

補足-026-10 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の地震応答計算書及び
耐震性についての計算書に関する補足説明資料

目 次

1. 評価方法	1
2. 評価条件	1
2.1 適用規格	1
2.2 構造概要	3
2.3 評価対象断面の方向	14
2.4 評価対象断面の選定	14
2.5 使用材料及び材料の物性値	15
2.6 地盤物性値	16
2.7 評価構造物諸元	17
2.8 地下水位	20
2.9 耐震評価フロー	20
3. 地震応答解析	22
3.1 地震応答解析手法	22
3.2 地震応答解析モデルの設定	25
3.2.1 解析モデル領域	25
3.2.2 境界条件	26
3.2.3 構造物のモデル化	29
3.2.4 隣接構造物のモデル化	30
3.2.5 地盤、埋戻コンクリート及びMMRのモデル化	33
3.2.6 地震応答解析モデル	36
3.2.7 ジョイント要素の設定	39
3.2.8 材料特性の設定	44
3.3 減衰定数	46
3.4 荷重及び荷重の組合せ	58
3.4.1 機器・配管荷重	59
3.4.2 外水圧	60
3.4.3 内水圧	60
3.4.4 積雪荷重	60
3.4.5 動水圧	60
3.5 地震応答解析の解析ケース	62
3.5.1 耐震評価における解析ケース	62
3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース	65

4.	評価内容	68
4.1	入力地震動の設定	68
4.1.1	A-A断面及びB-B断面の入力地震動	69
4.1.2	C-C断面の入力地震動	81
4.2	許容限界の設定	93
4.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	93
4.2.2	せん断破壊に対する許容限界	96
4.2.3	基礎地盤の支持機能に対する許容限界	100
4.3	評価方法	101
4.3.1	C-C断面	101
5.	評価結果	103
5.1	地震応答解析結果	103
5.1.1	解析ケース	103
5.1.2	ひずみの時刻歴波形（A-A断面及びB-B断面）	110
5.1.3	断面力分布（せん断破壊に対する照査，A-A断面及びB-B断面）	113
5.1.4	断面力分布（層間変位最大時刻，C-C断面）	116
5.1.5	最大せん断ひずみ分布（A-A断面及びB-B断面）	120
5.2	構造部材の健全性に対する評価結果	123
5.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果	123
5.2.2	せん断破壊に対する評価結果	131
5.3	基礎地盤の支持性能に対する評価結果	141
6.	まとめ	146

参考資料1 機器・配管系の耐震評価に適用する影響検討ケース

参考資料2 ケミカルアンカーの有効埋め込み長さの検討

1. 評価方法

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽は、常設耐震重大事故等対処設備である低圧原子炉代替注水ポンプ等を間接支持しており、支持機能が要求される。また、低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の一部である低圧原子炉代替注水槽については、貯水機能が要求される。

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽については、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき、低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽が基準地震動 S_s に対して十分な構造強度、支持機能及び貯水機能を有していることを確認する。

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽に要求される機能維持の確認においては、構造部材の健全性評価及び基礎地盤の支持性能評価を実施することで、構造強度を有することを確認し、これにより常設耐震重大事故等対処設備を支持する機能を有することを確認する。さらに、部材がおおむね弾性範囲に留まることを確認することで、貯水機能を有することを確認する。

2. 評価条件

2.1 適用規格

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の耐震評価にあたっては、「コンクリート標準示方書[構造性能照査編]（（社）土木学会，2002年制定）」（以下「コンクリート標準示方書2002」という。）及び「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）」（以下「J E A G 4 6 0 1 - 1987」という。）を適用するが、鉄筋コンクリート部材の曲げ・軸力系及びせん断破壊の許容限界の一部については、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（（社）土木学会，2005年）」（以下「土木学会マニュアル2005」という。）を適用する。また、基礎地盤の支持性能の許容限界については、「道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解説（（社）日本道路協会，平成14年3月）」（以下「道示・IV 下部構造編」という。）を適用する。

表2-1に適用する規格，基準類を示す。

表 2-1 適用する規格，基準類

項目	適用する規格， 基準類	備考	確認項目
使用材料及び材料定数	コンクリート標準示方書 2002	鉄筋コンクリートの材料諸元 (γ , E, ν)	
荷重及び荷重の組合せ	コンクリート標準示方書 2002	永久荷重，偶発荷重等の適切な組み合わせを検討	
許容限界	土木学会マニュアル 2005	<p>曲げ・軸力系の破壊に対する照査は，発生ひずみが限界ひずみ（圧縮縁コンクリートひずみ 1.0%）以下であることを確認</p> <p>せん断破壊に対する照査は，発生せん断力がせん断耐力を下回ることを確認</p>	構造強度を有すること
	コンクリート標準示方書 2002	<p>曲げ・軸力系の破壊に対する照査においておおむね弾性範囲として，発生ひずみが限界ひずみ（コンクリート圧縮 2000μ，主筋ひずみ 1725μ）を下回ることを確認</p>	貯水機能を有すること
許容限界	道示・IV下部構造編	基礎地盤の支持性能に対する照査は，基礎地盤に発生する応力が極限支持力を下回ることを確認	
地震応答解析	J E A G 4 6 0 1 - 1987	有限要素法による 2 次元モデル作成等	
	土木学会マニュアル 2005	構造物の要素分割等	

2.2 構造概要

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の位置図を図 2-1 に、平面図を図 2-2 に、断面図を図 2-3～図 2-7 に、概略配筋図を図 2-8～図 2-12 に、安全対策工事における掘削範囲図を図 2-13 に、評価対象断面図を図 2-14～図 2-16 に示す。

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽は、低圧原子炉代替注水槽を有し、低圧原子炉代替注水ポンプ等を間接支持する幅 26.6m (E-W方向) ×13.4m (N-S方向)、高さ約 21.2m の鉄筋コンクリート造の地中 (一部地上部を含む) 構造物であり、直接又はマンメイドロック (以下「MMR」という。) を介して十分な支持性能を有する C_M級及び C_H級岩盤に支持される。また、地上部の一部については、ケミカルアンカーにて一体化をしている。ケミカルアンカーの有効埋め込み長さの検討については参考資料 2 に示す。

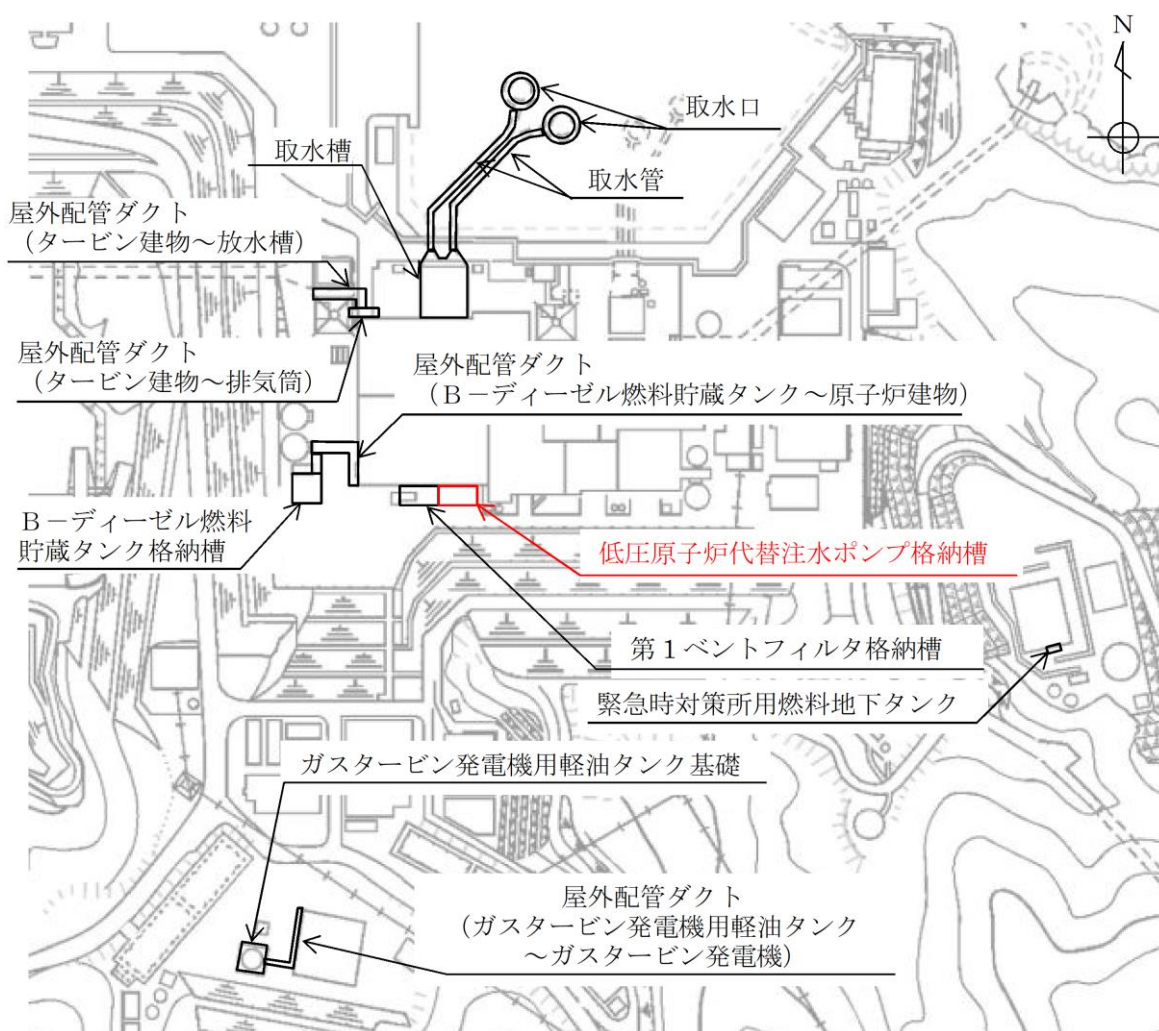


図 2-1 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 位置図

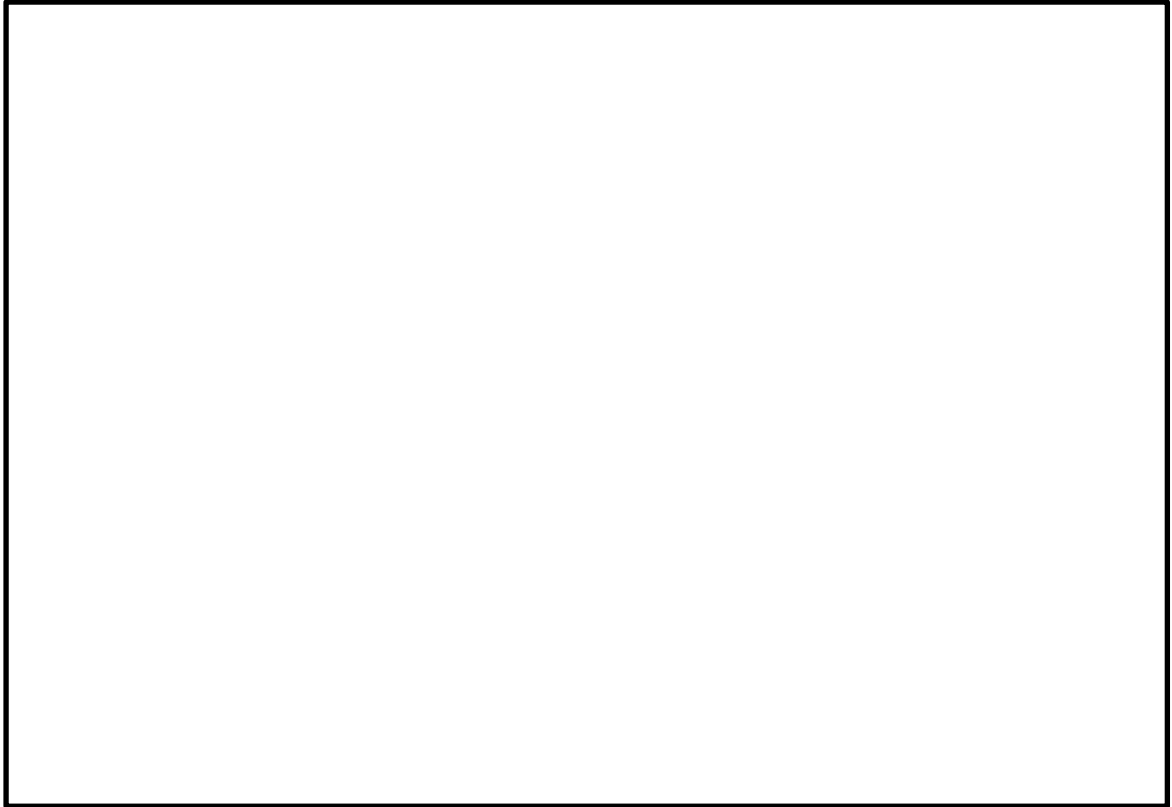
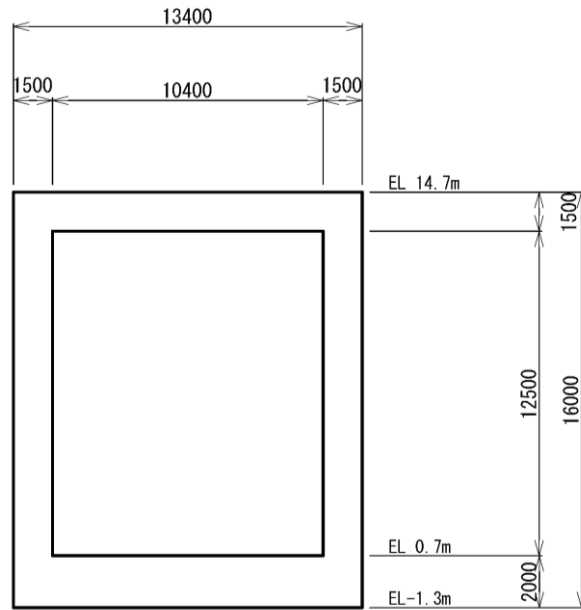


図 2-2 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 平面図

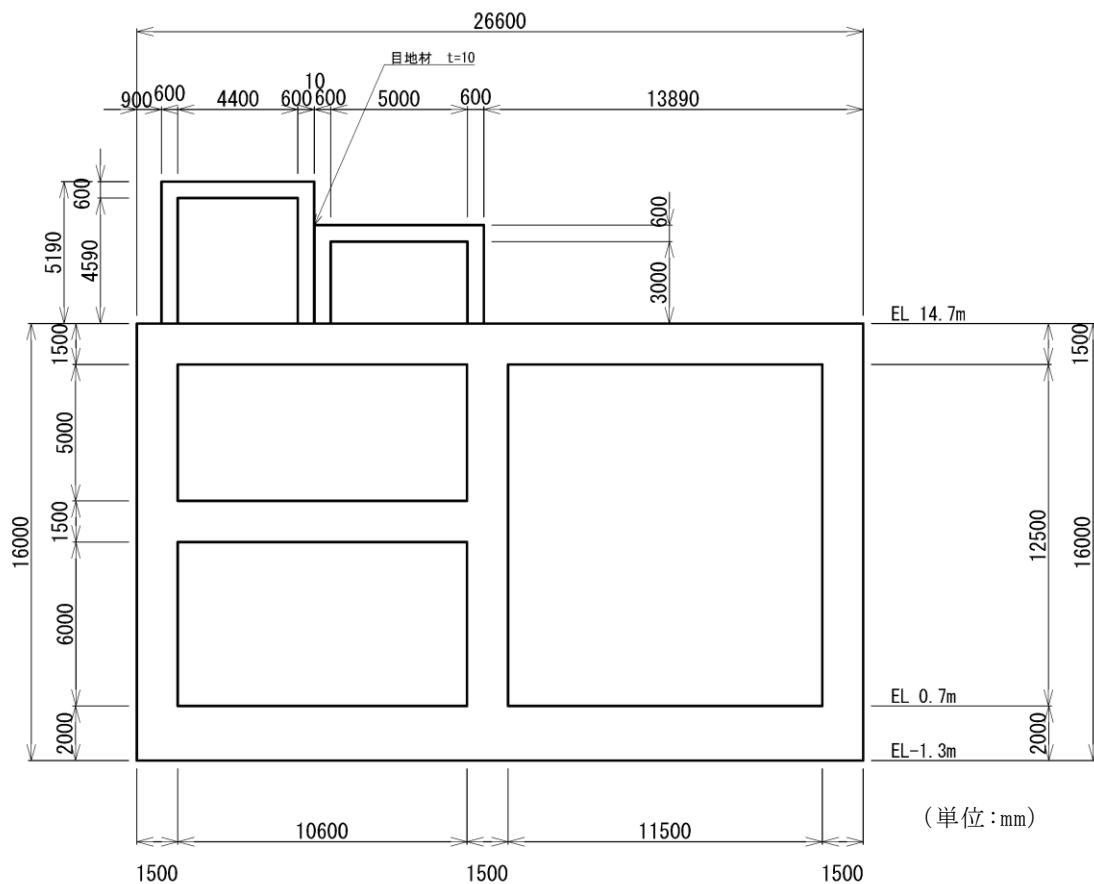


図 2-3 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 断面図 (A-A断面)



(単位: mm)

図 2-4 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 断面図 (B-B 断面)



(単位: mm)

図 2-5 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 断面図 (C-C 断面)

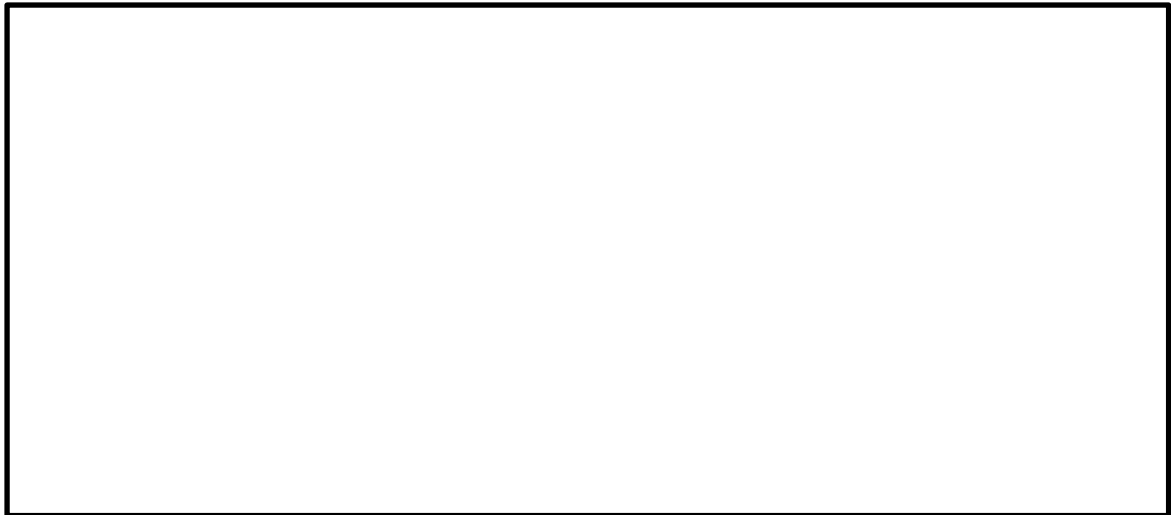


図 2-6 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 断面図 (D-D断面)

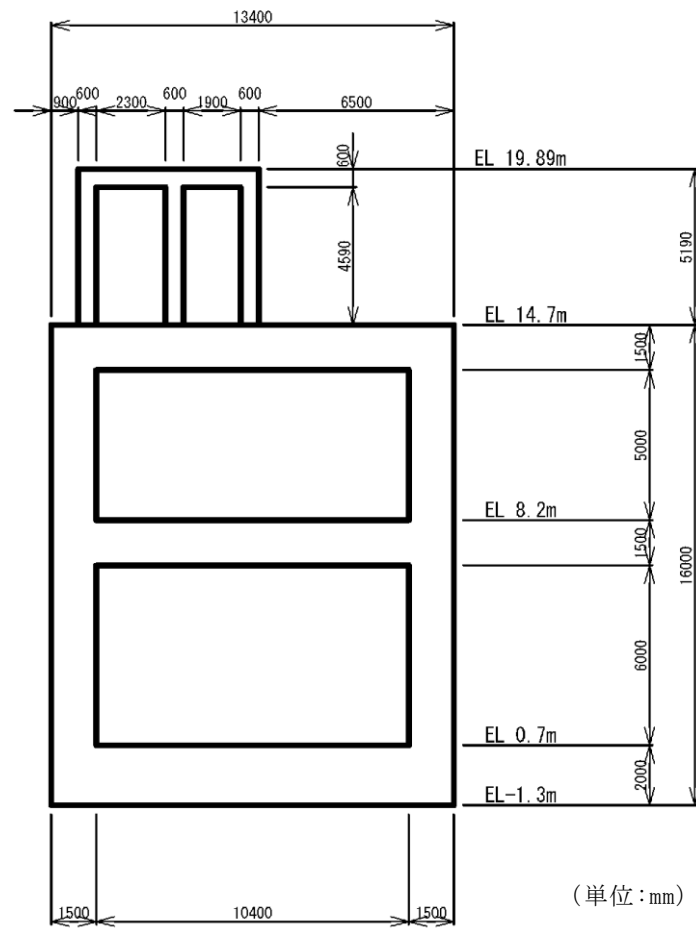


図 2-7 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 断面図 (E-E断面)

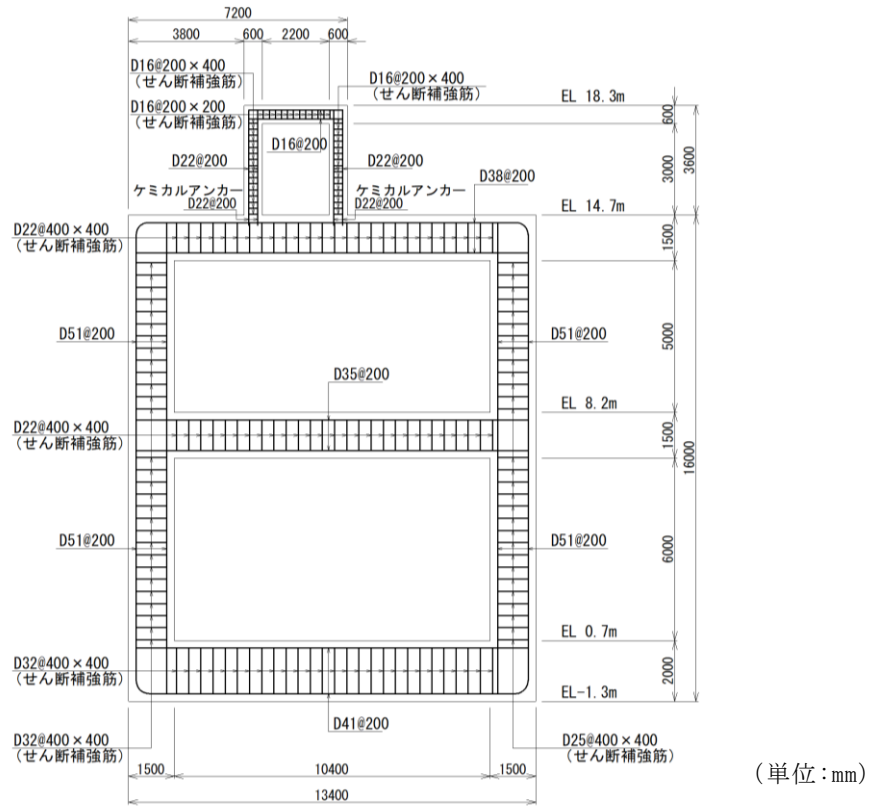


図 2-8 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 概略配筋図 (A-A 断面)

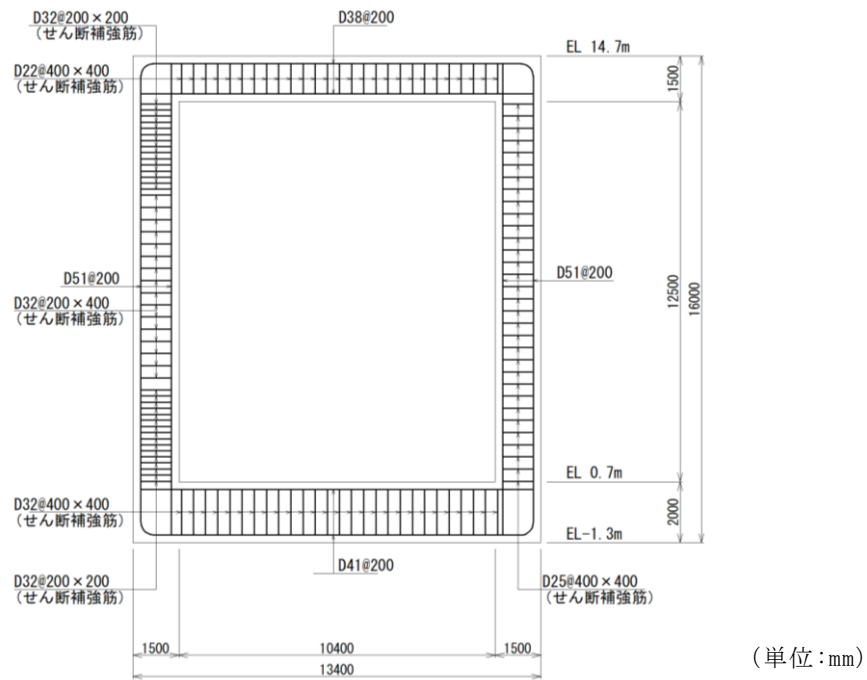


図 2-9 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 概略配筋図 (B-B 断面)

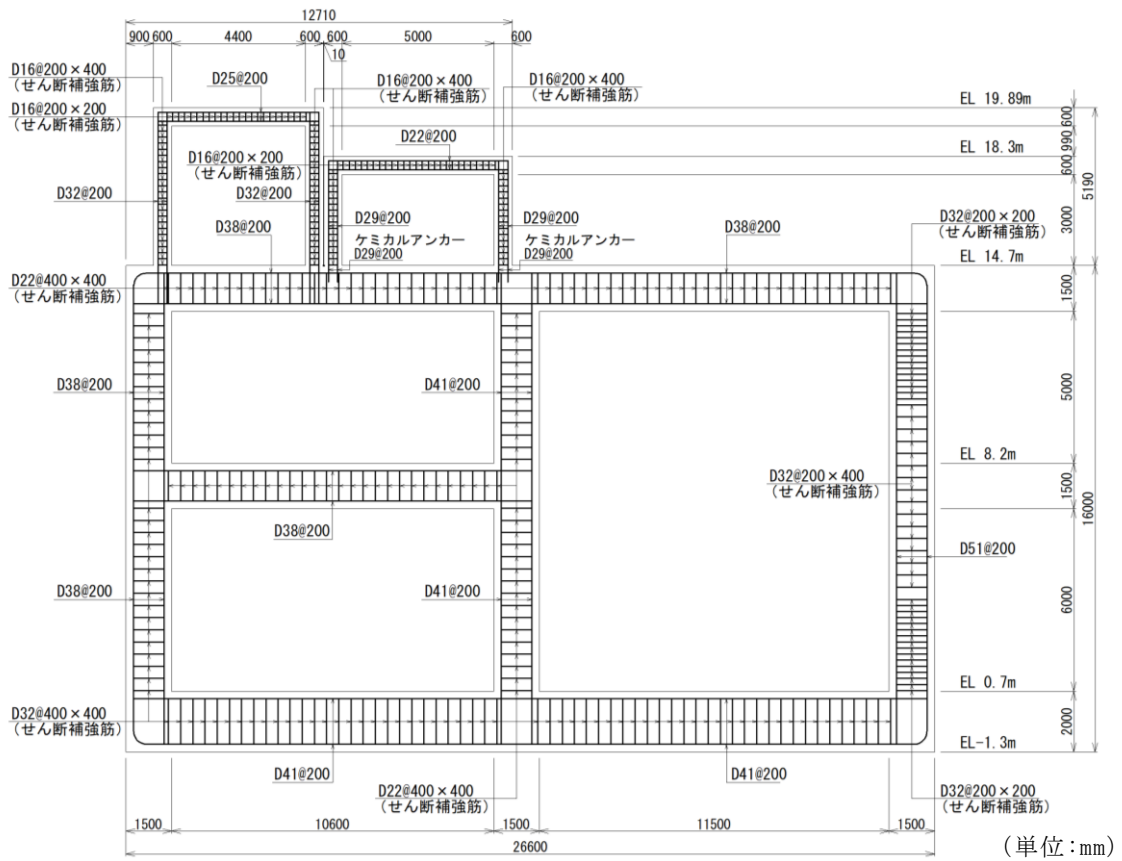


図 2-10 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 概略配筋図 (C-C 断面)

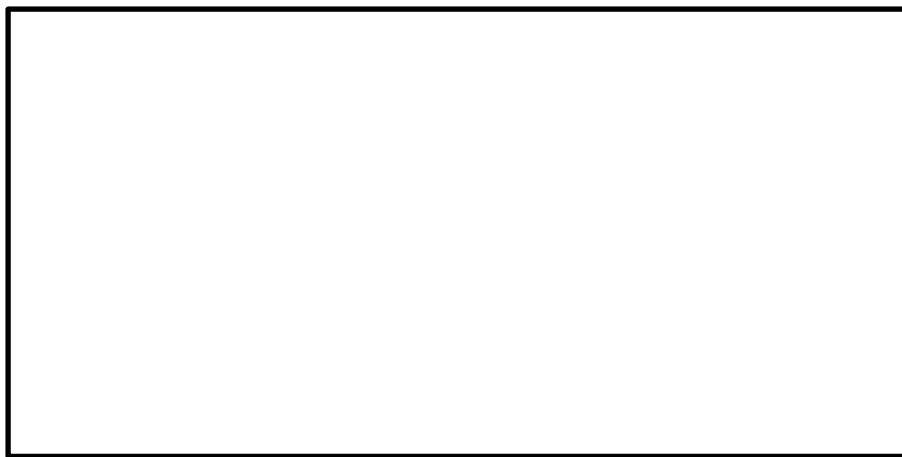


図 2-11 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 概略配筋図 (D-D 断面)

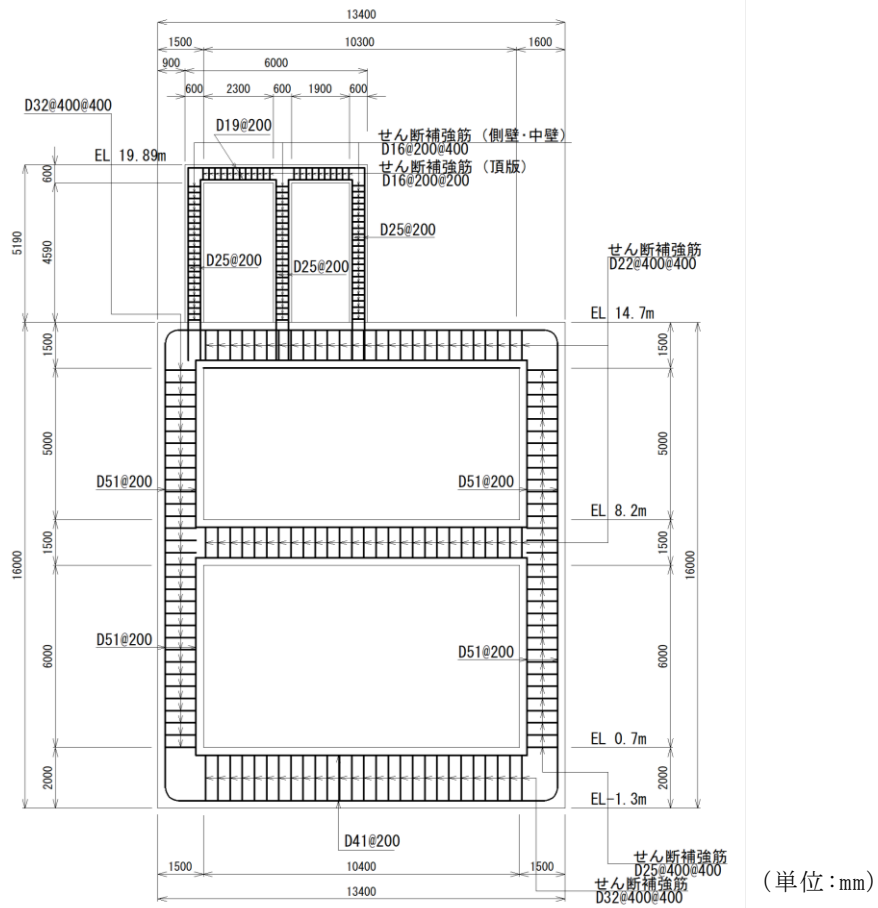


図 2-12 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 概略配筋図 (E-E 断面)

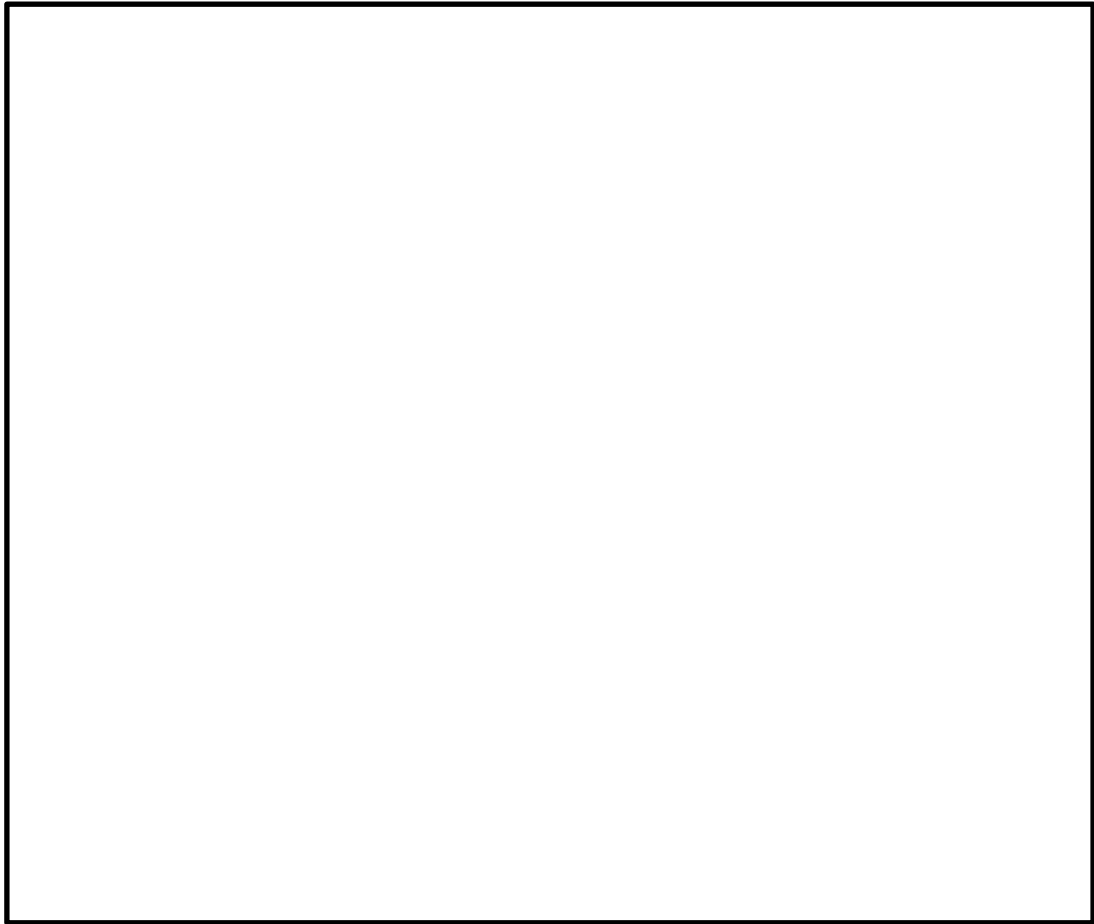
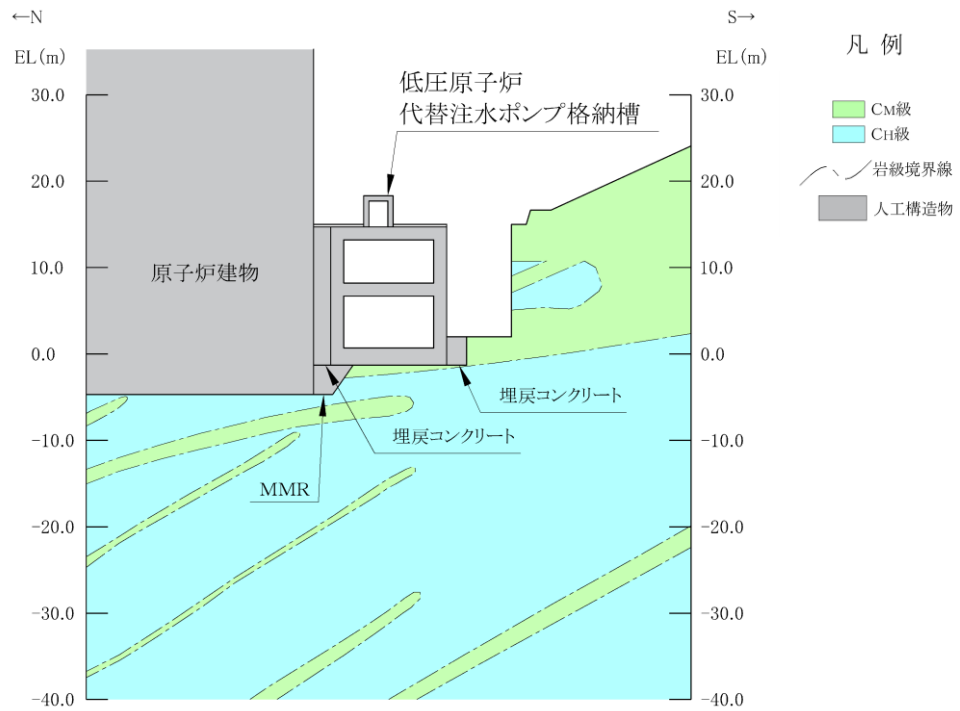
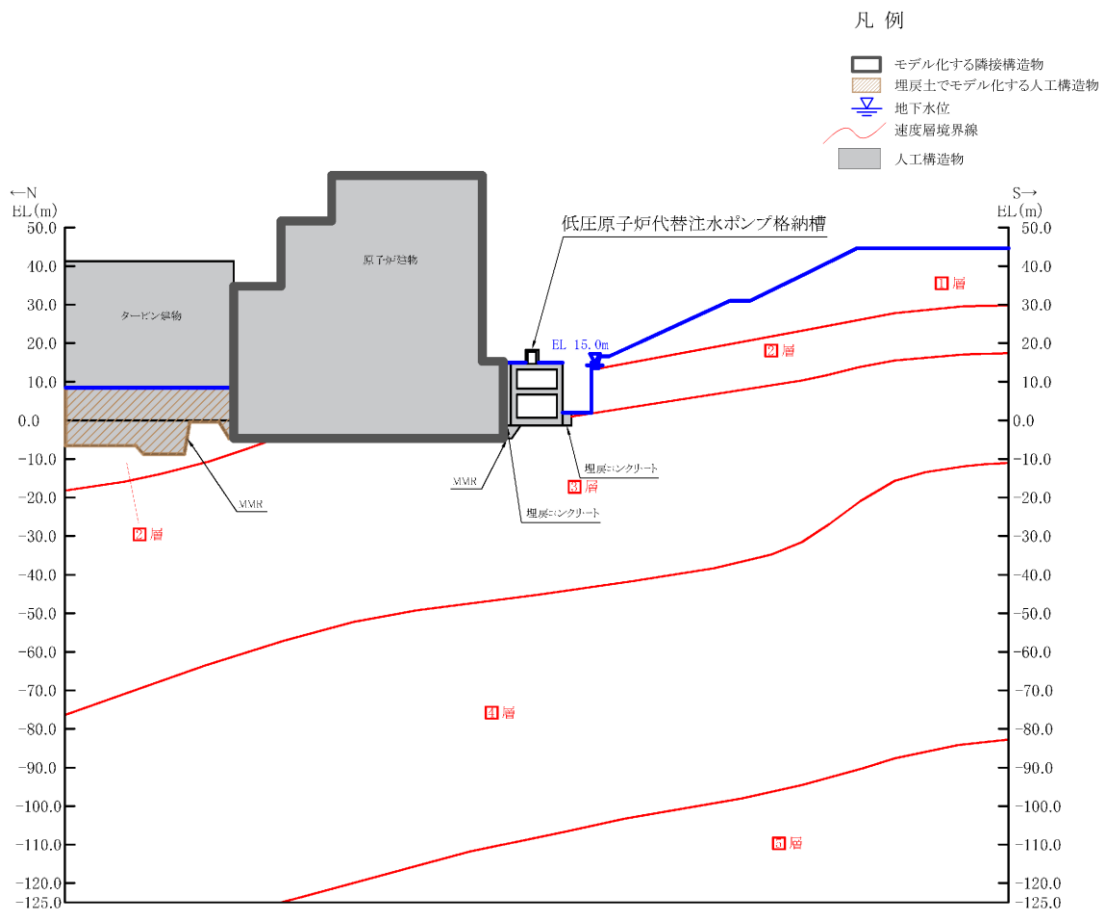


図 2-13 安全対策工事に伴う掘削範囲図

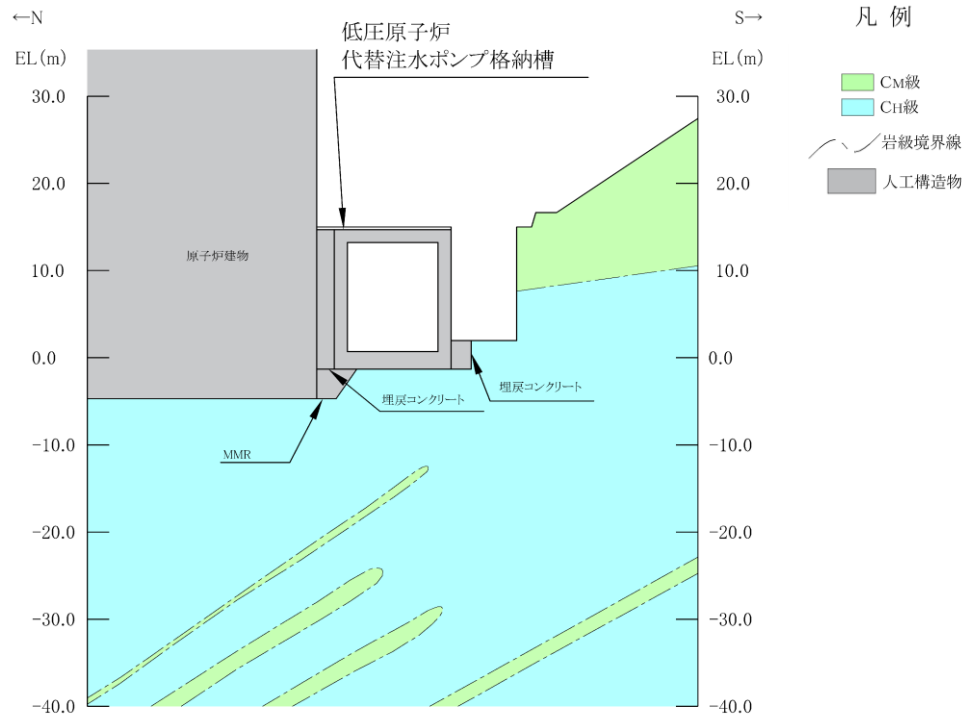


(岩級図)

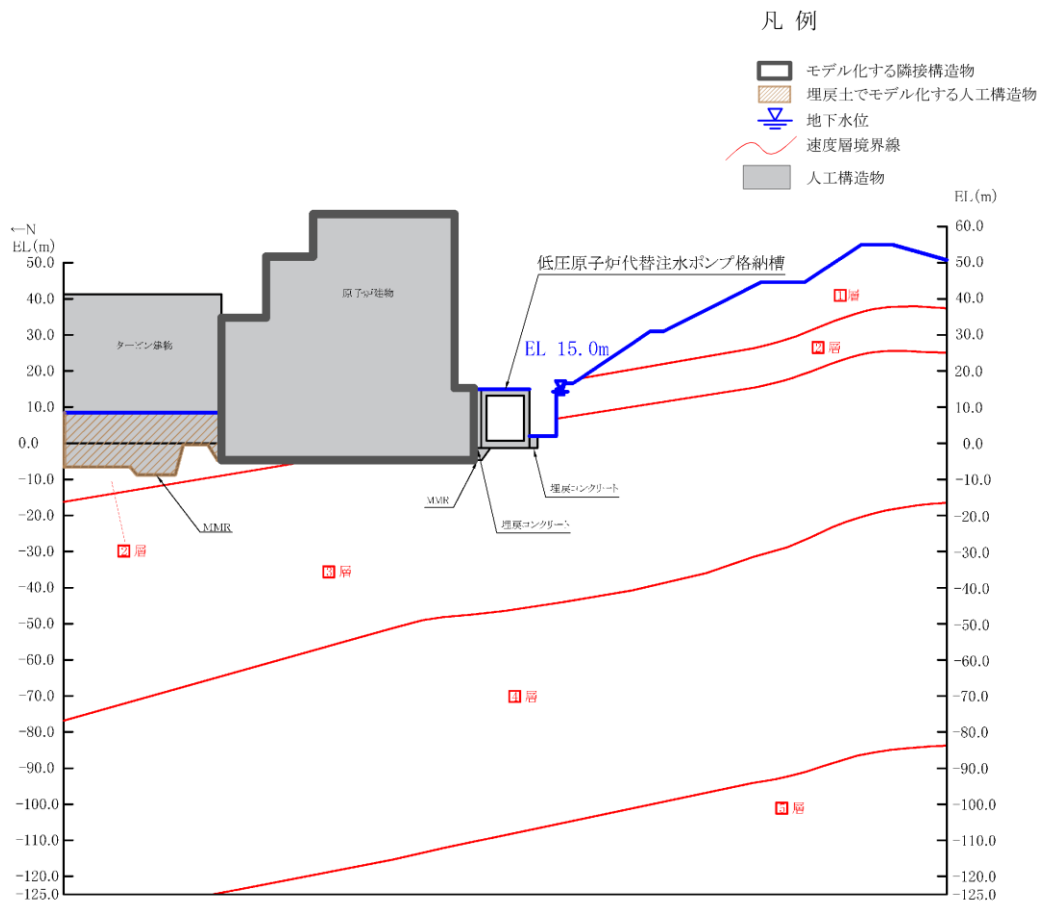


(速度層図)

図 2-14 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 評価対象断面図 (A-A断面位置)

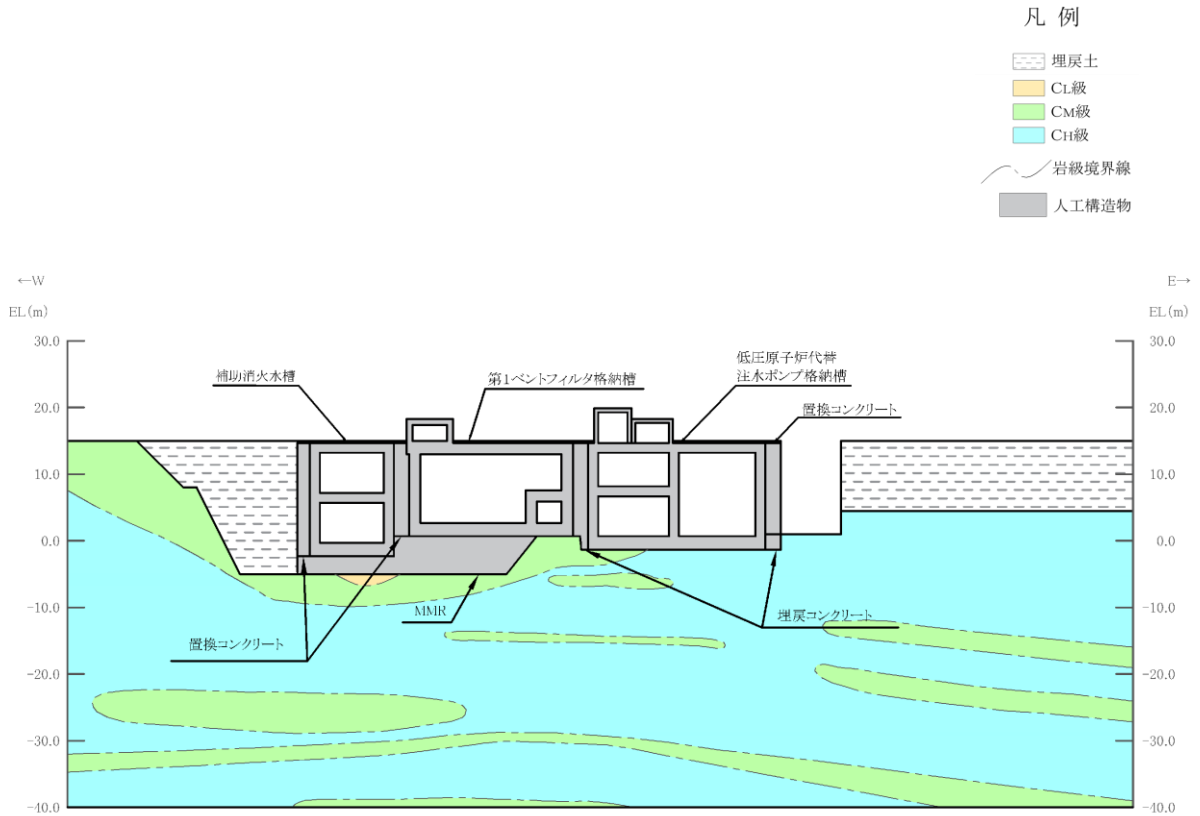


(岩級図)

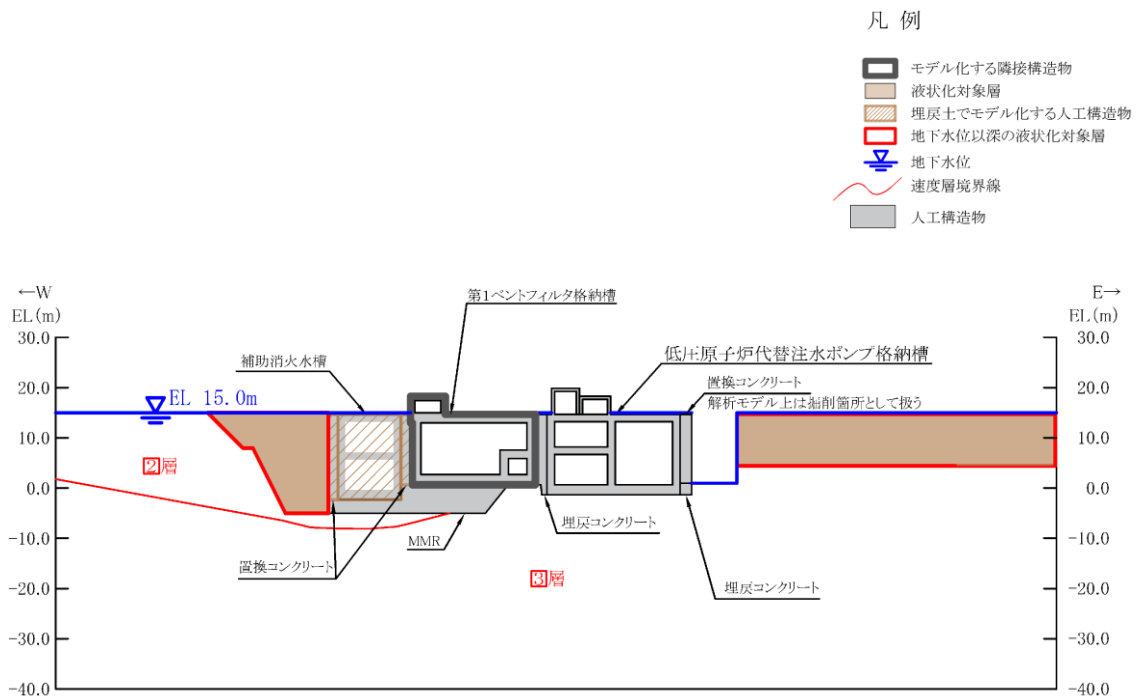


(速度層図)

図 2-15 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 評価対象断面図 (B-B 断面位置)



(岩級図)



(速度層図)

図 2-16 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 評価対象断面図 (C-C断面位置)

2.3 評価対象断面の方向

長辺方向（E W方向）に加振した場合は、加振方向に直交する方向の構造物の長さに対する加振方向と平行に設置される妻壁同士の間隔が小さく強軸方向となるが、短辺方向（N S方向）に加振した場合は、耐震要素として機能する妻壁同士の離隔が大きく弱軸方向となる。

以上より、弱軸断面となる短辺方向（N S方向）から評価対象断面を選定する。ただし、短辺方向（N S方向）において評価対象外となっている長辺方向（E W方向）の部材を評価するために、長辺方向（E W方向）からも評価対象断面を選定する。

2.4 評価対象断面の選定

「2.3 評価対象断面の方向」に示すとおり、評価対象断面は、加振方向に平行な部材全体を耐震設計上見込むことが出来ず、弱軸方向となる短辺方向から選定する。短辺方向における各断面の奥行き方向について、部材厚や内空断面及び配筋はおおむね同一であることから、評価対象断面は構造の異なるA-A断面及びB-B断面とする。なお、A-A断面とE-E断面は地上部の構造が異なるが、A-A断面のほうが設置される機器・配管荷重が大きく、常設重大事故等対処設備が設置される地中部に及ぼす影響が大きいと考えられるため、E-E断面は選定しない。

長辺方向については、C-C断面を選定し、短辺方向において評価できない部材（頂版、床版、隔壁及び側壁）についても、耐震安全性を網羅的に確認する。

D-D断面については、周囲全周を埋戻コンクリートで囲まれていることに加え、他の断面と比較して部材厚に対する内空は小さいが、配筋は同等であるため、評価対象断面として選定しない。

2.5 使用材料及び材料の物性値

構造物の使用材料を表 2-2 に、材料の物性値を表 2-3 に示す。

表 2-2 使用材料

材料		仕様
構造物 (鉄筋コンクリート)	コンクリート	設計基準強度 24.0N/mm ²
	鉄筋	SD345
埋戻コンクリート		設計基準強度 18.0N/mm ²
MMR		

表 2-3 材料の物性値

材料	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比
構造物 (鉄筋コンクリート)	2.50×10 ⁴	24.0* ¹	0.2
埋戻コンクリート	2.20×10 ⁴	22.6* ²	
MMR			

注記*1：鉄筋コンクリートの単位体積重量を示す。

*2：無筋コンクリートの単位体積重量を示す。

2.6 地盤物性値

地盤については、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」にて設定している物性値を用いる。地盤の物性値を表2-4及び表2-5に示す。

表2-4 地盤の解析用物性値（岩盤）

層番号	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G ($\times 10^5$ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
1層	250	800	20.6	0.446	1.31	3
2層	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
3層	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
4層	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
5層	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
6層*	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記*：入力地震動の算定においてのみ用いる解析用物性値

表2-5 地盤の解析用物性値（埋戻土）

		解析用物性値
		埋戻土
物理特性	密度 ρ_s (g/cm ³)	2.11
強度特性	初期せん断強度 τ_0 (N/mm ²)	0.22
	内部摩擦角 ϕ (°)	22
動的変形特性	初期せん断弾性係数 G_0 (N/mm ²)	$G_0 = 749 \sigma^{0.66}$ (N/mm ²) $G/G_0 = 1/(1 + \gamma/0.00027)$
	動ポアソン比 ν_d	0.45*
減衰特性	減衰定数 h	$h = 0.0958 \times (1 - G/G_0)^{0.85}$

注記*：常時応力解析においては、土木学会マニュアル2005に基づき、静止土圧 ($K_0 = \nu / (1 - \nu) = 0.5$) を作用させるため、 $\nu = 0.333$ とする。

2.7 評価構造物諸元

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の諸元を表 2-6～表 2-8 に評価部位を図 2-17～図 2-19 に示す。

表 2-6 評価部位とその仕様(A-A断面)

部位		仕様		材料		要求性能
		部材幅 (mm)	部材厚 (mm)	コンクリート 設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)	鉄筋	
頂版	1	2200	600	24.0	SD345	支持機能
頂版	2	2300	1500	24.0	SD345	
床版	3	2200	1500	24.0	SD345	
頂版	4	4700	1500	24.0	SD345	
床版	5	10400	1500	24.0	SD345	
底版	6	10400	2000	24.0	SD345	
側壁	7 8	3000	600	24.0	SD345	
側壁	9 11	5000	1500	24.0	SD345	
側壁	10 12	6000	1500	24.0	SD345	

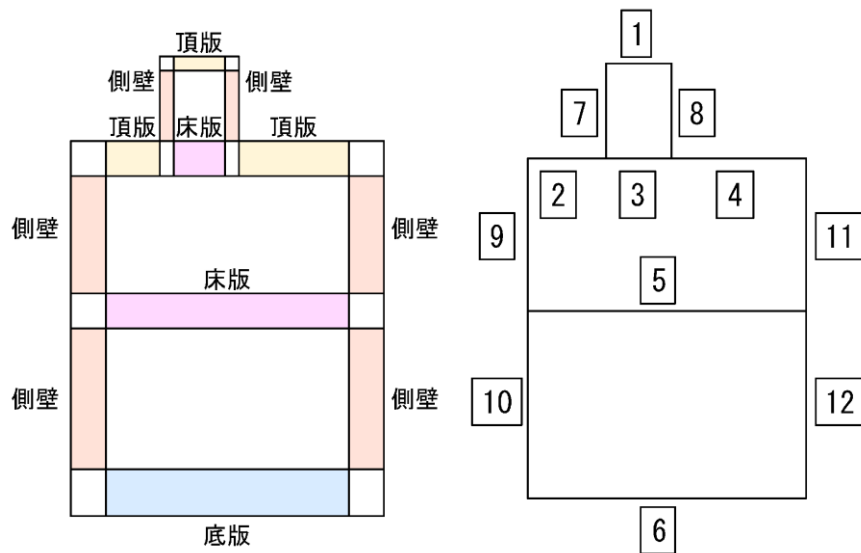


図 2-17 評価部位位置図

表 2-7 評価部位とその仕様 (B-B断面)

部位		仕様		材料		要求性能
		部材幅 (mm)	部材厚 (mm)	コンクリート 設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)	鉄筋	
頂版	1	10400	1500	24.0	SD345	支持機能 貯水機能
底版	2	10400	2000	24.0	SD345	
側壁	3 4	12500	1500	24.0	SD345	

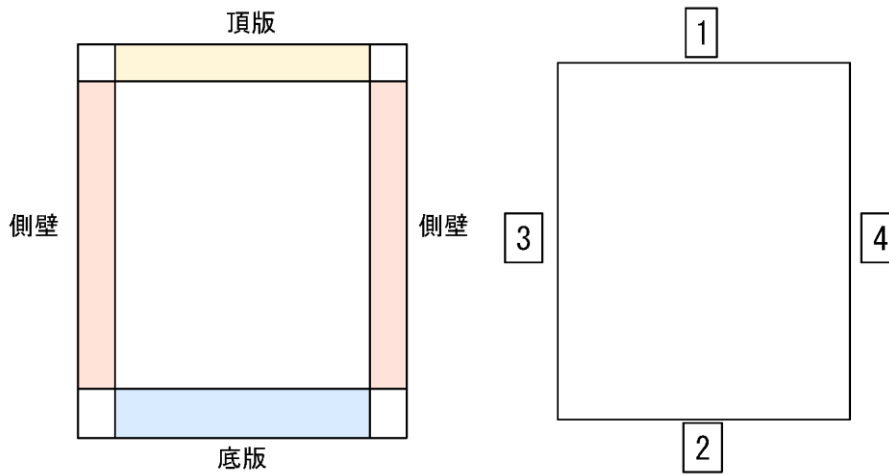


図 2-18 評価部位位置図

表 2-8 評価部位とその仕様(C-C断面)

部位		仕様		材料		要求性能
		部材幅 (mm)	部材厚 (mm)	コンクリート 設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)	鉄筋	
頂版	1	4400	600	24.0	SD345	支持機能
頂版	2	5000	600	24.0	SD345	支持機能
床版	3	4400	1500	24.0	SD345	支持機能
床版	4	5000	1500	24.0	SD345	支持機能
頂版	5	11500	1500	24.0	SD345	支持機能 貯水機能
床版	6	10600	1500	24.0	SD345	支持機能
底版	7	10600	2000	24.0	SD345	支持機能
底版	8	11500	2000	24.0	SD345	支持機能 貯水機能
側壁	9 10	4590	600	24.0	SD345	支持機能
側壁	11 12	3000	600	24.0	SD345	支持機能
側壁	13	5000	1500	24.0	SD345	支持機能
側壁	14	6000	1500	24.0	SD345	支持機能
隔壁	15	5000	1500	24.0	SD345	支持機能 貯水機能
隔壁	16	6000	1500	24.0	SD345	
側壁	17	12500	1500	24.0	SD345	

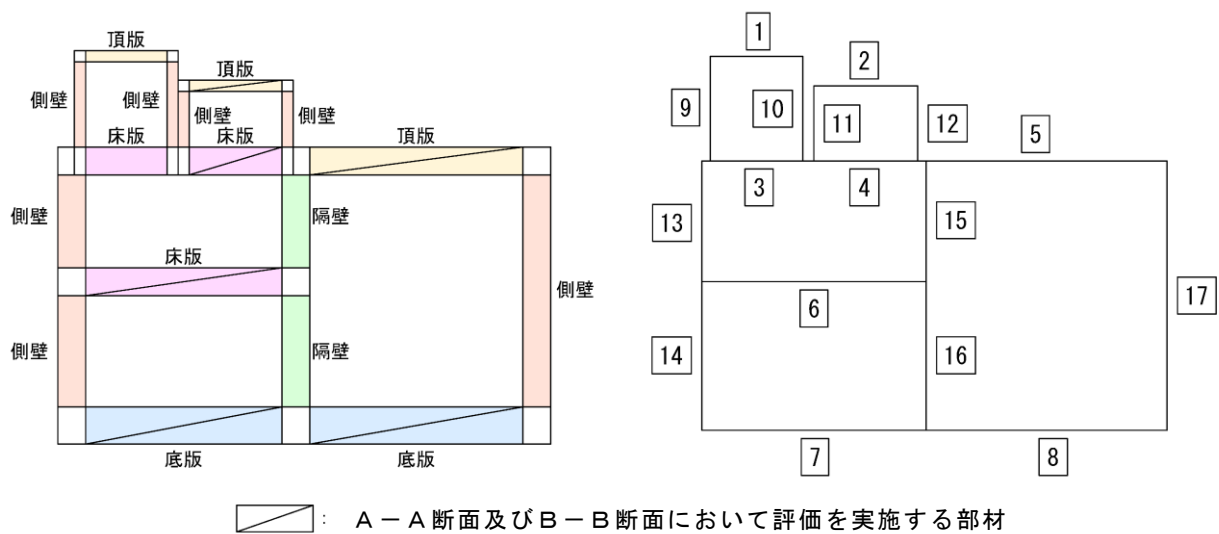


図 2-19 評価部位位置図

2.8 地下水位

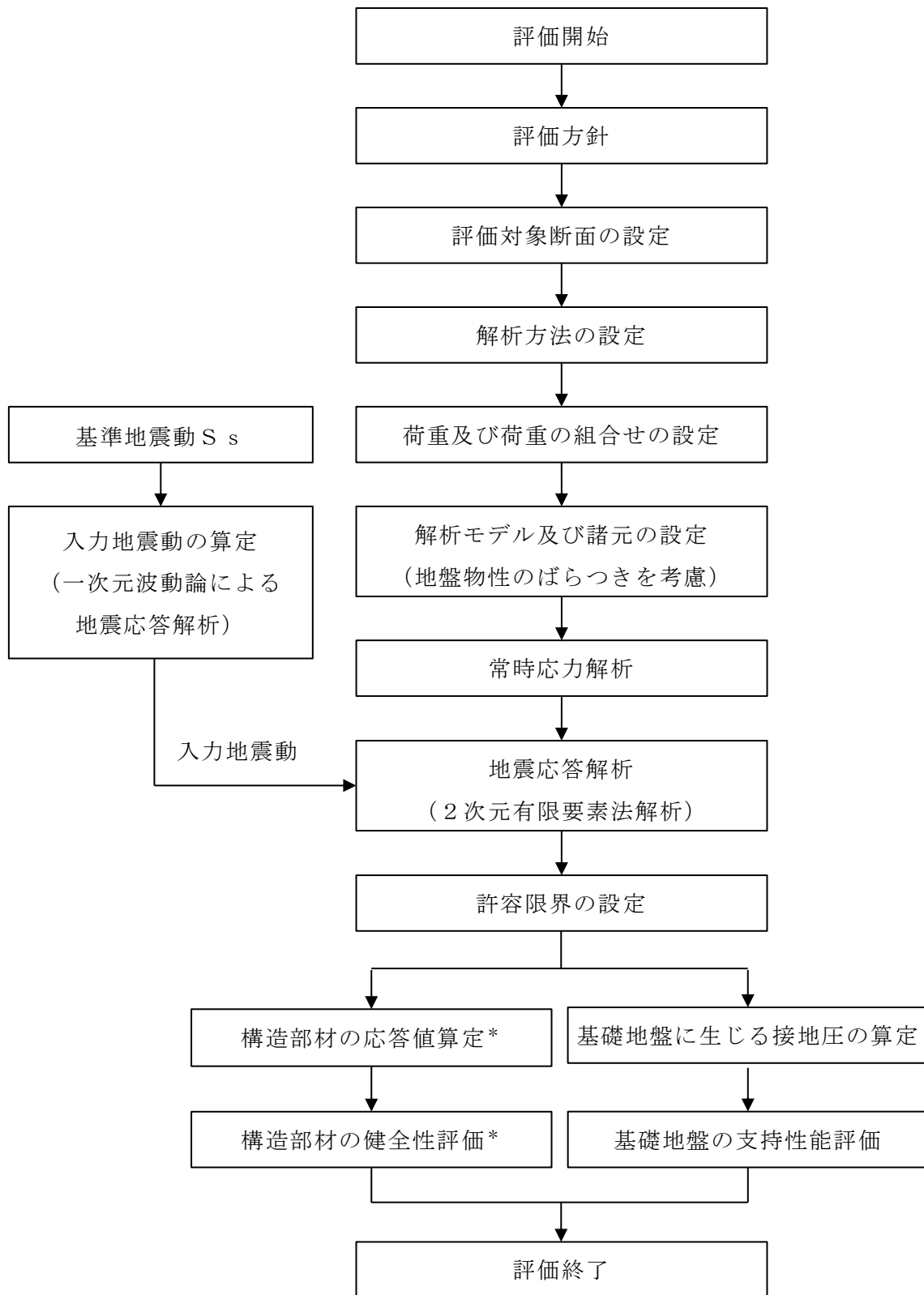
設計地下水位は，VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に従い設定する。また，地下水位低下設備が機能していないものとして，保守的に設定する。設計地下水位の一覧を表 2-9 に示す。

表 2-9 設計地下水位の一覧

施設名称	解析断面	設計地下水位 (EL m)
低圧原子炉代替注水 ポンプ格納槽	A-A断面	15.0
	B-B断面	
	C-C断面	

2.9 耐震評価フロー

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の耐震評価フローを図 2-20 に示す。弱軸方向断面である A-A 断面及び B-B 断面については，地震応答解析における応答値を用いたはり要素の評価を実施する。一方で強軸方向断面である C-C 断面については，「補足 026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」に基づき，短辺方向の評価に含まれない鉛直部材及び水平部材に対して，妻壁による拘束効果を固定境界として考慮した 4 辺固定版による評価を実施する。



注記* : A-A断面及びB-B断面についてははり要素に対する評価を,
C-C断面については4辺固定版に対する評価を実施する。

図 2-20 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の耐震評価フロー

3. 地震応答解析

3.1 地震応答解析手法

地震応答解析は、構造物と地盤の相互作用を考慮できる 2 次元有限要素法により、基準地震動 S_s に基づき設定した水平地震動と鉛直地震動の同時加振による逐次時間積分の時刻歴応答解析により行うこととし、解析手法については、図 3-1 に示す解析手法の選定フローに基づき選定する。

A-A 断面及び B-B 断面、C-C 断面は、施設周辺の設計地下水位が底版より高いが、施設周辺に地下水位以深の液状化対象層が存在しないため、解析手法の選定フローに基づき「②全応力解析」を選定する。

構造部材の非線形特性については、ファイバーモデルで考慮する。なお、4 辺固定版の荷重抽出においては、土圧を保守的に算定する観点から構造物を線形はり要素でモデル化し、妻壁を等価な重量及び剛性とした平面応力要素で考量する。また、地盤については、平面ひずみ要素でモデル化することとし、岩盤は線形でモデル化する。埋戻土については、地盤のひずみ依存性を適切に考慮できるようマルチスプリングモデルを用いることとし、ばね特性は双曲線モデル（修正 GHE モデル）を用いて非線形性を考慮する。なお、MMR 及び埋戻コンクリートについては線形の平面ひずみ要素でモデル化する。地震応答解析については、解析コード「TDA P III」を使用する。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

地震応答解析手法の選定フローを図 3-2 に示す。

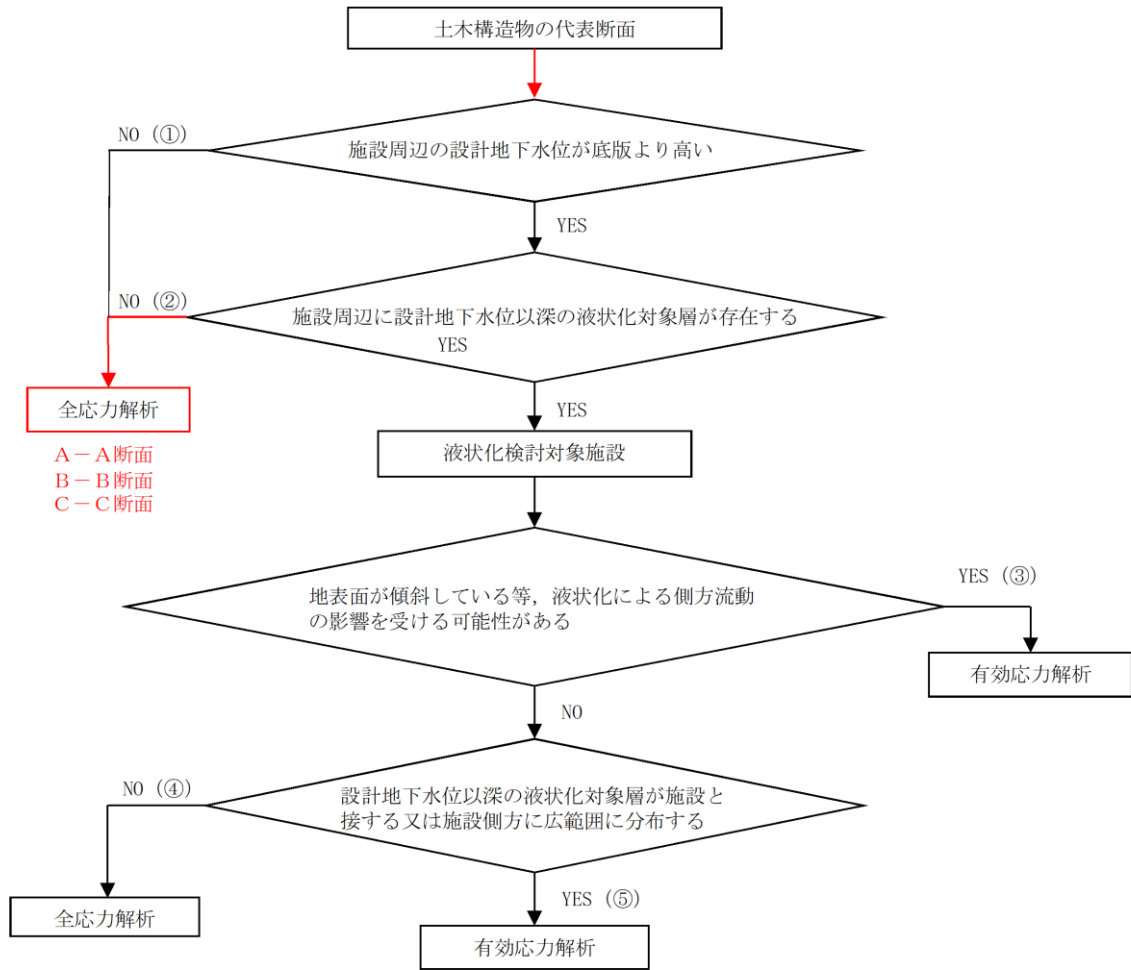
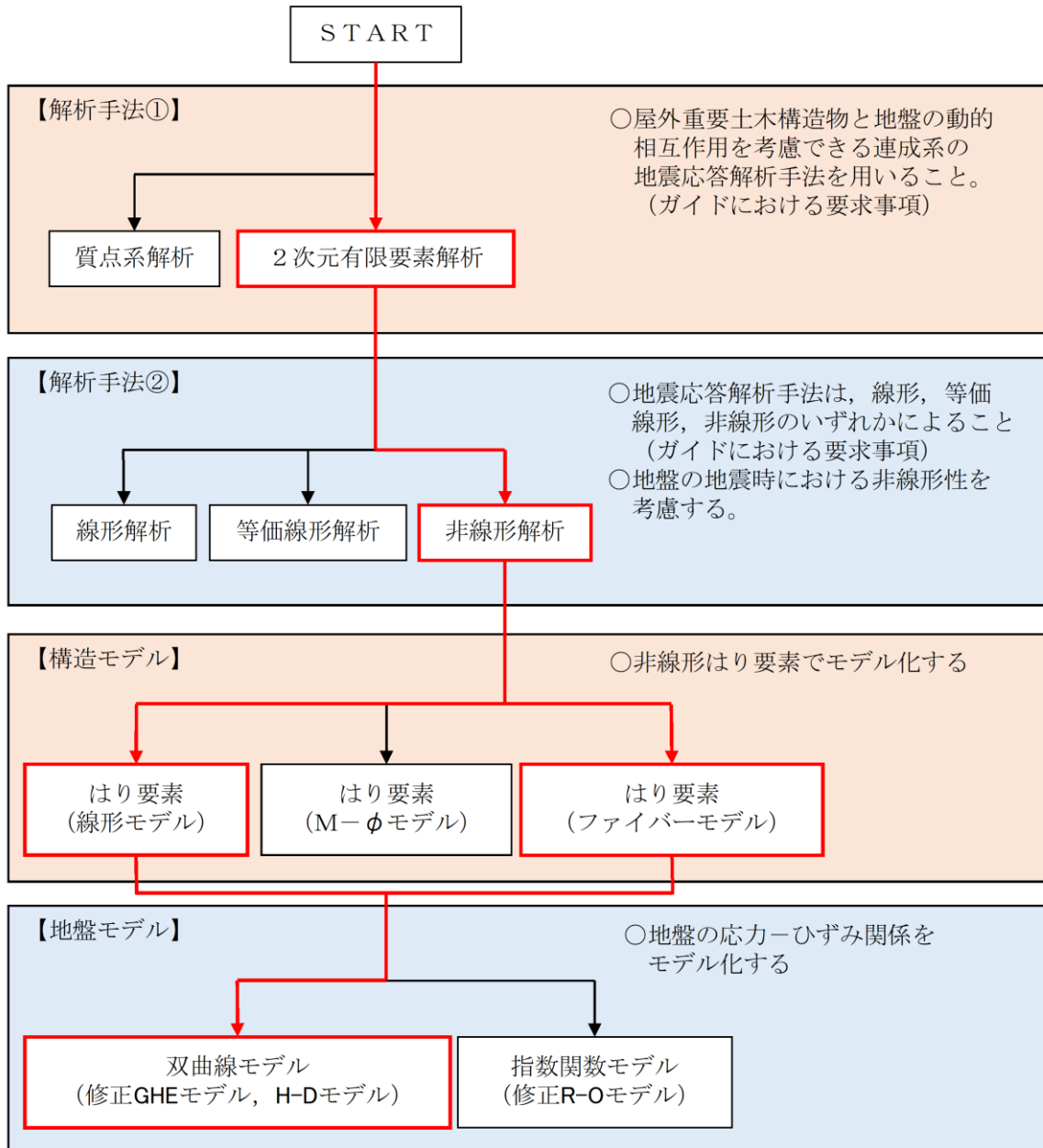


図 3-1 解析手法の選定フロー



注記*：4辺固定版による評価を実施する場合は線形はり要素でモデル化する

図3-2 地震応答解析手法の選定フロー

3.2 地震応答解析モデルの設定

3.2.1 解析モデル領域

地震応答解析モデルは、境界条件の影響が地盤及び構造物の応力状態に影響を及ぼさないよう、十分広い領域とする。J E A G 4 6 0 1 -1987 を参考に、図 3-3 に示すとおりモデル幅を構造物基礎幅の 5 倍以上、モデル高さを構造物基礎幅の 1.5 倍～2 倍以上とする。

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の解析モデル領域については、西側に第 1 ベントフィルタ格納槽及び北側に原子炉建物が隣接しているため、上記の考え方に加えて、隣接構造物外側の地盤応答を適切に表現できる範囲までモデル化領域を拡大して設定する。

なお、解析モデルの境界条件は、側面及び底面ともに粘性境界とする。

地盤の要素分割については、波動をなめらかに表現するために、対象とする波長の 5 分の 1 程度を考慮し、要素高さを 1m 程度まで細分割して設定する。

構造物の要素分割については、土木学会マニュアル 2005 に従い、要素長さを部材の断面厚さ又は有効高さの 2.0 倍以下とし、1.0 倍程度まで細分して設定する。

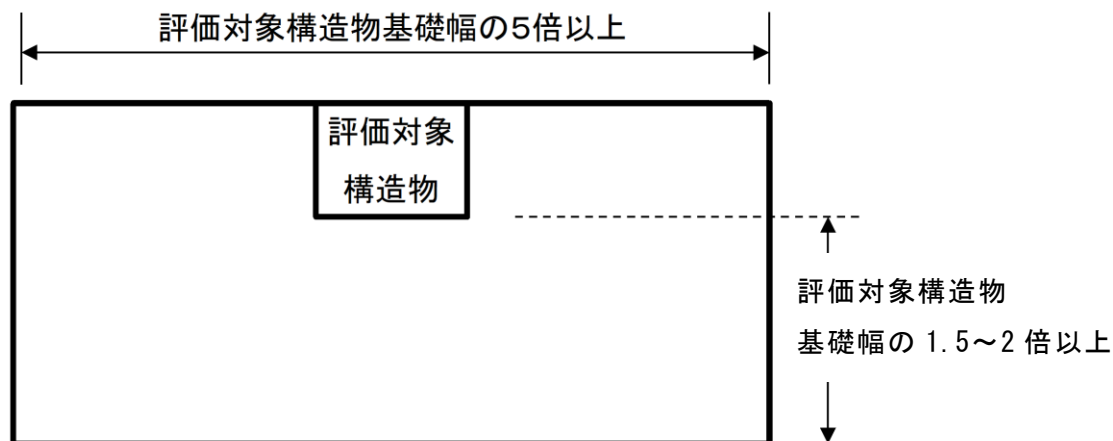


図 3-3 モデル化範囲の考え方

3.2.2 境界条件

(1) 固有値解析時

固有値解析を実施する際の境界条件は、境界が構造物を含めた周辺地盤の振動特性に影響を与えないよう設定する。ここで、底面境界は地盤のせん断方向の卓越変形モードを把握するために固定とし、側方境界はフリーとする。境界条件の概念図を図3-4に示す。

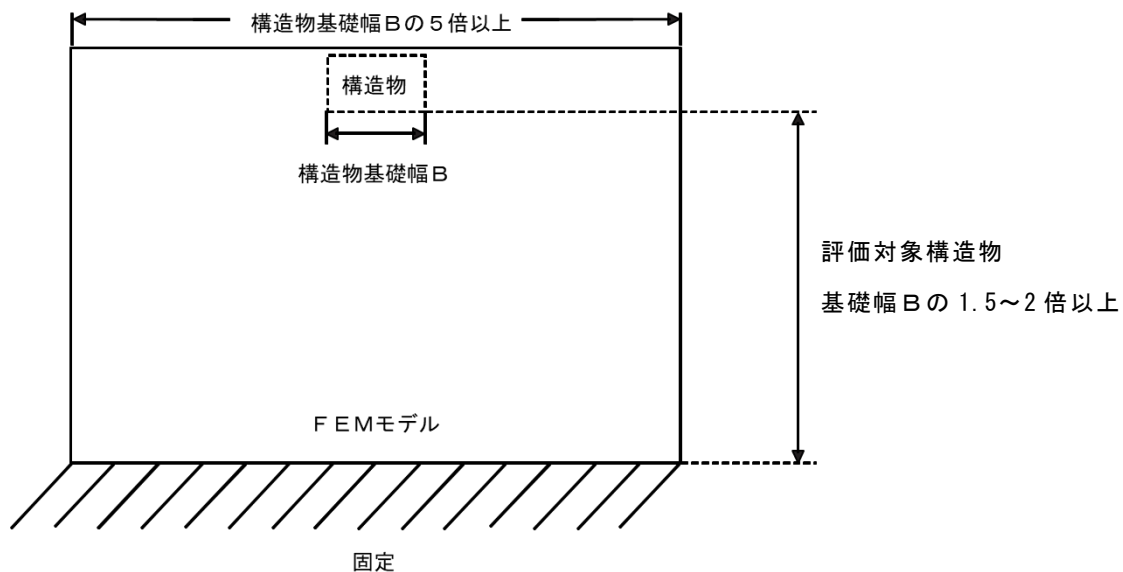


図3-4 固有値解析における境界条件の概念図

(2) 常時応力解析時

常時応力解析は、地盤や構造物の自重等の静的な荷重を載荷することによる常時応力を算定するために行う。そこで、常時応力解析時の境界条件は底面固定とし、側方は自重等による地盤の鉛直方向の変形を拘束しないよう鉛直ローラーとする。境界条件の概念図を図3-5に示す。

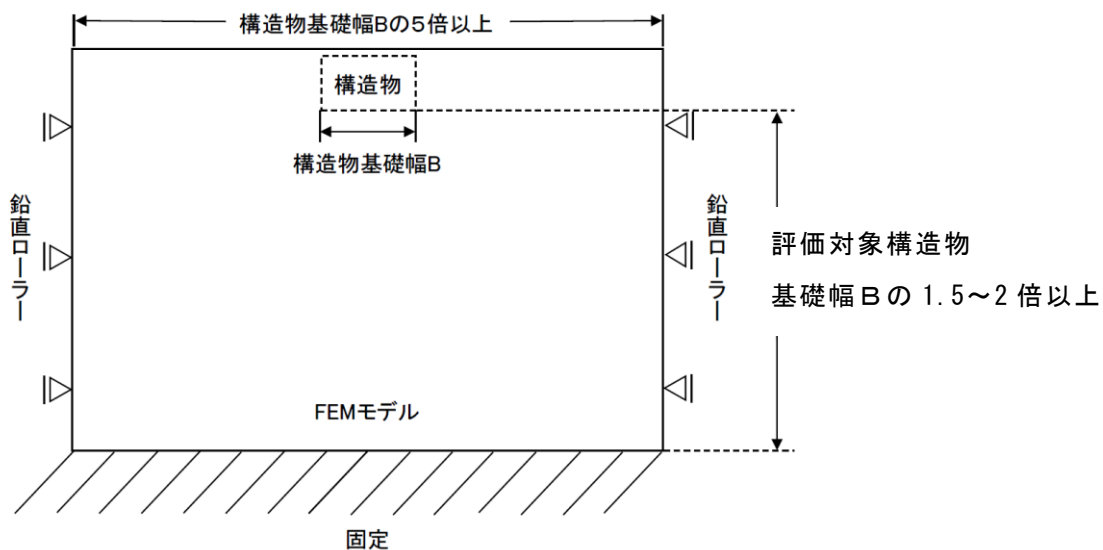


図3-5 常時応力解析における境界条件の概念図

(3) 地震応答解析時

地震応答解析時の境界条件については、有限要素解析における半無限地盤を模擬するため、粘性境界を設ける。底面の粘性境界については、地震動の下降波がモデル底面境界から半無限地盤へ通過していく状態を模擬するため、ダッシュポットを設定する。側方の粘性境界については、自由地盤の地盤振動と不整形地盤側方の地盤振動の差分が側方を通過していく状態を模擬するため、自由地盤の側方にダッシュポットを設定する。境界条件の概念図を図3-6に示す。

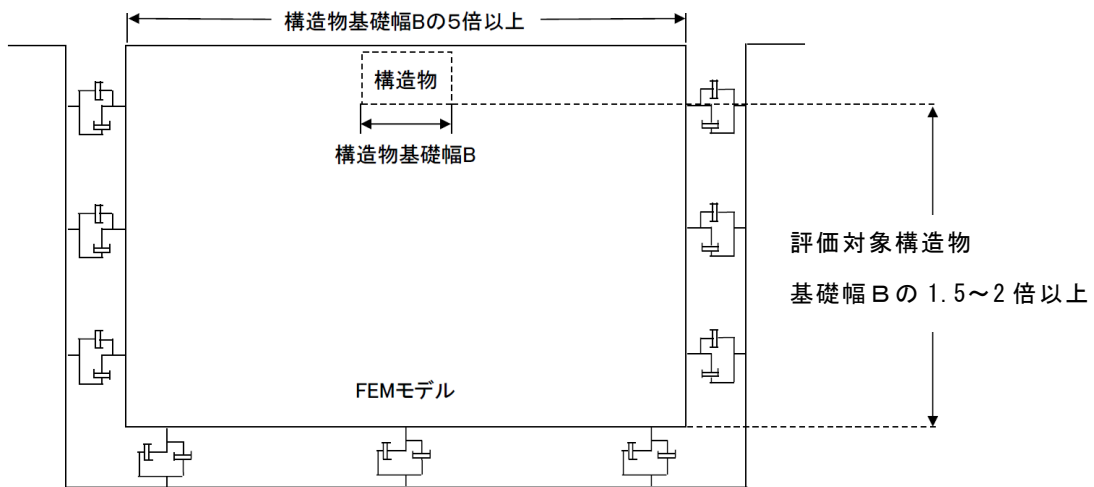


図3-6 地震応答解析における境界条件の概念図

3.2.3 構造物のモデル化

A-A断面及びB-B断面については、構造物を非線形はり要素及び平面応力要素でモデル化する。

C-C断面については、構造物を線形はり要素でモデル化し、妻壁を等価な重量及び剛性とした平面応力要素で考慮する。等価重量及び等価弾性係数の算定方法は以下に示すとおりである。

また、機器・配管荷重は解析モデルに付加質量として与えることで考慮する。

$$E = E_c \times \alpha$$

$$W = W_c \times \alpha$$

ここに、

- E : 妻壁の等価弾性係数
- E_c : コンクリートの弾性係数
- W : 妻壁の等価重量
- W_c : 鉄筋コンクリートの重量
- α : 構造物の奥行長さに対する妻壁の厚さの比率 (L_e / L)
- L_e : 妻壁の厚さ (複数の妻壁を有する場合はその和)
- L : 構造物の奥行長さ

3.2.4 隣接構造物のモデル化

A-A断面及びB-B断面の解析モデル範囲において隣接構造物となる原子炉建物は、等価剛性として線形の平面ひずみ要素でモデル化する。

原子炉建物は「VI-2-2-2 原子炉建物の地震応答計算書」における多質点系モデル（多軸床剛多質点系モデル（水平）及び多軸多質点系モデル（鉛直））を基に図3-7に示す手順で有限要素モデルを作成する。まず、多質点系モデルのフロア毎に重量を、層毎に剛性を集約し、多質点系モデルと振動的に等価な単軸モデル（水平、鉛直）を作成し、1次モードの固有周期が同等となるよう単軸モデルのせん断断面積及び断面2次モーメントを補正する。その後、図3-8に示す関係式を用いて、単軸モデルの水平剛性 K_H 、鉛直剛性 K_V 及び曲げ剛性 K_ϕ を有限要素モデルのせん断剛性 G 、ポアソン比 ν 及びばね定数 k_s に変換し、単軸モデルと有限要素モデルが振動的に等価となるよう一致させる。なお、重量については、各節点の分担長に応じて層毎に設定する。

原子炉建物の有限要素モデルを図3-9に、有限要素モデルの平面ひずみ要素の物性値を表3-1に、1次モードの固有周期の調整結果を表3-2に示す。

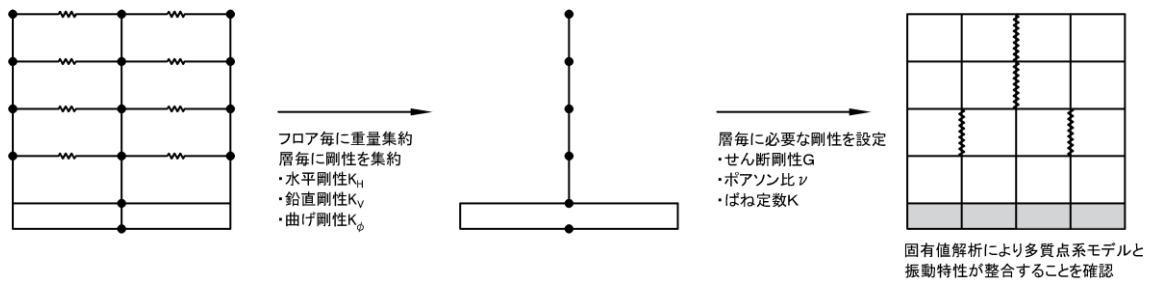
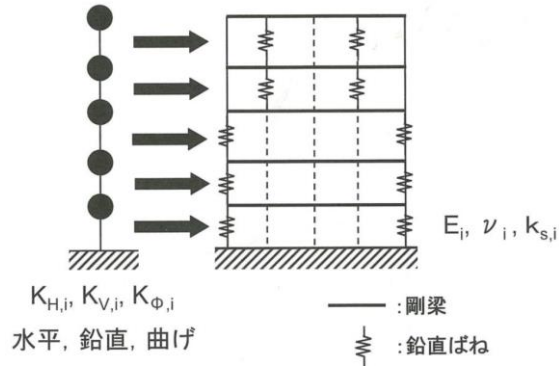


図3-7 原子炉建物の有限要素モデル作成の考え方



$$K_{H,i} = \frac{G_i A_{H,i}}{\ell_i} \dots\dots\dots (4.3.1)$$

$$K_{V,i} = \frac{E_i A_{V,i}}{\ell_i} \dots\dots\dots (4.3.2)$$

$$K_{\phi,i} = E_i I_i \dots\dots\dots (4.3.3)$$

$$\tilde{G}_i = \left(\frac{A_{H,i}}{a_i} \right) G_i \dots\dots\dots (4.3.4)$$

$$K_{V,i} = \frac{2a_i \tilde{G}_i (1 - \tilde{\nu}_i)}{b_i (1 - 2\tilde{\nu}_i)} + 2k_{sp,i} \dots\dots\dots (4.3.5)$$

$$K_{\phi,i} = \frac{a_i^3 \tilde{G}_i (1 - \tilde{\nu}_i)}{6 (1 - 2\tilde{\nu}_i)} + \frac{b_i d_i^2}{2} \cdot k_{sp,i} \dots\dots\dots (4.3.6)$$

$$\tilde{\nu}_i = \frac{1}{2} \frac{12K_{\phi,i} - 3b_i \cdot d_i^2 K_{V,i} - 2(a_i^3 - 3a_i \cdot d_i^2) \tilde{G}_i}{12K_{\phi,i} - 3b_i \cdot d_i^2 K_{V,i} - (a_i^3 - 3a_i \cdot d_i^2) \tilde{G}_i} \dots\dots\dots (4.3.7)$$

$$k_{sp,i} = \frac{1}{2} \frac{K_{V,i} \cdot a_i^2 \cdot b_i - 12K_{\phi,i}}{(a_i^2 - 3d_i^2) b_i} \dots\dots\dots (4.3.8)$$

(「原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術<技術資料>

((社) 土木学会, 原子力土木委員会, 2009年2月) 」より抜粋)

図 3-8 質点系モデルから有限要素モデルへのモデル化概要

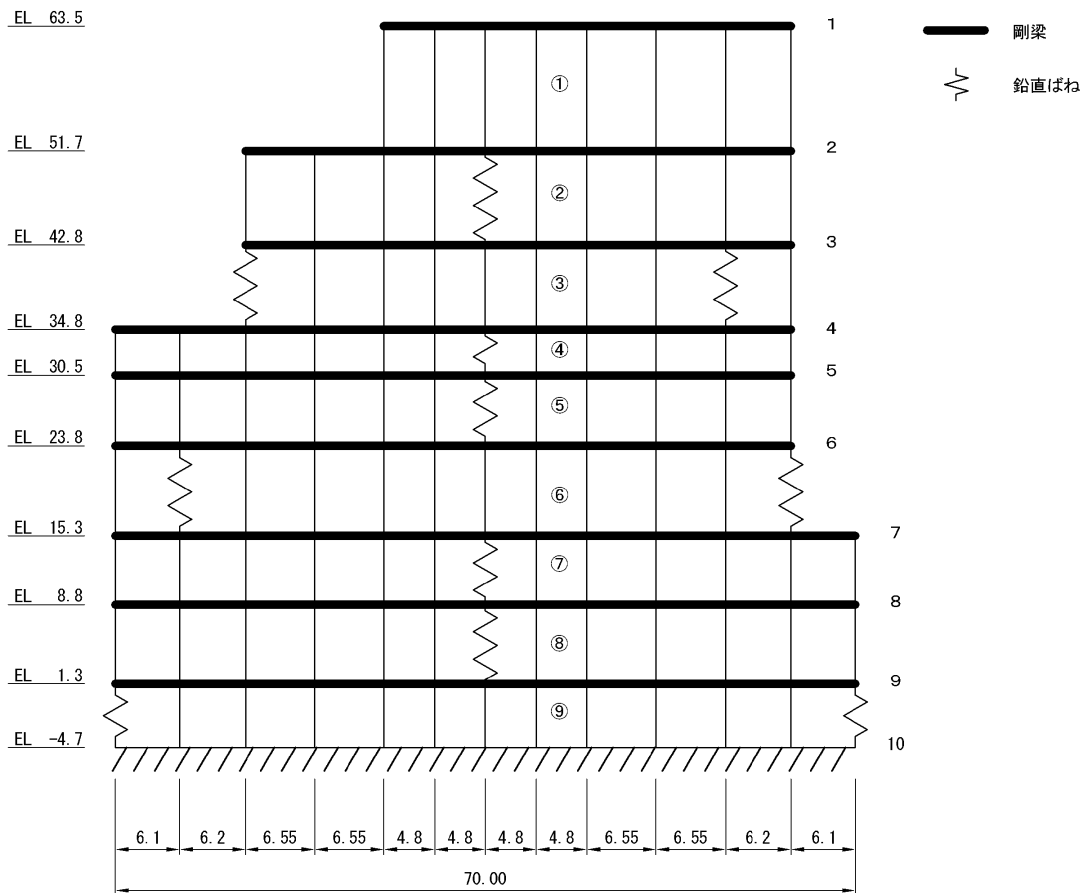


図 3-9 原子炉建物 有限要素モデル図

表 3-1 原子炉建物 (平面ひずみ要素) の物性値

物性 番号	せん断弾性係数 G (kN/m ²)	ヤング係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	ばね係数 k_s (kN/m/m)
①	1.648×10^5	4.579×10^5	0.38903	—
②	2.273×10^5	6.288×10^5	0.38307	1.858×10^5
③	5.324×10^5	1.452×10^6	0.36391	1.590×10^5
④	6.237×10^5	1.730×10^6	0.38718	1.603×10^5
⑤	7.683×10^5	2.065×10^6	0.34391	1.763×10^6
⑥	9.448×10^5	2.507×10^6	0.32679	1.667×10^6
⑦	9.805×10^5	2.650×10^6	0.35126	4.177×10^6
⑧	1.140×10^6	3.069×10^6	0.34589	2.296×10^6
⑨	9.571×10^6	2.143×10^7	0.11973	1.177×10^5

表 3-2 固有周期（1次モード）の調整結果

	有限要素モデル	多質点系モデル (地盤ばねなし)
水平方向	0.1980	0.1980
鉛直方向	0.0882	0.0882

C-C断面の解析モデル範囲において隣接構造物となる第1ベントフィルタ格納槽については、耐震性に関する技術基準へ適合することを確認するために用いる応答値を抽出する必要があることから、非線形はり要素及び平面応力要素でモデル化する。また、ノンクラスの構造物である補助消火水槽は、保守的に埋戻土でモデル化する。埋戻土は、地盤の非線形性をマルチスプリング要素で考慮した平面ひずみ要素でモデル化する。

3.2.5 地盤、埋戻コンクリート及びMMRのモデル化

岩盤、埋戻コンクリート及びMMRは線形の平面ひずみ要素でモデル化する。埋戻土は、地盤の非線形性をマルチスプリング要素で考慮した平面ひずみ要素でモデル化する。

安全対策工事に伴う掘削箇所東側の埋戻土については、追加対策（埋戻コンクリート）を実施することにより崩壊防止策を講じていることから、本検討においては掘削箇所と地盤の境界部に剛梁を設定することにより掘削形状を維持するようモデル化する。埋戻コンクリートを設置したことによる低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽への影響は、「補足-026-09 第1ベントフィルタ格納槽の地震応答計算書及び耐震性についての計算書に関する補足説明資料」における「参考資料3 改良地盤の影響について」にて、埋戻土より剛性の高い物性値での影響を検討した結果、軽微であることを示しているため、モデル化しない。

剛梁については十分な剛性を模擬するため、鉄筋コンクリート構造物の断面2次モーメント及び断面積を100倍とした物性値とする（単位体積重量はゼロとする）。

地盤のモデル化に用いる、地質断面図を図3-10～図3-12に示す。

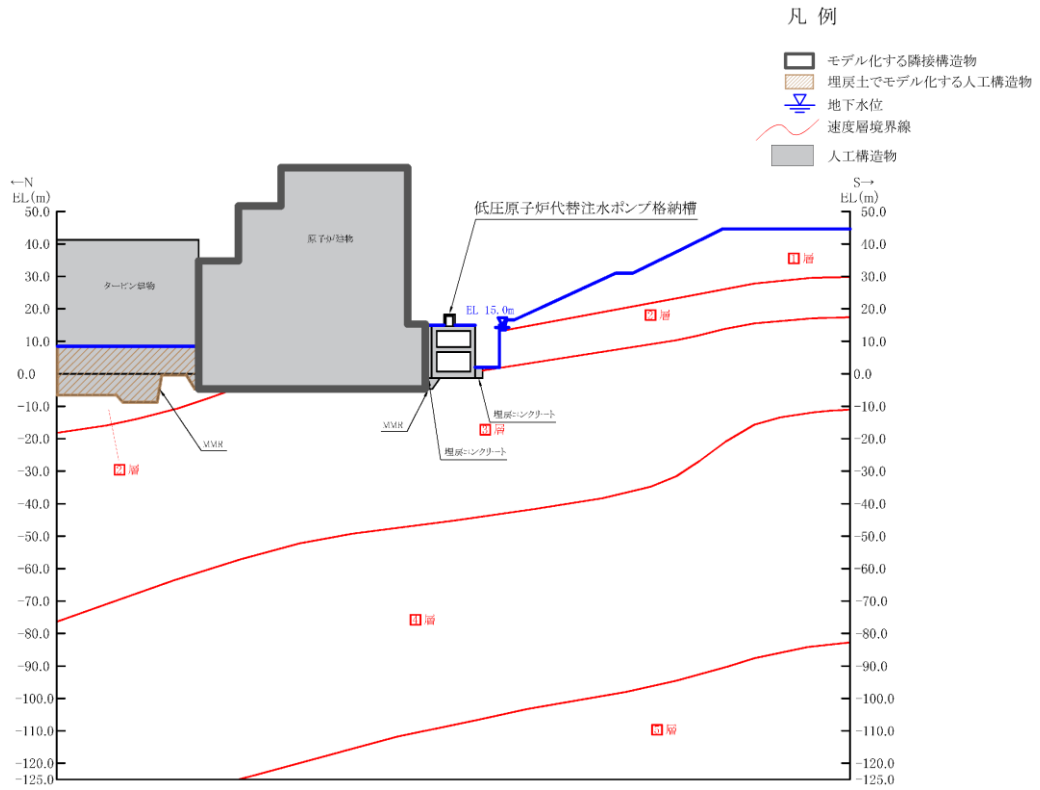


図 3-10 評価対象地質断面図 (A-A 断面位置)

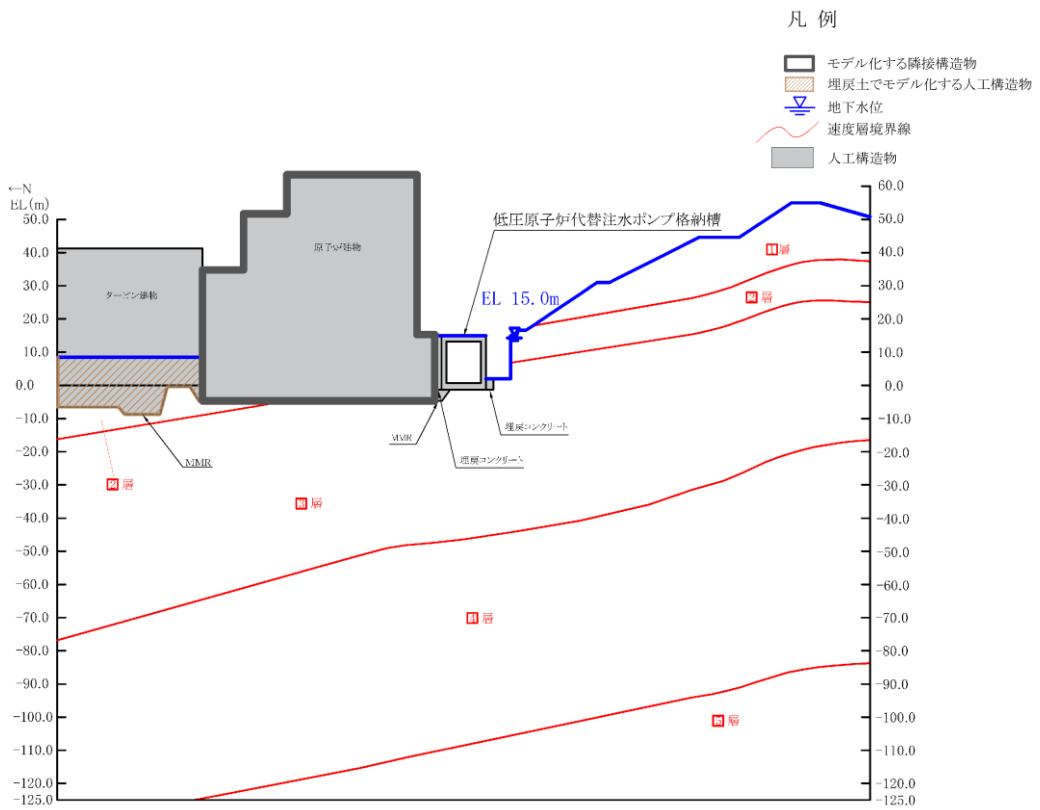


図 3-11 評価対象地質断面図 (B-B 断面位置)

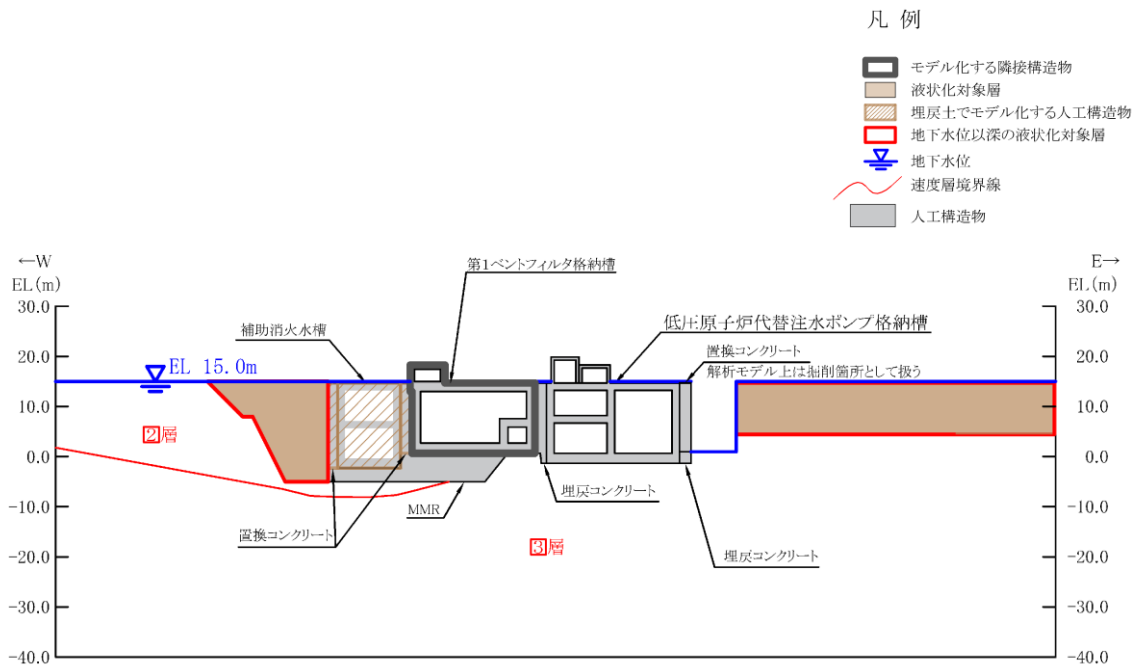
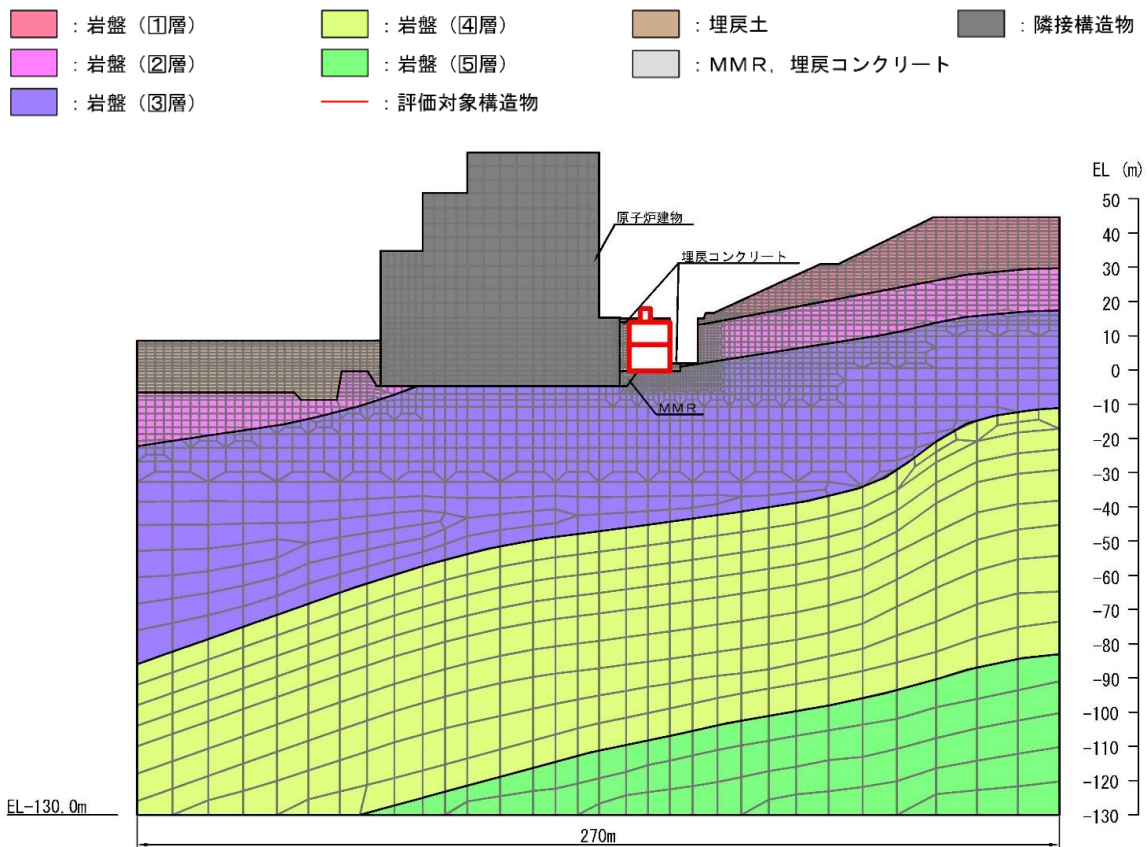


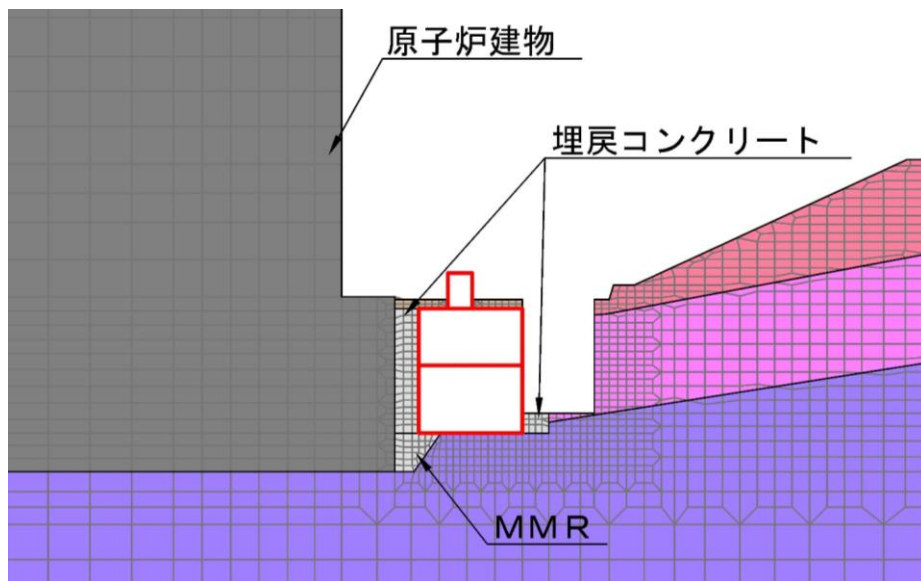
図 3-12 評価対象地質断面図 (C-C 断面位置)

3.2.6 地震応答解析モデル

評価対象地質断面図を踏まえて設定した地震応答解析モデル図を図 3-13～図 3-15 に示す。



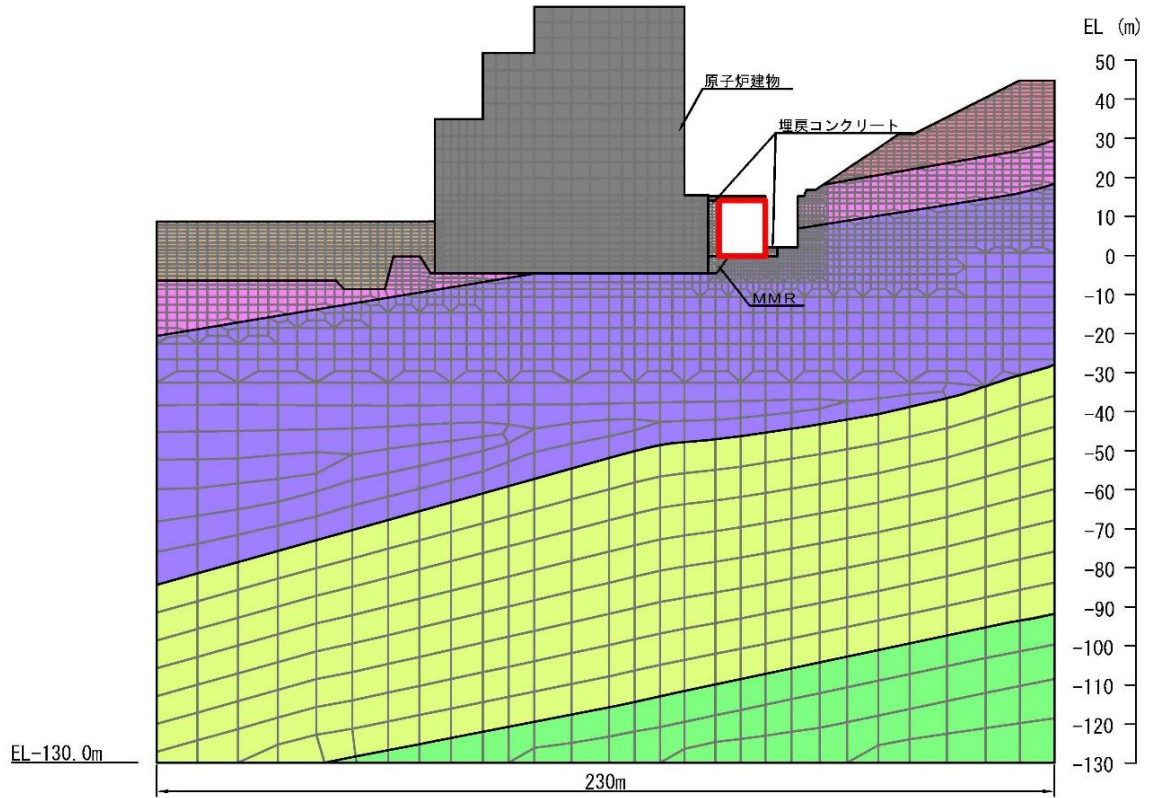
(全体図)



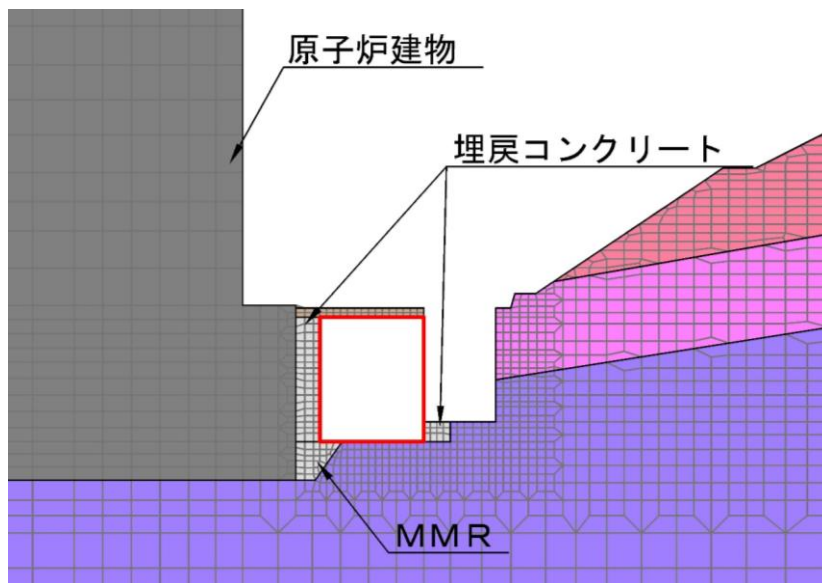
(拡大図)

図 3-13 地震応答解析モデル図 (A-A 断面)

- : 岩盤 (1層)
 - : 岩盤 (2層)
 - : 岩盤 (3層)
- : 岩盤 (4層)
 - : 岩盤 (5層)
 - : 評価対象構造物
- : 埋戻土
 - : MMR, 埋戻コンクリート
- : 隣接構造物



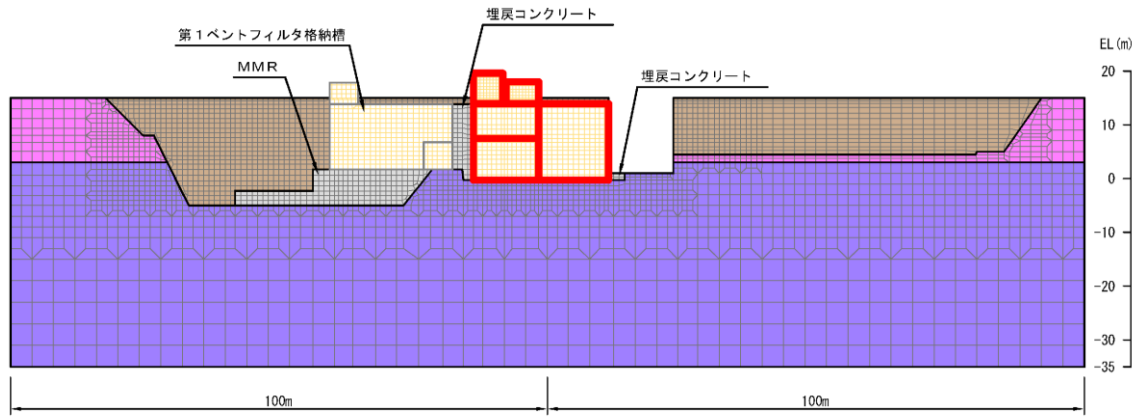
(全体図)



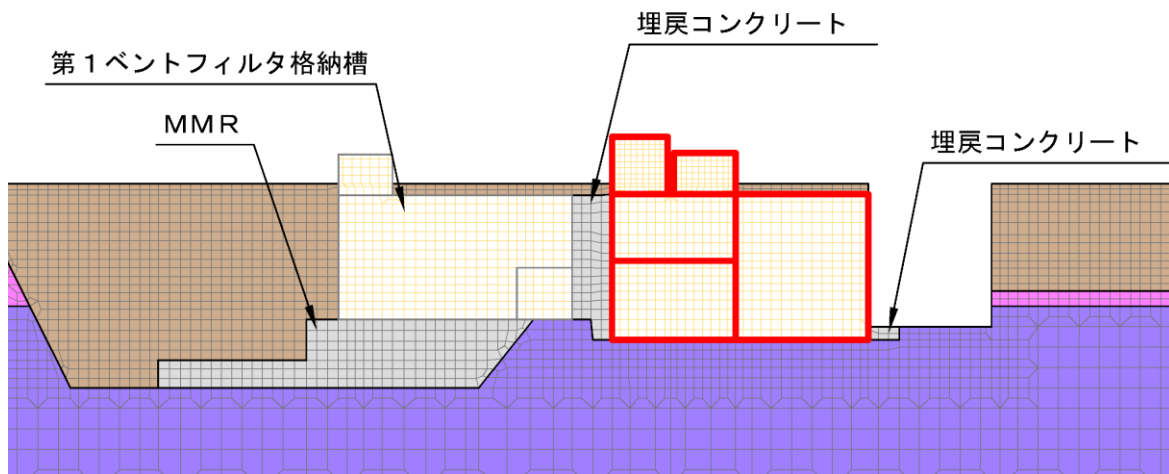
(拡大図)

図 3-14 地震応答解析モデル図 (B-B断面)

- : 岩盤 (2層)
 - : 岩盤 (3層)
 - : 構造物 (妻壁)
- : 埋戻土
 - : MMR, 埋戻コンクリート
 - : 評価対象構造物



(全体図)



(拡大図)

図 3-15 地震応答解析モデル図 (C-C断面)

3.2.7 ジョイント要素の設定

地盤と構造物との接合面にジョイント要素を設けることにより、地震時の地盤と構造物の接合面における剥離及びすべりを考慮する。

ジョイント要素は、地盤と構造物の接合面で法線方向及びせん断方向に対して設定する。法線方向については、常時状態以上の引張荷重が生じた場合、剛性及び応力をゼロとし、剥離を考慮する。せん断方向については、地盤と構造物の接合面におけるせん断強度以上のせん断荷重が生じた場合、せん断剛性をゼロとし、すべりを考慮する。

せん断強度 τ_f は次式の Mohr-Coulomb 式により規定される。粘着力 c 及び内部摩擦角 ϕ は周辺地盤の c 、 ϕ とし、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき表 3-3 のとおりとする。また、要素間の粘着力 c 及び内部摩擦角 ϕ は表 3-4 のとおり設定する。

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の直下には C_M 級～ C_H 級の岩盤が分布するが、せん断強度の設定においては C_M 級岩盤の粘着力 c 及び内部摩擦角 ϕ を用いる。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

ここに、 τ_f : せん断強度

c : 粘着力 (= 初期せん断強度 τ_0)

ϕ : 内部摩擦角

表 3-3 周辺地盤との境界に用いる強度特性

地盤	粘着力 c (N/mm ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
岩盤 (C_M 級)	1.23	52
埋戻コンクリート・MMR ($f'_{ck} = 18.0\text{N/mm}^2$)	3.58	40

表 3-4 要素間の粘着力と内部摩擦角

接合条件		粘着力 c (N/mm^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)
材料 1	材料 2		
構造物	無筋コンクリート*1	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
	埋戻土	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
	岩盤	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
無筋コンクリート*1	埋戻土	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
	岩盤	—*2	—*2

注記*1：MMR，置換コンクリート及び埋戻コンクリートの総称

*2：表面を露出させて打継処理が可能である箇所については，ジョイント要素を設定しない。

ジョイント要素のばね定数は，土木学会マニュアル 2005 を参考に，数値計算上，不安定な挙動を起こさない程度に周囲材料の剛性よりも十分に大きな値を設定する。表 3-5 にジョイント要素のばね定数を示す。

また，ジョイント要素の力学特性を図 3-16 に，ジョイント要素の配置を図 3-17～図 3-19 に示す。

表 3-5 ジョイント要素のばね定数

圧縮剛性 k_n (kN/m^3)	せん断剛性 k_s (kN/m^3)
1.0×10^7	1.0×10^7

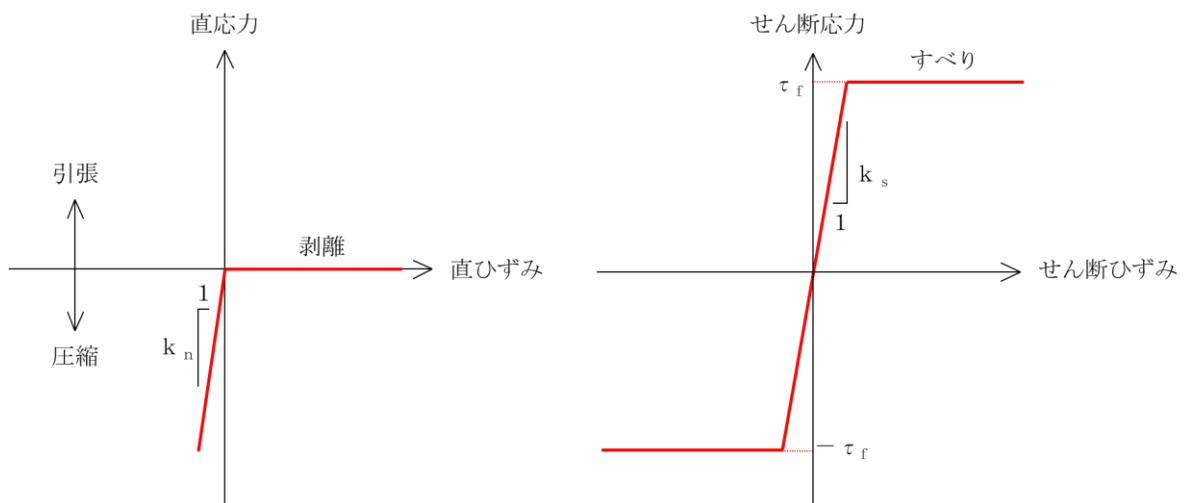

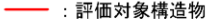
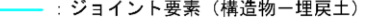

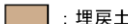
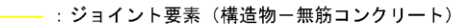




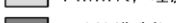


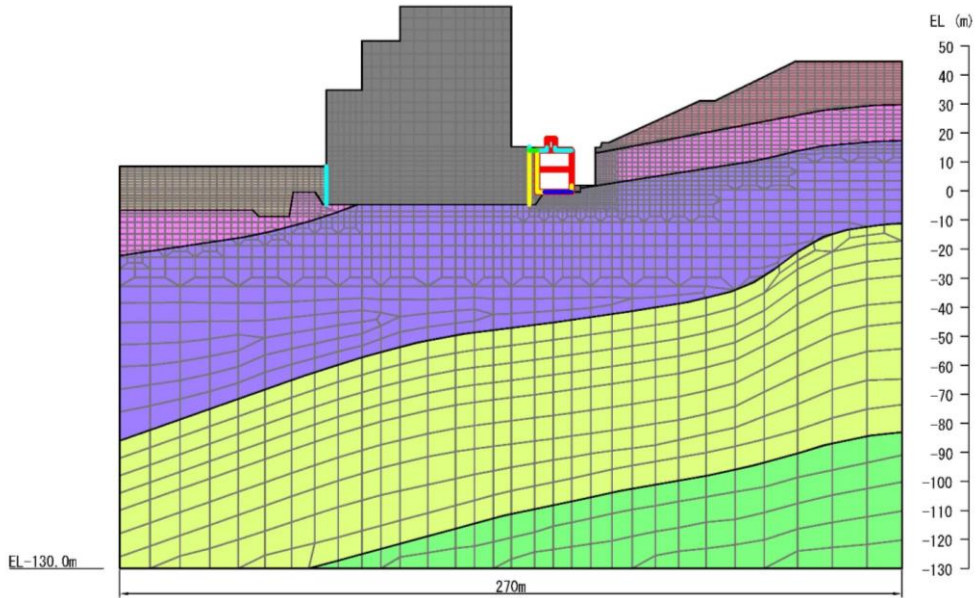
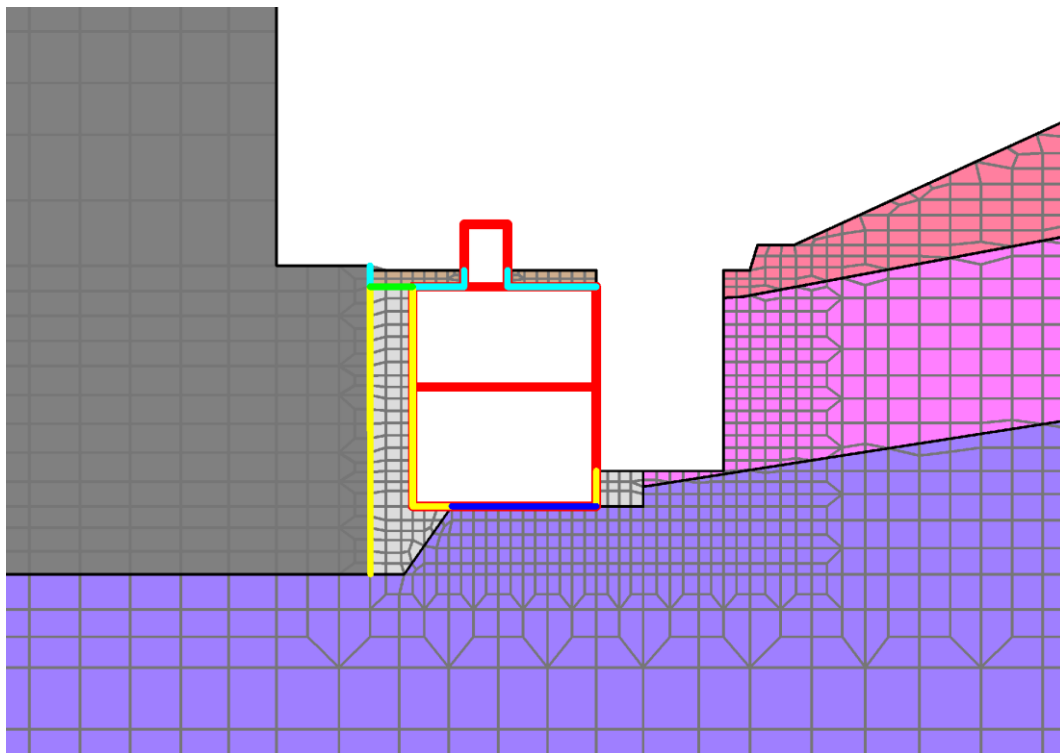


図 3-16 ジョイント要素の力学特性

- | | | |
|---|---|---|
|  : 岩盤 (Ⅰ層) |  : 評価対象構造物 |  : ジョイント要素 (構造物-埋戻土) |
|  : 岩盤 (Ⅱ層) |  : 埋戻土 |  : ジョイント要素 (構造物-無筋コンクリート) |
|  : 岩盤 (Ⅲ層) |  : MMR, 埋戻コンクリート |  : ジョイント要素 (構造物-岩盤) |
|  : 岩盤 (Ⅳ層) |  : 隣接構造物 |  : ジョイント要素 (無筋コンクリート-埋戻土) |
|  : 岩盤 (Ⅴ層) | | |













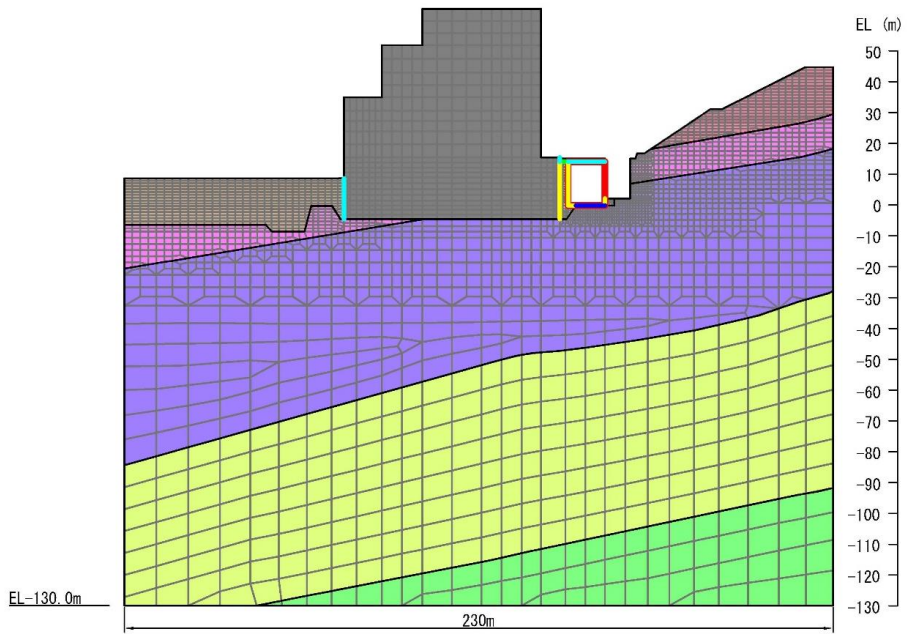
(全体図)



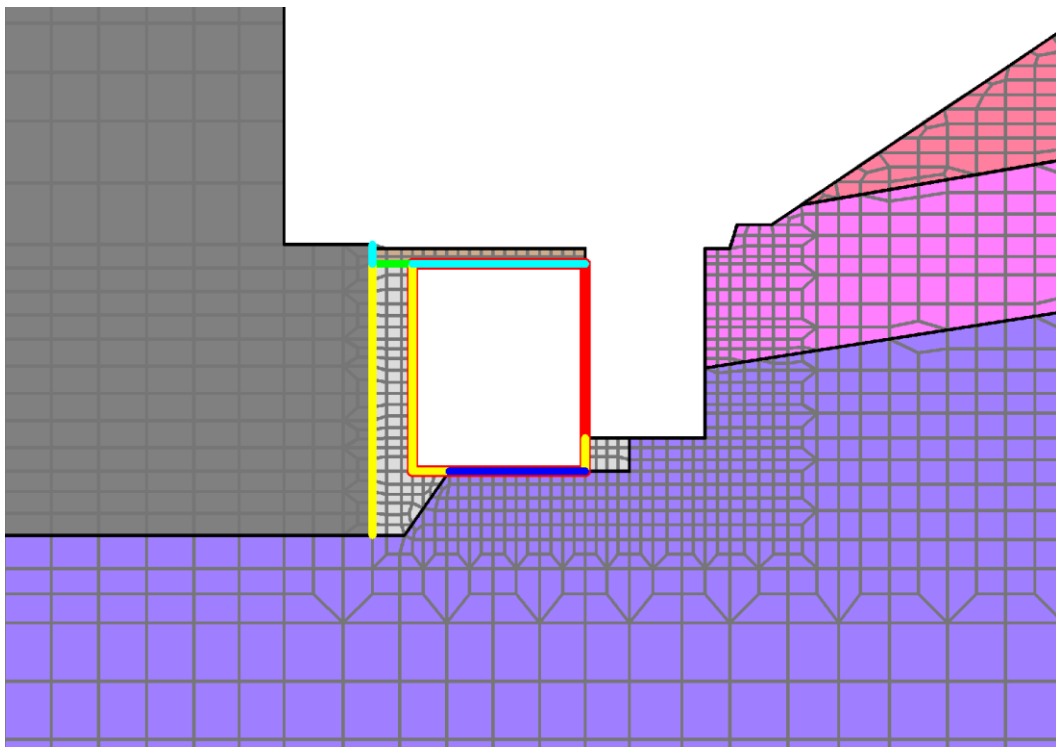
(拡大図)

図 3-17 ジョイント要素の配置 (A-A断面)

- | | | | |
|---|---|---|---|
|  : 岩盤 (①層) |  : 岩盤 (④層) |  : 埋戻土 |  : 隣接構造物 |
|  : 岩盤 (②層) |  : 岩盤 (⑤層) |  : MMR, 埋戻コンクリート | |
|  : 岩盤 (③層) |  : 評価対象構造物 |  : ジョイント要素 | |













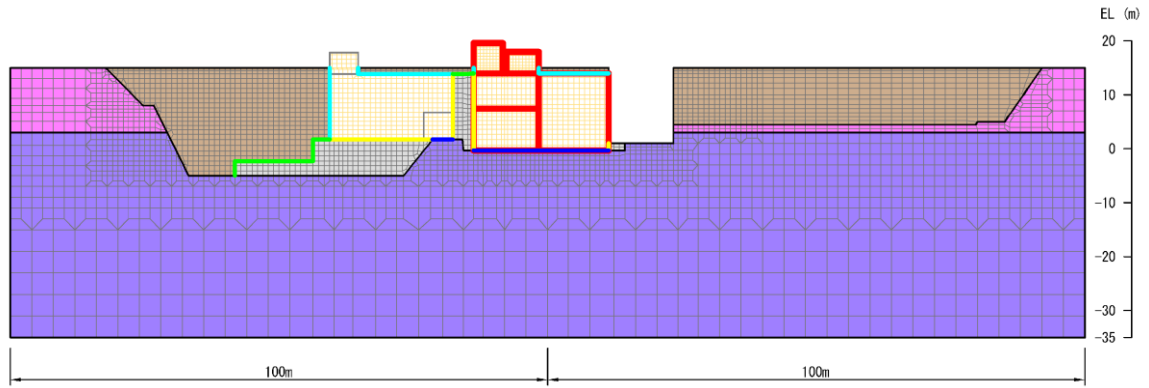
(全体図)



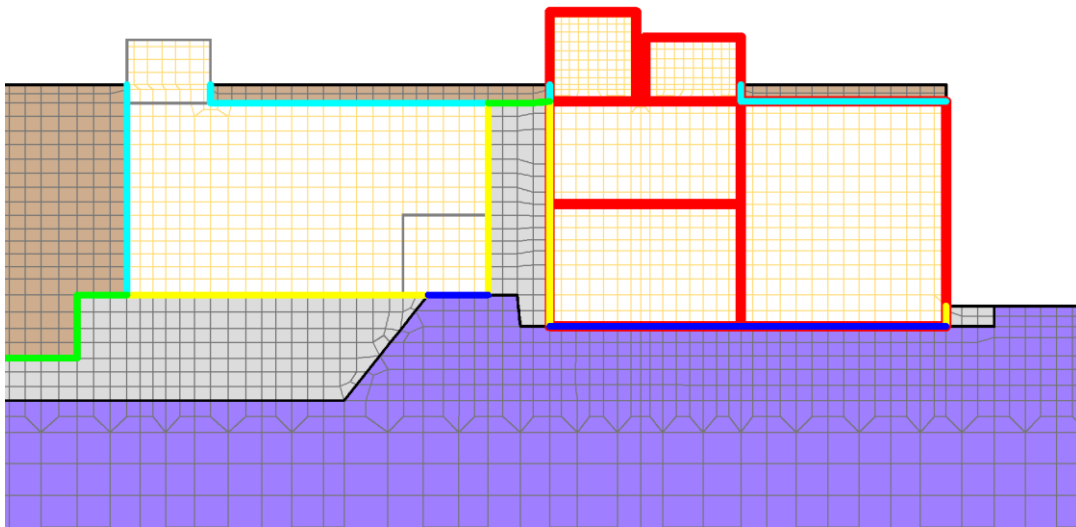
(拡大図)

図 3-18 ジョイント要素の配置 (B-B断面)

- | | | |
|--|---|--|
|  : 岩盤 (2層) |  : 埋戻土 |  : ジョイント要素 (構造物-埋戻土) |
|  : 岩盤 (3層) |  : MMR, 埋戻コンクリート |  : ジョイント要素 (構造物-無筋コンクリート) |
|  : 構造物 (妻壁) |  : 評価対象構造物 |  : ジョイント要素 (構造物-岩盤) |
| | |  : ジョイント要素 (無筋コンクリート-埋戻土) |



(全体図)



(拡大図)

図 3-19 ジョイント要素の配置 (C-C断面)

3.2.8 材料特性の設定

鉄筋コンクリート部材は、ファイバーモデルによる非線形はり要素でモデル化する。ファイバーモデルは、はり要素の断面を層状に分割し各層に材料の非線形特性を考慮する材料非線形モデルであり（図3-20参照）、図3-21に示すコンクリートの応力-ひずみ関係を考慮する。

また、図3-22に鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。

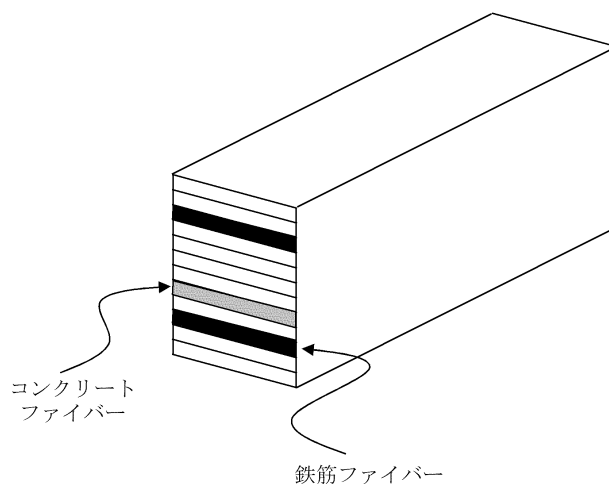
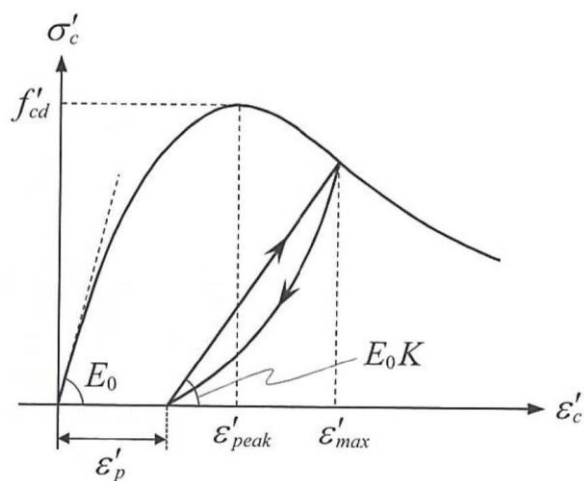
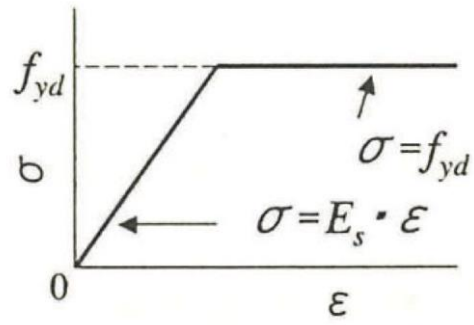


図3-20 ファイバーモデルの概念図



（「コンクリート標準示方書[設計編]」（社）土木学会，2017年制定）」より引用）

図3-21 構造部材の非線形特性（コンクリートの応力-ひずみ関係）



(コンクリート標準示方書 2002 より引用)

図 3-22 構造部材の非線形特性 (鉄筋の応力-ひずみ関係)

3.3 減衰定数

減衰定数は、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」の「9. 地震応答解析における減衰定数」に基づき、粘性減衰及び履歴減衰で考慮する。

固有値解析にて求められる解析モデル全体の固有周期と各材料の減衰比に基づき、質量マトリックス及び剛性マトリックスの線形結合で表される以下のRayleigh減衰を解析モデル全体に与える。Rayleigh減衰の設定フローを図3-23に示す。

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

[C] : 減衰係数マトリックス

[M] : 質量マトリックス

[K] : 剛性マトリックス

α , β : 係数

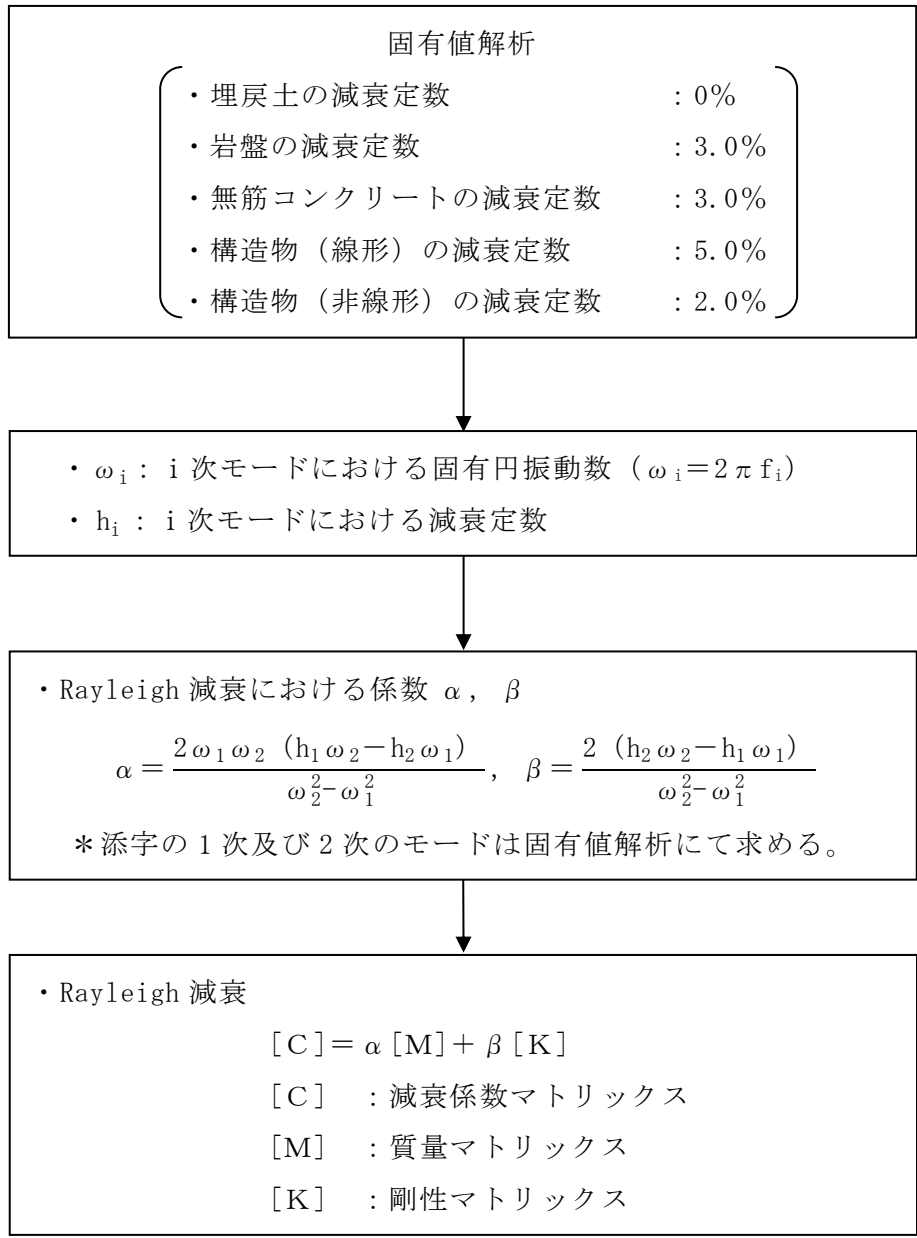


図 3-23 Rayleigh 減衰の設定フロー

Rayleigh 減衰における係数 α , β は、低次のモードの変形が支配的となる地中埋設構造物に対して、その特定の振動モードの影響が大きいことを考慮して、固有値解析結果より得られる卓越するモードの減衰と Rayleigh 減衰が一致するように設定する。なお、卓越するモードは全体系の固有値解析における刺激係数及びモード図にて決定するが、係数 α , β が負値となる場合は当該モードを選定しない。

$$h_i = \alpha / 2 \omega_i + \beta \omega_i / 2$$

h_i : 固有値解析により求められた i 次モードの減衰定数

ω_i : 固有値解析により求められた i 次モードの固有円振動数

固有値解析結果の一覧を表 3-6~表 3-8 に、固有値解析におけるモード図を図 3-24~図 3-26 に、係数 α , β を表 3-9 に、固有値解析結果に基づき設定した Rayleigh 減衰を図 3-27~図 3-29 に示す。

表 3-6 固有値解析結果 (A-A 断面)

	固有振動数 (Hz)	有効質量比 (%)		刺激係数		備考
		T_x	T_y	β_x	β_y	
1	2.466	56	0	3.93	-0.15	1 次として採用
2	3.313	6	1	2.68	0.96	
3	3.800	9	0	4.79	-0.97	
4	4.748	0	7	-0.61	2.73	
5	5.015	4	15	-2.19	-4.40	2 次として採用
6	5.222	0	5	-1.04	-3.37	
7	5.495	2	5	1.25	2.23	
8	5.864	6	12	1.50	-2.14	
9	6.377	0	8	0.06	1.84	
10	6.684	0	1	0.35	-1.80	

表 3-7 固有値解析結果 (B-B 断面)

	固有振動数 (Hz)	有効質量比 (%)		刺激係数		備考
		T_x	T_y	β_x	β_y	
1	2.471	59	0	4.11	-0.10	1次として採用
2	3.368	3	1	2.33	0.93	
3	3.792	7	0	3.90	-1.00	
4	4.885	2	1	-1.94	1.17	
5	5.130	2	11	1.81	5.05	
6	5.316	3	23	1.86	4.74	
7	5.903	5	17	1.36	-2.49	2次として採用
8	6.161	1	5	1.02	-2.81	
9	6.645	0	0	0.84	0.45	
10	6.797	1	2	1.80	2.41	

表 3-8 固有値解析結果 (C-C 断面)

	固有振動数 (Hz)	有効質量比 (%)		刺激係数		備考
		T_x	T_y	β_x	β_y	
1	5.183	15	0	2.89	-0.12	1次として採用
2	5.786	13	0	-2.74	-0.28	
3	6.614	0	0	-0.31	0.24	
4	7.831	18	0	2.71	0.02	
5	7.999	2	2	0.93	0.83	
6	8.734	15	0	-2.55	0.18	2次として採用
7	8.918	4	1	-1.69	0.69	
8	9.210	0	0	0.00	-0.50	
9	9.703	3	1	1.22	-0.37	
10	10.025	0	1	0.50	1.33	

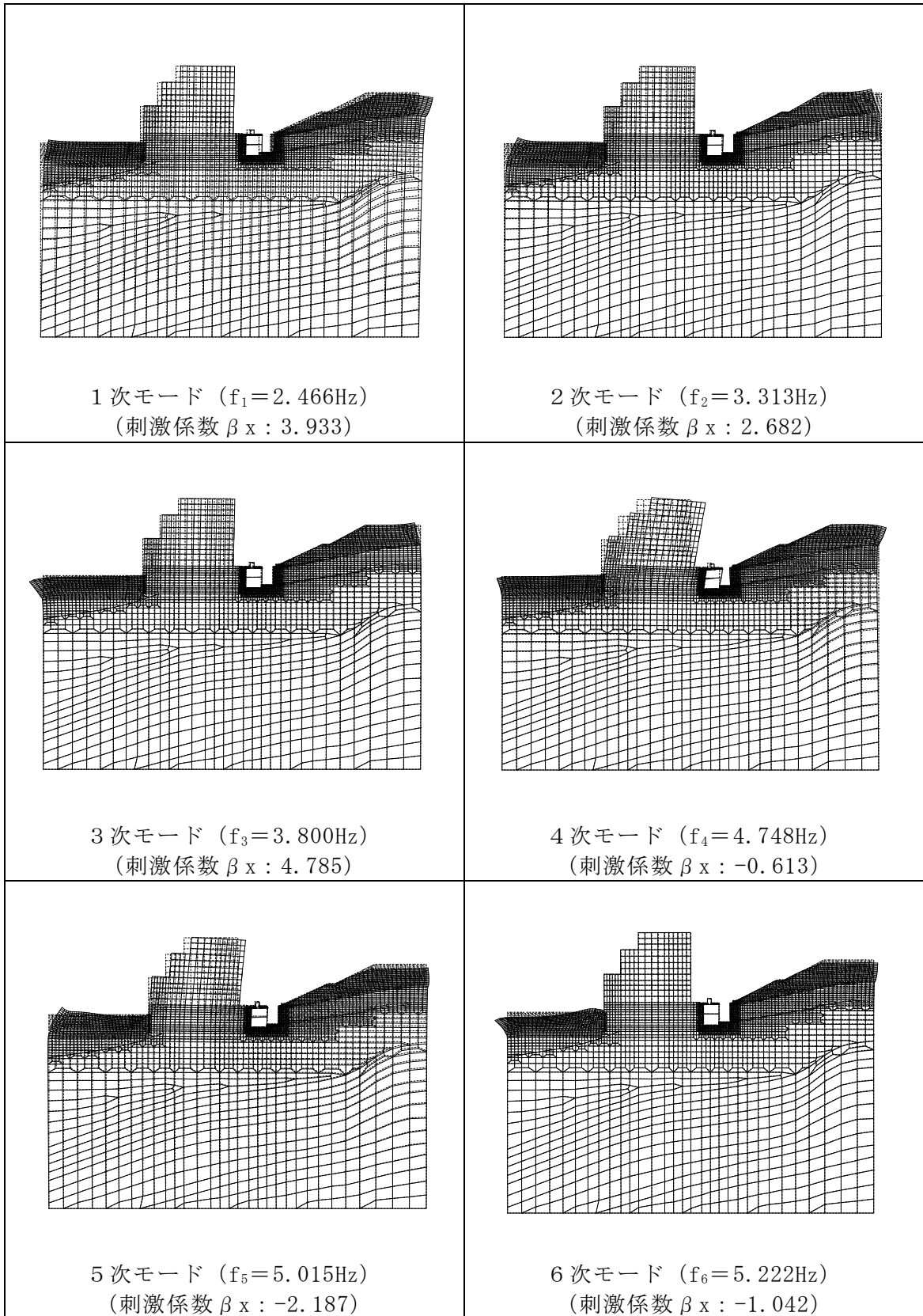


図 3-24(1) 固有値解析結果 (モード図, A-A断面)

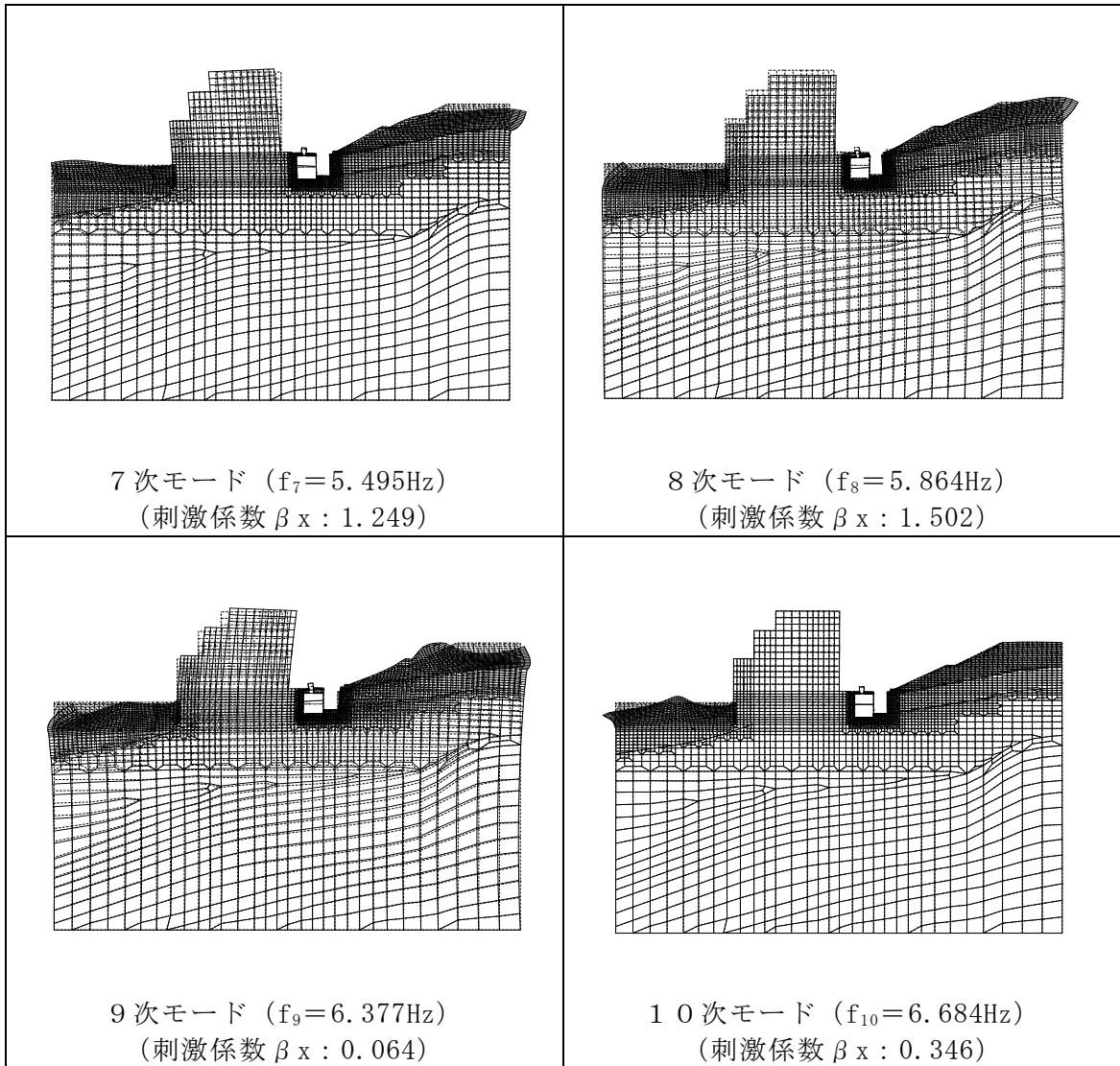


図 3-24(2) 固有値解析結果 (モード図, A-A断面)

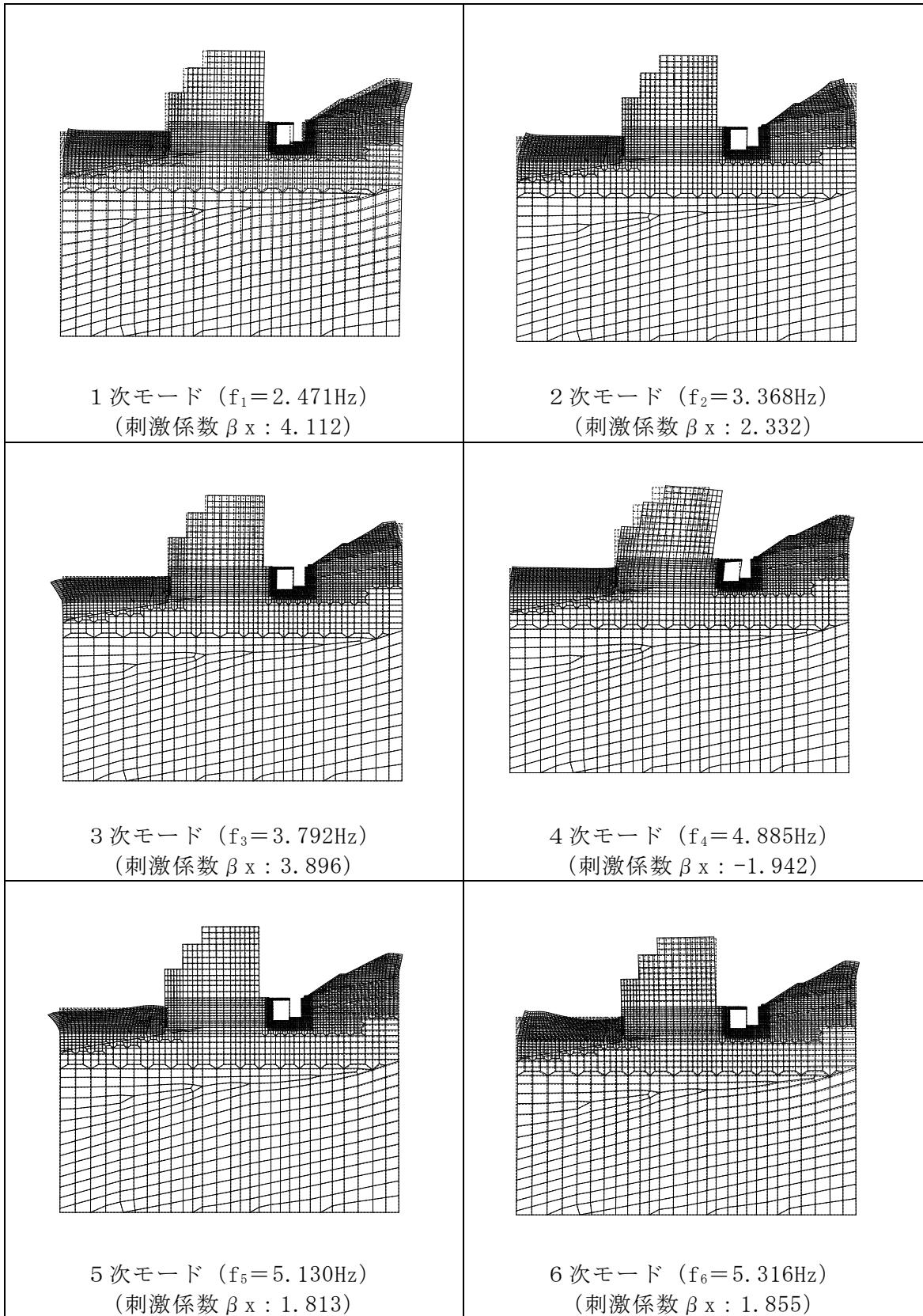


図 3-25(1) 固有値解析結果 (モード図, B-B断面)

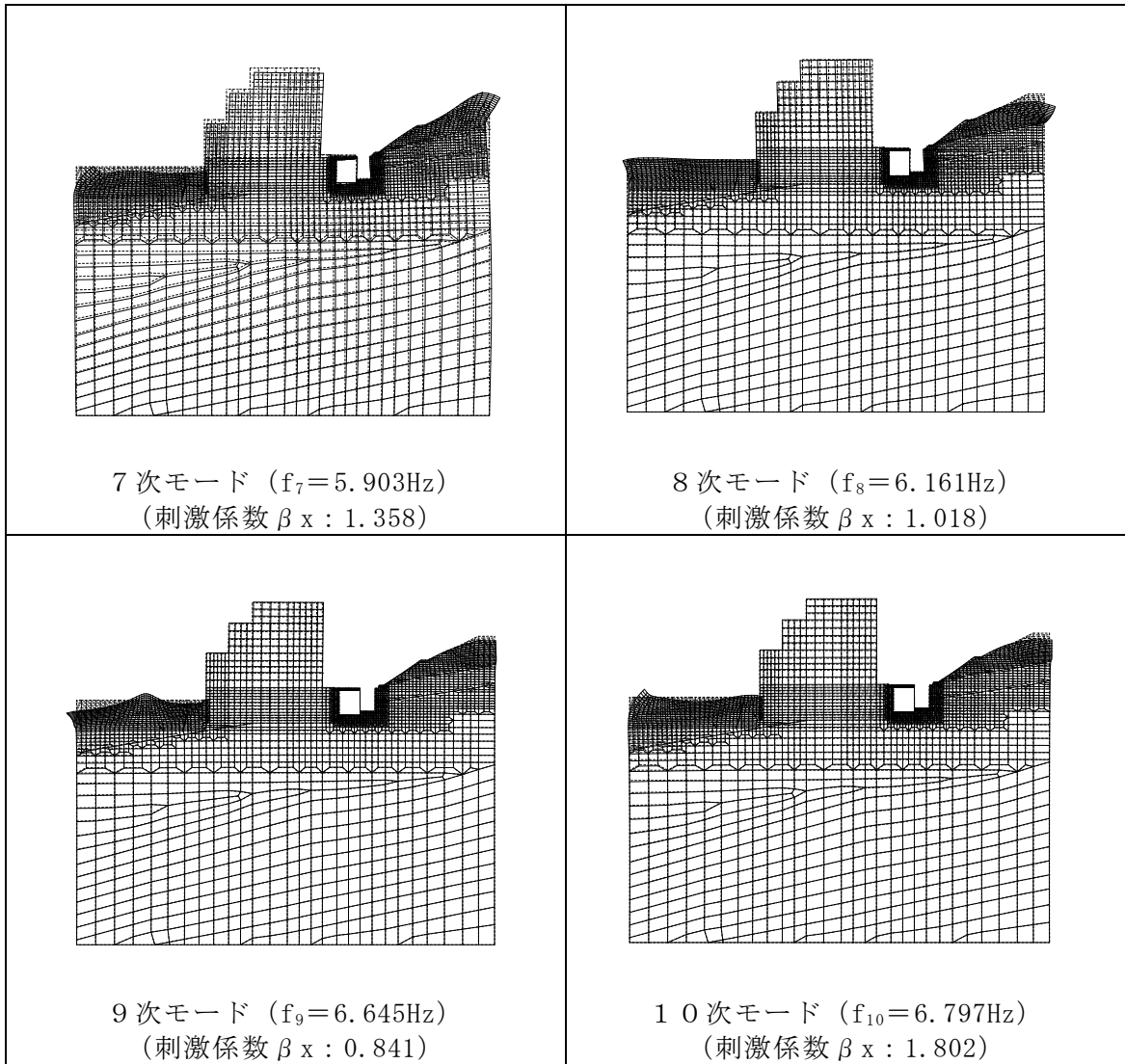


図 3-25(2) 固有値解析結果 (モード図, B-B断面)

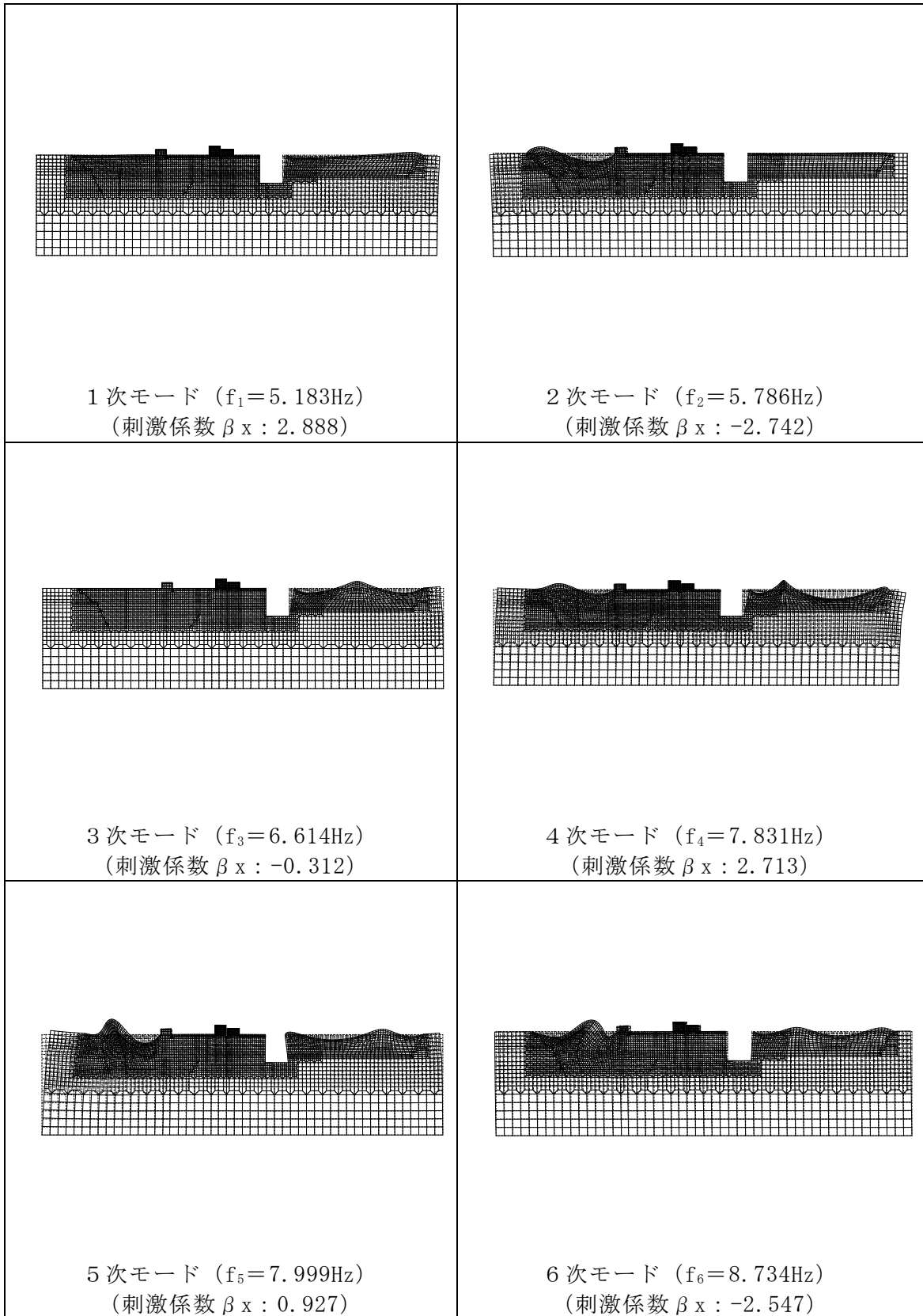


図 3-26(1) 固有値解析結果 (モード図, C-C断面)

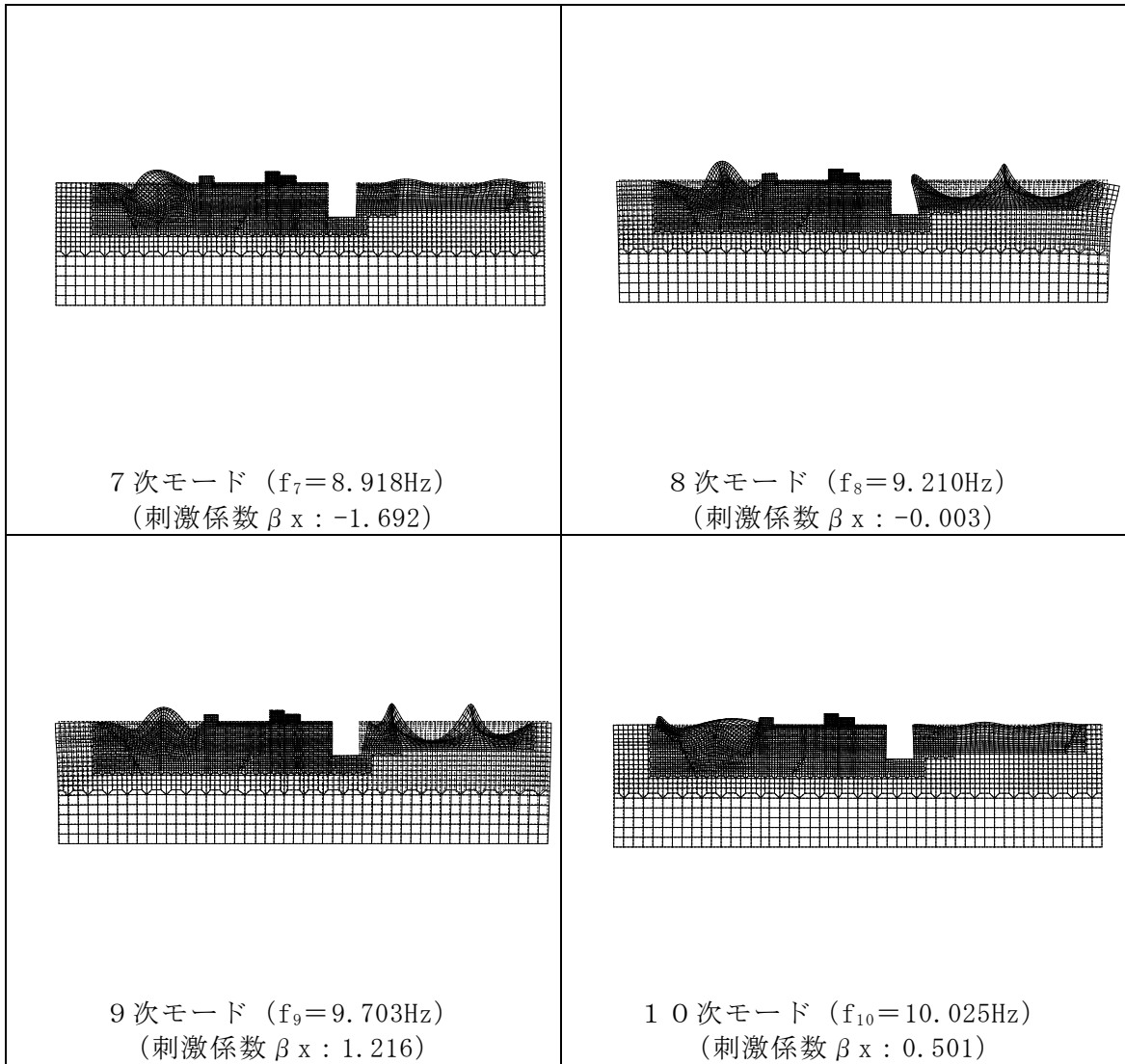


図 3-26(2) 固有値解析結果 (モード図, C-C断面)

表 3-9 Rayleigh 減衰における係数 α , β の設定結果

評価対象断面	α	β
A-A 断面	6.495×10^{-1}	1.108×10^{-3}
B-B 断面	6.473×10^{-1}	1.098×10^{-3}
C-C 断面	1.367×10^{-1}	2.611×10^{-4}

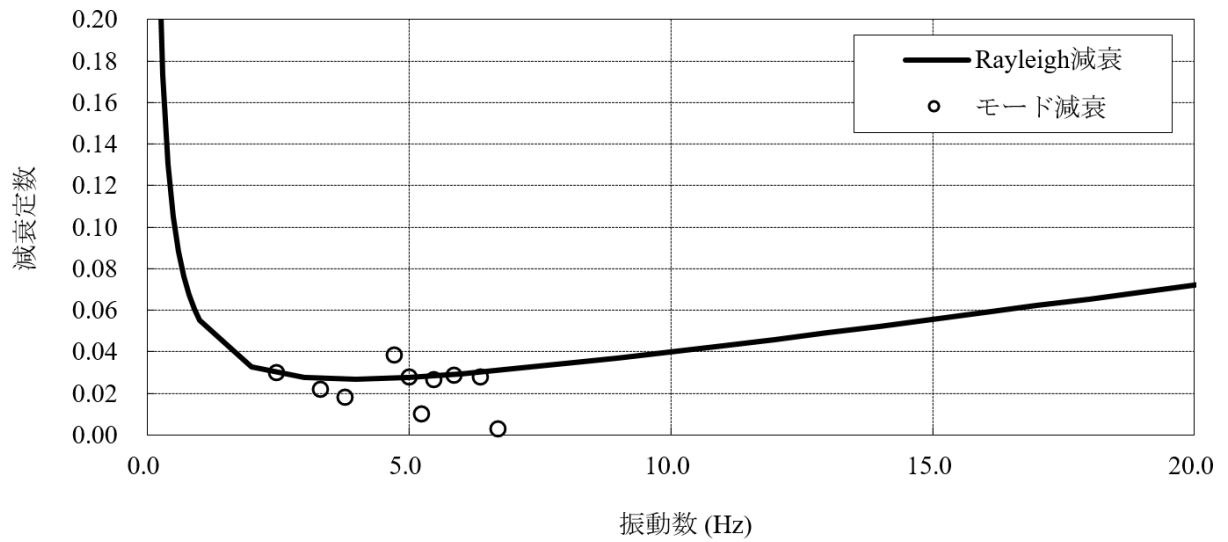


図 3-27 設定した Rayleigh 減衰 (A-A 断面)

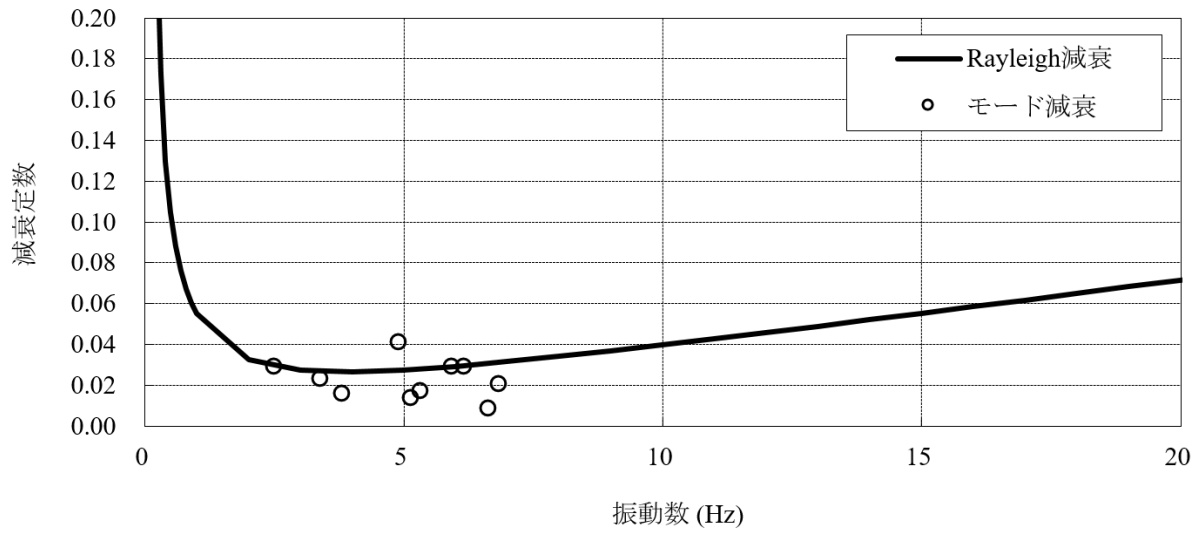


図 3-28 設定した Rayleigh 減衰 (B-B 断面)

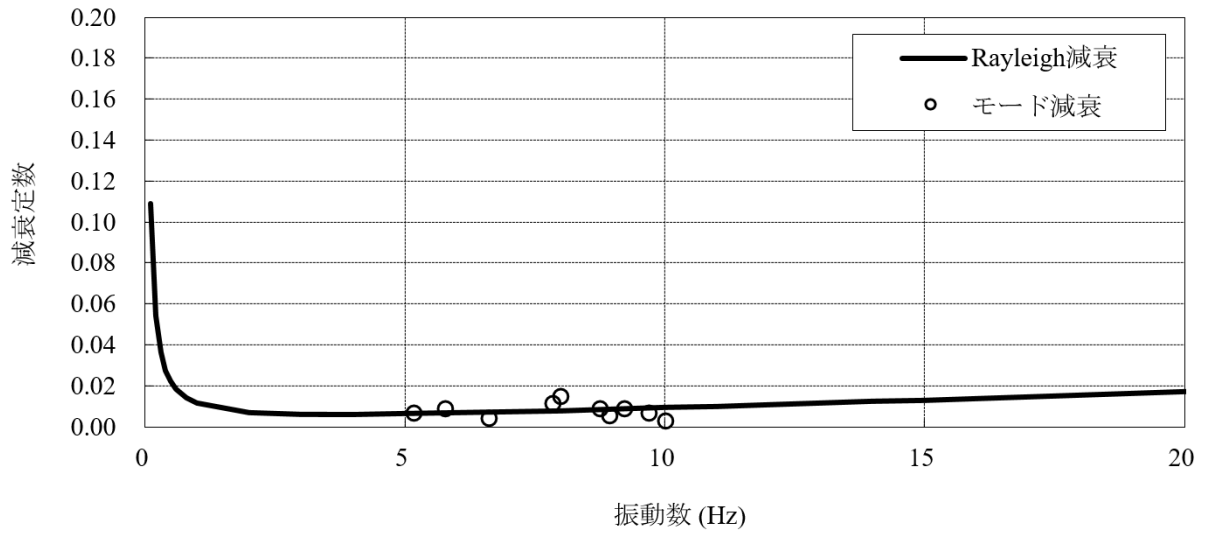


図 3-29 設定した Rayleigh 減衰 (C-C 断面)

3.4 荷重及び荷重の組合せ

耐震評価にて考慮する荷重は、通常運転時の荷重（永久荷重）及び地震荷重を抽出し、それぞれを組み合わせて設定する。地震荷重には、地震時土圧及び機器・配管系からの反力による荷重が含まれるものとする。

地震時に低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽に作用する機器・配管系からの反力については、機器・配管系を解析モデルに付加質量として与えることで考慮する。

荷重の組合せを表 3-10 に示す。

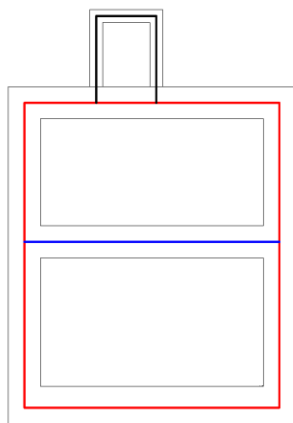
表 3-10 荷重の組合せ

種別	荷重		算定方法の概要
永久荷重 (常時荷重)	固定荷重	躯体自重	○ 設計図書に基づいて、対象構造物の体積に材料の密度を乗じて設定する。
		機器・配管荷重	○ 機器・配管系の重量に基づいて設定する。
	積載荷重	静止土圧	○ 常時応力解析により設定する。
		外水圧	○ 地下水位に応じた静水圧として考慮する。 地下水の密度を考慮する。
		内水圧	○ 内水位に応じた静水圧として考慮する。 淡水の密度を考慮する。
		積雪荷重	○ 地表面及び構造物天端に考慮する。
		土被り荷重	○ 常時応力解析により設定する。
永久上載荷重	— 地表面に恒常的に置かれる設備等はないことから考慮しない。		
偶発荷重 (地震荷重)	水平地震動	○	基準地震動 S_s による水平・鉛直同時加振を考慮する。
	鉛直地震動	○	
	動水圧	○ 水位条件及び密度は、永久荷重のうち内水圧と同様とする。 地震時動水圧を付加質量により考慮する。	

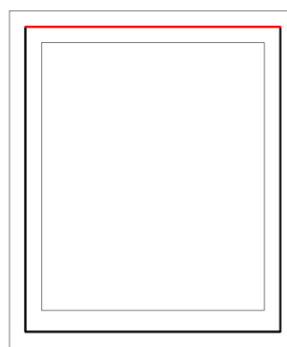
3.4.1 機器・配管荷重

地震時に低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽に作用する機器・配管系の荷重図を図3-30に示す。機器・配管荷重は、常時・地震時ともに付加質量でモデル化する。

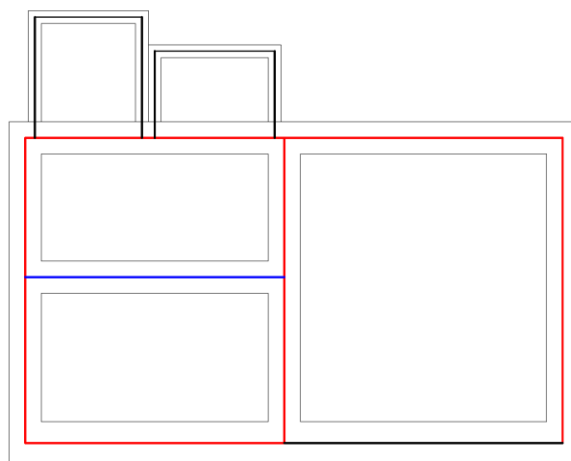
A-A断面図



B-B断面図



C-C断面図



- 機器・配管重量を考慮しない部材
- 機器・配管重量 6.0kN/m^2 を考慮する部材
- 機器・配管重量 5.0kN/m^2 を考慮する部材

図3-30 解析用機器・配管荷重図

3.4.2 外水圧

外水圧は、地下水位に応じた静水圧を設定する。地下水位については、「2.8 地下水位」のとおりとし、地下水の密度として $1.00\text{g}/\text{cm}^3$ を考慮する。

3.4.3 内水圧

低圧原子炉代替注水槽の内水位は、EL 11.2m とし、淡水の密度として $1.00\text{g}/\text{cm}^3$ を考慮する。

3.4.4 積雪荷重

積雪荷重は、VI-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等における損傷の防止に関する基本方針」に基づき、発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上1位の月最深積雪100cmに平均的な積雪荷重を与えるための係数0.35を考慮し35.0cmとする。積雪荷重については、「松江市建築基準法施行細則（平成17年3月31日、松江市規則第234号）」により、積雪量1cmごとに $20\text{N}/\text{m}^2$ の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

3.4.5 動水圧

動水圧は Westergaard 式から算定する。

(1) 水平方向の動水圧

取水槽内部の水を固定水として扱い、次式で算定する。水平方向動水圧の概要図を図3-31に示す。

$$p_w = \frac{7}{8} \times c \times \gamma_w \times \sqrt{(h \times y)} \times k_H$$

ここで

- p_w : 動水圧
- c : 補正係数
 $L/h < 1.5$ の場合, $c = L / (1.5h)$
 $L/h \geq 1.5$ の場合, $c = 1.0$
- L : 水路幅
- h : 水深
- γ_w : 水の単位体積重量
- y : 水面から動水圧を求める点までの深さ
- k_H : 水平震度

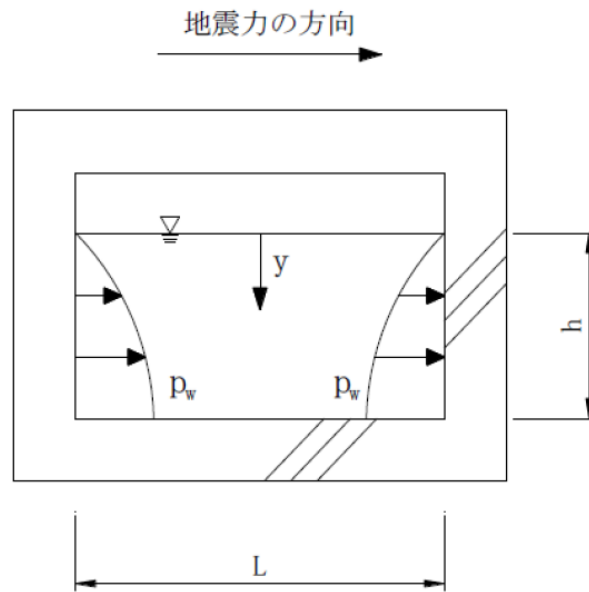


図 3-31 水平方向の動水圧分布図

(2) 鉛直方向の動水圧

取水槽内部の水を固定水として扱い、次式で算定する。鉛直方向動水圧の概要図を図 3-32 に示す。

$$p_w = k_v \times \gamma_w \times h$$

ここで

- p_w : 動水圧
- k_v : 鉛直震度
- γ_w : 水の単位体積重量
- h : 水深

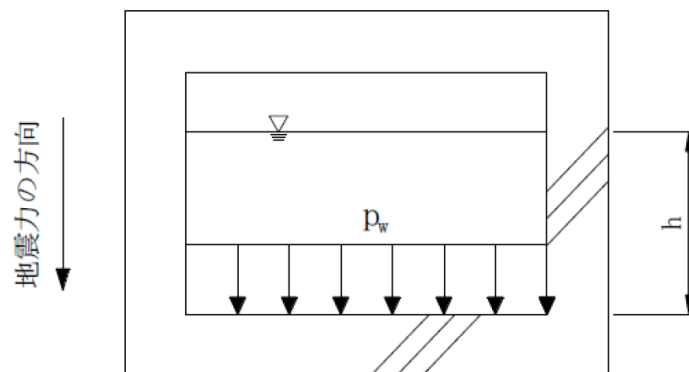


図 3-32 鉛直方向の動水圧分布図

3.5 地震応答解析の解析ケース

3.5.1 耐震評価における解析ケース

(1) 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

地盤物性のばらつきの影響を考慮するため、表 3-11 に示す解析ケースを設定する。

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽は地中に埋設された鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、周辺には埋戻土のような動的変形特性にひずみ依存性がある地盤が分布しておらず、主に C_M級及び C_H級岩盤が分布していることから、これらの地盤が地震時の構造物への応答に大きく影響を与えると判断し、岩盤の動せん断弾性係数のばらつきを考慮する。

ばらつきを考慮する物性値は地盤のせん断変形を定義するせん断弾性係数とし、平均値を基本ケース（表 3-11 に示すケース①）とした場合に加え、平均値±1.0×標準偏差（ σ ）のケース（表 3-11 に示すケース②及び③）について確認を行う。

地盤のばらつきの設定方法の詳細は、「補足-023-01 地盤の支持性能について」に示す。

表 3-11 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽における解析ケース

解析ケース	解析手法	地盤物性	
		埋戻土 (G_0 : 初期せん断 弾性係数)	岩盤 (G_d : 動せん断 弾性係数)
ケース① (基本ケース)	全応力解析	平均値	平均値
ケース②	全応力解析	平均値	平均値 + 1 σ
ケース③	全応力解析	平均値	平均値 - 1 σ

(2) 耐震評価における解析ケースの組合せ

耐震評価における解析ケースを表 3-12 に示す。耐震評価においては、基準地震動 S_s 全波（6 波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（6 波）を加えた全 12 波に対し、基本ケース（ケース①）を実施する。基本ケース（ケース①）において、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び地盤の支持力照査の照査項目ごとに照査値が 0.5 を超える照査項目に対して、最も厳しい地震動を用いて、表 3-12 に示す解析ケース②及び③を実施する。すべての照査項目の照査値がいずれも 0.5 以下の場合には、照査値が最も厳しくなる地震動を用いて、解析ケース②及び③を実施する。また、追加解析ケースを実施する地震動の選定フローを図 3-33 に示す。なお、C-C 断面については 4 辺固定版による評価を実施することから、上記によらず「5.1.1 解析ケース」において解析ケースを選定する。

表 3-12 耐震評価における解析ケース

解析ケース		ケース①	ケース②	ケース③
		基本ケース	地盤物性のばらつき (+1 σ) を考慮した解析ケース	地盤物性のばらつき (-1 σ) を考慮した解析ケース
地盤物性		平均値	平均値 + 1 σ	平均値 - 1 σ
地震動 (位相)	$S_s - D$	++*	○	基準地震動 S_s （6 波）に位相反転を考慮した地震動（6 波）を加えた全 12 波に対し、ケース①（基本ケース）を実施し、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び基礎地盤の支持力照査の各照査項目ごとに照査値が 0.5 を超える照査項目に対して、最も厳しい（許容限界に対する裕度が最も小さい）地震動を用いてケース②及び③を実施する。 すべての照査項目の照査値がいずれも 0.5 以下の場合には、照査値が最も厳しくなる地震動を用いてケース②及び③を実施する。
		-+*	○	
		+ -*	○	
		--*	○	
	$S_s - F 1$	++*	○	
	$S_s - F 2$	++*	○	
	$S_s - N 1$	++*	○	
		-+*	○	
	$S_s - N 2$ (NS)	++*	○	
		-+*	○	
$S_s - N 2$ (EW)	++*	○		
	-+*	○		

注記*：地震動の位相について、++の左側は水平動，右側は鉛直動を表し、「-」は位相を反転させたケースを示す。

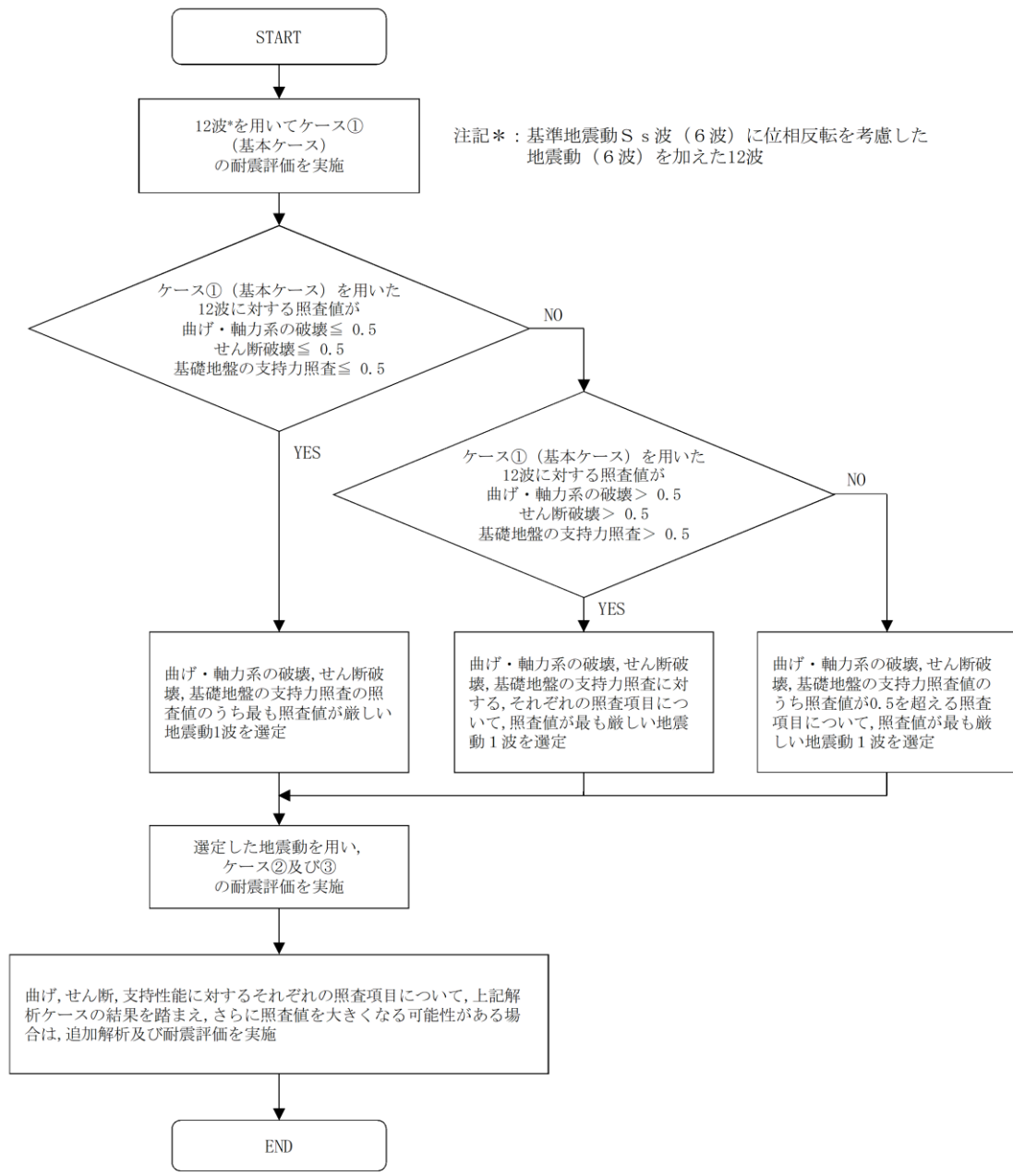


図 3-33 追加解析を実施する地震動の選定フロー

3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース

(1) 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

「3.5.1 耐震評価における解析ケース」と同様に、地盤物性のばらつきを考慮する（表 3-13 に示すケース②及び③）。

表 3-13 機器・配管系の耐震評価における解析ケース

解析ケース	解析手法	地盤物性		備考
		埋戻土 (G_0 : 初期せん断弾性係数)	岩盤 (G_d : 動せん断弾性係数)	
ケース① (基本ケース)	全応力解析	平均値	平均値	
ケース②	全応力解析	平均値	平均値 + 1σ	
ケース③	全応力解析	平均値	平均値 - 1σ	
ケース④	全応力解析	平均値	平均値	材料物性のばらつき
ケース⑤	全応力解析	平均値	平均値	地下水位低下*

注記*：解析モデル内に地下水位を設定しない状態で検討する。

(2) 材料物性のばらつきを考慮した解析ケース

材料物性のばらつきについては、剛性を定義するコンクリートのヤング係数が、コンクリートの設計基準強度に対応して定まることを踏まえ、コンクリートの設計基準強度を基本ケースとし、ヤング係数をコンクリートの実強度に対応して定めたケースについて確認を行う（表 3-13 に示すケース④）。

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽におけるコンクリート実強度は、「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事（社）日本建築学会，2013年）」及び「日本原子力学会標準 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準（社）日本原子力学会，2015年）」より算定される圧縮強度のうち最大となるものを選択する。

ヤング係数は実強度に対応するコンクリート標準示方書 2002 に基づき算出する。設定した、圧縮強度及びヤング係数を表 3-14 に示す。

表 3-14 コンクリート実強度を考慮した物性値

圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
36.1	29.8

(3) 地下水位低下の影響を考慮した解析ケース

地下水位については、地下水位低下設備に期待せず、保守的に高く設計地下水位を設定していることから、機器・配管系の床応答への影響を確認するため、地下水位が低下している状態での影響検討を実施する（表 3-13 に示すケース⑤）。

(4) 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケースの組合せ

機器・配管系に対する応答加速度抽出においては、基準地震動 S s 全波（6波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（6波）を加えた全 12 波を用いて解析ケース（表 3-15 におけるケース①～⑤）を実施する。

表 3-15 機器・配管系の応答加速度抽出のための解析ケース

解析ケース	ケース①	ケース②	ケース③	ケース④	ケース⑤
	基本ケース	地盤物性のばらつき (+1σ) を考慮した解析ケース	地盤物性のばらつき (-1σ) を考慮した解析ケース	材料特性 (コンクリート) の実強度を考慮した解析ケース	地下水が低い場合を仮定した解析ケース
地盤物性	平均値	平均値+1σ	平均値-1σ	平均値	平均値
S s - D	++*1	○	○	△*2	△*2
	-+*1	○	○	-	-
	+-*1	○	○	-	-
	--*1	○	○	-	-
S s - F 1	++*1	○	○	-	-
	++*1	○	○	-	-
S s - N 1	++*1	○	○	-	-
	-+*1	○	○	-	-
S s - N 2 (NS)	++*1	○	○	-	-
	-+*1	○	○	-	-
S s - N 2 (EW)	++*1	○	○	-	-
	-+*1	○	○	-	-

注記*1：地震動の位相について，++の左側は水平動，右側は鉛直動を表し，「-」は位相を反転させたケースを示す。

*2：△は影響検討ケースについては，S s - D (++) により影響の程度を確認する。

4. 評価内容

4.1 入力地震動の設定

入力地震動は、VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」のうち「2.3 屋外重要土木構造物」に示す入力地震動の設定方針を踏まえて設定する。

地震応答解析に用いる入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を一次元波動論により地震応答解析モデル下端位置で評価したものをを用いる。なお、入力地震動の設定に用いる地下構造モデルは、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」のうち「7.1 入力地震動の設定に用いる地下構造モデル」を用いる。

図4-1に入力地震動算定の概念図を示す。入力地震動の算定には、解析コード「SHAKE」及び「microSHAKE/3D」を使用する。解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

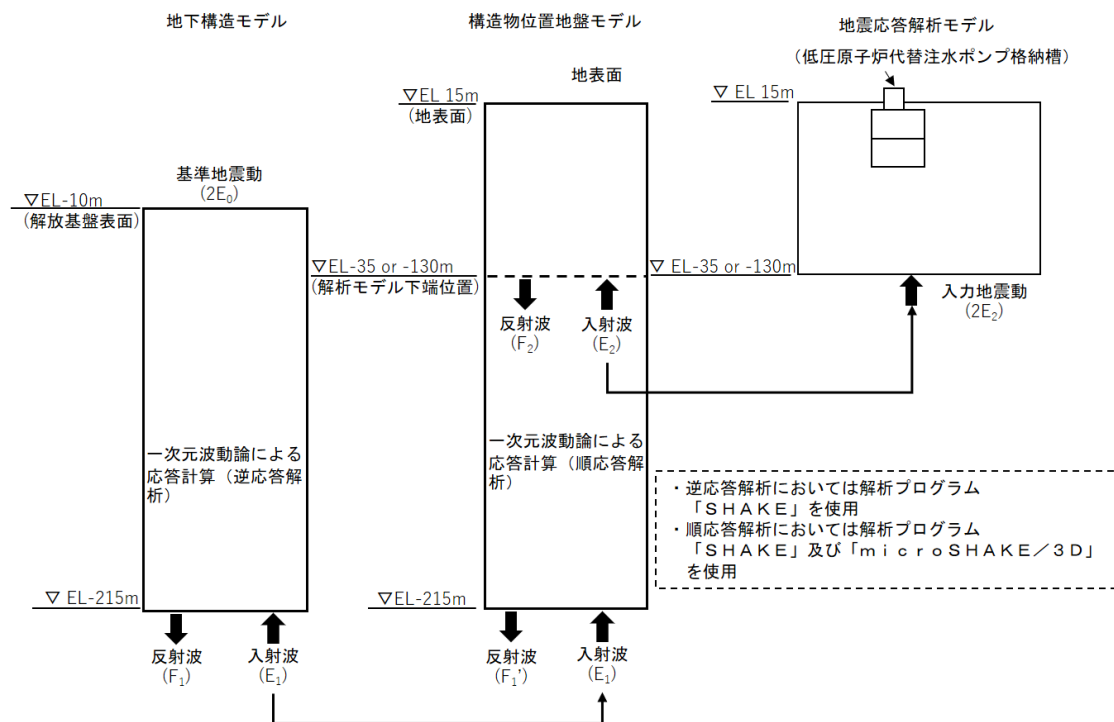
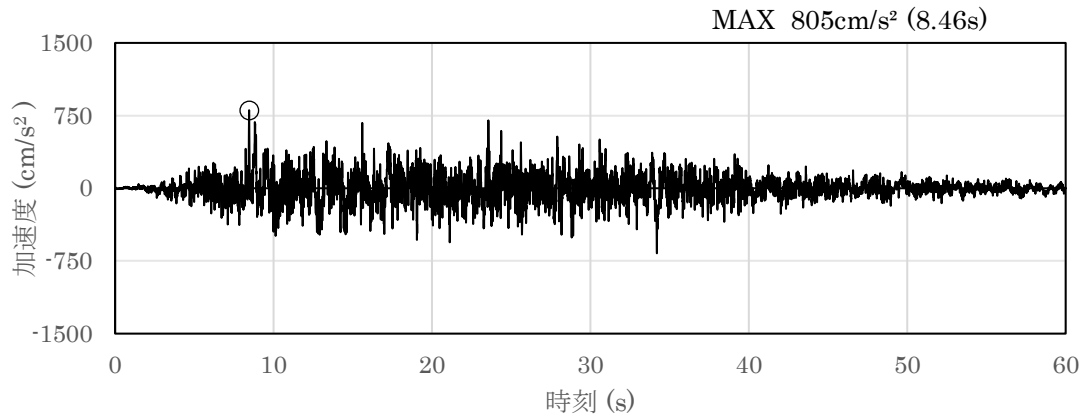


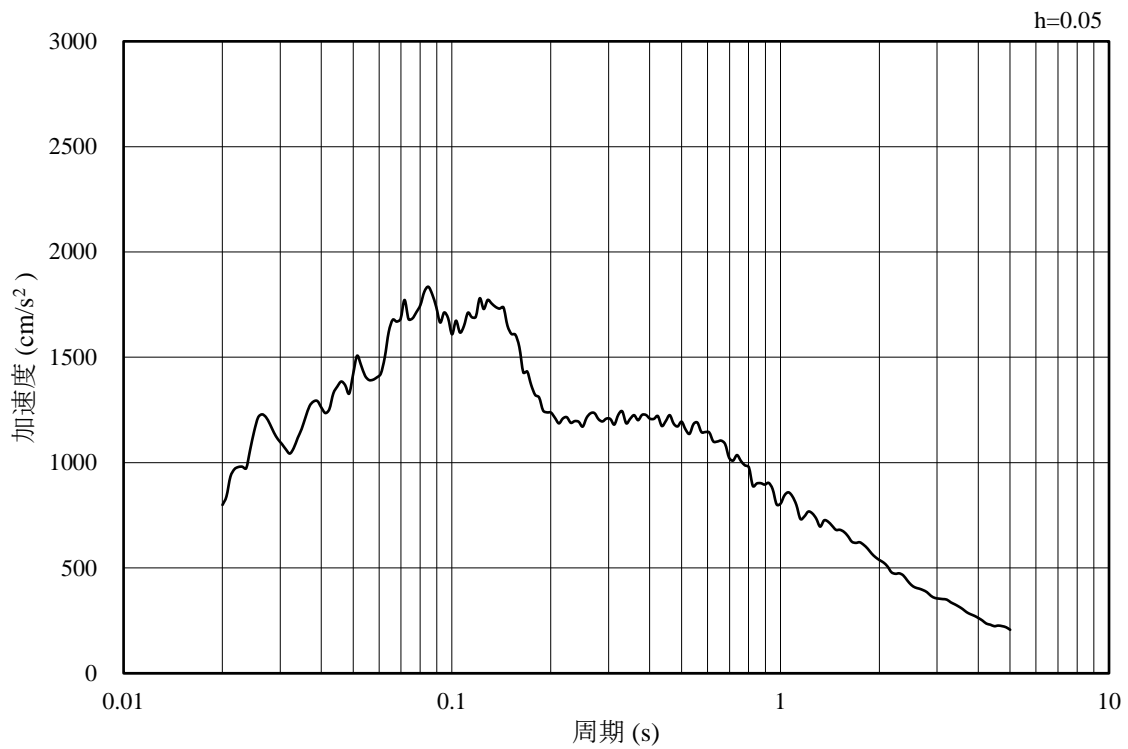
図4-1 入力地震動算定の概念図

4.1.1 A-A断面及びB-B断面の入力地震動

図4-2～図4-13にA-A断面及びB-B断面の入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを示す。

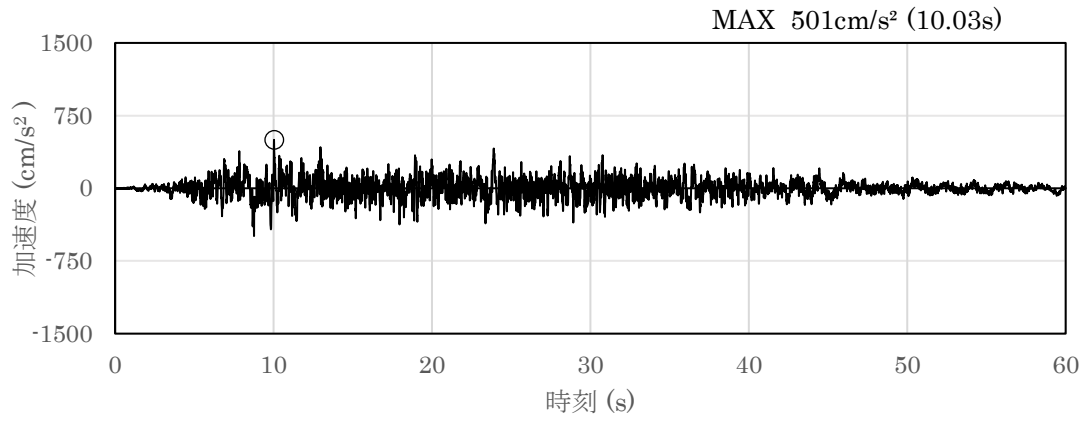


(a) 加速度時刻歴波形

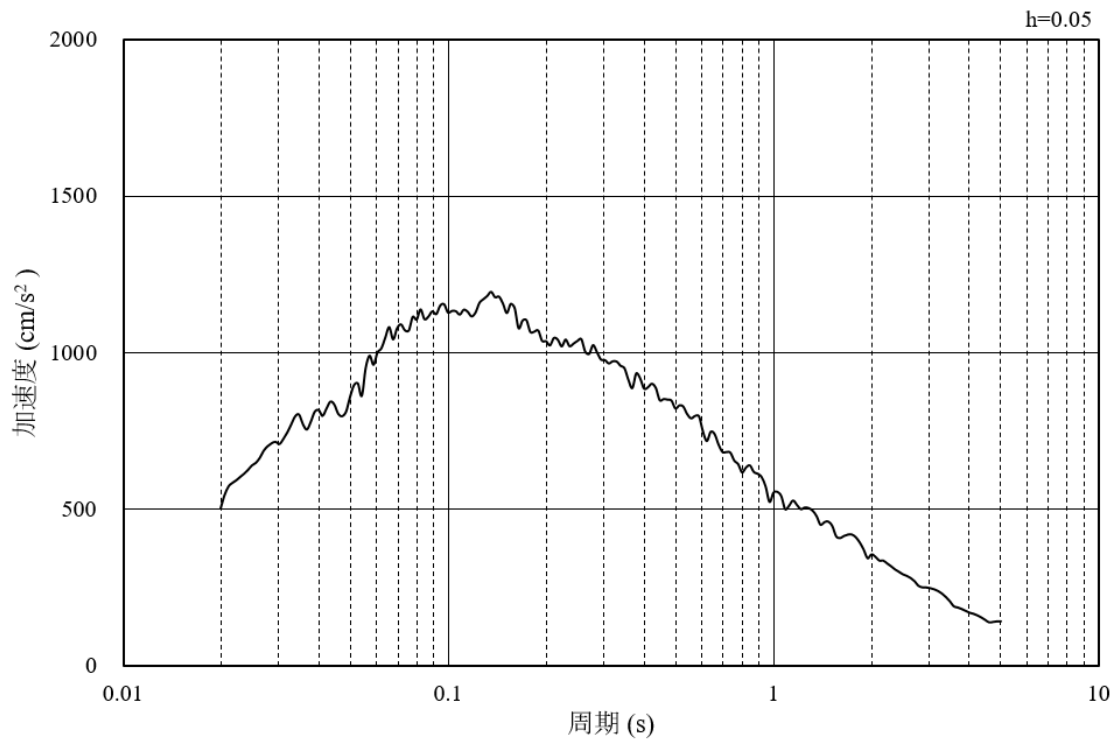


(b) 加速度応答スペクトル

図4-2 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S s - D, EL-130m)

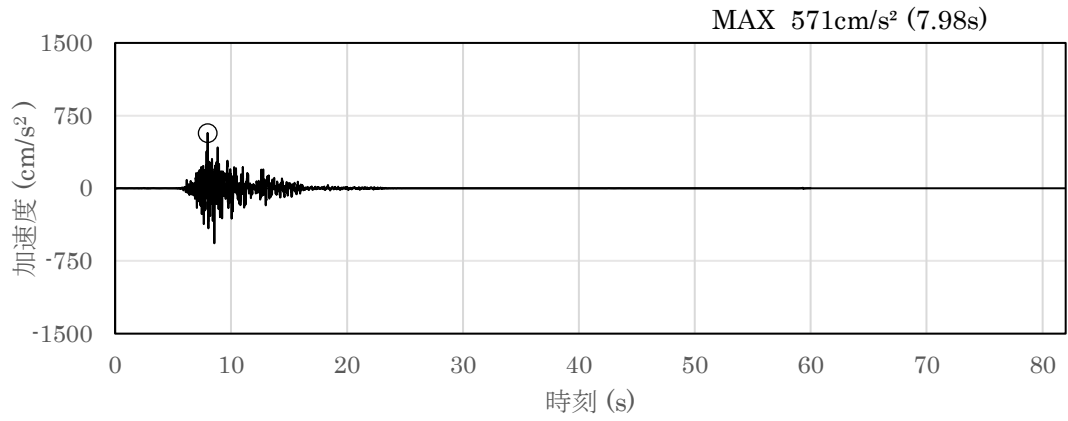


(a) 加速度時刻歴波形

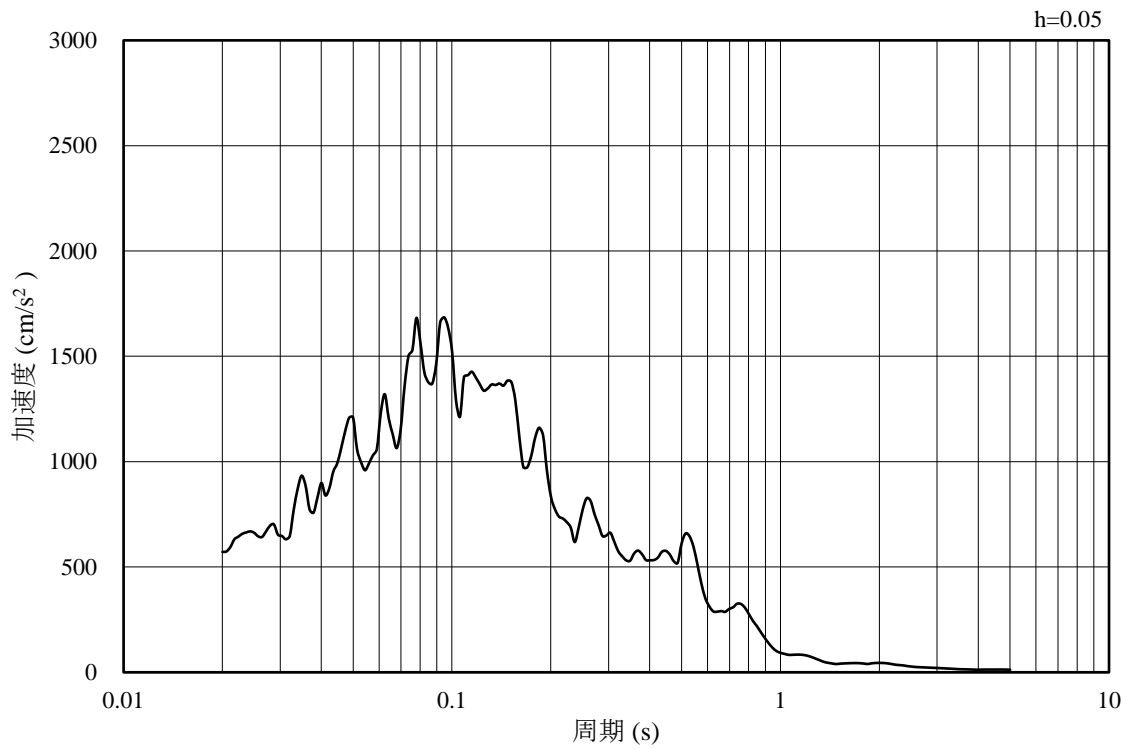


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-3 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - D, EL-130m)

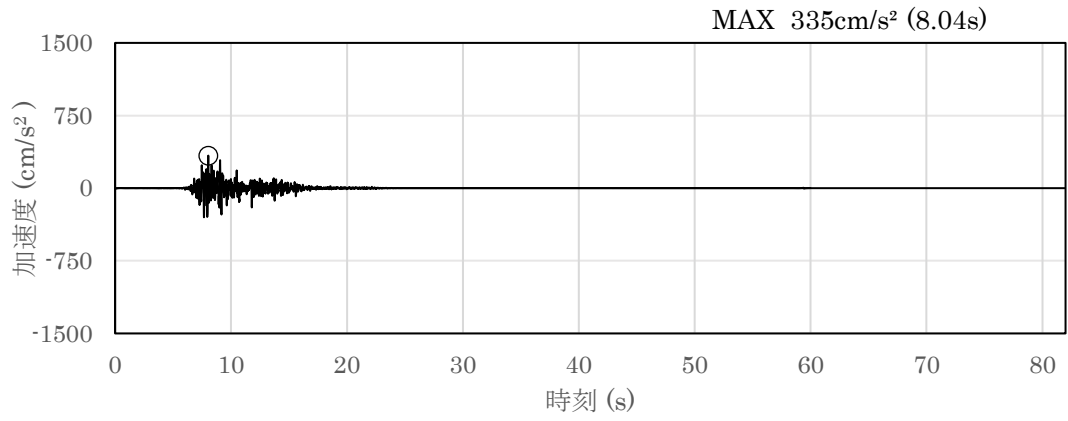


(a) 加速度時刻歴波形

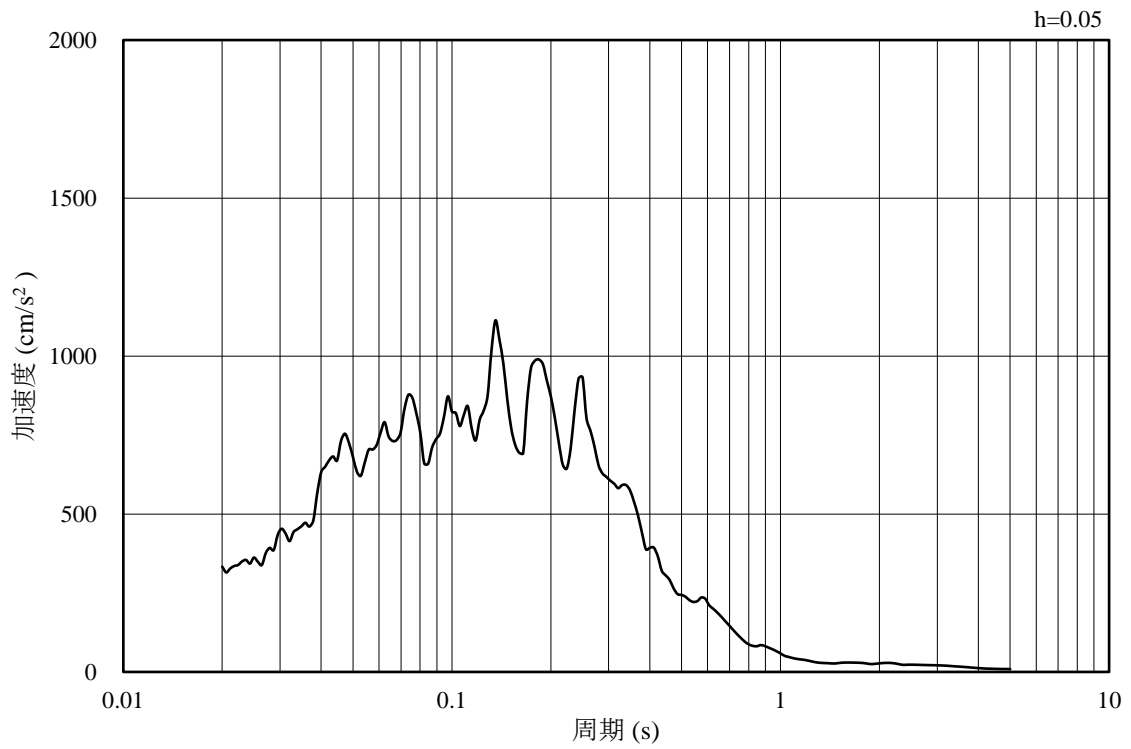


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-4 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S s - F 1, EL-130m)

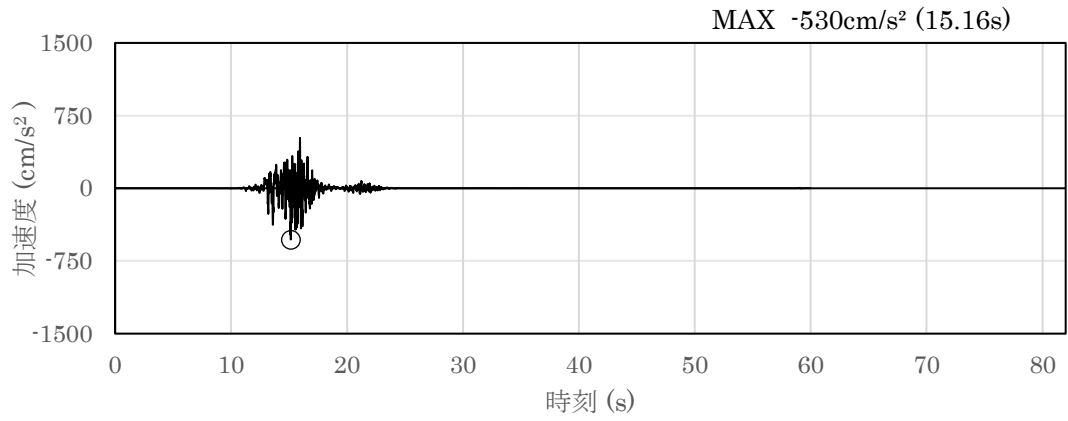


(a) 加速度時刻歴波形

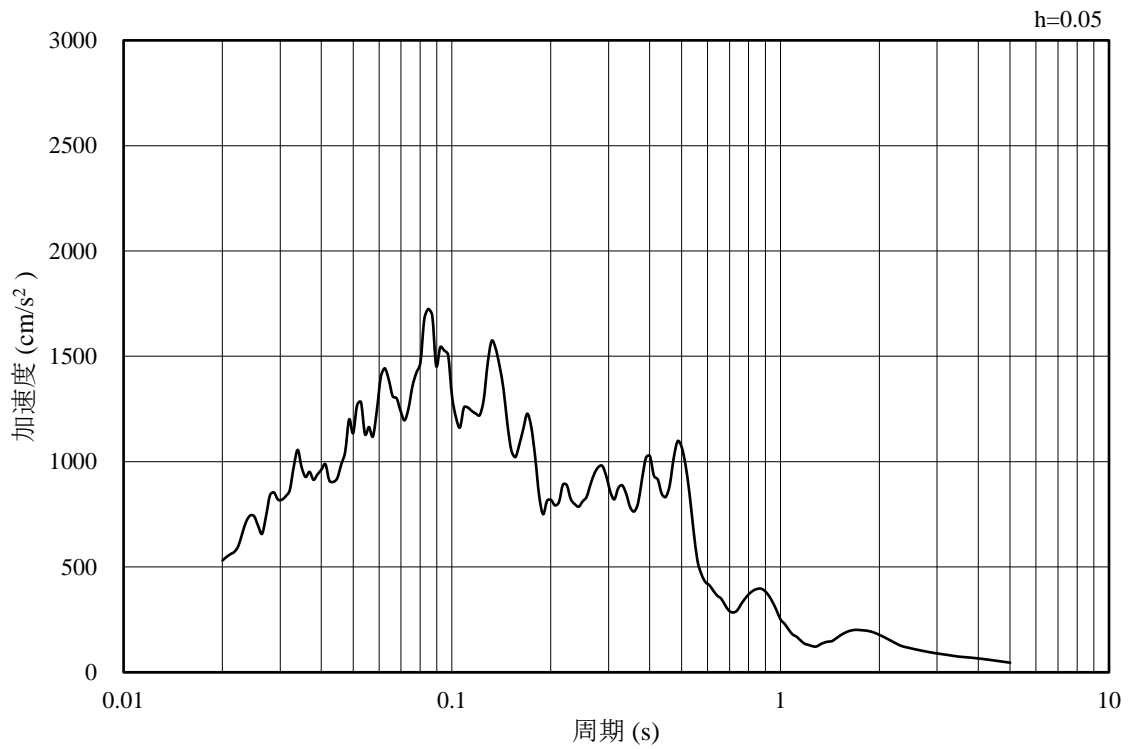


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-5 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - F 1, EL-130m)

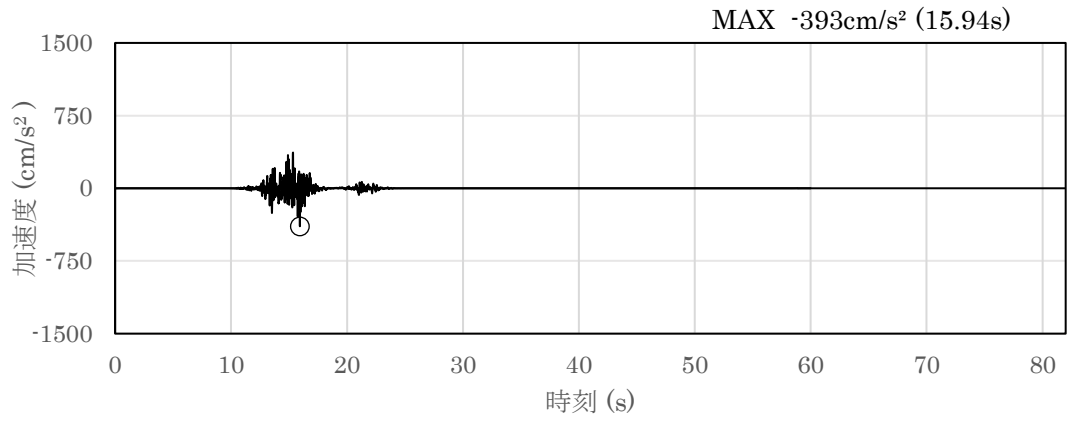


(a) 加速度時刻歴波形

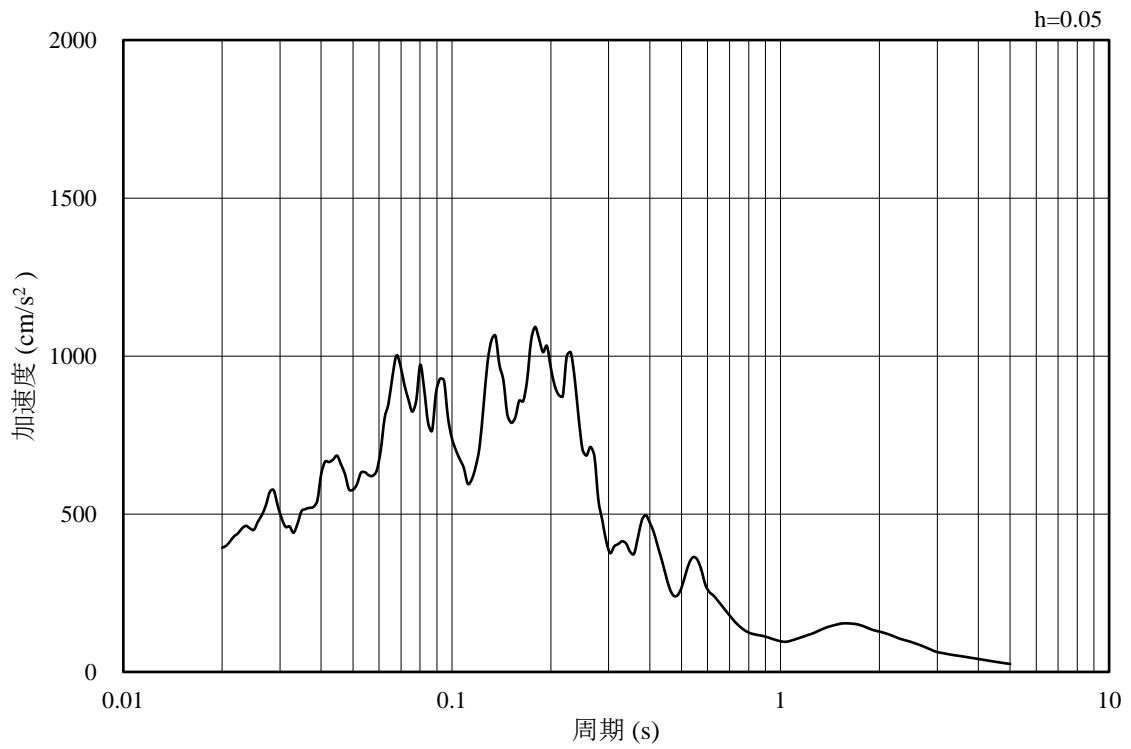


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-6 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - F 2 , EL-130m)

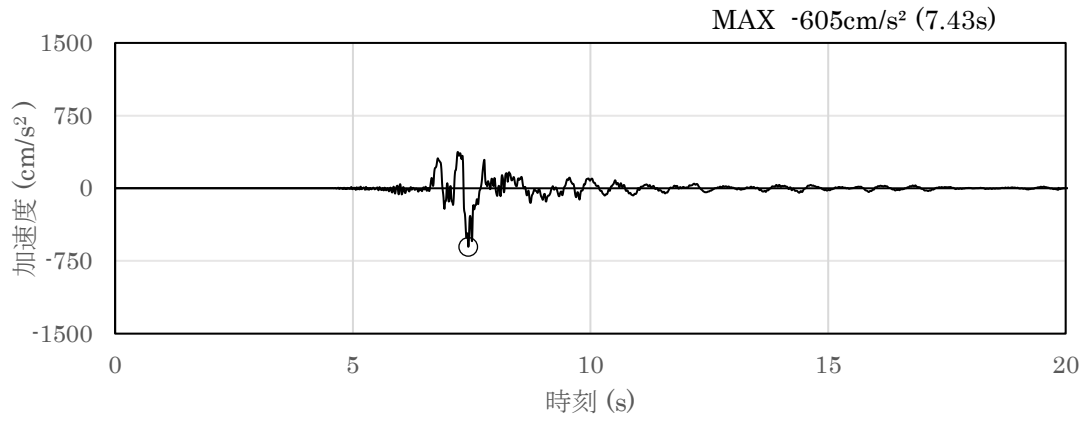


(a) 加速度時刻歴波形

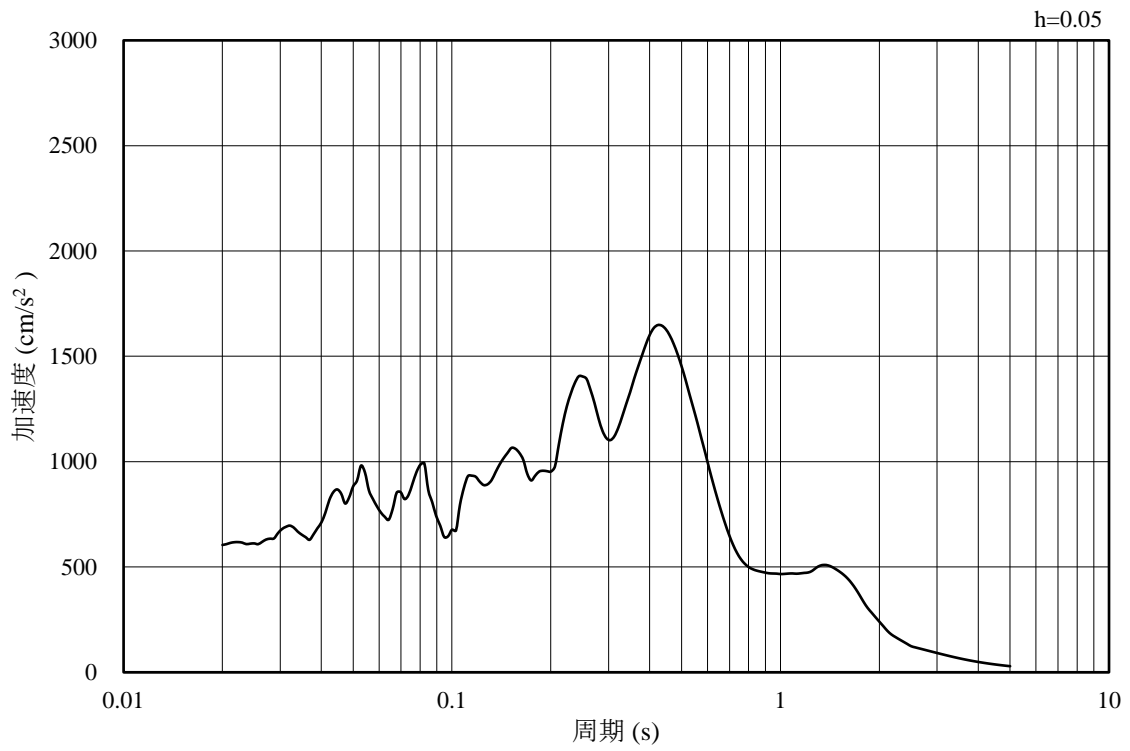


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-7 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - F 2, EL-130m)

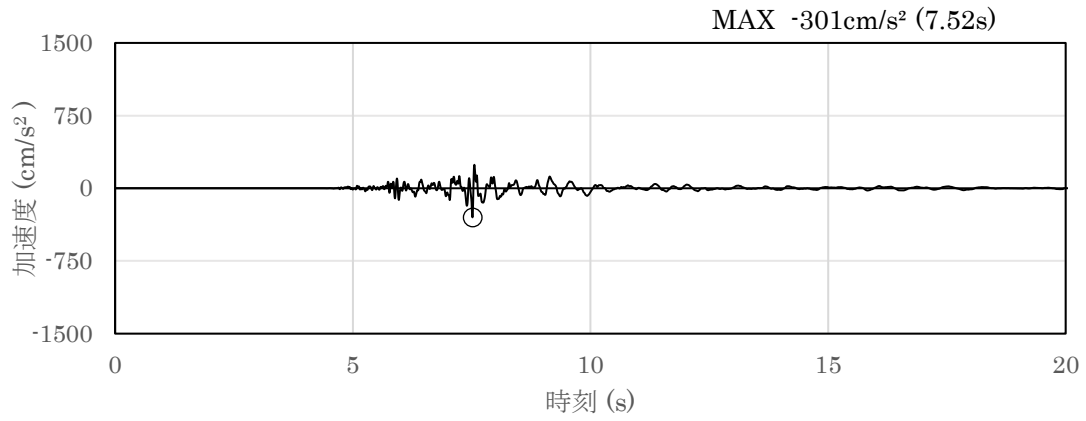


(a) 加速度時刻歴波形

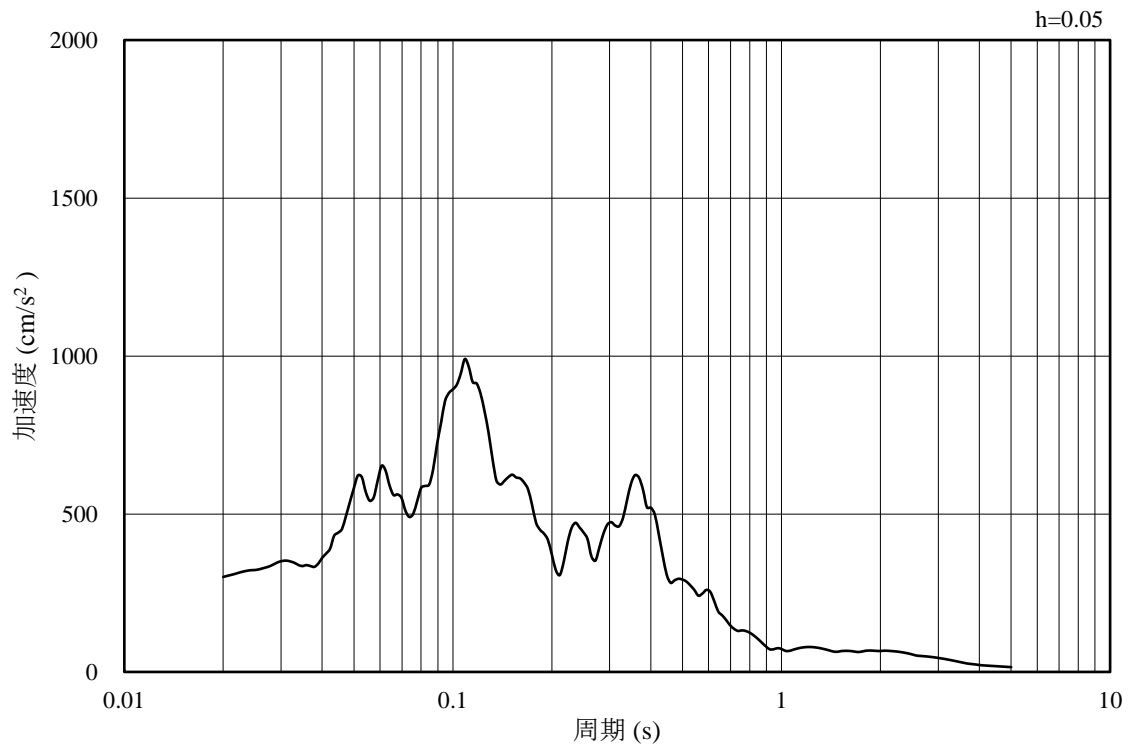


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-8 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - N 1 , EL-130m)

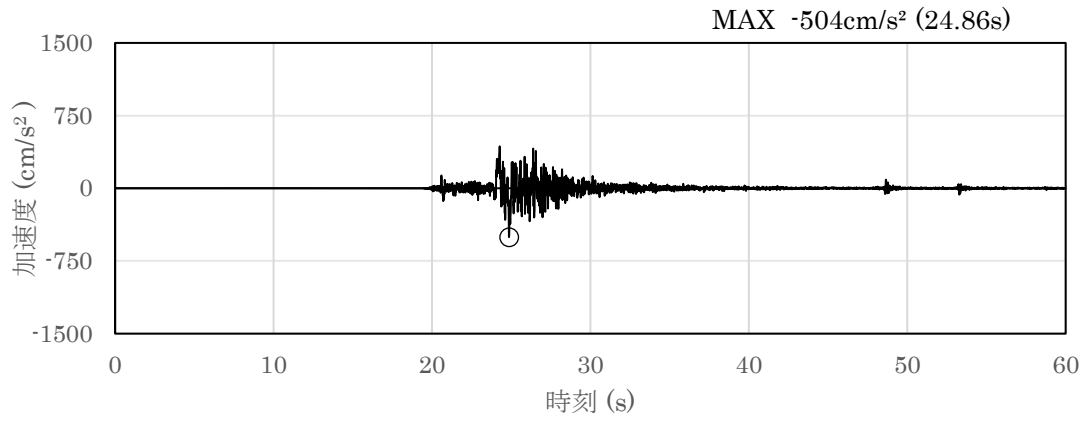


(a) 加速度時刻歴波形

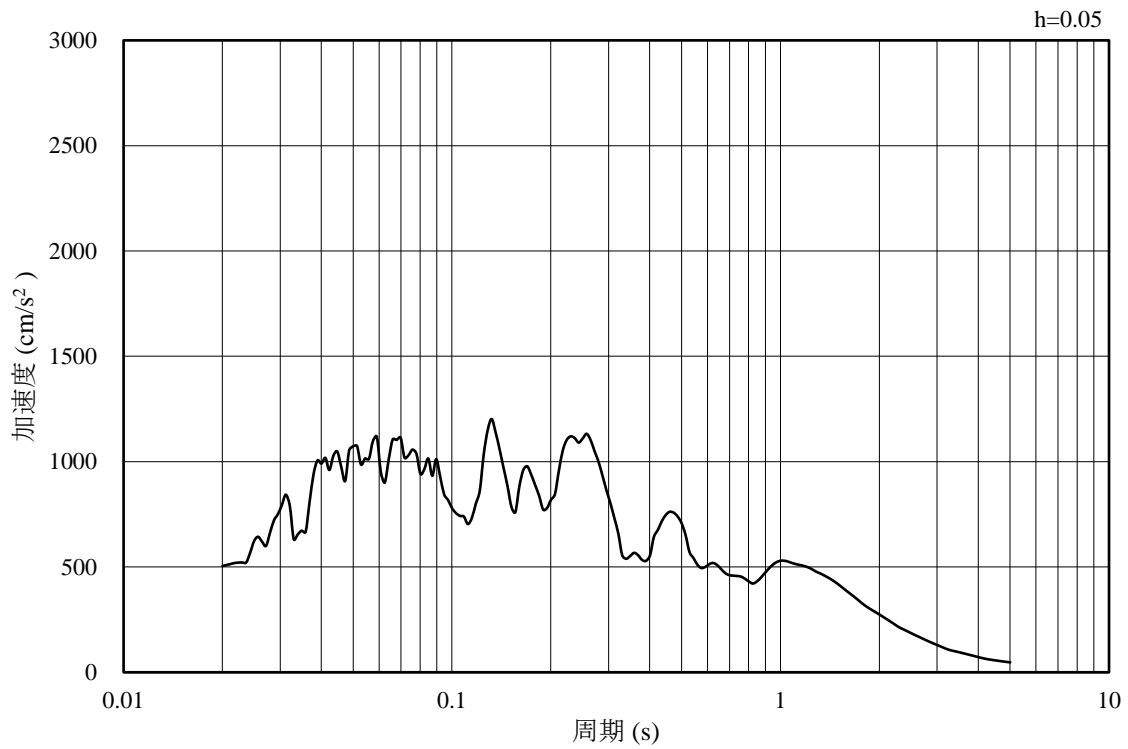


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-9 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - N 1, EL-130m)

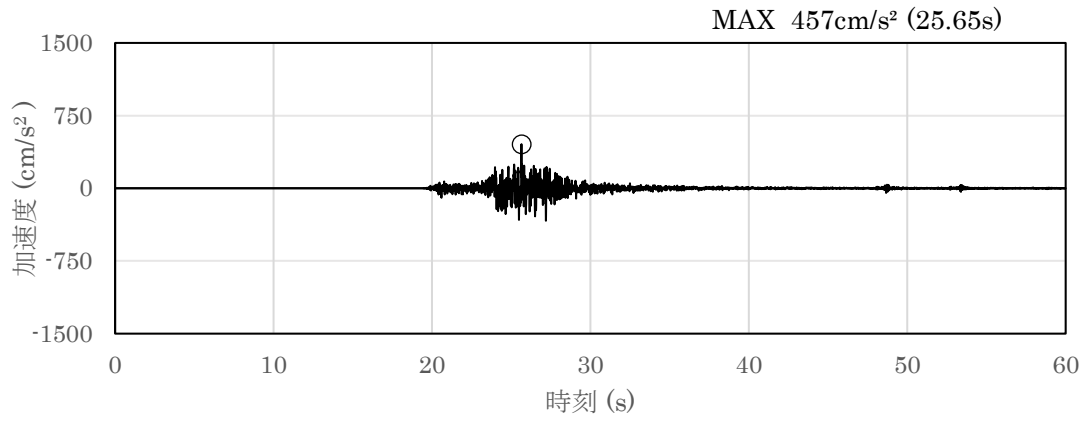


(a) 加速度時刻歴波形

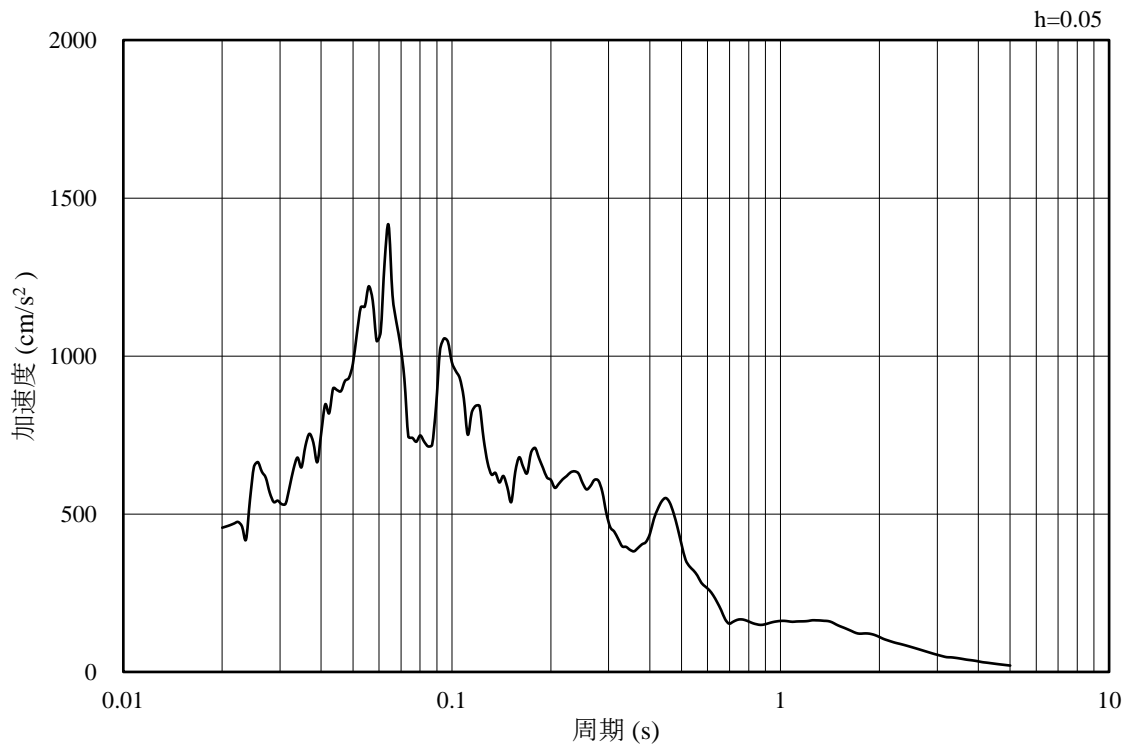


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-10 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - N 2 (N S) , EL-130m)

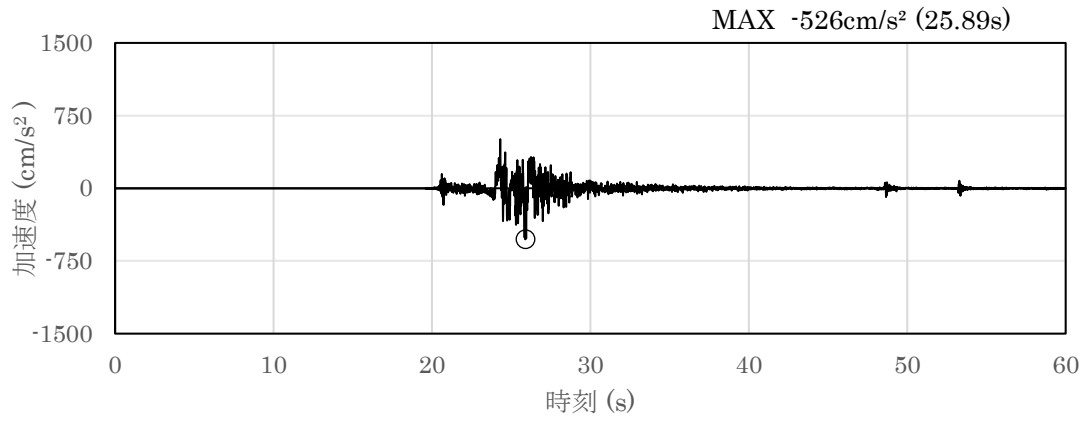


(a) 加速度時刻歴波形

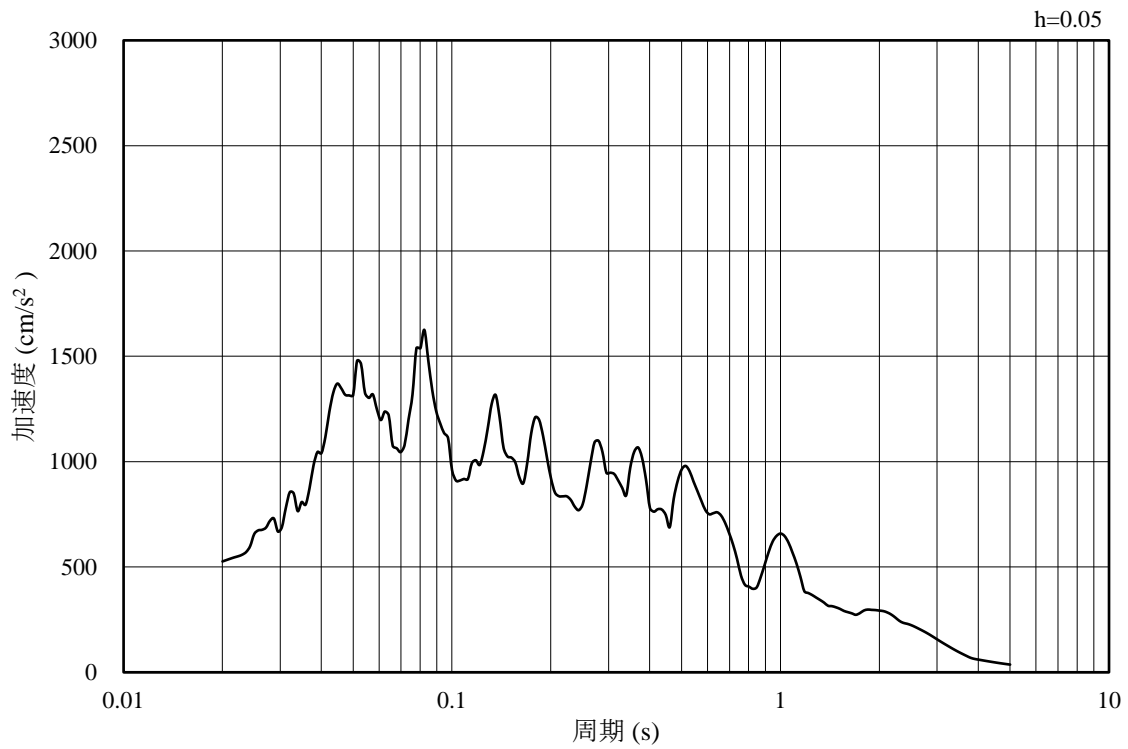


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-11 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - N 2 (N S), EL-130m)

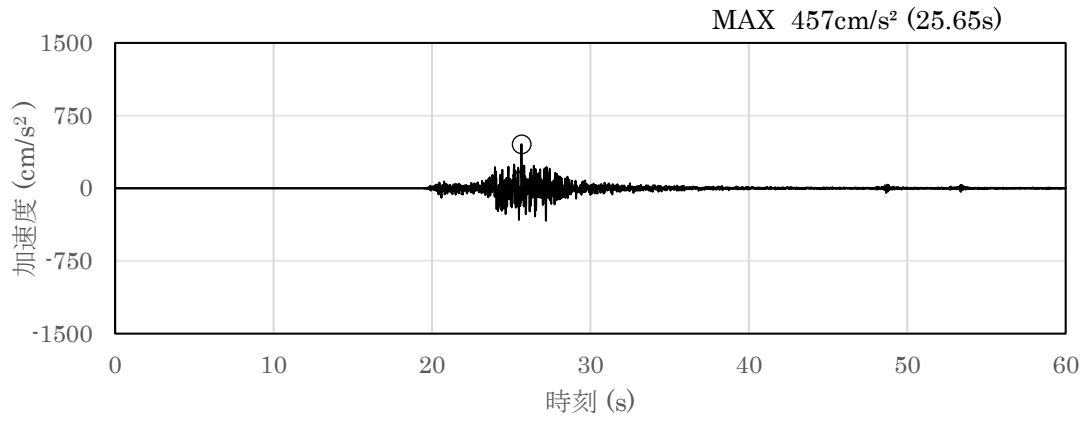


(a) 加速度時刻歴波形

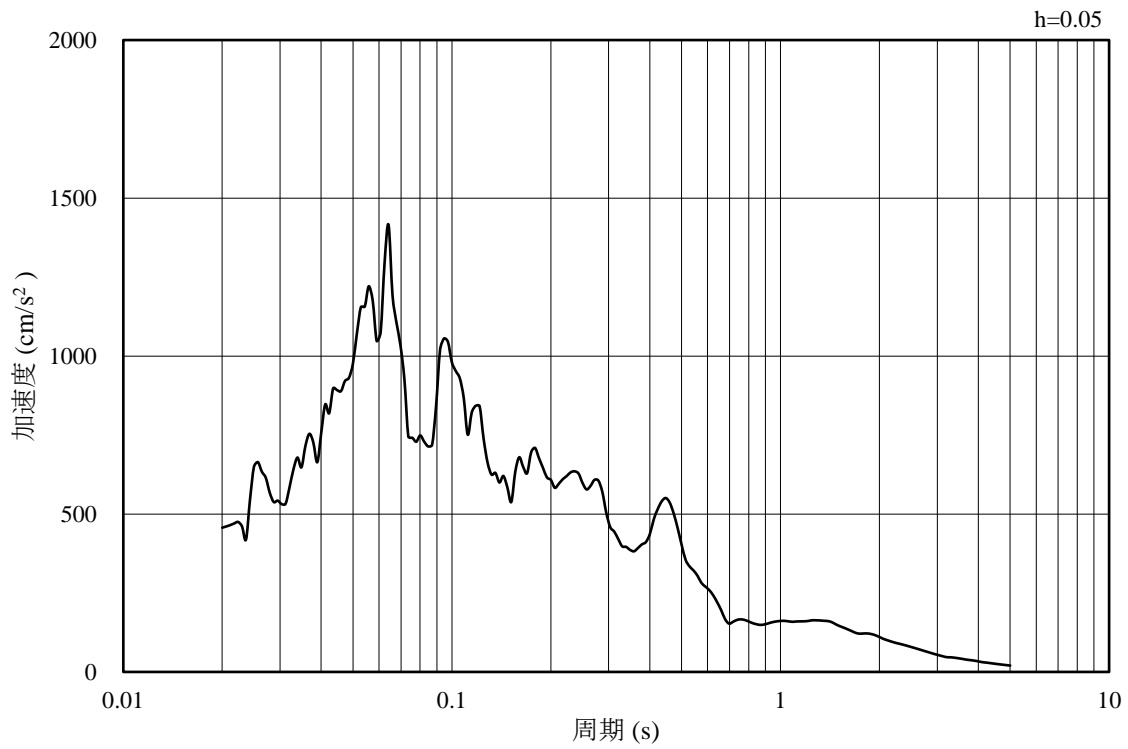


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-12 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - N 2 (E W) , EL-130m)



(a) 加速度時刻歴波形

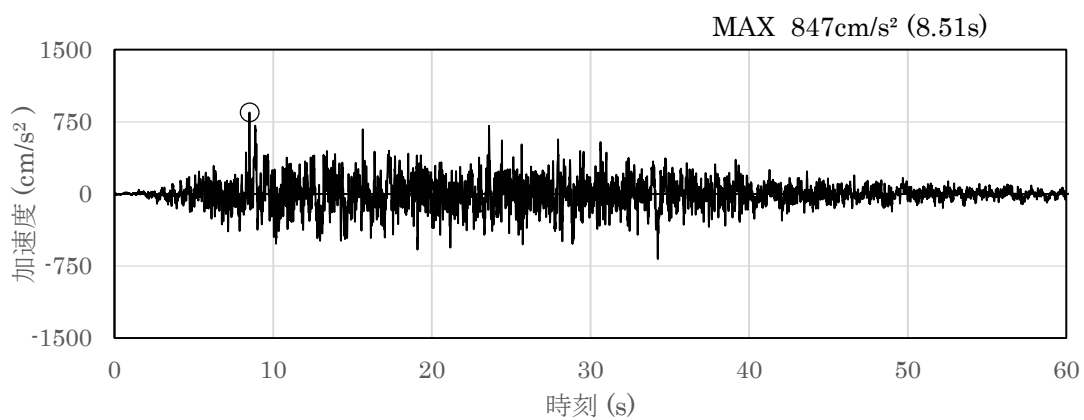


(b) 加速度応答スペクトル

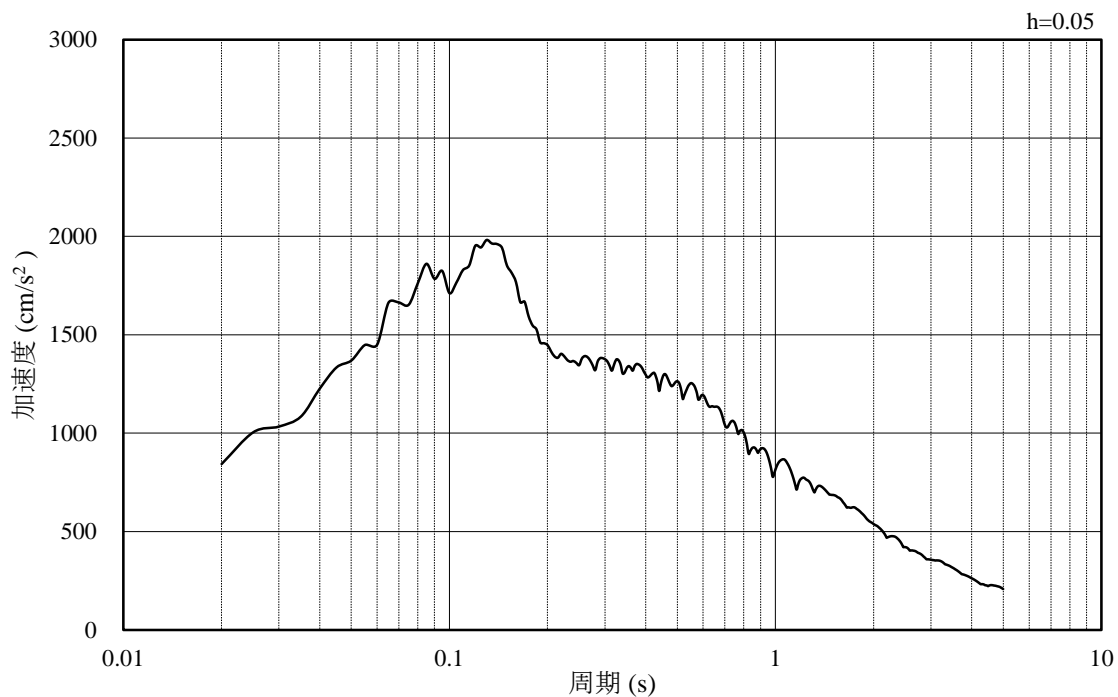
図 4-13 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - N 2 (E W) , EL-130m)

4.1.2 C-C断面の入力地震動

図4-14～図4-25にC-C断面の入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを示す。

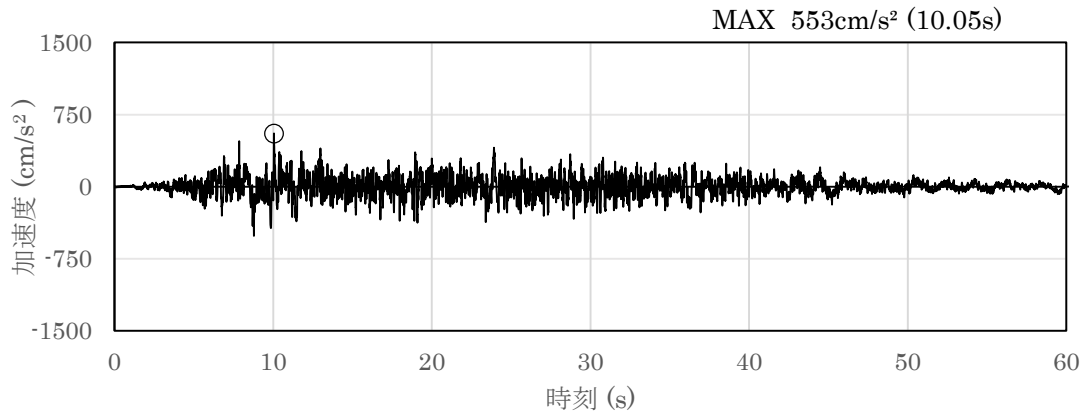


(a) 加速度時刻歴波形

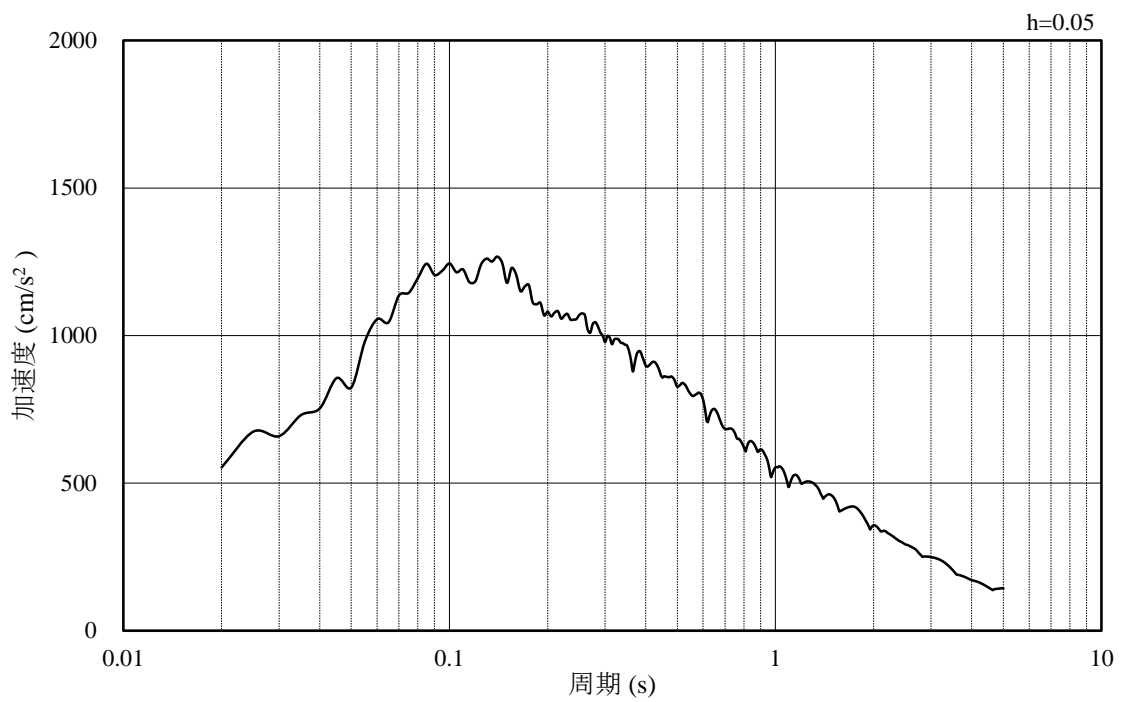


(b) 加速度応答スペクトル

図4-14 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S s - D, EL-35m)

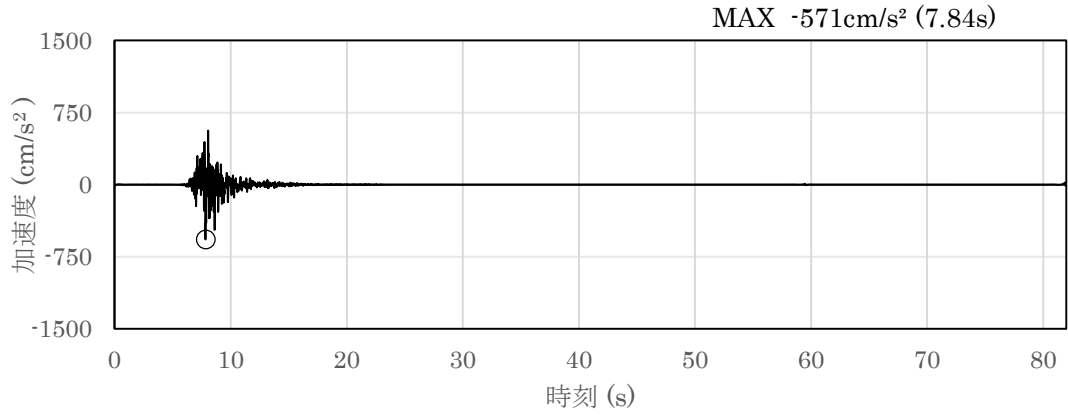


(a) 加速度時刻歴波形

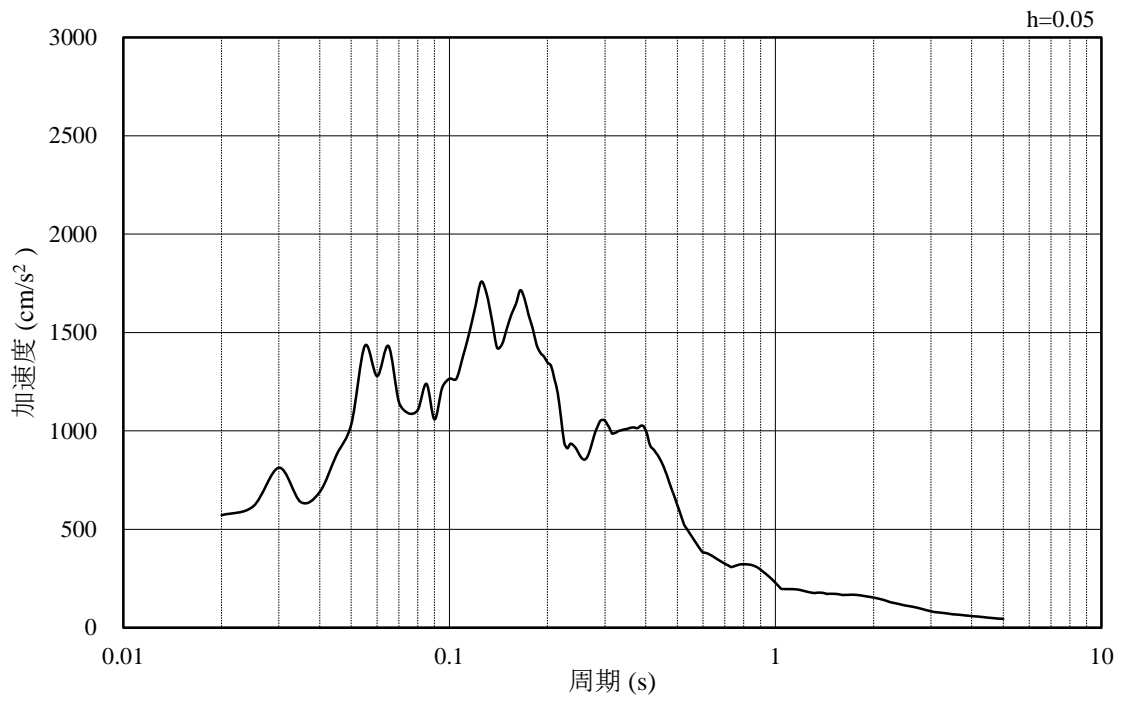


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-15 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - D, EL-35m)

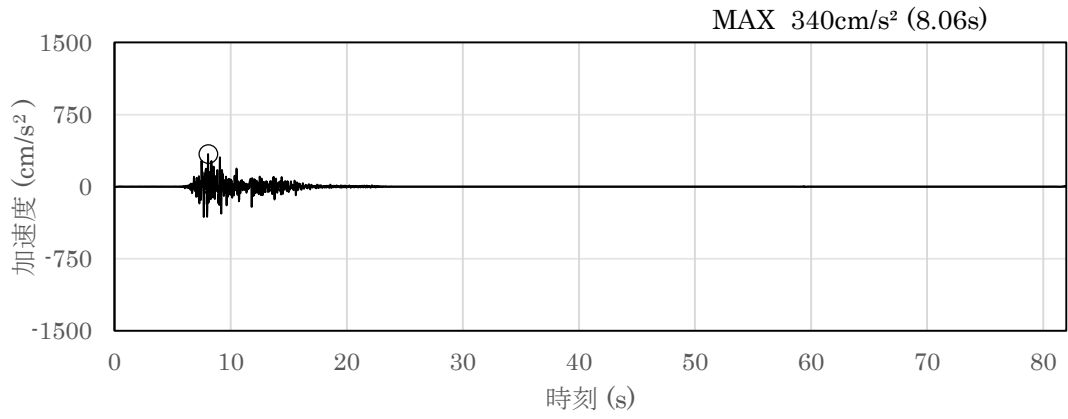


(a) 加速度時刻歴波形

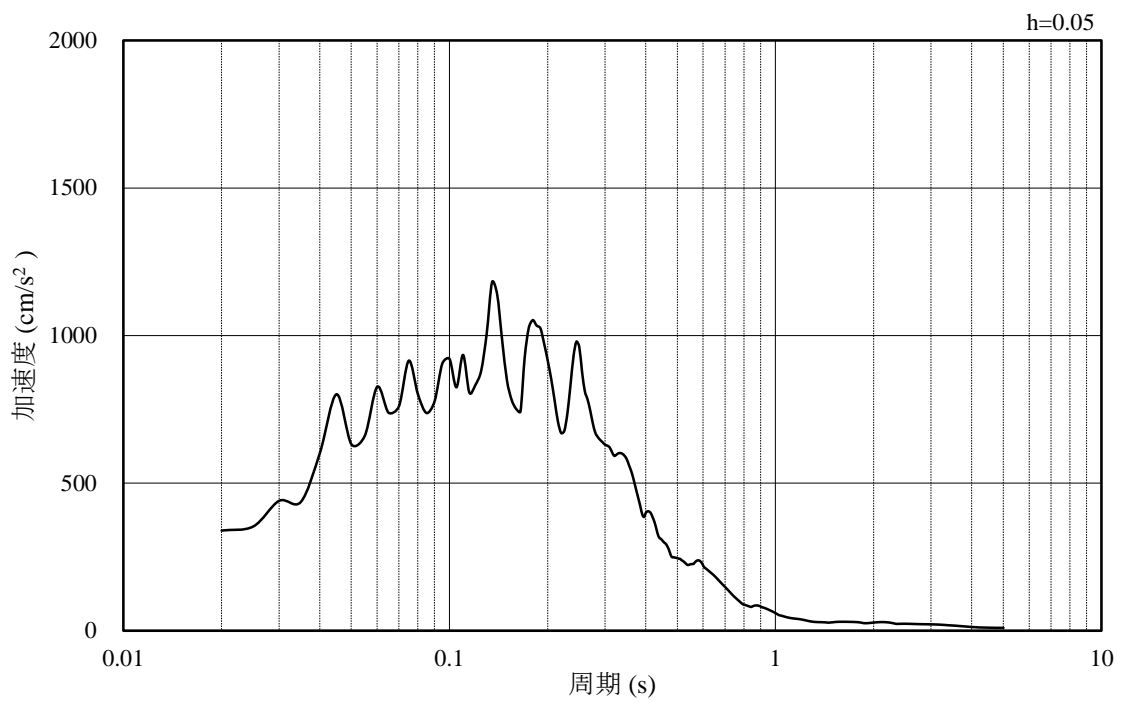


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-16 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - F 1 , EL-35m)

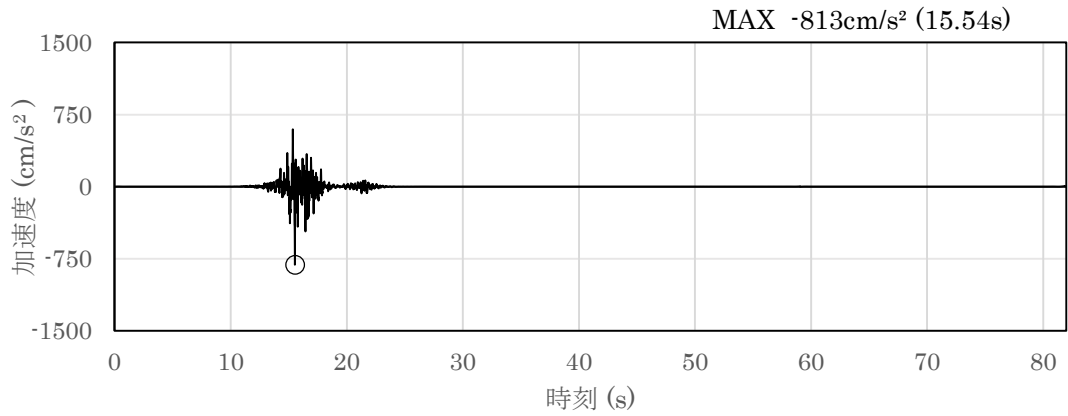


(a) 加速度時刻歴波形

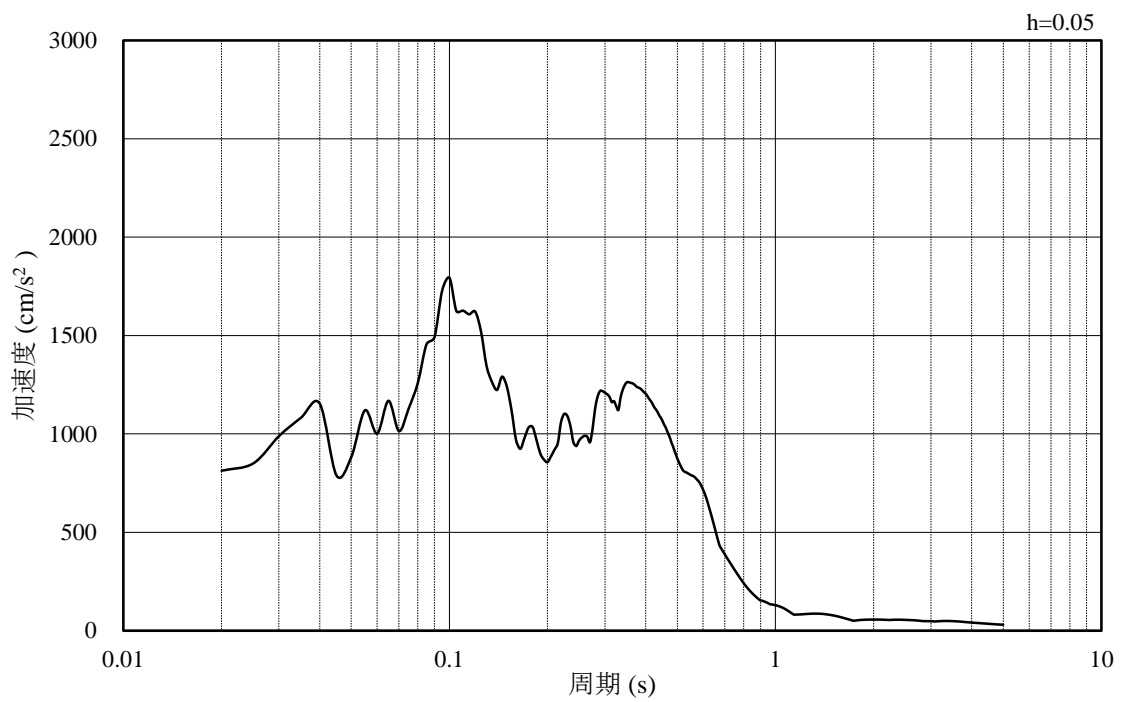


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-17 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - F 1, EL-35m)

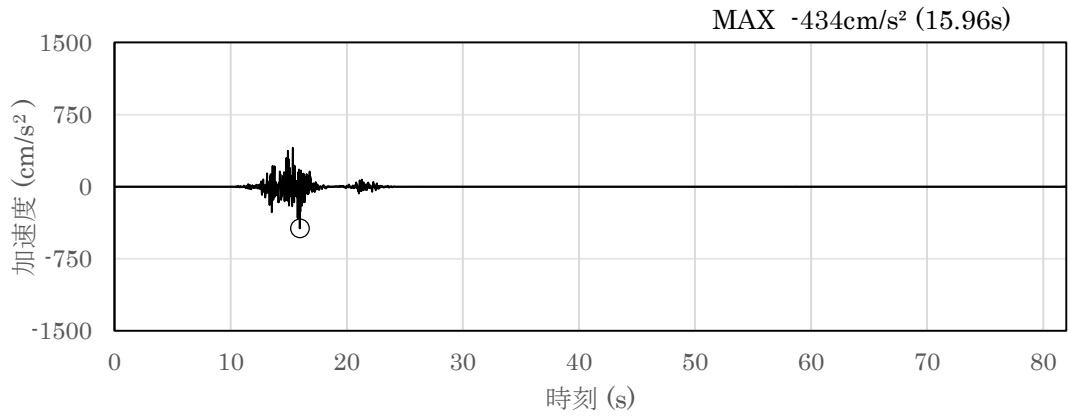


(a) 加速度時刻歴波形

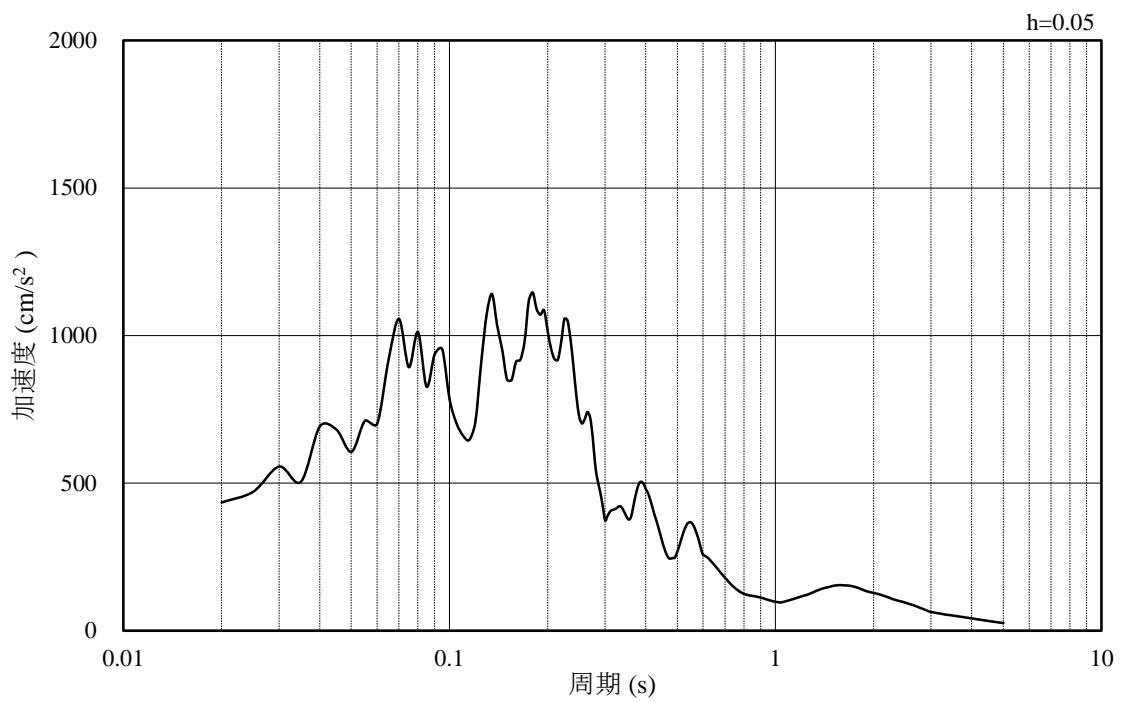


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-18 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - F 2 , EL-35m)

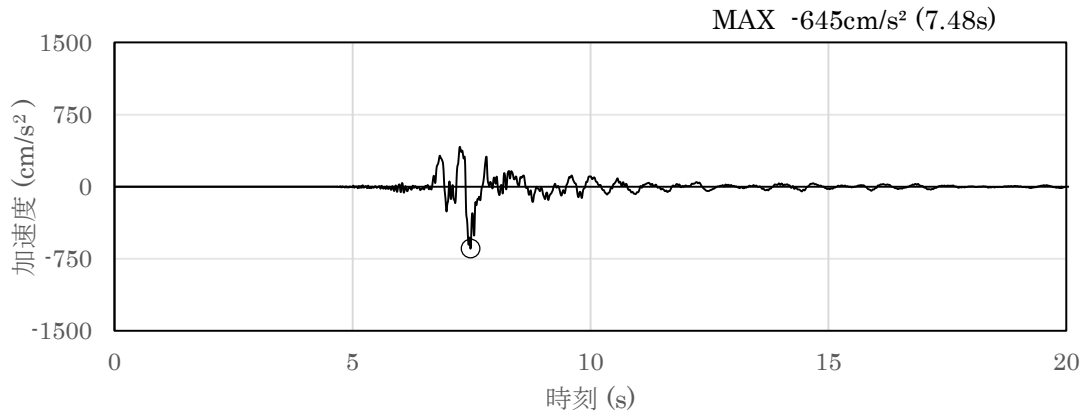


(a) 加速度時刻歴波形

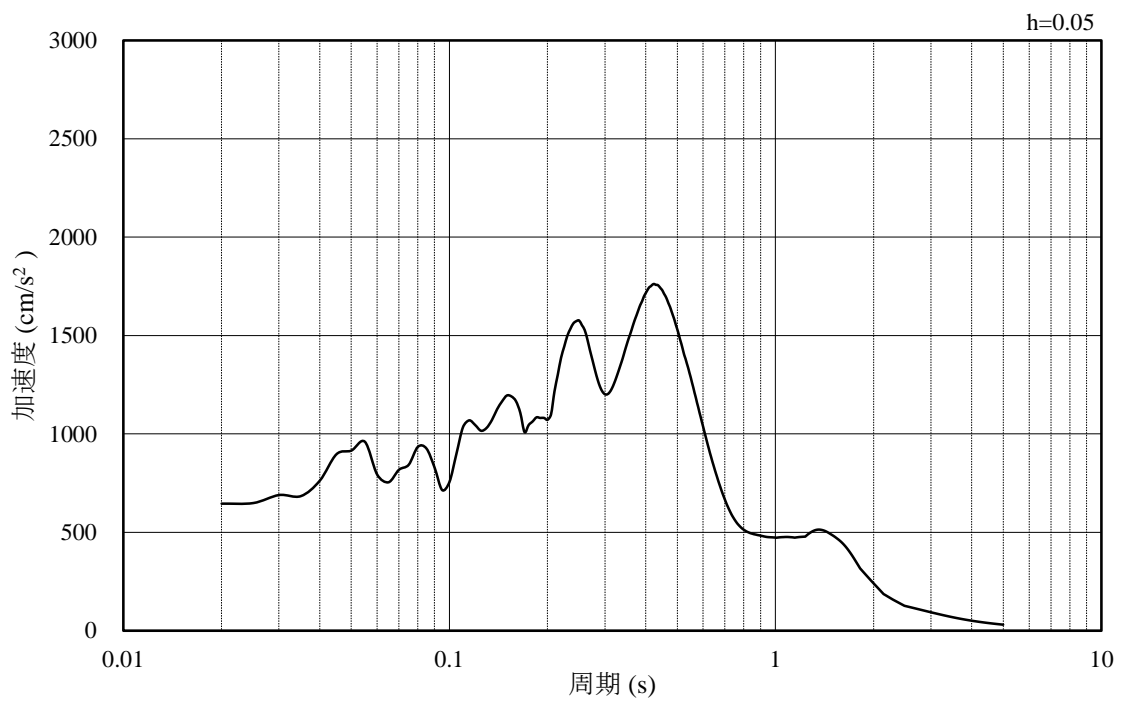


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-19 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - F 2, EL-35m)

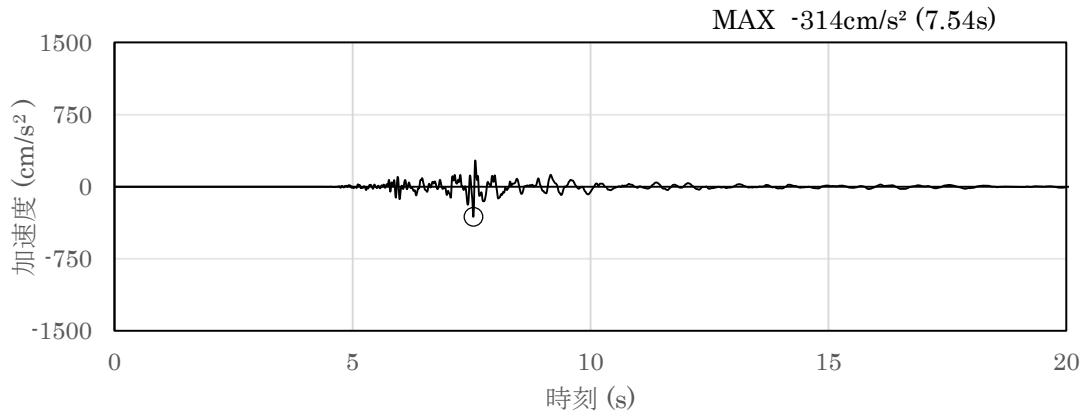


(a) 加速度時刻歴波形

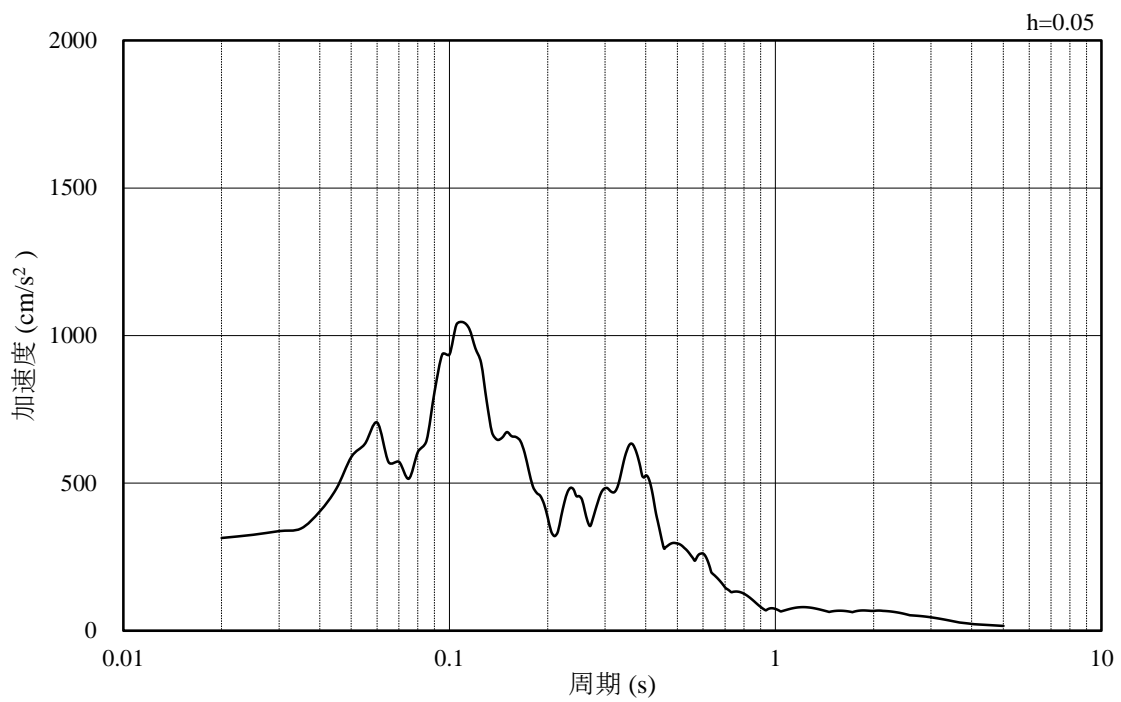


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-20 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - N 1 , EL-35m)

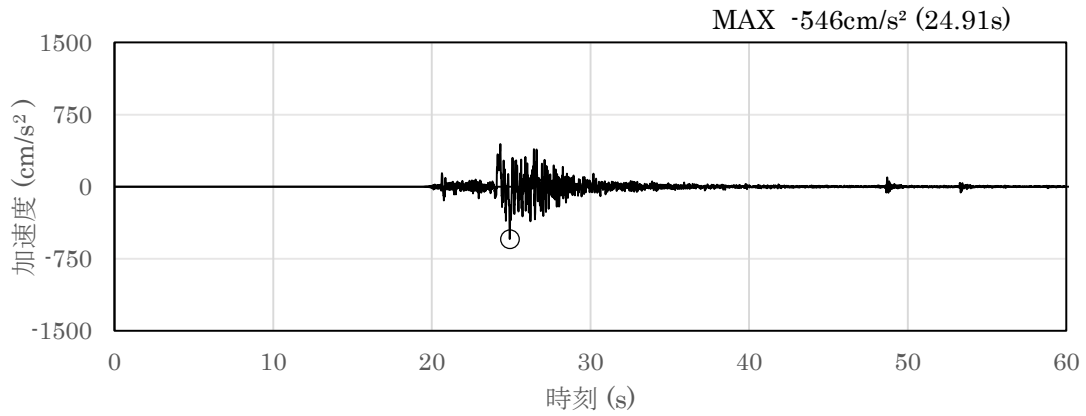


(a) 加速度時刻歴波形

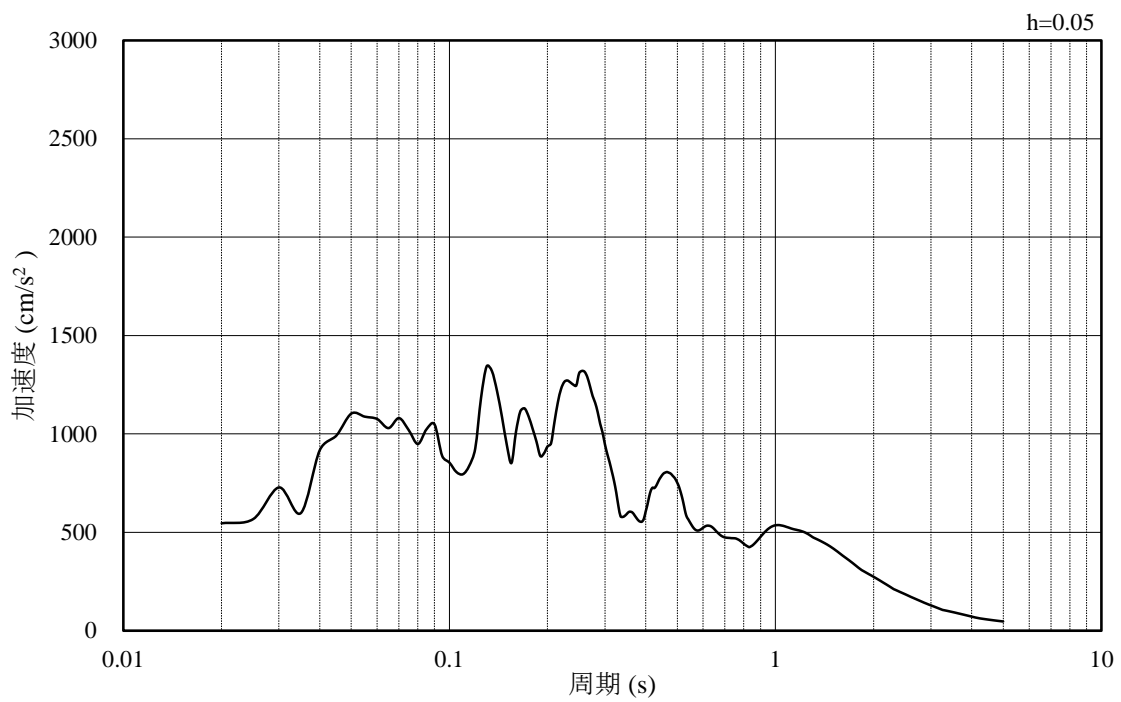


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-21 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - N 1, EL-35m)

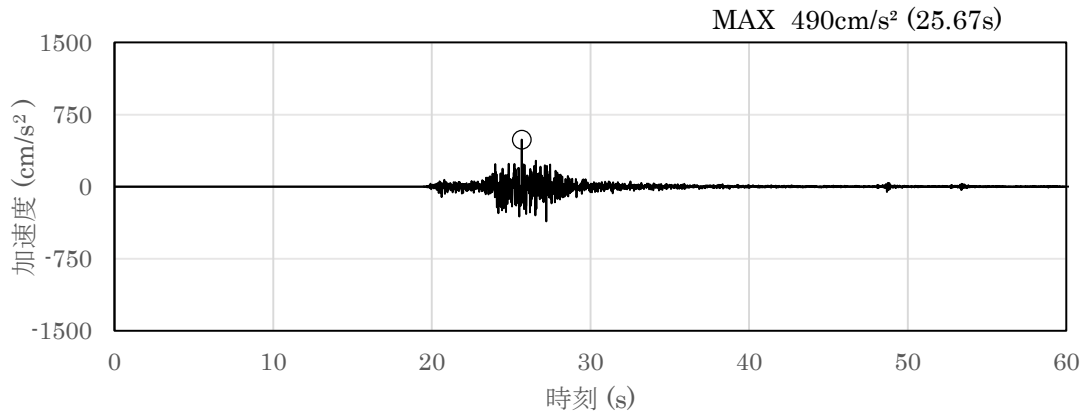


(a) 加速度時刻歴波形

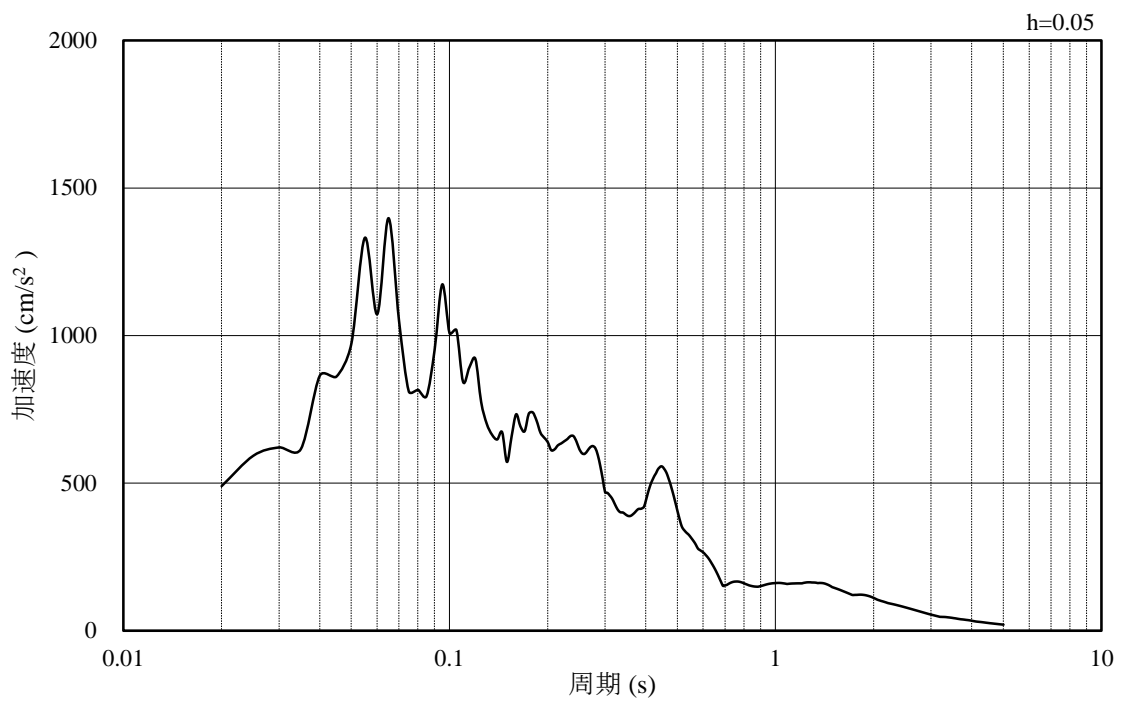


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-22 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S s - N 2 (N S) , EL-35m)

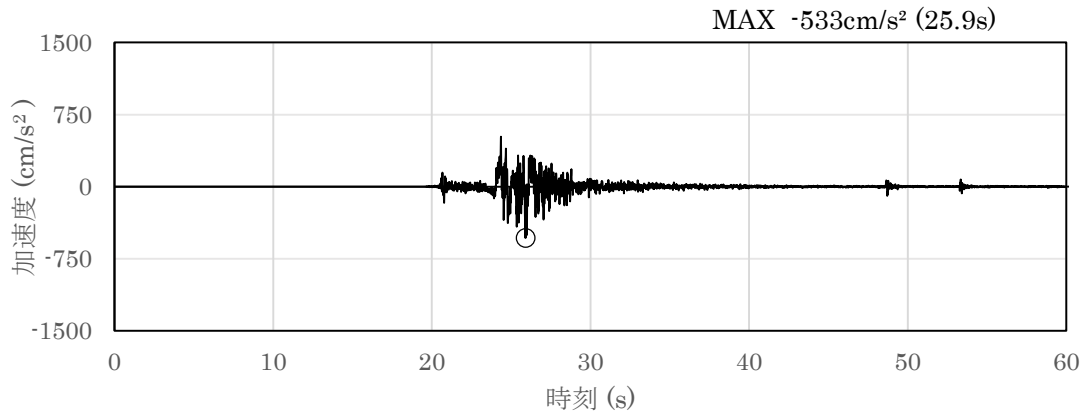


(a) 加速度時刻歴波形

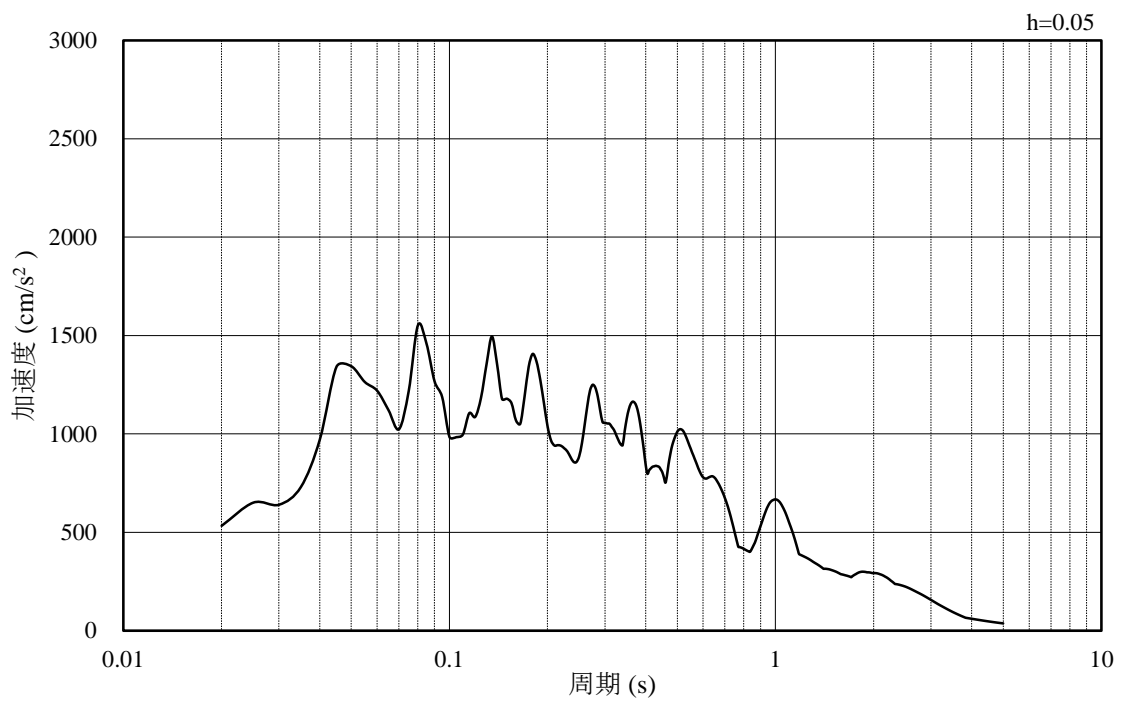


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-23 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - N 2 (N S) , EL-35m)

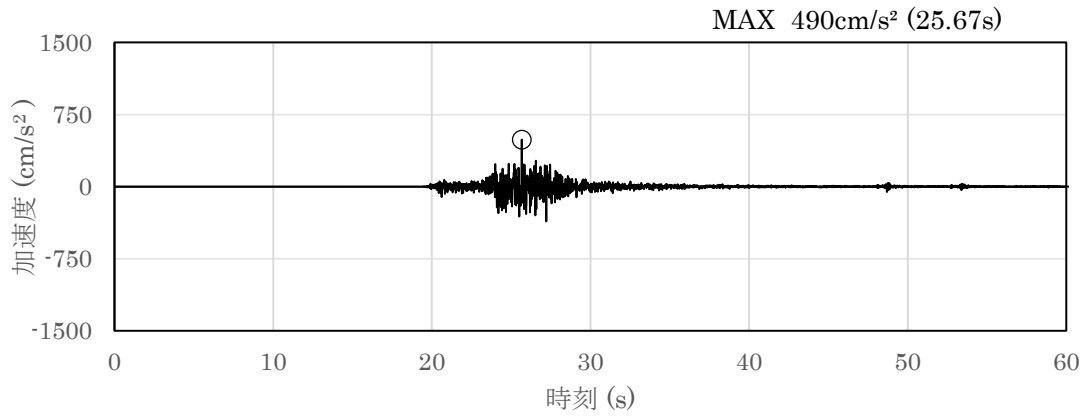


(a) 加速度時刻歴波形

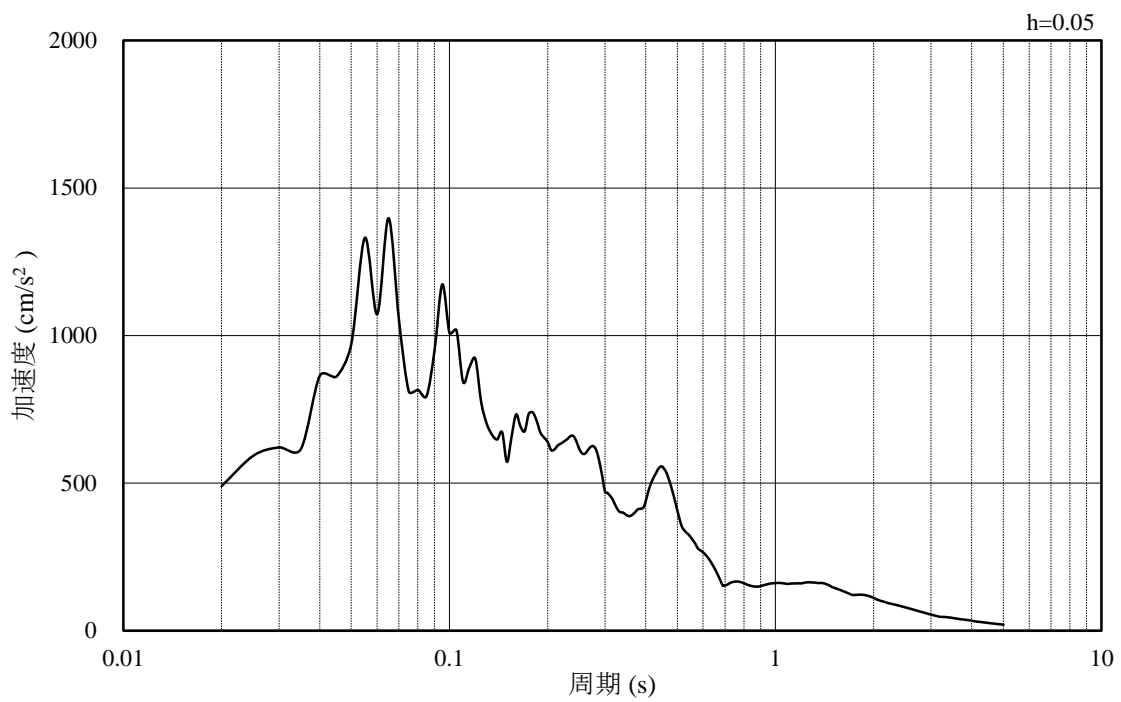


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-24 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - N 2 (E W), EL-35m)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 4-25 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - N 2 (E W), EL-35m)

4.2 許容限界の設定

屋外重要土木構造物の耐震安全性評価は、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」のうち「2. 屋外重要土木構造物の要求機能と要求機能に対する耐震評価内容」に示すとおり、各構造物の要求機能と要求機能に応じた許容限界を設定し照査を行う。

耐震安全性評価は、限界状態設計法を用いることとし、限界状態設計法については以下に詳述する。

4.2.1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

(1) A-A断面及びB-B断面

構造部材の曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界は、土木学会マニュアル2005に基づき、限界ひずみ（圧縮縁コンクリートひずみ1.0%）とする。

土木学会マニュアル2005では、曲げ・軸力系の破壊に対する限界状態は、コンクリートの圧縮縁のかぶりが剥落しないこととされている。圧縮縁コンクリートひずみ1.0%の状態は、かぶりコンクリートが剥落する前の状態であることが、屋外重要土木構造物を模したラーメン構造の破壊実験及び数値シミュレーション等の結果より確認されており、この状態を限界値とすることで構造全体としての安定性が確保できるとして設定されたものである。

また、貯水機能を損なわないことの確認においては、コンクリート標準示方書2002に基づき、コンクリートの圧縮ひずみ及び主筋ひずみについて、部材降伏に相当する限界ひずみ（コンクリート：2000 μ ，主鉄筋：1725 μ ）とする。

曲げ・軸力系の破壊に対する照査において、変形による照査に用いるひずみは地震応答解析により得られた応答値に安全係数（構造解析係数）1.2を乗ずることにより、曲げ・軸力系の破壊に対する安全余裕を見込んだ評価を実施する。

鉄筋コンクリートの曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界を表4-1に示す。

表 4-1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

確認項目	許容限界	
構造強度を有すること	限界ひずみ	圧縮縁コンクリートひずみ 1.0% (10000 μ) *1
貯水機能を損なわないこと		コンクリート : 2000 μ *2 主鉄筋 (SD345) : 1725 μ *2

注記*1 : $\gamma_i \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_R} < 1.0$

ここで、

- γ_i : 構造物係数 ($\gamma_i = 1.0$)
- ε_R : 限界ひずみ (圧縮縁コンクリートひずみ 10000 μ)
- ε_d : 照査用ひずみ ($\varepsilon_d = \gamma_a \cdot \varepsilon$)
- γ_a : 構造解析係数 ($\gamma_a = 1.2$)
- ε : 圧縮縁の発生ひずみ

*2 : $\gamma_i \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_R} < 1.0$

ここで、

- γ_i : 構造物係数 ($\gamma_i = 1.0$)
- ε_R : 限界ひずみ (圧縮ひずみ 2000 μ , 主筋ひずみ 1750 μ)
- ε_d : 照査用ひずみ ($\varepsilon_d = \gamma_a \cdot \varepsilon$)
- γ_a : 構造解析係数 ($\gamma_a = 1.2$)
- ε : 圧縮縁の発生ひずみ

(2) C-C断面

構造強度を有することの確認及び貯水機能を損なわないことの確認における構造部材の曲げ・軸力系の破壊及びせん断破壊に対する許容限界は、短期許容応力度とする。コンクリート及び鉄筋の許容応力度を表4-2及び表4-3に示す。

なお、短期許容応力度により照査を行うため、構造強度を有することの確認と貯水機能を損なわないことの確認における許容限界は同一となる。したがって、全部材に対して構造強度を有することを確認することで、貯水機能を損なわないことの確認も同時に行う。

表4-2 コンクリートの許容応力度及び短期許容応力度

設計基準強度	許容応力度 (N/mm ²)		短期許容応力度*
			(N/mm ²)
f'ck = 24.0 (N/mm ²)	許容曲げ圧縮応力度 σ'ca	9.0	13.5
	許容せん断応力度 τa1	0.45	0.675

注記*：コンクリート標準示方書2002により地震時の割り増し係数として1.5を考慮する。

表4-3 鉄筋の許容応力度及び短期許容応力度

鉄筋の種類	許容応力度 (N/mm ²)		短期許容応力度*
			(N/mm ²)
SD345	許容引張応力度 σsa	196	294

注記*：コンクリート標準示方書2002により地震時の割り増し係数として1.5を考慮する。

4.2.2 せん断破壊に対する許容限界

(1) A-A断面及びB-B断面

構造部材のせん断破壊に対する許容限界は、棒部材式で求まるせん断耐力とする。

棒部材式

$$V_{y d} = V_{c d} + V_{s d}$$

ここで、 $V_{y d}$: せん断耐力

$V_{c d}$: コンクリートが分担するせん断耐力

$V_{s d}$: せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力

$$V_{c d} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{v c d} \cdot b_w \cdot d / \gamma_{b c}$$

$f_{v c d} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{c d}}$ ただし、 $f_{v c d} > 0.72 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ となる場合は

$$f_{v c d} = 0.72 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$\beta_d = \sqrt[4]{1/d}$ (d [m]) ただし、 $\beta_d > 1.5$ となる場合は $\beta_d = 1.5$

$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_v}$ ただし、 $\beta_p > 1.5$ となる場合は $\beta_p = 1.5$

$\beta_n = 1 + M_o / M_d$ ($N'_d \geq 0$) ただし、 $\beta_n > 2.0$ となる場合は $\beta_n = 2.0$
 $= 1 + 2M_o / M_d$ ($N'_d < 0$)

$\beta_a = 0.75 + \frac{1.4}{a/d}$ ただし、 $\beta_a < 1.0$ となる場合は $\beta_a = 1.0$

ここで、

$f'_{c d}$: コンクリート圧縮強度の設計用値 (N/mm²) で設計基準強度
 $f'_{c k}$

を材料係数 $\gamma_{m c}$ 除したもの

p_v : 引張鉄筋比 $p_v = A_s / (b_w \cdot d)$

A_s : 引張側鋼材の断面積

b_w : 部材の有効幅

d : 部材の有効高さ

N'_d : 設計軸圧縮力

M_d : 設計曲げモーメント

M_o : M_d に対する引張縁において、軸力方向によって発生する
 応力を打ち消すのに必要なモーメント (デコンプレッション
 モーメント) $M_o = N'_d \cdot D / 6$

- D : 断面高さ
 a / d : せん断スパン比
 γ_{bc} : 部材係数

$$V_{sd} = \{ A_w f_{wyd} (\sin \alpha + \cos \alpha) / s \} z / \gamma_{bs}$$

ここで、

- A_w : 区間 s におけるせん断補強鉄筋の総断面積
 f_{wyd} : せん断補強鉄筋の降伏強度を γ_{ms} で除したもので、400N/mm² 以下とする。ただし、コンクリート圧縮強度の特性値 f'_{ck} が 60N/mm² 以上のときは 800N/mm² 以下とする。
 α : せん断補強鉄筋と部材軸のなす角度
 s : せん断補強鉄筋の配置間隔
 z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で d / 1.15 とする。
 γ_{bs} : 部材係数

また、土木学会マニュアル 2005 におけるせん断耐力式による評価においては、表 4-4 に示すとおり、複数の安全係数が見込まれていることから、せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施することが可能である。

表 4-4 せん断耐力式による評価において考慮している安全係数

安全係数			せん断照査		内容
			応答値算定	限界値算定	
材料係数	コンクリート	$\gamma_{m c}$	1.0	1.3	コンクリートの特性値を低減
	鉄筋	$\gamma_{m s}$	1.0	1.0	—
部材係数*	コンクリート	$\gamma_{b c}$	—	1.3	せん断耐力（コンクリート負担分）を低減
	鉄筋	$\gamma_{b s}$	—	1.1	せん断耐力（鉄筋負担分）を低減
構造解析係数		γ_a	1.05	—	応答値（断面力）の割り増し

注記*：土木学会マニュアル 2005 では、部材係数 $\gamma_b = \gamma_{b 1} \cdot \gamma_{b 2}$ とされている。

$$\gamma_{b 1} = \begin{cases} 1.3 & (\text{コンクリート}) \\ 1.1 & (\text{鉄筋}) \end{cases}$$

$$\gamma_{b 2} = \begin{cases} 1.0 & (R \leq 0.01) \\ \frac{100R + 2}{3} & (0.01 < R \leq 0.025) \\ 1.5 & (R > 0.025) \end{cases}$$

ここで、R：層間変形角

$\gamma_{b 2}$ は層間変形角の値によらず、部材が降伏していない状態であれば、

$\gamma_{b 2} = 1.0$ としてよいとされている。

(2) C-C断面

構造部材（鉄筋コンクリート）のせん断破壊に対する許容限界は、表 4-2 及び表 4-3 に示すコンクリートと鉄筋の短期許容応力度から算定した短期許容せん断力とする。

$$V_a = V_c + V_s$$

ここで、

- V_a : 短期許容せん断力
- V_c : コンクリートが分担するせん断力
- V_s : せん断補強鉄筋が分担するせん断力

$$V_c = \frac{1}{2} \tau_{a1} \cdot b_w \cdot z$$

ここで、

- τ_{a1} : コンクリートの短期許容せん断応力度
- b_w : 部材の有効幅
- d : 部材の有効高さ
- z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離
で $d/1.15$ とする。

ただし、せん断補強筋を有さない場合は、 $V_c = \tau_{a1} \cdot b_w \cdot z$

$$V_s = \{ A_w \sigma'_{sa} (\sin \alpha + \cos \alpha) / s \} z$$

ここで、

- A_w : 区間 s におけるせん断補強筋の総断面積
- σ'_{sa} : 鉄筋の短期許容引張応力度
- α : せん断補強鉄筋と部材軸のなす角度
- s : せん断補強鉄筋の配置間隔

ただし、せん断補強筋を有さない場合は、 $V_s = 0$

4.2.3 基礎地盤の支持機能に対する許容限界

基礎地盤に発生する接地圧に対する許容限界は、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき、岩盤の極限支持力度とする。なお、低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の基礎地盤には一部MMRが存在するが、MMRの支圧強度は岩盤の限界支持力より十分に大きい（ $f'_a = 18.0\text{N/mm}^2$ ）ことから、評価を省略する。

基礎地盤の支持性能に対する許容限界を表4-5に示す。

表4-5 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

評価項目	基礎地盤	許容限界 (N/mm^2)
極限支持力度	C_M 級又は C_H 級岩盤	9.8

4.3 評価方法

4.3.1 C-C断面

C-C断面においては、鉛直部材及び水平部材を4辺固定版とした際に発生する断面力を用いた照査を実施する。4辺固定版は、線形シェル要素によりモデル化する。C-C断面の4辺固定版の解析モデル概念図を図4-26に示す。

4辺固定版に入力する荷重については、地震応答解析における応答値（土圧及び慣性力）とし、土圧は地震応答解析モデルの構造物（側壁）-地盤間に発生する直応力、慣性力は側壁を構成する各節点に発生する応答加速度に自重を乗じたものとする。鉛直部材については、地上部側壁は土圧が作用しないことから、地下部側壁を選定する。また、西側壁には埋戻コンクリートが隣接しており、掘削面と隣接している東側壁より作用する土圧が大きいことから対象は西側壁とする。水平部材については、部材厚の薄い頂版を選定する。

4辺固定版の照査位置概念図を図4-27に示す。照査位置については、はり要素と同様に、曲げ・軸力系の破壊に対する照査では解析モデル端部までを照査範囲とし、せん断破壊に対する照査では部材端部（支承前面）を照査範囲とする。

4辺固定版による評価については、解析コード「TDA P III」を使用する。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

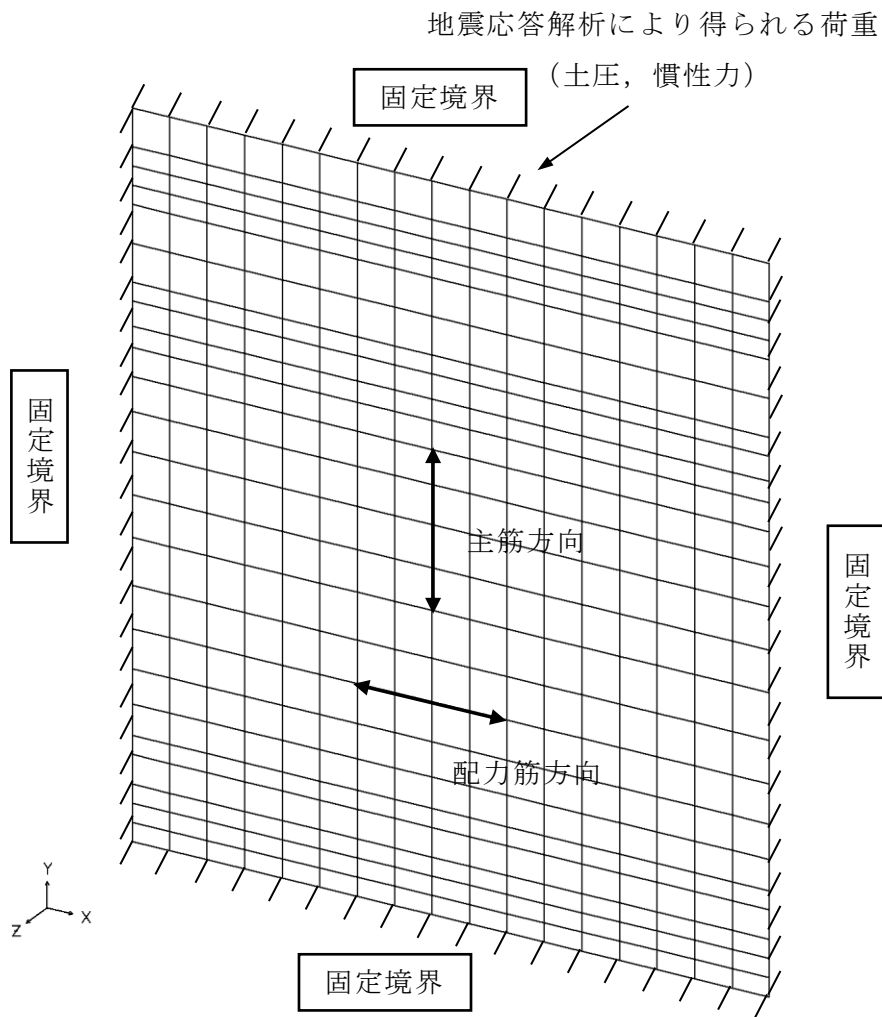


図 4-26 4 辺固定版の解析モデル概念図 (4 辺固定版)

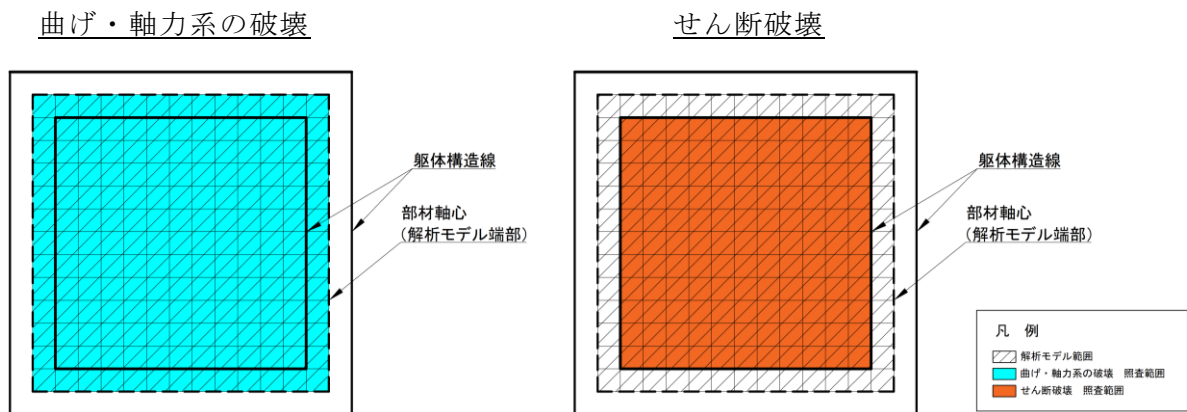


図 4-27 4 辺固定版の照査位置概念図

5. 評価結果

5.1 地震応答解析結果

地震応答解析結果として「ひずみの時刻歴波形」、断面力に対し照査を行っている項目のうち最も厳しい照査値に対する「断面力分布」、曲げ・軸力系の破壊に対する照査及びせん断破壊に対する照査で最大照査値を示すケースの地盤の「最大せん断ひずみ分布」を記載する。なお、断面力分布は単位奥行きあたりの断面力を図示する。

5.1.1 解析ケース

(1) A-A断面及びB-B断面

耐震評価における解析ケースについては、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」のうち「10. 屋外重要土木構造物等の耐震評価における追加解析ケースの選定」に基づき設定する。

耐震評価においては、基準地震動 S_s 全波（6波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（6波）を加えた全12波に対し、基本ケース（ケース①）を実施する。基本ケースにおいて、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び地盤の支持力照査の照査項目ごとに照査値が0.5を超える照査項目に対して、最も厳しい地震動を用いて、解析ケース②及び③を実施する。すべての照査項目の照査値がいずれも0.5以下の場合、照査値が最も厳しくなる地震動を用いて、解析ケース②及び③を実施する。

解析ケース②及び③を実施する地震動を表5-1に示す。

上記実施ケースの結果を踏まえ、照査値に十分な裕度を有することから、追加解析を実施しない。

表5-1 解析ケース②及び③を実施する地震動

断面	解析ケース②及び③ を実施する地震動	備考
A-A断面	$S_s - D$ (--)	せん断破壊から選定
B-B断面	$S_s - N1$ (++)	曲げ・軸力系の破壊から選定
	$S_s - D$ (+-)	せん断破壊から選定

(2) C-C断面

a. 鉛直部材

鉛直部材においては西側壁を対象に、地震応答解析結果から4辺固定版に作用させる荷重を選定する。4辺固定版に作用させる荷重は土圧及び慣性力であるため、地震応答解析において鉛直部材の層間変位が最大となる時刻における荷重が構造物にとって最も厳しくなると考えられる。なお、西側壁が東側（右向き）に変形する場合には隣接する埋戻コンクリートから離れることとなり、土圧（直応力）が作用しないことから、西側（左向き）の変形を対象とする。

評価対象部材を図5-1に示す。西側壁のうち、上側に位置する壁を選定した理由については後述する。

基本ケース（解析ケース①）の各地震動の層間変位最大時刻における土圧分布図を図5-2に、総土圧の一覧表を表5-2に示す。なお、側壁の慣性力については最大でも57.3kN程度であり、耐震評価に与える影響が土圧に対して小さいことから、作用荷重の選定においては土圧に着目する。

土圧分布から西側壁【下】に対して西側壁【上】に作用する土圧が大きいことから、西側壁【上】を評価対象とする。

解析ケース①においては、総土圧が最大となる $S_s - D (+)$ を選定する。また、地盤物性のばらつきの影響を確認するために、 $S_s - D (+)$ の解析ケース①と解析ケース②及び③の層間変位最大時刻における土圧分布及び総土圧を比較する。図5-3及び表5-3に示すとおり、最大土圧及び総土圧が最大となるのは解析ケース③である。

以上より、鉛直部材においては西側壁【上】を対象とし、解析ケース③の $S_s - D (+)$ にて層間変位が最大となる時刻における荷重を4辺固定版に作用させることとする。

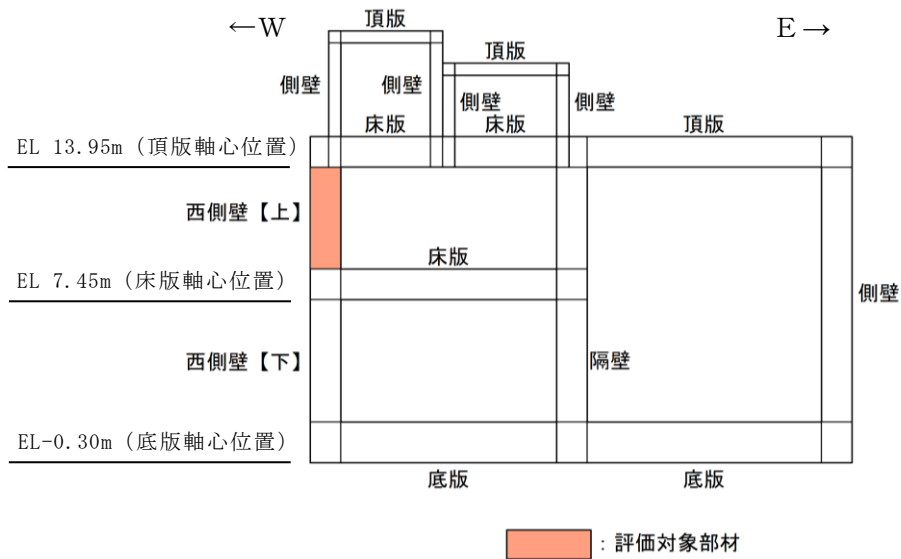
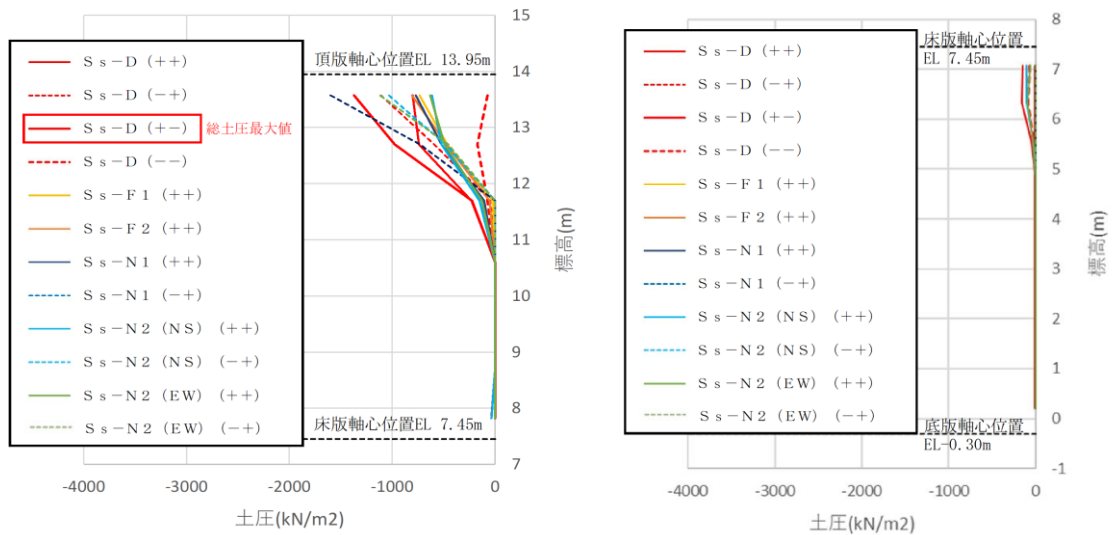


図 5-1 鉛直部材評価対象部材



西側壁【上】

西側壁【下】

図 5-2 側壁作用する土圧分布図 (解析ケース①)

表 5-2 側壁に作用する総土圧 (解析ケース①)

地震動		総土圧 (kN)	地震動		総土圧 (kN)
S s - D	++	1802	S s - N 1	++	1399
	-+	1745		-+	2327
	+ -	2567	S s - N 2 (NS)	++	1314
	--	315		-+	1515
S s - F 1	++	1218	S s - N 2 (EW)	++	1244
S s - F 2	++	1329		-+	1572

注：ハッチングは最大値を示す。

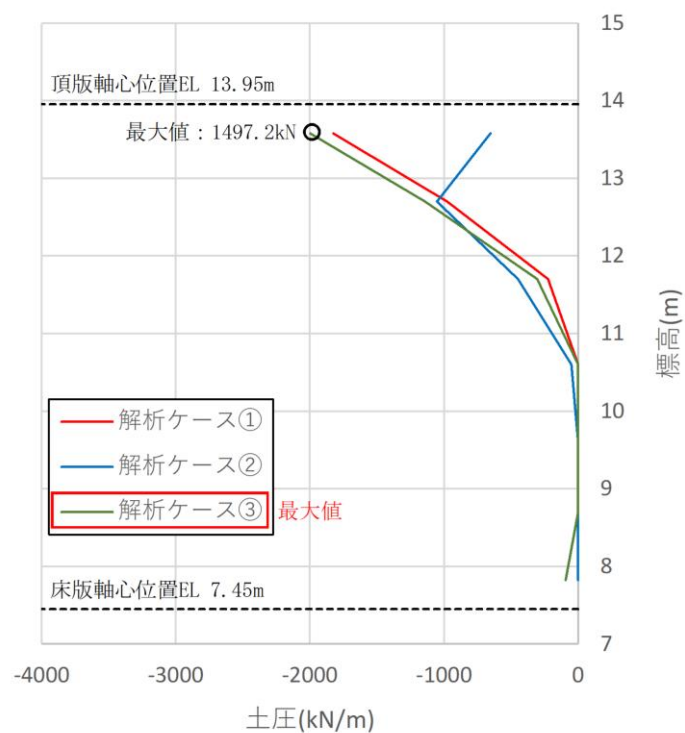


図 5-3 側壁に作用する土圧分布図の比較 (S s - D (+ -))

表 5-3 側壁の層間変位最大時刻における総土圧 (S s - D (+ -))

解析ケース	総土圧 (kN)
ケース①	2567
ケース②	2048
ケース③	3010

注：ハッチングは最大値を示す。

b. 水平部材

水平部材においては頂版を対象に，地震応答解析結果から4辺固定版に作用させる荷重を選定する。4辺固定版に作用させる荷重は慣性力であるため，地震応答解析において水平部材の鉛直下向きの加速度が最大となる時刻における荷重が構造物にとって最も厳しくなると考えられる。評価対象部材を図5-4に示す。

基本ケース（解析ケース①）の各地震動の鉛直加速度最大時刻における加速度分布図を図5-5に，最大加速度の一覧表を表5-4に示す。解析ケース①においては，鉛直下向きの加速度が最大となるS_s-N2（EW）（-+）を選定する。

また，地盤物性のばらつきの影響を確認するために，解析ケース①と解析ケース②及び③の鉛直下向きの加速度最大時刻における加速度分布図及び最大加速度を比較する。図5-6及び表5-5に示すとおり，鉛直下向きの加速度が最大となるのは解析ケース③である。

以上より，鉛直下向きの最大応答加速度を保守的に部材全体に作用させることとする。

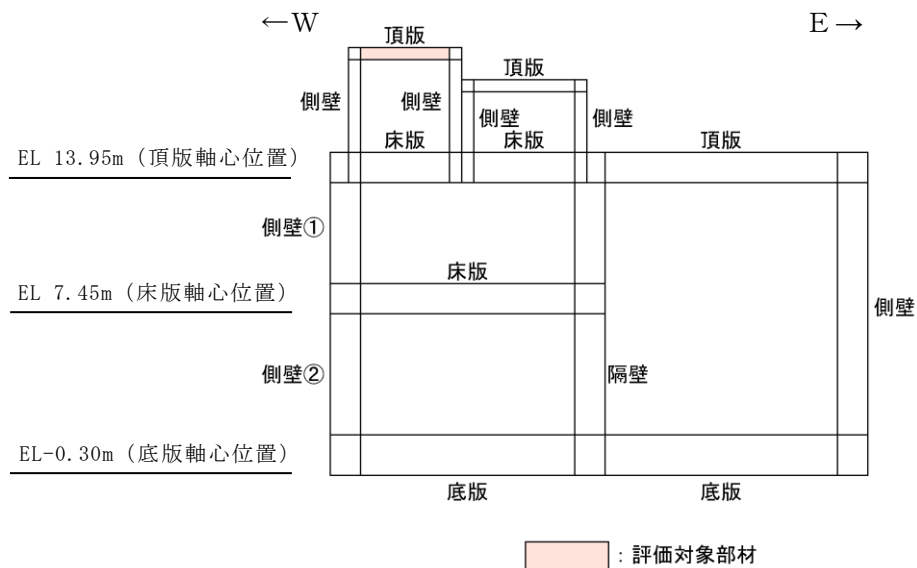


図5-4 水平部材評価対象部材

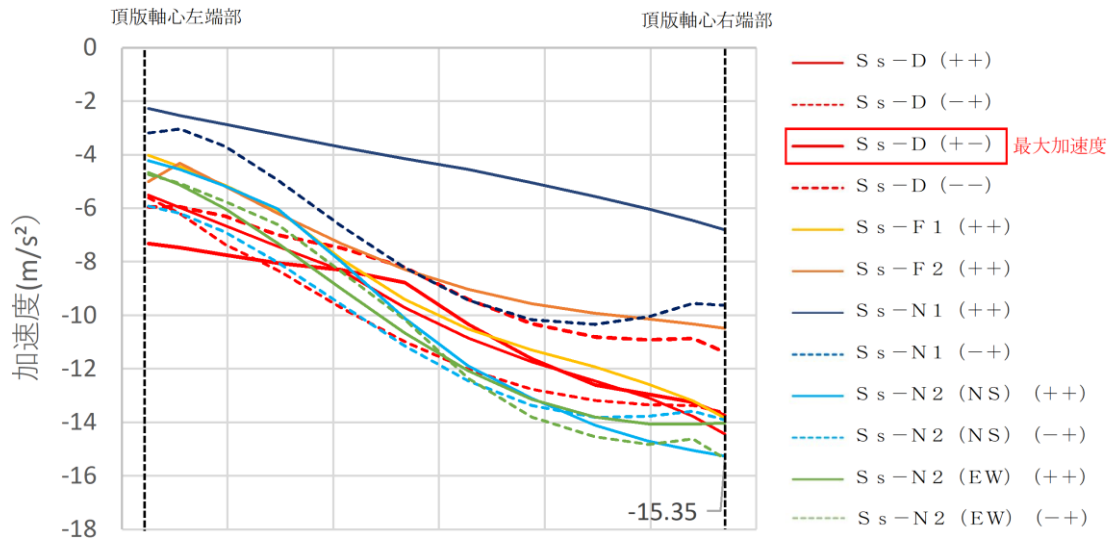


図 5-5 頂版に作用する加速度分布図 (解析ケース①)

表 5-4 頂版に作用する最大加速度 (解析ケース①)

地震動		最大加速度 (m/s^2)	地震動		最大加速度 (m/s^2)
S s - D	++	-14.44	S s - N 1	++	-6.80
	-+	-13.64		-+	-10.34
	+-	-13.75	S s - N 2 (NS)	++	-15.25
	--	-11.37		-+	-13.90
S s - F 1	++	-13.84	S s - N 2 (EW)	++	-14.07
S s - F 2	++	-10.48		-+	-15.35

注：ハッチングは最大値を示す。

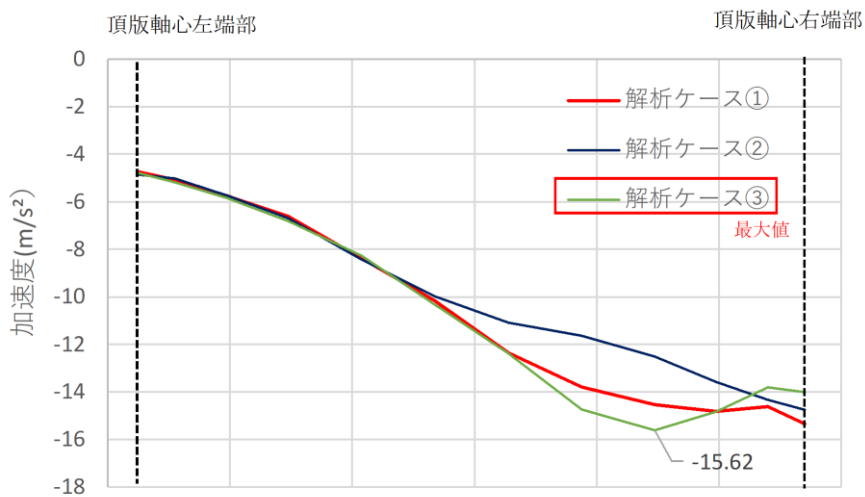


図 5-6 頂版に作用する加速度分布図の比較 (S s - N 2 (E W) (-+))

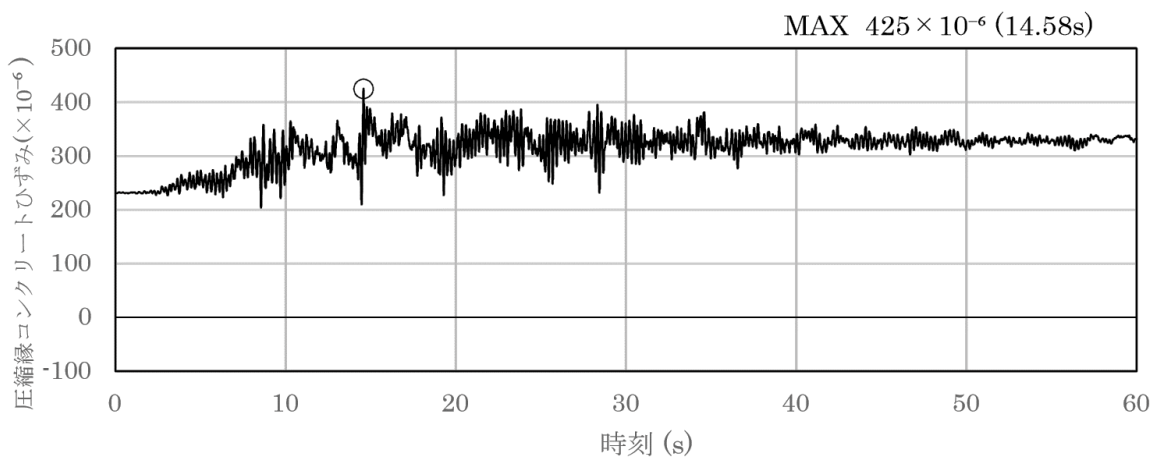
表 5-5 頂版に作用する最大加速度 (S s - N 2 (E W) (-+))

解析ケース	最大加速度 (m/s ²)
ケース①	-15.35
ケース②	-14.76
ケース③	-15.62

注：ハッチングは最大値を示す。

5.1.2 ひずみの時刻歴波形（A-A断面及びB-B断面）

曲げ・軸力系の破壊に対する照査において、最も厳しい照査値となる解析ケースの照査時刻における時刻歴波形を図5-7～図5-9に示す。



(圧縮を正で示す。)

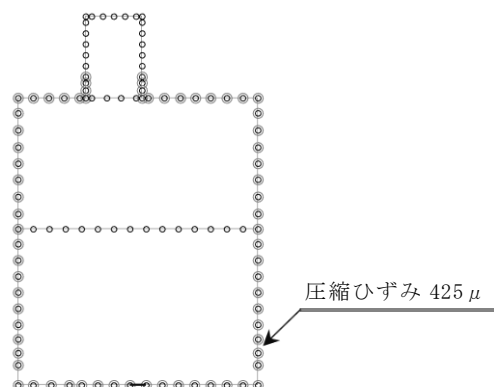
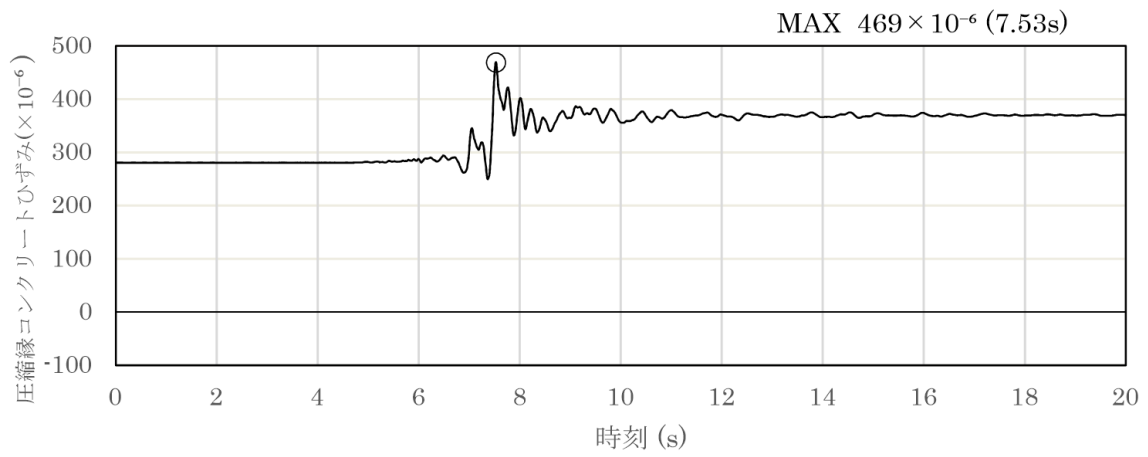


図5-7 曲げ・軸力系の破壊に対する照査が最も厳しくなるケースの時刻歴波形
(全応力解析) (A-A断面, 解析ケース①, S s - D (+ -))



(圧縮を正で示す。)

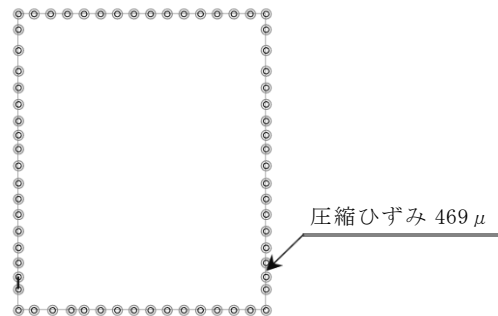


図 5-8 曲げ・軸力系の破壊に対する照査が最も厳しくなるケースの時刻歴波形 (全応力解析) (B-B断面, コンクリート, 解析ケース③, S_s-N1 (++))

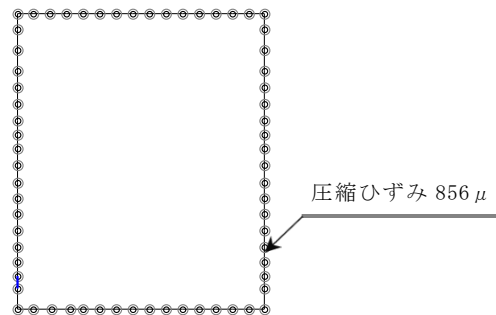
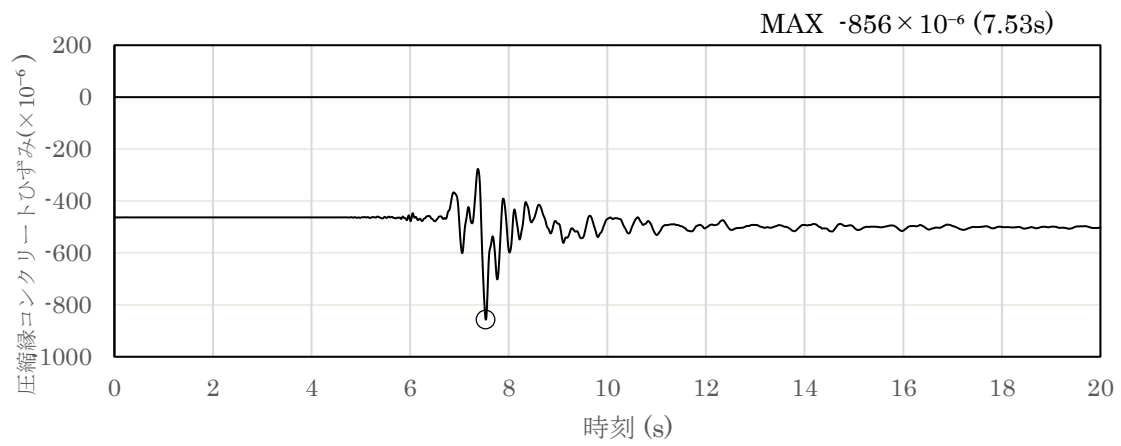
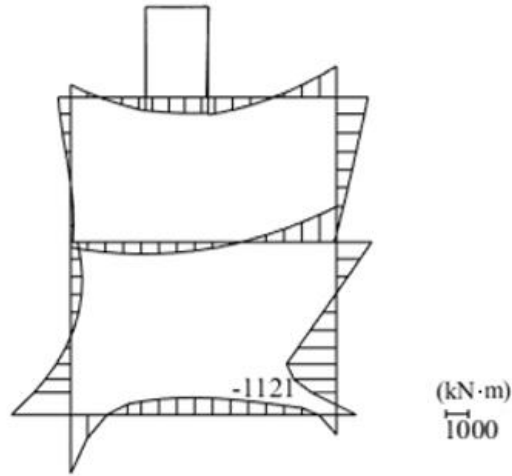


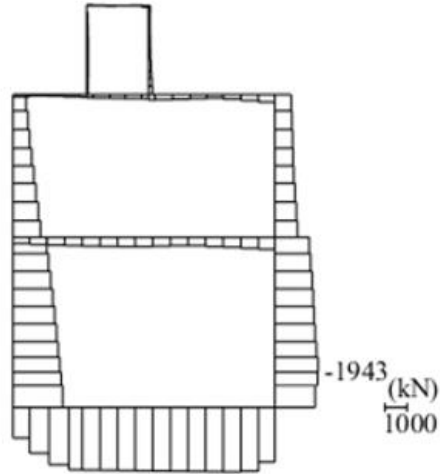
図 5-9 曲げ・軸力系の破壊に対する照査が最も厳しくなるケースの時刻歴波形
 (全応力解析) (B-B断面, 主筋, 解析ケース③, S_s-N1(++))

5.1.3 断面力分布（せん断破壊に対する照査，A－A断面及びB－B断面）

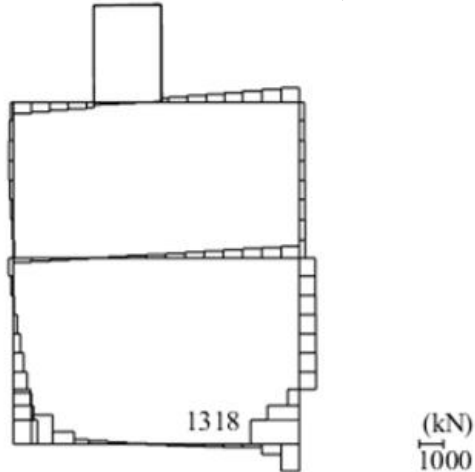
せん断破壊に対する照査において，最も厳しい照査値となる解析ケースの照査時刻における断面力分布図（曲げモーメント，軸力，せん断力）を図5－10及び図5－11示す。



数值：評価位置における断面力
 (a) 曲げモーメント (kN・m)

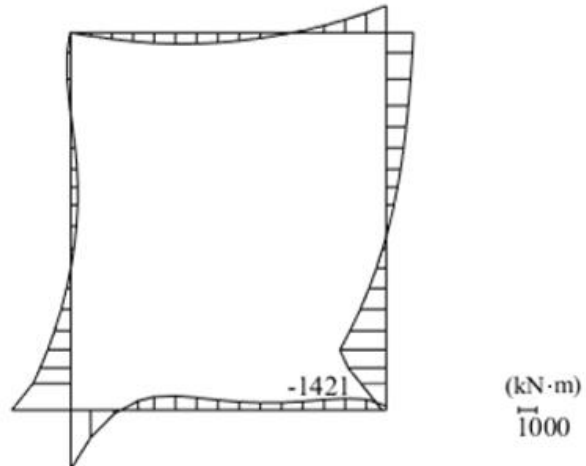


数值：評価位置における断面力
 (b) 軸力 (kN) (+：引張，-：圧縮)

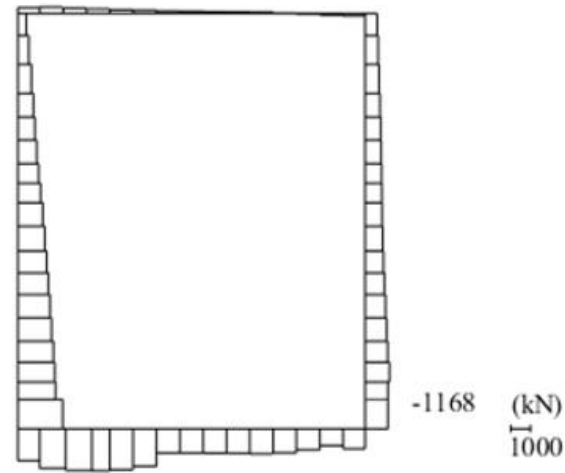


数值：評価位置における断面力
 (c) せん断力 (kN)

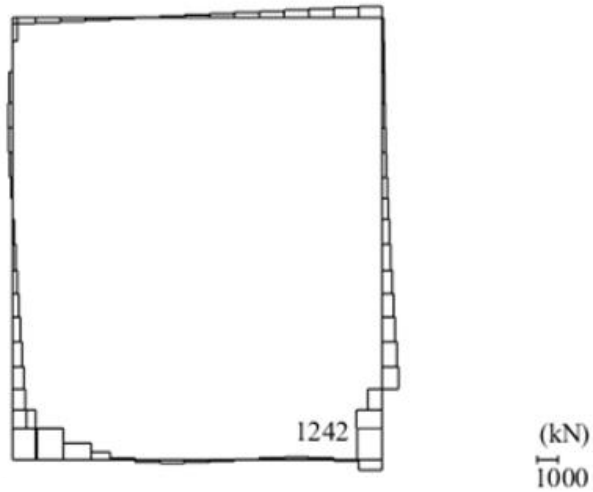
図 5-10 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力図 (A-A断面)
 (解析ケース①, S s - D (---), t=8.79s)



数值：評価位置における断面力
 (a) 曲げモーメント (kN・m)



数值：評価位置における断面力
 (b) 軸力 (kN) (+ : 引張, - : 圧縮)



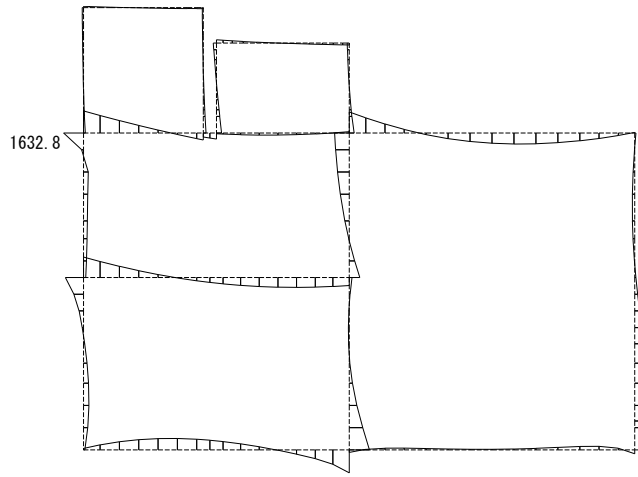
数值：評価位置における断面力
 (c) せん断力 (kN)

図 5-11 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力図 (B-B断面)
 (解析ケース③, S s - D (+ -), t = 14.59s)

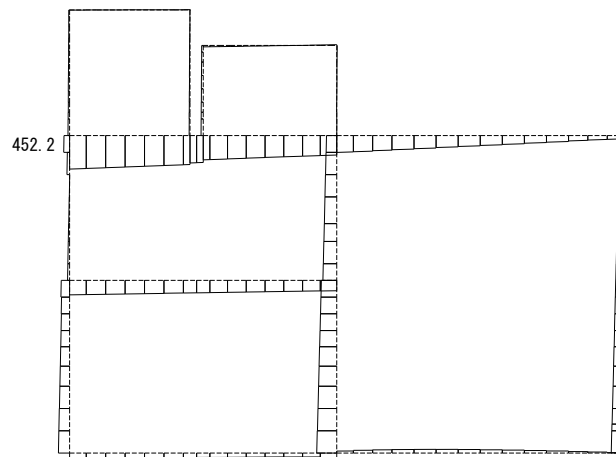
5.1.4 断面力分布（層間変位最大時刻，C－C断面）

(1) 鉛直部材

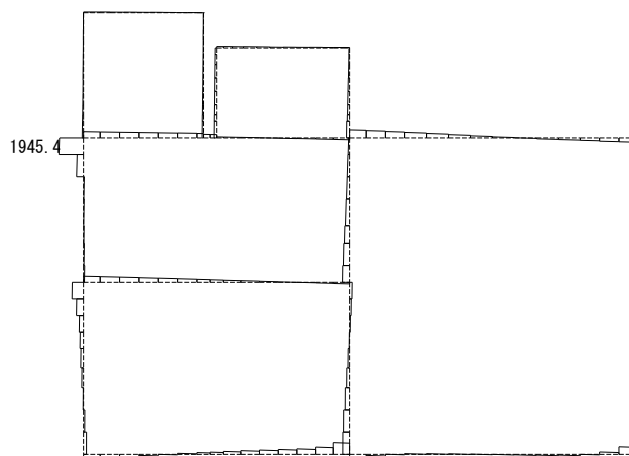
4辺固定版による評価を実施するC－C断面について，地震応答解析において鉛直部材の層間変位が最大となる時刻における断面力分布図（曲げモーメント，軸力，せん断力）を図5－12に示す。



(a) 曲げモーメント (kN・m)



(b) 軸力 (kN) (+ : 圧縮, - : 引張)

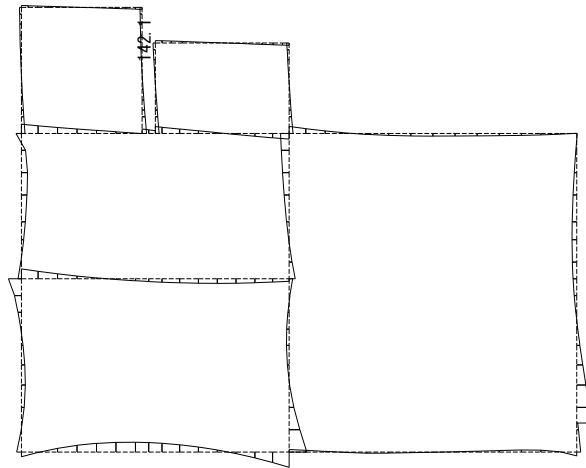


(c) せん断力 (kN)

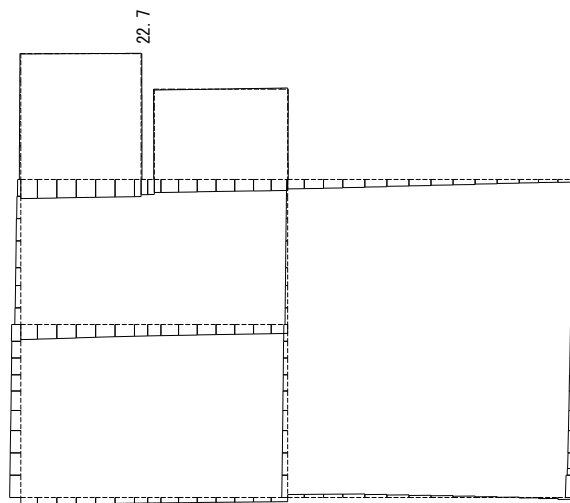
図 5-12 層間変位最大時刻における断面力図
(C-C断面, 側壁, 解析ケース③, $S_s - D (+ -)$)

(2) 水平部材

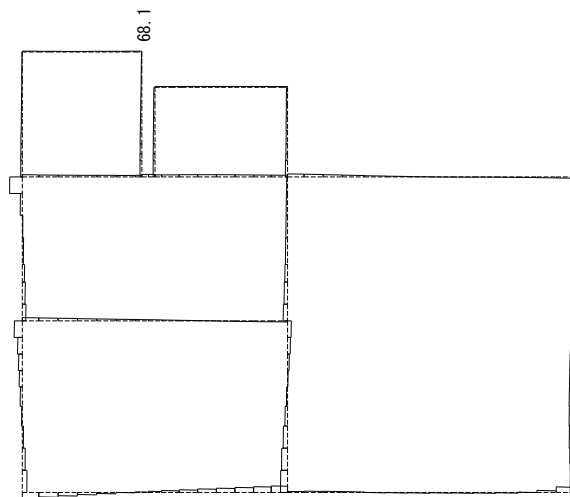
4辺固定版による評価を実施するC-C断面について、地震応答解析において水平部材の鉛直下向きの加速度が最大となる時刻における断面力分布図（曲げモーメント，軸力，せん断力）を図5-13に示す。



(a) 曲げモーメント (kN・m)



(b) 軸力 (kN) (+ : 圧縮, - : 引張)



(c) せん断力 (kN)

図 5-13 加速度最大時刻における断面力図
(C-C断面, 頂版, 解析ケース③, S_s-N2 (EW) (-+))

5.1.5 最大せん断ひずみ分布（A－A断面及びB－B断面）


曲げ・軸力系の破壊に対する照査及びせん断破壊に対する照査で最大照査値を示すケースについて、地盤に発生した最大せん断ひずみを確認する。

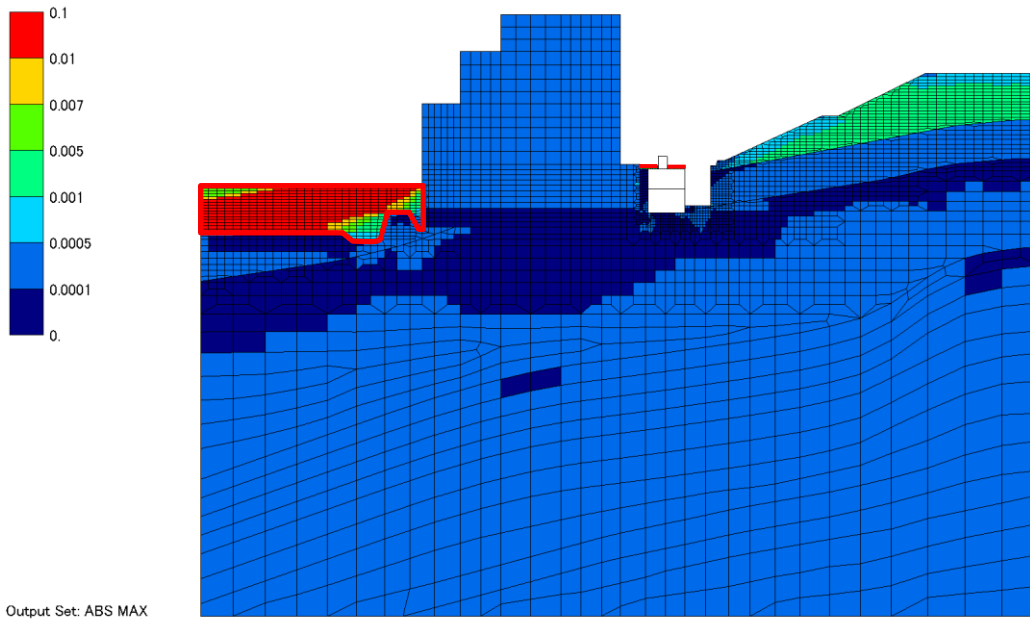
最大照査値を示す解析ケースの一覧を表5-6に、最大せん断ひずみ分布図を図5-14及び図5-15に示す。

構造物周辺の埋戻土に発生するせん断ひずみは最大でも1%程度であり、試験において確認しているひずみレベル相当であることを確認した。

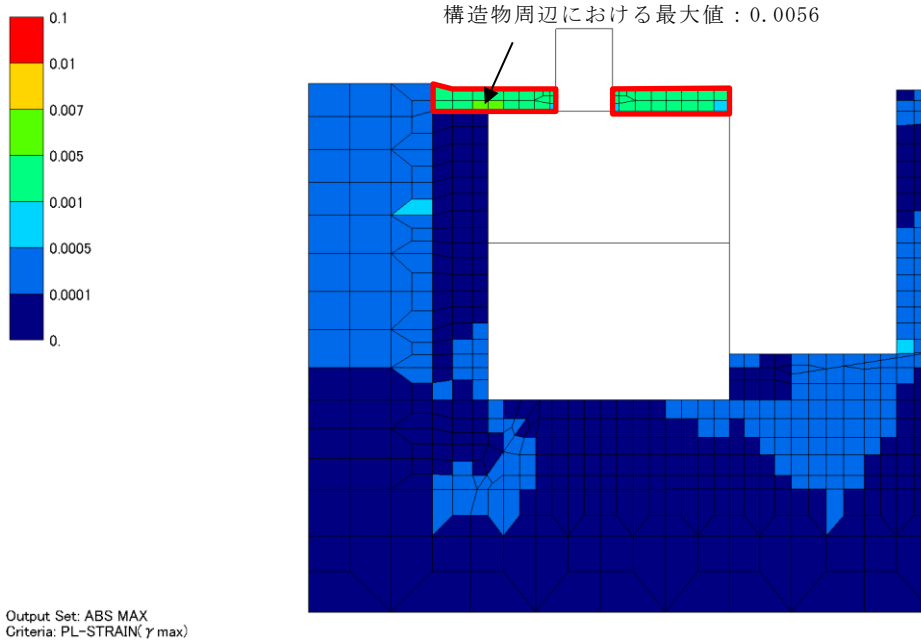
表5-6 最大照査値を示すケースの一覧

対象断面	対象ケース	照査項目
A－A断面	解析ケース① S _s －D（--）	せん断破壊に対する照査
B－B断面	解析ケース③ S _s －D（+-）	せん断破壊に対する照査

 : 埋戻土の範囲




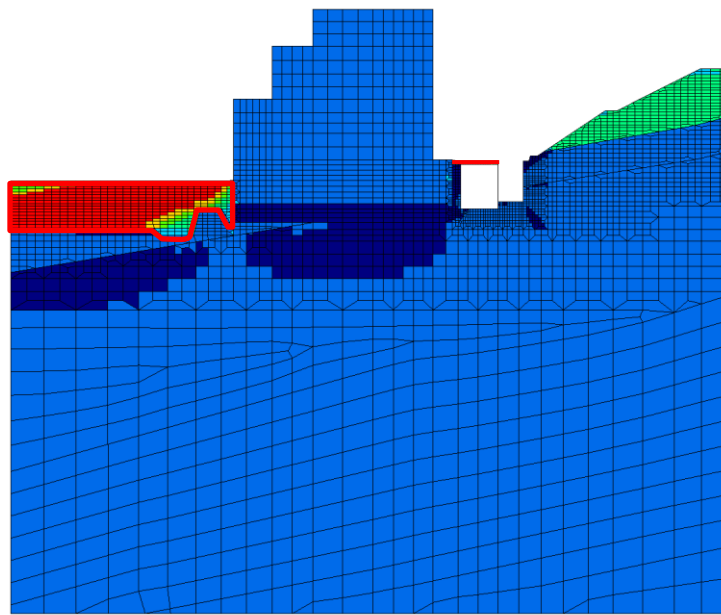
(a) 全体図



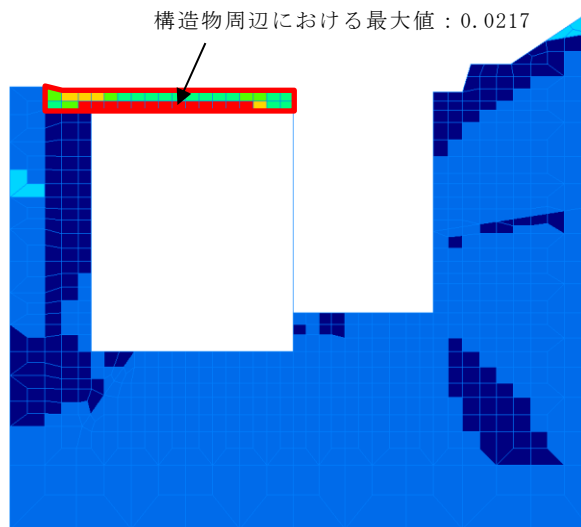
(b) 拡大図

図 5-14 最大せん断ひずみ分布図 (A-A断面)
(解析ケース①, S s - D (--))

 : 埋戻土の範囲



(a) 全体図



(b) 拡大図

図 5-15 最大せん断ひずみ分布図 (B-B 断面)
(解析ケース③, $S_s - D (+ -)$)

5.2 構造部材の健全性に対する評価結果

5.2.1 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果

(1) A-A断面

構造強度を有することの確認における曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果を表5-7に示す。照査値は、ひずみを許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。同表のとおり、全地震動において許容限界（限界ひずみ：10000 μ ）を下回ることを確認した。

表5-7 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果
(構造強度を有することの確認)

解析 ケース	地震動		照査用ひずみ	限界ひずみ	照査値
			ε_d^*	ε_R	$\varepsilon_d / \varepsilon_R$
①	S s - D	++	478 μ	10000 μ	0.05
		-+	474 μ	10000 μ	0.05
		+ -	510 μ	10000 μ	0.06
		--	480 μ	10000 μ	0.05
	S s - F 1	++	402 μ	10000 μ	0.05
	S s - F 2	++	408 μ	10000 μ	0.05
	S s - N 1	++	466 μ	10000 μ	0.05
		-+	418 μ	10000 μ	0.05
	S s - N 2 (NS)	++	460 μ	10000 μ	0.05
		-+	428 μ	10000 μ	0.05
	S s - N 2 (EW)	++	409 μ	10000 μ	0.05
		-+	382 μ	10000 μ	0.04
②	S s - D	--	448 μ	10000 μ	0.05
③	S s - D	--	481 μ	10000 μ	0.05

注記*：照査用ひずみ $\varepsilon_d =$ 発生ひずみ $\varepsilon \times$ 構造解析係数 $\gamma_a (=1.2)$

(2) B-B断面

構造強度を有することの確認における曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果を表5-8に示す。また、貯水機能を損なわないことの確認における曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果を表5-9及び表5-10に示す。照査値は、ひずみを許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。

表5-8のとおり、全地震動において許容限界（限界ひずみ：10000 μ ）を下回ることを確認した。

また、表5-9及び表5-10のとおり、コンクリートの圧縮ひずみ、主筋ひずみが、全ケースにおいて許容限界（コンクリートの圧縮ひずみ：2000 μ ，主筋ひずみ：1725 μ ，降伏曲げモーメント）を下回ることを確認した。

表5-8 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果
(構造強度を有することの確認：全応力解析)

解析 ケース	地震動		照査用ひずみ ϵ_d^*	限界ひずみ ϵ_R	照査値 ϵ_d / ϵ_R
①	S s - D	++	507 μ	10000 μ	0.06
		-+	503 μ	10000 μ	0.06
		+-	534 μ	10000 μ	0.06
		--	514 μ	10000 μ	0.06
	S s - F 1	++	440 μ	10000 μ	0.05
	S s - F 2	++	457 μ	10000 μ	0.05
	S s - N 1	++	545 μ	10000 μ	0.06
		-+	475 μ	10000 μ	0.05
	S s - N 2 (NS)	++	510 μ	10000 μ	0.06
		-+	435 μ	10000 μ	0.05
S s - N 2 (EW)	++	459 μ	10000 μ	0.05	
	-+	431 μ	10000 μ	0.05	
②	S s - N 1	++	538 μ	10000 μ	0.06
	S s - D	+-	516 μ	10000 μ	0.06
③	S s - N 1	++	563 μ	10000 μ	0.06
	S s - D	+-	547 μ	10000 μ	0.06

注記*：照査用ひずみ $\epsilon_d =$ 発生ひずみ $\epsilon \times$ 構造解析係数 $\gamma_a (=1.2)$

表 5-9 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果（コンクリートの圧縮ひずみ）

（貯水機能を損なわないことの確認：全応力解析）

解析 ケース	地震動		照査用ひずみ	限界ひずみ	照査値
			ϵ_d^*	ϵ_R	ϵ_d / ϵ_R
①	S s - D	++	507 μ	2000 μ	0.26
		-+	503 μ	2000 μ	0.26
		+ -	534 μ	2000 μ	0.27
		--	514 μ	2000 μ	0.26
	S s - F 1	++	440 μ	2000 μ	0.22
	S s - F 2	++	457 μ	2000 μ	0.23
	S s - N 1	++	545 μ	2000 μ	0.28
		-+	475 μ	2000 μ	0.24
	S s - N 2 (N S)	++	510 μ	2000 μ	0.26
		-+	435 μ	2000 μ	0.22
	S s - N 2 (E W)	++	459 μ	2000 μ	0.23
		-+	431 μ	2000 μ	0.22
②	S s - N 1	++	538 μ	2000 μ	0.27
	S s - D	+ -	516 μ	2000 μ	0.26
③	S s - N 1	++	563 μ	2000 μ	0.29
	S s - D	+ -	547 μ	2000 μ	0.28

注記*：照査用ひずみ $\epsilon_d =$ 発生ひずみ $\epsilon \times$ 構造解析係数 $\gamma_a (= 1.2)$

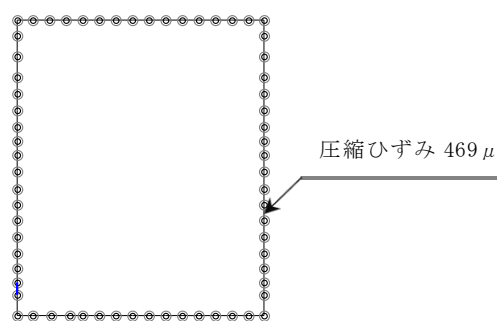


図 5-16 曲げ・軸力系の破壊に対する照査におけるひずみ（コンクリート）の発生要素（B-B断面，解析ケース③，S s - N 1（++））

表 5-10 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果（主筋ひずみ）

（貯水機能を損なわないことの確認：全応力解析）

解析 ケース	地震動		照査用ひずみ	限界ひずみ	照査値
			ε_d^*	ε_R	$\varepsilon_d / \varepsilon_R$
①	S _s -D	++	934 μ	1725 μ	0.55
		-+	928 μ	1725 μ	0.54
		+ -	930 μ	1725 μ	0.54
		--	909 μ	1725 μ	0.53
	S _s -F 1	++	739 μ	1725 μ	0.43
	S _s -F 2	++	799 μ	1725 μ	0.47
	S _s -N 1	++	982 μ	1725 μ	0.57
		-+	845 μ	1725 μ	0.50
	S _s -N 2 (NS)	++	904 μ	1725 μ	0.53
		-+	782 μ	1725 μ	0.46
	S _s -N 2 (EW)	++	822 μ	1725 μ	0.48
		-+	774 μ	1725 μ	0.45
②	S _s -N 1	++	971 μ	1725 μ	0.57
	S _s -D	+ -	895 μ	1725 μ	0.52
③	S _s -N 1	++	1028 μ	1725 μ	0.60
	S _s -D	+ -	974 μ	1725 μ	0.57

注記*：照査用ひずみ $\varepsilon_d =$ 発生ひずみ $\varepsilon \times$ 構造解析係数 $\gamma_a (=1.2)$

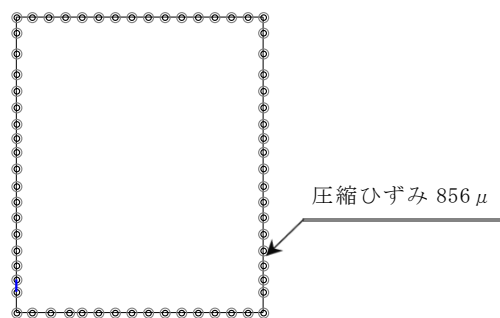


図 5-17 曲げ・軸力系の破壊に対する照査におけるひずみ（主筋）の発生要素（B-B断面，解析ケース③，S_s-N 1（++））

(3) C-C断面

a. 鉛直部材

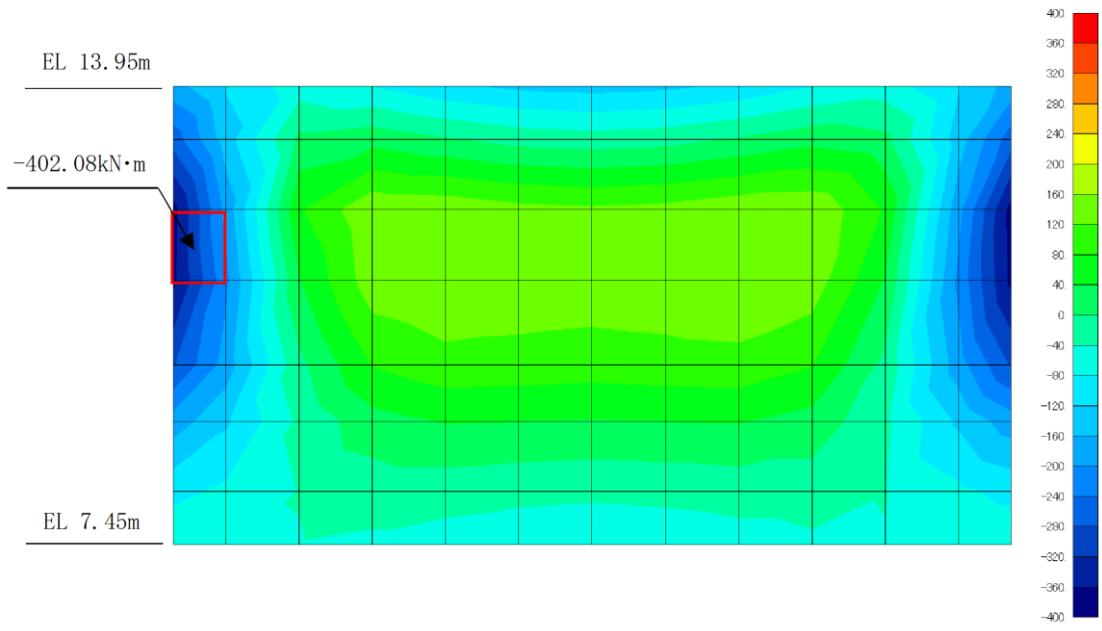
構造強度を有することの確認における曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果を表5-11及び表5-12に示す。また、4辺固定版における断面力図を図5-18及び図5-19に示す。同表のとおり、発生応力度は短期許容応力度を下回ることを確認した。

表5-11 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果（側壁，コンクリート）

解析 ケース	地震動	方向	曲げ モーメ ント (kN・m)	発生 応力度 σ'_c (N/mm ²)	短期許容 応力度 $\sigma'_{c a}$ (N/mm ²)	照査値 $\sigma'_c / \sigma'_{c a}$
③	S s - D (+-)	X方向 (配力筋方向)	-402	1.734	13.5	0.13
		Y方向 (主筋方向)	-748	3.228	13.5	0.24

表5-12 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果（側壁，鉄筋）

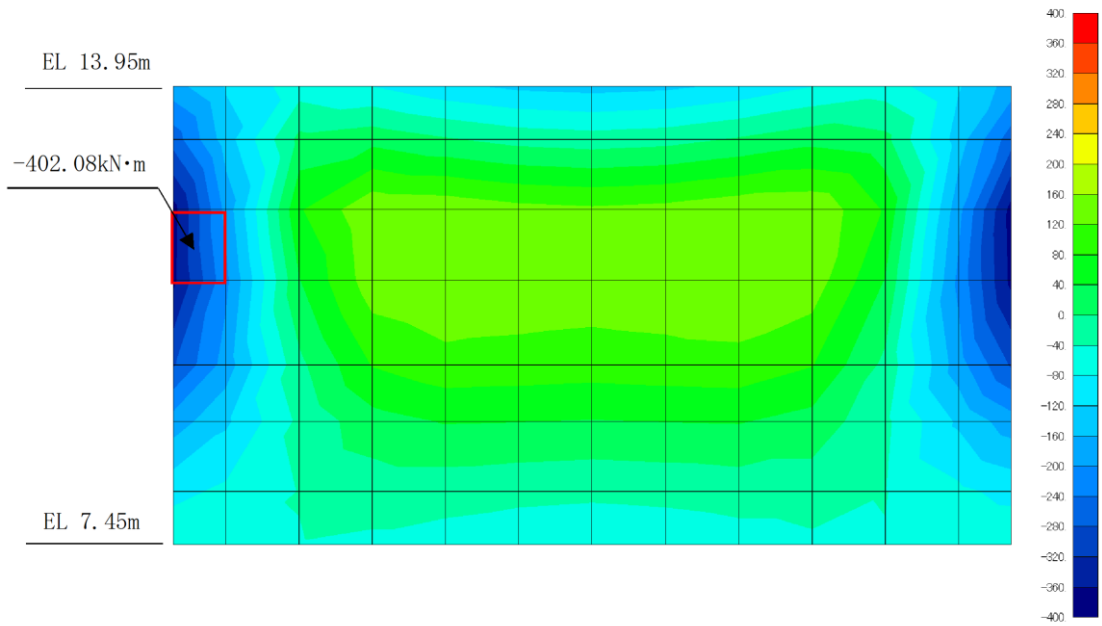
解析 ケース	地震動	方向	曲げ モーメ ント (kN・m)	発生 応力度 σ_s (N/mm ²)	短期許容 応力度 $\sigma_{s a}$ (N/mm ²)	照査値 $\sigma_s / \sigma_{s a}$
③	S s - D (+-)	X方向 (配力筋方向)	-402	63.410	294	0.22
		Y方向 (主筋方向)	-748	118.006	294	0.41



数值：評価位置における断面力

曲げモーメント M_x (kN・m)

図 5-18 4 辺固定版における断面力図 (側壁, X 方向)



数值：評価位置における断面力

曲げモーメント M_y (kN・m)

図 5-19 4 辺固定版における断面力図 (側壁, Y 方向)

b. 水平部材

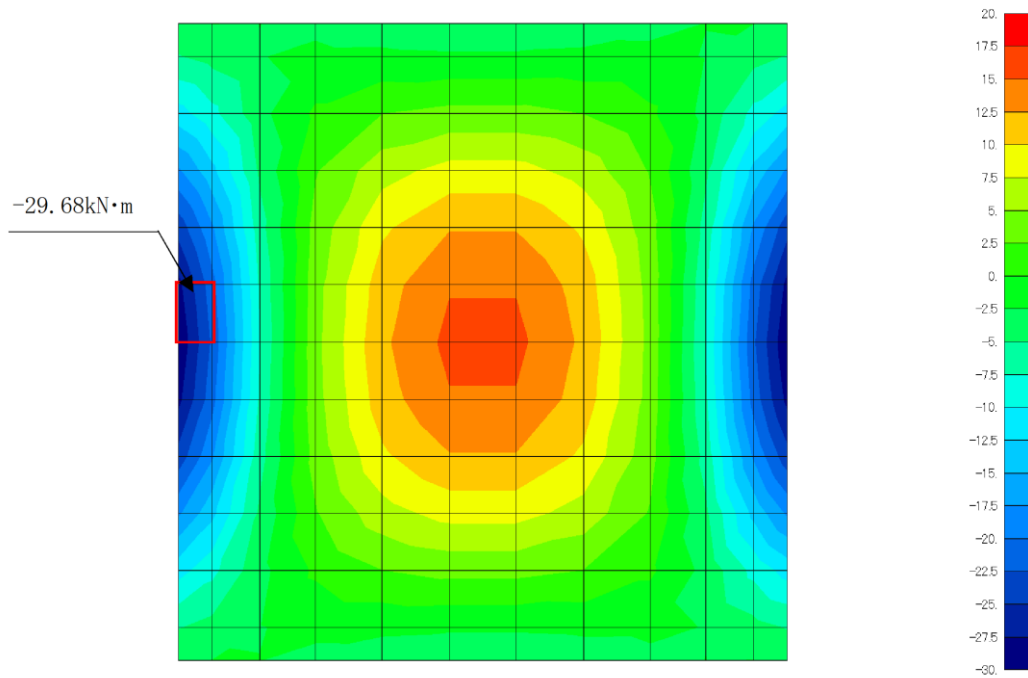
構造強度を有することの確認における曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果を表 5-13 及び表 5-14 に示す。また、4 辺固定版における断面力図を図 5-20 及び図 5-21 に示す。同表のとおり、発生応力度は短期許容応力度を下回ることを確認した。

表 5-13 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果（頂版，コンクリート）

解析 ケース	地震動	方向	曲げ モーメ ント (kN・m)	発生 応力度 σ'_c (N/mm ²)	短期許容 応力度 σ'_{ca} (N/mm ²)	照査値 σ'_c / σ'_{ca}
③	S s - N 2 (E W) (- +)	X 方向 (主筋方向)	-30	1.247	13.5	0.10
		Y 方向 (配力筋方向)	-29	0.946	13.5	0.08

表 5-14 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果（頂版，鉄筋）

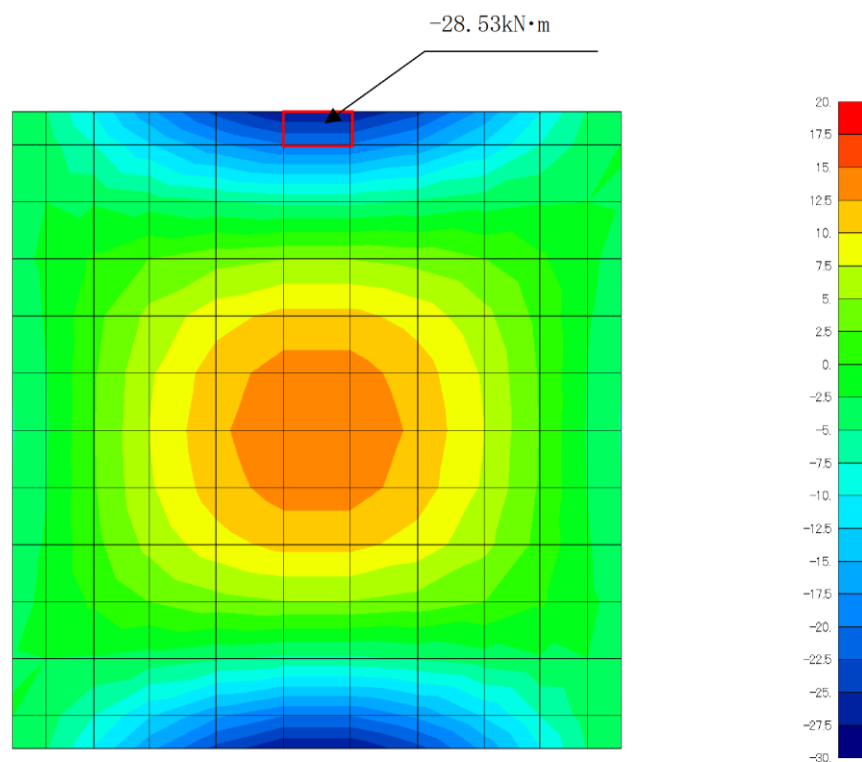
解析 ケース	地震動	方向	曲げ モーメ ント (kN・m)	発生 応力度 σ_s (N/mm ²)	短期許容 応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	照査値 σ_s / σ_{sa}
③	S s - N 2 (E W) (- +)	X 方向 (主筋方向)	-30	49.583	294	0.17
		Y 方向 (配力筋方向)	-29	28.183	294	0.10



数値：評価位置における断面力

曲げモーメント M_x (kN・m)

図 5-20 4 辺固定版における断面力図 (頂版, X 方向)



数値：評価位置における断面力

曲げモーメント M_y (kN・m)

図 5-21 4 辺固定版における断面力図 (頂版, Y 方向)

5.2.2 せん断破壊に対する評価結果

(1) A-A断面

構造強度を有することの確認におけるせん断破壊に対する評価結果を表5-15に示す。照査値は、せん断力を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。同表より、全部材で照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認した。

表5-15(1) せん断破壊に対する評価結果

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用 せん断力 V_d^{*2} (kN)	せん断 耐力 $V_{y d}$ (kN)	照査値 $V_d / V_{y d}$
①	S s - D	++	頂版	4	625	1219	0.52
			側壁	12	1274	1635	0.78
			床版	5	473	1223	0.39
			底版	6	1461	3004	0.49
		-+	頂版	4	598	1219	0.50
			側壁	12	1299	1639	0.80
			床版	5	461	1220	0.38
			底版	6	1329	2960	0.45
		+-	頂版	4	632	1217	0.52
			側壁	12	1327	1651	0.81
			床版	5	452	1207	0.38
			底版	6	1460	2999	0.49
		---	頂版	4	636	1215	0.53
			側壁	12	1384	1654	0.84
			床版	5	491	1222	0.41
			底版	6	1315	2989	0.44
	S s - F 1	++	頂版	4	574	1218	0.48
			側壁	12	1150	1636	0.71
			床版	5	423	1223	0.35
			底版	6	1183	2954	0.41
S s - F 2	++	頂版	4	578	1218	0.48	
		側壁	12	1126	1631	0.70	
		床版	5	410	1220	0.34	
		底版	6	1079	2932	0.37	

表 5-15(2) せん断破壊に対する評価結果

解析 ケー ス	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値 $V_d/V_{y d}$
					せん断力 V_d *2 (kN)	耐力 $V_{y d}$ (kN)	
①	S s - N 1	++	頂版	4	584	1210	0.49
			側壁	12	1283	1623	0.80
			床版	5	415	1200	0.35
			底版	6	1651	3003	0.55
		-+	頂版	4	519	1223	0.43
			側壁	12	1288	1646	0.79
			床版	5	452	1245	0.37
			底版	6	1495	3082	0.49
	S s - N 2 (N S)	++	頂版	4	539	1211	0.45
			側壁	12	1284	1641	0.79
			床版	5	462	1236	0.38
			底版	6	1320	2978	0.45
		-+	頂版	4	600	1220	0.50
			側壁	12	1210	1640	0.74
			床版	5	430	1195	0.37
			底版	6	1253	3016	0.42
S s - N 2 (E W)	++	頂版	4	597	1220	0.49	
		側壁	12	1101	1621	0.68	
		床版	5	448	1204	0.38	
		底版	6	1155	2926	0.40	
	-+	頂版	4	525	1217	0.44	
		側壁	12	1085	1627	0.67	
		床版	5	448	1224	0.37	
		底版	6	1128	3000	0.38	
②	S s - D	--	頂版	4	648	1218	0.54
			側壁	12	1207	1627	0.75
			床版	5	474	1211	0.40
			底版	6	1258	2938	0.43

表 5-15(3) せん断破壊に対する評価結果

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値 $V_d/V_{y d}$
					せん断力 V_d^{*2} (kN)	耐力 $V_{y d}$ (kN)	
③	S s - D	--	頂版	4	645	1215	0.54
			側壁	12	1346	1634	0.83
			床版	5	490	1227	0.40
			底板	6	1396	3014	0.47

注記*1：評価位置は図 5-22 に示す。

*2：照査用せん断力 $V_d =$ 発生せん断力 $V \times$ 構造解析係数 $\gamma_a (=1.05)$

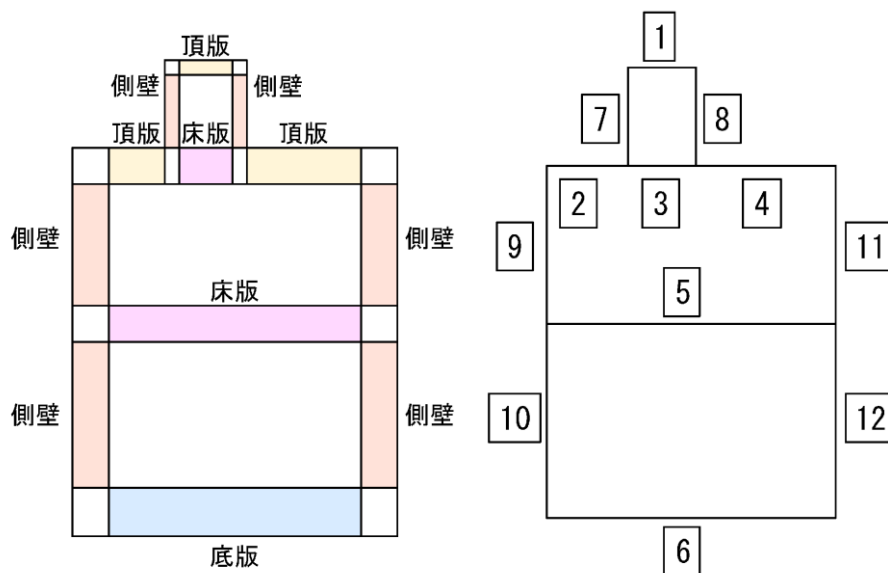


図 5-22 評価位置図 (A-A 断面)

(2) B-B断面

構造強度を有すること及び貯水機能を損なわないことの確認におけるせん断破壊に対する評価結果を表5-16に示す。照査値は、せん断力を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。同表より、全部材で照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認した。

表5-16(1) せん断破壊に対する評価結果

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値 $V_d/V_{y d}$
					せん断力 V_d^{*2} (kN)	耐力 $V_{y d}$ (kN)	
①	S s - D	++	頂版	1	570	1209	0.48
			側壁	4	1227	1591	0.78
			底版	2	1600	2953	0.55
		-+	頂版	1	560	1220	0.46
			側壁	4	1209	1611	0.76
			底版	2	1471	2926	0.51
		+-	頂版	1	572	1206	0.48
			側壁	4	1288	1602	0.81
			底版	2	1581	2955	0.54
		--	頂版	1	582	1205	0.49
			側壁	4	1269	1611	0.79
			底版	2	1452	2946	0.50
	S s - F 1	++	頂版	1	530	1216	0.44
			側壁	4	1109	1596	0.70
			底版	2	1295	2946	0.44
	S s - F 2	++	頂版	1	563	1212	0.47
			側壁	4	1045	1582	0.67
			底版	2	1254	2913	0.44
	S s - N 1	++	頂版	1	491	1182	0.42
			側壁	4	1264	1595	0.80
			底版	2	1655	2984	0.56
		-+	頂版	1	520	1230	0.43
			側壁	4	1200	1610	0.75
			底版	2	1297	3055	0.43

表 5-16(2) せん断破壊に対する評価結果

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値 $V_d/V_{y d}$
					せん断力 V_d^{*2} (kN)	耐力 $V_{y d}$ (kN)	
①	S s - N 2 (N S)	++	頂版	1	527	1225	0.44
			側壁	4	1203	1591	0.76
			底版	2	1461	2960	0.50
		-+	頂版	1	562	1209	0.47
			側壁	4	1140	1602	0.72
			底版	2	1319	2971	0.45
	S s - N 2 (E W)	++	頂版	1	582	1213	0.48
			側壁	4	1085	1593	0.69
			底版	2	1271	2931	0.44
		-+	頂版	1	514	1219	0.43
			側壁	4	1044	1593	0.66
			底版	2	1180	2975	0.40
②	S s - N 1	++	頂版	1	508	1201	0.43
			側壁	4	1213	1589	0.77
			底版	2	1370	2945	0.47
	S s - D	+-	頂版	1	563	1200	0.47
			側壁	4	1179	1592	0.75
			底版	2	1463	2941	0.50
③	S s - N 1	++	頂版	1	490	1187	0.42
			側壁	4	1276	1592	0.81
			底版	2	1709	3007	0.57
	S s - D	+-	頂版	1	580	1205	0.49
			側壁	4	1304	1601	0.82
			底版	2	1636	2993	0.55

注記*1：評価位置は図 5-23 に示す。

*2：照査用せん断力 $V_d =$ 発生せん断力 $V \times$ 構造解析係数 $\gamma_a (=1.05)$

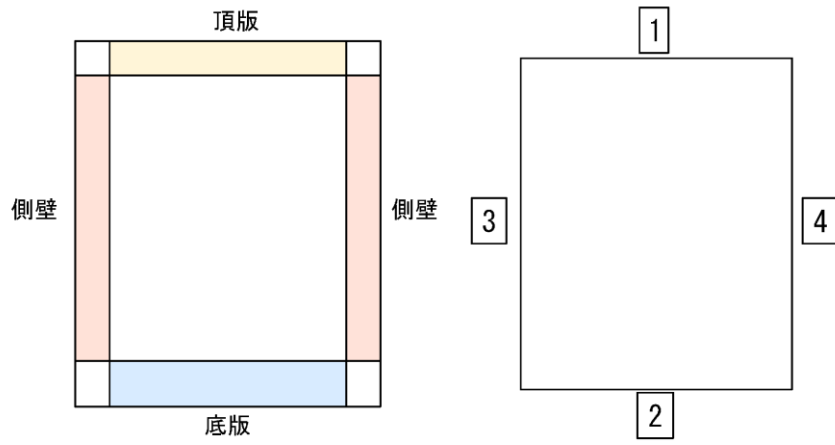


图 5-23 評価位置図 (B - B 断面)

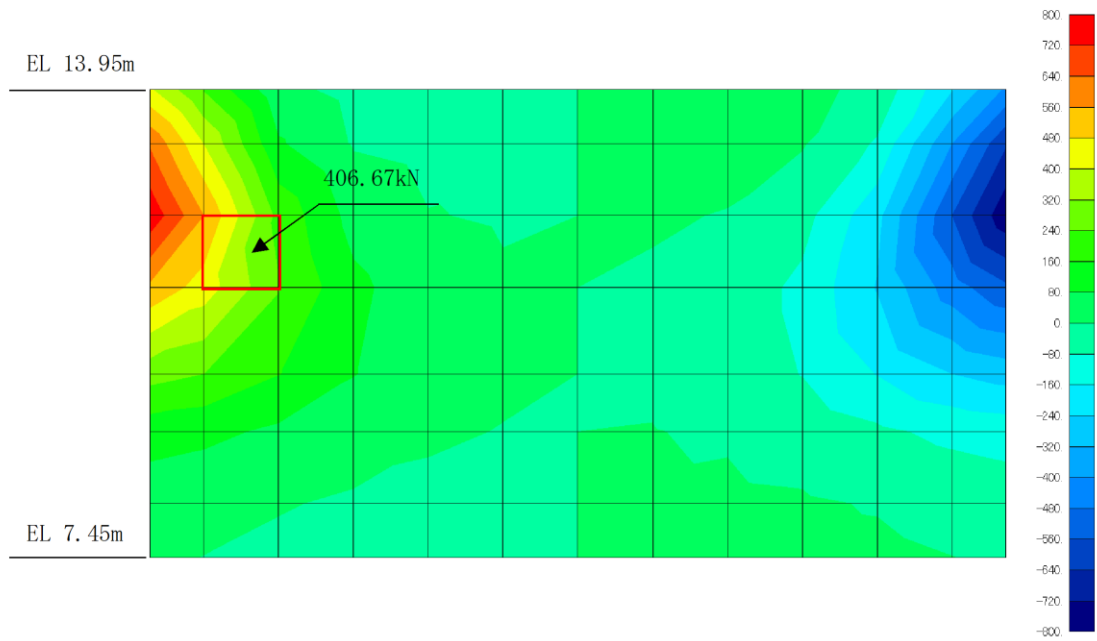
(3) C-C断面

a. 鉛直部材

構造強度を有することの確認におけるせん断破壊に対する評価結果を表5-17に示す。また、4辺固定版における断面力図を図5-24及び図5-25に示す。同表より、発生応力度は短期許容応力度を下回ることを確認した。

表5-17 せん断破壊に対する評価結果（側壁）

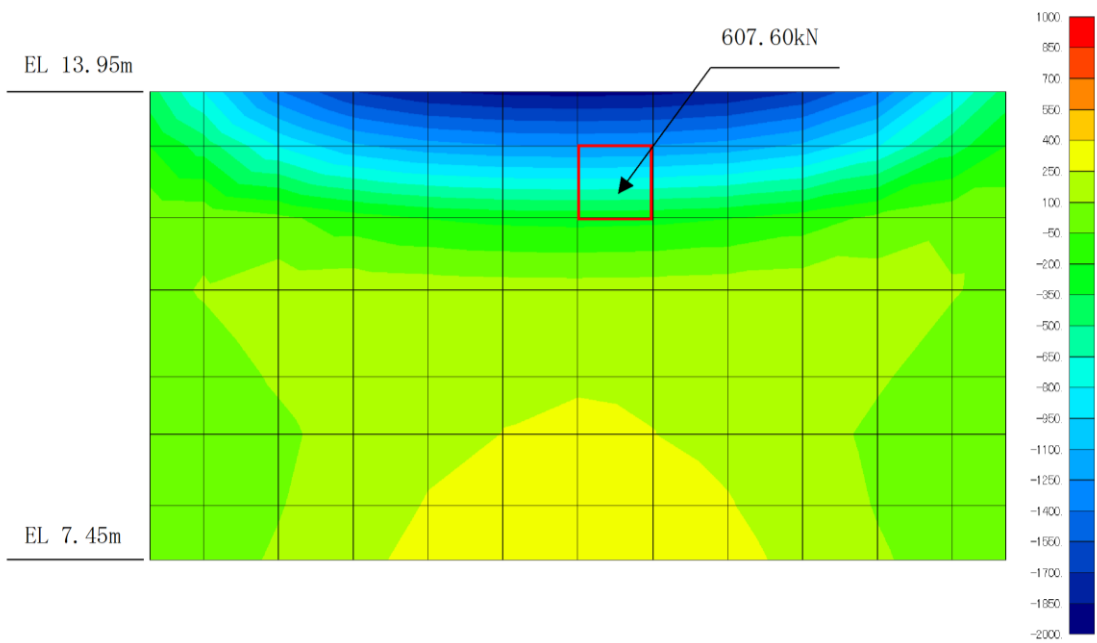
解析ケース	地震動		方向	発生せん断力V (kN/m)	短期許容せん断力V _a (kN/m)	照査値 V/V _a
③	S _s -D	+-	X方向 (配力筋方向)	407	1953	0.21
			Y方向 (主筋方向)	608	1953	0.32



数值：評価位置における断面力

せん断力 Q_x (kN)

図 5-24 4 辺固定版における断面力図（側壁，X 方向）



数值：評価位置における断面力

せん断力 Q_y (kN)

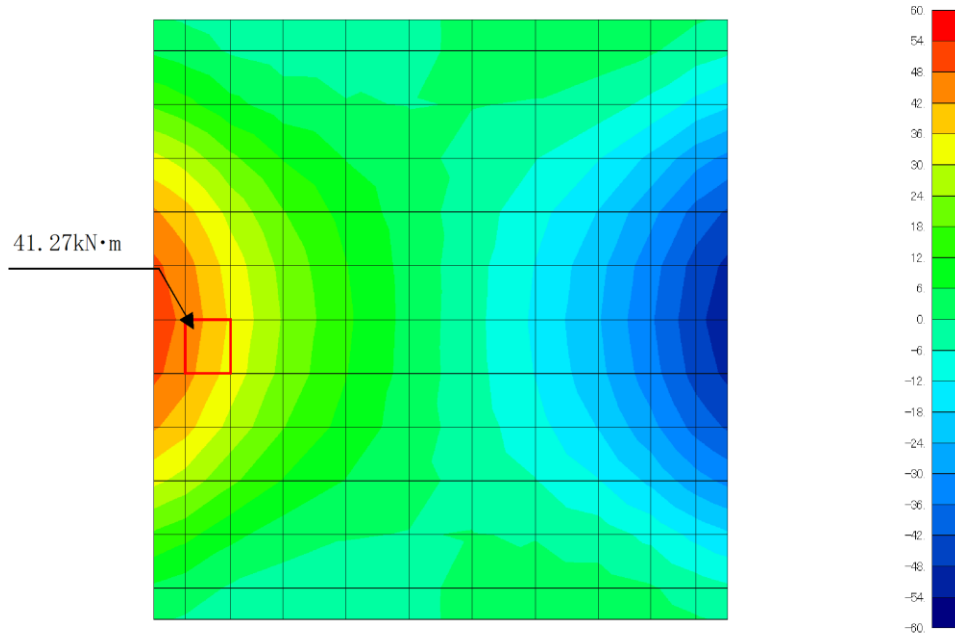
図 5-25 4 辺固定版における断面力図（側壁，Y 方向）

b. 水平部材

構造強度を有することの確認におけるせん断破壊に対する評価結果を表 5-18 に示す。また、4 辺固定版における断面力図を図 5-26 及び図 5-27 に示す。同表より、発生応力度は短期許容応力度を下回ることを確認した。

表 5-18 せん断破壊に対する評価結果（頂版）

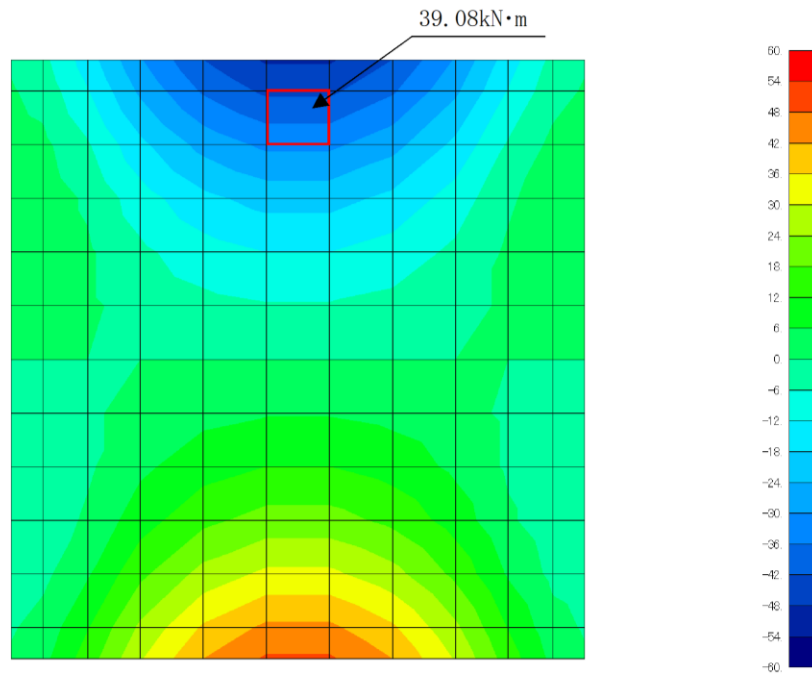
解析 ケース	地震動		方向	発生 せん断力 V (kN/m)	短期許容 せん断力 V _a (kN/m)	照査値 V / V _a
③	S _s -N2 (EW)	-+	X 方向 (主筋方向)	41	1078	0.04
			Y 方向 (配力筋方向)	39	1078	0.04



数值：評価位置における断面力

せん断力 Q_x (kN)

図 5-26 4 辺固定版における断面力図 (頂版, X 方向)



数值：評価位置における断面力

せん断力 Q_y (kN)

図 5-27 4 辺固定版における断面力図 (頂版, Y 方向)

5.3 基礎地盤の支持性能に対する評価結果

基礎地盤の支持性能に対する照査結果を表 5-19～表 5-21 に示す。また、最大接地圧分布図を図 5-28～図 5-30 に示す。

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の基礎地盤に発生する最大接地圧が、極限支持力度を下回ることを確認した。

なお、低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の基礎地盤には一部MMRが存在するが、MMRの支圧強度は岩盤の極限支持力度より十分に大きい ($f'_a = 18.0\text{N/mm}^2$) ことから、評価を省略する。

表 5-19 基礎地盤の支持性能に対する照査結果 (A-A断面)

解析 ケース	地震動		最大接地圧 R_d (N/mm ²)	極限支持力度 R_u (N/mm ²)	照査値 R_d/R_u
①	S _s -D	++	2.63	9.8	0.27
		-+	2.16	9.8	0.23
		+ -	2.83	9.8	0.29
		--	2.20	9.8	0.23
	S _s -F 1	++	1.93	9.8	0.20
	S _s -F 2	++	1.62	9.8	0.17
	S _s -N 1	++	2.60	9.8	0.27
		-+	1.80	9.8	0.19
	S _s -N 2 (NS)	++	2.33	9.8	0.24
		-+	1.81	9.8	0.19
	S _s -N 2 (EW)	++	1.73	9.8	0.18
		-+	1.39	9.8	0.15
②	S _s -D	--	2.47	9.8	0.26
③	S _s -D	--	2.25	9.8	0.23

表 5-20 基礎地盤の支持性能に対する照査結果 (B-B 断面)

解析 ケース	地震動		最大接地圧 R_d (N/mm ²)	極限支持力度 R_u (N/mm ²)	照査値 R_d/R_u
①	S _s -D	++	2.24	9.8	0.23
		-+	1.85	9.8	0.19
		+ -	2.38	9.8	0.25
		--	1.87	9.8	0.20
	S _s -F 1	++	1.53	9.8	0.16
	S _s -F 2	++	1.39	9.8	0.15
	S _s -N 1	++	2.28	9.8	0.24
		-+	1.59	9.8	0.17
	S _s -N 2 (NS)	++	1.91	9.8	0.20
		-+	1.53	9.8	0.16
	S _s -N 2 (EW)	++	1.41	9.8	0.15
		-+	1.07	9.8	0.11
②	S _s -N 1	++	1.89	9.8	0.20
	S _s -D	+ -	2.00	9.8	0.21
③	S _s -N 1	++	2.39	9.8	0.25
	S _s -D	+ -	2.40	9.8	0.25

表 5-21 基礎地盤の支持性能に対する照査結果 (C-C断面)

解析 ケース	地震動		最大接地圧 R_d (N/mm ²)	極限支持力度 R_u (N/mm ²)	照査値 R_d/R_u
①	S s - D	++	2.58	9.8	0.27
		-+	2.84	9.8	0.29
		+ -	2.40	9.8	0.25
		--	2.38	9.8	0.25
	S s - F 1	++	1.51	9.8	0.16
	S s - F 2	++	2.02	9.8	0.21
	S s - N 1	++	2.65	9.8	0.28
		-+	1.43	9.8	0.15
	S s - N 2 (NS)	++	1.37	9.8	0.14
		-+	1.42	9.8	0.15
	S s - N 2 (EW)	++	1.75	9.8	0.18
		-+	1.49	9.8	0.16
②	S s - D	+ -	2.40	9.8	0.25
③	S s - D	+ -	2.35	9.8	0.24

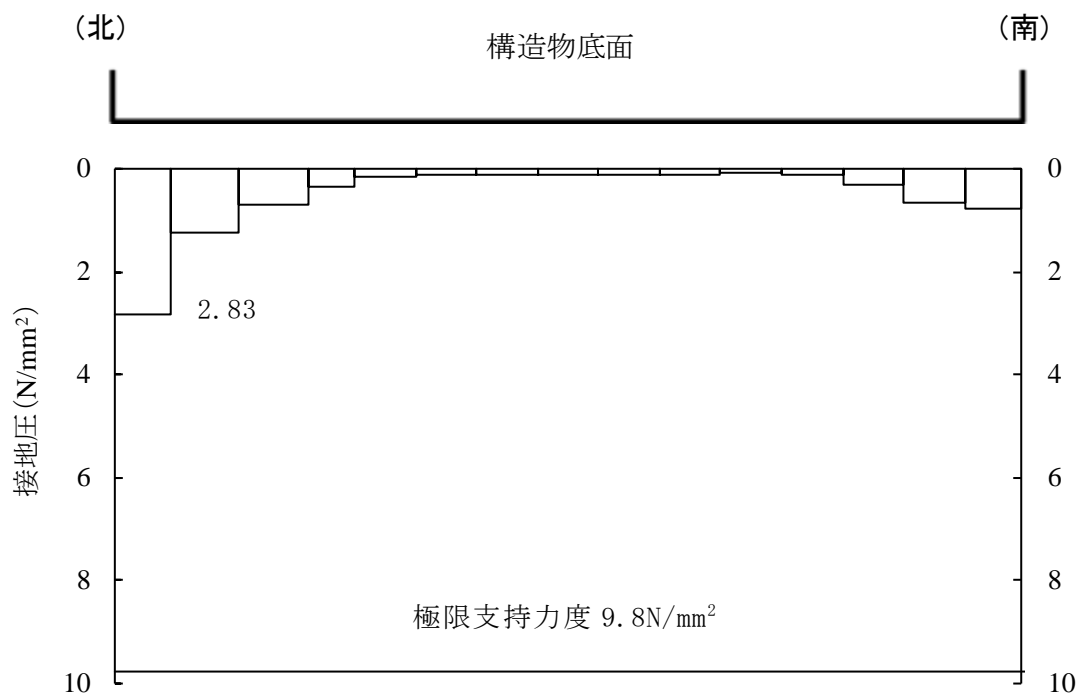


図 5-28 基礎地盤の最大接地圧分布図
(A-A断面, 解析ケース①, S_s-D (+-))

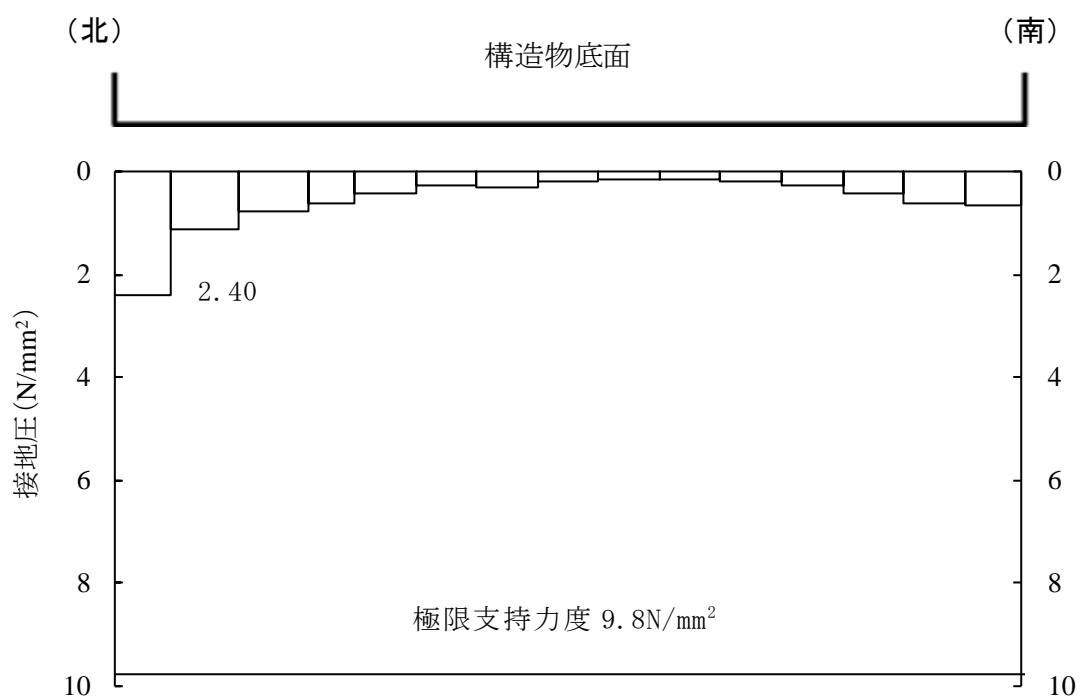


図 5-29 基礎地盤の最大接地圧分布図
(B-B断面, 解析ケース③, S_s-D (+-))

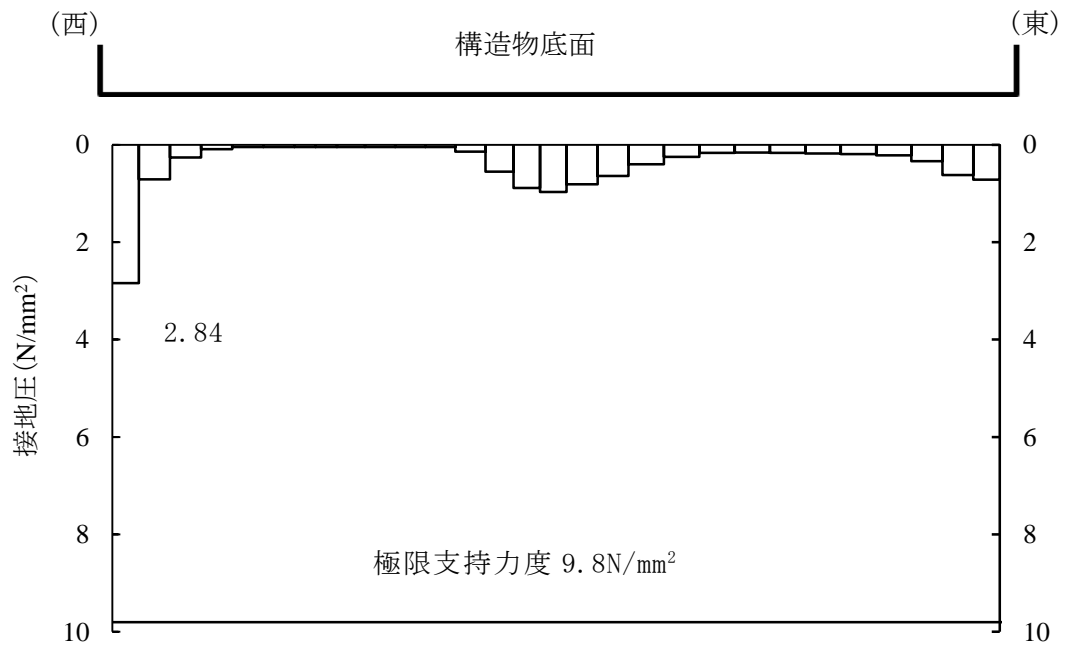


図 5-30 基礎地盤の最大接地圧分布図
 (C-C断面, 解析ケース①, S_s-D (-+))

6. まとめ

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽については、基準地震動 S_s による耐震評価として、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び基礎地盤の支持性能に対する評価を実施した。

構造部材の健全性評価については、ひずみ及びせん断力が要求性能に応じた許容限界を下回ることを確認した。

基礎地盤の支持性能評価については、基礎地盤に発生する応力（接地圧）が極限支持力度に基づく許容限界を下回ることを確認した。

また、貯水機能が要求される B-B 断面においては、部材がおおむね弾性の範囲に留まることを確認した。以上から、低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽が基準地震動 S_s による地震力に対して、構造強度を有すること、支持機能を有すること及び貯水機能を損なわないことを確認した。

参考資料1 機器・配管系の耐震評価に適用する影響検討ケース

1. 材料物性のばらつきを考慮した解析ケース

1.1 はじめに

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽について、構造物の機器・配管系の耐震評価に適用する床応答への保守的な配慮として、コンクリートの物性値を実強度に変更した解析を実施した。

コンクリートの実強度の設定方法は「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」に示す。

1.2 解析方針

耐震評価は、本文における評価条件に基づき実施する。変更した材料の物性値を表1-1に示す。影響検討ケースは位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動 $S_s - D$ に対して実施することとする。

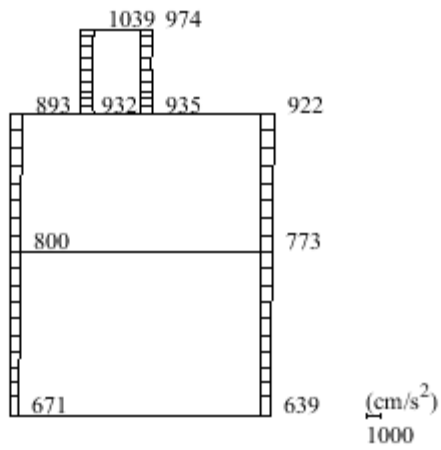
影響検討に用いる地震動は、本文で使用した基準地震動 $S_s - D$ (++) を使用する。

表 1-1 材料の物性値

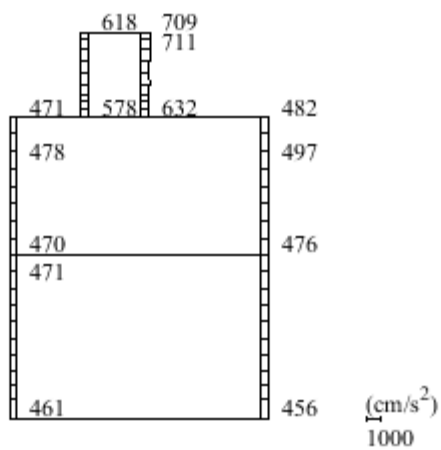
材料		仕様	ヤング係数 (N/mm^2)
構造物	コンクリート	実強度 $36.1N/mm^2$	2.98×10^4

1.3 解析結果

ケース④に係る地震応答解析結果として、基準地震動 S_s に対する最大加速度分布図を図1-1～図1-3に示す。

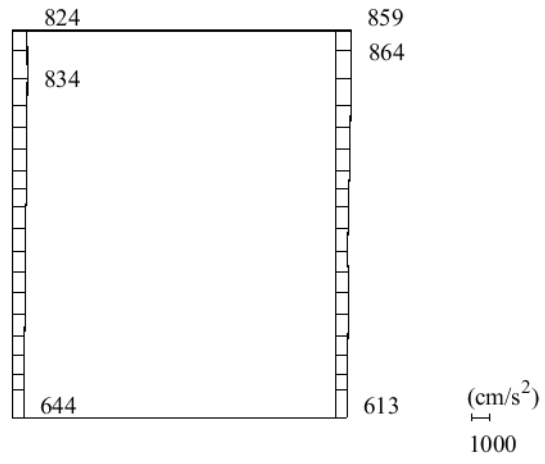


(a) S s - D (++) 水平

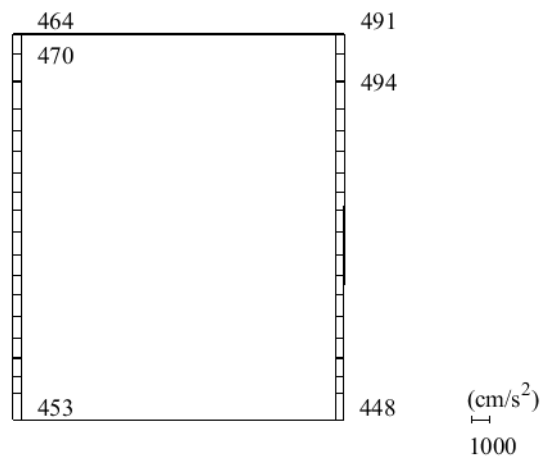


(b) S s - D (++) 鉛直

図 1-1 最大応答加速度分布図 (A-A断面, 解析ケース④)

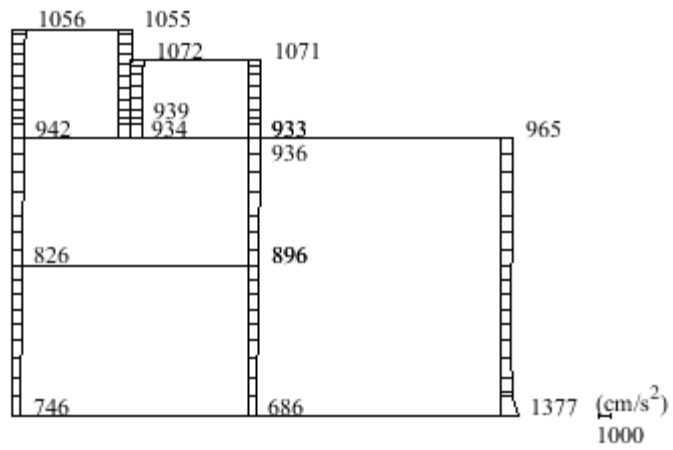


(a) S s - D (++) 水平

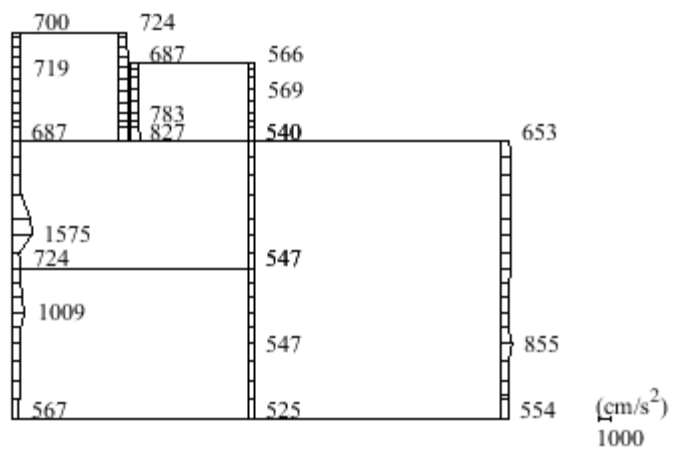


(b) S s - D (++) 鉛直

図 1-2 最大応答加速度分布図 (B-B 断面, 解析ケース④)



(a) S s - D (++) 水平



(b) S s - D (++) 鉛直

図 1-3 最大応答加速度分布図 (C-C断面, 解析ケース④)

2. 地下水位低下の影響を考慮した解析ケース

2.1 はじめに

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽について、機器・配管系の耐震評価に適用する床応答への保守的な配慮として、地下水位が構造物基礎下端より十分低い状態を仮定した、解析を実施した。

2.2 解析方針

耐震評価は本文における評価条件に基づき実施する。変更した地下水水位の条件を表 2-1 に示す。影響検討ケースは位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動 $S_s - D$ に対して実施することとする。

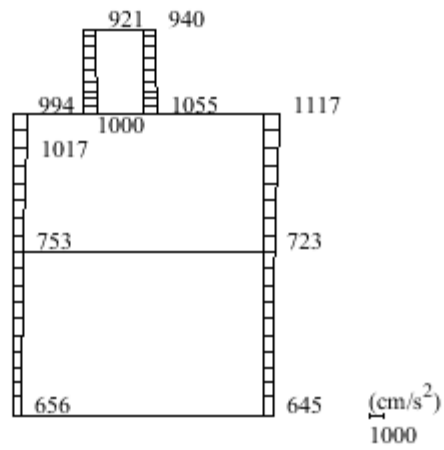
影響検討に用いる地震動は、本文で使用した基準地震動 $S_s - D (+ +)$ を使用する。

表 2-1 材料の物性値

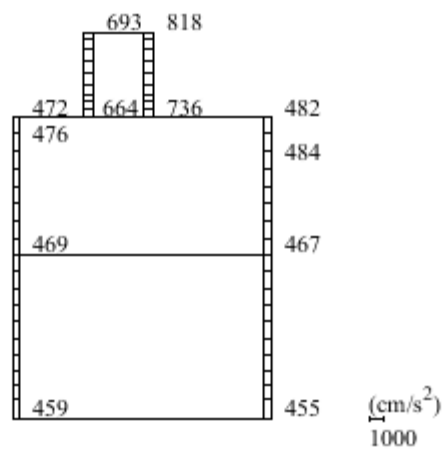
施設名称	解析断面	設計地下水位 (EL m)
低圧原子炉代替注水 ポンプ格納槽	A - A 断面	解析モデル中に地下水位を 考慮しない
	B - B 断面	
	C - C 断面	

2.3 解析結果

ケース⑤に係る地震応答解析結果として、基準地震動 S_s に対する最大加速度分布図を図 2-1～図 2-3 に示す。

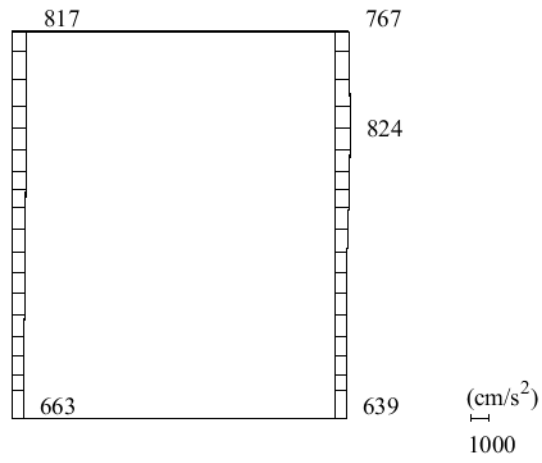


(a) S s - D (++) 水平

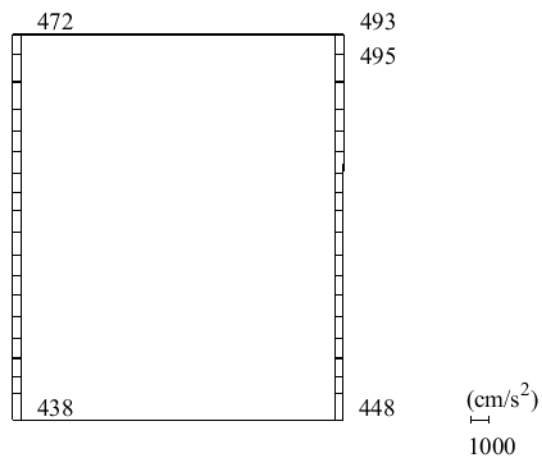


(b) S s - D (++) 鉛直

図 2-1 最大応答加速度分布図 (A-A断面, 解析ケース⑤)

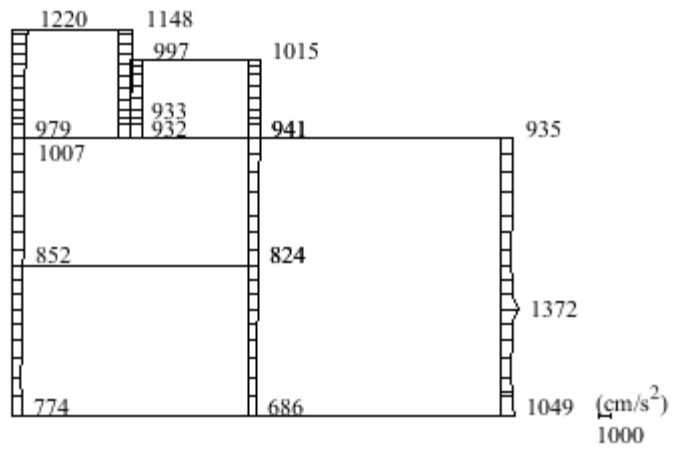


(a) S s - D (++) 水平

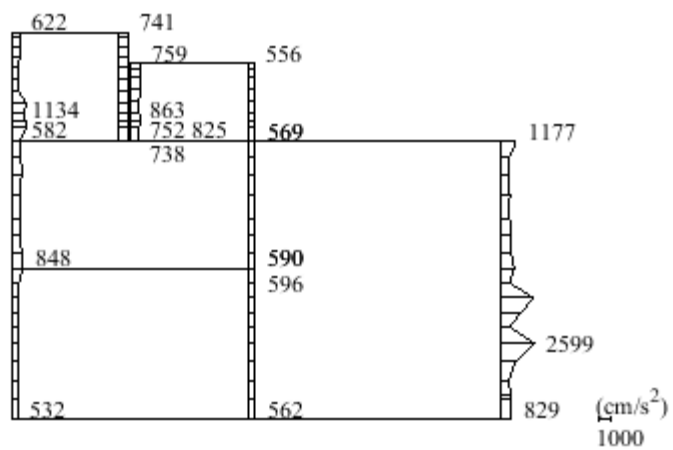


(b) S s - D (++) 鉛直

図 2-2 最大応答加速度分布図 (B-B 断面, 解析ケース⑤)



(a) S s - D (++) 水平



(b) S s - D (++) 鉛直

図 2-3 最大応答加速度分布図 (C-C断面, 解析ケース⑤)

3. 妻壁の剛性を考慮した解析ケース

3.1 はじめに

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽のA-A断面及びB-B断面では、耐震評価上の保守的な条件として妻壁を考慮しない評価を実施しており、機器・配管系に適用する床応答についても同様の解析モデルを用いて算定している。本章では、機器・配管系の耐震評価に適用する床応答への保守的な配慮として、妻壁を考慮したモデルにおける解析を実施した。

3.2 解析方針

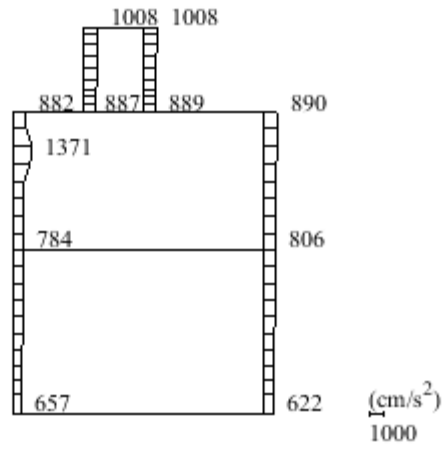
耐震評価は本文における評価条件に基づき実施する。ただし、本検討においては妻壁の剛性及び重量を等価剛性及び等価重量として考慮することとする。

影響検討ケースは位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動 $S_s - D$ に対して実施することとする。

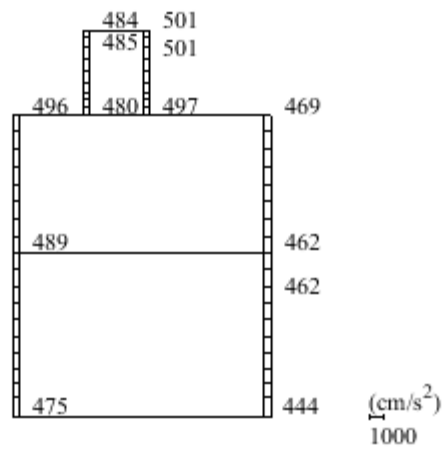
影響検討に用いる地震動は、本文で使用した基準地震動 $S_s - D$ (++)を使用する。

3.3 解析結果

基準地震動 $S_s - D$ (++)に対する最大加速度分布図を図3-1及び図3-2に示す。

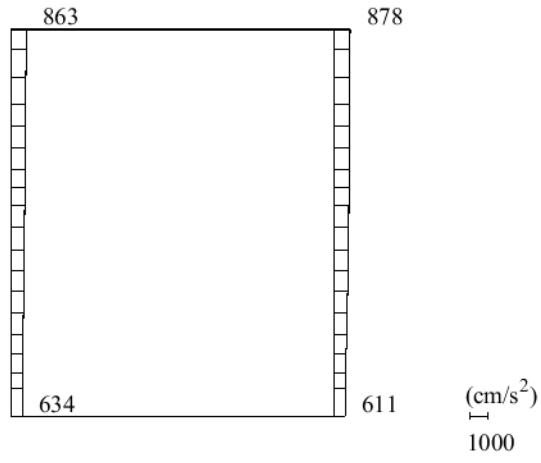


(a) S s - D (++) 水平

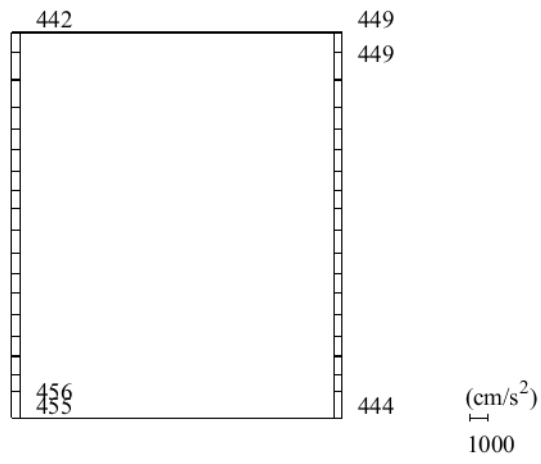


(b) S s - D (++) 鉛直

图 3-1 最大応答加速度分布图 (A-A断面)



(a) S s - D (++) 水平



(b) S s - D (++) 鉛直

图 3-2 最大応答加速度分布图 (B - B 断面)

参考資料2 ケミカルアンカーの有効埋め込み長さの検討

1. はじめに

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽について，地上部のボンベ庫はケミカルアンカーにて一体化を行っている。平面図を図1-1に，断面図を図1-2及び図1-3に，概略配筋図を図1-4及び図1-5に，ケミカルアンカー設置位置図を図1-6に示す。

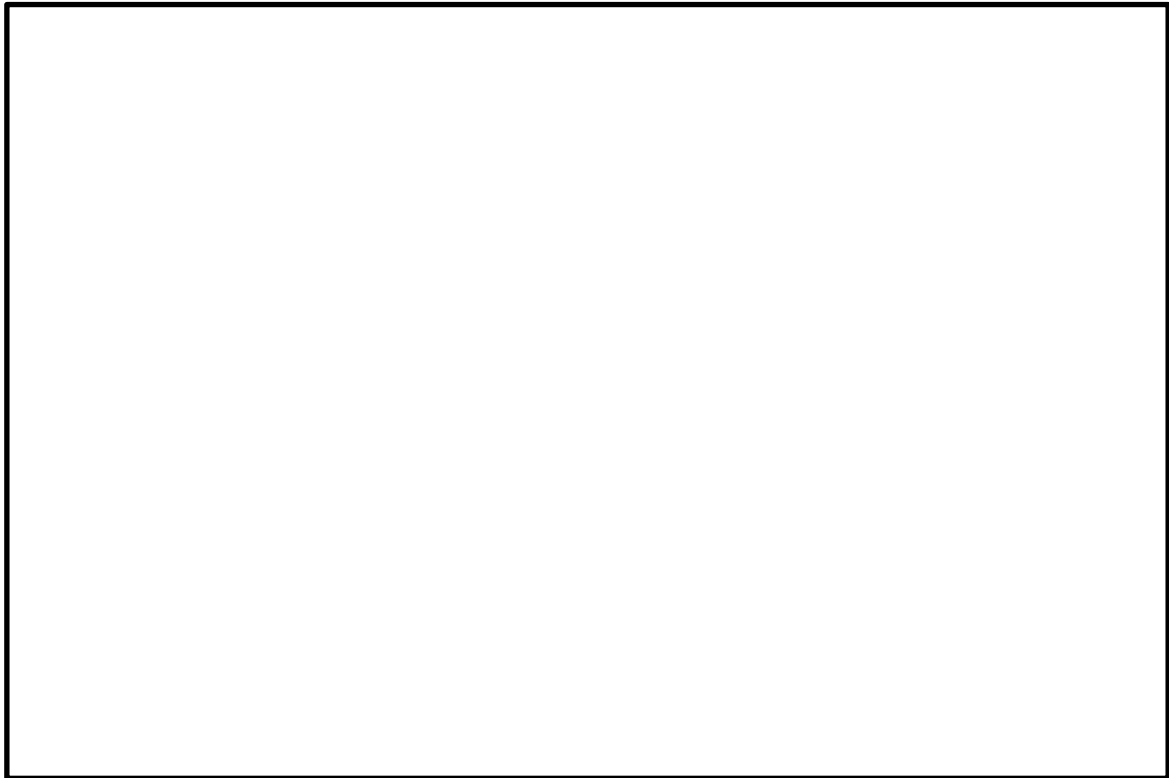
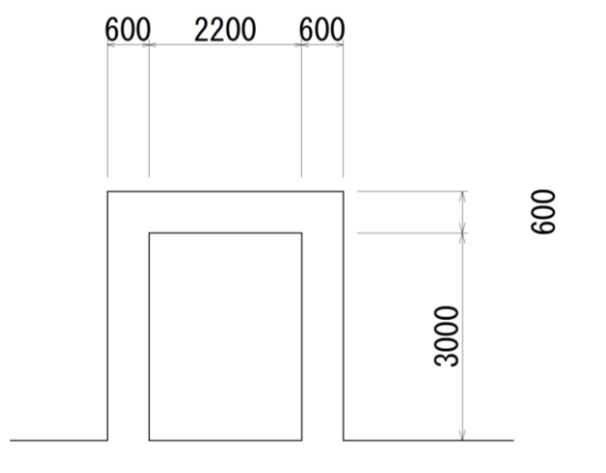
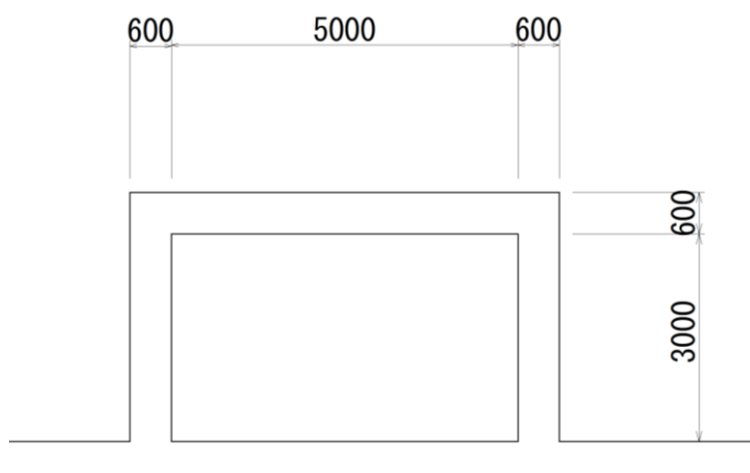


図1-1 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 平面図



(単位:mm)

図 1-2 ポンベ庫 断面図 (A-A 断面)



(単位:mm)

図 1-3 ポンベ庫 断面図 (B-B 断面)

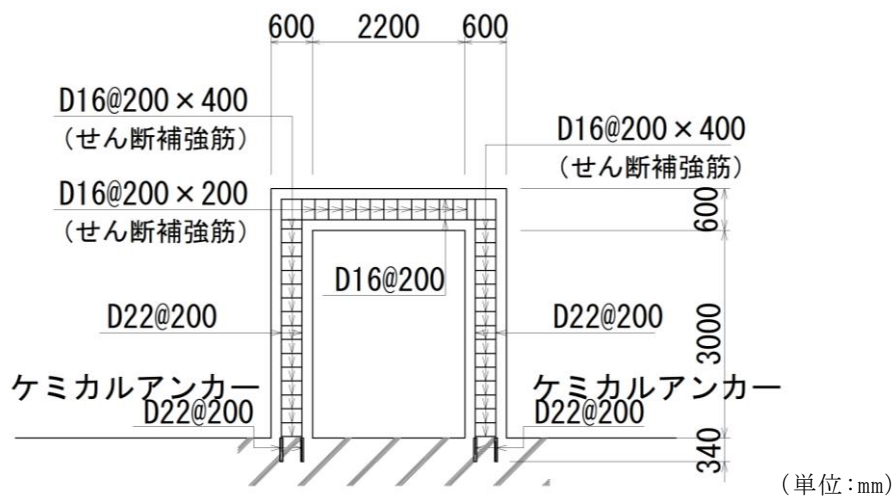


図 1-4 ボンベ庫 概略配筋図 (A-A 断面)

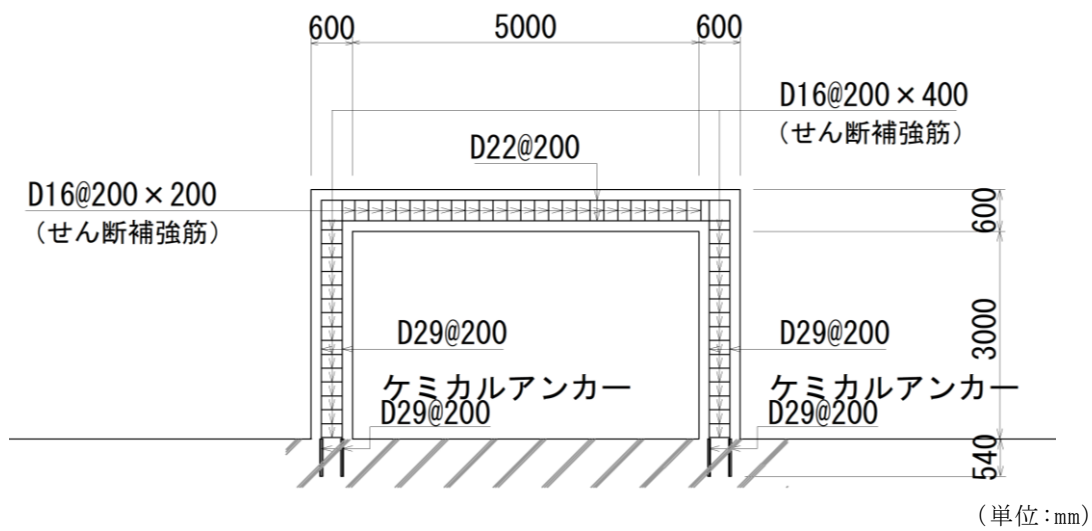


図 1-5 ボンベ庫 概略配筋図 (B-B 断面)

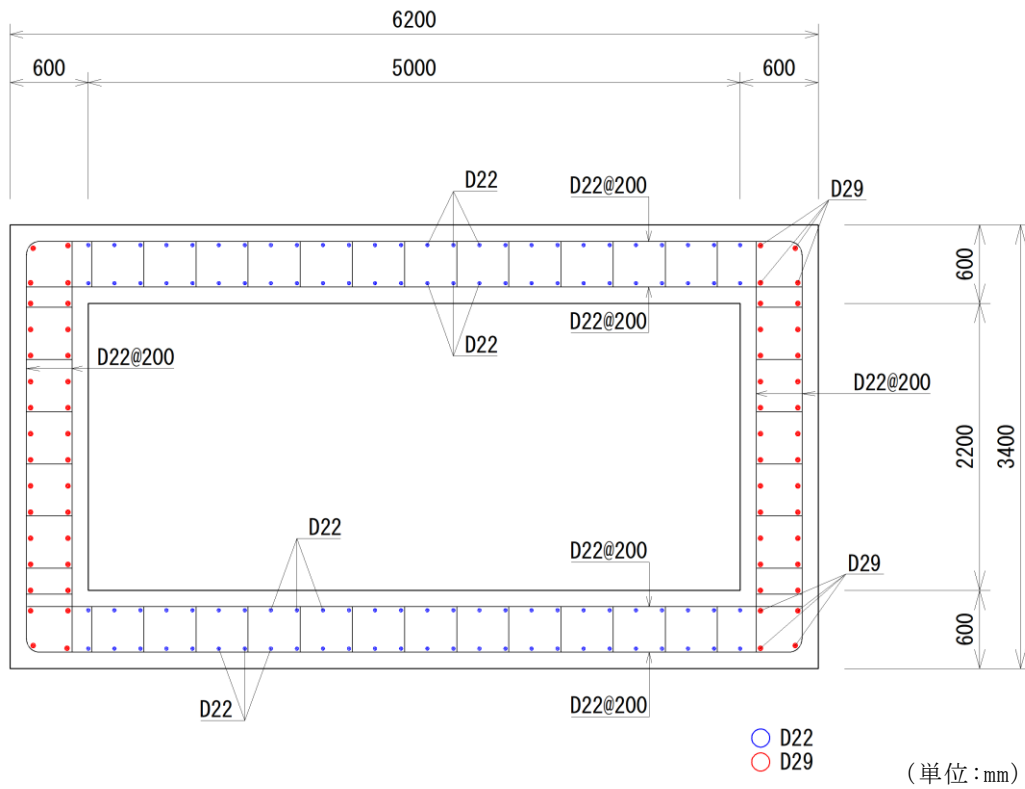


図 1-6 ケミカルアンカー設置位置図

2. 検討方法

ケミカルアンカーの有効埋め込み長さについては「各種合成構造設計指針・同解説 日本建築学会」を適用し、アンカーボルトのピッチを考慮した接着系アンカーボルトの有効埋め込み長さ l_e は下記より算定する。

$$l_e \geq \frac{s_{\sigma p a} \times d_a}{4 \times \tau_a}$$

ここで、

- $s_{\sigma p a}$: 接着系アンカーボルトの有効埋め込み長さを算定する場合の引張強度で $s_{\sigma p a} = s_{\sigma y}$ とする。
- $s_{\sigma y}$: 接着系アンカーボルトの規格降伏強度
- d_a : 接着系アンカーボルトの径
- l_e : 接着系アンカーボルトの有効埋め込み長さ
- τ_a : へり空き及びアンカーボルトのピッチを考慮した接着系アンカーボルトの引張力に対する付着強度で、下式による
$$\tau_a = \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3 \times \tau_{b a v g}$$
- α_n : へり空き及びアンカーボルトのピッチによる付着強度の低減係数であり下式による ($n=1, 2, 3$)。最も小さい寸法となる3面までを考慮する。 $\alpha_n = 0.5 (c_n / l_c) + 0.5$
ただし、 $(c_n / l_c) \geq 1.0$ の場合は $(c_n / l_c) = 1.0$
 $l_c \geq 10 d_a$ の場合は $l_c = 10 d_a$ とする。
- $\tau_{b a v g}$: 接着系アンカーボルトの基本平均付着強度
- c_n : へり空き寸法又はアンカーボルトピッチ a の $1/2$ 。
最も小さい寸法となる3面までを考慮する。

3. 検討結果

①接着系アンカーボルトの有効埋め込み長さを算定する場合の引張強度

$$s_{\sigma p a} = s_{\sigma y} = 345 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

②接着系アンカーボルトの径

ボンベ庫は部位により，既設コンクリートとの定着鉄筋径が異なる。

鉄筋径 D22 の南北壁と，鉄筋径 D29 の東西壁に区分する。

鉄筋径 D22 の南北壁 $d_a = 22\text{mm}$

鉄筋径 D29 の東西壁 $d_a = 29\text{mm}$

③接着系アンカーボルトの基本平均付着強度

$$\begin{aligned}\tau_{b a v g} &= 10 \times \sqrt{F_c / 21} \\ &= 10 \times \sqrt{27 / 21} \\ &= 11.34 \text{ (N/mm}^2\text{)}\end{aligned}$$

④へり空き及びアンカーボルトのピッチによる付着強度の低減係数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$

南北壁 鉄筋径 D22

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 0.5 (C1 / l_e') + 0.5 \\ &= 0.5 (78.5 / 220) + 0.5 \\ &= 0.68\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= 0.5 (C1 / l_e') + 0.5 \\ &= 0.5 (100 / 220) + 0.5 \\ &= 0.73\end{aligned}$$

$$\alpha_3 = 1.00$$

東西壁 鉄筋径 D29

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 0.5 (C1 / l_e') + 0.5 \\ &= 0.5 (78.5 / 290) + 0.5 \\ &= 0.64\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= 0.5 (C1 / l_e') + 0.5 \\ &= 0.5 (78.5 / 290) + 0.5 \\ &= 0.64\end{aligned}$$

$$\alpha_3 = 1.00$$

⑤接着系アンカーボルトの有効埋め込み長さ

南北壁

$$l_e' = 10 d_a \\ = 220\text{mm}$$

東西壁

$$l_e' = 10 d_a \\ = 290\text{mm}$$

⑥へり空き及びアンカーボルトのピッチを考慮した接着系アンカーボルトの引張力に対する付着強度

南北壁 鉄筋径 D22

$$\tau_a = \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3 \times \tau_{bavg} \\ = 5.63 \text{ N/mm}^2$$

東西壁 鉄筋径 D22

$$\tau_a = \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3 \times \tau_{bavg} \\ = 4.64 \text{ N/mm}^2$$

⑦計算から算出される接着系アンカーボルトの有効埋め込み長さ

南北壁 鉄筋径 D22

$$l_e = (s_{opa} \times d_a) / (4 \times \tau_a) \\ = 337\text{mm}$$

東西壁 鉄筋径 D29

$$l_e = (s_{opa} \times d_a) / (4 \times \tau_a) \\ = 539.1\text{mm}$$

⑧有効埋め込み長さに対する設計定着長

表 3-1 のとおり，設計定着長は有効埋め込み長さを満足することを確認した。

表 3-1 有効埋め込み長さに対する設計定着長

	有効埋め込み長さ (mm)	設計定着長 (mm)
南北壁 (鉄筋径 D22)	337.0	340
東西壁 (鉄筋径 D29)	539.1	540

補足-026-11 緊急時対策所用燃料地下タンクの耐震性についての
計算書に関する補足説明資料

目 次

1. 評価方法	1
2. 評価条件	1
2.1 適用規格	1
2.2 構造概要	3
2.3 評価対象断面の方向	11
2.4 評価対象断面の選定	11
2.5 使用材料及び材料の物性値	11
2.6 地盤物性値	12
2.7 評価構造物諸元	13
2.8 地下水位	15
2.9 耐震評価フロー	15
3. 地震応答解析	17
3.1 地震応答解析手法	17
3.2 地震応答解析モデルの設定	20
3.2.1 解析モデル領域	20
3.2.2 境界条件	21
3.2.3 構造物のモデル化	24
3.2.4 地盤のモデル化	25
3.2.5 地震応答解析モデル	27
3.2.6 ジョイント要素の設定	29
3.3 減衰定数	33
3.4 荷重及び荷重の組合せ	42
3.4.1 内水圧	43
3.4.2 積雪荷重	43
3.4.3 動水圧	44
3.5 地震応答解析の解析ケース	47
3.5.1 耐震評価における解析ケース	47
4. 評価内容	51
4.1 入力地震動の設定	51
4.2 許容限界の設定	68
4.2.1 構造部材（鉄筋コンクリート）に対する許容限界	68
4.2.2 構造部材（鋼製タンク）に対する許容限界	70
4.2.3 基礎地盤の支持性能に対する許容限界	70
4.3 評価方法	71
4.3.1 A-A断面	71

4.3.2	B－B断面	72
4.3.3	剛域の設定の有無について	74
5.	評価結果	75
5.1	地震応答解析結果	75
5.1.1	解析ケース	75
5.1.2	断面力分布（曲げ・軸力系の破壊に対する照査，A－A断面）	79
5.1.3	断面力分布（せん断破壊に対する照査，A－A断面）	82
5.1.4	断面力分布（層間変位最大時刻，B－B断面）	85
5.2	構造部材の健全性に対する評価結果	87
5.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果	87
5.2.2	せん断破壊に対する評価結果	92
5.3	基礎地盤の支持性能に対する評価結果	98
6.	まとめ	102

参考資料 充填コンクリートの評価結果

1. 評価方法

緊急時対策所用燃料地下タンクは、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として非常用発電装置に係る燃料の貯蔵が要求される構造物であり、貯水機能相当*が要求される。

緊急時対策所用燃料地下タンクについては、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき、緊急時対策所用燃料地下タンクが基準地震動 S_s に対して十分な構造強度及び貯水機能相当の機能を有していることを確認する。

緊急時対策所用燃料地下タンクに要求される機能の維持を確認するにあたっては、地震応答解析に基づく構造部材の健全性評価、貯水機能相当の評価及び基礎地盤の支持性能評価により行う。

なお、貯水機能相当を期待する部位は、鋼製タンクとする。

注記*：貯水機能は、VI-2-1-1「耐震設計の基本方針」において、重大事故等時に溶融炉心の冷却水を確保するための設備に対して貯水機能を確保し、漏えいを防止することと定義されている。緊急時対策所用燃料地下タンクの要求機能はこれに該当するものではないが、重大事故等時に燃料の漏出を防止する観点から、貯水機能と同等の機能を維持するものとし、要求機能を「貯水機能相当」と表現する。

2. 評価条件

2.1 適用規格

緊急時対策所用燃料地下タンクの耐震評価にあたっては、「コンクリート標準示方書[構造性能照査編]（（社）土木学会，2002年制定）」（以下「コンクリート標準示方書2002」という。）及び「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）」（以下「J E A G 4 6 0 1 - 1987」という。）適用するが、鋼材の曲げ・軸力系及びせん断破壊の許容限界については、「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（（社）日本建築学会，2005年）」を適用する。また、基礎地盤の支持性能の許容限界については、「道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解説（（社）日本道路協会，平成14年3月）」（以下「道示・IV 下部構造編」という。）を適用する。なお、解析モデルの要素分割及び構造物のモデル化等において、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（（社）土木学会，2005年）」（以下「土木学会マニュアル2005」という。）も参照している。

表2-1に適用する規格，基準類を示す。

表 2-1 適用する規格，基準類

項目	適用する規格，基準類	参照する内容
使用材料及び 材料定数	・コンクリート標準示方書 2002	・鉄筋コンクリートの材料諸元 (γ , E, ν)
荷重及び荷重 の組合せ	・コンクリート標準示方書 2002	・永久荷重，偶発荷重等の適切な組合せを 検討
許容限界	・コンクリート標準示方書 2002	【鉄筋コンクリート】 ・曲げ及び軸力系の破壊に対する照査にお いて，発生応力度が短期許容応力度を下 回ることを確認 ・せん断破壊に対する照査において，発生 せん断力が短期許容せん断力を下回るこ とを確認
	・鋼構造設計規準－許容応 力度設計法－（日本建築 学会 2005 年改定）	【鋼製タンク】 ・曲げ及び軸力系の破壊に対する照査にお いて，発生応力度が短期許容引張応力度 を下回ることを確認 ・せん断破壊に対する照査において，発生 せん断応力度が短期許容せん断応力度を 下回ることを確認
	・道示・IV下部構造編	・基礎地盤の支持性能に対する照査は，基 礎地盤に発生する応力が極限支持力度を 下回ることを確認
地震応答解析	・J E A G 4 6 0 1 -1987	・有限要素法による 2 次元モデル作成等
	・土木学会マニュアル 2005	・構造物の要素分割等

2.2 構造概要

緊急時対策所用燃料地下タンクの位置図を図 2-1 に、周辺拡大図を図 2-2 に、平面図を図 2-3 に、断面図を図 2-4 及び図 2-5 に、概略配筋図を図 2-6～図 2-8 に、評価対象地質断面図を図 2-9 及び図 2-10 に示す。

緊急時対策所用燃料地下タンクは、延長 12.8m、幅 3.85m、高さ 3.9m の鉄筋コンクリート造で鋼製タンク（ $t = 9\text{mm}$ 、 $\phi = 2400\text{mm}$ ）を内包する地中構造物であり、十分な支持性能を有する C_H 級～ C_L 級岩盤に直接支持される。

頂版はハーフ P C a 版を設置後、現場打ちコンクリートを打設することで一体化を図っている。なお、トラス筋については保守的に構造鉄筋として考慮しない。

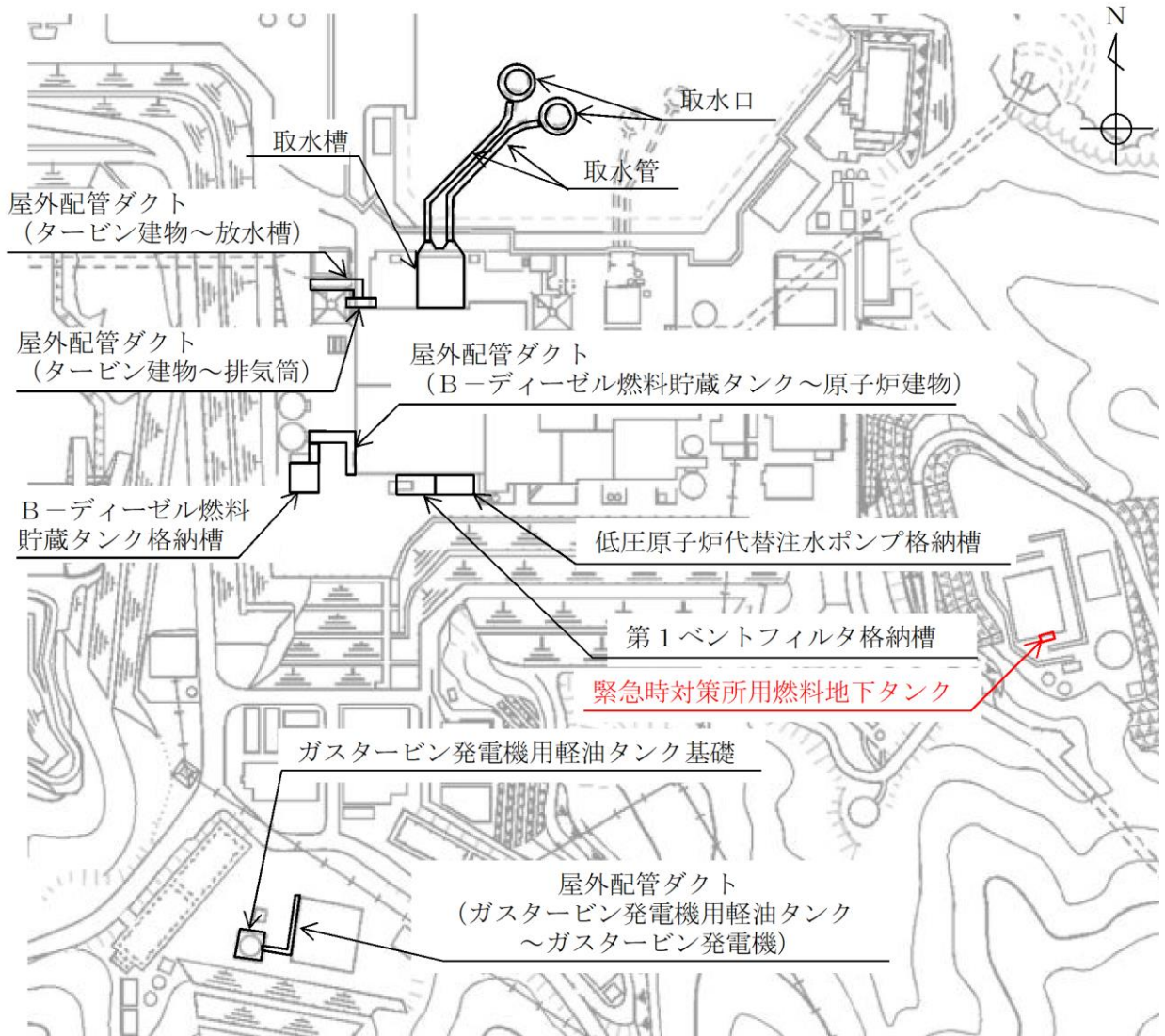


図 2-1 緊急時対策所用燃料地下タンク 位置図

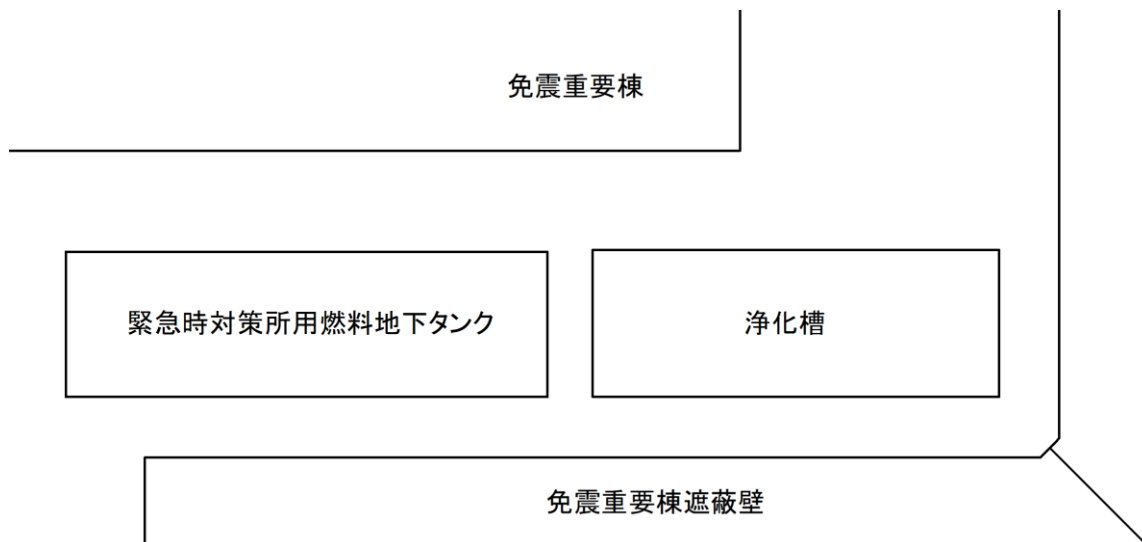


図 2-2 緊急時対策所用燃料地下タンク周辺拡大図

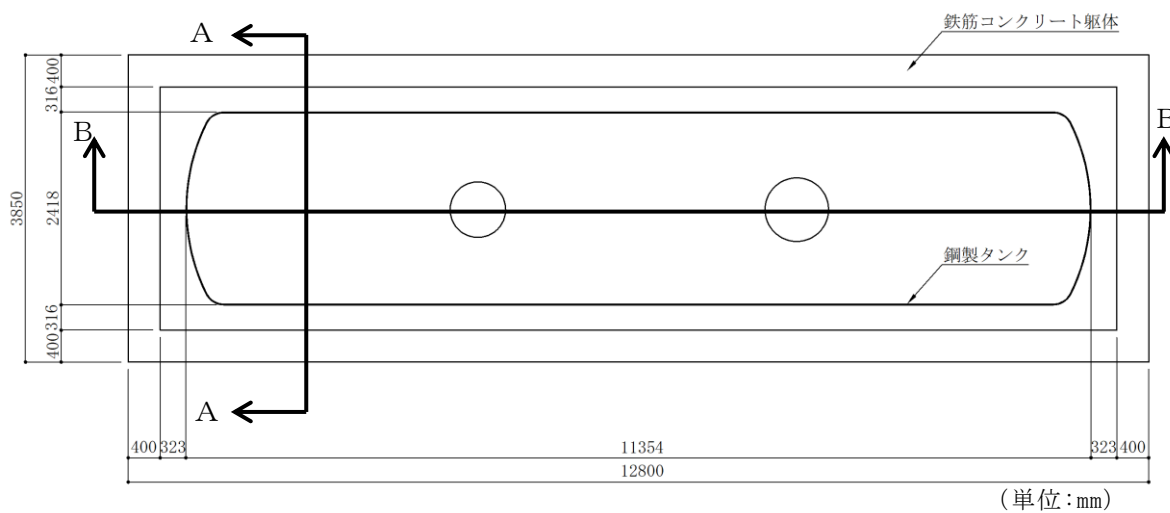


図 2-3 緊急時対策所用燃料地下タンク 平面図

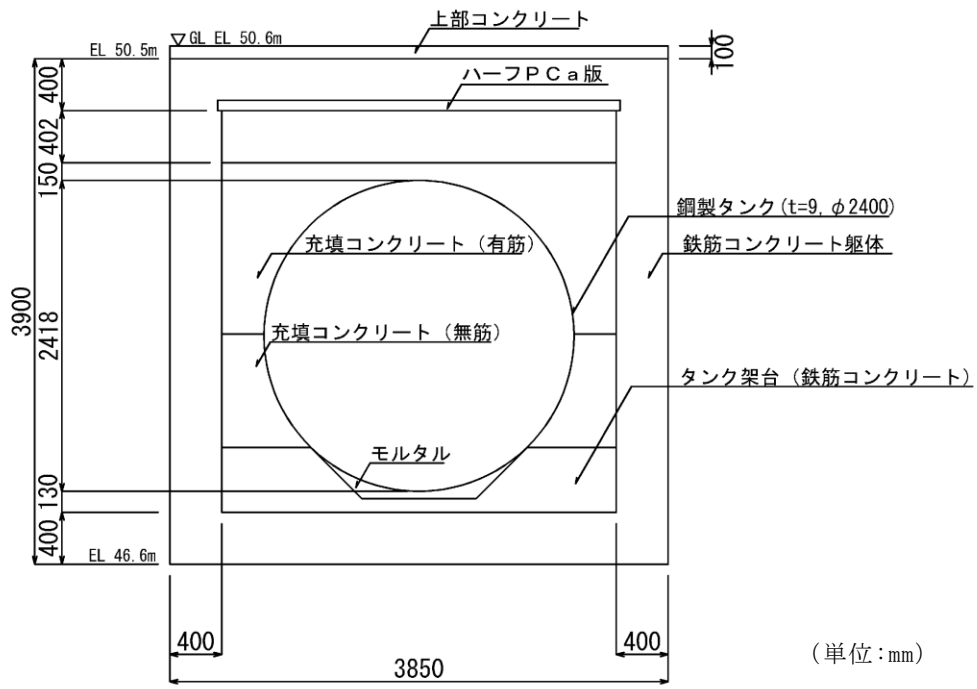


図 2-4 緊急時対策所用燃料地下タンク 断面図 (A-A断面)

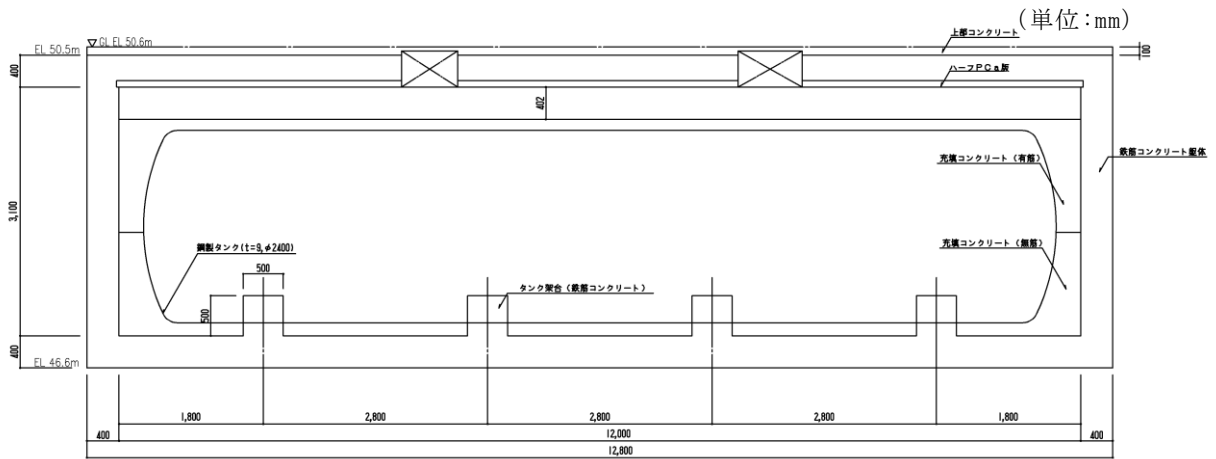


図 2-5 緊急時対策所用燃料地下タンク 断面図 (B-B 断面)

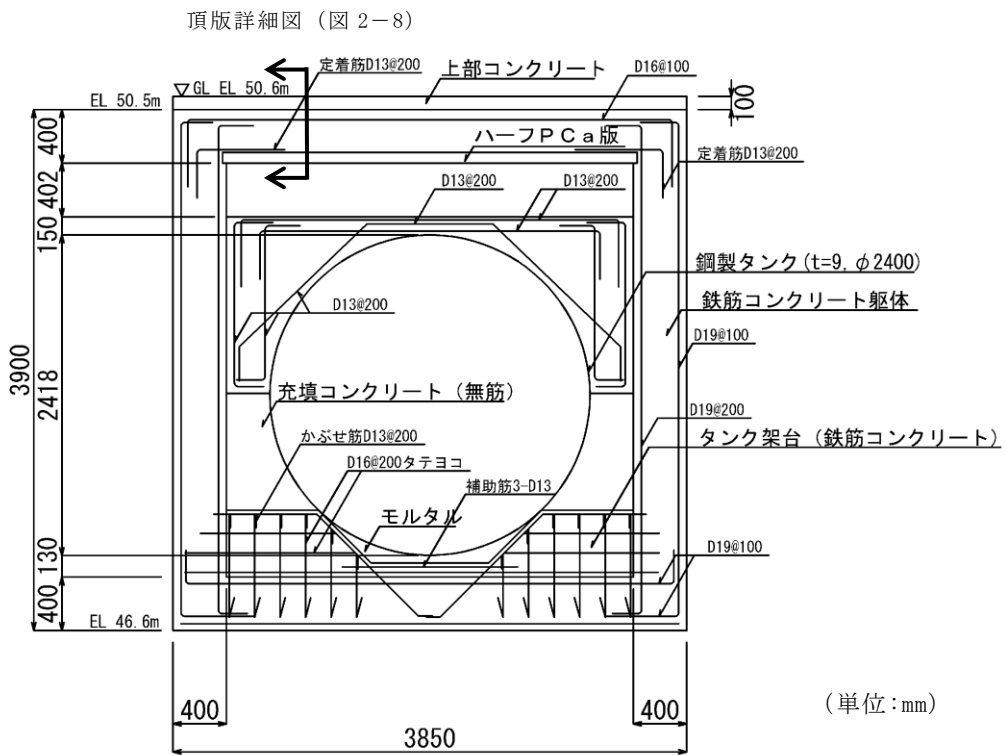
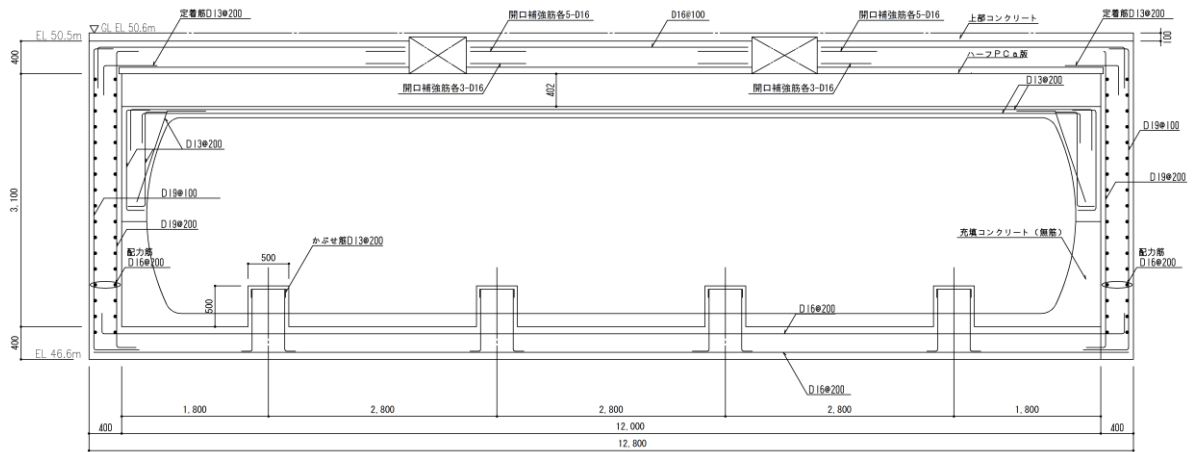
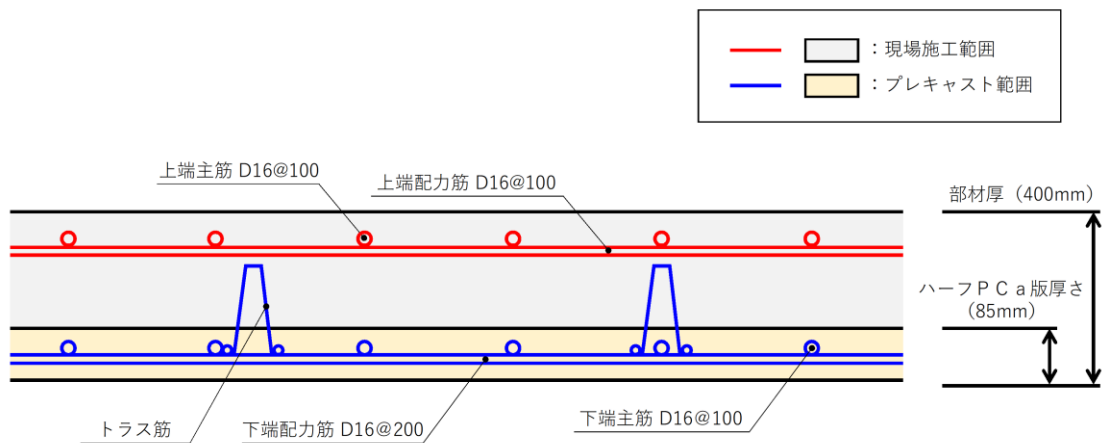


図 2-6 緊急時対策所用燃料地下タンク 概略配筋図 (A-A 断面)



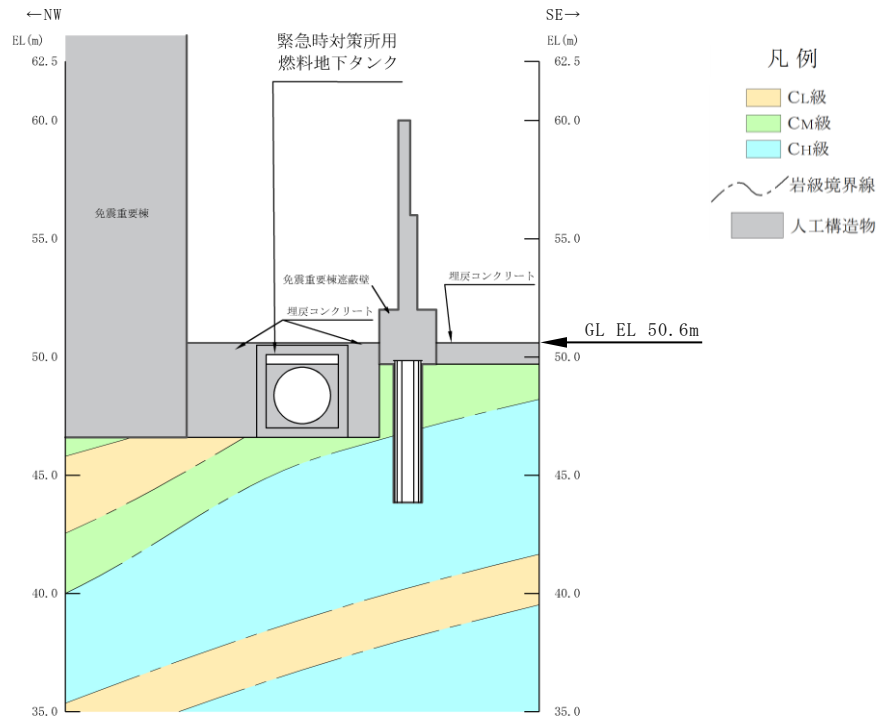
注：配力筋は評価に用いる側壁のみ記載 (単位: mm)

図 2-7 緊急時対策所用燃料地下タンク 概略配筋図 (B-B断面)

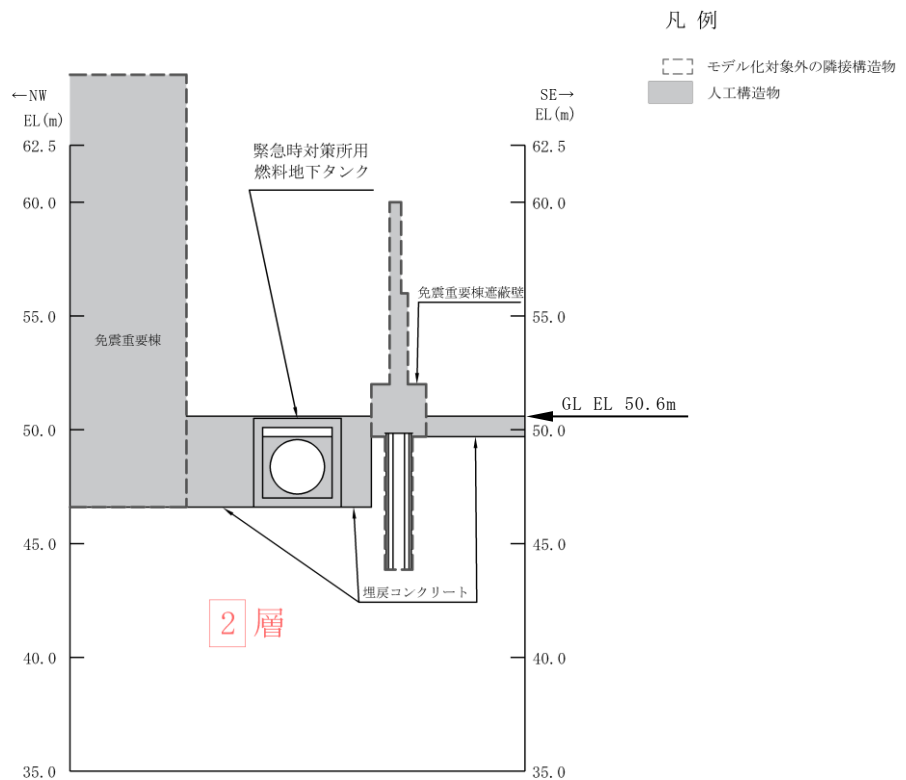


注1：ハーフP.C.a版内の配筋はSD295Aとする。
注2：トラス筋は構造鉄筋として考慮しない。

図 2-8 緊急時対策所用燃料地下タンク 概略配筋図 (頂版詳細図)



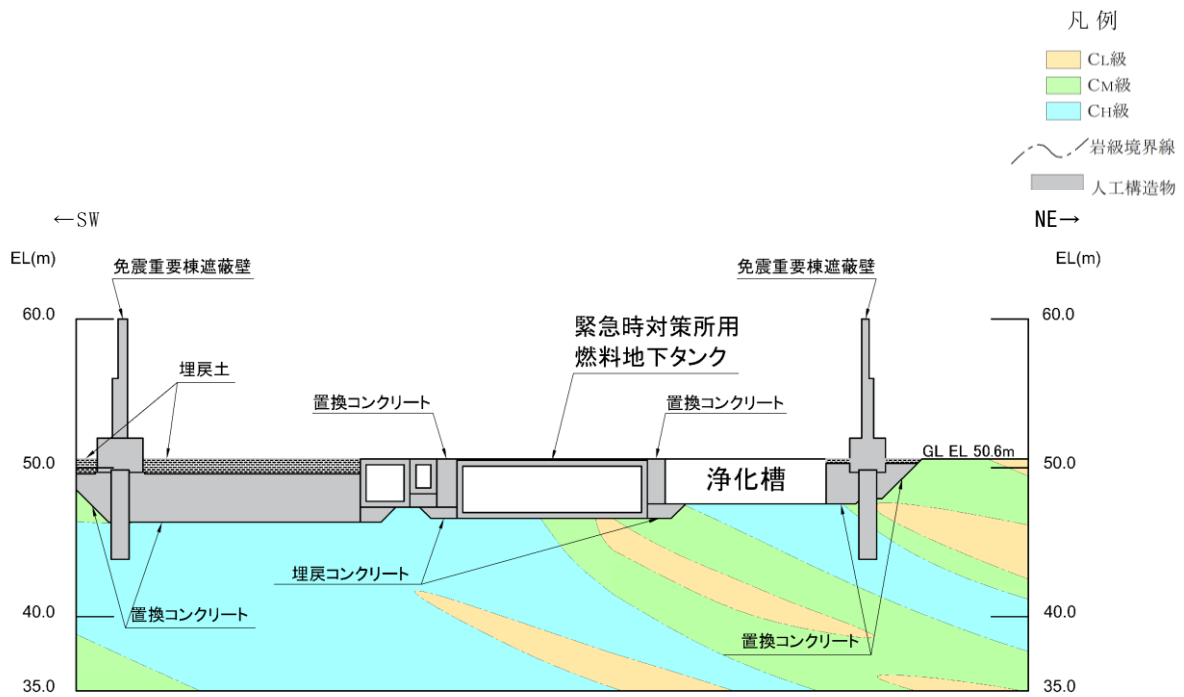
(岩級図)



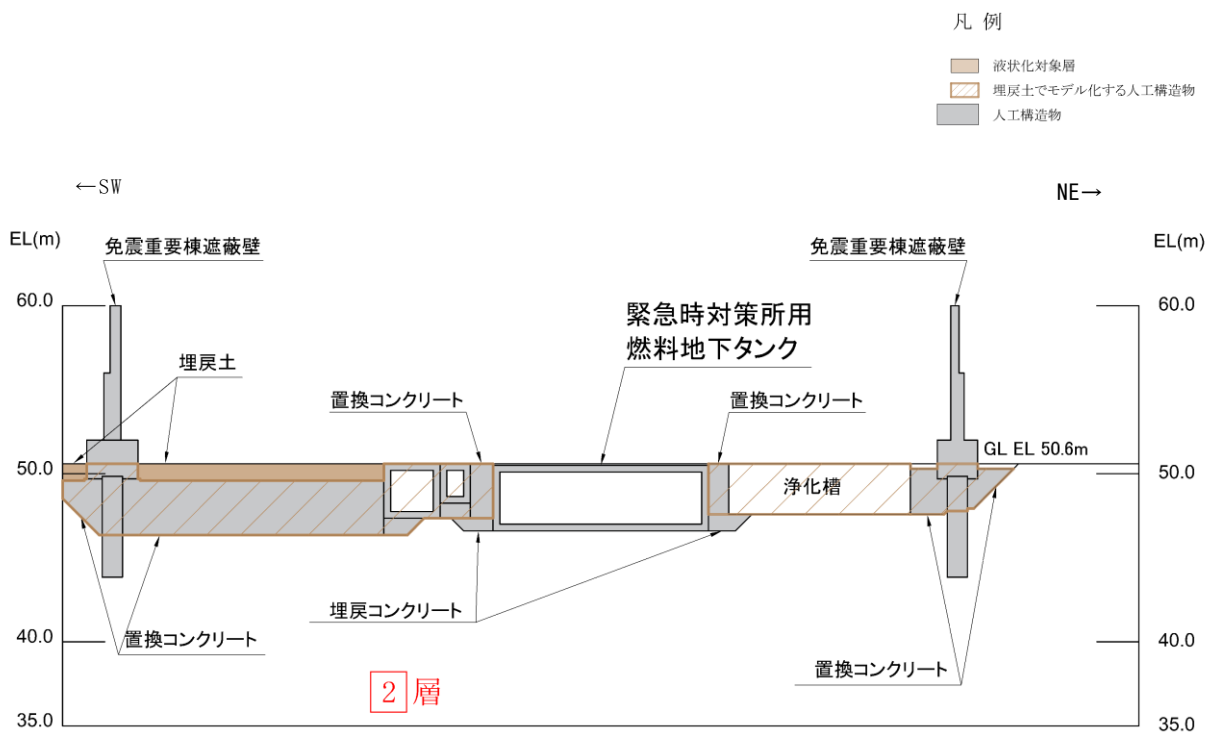
地下水位は施設設置地盤より十分低いいため、設計地下水位を設定しない構造物
(3次元浸透流解析による自然水位：EL 22.0m～22.5m)

(速度層図)

図 2-9 緊急時対策所用燃料地下タンク 評価対象地質断面図 (A-A断面位置)



(岩級図)



地下水位は施設設置地盤より十分低いため、設計地下水位を設定しない構造物
(3次元浸透流解析による自然水位：EL 22.0m～22.5m)

(速度層図)

図 2-10 緊急時対策所用燃料地下タンク 評価対象地質断面図 (B-B断面位置)

2.3 評価対象断面の方向

長辺方向に加振した場合は、加振方向に直交する方向の構造物の長さに対する加振方向と平行に設置される妻壁同士の離隔が小さくなるが、短辺方向に加振した場合は、耐震要素として機能する妻壁同士の離隔が大きい。

以上より、弱軸方向となる短辺方向を選定する。ただし、短辺方向において評価対象外となっている長辺方向の側壁の評価についても実施する。

2.4 評価対象断面の選定

「2.3 評価対象断面の方向」に示すとおり、評価対象断面は、加振方向に平行な部材全体を耐震設計上見込むことができず、弱軸方向となる短辺方向から選定する。短辺方向における各断面の奥行き方向について、部材厚や内空断面及び配筋はおおむね同一であることから、評価対象断面はA-A断面とする。

なお、短辺方向の評価に含まれない部材（長辺方向の側壁）についても、B-B断面を用いて側壁の評価を実施する。

2.5 使用材料及び材料の物性値

構造物の使用材料を表 2-2 に、材料の物性値を表 2-3 に示す。

表 2-2 使用材料

材料		仕様
構造物	構造部材（鉄筋コンクリート） 充填コンクリート（有筋・無筋）	設計基準強度 24.0N/mm ²
	鉄筋	SD295A, SD345
	鋼製タンク	SS400
埋戻コンクリート		設計基準強度 18.0N/mm ²

表 2-3 材料の物性値

材料	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比
構造部材（鉄筋コンクリート） 充填コンクリート（有筋）	2.50×10 ⁴	24.0* ¹	0.2
充填コンクリート（無筋）	2.50×10 ⁴	23.0* ²	
埋戻コンクリート	2.20×10 ⁴	22.6* ²	
鋼製タンク	2.00×10 ⁵	77.0	0.3

注記*1：鉄筋コンクリートの単位体積重量を示す。

*2：無筋コンクリートの単位体積重量を示す。

2.6 地盤物性値

地盤については、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」にて設定している物性値を用いる。地盤の物性値を表2-4及び表2-5に示す。

表2-4 地盤の解析用物性値（岩盤）

層番号	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	動せん断弾性係数 G_d ($\times 10^5$ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
2層	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
3層*	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
4層*	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
5層*	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
6層*	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記*：入力地震動の算定においてのみ用いる解析用物性値

表2-5 地盤の解析用物性値（埋戻土）

		解析用物性値
		埋戻土
物理特性	密度 ρ_s (g/cm ³)	2.11
強度特性	初期せん断強度 τ_0 (N/mm ²)	0.22
	内部摩擦角 ϕ (°)	22
動的変形特性	初期せん断弾性係数 G_0 (N/mm ²)	$G_0 = 749 \sigma^{0.66}$ (N/mm ²) $G/G_0 = 1/(1 + \gamma/0.00027)$
	動ポアソン比 ν_d	0.45*
減衰特性	減衰定数 h	$h = 0.0958 \times (1 - G/G_0)^{0.85}$

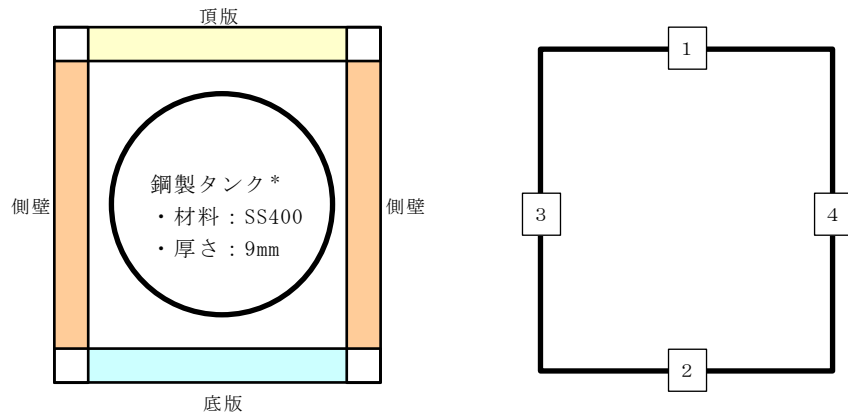
注記*：常時応力解析においては、土木学会マニュアル2005に基づき、静止土圧 ($K_0 = \nu / (1 - \nu) = 0.5$) を作用させるため、 $\nu = 0.333$ とする。

2.7 評価構造物諸元

緊急時対策所用燃料地下タンクの諸元を表 2-6 及び表 2-7 に、評価部位を図 2-11 及び図 2-12 に示す。

表 2-6 評価部位とその仕様 (A-A 断面)

部位		仕様		材料		要求性能
		部材幅 (mm)	部材厚 (mm)	コンクリート 設計基準強度 $f'_{c,k}$ (N/mm ²)	鉄筋	
頂版	1	3050	400	24.0	SD345 SD295A	構造強度を 有すること
底版	2	3050	400	24.0	SD345	
側壁	3 4	3100	400	24.0	SD345	



注記*：鋼製タンクは貯水機能相当を要求機能とする。

図 2-11 評価部位位置図

表 2-7 評価部位とその仕様 (B-B 断面)

部位		仕様		材料		要求性能
		部材幅 (mm)	部材厚 (mm)	コンクリート 設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)	鉄筋	
側壁	1 2	3100	400	24.0	SD345	構造強度を 有すること

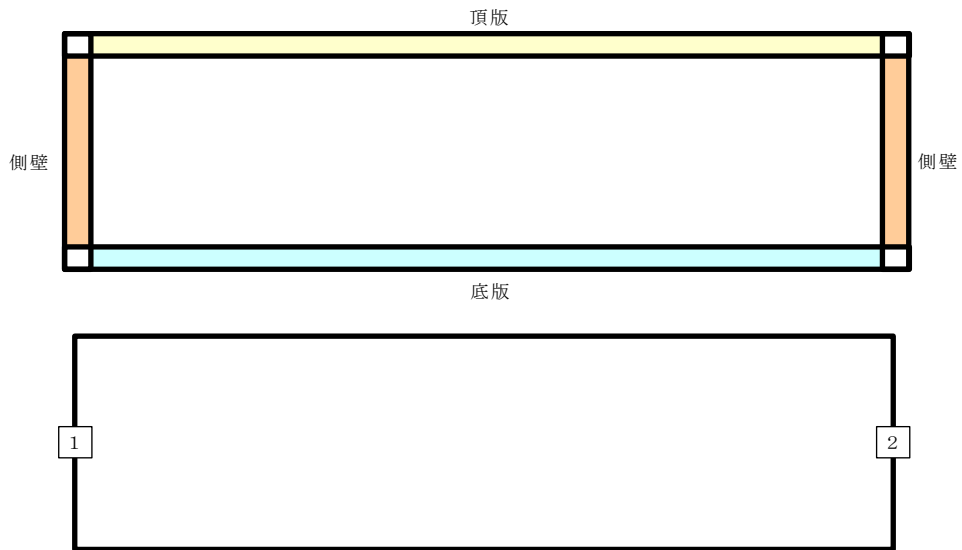


図 2-12 評価部位位置図

2.8 地下水位

設計地下水位は、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に従い設定する。設計地下水位の一覧を表2-8に示す。

なお、緊急時対策所用燃料地下タンク直下の地下水位は、緊急時対策所用燃料地下タンク下端より低いため、地下水位を考慮しない。

表2-8 設計地下水位の一覧

施設名称	設計地下水位 (EL m)	備考
緊急時対策所用 燃料地下タンク	地下水位が構造物基礎下端より十分低いため考慮しない。	3次元浸透流解析による 自然水位：EL 22.1m～22.6m

2.9 耐震評価フロー

緊急時対策所用燃料地下タンクの耐震評価フローを図2-13に示す。弱軸方向断面であるA-A断面については、地震応答解析における応答値を用いたはり要素の評価を実施する。一方で強軸方向断面であるB-B断面については、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」に基づき、短辺方向の評価に含まれない側壁に対して、妻壁による拘束効果を固定境界として考慮した4辺固定版による評価を実施する。

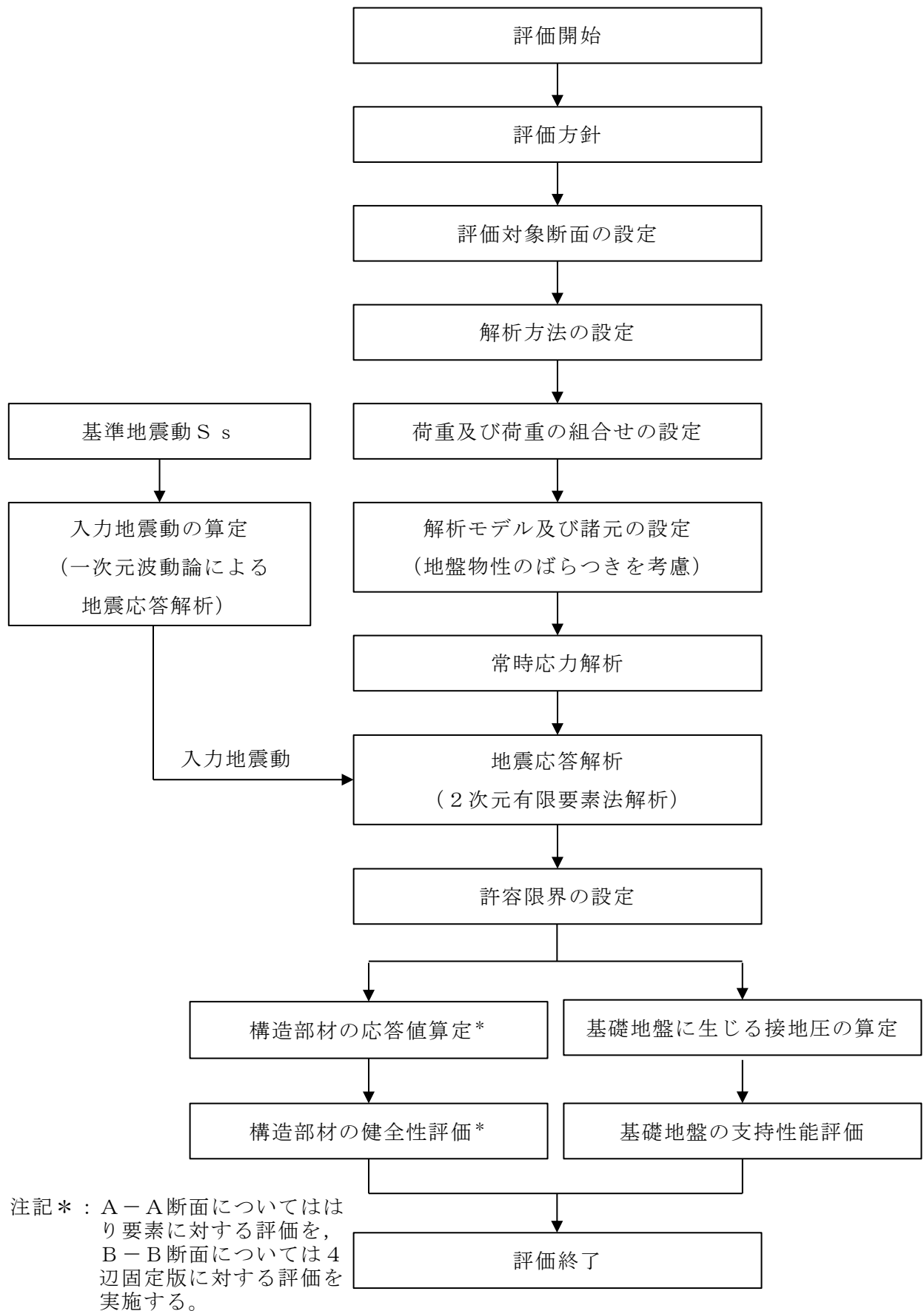


図 2-13 緊急時対策所用燃料地下タンクの耐震評価フロー

3. 地震応答解析

3.1 地震応答解析手法

地震応答解析は、構造物と地盤の相互作用を考慮できる 2 次元有限要素法により、基準地震動 S_s に基づき設定した水平地震動と鉛直地震動の同時加振による逐次時間積分の時刻歴応答解析により行うこととし、解析手法については、図 3-1 に示す解析手法の選定フローに基づき選定する。

A-A 断面及び B-B 断面は、施設周辺の設計地下水位が底版より低いため解析手法の選定フローに基づき「①全応力解析」を選定する。

A-A 断面においては、構造部材は線形はり要素でモデル化し、充填コンクリートは線形の平面ひずみ要素でモデル化する。

B-B 断面においては、構造部材は線形はり要素でモデル化し、充填コンクリートは配置が局所的であることからモデル化しない。妻壁については 4 辺固定版に与える土圧を保守的に算定する観点から、等価剛性でモデル化する。

また、地盤については、平面ひずみ要素でモデル化することとし、岩盤は線形でモデル化する。埋戻土については、地盤のひずみ依存性を適切に考慮できるようなマルチスプリングモデルを用いることとし、ばね特性は双曲線モデル（修正 GHE モデル）を用いて非線形性を考慮する。なお、埋戻コンクリートについては線形の平面ひずみ要素でモデル化する。

地震応答解析については、解析コード「T D A P III」を使用する。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

地震応答解析手法の選定フローを図 3-2 に示す。

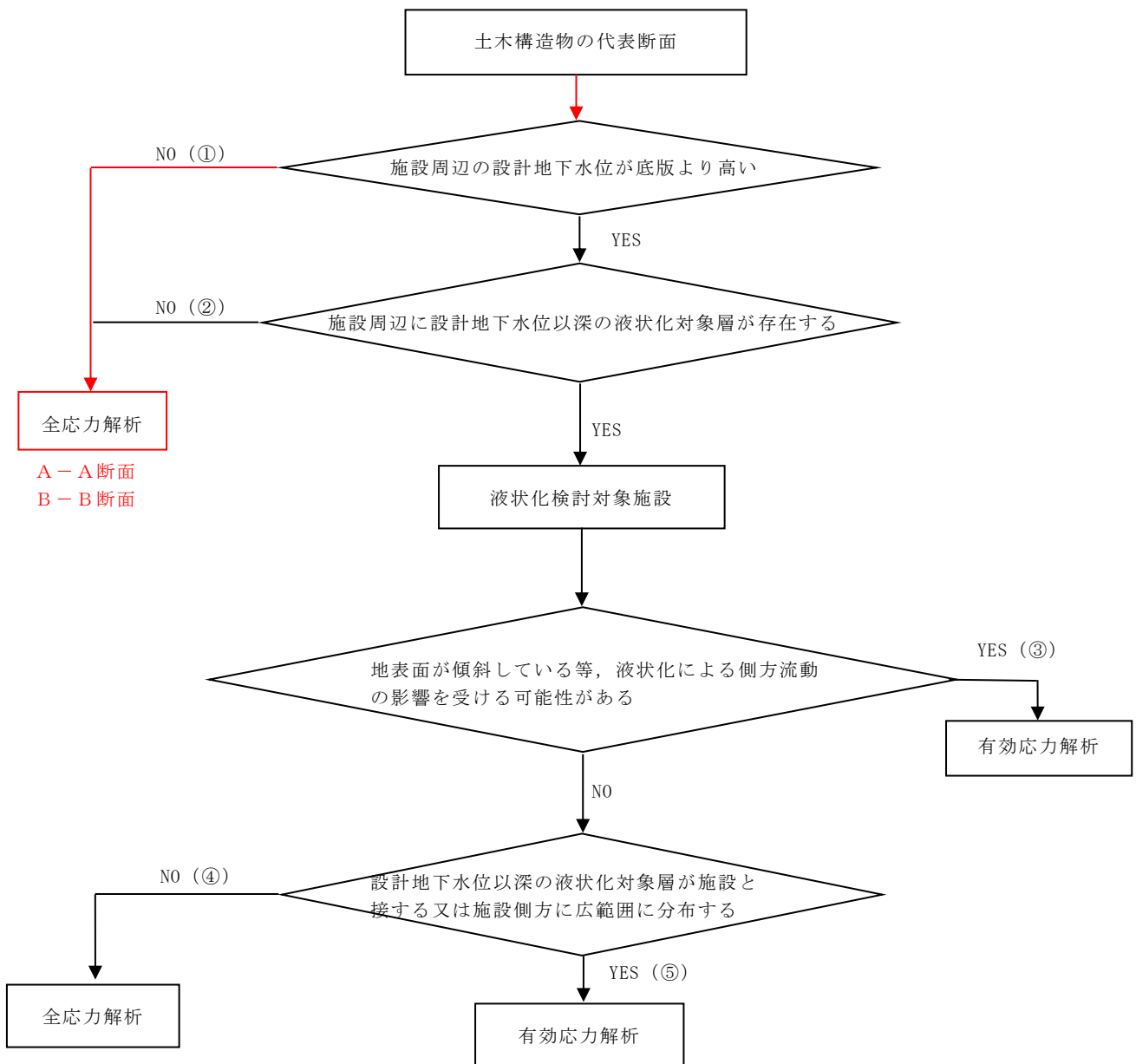


図 3-1 解析手法の選定フロー

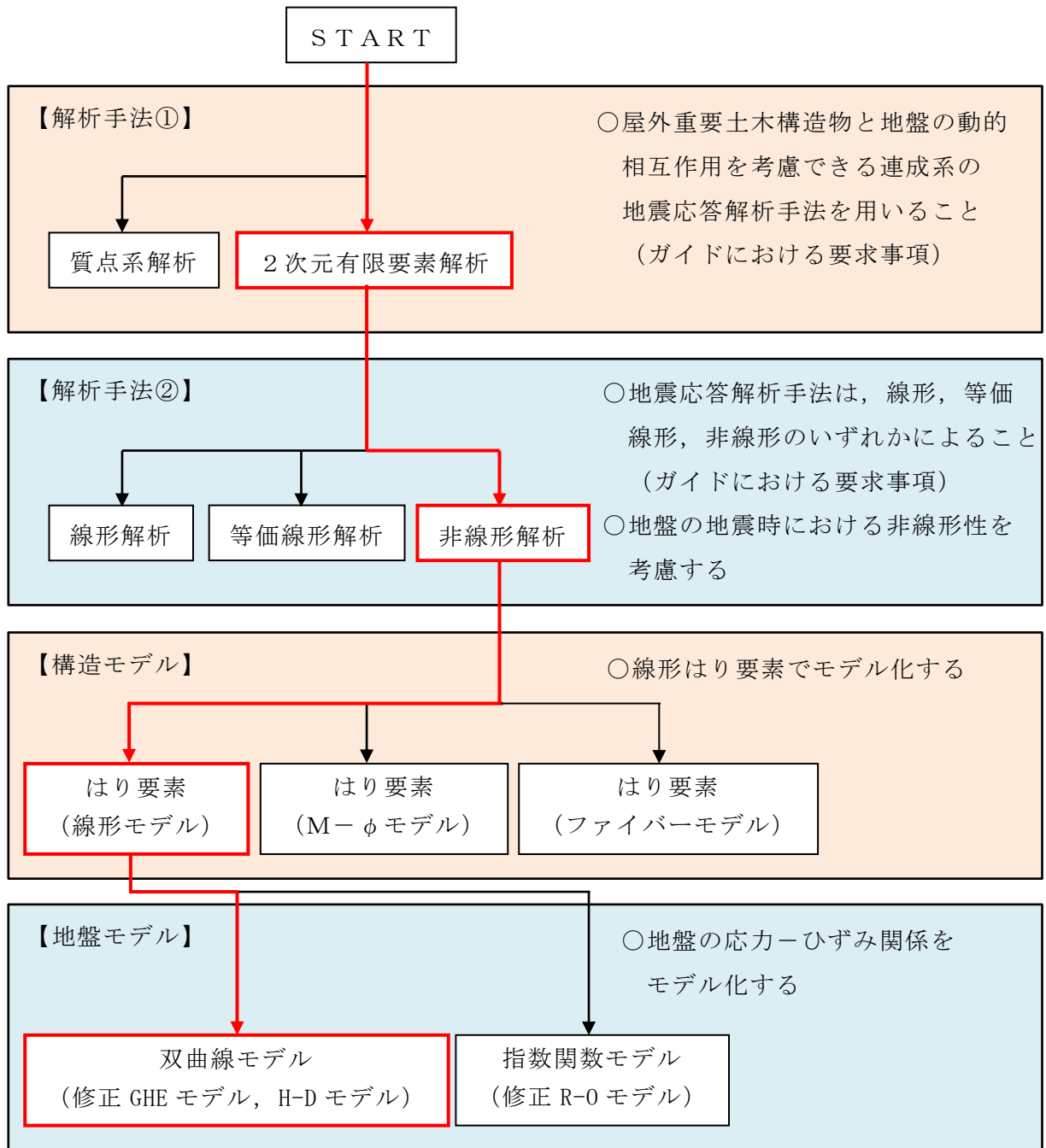


図 3-2 地震応答解析手法の選定フロー

3.2 地震応答解析モデルの設定

3.2.1 解析モデル領域

地震応答解析モデルは、境界条件の影響が地盤及び構造物の応力状態に影響を及ぼさないよう、十分広い領域とする。J E A G 4 6 0 1 -1987 を参考に、図 3-3 に示すとおりモデル幅を構造物基礎幅の 5 倍以上、モデル高さを構造物基礎幅の 1.5 倍～2 倍以上とする。

なお、解析モデルの境界条件は、側面及び底面ともに粘性境界とする。

地盤の要素分割については、波動をなめらかに表現するために、対象とする波長の 5 分の 1 程度を考慮し、要素高さを 1m 程度まで細分割して設定する。

構造物の要素分割については、土木学会マニュアル 2005 に従い、要素長さを部材の断面厚さ又は有効高さの 2.0 倍以下とし、1.0 倍程度まで細分して設定する。

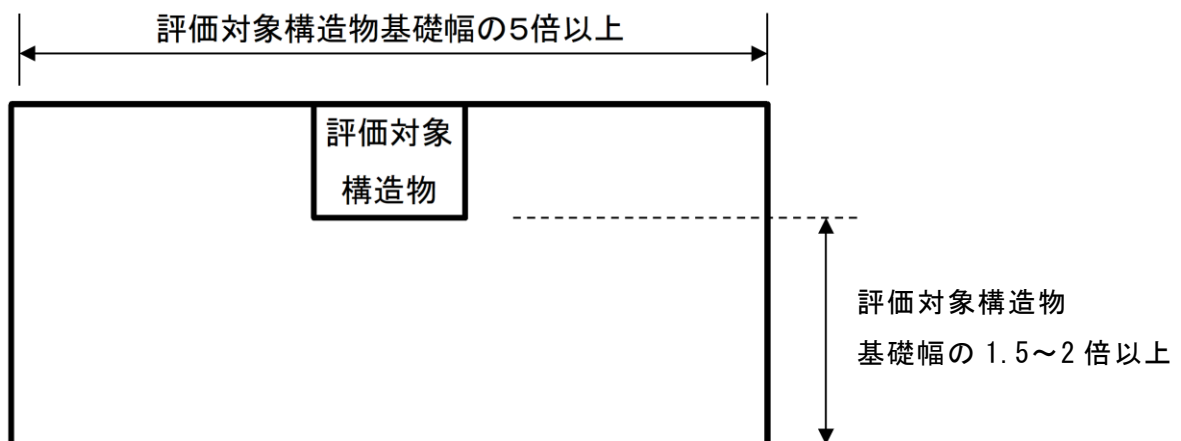


図 3-3 モデル化範囲の考え方

3.2.2 境界条件

(1) 固有値解析時

固有値解析を実施する際の境界条件は、境界が構造物を含めた周辺地盤の振動特性に影響を与えないよう設定する。ここで、底面境界は地盤のせん断方向の卓越変形モードを把握するために固定とし、側方境界はフリーとする。境界条件の概念図を図3-4に示す。

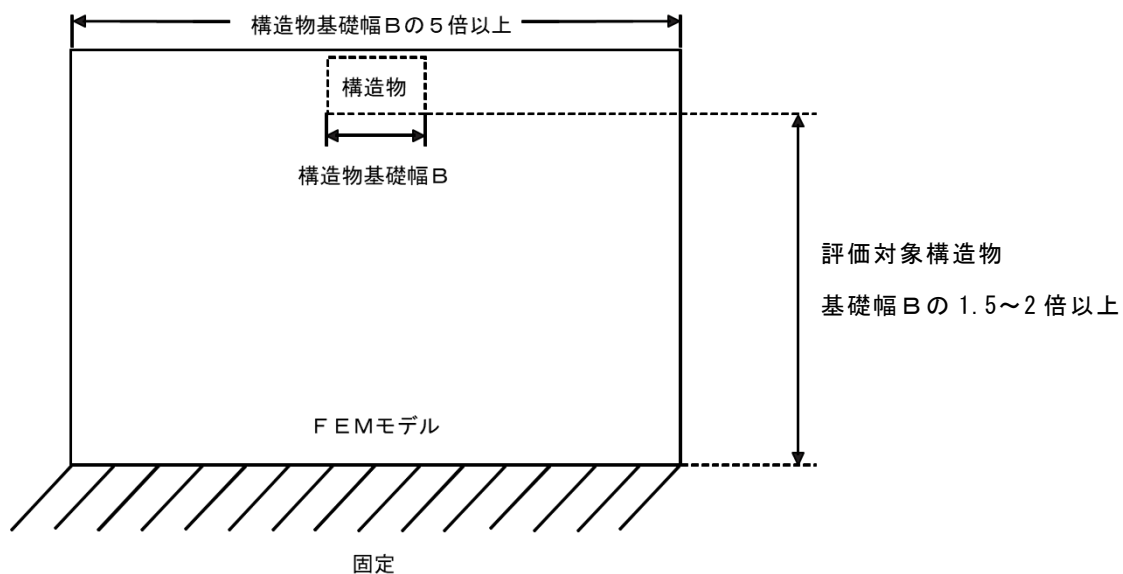


図3-4 固有値解析における境界条件の概念図

(2) 常時応力解析時

常時応力解析は、地盤や構造物の自重等の静的な荷重を載荷することによる常時応力を算定するために行う。そこで、常時応力解析時の境界条件は底面固定とし、側方は自重等による地盤の鉛直方向の変形を拘束しないよう鉛直ローラーとする。境界条件の概念図を図 3-5 に示す。

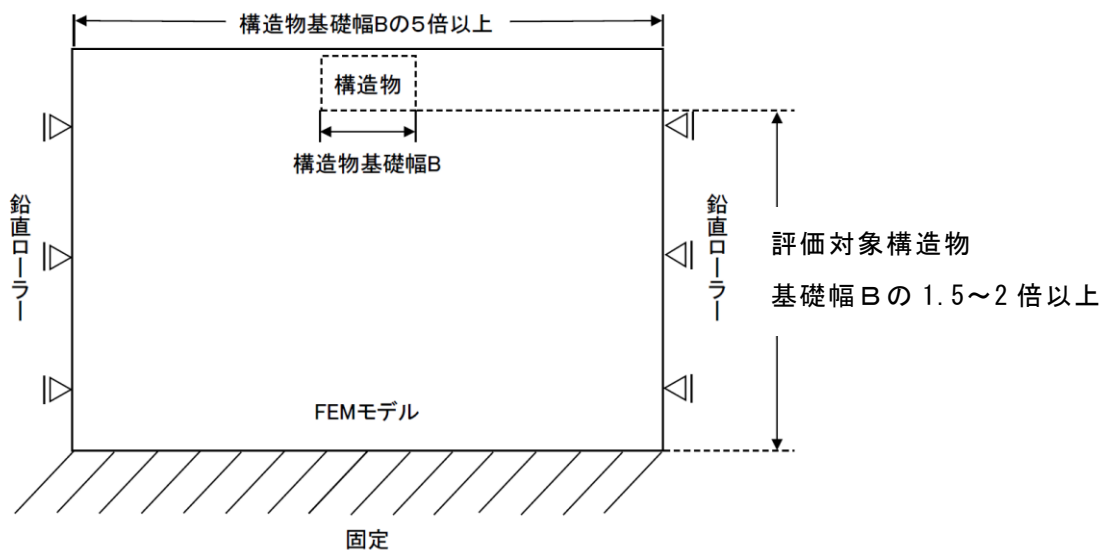


図 3-5 常時応力解析における境界条件の概念図

(3) 地震応答解析時

地震応答解析時の境界条件については、有限要素解析における半無限地盤を模擬するため、粘性境界を設ける。底面の粘性境界については、地震動の下降波がモデル底面境界から半無限地盤へ通過していく状態を模擬するため、ダッシュポットを設定する。側方の粘性境界については、自由地盤の地盤振動と不整形地盤側方の地盤振動の差分が側方を通過していく状態を模擬するため、自由地盤の側方にダッシュポットを設定する。境界条件の概念図を図3-6に示す。

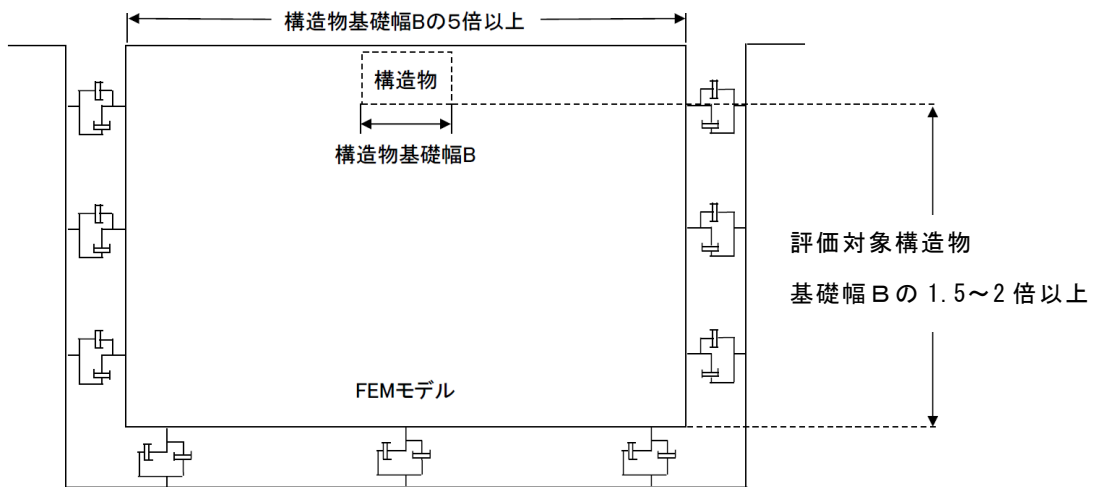


図3-6 地震応答解析における境界条件の概念図

3.2.3 構造物のモデル化

A-A断面においては、鉄筋コンクリート躯体及び鋼製タンクは線形はり要素、充填コンクリートは奥行き方向に十分連続していることから線形の平面ひずみ要素によりモデル化する。なお、タンク架台は配置が局所的であるため、充填コンクリートが奥行き方向に一様に配置されているものとしてモデル化する。

B-B断面においては、構造部材は線形はり要素でモデル化し、充填コンクリートは配置が局所的であることからモデル化しない。妻壁については等価な重量及び剛性とした平面応力要素で考慮する。等価重量及び等価弾性係数の算定方法は以下に示すとおりである。

$$E = E_c \times \alpha$$

$$W = W_c \times \alpha$$

ここに、

- E : 妻壁の等価弾性係数
- E_c : コンクリートの弾性係数
- W : 妻壁の等価重量
- W_c : 鉄筋コンクリートの重量
- α : 構造物の奥行長さに対する妻壁の厚さの比率 (L_e / L)
- L_e : 妻壁の厚さ (複数の妻壁を有する場合はその和)
- L : 構造物の奥行長さ

3.2.4 地盤のモデル化

岩盤及び埋戻コンクリートは線形の平面ひずみ要素でモデル化する。

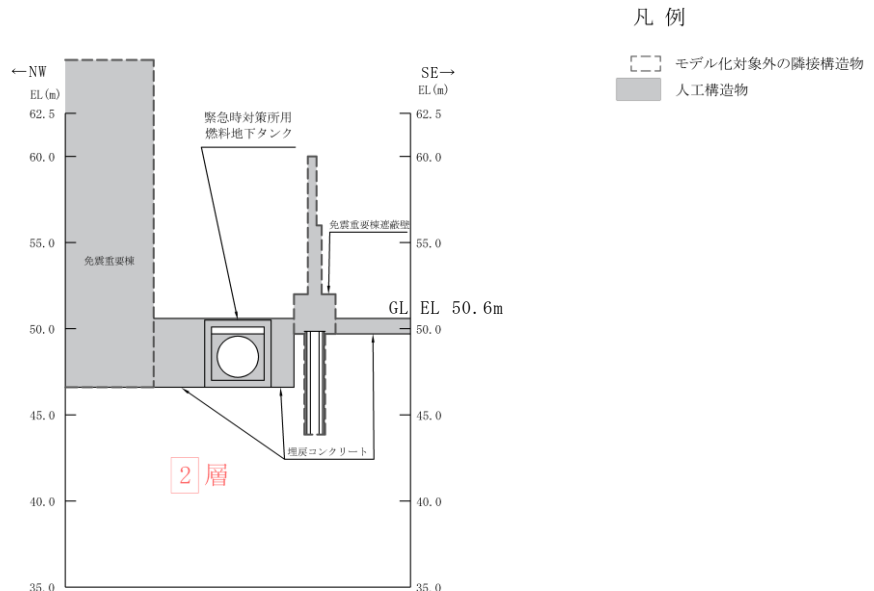
A-A断面において、緊急時対策所用燃料地下タンクの周辺には埋戻コンクリート、免震重要棟、免震重要棟遮蔽壁及び岩盤が存在するが、それぞれが十分に大きな剛性*を有しており、応答加速度を用いた評価を行う設備も設置されないことから、簡略的に緊急時対策所用燃料地下タンク周囲の埋戻コンクリートが水平方向に一様に分布するものとしてモデル化する。なお、構造物周辺地盤を簡易なモデルとしていることを踏まえ、最終的な照査値に十分な余裕を有することを確認する。

また、B-B断面においては、周囲の置換コンクリート及び構造物を埋戻土としてモデル化する。埋戻土は地盤の非線形性をマルチスプリング要素で考慮した平面ひずみ要素でモデル化する。

地盤のモデル化に用いる評価対象地質断面図を図3-7及び図3-8に示す。

注記*：それぞれの材料のせん断弾性係数G (N/mm²)を以下に記載する。

- ・ 2層： 1.9×10^4
- ・ 埋戻コンクリート ($f'_{ck} = 18.0 \text{ N/mm}^2$)： 9.2×10^4
- ・ 鋼管杭（鋼材）： 7.7×10^5

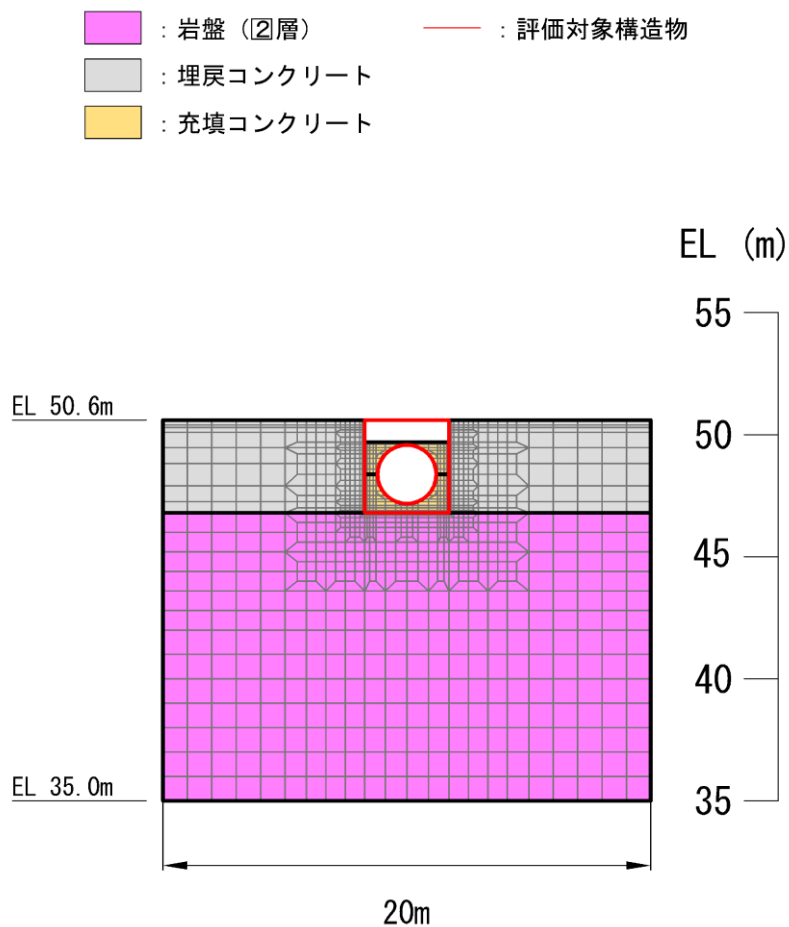


地下水位は施設設置地盤より十分低いため、設計地下水位を設定しない構造物
(3次元浸透流解析による自然水位：EL 22.0m～22.5m)

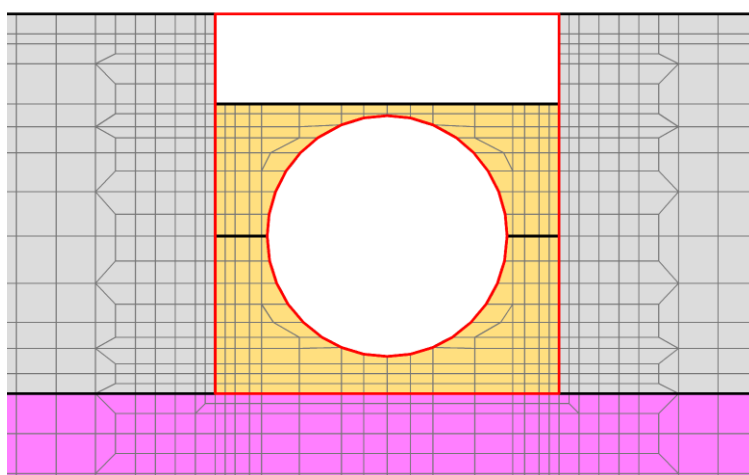
図3-7 評価対象地質断面図 (A-A断面位置)

3.2.5 地震応答解析モデル

3.2.1～3.2.4 を踏まえて設定した地震応答解析モデル図を図 3-9 及び図 3-10 に示す。



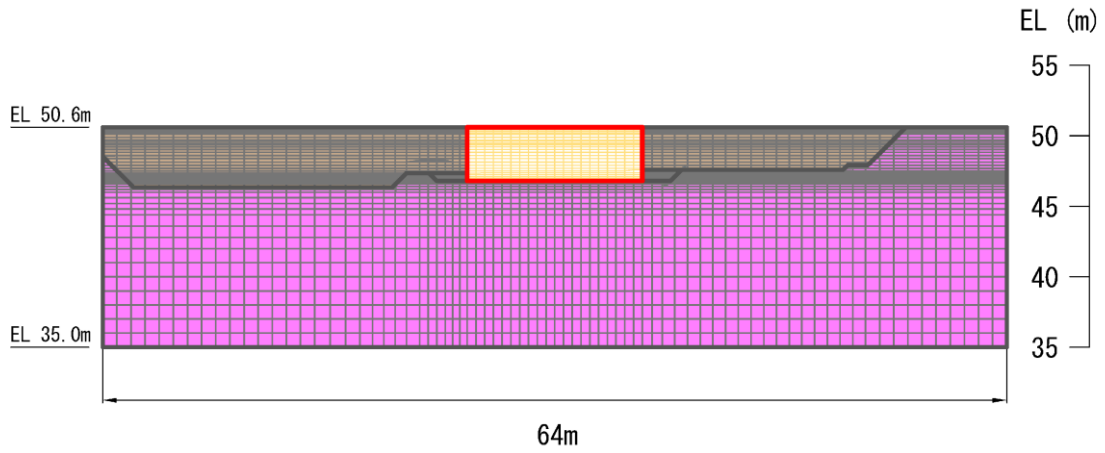
(全体図)



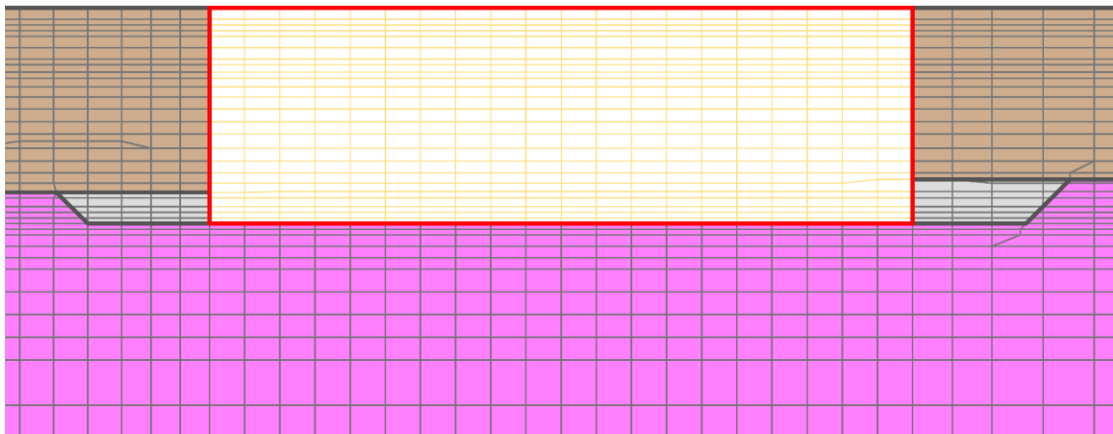
(拡大図)

図 3-9 地震応答解析モデル図 (A-A 断面)

- : 岩盤 (2層)
 - : 埋戻コンクリート
 - : 埋戻土
- : 評価対象構造物
 - : 構造物 (妻壁)



(全体図)



(拡大図)

図 3-10 地震応答解析モデル図 (B-B断面)

3.2.6 ジョイント要素の設定

地盤と構造物との接合面にジョイント要素を設けることにより、地震時の地盤と構造物の接合面における剥離及びすべりを考慮する。

ジョイント要素は、地盤と構造物の接合面で法線方向及びせん断方向に対して設定する。法線方向については、常時状態以上の引張荷重が生じた場合、剛性及び応力をゼロとし、剥離を考慮する。せん断方向については、地盤と構造物の接合面におけるせん断抵抗力以上のせん断荷重が生じた場合、せん断剛性をゼロとし、すべりを考慮する。

せん断強度 τ_f は次式の Mohr-Coulomb 式により規定される。粘着力 c 及び内部摩擦角 ϕ は周辺地盤の c 、 ϕ とし、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき表 3-1 のとおりとする。また、要素間の粘着力 c 及び内部摩擦角 ϕ は表 3-2 のとおり設定する。ただし、B-B 断面における無筋コンクリート-埋戻土間のジョイント要素については、いずれの材料も照査対象外であることから、ジョイント要素を設定しない。

緊急時対策所用燃料地下タンクの直下には C_H 級～ C_L 級の岩盤が分布するが、せん断強度の設定においては一律 C_L 級岩盤の粘着力 c 及び内部摩擦角 ϕ を用いる。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

ここに、 τ_f : せん断強度

c : 粘着力 (= 初期せん断強度 τ_0)

ϕ : 内部摩擦角

表 3-1 周辺地盤との境界に用いる強度特性

地盤	粘着力 c (N/mm ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
岩盤 (C_L 級)	0.56	37
埋戻土	0.22	22
充填コンクリート ($f'_{ck} = 24.0\text{N/mm}^2$)	4.77	40
埋戻コンクリート ($f'_{ck} = 18.0\text{N/mm}^2$)	3.58	40

表 3-2 要素間の粘着力及び内部摩擦角

接合条件		粘着力 c (N/mm^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)
材料 1	材料 2		
構造物	無筋コンクリート* ¹	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
	埋戻土	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
	岩盤	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
無筋コンクリート* ¹	埋戻土	—	—
	岩盤	—* ²	—* ²

注記*1：MMR，置換コンクリート及び埋戻コンクリートの総称（本構造物においては充填コンクリートも含む）

*2：表面を露出させて打継処理が可能である箇所については，ジョイント要素を設定しない

ジョイント要素のばね定数は，土木学会マニュアル 2005 を参考に，数値計算上，不安定な挙動を起こさない程度に周囲材料の剛性よりも十分に大きな値を設定する。表 3-3 にジョイント要素のばね定数を示す。

また，ジョイント要素の力学特性を図 3-11 に，ジョイント要素の配置を図 3-12 及び図 3-13 に示す。

表 3-3 ジョイント要素のばね定数

圧縮剛性 k_n (kN/m^3)	せん断剛性 k_s (kN/m^3)
1.0×10^7	1.0×10^7

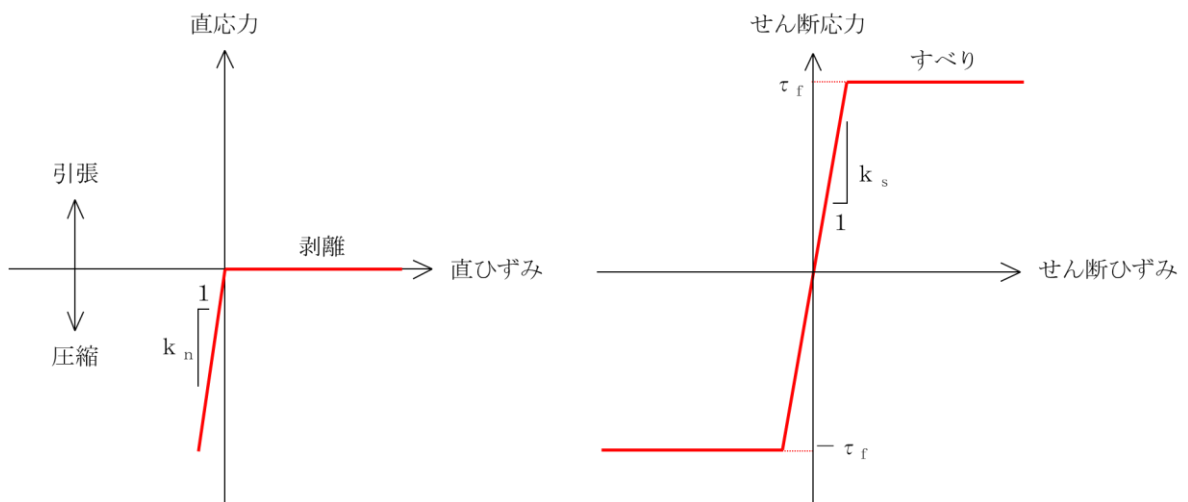
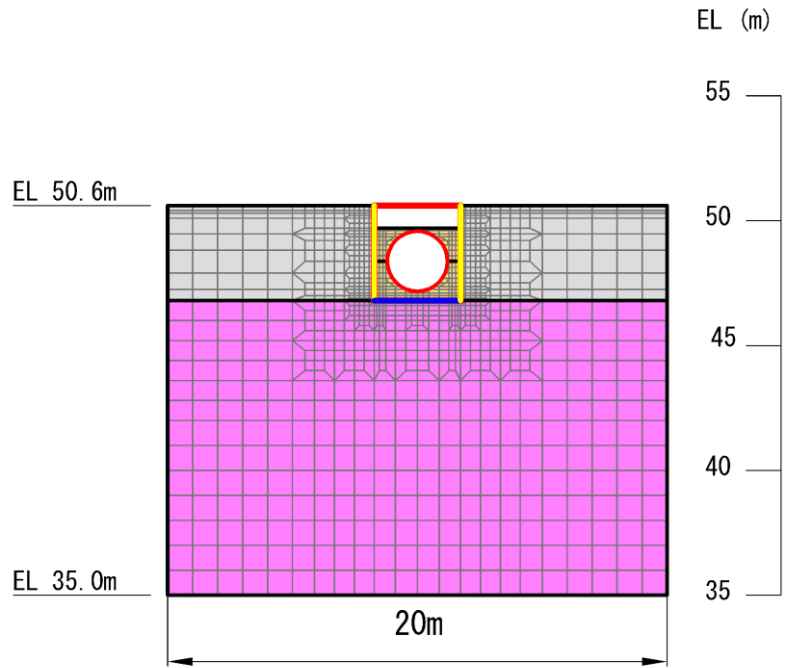
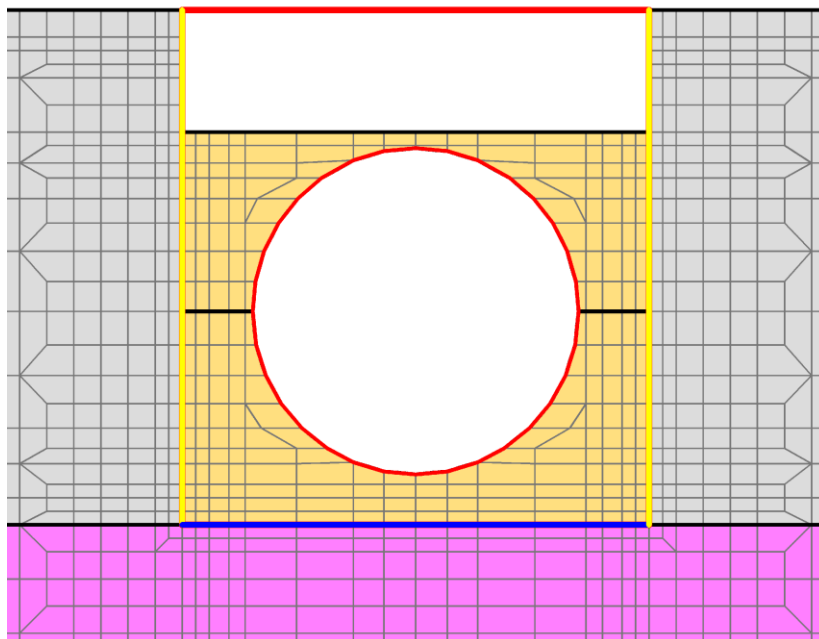


図 3-11 ジョイント要素の力学特性

- : 岩盤 (2層)
- : 埋戻コンクリート
- : 充填コンクリート
- : 評価対象構造物
- : ジョイント要素 (構造物-無筋コンクリート)
- : ジョイント要素 (構造物-岩盤)











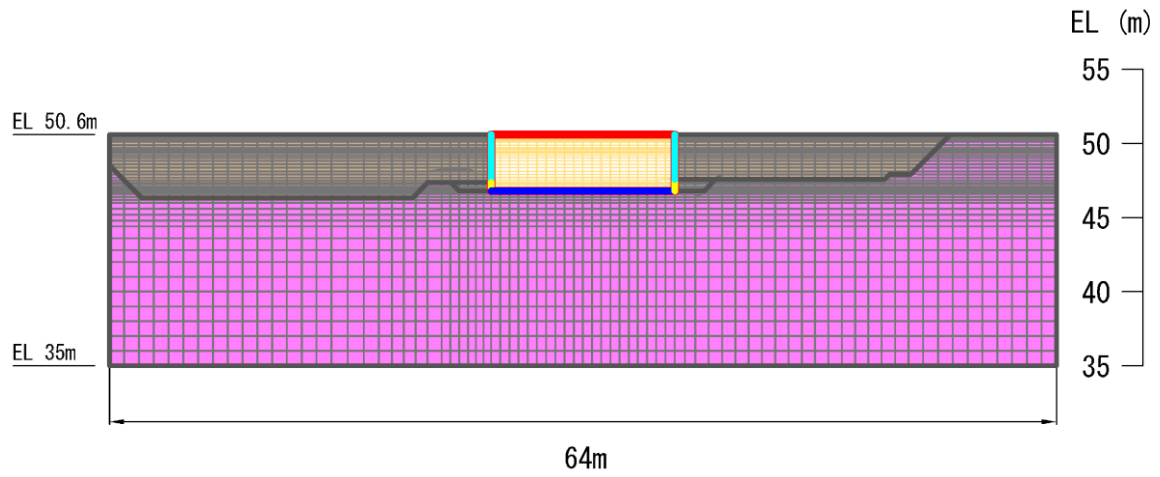
(全体図)



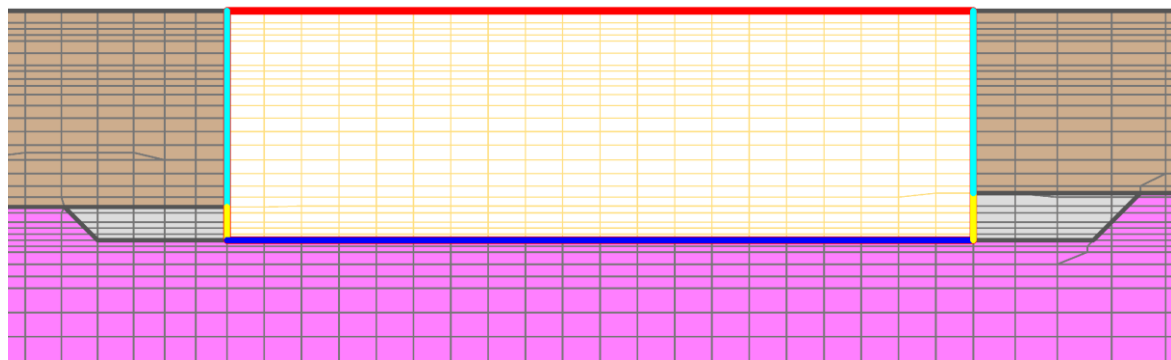
(拡大図)

図 3-12 ジョイント要素の配置 (A-A断面)

- | | | | |
|---|------------|---|--------------------------|
|  | : 岩盤 (2層) |  | : ジョイント要素 (構造物-埋戻土) |
|  | : 埋戻コンクリート |  | : ジョイント要素 (構造物-無筋コンクリート) |
|  | : 埋戻土 |  | : ジョイント要素 (構造物-岩盤) |
|  | : 構造物 (妻壁) |  | : 評価対象構造物 |



(全体図)



(拡大図)

図 3-13 ジョイント要素の配置 (B-B断面)

3.3 減衰定数

減衰定数は、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」の「9. 地震応答解析における減衰定数」に基づき、粘性減衰及び履歴減衰で考慮する。

粘性減衰は、固有値解析にて求められる固有周期と各材料の減衰比に基づき、質量マトリックス及び剛性マトリックスの線形結合で表される以下の Rayleigh 減衰を解析モデル全体に与える。

Rayleigh 減衰の設定フローを図 3-14 に示す。

なお、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」の「9. 地震応答解析における減衰定数」では、無筋コンクリートの減衰定数を 3.0%としているが、躯体内部に充填コンクリートをモデル化している本構造物（A-A 断面）においては、充填コンクリートと同様に埋戻コンクリートについても、構造物（線形）の減衰定数である 5.0%を一律で採用した。

結果として、1次モード及び3次モードが支配的であり、解析モデル内に最も広く分布する岩盤の減衰による影響が有意であることが確認されたため、無筋コンクリートの減衰定数の設定による影響は軽微であったと考察される。

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

[C] : 減衰係数マトリックス

[M] : 質量マトリックス

[K] : 剛性マトリックス

α , β : 係数

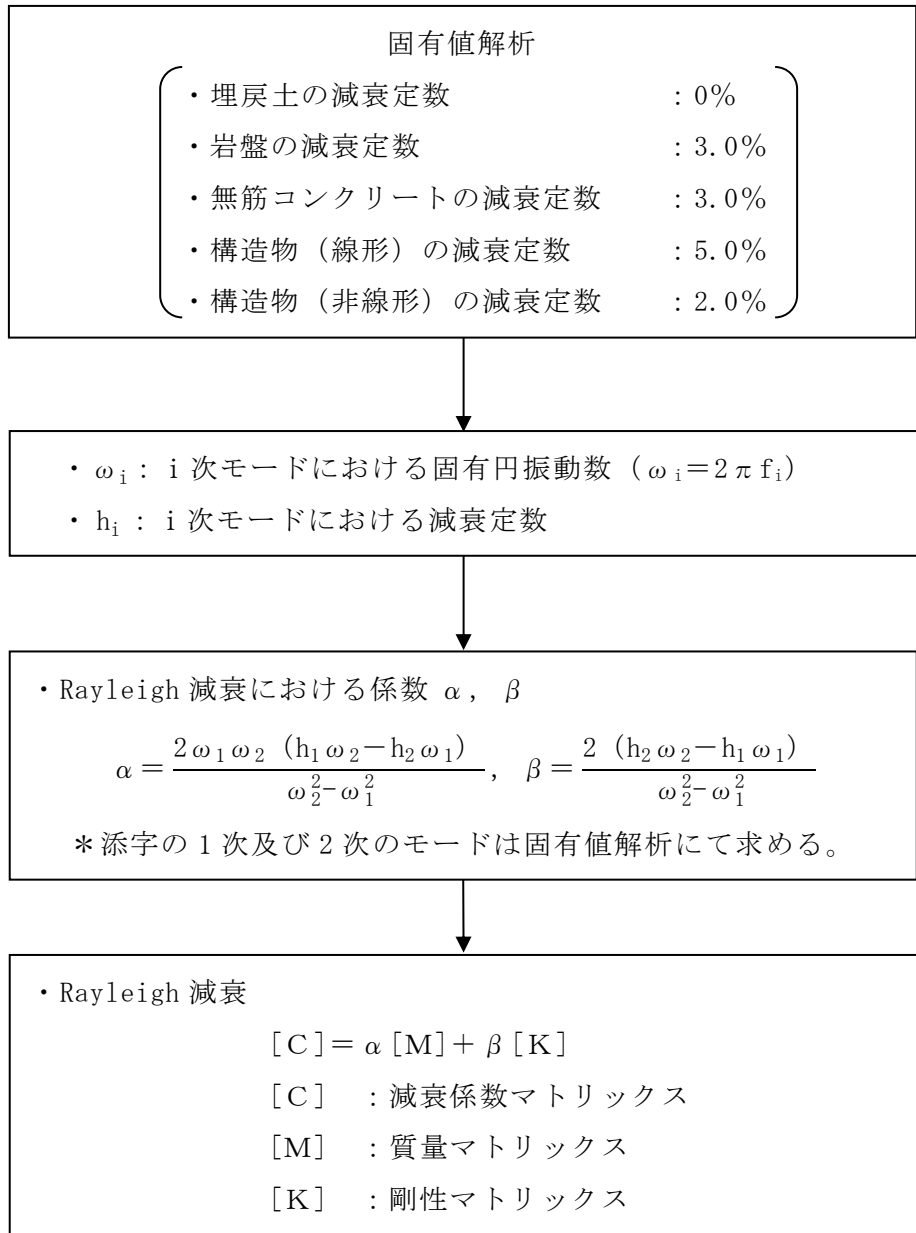


図 3-14 Rayleigh 減衰の設定フロー

Rayleigh 減衰における係数 α 、 β は、低次のモードの変形が支配的となる地中埋設構造物に対して、その特定の振動モードの影響が大きいことを考慮して、固有値解析結果より得られる卓越するモードの減衰と Rayleigh 減衰が一致するように設定する。なお、卓越するモードは全体系の固有値解析における刺激係数及びモード図にて決定するが、係数 α 、 β が負値となる場合は当該モードを選定しない。

固有値解析結果の一覧を表 3-4 及び表 3-5 に、固有値解析におけるモード図を図 3-15 及び図 3-16 に、係数 α 、 β を表 3-6 に、固有値解析結果に基づき設定した Rayleigh 減衰を図 3-17 及び図 3-18 に示す。

表 3-4 固有値解析結果 (A-A 断面)

	固有振動数 (Hz)	有効質量比 (%)		刺激係数		備考
		T _x	T _y	β_x	β_y	
1	11.542	74	0	22.81	0.00	1次として採用
2	26.858	0	70	0.00	22.10	
3	28.430	14	0	-9.78	0.00	2次として採用
4	39.614	0	1	0.00	-2.83	
5	43.268	4	0	5.52	-0.00	
6	49.130	0	11	0.00	8.86	
7	59.569	2	0	4.02	0.00	
8	66.893	0	2	0.00	-4.12	
9	73.468	0	1	0.00	-2.01	
10	73.775	1	0	1.58	0.00	

表 3-5 固有値解析結果 (B-B 断面)

	固有振動数 (Hz)	有効質量比 (%)		刺激係数		備考
		T _x	T _y	β_x	β_y	
1	10.508	25	0	23.23	2.21	1次として採用
2	13.314	31	1	-25.72	3.83	$\alpha < 0$ のため不採用
3	14.208	1	0	4.98	-0.13	
4	17.460	5	0	-10.17	-1.23	
5	17.961	4	1	9.73	-5.34	
6	19.478	12	2	-16.33	-5.21	2次として採用
7	20.834	1	4	4.28	9.81	
8	21.113	0	0	1.69	2.76	
9	23.317	2	1	-6.69	3.34	
10	23.624	2	0	5.05	-2.87	

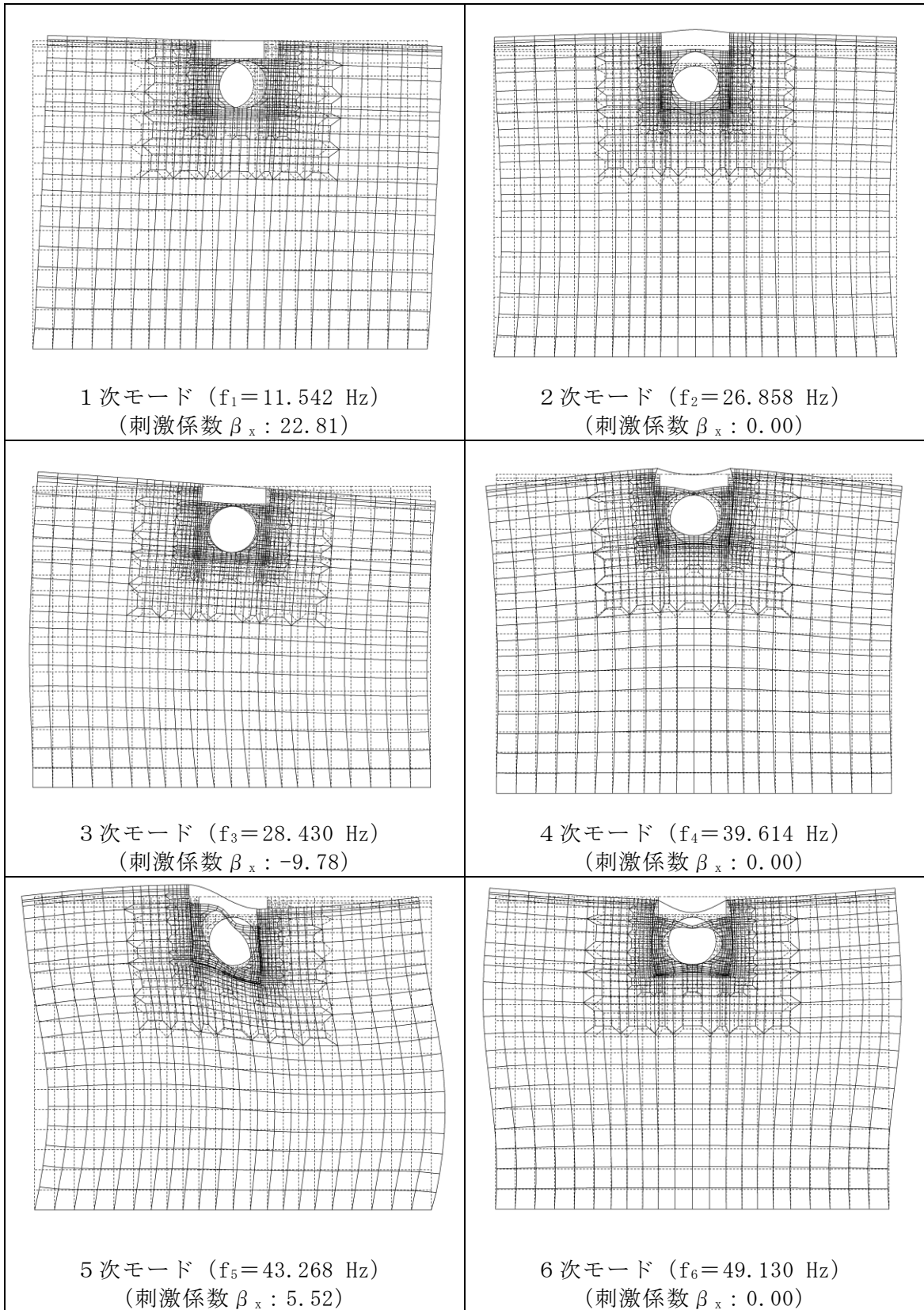


図 3-15(1) 固有値解析結果 (モード図, A-A断面)

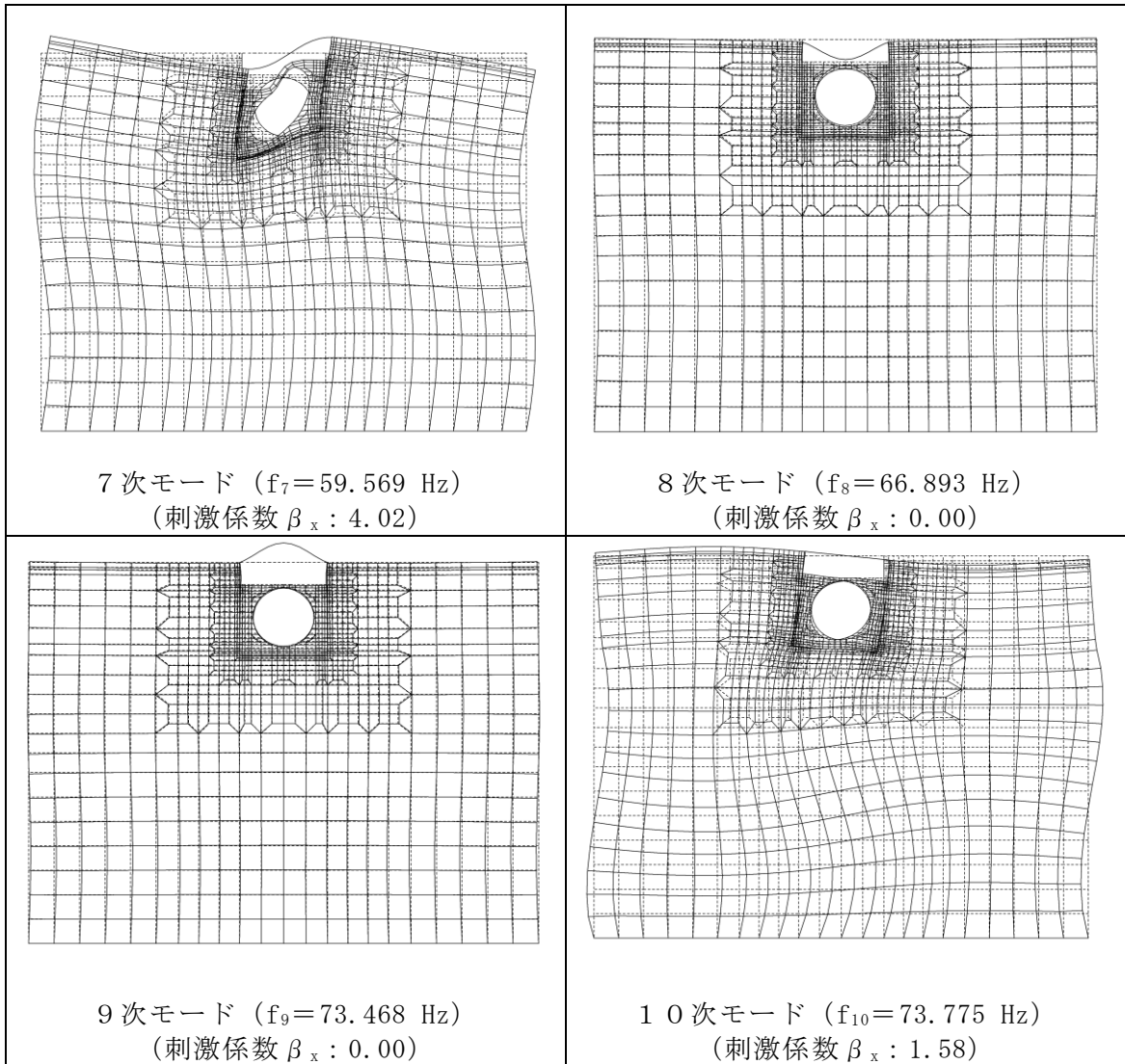


図 3-15(2) 固有値解析結果 (モード図, A-A断面)

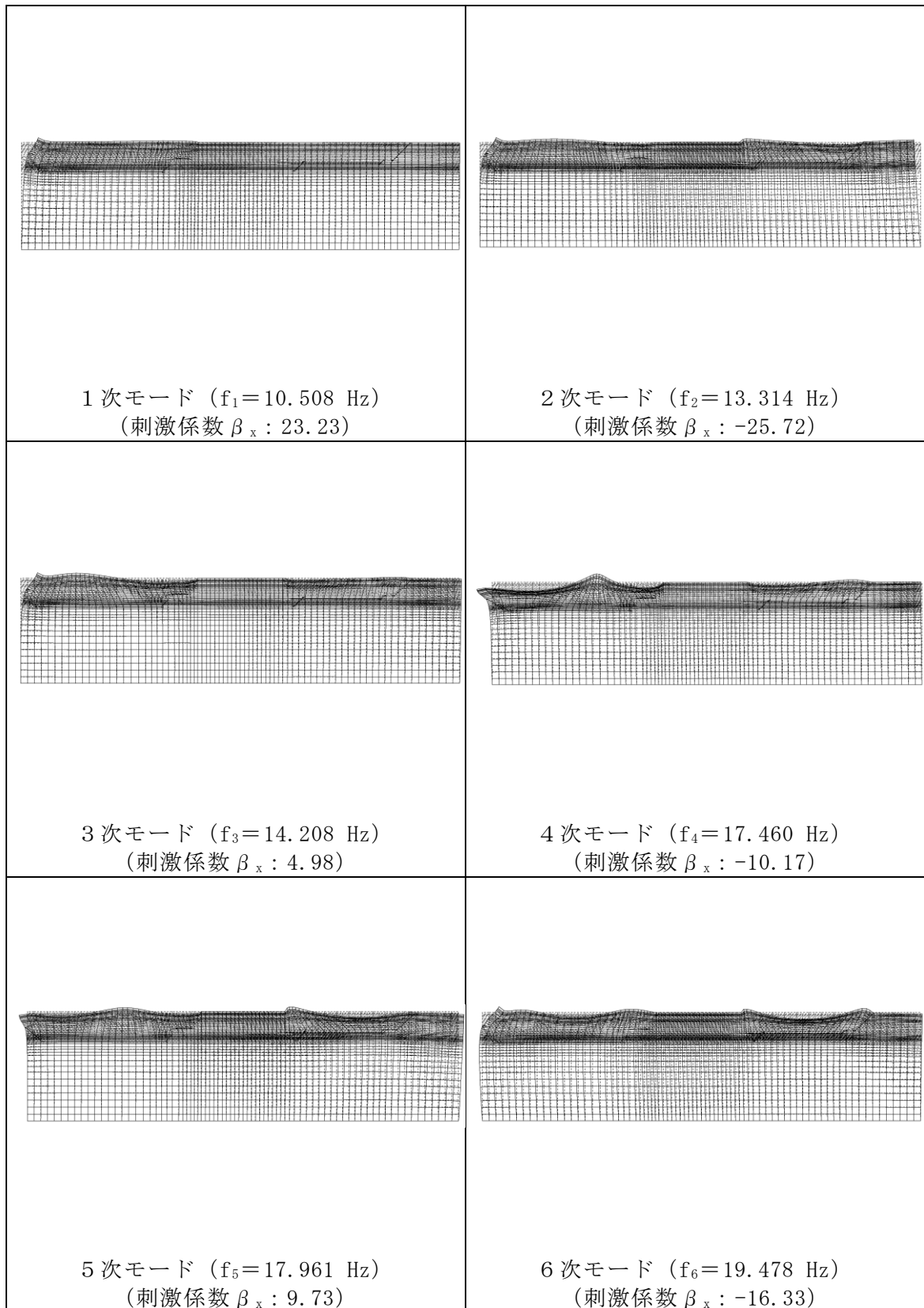


図 3-16(1) 固有値解析結果 (モード図, B-B 断面)

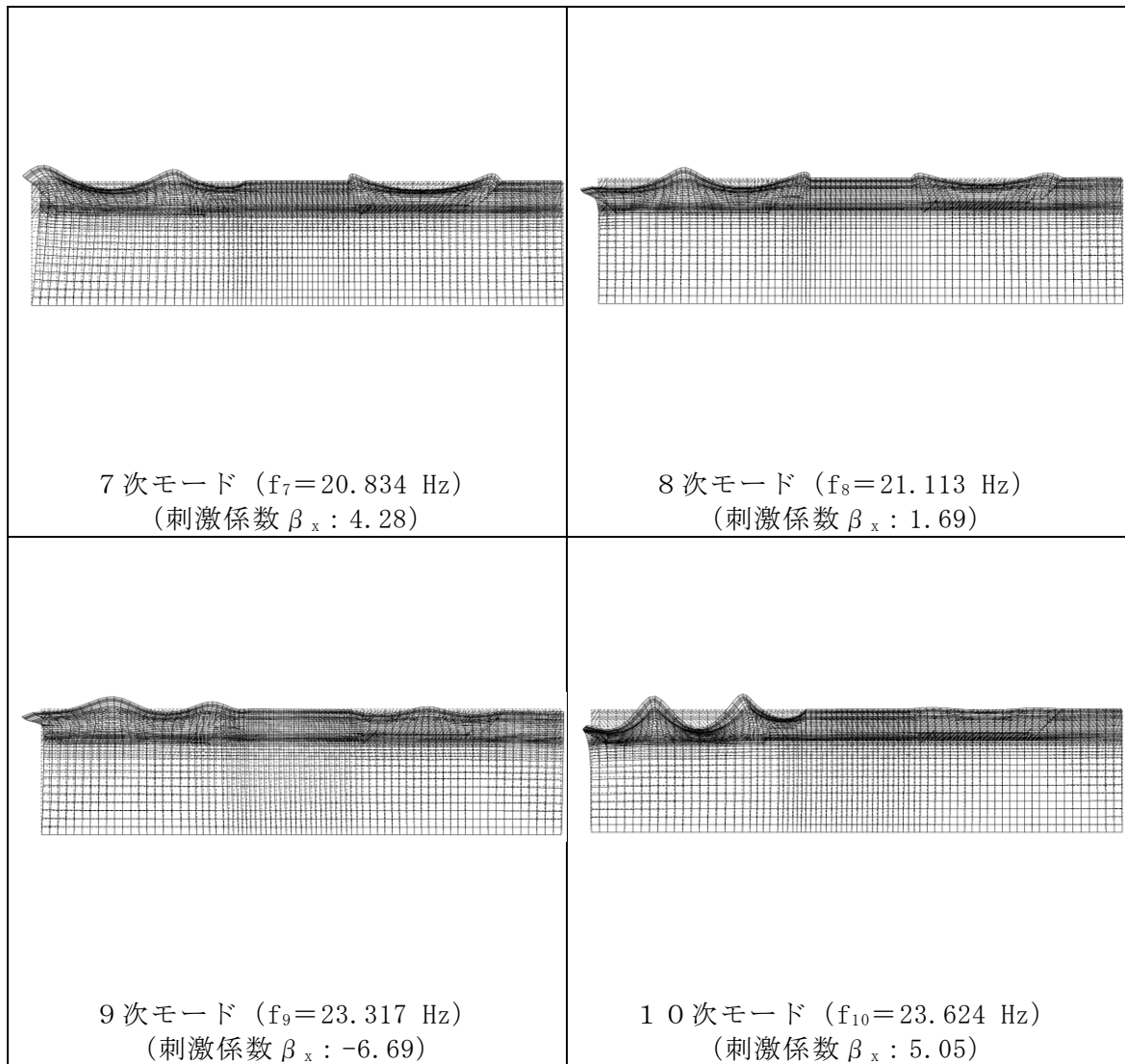


図 3-16(2) 固有値解析結果 (モード図, B-B断面)

表 3-6 Rayleigh 減衰における係数 α , β の設定結果

評価対象断面	α	β
A-A 断面	3.109	2.410×10^{-4}
B-B 断面	9.894×10^{-1}	1.380×10^{-4}

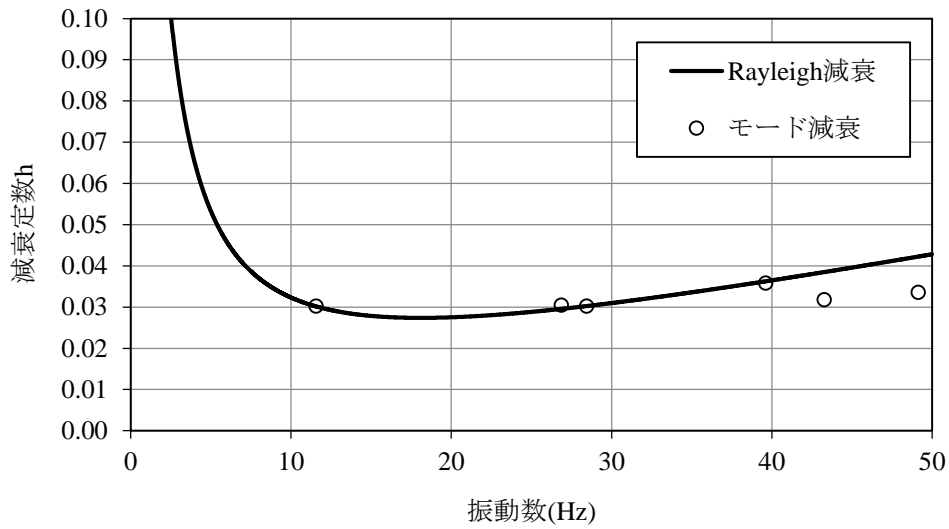


図 3-17 設定した Rayleigh 減衰 (A-A 断面)

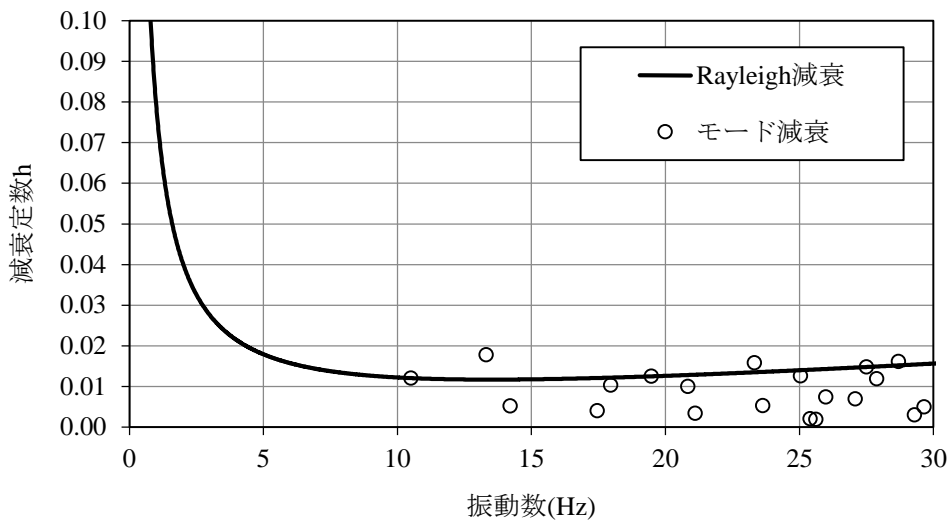


図 3-18 設定した Rayleigh 減衰 (B-B 断面)

3.4 荷重及び荷重の組合せ

耐震評価にて考慮する荷重は、通常運転時の荷重（永久荷重）及び地震荷重を抽出し、それぞれを組み合わせて設定する。地震荷重には、地震時土圧からの反力及び動水圧による荷重が含まれるものとする。

なお、緊急時対策所用燃料地下タンクの運転時、設計基準事故時及び重大事故時の状態における荷重条件は変わらないため、評価は設計基準対象施設の評価結果に包括されることから、設計基準対象施設の評価結果を用いた重大事故等対処施設の評価を行う。

荷重の組合せを表 3-7 に示す。

表 3-7 荷重の組合せ

種別	荷重		算定方法の概要
永久荷重 (常時荷重)	固定荷重	躯体自重	○ ・設計図書に基づいて、対象構造物の体積に材料の密度を乗じて設定する。
		機器・配管荷重	— ・機器・配管系が設置されないことから考慮しない。
	積載荷重	静止土圧	○ ・常時応力解析により設定する。
		外水圧	— ・地下水位が構造物基礎下端より十分低いいため考慮しない
		内水圧	○ ・鋼製タンクの内容液による静水圧として考慮する。 ・保守的に水の密度を考慮する。
		積雪荷重	○ ・地表面及び構造物上部に考慮する。
		土被り荷重	— ・土被りがないことから考慮しない。
永久上載荷重	○ ・頂版上部に打設された上部コンクリートの重量に基づいて設定する。		
偶発荷重 (地震荷重)	水平地震動	○	・基準地震動 S_s による水平・鉛直同時加振を考慮する。
	鉛直地震動	○	
	動水圧	○ ・水位条件及び密度は、永久荷重のうち内水圧と同様とする。 ・地震時動水圧を付加質量により考慮する。	

3.4.1 内水圧

鋼製タンクの内容液による荷重は、タンク本体の頂部に静水面があるものとしてタンク本体各節点での水位と内容液の単位体積重量から算定し、タンクに対して垂直方向の分布荷重で与える。なお、内容液については、保守的に水の密度として 9.81kN/m^3 を用いる。図 3-19 に鋼製タンク本体に作用する内容液荷重のイメージ図を示す。

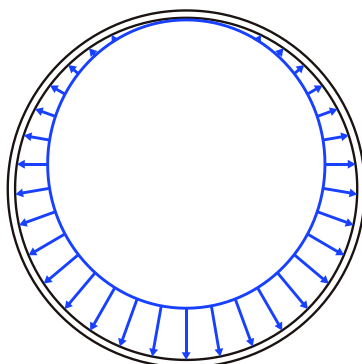


図 3-19 鋼製タンク本体に作用する内容液荷重のイメージ図

3.4.2 積雪荷重

積雪荷重は、VI-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等における損傷の防止に関する基本方針」に基づき、発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上1位の月最深積雪100cmに平均的な積雪荷重を与えるための係数0.35を考慮し35.0cmとする。積雪荷重については、「松江市建築基準法施行細則（平成17年3月31日，松江市規則第234号）」により，積雪量1cmごとに 20N/m^2 の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

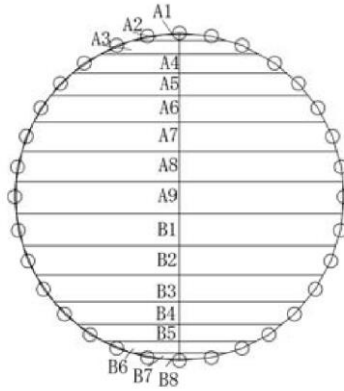
3.4.3 動水圧

動水圧は、地震応答解析における応答加速度に応じた内容液重量を付加質量として鋼製タンク本体の構成節点に与えることで作用させる。なお、各構成節点の付加質量はタンク本体を満液状態とし、タンク内空面積の分担を考慮して、図 3-20 に示すとおり水平成分と鉛直成分で個別に下式により算定する。各構成節点の分担面積及び付加質量の算定結果を表 3-8 に、解析モデルにおけるタンク本体の節点番号図を図 3-21 に、節点番号毎の付加質量を表 3-9 に示す。

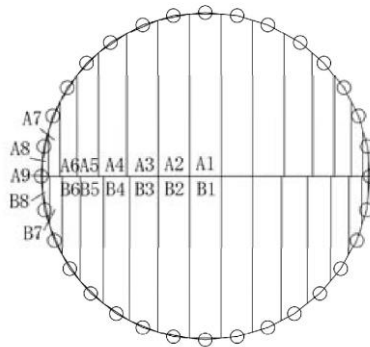
$$P_{dwhi} = \pm k_{hi} \cdot \gamma \cdot A_{hi}$$

$$P_{dsvi} = \pm k_{vi} \cdot \gamma \cdot A_{vi}$$

ここに、	P_{dwhi}	: i 節点の動水圧の水平成分
	P_{dsvi}	: i 節点の動水圧の鉛直成分
	k_{hi}	: i 節点の水平震度 ($= \alpha_{hi} / g$)
	k_{vi}	: i 節点の鉛直震度 ($= \alpha_{vi} / g$)
	α_{hi}	: i 節点の水平加速度
	α_{vi}	: i 節点の鉛直加速度
	g	: 重力加速度 ($= 9.80665 \text{m/s}^2$)
	γ_w	: 内容液重量 ($= 9.81 \text{kN/m}^3$)
	A_{hi}	: i 節点の水平成分の分担面積
	A_{vi}	: i 節点の鉛直成分の分担面積



a) 水平加振 A_{hi}



b) 鉛直加振 A_{vi}

図 3-20 付加質量算定時の分担面積

表 3-8 分担面積及び付加質量の算定結果

水平加振			鉛直加振		
区分	$A(m^2)$	$W(kN)$	区分	$A(m^2)$	$W(kN)$
A1	0.001	0.014	A1	0.279	2.739
A2	0.011	0.103	A2	0.269	2.635
A3	0.046	0.450	A3	0.254	2.489
A4	0.096	0.937	A4	0.201	1.972
A5	0.143	1.400	A5	0.131	1.282
A6	0.195	1.915	A6	0.081	0.790
A7	0.240	2.350	A7	0.038	0.370
A8	0.260	2.555	A8	0.009	0.092
A9	0.279	2.739	A9	0.001	0.014
B1	0.276	2.709	B1	0.279	2.739
B2	0.238	2.330	B2	0.269	2.635
B3	0.192	1.882	B3	0.232	2.273
B4	0.138	1.351	B4	0.191	1.871
B5	0.082	0.800	B5	0.145	1.426
B6	0.038	0.376	B6	0.090	0.885
B7	0.011	0.103	B7	0.043	0.426
B8	0.001	0.014	B8	0.012	0.115

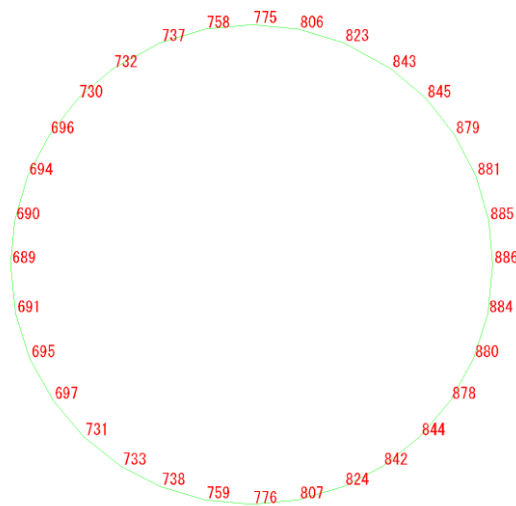


図 3-21 タンク本体の節点番号図

表 3-9 タンク本体の節点番号毎の付加質量

節点番号	水平加振		鉛直加振	
	区分	W(kN)	区分	W(kN)
689	A9	2.739	A9	0.014
690	A8	2.555	A8	0.092
694	A7	2.350	A7	0.370
696	A6	1.915	A6	0.790
730	A5	1.400	A5	1.282
732	A4	0.937	A4	1.972
737	A3	0.450	A3	2.489
758	A2	0.103	A2	2.635
775	A1	0.014	A1	2.739
806	A2	0.103	A2	2.635
823	A3	0.450	A3	2.489
843	A4	0.937	A4	1.972
845	A5	1.400	A5	1.282
879	A6	1.915	A6	0.790
881	A7	2.350	A7	0.370
885	A8	2.555	A8	0.092
886	A9	2.739	A9	0.014
884	B1	2.709	B8	0.115
880	B2	2.330	B7	0.426
878	B3	1.882	B6	0.885
844	B4	1.351	B5	1.426
842	B5	0.800	B4	1.871
824	B6	0.376	B3	2.273
807	B7	0.103	B2	2.635
776	B8	0.014	B1	2.739
759	B7	0.103	B2	2.635
738	B6	0.376	B3	2.273
733	B5	0.800	B4	1.871
731	B4	1.351	B5	1.426
697	B3	1.882	B6	0.885
695	B2	2.330	B7	0.426
691	B1	2.709	B8	0.115
合計		44.028		44.028

3.5 地震応答解析の解析ケース

3.5.1 耐震評価における解析ケース

(1) 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

緊急時対策所用燃料地下タンクは地中に埋設された鉄筋コンクリート造の地中構造物である。

A-A断面においては、緊急時対策所用燃料地下タンクの周辺には、埋戻土のような動的変形特性にひずみ依存性がある地盤が分布しておらず、C_H級～C_L級岩盤が分布しているため、これらの地盤が地震時に構造物の応答に影響を与えると判断されることから、岩盤のばらつきを考慮する。

B-B断面においては、緊急時対策所用燃料地下タンクの周辺には、主として埋戻土のような動的変形特性にひずみ依存性がある地盤が分布し、主たる荷重は埋戻土の土圧となることから、埋戻土のばらつきを考慮する。

ばらつきを考慮する物性値は地盤のせん断変形を定義するせん断弾性係数とし、平均値を基本ケース（表3-10及び表3-11に示す解析ケース①）とした場合に加えて、平均値±1.0×標準偏差（σ）のケース（表3-10及び表3-11に示す解析ケース②及び③）について確認を行う。

地盤のばらつきの設定方法の詳細は、「補足-023-01 地盤の支持性能について」に示す。

表3-10 緊急時対策所用燃料地下タンク耐震評価における解析ケース
(A-A断面)

解析ケース	解析手法	地盤物性	
		埋戻土 (G _o :初期せん断弾性係数)	岩盤 (G _d :動せん断弾性係数)
ケース① (基本ケース)	全応力解析	平均値	平均値
ケース②	全応力解析	平均値	平均値 + 1σ
ケース③	全応力解析	平均値	平均値 - 1σ

表 3-11 緊急時対策所用燃料地下タンク耐震評価における解析ケース
(B-B断面)

解析ケース	解析手法	地盤物性	
		埋戻土 (G_0 : 初期せん断弾性係数)	岩盤 (G_d : 動せん断弾性係数)
ケース① (基本ケース)	全応力解析	平均値	平均値
ケース②	全応力解析	平均値 + 1σ	平均値
ケース③	全応力解析	平均値 - 1σ	平均値

(2) 耐震評価における解析ケースの組合せ

耐震評価においては、基準地震動 S_s 全波（6波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（6波）を加えた全12波に対し、基本ケースを実施する。基本ケースにおいて、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び地盤の支持力照査の照査項目ごとに照査値が0.5を超える照査項目に対して、最も厳しい地震動を用いて、表3-12に示す解析ケース②及び③を実施する。すべての照査項目の照査値がいずれも0.5以下の場合には、照査値が最も厳しくなる地震動を用いて、解析ケース②及び③を実施する。耐震評価における解析ケースを表3-12に示す。また、追加解析ケースを実施する地震動の選定フローを図3-22に示す。なお、B-B断面については4辺固定版による評価を実施することから、上記によらず「5.1.1 解析ケース」において解析ケースを選定する。

表3-12 耐震評価における解析ケース

解析ケース		ケース①	ケース②	ケース③
		基本ケース	地盤物性のばらつき (+1 σ)を考慮した解析ケース	地盤物性のばらつき (-1 σ)を考慮した解析ケース
地盤物性		平均値	平均値+1 σ	平均値-1 σ
地震動 (位相)	S_s-D	++* ¹	○	
		–+* ¹	○* ²	
		+–* ¹	○	
		––* ¹	○* ²	
	S_s-F1	++* ¹	○	
	S_s-F2	++* ¹	○	
	S_s-N1	++* ¹	○	
		–+* ¹	○* ²	
	S_s-N2 (NS)	++* ¹	○	
		–+* ¹	○* ²	
S_s-N2 (EW)	++* ¹	○		
	–+* ¹	○* ²		

基準地震動 S_s （6波）に位相反転を考慮した地震動（6波）を加えた全12波に対し、ケース①（基本ケース）を実施し、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び基礎地盤の支持力照査の各照査項目ごとに照査値が0.5を超える照査項目に対して、最も厳しい（許容限界に対する裕度が最も小さい）地震動を用いてケース②及び③を実施する。
すべての照査項目の照査値がいずれも0.5以下の場合には、照査値が最も厳しくなる地震動を用いてケース②及び③を実施する。

注記*1：地震動の位相について、++の左側は水平動，右側は鉛直動を表し、「–」は位相を反転させたケースを示す。

*2：A-A断面については、解析モデルが左右対称であり、水平動の位相反転による解析結果への影響はないと考えられることから実施しない。

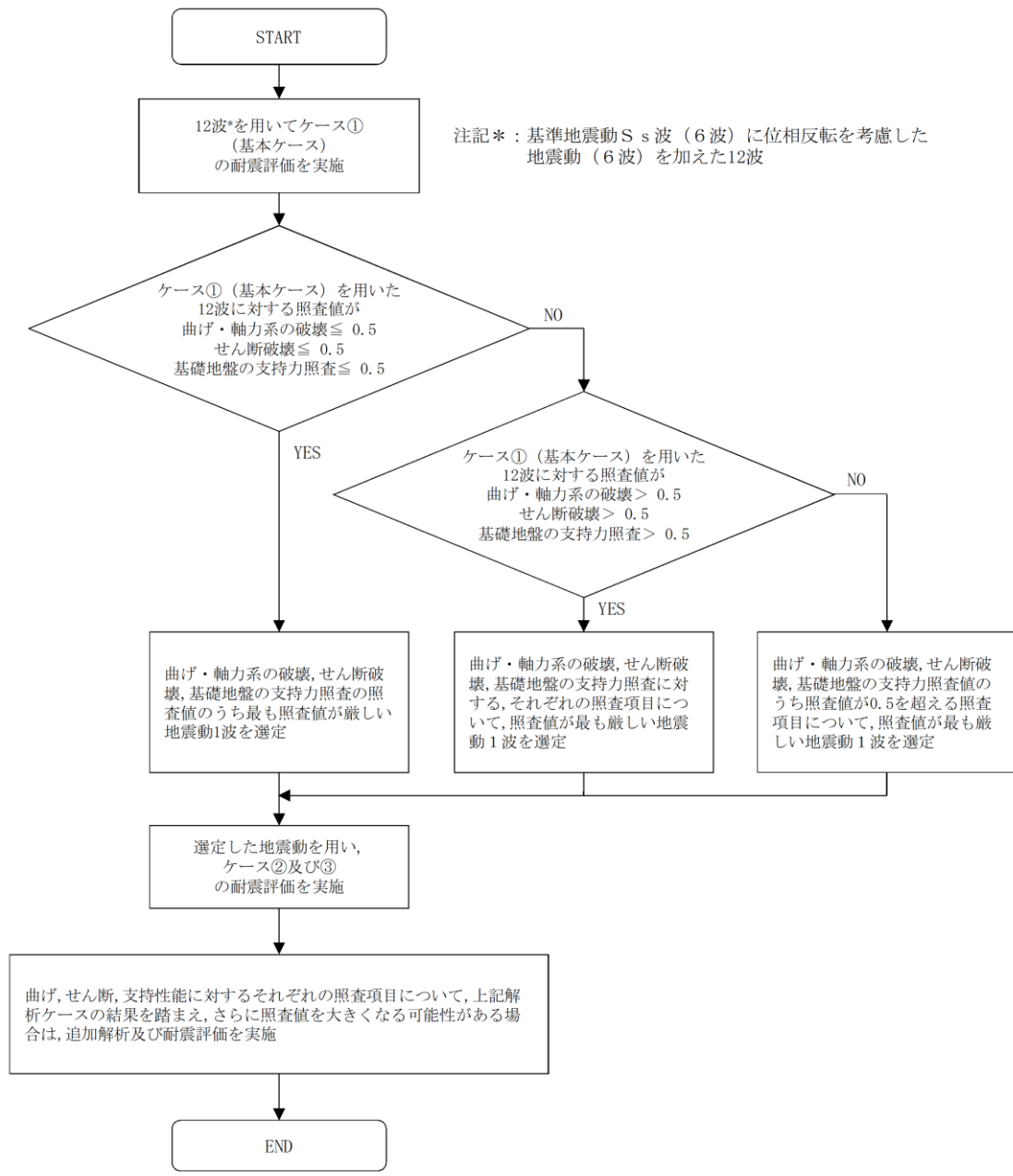


図 3-22 追加解析を実施する地震動の選定フロー

4. 評価内容

4.1 入力地震動の設定

入力地震動は、VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」のうち「2.3 屋外重要土木構造物」に示す入力地震動の設定方針を踏まえて設定する。

地震応答解析に用いる入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を一次元波動論により地震応答解析モデル下端位置で評価したものをを用いる。なお、入力地震動の設定に用いる地下構造モデルは、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」のうち「7.1 入力地震動の設定に用いる地下構造モデル」を用いる。

図4-1に入力地震動算定の概念図を、図4-2～図4-17に入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを示す。入力地震動の算定には、解析コード「SHAKE」及び「microSHAKE/3D」を使用する。解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

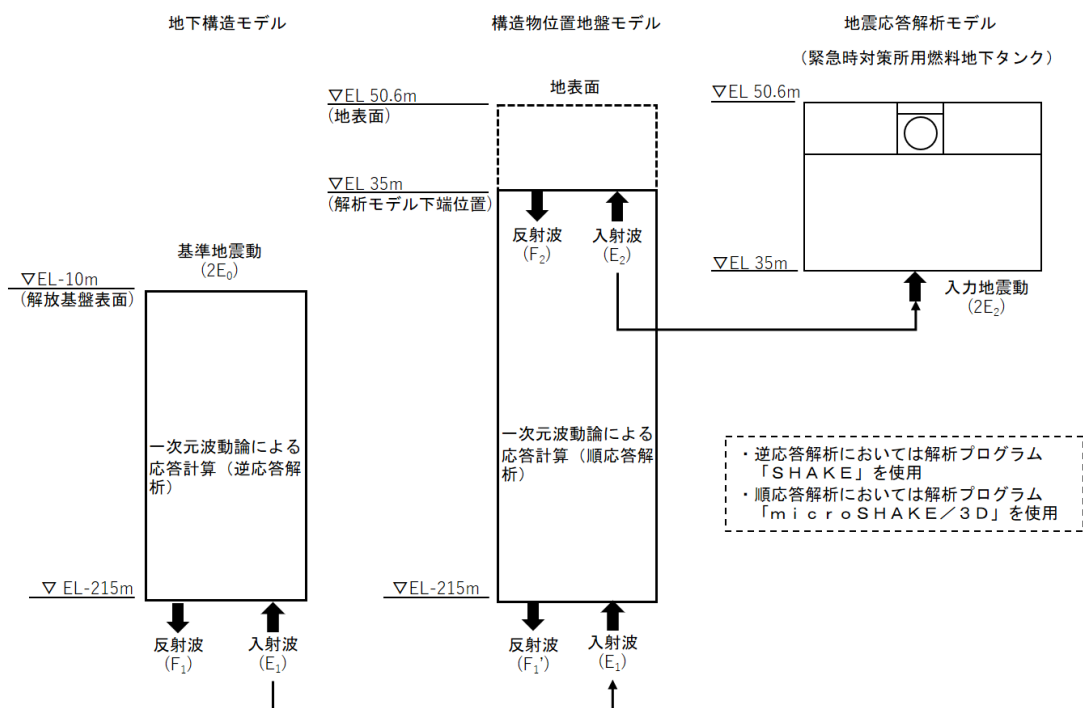
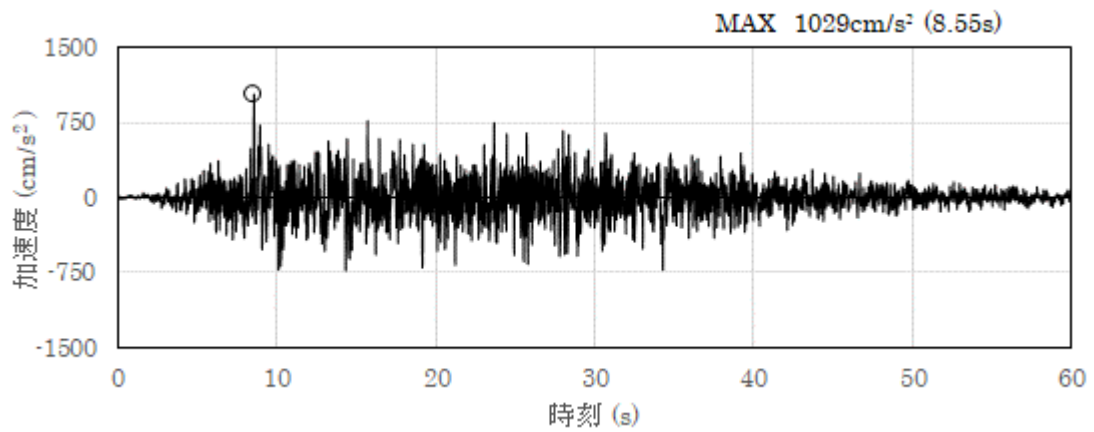
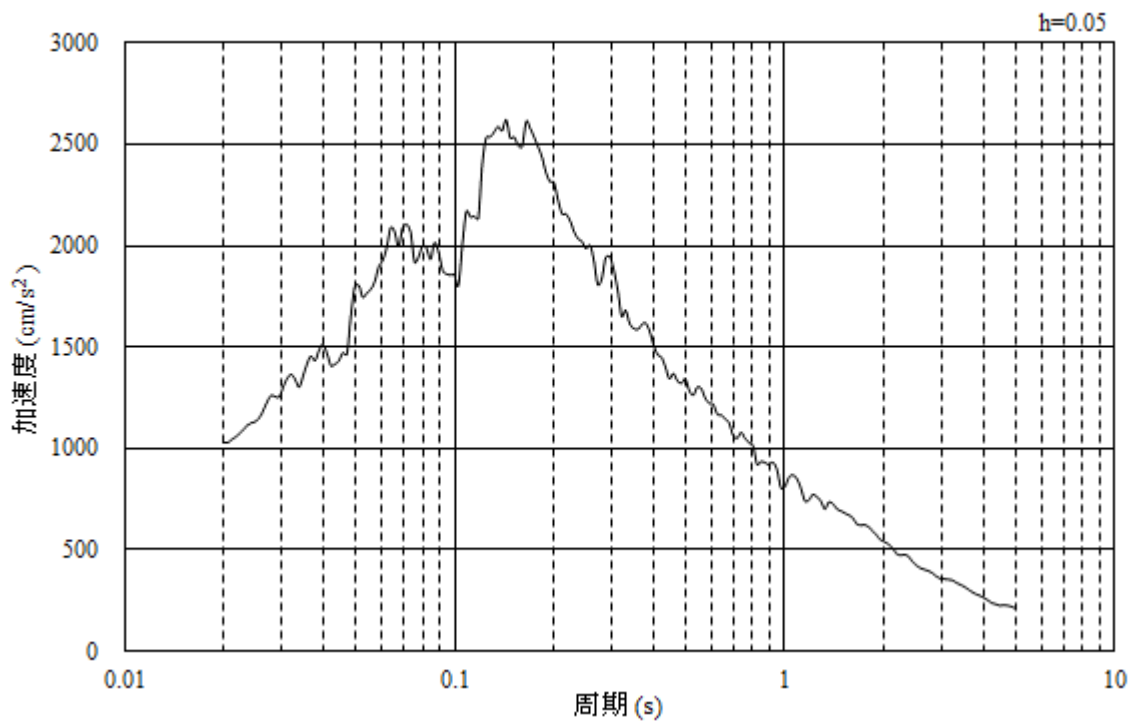


図4-1 入力地震動算定の概念図

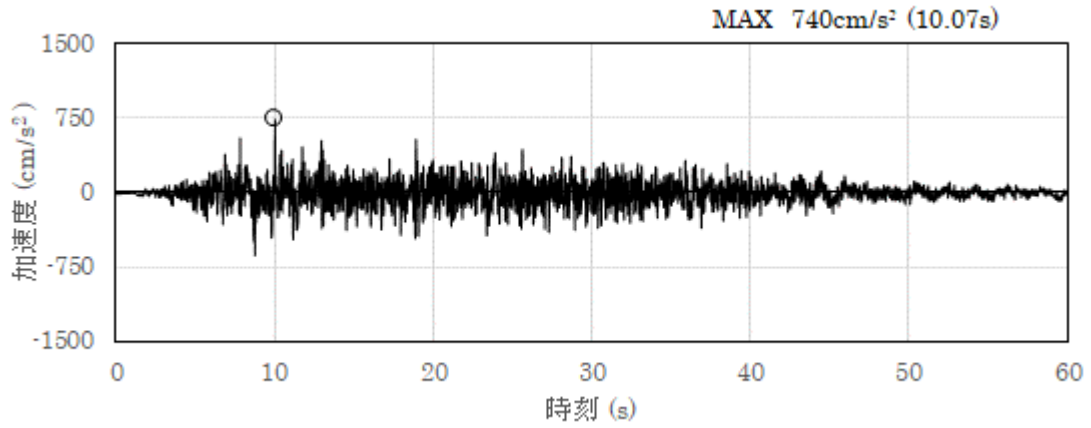


(a) 加速度時刻歴波形

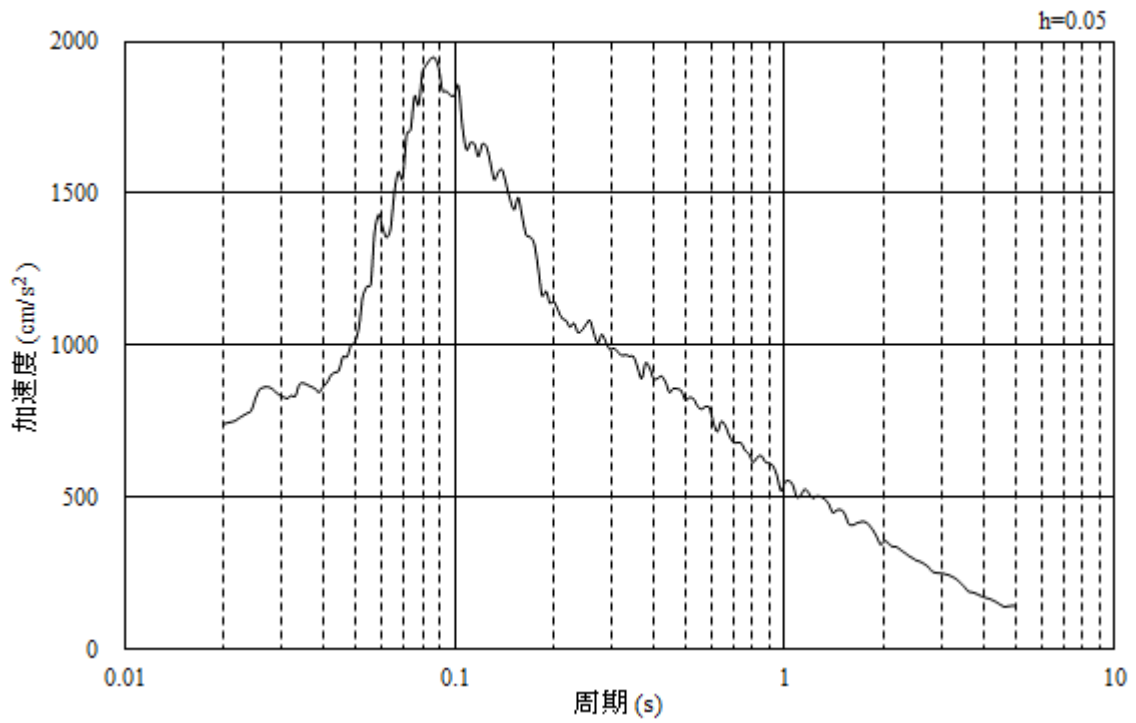


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-2 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - D)

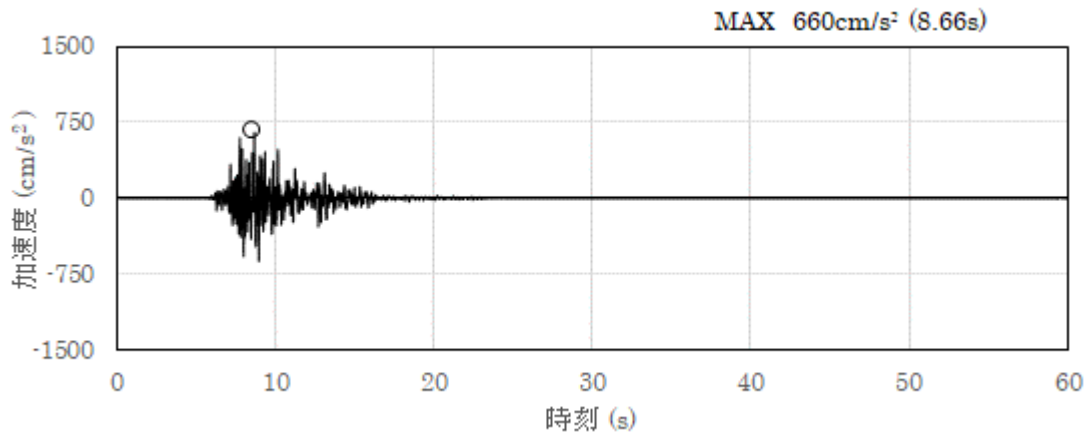


(a) 加速度時刻歴波形

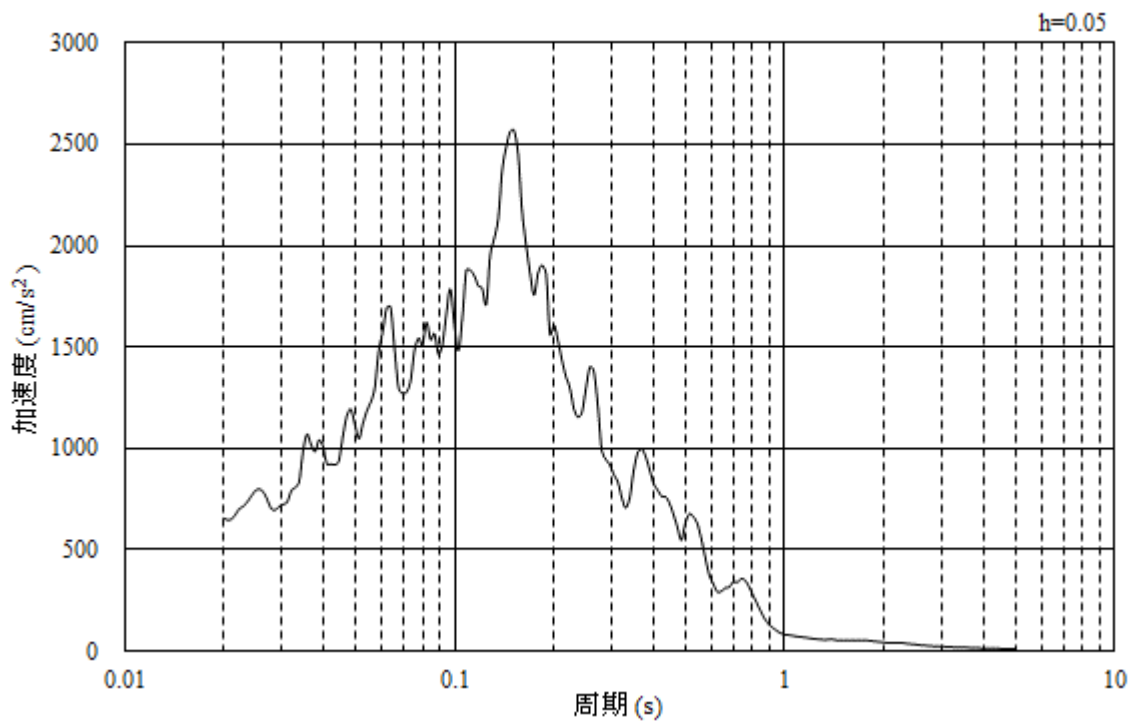


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-3 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - D)

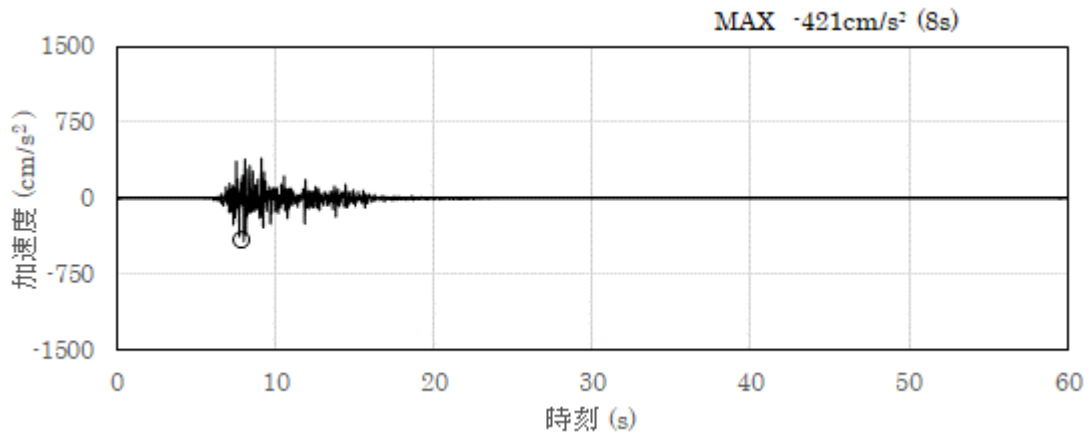


(a) 加速度時刻歴波形

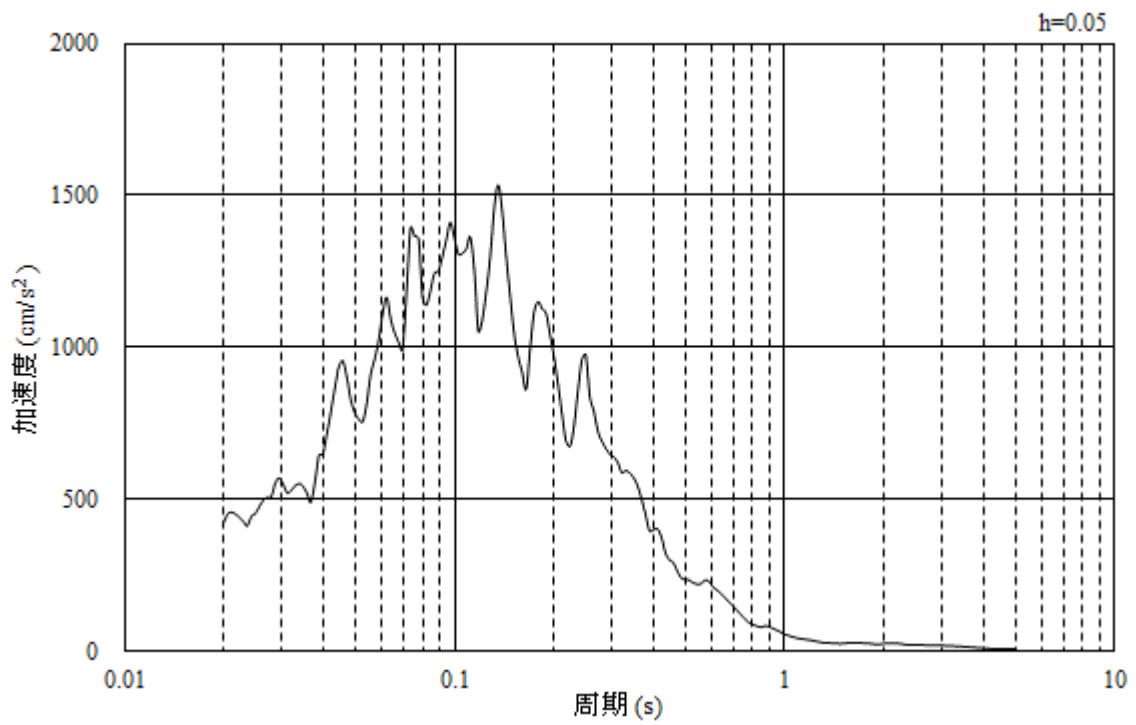


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-4 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S s - F 1, N S 方向)

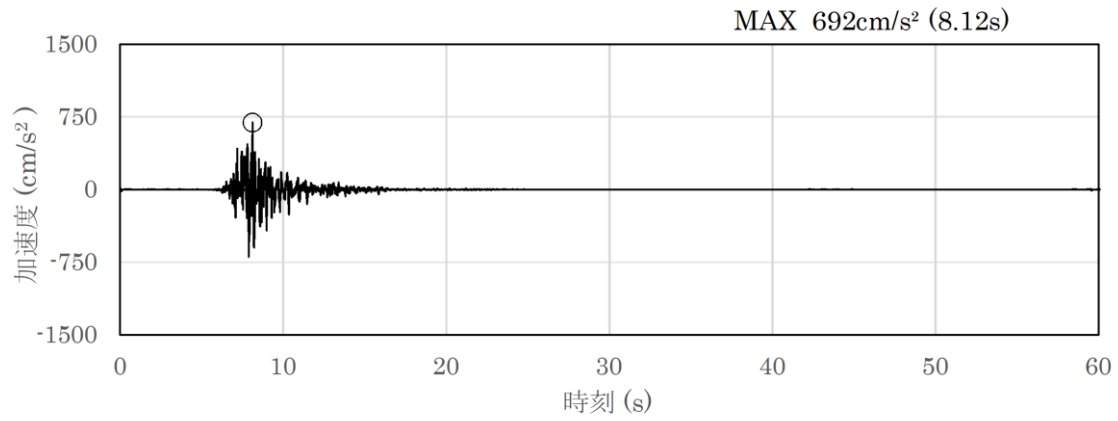


(a) 加速度時刻歴波形

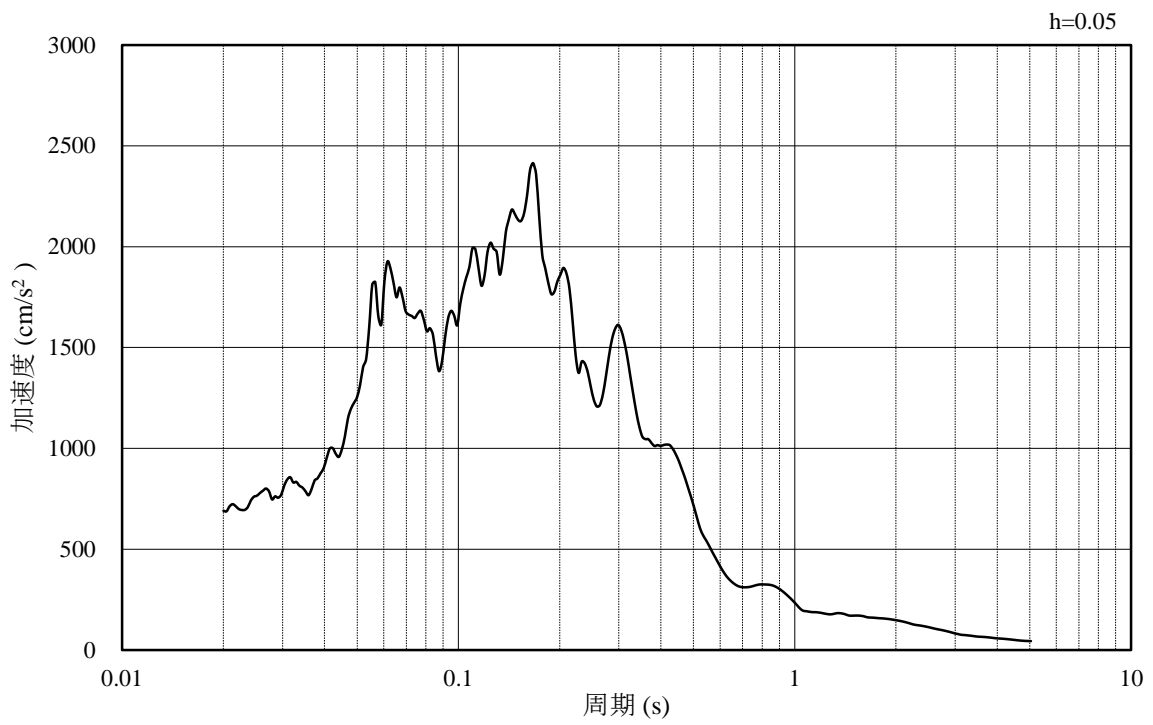


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-5 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - F 1, N S 方向)

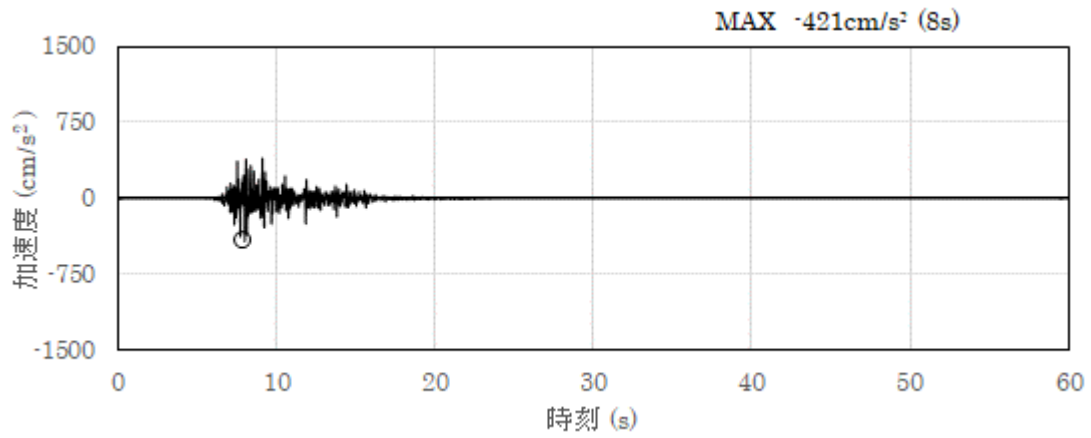


(a) 加速度時刻歴波形

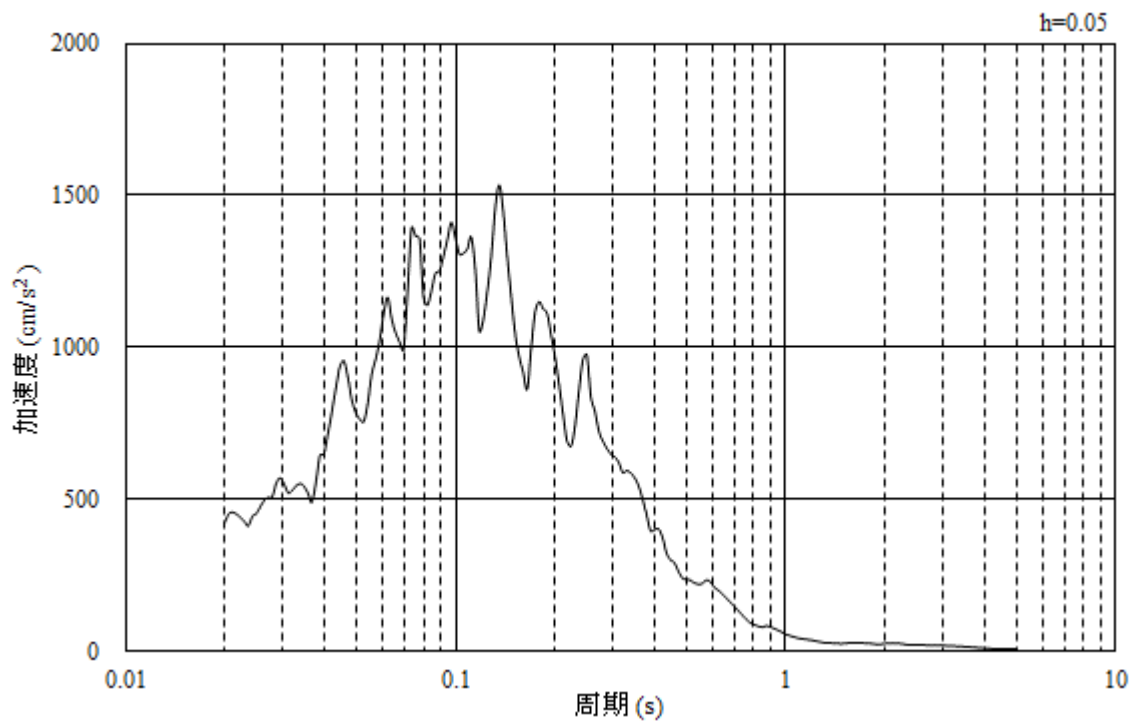


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-6 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - F 1, E W 方向)

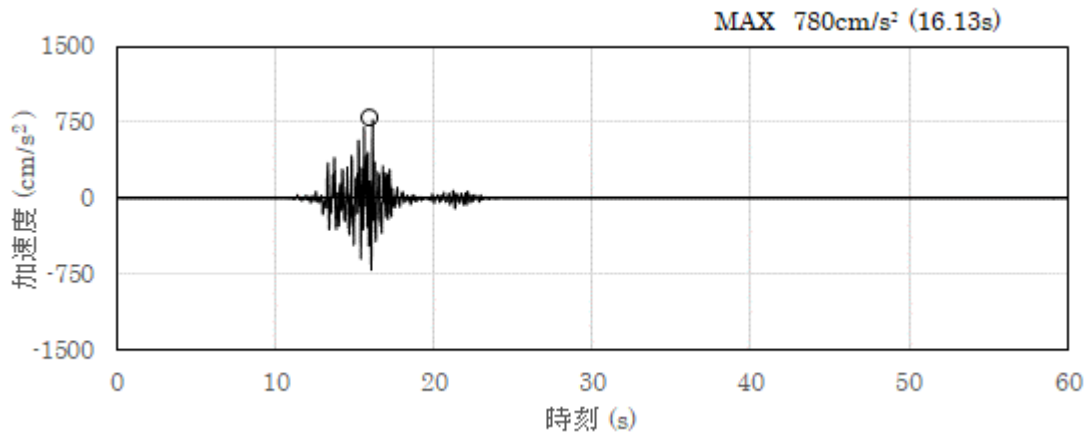


(a) 加速度時刻歴波形

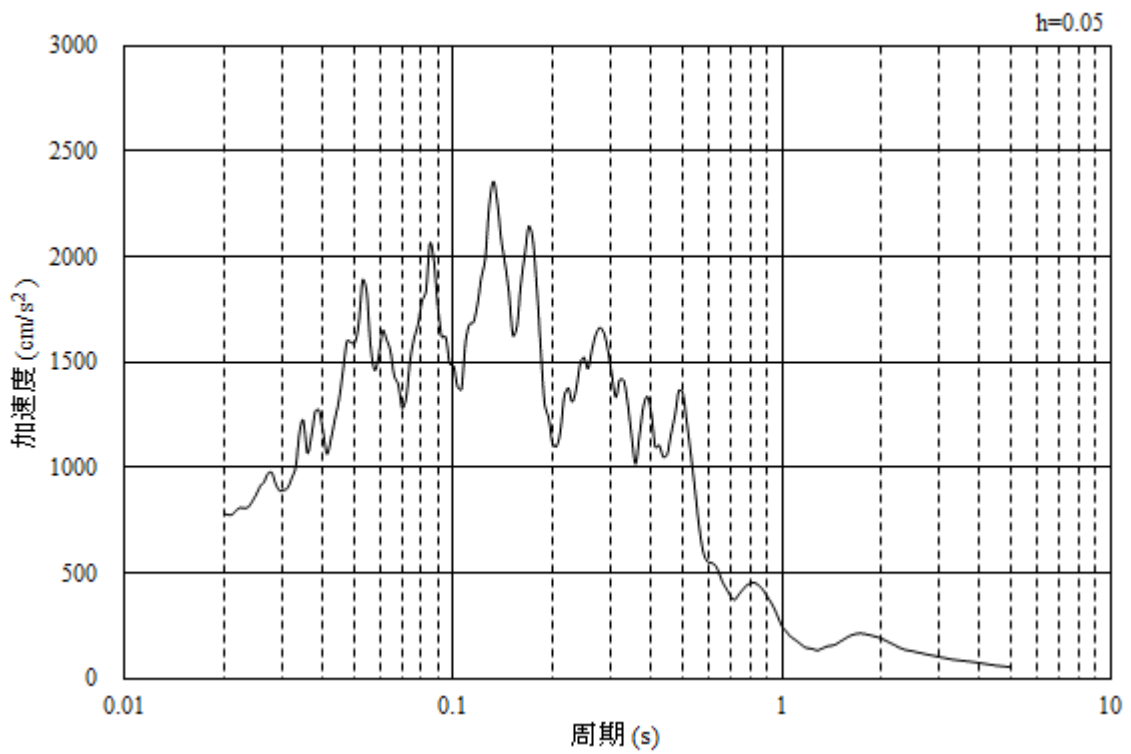


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-7 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - F 1, E W方向)

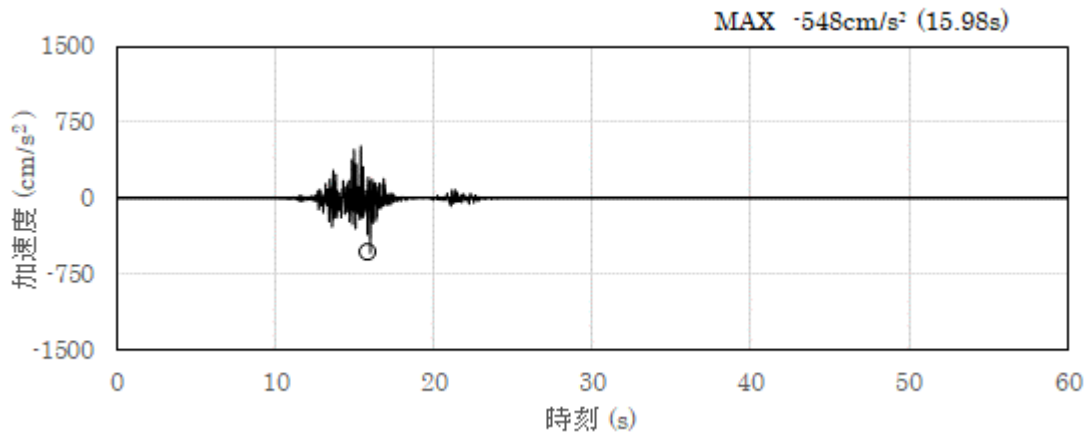


(a) 加速度時刻歴波形

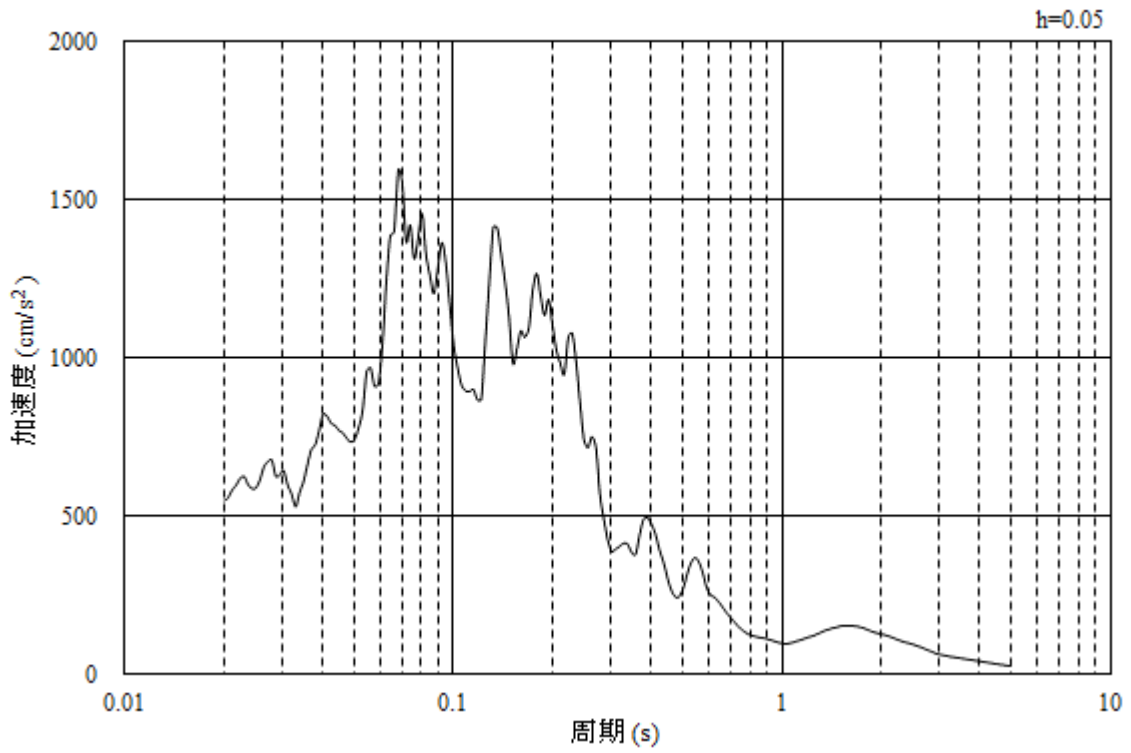


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-8 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S s - F 2, N S 方向)

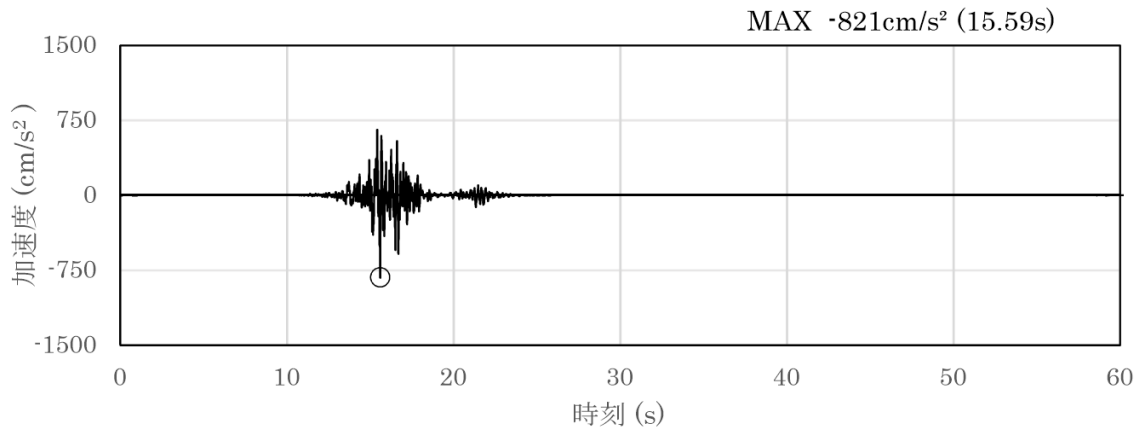


(a) 加速度時刻歴波形

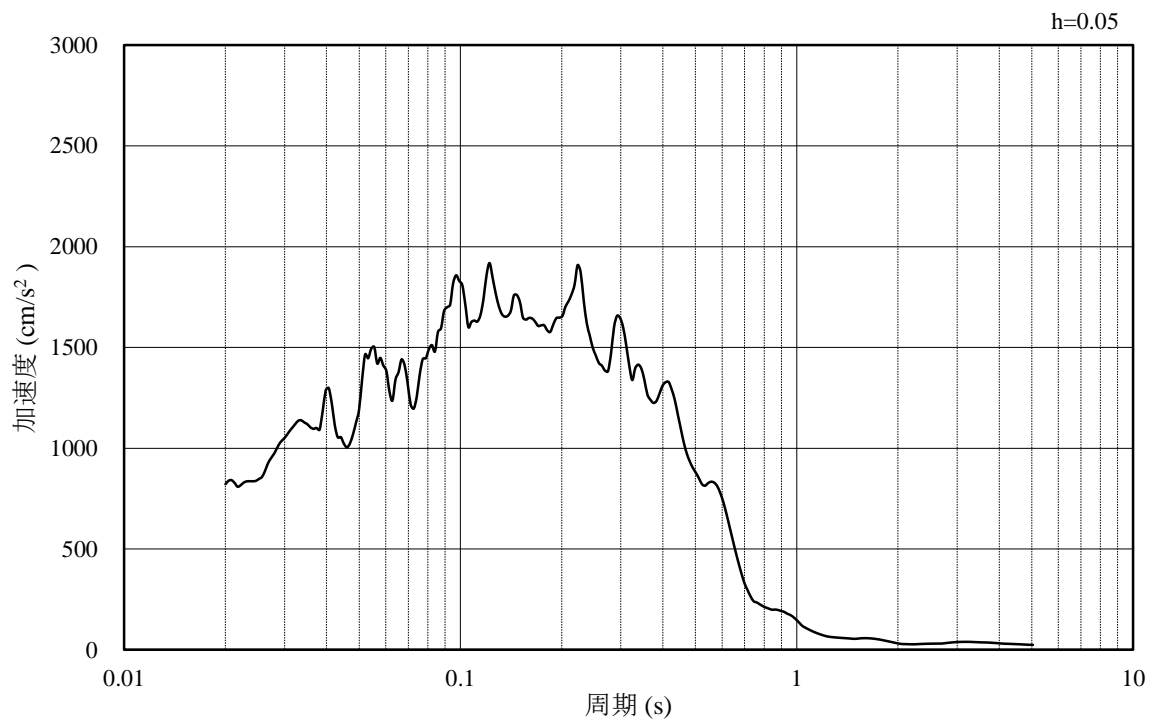


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-9 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - F 2, N S 方向)

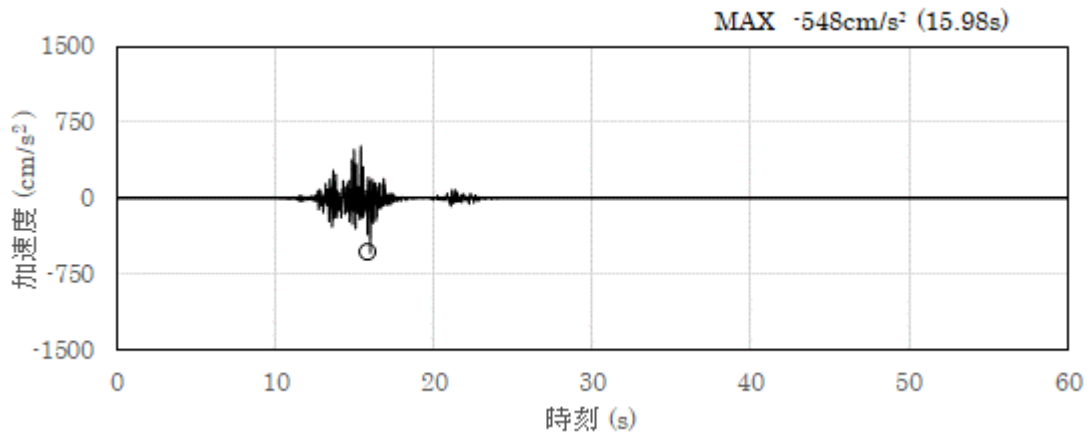


(a) 加速度時刻歴波形

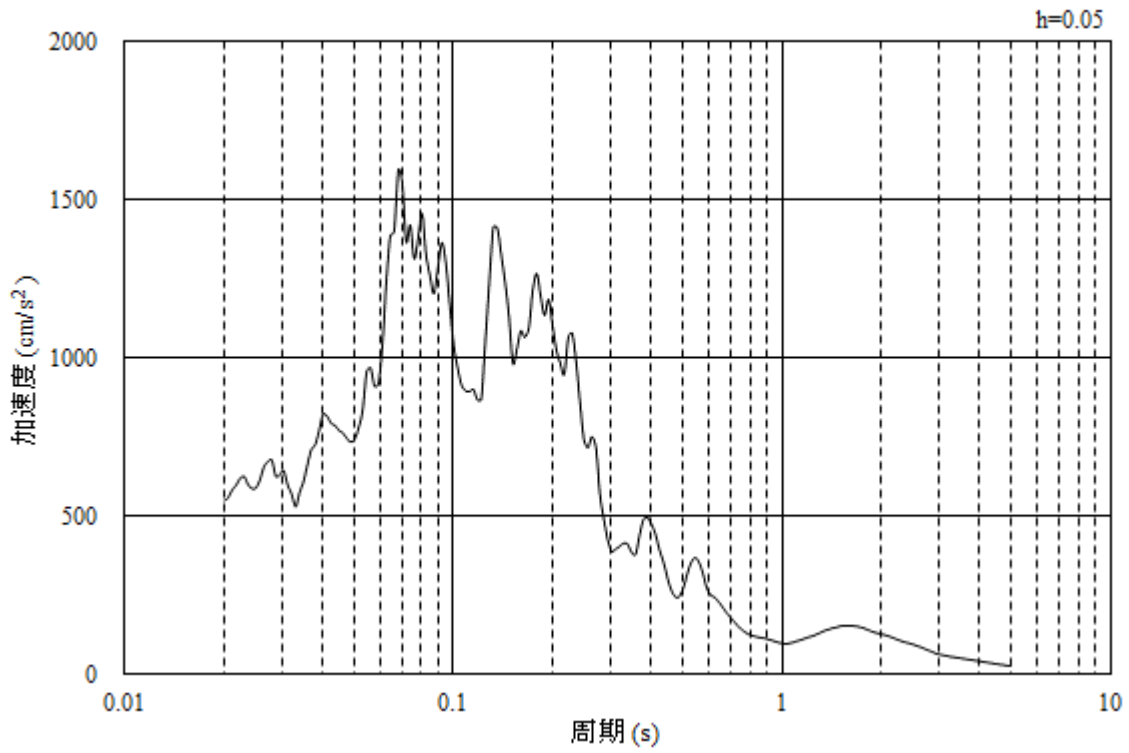


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-10 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S s - F 2, E W方向)

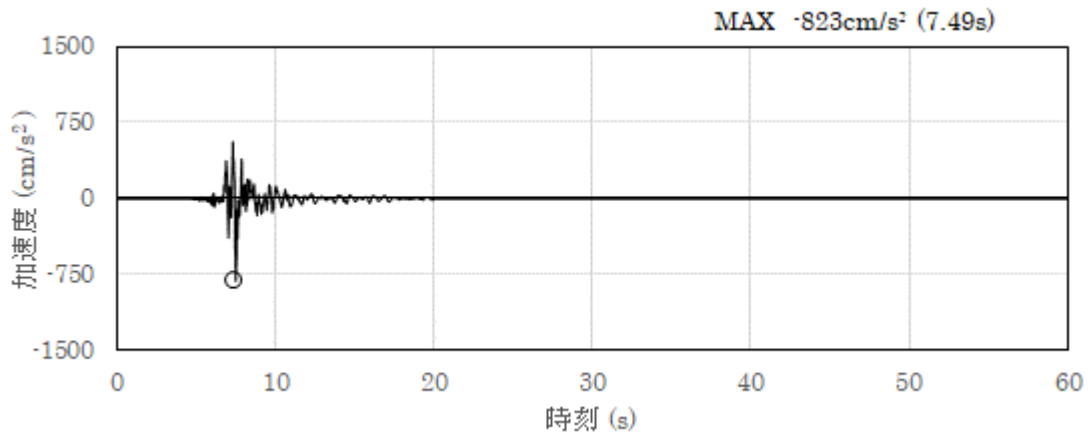


(a) 加速度時刻歴波形

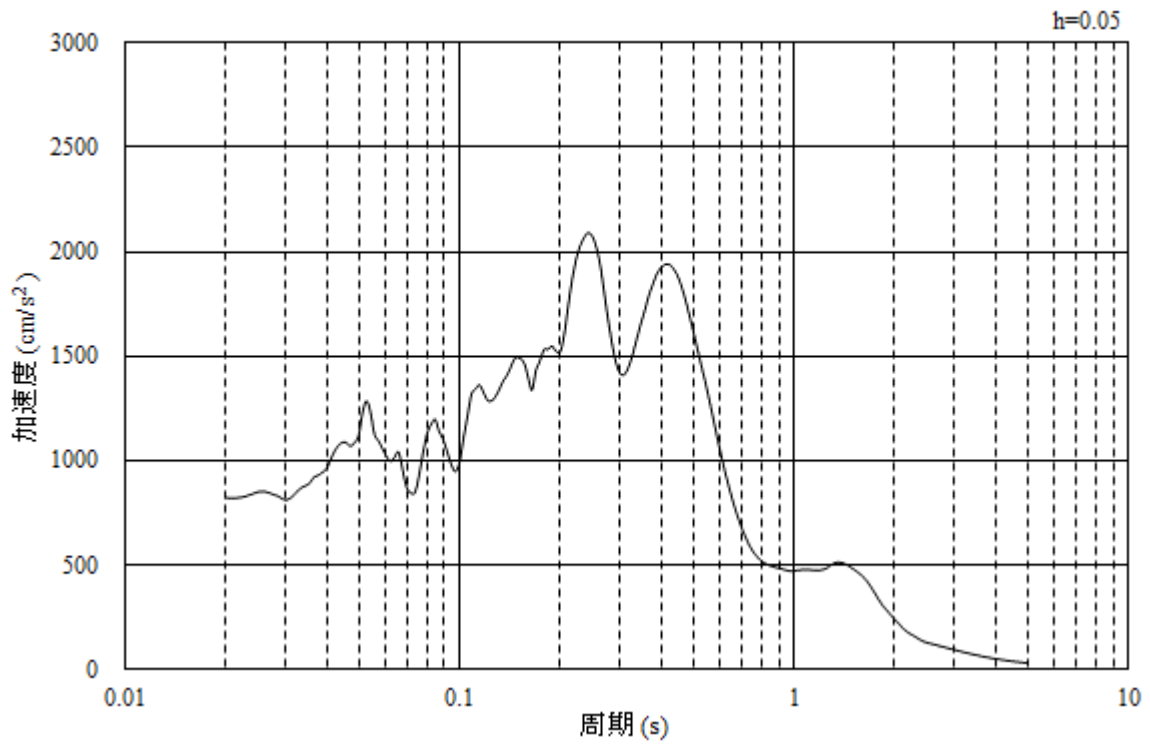


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-11 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - F 2, E W方向)

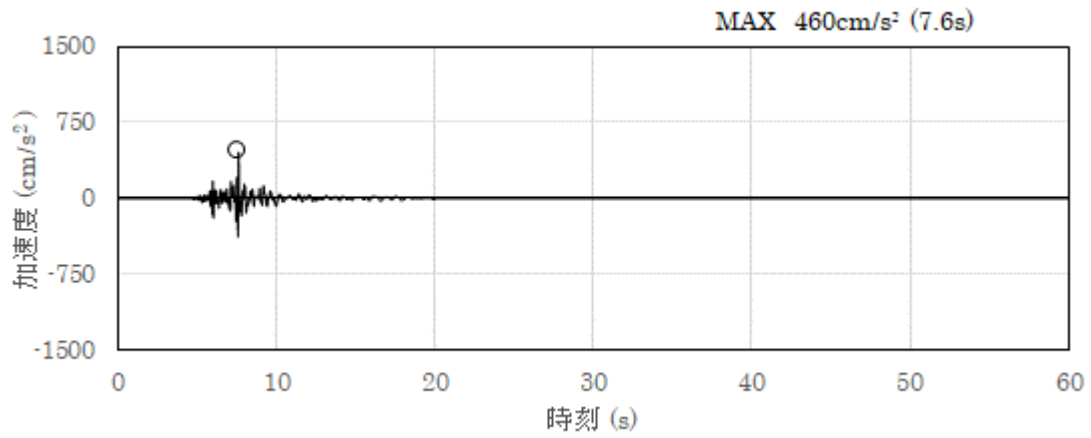


(a) 加速度時刻歴波形

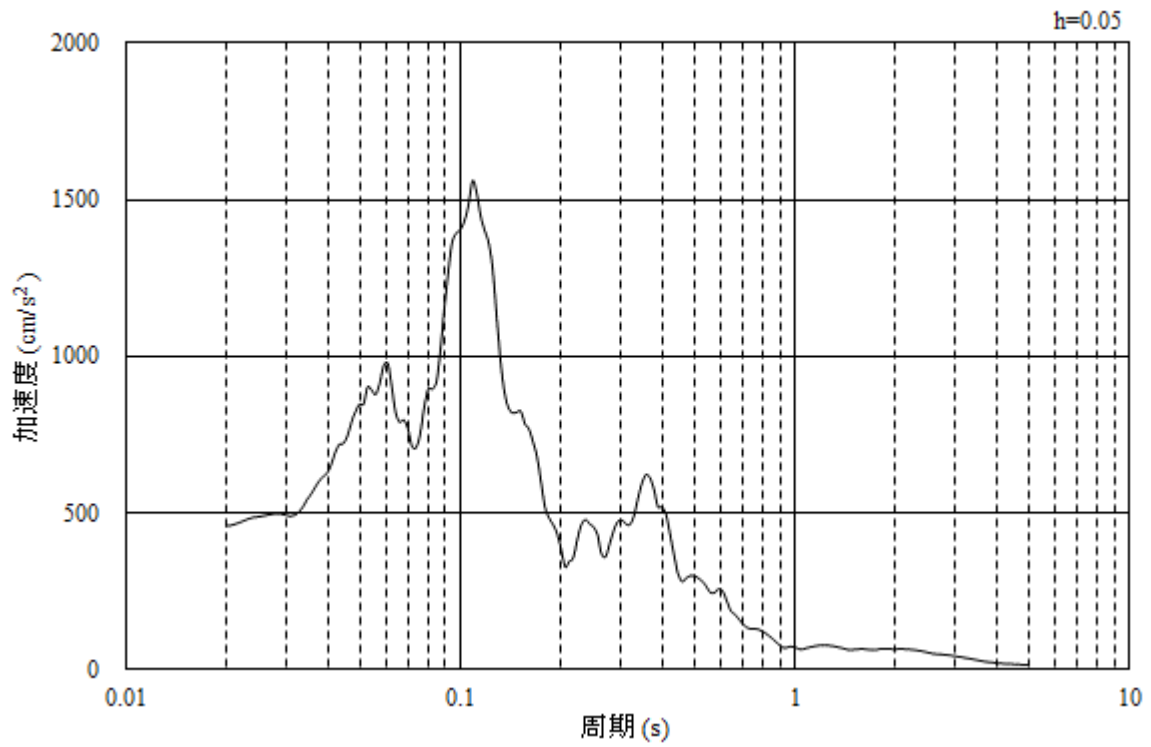


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-12 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - N 1)

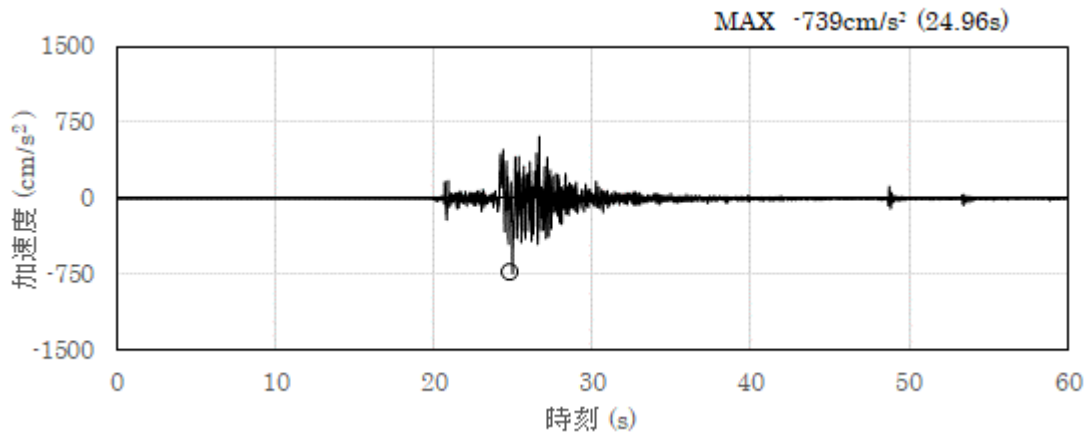


(a) 加速度時刻歴波形

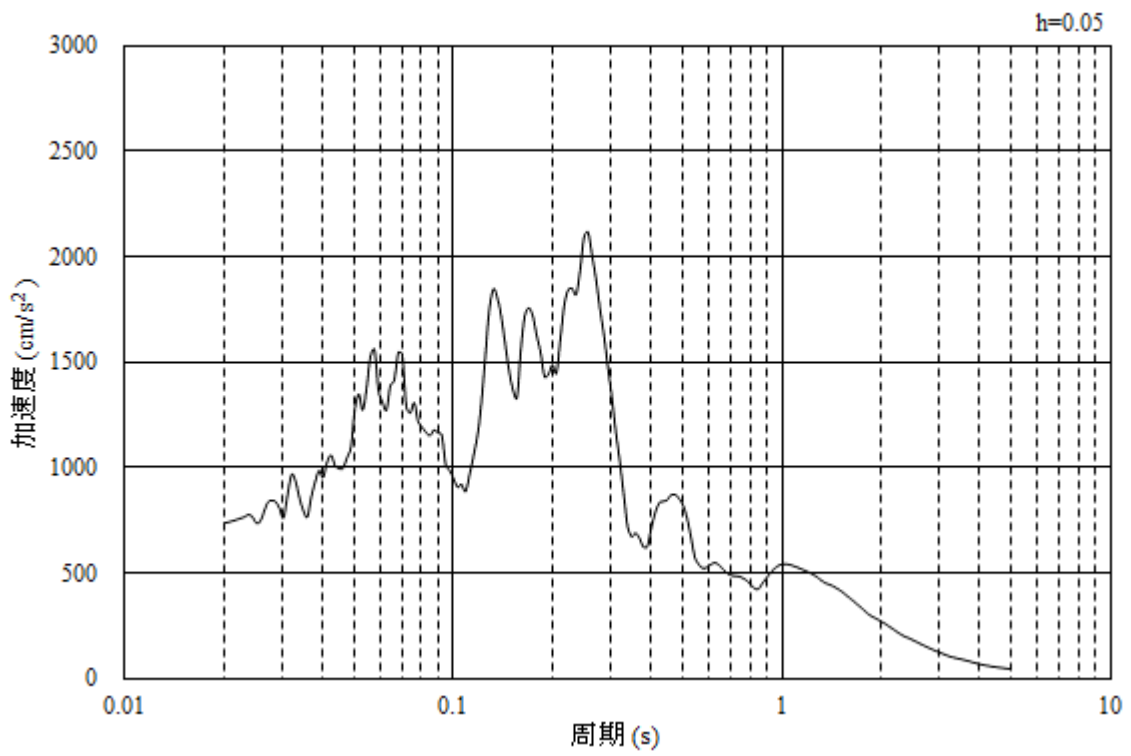


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-13 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - N 1)

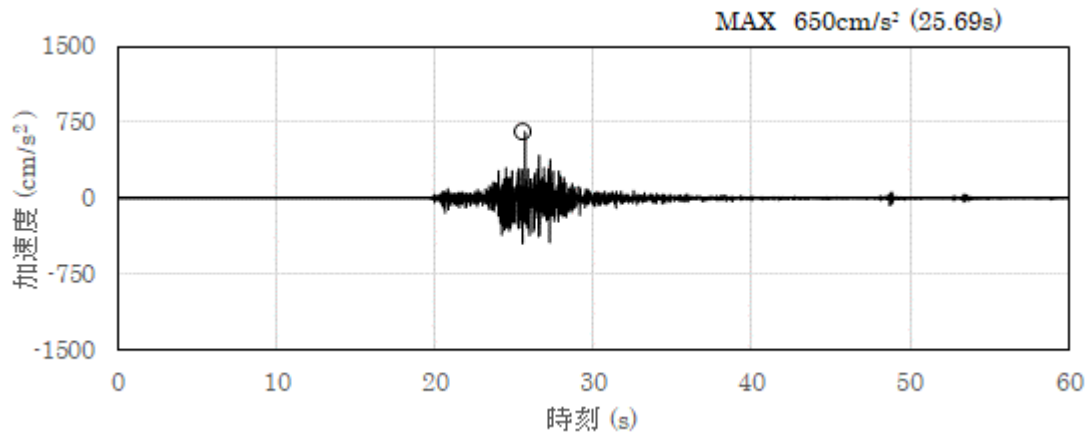


(a) 加速度時刻歴波形

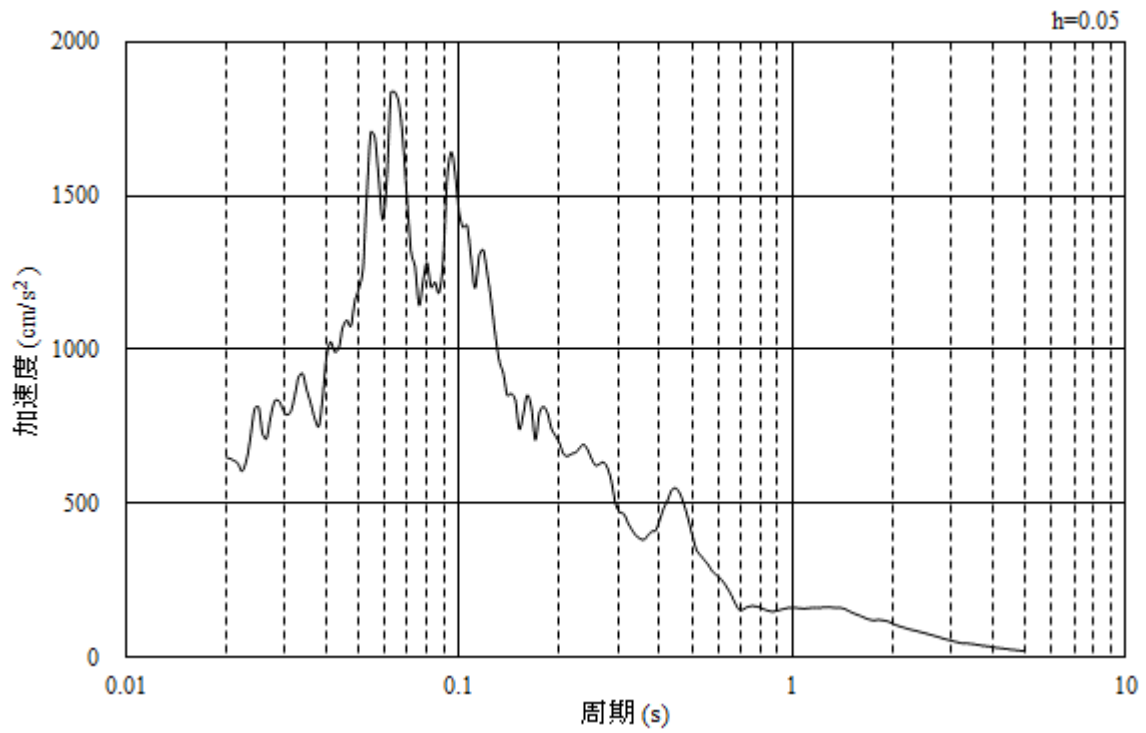


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-14 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S s - N 2, N S 方向)

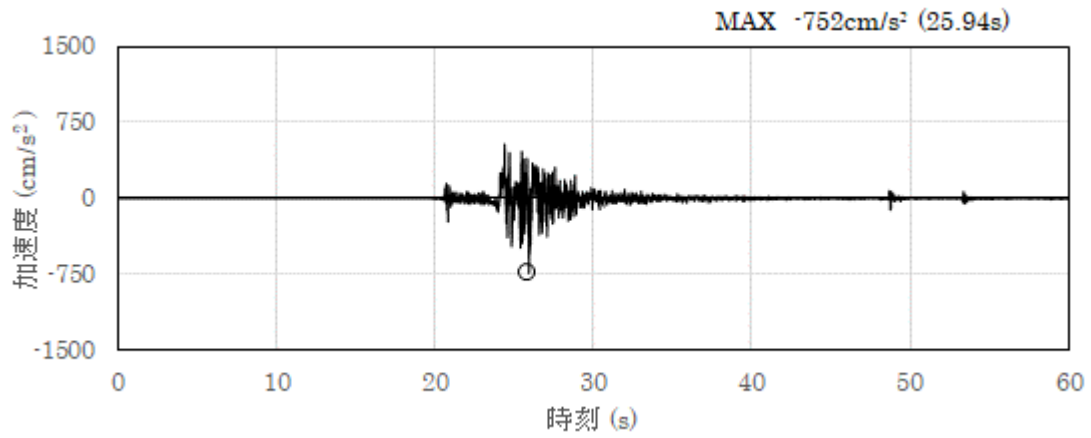


(a) 加速度時刻歴波形

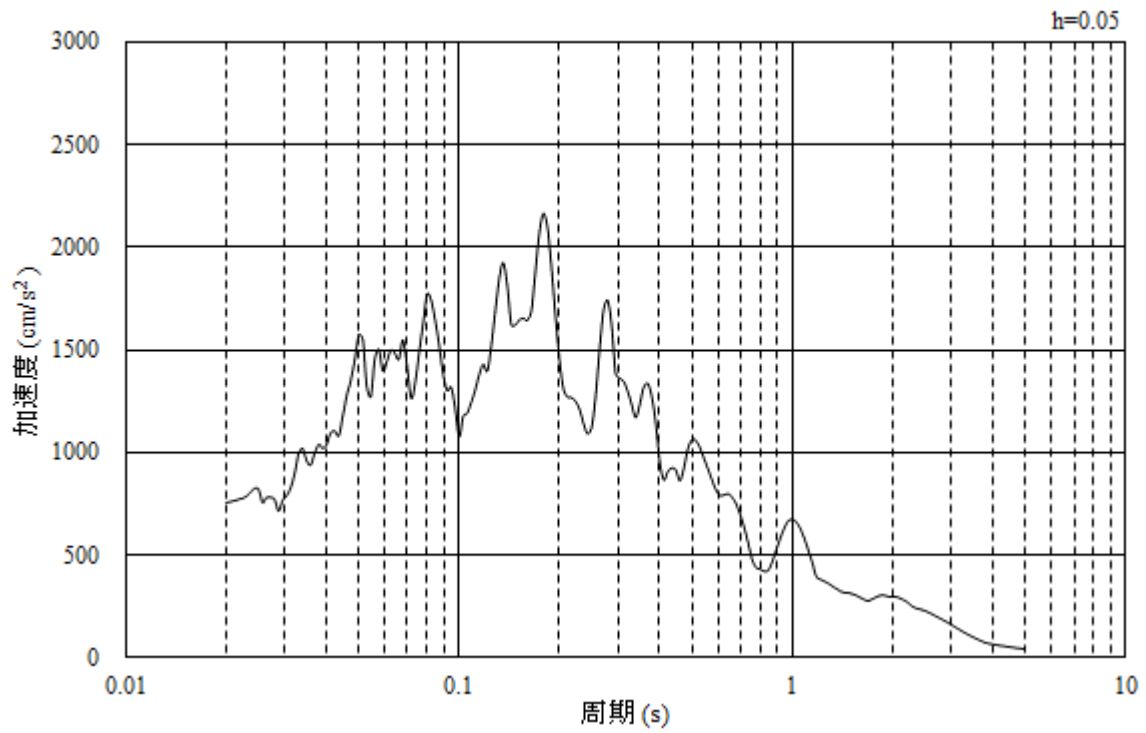


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-15 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - N 2, N S 方向)

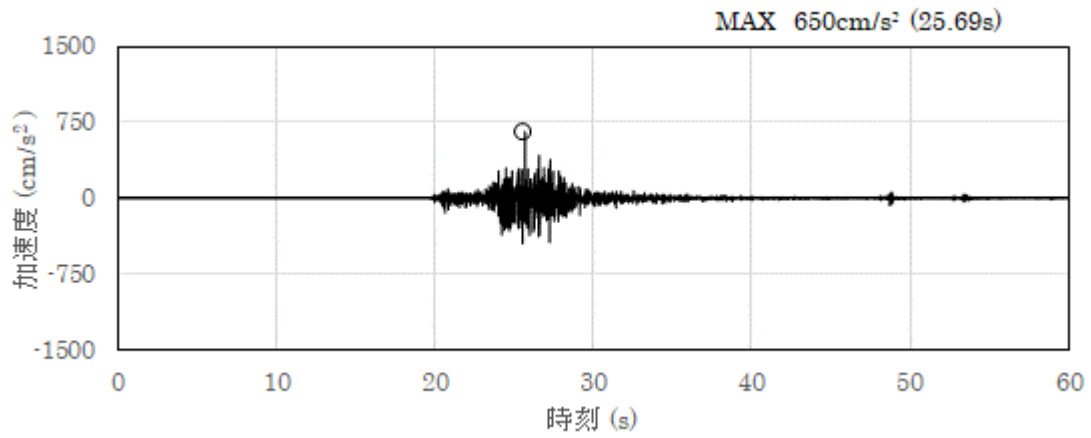


(a) 加速度時刻歴波形

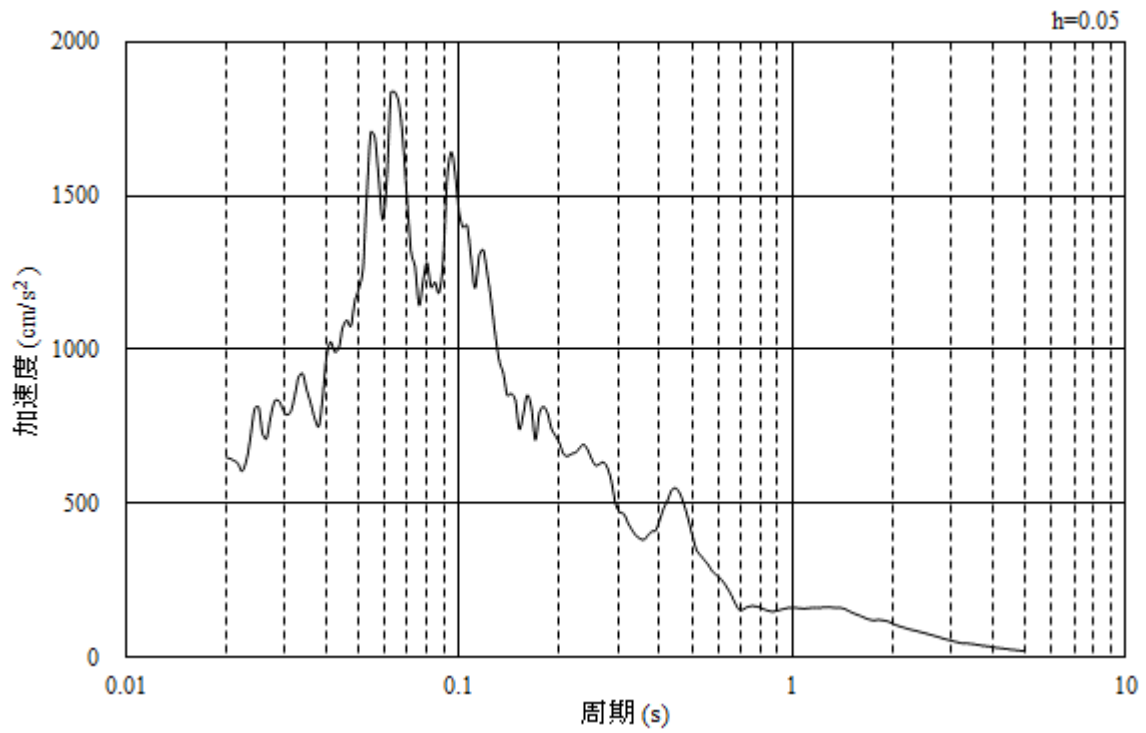


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-16 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S_s-N₂, EW方向)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 4-17 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - N 2, E W方向)

4.2 許容限界の設定

屋外重要土木構造物の耐震安全性評価は、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」の「2. 屋外重要土木構造物の要求機能と要求機能に対する耐震評価内容」に示すとおり、各構造物の要求機能と要求機能に応じた許容限界を設定し照査を行う。なお、充填コンクリートの評価については、「参考資料 充填コンクリートの評価結果」に示す。

4.2.1 構造部材（鉄筋コンクリート）に対する許容限界

(1) 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

構造強度を有することの確認における構造部材（鉄筋コンクリート）の曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界は、短期許容応力度とする。コンクリート及び鉄筋の許容応力度を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

表 4-1 コンクリートの許容応力度及び短期許容応力度

設計基準強度	許容応力度 (N/mm ²)		短期許容応力度*
			(N/mm ²)
f' _{ck} = 24.0 (N/mm ²)	許容曲げ圧縮応力度 σ'_{ca}	9.0	13.5
	許容せん断応力度 τ_{a1}	0.45	0.675

注記*：コンクリート標準示方書 2002 により地震時の割り増し係数として 1.5 を考慮する。

表 4-2 鉄筋の許容応力度及び短期許容応力度

鉄筋の種類	許容応力度 (N/mm ²)		短期許容応力度*
			(N/mm ²)
SD295A	許容引張応力度 σ_{sa}	176	264
SD345		196	294

注記*：コンクリート標準示方書 2002 により地震時の割り増し係数として 1.5 を考慮する。

(2) せん断破壊に対する許容限界

構造部材（鉄筋コンクリート）のせん断破壊に対する許容限界は、表 4-1 及び表 4-2 に示すコンクリートと鉄筋の短期許容応力度から算定した短期許容せん断力とする。

$$V_a = V_c + V_s$$

ここで、

- V_a : 短期許容せん断力
- V_c : コンクリートが分担するせん断力
- V_s : せん断補強鉄筋が分担するせん断力

$$V_c = \frac{1}{2} \tau_{a1} \cdot b_w \cdot z$$

ここで、

- τ_{a1} : コンクリートの短期許容せん断応力度
- b_w : 部材の有効幅
- d : 部材の有効高さ
- z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離
で $d/1.15$ とする。

ただし、せん断補強筋を有さない場合は、 $V_c = \tau_{a1} \cdot b_w \cdot z$

$$V_s = \{ A_w \sigma'_{sa} (\sin \alpha + \cos \alpha) / s \} z$$

ここで、

- A_w : 区間 s におけるせん断補強筋の総断面積
- σ'_{sa} : 鉄筋の短期許容引張応力度
- α : せん断補強鉄筋と部材軸のなす角度
- s : せん断補強鉄筋の配置間隔

ただし、せん断補強筋を有さない場合は、 $V_s = 0$

4.2.2 構造部材（鋼製タンク）に対する許容限界

(1) 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

構造強度を有することの確認及び貯水機能相当を損なわないことの確認における構造部材（鋼製タンク）のせん断破壊に対する許容限界は、短期許容応力度とする。鋼製タンクの許容応力度を表 4-3 に示す。

なお、短期許容応力度により照査を行うため、構造強度を有することの確認と貯水機能相当を損なわないことの確認における許容限界は同一となる。したがって、全部材に対して構造強度を有することを確認することで、貯水機能相当を損なわないことの確認も同時に行う。

表 4-3 鋼製タンクの許容応力度及び短期許容応力度

鋼製タンク の仕様	許容応力度 (N/mm ²)		短期許容応力度* (N/mm ²)
	SS400	許容引張応力度 f_t	156
許容せん断応力度 f_s		90	135

注記*：「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（日本建築学会，2005年）」により地震時の割り増し係数として 1.5 を考慮する。

(2) せん断破壊に対する許容限界

構造強度を有することの確認及び貯水機能相当を損なわないことの確認における構造部材（鋼製タンク）のせん断破壊に対する許容限界は、表 4-3 に示す短期許容応力度とする。

4.2.3 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

基礎地盤に発生する接地圧に対する許容限界は、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき、岩盤の極限支持力度とする。

基礎地盤の支持性能に対する許容限界を表 4-4 に示す。

表 4-4 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

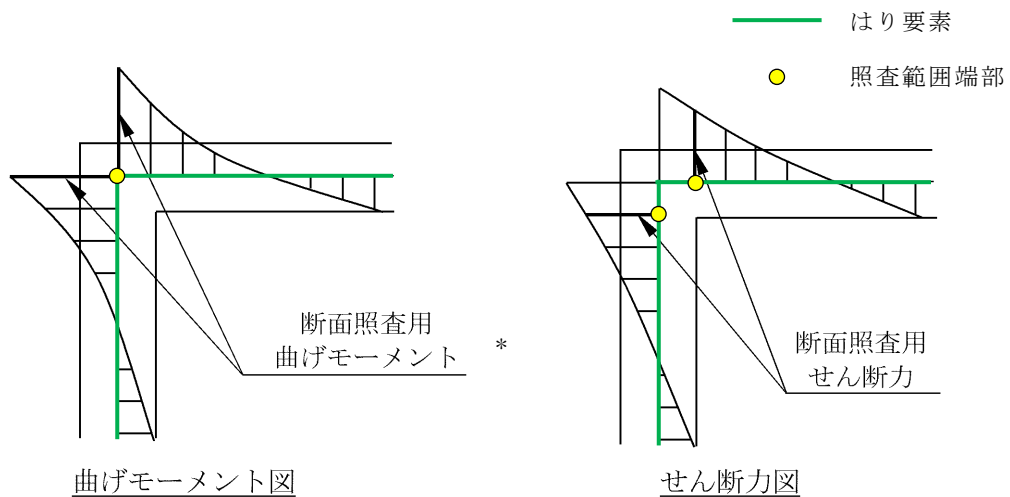
評価項目	基礎地盤	許容限界 (N/mm ²)
極限支持力度	C _L 級岩盤	3.9

4.3 評価方法

4.3.1 A-A断面

許容応力度法によるはり部材の照査では、地震応答解析において構造部材（鉄筋コンクリート）を構成するはり要素に発生した断面力を用いる。

図4-18に示すとおり、曲げ・軸力系の破壊に対する照査では要素端部までを照査範囲とし、せん断破壊に対する照査では部材端部（支承前面）までを照査範囲とする。



注記*：応力の算定においては、同一節点における軸力も用いる

図4-18 はり要素における照査位置

4.3.2 B-B断面

B-B断面においては、側壁を4辺固定版とした際に発生する断面力を用いた照査を実施する。4辺固定版は、線形シェル要素によりモデル化する。B-B断面（側壁）の応力解析モデル図を図4-19に示す。

4辺固定版に入力する荷重については、地震応答解析における応答値（土圧及び慣性力）とし、土圧は地震応答解析モデルの構造物（側壁）－地盤間に発生する直応力、慣性力は側壁を構成する各節点に発生する応答加速度に自重を乗じたものとする。東側壁と西側壁を比較した際に、西側壁のほうが埋戻土層厚が厚いことから、対象は西側壁とする。

4辺固定版の照査位置概念図を図4-20に示す。照査位置については、はり要素と同様に、曲げ・軸力系の破壊に対する照査では解析モデル端部までを照査範囲とし、せん断破壊に対する照査では部材端部（支承前面）を照査範囲とする。

4辺固定版による評価については、解析コード「TDA P III」を使用する。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

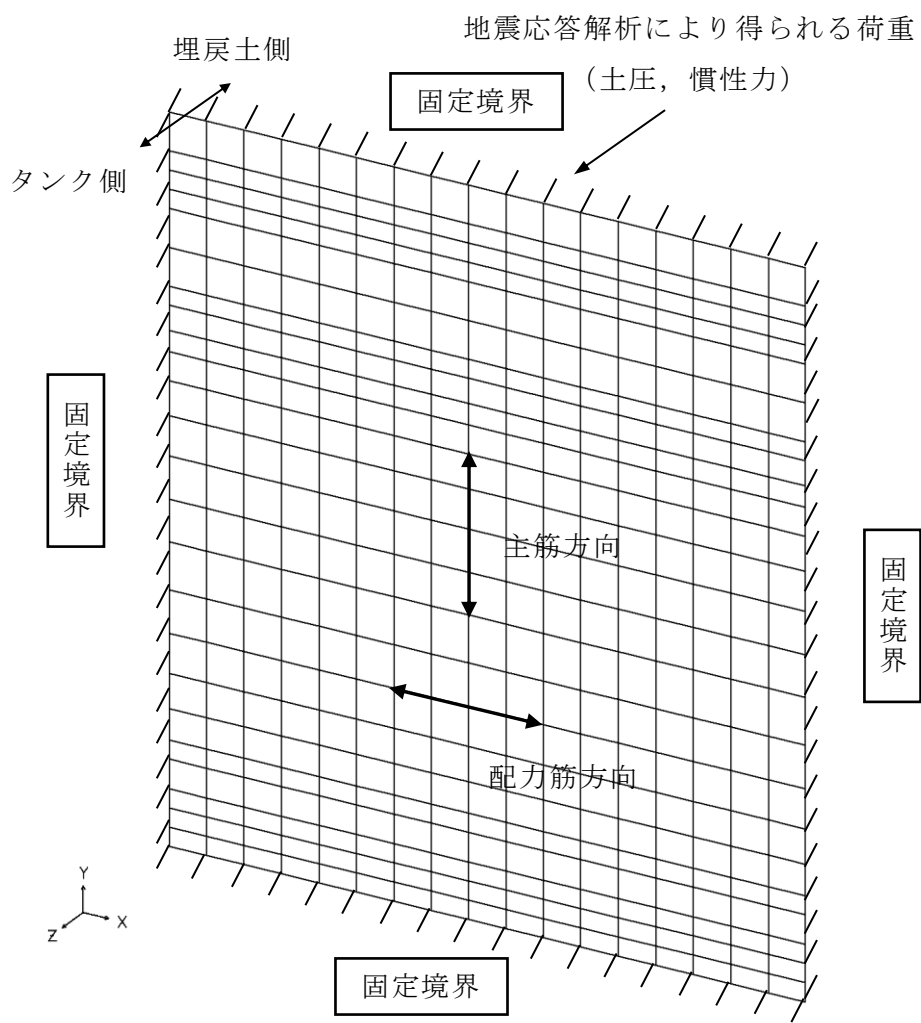


図 4-19 応力解析モデル図 (4 辺固定版)

曲げ・軸力系の破壊

せん断破壊

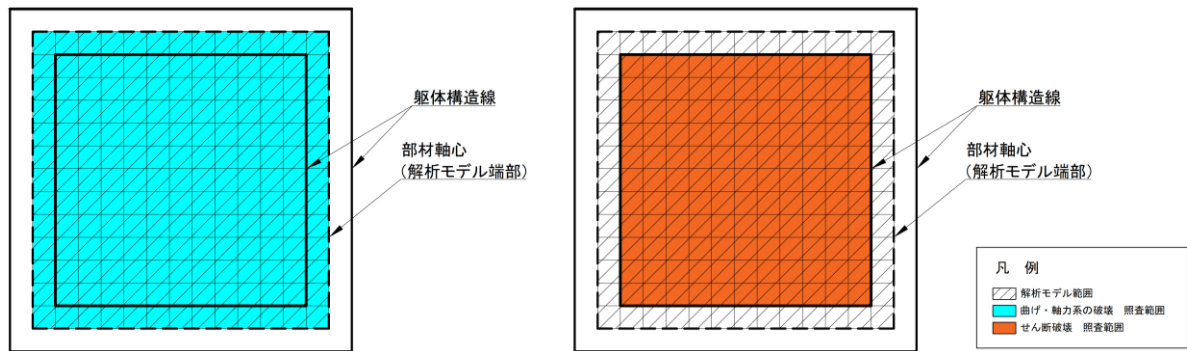


図 4-20 4 辺固定版の照査位置概念図

4.3.3 剛域の設定の有無について

剛域については、一般に構造物の部材寸法に占める剛域長の割合が 10% 程度以下であることから、構造物の地震時挙動及び耐震安全性評価に与える影響は軽微であると考えられるが、設定の有無により地震応答解析における応答値及び部材照査に少なからず影響を及ぼす可能性がある。具体的には、剛域を設定することで、構造物全体のせん断剛性が相対的に大きくなり、地震応答解析における応答値である変形を小さく評価する又は発生断面力を大きく評価する可能性がある。また、部材照査においては剛域内の断面力を無視できることから、保守的ではないが、合理的な部材照査を行うことができる。一方で、剛域部の要素分割が他の一般部と比較して細かくなりすぎる傾向もある。

以上を踏まえると、剛域の考慮の有無については構造物毎に適宜判断すればよいと考えられ、本構造物においては、部材厚が薄く要素分割が過度に細かくなることが懸念されることから、剛域を考慮しない地震応答解析及び部材照査を実施することとする。

5. 評価結果

5.1 地震応答解析結果

全応力解析の地震応答解析結果として、断面力に対し照査を行っている項目のうち最も厳しい照査値に対する「断面力分布」を記載する。なお、断面力分布は単位奥行きあたりの断面力を図示する。

5.1.1 解析ケース

(1) A-A断面

耐震評価における解析ケースについては、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」のうち「10. 屋外重要土木構造物等の耐震評価における追加解析ケースの選定」に基づき設定する。

耐震評価においては、基準地震動 S_s 全波（6波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（6波）を加えた全12波に対し、基本ケース（解析ケース①）を実施する。基本ケースにおいて、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び地盤の支持力照査の照査項目ごとに照査値が0.5を超える照査項目に対して、最も厳しい地震動を用いて、解析ケース②及び③を実施する。すべての照査項目の照査値がいずれも0.5以下の場合、照査値が最も厳しくなる地震動を用いて、解析ケース②及び③を実施する。

解析ケース②及び③を実施する地震動について、表5-1に示す。

なお、上記実施ケースの結果を踏まえ、照査値に十分な裕度を有することから、追加解析を実施しない。

表5-1 解析ケース②及び③を実施する地震動

断面	解析ケース②及び③を実施する地震動
A-A断面	$S_s - D (+ -)$

(2) B－B断面

B－B断面においては、地震応答解析結果から4辺固定版に作用させる荷重を選定する。4辺固定版に作用させる荷重は土圧及び慣性力であるため、地震応答解析において頂底板間の層間変位が最大となる時刻における荷重が構造物にとって最も厳しくなると考えられる。

基本ケース（解析ケース①）の各地震動の層間変位最大時刻における土圧分布図を図5-1に、総土圧の一覧表を表5-2に示す。解析ケース①においては、最大土圧及び頂底板間での総土圧が最大となるS_s-D（+-）を選定する。

また、地盤物性のばらつきの影響を確認するために、解析ケース①と解析ケース②及び③におけるS_s-D（+-）の層間変位最大時刻における土圧分布及び総土圧を比較する。図5-2及び表5-3に示すとおり、最大土圧及び頂底板間での総土圧が最大となるのは解析ケース①である。

以上より、解析ケース①のS_s-D（+-）を対象に、層間変位最大時刻における荷重を4辺固定版に作用させることとする。

なお、慣性力については最大でも2.24kN程度であり、耐震評価に与える影響が土圧に対して小さいことを確認した。

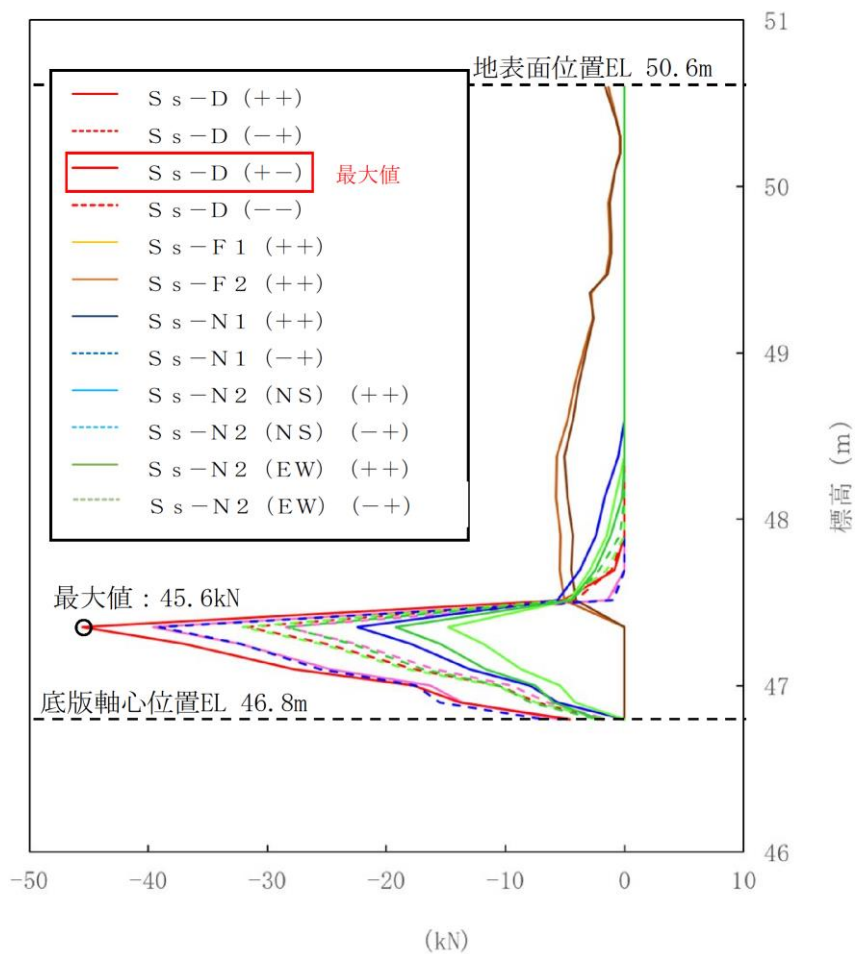


図 5-1 側壁に作用する土圧分布図（解析ケース①）

表 5-2 側壁に作用する総土圧（解析ケース①）

地震動	位相	総土圧 (kN)	地震動	位相	総土圧 (kN)
S s - D	++	134	S s - N 1	++	81
	-+	86		-+	138
	+-	152	S s - N 2 (N S)	++	55
	--	99		-+	102
S s - F 1	++	54	S s - N 2 (E W)	++	70
S s - F 2	++	48		-+	96

注：ハッチングは最大値を示す。

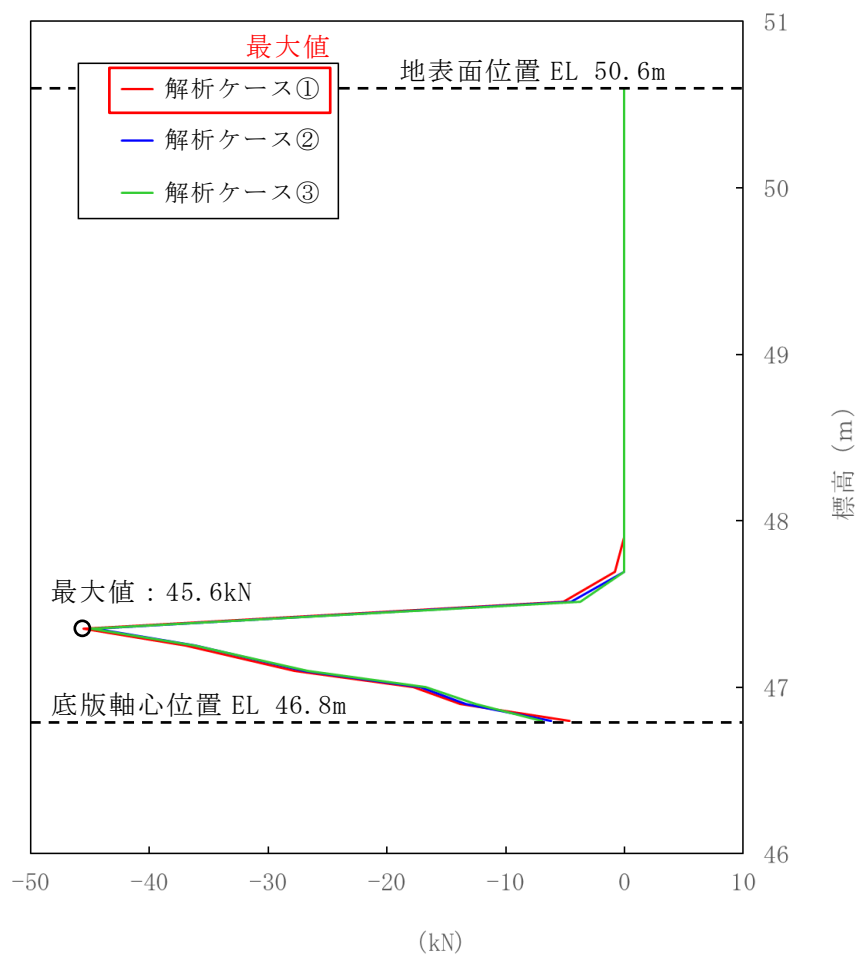


図 5-2 側壁に作用する土圧分布図の比較 (S s - D (+))

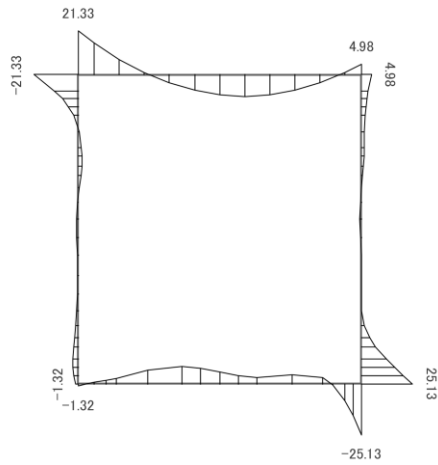
表 5-3 層間変位最大時刻における総土圧 (S s - D (+))

解析ケース	総土圧 (kN)
ケース①	152
ケース②	147
ケース③	145

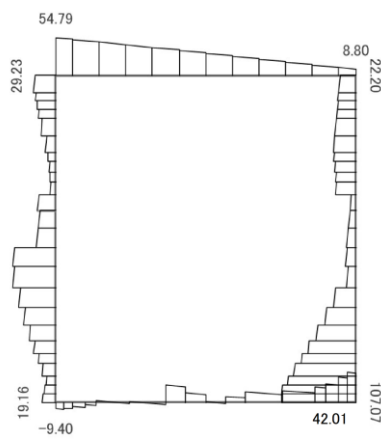
注：ハッチングは最大値を示す。

5.1.2 断面力分布（曲げ・軸力系の破壊に対する照査，A－A断面）

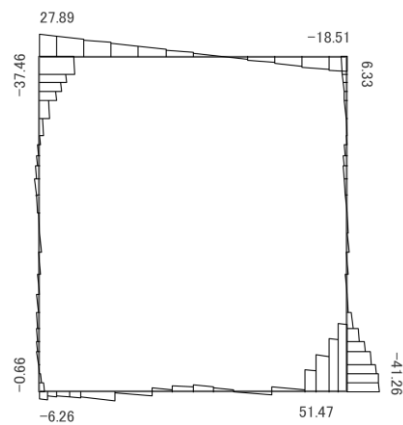
曲げ・軸力系の破壊に対する照査において，最も厳しい照査値となる解析ケースの照査時刻における断面力分布図（曲げモーメント，軸力，せん断力）を図5-3及び図5-4に示す。



(a) 曲げモーメント (kN・m)

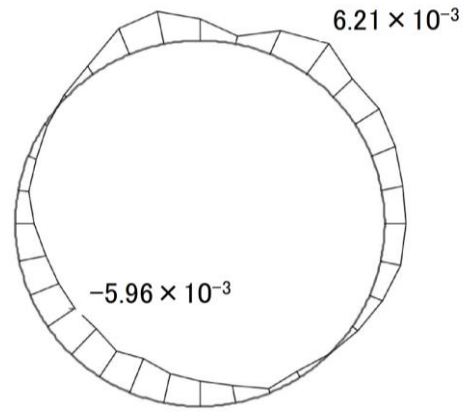


(b) 軸力 (kN) (+ : 圧縮, - : 引張)

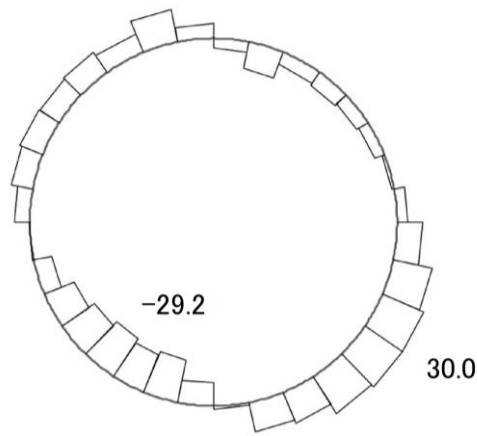


(c) せん断力 (kN)

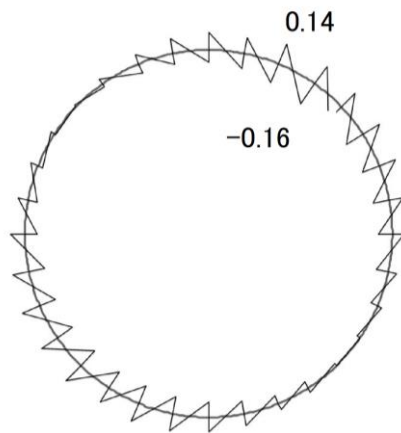
図 5-3 曲げ・軸力系の破壊に対する照査値最大時の断面力図 (鉄筋コンクリート)
(A-A断面, 解析ケース③, S_s-D (+-))



(a) 曲げモーメント (kN・m)



(b) 軸力 (kN) (+ : 圧縮, - : 引張)

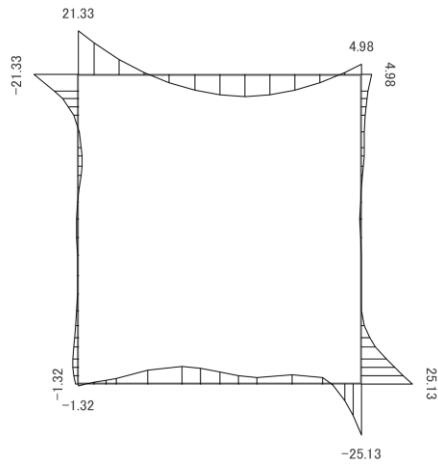


(c) せん断力 (kN)

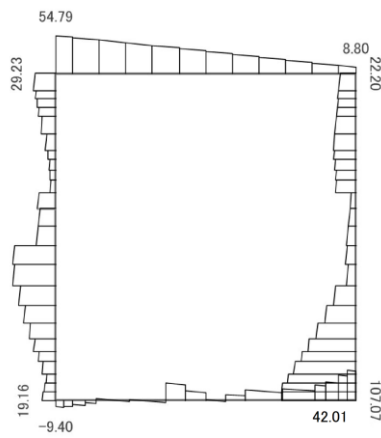
図 5-4 曲げ・軸力系の破壊に対する照査値最大時の断面力図 (鋼製タンク)
(A-A断面, 解析ケース③, S s - D (+ -))

5.1.3 断面力分布（せん断破壊に対する照査，A－A断面）

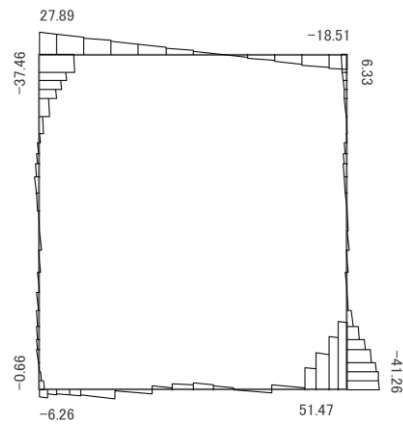
せん断破壊に対する照査において，最も厳しい照査値となる解析ケースの照査時刻における断面力分布図（曲げモーメント，軸力，せん断力）を図5－5及び図5－6に示す。



(a) 曲げモーメント (kN・m)

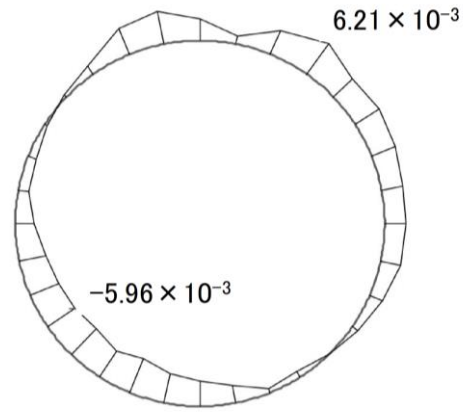


(b) 軸力 (kN) (+ : 圧縮, - : 引張)

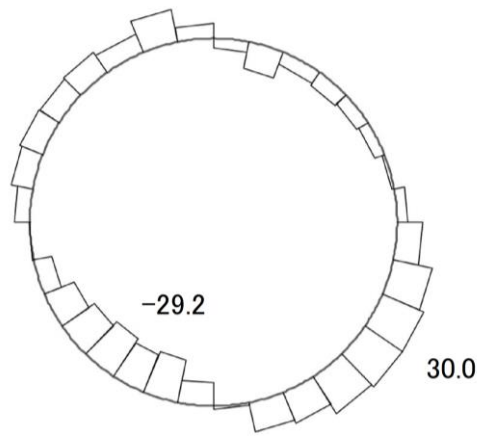


(c) せん断力 (kN)

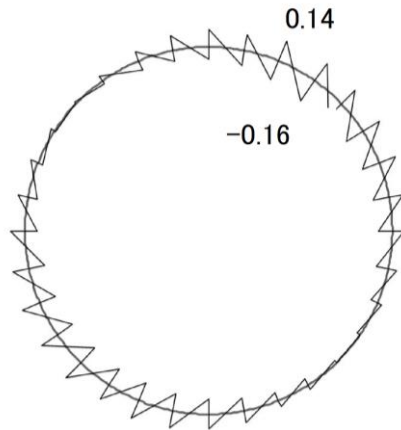
図 5-5 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力図 (鉄筋コンクリート)
(A-A断面, 解析ケース③, S s - D (+ -))



(a) 曲げモーメント (kN・m)



(b) 軸力 (kN) (+ : 圧縮, - : 引張)

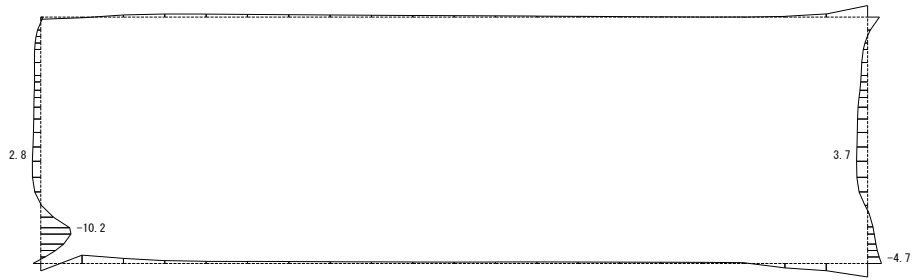


(c) せん断力 (kN)

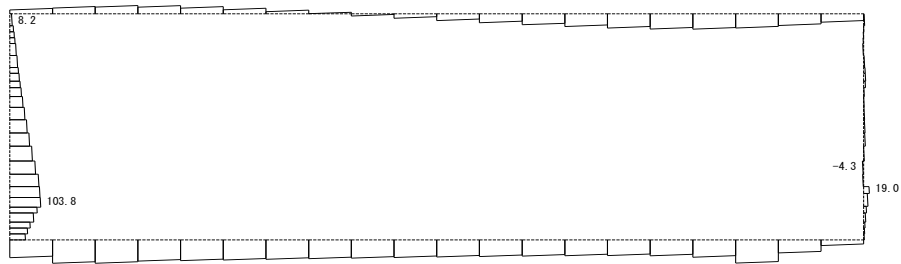
図 5-6 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力図 (鋼製タンク)
 (A-A断面, 解析ケース③, S s-D (+-))

5.1.4 断面力分布（層間変位最大時刻，B－B断面）

4辺固定版による評価を実施するB－B断面について，地震応答解析において頂底版間の層間変位が最大となる時刻における断面力分布図（曲げモーメント，軸力，せん断力）を図5-7に示す。



(a) 曲げモーメント (kN・m)



(b) 軸力 (kN) (+ : 圧縮, - : 引張)



(c) せん断力 (kN)

図 5-7 層間変位最大時刻における断面力図
(B-B断面, 解析ケース①, S s-D (+-))

5.2 構造部材の健全性に対する評価結果

5.2.1 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果

(1) A-A断面

構造強度を有することの確認における曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果を表5-4～表5-6に示す。照査値は、応力度を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。同表のとおり、全ケースにおいて発生応力度は短期許容応力度を下回ることを確認した。

表5-4 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果（コンクリート）

解析 ケース	地震動		評価 位置*		曲げ	軸力 (kN)	発生	短期許容	照査値 $\sigma'_c / \sigma'_{c a}$
					モーメ ント (kN・m)		応力度 σ'_c (N/mm ²)	応力度 $\sigma'_{c a}$ (N/mm ²)	
①	S s - D	++	側壁	4	20.3	39.6	1.3	13.5	0.10
		+ -	側壁	3	19.0	28.0	1.2	13.5	0.09
	S s - F 1	++	側壁	4	16.9	31.7	1.0	13.5	0.08
	S s - F 2	++	側壁	4	19.3	35.3	1.2	13.5	0.09
	S s - N 1	++	側壁	4	18.3	28.1	1.1	13.5	0.09
	S s - N 2 (N S)	++	側壁	3	19.5	37.3	1.2	13.5	0.09
	S s - N 2 (E W)	++	側壁	4	19.6	37.4	1.2	13.5	0.09
②	S s - D	+ -	側壁	4	18.1	31.9	1.1	13.5	0.09
③	S s - D	+ -	側壁	4	25.1	107.1	1.5	13.5	0.12

注記*：評価位置は図5-8に示す。

表 5-5 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果（鉄筋）

解析 ケース	地震動		評価 位置*		曲げ	軸力 (kN)	発生	短期許容	照査値 σ_s / σ_{sa}
					モーメ ント (kN・m)		応力度 σ_s (N/mm ²)	応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	
①	S _s -D	++	頂版	1	20.4	36.5	25.3	264	0.10
		+ -	頂版	1	18.4	32.8	22.9	264	0.09
	S _s -F1	++	頂版	1	16.9	31.8	20.7	264	0.08
	S _s -F2	++	頂版	1	19.3	37.1	23.4	264	0.09
	S _s -N1	++	頂版	1	17.6	32.9	21.5	264	0.09
	S _s -N2 (NS)	++	頂版	1	19.5	35.8	24.0	264	0.10
	S _s -N2 (EW)	++	頂版	1	19.6	36.4	24.1	264	0.10
②	S _s -D	+ -	頂版	1	18.1	32.6	22.4	264	0.09
③	S _s -D	+ -	頂版	1	7.9	18.9	27.3	264	0.11

注記*：評価位置は図 5-8 に示す。

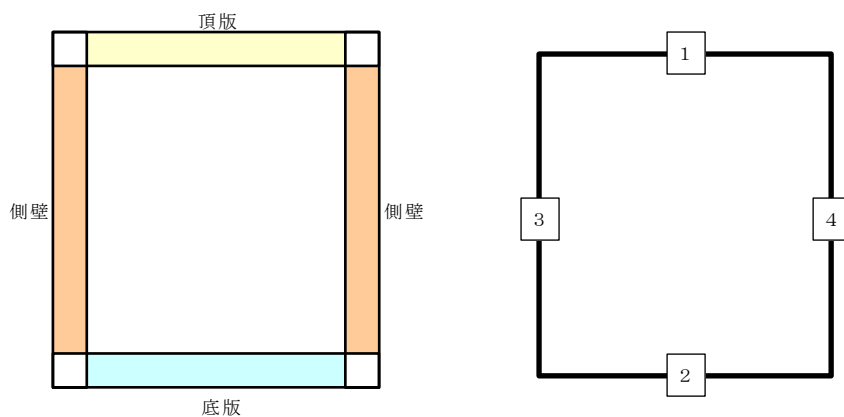


図 5-8 評価位置図（A-A 断面）

表 5-6 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果（鋼製タンク）

解析 ケース	地震動		曲げ モーメント (kN・m)	軸力 (kN)	発生応力度 σ_{max} (N/mm ²)	短期許容 応力度 f_t (N/mm ²)	照査値 σ_{max} / f_t
①	S s - D	++	5.05×10^{-3}	-26.5	3.3	235	0.02
		+-	5.47×10^{-3}	-24.9	3.2	235	0.02
	S s - F 1	++	4.27×10^{-3}	-16.3	2.1	235	0.01
	S s - F 2	++	3.87×10^{-3}	-19.9	2.5	235	0.02
	S s - N 1	++	5.18×10^{-3}	-20.5	2.7	235	0.02
	S s - N 2 (NS)	++	4.40×10^{-3}	-18.4	2.4	235	0.02
	S s - N 2 (EW)	++	3.86×10^{-3}	-18.4	2.3	235	0.01
②	S s - D	+-	5.06×10^{-3}	-20.8	2.7	235	0.02
③	S s - D	+-	5.96×10^{-3}	-29.2	3.7	235	0.02

(2) B-B断面

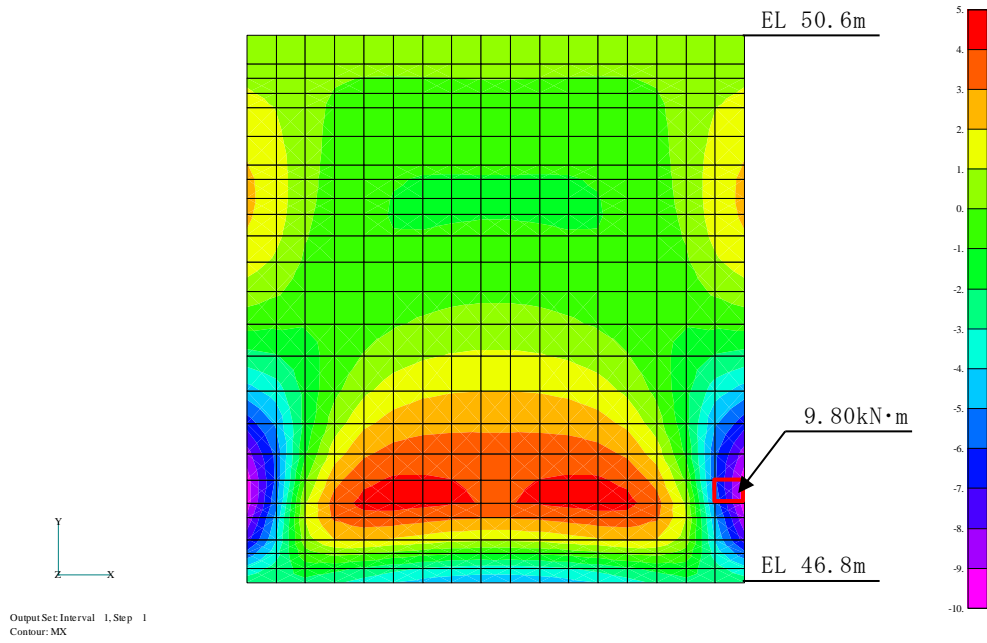
構造強度を有することの確認における曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果を表5-7及び表5-8に示す。また、4辺固定版における断面力図を図5-9及び図5-10に示す。同表のとおり、発生応力度は短期許容応力度を下回ることを確認した。

表5-7 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果（コンクリート）

解析 ケース	地震動		方向	曲げ モーメ ント (kN・m)	発生 応力度 σ'_c (N/mm ²)	短期許容 応力度 σ'_{ca} (N/mm ²)	照査値 σ'_c / σ'_{ca}
①	S s - D	+-	X方向 (配力筋方向)	9.80	0.911	13.5	0.07
			Y方向 (主筋方向)	24.7	1.51	13.5	0.12

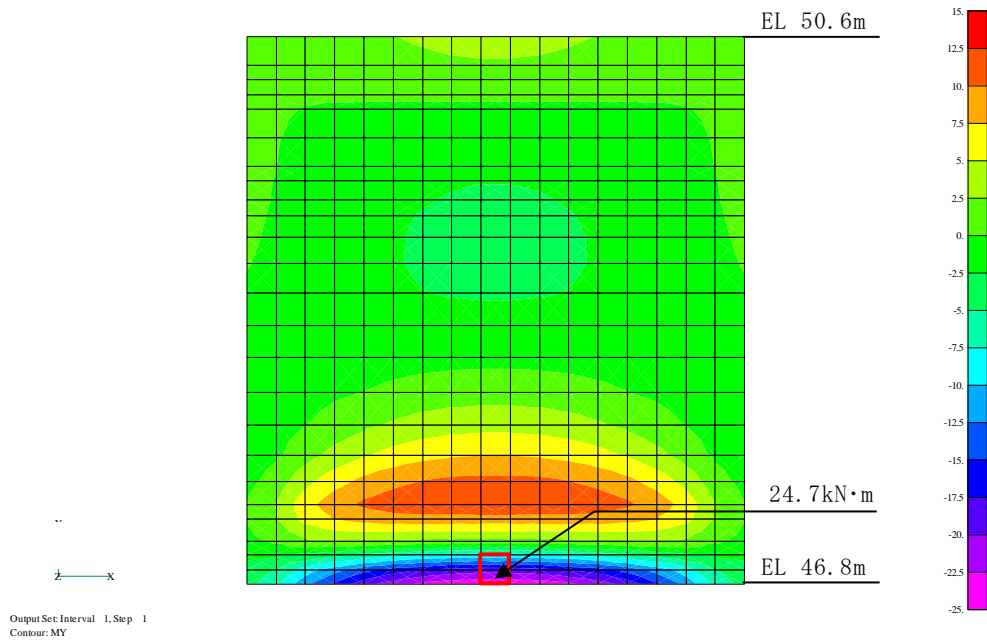
表5-8 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果（鉄筋）

解析 ケース	地震動		方向	曲げ モーメ ント (kN・m)	発生 応力度 σ_s (N/mm ²)	短期許容 応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	照査値 σ_s / σ_{sa}
①	S s - D	+-	X方向 (配力筋方向)	9.80	35.5	294	0.13
			Y方向 (主筋方向)	24.7	33.6	294	0.12



数值：評価位置における断面力
 曲げモーメント M_x (kN・m)

図 5-9 4 辺固定版における断面力図 (B-B 断面, X 方向)



数值：評価位置における断面力
 曲げモーメント M_y (kN・m)

図 5-10 4 辺固定版における断面力図 (B-B 断面, Y 方向)

5.2.2 せん断破壊に対する評価結果

(1) A-A断面

構造強度を有することの確認におけるせん断破壊に対する評価結果を表5-9及び表5-10に示す。照査値は、発生値を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。

同表より、全ケースにおいて発生値は許容限界を下回ることを確認した。

表 5-9 せん断破壊に対する評価結果（鉄筋コンクリート）

解析 ケース	地震動		評価 位置*		発生	短期許容	照査値 V/V_a
					せん断力 V (kN/m)	せん断力 V_a (kN/m)	
①	S s - D	++	頂版	1	34.4	180.8	0.20
			側壁	3	32.5	176.1	0.19
			底版	2	35.8	176.1	0.21
		+-	頂版	1	31.5	180.8	0.18
			側壁	3	34.5	176.1	0.20
			底版	2	41.1	176.1	0.24
	S s - F 1	++	頂版	1	27.5	180.8	0.16
			側壁	4	27.6	176.1	0.16
			底版	2	32.4	176.1	0.19
	S s - F 2	++	頂版	1	31.0	180.8	0.18
			側壁	4	31.5	176.1	0.18
			底版	2	32.5	176.1	0.19
	S s - N 1	++	頂版	1	29.0	180.8	0.17
			側壁	4	32.2	176.1	0.19
			底版	2	34.4	176.1	0.20
	S s - N2 (NS)	++	頂版	1	32.3	180.8	0.18
			側壁	3	31.3	176.1	0.18
			底版	2	33.0	176.1	0.19
S s - N2 (EW)	++	頂版	1	32.4	180.8	0.18	
		側壁	4	31.8	176.1	0.19	
		底版	2	32.5	176.1	0.19	
②	S s - D	+-	頂版	1	30.7	180.8	0.17
			側壁	3	33.0	176.1	0.19
			底版	2	37.1	176.1	0.22
③	S s - D	+-	頂版	1	32.1	180.8	0.18
			側壁	4	41.3	176.1	0.24
			底版	2	51.5	176.1	0.30

注記*：評価位置は図 5-11 に示す。

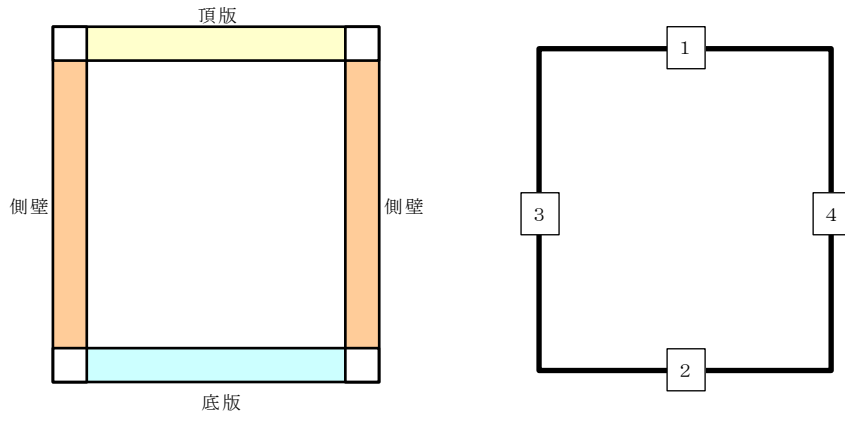


図 5-11 評価位置図 (A-A 断面)

表 5-10 せん断破壊に対する評価結果（鋼製タンク）

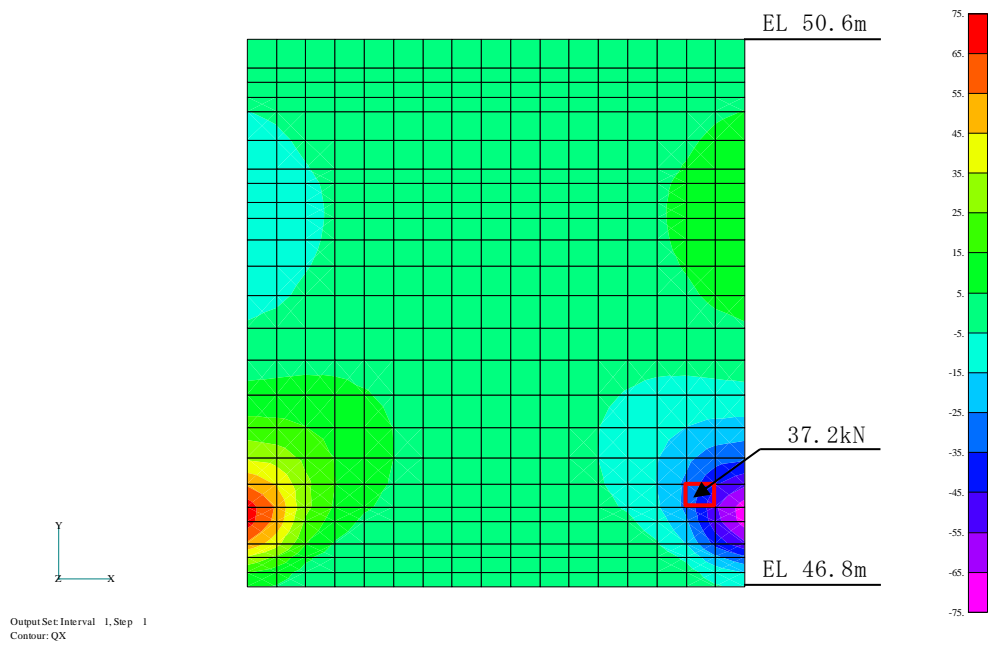
解析 ケース	地震動		発生せん断 応力度 τ_{max} (N/mm ²)	短期許容応力度 f_s (N/mm ²)	照査値 τ_{max} / f_s
①	S _s -D	++	1.67×10^{-2}	135	0.01
		+ -	1.61×10^{-2}	135	0.01
	S _s -F1	++	1.42×10^{-2}	135	0.01
	S _s -F2	++	1.62×10^{-2}	135	0.01
	S _s -N1	++	1.56×10^{-2}	135	0.01
	S _s -N2 (NS)	++	1.63×10^{-2}	135	0.01
	S _s -N2 (EW)	++	1.65×10^{-2}	135	0.01
②	S _s -D	+ -	1.54×10^{-2}	135	0.01
③	S _s -D	+ -	1.74×10^{-2}	135	0.01

(2) B-B断面

構造強度を有することの確認におけるせん断破壊に対する評価結果を表5-11に示す。また、4辺固定版における断面力図を図5-12及び図5-13に示す。同表より、発生せん断力は短期許容せん断力を下回ることを確認した。

表5-11 せん断破壊に対する評価結果

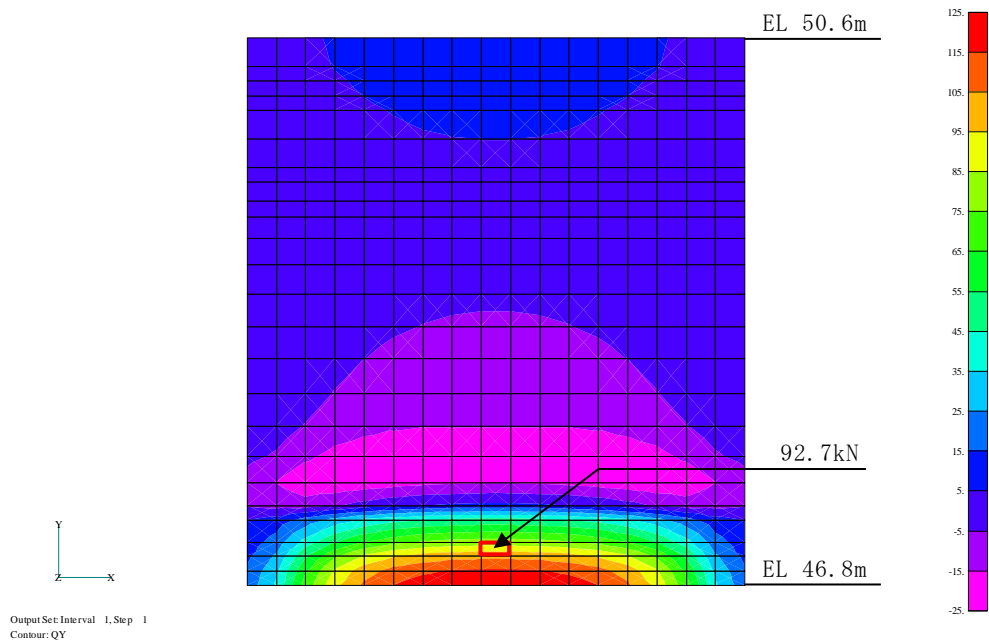
解析 ケース	地震動		方向	発生 せん断力 V (kN/m)	短期許容 せん断力 V _a (kN/m)	照査値 V/V _a
①	S _s -D	+-	X方向 (配力筋方向)	37.2	176.1	0.22
			Y方向 (主筋方向)	92.7	176.1	0.53



数値：評価位置における断面力

せん断力 Q_x (kN)

図 5-12 4 辺固定版における断面力図 (B-B 断面, X 方向)



数値：評価位置における断面力

せん断力 Q_y (kN)

図 5-13 4 辺固定版における断面力図 (B-B 断面, Y 方向)

5.3 基礎地盤の支持性能に対する評価結果

基礎地盤の支持性能に対する照査結果を表 5-12 及び表 5-13 に示す。また、最大接地圧分布図を図 5-14 及び図 5-15 に示す。

緊急時対策所用燃料地下タンクの基礎地盤に発生する最大接地圧が、極限支持力度を下回ることを確認した。

表 5-12 基礎地盤の支持性能に対する照査結果 (A-A 断面)

解析 ケース	地震動		最大接地圧 R_d (N/mm ²)	極限支持力度 R_u (N/mm ²)	照査値 R_d/R_u
①	S _s -D	++	0.25	3.9	0.07
		+ -	0.25	3.9	0.07
	S _s -F1	++	0.23	3.9	0.06
	S _s -F2	++	0.24	3.9	0.07
	S _s -N1	++	0.24	3.9	0.07
	S _s -N2 (NS)	++	0.25	3.9	0.07
	S _s -N2 (EW)	++	0.25	3.9	0.07
②	S _s -D	+ -	0.26	3.9	0.07
③	S _s -D	+ -	0.25	3.9	0.07

表 5-13 基礎地盤の支持性能に対する照査結果 (B-B断面)

解析 ケース	地震動		最大接地圧 R_d (N/mm ²)	極限支持力度 R_u (N/mm ²)	照査値 R_d/R_u
①	S _s -D	++	0.18	3.9	0.05
		-+	0.17	3.9	0.05
		+-	0.18	3.9	0.05
		--	0.17	3.9	0.05
	S _s -F1	++	0.10	3.9	0.03
	S _s -F2	++	0.11	3.9	0.03
	S _s -N1	++	0.16	3.9	0.05
		-+	0.17	3.9	0.05
	S _s -N2 (NS)	++	0.16	3.9	0.05
		-+	0.15	3.9	0.04
	S _s -N2 (EW)	++	0.15	3.9	0.04
		-+	0.17	3.9	0.05
②	S _s -D	+-	0.17	3.9	0.05
③	S _s -D	+-	0.17	3.9	0.05

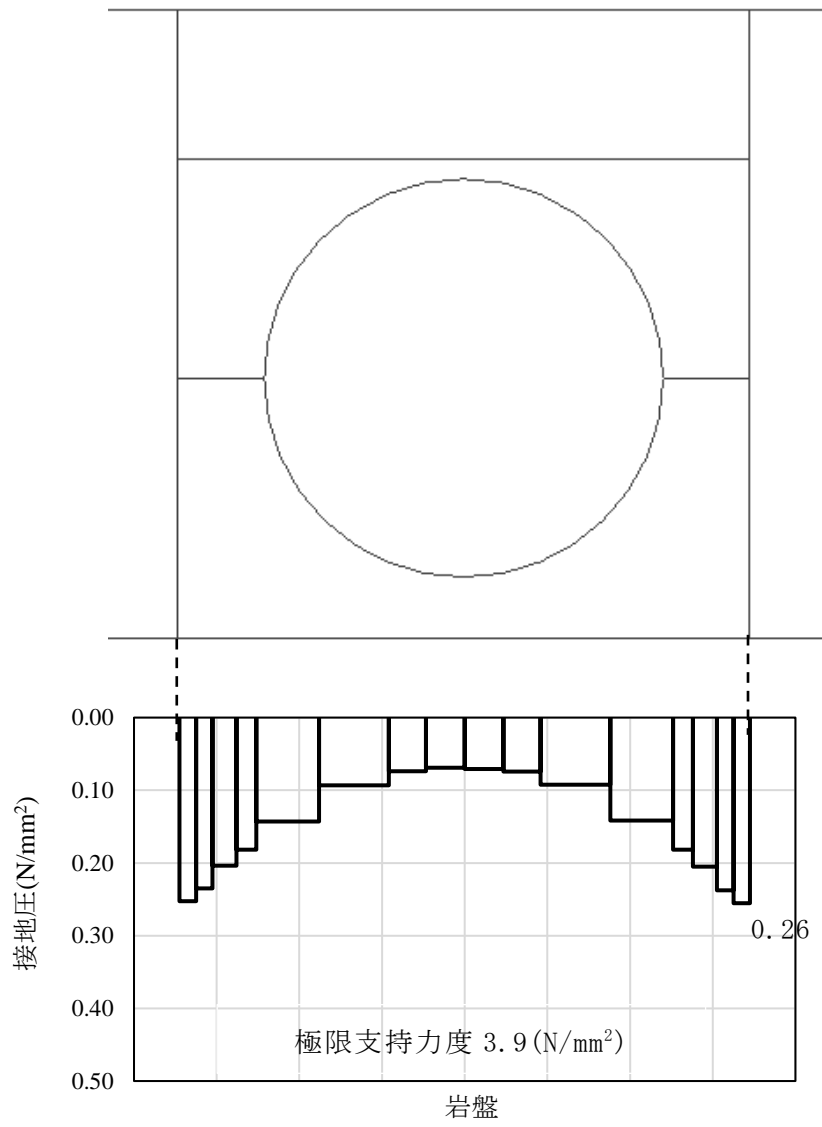


図 5-14 基礎地盤の最大接地圧分布図
 (A-A断面, 解析ケース②, S s-D (+-))

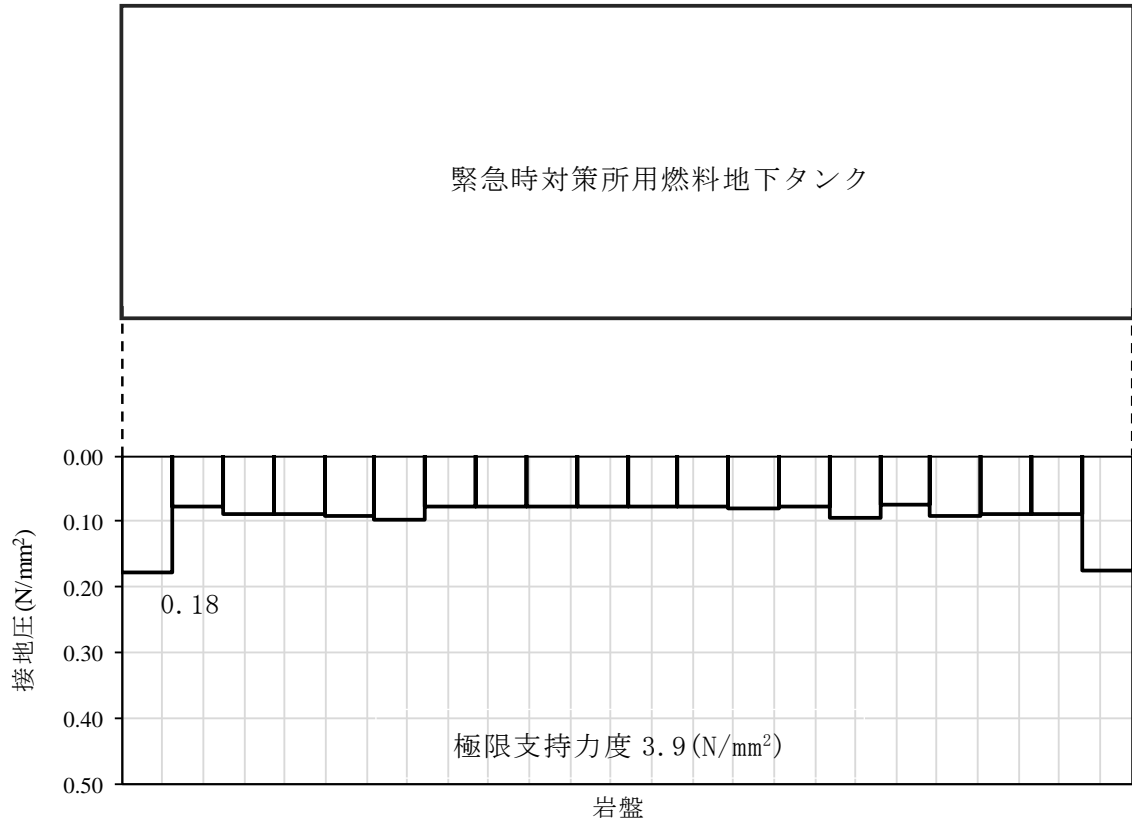


図 5-15 基礎地盤の最大接地圧分布図
 (B-B 断面, 解析ケース①, S s-D (++))

6. まとめ

緊急時対策所用燃料地下タンクについては、基準地震動 S_s による耐震評価として、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び基礎地盤の支持性能に対する評価を実施した。

構造部材の健全性評価については、発生応力が要求性能に応じた許容限界を下回ることを確認した。なお、A-A断面については、構造物周辺地盤を簡易なモデルとしていることを踏まえ、照査値に十分な余裕を有することも併せて確認した。

基礎地盤の支持性能評価については、基礎地盤に発生する応力（接地圧）が極限支持力度に基づく許容限界を下回ることを確認した。

以上から、緊急時対策所用燃料地下タンクは、基準地震動 S_s による地震力に対して、構造強度を有すること及び貯水機能相当を損なわないことを確認した。

参考資料 充填コンクリートの評価結果

1. 概要

緊急時対策所用燃料地下タンクに要求される機能を期待する部位は、鉄筋コンクリート躯体及び鋼製タンクであるが、当該箇所の評価においては充填コンクリートが健全であることが前提となるため、本資料では充填コンクリートの健全性について確認する。

2. 評価方針

本文において記載した地震応答解析結果に基づき、下式に示す局所安全係数に対する照査を実施する。局所安全係数は全時刻において最小となる値を記載する。なお、充填コンクリート（有筋）については、保守的に鉄筋に期待せず、無筋コンクリートとして評価を実施する。充填コンクリートの許容限界を表 2-1 に示す。

$$f_s = R / S$$

ここに、 f_s : 局所安全係数

R : 表 2-1 に示すせん断強度又は引張強度

S : 発生せん断応力又は発生引張応力

表 2-1 充填コンクリートの許容限界

	評価項目	算定式	許容限界
充填コンクリート $f'_{ck} = 24.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	せん断強度 (N/mm ²)	$1/5 f'_{ck}$	4.80
	引張強度 (N/mm ²)	$0.23 f'_{ck}^{2/3}$	1.91

3. 評価結果

充填コンクリートの健全性に対する評価結果を表 3-1 及び表 3-2 に、最大応力コンター図を図 3-1 及び図 3-2 に示す。全ての局所安全係数が 1.0 を上回ることから、充填コンクリートが健全であることを確認した。

表 3-1 充填コンクリートの健全性に対する評価結果（せん断破壊）

解析 ケース	地震動		せん断応力 S (N/mm ²)	せん断強度 R (N/mm ²)	局所安全係数 f _s
①	S _s -D	++	0.16	4.80	30.1
		+ -	0.15	4.80	31.8
	S _s -F 1	++	0.10	4.80	47.7
	S _s -F 2	++	0.12	4.80	39.7
	S _s -N 1	++	0.12	4.80	38.8
	S _s -N2 (NS)	++	0.11	4.80	42.7
	S _s -N2 (EW)	++	0.11	4.80	43.0
②	S _s -D	+ -	0.13	4.80	38.0
③	S _s -D	+ -	0.18	4.80	27.3

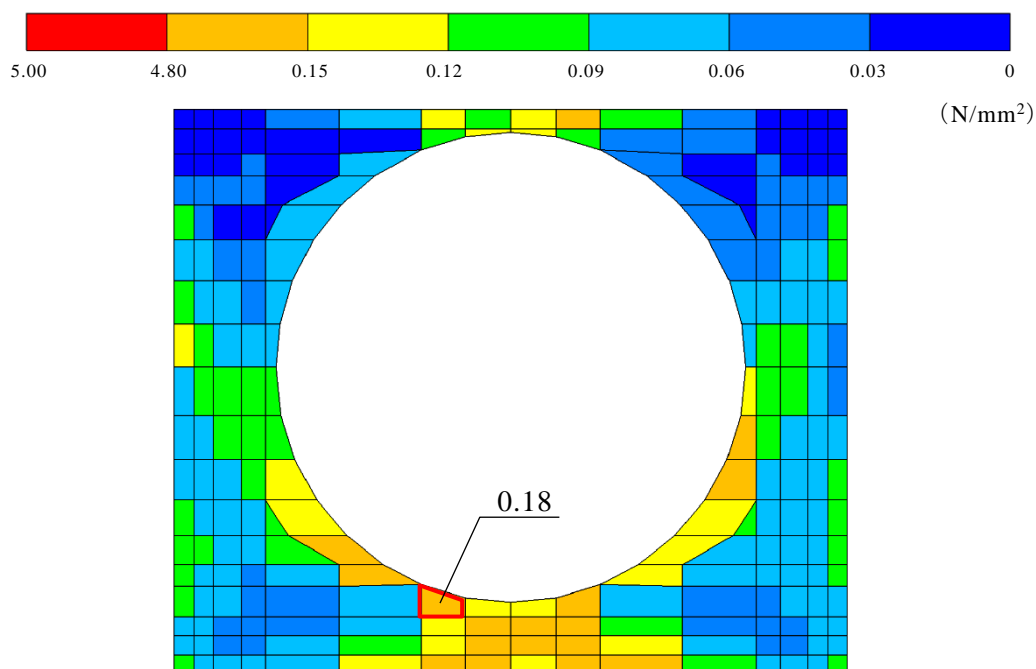


図 3-1 最大せん断応力コンター図（解析ケース③，S_s-D（+-））

表 3-2 充填コンクリートの健全性に対する評価結果（引張破壊）

解析 ケース	地震動		引張応力 S (N/mm ²)	引張強度 R (N/mm ²)	局所安全係数 f _s
①	S _s -D	++	0.33	1.91	5.79
		+ -	0.31	1.91	6.12
	S _s -F1	++	0.19	1.91	9.87
	S _s -F2	++	0.25	1.91	7.72
	S _s -N1	++	0.25	1.91	7.79
	S _s -N2 (NS)	++	0.22	1.91	8.50
	S _s -N2 (EW)	++	0.23	1.91	8.31
②	S _s -D	+ -	0.25	1.91	7.50
③	S _s -D	+ -	0.36	1.91	5.23

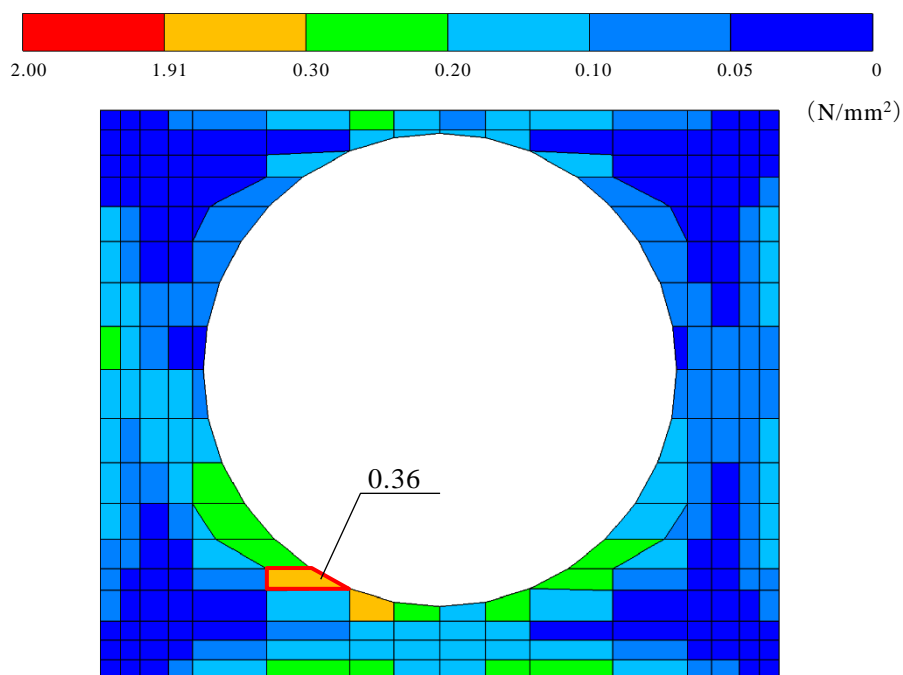


図 3-2 最大引張応力コンター図（解析ケース③，S_s-D（+-））

補足-026-12 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の地震応答計算書
及び耐震性についての計算書に関する補足説明資料

目 次

1.	評価方法	1
2.	評価条件	2
2.1	適用規格	2
2.2	構造概要	4
2.3	評価対象断面の選定	10
2.4	使用材料及び材料の物性値	11
2.5	地盤物性値	12
2.6	評価構造物諸元	13
2.7	地下水位	14
2.8	耐震評価フロー	15
3.	地震応答解析	16
3.1	地震応答解析手法	16
3.2	地震応答解析モデルの設定	17
3.2.1	構造物のモデル化	17
3.2.2	地盤のモデル化	20
3.2.3	地盤の回転ばねの復元力特性	22
3.2.4	地震応答解析モデル	25
3.3	固有値解析結果	32
3.4	荷重及び荷重の組合せ	39
3.4.1	機器・配管荷重	39
3.4.2	積雪荷重	39
3.5	地震応答解析の解析ケース	40
3.5.1	耐震評価における解析ケース	40
3.5.2	機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース	42
3.6	入力地震動の設定	44
3.7	地震応答解析結果	85
3.7.1	最大応答値一覧	85
3.7.2	3次元構造解析への入力荷重の時刻選定	108
4.	3次元構造解析	110
4.1	解析手法	110
4.2	解析モデルの設定	110
4.2.1	構造物のモデル化	110
4.2.2	境界条件及び地盤ばね要素	111
4.3	荷重及び荷重の組合せ	113
4.3.1	機器・配管荷重	113

4.3.2	積雪荷重	115
4.3.3	風荷重	115
4.3.4	上載物（タンク及び防油堤）から受ける地震時荷重	116
4.3.5	基礎スラブに作用する地震力	117
4.4	地震時荷重の作用方向	119
5.	評価内容	120
5.1	許容限界	120
5.1.1	曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	120
5.1.2	せん断の破壊に対する許容限界	122
5.1.3	基礎地盤の支持性能に対する許容限界	125
6.	評価結果	126
6.1	構造部材の健全性に対する評価結果（水平2方向検討）	126
6.2	基礎地盤の支持性能に対する評価結果	133
7.	まとめ	135

参考資料1 防油堤の耐震評価

参考資料2 機器・配管系の耐震評価に適用する影響検討ケース

参考資料3 漏油に対する補足確認について

参考資料4 入力地震動の妥当性について

1. 評価方法

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎は、常設耐震重大事故等対処設備であるガスタービン発電機用軽油タンク等を間接支持しており、支持機能が要求される。

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎については、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき、ガスタービン発電機用軽油タンク基礎が基準地震動 S_s に対して十分な構造強度及び支持機能を有していることを確認する。

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎に要求される機能維持の確認においては、構造部材の健全性評価及び基礎地盤の支持性能評価を実施することで、構造強度を有することを確認し、これにより常設耐震重大事故等対処設備を支持する機能を有することを確認する。

また、ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の付帯設備のうち常設耐震重大事故等対処設備であるガスタービン発電機燃料配管を間接支持する防油堤についても耐震評価を実施する。防油堤の耐震評価については、「参考資料1 防油堤の耐震評価」に示す。

2. 評価条件

2.1 適用規格

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の耐震評価にあたっては、「コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（（社）土木学会，2002年制定）」（以下「コンクリート標準示方書」という。）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987（（社）日本電気協会）」以下「JEAC 4601-1987」という。）を適用するが、曲げ・軸力系の破壊及びせん断破壊の許容限界の一部については、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（（社）土木学会，2005年）」（以下「土木学会マニュアル」という。）を適用する。

基礎地盤の許容限界については、「道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解説（（社）日本道路協会，平成14年3月）」を適用する。

また、質点系モデルにおける地盤ばねの設定については、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版（（社）日本電気協会）」（以下「JEAG 4601-1991 追補版」という。）及び「原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC 4601-2008（（社）日本電気協会）」（以下「JEAC 4601-2008」という。）を適用する。なお、「JEAC 4601-2008」については、基礎浮き上がり評価の手順のみ適用した。

表2-1に適用する規格・基準類を示す。

表 2-1 適用する規格・基準類

項目	適用する規格・基準類	備考
使用材料及び材料定数	・コンクリート標準示方書	・鉄筋コンクリートの材料諸元 (γ , E, ν)
	・J E A G 4 6 0 1 -1987	・軽油タンク (鋼材) 及び基礎スラブ (コンクリート) の減衰定数
荷重及び荷重の組合せ	・コンクリート標準示方書	・永久荷重, 偶発荷重等の適切な組合せを検討
許容限界	・土木学会マニュアル	・せん断破壊に対する照査は, 発生せん断力がせん断耐力を下回ることを確認
	・コンクリート標準示方書	・曲げ・軸力系の破壊に対する照査において, 発生曲げモーメントが終局曲げモーメントを下回ることを確認
	・道路橋示方書 (I 共通編・IV 下部構造編)・同解説 ((社) 日本道路協会, 平成 14 年 3 月)	・基礎地盤の支持性能に対する照査は, 基礎地盤に発生する応力が極限支持力度を下回ることを確認
地震応答解析	・J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 ・J E A C 4 6 0 1 -2008	・質点系モデルにおける地盤ばねの設定方法

注: 「J E A C 4 6 0 1 -2008」については, 基礎浮き上がり評価の手順のみ適用した。

2.2 構造概要

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の位置図を図 2-1 に、平面図を図 2-2 に、断面図を図 2-3 に、概略配筋図を図 2-4 に、地質断面図を図 2-5 及び図 2-6 に示す。

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎は、基礎スラブ及び防油堤で構成される鉄筋コンクリート造の構造物である。

基礎スラブは平面寸法 18.0m×18.0m、厚さ 1.4m で、内径 9.8m、容量 560m³ のタンク 1 基を支持しており、マンメイドロック（以下「MMR」という。）を介して十分な支持性能を有する C_L 級岩盤に支持される。

防油堤は幅 0.3m、高さ 2.5m で、基礎スラブを取り囲むように設置されている。

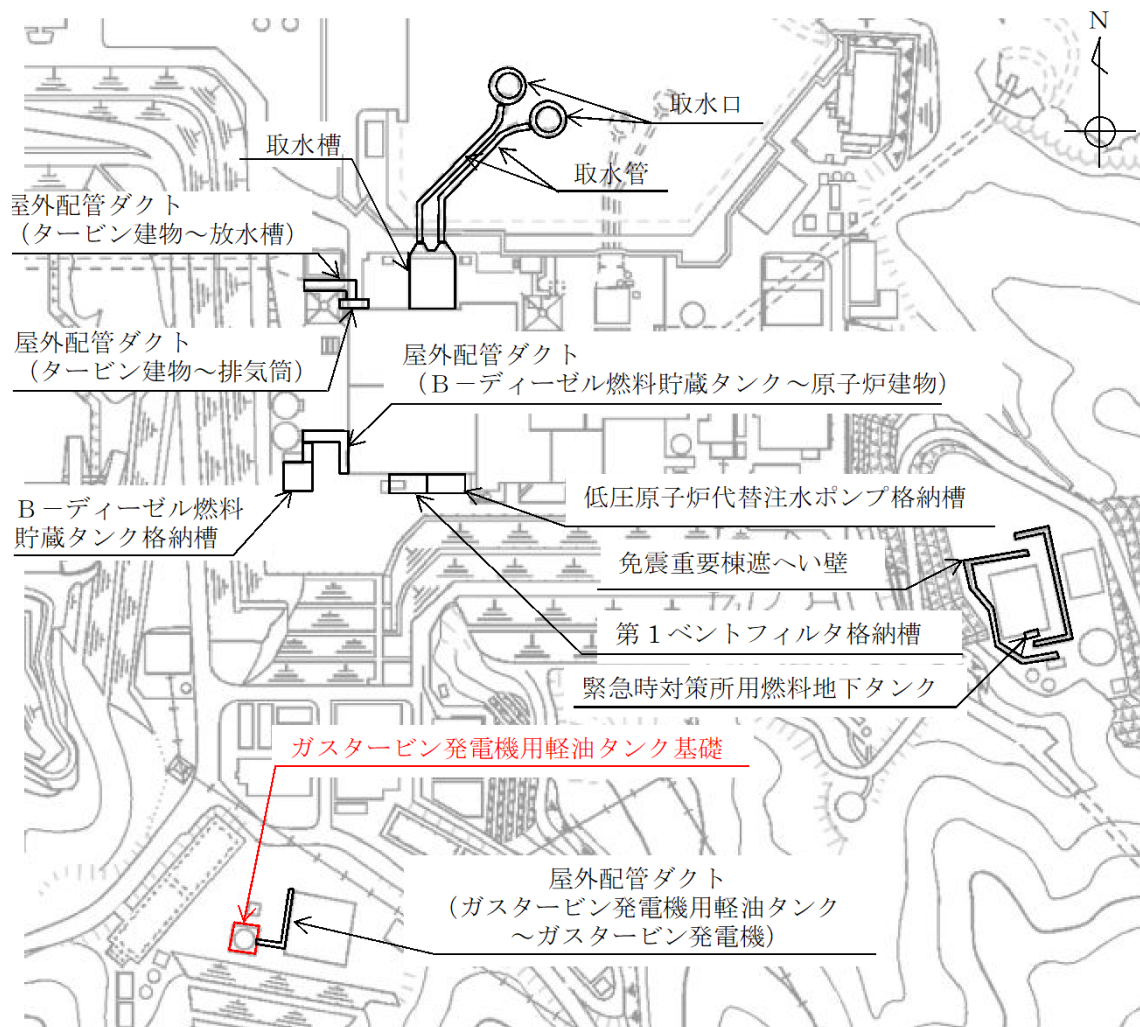


図 2-1 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 位置図

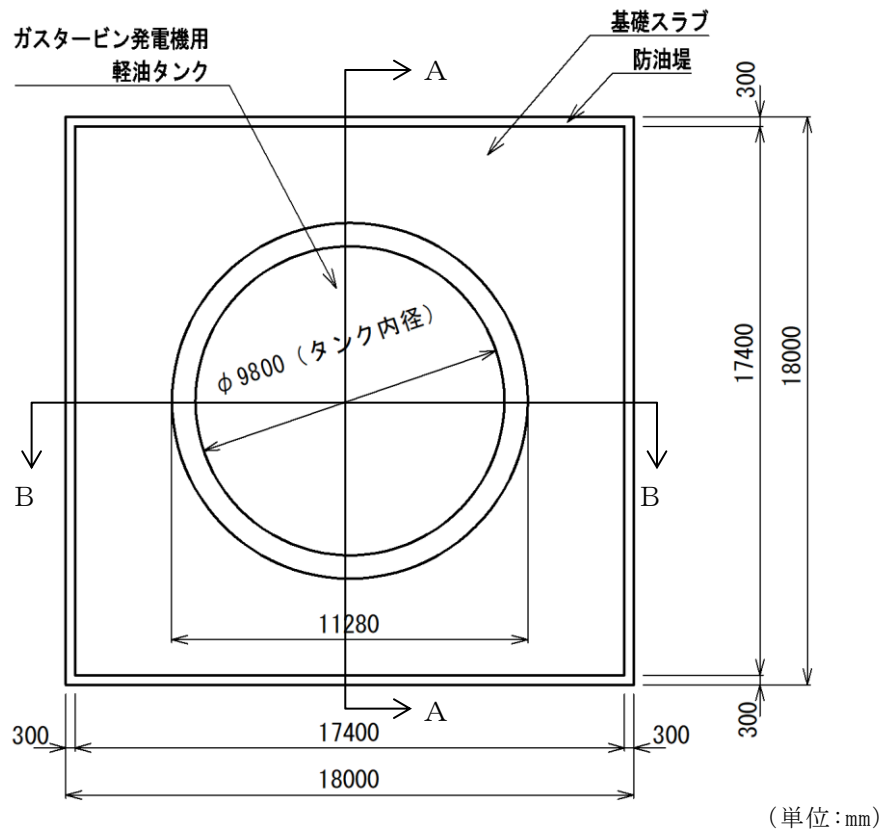


図 2-2 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 平面図

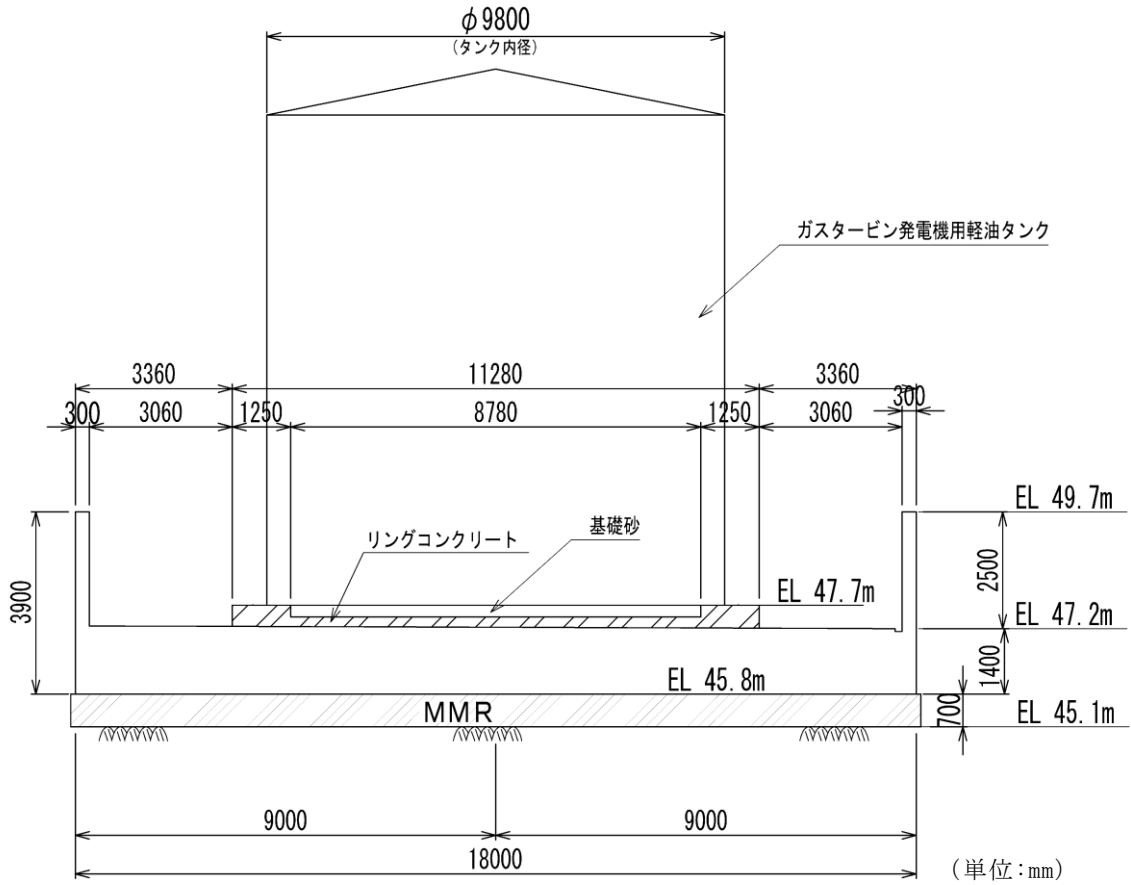


図 2-3 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 断面図
(A-A断面及びB-B断面)

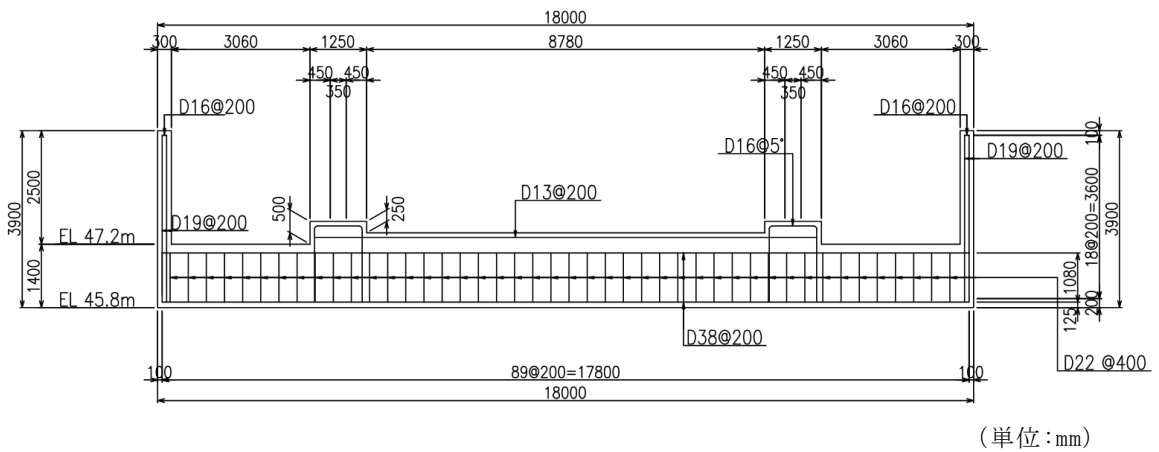
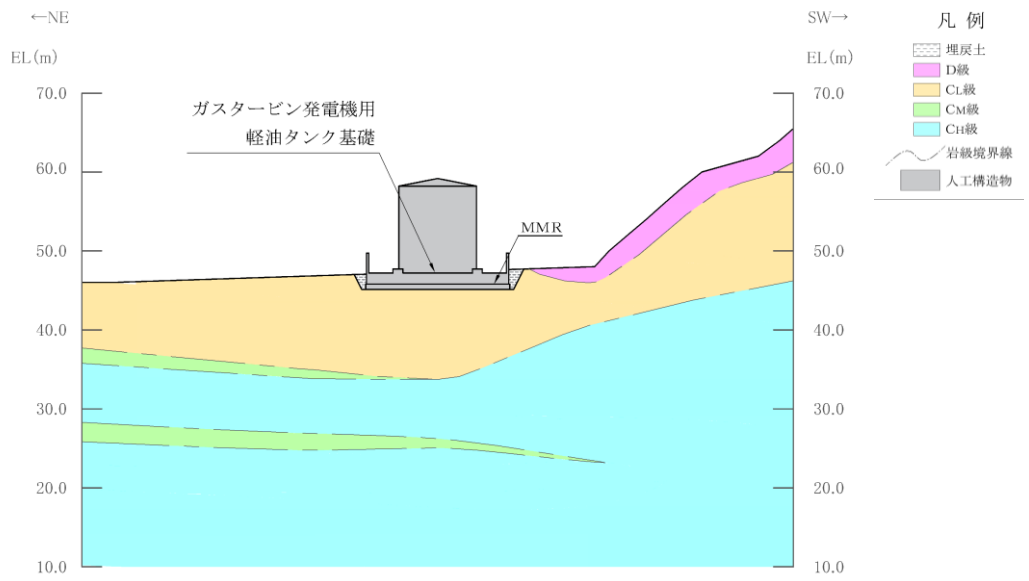
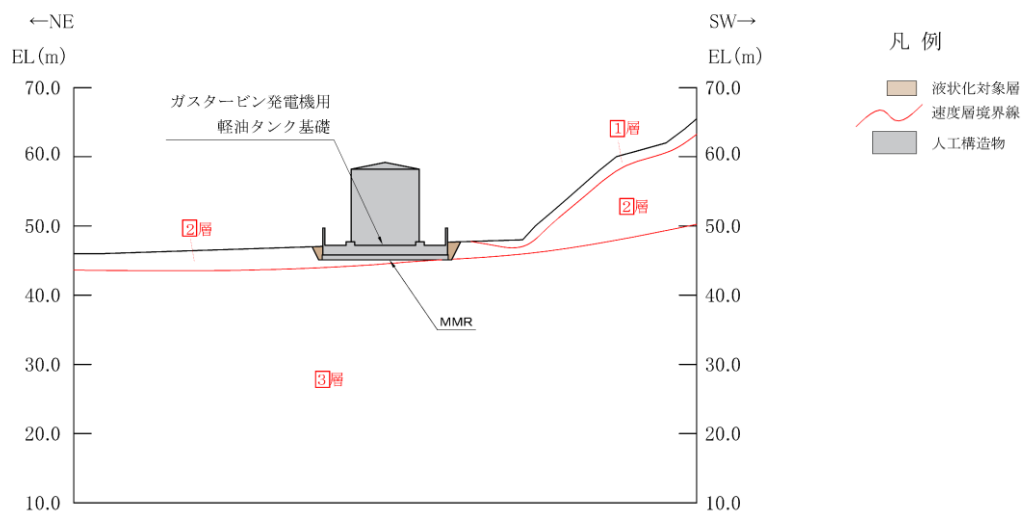


図 2-4 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 概略配筋図
(A-A断面及びB-B断面)

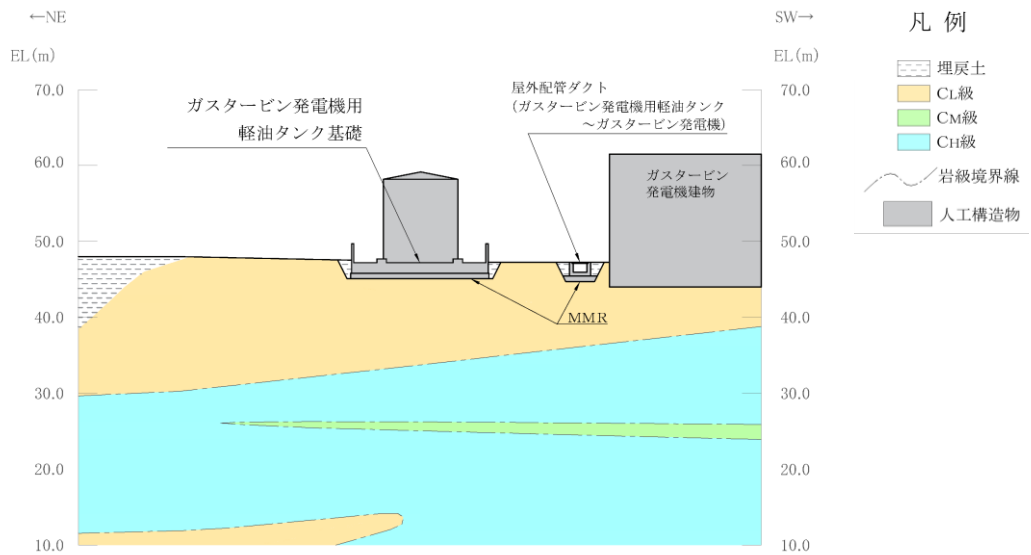


(岩級図)

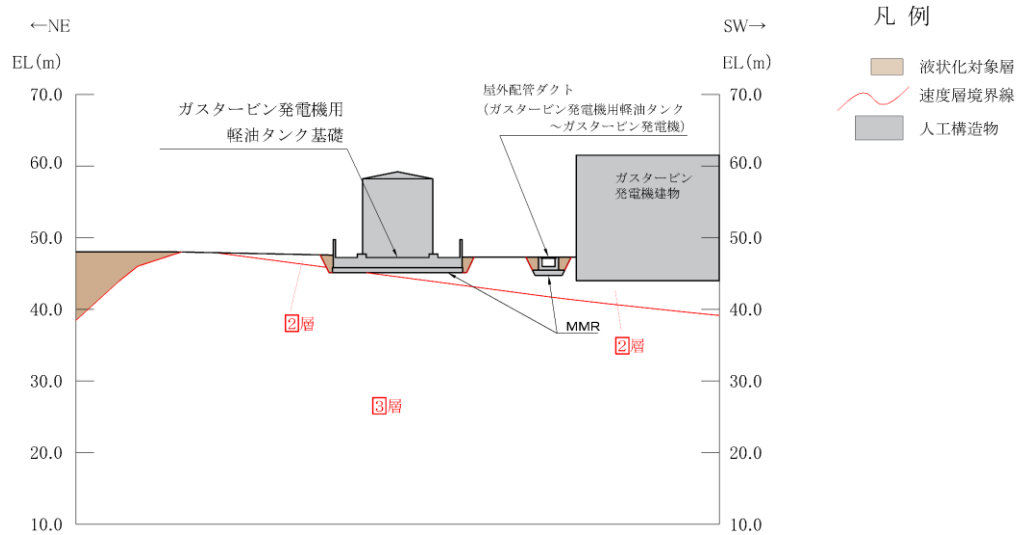


(速度層図)

図 2-5 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 地質断面図 (A-A断面)



(岩級図)



(速度層図)

図 2-6 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 地質断面図 (B-B断面)

2.3 評価対象断面の選定

評価対象断面は、「補足-026-01 屋外重要土木建造物の耐震安全性評価について」に示すとおり、構造的特徴や周辺状況等を踏まえ選定する。

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の構造はA-A断面及びB-B断面で同一であり、地表面付近の岩盤を掘り込んで設置している直接基礎であることを踏まえると、建造物の周辺状況が耐震評価に及ぼす影響は軽微である。また、建造物直下の速度層分布については、いずれの断面も薄い[2]層を介して[3]層が支配的であり、差異は軽微である。

以上を踏まえ、地震応答解析においては同一のモデルにおいて評価が可能であるが、A-A断面及びB-B断面の両断面に作用する地震動に対して網羅的に評価を実施する。

2.4 使用材料及び材料の物性値

地震応答解析モデルの設定に用いた使用材料の物性値を表 2-2 に示す。

表 2-2 使用材料の物性値

使用材料	単位体積重量 (kN/m ³)	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)	減衰定数 h (%)
軽油タンク (SM400A, SM400C)	77.0	2.00×10^5	7.710×10^4	1
基礎スラブ・防油堤 (鉄筋コンクリート) コンクリート： Fc = 24.0 (N/mm ²) 鉄筋：SD345	24.0	2.50×10^4	1.042×10^4	5

2.5 地盤物性値

地盤については、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」にて設定している物性値を用いる。地盤の解析用物性値を表2-3に示す。

表2-3 地盤の解析用物性値（岩盤）

層番号	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	動せん断弾性係数 G_d ($\times 10^5$ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
2層	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
3層	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
4層	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
5層	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
6層	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

2.6 評価構造物諸元

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の断面諸元を表 2-4 及び表 2-5 に、概略配筋図を図 2-7 に示す。

表 2-4 断面諸元（軽油タンク基礎）

位置	部材厚 (mm)	主鉄筋		せん断 補強筋	かぶり (鉄筋中心位置)	
		上側鉄筋	下側鉄筋		上側鉄筋	下側鉄筋
南北方向	1400	D38@200mm	D38@200mm	D22@400mm × 400mm	220mm	160mm
東西方向		D38@200mm	D38@200mm			

表 2-5 断面諸元（防油堤）

位置	部材厚 (mm)	主鉄筋		せん断 補強筋	かぶり (鉄筋中心位置)	
		上側鉄筋	下側鉄筋		上側鉄筋	下側鉄筋
鉛直方向	300	D19@200mm	D19@200mm	なし	100mm	100mm
水平方向		D16@200mm	D16@200mm			

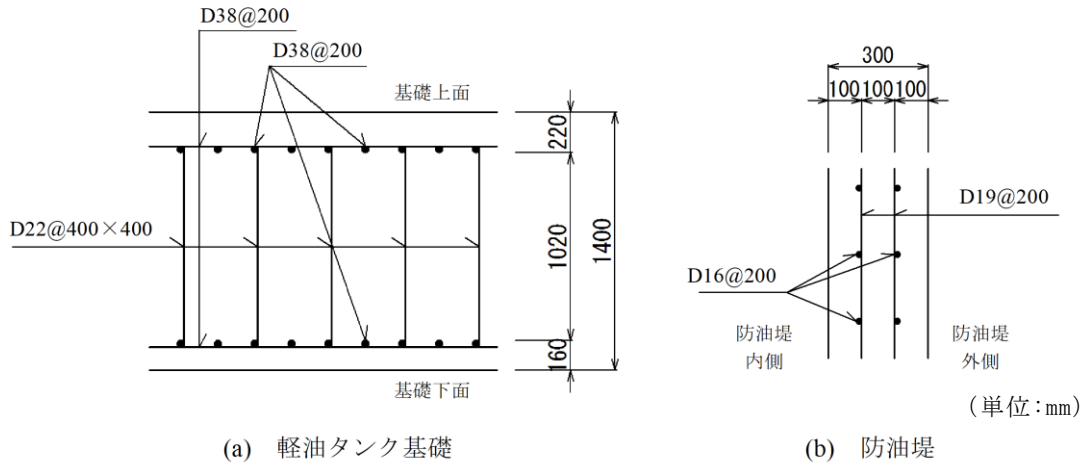


図 2-7 概略配筋図

2.7 地下水位

設計地下水位は、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に従い設定する。設計地下水位の一覧を表 2-6 に示す。

なお、ガスタービン発電機用軽油タンク基礎については、地下水位が構造物基礎下端より十分低いため、地下水を考慮しない。

表 2-6 設計地下水位の一覧

施設名称	設計地下水位 (EL m)	備考
ガスタービン発電機用 軽油タンク基礎	地下水位が構造物基礎下端 (EL 45.8m) より十分低いた め考慮しない。	3次元浸透流解析による 自然水位：EL22.1m～24.2m

2.8 耐震評価フロー

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の地震応答解析及び耐震評価フローを図2-8に示す。ガスタービン発電機用軽油タンク基礎は2次元地震応答解析より求める応答値を用いた3次元構造解析により耐震評価を実施する。同様に、基礎地盤の支持性能評価についても3次元構造解析により行う。

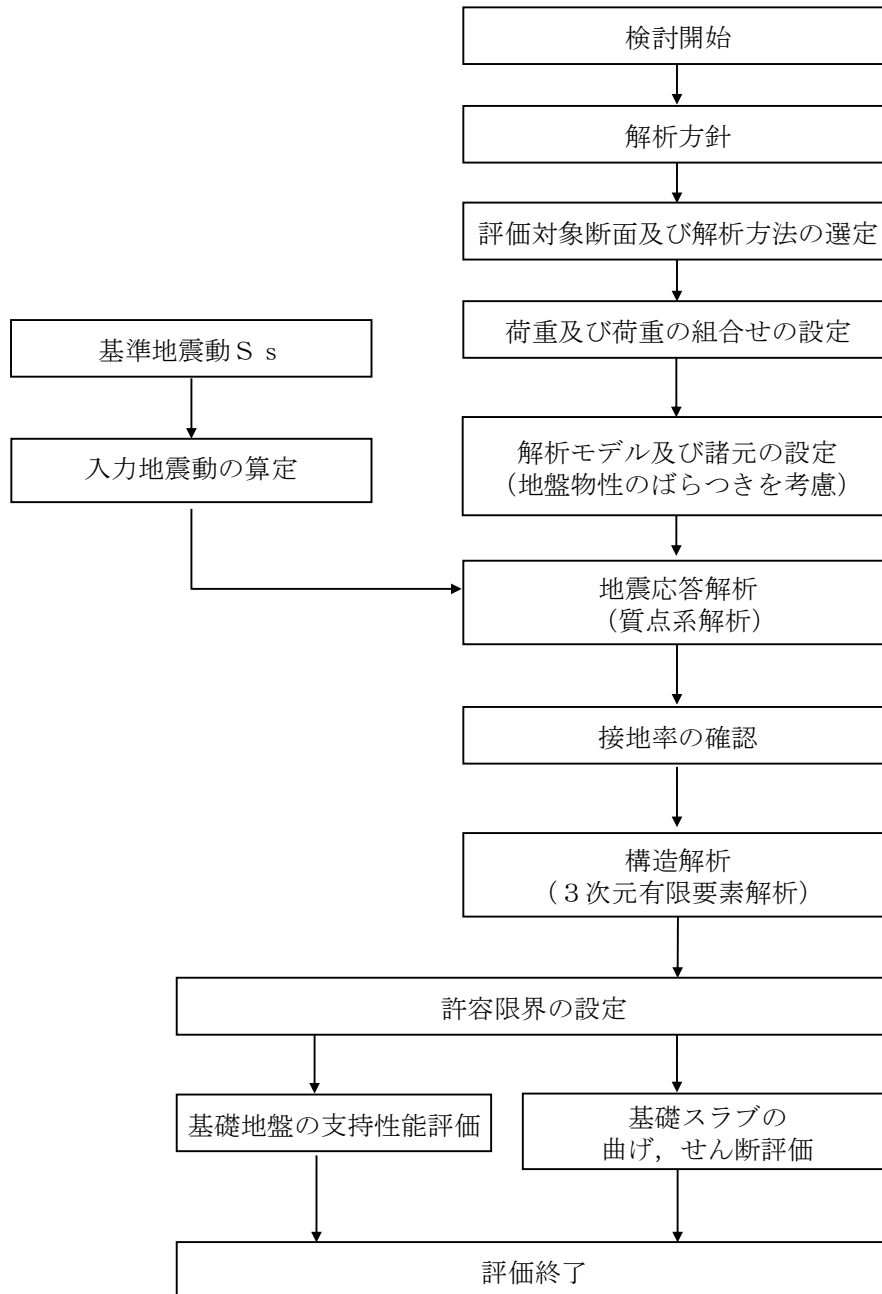


図 2-8 地震応答解析及び耐震評価フロー

3. 地震応答解析

3.1 地震応答解析手法

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎は、地表面付近の岩盤を掘り込んで設置している直接基礎であることを踏まえ、地震応答解析は、構造物と地盤の相互作用を考慮できる質点系モデルにより、逐次時間積分の時刻歴応答解析により行うこととする。

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎周辺の地下水位は構造物基礎下端より低いため、周辺地盤の液状化による影響を考慮する必要は無い。

地震応答解析については、解析コード「D Y N A 2 E」を使用する。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

地震応答解析手法の選定フローを図 3-1 に示す。

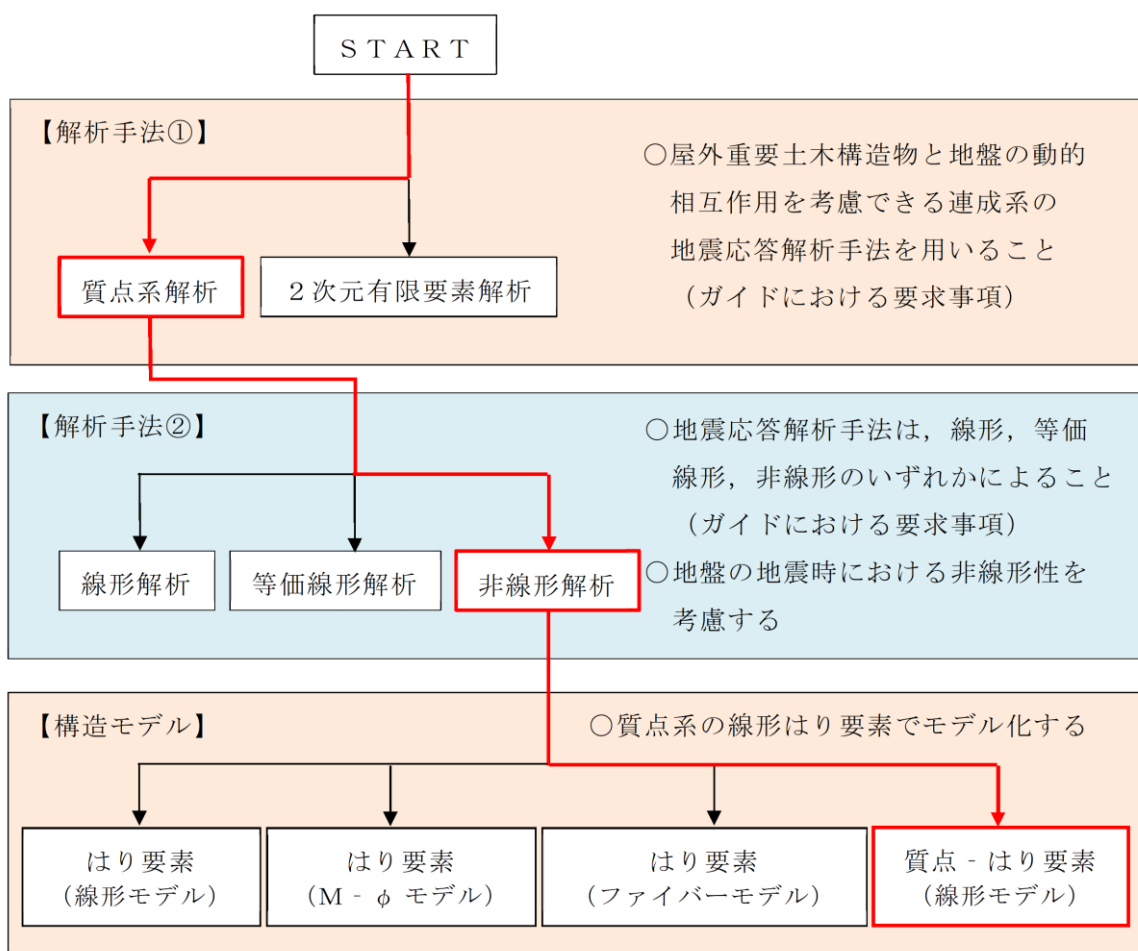


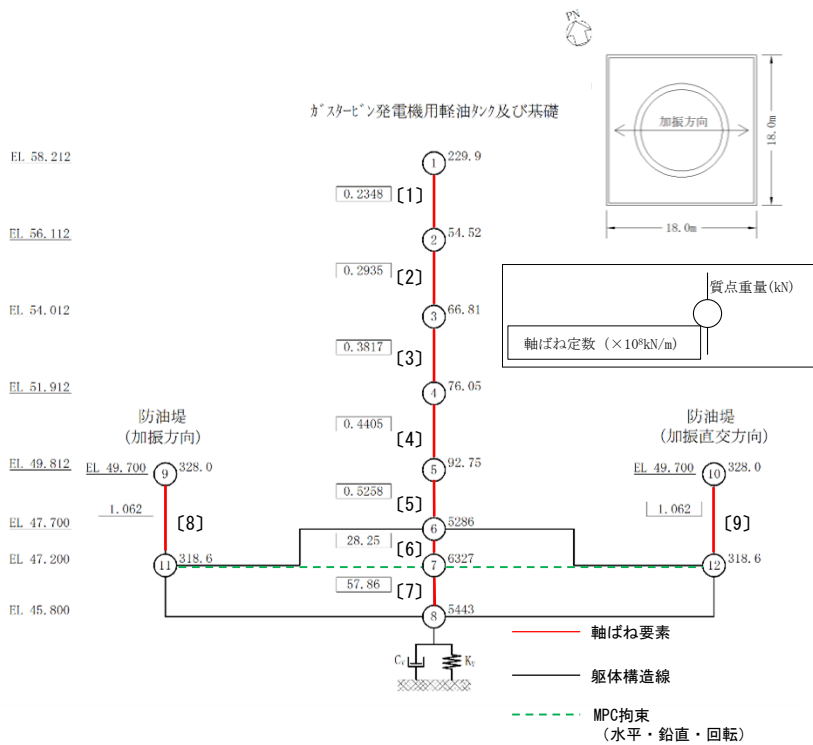
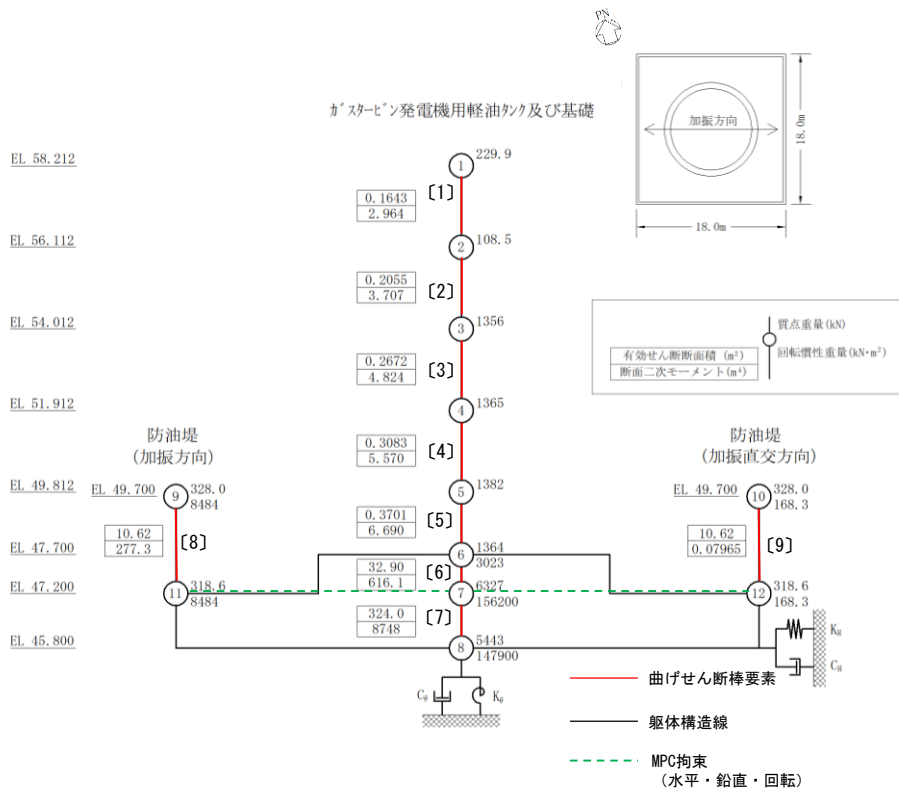
図 3-1 地震応答解析手法の選定フロー

3.2 地震応答解析モデルの設定

3.2.1 構造物のモデル化

地震応答解析モデル図を図 3-2 に示す。水平方向についてはタンク、基礎スラブ及び防油堤を集中質点と曲げせん断棒でモデル化し、基礎スラブと地盤の相互作用を水平ばねと回転ばねで考慮する。また、鉛直方向については、タンク、基礎スラブ及び防油堤を集中質点と軸ばねでモデル化し、基礎スラブと地盤の相互作用を鉛直ばねで考慮する。ここで、質点⑨～⑫については防油堤を模擬しており、防油堤下端の⑪、⑫については、同じ標高である、質点⑦と水平・鉛直・回転の自由度を拘束している。

なお、「補足-027-10-96 溢水源としないB、Cクラス機器の内屋外タンクの耐震評価方法について」の「別紙(1) スロッシングを考慮した場合の内包流体の挙動について」に示すとおり、内包流体にスロッシングによる揺動を考慮することでタンク本体及び基礎ボルトに作用する地震荷重が低減されるため、本モデルにおいては内包流体を固定水として取り扱う。スロッシングの考慮の有無についての概念図を図 3-3 に示す。



注：標高の単位については (m) とする。

図 3-2 地震応答解析モデル

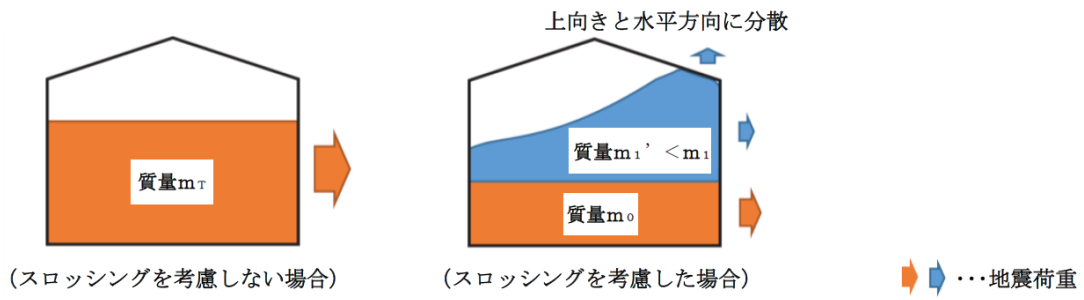
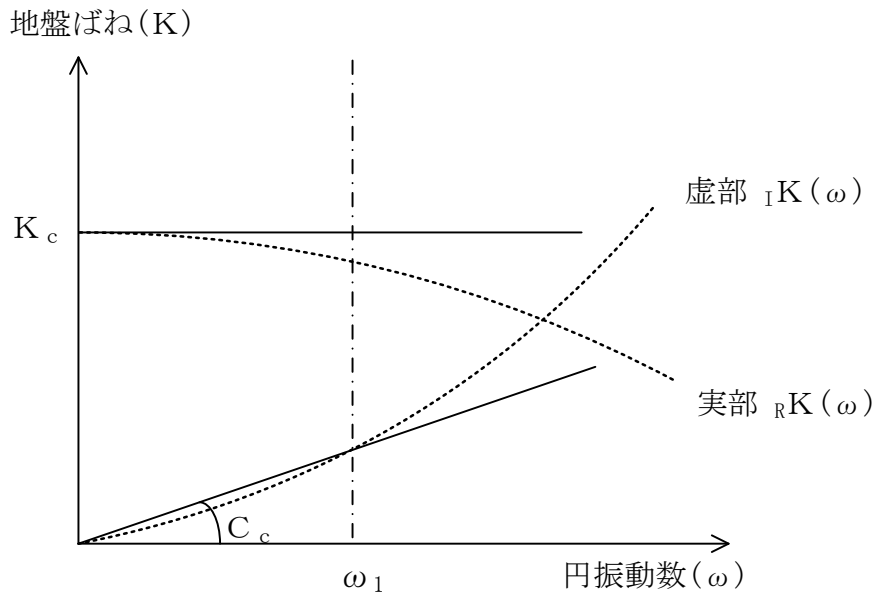


図 3-3 スロッシングの考慮の有無についての概念図

3.2.2 地盤のモデル化

基礎底面の地盤ばねについては、「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」により、成層補正を行ったのち、振動アドミタンス理論に基づき求めたスウェイ及びロッキングの地盤ばねを、近似法により定数化して用いる。このうち、基礎底面のロッキング地盤ばねには、基礎浮上りによる幾何学的非線形性を考慮する。地盤ばねの定数化の概要を図3-4に示す。基礎底面ばねの評価には解析コード「d m a i n 2」を用いる。評価に用いる解析コードの検証、妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。



ばね定数：0Hz のばね定数 K_c で定数化

減衰係数：地盤－建物連成系の1次固有円振動数 ω_1 に対応する虚部の値と
原点とを結ぶ直線の傾き C_c で定数化

図3-4 地盤ばねの定数化の概要

水平方向の地盤ばね定数及び減衰係数を表 3-1 に、鉛直方向の地盤ばね定数及び減衰係数を表 3-2 に示す。

表 3-1 地盤ばね定数及び減衰係数（水平方向）

解析 ケース*	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね定数 K _c	減衰係数 C _c
①	K _H , C _H	底面・水平	1.136×10 ⁸ (kN/m)	6.231×10 ⁵ (kN・s/m)
	K _θ , C _θ	底面・回転	9.754×10 ⁹ (kN・m/rad)	1.252×10 ⁷ (kN・m・s/rad)
②	K _H , C _H	底面・水平	1.607×10 ⁸ (kN/m)	7.367×10 ⁵ (kN・s/m)
	K _θ , C _θ	底面・回転	1.382×10 ¹⁰ (kN・m/rad)	1.204×10 ⁷ (kN・m・s/rad)
③	K _H , C _H	底面・水平	7.418×10 ⁷ (kN/m)	5.090×10 ⁵ (kN・s/m)
	K _θ , C _θ	底面・回転	6.358×10 ⁹ (kN・m/rad)	1.263×10 ⁷ (kN・m・s/rad)

注記*：解析ケースの詳細については「3.5 地震応答解析の解析ケース」参照

表 3-2 地盤ばね定数及び減衰係数（鉛直方向）

解析 ケース*	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね定数 K _c	減衰係数 C _c
①	K _V , C _V	底面・鉛直	2.140×10 ⁸ (kN/m)	1.778×10 ⁶ (kN・s/m)
②	K _V , C _V	底面・鉛直	2.927×10 ⁸ (kN/m)	2.056×10 ⁶ (kN・s/m)
③	K _V , C _V	底面・鉛直	1.454×10 ⁸ (kN/m)	1.477×10 ⁶ (kN・s/m)

注記*：解析ケースの詳細については「3.5 地震応答解析の解析ケース」参照

3.2.3 地盤の回転ばねの復元力特性

地盤の回転ばねに関する曲げモーメントー回転角の関係は「J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版」及び「J E A C 4 6 0 1 - 2008」により、基礎の浮き上がりを考慮する非線形ばねとし、浮き上がり非線形地震応答解析（接地率に応じて誘発上下動を考慮）とする。基礎浮き上がり評価の手順を図 3-5 に、誘発上下動を考慮した多質点系モデルの概念図を図 3-6 に、基礎浮き上がり時の地盤ばね剛性と減衰を表 3-3 に示す。

また、誘発上下動を考慮した質点系解析の概念及び適用限界を図 3-7 に示す。地震応答解析結果より、接地率が 50%以上であることを確認することで、本モデルの適用性を確認する。加えて、接地率が 65%以下の場合については、誘発上下動の影響を無視できないことから、3次元構造解析において誘発上下動による応答値を考慮する。

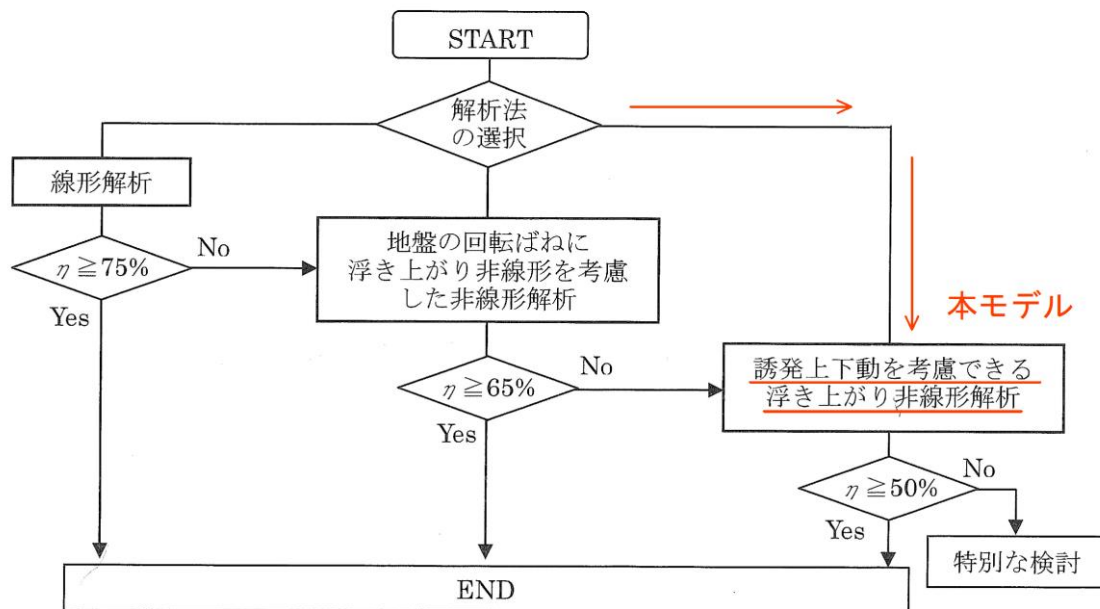


図 3-5 基礎浮き上がり評価の手順
(「J E A C 4 6 0 1 - 2008」)

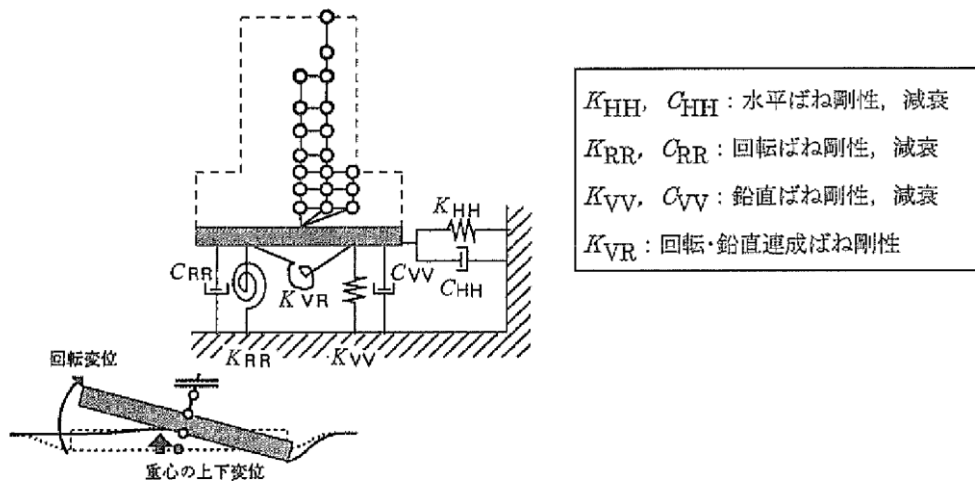


図 3-6 誘発上下動を考慮した多質点系モデルの概念図
 (「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」)

表 3-3 誘発上下動モデルにおける基礎浮き上がり時の地盤ばね剛性と減衰

	水平ばね K_{HH}, C_{HH}	回転ばね K_{RR}, C_{RR}	回転・鉛直 連成ばね K_{VR}, C_{VR}	鉛直ばね K_{VV}, C_{VV}
地盤ばね の剛性 K	K_{H0}	$\frac{M - K_{VR} \cdot w_0}{\theta}$	$\frac{1-\eta}{2} \cdot L \cdot K_{VV}$	$\eta^\beta \cdot K_{V0}$
地盤ばね の減衰 C	C_{H0}	$C_{R0} \cdot \eta^{\frac{\alpha}{2}}$	0	$C_{V0} \cdot \eta^{\frac{\alpha}{2}}$
$\eta = \left(\frac{\theta_0}{\theta}\right)^{\frac{2}{\alpha-2}}$	M : 転倒モーメント w_0 : 基礎版中心の鉛直変位 θ : 回転角 θ_0 : 浮き上がり限界回転角 L : 構造物の基礎幅 K_{H0} : 線形域の水平ばね剛性 K_{V0} : 線形域の鉛直ばね剛性		β : 0.46 α : 地反力分布に応じた値 (三角形分布 6.0) C_{H0} : 線形域の水平ばね減衰係数 C_{V0} : 線形域の鉛直ばね減衰係数 C_{R0} : 線形域の回転ばね減衰係数	

(4) 誘発上下動考慮の SR モデルについて (参考資料 3.5 (2)参照)

a. 浮き上がり時の地盤ばねと減衰係数について

接地率 η が 50% 以上の場合に適用できるこのモデルは、水平、回転の 2 自由度からなる通常の SR モデルに鉛直方向の自由度を加えたもので、地盤ばねは基礎底面中心の水平・鉛直・回転の各変位 (u_0, w_0, θ) に対して、式 (附 3.6-3) に示す剛性行列として設定する。基礎が浮き上がると回転自由度と鉛直自由度が連成することにより誘発上下動を評価するモデルである。

このモデルの地盤ばねと減衰係数を附表 3.6-1 に示す。各ばねの剛性の非線形特性については静的 Mindlin 解を用いた 3 次元静的漸増解析 (剛板分布) とジョイント要素を考慮した FEM により評価した。また減衰については、回転ばねの減衰は浮き上がりによって変化すること、水平ばねの減衰は回転のばねの減衰ほど浮き上がりによって影響を受けないこと等を考慮し、附表 3.6-1 に示すように定め、時間領域のグリーン関数法を用いた定常加振解析や建物・構築物の地震応答解析結果との比較からその妥当性を確認した。

b. 誘発上下動考慮の SR モデルの適用限界について

この誘発上下動考慮の SR モデルの適用範囲の検討として、時間領域のグリーン関数法を精算解と位置付け、時間領域のグリーン関数法と誘発上下動考慮の SR モデルの非線形地震応答解析を比較した結果、水平応答に関しては接地率 η にかかわらずよく対応するのに対し、誘発上下動については差が見られた。そこで誘発上下動の加速度に設計で考慮している鉛直動の影響を SRSS で考慮して比較した結果、接地率 η が 50% 以上の範囲では時間領域のグリーン関数との差は 10% 以下程度であった。また、誘発上下動の加速度を直接比較した場合の差は 20% 程度であった。このことから、誘発上下動考慮の SR モデルを接地率 η が 50% までの範囲で使用可能とした。なお、接地率 η が 65% 以下の場合にこのモデルを用いた場合には、浮き上がりによって生じる誘発上下動が無視できなくなるため、設計でこの影響を考慮する必要がある。

接地率 η が 50% を下回った場合には特別な検討を行う必要がある。その方法として参考資料 3.5 (1) に示す時間領域のグリーン関数法や参考資料 3.5 (3) に示すジョイント要素を考慮した 3 次元 FEM モデルを用いることが考えられる。

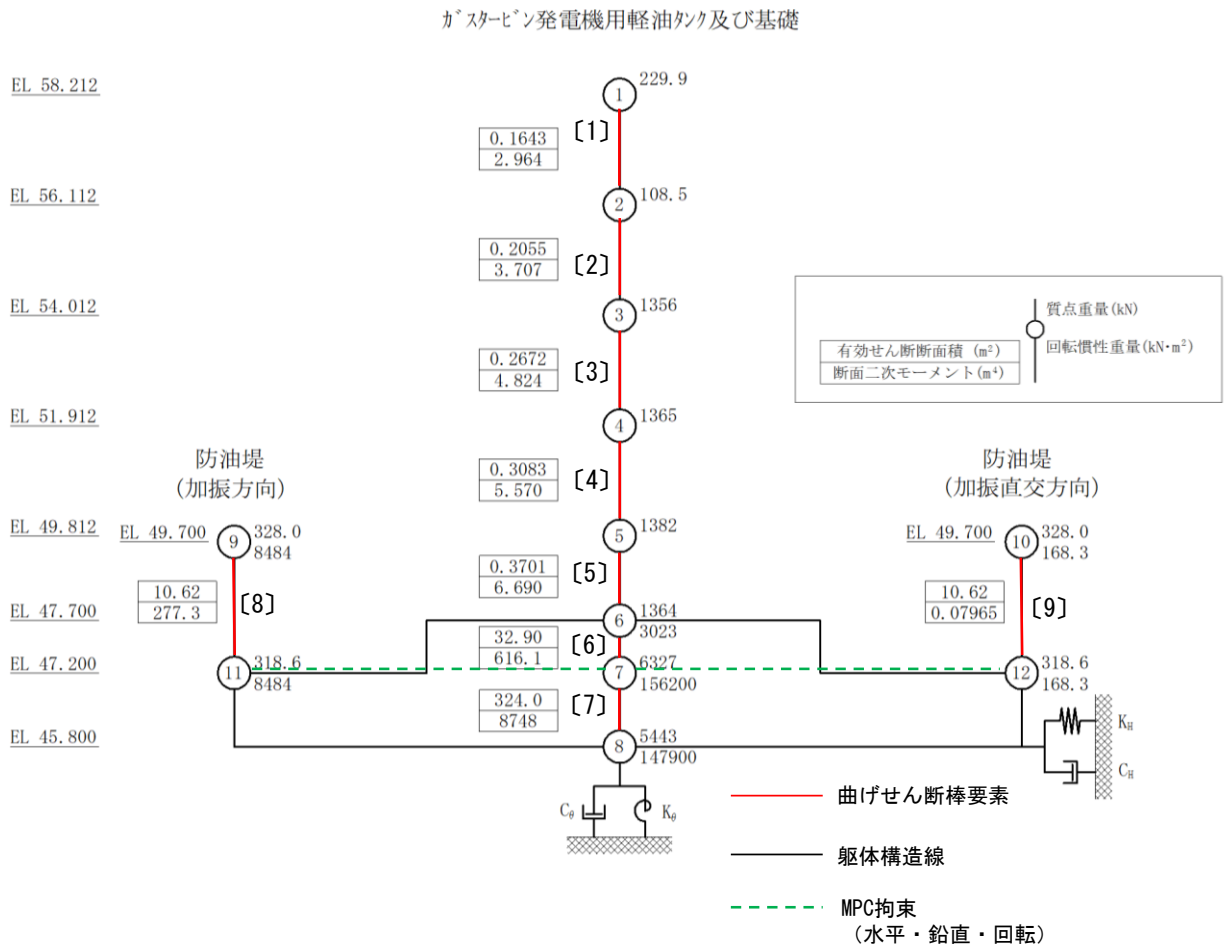
図 3-7 誘発上下動を考慮した質点系解析の概念及び適用限界
(「J E A C 4 6 0 1 -2008」に追記)

3.2.4 地震応答解析モデル

(1) 水平モデル

水平方向の地震応答解析モデル図を図3-8に示す。図3-8における質点⑨～⑫については防油堤を模擬しており、防油堤下端の⑪、⑫については、同じ標高である、質点⑦と水平・鉛直・回転の自由度を拘束している。各質点及び曲げせん断棒要素に与える物性値の一覧を表3-4に示す。各質点及び曲げせん断棒要素における分担エリアの考え方の概念図を図3-9に示す。各質点の分担エリアは質点間中央で分割している。また、質点⑨～⑫、曲げせん断棒〔8〕～〔9〕については、防油堤を対象としており、質点⑨、⑩及び曲げせん断棒〔8〕については加振方向の防油堤を集約したもの、質点⑩、⑫及び曲げせん断棒〔9〕については加振直交方向の防油堤を集約したものとしている。

なお、ガスタービン発電機用軽油タンクの諸元については、VI-2-10-1-2-3-4「ガスタービン発電機用軽油タンクの耐震性についての計算書」に準じる。



注：標高の単位については (m) とする。

図3-8 地震応答解析モデル (水平方向)

表 3-4 各質点及び曲げせん断棒要素に与える物性値一覧表

質点No	高さ	質量(水平)	回転慣性重量	節点スパン	要素No	断面二次モーメント	有効せん断断面積
	EL m	kN	kN・m ²	m		m ⁴	m ²
①	58.212	229.9	-	2.100	[1]	2.964	0.1643
②	56.112	108.5	-		[2]	3.707	0.2055
③	54.012	1,356	-	2.100	[3]	4.824	0.2672
④	51.912	1,365	-		[4]	5.570	0.3083
⑤	49.812	1,382	-	2.112	[5]	6.690	0.3701
⑥	47.700	1,364	3,023		[6]	616.1	32.90
⑦	47.200	6,327	156,200	1.400	[7]	8748	324.0
⑧	45.800	5,443	147,900				
⑨	49.700	328.0	8,484	2.500	[8]	277.3	10.62
⑪	47.200	318.6	8,484		-	-	-
⑩	49.700	328.0	168.3	2.500	[9]	0.07965	10.62
⑫	47.200	318.6	168.3				

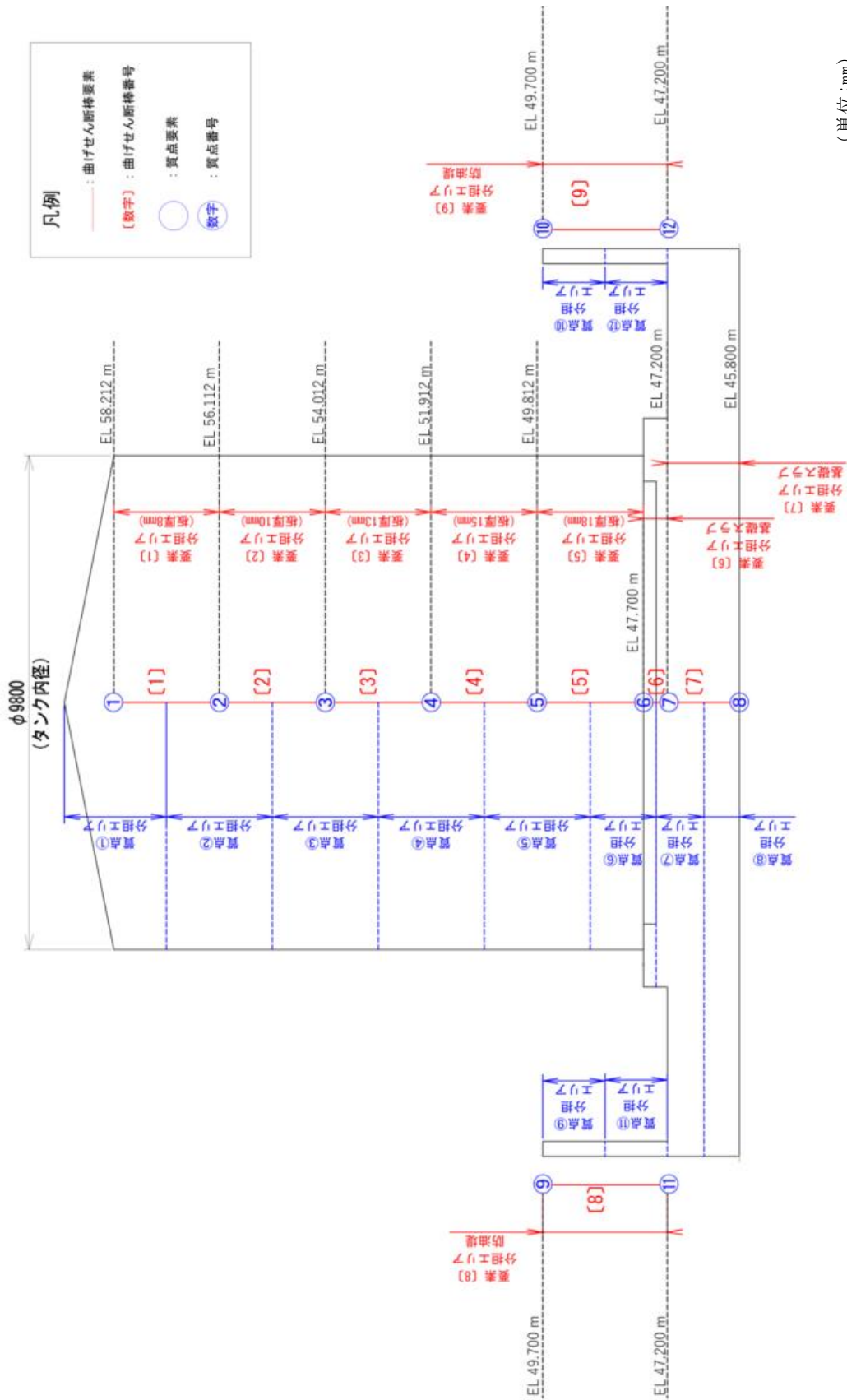
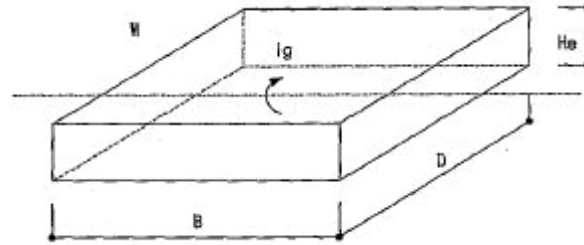


図 3-9 各要素における分担エリア概念図

タンク部分は基礎スラブ及び防油堤と比較して断面二次モーメントが十分小さく、それらから算定される回転慣性重量の影響が軽微であることから、回転慣性重量を考慮せず、重量のみを考慮したモデルとする。ここで、回転慣性重量の算定手法については図 3-10 に記載する。



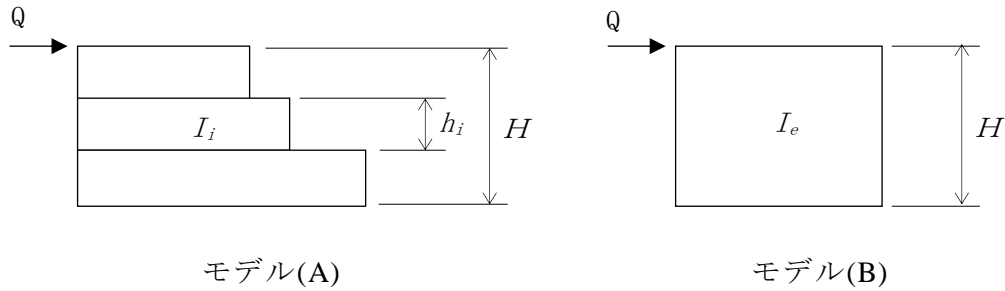
$$I_g = \left\{ \frac{I}{A} + \frac{H_e^2}{12} \right\} \times W + W \times \left\{ \frac{H_e}{2} \right\}^2$$

$$= \left\{ I \times H_e + \frac{1}{12} \times A \times H_e^3 \right\} \times \gamma + W \times \left\{ \frac{H_e}{2} \right\}^2$$

- ここで、 I_g : 回転慣性 (kN・m²)
 A : 断面積(m²)
 I : 断面二次モーメント(m⁴)
 W : 構造物各質点の重量 (kN)
 γ : 単位体積重量(kN/m³)
 H_e : 高さ

図 3-10 回転慣性重量算定手法

各質点をつなぐ、曲げせん断棒要素の断面二次モーメントの算定手法を図3-11に記載する。なお、断面二次モーメントは、基礎スラブ中央部のリングコンクリート部分のような変断面を有する場合には、頂部における回転角が等価となる断面二次モーメント I_e で評価する。また、曲げせん断弾性係数はガスタービン発電機用軽油タンクについては鋼材の物性値、基礎スラブ及び防油堤についてはコンクリートの物性値として設定する。



$$\begin{aligned} \theta_A &= \int_0^{h_1} \frac{M}{E \cdot I_1} \cdot dh + \int_{h_1}^{h_1+h_2} \frac{M}{E \cdot I_2} \cdot dh + \dots + \int_{H-h_n}^H \frac{M}{E \cdot I_n} \cdot dh \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{M \cdot h_i}{E \cdot I_i} \end{aligned}$$

$$\theta = \int_0^H \frac{M}{E \cdot I_e} \cdot dh = \frac{M \cdot H}{E \cdot I_e}$$

$\theta_A = \theta$ とすると、

$$I_e = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{I_i}}$$

ここで、 θ_A : モデル(A)の回転角 (rad)

θ : モデル(B)の回転角 (rad)

h_i : 要素内の各断面変化部分の高さ (m)

M : 曲げモーメント = $Q \cdot H$ (kN・m)

Q : 水平力 (kN)

E : 弾性係数 (kN/m²)

I_i : 要素内の各断面変化部分の断面二次モーメント (m⁴)

n : 要素内の断面変化部分の数

H : 要素全体の高さ (m)

I_e : 要素の等価断面二次モーメント (m⁴)

図3-11 断面二次モーメント算定手法

(2) 鉛直モデル

鉛直方向の地震応答解析モデル図を図 3-12 に示す。各質点及び軸ばね要素に与える物性値の一覧を表 3-5 に示す。各質点及び軸ばね要素における分担エリアの考え方については、水平モデルと同様である。

各質点をつなぐ、軸ばね要素のばね定数については、縦弾性係数、有効断面積並びに節点スパンを使用して算定する。

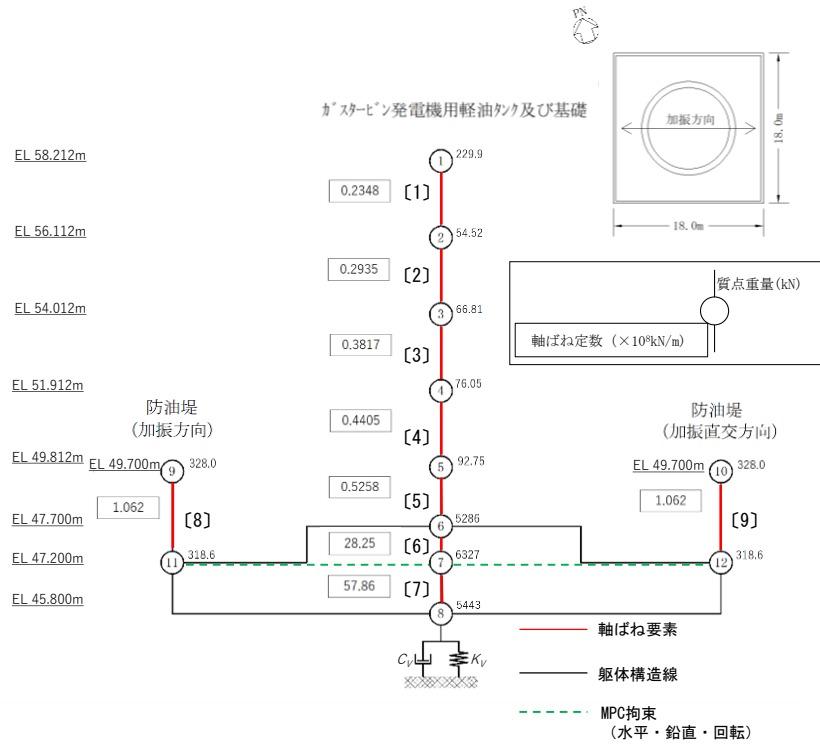


図 3-12 地震応答解析モデル (鉛直方向)

表 3-5 各質点及び軸ばね要素に与える物性値一覧表

質点No	高さ	質量(鉛直)	節点スパン	要素No	ばね定数
	EL m	kN	m		kN/m ²
①	58.212	229.9			
②	56.112	54.52	2.100	[1]	2.348×10^7
③	54.012	66.81	2.100	[2]	2.935×10^7
④	51.912	76.05	2.100	[3]	3.817×10^7
⑤	49.812	92.75	2.100	[4]	4.405×10^7
⑥	47.700	5,286	2.112	[5]	5.258×10^7
⑦	47.200	6,327	0.500	[6]	2.825×10^9
⑧	45.800	5,443	1.400	[7]	5.786×10^9
⑨	49.700	328.0			
⑩	47.200	318.6	2.500	[8]	1.062×10^8
⑪	49.700	328.0	-	-	-
⑫	47.200	318.6	2.500	[9]	1.062×10^8

3.3 固有値解析結果

基本ケース（解析ケース①*）の地震応答解析モデルの固有値解析結果（固有周期，固有振動数及び刺激係数）を表 3-6 に示す。刺激関数図を図 3-13～図 3-24 に示す。

固有値解析結果は，地震応答解析における地盤ばねの設定に用いるが，1次固有円振動数 ω_1 については，保守的に固有振動数が最小となる防油堤（加振直交方向）の1次モードから算定する。

注記*：解析ケースの取り合いについては，「3.5 地震応答解析の解析ケース」において示す

表 3-6 固有値解析結果（解析ケース①）

(a) 水平方向

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.065	15.48	1.359	防油堤（加振直交方向） 1次
2	0.061	16.51	1.779	軽油タンク及び基礎スラ ブ1次
3	0.025	40.34	-2.690	防油堤（加振方向）1次
4	0.020	48.96	2.223	
5	0.016	64.06	-0.448	
6	0.013	74.13	-0.109	

(b) 鉛直方向

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.019	51.87	1.933	軽油タンク及び基礎スラ ブ並びに防油堤1次
2	0.013	79.11	-0.950	
3	0.004	239.28	-0.049	
4	0.004	283.60	0.000	
5	0.003	287.10	-0.032	
6	0.002	407.28	0.075	

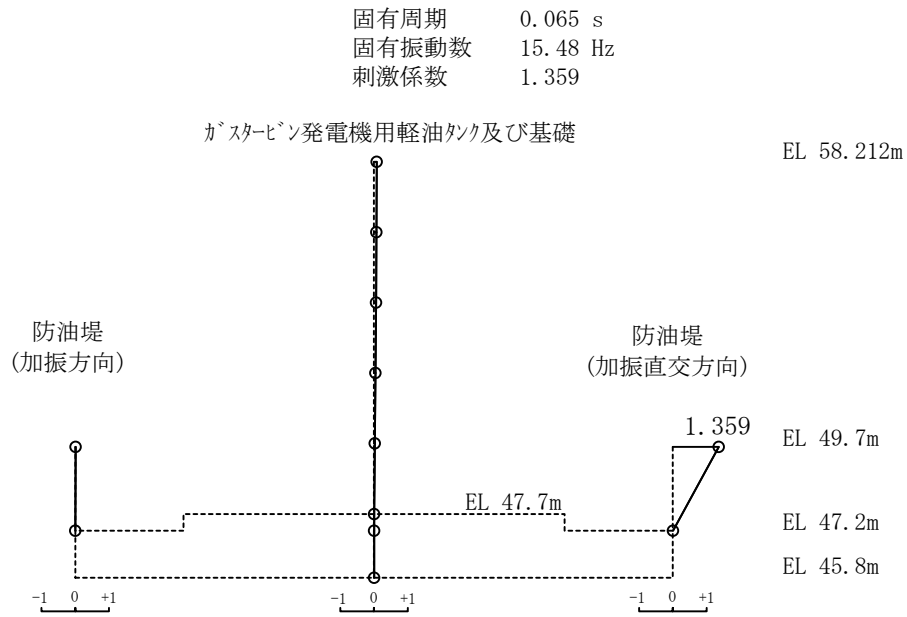


図 3-13 刺激関数図 (解析ケース①, 水平方向, 1次モード)

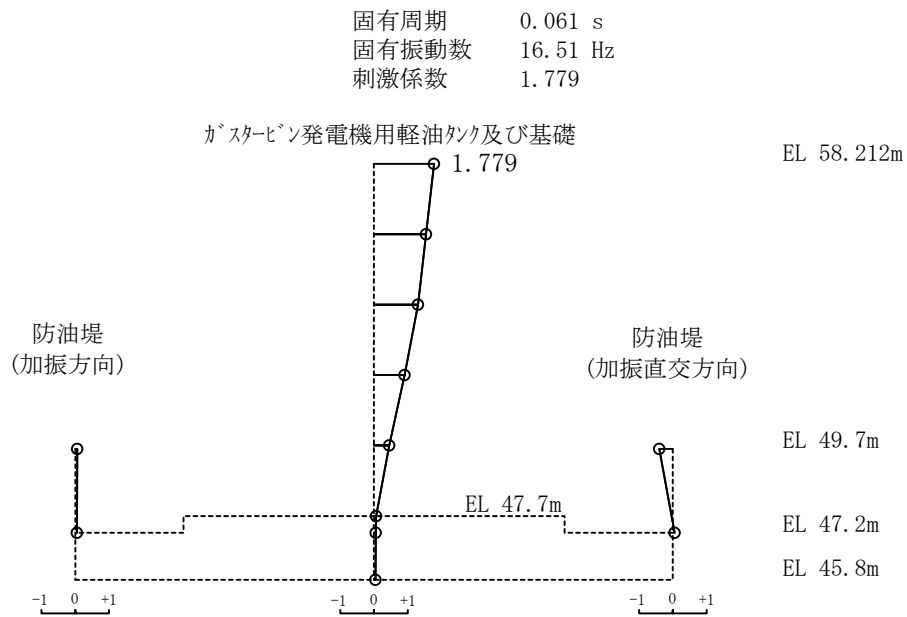


図 3-14 刺激関数図 (解析ケース①, 水平方向, 2次モード)

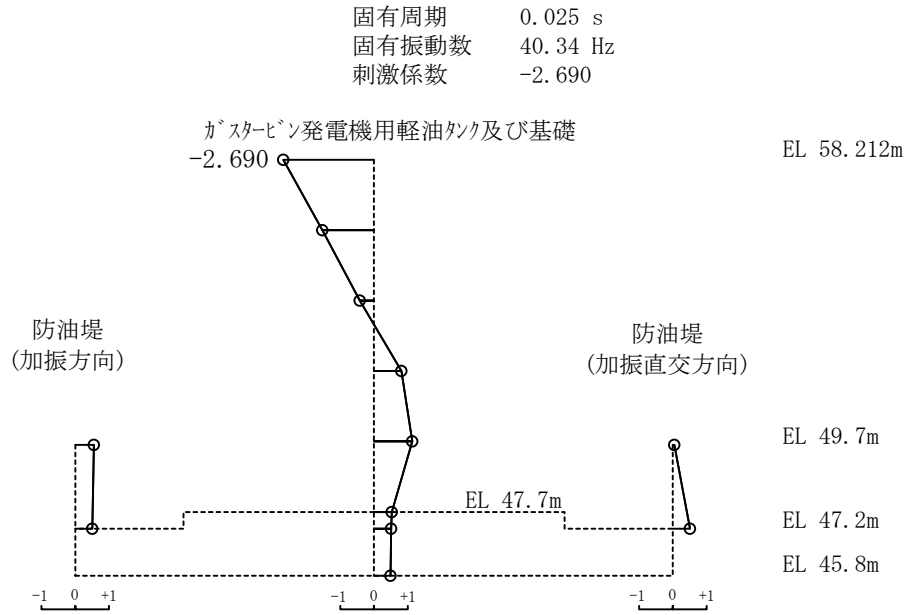


図 3-15 刺激関数図 (解析ケース①, 水平方向, 3次モード)

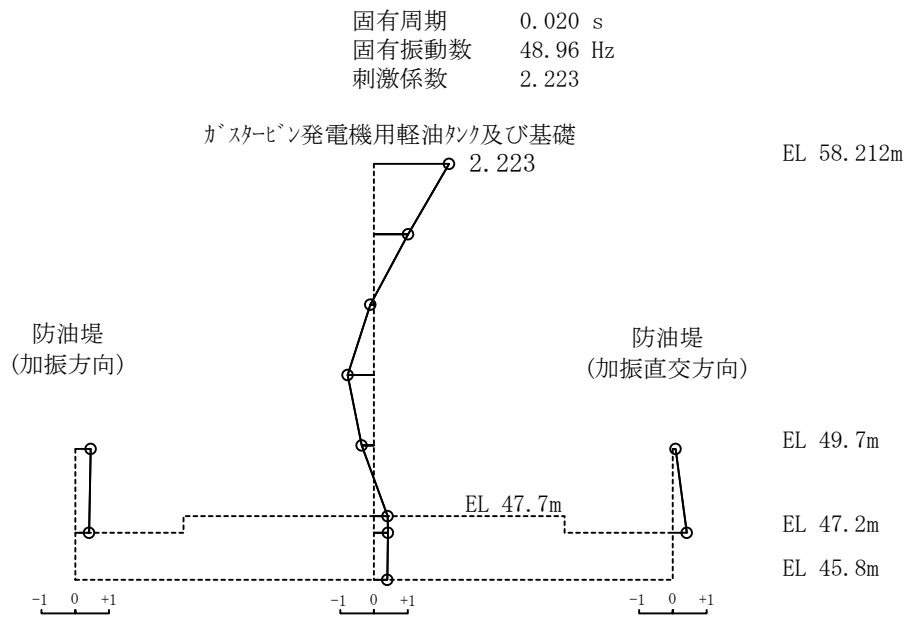


図 3-16 刺激関数図 (解析ケース①, 水平方向, 4次モード)

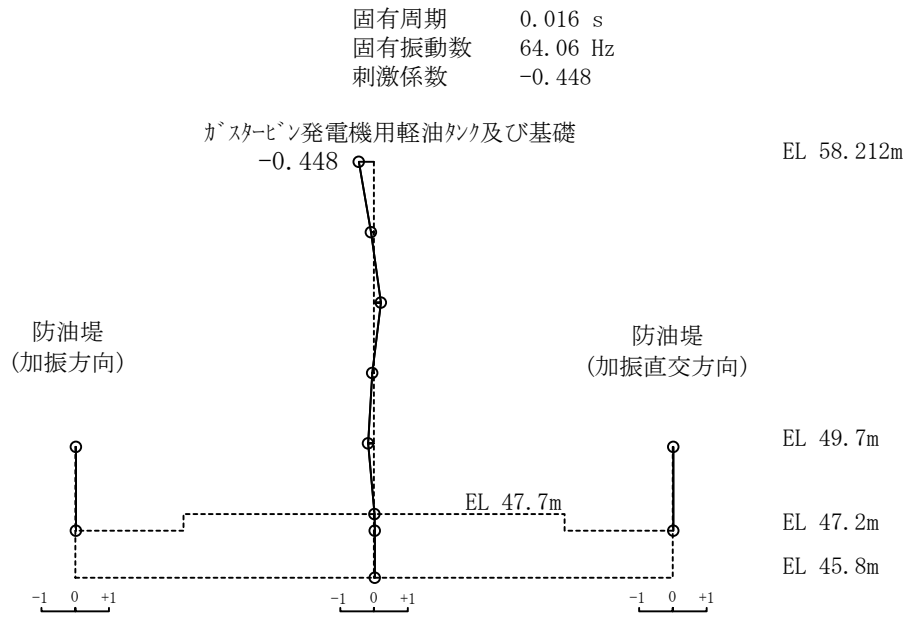


図 3-17 刺激関数図 (解析ケース①, 水平方向, 5 次モード)

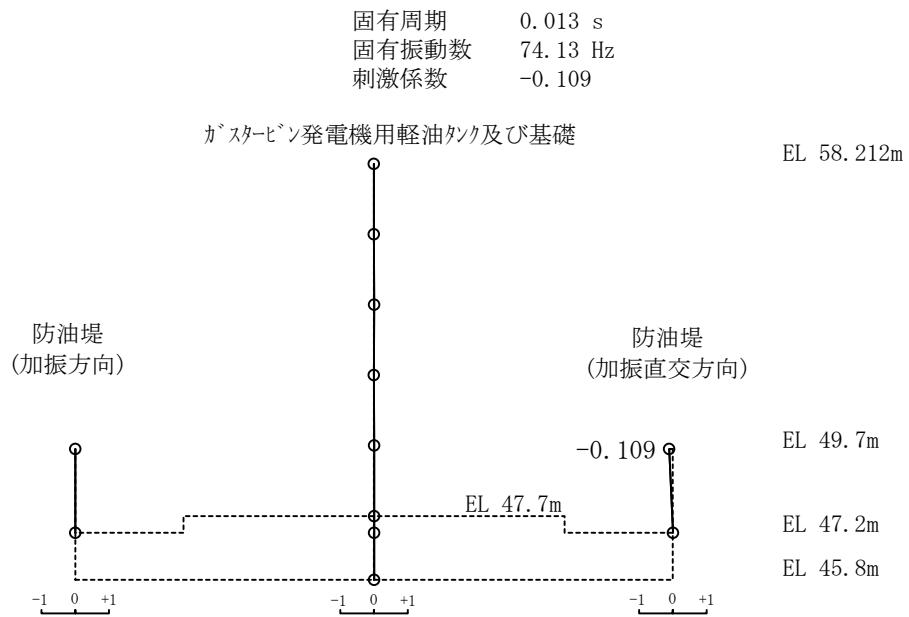


図 3-18 刺激関数図 (解析ケース①, 水平方向, 6 次モード)

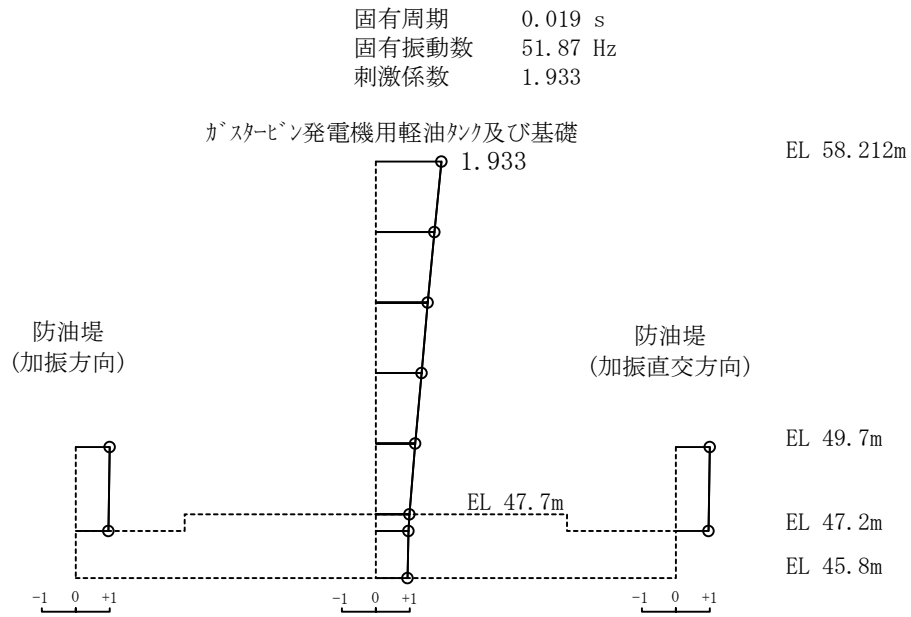


図 3-19 刺激関数図 (解析ケース①, 鉛直方向, 1 次モード)

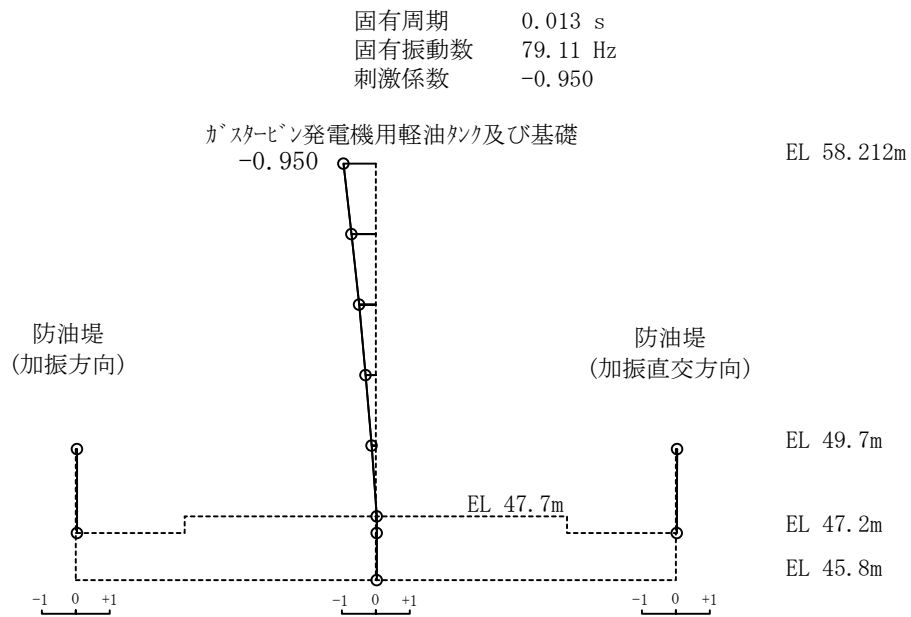


図 3-20 刺激関数図 (解析ケース①, 鉛直方向, 2 次モード)

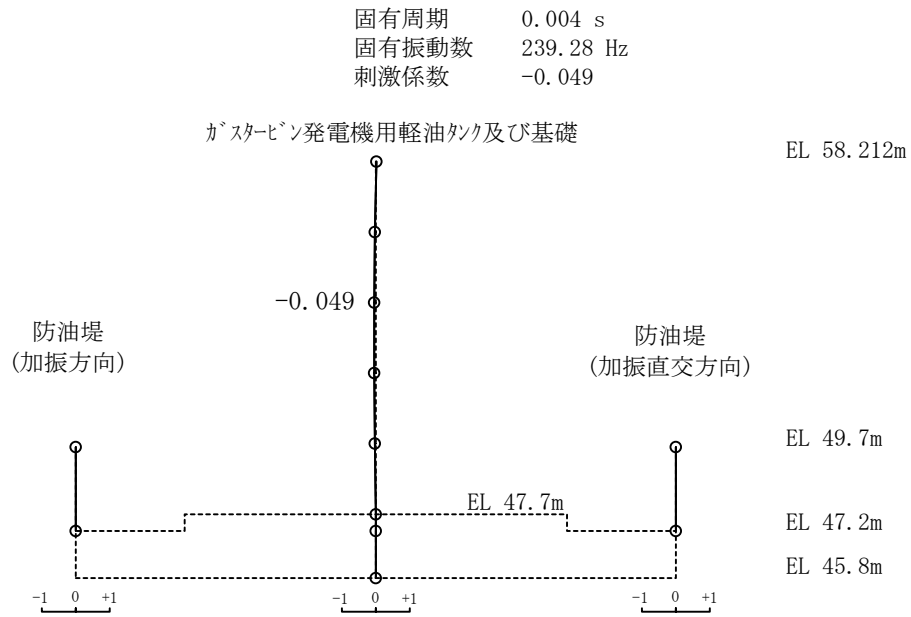


図 3-21 刺激関数図 (解析ケース①, 鉛直方向, 3 次モード)

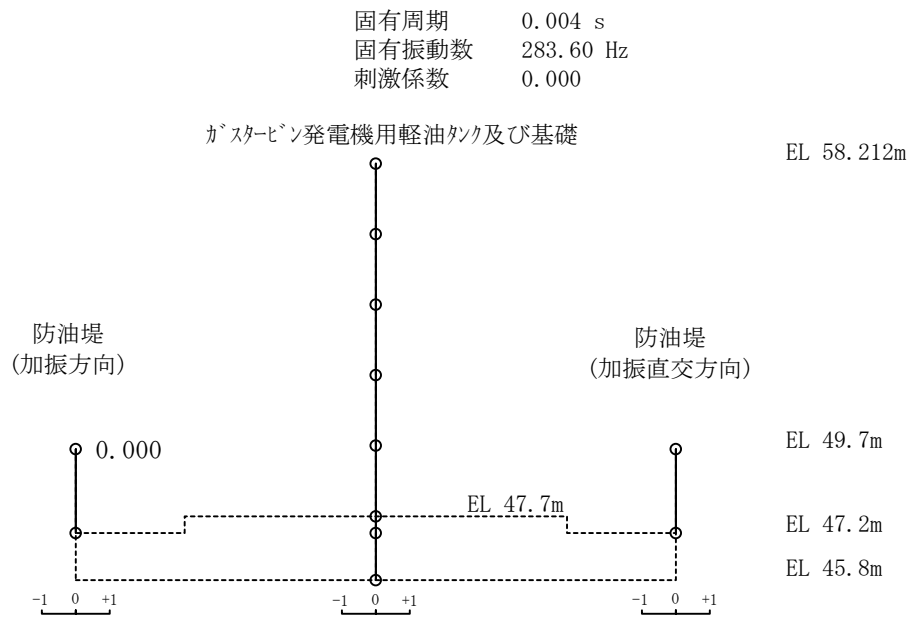


図 3-22 刺激関数図 (解析ケース①, 鉛直方向, 4 次モード)

3.4 荷重及び荷重の組合せ

地震応答解析においては、躯体自重、機器・配管荷重及び積雪荷重を各質点に考慮する。

3.4.1 機器・配管荷重

(1) タンク関連の機器・配管荷重

タンク関連（タンク本体及び内容液）の機器・配管荷重については、図 3-9 に示す分担エリアに応じた重量を各質点に載荷する。

(2) ポンプ関連の機器・配管荷重

ポンプ関連の機器・配管荷重として、基礎スラブに 9.8kN、防油堤に 3.9kN の配管荷重を考慮する。防油堤については総重量を 2 分割し、加振方向及び加振直交方向の防油堤頂部の質点に載荷する。

3.4.2 積雪荷重

積雪荷重として、発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上 1 位の月最深積雪 100cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮し 35.0 cm とする。積雪荷重については、「松江市建築基準法施行細則（平成 17 年 3 月 31 日、松江市規則第 234 号）」により、積雪量 1 cm ごとに 20N/m^2 の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

3.5 地震応答解析の解析ケース

3.5.1 耐震評価における解析ケース

(1) 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

地盤物性のばらつきの影響を考慮するため、表 3-7 に示す解析ケースを設定する。

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎周辺では、岩盤の分布が支配的であるため、これらの地盤が地震時に構造物の応答に影響を与えると判断されることから、岩盤のばらつきを考慮する。

ばらつきを考慮する物性値は地盤のせん断変形を定義するせん断弾性係数とし、平均値を基本ケース（表 3-7 に示すケース①）とした場合に加えて、平均値 $\pm 1.0 \times$ 標準偏差（ σ ）のケース（表 3-7 に示すケース②及び③）について確認を行う。

地盤のばらつきの設定方法の詳細は、「補足-023-01 地盤の支持性能について」に示す。

表 3-7 耐震評価における解析ケース

解析ケース	岩盤 (G_d : 動せん断弾性係数)
ケース① (基本ケース)	平均値
ケース②	平均値 + 1σ
ケース③	平均値 - 1σ

(2) 耐震評価における解析ケースの組合せ

表 3-8 に耐震評価における解析ケースの組合せを示す。表 3-8 に示すように基準地震動 S_s 全波（6 波）に $S_s - F 1$ 及び $S_s - F 2$ の直交方向の成分（2 波）を加えた全 8 波に対し、基本ケース（表 3-8 に示すケース①）を実施し、「3.7.2 3次元構造解析への入力荷重の時刻選定」に示す観点で選定された地震動に対して、解析ケース（表 3-8 に示すケース②及び③）を実施する。

表 3-8 耐震評価における解析ケースの組合せ

解析ケース		ケース①	ケース②	ケース③
		基本ケース	地盤物性のばらつき（ $+1\sigma$ ）を考慮した解析ケース	地盤物性のばらつき（ -1σ ）を考慮した解析ケース
地盤物性		平均値	平均値 $+1\sigma$	平均値 -1σ
地震動 (位相)	$S_s - D$	++	○	
	$S_s - F 1$ (NS)	++	○	基準地震動 S_s 全波（6 波）に $S_s - F 1$ 及び $S_s - F 2$ の直交方向の成分（2 波）を加えた全 8 波に対し、基本ケース（ケース①）を実施し、「3.7.2 3次元構造解析への入力荷重の時刻選定」に示す観点で選定された地震動に対して、解析ケース（ケース②及び③）を実施する。
	$S_s - F 1$ (EW)	++	○	
	$S_s - F 2$ (NS)	++	○	
	$S_s - F 2$ (EW)	++	○	
	$S_s - N 1$	++	○	
	$S_s - N 2$ (NS)	++	○	
	$S_s - N 2$ (EW)	++	○	

注 1：地震動の位相について、++の左側は水平動，右側は鉛直動を表す。

注 2： $S_s - F 1$ 及び $S_s - F 2$ については、A-A 断面及び B-B 断面の両断面を評価するため、それぞれの断面の加振方向の成分として、NS 方向及び EW 方向の 2 方向を対象としている。

3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース

(1) 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケースにおける地盤物性のばらつきを考慮した解析ケースを表 3-9 に示す。表 3-9 に示すように、機器・配管系に対する応答加速度抽出においても「3.5.1 耐震評価における解析ケース」と同様に、地盤物性のばらつきを考慮する（表 3-9 に示すケース②及び③）。

表 3-9 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース

解析ケース	岩盤 (G_d : 動せん断弾性係数)	備考
ケース① (基本ケース)	平均値	
ケース②	平均値 + 1σ	
ケース③	平均値 - 1σ	
ケース④	平均値	材料物性のばらつき

(2) 材料物性のばらつきを考慮した解析ケース

材料物性のばらつきについては、剛性を定義するコンクリートのヤング係数が、コンクリートの設計基準強度に対応して定まることを踏まえ、コンクリートの設計基準強度を基本ケースとし、ヤング係数をコンクリートの実強度に対応して定めたケースについて確認を行う（表 3-9 に示すケース④）。

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎におけるコンクリート実強度は、「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事（（社）日本建築学会，2013 年）」「日本原子力学会標準 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準（（社）日本原子力学会，2015 年）」より算定される圧縮強度のうち最大となるものを選択する。ヤング係数は実強度に対応する「コンクリート標準示方書」に基づき算出する。

設定した、圧縮強度及びヤング係数を表 3-10 に示す。

表 3-10 コンクリート実強度を考慮した物性値

圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
36.1	29.8

(3) 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケースの組合せ

機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケースの組合せを表3-11に示す。機器・配管系に対する応答加速度抽出においては、床応答への保守的な配慮として基本ケースに加え、表3-11に示す解析ケース②～④を実施する。

表3-11 機器・配管系の応答加速度抽出のための解析ケースの組合せ

解析ケース		ケース①		ケース②		ケース③		ケース④	
		基本ケース		地盤物性のばらつき (+1 σ) を考慮した解析ケース		地盤物性のばらつき (-1 σ) を考慮した解析ケース		材料物性 (コンクリート) の実強度を考慮した解析ケース	
地盤物性		平均値		平均値 + 1 σ		平均値 - 1 σ		平均値	
地震動 (位相)	S _s -D	++	○	○	○	○	○	○	△*
	S _s -F1 (NS)	++	○	○	○	○	○	○	-
	S _s -F1 (EW)	++	○	○	○	○	○	○	-
	S _s -F2 (NS)	++	○	○	○	○	○	○	-
	S _s -F2 (EW)	++	○	○	○	○	○	○	-
	S _s -N1	++	○	○	○	○	○	○	-
	S _s -N2 (NS)	++	○	○	○	○	○	○	-
	S _s -N2 (EW)	++	○	○	○	○	○	○	-

注記* : 「△」は影響検討ケースを示す。影響検討ケースについては、S_s-D (++) により影響の程度を確認する。

注1 : 地震動の位相について、++の左側は水平動、右側は鉛直動を表す。

注2 : S_s-F1及びS_s-F2については、A-A断面及びB-B断面の両断面を評価するため、それぞれの断面の加振方向の成分として、NS方向及びEW方向の2方向を対象としている。

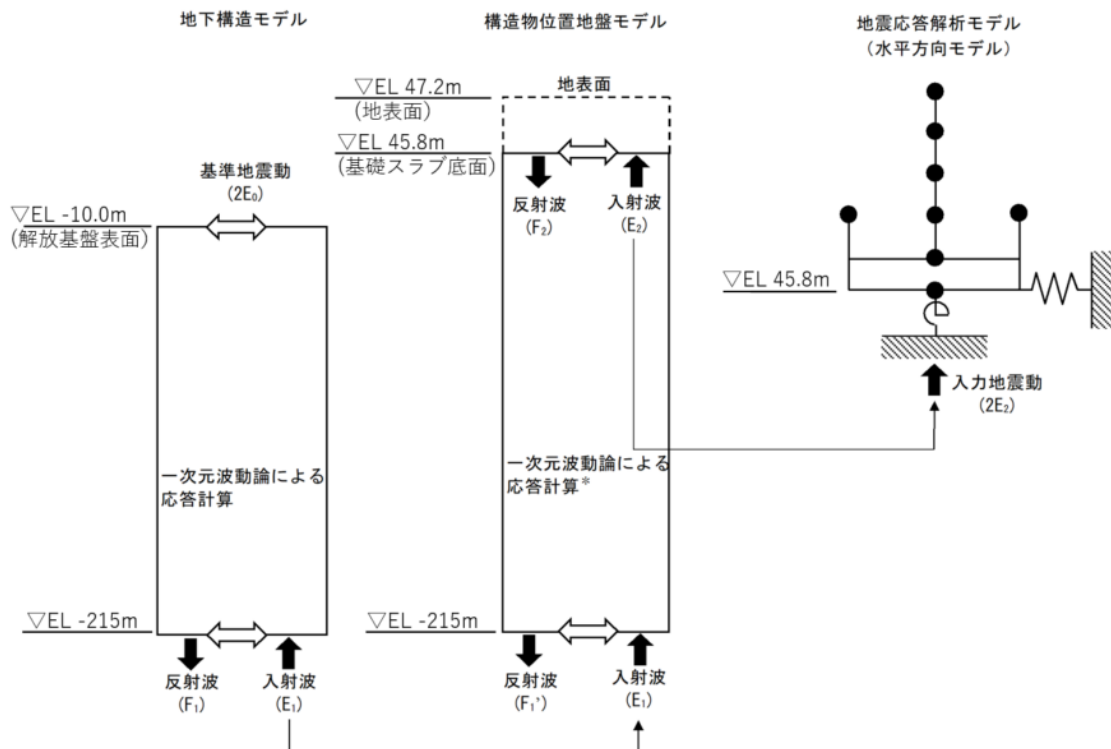
3.6 入力地震動の設定

入力地震動は、VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」のうち「2.3 屋外重要土木構造物」に示す入力地震動の設定方針を踏まえて設定する。

地震応答解析に用いる入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を一次元波動論により地震応答解析モデル下端位置で評価したものをを用いる。なお、入力地震動の設定に用いる地下構造モデルは、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」のうち「7.1 入力地震動の設定に用いる地下構造モデル」を用いる。

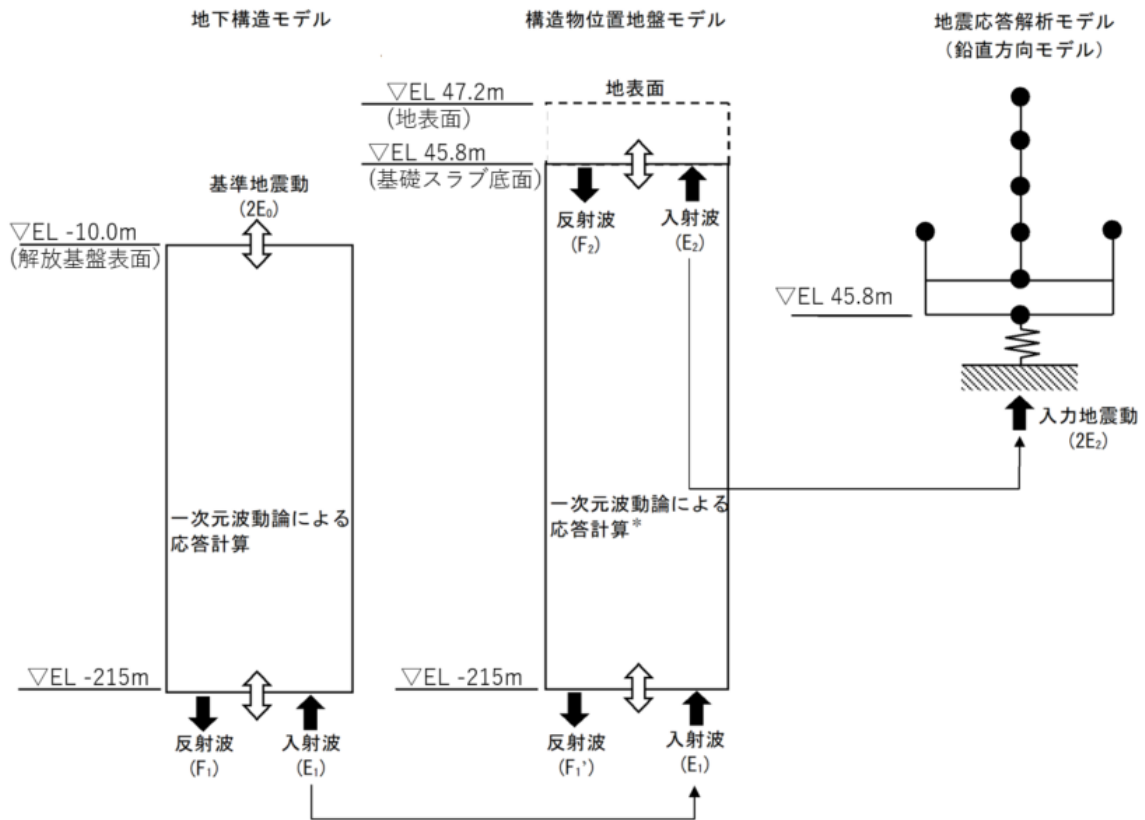
なお、基準地震動 $S_s - F1$ 及び $S_s - F2$ に関しては、ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の配置に応じて方位を補正した波形を用いる。

図3-25及び図3-26に入力地震動算定の概念図を、図3-27～図3-65に入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを示す。入力地震動の算定には、解析コード「SHAKE」を使用する。解析コードの検証及び妥当性確認の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。



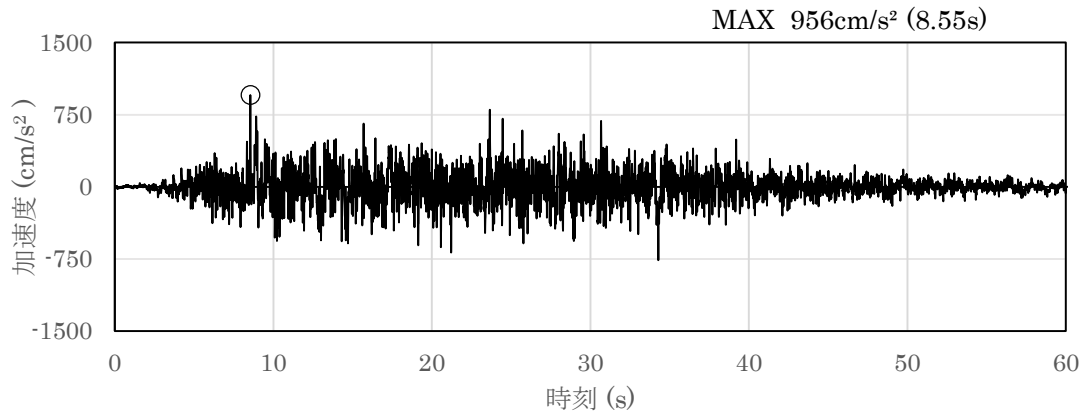
注記*：地盤物性のばらつきを考慮する。

図3-25 入力地震動算定の概念図（水平成分の場合）

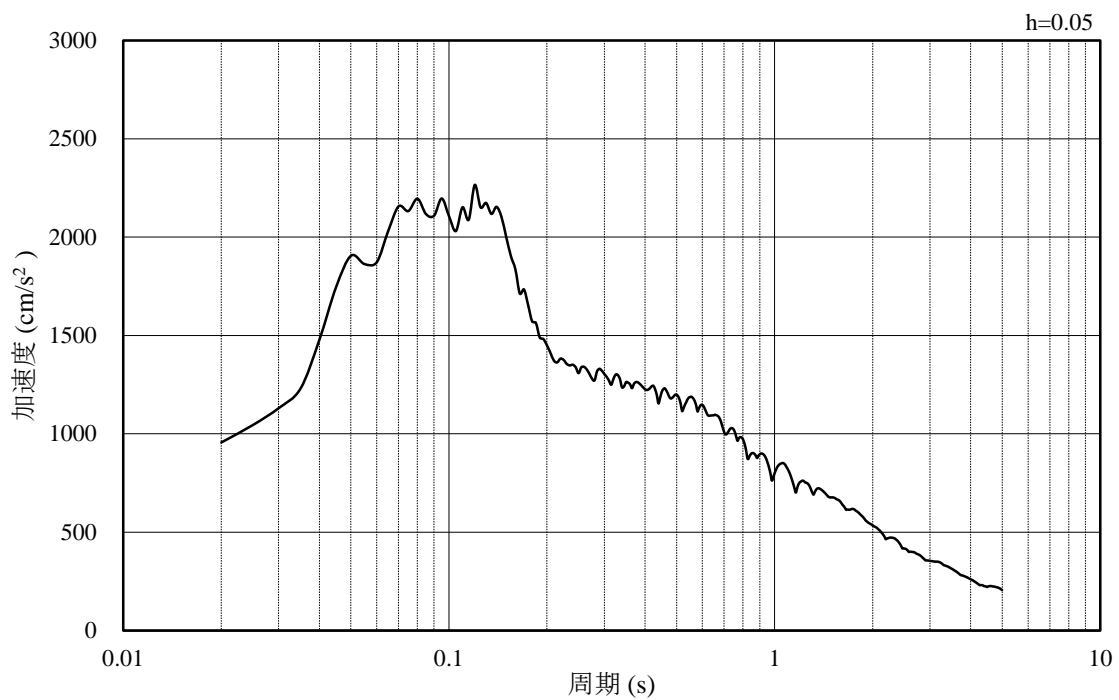


注記*：地盤物性のばらつきを考慮する。

図 3-26 入力地震動算定の概念図（鉛直成分の場合）

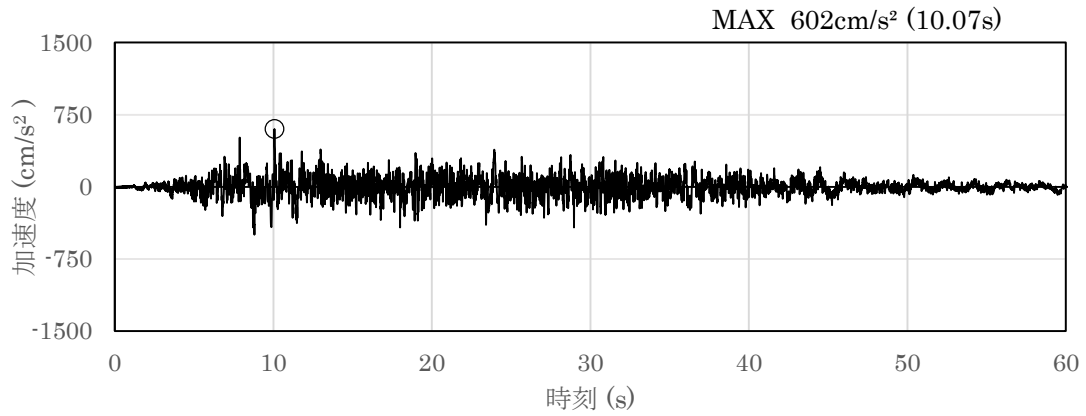


(a) 加速度時刻歴波形

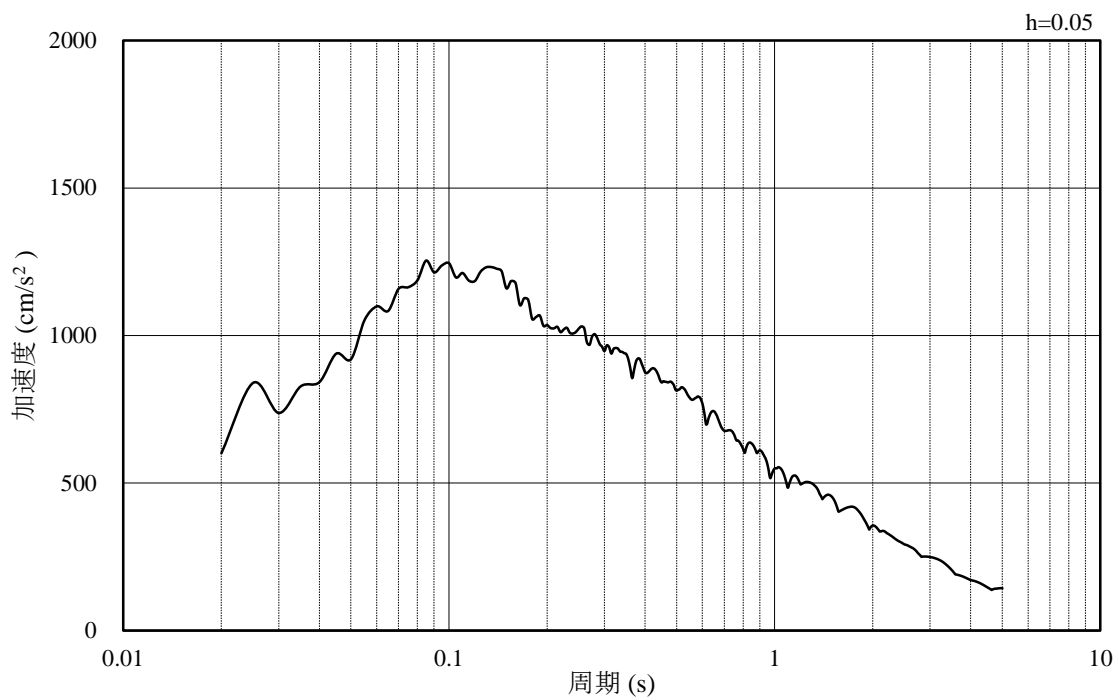


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-27 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース①) (水平成分 : S s - D)

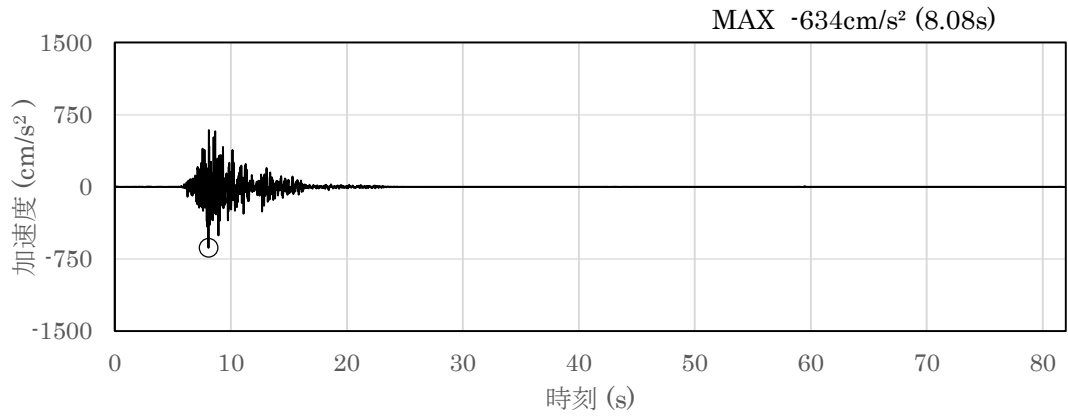


(a) 加速度時刻歴波形

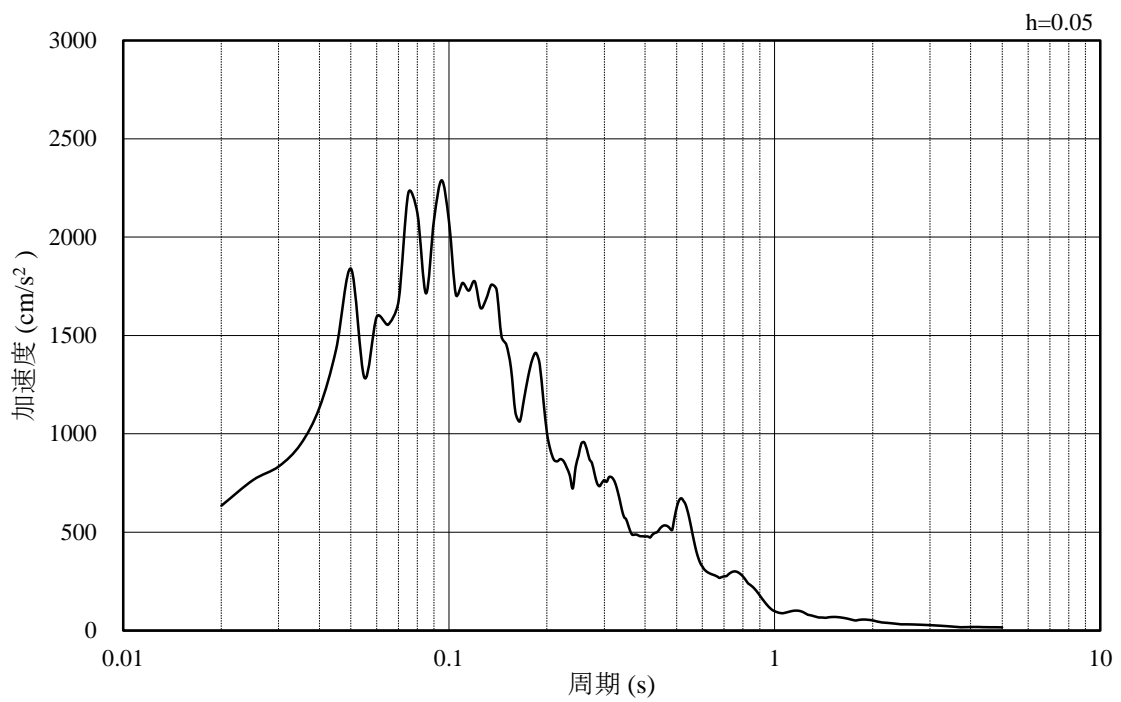


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-28 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース①) (鉛直成分: S s - D)

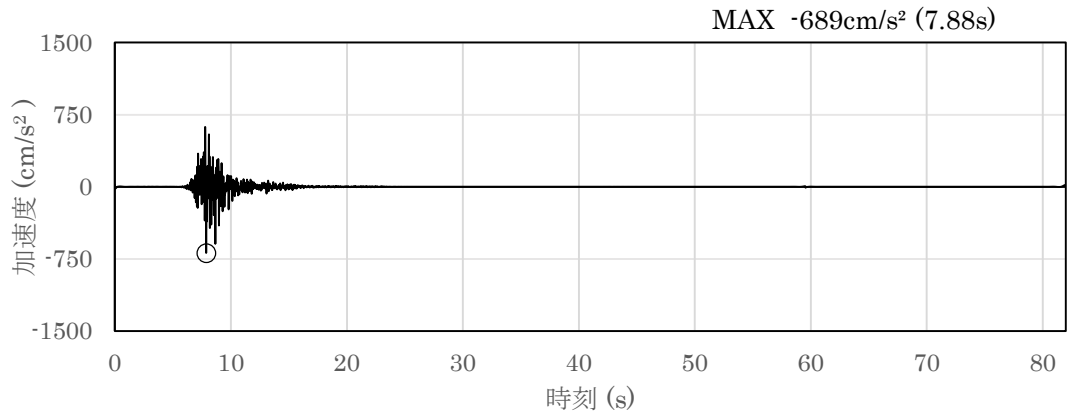


(a) 加速度時刻歴波形

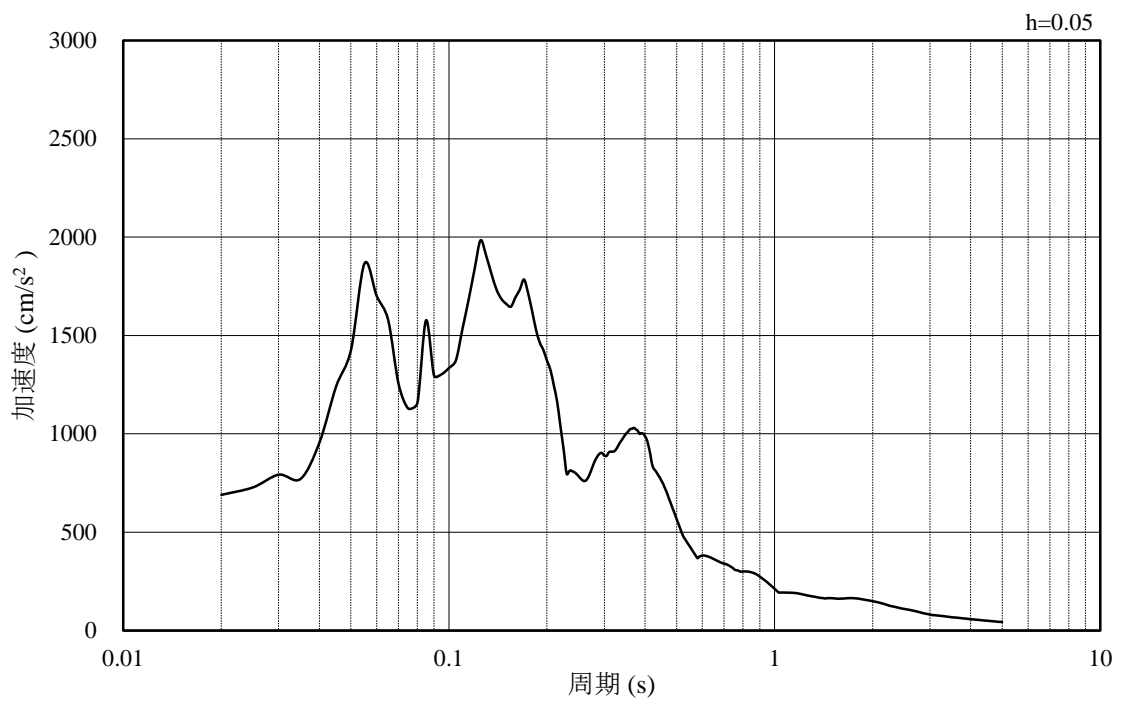


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-29 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース①) (水平成分: S s - F 1 (N S))

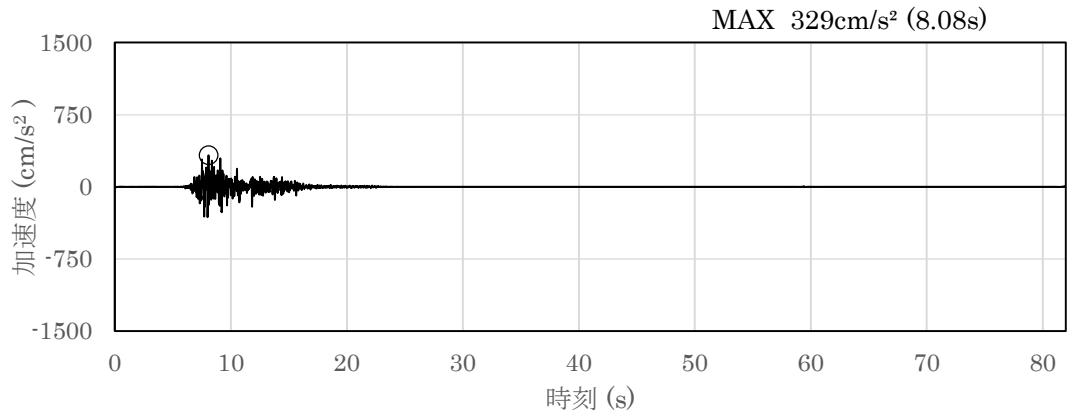


(a) 加速度時刻歴波形

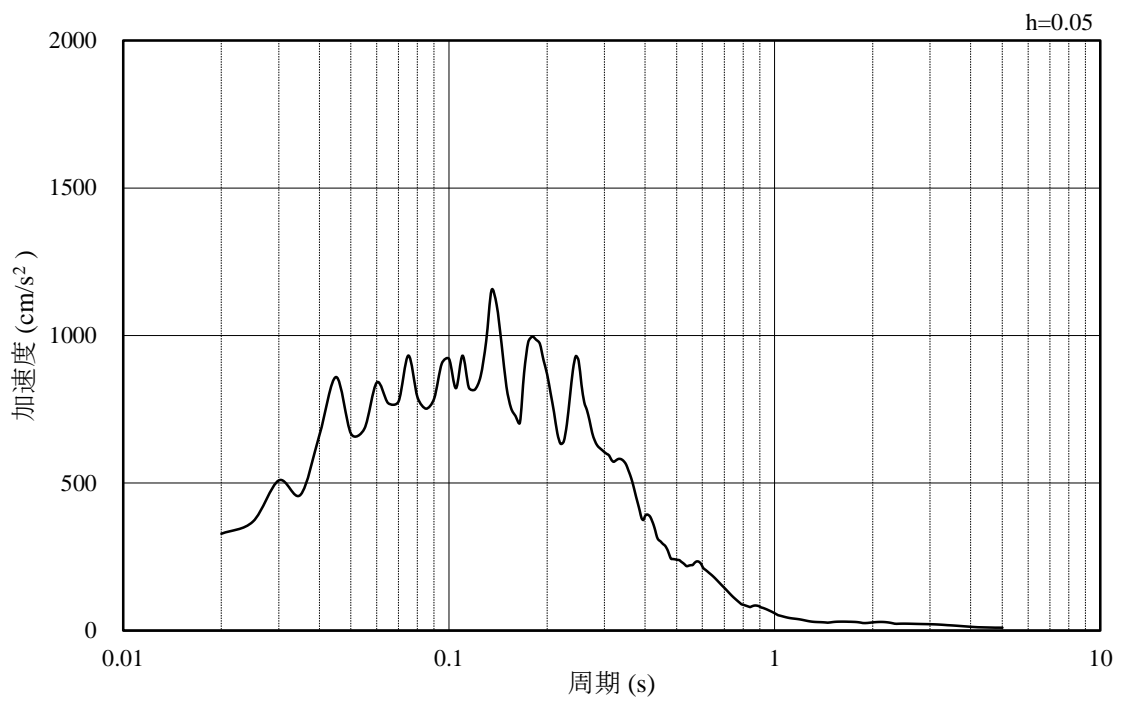


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-30 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース①) (水平成分: S s - F 1 (EW))

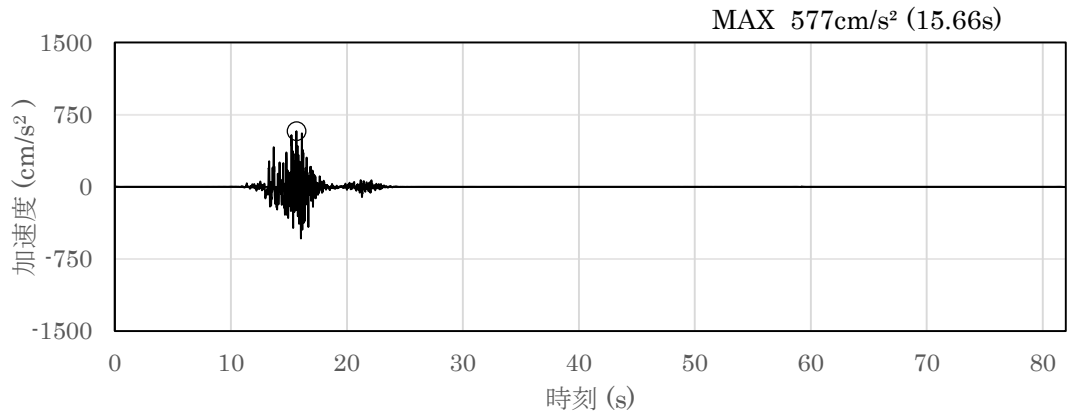


(a) 加速度時刻歴波形

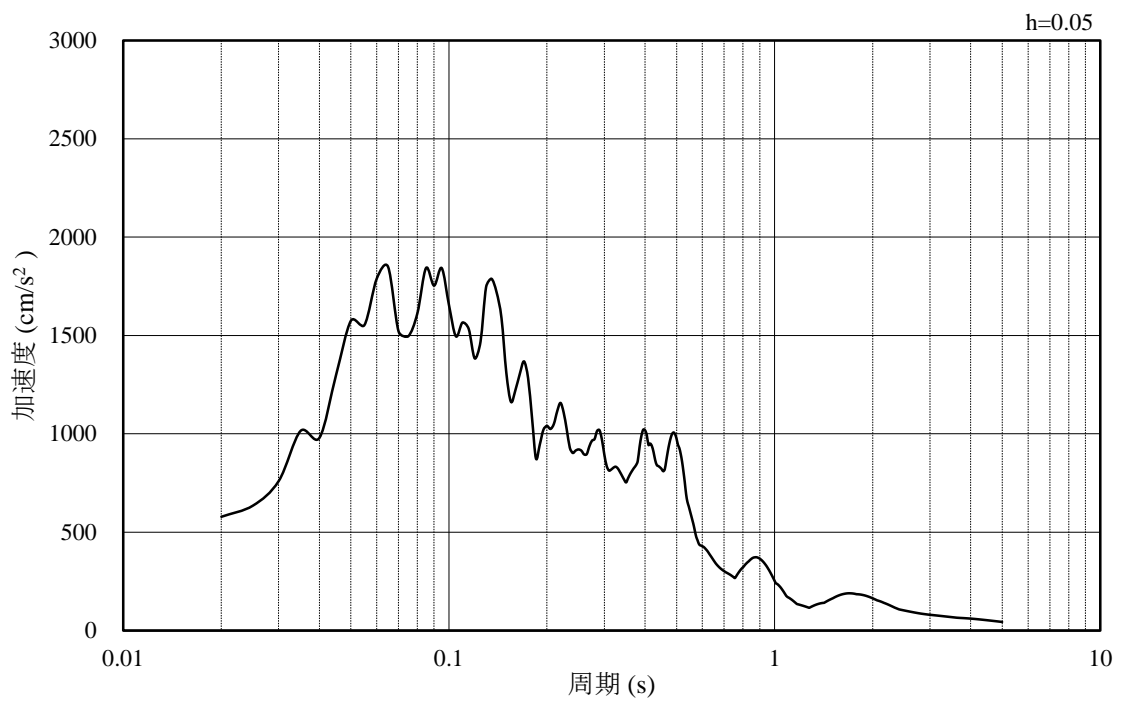


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-31 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース①) (鉛直成分: S s - F 1)

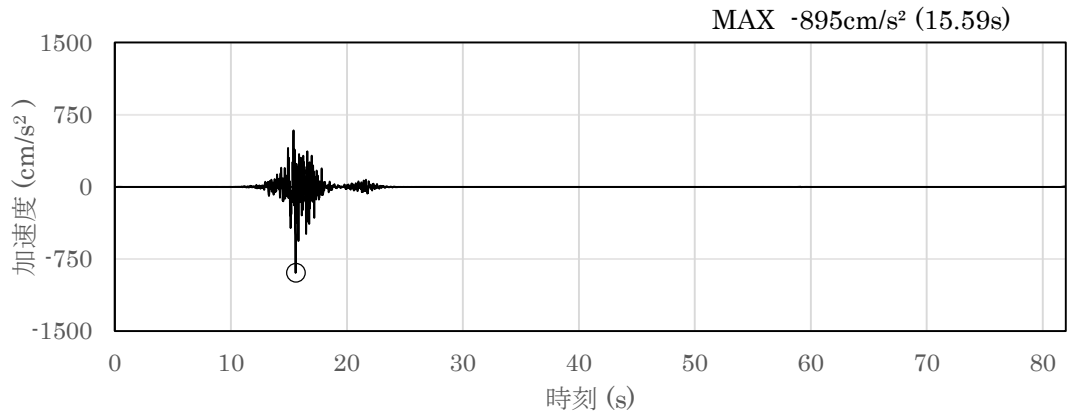


(a) 加速度時刻歴波形

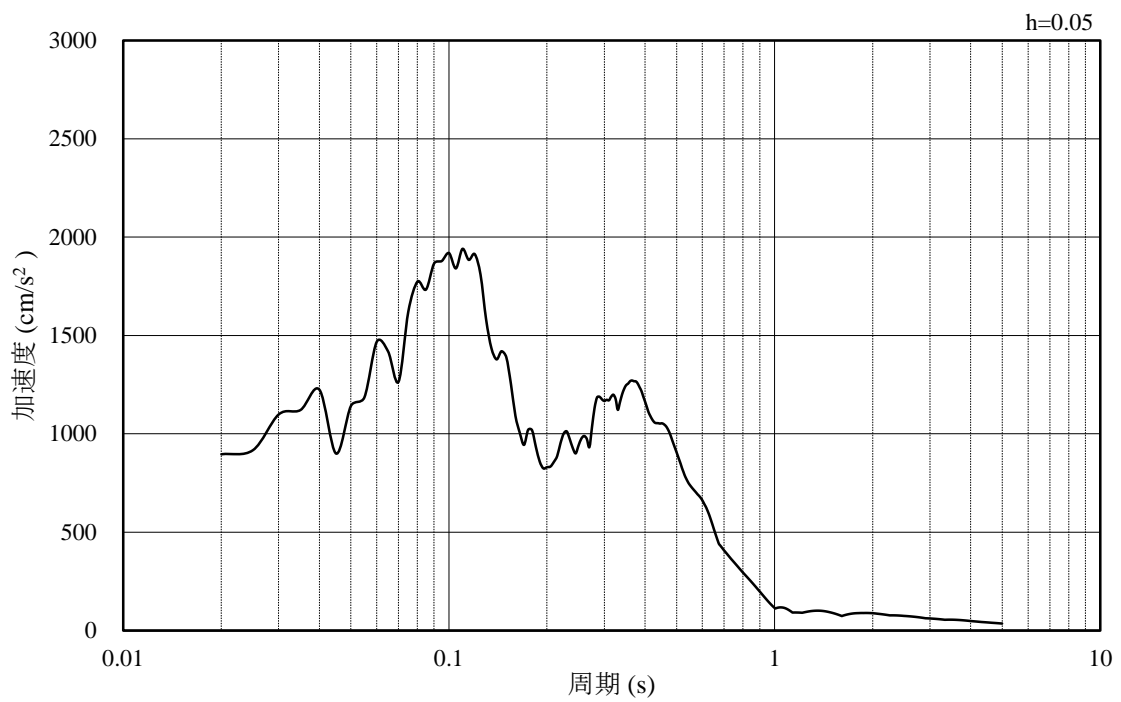


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-32 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース①) (水平成分: S s - F 2 (N S))

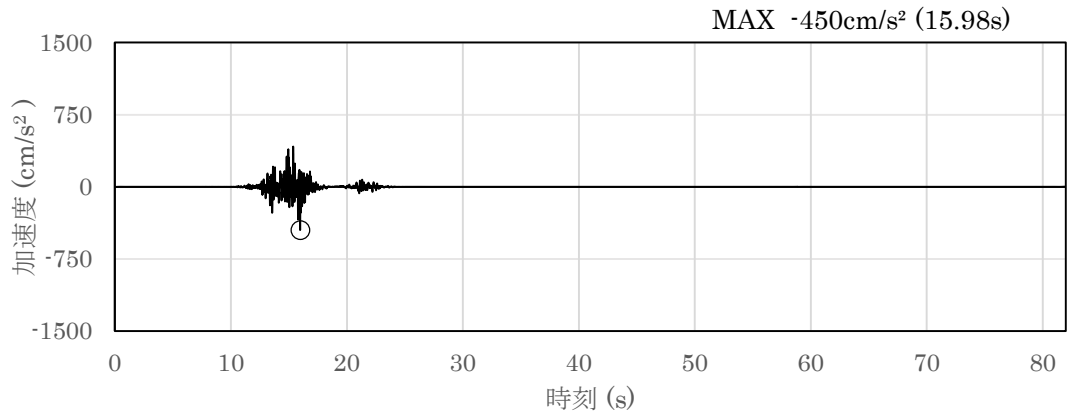


(a) 加速度時刻歴波形

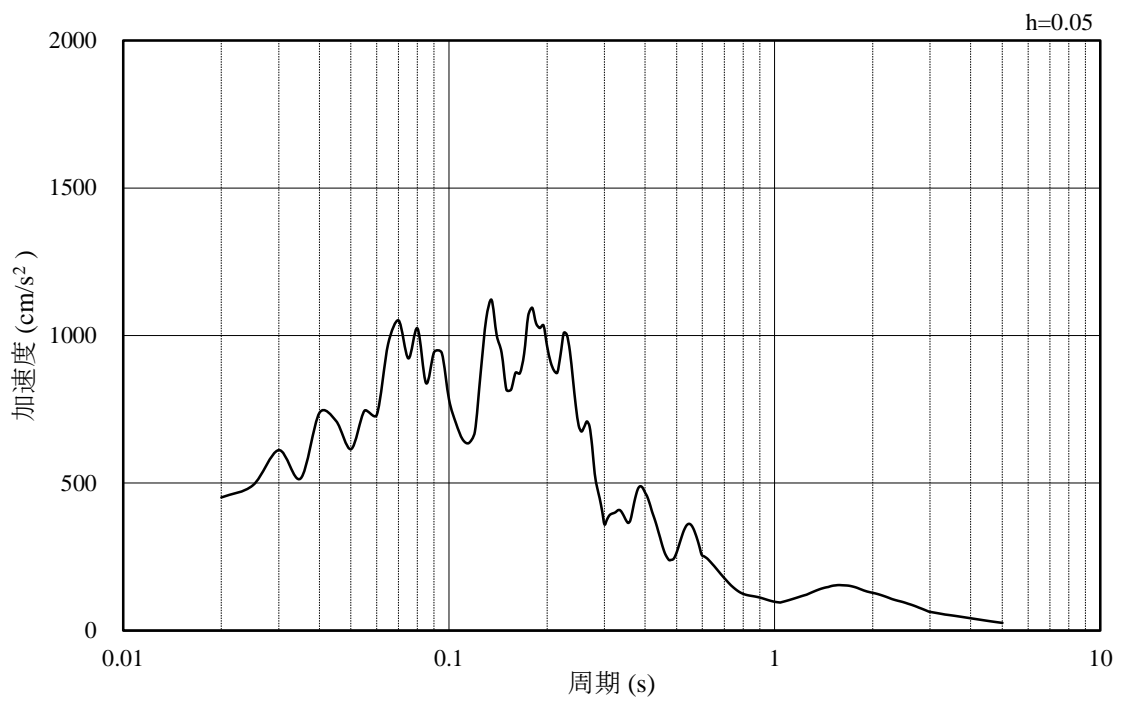


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-33 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
 (解析ケース①) (水平成分: S s - F 2 (EW))

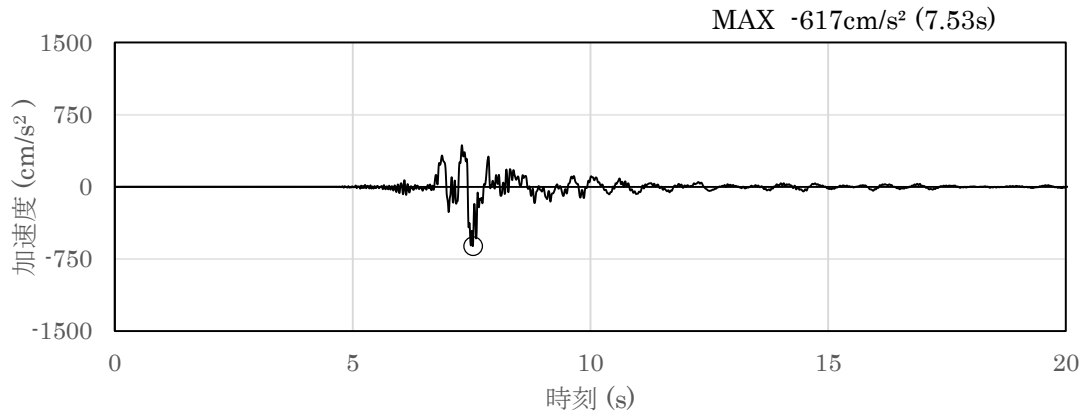


(a) 加速度時刻歴波形

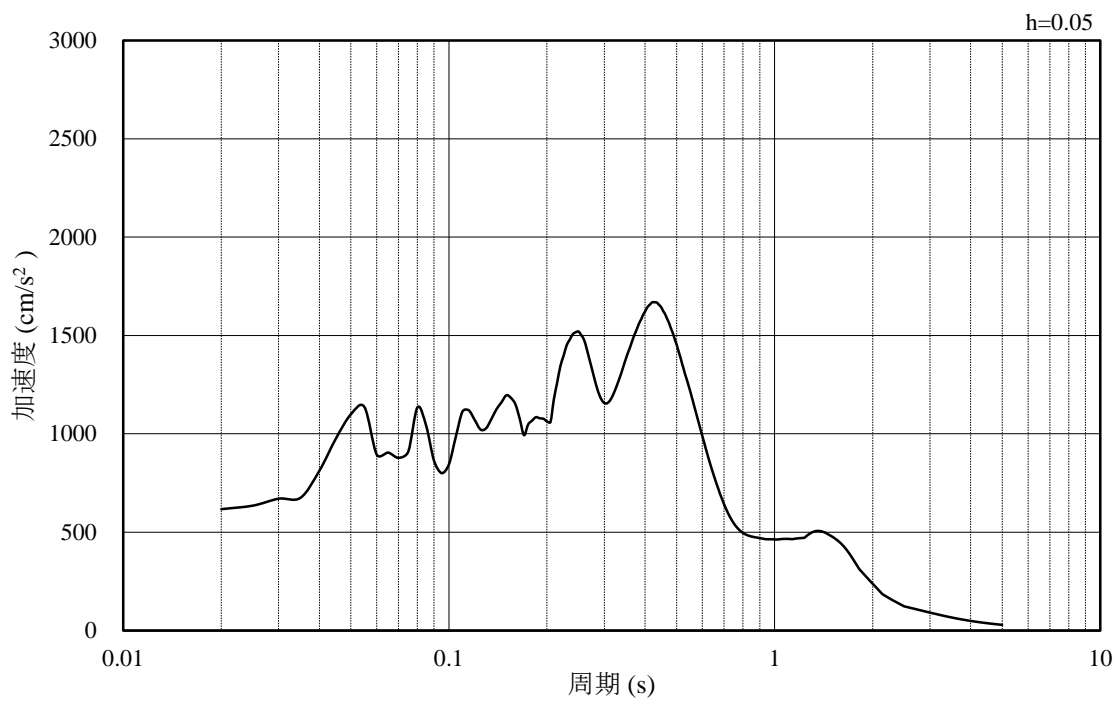


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-34 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース①) (鉛直成分: S_s-F2)

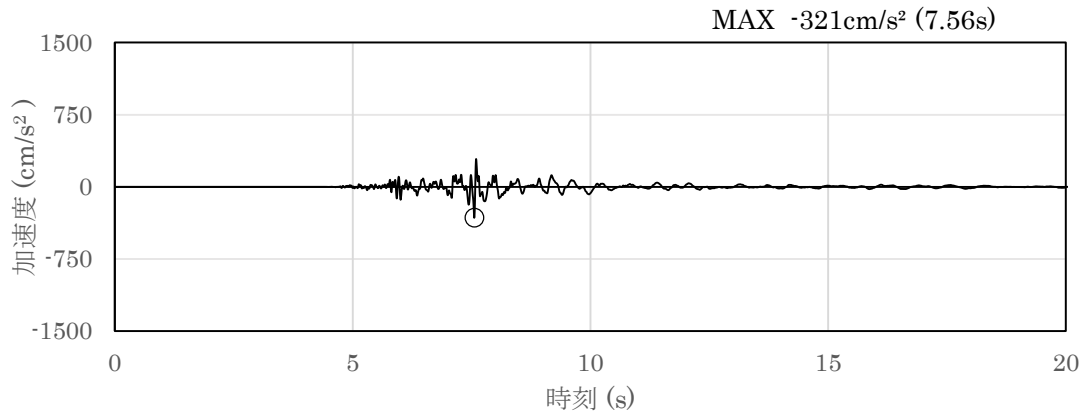


(a) 加速度時刻歴波形

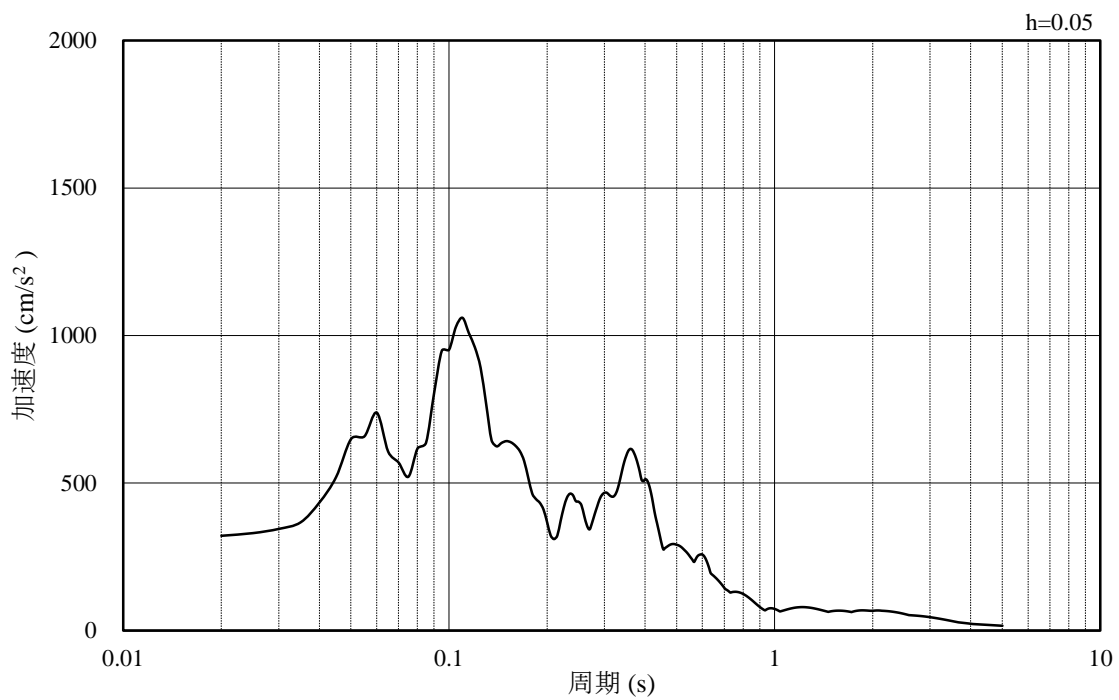


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-35 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース①) (水平成分: S_s-N1)

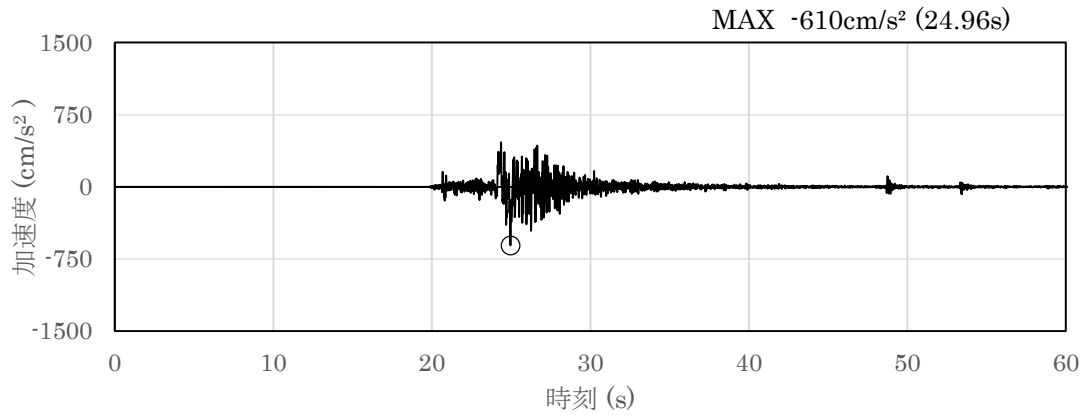


(a) 加速度時刻歴波形

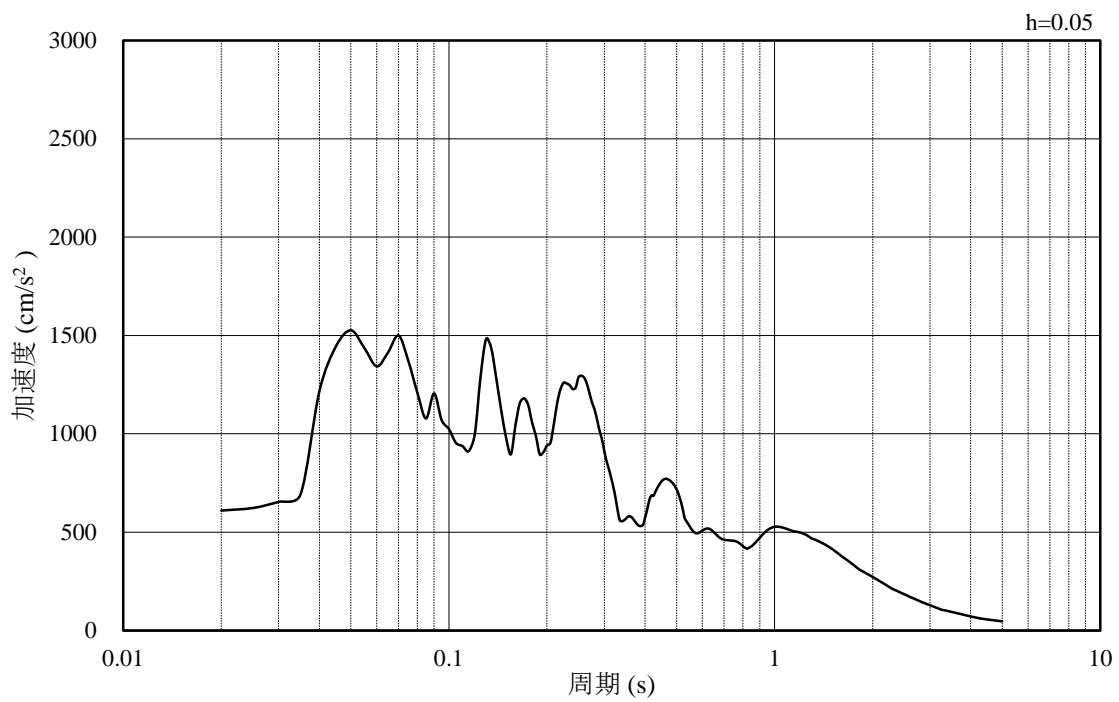


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-36 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース①) (鉛直成分: S s - N 1)

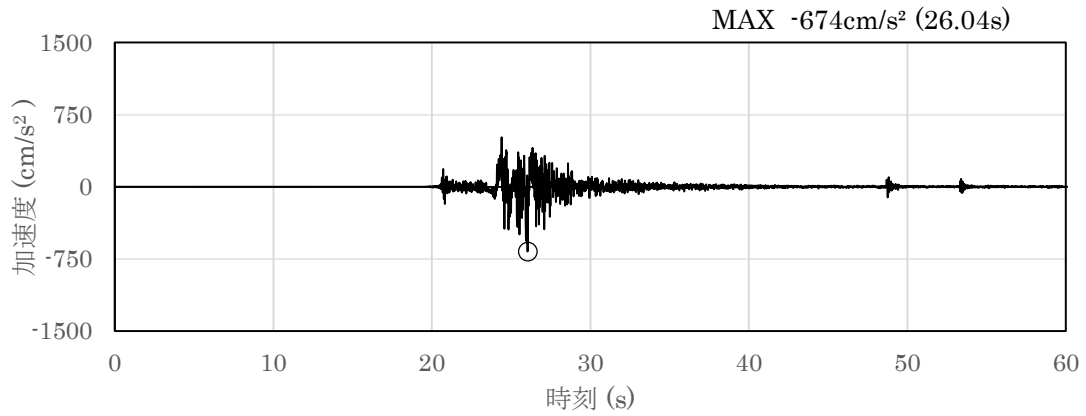


(a) 加速度時刻歴波形

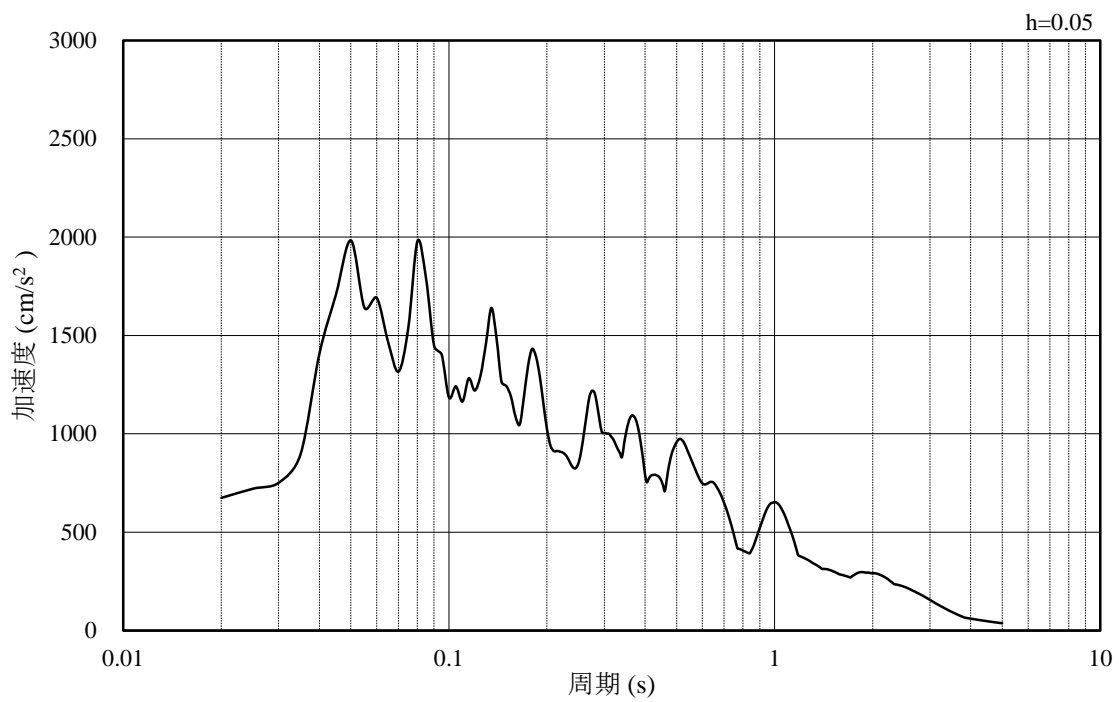


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-37 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
 (解析ケース①) (水平成分: S s - N 2 (N S))

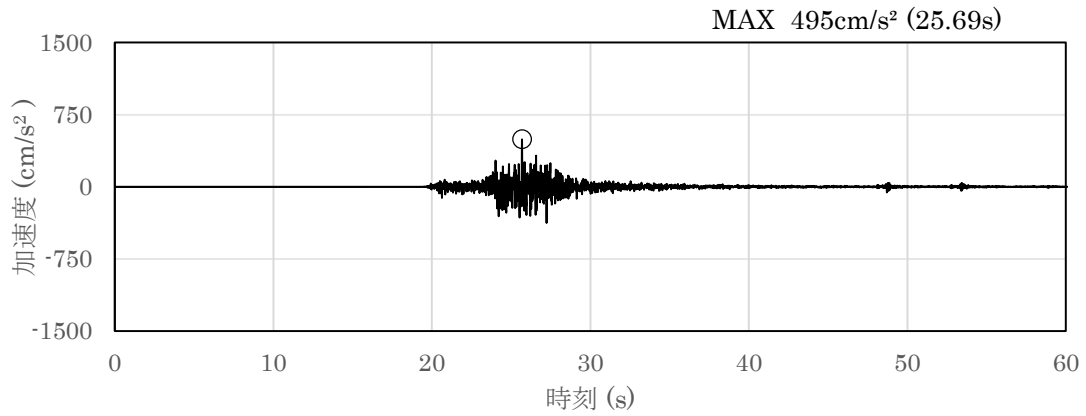


(a) 加速度時刻歴波形

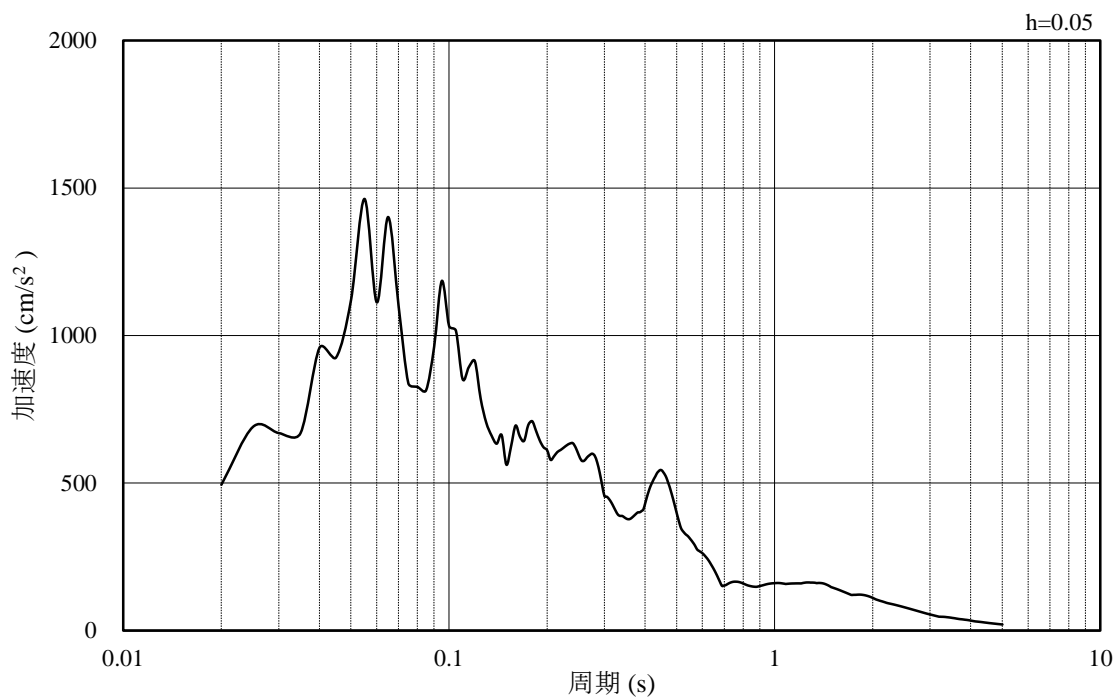


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-38 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース①) (水平成分: S s - N 2 (EW))

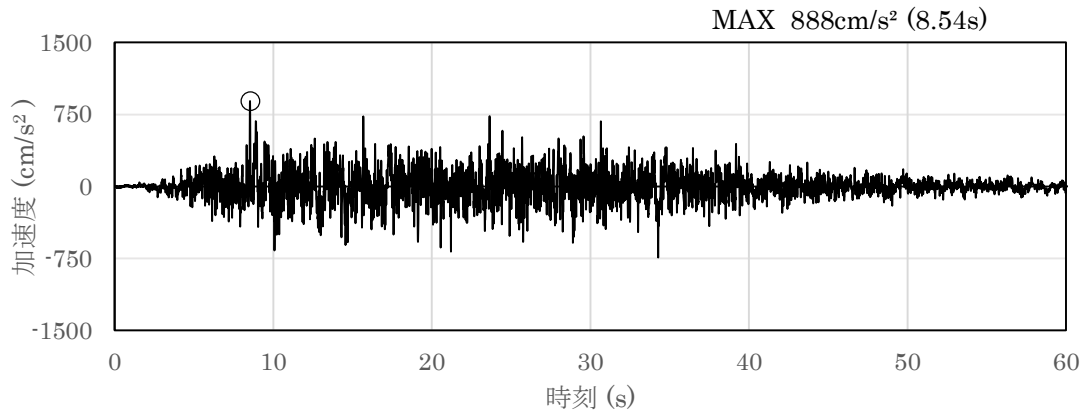


(a) 加速度時刻歴波形

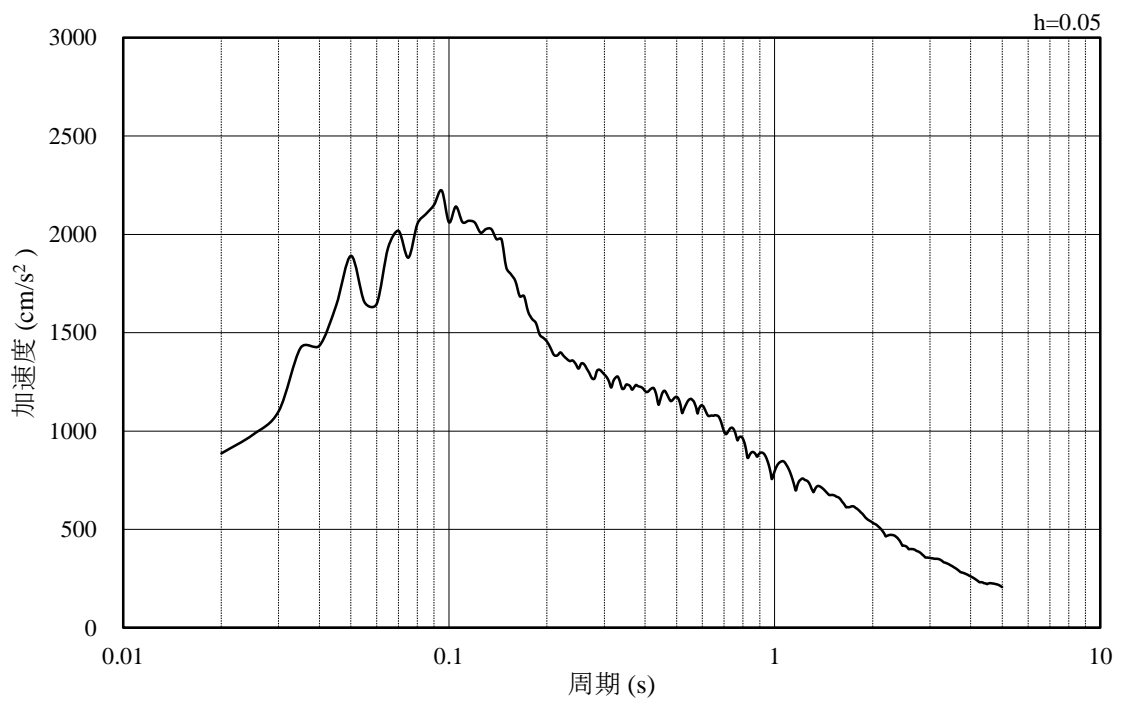


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-39 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース①) (鉛直成分: S_s-N2)

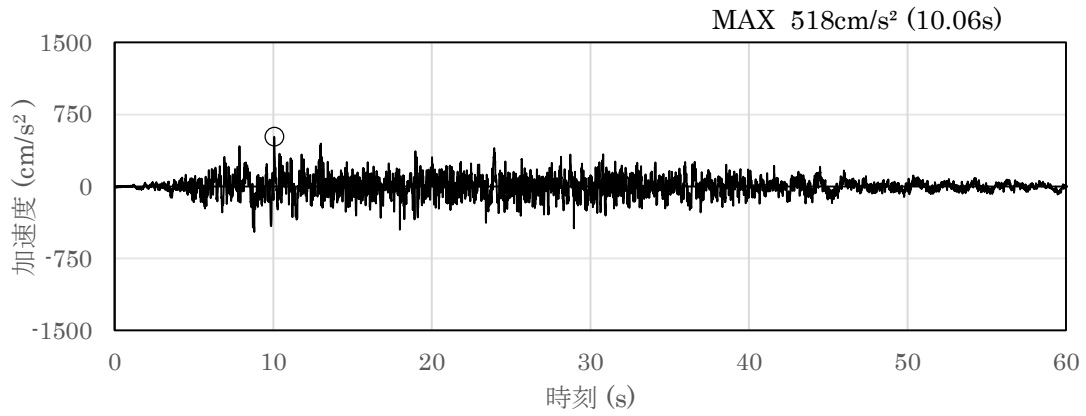


(a) 加速度時刻歴波形

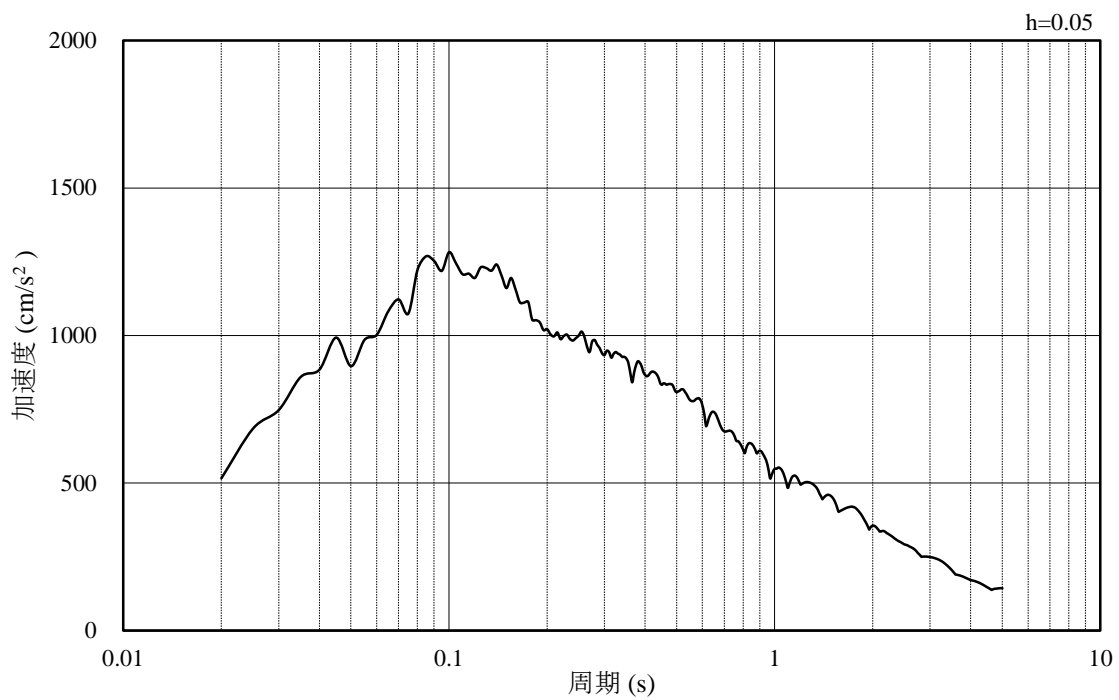


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-40 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース②) (水平成分: S s - D)

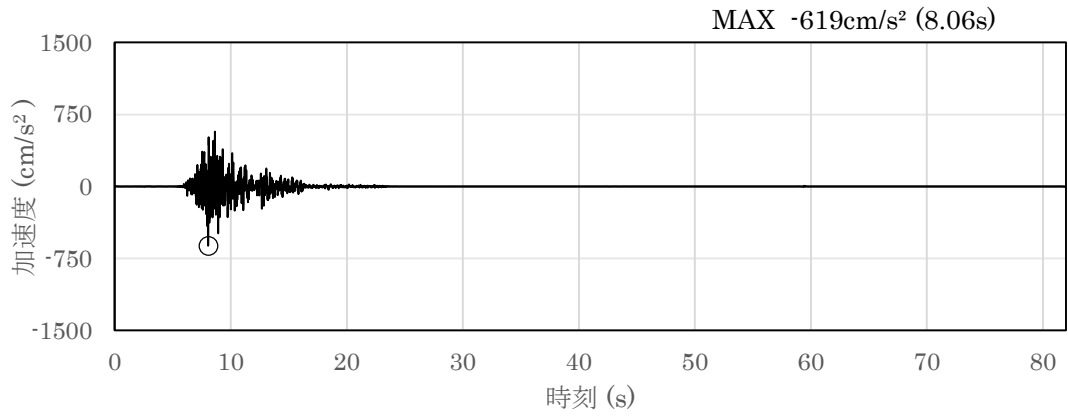


(a) 加速度時刻歴波形

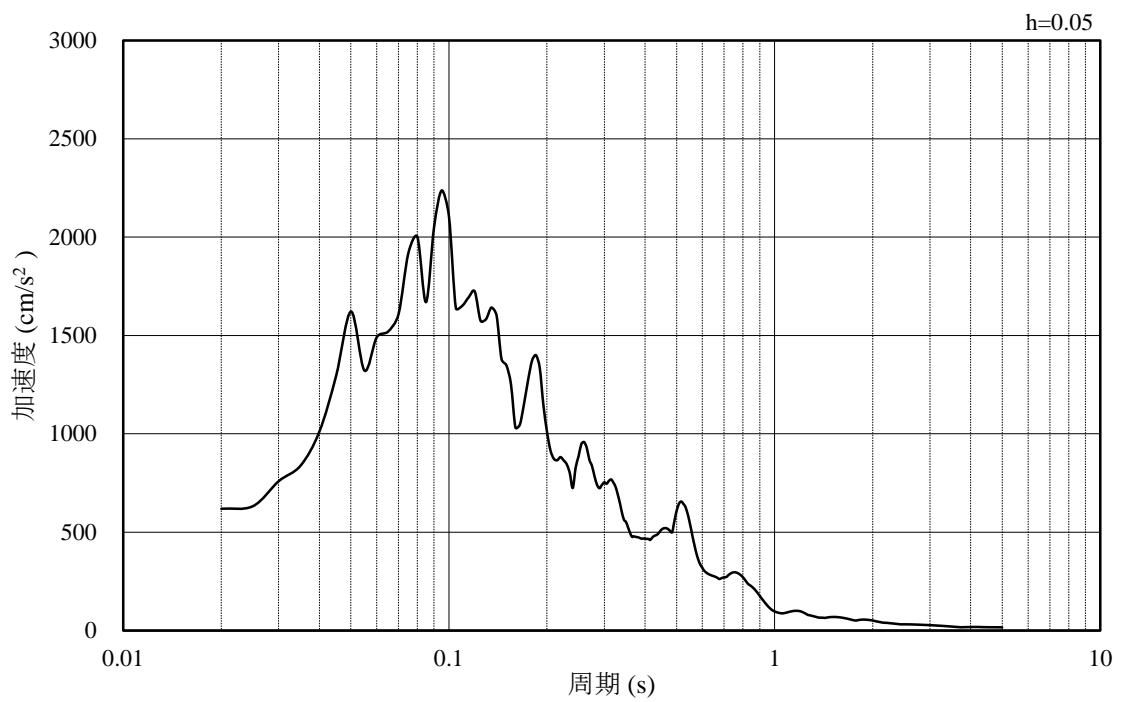


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-41 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース②) (鉛直成分: S s - D)

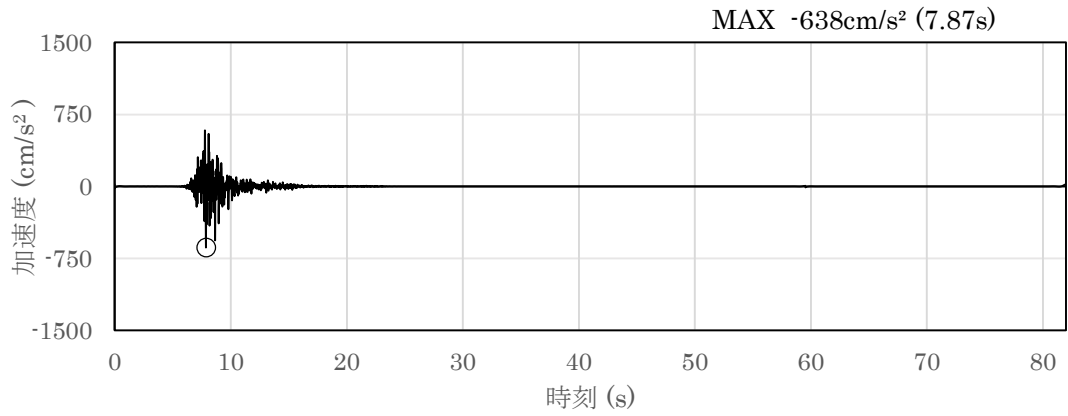


(a) 加速度時刻歴波形

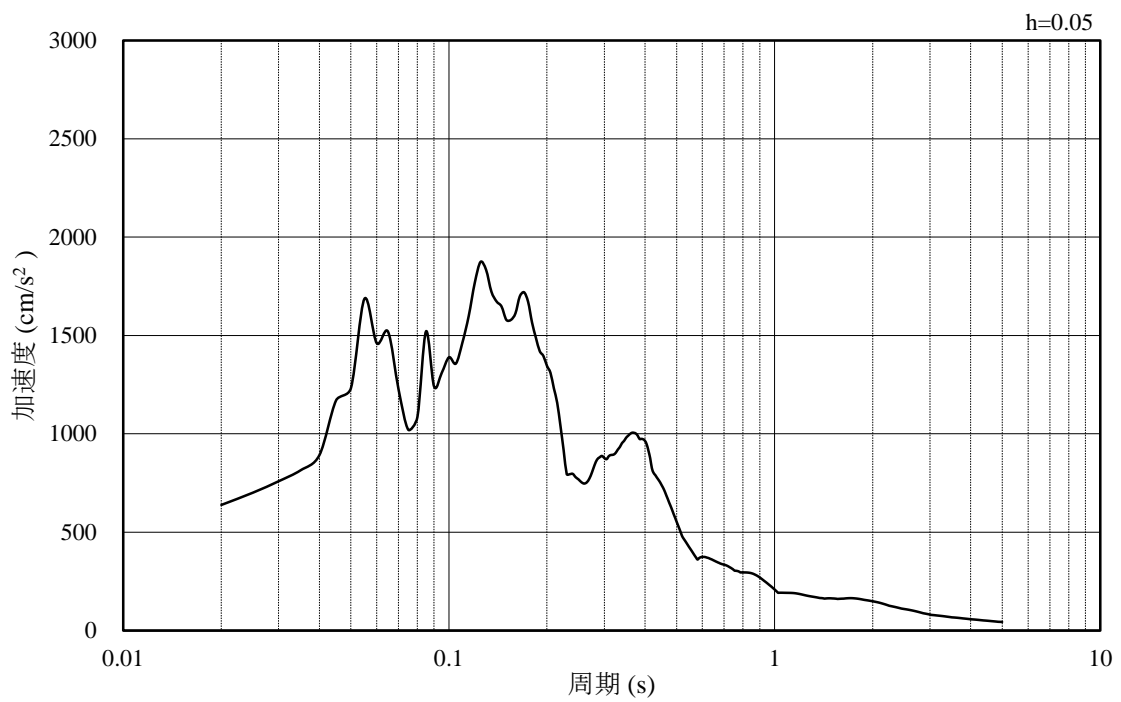


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-42 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
 (解析ケース②) (水平成分: S s - F 1 (N S))

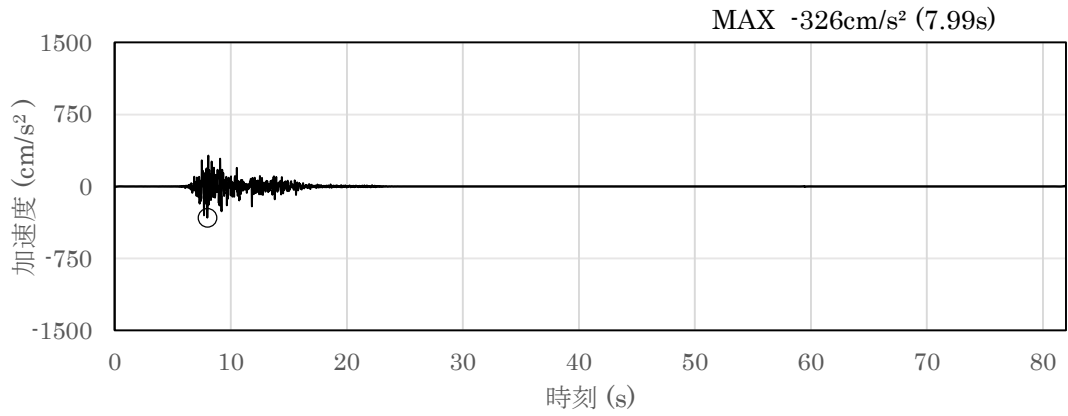


(a) 加速度時刻歴波形

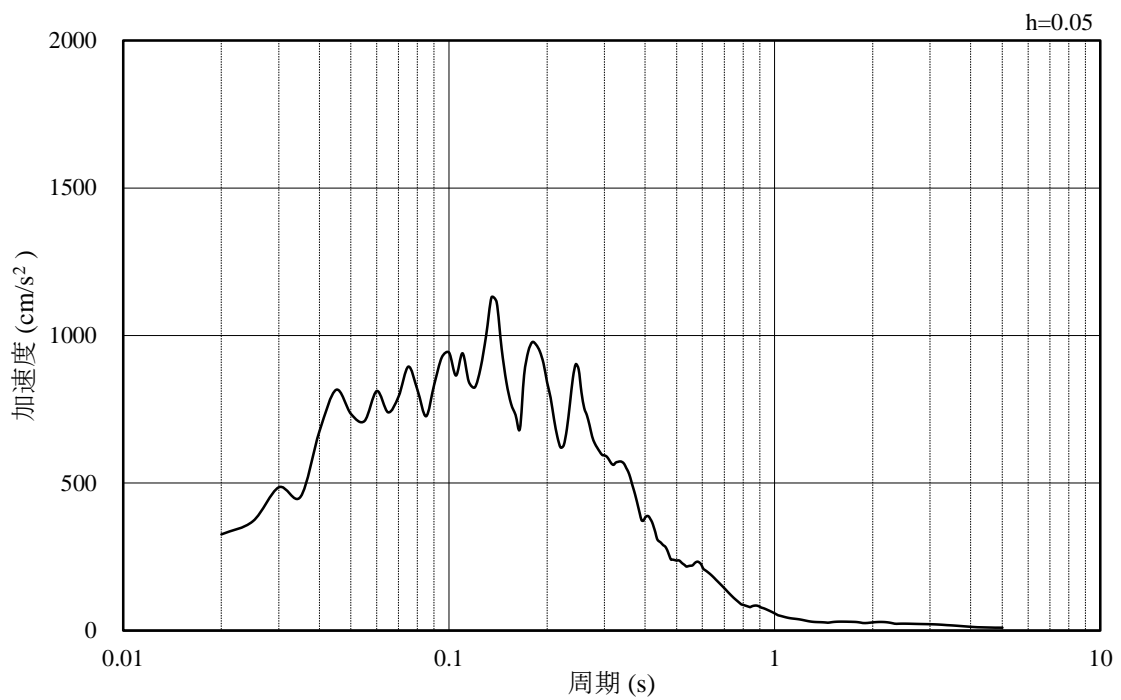


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-43 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース②) (水平成分: S s - F 1 (E W))

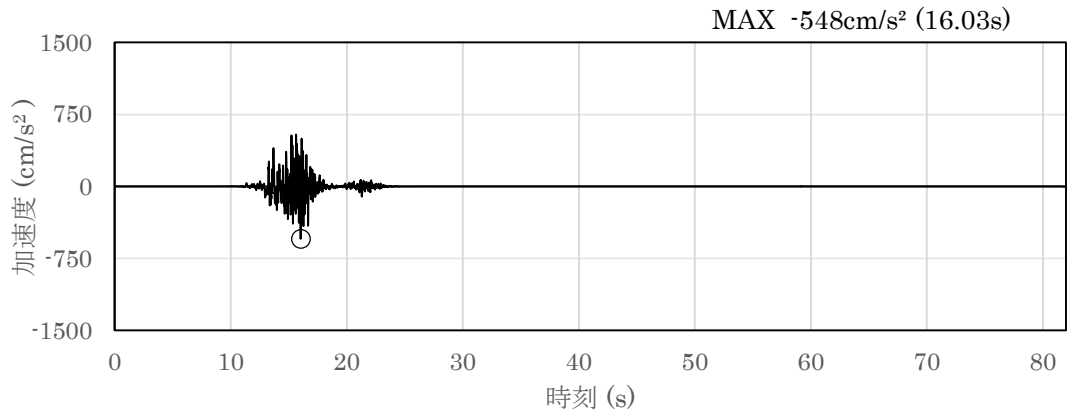


(a) 加速度時刻歴波形

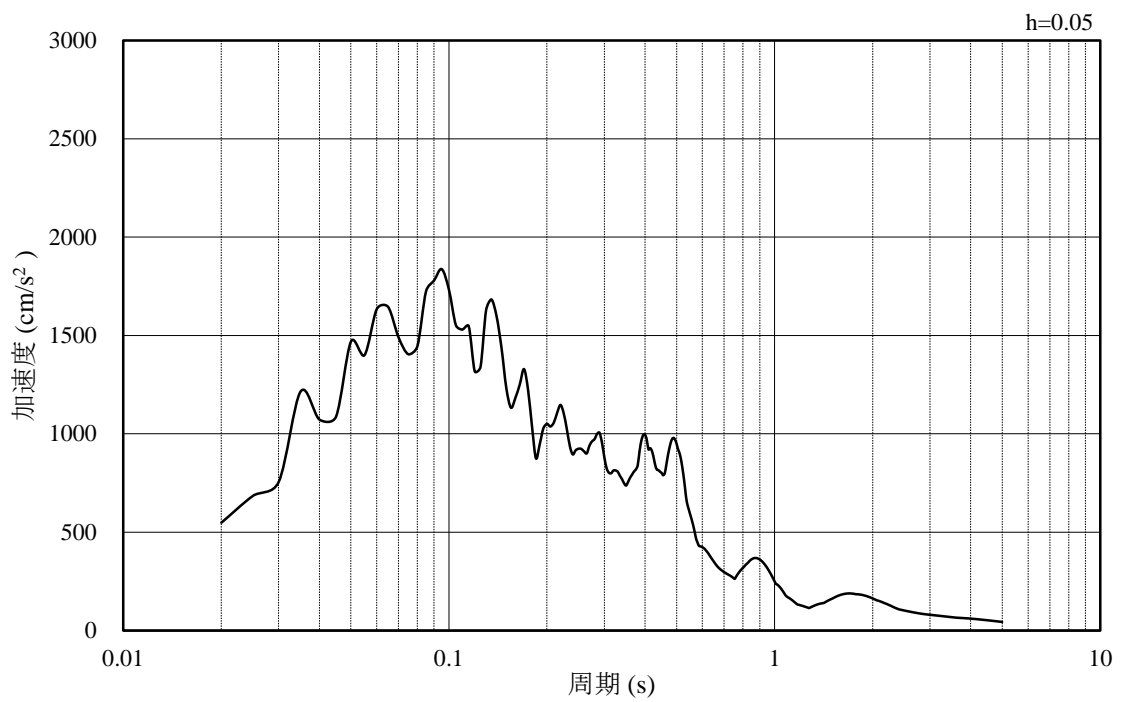


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-44 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース②) (鉛直成分: S s - F 1)

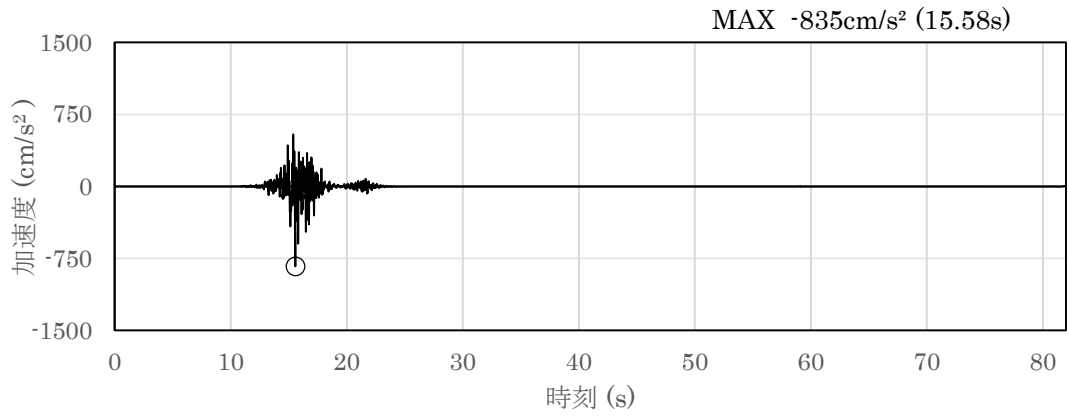


(a) 加速度時刻歴波形

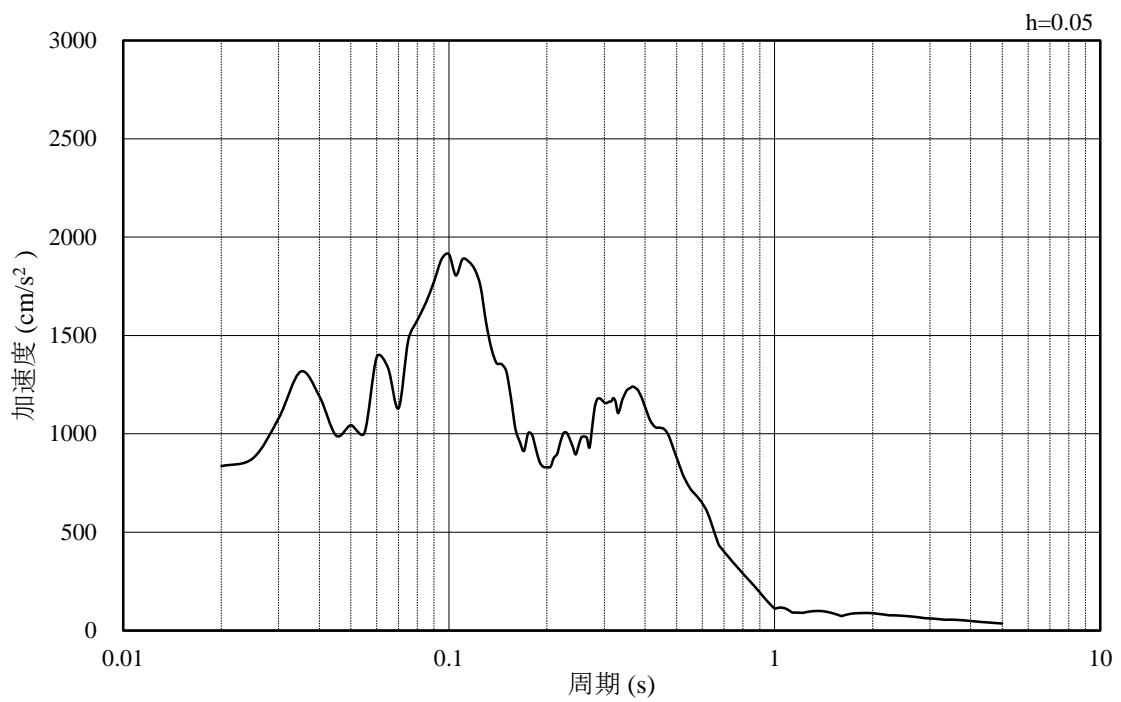


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-45 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース②) (水平成分: S s - F 2 (N S))

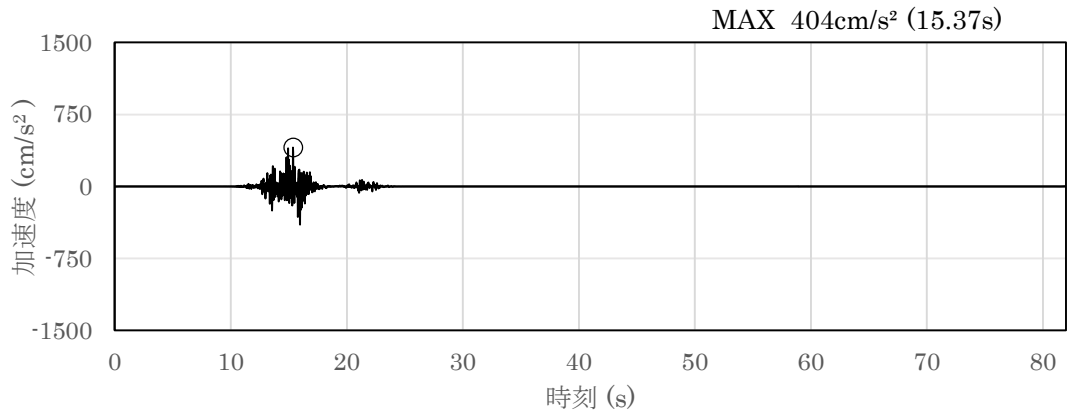


(a) 加速度時刻歴波形

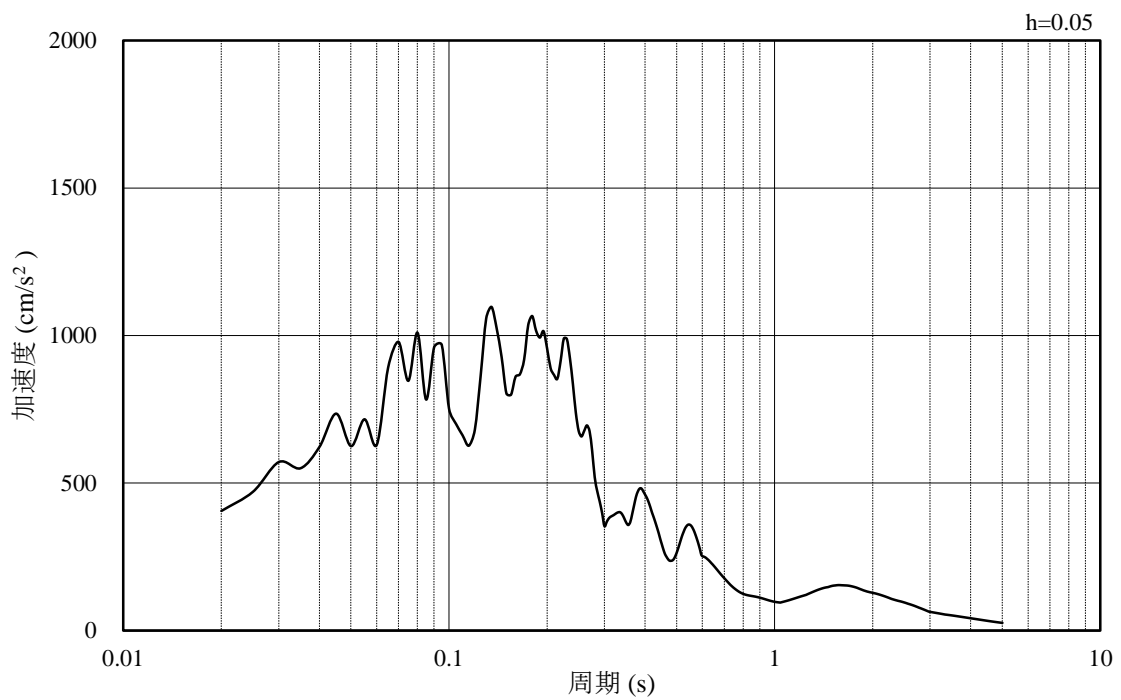


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-46 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース②) (水平成分: S s - F 2 (EW))

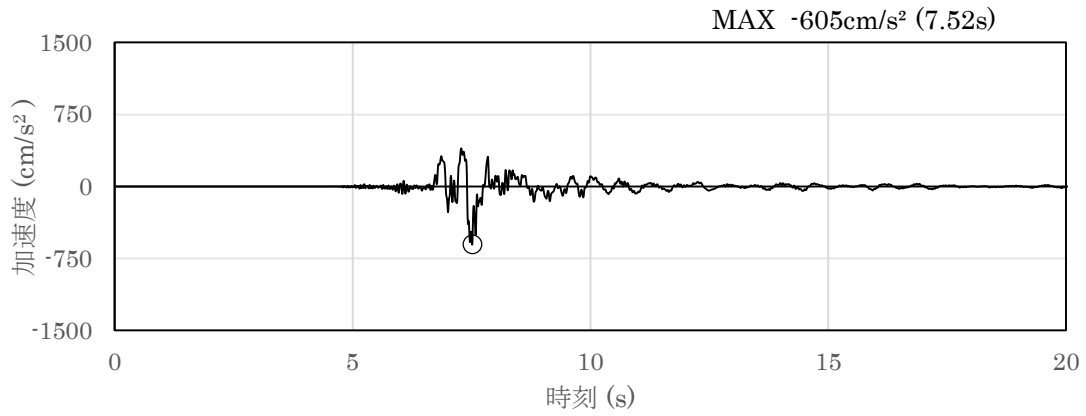


(a) 加速度時刻歴波形

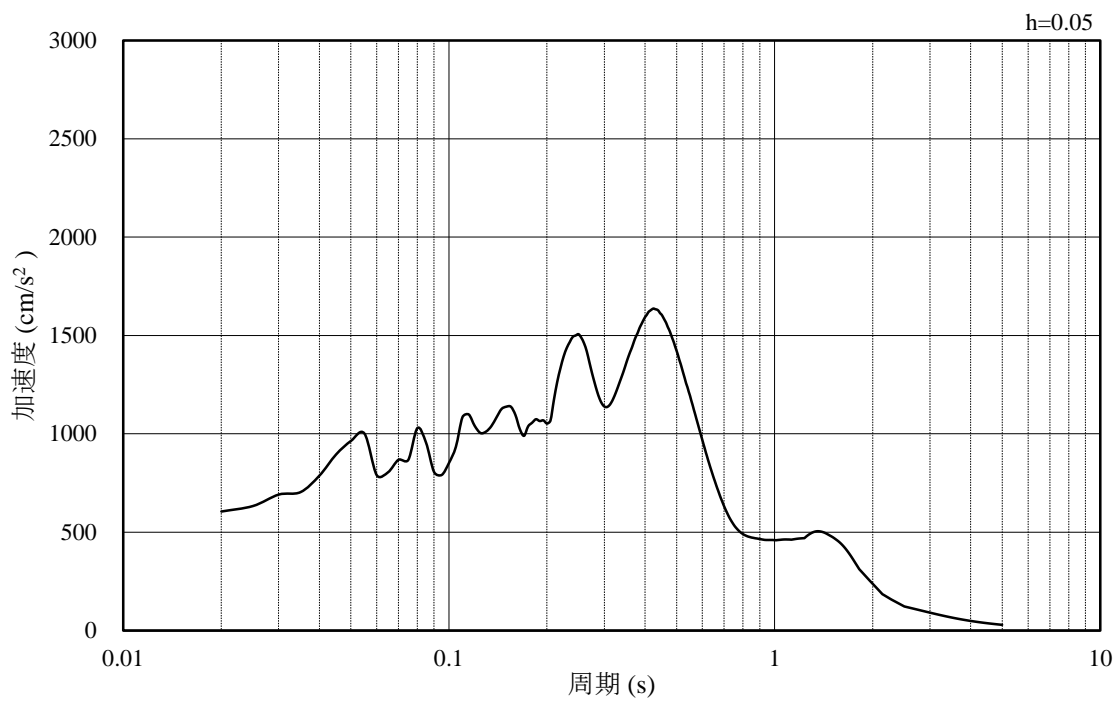


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-47 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース②) (鉛直成分: S_s-F2)

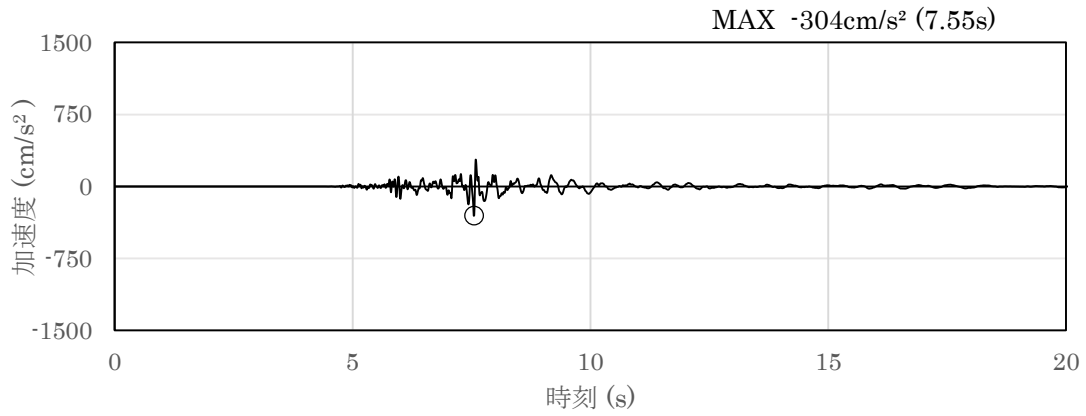


(a) 加速度時刻歴波形

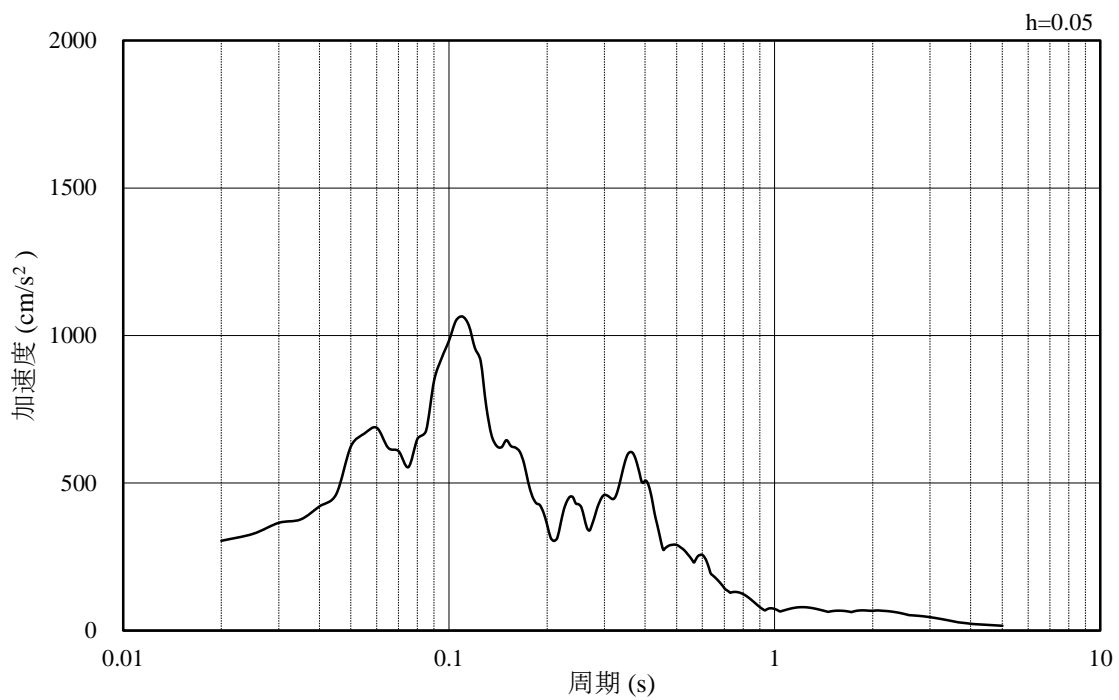


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-48 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース②) (水平成分: S s - N 1)

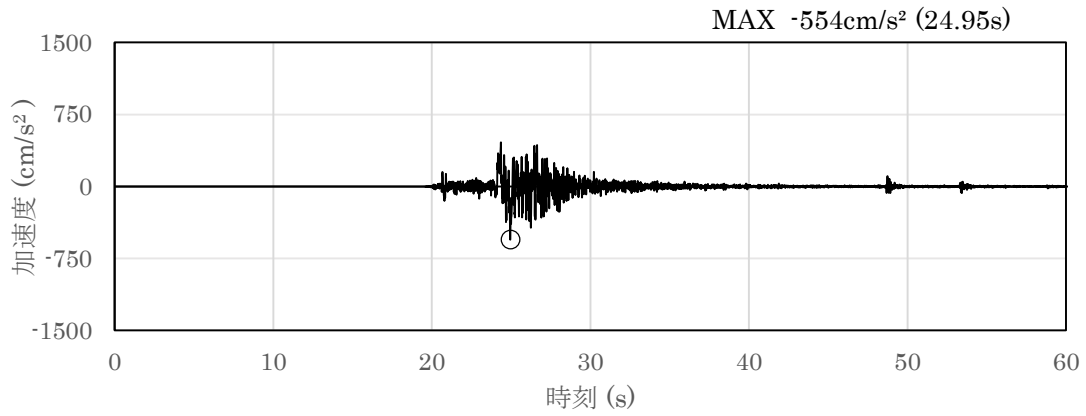


(a) 加速度時刻歴波形

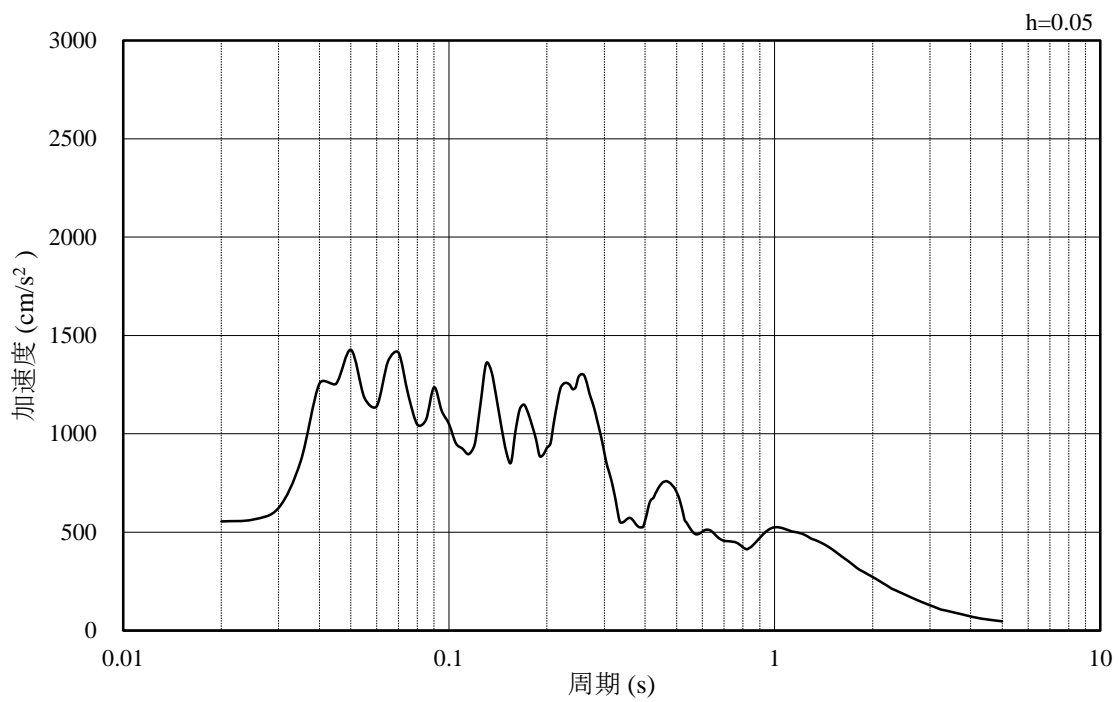


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-49 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース②) (鉛直成分: S s - N 1)

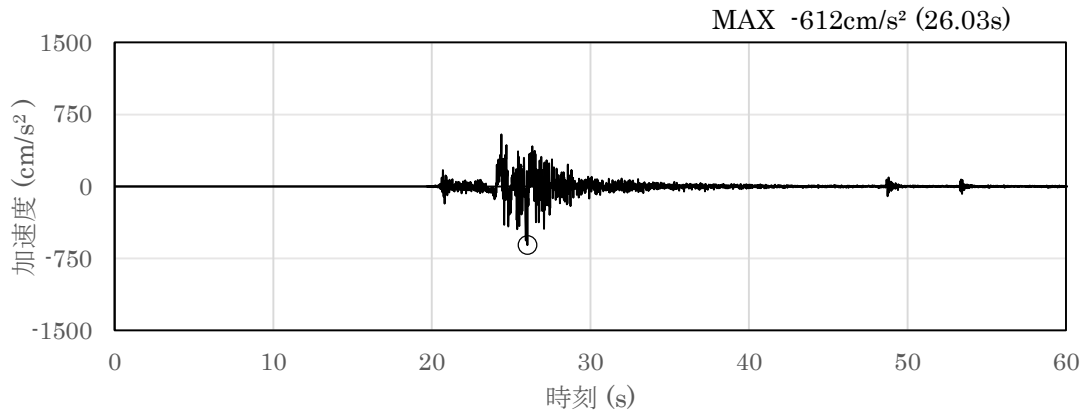


(a) 加速度時刻歴波形

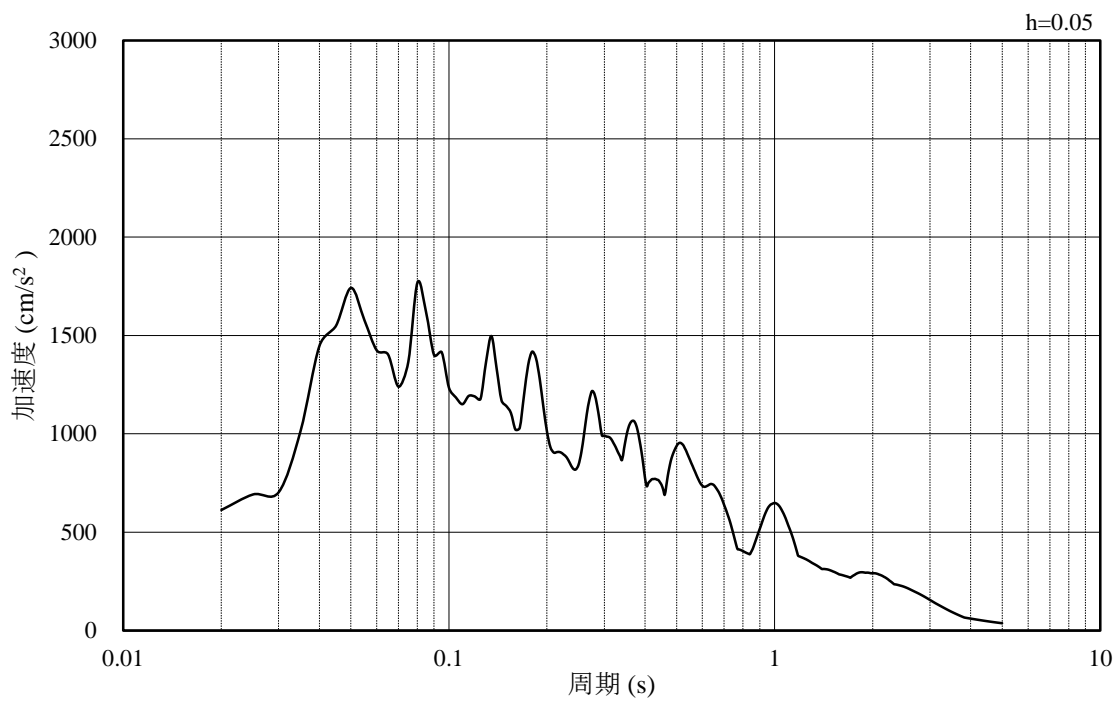


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-50 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース②) (水平成分: S s - N 2 (N S))

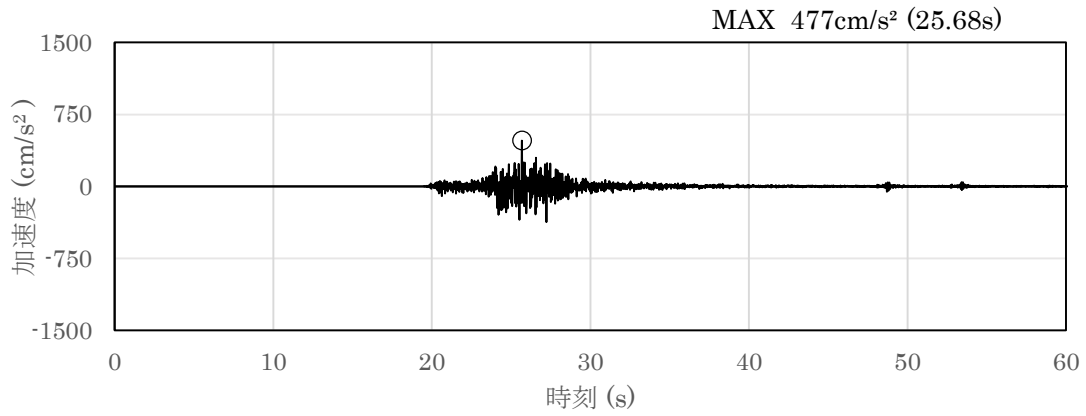


(a) 加速度時刻歴波形

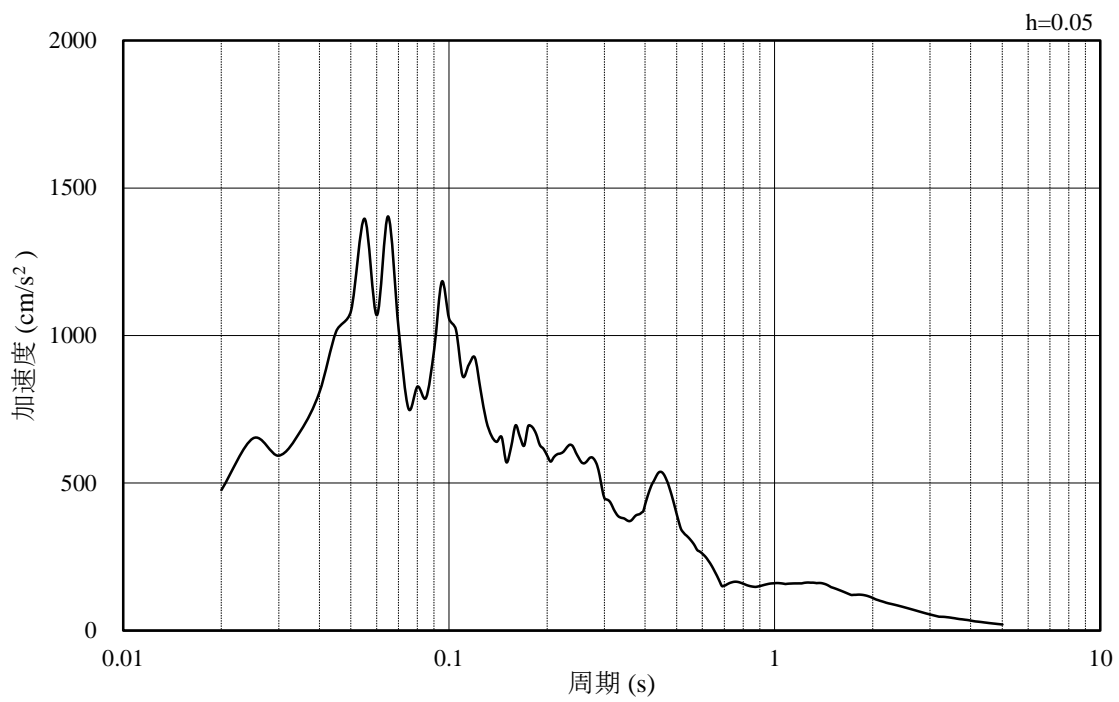


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-51 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース②) (水平成分: S s - N 2 (EW))

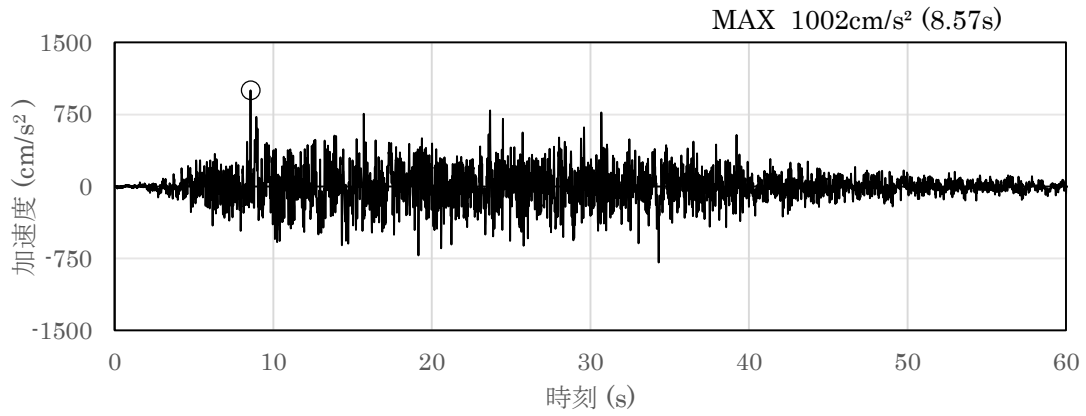


(a) 加速度時刻歴波形

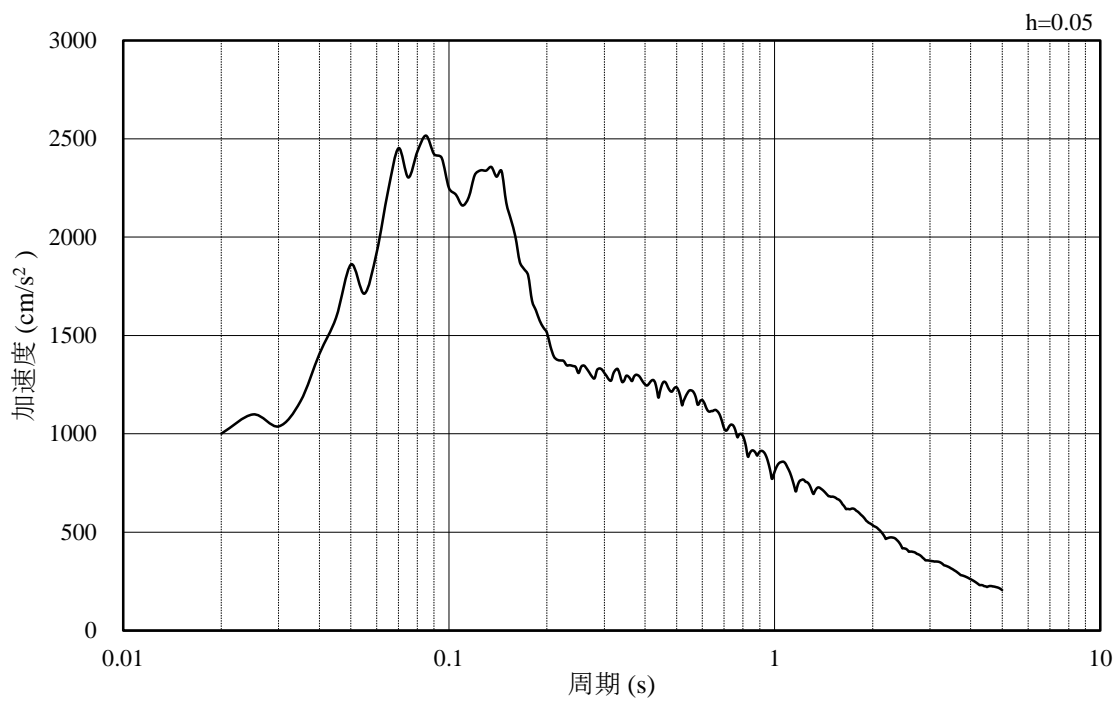


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-52 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース②) (鉛直成分: S_s-N₂)

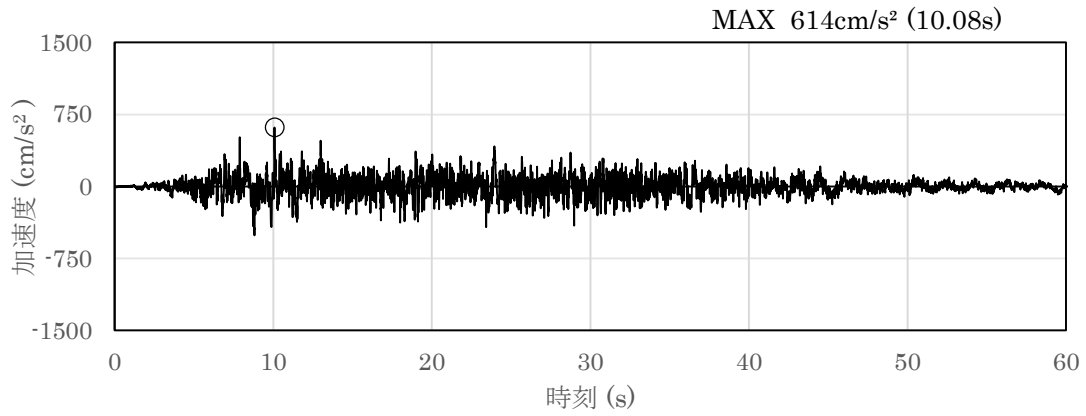


(a) 加速度時刻歴波形

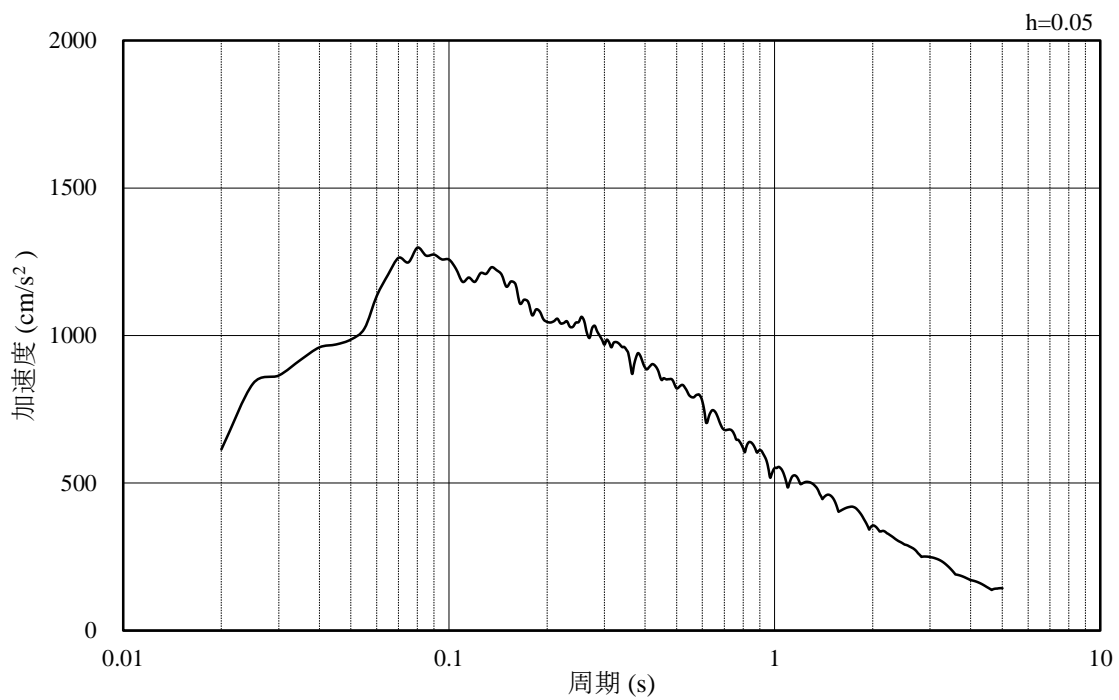


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-53 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース③) (水平成分: S s - D)

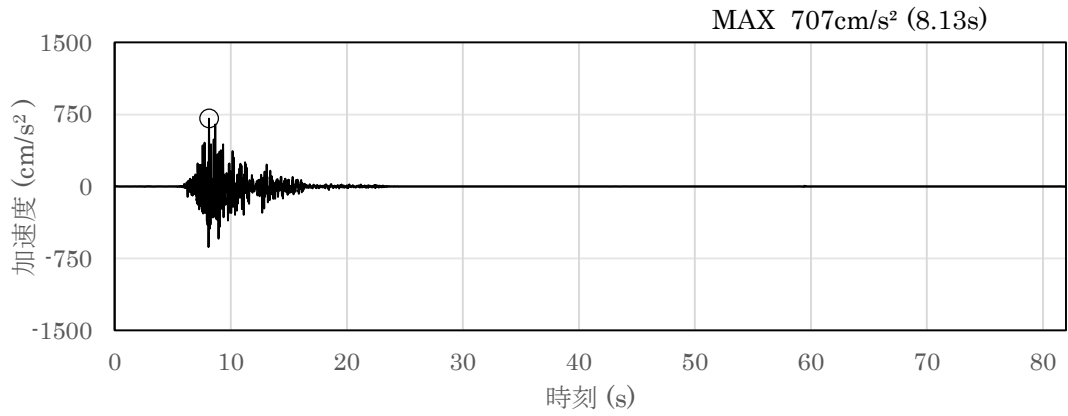


(a) 加速度時刻歴波形

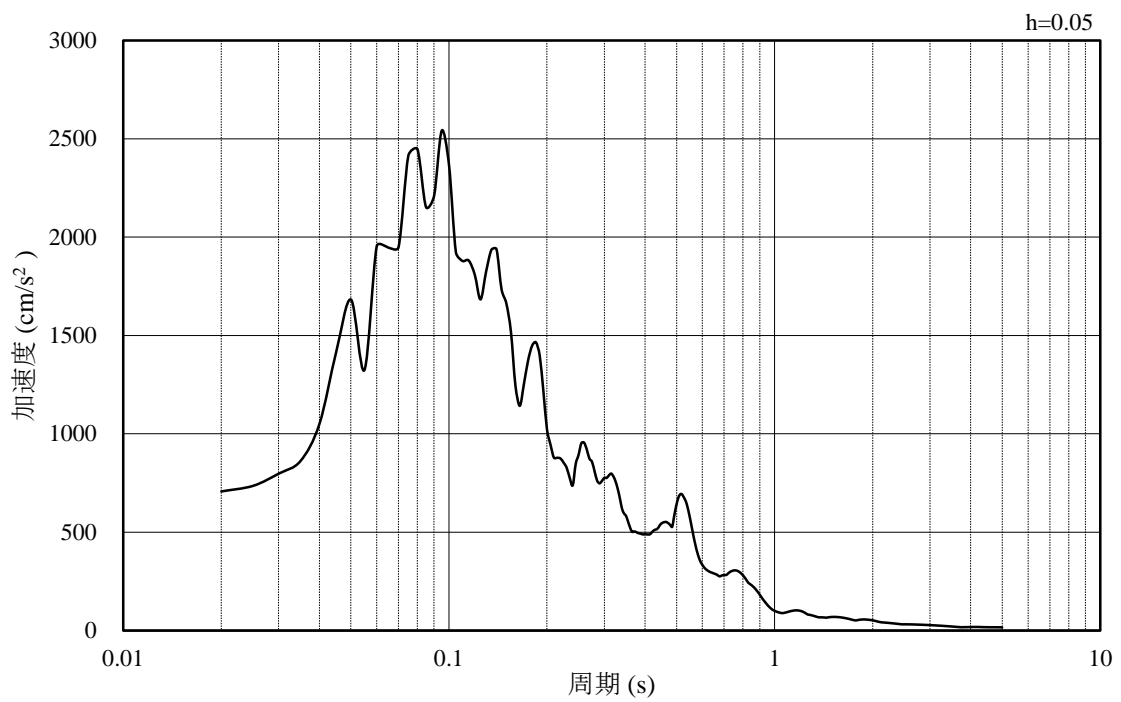


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-54 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース③) (鉛直成分: S s - D)

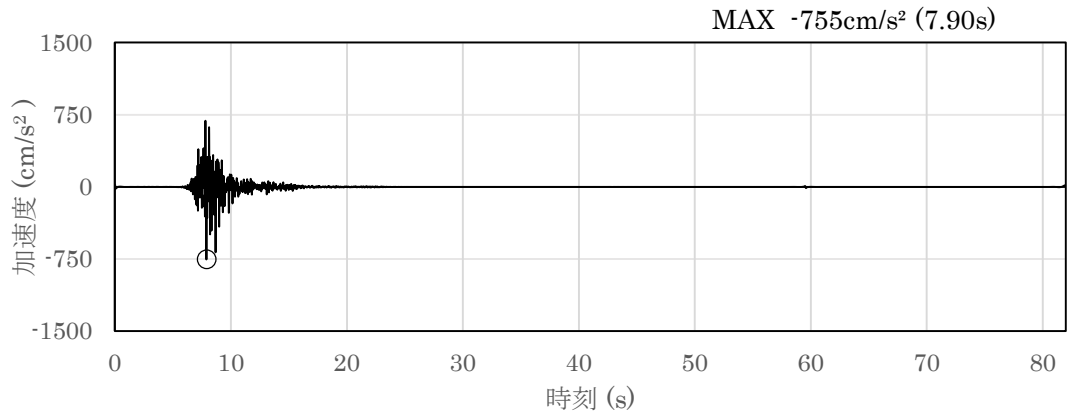


(a) 加速度時刻歴波形

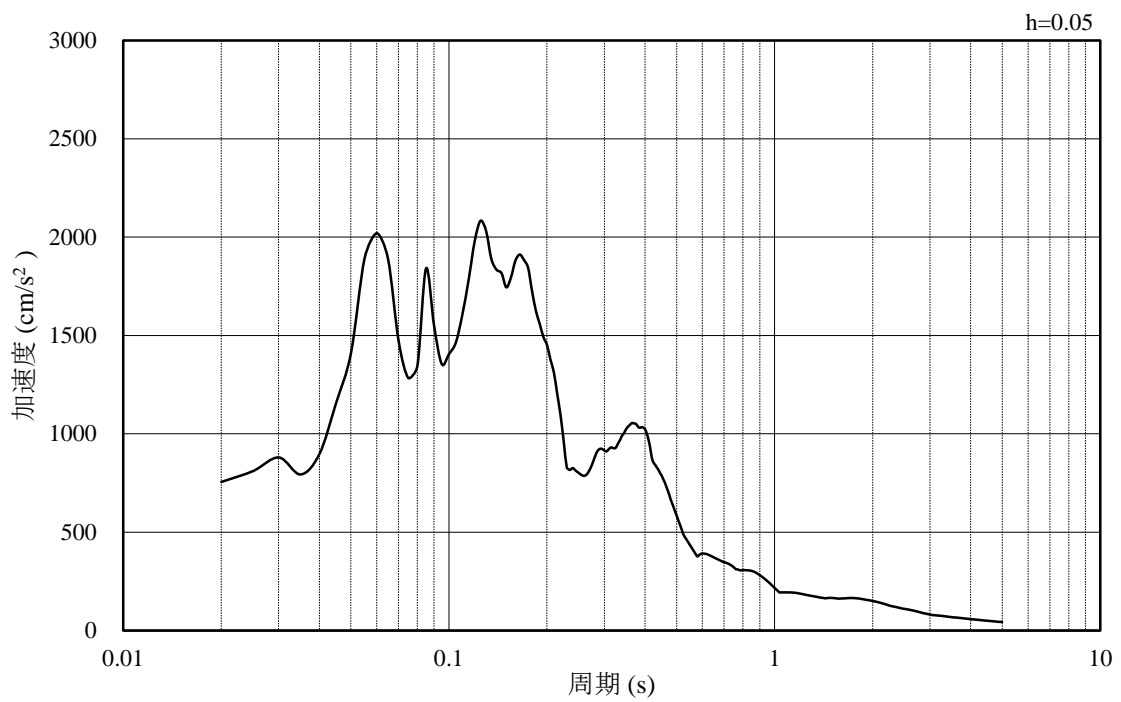


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-55 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース③) (水平成分: S s - F 1 (N S))

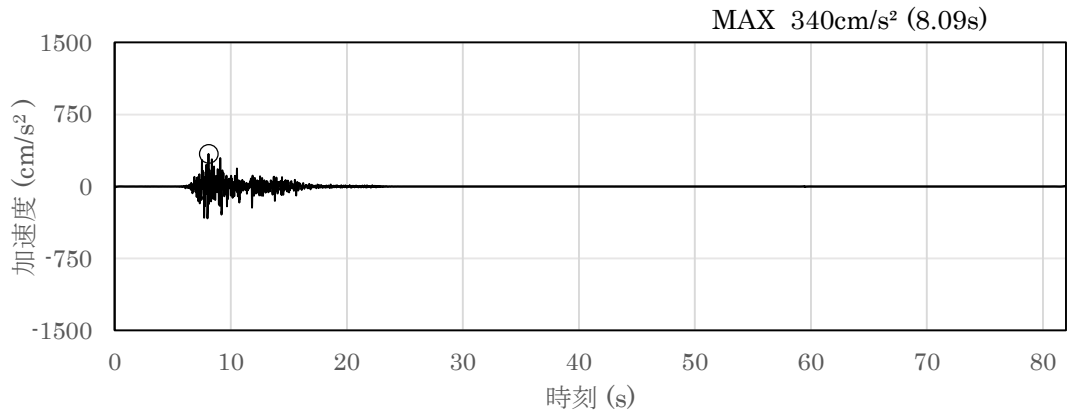


(a) 加速度時刻歴波形

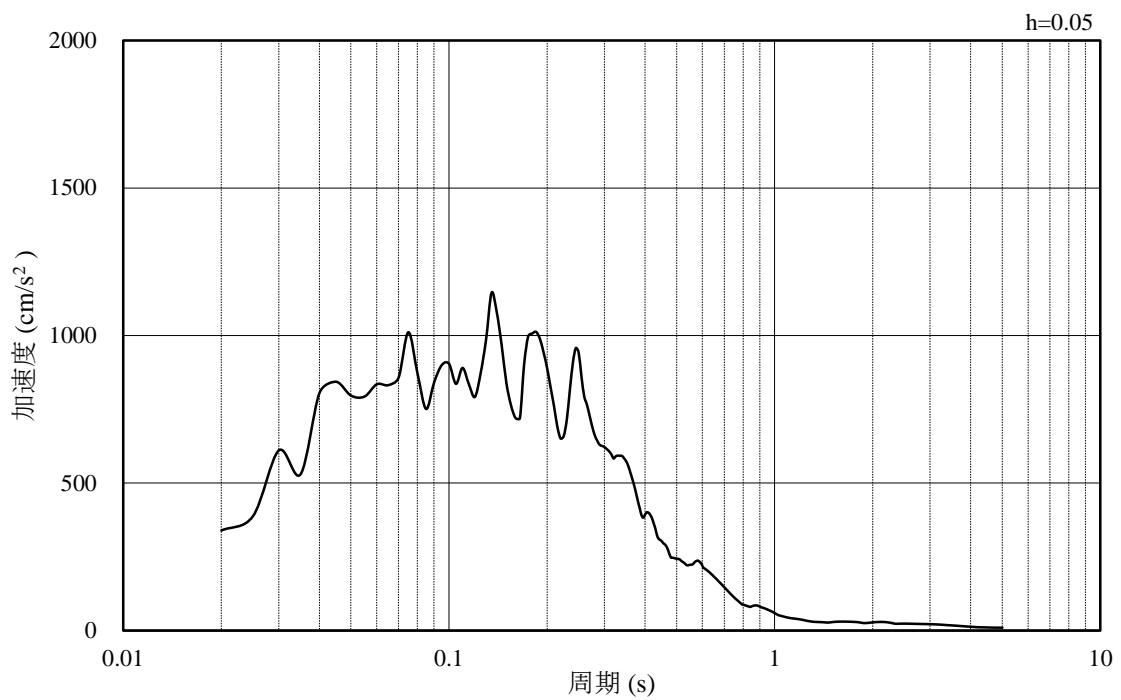


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-56 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース③) (水平成分: S s - F 1 (EW))

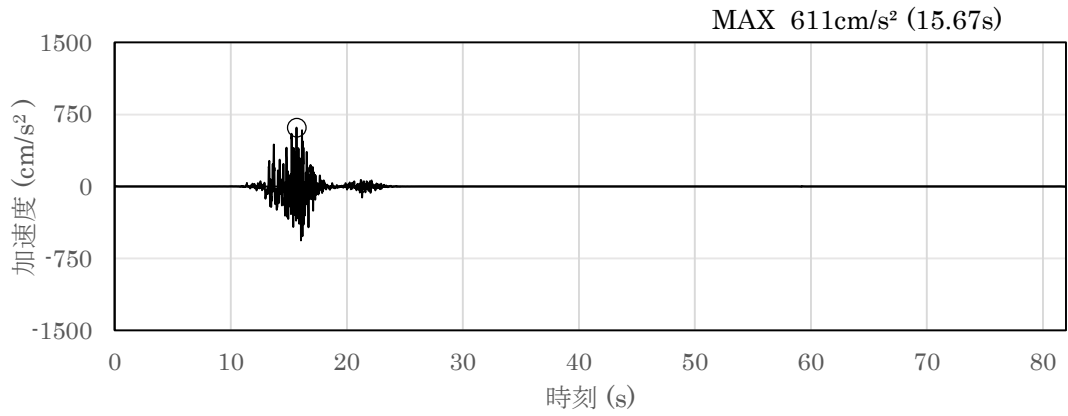


(a) 加速度時刻歴波形

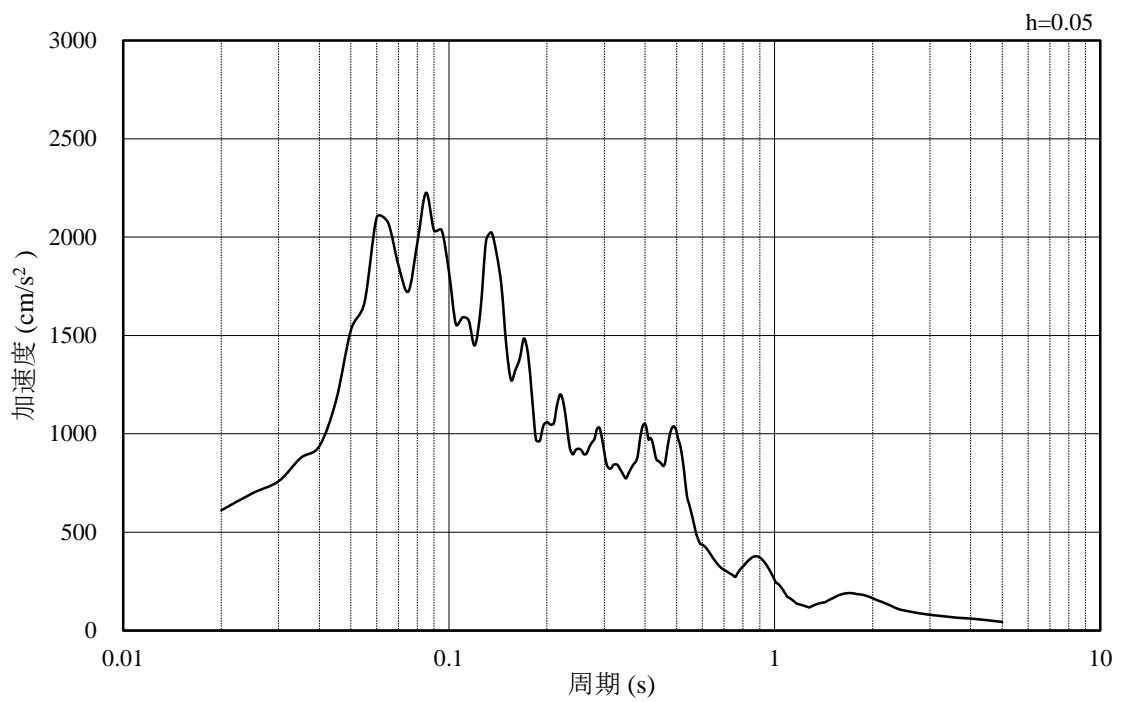


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-57 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース③) (鉛直成分：S s - F 1)

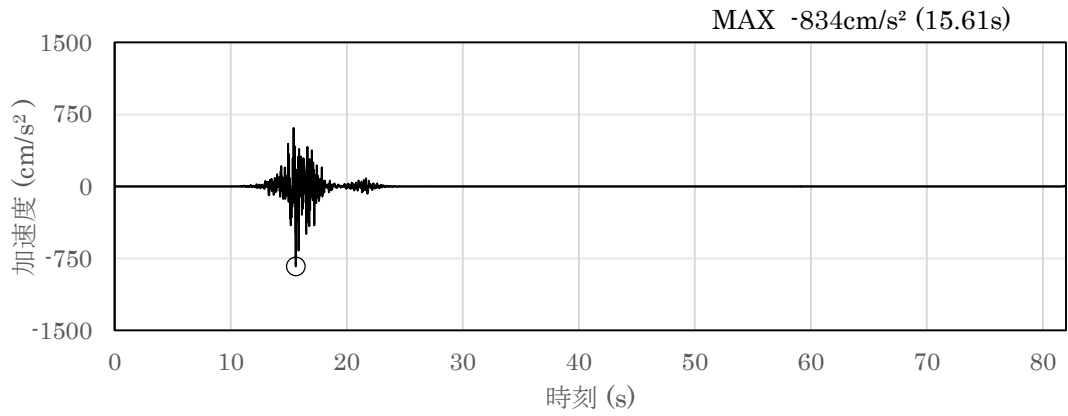


(a) 加速度時刻歴波形

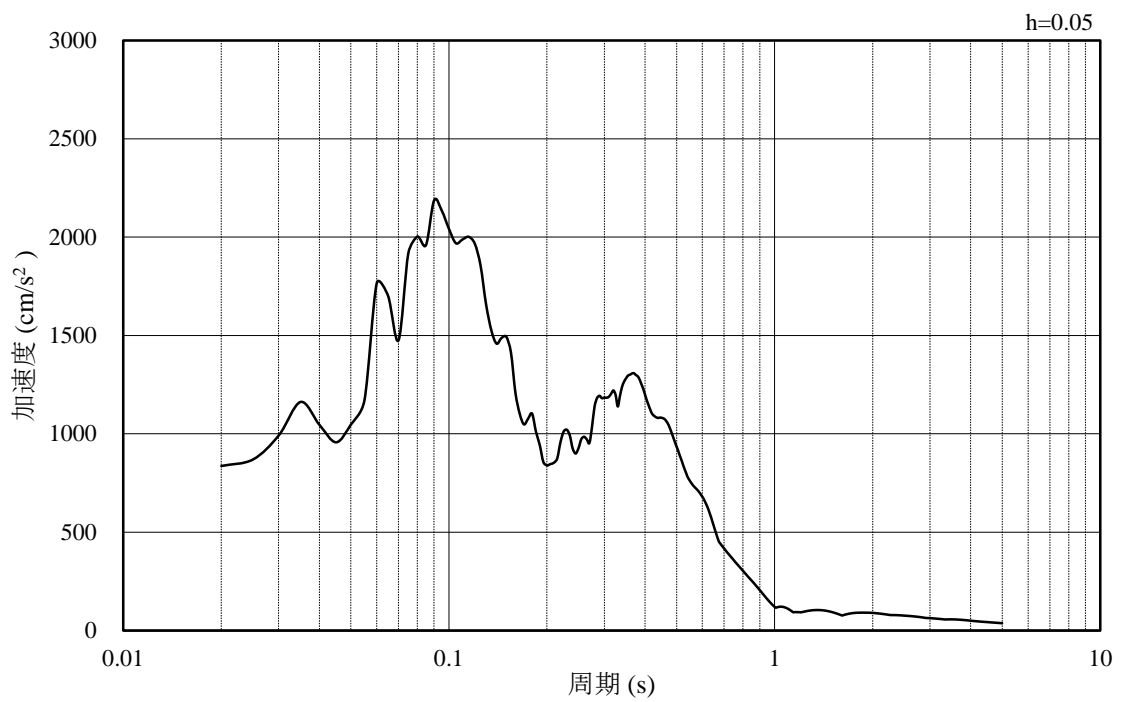


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-58 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース③) (水平成分: S s - F 2 (N S))

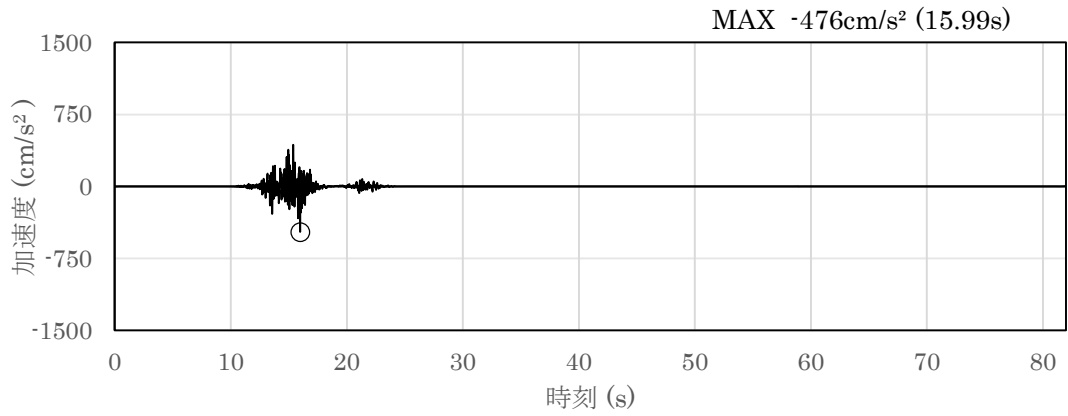


(a) 加速度時刻歴波形

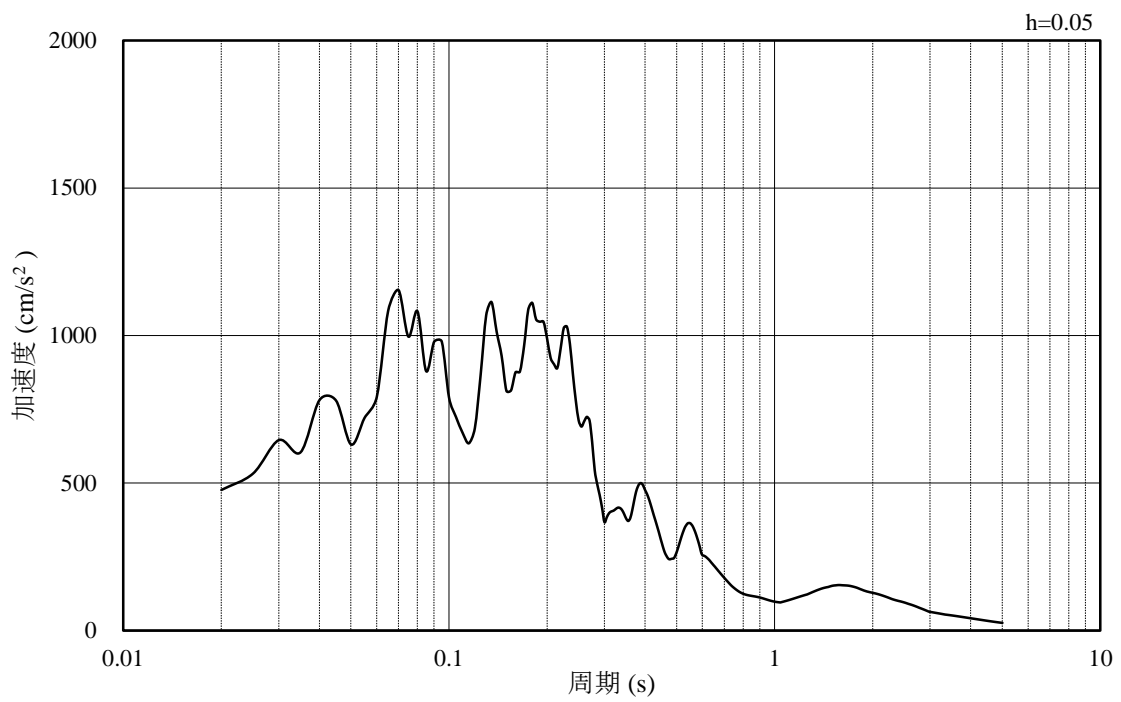


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-59 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
 (解析ケース③) (水平成分: S s - F 2 (E W))

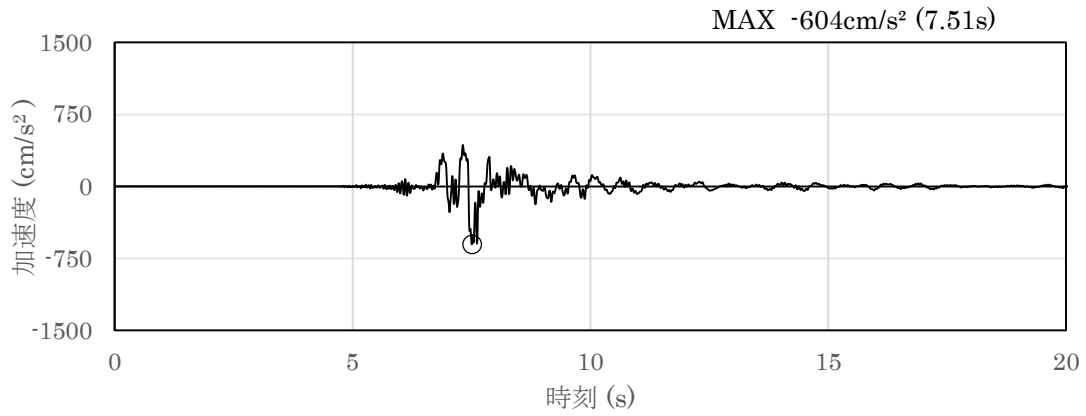


(a) 加速度時刻歴波形

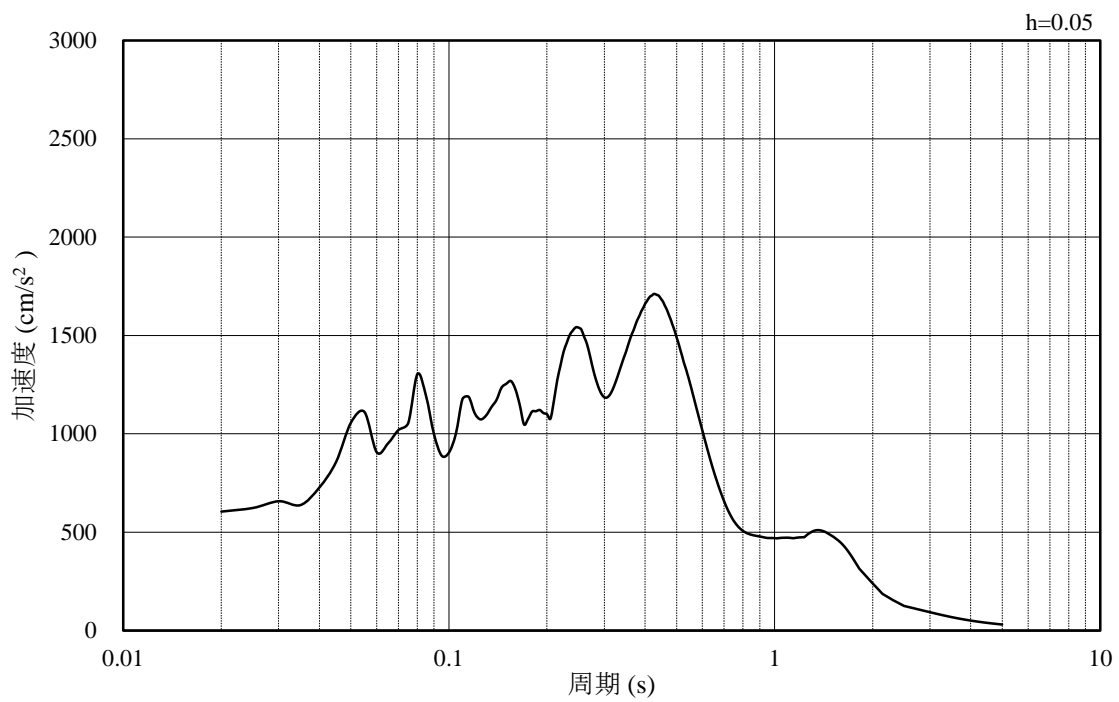


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-60 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース③) (鉛直成分: S s - F 2)

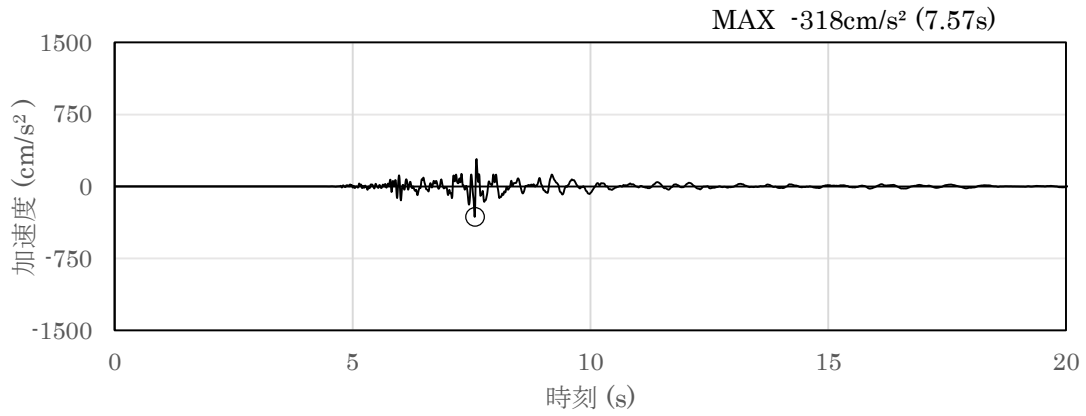


(a) 加速度時刻歴波形

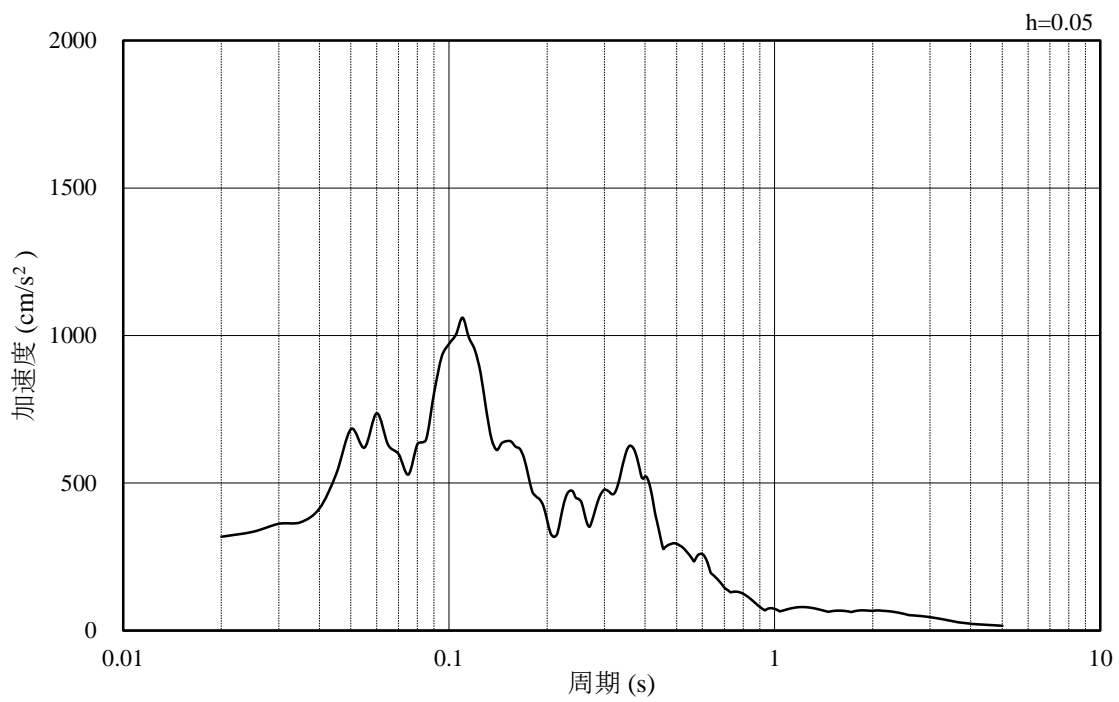


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-61 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース③) (水平成分: S s - N 1)

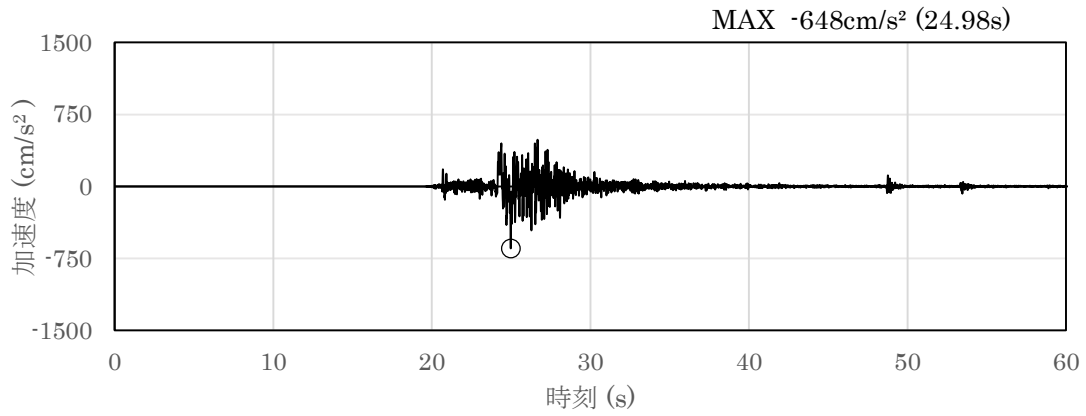


(a) 加速度時刻歴波形

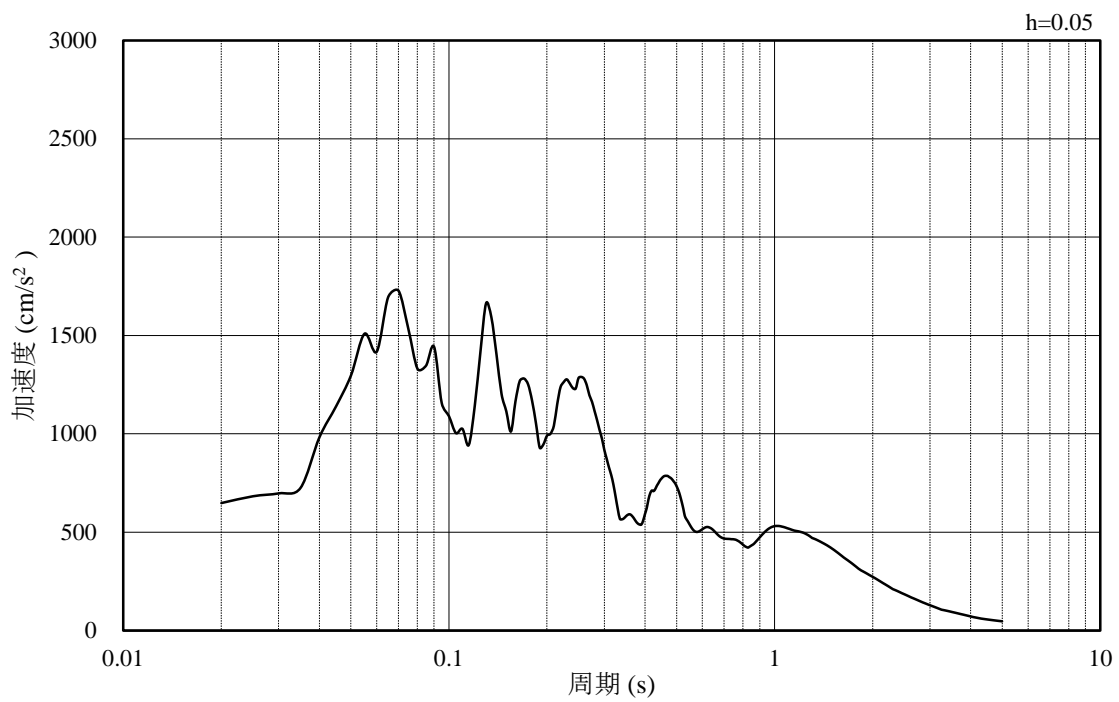


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-62 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース③) (鉛直成分: S s - N 1)

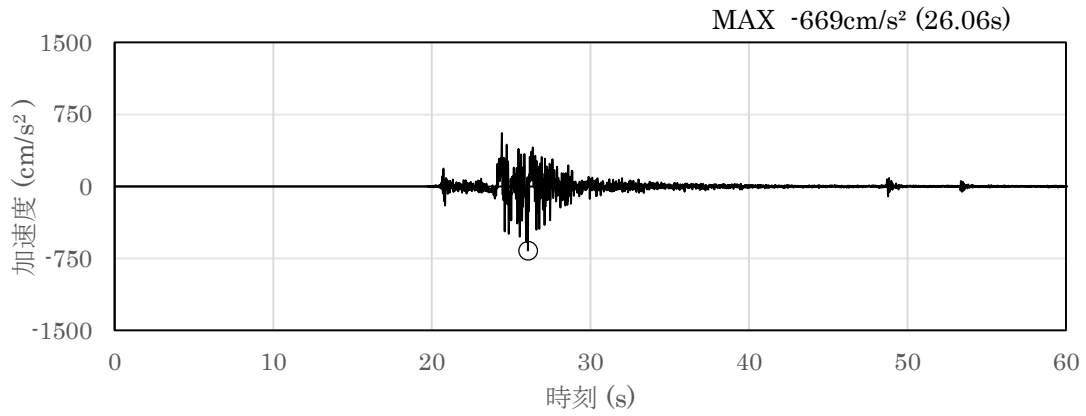


(a) 加速度時刻歴波形

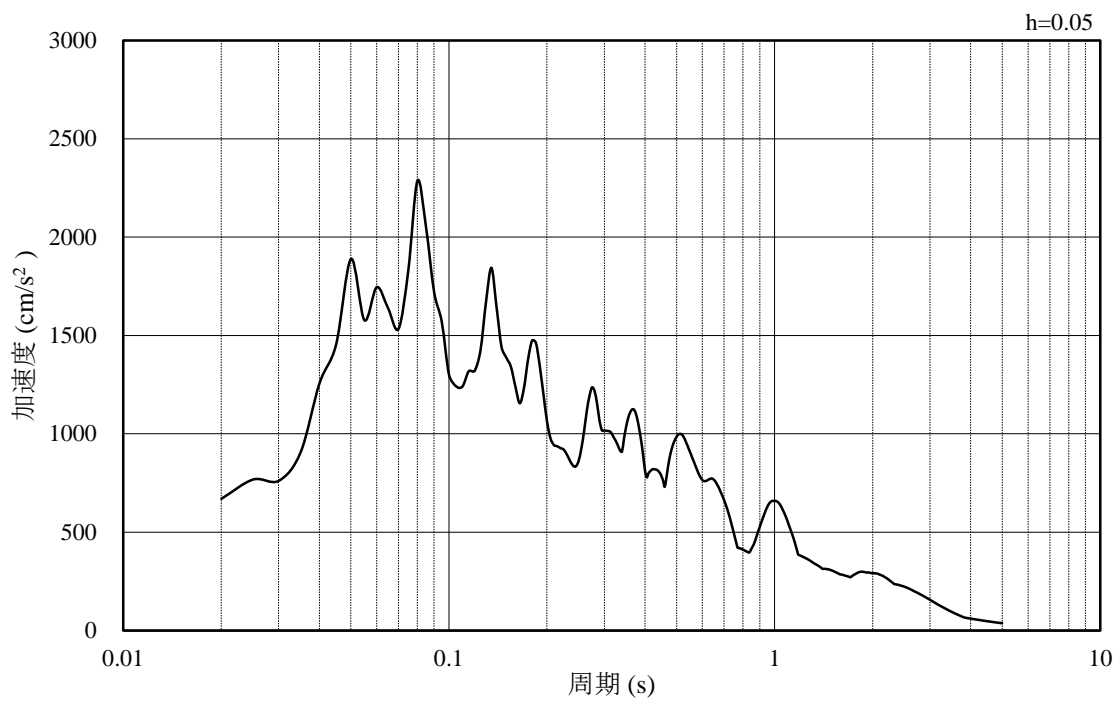


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-63 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース③) (水平成分: S_s-N₂ (NS))

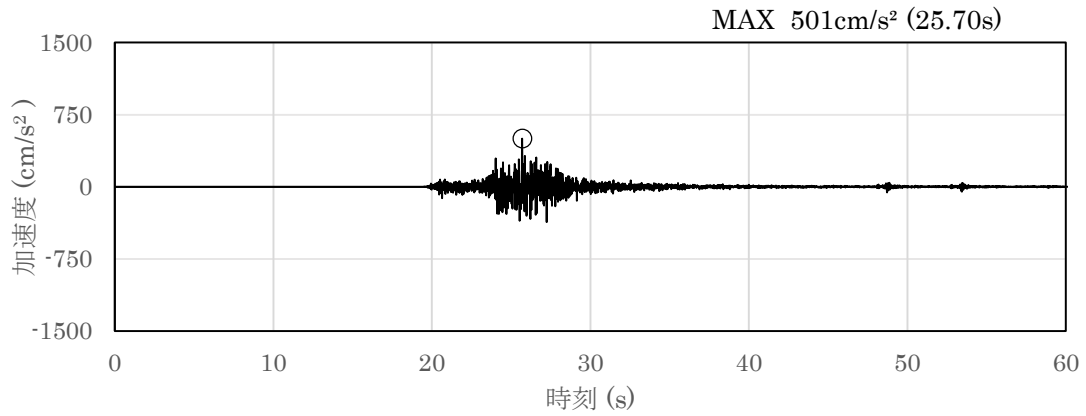


(a) 加速度時刻歴波形

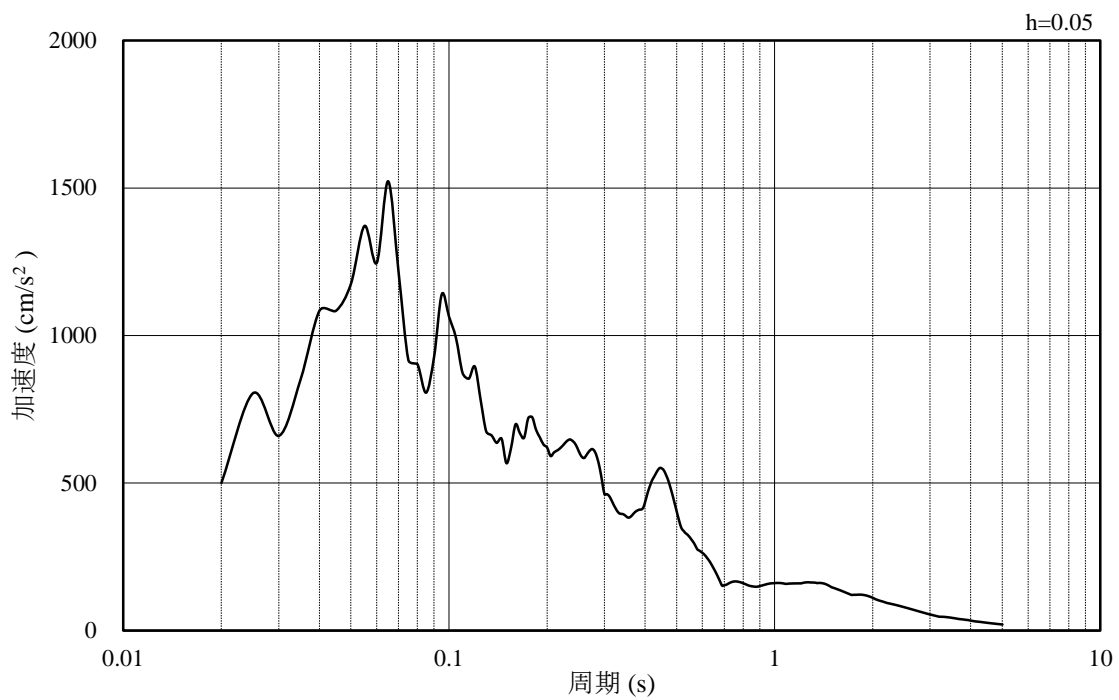


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-64 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース③) (水平成分: S s - N 2 (EW))



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 3-65 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(解析ケース③) (鉛直成分: S_s-N₂)

3.7 地震応答解析結果

3.7.1 最大応答値一覧

地震応答解析結果として、解析ケース①～③について、すべての基準地震動 S_s による全時刻の最大応答値を図 3-66～図 3-87 及び表 3-12～表 3-32 に示す。

また、地震応答解析の妥当性を確認するため、解析ケース①～③について、すべての基準地震動 S_s による接地率を表 3-33 に示す。接地率は、誘発上下動を考慮した地震応答解析を適用できる基準値（50%以上）を満足していることを確認した。

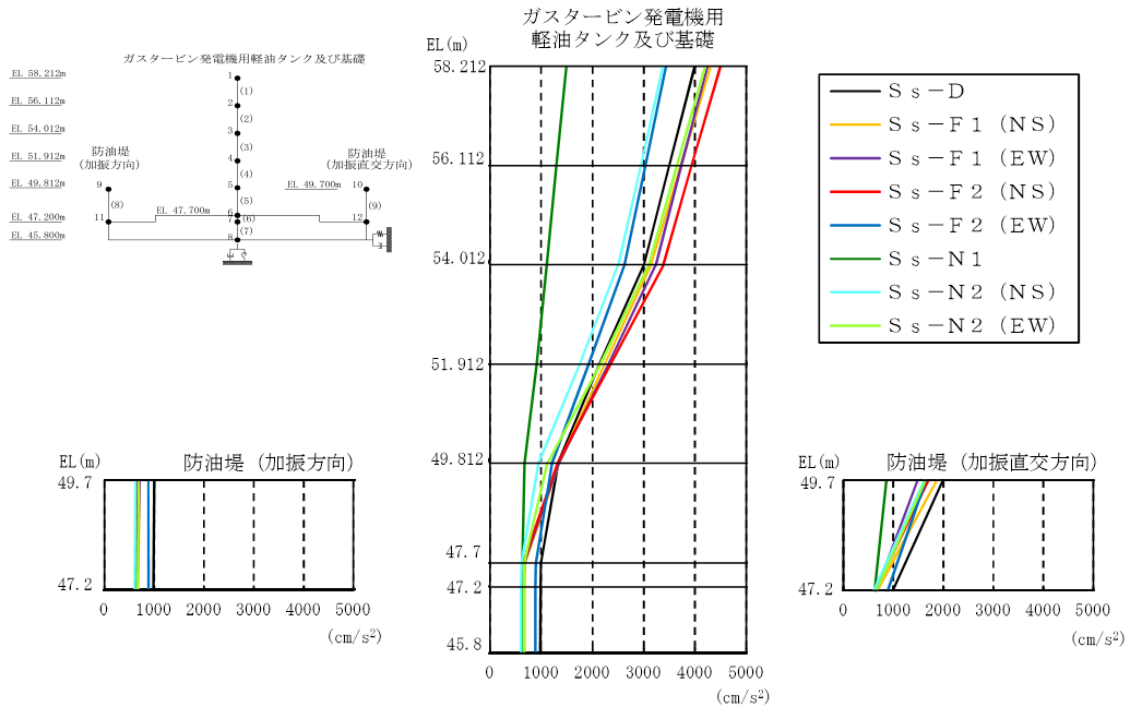


図 3-66 最大応答加速度分布図（水平方向，解析ケース①）

表 3-12 最大応答加速度一覧（水平方向，解析ケース①）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答加速度 (cm/s ²)								最大値
			S s - D	S s - F 1 (NS)	S s - F 1 (EW)	S s - F 2 (NS)	S s - F 2 (EW)	S s - N 1	S s - N 2 (NS)	S s - N 2 (EW)	
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212	1	3994	4306	4246	4498	3433	1487	3375	4198	4498
	56.112	2	3495	3724	3730	3930	3031	1296	2939	3648	3930
	54.012	3	2999	3141	3236	3383	2621	1107	2498	3094	3383
	51.912	4	2130	2234	2311	2359	1923	910	1748	2156	2359
	49.812	5	1329	1344	1344	1313	1209	672	942	1117	1344
	47.700	6	991	681	667	644	890	628	611	667	991
基礎	47.200	7	985	676	659	633	888	627	608	666	985
	45.800	8	977	674	658	621	883	626	604	663	977
防油堤 (加振方向)	49.700	9	999	700	704	646	883	627	621	689	999
	47.200	11	985	676	659	633	888	627	608	666	985
防油堤 (加振直交方向)	49.700	10	1992	1871	1487	1698	1646	861	1617	1643	1992
	47.200	12	985	676	659	633	888	627	608	666	985

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

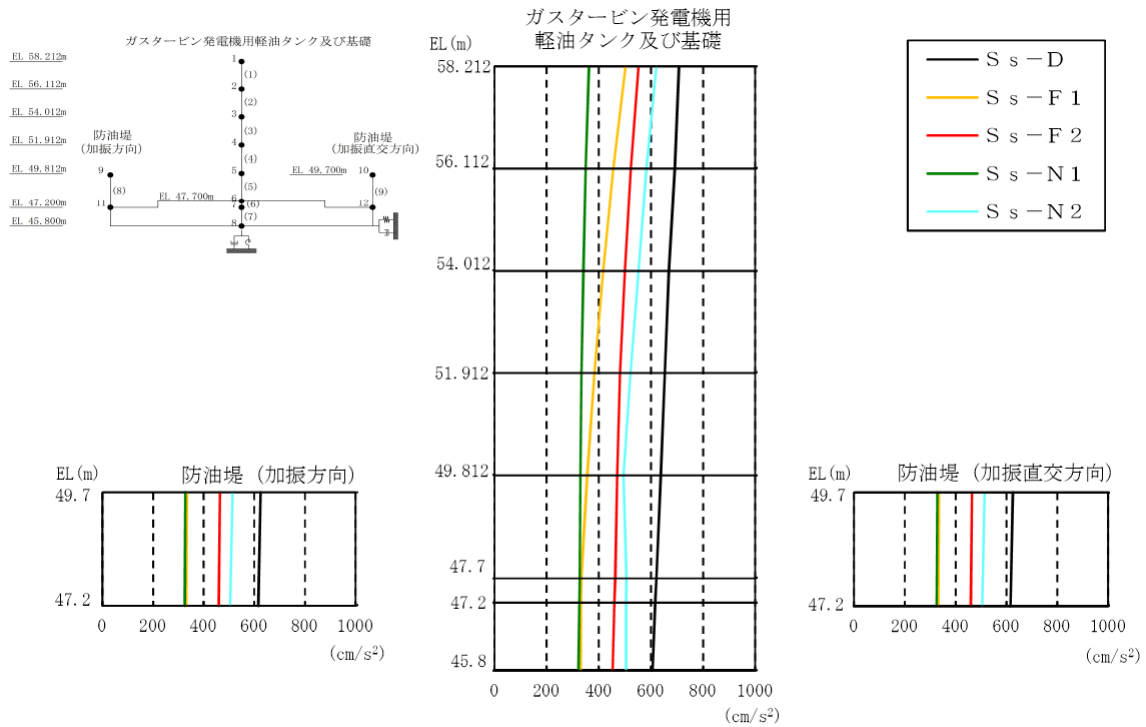


図 3-67 最大応答加速度分布図（鉛直方向，解析ケース①）

表 3-13 最大応答加速度一覧（鉛直方向，解析ケース①）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答加速度 (cm/s ²)					最大値
			S s - D	S s - F 1	S s - F 2	S s - N 1	S s - N 2	
ガスタービン発電機用軽油タンク	58.212	1	708	503	553	362	621	708
	56.112	2	691	456	522	350	582	691
	54.012	3	669	416	500	341	553	669
	51.912	4	653	382	480	333	521	653
	49.812	5	638	356	470	329	495	638
	47.700	6	621	333	463	327	506	621
基礎	47.200	7	616	332	459	325	504	616
	45.800	8	606	330	453	322	504	606
防油堤（加振方向）	49.700	9	625	334	464	328	514	625
	47.200	11	616	332	459	325	504	616
防油堤（加振直交方向）	49.700	10	625	334	464	328	514	625
	47.200	12	616	332	459	325	504	616

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

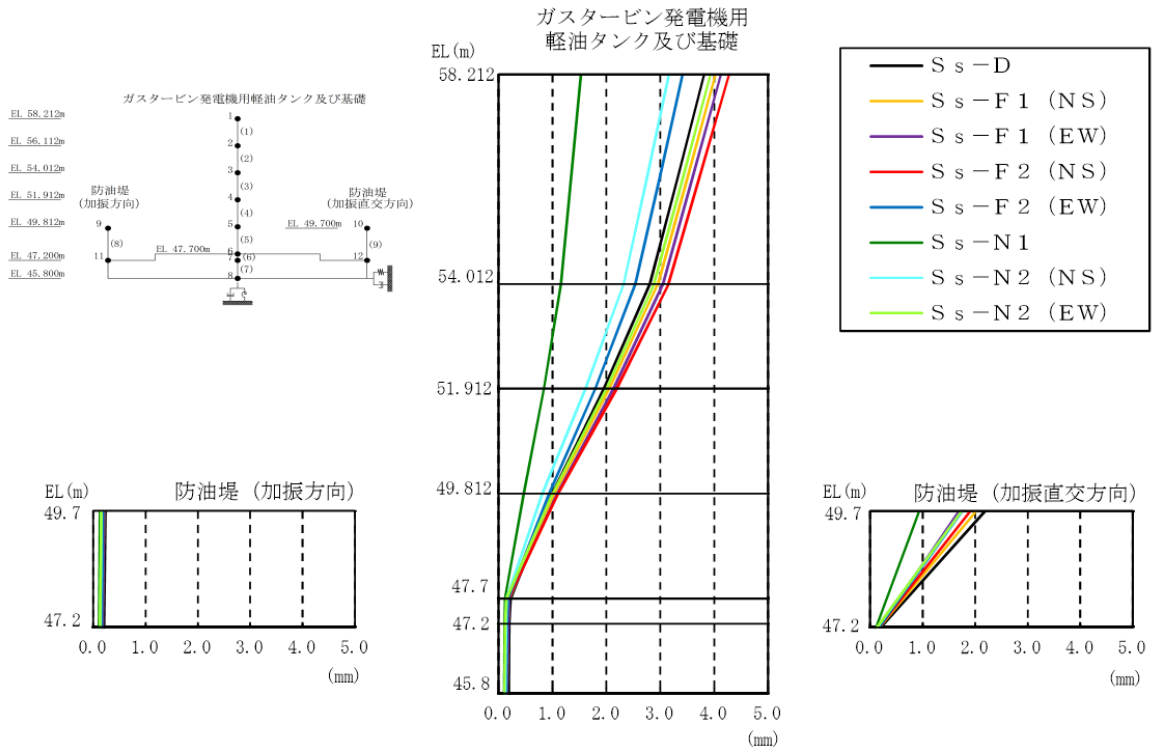


図 3-68 最大応答変位分布図（水平方向，解析ケース①）

表 3-14 最大応答変位一覧（水平方向，解析ケース①）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答変位 (mm)								
			S s - D	S s - F 1 (NS)	S s - F 1 (EW)	S s - F 2 (NS)	S s - F 2 (EW)	S s - N 1	S s - N 2 (NS)	S s - N 2 (EW)	最大値
ガスタービン発電機用軽油タンク	58.212	1	3.81	4.02	4.12	4.28	3.41	1.52	3.16	3.93	4.28
	56.112	2	3.31	3.49	3.59	3.72	2.98	1.34	2.74	3.41	3.72
	54.012	3	2.81	2.96	3.05	3.15	2.54	1.16	2.32	2.89	3.15
	51.912	4	1.95	2.05	2.13	2.19	1.79	0.84	1.61	2.00	2.19
	49.812	5	0.99	1.03	1.09	1.10	0.94	0.47	0.81	1.00	1.10
基礎	47.700	6	0.22	0.19	0.20	0.18	0.18	0.12	0.15	0.15	0.22
	47.200	7	0.20	0.17	0.18	0.16	0.16	0.11	0.13	0.13	0.20
防油堤 (加振方向)	45.800	8	0.19	0.15	0.16	0.14	0.14	0.10	0.12	0.11	0.19
	49.700	9	0.23	0.20	0.21	0.19	0.19	0.12	0.15	0.15	0.23
防油堤 (加振直交方向)	47.200	11	0.20	0.17	0.18	0.16	0.16	0.11	0.13	0.13	0.20
	49.700	10	2.18	2.02	1.69	1.90	1.76	0.93	1.74	1.74	2.18
	47.200	12	0.20	0.17	0.18	0.16	0.16	0.11	0.13	0.13	0.20

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

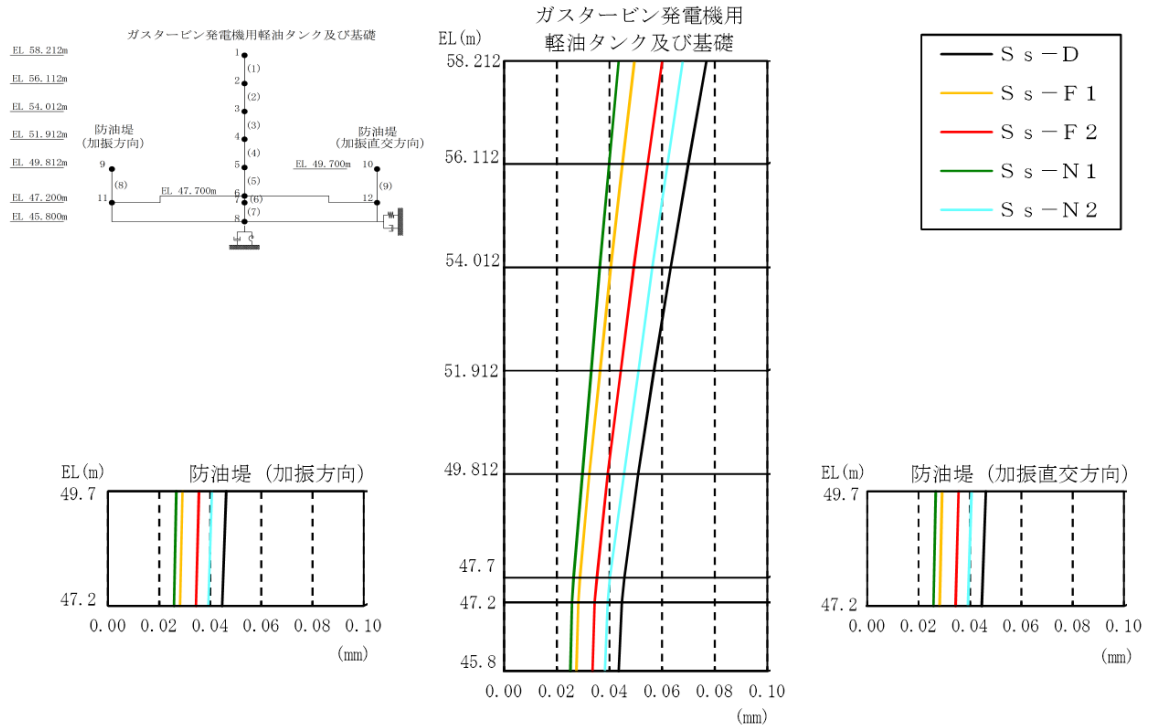


図 3-69 最大応答変位分布図（鉛直方向，解析ケース①）

表 3-15 最大応答変位一覧（鉛直方向，解析ケース①）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答変位 (mm)					最大値
			S s - D	S s - F 1	S s - F 2	S s - N 1	S s - N 2	
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212	1	0.08	0.05	0.06	0.04	0.07	0.08
	56.112	2	0.07	0.04	0.05	0.04	0.06	0.07
	54.012	3	0.06	0.04	0.05	0.04	0.06	0.06
	51.912	4	0.06	0.04	0.04	0.03	0.05	0.06
	49.812	5	0.05	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05
	47.700	6	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
基礎	47.200	7	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
	45.800	8	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
防油堤 (加振方向)	49.700	9	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
	47.200	11	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
防油堤 (加振直交方向)	49.700	10	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
	47.200	12	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

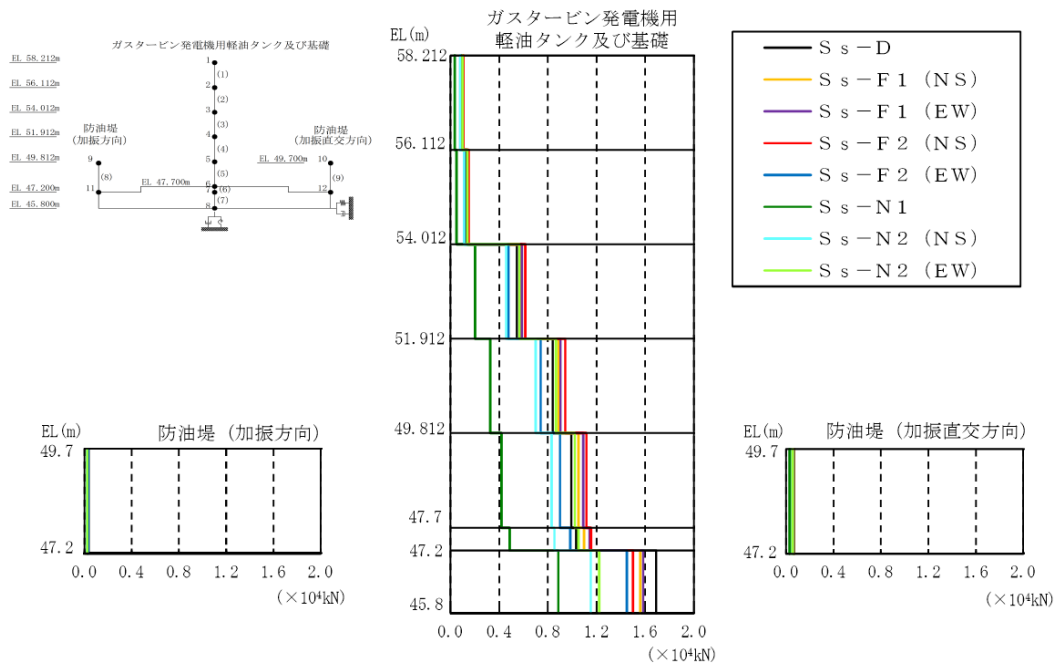


図 3-70 最大応答せん断力分布図（解析ケース①）

表 3-16 最大応答せん断力一覧（解析ケース①）

部位	EL (m)	要素番号	最大応答せん断力 ($\times 10^4$ kN)								
			S s - D	S s - F 1 (NS)	S s - F 1 (EW)	S s - F 2 (NS)	S s - F 2 (EW)	S s - N 1	S s - N 2 (NS)	S s - N 2 (EW)	最大値
ガスタービン発電機用軽油タンク	58.212~56.112	1	0.09	0.10	0.10	0.11	0.08	0.03	0.08	0.10	0.11
	56.112~54.012	2	0.13	0.14	0.14	0.15	0.11	0.05	0.11	0.14	0.15
	54.012~51.912	3	0.55	0.58	0.59	0.61	0.48	0.20	0.46	0.57	0.61
	51.912~49.812	4	0.84	0.89	0.90	0.94	0.74	0.33	0.70	0.87	0.94
基礎	49.812~47.700	5	0.99	1.05	1.09	1.12	0.90	0.42	0.83	1.02	1.12
	47.700~45.800	6	1.03	1.10	1.14	1.15	0.98	0.49	0.85	1.05	1.15
防油堤 (加振方向)	49.700~47.200	8	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03
防油堤 (加振直交方向)	49.700~47.200	9	0.07	0.06	0.05	0.06	0.06	0.03	0.05	0.06	0.07

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

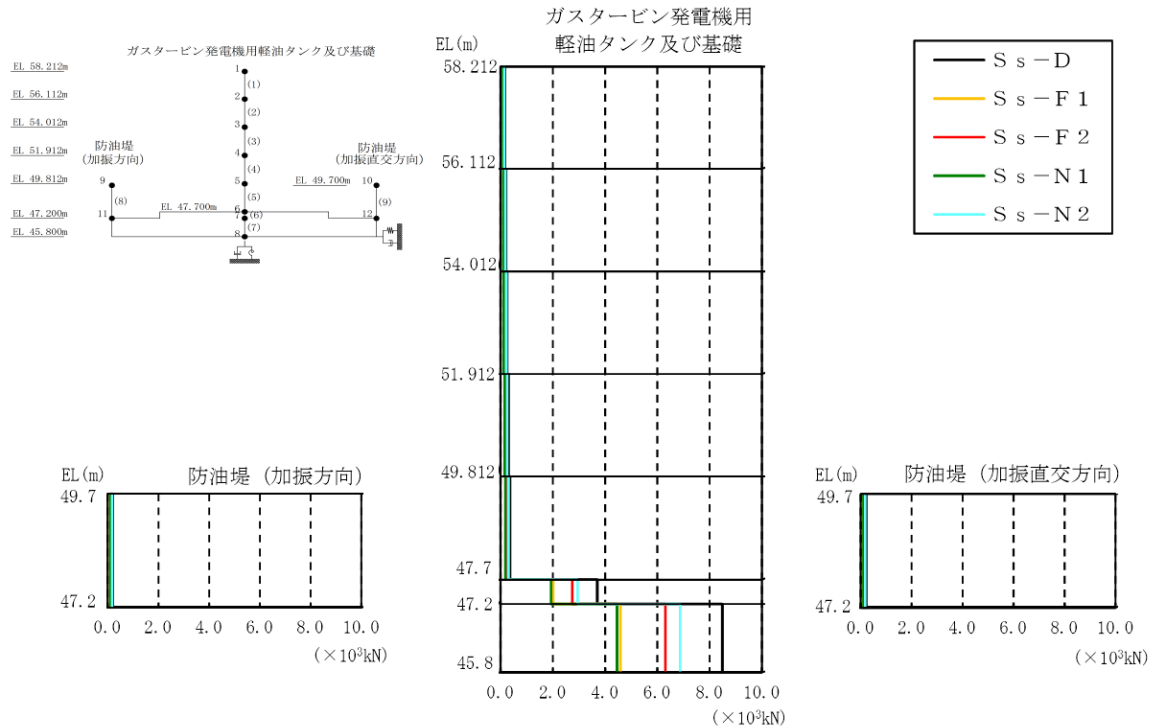


図 3-72 最大応答軸力分布図（解析ケース①）

表 3-18 最大応答軸力一覧（解析ケース①）

部位	EL (m)	要素番号	最大応答軸力 (×10 ³ kN)					最大値
			S s - D	S s - F 1	S s - F 2	S s - N 1	S s - N 2	
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212～56.112	1	0.17	0.12	0.13	0.09	0.15	0.17
	56.112～54.012	2	0.20	0.14	0.16	0.10	0.18	0.20
	54.012～51.912	3	0.25	0.17	0.19	0.13	0.22	0.25
	51.912～49.812	4	0.30	0.20	0.23	0.15	0.26	0.30
	49.812～47.700	5	0.36	0.23	0.27	0.18	0.30	0.36
基礎	47.700～47.200	6	3.70	2.01	2.74	1.93	2.94	3.70
	47.200～45.800	7	8.49	4.59	6.31	4.46	6.87	8.49
防油堤 (加振方向)	49.700～47.200	8	0.21	0.11	0.16	0.11	0.17	0.21
防油堤 (加振直交方向)	49.700～47.200	9	0.21	0.11	0.16	0.11	0.17	0.21

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

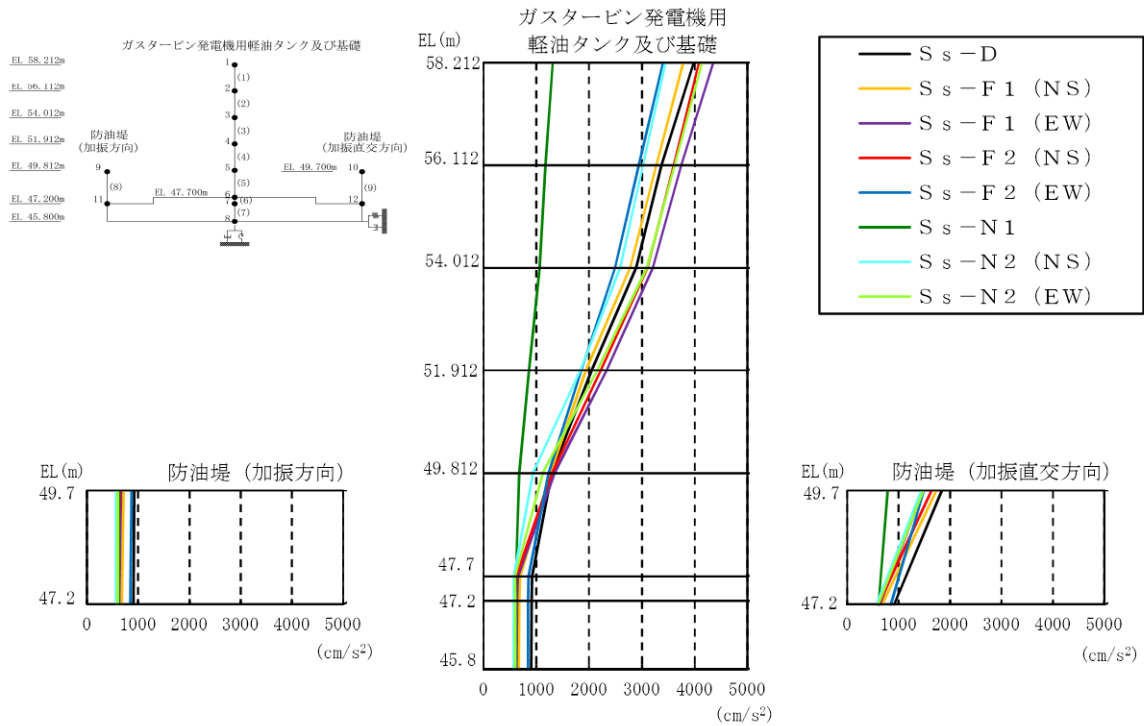


図 3-73 最大応答加速度分布図（水平方向，解析ケース②）

表 3-19 最大応答加速度一覧（水平方向，解析ケース②）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答加速度 (cm/s ²)								
			S _s -D	S _s -F 1 (NS)	S _s -F 1 (EW)	S _s -F 2 (NS)	S _s -F 2 (EW)	S _s -N 1	S _s -N 2 (NS)	S _s -N 2 (EW)	最大値
ガスタービン発電機用軽油タンク	58.212	1	3980	3780	4353	4083	3399	1309	3446	4141	4353
	56.112	2	3369	3270	3747	3601	2943	1171	3019	3620	3747
	54.012	3	2888	2778	3205	3106	2490	1067	2585	3092	3205
	51.912	4	2043	1936	2328	2220	1847	862	1829	2154	2328
	49.812	5	1286	1265	1341	1294	1234	672	935	1116	1341
	47.700	6	916	689	645	618	849	608	571	593	916
基礎	47.200	7	908	677	629	603	845	607	566	598	908
	45.800	8	904	665	625	589	846	607	562	595	904
防油堤 (加振方向)	49.700	9	920	712	665	634	870	616	571	599	920
	47.200	11	908	677	629	603	845	607	566	598	908
防油堤 (加振直交方向)	49.700	10	1839	1731	1472	1636	1488	786	1439	1478	1839
	47.200	12	908	677	629	603	845	607	566	598	908

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

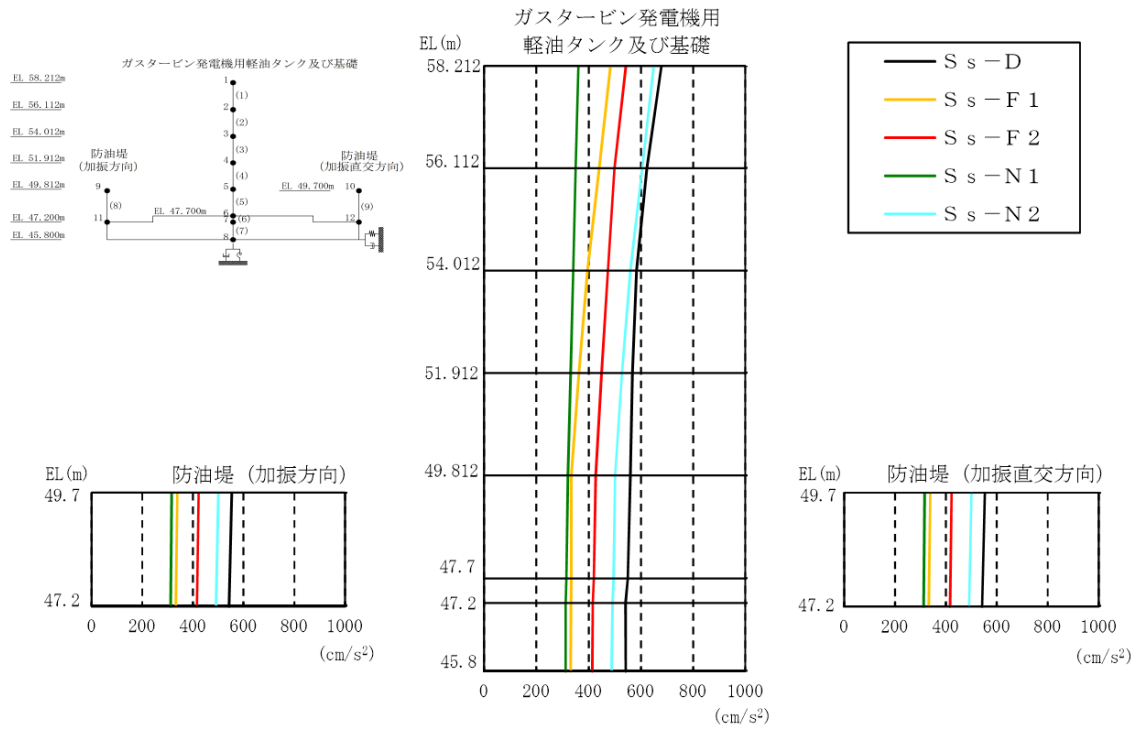


図 3-74 最大応答加速度分布図（鉛直方向，解析ケース②）

表 3-20 最大応答加速度一覧（鉛直方向，解析ケース②）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答加速度 (cm/s ²)					最大値
			S s - D	S s - F 1	S s - F 2	S s - N 1	S s - N 2	
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212	1	679	483	542	361	649	679
	56.112	2	624	440	498	350	605	624
	54.012	3	583	396	473	340	560	583
	51.912	4	569	362	449	331	527	569
	49.812	5	560	333	427	320	501	560
	47.700	6	550	334	420	315	495	550
基礎	47.200	7	542	332	416	312	491	542
	45.800	8	542	331	414	312	488	542
防油堤 (加振方向)	49.700	9	553	338	422	316	500	553
	47.200	11	542	332	416	312	491	542
防油堤 (加振直交方向)	49.700	10	553	338	422	316	500	553
	47.200	12	542	332	416	312	491	542

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

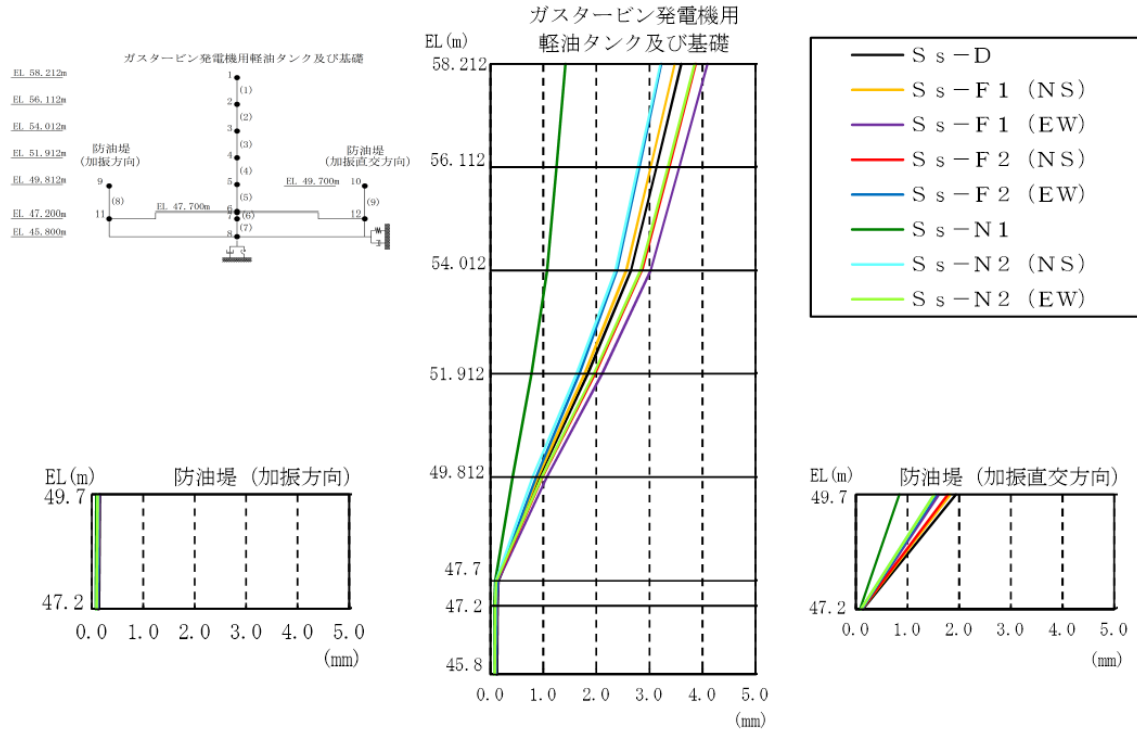


図 3-75 最大応答変位分布図（水平方向，解析ケース②）

表 3-21 最大応答変位一覧（水平方向，解析ケース②）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答変位 (mm)								最大値
			S s - D	S s - F 1 (NS)	S s - F 1 (EW)	S s - F 2 (NS)	S s - F 2 (EW)	S s - N 1	S s - N 2 (NS)	S s - N 2 (EW)	
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212	1	3.60	3.48	4.09	3.87	3.22	1.41	3.21	3.85	4.09
	56.112	2	3.13	3.02	3.56	3.37	2.81	1.24	2.79	3.35	3.56
	54.012	3	2.65	2.56	3.02	2.85	2.39	1.07	2.36	2.83	3.02
	51.912	4	1.84	1.78	2.11	1.98	1.67	0.77	1.63	1.95	2.11
	49.812	5	0.92	0.89	1.07	0.98	0.86	0.42	0.80	0.97	1.07
基礎	47.700	6	0.15	0.13	0.15	0.13	0.13	0.09	0.11	0.11	0.15
	47.200	7	0.14	0.12	0.13	0.11	0.11	0.08	0.10	0.09	0.14
防油堤 (加振方向)	45.800	8	0.12	0.10	0.11	0.10	0.10	0.07	0.08	0.08	0.12
	49.700	9	0.16	0.13	0.15	0.13	0.13	0.09	0.11	0.11	0.16
防油堤 (加振直交方向)	47.200	11	0.14	0.12	0.13	0.11	0.11	0.08	0.10	0.09	0.14
	49.700	10	1.94	1.83	1.60	1.78	1.55	0.84	1.52	1.52	1.94
	47.200	12	0.14	0.12	0.13	0.11	0.11	0.08	0.10	0.09	0.14

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

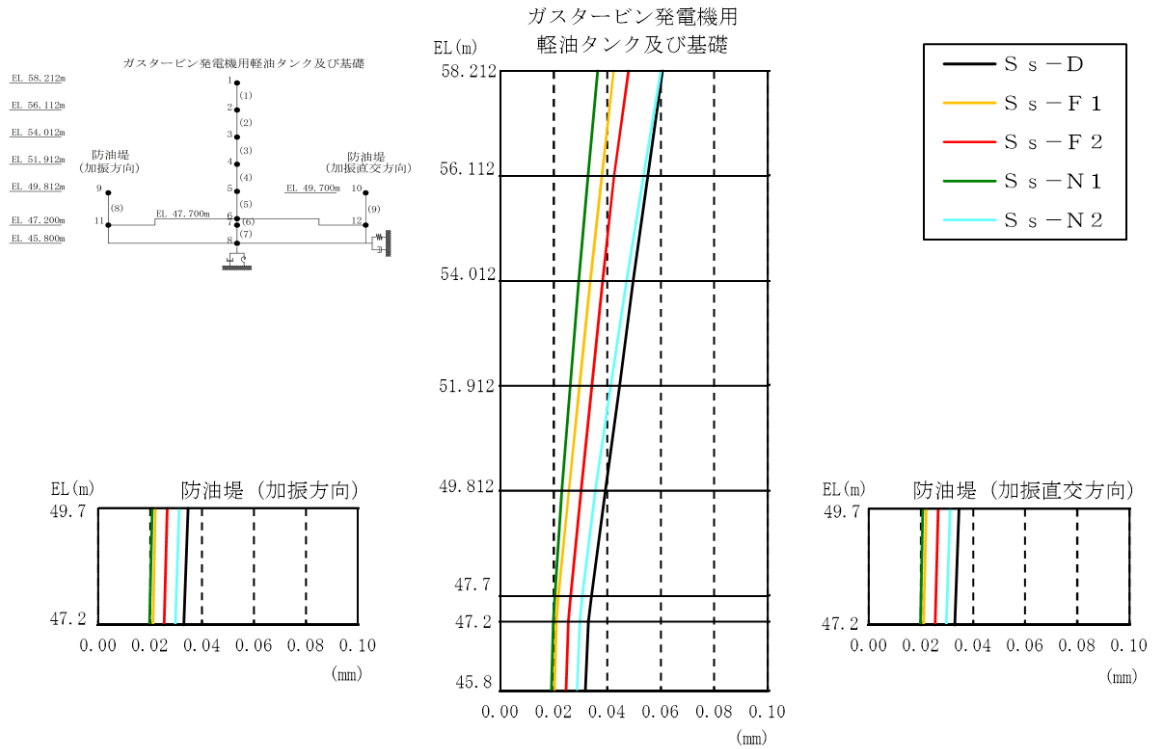


図 3-76 最大応答変位分布図（鉛直方向，解析ケース②）

表 3-22 最大応答変位一覧（鉛直方向，解析ケース②）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答変位 (mm)					最大値
			S s - D	S s - F 1	S s - F 2	S s - N 1	S s - N 2	
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212	1	0.06	0.04	0.05	0.04	0.06	0.06
	56.112	2	0.06	0.04	0.04	0.03	0.05	0.06
	54.012	3	0.05	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05
	51.912	4	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
	49.812	5	0.04	0.03	0.03	0.02	0.04	0.04
	47.700	6	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03
基礎	47.200	7	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03
	45.800	8	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
防油堤 (加振方向)	49.700	9	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03
	47.200	11	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03
防油堤 (加振直交方向)	49.700	10	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03
	47.200	12	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

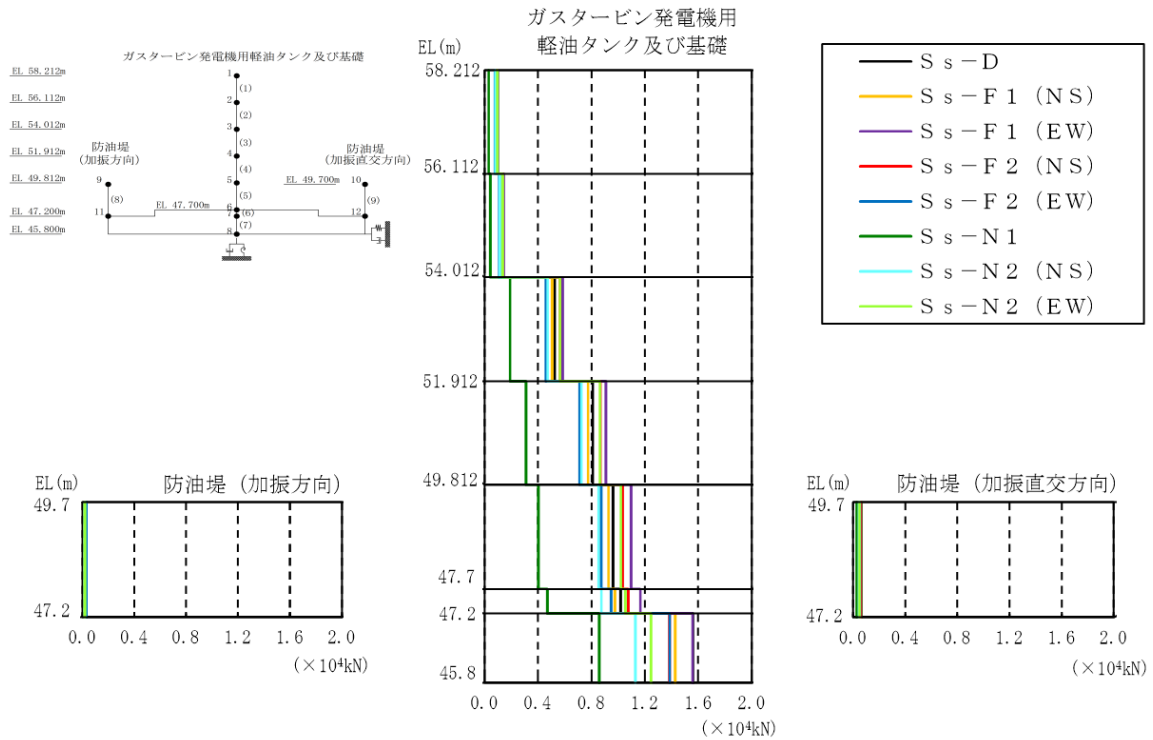


図 3-77 最大応答せん断力分布図（解析ケース②）

表 3-23 最大応答せん断力一覧（解析ケース②）

部位	EL (m)	要素番号	最大応答せん断力 ($\times 10^4 \text{kN}$)									最大値
			S s - D	S s - F 1 (NS)	S s - F 1 (EW)	S s - F 2 (NS)	S s - F 2 (EW)	S s - N 1	S s - N 2 (NS)	S s - N 2 (EW)		
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212~56.112	1	0.09	0.09	0.10	0.10	0.08	0.03	0.08	0.10	0.10	
	56.112~54.012	2	0.13	0.12	0.14	0.14	0.11	0.04	0.11	0.14	0.14	
	54.012~51.912	3	0.52	0.51	0.58	0.56	0.46	0.19	0.47	0.56	0.58	
	51.912~49.812	4	0.81	0.78	0.91	0.87	0.71	0.31	0.73	0.86	0.91	
	49.812~47.700	5	0.96	0.93	1.10	1.04	0.87	0.40	0.85	1.02	1.10	
基礎	47.700~47.200	6	1.02	0.98	1.16	1.08	0.95	0.47	0.87	1.05	1.16	
	47.200~45.800	7	1.56	1.43	1.56	1.39	1.39	0.86	1.13	1.25	1.56	
防油堤 (加振方向)	49.700~47.200	8	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	
防油堤 (加振直交方向)	49.700~47.200	9	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.03	0.05	0.05	0.06	

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

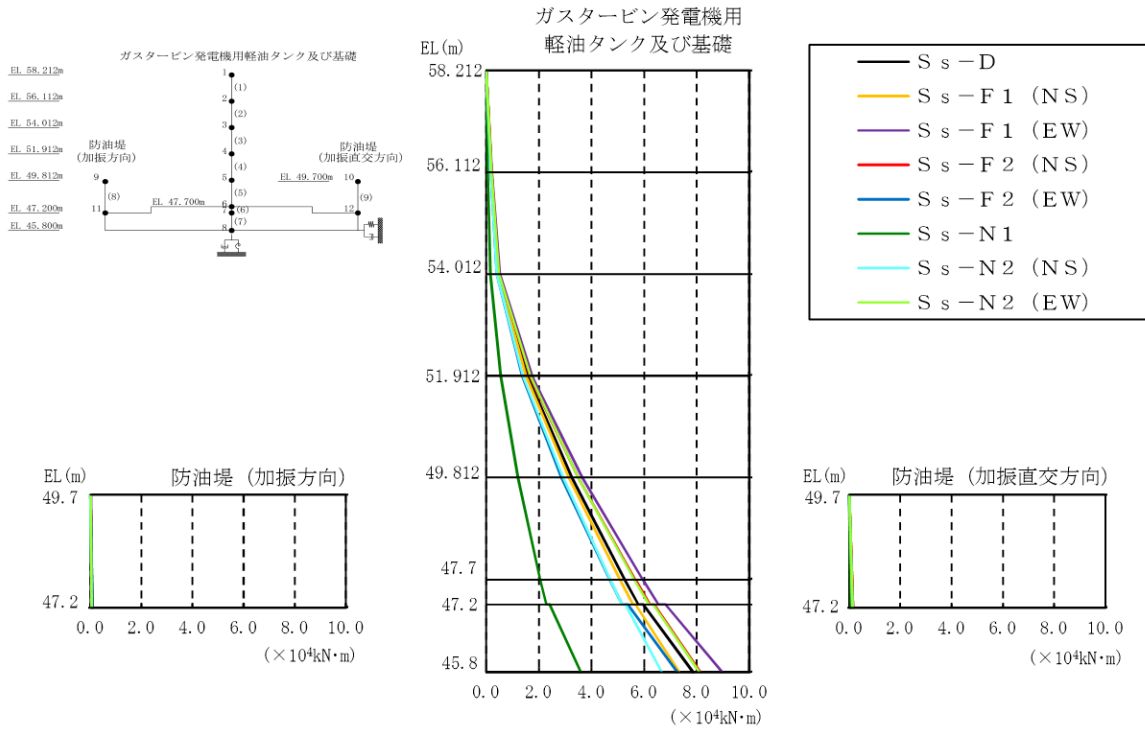


図 3-78 最大応答曲げモーメント分布図 (解析ケース②)

表 3-24 最大応答曲げモーメント一覧 (解析ケース②)

部位	EL (m)	要素番号	最大応答曲げモーメント ($\times 10^4 \text{kN}\cdot\text{m}$)									
			S s - D	S s - F 1 (NS)	S s - F 1 (EW)	S s - F 2 (NS)	S s - F 2 (EW)	S s - N 1	S s - N 2 (NS)	S s - N 2 (EW)	最大値	
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212~56.112	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—
			0.20	0.19	0.21	0.20	0.17	0.06	0.17	0.20	0.21	
	56.112~54.012	2	0.20	0.19	0.21	0.20	0.17	0.06	0.17	0.20	0.21	
			0.47	0.45	0.51	0.49	0.40	0.16	0.41	0.49	0.51	
	54.012~51.912	3	0.47	0.45	0.51	0.49	0.40	0.16	0.41	0.49	0.51	
1.56			1.51	1.74	1.67	1.36	0.55	1.40	1.68	1.74		
51.912~49.812	4	1.56	1.51	1.74	1.67	1.36	0.55	1.40	1.68	1.74		
		3.25	3.14	3.65	3.49	2.86	1.20	2.92	3.49	3.65		
49.812~47.700	5	3.25	3.14	3.65	3.49	2.86	1.20	2.92	3.49	3.65		
		5.28	5.09	5.96	5.67	4.69	2.05	4.72	5.64	5.96		
基礎	47.700~47.200	6	5.28	5.10	5.96	5.68	4.70	2.05	4.72	5.64	5.96	
			5.78	5.58	6.55	6.21	5.17	2.29	5.16	6.17	6.55	
47.200~45.800	7	5.97	5.67	6.81	6.38	5.37	2.41	5.28	6.35	6.81		
		7.86	7.33	8.97	8.14	7.26	3.60	6.67	8.10	8.97		
防油堤 (加振方向)	49.700~47.200	8	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	
防油堤 (加振直交方向)	49.700~47.200	9	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	
			0.16	0.16	0.14	0.15	0.13	0.07	0.13	0.13	0.16	

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

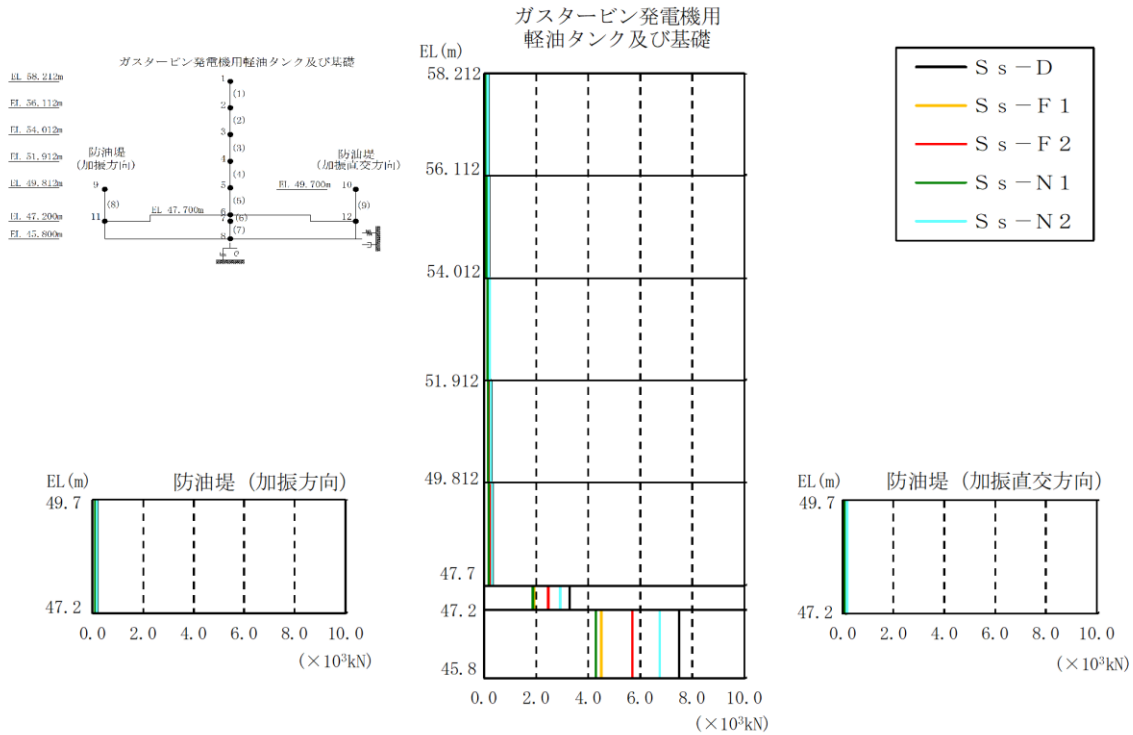


図 3-79 最大応答軸力分布図（解析ケース②）

表 3-25 最大応答軸力一覧（解析ケース②）

部位	EL (m)	要素番号	最大応答軸力 ($\times 10^3$ kN)					最大値
			S s - D	S s - F 1	S s - F 2	S s - N 1	S s - N 2	
ガスタービン発電機用軽油タンク	58.212~56.112	1	0.16	0.11	0.13	0.08	0.15	0.16
	56.112~54.012	2	0.19	0.14	0.15	0.10	0.19	0.19
	54.012~51.912	3	0.23	0.16	0.18	0.13	0.22	0.23
	51.912~49.812	4	0.27	0.19	0.22	0.15	0.26	0.27
	49.812~47.700	5	0.32	0.22	0.26	0.18	0.31	0.32
基礎	47.700~47.200	6	3.28	1.92	2.47	1.87	2.92	3.28
	47.200~45.800	7	7.50	4.50	5.71	4.30	6.74	7.50
防油堤 (加振方向)	49.700~47.200	8	0.19	0.11	0.14	0.11	0.17	0.19
防油堤 (加振直交方向)	49.700~47.200	9	0.19	0.11	0.14	0.11	0.17	0.19

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

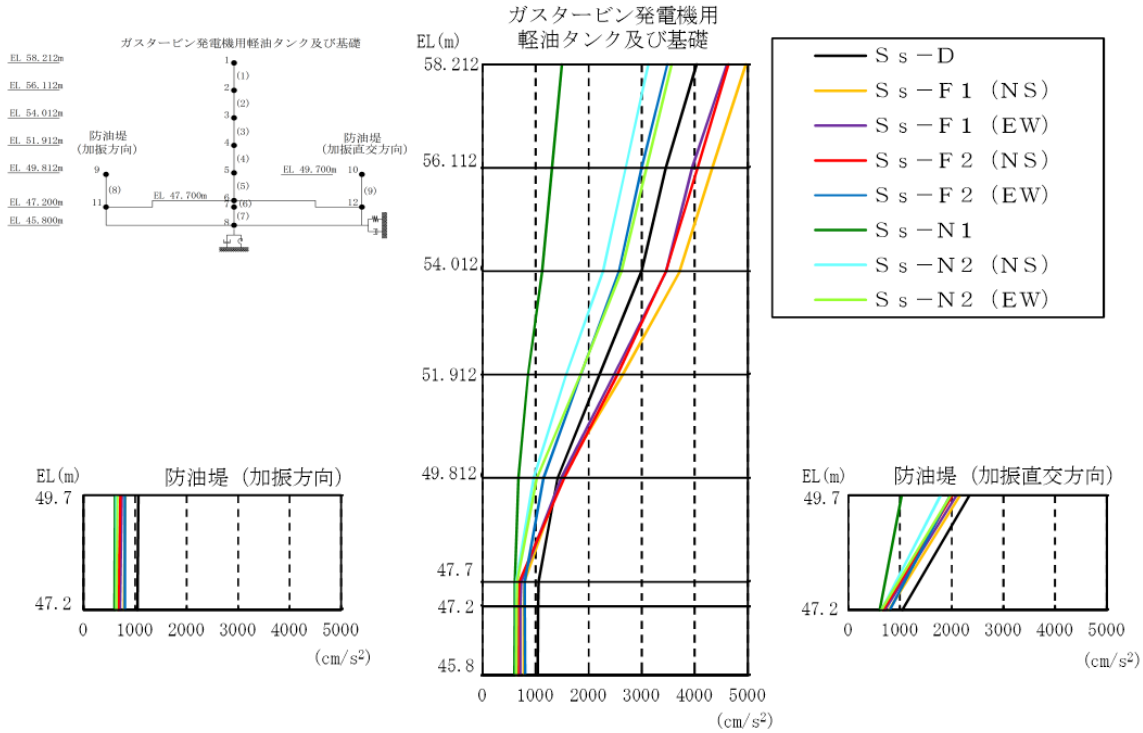


図 3-80 最大応答加速度分布図（水平方向，解析ケース③）

表 3-26 最大応答加速度一覧（水平方向，解析ケース③）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答加速度 (cm/s ²)								最大値
			S s - D	S s - F 1 (NS)	S s - F 1 (EW)	S s - F 2 (NS)	S s - F 2 (EW)	S s - N 1	S s - N 2 (NS)	S s - N 2 (EW)	
ガスタービン発電機用軽油タンク	58.212	1	4038	4963	4604	4634	3482	1496	3121	3564	4963
	56.112	2	3450	4330	3950	4051	2995	1310	2699	3092	4330
	54.012	3	2997	3718	3465	3459	2569	1124	2274	2622	3718
	51.912	4	2207	2643	2475	2542	1854	860	1577	1846	2643
	49.812	5	1416	1479	1487	1539	1152	680	968	1027	1539
	47.700	6	1055	792	728	693	797	610	636	647	1055
基礎	47.200	7	1048	782	711	673	801	608	635	642	1048
	45.800	8	1039	776	709	667	807	604	634	636	1039
防油堤 (加振方向)	49.700	9	1066	811	747	714	803	613	639	660	1066
	47.200	11	1048	782	711	673	801	608	635	642	1048
防油堤 (加振直交方向)	49.700	10	2345	2164	2091	2015	1971	1029	1785	1977	2345
	47.200	12	1048	782	711	673	801	608	635	642	1048

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

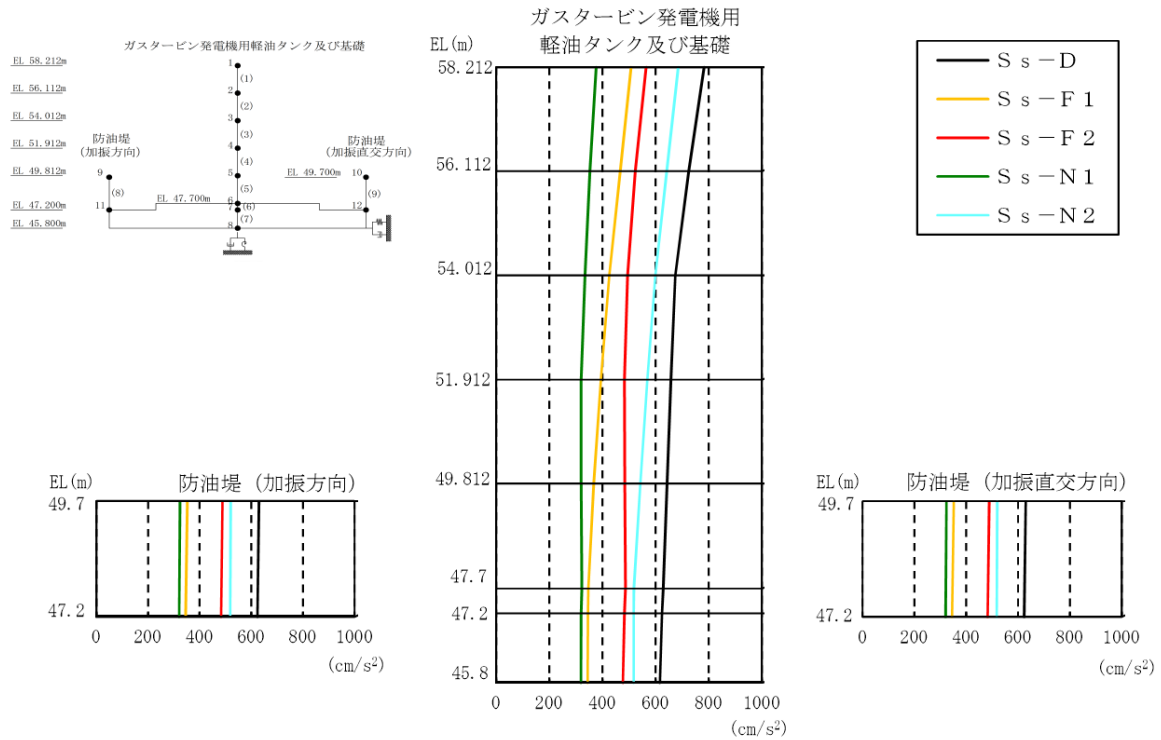


図 3-81 最大応答加速度分布図（鉛直方向，解析ケース③）

表 3-27 最大応答加速度一覧（鉛直方向，解析ケース③）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答加速度 (cm/s ²)					最大値
			S s - D	S s - F 1	S s - F 2	S s - N 1	S s - N 2	
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212	1	782	508	564	377	686	782
	56.112	2	724	467	524	352	641	724
	54.012	3	675	425	494	334	599	675
	51.912	4	657	394	483	320	569	657
	49.812	5	643	367	484	320	542	643
	47.700	6	629	347	486	322	518	629
基礎	47.200	7	624	345	483	320	518	624
	45.800	8	616	344	477	319	518	616
防油堤 (加振方向)	49.700	9	630	352	489	324	520	630
	47.200	11	624	345	483	320	518	624
防油堤 (加振直交方向)	49.700	10	630	352	489	324	520	630
	47.200	12	624	345	483	320	518	624

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

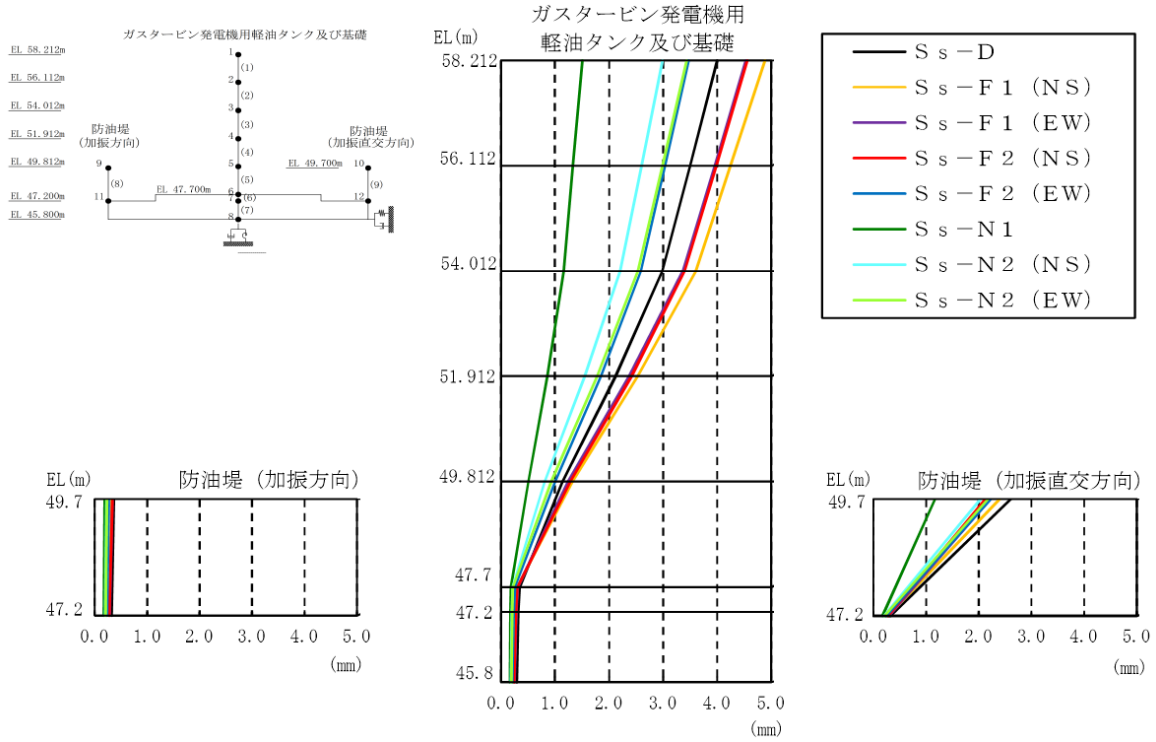


図 3-82 最大応答変位分布図（水平方向，解析ケース③）

表 3-28 最大応答変位一覧（水平方向，解析ケース③）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答変位 (mm)								最大値
			S s - D	S s - F 1 (NS)	S s - F 1 (EW)	S s - F 2 (NS)	S s - F 2 (EW)	S s - N 1	S s - N 2 (NS)	S s - N 2 (EW)	
ガスタービン発電機用軽油タンク	58.212	1	4.00	4.88	4.53	4.56	3.47	1.51	2.99	3.44	4.88
	56.112	2	3.50	4.25	3.95	3.98	3.03	1.33	2.60	2.99	4.25
	54.012	3	2.99	3.61	3.37	3.40	2.59	1.16	2.21	2.54	3.61
	51.912	4	2.12	2.53	2.37	2.41	1.85	0.86	1.55	1.78	2.53
	49.812	5	1.14	1.32	1.25	1.29	1.01	0.51	0.81	0.93	1.32
	47.700	6	0.34	0.30	0.31	0.30	0.25	0.18	0.21	0.22	0.34
基礎	47.200	7	0.32	0.27	0.29	0.28	0.23	0.17	0.20	0.20	0.32
	45.800	8	0.29	0.24	0.25	0.24	0.21	0.16	0.18	0.19	0.29
防油堤 (加振方向)	49.700	9	0.36	0.32	0.34	0.34	0.27	0.19	0.22	0.23	0.36
	47.200	11	0.32	0.27	0.29	0.28	0.23	0.17	0.20	0.20	0.32
防油堤 (加振直交方向)	49.700	10	2.61	2.40	2.22	2.13	2.23	1.17	2.03	2.18	2.61
	47.200	12	0.32	0.27	0.29	0.28	0.23	0.17	0.20	0.20	0.32

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

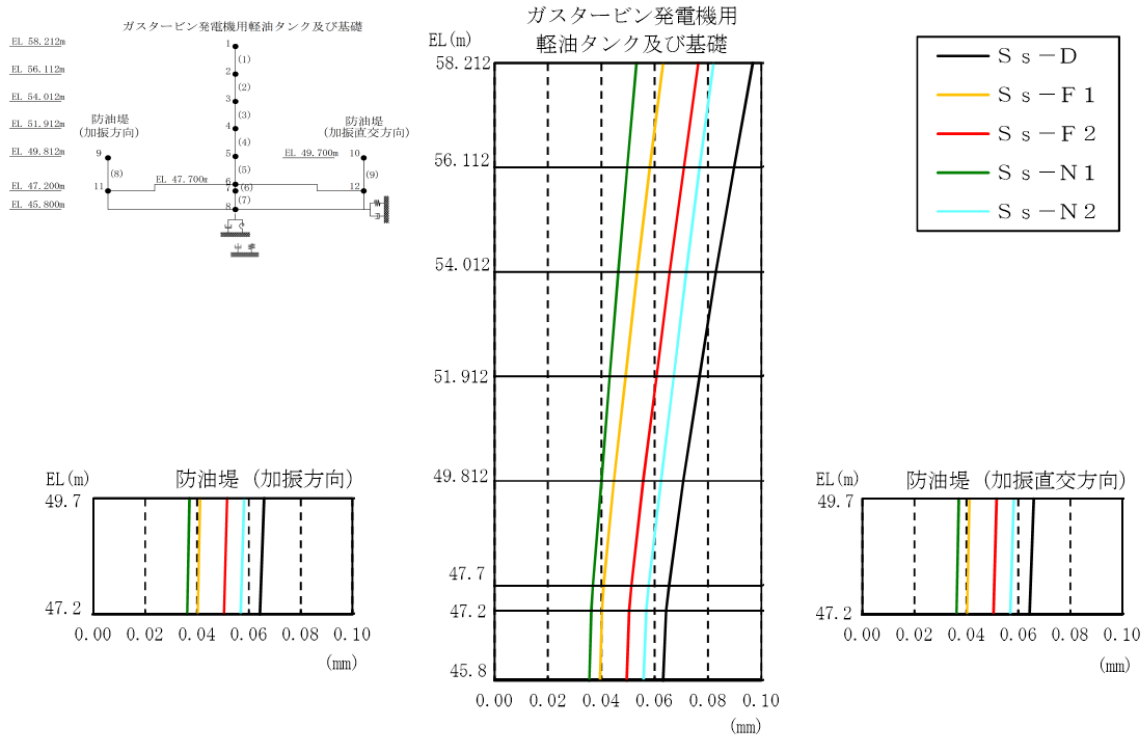


図 3-83 最大応答変位分布図（鉛直方向，解析ケース③）

表 3-29 最大応答変位一覧（鉛直方向，解析ケース③）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答変位 (mm)					最大値
			S s - D	S s - F 1	S s - F 2	S s - N 1	S s - N 2	
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212	1	0.10	0.06	0.08	0.05	0.08	0.10
	56.112	2	0.09	0.06	0.07	0.05	0.08	0.09
	54.012	3	0.08	0.05	0.07	0.05	0.07	0.08
	51.912	4	0.08	0.05	0.06	0.04	0.07	0.08
	49.812	5	0.07	0.04	0.06	0.04	0.06	0.07
	47.700	6	0.07	0.04	0.05	0.04	0.06	0.07
基礎	47.200	7	0.06	0.04	0.05	0.04	0.06	0.06
	45.800	8	0.06	0.04	0.05	0.04	0.06	0.06
防油堤 (加振方向)	49.700	9	0.07	0.04	0.05	0.04	0.06	0.07
	47.200	11	0.06	0.04	0.05	0.04	0.06	0.06
防油堤 (加振直交方向)	49.700	10	0.07	0.04	0.05	0.04	0.06	0.07
	47.200	12	0.06	0.04	0.05	0.04	0.06	0.06

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

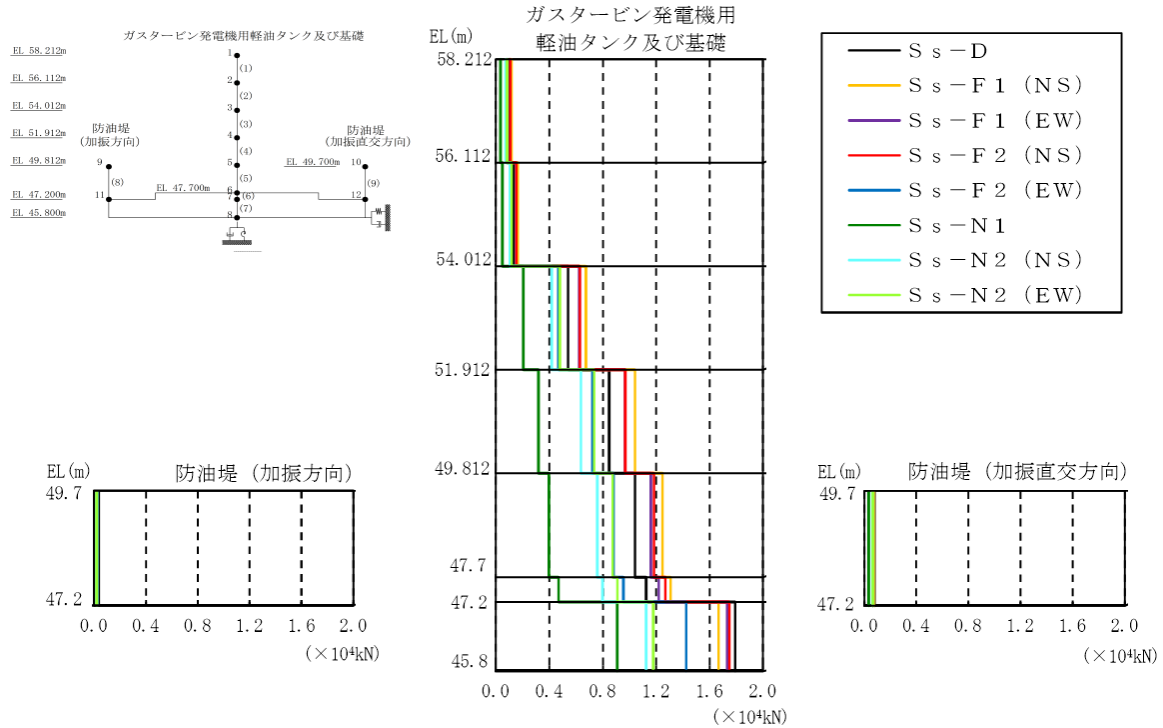


図 3-84 最大応答せん断力分布図（解析ケース③）

表 3-30 最大応答せん断力一覧（解析ケース③）

部位	EL (m)	要素番号	最大応答せん断力 ($\times 10^3$ kN)								最大値
			Ss-D	Ss-F1 (NS)	Ss-F1 (EW)	Ss-F2 (NS)	Ss-F2 (EW)	Ss-N1	Ss-N2 (NS)	Ss-N2 (EW)	
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212~56.112	1	0.09	0.12	0.11	0.11	0.08	0.03	0.07	0.08	0.12
	56.112~54.012	2	0.13	0.16	0.15	0.15	0.11	0.05	0.10	0.12	0.16
	54.012~51.912	3	0.54	0.67	0.62	0.63	0.47	0.20	0.42	0.48	0.67
	51.912~49.812	4	0.85	1.04	0.97	0.97	0.73	0.32	0.64	0.74	1.04
	49.812~47.700	5	1.04	1.25	1.16	1.18	0.88	0.40	0.76	0.87	1.25
基礎	47.700~47.200	6	1.12	1.31	1.22	1.27	0.96	0.47	0.80	0.91	1.31
	47.200~45.800	7	1.79	1.67	1.73	1.75	1.42	0.91	1.13	1.18	1.79
防油堤 (加振方向)	49.700~47.200	8	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04
防油堤 (加振直交方向)	49.700~47.200	9	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.03	0.06	0.07	0.08

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

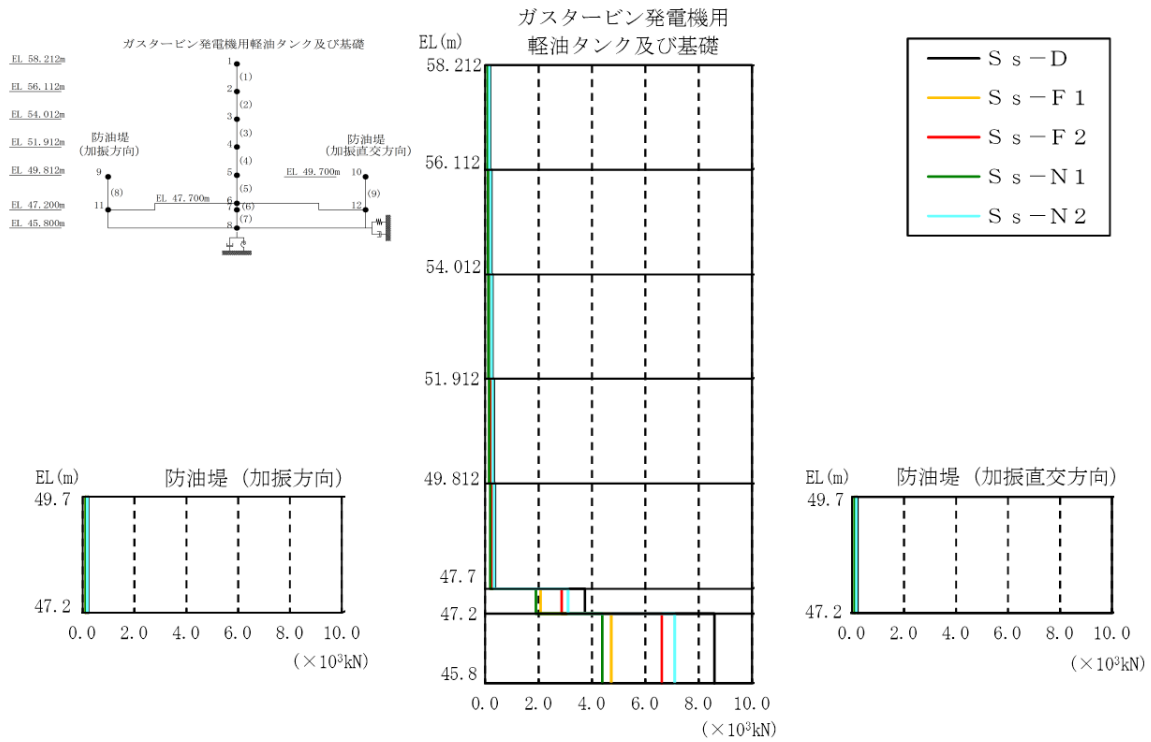


図 3-86 最大応答軸力分布図（解析ケース③）

表 3-32 最大応答軸力一覧（解析ケース③）

部位	EL (m)	要素番号	最大応答軸力 (×10 ³ kN)					最大値
			S s - D	S s - F 1	S s - F 2	S s - N 1	S s - N 2	
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212~56.112	1	0.18	0.12	0.13	0.09	0.16	0.18
	56.112~54.012	2	0.22	0.15	0.16	0.11	0.20	0.22
	54.012~51.912	3	0.27	0.17	0.19	0.13	0.24	0.27
	51.912~49.812	4	0.32	0.20	0.23	0.15	0.28	0.32
基礎	49.812~47.700	5	0.37	0.24	0.27	0.18	0.33	0.37
	47.700~47.200	6	3.74	2.07	2.86	1.90	3.11	3.74
防油堤 (加振方向)	49.700~47.200	8	0.21	0.12	0.16	0.11	0.17	0.21
		9	0.21	0.12	0.16	0.11	0.17	0.21

注：ハッチングは最大応答値のうち全地震動の最大値を示す。

表 3-33 地震応答解析における接地率一覧

解析ケース	地震動	最大転倒モーメント ($\times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}$)	最小接地率 (%)
①	S _s -D	0.817	77.8
	S _s -F1 (NS)	0.852	74.7
	S _s -F1 (EW)	0.883	72.0
	S _s -F2 (NS)	0.905	70.1
	S _s -F2 (EW)	0.765	82.4
	S _s -N1	0.376	100.0
	S _s -N2 (NS)	0.660	91.7
	S _s -N2 (EW)	0.814	78.0
②	S _s -D	0.786	80.5
	S _s -F1 (NS)	0.741	84.5
	S _s -F1 (EW)	0.890	71.3
	S _s -F2 (NS)	0.820	77.5
	S _s -F2 (EW)	0.730	85.5
	S _s -N1	0.362	100.0
	S _s -N2 (NS)	0.673	90.5
	S _s -N2 (EW)	0.814	78.1
③	S _s -D	0.862	73.9
	S _s -F1 (NS)	1.020	59.8
	S _s -F1 (EW)	0.960	65.2
	S _s -F2 (NS)	0.972	64.1
	S _s -F2 (EW)	0.755	83.2
	S _s -N1	0.366	100.0
	S _s -N2 (NS)	0.620	95.2
	S _s -N2 (EW)	0.708	87.4

3.7.2 3次元構造解析への入力荷重の時刻選定

(1) 選定時刻の考え方

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎は地震応答解析より求まる応答値を用いた3次元構造解析により耐震評価を実施する。ガスタービン発電機用軽油タンク基礎が支持する設備には、ガスタービン発電機用軽油タンク及び防油堤があり、地震時にはこれらの設備を介して基礎スラブに荷重が作用する。

表3-34に各設備の重量を示す。ガスタービン発電機用軽油タンクが最も重量が大きく、地上部に突出した設備であることから、基礎スラブの耐震評価における支配的な荷重はタンクを介して基礎スラブに作用する荷重であると考えられるため、タンク下端の曲げモーメントが最大となる時刻（時刻①）を選定する。なお、タンク下端の曲げモーメント以外の要因による照査値への影響を幅広く確認するために、時刻①の次点にタンク下端の曲げモーメントが大きい時刻（時刻②）についても確認する。

表 3-34 各設備の重量一覧表

設備名称	重量
ガスタービン発電機用軽油タンク	約 5245kN
防油堤	約 637kN

(2) 時刻選定結果

基本ケース（解析ケース①）のうち、時刻①及び時刻②の観点で選定された地震動に対して解析ケース②及び③の応答値を確認する。それぞれの地震動において、解析ケース①～③のうち、タンク下端の曲げモーメントが最大となる地震動並びに時刻を選定して3次元構造解析を行う。

各地震動におけるタンク下端の曲げモーメント最大時刻の一覧を表3-35に示す。時刻①については、S_s-N2（EW）のうち解析ケース①を選定する。また、時刻②については、S_s-Dのうち解析ケース③を選定する。なお、選定された解析ケースにおいて、地震応答解析における最小接地率が65%を下回らないことを確認した。

表 3-35 タンク下端の曲げモーメント最大時刻一覧

解析 ケース	地震動	タンク下端の 曲げモーメント (kN・m)			時刻 (s)	最小接地率 (%)	備考
		主方向	従方向	合力			
①	S s - D	54810	—	77513	27.514	77.8	
	S s - F 1 (N S)	58000	2847	58070	9.373	74.7	
	S s - F 1 (E W)	59330	11810	60494	8.209	72.0	
	S s - F 2 (N S)	61570	8463	62149	16.300	70.1	
	S s - F 2 (E W)	48640	34640	59714	15.844	82.4	
	S s - N 1	21520	—	30434	7.514	100.0	
	S s - N 2 (N S)	45830	—	64813	26.969	91.7	
	S s - N 2 (E W)	56650	—	80115	26.780	78.0	時刻①として 選定
②	S s - D	52790	—	74656	35.142	80.5	
	S s - N 2 (E W)	56380	—	79733	26.765	78.1	
③	S s - D	55740	—	78828	15.268	73.9	時刻②として 選定
	S s - N 2 (E W)	48220	—	68193	26.802	87.4	

注 1：ハッチングは 3 次元構造解析への入力荷重として選定した地震動を示す。

注 2：タンク下端の曲げモーメントの合力は、以下のとおり算定している。

- ・地震動が方向性を持たない場合 (S s - D, N 1, N 2 (N S, E W))
主方向と従方向の合力として主方向の応答値に $\sqrt{2}$ を乗じた値を示す。
- ・地震動が方向性を持つ場合 (S s - F 1, F 2)
主方向と従方向 (主方向と同時刻) の合力として、応答値を二乗和平方根した値を示す。

4. 3次元構造解析

4.1 解析手法

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の耐震評価においては、基礎スラブを線形シェル要素、防油堤を線形はり要素でモデル化し、3次元構造解析により水平2方向及び鉛直方向の荷重に対する評価を行う。3次元構造解析には、解析コード「NX NASTRAN」を用いる。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3次元構造解析の入力荷重は、「3.7.2 3次元構造解析への入力荷重の時刻選定」に示すとおり、地震応答解析においてタンク下端の曲げモーメントが最大となる時刻における荷重とする。

3次元構造解析により算定した鉄筋コンクリート部材の照査用曲げモーメント及び照査用せん断力が、「5.1 許容限界」に示す許容限界以下であることを確認する。

4.2 解析モデルの設定

4.2.1 構造物のモデル化

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の基礎スラブは線形シェル要素、基礎スラブ外周に立ち上がる防油堤は線形はり要素でモデル化する。基礎スラブをモデル化したシェル要素と防油堤をモデル化したはり要素の境界条件は剛結とする。

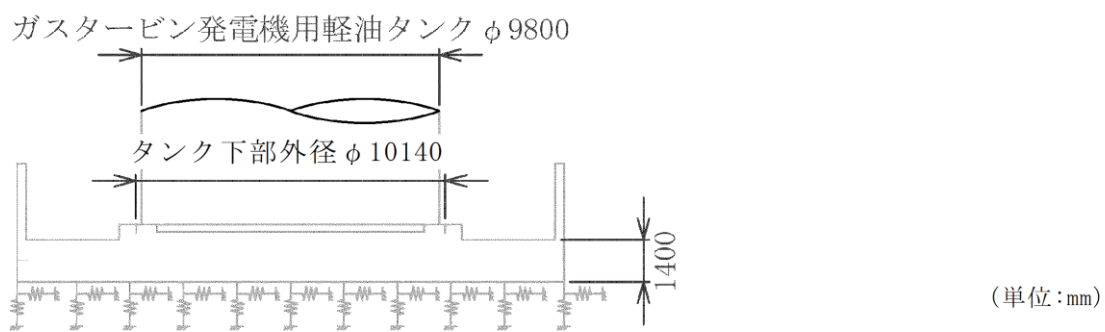
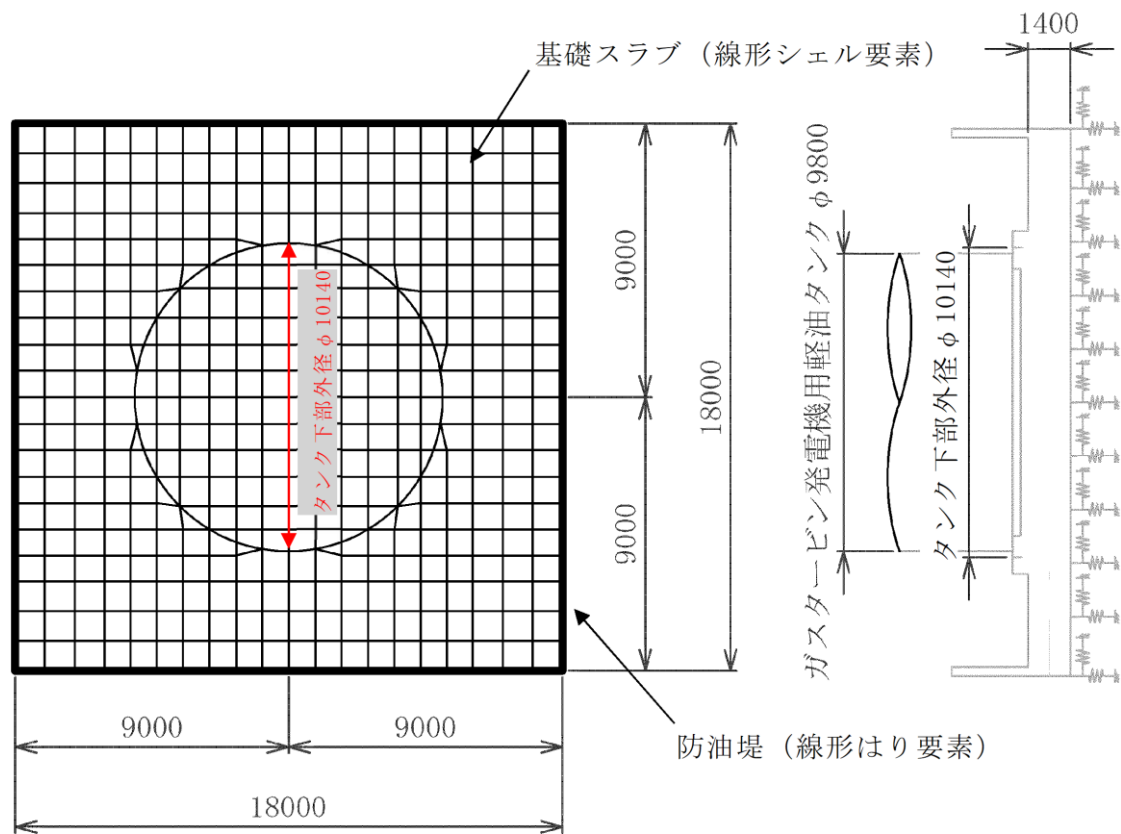
また、基礎スラブ（線形シェル要素）はスラブ中央高さにおいてフラットな版としてモデル化し、リングコンクリートは重量として考慮する。

4.2.2 境界条件及び地盤ばね要素

構造物の底面には、水平2方向及び鉛直方向の計3成分の地盤ばねを設定する。地盤ばねの設定については「3.2.2 地盤のモデル化」にて振動アドミタンス理論に基づき算定した地盤ばねを節点ばねに置き換えてモデル化する。3次元構造解析モデル図を図4-1に、節点ばねの物性値を表4-1に示す。

水平方向の地盤ばねは、地盤応答解析における地盤ばね（水平方向）を基礎の面積で除することにより求める。なお、基礎スラブの形状は正方形のため、いずれの方向の地盤ばね定数も同様の値となる。

鉛直方向の地盤ばねは、水平力によるロッキングに伴う鉛直荷重が卓越することから、地震応答解析における回転ばねを断面二次モーメントで除することにより求める。また、鉛直地盤ばねはNo-tensionばねとし、地震作用時に浮き上がる箇所について引張力が作用しないようにする。



注：タンク下部外径はタンクと基礎スラブを結合しているボルトの位置を示す。

図 4-1 3次元構造解析モデル

表 4-1 3次元構造解析モデルにおける節点ばねの物性値

解析ケース	地盤ばね成分	ばね定数 (kN/m ³)
①	水平	3.506×10^5
	鉛直	1.115×10^6
②	水平	4.960×10^5
	鉛直	1.580×10^6
③	水平	2.290×10^5
	鉛直	7.268×10^5

4.3 荷重及び荷重の組合せ

3次元構造解析における入力荷重の一覧を表4-2に示す。

表4-2 3次元構造解析における入力荷重

区分	種別	考慮する荷重
常時荷重	固定荷重	<ul style="list-style-type: none"> ・ 躯体自重（防油堤を含む） ・ 機器・配管荷重
	積載荷重	<ul style="list-style-type: none"> ・ 積雪荷重 ・ 風荷重
地震荷重	地震時荷重	<ul style="list-style-type: none"> ・ 上載物（タンク及び防油堤）から受ける地震時荷重 ・ 基礎スラブに作用する地震力

4.3.1 機器・配管荷重

(1) タンク関連の機器・配管荷重

タンク関連（タンク本体及び内容液）の機器・配管荷重については、基礎ボルト内側に等分布荷重で与えるものとし、次式で算定する。荷重の載荷方法を図4-2に示す。

$$q_{ELID} = \frac{W_{ELID}}{A_T}$$

ここで、

q_{ELID} : 基礎スラブに作用する W_{ELID} による鉛直荷重 (kN/m²)

W_{ELID} : 基礎スラブ上面における機器荷重 (kN)

A_T : タンク底部面積 (m²) $A_T = \frac{\pi D_o^2}{4}$

D_o : タンク下部外径 (m)

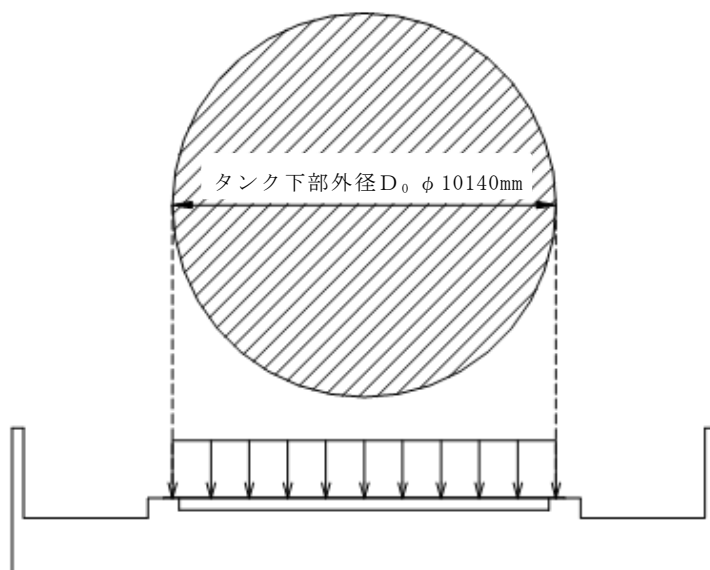


図 4-2 機器・配管荷重図

(2) ポンプ関連の機器・配管荷重

ポンプ関連の機器・配管荷重として、基礎スラブに 9.8kN, 防油堤に 3.9kN の配管荷重を考慮する。

4.3.2 積雪荷重

「3.4.2 積雪荷重」と同様に，タンク，基礎スラブ及び防油堤上の積雪荷重を考慮する。荷重の載荷方法を図4-3に示す。

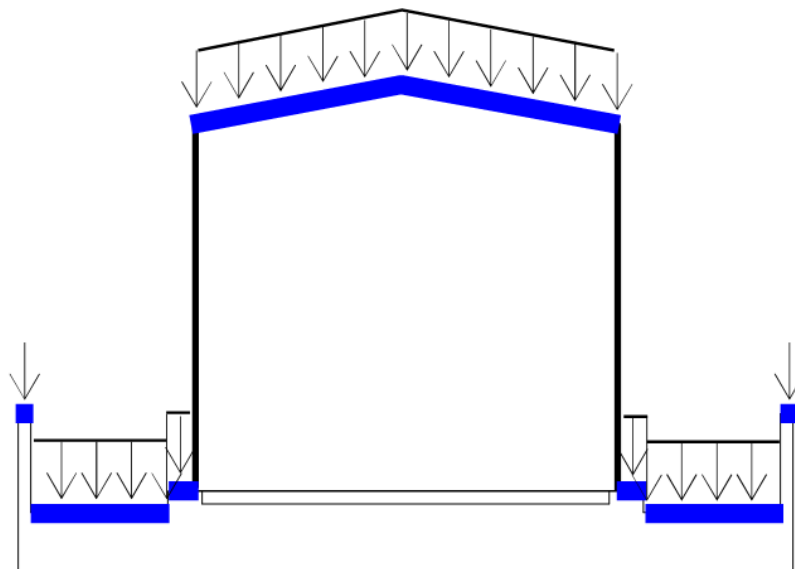


図4-3 積雪荷重の載荷方法

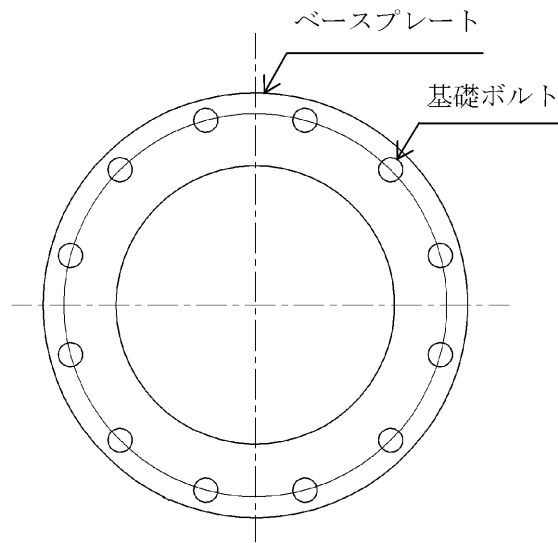
4.3.3 風荷重

風荷重については，タンク及び防油堤を介して基礎スラブに伝達されるため，その影響を考慮する。

4.3.4 上載物（タンク及び防油堤）から受ける地震時荷重

(1) タンクから受ける荷重

タンク下端に生じる水平力及び曲げモーメントは基礎ボルトを通じて基礎スラブに伝達するものと考え、それぞれ分布荷重又はモーメント荷重として基礎ボルト位置に作用させる。基礎ボルトの配置の概念図を図4-4に示す。また、タンク下端に生じる鉛直力については、図4-2と同様に基礎ボルト内側に等分布荷重で与える。



注：概要を示したものであり、ボルトの形状及び本数は実機とは異なる

図4-4 基礎ボルトの配置の概念図

(2) 防油堤から受ける荷重

防油堤下端に生じる水平力及び鉛直力は分布荷重、曲げモーメントはモーメント荷重として基礎スラブに作用させる。

4.3.5 基礎スラブに作用する地震力

地震応答解析より算定した基礎スラブの各質点に生じる応答加速度を用いて、水平及び鉛直方向の震度を求め、重量を乗じた分布荷重として作用させる。躯体に作用する慣性力の作用概念図を図4-5に示す。

また、基礎スラブ底面地盤ばねに生じる曲げモーメントから、上載物（タンク及び防油堤）から作用する曲げモーメントを差し引いた値と等価になる荷重（以下「付加曲げモーメント」という。）を基礎スラブの各節点に、節点の支配面積と中心位置からの距離に応じて偶力に置換して分配し、節点荷重として入力する。なお、付加曲げモーメントの偶力への置換については、基礎スラブ中心軸からの平面保持を仮定している。付加曲げモーメントの概念図を図4-6に示す。

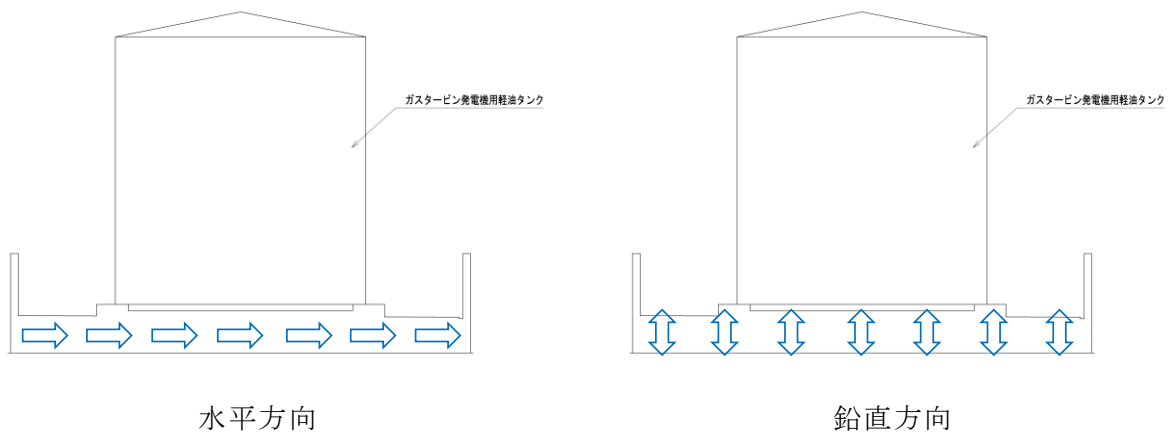
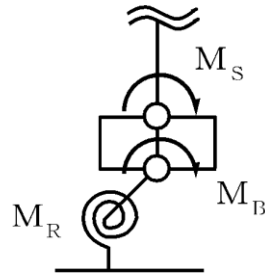


図4-5 躯体に作用する慣性力の作用概念図



■基礎スラブに作用させる付加曲げモーメント M_B の算出

$$M_B = M_R - M_S$$

M_B : 基礎スラブに入力する付加曲げモーメント

M_R : 地震応答解析より設定した地盤ばねに生じる曲げモーメント

M_S : 地震応答解析より設定した上載物（タンク及び防油堤）から基礎スラブに作用する曲げモーメント

図 4-6 付加曲げモーメントの概念図

4.4 地震時荷重の作用方向

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎は、平面的な形状が正方形の直接基礎であり、明確に強軸及び弱軸の区別ができないことから、応力解析を行う際の地震時荷重は、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる検討を行う。

水平 2 方向の検討についてはVI-2-1-8「水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組み合わせに関する影響評価方針」に基づいて行う。具体的には、「3.7.2 3次元構造解析への入力荷重の時刻選定」にて選定された地震動による荷重を主方向とし、主方向と同時刻の従方向及び鉛直方向荷重を水平 2 方向及び鉛直方向地震力として作用させる。

5. 評価内容

5.1 許容限界

屋外重要土木構造物の耐震安全性評価は、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」の「2. 屋外重要土木構造物の要求機能と要求機能に対する耐震評価内容」に示すとおり、各構造物の要求機能と要求機能に応じた許容限界を設定し照査を行う。

耐震安全性評価は、限界状態設計法を用いることとし、限界状態設計法については以下に詳述する。

5.1.1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

構造部材の曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界は、「コンクリート標準示方書」に基づき、終局曲げモーメントとする。

鉄筋コンクリートの曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界を表 5-1 に示す。なお、曲げ・軸力系の破壊に対する照査において断面力による照査を実施する際には、表 5-2 に示す安全係数を見込むことで安全余裕を見込んだ評価を実施する。

表 5-1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

確認項目	許容限界	
構造強度を有すること	曲げモーメント	終局曲げモーメント*

注記* : $\gamma_i \frac{M_d}{M_{u d}} < 1.0$

ここで、

γ_i : 構造物係数 ($\gamma_i = 1.0$)

$M_{u d}$: 終局曲げモーメント ($M_{u d} = M_u / \gamma_b$)

M_u : 断面終局に相当する曲げモーメント

M_d : 照査用曲げモーメント ($M_d = \gamma_a \cdot M$)

γ_a : 構造解析係数 ($\gamma_a = 1.0$)

γ_b : 部材係数 ($\gamma_b = 1.15$)

M : 発生曲げモーメント

表 5-2 曲げ・軸力系の破壊に対する照査（断面力）において考慮している安全係数

安全係数			曲げ・軸力系の 破壊に対する照査		内容
			応答値 算定	限界値 算定	
材料係数	コンクリート	$\gamma_{m c}$	1.0	1.3	コンクリートの特性値 を低減
	鉄筋	$\gamma_{m s}$	1.0	1.0	—
部材係数		γ_b	—	1.15	断面終局に相当する曲 げモーメントを低減

5.1.2 せん断の破壊に対する許容限界

構造部材のせん断破壊に対する許容限界は、棒部材式で求まるせん断耐力とする。

棒部材式

$$V_{y d} = V_{c d} + V_{s d}$$

ここで、 $V_{y d}$: せん断耐力

$V_{c d}$: コンクリートが分担するせん断耐力

$V_{s d}$: せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力

$$V_{c d} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{v c d} \cdot b_w \cdot d / \gamma_{b c}$$

$$f_{v c d} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{c d}} \quad \text{ただし、} f_{v c d} > 0.72 (\text{N/mm}^2) \quad \text{となる場合は}$$

$$f_{v c d} = 0.72 (\text{N/mm}^2)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad (d [\text{m}]) \quad \text{ただし、} \beta_d > 1.5 \quad \text{となる場合は} \beta_d = 1.5$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_v} \quad \text{ただし、} \beta_p > 1.5 \quad \text{となる場合は} \beta_p = 1.5$$

$$\beta_n = 1 + M_o / M_d \quad (N_d \geq 0) \quad \text{ただし、} \beta_n > 2.0 \quad \text{となる場合は} \beta_n = 2.0$$

$$= 1 + 2M_o / M_d \quad (N_d < 0) \quad \text{ただし、} \beta_n < 0 \quad \text{となる場合は} \beta_n = 0$$

$$\beta_a = 0.75 + \frac{1.4}{a/d} \quad \text{ただし、} \beta_a < 1.0 \quad \text{となる場合は} \beta_a = 1.0$$

ここで、 $f'_{c d}$: コンクリート圧縮強度の設計用値 (N/mm^2) で設計基準強度 $f'_{c k}$ を材料係数 $\gamma_{m c}$ 除したもの

$$p_v : \text{引張鉄筋比} \quad p_v = A_s / (b_w \cdot d)$$

A_s : 引張側鋼材の断面積

b_w : 部材の有効幅

d : 部材の有効高さ

N'_d : 設計軸圧縮力

M_d : 設計曲げモーメント

M_o : M_d に対する引張縁において、軸力方向によって発生する応力を打ち消すのに必要なモーメント (デコンプレッションモーメント) $M_o = N'_d \cdot D / 6$

D : 断面高さ

a/d : せん断スパン比

γ_{bc} : 部材係数

$$V_{sd} = \left\{ A_w f_{wyd} (\sin \alpha + \cos \alpha) / s \right\} z / \gamma_{bs}$$

ここで、 A_w : 区間 s におけるせん断補強鉄筋の総断面積

f_{wyd} : せん断補強鉄筋の降伏強度を γ_{ms} で除したもので、 400N/mm^2 以下とする。ただし、コンクリート圧縮強度の特性値 f'_{ck} が 60N/mm^2 以上のときは 800N/mm^2 以下とする。

α : せん断補強鉄筋と部材軸のなす角度

s : せん断補強鉄筋の配置間隔

z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で $d/1.15$ とする。

γ_{bs} : 部材係数

また、「土木学会マニュアル」におけるせん断耐力式による評価においては、表5-3に示すとおり、複数の安全係数が見込まれていることから、せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施することが可能である。

表5-3 せん断耐力式による評価において考慮している安全係数

安全係数			せん断照査		内容
			応答値算定	限界値算定	
材料係数	コンクリート	$\gamma_{m c}$	1.0	1.3	コンクリートの特性値を低減
	鉄筋	$\gamma_{m s}$	1.0	1.0	—
部材係数*	コンクリート	$\gamma_{b c}$	—	1.3	せん断耐力（コンクリート負担分）を低減
	鉄筋	$\gamma_{b s}$	—	1.1	せん断耐力（鉄筋負担分）を低減
構造解析係数		γ_a	1.0	—	応答値（断面力）の割り増し

注記*：「土木学会マニュアル」では、部材係数 $\gamma_b = \gamma_{b 1} \cdot \gamma_{b 2}$

$$\gamma_{b 1} = \begin{cases} 1.3 & (\text{コンクリート}) \\ 1.1 & (\text{鉄筋}) \end{cases}$$

$$\gamma_{b 2} = \begin{cases} 1.0 & (R \leq 0.01) \\ \frac{100R + 2}{3} & (0.01 < R \leq 0.025) \\ 1.5 & (R > 0.025) \end{cases}$$

ここで、R：層間変形角とされている。

$\gamma_{b 2}$ は層間変形角の値によらず、部材が降伏していない状態であれば、

$\gamma_{b 2} = 1.0$ としてよいとされている。

5.1.3 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

基礎地盤に発生する接地圧に対する許容限界は、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき、岩盤の極限支持力度とする。

基礎地盤の支持性能に対する許容限界を表5-4に示す。

なお、MMRについては岩盤面の不陸を調整する目的で設置されており、C_L級岩盤の許容限界と比較して強度が十分大きい

(支圧強度 $f'_a = 18.0\text{N/mm}^2$) ことから、MMRの評価はC_L級岩盤の評価に包絡される。

表5-4 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

評価項目	基礎地盤	許容限界 (N/mm ²)
極限支持力度	C _L 級岩盤	3.9

6. 評価結果

6.1 構造部材の健全性に対する評価結果（水平2方向検討）

水平2方向による構造部材の曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値を表6-1に、せん断破壊に対する各評価位置での最大照査値を表6-2に示す。

また、照査時刻における断面力図を図6-1～図6-6に示す。

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の照査用曲げモーメント及び照査用せん断力が許容限界以下であることを確認した。

表6-1 曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値（水平2方向）

解析 ケース	地震動	照査用曲げ モーメント M_d (kN・m)	終局曲げ モーメント M_{ud}^{*1} (kN・m)	照査値 M_d/M_{ud}
①	S s - N 2 (E W)	1097	2289 ^{*2}	0.48
③	S s - D	1201	2329 ^{*3}	0.52

注記*1：終局曲げモーメント M_{ud} =断面終局に相当する曲げモーメント M_d /部材係数 γ_b (=1.15)

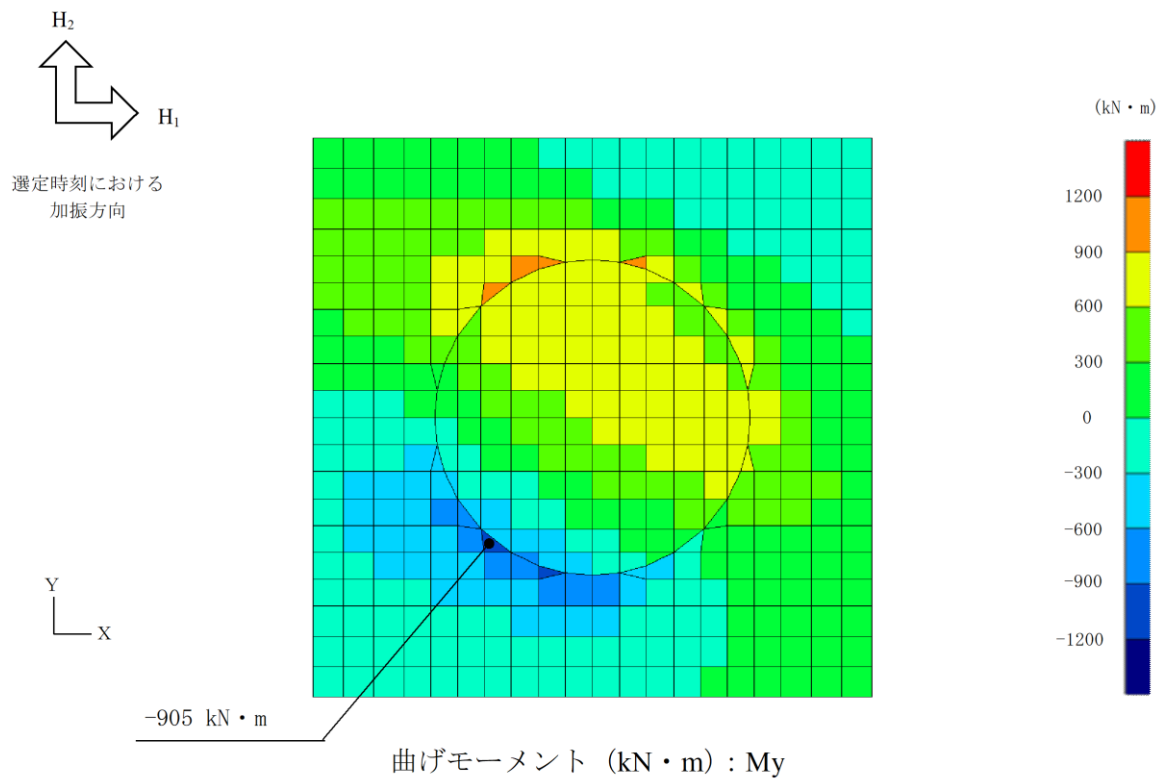
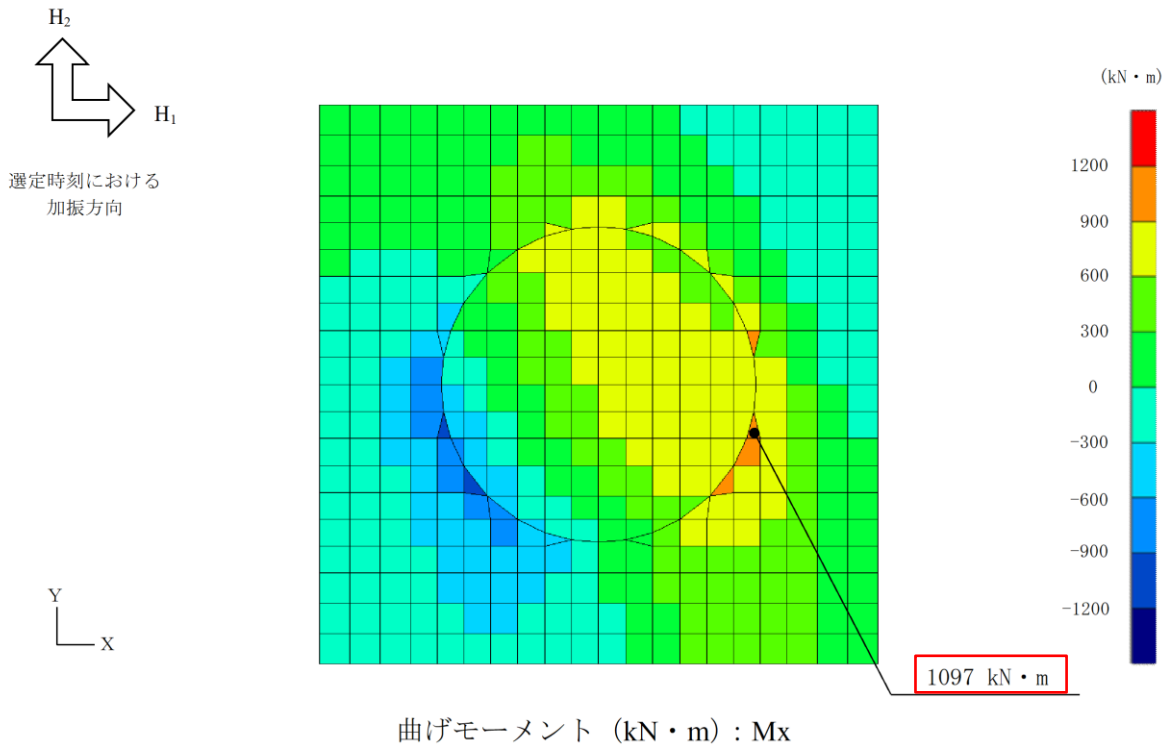
*2：同時刻に照査対象要素に発生する軸力-567kN（圧縮）を考慮

*3：同時刻に照査対象要素に発生する軸力-658kN（圧縮）を考慮

表6-2 せん断破壊に対する最大照査値（水平2方向）

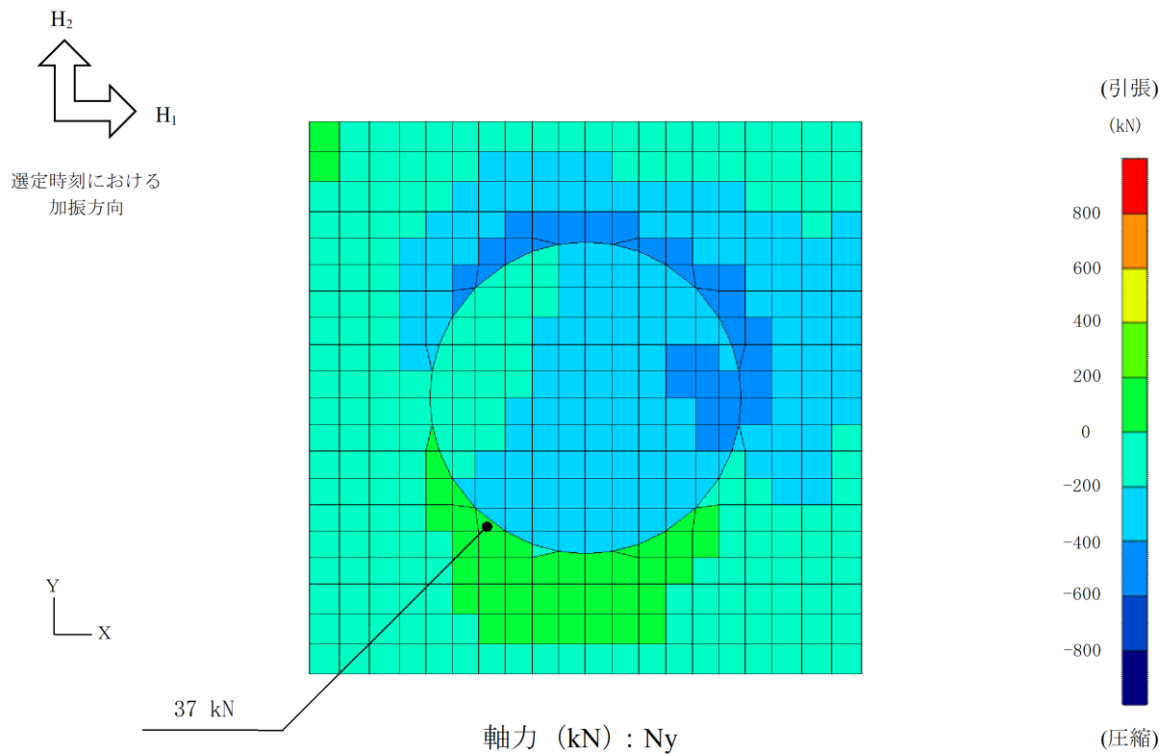
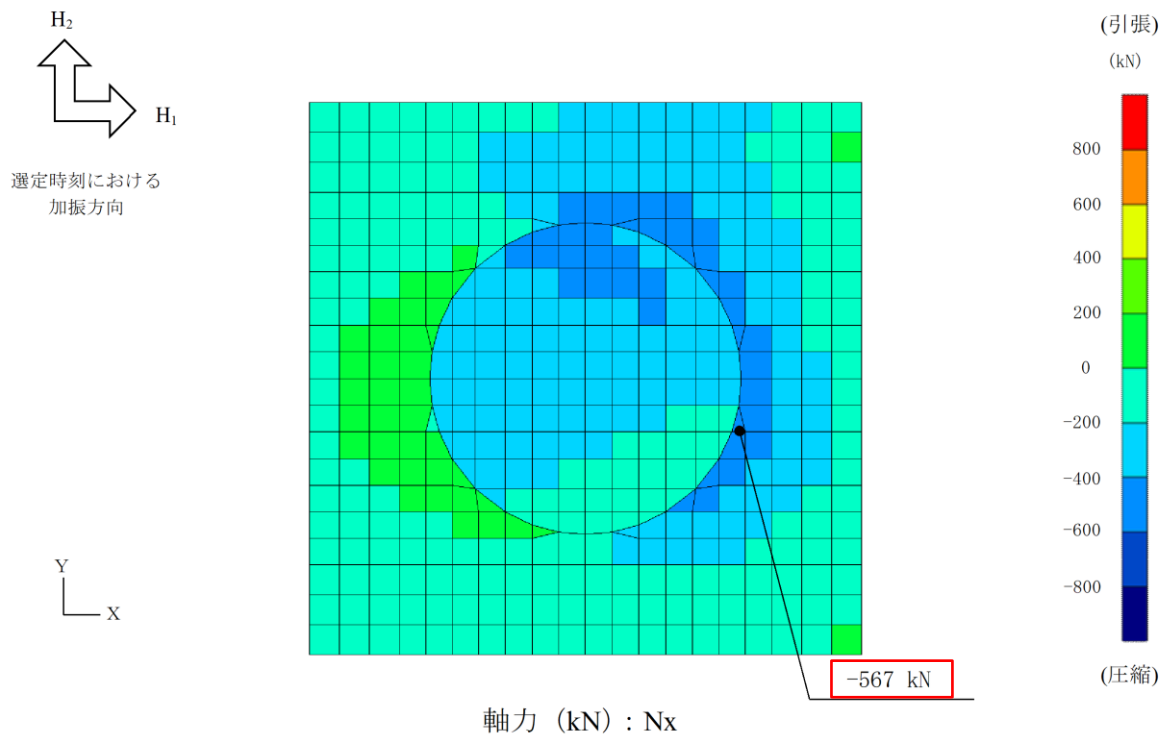
解析 ケース	地震動	照査用 せん断力 V_d^{*} (kN)	せん断耐力 V_{yd} (kN)	照査値 V_d/V_{yd}
①	S s - N 2 (E W)	759	1239	0.62
③	S s - D	793	1245	0.64

注記*：照査用せん断力 V_d =発生せん断力 V ×構造解析係数 γ_a (=1.0)



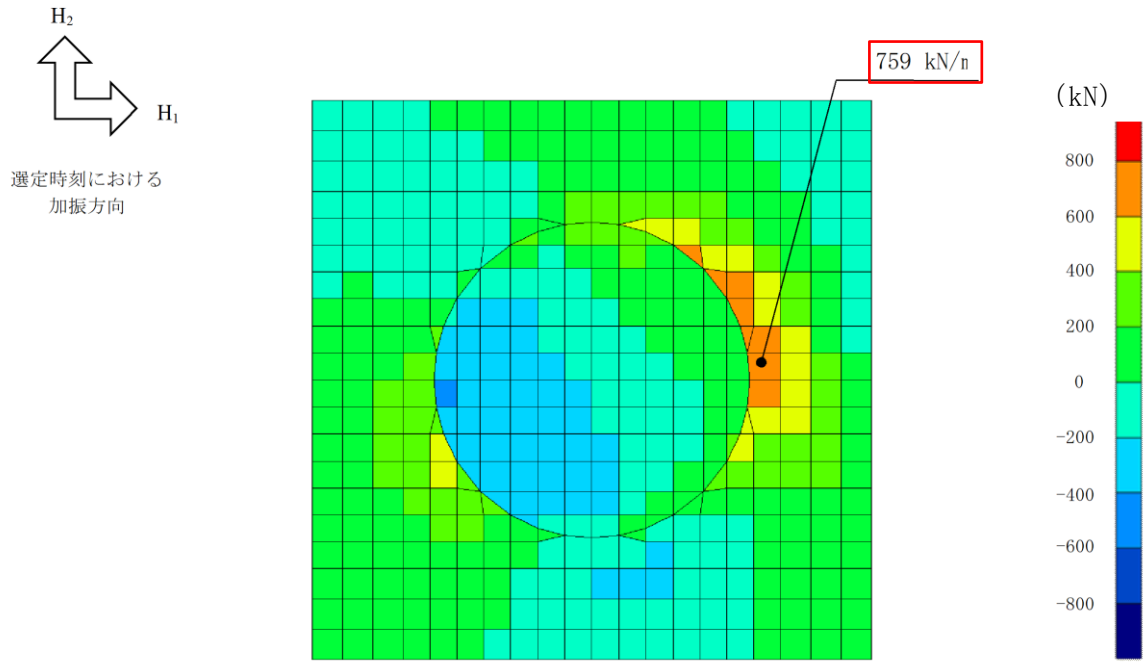
: 照査に用いた断面力

図 6-1 照査時刻における断面力図
(解析ケース①, S s - N 2 (E W), 26.780 秒)

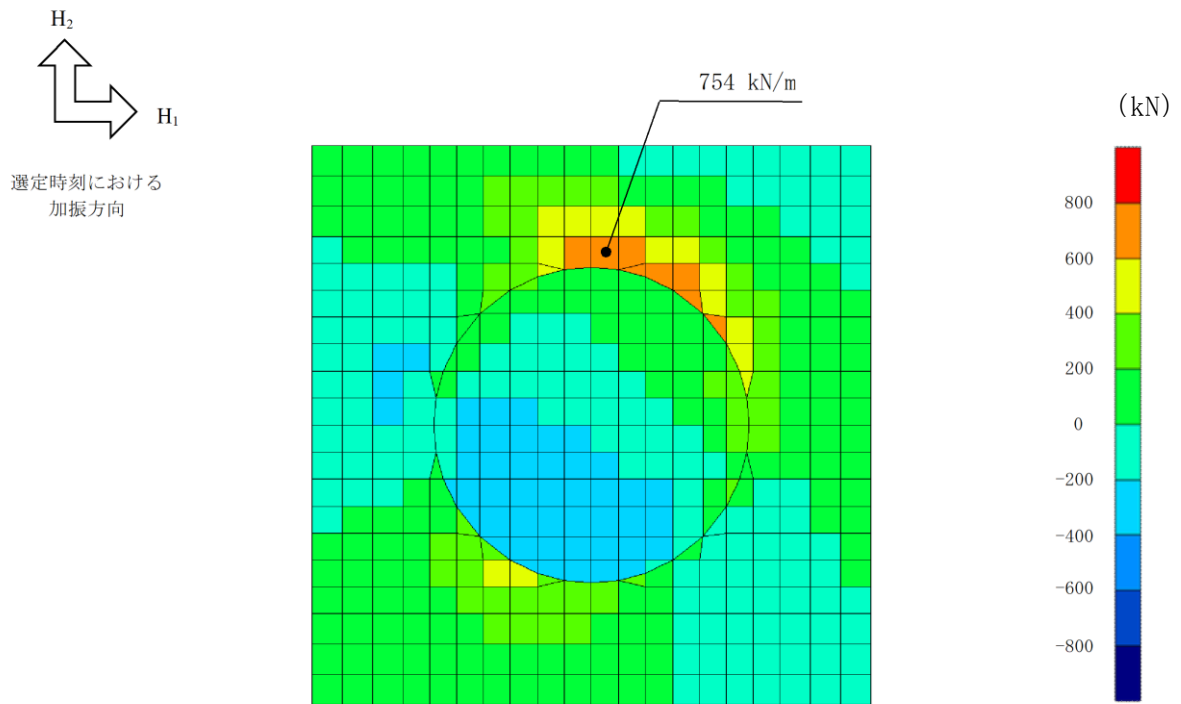


: 照査に用いた断面力

図 6-2 照査時刻における断面力図
(解析ケース①, $S_s - N_2$ (EW), 26.780 秒)



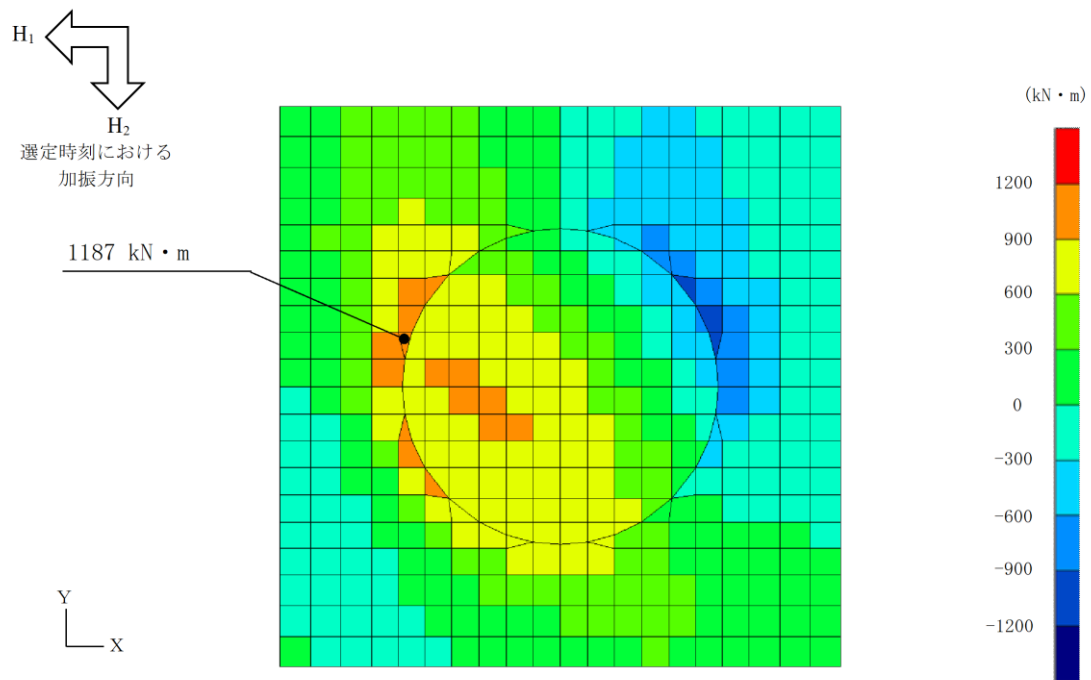
せん断力 (kN) : Q_x



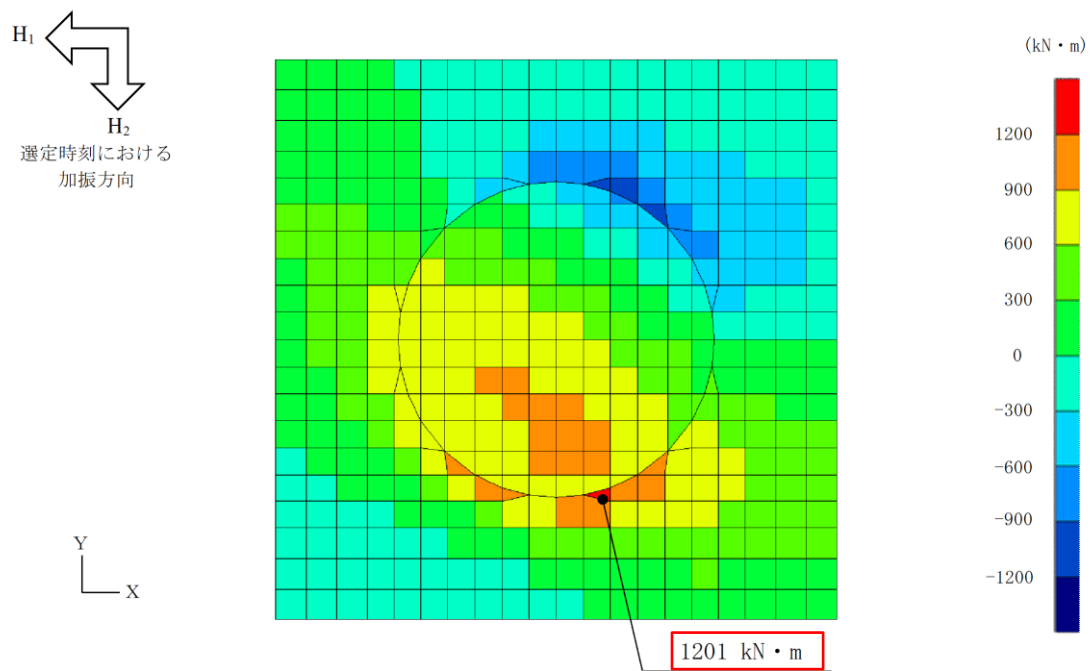
せん断力 (kN) : Q_y

: 照査に用いた断面力

図 6-3 照査時刻における断面力図
(解析ケース①, $S_s - N2$ (EW), 26.780 秒)



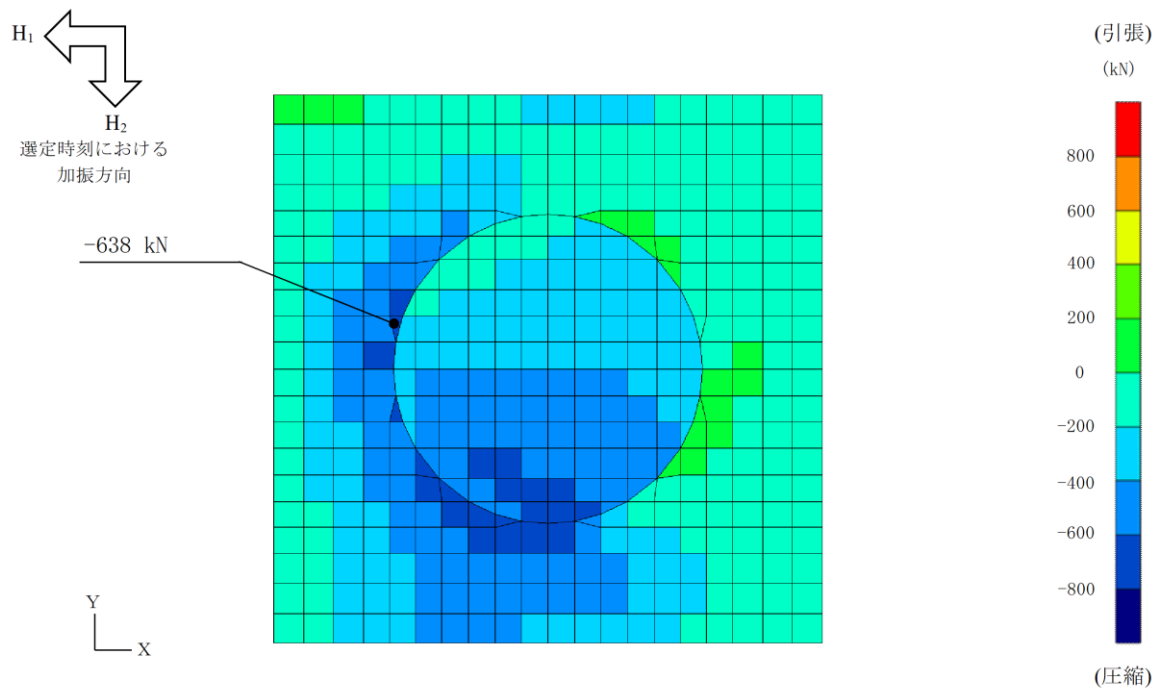
曲げモーメント (kN · m) : M_x



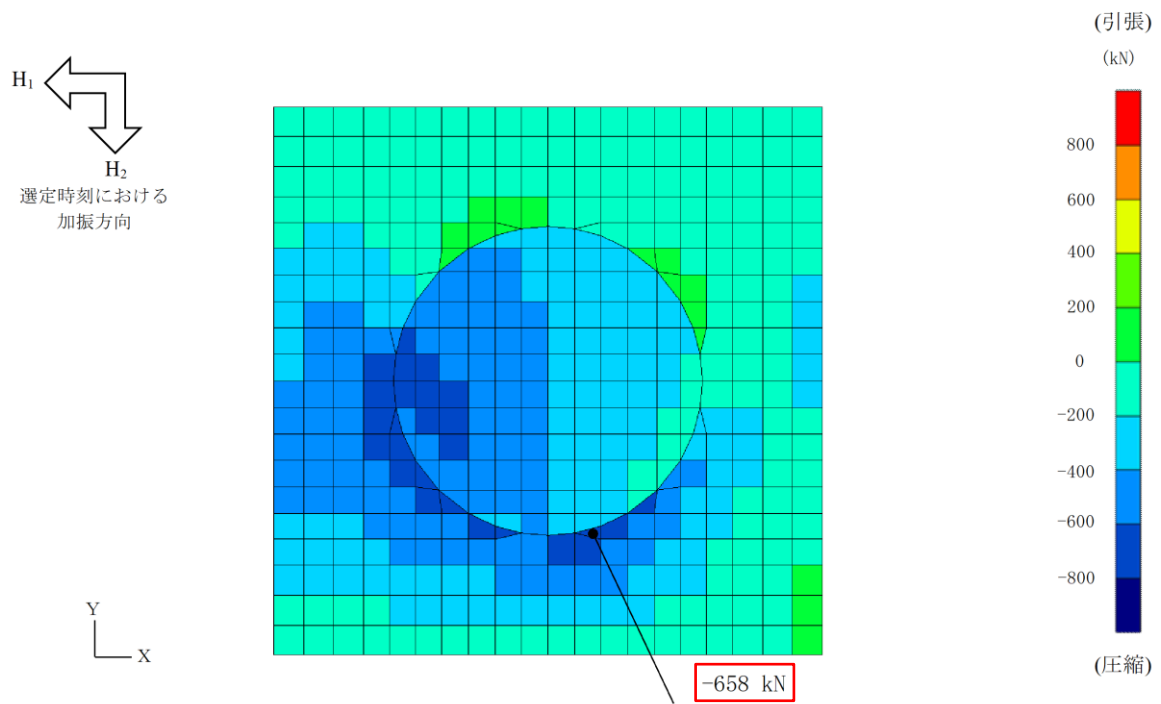
曲げモーメント (kN · m) : M_y

: 照査に用いた断面力

図 6-4 照査時刻における断面力図
(解析ケース③, S s - D, 15.268 秒)



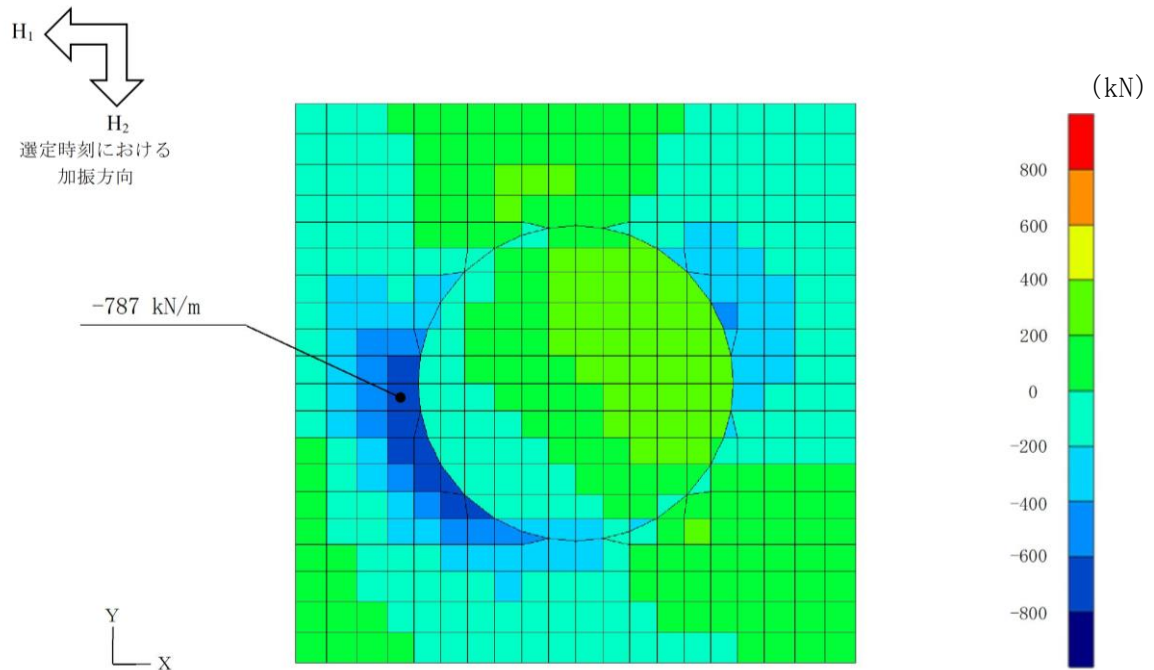
軸力 (kN) : N_x



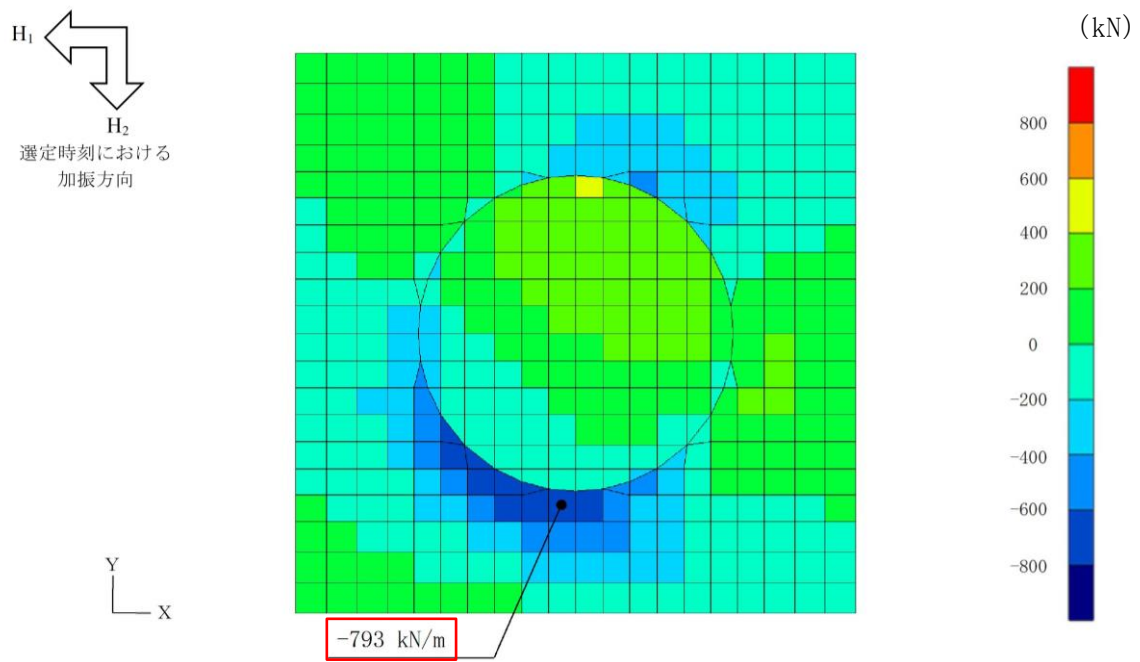
軸力 (kN) : N_y

: 照査に用いた断面力

図 6-5 照査時刻における断面力図
(解析ケース③, $S_s - D$, 15.268 秒)



(a) せん断力 (kN) : Q_x



せん断力 (kN) : Q_y

-793 kN/m : 照査に用いた断面力

図 6-6 照査時刻における断面力図
 (解析ケース③, S s - D, 15.268 秒)

6.2 基礎地盤の支持性能に対する評価結果

基礎地盤の支持性能に対する照査は鉛直力 N と転倒モーメント M_r のつり合い条件より最大接地圧 q_{max} を算出し、極限支持力度以下となることを確認する。

基礎地盤の支持性能に対する照査結果を表6-3に、最大照査値発生位置図を図6-7及び図6-8に示す。ガスタービン発電機用軽油タンク基礎に発生する最大接地圧が、極限支持力度を下回ることを確認した。

表6-3 基礎地盤の支持性能に対する照査結果（水平2方向）

解析 ケース	地震動	最大接地圧 q_{max} (N/mm ²)	極限支持力度 R_u (N/mm ²)	照査値 R_d/R_u
①	S _s -N2 (EW)	0.45	3.9	0.12
③	S _s -D	0.42	3.9	0.11

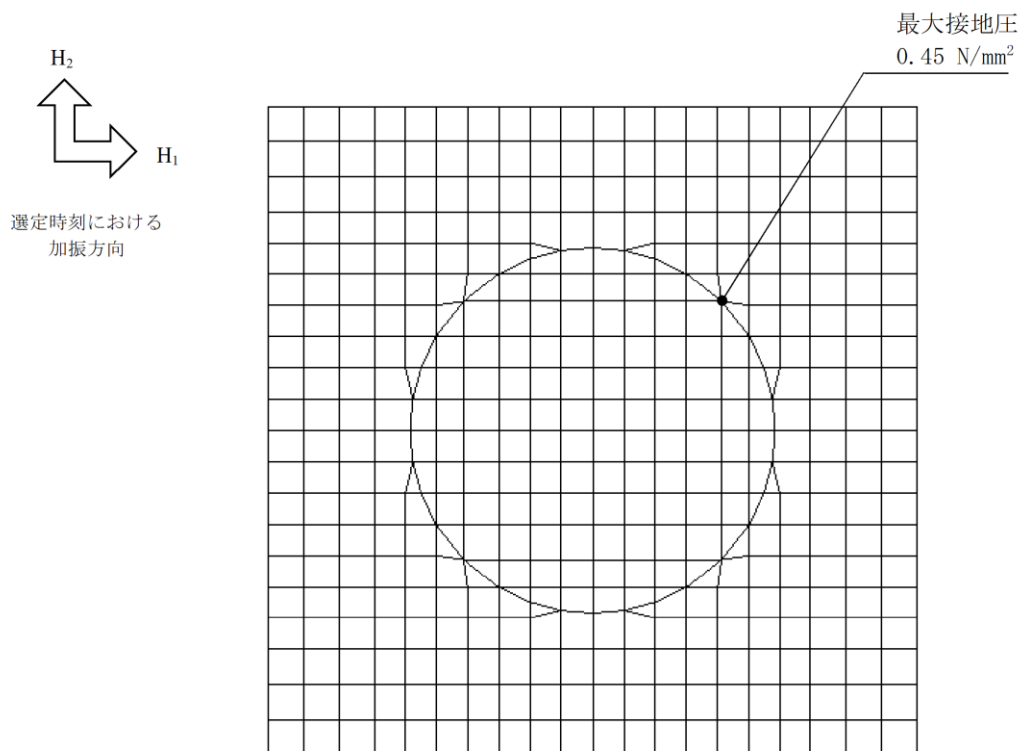


図6-7 最大照査値発生位置図
(解析ケース①, S_s-N2 (EW), 26.780秒)

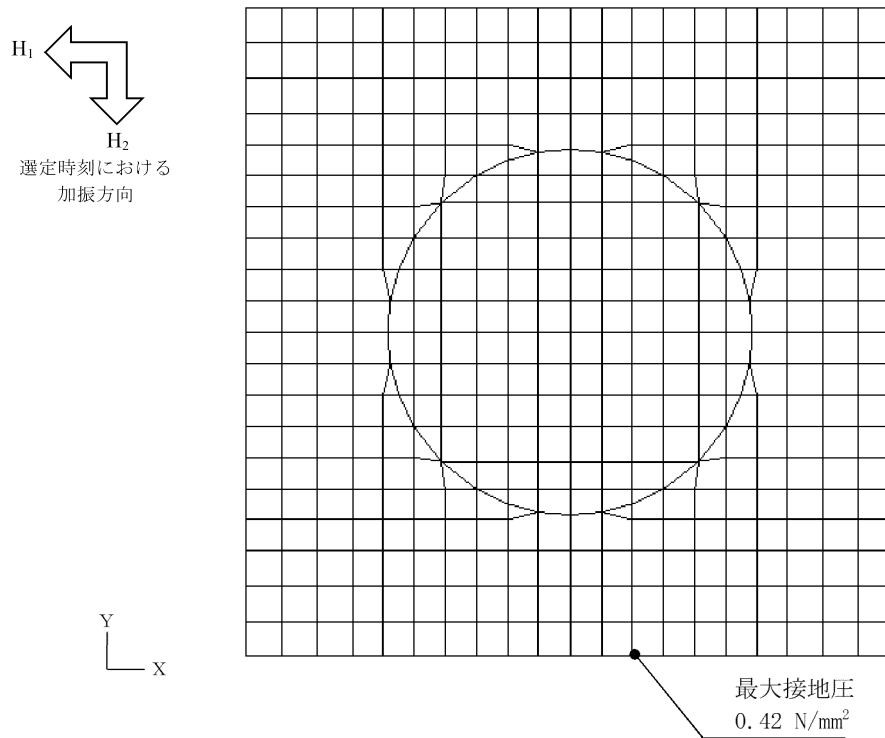


図 6-8 最大照査値発生位置図
 (解析ケース③, $S_s - D$, $t = 15.268\text{s}$)

7. まとめ

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎については、基準地震動 S_s による耐震評価として、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び基礎地盤の支持性能に対する評価を実施した。

構造部材の健全性評価については、曲げモーメント及びせん断力が要求性能に応じた許容限界を下回ることを確認した。

基礎地盤の支持性能評価については、基礎地盤に発生する応力（接地圧）が極限支持力度に基づく許容限界を下回ることを確認した。

以上から、ガスタービン発電機用軽油タンク基礎は、基準地震動 S_s による地震力に対して、構造強度を有すること及び支持機能を有することを確認した。

参考資料 1 防油堤の耐震評価

1. 概要

本資料は、ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の付帯設備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であるガスタービン発電機燃料配管等を間接支持する防油堤が、基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有していることを確認するものである。

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の付帯設備に要求される機能の維持を確認するにあたっては、本文より得られた地震応答解析の結果に基づき、片持ち梁の理論式による構造部材の健全性評価を実施する。

2. 基本方針

2.1 構造概要

評価対象とする防油堤の配置図を図 2-1、断面図を図 2-2 に示す。

防油堤は幅 0.3m、高さ 2.5m の鉄筋コンクリート造で、ガスタービン発電機用軽油タンク基礎を取り囲むように設置されている。

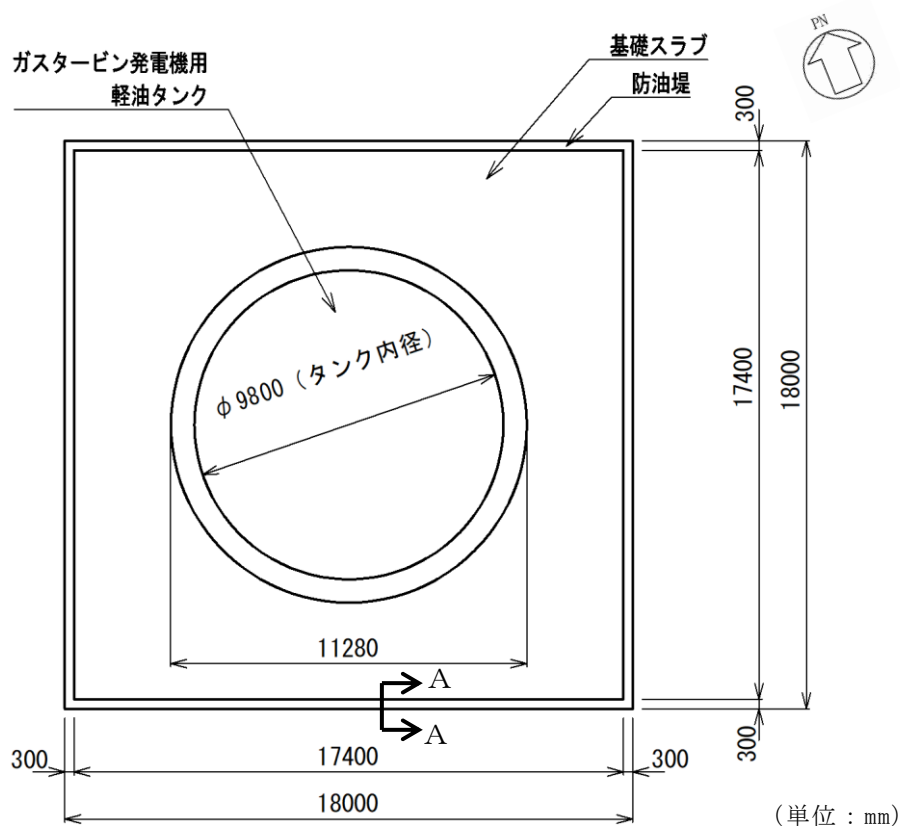


図 2-1 防油堤 配置図

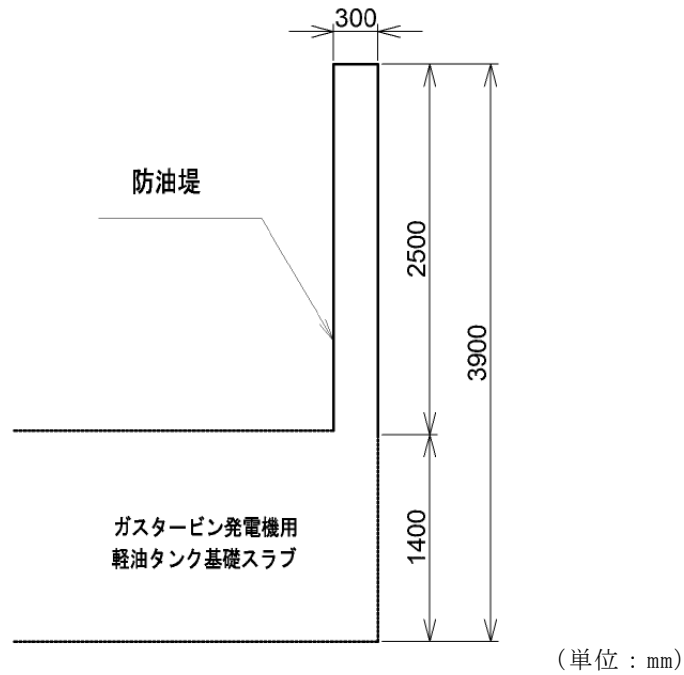


図 2-2 防油堤 断面図

2.2 評価方針

付帯設備の耐震評価フローを図 2-3 に示す。

付帯設備の耐震評価は、本文より得られた地震応答解析の結果に基づき、片持ち梁の理論式により断面力を算定し、鉄筋コンクリート部材の照査用曲げモーメント及び照査用せん断力が表 2-1 に示す許容限界以下であることを確認する。

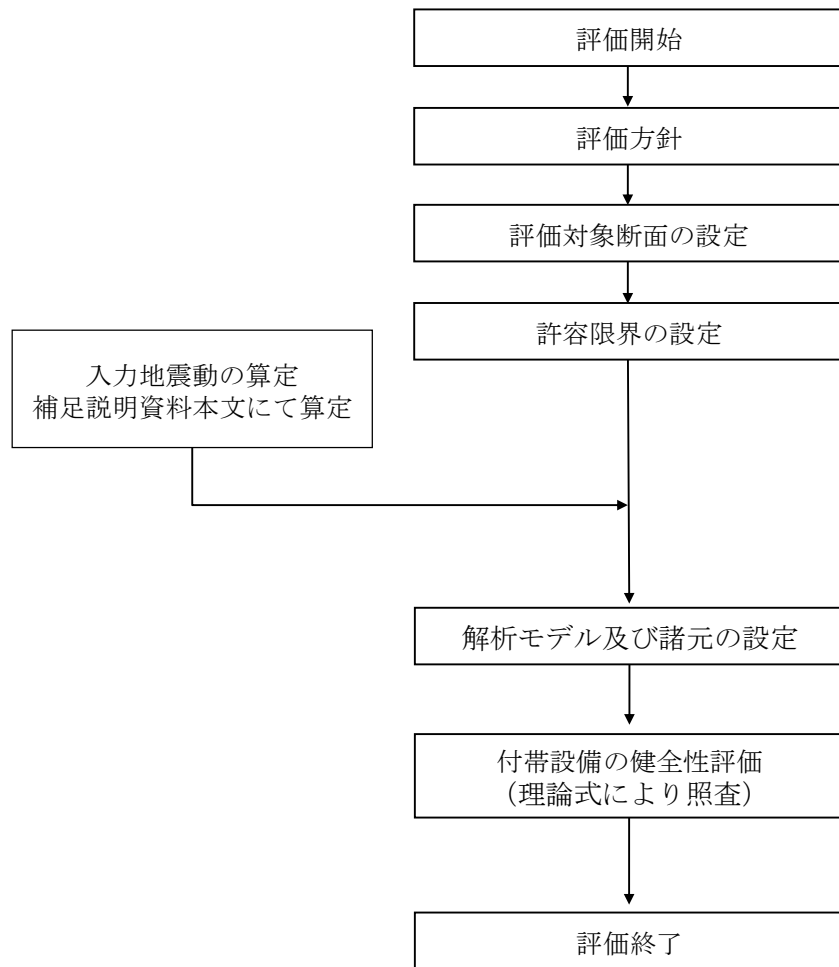


図 2-3 付帯設備の耐震評価フロー

表 2-1 付帯設備 評価項目

付帯設備	評価項目	評価方法	許容限界	
			曲げ・軸力	終局曲げモーメント*
防油堤	構造部材の健全性	照査用曲げモーメント及び照査用せん断力が許容限界を下回ることを確認	せん断力	せん断耐力*
			曲げ・軸力	終局曲げモーメント*

注記*： 妥当な安全余裕を考慮する。

3. 耐震評価

3.1 評価対象断面

防油堤の評価対象断面位置図を図 3-1、概略配筋図を図 3-2 に示す。

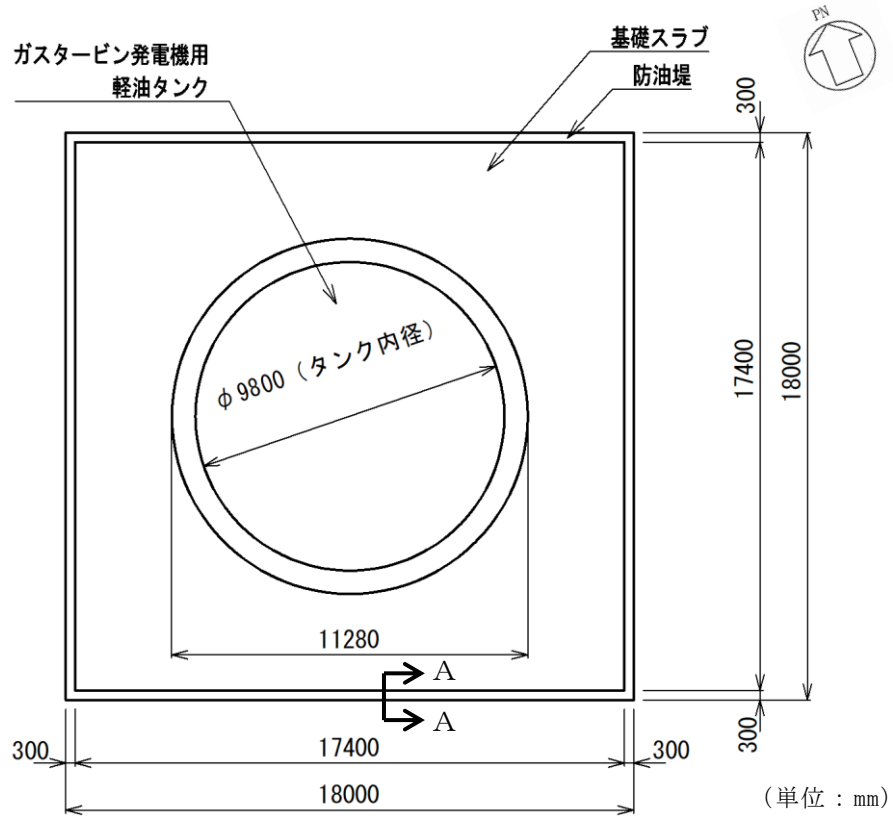


図 3-1 防油堤 評価対象断面位置図

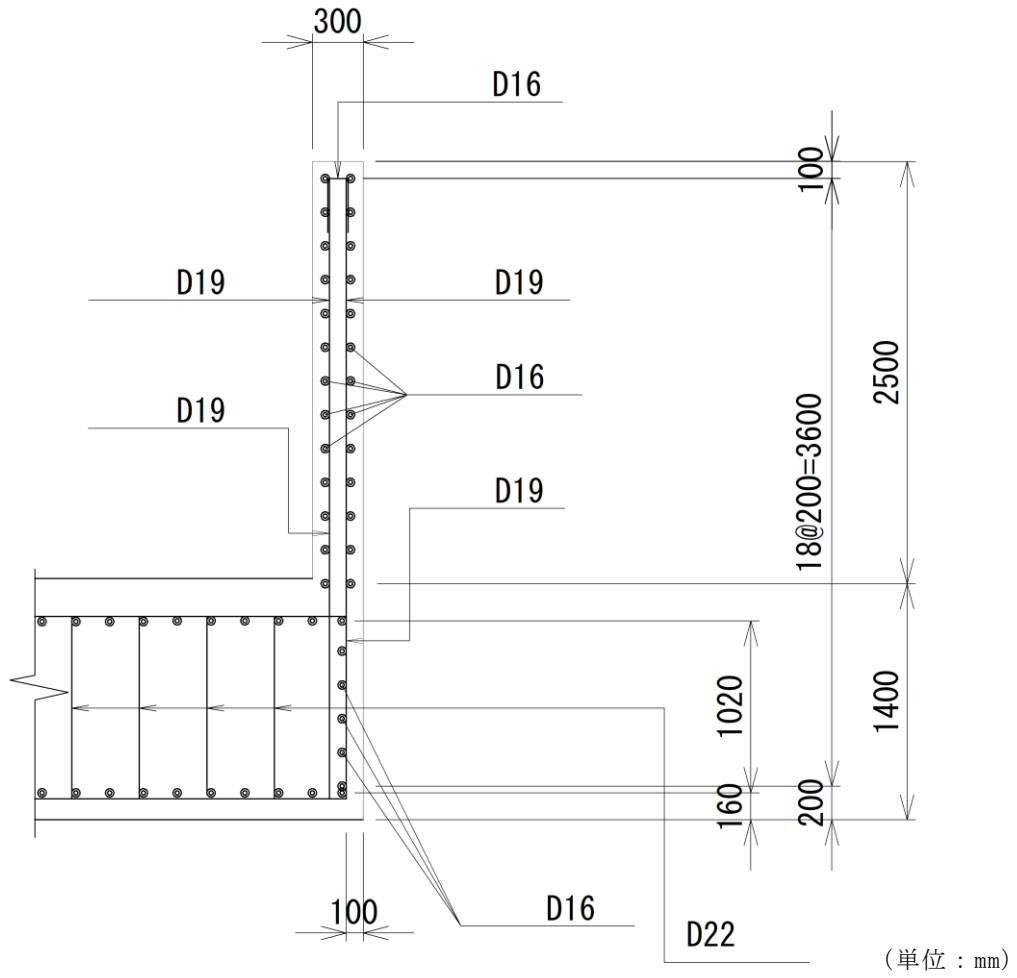


图 3-2 防油堤 概略配筋图 (A-A 断面)

3.2 解析モデル

防油堤の解析モデルを図 3-3 に示す。防油堤は片持ち梁でモデル化し、図 3-4 に示す理論式により断面力を算定する。

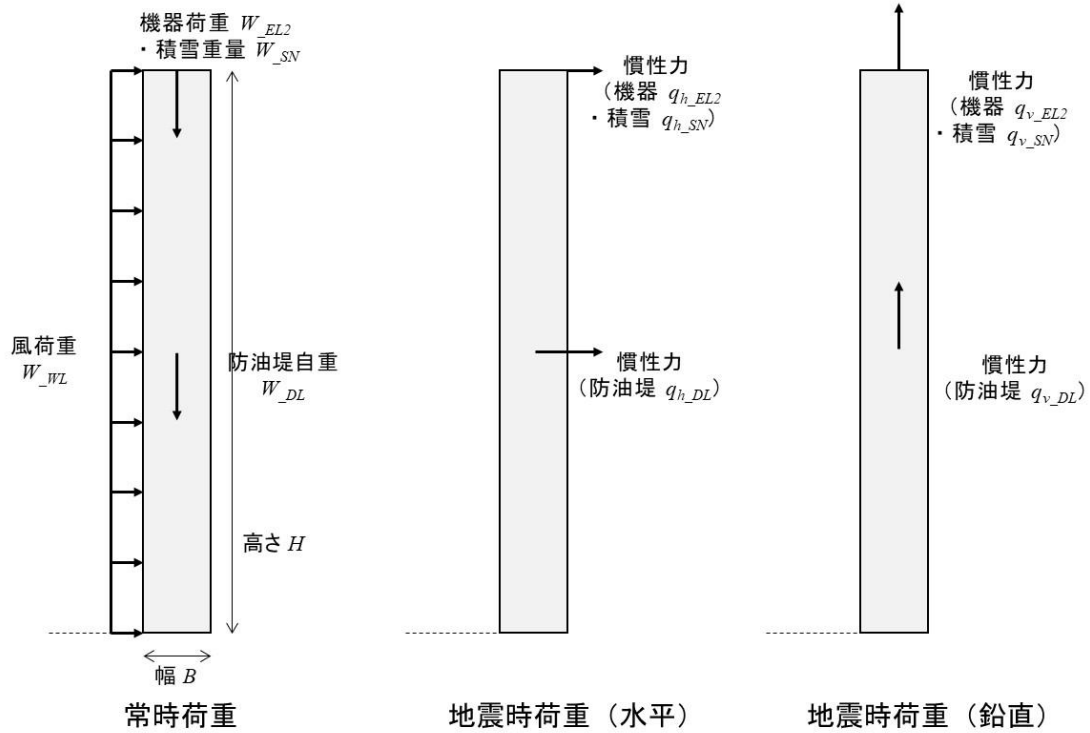


図 3-3 防油堤の解析モデル

曲げモーメント (地震時)

$$: M = q_{h_DL} \times 1/2 \times H + (q_{h_EL2} + q_{h_SN}) \times H + W_{WL} \times H^2 \times 1/2$$

せん断力 (地震時)

$$: Q_E = q_{h_DL} + q_{h_EL2} + q_{h_SN} + W_{WL} \times H$$

軸力 (地震時, 鉛直震度 K_v : 上向き)

$$: N = (W_{DL} + W_{EL2} + W_{SN}) - (q_{v_DL} + q_{v_EL2} + q_{v_SN})$$

ただし,

$$q_{h_DL} = K_h \times W_{DL}$$

$$q_{h_EL2} = K_h \times W_{EL2}$$

$$q_{h_SN} = K_h \times W_{SN}$$

$$q_{v_DL} = K_v \times W_{DL}$$

$$q_{v_EL2} = K_v \times W_{EL2}$$

$$q_{v_SN} = K_v \times W_{SN}$$

図 3-4 断面力算定の理論式

3.3 材料特性

構造物の使用材料を表 3-1、材料の物性値を表 3-2 に示す。

表 3-1 使用材料

材料	仕様
コンクリート	設計基準強度 24.0N/mm ²
鉄筋	SD345

表 3-2 材料の物性値

材料	項目	材料諸元
鉄筋コンクリート	単位体積重量 (kN/m ³)	24.0
コンクリート	ヤング係数 (N/mm ²)	2.5×10 ⁴
	ポアソン比	0.2

3.4 照査用震度

防油堤の照査用水平震度は、本文における地震応答解析の全解析ケース（ケース①～ケース③）から、防油堤における最大応答加速度（水平方向）を用いて算定する。

照査用鉛直震度は、水平震度の算定に用いた最大応答加速度（水平方向）と同時刻の防油堤における最大応答加速度（鉛直方向）を用いて算定する。

照査用震度を表 3-3 に示す。

表 3-3 照査用震度の設定

解析 ケース	地震動	時刻	照査用震度	
			水平震度 K_h	鉛直震度 K_v
③	S s - D	11.155s	2.40	-0.03

3.5 入力荷重

防油堤の耐震評価における入力荷重を表 3-4 に示す。防油堤の入力荷重は、「3.4 照査用震度」で設定した照査用震度、固定荷重及び積載荷重を用いて算定する。

積載荷重は本文に基づく積雪荷重及び風荷重とする。なお、基礎スラブ上の積雪が防油堤に及ぼす影響は軽微であることから考慮しない。

表 3-4 防油堤の耐震評価における入力荷重

区分	種別	考慮する荷重
主荷重	固定荷重	防油堤自重，機器荷重
	積載荷重	積雪荷重，風荷重
地震時 荷重	地震時荷重	防油堤に作用する慣性力

3.6 許容限界

3.6.1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

防油堤の曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界は、「コンクリート標準示方書」に基づき、終局曲げモーメントとする。

3.6.2 せん断破壊に対する許容限界

構造部材のせん断破壊に対する許容限界は、「土木学会マニュアル」に基づき、棒部材式で求まるせん断耐力とする。

4. 耐震評価結果

4.1 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果

防油堤の曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値を表 4-1 に示す。

防油堤の照査用曲げモーメントが許容限界以下であることを確認した。

表 4-1 曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値 (11.155 秒)

解析 ケース	地震動	照査用曲げモーメント M_d (kN・m)	終局曲げ モーメント M_{ud} (kN・m) *1	照査値 M_d/M_{ud}
③	S s - D	58	99*2	0.59

注記*1：終局曲げモーメント M_{ud} = 断面終局に相当する曲げモーメント M_d / 部材係数 γ_b (=1.15)

*2：同時刻に照査対象要素に発生する軸力-19kN (圧縮) を考慮

4.2 せん断力に対する評価結果

防油堤のせん断破壊に対する最大照査値を表 4-2 に示す。

防油堤の照査用せん断力が許容限界以下であることを確認した。

表 4-2 せん断破壊に対する最大照査値 (11.155 秒)

解析 ケース	地震動	照査用せん断力 V_d^* (kN)	せん断耐力 V_{yd} (kN)	照査値 V_d/V_{yd}
③	S s - D	46	111	0.42

注記*：照査用せん断力 V_d = 発生せん断力 V × 構造解析係数 γ_a (=1.0)

参考資料2 機器・配管系の耐震評価に適用する影響検討ケース

1. コンクリート実強度を反映した解析ケース

1.1 はじめに

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎について、構造物の機器・配管系の耐震評価に適用する床応答への保守的な配慮として、コンクリートの物性値を実強度に変更し、ケース④の解析を実施している。

コンクリートの実強度の設定方法は、本文「3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース」に示す。

1.2 解析方針

耐震評価は、本文「2. 評価条件」における評価条件に基づき実施する。変更した材料の物性値を表1-1に示す。影響検討ケースは位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動 $S_s - D$ に対して実施することとする。

影響検討に用いる地震動は、本文で使用した基準地震動 $S_s - D$ (++) を使用する。

表 1-1 材料の物性値

材料		仕様	ヤング係数 (N/mm^2)
構造物	コンクリート	実強度 36.1 N/mm^2	2.98 $\times 10^4$

1.3 解析結果

ケース④に係る地震応答解析結果として、基準地震動 $S_s - D$ (++) に対する最大応答値を図1-1～図1-7及び表1-2～表1-8に示す。

また、その際の接地率を表1-9に示す。表1-9より接地率は、誘発上下動を考慮した地震応答解析を適用できる基準値(50%以上)を満足していることを確認した。

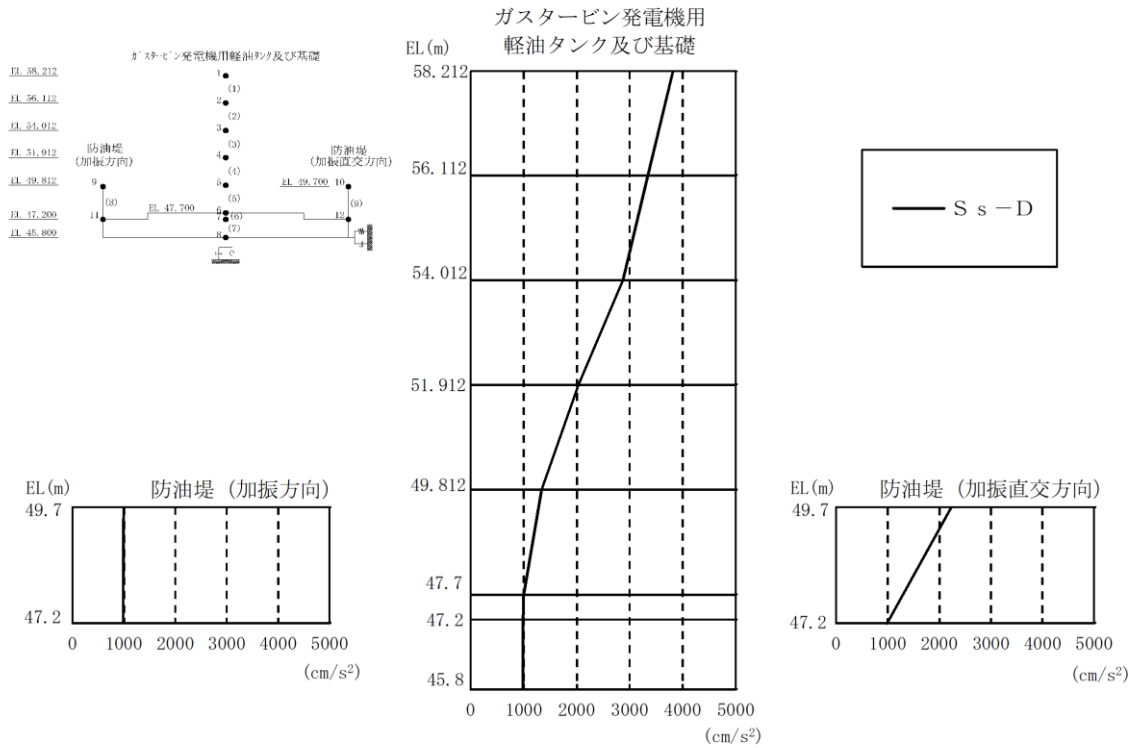


図 1-1 最大応答加速度分布図（水平方向，解析ケース④）

表 1-2 最大応答加速度一覧（水平方向，解析ケース④）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答加速度 (cm/s ²)								
			S _s -D	S _s -F 1 (NS)	S _s -F 1 (EW)	S _s -F 2 (NS)	S _s -F 2 (EW)	S _s -N 1	S _s -N 2 (NS)	S _s -N 2 (EW)	最大値
ガスタービン発電機用軽油タンク	58.212	1	3816	-	-	-	-	-	-	-	3816
	56.112	2	3342	-	-	-	-	-	-	-	3342
	54.012	3	2868	-	-	-	-	-	-	-	2868
	51.912	4	2032	-	-	-	-	-	-	-	2032
	49.812	5	1337	-	-	-	-	-	-	-	1337
基礎	47.7	6	997	-	-	-	-	-	-	-	997
	47.2	7	985	-	-	-	-	-	-	-	985
基礎	45.8	8	980	-	-	-	-	-	-	-	980
	45.8	8	980	-	-	-	-	-	-	-	980
防油堤 (加振方向)	49.7	9	993	-	-	-	-	-	-	-	993
	47.2	11	985	-	-	-	-	-	-	-	985
防油堤 (加振直交方向)	49.7	10	2233	-	-	-	-	-	-	-	2233
	47.2	12	985	-	-	-	-	-	-	-	985

注：ハッチングは影響検討ケースを実施する地震動を示す。

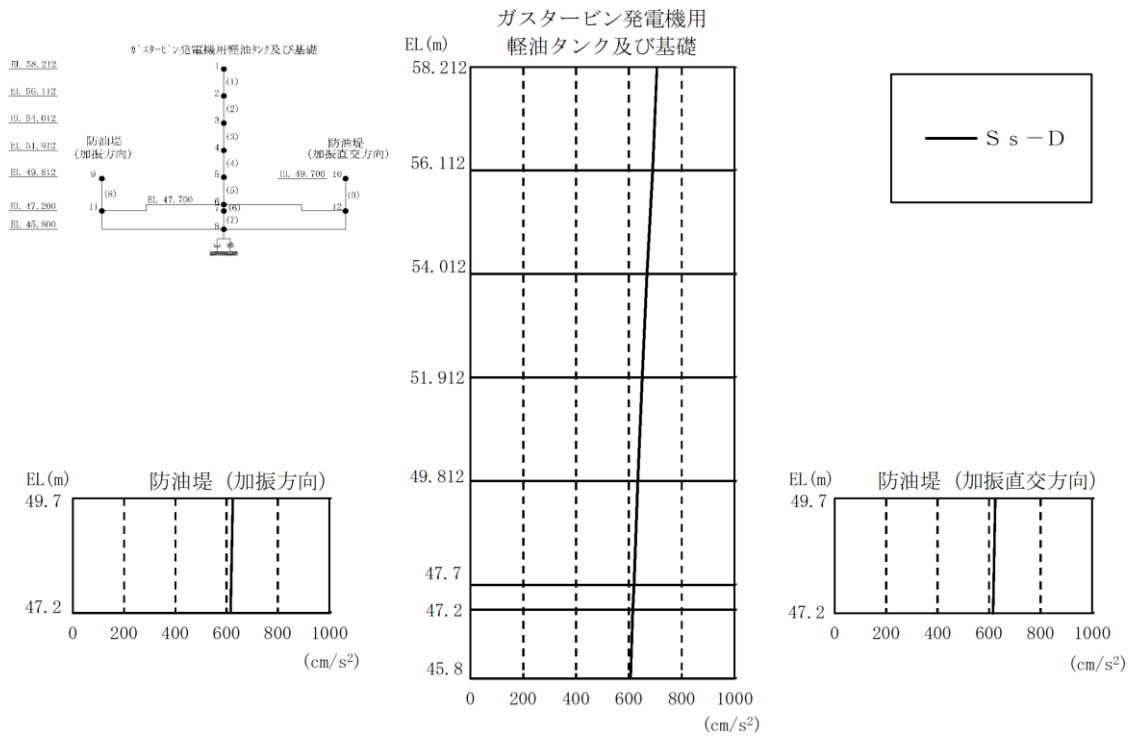


図 1-2 最大応答加速度分布図（鉛直方向，解析ケース④）

表 1-3 最大応答加速度一覧（鉛直方向，解析ケース④）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答加速度 (cm/s ²)					最大値
			S _s -D	S _s -F1	S _s -F2	S _s -N1	S _s -N2	
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212	1	706	-	-	-	-	706
	56.112	2	691	-	-	-	-	691
	54.012	3	669	-	-	-	-	669
	51.912	4	651	-	-	-	-	651
	49.812	5	634	-	-	-	-	634
	47.7	6	620	-	-	-	-	620
基礎	47.2	7	615	-	-	-	-	615
	45.8	8	607	-	-	-	-	607
防油堤 (加振方向)	49.7	9	624	-	-	-	-	624
	47.2	11	615	-	-	-	-	615
防油堤 (加振直交方向)	49.7	10	624	-	-	-	-	624
	47.2	12	615	-	-	-	-	615

注：ハッチングは影響検討ケースを実施する地震動を示す。

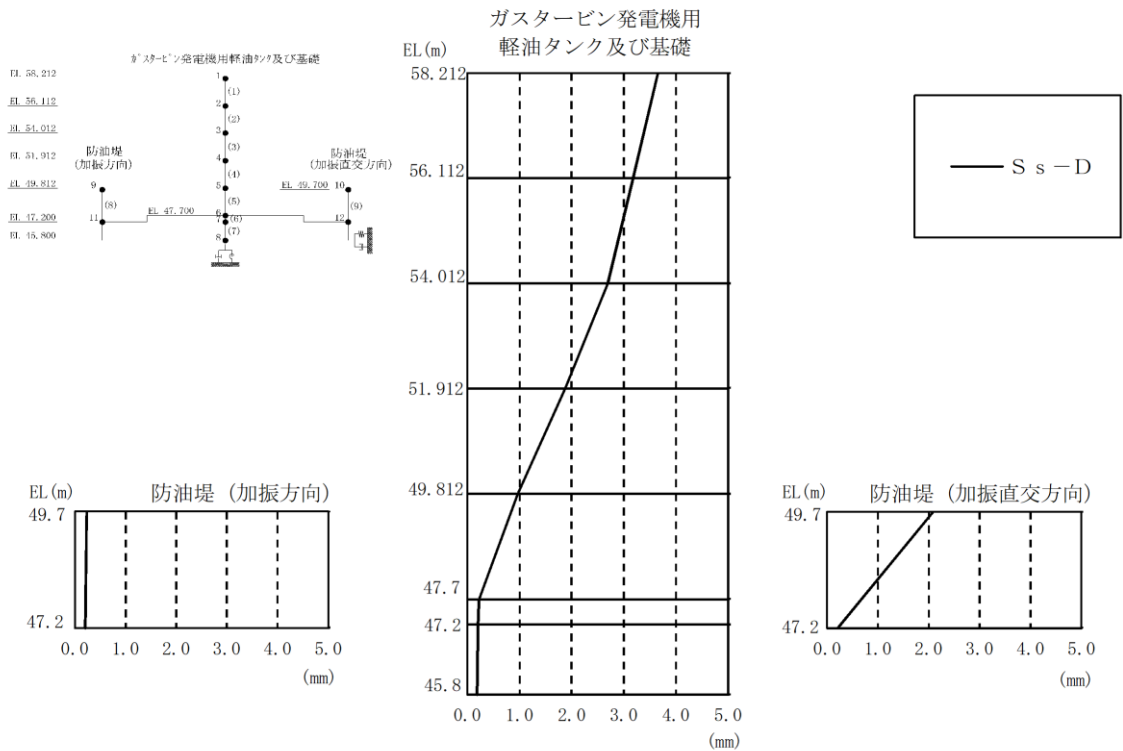


図 1-3 最大応答変位分布図 (水平方向, 解析ケース④)

表 1-4 最大応答変位一覧 (水平方向, 解析ケース④)

部位	EL (m)	質点番号	最大応答変位 (mm)								
			S s - D	S s - F 1 (NS)	S s - F 1 (EW)	S s - F 2 (NS)	S s - F 2 (EW)	S s - N 1	S s - N 2 (NS)	S s - N 2 (EW)	最大値
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212	1	3.65	-	-	-	-	-	-	-	3.65
	56.112	2	3.17	-	-	-	-	-	-	-	3.17
	54.012	3	2.69	-	-	-	-	-	-	-	2.69
	51.912	4	1.87	-	-	-	-	-	-	-	1.87
	49.812	5	0.96	-	-	-	-	-	-	-	0.96
	47.7	6	0.22	-	-	-	-	-	-	-	0.22
基礎	47.2	7	0.20	-	-	-	-	-	-	-	0.20
	45.8	8	0.19	-	-	-	-	-	-	-	0.19
防油堤 (加振方向)	49.7	9	0.23	-	-	-	-	-	-	-	0.23
	47.2	11	0.20	-	-	-	-	-	-	-	0.20
防油堤 (加振直交方向)	49.7	10	2.09	-	-	-	-	-	-	-	2.09
	47.2	12	0.20	-	-	-	-	-	-	-	0.20

注：ハッチングは影響検討ケースを実施する地震動を示す。

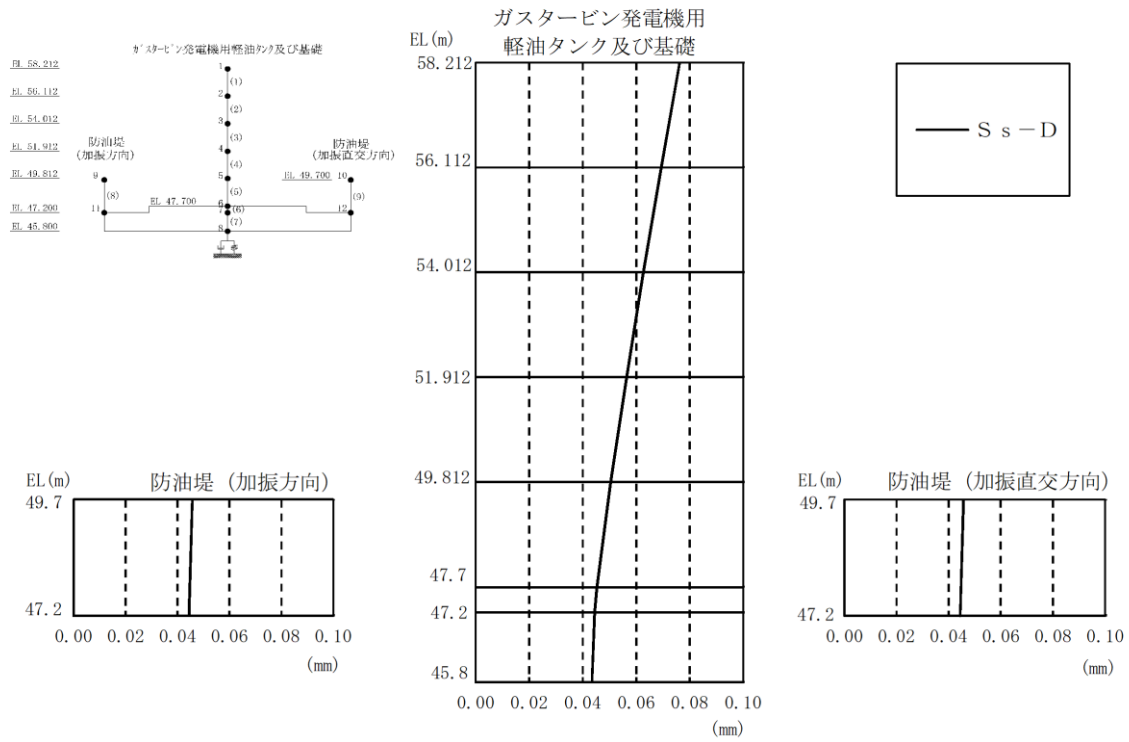


図 1-4 最大応答変位分布図（鉛直方向，解析ケース④）

表 1-5 最大応答変位一覧（鉛直方向，解析ケース④）

部位	EL (m)	質点番号	最大応答変位 (mm)					最大値
			S s - D	S s - F 1	S s - F 2	S s - N 1	S s - N 2	
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212	1	0.08	-	-	-	-	0.08
	56.112	2	0.07	-	-	-	-	0.07
	54.012	3	0.06	-	-	-	-	0.06
	51.912	4	0.06	-	-	-	-	0.06
	49.812	5	0.05	-	-	-	-	0.05
	47.7	6	0.05	-	-	-	-	0.05
基礎	47.2	7	0.04	-	-	-	-	0.04
	45.8	8	0.04	-	-	-	-	0.04
防油堤 (加振方向)	49.7	9	0.05	-	-	-	-	0.05
	47.2	11	0.04	-	-	-	-	0.04
防油堤 (加振直交方向)	49.7	10	0.05	-	-	-	-	0.05
	47.2	12	0.04	-	-	-	-	0.04

注：ハッチングは影響検討ケースを実施する地震動を示す。

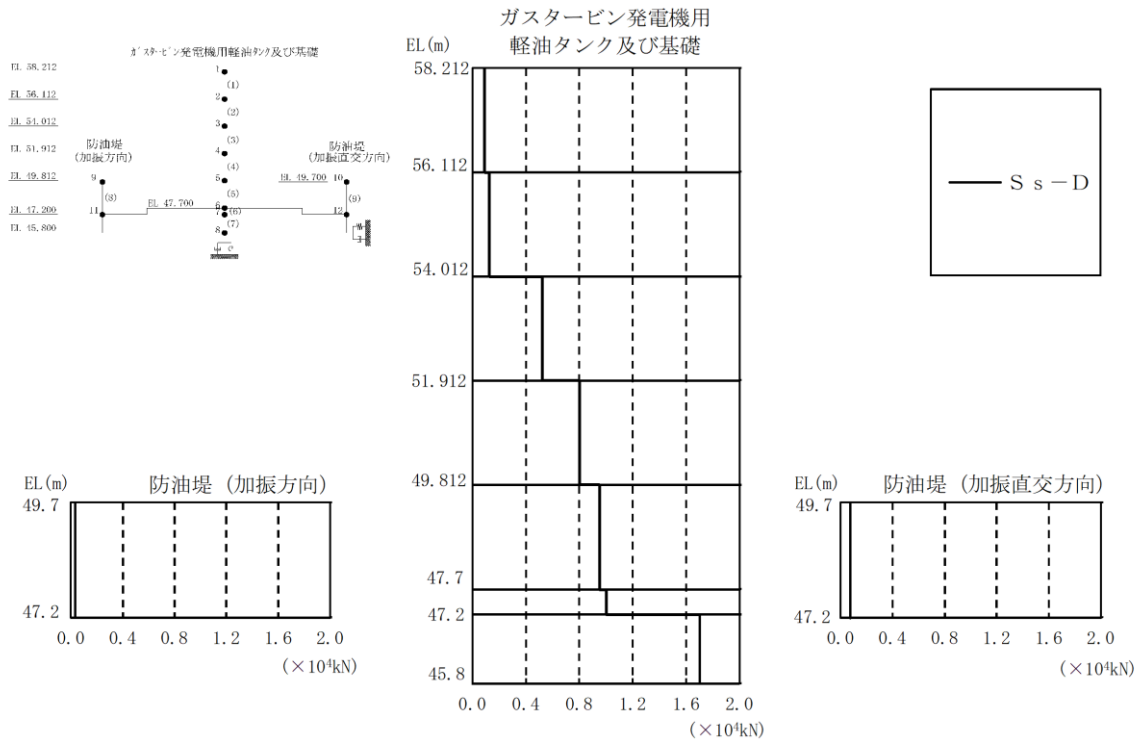


図 1-5 最大応答せん断力分布図（解析ケース④）

表 1-6 最大応答せん断力一覧（解析ケース④）

部位	EL (m)	要素番号	最大応答せん断力 (×10 ⁴ kN)								
			S _s -D	S _s -F 1 (NS)	S _s -F 1 (EW)	S _s -F 2 (NS)	S _s -F 2 (EW)	S _s -N 1	S _s -N 2 (NS)	S _s -N 2 (EW)	最大値
ガスタービン発電機用軽油タンク	58.212~56.112	1	0.09	-	-	-	-	-	-	-	0.09
	56.112~54.012	2	0.13	-	-	-	-	-	-	-	0.13
	54.012~51.912	3	0.52	-	-	-	-	-	-	-	0.52
	51.912~49.812	4	0.80	-	-	-	-	-	-	-	0.80
	49.812~47.7	5	0.95	-	-	-	-	-	-	-	0.95
基礎	47.7~47.2	6	1.00	-	-	-	-	-	-	-	1.00
	47.2~45.8	7	1.70	-	-	-	-	-	-	-	1.70
防油堤 (加振方向)	49.7~47.2	8	0.03	-	-	-	-	-	-	-	0.03
防油堤 (加振直交方向)	49.7~47.2	9	0.07	-	-	-	-	-	-	-	0.07

注：ハッチングは影響検討ケースを実施する地震動を示す。

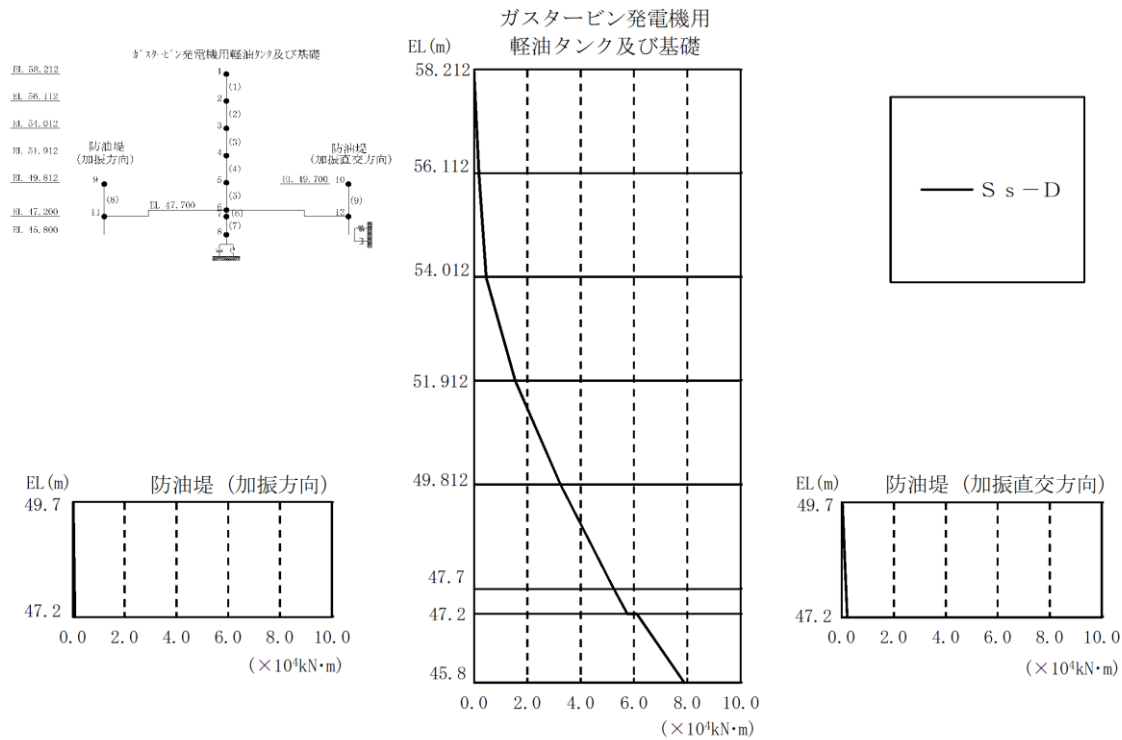


図 1-6 最大応答曲げモーメント分布図 (解析ケース④)

表 1-7 最大応答曲げモーメント一覧 (解析ケース④)

部位	EL (m)	要素番号	最大応答曲げモーメント ($\times 10^4 \text{kN}\cdot\text{m}$)							最大値	
			S s - D	S s - F 1 (NS)	S s - F 1 (EW)	S s - F 2 (NS)	S s - F 2 (EW)	S s - N 1	S s - N 2 (NS)		S s - N 2 (EW)
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212~56.112	1	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-
			0.19	-	-	-	-	-	-	-	0.19
	56.112~54.012	2	0.19	-	-	-	-	-	-	-	0.19
			0.45	-	-	-	-	-	-	-	0.45
	54.012~51.912	3	0.45	-	-	-	-	-	-	-	0.45
			1.55	-	-	-	-	-	-	-	1.55
51.912~49.812	4	1.55	-	-	-	-	-	-	-	1.55	
		3.24	-	-	-	-	-	-	-	3.24	
49.812~47.7	5	3.24	-	-	-	-	-	-	-	3.24	
		5.25	-	-	-	-	-	-	-	5.25	
基礎	47.7~47.2	6	5.25	-	-	-	-	-	-	-	5.25
			5.75	-	-	-	-	-	-	-	5.75
47.2~45.8	7	6.11	-	-	-	-	-	-	-	6.11	
		7.89	-	-	-	-	-	-	-	7.89	
防油堤 (加振方向)	49.7~47.2	8	0.02	-	-	-	-	-	-	-	0.02
			0.09	-	-	-	-	-	-	-	0.09
防油堤 (加振直交方向)	49.7~47.2	9	0.02	-	-	-	-	-	-	-	0.02
			0.21	-	-	-	-	-	-	-	0.21

注：ハッチングは影響検討ケースを実施する地震動を示す。

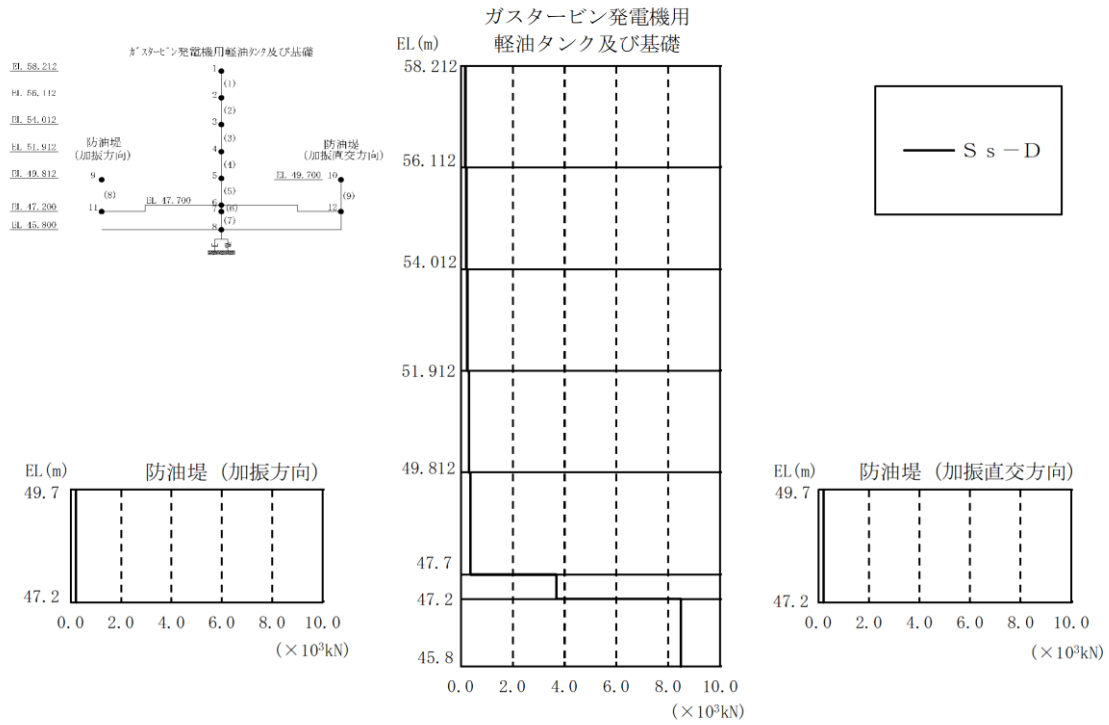


図 1-7 最大応答軸力分布図（解析ケース④）

表 1-8 最大応答軸力一覧（解析ケース④）

部位	EL (m)	要素番号	最大応答軸力 (×10 ³ kN)					
			S s - D	S s - F 1	S s - F 2	S s - N 1	S s - N 2	最大値
ガスタービン 発電機用 軽油タンク	58.212~56.112	1	0.17	-	-	-	-	0.17
	56.112~54.012	2	0.20	-	-	-	-	0.20
	54.012~51.912	3	0.25	-	-	-	-	0.25
	51.912~49.812	4	0.30	-	-	-	-	0.30
基礎	49.812~47.7	5	0.36	-	-	-	-	0.36
	47.7~47.2	6	3.70	-	-	-	-	3.70
	47.2~45.8	7	8.48	-	-	-	-	8.48
防油堤 (加振方向)	49.7~47.2	8	0.21	-	-	-	-	0.21
防油堤 (加振直交方向)	49.7~47.2	9	0.21	-	-	-	-	0.21

注：ハッチングは影響検討ケースを実施する地震動を示す。

表 1-9 地震応答解析に基づく接地率（解析ケース④）

基準地震動 S _s	最大転倒モーメント (×10 ⁵ kN・m)	最小接地率 (%)
S _s -D	0.811	78.4
S _s -F1 (NS)	—	—
S _s -F1 (EW)	—	—
S _s -F2 (NS)	—	—
S _s -F2 (EW)	—	—
S _s -N1	—	—
S _s -N2 (NS)	—	—
S _s -N2 (EW)	—	—

注：ハッチングは影響検討ケースを実施する地震動を示す。

参考資料3 漏油に対する補足確認について

1. はじめに

ガスタービン発電機用軽油タンクは、VI-2-10-1-2-3-4「ガスタービン発電機用軽油タンクの耐震性についての計算書」において、基準地震動 S_s に対する耐震性を確認していることから、地震に起因するタンクからの漏油は想定されない。しかしながら、本資料では念のための検討として、他の要因によりタンクからの漏油を想定した場合においても、基準地震動 S_s に対して基礎スラブ及び防油堤が施設外部への漏油を抑制できることを確認する。

2. 許容限界

本文及び参考資料1では、曲げ・軸力系の破壊に対して終局曲げモーメントに対する評価を実施し、断面終局に至らないことを確認している。本資料では、短期許容応力度に対する評価を実施し、部材がおおむね弾性範囲に留まることで、基礎スラブ及び防油堤からの漏油が抑制されることを確認する。コンクリートの許容応力度を表2-1に、鉄筋の許容応力度を表2-2に示す。

なお、せん断破壊は脆性的な破壊形態を示すことから、せん断耐力に至るまでは部材を貫通するような顕著なひび割れは発生しないと判断されるため、本文及び参考資料1の結果をもって、基礎スラブ及び防油堤からの漏油が抑制されることを確認している。

表2-1 コンクリートの許容応力度

設計基準強度	許容応力度 (N/mm ²)		短期許容応力度 (N/mm ²)
$f'_{ck} = 24.0$ (N/mm ²)	許容曲げ圧縮応力度 σ'_{ca}	9.0	13.5

表2-2 鉄筋の許容応力度

鉄筋の種類	許容応力度 (N/mm ²)		短期許容応力度 (N/mm ²)
SD345	許容引張応力度 σ_{sa}	196	294

3. 評価結果

3.1 基礎スラブ

基礎スラブの短期許容応力度に対する評価結果を、表 3-1 及び表 3-2 に示す。また、照査時刻における断面力図を図 3-1～図 3-4 に示す。

表 3-1 短期許容応力度に対する評価結果（基礎スラブ，コンクリート）

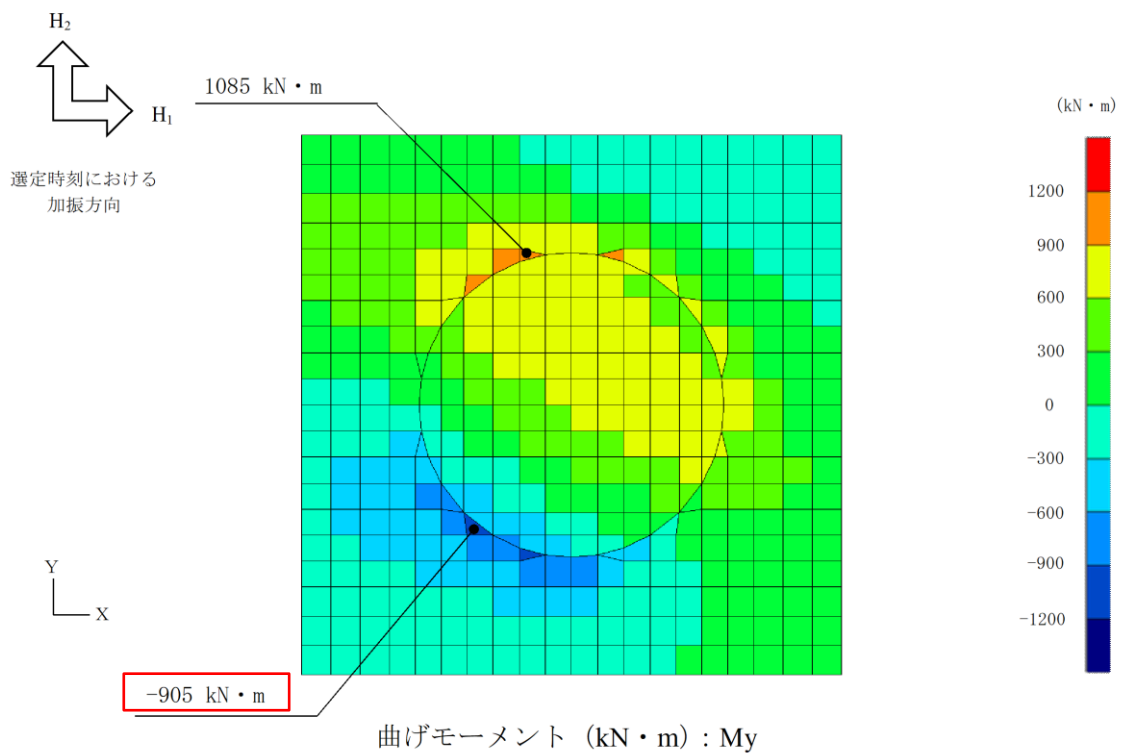
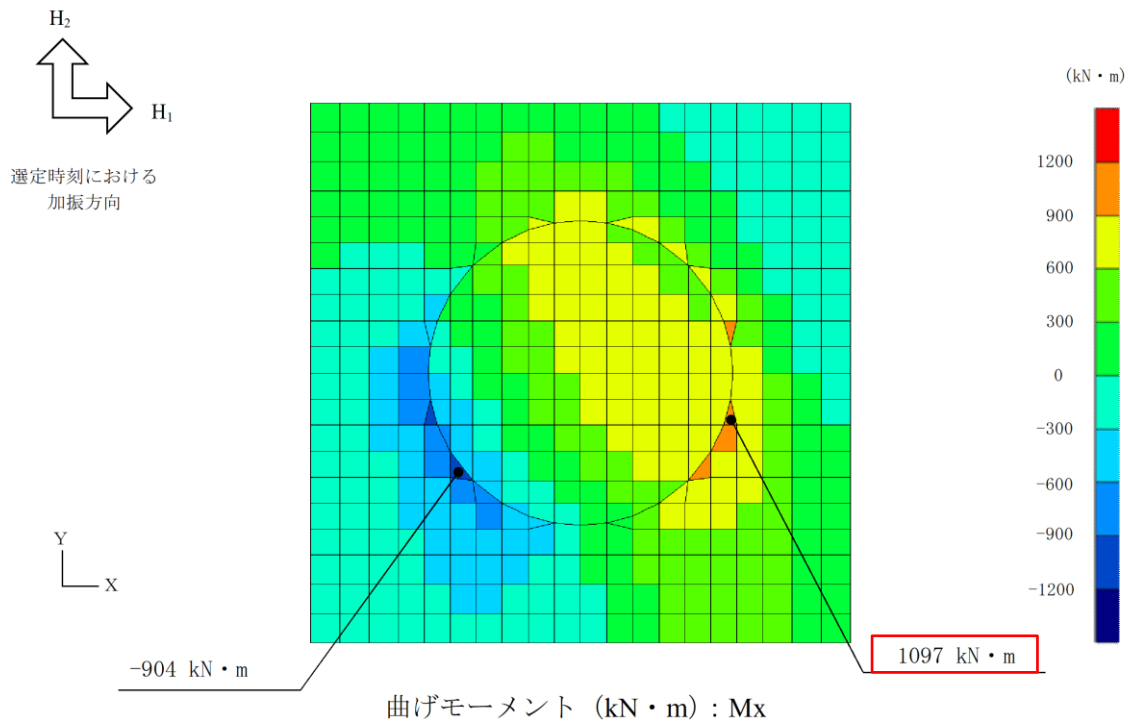
解析 ケース	地震動	照査用曲げ モーメント M_d (kN・m)	軸力* N_d (kN)	発生応力度 σ'_c (N/mm ²)	許容応力度 σ'_{ca} (N/mm ²)	照査値 σ'_c / σ'_{ca}
①	S s - N 2 (E W)	1097	-567	4.9	13.5	0.37
③	S s - D	1201	-658	5.4	13.5	0.40

注記*：軸力は正の値が引張を示す。

表 3-2 短期許容応力度に対する評価結果（基礎スラブ，鉄筋）

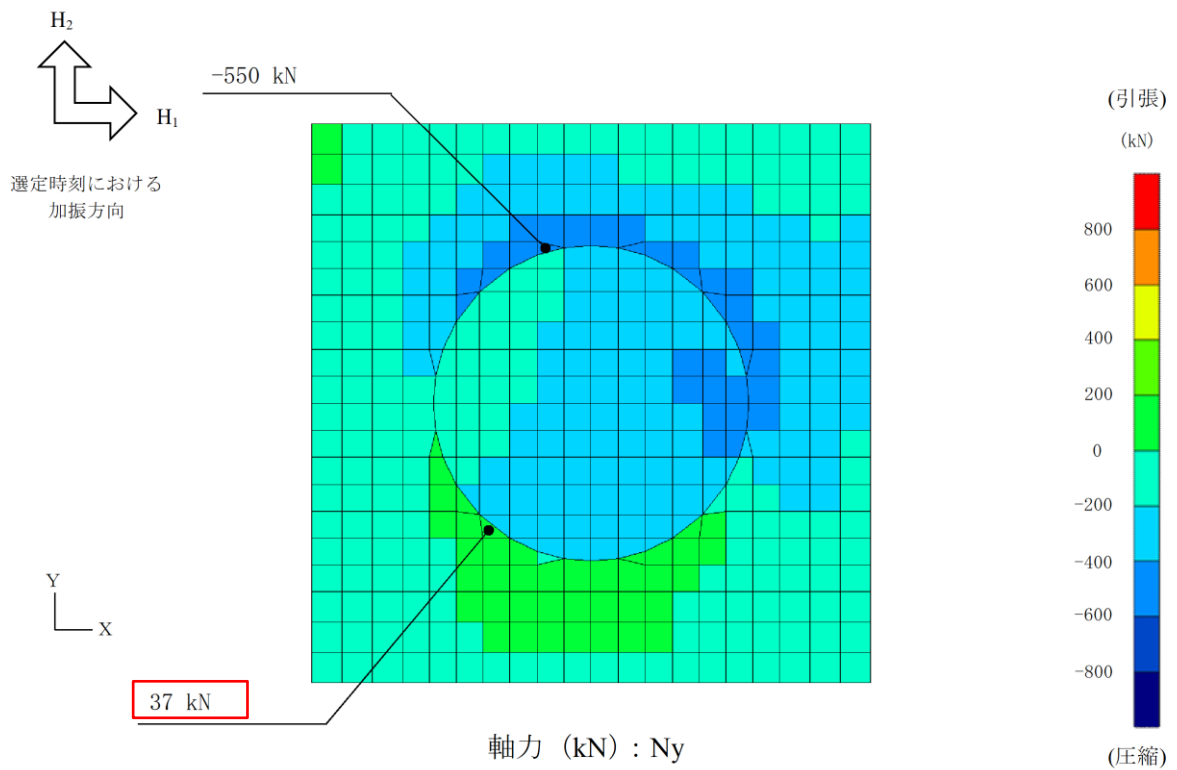
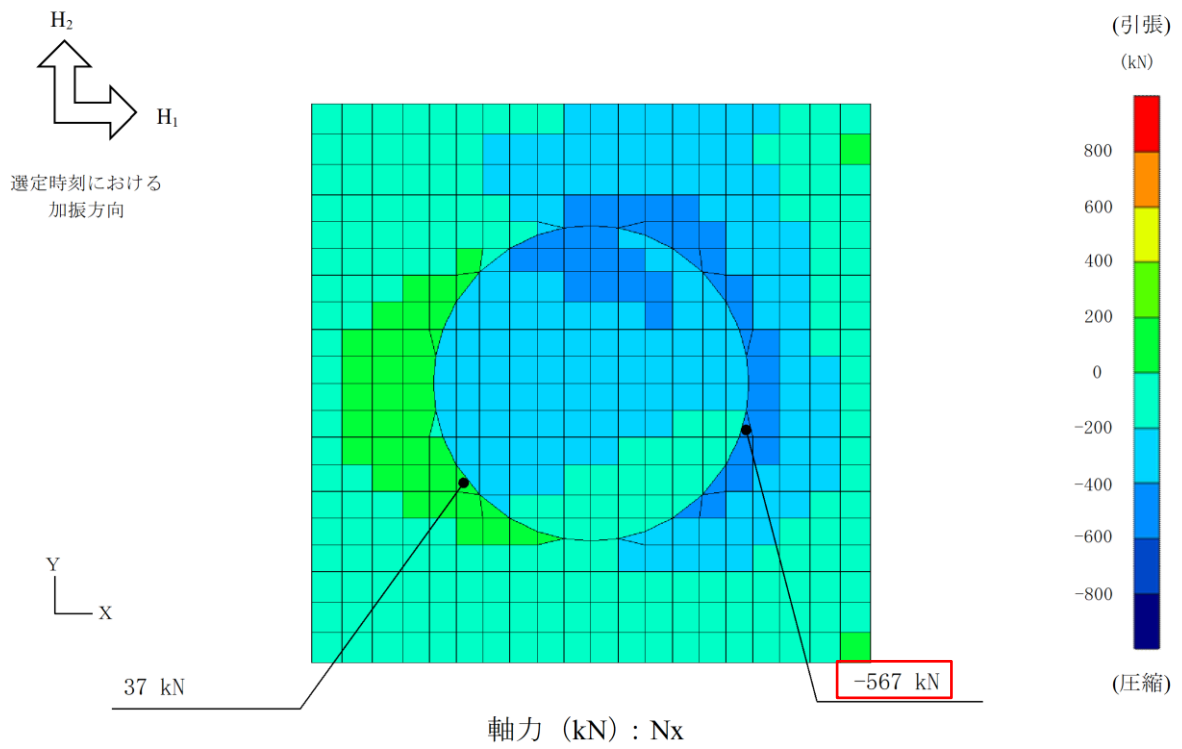
解析 ケース	地震動	照査用曲げ モーメント M_d (kN・m)	軸力* N_d (kN)	発生応力度 σ_s (N/mm ²)	許容応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	照査値 σ_s / σ_{sa}
①	S s - N 2 (E W)	-905	37	153	294	0.53
③	S s - D	-910	8	152	294	0.52

注記*：軸力は正の値が引張を示す。



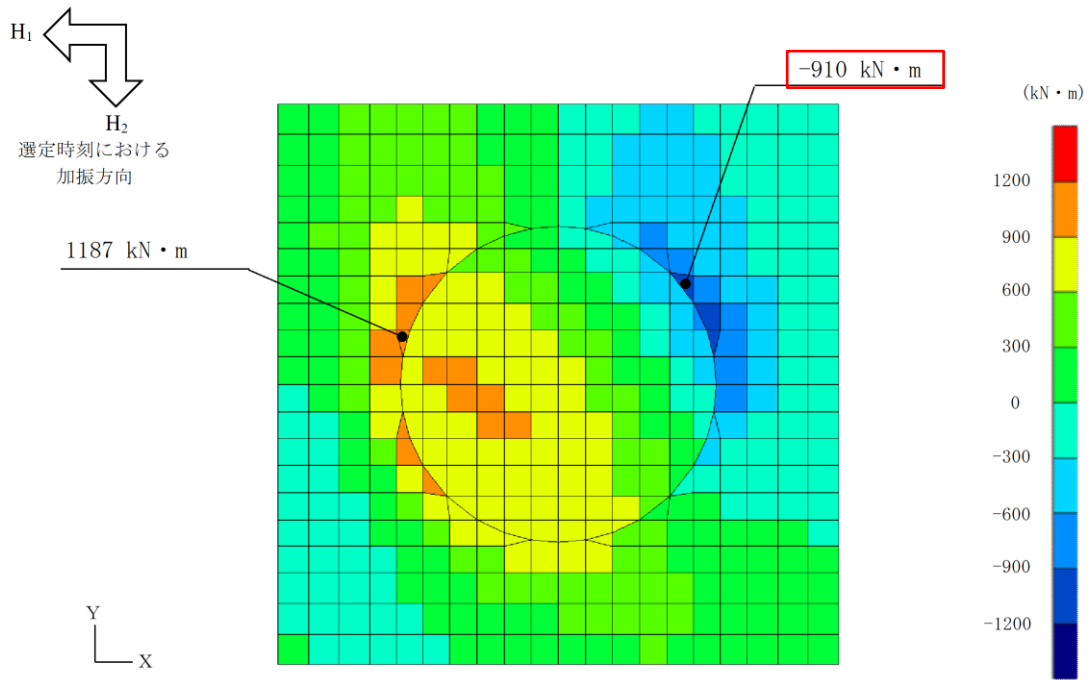
: 照査に用いた断面力

図 3-1 照査時刻における断面力図
(解析ケース①, $S_s - N2$ (EW), 26.780 秒)

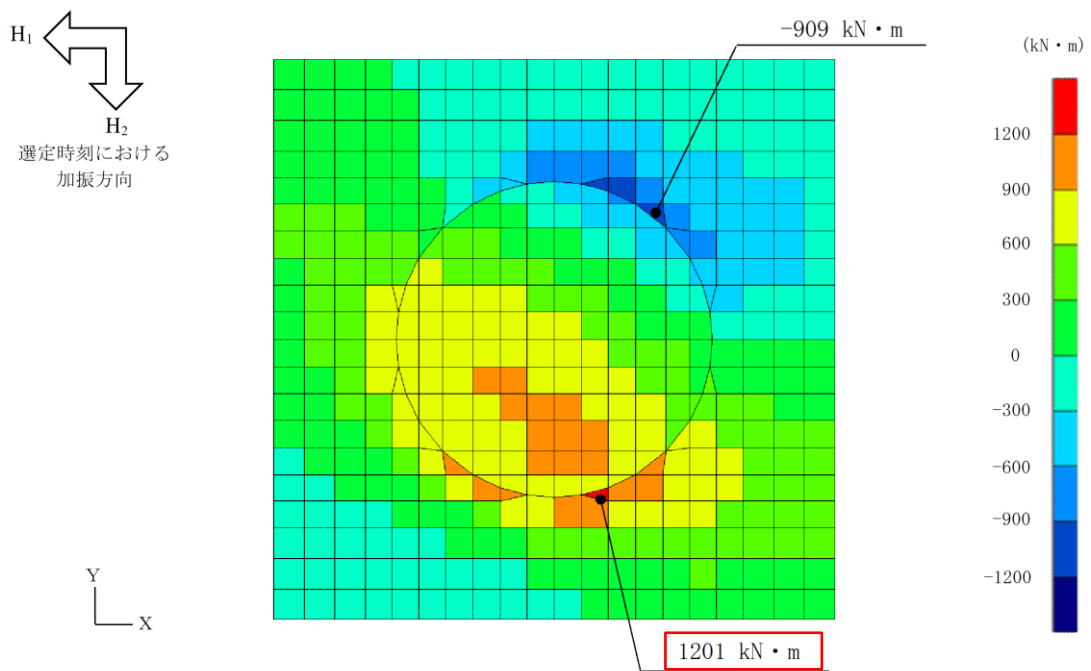


 : 照査に用いた断面力

図 3-2 照査時刻における断面力図
(解析ケース①, S s - N 2 (E W), 26.780 秒)



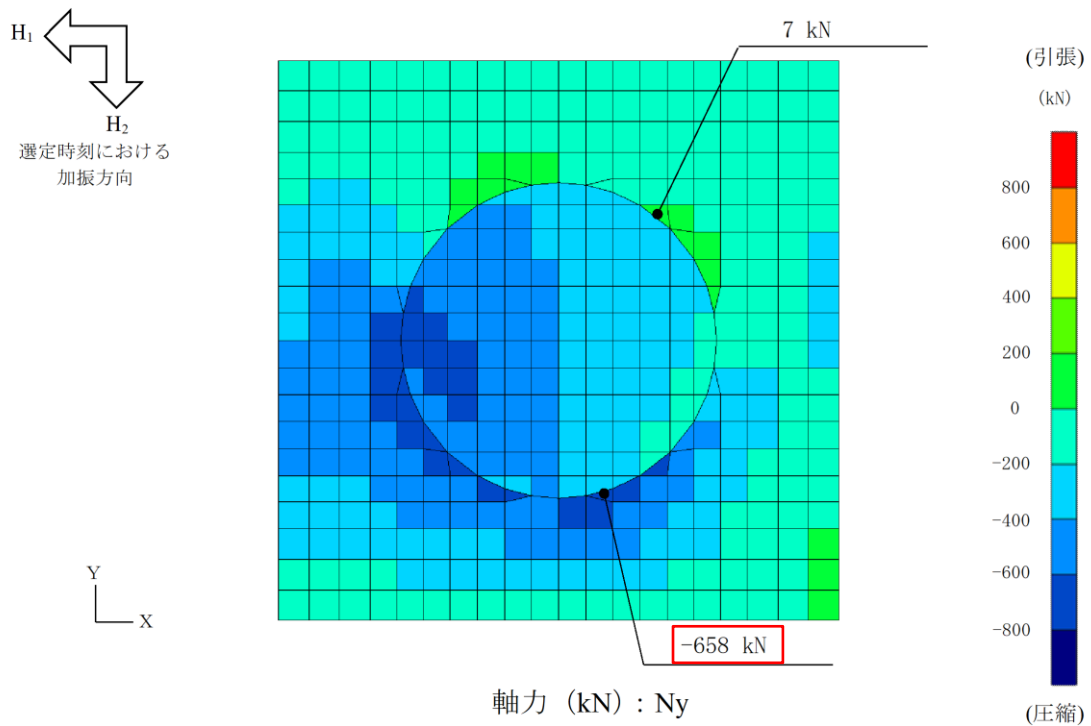
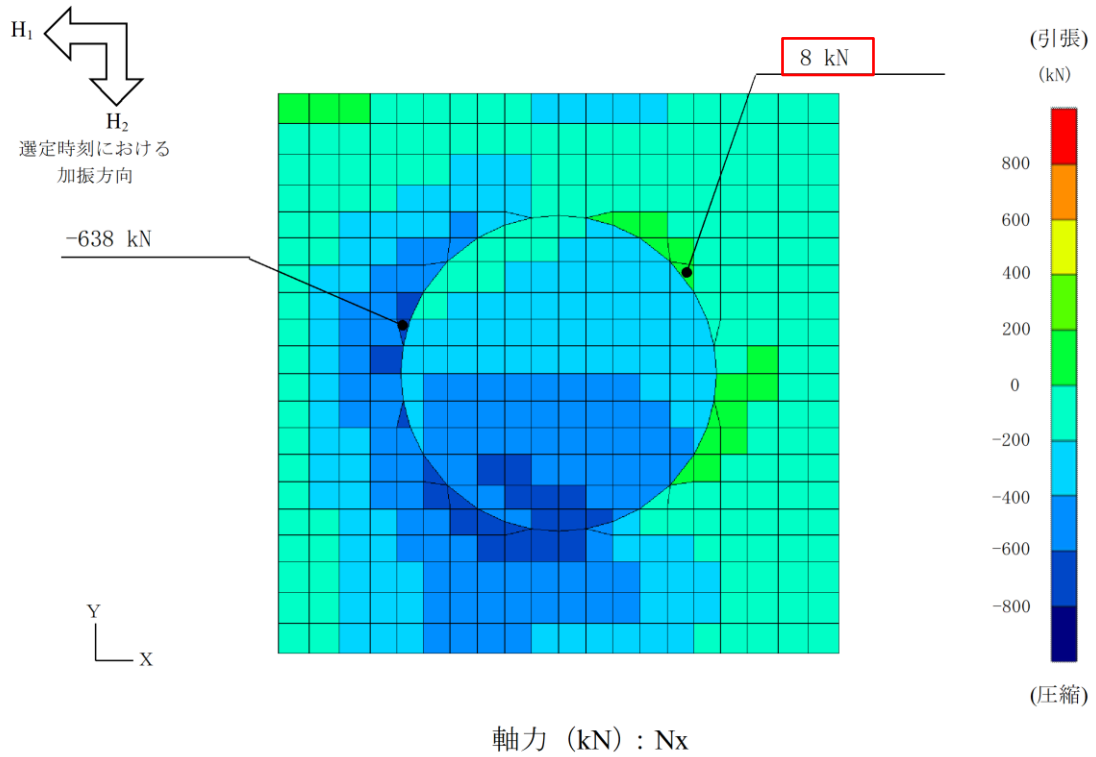
曲げモーメント (kN · m) : M_x



曲げモーメント (kN · m) : M_y

 : 照査に用いた断面力

図 3-3 照査時刻における断面力図
 (解析ケース③, $S_s - D$, 15.268 秒)



: 照査に用いた断面力

図 3-4 照査時刻における断面力図
 (解析ケース③, $S_s - D$, 15.268 秒)

3.2 防油堤

防油堤の短期許容応力度に対する評価結果を、表 3-3 及び表 3-4 に示す。

表 3-3 短期許容応力度に対する評価結果（防油堤，コンクリート）

解析 ケース	地震動	照査用曲げ モーメント M_d (kN・m)	軸力* N_d (kN)	発生応力度 σ'_c (N/mm ²)	許容応力度 σ'_{ca} (N/mm ²)	照査値 σ'_c / σ'_{ca}
③	S s - D	58	-19	9.3	13.5	0.69

注記*：軸力は正の値が引張を示す。

表 3-4 短期許容応力度に対する評価結果（防油堤，鉄筋）

解析 ケース	地震動	照査用曲げ モーメント M_d (kN・m)	軸力* N_d (kN)	発生応力度 σ_s (N/mm ²)	許容応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	照査値 σ_s / σ_{sa}
③	S s - D	58	-19	209	294	0.72

注記*：軸力は正の値が引張を示す。

4. まとめ

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の基礎スラブ及び防油堤について、短期許容応力度に対する評価を実施し、部材がおおむね弾性範囲に留まることを確認した。よって、基準地震動 S_s 以外の要因によりタンクからの漏油を想定した場合においても、基礎スラブ及び防油堤により漏油が抑制されることから、施設外部への漏油は発生しない。

参考資料4 入力地震動の妥当性について

1. はじめに

ガスタービン発電機用軽油タンクの地震応答解析における入力地震動については、構造物の周辺状況が耐震評価に及ぼす影響は軽微であると判断し、1次元地震応答解析にて算定している。本資料では、ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の南側に位置する斜面をモデル化せず、水平成層として入力地震動を算定していることの妥当性を確認する。

2. 周辺状況の整理

ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の南側には、図2-1に示すとおり背後斜面が位置する。当該斜面(⑫-⑫'断面)については、「補足-020-2 可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルートに係る補足説明資料」において、図2-2に示す解析モデルを用いて2次元地震応答解析を実施し、斜面の安定性評価を実施している。

⑫-⑫'断面は重大事故等対処施設であるガスタービン発電機建物位置を対象としているが、⑫-⑫'断面とガスタービン発電機用軽油タンク基礎の離隔が小さいことから、⑫-⑫'断面の地震応答解析結果を参照する。

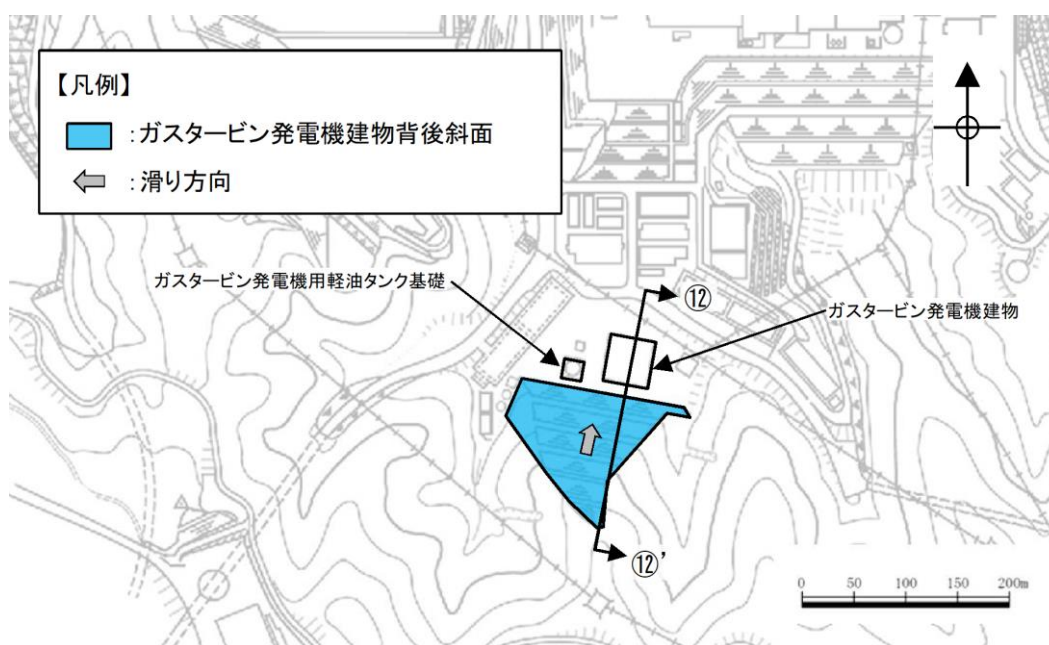
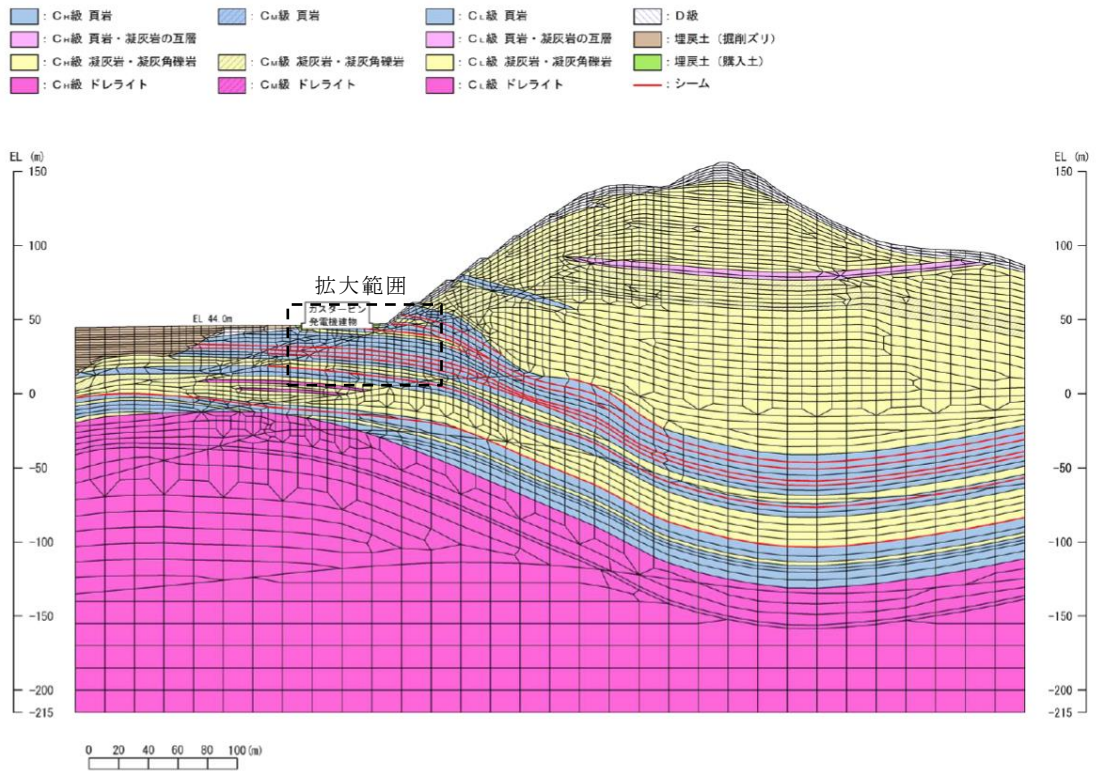
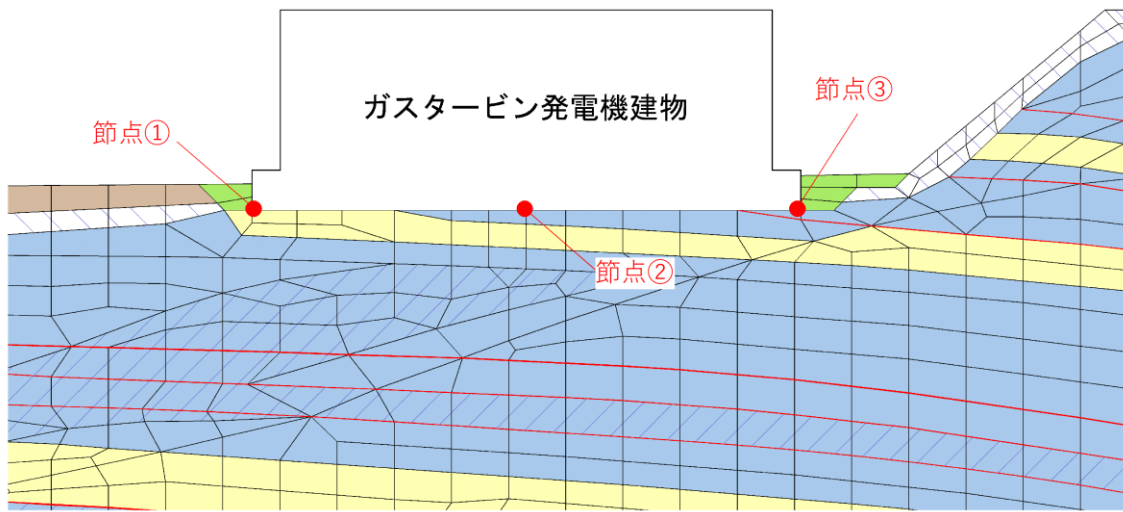


図2-1 ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の背後斜面

(「補足-020-2 可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルートに係る補足説明資料」にて示す図を一部加工)



(全体図)



(拡大図)

図 2-2 斜面の安定性評価における解析モデル図 (⑫-⑫' 断面)

3. 斜面の安定性評価における応答加速度の確認結果

斜面の安定性評価における地表面の応答加速度を表 3-1 に示す。最大水平加速度は節点①～③でおおむね同等，最大鉛直加速度は斜面の法尻に近づくほど（節点①→②→③）小さくなる傾向が見られる。また，1次元地震応答解析により算定した入力地震動は，斜面の安定性評価における最大応答加速度よりも大きいことから，斜面をモデル化せず水平成層として入力地震動を算定していることの保守性を確認した。

表 3-1 斜面の安定性評価における地表面の応答加速度（S_s-D（++））

	抽出高さ (EL m)	抽出位置	最大水平 加速度* ¹ (cm/s ²)	最大鉛直 加速度* ¹ (cm/s ²)
斜面の安定性評価 (2次元地震応答解析)	44.0	節点①	742	585
		節点②	740	-463
		節点③	731	447
【参考】入力地震動* ²	45.8	—	956	602

注記*1：最大加速度は，加速度の方向を問わず抽出

*2：対象地震動はS_s-D

補足-026-13 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～
ガスタービン発電機）の地震応答計算書及び耐震性についての
計算書に関する補足説明資料

目 次

1. 評価方法	1
2. 評価条件	1
2.1 適用規格	1
2.2 構造概要	3
2.3 評価対象断面の方向	8
2.4 評価対象断面の選定	9
2.5 使用材料及び材料の物性値	9
2.6 地盤物性値	10
2.7 評価構造物諸元	11
2.8 地下水位	11
2.9 耐震評価フロー	12
3. 地震応答解析	13
3.1 地震応答解析手法	13
3.2 地震応答解析モデルの設定	16
3.2.1 解析モデル領域	16
3.2.2 境界条件	17
3.2.3 構造物のモデル化	20
3.2.4 隣接構造物のモデル化	20
3.2.5 地盤及びMMRのモデル化	20
3.2.6 地震応答解析モデル	21
3.2.7 ジョイント要素の設定	22
3.2.8 材料特性の設定	25
3.3 減衰定数	27
3.4 荷重及び荷重の組合せ	33
3.4.1 固定荷重	34
3.4.2 機器・配管荷重	34
3.4.3 積雪荷重	34
3.5 地震応答解析の解析ケース	35
3.5.1 耐震評価における解析ケース	35
3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース	38

4.	評価内容	40
4.1	入力地震動の設定	40
4.2	許容限界の設定	57
4.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	57
4.2.2	せん断の破壊に対する許容限界	58
4.2.3	基礎地盤の支持性能に対する許容限界	61
5.	評価結果	62
5.1	地震応答解析結果	62
5.1.1	解析ケース	62
5.1.2	ひずみの時刻歴波形	63
5.1.3	断面力分布（せん断破壊に対する照査）	64
5.1.4	最大せん断ひずみ分布	65
5.2	構造部材の健全性に対する評価結果	67
5.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果	67
5.2.2	せん断破壊に対する評価結果	68
5.3	基礎地盤の支持性能に対する評価結果	70
5.3.1	基礎地盤	70
5.3.2	MMR	71
6.	まとめ	74

参考資料1 機器・配管系の耐震評価に適用する影響検討ケース

参考資料2 コンクリート蓋に関する照査

1. 評価方法

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）は、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であるガスタービン発電機用燃料移送配管・弁を間接支持する重大事故等対処施設である。

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）については、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき、屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）が基準地震動 S_s に対して十分な構造強度及び支持機能を有していることを確認する。

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）に要求される機能の維持を確認するにあたっては、地震応答解析に基づく構造部材の健全性評価及び基礎地盤の支持性能評価により行う。

2. 評価条件

2.1 適用規格

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の耐震評価にあたっては、「コンクリート標準示方書[構造性能照査編]」（（社）土木学会，2002年制定）」（以下「コンクリート標準示方書2002」という。），「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」（（社）日本電気協会）」（以下「JEAG 4601-1987」という。）を適用するが、鉄筋コンクリート部材の曲げ・軸力系及びせん断破壊の許容限界の一部については、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル」（（社）土木学会，2005年）（以下「土木学会マニュアル2005」という。）及びコンクリート標準示方書2002を適用する。また、基礎地盤及びマンメイドロック（以下「MMR」という。）の支持性能の許容限界については、「道路橋示方書（I共通編・IV下部構造編）・同解説」（（社）日本道路協会，平成14年3月）」（以下「道示・IV下部構造編」という。）を適用する。

表2-1に適用する規格，基準類を示す。

表 2-1 適用する規格，基準類

項目	適用する規格，基準類	備考
使用材料及び材料定数	コンクリート標準示方書 2002	鉄筋コンクリートの材料諸元 (γ , E , ν)
荷重及び荷重の組み合わせ	コンクリート標準示方書 2002	永久荷重，偶発荷重等の適切な組み合わせを検討
許容限界	土木学会マニュアル 2005	<p>曲げ・軸力系の破壊に対する照査は，発生ひずみが限界ひずみ（圧縮縁コンクリートひずみ 1.0%）以下であることを確認</p> <p>せん断破壊に対する照査は，発生せん断力がせん断耐力を下回ることを確認</p>
	コンクリート標準示方書 2002	MMRの支持性能に対する照査は，基礎地盤に発生する応力が極限支持力度を下回ることを確認
	道示・IV下部構造編	基礎地盤の支持性能に対する照査は，基礎地盤に発生する応力が極限支持力度を下回ることを確認
地震応答解析	J E A G 4 6 0 1 -1987	有限要素法による2次元モデル作成等
	土木学会マニュアル 2005	構造物の要素分割等

2.2 構造概要

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の位置図を図 2-1 に、平面図を図 2-2 に、断面図を図 2-3 及び図 2-4 に、概略配筋図を図 2-5 に、評価対象断面図及び評価対象地質断面図を図 2-6 示す。

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）は、ガスタービン発電機用燃料移送配管・弁を間接支持する延長約 55.5m、幅 2.8m、高さ 1.8m の鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、MMR を介して十分な支持性能を有する C_L 級岩盤に支持される。

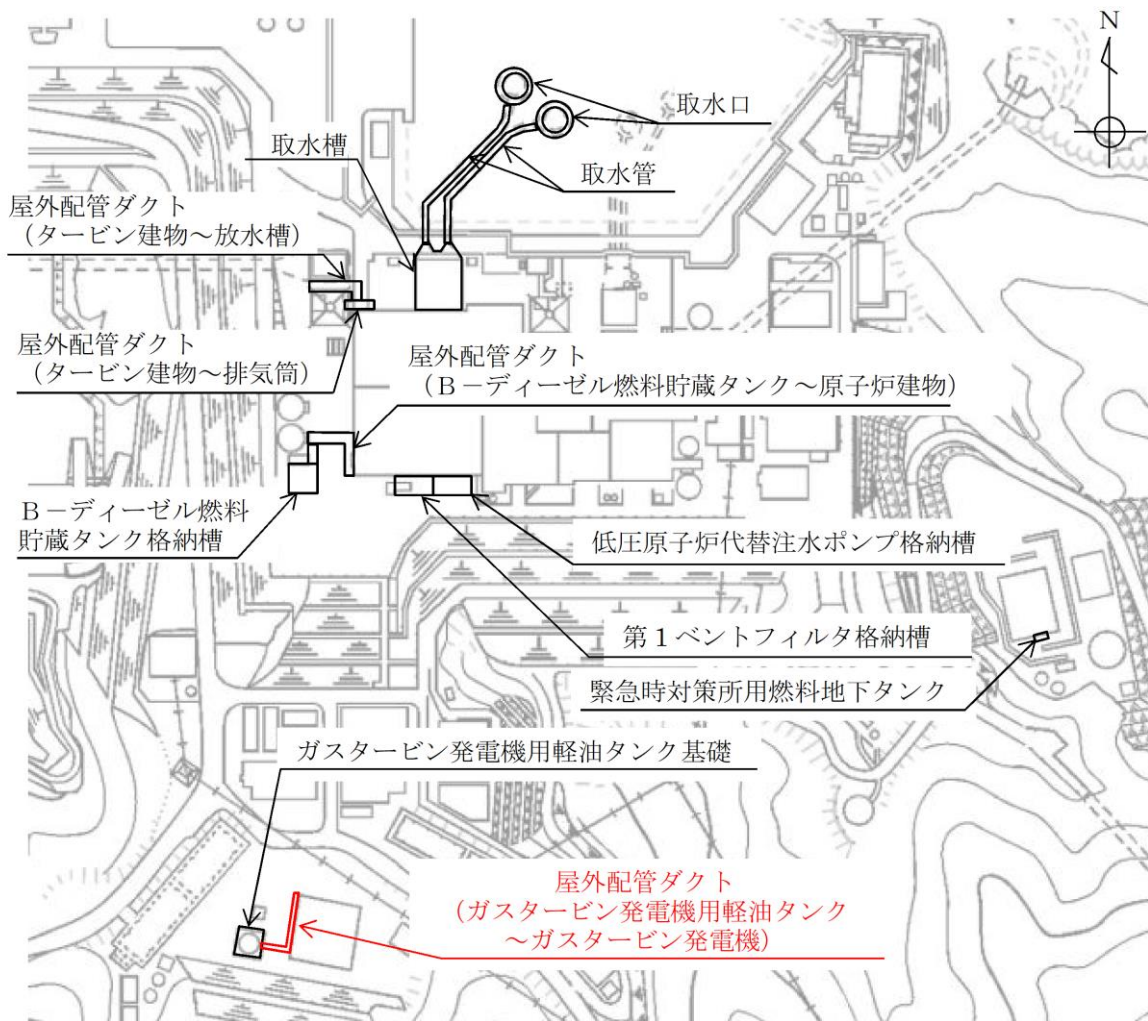


図 2-1 屋外配管ダクト (ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機) 位置図

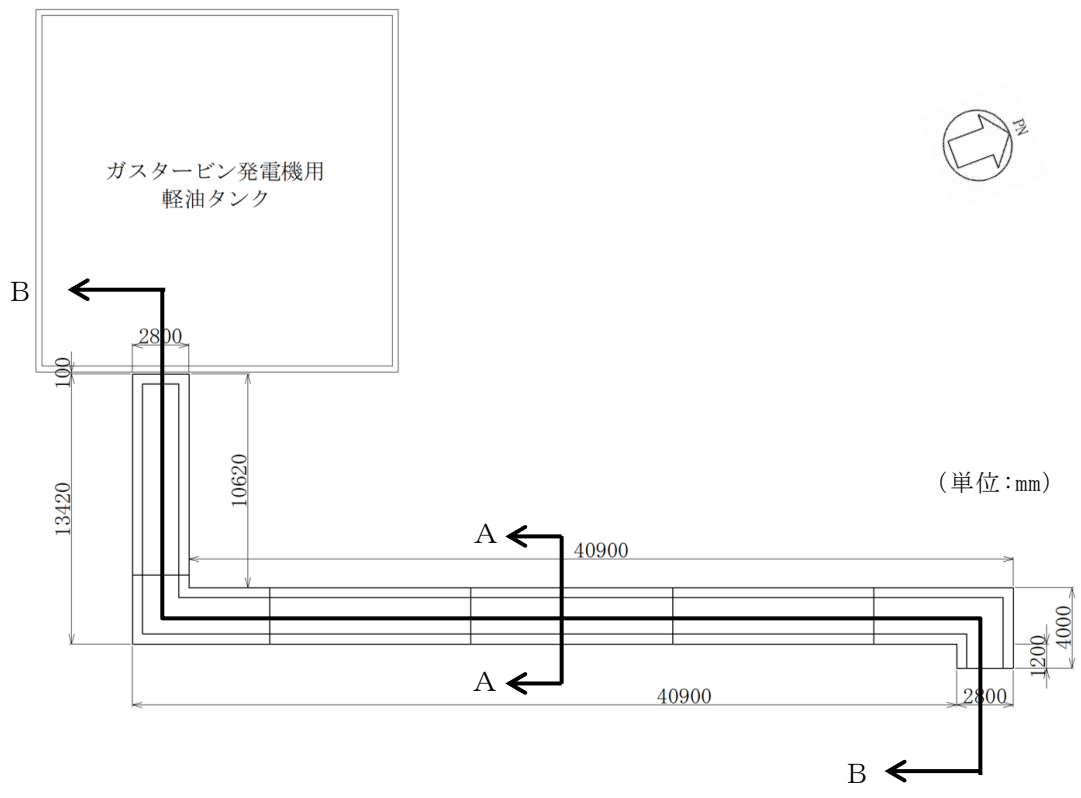


図 2-2 屋外配管ダクト (ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)
平面図

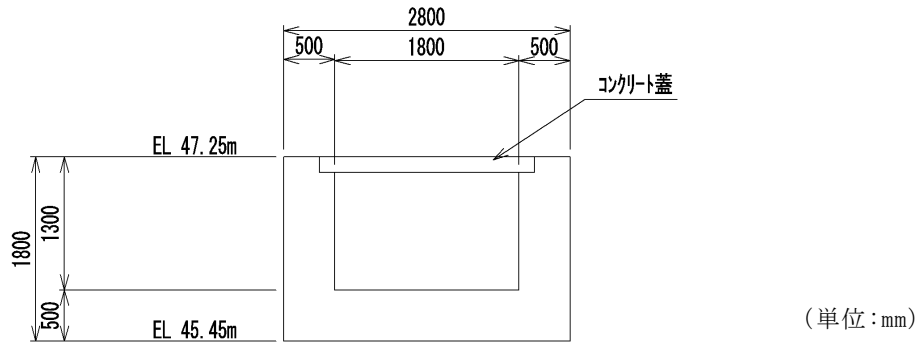


図 2-3 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）
断面図（A-A断面）

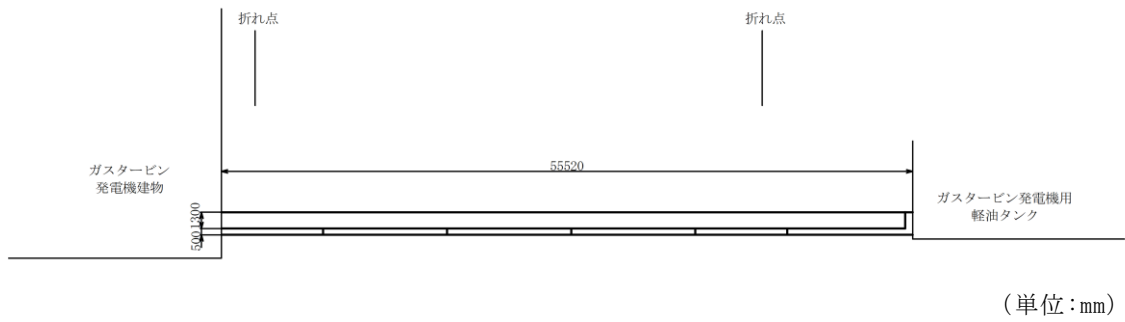


図 2-4 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）
断面図（B-B断面）

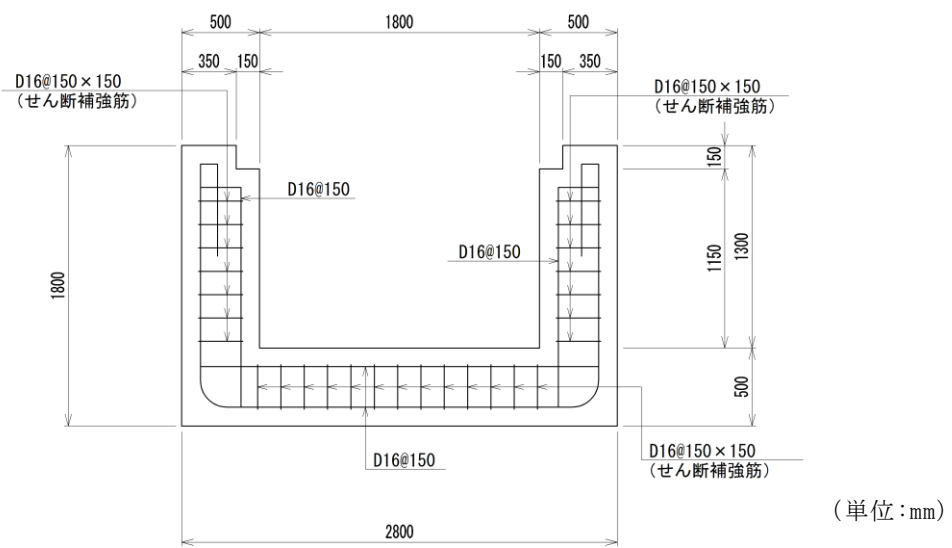


図 2-5 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）
概略配筋図（A-A断面）

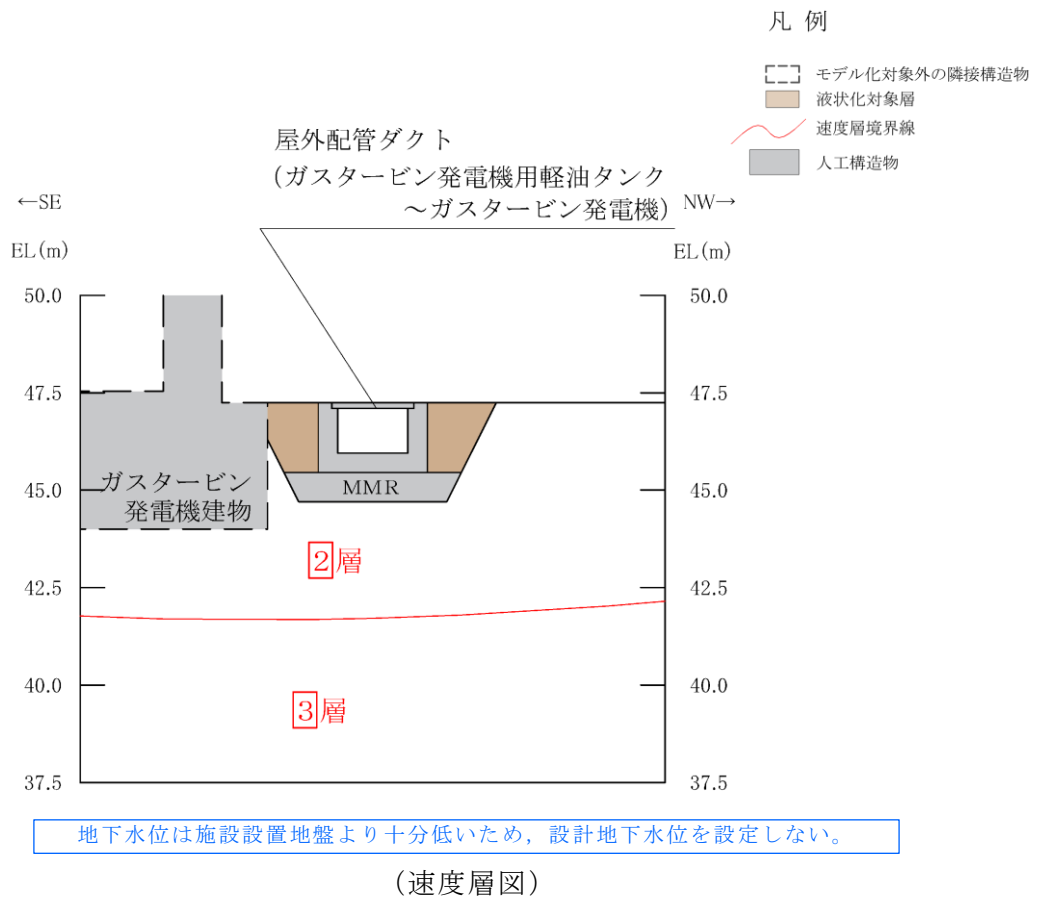
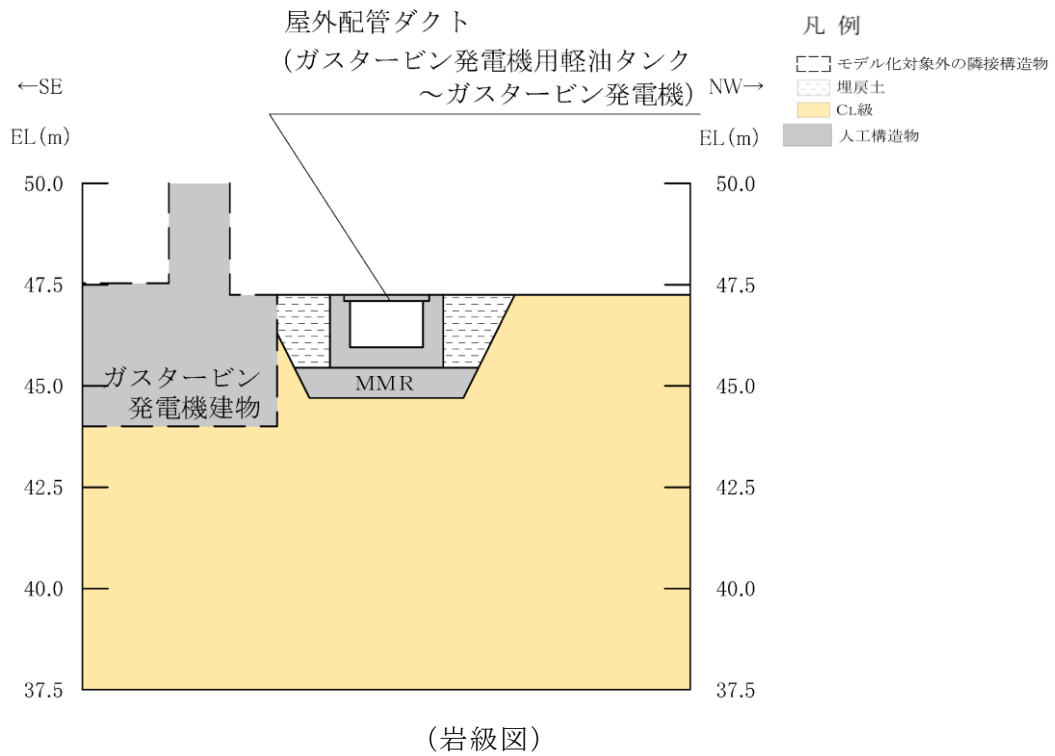
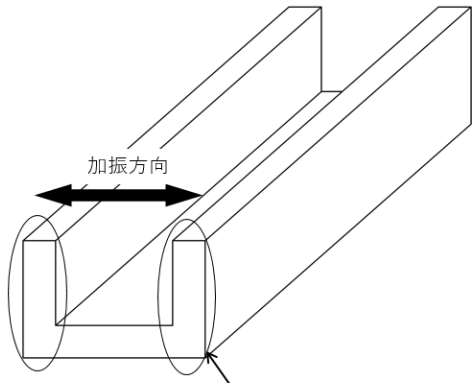
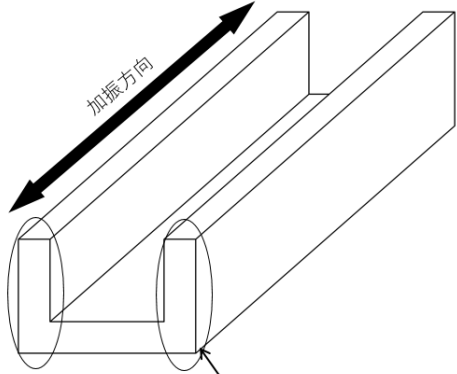


図 2-6 屋外配管ダクト (ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)
評価対象断面図及び評価対象地質断面図 (A-A断面位置)

2.3 評価対象断面の方向

評価対象断面の方向の選定に係る考え方を表 2-2 に示す。間接支持する配管の管軸方向と直交する方向に配置される壁部材が少ないため、管軸直交方向（横断方向）が明確な弱軸方向となり、側壁が耐震要素として機能する管軸方向（延長方向）が強軸方向となる。

表 2-2 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）
の評価対象断面の方向の選定

	管軸直交方向（横断方向）	管軸方向（延長方向）
屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）	 <p>加振方向に抵抗する部材が少ない ⇒ 弱軸</p>	 <p>側壁が加振方向に抵抗する ⇒ 強軸</p>
	管軸直交方向は、加振方向に平行な壁部材がなく、弱軸方向にあたる。	管軸方向は、加振方向に平行な部材全体を耐震設計上見込むことができ、強軸方向にあたる。
	弱軸方向を評価対象断面とする。	

2.4 評価対象断面の選定

評価対象断面は、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」の「4.15 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の断面選定の考え方」に示すとおり、構造的特徴や周辺状況等を踏まえ選定する。明確な弱軸方向となる横断方向のA-A断面を評価対象断面として選定する。また、A-A断面は最も長い直線区間の中心付近を通る位置とする。

2.5 使用材料及び材料の物性値

構造物の使用材料を表2-3に、材料の物性値を表2-4に示す。

表2-3 使用材料

材料		仕様
構造物 (鉄筋コンクリート)	コンクリート	設計基準強度 24.0N/mm ²
	鉄筋	SD345
MMR		設計基準強度 18.0N/mm ²

表2-4 材料の物性値

材料	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比
構造物 (鉄筋コンクリート)	2.50×10 ⁴	24.0* ¹	0.2
MMR	2.20×10 ⁴	22.6* ²	

注記*1：鉄筋コンクリートの単位体積重量を示す。

*2：無筋コンクリートの単位体積重量を示す。

2.6 地盤物性値

地盤については、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」にて設定している物性値を用いる。地盤の物性値を表2-5及び表2-6に示す。

表2-5 地盤の解析用物性値（岩盤）

層番号	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G ($\times 10^5$ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
2層	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
3層*	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
4層*	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
5層*	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
6層*	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記*：入力地震動の算定においてのみ用いる解析用物性値

表2-6 地盤の解析用物性値（埋戻土）

		解析用物性値
		埋戻土
物理特性	密度 ρ_s (g/cm ³)	2.11
強度特性	初期せん断強度 τ_0 (N/mm ²)	0.22
	内部摩擦角 ϕ (°)	22
動的変形特性	初期せん断弾性係数 G_0 (N/mm ²)	$G_0 = 749 \sigma^{0.66}$ $G/G_0 = 1/(1 + \gamma/0.00027)$
	動ポアソン比 ν_d	0.45*
減衰特性	減衰定数 h	$h = 0.0958 \times (1 - G/G_0)^{0.85}$

注記*：常時応力解析においては、土木学会マニュアル2005に基づき、静止土圧 ($K_0 = \nu / (1 - \nu) = 0.5$) を作用させるため、 $\nu = 0.333$ とする。

2.7 評価構造物諸元

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の諸元を表 2-7 に評価部位を図 2-7 に示す。

表 2-7 評価部位とその仕様（A-A断面）

部位	仕様		材料		要求性能	
	部材幅 (mm)	部材厚 (mm)	コンクリート 設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)	鉄筋		
側壁	1 2	1300	500	24.0	SD345	支持機能
底版	3	1800	500	24.0	SD345	

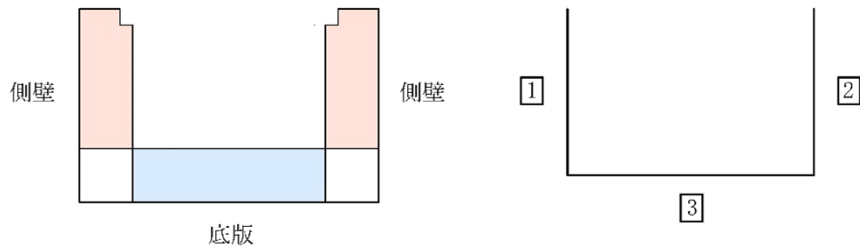


図 2-7 評価部位位置図

2.8 地下水位

設計地下水位は、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に従い設定する。設計地下水位の一覧を表 2-8 に示す。

なお、屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）直下の地下水位は、屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）下端より低いため、地下水位を考慮しない。

表 2-8 設計地下水位の一覧

施設名称	設計地下水位 (EL m)	備考
屋外配管ダクト(ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)	地下水位が構造物基礎下端より十分低いため考慮しない。	3次元浸透流解析による 自然水位：EL 22.1m～24.2m

2.9 耐震評価フロー

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の耐震評価フローを図 2-8 に示す。

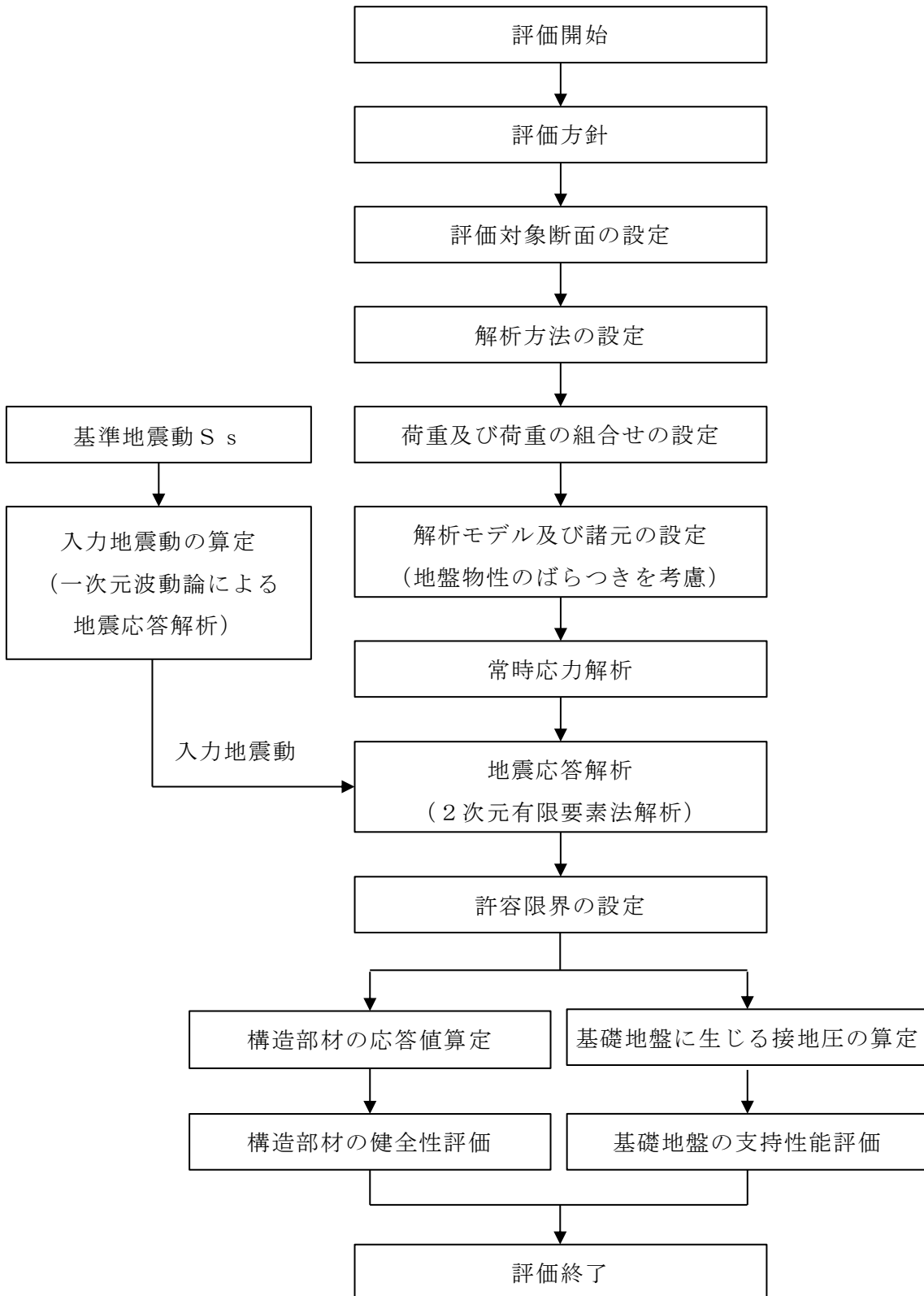


図 2-8 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）耐震評価フロー

3. 地震応答解析

3.1 地震応答解析手法

地震応答解析は、構造物と地盤の相互作用を考慮できる 2次元有限要素法により、基準地震動 S_s に基づき設定した水平地震動と鉛直地震動の同時加振による逐次時間積分の時刻歴応答解析により行うこととし、解析手法については、図 3-1 に示す解析手法の選定フローに基づき選定する。

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の施設周辺の地下水位は底版より低いため、解析手法の選定フローに基づき「①全応力解析」を選択する。

構造部材については、ファイバーモデルで考慮する。また、地盤については、平面ひずみ要素でモデル化することとし、岩盤は線形でモデル化する。埋戻土については、地盤のひずみ依存性を適切に考慮できるようにマルチスプリングモデルを用いることとし、ばね特性は双曲線モデル（修正 GHE モデル）を用いて非線形性を考慮する。

地震応答解析については、解析コード「T D A P III」を使用する。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

地震応答解析手法の選定フローを図 3-2 に示す。

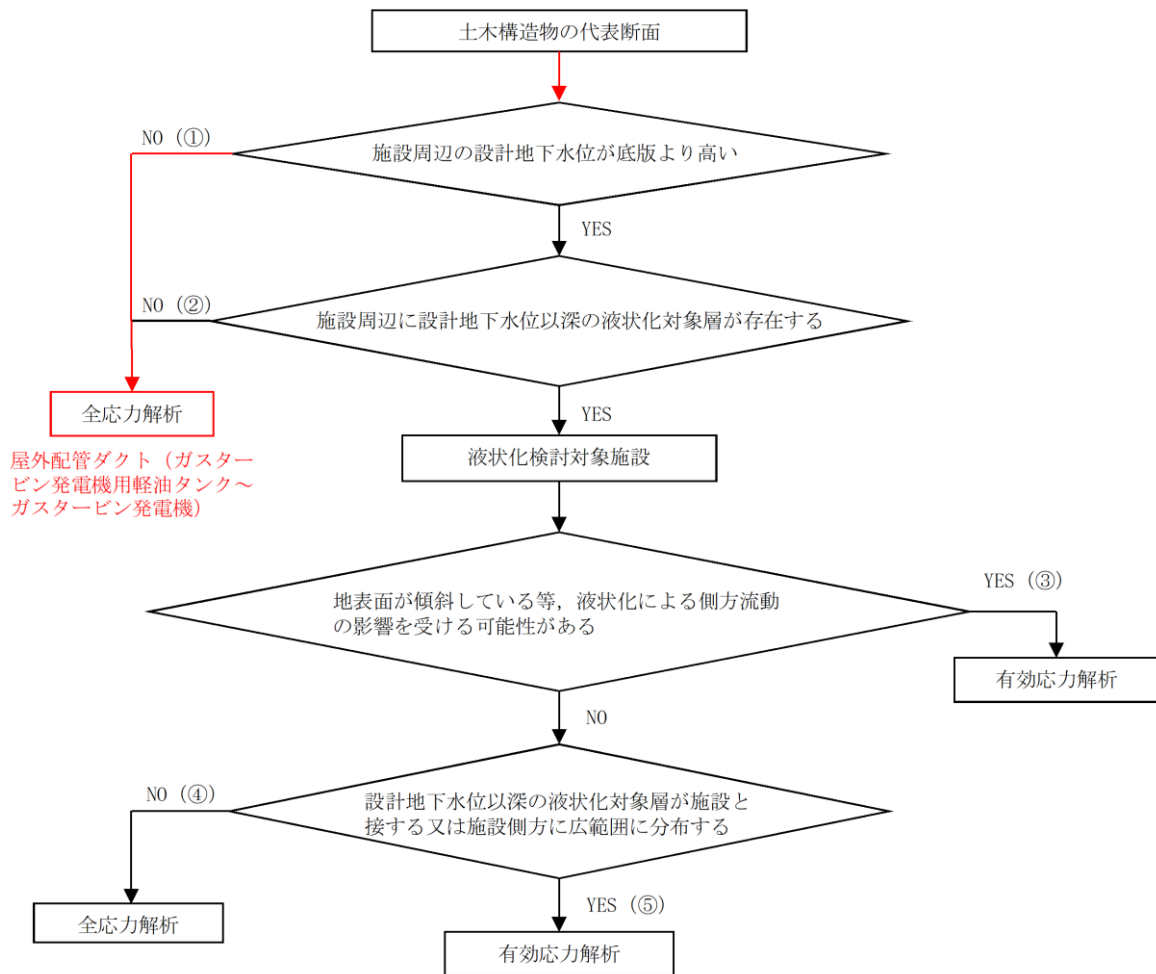


図 3-1 解析手法の選定フロー

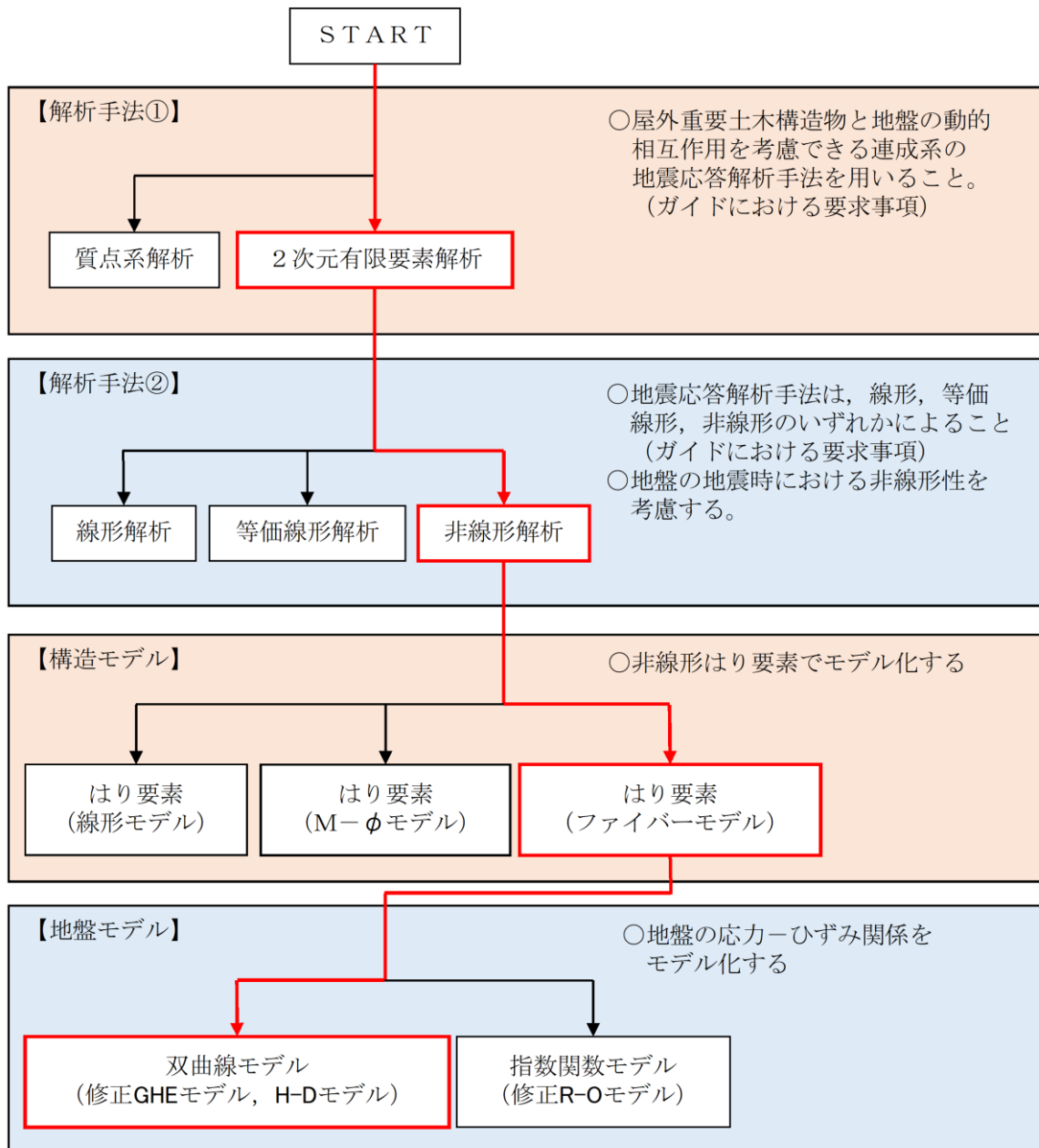


図 3-2 地震応答解析手法の選定フロー

3.2 地震応答解析モデルの設定

3.2.1 解析モデル領域

地震応答解析モデルは、境界条件の影響が地盤及び構造物の応力状態に影響を及ぼさないよう、十分広い領域とする。J E A G 4 6 0 1 -1987 を参考に、図 3-3 に示すとおりモデル幅を構造物基礎幅の 5 倍以上、モデル高さを構造物基礎幅の 1.5 倍～2 倍以上とする。

なお、解析モデルの境界条件は、側面及び底面ともに粘性境界とする。

地盤の要素分割については、波動をなめらかに表現するために、対象とする波長の 5 分の 1 程度を考慮し、要素高さを 1m 程度まで細分割して設定する。

構造物の要素分割については、土木学会マニュアル 2005 に従い、要素長さを部材の断面厚さ又は有効高さの 2.0 倍以下とし、1.0 倍程度まで細分して設定する。

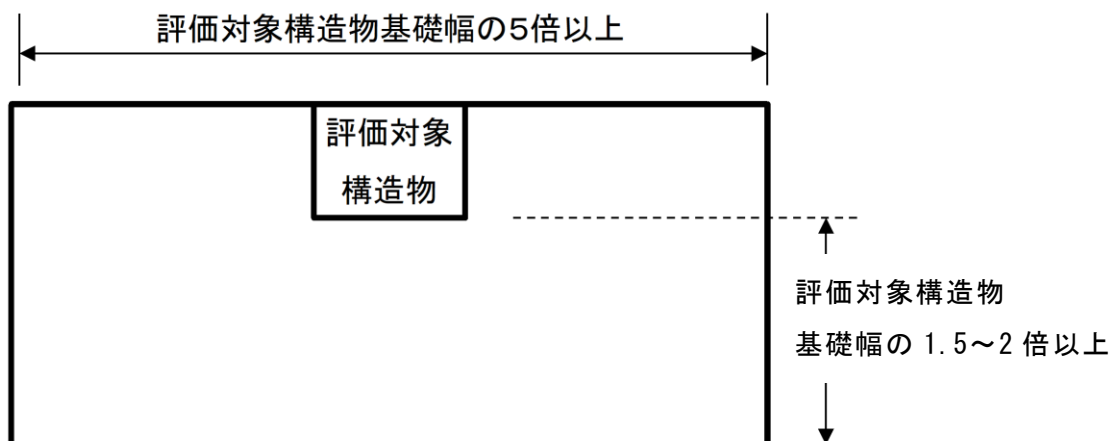


図 3-3 モデル化範囲の考え方

3.2.2 境界条件

(1) 固有値解析時

固有値解析を実施する際の境界条件は、境界が構造物を含めた周辺地盤の振動特性に影響を与えないよう設定する。ここで、底面境界は地盤のせん断方向の卓越変形モードを把握するために固定とし、側方境界はフリーとする。境界条件の概念図を図3-4に示す。

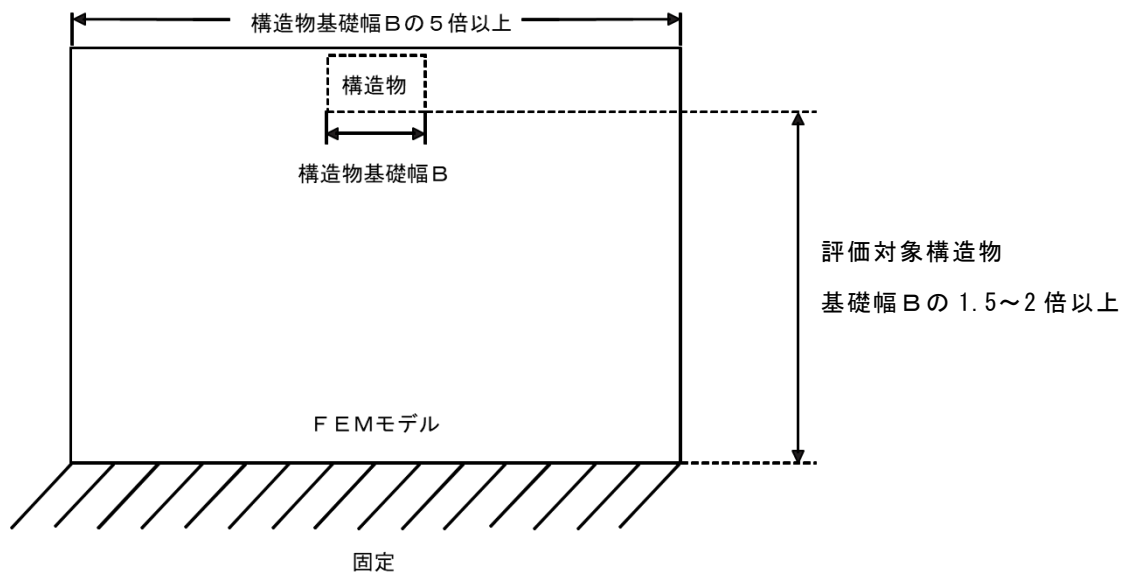
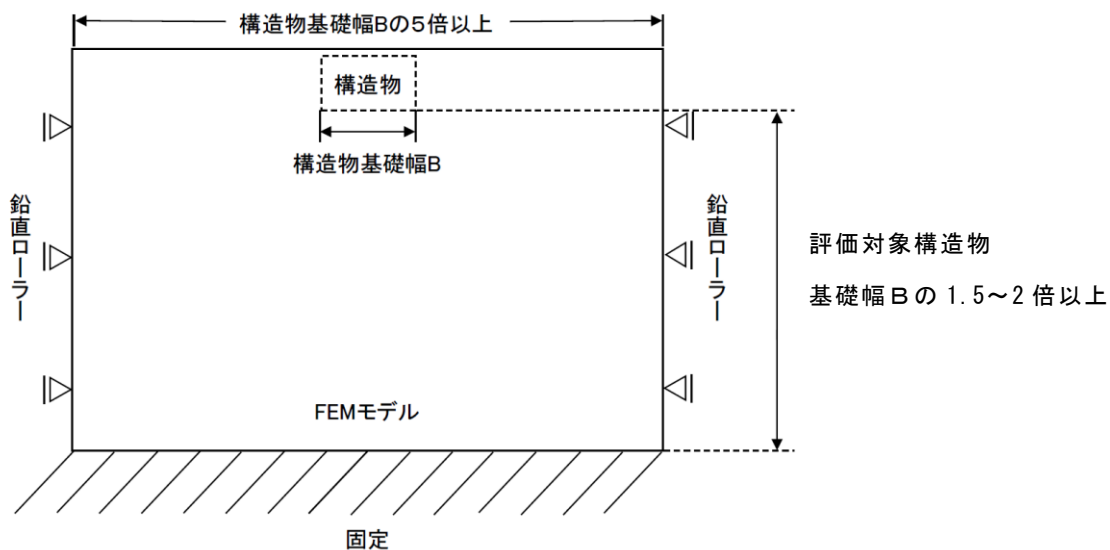


図3-4 固有値解析における境界条件の概念図

(2) 常時応力解析時

常時応力解析は、地盤や構造物の自重等の静的な荷重を載荷することによる常時応力を算定するために行う。そこで、常時応力解析時の境界条件は底面固定とし、側方は自重等による地盤の鉛直方向の変形を拘束しないよう鉛直ローラーとする。境界条件の概念図を図 3-5 に示す。



(3) 地震応答解析時

地震応答解析時の境界条件については、有限要素解析における半無限地盤を模擬するため、粘性境界を設ける。底面の粘性境界については、地震動の下降波がモデル底面境界から半無限地盤へ通過していく状態を模擬するため、ダッシュポットを設定する。側方の粘性境界については、自由地盤の地盤振動と不整形地盤側方の地盤振動の差分が側方を通過していく状態を模擬するため、自由地盤の側方にダッシュポットを設定する。

境界条件の概念図を図 3-6 に示す。

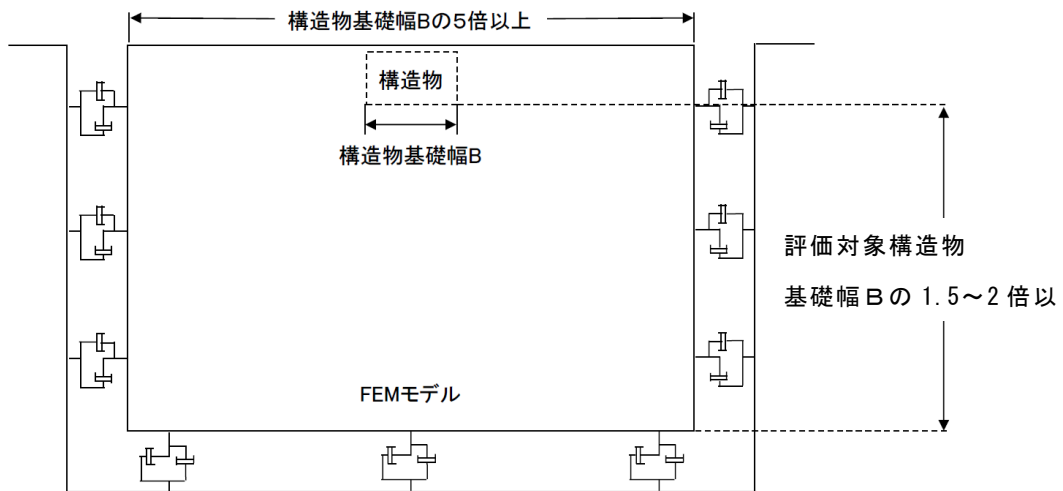


図 3-6 地震応答解析における境界条件の概念図

3.2.3 構造物のモデル化

鉄筋コンクリート部材は非線形はり要素によりモデル化する。

また、ダクト上部のコンクリート蓋はモデル化せず、コンクリート蓋の自重及び蓋に堆積する積雪荷重を付加質量として蓋掛り部に考慮する。

機器・配管荷重は解析モデルに付加質量として与えることで考慮する。

3.2.4 隣接構造物のモデル化

A-A断面の解析モデル範囲において隣接するガスタービン発電機建物は、地表面付近の岩盤上に設置され、埋込は有していない。また、地下部の基礎は岩盤と同程度の剛性のため、屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）へ与える応答の影響は小さいことから隣接構造物としてモデル化しない。

3.2.5 地盤及びMMRのモデル化

岩盤及びMMRは線形の平面ひずみ要素でモデル化する。埋戻土は、地盤の非線形性をマルチスプリング要素で考慮した平面ひずみ要素でモデル化する。

地盤のモデル化に用いる地質断面図を図3-7に示す。

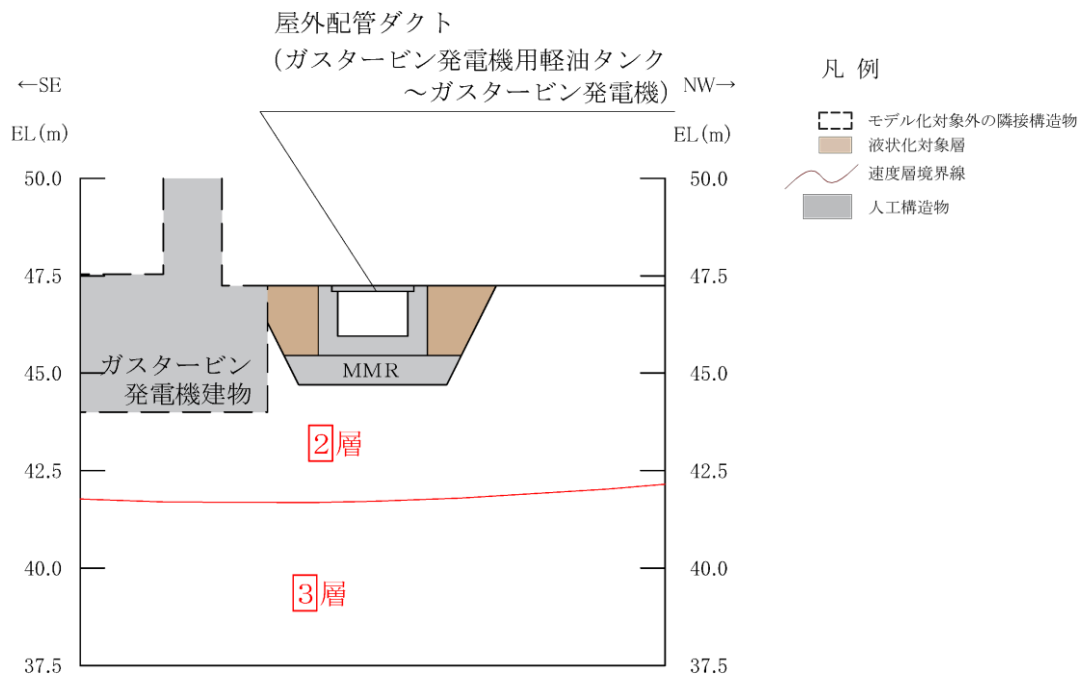


図 3-7 評価対象地質断面図 (A-A断面位置)

3.2.6 地震応答解析モデル

評価対象地質断面図を踏まえて設定した地震応答解析モデル図を図3-8に示す。

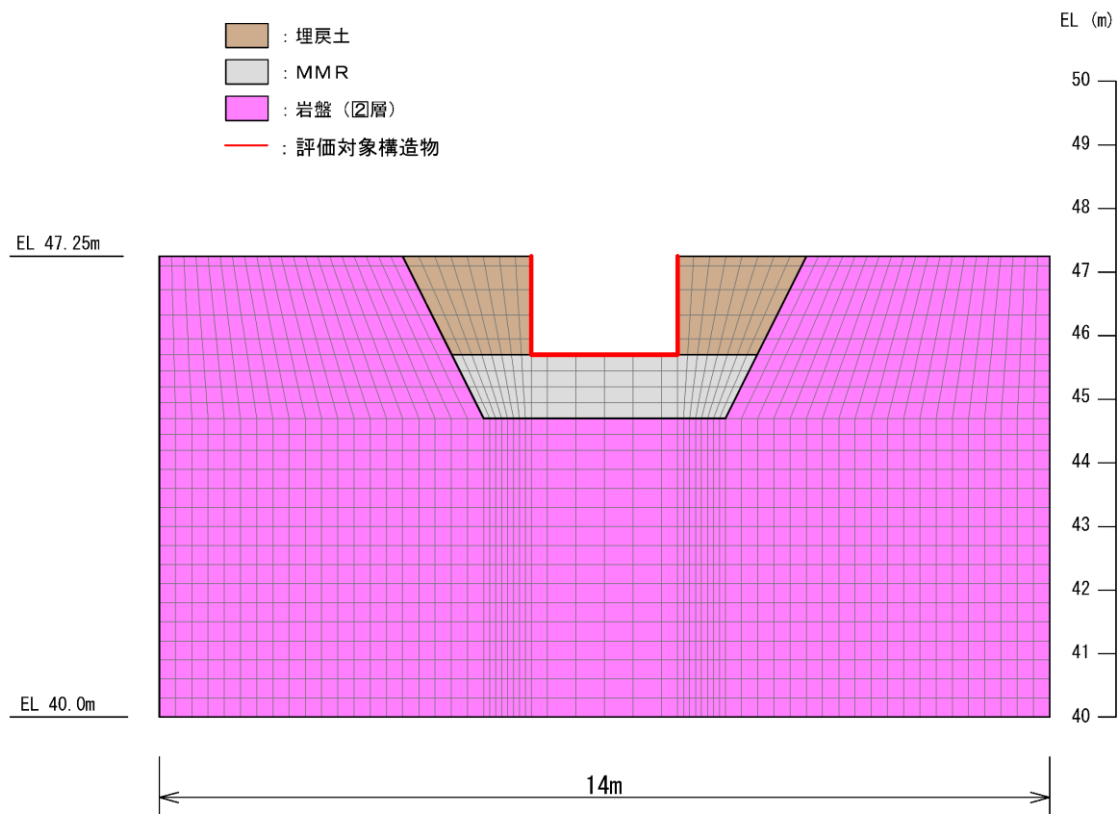


図3-8 地震応答解析モデル図

3.2.7 ジョイント要素の設定

地盤と構造物との接合面にジョイント要素を設けることにより、地震時の地盤と構造物の接合面における剥離及びすべりを考慮する。

ジョイント要素は、地盤と構造物の接合面で法線方向及びせん断方向に対して設定する。法線方向については、常時状態以上の引張荷重が生じた場合、剛性及び応力をゼロとし、剥離を考慮する。せん断方向については、地盤と構造物の接合面におけるせん断抵抗力以上のせん断荷重が生じた場合、せん断剛性をゼロとし、すべりを考慮する。

せん断強度 τ_f は次式の Mohr-Coulomb 式により規定される。粘着力 c 及び内部摩擦角 ϕ は周辺地盤の c 、 ϕ とし、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき表 3-1 のとおりとする。また、要素間の粘着力 c 及び内部摩擦角 ϕ は、表 3-2 のとおり設定する。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

ここに、 τ_f : せん断強度

c : 粘着力 (= 初期せん断強度 τ_0)

ϕ : 内部摩擦角

表 3-1 周辺地盤との境界に用いる強度特性

地盤	粘着力 c (N/mm ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
岩盤 (C _L 級)	0.56	37
埋戻土	0.22	22
MMR ($f'_{ck} = 18.0\text{N/mm}^2$)	3.58	40

表 3-2 要素間の粘着力と内部摩擦角

接合条件		粘着力 c (N/mm^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)
材料 1	材料 2		
構造物	無筋コンクリート	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
	埋戻土	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
無筋コンクリート	埋戻土	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
	岩盤	- *	- *

注記*：表面を露出させて打継処理が可能である箇所については、ジョイント要素を設定しない。

ジョイント要素のばね定数は、土木学会マニュアル 2005 を参考に、数値計算上、不安定な挙動を起こさない程度に周囲材料の剛性よりも十分に大きな値を設定する。表 3-3 にジョイント要素のばね定数を示す。

また、ジョイント要素の力学特性を図 3-9 に、ジョイント要素の配置を図 3-10 に示す。

表 3-3 ジョイント要素のばね定数

圧縮剛性 k_n (kN/m^3)	せん断剛性 k_s (kN/m^3)
1.0×10^7	1.0×10^7

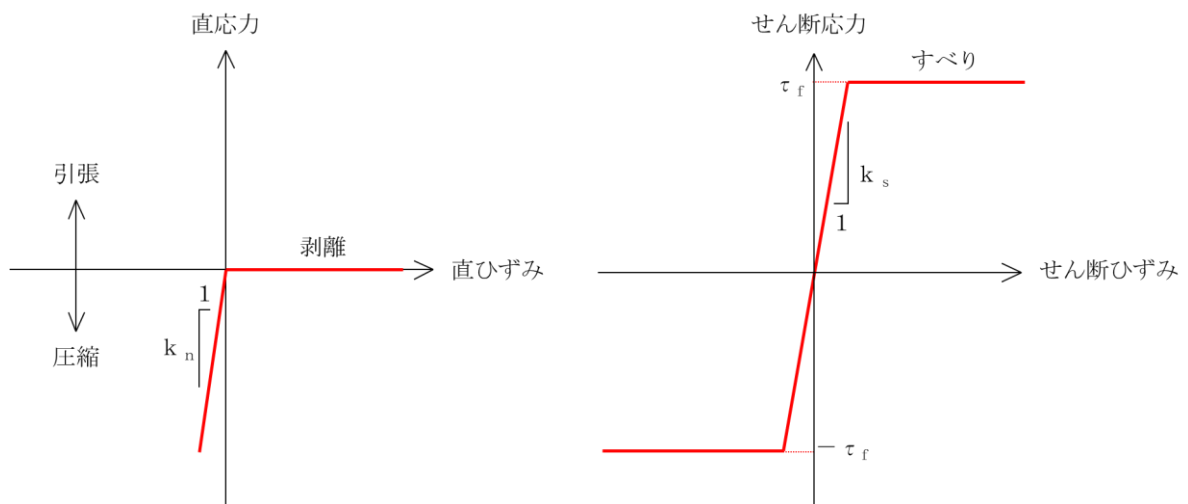


図 3-9 ジョイント要素の力学特性

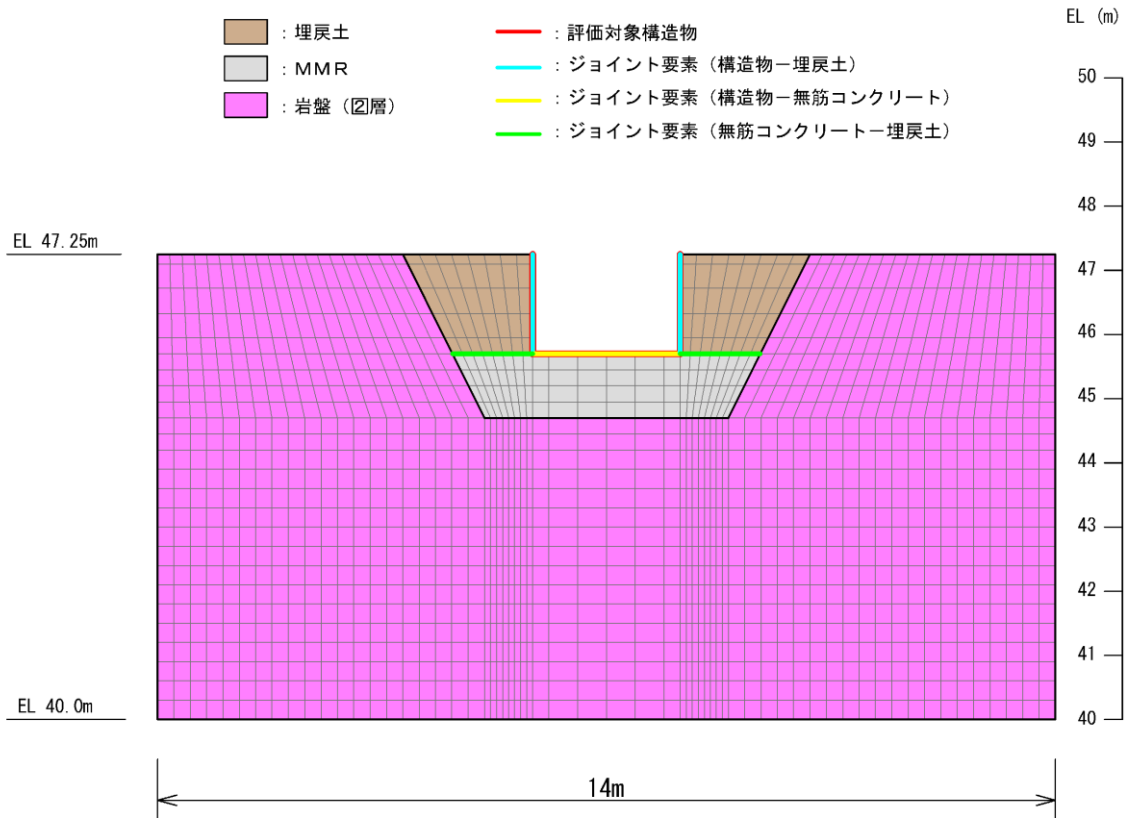


図 3-10 ジョイント要素の配置

3.2.8 材料特性の設定

鉄筋コンクリート部材は、ファイバーモデルによる非線形はり要素でモデル化する。ファイバーモデルは図3-11に示すように、はり要素の断面を層状に分割し各層に材料の非線形特性を考慮する材料非線形モデルであり、図3-12に示すコンクリートの応力-ひずみ関係を考慮する。

また、図3-13に鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。

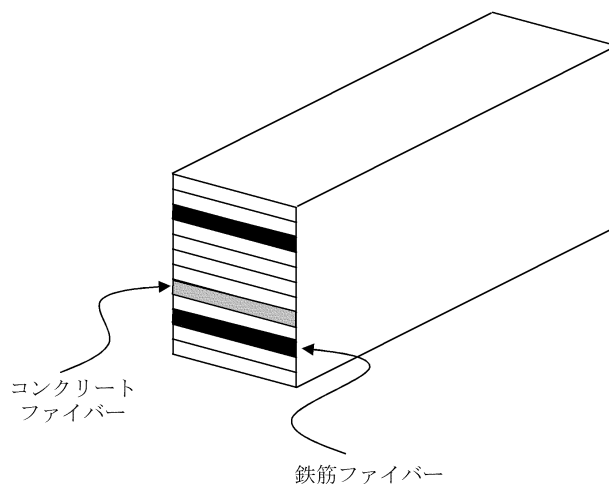
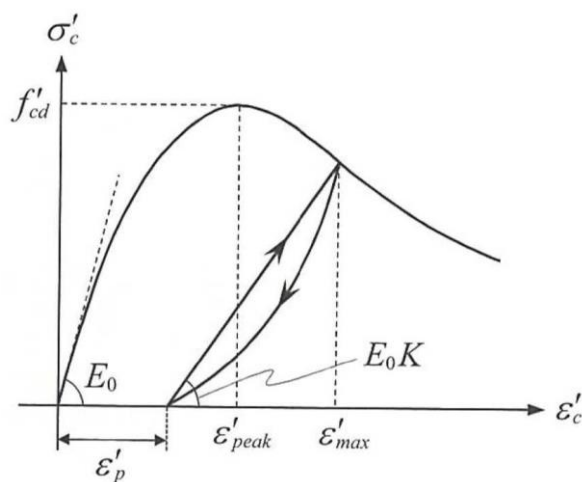
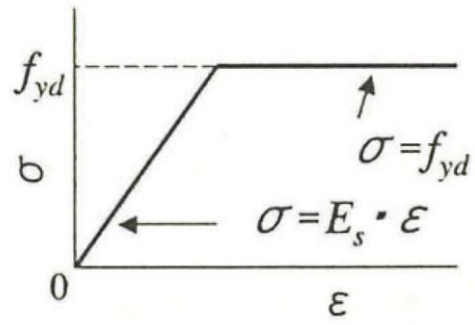


図3-11 ファイバーモデルの概念図



(「コンクリート標準示方書[設計編] (社) 土木学会, 2017年制定)」より引用)

図3-12 構造部材の非線形特性 (コンクリートの応力-ひずみ関係)



(コンクリート標準示方書 2002 より引用)

図 3-13 構造部材の非線形特性 (鉄筋の応力-ひずみ関係)

3.3 減衰定数

減衰定数は、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」の「9. 地震応答解析における減衰定数」に基づき、粘性減衰及び履歴減衰で考慮する。

固有値解析にて求められる解析モデル全体の固有周期と各材料の減衰比に基づき、質量マトリックス及び剛性マトリックスの線形結合で表される以下のRayleigh減衰を解析モデル全体に与える。

Rayleigh減衰の設定フローを図3-14に示す。

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

[C]：減衰係数マトリックス

[M]：質量マトリックス

[K]：剛性マトリックス

α , β ：係数

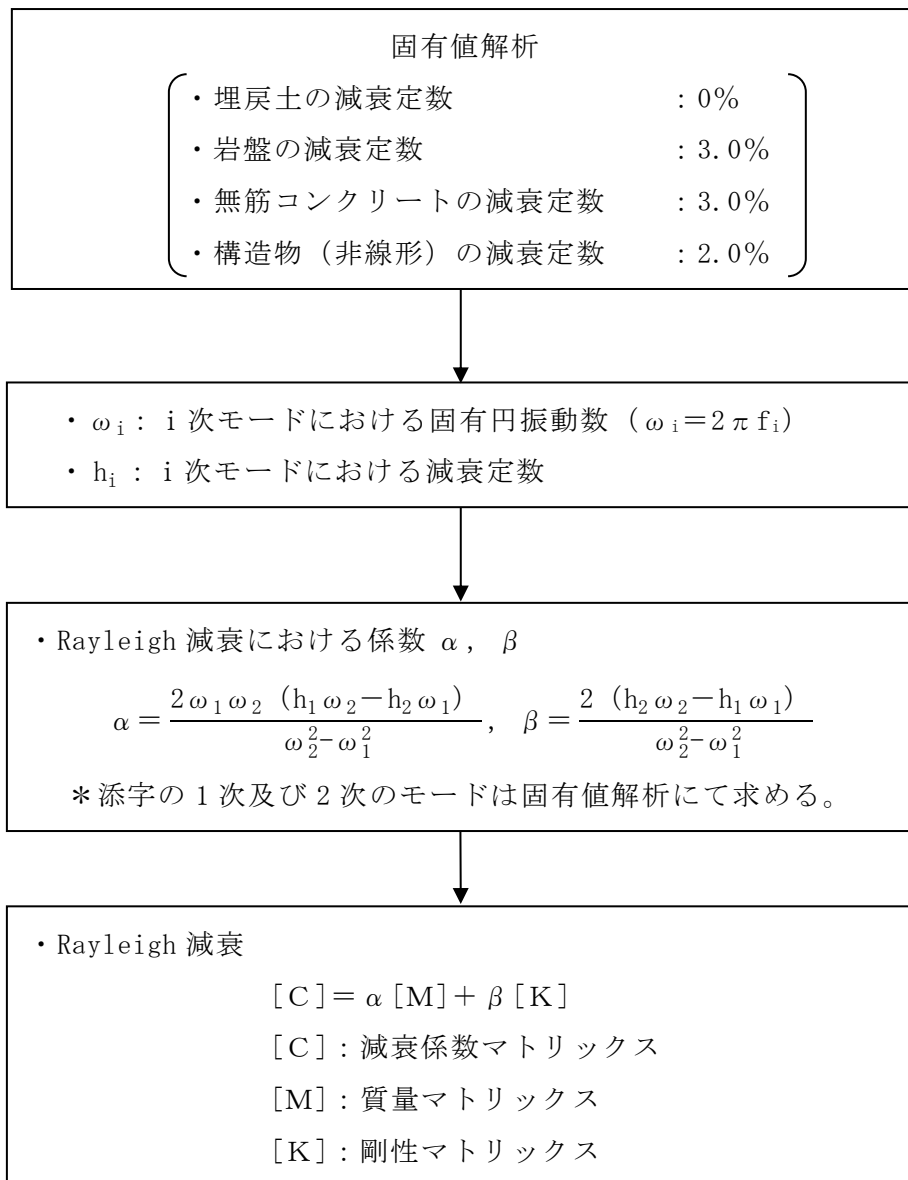


図 3-14 Rayleigh 減衰の設定フロー

Rayleigh 減衰における係数 α , β は、低次のモードの変形が支配的となる地中埋設構造物に対して、その特定の振動モードの影響が大きいことを考慮して、固有値解析結果より得られる卓越するモードの減衰と Rayleigh 減衰が一致するように設定する。なお、卓越するモードは全体系の固有値解析における刺激係数及びモード図にて決定するが、係数 α , β が負値となる場合は当該モードを選定しない。

固有値解析結果の一覧を表 3-4 に、固有値解析におけるモード図を図 3-15 に、係数 α , β を表 3-5 に、固有値解析結果に基づき設定した Rayleigh 減衰を図 3-16 に示す。

表 3-4 固有値解析結果

	固有振動数 (Hz)	有効質量比 (%)		刺激係数		備考
		Tx	Ty	β_x	β_y	
1	26.650	74	0	13.06	0.00	1次として採用
2	44.821	0	4	0.00	-3.21	—
3	50.597	0	20	0.00	-6.71	—
4	50.750	1	0	1.55	0.00	—
5	58.362	8	0	-4.35	0.00	2次として採用
6	60.076	0	21	0.00	6.99	—
7	67.637	4	0	-2.93	0.00	—
8	73.782	0	14	0.00	5.61	—
9	74.829	0	0	0.54	0.00	—
10	80.145	0	14	0.00	5.61	—

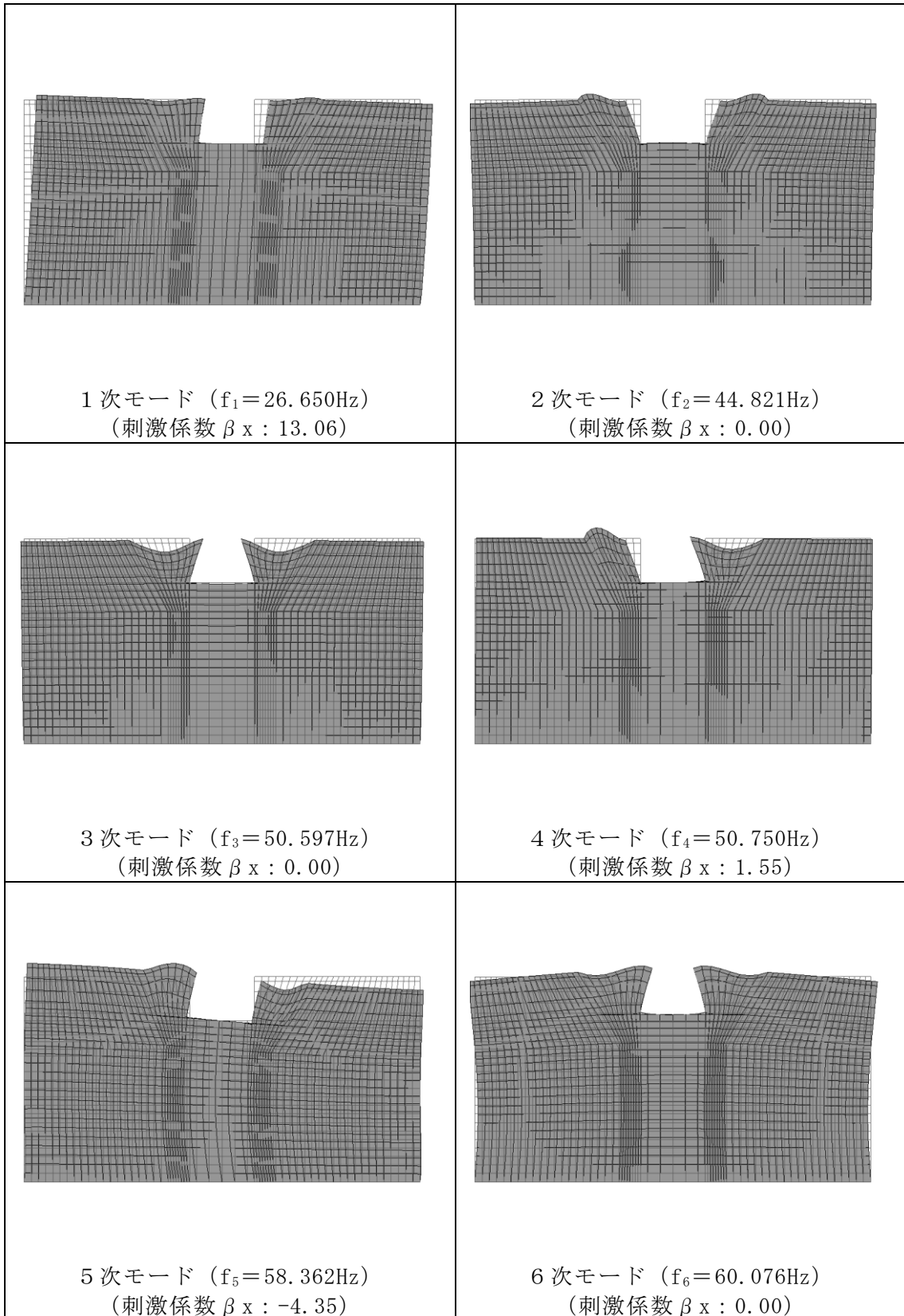


図 3-15(1) 固有値解析結果 (モード図)

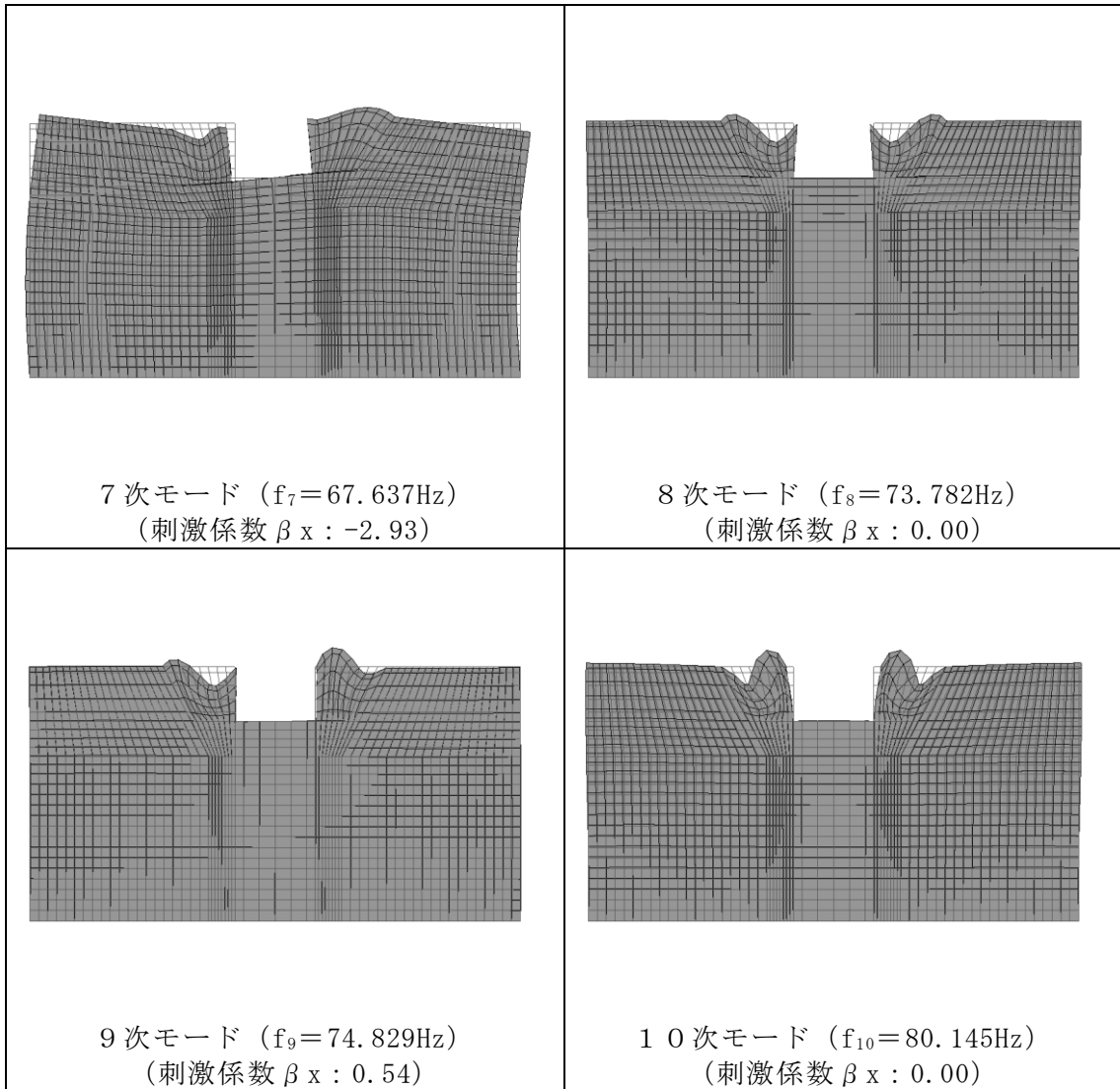


図 3-15(2) 固有値解析結果 (モード図)

表 3-5 Rayleigh 減衰における係数 α , β の設定結果

評価対象断面	α	β
A-A 断面	6.834	1.059×10^{-4}

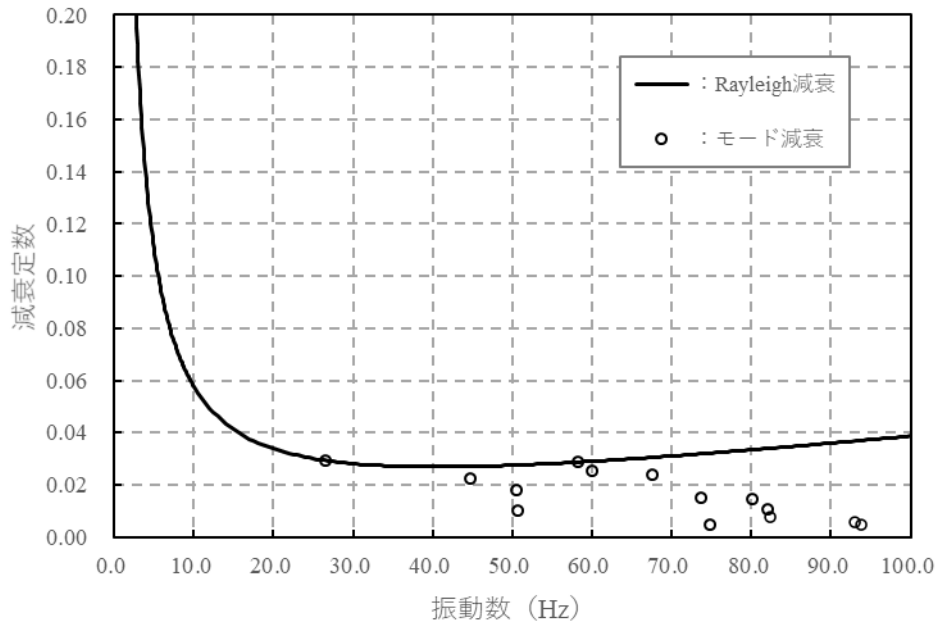


図 3-16 設定した Rayleigh 減衰

3.4 荷重及び荷重の組合せ

耐震評価にて考慮する荷重は、通常運転時の荷重（永久荷重）及び地震荷重を抽出し、それぞれを組み合わせて設定する。地震荷重には、地震時土圧及び機器・配管系からの反力による荷重が含まれるものとする。

地震時に屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）に作用する機器・配管系からの反力については、機器・配管系を解析モデルに付加質量として与えることで考慮する。

なお、屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の運転時、設計基準事故時及び重大事故時の状態における荷重条件は変わらないため、評価は設計基準対象施設の評価結果に包括されることから、設計基準対象施設の評価結果を用いた重大事故等対処施設の評価を行う。

荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

種別	荷重		算定方法の概要
永久荷重 (常時荷重)	固定 荷重	躯体自重	○ 設計図書に基づいて、対象構造物の体積に材料の密度を乗じて設定する。
		機器・配管荷重	○ 機器・配管系の重量に基づいて設定する。
	積載 荷重	静止土圧	○ 常時応力解析により設定する。
		外水圧	— 地下水位が構造物基礎下端より十分低いため考慮しない。
		積雪荷重	○ 構造物上（蓋を含む）に考慮する。
		土被り荷重	— 土被りが無いことから考慮しない。
		永久上載荷重	— 地表面に恒常的に置かれる設備等はないことから考慮しない。
偶発荷重 (地震荷重)	水平地震動	○ 基準地震動 S_s による水平・鉛直同時加振を考慮する。	
	鉛直地震動	○	

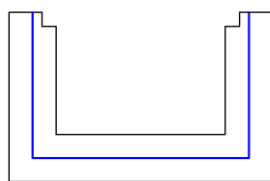
3.4.1 固定荷重

躯体自重のうち，構造物の断面部材として見込んでいないコンクリート蓋重量 3.6kN/m^2 を両側壁の上端で負担する。

また，構造物の部材断面として見込んでいない底版側溝底面より上方の 2 次コンクリート重量を，底版への荷重として考慮する。

3.4.2 機器・配管荷重

地震時に屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）に作用する機器・配管系の荷重図を図 3-17 に示す。機器・配管荷重は，常時・地震時ともに付加質量でモデル化する。



— 機器・配管重量 1.0kN/m^2 を考慮する部材

図 3-17 解析用機器・配管荷重図

3.4.3 積雪荷重

積雪荷重は，VI-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等における損傷の防止に関する基本方針」に基づき，発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上 1 位の月最深積雪 100cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮し 35.0cm とする。積雪荷重については，「松江市建築基準法施行細則（平成 17 年 3 月 31 日，松江市規則第 234 号）」により，積雪量 1cm ごとに 20N/m^2 の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

3.5 地震応答解析の解析ケース

3.5.1 耐震評価における解析ケース

(1) 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

地盤物性のばらつきの影響を考慮するため、表 3-7 に示す解析ケースを設定する。

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）は、MMR 上に設置され、側面に埋戻土が分布し、主たる荷重は埋戻土の土圧となることから、埋戻土の初期せん断弾性係数のばらつきを考慮する。

ばらつきを考慮する物性値は地盤のせん断変形を定義するせん断弾性係数とし、平均値を基本ケース（表 3-7 に示すケース①）とした場合に加えて、平均値±1.0×標準偏差（ σ ）のケース（表 3-7 に示すケース②及び③）について確認を行う。

地盤のばらつきの設定方法の詳細は、「補足-023-01 地盤の支持性能について」に示す。

表 3-7 解析ケース

解析ケース	解析手法	地盤物性	
		埋戻土 (G_0 : 初期せん断 弾性係数)	岩盤 (G_d : 動せん断 弾性係数)
ケース① (基本ケース)	全応力解析	平均値	平均値
ケース②	全応力解析	平均値 + 1 σ	平均値
ケース③	全応力解析	平均値 - 1 σ	平均値

(2) 耐震評価における解析ケースの組合せ

耐震評価においては、基準地震動 S_s 全波（6波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（6波）を加えた全12波に対し、ケース①を実施する。ケース①において、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び地盤の支持力照査の照査項目ごとに照査値が0.5を超える照査項目に対して、最も厳しい地震動を用いて、表3-8に示す解析ケース（ケース②及び③）を実施する。すべての照査項目の照査値がいずれも0.5以下の場合、照査値が最も厳しくなる地震動を用いて、解析ケース②及び③を実施する。耐震評価における解析ケースを表3-8に示す。また、追加解析ケースを実施する地震動の選定フローを図3-18に示す。

表3-8 耐震評価における解析ケース

解析ケース			ケース①	ケース②	ケース③
			基本ケース	地盤物性のばらつき (+1 σ) を考慮した解析ケース	地盤物性のばらつき (-1 σ) を考慮した解析ケース
地盤物性			平均値	平均値 + 1 σ	平均値 - 1 σ
地震動 (位相)	$S_s - D$	++* ¹	○	基準地震動 S_s (6波) に位相反転を考慮した地震動 (1波) を加えた全7波に対し、ケース① (基本ケース) を実施し、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び基礎地盤の支持力照査の各照査項目ごとに照査値が0.5を超える照査項目に対して、最も厳しい (許容限界に対する裕度が最も小さい) 地震動を用いてケース②及び③を実施する。 すべての照査項目の照査値がいずれも0.5以下の場合、照査値が最も厳しくなる地震動を用いてケース②及び③を実施する。	
		-+* ¹	-* ²		
		+-* ¹	○		
		--* ¹	-* ²		
	$S_s - F1$	++* ¹	○		
	$S_s - F2$	++* ¹	○		
	$S_s - N1$	++* ¹	○		
		-+* ¹	-* ²		
	$S_s - N2$ (NS)	++* ¹	○		
		-+* ¹	-* ²		
$S_s - N2$ (EW)	++* ¹	○			
	-+* ¹	-* ²			

注記*1：地震動の位相について、++の左側は水平動，右側は鉛直動を表し、「-」は位相を反転させたケースを示す。

*2：解析モデルが左右対称であり、水平動の位相反転による解析結果への影響はないと考えられることから実施しない。

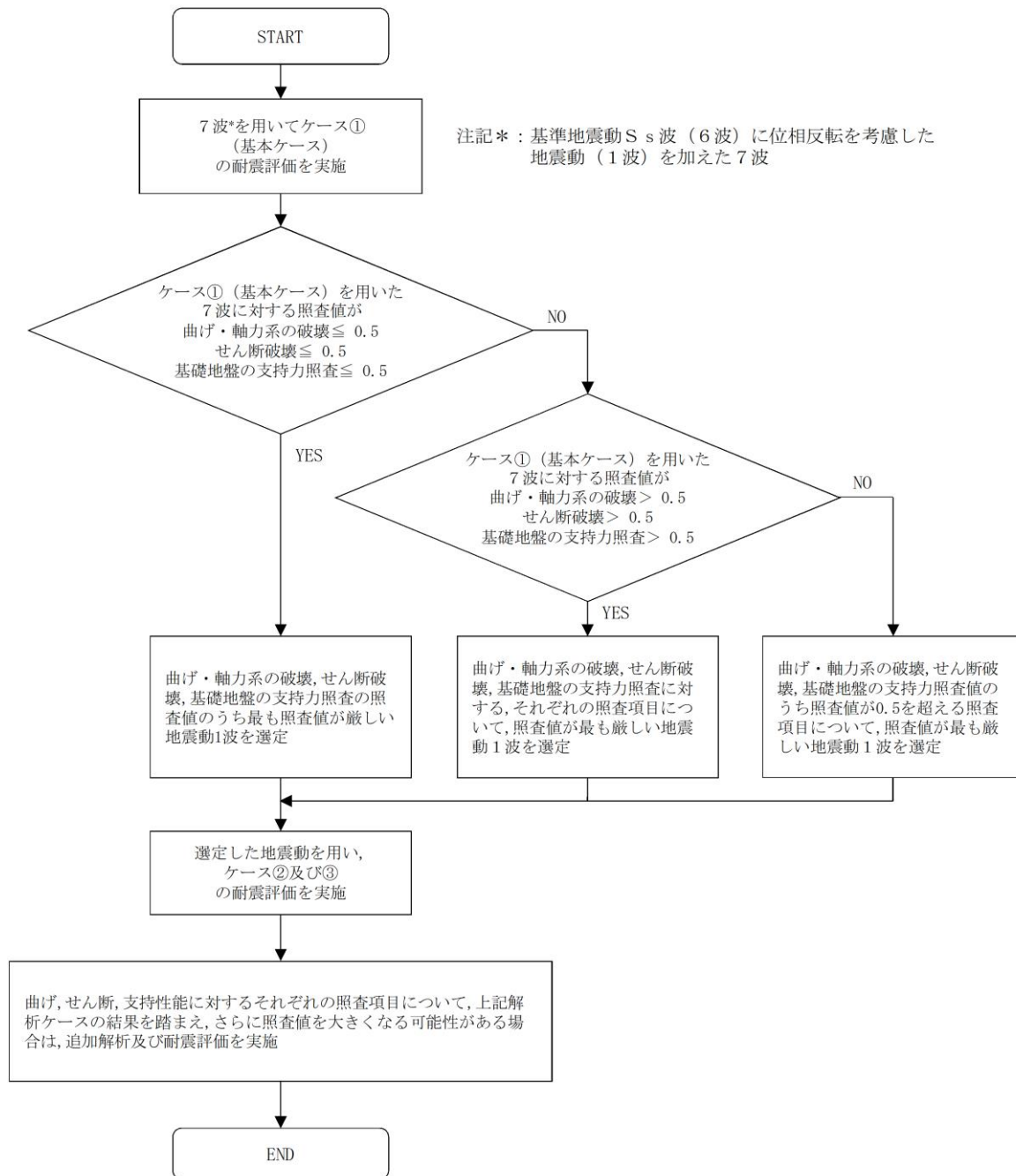


図 3-18 追加解析を実施する地震動の選定フロー

3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース

(1) 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

「3.5.1 耐震評価における解析ケース」と同様に、地盤物性のばらつきを考慮する（表 3-9 に示すケース②及び③）。

表 3-9 機器・配管系の耐震評価における解析ケース

解析ケース	解析手法	地盤物性		備考
		埋戻土 (G_0 : 初期せん断弾性係数)	岩盤 (G_d : 動せん断弾性係数)	
ケース① (基本ケース)	全応力解析	平均値	平均値	
ケース②	全応力解析	平均値 + 1 σ	平均値	
ケース③	全応力解析	平均値 - 1 σ	平均値	
ケース④	全応力解析	平均値	平均値	材料物性のばらつき

(2) 材料物性のばらつきを考慮した解析ケース

材料物性のばらつきについては、剛性を定義するコンクリートのヤング係数が、コンクリートの設計基準強度に対応して定まることを踏まえ、コンクリートの設計基準強度を基本ケースとし、ヤング係数をコンクリートの実強度に対応して定めたケースについて確認を行う（表 3-9 に示すケース④）。

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）におけるコンクリート実強度は、「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事（（社）日本建築学会，2013年）」及び「日本原子力学会標準 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準（（社）日本原子力学会，2015年）」より算定される圧縮強度のうち最大となるものを選択する。ヤング係数は実強度に対応するコンクリート標準示方書に基づき算出する。

設定した、圧縮強度及びヤング係数を表 3-10 に示す。

表 3-10 コンクリート実強度を考慮した物性値

圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
36.1	29.8

(3) 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケースの組合せ

機器・配管系に対する応答加速度抽出においては、床応答への保守的な配慮として基本ケースに加え、表 3-11 に示す解析ケース②～④を実施する。

また、構造物の延長において、選定された断面（A-A断面）と直交する断面も含むことから、機器・配管系に対する床応答加速度への保守的な配慮として、A-A断面の検討の際に、A-A断面と直交する方向の成分の地震動も含めて評価する。

表 3-11 機器・配管系の応答加速度抽出のための解析ケース

解析ケース		ケース①	ケース②	ケース③	ケース④	
		基本 ケース	地盤物性のば らつき（+1 σ ）を考慮し た解析ケース	地盤物性のば らつき（-1 σ ）を考慮し た解析ケース	材料物性（コ ンクリート） の実強度を考 慮した解析ケ ース	
地盤物性		平均値	平均値 + 1 σ	平均値 - 1 σ	平均値	
地震動 (位相)	S s - D	++* ¹	○	○	○	△* ³
		-+* ¹	-* ²	-* ²	-* ²	-
		+-* ¹	○	○	○	-
		--* ¹	-* ²	-* ²	-* ²	-
	S s - F 1	++* ¹	○	○	○	-
	S s - F 2	++* ¹	○	○	○	-
	S s - N 1	++* ¹	○	○	○	-
		-+* ¹	-* ²	-* ²	-* ²	-
	S s - N 2 (NS)	++* ¹	○	○	○	-
		-+* ¹	-* ²	-* ²	-* ²	-
	S s - N 2 (EW)	++* ¹	○	○	○	-
		-+* ¹	-* ²	-* ²	-* ²	-

注記*1：地震動の位相について、++の左側は水平動，右側は鉛直動を表し、「-」は位相を反転させたケースを示す。

*2：解析モデルが左右対称であり、水平動の位相反転による解析結果への影響はないと考えられることから実施しない。

*3：△は影響検討ケースを示す。影響検討ケースについては、S s - D（++）により影響の程度を確認する。

4. 評価内容

4.1 入力地震動の設定

入力地震動は、VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」のうち「2.3 屋外重要土木構造物」に示す入力地震動の設定方針を踏まえて設定する。

地震応答解析に用いる入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を一次元波動論により地震応答解析モデル下端位置で評価したものをを用いる。なお、入力地震動の設定に用いる地下構造モデルは、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」のうち「7.1 入力地震動の設定に用いる地下構造モデル」を用いる。

図4-1に入力地震動算定の概念図を、図4-2～図4-17に入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを示す。入力地震動の算定には、解析コード「SHAKE」及び「microSHAKE/3D」を使用する。解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

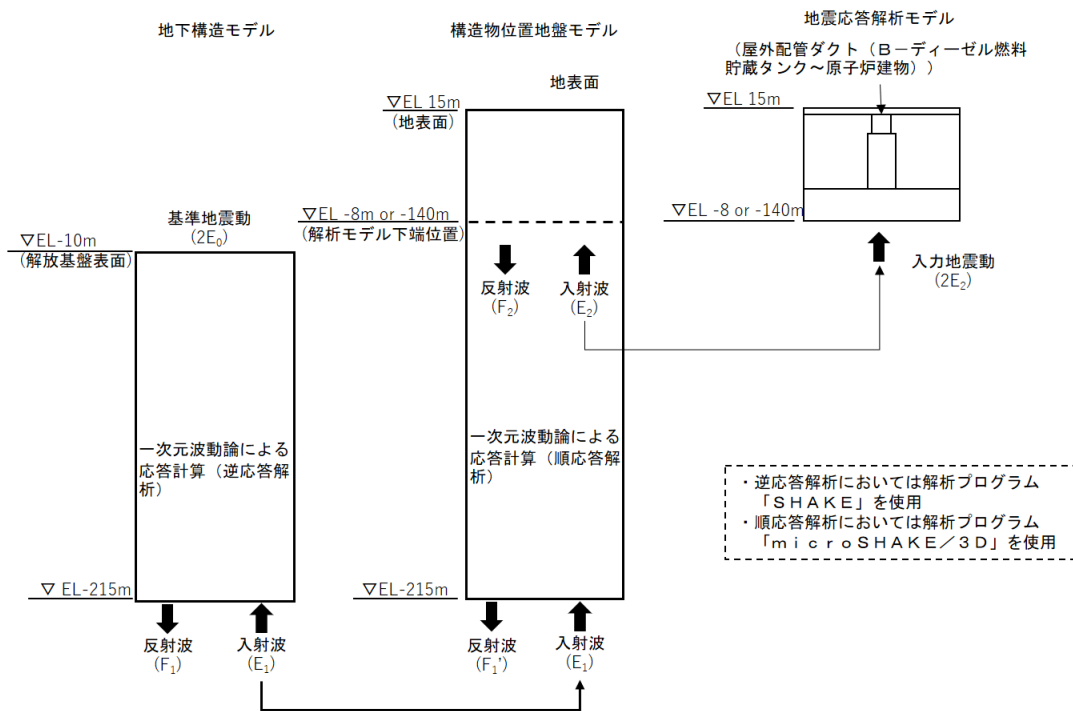
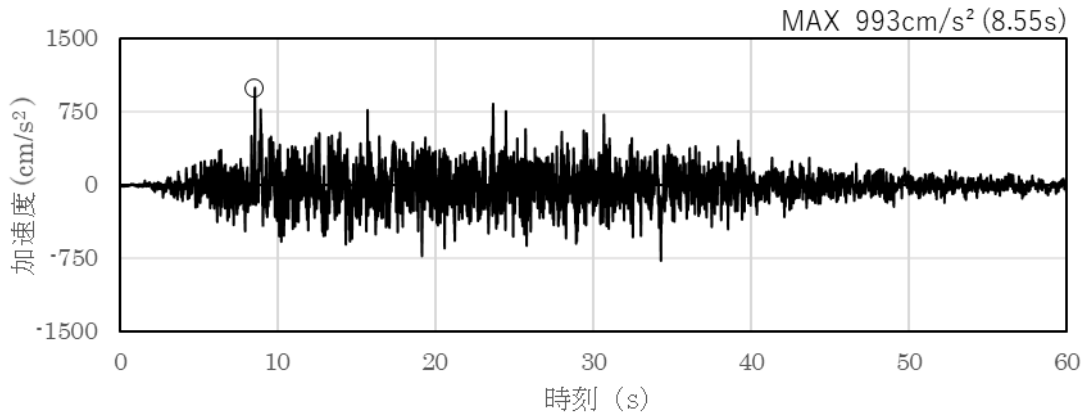
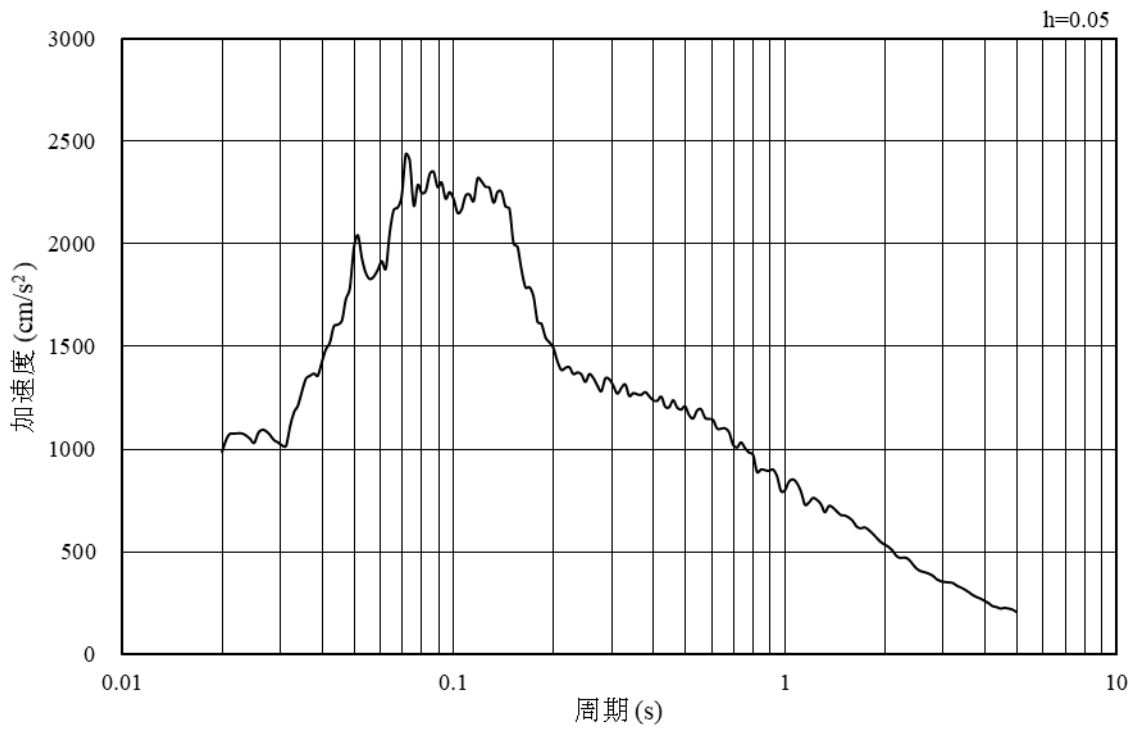


図4-1 入力地震動算定の概念図

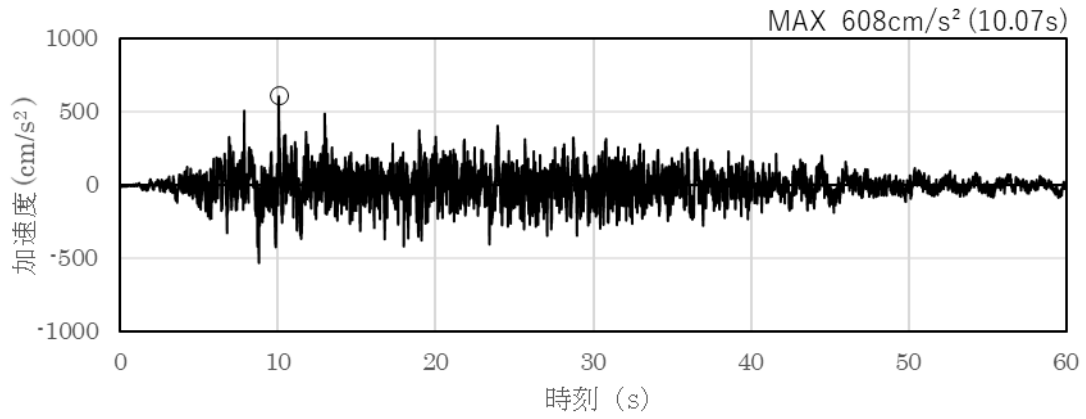


(a) 加速度時刻歴波形

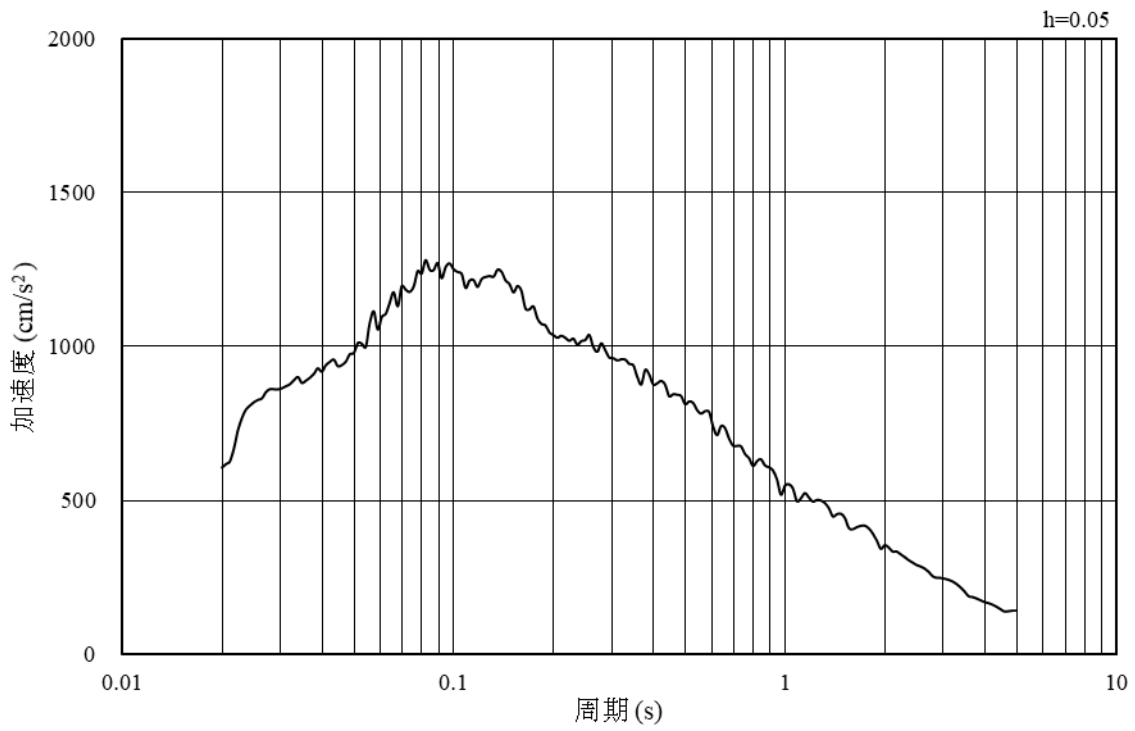


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-2 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S s - D)

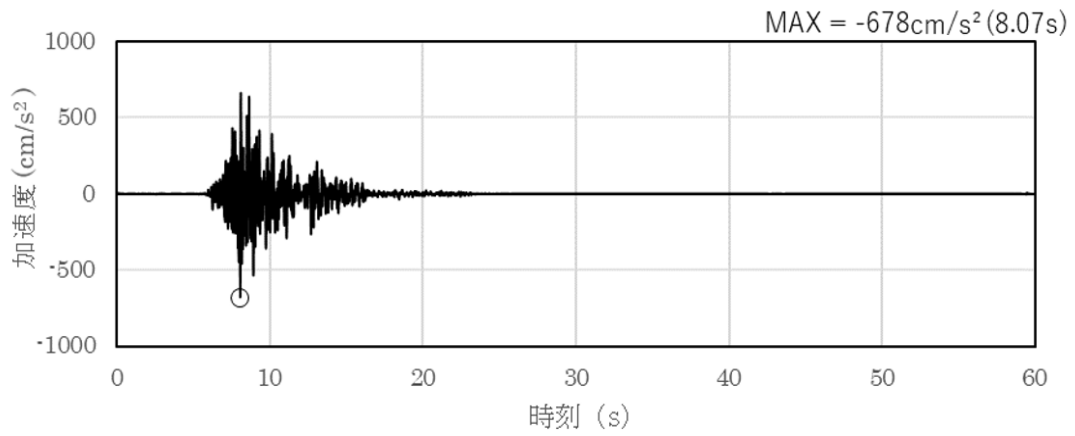


(a) 加速度時刻歴波形

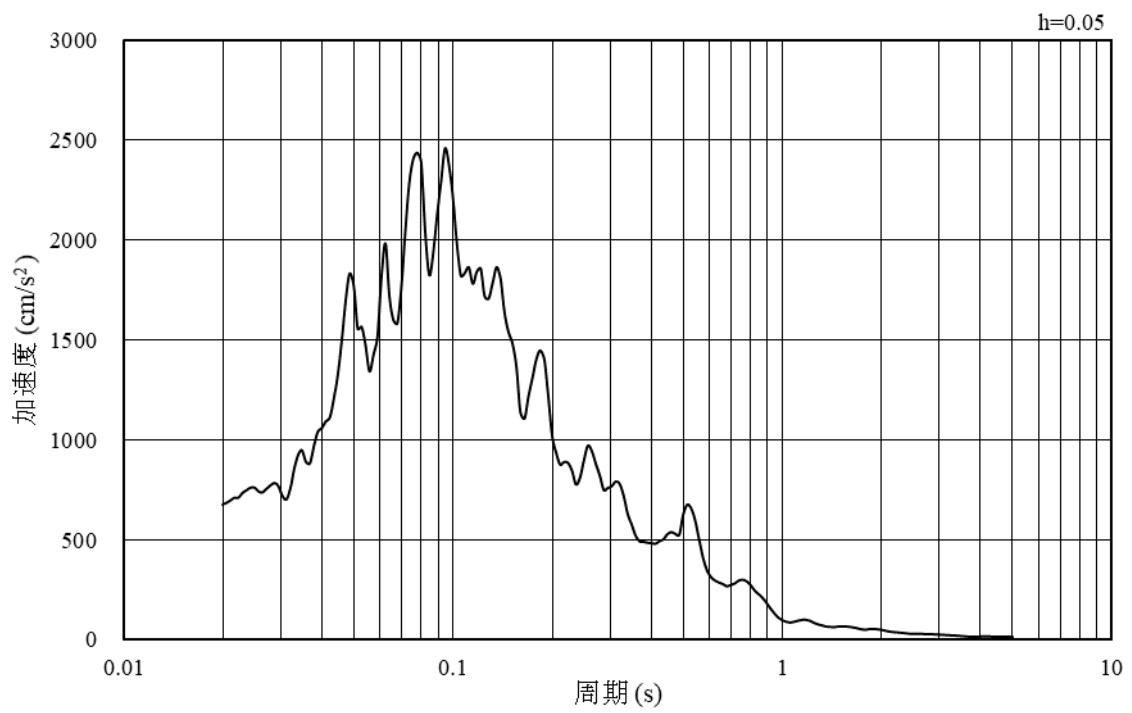


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—3 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - D)

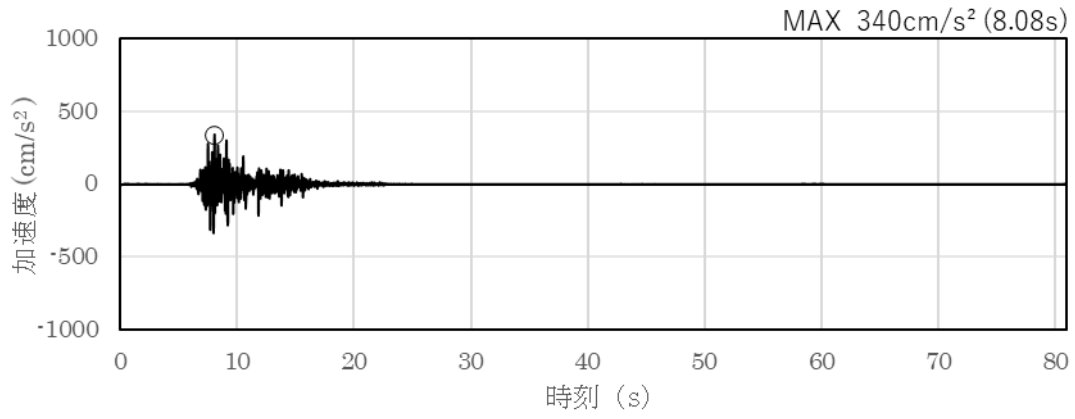


(a) 加速度時刻歴波形

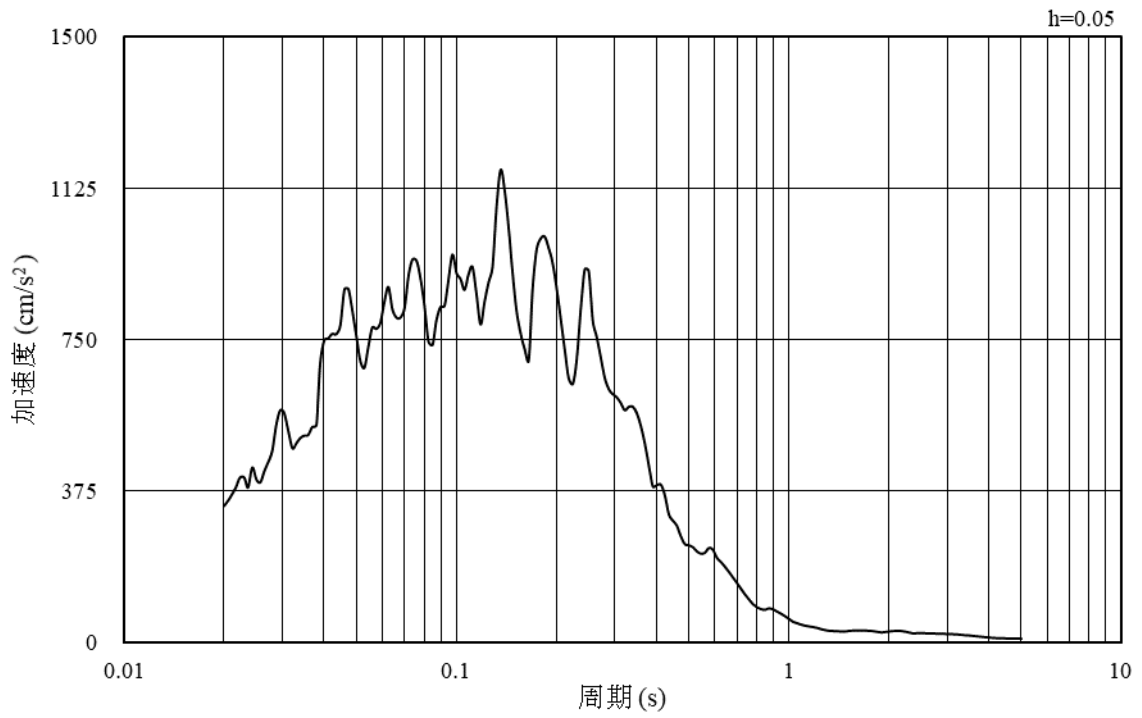


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—4 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S s - F 1 (NS))

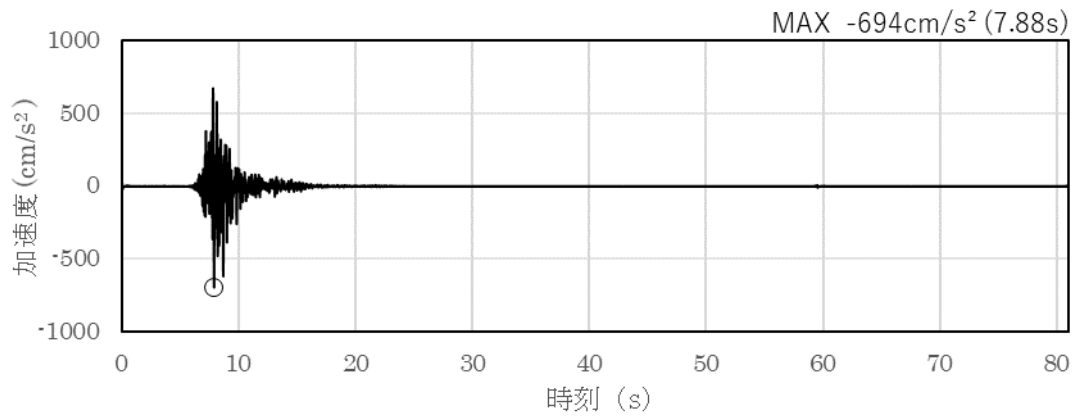


(a) 加速度時刻歴波形

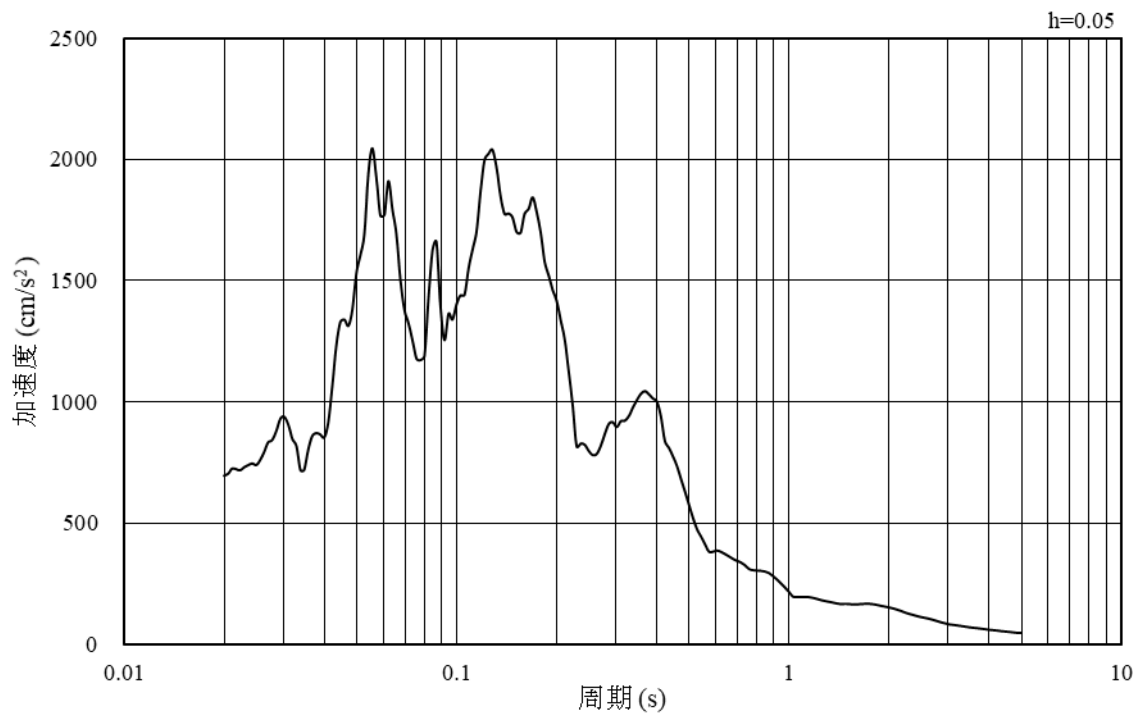


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—5 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S_s - F 1 (NS))

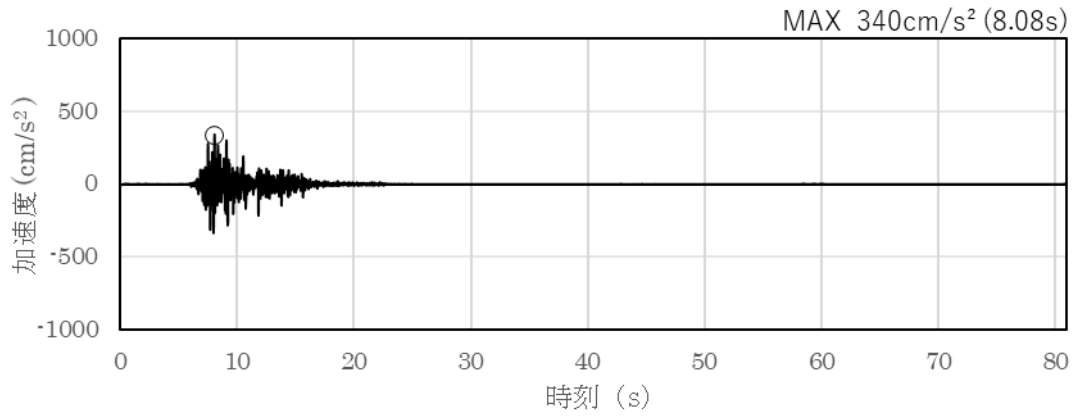


(a) 加速度時刻歴波形

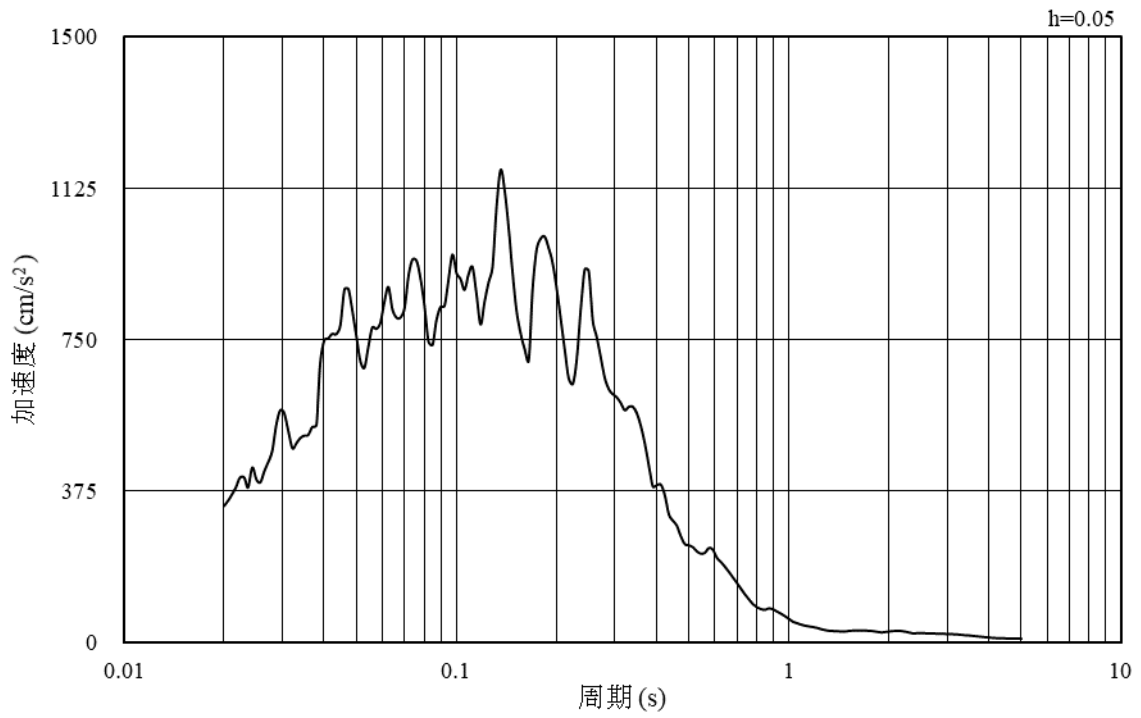


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—6 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S s - F 1 (E W))

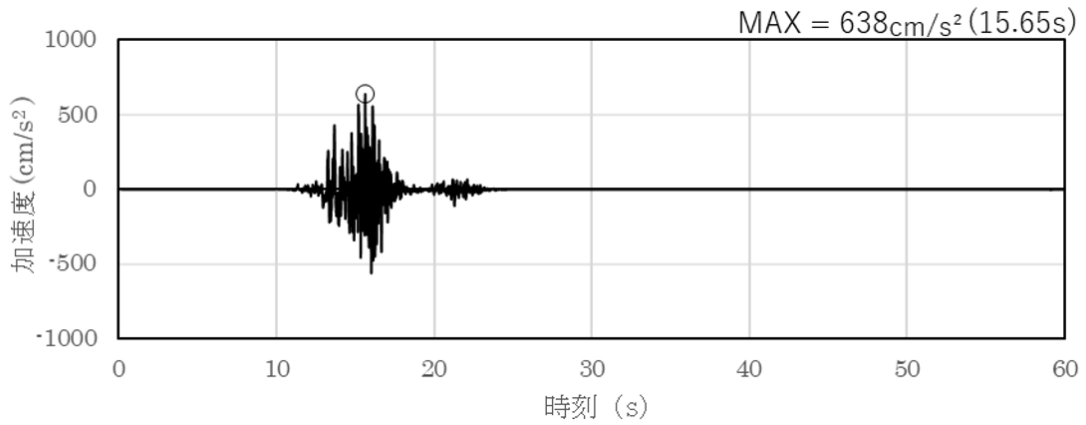


(a) 加速度時刻歴波形

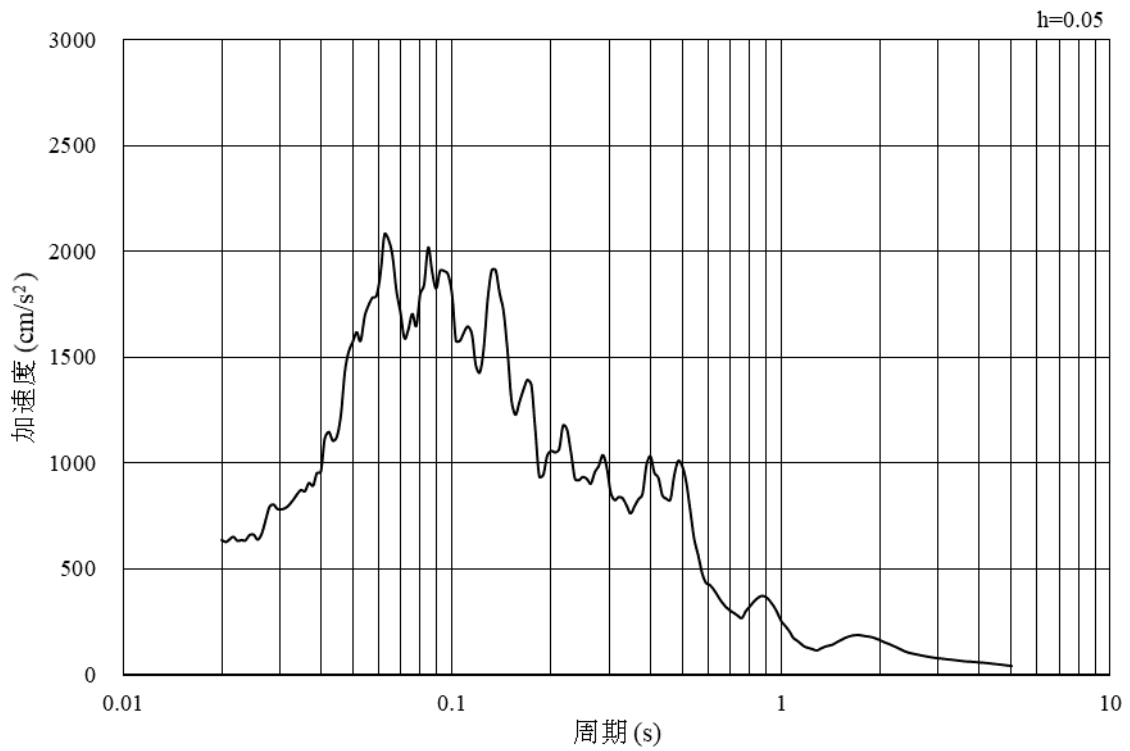


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—7 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - F 1 (E W))

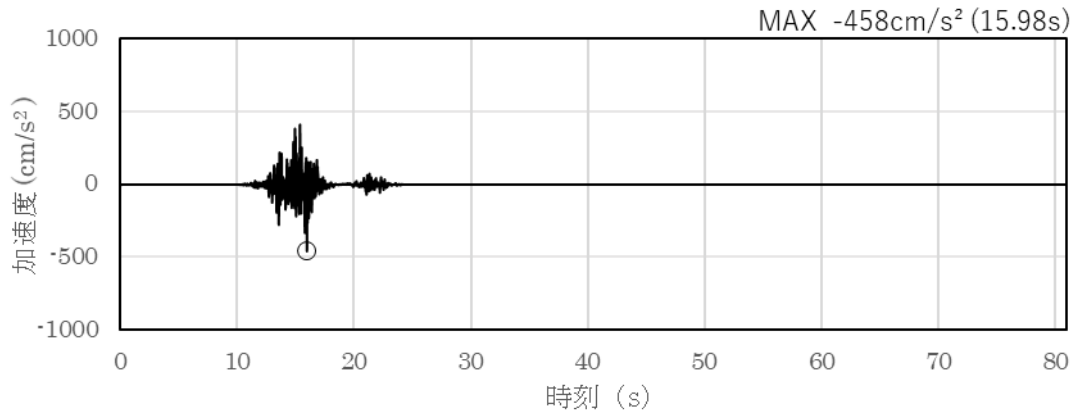


(a) 加速度時刻歴波形

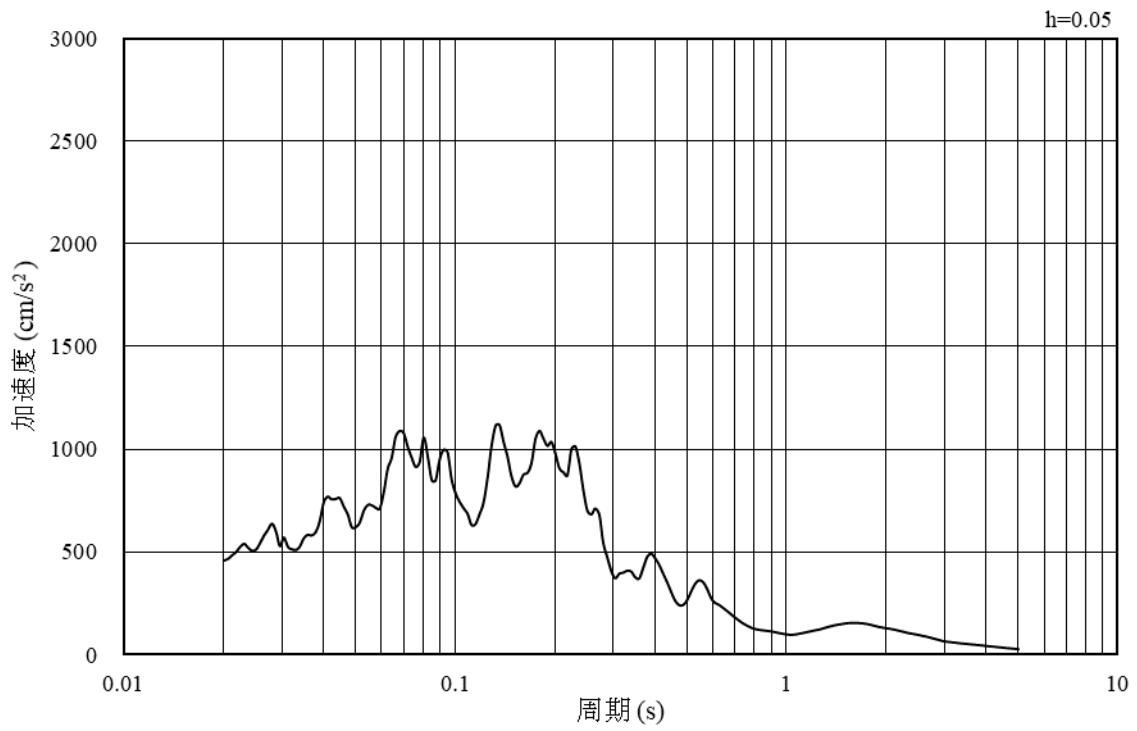


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—8 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - F 2 (N S))

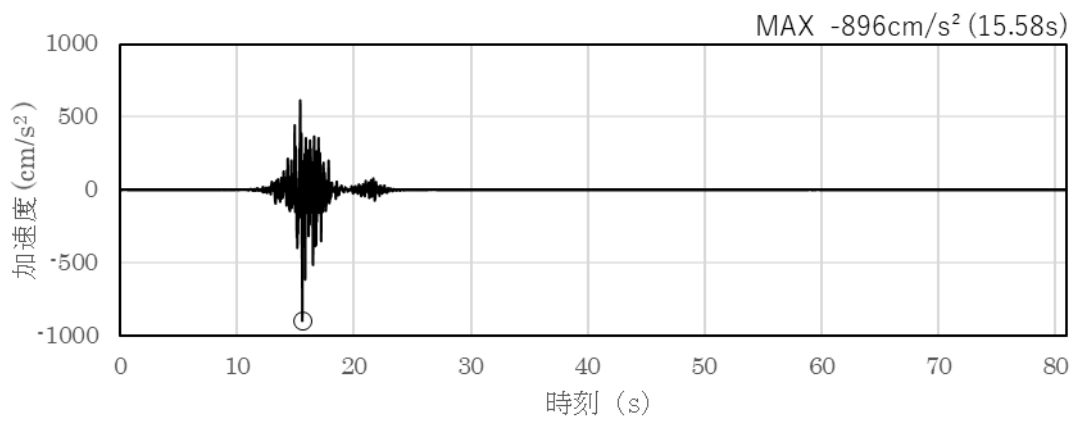


(a) 加速度時刻歴波形

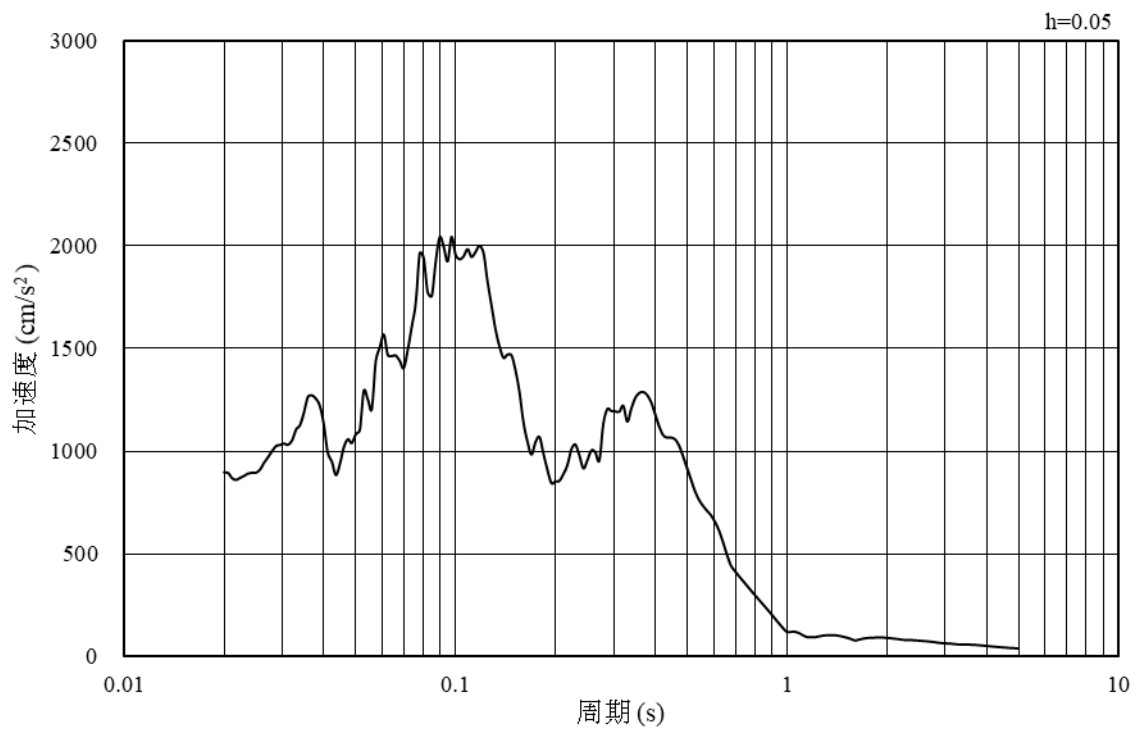


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—9 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S_s - F₂ (NS))

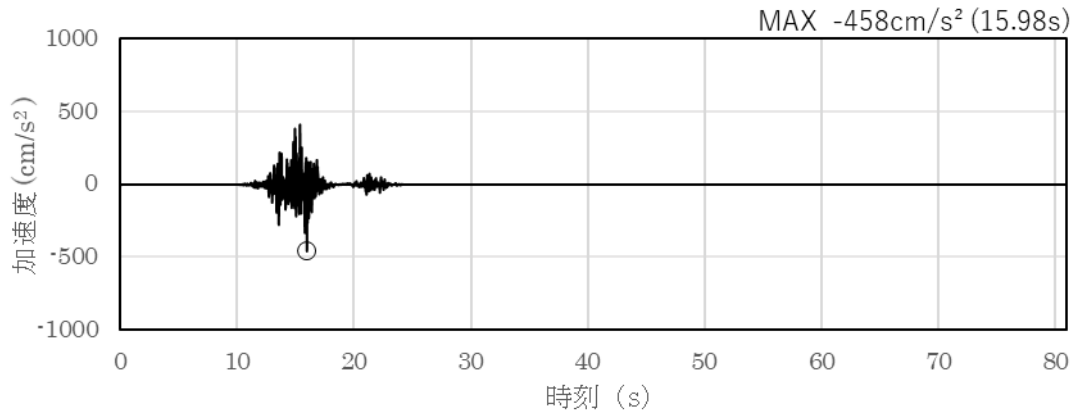


(a) 加速度時刻歴波形

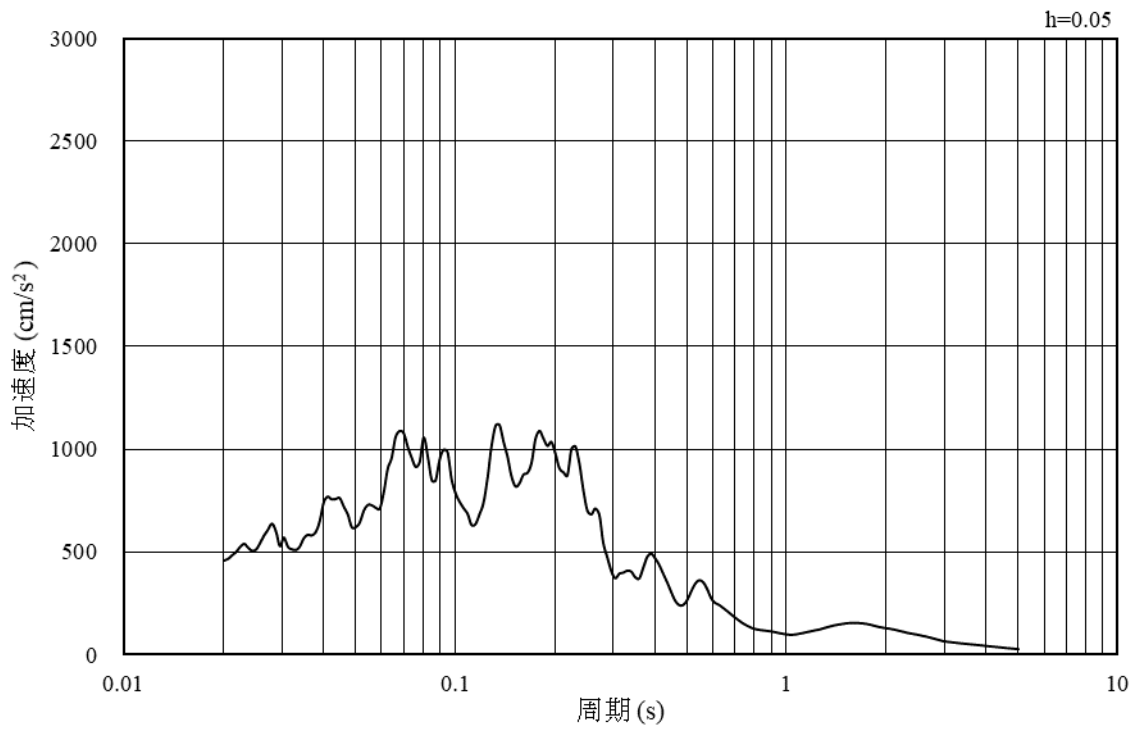


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—10 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S s - F 2 (E W))

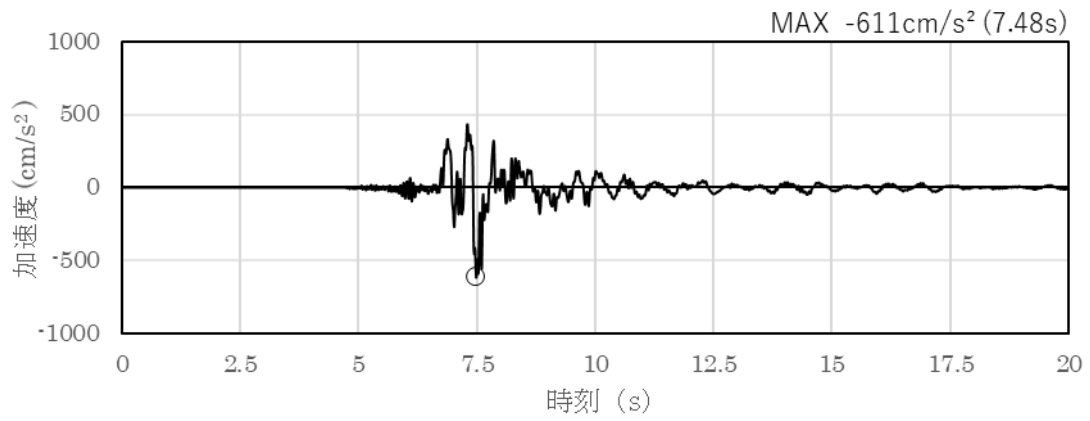


(a) 加速度時刻歴波形

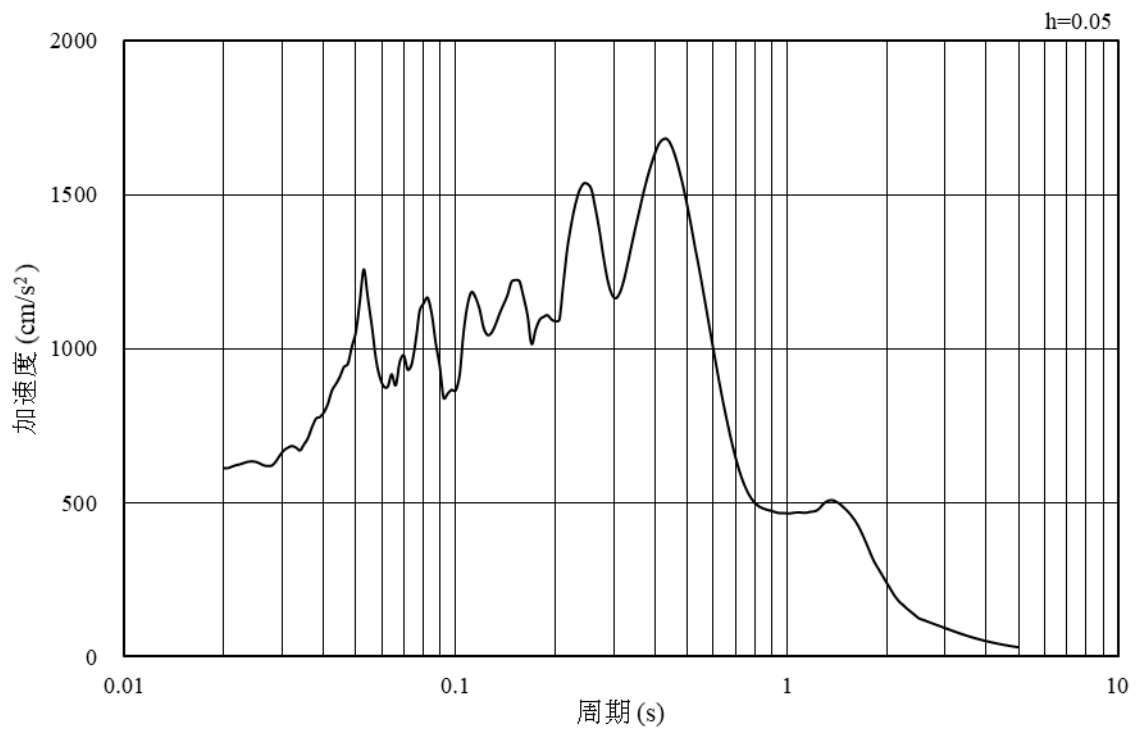


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—11 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S_s - F 2 (E W))

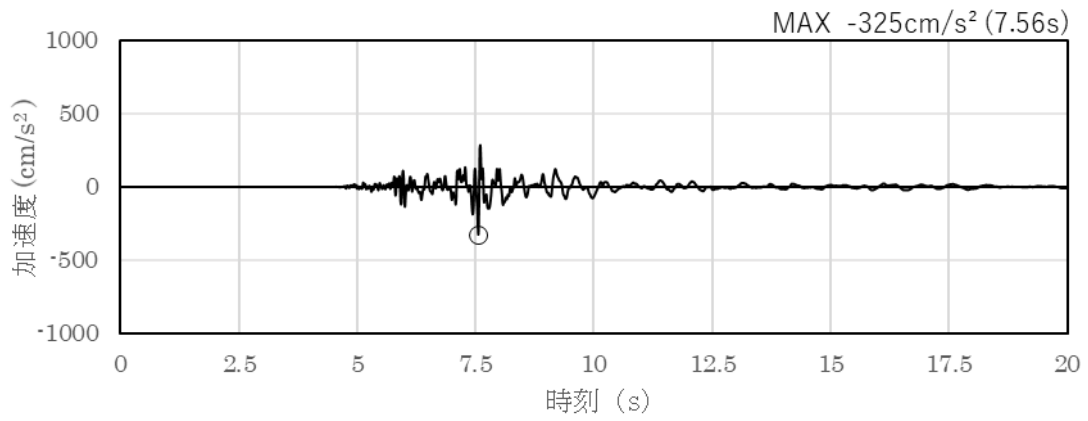


(a) 加速度時刻歴波形

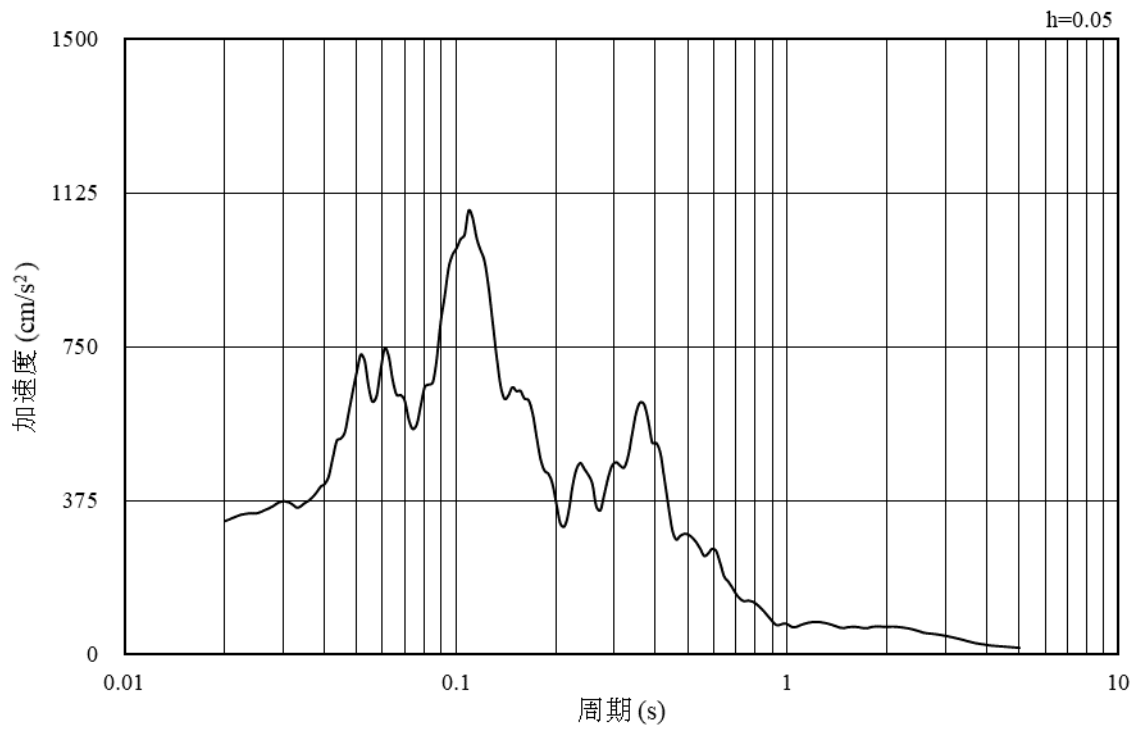


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—12 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - N 1)

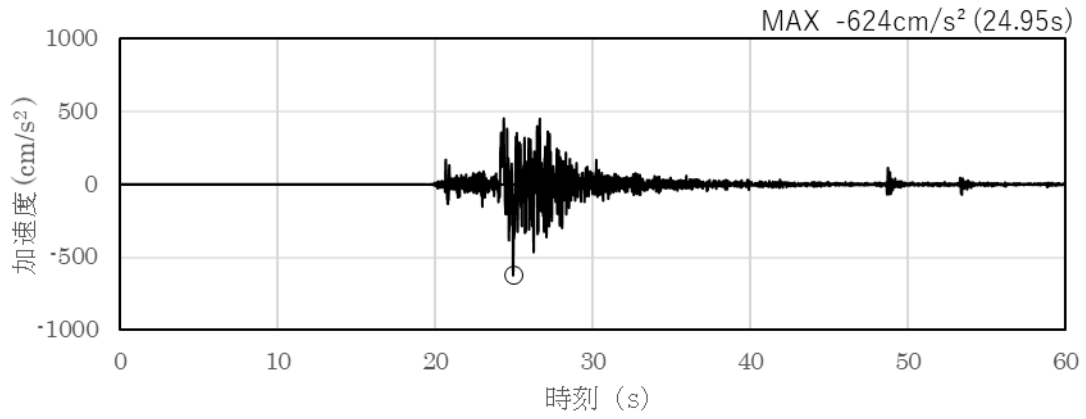


(a) 加速度時刻歴波形

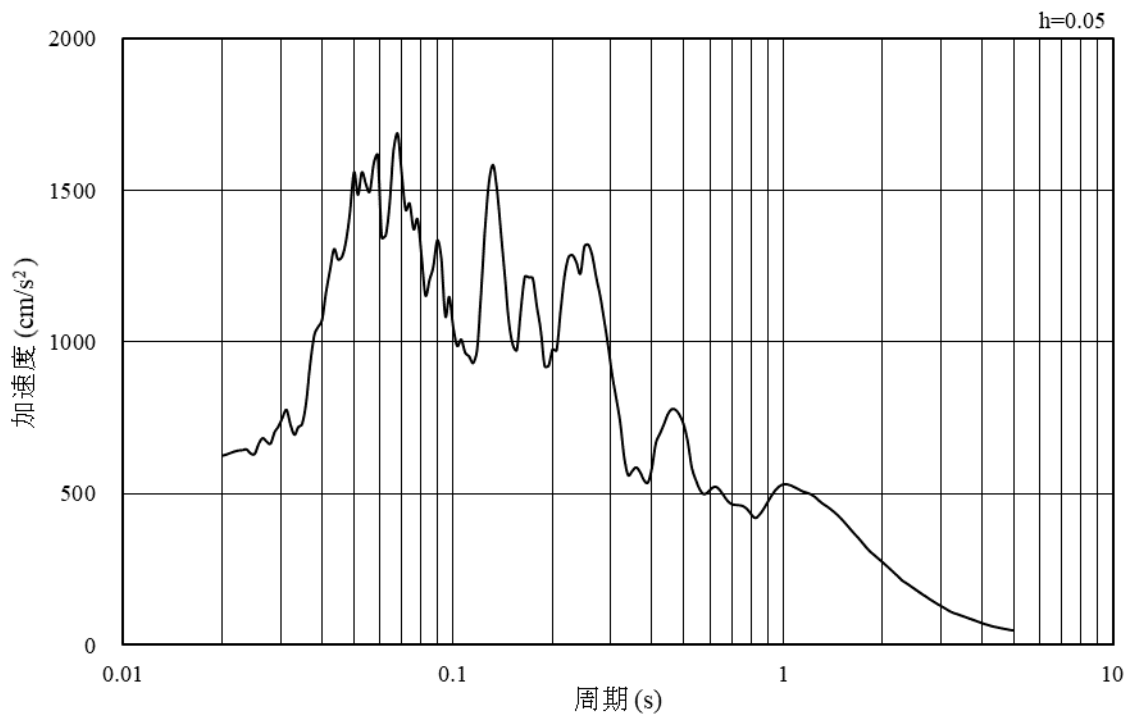


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—13 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - N 1)

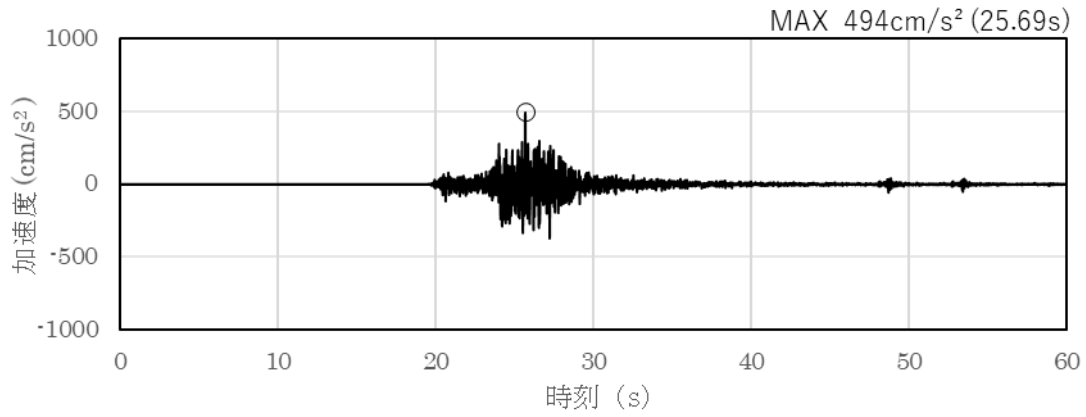


(a) 加速度時刻歴波形

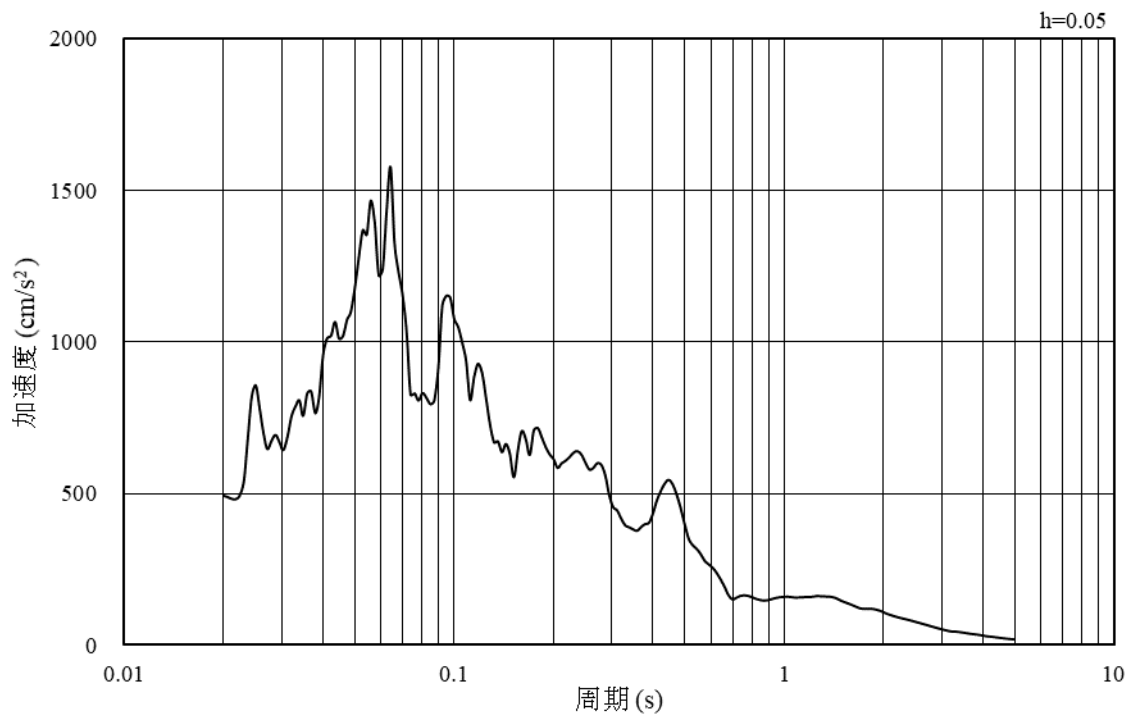


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—14 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分 : S s - N 2 (N S))

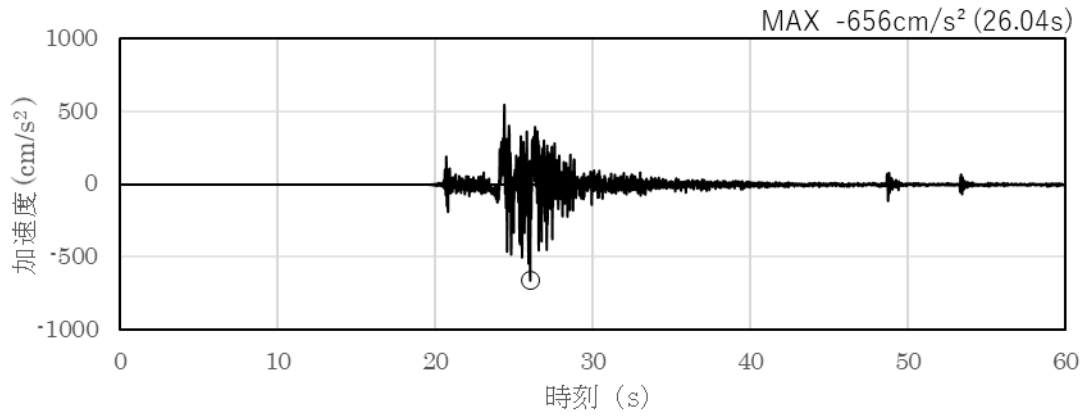


(a) 加速度時刻歴波形

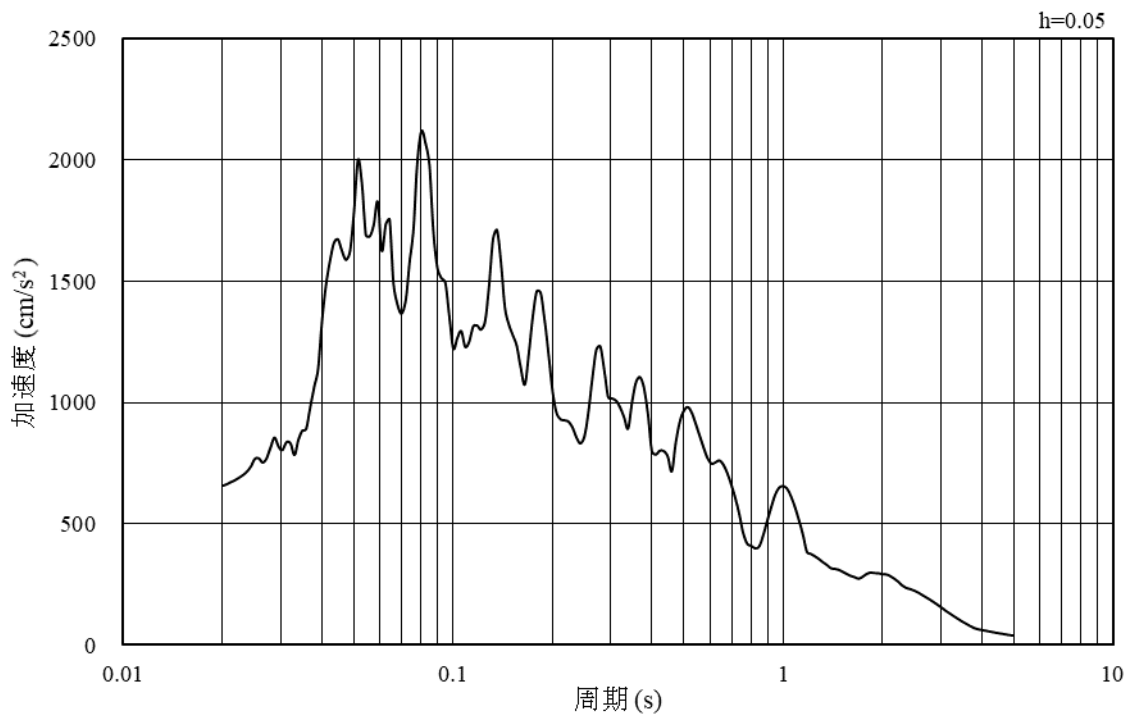


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—15 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S_s - N₂ (NS))

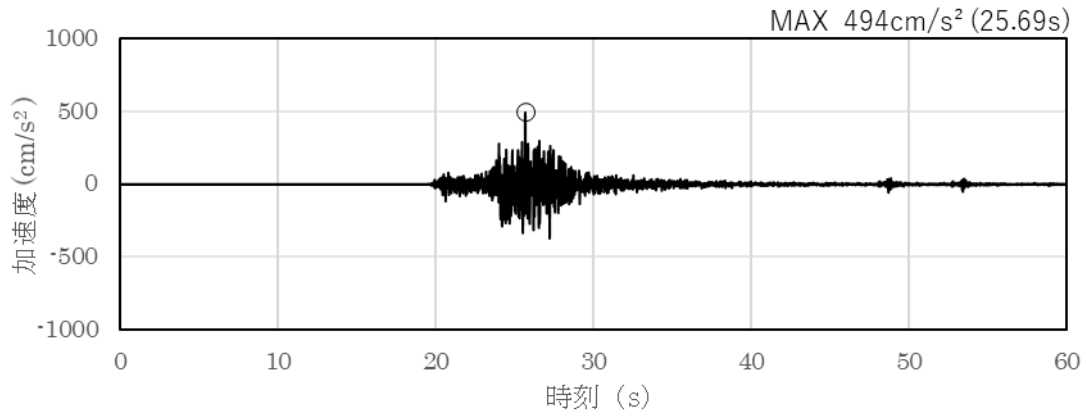


(a) 加速度時刻歴波形

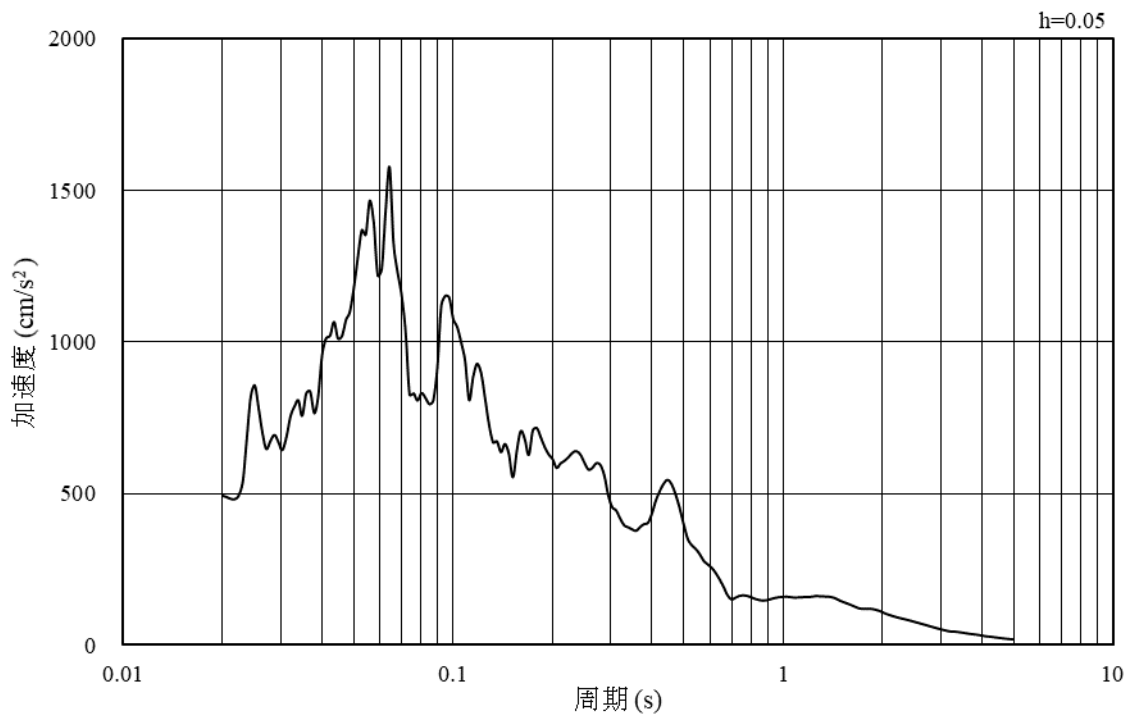


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—16 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平成分：S_s - N₂ (EW))



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 4—17 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直成分：S s - N 2 (E W))

4.2 許容限界の設定

屋外重要土木構造物の耐震安全性評価は、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の要求機能と要求機能に対する耐震評価内容」に示すとおり、各構造物の要求機能と要求機能に応じた許容限界を設定し照査を行う。

耐震安全性評価は、限界状態設計法を用いることとし、限界状態設計法については以下に詳述する。

4.2.1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

構造部材の曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界は、土木学会マニュアル 2005 に基づき、限界ひずみ（圧縮縁コンクリートひずみ 1.0%）とする。

土木学会マニュアル 2005 では、曲げ・軸力系の破壊に対する限界状態は、コンクリートの圧縮縁のかぶりが剥落しないこととされている。圧縮縁コンクリートひずみが 1.0% の状態は、かぶりコンクリートが剥落する前の状態であることが、屋外重要土木構造物を模したラーメン構造の破壊実験及び数値シミュレーション等の結果より確認されており、この状態を限界値とすることで構造全体としての安定性が確保できるとして設定されたものである。

鉄筋コンクリートの曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界を表 4-1 に示す。

表 4-1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

確認項目	許容限界	
構造強度を有すること	限界ひずみ	圧縮縁コンクリートひずみ 1.0% (10000 μ) *

注記* : $\gamma_i \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_R} < 1.0$

ここで、 γ_i : 構造物係数 ($\gamma_i = 1.0$)

ε_R : 限界ひずみ (圧縮縁コンクリートひずみ 10000 μ)

ε_d : 照査用ひずみ ($\varepsilon_d = \gamma_a \cdot \varepsilon$)

γ_a : 構造解析係数 ($\gamma_a = 1.2$)

ε : 圧縮縁の発生ひずみ

4.2.2 せん断の破壊に対する許容限界

構造部材のせん断破壊に対する許容限界は、棒部材式で求まるせん断耐力とする。

棒部材式

$$V_{y d} = V_{c d} + V_{s d}$$

ここで、 $V_{y d}$: せん断耐力

$V_{c d}$: コンクリートが分担するせん断耐力

$V_{s d}$: せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力

$$V_{c d} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{v c d} \cdot b_w \cdot d / \gamma_{b c}$$

$$f_{v c d} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{c d}} \quad \text{ただし、} f_{v c d} > 0.72 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad \text{となる場合は}$$

$$f_{v c d} = 0.72 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad (d \text{ [m]}) \quad \text{ただし、} \beta_d > 1.5 \quad \text{となる場合は} \beta_d = 1.5$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_v} \quad \text{ただし、} \beta_p > 1.5 \quad \text{となる場合は} \beta_p = 1.5$$

$$\beta_n = 1 + M_o / M_d \quad (N'_d \geq 0) \quad \text{ただし、} \beta_n > 2.0 \quad \text{となる場合は} \beta_n = 2.0$$

$$= 1 + 2M_o / M_d \quad (N'_d < 0)$$

$$\beta_a = 0.75 + \frac{1.4}{a/d} \quad \text{ただし、} \beta_a < 1.0 \quad \text{となる場合は} \beta_a = 1.0$$

ここで、

$f'_{c d}$: コンクリート圧縮強度の設計用値 (N/mm²) で設計基準強度 $f'_{c k}$ を材料係数 $\gamma_{m c}$ 除したもの

p_v : 引張鉄筋比 $p_v = A_s / (b_w \cdot d)$

A_s : 引張側鋼材の断面積

b_w : 部材の有効幅

d : 部材の有効高さ

N'_d : 設計軸圧縮力

M_d : 設計曲げモーメント

M_o : M_d に対する引張縁において、軸力方向によって発生する応力を打ち消すのに必要なモーメント (デコンプレッションモーメント) $M_o = N'_d \cdot D / 6$

$M_{u d}$: 軸方向力を考慮しない純曲げ耐力

- D : 断面高さ
 a / d : せん断スパン比
 γ_{bc} : 部材係数

$$V_{sd} = \left\{ A_w f_{wyd} (\sin \alpha + \cos \alpha) / s \right\} z / \gamma_{bs}$$

ここで、

- A_w : 区間 s におけるせん断補強鉄筋の総断面積
 f_{wyd} : せん断補強鉄筋の降伏強度を γ_{ms} で除したもので、 400N/mm^2 以下とする。ただし、コンクリート圧縮強度の特性値 f'_{ck} が 60N/mm^2 以上のときは 800N/mm^2 以下とする。
 α : せん断補強鉄筋と部材軸のなす角度
 s : せん断補強鉄筋の配置間隔
 z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で $d/1.15$ とする。
 γ_{bs} : 部材係数

また、土木学会マニュアル 2005 におけるせん断耐力式による評価においては、表 4-2 に示すとおり、複数の安全係数が見込まれていることから、せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施することが可能である。

表 4-2 せん断耐力式による評価において考慮している安全係数

安全係数			せん断照査		内容
			応答値算定	限界値算定	
材料係数	コンクリート	$\gamma_{m c}$	1.0	1.3	コンクリートの特性値を低減
	鉄筋	$\gamma_{m s}$	1.0	1.0	—
部材係数*	コンクリート	$\gamma_{b c}$	—	1.3	せん断耐力（コンクリート負担分）を低減
	鉄筋	$\gamma_{b s}$	—	1.1	せん断耐力（鉄筋負担分）を低減
構造解析係数		γ_a	1.05	—	応答値（断面力）の割り増し

注記*：土木学会マニュアル 2005 では、部材係数 $\gamma_b = \gamma_{b 1} \cdot \gamma_{b 2}$ とされている。

$$\gamma_{b 1} = \begin{cases} 1.3 & (\text{コンクリート}) \\ 1.1 & (\text{鉄筋}) \end{cases}$$

$$\gamma_{b 2} = \begin{cases} 1.0 & (R \leq 0.01) \\ \frac{100R + 2}{3} & (0.01 < R \leq 0.025) \\ 1.5 & (R > 0.025) \end{cases}$$

ここで、R：層間変形角

$\gamma_{b 2}$ は層間変形角の値によらず、部材が降伏していない状態であれば、

$\gamma_{b 2} = 1.0$ としてよいとされている。

4.2.3 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

(1) 基礎地盤

基礎地盤に発生する接地圧に対する許容限界は、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき、岩盤の極限支持力度とする。

基礎地盤の支持性能に対する許容限界を表 4-3 に示す。

表 4-3 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

評価項目	基礎地盤	許容限界 (N/mm ²)
極限支持力度	C _L 級岩盤	3.9

(2) MMR

a. 接地圧に対する許容限界

MMRに発生する接地圧に対する許容限界は、コンクリート標準示方書 2002に基づき、コンクリートの支圧強度とする。

MMRの支持性能に対する許容限界を表 4-4 に示す。

表 4-4 MMRの支持性能に対する許容限界

評価項目		MMR (N/mm ²)	許容限界 (N/mm ²)
支圧強度	A-A断面	$f'_{ck} = 18.0$	$f'_a = 18.0$

b. 健全性に対する許容限界

MMRの健全性に対する許容限界は、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」に基づき、表 4-5 に示すせん断強度及び引張強度とする。

表 4-5 MMRのせん断強度及び引張強度

	評価項目	算定式	許容限界
MMR $f'_{ck} = 18.0$ (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)	$1/5 f'_{ck}$	3.60
	引張強度 (N/mm ²)	$0.23 f'_{ck}^{2/3}$	1.57

5. 評価結果

5.1 地震応答解析結果

地震応答解析結果として「ひずみの時刻歴波形」，断面力に対し照査を行っている項目のうち最も厳しい照査値に対する「断面力分布」，曲げ・軸力系の破壊に対する照査及びせん断破壊に対する照査で最大照査値を示すケースの地盤における「最大せん断ひずみ分布」を記載する。なお，断面力分布は単位奥行きあたりの断面力を図示する。

5.1.1 解析ケース

耐震評価における解析ケースについては、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」のうち「10. 屋外重要土木構造物の耐震評価における追加解析ケースの選定」に基づき設定する。

耐震評価においては，基準地震動 S_s 全波（6波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（1波）を加えた全7波に対し，基本ケースを実施する。基本ケースにおいて，曲げ・軸力系の破壊，せん断破壊及び地盤の支持力照査の照査項目ごとに照査値が0.5を超える照査項目に対して，最も厳しい地震動を用いて，解析ケース②及び③をする。すべての照査項目の照査値がいずれも0.5以下の場合には，照査値が最も厳しくなる地震動を用いて，解析ケース②及び③を実施する。

解析ケース②及び③を実施する地震動について，表5-1に示す。

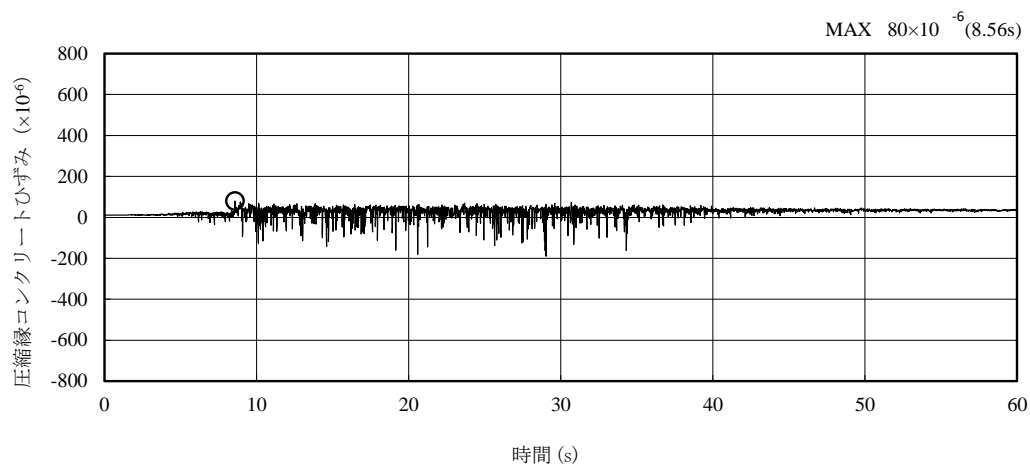
上記実施ケースの結果を踏まえ，照査値に十分な裕度を有することから，追加解析を実施しない。

表5-1 解析ケース②及び③を実施する地震動

断面	解析ケース②及び③を実施する地震動	備考
A-A断面	$S_s - D (+)$	せん断破壊から選定

5.1.2 ひずみの時刻歴波形

曲げ・軸力系の破壊に対する照査において、最も厳しい照査値となる解析ケースの照査時刻における時刻歴波形を図 5-1 に示す。



注：圧縮を正で示す。

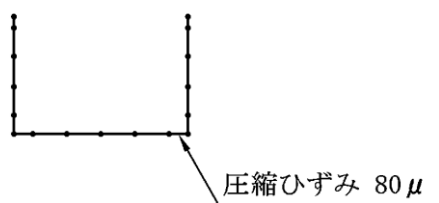
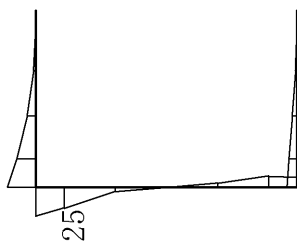


図 5-1 曲げ・軸力系の破壊に対する照査が最も厳しくなるケースの圧縮縁コンクリートひずみの時刻歴波形（解析ケース③，S s - D (+ -))

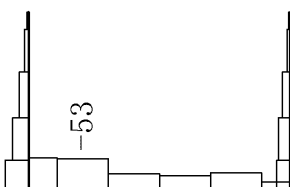
5.1.3 断面力分布（せん断破壊に対する照査）

せん断破壊に対する照査において、最も厳しい照査値となる解析ケースの照査時刻における断面力図（曲げモーメント，軸力，せん断力）を図5-2に示す。



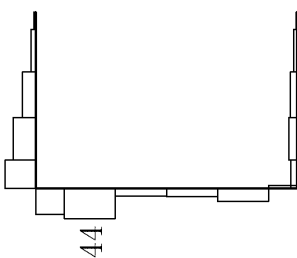
数値：評価位置における断面力

(a) 曲げモーメント (kN・m)



数値：評価位置における断面力

(b) 軸力 (kN) (+：引張，-：圧縮)



数値：評価位置における断面力

(c) せん断力 (kN)

図5-2 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力図
(解析ケース③，S_s-D (+-)，t=21.23s)

5.1.4 最大せん断ひずみ分布

曲げ・軸力系の破壊に対する照査及びせん断破壊に対する照査で最大照査値を示すケースについて、地盤に発生した最大せん断ひずみを確認する。

最大照査値を示す解析ケースの一覧を表 5-2 に、最大せん断ひずみ分布図を図 5-3 に示す。

埋戻土に発生するせん断ひずみは最大でも 1 % 以下であり、試験において確認しているひずみの範囲内であることを確認した。

表 5-2 最大照査値を示すケースの一覧

対象断面	対象ケース	照査項目
A-A断面	ケース③ S s - D (+)	せん断破壊に対する照査

最大せん断ひずみ ($\times 10^{-4} \gamma_{max}$)

: 埋戻土の範囲

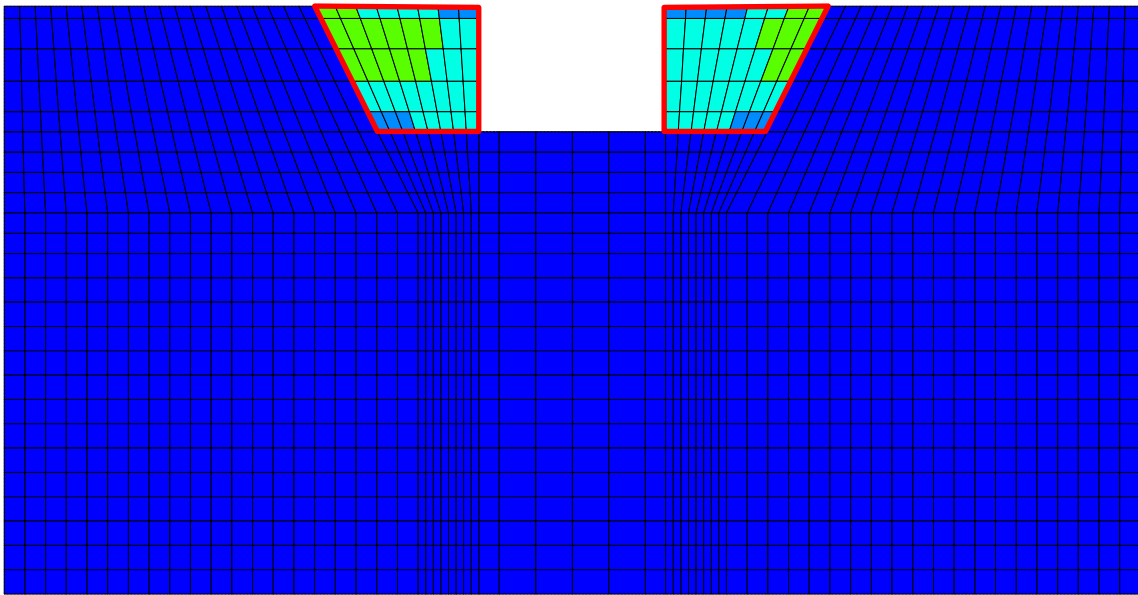
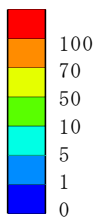


図 5-3 最大せん断ひずみ分布図 (A-A断面, 解析ケース③, $S_s - D (+)$)
曲げ・軸力系の破壊に対する照査で照査値が最も厳しい解析ケース

5.2 構造部材の健全性に対する評価結果

5.2.1 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果

構造強度を有することの確認における曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果を表5-3に示す。照査値は、応力度を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。同表のとおり、全地震動において照査用ひずみは限界ひずみを下回ることを確認した。

表5-3 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果
(構造強度を有することの確認)

解析 ケース	地震動		照査用ひずみ*	限界ひずみ	照査値
			ε_d	ε_R	$\varepsilon_d / \varepsilon_R$
①	S s - D	++	93 μ	10000 μ	0.01
		+ -	94 μ	10000 μ	0.01
	S s - F 1	++	68 μ	10000 μ	0.01
	S s - F 2	++	78 μ	10000 μ	0.01
	S s - N 1	++	60 μ	10000 μ	0.01
	S s - N 2 (E W)	++	71 μ	10000 μ	0.01
	S s - N 2 (N S)	++	56 μ	10000 μ	0.01
②	S s - D	+ -	91 μ	10000 μ	0.01
③	S s - D	+ -	96 μ	10000 μ	0.01

注記* : 照査用ひずみ $\varepsilon_d =$ 発生ひずみ $\varepsilon \times$ 構造解析係数 $\gamma_a (=1.2)$

5.2.2 せん断破壊に対する評価結果

構造強度を有することの確認におけるせん断破壊に対する評価結果を表 5-4 に示す。照査値は、応力度を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。

同表より、全部材で照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認した。

表 5-4 せん断破壊に対する評価結果

解析 ケース	地震動		評価位置*1	照査用	せん断	照査値
				せん断力	耐力	
				V_d^{*2} (kN)	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
①	S s - D	++	側壁	34	1064	0.04
			底版	43	1081	0.05
		+-	側壁	35	1065	0.04
			底版	45	1078	0.05
	S s - F 1	++	側壁	27	1070	0.03
			底版	34	1082	0.04
	S s - F 2	++	側壁	29	1066	0.03
			底版	40	1080	0.04
	S s - N 1	++	側壁	23	1073	0.03
			底版	29	1083	0.03
	S s - N 2 (E W)	++	側壁	27	1067	0.03
			底版	35	1080	0.04
S s - N 2 (N S)	++	側壁	22	1070	0.03	
		底版	28	1083	0.03	
②	S s - D	+-	側壁	35	1066	0.04
			底版	44	1082	0.05
③	S s - D	+-	側壁	36	1065	0.04
			底版	46	1078	0.05

注記*1：評価位置は図 5-4 に示す。

*2：照査用せん断力 V_d = 発生せん断力 V × 構造解析係数 γ_a (=1.05)

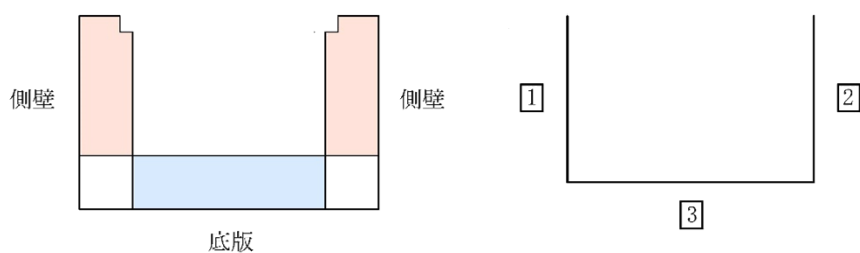


図 5-4 評価位置図 (A-A断面)

5.3 基礎地盤の支持性能に対する評価結果

5.3.1 基礎地盤

基礎地盤の支持性能に対する評価結果を表 5-5 に示す。また、最大接地圧分布図を図 5-5 に示す。同表より、基礎地盤に発生する接地圧が極限支持力度を下回ることを確認した。

表 5-5 基礎地盤の支持性能に対する評価結果

解析 ケース	地震動		最大接地圧 R_d (N/mm ²)	極限支持力度 R_u (N/mm ²)	照査値 R_d / R_u
①	S _s -D	++	0.10	3.9	0.03
		+ -	0.09	3.9	0.03
	S _s -F 1	++	0.08	3.9	0.03
	S _s -F 2	++	0.09	3.9	0.03
	S _s -N 1	++	0.08	3.9	0.02
	S _s -N 2 (E W)	++	0.09	3.9	0.03
	S _s -N 2 (N S)	++	0.09	3.9	0.03
②	S _s -D	+ -	0.09	3.9	0.03
③	S _s -D	+ -	0.09	3.9	0.03

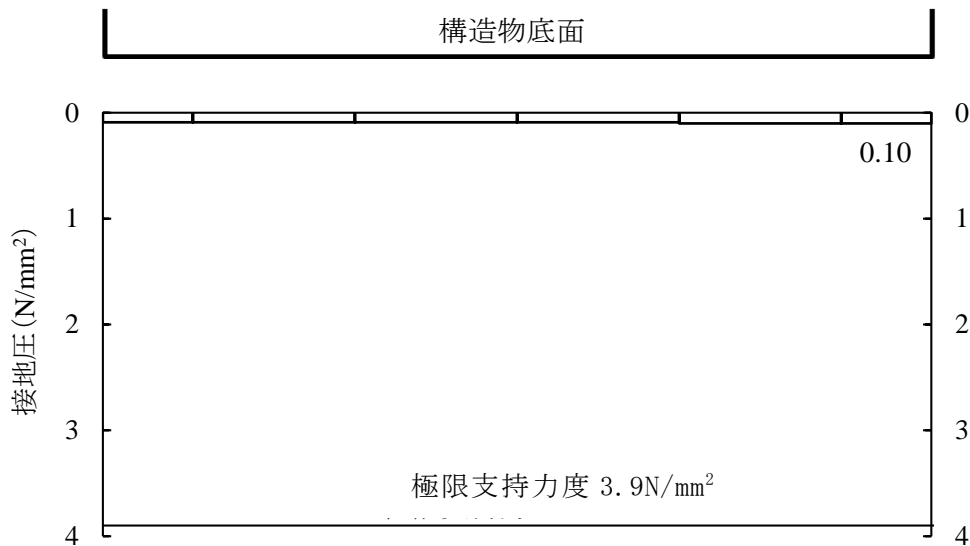


図 5-5 基礎地盤の最大接地圧分布図 (A-A 断面)
(解析ケース①, S_s-D (++))

5.3.2 MMR

(1) 支持性能評価

MMRの支持性能に対する評価結果を表5-6に示す。また、最大接地圧分布図を図5-6に示す。

同表より、MMRに発生する接地圧が支圧強度を下回ることを確認した。

表5-6 MMRの支持性能に対する評価結果

解析 ケース	地震動		最大接地圧 R_d (N/mm ²)	支圧強度 f'_a (N/mm ²)	照査値 R_d / f'_a
①	$S_s - D$	++	0.10	18.0	0.01
		+ -	0.12	18.0	0.01
	$S_s - F 1$	++	0.09	18.0	0.01
	$S_s - F 2$	++	0.09	18.0	0.01
	$S_s - N 1$	++	0.09	18.0	0.01
	$S_s - N 2$ (EW)	++	0.08	18.0	0.01
	$S_s - N 2$ (NS)	++	0.08	18.0	0.01
②	$S_s - D$	+ -	0.11	18.0	0.01
③	$S_s - D$	+ -	0.12	18.0	0.01

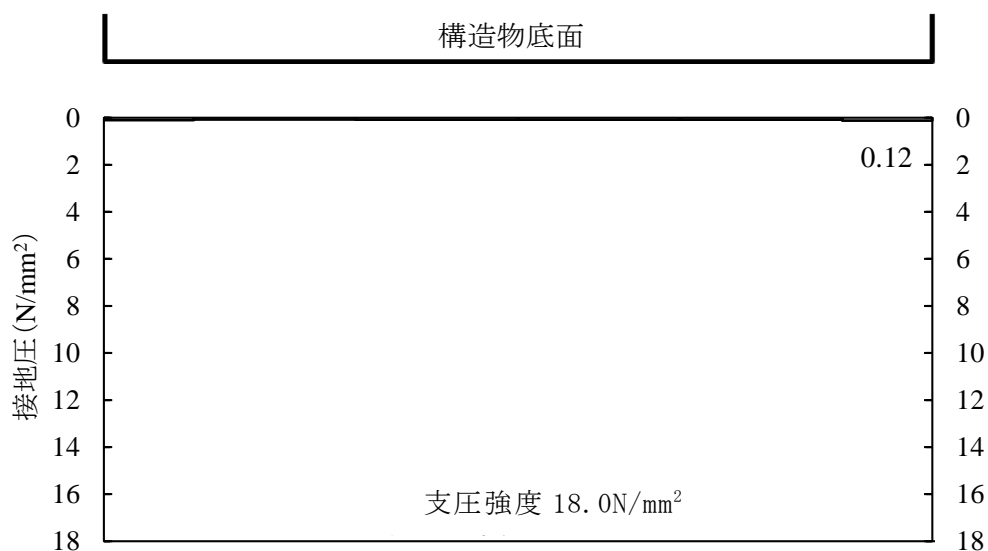


図5-6 MMRの最大接地圧分布図 (A-A断面)
(解析ケース③, $S_s - D$ (+ -))

(2) 健全性評価

MMRのせん断破壊に対する局所安全係数を表5-7に、引張破壊に対する局所安全係数を表5-8に示す。

局所安全係数は全時刻において最小となる値を記載する。

$$f_s = R / S$$

ここに、 f_s : 局所安全係数

R : せん断強度又は引張強度

S : 発生せん断応力又は発生引張応力

表5-7及び表5-8より、すべての局所安全係数が1.0を上回ることから、MMRが健全であることを確認した。

表 5-7 MMR のせん断破壊に対する局所安全係数

解析 ケース	地震動		せん断応力 S (N/mm ²)	せん断強度 R (N/mm ²)	局所安全係数 f _s
	①	S _s -D	++	0.10	3.60
+ -			0.09	3.60	38.36
S _s -F 1		++	0.07	3.60	52.08
S _s -F 2		++	0.08	3.60	45.01
S _s -N 1		++	0.06	3.60	56.79
S _s -N 2 (EW)		++	0.07	3.60	55.01
S _s -N 2 (NS)		++	0.06	3.60	59.44
②	S _s -D	+ -	0.09	3.60	38.53
③	S _s -D	+ -	0.09	3.60	38.21

表 5-8 MMR の引張破壊に対する局所安全係数

解析 ケース	地震動		引張応力 S (N/mm ²)	引張強度 R (N/mm ²)	局所安全係数 f _s
	①	S _s -D	++	0.09	1.57
+ -			0.09	1.57	18.26
S _s -F 1		++	0.05	1.57	29.26
S _s -F 2		++	0.07	1.57	21.35
S _s -N 1		++	0.05	1.57	34.57
S _s -N 2 (EW)		++	0.05	1.57	31.50
	S _s -N 2 (NS)	++	0.05	1.57	32.21
②	S _s -D	+ -	0.09	1.57	18.03
③	S _s -D	+ -	0.09	1.57	18.37

6. まとめ

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）については、基準地震動 S_s による耐震評価として、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び基礎地盤の支持性能に対する評価を実施した。

構造部材の健全性評価については、曲げモーメント及びせん断力が要求性能に応じた許容限界を下回ることを確認した。

基礎地盤の支持性能評価については、基礎地盤に発生する応力（接地圧）が極限支持力度に基づく許容限界を下回ることを確認した。

以上から、屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）、基準地震動 S_s による地震力に対して、構造強度を有すること、支持機能を損なわないことを確認した。

参考資料1 機器・配管系の耐震評価に適用する影響検討ケース

1. 材料物性のばらつきを反映した解析ケース

1.1 はじめに

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）について、構造物の機器・配管系の耐震評価に適用する床応答への保守的な配慮として、コンクリートの物性値を実強度に変更し、ケース①の解析を実施している。

コンクリートの実強度の設定方法は、本文「3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース」に示す。

1.2 解析方針

耐震評価は、本文「2. 評価条件」における評価条件に基づき実施する。変更した材料の物性値を表1-1に示す。影響検討ケースは位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動 $S_s - D$ に対して実施することとする。

影響検討に用いる地震動は、本文で使用した基準地震動 $S_s - D$ （++）を使用する。

表1-1 材料の物性値

材料		仕様	ヤング係数 (kN/mm^2)
構造物	鉄筋コンクリート	実強度 $36.1N/mm^2$	29.8

1.3 解析結果

ケース④に係る地震応答解析結果として、基準地震動 S_s に対する最大応答加速度分布図を図 1-1 に示す。

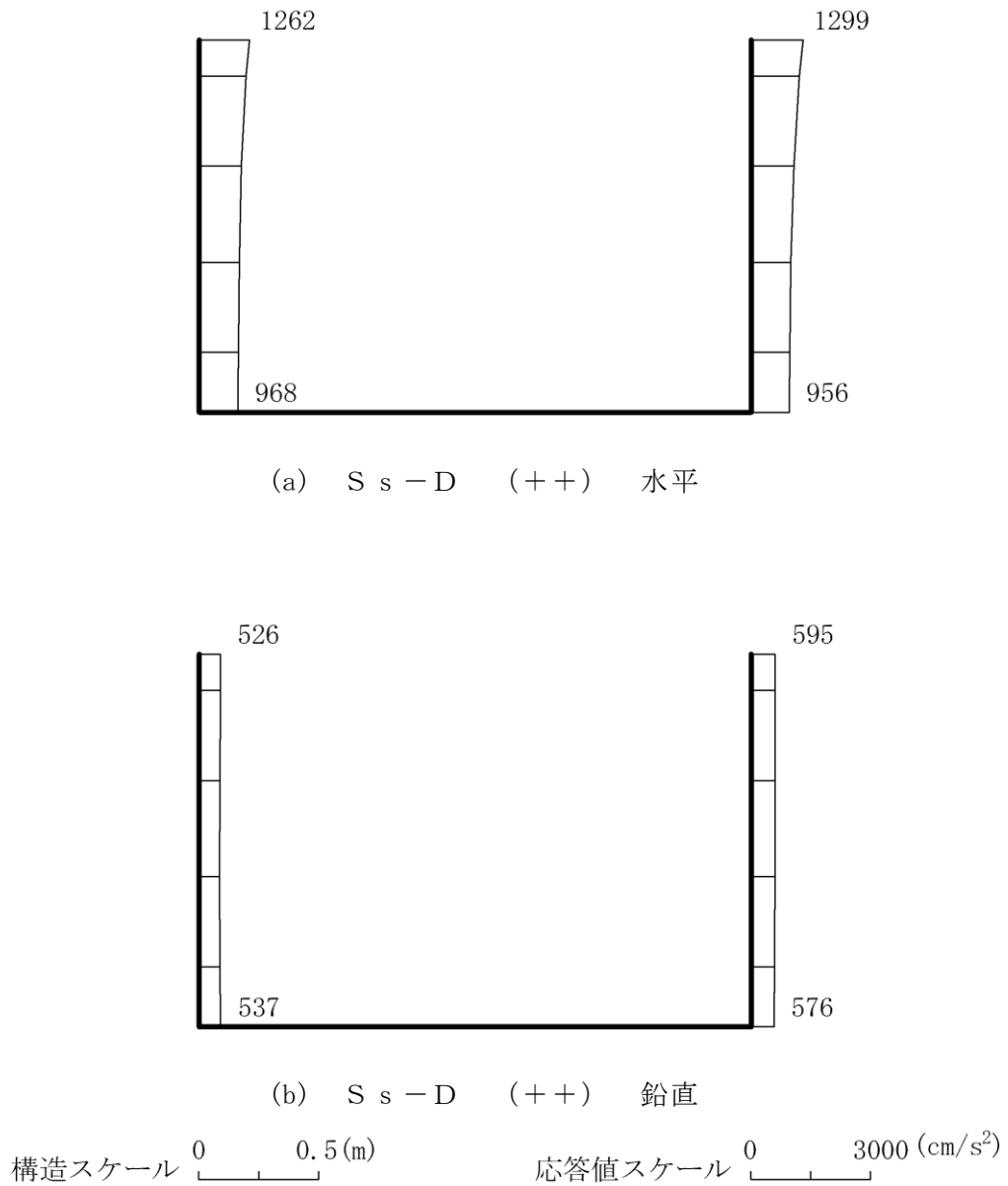


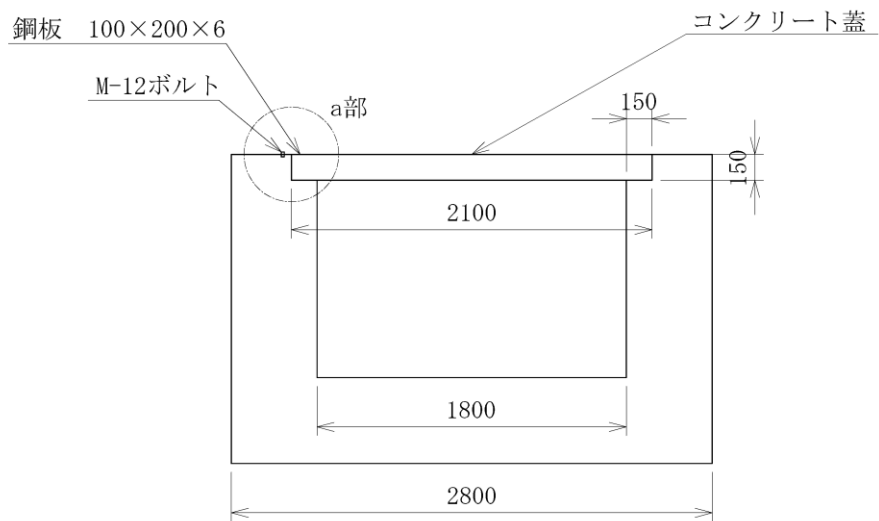
図 1-1 最大応答加速度分布図 (解析ケース④)

参考資料2 コンクリート蓋に関する照査

1. はじめに

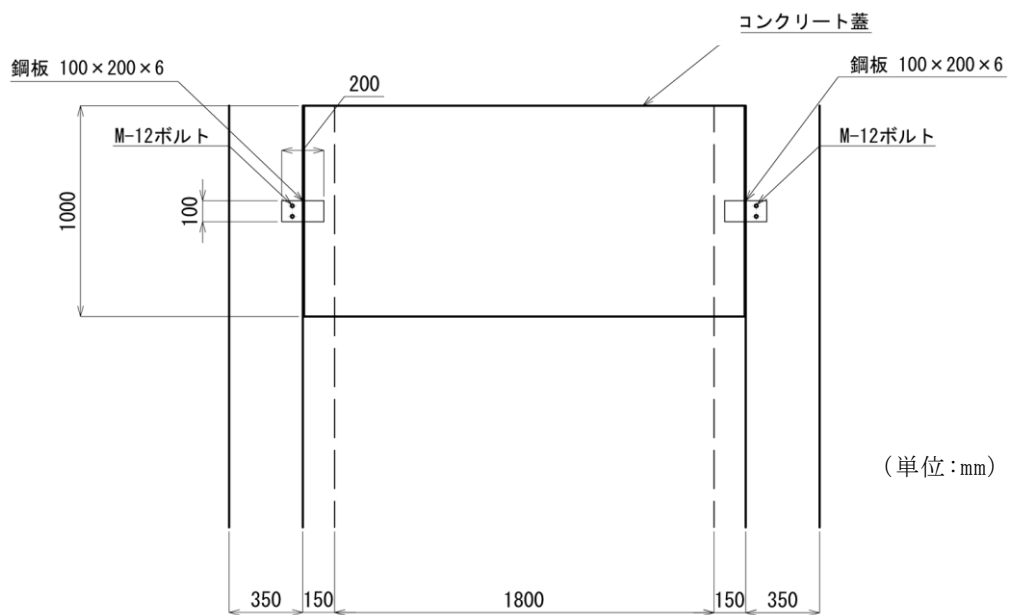
屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）について、地震時にコンクリート蓋の落下により、ダクト内の機器・配管系に影響を及ぼす可能性がある。そのため、構造物の機器・配管系の影響検討として、地震時におけるコンクリート蓋の落下についての評価を行う。コンクリート蓋は1000mm×2090mmのプレキャスト材であり、蓋止めのためのボルト及び鋼板が設置されている。

コンクリート蓋の断面図を図1-1に、平面図を図1-2に、蓋止め詳細図を図1-3に、配筋図を図1-4に示す。



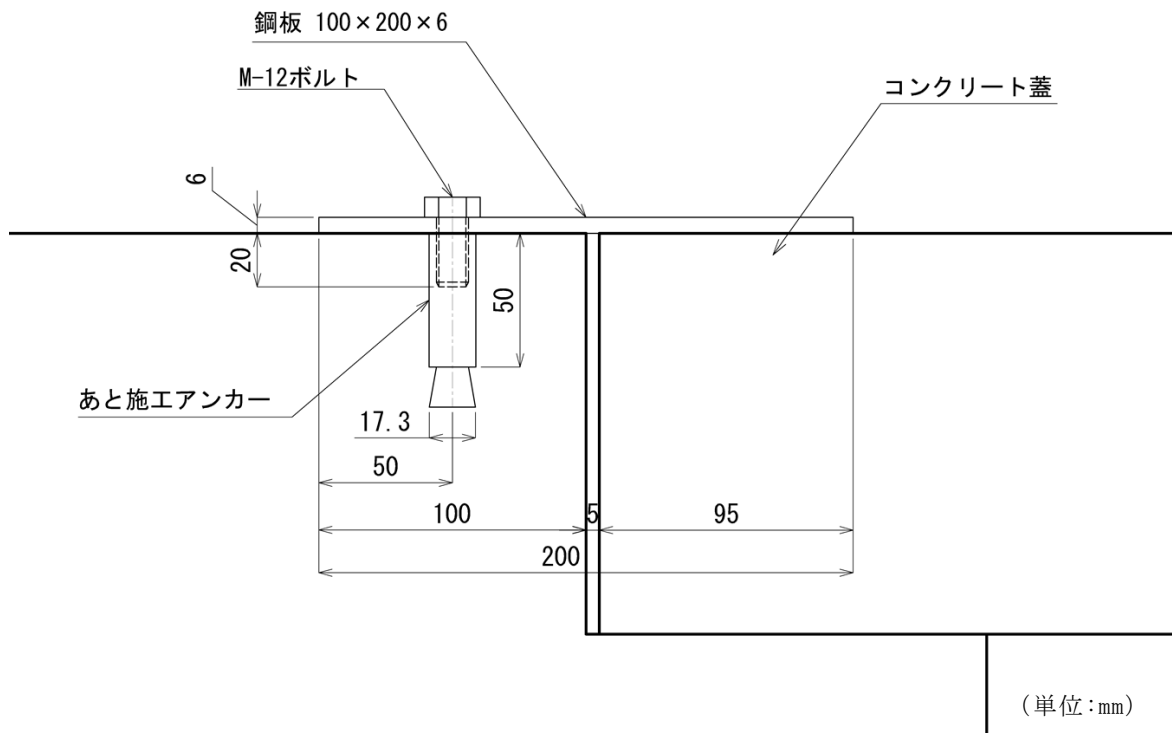
(単位: mm)

図 1-1 コンクリート蓋断面図

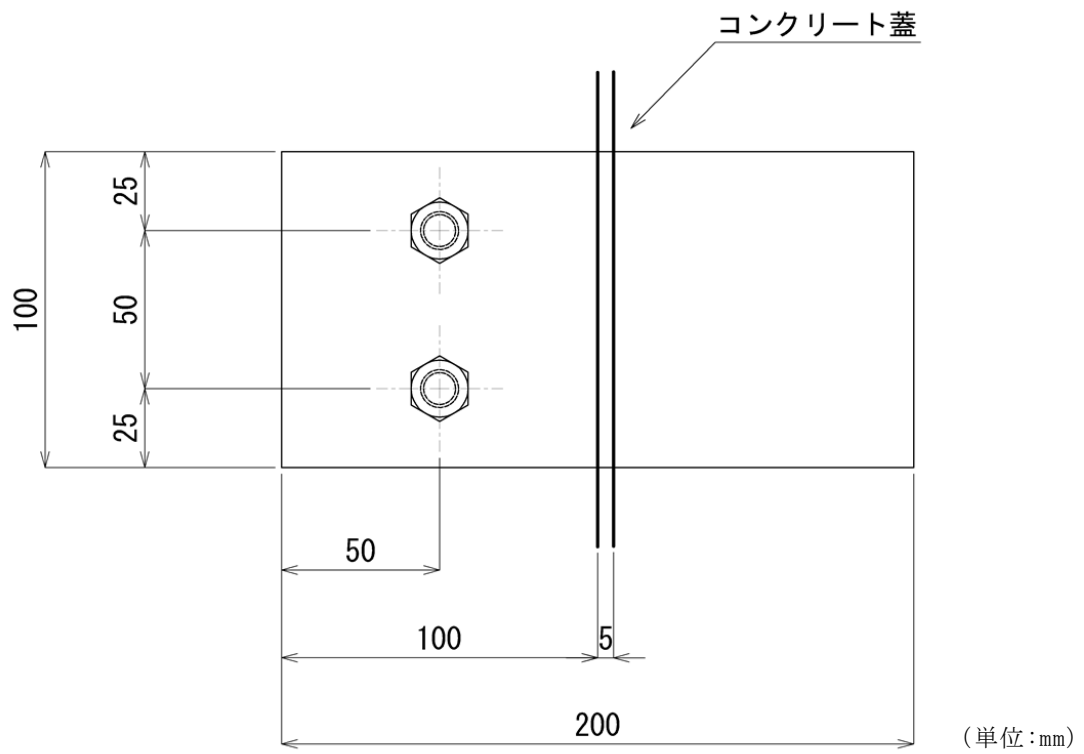


(単位: mm)

図 1-2 コンクリート蓋平面図

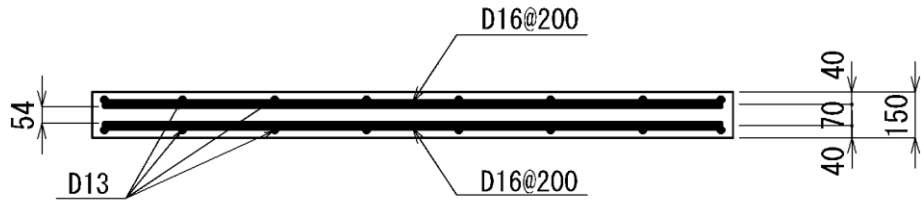


(a 部断面詳細図)

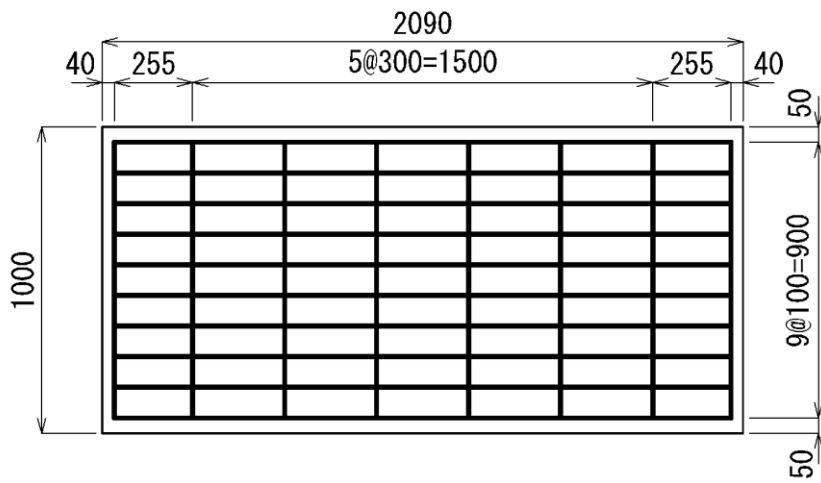


(b 部平面詳細図)

図 1-3 蓋止め詳細図



下面



上面

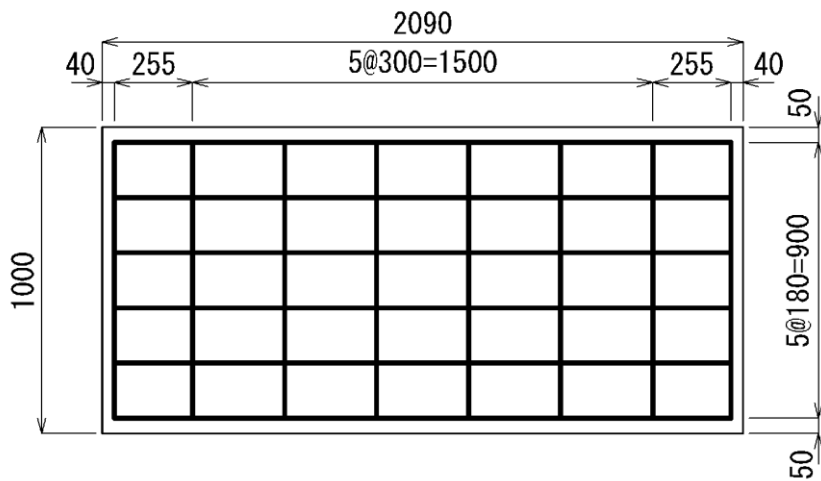


图 1-4 配筋图

(单位: mm)

2. 解析方針

コンクリート蓋が地震時の鉛直加速度により浮き上がり、落下しないことの評価として、基準地震動 S_s 全波（6波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（1波）を加えた全7波に対し、構造物上端に作用する鉛直加速度が重力加速度より小さいことを確認する。

地震時にダクト側壁が開くことにより、コンクリート蓋が落下しないことの評価として、地震時において基準地震動 S_s 全波（6波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（1波）を加えた全7波に対し、構造物上端2点の相対変位が蓋がかりの幅（150mm）より小さいことを確認する。

3. 解析結果

3.1 浮き上がりに対する評価結果

浮き上がりに対する評価結果を表 3-1 に鉛直加速度の評価位置図を図 3-1 示す。

照査値は、鉛直加速度を重力加速度で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。同表のとおり、全地震動において鉛直加速度は重力加速度を下回り、コンクリート蓋の浮き上がりが発生しないことを確認した。

表 3-1 鉛直方向に対する評価結果

解析 ケース	地震動		鉛直加速度 (gal)	重力加速度 (gal)	照査値
①	S _s -D	++	595	980	0.61
		+ -	600	980	0.62
	S _s -F 1	++	343	980	0.35
	S _s -F 2	++	437	980	0.45
	S _s -N 1	++	315	980	0.33
	S _s -N 2 (E W)	++	491	980	0.51
	S _s -N 2 (N S)	++	488	980	0.50

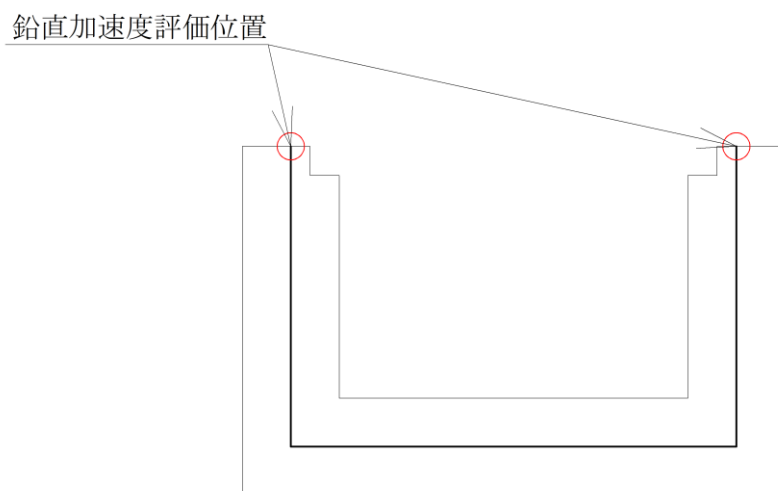


図 3-1 鉛直加速度評価位置図

3.2 側壁の開きに対する評価結果

側壁の開きに対する評価結果を表 3-2 に、相対変位の概念図を図 3-2 に示す。照査値は、構造物上端 2 点の相対変位を蓋がかり幅で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。同表のとおり、全地震動において構造物上端 2 点の相対変位は蓋がかり幅を下回り、コンクリート蓋の落下が発生しないことを確認した。

表 3-2 水平方向に対する評価結果

解析 ケース	地震動		相対変位 (mm)	蓋がかり幅 (mm)	照査値
①	S s - D	++	0.000	150	0.01
		+ -	0.061	150	0.01
	S s - F 1	++	0.000	150	0.01
	S s - F 2	++	0.000	150	0.01
	S s - N 1	++	0.000	150	0.01
	S s - N 2 (E W)	++	0.023	150	0.01
	S s - N 2 (N S)	++	0.000	150	0.01

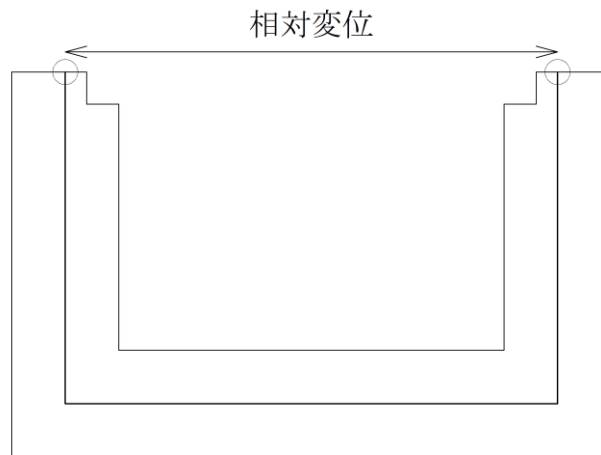


図 3-2 相対変位概念図

4. まとめ

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）のコンクリート蓋の落下についての評価を実施した。

落下について、基準地震動 S_s による地震力において、水平方向及び鉛直方向にコンクリート蓋が落下しないことを確認した。

以上から、屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）のコンクリート蓋が地震時に、構造物の機器・配管系の波及的影響を与えないことを確認した。