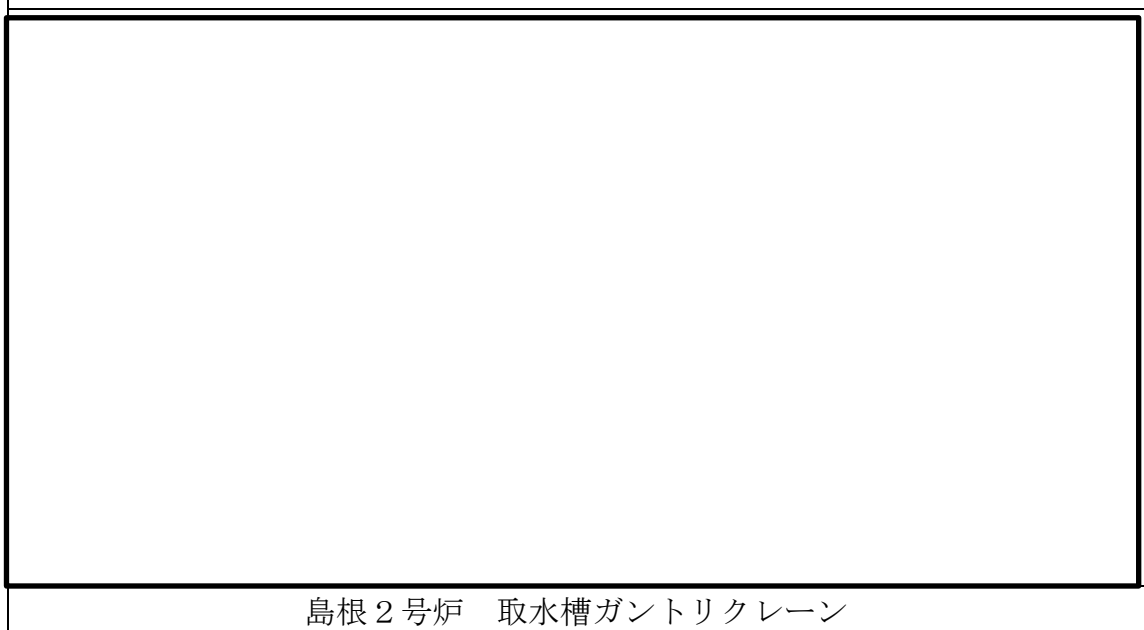
海水ポンプ室門型クレーンと取水槽ガントリクレーンの違いは単軸粘性ダンパの有無が挙げられる。また、海水ポンプ室門型クレーンは、原子炉建屋天井クレーンの脱線防止ラグと同等の構造の脱線防止装置を設置しており、取水槽ガントリクレーンとは構造が異なっている。それ以外の構造物としての特徴は類似しており、ともに鉛直方向に浮上る可能性がある。



大間1号炉 原子炉建屋天井クレーン



女川2号炉 海水ポンプ室門型クレーン



島根2号炉 取水槽ガントリクレーン

第2-3添図 大間1号炉原子炉建屋天井クレーン，女川2号炉海水ポンプ室門型クレーン及び島根2号炉取水槽ガントリクレーンの構造概要図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第2-1添表 構造の特徴比較

	大間1号炉 原子炉建屋天井 クレーン	女川2号炉 海水ポンプ室門型 クレーン	島根2号炉 取水槽ガントリ クレーン
構造概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2本のレール間を跨ぐ桁構造</li> <li>・ガーダ上にトロリを設置</li> <li>・車輪を介してレールに設置</li> </ul>	同左	同左
主要構造物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガーダ</li> <li>・サドル</li> <li>・トロリ</li> <li>・脱線防止ラグ</li> <li>・トロリストoppa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガーダ</li> <li>・サドル</li> <li>・トロリ</li> <li>・脚</li> <li>・脱線防止装置</li> <li>・トロリストoppa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガーダ</li> <li>・トロリ</li> <li>・ホイスト</li> <li>・脚</li> <li>・単軸粘性ダンパ</li> <li>・転倒防止装置</li> <li>・トロリストoppa</li> </ul>
構造形状	鋼構造物（炭素鋼）	同左	同左
	溶接構造物	同左	同左

## 2.2 荷重伝達について

原子炉建屋天井クレーンと取水槽ガントリクレーンの本体及びトロリは、いずれも固定されずにレール上に車輪を介して設置されており、以下に示す荷重伝達機構も同様である。

### (1) 走行方向（EW方向）の水平力

#### a. クレーン本体

(a) クレーン本体は走行レール上に乗っており、固定されていないため、走行方向（EW方向）の水平力が加わっても、クレーン本体は走行レール上をすべり、クレーン本体には走行レールと走行車輪間の最大静止摩擦力以上の荷重は作用しない。

(b) クレーン本体の走行車輪は、駆動輪及び従動輪である。

(c) 駆動輪は、電動機及び減速機等の回転部分と連結されているため、最大静止摩擦力以上の地震慣性力が車輪部に加わった場合、回転部分が追従できず、走行レール上をすべる。

(d) 従動輪は回転が拘束されていないため、クレーン本体の動きに合わせて自由に回転することからクレーン本体走行方向の水平力をクレーン本体に伝達しない。

#### b. トロリ

(a) トロリはクレーン本体の走行レールに対して直交方向に設置された横行

レール上に設置していることから、走行方向（E W方向）の地震力はガーダ本体・横行レールを介してトロリへ作用する。

(2) 横行方向（N S方向）の水平力

a. クレーン本体

(a) クレーン本体は横行レールに対して直交方向に設置された走行レール上に設置していることから、横行方向（N S方向）の地震力は走行レールを介してクレーン本体へ作用する。

b. トロリ

(a) トロリは横行レール上に乗っており、横行レールとは固定されていないため、横行方向（N S方向）の水平力がトロリに加わっても、トロリは横行レール上をすべり、トロリ本体には横行レールと横行車輪間の最大静止摩擦力以上の荷重は作用しない。

(b) トロリの横行車輪は、駆動輪及び従動輪である。

(c) トロリの駆動輪は、電動機及び減速機等の回転部分と連結されているため、最大静止摩擦力以上の地震慣性力が車輪部に加わった場合、回転部分が追従できず、横行レール上をすべる。

(d) 従動輪は回転が拘束されていないため、トロリの動きに合わせて自由に回転することからトロリ横行方向の水平力をトロリ本体に伝達しない。

(3) 鉛直力

クレーン本体及びトロリは、レールと固定されていないことから、鉛直方向の地震力によってレールから浮上る可能性がある。

## 2.3 車輪まわりの構造比較

本解析手法は車輪まわりのすべりや浮上りを考慮した非線形解析であり、車輪まわりの特徴を踏まえたモデル化が必要であることから、車輪とレールの接触部分を対象として、原子炉建屋天井クレーンと取水槽ガントリクレーンについて詳細に構造比較を行う。

(1) 原子炉建屋天井クレーン

原子炉建屋天井クレーンの車輪まわりは、走行装置が前後左右の4隅に配置された構造であり、各走行装置は2輪ずつの車輪で構成されている。車輪と走行レール間には鉛直上向きの拘束がなく浮上りが発生する可能性がある構造となっており、クレーンと走行レールの接触点は、ともに鋼製部材である車輪と走行レールの接触となる。

また、車輪については、駆動装置が設置された駆動輪（2隅分）とクレーンの動きに追従して回転する従動輪（2隅分）があり、全体の半分の車輪で駆動力を伝達する機構となっている。

トロリの車輪まわりは、前後左右で1輪ずつ配置された構造となっており、



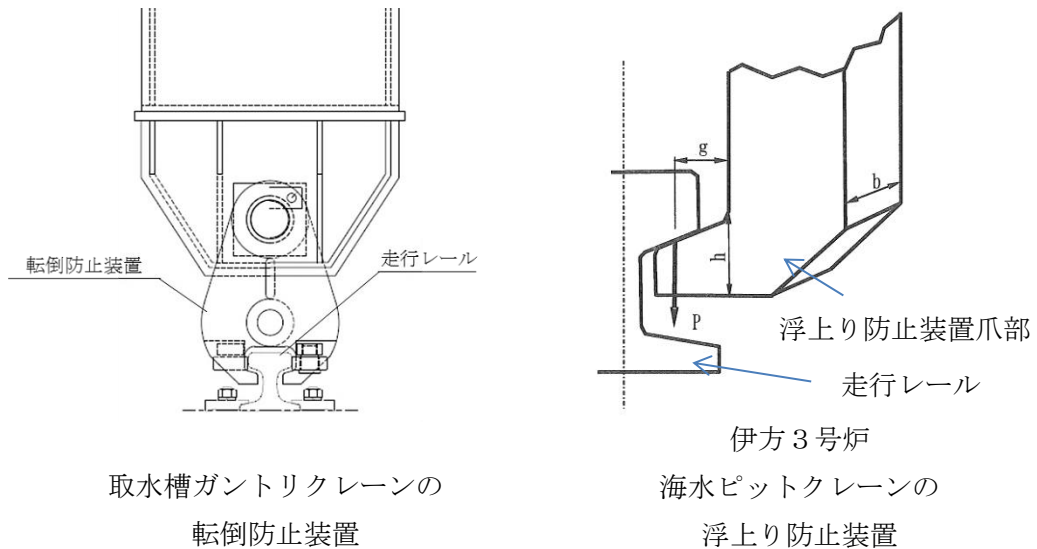
クレーン本体の車輪と同様に鉛直方向の拘束がないため浮上りが発生する可能性がある構造となっている。駆動輪と従動輪についてもクレーン本体の車輪と同様に前後で役割の異なる車輪が配置されている。

クレーン本体車輪まわり及びトロリ車輪まわりには、脱線防止装置若しくはトロリストoppaが設置されているため、車輪がレールから浮上る現象が発生した場合でも、脱線を防止する構造となっている。

(2) 取水槽ガントリクレーン

取水槽ガントリクレーンの本体車輪まわりは、第2-3添図に示すとおり走行装置が前後左右の4隅に配置された構造であり、各走行装置は2輪ずつの車輪で構成されている。車輪とレール間は鋼製部材同士の接触で上向きの拘束がなく浮上りが発生する可能性がある点や駆動輪と従動輪が半数ずつで車輪が構成されている点など、原子炉建屋天井クレーンと同様の構造である。トロリの車輪まわりについても車輪（駆動輪，従動輪）配置や接触状況等について同様の構造である。

取水槽ガントリクレーン本体車輪の間には転倒防止装置が設置されており、走行レールを掴むことで、転倒・脱線を防止する構造となっている。この構造は原子炉建屋天井クレーンと異なっているが、伊方3号炉海水ピットクレーンの浮上り防止装置と同様の構造である。取水槽ガントリクレーンの転倒防止装置と伊方3号炉海水ピットクレーンの浮上り防止装置の構造を第2-4添図に示す。



第2-4添図 取水槽ガントリクレーンの転倒防止装置及び伊方3号炉海水ピットクレーンの浮上り防止装置の構造

### 3. 先行審査実績（大間1号炉原子炉建屋天井クレーン，女川2号炉海水ポンプ室門型クレーン）との評価方法の比較

#### 3.1 評価方法の比較

原子炉建屋天井クレーン，海水ポンプ室門型クレーン，取水槽ガントリクレーンの評価方法の比較を第2-2添表に示す。車輪部のすべり，浮上り，衝突を考慮した取水槽ガントリクレーンの解析手法，解析モデル，境界条件等は，原子炉建屋天井クレーン及び海水ポンプ室門型クレーンと同一の評価方法である。なお，原子炉建屋天井クレーンの脱線防止ラグ及び海水ポンプ室門型クレーンの脱線防止装置と取水槽ガントリクレーンの転倒防止装置は構造が異なるが，転倒防止装置のルールと爪部のギャップ要素を含めたモデル化は，伊方3号炉海水ピットクレーンの浮上り防止装置と同様である。

入力地震動はそれぞれの設備を設置している箇所の地震動を適用するため，評価方法の差異にはあたらない。

第2-2添表 先行審査実績のあるクレーン類の評価方法との比較

項目		大間1号炉 原子炉建屋 天井クレーン	女川2号炉 海水ポンプ室門型クレーン	島根2号炉 取水槽ガントリ クレーン
解析手法		非線形時刻歴応答解析	同左	同左
解析モデル		3次元FEM解析 モデル	同左	同左
車輪-ルール間の 境界条件		すべり，浮上り，衝突 考慮	同左	同左
地震力	水平	動的地震力	同左	同左
	鉛直	動的地震力	同左	同左
入力地震動		原子炉建屋におけるク レーン設置位置の加速 度時刻歴	海水ポンプ室におけるク レーン設置位置の加速 度時刻歴	取水槽におけるク レーン設置位置の加速 度時刻歴
減衰 定数	水平	2.0%	同左	同左
	鉛直	2.0%	同左	同左
解析プログラム		ABAQUS (Ver. 6.5-4)	ABAQUS (Ver. 6.11-1)	同左

#### 3.2 地震応答解析モデルの比較

原子炉建屋天井クレーン及び取水槽ガントリクレーンの解析モデルの概要を第2-5添図に示す。

取水槽ガントリクレーンは原子炉建屋天井クレーンと同様に，クレーンの主要構成部材をはり要素でモデル化している。また，車輪部についても原子炉建屋天井クレーンと同様に水平方向のすべり及び鉛直方向の浮上りを考慮する

ため、ギャップ要素、ばね及び減衰要素でモデル化している。なお、車輪部の非線形要素については添付資料（2-4）に詳細を示す。

大間 1 号炉原子炉建屋天井クレーン	島根 2 号炉取水槽ガントリクレーン

第2-5添図 解析モデル概要図

#### 4. 非線形時刻歴応答解析の適用性（まとめ）

島根 2 号炉取水槽ガントリクレーンに対して非線形時刻歴応答解析を適用するにあたり、先行審査実績（大間 1 号炉原子炉建屋天井クレーン、女川 2 号炉海水ポンプ室門型クレーン）との構造及び評価方法の比較を行った。

全体構造、荷重伝達及び車輪まわりの構造について比較した結果、先行審査実績のある原子炉建屋天井クレーンに対して、取水槽ガントリクレーンは、クレーン本体の鋼構造物として脚が存在し単軸粘性ダンパを有する点及び脱線防止ラグと転倒防止装置の構造が異なる点において差異があるが、これ以外の全体構造、荷重伝達及び車輪まわりの構造が同等であることを確認した。なお、脚及び単軸粘性ダンパが存在することについては、適切に解析モデルに反映することとし、単軸粘性ダンパを有する構造物の解析手法については、別紙-18 「機器・配管系への制震装置の適用について」に示す。

また、評価方法及び解析モデルについて比較した結果、解析モデルの設定方法として、はり要素によるモデル化、水平方向のすべり、鉛直方向の浮上り等の挙動を考慮する非線形要素の考え方が同様であることを確認した。なお、原子炉建屋天井クレーンの脱線防止ラグ及び海水ポンプ室門型クレーンの脱線防止装置と取水槽ガントリクレーンの転倒防止装置は構造が異なるが、転倒防止装置は伊方 3 号炉海水ピットクレーンの浮上り防止装置と同等の構造となっており、浮上りが発生し、浮上り防止装置の爪部とレールが接触しない限りは、応力が発生しない構造であり、モデル化が適切であることを確認した。

以上のことから、島根 2 号炉取水槽ガントリクレーンの耐震評価として、先行審査実績のある非線形時刻歴応答解析を適用することは妥当であると考えられる。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

### 添付資料(2-3) 取水槽ガントリクレーンの解析ケースの設定

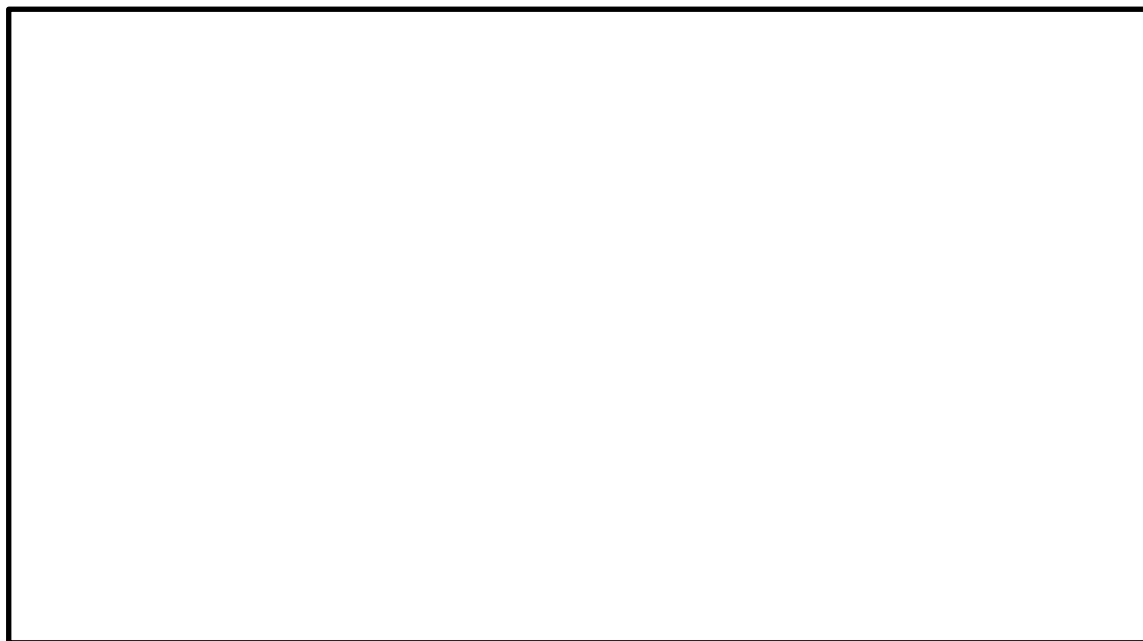
取水槽ガントリクレーンの地震応答解析にあたっては、トロリ及びホイストの位置や吊荷の有無によって地震時の挙動が変化する可能性があるため、トロリ及びホイストの位置並びに吊荷の有無に応じた解析ケースを設定する必要がある。設定した解析ケースを第3-1添表に示す。取水槽ガントリクレーン使用時の状況を踏まえて解析ケースについて検討した内容を以下に示す。

取水槽ガントリクレーンを使用する場合、まずクレーン本体が待機位置から吊り上げ対象物に向けて走行方向（EW方向）に移動する。クレーン本体の移動中は、トロリ及びホイストはそれぞれの待機位置にある。このような状態を踏まえた解析ケースとして、トロリ及びホイストがいずれも待機位置で吊荷なしの条件を設定する。（ケース1）

トロリにより吊荷を吊り上げる場合は、トロリを横行方向（NS方向）に対象物の直上まで移動させ、対象物を吊り上げた後、トロリ位置はそのままでクレーン本体が走行方向（EW方向）に点検等の作業エリアへ移動する。また、ホイストにより吊荷を吊り上げる場合もトロリの場合と同様に、ホイストを横行方向（NS方向）に対象物の直上まで移動させ、対象物を吊り上げた後、ホイスト位置はそのままでクレーン本体が走行方向（EW方向）に点検等の作業エリアへ移動する。トロリとホイストを同時に使用することはないため、トロリを使用する場合にはホイストは待機位置、ホイストを使用する場合にはトロリは待機位置から移動しない。トロリ及びホイストの待機位置について第3-1添図に示す。以上のトロリ及びホイストの使用状態を踏まえた解析ケースとして、トロリ及びホイストのいずれかは最大質量の吊荷有りとし、もう一方は待機位置で吊荷なしの条件を設定する。なお、吊荷有りの場合のトロリ及びホイストの位置は中央付近であるためガーダの中央とする。（ケース2，3）

第3-1添表 取水槽ガントリクレーンの耐震評価ケース

ケース	トロリ		ホイスト	
	位置	吊荷有無 (質量)	位置	吊荷有無 (質量)
1	待機位置	なし	待機位置	なし
2	中央	有り (50t)	待機位置	なし
3	待機位置	なし	中央	有り (17t)

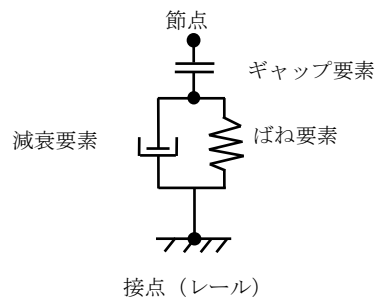


第3-1添図 取水槽ガントリクレーンのトロリ，ホイスト待機位置

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

添付資料(2-4) 取水槽ガントリクレーン車輪部の非線形要素  
(摩擦, 接触, 減衰)

取水槽ガントリクレーン車輪部のモデル化では, すべり, 浮上り及び衝突の挙動を模擬するためギャップ要素を用いる。また, 接触部位の局所変形による接触剛性をばね要素で, 衝突による減衰効果を減衰要素で模擬し, 第4-1添図に示すように, ギャップ要素と直列に配置する。



第4-1添図 車輪部の非線形要素

1. 車輪とレール間の摩擦特性

取水槽ガントリクレーンの車輪には電動機及び減速機等の回転部分と連結された駆動輪と, 回転部分と連結されていない従動輪の2種類がある。第4-2添図に取水槽ガントリクレーンの概要図を示す。このうち駆動輪は回転が拘束されているため, 最大静止摩擦力以上の地震慣性力が加わった場合, レール上をすべる挙動を示す。ここで, 摩擦係数は原子炉建物天井クレーンと同様の0.3を用いる。



第4-2添図 取水槽ガントリクレーンの概要図

本資料のうち, 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 2. 車輪とレールの接触剛性

接触剛性は「平成 20 年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 動的上下動耐震試験(クレーン類)に係る報告書(09 耐部報-0008, (独)原子力安全基盤機構)」を参照し, 車輪とレールの衝突時の剛性を模擬したばね要素を考慮し, クレーン質量で構成される 1 自由度系の固有振動数が 20Hz 相当になるように設定する。

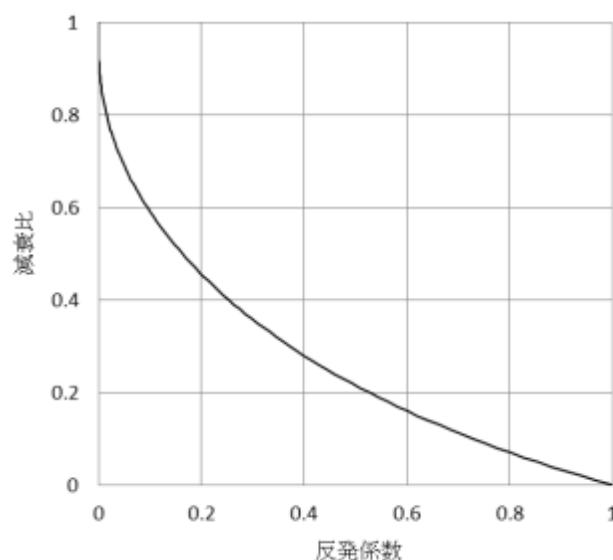
## 3. 車輪とレール間の衝突による減衰

衝突による減衰は「平成 19 年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 動的上下動耐震試験(クレーン類)に係る報告書(08 耐部報-0021, (独)原子力安全基盤機構)」にて実施した要素試験のうち, 車輪反発係数試験結果より評価した反発係数から算出する。なお, 減衰比と反発係数の関係式には次式を用いる。

$$e = \exp\left(-\frac{h \pi}{\sqrt{1-h^2}}\right)$$

ここで,  $e$  は反発係数,  $h$  は減衰比である。

上記の式で表される反発係数と減衰比との関係を第 4-3 添図に示す。



第 4-3 添図 反発係数と減衰比の関係

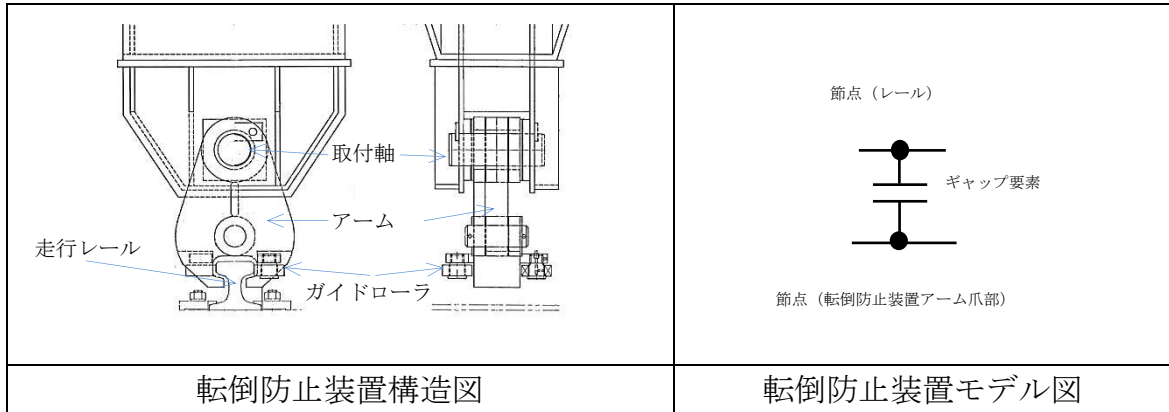
## 4. 転倒防止装置の構造・モデル化について

転倒防止装置は, 第 4-4 添図に示すように, レールの上部からレール頭部をアームで挟み込む構造である。通常運転時, アームの先端の爪部とレールの間には間隙がある。クレーンに浮上りが発生してレール頭部と転倒防止装置のアーム先端の爪部が接触すると鉛直方向の荷重が伝達される。

水平方向については, レール直交方向には転倒防止装置が取付軸により回転す

る構造となっており、レールに沿った方向（クレーン走行方向）にはガイドローラによって滑る構造のため、水平荷重は発生しない。

以上より、転倒防止装置については、鉛直方向の爪部とレール頭部の間隙を考慮して、第4-4添図に示すギャップ要素によりモデル化を行う。



第4-4添図 転倒防止装置の構造及びモデル図

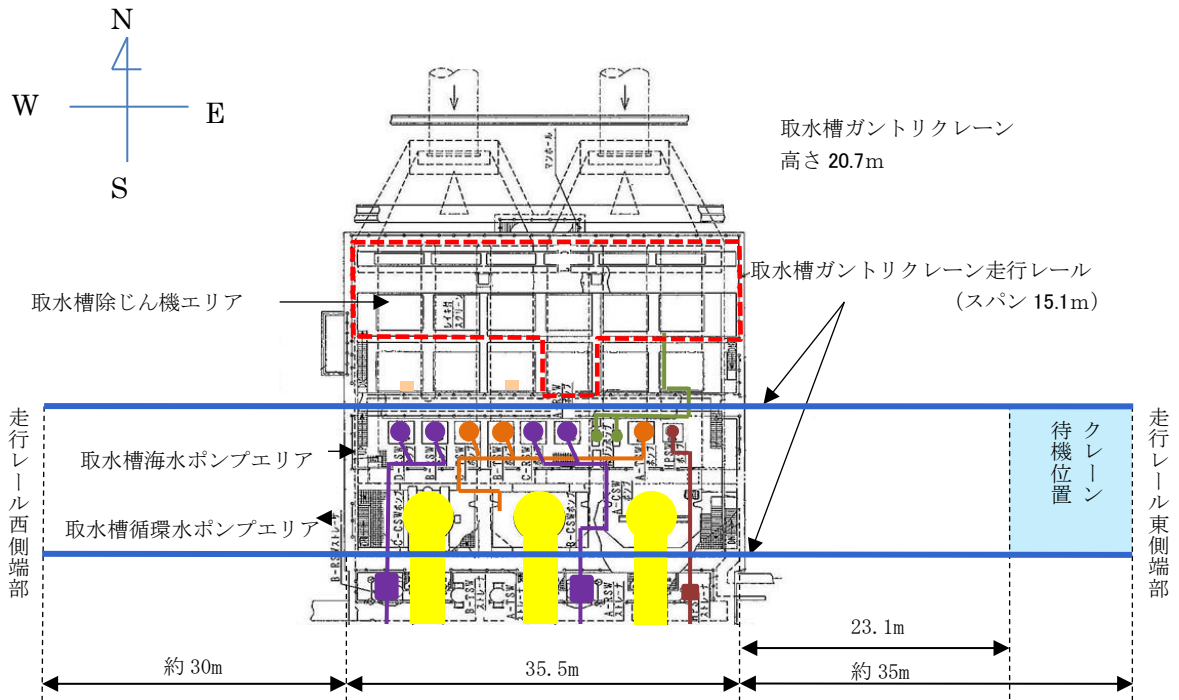


## 添付資料(2-5) 取水槽ガントリクレーン本体及びトロリのすべりの影響について

取水槽ガントリクレーン本体及びトロリがすべりによって走行レール端部及び横行レール端部に衝突した場合、取水槽ガントリクレーン本体の転倒、トロリの落下により上位クラス施設へ波及的影響を及ぼすおそれがあることから、取水槽ガントリクレーン本体及びトロリのすべりによるレール端部への衝突の有無を確認する。取水槽ガントリクレーンの走行範囲を第5-1添図に示す。

取水槽から走行レール端部までの距離は最小で約30mであり、取水槽ガントリクレーンがすべりによって走行レール端部に衝突することはない。

トロリについては、詳細設計段階においてすべり量を算出し、レール端部との適切な離隔距離を確保する。



< 取水槽周辺の主な上位クラス施設 >

- |                       |                      |
|-----------------------|----------------------|
| ● : 原子炉補機海水ポンプ        | ● : タービン補機海水ポンプ      |
| ■ : 原子炉補機海水ストレーナ      | — : タービン補機海水系配管及び出口弁 |
| — : 原子炉補機海水系配管        | ● : 循環水ポンプ           |
| ● : 高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ   | ■ : 循環水系配管           |
| ■ : 高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ | ● : 除じんポンプ           |
| — : 高圧炉心スプレイ補機海水系配管   | — : 除じん系配管           |
| ■ : 取水槽水位計            | --- : 取水槽除じん機エリア防水壁  |

第5-1添図 取水槽ガントリクレーンの走行範囲

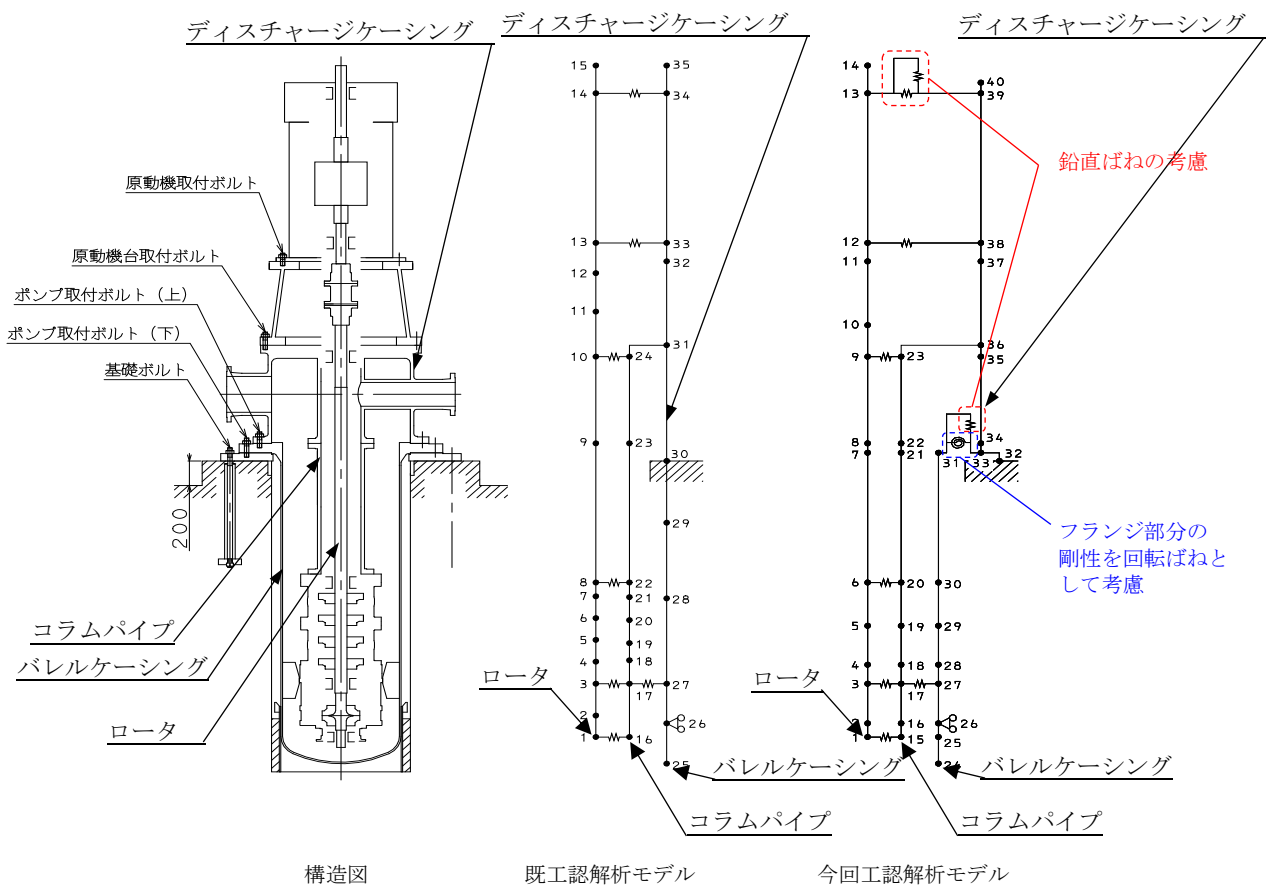
ポンプ等の応答解析モデルの精緻化について

1. 立形ポンプの応答解析モデルの精緻化

既工認における立形ポンプの応答解析モデルは、実機構造を踏まえた振動特性とするため、設備の寸法、質量情報に基づき、主要部であるロータ、インナーケーシング及びディスチャージケーシングを相互にばね等で接続した多質点モデルとして構築していた。

今回工認では、最新の知見に基づくモデル化を行う観点から、既工認モデルに対して J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づき、フランジ部分の剛性を回転ばねとして考慮する。また、鉛直方向の動的地震力を適用することに伴い、鉛直方向の固有周期を算出する為、新たに鉛直ばねを考慮している（第 1-1 図参照）。なお、解析結果より、鉛直方向は十分な剛性を有している。

本解析モデルは、大間 1 号炉建設工認及び東海第二にて適用実績がある。



第 1-1 図 残留熱除去ポンプ応答解析モデル図

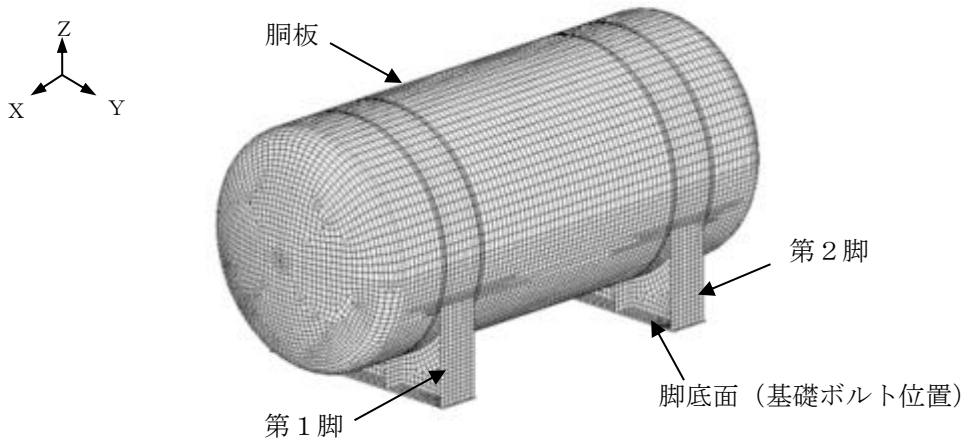
## 容器等の応力解析へのFEMモデルの適用について

既工認において、公式等による評価にて耐震計算を実施していた設備について、至近の既工認の適用実績を踏まえて、3次元FEMモデルを適用した耐震評価を実施する。FEMモデルを用いる手法は、大間1号炉建設工認及び東海第二において適用実績がある手法である。

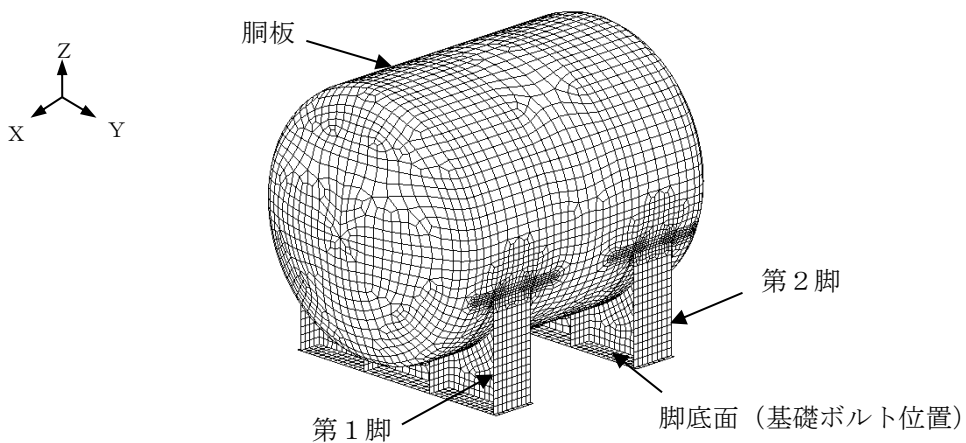
## 1. 容器へのFEMモデルの適用

ディーゼル発電機の付属設備であるディーゼル燃料デイトンク及びディーゼル燃料貯蔵タンク並びに原子炉補機冷却系熱交換器について、公式等による計算では許容値を超える見込みであることから、精緻な評価を行うためにFEMモデルを適用する。

胴板及び脚部の実機形状をシェル要素にて模擬し、「発電用原子力設備規格設計・建設規格（2005年版（2007年追補版）〈第I編 軽水炉規格〉 JSME S NC1-2005/2007）」等に基づく材料諸元を与えてモデル化することにより、応力解析を行う。応力解析に用いる解析モデル図を第1-1図～第1-3図に示すとともに、第1-1表～第1-3表に解析概要を示す。



(1) 非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料デイタンク

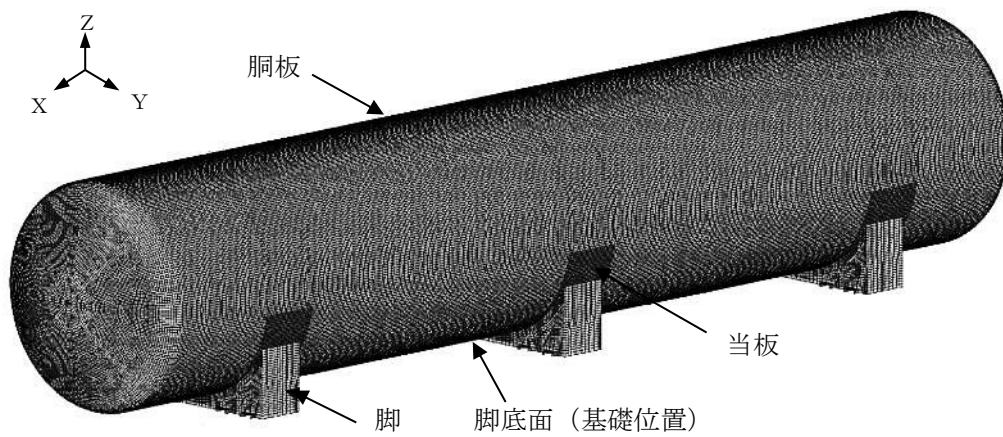


(2) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料  
デイタンク

第1-1図 解析モデル (ディーゼル燃料デイタンク)

第1-1表 解析概要 (ディーゼル燃料デイタンク)

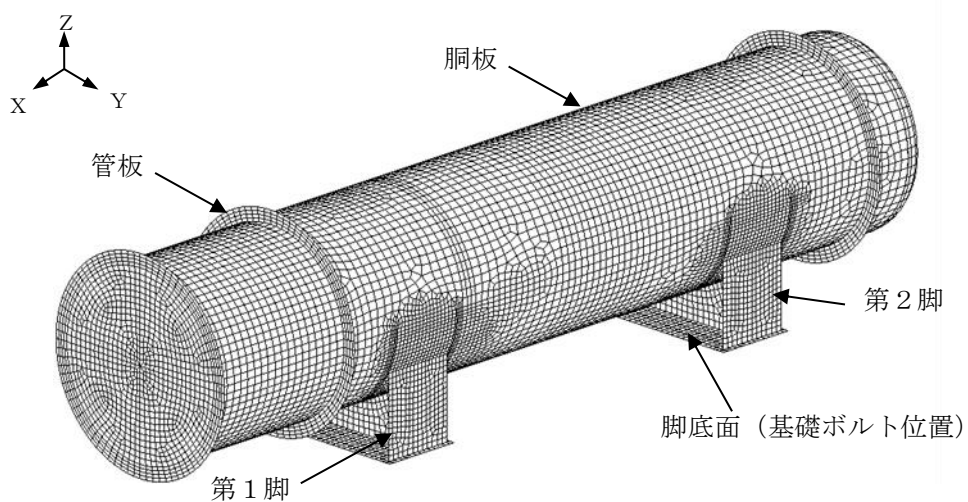
項目	内容
適用部位	胴板 (脚取付部)
解析コード	ABAQUS (Ver. 6.5-4)
地震条件	別途実施する原子炉建物地震応答解析から得られる加速度を入力する。



第1-2図 解析モデル (A, H-ディーゼル燃料貯蔵タンク)

第1-2表 解析概要 (A, H-ディーゼル燃料貯蔵タンク)

項目	内容
適用部位	胴板 (脚取付部)
解析コード	ABAQUS (Ver. 6.5-4)
地震条件	別途実施する排気筒基礎地震応答解析から得られる加速度を入力する。



第1-3図 解析モデル (原子炉補機冷却系熱交換器)

第1-3表 解析概要 (原子炉補機冷却系熱交換器)

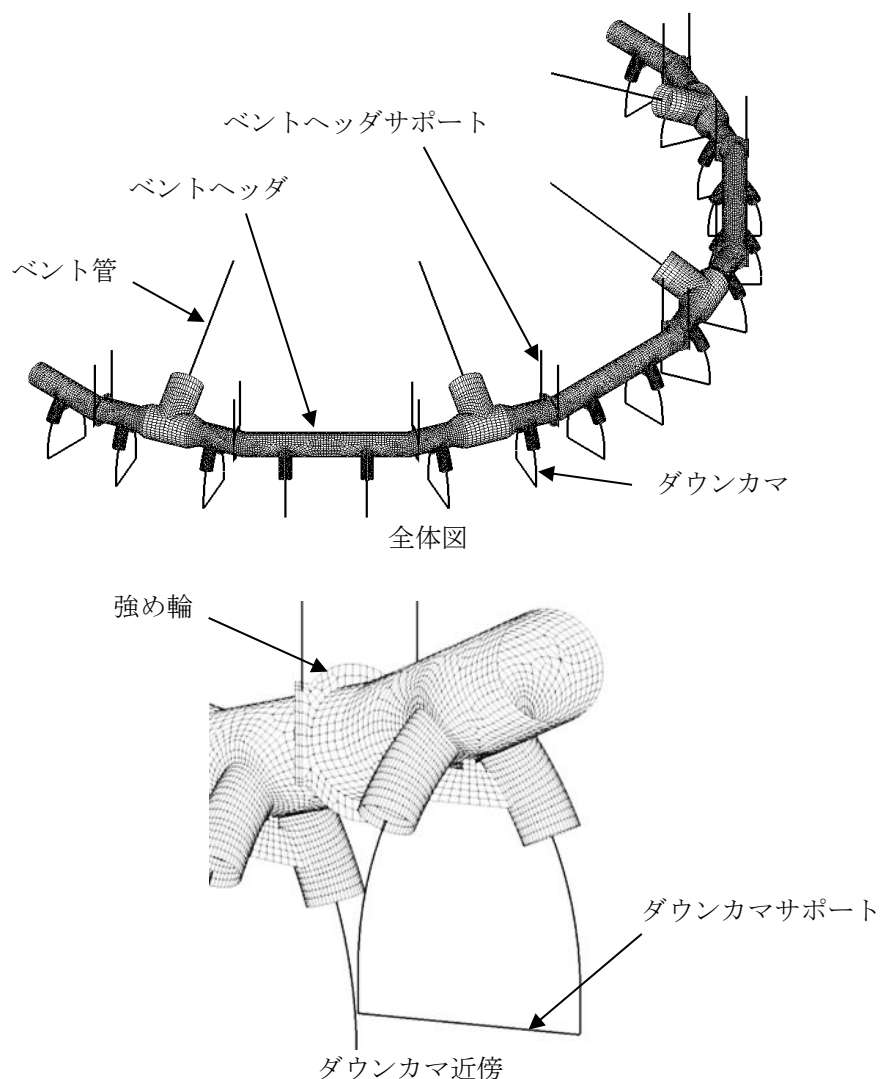
項目	内容
適用部位	胴板 (脚取付部)
解析コード	ABAQUS (Ver. 6.5-4)
地震条件	別途実施する原子炉建物地震応答解析から得られる加速度を入力する。

## 2. ベントヘッド及びダウンカマへのFEMモデルの適用

ベント系の評価において、公式等による計算では許容値を超える見込みであることから、精緻な評価を行うため、原子炉格納容器ベント管、ベントヘッド、ダウンカマ、ベントヘッドサポート及びダウンカマサポートを模擬したFEMモデルを適用する。

モデル化範囲は構造の対称性を考慮して180°とし、形状不連続部であるベント管とベントヘッドの結合部、ベントヘッドとダウンカマの結合部及びベントヘッドの実機形状をシェル要素でモデル化し、ベント管、ダウンカマ、ベントヘッドサポート及びダウンカマサポートはビーム要素でモデル化する。

応答解析及び応力解析に用いる解析モデル図を第2-1図に示すとともに、第2-1表に解析概要を示す。



第2-1図 解析モデル（ベントヘッド及びダウンカマ）



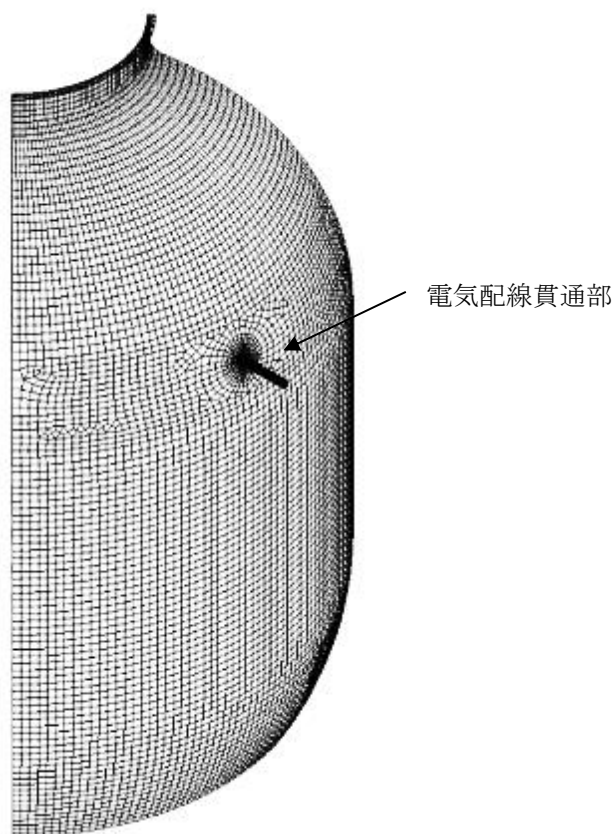
第2-1表 解析概要

項 目	内 容
適用部位	ベントヘッド（ベント管結合部） ベントヘッド強め輪取付部 ベントヘッドとダウンカマの結合部
解析コード	N A S T R A N（Ver. 2013）
地震条件	別途実施する原子炉建物－大型機器連成解析 から得られる加速度を入力する。

### 3. 原子炉格納容器電気配線貫通部へのFEMモデルの適用

原子炉格納容器における電気配線貫通部の評価において、公式等による計算では許容値を超える見込みであることから、原子炉格納容器胴部とスリーブとの取付部を精緻に評価するため、実機形状をシェル要素により模擬したFEMモデルを適用する。

モデル化範囲は、モデルの境界条件が応力評価点の応力に影響しない範囲とする。応力解析に用いる解析モデル図を第3-1図に示すとともに、第3-1表に解析概要を示す。



第3-1図 解析モデル（原子炉格納容器電気配線貫通部）

第3-1表 解析概要

項目	内容
適用部位	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部（胴側）
解析コード	NASTRAN (Ver. 2005)
地震条件	別途実施する原子炉建物－大型機器連成解析から得られる加速度を入力する。

## 原子炉建物－大型機器連成解析モデルの変更について

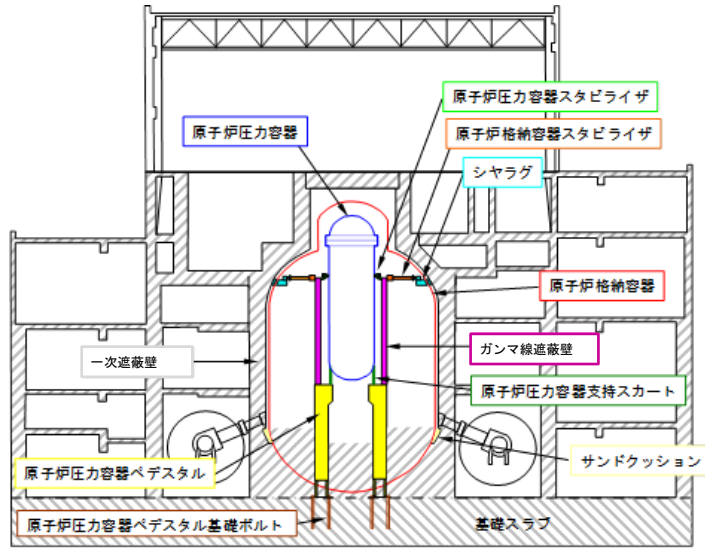
## 1. はじめに

原子炉建物内の原子炉格納容器（以下「PCV」という。）、原子炉压力容器（以下「RPV」という。）及びガンマ線遮蔽壁等の大型機器は、建物質量に対しその質量が比較的大きく、また、支持構造上からも建物との連成が無視できないため、原子炉建物との連成系で解析するためのモデル（以下「大型機器連成解析モデル」という。）を設定し、地震応答解析を行う。

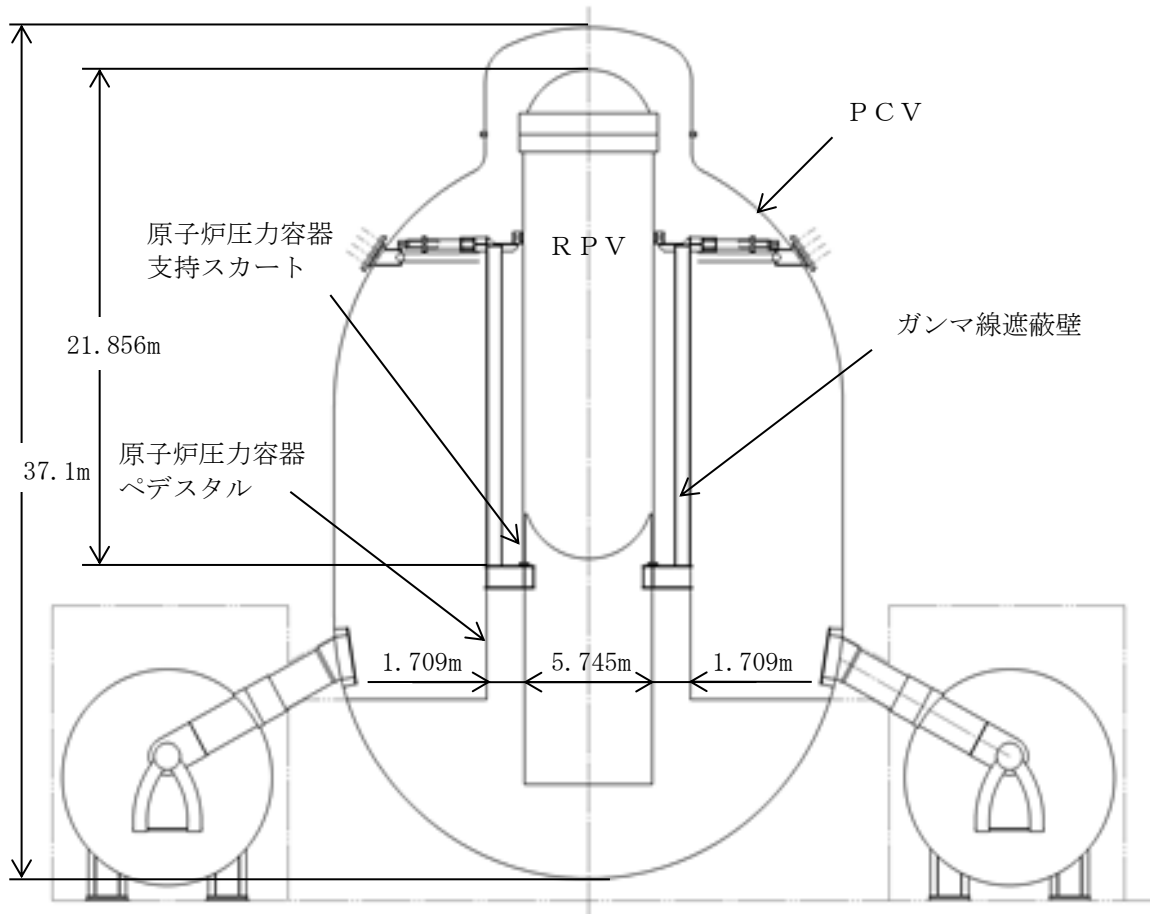
原子炉建物、PCV、RPV及びRPVペデスタルの概略断面図を第1-1図に、RPV内部構造物の構造図を第1-2図に示す。また、原子炉建物－大型機器連成解析に係る手順を第1-3図に示す。

原子炉本体及び炉内構造物の水平方向の地震応答解析モデルについて、既工認では建設工程の関係上、原子炉格納容器－原子炉压力容器モデル（以下「PCV－RPVモデル」という。）と原子炉压力容器－炉内構造物モデル（以下「RPV－Rinモデル」という。）の2種類のモデルを用いていたが、今回工認では、原子炉格納容器－原子炉压力容器－炉内構造物モデル（以下「PCV－RPV－Rinモデル」という。）を用いる。これに合わせて、原子炉压力容器スタビライザ（以下「RPVスタビライザ」という。）及び原子炉格納容器スタビライザ（以下「PCVスタビライザ」という。）のばね定数算出方法について、最新の工認実績を踏まえた算出方法に変更する。本手法は、他プラントを含む既工認あるいは補正工認において適用実績がある手法である。

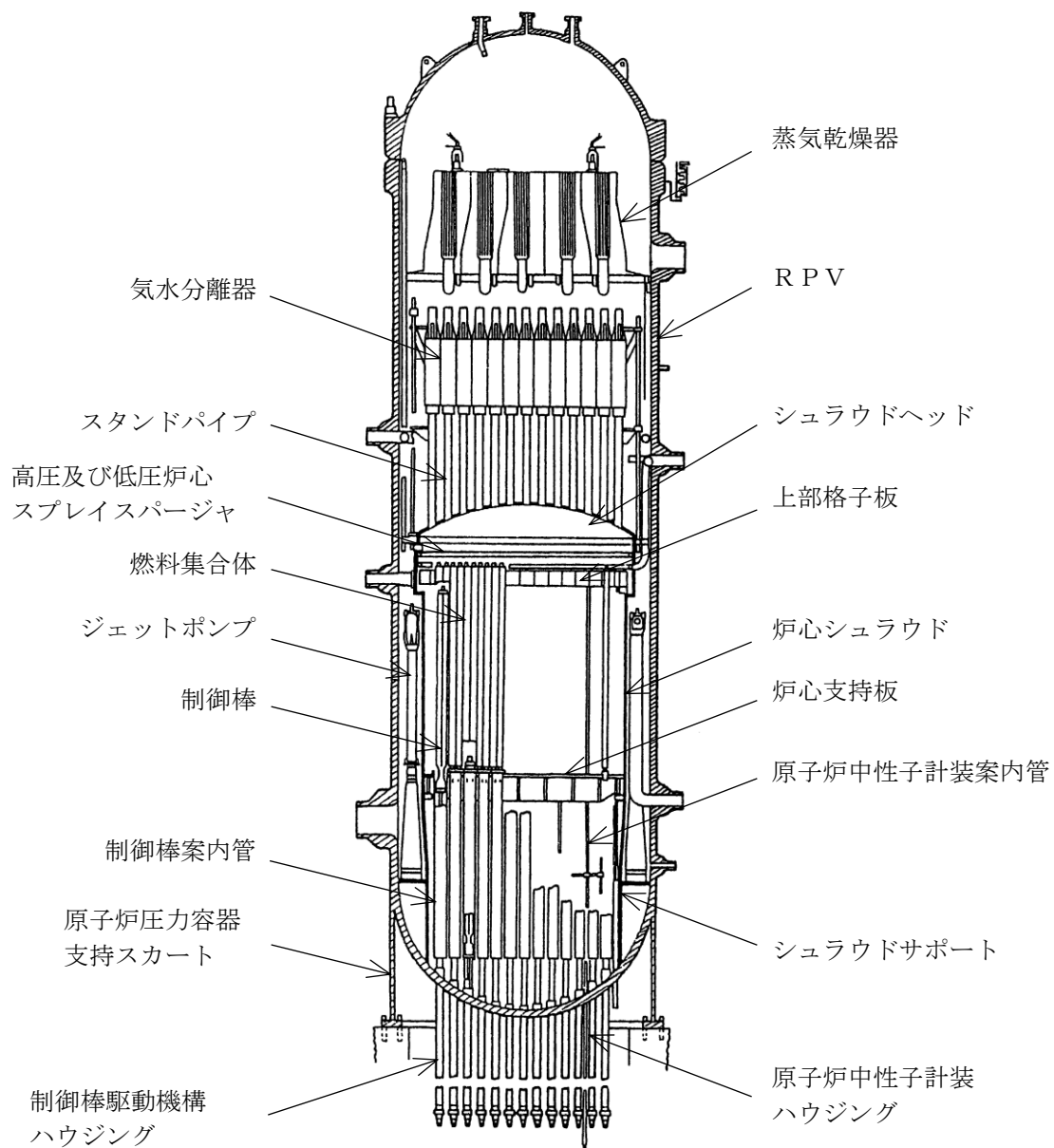
また、鉛直方向に動的地震力が導入されたことから、原子炉本体及び炉内構造物について、鉛直方向の応答を適切に評価する観点で、水平方向応答解析モデルとは別に鉛直方向の地震応答解析モデル（PCV－RPV－Rinモデル）を新たに採用し、鉛直地震動に対する評価を実施する。鉛直方向応答解析モデルは、他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である。



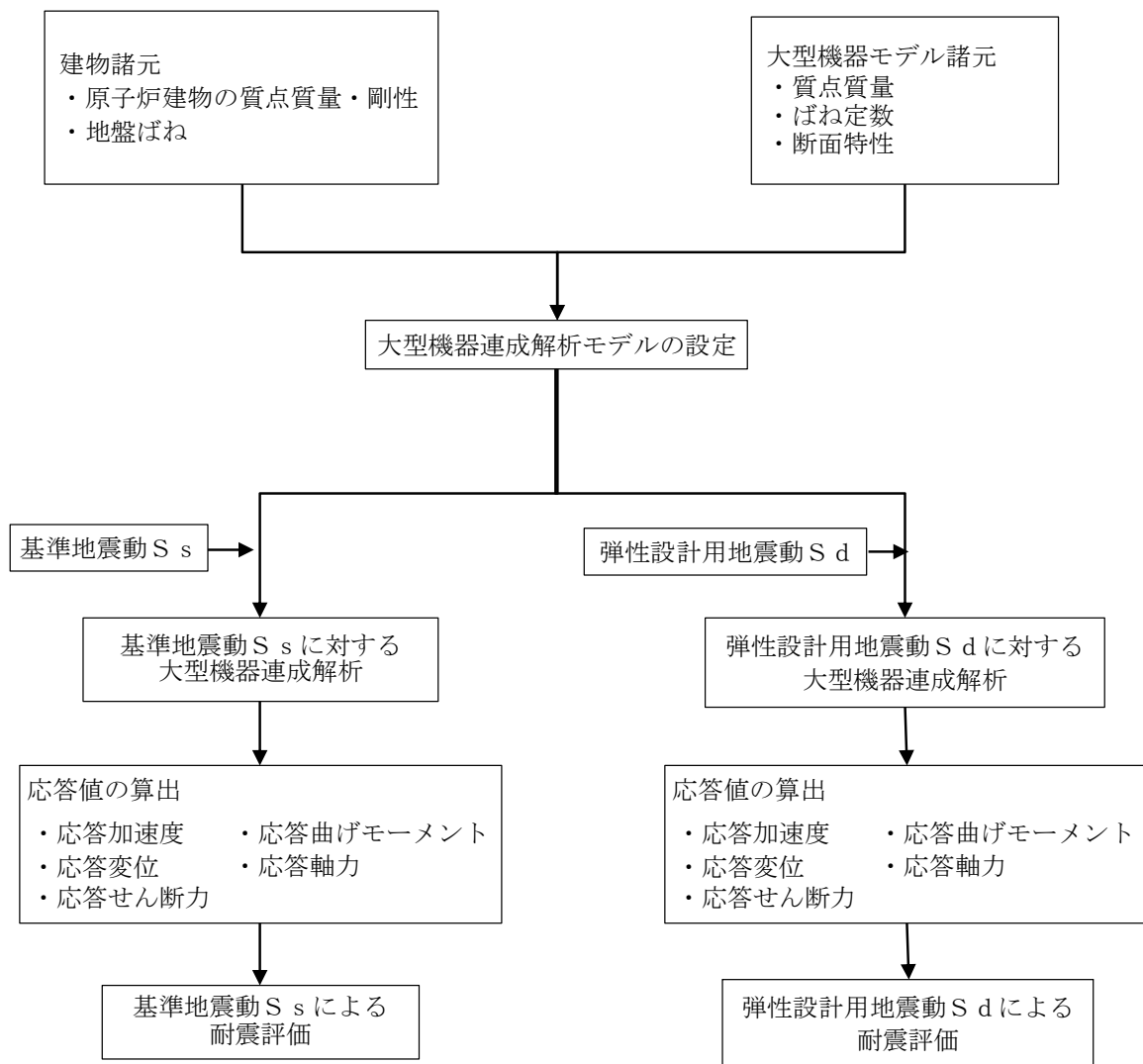
原子炉建物概略断面図



第1-1図 PCV, RPV及びRPVペDESTAL概略断面図



第 1-2 図 R P V 内部構造物構造図



第 1-3 図 原子炉建物-大型機器連成解析の手順

## 2. 水平及び鉛直方向における大型機器連成解析モデル

### 2.1 水平方向の大型機器連成解析モデルの概要及び既工認からの変更

水平方向の大型機器連成解析モデルを第 2.1-1 図及び第 2.1-2 図に示す。水平方向の大型機器連成解析モデルは、PCV、RPV、ガンマ線遮蔽壁、RPV ペDESTAL をモデル化し、RPV 内の燃料集合体、制御棒案内管、制御棒駆動機構ハウジング、気水分離器、スタンドパイプ及び炉心シュラウドについてもモデル化する。これらをシュラウドサポートと等価な回転ばねを介して RPV と結合する。PCV はシヤラグ及びウェルシールベローズと等価なばねにより建物と結合され、下端は原子炉建物と剛に結合される。RPV は、RPV スタビライザと等価なばねによりガンマ線遮蔽壁上端と結合され、RPV スタビライザ及び PCV スタビライザと等価なばねにより PCV に結合される。また、RPV は燃料交換ベローズと等価なばねにより PCV に直接結合される。RPV の下端は、RPV ペDESTAL 上端に剛に結合されており、RPV ペDESTAL は、その下端にお

いて原子炉建物と剛に結合される。また、制御棒駆動機構ハウジングは制御棒駆動機構ハウジングレストレントビームによりRPVペデスタルと結合される。

建設工認において、原子炉建物－大型機器連成解析モデルを用いた水平方向の地震応答解析は、工認申請の進捗に合わせて、PCV－RPVモデル、RPV－Rinモデルの2種類の応答解析モデルを用いて実施していた。しかし、今回工認では建設工認のように設計進捗に応じたモデルの使い分けの必要がないこと及び実機に合わせて構造体をモデル化できることから、RPV－RinモデルにPCVを追加したPCV－RPV－Rinモデルを水平方向の大型機器連成解析モデルとする。建設工認及び今回工認の原子炉建物－大型機器連成解析モデルを第2.1-1表に示す。今回工認で用いるPCV－RPV－Rinモデルの質点位置、質量、断面特性は、既工認のPCV－RPVモデル（炉内構造物はRPVの付加質量として考慮）及びRPV－Rinモデル（PCVは原子炉建物の付加質量として考慮）と同等であるため、PCV－RPV－Rinモデルを採用することによる地震応答への影響は十分小さい。なお、水平方向の大型機器連成解析モデルとしてのPCV－RPV－Rinモデルの適用は、東海第二の新規制工認において適用実績がある。

大型機器連成解析モデルを設定する場合には、既工認のモデル諸元を適用することを基本とするが、解析モデルを最新化するため先行プラントにおいて適用実績のあるモデル化手法を参照し、今回工認では、RPVスタビライザ及びPCVスタビライザのばね定数を精緻化する。

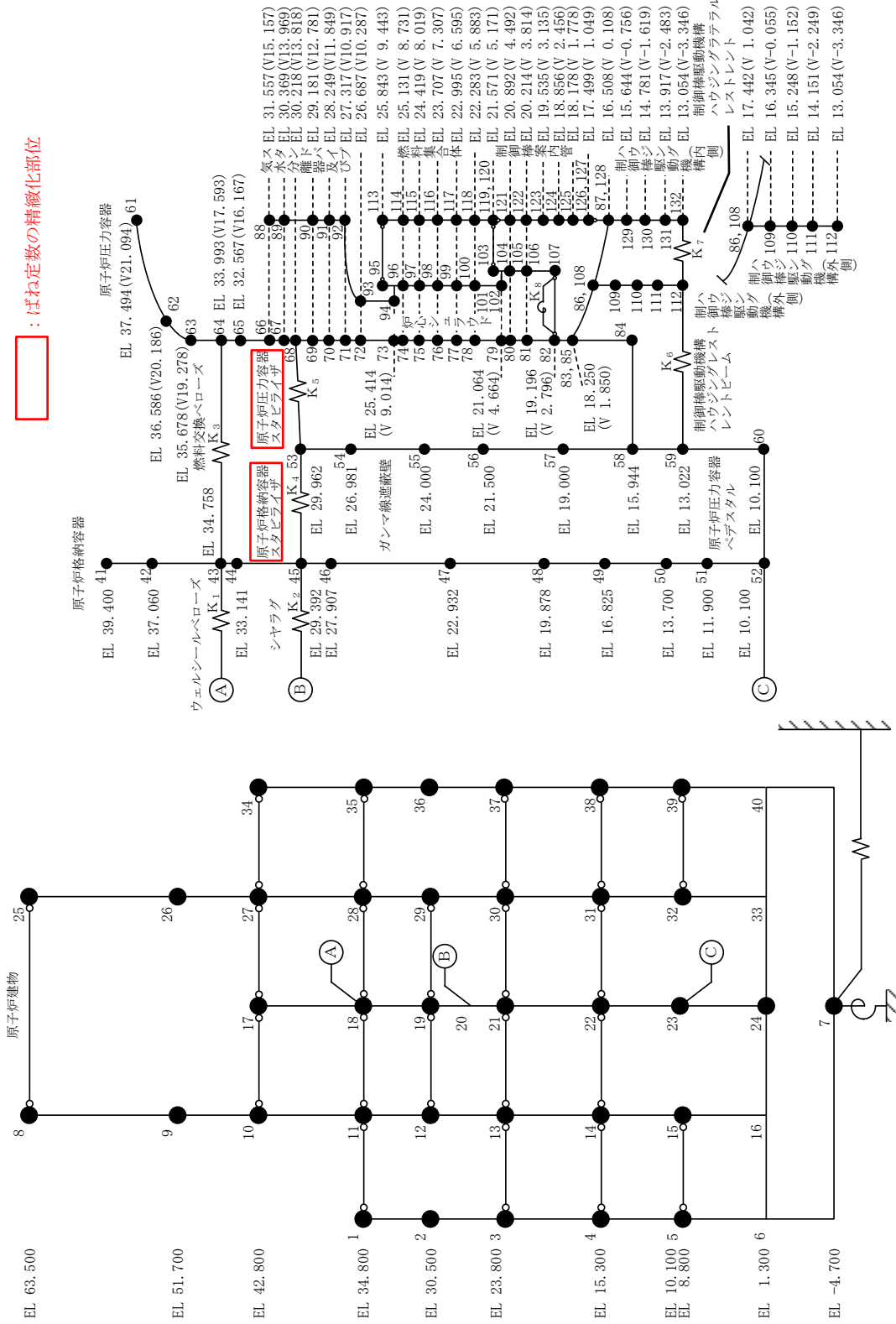
なお、今回工認においてPCV－RPV－Rinモデル（スタビライザのばね定数変更を含む）を適用するにあたり、機器・配管系への影響を検討し、地震応答への影響が十分小さいことを確認した。（参考資料5-1）

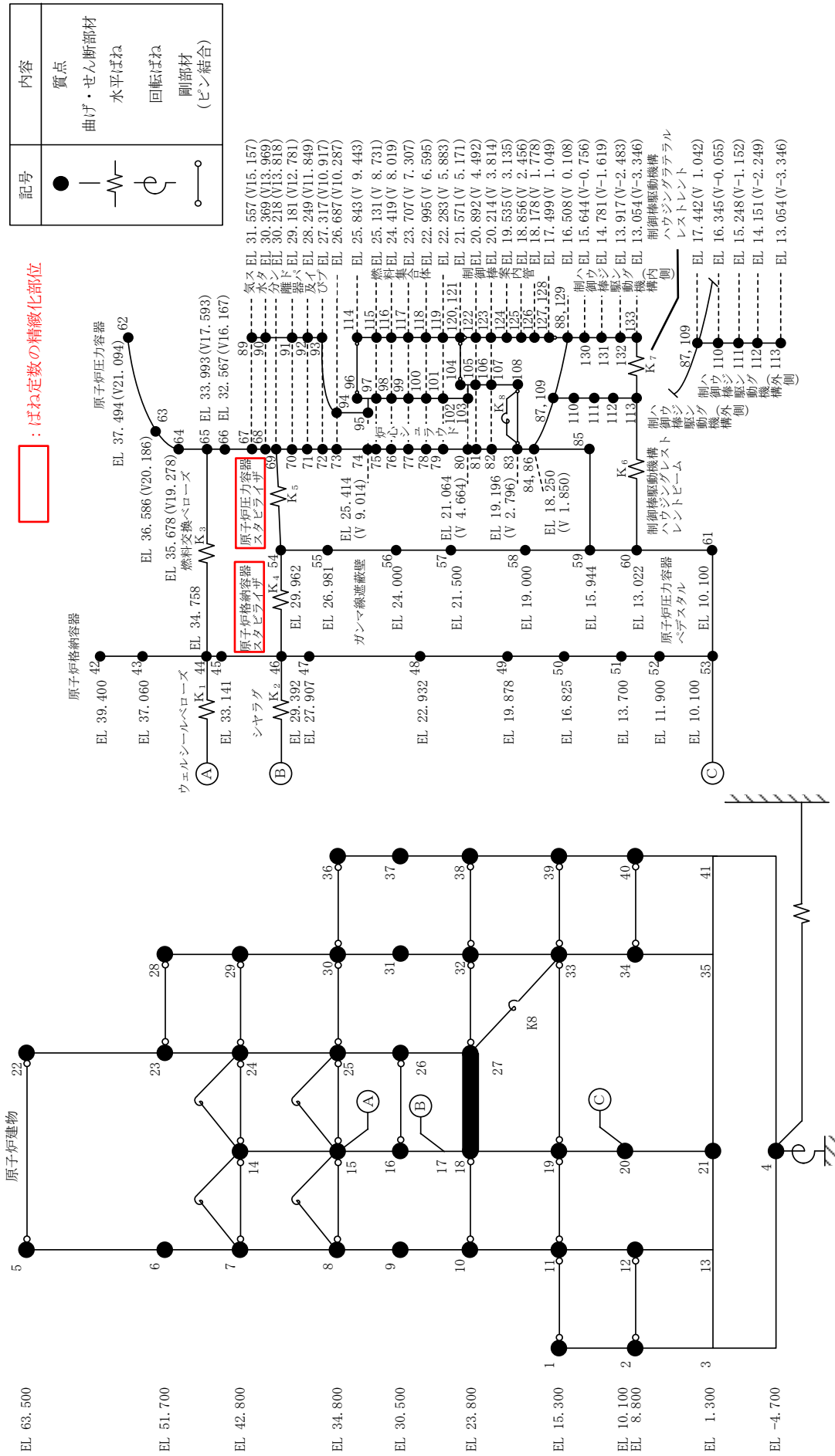
第 2.1-1 表 建設工認及び今回工認における原子炉建物一大型機器連成解析モデル

建設工認		今回工認	
モデル化 範囲	PCV-RPVモデル	RPV-Rinモデル	PCV-RPV-Rinモデル
	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉建物</li> <li>PCV</li> <li>ガンマ線遮蔽壁</li> <li>RPVペデスタル</li> <li>RPV (炉内構造物を付加質量として考慮)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉建物 (PCVを付加質量として考慮)</li> <li>ガンマ線遮蔽壁</li> <li>RPVペデスタル</li> <li>RPV</li> <li>炉内構造物 (気水分離器及びスタンドパイプ, 炉心シユラウド, 燃料集合体, 制御棒案内管)</li> <li>制御棒駆動機構ハウジング</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉建物</li> <li>PCV</li> <li>ガンマ線遮蔽壁</li> <li>RPVペデスタル</li> <li>RPV</li> <li>炉内構造物 (気水分離器及びスタンドパイプ, 炉心シユラウド, 燃料集合体, 制御棒案内管)</li> <li>制御棒駆動機構ハウジング</li> </ul>
解析モデル 図 (NS方 向)			



記号	内容
●	質点
— — —	曲げ・せん断部材
— — —	水平ばね
— — —	回転ばね
○—○	剛部材 (ピン結合)





□ : ばね定数の精緻化部位

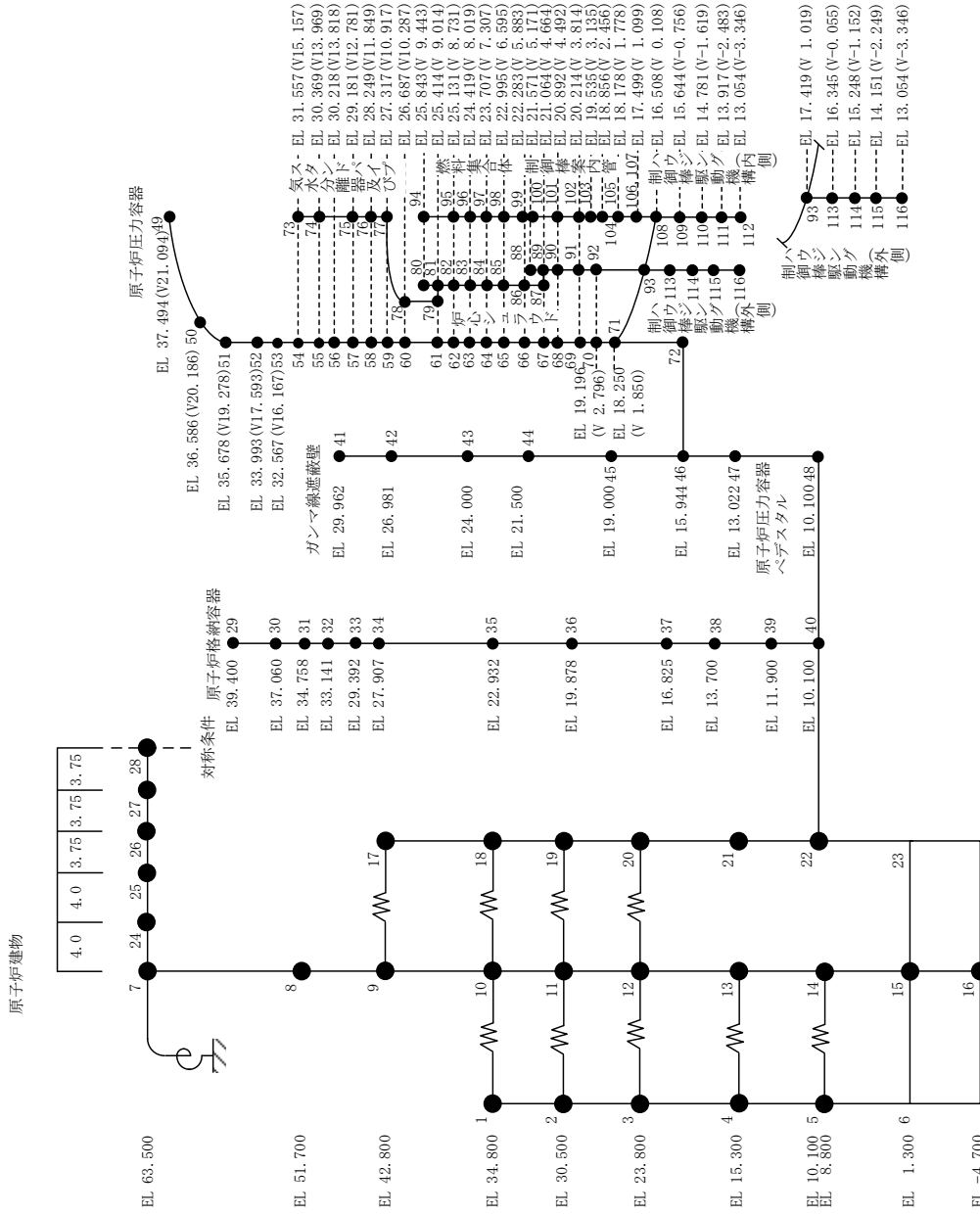
第 2.1-2 図 大型機器連成系応答解析モデル (E-W方向)

## 2.2 鉛直方向の大型機器連成解析モデルの概要

既工認では、鉛直方向については静的震度による地震荷重を算定していたが、今回工認においては、新たに鉛直方向の動的地震力に対する考慮が必要となったことから、鉛直方向についても水平方向と同様に動的地震力の算定を行う。鉛直方向の大型機器連成解析モデルを第 2.2-1 図に示す。鉛直方向の大型機器連成解析モデルについては、鉛直方向の各応力評価点における軸力を算定するため、水平方向モデルをベースに新たに多質点モデルを作成し、水平方向と同様の PCV-RPV-Rin モデルとする。PCV の下端は、原子炉建物と剛に結合される。RPV 支持スカートの下端は、RPV ペDESTAL の上端に剛に結合されており、RPV ペDESTAL の下端は、原子炉建物と剛に結合される。

なお、鉛直方向の大型機器連成解析モデルは、大間 1 号炉の建設工認及び東海第二の新規制工認において適用実績がある。

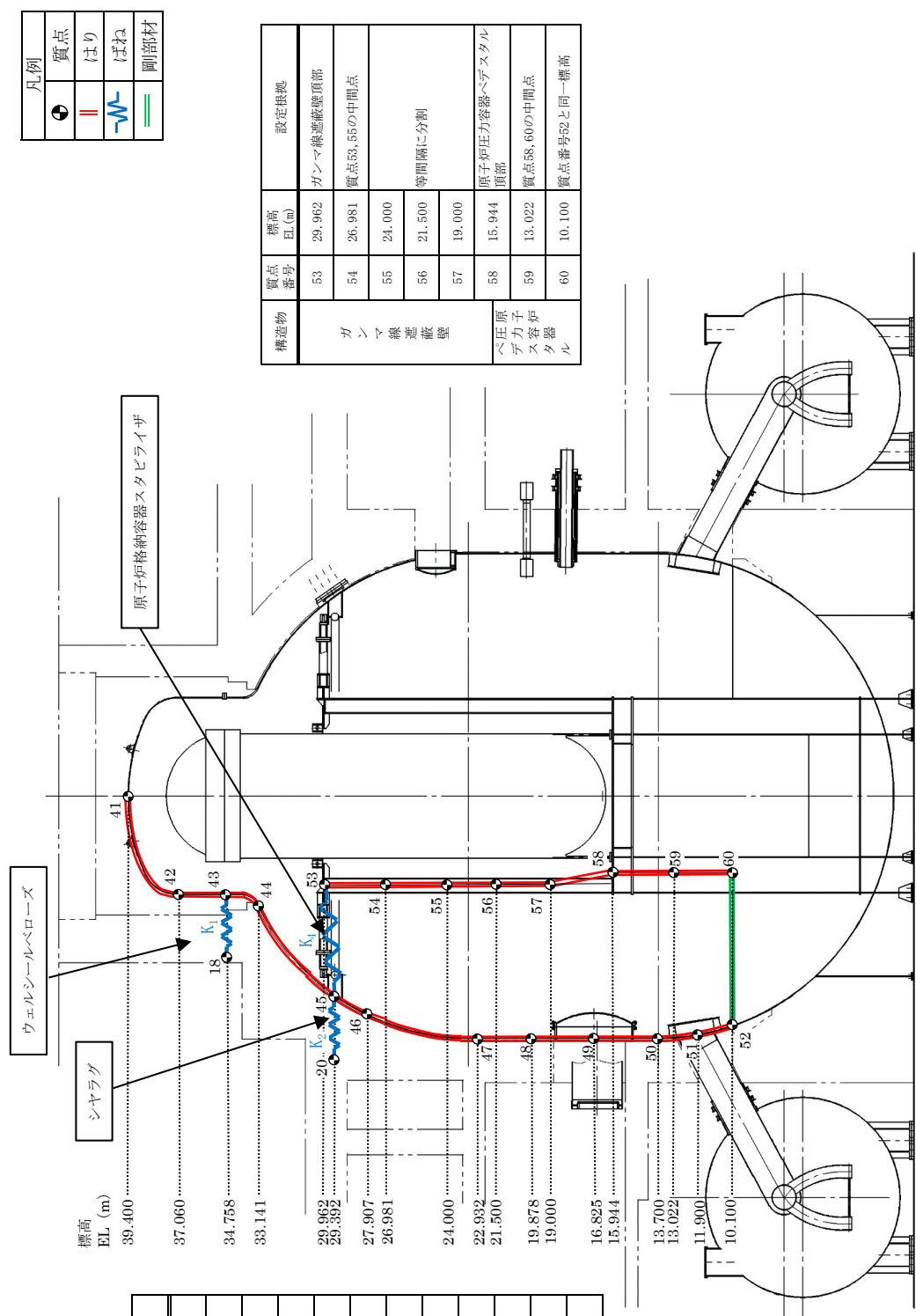
記号	内容
●	質点
— —	軸ばね
— — —	せん断ばね
— — — —	回転ばね
— — — — —	鉛直ばね
—	はり (屋根トラス部)



第2.2-1 図 大型機器連成系地震応答解析モデル (鉛直方向)

### 3. 質点位置の設定

大型機器連成解析モデルの質点位置は、各構造物の地震応答を把握できるように、モデル化する各構造物の形状を踏まえて設定する。PCV、ガンマ線遮蔽壁及びRPVペDESTALの質点位置を第3-1図(1)及び第3-2図(1)に、RPV、炉心シュラウド、燃料集合体、制御棒案内管及び制御棒駆動機構ハウジング等の質点位置を第3-1図(2)及び第3-2図(2)に示す。炉内構造物の質点位置は、その振動性状を適切に評価出来るように配慮する他、部材の剛性の変化する点、構造的に不連続な点、応力評価点等を考慮して定める。



凡例	
●	質点
	はり
~	ばね
—	副部材

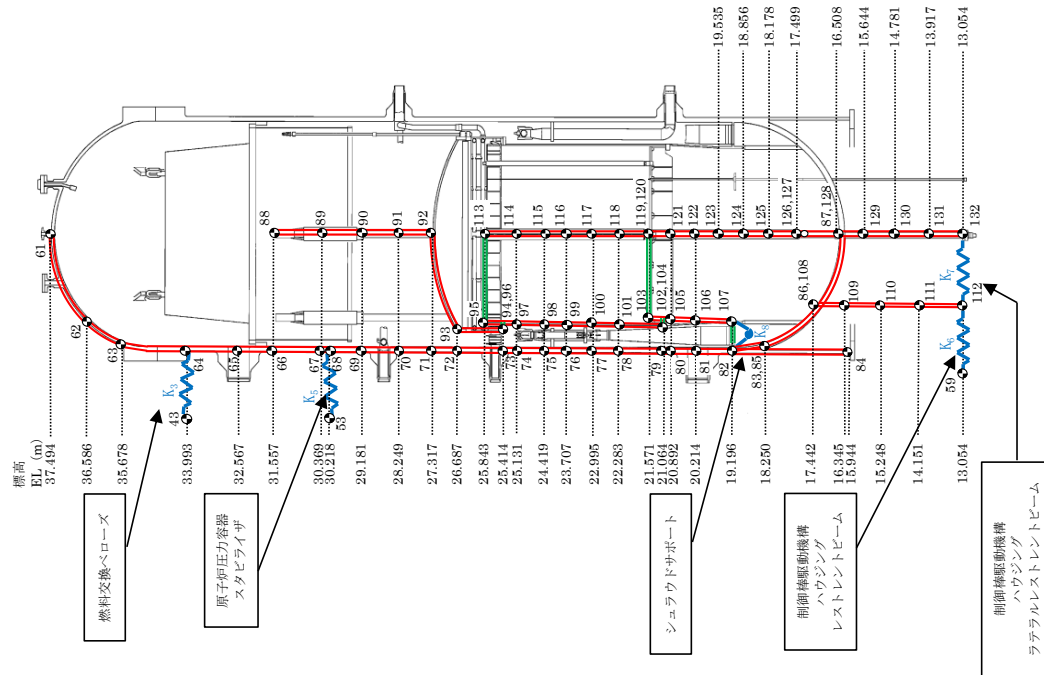
標高 EL (m)	原子炉格納容器スタビライザ
39.400	41
37.060	42
34.758	43
33.141	44

構造物	質点番号	標高 EL (m)	設定根拠
原子炉格納容器	41	39.400	原子炉格納容器頂部
	42	37.060	板厚変更点
	43	34.758	フランジ部
	44	33.141	板厚変更点
	45	29.992	シヤラグ位置
	46	27.907	板厚変更点
	47	22.932	材質変更点
	48	19.878	質点47.49の二等分点
	49	16.825	機器搬出入口中央
	50	13.700	材質変更点
ベント管と原子炉格納容器の接続点	51	11.900	トライウェル基礎部コネクタート上端
	52	10.100	

構造物	質点番号	標高 EL (m)	設定根拠
ガンマ線遮蔽壁	53	29.962	ガンマ線遮蔽壁頂部
	54	26.981	質点53.55の中間点
	55	24.000	等間隔に分割
	56	21.500	
	57	19.000	
ベント管と原子炉格納容器の接続点	58	15.944	原子炉圧力容器ベント管頂部
	59	13.022	質点58.60の中間点
	60	10.100	質点番号52と同一標高

第3-1 図 水平方向の大型機器連成解析モデルにおける質点位置の設定  
 (1) PCV, ガンマ線遮蔽壁及びRPVベント管

構造物	質点番号	標高 EL(m)	設定根拠
原子炉圧力容器	61	37.494	原子炉圧力容器頂部
	62	36.586	等間隔に分割
	63	35.678	フランジと上銅板の取合い部
	64	33.993	フランジと胴板の取合い部
	65	32.567	主蒸気用ノズル位置
	66	31.557	質点番号88位置と合わせている
	67	30.369	質点番号89位置と合わせている
	68	30.218	スタビライザブラケット位置
	69	29.181	質点番号90と同一標高
	70	28.249	質点番号91と同一標高
	71	27.317	質点番号92と同一標高
	72	26.687	質点番号93と同一標高
	73	25.414	質点番号94と同一標高
	74	25.131	
	75	24.419	
燃料集合体	76	23.707	燃料集合体と同一標高
	77	22.995	
	78	22.283	
	79	21.064	質点番号104と同一標高
	80	20.892	質点番号121と同一標高
	81	20.214	再循環水出口用ノズル位置
	82	19.196	シュワウドサポートとの接続位置
	83	18.250	支持スカート頂部
	84	15.944	支持スカート基部
	85	14.151	支持スカート頂部
圧力容器	86	17.442	制御棒駆動スタブチューブ位置
	87	16.508	原子炉圧力容器底部



構造物	質点番号	標高 EL(m)	設定根拠
気水分離器	88	31.557	気水分離器頂部
	89	30.369	気水分離器中央
	90	29.181	スタントドバイブ頂部
	91	28.249	スタントドバイブ中央
	92	27.317	シュワウドヘッド胴板頂部
	93	26.687	炉心シュワウド上部胴上端
	94	25.414	炉心シュワウド上部胴下端
	95	25.843	
	96	25.414	
	97	25.131	燃料集合体と同一標高
炉心シュワウド	98	24.419	燃料集合体と同一標高
	99	23.707	
	100	22.995	
	101	22.283	炉心シュワウド中間胴下端
	102	21.064	炉心支持板位置
	103	21.571	炉心シュワウド下部胴上端
	104	21.064	質点番号121と同一標高
	105	20.892	質点番号81と同一標高
	106	20.214	質点番号81と同一標高
	107	19.196	炉心シュワウド下部胴下端

構造物	質点番号	標高 EL(m)	設定根拠
燃料集合体	113	25.843	上部格子板位置
	114	25.131	
	115	24.419	
	116	23.707	等間隔に分割
	117	22.995	
	118	22.283	
	119	21.571	炉心支持板位置
	120	21.571	炉心支持板位置
	121	20.892	
	122	20.214	
制御棒案内管	123	19.535	等間隔に分割
	124	18.856	
	125	18.178	
	126	17.499	制御棒案内管下端
	127	17.499	ハウジング上端
	128	16.508	原子炉圧力容器底部
	129	15.644	
	130	14.781	等間隔に分割
	131	13.917	
	132	13.054	ハウジング下端

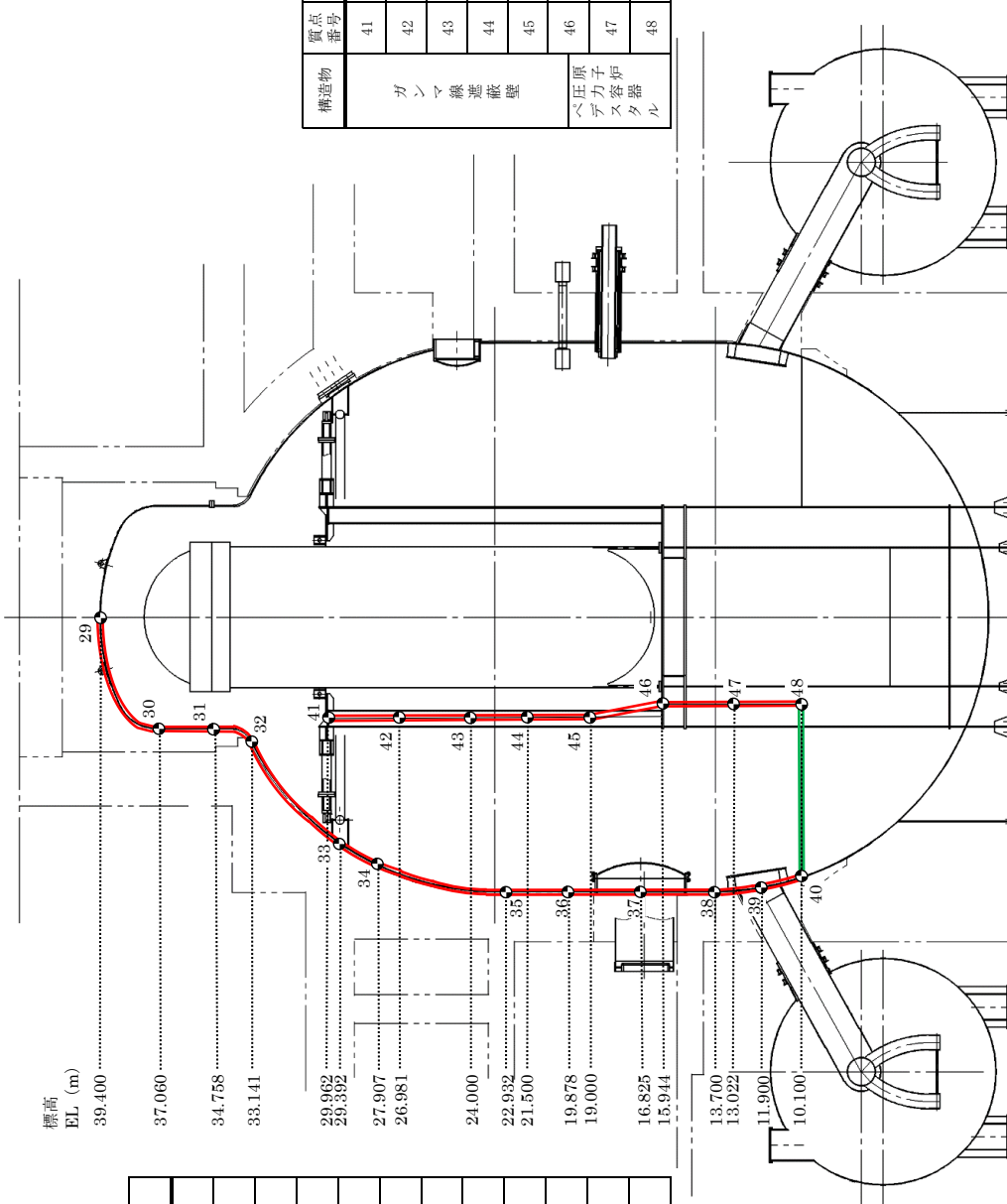
構造物	質点番号	標高 EL(m)	設定根拠
制御棒駆動機構	108	17.442	制御棒駆動スタブチューブ位置
	109	16.345	
	110	15.248	等間隔に分割
	111	14.151	
	112	13.054	ハウジング下端

凡例	
●	質点
	はり
~	ばね
—	副部材

第3-1 図 水平方向の大型機器連成解析モデルにおける質点位置の設定

(2) R P V, 炉心シュワウド, 燃料集合体, 制御棒案内管及び制御棒駆動機構ハウジング等

凡例	
●	質点
	軸ばね
—	剛部材



標高  
EL (m)

39.400

37.060

34.758

33.141

29.962

29.392

27.907

26.981

24.000

22.932

21.500

19.878

19.000

16.825

15.944

13.700

13.022

11.900

10.100

構造物	質点番号	標高 EL(m)	設定根拠
原子炉格納容器	29	39.400	原子炉格納容器頂部
	30	37.060	板厚変更点
	31	34.758	フランジ部
	32	33.141	板厚変更点
	33	29.392	シヤラグ位置
	34	27.907	板厚変更点
	35	22.932	材質変更点
	36	19.878	質点47, 49の二等分点
	37	16.825	機器搬出入口中央
	38	13.700	材質変更点
	39	11.900	ベント管と原子炉格納容器の接続点
	40	10.100	ドラウワエル基底部コネクタリート上端

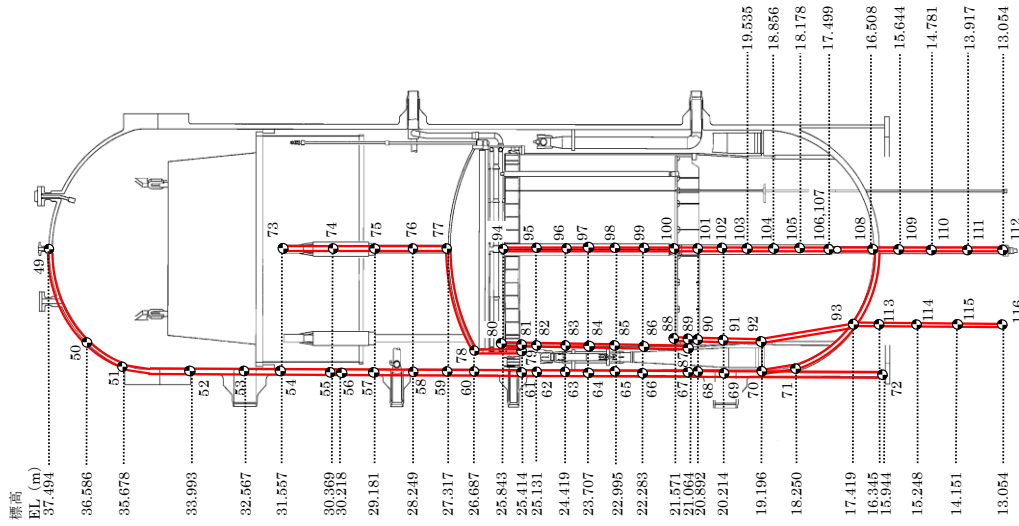
構造物	質点番号	標高 EL(m)	設定根拠
ガンマ線遮蔽壁	41	29.962	ガンマ線遮蔽壁頂部
	42	26.981	質点53, 55の中間点
	43	24.000	等間隔に分割
	44	21.500	
	45	19.000	
ベント管と原子炉格納容器	46	15.944	原子炉圧力容器ベント管頂部
	47	13.022	質点58, 60の中間点
	48	10.100	質点番号52と同一標高

第3-2図 鉛直方向の大型機器連成解析モデルにおける質点位置の設定

(1) PCV, ガンマ線遮蔽壁及びRPVペDESTAL



構造物	質点番号	標高 EL(m)	設定根拠	
原子炉圧力容器	49	37.494	原子炉圧力容器頂部	
	50	36.586	等間隔に分割	
	51	35.678	フランジと上鏡板の取合い部	
	52	33.993	フランジと胴板の取合い部	
	53	32.567	主蒸気用ノズル位置	
	54	31.557	質点番号88位置と合わせている	
	55	30.369	質点番号89位置と合わせている	
	56	30.218	スタビライザブライケット位置	
	57	29.181	質点番号90と同一標高	
	58	28.249	質点番号91と同一標高	
	59	27.317	質点番号92と同一標高	
	60	26.687	質点番号93と同一標高	
	61	25.414	質点番号94と同一標高	
	62	25.131		
	63	24.419		
	64	23.707	燃料集合体と同一標高	
	65	22.995		
	66	22.283		
支持スカート	67	21.064	質点番号104と同一標高	
	68	20.892	質点番号121と同一標高	
	69	20.214	再循環水出口用ノズル位置	
	70	19.196	シュラウドサポートプレートとの後継位置	
	71	18.250	支持スカート頂部	
	72	15.944	支持スカート基部	
	原子炉圧力容器	93	17.419	制御棒貫通孔スタブチューブ位置
		108	16.508	原子炉圧力容器底部



構造物	質点番号	標高 EL(m)	設定根拠
原子炉圧力容器	73	31.557	気水分離器頂部
	74	30.369	気水分離器中央
	75	29.181	スタンドパイプ頂部
	76	28.249	スタンドパイプ中央
	77	27.317	シュラウドヘッド
	78	26.687	炉芯シユラウド上部胴上端
	79	25.414	炉芯シユラウド上部胴下端
	80	25.843	
	81	25.414	
	82	25.131	
炉芯シユラウド	83	24.419	燃料集合体と同一標高
	84	23.707	
	85	22.995	
	86	22.283	
	87	21.064	炉芯シユラウド中間胴下端
	88	21.571	炉芯支持板位置
	89	21.064	炉芯シユラウド下部胴上端
	90	20.892	質点番号121と同一標高
	91	20.214	質点番号91と同一標高
	92	19.196	炉芯シユラウド下部胴下端
制御棒駆動機構(内側)	93	17.419	制御棒貫通孔スタブチューブ位置
	113	16.345	
	114	15.248	等間隔に分割
	115	14.151	
	116	13.054	ハウジング下端
	制御棒駆動機構(外側)	108	16.508
109		15.644	
110		14.781	等間隔に分割
111		13.917	
112		13.054	ハウジング下端
116		13.054	ハウジング下端

凡例	
●	質点
	軸ばね
—	剛部材

構造物	質点番号	標高 EL(m)	設定根拠
燃料集合体	94	25.843	上部格子板位置
	95	25.131	
	96	24.419	
	97	23.707	等間隔に分割
	98	22.995	
	99	22.283	
	100	21.571	炉芯支持板位置
制御棒案内管	101	20.892	
	102	20.214	
	103	19.535	等間隔に分割
	104	18.856	
	105	18.178	
	106	17.499	制御棒案内管下端
制御棒駆動機構(内側)	107	17.499	ハウジング上端
	108	16.508	原子炉圧力容器底部
	109	15.644	
	110	14.781	等間隔に分割
	111	13.917	
	112	13.054	ハウジング下端

第3-2図 鉛直方向の大型機器連成解析モデルにおける質点位置の設定

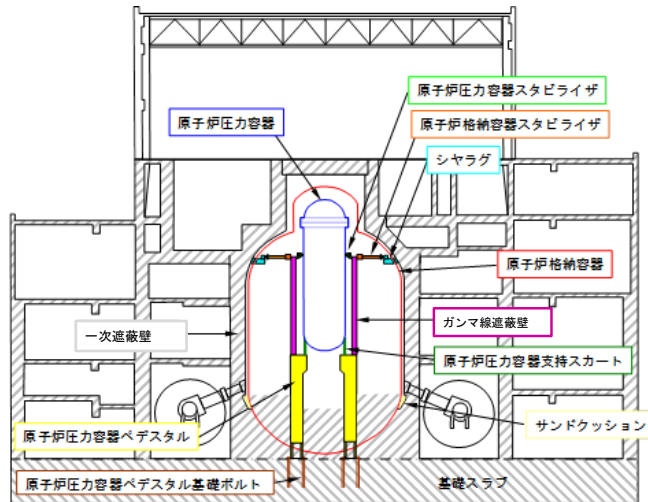
(2) RPV, 炉芯シユラウド, 燃料集合体, 制御棒案内管及び制御棒駆動機構ハウジング等

#### 4. 構造物間ばね定数の設定（既工認から変更ある部位）

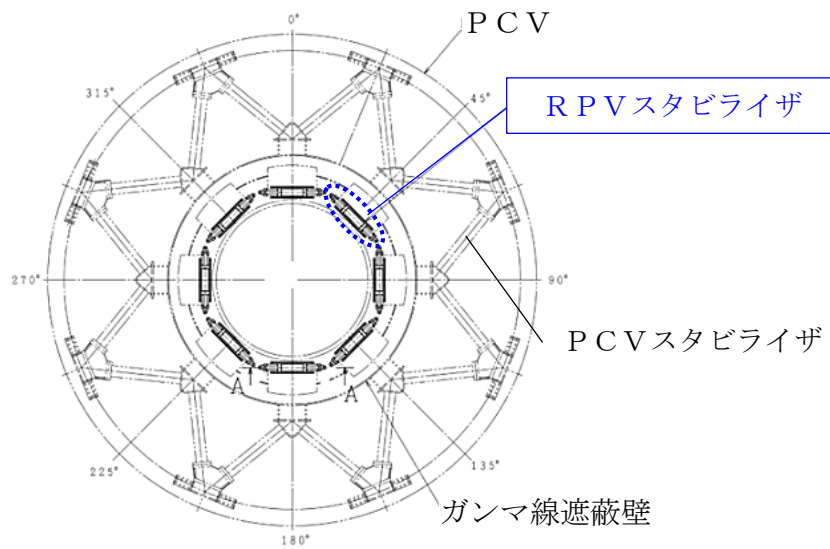
##### 4.1 R P Vスタビライザ

###### 4.1.1 R P Vスタビライザの構造

R P Vスタビライザは、ガンマ線遮蔽壁頂部に円周状に8箇所設置され、R P V付属構造物であるスタビライザブラケットをあらかじめ初期締付荷重を与えたサラバネを介して両側から挟み込む構造であり、サラバネを介して地震時の水平方向荷重をガンマ線遮蔽壁へ伝達させる機能を有する。R P Vスタビライザの概略図を第4.1.1-1図に、構造図を第4.1.1-2図に示す。

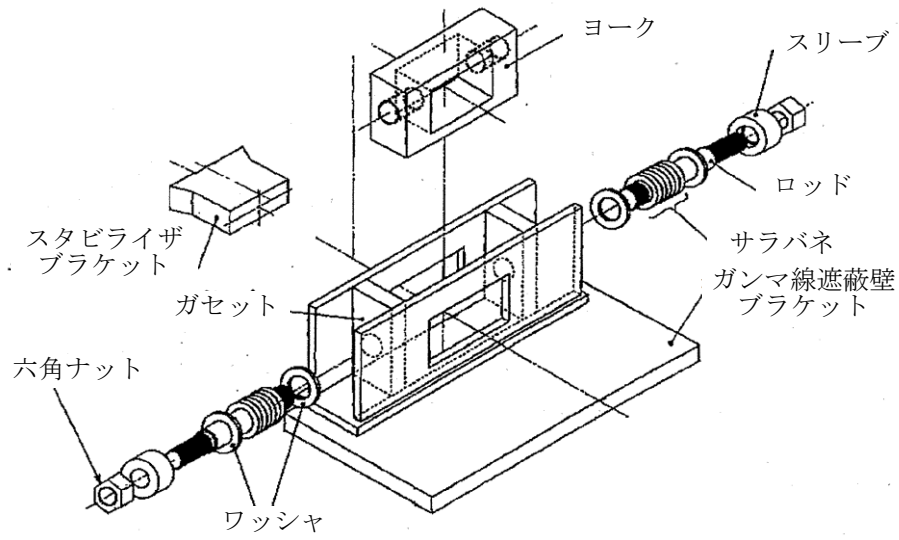


原子炉建物全体模式図

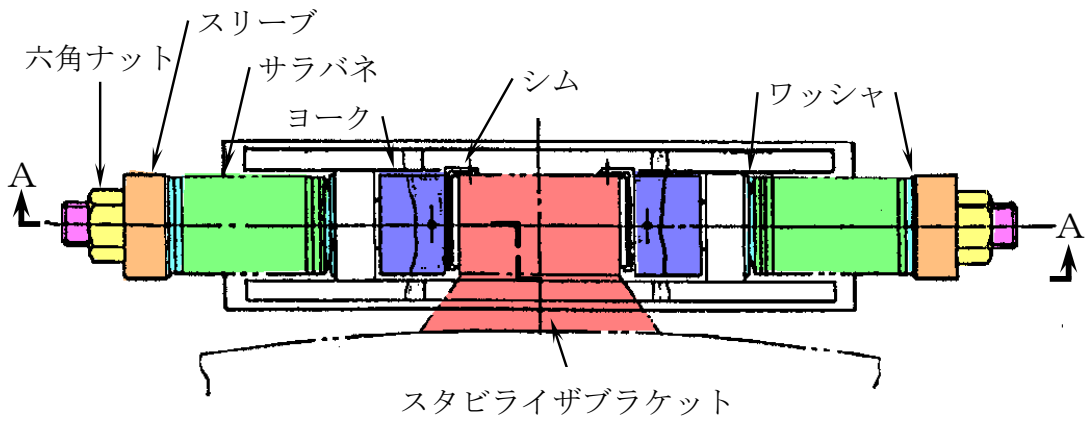


PCV平面図

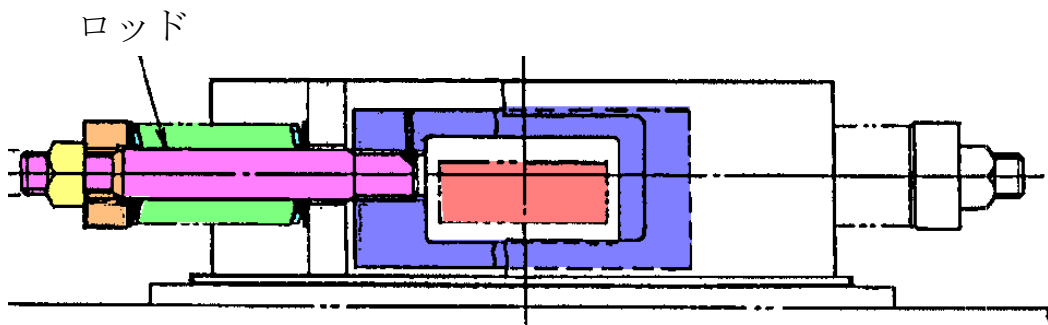
第 4.1.1-1 図 RPVスタビライザ概略図



RPVスタビライザ分解図



RPVスタビライザ平面図



断面A-A

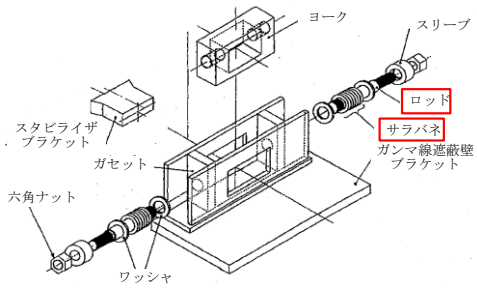
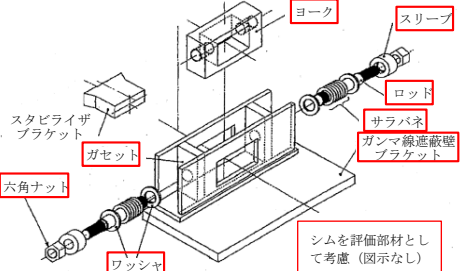
第 4.1.1-2 図 RPVスタビライザ構造図

#### 4.1.2 既工認と今回工認での変更点

R P Vスタビライザのばね定数について、既工認からの変更点を第 4.1.2-1 表に示す。既工認では、R P Vスタビライザの剛性に大きく寄与するロッド、サラバネのみ剛性を考慮しているが、今回工認ではガンマ線遮蔽壁ブラケット、スリーブ等の剛性を追加で考慮する。

なお、上記ばね定数算出方法は大間 1 号炉建設工認、島根 3 号炉建設工認及び東海第二の新規制工認において適用実績がある。

第 4.1.2-1 表 R P Vスタビライザばね定数の変更点

	既工認	今回工認
計算方法	理論式による (各部材の剛性を直列ばねとして合成)	同左
評価部材 (赤枠部)		
ばね定数	$9.6 \times 10^6$ [kN/m]	$6.8 \times 10^6$ [kN/m]

#### 4.1.3 既工認におけるばね定数算出方法

既工認では、サラバネ及びロッドを主たる支持部材と考え、第4.1.3-1図に示すようなばね定数算出モデルを設定している。

サラバネ( $K_S$ )及びロッド( $K_R$ )について、R P Vスタビライザ 1 基の片側分のばね定数( $K_{1\text{half}}$ )を直列ばねで定義して以下となる。

$$K_{1\text{half}} = \frac{K_S \cdot K_R}{K_S + K_R}$$

R P Vスタビライザ 1 基の両側分のばね定数( $K_1$ )を片側分のばね定数( $K_{1\text{half}}$ )の並列ばねで定義して以下となる。

$$K_1 = K_{1\text{half}} + K_{1\text{half}} = \frac{2 \cdot K_S \cdot K_R}{K_S + K_R}$$

R P Vスタビライザ 8 基分の全体でのばね定数 ( $K$ ) を荷重-変位の関係から算出する。第4.1.3-2図のとおり R P Vスタビライザに強制変位  $x$  を負荷した場合に強制変位と同じ方向に生じる全体荷重  $W$  を算出する。

$90^\circ$  及び  $270^\circ$  の位置に設置された R P Vスタビライザに生じる荷重を  $W_1$  ,  $45^\circ$  ,  $135^\circ$  ,  $225^\circ$  及び  $315^\circ$  の位置に設置された R P Vスタビライザに生じる荷重を  $W_2'$  とし、荷重  $W_2'$  の強制変位  $x$  と同じ方向の分力を  $W_2$  とする。

強制変位  $x$  を負荷したときの  $45^\circ$  ,  $135^\circ$  ,  $225^\circ$  及び  $315^\circ$  の位置に設置され

たRPVスタビライザに生じる接線方向の変位は  $x \cdot \cos \alpha$  であることから、荷重  $W_2'$  は以下のとおりとなる。

$$W_2' = K_1 \cdot x \cdot \cos \alpha$$

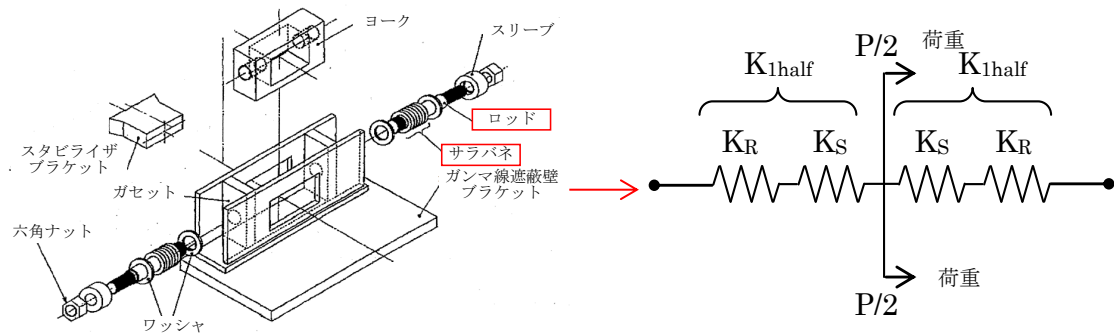
第4.1.3-2図内の拡大図の関係から強制変位  $x$  と同じ方向の分力  $W_2$  は以下のとおりとなる。

$$W_2 = W_2' \cos \alpha = K_1 \cdot x \cdot \cos^2 \alpha$$

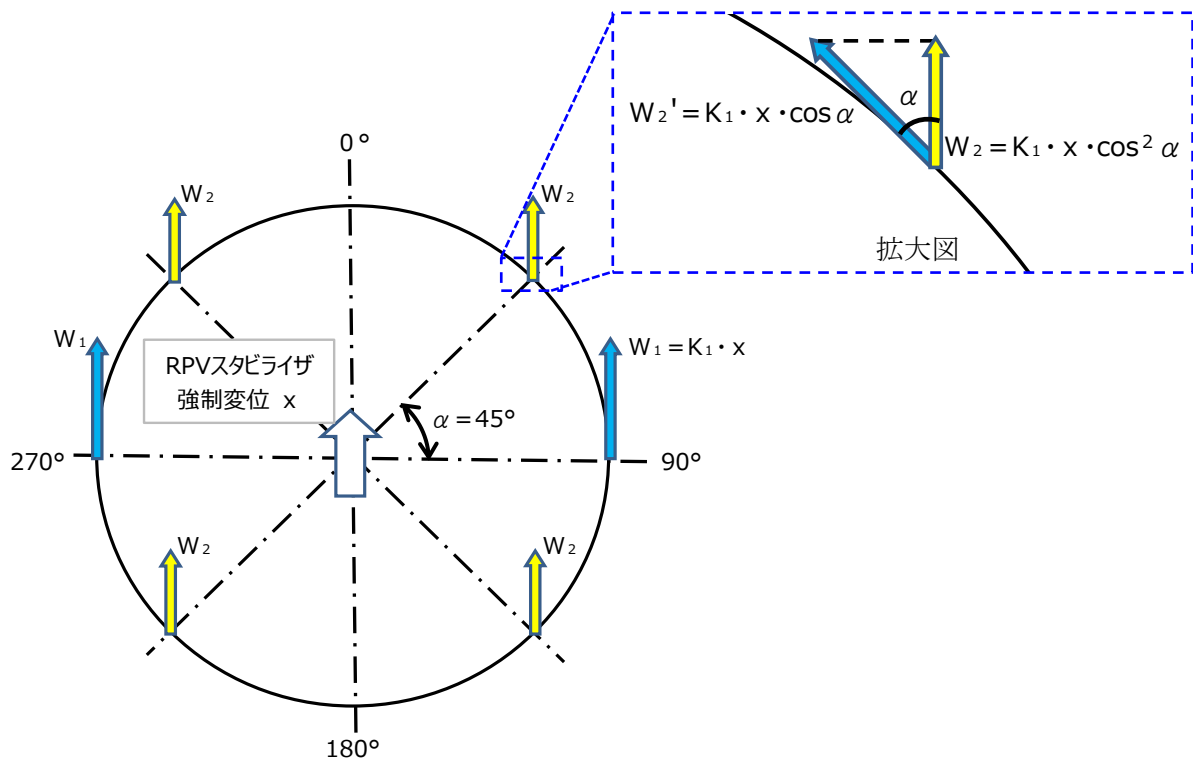
従って、RPVスタビライザ全体のばね定数 ( $K$ ) は以下のとおりとなる。

$$W = 2 \cdot W_1 + 4 \cdot W_2 = 2 \cdot (K_1 \cdot x) + 4 \cdot (K_1 \cdot x \cdot \cos^2 \alpha) = 4 \cdot K_1 \cdot x$$

$$K = \frac{W}{x} = 4 K_1 = 4 \cdot \frac{2 \cdot K_S \cdot K_R}{K_S + K_R} = \frac{8 \cdot K_S \cdot K_R}{K_S + K_R}$$



第 4.1.3-1 図 既工認におけるばね定数算出モデル



第 4.1.3-2 図 水平荷重の分配

#### 4.1.4 今回工認におけるばね定数算出方法

##### (1) R P Vスタビライザのばね定数算出方法

今回工認においては、サラバネ及びロッドの他にR P Vからの外力の支持に寄与する部材を評価対象範囲に追加する。今回工認におけるばね定数算出モデルを第 4.1.4-4 図に示す。サラバネ( $K_S$ )及びロッド ( $K_R$ )に加え、ガセット( $K_G$ )、ヨーク(引張方向 $K_{YT}$ 、圧縮方向 $K_{YC}$ )、スリーブ( $K_{SL}$ )、六角ナット( $K_H$ )、ワッシャ( $K_W$ )について、R P Vスタビライザ1基の片側分のばね定数( $K_{1half}$ )を直列ばねで定義して以下のように表す。(2)にて各評価部材のばね定数の算出方法を示し、算出結果を第 4.1.4-1 表に示す。なお、縦弾性係数は「発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2005年版(2007年追補版を含む)) (以下「JSME2005/2007年版」という。))の値を用いる。

$$K_{1half(T)} = \frac{1}{\frac{1}{K_H} + \frac{1}{K_{SL}} + \frac{1}{K_W} + \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_R} + \frac{1}{K_G} + \frac{1}{K_{YT}}} \quad (\text{引張側})$$

$$K_{1half(C)} = \frac{1}{\frac{1}{K_H} + \frac{1}{K_{SL}} + \frac{1}{K_W} + \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_R} + \frac{1}{K_G} + \frac{1}{K_{YC}}} \quad (\text{圧縮側})$$

また、R P Vスタビライザ1基の両側分のばね定数 ( $K_1$ ) を片側分のばね定数の並列ばね及びガンマ線遮蔽壁ブラケット ( $K_B$ )、シム ( $K_{SM}$ ) の直列ばねで定義して以下のように表す。

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{K_{1half(T)} + K_{1half(C)}} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_{SM}}}$$

8基分全体でのばね定数は次式のように表される。

$$K = 4K_1 = \frac{4}{\frac{1}{K_{1half(T)} + K_{1half(C)}} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_{SM}}}$$

ここで、

- $K$  : R P Vスタビライザ8基分のばね定数
- $K_1$  : R P Vスタビライザ1基分のばね定数
- $K_{1half}$  : R P Vスタビライザ1基分(片側分)のばね定数
- $K_S$  : サラバネのばね定数
- $K_R$  : ロッドのばね定数
- $K_G$  : ガセットのばね定数
- $K_{YT}$  : ヨークのばね定数(引張方向)
- $K_{YC}$  : ヨークのばね定数(圧縮方向)
- $K_{SL}$  : スリーブのばね定数

- K<sub>H</sub> : 六角ナットのばね定数
- K<sub>W</sub> : ワッシャのばね定数
- K<sub>B</sub> : ガンマ線遮蔽壁ブラケットのばね定数
- K<sub>SM</sub> : シムのばね定数

である。

(2) 評価部材のばね定数算出方法

a. サラバネ

メーカ試験結果よりサラバネ一枚あたりのばね定数は、 [kg/mm] である。

R P Vスタビライザの片側にサラバネは並列ばねになるように  枚重ねているので、片側全体のばね定数はこれらの積で算出する。

b. ロッド

ロッドの軸方向ばね定数は、以下の式に基づき算出する。

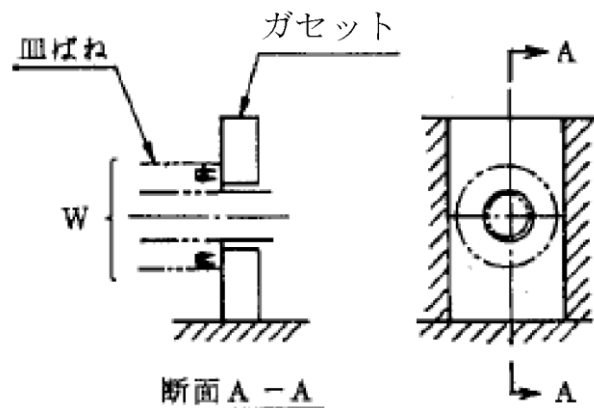
$$K_R = \frac{E}{\frac{L_{R1}}{A_{R1}} + \frac{L_{R2}}{A_{R2}}}$$

ここで、

- A<sub>R1</sub> : 丸棒部断面積
- A<sub>R2</sub> : ねじ部断面積
- L<sub>R1</sub> : 丸棒部長さ
- L<sub>R2</sub> : 丸棒部先端～スリーブの六角ナット側端面の距離
- E : 縦弾性係数

c. ガセット

ガセットは、第 4.1.4-1 図に示す計算モデルを用いて F E M解析による荷重-変位関係から算出する。



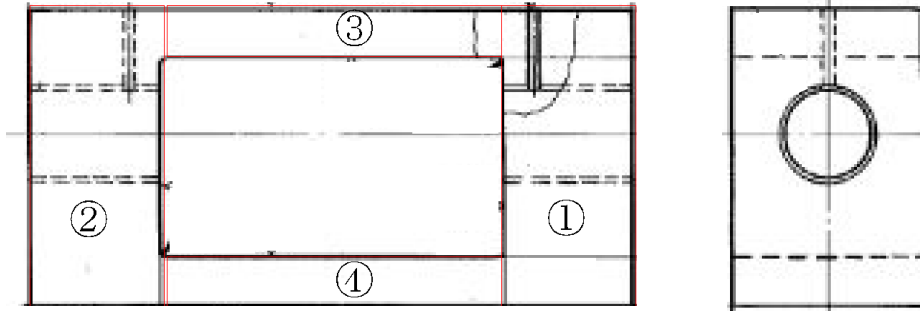
第 4.1.4-1 図 ガセットの構造

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



d. ヨーク

ヨークのばね定数は、第 4. 1. 4-2 図のとおり分割した①～④のそれぞれのばね定数を計算し、直列ばねとして引張ばね定数 ( $K_{YT}$ ) と圧縮ばね定数 ( $K_{YC}$ ) を算出する。



第 4. 1. 4-2 図 ヨークのばね定数算出のための計算モデル分割

i) 引張

ヨークの引張によるばね定数は、以下の式に基づき算出する。

$$K_{YT} = \frac{1}{\frac{1}{K_{YS1}} + \frac{1}{K_{YTE}} + \frac{2}{K_{YB}} + \frac{2}{K_{YS2}}}$$

ここで、

$K_{YS1}$  : ①及び②のねじ部のせん断によるばね定数 ( $= \frac{A_{YS1} \cdot G_Y}{R_Y}$ )

$A_{YS1}$  : ①及び②のねじ穴側面積

$R_Y$  : ねじ穴半径

$G_Y$  : せん断弾性係数

$K_{YTE}$  : ③及び④の引張りによるばね定数 ( $= \frac{A_{YTE} \cdot E}{L_{YTE}}$ )

$A_{YTE}$  : ③及び④の断面積

$L_{YTE}$  : ③及び④の長さ

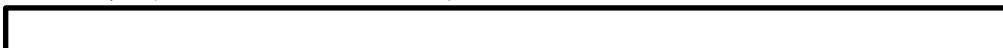
$K_{YB}$  : ①及び②の曲げによるばね定数



$I$  : 断面二次モーメント

$E$  : 縦弾性係数

以下は、第 4. 1. 4-3 図を参照。



本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



$K_{YS2}$  : ①及び②の板部のせん断によるばね定数



$t_Y$  : ①及び②の板部の長さ

$G_Y$  : せん断弾性係数

$I$  : 断面二次モーメント



第 4.1.4-3 図 ①及び②の曲げによるばね定数計算モデル

ii) 圧縮

ヨークの圧縮によるばね定数は、以下の式に基づき算出する。

$$K_{YC} = K_{YS1}$$

e. スリーブ

スリーブの軸方向ばね定数は、以下の式に基づき算出する。

$$K_{SL} = \frac{E}{\frac{L_{SL1}}{A_{SL1}} + \frac{L_{SL2}}{A_{SL2}}}$$

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

ここで、

- $A_{SL1}$  : 座繰り穴側断面積
- $A_{SL2}$  : 貫通穴側断面積
- $L_{SL1}$  : 座繰り穴深さ
- $L_{SL2}$  : 貫通穴深さ
- $E$  : 縦弾性係数

f. 六角ナット

六角ナットのせん断によるばね定数は、以下の式に基づき算出する。

$$K_H = \frac{A_H \cdot G_H}{R_H}$$

ここで、

- $A_H$  : ねじ穴側面積
- $R_H$  : 穴の半径
- $G_H$  : せん断弾性係数

g. ワッシャ

ワッシャの軸方向ばね定数は、以下の式に基づき算出する。

$$K_W = \frac{A_W \cdot E}{L_W}$$

ここで、

- $A_W$  : 断面積
- $L_W$  : 板厚
- $E$  : 縦弾性係数

h. ガンマ線遮蔽壁ブラケット

ガンマ線遮蔽壁ブラケットによるばね定数は、以下の式に基づき算出する。

$$K_B = \frac{A_B \cdot G_B}{L_B}$$

ここで、

- $A_B$  : 断面積
- $L_B$  : ガンマ線遮蔽壁～RPVスタビライザ端部の距離
- $G_B$  : せん断弾性係数

i. シム

シムの軸方向ばね定数は、以下の式に基づき算出する。

$$K_{SM} = \frac{A_{SM} \cdot E}{t_{SM}}$$

ここで、

$A_{SM}$  : 断面積

$t_{SM}$  : 厚さ

$E$  : 縦弾性係数

(3) R P Vスタビライザのばね定数算出結果

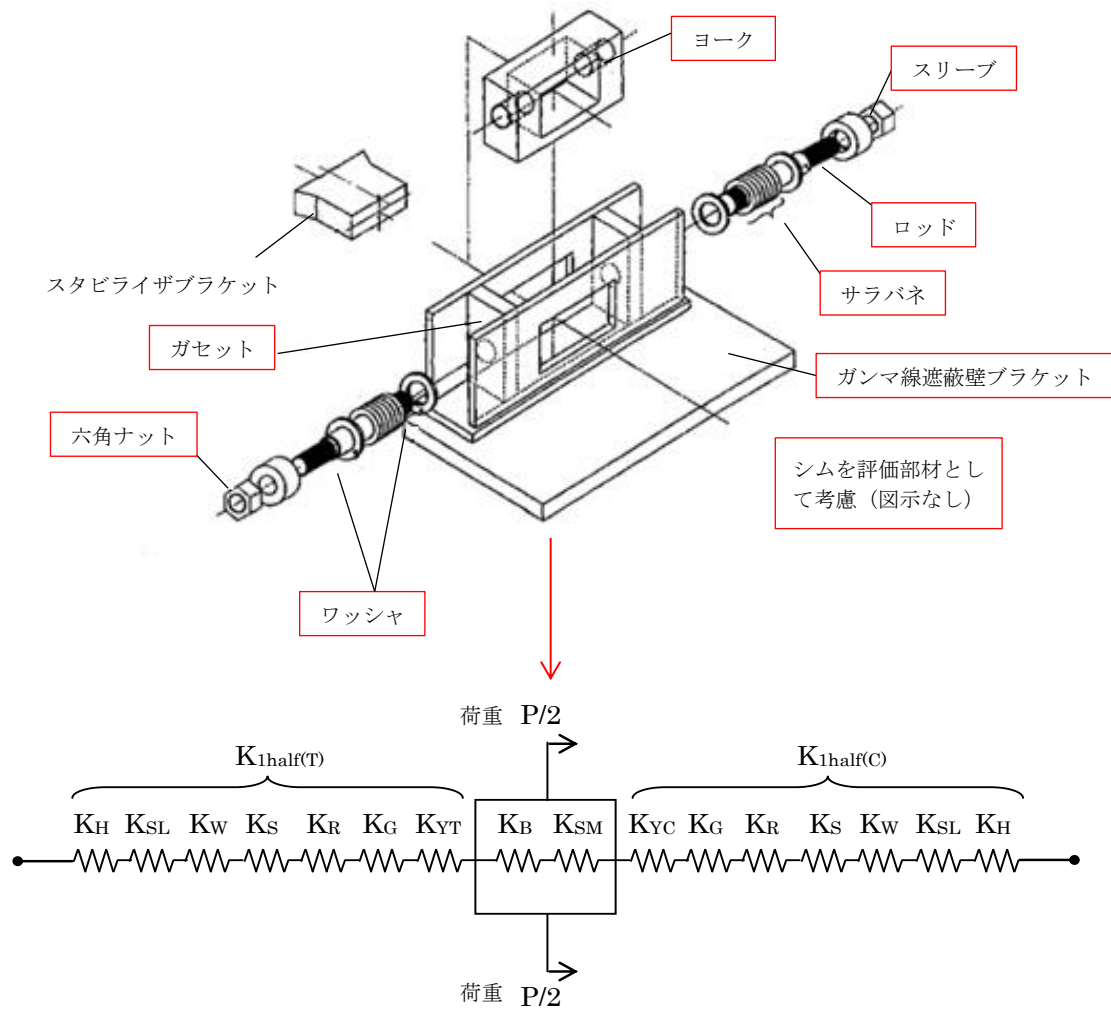
(2)で算出した各部材のばね定数並びに(1)で算出したR P Vスタビライザ1基及び全体のばね定数の算出結果を下表に示す。

第 4.1.4-1 表 各部材のばね定数

[単位：kN/m]

R P Vスタビライザの部材	既工認	今回工認
サラバネ ( $K_S$ )	$2.3 \times 10^6$	同左
ロッド ( $K_R$ )	$3.7 \times 10^6$	$3.3 \times 10^6$
ガセット ( $K_G$ )	—	$3.3 \times 10^7$
ヨークのばね定数 (引張方向) ( $K_{YT}$ )	—	$4.3 \times 10^6$
ヨークのばね定数 (圧縮方向) ( $K_{YC}$ )	—	$6.7 \times 10^7$
スリーブのばね定数 ( $K_{SL}$ )	—	$7.1 \times 10^7$
六角ナットのばね定数 ( $K_H$ )	—	$4.0 \times 10^7$
ワッシャのばね定数 ( $K_W$ )	—	$5.8 \times 10^8$
ガンマ線遮蔽壁ブラケット ( $K_B$ )	—	$8.8 \times 10^6$
シムのばね定数 ( $K_{SM}$ )	—	$2.8 \times 10^8$
R P Vスタビライザ1基分のばね定数	$2.4 \times 10^6$	$1.7 \times 10^6$
R P Vスタビライザ全体のばね定数	$9.6 \times 10^6$	$6.8 \times 10^6$

前述の計算結果に基づき、R P Vスタビライザのばね定数を  $6.8 \times 10^6$  [kN/m]と設定する。なお、既工認と比べて今回工認のばね定数が小さくなっているが、今回工認ではガセット、ヨーク、スリーブ、六角ナット、ワッシャ、ガンマ線遮蔽壁ブラケット、シムの剛性を考慮して、直列ばね成分が増えたことにより全体のばね定数が低下した。

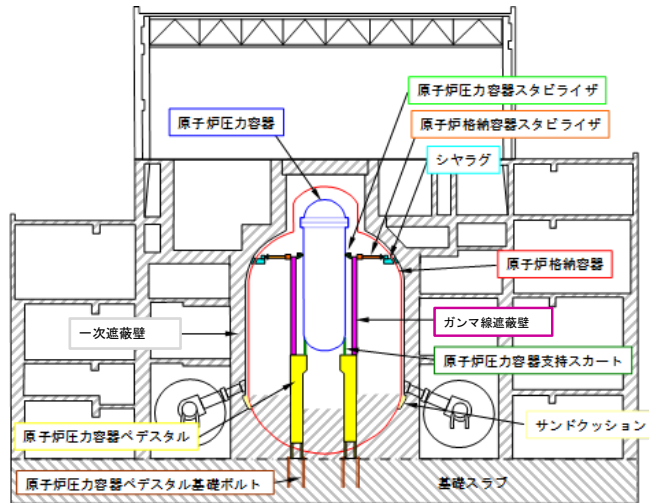


第 4.1.4-4 図 今回工認におけるばね定数算出モデル

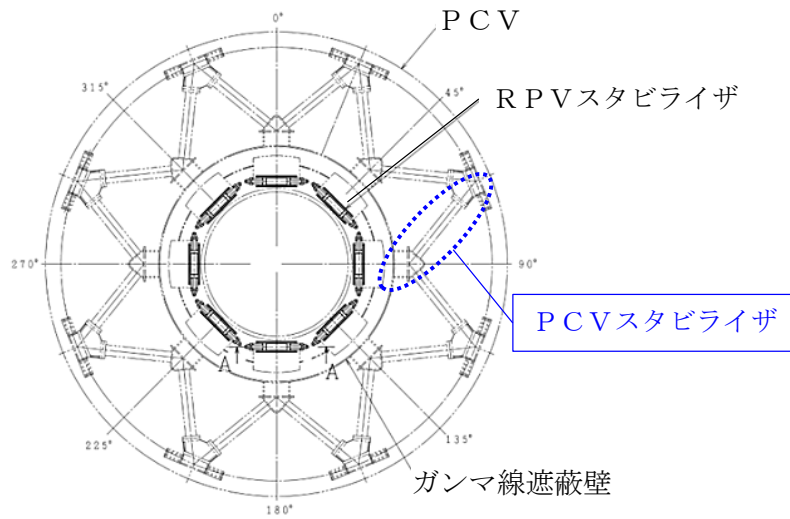
## 4.2 PCVスタビライザ

### 4.2.1 PCVスタビライザの構造

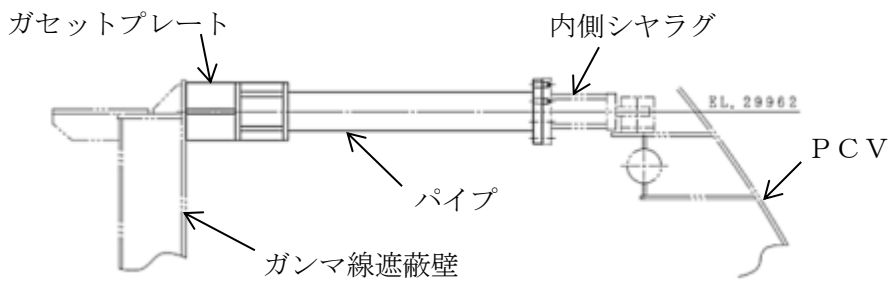
PCVスタビライザはガンマ線遮蔽壁外側上部に溶接で固定されたトラス状の構造物であり、多角形配置のシャラグを介してガンマ線遮蔽壁に作用する水平地震荷重をPCVに伝達する機能を有する。PCVスタビライザの概略図を第4.2.1-1 図に示す。PCVスタビライザの構成部材としては、円筒形状のパイプ、ガンマ線遮蔽壁との取り付け部であるガセットプレート、PCVとの取り付け部である内側シャラグからなる。ガセットプレートとガンマ線遮蔽壁の取り付け部及び内側シャラグの構造を第4.2.1-2 図に示す。



原子炉建物全体模式図

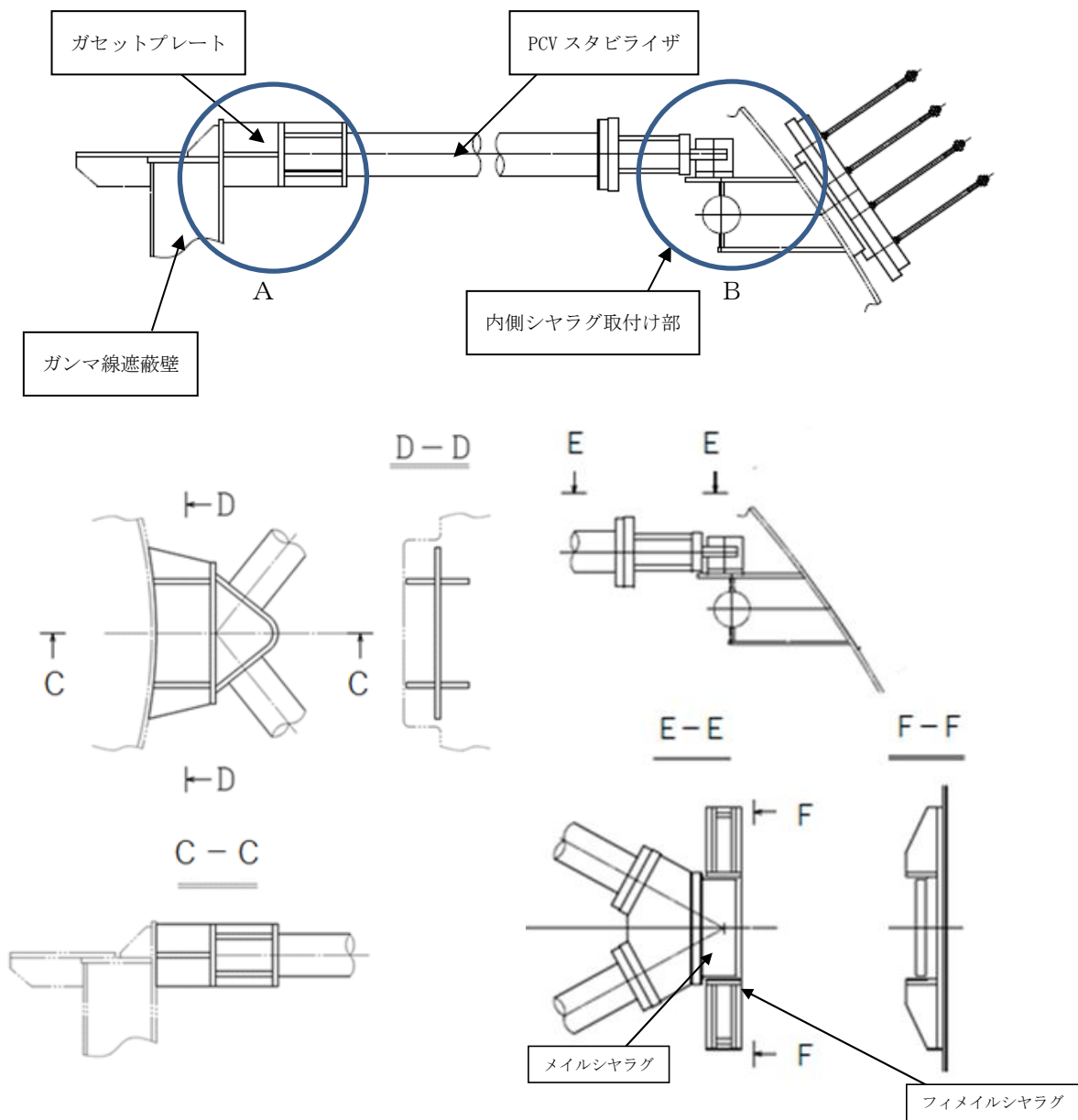


PCV平面図



PCVスタビライザ構造図

第4.2.1-1図 PCVスタビライザ概略図



ガセットプレート拡大図 (A部)

内側シヤラグ取付け部拡大図 (B部)

第 4.2.1-2 図 ガセットプレートとガンマ線遮蔽壁の取付け部及び内側シヤラグ構造

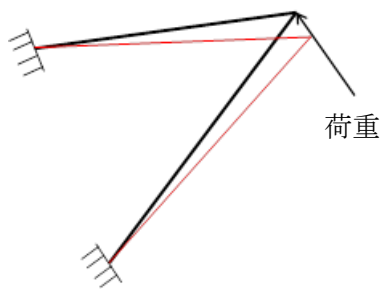
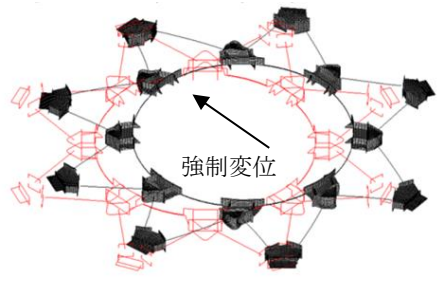
#### 4.2.2 既工認と今回工認での変更点

PCVスタビライザばね定数について、既工認からの変更点を第4.2.2-1表に示す。既工認では、PCVスタビライザの剛性に最も大きく寄与するパイプをモデル化対象として、1対のトラス（パイプ2本）の荷重-変位関係によりばね定数を算定している。今回工認では、取り合い部であるガセットプレート及び内側シヤラグについてもモデル化対象に含め、最新の許認可手法に合わせて全体系モデルによるFEM解析を適用し、より実現象に即したばね定数を算定する。



全体系モデルによるFEM解析手法は、東海第二の新規制工認にてPCVスタビライザのばね定数算出にて適用実績があり、また、大間1号炉建設工認にて同様な多角形配置の構造物である制御棒駆動機構ハウジングレストレントビームのばね定数算出にて適用実績がある。

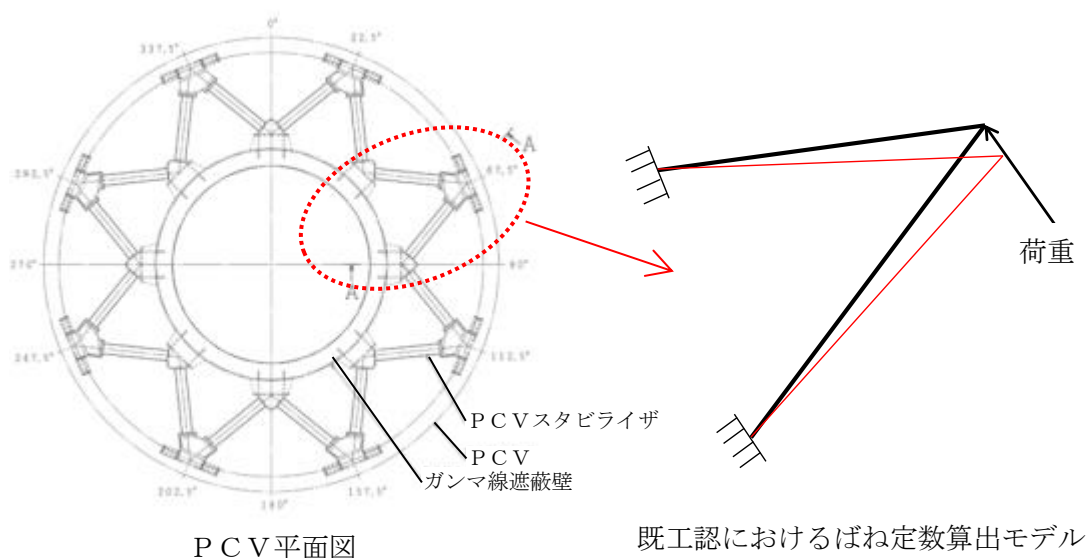
第4.2.2-1表 PCVスタビライザの変更点

	既工認	今回工認
計算方法	手計算 (1対のトラス(パイプ2本)の荷重-変位関係により算出)	FEM解析 (固定部のガセットプレート及び内側シヤラグをモデル化した全体モデルの荷重-変位関係により算出)
評価モデル		
ばね定数	$5.3 \times 10^6$ (kN/m)	$3.5 \times 10^6$ (kN/m)

#### 4.2.3 既工認におけるばね定数算出方法

##### 4.2.3.1 計算モデルの範囲

既工認におけるばね定数算出のモデル化範囲を第4.2.3.1-1図に示す。PCVスタビライザのうち、1対のトラス(パイプ2本)についてモデル化し、パイプの断面剛性を設定したトラスでの荷重-変位関係からばね定数を算出する。



第4.2.3.1-1図 既工認におけるばね定数算出のモデル化範囲

#### 4.2.3.2 算出方法

既工認におけるばね定数算出モデルを第4.2.3.2-1図に示す。1対のトラス（パイプ2本）において、水平方向荷重による変位量 $\delta$ が生じた際の荷重及び変位の算出式は以下となる。

$$\delta 1 = \delta \sin \theta$$

$$F = \sigma \cdot A = E \cdot \frac{\delta 1}{L} \cdot A$$

$$W = 2 \cdot F \cdot \sin \theta$$

ここで、

$\delta$  : トラスの荷重方向の変位

$\delta 1$  : トラスの長さ方向の変位

$\theta$  : パイプ角度

$W$  : 1対のトラスに生じる荷重

$F$  : パイプに生じる荷重

$E$  : 縦弾性係数

$L$  : パイプの長さ

$A$  : パイプの断面積

上記の式より、1対のトラス（パイプ2本）における荷重－変位関係の式は以下となる。

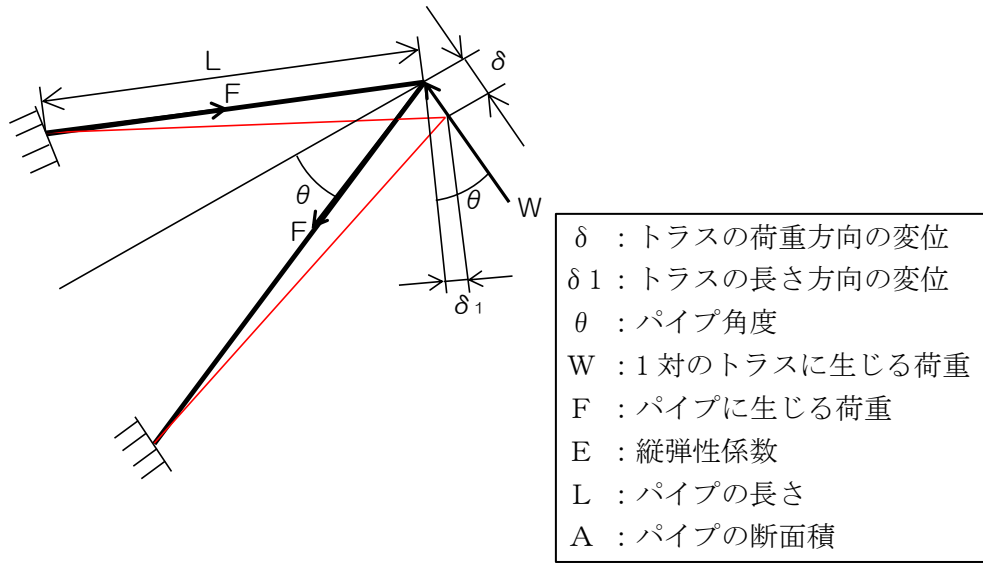
$$W = 2 \cdot E \cdot \frac{\delta 1}{L} \cdot A \cdot \sin \theta = 2 \cdot \frac{EA}{L} \cdot \sin^2 \theta \cdot \delta$$

よって、1対のトラス（パイプ2本）におけるばね定数( $K_1$ )は以下となる。

$$K_1 = \frac{W}{\delta} = 2 \cdot \frac{EA}{L} \cdot \sin^2 \theta$$

以上より、PCVスタビライザ全体でのばね定数( $K$ )は以下となる。

$$K = 4K_1 = 4 \cdot 2 \cdot \frac{EA}{L} \cdot \sin^2 \theta = 8 \cdot \frac{EA}{L} \cdot \sin^2 \theta$$



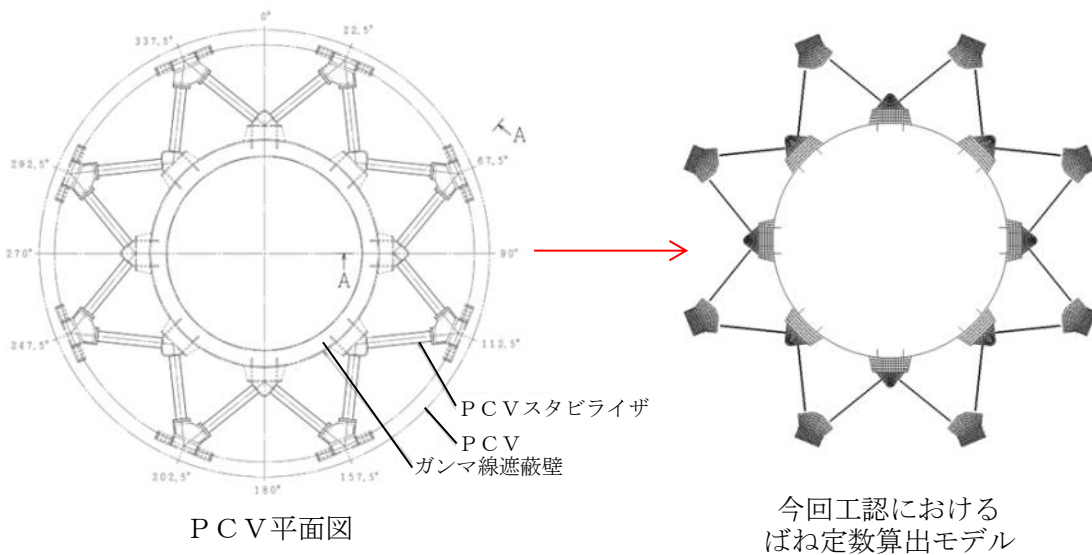
第 4.2.3.2-1 図 既工認におけるばね定数算出モデル

#### 4.2.4 今回工認におけるばね定数算出方法

##### 4.2.4.1 解析モデルの範囲

今回工認におけるばね定数算出モデルを第 4.2.4.1-1 図に示す。PCV スタビライザの構成部材であるパイプ、ガセットプレート及び内側シヤラグを 360° 全体でモデル化する。

なお、今回評価に用いる FEM 解析には「NASTRAN Ver. 2005」を使用する。



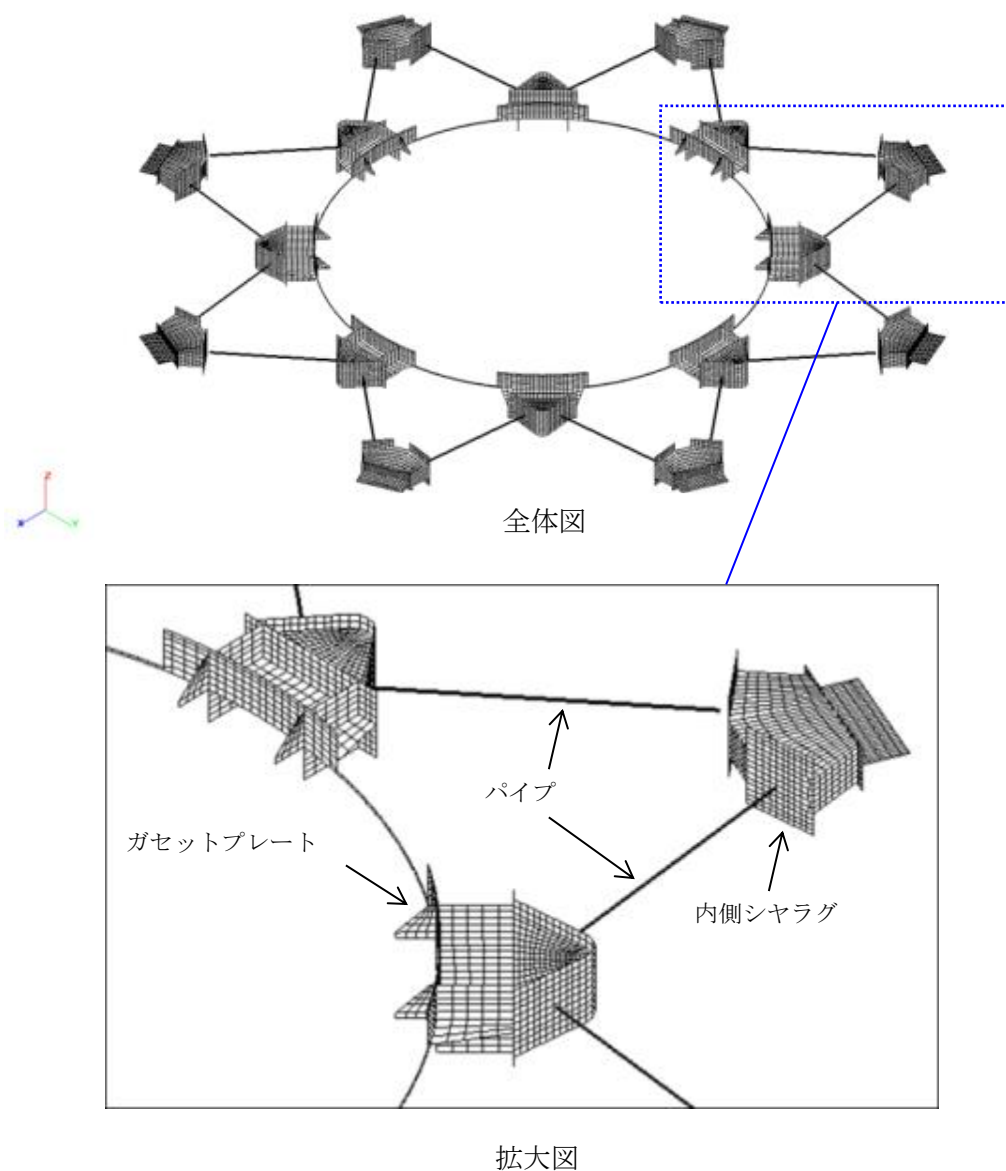
第 4.2.4.1-1 図 今回工認におけるばね定数算出のモデル化範囲

#### 4.2.4.2 解析モデル

解析モデルの諸元を第4.2.4.2-1表に、解析モデル図を第4.2.4.2-1図に示す。パイプは断面特性を考慮したビーム要素、ガセットプレート及び内側シヤラグはシェル要素によりモデル化する。

第4.2.4.2-1表 FEM解析モデルの諸元

節点数	要素数	使用要素タイプ	
		パイプ	ビーム要素
19,336	18,768	ガセットプレート	シェル要素
		内側シヤラグ	



第4.2.4.2-1図 PCVスタビライザ解析モデル

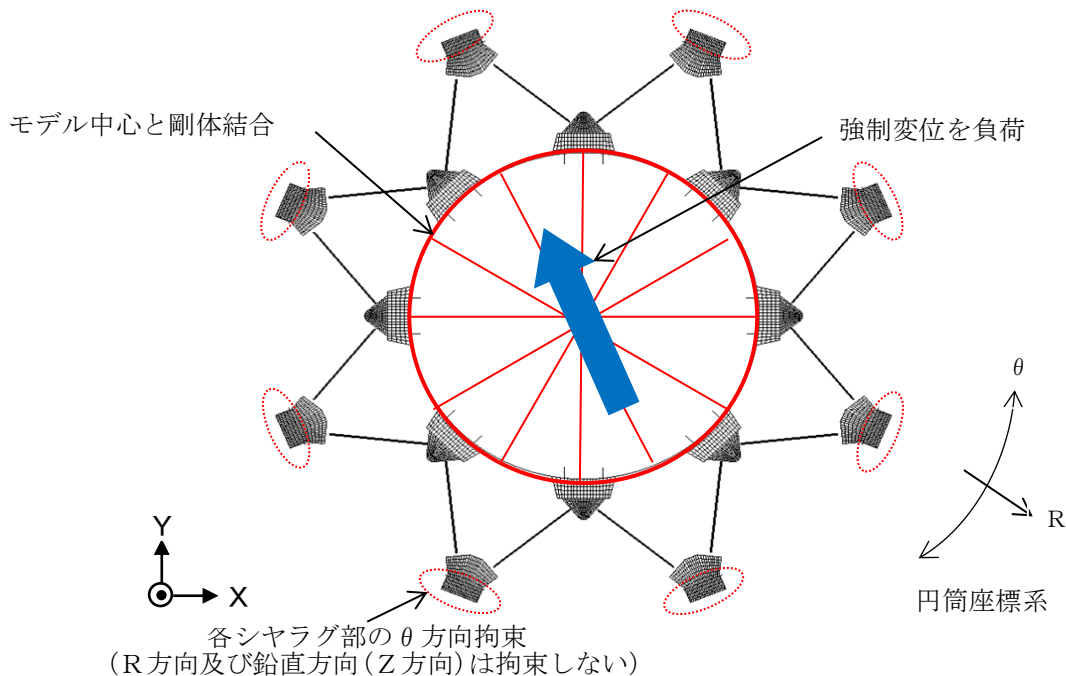
#### 4.2.4.3 解析条件

解析モデルの境界条件及び負荷条件を第 4.2.4.3-1 図に示す。ガンマ線遮蔽壁とガセットプレート境界条件はモデル中心と剛体結合として定義し、剛体結合されたモデル中心に強制変位を対角の位置にある内側シヤラグを結んだ線上に負荷する。なお、周方向に等間隔で設置された P C V スタビライザ 8 基で荷重を負担するため、ばね定数は強制変位を負荷する方向によらず一定の値となる。内側シヤラグと P C V との境界条件は、メイルシヤラグがフィメールシヤラグと嵌め合い構造となっていることから、円筒座標系の R 方向及び鉛直方向 (Z 方向) は拘束せず、 $\theta$  方向を拘束する。

P C V スタビライザの各構成部材の材質及び材料物性を第 4.2.4.3-1 表に示す。縦弾性係数は、JSME2005/2007 年版の値を用いる。

第 4.2.4.3-1 表 各構成部材の材質及び材料物性

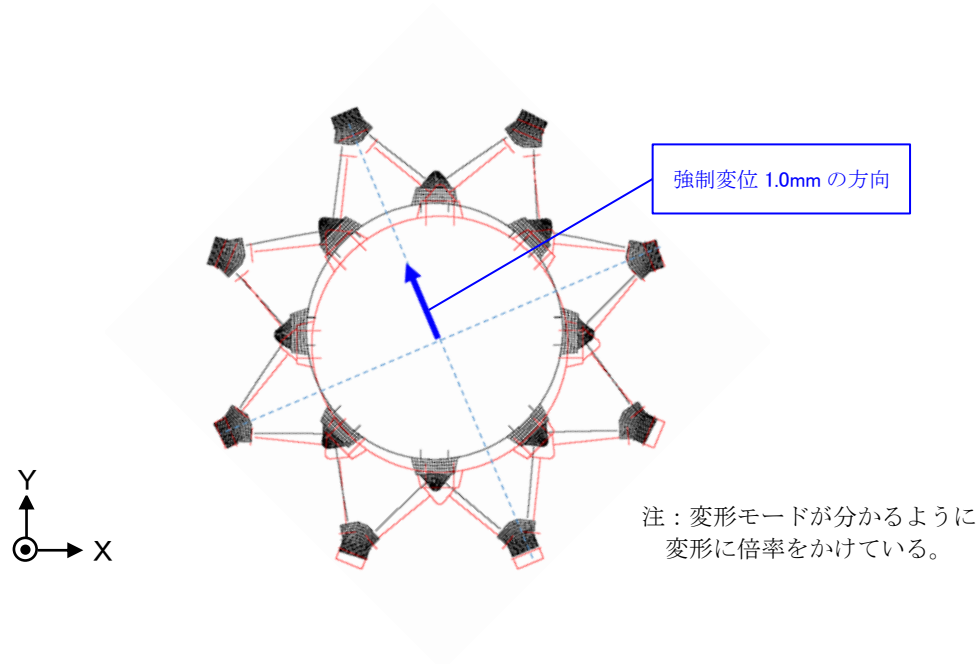
構成部材	材質	縦弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 $\nu$
パイプ	STS410(STS42)	$2.01 \times 10^5$	0.3
ガセットプレート	SM400B(SM41B)	$2.01 \times 10^5$	0.3
内側シヤラグ	SGV480(SGV49)	$2.01 \times 10^5$	0.3



第 4.2.4.3-1 図 境界条件及び負荷条件

#### 4.2.4.4 解析結果

強制変位を負荷させた際の変形図を第4.2.4.4-1図に示す。この図では変形前の形状を赤線、変形後の形状を黒線で示す。荷重は、剛体結合されたモデル中心の反力として算出する。この解析結果から得た荷重-変位関係から、P C Vスタビライザのばね定数を  $3.5 \times 10^6$  [kN/m] と設定する。



第4.2.4.4-1図 変形図

#### 4.2.4.5 ばね定数低下に係る要因の考察

##### 4.2.4.5.1 要因考察

既工認と比べて今回工認（FEM解析）のばね定数が低下した要因を考察するため、部材の剛性の考慮有無や結合方法等を変更した参考モデル（I-1、2及びII）を用いてばね定数を算出した。

要因の考察に用いた解析モデルの概要を第4.2.4.5.1-1表に示す。また、各解析モデルにより算出されたばね定数を第4.2.4.5.1-1図に示す。

第4.2.4.5.1-1表 解析モデルの概要

モデル名称	参考モデルI-1	参考モデルI-2	参考モデルII	今回工認モデル
モデル概要	既工認のトラス1対モデルをFEMモデルで再現したモデル	トラス1対について、ガセットプレート及び内側シヤラグを剛体として考慮し、パイプの曲げ及びせん断剛性を考慮したモデル	トラス1対について、パイプの曲げ及びせん断剛性に加え、ガセットプレート及び内側シヤラグの剛性を考慮したモデル	全トラスについて、パイプの曲げ及びせん断剛性と、ガセットプレート及び内側シヤラグの剛性を考慮したモデル
ガセットプレート／内側シヤラグ	—	剛体	剛性考慮	剛性考慮
パイプとの取り付け部	ピン結合	剛結合	剛結合	剛結合
パイプ	軸変形を考慮 (長さ L=3749mm)	軸変形、曲げ、せん断を考慮 (長さ L=2574.1mm)	軸変形、曲げ、せん断を考慮 (長さ L=2574.1mm)	軸変形、曲げ、せん断を考慮 (長さ L=2574.1mm)
解析モデル図				

#### 《解析結果の考察》

##### ① 既工認と参考モデルI-1の比較・考察

参考モデルI-1により算出されたばね定数は既工認と同値であるため、FEM解析モデルは既工認の計算モデルと同等である。

##### ② 参考モデルI-1と参考モデルI-2の比較・考察

参考モデルI-2では、ガセットプレート及び内側シヤラグを剛体としてモデル化したことによりパイプ長が短くなったため、ばね定数の値が参考モデルI-1より大きくなる。

##### ③ 参考モデルI-2と参考モデルIIの比較・考察

参考モデルIIでは、ガセットプレート及び内側シヤラグに剛性を考慮することにより、ばね定数の値が参考モデルI-2より小さくなる。

##### ④ 参考モデルIIと今回工認モデルの比較・考察

本来ガセットプレートは隣り合うパイプの荷重を受け持つこととなるが

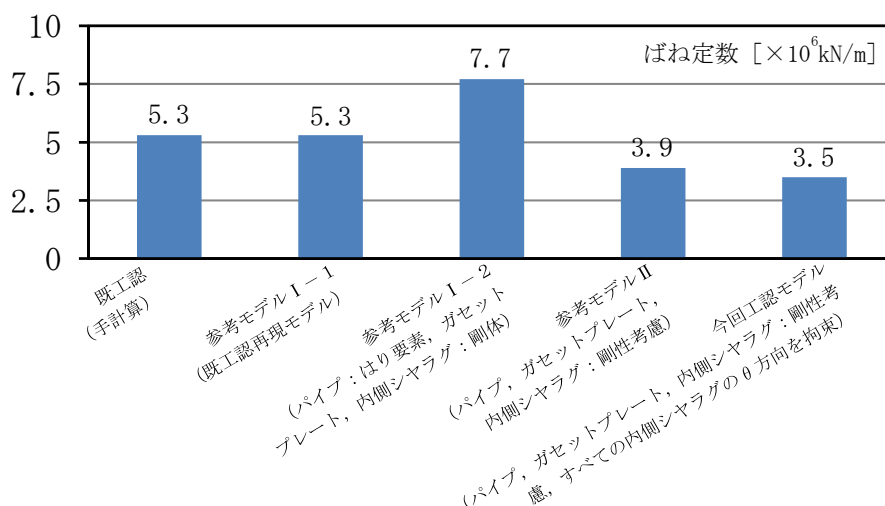
(第 4.2.4.5.1-2 図 (b) 参照), 参考モデルⅡでは, 1 対のトラスのみの荷重を受け持つモデル化を行っており(第 4.2.4.5.1-2 図(a)参照), 隣り合うパイプからの荷重を考慮していない。このためガセットプレートの変形が小さくなり,ばね定数の値が今回工認モデルより大きくなる。

PCVスタビライザを構成する各部材の剛性を考慮することにより, 現実的なばね定数を算出した。その中でも, ガセットプレート及び内側シヤラグの剛性を考慮したことが, ばね定数低下に大きく寄与している。

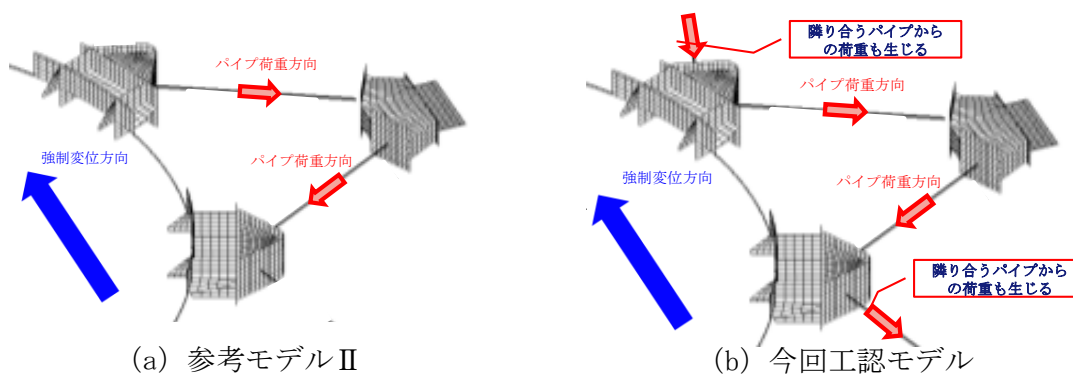
以上の考察より, 今回工認のばね定数は妥当なものであることを確認した。

[単位:  $\times 10^6 \text{kN/m}$ ]

項目	既工認	参考モデルⅠ-1	参考モデルⅠ-2	参考モデルⅡ	今回工認モデル
トラス 1 対	1.3	1.3	1.9	1.0	—
全体 (トラス 8 対)	5.3	5.3	7.7	3.9	3.5



第 4.2.4.5.1-1 図 各解析モデルのばね定数



第 4.2.4.5.1-2 図 参考モデルⅡと今回工認モデルの荷重伝達



## 5. 構造物間ばね定数の設定（既工認から変更ない部位）

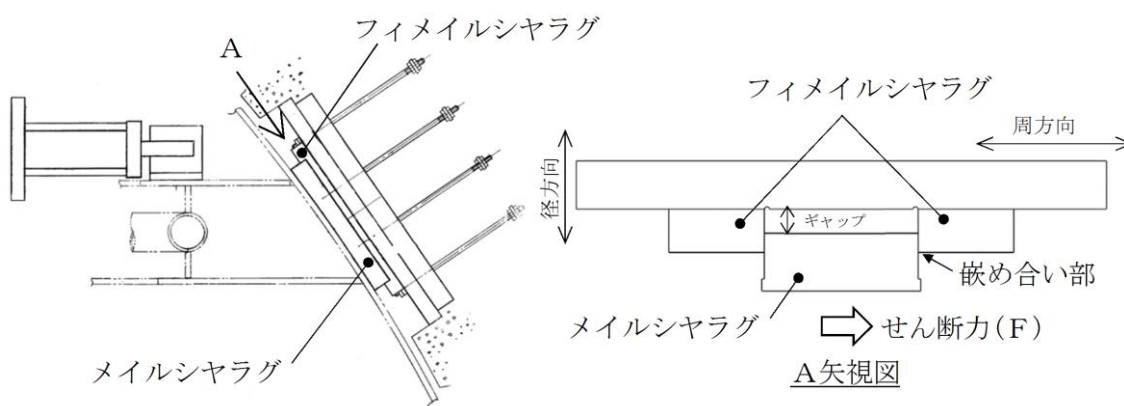
既工認からばね定数の算出方法に変更がない部位のうち、主要部位であるシヤラグ及び制御棒駆動機構ハウジングレストレントビームを代表としてばね定数の算出方法を説明する。

なお、縦弾性係数は建設時の適用基準（昭和 55 年通商産業省告示第 501 号）の値を用いる。

### 5.1 シヤラグ

#### 5.1.1 シヤラグの構造

シヤラグは、ドライウェル上部に周方向に 8 箇所設置され、PCV 外側のメイルシヤラグが原子炉建物側のフィメイルシヤラグと嵌め合い構造となっており、水平方向のうち PCV 周方向の変位を拘束し、径方向変位は拘束されない構造である。（第 5.1.1-1 図参照）



第 5.1.1-1 図 シヤラグ概要図

#### 5.1.2 ばね定数の算出方法

シヤラグのばね定数は、せん断荷重から求めた荷重－変位の関係により算出する。なお、シヤラグのばね定数算出方法について、既工認から変更はない。

せん断力(F)を受ける際のせん断変形の式から求める荷重－変位関係より、第 5.1.2-1 図に示すメイルシヤラグ及びフィメイルシヤラグの各部に対するシヤラグ 1 基分のばね定数 (k) を算出する。

$$v = \frac{1}{G} \int_0^x \left( \frac{\kappa \cdot F}{A} \right) dx = \frac{\kappa \cdot F}{G} \left( \frac{l_1}{A_1} + \frac{l_2}{A_2} + \frac{l_3}{A_3} \right)$$

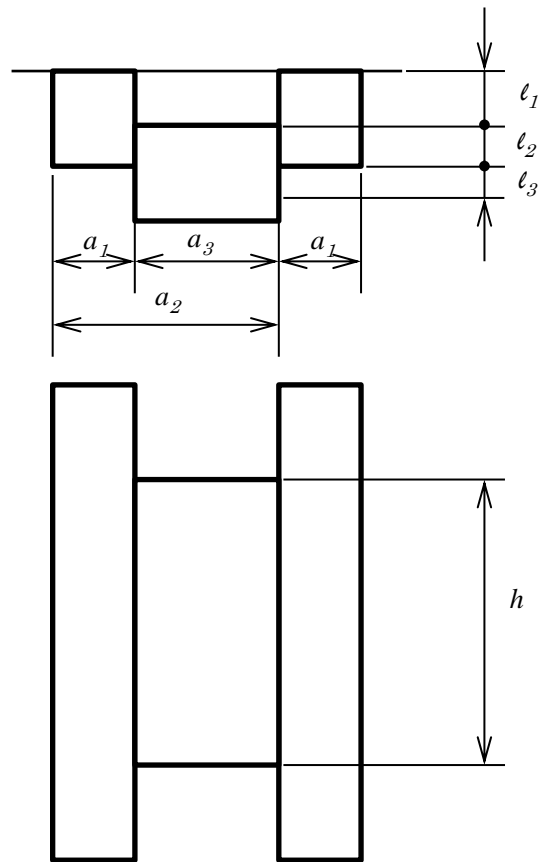
$$k = \frac{F}{v} = \frac{G}{\kappa} \left( \frac{l_1}{A_1} + \frac{l_2}{A_2} + \frac{l_3}{A_3} \right)^{-1}$$

よって、シヤラグ 8 基全体のばね定数 (K) は円周状にシヤラグが配置されていることから、次のとおりとなる。

$$K = 4 \cdot k$$

ここで,

- $\nu$  : せん断ひずみ
- $G$  : せん断弾性係数
- $\kappa$  : 断面の形状係数
- $a_1$  : フィメールシヤラグの幅
- $a_2$  :  $a_1 + a_3$
- $a_3$  : メールシヤラグの幅
- $l_1$  : フィメールシヤラグの長さ
- $l_2$  : シヤラグ接触面の長さ
- $l_3$  : メールシヤラグの長さ
- $h$  : シヤラグ接触面の長さ
- $A_1$  : フィメールシヤラグの断面積 ( $= a_1 h$ )
- $A_2$  :  $A_1 + A_3$  ( $= a_2 h$ )
- $A_3$  : メールシヤラグの断面積 ( $= a_3 h$ )



第 5.1.2-1 図 シヤラグばね定数算出概念図

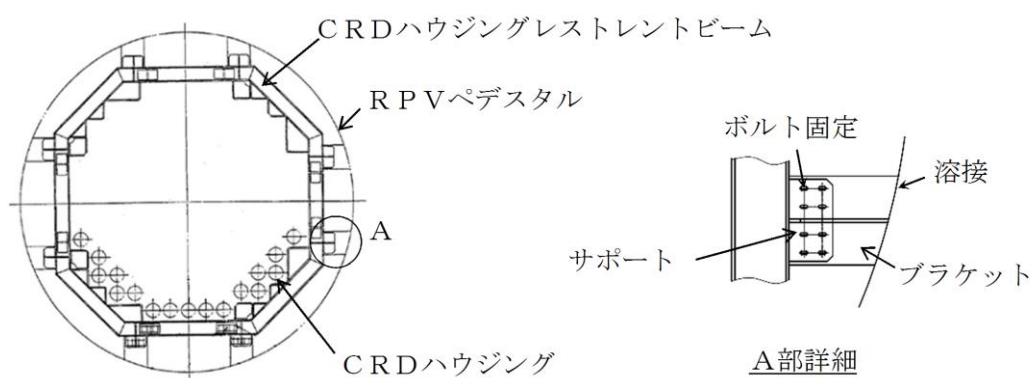
## 5.2 制御棒駆動機構ハウジングレストレントビーム

### 5.2.1 制御棒駆動機構ハウジングレストレントビームの構造

制御棒駆動機構ハウジングレストレントビーム（以下「CRDハウジングレストレントビーム」という。）は、8箇所ブラケットでRPVペDESTALと溶接により固定された構造物であり、構成部材としてはCRDハウジングレストレントビーム、サポート、ブラケットからなる。

CRDハウジングレストレントビームは、CRDハウジングの水平方向地震荷重を受けるが、CRDハウジングレストレントビームはCRDハウジングを接触のみで支持しているため、圧縮方向の荷重は伝達するが引張方向の荷重は伝達しない構造である。

CRDハウジングレストレントビームの構造を第5.2.1-1図に示す。



第5.2.1-1図 CRDハウジングレストレントビームの構造

### 5.2.2 CRDハウジングレストレントビームのばね定数算出方法

CRDハウジングレストレントビームのばね定数は、FEM解析により算出する。なお、CRDハウジングレストレントビームのばね定数算出方法について、既工認から変更はない。

### 5.2.3 計算方法

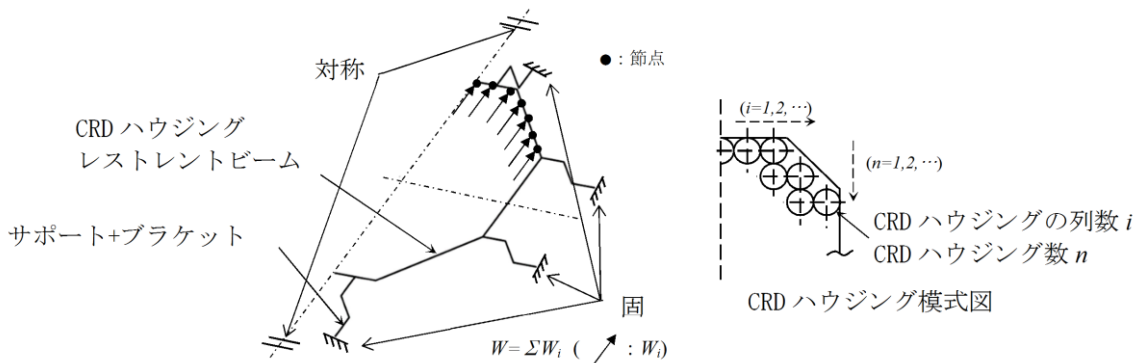
計算機コード「SAP-IV」により、各部材ごとに断面積、断面二次モーメント、重量等を与えるビーム要素モデルで解析する。

### 5.2.4 計算条件

#### 5.2.4.1 解析モデル

解析モデルの概要を第5.2.4.1-1図に示す。

解析モデルはCRDハウジングレストレントビームの対称性を考慮し、 $180^\circ$ の範囲をモデル化する。



第 5.2.4.1-1 図 解析モデルの概要

#### 5.2.4.2 各構成部材の材質及び材料物性

解析に用いる各構成部材の材質及び材料定数を第 5.2.4.2-1 表に示す。

第 5.2.4.2-1 表 各構成部材の材質及び材料定数

構成部材	材質	縦弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 $\nu$
CRDハウジング レストレイントビーム	SS400	$1.92 \times 10^5$	0.3
サポート	SM400A	$1.92 \times 10^5$	0.3
ブラケット	SM400A	$1.92 \times 10^5$	0.3

#### 5.2.4.3 荷重条件

CRDハウジング全水平荷重Wを分配して、CRDハウジングの列ごとの荷重 $W_i$ を設定し、それらの荷重 $W_i$ をCRDハウジングレストレイントビーム列上の最も近い接点に負荷する。

荷重 $W_i$ は列ごとのCRDハウジング本数に応じた比例配分により、次のとおり算出する。

$$W_i = \frac{W \cdot n_i}{\sum n_i} \quad (n: \text{本数}, i: \text{列数})$$

#### 5.2.4.4 境界条件

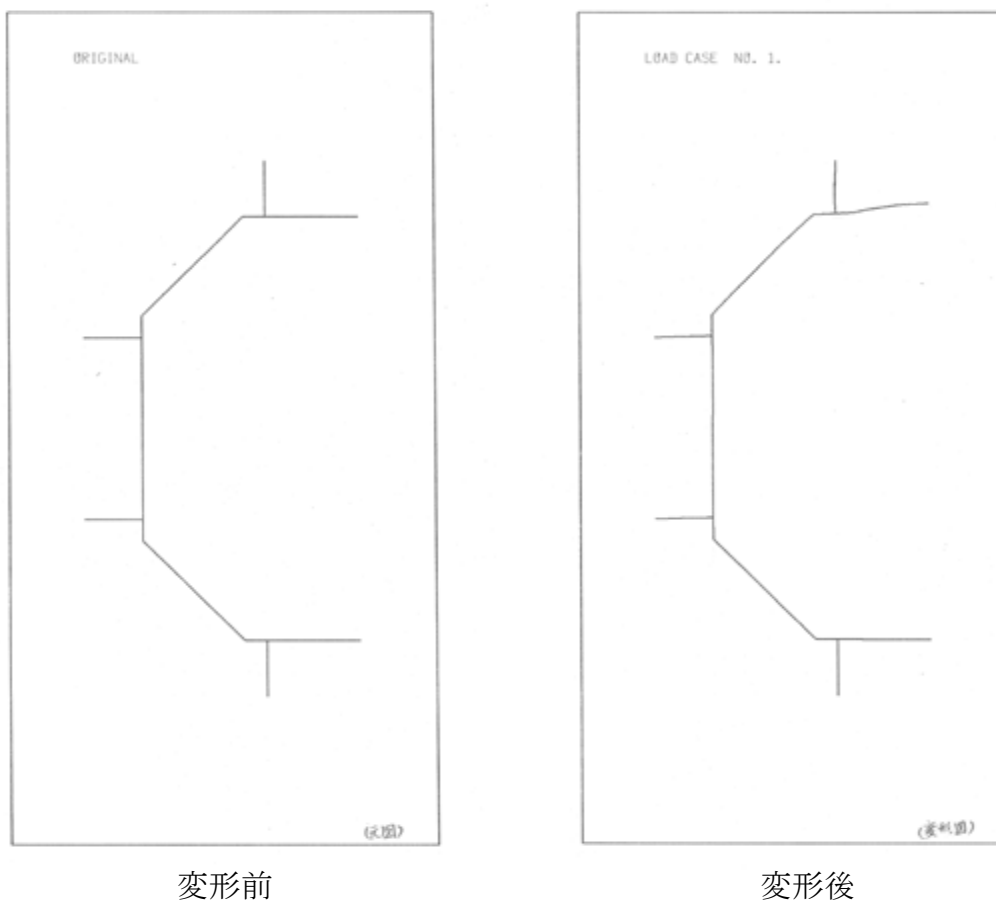
CRDハウジングレストレイントビームとRPVペDESTALは溶接にて固定されていることから境界条件は固定する。また、 $180^\circ$ の範囲をモデル化していることから、対称性を考慮した拘束条件とする。

### 5.2.5 解析結果

ばね定数は、全水平荷重 $W$ を最大変位量 $\delta$ で割ることにより求める。ばね定数を以下に示す。

また、変形前(荷重付与前)及び変形後のモデル形状を第5.2.5-1図に示す。

$$\text{ばね定数} : K = \frac{W}{\delta} = 7.16 \times 10^5 [\text{kN/m}]$$



変形前

変形後

第5.2.5-1図 変形前後のモデル形状

原子炉建物—大型機器連成解析モデルの変更に伴う地震応答への影響について

1. はじめに

原子炉建物—大型機器連成解析モデルを既工認から変更することに伴い、地震応答への影響を確認する。

2. 入力地震動

基準地震動  $S_s$  のうち、応答加速度が全周期帯において概ね支配的である  $S_{s-D}$  を代表波として選定する。

3. 影響検討方法

原子炉建物—大型機器連成解析モデルを既工認から変更することに伴う地震応答の影響を確認するため、表1に示す影響検討モデル1及び2を用いた固有値解析及び地震応答解析を行い、表2に示す影響検討ケースで各影響検討モデルの解析結果を今回工認モデルと比較することにより、地震応答への影響について検討した。

影響検討ケース1は、PCV-RPVモデルをPCV-RPV-Rinモデルに変更したことによる地震応答への影響を検討することを目的として、表1に示す影響検討モデル1と今回工認モデルを比較する。ばね定数は、どちらのモデルも精緻化した値を適用する。

影響検討ケース2は、PCV及びRPVスタビライザのばね定数を変更したことによる地震応答への影響を検討することを目的として、表1に示す影響検討モデル2と今回工認モデルを比較する。解析モデルは、どちらもPCV-RPV-Rinモデルとし、影響検討モデル2では、スタビライザのばね定数として既工認の値を適用し、今回工認モデルでは、スタビライザのばね定数として精緻化した値を適用する。

表1の解析モデルのモデル図については、第1-1-1~2図にてPCV-RPVモデルを示し、第1-2-1~2図にてPCV-RPV-Rinモデルを示す。

表1 影響検討モデル

影響検討 モデル	解析モデル	モデル緒元		備考
		スタビライザ ばね定数	その他	
1	PCV-RPVモデル	精緻化値	既工認と同じ	
2	PCV-RPV-Rinモデル	既工認と同じ	既工認と同じ	
—	PCV-RPV-Rinモデル	精緻化値	既工認と同じ	今回工認モデル

表2 影響検討ケース

影響検討 ケース	比較対象モデル	比較目的	検討結果	
			固有値解析	地震応答解析
1	影響検討モデル1と 今回工認モデル	PCV-RPVモデルを PCV-RPV-Rin モデルに変更にしたこと による地震応答への影響 を検討	第1-1-1～ 第1-1-2表 第2-1-1～ 第2-1-12図	第2-1-1～ 第2-1-2表
2	影響検討モデル2と 今回工認モデル	PCV及びRPVスタビ ライザのばね定数を変更 したことによる地震応答 への影響を検討	第1-2-1～ 第1-2-2表 第2-2-1～ 第2-2-20図	第2-2-1～ 第2-2-2表

#### 4. 検討結果

##### (1) 影響検討ケース1

第1-1-1～第1-1-2表並びに第2-1-1～第2-1-12図に示す固有値解析結果から、影響検討モデル1と今回工認モデルにおける各振動モードの変形状態は一致しており、固有周期の変動も小さい(最大4%変動)ことがわかる。

また、第2-1-1～第2-1-2表に示す地震応答解析結果から、各部位の荷重が概ね一致している(最大10%変動)ことがわかる。したがって、PCV-RPVモデルをPCV-RPV-Rinモデルに変更したことによる地震応答への影響は軽微である。

##### (2) 影響検討ケース2

第1-2-1～第1-2-2表並びに第2-2-1～第2-2-20図に示す固有値解析結果から、PCV及びRPVスタビライザのばね定数を変更した結果、各振動モードの変形状態は一致することがわかる。また、各振動モードのうち原子炉圧力容器の応答が卓越する振動モードで固有周期が長くなる(最大9%)が、その他の振動モードの固有周期の変動は小さいことがわかる。

また、第2-2-1～第2-2-2表に示す地震応答解析結果から、PCV及びRPVスタビライザのばね定数を変更したことにより、PCV、RPV及びシヤラグの荷重等が変動するが、最大でも36%(PCVスタビライザ)であることがわかる。

地震応答解析結果に示す荷重のうち、RPV支持スカート基部、ガンマ線遮蔽壁基部、RPVペDESTAL基部、シヤラグでは、影響検討モデル2(①)と今回工認モデル(②)の荷重の比率(②/①)がNS方向とEW方向で異なり、NS方向の荷重は大きくなる(比率(②/①)が1より大きい)のに対し、EW方向の荷重は小さくなる(比率(②/①)が1より小さい)。

また、今回工認モデルにおけるRPVスタビライザとPCVスタビライザで

は、NS方向とEW方向のいずれでも荷重が小さくなり（比率（②／①）が1より小さい）、NS方向よりEW方向の荷重が小さい（比率（②／①）がNS方向よりEW方向のほうが小さい）。

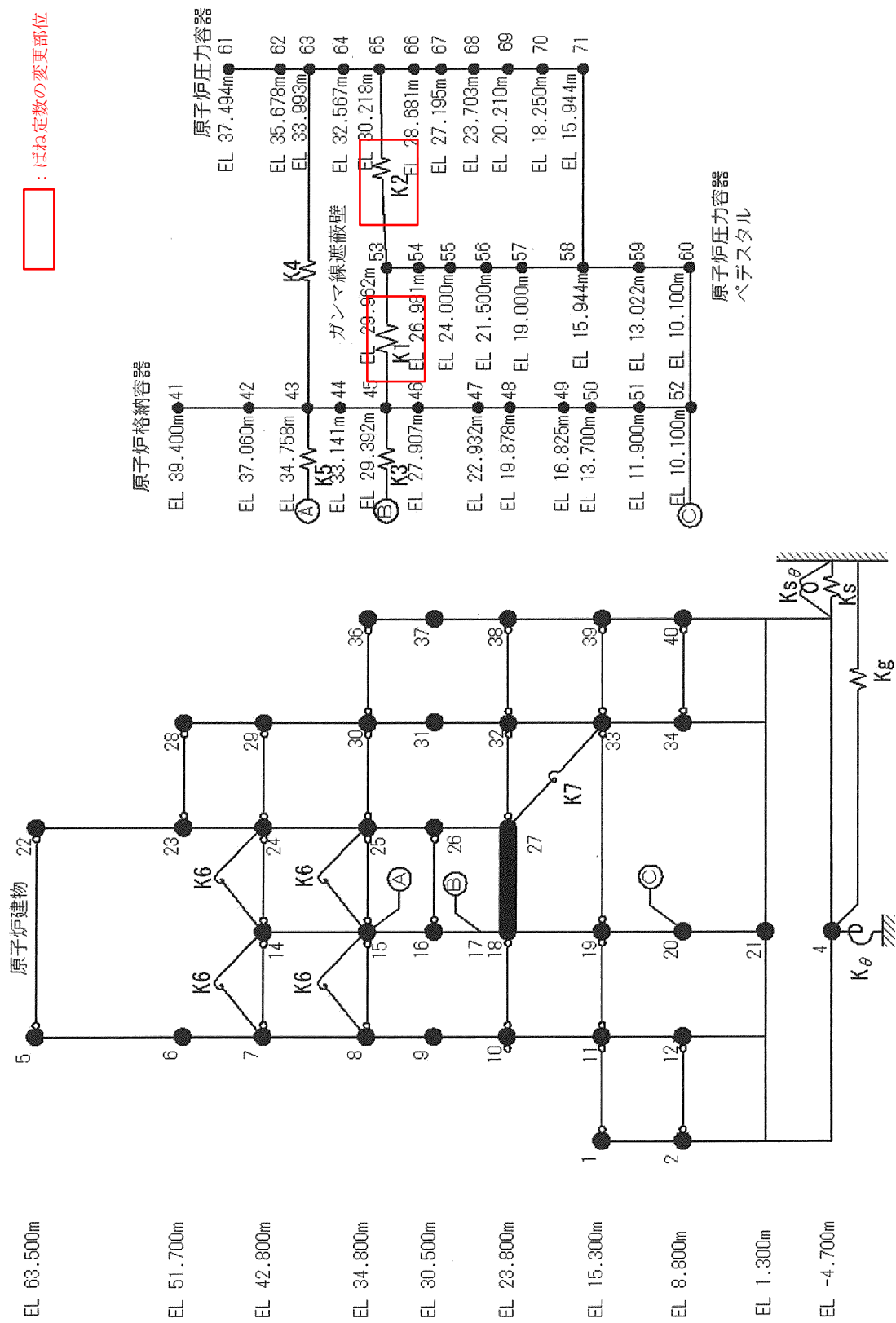
これらの要因として、ばね定数変更により固有周期と床応答スペクトルが変化し、固有周期と床応答スペクトルとの関係により、NS方向とEW方向で荷重の変化の傾向に違いが生じていることや、RPV及びPCVスタビライザのばね定数が低下したことにより、これらが分担する荷重が小さくなることが考えられる。

第2-3-1図にRPVスタビライザとPCVスタビライザが接続するガンマ線遮蔽壁頂部（質点番号53）における影響検討モデル2及び今回工認モデルの基準地震動 $S_s-D$ の床応答スペクトルを示す。また、第2-3-1表に、影響検討モデル2（①）と今回工認モデル（②）における、RPVの振動が卓越する最も低い振動数の第4次モードの固有周期と床応答加速度及びその比率（②／①）を示す。NS方向はスタビライザばね定数の変更に伴い応答加速度が大きくなるが、EW方向は小さくなっており、このような違いが荷重の変化の傾向に影響したものと考えられる。

以上の考察のとおり、ばね定数の変更に対して妥当な結果が得られている。



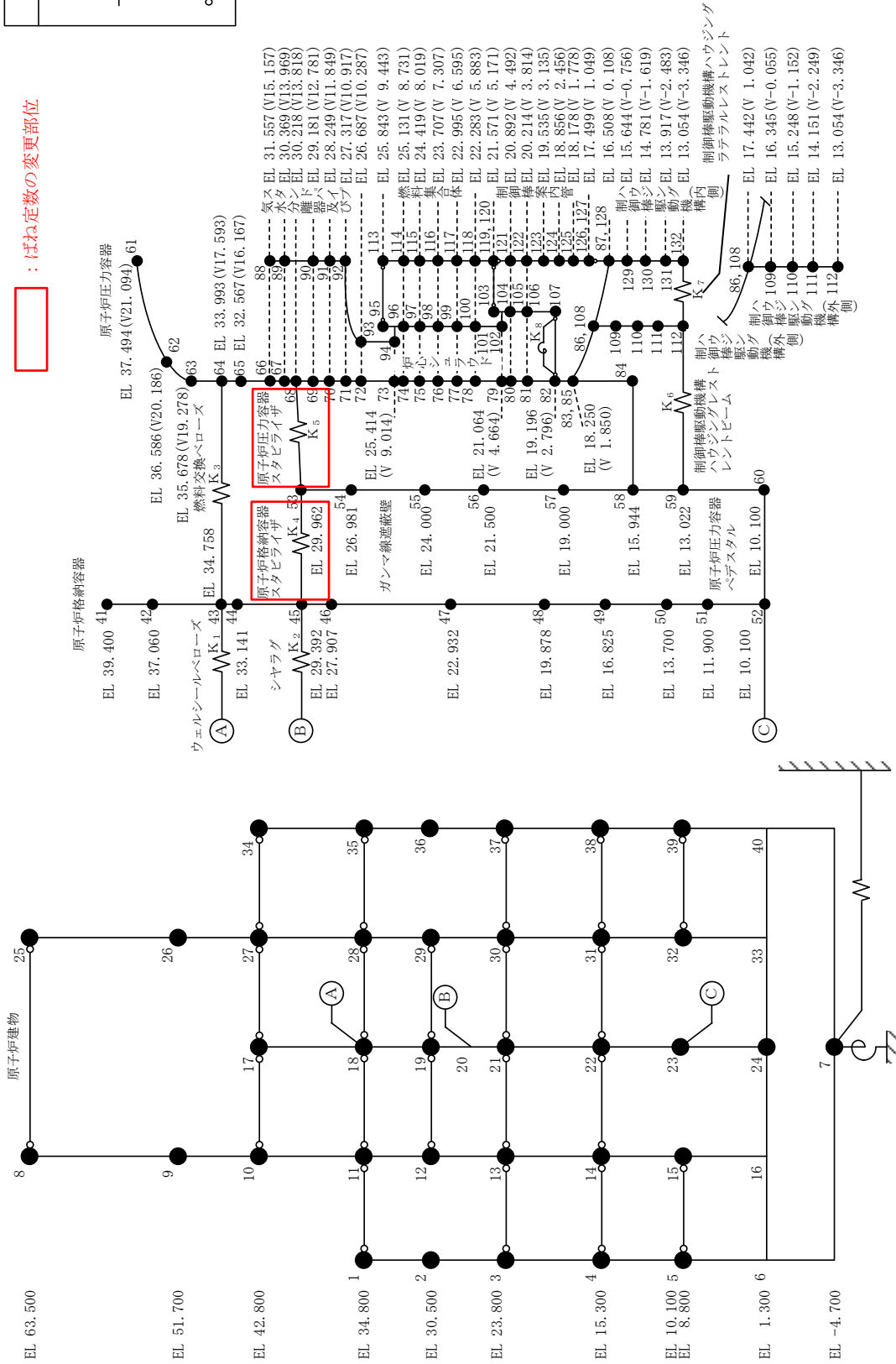




第1-1-2 図 PCV-RPVモデル (EW方向)

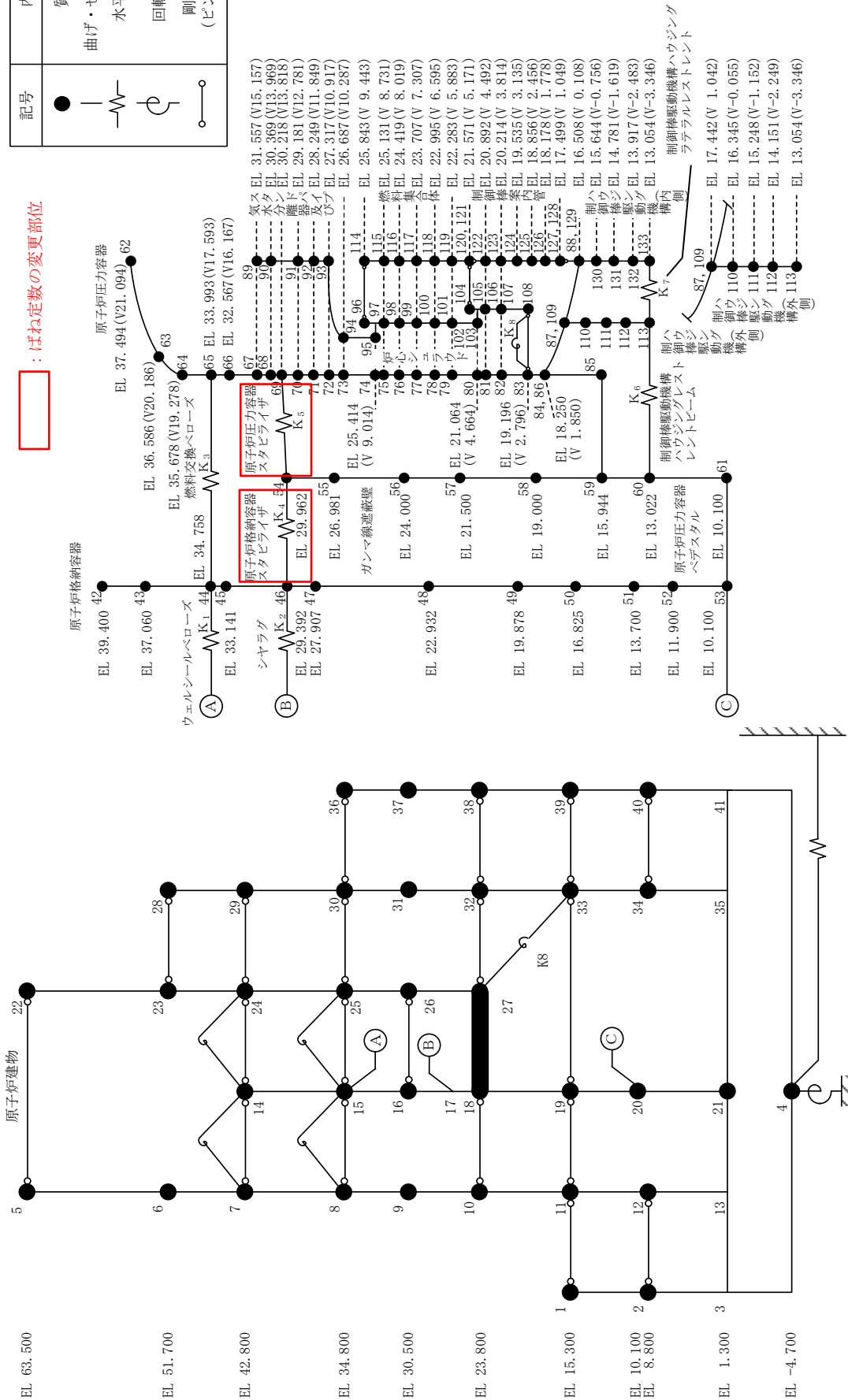
記号	内容
●	質点
— —	曲げ・せん断部材
—W—	水平ばね
⊕	回転ばね
○—○	剛部材 (ピン結合)

：ばね定数の変更部位



第1-2-1図 PCV-RPV-Rinモデル (NS方向)

記号	内容
●	質点
— —	曲げ・せん断部材
— — —	水平ばね
⊕	回転ばね
○—○	剛部材 (ピン結合)



第1-2-2図 PCV-RPV-R inモデル (EW方向)

第1-1-1表 固有値解析結果（影響検討ケース1，NS方向）

次数		①影響検討モデル1	②今回工認モデル	固有周期 の比率 (②/①)	卓越部位
①	②	固有周期[秒]	固有周期[秒]		
1	1	0.219	0.219	1.00	原子炉建物
—	2	—	0.202	—	燃料集合体
—	3	—	0.135	—	炉心シュラウド
2	4	0.113	0.110	0.97	R P V
3	5	0.098	0.098	1.00	原子炉建物
4	6	0.069	0.069	1.00	原子炉建物
—	7	—	0.066	—	制御棒案内管
5	8	0.058	0.057	0.98	R P V
6	9	0.052	0.052	1.00	原子炉建物
—	10	—	0.050	—	燃料集合体

第1-1-2表 固有値解析結果（影響検討ケース1，EW方向）

次数		①影響検討モデル1	②今回工認モデル	固有周期 の比率 (②/①)	卓越部位
①	②	固有周期[秒]	固有周期[秒]		
—	1	—	0.204	—	燃料集合体
1	2	0.202	0.200	0.99	原子炉建物
—	3	—	0.135	—	炉心シュラウド
2	4	0.113	0.109	0.96	R P V
3	5	0.093	0.093	1.00	原子炉建物
4	6	0.067	0.067	1.00	原子炉建物
—	7	—	0.066	—	制御棒案内管
5	8	0.058	0.057	0.98	R P V
6	9	0.051	0.051	1.00	原子炉建物
—	10	—	0.050	—	燃料集合体

第1-2-1表 固有値解析結果（影響検討ケース2，NS方向）

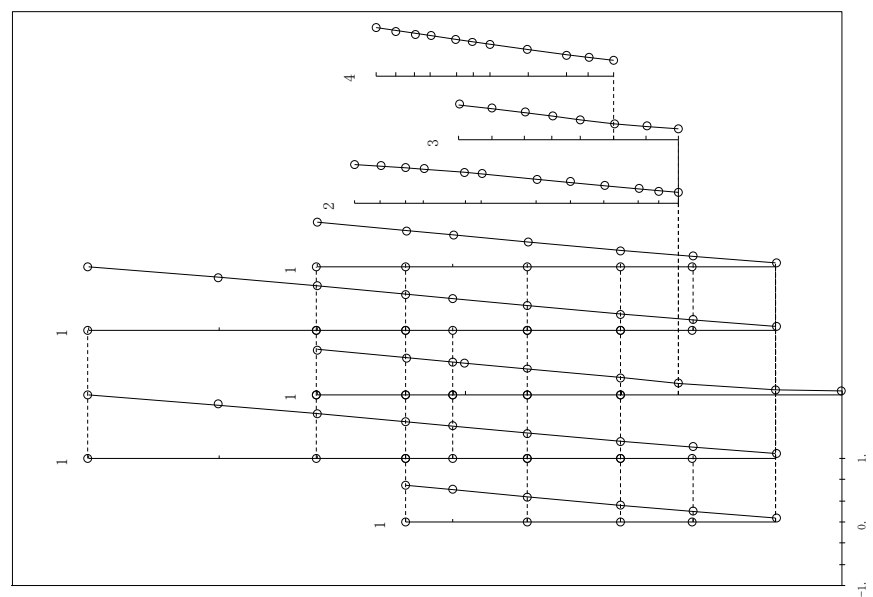
次数	①影響検討モデル2	②今回工認モデル	固有周期 の比率 (②/①)	卓越部位
	固有周期[秒]	固有周期[秒]		
1	0.219	0.219	1.00	原子炉建物
2	0.202	0.202	1.00	燃料集合体
3	0.135	0.135	1.00	炉心シュラウド
4	0.102	0.110	1.08	R P V
5	0.095	0.098	1.03	原子炉建物
6	0.069	0.069	1.00	原子炉建物
7	0.066	0.066	1.00	制御棒案内管
8	0.056	0.057	1.02	R P V
9	0.052	0.052	1.00	原子炉建物
10	0.050	0.050	1.00	燃料集合体

第1-2-2表 固有値解析結果（影響検討ケース2，EW方向）

次数	①影響検討モデル2	②今回工認モデル	固有周期 の比率 (②/①)	卓越部位
	固有周期[秒]	固有周期[秒]		
1	0.204	0.204	1.00	燃料集合体
2	0.200	0.200	1.00	原子炉建物
3	0.135	0.135	1.00	炉心シュラウド
4	0.100	0.109	1.09	R P V
5	0.091	0.093	1.02	原子炉建物
6	0.067	0.067	1.00	原子炉建物
7	0.066	0.066	1.00	制御棒案内管
8	0.055	0.057	1.04	R P V
9	0.051	0.051	1.00	原子炉建物
10	0.050	0.050	1.00	燃料集合体

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器へダクト
- 4 原子炉圧力容器

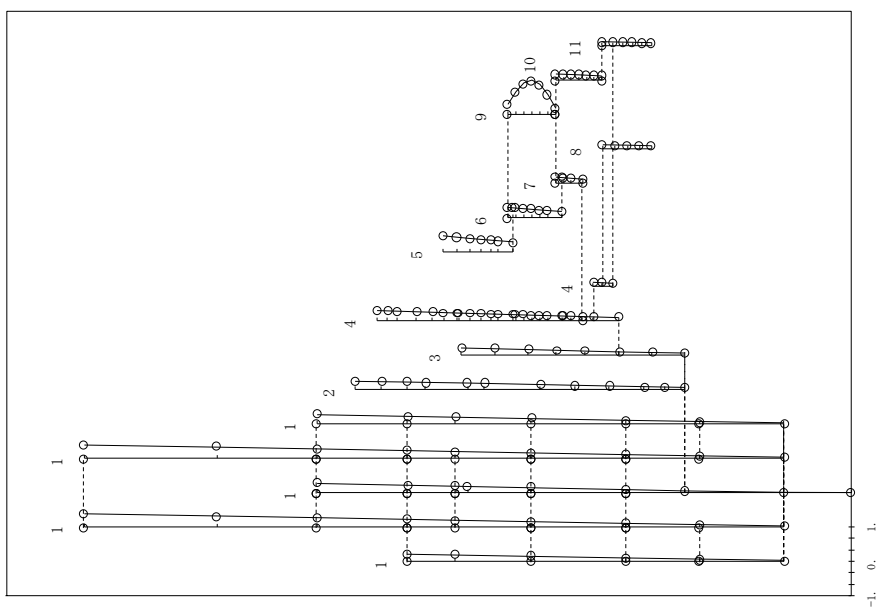
固有周期 (s) ; 0.219



第2-1-1図 (a) 影響検討モデル1 第1次振動モード図 (NS方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器へダクト
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器, スタンドパイプ, シュラウドヘッド及び炉心シュラウド上部

固有周期 (s) ; 0.219

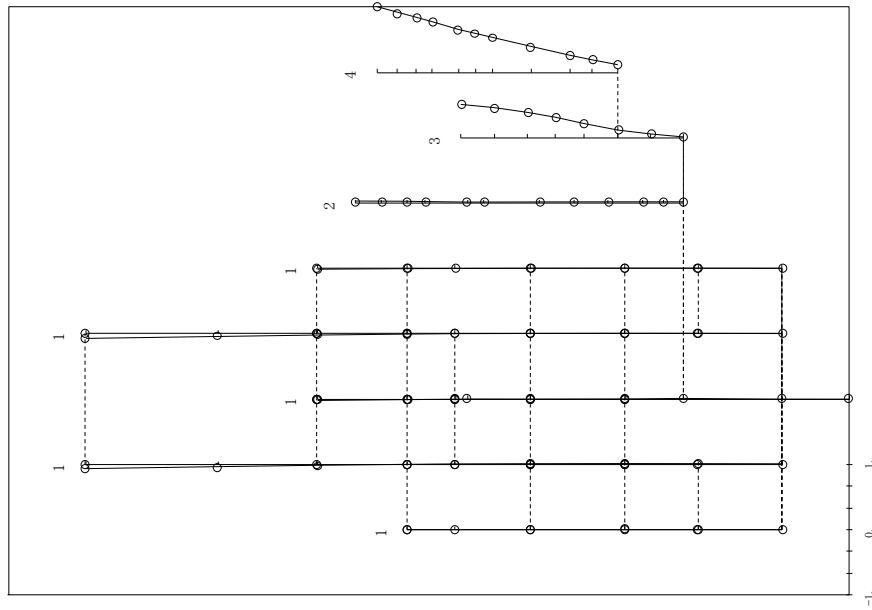


- 6 炉心シュラウド中間胴
- 7 炉心シュラウド下部胴
- 8 炉心シュラウド下部胴ハウジング(外側)
- 9 燃料集合体
- 10 炉心格納容器内管
- 11 炉心格納容器ハウジング(内側)

第2-1-1図 (b) 今回工認モデル 第1次振動モード図 (NS方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ベデスタル
- 4 原子炉圧力容器

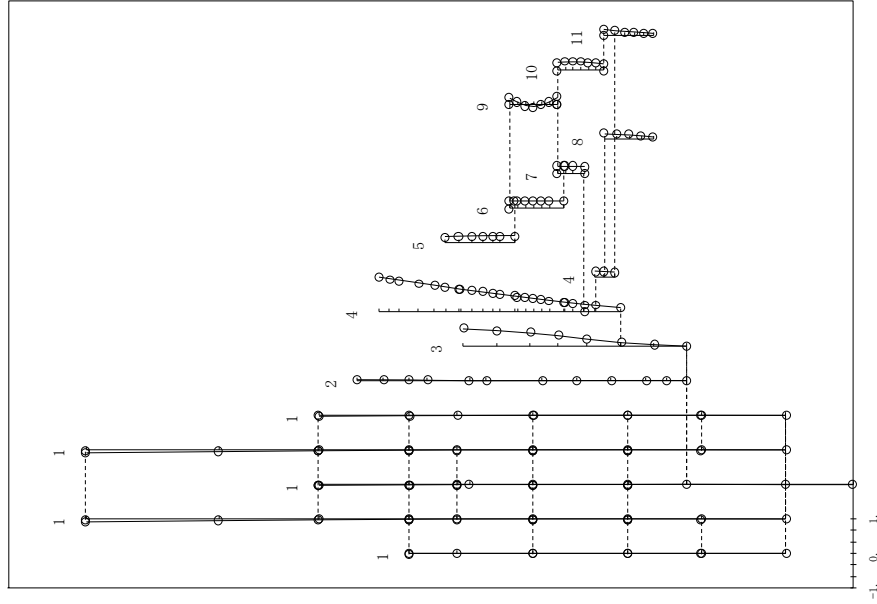
固有周期 (s) ; 0.113



第2-1-2図 (a) 影響検討モデル1 第2次振動モード図 (NS方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ベデスタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器、スタンドパイプ、シュワウヘッド及び炉心シュワウヘッド上部間
- 6 炉心シュワウヘッド中間間
- 7 炉心シュワウヘッド下部間
- 8 制御機駆動機構ハウジング(外側)
- 9 燃料集合体
- 10 制御機案内管
- 11 制御機駆動機構ハウジング(内側)

固有周期 (s) ; 0.110

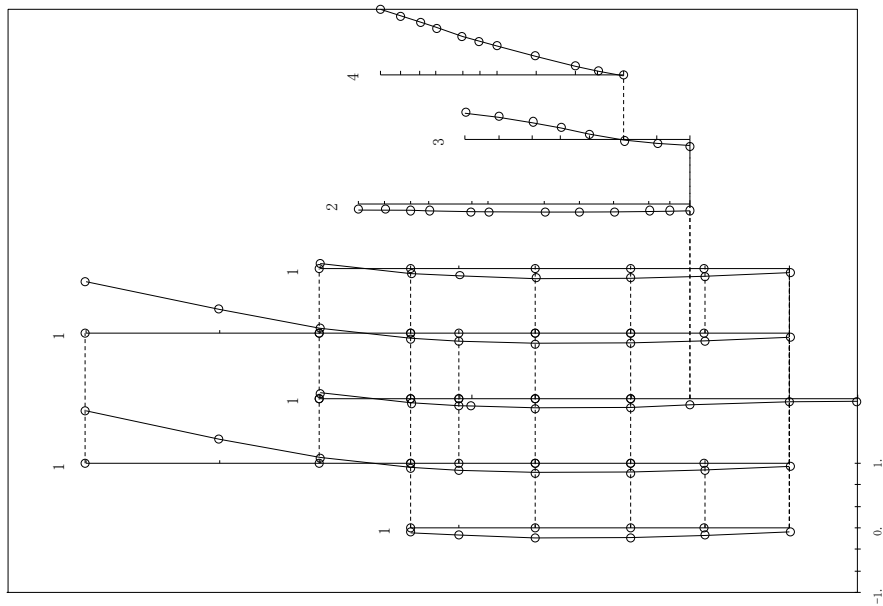


第2-1-2図 (b) 今回工認モデル 第4次振動モード図 (NS方向)



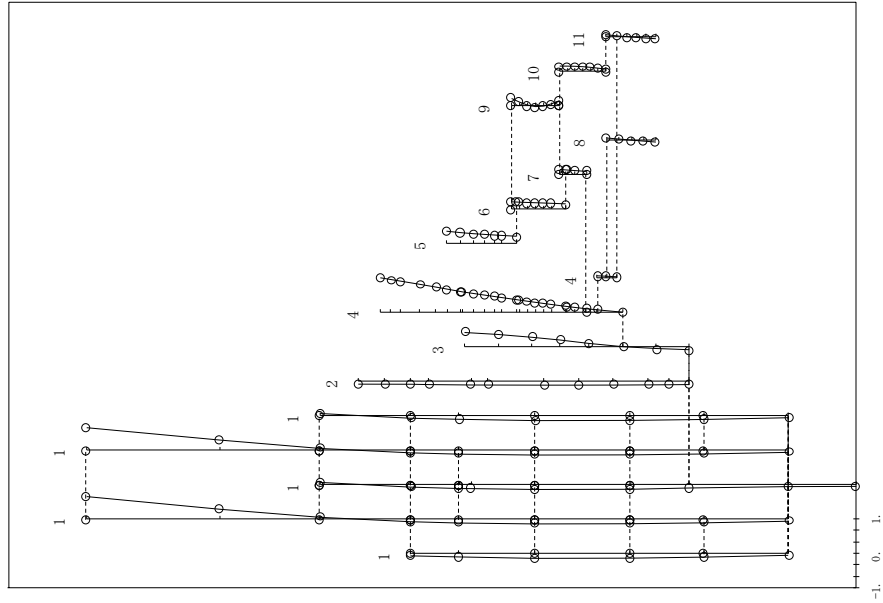
- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ヘダスタル
- 4 原子炉圧力容器

固有周期 (s) ; 0.098



第2-1-3図 (a) 影響検討モデル1 第3次振動モード図 (NS方向)

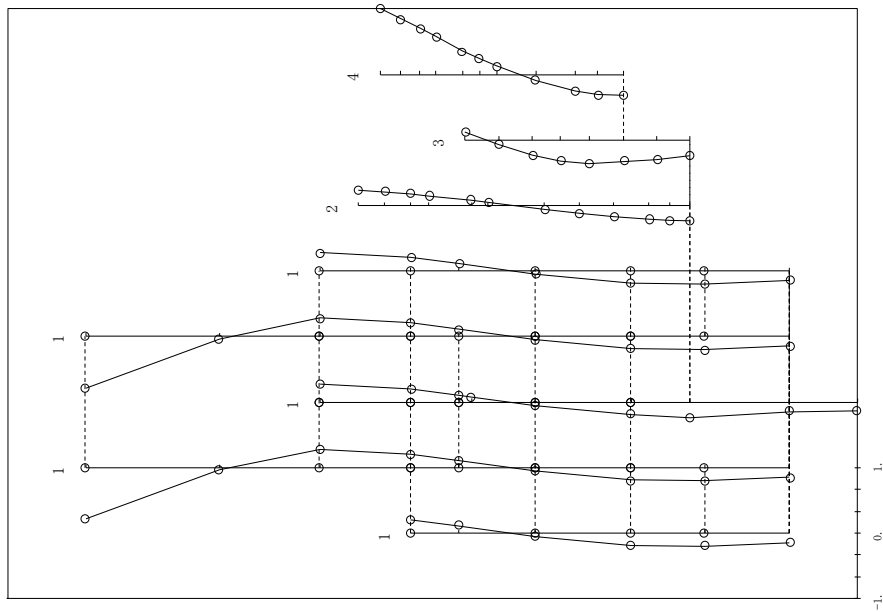
- 1 原子炉建物
  - 2 原子炉格納容器
  - 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ヘダスタル
  - 4 原子炉圧力容器
  - 5 気水分離器、スタンドパイプ、シュワウドヘッド及び炉心シュワウド上部屋
- 固有周期 (s) ; 0.098



第2-1-3図 (b) 今回工認モデル 第5次振動モード図 (NS方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器へデスタル
- 4 原子炉圧力容器

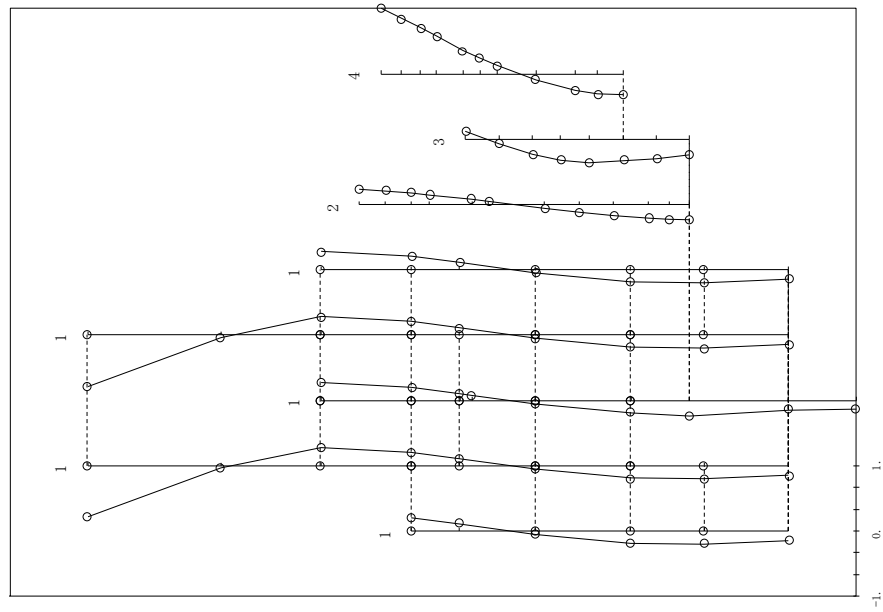
固有周期 (s) ; 0.069



第2-1-4図 (a) 影響検討モデル1 第4次振動モード図 (NS方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器へデスタル
- 4 原子炉圧力容器

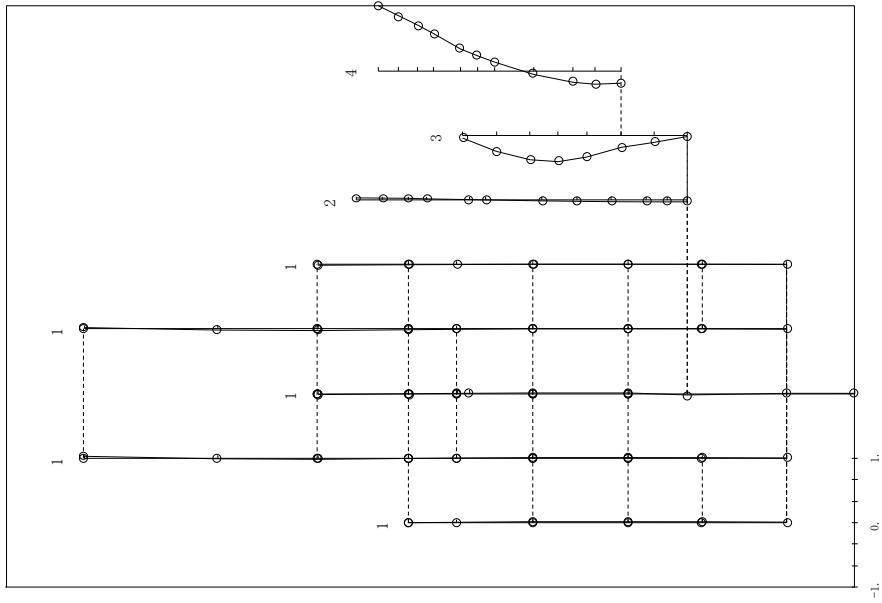
固有周期 (s) ; 0.069



第2-1-4図 (b) 今回工認モデル 第6次振動モード図 (NS方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ベースタル
- 4 原子炉圧力容器

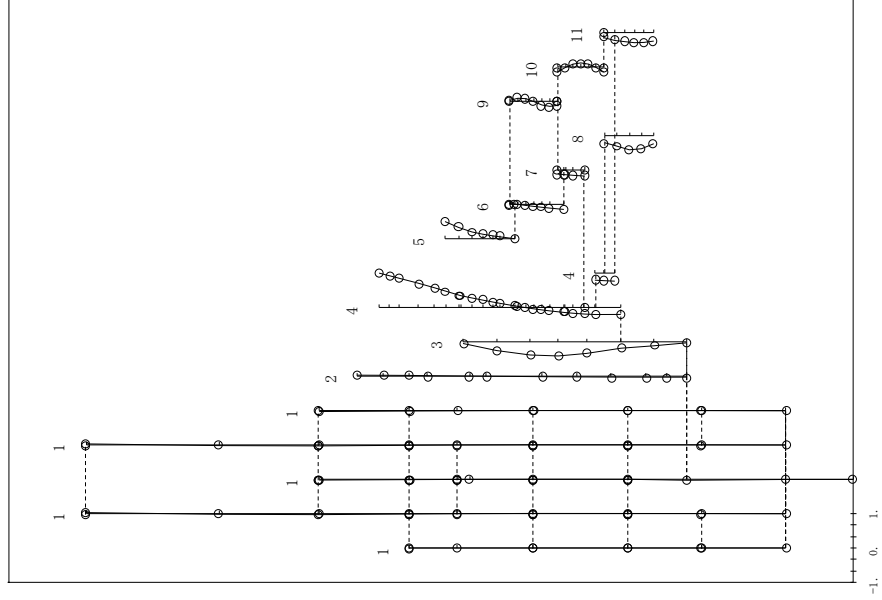
固有周期 (s) : 0.058



第2-1-5図 (a) 影響検討モデル1 第5次振動モード図  
(NS方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ベースタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器、スタンドパイプ、シュワウトヘッド及び炉心シュワウト上細間

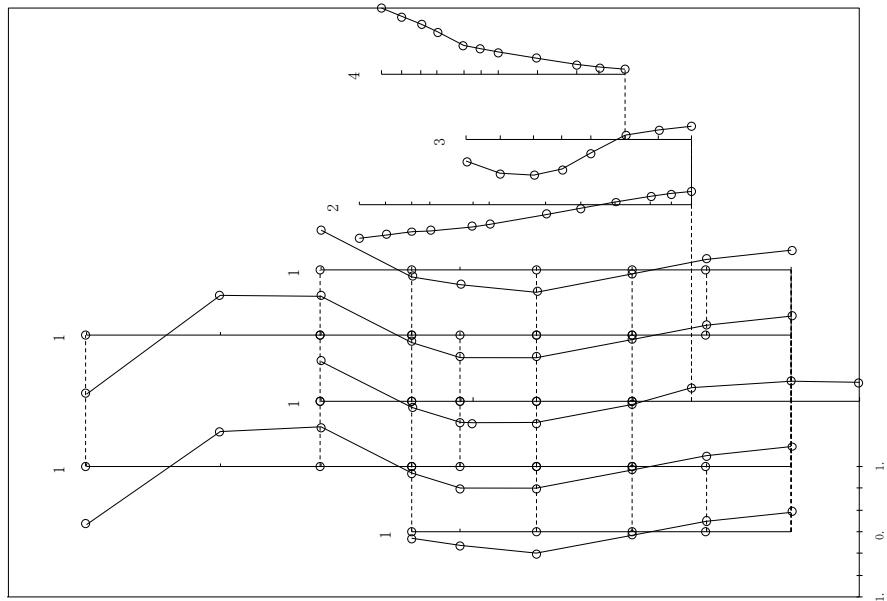
固有周期 (s) : 0.057



第2-1-5図 (b) 今回工認モデル 第8次振動モード図  
(NS方向)

- 1 原子炉建物は
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽型及び原子炉圧力容器へダズタル
- 4 原子炉圧力容器

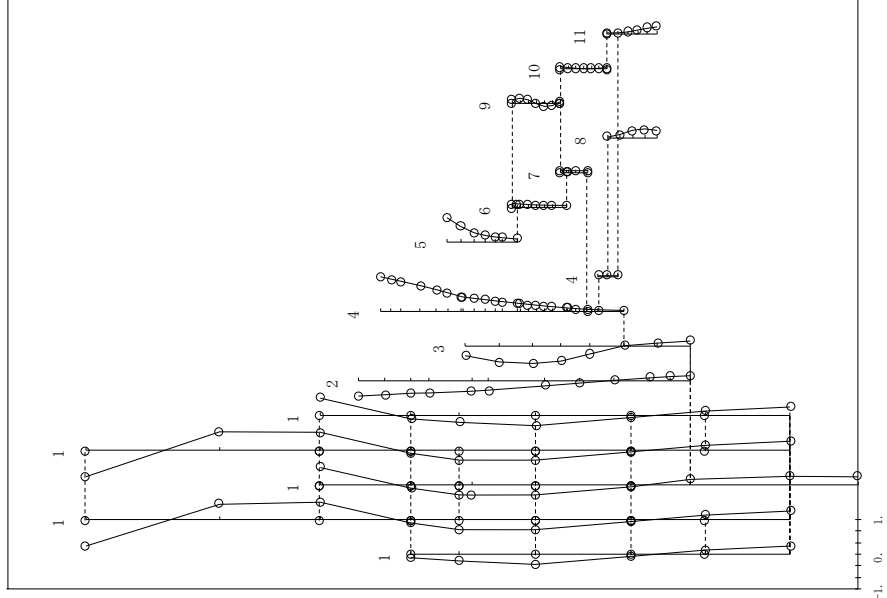
固有周期 ( s ) ; 0.052



第2-1-6図 (a) 影響検討モデル1 第6次振動モード図 (NS方向)

- 1 原子炉建物は
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽型及び原子炉圧力容器へダズタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器、スタンドハイブ、シェラウドヘッド及び炉心シェラウド上部

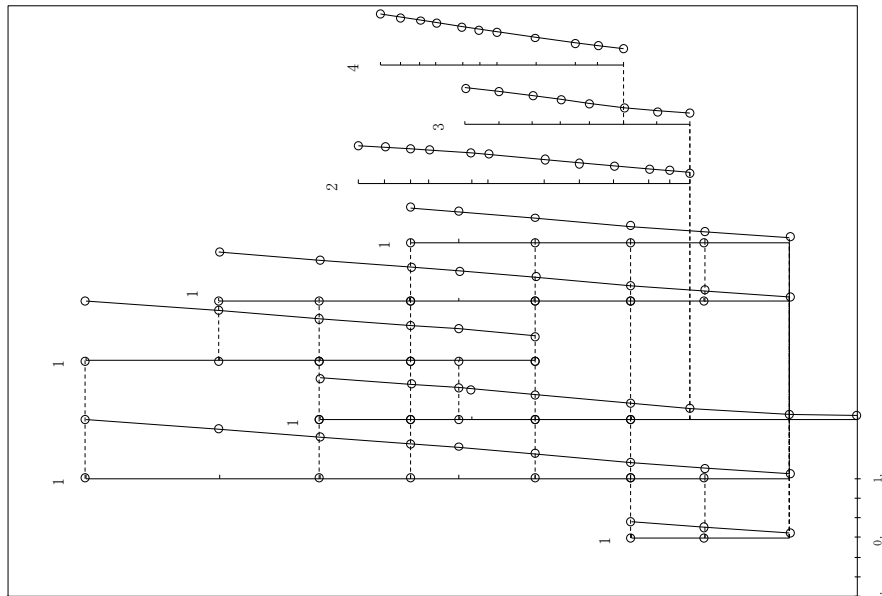
固有周期 ( s ) ; 0.052



第2-1-6図 (b) 今回工認モデル 第9次振動モード図 (NS方向)

- 1 原子炉建屋
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器へアクセス
- 4 原子炉圧力容器

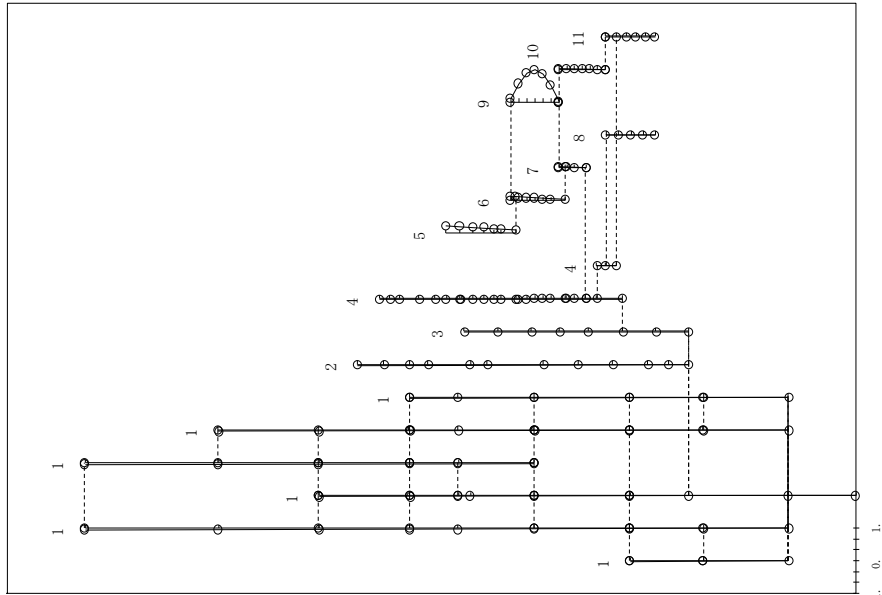
固有周期 (s) ; 0.202



第2-1-7図 (a) 影響検討モデル1 第1次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建屋
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器へアクセス
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器, スタンドパイプ, シュラウドヘッド及び炉心シュラウド上部

固有周期 (s) ; 0.200

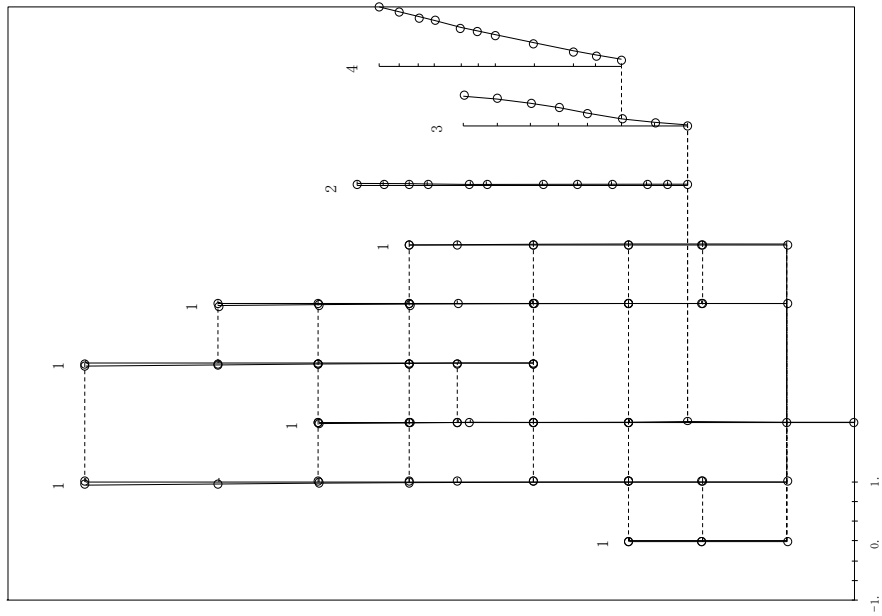


- 6 炉心シュラウド中間胴
- 7 炉心シュラウド下部胴
- 8 炉筒駆動機構ハウジング(外側)
- 9 燃料集合体
- 10 炉筒棒案内管
- 11 炉筒棒駆動機構ハウジング(内側)

第2-1-7図 (b) 今回工認モデル 第2次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽及び原子炉圧力容器ベテスタル
- 4 原子炉圧力容器

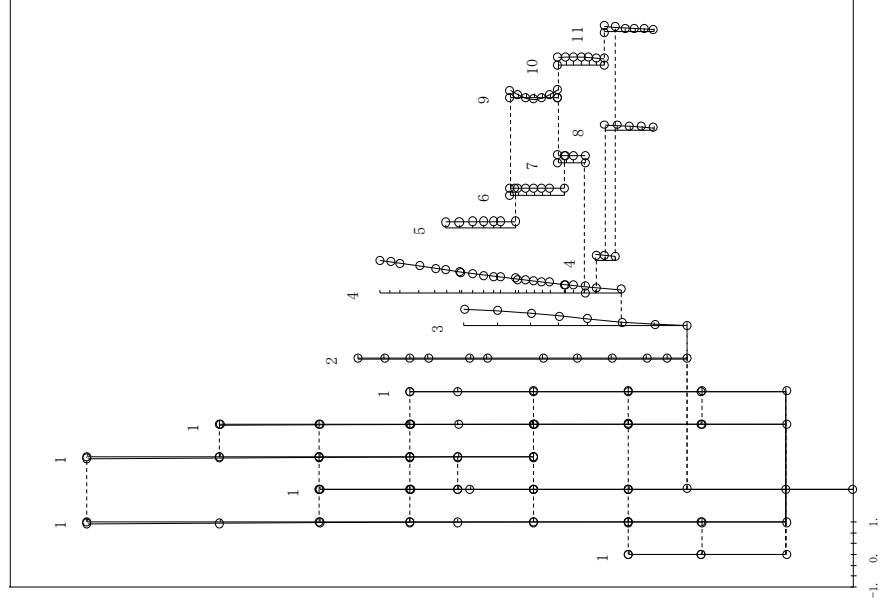
固有周期 (s) ; 0.113



第2-1-8 図 (a) 影響検討モデル1 第2次振動モード図  
(EW方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽及び原子炉圧力容器ベテスタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器、スタントハイプ、シュウワウドヘッド及び炉心シュウワウド上部間

固有周期 (s) ; 0.109

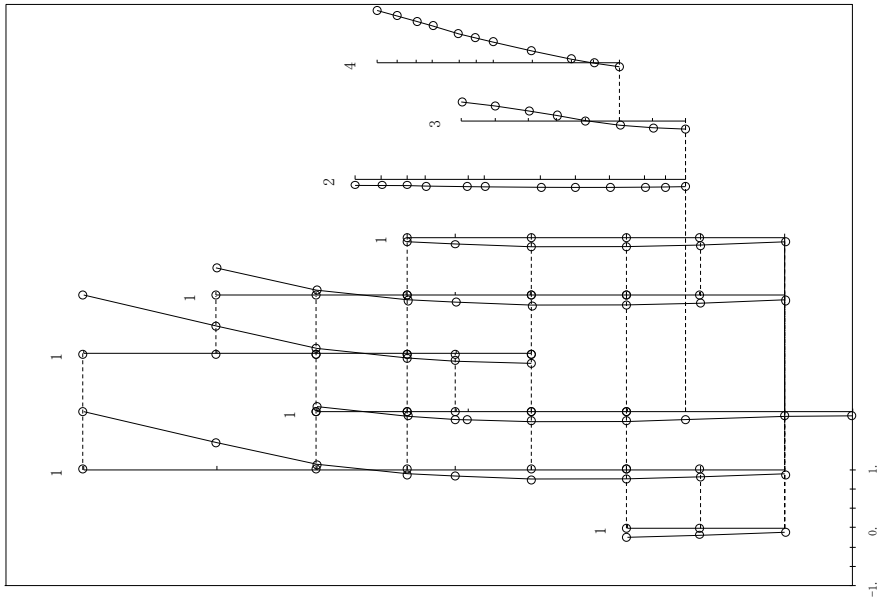


- 6 炉心シュウワウド中間間
- 7 炉心シュウワウド下部間
- 8 制御棟駆動機庫ハウジング(外側)
- 9 燃料集合体
- 10 制御棟案内管
- 11 制御棟駆動機庫ハウジング(内側)

第2-1-8 図 (b) 今回工認モデル 第4次振動モード図  
(EW方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ベアスタル
- 4 原子炉圧力容器

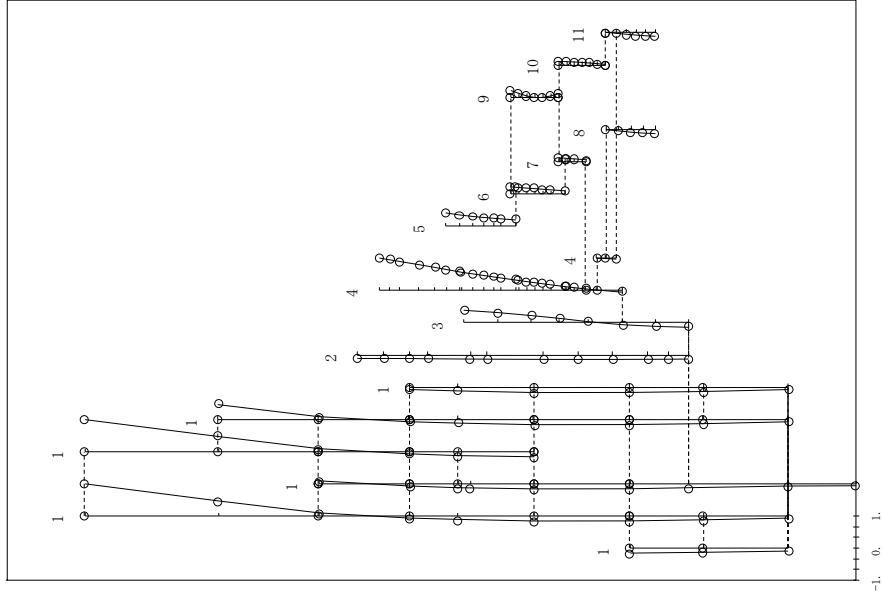
固有周期 (s) ; 0.083



第2-1-9 図 (a) 影響検討モデル1 第3次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ベアスタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器、スタントスライプ、シュワウドヘッド及び炉心シュワウド上部胴

固有周期 (s) ; 0.083

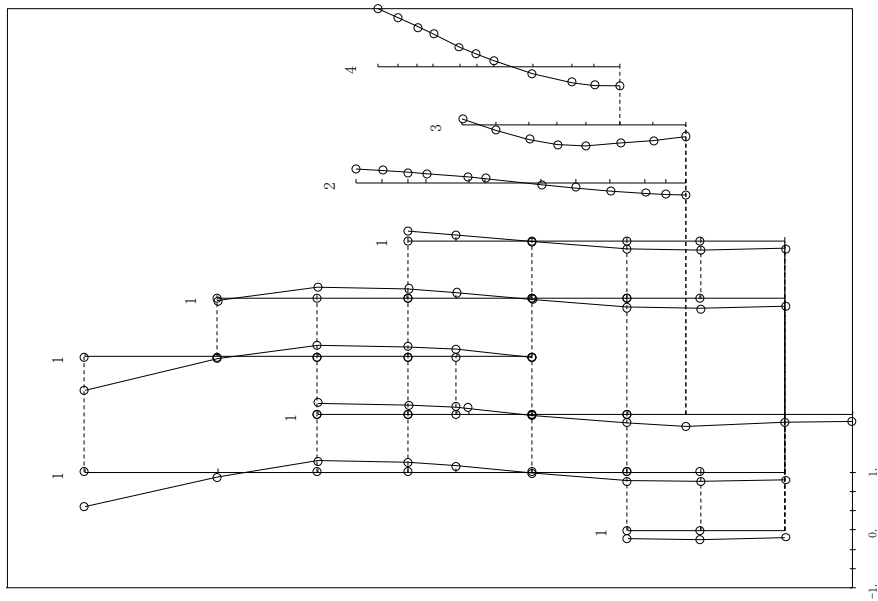


- 6 炉心シュワウド中間胴
- 7 炉心シュワウド下部胴
- 8 炉内排熱動機構ハウジング(外側)
- 9 燃料集合体
- 10 炉内排熱案内管
- 11 炉内排熱動機構ハウジング(内側)

第2-1-9 図 (b) 今回工認モデル 第5次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ベースタル
- 4 原子炉圧力容器

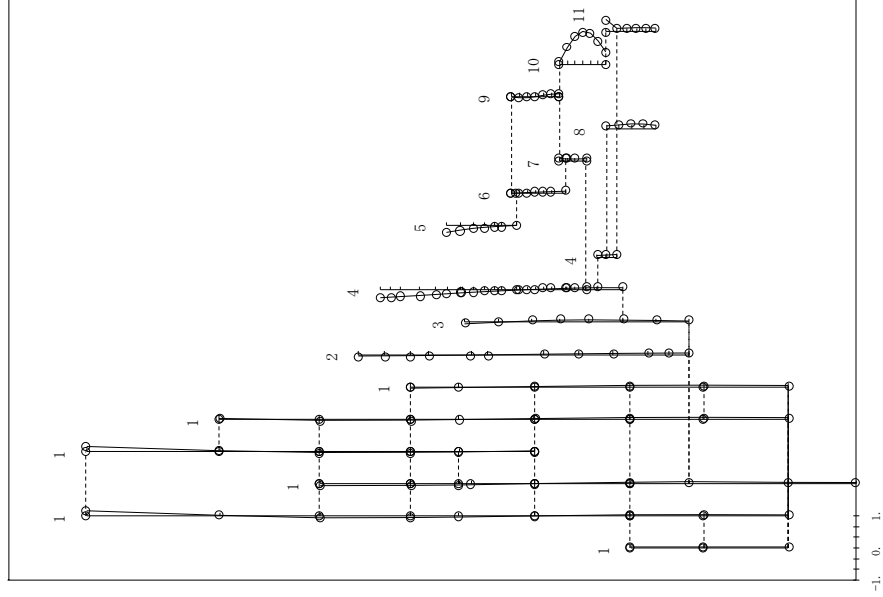
固有周期 (s) ; 0.067



第2-1-10図 (a) 影響検討モデル1 第4次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ベースタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器, スタンドハイク, シェアラウドヘッド及び炉心シユアラウド上部屋

固有周期 (s) ; 0.067

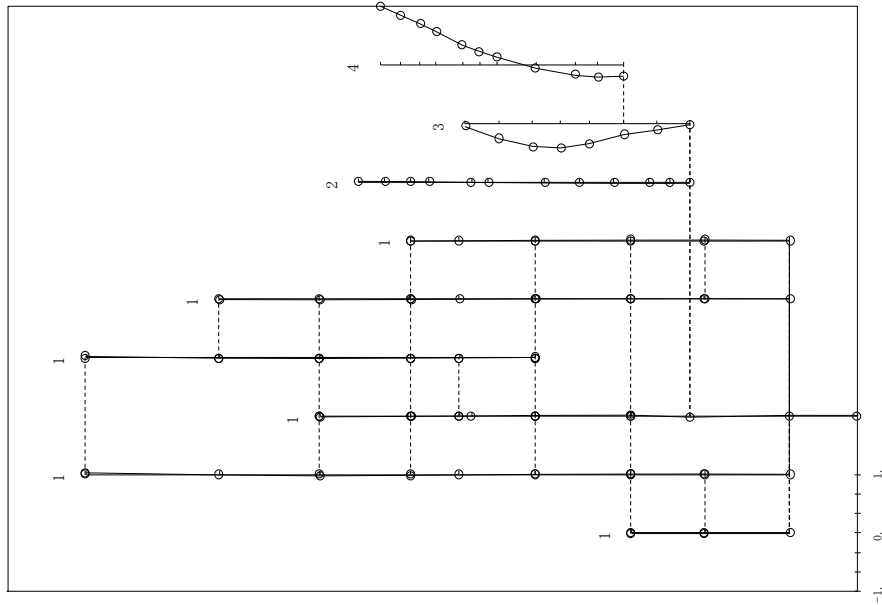


第2-1-10図 (b) 今回工認モデル 第6次振動モード図 (EW方向)



- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ベアスタル
- 4 原子炉圧力容器

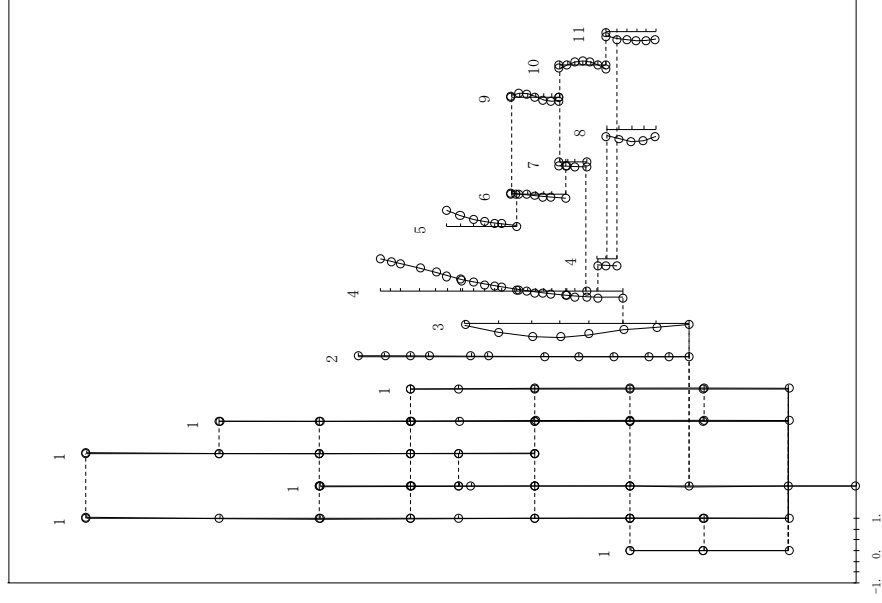
固有周期 (s) ; 0.058



第2-1-11 図 (a) 影響検討モデル1 第5次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ベアスタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器, スタンドパイプ, シェアラウドヘッド及び炉心シェアラウド上部剛

固有周期 (s) ; 0.057

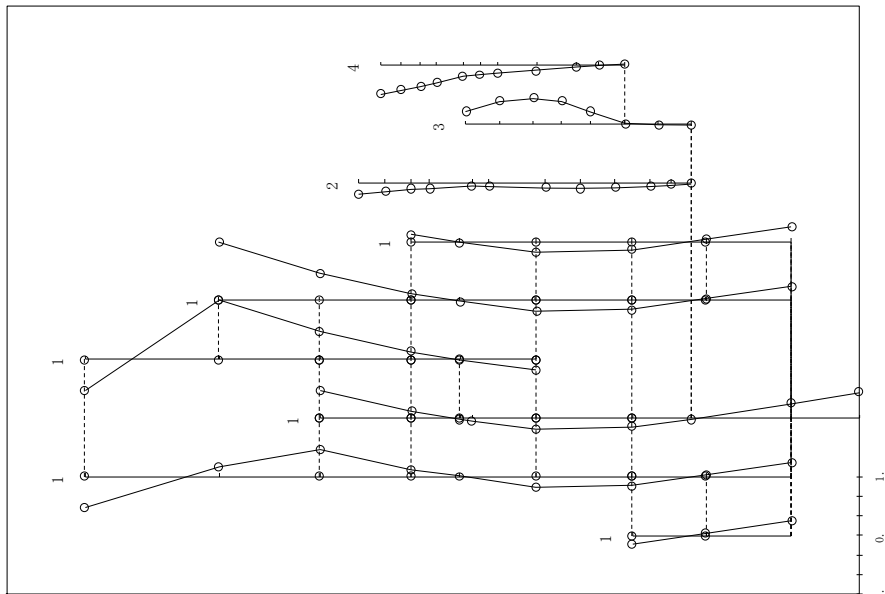


- 6 炉心シェアラウド中間剛
- 7 炉心シェアラウド下部剛
- 8 制御棒駆動機構ハウジング(外側)
- 9 燃料集合体
- 10 制御棒案内管
- 11 制御棒駆動機構ハウジング(内側)

第2-1-11 図 (b) 今回工認モデル 第8次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器へズスタル
- 4 原子炉圧力容器

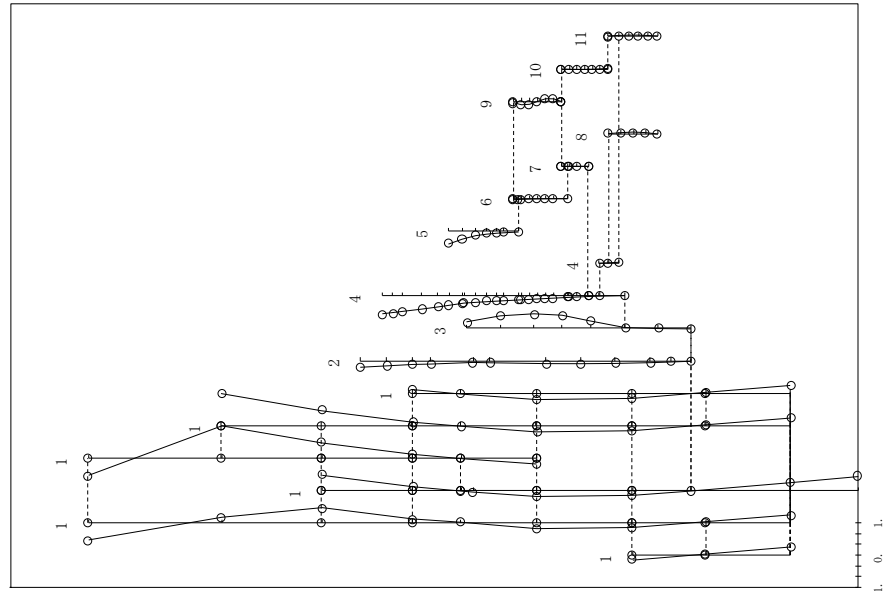
固有周期 (s) ; 0.051



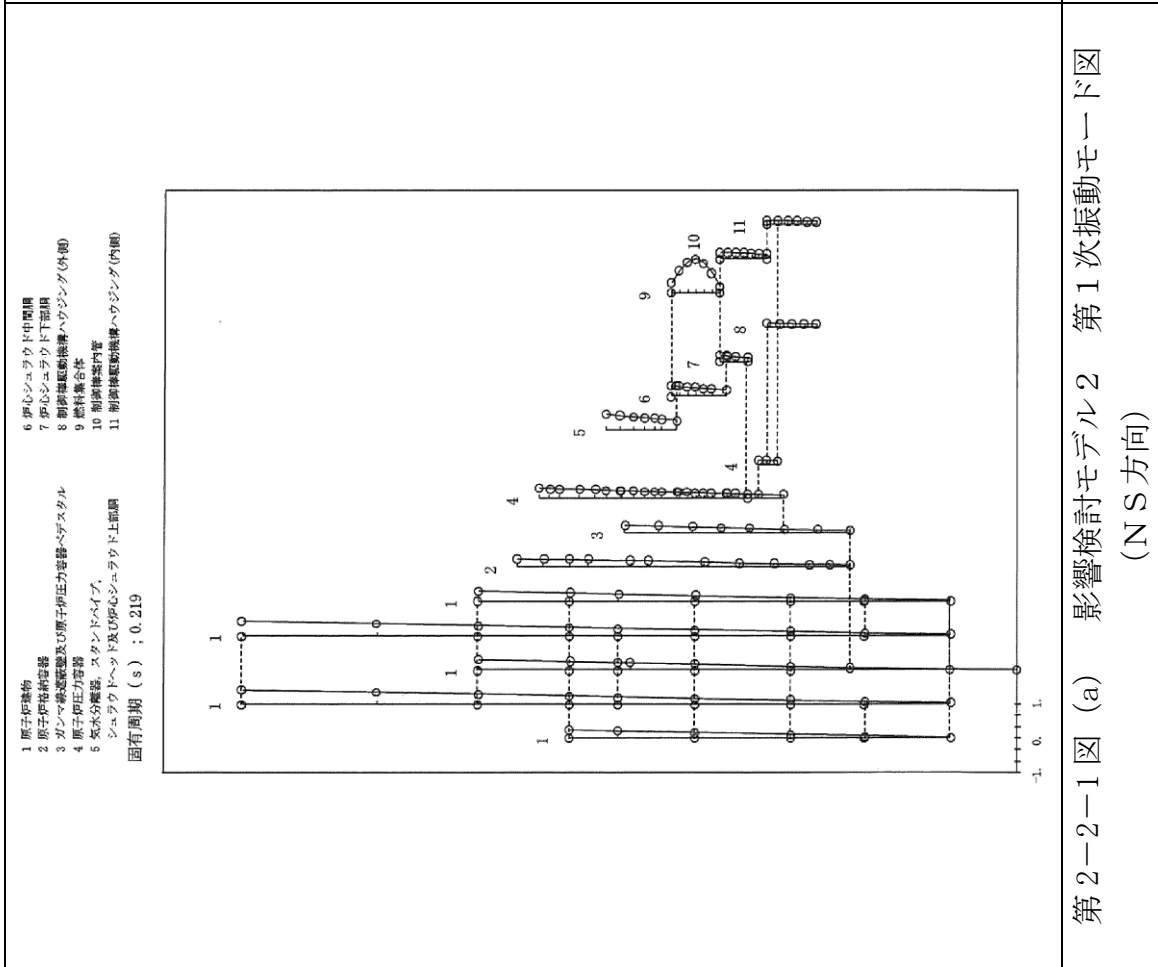
第2-1-12図 (a) 影響検討モデル1 第6次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器へズスタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器、スタンドパイプ、シュワウドヘッド及び炉心シュワウド上部屋

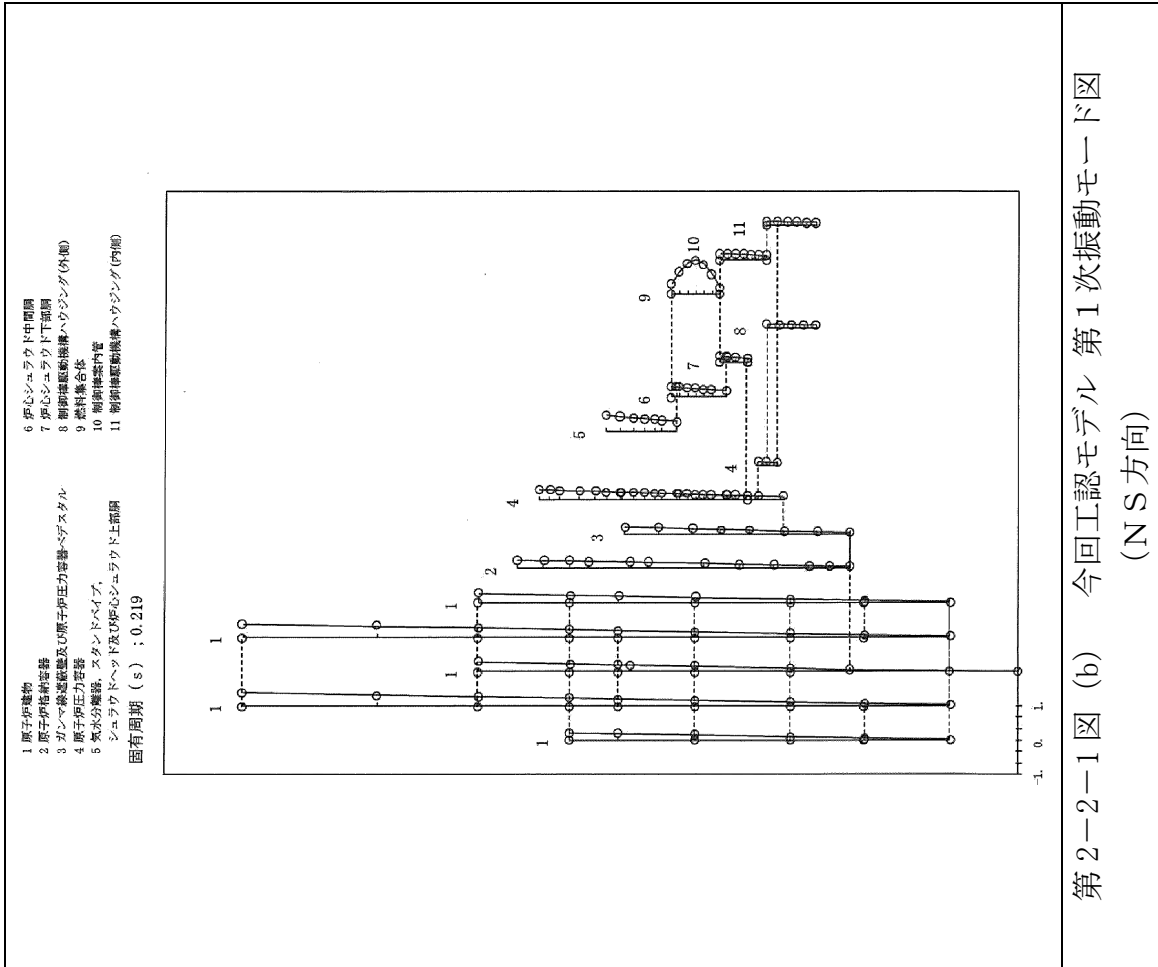
固有周期 (s) ; 0.051



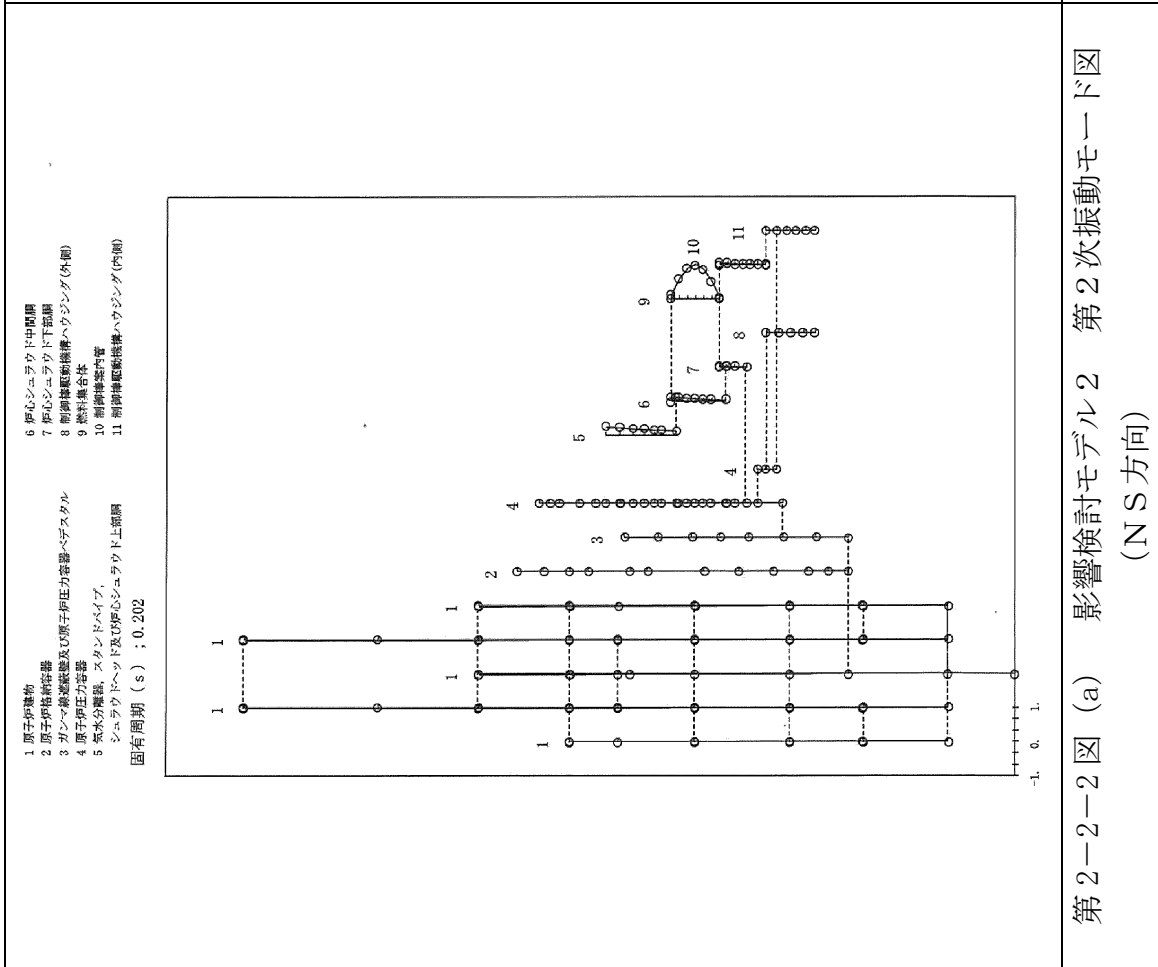
第2-1-12図 (b) 今回工認モデル 第9次振動モード図 (EW方向)



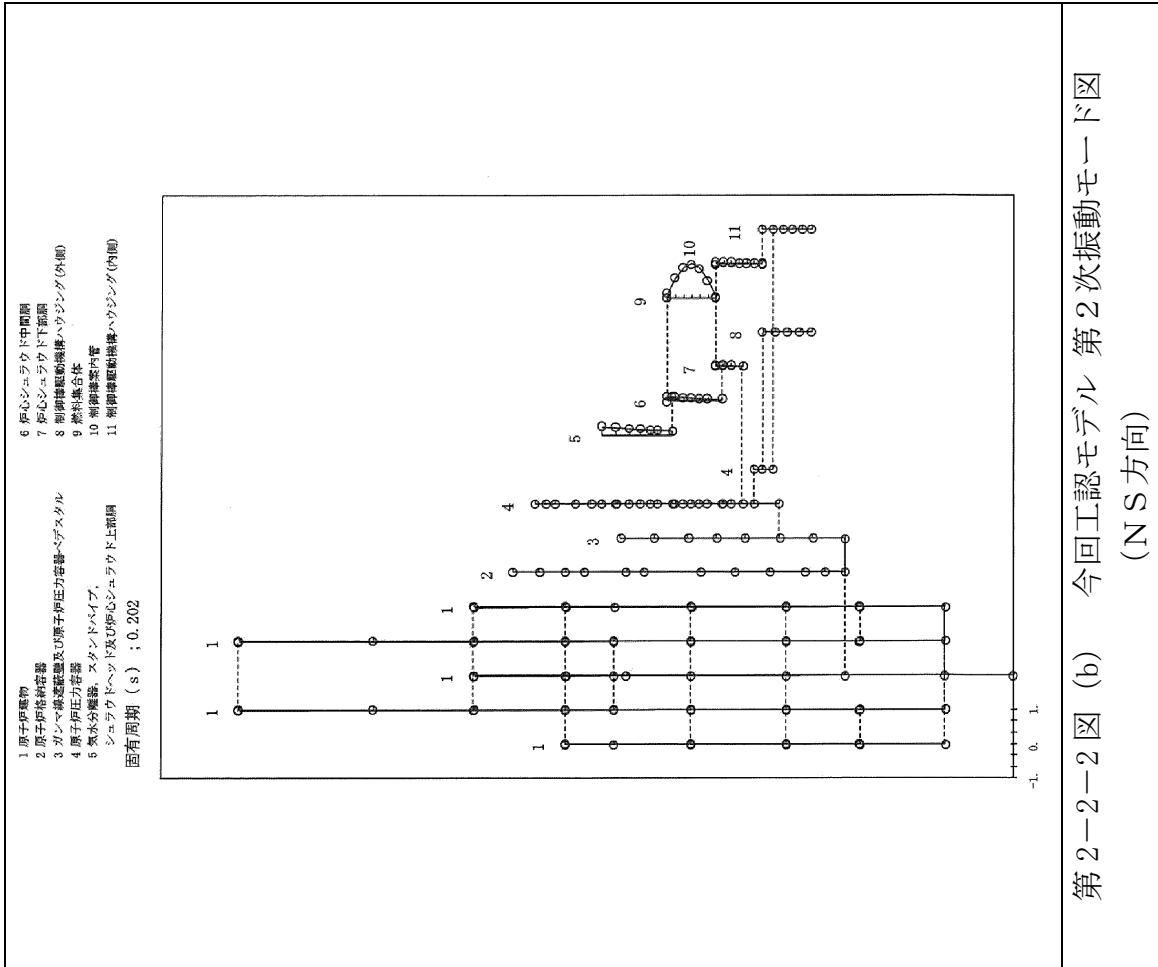
第2-2-1図 (a) 影響検討モデル2 第1次振動モード図 (NS方向)



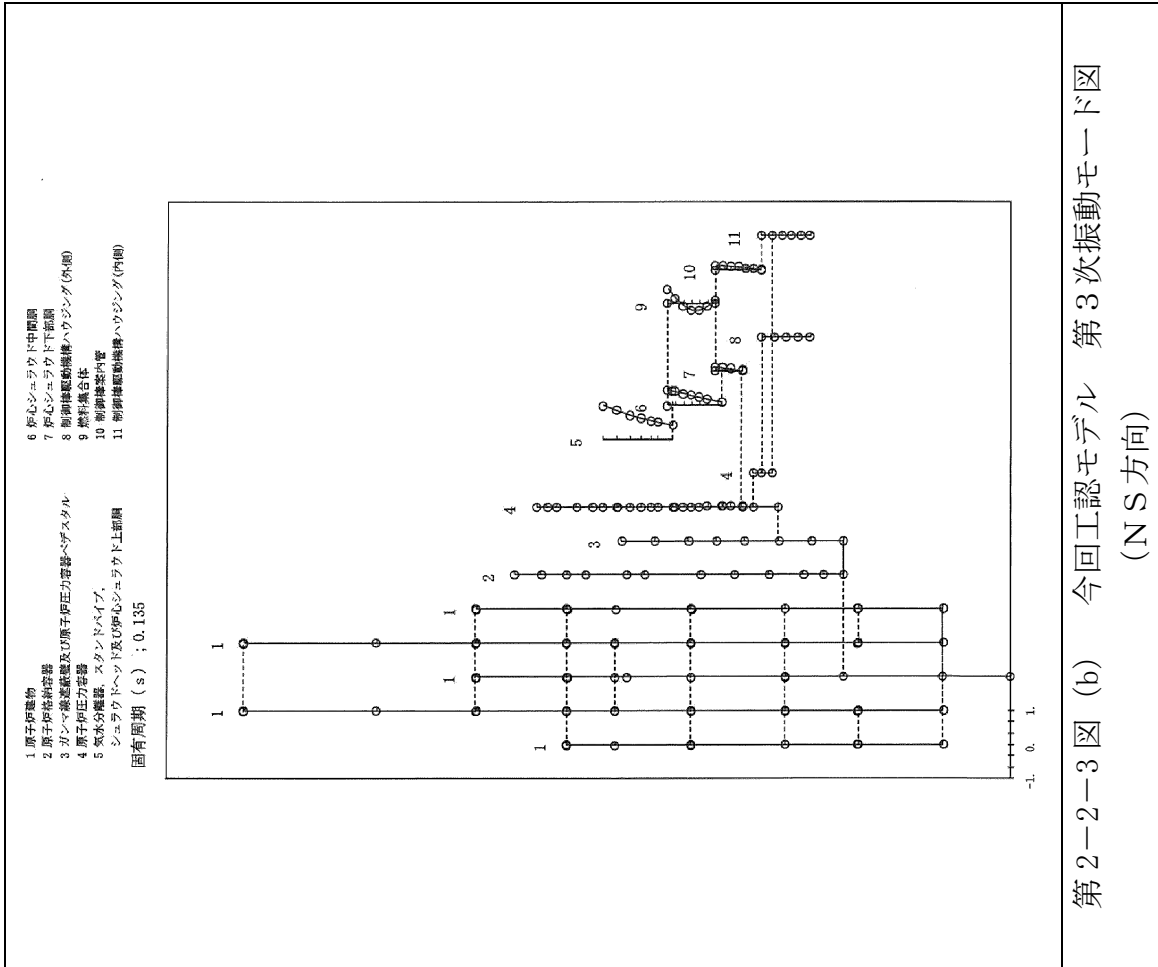
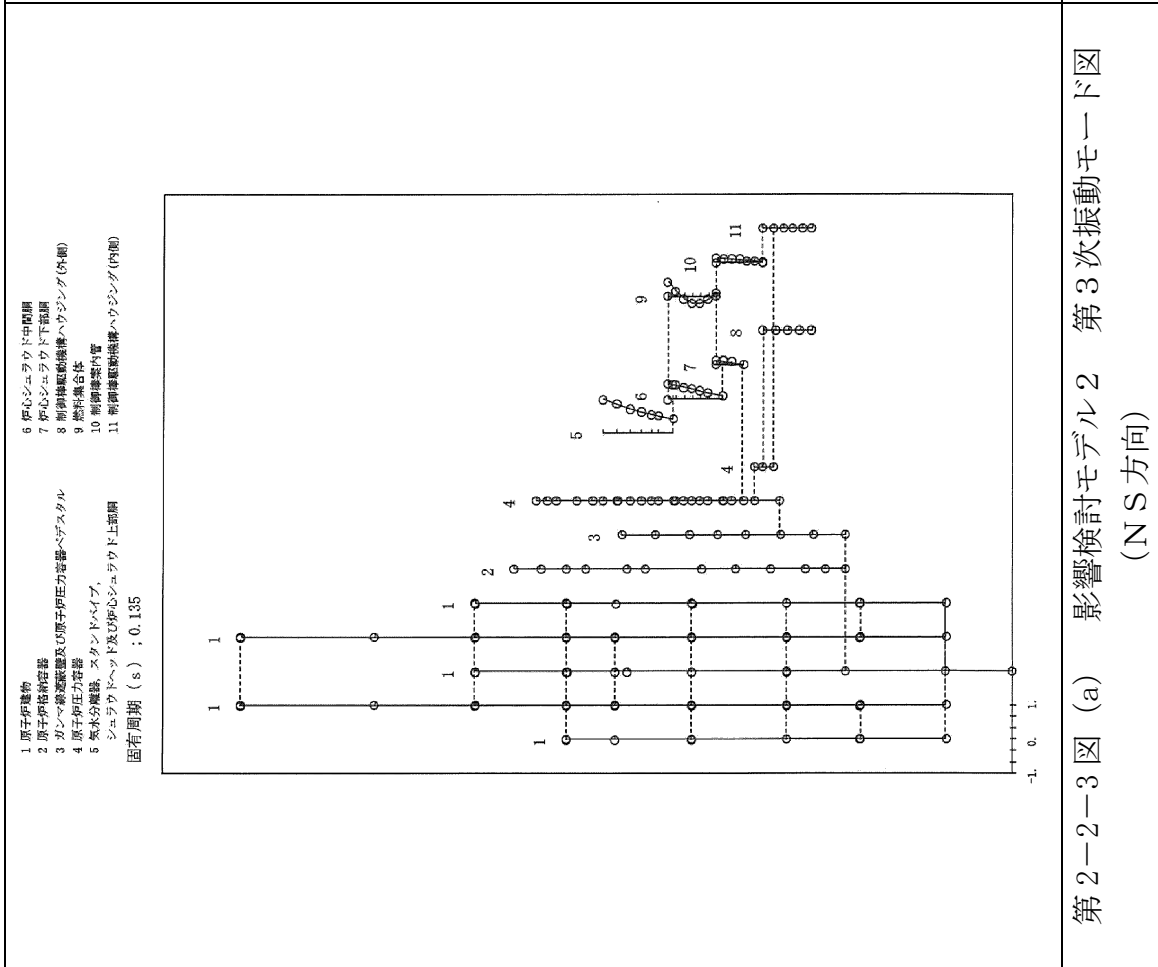
第2-2-1図 (b) 今回工認モデル 第1次振動モード図 (NS方向)

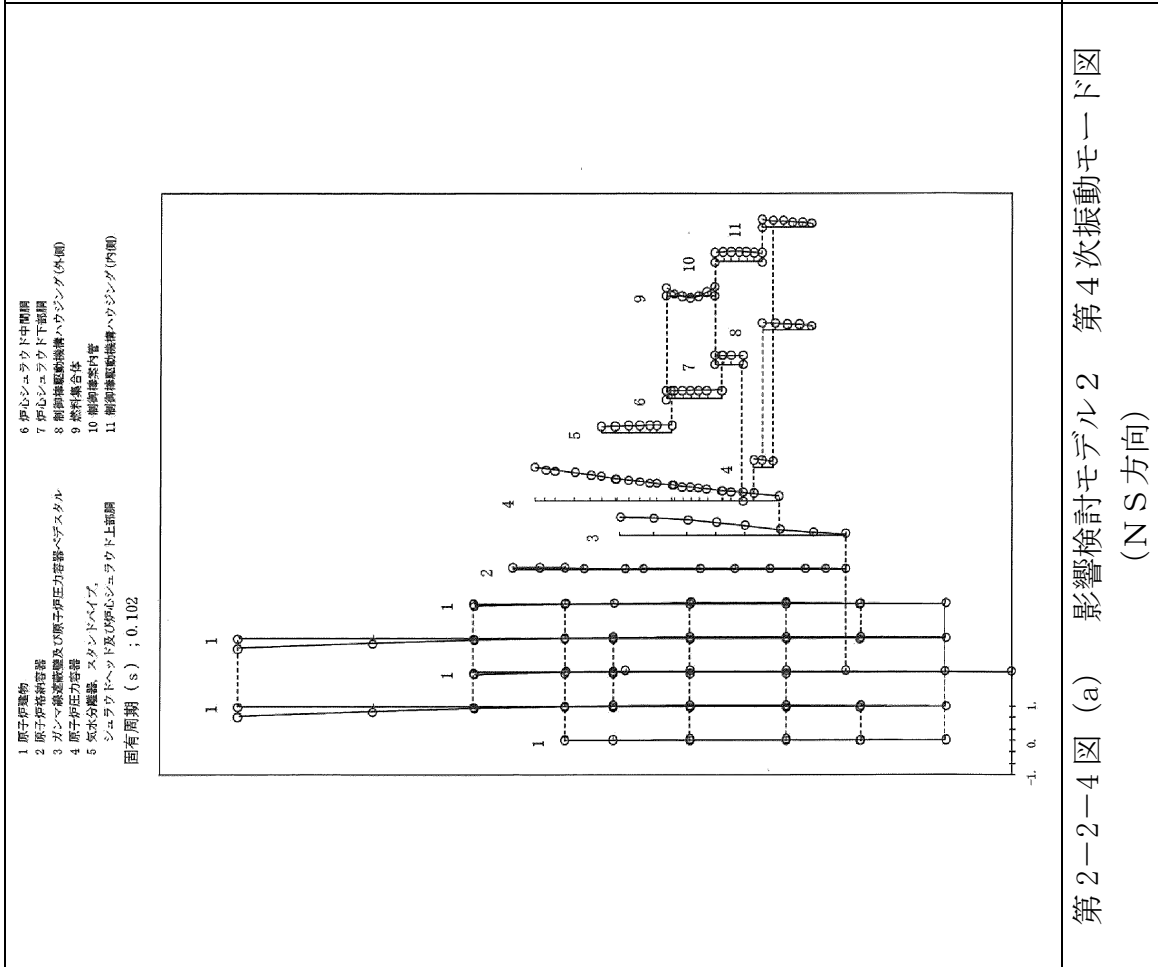
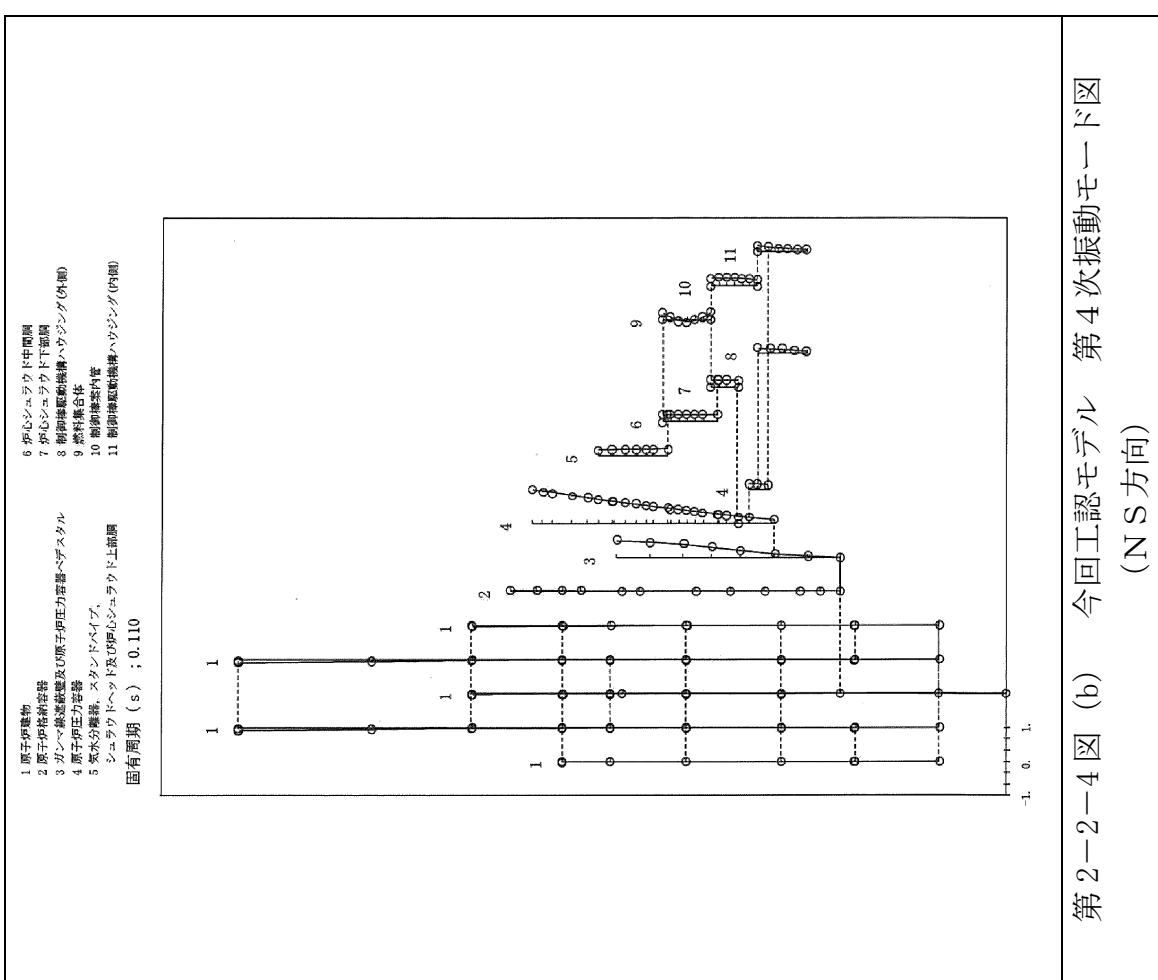


第2-2-2図 (a) 影響検討モデル2 第2次振動モード図 (NS方向)



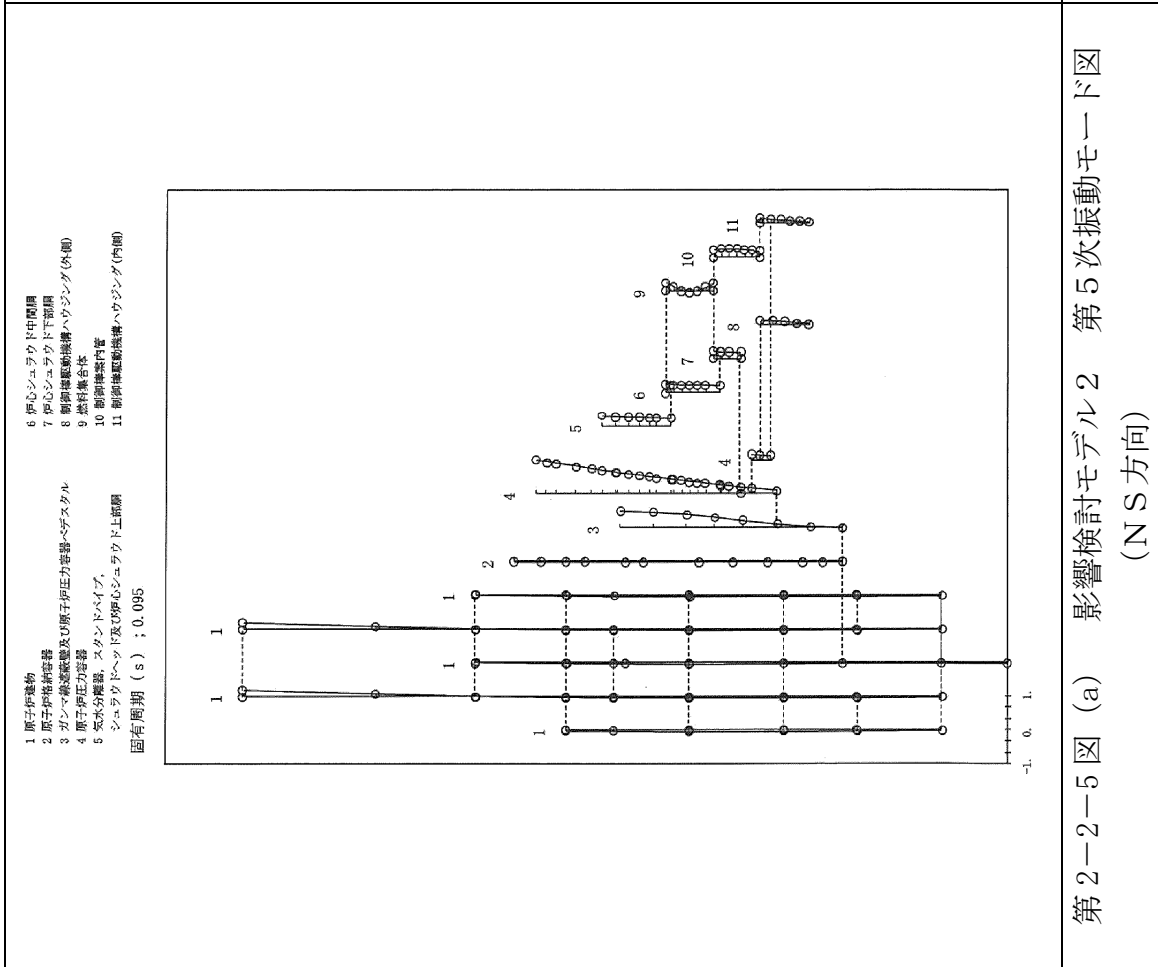
第2-2-2図 (b) 今回工認モデル 第2次振動モード図 (NS方向)



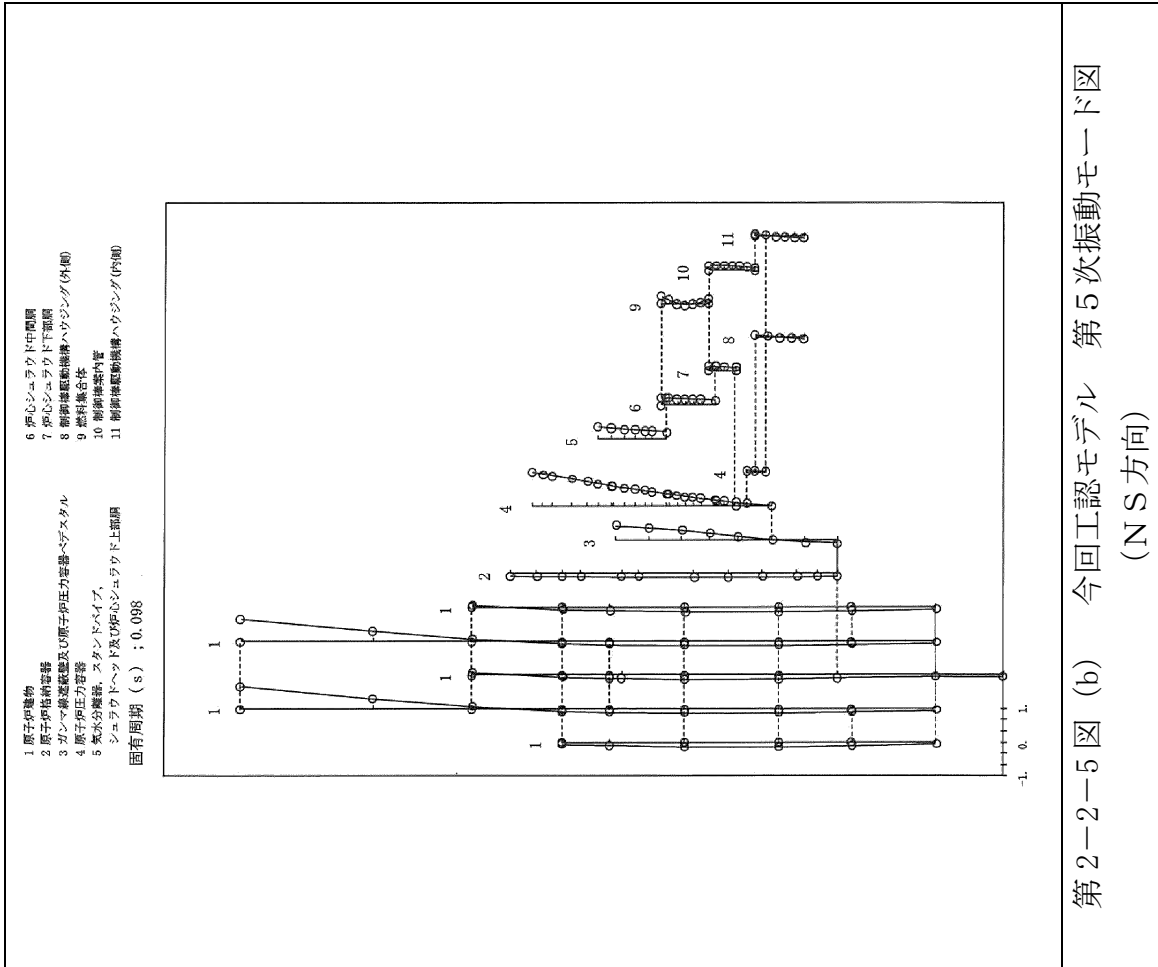


第2-2-4 図 (a) 影響検討モデル2 第4次振動モード図 (NS方向)

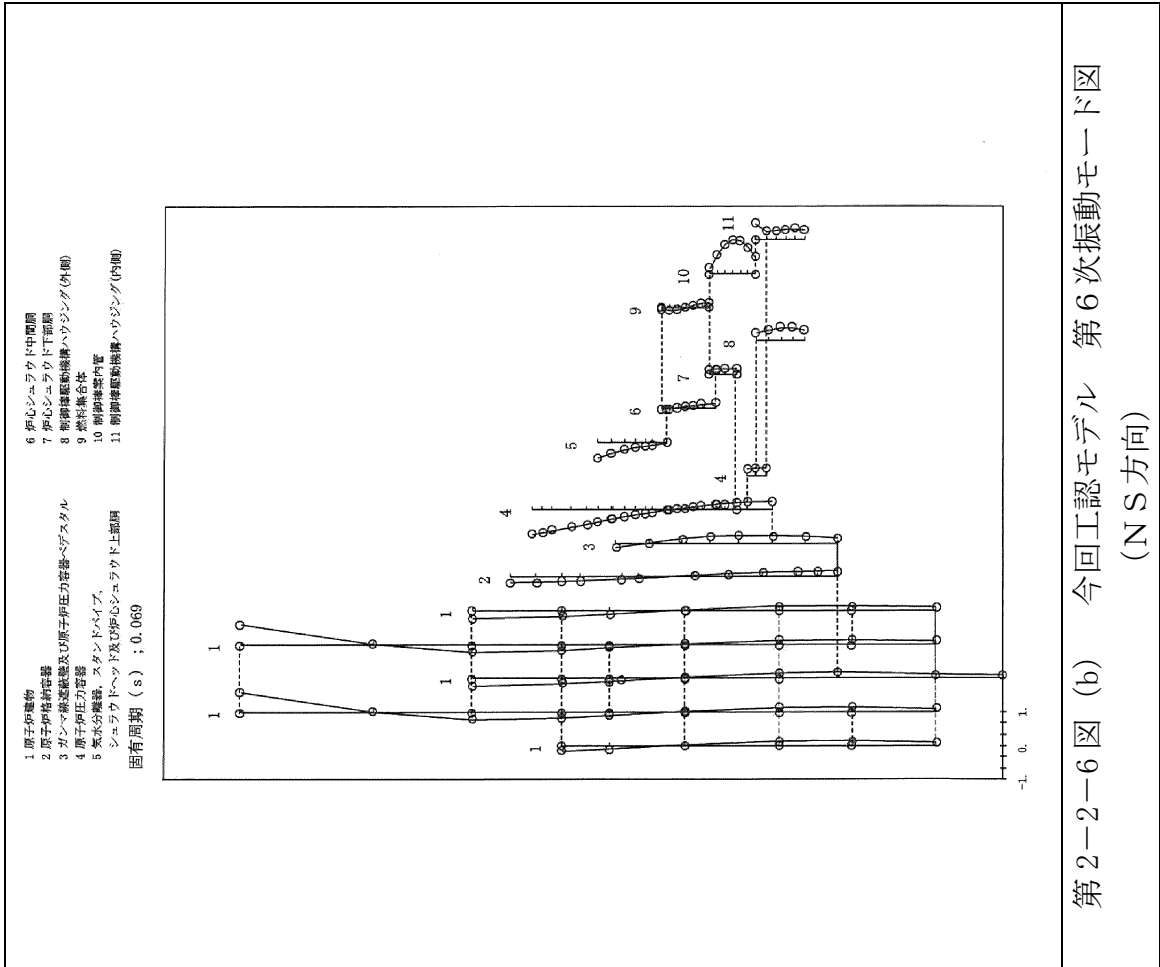
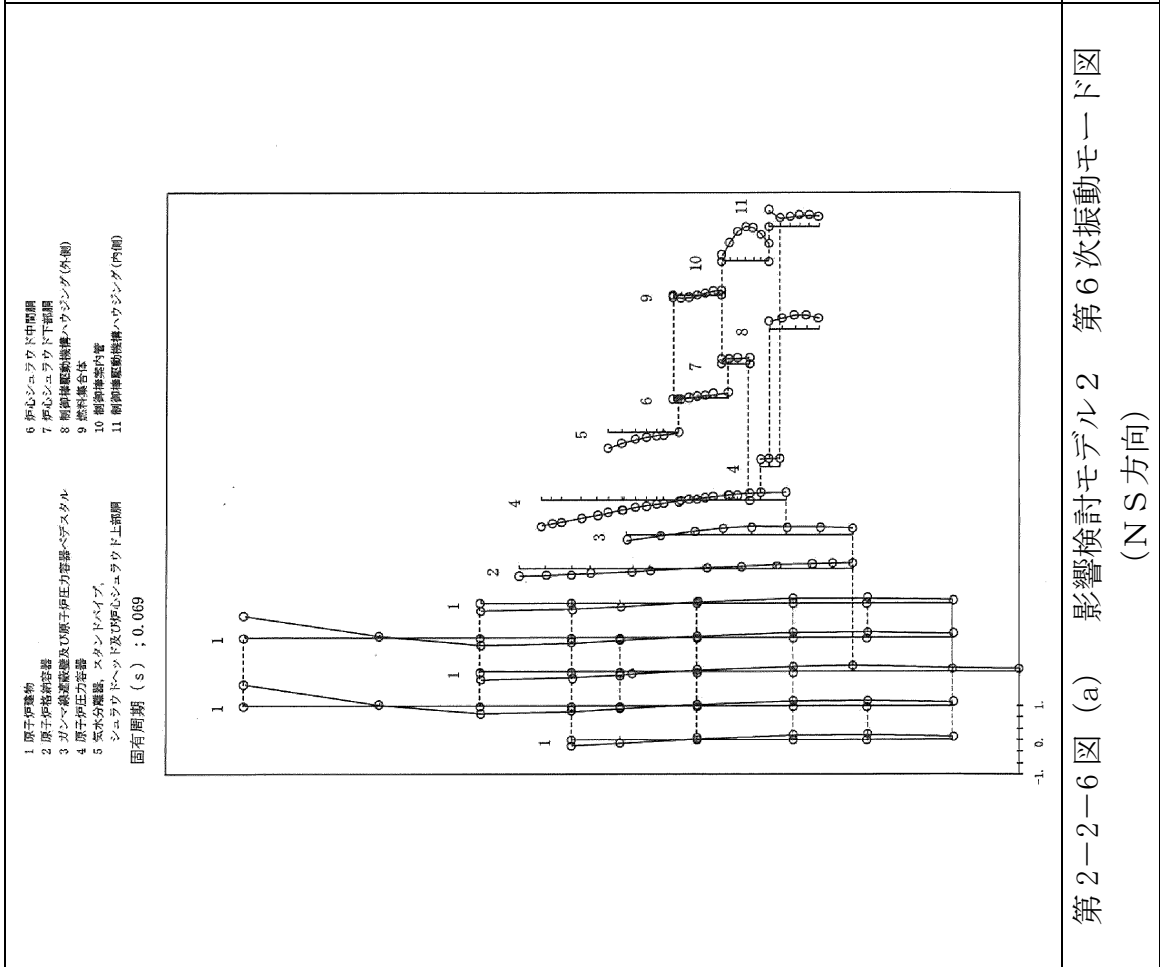
第2-2-4 図 (b) 今回工認モデル 第4次振動モード図 (NS方向)



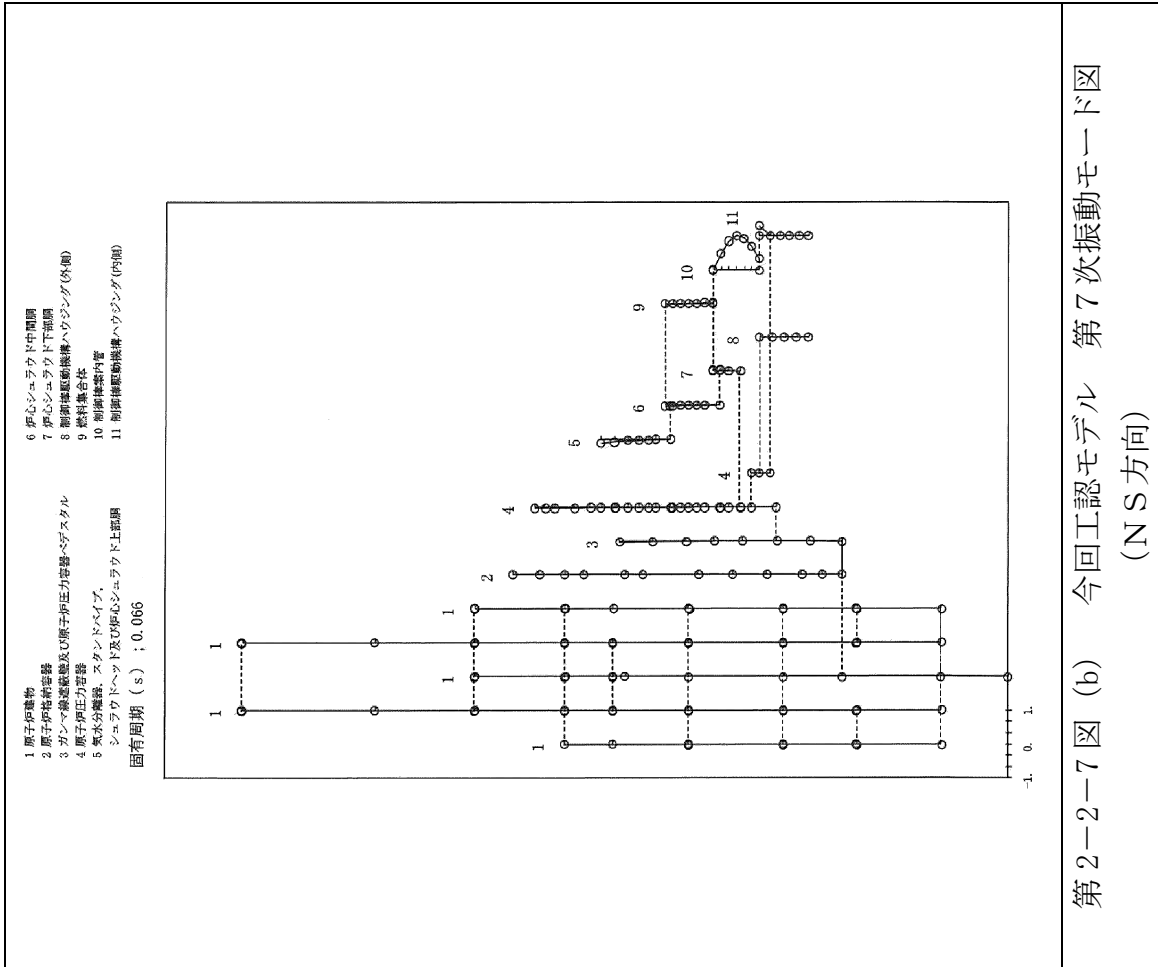
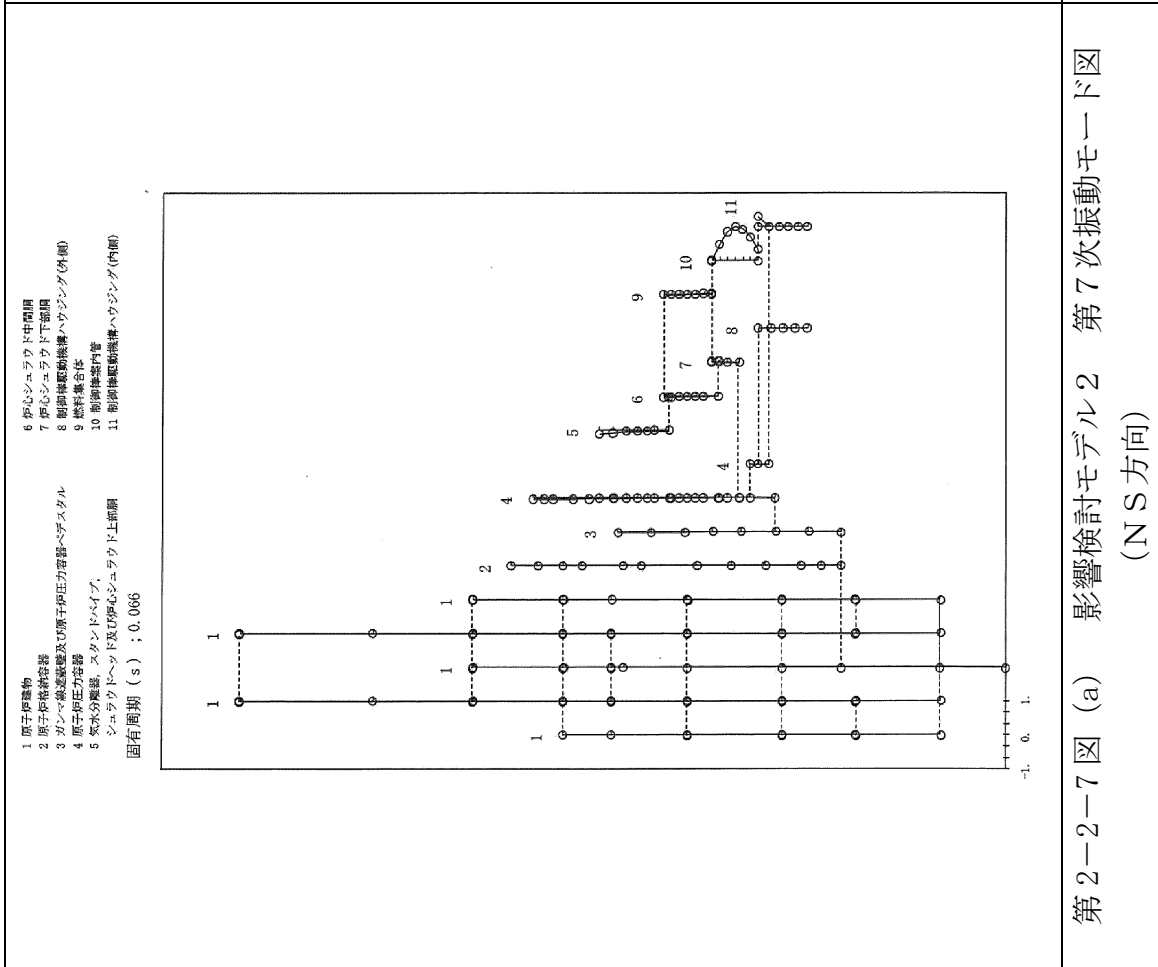
第2-2-5図 (a) 影響検討モデル2 第5次振動モード図 (NS方向)

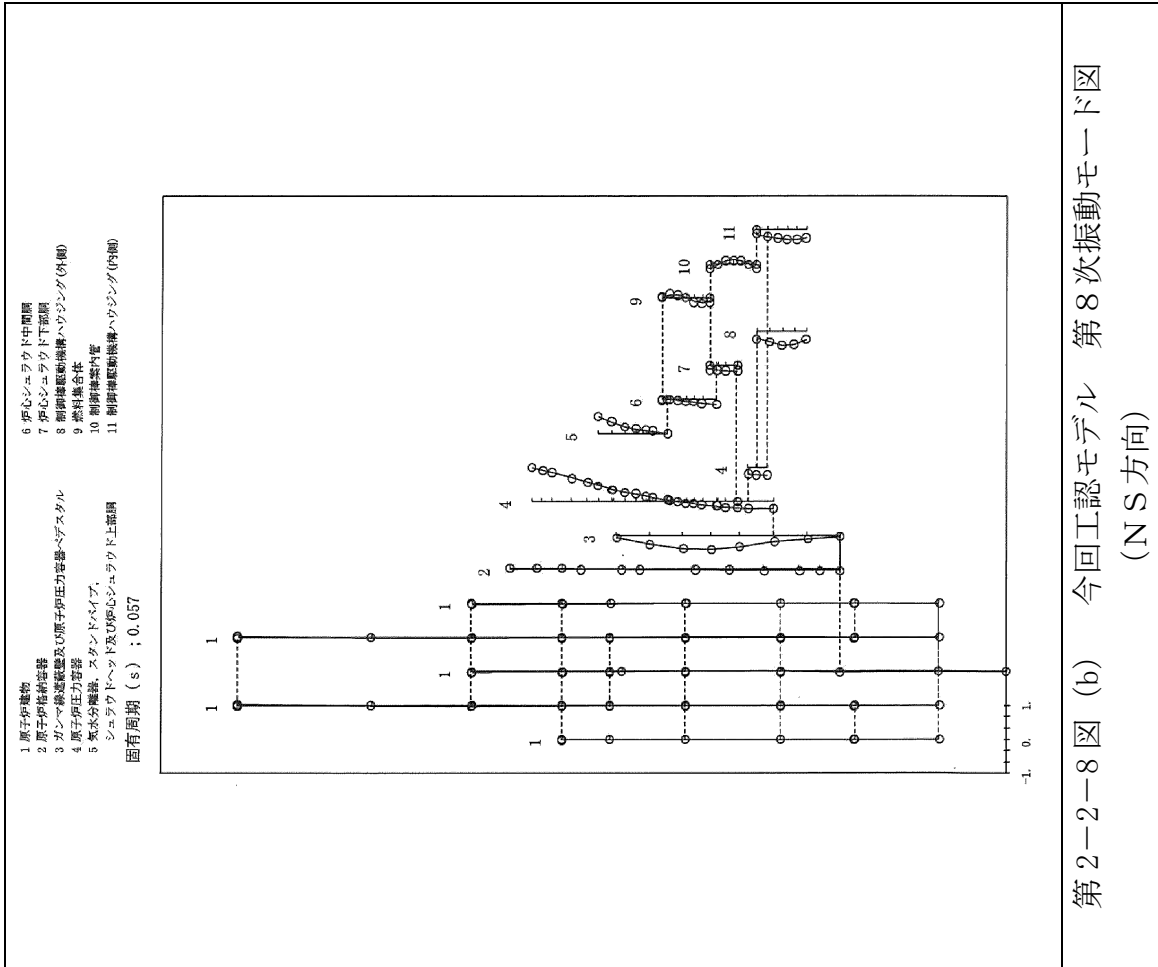
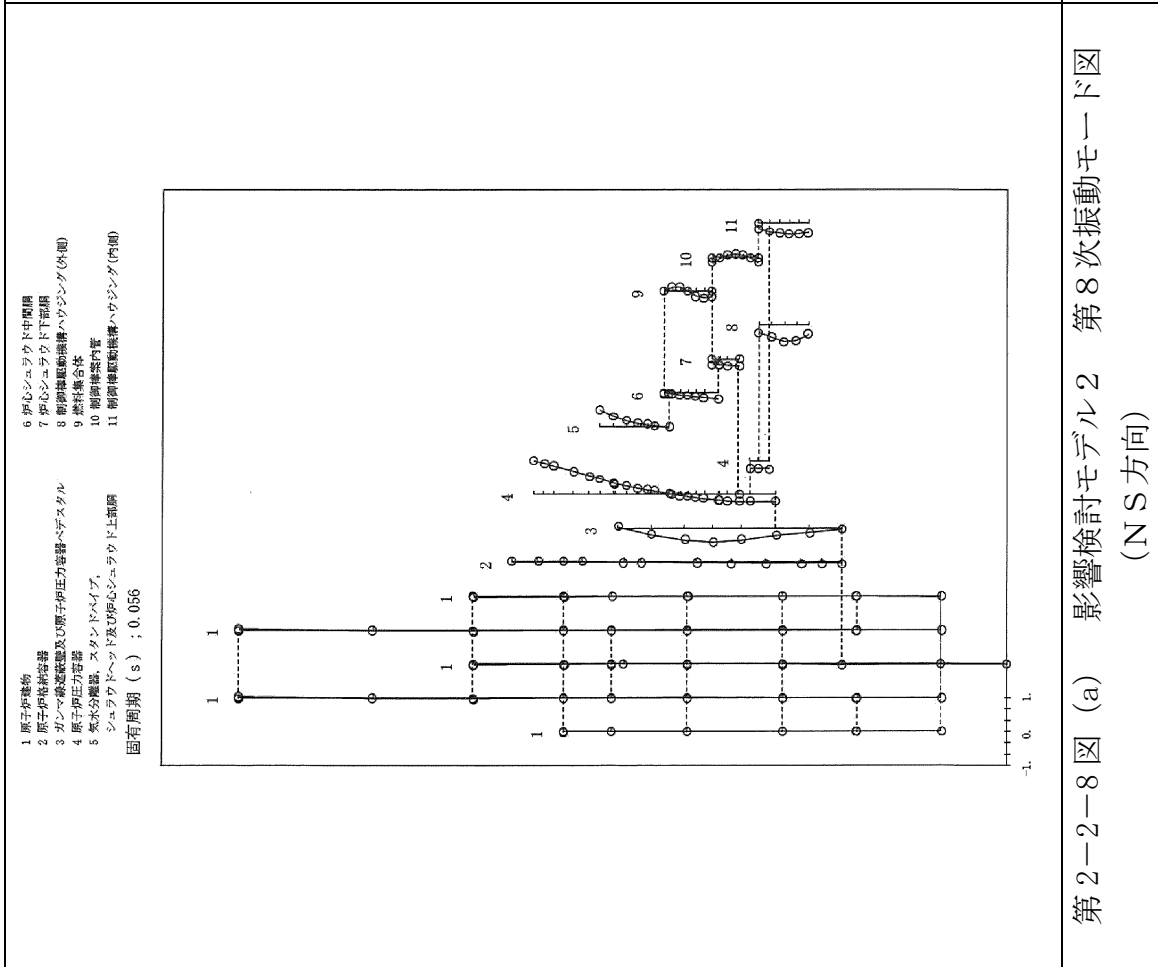


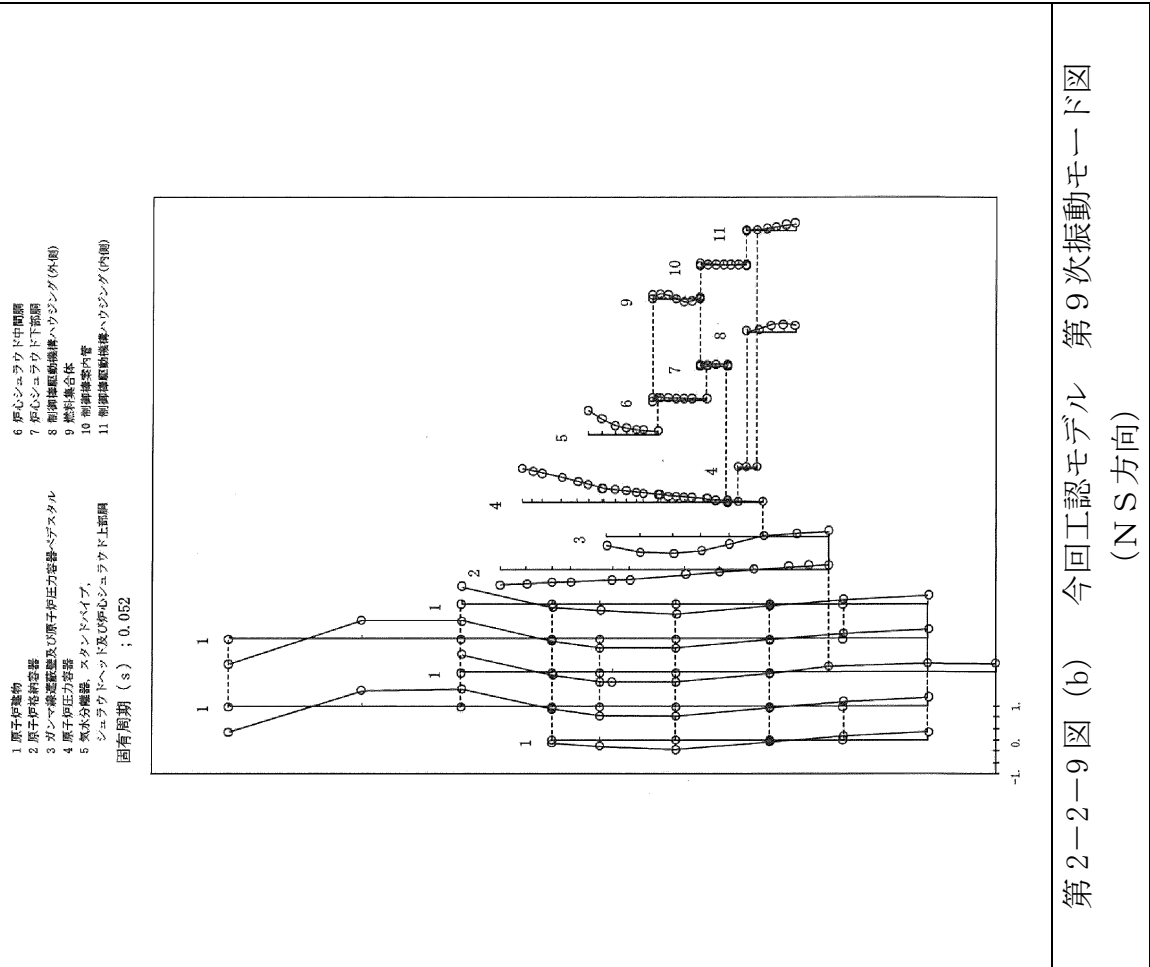
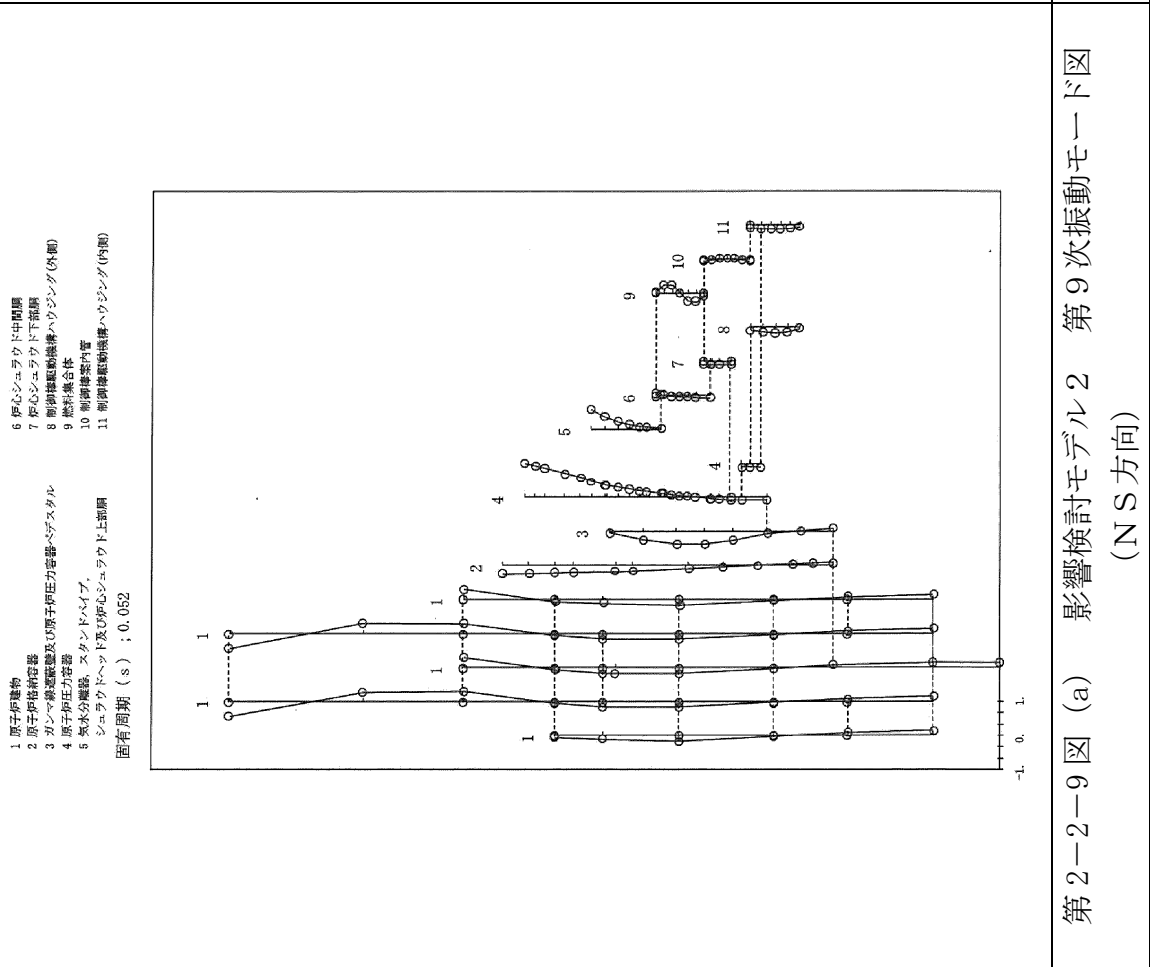
第2-2-5図 (b) 今回工認モデル 第5次振動モード図 (NS方向)

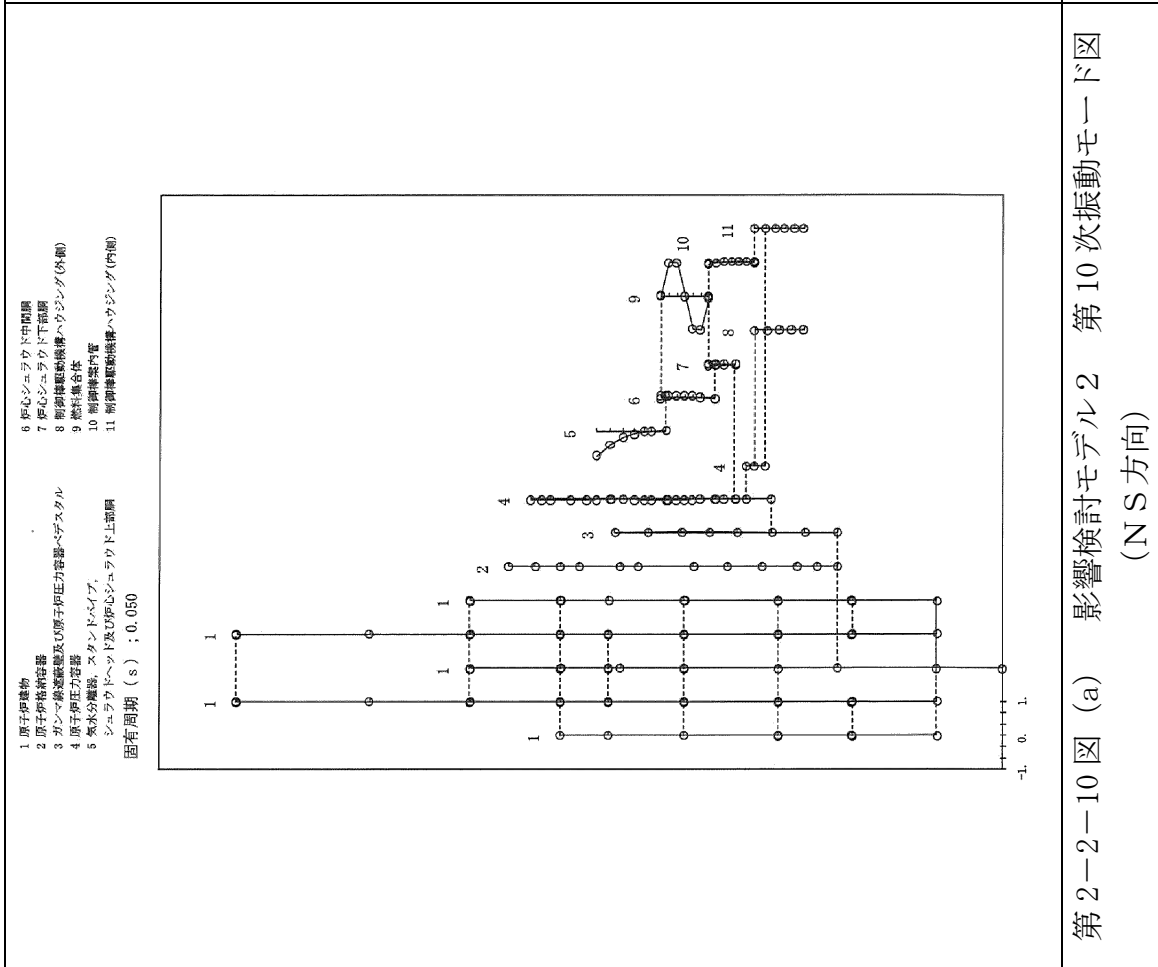




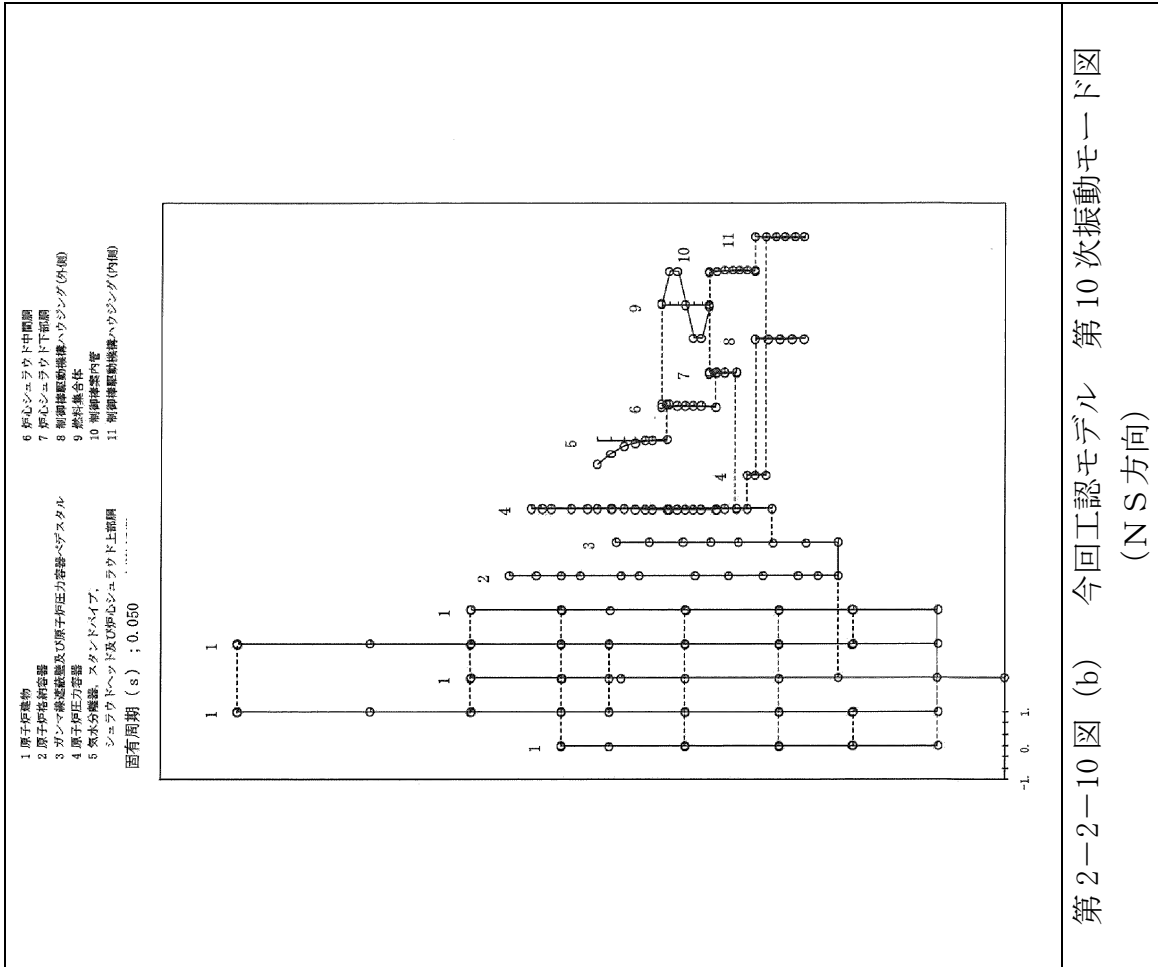








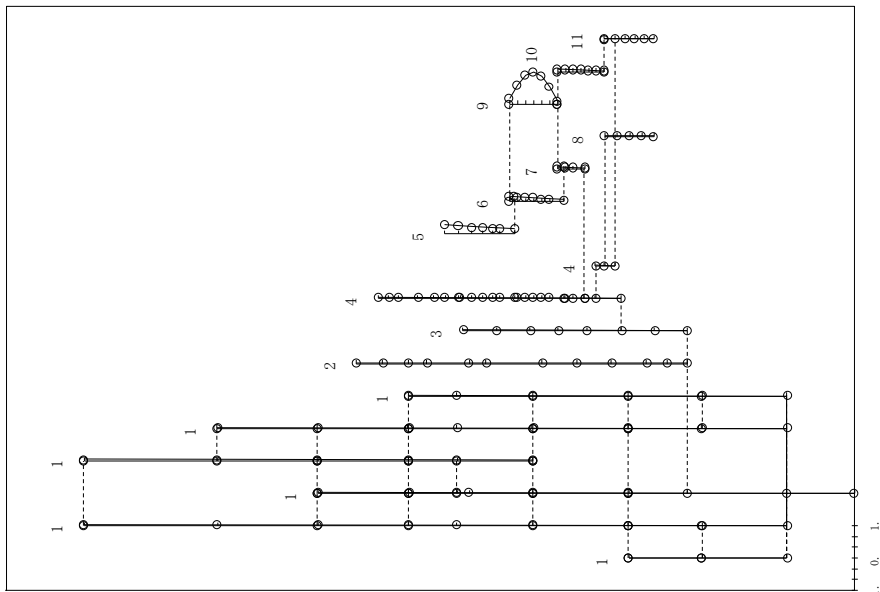
第2-2-10 図 (a) 影響検討モデル2 第10次振動モード図  
(NS方向)



第2-2-10 図 (b) 今回工認モデル 第10次振動モード図  
(NS方向)

- 1 原子炉建屋
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器-ベデスタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器、スタンバイ、シュワウドヘッド及び炉心シュワウド上部胴
- 6 炉心シュワウド中間胴
- 7 炉心シュワウド下部胴
- 8 制御棒駆動機構ハウジング(外側)
- 9 燃料集合体
- 10 制御棒案内管
- 11 制御棒駆動機構ハウジング(内側)

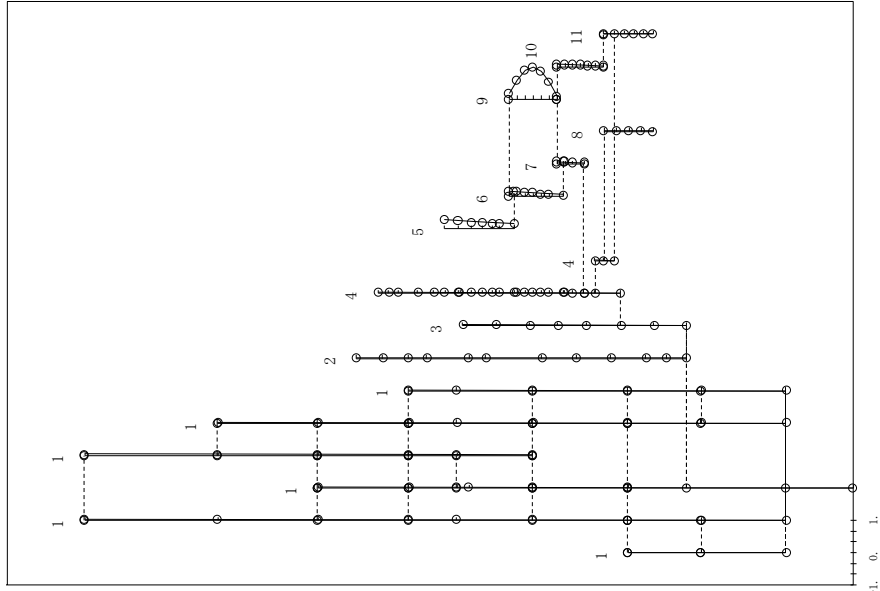
固有周期 (s) ; 0.204



第2-2-11 図 (a) 影響検討モデル2 第1次振動モード図 (EW方向)

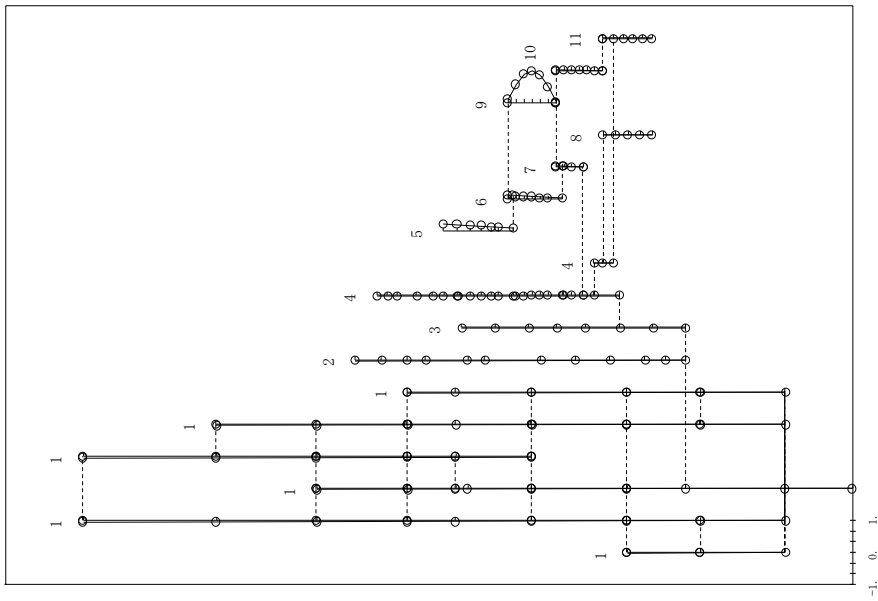
- 1 原子炉建屋
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器-ベデスタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器、スタンバイ、シュワウドヘッド及び炉心シュワウド上部胴
- 6 炉心シュワウド中間胴
- 7 炉心シュワウド下部胴
- 8 制御棒駆動機構ハウジング(外側)
- 9 燃料集合体
- 10 制御棒案内管
- 11 制御棒駆動機構ハウジング(内側)

固有周期 (s) ; 0.204



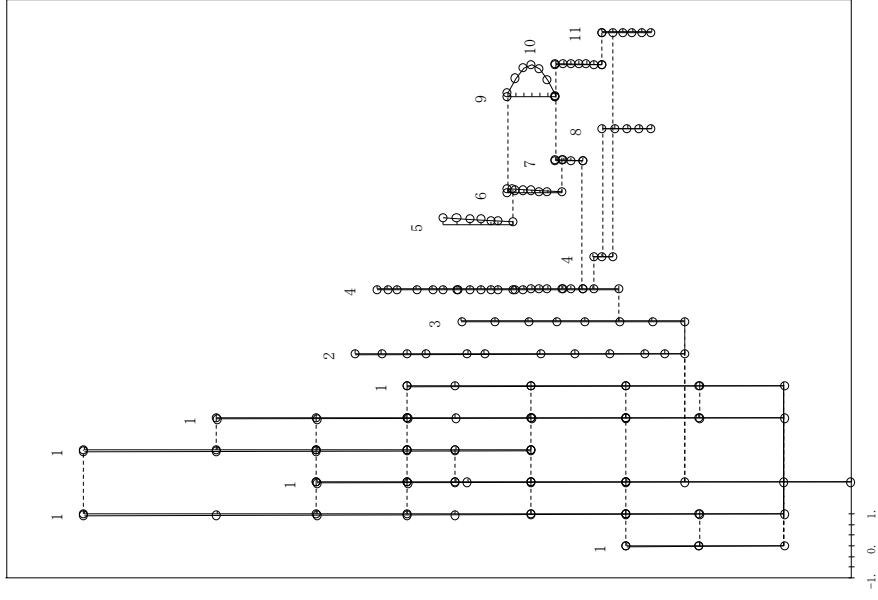
第2-2-11 図 (b) 今回工認モデル 第1次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建屋
  - 2 原子炉格納容器
  - 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ヘダスタル
  - 4 原子炉圧力容器
  - 5 気水分離器、スタントドハイブ、シュウワウドヘッド及び炉心シュウワウド上部屋
  - 6 炉心シュウワウド中間
  - 7 炉心シュウワウド下部屋
  - 8 制御棒駆動機構ハウジング(外側)
  - 9 燃料集合体
  - 10 制御棒案内管
  - 11 制御棒駆動機構ハウジング(内側)
- 固有周期 (s) ; 0.200



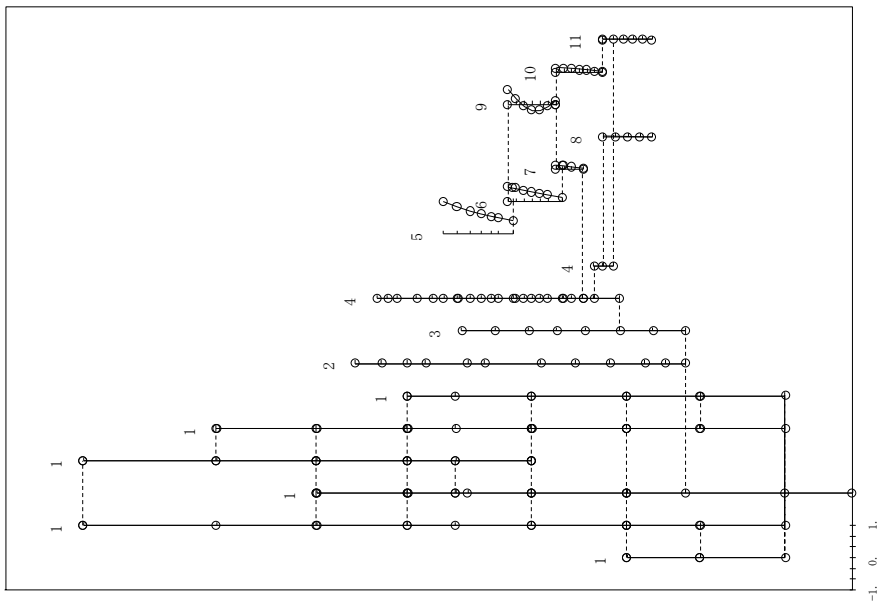
第2-2-12図 (a) 影響検討モデル2 第2次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建屋
  - 2 原子炉格納容器
  - 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ヘダスタル
  - 4 原子炉圧力容器
  - 5 気水分離器、スタントドハイブ、シュウワウドヘッド及び炉心シュウワウド上部屋
  - 6 炉心シュウワウド中間
  - 7 炉心シュウワウド下部屋
  - 8 制御棒駆動機構ハウジング(外側)
  - 9 燃料集合体
  - 10 制御棒案内管
  - 11 制御棒駆動機構ハウジング(内側)
- 固有周期 (s) ; 0.200



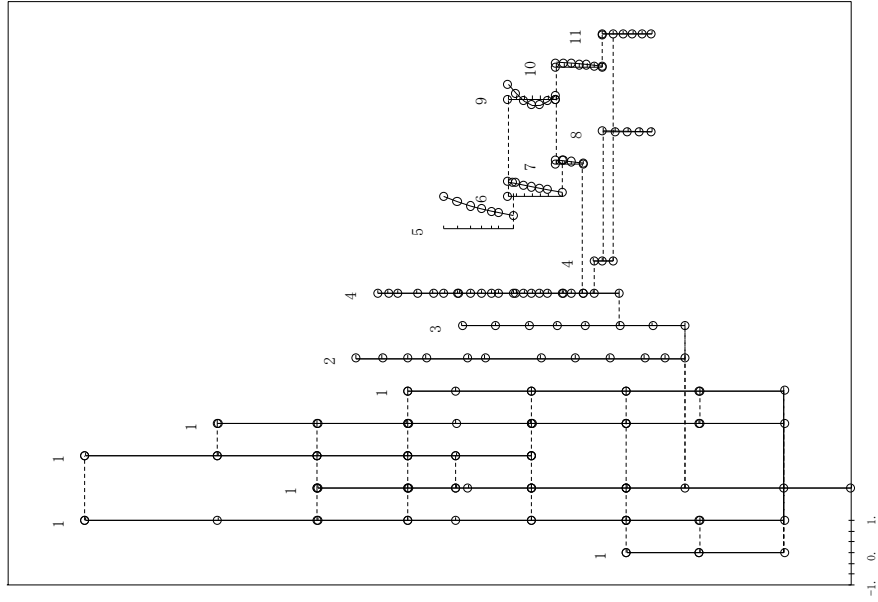
第2-2-12図 (b) 今回工認モデル 第2次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建物
  - 2 原子炉格納容器
  - 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ヘジスタル
  - 4 原子炉圧力容器
  - 5 気水分離器、スタンドバイ、シュウワウドヘッド及び炉心シュウワウド上部屋
  - 6 炉心シュウワウド中間
  - 7 炉心シュウワウド下部屋
  - 8 制御棒駆動機構ハウジング(外側)
  - 9 燃料集合体
  - 10 制御棒案内管
  - 11 制御棒駆動機構ハウジング(内側)
- 固有周期 (s) ; 0.135



第2-2-13 図 (a) 影響検討モデル2 第3次振動モード図 (EW方向)

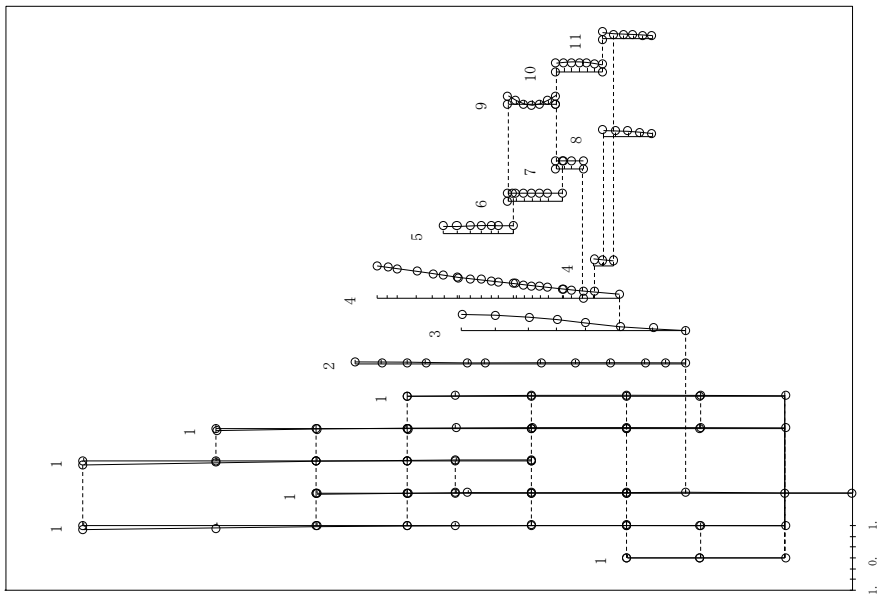
- 1 原子炉建物
  - 2 原子炉格納容器
  - 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ヘジスタル
  - 4 原子炉圧力容器
  - 5 気水分離器、スタンドバイ、シュウワウドヘッド及び炉心シュウワウド上部屋
  - 6 炉心シュウワウド中間
  - 7 炉心シュウワウド下部屋
  - 8 制御棒駆動機構ハウジング(外側)
  - 9 燃料集合体
  - 10 制御棒案内管
  - 11 制御棒駆動機構ハウジング(内側)
- 固有周期 (s) ; 0.135



第2-2-13 図 (b) 今回工認モデル 第3次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器へダスタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器、スタンドバイパス、シュワウドヘッド及び炉心シュワウド上部間
- 6 炉心シュワウド中間間
- 7 炉心シュワウド下部間
- 8 制御棒駆動機構ハウジング(外側)
- 9 燃料集合体
- 10 制御棒案内管
- 11 制御棒駆動機構ハウジング(内側)

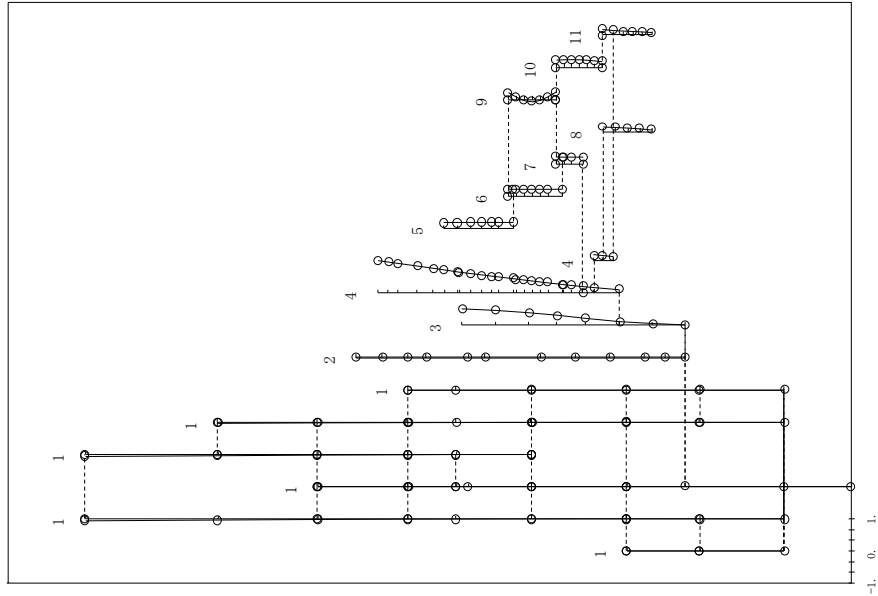
固有周期 (s) ; 0.100



第2-2-14図 (a) 影響検討モデル2 第4次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器へダスタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器、スタンドバイパス、シュワウドヘッド及び炉心シュワウド上部間
- 6 炉心シュワウド中間間
- 7 炉心シュワウド下部間
- 8 制御棒駆動機構ハウジング(外側)
- 9 燃料集合体
- 10 制御棒案内管
- 11 制御棒駆動機構ハウジング(内側)

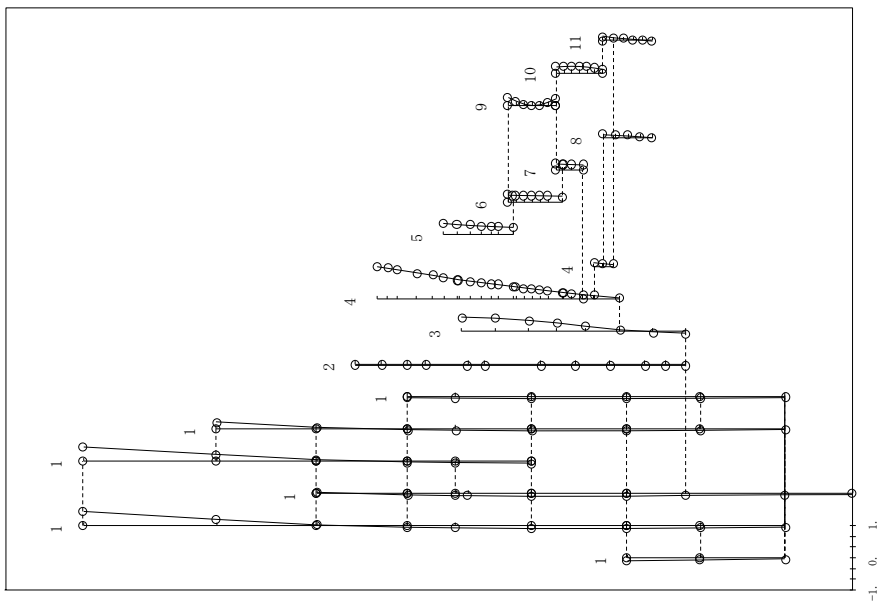
固有周期 (s) ; 0.109



第2-2-14図 (b) 今回工認モデル 第4次振動モード図 (EW方向)

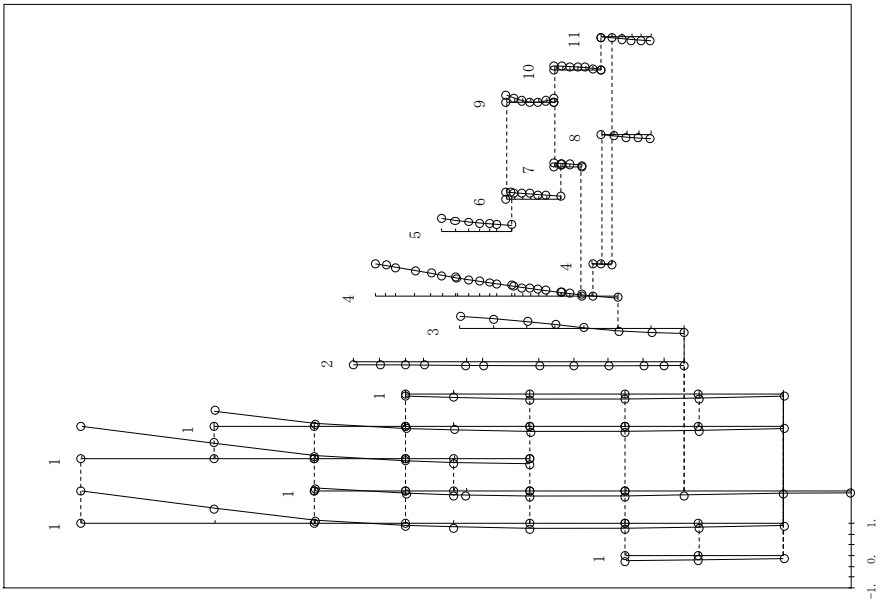


- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ベダスタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器、スタンドパイプ、シュウラウドヘッド及び炉心シュウラウド上部胴
- 固有周期 (s) ; 0.091
- 6 炉心シュウラウド中間胴
- 7 炉心シュウラウド下部胴
- 8 制御棒駆動機構ハウジング(外側)
- 9 燃料集合体
- 10 制御棒案内管
- 11 制御棒駆動機構ハウジング(内側)

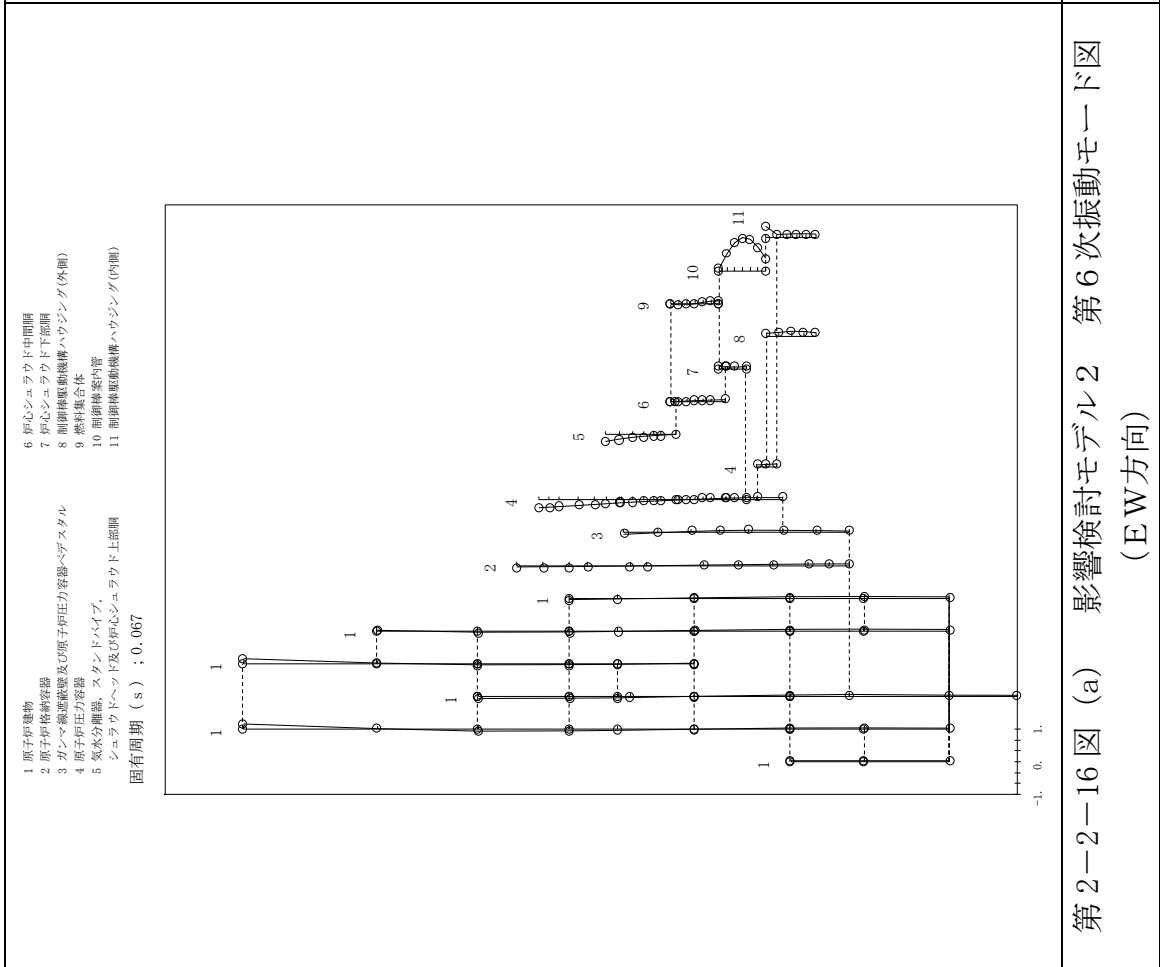


第2-2-15 図 (a) 影響検討モデル2 第5次振動モード図 (EW方向)

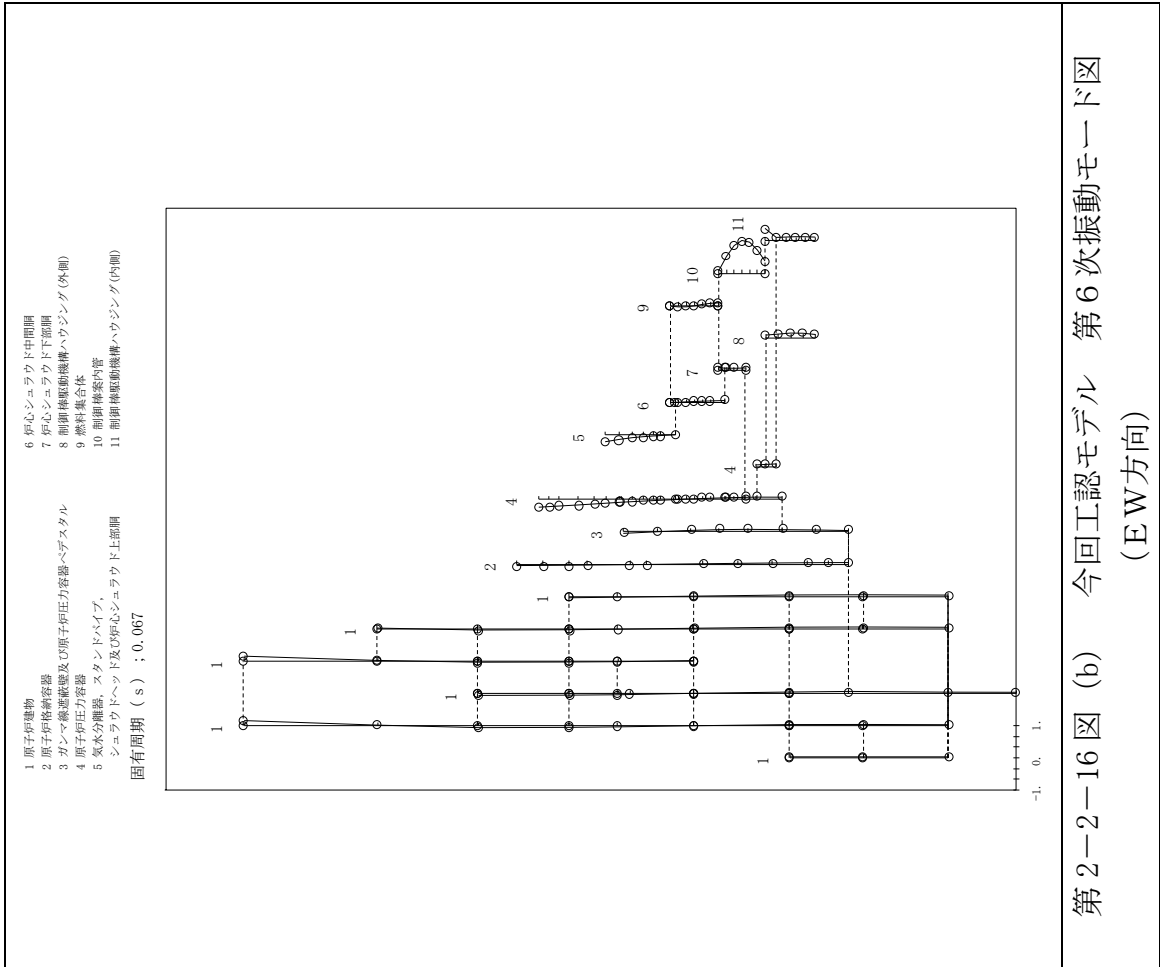
- 1 原子炉建物
- 2 原子炉格納容器
- 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ベダスタル
- 4 原子炉圧力容器
- 5 気水分離器、スタンドパイプ、シュウラウドヘッド及び炉心シュウラウド上部胴
- 固有周期 (s) ; 0.093
- 6 炉心シュウラウド中間胴
- 7 炉心シュウラウド下部胴
- 8 制御棒駆動機構ハウジング(外側)
- 9 燃料集合体
- 10 制御棒案内管
- 11 制御棒駆動機構ハウジング(内側)



第2-2-15 図 (b) 今回工認モデル 第5次振動モード図 (EW方向)

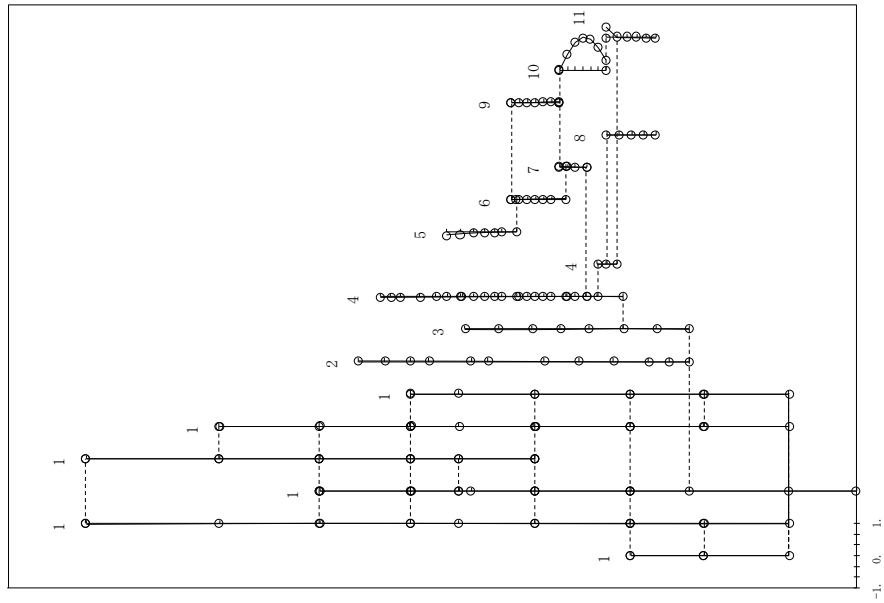


第2-2-16図 (a) 影響検討モデル2 第6次振動モード図 (EW方向)



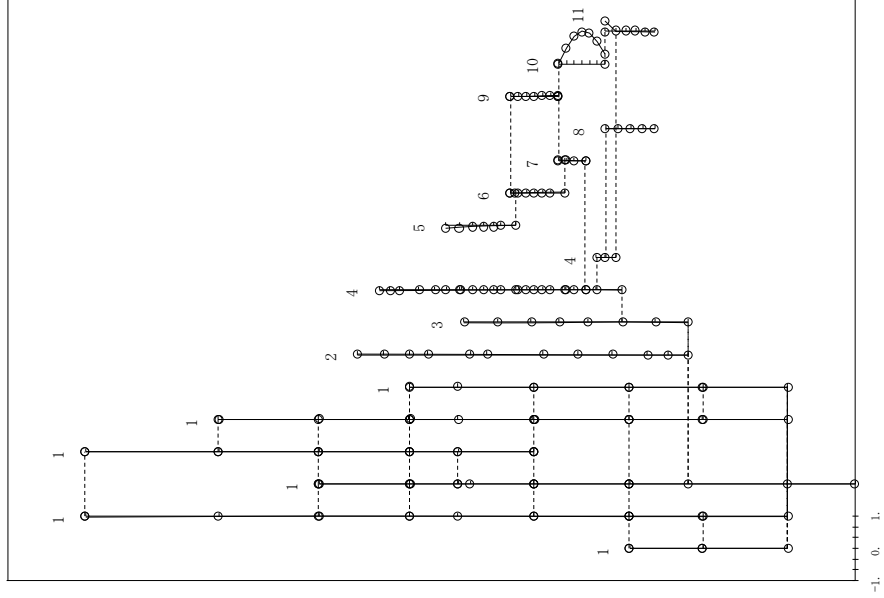
第2-2-16図 (b) 今回工認モデル 第6次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建物
  - 2 原子炉格納容器
  - 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器-ベズスタル
  - 4 原子炉圧力容器
  - 5 気水分離器, スタンドパイプ, シュウワドヘッド及び炉心シュウワド上部剛
  - 6 炉心シュウワド中間剛
  - 7 炉心シュウワド下部剛
  - 8 制御棒駆動機構ハウジング(外側)
  - 9 燃料集合体
  - 10 制御棒案内管
  - 11 制御棒駆動機構ハウジング(内側)
- 固有周期 (s) ; 0.066

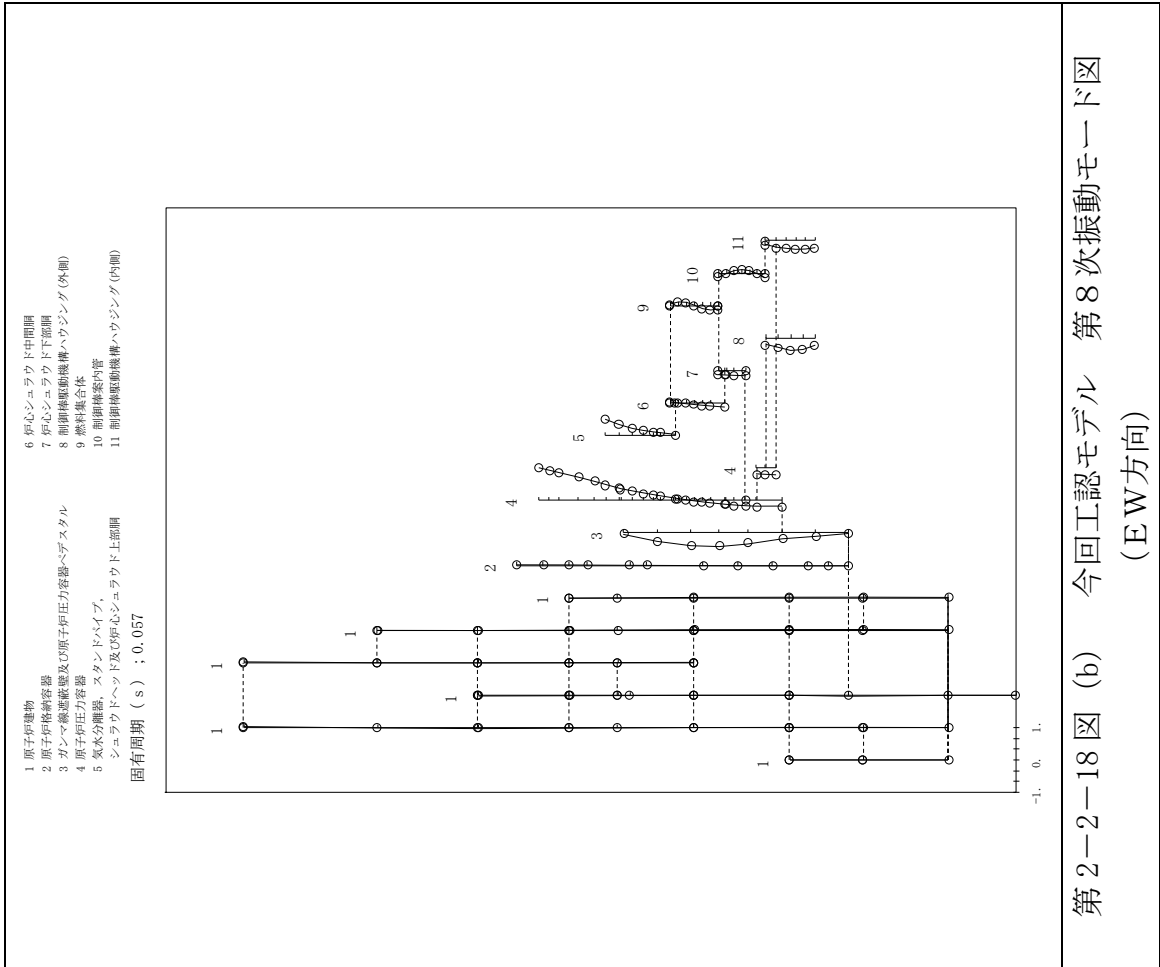
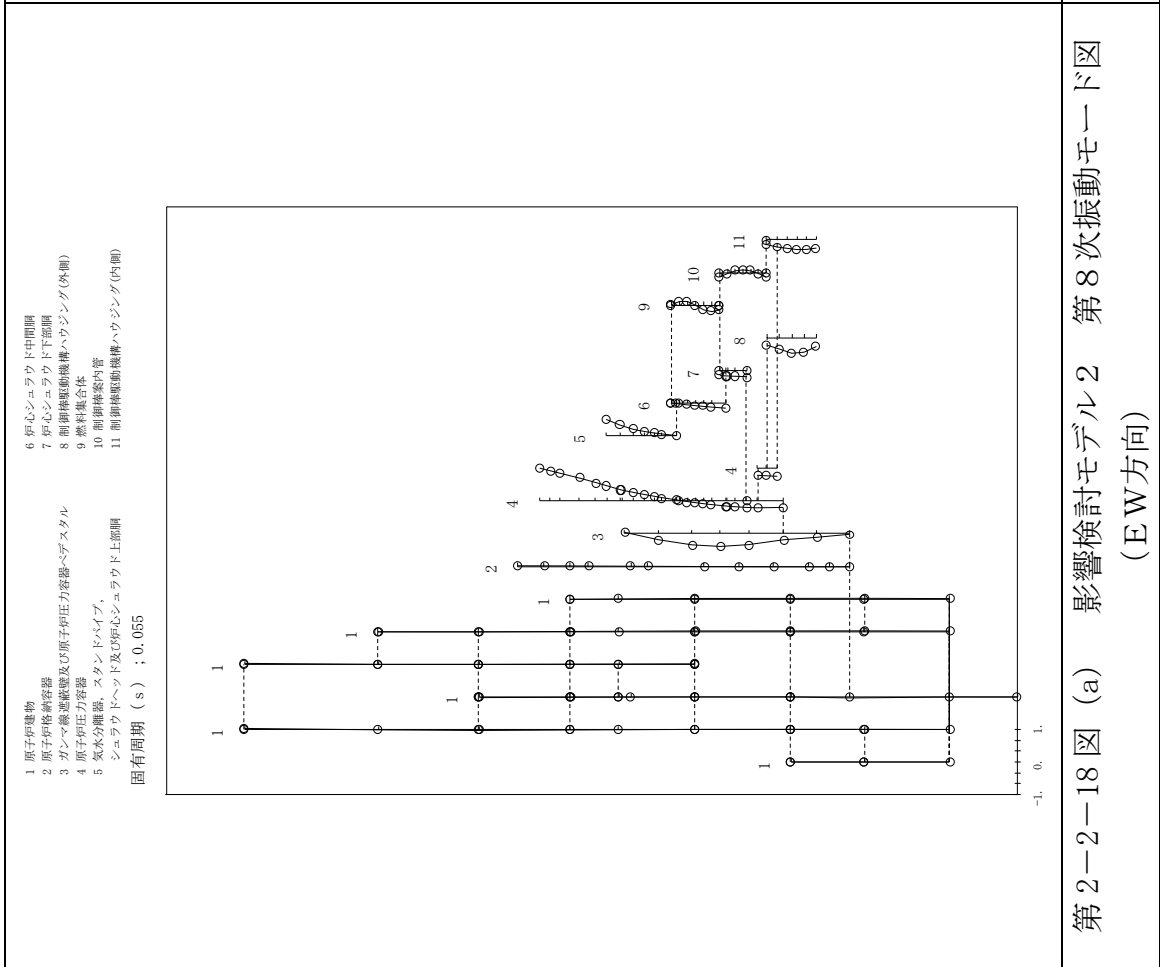


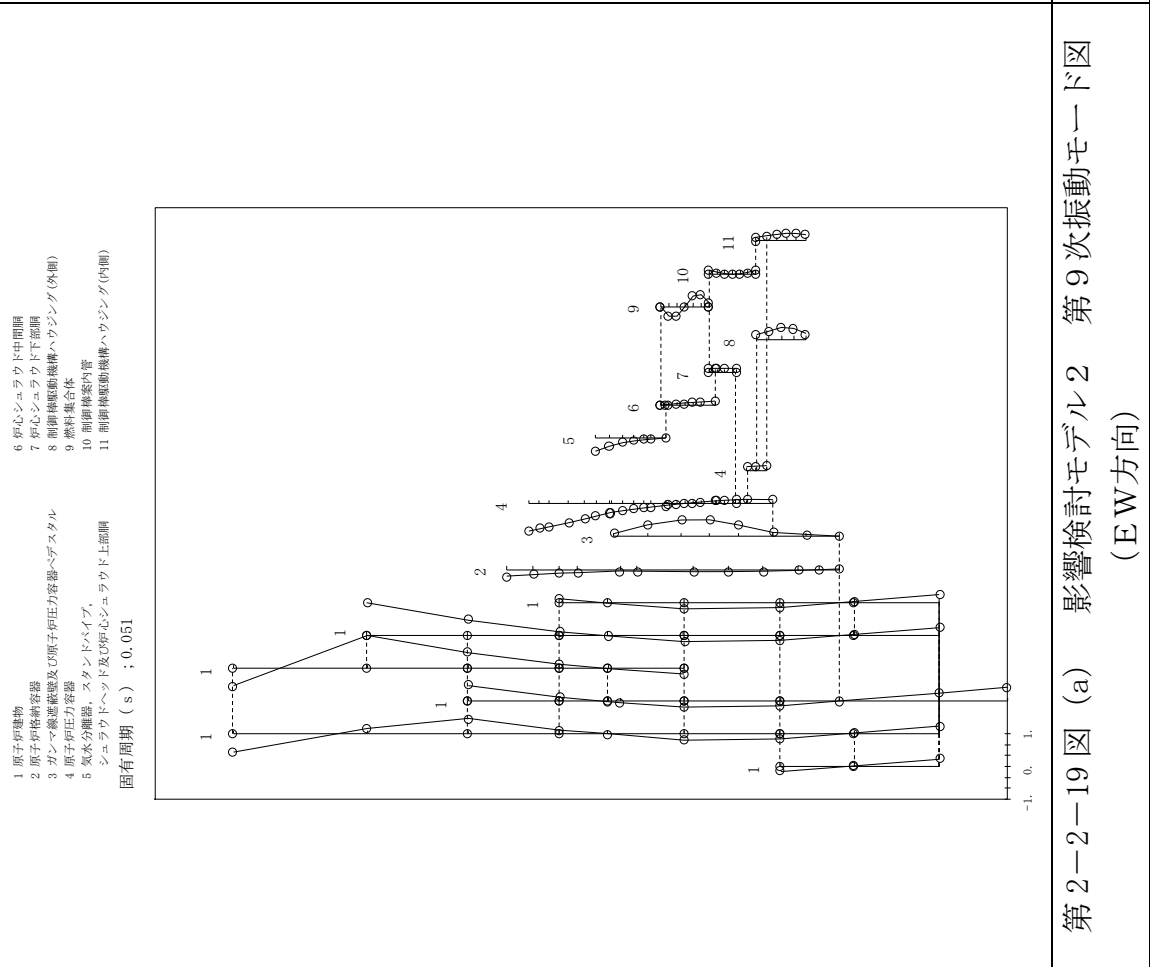
第2-2-17図 (a) 影響検討モデル2 第7次振動モード図 (EW方向)

- 1 原子炉建物
  - 2 原子炉格納容器
  - 3 ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器-ベズスタル
  - 4 原子炉圧力容器
  - 5 気水分離器, スタンドパイプ, シュウワドヘッド及び炉心シュウワド上部剛
  - 6 炉心シュウワド中間剛
  - 7 炉心シュウワド下部剛
  - 8 制御棒駆動機構ハウジング(外側)
  - 9 燃料集合体
  - 10 制御棒案内管
  - 11 制御棒駆動機構ハウジング(内側)
- 固有周期 (s) ; 0.066

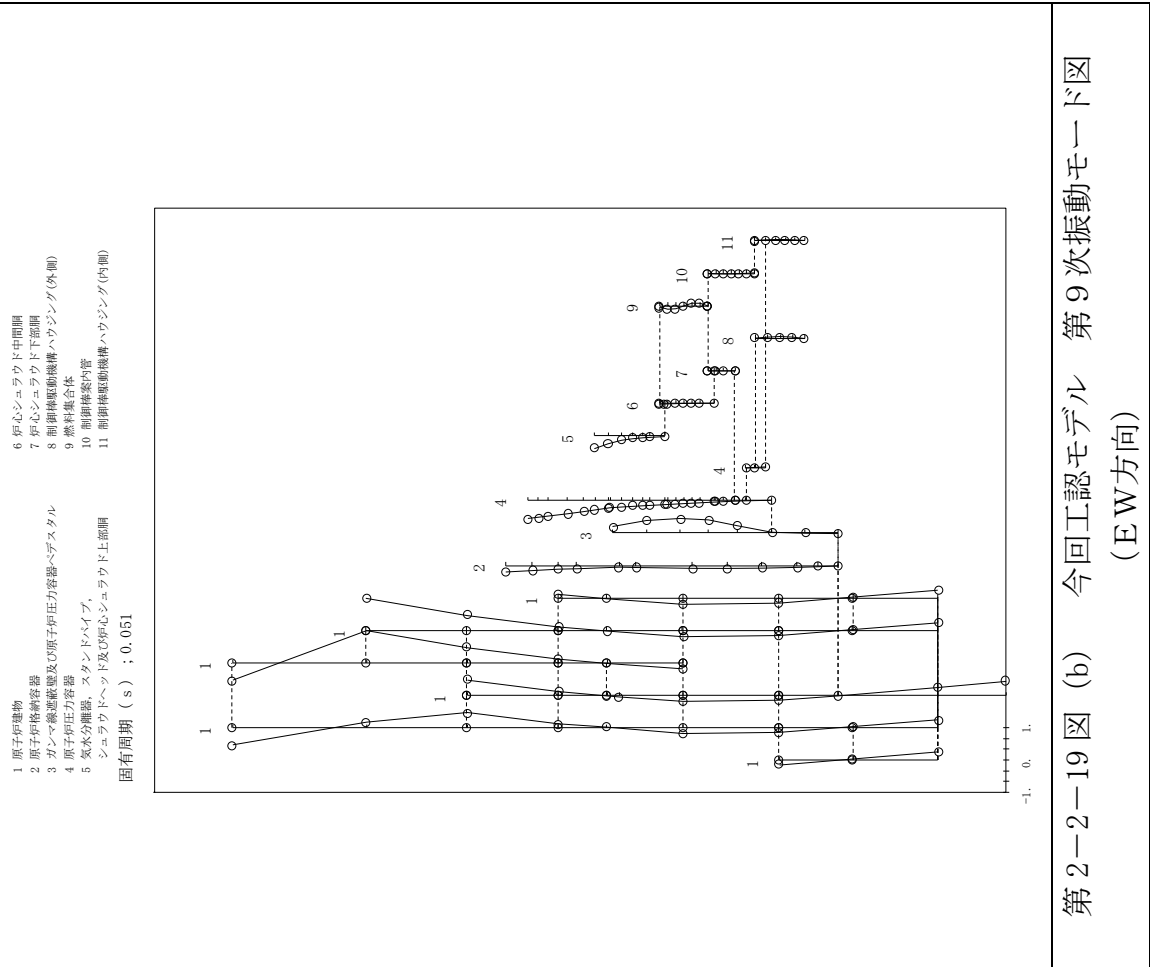


第2-2-17図 (b) 今回工認モデル 第7次振動モード図 (EW方向)

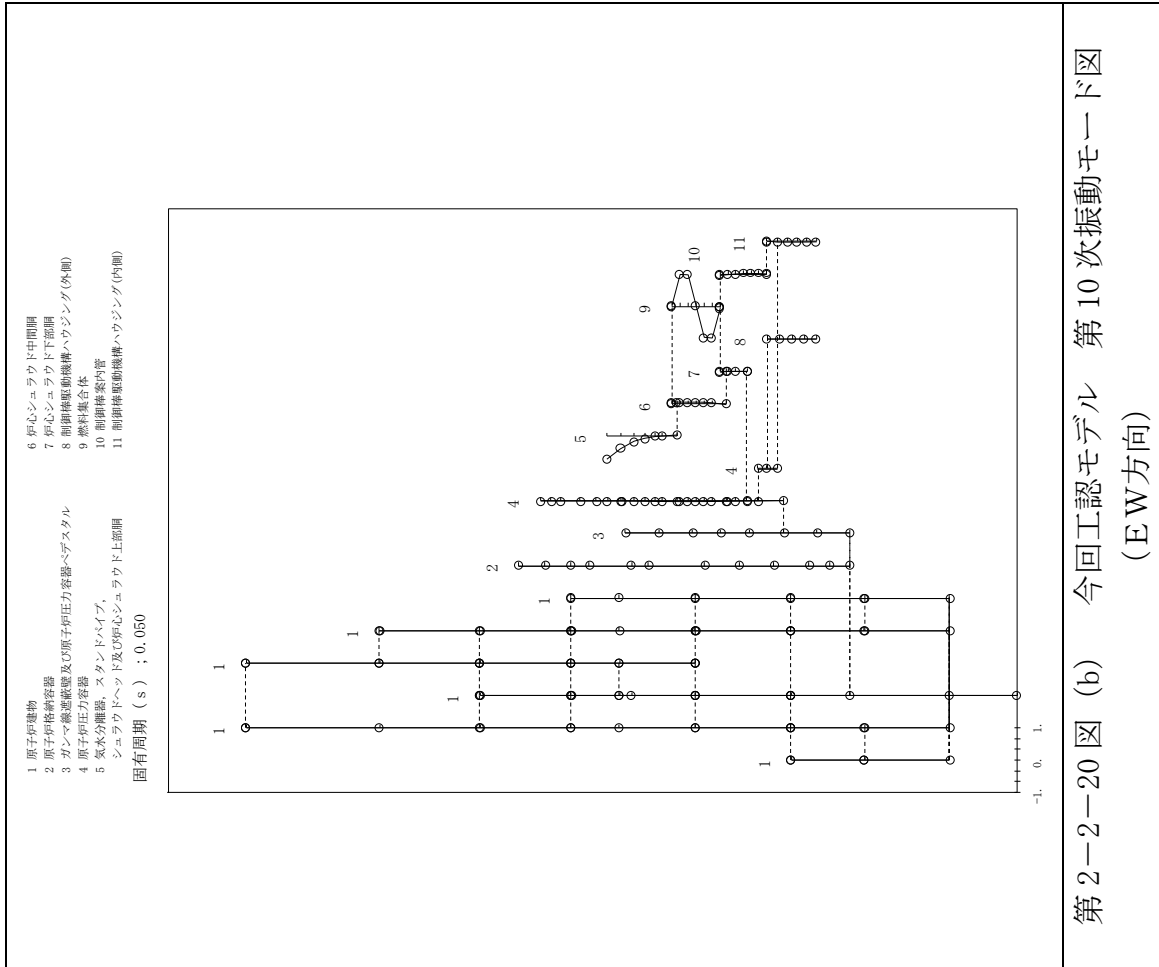
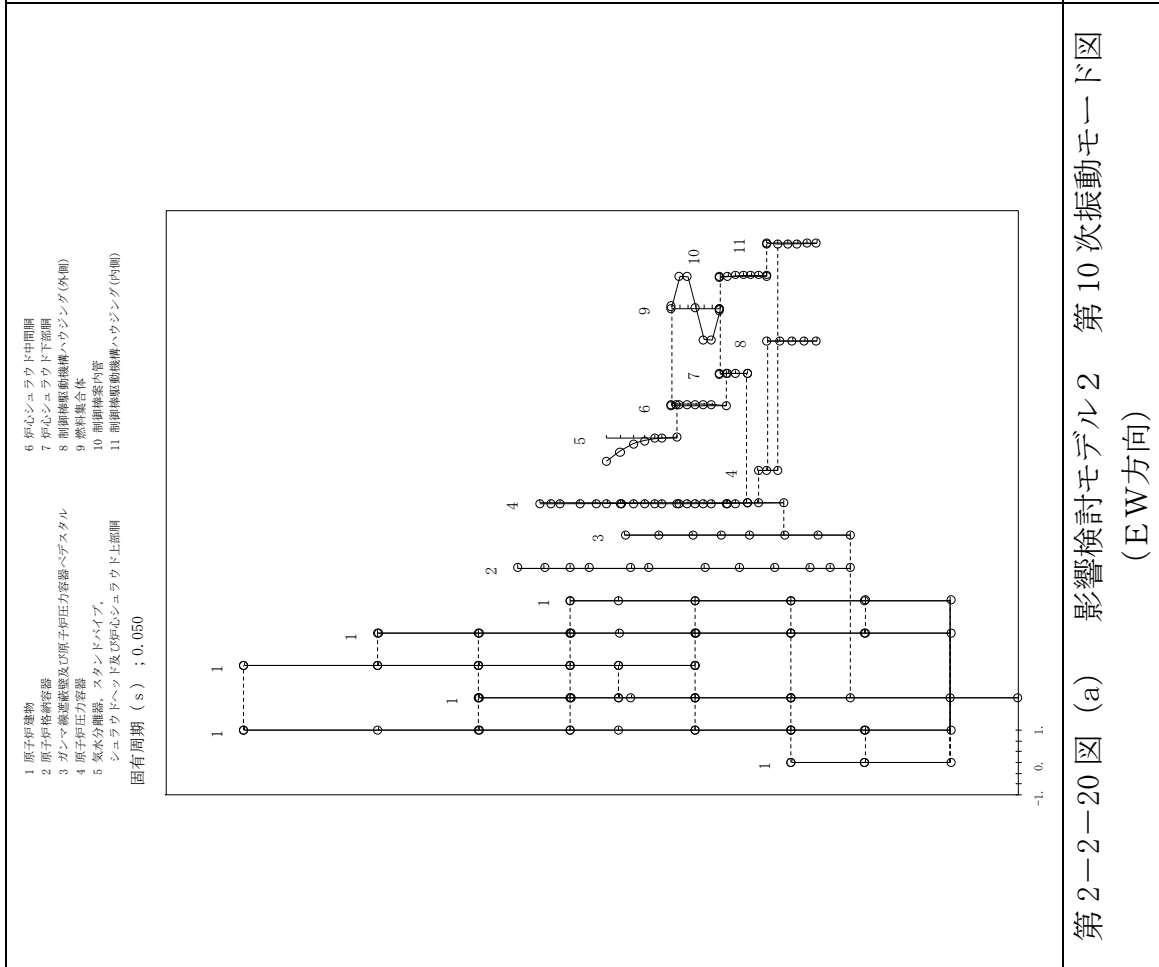




第2-2-19図 (a) 影響検討モデル2 第9次振動モード図 (EW方向)



第2-2-19図 (b) 今回工認モデル 第9次振動モード図 (EW方向)



第2-1-1表 主要設備の地震応答解析結果（影響検討ケース1，NS方向）

主要設備・部位	荷重	①影響検討モデル1	②今回工認モデル	比率 (②/①)
RPV支持スカート 基部	せん断力 (kN)	12200	11500	0.94
	モーメント (kN・m)	120000	112000	0.93
PCV基部	せん断力 (kN)	23400	23200	0.99
	モーメント (kN・m)	428000	426000	1.00
ガンマ線遮蔽壁基部	せん断力 (kN)	35300	33600	0.95
	モーメント (kN・m)	140000	134000	0.96
RPVペDESTAL 基部	せん断力 (kN)	40400	38600	0.96
	モーメント (kN・m)	459000	435000	0.95
RPVスタビライザ	反力 (kN)	12000	10800	0.90
PCVスタビライザ	反力 (kN)	19300	18100	0.94
シヤラグ	反力 (kN)	28900	28400	0.98

応答値は有効数字4桁目を四捨五入

第2-1-2表 主要設備の地震応答解析結果（影響検討ケース1，EW方向）

主要設備・部位	荷重	①影響検討モデル1	②今回工認モデル	比率 (②/①)
RPV支持スカート 基部	せん断力 (kN)	11800	11100	0.94
	モーメント (kN・m)	112000	102000	0.91
PCV基部	せん断力 (kN)	26700	24900	0.93
	モーメント (kN・m)	465000	428000	0.92
ガンマ線遮蔽壁基部	せん断力 (kN)	36300	33600	0.93
	モーメント (kN・m)	143000	133000	0.93
RPVペDESTAL 基部	せん断力 (kN)	39500	37100	0.94
	モーメント (kN・m)	464000	439000	0.95
RPVスタビライザ	反力 (kN)	11200	10900	0.97
PCVスタビライザ	反力 (kN)	17300	18100	1.05
シヤラグ	反力 (kN)	24800	25300	1.02

応答値は有効数字4桁目を四捨五入

第2-2-1表 主要設備の地震応答解析結果（影響検討ケース2，NS方向）

主要設備・部位	荷重	①影響検討モデル2	②今回工認モデル	比率 (②/①)
炉心シュラウド 下部胴下端	せん断力 (kN)	5500	5780	1.05
	モーメント (kN・m)	31300	33700	1.08
RPV支持スカート 基部	せん断力 (kN)	9610	11500	1.20
	モーメント (kN・m)	93800	112000	1.19
PCV基部	せん断力 (kN)	23500	23200	0.99
	モーメント (kN・m)	426000	426000	1.00
ガンマ線遮蔽壁基部	せん断力 (kN)	28200	33600	1.19
	モーメント (kN・m)	106000	134000	1.26
RPVペDESTAL 基部	せん断力 (kN)	32600	38600	1.18
	モーメント (kN・m)	369000	435000	1.18
RPVスタビライザ	反力 (kN)	11900	10800	0.91
PCVスタビライザ	反力 (kN)	19200	18100	0.94
シヤラグ	反力 (kN)	21600	28400	1.31
燃料集合体	変位 (mm)	21.9	22.6	1.03

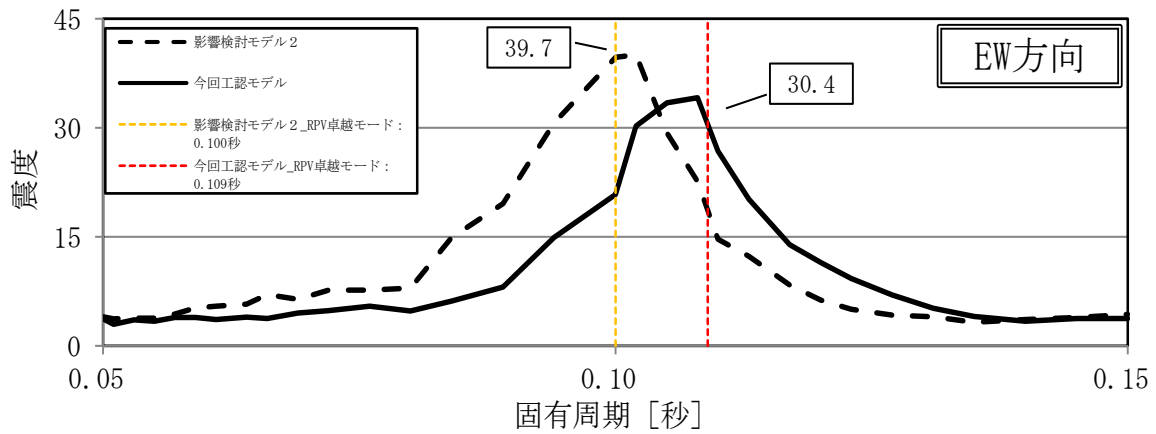
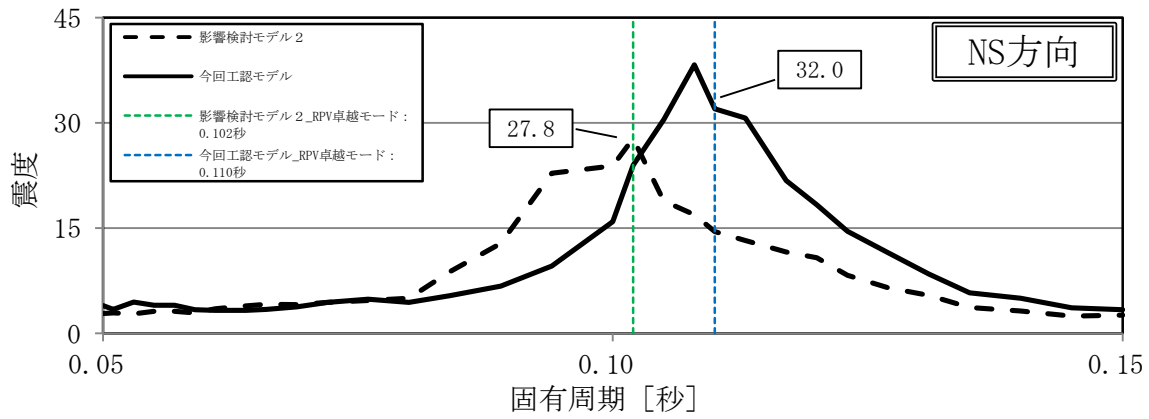
応答値は有効数字4桁目を四捨五入

第2-2-2表 主要設備の地震応答解析結果（影響検討ケース2，EW方向）

主要設備・部位	荷重	①影響検討モデル2	②今回工認モデル	比率 (②/①)
炉心シュラウド 下部胴下端	せん断力 (kN)	5270	5700	1.08
	モーメント (kN・m)	31900	30400	0.95
RPV支持スカート 基部	せん断力 (kN)	11600	11100	0.96
	モーメント (kN・m)	107000	102000	0.95
PCV基部	せん断力 (kN)	24800	24900	1.00
	モーメント (kN・m)	431000	428000	0.99
ガンマ線遮蔽壁基部	せん断力 (kN)	39400	33600	0.85
	モーメント (kN・m)	137000	133000	0.97
RPVペDESTAL 基部	せん断力 (kN)	42900	37100	0.86
	モーメント (kN・m)	462000	439000	0.95
RPVスタビライザ	反力 (kN)	16000	10900	0.68
PCVスタビライザ	反力 (kN)	28100	18100	0.64
シヤラグ	反力 (kN)	33700	25300	0.75
燃料集合体	変位 (mm)	25.1	26.9	1.07

応答値は有効数字4桁目を四捨五入





第2-3-1 図 ガンマ線遮蔽壁頂部（質点番号 53）における床応答スペクトル（減衰 1 %）

第2-3-1 表 ガンマ線遮蔽壁頂部（質点番号 53）におけるRPVが卓越する第4次振動モードの固有周期と床応答加速度

	NS方向		EW方向	
	影響検討モデル 2 (①)	今回工認モデル (②)	影響検討モデル 2 (①)	今回工認モデル (②)
固有周期 (秒)	0.102	0.110	0.100	0.109
加速度 (G)	27.8	32.0	39.7	30.4
加速度の 比率 (②/①)	1.15		0.77	

最新知見として得られた減衰定数の採用について

1. 概要

今回工認では、以下の設備について最新知見として得られた減衰定数を採用する。これらの変更は、振動試験結果を踏まえ設計評価用として安全側に設定した減衰定数を最新知見として反映したものであり、大間1号炉の建設工認及び東海第二において適用実績がある。

- ①原子炉建物天井クレーンの減衰定数<sup>注1</sup>
- ②燃料取替機の減衰定数<sup>注1</sup>
- ③配管系の減衰定数<sup>注2注3</sup>

注1：電力共通研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究（H7～H10）」

注2：電力共通研究「機器・配管系に対する合理的耐震評価法の研究（H12～H13）」

注3：（財）原子力工学試験センター「BWR再循環系配管耐震実証試験（S55～S60）」

なお、本資料に記載する①～③の内容については、「大間原子力発電所1号機の工事計画認可申請に関わる意見聴取会」において聴取されたものである。

また、鉛直方向の動的地震力を適用することに伴い、鉛直方向の設計用減衰定数についても大間1号炉と同様に新たに設定している。

2. 今回工認で用いた設計用減衰定数

最新知見として反映した原子炉建物天井クレーン, 燃料取替機及び配管系の設計用減衰定数を第2-1表及び第2-2表に示す。

第2-1表 原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機の設計用減衰定数

設 備	設計用減衰定数 (%)			
	水平方向		鉛直方向	
	J E A G 4 6 0 1 注1	島根2号炉	J E A G 4 6 0 1 注1	島根2号炉
原子炉建物 天井クレーン	1.0	2.0	—	2.0
燃料取替機	1.0	2.0	—	1.5(2.0)注2

□ : 新たに設定したもの

□ : J E A G 4 6 0 1 から見直したもの

注1 : 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版 ( 社団法人日本電気協会 )

注2 : 括弧外は, 燃料取替機のトロリ位置が端部にある場合。

括弧内は, 燃料取替機のトロリ位置が中央部にある場合。

第2-2表 配管系の設計用減衰定数

配管区分		設計用減衰定数 <sup>注3</sup> (%)			
		保温材無		保温材有 <sup>注4</sup>	
		J E A G 4 6 0 1 <sup>注1</sup>	島根 2号炉	J E A G 4 6 0 1 <sup>注1</sup>	島根 2号炉
I	支持具がスナッパ及び架構レストレイント主体の配管系で、その数が4個以上のもの	2.0	同左	2.5	3.0
II	スナッパ、架構レストレイント、ロッドレストレイント、ハンガ等を有する配管系で、アンカ及びUボルトを除いた支持具の数が4個以上であり、配管区分Iに属さないもの	1.0	同左	1.5	2.0
III <sup>注2</sup>	Uボルトを有する配管系で、架構で水平配管の自重を受けるUボルトの数が4個以上のもの	—	2.0	—	3.0
IV	配管区分I、II及びIIIに属さないもの	0.5	同左	1.0	1.5

□ : 新たに設定したもの

□ : J E A G 4 6 0 1 から見直したもの

注1 : 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版 ( 社団法人日本電気協会 )

注2 : 区分IIIについては新たに設定されたものであり、現行 J E A G 4 6 0 1 では区分IVに含まれる。

注3 : 水平方向及び鉛直方向の設計用減衰定数は同じ値を使用。

注4 : 保温材有の設計用減衰定数は、無機多孔質保温材による付加減衰定数として、1.0%を考慮したものである。金属保温材による付加減衰定数は、配管ブロック全長に対する金属保温材使用割合が40%以下の場合1.0%を適用してよいが、金属保温材使用割合が40%を超える場合は0.5%とする。

(適用条件)

- a. 適用対象がアンカからアンカまでの独立した振動系であること。  
大口径管から分岐する小口径管は、その口径が大口径管の口径の1/2倍以下である場合、その分岐部をアンカ相当とする独立の振動系とみなしてよい。
- b. 配管系全体として、配管系支持具の位置及び方向が局所的に集中していないこと。
- c. 配管系の支持点間の間隔が次の条件を満たすこと。  
配管系全長 / ( 配管区分ごとに定められた支持具の支持点数 ) ≤ 15 ( m / 支持点 )  
ここで、支持点とは、支持具が取り付けられている配管節点をいい、複数の支持具が取り付けられている場合も1支持点とする。
- d. 配管と支持構造物の間のガタの状態等が施工管理規程に基づき管理されていること。ここで、施工管理規程とは、支持装置の設計仕様に要求される内容を反映した施工要領等をいう。

### 3. 設計用減衰定数の設定の考え方

#### 3.1 原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機の設計用減衰定数

##### (1) 既工認の設計用減衰定数

原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 (以下 J E A G 4 6 0 1 という。) におけるクレーン類は溶接構造物に分類されるため、設計用減衰定数は 1.0%と規定されている。ただし、既工認においては原子炉建物天井クレーン、燃料取替機ともに水平方向に剛構造であり、上記減衰定数を適用した応答解析は実施していない。

##### (2) 設計用減衰定数の変更

原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機の減衰特性に寄与する要素には、材料減衰とクレーンを構成する部材間に生じる構造減衰に加え、車輪とレール間のガタや摩擦による減衰があり、溶接構造物としての 1.0%よりも大きな減衰定数を有すると考えられることから、実機を試験体とした振動試験が実施された。振動試験の結果、原子炉建物天井クレーンの減衰定数については、水平 2.0%、鉛直 2.0%が得られている。また、燃料取替機については、水平 2.0%、鉛直 2.0% (燃料取替機のトロリ位置が中央部にある場合)、鉛直 1.5% (燃料取替機のトロリ位置が端部にある場合) が得られている。

##### (3) 島根 2 号炉への適用性

振動試験の概略と、振動試験における試験体と島根 2 号炉及び先行認可実績のある大間 1 号炉の実機との仕様の比較を参考資料(6-1)、(6-2)に示す。

島根 2 号炉の原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機については、試験結果の適用性が確認されている大間 1 号炉の原子炉建屋クレーン及び燃料取替機と同等の基本仕様であり、重量比 (トロリ重量/総重量) の比較から振動特性は同等である。

ここで、原子炉建物天井クレーン (トロリ中央/端部) 及び燃料取替機 (トロリ中央位置) の鉛直方向の減衰定数については、応答振幅の増加に伴い減衰比は増加する傾向が試験結果から得られており、島根 2 号炉の応答振幅はこの試験における応答振幅よりも大きくなる。

一般的に構造物の減衰は、材料減衰及び構造減衰によるものが支配的であると考えられる。材料減衰は、材料が変形する際の内部摩擦による減衰であり、減衰比は振幅によらず一定となる。一方、構造減衰は、部材の接合部における摩擦現象によって発生し、振幅とともに増大すると言われている。

実機のクレーン類は、機上に駆動部品や搭載機器類 (取付器具、電気盤、巻上機、ワイヤロープ、燃料取替機マストチューブ等) を多数持つ構造であり、振幅とともに増大する構造減衰を期待できると考えられる。

また、燃料取替機のトロリ端部位置については、試験結果から明確な応答振幅に対する増加傾向が確認できていないものの、燃料取替機にはボルト締結部等の摩擦減衰を期待できる電気盤等の上部構造物が多数設置されていることから、応答振幅の増加に伴い減衰比は少なくとも増加する傾向となり、

1.5%以上で推移すると考えられる。

さらに、水平方向の減衰定数については、原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機ともに鉛直方向よりも大きい減衰が得られている。

したがって、今回の評価における原子炉建物天井クレーンの減衰定数については水平 2.0%、鉛直 2.0%を用いる。また、燃料取替機については水平 2.0%、鉛直 1.5%（燃料取替機のトロリ位置が端部にある場合）、鉛直 2.0%（燃料取替機のトロリ位置が中央部にある場合）を用いる。

### 3.2 配管系の設計用減衰定数

#### (1) 既工認の設計用減衰定数

J E A G 4 6 0 1における配管系の設計用減衰定数は、配管支持装置の種類や個数によって3区分に分類されており、さらに保温材を設置した場合の設計用減衰定数が規定されている。既工認では、上記の設計用減衰定数を適用していた。

#### (2) 今回の評価で用いた設計用減衰定数

以下、a、bに示す項目について、配管系の振動試験の研究成果に基づき、J E A G 4 6 0 1に規定する値を見直し設定する。

##### a. Uボルト支持配管系

J E A G 4 6 0 1におけるUボルト支持配管系の設計用減衰定数は、0.5%と規定されている。

Uボルト支持配管系の減衰に寄与する要素には、主に配管支持部における摩擦があり、架構レストレイントを支持具とする配管系と同程度の減衰定数を有すると考えられることから、振動試験等が実施され、減衰定数 2.0%が得られた。

振動試験で用いられたUボルトについては、原子力発電所で採用されている代表的なものを用いていることから、振動試験等により得られた減衰定数を適用できると判断し、今回の評価におけるUボルト支持配管系の設計用減衰定数は振動試験結果から得られた減衰定数 2.0%を設定する。参考として振動試験の概略を参考資料(6-3)に示す。

##### b. 保温材を設置した配管系

J E A G 4 6 0 1における保温材を設置した配管系の設計用減衰定数は、振動試験の結果に基づき、保温材を設置していない配管系に比べ設計用減衰定数を0.5%付加できることが規定されている。

その後、保温材の有無に関する減衰定数の試験データが拡充され、保温材を設置した場合に付加できる設計用減衰定数の検討が行われた。

今回の評価における保温材を設置した場合に付加する設計用付加減衰定数は、振動試験結果から得られた減衰定数 1.0%を保温材無の場合に比べて付加することとする。また、金属保温材が施工されている場合は、金属保温材が施工されている配管長さが配管全長に対して40%以下の場合は1.0%を付

加し、配管全長に対して 40%を超える場合には 0.5%を付加する。参考として振動試験の概略を参考資料(6-4)及び参考資料(6-5)に示す。

### (3) 島根 2 号炉への適用性

減衰定数の検討においては、要素試験結果から減衰定数を算出するための評価式を求め、その上で実機配管系の解析を行い、減衰定数を求めている。

まず、要素試験においては、原子力発電所で採用されている代表的な 4 タイプ（参考資料(6-3)補足参照）を選定しており、島根 2 号炉においてもこの 4 タイプの U ボルトを採用している。次に実機配管系の解析対象とした 28 モデルには、BWR プラントの実機配管が含まれており、また配管仕様（口径、肉厚、材質）、支持間隔、配管ルートも異なっており、様々な配管剛性や振動モードに対応している（参考資料(6-3)参照）。

したがって、今回検討した設計用減衰定数は島根 2 号炉へ適用可能と判断し、島根 2 号炉における配管系の設計用減衰定数として設定する。

## 4. 鉛直方向の設計用減衰定数について

今回工認では、鉛直方向の動的地震力を適用することに伴い、鉛直方向の設計用減衰定数を新たに設定している。

機器・配管系の設計用減衰定数を第 4-1 表に示す。鉛直方向の設計用減衰定数は、基本的に水平方向と同様とするが、電気盤や燃料集合体等の鉛直地震動に対し剛体挙動とする設備は 1.0%とする。また、原子炉建物天井クレーン、燃料取替機及び配管系については、既往試験等により確認されている値を用いる。

なお、これらの設計用減衰定数は大間 1 号炉建設工認及び東海第二において適用実績がある。

第 4-1 表 機器・配管系の設計用減衰定数

設 備	設計用減衰定数 (%)			
	水平方向		鉛直方向	
	既工認	今回工認	既工認	今回工認
溶接構造物	1.0	同左	—	1.0
ボルト及びリベット構造物	2.0	同左	—	2.0
ポンプ・ファン等の機械装置	1.0	同左	—	1.0
燃料集合体	7.0	同左	—	1.0
制御棒駆動機構	3.5	同左	—	1.0
電気盤	4.0	同左	—	1.0
原子炉建物天井クレーン	1.0	2.0	—	2.0
燃料取替機	1.0	2.0	—	1.5(2.0) <sup>注</sup>
配管系	0.5~2.0	0.5~3.0	—	0.5~3.0

□：新たに設定したもの

注：括弧外は、燃料取替機のトロリ位置が端部にある場合。

括弧内は、燃料取替機のトロリ位置が中央部にある場合。

原子炉建物天井クレーンの振動試験～減衰比の検討～設計用減衰定数の設定

実機を試験体とした振動試験から得られた、原子炉建物天井クレーンの減衰特性に基づき、設計用減衰定数の検討を実施した。

1. 代表試験体の選定

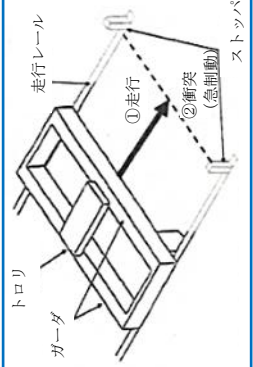
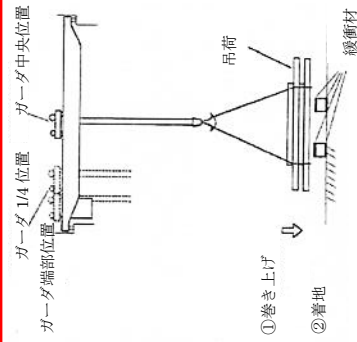
原子炉建物天井クレーン8タイプ、一般用クレーン2タイプの基本仕様(トロリ及びガーダの質量、高さ、スパン)を調査。各クレーンの構成要素、基本構造、減衰に影響を与えると考えられるクレーン全質量とトロリ質量の比及び振動特性が同等であることを確認。

一般用天井クレーンを代表試験体とし、個体差及びガーダ形状の影響を確認するため、ガーダの断面形状が異なるタイプの同一仕様の試験体 No.1,2 及びガーダの断面形状が同じタイプの試験体 No.3 を使用し、合計3機の試験体で試験を実施。

2. 振動試験

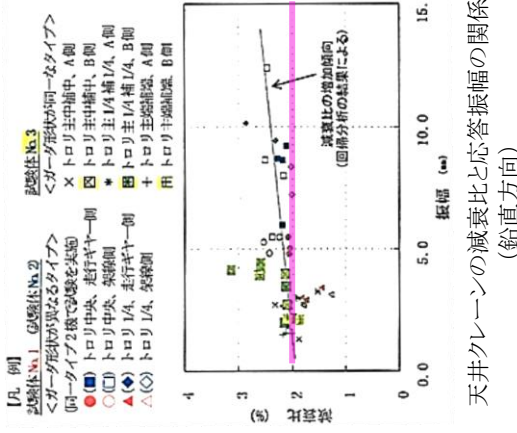
【鉛直方向加振方法】  
吊荷を床から50mm程度まで持ち上げた後、最大速度で下降させて床に着地させ、この時の自由振動を計測。

【水平方向加振方法】  
クレーンを1m程度走行させ、急停止することにより自由振動を計測。

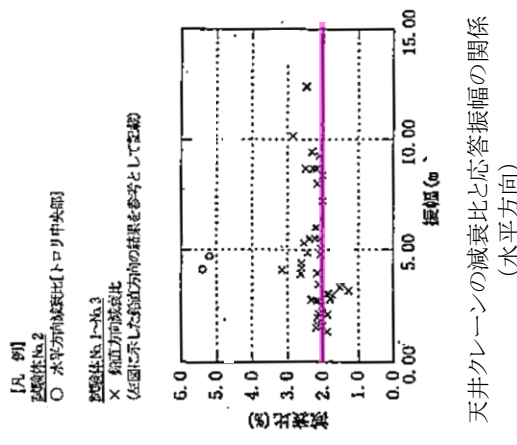


3. 計測データの処理

振動試験で得られた自由振動波形から減衰比を算定。



天井クレーンの減衰比と応答振幅の関係 (鉛直方向)



天井クレーンの減衰比と応答振幅の関係 (水平方向)

4. 設計用減衰定数の設定

【試験結果(鉛直方向)】  
応答振幅に対する減衰比の傾向は、応答振幅が比較的小さい場合にはばらつきが大きいが、応答振幅が大きくなると減衰比の発生源となる構造減衰が増加し、減衰比が徐々に増加すると共に、そのばらつきが小さくなる。  
応答振幅 5.0 mm で減衰比 2.0% が得られた。

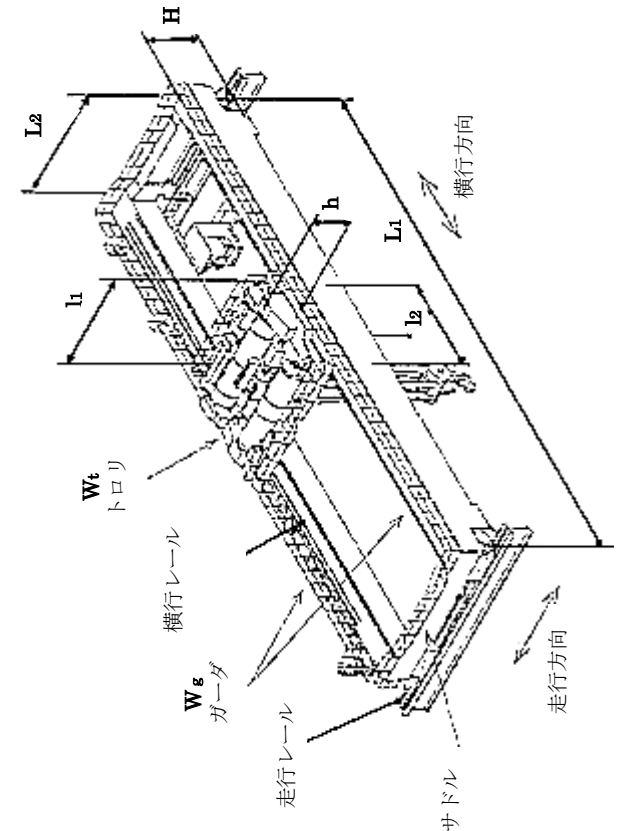
【試験結果(水平方向)】  
水平方向の減衰比は、応答振幅 4.7 mm において 5.2% という結果が得られた。

【設計用減衰定数(鉛直方向)】  
応答振幅の増加に伴い、減衰比は増加傾向にあり、設計応答振幅(トロリ位置中央部 12.2 mm、端部 6.0 mm)レベルで減衰比 2.0% 以上となっておりことから、設計用減衰定数 2.0% と設定する。

【設計用減衰定数(水平方向)】  
水平方向の減衰比は、応答振幅レベルが 4.7 mm において 5.0% 程度の減衰比が得られているが、データ点数が少ない(設計応答振幅 8.9 mm に達していない)ため、鉛直方向と同様に設計用減衰定数を 2.0% と設定する。



天井クレーン試験体と島根2号炉及び大間1号炉の原子炉建物天井クレーンの仕様比較

仕様		試験体 1, 2	試験体 3	島根 2 号炉	大間 1 号炉	備考
トロリ	質量 $W_t$ (t)	43.5	71.0	56.0	80.0	
	高さ h (m)	2.265	3.0	3.393	2.815	
	スパン l1 (m)	5.8	5.8	5.6	7.7	
	スパン l2 (m)	4.1	3.0(主巻用) 2.5(補巻用)	4.85	4.6	
	質量 $W_g$ (t)	104.5	191.5	149.0	190.0	
ガード	高さ H (m)	1.32	2.3	2.4	2.5	
	スパン L1 (m)	33.0	33.0	34.9	34.9	
	スパン L2 (m)	7.06	8.9	7.3	9.38	
総質量 W (t)	148.0	262.5	205.0	270.0		
トロリ質量と 総質量の比 $W_t/W$	0.294	0.270	0.273	0.296		

【試験体と実機との比較の考え方】

減衰比は、一般的に振動エネルギーと消散エネルギーの比で表される。消散エネルギーはガード等の構造部材の材料減衰、トロリ、ガード等のガタや摩擦による構造減衰により発生すると考えられ、原子炉建物天井クレーンにおいて、トロリ、ガードは固定構造ではなく、レール車輪間にすべりが発生する構造であることから、トロリとガードとの微小な相対運動によるエネルギーの消散が減衰特性に最も影響が大きい因子と考えられる。

ここで、トロリとガードの相対運動による消散エネルギーはトロリ質量に比例し、振動エネルギーはクレーンの振動質量に比例する。天井クレーンは建物に対して走行車輪部のみで支持された両端支持はりの構造をしており、地震時の振動モードは上下・水平方向ともにガード中央のたわみが最大となる1次モードが支配的となる。そのため、振動質量はクレーンの総質量に比例し、減衰比はトロリ質量とクレーンの総質量の影響を受けることになる。

上表より、島根2号炉の原子炉建物天井クレーンのトロリ質量と総質量の比は、試験体及び先行認可実績のある大間1号炉の実機と同程度になることを確認している。

以上から、島根2号炉の原子炉建物天井クレーンの設計用減衰定数として水平2.0%、鉛直2.0%を適用する。

燃料取替機の振動試験～減衰比の検討～設計用減衰定数の設定

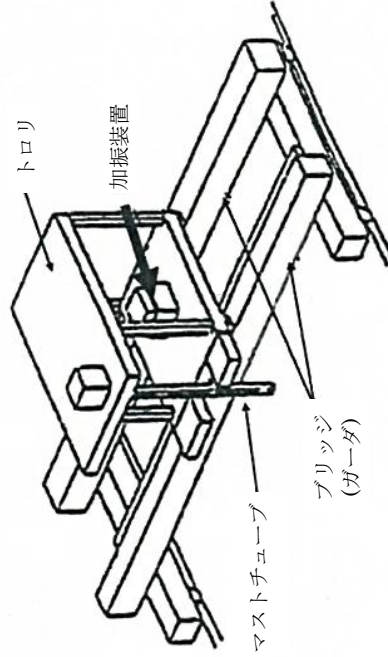
実機を試験体とした振動試験から得られた、燃料取替機の減衰特性に基づき、設計用減衰定数の検討を実施した。

1. 代表試験体の選定

燃料取替機 5 タイプについて、基本仕様(トロリ及びびガーダの重量、高さ、スパン)を調査。  
各燃料取替機の構成要素、基本構造、サイズ、重量、振動特性が同等であることを確認。

燃料取替機 5 機の中から、建設中プラントの燃料取替機を代表試験体として選定。

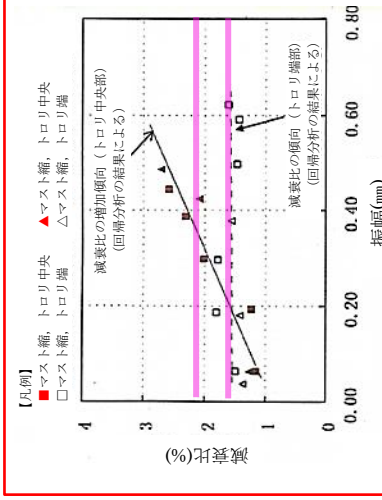
2. 振動試験



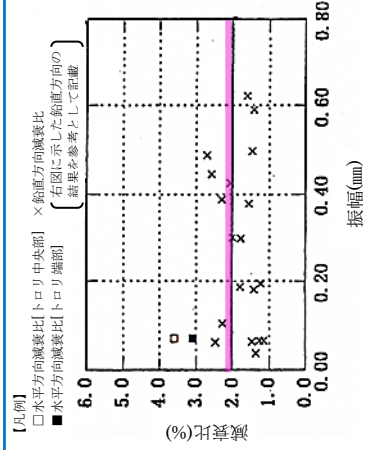
【加振方法(水平・鉛直方向)】  
トロリ中央部に設置した加振装置による強制加振  
(正弦波 5Hz～20Hz)

3. 計測データの処理

振動試験で得られた周波数応答曲線からハーフパワー法で減衰比を算定。



燃料取替機の減衰比と応答振幅の関係  
(鉛直方向)



燃料取替機の減衰比と応答振幅の関係  
(水平方向)

4. 設計用減衰定数の設定

【試験結果(鉛直方向)】  
トロリ位置が中央の場合では、応答振幅の増加にしたがって減衰比は増加する傾向を示している。応答振幅 0.40mm で減衰比 2.0% 以上が得られている。トロリ位置が端部の場合では、応答振幅に係らず、1.5% 程度の減衰比が得られている。

【設計用減衰定数(鉛直方向)】  
トロリ位置が中央部の場合では、応答振幅の増加に伴い減衰比は増加傾向にあり、振幅レベル 0.40mm でも減衰比 2.0% 以上となっていること、振幅が増加すると取付器具の振動等で構造減衰が増加し、設計応答振幅レベルでも減少することはないと考えられることから、設計用減衰定数 2.0% とした。  
トロリ位置が端部の場合では、応答振幅に係らず 1.5% 程度の減衰が得られていることから、設計用減衰定数 1.5% とした。

【試験結果(水平方向)】  
燃料取替機の水平方向の減衰比は、トロリ位置が中央部では応答振幅 0.07mm において 3.6%、トロリ位置が端部では応答振幅 0.07mm において 3.1% という結果が得られている。

【設計用減衰定数(水平方向)】  
水平方向の減衰比は、振幅レベル 0.07mm でも鉛直方向の減衰を上回る事が確認されており、鉛直方向の試験結果から、減衰比は応答振幅の増加とともに大きくなる傾向にあるが、データ点数が少ないため、鉛直方向と同じ 2.0% を水平方向の設計用減衰定数とした。

燃料取替機試験体と島根2号炉及び大間1号炉の燃料取替機の仕様の比較

仕様		試験体	島根2号炉	大間1号炉	備考
トロリ	質量 $W_t$ (t)	15.5	13.1	27.0	
	高さ $h$ (m)	4.795	5.795	5.795	
	スパン $L_1$ (m)	3.0	3.0	3.0	
	スパン $L_2$ (m)	2.6	2.6	3.0	
	質量 $W_g$ (t)	23.6	27.5	40.0	
ブリッジ	高さ $H$ (m)	2.005	2.005	2.075	
	スパン $L_1$ (m)	12.46	15.16	15.16	
	スパン $L_2$ (m)	4.6	4.6	4.43	
総質量 $W$ [t]		39.1	40.6	67.0	

【試験体と実機との比較の考え方】

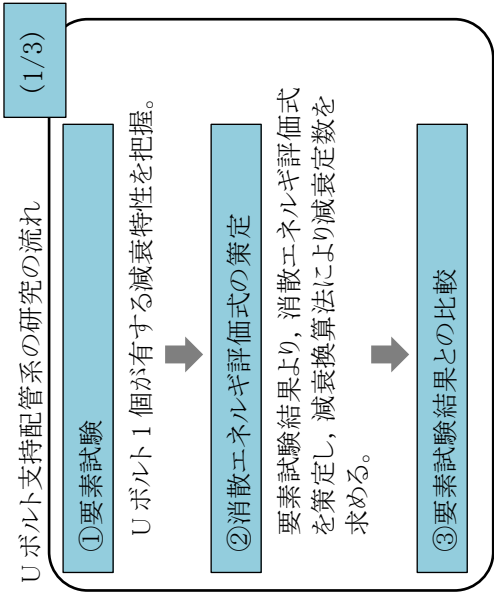
燃料取替機については、ブリッジ等の骨組み構造の材料減衰及びトロリ、ブリッジ等のガタや摩擦による構造減衰が減衰を与えると考えられる。トロリの構造減衰はトロリ位置によって異なる。試験で得られた減衰比データとしては、ブリッジ中央にトロリがある場合、ブリッジの端部にトロリがある場合の2種類ある。鉛直方向に関しては、ブリッジの中央にトロリがある場合の方が、ブリッジの端部にトロリがある場合に比べて減衰比は高くなっている。ブリッジの中央にトロリがある場合、鉛直方向に関しては、応答振幅の増加に伴い減衰比は増加傾向にあり、応答振幅レベル0.40mmで減衰比2.0%以上となっていることから、設計用減衰定数を2.0%とする。水平方向に関しては、応答振幅レベル0.07mmで3.6%の減衰比が得られているが、データ点数が少なかったため、鉛直方向と同じ2.0%を水平方向の設計用減衰定数とした。

ブリッジの端部にトロリがある場合、鉛直方向に関しては、応答振幅に係らず1.5%程度の減衰比が得られていることから、設計用減衰定数を1.5%とした。水平方向の減衰比は、応答振幅レベル0.07mmで3.1%の減衰比が得られているが、データ点数が少ないため、鉛直方向と同じ2.0%を水平方向の設計用減衰定数とした。

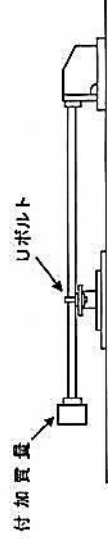
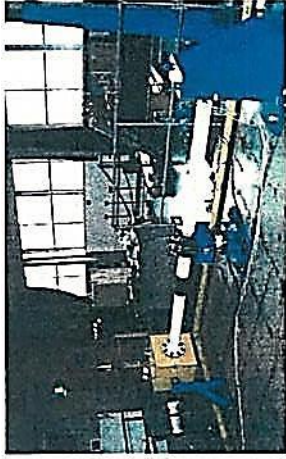
次に島根2号炉への適用性の観点では、上表より、サイズ及び質量は試験体とほぼ同等であるため、振動特性も同等であると考えられる。また、試験では低加速度レベル（水平約100gal、鉛直約200gal）にて実施されているが、実際の基準地震動 $S_s$ はそれよりも大きい加速度レベルとなる。試験結果から、応答の増幅に伴い減衰比も増加傾向にあるため、上記の試験結果より得られた減衰比は適用可能と考えられる。以上から、島根2号炉の燃料取替機における設計用減衰定数として水平2.0%、鉛直1.5%（燃料取替機のトロリ位置が端部にある場合）、2.0%（燃料取替機のトロリ位置が中央部にある場合）を適用する。

Uボルト支持配管系の振動試験 (1/3) : ①要素試験～②消散エネルギー評価式の策定～③要素試験結果との比較

Uボルト支持部1箇所の減衰特性を把握するため、最も単純な試験体で振動試験を実施。

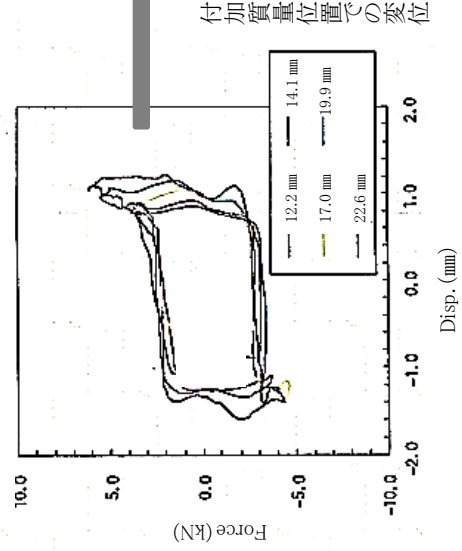


要素試験装置

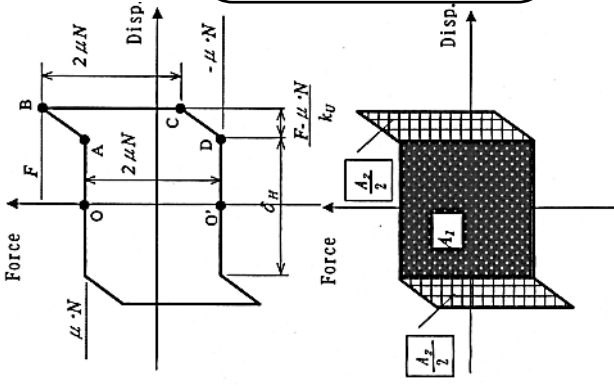


水平支持力と水平変位を測定

1サイクルあたりの履歴



変位-荷重履歴のモデル化



(消散エネルギー評価式の策定)

【消散エネルギー評価式の策定】  
モデル内部の面積が消散されるエネルギーであり、この面積を数式化

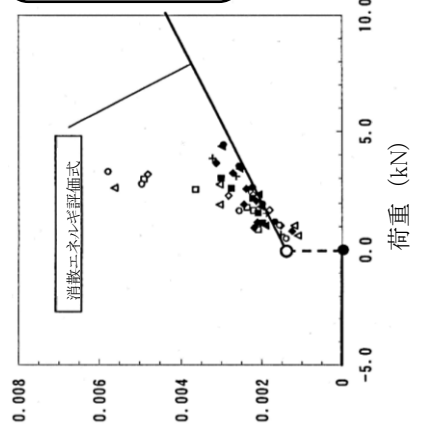
$$\Delta E = A_1 + A_2$$

$$A_1 = 4 \cdot \mu \cdot N \cdot \frac{\delta_H}{2}$$

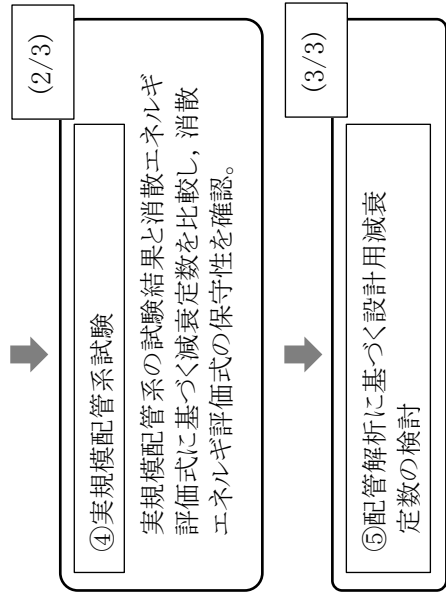
$$A_2 = 4 \cdot \mu \cdot N \cdot \frac{F - \mu \cdot N}{k_U}$$

要素試験結果と消散エネルギー評価式の結果の比較

消散エネルギー評価式の保守性の確認

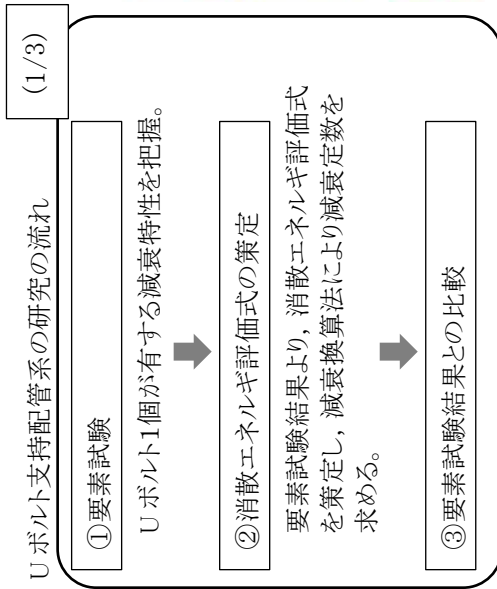


(2/3) 要素試験結果

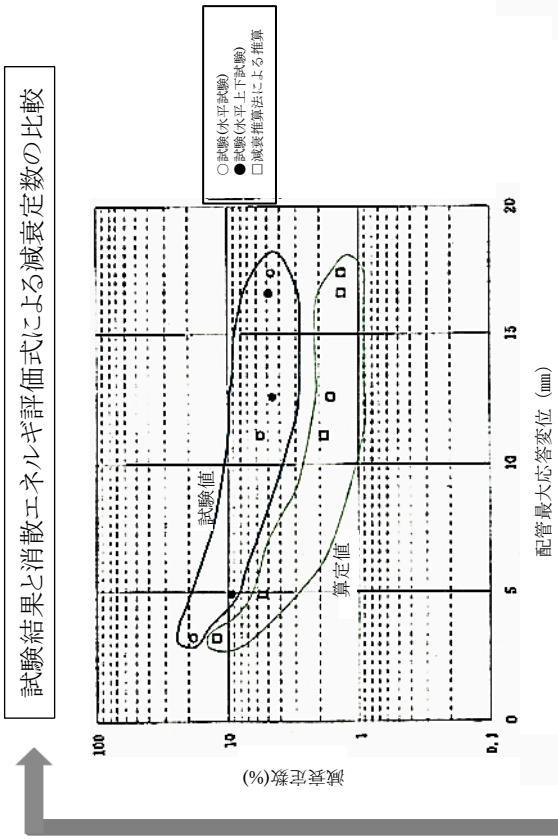
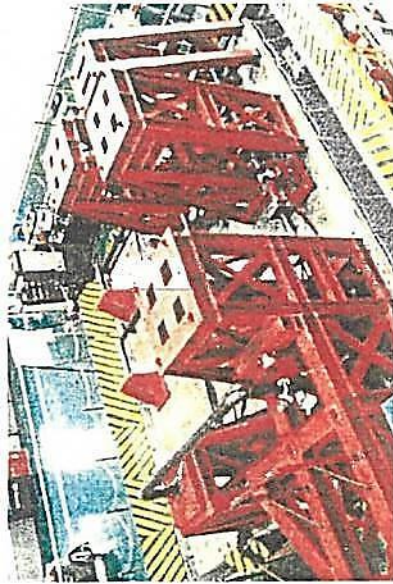


Uボルト支持配管系の振動試験 (2/3) : ④実規模配管系試験

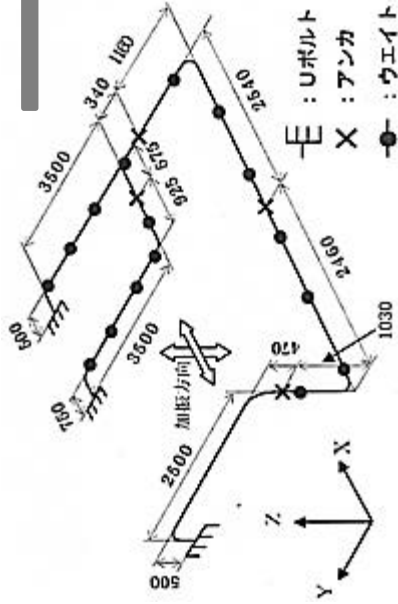
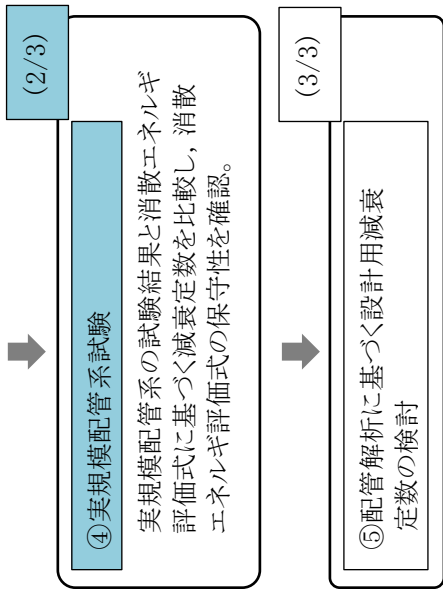
要素試験結果に基づき策定した消散エネルギー評価式の実機への適用性確認のため、実規模配管系試験による振動試験を実施し、試験結果より得られる減衰定数と消散エネルギー評価式より得られる減衰定数の比較検討を行った。



実規模配管系試験装置



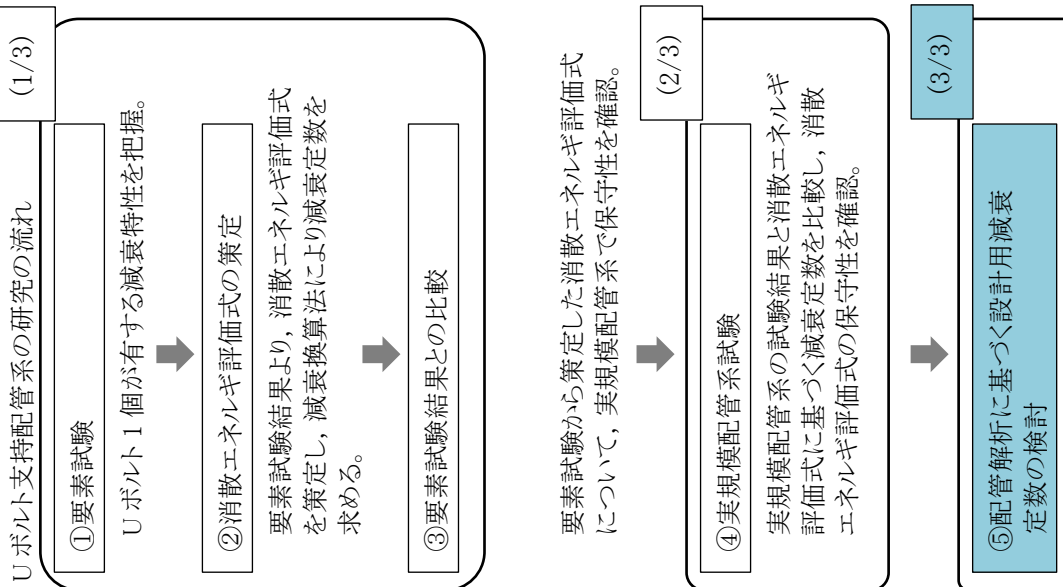
要素試験から策定した消散エネルギー評価式について、実規模配管系で保守性を確認。



試験結果と消散エネルギー評価式による減衰定数を比較した結果、消散エネルギー評価式の方が全変位領域で下回っており、消散エネルギー評価式の保守性が確認された。

### Uボルト支持配管系の振動試験 (3/3) : ⑤配管解析に基づく設計用減衰定数の設定

実機プラントにおいては、配管系の支持箇所やルートは多種多様である。ここでは、実機配管系の計算モデルに対して消散エネルギー評価式を用いて減衰定数を算出し、さらに、Uボルト支持配管系の設計用減衰定数の検討を行った。



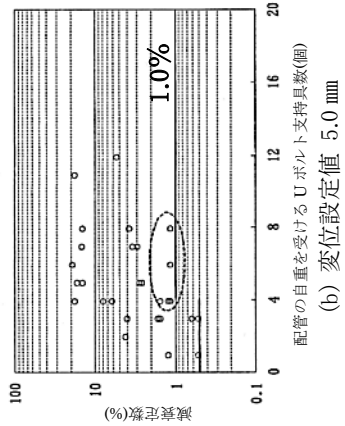
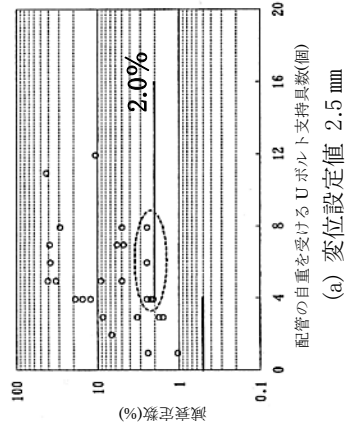
Uボルト支持配管系 (28 モデル) に対する解析による検討(各振動モードが全て一律の変位が生じると仮定)

- 前項までに、実規模配管系試験にて消散エネルギー評価式の保守性を確認。
- 設計用減衰定数を設定するに当たり、Uボルトの支持具数や配管ルート等様々な配管系について検討する必要がある。
- 消散エネルギー評価式による減衰定数が配管変位に依存するため、配管系の振動モード変位を一定と仮定した状態で減衰定数(変位仮定減衰定数)を算出した。対象はUボルト支持部を有する実機配管系(28モデル)とした。

解析の結果、Uボルト4個以上の配管系において、

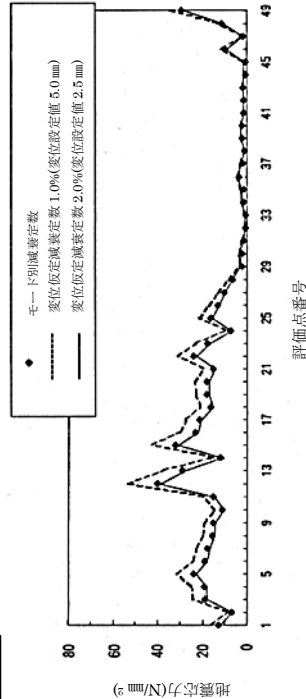
- (a) 仮定変位 2.5 mm の場合、減衰定数 2.0% 以上が得られた。
- (b) 仮定変位 5.0 mm の場合、減衰定数 1.0% 以上が得られた。

Uボルト支持配管系の減衰推算結果



詳細計算による減衰定数の検討(モード別減衰定数による検討)

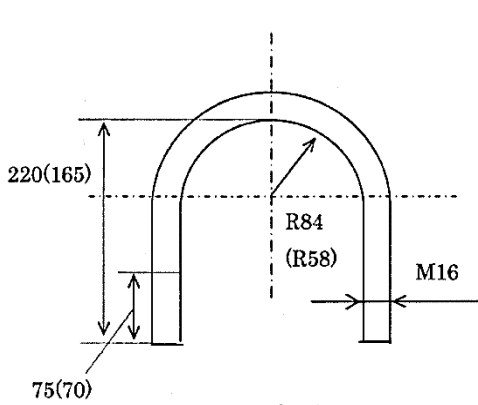
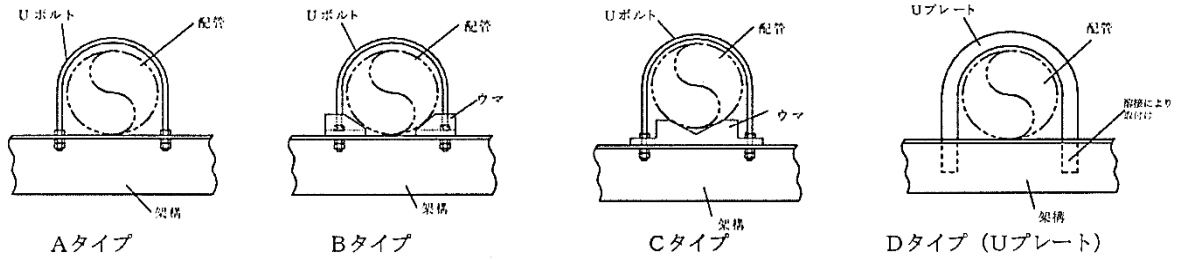
- 変位仮定減衰定数は、計算結果からも分かるように「仮定する変位」に依存する。
- 変位 2.5 mm の減衰定数及び変位 5.0 mm の減衰定数である 2.0% 及び 1.0% を与える下限値を示した配管モデルに対して、より詳細な解析を行い、Uボルト支持配管系の設計用減衰定数を検討した。
- 比較検討の結果、詳細計算結果と変位 2.5 mm を与えた場合の結果がよく一致していることが分かった。



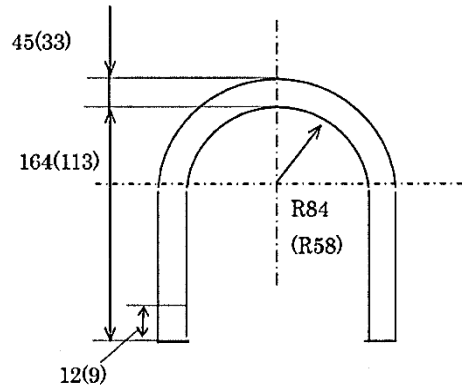
- 設計用減衰定数を 2.0% に設定した。
- Uボルトは、運転時に配管とボルト頂部との間に隙間があるよう施工されること。
- 今回検討対象としたUボルトの据付状態であること。(水平配管の自重を架構で受けるUボルト)

【補足】要素試験に用いたUボルト支持構造物のタイプ

試験に用いたUボルトは、原子力発電所で採用されている代表的な4タイプを選定した。



Uボルト  
150A(100A) (材質: SS400)



Uプレート  
150A(100A) (材質: SS400)

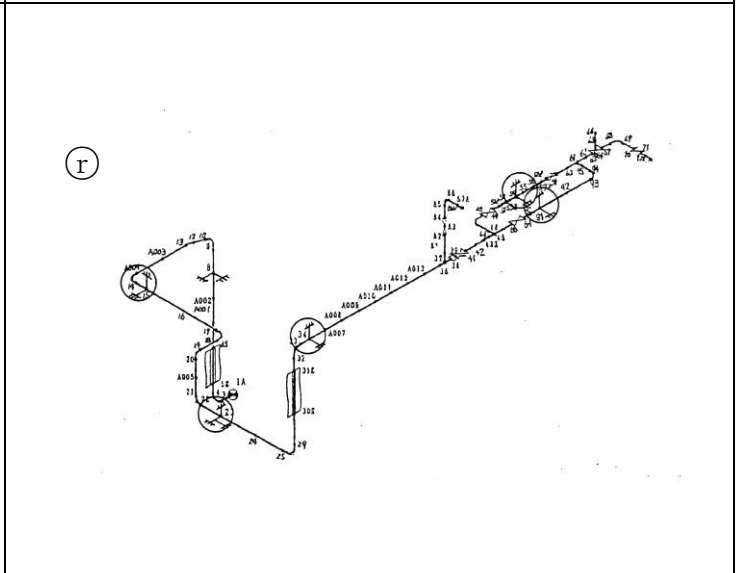
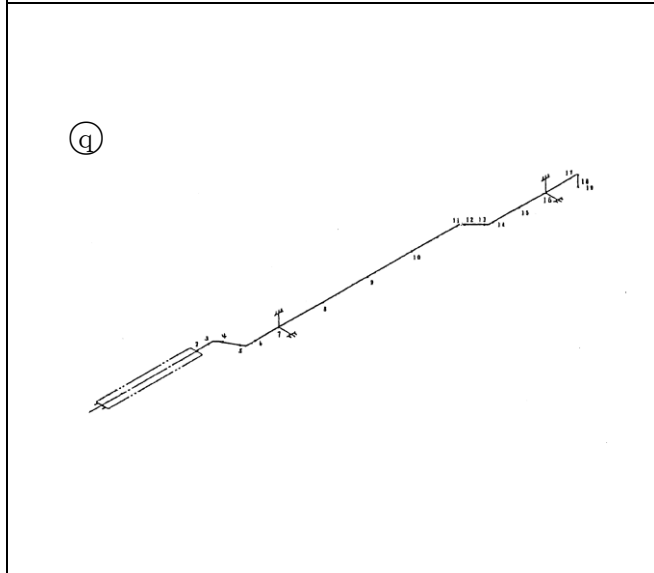
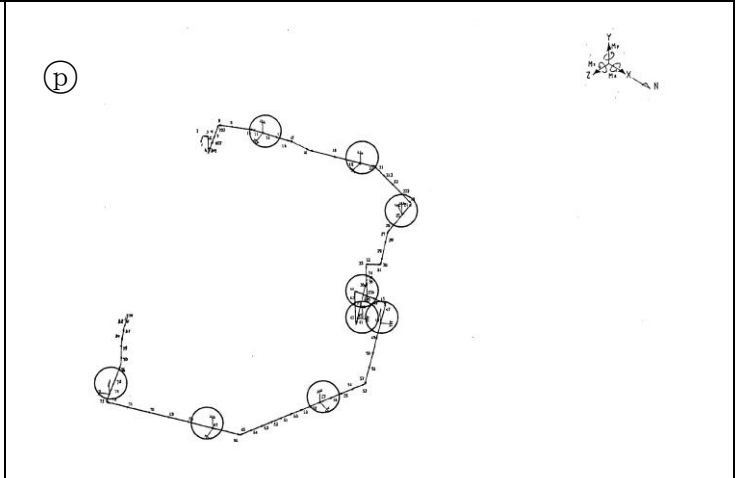
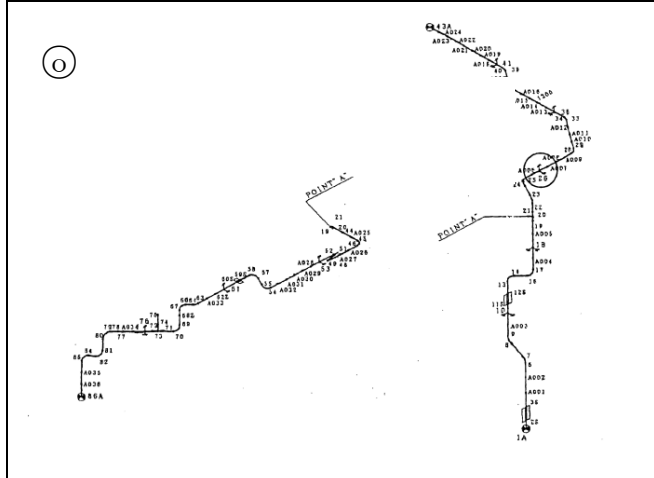
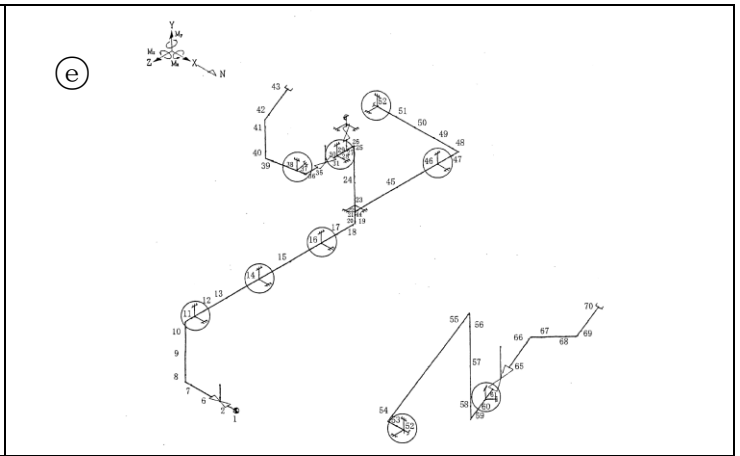
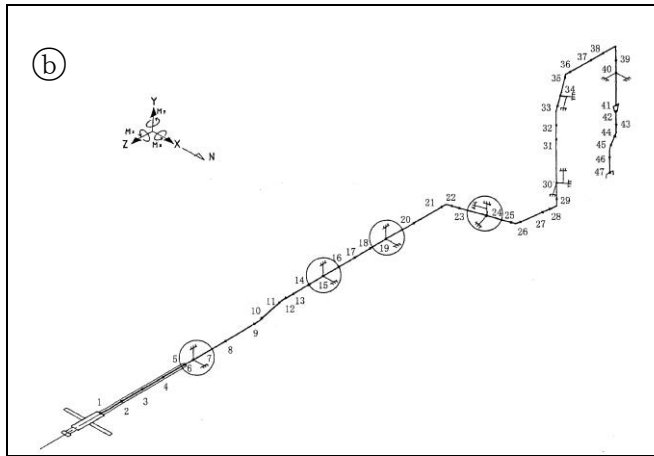
【解析を行った配管仕様】

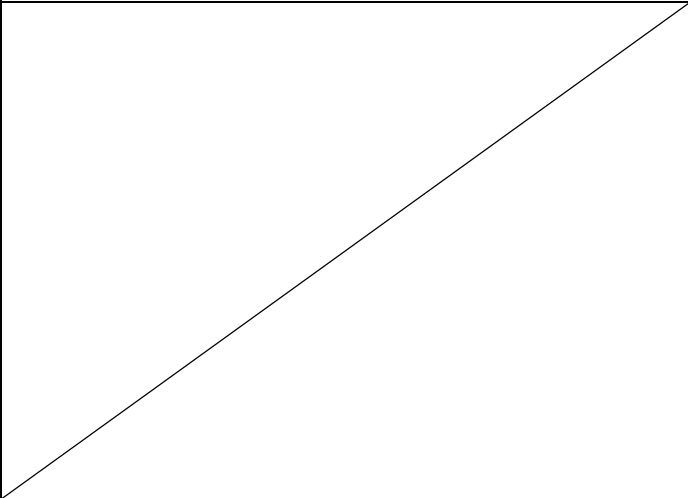
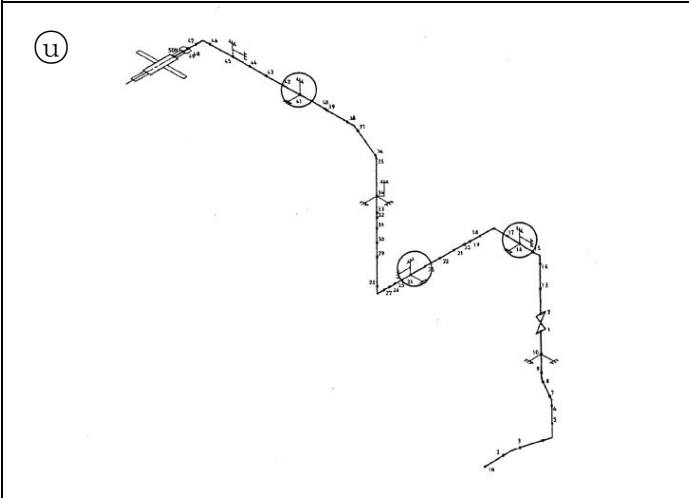
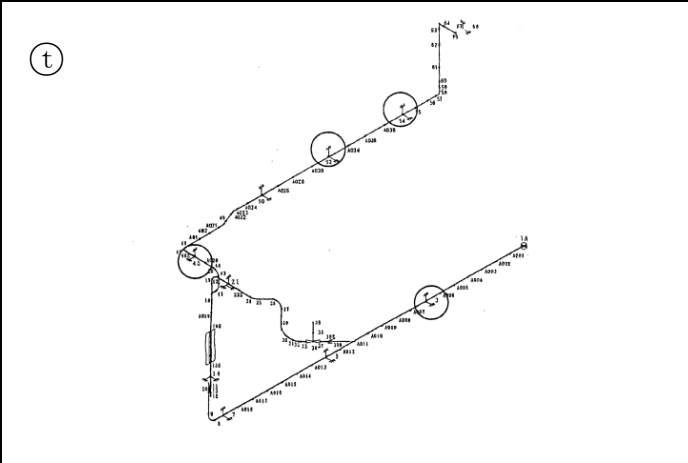
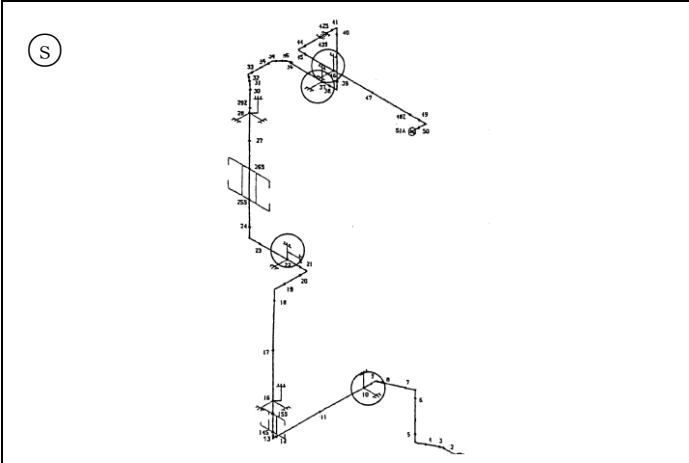
- ・口径：20A～400A
- ・材質：ステンレス鋼，炭素鋼

解析を行ったBWR実機配管

	系 統	口 径
⑥配管	C R D	32 A
⑦配管	A C	50 A
⑧配管	R H R	150 A
⑨配管	F P C	40 A
⑩配管	M U W C	100 A
⑪配管	M U W C	150 A, 80 A
⑫配管	R C W	200 A
⑬配管	R C W	200 A, 80 A
⑭配管	C R D	32 A







配管系の保温材による付加減衰定数(無機多孔質保温材)

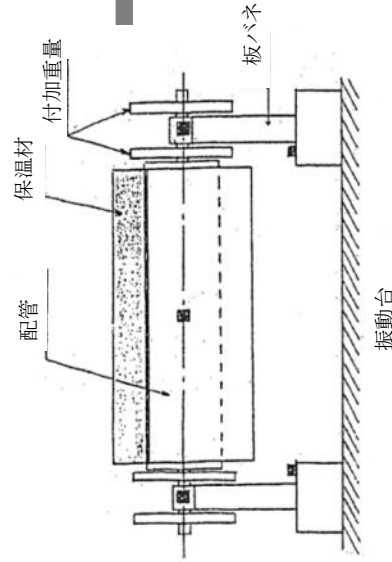
試験体(無機多孔質保温材)を使用した振動試験から得られた配管系の保温材による付加減衰定数に基づき、設計用減衰定数の検討を行った。

1. 試験体

配管口径の異なる3種類(①8B(200A), ②12B(300A), ③20B(500A))の試験体を用いて振動試験を実施。

2. 振動試験

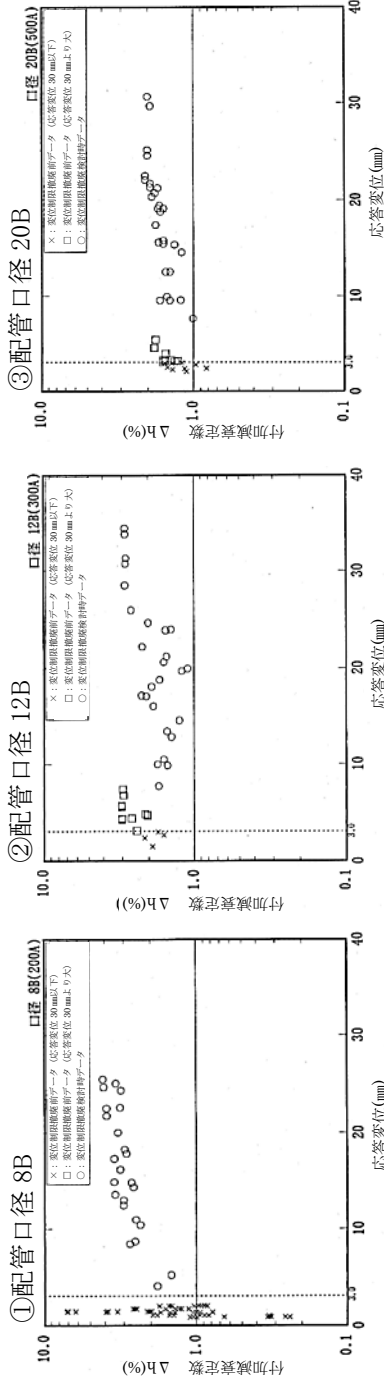
振動試験は保温材有りの場合及び保温材無しの場合について実施。(保温材厚さ 75mm)



試験装置概略図

3. 試験結果

保温材有・無の結果を比較し、保温材が有る場合に付加できる減衰定数(付加減衰定数)と変位との関係を示す。



4. 設計用減衰定数の設定

【試験結果(8B, 12B, 20B)】

- 応答変位 3.0 mm以上の領域  
保温材による付加減衰定数は 1.0%以上, 応答変位の漸増又は一定の値を示す傾向。
- 応答変位 3.0 mm以下の領域(小応答領域)  
減衰データにばらつきがあり, 付加減衰定数 1.0%以下の場合がある。

【設計用減衰定数の設定】

小応答領域については、配管の強度上問題とならないことから、保温材による付加減衰定数は 1.0%とする。

配管系の保温材による付加減衰定数(金属保温材及び無機多孔質保温材)

試験体(金属保温材及び無機多孔質保温材)を使用した振動試験から得られた保温材による付加減衰定数に基づき、設計用減衰定数の検討を行った。

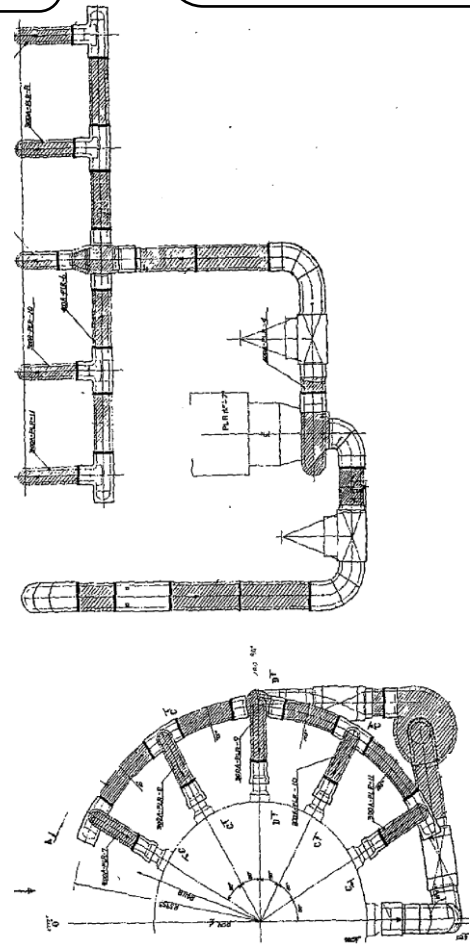
1. 試験体

BWR型プラントの再循環系(PLR)配管2ループのうち1ループを模擬した実物大モデル



2. 振動試験

振動試験は保温材有・無の場合について実施。保温材については、金属保温材と無機多孔質保温材が混在して配管全長に施工され、金属保温材が施工されている配管長さは、配管全長に対し43%を占める。



PLR配管を模擬した試験体の保温材施工図  
(ハッチング部：無機多孔質保温材，白抜き部：金属保温材)

3. 試験結果

試験体を再現した解析モデルを用いて固有値解析を行った結果、一次モードが応答に支配的であることが分かった。一次モードにおける保温材有・無の減衰定数を下表に示す。

減衰定数 [%]	
保温材有	9.4
保温材無	5.5

4. 設計用減衰定数の設定

- ・付加減衰定数は、保温材有の減衰定数(9.4%)と保温材無の減衰定数(5.5%)の差より、3.9%と評価できる。
- ・一次モードにおける卓越部位はポンプ廻りの配管系であり、当該部位での金属保温材の使用割合は、約75%(ポンプ入口弁エルボ部からポンプ出口弁エルボ部の範囲)であることから、付加減衰定数3.9%は金属保温材の影響が支配的であったと考えられる。



**【設計用減衰定数の設定】**  
 試験より得られた付加減衰定数3.9%は、設計用減衰定数として設定した保温材による付加減衰定数1.0%を上回ることから、金属保温材と無機多孔質保温材が混在する場合についても適用できると考えられる。  
 ただし本試験において、金属保温材が施工されている配管長さは配管全長に対し、43%であったことから、下記の適用条件を設定した。

- ① 金属保温材が施工されている配管長さが配管全長に対して40%以下の場合
  - ・・・1.0%を付加する。
- ② 金属保温材が施工されている配管長さが配管全長に対して40%を超える場合
  - ・・・0.5%を付加する。

## 水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根法による組合せ について

### 1. 概要

今回工認の耐震設計では、これまで静的な取扱いのみであった鉛直方向の地震力について、動的な地震力を考慮することに伴い、水平方向及び鉛直方向の動的な地震力による荷重を適切に組み合わせることが必要となる。

従来の水平方向及び鉛直方向の荷重の組合せは、静的地震力による鉛直方向の荷重には地震継続時間や最大加速度の発生時刻のような時間の概念がなかったことから、水平方向及び鉛直方向の地震力による荷重の最大値同士の絶対値和としていた（以下「絶対値和法」という。）。

一方、水平方向及び鉛直方向がともに動的地震力である場合、両者の最大加速度の発生時刻に差があるという実挙動を踏まえると、従来と同じように絶対値和法を用いるのではなく、時間的な概念を取り入れた荷重の組合せ方法を検討する必要がある。

本資料では、水平方向及び鉛直方向の動的地震力の組合せに関する既往研究<sup>(1)</sup>をもとに、二乗和平方根（以下「SRSS (Square Root of the Sum of the Squares)」という。）法による組合せの妥当性について説明するものである。

なお、SRSS法による荷重の組合せは、大間1号炉建設工認及び東海第二において適用実績のある手法である。

## 2. 島根2号炉で用いる荷重の組合せ方法

島根2号炉では、静的地震力による荷重の組合せについては、従来通り絶対値和法を用いて評価を行う。また、動的地震力による荷重の組合せについては、既往知見に基づきSRSS法を用いて評価を行う。

## 3. 水平方向及び鉛直方向の地震力による荷重の組合せ方法に関する研究の成果

### 3.1 荷重の組合せ方法の概要

荷重の組合せ方法として、絶対値和法及びSRSS法の概要を以下に示す。

#### (1) 絶対値和法

本手法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重（又は応力）<sup>注</sup>を絶対値和で組み合わせる方法である。

この方法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重が同時刻に同位相で発生することを仮定しており、組合せ方法の中では最も大きな荷重を与える。本手法は、主に地震力について時間の概念がない静的地震力による荷重の組合せに使用する。

$$\text{組合せ荷重（又は応力）} = |M_H|_{\max} + |M_V|_{\max}$$

$M_H$ ：水平方向地震力による荷重（又は応力）

$M_V$ ：鉛直方向地震力による荷重（又は応力）

#### (2) SRSS法

本手法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重（又は応力）<sup>注</sup>を二乗和平方根で組み合わせる方法である。

この方法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重の発生時刻に時間的なずれがあるという実挙動を考慮しており、水平方向及び鉛直方向地震動の同時入力による時刻歴応答解析結果との比較において平均的な荷重を与える。本手法は動的地震力による荷重同士の組合せに使用する。

$$\text{組合せ荷重（又は応力）} = \sqrt{(M_H)_{\max}^2 + (M_V)_{\max}^2}$$

$M_H$ ：水平方向地震力による荷重（又は応力）

$M_V$ ：鉛直方向地震力による荷重（又は応力）

注：荷重の段階で組み合わせる場合と荷重により発生した応力の段階で組み合わせる場合がある（次頁補足参照）。応力で組み合わせる場合は、その妥当性を確認した上で適用する。

(補足) 荷重又は応力による組合せについて

水平方向及び鉛直方向の動的地震力をSRS法で組み合わせる際、評価対象機器の形状や部位に応じて荷重の段階で組み合わせる場合と荷重により発生した応力の段階で組み合わせる場合がある。ここではその使い分けについて、具体例を用いて説明する。

#### A. 荷重の段階で組合せを行う場合

横形ポンプの基礎ボルトの引張応力の評価を例とする。以下の式で示すように水平方向地震力と鉛直方向地震力の組合せは、荷重である水平方向地震力によるモーメント ( $m \cdot g \cdot C_H \cdot h$ ) と鉛直方向地震力によるモーメント ( $m \cdot g \cdot C_V \cdot l_1$ ) を組み合わせる。

本手法については、非同時性を考慮する地震荷重についてのみSRS法しており、実績のある妥当な手法である。

##### 【絶対値和法】

$$F_b = \frac{1}{L} \{ m g (C_H h + C_V l_1) + m g C_P (h + l_1) + M_P - m g l_1 \} \quad \dots(\text{式 A-1})$$

##### 【SRS法】

$$F_b = \frac{1}{L} \left\{ m g \sqrt{(C_H h)^2 + (C_V l_1)^2} + m g C_P (h + l_1) + M_P - m g l_1 \right\} \quad \dots(\text{式 A-2})$$

ここで、

$F_b$  : 基礎ボルトに生じる引張力

$C_H$  : 水平方向震度

$C_V$  : 鉛直方向震度

$C_P$  : ポンプ振動による震度

$M_P$  : ポンプ回転により働くモーメント

$g$  : 重力加速度

$h$  : 据付面から重心までの距離

$l_1, l_2$  : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離

$L$  : 支点とする基礎ボルトから最大引張応力がかかる基礎ボルトまでの距離

$m$  : 機器の運転時質量

である。

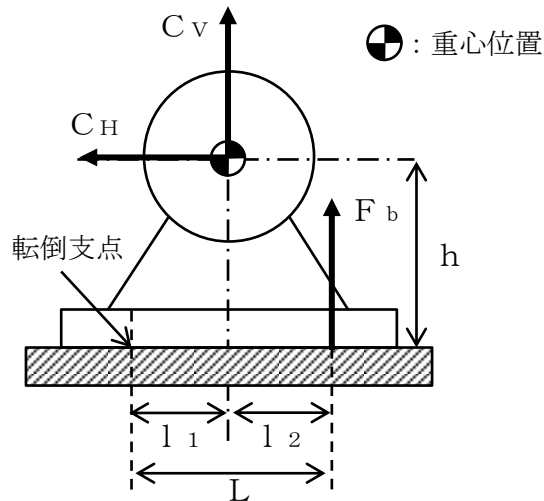


図 A-1 横形ポンプに作用する震度

B. 応力による組合せを行う場合

横置円筒形容器の脚の組合せ応力の評価を例とする。脚には、水平方向地震力による曲げモーメント $M_{11}$ 及び鉛直方向荷重 $P_1$ 、鉛直方向地震力による鉛直荷重 $(R_1 + m_{s1}g) \cdot C_V$ が作用する。

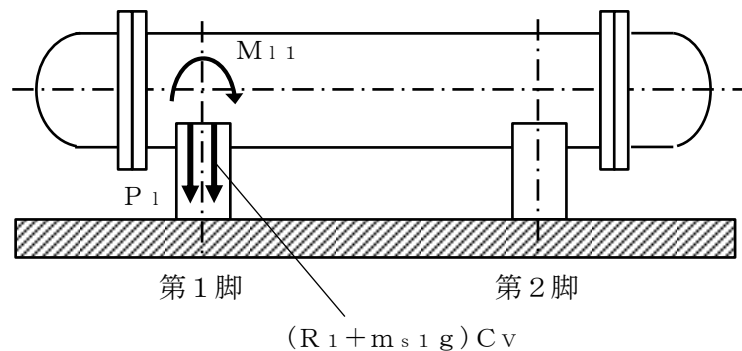


図 B-1 横置円筒形容器の脚部に作用する荷重

水平地震力による圧縮応力 $\sigma_{s2}$ 及び鉛直方向地震力による圧縮応力 $\sigma_{s4}$ は以下の式で表され、脚の組合せ応力の評価の際はこれらの応力をSRSS法により組み合わせて評価を行う。

$$\sigma_{s2} = \frac{M_{11}}{Z_{sy}} + \frac{P_1}{A_s} \quad \dots (\text{式 B-1})$$

$$\sigma_{s4} = \frac{R_1 + m_{s1}g}{A_s} C_V \quad \dots (\text{式 B-2})$$



【絶対値和法】

$$\sigma_s = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s4})^2 + 3\tau_{s2}^2} \quad \dots(\text{式 B-3})$$

【SRSS法】

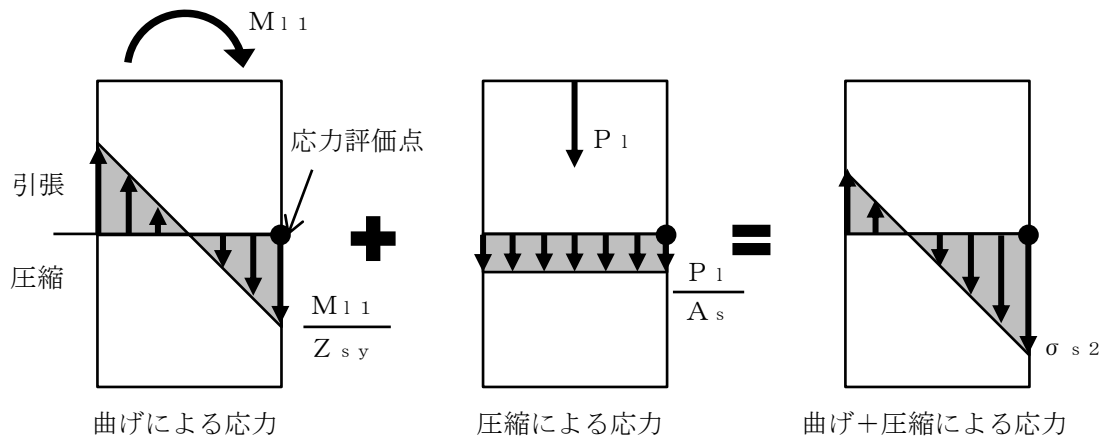
$$\sigma_s = \sqrt{\left(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s2}^2 + \sigma_{s4}^2}\right)^2 + 3\tau_{s2}^2} \quad \dots(\text{式 B-4})$$

ここで、

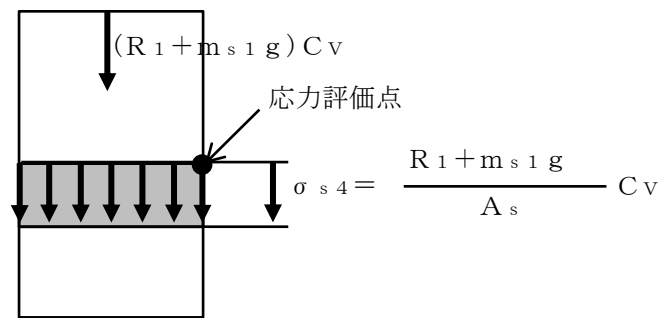
- $\sigma_s$  : 水平方向及び鉛直方向地震力が作用した場合の脚の組合せ応力
- $\sigma_{s1}$  : 運転時質量により脚に生じる圧縮応力
- $\sigma_{s2}$  : 水平方向地震力により脚に生じる曲げ及び圧縮応力の和
- $\sigma_{s4}$  : 鉛直方向地震力により脚に生じる圧縮応力
- $\tau_{s2}$  : 水平方向地震力により脚に生じるせん断応力
- $M_{11}$  : 水平方向地震力により脚底面に作用する曲げモーメント
- $P_1$  : 水平方向地震力により胴の脚付け根部に作用する鉛直方向荷重
- $R_1$  : 脚が受ける自重による荷重
- $g$  : 重力加速度
- $m_{s1}$  : 脚の質量
- $Z_{sy}$  : 脚の断面係数
- $A_s$  : 脚の断面積

である。

ここで、水平地震力による圧縮応力 $\sigma_{s2}$ 及び鉛直方向地震力による圧縮応力 $\sigma_{s4}$ は、図B-2に示すように、ともに脚の外表面の圧縮応力を表すものであり、脚の同一評価点、同一応力成分であることから、これらの組合せをSRSS法により行うことは妥当である。



(a) 水平方向地震力による応力評価点の圧縮応力



(b) 鉛直方向地震力による応力評価点の圧縮応力

図 B-2 横置円筒形容器の脚部に作用する地震力による応力  
概念図

### 3.2 S R S S法の妥当性

既往研究<sup>(1)</sup>では、実機配管系に対して、水平及び鉛直地震動による最大荷重をS R S S法により組み合わせた場合と水平及び鉛直地震動の同時入力による時刻歴応答解析法により組み合わせた場合との比較検討を以下のとおり行っている。

#### (1) 解析対象配管系モデル

解析対象とした配管は、代表プラントにおける格納容器内の給水系（F D W）2本、残留熱除去系（R H R）1本及び主蒸気系（M S）1本の計4本の配管モデルである。当該配管系はSクラスに分類されるものである。

#### (2) 入力地震動

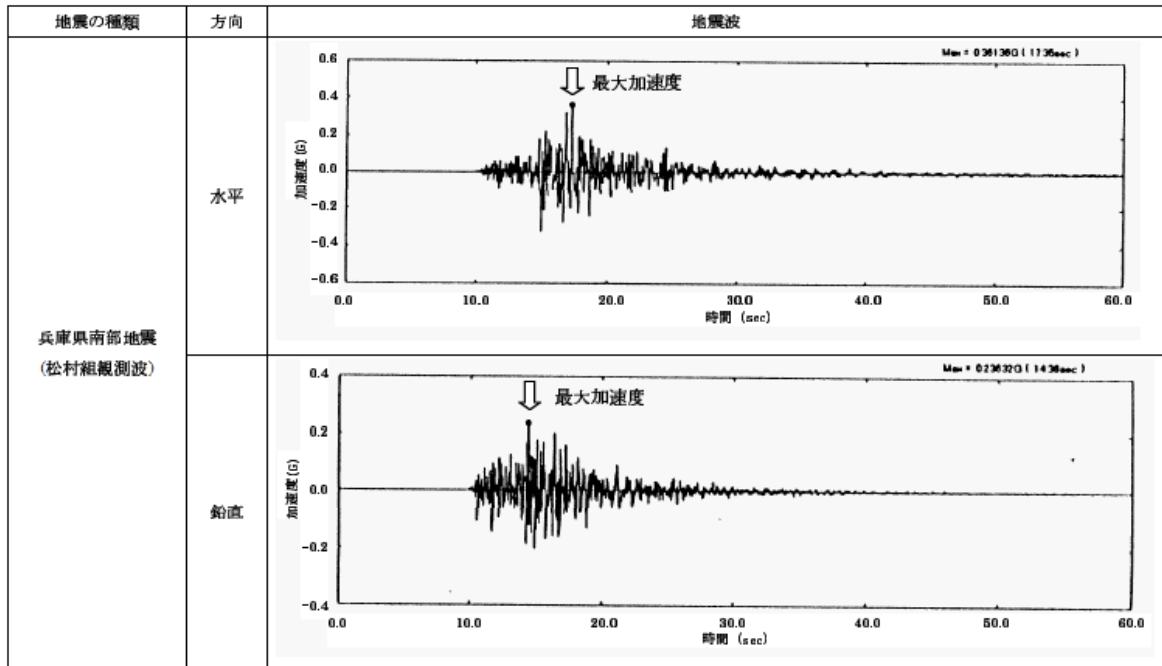
解析に用いた入力地震動は、地震動の違いによる影響を確認するため、兵庫県南部地震（松村組観測波）、人工波及びエルセントロ波の3波を用いた。機器・配管系への入力地震動となる原子炉建屋中間階の応答波の例を第3-1(1)図～第3-1(3)図に示す。

#### (3) 解析結果

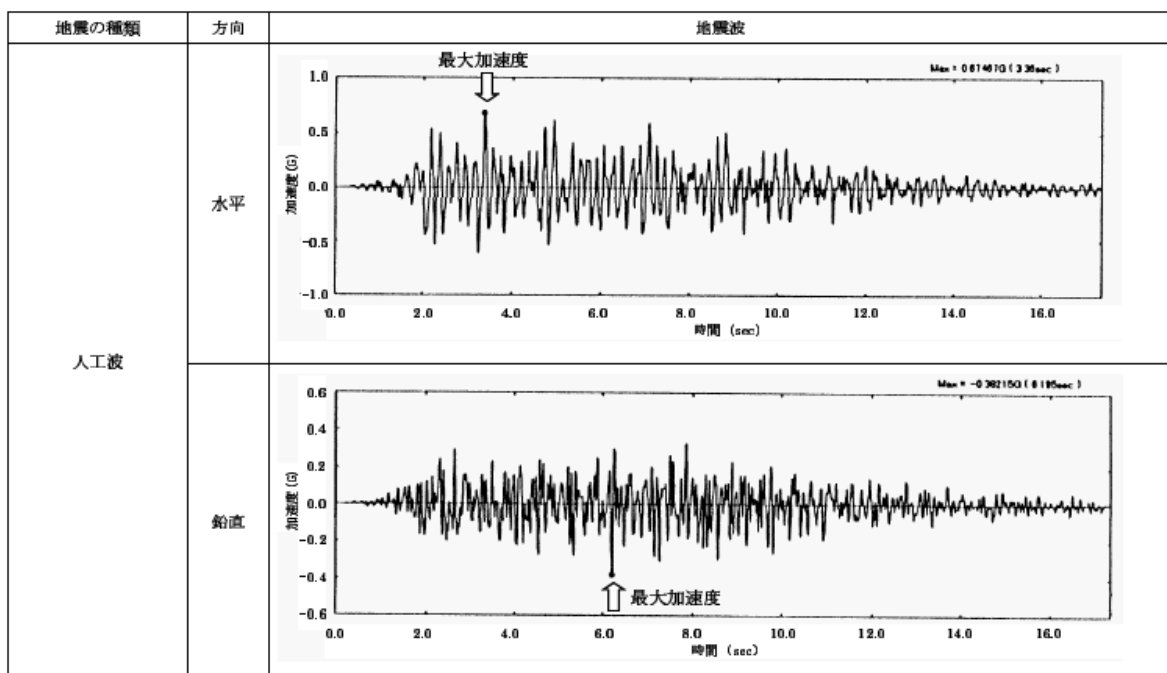
解析結果を第3-2(1)図～第3-2(4)図に示す。第3-2(1)図～第3-2(4)図は、水平方向及び鉛直方向の応力に対して、同時入力による時刻歴応答解析法及びS R S S法により組み合わせた結果をまとめたものであり、参考までに絶対値和法による結果も併記した。

第3-2(1)図～第3-2(4)図より、いずれの配管系においても最大応力発生点においては、時刻歴応答解析法に対してS R S S法の方が約1.1～1.4倍の比率で上回る結果となった。最大応力発生点におけるS R S S法と同時入力による時刻歴応答解析法との結果の比較を第3-1表に示す。また、最大応力発生点の部位を第3-3(1)図～第3-3(4)図に示す。

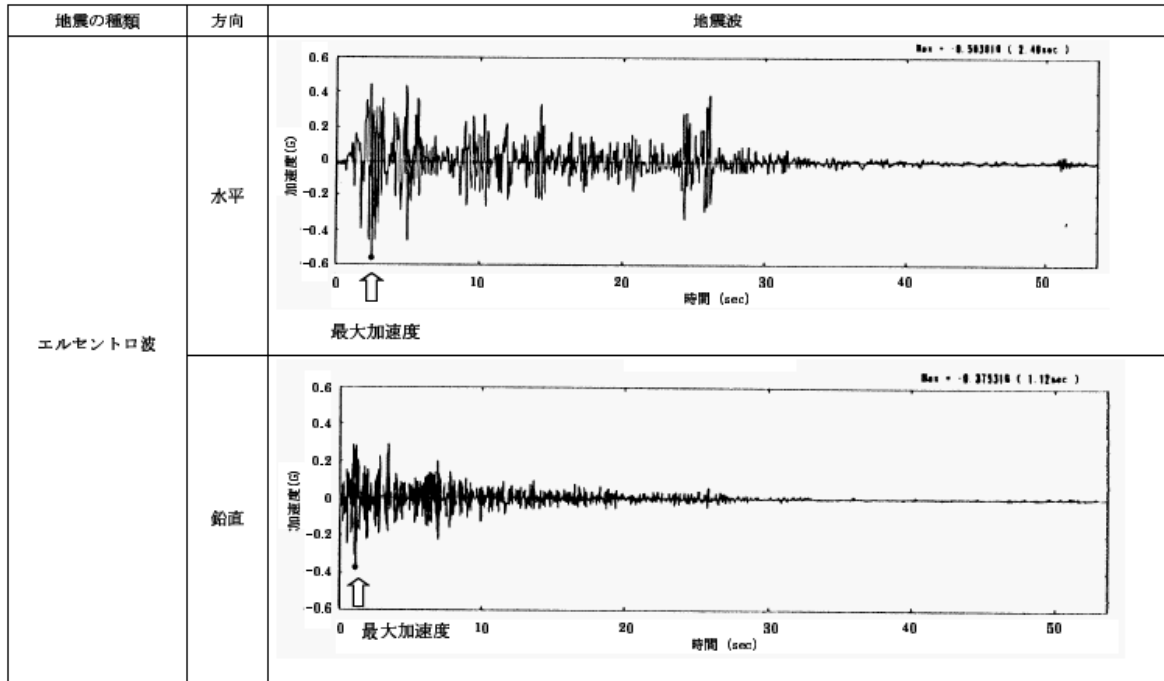
さらに、配管系全体の傾向を確認するため、配管系の主要な部位における発生応力の比較を第3-4図に示す。第3-2(1)図～第3-2(4)図に基づき、各配管モデルの節点の応力値をプロットしたものである。第3-4図より、S R S S法は発生応力の低い領域では同時入力による時刻歴応答解析法に対して平均的な結果を与え、発生応力の増加に伴い、保守的な結果を与える傾向にあることが確認できる。



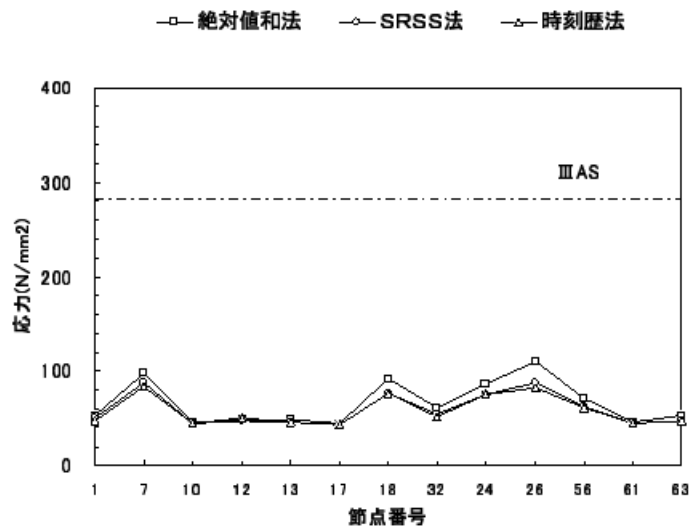
第3-1(1)図 機器・配管系への入力地震動  
(兵庫県南部地震 (松村組観測波))



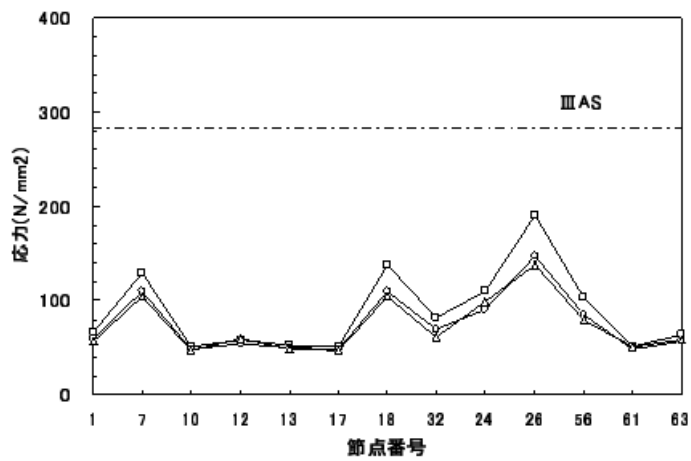
第3-1(2)図 機器・配管系への入力地震動 (人工波)



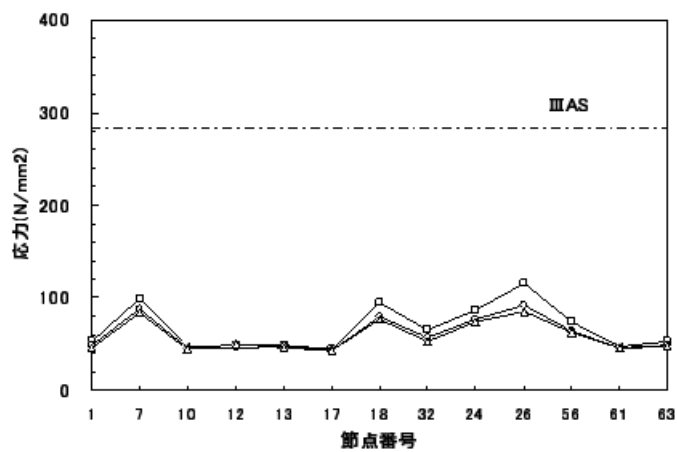
第3-1(3)図 機器・配管系への入力地震動  
(エルセントロ波)



兵庫県南部地震（松村組観測波）

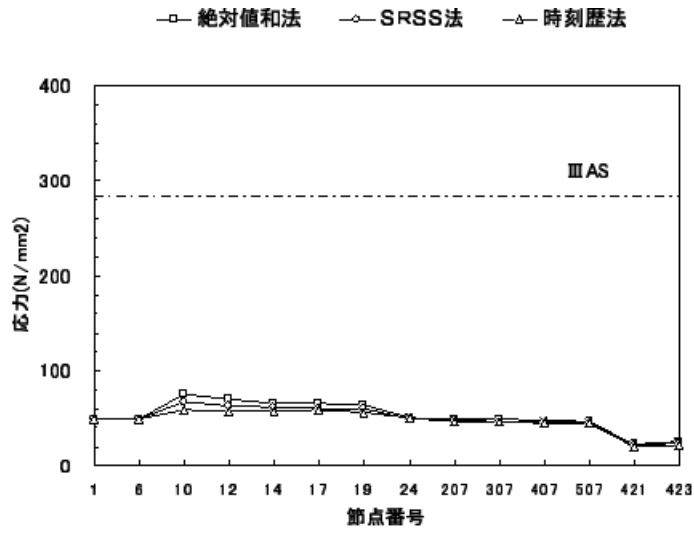


人工波

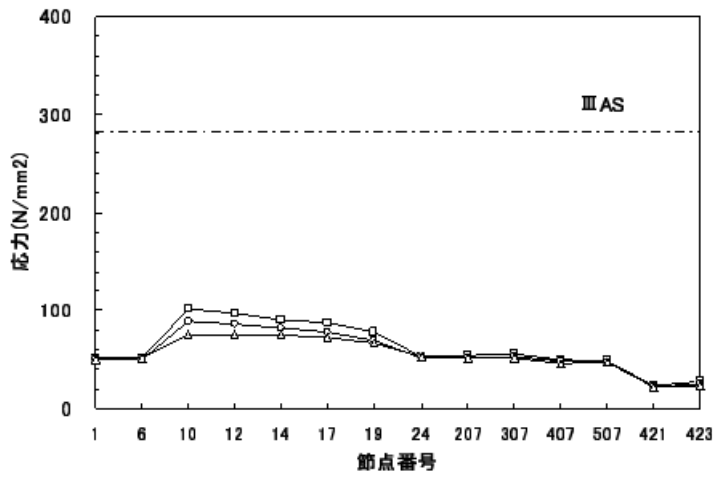


エルセントロ波

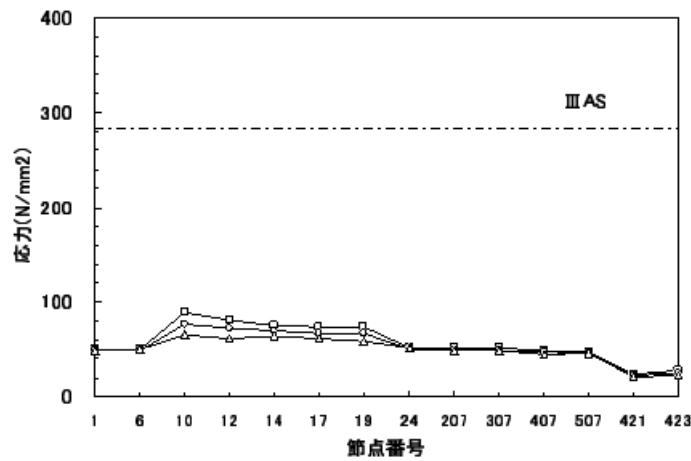
第3-2(1)図 主要な部位における発生応力（FDW-001，代表Aプラント）



兵庫県南部地震（松村組観測波）

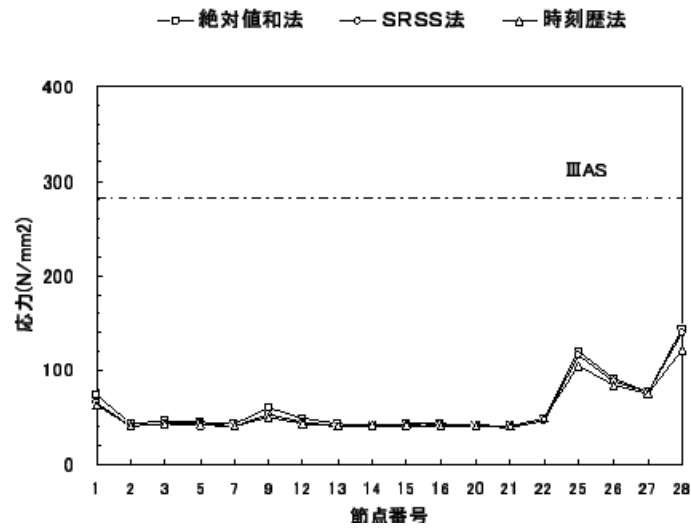


人工波

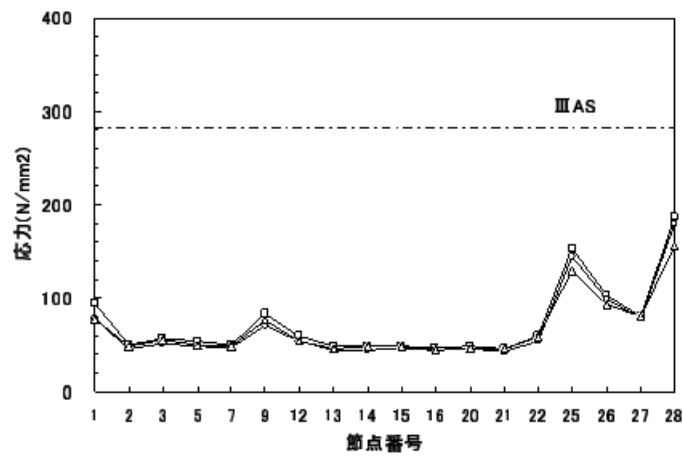


エルセントロ波

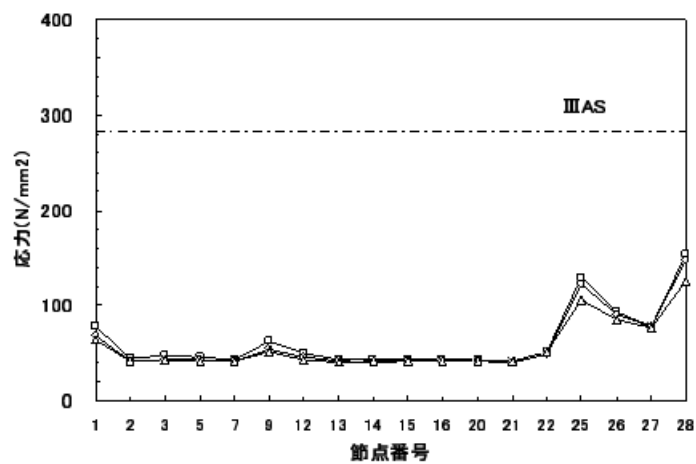
第3-2(2)図 主要な部位における発生応力 (MS-001, 代表Aプラント)



兵庫県南部地震（松村組観測波）



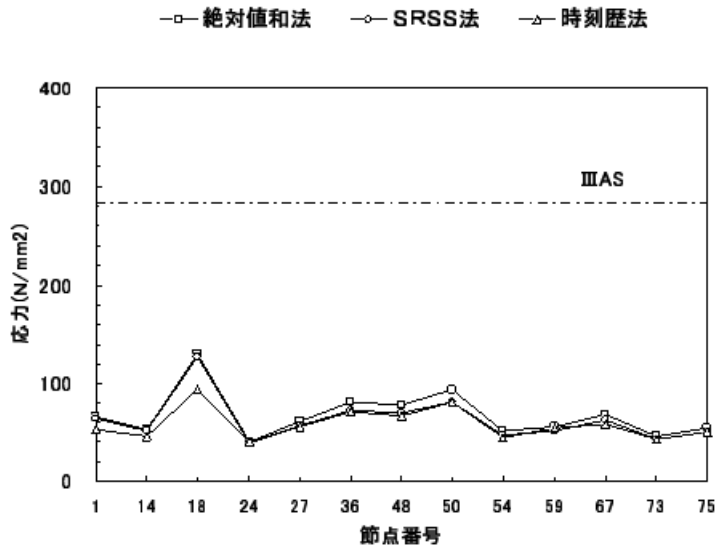
人工波



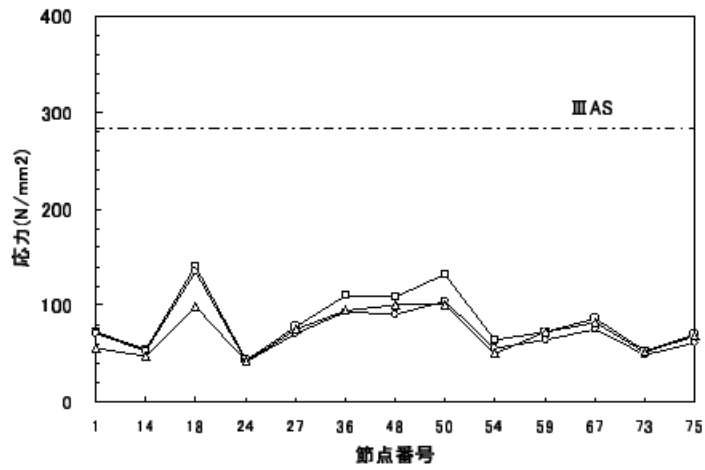
エルセントロ波

第 3-2(3) 図 主要な部位における発生応力（RHR-001，代表Aプラント）

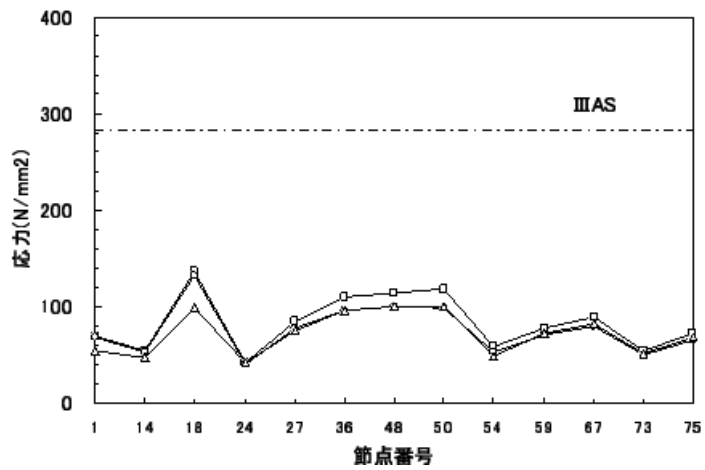




兵庫県南部地震（松村組観測波）



人工波



エルセントロ波

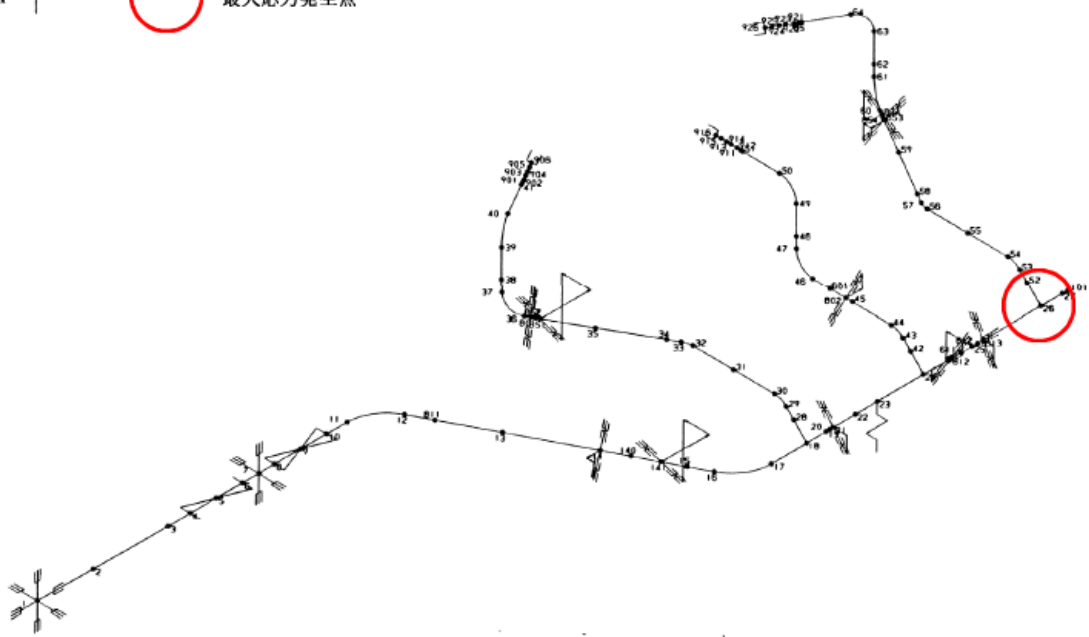
第3-2(4)図 主要な部位における発生応力（FDW-001，代表Bプラント）

第3-1表 一次応力でのS R S S法と同時入力時刻歴法の比較  
(最大応力発生点)

解析対象配管	入力地震波	最大応力発生点	S R S S法 ／同時入力
F D W-001 (代表Aプラント)	兵庫県南部地震	分岐部 (節点 No. 26)	1.08
	人工波	分岐部 (節点 No. 26)	1.08
	エルセントロ波	分岐部 (節点 No. 26)	1.08
M S-001 (代表Aプラント)	兵庫県南部地震	分岐部 (節点 No. 10)	1.15
	人工波	分岐部 (節点 No. 10)	1.20
	エルセントロ波	分岐部 (節点 No. 10)	1.18
R H R-001 (代表Aプラント)	兵庫県南部地震	拘束点 (節点 No. 28)	1.15
	人工波	拘束点 (節点 No. 28)	1.15
	エルセントロ波	拘束点 (節点 No. 28)	1.18
F D W-001 (代表Bプラント)	兵庫県南部地震	拘束点 (節点 No. 18)	1.35
	人工波	拘束点 (節点 No. 18)	1.37
	エルセントロ波	拘束点 (節点 No. 18)	1.34



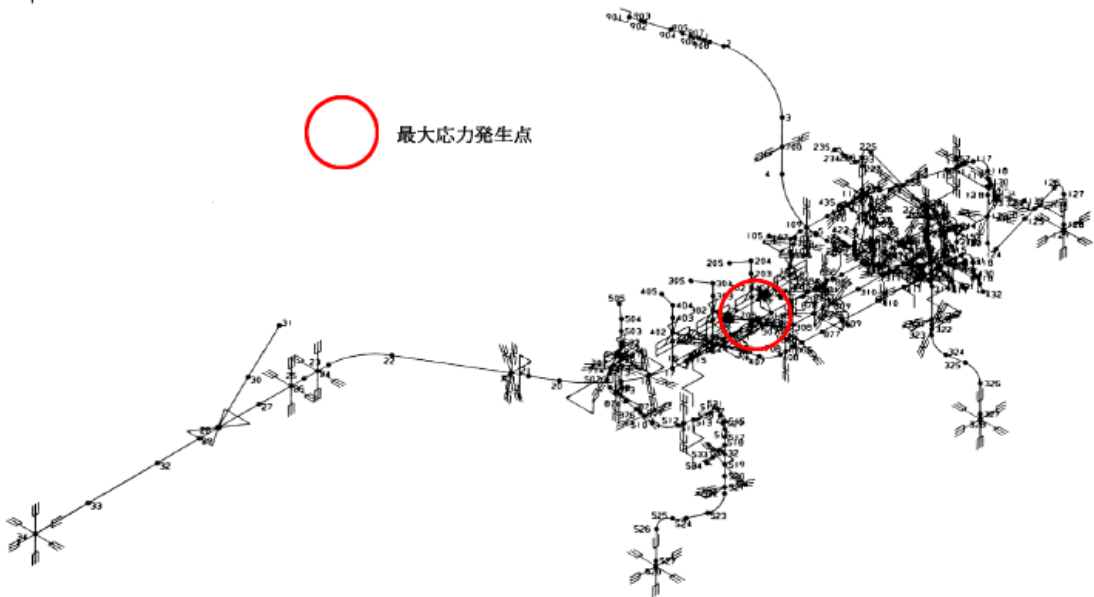
○ 最大応力発生点



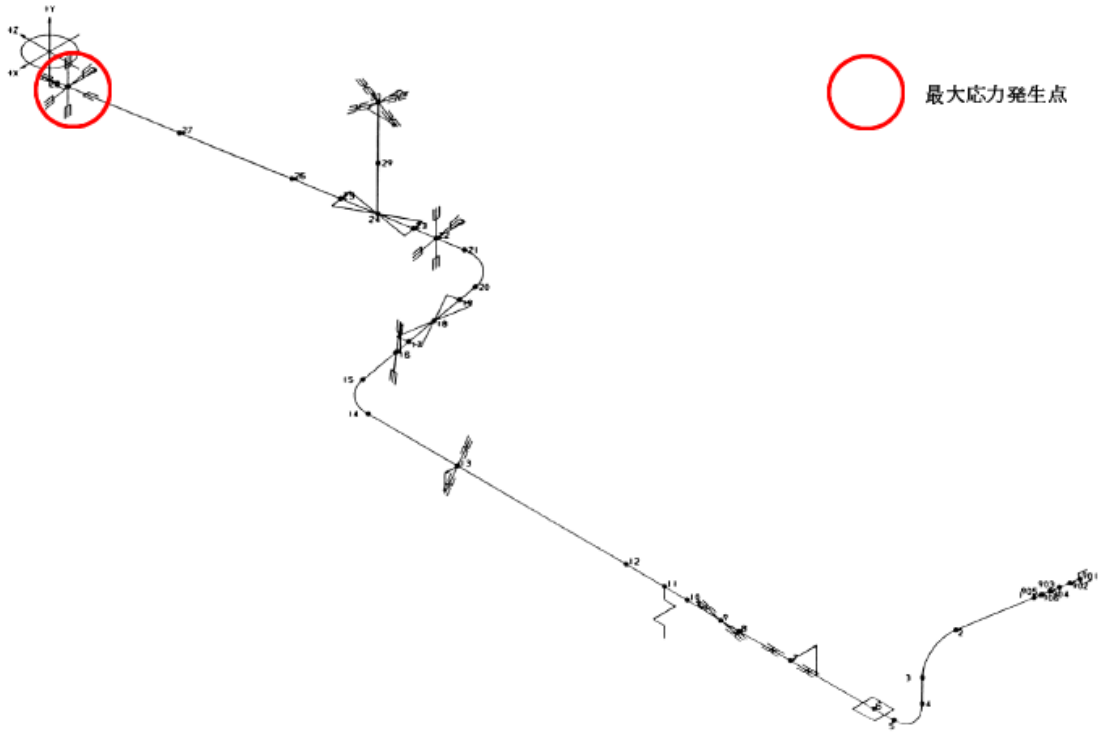
第3-3(1)図 給水系配管 (FDW-001, 代表Aプラント)



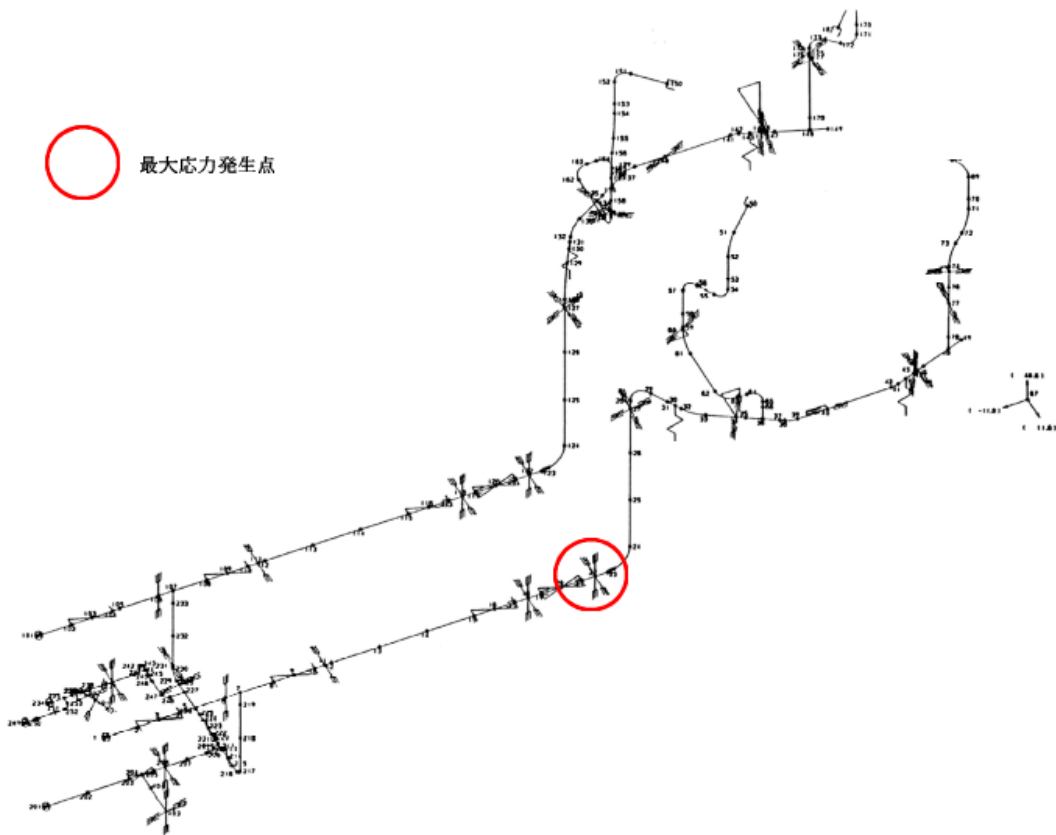
○ 最大応力発生点



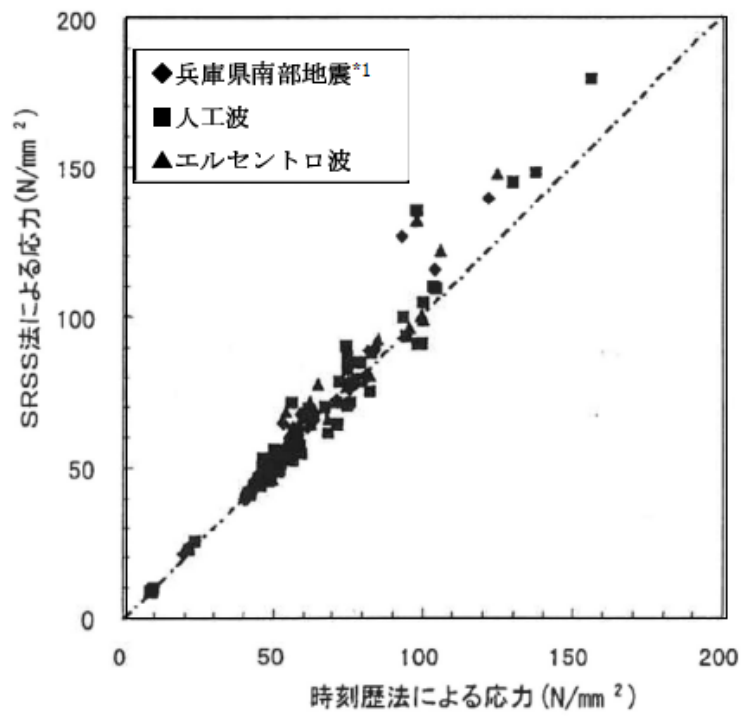
第3-3(2)図 主蒸気系配管 (MS-001, 代表Aプラント)



第3-3(3)図 残留熱除去系配管 (RHR-001, 代表Aプラント)



第3-3(4)図 給水系配管 (FDW-001, 代表Bプラント)



注記

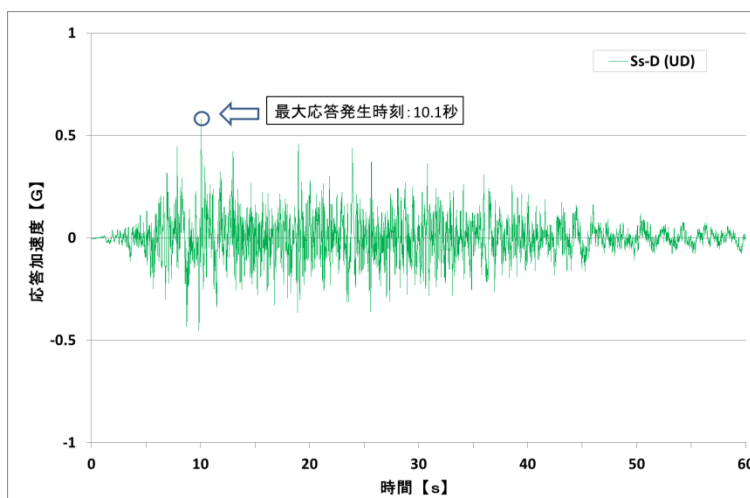
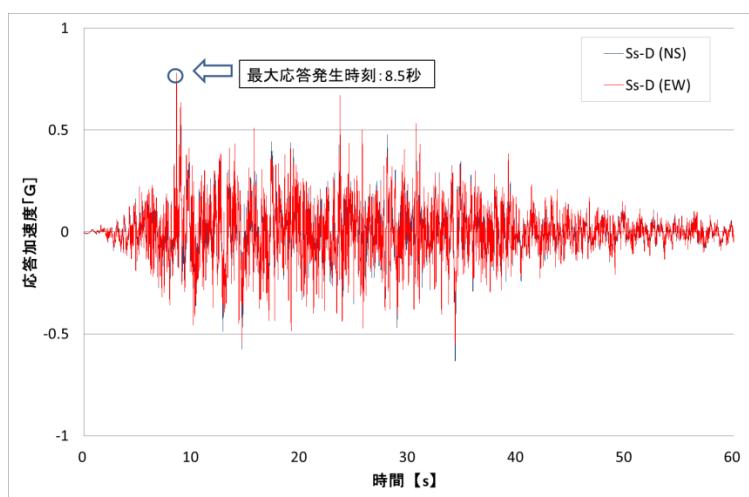
\* 1 : 松村組観測波

第 3-4 図 S R S S 法による応力と時刻歴応答解析法による応力の比較

4. 島根2号炉における水平方向及び鉛直方向の最大応答値の発生時刻の差について

島根2号炉における水平方向及び鉛直方向の最大応答加速度の発生時刻の差について、原子炉建物を例に、島根2号炉の施設の耐震評価において支配的な地震動である基準地震動 $S_s - D$ に対する水平方向及び鉛直方向の最大応答加速度の発生時刻の差を確認した。ここで、機器・配管系の耐震評価に用いる水平方向の設計用震度は、すべての地震動に対する南北方向及び東西方向の最大応答加速度を包絡した値を用いることを踏まえ、水平方向の最大応答値の発生時刻については、 $S_s - D$ によるNS方向及びEW方向の最大応答加速度の発生時刻を用いた。

第4-1図及び第4-1表に示すように、水平方向及び鉛直方向の最大応答値の発生時刻には約1～16秒の差があり、島根2号炉においても水平方向及び鉛直方向の最大応答値の発生時刻には差があることを確認した。



第 4-1 図 原子炉建物応答値 (E L. 1.3m の例)

第 4-1 表 最大応答値の発生時刻の差

位置 (m)	最大応答値の発生時刻 (sec)		発生時刻の差 (sec)
	水平方向	鉛直方向	
51.7	25.8	10.1	15.7
42.8	8.6	10.1	1.5
34.8	14.6	10.1	4.5
30.5	14.6	10.1	4.5
23.8	14.6	10.1	4.5
15.3	8.5	10.1	1.6
10.1	8.5	10.1	1.6
8.8	8.5	10.1	1.6
1.3	8.5	10.1	1.6
-4.7	8.5	10.1	1.6

## 5. まとめ

以上より，島根2号炉では，水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せ方法としてSRSS法を適用する。

## 6. 参考文献

- (1) 電力共通研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究（ステップ2）」（平成7年～平成10年）

## 7. 参考資料

- (参考) 鳥取地震による島根原子力発電所の水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について



(参考) 2000年鳥取県西部地震による島根原子力発電所2号炉の水平方向及び鉛直方向の最大応答値の発生時刻の差について

1. はじめに

島根原子力発電所2号炉では、2000年10月6日に鳥取県西部地震による観測記録が得られている。本資料では、2000年鳥取県西部地震による島根原子力発電所2号炉の水平方向及び鉛直方向の最大応答値の発生時刻の差について参考として確認する。

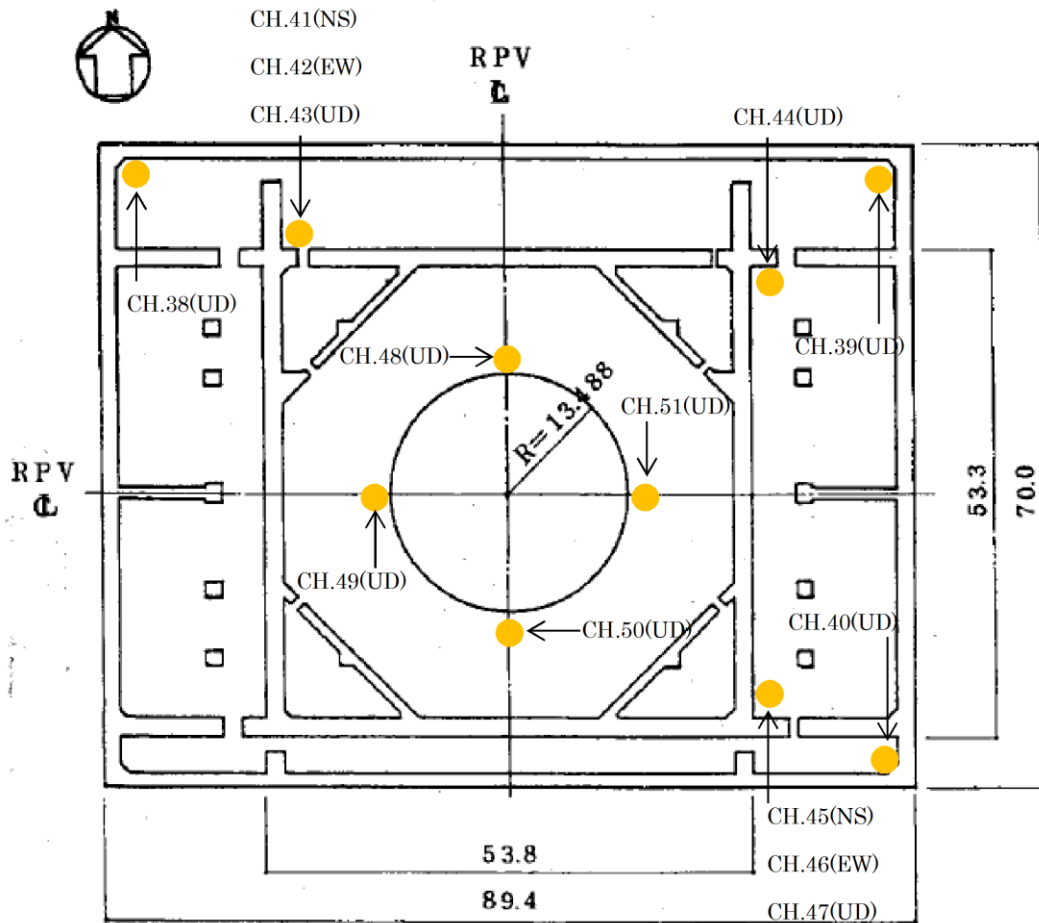
2. 確認結果

参考第1表に示すように、水平方向及び鉛直方向の最大応答値の発生時刻には約1秒～約2秒の差があり、島根原子力発電所2号炉において観測された実地震についても、水平方向及び鉛直方向の最大応答値の発生時刻には差があることを確認した。

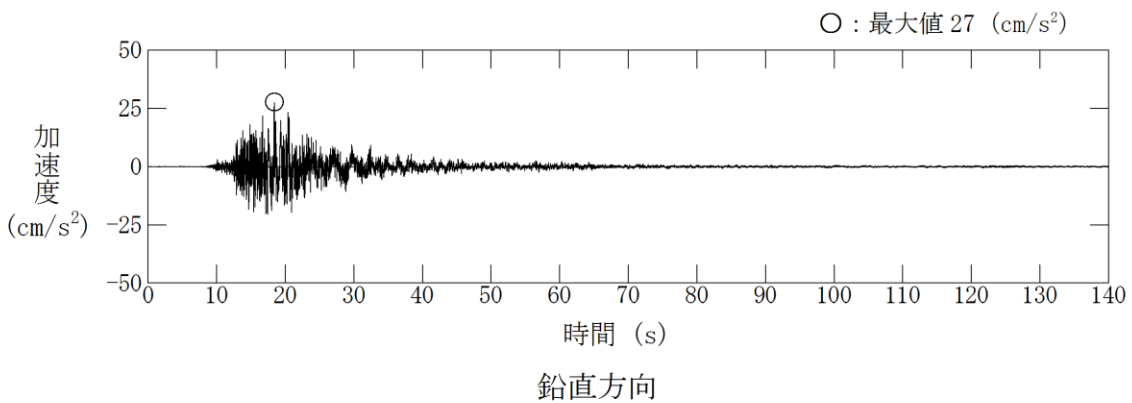
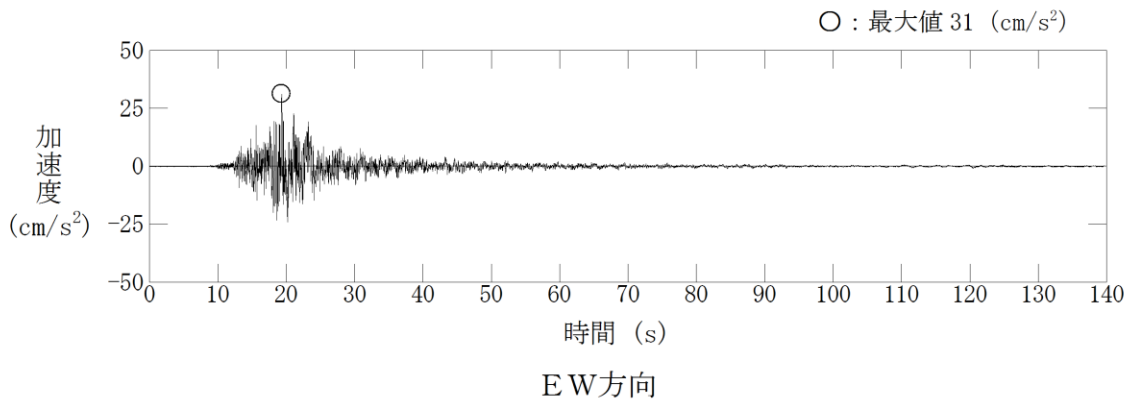
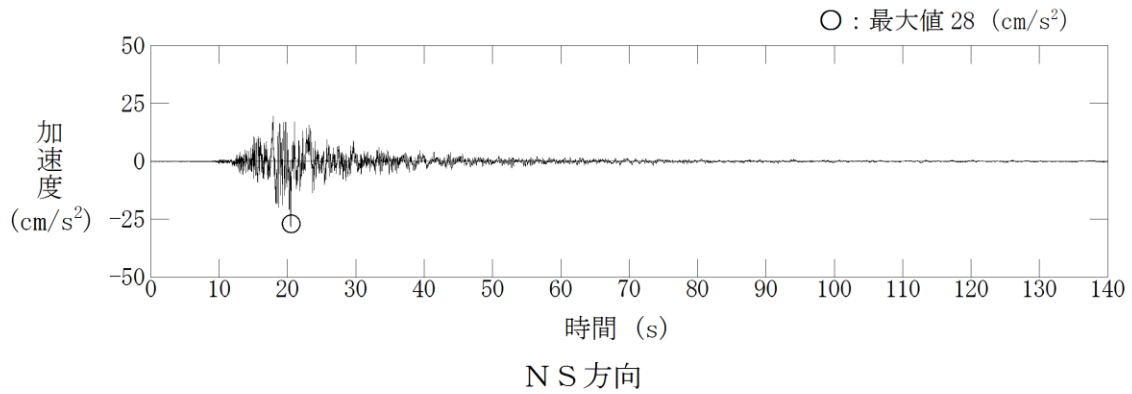
参考第1表 2000年鳥取県西部地震の観測記録における  
最大応答値の発生時刻の差

位置 (m)	最大応答値の発生時刻 (秒)			発生時刻の差 (秒)	
	南北方向 (N S)	東西方向 (E W)	鉛直方向 (U D)	N S - U D	E W - U D
島根2号炉 原子炉建物 (E L 1.3m)	20.455	19.325	18.380	2.075	0.945

● : 地震計設置箇所



参考第 1-1 図 島根 2 号炉原子炉建物基礎上 ( E L 1.3m )  
地震計設置位置



参考第 1-2 図 原子炉建物基礎上の観測記録 加速度時刻歴波形  
(CH. 45, CH. 46, CH. 47 E L 1.3m)

## 等価繰返し回数の評価方針について

## 1. 基本的な考え方

島根2号炉の耐震評価における疲労評価では、原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）の手順のうち、等価繰返し回数を用いた評価としている。

今回工認で用いる等価繰返し回数は、J E A G 4 6 0 1のピーク応力法に基づき等価繰返し回数を算定する。等価繰返し回数は、設備のピーク応力、固有周期、減衰定数、応答変位時刻歴によって値が異なるため、保守性を持たせた「一律に設定する等価繰返し回数」を用いることを基本とする。また、より精緻に疲労評価を行う場合は、「個別に設定する等価繰返し回数」を用いる。適用する等価繰返し回数の使い分けの考え方を第1図に示す。

なお、建設時における島根2号炉の等価繰返し回数は、建設時の基準地震動 S 1 及び S 2 に対する原子炉建物の等価繰返し回数を「昭和55年度耐震設計の標準化に関する調査報告書」（以下「標準化報告書」という。）に基づき算出し、保守性を持たせた一律の等価繰返し回数として100回を設定している。

## 2. 等価繰返し回数の評価方針

## 2.1 評価手法

等価繰返し回数の算定方法について、J E A G 4 6 0 1に「地震動の等価繰返し回数を用いる場合にはピーク応力法あるいはエネルギー換算法が用いられる」と記載されており、島根2号炉では、ピーク応力法を用いて算定する方針とする。

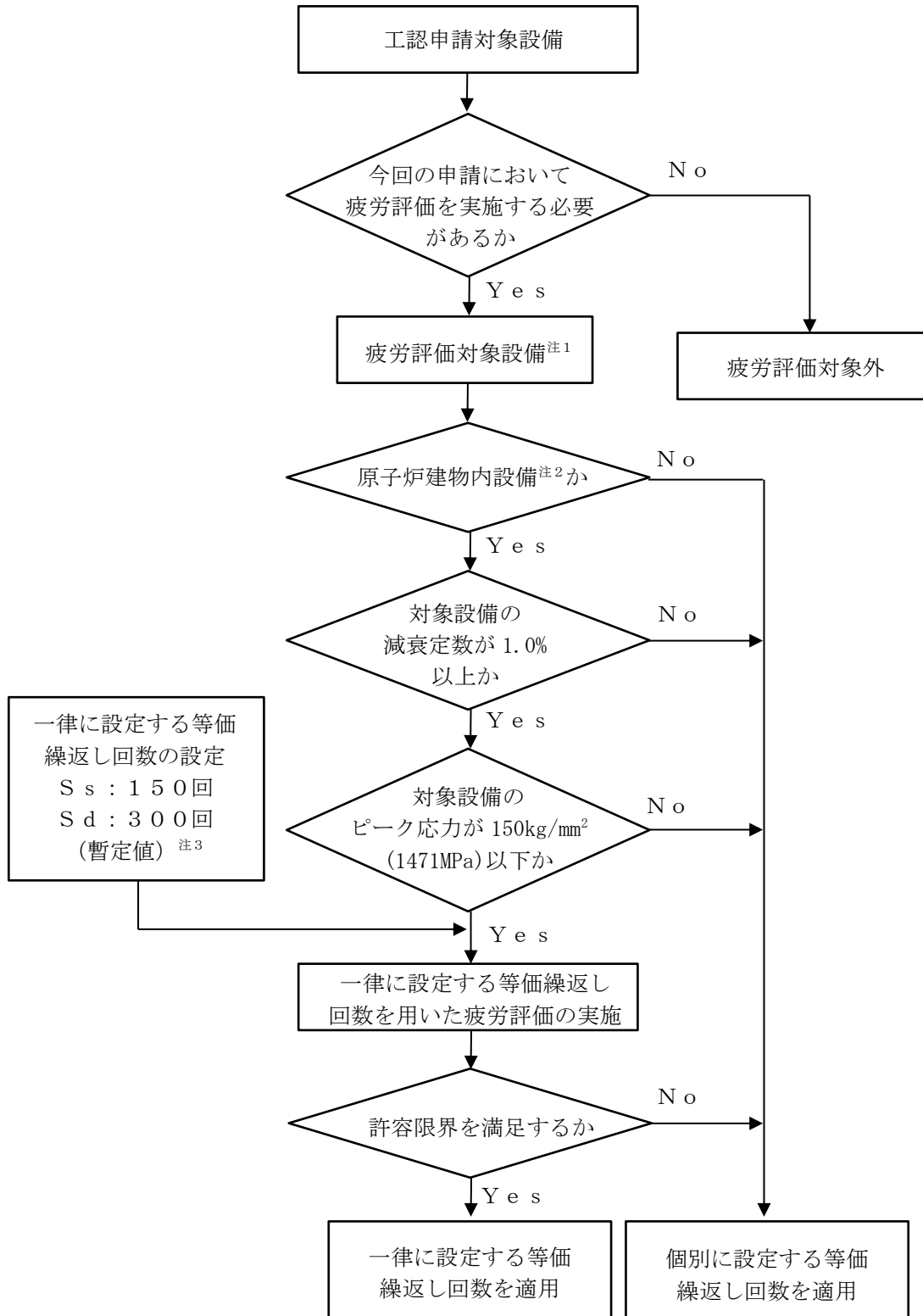
## 2.2 算定フロー及び算定条件

J E A G 4 6 0 1に記載されているピーク応力法を用いた等価繰返し回数の算定フローを第2図に示す。

当該フローに基づき、島根2号炉の耐震評価における疲労評価に用いる等価繰返し回数として「一律に設定する等価繰返し回数」又は「個別に設定する等価繰返し回数」を設定する。なお、等価繰返し回数の算定に当たっては、標準化報告書における等価繰返し回数の算定方法を参考とする。

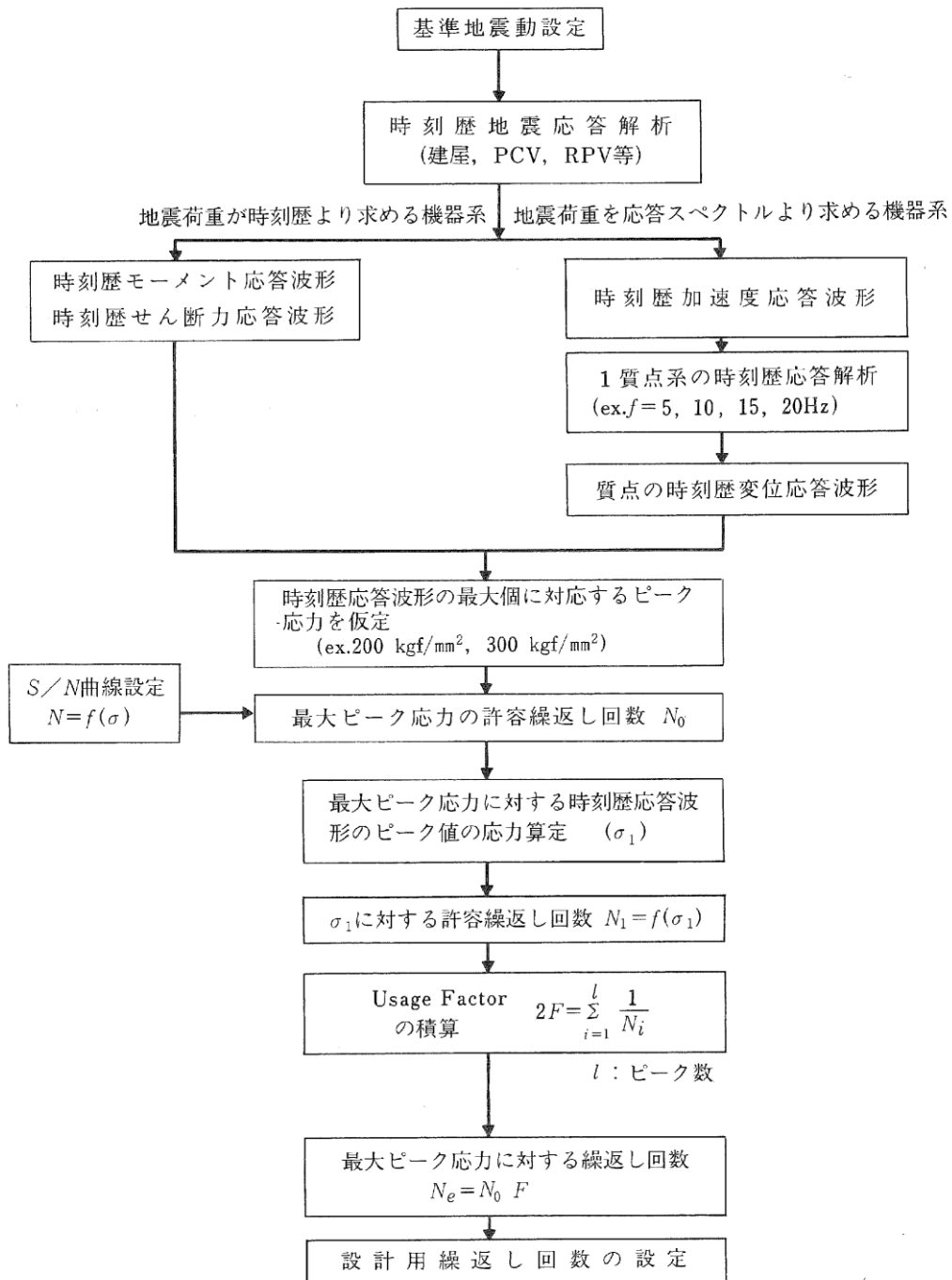
島根2号炉の等価繰返し回数の算定条件と標準化報告書との比較結果を第1表に示す。

等価繰返し回数は、詳細設計段階で設定する。なお、暫定的に一律に設定する等価繰返し回数を使用する場合、基準地震動 S s による評価において150回、弾性設計用地震動 S d による評価において300回を適用する。



- 注1 このフローによらず個別に設定する等価繰返し回数を適用する場合がある  
 注2 「一律に設定する等価繰返し回数」の適用範囲を原子炉建物内設備とした場合  
 注3 「一律に設定する等価繰返し回数」は詳細設計段階で設定

第1図 適用する等価繰返し回数の使い分け



第2図 ピーク応力法を用いた地震の等価繰返し回数の算定フロー  
(J E A G 4 6 0 1 より引用)

第1表 昭和55年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書及び島根2号炉の等価繰返し回数算定条件の比較

		昭和55年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書 (標準化報告書)		島根2号炉	
		【手法1】	【手法2】	建設時	今回工認
対象設備		原子炉圧力容器 スカート	第1種配管	原子炉建物に 設置された設備	原子炉建物 <sup>注1</sup> 以外、減 衰定数が0.5%の設備、 ピーク応力が150kg/ mm <sup>2</sup> (1471MPa)を超える 設備、疲労評価の精緻 化が必要な設備
算出方法	回数算出 に用いる 応答時刻 歴波	時刻歴解析より算定さ れる時刻歴モーメント を用いた算出方法 <sup>注5</sup>	建物床応答を入力とし た1質点系モデルによ る応答時刻歴を用いた 算出方法 <sup>注6</sup>	時刻歴解析より算定され る時刻歴荷重を用いた算 出方法 <sup>注5</sup> 又は建物床応答 を入力とした1質点系モ デルによる応答時刻歴を 用いた算出方法 <sup>注6</sup>	同左
	波形	時刻歴モーメント波形	変位応答時刻歴波	荷重時刻歴波形又は 変位応答時刻歴波	同左
対象建屋・床	時刻歴最大値 (設備の最大 ピーク応力)	5種類のピーク応力 (最大300kg/mm <sup>2</sup> )	代表設備の最大ピーク 応力を安全側に設定 (300kg/mm <sup>2</sup> )	150kg/mm <sup>2</sup> (1471MPa) (標準化報告書の検討に て十分とされる値)	同左又は対象設備のピ ーク応力
	固有周期	代表設備の設置床面	同左	対象設備の設置位置	同左
減衰定数	時刻歴解析結果より 直接算定	設備の固有周期 でなく、全固有周期	設備の固有周期 でなく、全固有周期	対象設備の固有周期 <sup>注2</sup> でなく、全固有周期 <sup>注2</sup>	対象設備の固有周期
	報告書に言及なし	同左	同左	1.0%	対象設備の設計用減衰 定数
設計用疲労線図	代表設備材料の 線図を使用	同左	炭素鋼の設計疲労線図 <sup>注3</sup>	炭素鋼の設計疲労線図 <sup>注4</sup>	対象設備の仕様材料 に応じて、炭素鋼又は ステンレス鋼の設計 疲労線図 <sup>注4</sup>
	地盤条件	Vs=500, 1000, 1500m/s	Vs=1500m/s	Vs=1600m/s <sup>注7</sup>	同左

注1 「一律に設定する等価繰返し回数」の適用範囲を原子炉建物内設備とした場合  
 注2 設備の固有周期を踏まえ固有周期帯を限定する場合がある。  
 注3 発電用原子炉設備に関する構造等の技術基準(昭和55年通商産業省告示第501号)を適用  
 注4 日本機械学会 設計建設規格(J S M E S N C 1 2005/2007)を適用

## 多入力の時刻歴応答解析の適用について

## 1. 概要

今回工認では、三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析において、多入力の時刻歴応答解析手法を適用するため、本資料にて、その解析手法を説明する。なお、本解析手法は、原子炉建物等の建物・構築物の地震応答解析において、他プラントを含む既工認にて適用実績がある。

## 2. 多入力の時刻歴応答解析法

多入力の時刻歴応答解析では、基準とする入力点（基準入力点）に対する配管系の相対変位及び入力点の相対変位を用いると、地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式は以下となる。

$$[M]\{\ddot{x}_a\} + [C]\{\dot{x}_a\} + [K]\{x_a\} = -[M]\{I\}\ddot{y}_0 - [\tilde{C}]\{\dot{x}_b\} - [\tilde{K}]\{x_b\} \quad (1)$$

$[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  : 配管系の質量, 減衰, 剛性マトリクス

$\{I\}$  : 単位ベクトル

$\{x_a\}$  : 基準入力点に対する配管系の相対変位ベクトル

$\{x_b\}$  : 基準入力点に対する入力点の相対変位ベクトル

$y_0$  : 基準入力点の絶対変位

$[\tilde{C}]$  : 入力点の相対速度に対応した減衰マトリクス

$[\tilde{K}]$  : 入力点の相対変位に対応した剛性マトリクス

式(1)の左辺は地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式である。右辺第一項は、基準入力点の加速度を用いており、右辺第二項及び右辺第三項は、入力点の相対変位、相対速度により生じる力を表している。式(1)は、単一入力の場合と同様に、モード座標系の運動方程式に変換することが可能であり、今回の評価では、モード空間での連成した運動方程式に対して時間積分を行う方法を適用する。

## 3. 多入力の場合の2自由度系の運動方程式の例

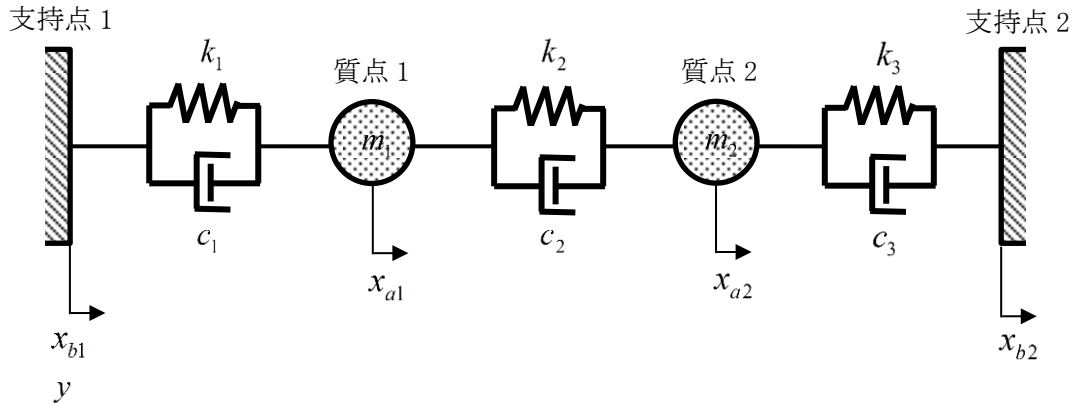
多入力の時刻歴応答解析手法は、いくつかの定式化が可能であるが、前項に示した系全体の絶対変位を「基準とする支持点の絶対変位」と「基準とする支持点からの相対変位」の和で表す場合の定式化について、多入力の場合の2自由度系の運動方程式の例を以下に示す。対象とする2自由度系を図3-1に示す。

なお、系を静的平衡関係から得られる疑似静的変位と動変位の和で定義することを特徴とする Clough の方法が J E A G 4 6 0 1<sup>注1</sup>に示されているが、変



位等の定義の仕方が異なるだけであり，系の運動方程式としては，式（1）と同等である（参考資料(9-1)参照）。

注1：原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1987（社団法人日本電気協会）



- $y$  : 基準とする支持点 1 の絶対変位
- $x_{a1}, x_{a2}$  : 支持点 1 に対する各質点の相対変位
- $x_{b1}, x_{b2}$  : 支持点 1 に対する各支持点の相対変位 ( $x_{b1} = 0$ )
- $m_1, m_2$  : 質量
- $k_1, k_2, k_3$  : ばね定数
- $c_1, c_2, c_3$  : 減衰係数

図 3-1 多入力の場合の 2 自由度系

地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式を以下に示す。

$$\begin{cases} m_1(\ddot{x}_{a1} + \ddot{y}) + c_1(\dot{x}_{a1} - \dot{x}_{b1}) - c_2(\dot{x}_{a2} - \dot{x}_{a1}) + k_1(x_{a1} - x_{b1}) - k_2(x_{a2} - x_{a1}) = 0 & (2) \\ m_2(\ddot{x}_{a2} + \ddot{y}) + c_2(\dot{x}_{a2} - \dot{x}_{a1}) - c_3(\dot{x}_{b2} - \dot{x}_{a2}) + k_2(x_{a2} - x_{a1}) - k_3(x_{b2} - x_{a2}) = 0 & (3) \end{cases}$$

基準とする支持点 1 に関する項を右辺に移項して整理すると，

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_{a1} + (c_1 + c_2)\dot{x}_{a1} - c_2\dot{x}_{a2} + (k_1 + k_2)x_{a1} - k_2x_{a2} - c_1\dot{x}_{b1} - k_1x_{b1} = -m_1\ddot{y} & (4) \\ m_2\ddot{x}_{a2} - c_2\dot{x}_{a1} + (c_2 + c_3)\dot{x}_{a2} - k_2x_{a1} + (k_2 + k_3)x_{a2} - c_3\dot{x}_{b2} - k_3x_{b2} = -m_2\ddot{y} & (5) \end{cases}$$

となる。式（4）および式（5）を行列式で表現すると，

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{a1} \\ \ddot{x}_{a2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_{a1} \\ \dot{x}_{a2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{a1} \\ x_{a2} \end{Bmatrix} \\
+ \begin{bmatrix} -c_1 & 0 \\ 0 & -c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_{b1} \\ \dot{x}_{b2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_1 & 0 \\ 0 & -k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{b1} \\ x_{b2} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{y}
\end{aligned} \tag{6}$$

となる。

ここで、入力点の相対速度に対応した減衰マトリクスを $[\tilde{C}]$ 、入力点の相対変位に対応した剛性マトリクスを $[\tilde{K}]$ としたうえでこれらを右辺に移項すると、以下の式となる。

$$[M]\{\ddot{x}_a\} + [C]\{\dot{x}_a\} + [K]\{x_a\} = -[M]\{I\}\ddot{y} - [\tilde{C}]\{\dot{x}_b\} - [\tilde{K}]\{x_b\} \tag{7}$$

式(7)の左辺は質点の変位 $x_a$ 、右辺は支持点の変位 $x_b$ および $y$ の運動方程式であり、前項に示す式(1)と同様の方程式となる。

J E A G 4 6 0 1 -1987 (抜粋)  
 6.5.4 地震応答解析法 (3)配管

(3) 配 管

Aクラス配管の地震応答解析手法として設計において最も多く用いられている方法は、「6.5.4(2)容器」で示したスペクトルモーダル解析法であるが、「6.5.4(1)建屋連成系の機器」で述べた時刻歴解析法による場合もある。配管系は、多数の支持点にて支持されていることから多入力解析を用いることが合理的と考えられる。この多入力解析法については、いくつかの定式化が考えられるが、配管を対象とした多入力解析の場合は Clough により提案された方法<sup>(6.5.4-2)</sup>を用いることが多い。この Clough の方法は、系を静的平衡関係から得られる擬似静的変位と動の変位の和で定義したことを特徴とするもので、最終的には系の運動方程式は次の式(6.5.4-8)となる。

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -MH\ddot{U}_b \quad \dots\dots\dots (6.5.4-8)$$

- $M$  : 質量マトリクス
- $C$  : 減衰マトリクス
- $K$  : 剛性マトリクス
- $\ddot{U}_b$  : 支持点の絶対加速度
- $H$  : 静的平衡関係から得られる変換マトリクス

式(6.5.4-8)はこれまでに扱ってきた運動方程式と同様な形式となっているため、時刻歴による多入力解析はもちろんであるが支持点の応答スペクトルを用いたスペクトル多入力解析をも可能としている。ただし、膨大な数のモデルを対象とする配管設計においては、簡便さと安全側の観点から各々の支持部の入力を包絡し、単一入力として解析する場合が多い。

つまり、配管系の地震応答解析は「6.5.2(3)配管」において述べたように曲げせん断はり(ビーム、管要素)により3次元のモデル化が行われスペクトルモーダル解析により地震力を求める解析法が主となっている。そして、スペクトルモーダル解析においてモード合成により部材力を求める場合は「SRSS」法が用いられ、地震入力方向の合成には絶対値和法を用いるのが普通である。