

島根原子力発電所2号炉
地震による損傷の防止

令和元年11月
中国電力株式会社

第4条：地震による損傷の防止

<目次>

第1部

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
 - 1.2 追加要求事項に対する適合性
 - (1) 位置，構造及び設備
 - (2) 安全設計方針
 - (3) 適合性説明
 - 1.3 気象等
 - 1.4 設備等
 - 1.5 手順等

第2部

1. 耐震設計の基本方針
 - 1.1 基本方針
 - 1.2 適用規格
2. 耐震設計上の重要度分類
 - 2.1 重要度分類の基本方針
 - 2.2 耐震重要度分類
3. 設計用地震力
 - 3.1 地震力の算定法
 - 3.2 設計用地震力
4. 荷重の組合せと許容限界
 - 4.1 基本方針
5. 地震応答解析の方針
 - 5.1 建物・構築物
 - 5.2 機器・配管系
 - 5.3 屋外重要土木構造物
 - 5.4 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備及び津波監視設備が設置された建物・構築物
6. 設計用減衰定数
7. 耐震重要施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響
8. 水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに関する影響評価方針
9. 構造計画と配置計画

(別添)

- 別添－ 1 設計用地震力
- 別添－ 2 動的機能維持の評価
- 別添－ 3 弾性設計用地震動 S_d ・静的地震力による評価
- 別添－ 4 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別添－ 5 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価方針
- 別添－ 6 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
- 別添－ 7 主要建物の構造概要について
- 別添－ 8 地震応答解析に用いる地質断面図の作成例及び地盤の速度構造

(別紙)

- 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
- 別紙－ 2 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 FEM モデルの採用）
- 別紙－ 3 基礎スラブの応力解析モデルへの弾塑性解析の適用について
- 別紙－ 4 原子炉建物屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の適用について
- 別紙－ 5 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
- 別紙－ 6 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
- 別紙－ 7 機器・配管系における手法の変更点について
- 別紙－ 8 サプレッション・チェンバ内部水質量の考え方の変更について
- 別紙－ 9 下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別紙－ 1 0 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せに関する検討について
- 別紙－ 1 1 液状化影響の検討方針について
- 別紙－ 1 2 既設設備に対する耐震補強等について
- 別紙－ 1 3 後施工せん断補強筋による耐震補強
- 別紙－ 1 4 地震時における燃料被覆管の閉じ込め機能の維持について
- 別紙－ 1 5 動的機能維持評価の検討方針について
- 別紙－ 1 6 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価について

下線は、今回の提出資料を示す。

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
(耐震)

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 機器・配管系への制震装置の適用について

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 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

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-9 参照）。

(2) 機器・配管系への制震装置の適用

島根2号炉の取水槽ガントリクレーン及びBクラスの配管系において、耐震性向上を目的として制震装置を適用するため、地震応答解析において制震装置の特性を適切にモデル化し、時刻歴応答解析を適用する。本手法は、島根3号炉、柏崎6／7号炉等の排気筒にて適用例があるが、島根2号炉の取水槽ガントリクレーン及びBクラスの配管系と適用対象設備の主要構造に差異がある（詳細は添付資料-2 参照）。

(3) 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）。

(4) 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）。

(5) 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）。

(6) 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）。

(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

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）。

(8) 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）。

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PWR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，プラント毎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. 機器・配管系への制震装置の適用

制震装置を適用した機器・配管系への制震装置の適用については，島根3号炉，柏崎6／7号炉等の排気筒で線形の単軸粘性ダンパを使用した実績がある。島根2号炉の取水槽ガントリクレーンでは，制震装置として非線形の単軸粘性ダンパを適用するためダンパの特性に差異があり，単軸粘性ダンパを設置する設備の主要構造に差異がある。

また，Bクラスの配管系に適用する三軸粘性ダンパは，海外の原子力発電所では適用実績があるものの，国内の原子力発電所では適用実績がない。

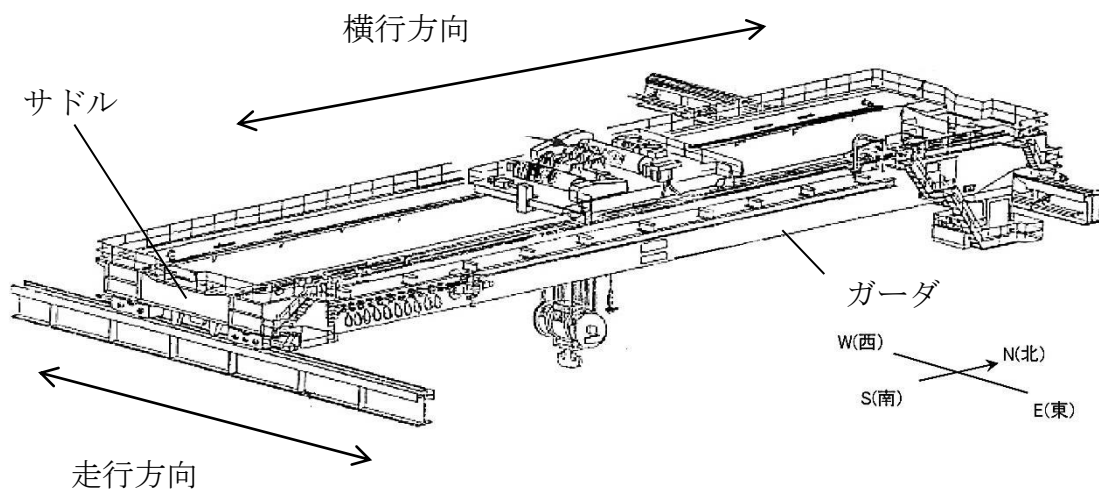
以上のことから機器・配管系への制震装置の適用性を確認する。

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

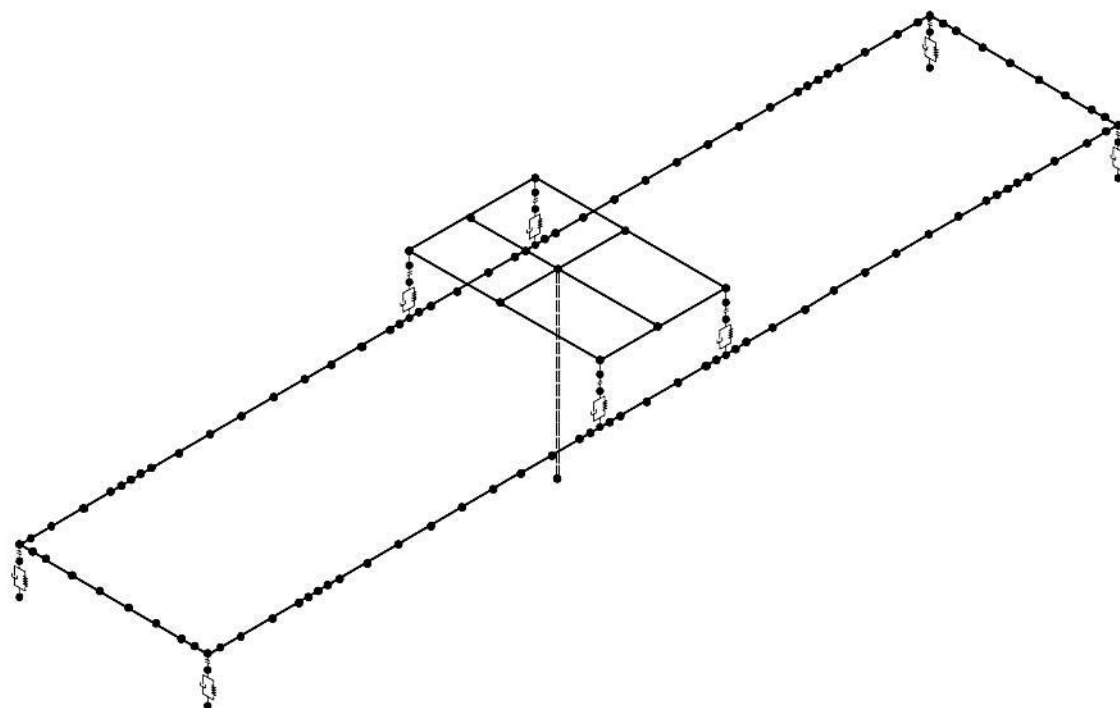
1. 概要

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。

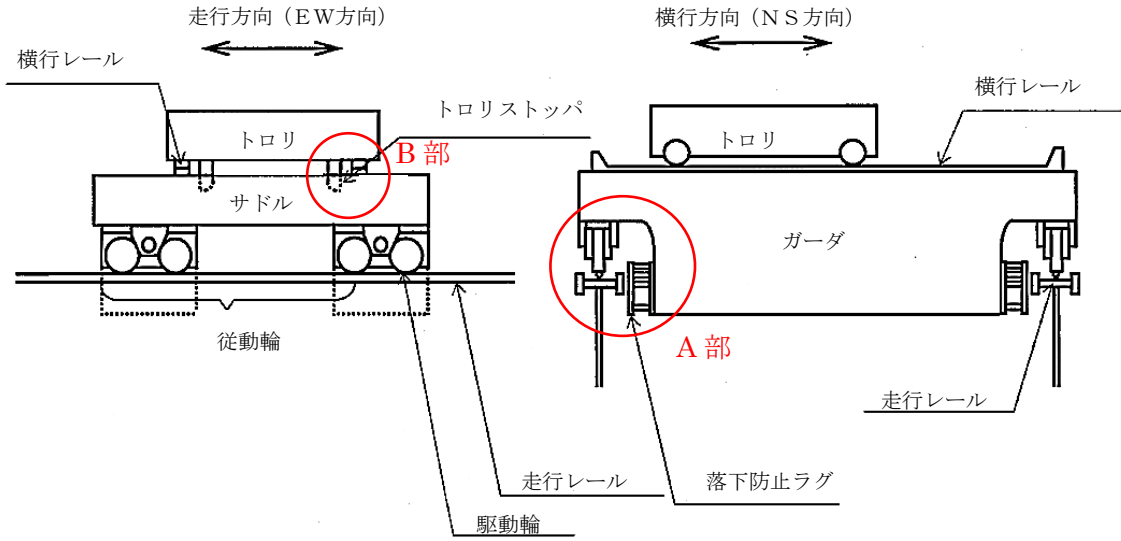
(2) 横行方向の水平荷重

- 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	<p>ガーダ</p> <p>脱線防止ラグ</p>	<p>ガーダ</p> <p>走行レール</p> <p>ランウェイガーダ</p> <p>落下防止ラグ</p>
B部	<p>トロリストップ</p> <p>トロリ</p> <p>ガーダ</p>	<p>トロリストップ</p> <p>トロリ</p> <p>ガーダ</p>

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

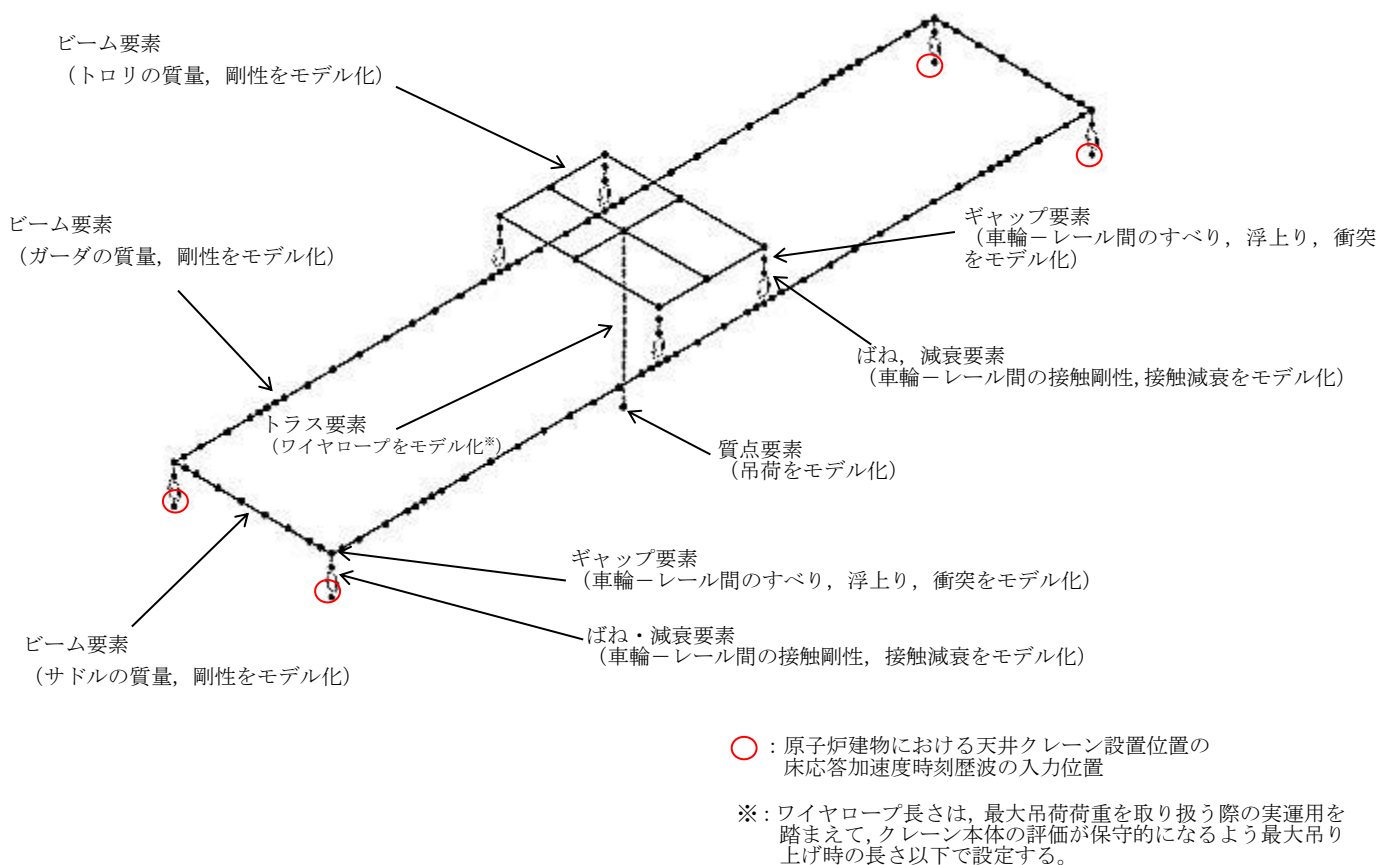
項目		大間1号炉	島根2号炉	
			既工認	今回工認
解析手法		非線形 時刻歴応答解析	手計算による 評価	非線形 時刻歴応答解析
解析モデル		3次元FEM解析 モデル	—	3次元FEM解析 モデル
車輪—レール間の 境界条件		すべり，浮上り， 衝突考慮	すべり考慮	すべり，浮上り， 衝突考慮
地震力	動的地震力	動的地震力	動的地震力	動的地震力
	動的地震力	動的地震力	静的地震力	動的地震力
入力地震動		原子炉建物における クレーン設置位置の 床応答加速度	原子炉建物における クレーン設置位置の 床応答加速度	原子炉建物における クレーン設置位置の 床応答加速度
減衰定 数	2.0% ^{注2}	2.0%	1.0% ^{注1}	2.0% ^{注2}
	2.0% ^{注2}	2.0%	—	2.0% ^{注2}
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。



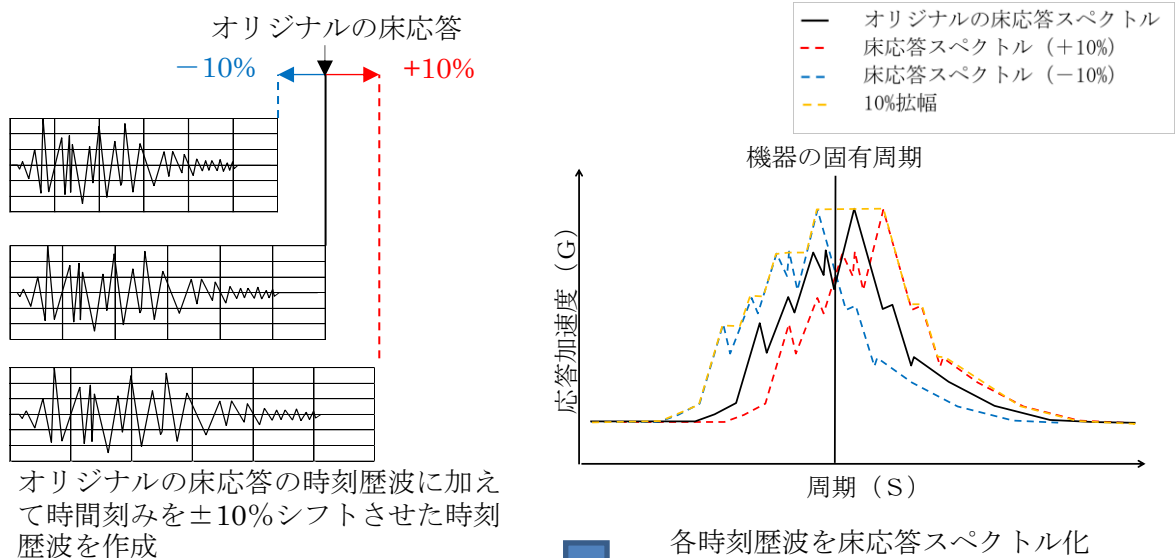
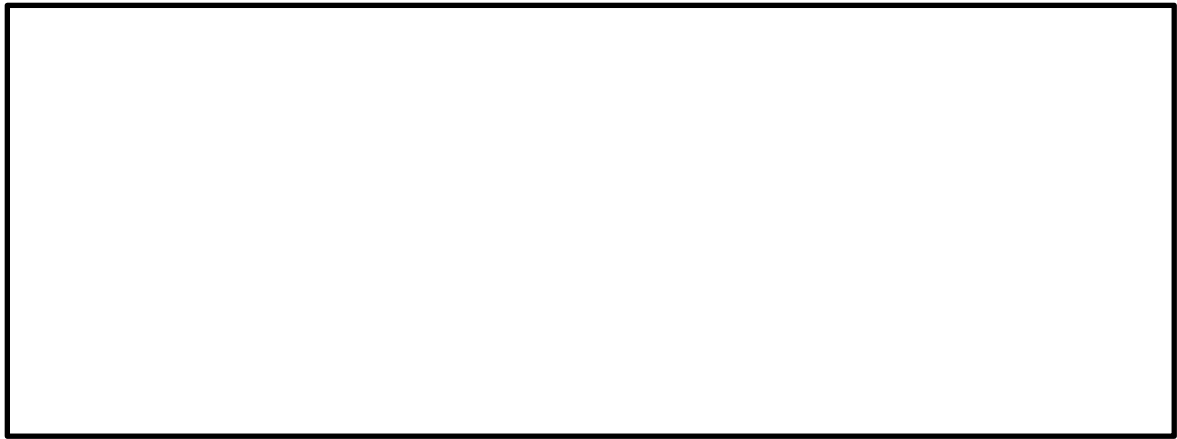
第3-1図 原子炉建物天井クレーン解析モデル

3.2 地盤物性等の不確かさに対する検討方針

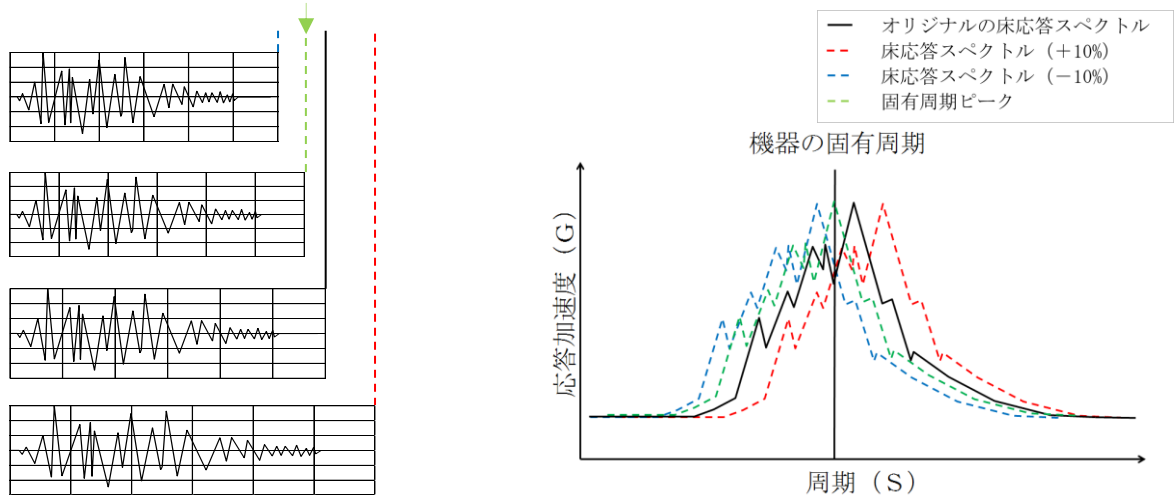
スペクトルモーダル解析では、床応答加速度は地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動を考慮して周期方向に±10%拡幅した設計用床応答曲線を用いている。

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史波



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史波を作成し、時刻歴史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。

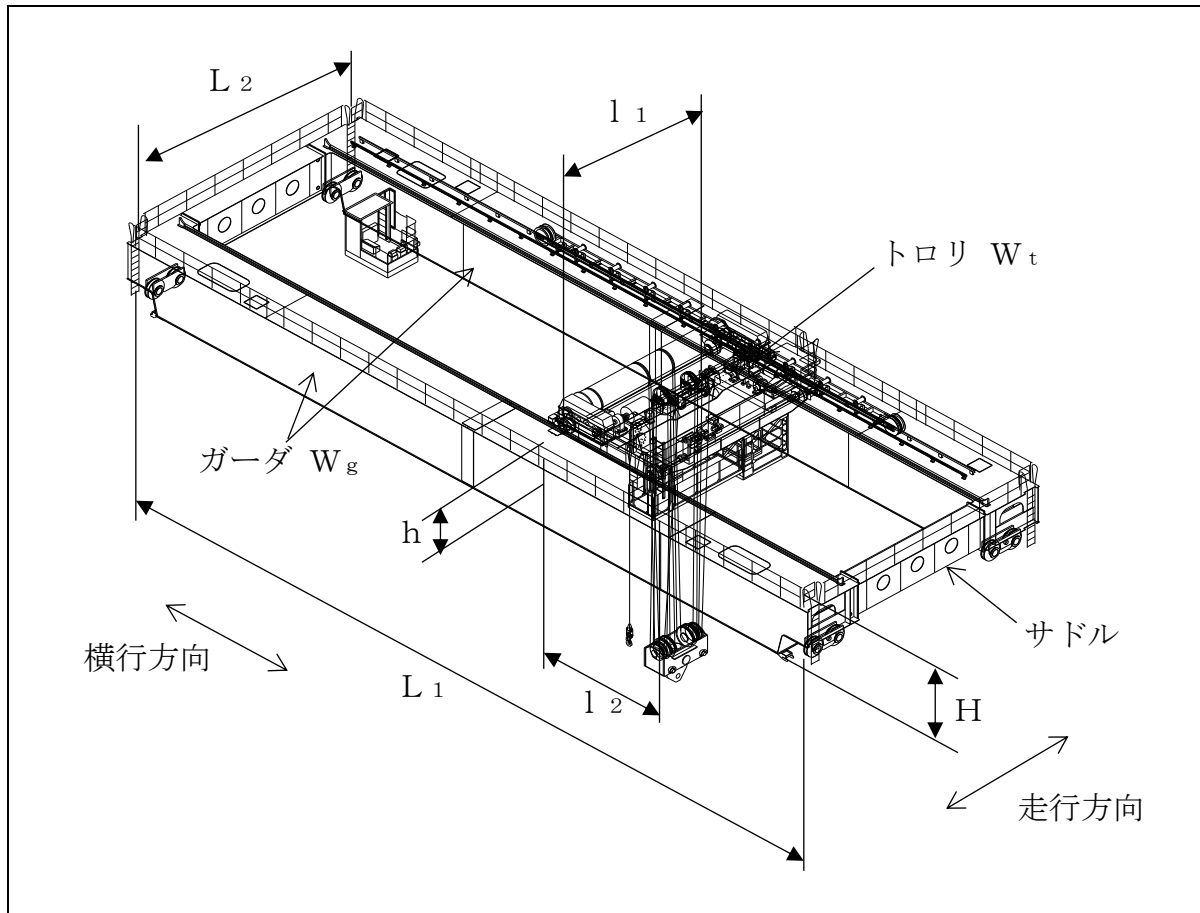
4. 添付資料

- (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

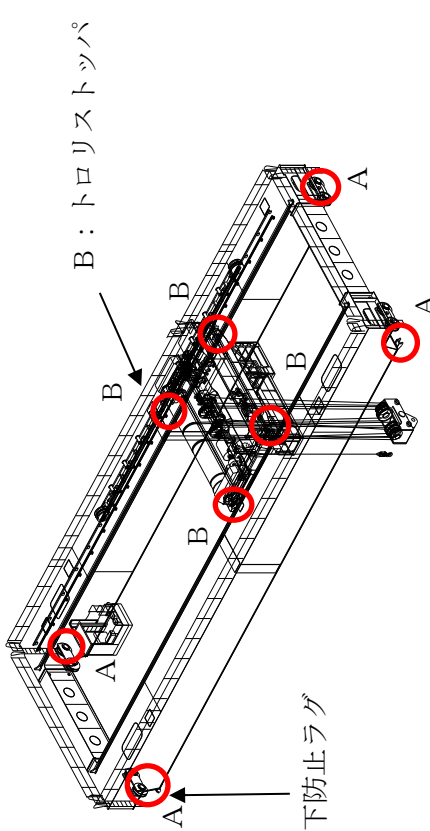
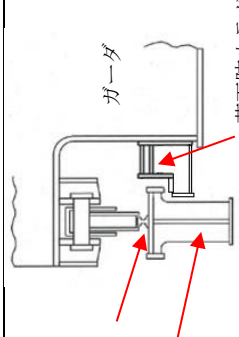
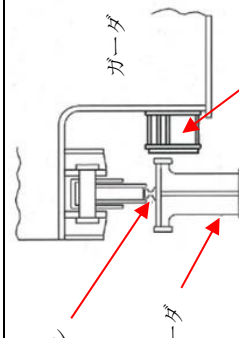
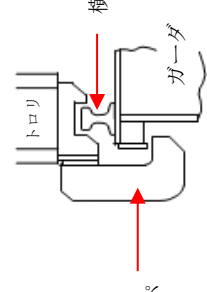
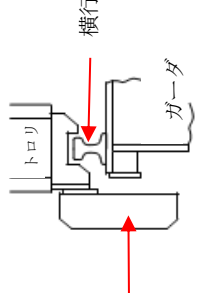
- (1) 平成19年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 動的上下動耐震試験（クレーン類）に係る報告書（08 耐部報-0021，（独）原子力安全基盤機構）
- (2) 平成20年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 動的上下動耐震試験（クレーン類）に係る報告書（09 耐部報-0008，（独）原子力安全基盤機構）

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



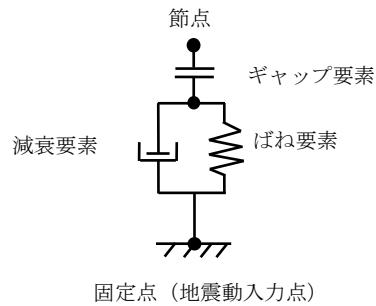
仕様		大間1号炉	島根2号炉
トロリ	質量 W_t (ton)	80	56
	高さ h (m)	2.8	3.4
	スパン l_1 (m)	7.7	5.6
	スパン l_2 (m)	4.6	4.9
ガーダ	質量 W_g (ton)	190	149
	高さ H (m)	2.5	2.4
	スパン L_1 (m)	34.9	34.9
	スパン L_2 (m)	9.4	7.3
総質量 W (ton)		270	205

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）

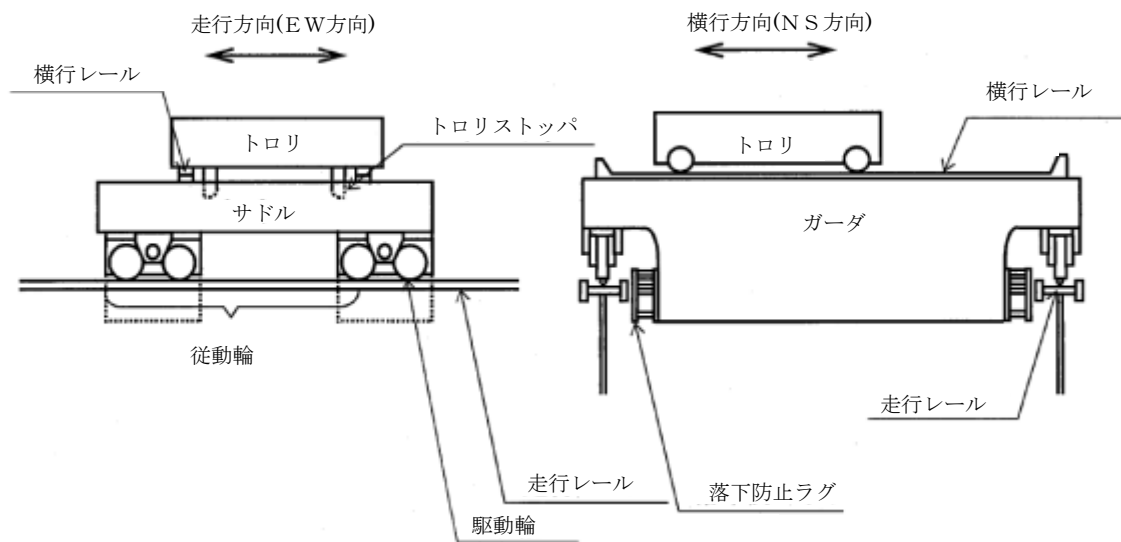
クレーン車輪部のモデル化では，すべり，浮上り及び衝突の挙動を模擬するためギャップ要素を用いる。また，接触部位の局所変形による接触剛性をばね要素で，衝突による減衰効果を減衰要素で模擬し，第3-1添図に示すように，ギャップ要素と直列に配置する。



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。

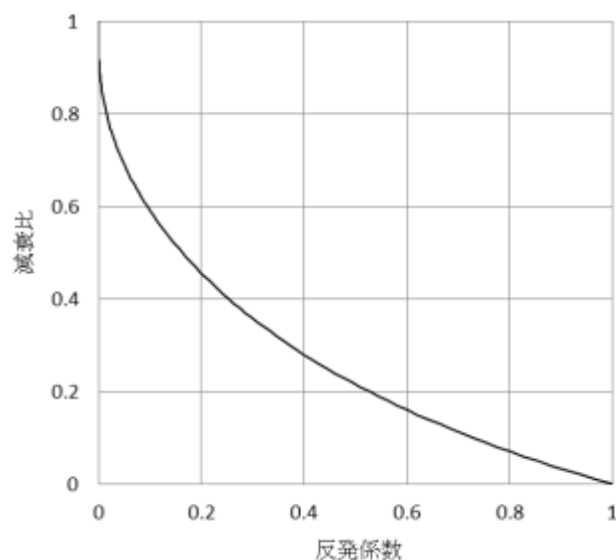
3. 車輪とレール間の衝突による減衰

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算定する。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

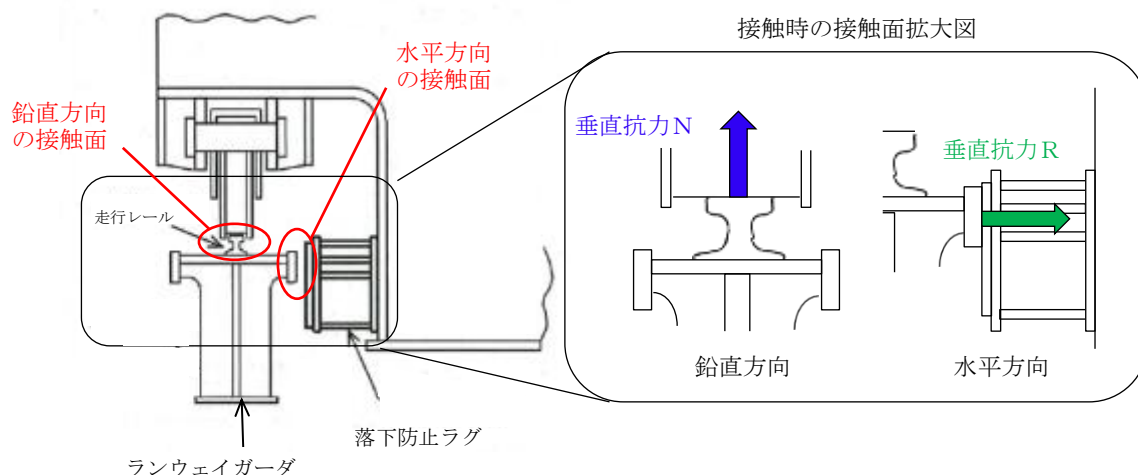
クレーンはレール上を車輪で移動する構造であるため、地震時にはレールに沿う方向にすべりが発生し、最大静止摩擦力以上の荷重を受けない構造である。

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 μ （ $=0.30$ ）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僅かな時間となる。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

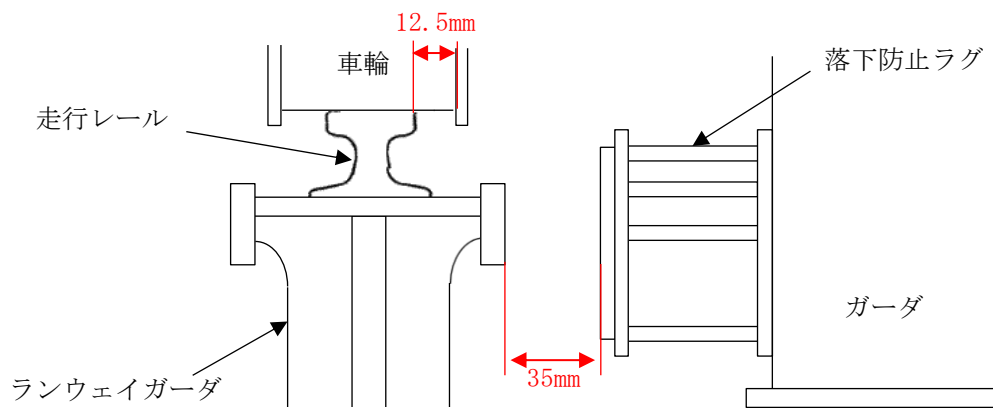
クレーンのモデル化に当たり、車輪がレール上にあり、レール直角方向に対し落下防止ラグあるいはトロリストッパの支持機能が維持されていることを前提としている。

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。

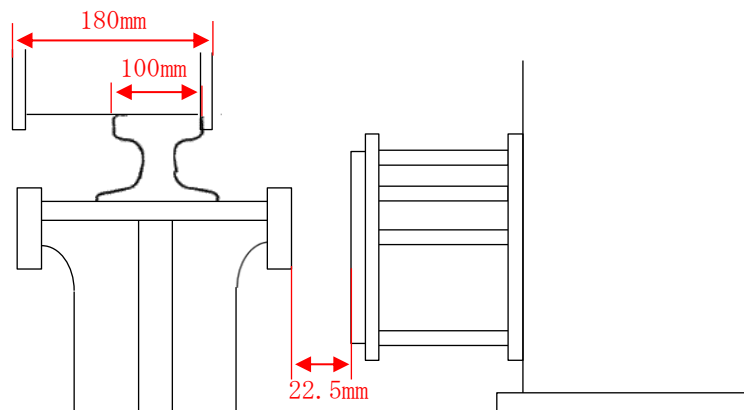
天井クレーン横行方向に地震力が作用するときは、車輪がレール上に乗り上がる挙動が想定されるが、落下防止ラグがランウェイガーダに接触することにより横行方向の移動量は制限される。落下防止ラグは構造強度部材として基準地震動 S_s により生じる地震力に対して耐震性が成立する設計としており、地震で破損することはないため、落下防止ラグとランウェイガーダ間のギャップに相当する移動量となった場合でも構造上車輪がレールから落下することはない（第 4-2 添図参照）。

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。

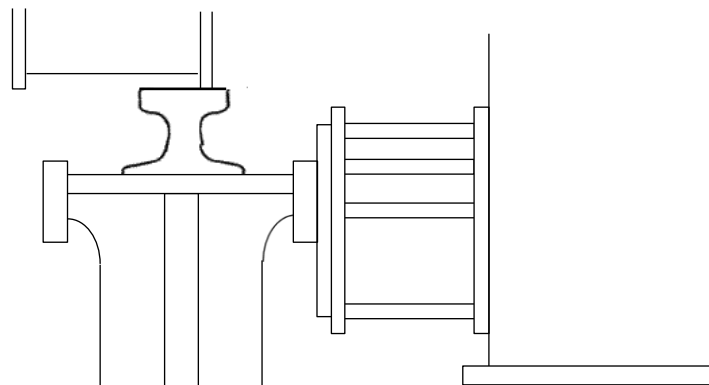
以上より、地震時に落下防止ラグがランウェイガーダに接触して機能する前に、車輪がすべり面であるレールから落下することやレールが大きく破損することがないことから、落下防止ラグが機能する前に地震応答解析モデルの前提を満足しなくなるおそれはないと考えられるが、地震時に落下防止ラグがランウェイガーダに接触して機能する前の車輪とレールの接触による影響については、詳細設計段階にて念のため確認を行う。



(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^{注1}

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。

機器・配管系への制震装置の適用について

目次

1. 概要
2. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置
 - 2.1 基本方針
 - 2.1.1 要求事項
 - 2.1.2 構造の概要
 - 2.1.3 設計方針
 - 2.1.4 適用規格
 - 2.2 耐震評価方法
 - 2.2.1 評価方針
 - 2.2.2 単軸粘性ダンパの配置検討
 - 2.2.3 性能試験及び解析モデル
 - 2.2.4 地震応答解析手法
 - 2.2.5 単軸粘性ダンパ評価
 - 2.2.6 機器評価
3. 三軸粘性ダンパの配管系への設置
 - 3.1 基本方針
 - 3.1.1 要求事項
 - 3.1.2 構造の概要
 - 3.1.3 設計方針
 - 3.1.4 適用規格
 - 3.2 耐震評価方法
 - 3.2.1 評価方針
 - 3.2.2 三軸粘性ダンパの配置検討
 - 3.2.3 性能試験及び解析モデル
 - 3.2.4 地震応答解析手法
 - 3.2.5 三軸粘性ダンパ評価
 - 3.2.6 配管系評価
4. まとめ

添 付 資 料

- (2-1-1) 制震装置の減衰性能に影響する検討項目の抽出
- (2-1-2) 既工認実績のある制震装置との差異の整理
- (2-1-3) Time History Broadening の概要
- (2-2-1) 取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置の選定
- (2-2-2) 単軸粘性ダンパの性能試験方法及び特性試験
- (2-3-1) 三軸粘性ダンパの低速移動時の拘束力
- (2-3-2) 配管系に設置する制震装置の選定
- (2-3-3) 三軸粘性ダンパに関する ASME Boiler and Pressure Vessel Code
の記載
- (2-3-4) 三軸粘性ダンパを設置した配管系の加振試験の概要
- (2-3-5) 三軸粘性ダンパの減衰性能及び解析モデルによる表現
- (2-3-6) 三軸粘性ダンパの特性試験
- (2-3-7) 三軸粘性ダンパの性能試験方法

1. 概要

島根2号炉において、波及的影響を防止するための対策を行う取水槽ガントリクレーン及びBクラスの配管系に、耐震性向上を目的として制震装置を設置する。大きな地震力が作用する機器・配管系に対して、耐震構造による補強では設計及び施工が困難となる場合、制震装置の設置により地震応答を低減することは有効な耐震補強の手法のひとつである。

制震装置の適用にあたっては、その減衰性能を適切にモデル化し、制震装置を組み込んだ機器・配管系の地震応答解析を実施する必要がある。本資料では、制震装置の構造、作動原理等を示した上で、制震装置の減衰性能を適切に考慮したモデル化及び地震応答解析手法について説明する。

なお、制震装置（単軸粘性ダンパ）の設置は、島根2号炉、島根3号炉及び柏崎6／7号炉等の排気筒で実績がある。

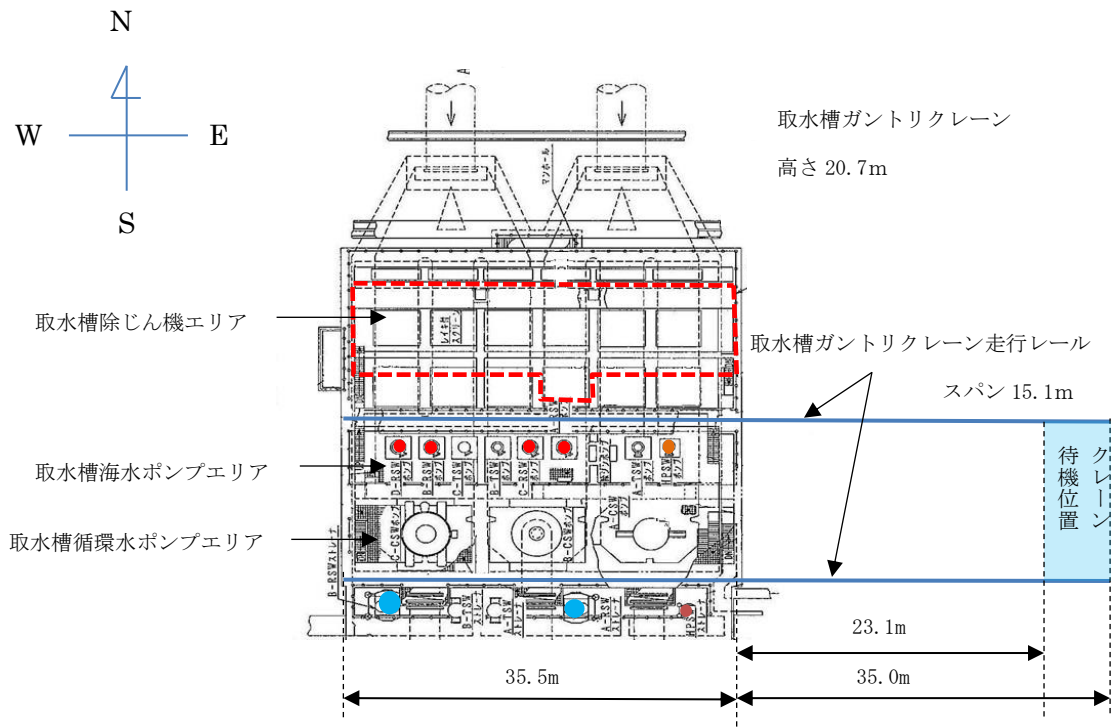
2. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置

2.1 基本方針

2.1.1 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及び取水槽周辺の上位クラス施設概要を第2-1図に示す。

発電所の運転中など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、基準地震動 S_s による地震力に対して取水槽ガントリクレーンが損傷、転倒及び落下することで、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。



- <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
 - 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ストレーナ
 - 高圧炉心スプレイ補機海水ポンプストレーナ
 - 取水槽除じん機エリア防水壁

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

2.1.2 構造の概要

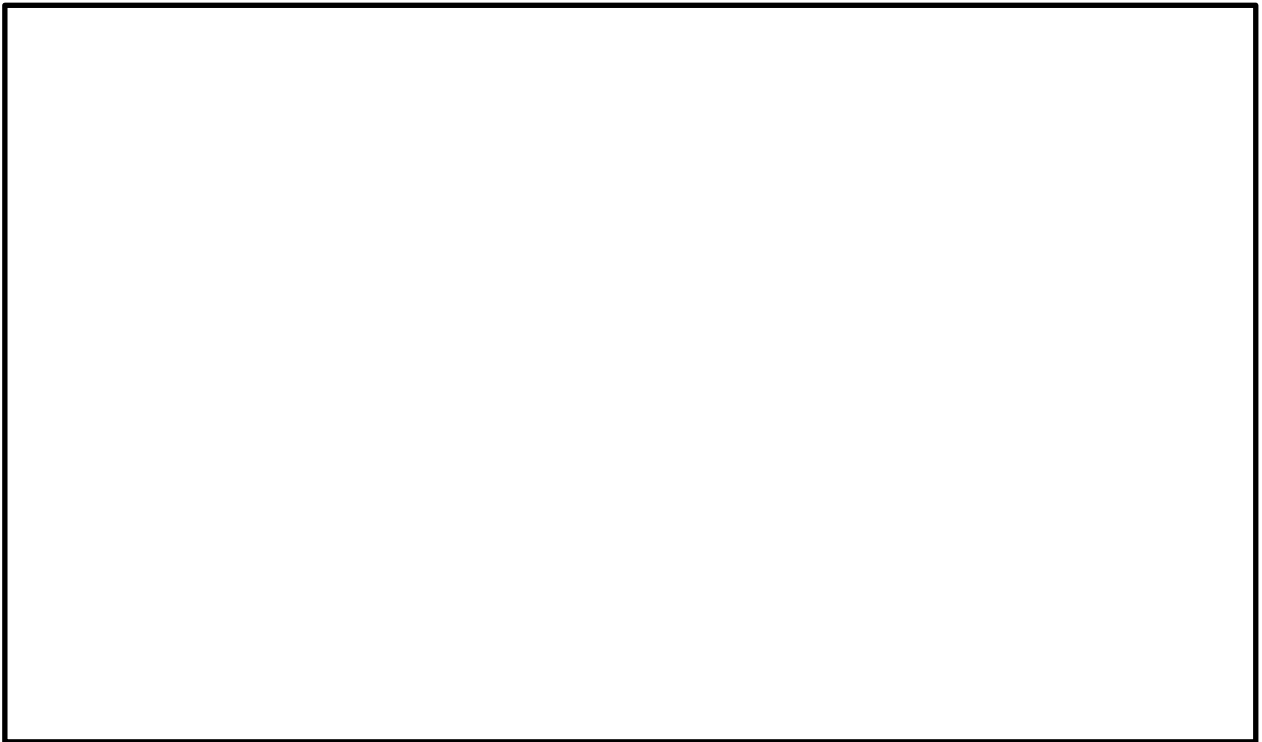
(1) 取水槽ガントリクレーンの構造概要

取水槽ガントリクレーンの構造を第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）、また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、横行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。制震装置選定の考

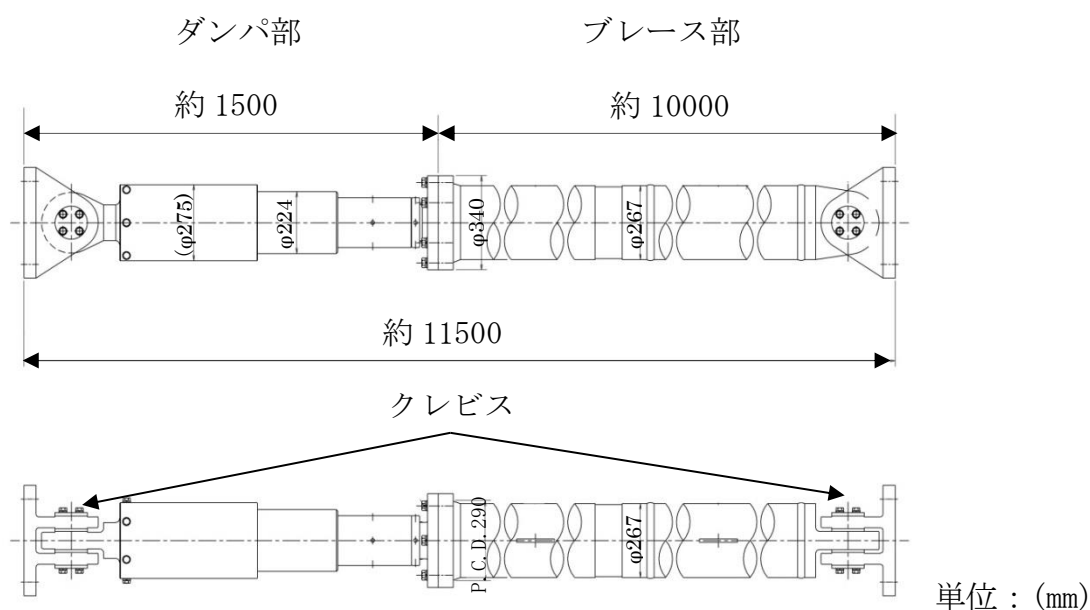
え方を添付資料(2-2-1)に示す。単軸粘性ダンパの設置は、島根2号炉、島根3号炉及び柏崎6/7号炉等の排気筒で実績がある。

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部、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。

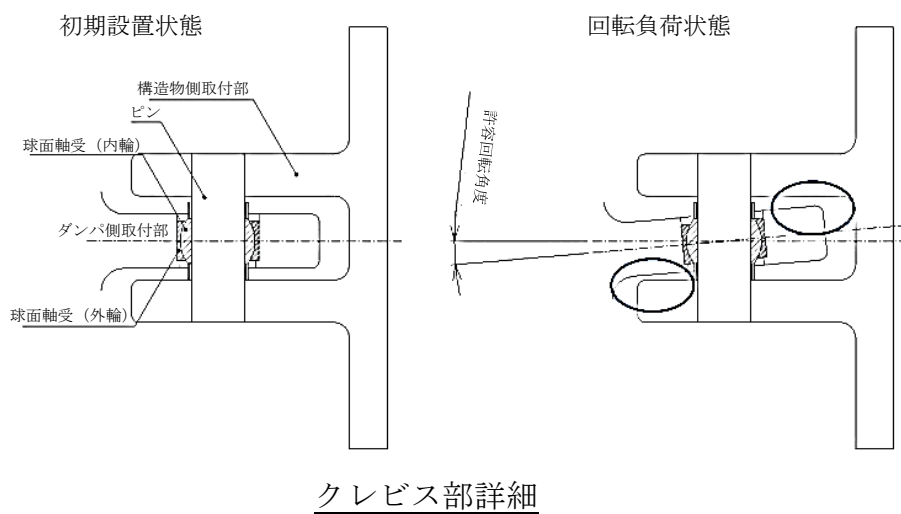


第2-2図 取水槽ガントリクレーンの構造

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) 単軸粘性ダンパの構造概要

取水槽ガントリークレーンに設置する単軸粘性ダンパの仕様を第 2-1 表に示す。また、単軸粘性ダンパの外観及び構造を第 2-4 図に示す。単軸粘性ダンパは主にシリンダ、ピストン、ロッド及び粘性体により構成されている。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。

単軸粘性ダンパの動作原理を第 2-5 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外面の間

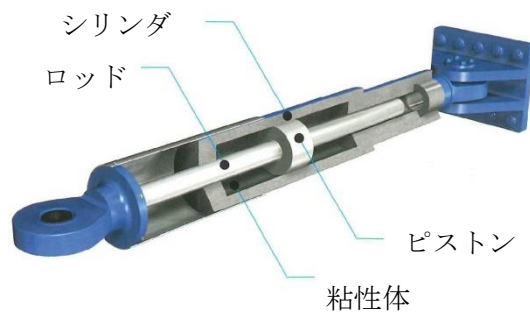
に形成されるオリフィス部を粘性体が流れ、その抵抗力により減衰性能を発揮するものであり、自重等の静的荷重は支持しない。

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

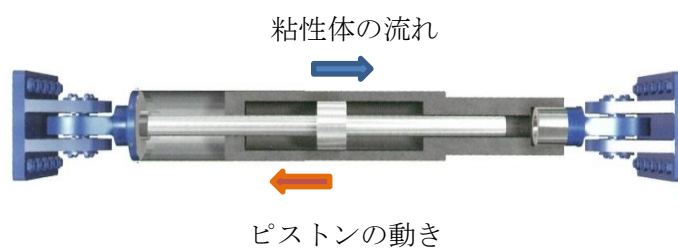
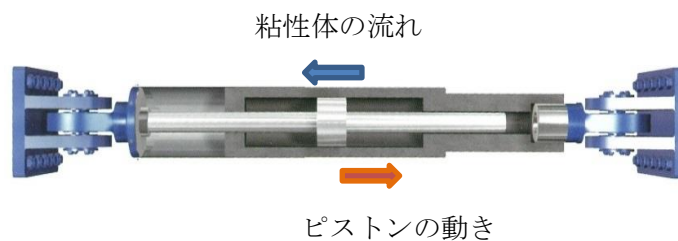
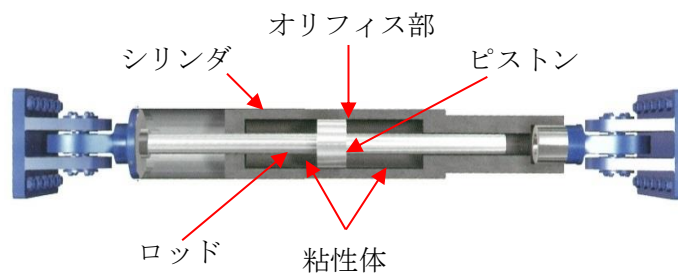


単軸粘性ダンパの外観（橋梁への設置例）



単軸粘性ダンパの構造

第2-4図 単軸粘性ダンパの外観及び構造

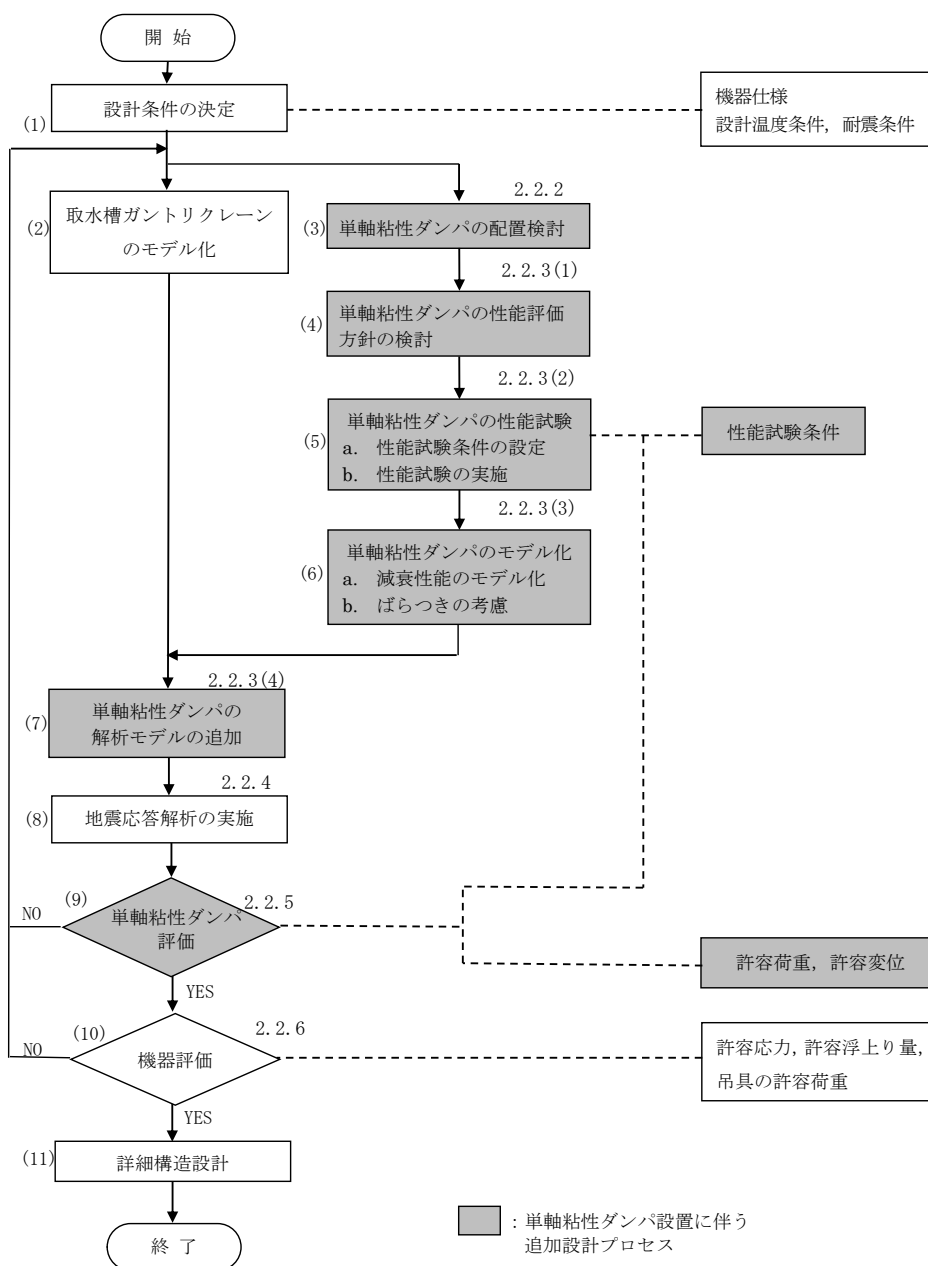


第2-5図 単軸粘性ダンパの動作原理

2.1.3 設計方針

単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの耐震設計フローを第2-6図に、設計プロセスを第2-2表に示す。また、単軸粘性ダンパ設置前の取水槽ガントリクレーンと単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデルを第2-7図に示す。単軸粘性ダンパ設置前の地震応答解析モデルに制震装置を適切にモデル化して追加するという考え方は、既工認実績のある排気筒のモデル化の考え方と同様である。

第2-6図の耐震設計フローは、基本的に一般的な機器の設計フローと同じであるが、第2-6図における単軸粘性ダンパを設置することに伴う追加の設計プロセスについて、2.2項にて詳細に説明する。

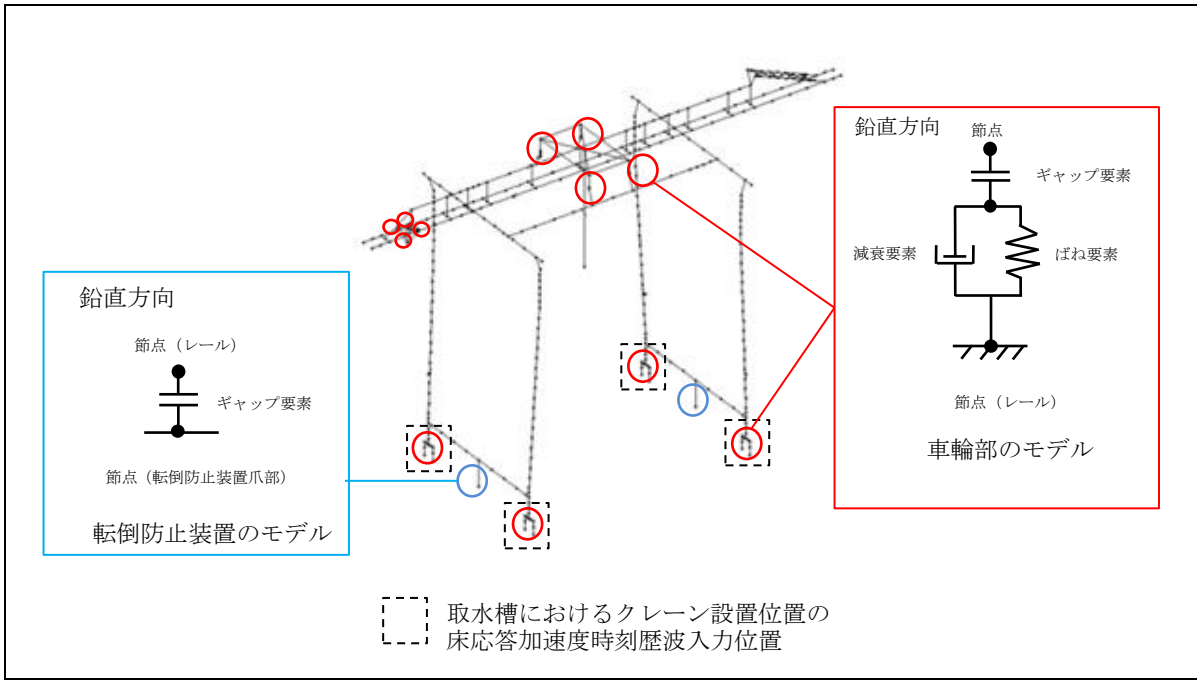


第2-6図 単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの耐震設計フロー

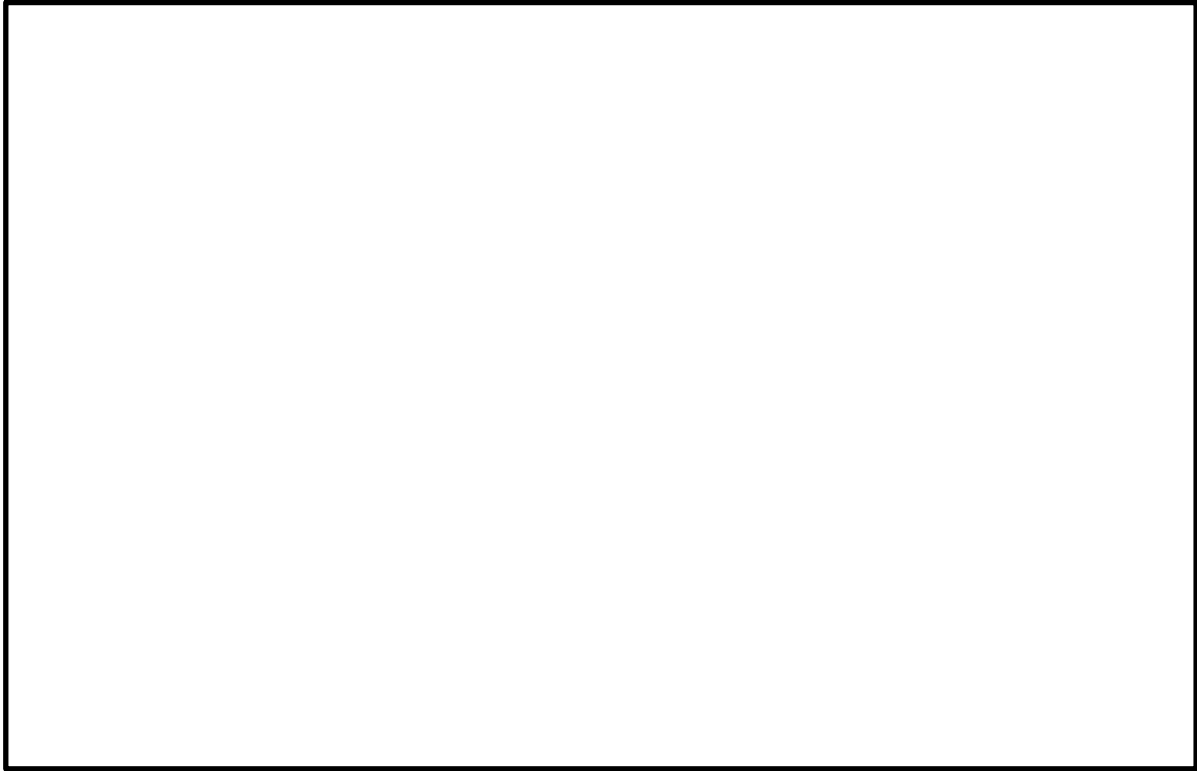
第2-2表 単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの設計プロセス

番号※1	実施事項	内容	追加設計プロセス
(1)	設計条件の決定	取水槽ガントリクレーンの仕様, 設計条件を決定する。	—
(2)	取水槽ガントリクレーンのモデル化	取水槽ガントリクレーン本体を構成する主要部材を質点及びはり要素でモデル化し, 車輪部のすべり及び浮上り等の非線形挙動をギャップ要素, ばね要素及び減衰要素でモデル化する。	—
(3)	単軸粘性ダンパの配置検討	単軸粘性ダンパの配置を検討する。	○
(4)	単軸粘性ダンパの性能評価方針の検討	単軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討を要する項目を抽出し, 性能試験及びモデル化における対応方針の検討を行う。	○
(5)	単軸粘性ダンパの性能試験	単軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえた性能試験条件を設定し, 性能試験を実施する。	○
(6)	単軸粘性ダンパのモデル化	性能試験結果から単軸粘性ダンパの減衰性能をMaxwellモデルによりモデル化する。また, 減衰性能のばらつきを考慮して, 地震応答解析モデルにおける減衰性能を設定する。	○
(7)	単軸粘性ダンパの解析モデルの追加	取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデルに単軸粘性ダンパをモデル化したMaxwellモデルを追加する。	○
(8)	地震応答解析の実施	地震応答解析を実施し, 応力, 変位等を求める。	—
(9)	単軸粘性ダンパ評価	地震応答解析により得られた応答値が性能試験条件の範囲内であること及び単軸粘性ダンパの許容限界が満たされていることを確認する。	○
(10)	機器評価	地震応答解析結果を基に, 発生応力, 浮上り量, 吊具荷重が許容値以内であることを確認する。	—
(11)	詳細構造設計	地震応答解析結果を基に, 各部の詳細構造設計を行う。	—

※1 : 番号は第2-6図の耐震設計フローの番号に対応している。



単軸粘性ダンパを設置前の取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル



単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル

第 2-7 図 取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル

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。

2.1.4 適用規格

取水槽ガントリクレーンの設計に用いる規格としては、原子力発電所の施設設計に用いる以下の規格（以下「J E A G 4 6 0 1 等」という。）を基本とする。

- ・「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)

2.2 耐震評価方法

2.2.1 評価方針

2.1.3にて整理した単軸粘性ダンパを設置することに伴う追加の設計プロセスについて、具体的な評価方針を以下に示す。

まず、取水槽ガントリクレーンの構造を考慮して、地震荷重の低減に効果的な単軸粘性ダンパの配置を検討する。次に、単軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討を要する項目を抽出し、性能試験及びモデル化における対応方針を検討する。単軸粘性ダンパのモデル化を行うために、実機使用条件を踏まえた性能試験条件により、実機に設置する単軸粘性ダンパを用いた性能試験を実施する。性能試験の結果に基づき減衰性能を設定し、単軸粘性ダンパを Maxwell モデルによりモデル化する。この Maxwell モデルを取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデルに追加し、地震応答解析を行う。単軸粘性ダンパの評価として、地震応答解析により得られた応答値が性能試験条件の範囲内であること及び単軸粘性ダンパの許容限界が満たされていることを確認する。

2.2.2 単軸粘性ダンパの配置検討

取水槽ガントリクレーンの構造を考慮して、地震荷重の低減に効果的な単軸粘性ダンパの配置を検討する。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で生じる抵抗力により減衰性能を発揮するため、大きな変位が生じる取水槽ガントリクレーンのガーダと脚の間に設置する。

2.2.3 性能試験及び解析モデル

(1) 単軸粘性ダンパの性能評価方針の検討

単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの評価においては単軸粘性ダンパの減衰性能を適切に取得して設定することが重要であるため、単軸粘性ダンパの性能試験及びモデル化にあたって、減衰性能への影響の検討を要

する項目を「免震構造の審査手引きの提案（平成 26 年 1 月） 独立行政法人原子力安全基盤機構」を参照して抽出した（添付資料(2-1-1)参照）。減衰性能への影響の検討結果を第 2-3 表に示す。減衰性能に影響する項目については、減衰性能を取得するための性能試験条件の設定において適切に考慮する、もしくは地震応答解析においてばらつきとして考慮する方針とする。

第 2-3 表 減衰性能への影響の検討結果（単軸粘性ダンパ）

No.	項目	減衰性能への影響	対応方針
1	連続加振	連続加振による減衰性能への影響は十分小さいことを試験により確認している（添付資料(2-2-2)参照）。	—
2	振動数	減衰性能は、加振振動数によって±10%以内の範囲で変動することを試験により確認した（添付資料(2-2-2)参照）。	左記の変動及びばらつき要因を合わせて、±20%の減衰性能のばらつきを考慮する。
3	製造公差	製造公差による減衰性能のばらつきは±10%以内で管理する。	

(2) 単軸粘性ダンパの性能試験

a. 性能試験条件の設定

単軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえ、性能試験条件を設定する。

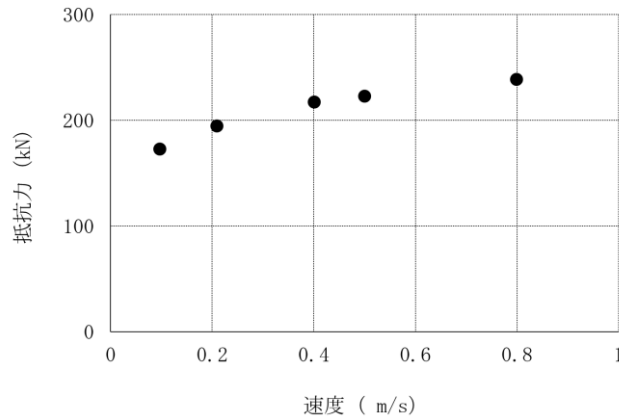
加振振動数による単軸粘性ダンパの減衰性能の変動は比較的小さいことを踏まえ、単軸粘性ダンパの許容変位 100mm の中で実機使用条件を含む幅広い試験速度（0.1～0.8m/s）を設定して性能試験を実施する。性能試験条件を第 2-4 表に示す。

b. 性能試験の実施

設定した性能試験条件により、単軸粘性ダンパの性能試験を実施する。性能試験の詳細について添付資料(2-2-2)に示す。地震応答解析に適用する単軸粘性ダンパの減衰性能は、実機に設置する単軸粘性ダンパについて性能試験を実施のうえ設定する。単軸粘性ダンパは抵抗力が速度の 0.1 乗に比例するように設計されており、非線形の挙動を示すことから、その減衰性能は抵抗力と速度の関係で把握する。性能試験結果により取得した減衰性能を第 2-8 図に示す。

第2-4表 単軸粘性ダンパの性能試験条件

No.	振動数 (Hz)	加振速度 (m/s)
1	1.6	0.1
2		0.2
3		0.4
4		0.5
5		0.8



第2-8図 性能試験結果

(3) 単軸粘性ダンパのモデル化

a. 減衰性能のモデル化

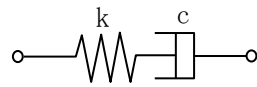
性能試験の結果に基づき、単軸粘性ダンパの減衰性能をモデル化する。

単軸粘性ダンパは、加振速度の変化に対して抵抗力の変化が小さく、振動数依存性も比較的小さいことから、速度の0.1乗に比例するダッシュポットを組み込んだMaxwellモデルを用いる。単軸粘性ダンパの減衰性能を模擬するMaxwellモデルを第2-9図に示す。加振振動数1.6Hzの場合のMaxwellモデルによる計算値と性能試験結果の比較を第2-10図に示す。この図から、速度と抵抗力の関係及び履歴曲線で囲まれる面積に相当する散逸エネルギーのいずれに関しても、Maxwellモデルにより減衰性能を精度よく表現できることが分かる。

b. ばらつきの考慮

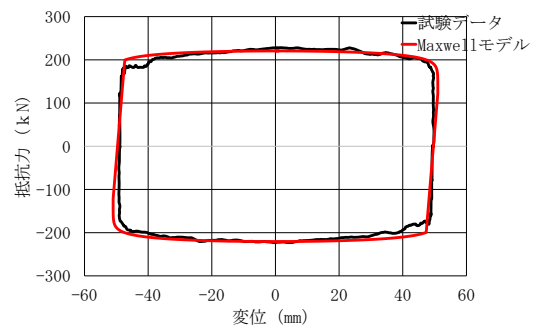
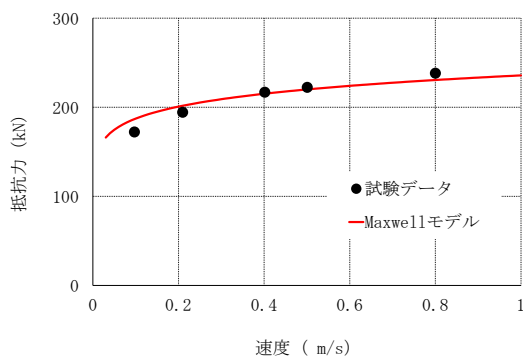
単軸粘性ダンパの減衰性能のばらつきを考慮して、地震応答解析に用いる解析モデルを設定する。性能試験結果に基づいてモデル化した単軸粘性ダンパの減衰性能に対して、第2-3表に基づき、振動数による±10%の変動と、製造公差による±10%のばらつきを合わせて±20%のばらつきを考慮する。単軸粘性ダンパの減衰性能は、ばらつきを考慮して標準性能+20%、標準性能、標準性能-20%の3段階設定する。標準性能+20%の減衰性能を設定す

る理由は、単軸粘性ダンパの取付部材の設計においては減衰性能が高く抵抗力が大きい場合の荷重を適用するためである。地震応答解析モデルにおける減衰性能の設定を第2-11図に示す。



k : ばね剛性
c : 速度の0.1乗に比例する
ダッシュポットの減衰係数

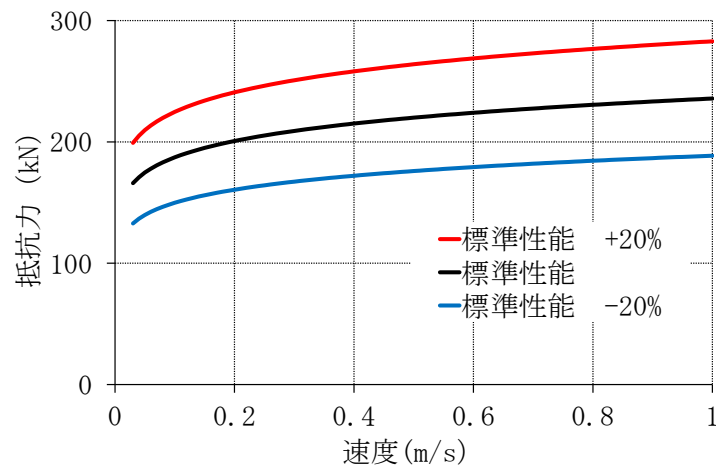
第2-9図 単軸粘性ダンパのMaxwellモデル



速度と抵抗力の関係

速度 0.5m/s における
正弦波 1 周期分の履歴曲線

第2-10図 Maxwellモデルによる計算値と性能試験結果の比較



第2-11図 地震応答解析モデルにおける段階的な減衰性能の設定

(4) 単軸粘性ダンパの解析モデルの追加

単軸粘性ダンパをモデル化した Maxwell モデルを取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデルに追加することにより、単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデルを作成する。

2.2.4 地震応答解析手法

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るため、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。標準性能+20%、標準性能、標準性能-20%の3段階の減衰性能に対応した地震応答解析を行い、これらの最大応答を用いて耐震評価を行う（第2-11図参照）。

取水槽ガントリクレーンの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」に示す原子炉建物天井クレーンの減衰定数2%を適用する。

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。取水槽ガントリクレーンの地震応答解析では、時刻歴応答解析を採用することから、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（添付資料(2-1-3)参照）。

2.2.5 単軸粘性ダンパ評価

単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの地震応答解析によって得られた応答値が、単軸粘性ダンパの減衰性能を取得した性能試験の試験条件の範囲内であることを確認する。

また、単軸粘性ダンパが許容限界を満足し、地震時にその機能を維持する設計とするため、単軸粘性ダンパは許容荷重及び許容変位を満たすように設計する。

2.2.6 機器評価

取水槽ガントリクレーンは、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ため、応力評価等における許容限界は第2-5表の通りとする。許容限界は、J E A G 4 6 0 1等に基づき設定することを基本とする。

第2-5表 機器評価における評価方法及び許容限界

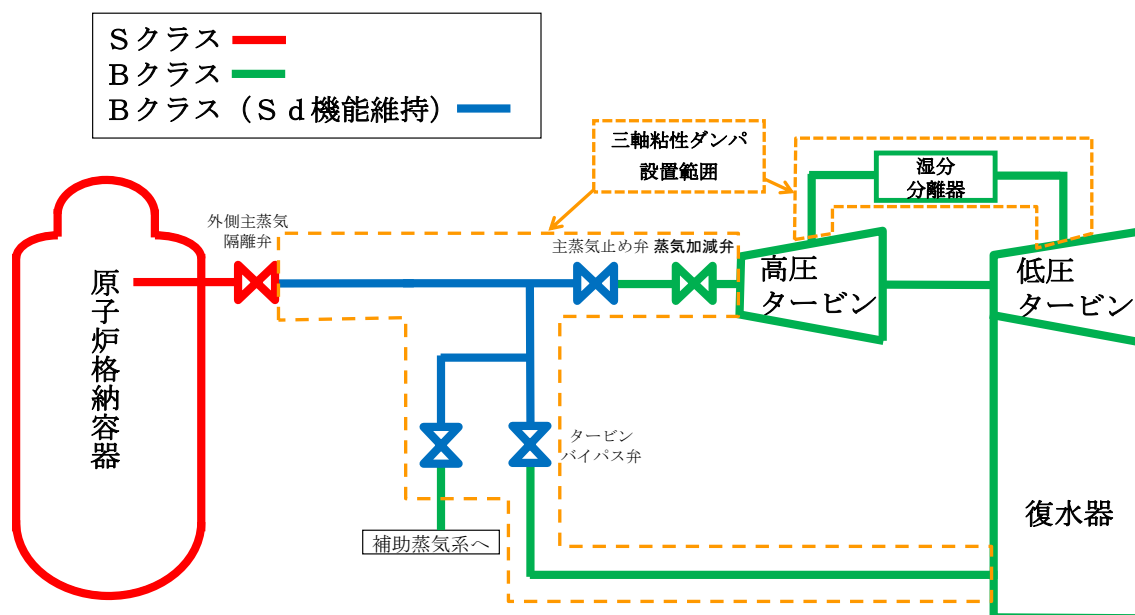
評価方針	設計地震力	部位	評価方法	許容限界
上位クラス施設へ波及的影響を及ぼさないこと	基準地震動 S_s による地震力	クレーン本体	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 $IV_A S$ の許容応力
		転倒防止装置	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 $IV_A S$ の許容応力
		レール	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 $IV_A S$ の許容応力
		トロリ	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 $IV_A S$ の許容応力
			浮上り量が許容限界を超えないことを確認する。	トロリストッパ高さに基づく許容浮上り量
		吊具	吊具部分の荷重が許容限界を超えないことを確認する。	吊具の許容荷重
		ブレース	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 $IV_A S$ の許容応力
		単軸粘性ダンパ	単軸粘性ダンパの荷重及び変位が許容限界を超えないことを確認する。	許容荷重及び許容変位

3. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

3.1 基本方針

3.1.1 要求事項

三軸粘性ダンパは外側主蒸気隔離弁から低圧タービン、復水器までの主蒸気系配管に設置する。三軸粘性ダンパの設置範囲を第3-1図に示す。当該配管の耐震重要度分類はBクラスである。また、外側主蒸気隔離弁から主蒸気止め弁までの範囲はS d機能維持設計とする。



第3-1図 三軸粘性ダンパの設置範囲及び耐震クラス

3.1.2 構造の概要

(1) 主蒸気系配管の構造概要

外側主蒸気隔離弁から低圧タービン、復水器までの主蒸気系配管は、大口径配管（主流路は600A～1600A程度）であり、また運転時には高温になるため、熱膨張による配管変位を考慮した設計が必要である。地震荷重が大きく、熱膨張の変位を拘束するサポートの設置が困難であることから、熱膨張の変位を拘束しない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。三軸粘性ダンパ設置範囲の主蒸気系配管について、代表箇所を第3-2図に示す。

配管系の応答は、複数の振動モードの重ね合わせであり、応答の方向も部位により異なるため、3方向に減衰性能を発揮し、熱膨張による低速度の運動を拘束しない（添付資料(2-3-1)参照）三軸粘性ダンパを主蒸気系配管に設置する。制震装置選定の考え方を添付資料(2-3-2)に示す。

なお、三軸粘性ダンパの合計質量（約50台想定）は、建物の配管系設置床の質点質量に対して0.1%以下であり、建物の地震応答解析結果への影響は軽微である。また、三軸粘性ダンパを設置する配管系については三軸粘性ダンパ設置に伴う質量増加を踏まえてモデル化を行う。



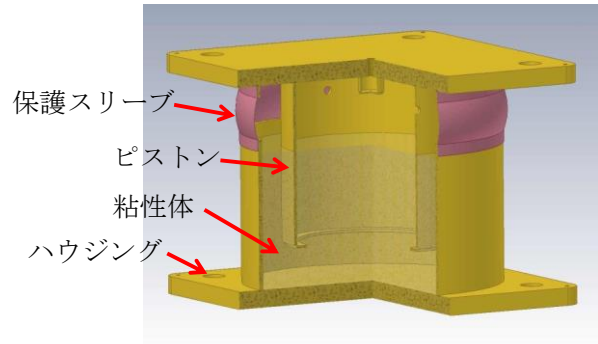
(a) 主蒸気ヘッダ周辺 (600A) (b) 高圧タービン下部 (1050A)
第 3-2 図 三軸粘性ダンパ設置範囲の主蒸気系配管 (代表箇所)

(2) 三軸粘性ダンパの構造概要

三軸粘性ダンパの外観及び構造を第 3-3 図に、仕様を第 3-1 表に、動作機構を第 3-4 図に示す。三軸粘性ダンパは、主にピストン、ハウジング及び粘性体から構成されており、粘性体への異物等の混入防止のために保護スリーブが取り付けられている。三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。三軸粘性ダンパは、粘性体に入ったハウジングにピストンが挿入された構造であり、粘性体とピストンの間に相対運動が生じることで、相対運動の方向と逆向きに流動抵抗による減衰性能を発揮する。水平方向については回転対称な構造であるため、方向による減衰性能の違いはないが、鉛直方向については動作機構が異なるため、水平方向とは減衰性能が異なる。三軸粘性ダンパは自重等の静的荷重は支持せず、熱膨張のような低速度の運動を拘束しない。

三軸粘性ダンパは、原子力発電所に用いることができる制震装置として ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION1-Subsection NF-Supports に記載されており (添付資料(2-3-3)参照)、海外の原子力発電所において振動対策及び地震対策として設置実績がある。海外の原子力発電所における三軸粘性ダンパの設置例を第 3-5 図に示す。

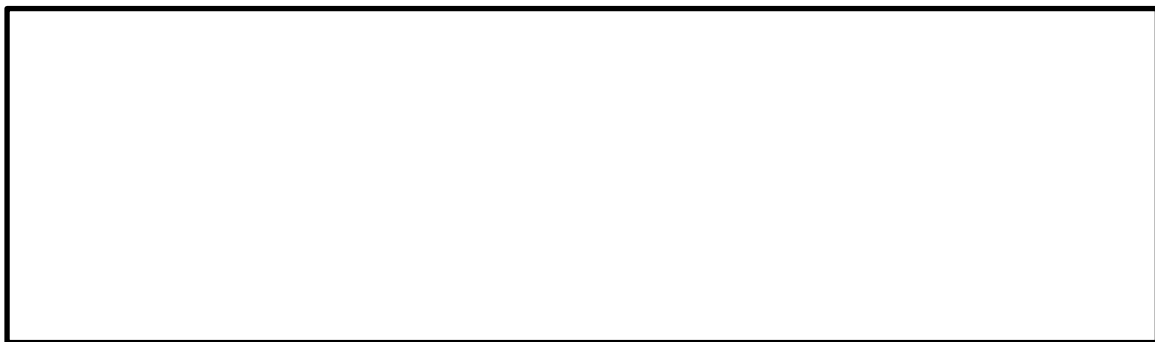
また、三軸粘性ダンパを配管系に設置した場合の有効性を確認するため、配管系を対象とした加振試験を実施し、地震応答の低減に有効であることを確認した。加振試験の詳細は添付資料(2-3-4)に示す。



第3-3図 三軸粘性ダンパの外観及び構造

第3-1表 三軸粘性ダンパの仕様

型式	外径 (mm)	高さ (mm)	質量 (kg)	許容荷重 (kN)		許容変位 (mm)	
				水平	鉛直	水平	鉛直
中型	325	343	111	68	27		
大型	630	586	691	350	140		



第3-4図 三軸粘性ダンパの動作機構

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。



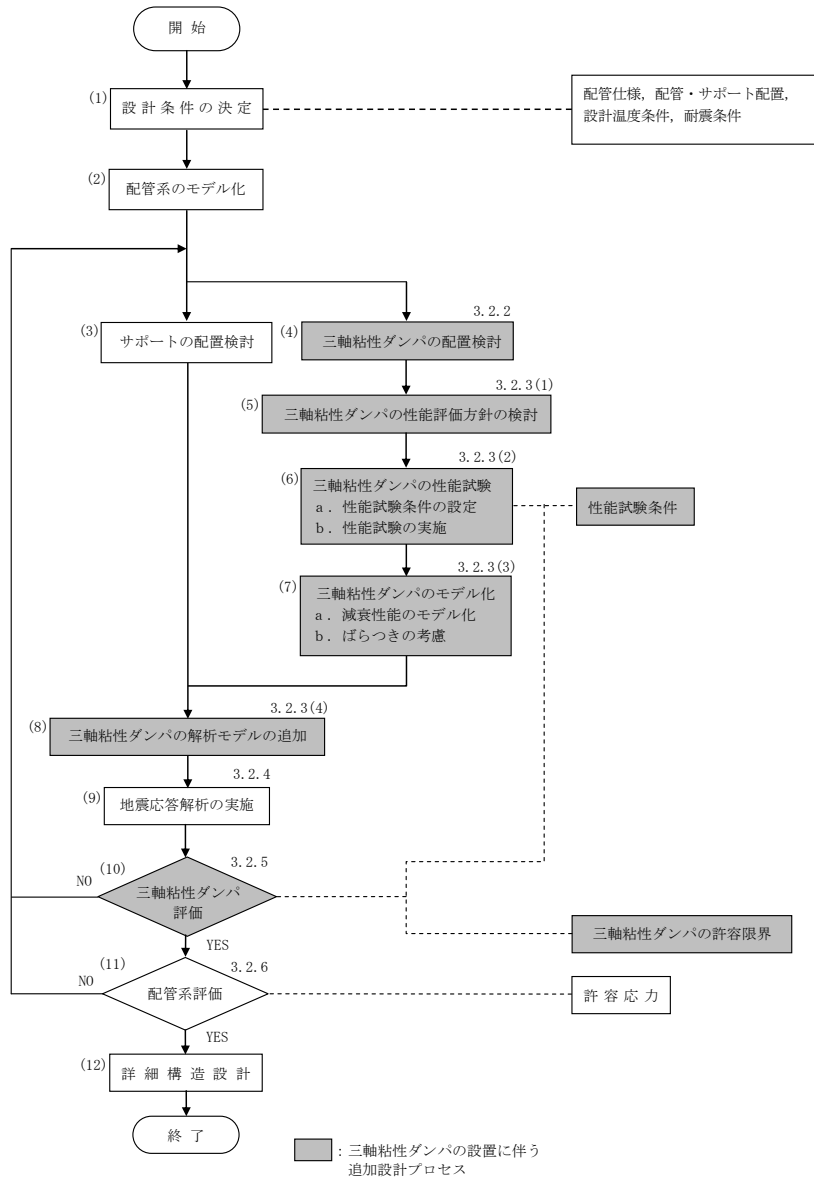
第 3-5 図 海外原子力発電所における三軸粘性ダンパの設置例

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。

3.1.3 設計方針

三軸粘性ダンパを設置した配管系の耐震設計フローを第3-6図に、設計プロセスを第3-2表に示す。また、三軸粘性ダンパ設置前の配管系と三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析モデルの一例を第3-7図に示す。三軸粘性ダンパ設置前の地震応答解析モデルに制震装置を適切にモデル化して追加するという考え方は、既工認実績のある排気筒のモデル化の考え方と同様である。また、4パラメータ Maxwell モデルによる三軸粘性ダンパのモデル化は、海外の原子力発電所において実績のあるモデル化手法である。

第3-6図の耐震設計フローは、基本的に一般的な配管系の設計フローと同じであるが、第3-6図における三軸粘性ダンパを設置することに伴う追加の設計プロセスについて、3.2項にて詳細に説明する。

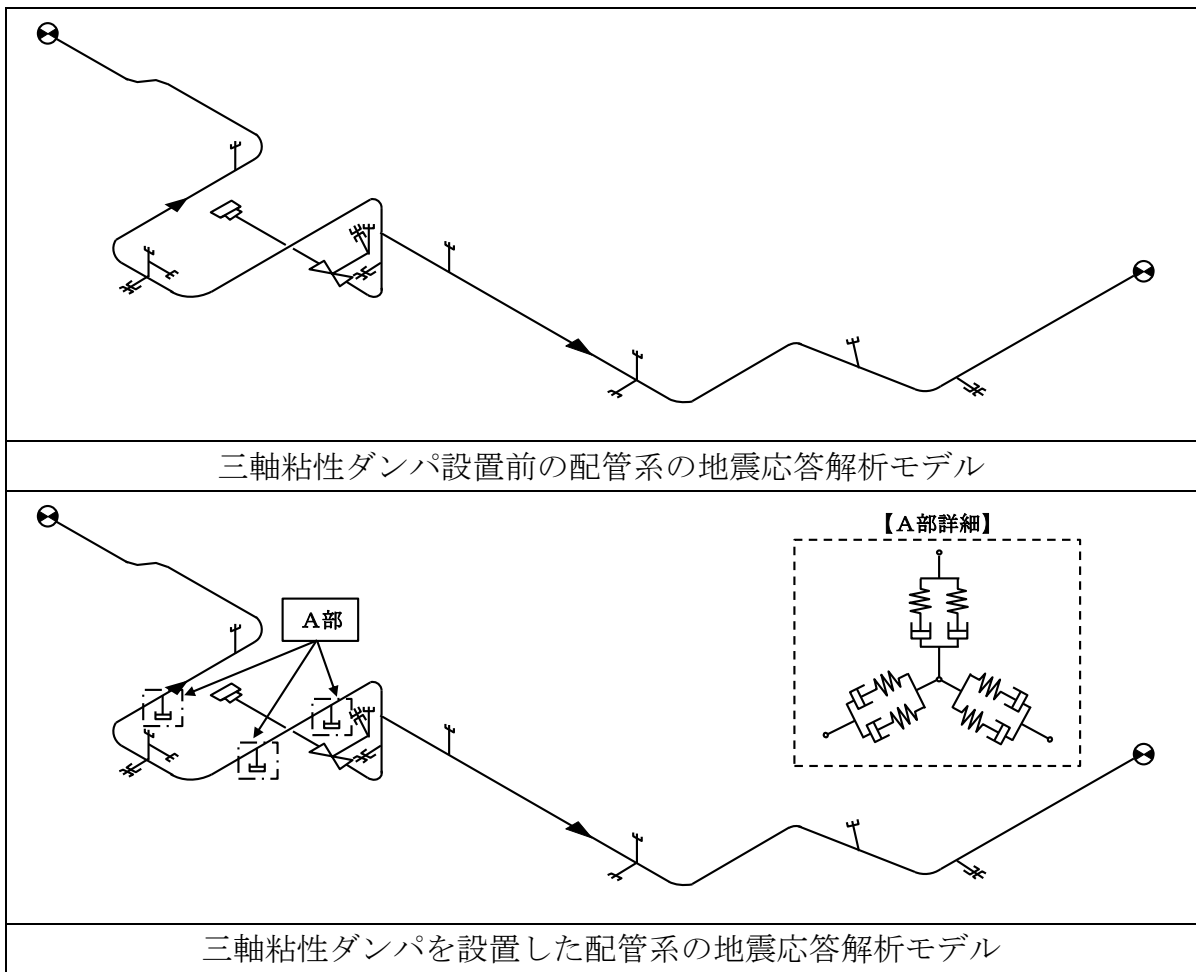


第3-6図 三軸粘性ダンパを設置した配管系の耐震設計フロー

第3-2表 三軸粘性ダンパを設置した配管系の設計プロセス

番号※ ¹	実施事項	内容	追加設計プロセス
(1)	設計条件の決定	配管系の仕様, 配置他設計条件を決定する。	—
(2)	配管系のモデル化	配管系を3次元はりモデルによりモデル化する。	—
(3)	サポートの配置検討	サポートの配置を検討する。	—
(4)	三軸粘性ダンパの配置検討	三軸粘性ダンパの配置を検討する。	○
(5)	三軸粘性ダンパの性能評価方法の検討	三軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討を要する項目を抽出し, 性能試験及びモデル化における対応方針の検討を行う。	○
(6)	三軸粘性ダンパの性能試験	三軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえた性能試験条件により, 性能試験を実施する。	○
(7)	三軸粘性ダンパのモデル化	性能試験結果から三軸粘性ダンパの減衰性能を4パラメータ Maxwell モデルによりモデル化する。また, 減衰性能のばらつきを考慮して, 地震応答解析モデルにおける減衰性能を設定する。	○
(8)	三軸粘性ダンパの解析モデルの追加	配管系の地震応答解析モデルに三軸粘性ダンパをモデル化した4パラメータ Maxwell モデルを追加する。	○
(9)	地震応答解析の実施	地震応答解析を実施し, 応力, 変位等を求める。	—
(10)	三軸粘性ダンパ評価	地震応答解析により得られた応答値が性能試験条件の範囲内であること及び三軸粘性ダンパの許容限界が満たされていることを確認する。	○
(11)	配管系評価	地震応答解析結果を基に, 配管系の発生応力が許容応力を満たしていることを確認する。	—
(12)	詳細構造設計	地震応答解析結果を基に, 各部の詳細構造設計を行う。	—

※1 : 番号は第3-6図の耐震設計フローの番号に対応している。



第 3-7 図 配管系の地震応答解析モデル

3.1.4 適用規格

配管系の設計に用いる規格としては、原子力発電所の施設設計に用いる J E A G 4 6 0 1 等を基本とする。

3.2 耐震評価方法

3.2.1 評価方針

3.1.3にて整理した三軸粘性ダンパを設置することに伴う追加の設計プロセスについて、三軸粘性ダンパを設置した配管系の評価方針を以下に示す。

まず、配管系の地震荷重の低減に効果的な三軸粘性ダンパの配置を検討する。次に、三軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討を要する項目を抽出し、性能試験及びモデル化における対応方針の検討を行う。三軸粘性ダンパのモデル化を行うために、実機使用条件を踏まえた性能試験条件により、三軸粘性ダンパを用いた性能試験を実施する。性能試験の結果に基づき減衰性能を設定し、三軸粘性ダンパを 4 パラメータ Maxwell モデルによりモデル化する。この 4 パラメータ Maxwell モデルを配管系の地震応答解析モデルに追加し、地震応答解析を行う。三軸粘性ダンパの評価として、地震応答解析により得られた応答値が

性能試験条件の範囲内であること及び三軸粘性ダンパの許容限界が満たされていることを確認する。

3.2.2 三軸粘性ダンパの配置検討

配管系の地震荷重の低減に効果的な三軸粘性ダンパの配置を検討する。三軸粘性ダンパは粘性体とピストンの間に相対運動が生じることで減衰性能を発揮するため、配管系の変位が大きくなる箇所に設置する。

3.2.3 性能試験及び解析モデル

(1) 三軸粘性ダンパの性能評価方針の検討

三軸粘性ダンパの粘性体は粘弾性を有するため、その減衰性能は等価剛性 K 及び等価減衰係数 C により表現する（添付資料(2-3-5)参照）。また、三軸粘性ダンパはその構造から水平方向加振に対する減衰性能は各方向で等しいが、水平方向加振と鉛直方向加振では減衰性能が異なるため、各方向で減衰性能を表現する。

三軸粘性ダンパを設置した配管系の評価においては三軸粘性ダンパの減衰性能を適切に取得して設定することが重要であるため、三軸粘性ダンパの性能試験及びモデル化にあたって、減衰性能への影響の検討を要する項目を「免震構造の審査手引きの提案（平成 26 年 1 月） 独立行政法人原子力安全基盤機構」を参照して抽出した（添付資料(2-1-1)参照）。抽出した項目と減衰性能への影響検討結果を第 3-3 表に示す。減衰性能に影響する項目については、減衰性能を取得するための性能試験条件の設定において適切に考慮する、もしくは地震応答解析においてばらつきとして考慮する方針とする。

第3-3表 減衰性能への影響の検討結果（三軸粘性ダンパ）

No.	項目	減衰性能への影響	対応方針
1	水平・鉛直同時加振	地震時に三軸粘性ダンパは3方向同時加振されることから、水平方向及び鉛直方向の同時加振と1方向加振との減衰性能に差異がないことを試験により確認している（添付資料(2-3-6)参照）。	—
2	放射線	放射線による減衰性能への影響が十分小さいことを試験により確認している（添付資料(2-3-6)参照）。	—
3	温度	粘性体は高温になるほど粘度が低下する性質があることから、粘性体の温度によって三軸粘性ダンパの減衰性能が変動することを試験により確認している（添付資料(2-3-6)参照）。	減衰性能を取得する性能試験条件の設定において考慮する。
4	振幅	減衰性能は加振振幅が大きいほど低下することを試験により確認している（添付資料(2-3-6)参照）。	
5	連続加振	減衰性能は連続加振により累積消費エネルギーが増大すると低下することを試験により確認している（添付資料(2-3-6)参照）。	
6	製造公差	製造公差による減衰性能のばらつきは±10%以内で管理する。	左記のばらつき要因を合わせて±30%の減衰性能のばらつきを考慮する。
7	据付公差	据付公差による減衰性能のばらつきは±20%以内で管理する。	

(2) 三軸粘性ダンパの性能試験

a. 性能試験条件の設定

三軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえ、性能試験条件を設定する。三軸粘性ダンパはその構造から水平方向加振に対する減衰性能は各方向で等しいが、水平方向加振と鉛直方向加振では減衰性能が異なるため、水平方向及び鉛直方向でそれぞれ性能試験を実施する。

減衰性能への影響検討結果（第3-3表参照）に基づき、三軸粘性ダンパの減衰性能については、変動及びばらつきを包絡するように減衰性能の上限と下限を設定する。第3-3表のうち温度、振幅及び連続加振による変動を踏まえた

第3-4表に示す性能試験条件により，高側ダンパ試験性能 (K_{High} , C_{High}) と，低側ダンパ試験性能 (K_{Low} , C_{Low}) を性能試験で取得する。具体的な性能試験条件の設定例について添付資料(2-3-7)に示す。なお，減衰性能の設定において上限及び下限を設定する理由は，減衰性能が低いほど配管系の応答は大きくなる傾向であるが，三軸粘性ダンパを支持する構造物の設計においては上限の減衰性能に基づく最大荷重を適用するためである。

b. 性能試験の実施

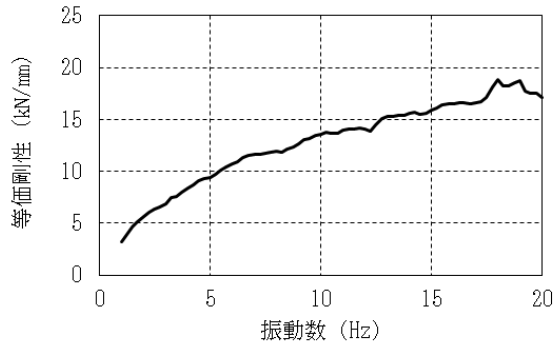
設定した性能試験条件により，三軸粘性ダンパの性能試験を実施する。性能試験の詳細について添付資料(2-3-7)に示す。地震応答解析に適用する三軸粘性ダンパの減衰性能は，実機に設置する各型式の三軸粘性ダンパについて性能試験を実施のうえ設定する。

第3-4表に示す性能試験条件に基づいて取得した三軸粘性ダンパの高側ダンパ試験性能 (K_{High} , C_{High}) と，低側ダンパ試験性能 (K_{Low} , C_{Low}) を第3-8図及び第3-9図に示す。

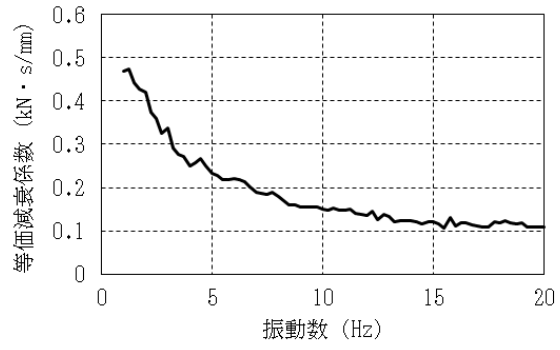
第3-4表 三軸粘性ダンパの性能試験条件の設定

取得性能	試験条件設定の考え方	性能試験条件		
		温度	加振振幅	累積消費エネルギー
高側ダンパ 試験性能 (K_{High} , C_{High})	実機使用条件より減衰性能を高く取得するため，室温，微小加振振幅，微小累積消費エネルギーとする。	常温	小	小
低側ダンパ 試験性能 (K_{Low} , C_{Low})	実機使用条件より減衰性能を低く取得するため，実機使用で想定される最高温度，最大加振振幅，最大累積消費エネルギーとする。	高温 ^{※1}	大 ^{※1}	大 ^{※1}

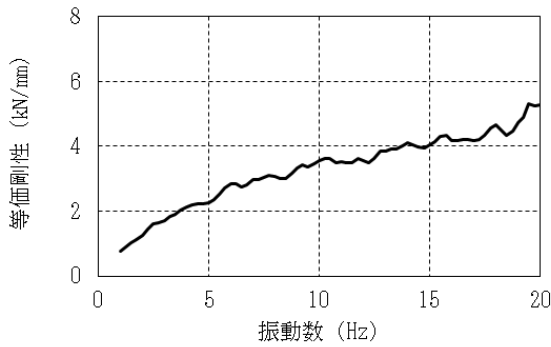
※1：実機使用条件を想定して設定する。



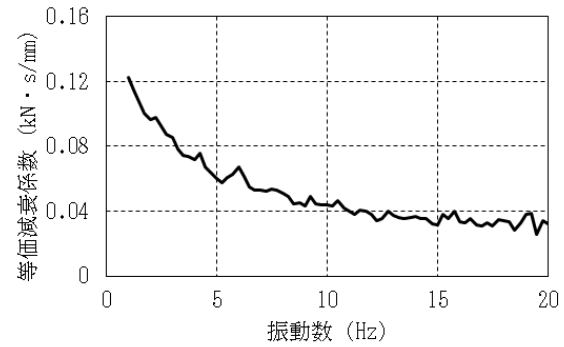
(H-1) 等価剛性 K_{High} (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 C_{High} (水平方向)

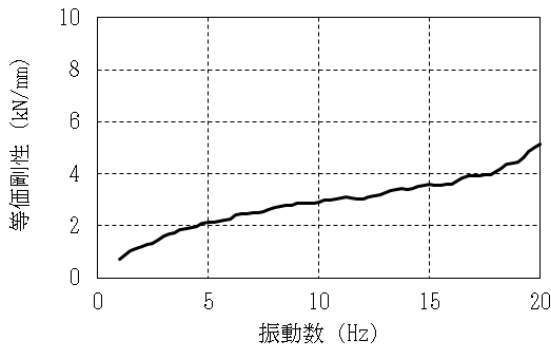


(V-1) 等価剛性 K_{High} (鉛直方向)

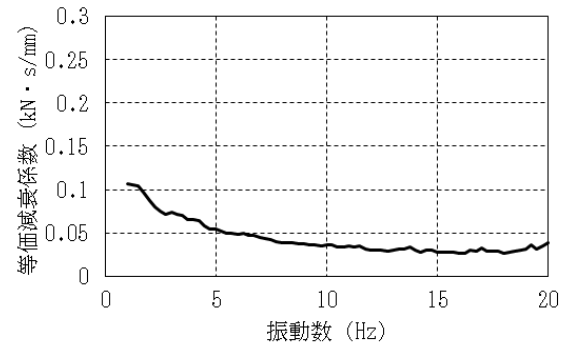


(V-2) 等価減衰係数 C_{High} (鉛直方向)

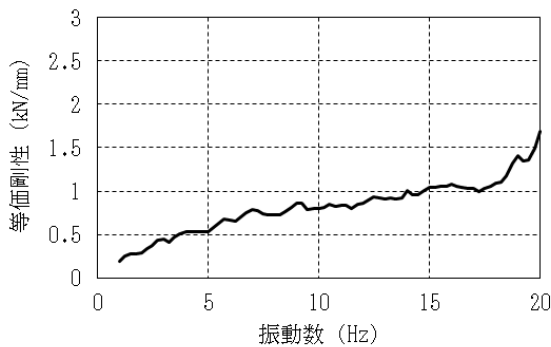
第 3-8 図 高側ダンパ試験性能 (中型の例)



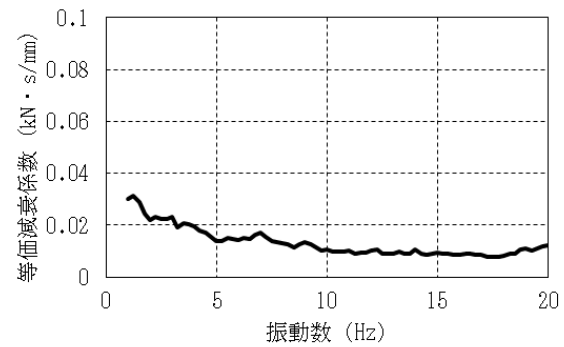
(H-1) 等価剛性 K_{Low} (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 C_{Low} (水平方向)



(V-1) 等価剛性 K_{Low} (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 C_{Low} (鉛直方向)

第 3-9 図 低側ダンパ試験性能 (中型の例)

(3) 三軸粘性ダンパのモデル化

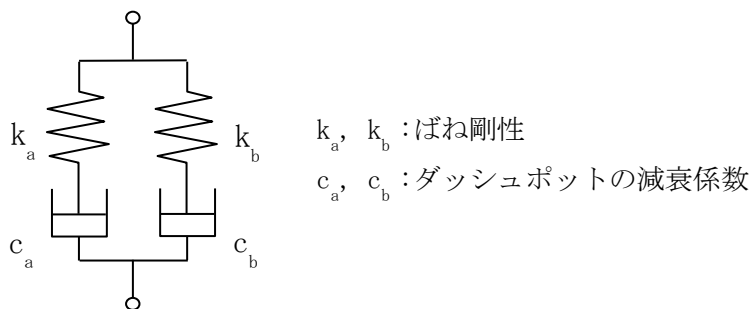
a. 減衰性能のモデル化

性能試験の結果に基づき、三軸粘性ダンパの減衰性能をモデル化する。三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C は振動数依存性を有しているが、4パラメータ Maxwell モデルにより、その振動数特性を精度良くモデル化できる。4パラメータ Maxwell モデルを第3-10図に、4パラメータ Maxwell モデルによる性能試験結果のモデル化を第3-11図及び第3-12図に示す。

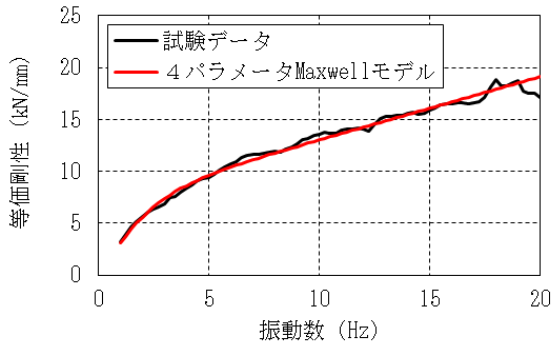
三軸粘性ダンパの減衰性能は、水平方向及び鉛直方向でそれぞれ高側ダンパ試験性能 ($K_{\text{High}}, C_{\text{High}}$) 及び低側ダンパ試験性能 ($K_{\text{Low}}, C_{\text{Low}}$) を性能試験により取得するため、4パラメータ Maxwell モデルは各方向に対して高側及び低側を設定する。

b. ばらつきの考慮

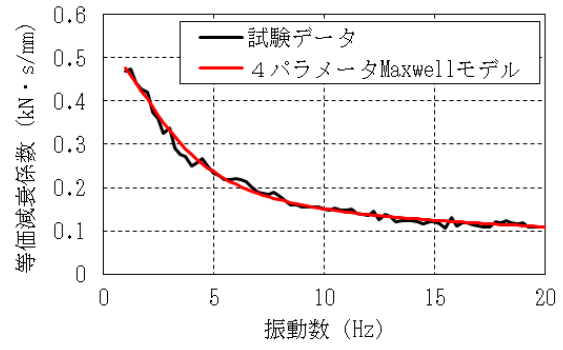
三軸粘性ダンパの減衰性能のばらつきを考慮して、地震応答解析に用いる解析モデルを設定する。性能試験結果に基づいてモデル化した三軸粘性ダンパの高側及び低側の減衰性能に対して、さらに第3-3表のうち製造公差による $\pm 10\%$ のばらつきと、据付公差による $\pm 20\%$ のばらつきを合わせて $\pm 30\%$ のばらつきとして考慮し、解析上の減衰性能の上限 ($K_1=1.3 \times K_{\text{High}}, C_1=1.3 \times C_{\text{High}}$) 及び下限 ($K_5=0.7 \times K_{\text{Low}}, C_5=0.7 \times C_{\text{Low}}$) を第3-13図のように設定する。また、保守的に変動及びばらつきを考慮することで上限と下限の減衰性能の差が大きくなるため、等間隔に補間した減衰性能も設定することとし、上限と下限を含めた5段階の減衰性能を設定する。地震応答解析モデルにおける減衰性能の設定を第3-14図に示す。



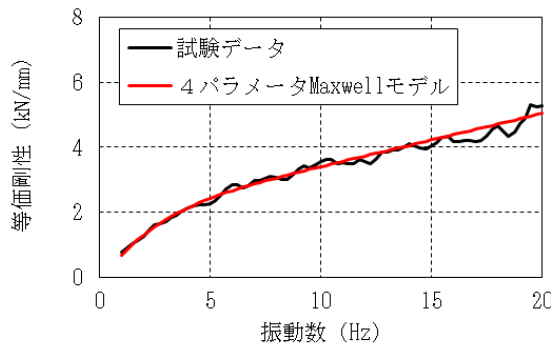
第3-10図 三軸粘性ダンパの4パラメータ Maxwell モデル



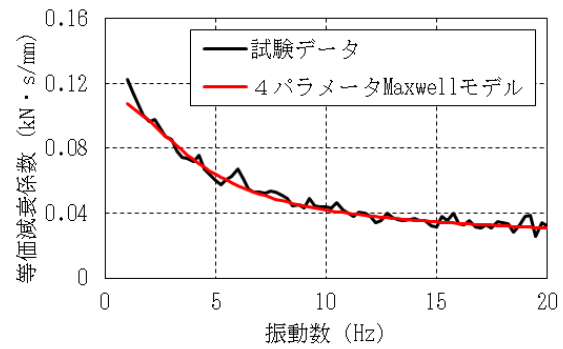
(H-1) 等価剛性 K_{High} (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 C_{High} (水平方向)

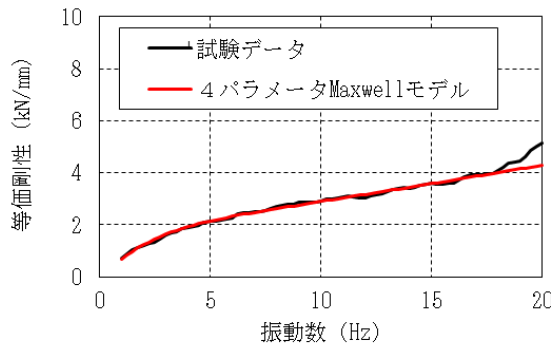


(V-1) 等価剛性 K_{High} (鉛直方向)

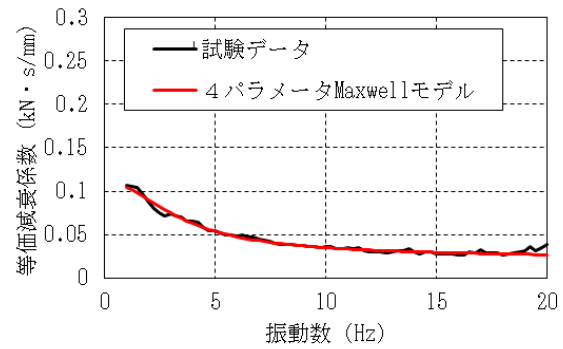


(V-2) 等価減衰係数 C_{High} (鉛直方向)

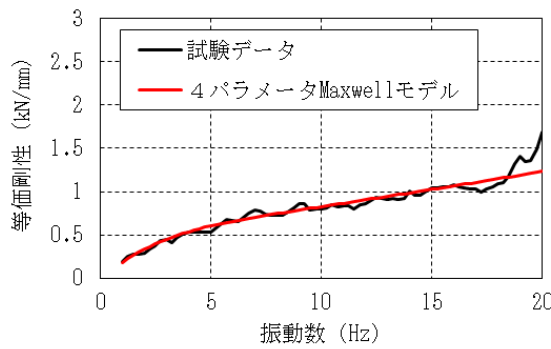
第 3-11 図 高側ダンパ試験性能のモデル化 (中型の例)



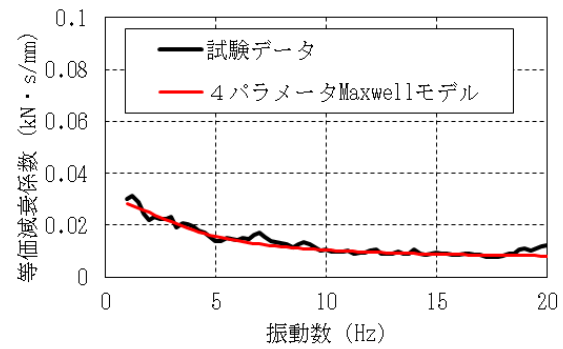
(H-1) 等価剛性 K_{Low} (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 C_{Low} (水平方向)

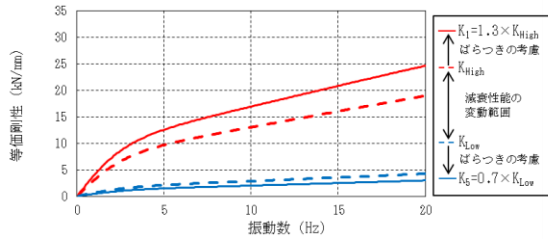


(V-1) 等価剛性 K_{Low} (鉛直方向)

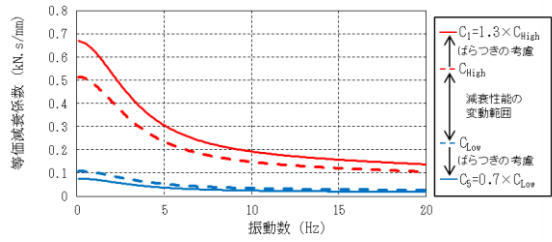


(V-2) 等価減衰係数 C_{Low} (鉛直方向)

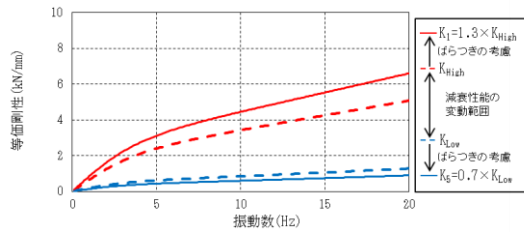
第 3-12 図 低側ダンパ試験性能のモデル化 (中型の例)



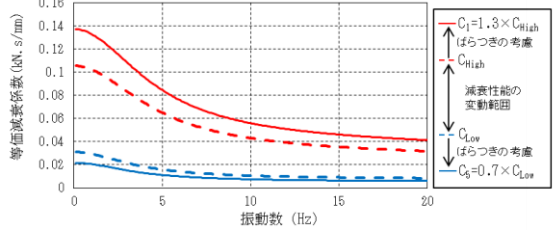
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)

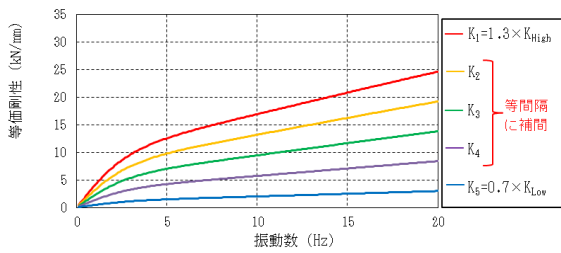


(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)

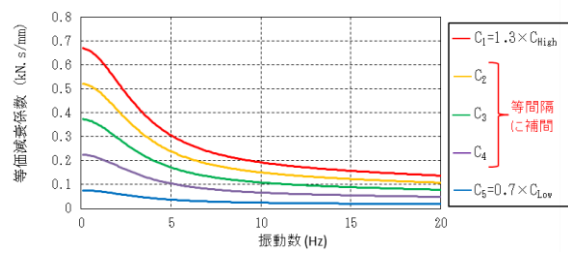


(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

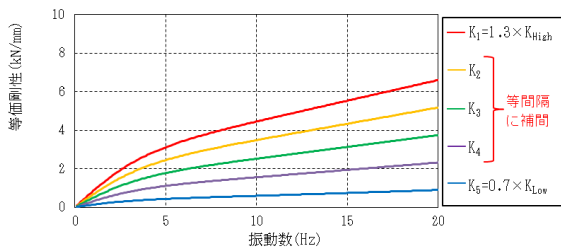
第 3-13 図 性能試験による減衰性能の上限と下限の設定 (中型の例)



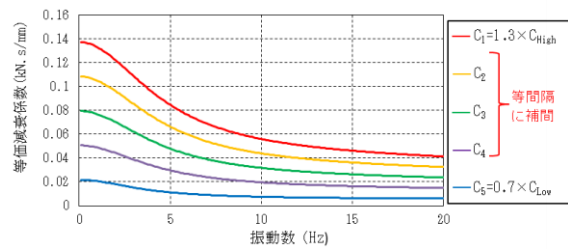
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第 3-14 図 地震応答解析モデルにおける段階的な減衰性能の設定 (中型の例)

(3) 三軸粘性ダンパの解析モデルの追加

三軸粘性ダンパをモデル化した4パラメータ Maxwell モデルを配管系の地震応答解析モデルに追加することにより、三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析モデルを作成する。

3.2.4 地震応答解析手法

三軸粘性ダンパを設置した配管系は減衰が大きくなるため、地震応答解析手法としてスペクトルモーダル解析は一般的ではないことから、時刻歴応答解析を適用する。三軸粘性ダンパの減衰性能の上限と下限を含めた5段階の減衰性能に対応した地震応答解析を行い、これらの最大応答を用いて耐震評価を行う。

配管系の減衰定数については、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」に示す配管系の減衰定数を適用する。

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。三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析では、時刻歴応答解析を採用することから、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, DIVISION 1—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(添付資料(2-1-3) 参照)。

3.2.5 三軸粘性ダンパ評価

三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析によって得られた応答値が、三軸粘性ダンパの減衰性能を取得した性能試験の試験条件の範囲内であることを確認する。

また、三軸粘性ダンパが許容限界を満足し、地震時にその機能を維持する設計とするため、三軸粘性ダンパは許容荷重及び許容変位を満たすように設計する。なお、許容変位の評価においては配管系の熱移動も考慮する。

3.2.6 配管系評価

三軸粘性ダンパを設置する外側主蒸気隔離弁から低圧タービン、復水器までの主蒸気系配管の耐震重要度分類はBクラスであり、外側主蒸気隔離弁から主蒸気止め弁までの範囲はS d 機能維持設計とするため、応力評価等における評価限界は第3-5表の通りとする。許容限界は、J E A G 4 6 0 1 等に基づき設定することを基本とする。

第3-5表 配管系評価における評価方法及び許容限界

範囲	地震力	部位	評価方法	許容限界
外側主蒸気隔離弁から主蒸気止め弁まで	静的地震力及び弾性設計用地震動S _d に2分の1を乗じたものによる地震力	配管	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 BASの許容 応力
		支持構造物	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 BASの許容 応力
		三軸粘性ダンパ	三軸粘性ダンパの荷重及び変位が許容限界を超えないことを確認する。	許容荷重及び 許容変位
	弾性設計用地震動S _d による地震力	配管	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 IVASの許容 応力
		支持構造物	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 IVASの許容 応力
		三軸粘性ダンパ	三軸粘性ダンパの荷重及び変位が許容限界を超えないことを確認する。	許容荷重及び 許容変位
上記以外の範囲	静的地震力及び弾性設計用地震動S _d に2分の1を乗じたものによる地震力	配管	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 BASの許容 応力
		支持構造物	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 BASの許容 応力
		三軸粘性ダンパ	三軸粘性ダンパの荷重及び変位が許容限界を超えないことを確認する。	許容荷重及び 許容変位

4. まとめ

単軸粘性ダンパ及び三軸粘性ダンパは、その減衰性能を Maxwell モデルにより精度良くモデル化できる。また、単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーン及び三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析では、減衰性能の変動及びばらつきを踏まえて段階的に設定した減衰性能に対応した地震応答解析を行い、これらの最大応答を用いて耐震評価を行う。従って、単軸粘性ダンパ及び三軸粘性ダンパのモデル化は妥当であり、減衰性能の変動及びばらつきを適切に考慮していることから、地震応答解析手法として妥当と考える。

また、既工認実績のある制震装置との差異に着目し、機器・配管系への適用性や減衰性能への影響の観点から検討を要する項目を整理した。その結果、追加の検討項目は抽出されず、必要な検討が行われていることを確認した。既工認実績との差異の確認結果について、詳細は添付資料(2-1-2)に示す。

【参考文献】

- (1) 免震構造の審査手引きの提案（平成 26 年 1 月） 独立行政法人原子力安全基盤機構
- (2) 三方向粘性ダンパを適用した機器・配管系の地震応答解析法に関する確性試験 報告書（平成 28 年 3 月） 一般財団法人 発電設備技術検査協会
- (3) I. Tamura, M. Kuramasu, “A STUDY ABOUT THE EFFECTIVENESS OF SEISMIC SAFETY IMPROVEMENT BY INSTALLING VISCOELASTIC DAMPERS AT PIPING SYSTEMS AND COMPONENTS,” Proceedings of ICAPP 2017, Fukui and Kyoto (Japan), April 24-28, 2017.
- (4) V. Kostarev, I. Tamura, M. Kuramasu, F. Barutzki, P. Vasiliev, Y. Enomoto, Y. Namita, S. Okita, Y. Sato, “Shaking Table Test of a Piping System with Viscoelastic Dampers Subjected to Severe Earthquake Motions,” ASME Pressure Vessels & Piping Conference, Vancouver, British Columbia, Canada, July 17-21, 2016, PVP2016-64004 (2016).
- (5) I. Tamura, M. Kuramasu, F. Barutzki, D. Fischer, V. Kostarev, A. Berkovsky, P. Vasiliev, T. Inoue, S. Okita, Y. Namita, “Dynamic Analysis of NPP Piping System and Components with Viscoelastic Dampers Subjected to Severe Earthquake Motions,” ASME Pressure Vessels & Piping Conference, Vancouver, British Columbia, Canada, July 17-21, 2016, PVP2016-64029 (2016).
- (6) 免震構造設計指針 日本建築学会
- (7) パッシブ制振構造 設計・施工マニュアル 第 2 版 社団法人 日本免震構造協会

添付資料(2-1-1) 制震装置の減衰性能に影響する検討項目の抽出

制震装置の減衰性能の設定において考慮すべき事項について「免震構造の審査手引きの提案(平成26年1月) 独立行政法人原子力安全基盤機構」を参照して第1-1-1添表に整理した。各項目について単軸粘性ダンパ及び三軸粘性ダンパの構造, 使用条件, 性能試験方法等を踏まえて, 減衰性能への影響の検討要否を第1-1-2添表に整理した。第1-1-2添表で検討要となった項目については, 制震装置のモデル化にあたって減衰性能への影響を検討する。

第1-1-1添表 免震構造の審査手引きの提案における検討項目(1/3)

項目	内容	記載箇所
①制震装置に応じた減衰性能の設定	制震装置に応じた減衰性能の設定方法について検討する。	【本文】5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(2)免震装置の構造に起因する応答特性の考慮 p.31 【解説】5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(2)免震装置の構造に起因する応答特性の考慮 p.38 【審査等のポイント】5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(2)免震装置の構造に起因する応答特性の考慮 p.42
②地震入力方向	地震入力方向による減衰性能の変化について検討する。	【本文】5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(1)地震入力方向による免震特性変化の考慮 p.31 【解説】5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(1)地震入力方向による免震特性変化の考慮 p.38 【審査等のポイント】5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(1)地震入力方向による免震特性変化の考慮 p.42
③使用環境	使用環境を踏まえて減衰性能を設定する。	【本文】5.4.6 p.30 【解説】5.4.6 p.33

第1-1-1 添表 免震構造の審査手引きの提案における検討項目 (2/3)

項目	内容	記載箇所
④温度	減衰性能の変化要因として温度による影響を検討する。	<p>【本文】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.31</p> <p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.36</p> <p>【審査等のポイント】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.41</p>
⑤速度	減衰性能の変化要因として速度による影響を検討する。	<p>【本文】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.31</p>
⑥振動数	減衰性能の変化要因として振動数による影響を検討する。	<p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.36</p>
⑦連続加振	作動中の減衰性能の変化について検討する。	<p>【審査等のポイント】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.41</p>
⑧経年劣化	経年劣化による減衰性能のばらつきについて検討する。	<p>【本文】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.31</p> <p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.35</p> <p>【審査等のポイント】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.41</p> <p>【参考資料-4】</p>

第1-1-1 添表 免震構造の審査手引きの提案における検討項目 (3/3)

項目	内容	記載箇所
⑨製造公差	製造公差による減衰性能のばらつきについて検討する。	<p>【本文】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.31</p> <p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.35</p> <p>【審査等のポイント】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.41</p>
⑩据付公差	据付公差による減衰性能のばらつきについて検討する。	<p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.35</p> <p>【審査等のポイント】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.41</p>
⑪制震装置の構造上の動作制限	制震装置の構造上、動作に影響を与える機構等があれば、その影響を検討する。	<p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震装置変位防止用ストッパー、台座、擁壁、塵埃防止カバー、結露に対する免震機能の変化の考慮 p.36</p>
⑫地震以外の外的事象	地震以外の外的事象による減衰性能への影響を検討する。	<p>【本文】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震以外の津波や風等外的事象に対する免震機能の変化の考慮 p.31</p> <p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震以外の津波や風等外的事象に対する免震機能の変化の考慮 p.36</p> <p>【審査等のポイント】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震以外の津波や風等外的事象に対する免震機能の変化の考慮 p.42</p>

第1-1-2 添表 減衰性能への影響の検討項目の抽出

項目 ^{※1}		三軸粘性ダンパ		三軸粘性ダンパ	
要否	理由	要否	理由	要否	理由
①制震装置に応じた減衰性能の設定	—	—	単軸粘性ダンパの性能試験結果を踏まえて減衰性能を適切にモデル化する。	—	三軸粘性ダンパの性能試験結果を踏まえて減衰性能を適切にモデル化する。
②地震入力方向	—	—	単軸粘性ダンパは、伸縮方向にのみ動作することから、この方向に加振して減衰性能を取得する。	○	三軸粘性ダンパは、水平方向は回転対称な構造であり方向による減衰性能の違いはないが、水平方向及び鉛直方向では動作機構が異なるためそれぞれ性能試験を実施して減衰性能を取得する。また、三軸に動作するものであることから、水平・鉛直同時加振による減衰性能への影響を確認する。
③使用環境	④温度	—	屋外で使用するため、使用環境温度の変化は小さい。また、減衰性能に対する温度の影響は小さいことを試験により確認済みである。(添付2-2-2参照)	○	屋内の使用環境温度による減衰性能への影響を確認する。
	放射線	—	屋外で使用するため放射線の影響を受けない。	○	放射線による減衰性能への影響を確認する。
⑥振動数	⑤経年劣化条件	—	化学的に安定な粘性体を使用しており、減衰性能の劣化は生じない。単軸粘性ダンパは10年以上の継続使用の実績がある。	—	化学的に安定な粘性体を使用しており、減衰性能の劣化は生じない。三軸粘性ダンパは10年以上の継続使用の実績がある。
	⑤速度	—	振動数による減衰性能への影響を確認する。	—	三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数依存性を有することから、この振動数特性を適切にモデル化する。
⑦連続加振	⑤速度	—	単軸粘性ダンパは非線形の挙動を示すことから、減衰性能は速度と抵抗力の関係として把握し、これを適切にモデル化する。	○	速度(振幅) ^{※2} による減衰性能への影響を確認する。
	⑦連続加振	○	連続加振による減衰性能への影響を確認する。	○	連続加振による減衰性能への影響を確認する。
ばらつき	⑨製造公差	○	製造公差による減衰性能のばらつきが生じる。	○	製造公差による減衰性能のばらつきが生じる。
	⑩据付公差	—	単軸粘性ダンパはオリフィス部を粘性体が移動する際の流動抵抗により減衰性能を発揮するものであるため、ピストン位置による減衰性能の変化は小さい。また、据付時にシムによりピストン位置を調整するため、据付公差は小さい。	○	据付公差による減衰性能のばらつきが生じる。
⑩制震装置の構造上の動作制限	—	—	変位防止用ストッパー、台座、擁壁、塵埃防止カバー等の制震装置の動作を制限するものは設置しておらず、塵埃防止カバーにあたる保護スリーブは柔軟性を有しておりピストンの動作に影響するものではないため、減衰性能に影響はない。また、屋内で使用し、使用環境において結露は生じない。	—	変位防止用ストッパー、台座、擁壁等の制震装置の動作を制限するものは設置しておらず、塵埃防止カバーにあたる保護スリーブは柔軟性を有しておりピストンの動作に影響するものではないため、減衰性能に影響はない。また、屋内で使用し、使用環境において結露は生じない。
⑩地震以外の外的事象	—	—	津波対策の実施により津波の敷地内への流入は防止しており、津波による減衰性能への影響を考慮する必要はない。なお、シリンダは密閉構造であるため、雨水の影響はない。また、単軸粘性ダンパは円筒形状であり、風及び積雪により受ける荷重は小さく、動作への影響はない。	—	屋内で使用するため、津波、風、積雪等の外的事象による減衰性能への影響はない。

※1：第1-1-2添表内の各項目番号は、第1-1-1添表内の各項目番号に対応している。

※2：三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数に応じて表現しており、ある振動数において加振速度を変更することは加振振幅を変更することと等しいため、加振振幅を変更することにより減衰性能の速度依存性を把握する。

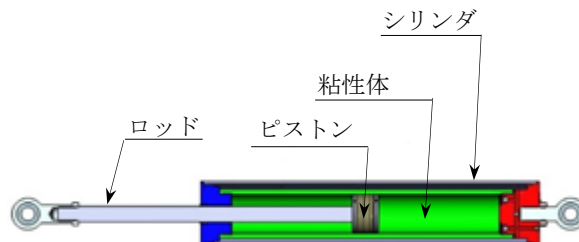
添付資料(2-1-2) 既工認実績のある制震装置との差異の整理

1. はじめに

取水槽ガントリクレーンに設置する単軸粘性ダンパ及び配管系に設置する三軸粘性ダンパと既工認実績である島根2号炉排気筒に設置した制震装置(単軸粘性ダンパ)との差異に着目し、機器・配管系への適用性や減衰性能への影響の観点から検討を要する項目を整理する。

2. 島根2号炉の排気筒で実績のある制震装置について

島根2号炉の排気筒で適用実績のある単軸粘性ダンパについて、概要を以下に示す。この単軸粘性ダンパは、粘性体が充填されたシリンダとピストンにより構成され、シリンダとピストンの間に相対運動が生じることで、相対運動の方向と逆向きに生じる抵抗力を用いるものである。単軸粘性ダンパは自重等の静的荷重は支持せず、熱膨張のような低速度の運動を拘束しない。単軸粘性ダンパの外観及び構造を第1-2-1添図に示す。また、単軸粘性ダンパの仕様を第1-2-1添表に示す。



第1-2-1添図 島根2号炉の排気筒に設置した単軸粘性ダンパの外観及び構造

第1-2-1添表 単軸粘性ダンパの仕様

全長 (mm)	外径 (mm)	質量 (kg)	許容荷重 (kN)	許容変位 (mm)
1350	165	86	144	300

3. 今回適用する制震装置と既工認実績のある制震装置の差異

取水槽ガントリクレーンに設置する単軸粘性ダンパ及び配管系に設置する三軸粘性ダンパと島根2号炉排気筒の単軸粘性ダンパを比較し、機器・配管系への適用性や減衰性能への影響の観点から検討を要する項目を整理した。結果を第1-2-2添表及び第1-2-3添表に示す。その結果、追加の検討項目は抽出されず、必要な検討が行われていることを確認した。

第1-2-2 添表 適用実績のある制震装置との差異の整理（単軸粘性ダンパ）

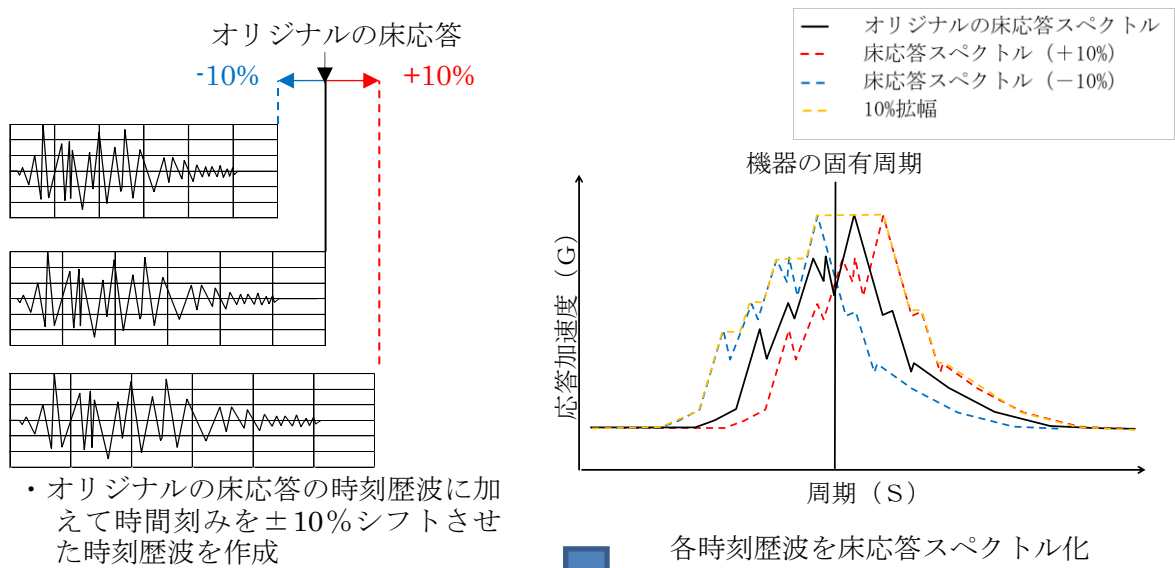
		単軸粘性 ダンパ 【島根2号 炉排気筒】	単軸粘性 ダンパ 【取水槽ガ ントリクレ ーン】	差異	検討内容
適用対象		排気筒	取水槽ガ ントリクレ ーン	○	適用対象のモデル化の方 法を検討 (添付資料-2 2.1.3 参照)
環境条件		屋外	屋外	—	—
制震 装置		単軸線形 タイプ	単軸非線形 タイプ	○	制震装置のモデル化の方 法を検討 (添付資料-2 2.2.3 参照)
解 析	制震 装置 モデル	Maxwell モデル	Maxwell モデル	—	—
	解析 手法	時刻歴 応答解析	時刻歴 応答解析	—	—

第1-2-3 添表 適用実績のある制震装置との差異の整理（三軸粘性ダンパ）

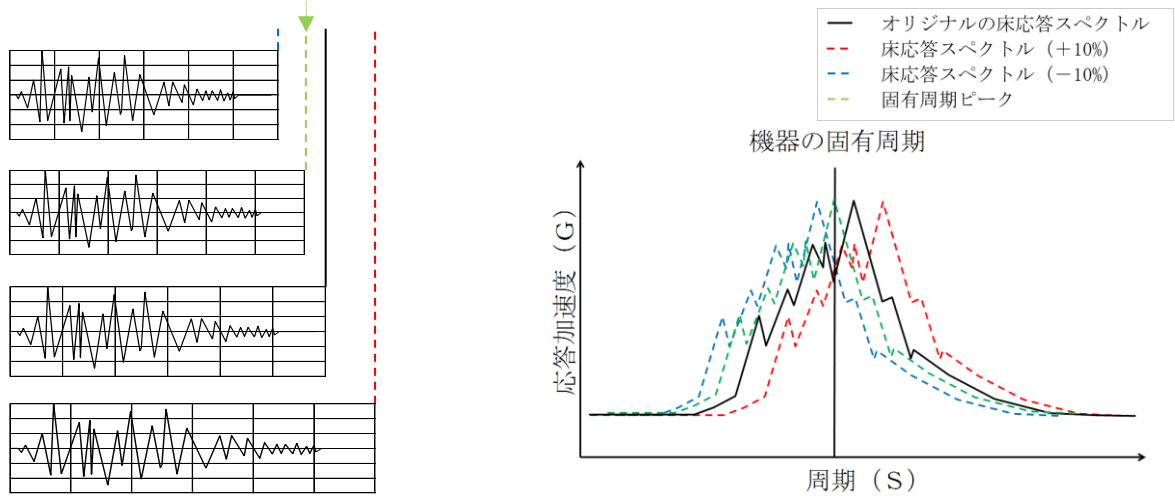
		単軸粘性 ダンパ 【島根2号 炉排気筒】	三軸粘性 ダンパ 【配管系】	差異	検討内容
適用対象		排気筒	配管系	○	適用対象のモデル化の方法を検討 (添付資料-2 3.1.3 参照)
環境条件		屋外	屋内	○	屋内の環境条件による制震装置の減衰性能への影響を検討 (添付資料-2 3.2.1 参照)
制震装置		単軸線形 タイプ	三軸非線形 タイプ	○	制震装置のモデル化の方法を検討 (添付資料-2 3.2.3 参照)
解析	制震装置 モデル	Maxwell モデル	Maxwell モデル (4パラメータ)	—	—
	解析 手法	時刻歴 応答解析	時刻歴 応答解析	—	—

添付資料(2-1-3) Time History Broadening の概要

ASME B&PV Code Sec. III Appendix-N 2017 より引用



固有周期と合致するよう調整した時刻歴波



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(2-2-1) 取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置の選定

取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置として単軸粘性ダンパを選定した理由について第2-1-1添表に整理した。

第2-1-1添表 取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置の検討

分類	ダンパの種類	原理	作動方向	支持荷重	抵抗力の特性	原子力施設における適用実績	適用性	理由		
履歴型	弾塑性ダンパ	材料の弾塑性挙動を利用してエネルギーを吸収するダンパ	1方向 または 2方向	熱膨張 地震 荷重	抵抗力は、材料の初期剛性、二次剛性で決まる。		△	塑性変形で地震エネルギーを吸収しており、繰返しにより抵抗力が変化する。また、ダンパの剛性が高いため、クレーンの剛性が高くなる。		
	摩擦ダンパ	摩擦抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は、摩擦材の締め付け力等で決定し、履歴曲線は矩形に近い。				○	粘性ダンパと特性は類似しているが、加振繰返し回数が多くなると、性能が変化する場合がある。
	鉛ダンパ	鉛の塑性流動抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は鉛の期剛性、二次剛性で決まる。				△	塑性変形で地震エネルギーを吸収しており、繰返しにより抵抗力が変化する。
単軸 粘性型	粘性ダンパ (非線形)	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ	1方向	地震 荷重	抵抗力は速度のべき乗(0.1~1)に比例し、0.1乗の場合、履歴曲線は矩形に近い。	なし	◎	微小変位から最大変位まで、抵抗力の変化が小さく、エネルギー吸収が大きいため、クレーンの剛性を高くせず、地震エネルギーの吸収を大きくできる		
	粘性ダンパ (線形)	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。				○	適用は可能であるが、粘性ダンパほどのエネルギー吸収が期待できない。
	オイルダンパ	オイルの流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は速度のべき乗(0.4~1)に比例し、履歴曲線は楕円に近い。				○	適用は可能であるが、粘性ダンパほどのエネルギー吸収が期待できない。
三軸	粘性ダンパ	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ	3方向		抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。	海外での適用例あり	△	取水槽ガントリクレーンは1軸方向の地震荷重の低減を必要としているため、3方向の減衰は必要ない。		

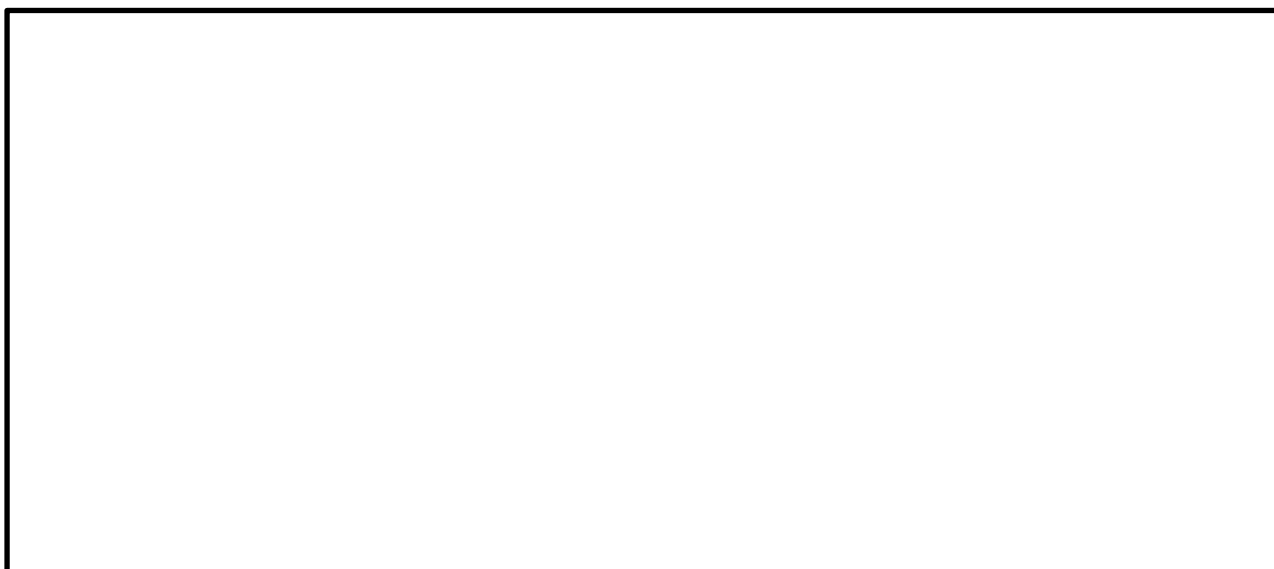
凡例 ◎：適用可能(有効性が最も高い) ○：適用可能 △：適用するため課題がある ×：適用不可

添付資料(2-2-2) 単軸粘性ダンパの性能試験方法及び特性試験

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 モデルによりモデル化する。ここでは、単軸粘性ダンパをモデル化した Maxwell モデルのパラメータを決定するための性能試験方法について示す。

1. 単軸粘性ダンパの性能試験方法

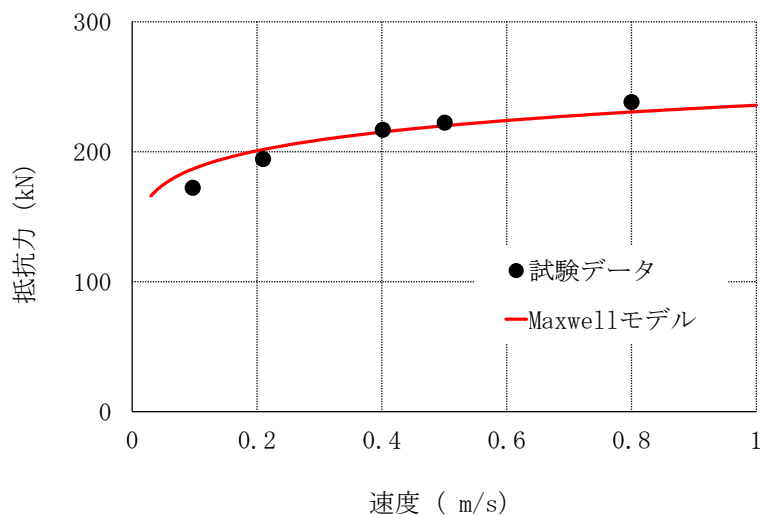
単軸粘性ダンパの性能試験装置の構成を第 2-2-1 添図に示す。単軸粘性ダンパの性能試験では、アクチュエータを用いて単軸粘性ダンパを所定の正弦波により加振し、加振中の変位及び荷重を測定する。加振条件を第 2-2-1 添表に示す。加振振動数による単軸粘性ダンパの減衰性能の変動は小さいことを踏まえ、単軸粘性ダンパのストローク 100mm の中で実機使用条件を含む幅広い試験速度 (0.1~0.8m/s) を設定して性能試験を実施する。単軸粘性ダンパ設置前の取水槽ガントリークレーンの固有振動数 (1.03Hz) 及び予備解析における単軸粘性ダンパの入力波形の主要な振動数 (0.8Hz~2.0Hz 程度) を考慮して加振振動数は 1.6Hz とした。また、単軸粘性ダンパの減衰性能は温度の影響を受けない(2.3 項参照) ことから、性能試験は室温にて実施した。単軸粘性ダンパの性能試験結果を第 2-2-2 添図に示す。測定した変位及び荷重の波形に適合するように、Maxwell モデルのパラメータを決定する。



第 2-2-1 添図 単軸粘性ダンパの性能試験装置の構成

第2-2-1 添表 単軸粘性ダンパの性能試験条件

No.	振動数 (Hz)	加振速度 (m/s)
1	1.6	0.1
2		0.2
3		0.4
4		0.5
5		0.8



第2-2-2 添図 単軸粘性ダンパの性能試験結果

2. 単軸粘性ダンパの特性試験

単軸粘性ダンパの減衰性能に影響する特性を把握するために実施した特性試験の結果を以下に示す。なお、(1)及び(2)の特性試験は、取水槽ガントリクレーンに設置する単軸粘性ダンパを用いて実施した。また、(3)温度依存性試験については、温度による減衰性能への影響が生じる場合、その主要な要因は粘性体の物性変化と考えられることから、取水槽ガントリクレーンに設置する単軸粘性ダンパと同タイプ(粘性体が同一)で定格荷重の異なるダンパを用いた。

<試験項目>

- (1) 加振振動数を変更した特性試験
- (2) 連続加振試験
- (3) 温度依存性試験

2.1 加振振動数を変更した特性試験

加振振動数に応じた単軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、以下の試験条件で単軸粘性ダンパの特性試験を実施した。

2.1.1 試験条件

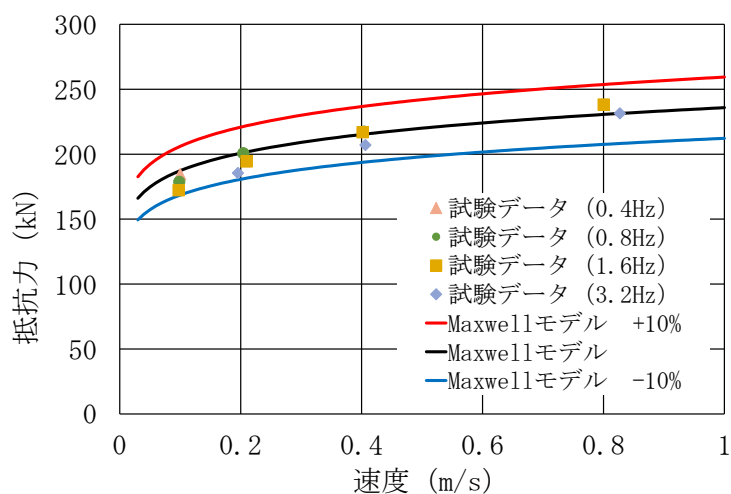
4段階の加振速度を設定し、同一の加振速度で振動数を変更した正弦波により特性試験を実施した。試験条件を第2-2-2添表に示す。

第2-2-2添表 加振振動数を変更した特性試験の試験条件

No.	加振速度 (m/s)	振動数 (Hz)
1	0.1	0.4
2		0.8
3		1.6
4	0.2	0.8
5		1.6
6		3.2
7	0.4	0.8
8		1.6
9		3.2
10	0.8	1.6
11		3.2

2.1.2 試験結果

試験結果を第2-2-3添図に示す。この図には、加振振動数 1.6Hz の時の Maxwell モデルによる計算値をあわせて示しているが、振動数を変更することによる抵抗力の変化は小さく、その変化幅は±10%以内であることが確認された。



第2-2-3添図 加振振動数を変更した単軸粘性ダンパの特性試験結果

2.2 連続加振試験

連続加振による単軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、正弦波による連続加振試験を実施した。

2.2.1 試験条件

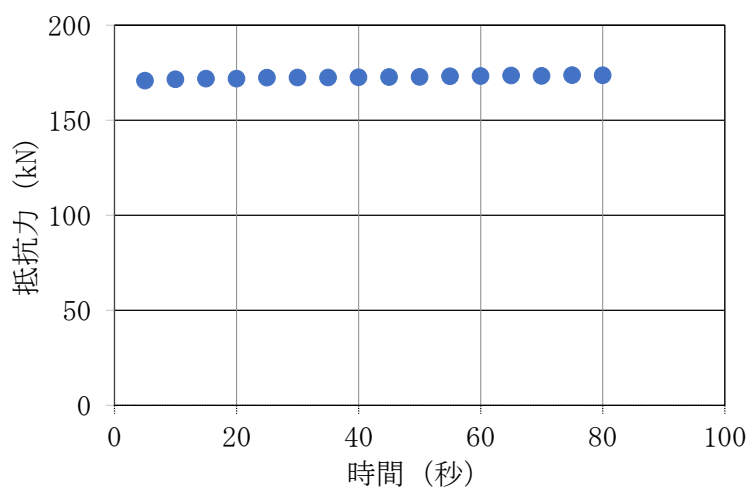
第2-2-3添表に試験条件を示す。試験条件は、取水槽ガントリクレーンにおける単軸粘性ダンパの散逸エネルギーを上回る条件として設定した。

第2-2-3添表 連続加振による性能試験条件

入力波	振動数 (Hz)	振幅 (mm)	加振時間 (秒)
正弦波	1	10	80以上

2.2.2 試験結果

連続加振試験における抵抗力の時間変化を第2-2-4添図に示す。80秒経過までの連続加振により抵抗力は変化しておらず、連続加振による減衰性能への影響はないことを確認した。



第2-2-4添図 連続加振試験結果

2.3 温度依存性試験

周囲環境温度による単軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、温度を変化させて単軸粘性ダンパの性能試験を実施した。

2.3.1 試験条件

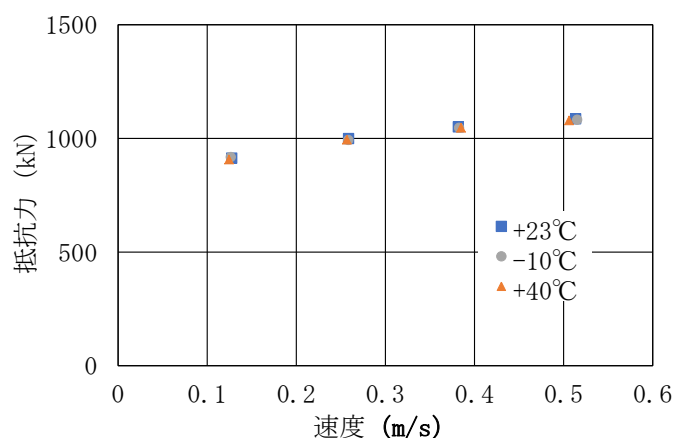
試験条件を第2-2-4添表に示す。屋外に設置することから、温度は-10℃、23℃、40℃の3段階とした。

第2-2-4添表 温度依存性試験の試験条件

No.	振動数 (Hz)	加振速度 (m/s)	温度 (°C)
1	1.0	0.13	-10
2			23
3			40
4		0.26	-10
5			23
6			40
7		0.39	-10
8			23
9			40
10		0.52	-10
11			23
12			40

2.3.2 試験結果

試験結果を第2-2-5添図に示す。温度が異なっても、抵抗力にほとんど差が見られないことから、単軸粘性ダンパの減衰性能への影響がないことを確認した。



第2-2-5添図 温度依存性試験結果

添付資料(2-3-1) 三軸粘性ダンパの低速移動時の拘束力

1. 概要

三軸粘性ダンパは熱膨張のような低速度の運動を拘束しないものであるが、低速移動時の拘束力を定量的に確認するため、低速移動試験を実施した。

2. 試験条件

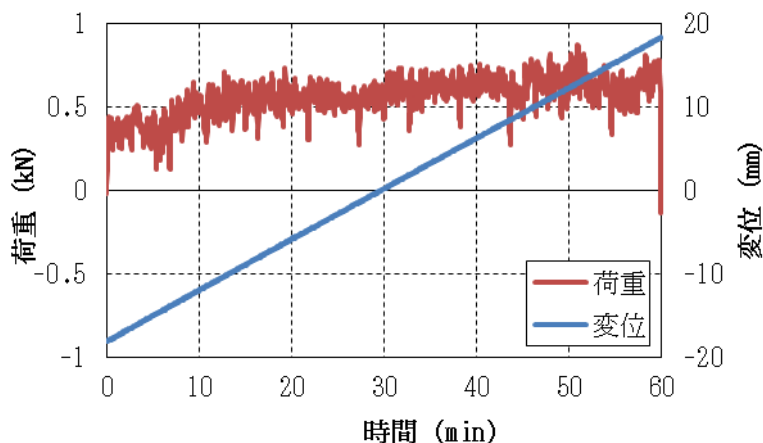
低速移動試験の試験条件を第 3-1-1 添表に示す。熱膨張が大きい主蒸気配管がプラント起動時に約 4.5 時間で通常運転温度まで昇温することから、大型ダンパの水平方向許容変位 72mm と等しい熱変位が約 4.5 時間で生じることを想定した場合の速度 0.005mm/s に余裕をみて、試験条件は 0.01mm/s とした。

第 3-1-1 添表 低速移動試験の試験条件

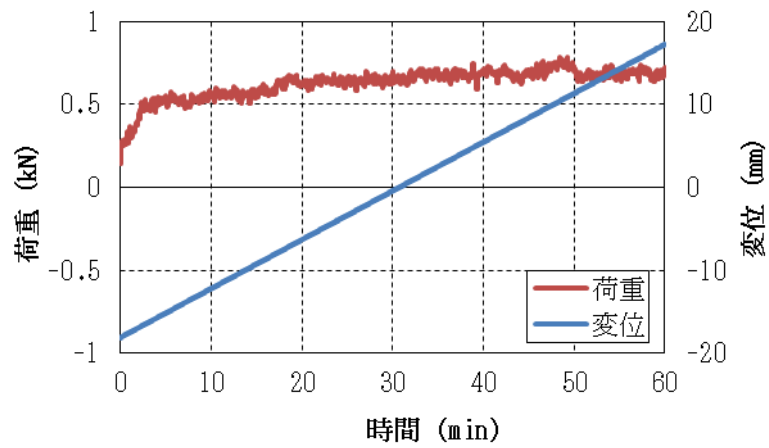
試験体	速度
大型	0.01mm/s

3. 試験結果

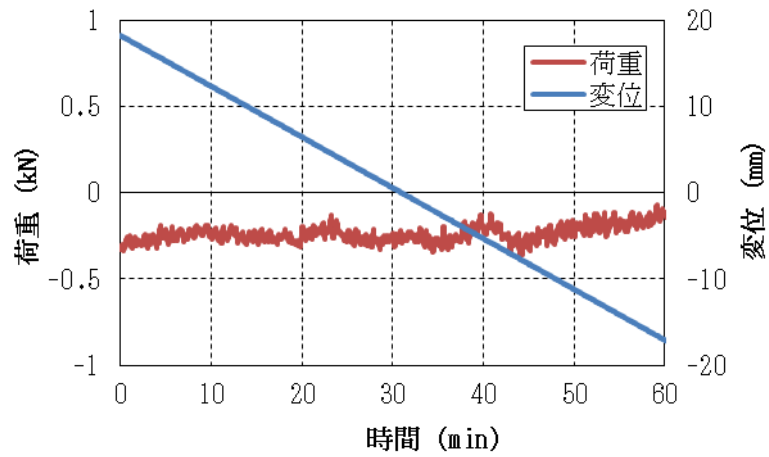
試験結果を第 3-1-1 添図～第 3-1-3 添図に示す。熱膨張を想定した低速移動に対して三軸粘性ダンパの発生荷重は 1kN を下回る十分に小さな値となり、三軸粘性ダンパは熱膨張のような低速度の運動を拘束しないことが確認された。



第 3-1-1 添図 水平方向の低速移動に対する発生荷重



第3-1-2 添図 鉛直方向（ピストンを上げる方向）の低速移動に対する発生荷重



第3-1-3 添図 鉛直方向（ピストンを下げる方向）の低速移動に対する発生荷重

添付資料(2-3-2) 配管系に設置する制震装置の選定

配管系に設置する制震装置として三軸粘性ダンパを選定した理由について第3-2-1添表に整理した。

第3-2-1添表 配管系に設置する制震装置の検討

分類	ダンパの種類	原理	作動方向	支持荷重	抵抗力の特性	原子力施設における適用実績	適用性	理由	
履歴型	弾塑性ダンパ	材料の弾塑性挙動を利用してエネルギーを吸収するダンパ	1方向 または 2方向	熱膨張 地震荷重	抵抗力は、材料の初期剛性、二次剛性で決まる。	なし	△	装置単体では熱膨張を拘束するため、別途熱膨張を逃がす据付方法を検討する必要がある。	
	摩擦ダンパ	摩擦抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は、摩擦材の締め付け力等で決定し、履歴曲線は矩形に近い。				
	鉛ダンパ	鉛の塑性流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は鉛の期剛性、二次剛性で決まる。				
粘性型	粘性ダンパ(非線形)	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ	1方向	地震荷重	抵抗力は速度のべき乗(0.1~1)に比例し、0.1乗の場合、履歴曲線は矩形に近い。	なし	○	三方向に応答する配管系に対して、1方向のみに減衰性能を発揮する。	
	粘性ダンパ(線形)	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。				排気筒への適用例あり
	オイルダンパ	オイルの流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は速度のべき乗(0.4~1)に比例し、履歴曲線は楕円に近い。				
三軸	粘性ダンパ	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ	3方向		抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。	海外での適用例あり	◎	三方向に減衰性能を発揮するため、三方向に応答する配管系に適している。	

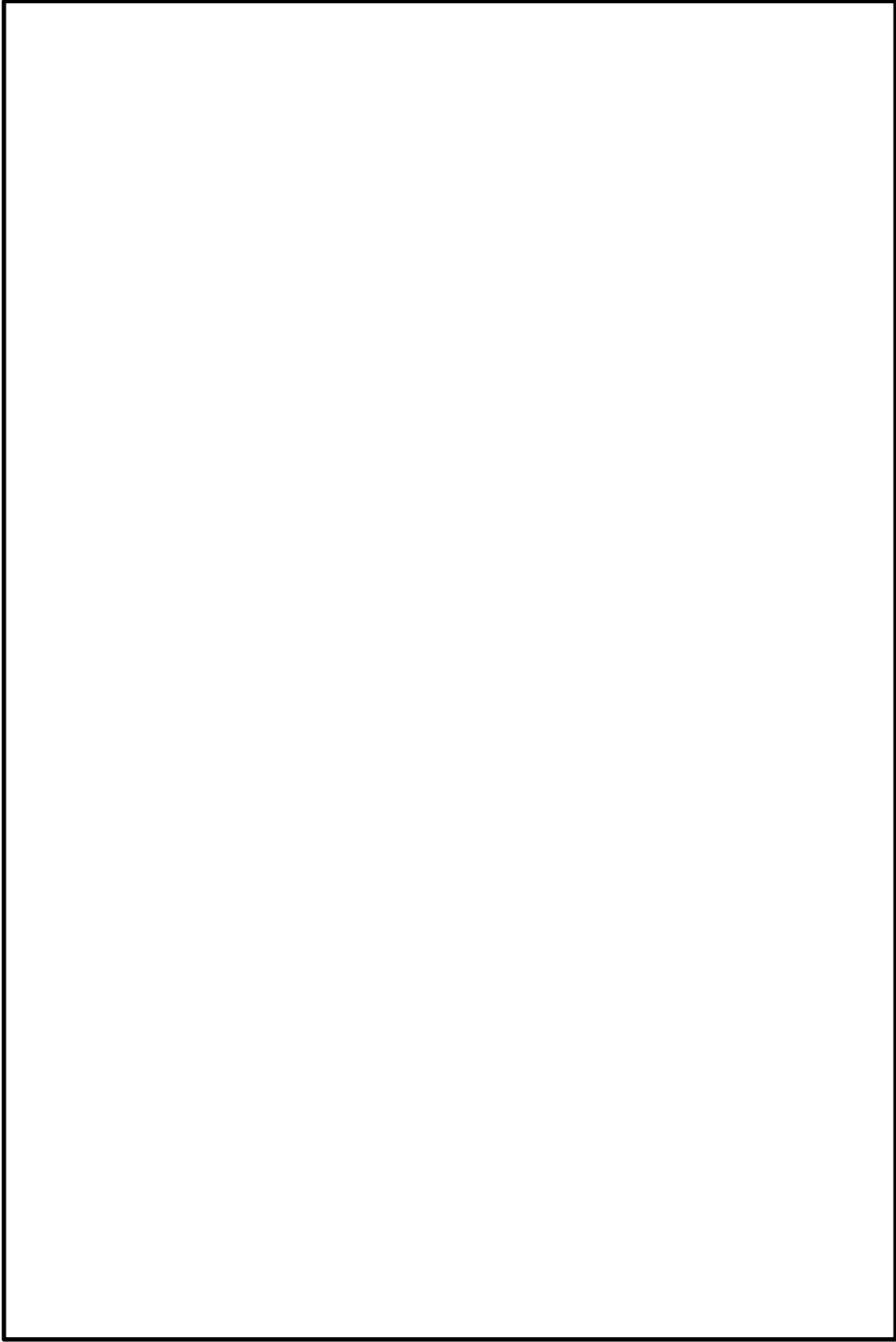
凡例 ◎：適用可能(有効性が最も高い) ○：適用可能 △：適用するために課題がある ×：適用不可

添付資料(2-3-3) 三軸粘性ダンパに関する ASME Boiler and Pressure Vessel Code の記載

三軸粘性ダンパは ASME Boiler and Pressure Vessel Code において、原子力発電所に設置できる典型的なダンパとして例示されている。三軸粘性ダンパに関する ASME Boiler and Pressure Vessel Code の記載について第 3-3-1 添表に示す。

第 3-3-1 添表 ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION 1-Subsection NF-Supports 2013 の記載

主な記載箇所			記載内容
ARTICLE NF-1000 INTRODUCTION	NF-1100 SCOPE AND GENERAL REQUIREMENTS	NF-1130 BOUNDARIES OF JURISDICTION	NF-1132 Boundary Between Supports and the Building Structure NF-1214 Standard Supports
	NF-1200 TYPES OF SUPPORTS AND ATTACHMENTS	NF-1210 TYPES OF SUPPORTS	
NONMANDATORY APPENDIX NF-E DAMPERS, ENERGY ABSORBERS, AND SNUBBERS	NF-E-1210 DAMPERS	NF-E-1210 DESCRIPTION	ダンパは動的振動を低減させる機能を持つ支持装置として使用され、系に減衰を付加することが記載されている。 三軸粘性ダンパを例として、構造、動作等について記載されている。
		NF-E-1220 FUNCTION	
ARTICLE NF-E-1000		NF-E-1230 APPLICATIONS	ダンパは振動対策や地震対策等に用いられることが記載されている。 ダンパは動的な支持装置であり静的荷重に対しては機能しないことが記載されている。また、機器・配管系にダンパを設置した場合の数値解析法として、モーダル解析及び時刻歴解析が記載されている。
		NF-E-1240 MODELING	



第3-3-1添図 ASME Boiler and Pressure Vessel Code の関連図

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。

添付資料(2-3-4) 三軸粘性ダンパを設置した配管系の加振試験の概要

1. 試験の概要

配管系に三軸粘性ダンパを設置した場合の効果を検証するため、配管系の加振試験を実施し、配管応答の低減効果を確認した。試験の概要を第3-4-1添表に示す。

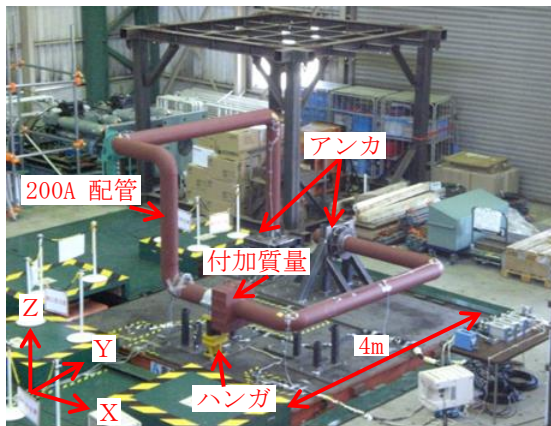
第3-4-1添表 試験の概要

実施期間	2014. 6. 9～2014. 6. 13
実施場所	奥村組技術研究所振動台

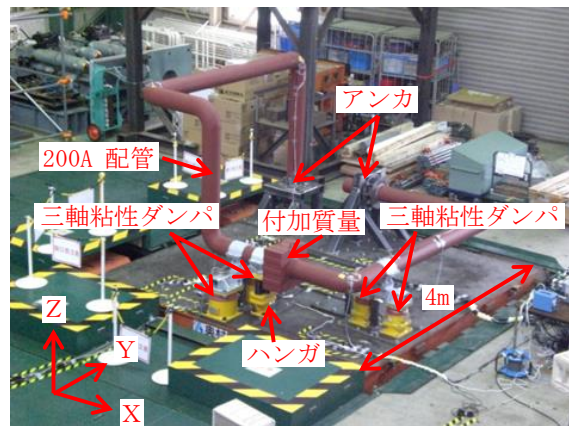
2. 加振試験条件

2.1 試験体

三軸粘性ダンパを設置した配管系（以下「ダンパ設置配管」という。）と三軸粘性ダンパを設置しない配管系（以下「ダンパ無配管」という。）の2種類の試験体を用いて加振試験を実施した。配管系試験体を第3-4-1添図に、配管系試験体構造図を第3-4-2添図に示す。いずれの配管系も配管部は200A Sch40の直管（STPT410）及びショートエルボ（STPT410）で構成している。また、配管系は終端2箇所アンカにより固定され、1箇所でスプリングハンガにより支持されており、弁を模擬した付加質量（372kg）を有する。ダンパ設置配管には、三軸粘性ダンパを配管系の2箇所に合計4台（2箇所×2台）設置した。

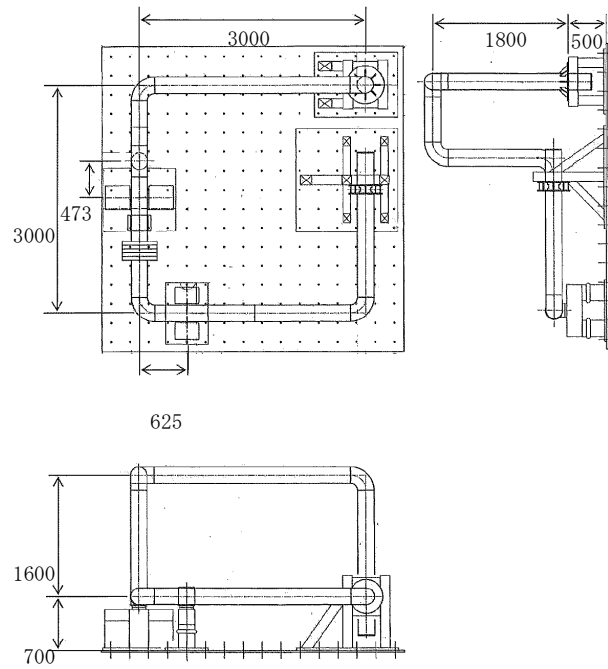


配管系試験体（ダンパ無配管）



配管系試験体（ダンパ設置配管）

第3-4-1添図 配管系試験体



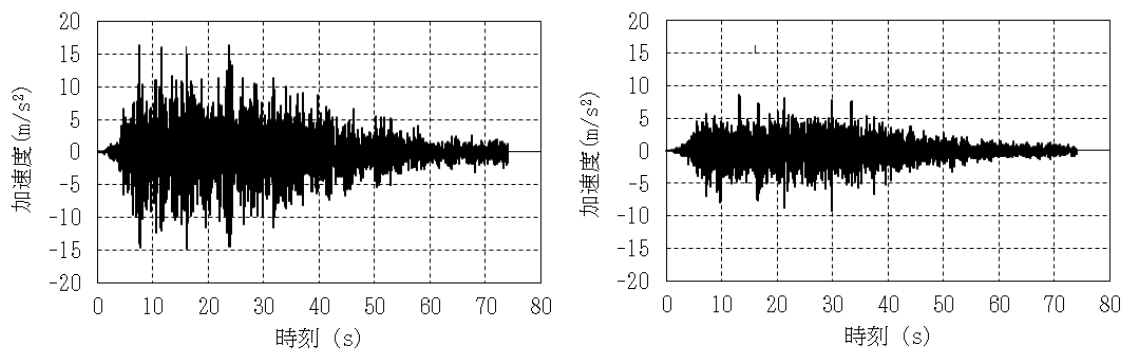
第3-4-2 添図 配管系試験体の構造図

2.2 入力地震波

地震波加振における入力地震波は、耐震バックチェック評価用地震動 $S_s - 1$ (600gal) に対して島根原子力発電所2号炉原子炉建物の地震応答解析により算出した床応答波を参考に設定した地震波を用いた。入力地震波の加速度時刻歴波形を第3-4-3添図に、応答スペクトルを第3-4-4添図に示す。加振レベルは、配管系が弾性域に留まり、三軸粘性ダンパ設置位置の変位及び荷重が三軸粘性ダンパの許容範囲内となる最大加振レベルを目安として設定した。

配管系試験体はY方向加振時の応答よりもX方向加振時の応答が大きくなる傾向があるため、水平方向加振はX方向を代表とし、地震波加振はX+Z方向について実施した。

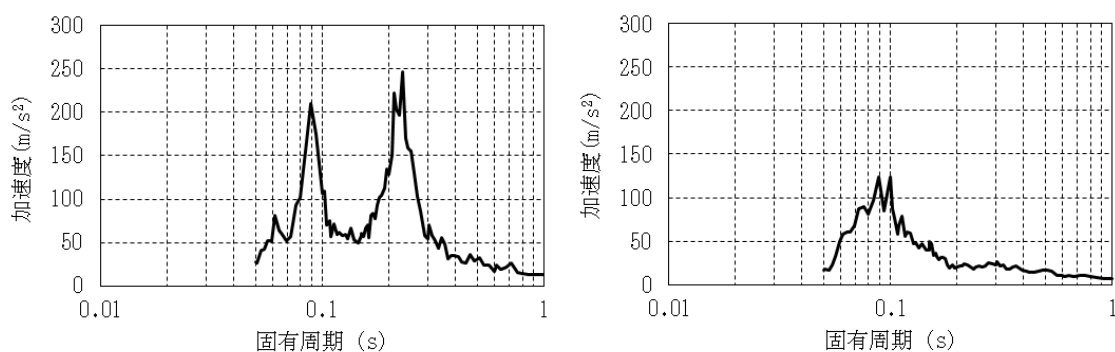
各試験ケースにおける加速度レベルを第3-4-2添表に示す。



(a) 水平方向 (X方向)

(b) 鉛直方向 (Z方向)

第3-4-3 添図 入力地震波の加速度時刻歴波形



(a) X方向

(b) Z方向

第3-4-4 添図 入力地震波の応答スペクトル (減衰定数 0.5%)

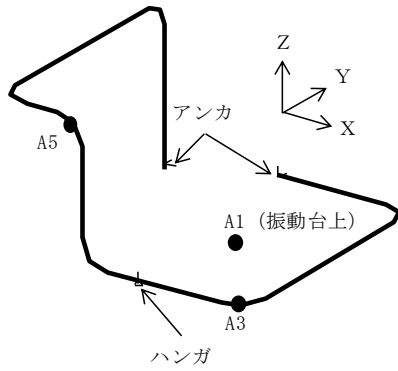
第3-4-2 添表 地震波加振の試験ケース

No.	試験体条件	加速度レベル (m/s ²)	
		X方向	Z方向
1	ダンパ無配管	1.5	0.84
2		2.5	1.41
3	ダンパ設置配管	2.5	1.41
4		10	5.6
5		18	10.1

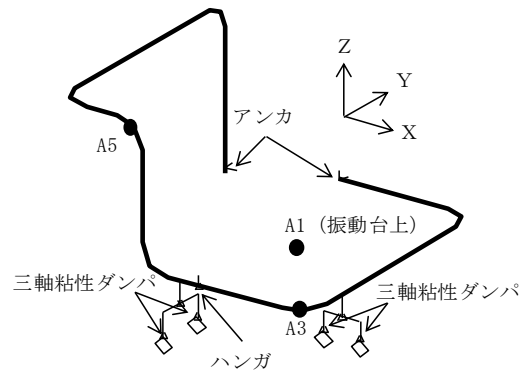
3. 加振試験結果

3.1 正弦波掃引試験結果

配管系試験体の概略図を第3-4-5 添図に示す。また、ダンパ無配管におけるX方向の正弦波掃引試験結果について、振動台上の加振方向の加速度に対する配管位置の加振方向の応答加速度の振動伝達特性を第3-4-6 添図に、カーブフィットにより得られた配管系試験体の固有振動数とモード減衰比を第3-4-3 添表に示す。同様にダンパ設置配管での振動伝達特性を第3-4-7 添図に、配管系試験体の固有振動数とモード減衰比を第3-4-4 添表に示す。第3-4-4 添表において、固有振動数とモード減衰比の値は概略値で示す。ダンパ設置配管の場合、配管系の減衰が非常に大きくなり、カーブフィットに対して固有振動数、モード減衰比の感度が低くなるため、モード減衰比を一律20%とした概略値で試験結果とカーブフィットが良好に一致する。これらの結果から、ダンパ無配管では最大で120倍程度の応答倍率を持つ複数のピークがあったが、ダンパ設置配管での応答倍率は最大で4倍程度まで低減されたことを確認した。また、ダンパ無配管は減衰比が非常に小さいが、ダンパ設置配管は減衰比が非常に大きいことが確認された。



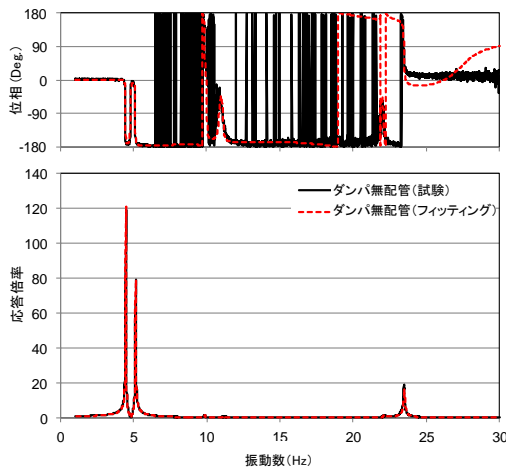
配管系試験体（ダンパ無配管）



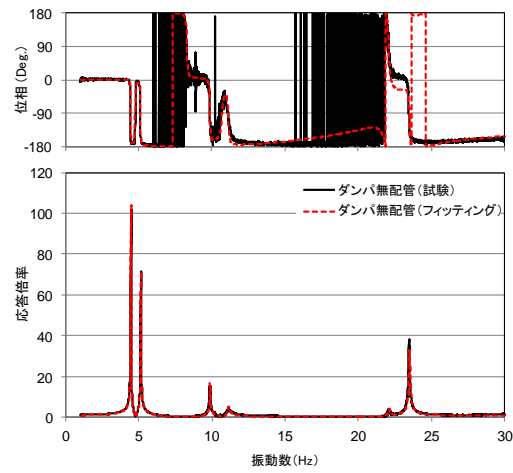
配管系試験体（ダンパ設置配管）

第3-4-5 添図

配管系試験体の概略図

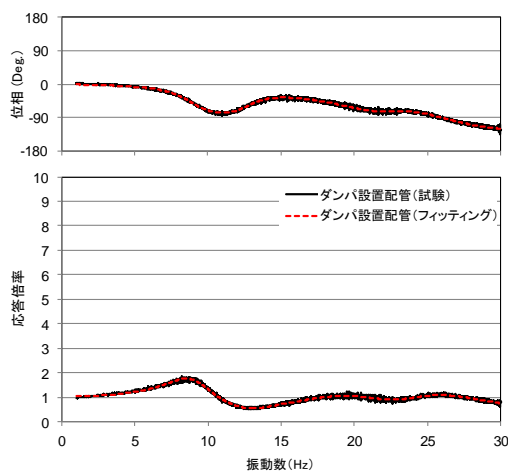


(1) A3X/A1X

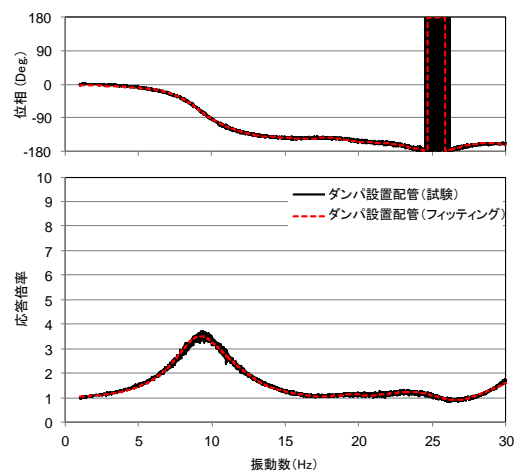


(2) A5X/A1X

第3-4-6 添図 振動伝達特性（ダンパ無配管，X方向加振、入力加速度、 0.5m/s^2 ）



(1) A3X/A1X



(2) A5X/A1X

第3-4-7 添図 振動伝達特性（ダンパ設置配管，X方向加振、入力加速度 1.0m/s^2 ）

第3-4-3 添表 固有振動数とモード減衰比（ダンパ無配管）

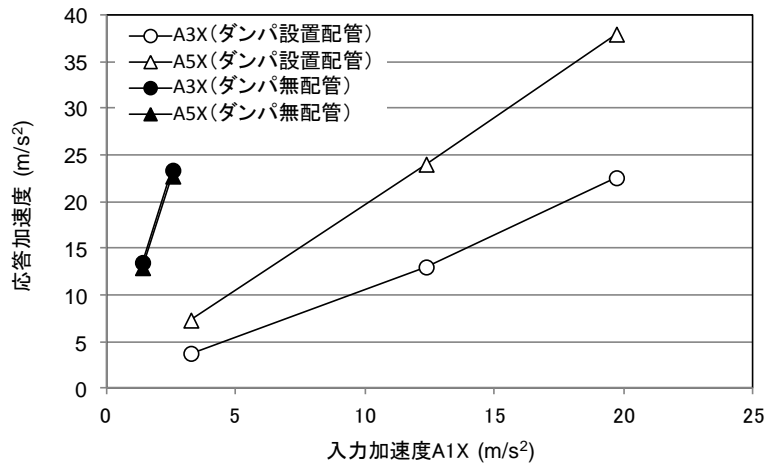
No.	固有振動数(Hz)	モード減衰比(%)
1	4.5	0.22
2	5.1	0.26
3	9.9	0.26
4	11.1	0.55
5	22.1	0.30
6	23.5	0.15

第3-4-4 添表 固有振動数とモード減衰比（ダンパ設置配管）

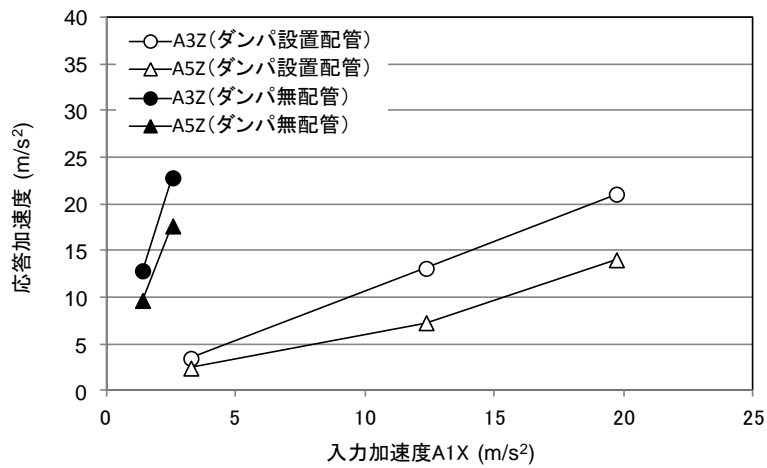
No.	固有振動数(Hz)	モード減衰比(%)
1	9	20
2	13	20
3	17	20
4	19	20
5	23	20
6	25	20

3.2 地震波加振の試験結果

入力地震波（X+Z方向）により加振した場合のダンパ無配管とダンパ設置配管の配管応答加速度を第3-4-8添図及び第3-4-9添図に示す。第3-4-8添図では、ダンパ無配管の応答倍率（応答/入力）がA3及びA5の位置で10倍程度であるのに対し、ダンパ設置配管の場合の応答倍率はA3の位置で1倍程度、A5の位置で2倍程度であり、応答がそれぞれ1/10、1/5に低減されている。また、第3-4-9添図では、ダンパ無配管の応答倍率がA3及びA5の位置で10倍程度であるのに対し、ダンパ設置配管の場合の応答倍率はA3の位置で1倍程度、A5の位置で0.7倍程度であり、応答がそれぞれ1/10、7/100に低減されている。加振試験の結果から、配管系に三軸粘性ダンパ設置することは地震応答の低減に有効であることが示された。



第3-4-8 添図 入力加速度 A_{1X} に対する X 方向の応答加速度
(地震波 X + Z 方向加振)



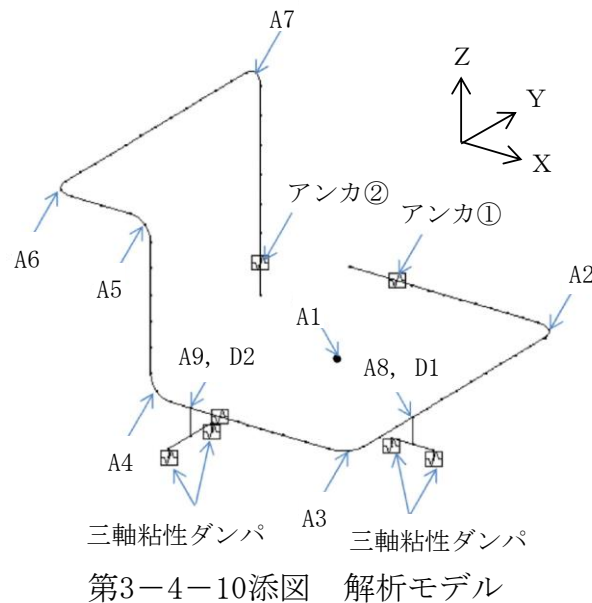
第3-4-9 添図 入力加速度 A_{1X} に対する Z 方向の応答加速度
(地震波 X + Z 方向加振)

4. 三軸粘性ダンパを適用した配管系の加振試験結果による妥当性確認

三軸粘性ダンパを適用した配管系の地震応答解析法の妥当性を加振試験結果と解析結果の比較により確認する。

4.1 解析モデル

三軸粘性ダンパを適用した配管系の加振試験の試験体をモデル化して地震応答解析を実施した。解析モデルを第3-4-10添図に示す。



4.2 解析ケース

上限の減衰性能 (K_1, C_1), 下限の減衰性能 (K_5, C_5) 及びその間の3つの内挿点の計5ケースの減衰性能により地震応答解析を実施した。地震応答解析ケースを第3-4-5添表に示す。なお、地震応答解析の対象とする試験ケースは、X方向及びZ方向の最大加振ケース (X方向: 19.7m/s^2 , Z方向: 10.6m/s^2) とした。

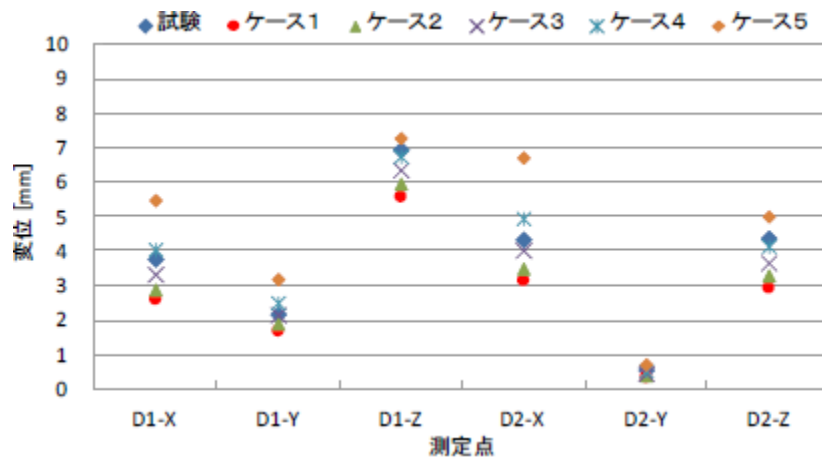
第3-4-5添表 解析ケース

解析ケース	減衰性能
1	K_1, C_1 (上限)
2	均等に内挿
3	
4	
5	K_5, C_5 (下限)

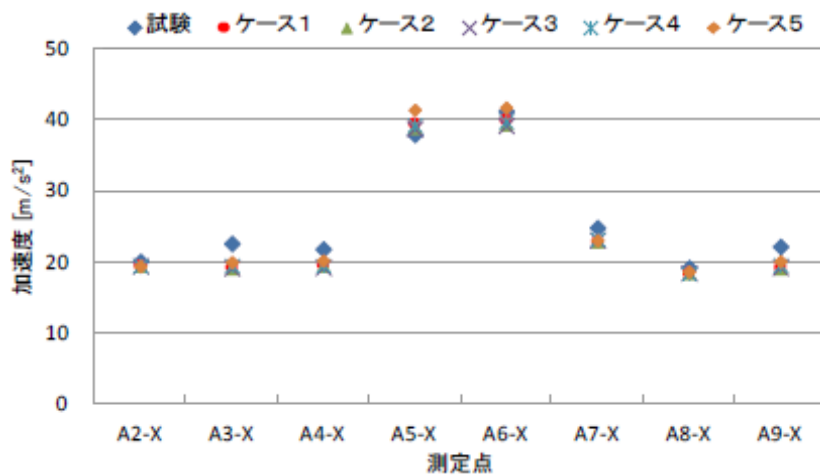
4.3 解析結果

三軸粘性ダンパの最大応答変位の試験結果と解析結果を第3-4-11添図に示す。X方向及びZ方向の最大応答加速度の試験結果と解析結果を第3-4-12添図に示す。三軸粘性ダンパの最大応答変位の解析結果は、試験結果を上回る保守的な評

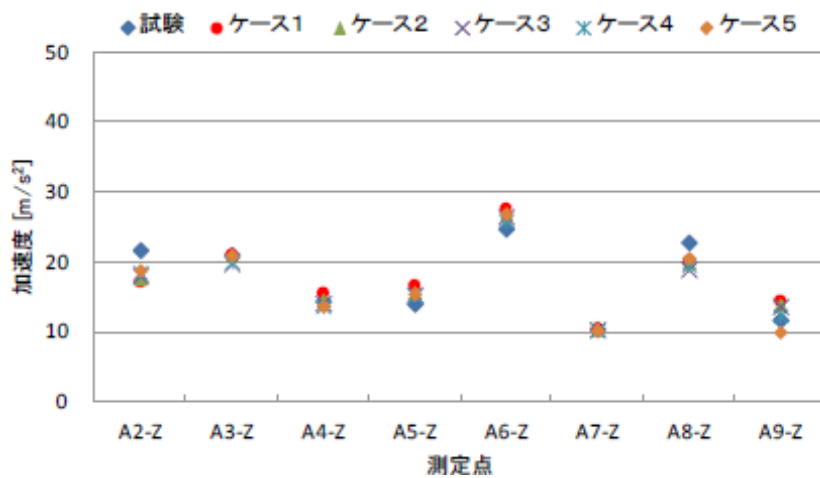
値となっている。また、配管最大応答加速度の解析結果は、試験結果に対して10%程度以上の精度で一致している。



第3-4-11添図 三軸粘性ダンパ最大応答変位



(a) X方向



(b) Z方向

第3-4-12添図 最大応答加速度

4.4 解析結果の考察

上限の減衰性能 (K_1, C_1), 下限の減衰性能 (K_5, C_5) 及びその間に内挿した減衰性能で地震応答解析を行い, 最大応答変位及び最大応答加速度を適切に評価できることを確認した。最大応答変位については, 解析結果が試験結果を上回っており, 地震動による配管応力を保守的に評価することができる。

添付資料(2-3-5) 三軸粘性ダンパの減衰性能及び解析モデルによる表現

1. 三軸粘性ダンパの性能の表し方

三軸粘性ダンパに使用される粘性体は粘弾性を有しており，三軸粘性ダンパの減衰性能は粘弾性を表すパラメータにより表現される。一般に粘弾性体を式(1)に示す正弦波変位 $\gamma(t)$ で加振すると，第3-5-1添図に示すように位相が変位に対して δ ($0 \sim \pi/2$) 進んだ荷重 $\sigma(t)$ (式(2))が生じる。

(1)

(2)

：変位の振幅 ω ：変位の角振動数 σ_0 ：荷重の振幅
 δ ：位相角(変位及び荷重の位相差)

荷重 $\sigma(t)$ は，式(3)に示すとおり変位成分に比例する弾性応答成分と速度成分に比例する粘性応答成分の和として表現することができる。

(3)

式(3)の最大変位 γ_0 と最大荷重 σ_0 の比 σ_0/γ_0 を等価剛性 K と呼ぶ。等価剛性 K は粘弾性体の剛性を定量的に定義する一般的なパラメータである。

荷重の式(3)に対して一周分積分を行うと変位成分に比例する弾性応答成分の項は0，速度成分に比例する粘性応答成分の項は $\pi \sigma_0 \gamma_0 \sin \delta$ となり，粘性応答成分による散逸エネルギーが求められる。散逸エネルギーは第3-5-1添図のリサージュ曲線で囲まれる面積に相当する。このような減衰性能を定量的に定義するため，粘弾性体を散逸エネルギーの等しい理想的な粘性体である速度比例型ダッシュポットに置き換えた場合の比例係数を等価減衰係数 C と定義する。一周分の変位 $\gamma(t)$ を減衰係数 C のダッシュポットに入力した場合の散逸エネルギーが $C \gamma_0^2 \omega \pi$ であるので，散逸エネルギーに関して式(4)の関係となる。従って，等価減衰係数 C は式(5)となる。

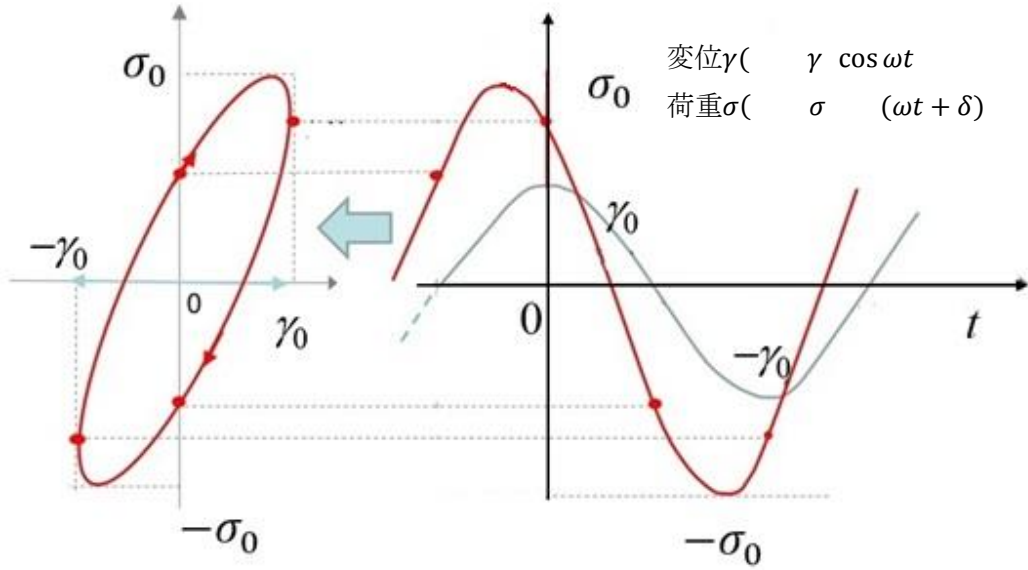
(4)

$$C = \frac{\sigma_0}{\omega \gamma_0} \quad (5)$$

三軸粘性ダンパの減衰性能は，これまで述べた粘弾性体の基本的な性質と同様に，等価剛性 K 及び等価減衰係数 C により表現することができる。

三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C は振動数依存性を有しており，一般に振動数が高いほど等価剛性 K は大きく，等価減衰係数 C は小さくなる傾向がある。

γ_0 : 変位の振幅	ω : 変位の角振動数
σ_0 : 荷重の振幅	δ : 位相角 (変位及び荷重の位相差)



第3-5-1添図 典型的な粘弾性体の荷重-変位特性
(左：荷重-変位，右：荷重-時刻)

2. 三軸粘性ダンパの解析モデル

粘弾性体のモデル化には、Voigt モデル、Maxwell モデル及びそれらを混合したモデル等が一般的に用いられている。三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数依存性を有するため、その振動数特性を表現できる Maxwell モデルを採用する。Maxwell モデルは、第3-5-2添図に示すばね剛性(=k)とダッシュポットの減衰係数(=c)を直列につないだものである。また、k/c を Maxwell モデルの特性振動数(=ω₀)とする。Maxwell モデルに変位 $\gamma = \gamma_0 \cos \omega t$ を与えた場合の荷重 $\sigma(t)$ を以下に示す。

$$\sigma(t) = \gamma_0 K_e \cos \omega t + \gamma_0 K_v \sin \omega t \quad (6)$$

γ_0 : 変位の振幅 ω : 変位の角振動数,

K_e : 三軸粘性ダンパの貯蔵弾性率, K_v : 三軸粘性ダンパの損失弾性率
または,

$$\sigma(t) = \gamma_0 K \cos(\omega t + \delta) \quad (7)$$

K : 三軸粘性ダンパの等価剛性(= $\sqrt{K_e^2 + K_v^2}$) δ : 位相角(= $\tan^{-1}(K_v / K_e)$)

Maxwell モデルの場合、 K_e 及び K_v は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} K_e &= k(\omega / \omega_0)^2 / (1 + (\omega / \omega_0)^2) \\ K_v &= k(\omega / \omega_0) / (1 + (\omega / \omega_0)^2) \end{aligned} \quad (8)$$

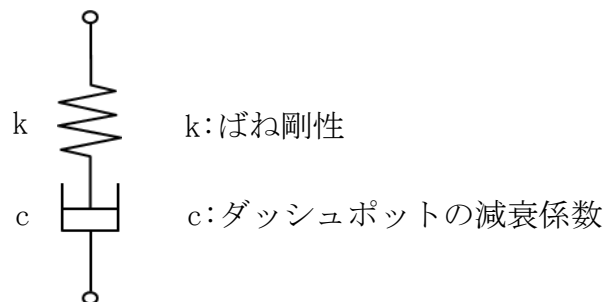
k : Maxwell モデルのばね剛性 ω_0 : Maxwell モデルの特性振動数

三軸粘性ダンパのモデル化にあたっては、その減衰性能の振動数特性をより精度良く表現するため、Maxwell モデルを2つ並列にした4パラメータ Maxwell モデル（第3-5-3 添図参照）を用いる（第3-5-4 添図参照）。4パラメータ Maxwell モデルでは、 K_e 及び K_v は以下の式となる。

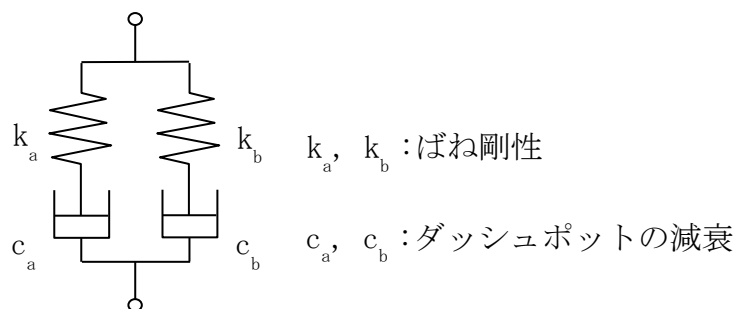
$$\begin{aligned} K_e &= K_a(\omega/\omega_a)^2/(1+(\omega/\omega_a)^2) + K_b(\omega/\omega_b)^2/(1+(\omega/\omega_b)^2) \\ K_v &= K_a(\omega/\omega_a)/(1+(\omega/\omega_a)^2) + K_b(\omega/\omega_b)/(1+(\omega/\omega_b)^2) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $\omega_a=k_a/c_a$ 、 $\omega_b=k_b/c_b$

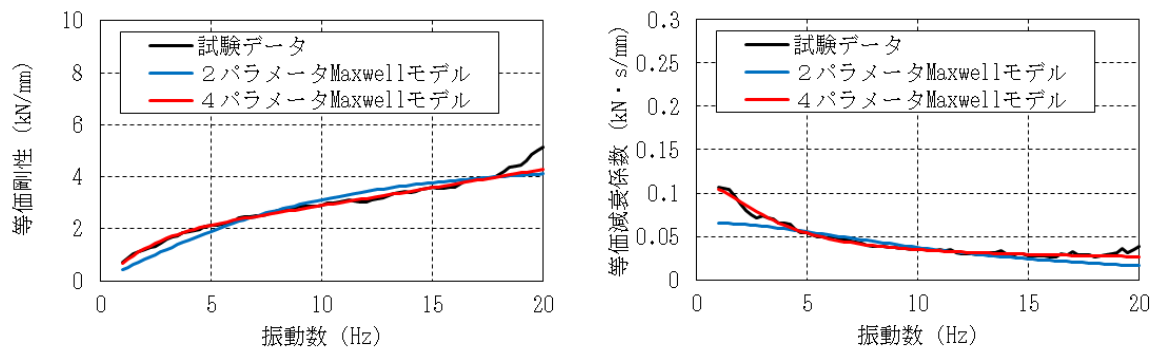
4パラメータ Maxwell モデルのパラメータは、三軸粘性ダンパの性能試験結果に基づいて設定する。



第3-5-2 添図 Maxwell モデル



第3-5-3 添図 4パラメータ Maxwell モデル



(H-1) 等価剛性（水平方向） (H-2) 等価減衰係数（水平方向）

第3-5-4 添図 4パラメータ Maxwell モデルと Maxwell モデルの比較
(中型の例)

添付資料(2-3-6) 三軸粘性ダンパの特性試験

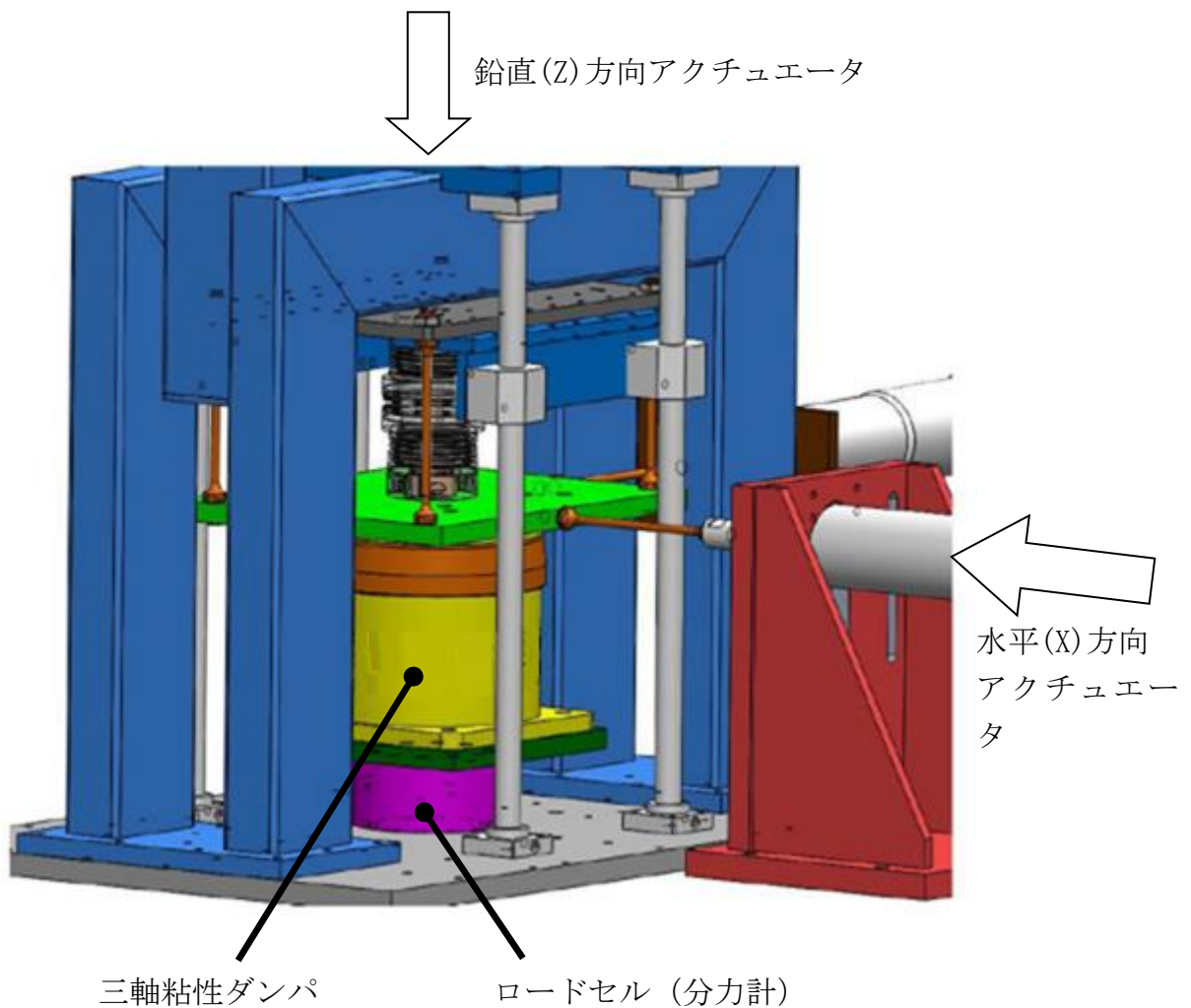
三軸粘性ダンパの減衰性能に影響する特性を把握するために実施した特性試験の結果を以下に示す。なお、三軸粘性ダンパは型式によらず構造は同じであり、使用する粘性体も同一であることから、特性試験結果については、中型及び小型（実機適用なし）の試験結果で代表して示す。

<試験項目>

1. 水平・鉛直同時加振試験（水平・鉛直同時加振）
2. 放射線照射試験（放射線）
3. 粘性体温度を変えた性能試験（温度）
4. 加振振幅を変えた性能試験（振幅）
5. 連続加振試験（連続加振）

1. 水平・鉛直同時加振試験

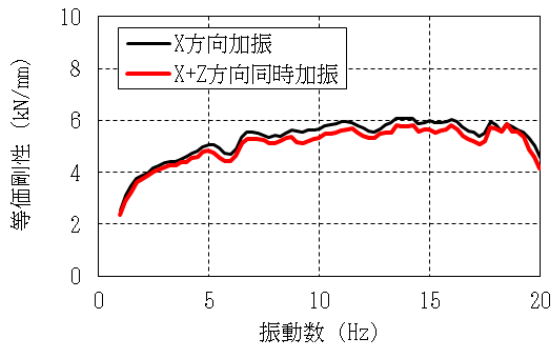
三軸粘性ダンパの性能試験は、水平、鉛直の各方向で1方向加振を行う方法により実施する。一方、地震時に三軸粘性ダンパは3方向同時加振されることから、水平方向加振と鉛直方向加振で相互に減衰性能に影響を及ぼす場合は、性能試験で取得した減衰性能と地震時の減衰性能に差が生じる可能性がある。そのため、水平方向及び鉛直方向の同時加振と1方向加振との減衰性能の比較を行った。水平・鉛直同時加振試験の概略図を第3-6-1添図に示す。試験条件を第3-6-1添表に、試験結果を第3-6-2添図に示す。第3-6-2添図のとおり、水平方向及び鉛直方向の同時加振と1方向加振では減衰性能に差がないことを確認した。



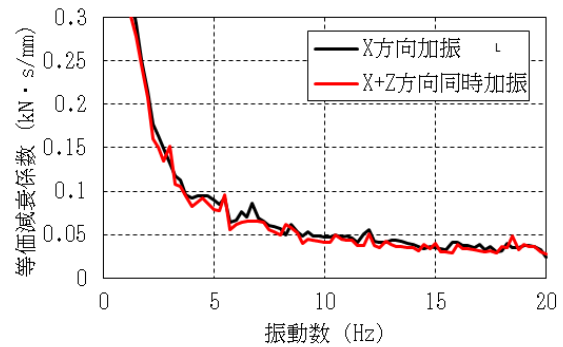
第3-6-1添図 水平・鉛直同時加振試験

第3-6-1 添表 水平・鉛直同時加振試験条件

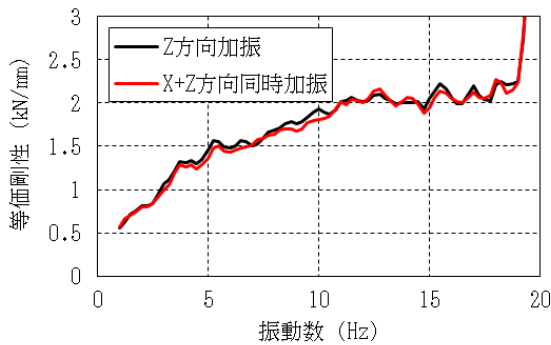
No.	型式	温度 (°C)	加振方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型	20	水平	ランダム波	3	32
2			鉛直			
3			水平・鉛直			



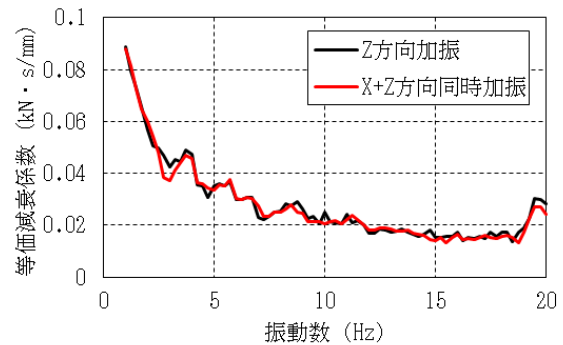
(H-1) 等価剛性 (水平単独と比較)



(H-2) 等価減衰係数 (水平単独と比較)



(V-1) 等価剛性 (鉛直単独と比較)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直単独と比較)

第3-6-2 添図 水平・鉛直同時加振による減衰性能への影響確認結果

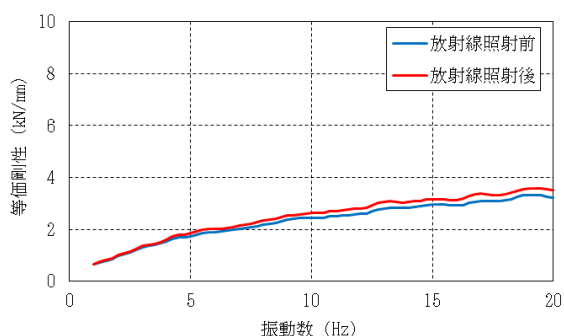
2. 放射線照射試験

放射線による三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、 γ 線照射量を変えた第3-6-2添表に示す試験条件にて三軸粘性ダンパの性能試験を実施した。 γ 線照射量は、島根2号炉の一般管理区域における40年間積算放射線量0.004kGyに余裕を見た1kGyとした。

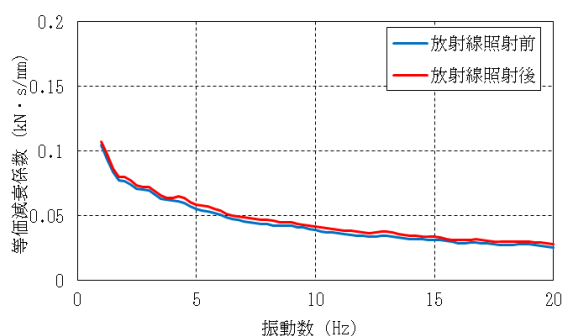
結果を第3-6-3添図に示す。第3-6-3添図のとおり、1kGyの照射では減衰性能は変化しておらず、影響がないことが確認された。

第3-6-2添表 放射線照射試験条件

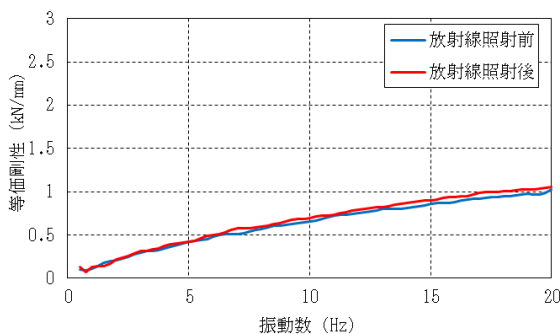
No.	型式	温度(°C)	加振方向	入力波形	振幅(mm)	継続時間(s)	γ 線照射量
1	小型	20	水平	ランダム波	1	32	照射なし
2			水平				1kGy
3			鉛直				照射なし
4			鉛直				1kGy



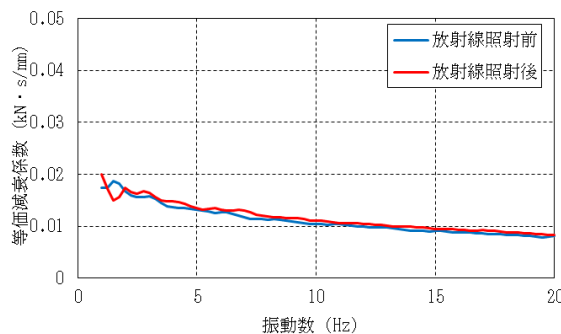
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第3-6-3添図 放射線による減衰性能への影響確認結果

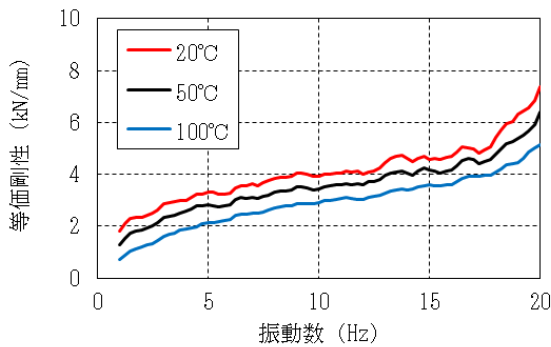
3. 粘性体温度を変えた性能試験

粘性体温度による三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、粘性体温度を変えた第 3-6-3 添表の試験条件にて三軸粘性ダンパの性能試験を実施した。

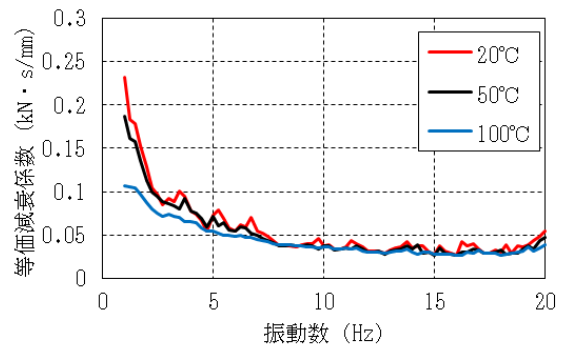
試験結果を第 3-6-4 添図に示す。第 3-6-4 添図のとおり、粘性体温度が高くなるほど三軸粘性ダンパの減衰性能が低下することが確認された。

第 3-6-3 添表 粘性体温度を変えた性能試験条件

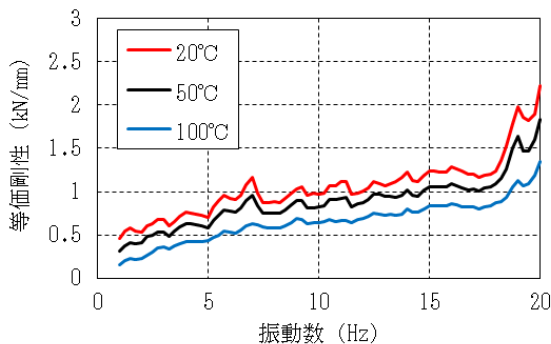
No.	型式	温度 (°C)	加振方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型	20	水平	ランダム波	6	32
2		50				
3		100				
4		20	鉛直			
5		50				
6		100				



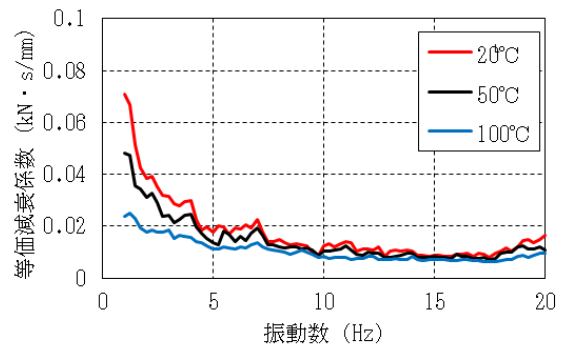
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第 3-6-4 添図 粘性体温度による減衰性能への影響確認結果

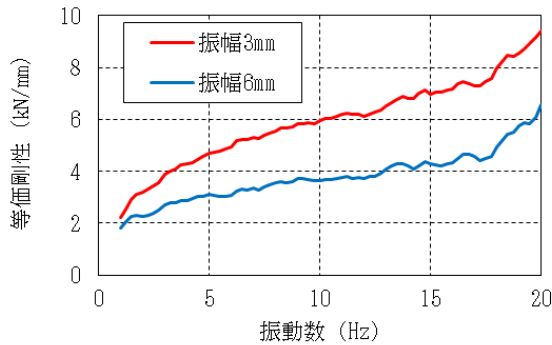
4. 加振振幅を変えた性能試験

振幅の大きさによる三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、振幅を変えた第3-6-4添表の試験条件にて三軸粘性ダンパの性能試験を実施した。

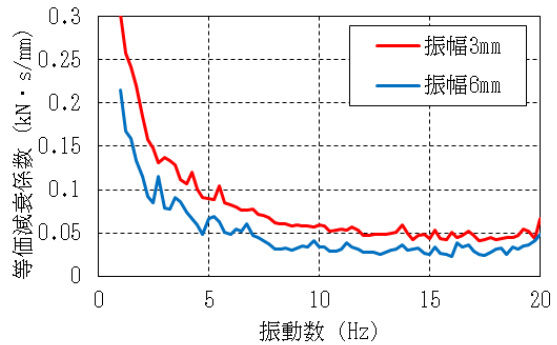
試験結果を第3-6-5添図に示す。第3-6-5添図のとおり、振幅が大きいほど三軸粘性ダンパの減衰性能が低下することが確認された。

第3-6-4添表 加振振幅を変えた性能試験条件

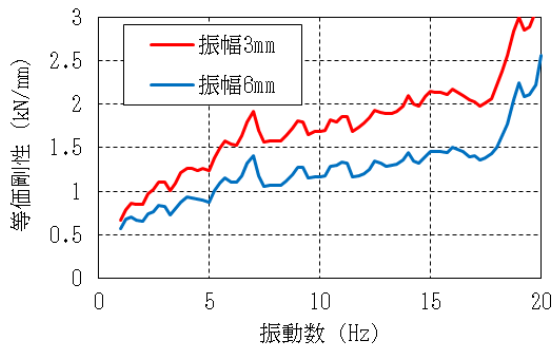
No.	型式	温度 (°C)	加振方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型	20	水平	ランダム波	3	32
2			鉛直			
3			水平		6	
4			鉛直			



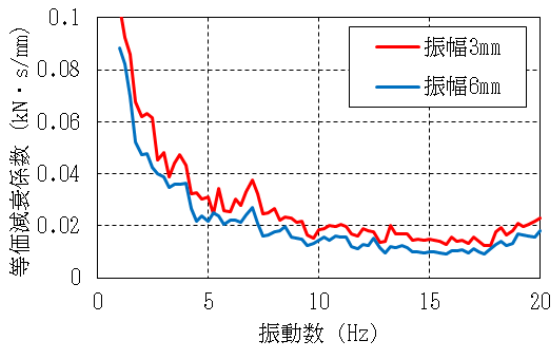
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第3-6-5添図 振幅による減衰性能への影響確認結果

5. 連続加振試験

連続加振による三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、第3-6-5添表に示す試験条件により、連続加振試験を実施した。

試験結果を第3-6-6添図に示す。第3-6-6添図のとおり、三軸粘性ダンパの累積消費エネルギー W が増大すると単調に減衰性能が低下することが確認された。累積消費エネルギー W とは加振により三軸粘性ダンパで消費されるエネルギーの総和をいい、以下の式(1)で表される。

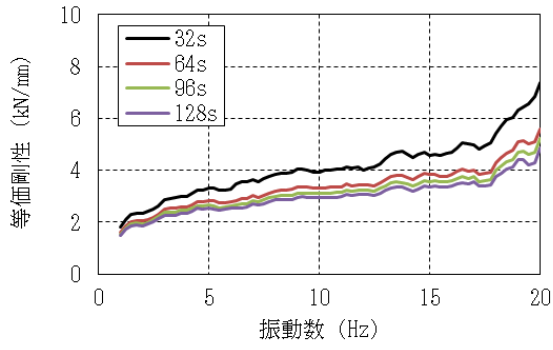
$$W = \int_0^T F(t) \frac{dx(t)}{dt} dt \quad (1)$$

ここで、

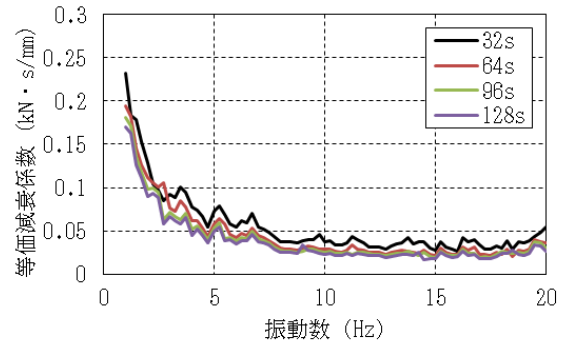
$F(t)$: 三軸粘性ダンパ反力, $x(t)$: 三軸粘性ダンパ変位, T : 加振継続時間

第3-6-5添表 連続加振試験条件

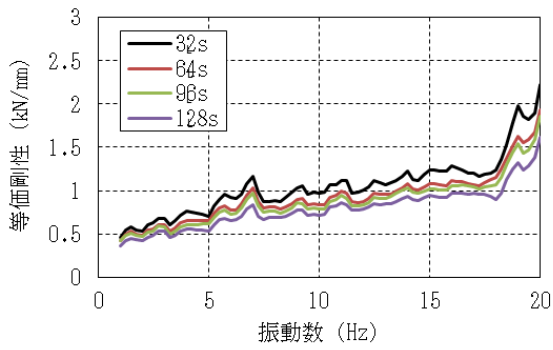
No.	型式	温度 (°C)	加振 方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型	20	水平	ランダム波	6	32
2			鉛直			
3			水平			64
4			鉛直			
5			水平			96
6			鉛直			
7			水平			128
8			鉛直			



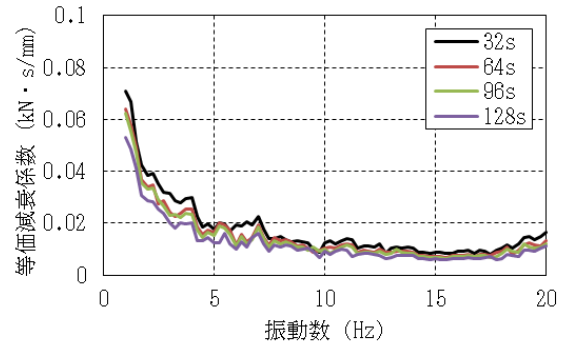
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第 3-6-6 添図 連続加振による減衰性能への影響確認結果

添付資料(2-3-7) 三軸粘性ダンパの性能試験方法

三軸粘性ダンパの減衰性能は等価剛性 K 及び等価減衰係数 C によって表現し、減衰性能の振動数特性を精度良く表現できる4パラメータ Maxwell モデルによりモデル化する。ここでは、三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C を取得し、4パラメータ Maxwell モデルのパラメータを決定するための性能試験方法について示す。

1. 性能試験方法

三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C を取得し、4パラメータ Maxwell モデルの4つのパラメータを決定するための性能試験は、以下の流れで実施する。

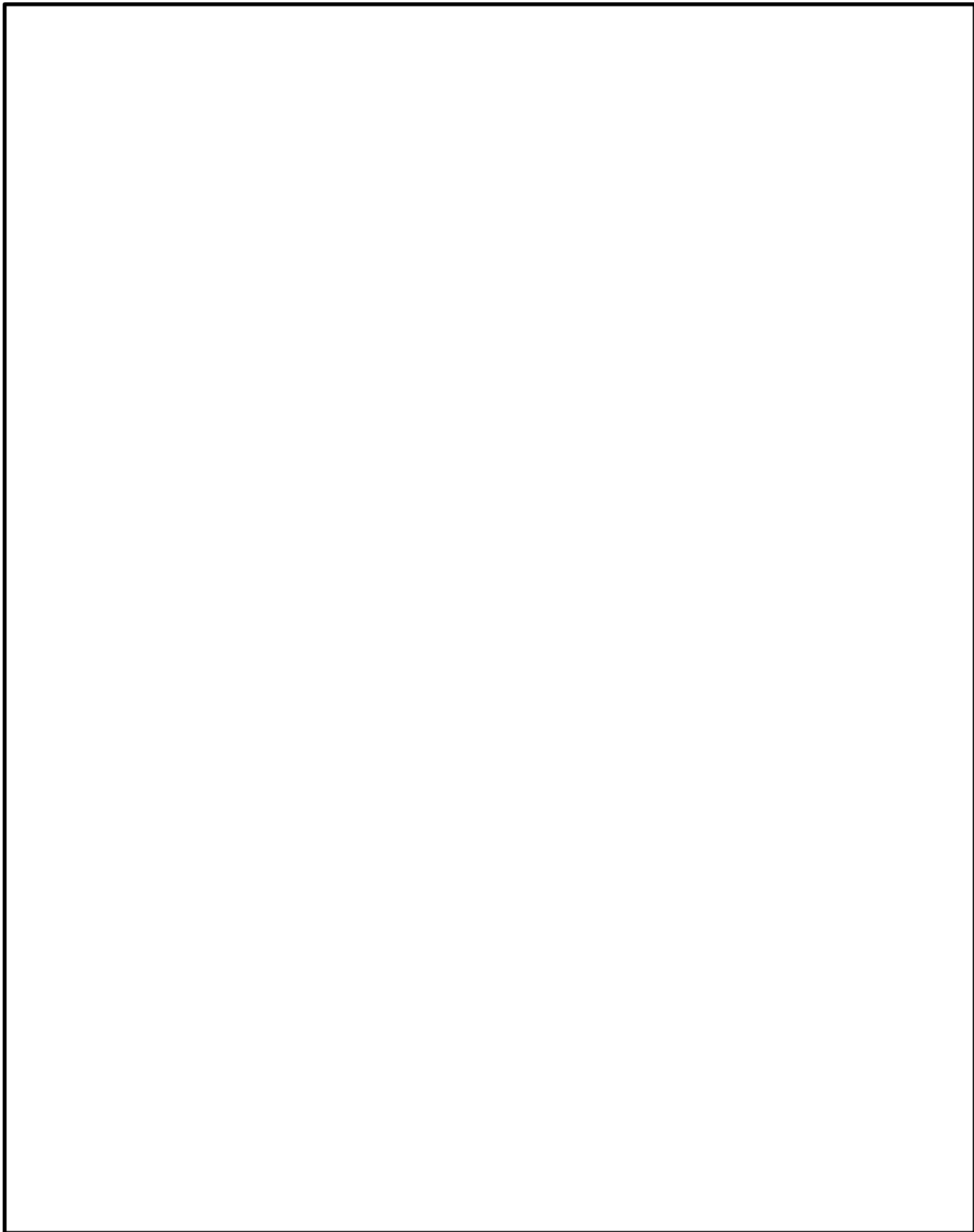
最初に粘性体が均一に所定の温度となるように三軸粘性ダンパを恒温槽等で加温する。次に、試験機を用いて三軸粘性ダンパを所定の変位波形で加振し、加振中の変位及び荷重を測定する。なお、減衰性能は水平方向加振と鉛直方向加振で異なることから、水平方向及び鉛直方向のそれぞれで加振を行い、データを取得する。加振中に測定した変位及び荷重の時刻歴波形からフーリエ変換によりフーリエスペクトルを求めて、伝達関数を算出し、三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C を得る。最後に、性能試験により取得した三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C に基づき、4パラメータ Maxwell モデルの4つのパラメータを決定する。性能試験のフローを第3-7-1添図に示す。

三軸粘性ダンパの性能試験においては、温度、加振振幅及び連続加振による減衰性能の変動を考慮して、高側ダンパ試験性能 ($K_{\text{High}}, C_{\text{High}}$) と低側ダンパ試験性能 ($K_{\text{Low}}, C_{\text{Low}}$) を取得する。高側ダンパ試験性能 ($K_{\text{High}}, C_{\text{High}}$) は実際の使用条件よりも高い減衰性能となる試験条件で、低側ダンパ試験性能 ($K_{\text{Low}}, C_{\text{Low}}$) は実際の使用条件よりも低い減衰性能となる試験条件で取得する性能である。試験条件の設定例を第3-7-1表に示す。

第3-7-1表 三軸粘性ダンパの性能試験条件の例

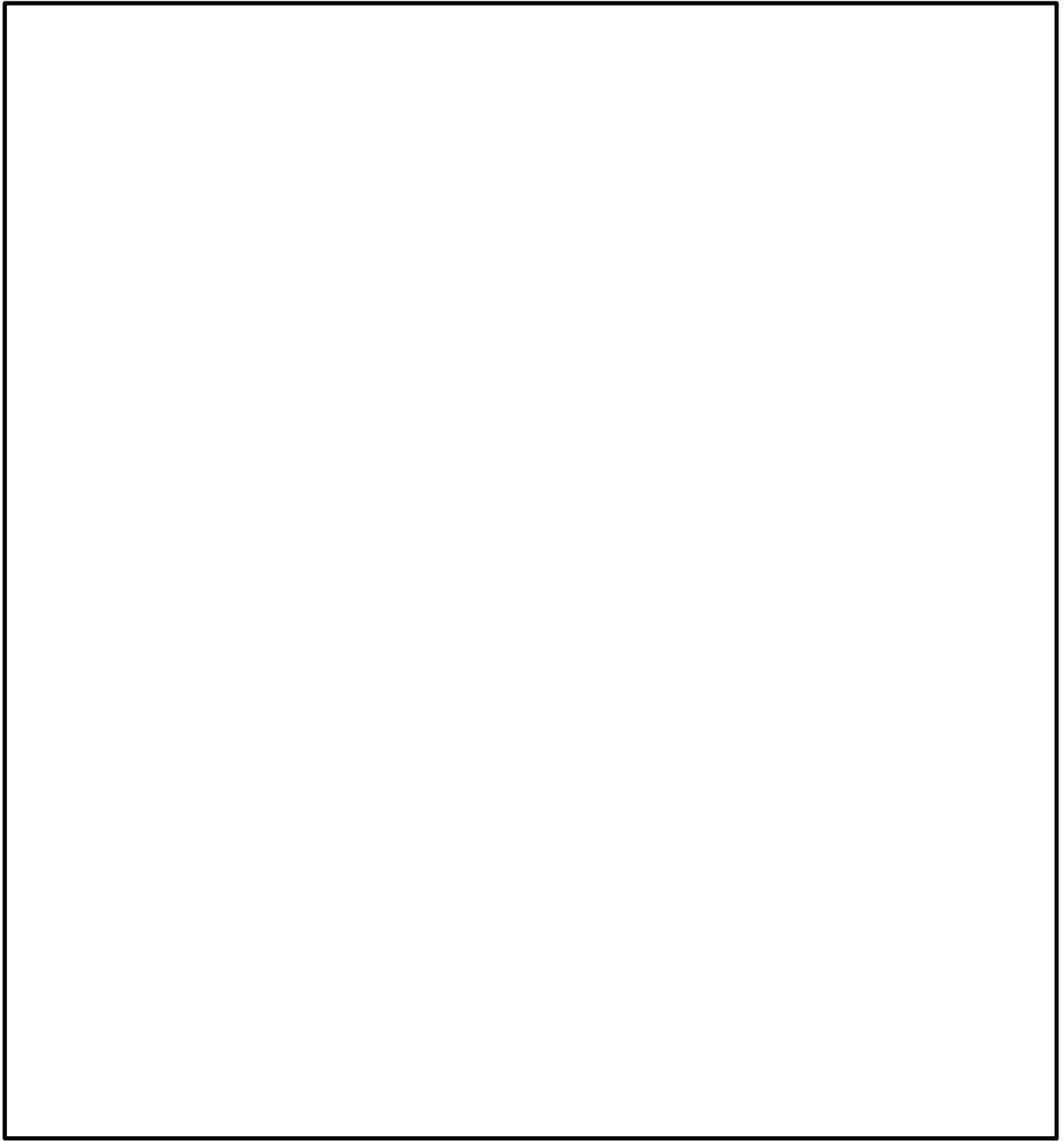
--

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。



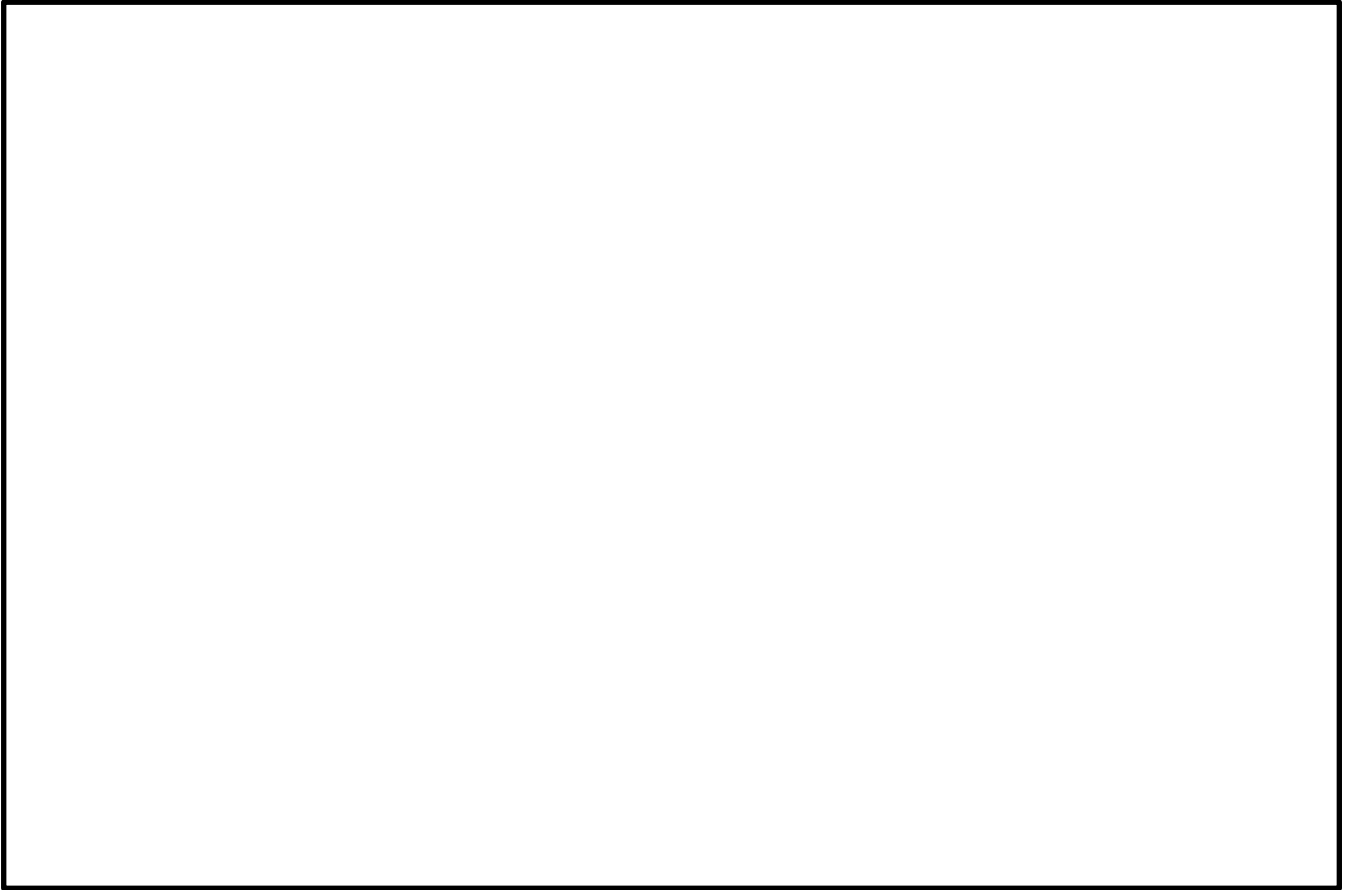
第 3-7-1 添図 性能試験フロー(1/3)

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3-7-1 添図 性能試験フロー(2/3)

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3-7-1 添図 性能試験フロー(3/3)

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。

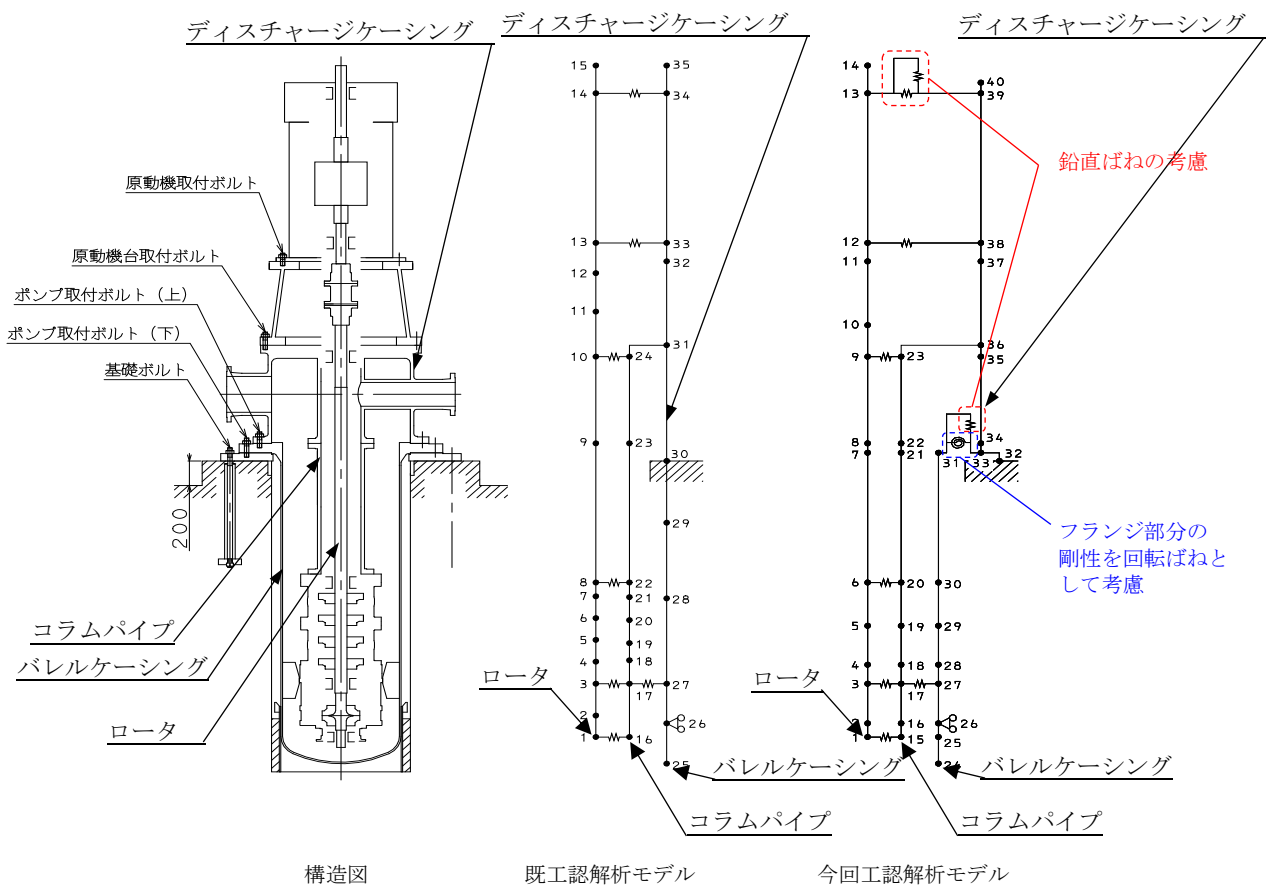
ポンプ等の応答解析モデルの精緻化について

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

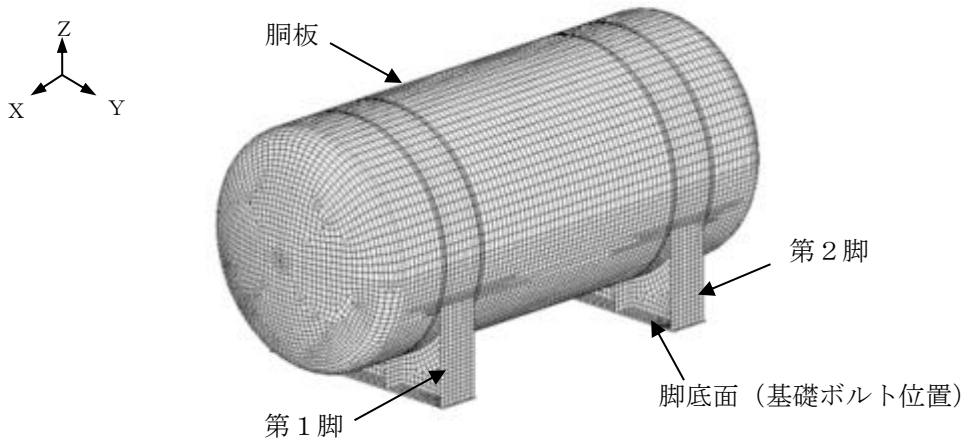
容器等の応力解析へのFEMモデルの適用について

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。

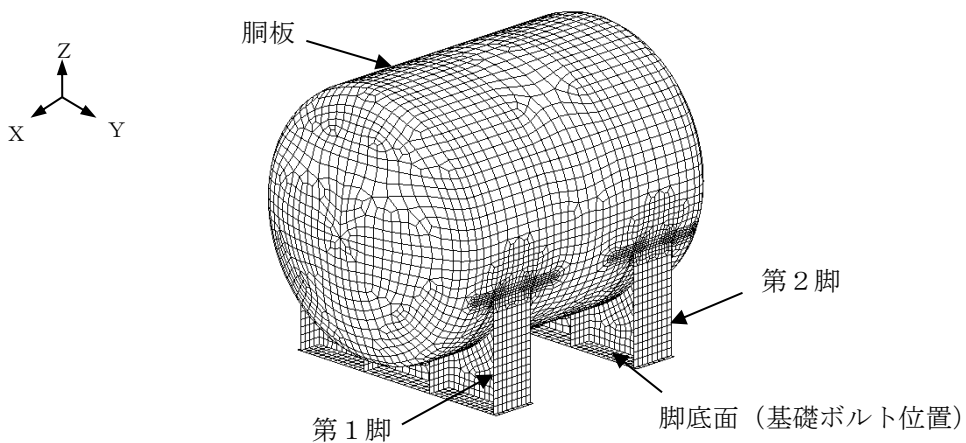
1. 容器へのFEMモデルの適用

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年版追補版）〈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

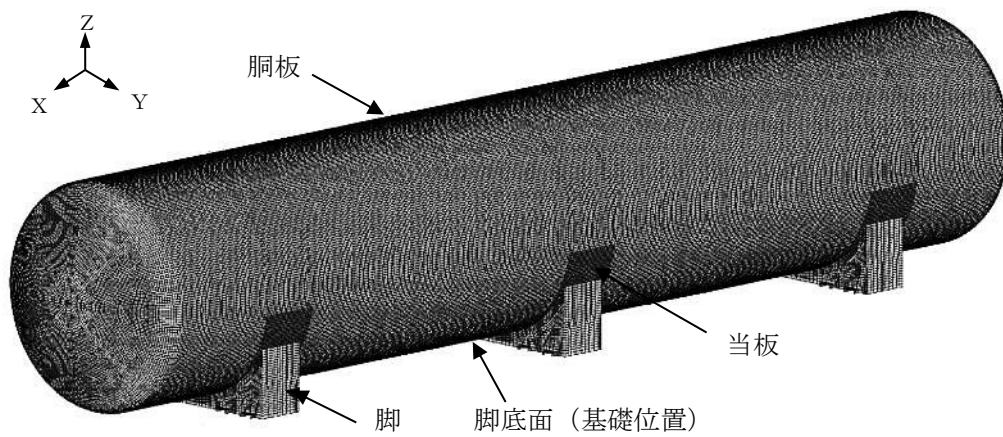


(2) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料
デイタンク

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)

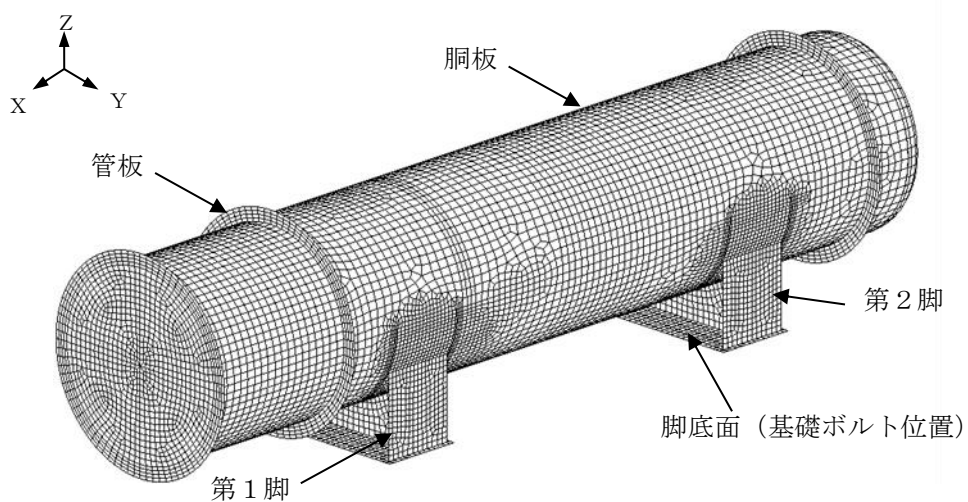
項目	内容
適用部位	胴板 (脚取付部)
解析コード	ABAQUS (Ver. 6.5-4)
地震条件	別途実施する原子炉建物地震応答解析から得られる加速度を入力する。



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. 6.4-4)
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)

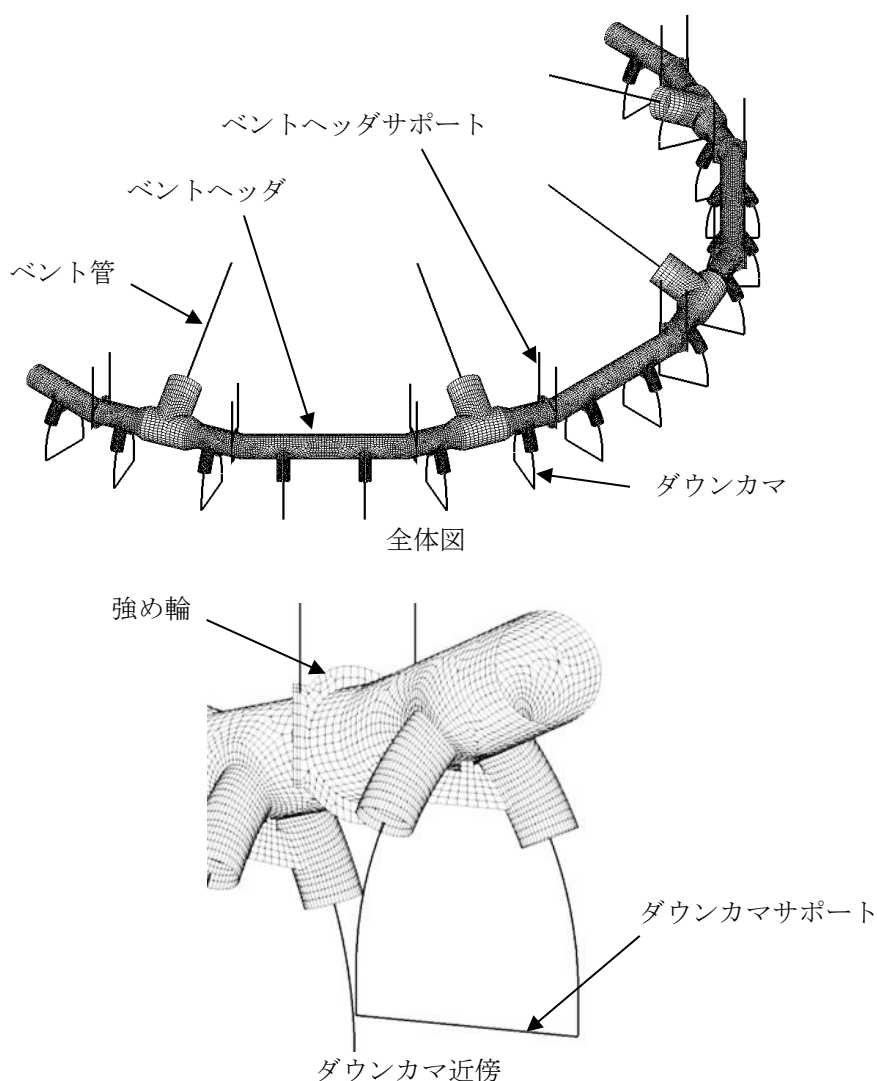
項目	内容
適用部位	胴板 (脚取付部)
解析コード	ABAQUS (Ver. 6.4-4)
地震条件	別途実施する原子炉建物地震応答解析から得られる加速度を入力する。

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）

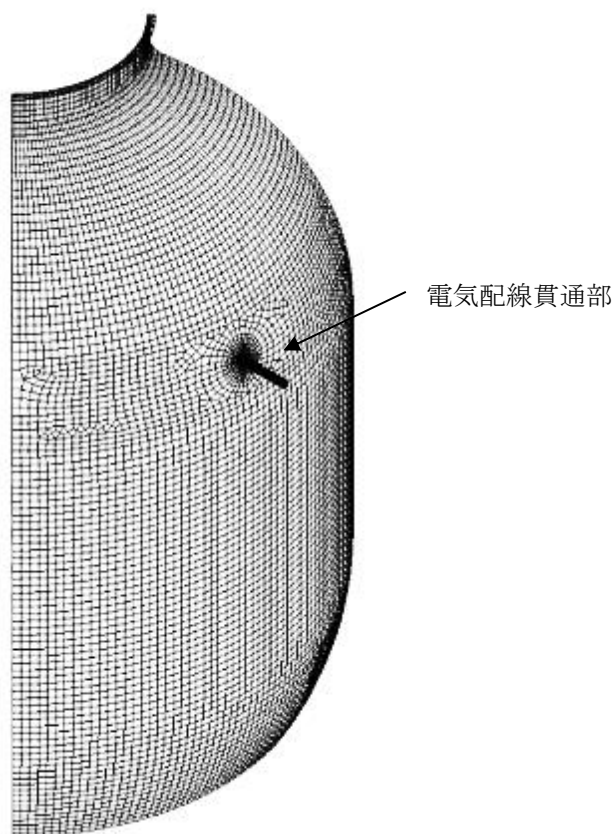
第2-1表 解析概要

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

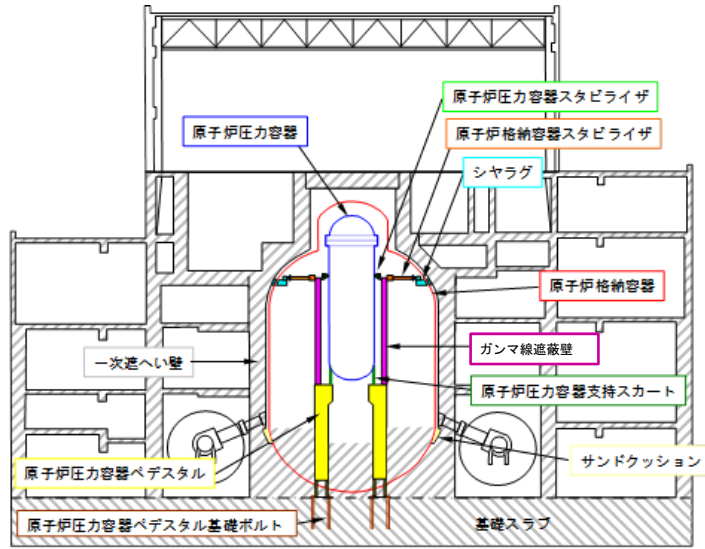
1. はじめに

原子炉建物内の原子炉格納容器（以下「PCV」という。）、原子炉圧力容器（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。

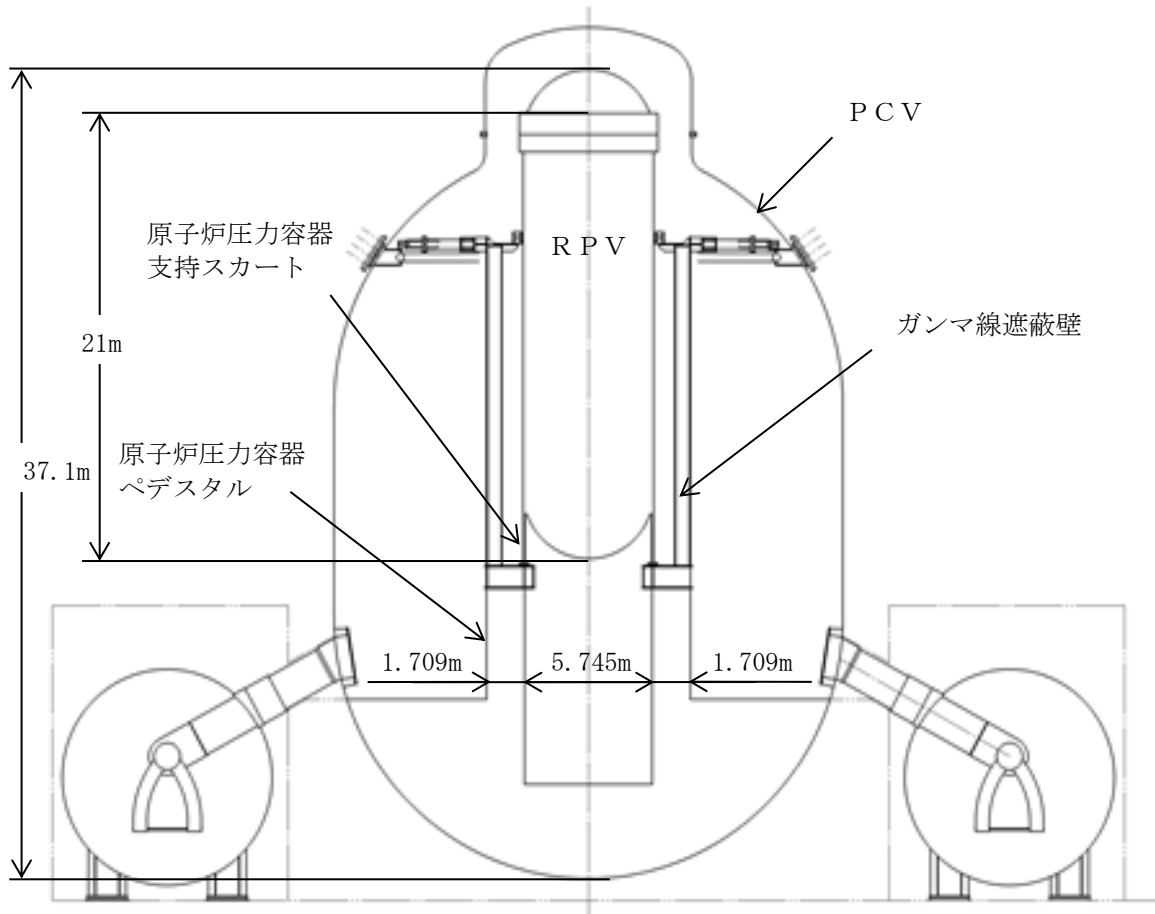
原子炉建物、PCV、RPV及びRPVペデスタルの概略断面図を第1-1図に、RPV内部構造物の構造図を第1-2図に示す。また、原子炉建物－大型機器連成解析に係る手順を第1-3図に示す。

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－原子炉圧力容器モデル（以下「PCV－RPVモデル^{注1}」という。）と原子炉圧力容器－炉内構造物モデル（以下「RPV－Rinモデル^{注2}」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－原子炉圧力容器－炉内構造物モデル（以下「PCV－RPV－Rinモデル^{注3}」という。）を用いる。これに合わせて、原子炉圧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。

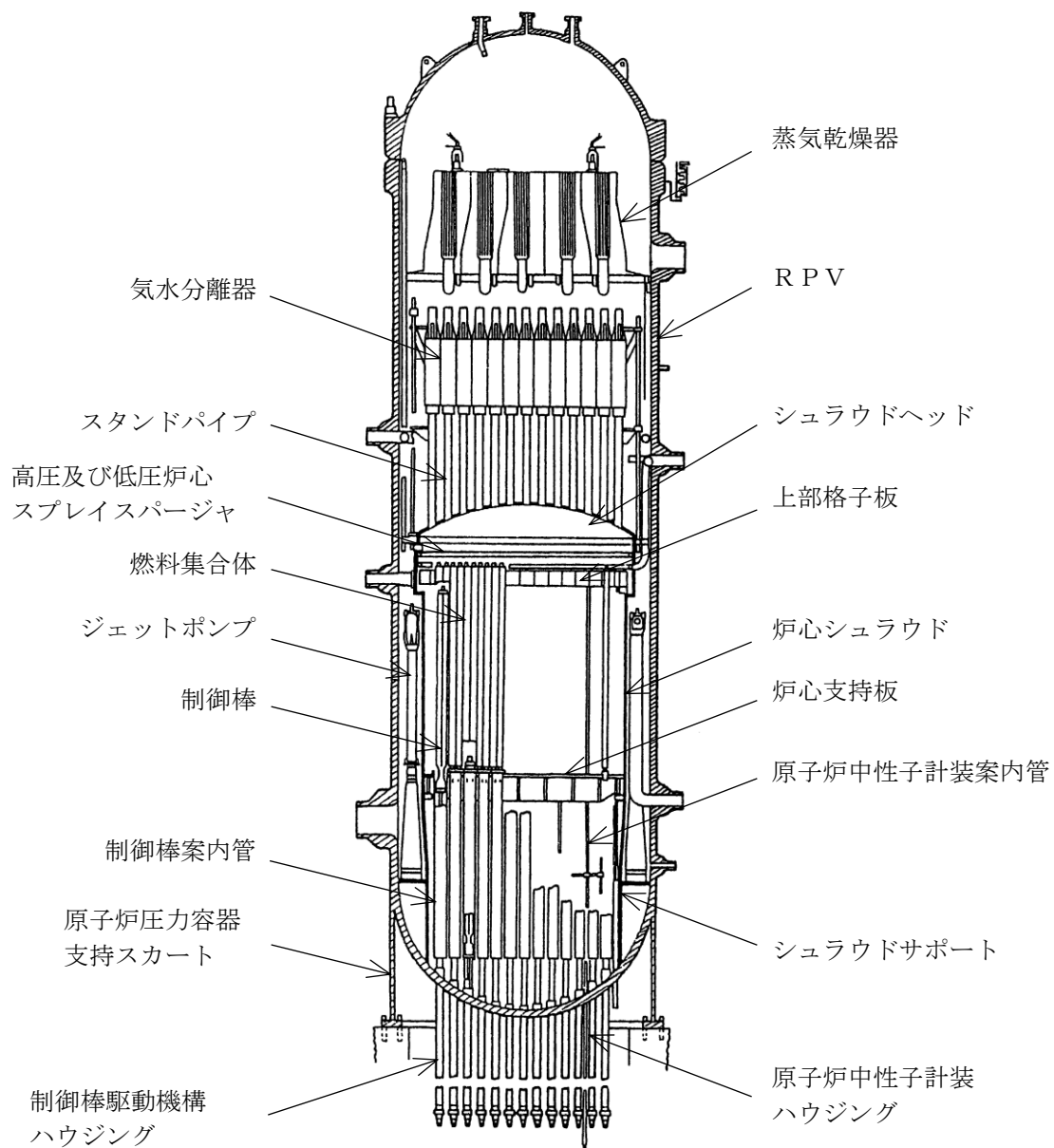
また、鉛直方向に動的地震力が導入されたことから、原子炉本体及び炉内構造物について、鉛直方向の応答を適切に評価する観点で、水平方向応答解析モデルとは別に鉛直方向の地震応答解析モデル（PCV－RPV－Rinモデル）を新たに採用し、鉛直地震動に対する評価を実施する。鉛直方向応答解析モデルは、他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である。



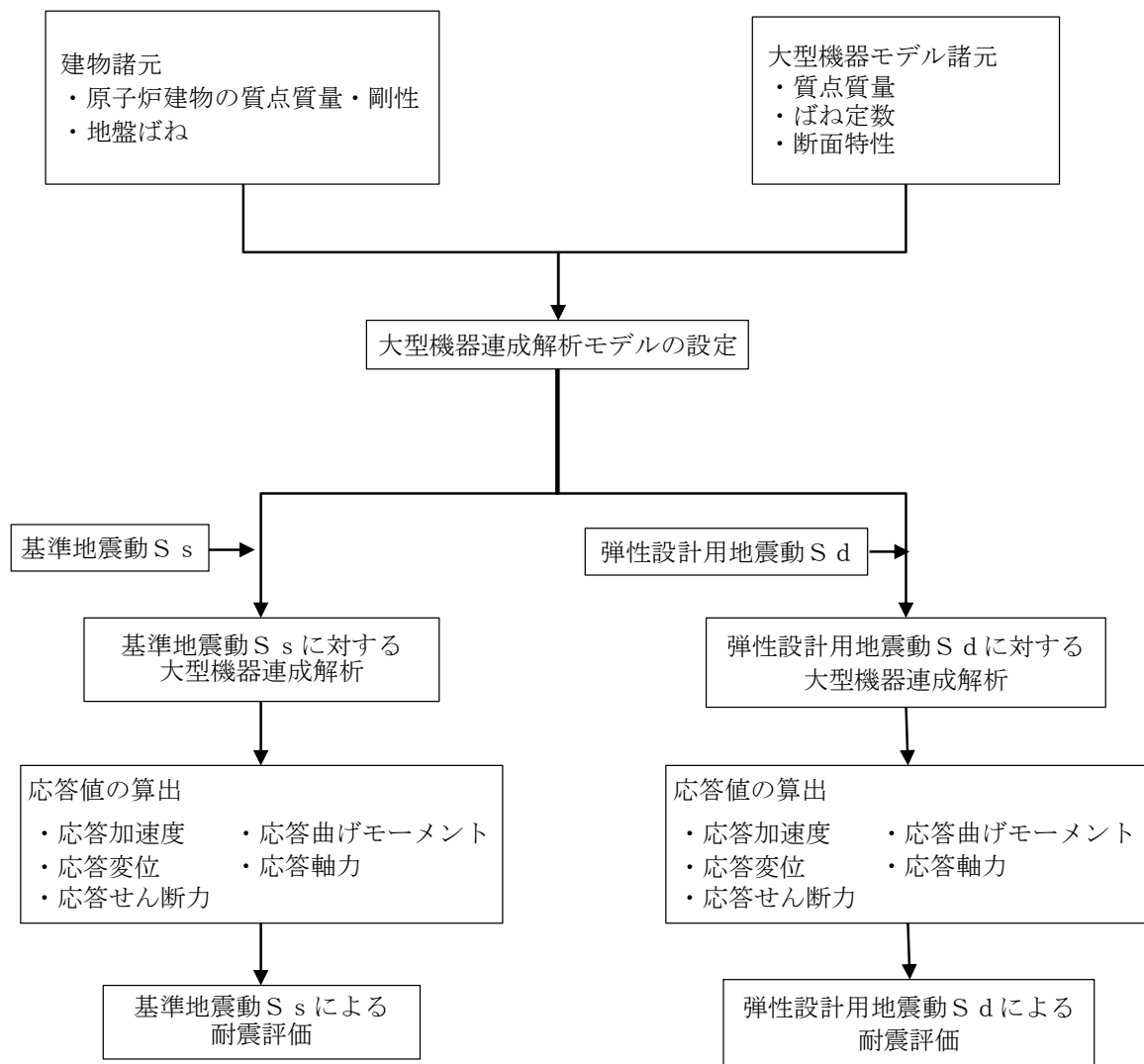
原子炉建物概略断面図



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DESTALと結合される。

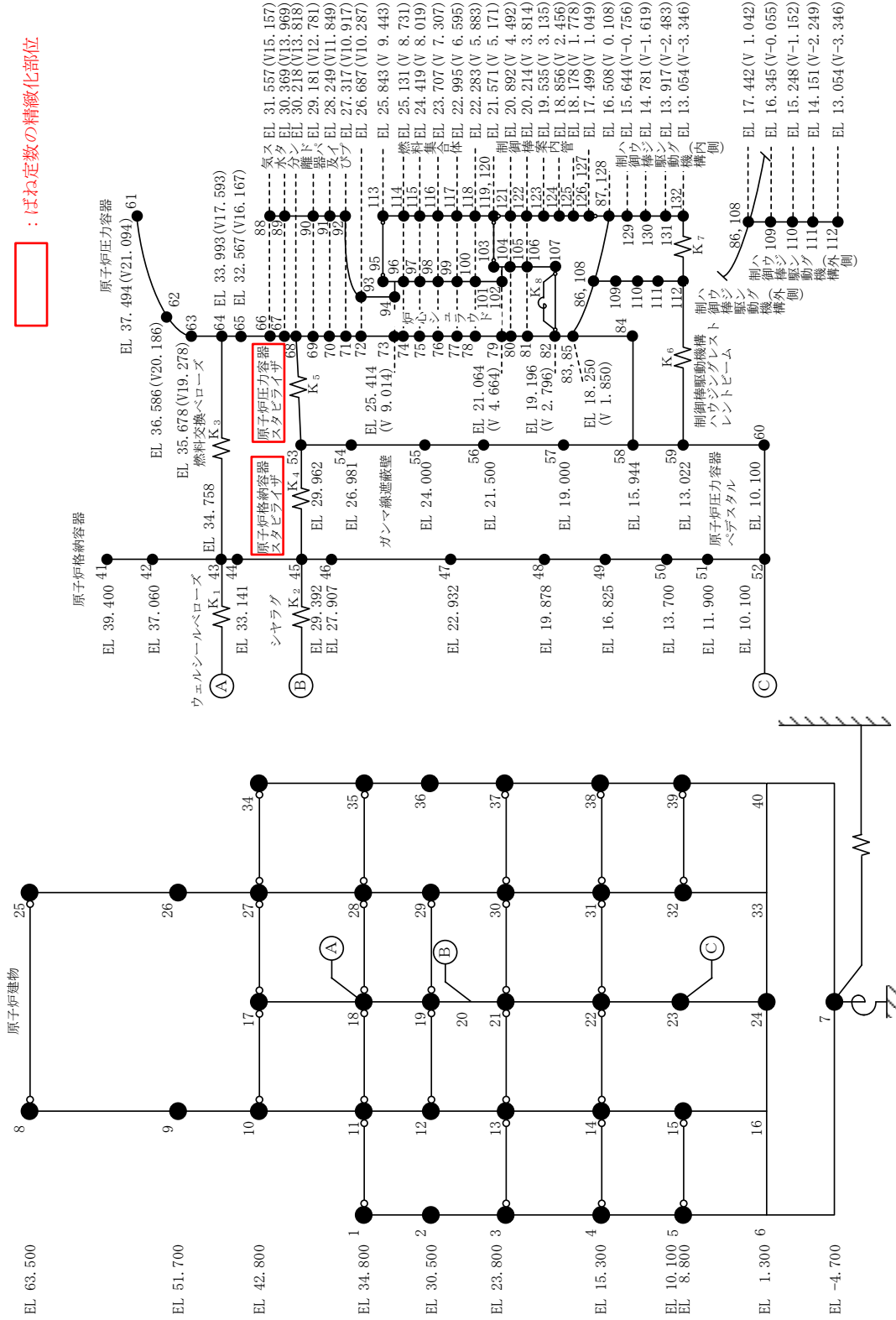
建設工認において、原子炉建物－大型機器連成解析モデルを用いた水平方向の地震応答解析は、工認申請の進捗に合わせて、PCV－RPVモデル、RPV－Rinモデルの2種類の応答解析モデルを用いて実施していた。しかし、今回工認では建設工認のように設計進捗に応じたモデルの使い分けの必要がないこと及び実機に合わせて構造体をモデル化できることから、RPV－RinモデルにPCVを追加したPCV－RPV－Rinモデルを水平方向の大型機器連成解析モデルとする。建設工認及び今回工認の原子炉建物－大型機器連成解析モデルを第2.1-1表に示す。今回工認で用いるPCV－RPV－Rinモデルの質点位置、質量、断面特性は、既工認の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。

第 2.1-1 表 建設工認及び今回工認における原子炉建物—大型機器連成解析モデル

		建設工認		今回工認	
	PCV-RPVモデル	RPV-Rinモデル	PCV-RPV-Rinモデル		
モデル化範囲	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建物 PCV ガンマ線遮蔽壁 RPVペDESTAL RPV (炉内構造物を付加質量として考慮) 	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建物 (PCVを付加質量として考慮) ガンマ線遮蔽壁 RPVペDESTAL RPV 炉内構造物 (気水分離器及びスタンドパイプ, 炉心シュラウド, 燃料集合体, 制御棒案内管) 制御棒駆動機構ハウジング 	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建物 PCV ガンマ線遮蔽壁 RPVペDESTAL RPV 炉内構造物 (気水分離器及びスタンドパイプ, 炉心シュラウド, 燃料集合体, 制御棒案内管) 制御棒駆動機構ハウジング 		
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)



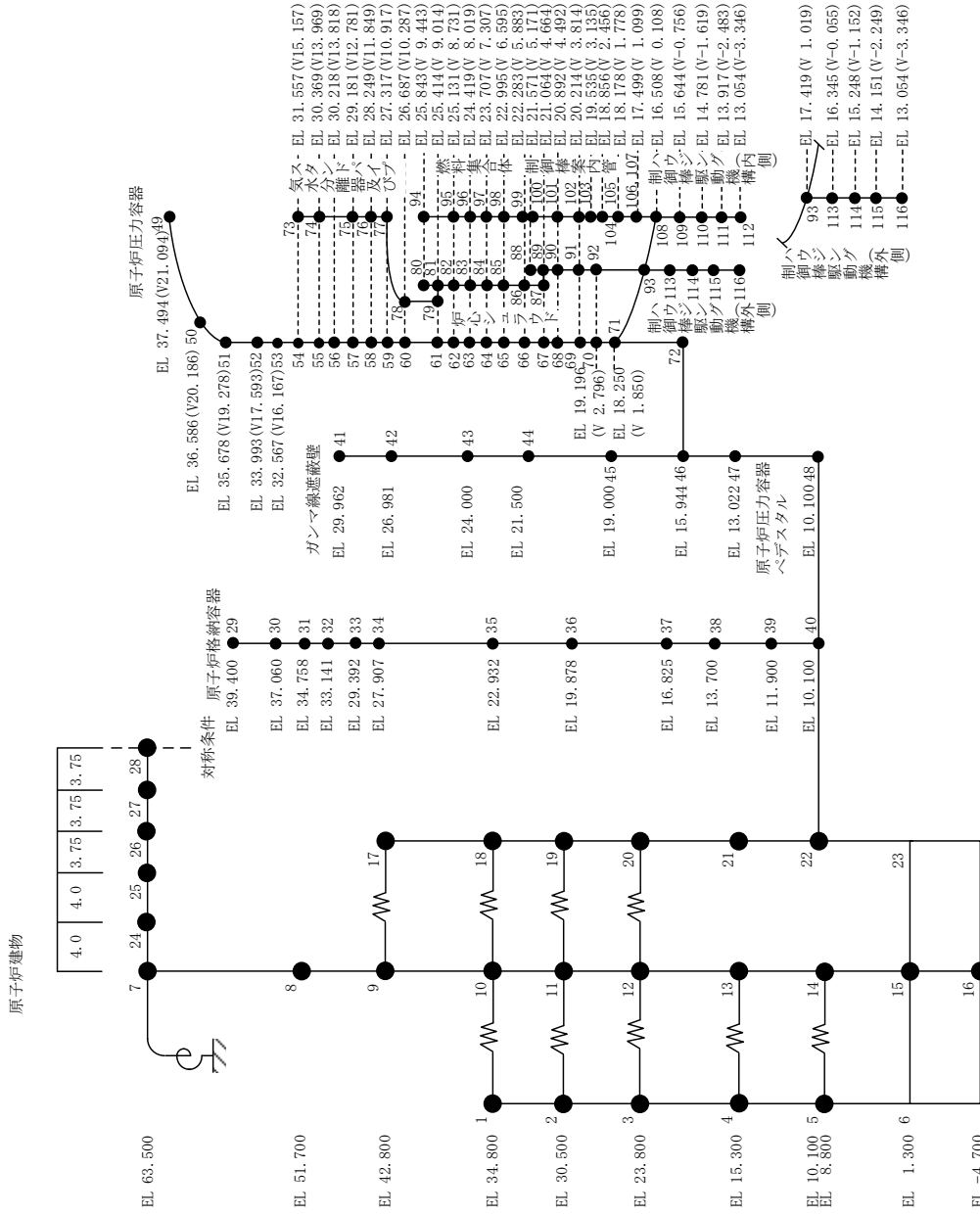
第 2.1-1 図 大型機器連成系応答解析モデル (NS 方向)

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ペデスタルの上端に剛に結合されており、RPVペデスタルの下端は、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。

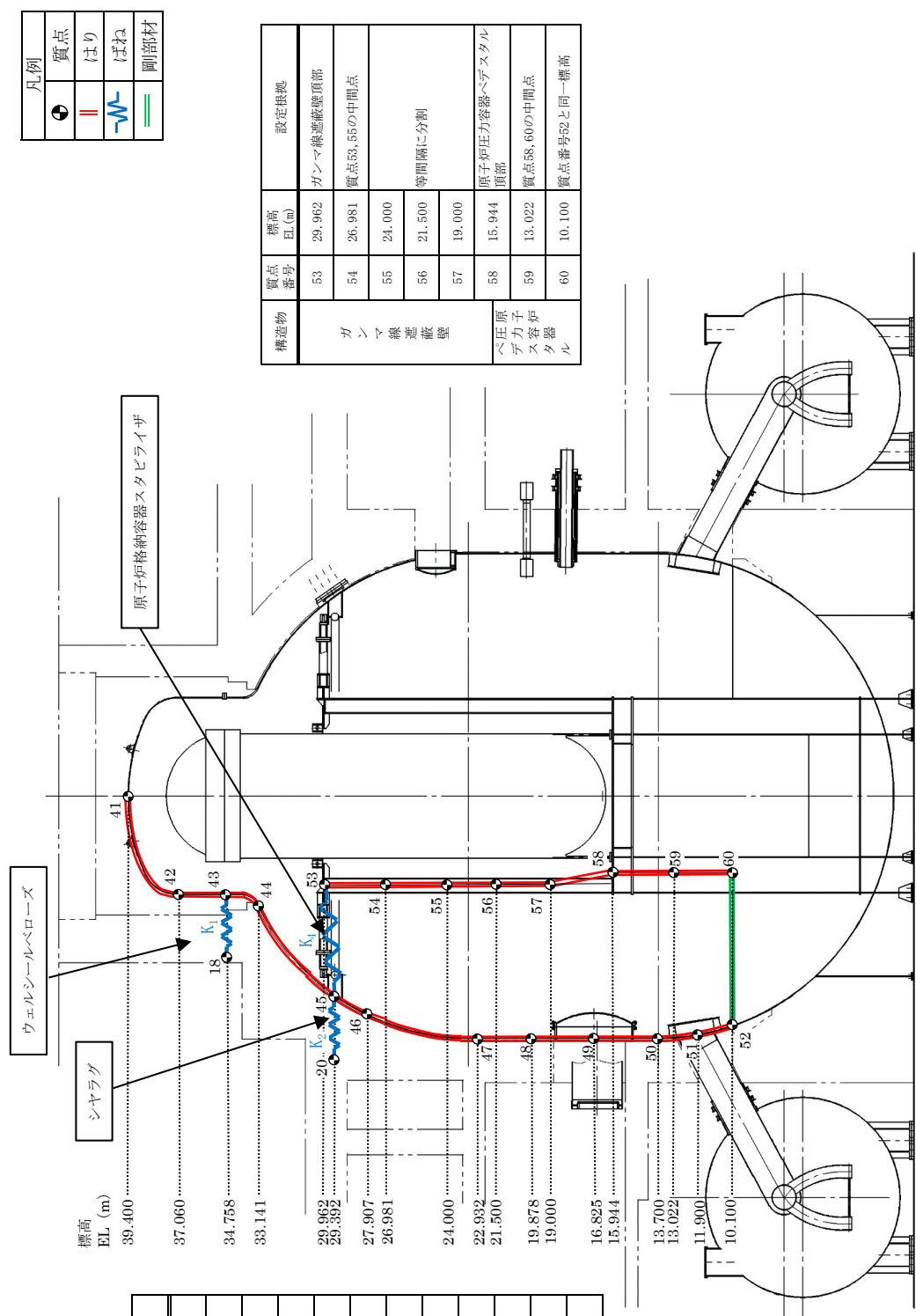
記号	内容
●	質点
— —	軸ばね
— /—	せん断ばね
— — —	回転ばね
— — — —	鉛直ばね
—	はり (屋根トラス部)



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。



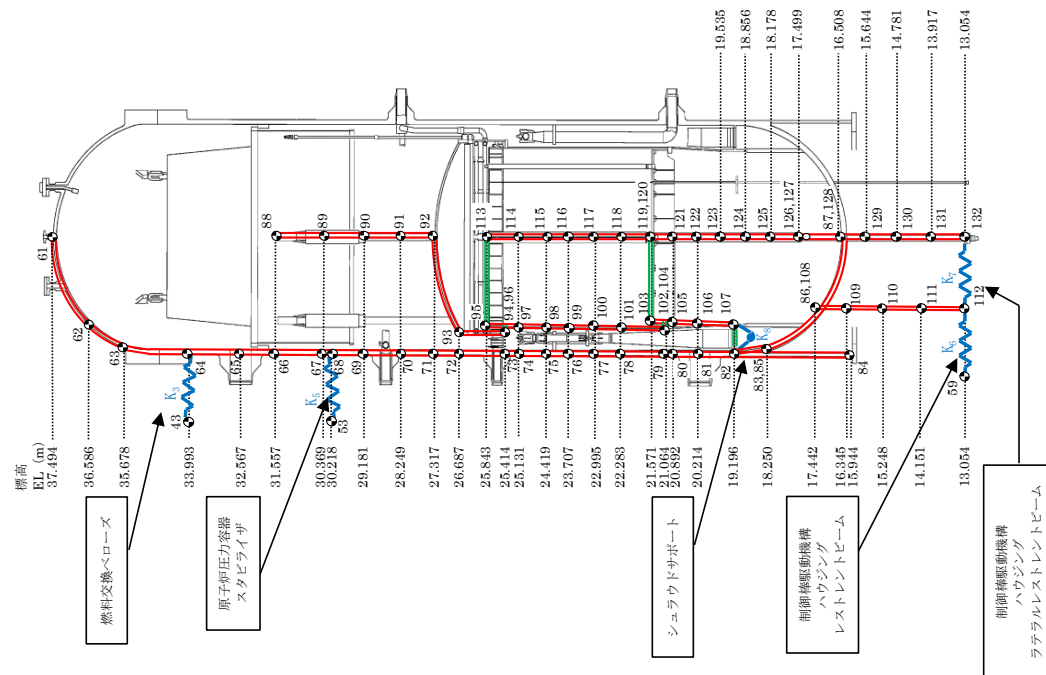
凡例	
●	質点
	はり
~	ばね
—	副部材

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	
51	11.900	ペント管と原子炉格納容器の接続点	
52	10.100	ドライウエル基礎部コネクタート上端	

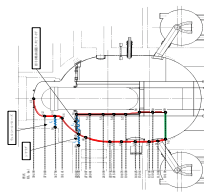
構造物	質点番号	標高 EL (m)	設定根拠
ガンマ線遮蔽壁	53	29.962	ガンマ線遮蔽壁頂部
	54	26.981	質点53, 55の中間点
	55	24.000	等間隔に分割
	56	21.500	
	57	19.000	
ベ圧原子炉压力容器	58	15.944	原子炉压力容器ペデスタル頂部
	59	13.022	質点58, 60の中間点
	60	10.100	質点番号52と同一標高

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ペデスタル

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トモの接線位置
	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	スタンドハイク頂部
	91	28.249	スタンドハイク中央
	92	27.317	シュワウドヘッド胴板頂部
	93	26.687	シュワウド上部胴板上端
	94	25.414	炉心シュワウド上部胴板下端
	95	25.843	
	96	25.414	
	97	25.131	
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	
	102	21.064	炉心シュワウド中間胴板上端
	103	21.571	炉心支持板位置
	104	21.064	炉心シュワウド下部胴板上端
	105	20.892	質点番号121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板下端



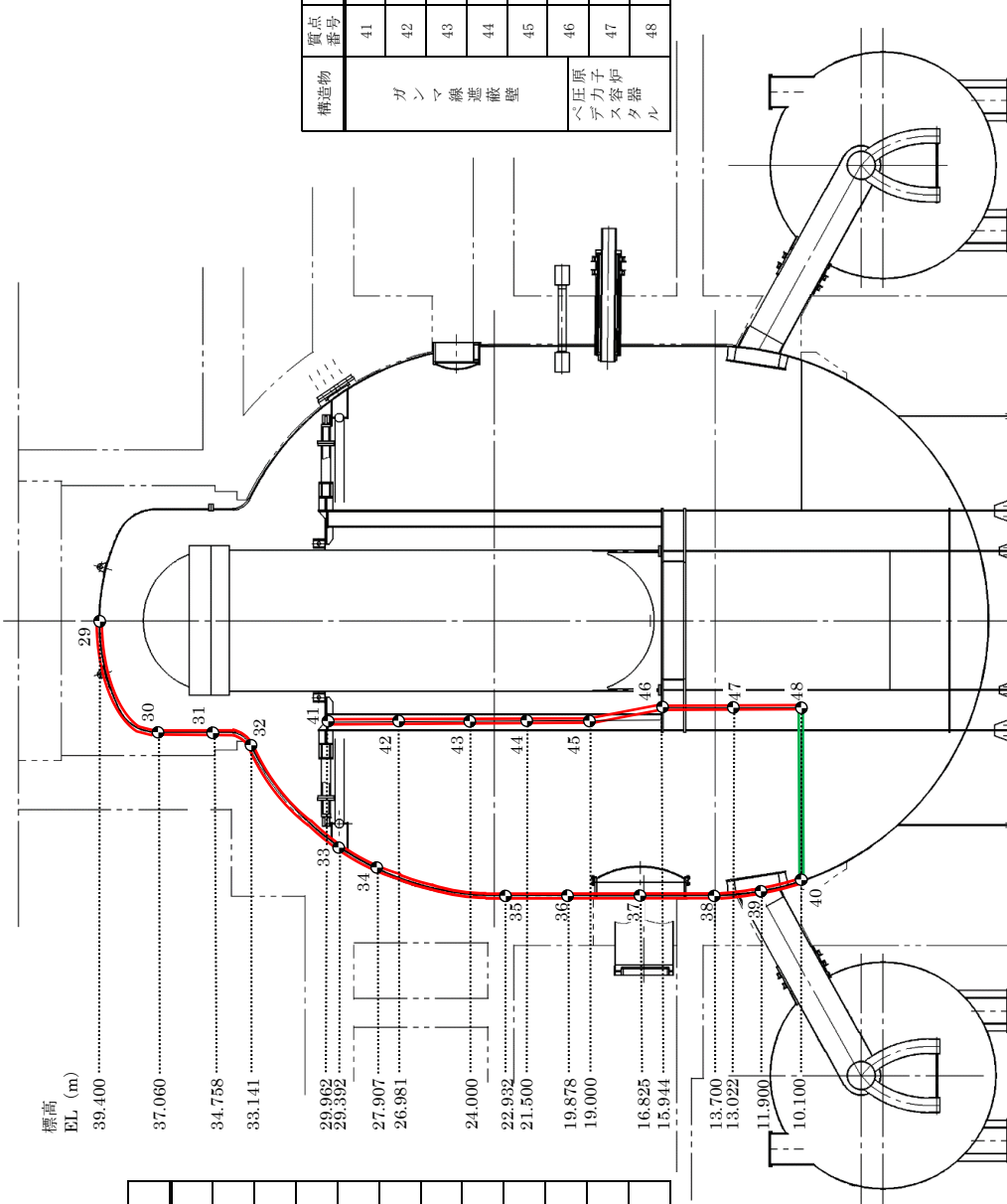
構造物	質点番号	標高 EL(m)	設定根拠
燃料集合体	113	25.843	上部格子板位置
	114	25.131	
	115	24.419	
	116	23.707	等間隔に分割
	117	22.995	
	118	22.283	
	119	21.571	炉心支持板位置
	120	21.571	炉心支持板位置
	121	20.892	
	122	20.214	
制御棒案内管	123	19.535	等間隔に分割
	124	18.856	
	125	18.178	
	126	17.499	制御棒案内管下端
	127	17.499	ハウジング上端
ハウジング	128	16.508	原子炉圧力容器底部
	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
ハウジング	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

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) RPV, 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

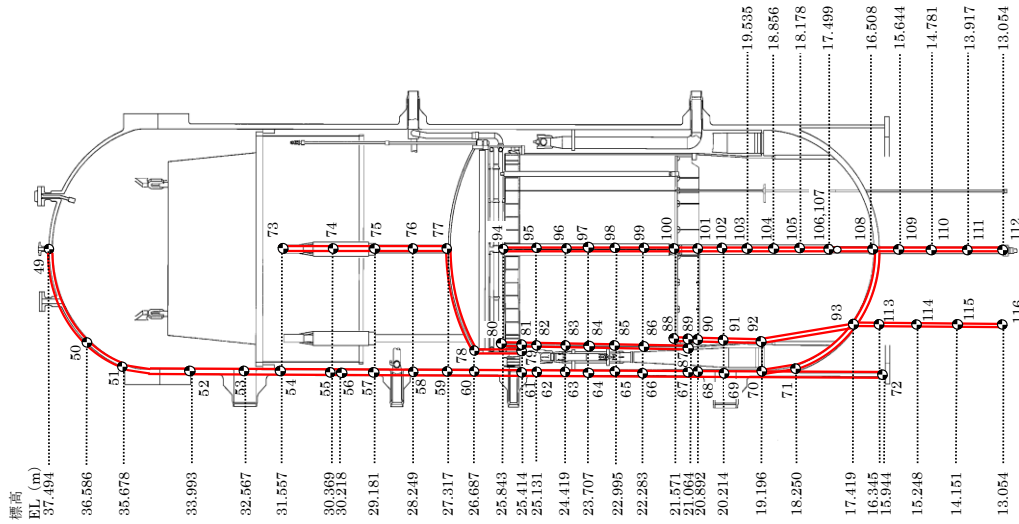
構造物	質点番号	標高 EL (m)	設定根拠
原子炉格納容器	29	39.400	原子炉格納容器頂部
	30	37.060	板厚変更点
	31	34.758	フランジ部
	32	33.141	板厚変更点
	33	29.392	シヤラグ位置
	34	27.907	板厚変更点
	35	22.932	材質変更点
	36	19.878	質点47, 49の二等分点
	37	16.825	機器搬出入口中央
	38	13.700	材質変更点
	39	11.900	ベント管と原子炉格納容器の接続点
	40	10.100	ドライウェル基礎部コネクタリート上端

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ペペスタル

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接合位置
原子炉圧力容器底部	71	18.250	支持スカート頂部
	72	15.944	支持スカート基部
	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	炉心シュラウド上部胴上端
	79	25.414	炉心シュラウド上部胴下端
	80	25.843	
	81	25.414	
	82	25.131	
炉心シュラウド	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	炉心シュラウド中間胴下端
	88	21.571	炉心支持板位置
	89	21.064	炉心シュラウド下部胴上端
	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	炉心シュラウド下部胴下端
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

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	炉心支持板位置
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
ハウジング	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

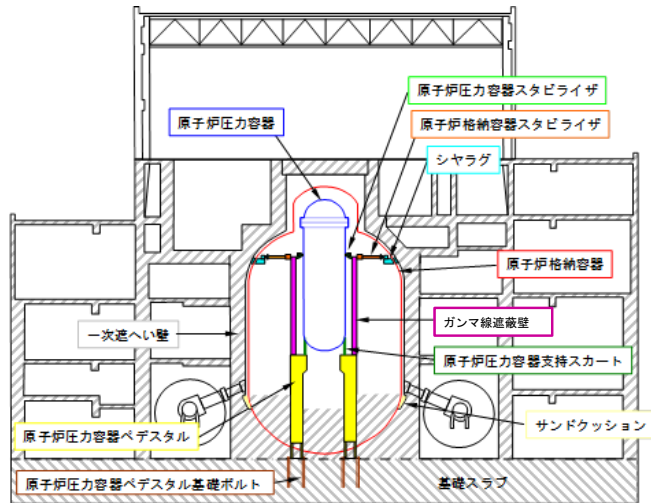
(2) RPV, 炉心シュラウド, 燃料集合体, 制御棒案内管及び制御棒駆動機構ハウジング等

4. 構造物間ばね定数の設定（既工認から変更ある部位）

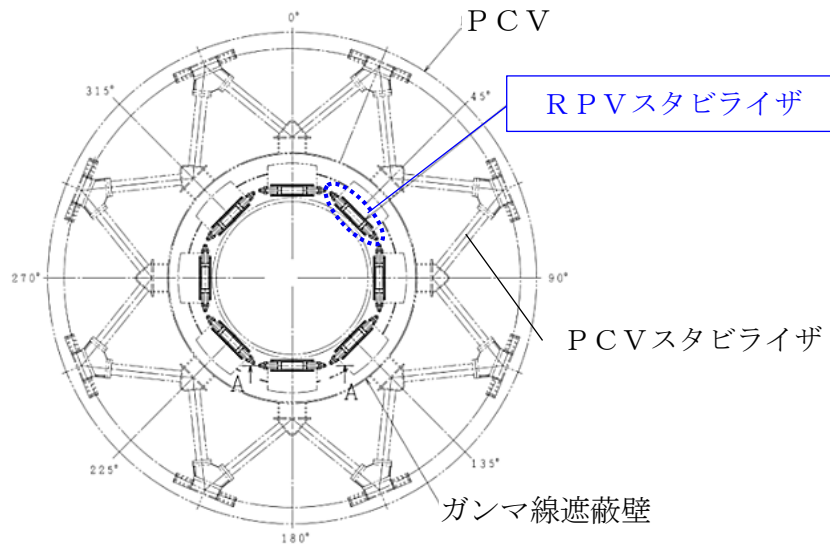
4.1 R P Vスタビライザ

4.1.1 R P Vスタビライザの構造

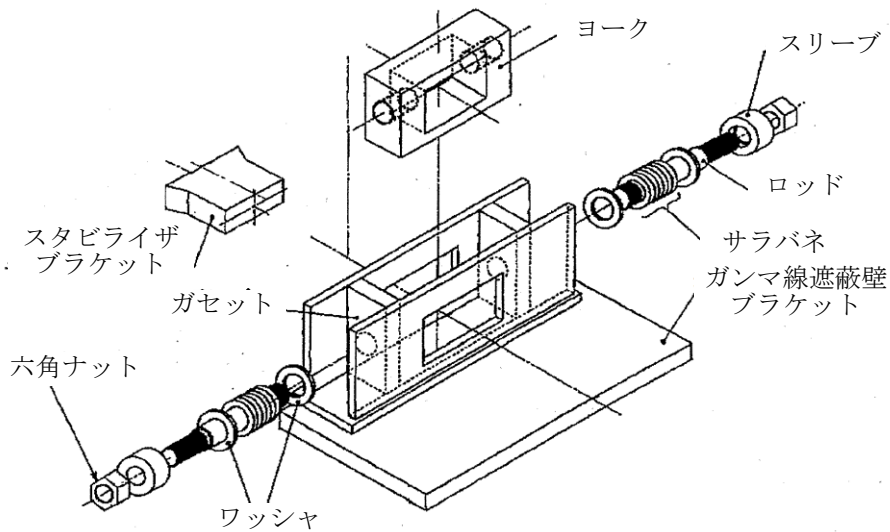
R P Vスタビライザは、ガンマ線遮蔽壁頂部に円周状に8箇所設置され、R P V付属構造物であるスタビライザブラケットをあらかじめ初期締付荷重を与えたサラバネを介して両側から挟み込む構造であり、サラバネを介して地震時の水平方向荷重をガンマ線遮蔽壁へ伝達させる機能を有する。R P Vスタビライザの概略図を第4.1.1-1図に示す。



原子炉建物全体模式図



P.C.V.平面図



R.P.V.スタビライザ分解図

第 4.1.1-1 図 R.P.V.スタビライザ概略図

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	9.6×10^6 [kN/m]	6.8×10^6 [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° 及び 270° 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° , 135° , 225° 及び 315° 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° , 135° , 225° 及び 315° 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。

$$W_2' = K_1 \cdot x \cdot \cos \alpha$$

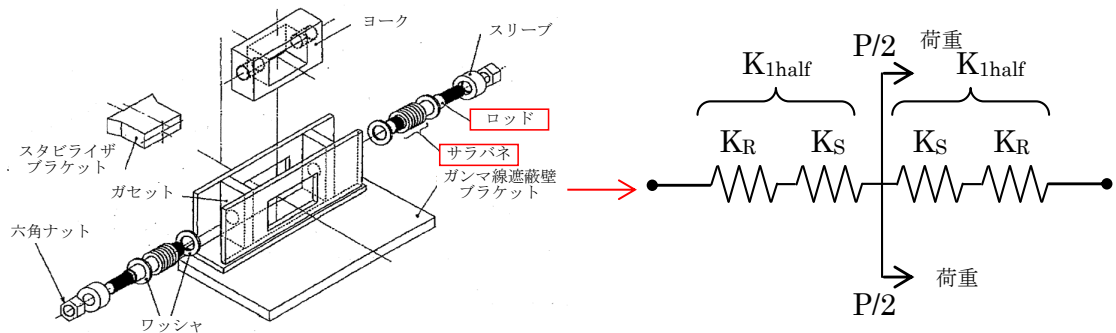
第4.1.3-2図内の拡大図の関係から強制変位 x と同じ方向の分力 W_2 は以下のとおりとなる。

$$W_2 = W_2' \cos \alpha = K_1 \cdot x \cdot \cos^2 \alpha$$

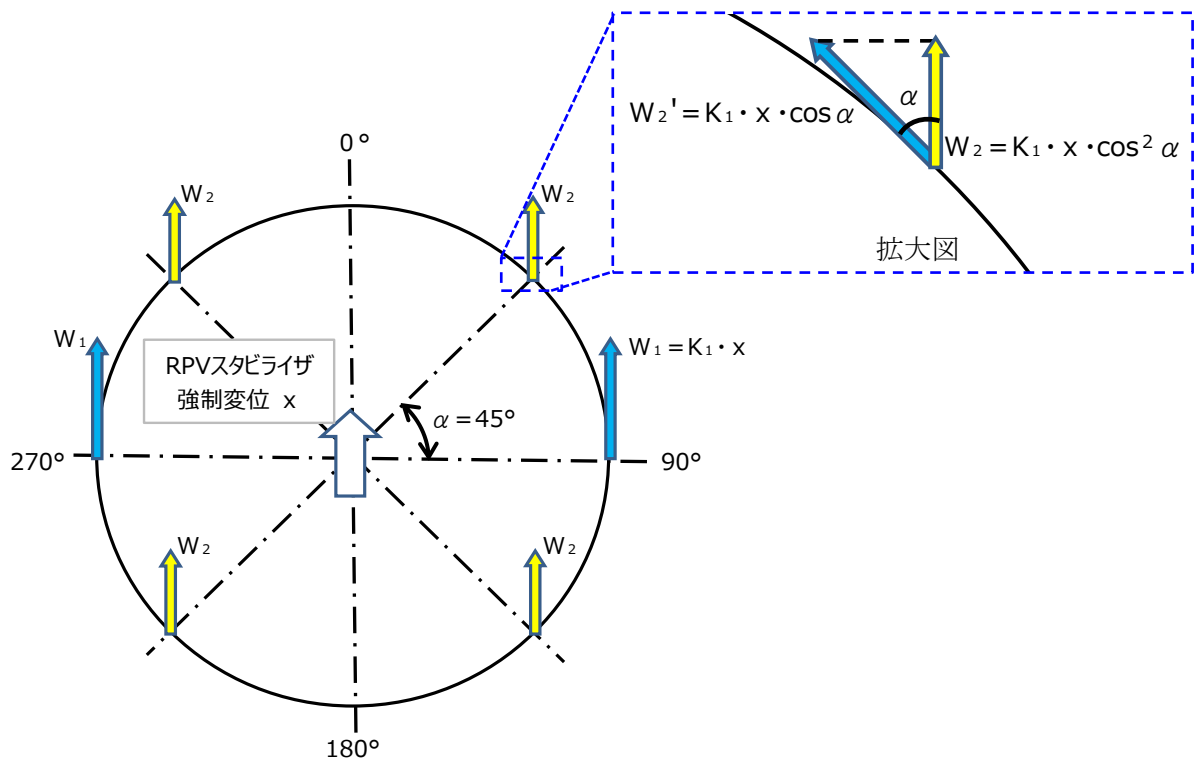
従って、RPVスタビライザ全体のばね定数 (K) は以下のとおりとなる。

$$W = 2 \cdot W_1 + 4 \cdot W_2 = 2 \cdot (K_1 \cdot x) + 4 \cdot (K_1 \cdot x \cdot \cos^2 \alpha) = 4 \cdot K_1 \cdot x$$

$$K = \frac{W}{x} = 4 K_1 = 4 \cdot \frac{2 \cdot K_S \cdot K_R}{K_S + K_R} = \frac{8 \cdot K_S \cdot K_R}{K_S + K_R}$$



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

今回工認においては、サラバネ及びロッドの他にRPV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4.1.4-1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、RPV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。

$$K_{1half(T)} = \frac{1}{\frac{1}{K_H} + \frac{1}{K_{SL}} + \frac{1}{K_W} + \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_R} + \frac{1}{K_G} + \frac{1}{K_{YT}}} \quad (\text{引張側})$$

$$K_{1half(C)} = \frac{1}{\frac{1}{K_H} + \frac{1}{K_{SL}} + \frac{1}{K_W} + \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_R} + \frac{1}{K_G} + \frac{1}{K_{YC}}} \quad (\text{圧縮側})$$

また、RPV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。

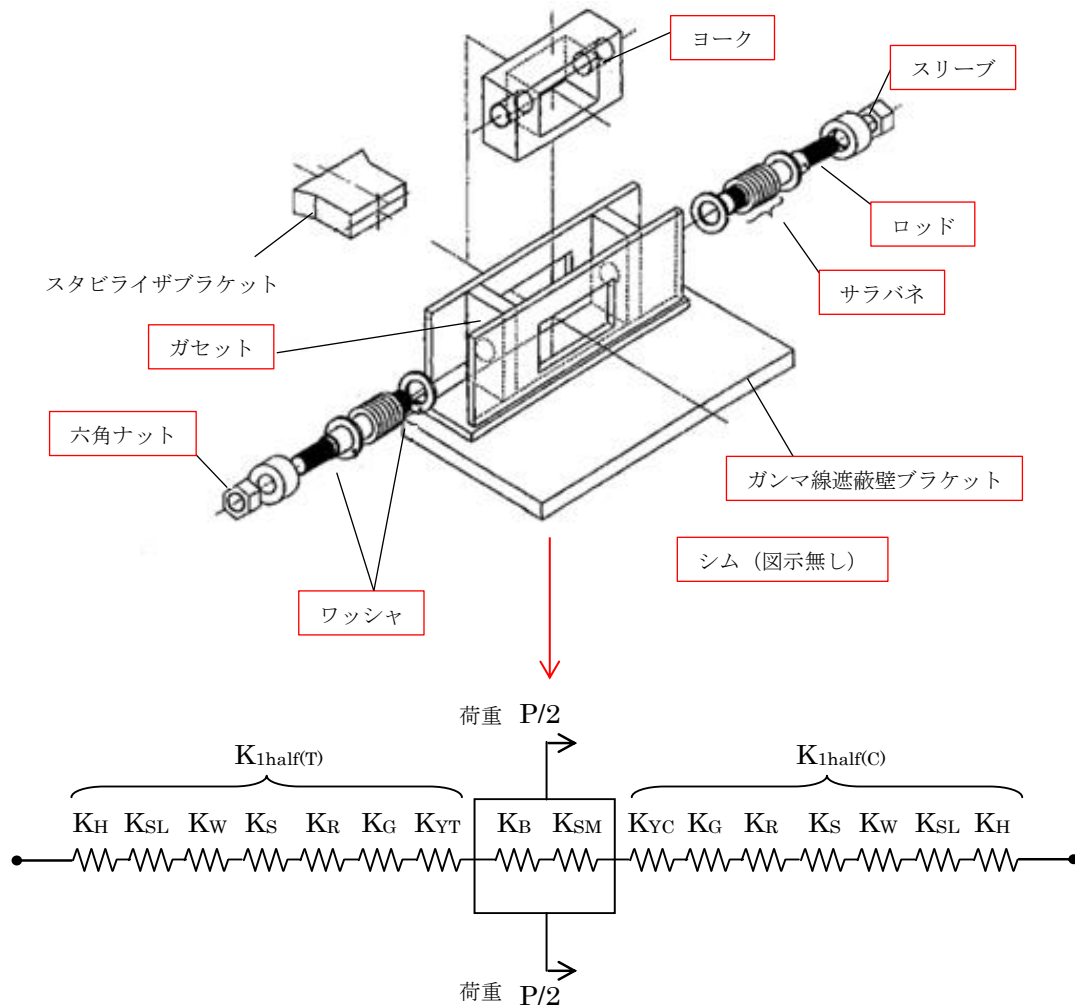
$$K = 4K_1 = \frac{4}{\frac{1}{K_{1half(T)} + K_{1half(C)}} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_{SM}}}$$

ここで、

- K : RPVスタビライザ8基分のばね定数
- K_1 : RPVスタビライザ1基分のばね定数
- K_{1half} : RPV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_H : 六角ナットのばね定数
- K_W : ワッシャのばね定数
- K_B : ガンマ線遮蔽ブラケットのばね定数
- K_{SM} : シムのばね定数

である。

上式による計算結果に基づき、R P Vスタビライザのばね定数を 6.8×10^6 [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、ガンマ線遮蔽ブラケット、シムの剛性を考慮してばね定数の算出を精緻化したためと考えられる。

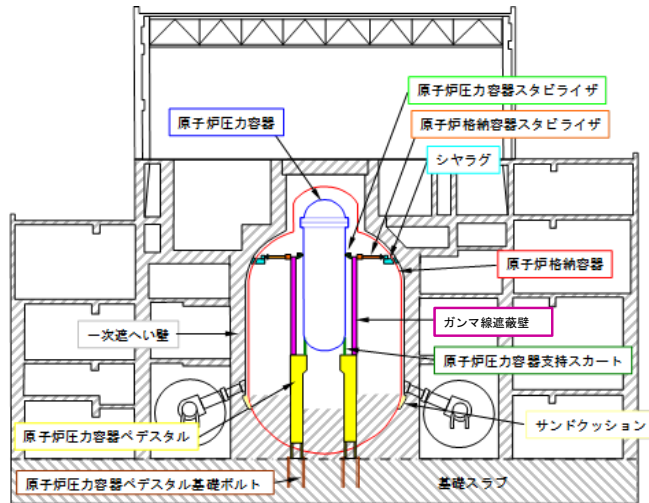


第 4.1.4-1 図 今回工認におけるばね定数算出モデル

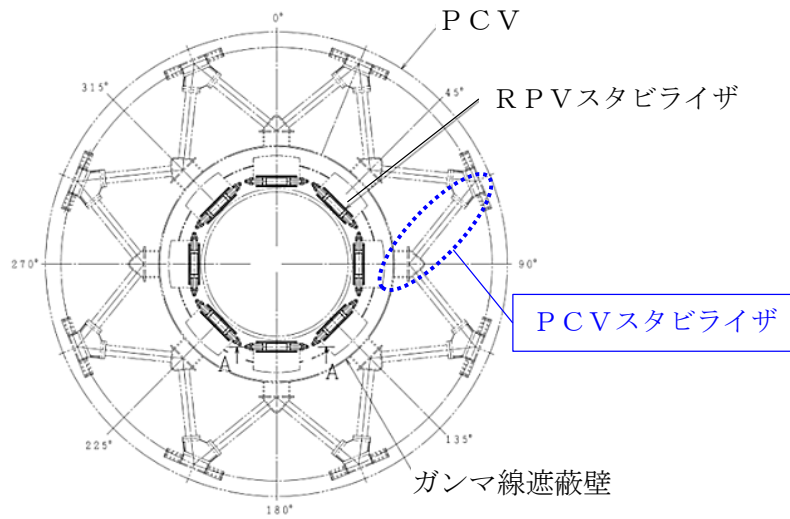
4.2 PCVスタビライザ

4.2.1 PCVスタビライザの構造

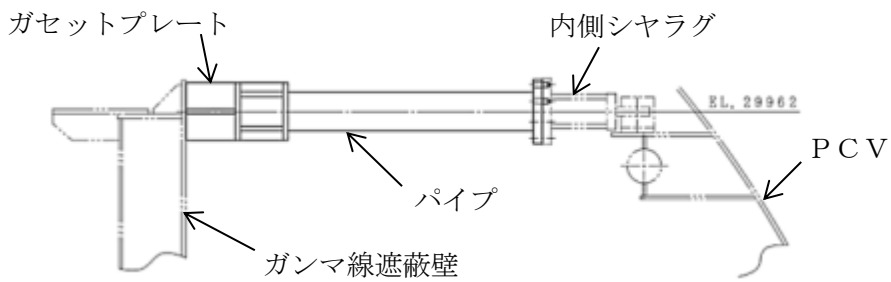
PCVスタビライザはガンマ線遮蔽壁外側上部に溶接で固定されたトラス状の構造物であり、多角形配置のシャラグを介してガンマ線遮蔽壁に作用する水平地震荷重をPCVに伝達する機能を有する。PCVスタビライザの概略図を第4.2.1-1 図に示す。PCVスタビライザの構成部材としては、円筒形状のパイプ、ガンマ線遮蔽壁との取り付け部であるガセットプレート、PCVとの取り付け部である内側シャラグからなる。ガセットプレートとガンマ線遮蔽壁の取付け部及び内側シャラグの構造を第4.2.1-2 図に示す。



原子炉建物全体模式図

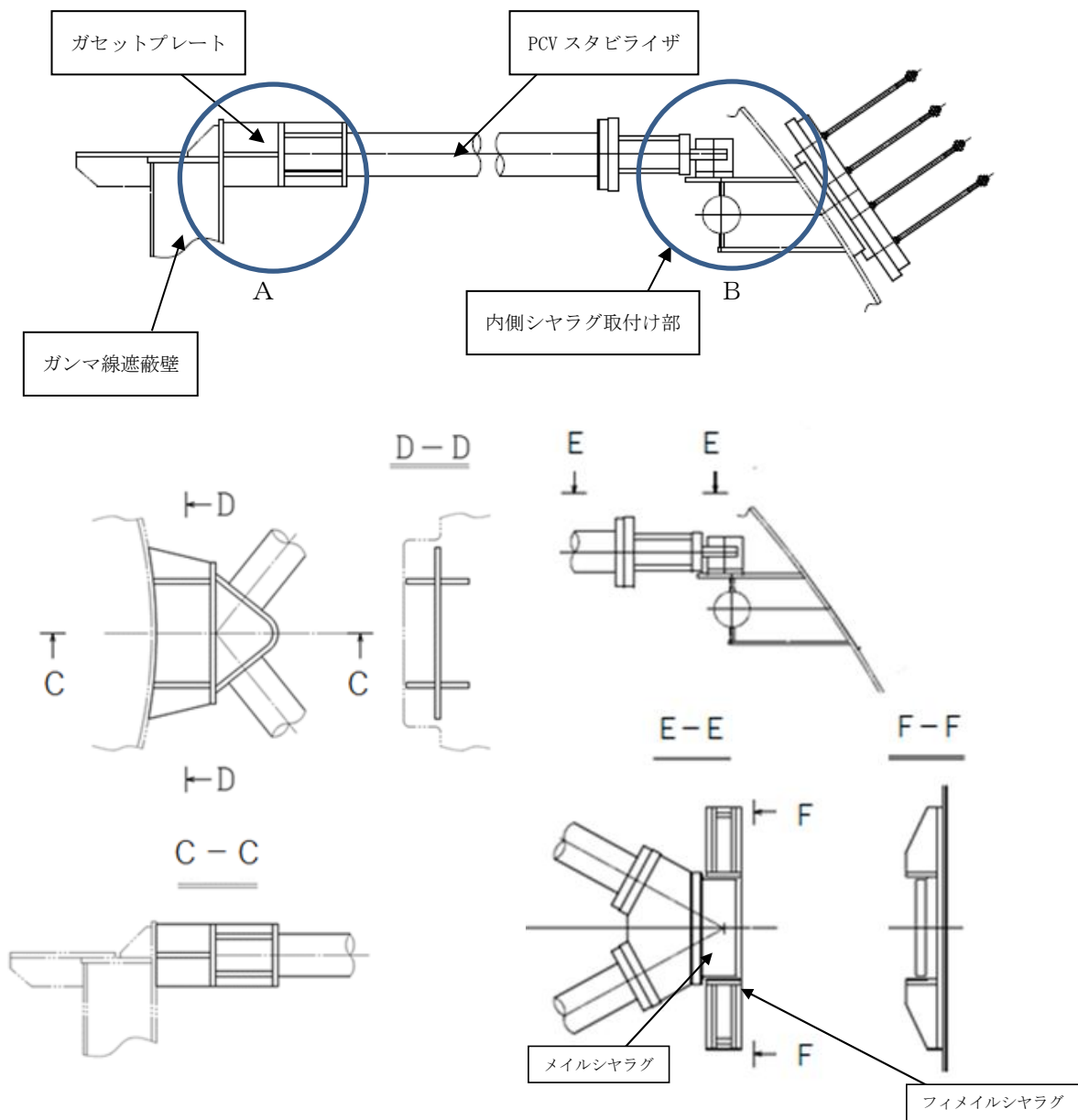


PCV平面図



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)

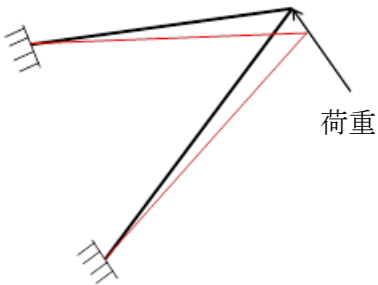
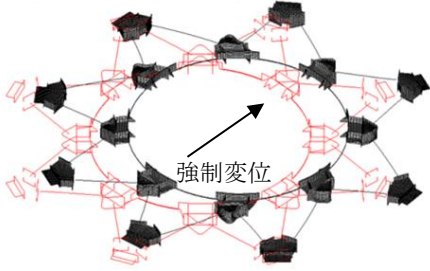
第 4.2.1-2 図 ガセットプレートとガンマ線遮蔽壁の取付け部及び内側シヤラグ構造

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。

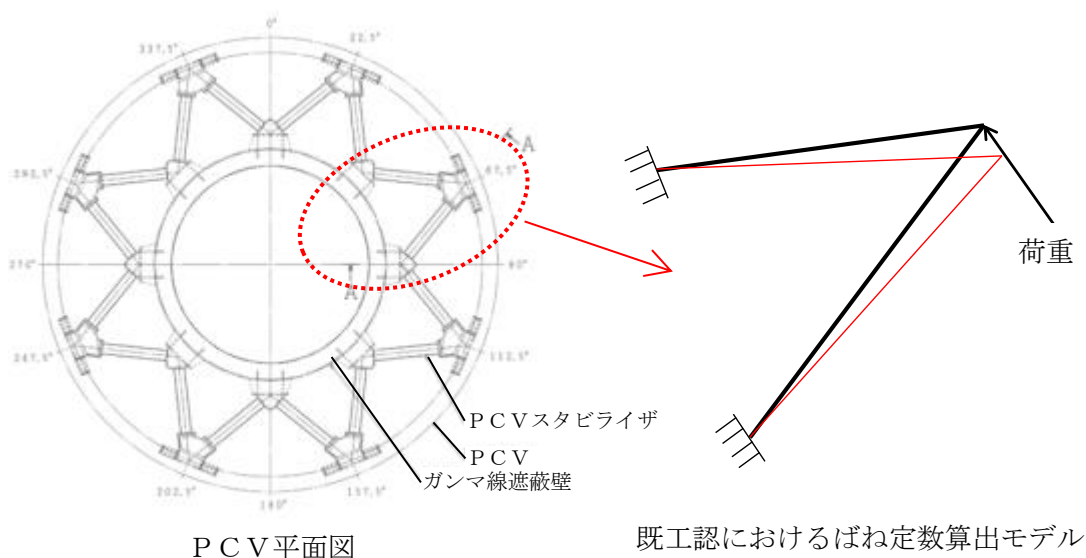
第4.2.2-1表 PCVスタビライザの変更点

	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	5.3×10^6 (kN/m)	3.5×10^6 (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 δ 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、

δ : トラスの荷重方向の変位

$\delta 1$: トラスの長さ方向の変位

θ : 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。

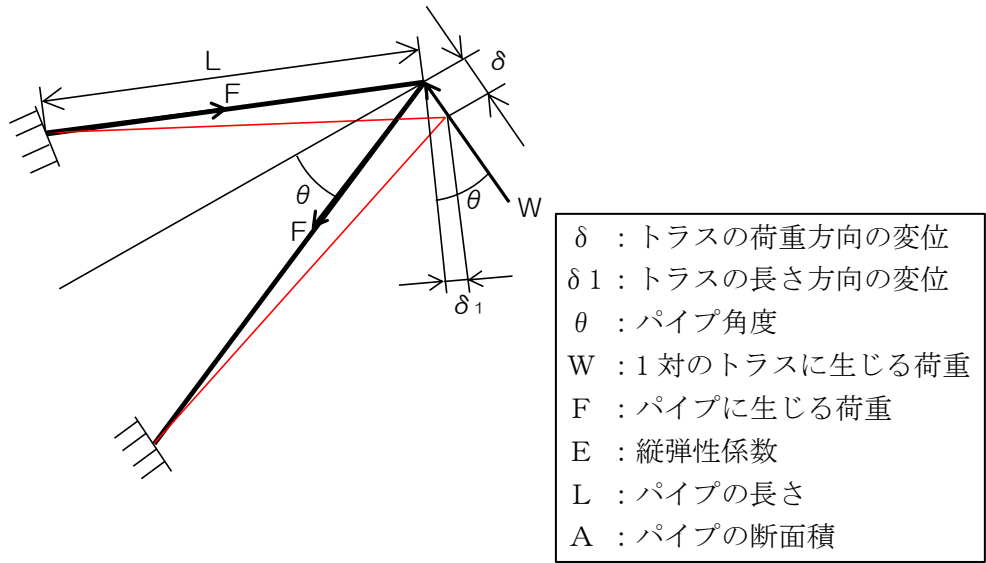
$$W = 2 \cdot E \cdot \frac{\delta 1}{L} \cdot A \cdot \sin \theta = 2 \cdot \frac{EA}{L} \cdot \sin^2 \theta \cdot \delta$$

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。

$$K = 4K_1 = 4 \cdot 2 \cdot \frac{EA}{L} \cdot \sin^2 \theta = 8 \cdot \frac{EA}{L} \cdot \sin^2 \theta$$



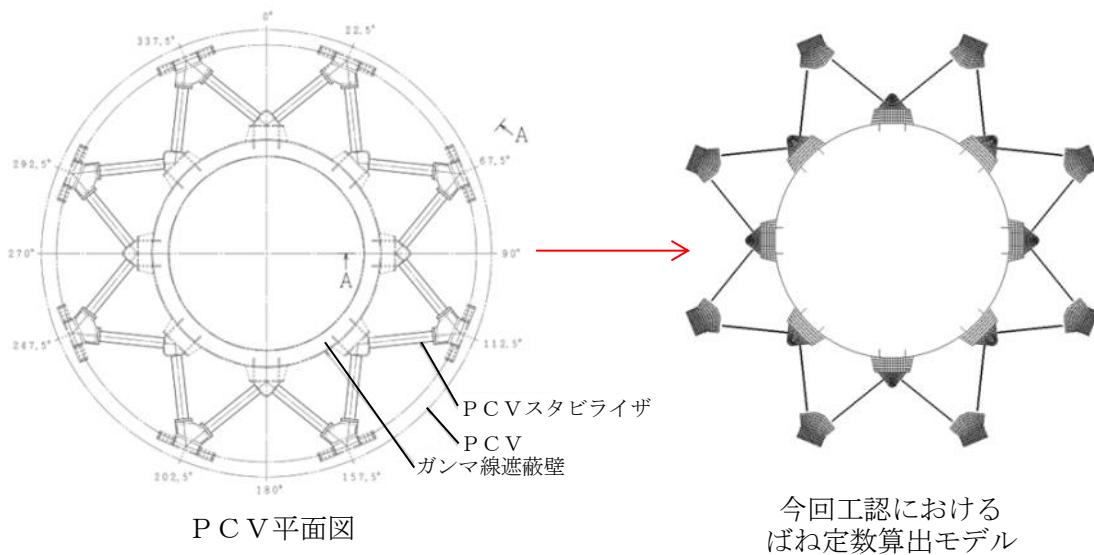
第 4.2.3.2-1 図 既工認におけるばね定数算出モデル

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。



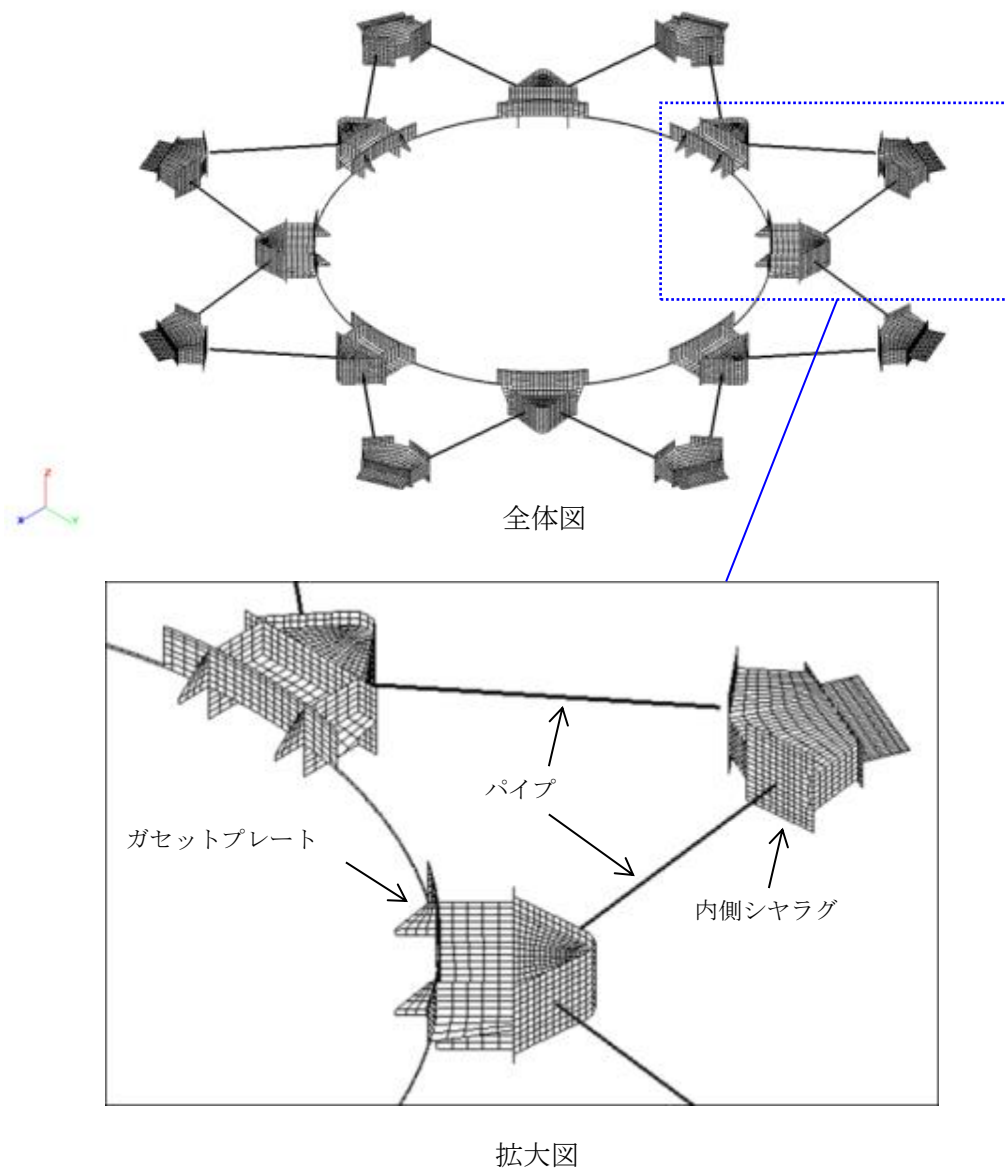
第 4.2.4.1-1 図 今回工認におけるばね定数算出のモデル化範囲

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

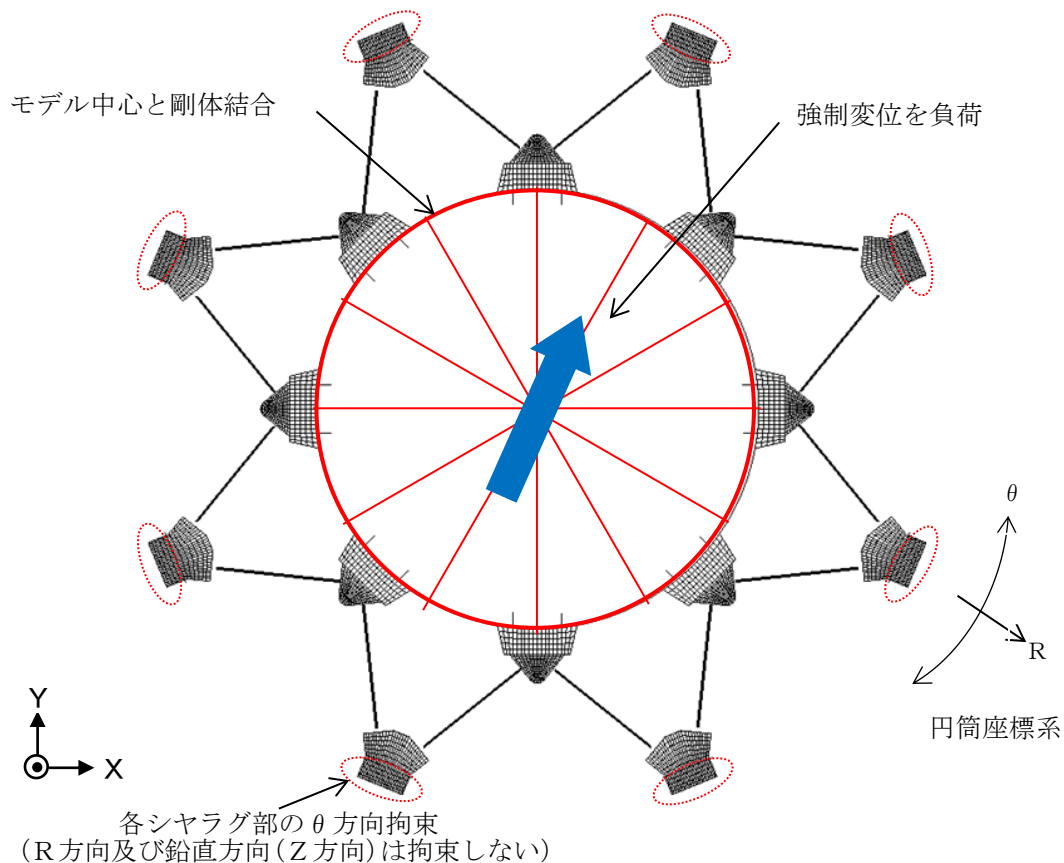
4.2.4.3 解析条件

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負荷する。なお、周方向に等間隔で設置された PCV 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 PCV 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、 θ 方向を拘束する。

PCV 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。

第 4.2.4.3-1 表 各構成部材の材質及び材料物性

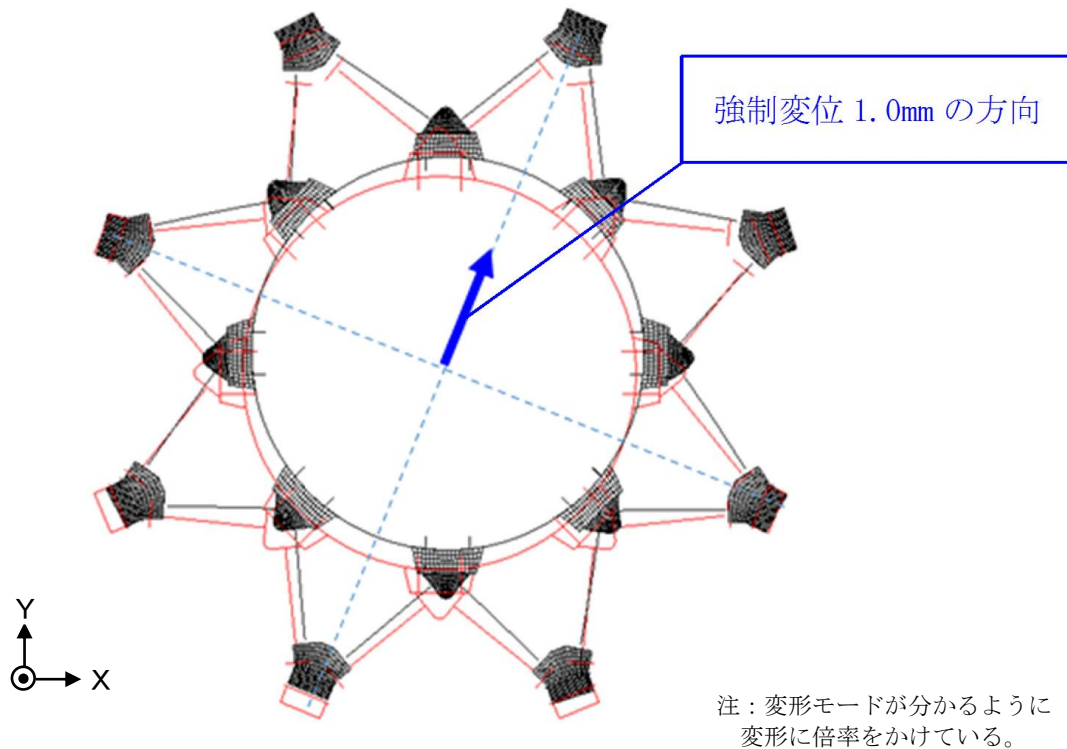
構成部材	材質	縦弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν
パイプ	STS410(STS42)	2.01×10^5	0.3
ガセットプレート	SM400B(SM41B)	2.01×10^5	0.3
内側シヤラグ	SGV480(SGV49)	2.01×10^5	0.3



第 4.2.4.3-1 図 境界条件及び負荷条件

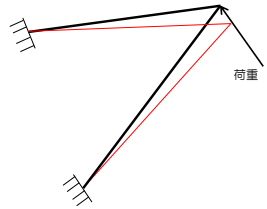
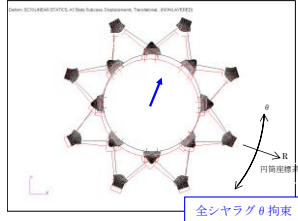
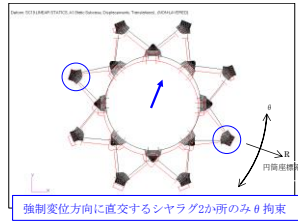
4.2.4.4 解析結果

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、PCVスタビライザのばね定数を 3.5×10^6 [kN/m] と設定する。既工認と比べて今回工認 (FEM解析) のばね定数が小さくなった要因を分析するため、今回工認の解析モデルに対して強制変位方向に直交する 2 箇所のみ θ 方向を拘束する条件に変更した参考モデルを用いてばね定数を算出した。ばね定数の比較結果を第 4.2.4.4-1 表に示す。参考モデルで求めたばね定数と今回工認のばね定数は概ね一致していることから、今回工認のモデルと参考モデルに共通する変更点であるモデル化対象の見直し (ガセットプレート及び内側シヤラグをシェル要素でモデル化してその剛性を考慮) が、PCVスタビライザ全体としてのばね定数が低減した主な要因と考えられる。



第 4.2.4.4-1 図 変形図

第 4.2.4.4-1 表 既工認と今回工認のばね定数の比較

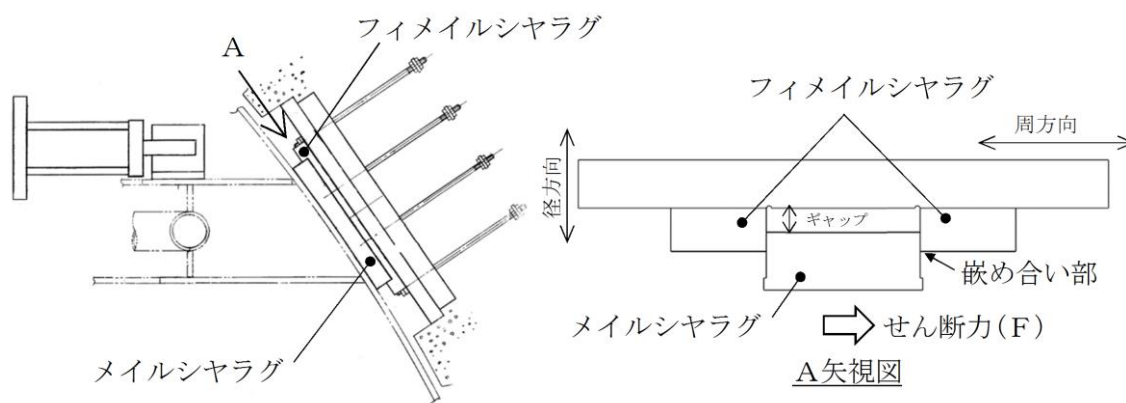
	既工認モデル	今回工認モデル	参考モデル
計算方法	1 対のトラスのばね定数を手計算で求め、1 対分のばね定数を 4 倍して全体のばね定数を算出	F E M解析結果から全体のばね定数を算出	<ul style="list-style-type: none"> ・今回工認のモデルを強制変位方向に直交する 2 箇所シヤラグのみ θ 方向を拘束する条件に変更して F E M解析を実施 ・F E M解析結果はトラス 2 対分のばね定数に相当するため、これを 2 倍して全体のばね定数を算出
モデル変形図			
ばね定数 (全体)	5.3×10^6 [kN/m]	3.5×10^6 [kN/m]	3.9×10^6 [kN/m]

5. 構造物間ばね定数の設定（既工認から変更ない部位）

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。

$$v = \frac{1}{G} \int_0^x \left(\frac{\kappa \cdot F}{A} \right) dx = \frac{\kappa \cdot F}{G} \left(\frac{l_1}{A_1} + \frac{l_2}{A_2} + \frac{l_3}{A_3} \right)$$

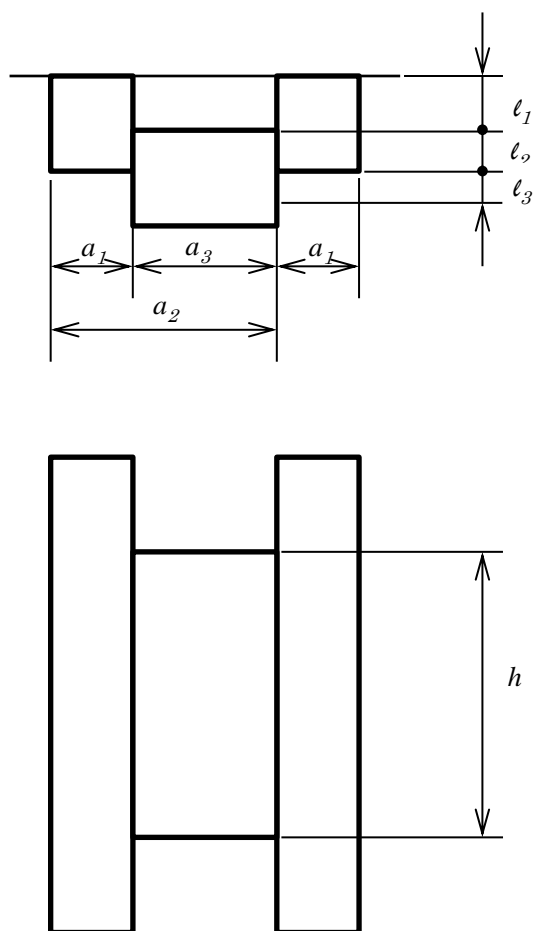
$$k = \frac{F}{v} = \frac{G}{\kappa} \left(\frac{l_1}{A_1} + \frac{l_2}{A_2} + \frac{l_3}{A_3} \right)^{-1}$$

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,

- ν : せん断ひずみ
- G : せん断弾性係数
- κ : 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

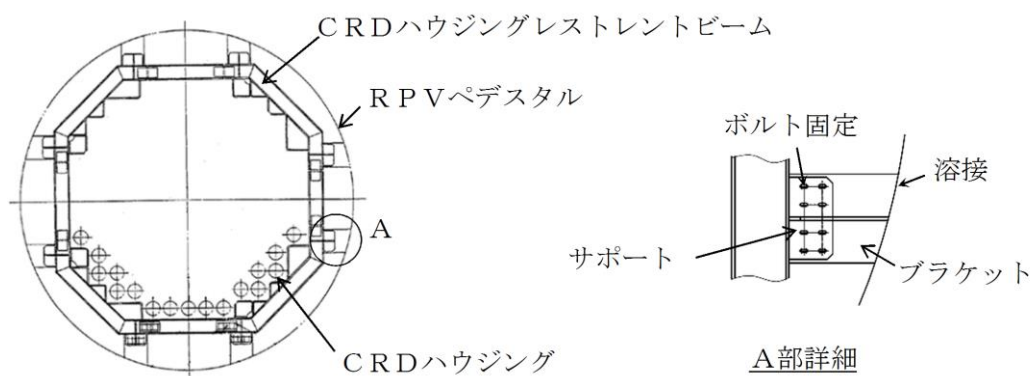
5.2 制御棒駆動機構ハウジングレストレントビーム

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ペデスタル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

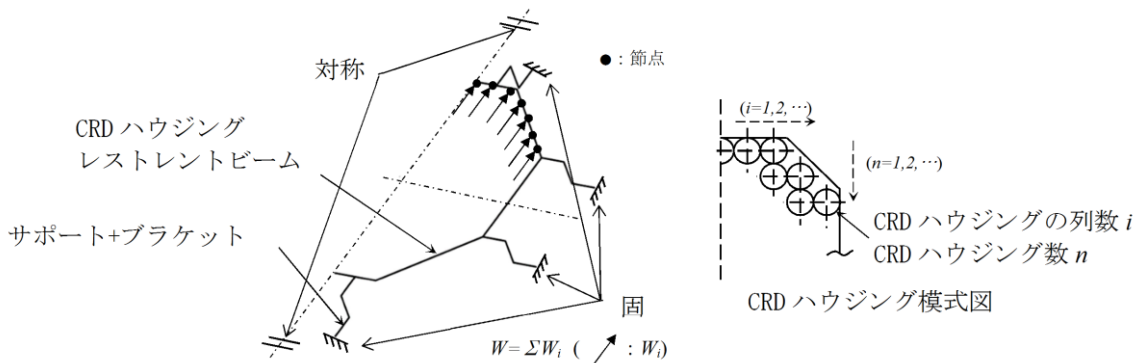
計算機コード「SAP-IV」により、各部材ごとに断面積、断面二次モーメント、重量等を与えるビーム要素モデルで解析する。

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° 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 ν
CRDハウジング レストレントビーム	SS400	1.92×10^5	0.3
サポート	SM400A	1.92×10^5	0.3
ブラケット	SM400A	1.92×10^5	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

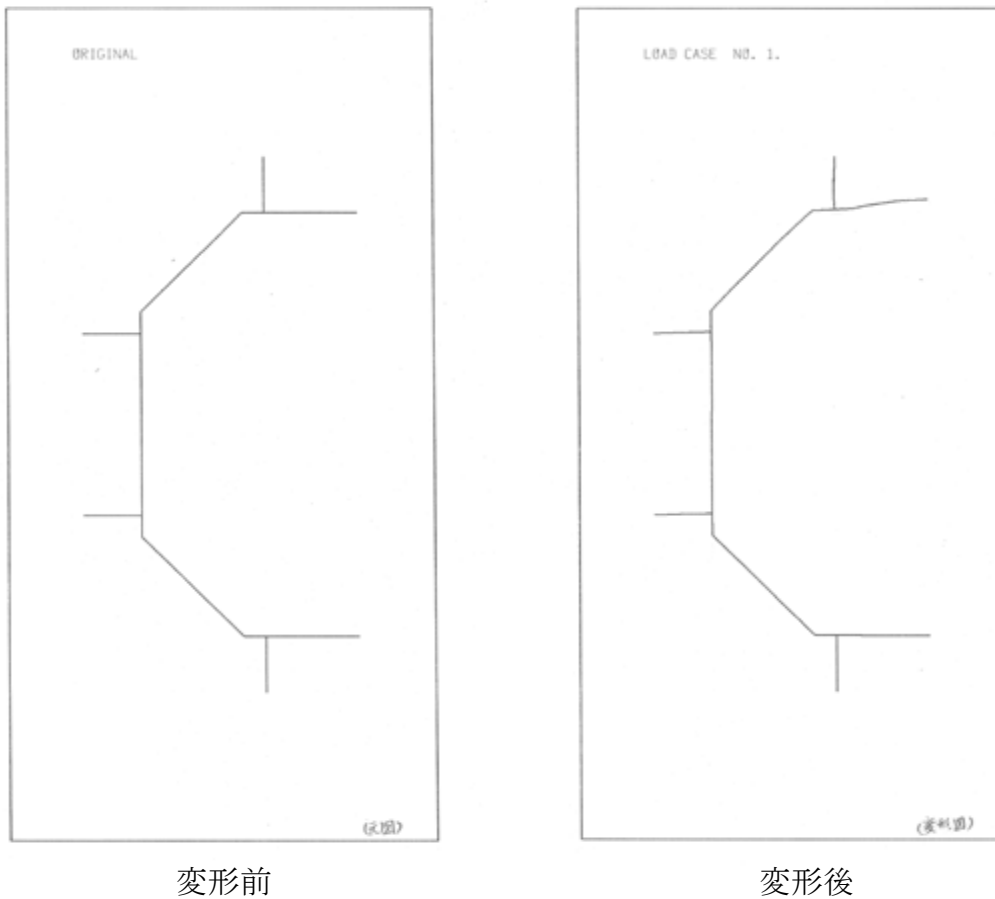
CRDハウジングレストレントビームとRPVペDESTALは溶接にて固定されていることから境界条件は固定する。また、 180° の範囲をモデル化していることから、対称性を考慮した拘束条件とする。

5.2.5 解析結果

ばね定数は、全水平荷重 W を最大変位量 δ 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

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^{注1}
- ②燃料取替機の減衰定数^{注1}
- ③配管系の減衰定数^{注2注3}

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 ^{注3} (%)			
		保温材無		保温材有 ^{注4}	
		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
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 ^{注2}	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言う。

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)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) ^注
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

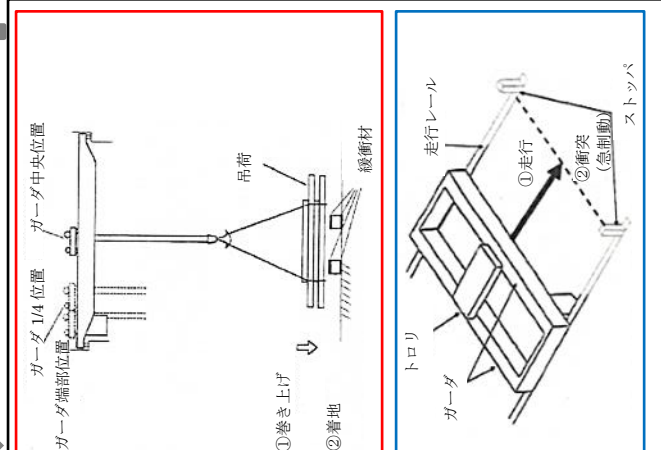
原子炉建物天井クレーン8タイプ、一般用クレーン2タイプの基本仕様(トロリ及びガーダの質量、高さ、スパン)を調査。各クレーンの構成要素、基本構造、減衰に影響を与えると考えられるクレーン全質量とトロリ質量の比及び振動特性が同等であることを確認。

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

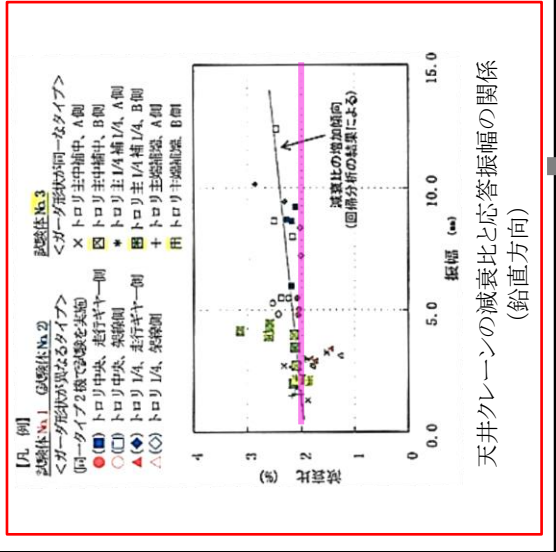
【鉛直方向加振方法】
吊荷を床から50mm程度まで持ち上げた後、最大速度で下降させて床に着地させ、この時の自由振動を計測。

【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。

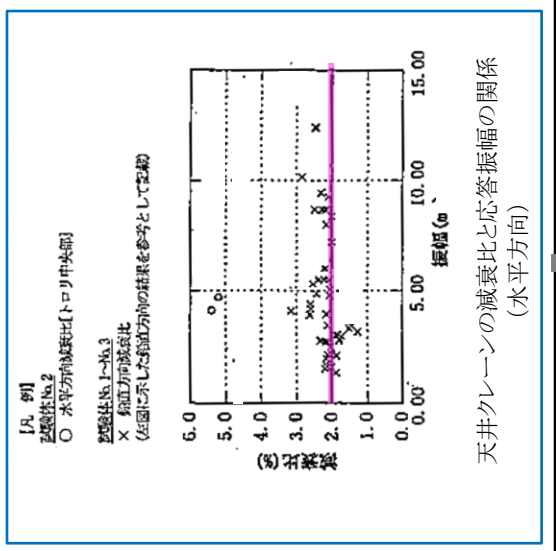


3. 計測データの処理

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共振周波数の関係 (鉛直方向)



天井クレーンの減衰比と共振周波数の関係 (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。

【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。

【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(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 l_1 (m)	5.8	5.8	5.6	7.7		
	スパン l_2 (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		
ガーダ	高さ H (m)	1.32	2.3	2.4	2.5		
	スパン L_1 (m)	33.0	33.0	34.9	34.9		
	スパン L_2 (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ダ等の構造部材の材料減衰、トロリ、ガーダ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、ガーダ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、トロリとガーダ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、トロリとガーダ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ダ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

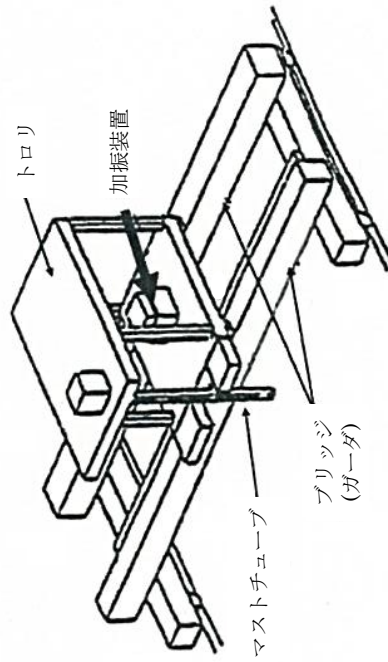
実機を試験体とした振動試験から得られた、燃料取替機の減衰特性に基づき、設計用減衰定数の検討を実施した。

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。

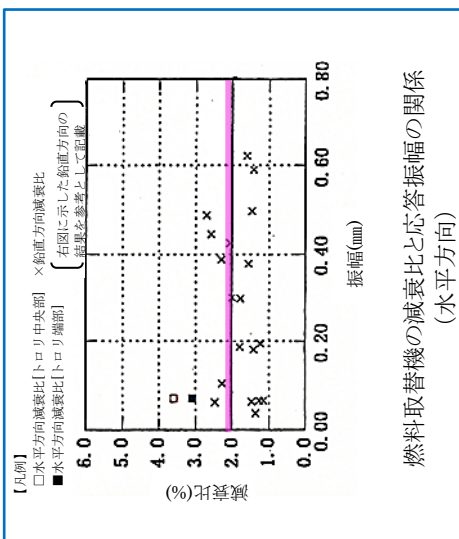
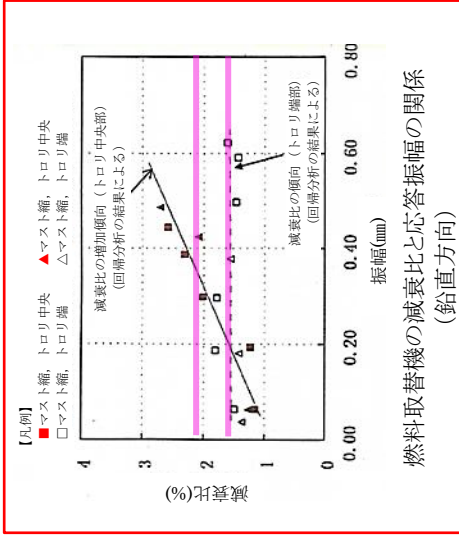
2. 振動試験



【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。



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】

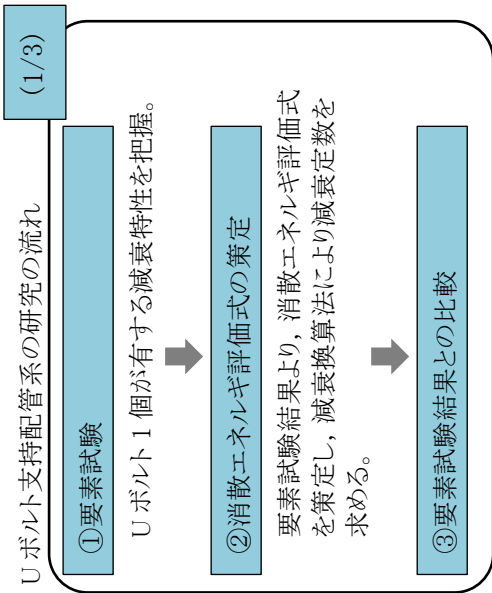
燃料取替機については、ブリッジ等の骨組み構造の材料減衰及びトロリ、ブリッジ等のガタや摩擦による構造減衰が減衰に影響を与えると考えられる。トロリの構造減衰はトロリ位置によって異なる。試験で得られた減衰比データとしては、ブリッジ中央にトロリがある場合、ブリッジの端部にトロリがある場合の2種類ある。鉛直方向に関しては、ブリッジの中央にトロリがある場合の方が、ブリッジの端部にトロリがある場合に比べて減衰比は高くなっている。ブリッジの中央にトロリがある場合、鉛直方向に関しては、応答振幅の増加に伴い減衰比は増加傾向にあり、応答振幅レベル0.40mmで減衰比2.0%以上となっていることから、設計用減衰定数を2.0%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。

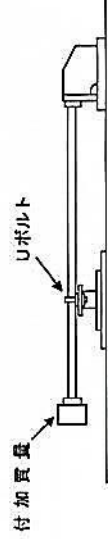
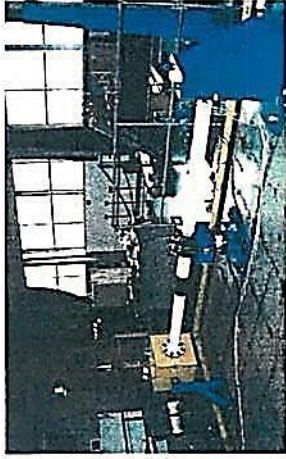
次に島根2号炉への適用性の観点では、上表より、サイズ及び質量は試験体とほぼ同等であるため、振動特性も同等であると考えられる。また、試験では低加速度レベル（水平約100gal、鉛直約200gal）にて実施されているが、実際の基準地震動 S_s はそれよりも大きい加速度レベルとなる。試験結果から、応答の増幅に伴い減衰比も増加傾向にあるため、上記の試験結果より得られた減衰比は適用可能と考えられる。以上から、島根2号炉の燃料取替機における設計用減衰定数として水平2.0%、鉛直1.5%（燃料取替機のトロリ位置が端部にある場合）、2.0%（燃料取替機のトロリ位置が中央部にある場合）を適用する。

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

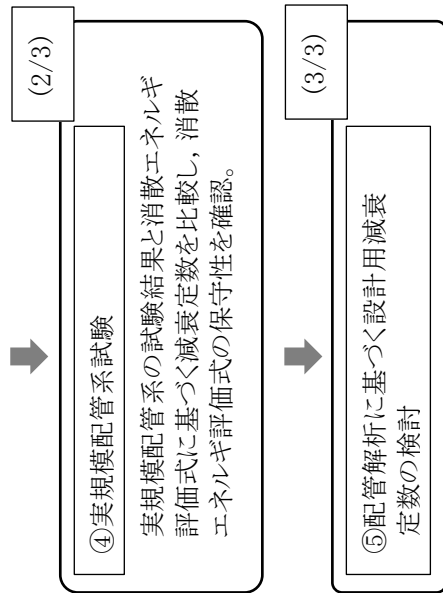
Uボルト支持部1箇所の減衰特性を把握するため、最も単純な試験体で振動試験を実施。



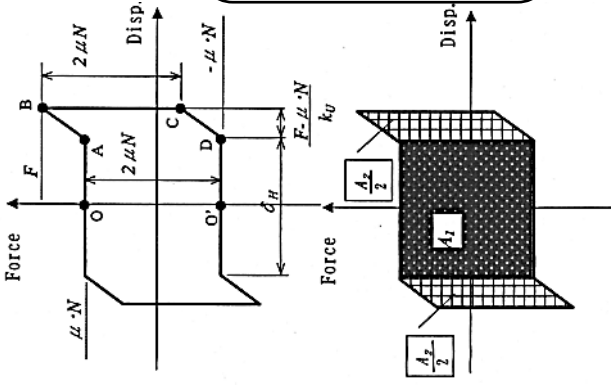
要素試験装置



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。



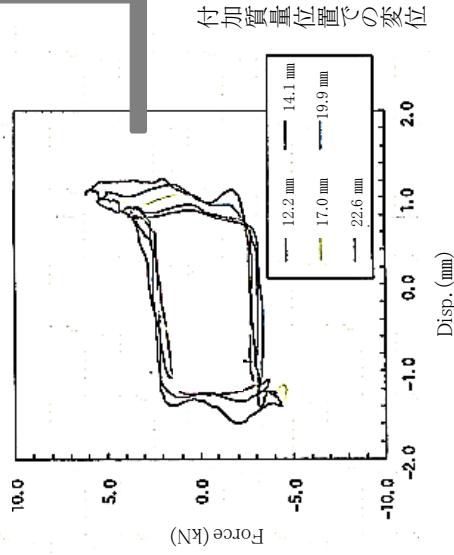
(消散エネルギー評価式の策定)



【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

$$\Delta E = A_1 + A_2$$

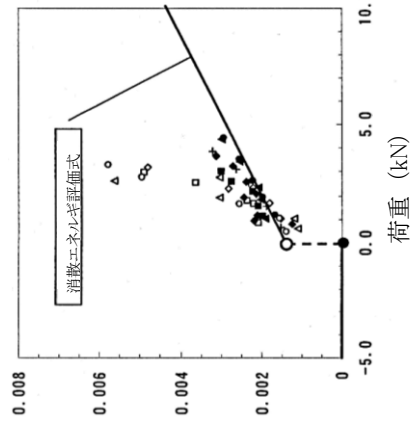
$$A_1 = 4 \cdot \mu \cdot N \cdot \frac{\delta_H}{2}$$

$$A_2 = 4 \cdot \mu \cdot N \cdot \frac{F - \mu \cdot N}{k_U}$$


要素試験結果と消散エネルギー評価式の結果の比較

➔

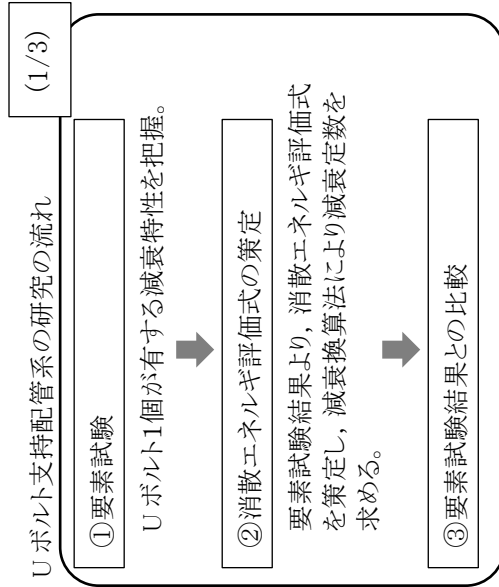
消散エネルギー評価式の保守性の確認



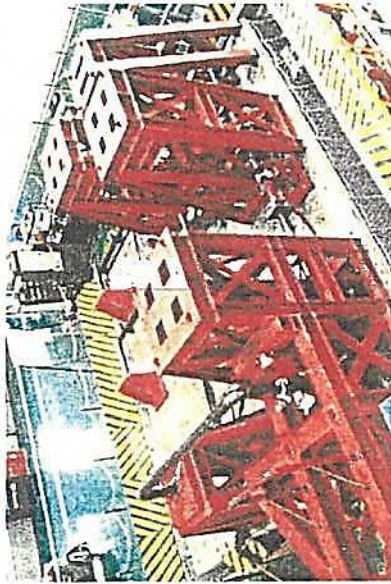
(2/3) 要素試験結果

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

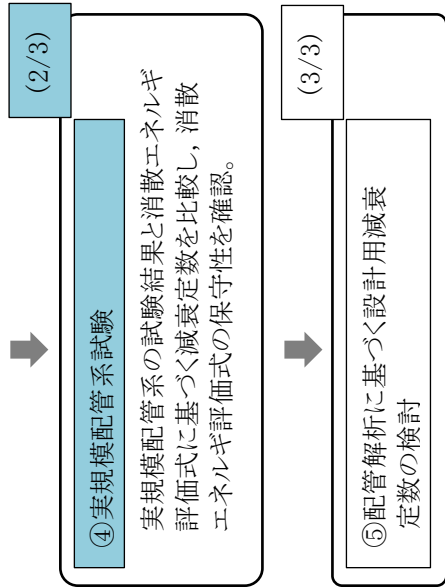
要素試験結果に基づき策定した消散エネルギー評価式の実機への適用性確認のため、実規模配管系試験を実施し、試験結果より得られる減衰定数と消散エネルギー評価式より得られる減衰定数の比較検討を行った。



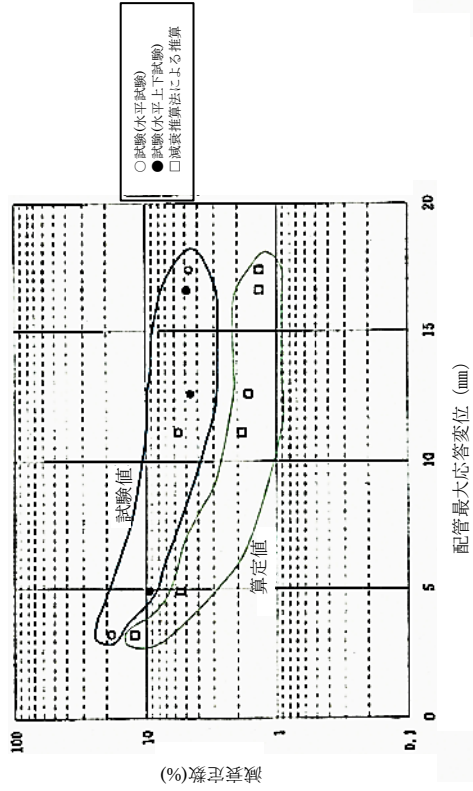
実規模配管系試験装置



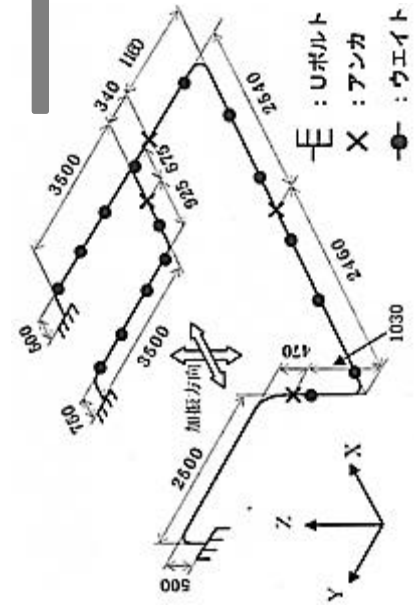
要素試験から策定した消散エネルギー評価式について、実規模配管系で保守性を確認。



試験結果と消散エネルギー評価式による減衰定数の比較

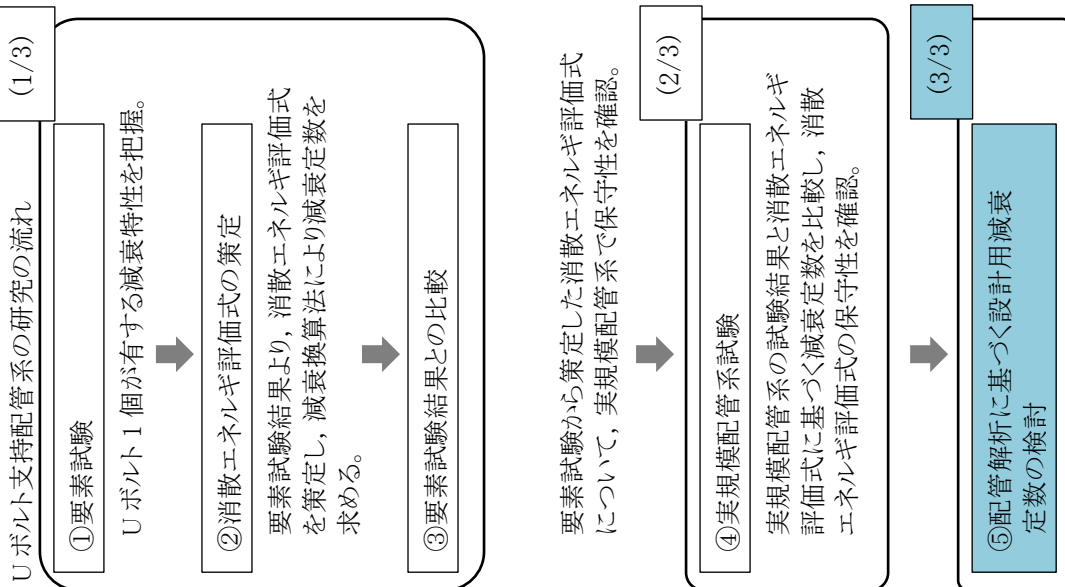


試験結果と消散エネルギー評価式による減衰定数を比較した結果、消散エネルギー評価式の方が全変位領域で下回っており、消散エネルギー評価式の保守性が確認された。



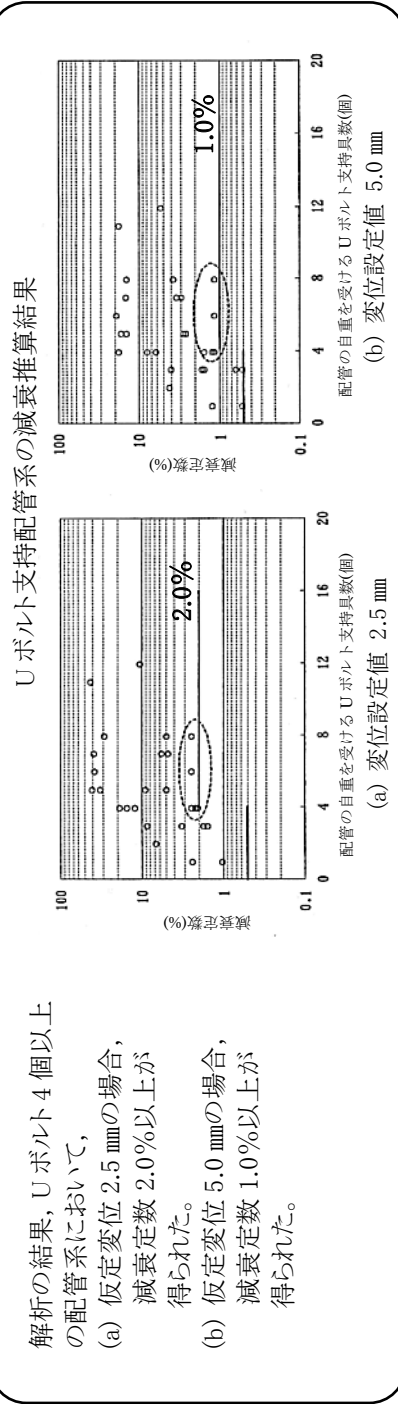
Uボルト支持配管系の振動試験 (3/3) : ⑤配管解析に基づく設計用減衰定数の設定

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)

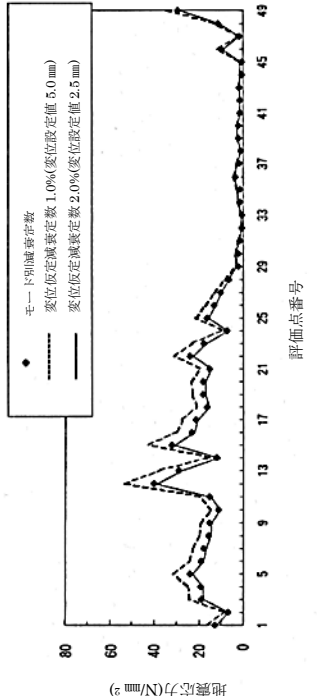
- 前項までに、実規模配管系試験にて消散エネルギー評価式の保守性を確認。
- 設計用減衰定数を設定するに当たり、Uボルトの支持具数や配管ルート等様々な配管系について検討する必要がある。
- 消散エネルギー評価式による減衰定数が配管変位に依存するため、配管系の振動モード変位を一定と仮定した状態で減衰定数(変位仮定減衰定数)を算出した。対象はUボルト支持部を有する実機配管系(28モデル)とした。



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)

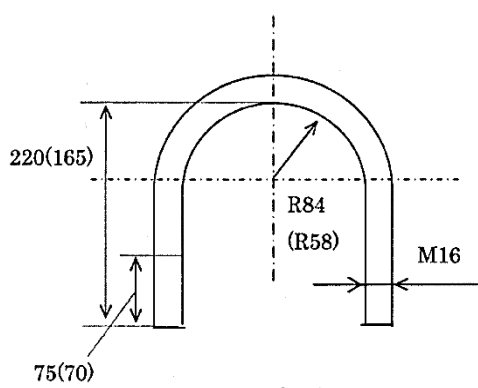
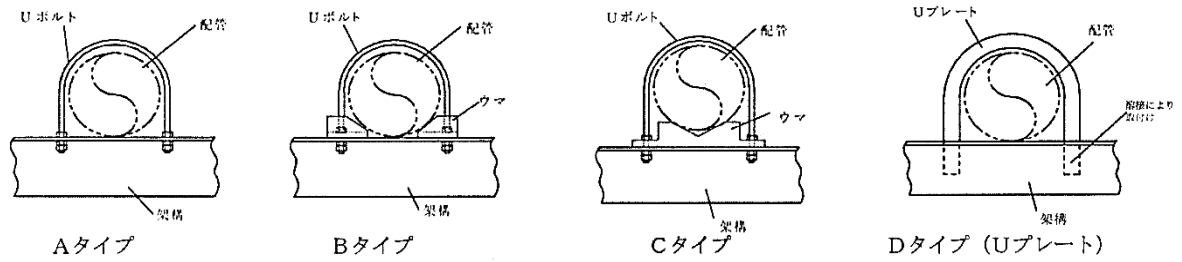
- 変位仮定減衰定数は、計算結果からも分かるように「仮定する変位」に依存する。
 - 変位2.5 mmの減衰定数及び変位5.0 mmの減衰定数である2.0%及び1.0%を与える下限値を示した配管モデルに対して、より詳細な解析を行い、Uボルト支持配管系の設計用減衰定数を検討した。
- 比較検討の結果、詳細計算結果と変位2.5 mmを与えた場合の結果がよく一致していることが分かった。Uボルト支持配管系の設計用減衰定数を2.0%に設定した。

- なお、設計用減衰定数2.0%適用に当たり、以下の項目を条件とする。
- 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)

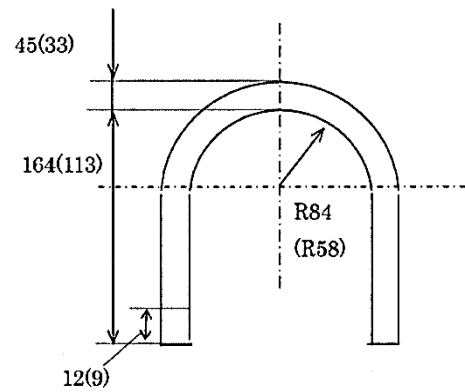


【補足】要素試験に用いたUボルト支持構造物のタイプ

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)



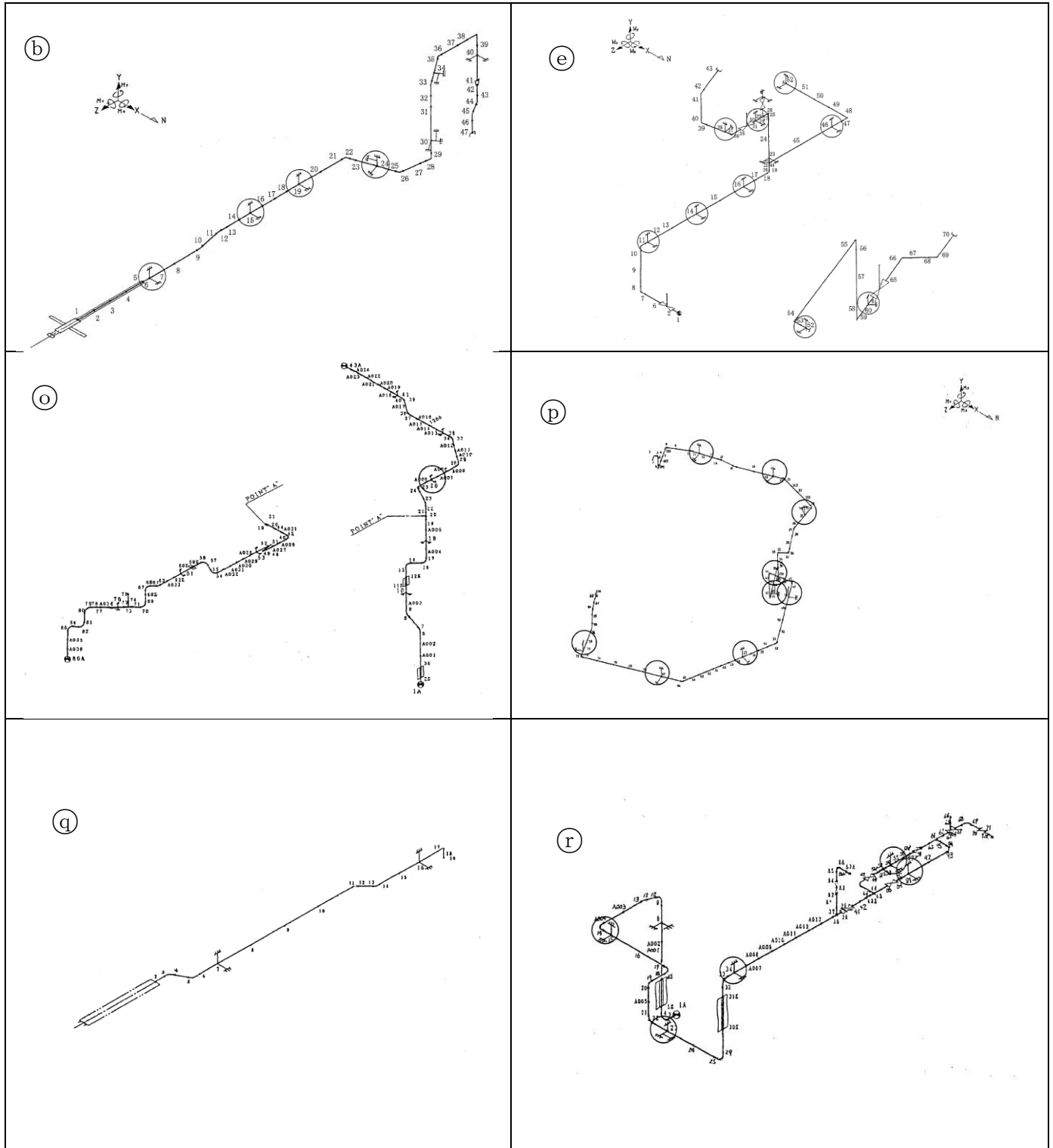
Uプレート
150A(100A) (材質: SS400)

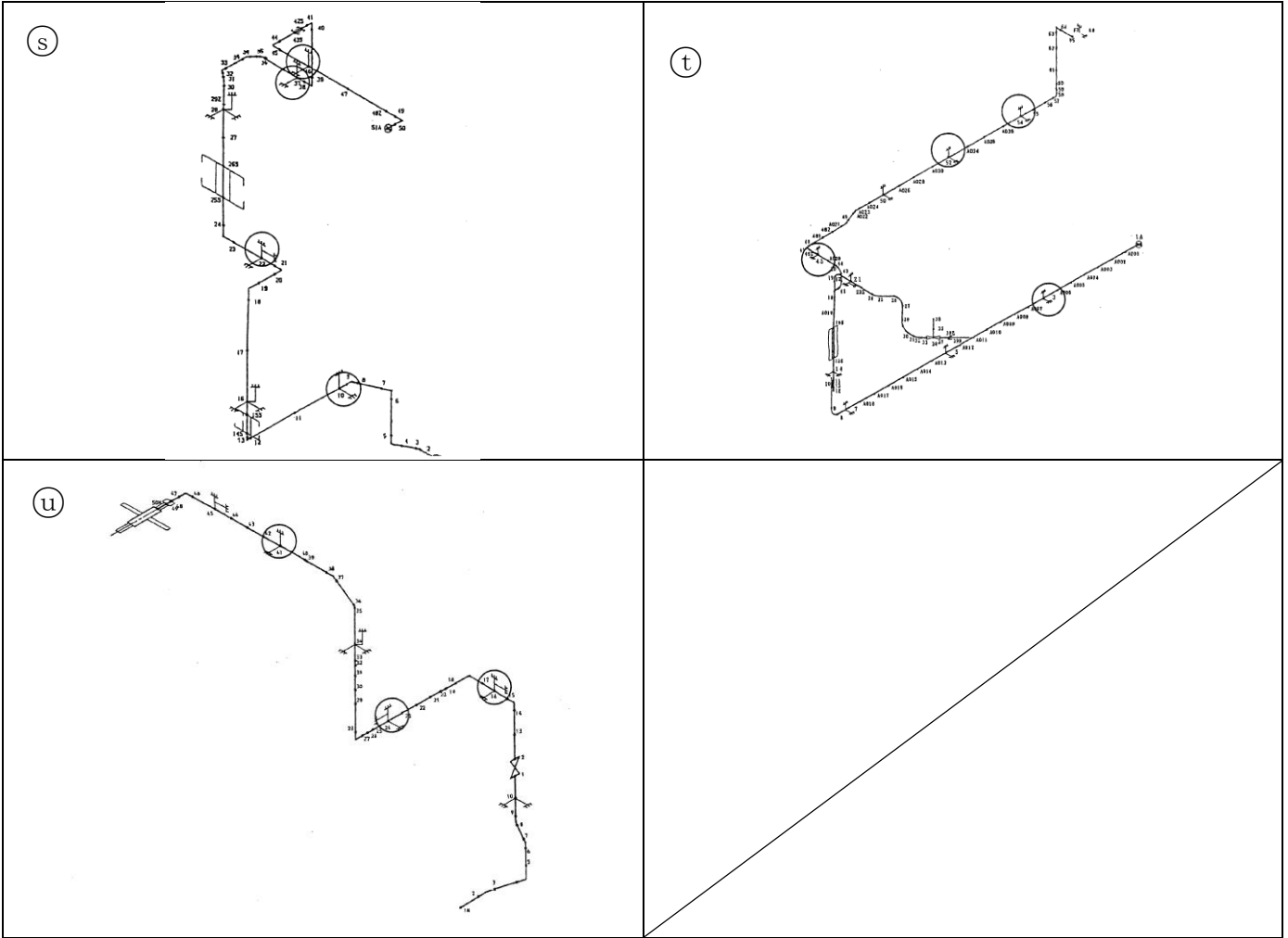
【解析を行った配管仕様】

- ・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
ⓑ 配管	CRD	32A
ⓔ 配管	AC	50A
ⓞ 配管	RHR	150A
ⓓ 配管	FPC	40A
ⓠ 配管	MUWC	100A
ⓡ 配管	MUWC	150A, 80A
ⓢ 配管	RCW	200A
ⓣ 配管	RCW	200A, 80A
ⓤ 配管	CRD	32A





配管系の保温材による付加減衰定数（無機多孔質保温材）

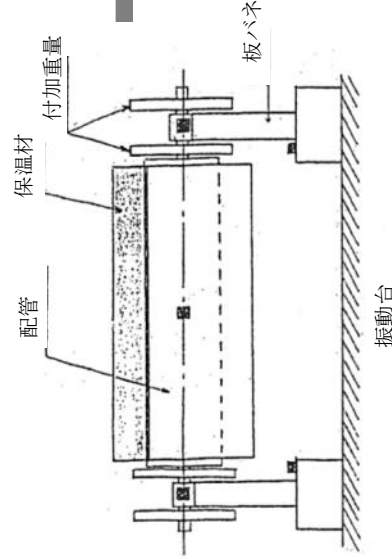
試験体（無機多孔質保温材）を使用した振動試験から得られた配管系の保温材による付加減衰定数に基づき、設計用減衰定数の検討を行った。

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

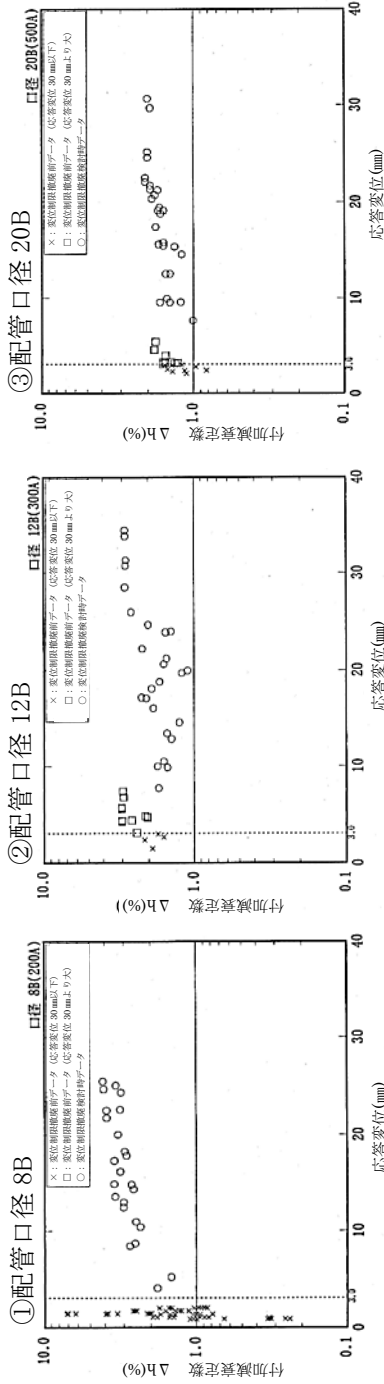
振動試験は保温材有りの場合及び保温材無しの場合について実施。
(保温材厚さ 75mm)



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。

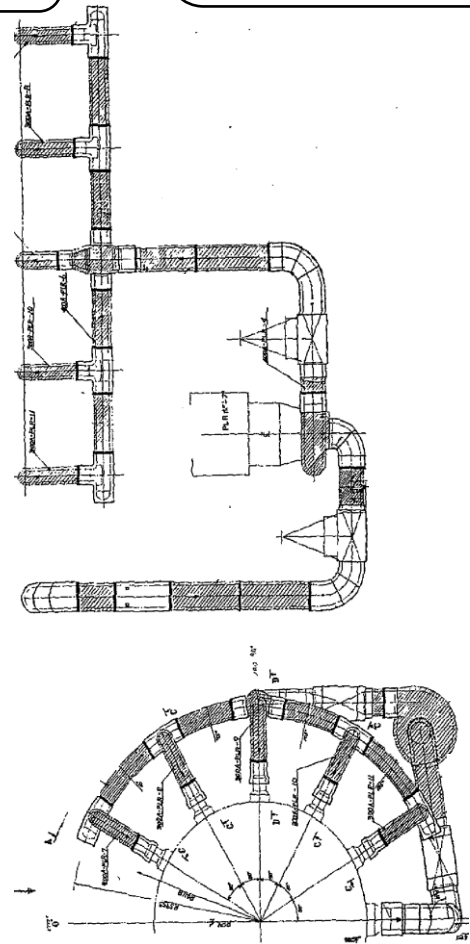
1. 試験体

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⁽¹⁾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）^注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）^注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。

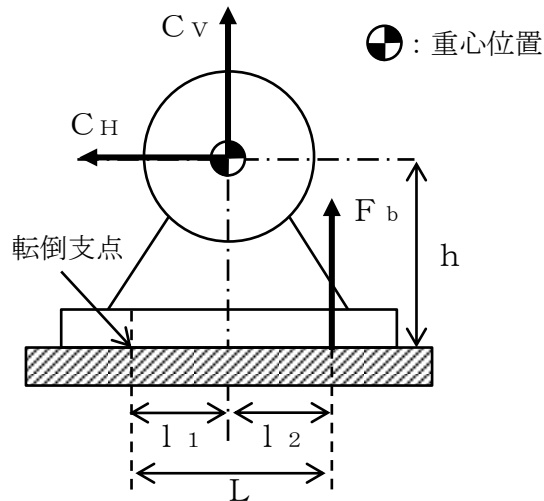


図 A-1 横形ポンプに作用する震度

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。

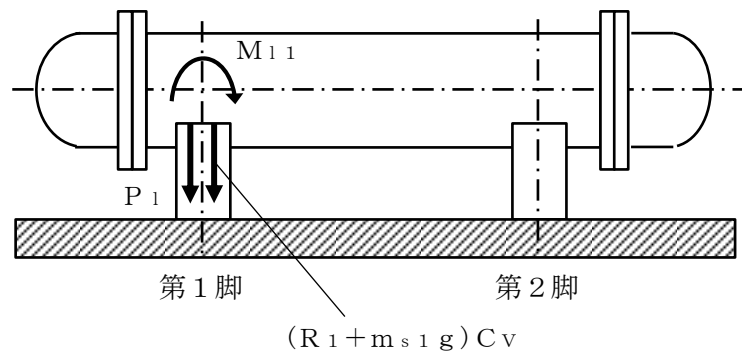


図 B-1 横置円筒形容器の脚部に作用する荷重

水平地震力による圧縮応力 σ_{s2} 及び鉛直方向地震力による圧縮応力 σ_{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】

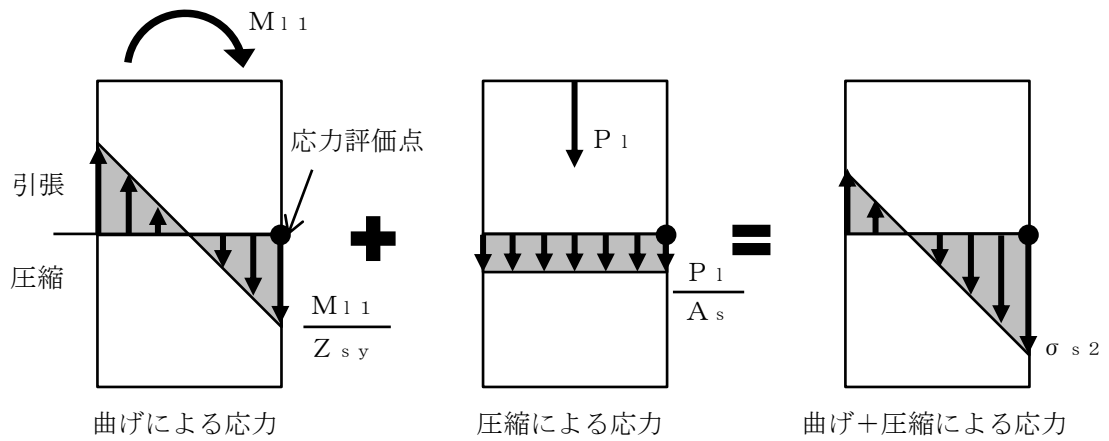
$$\sigma_s = \sqrt{\left(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s2}^2 + \sigma_{s4}^2}\right)^2 + 3\tau_{s2}^2} \quad \dots(\text{式 B-4})$$

ここで、

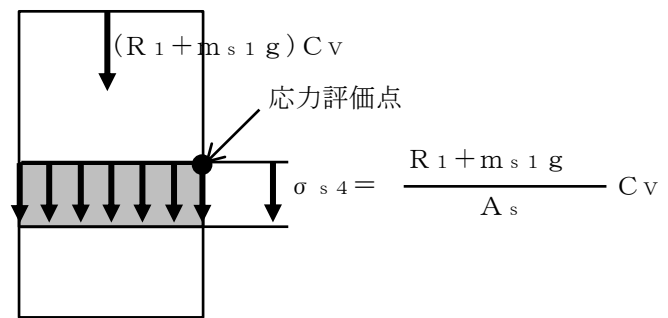
- σ_s : 水平方向及び鉛直方向地震力が作用した場合の脚の組合せ応力
- σ_{s1} : 運転時質量により脚に生じる圧縮応力
- σ_{s2} : 水平方向地震力により脚に生じる曲げ及び圧縮応力の和
- σ_{s4} : 鉛直方向地震力により脚に生じる圧縮応力
- τ_{s2} : 水平方向地震力により脚に生じるせん断応力
- M_{11} : 水平方向地震力により脚底面に作用する曲げモーメント
- P_1 : 水平方向地震力により胴の脚付け根部に作用する鉛直方向荷重
- R_1 : 脚が受ける自重による荷重
- g : 重力加速度
- m_{s1} : 脚の質量
- Z_{sy} : 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 σ_{s2} 及び鉛直方向地震力による圧縮応力 σ_{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⁽¹⁾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通り行っている。

(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

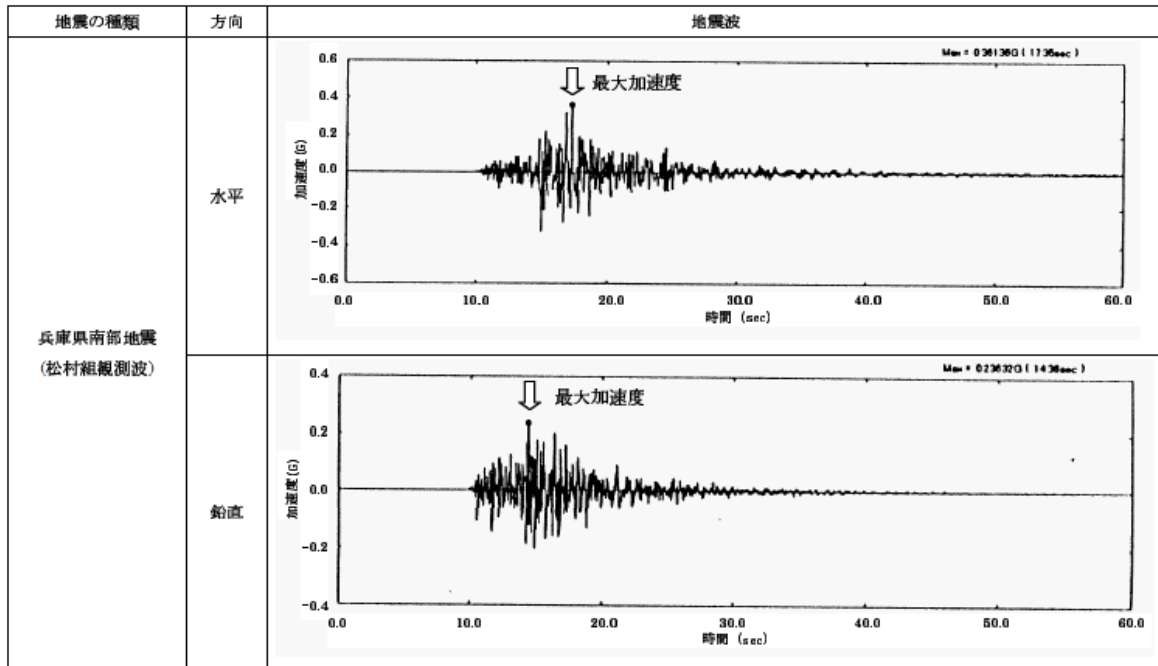
解析に用いた入力地震動は、地震動の違いによる影響を確認するため、兵庫県南部地震（松村組観測波）、人工波及びエルセントロ波の3波を用いた。機器・配管系への入力地震動となる原子炉建屋中間階の応答波の例を第3-1(1)図～第3-1(3)図に示す。

(3) 解析結果

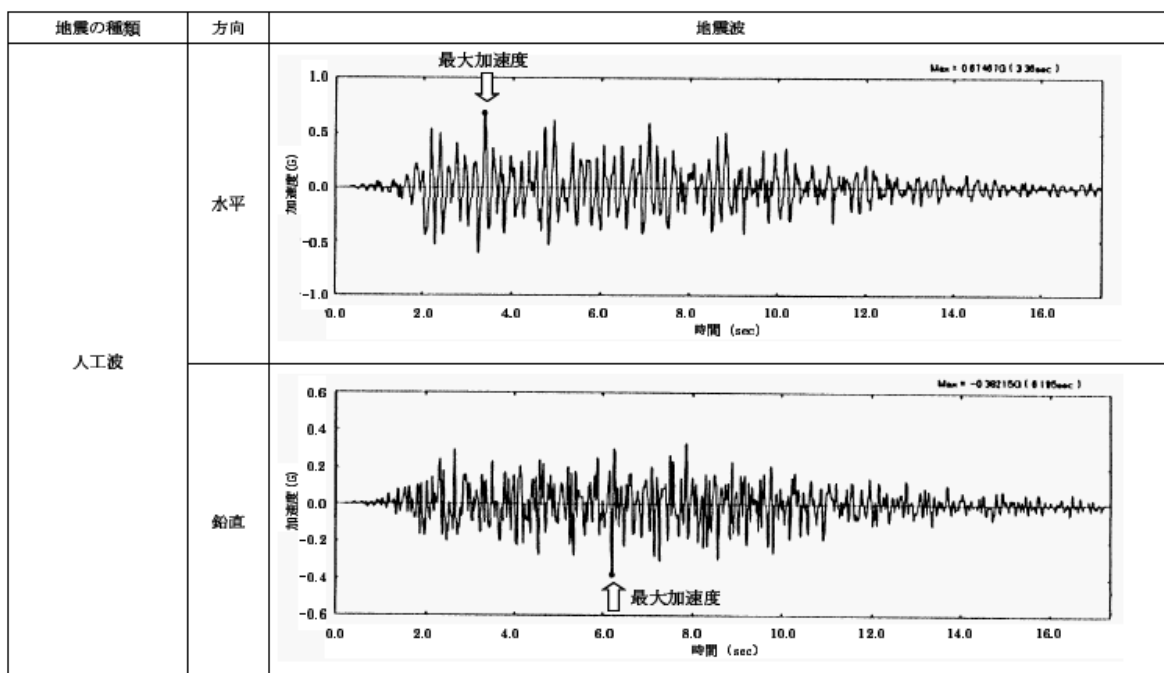
解析結果を第3-2(1)図～第3-2(4)図に示す。第3-2(1)図～第3-2(4)図は、水平方向及び鉛直方向の応力に対して、同時入力による時刻歴応答解析法及びS R S S法により組み合わせた結果をまとめたものであり、参考までに絶対値和法による結果も併記した。

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。

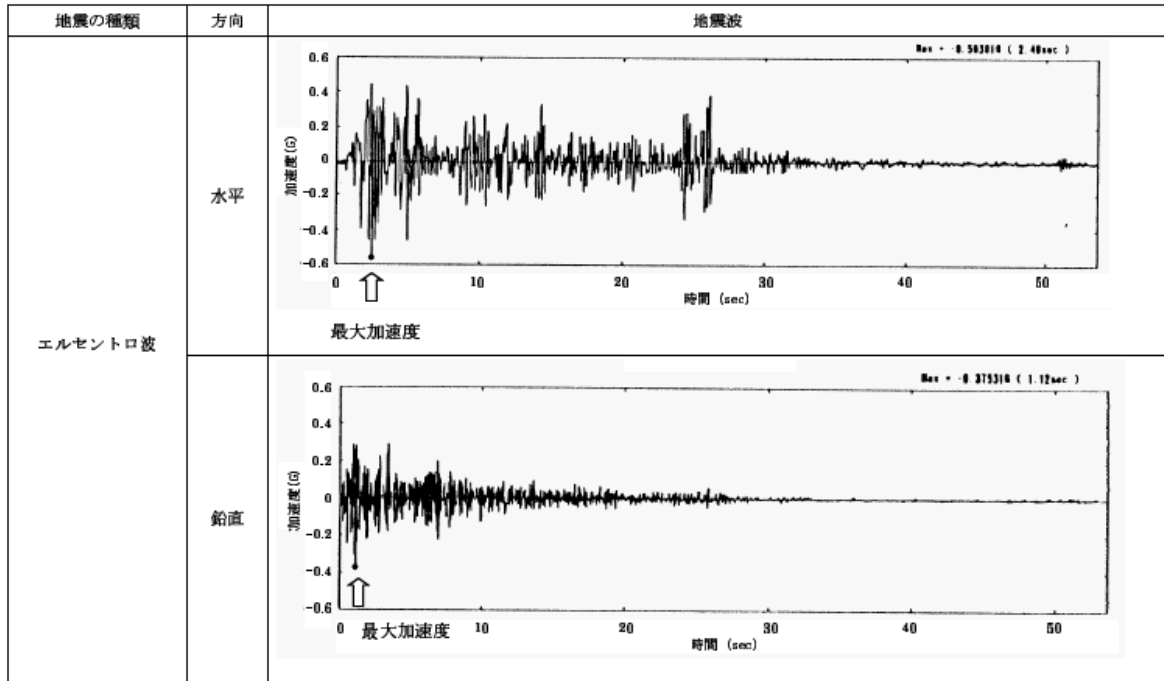
さらに、配管系全体の傾向を確認するため、配管系の主要な部位における発生応力の比較を第3-4図に示す。第3-2(1)図～第3-2(4)図に基づき、各配管モデルの節点の応力値をプロットしたものである。第3-4図より、S R S S法は発生応力の低い領域では同時入力による時刻歴応答解析法に対して平均的な結果を与え、発生応力の増加に伴い、保守的な結果を与える傾向にあることが確認できる。



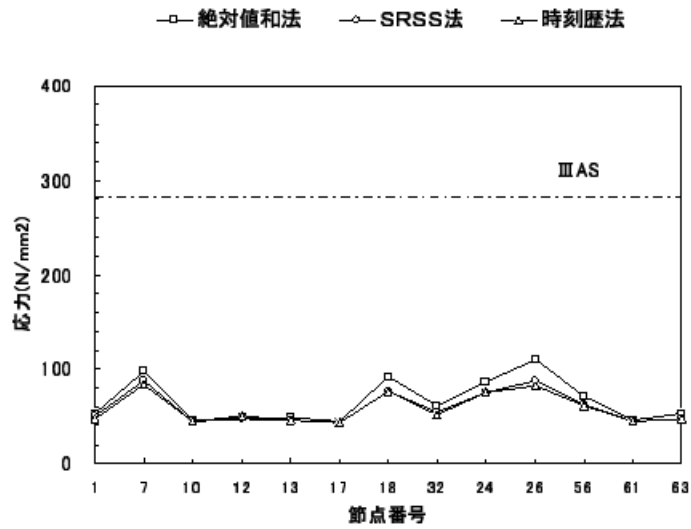
第3-1(1)図 機器・配管系への入力地震動
(兵庫県南部地震 (松村組観測波))



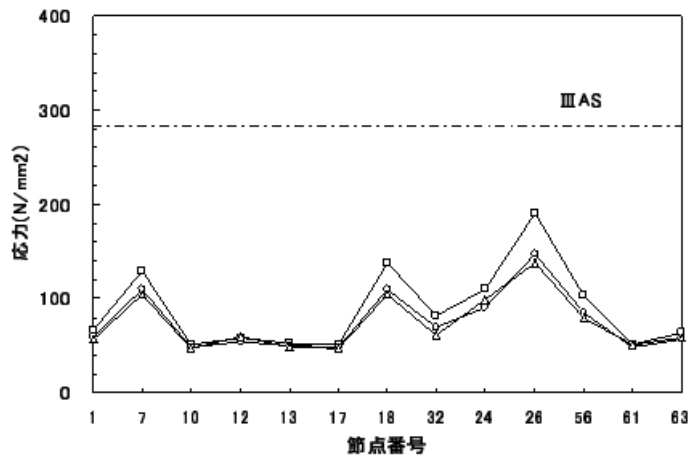
第3-1(2)図 機器・配管系への入力地震動 (人工波)



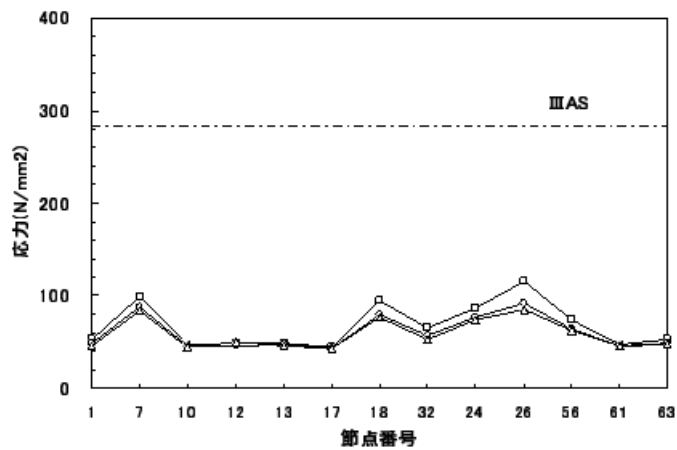
第3-1(3)図 機器・配管系への入力地震動
(エルセントロ波)



兵庫県南部地震（松村組観測波）

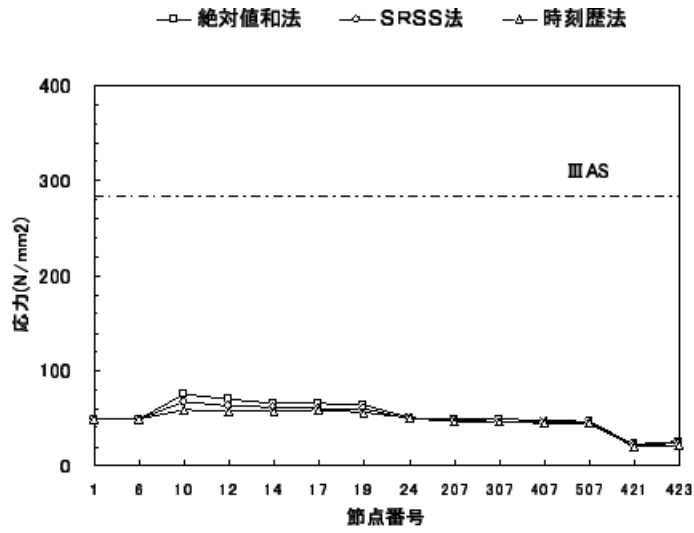


人工波

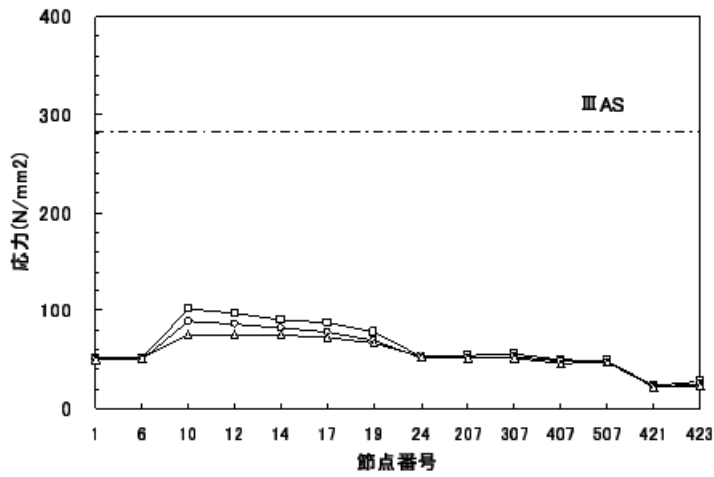


エルセントロ波

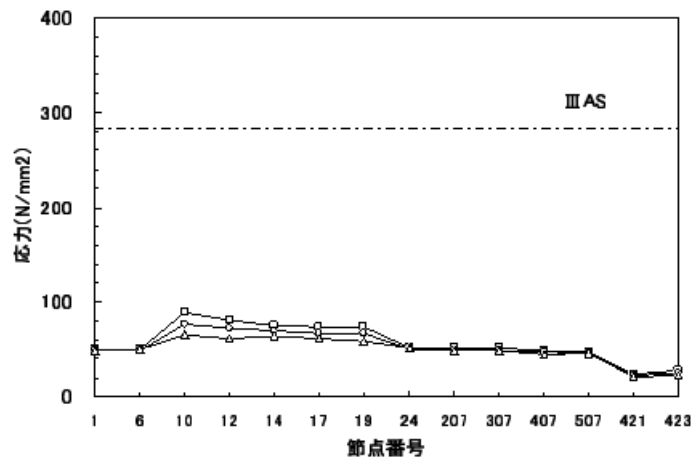
第3-2(1)図 主要な部位における発生応力（FDW-001，代表Aプラント）



兵庫県南部地震（松村組観測波）

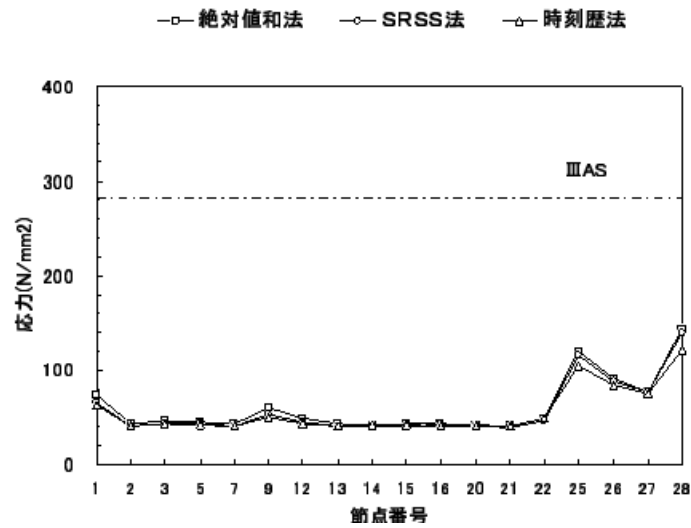


人工波

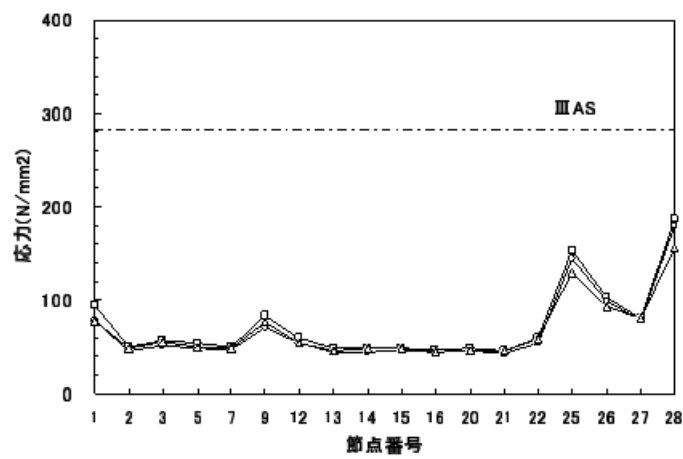


エルセントロ波

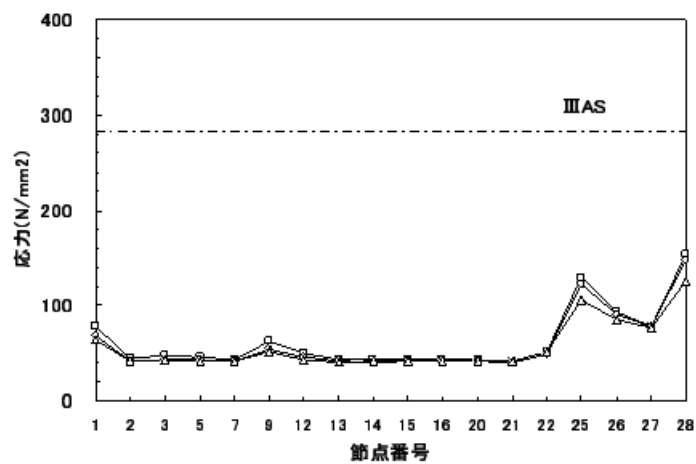
第3-2(2)図 主要な部位における発生応力 (MS-001, 代表Aプラント)



兵庫県南部地震（松村組観測波）

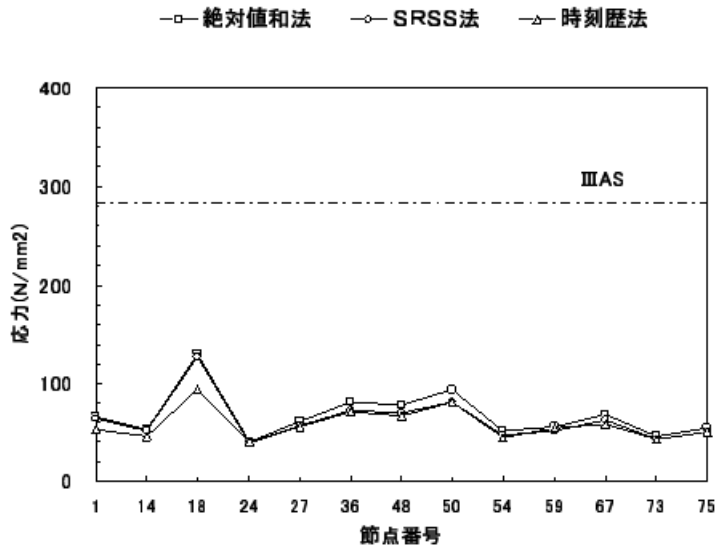


人工波

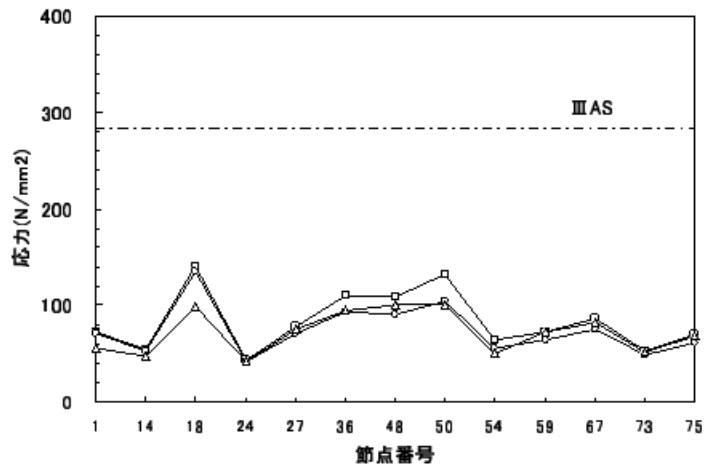


エルセントロ波

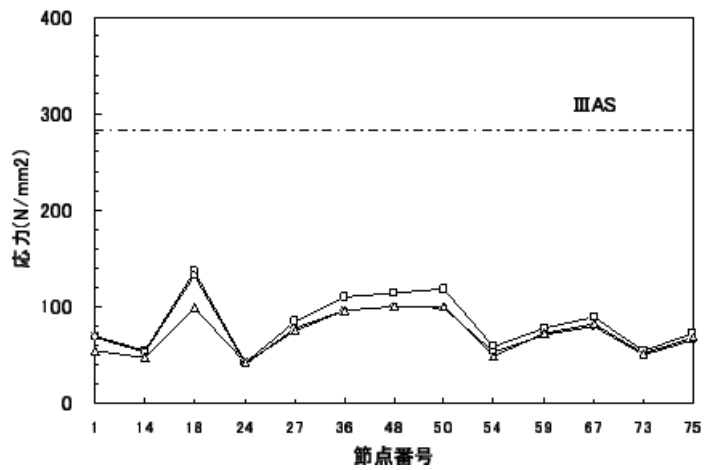
第 3-2(3) 図 主要な部位における発生応力（RHR-001，代表Aプラント）



兵庫県南部地震（松村組観測波）



人工波



エルセントロ波

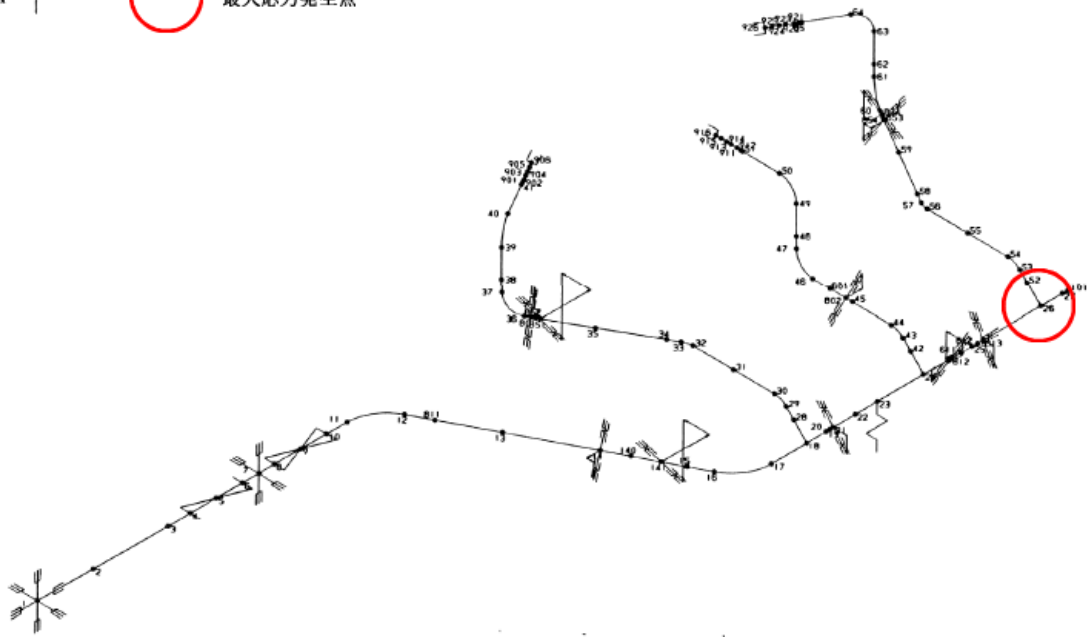
第3-2(4)図 主要な部位における発生応力（FDW-001，代表Bプラント）

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



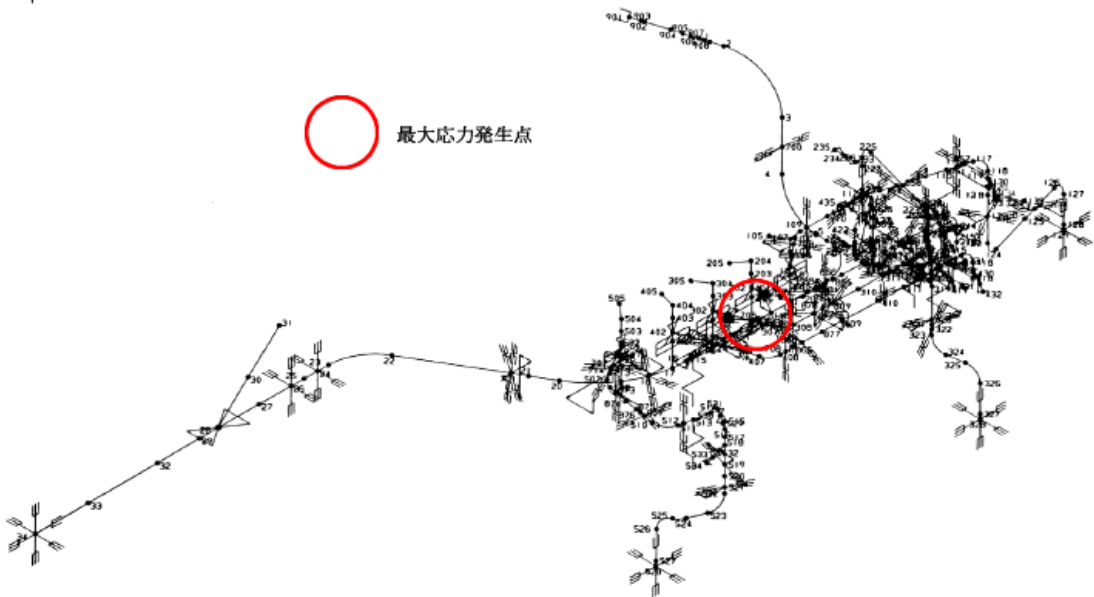
○ 最大応力発生点



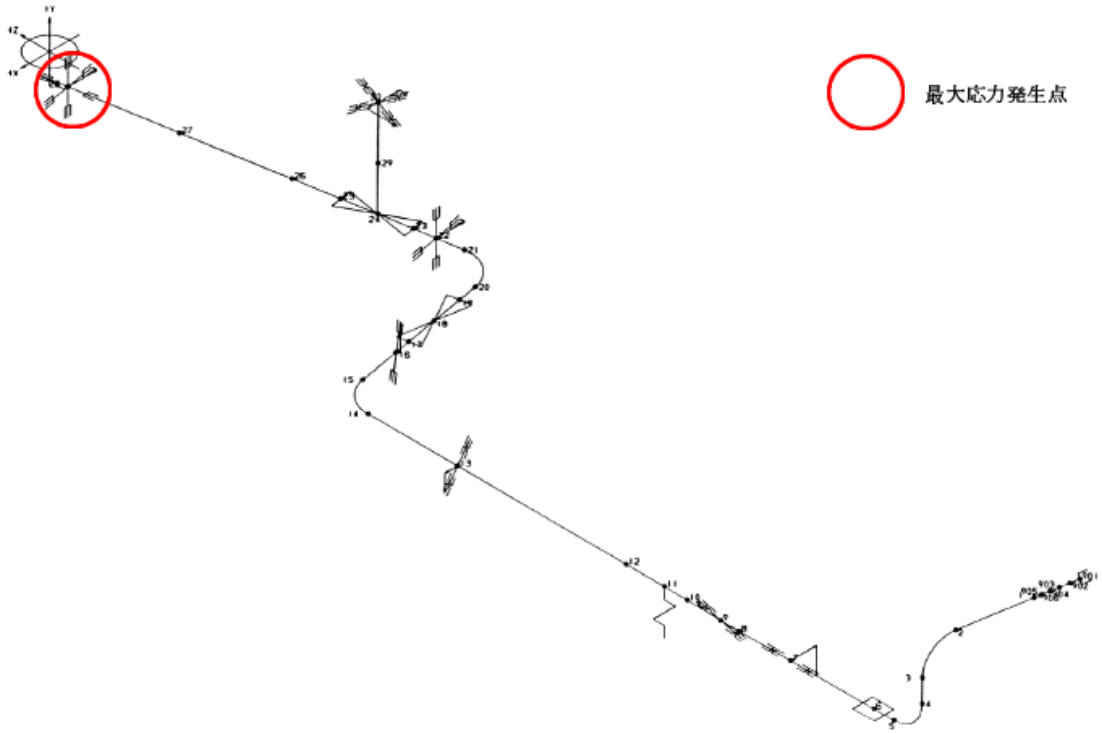
第3-3(1)図 給水系配管 (FDW-001, 代表Aプラント)



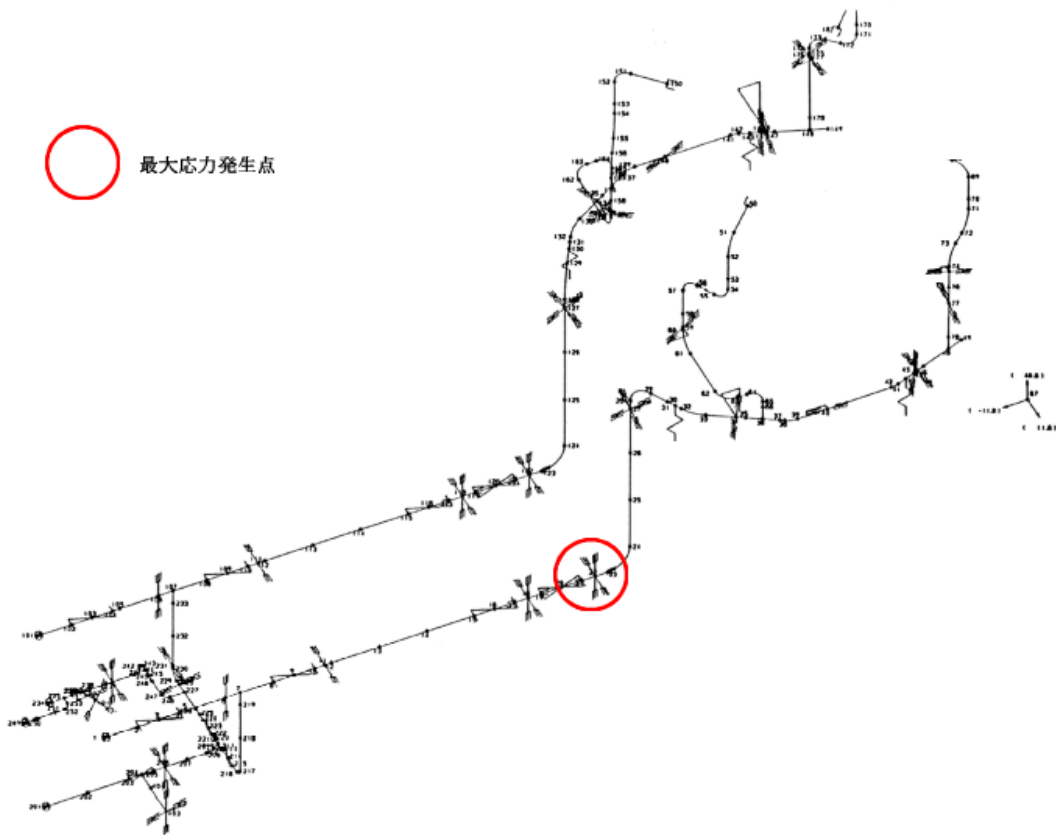
○ 最大応力発生点



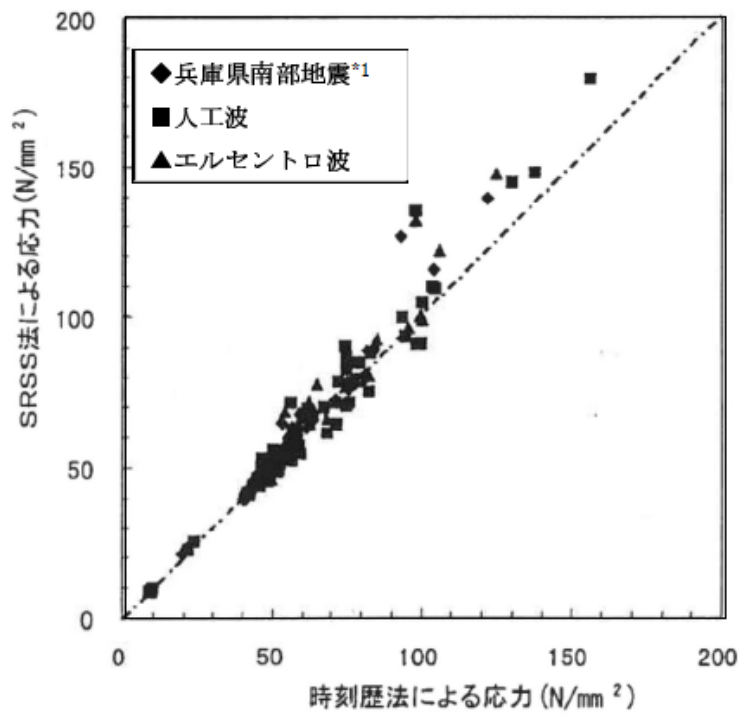
第3-3(2)図 主蒸気系配管 (MS-001, 代表Aプラント)



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

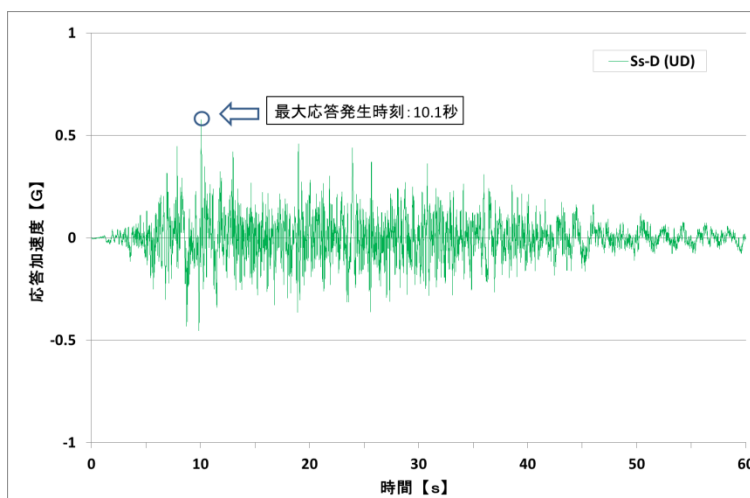
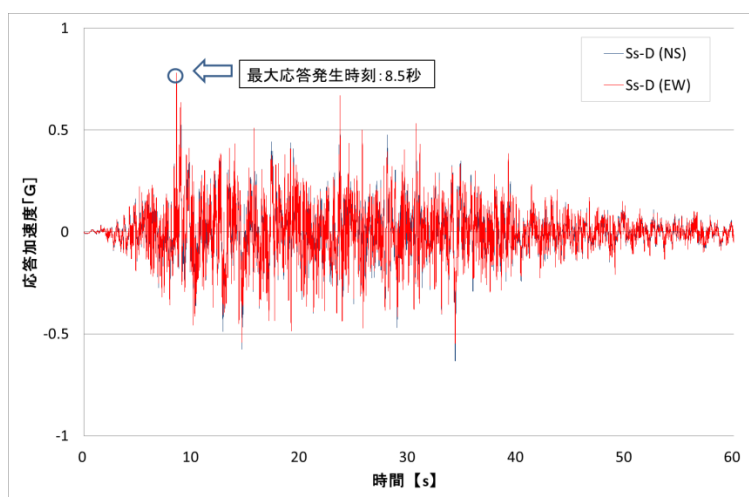
* 1 : 松村組観測波

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。

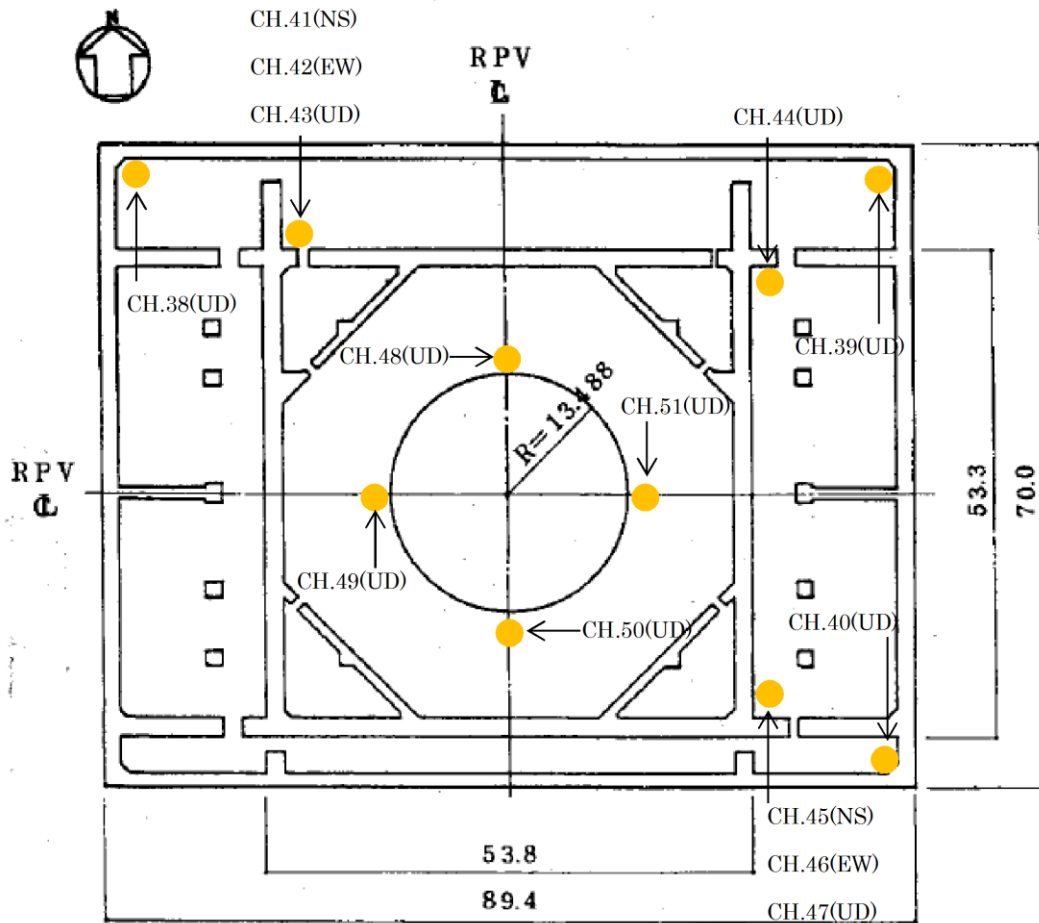
2. 確認結果

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。

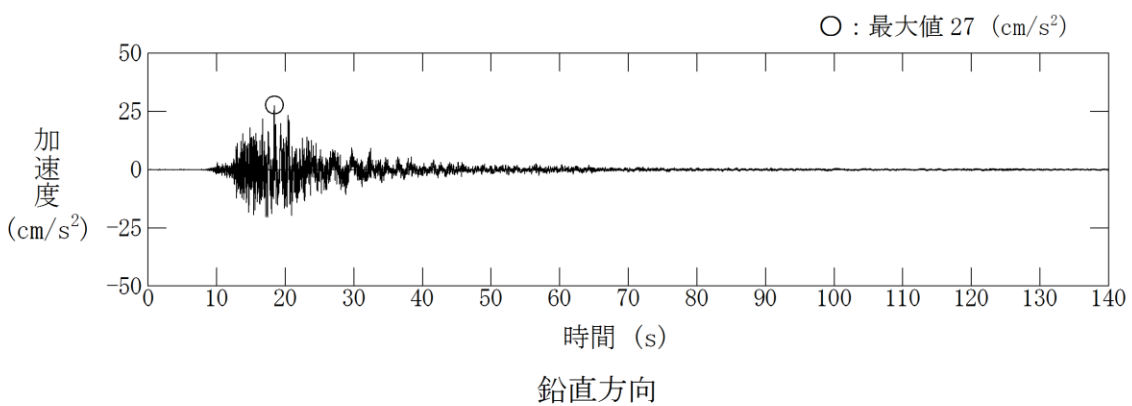
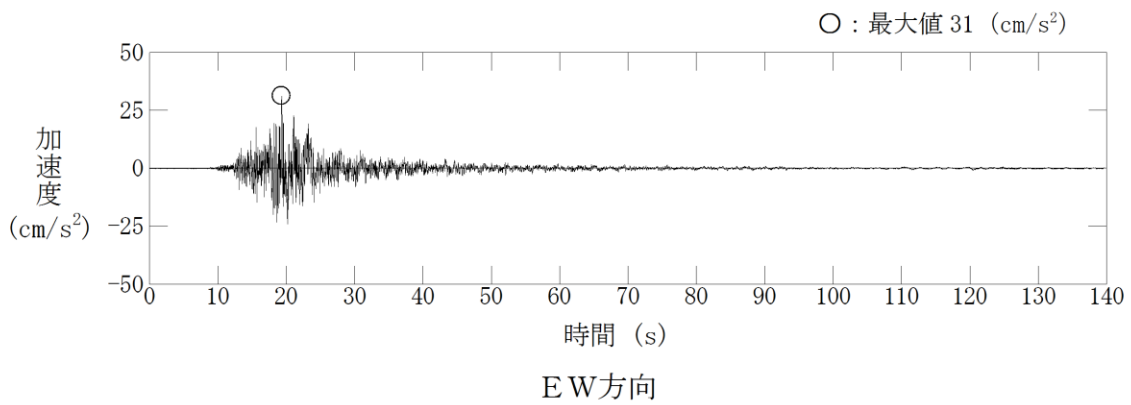
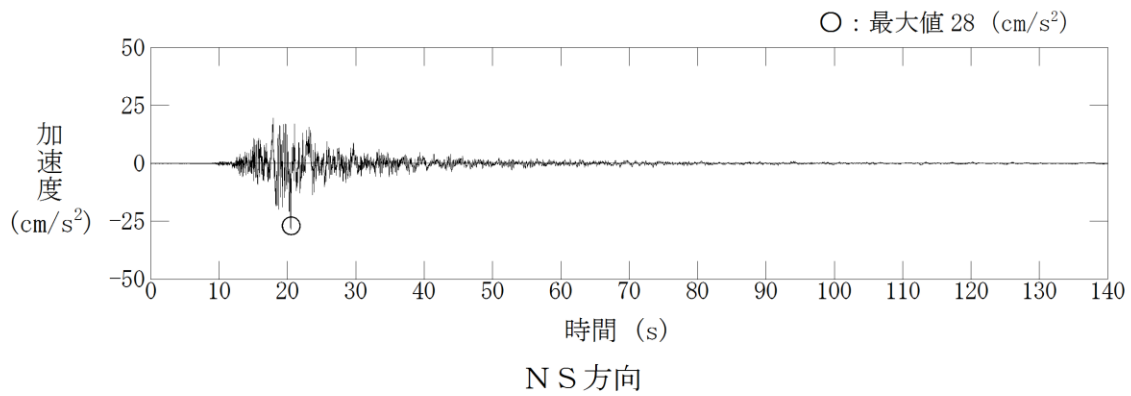
参考第1表 2000年鳥取県西部地震の観測記録における
最大応答値の発生時刻の差

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。

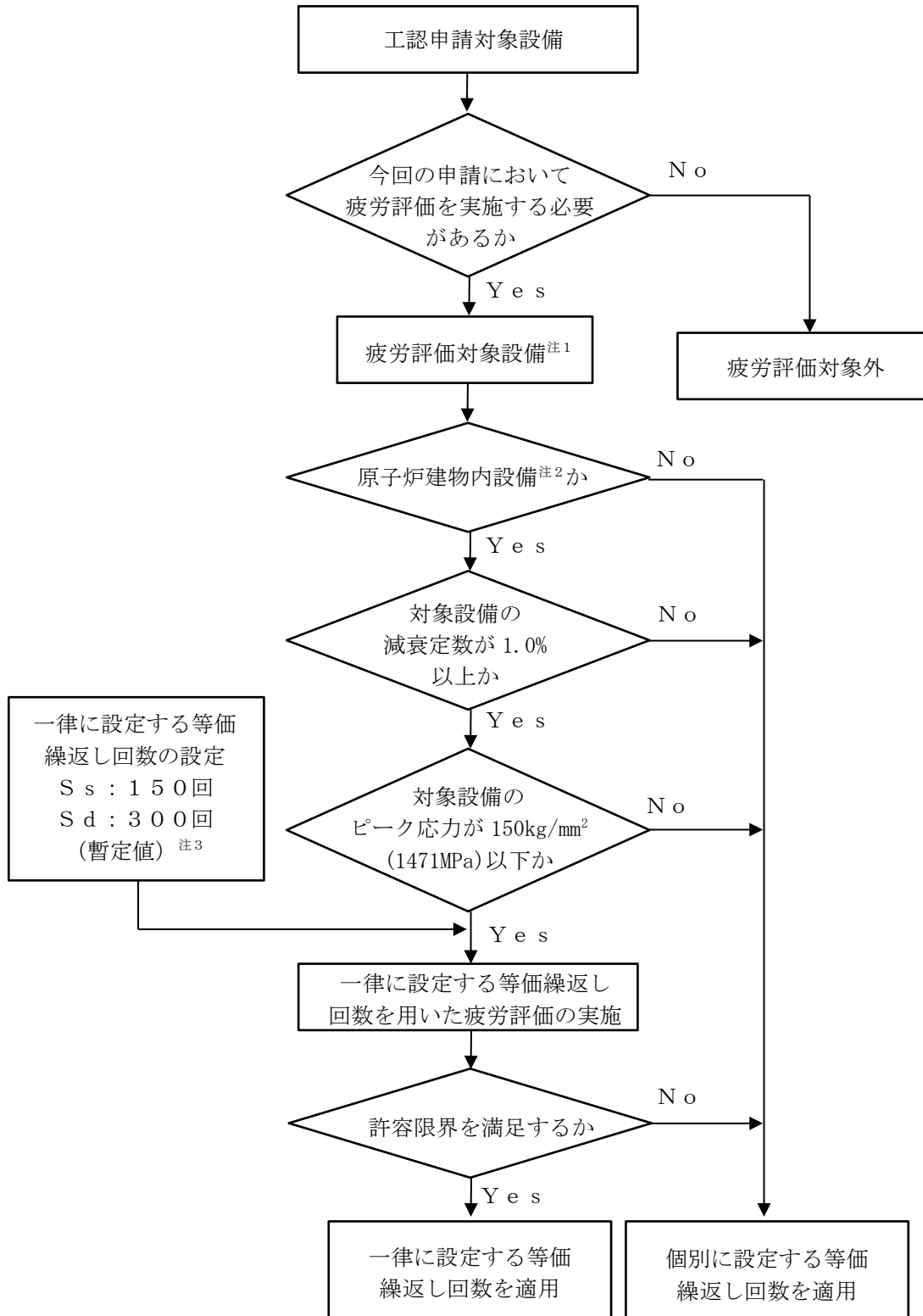
2.2 算定フロー及び算定条件

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。

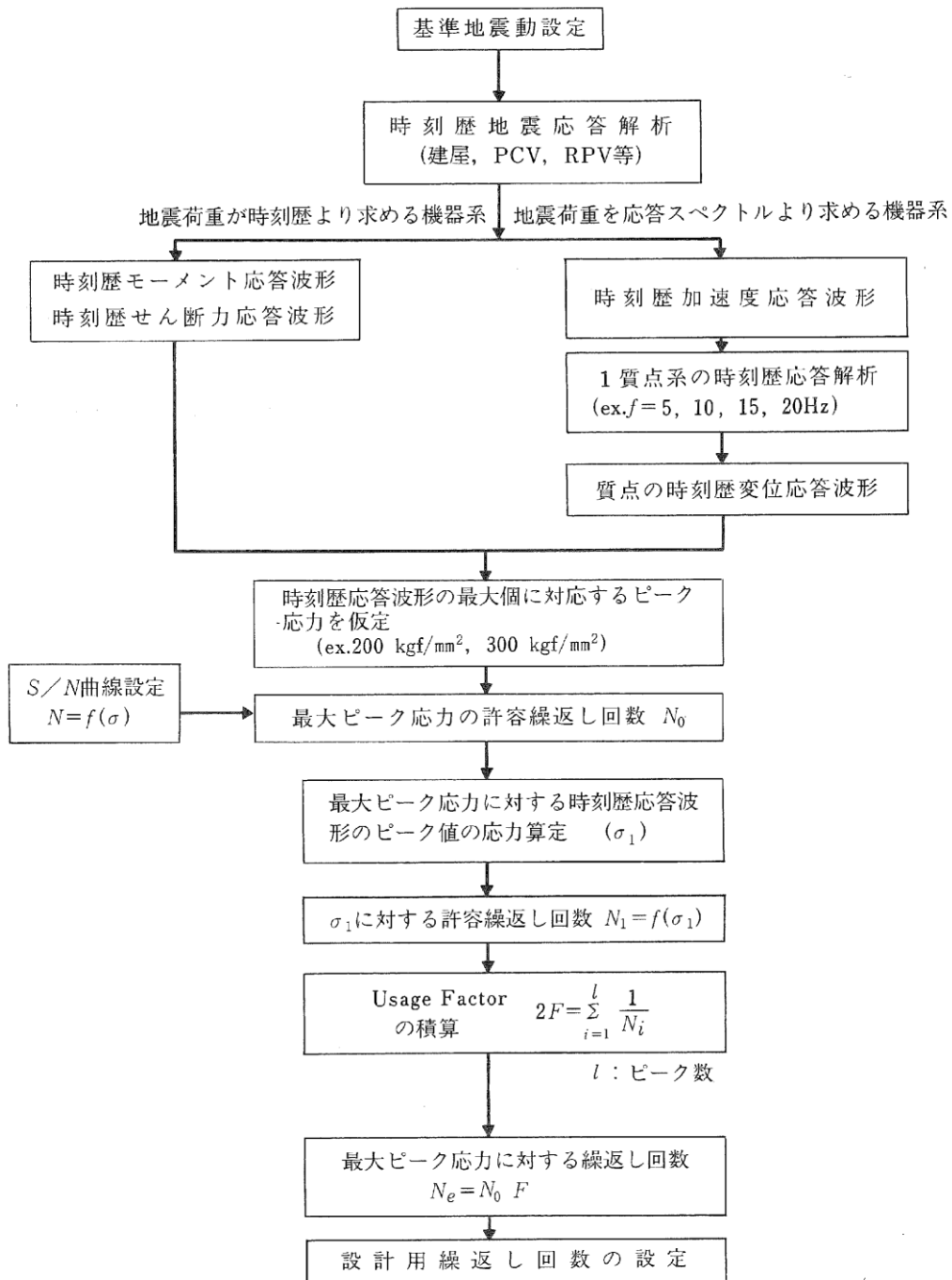
島根2号炉の等価繰返し回数の算定条件と標準化報告書との比較結果を第1表に示す。

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 ^{注1} 以外、減 衰定数が0.5%の設備、 ピーク応力が150kg/ mm ² (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 ^{注5}	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 ^{注6}	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 ^{注5} 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 ^{注6}	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 ²)	代表設備の最大ピーク 応力を安全側に設定 (300kg/mm ²)	150kg/mm ² (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 ^{注2} でなく、全固有周期 ^{注2}	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 ^{注3}	炭素鋼の設計疲労線図 ^{注4}	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 ^{注4}
	地盤条件	Vs=500, 1000, 1500m/s	Vs=1500m/s	Vs=1600m/s ^{注7}	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 発電用原子力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

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

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。

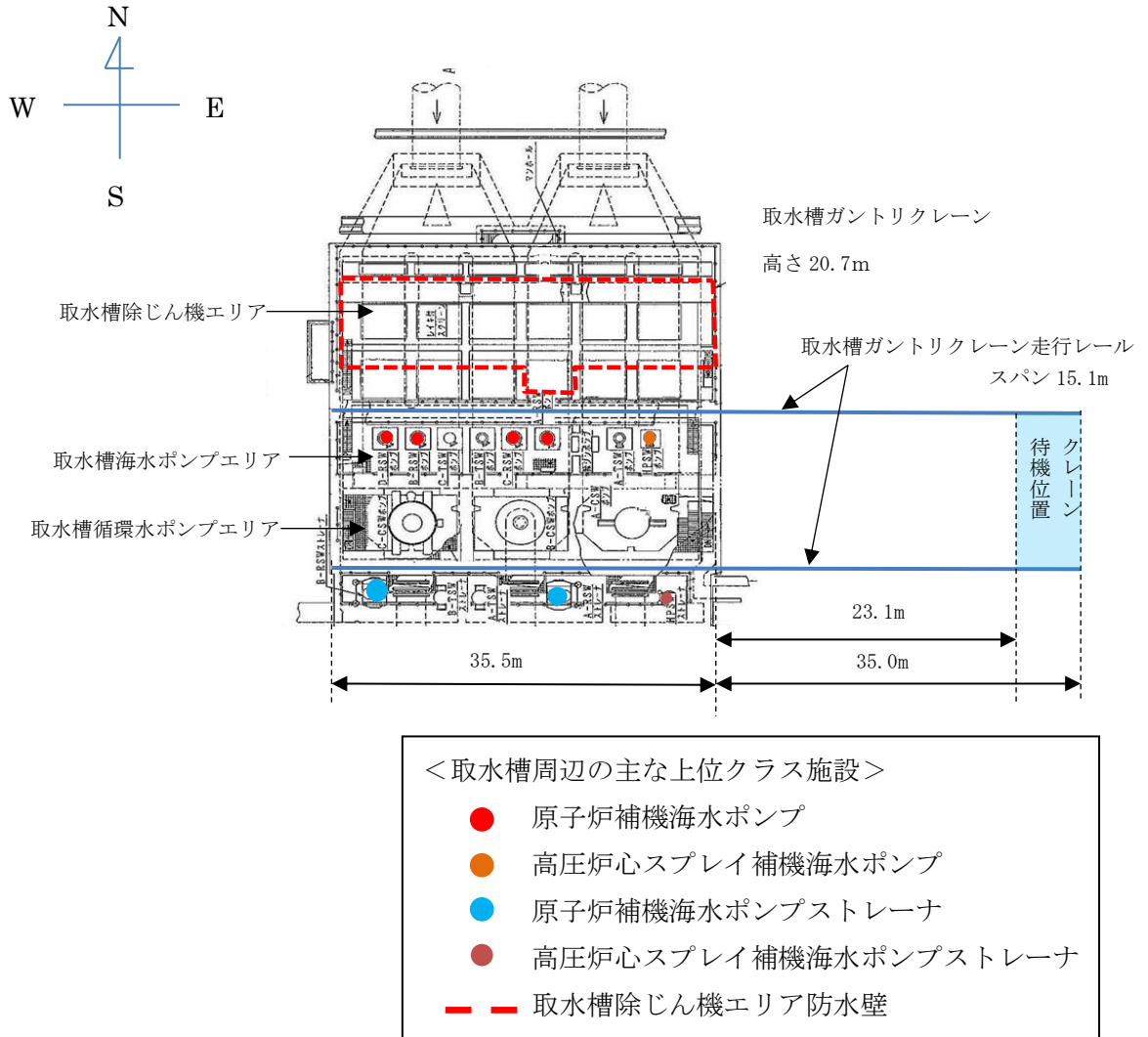
波及的影響検討において抽出された下位クラス施設のうち, 島根2号炉の取水槽ガントリクレーンの耐震評価について, 取水槽ガントリクレーンがレール上に固定されていないという構造上の特徴を踏まえ, 鉛直方向地震力に対する車輪の浮上り等の挙動を考慮した地震応答解析方法及び耐震評価方法について示す。

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。構造図を第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）、また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。

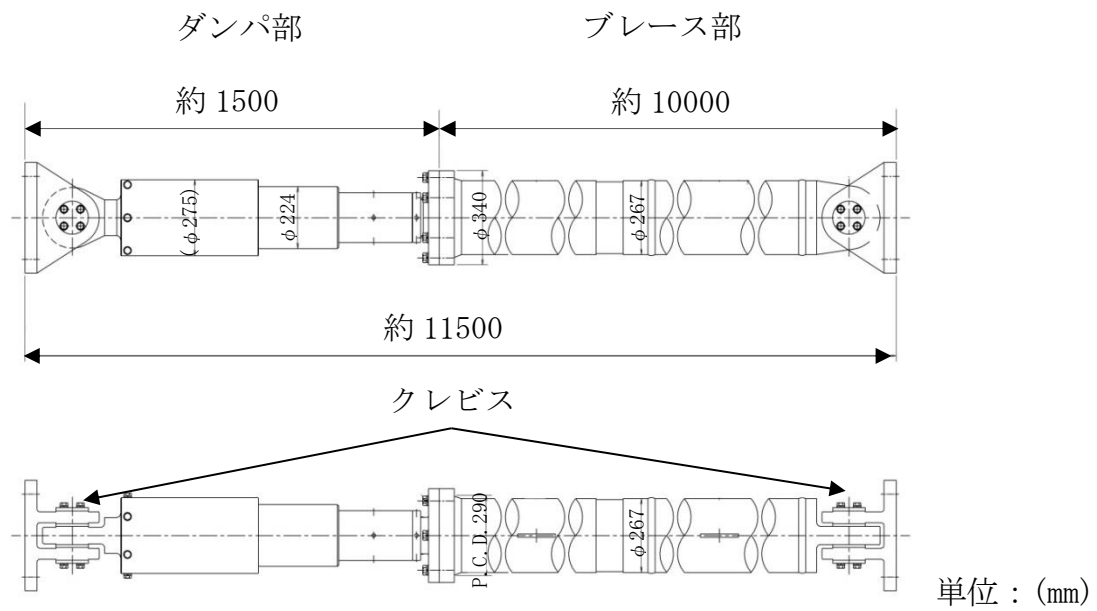
単軸粘性ダンパ及び取付部材の質量は適切に地震応答解析モデルに反映する。

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、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。

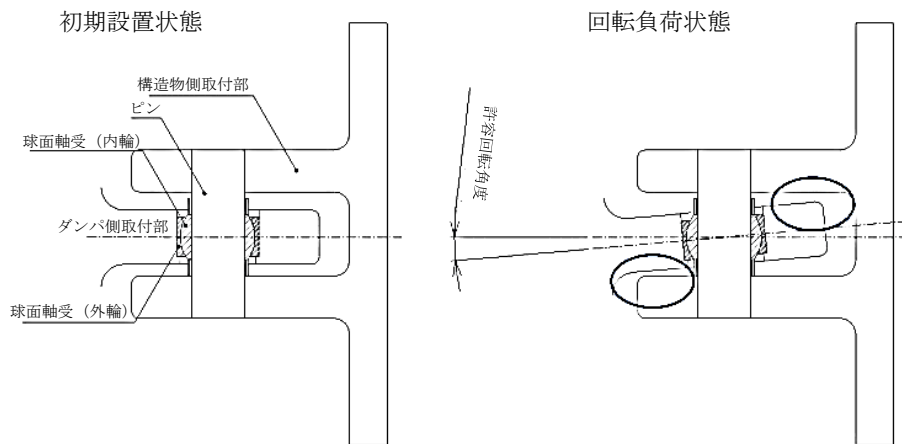


第2-2図 取水槽ガントリクレーンの構造

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

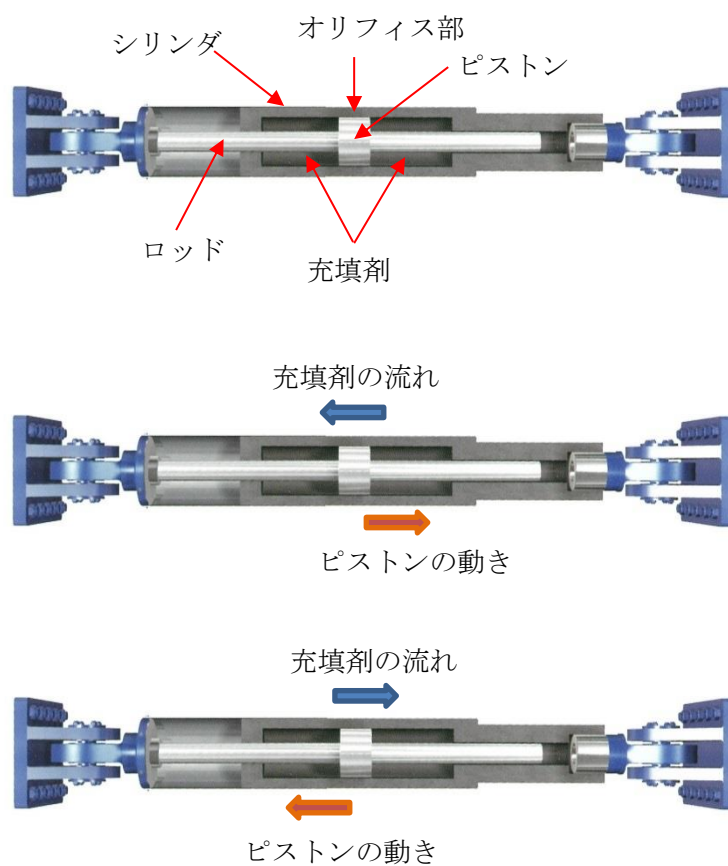
2.2.2 単軸粘性ダンパ

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。

単軸粘性ダンパの詳細については、別紙－7 添付資料－2「機器・配管系への制震装置の適用について」に示す。

第2-1表 単軸粘性ダンパの仕様

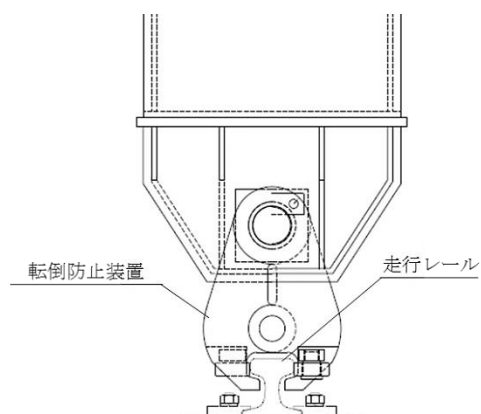
定格荷重 (kN)	全長 (mm)	外径 (mm)	質量 (kg)	許容荷重 (kN)	許容変位 (mm)
220	1535	224	533	300	100



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

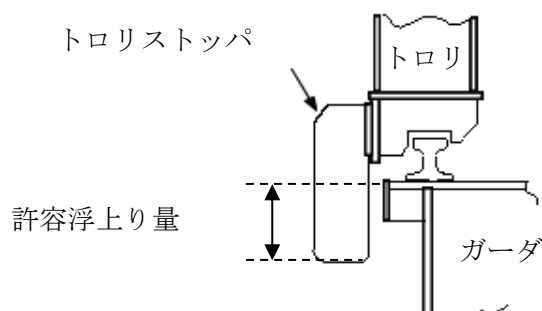
クレーン本体車輪部には、地震によって浮上りが発生した場合でも転倒しないように転倒防止装置が取り付けられており、浮上りによる脱線・転倒を防止する構造となっている。転倒防止装置の構造を第2-5図に示す。



第2-5図 転倒防止装置の構造

2.2.4 トロリストoppa

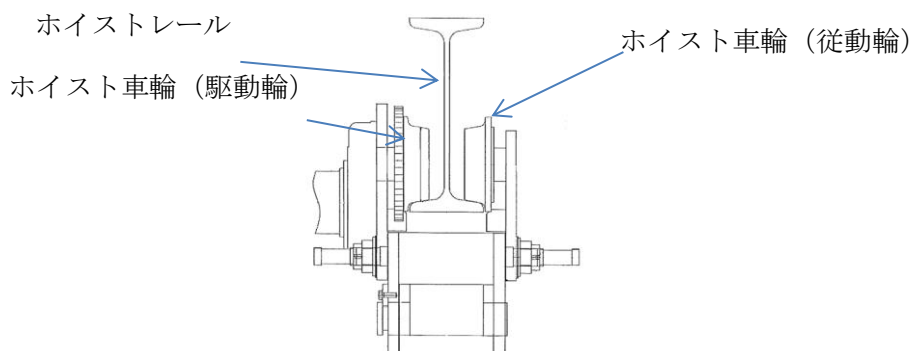
トロリの車輪部には、地震によって浮上りが発生した場合でも落下しないようにトロリストoppaを設置し、浮上りによる脱線・落下を防止する構造とする。トロリストoppaの概略構造を第2-6図に示す。



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

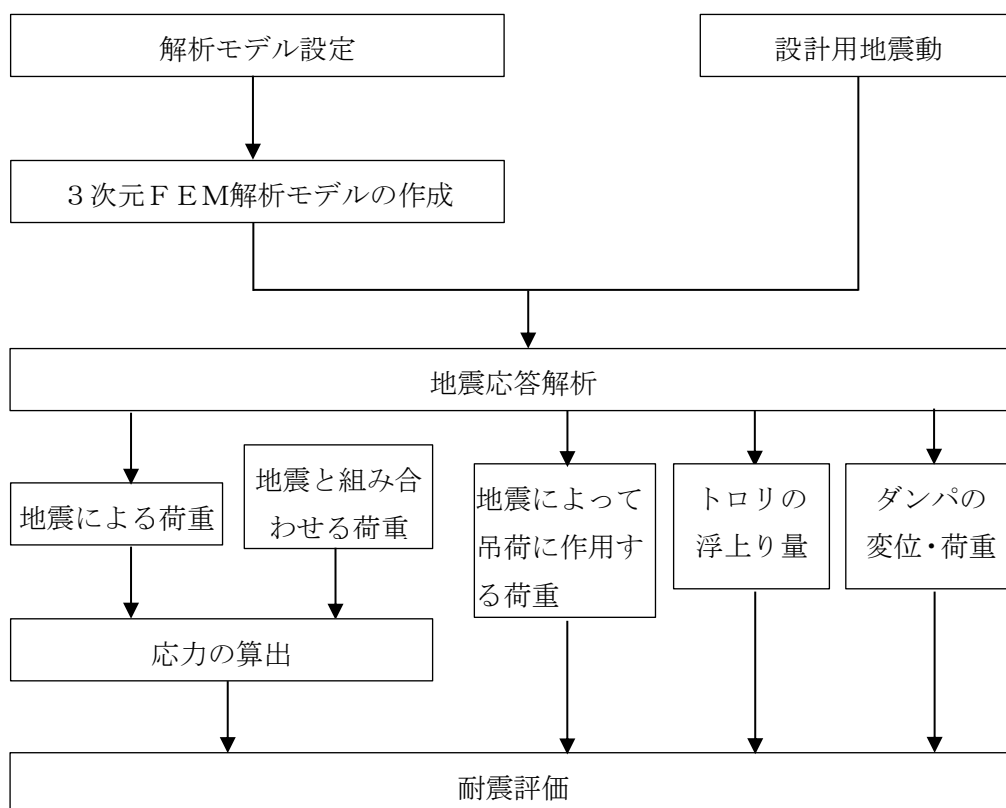
ホイストは、ホイスト車輪がホイストレールを挟み込むことにより懸架されている。ホイストレール及びホイスト車輪の構造を第2-7図に示す。



第2-7図 ホイストレール・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

3. 応答解析方法

3.1 解析方法及び解析モデル

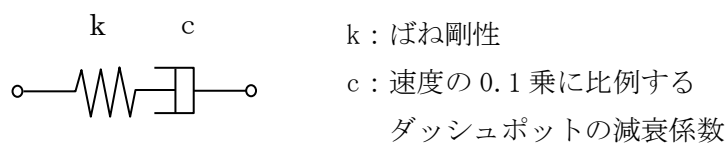
取水槽ガントリクレーンの地震応答解析方法及び解析モデルについて以下に示す。

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(9-1)に示す。
- (2) 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-7 添付資料-2「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%を適用する。
- (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(9-2)）。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。詳細は添付資料(9-2)を参照。
- (8) 耐震評価に用いる寸法は公称値を使用する。

第3-1表 取水槽ガントリクレーンの解析ケース

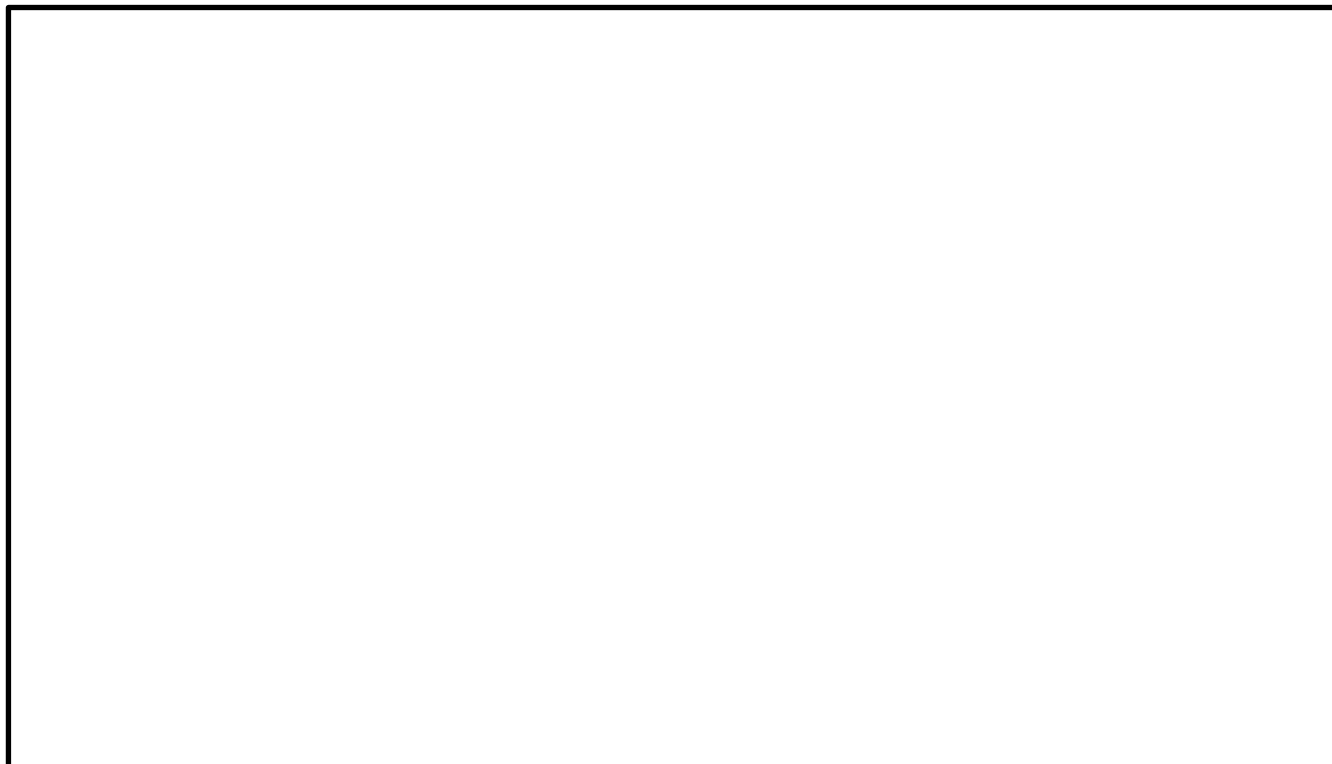
ケース	トロリ		ホイスト	
	位置	吊荷有無 (質量)	位置	吊荷有無 (質量)
1	待機位置	なし	待機位置	なし
2	中央	有り (50t)	待機位置	なし
3	待機位置	なし	中央	有り (17t)



第3-1図 単軸粘性ダンパのMaxwellモデル

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、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3-2図に示す。



第3-2図 取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル

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3-2表，第3-3表，第3-4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

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。

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3-3図に示す。

第3-2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 ^{注1}	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2-2図及び第1-3添図参照

μ ：摩擦係数

第3-3表 境界条件（横行車輪（トロリ車輪）と横行レール）

部位 ^{注1}	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1-3添図参照

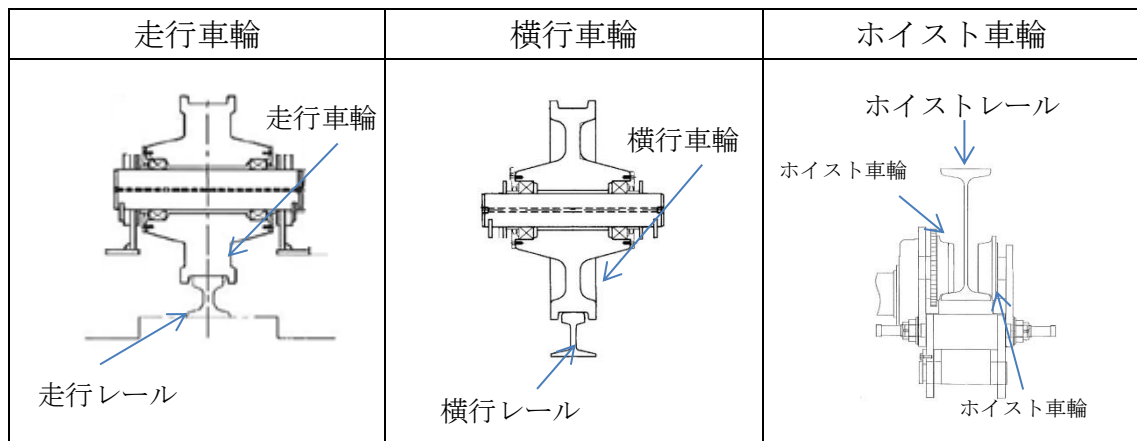
μ ：摩擦係数

第3-4表 境界条件 (ホイスト車輪とホイストレール)

部位 ^{注1}	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2-5図参照

μ ：摩擦係数



第3-3図 走行車輪部，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、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3-4図に示す。また、基準地震動 $S_s - D$ 入力加速度時刻歴波形を第3-5図、第3-6図に示す。

詳細設計段階では、基準地震動 S_s を用いて評価を実施する。その際、地盤物性等の不確かさの影響についても検討する。

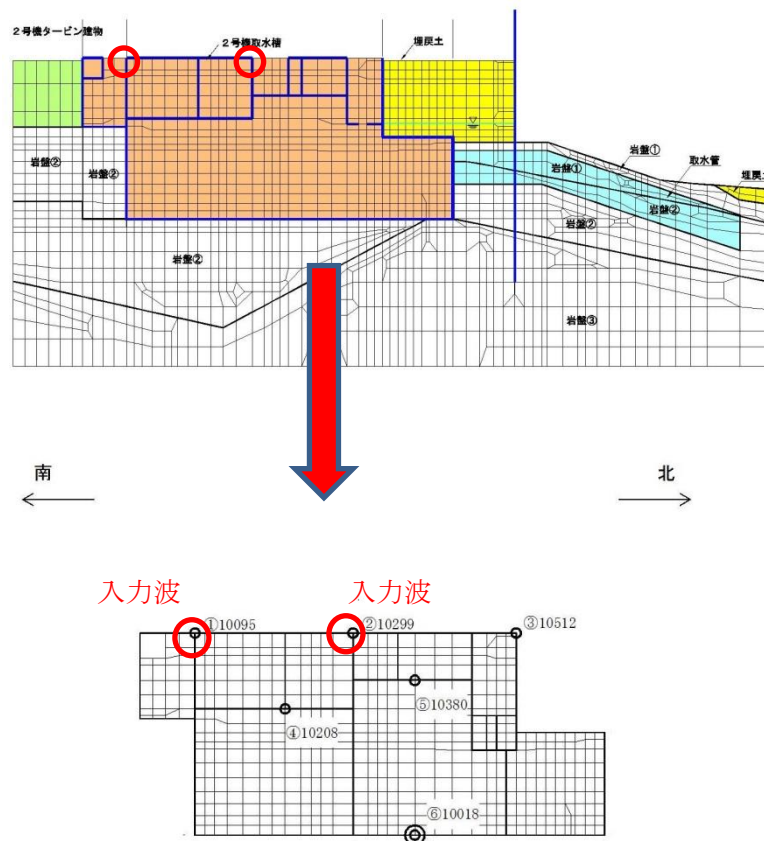
(2) 地震動の入力方向

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。

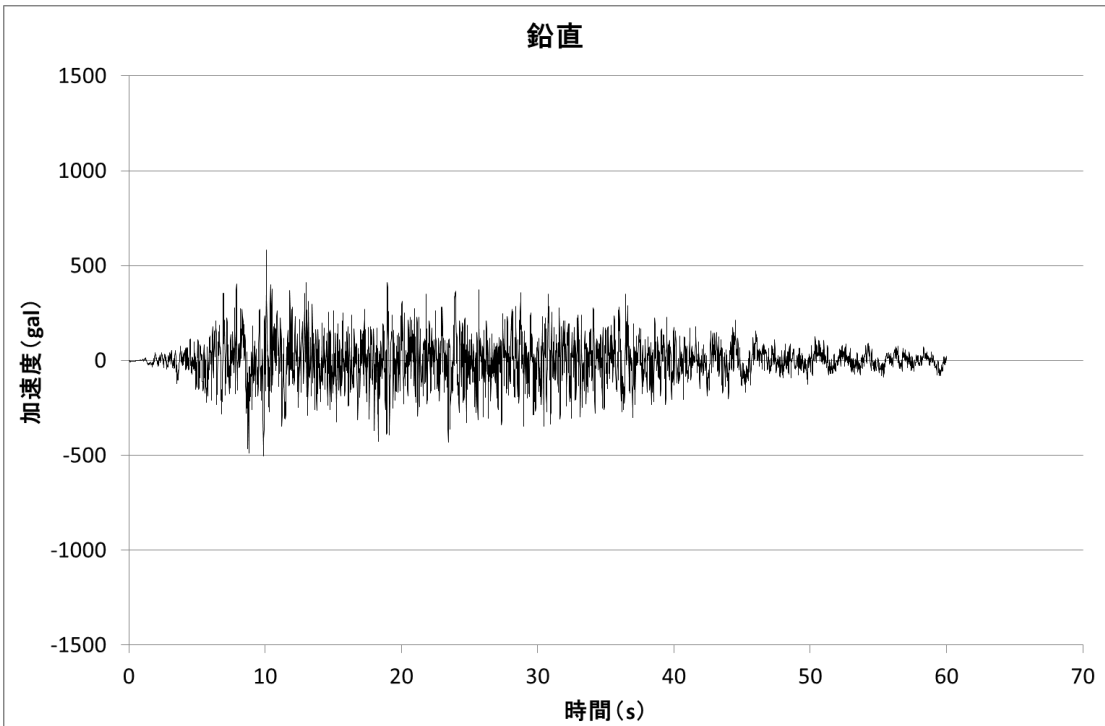
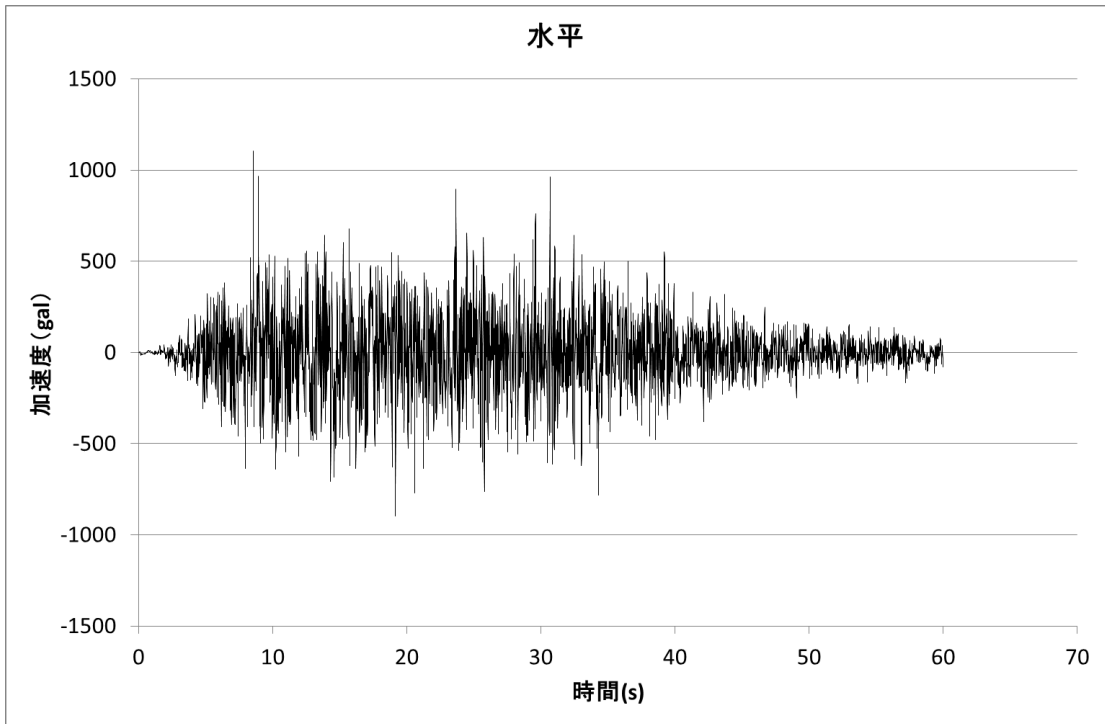
なお、クレーン本体の走行車輪と走行レールは固定されていないため、走行方向においては、各時刻における最大静止摩擦力以上の地震慣性力が加わった場合、クレーン本体は走行レール上をすべる。

(3) 地盤物性等の不確かさに対する検討方針

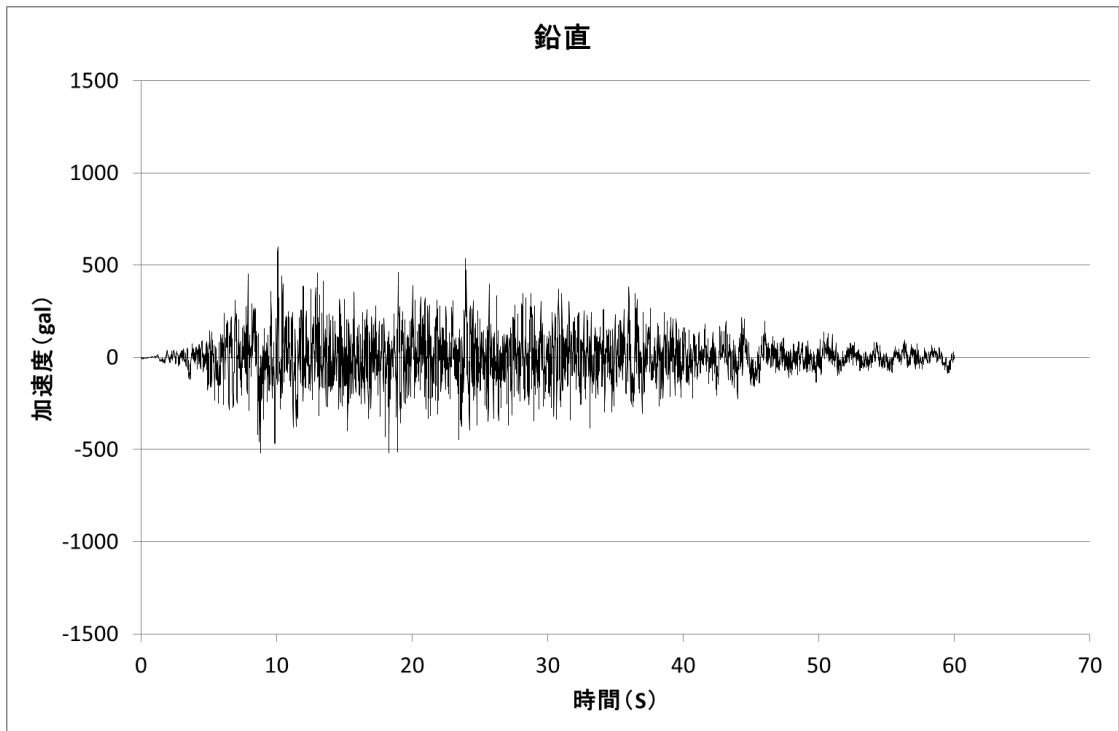
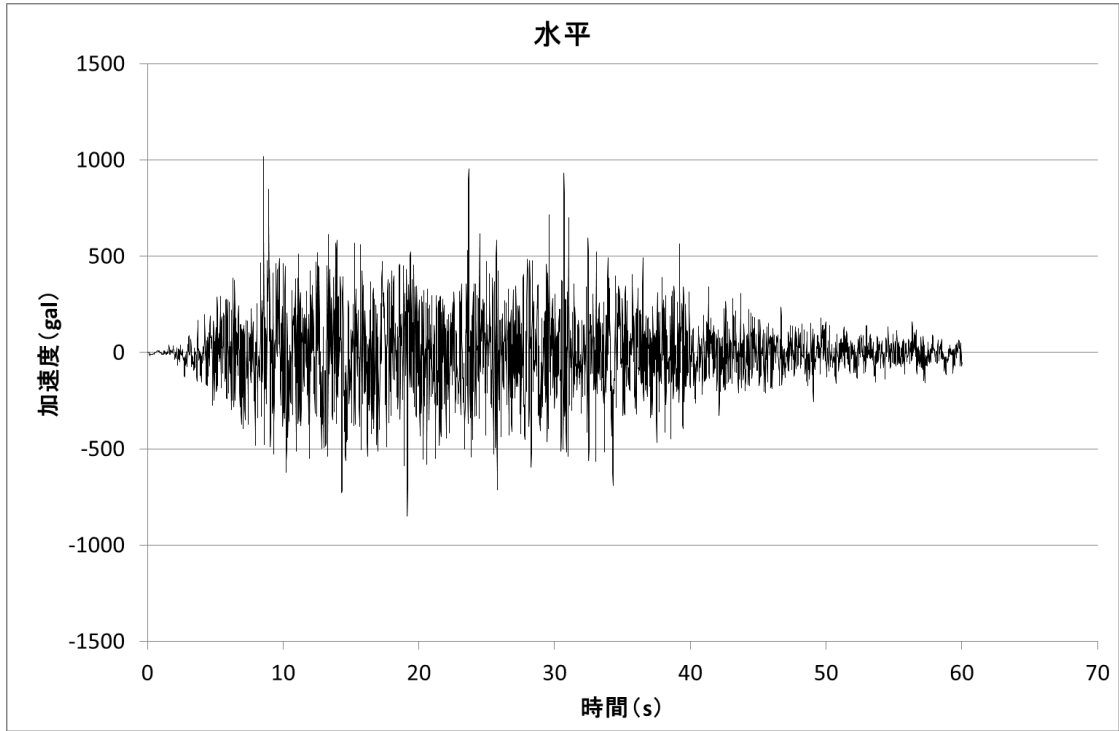
スペクトルモーダル解析では、床応答加速度は地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動を考慮して周期方向に±10%拡幅した設計用床応答曲線を用いる。取水槽ガントリクレーンの地震応答解析では、設計用床応答曲線を用いない時刻歴応答解析を採用することから、地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動の影響を考慮し、機器評価への影響が大きい地震動に対し、ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION1—NONMANDATORY APPENDIX N (ARTICLE N-1222.3 Time History Broadening) に規定された手法等により検討を行う。Time History Broadening の概念を第 3-7 図に示す。



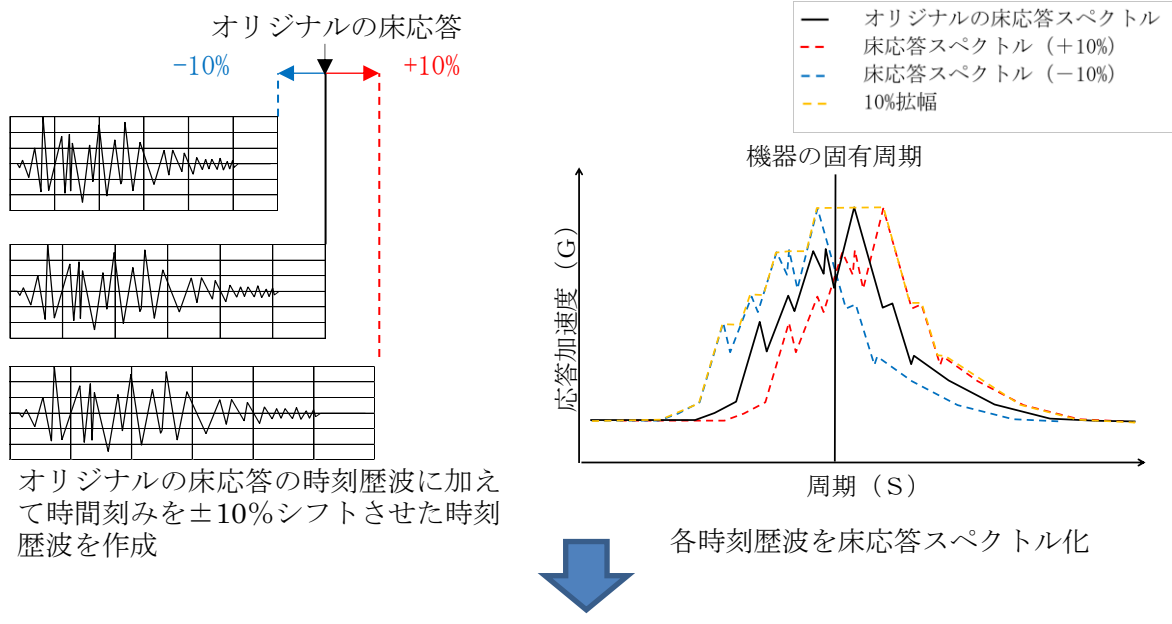
第 3-4 図 取水槽の地震応答解析モデル図



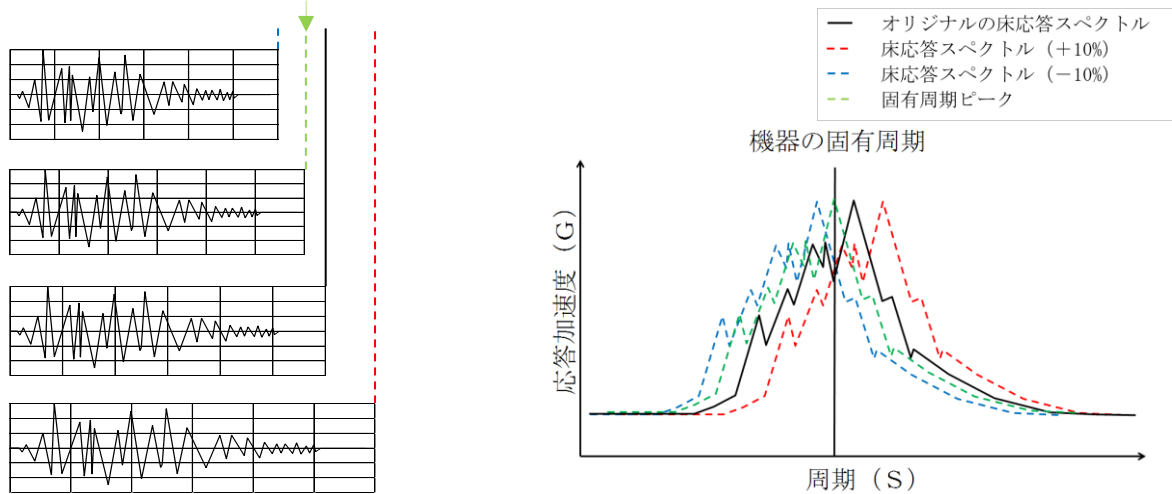
第 3-5 図 入力加速度時刻歴波形 (S_s-D 節点 10095)



第3-6図 入力加速度時刻歴波形 (S_s-D 節点10299)



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 3-7 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 許容限界

4.3.1 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。許容応力により評価する部位は、クレーン本体（ガーダ、脚、ガーダ継ぎ、脚下部継ぎ）、転倒防止装置、レール、トロリストoppaとする。

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
	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_c^*$	$1.5 \cdot f_b^*$

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。

4.3.2 許容浮上り量

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、トロリの浮上り量が、許容浮上り量を以下であることを確認する。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 ^{注1}

注1：トロリストップの形状設計中のため暫定値

4.3.3 単軸粘性ダンパの許容限界

単軸粘性ダンパの評価では、地震応答解析によって得られる変位及び荷重が、許容限界以下であることを確認する。単軸粘性ダンパの許容限界を第4-3表に示す。

第4-3表 単軸粘性ダンパの許容限界

許容変位	許容荷重
100mm	300kN

4.4 吊具の荷重評価

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。

5. まとめ

島根2号炉取水槽ガントリクレーンの耐震評価にあたっては、構造上の特徴を踏まえて非線形時刻歴応答解析を適用することから、その妥当性を確認するため、先行実績のあるクレーン類と構造及び評価手法を比較した。その結果、全体構造、荷重伝達及び車輪まわりの構造が同等であり、解析モデルの設定方法として、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から、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ことは妥当であることを確認した。

6. 添付資料

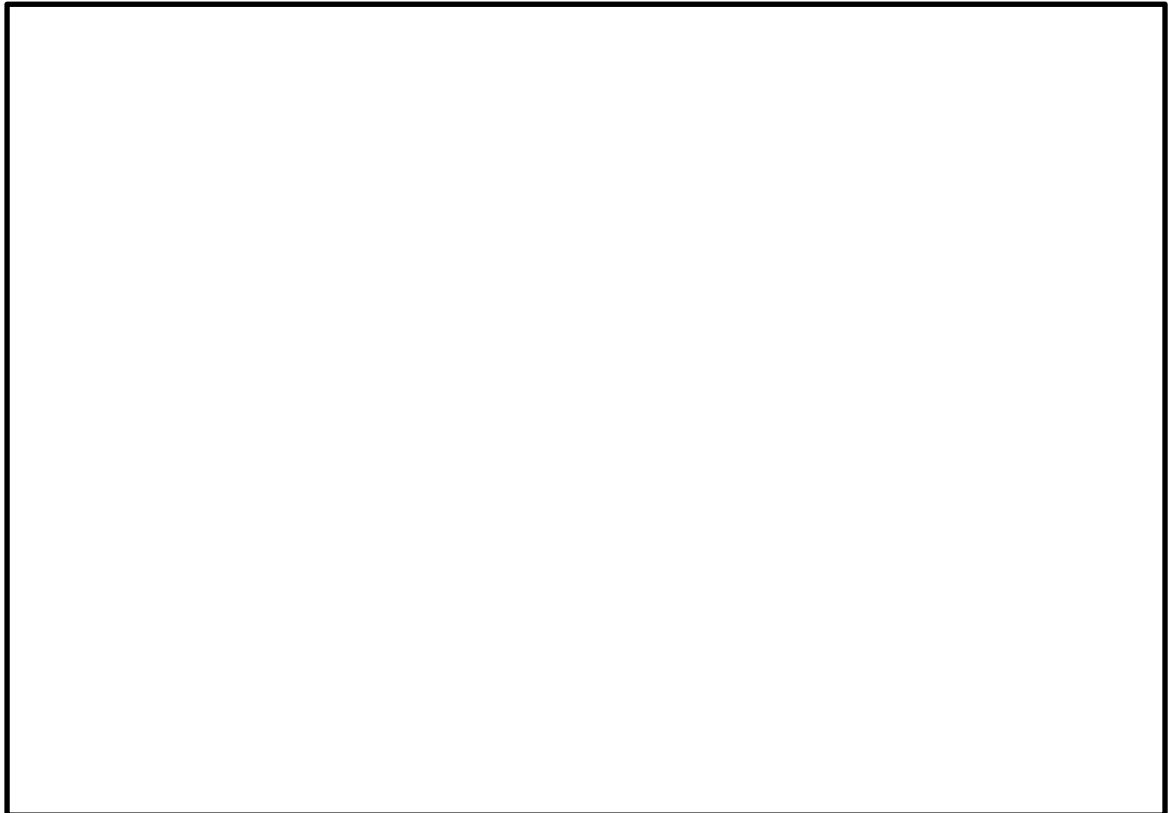
- (9-1) 取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用性
- (9-2) ガントリクレーンの解析ケースの設定
- (9-3) クレーン車輪部の非線形要素（摩擦，接触，減衰）

添付資料(9-1) 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1-1添図に、解析モデルの概要を第1-2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1-1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1-2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1-3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にもともに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にもともに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。

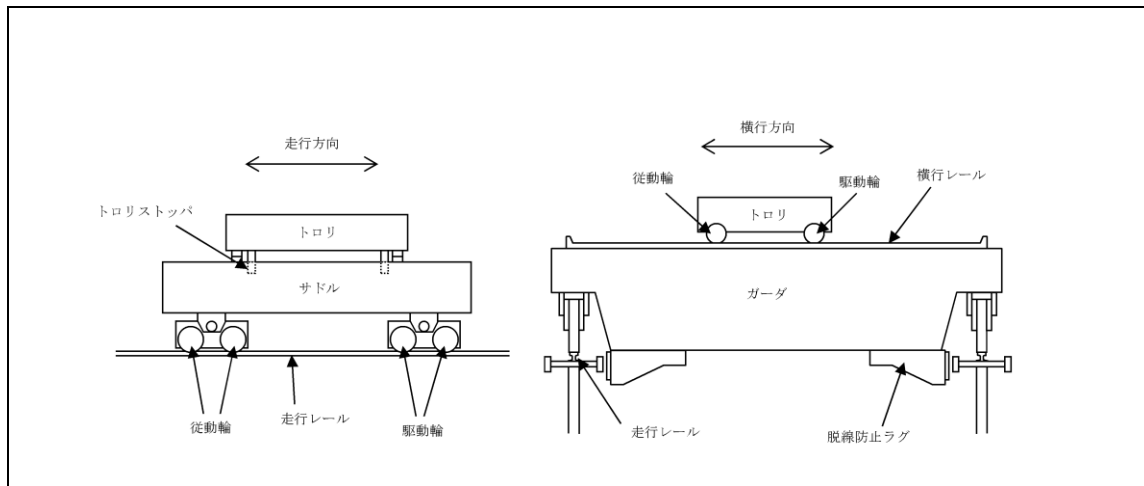
取水槽ガントリクレーンの本体構造はガーダ及び脚と呼ばれる鋼構造物が主体となっている。トロリ本体も同様に鋼構造物で構成されている。脚は走行レール上に、トロリは横行レール上にもともに4箇所にある車輪を介して固定されずに設置されている。取水槽ガントリクレーンは、走行方向の駆動輪、従動輪の間に転倒防止装置が設置されているが、地震時には原子炉建屋天井クレーンと同様、車輪は水平方向にすべり、鉛直方向に浮上りが発生する可能性がある。

(3) 構造の特徴比較

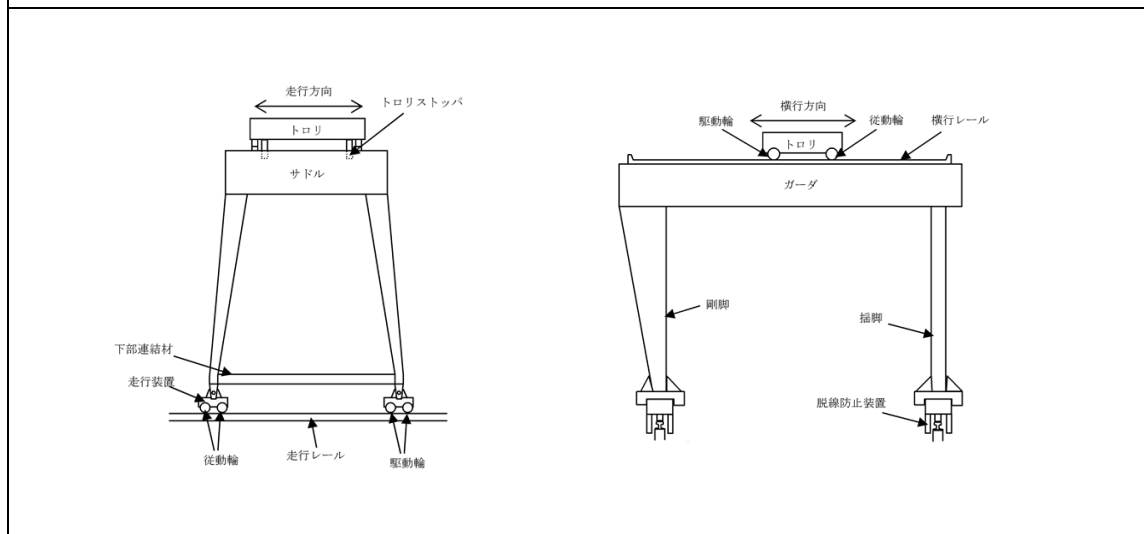
原子炉建屋天井クレーン、海水ポンプ室門型クレーン及び取水槽ガントリクレーンの構造について特徴を比較した結果を第1-1添表に示す。

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1-3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1-1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"> ・2本のレール間を跨ぐ桁構造 ・ガーダ上にトロリを設置 ・車輪を介してレールに設置 	同左	同左
主要構造物	<ul style="list-style-type: none"> ・ガーダ ・サドル ・トロリ ・脱線防止ラグ ・トロリストoppa 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガーダ ・サドル ・トロリ ・脚 ・脱線防止装置 ・トロリストoppa 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガーダ ・トロリ ・ホイスト ・脚 ・単軸粘性ダンパ ・転倒防止装置 ・トロリストoppa
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、

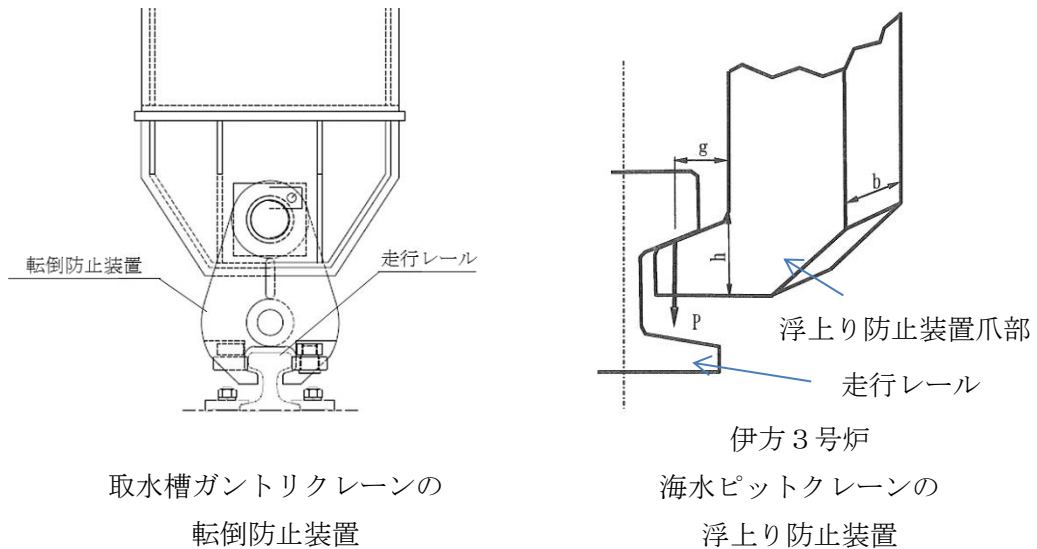
クレーン本体の車輪と同様に鉛直方向の拘束がないため浮上りが発生する可能性がある構造となっている。駆動輪と従動輪についてもクレーン本体の車輪と同様に前後で役割の異なる車輪が配置されている。

クレーン本体車輪まわり及びトロリ車輪まわりには、脱線防止装置もしくはトロリスト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1-3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1-4添図に示す。



第1-4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1-2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1-2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-レール間の 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1-5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（9-3）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1-5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-7 添付資料-2 「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。

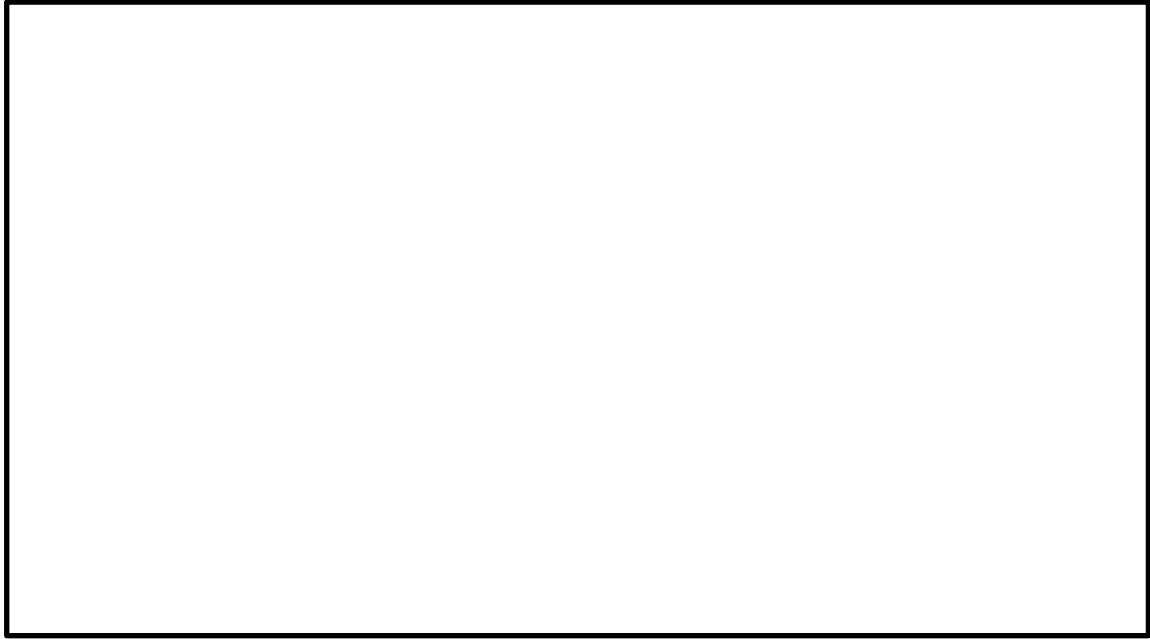
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

添付資料(9-2) 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2-1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2-1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2-1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

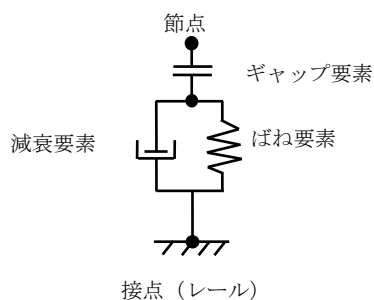
第2-1添表 取水槽ガントリクレーンの耐震評価ケース

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）

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(9-3) 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3-2添図 取水槽ガントリクレーンの概要図

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

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。

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。

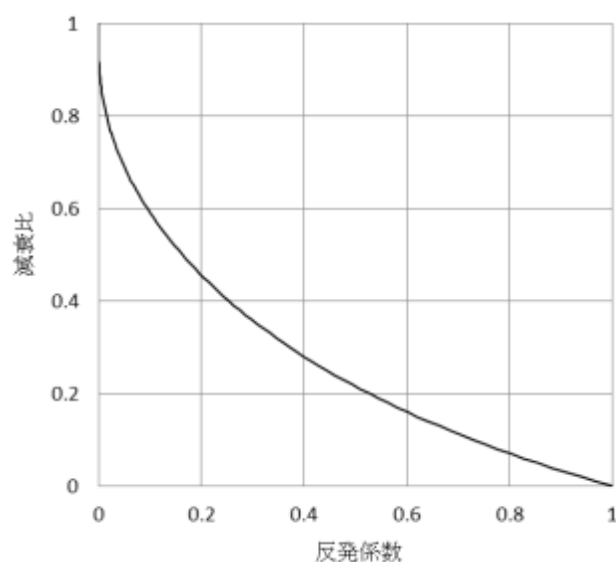
3. 車輪とレール間の衝突による減衰

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3-3添図に示す。



第3-3添図 反発係数と減衰比の関係