

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-026-03
提出年月日	2022年10月4日

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の耐震安全性評価

2022年10月

中国電力株式会社

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	9
2.4 評価対象断面の選定	10
2.5 使用材料及び材料の物性値	12
2.6 地盤物性値	13
2.7 評価構造物諸元	15
2.8 地下水位	16
2.9 耐震評価フロー	17
3. 地震応答解析	19
3.1 地震応答解析手法	19
3.2 地震応答解析モデルの設定	22
3.2.1 解析モデル領域	22
3.2.2 境界条件	24
3.2.3 構造物のモデル化	28
3.2.4 隣接構造物のモデル化	28
3.2.5 地盤及びMMRのモデル化	29
3.2.5 ジョイント要素の設定	29
3.2.6 材料特性の設定	33
3.3 減衰定数	35
3.4 荷重及び荷重の組合せ	41
3.4.1 機器・配管荷重	42
3.4.2 外水圧	43
3.4.3 積雪荷重	43
3.5 地震応答解析の解析ケース	44
3.5.1 耐震評価における解析ケース	44
3.5.2 機器・配管系の耐震評価に適用する解析ケース	47
4. 評価内容	54
4.1 入力地震動の設定	54
4.2 許容限界の設定	89
4.2.1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	89
4.2.2 せん断破壊に対する許容限界	90

4.2.3	せん断破壊に対する許容限界（材料非線形解析によるせん断耐力）	95
4.2.4	基礎地盤の支持性能に対する許容限界	109
5.	評価結果	
5.1	地震応答解析結果	
5.1.1	解析ケースと照査値	
5.1.2	ひずみ時刻歴波形（曲げ・軸力系の破壊に対する照査）	
5.1.3	断面力分布（せん断破壊に対する照査）	
5.1.4	最大せん断ひずみ	
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	
5.2.2	せん断破壊に対する評価結果	
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	
5.3.2	MMR（既設）	
6.	まとめ	

参考資料 1 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）一体化部の耐震安全性評価
について

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 静的地震力に対する耐震評価

1. 評価方法

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は非常用ガス処理系配管・弁等を間接支持する支持機能が要求される。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は、基準地震動 S_s による耐震評価として、構造部材が曲げ・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する。

構造部材の健全性評価については、鉄筋コンクリート部材の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する。

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）が極限支持力に基づく許容限界を下回ることを、マンメイドロック（以下「MMR」という。）に発生する応力（接地圧）が支圧強度を下回ることを、及びMMRの健全性を確認する。

2. 評価条件

2.1 適用規格

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の耐震評価に当たっては、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（土木学会 2002年制定）（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 J E A G 4 6 0 1 -1987（社団法人 日本電気協会 電気技術基準調査委員会）（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（2005年6月 土木学会 原子力土木委員会）（以下「土木学会マニュアル」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・同解説（I 共通編・IV 下部構造編）（（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。）及びコンクリート標準示方書2002を適用する。

また、材料非線形解析によりせん断力耐力を求める場合の材料定数についてはコンクリート標準示方書〔設計編〕（土木学会 2017年制定）（以下「コンクリート標準示方書2017」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	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（土木学会，2002年制定） 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋コンクリートの材料諸元（γ，E，ν） 	—
	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート標準示方書〔設計編〕（土木学会，2017年制定） 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの材料定数（材料非線形解析によるせん断耐力の算定） 	—
荷重及び荷重の組合せ	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（土木学会 2002年制定） 	<ul style="list-style-type: none"> ・永久荷重，偶発荷重等の適切な組合せを検討 	—
許容限界	<ul style="list-style-type: none"> ・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，原子力土木委員会，2005年6月） 	<ul style="list-style-type: none"> ・曲げ・軸力系の破壊に対する照査において，圧縮縁コンクリートひずみが1.0%を下回ることを確認* ・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* 	<ul style="list-style-type: none"> ・構造強度を有すること ・構造強度を有すること
	<ul style="list-style-type: none"> ・道路橋示方書・同解説（I共通編・IV下部構造編）（日本道路協会 平成14年3月） 	<ul style="list-style-type: none"> ・基礎地盤の支持性能に対する照査は，基礎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	<ul style="list-style-type: none"> ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1987 	<ul style="list-style-type: none"> ・有限要素法による2次元モデルを用いた時刻歴非線形解析 	—
	<ul style="list-style-type: none"> ・道路橋示方書・同解説（I共通編・IV下部構造編）（日本道路協会 平成14年3月） 		—

注記*： 妥当な安全余裕を考慮する。

2.2 構造概要

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）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 2-5 に，概略配筋図を図 2-6 に示す。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は，非常用ガス処理系配管・弁等を間接支持する鉄筋コンクリート造の地中構造物であり，延長約 20m，幅 6.7m，高さ 3.1m～3.6m の 2 連のボックスカルバート構造から構成された延長方向におおむね一様な線状構造物である。

また，屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は，屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の一部と一体構造（以下「一体化部」という。）となっており，タービン建物及び排気筒の接合部には構造目地が設置されている。一体化部の耐震評価については，3次元構造解析モデルにて耐震評価を別途実施しており，参考資料に記載する。

一体化部のイメージ図を図 2-7 に示す。

なお，各断面の奥行き方向において，部材厚や内空断面及び配筋はおおむね同一であり，MMR を介して十分な支持機能を有する C_M 級及び C_L 級岩盤に支持される。

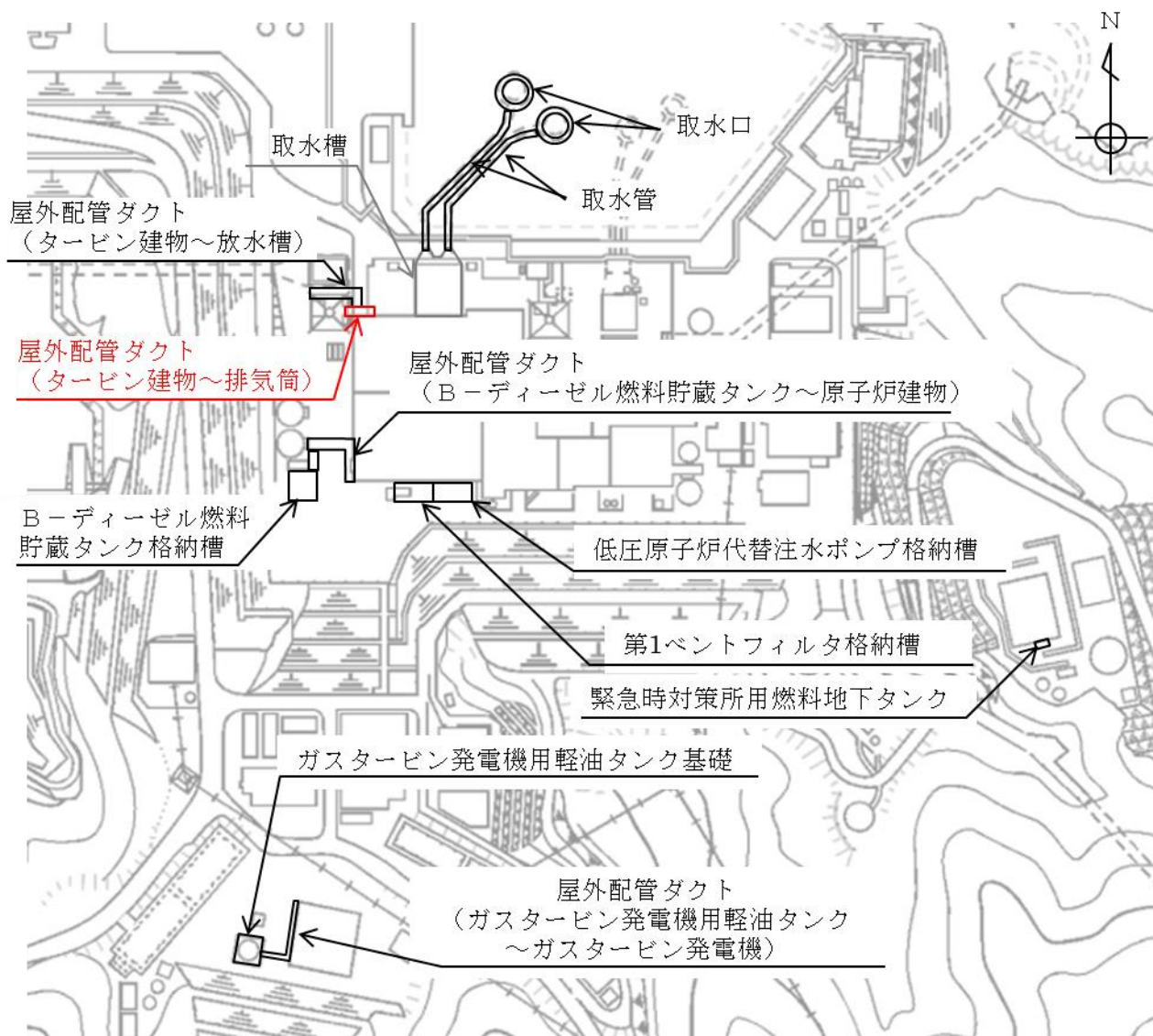


図 2-1 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 位置図

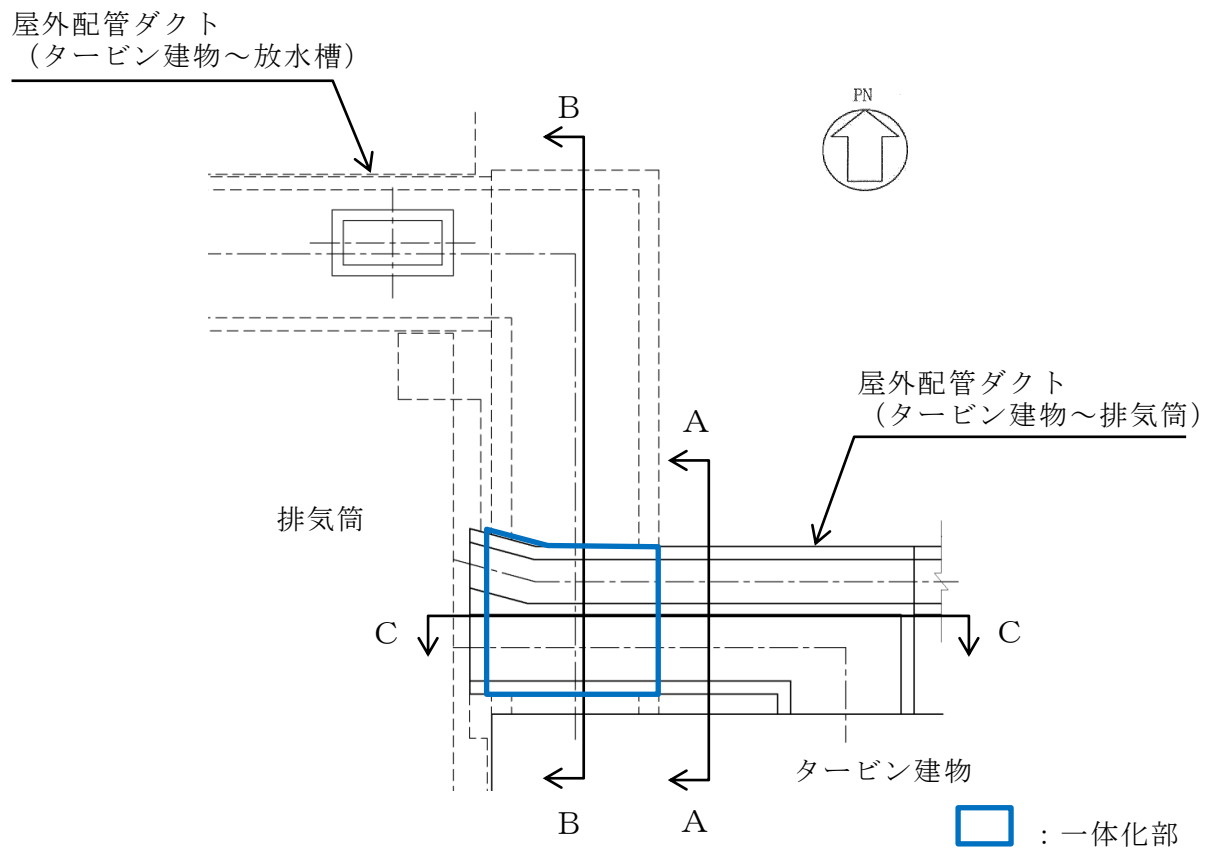


図 2-2 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 平面図

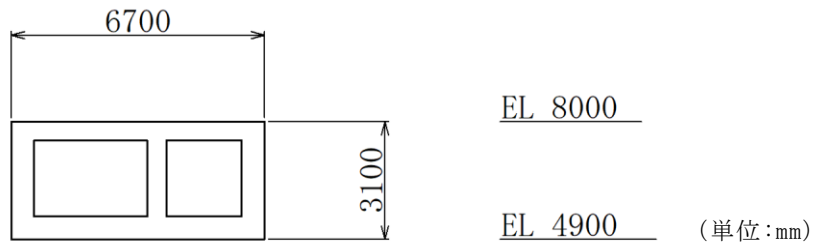


図 2-3 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 断面図（A-A断面）

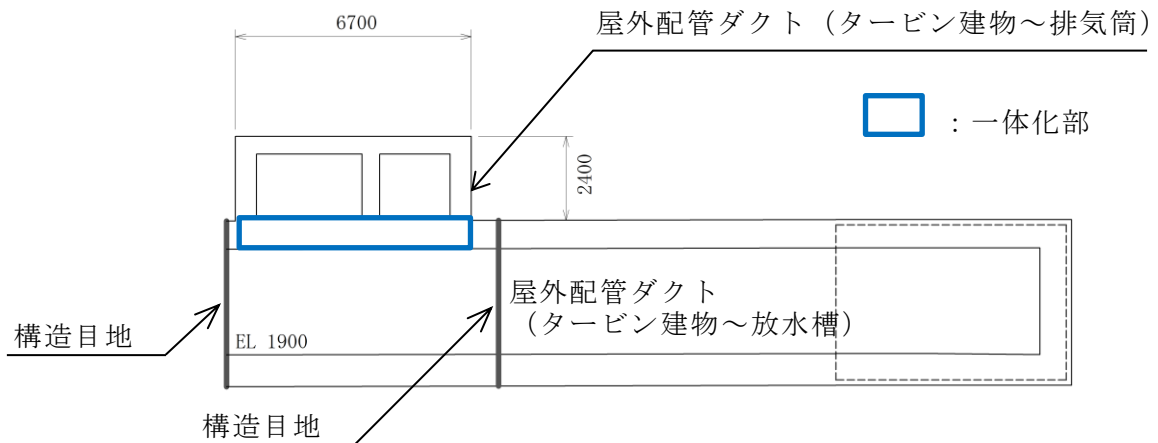


図 2-4 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 断面図（B-B断面）

（単位：mm）

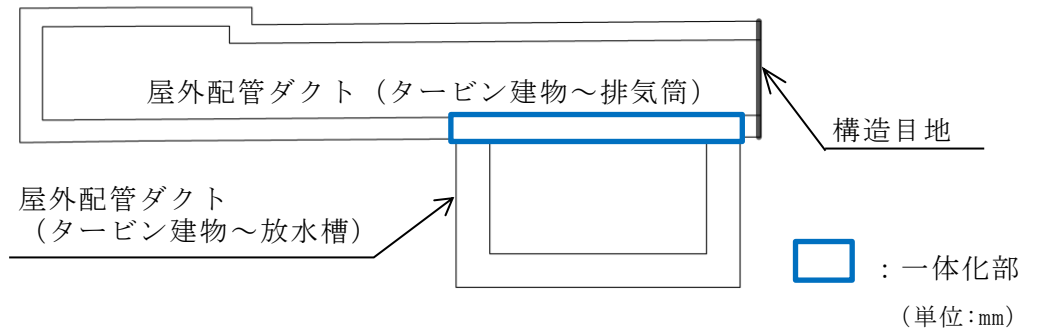


図 2-5 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 断面図（C-C断面）

（単位：mm）

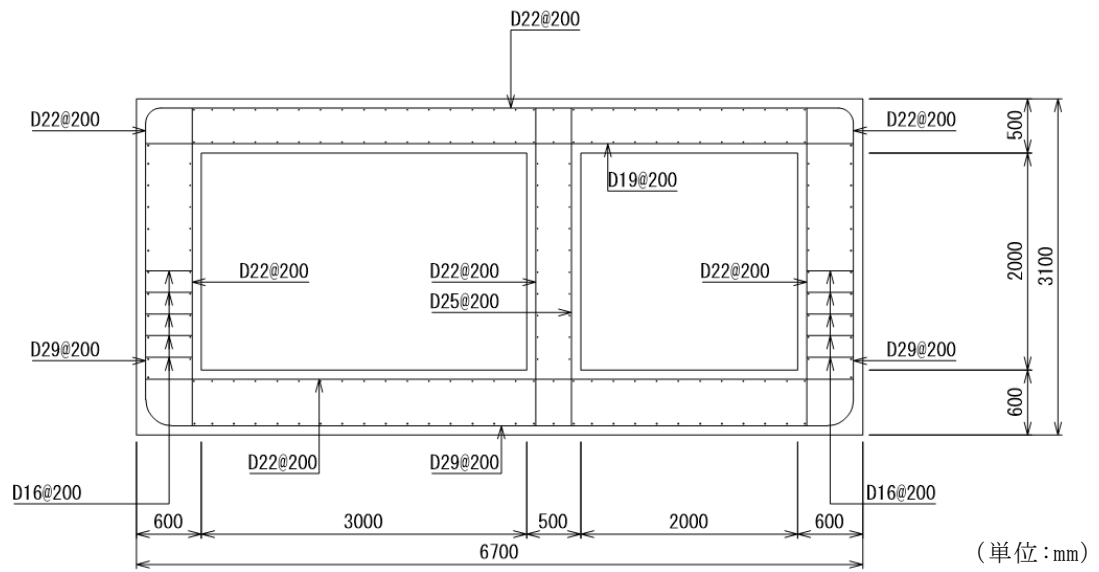
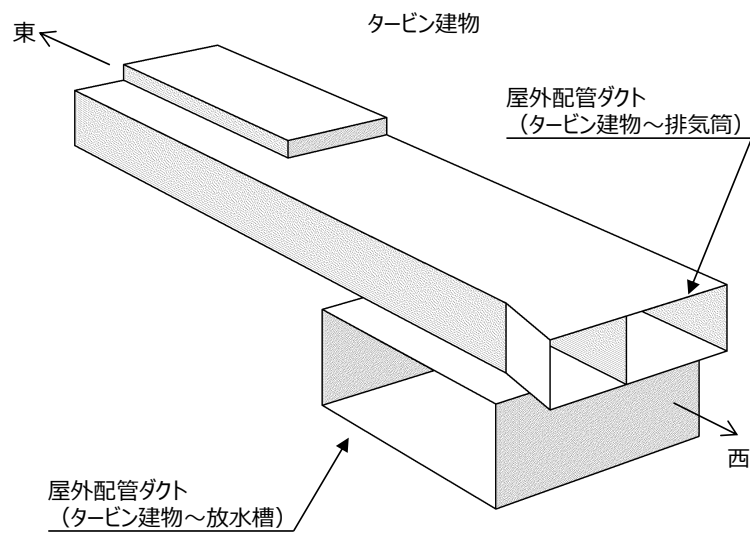
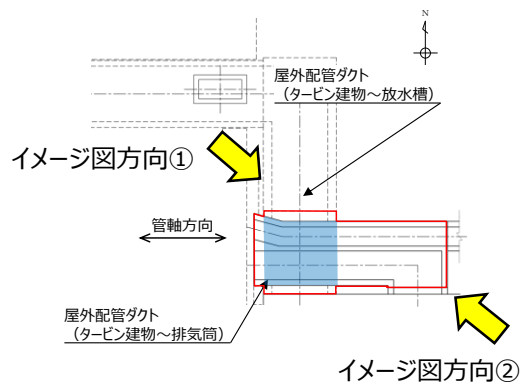
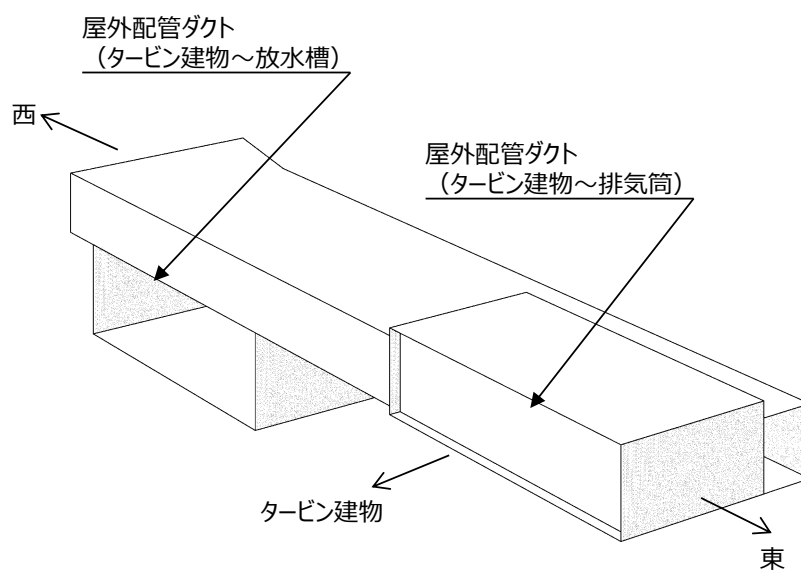


図 2-6 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 概略配筋図



(イメージ図方向①)



(イメージ図方向②)

図 2-7 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 一体化部のイメージ図

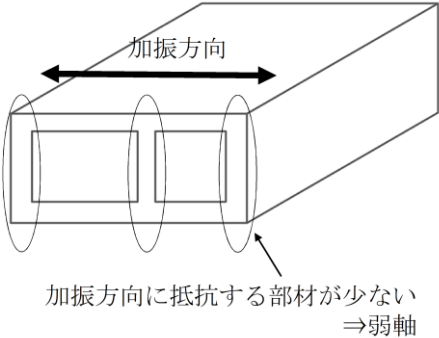
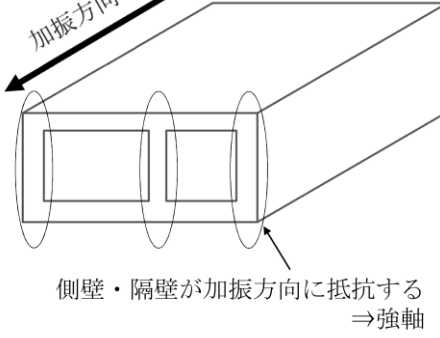
2.3 評価対象断面の方向

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は、非常用ガス処理系配管・弁等を間接支持する鉄筋コンクリート造の地中構造物である。

評価対象断面の方向に係る考え方を表 2-2 に示す。間接支持する配管の管軸方向（延長方向）と平行に配置されている壁部材が多いため、間接支持する配管の延長方向が強軸方向となり、横断方向が弱軸方向となっている。

以上のことから、標準的な断面形状及び周辺状況は延長方向におおむね一様であり、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の中心を通る横断方向の断面を評価対象断面として選定する。

表 2-2 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）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（タービン建物～排気筒）	 <p>加振方向に抵抗する部材が少ない =>弱軸</p>	 <p>側壁・隔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、「屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」の「4.5 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の断面選定の考え方」に示すとおり、標準的な断面形状及び周辺状況は延長方向におおむね一様であり、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の中心を通る横断方向の断面であるA-A断面を評価対象断面として選定する。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の評価対象断面位置図及び評価対象地質断面図を図2-8に示す。

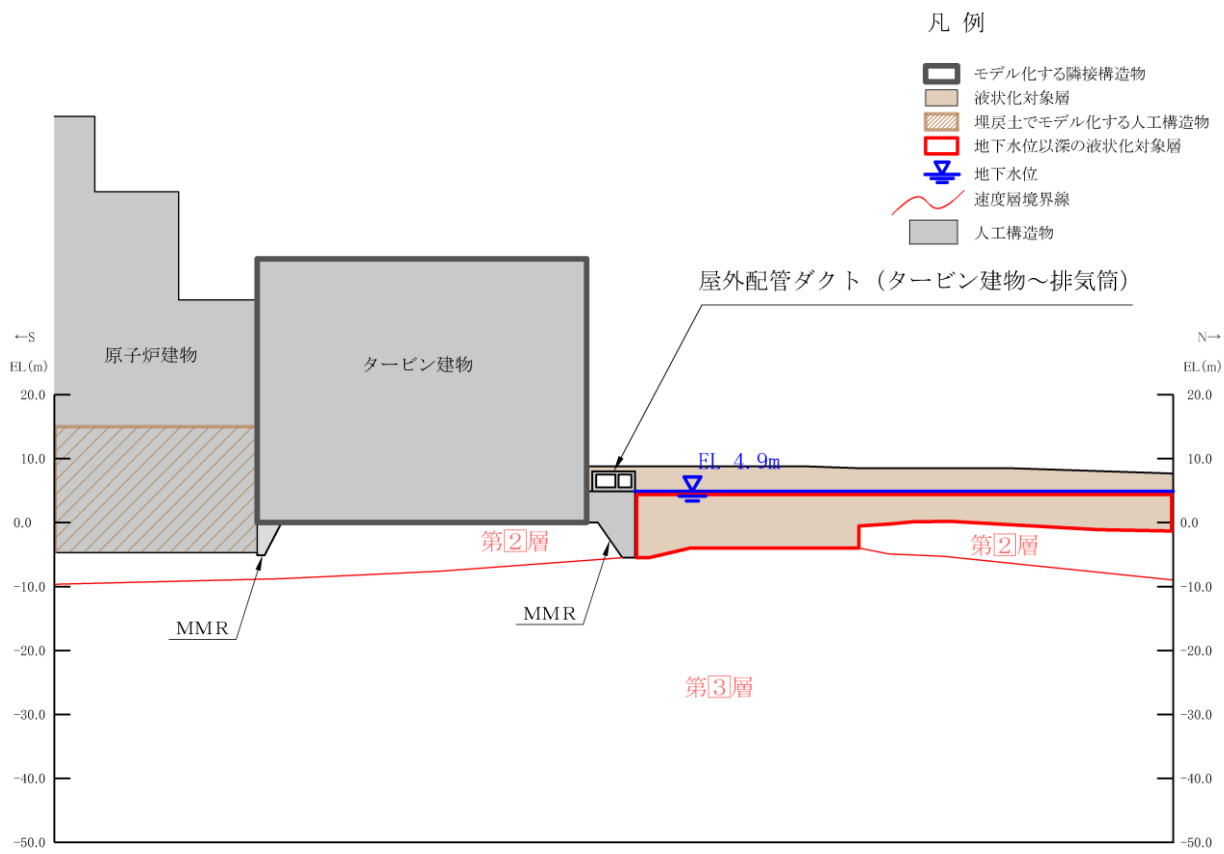


図 2-8 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)
 評価対象断面図及び評価対象地質断面図 (A-A断面)

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	コンクリート	設計基準強度 20.6N/mm ²
	鉄筋	SD345
MMR		設計基準強度 15.6N/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	2.33×10 ⁴	24.0* ¹	0.2
MMR	2.08×10 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に示す。

表2-5(1) 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 ($\times 10^3$ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
表層①-1	S s 127*	422*	20.7	0.45	0.341*	8*
	S d 156*	516*	20.7	0.45	0.512*	7*
岩盤①-2	250	800	20.6	0.446	1.31	3
岩盤②	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
岩盤③	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
岩盤④	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
岩盤⑤	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
岩盤⑥	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記*：地震動レベル及び試験結果に基づく埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値

表 2-5(2) 地盤の解析用物性値 (埋戻土, MMR)

	物理特性	強度特性			静的変形特性		動の変形特性		減衰特性
		せん断強度 τ_0 (N/mm ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	残留強度 τ (N/mm ²)	静弾性係数 E (N/mm ²)	静ポアソン比 ν_s	動せん断弾性係数 G_d (N/mm ²)	動ポアソン比 ν_d	
埋戻土	密度 ρ_s (g/cm ³) 2.11*	せん断強度 τ_0 (N/mm ²) 0.22	内部摩擦角 ϕ (°) 22	残留強度 τ (N/mm ²) 0.22+ $\sigma \tan 22^\circ$	静弾性係数 E (N/mm ²) $E_{0.5} = 115 \sigma^{0.61}$	静ポアソン比 ν_s 0.40	動せん断弾性係数 G_d (N/mm ²) $G_0 = 749 \sigma^{0.66}$ (N/mm ²) $G/G_0 = 1 / (1 + \gamma / 0.0027)$	動ポアソン比 ν_d 0.45	減衰定数 h $h = 0.095 \times (1 - G/G_0)$ $h = 0.0958 \times (1 - G/G_0) \times 0.85$
MMR	$f'_{ck} = 15.6 \text{ N/mm}^2$ 2.30	せん断強度 τ_0 (N/mm ²) 3.10	内部摩擦角 ϕ (°) 40	残留強度 τ (N/mm ²) 3.10+ $\sigma \tan 40^\circ$	静弾性係数 E (N/mm ²) 20,800	静ポアソン比 ν_s 0.20	動せん断弾性係数 G_d (N/mm ²) 1.03×10^4	動ポアソン比 ν_d 0.20	減衰定数 h 0.03

2.7 評価構造物諸元

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の諸元を表 2-6 に、評価部位を図 2-9 に示す。

表 2-6 評価部位とその仕様

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	3000	500	20.6	SD345	支持機能
頂版	2	2000	500	20.6	SD345	
側壁	3	2000	600	20.6	SD345	
側壁	4	2000	600	20.6	SD345	
隔壁	5	2000	500	20.6	SD345	
底版	6	3000	600	20.6	SD345	
底版	7	2000	600	20.6	SD345	

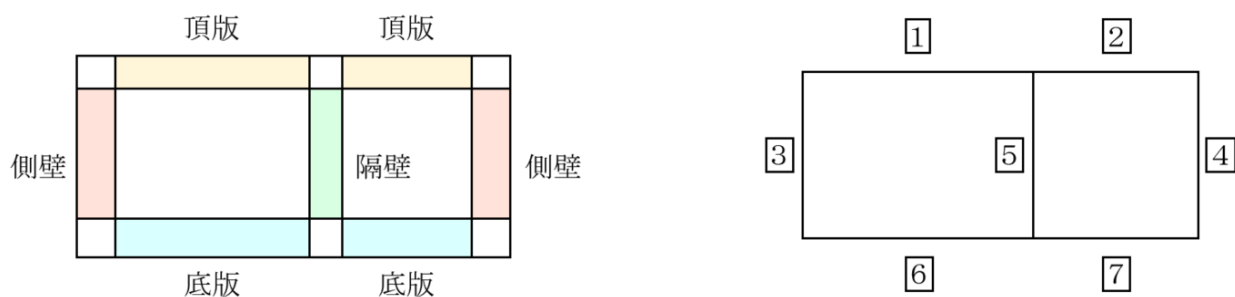


図 2-9 評価部位

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 2-7 に示す。

表 2-7 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)
屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)	A-A 断面	4.9

2.9 耐震評価フロー

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答解析フロー及び耐震評価フローを図 2-10 及び図 2-11 に示す。

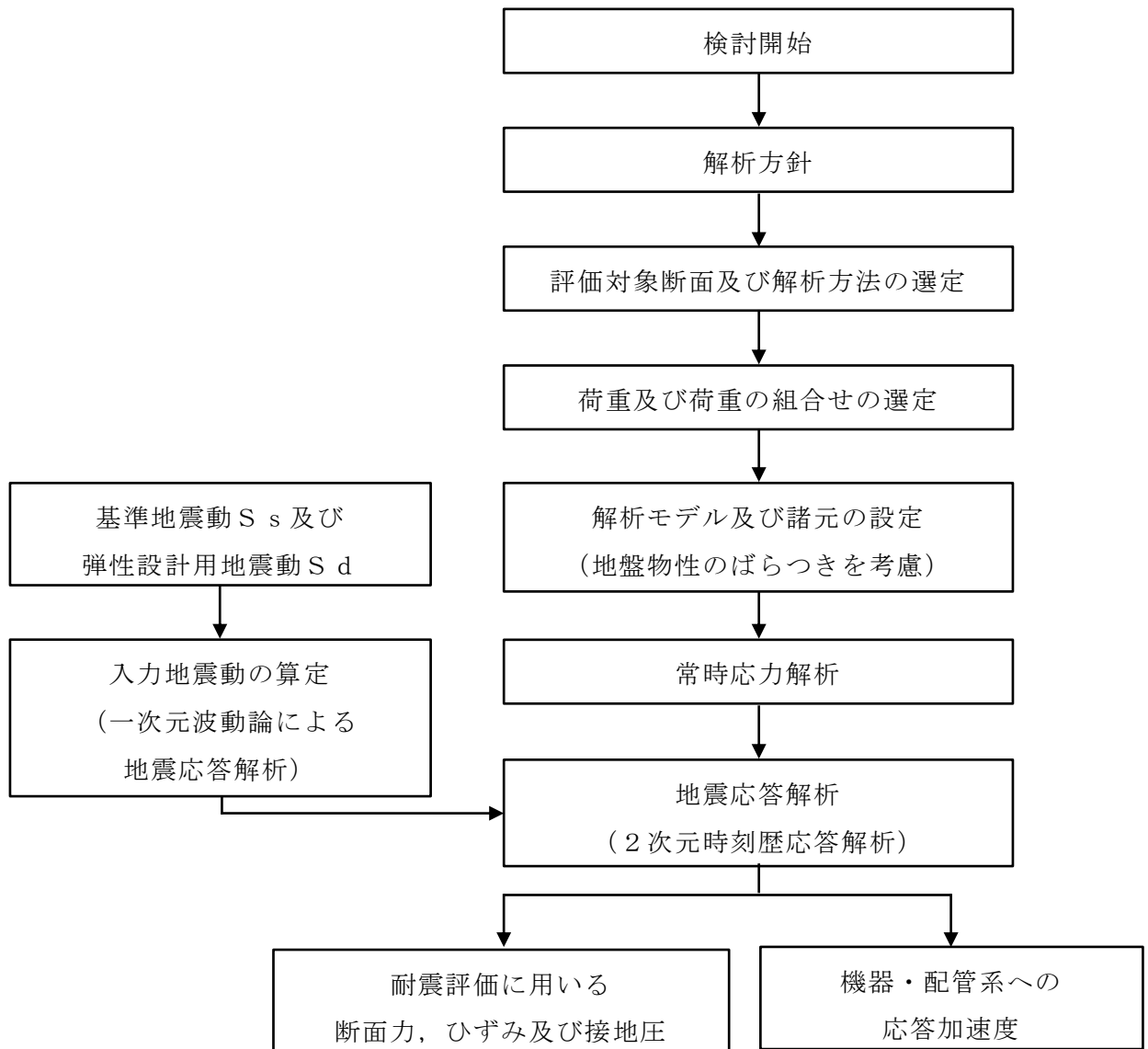


図 2-10 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答解析フロー

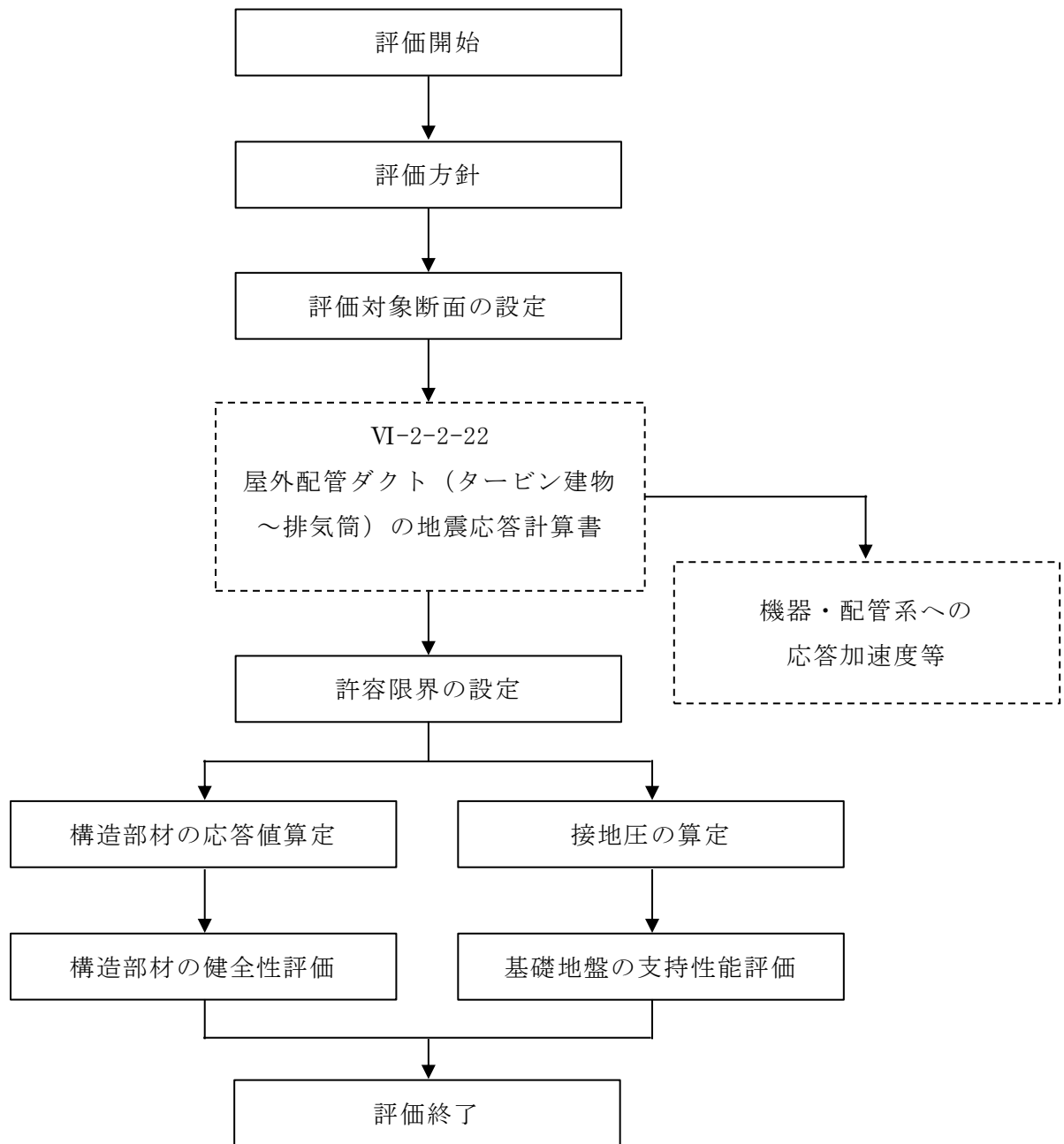


図 2-11 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の耐震評価フロー

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二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。

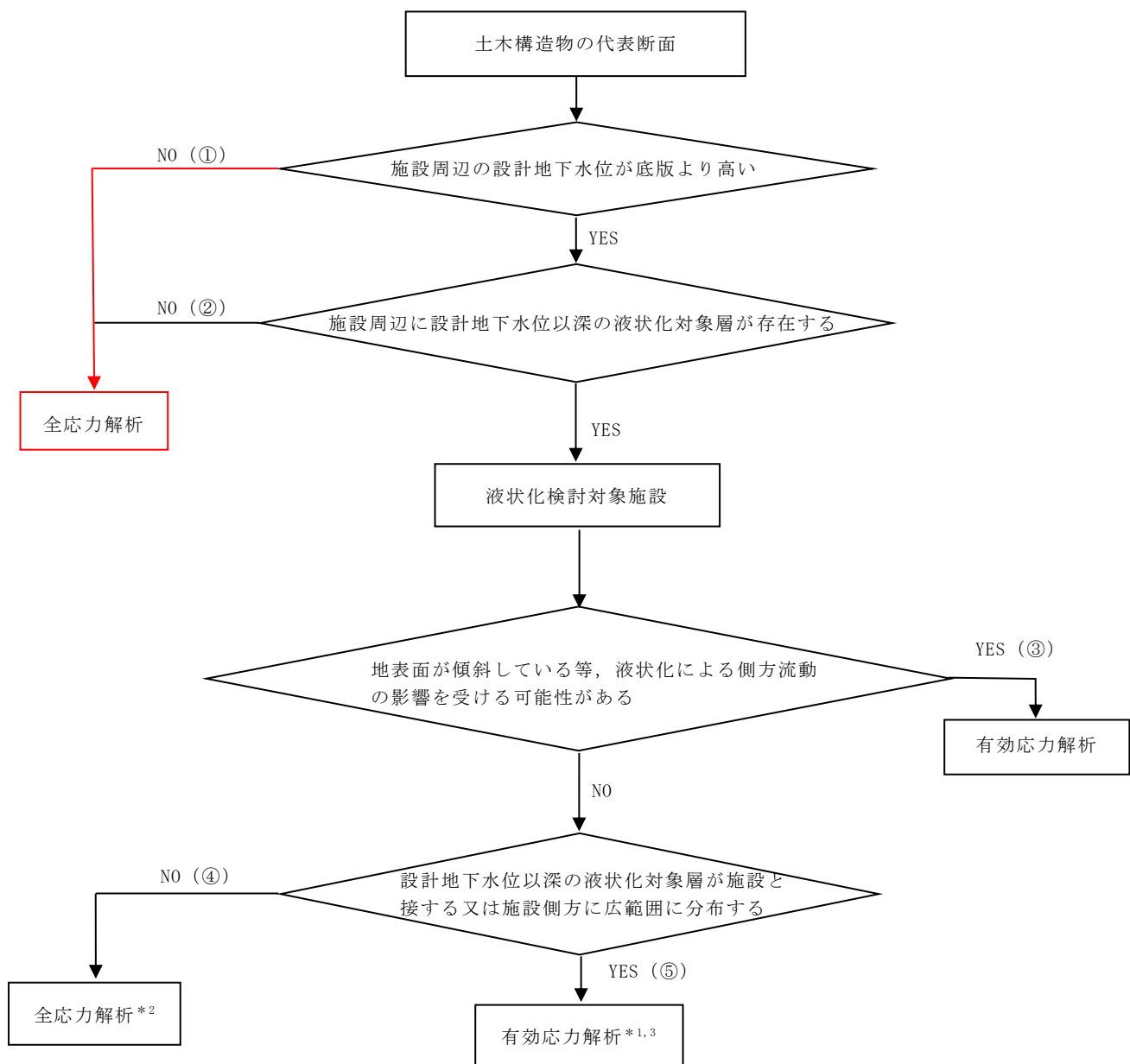
屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）周辺の地下水位は、構造物底版よりも低く、延長方向に一様であるため、解析手法のフローに基づき「①全応力解析」を選定する。

構造部材については、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。

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、このうち岩盤及びMMRについては、線形要素でモデル化する。埋戻土については、地盤の剛性及び減衰のひずみ依存性を適切に考慮できるマルチスプリング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。

地震応答解析の選定フローを図 3-2 に示す。



注記*1：非液状化の条件を仮定した全応力解析についても実施する。

*2：設計地下水位以深の液状化対象層の分布が局所的である断面のため全応力解析を実施するが、液状化の影響が構造物に及んでいないことを有効応力解析により確認する。

*3：土木構造物の耐震評価の追加解析ケースとして、液状化しない場合の全応力解析を実施する。また、全応力解析について、有効応力解析の解析コードとの差異による影響を代表構造物（例：取水槽）で確認する。

図 3-1 解析手法の選定フロー

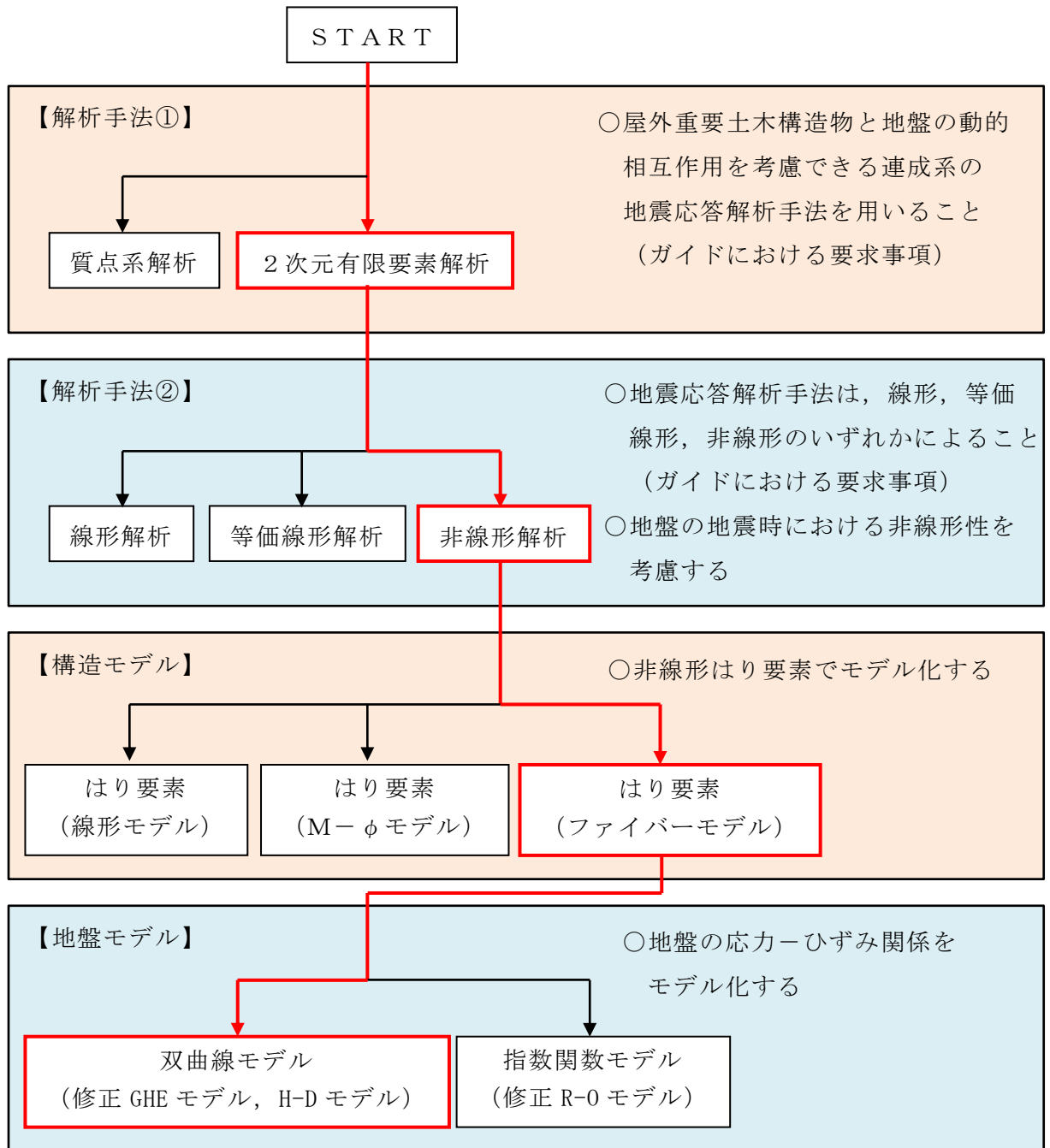


図 3-2 地震応答解析の選定フロー

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。具体的には、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倍以上を確保している。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の解析モデル領域については、南側にタービン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。

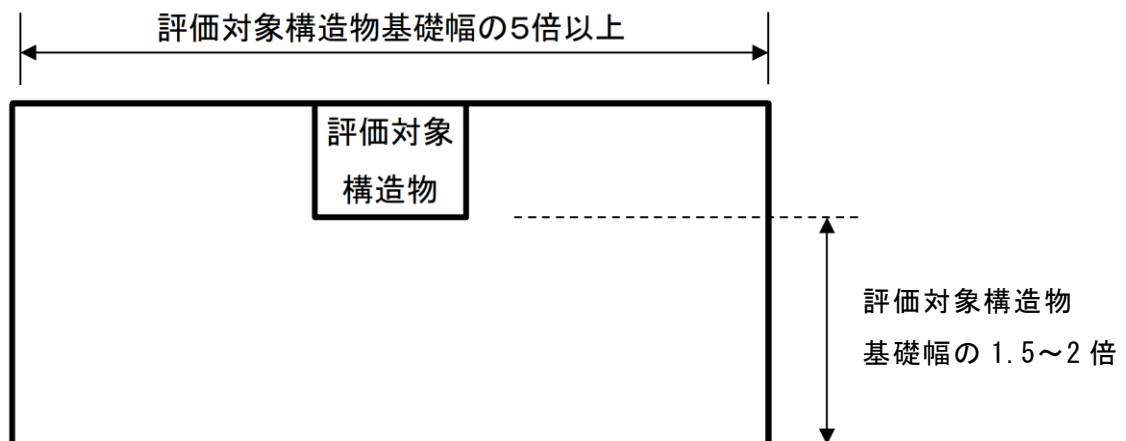


図3-3 モデル化範囲の考え方

二次元地震応答解析モデルは、検討対象構造物とその周辺地盤をモデル化した不整形地盤に加え、この不整形地盤の左右に広がる地盤をモデル化した自由地盤で構成される。この自由地盤は、不整形地盤の左右端と同じ地質構成を有する一次元地盤モデルである。二次元地震応答解析における自由地盤の常時応力解析から不整形地盤の地震応答解析までのフローを図 3-4 に示す。

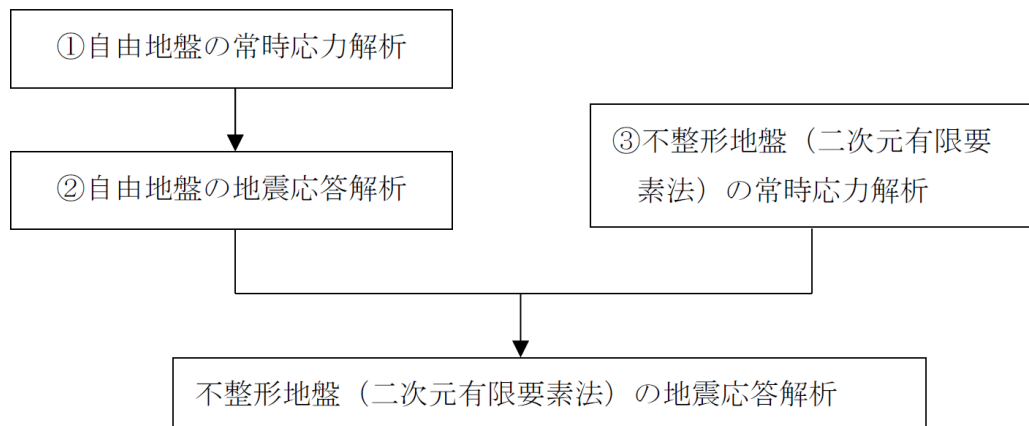


図 3-4 自由地盤の常時応力解析から不整形地盤の地震応答解析までのフロー

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 3-5 に示す。

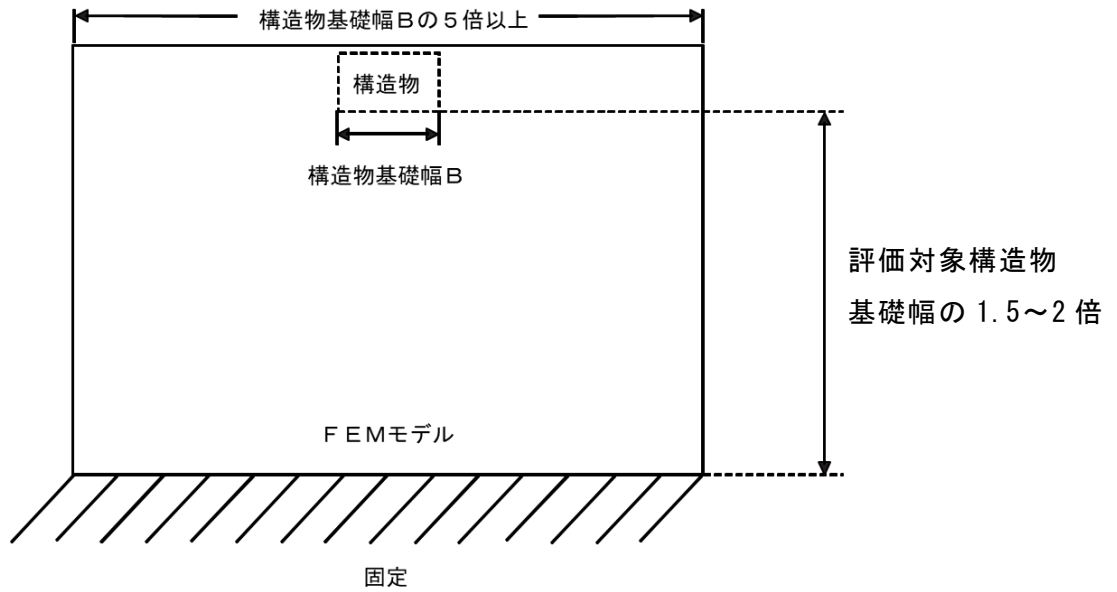


図 3-5 固有値解析における境界条件の概念図

(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3-6に示す。

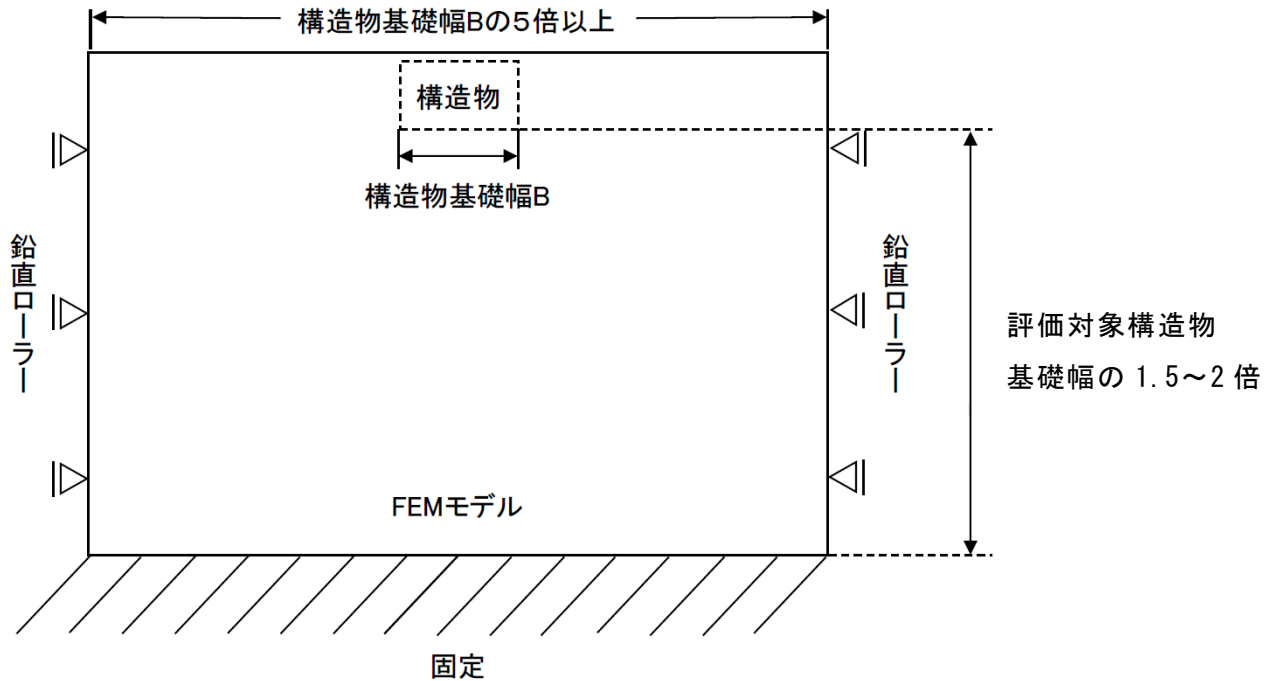
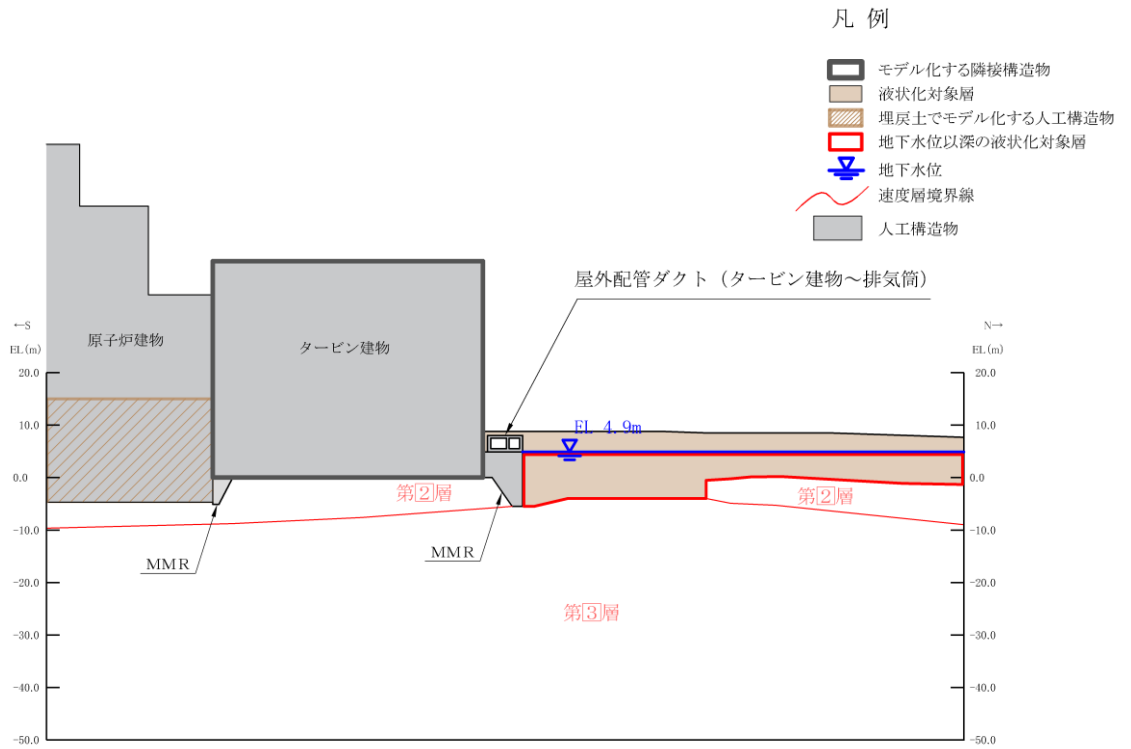


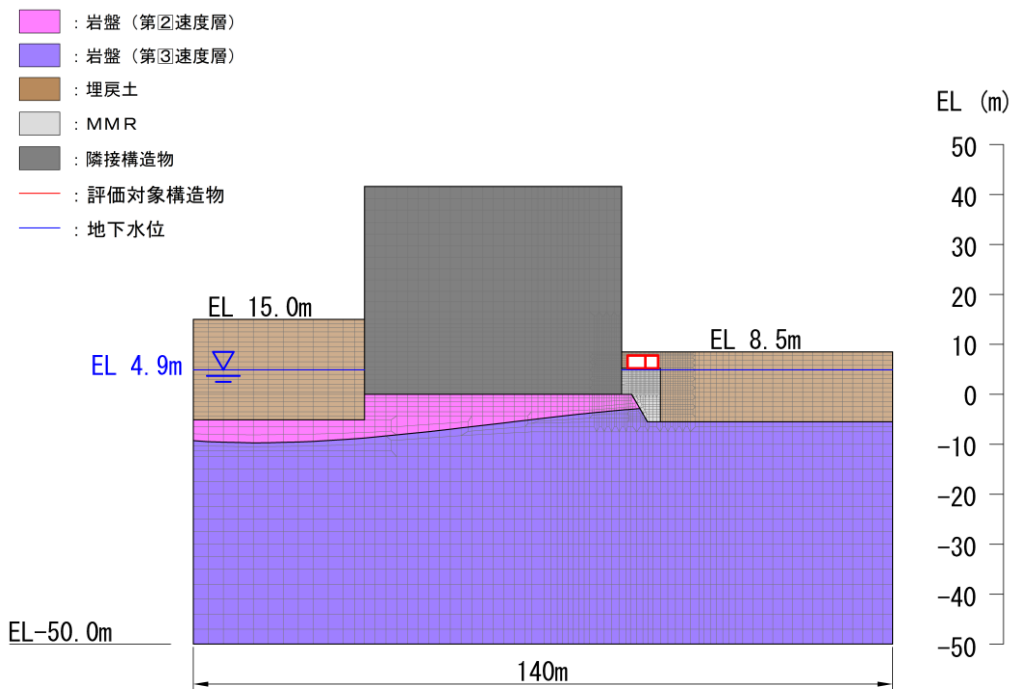
図3-6 常時応力解析における境界条件の概念図

(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。評価対象地質断面図及び、地震時荷重算出用地質断面図及び地震応答解析モデル図を図 3-7 に示す。



(a) 評価対象地質断面図



(b) 地震応答解析モデル図

図 3-7 評価対象地質断面図及び地震応答解析モデル図

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。

機器・配管荷重は解析モデルに付加重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

解析モデル範囲において隣接構造物となるタービン建物のモデル化は、「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〉」に基づき、質点系建屋モデルから建屋各層の水平剛性 K_H 、鉛直剛性 K_V 及び曲げ剛性 K_ϕ を用いて、せん断剛性 G 、ポアソン比 ν 、ばね定数 k_s を求め等価な有限要素モデルを作成する。タービン建物のモデル化概要について図3-8に、多質点系モデルと有限要素モデルの固有値（1次モード）の比較を表3-1に示す。

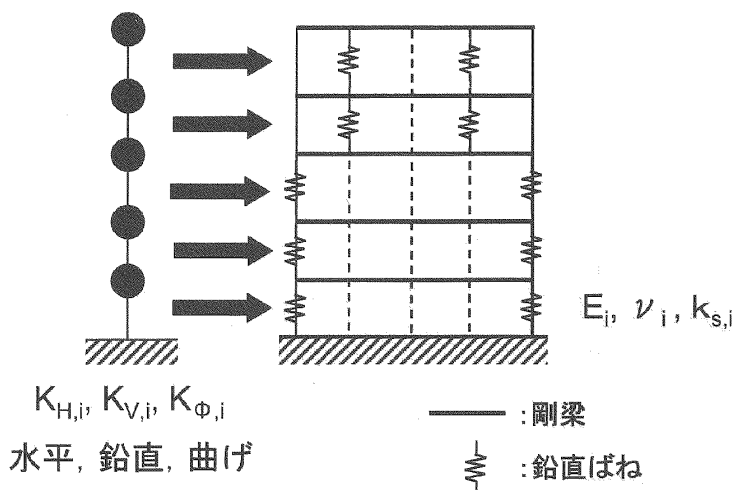


図3-8 タービン建物のモデル化概要

(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〉

(土木学会 原子力土木委員会 2009年2月) より引用)

表3-1 固有周期比較表

	固有周期（1次モード）
多質点系モデル	0.17（水平）
	0.05（鉛直）
有限要素モデル	0.17（水平）
	0.05（鉛直）

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。また、埋戻土は、地盤の剛性及び減衰のひずみ依存性を考慮できるマルチスプリング要素でモデル化する。

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 3-2 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 3-3 のとおり設定する。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

ここに、 τ_f : せん断強度

c : 粘着力

ϕ : 内部摩擦角

表 3-2 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 (°)
埋戻土	0.22	22
岩盤 (C _L 級)	0.56	37
岩盤 (C _M 級)	1.23	52
MMR	3.10	40

表 3-3 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
	改良地盤	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
改良地盤	無筋コンクリート*1	材料 1 の c	材料 1 の ϕ
	埋戻土	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
	$C_H \cdot C_M$ 級岩盤	材料 1 の c	材料 1 の ϕ
	C_L 級岩盤	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
無筋コンクリート*1	無筋コンクリート*1	設計基準強度が 小さい材料の c	設計基準強度が 小さい材料の ϕ
	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 3-4 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 3-4 ジョイント要素のばね定数

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

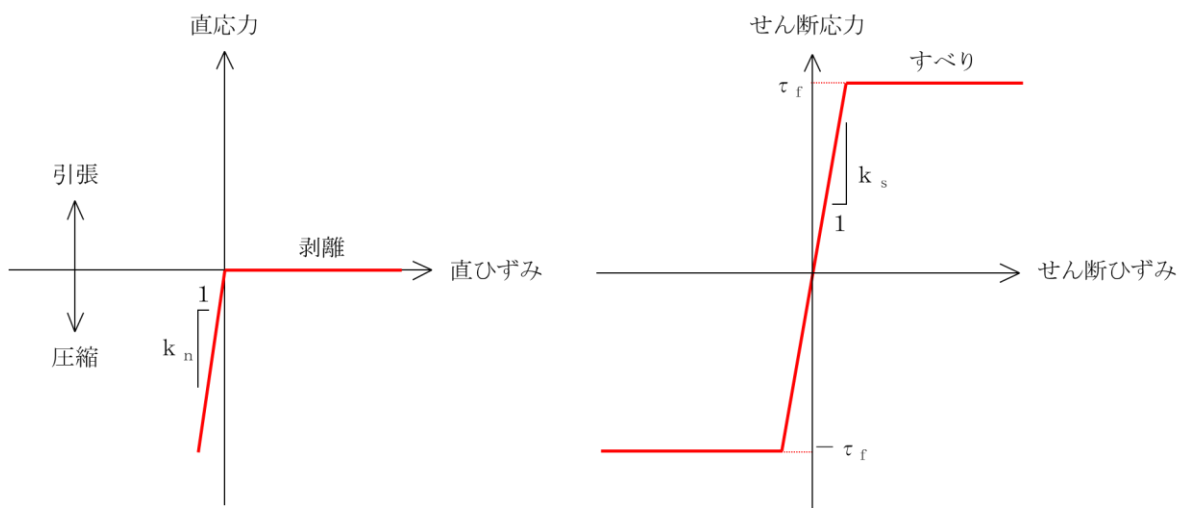
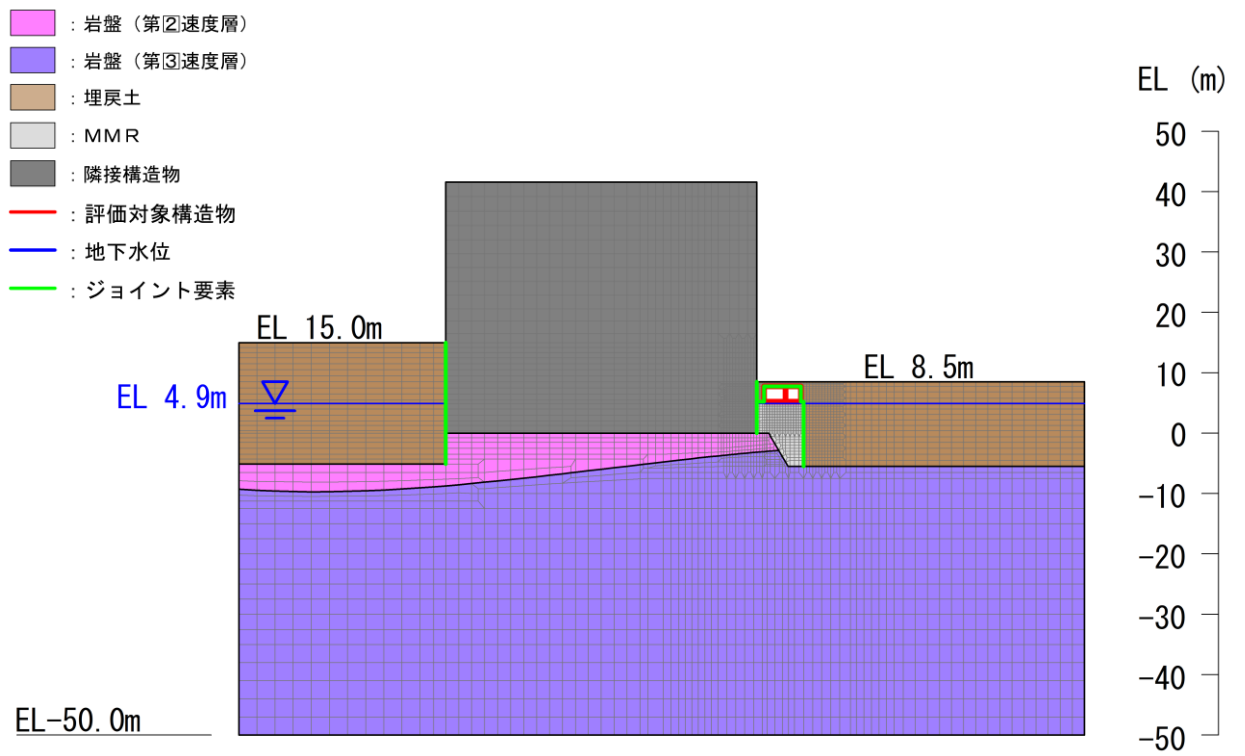
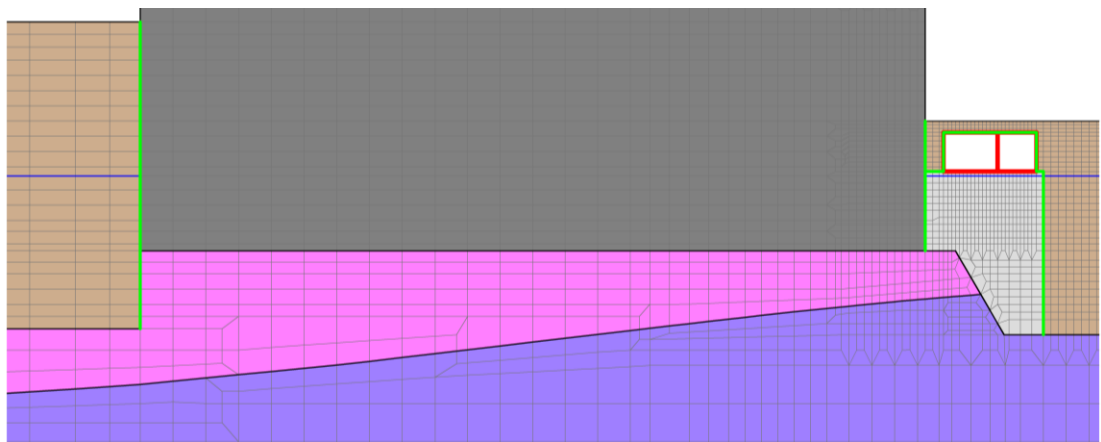


図 3-9 ジョイント要素の力学特性



(全体図)



(拡大図)

図 3-10 ジョイント要素の配置 (A-A断面)

3.2.7 材料特性の設定

全応力解析における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 3-11 参照）、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。

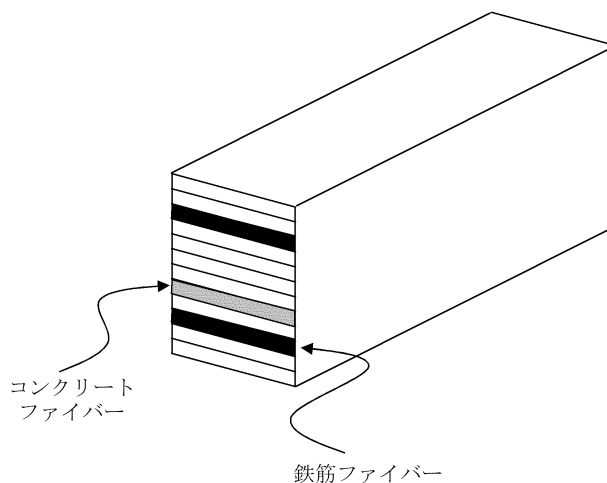
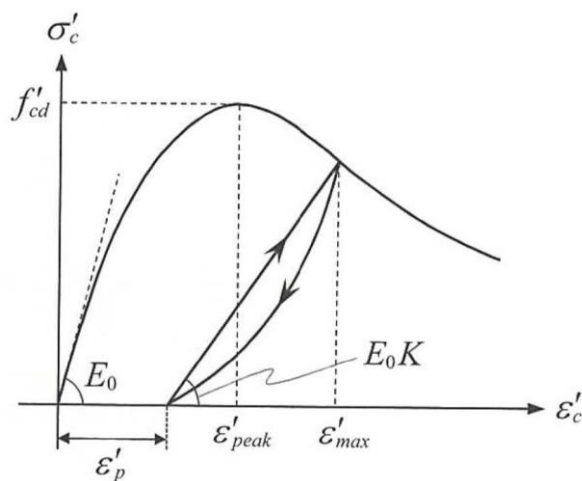
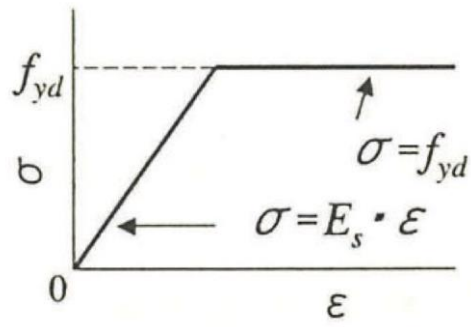


図 3-11 ファイバーモデルの概念図



(コンクリート標準示方書 2017 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、「資料1 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。

$$[C] = \alpha [m] + \beta [k]$$

[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

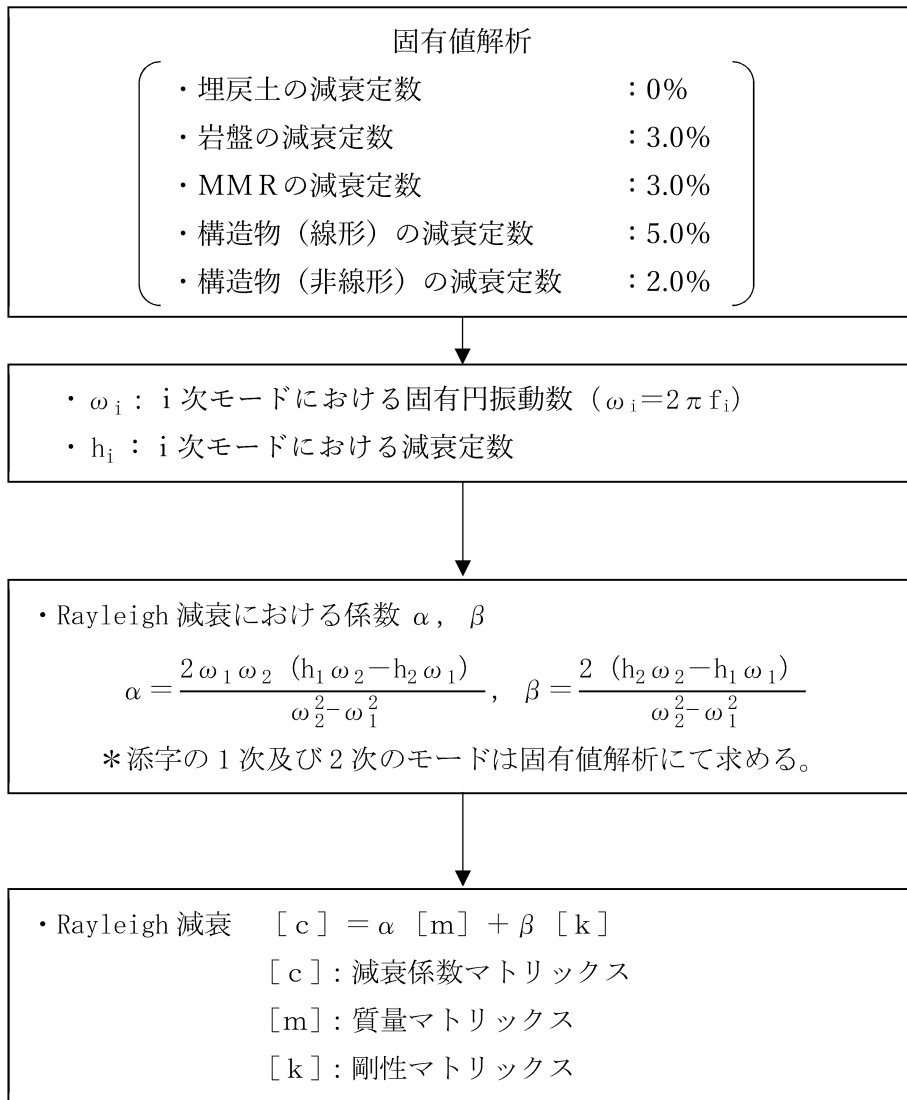


図 3-14 Rayleigh 減衰の設定フロー

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。

固有値解析結果の一覧を表 3-5 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 3-6 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 3-5 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
		Tx	Ty	β_x	β_y	
1	4.0262	27	0	3.9350	0.470	1次として採用
2	4.5543	5	1	-2.2480	0.9116	—
3	5.4795	7	0	1.9000	-0.2279	—
4	7.0277	16	0	-3.8720	-0.3492	2次として採用
5	7.4770	6	1	2.1410	0.2328	—
6	7.9769	0	4	-0.2299	-1.473	—
7	8.1987	16	2	3.0790	-0.9233	—
8	9.2080	0	0	-0.5772	0.5291	—
9	9.6809	0	0	0.5634	-0.7254	—
10	9.7981	2	7	1.3090	3.04	—

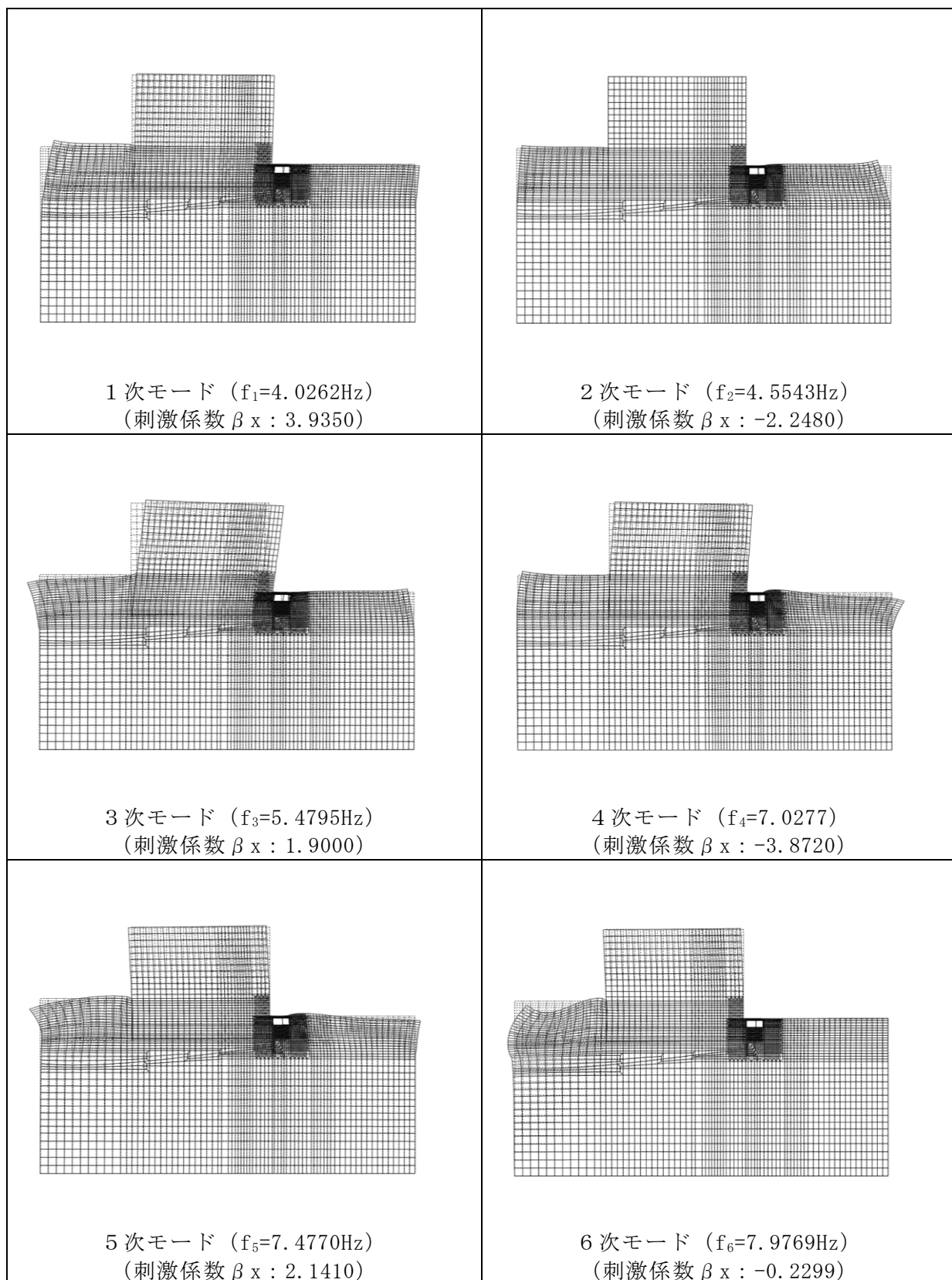


図 3-15(1) 固有値解析結果 (モード図) (A-A断面)

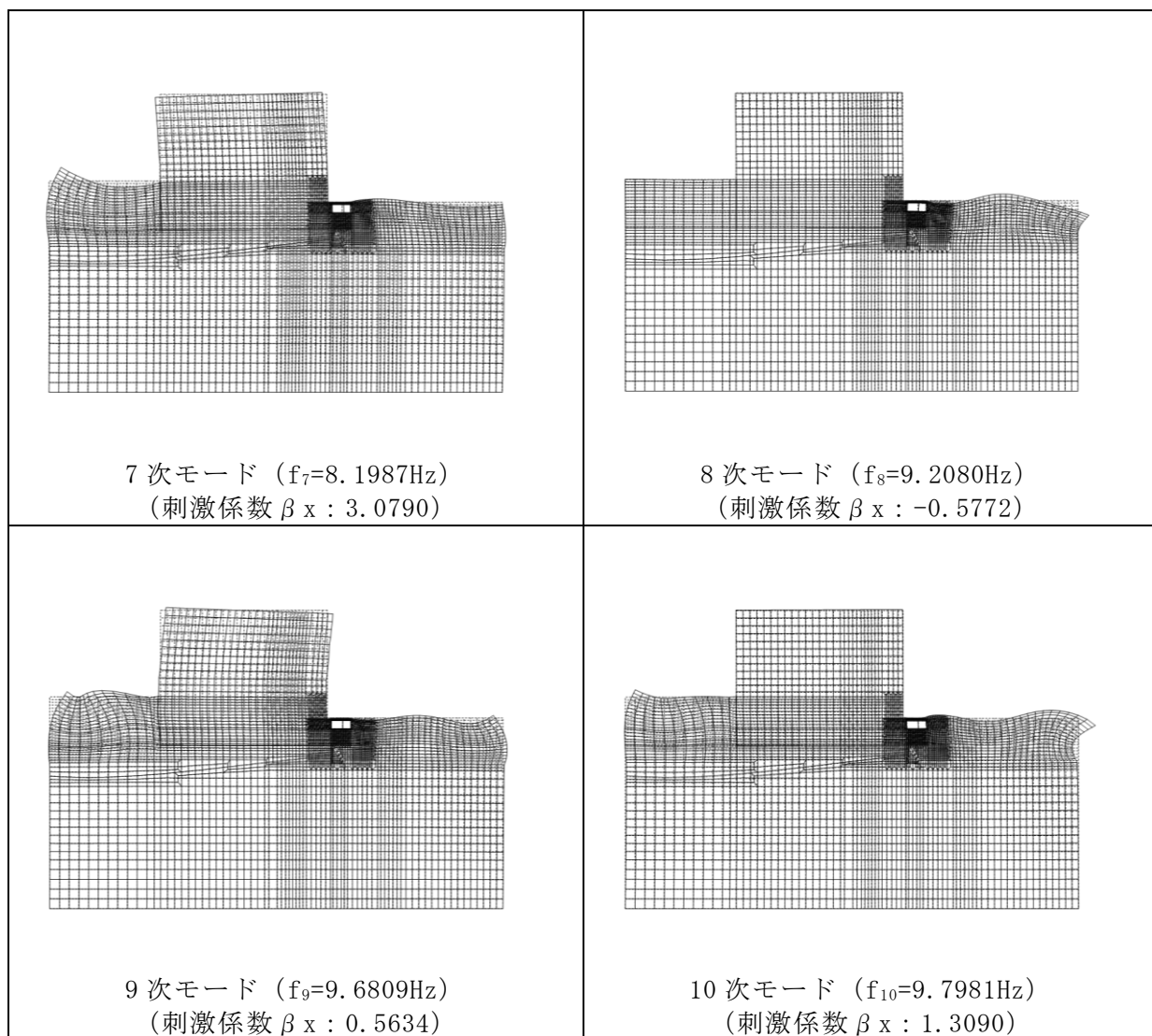


図 3-15(2) 固有値解析結果 (モード図) (A-A断面)

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	5.025E-01	4.149E-04

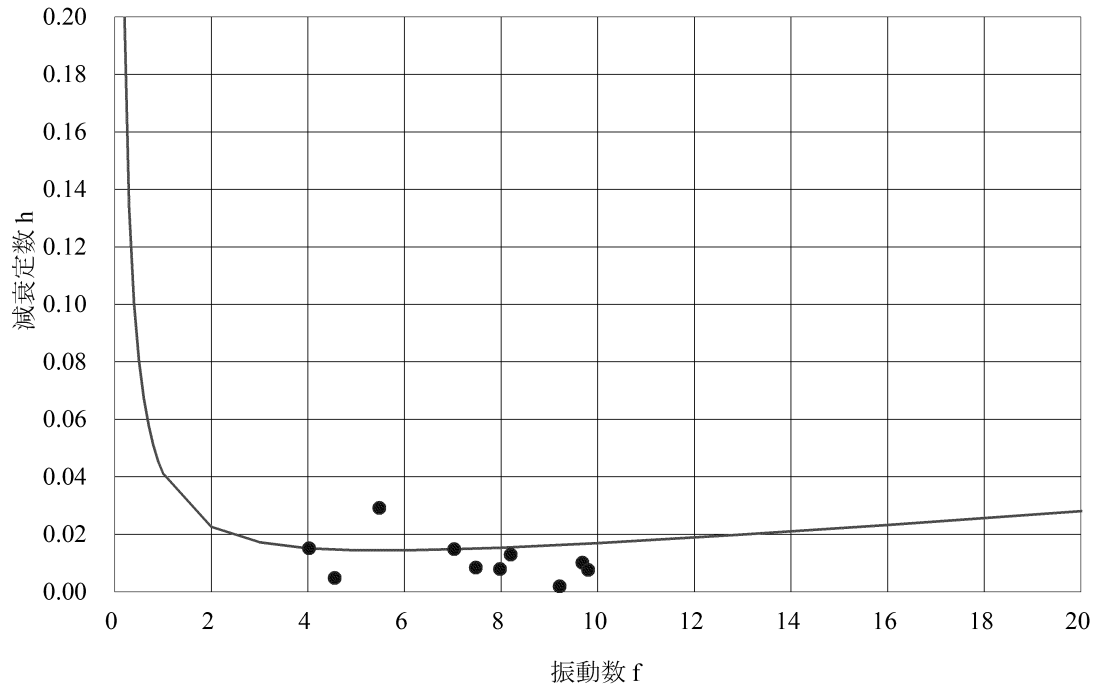


図 3-16 設定した Rayleigh 減衰 (A-A断面)

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、常時の荷重（永久荷重）及び地震荷重を抽出し、それぞれを組み合わせで設定する。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（タービン建物～排気筒）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 3-7 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。
		積雪荷重	○	・地表面及びタービン建物天端に考慮する。
	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		○	

3.4.1 機器・配管荷重

地震時に屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）に作用する機器・配管系の荷重一覧を表 3-8 に、荷重図を図 3-17 に示す。

機器・配管荷重は、常時・地震時ともに付加重量でモデル化する。

表 3-8 配管荷重一覧

配管敷設面における単位面積あたりの質量 (kN/m ²)			
①頂版	②底版	③隔壁	④南側壁
1.334	0.737 (7.35 kN/m ²)*	1.060	1.117

注記*：隔壁より北側の床面には括弧内の値を作用させる。

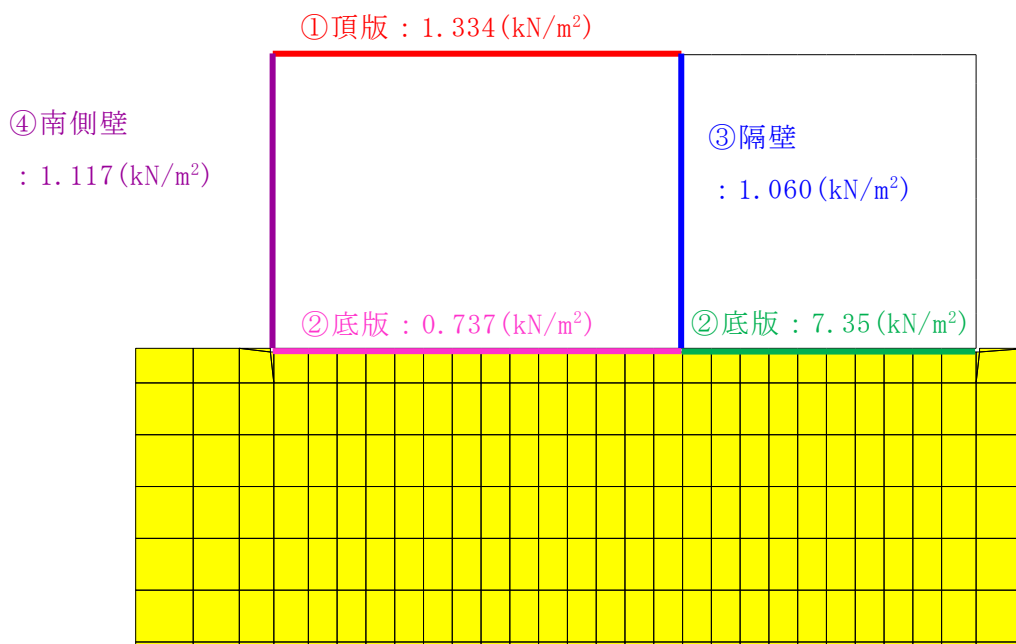


図 3-17 解析用機器・配管荷重図

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、「2.7 地下水位」のとおりとし、地下水の密度として 1.00g/cm^3 を考慮する。

3.4.3 積雪荷重

積雪荷重は、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。

地表面及びタービン建物天端への積雪荷重は、単位奥行き (1m) あたりの付加質量として考慮する。

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

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）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，構造物の耐震性に支配的な損傷モードは地盤のせん断変形に伴う構造部材の曲げ・軸力系の破壊及びせん断破壊となる。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）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，これらの地盤が地震時に構造物の応答に大きく影響を与えると判断されることから，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 3-9 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 3-9 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 3-9 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）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	
		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 + 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波を用いて、表3-9に示す解析ケース①（基本ケース）を実施する。解析ケース①において、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3-9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3-10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3-10 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。

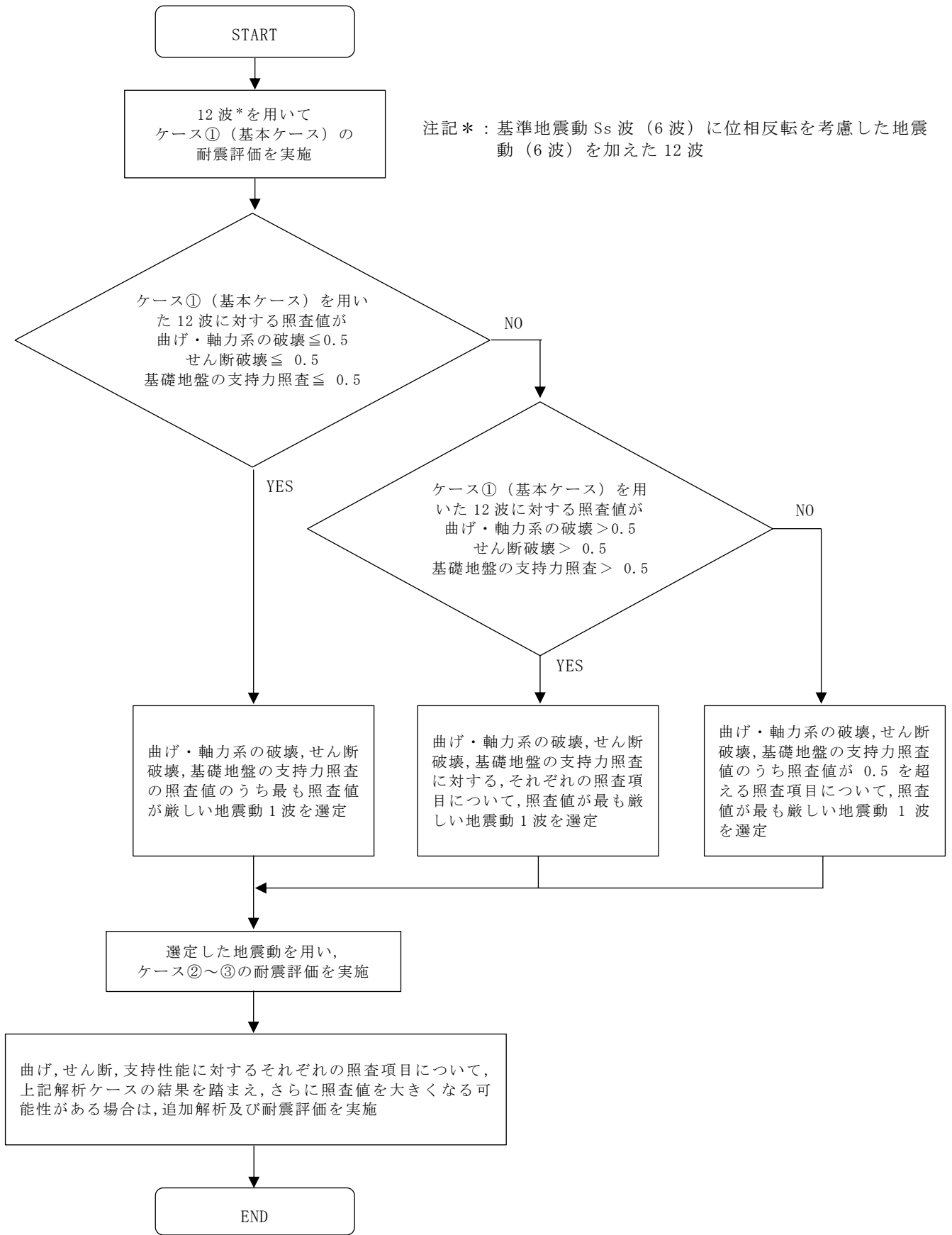


図 3-18 追加解析を実施する地震動の選定フロー

3.5.2 機器・配管系の耐震評価に適用する解析ケース

(1) 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

「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 3-11 に示すケース②及び③）。

(2) 材料物性の影響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 3-11 に示すケース④）。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）におけるコンクリート実強度は、図 3-19 及び図 3-20 に示す位置におけるコア抜き強度 $f'_{c,k}$ の平均値とし、ヤング係数は実強度の平均値からコンクリート標準示方書に基づき算出する。

材料物性の影響を考慮した解析ケースにて考慮する屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）のコンクリート実強度及びヤング係数を表 3-12 に、コア採取による圧縮強度試験結果を表 3-13 に示す。

(3) 地下水位低下の影響を考慮した解析ケース

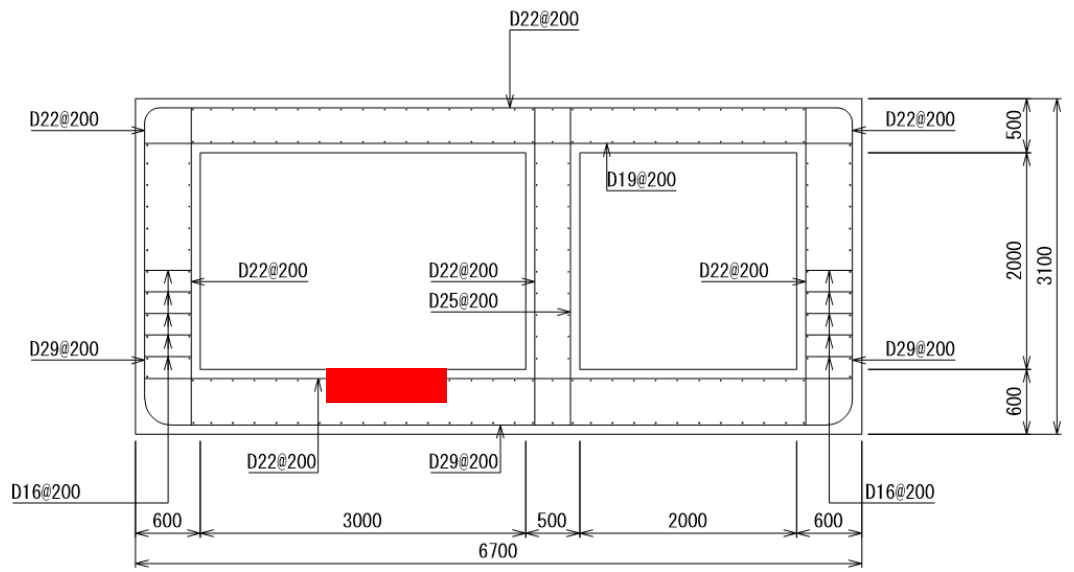
地下水位については、地下水位低下設備に期待せず、保守的に高く設計地下水位を設定していることから、機器・配管系の床応答への影響を確認するため、地下水位が低下している状態での影響検討を実施する（表 3-11 に示すケース⑤）。

表 3-11 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 + 1σ	平均値	
ケース③	全応力解析	平均値 - 1σ	平均値	
ケース④	全応力解析	平均値	平均値	コンクリート実強度*1
ケース⑤	全応力解析	平均値	平均値	地下水位低下*2

注記*1：既設構造物のコア採取による圧縮強度試験に基づき表 3-12 に示すとおりとする。

*2：解析モデル内に地下水位を設定しない状態における検討とする。



■ : コア採取位置

図 3-19(1) コア採取位置概念図

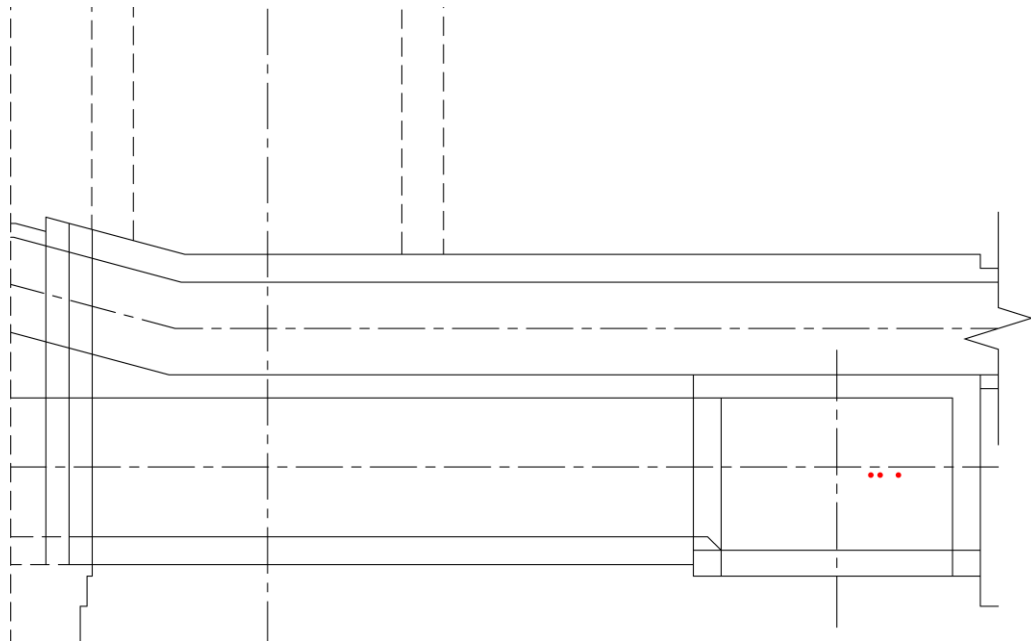


図 3-19(2) コア採取位置図

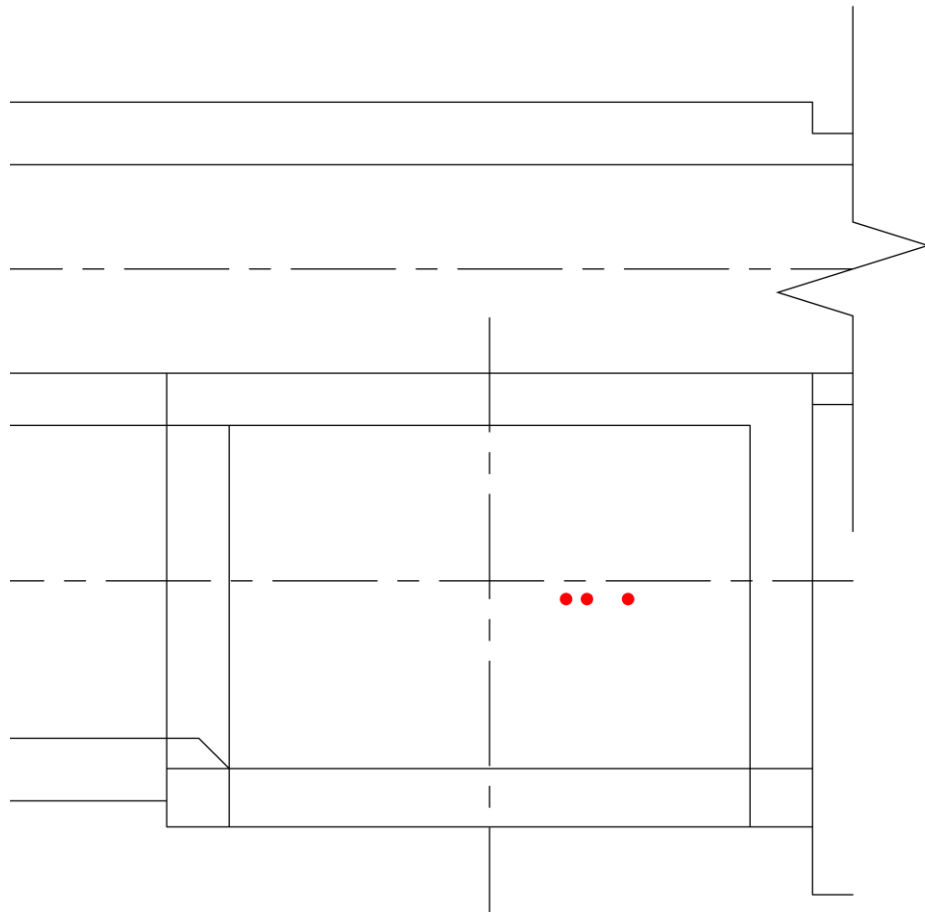


図 3-20 コア採取位置拡大図

表 3-12 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）のコンクリート実強度及びヤング係数

コンクリート実強度* ¹ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
33.0	28.9* ²

注記*1：屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）のコア採取による圧縮強度試験結果を表 3-13 に示す。

*2：実強度の平均値からコンクリート標準示方書に基づき算出したヤング係数であり，コア採取による圧縮強度試験結果の最大値よりも大きくなることから，保守的に材料物性の影響を考慮した解析ケースにおけるヤング係数として設定する。

表 3-13 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）のコア採取による圧縮強度試験結果
(静弾性係数試験結果を含む)

採取位置*	採取年	供試体数 (本)	コンクリート 実強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)	
			最大	最小	最大	最小
底版 (床部)	2016	3	33.9	32.6	28.0	27.3

注記*：採取位置を図 3-19 及び図 3-20 に示す。

(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 波を用いて表 3-14 に示す解析ケース①～⑤を行う。

弾性設計用地震動による機器・配管系の耐震評価に適用する解析ケースについては、表 3-15 に示す解析ケース①～③について、弾性設計用地震動 S d 全波（7 波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（9 波）を加えた全 16 波を用いて解析を行う。

表 3-14 機器・配管系の応答加速度抽出のための解析ケース（基準地震動 S_s ）

解析ケース*2	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 (+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+1 σ	平均値-1 σ	平均値	平均値
地震動（位相）	++*1	○	○	△	△
	-+*1	○	○	○	-
	+-*1	○	○	○	-
	--*1	○	○	○	-
	++*1	○	○	○	-
	++*1	○	○	○	-
	++*1	○	○	○	-
	++*1	○	○	○	-
	++*1	○	○	○	-
	++*1	○	○	○	-
	++*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：○は設計に用いる解析ケースを示し、△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。

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（弾性設計用地震動 S d）

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 (+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	
地盤物性		平均値		平均値 + 1σ		平均値 - 1σ	
地震動 (位相)	S d - D	++*	○	○	○	○	○
		-+*	○	○	○	○	
		+ - *	○	○	○	○	
		--*	○	○	○	○	
	S d - F 1	++*	○	○	○	○	
	S d - F 2	++*	○	○	○	○	
	S d - N 1	++*	○	○	○	○	
		-+*	○	○	○	○	
	S d - N 2 (N S)	++*	○	○	○	○	
		-+*	○	○	○	○	
	S d - N 2 (E W)	++*	○	○	○	○	
		-+*	○	○	○	○	
	S d - 1	++*	○	○	○	○	
		-+*	○	○	○	○	
		+ - *	○	○	○	○	
		--*	○	○	○	○	

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。

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 及び弾性設計用地震動 S_d 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 4-35 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。

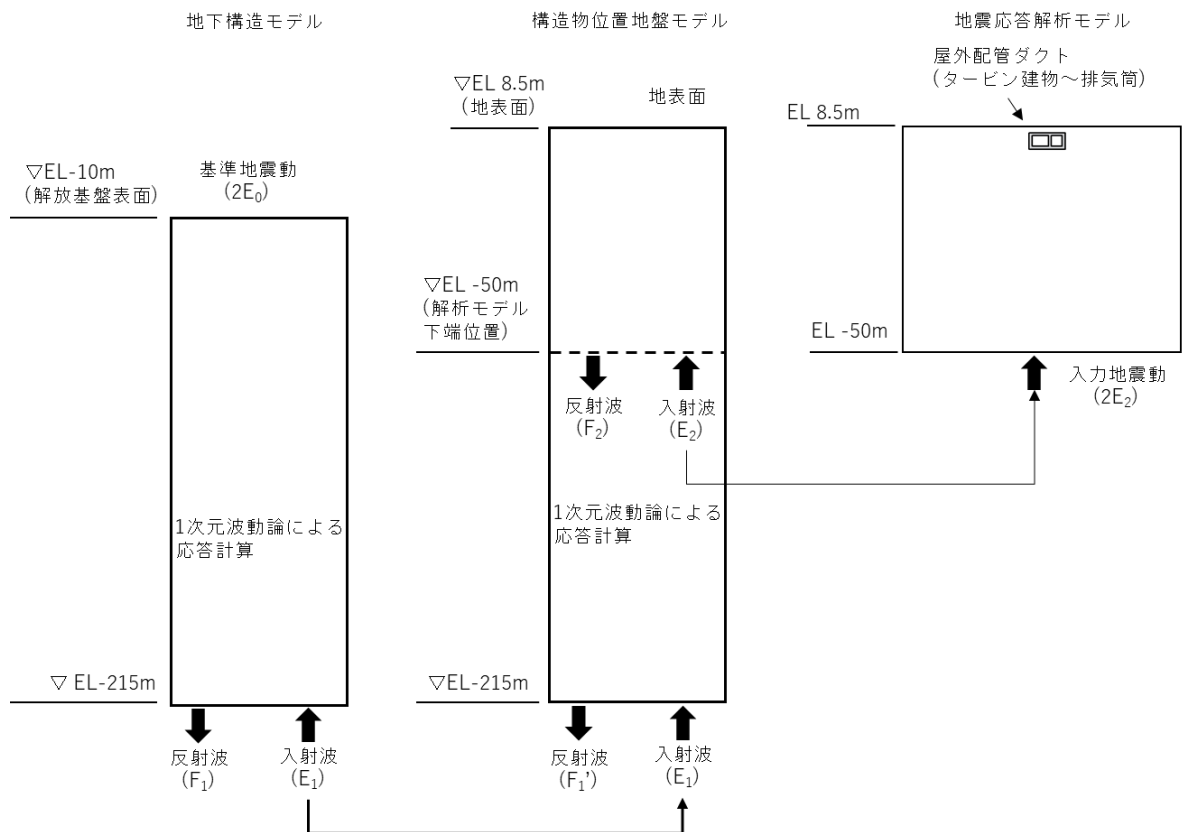
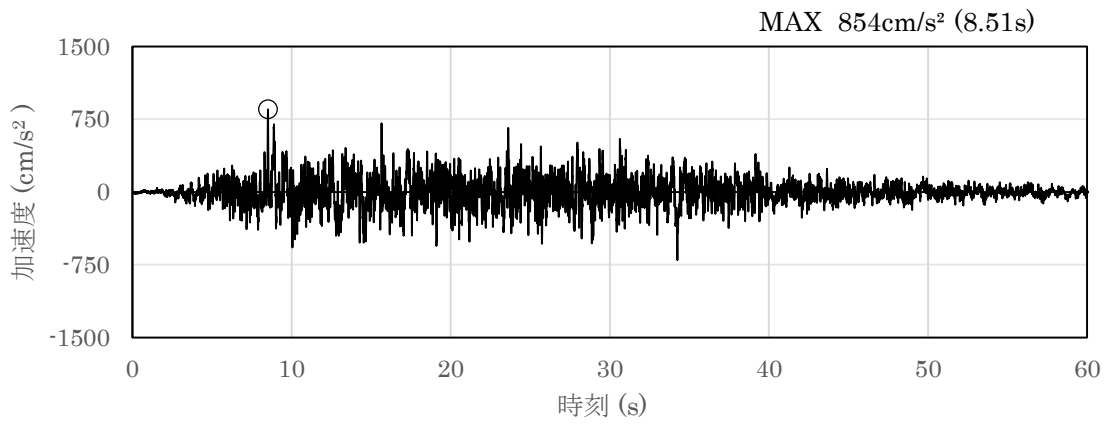
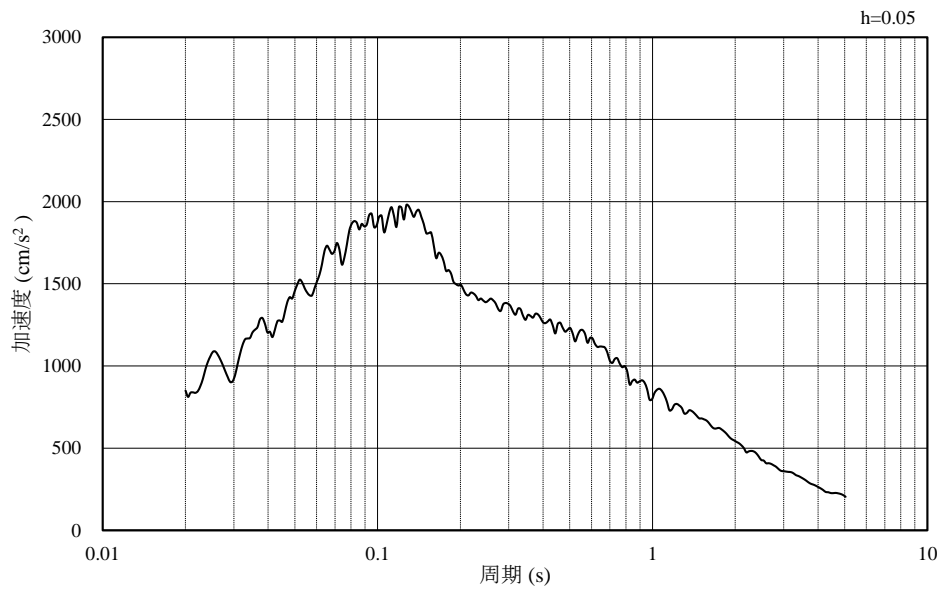


図 4-1 入力地震動算定の概念図

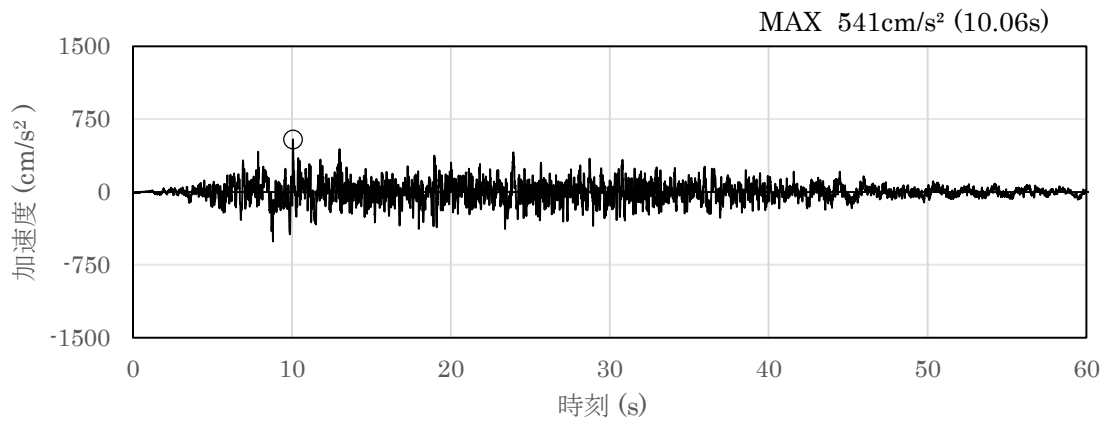


(a) 加速度時刻歴波形

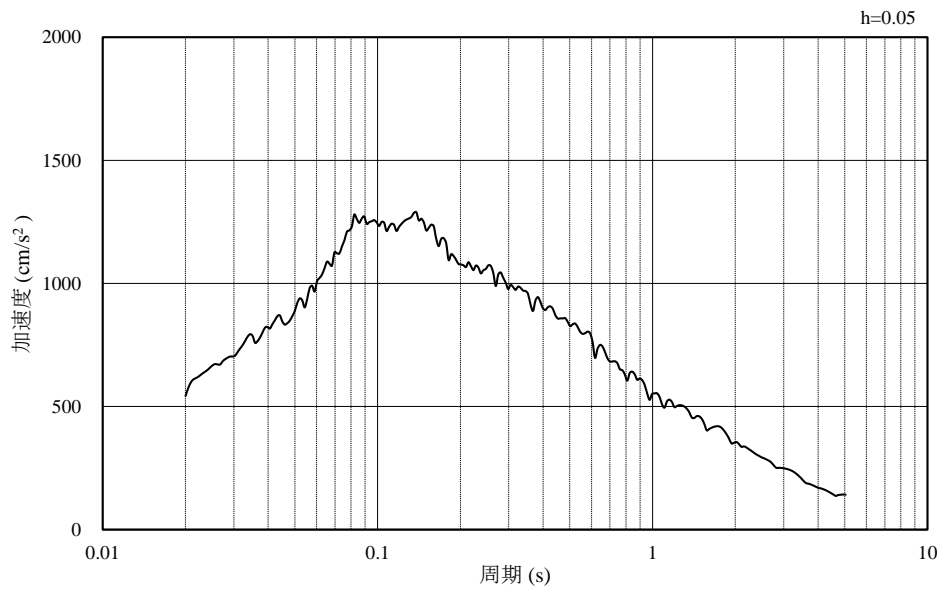


(b) 加速度応答スペクトル

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)

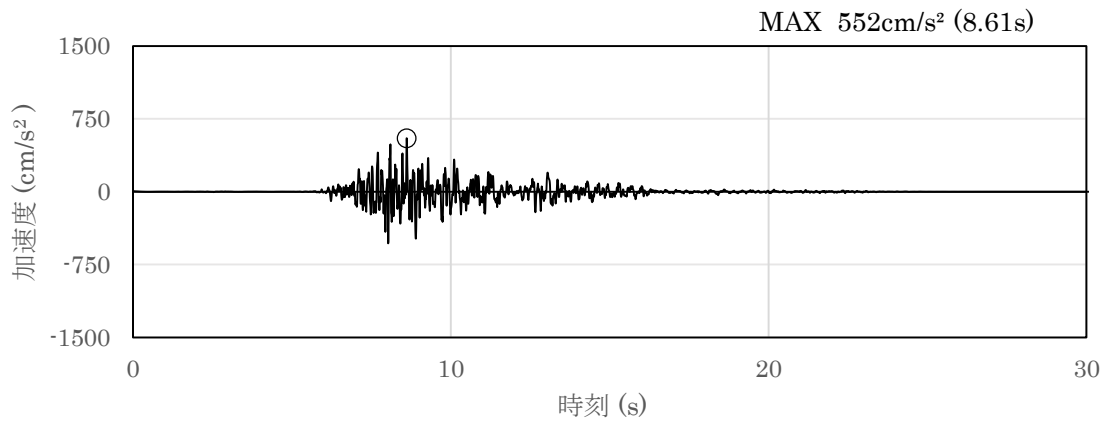


(a) 加速度時刻歴波形

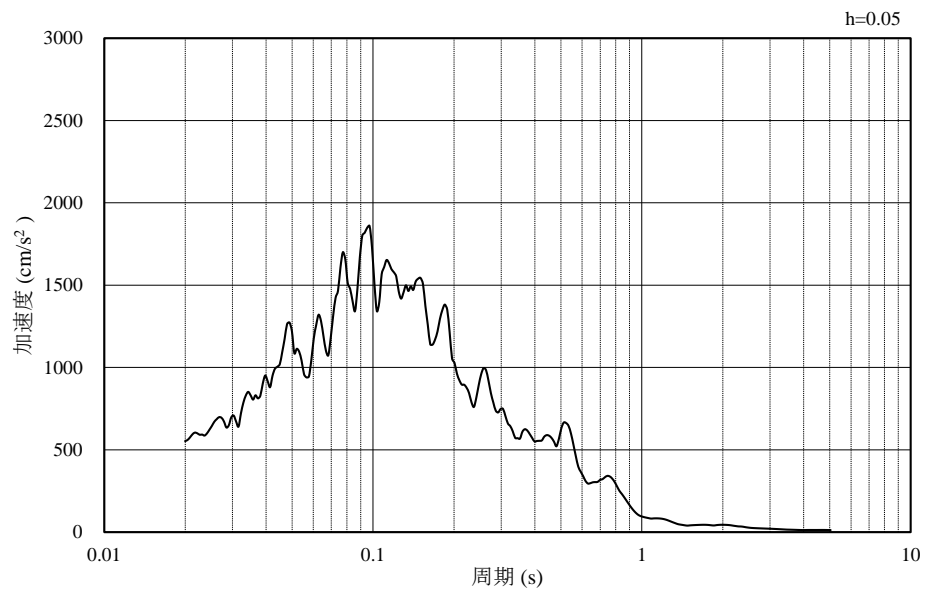


(b) 加速度応答スペクトル

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)

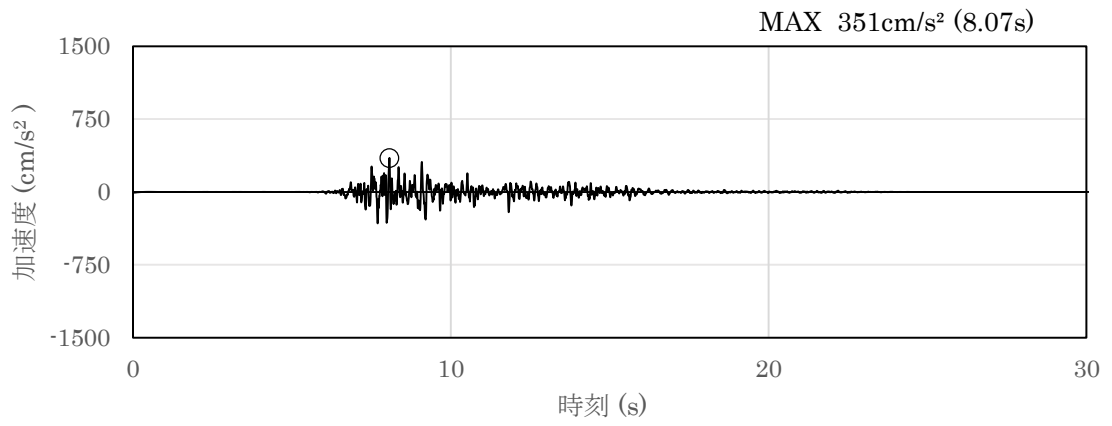


(a) 加速度時刻歴波形

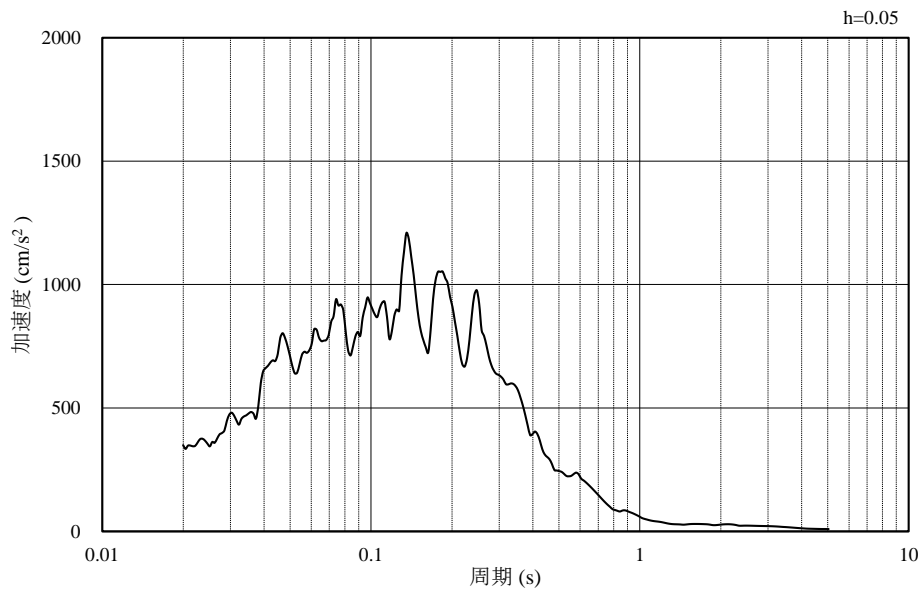


(b) 加速度応答スペクトル

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)

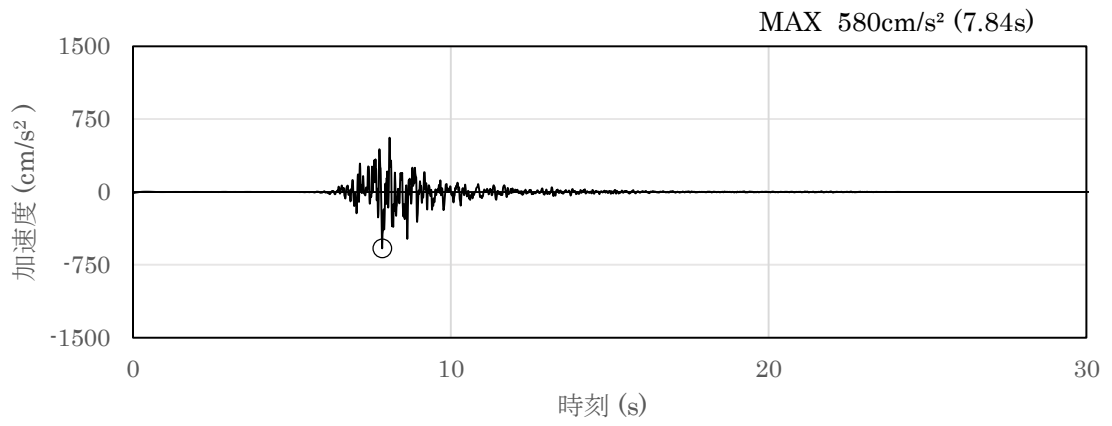


(a) 加速度時刻歴波形

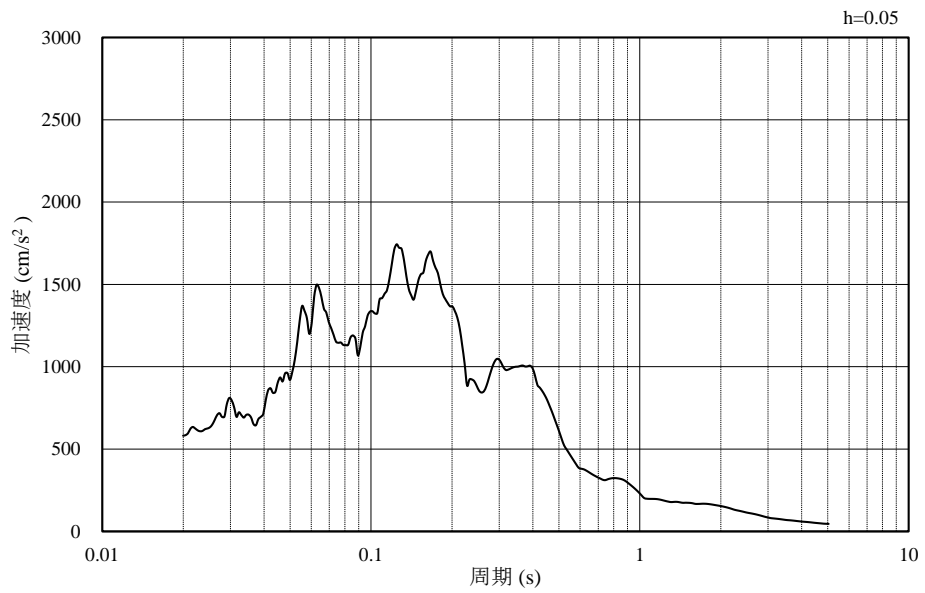


(b) 加速度応答スペクトル

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)

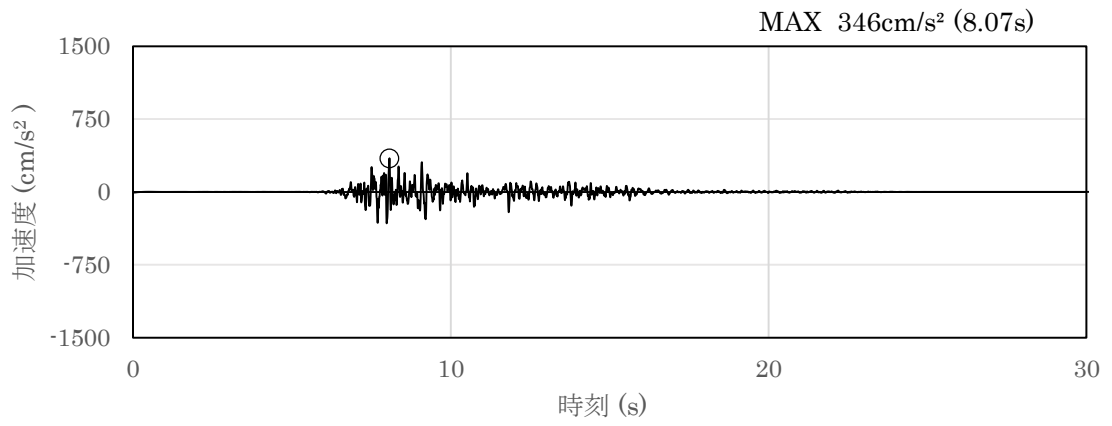


(a) 加速度時刻歴波形

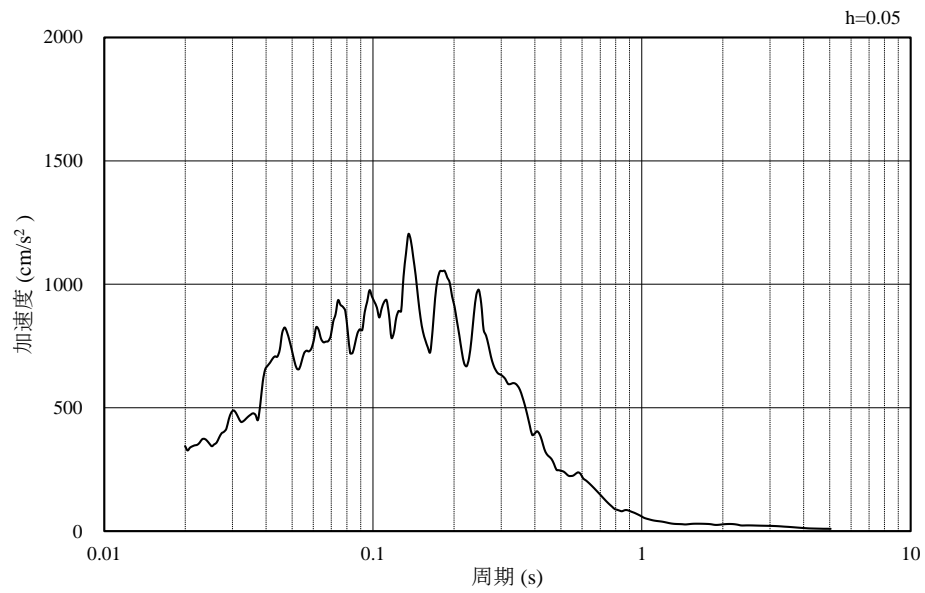


(b) 加速度応答スペクトル

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)

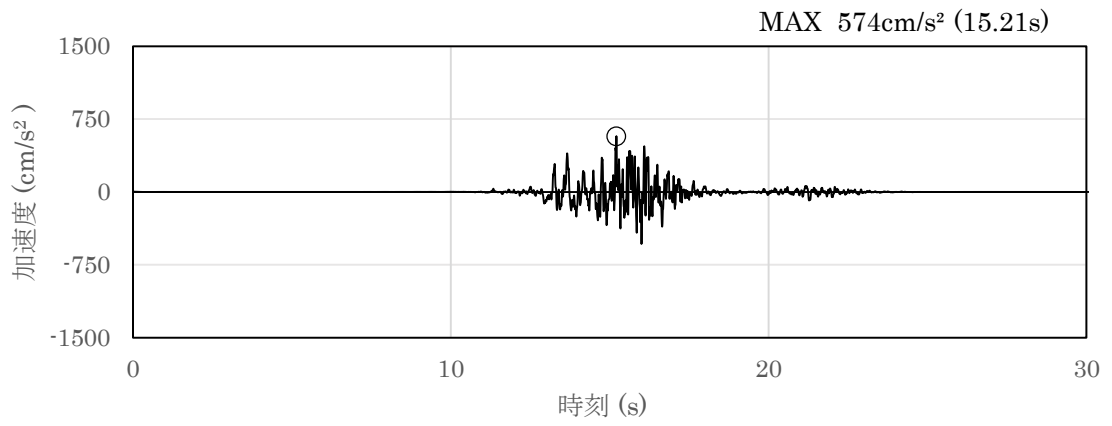


(a) 加速度時刻歴波形

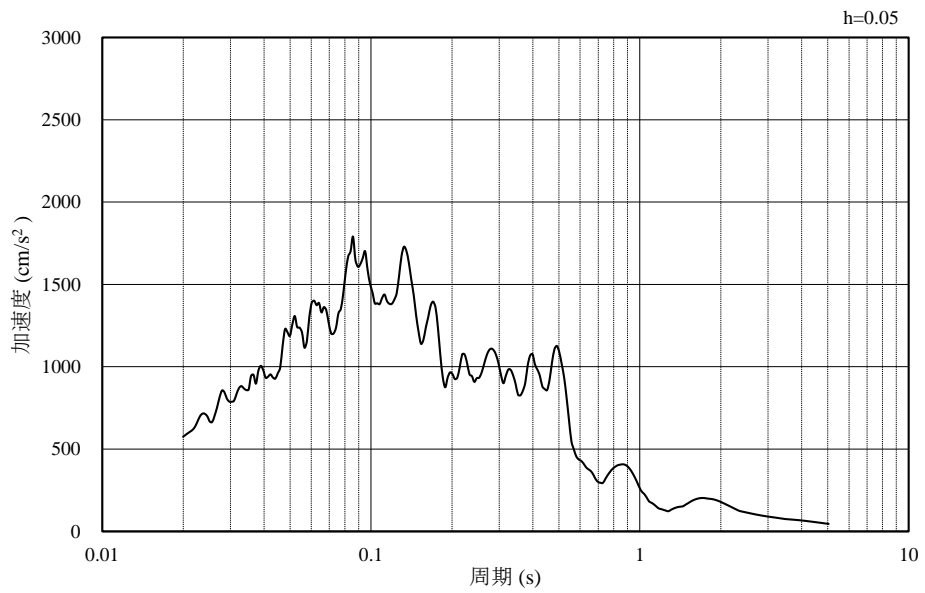


(b) 加速度応答スペクトル

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)

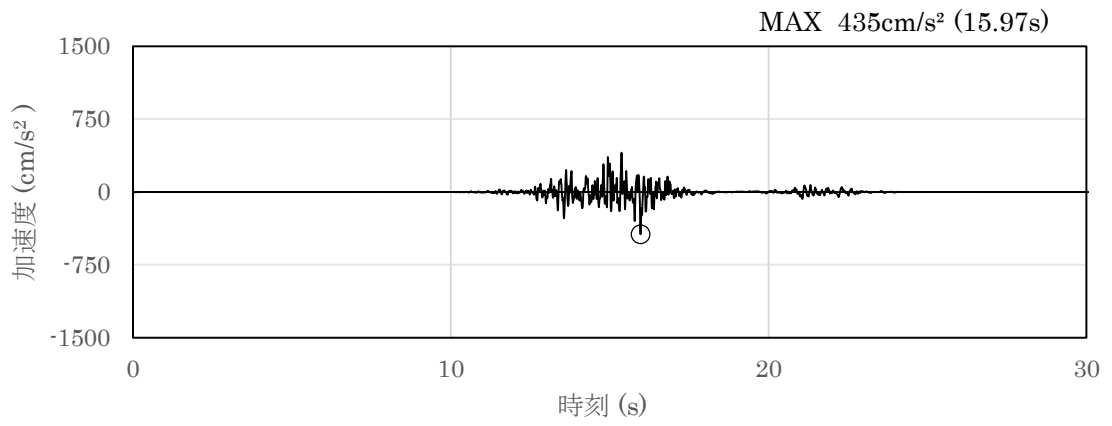


(a) 加速度時刻歴波形

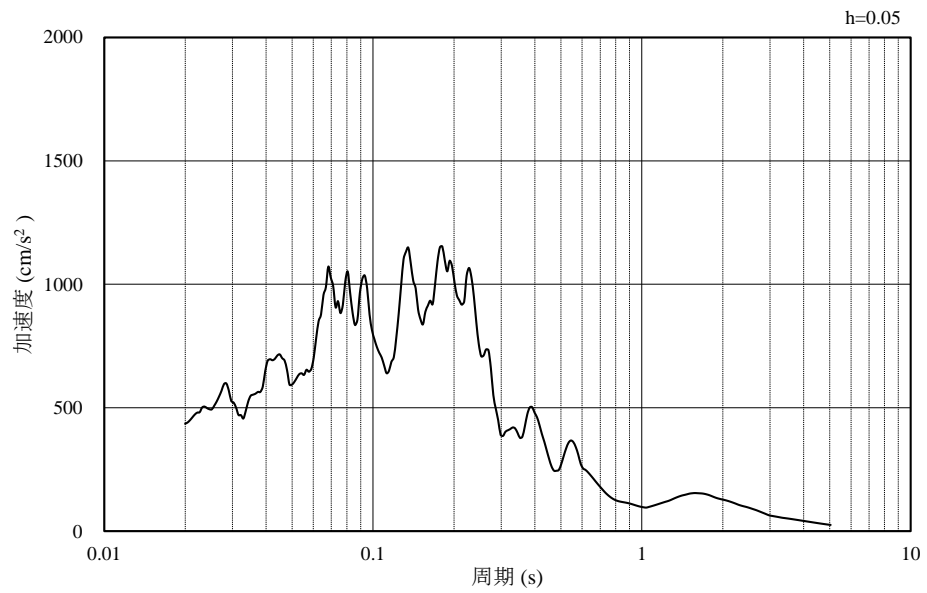


(b) 加速度応答スペクトル

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)

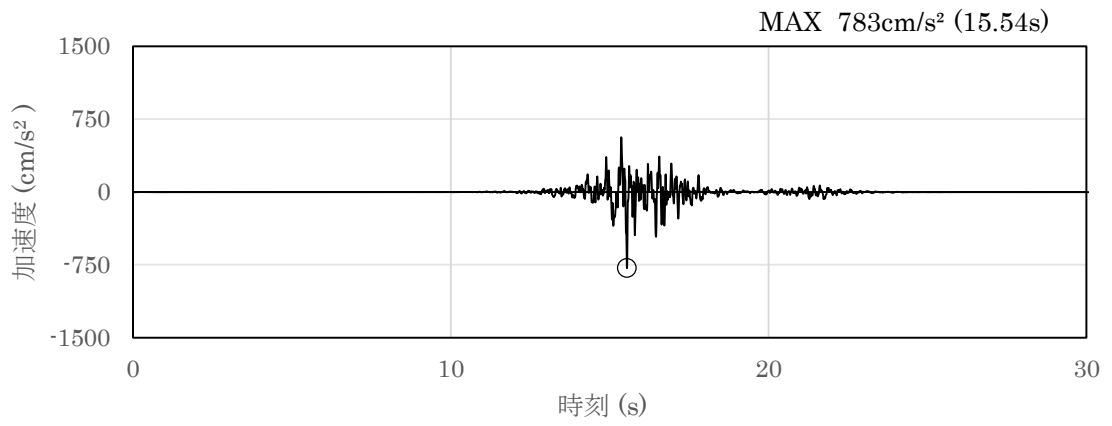


(a) 加速度時刻歴波形

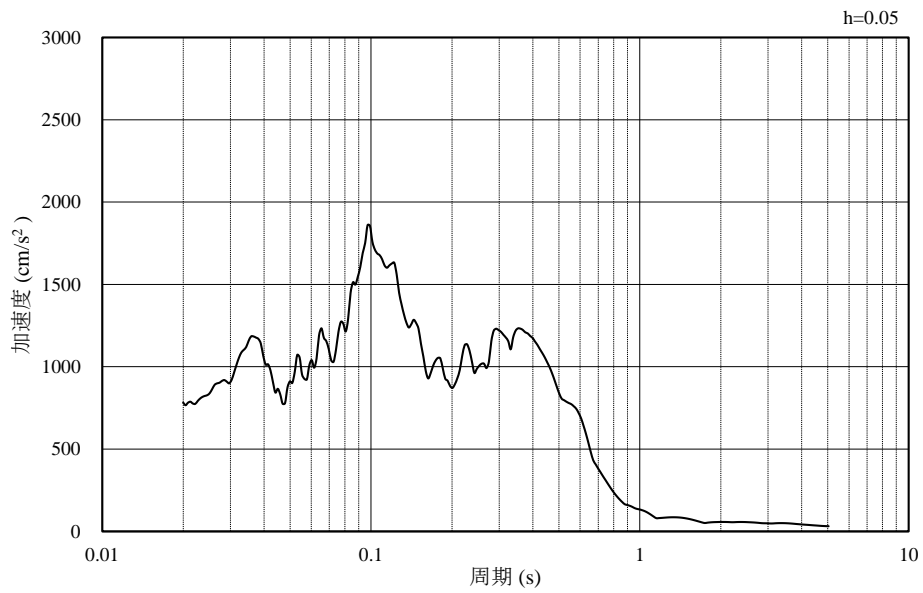


(b) 加速度応答スペクトル

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)

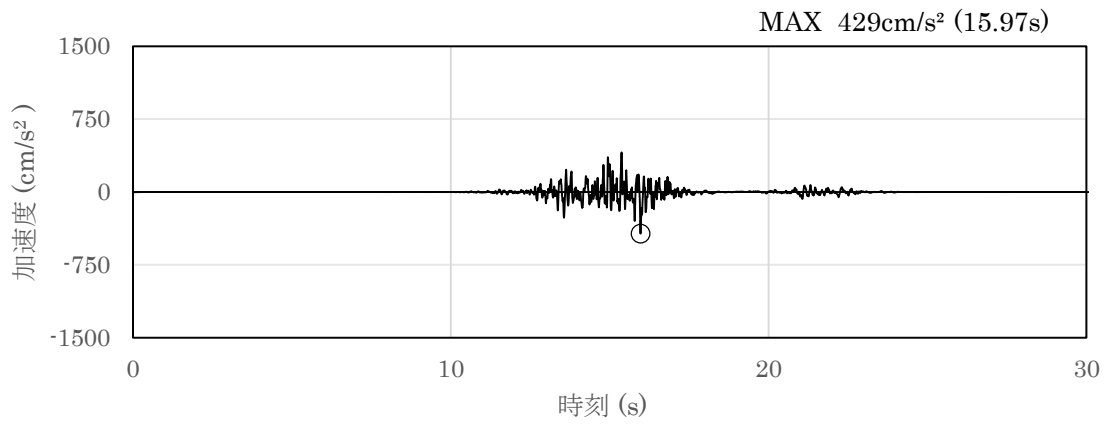


(a) 加速度時刻歴波形

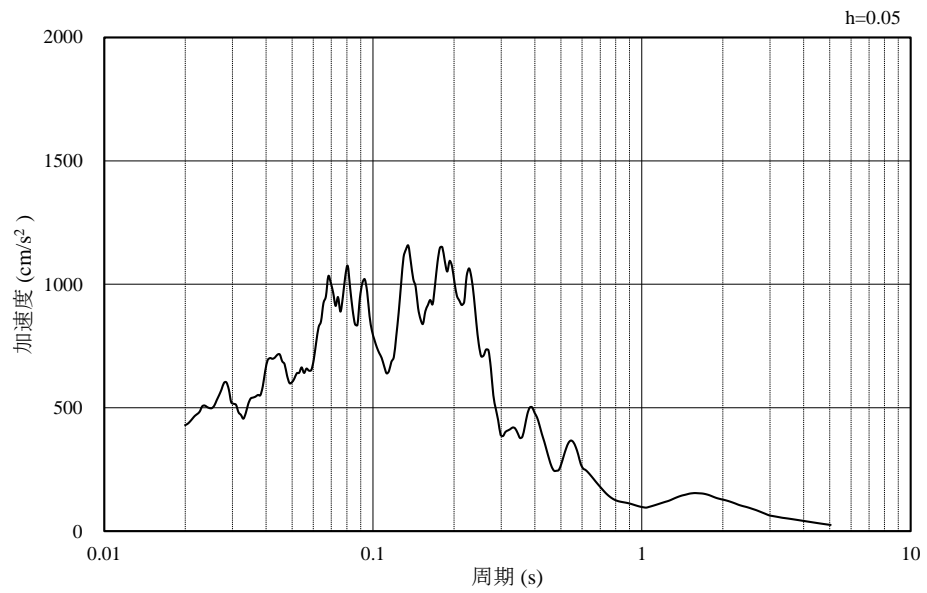


(b) 加速度応答スペクトル

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)

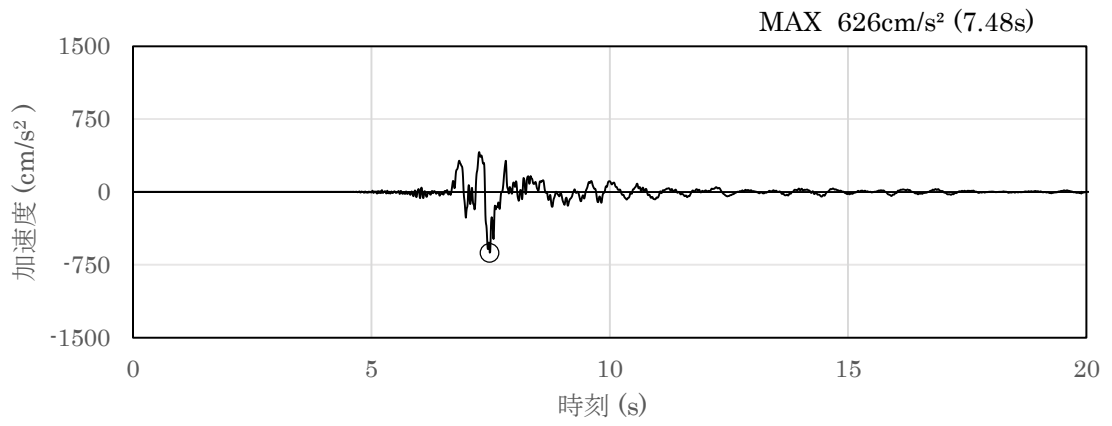


(a) 加速度時刻歴波形

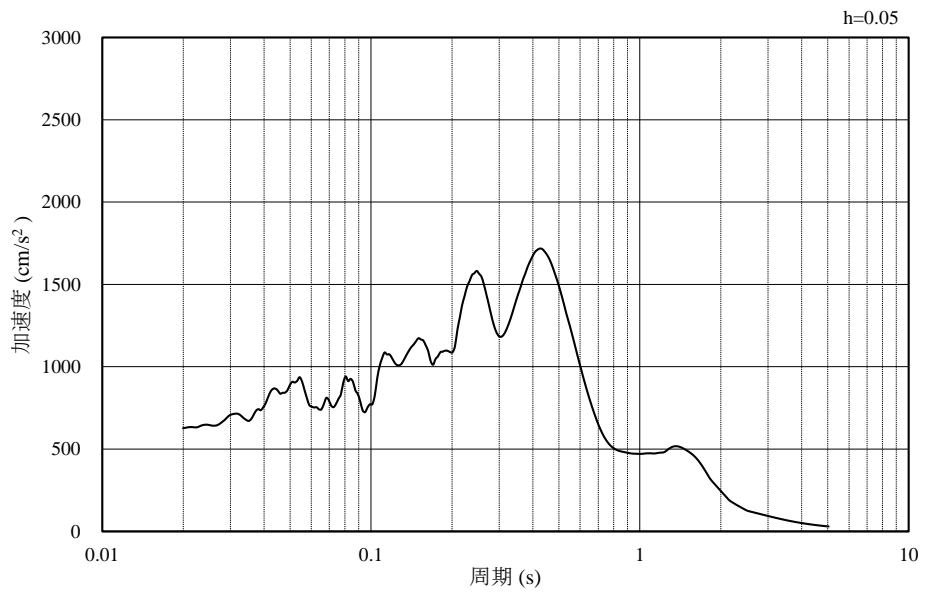


(b) 加速度応答スペクトル

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)

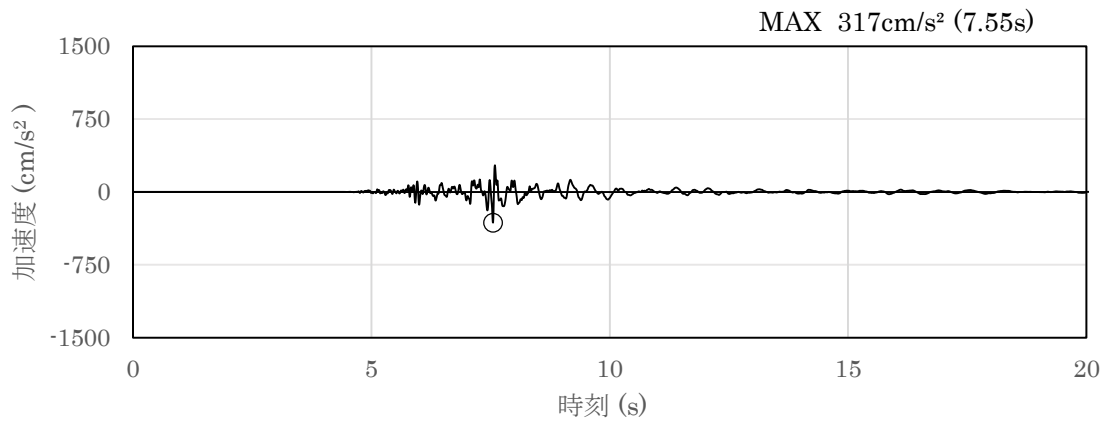


(a) 加速度時刻歴波形

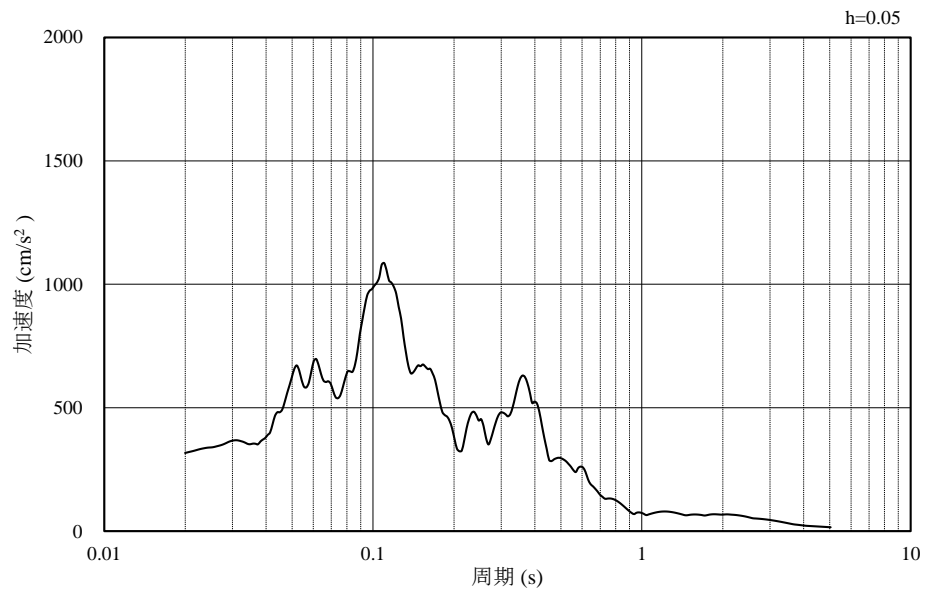


(b) 加速度応答スペクトル

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)

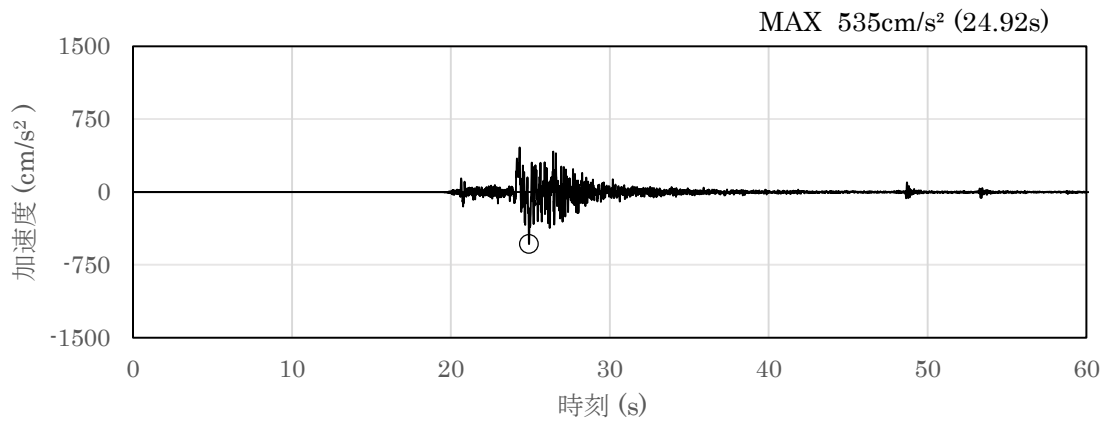


(a) 加速度時刻歴波形

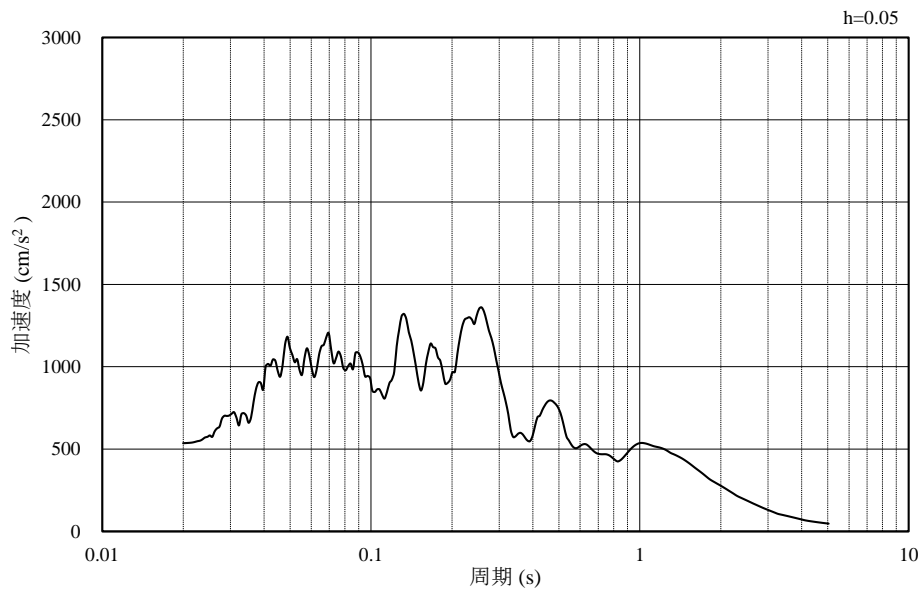


(b) 加速度応答スペクトル

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)

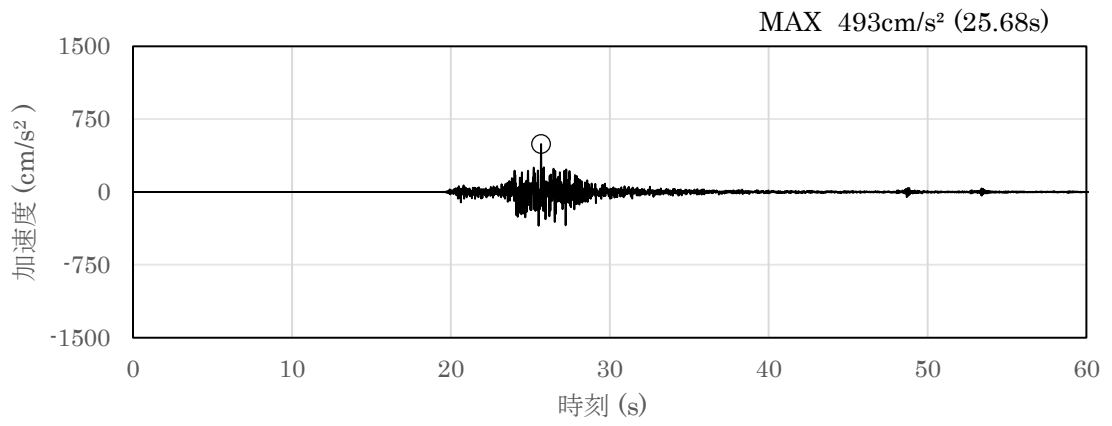


(a) 加速度時刻歴波形

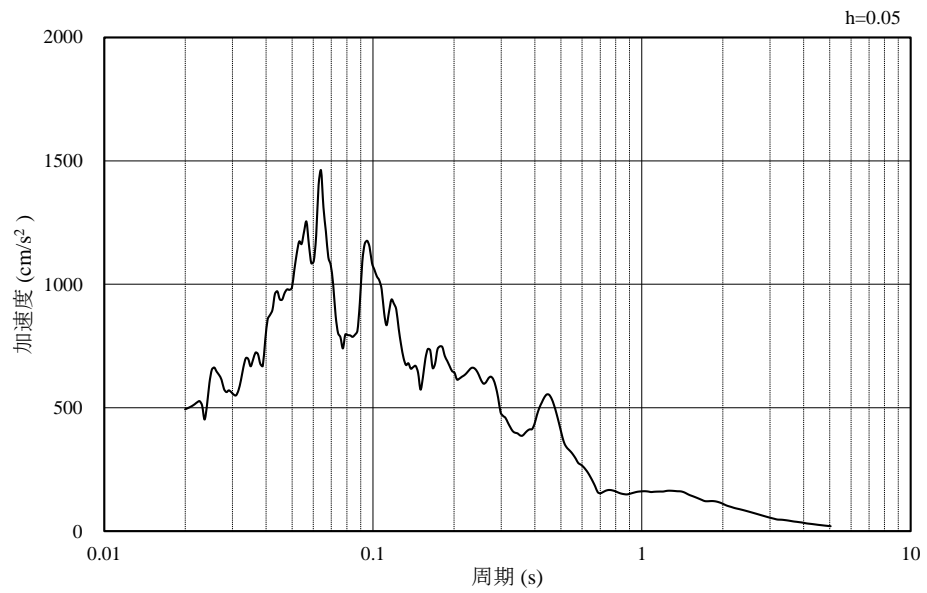


(b) 加速度応答スペクトル

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)

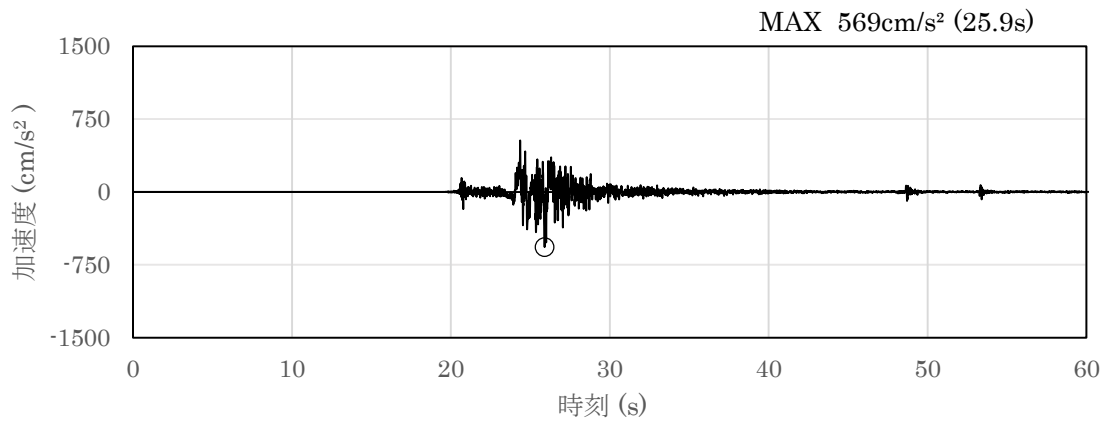


(a) 加速度時刻歴波形

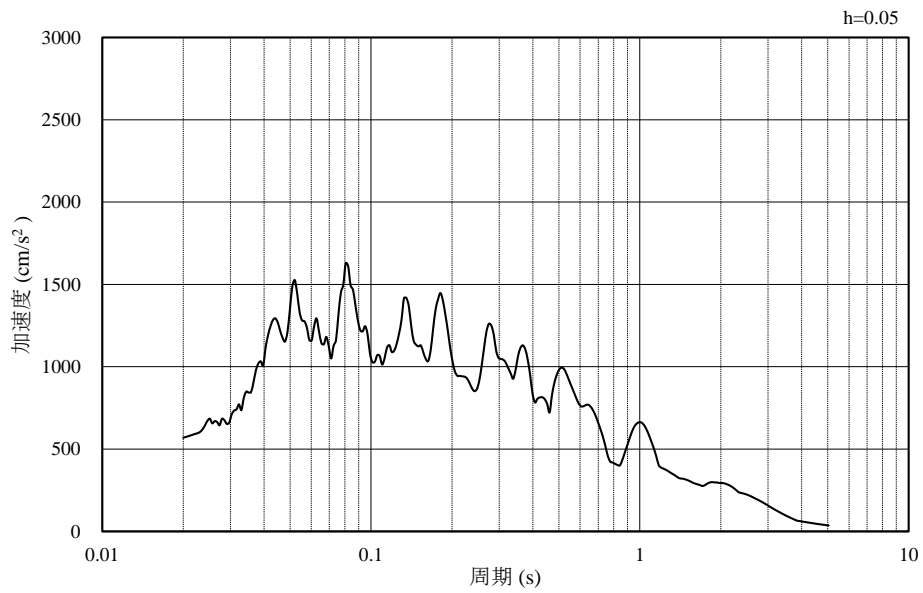


(b) 加速度応答スペクトル

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)

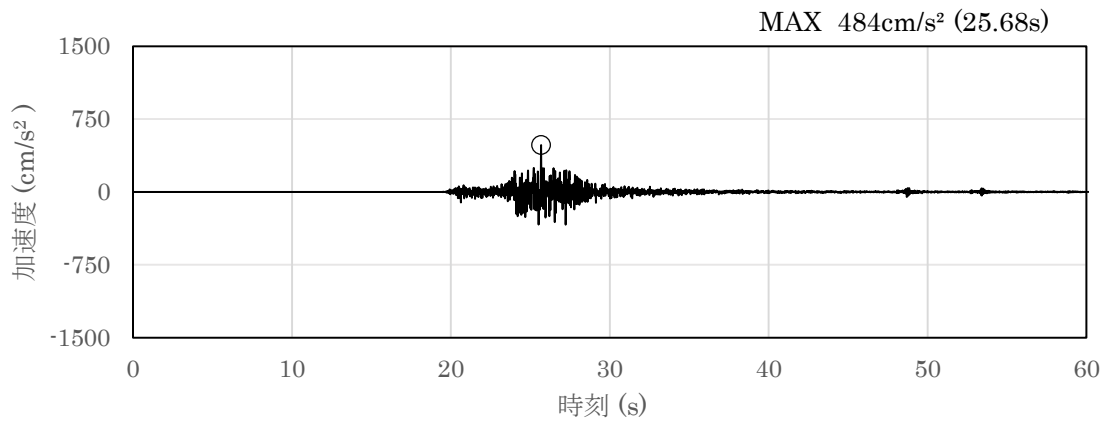


(a) 加速度時刻歴波形

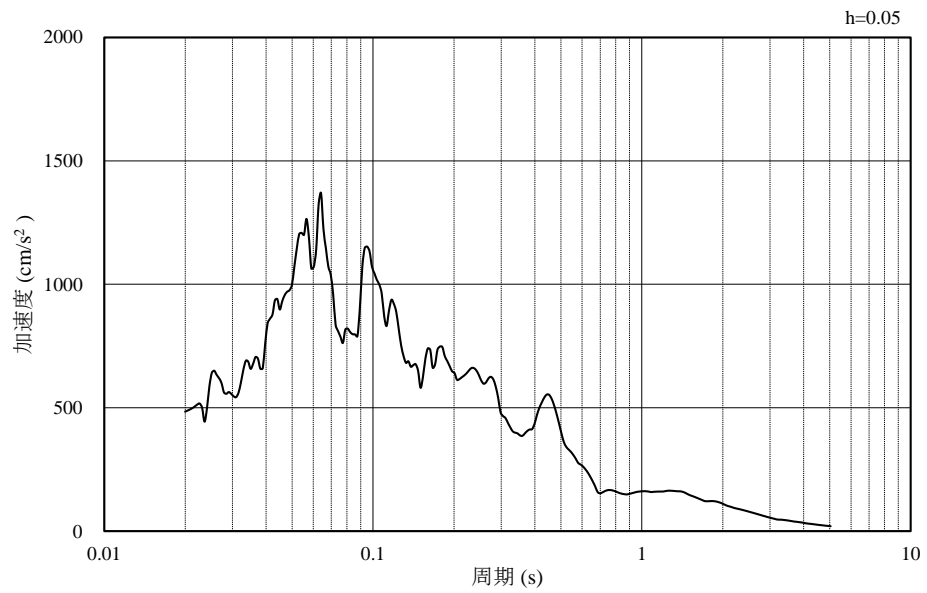


(b) 加速度応答スペクトル

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 - N 2, E W方向)

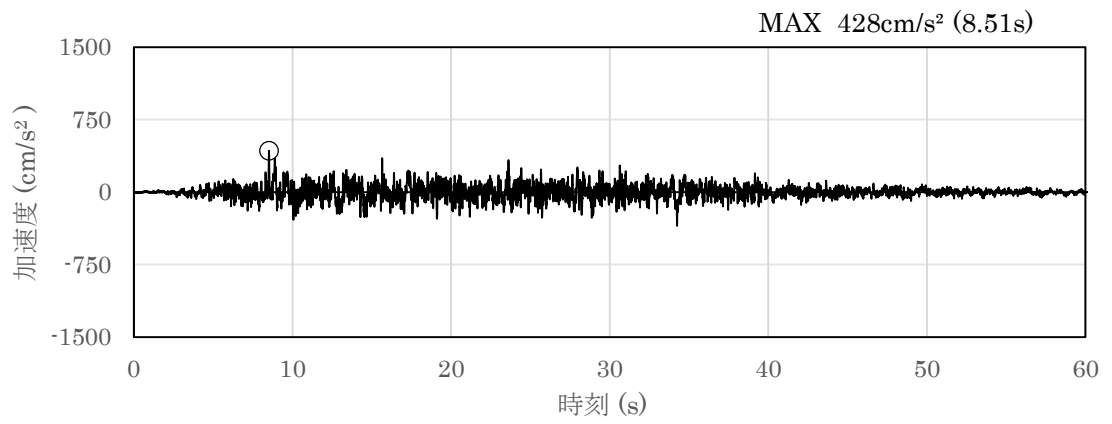


(a) 加速度時刻歴波形

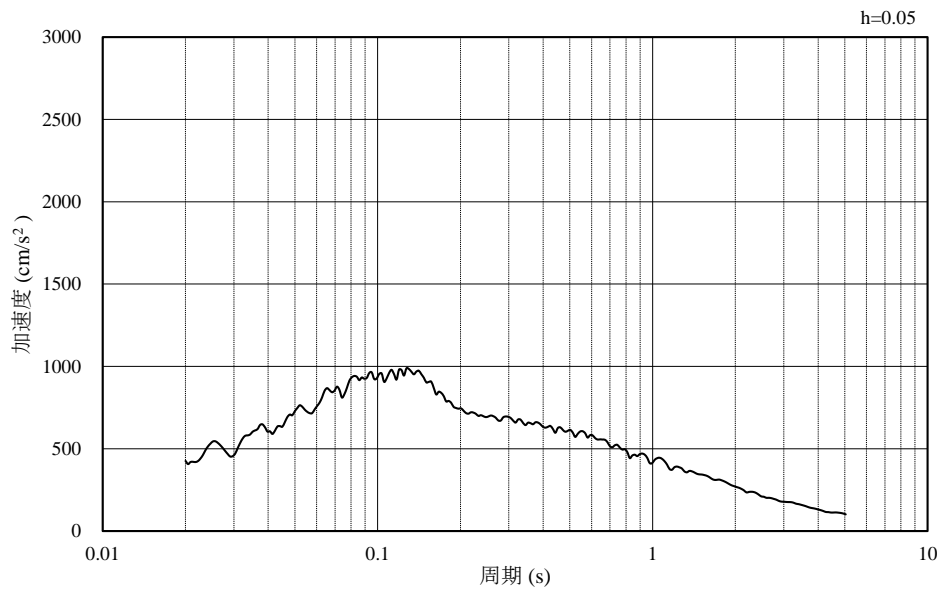


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-17 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)

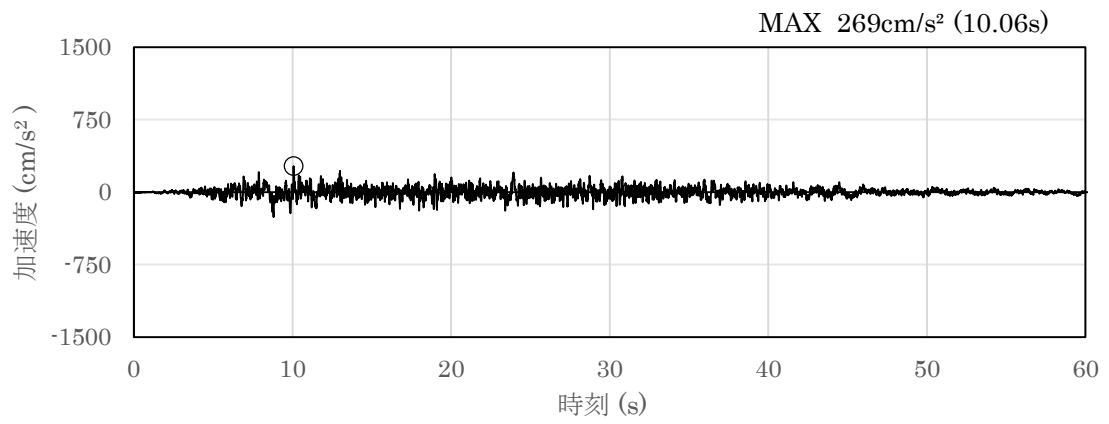


(a) 加速度時刻歴波形

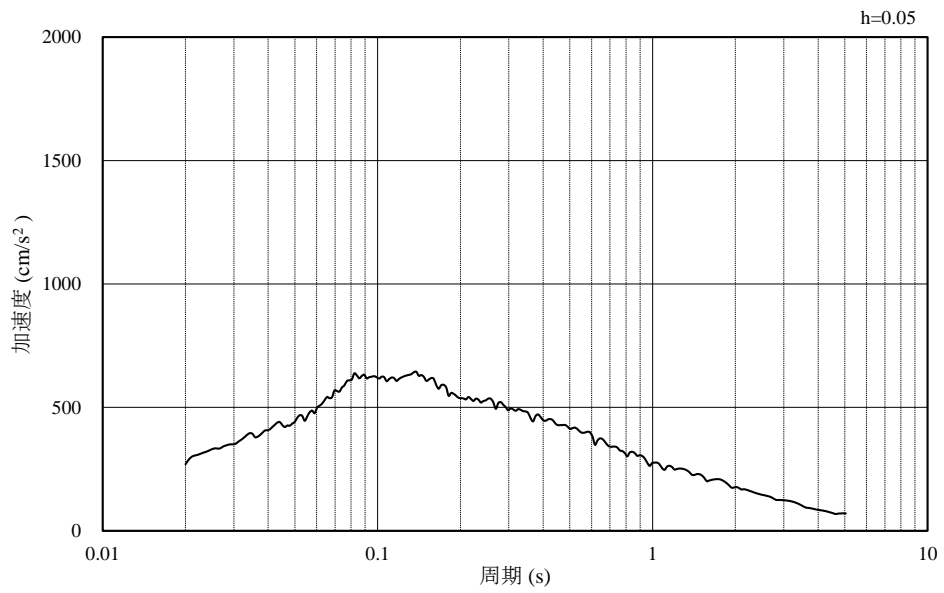


(b) 加速度応答スペクトル

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 d - D)

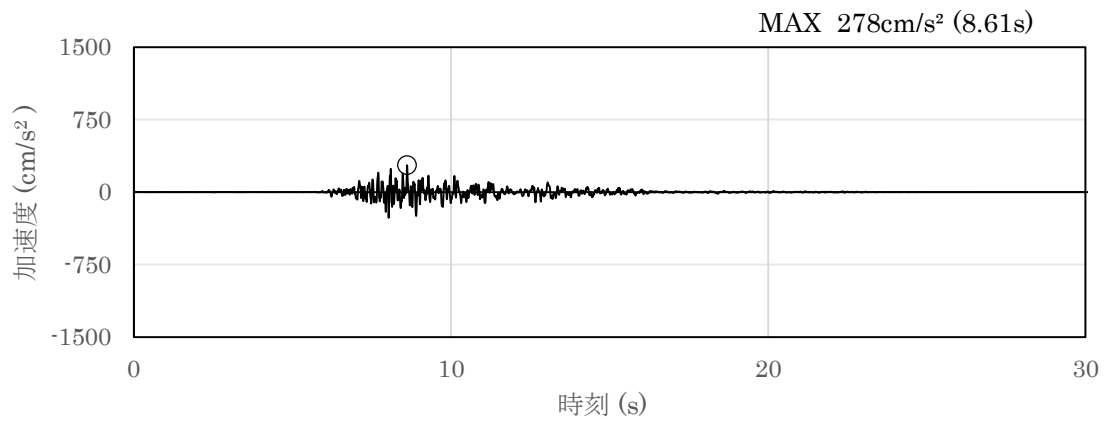


(a) 加速度時刻歴波形

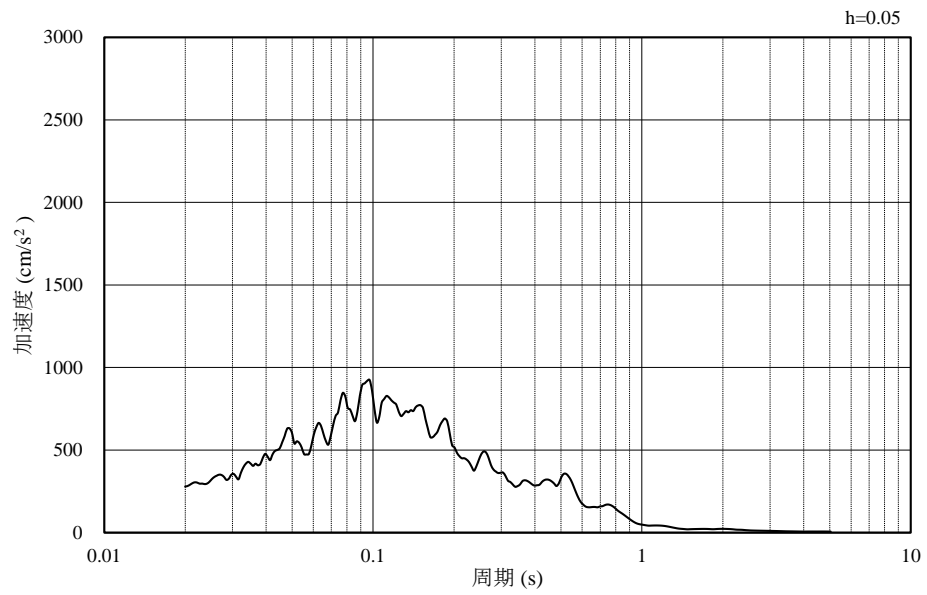


(b) 加速度応答スペクトル

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 d - D)

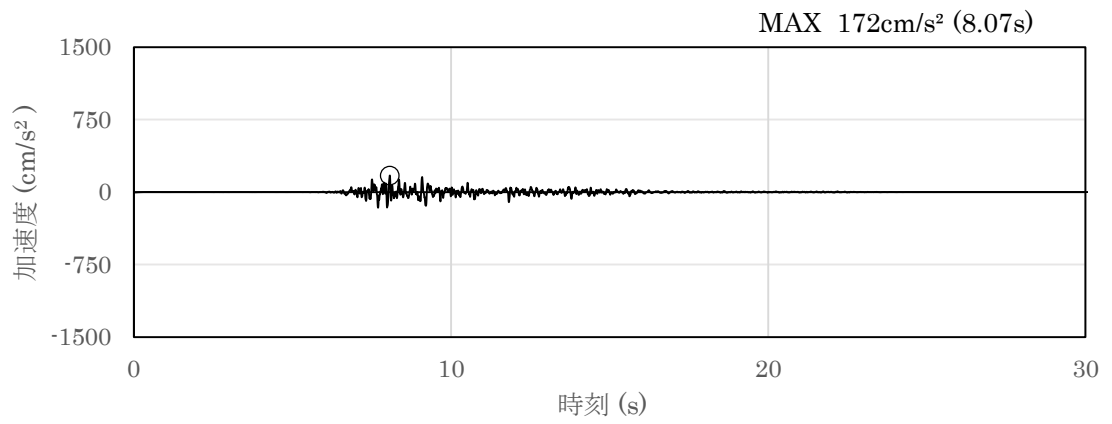


(a) 加速度時刻歴波形

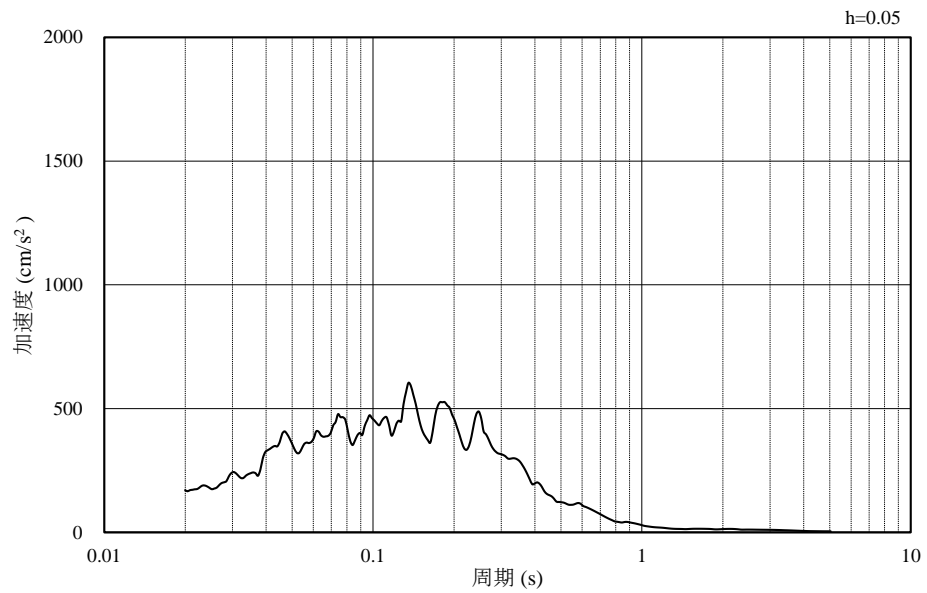


(b) 加速度応答スペクトル

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 d - F 1, N S 方向)

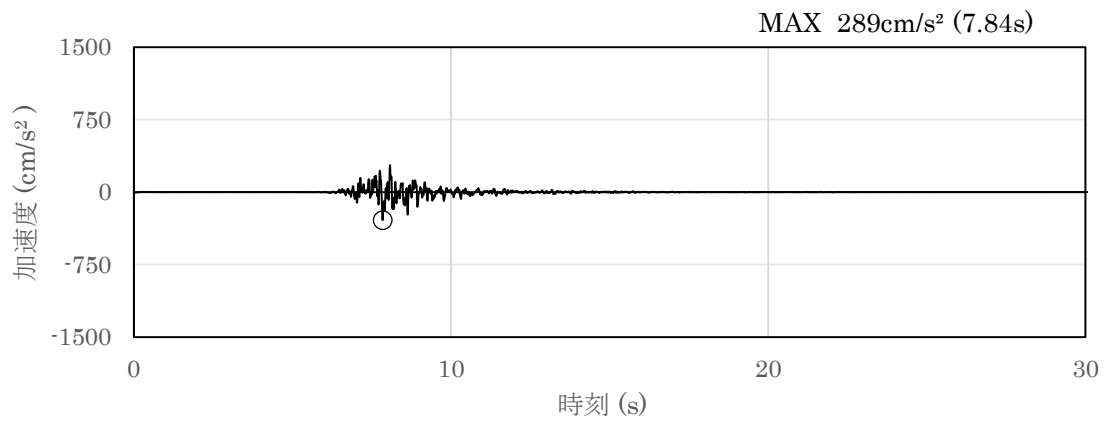


(a) 加速度時刻歴波形

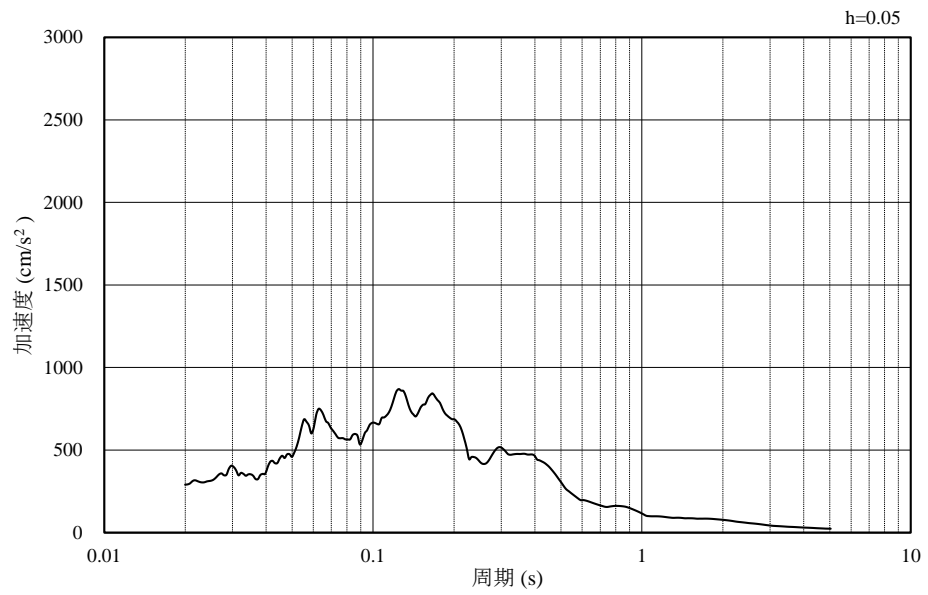


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-21 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 d - F 1, N S 方向)

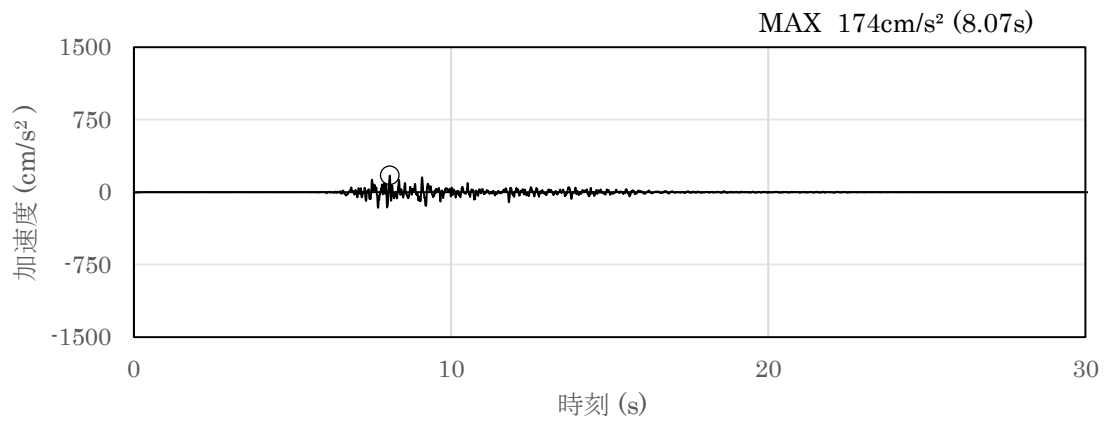


(a) 加速度時刻歴波形

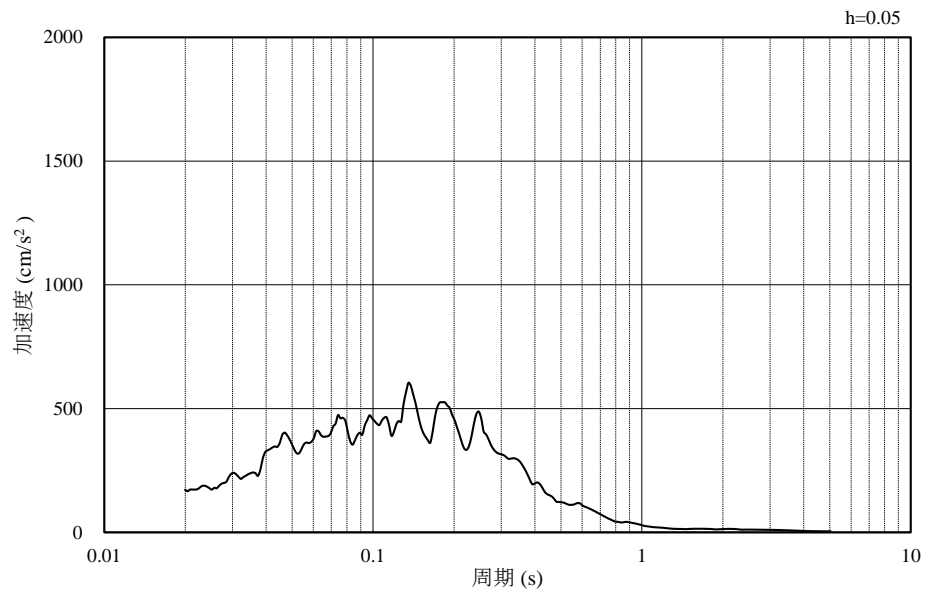


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-22 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 d - F 1, E W方向)

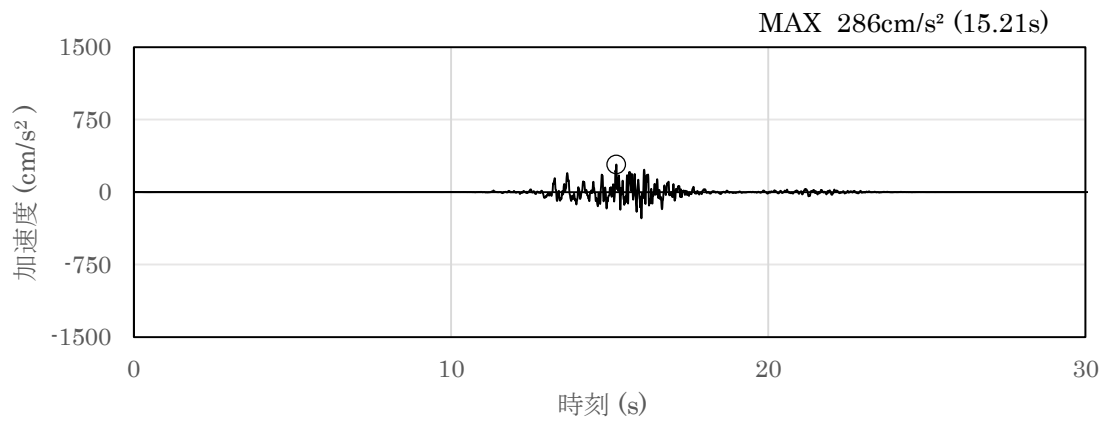


(a) 加速度時刻歴波形

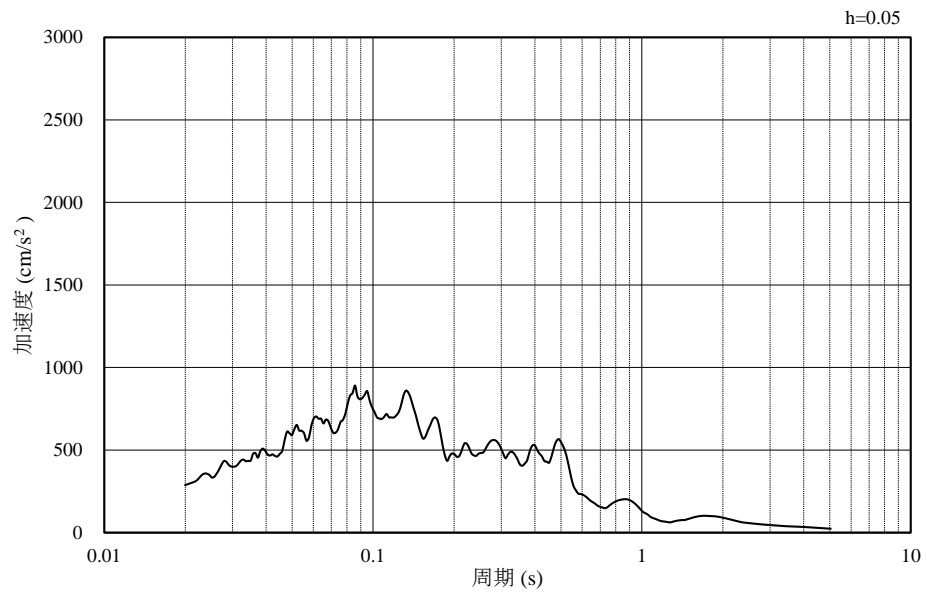


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-23 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 d - F 1, E W方向)

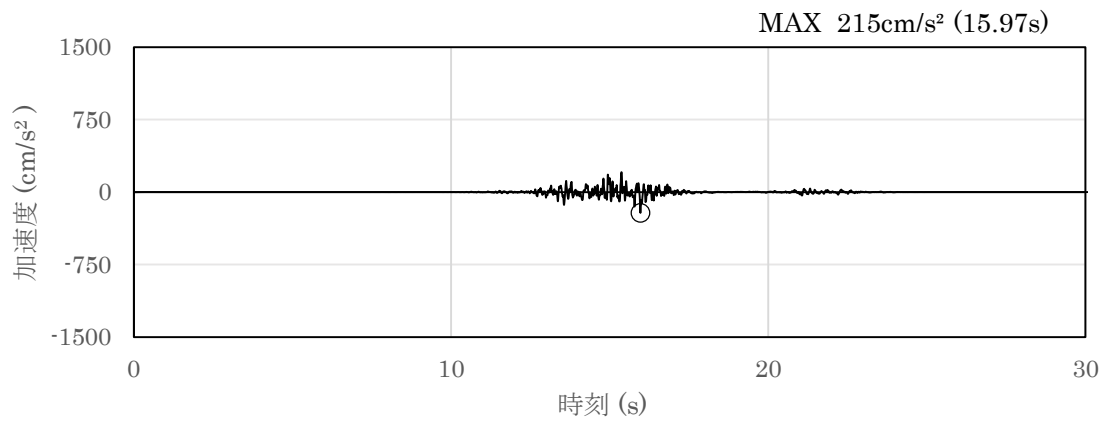


(a) 加速度時刻歴波形

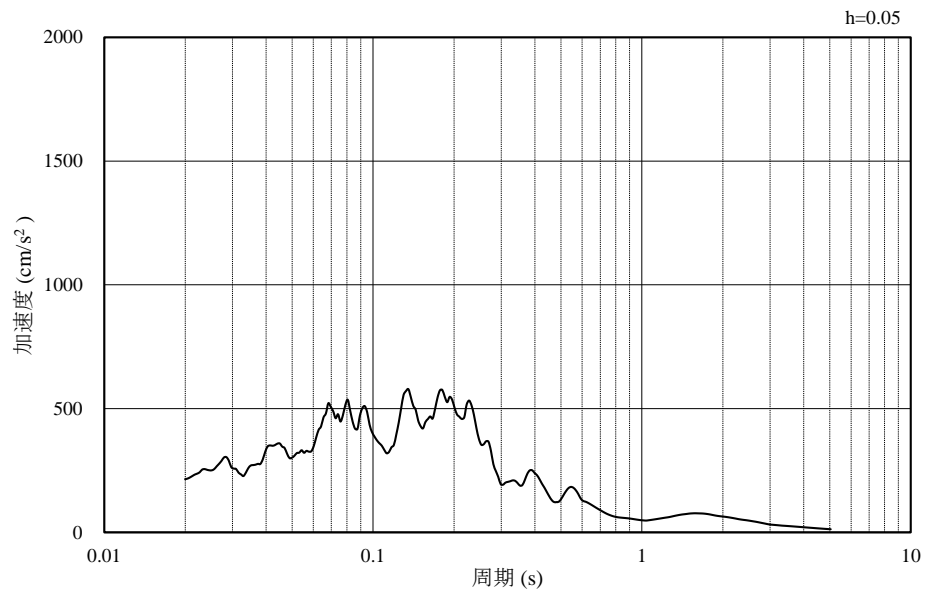


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-24 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 d - F 2, N S 方向)

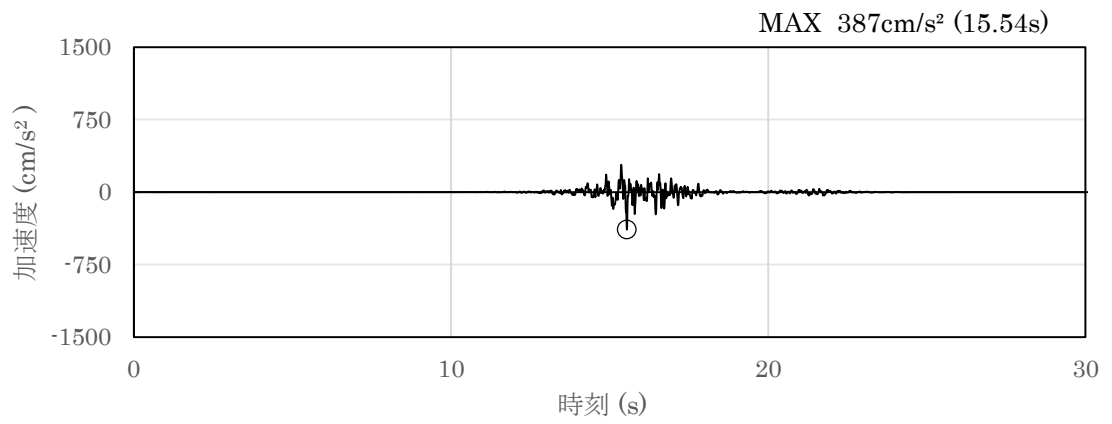


(a) 加速度時刻歴波形

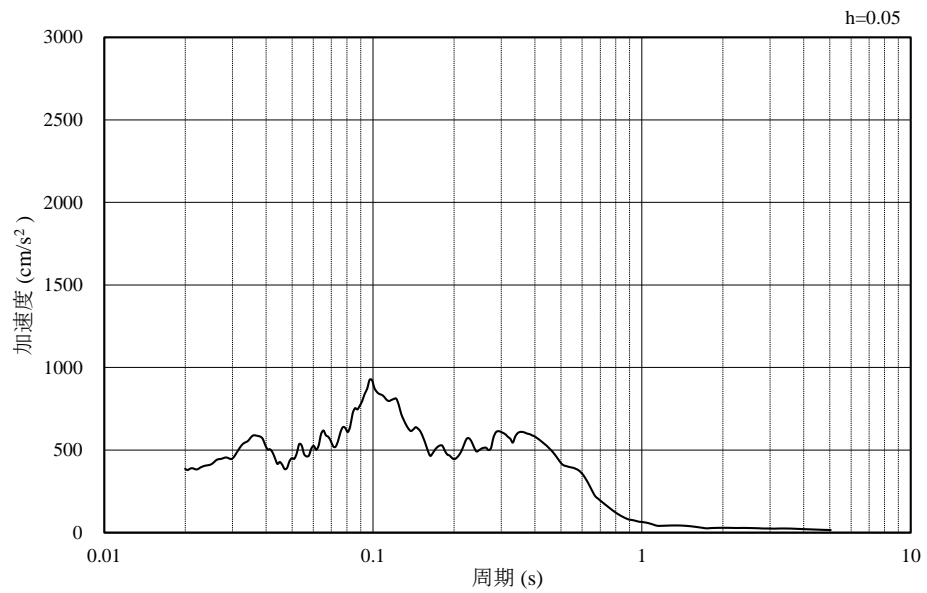


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-25 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 d - F 2, N S 方向)

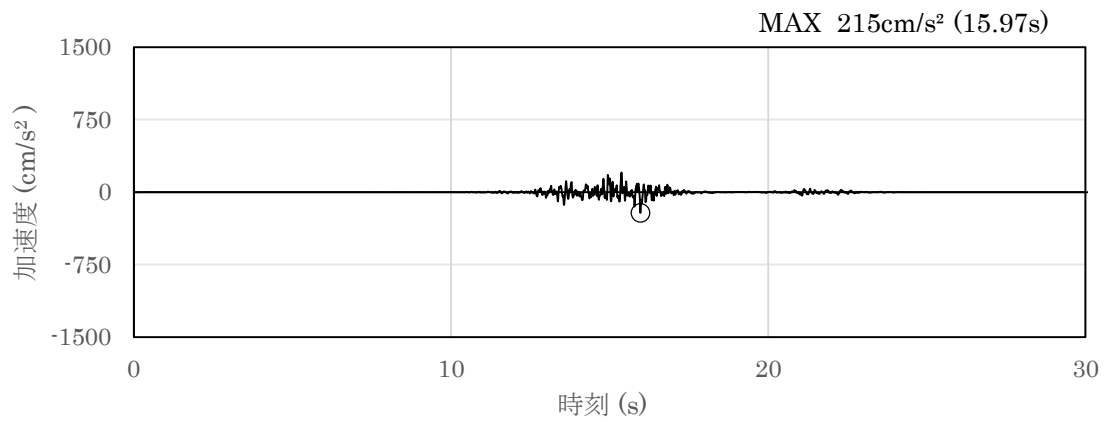


(a) 加速度時刻歴波形

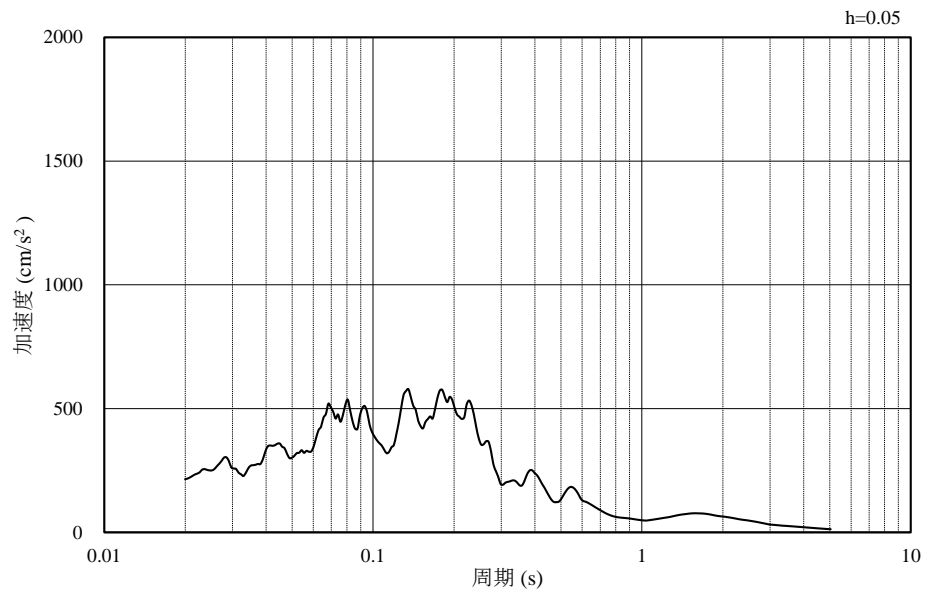


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-26 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 d - F 2, E W方向)

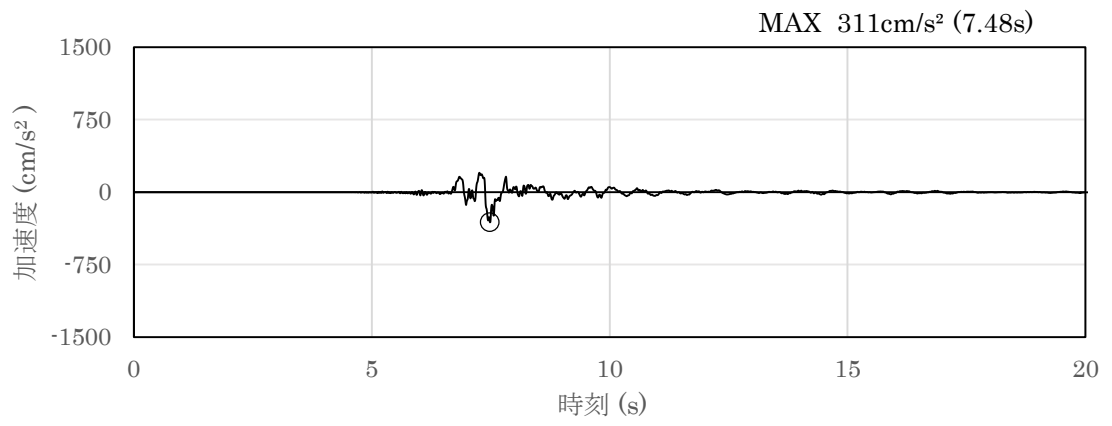


(a) 加速度時刻歴波形

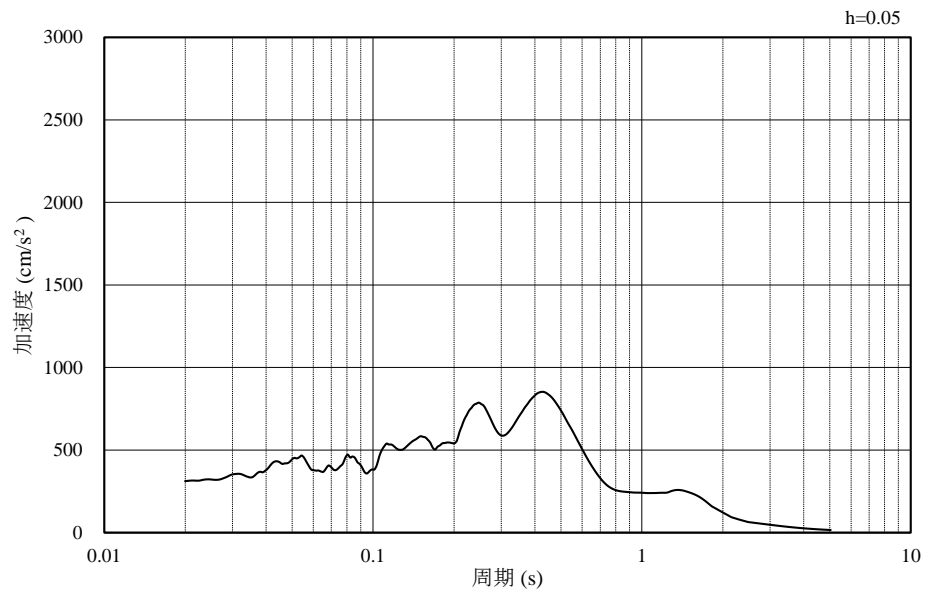


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-27 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
(鉛直成分：S d - F 2, E W方向)

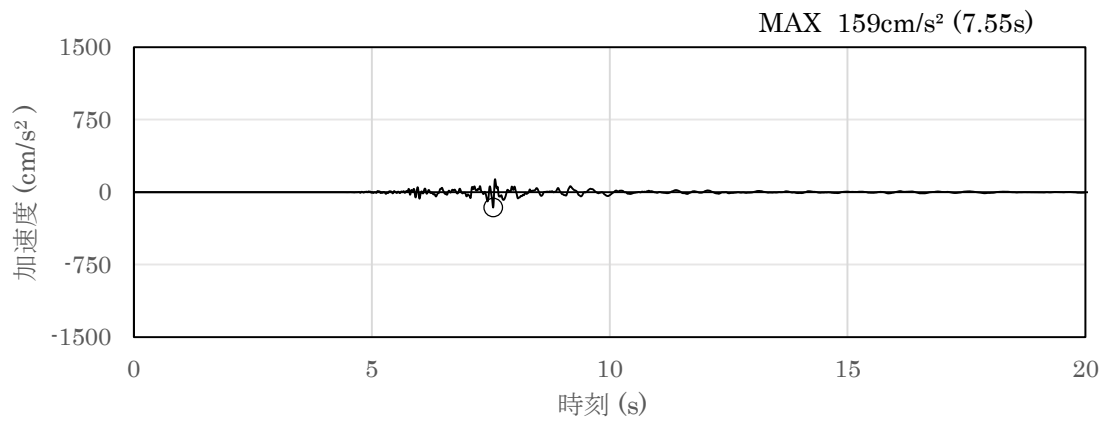


(a) 加速度時刻歴波形

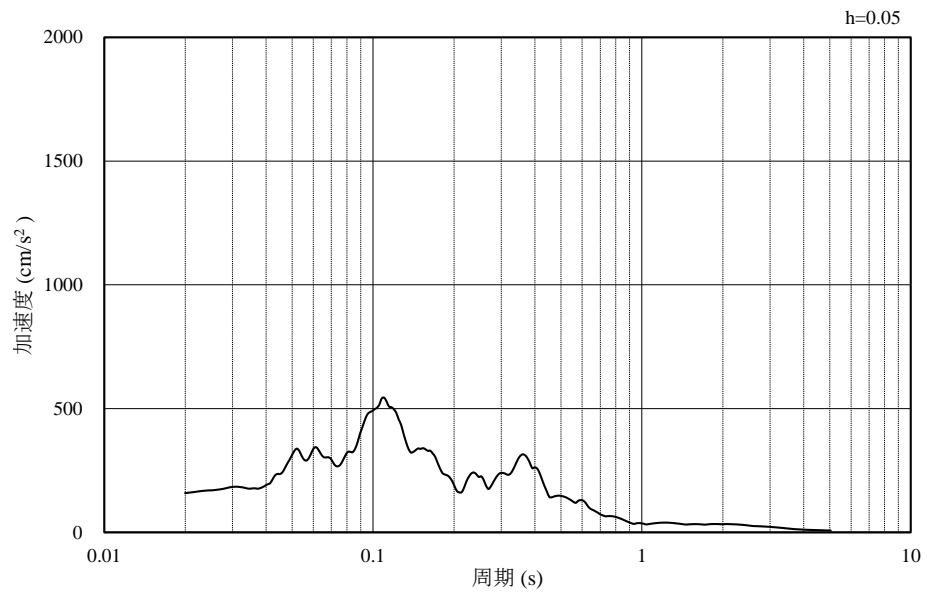


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-28 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
(水平成分 : S d - N 1)

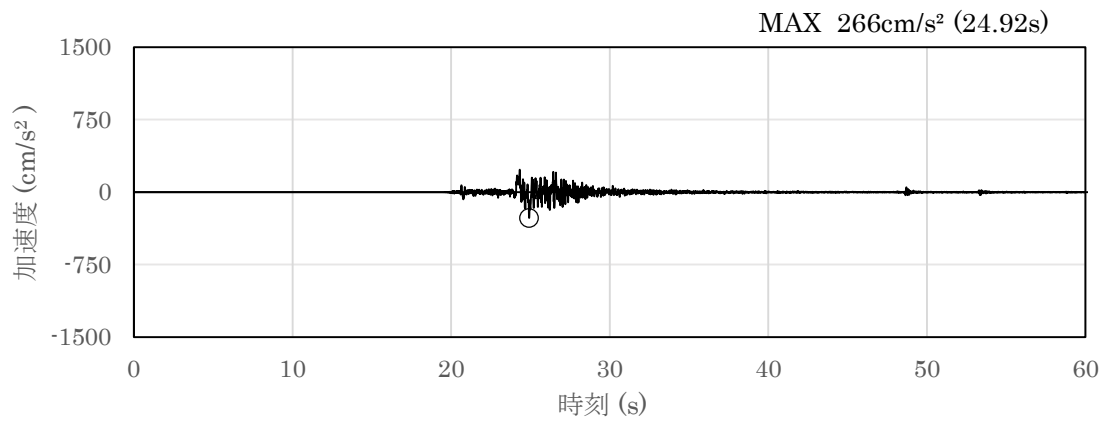


(a) 加速度時刻歴波形

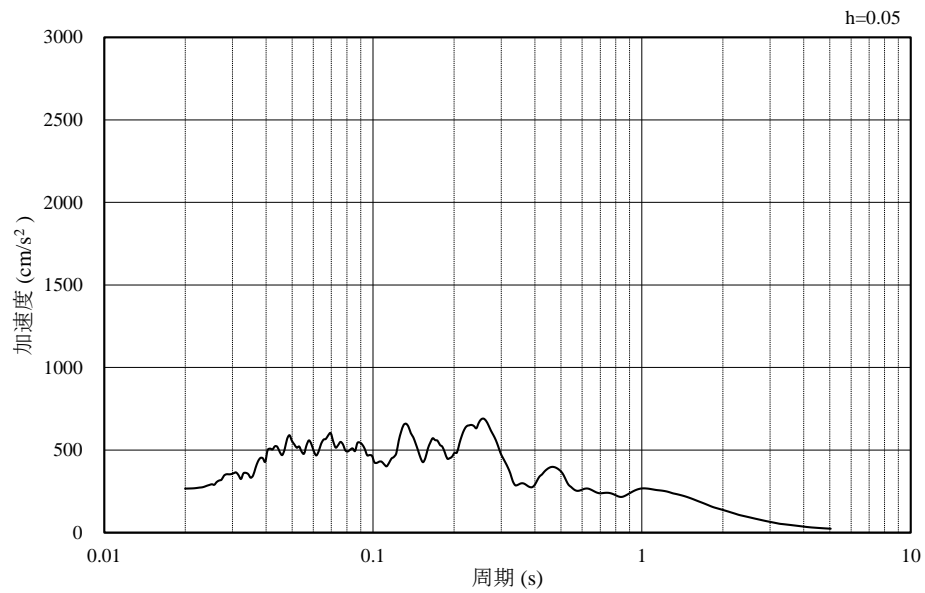


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-29 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
(鉛直成分：S d - N 1)

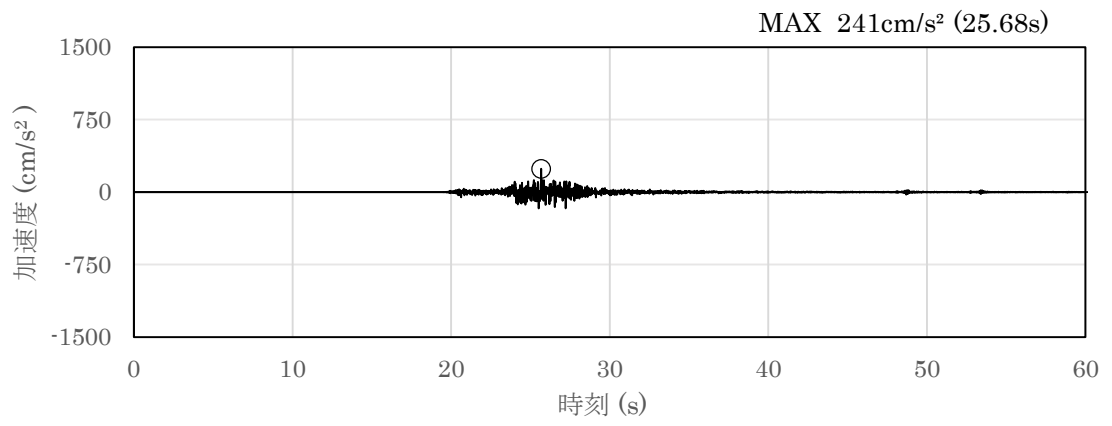


(a) 加速度時刻歴波形

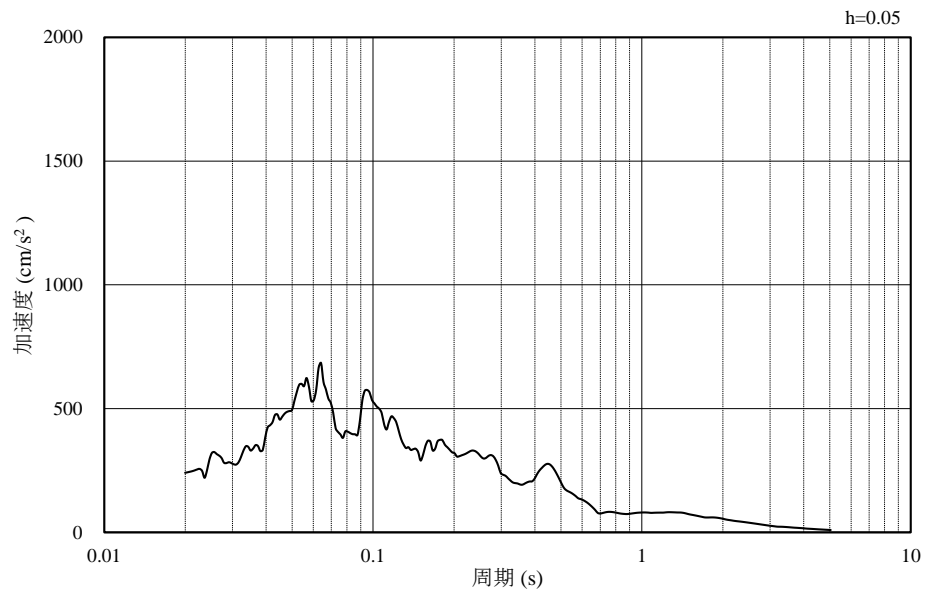


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-30 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
(水平成分：S d - N 2, N S 方向)

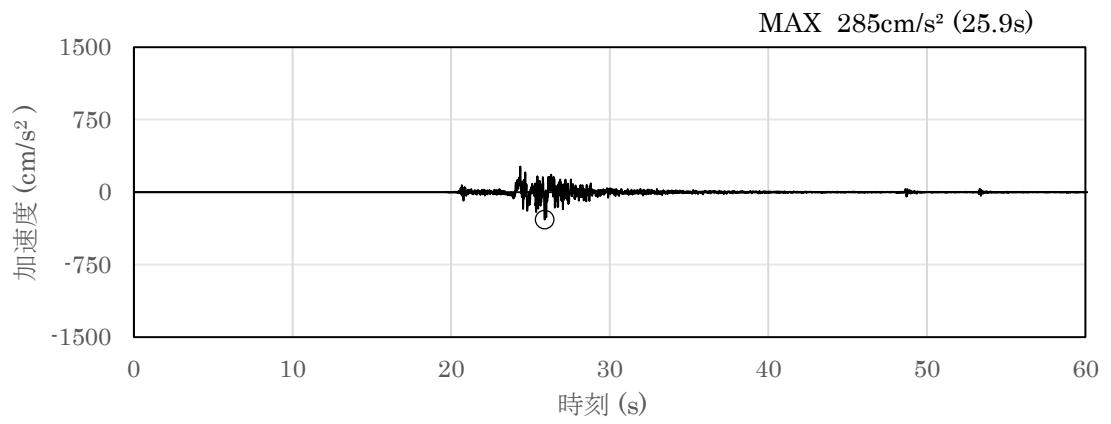


(a) 加速度時刻歴波形

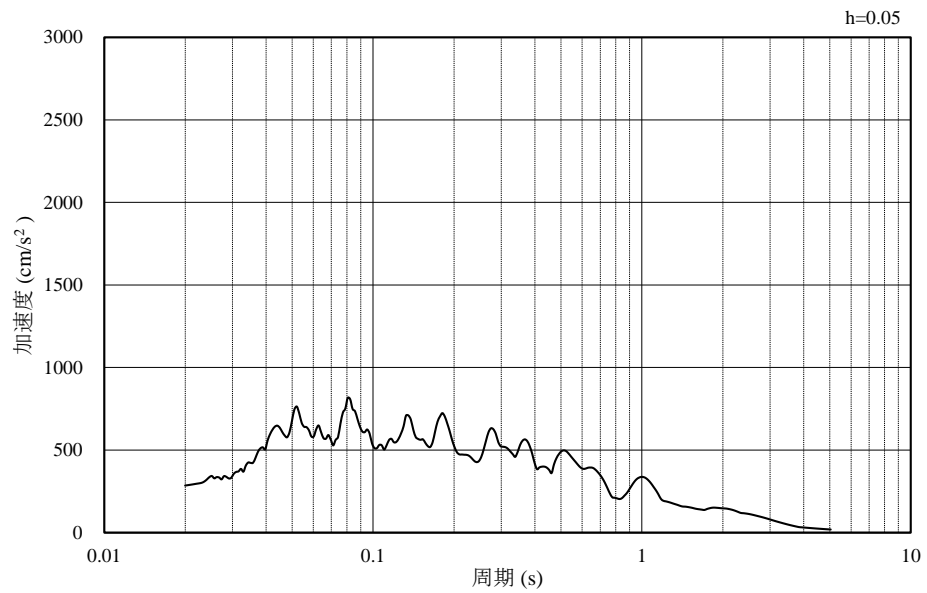


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-31 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
(鉛直成分：S d - N 2, N S 方向)

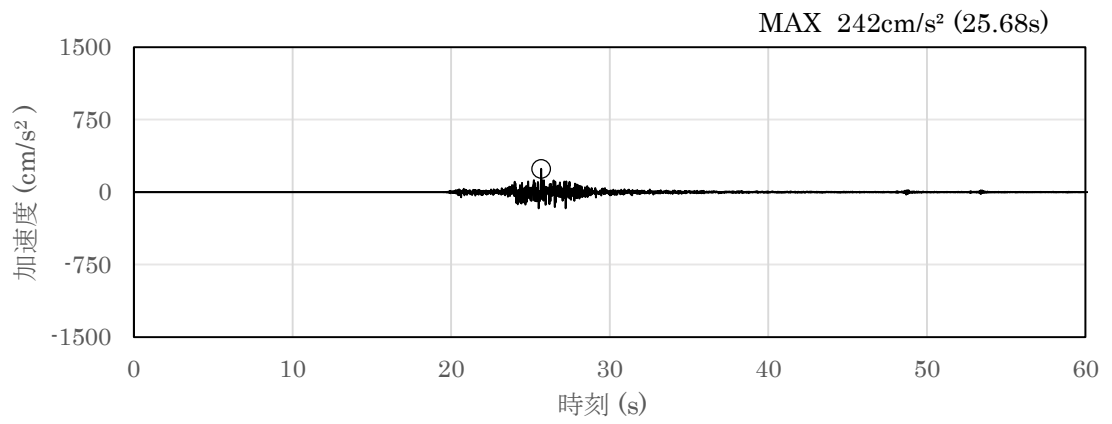


(a) 加速度時刻歴波形

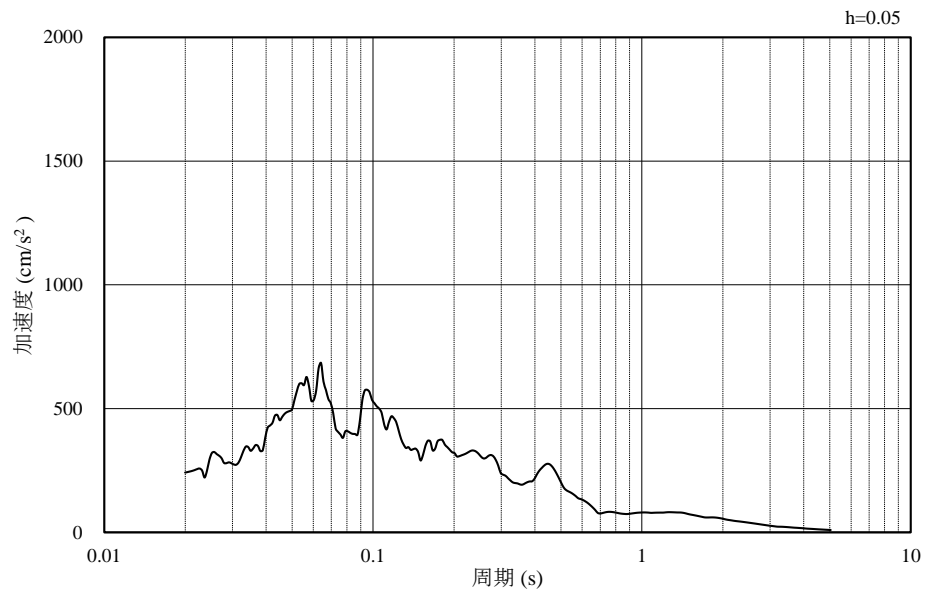


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-32 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
(水平成分：S d - N 2, E W方向)

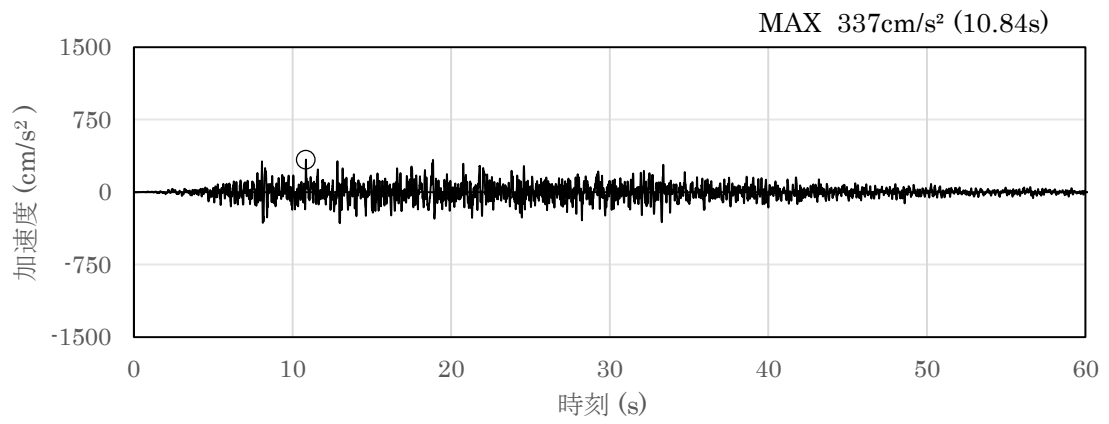


(a) 加速度時刻歴波形

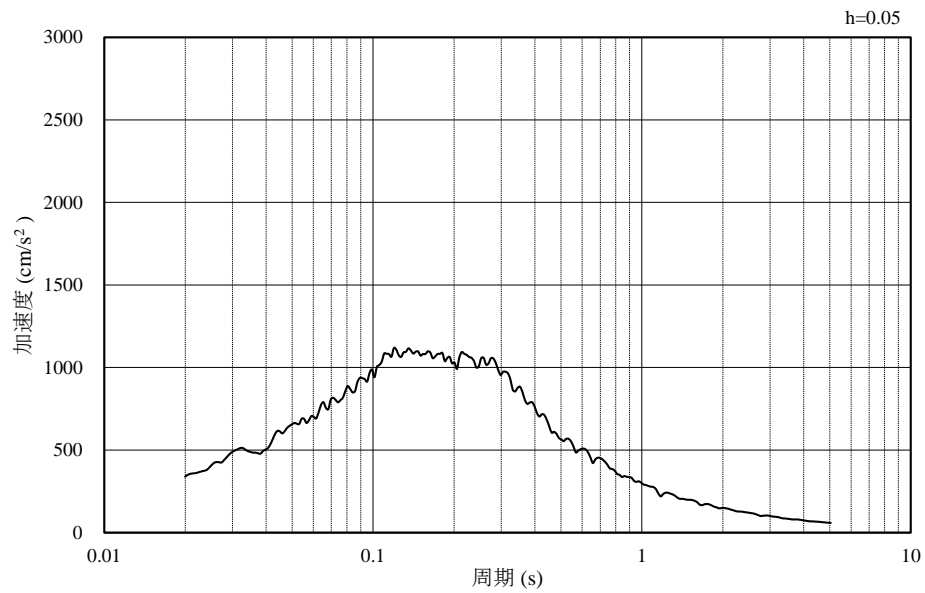


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-33 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
(鉛直成分：S d - N 2, E W方向)

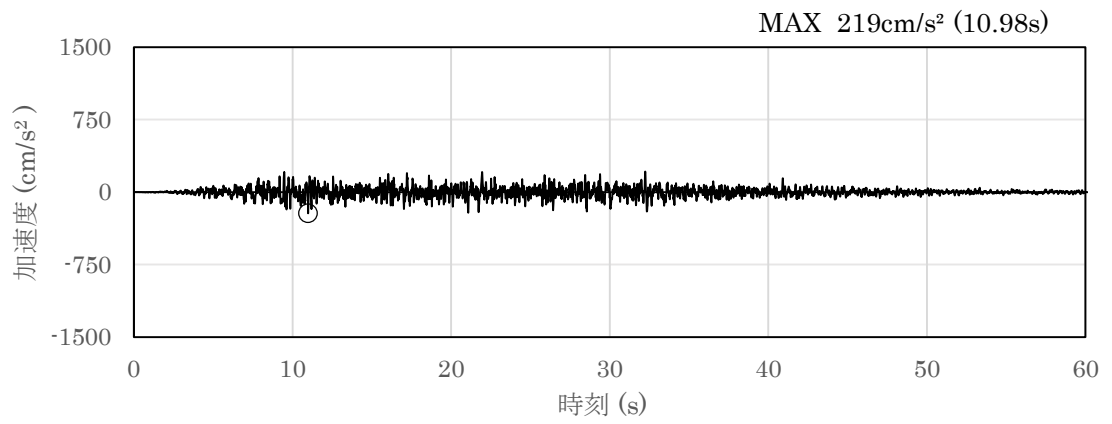


(a) 加速度時刻歴波形

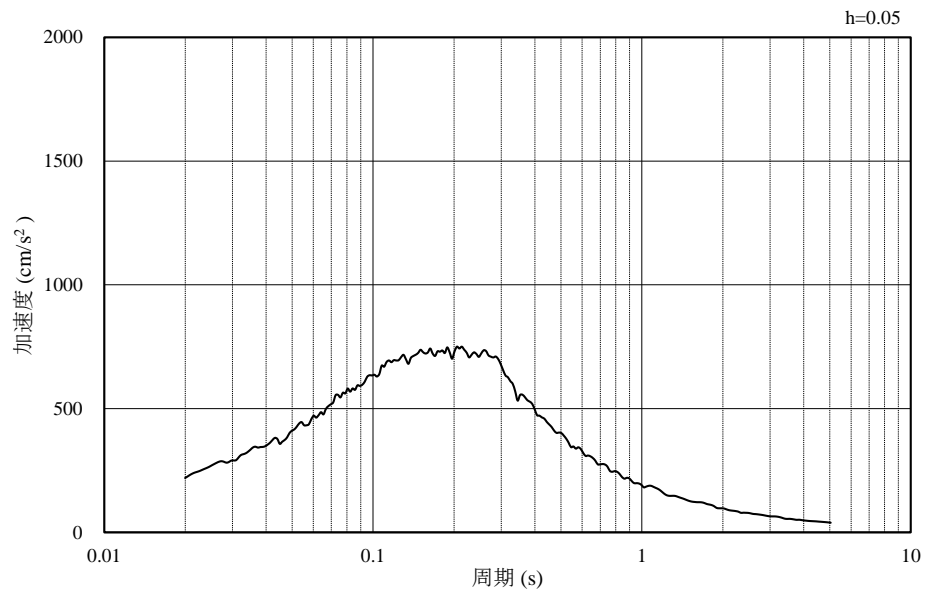


(b) 加速度応答スペクトル

図 4-34 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
(水平成分 : S d - 1)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 4-35 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
(鉛直成分 : S d - 1)

4.2 許容限界の設定

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おり、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いる。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。

曲げ・軸力系の破壊に対する照査に用いる照査用ひずみは、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、照査用曲げモーメントは、地震応答解析により得られた応答値に安全係数（構造物係数）1.0 を乗じることに 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	コンクリート：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
 ε_d ：照査用ひずみ（ $\varepsilon_d = \gamma_a \cdot \varepsilon$ ）
 γ_a ：構造物係数（ $\gamma_a = 1.2$ ）
 ε ：発生ひずみ

4.2.2 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。

また、せん断耐力式による照査において照査用せん断力が上記のせん断耐力を上回る場合、より詳細に材料非線形解析を用いて部材のせん断耐力を求め許容限界とする。せん断破壊に対する耐力評価のフローを図4-36に示す。

$$\gamma_i \cdot \frac{V_d}{V_{yd}} < 1.0$$

ここで、 γ_i : 構造物係数 ($\gamma_i = 1.0$)

V_{yd} : せん断耐力

V_d : 照査用せん断力 ($V_d = \gamma_a \cdot V$)

γ_a : 構造解析係数 ($\gamma_a = 1.05$)

V : 発生せん断力

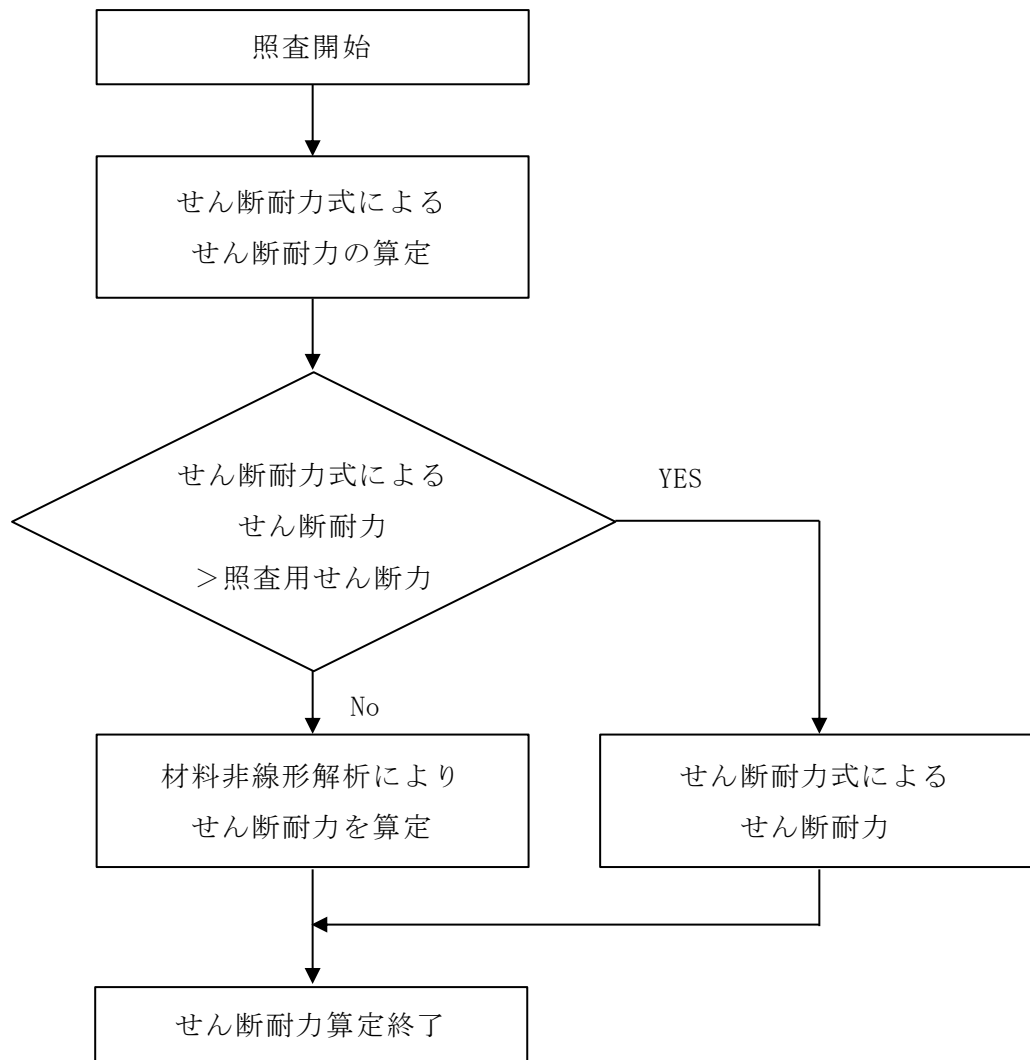


図 4-36 せん断破壊に対する耐力評価フロー

a. 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

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

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

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

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

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

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

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

$$\beta_a = 1.0$$

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

$\gamma_{b c}$: 部材係数

$\gamma_{m c}$: 材料係数

$$V_{s d} = \left\{ A_w f_{w y d} (\sin \alpha + \cos \alpha) / s \right\} z / \gamma_{b s}$$

ここで、 A_w : 区間 s におけるせん断補強鉄筋の総断面積

$f_{w y d}$: せん断補強鉄筋の降伏強度を $\gamma_{m s}$ で除したもので、 $400\text{N}/\text{mm}^2$ 以下とする。ただし、コンクリート圧縮強度の特性値 $f_{c k}$ が $60\text{N}/\text{mm}^2$ 以上のときは $800\text{N}/\text{mm}^2$ 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。

$\gamma_{b s}$: 部材係数

$\gamma_{m s}$: 材料係数

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 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	コンクリートが負担するせん断力を低減
	鉄筋	$\gamma_{m s}$	1.0	1.0	
部材係数	コンクリート	$\gamma_{b c}$	—	1.3	コンクリートが負担するせん断力を低減*
	鉄筋	$\gamma_{b s}$	—	1.1	せん断補強筋が負担するせん断力を低減*
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。

4.2.3 せん断破壊に対する許容限界（材料非線形解析によるせん断耐力）

(1) 評価条件

図 4-36 のせん断破壊に対する照査フローに示すとおり、照査用せん断力が、せん断耐力式によるせん断耐力を上回る場合は、材料非線形解析によりせん断耐力を算定し、せん断耐力が照査用せん断力を上回ることを確認する。

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

表 4-3 及び表 4-4 に材料非線形解析の概要を示す。

材料非線形解析は、90 年代までに、ひび割れの進展モデルや破壊エネルギーの概念等、基本となるモデルが提示され、様々な問題に適用されながら有効性と信頼性を高めており、コンクリート標準示方書[設計編]（土木学会 2012 年制定）

（以下「コンクリート標準示方書 2012」という。）や土木学会マニュアル等で取り扱われている。

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

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

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

材料非線形解析においては、解析コード「WCOMD Studio」を使用する。

表 4-3 材料非線形解析の位置付け（土木学会マニュアル）

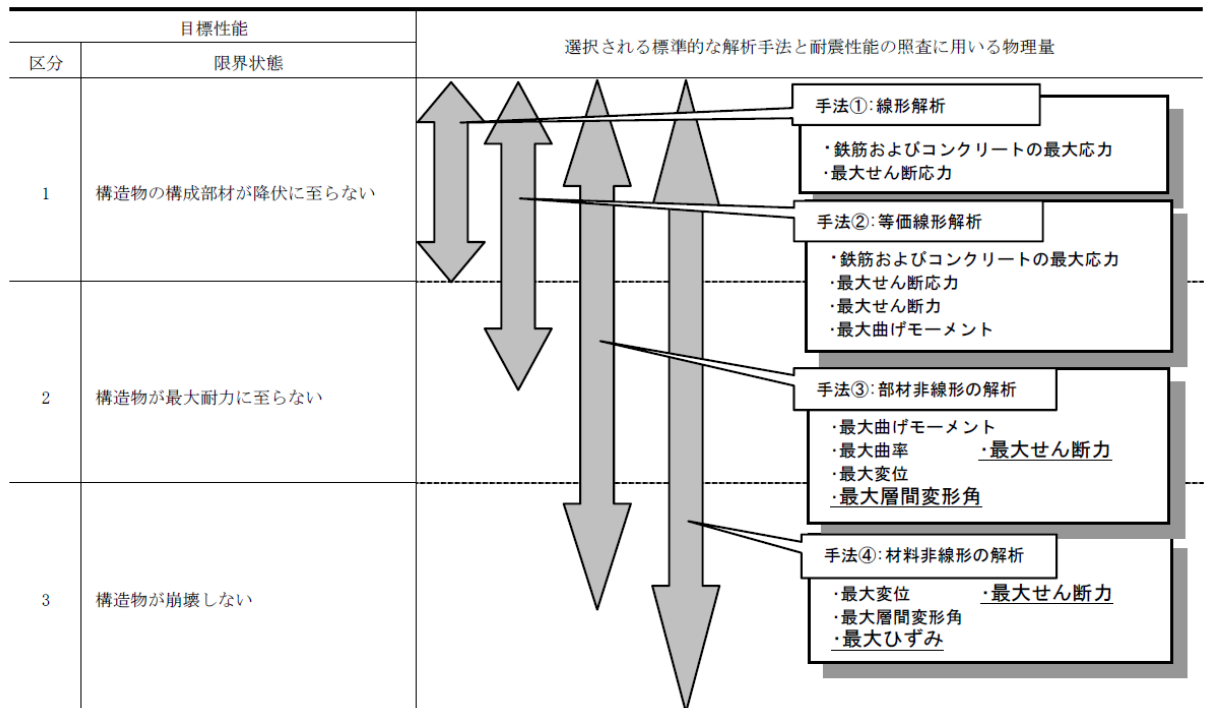


表 4-4 部材非線形解析と材料非線形解析の特徴（土木学会マニュアル）

解析手法	部材非線形モデル	材料非線形モデル		
モデル化	骨組	有限要素		
解析次元	一次元		二次元	三次元
構成則	$M-\phi$, $M-\theta$ など	応力ひずみ関係		
要素	はり要素	ファイバー要素	平面要素	立体要素
ガウス積分	$M-\phi$, $M-\theta$ など	$M-\phi$ に変換	応力-ひずみ	
特徴	汎用性	狭い ← → 広い		
	解析時間	短い ← → 長い		

a. 適用基準

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

表 4-5 に参考とする主な基準等を示す。

表 4-5 参考とする主な基準等

項目	参考とする主な基準等	備考
材料定数 材料特性	コンクリート標準示方書 2012 土木学会マニュアル	—
許容限界	—	せん断力-相対変位関係より設定した許容限界（破壊基準）が、部材係数の設定における材料非線形解析にて、実験結果とおおむね整合的であることを確認。

b. 材料定数

耐震評価に用いる材料定数は、文献等を基に設定する。コンクリート及び鉄筋の材料定数を表 4-6 及び表 4-7 に示す。

表 4-6 コンクリートの材料定数

	設定値	諸元
単位体積重量	0.0kN/m ³	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
圧縮強度	15.8N/mm ²	設計基準強度（20.6N/mm ² ） ／材料係数*
引張強度	1.33N/mm ²	引張強度／材料係数*
圧縮ピークひずみ	0.002	コンクリート標準示方書 2012
ひび割れ-せん断 伝達係数	1.0	コンクリート標準示方書 2012
破壊エネルギー	0.0681N/mm	コンクリート標準示方書 2012

注記*：材料係数を 1.3 として算出

表 4-7 鉄筋の材料定数

		設定値	諸元
単位体積重量		0.0kN/m ³	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
ヤング係数		200kN/mm ²	コンクリート標準示方書 2012
降伏 強度	主鉄筋	1000N/mm ²	せん断破壊先行型の破壊形態となるよう曲げ耐力が増大するように設定
	せん断 補強筋	345N/mm ²	SD345

c. 解析モデルの要素分割

材料非線形解析の対象とする構造部材を平面ひずみ要素でモデル化する。構造部材のモデル化に当たっては、図 4-37 に示すとおり、鉄筋の付着が有効な領域を鉄筋コンクリート要素としてモデル化し、付着の影響が及ばない領域を無筋コンクリート要素としてモデル化する。

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

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

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

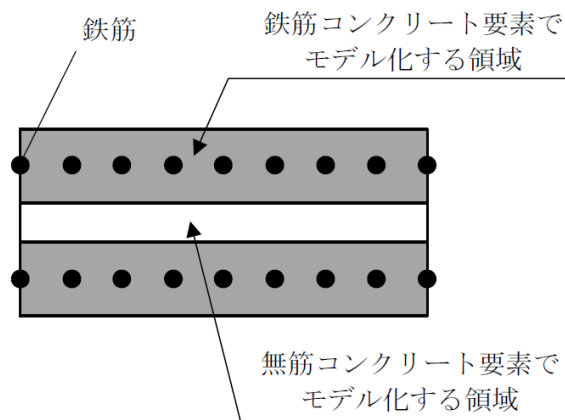


図 4-37 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の概要

d. コンクリートの非線形特性

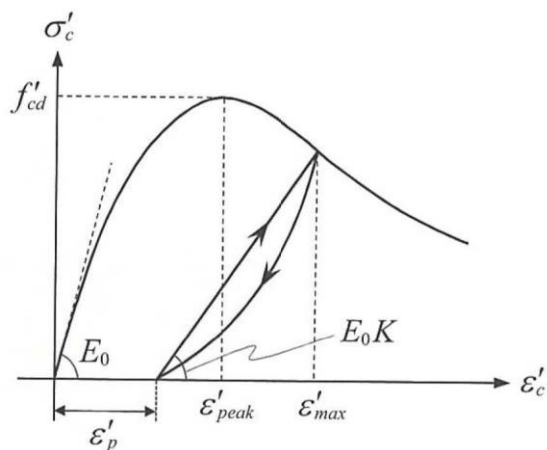
耐震評価に用いる要素は鉄筋コンクリート要素及び無筋コンクリート要素に分類されるが、それぞれの非線形特性は同一の考え方で表される。

(a) 圧縮応力下における応力-ひずみ関係

図 4-38 に一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。

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

また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、図 4-39 に示す。低減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮する。



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

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

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

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

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

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

ϵ'_{max} : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

ϵ'_p : 塑性ひずみ

K : 弾性剛性残存率

図 4-38 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性

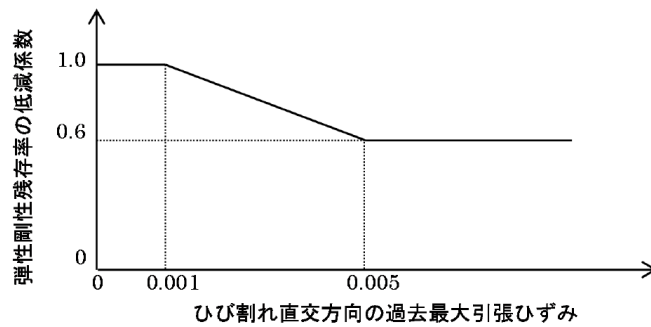


図 4-39 弾性剛性残存率の低減係数

(b) 引張応力下における応力-ひずみ関係

引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、図 4-40 に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

引張力を受ける無筋コンクリート要素では、引張軟化挙動は、破壊エネルギー (G_f) によって定義する。引張軟化挙動の考慮に当たっては、図 4-41 に示すひび割れ発生後の軟化曲線とひび割れ発生点からの除荷曲線とで囲まれる面積が G_f/L_e (要素寸法) に一致するように、軟化特性を表す係数 c を用いる。

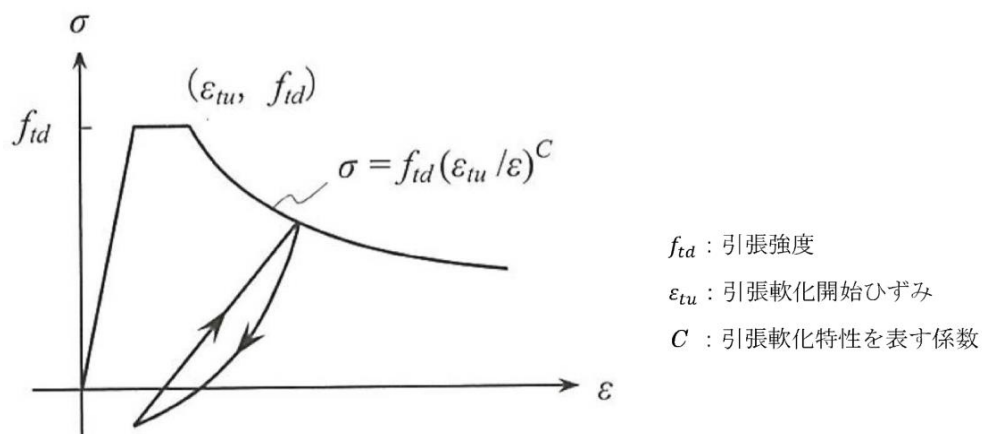


図 4-40 引張対応力下における鉄筋とコンクリートの付着効果を考慮した
応力-ひずみ関係

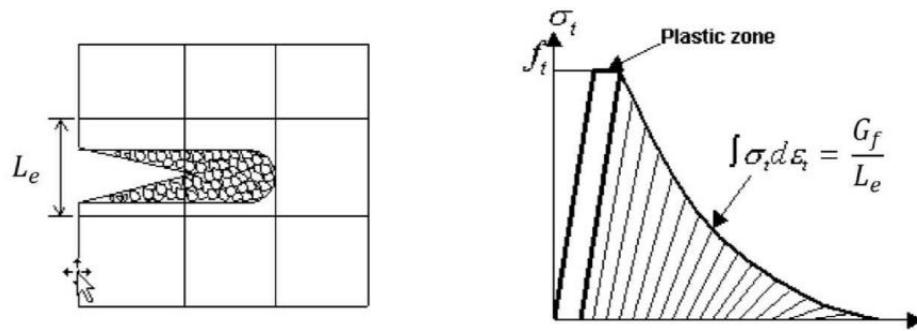
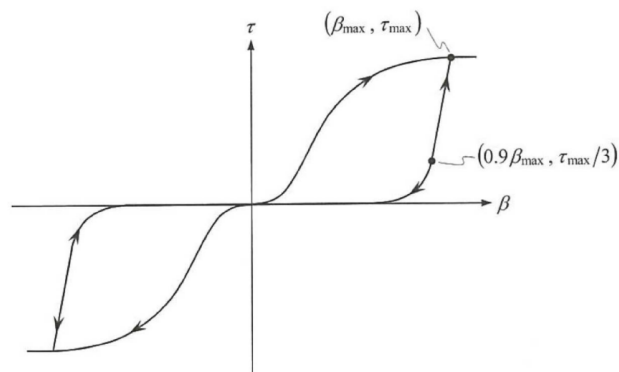


図 4-41 応力-ひずみ曲線と破壊エネルギー G_f の関係

(c) ひび割れ面でのせん断伝達関係

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

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、図 4-42 に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。

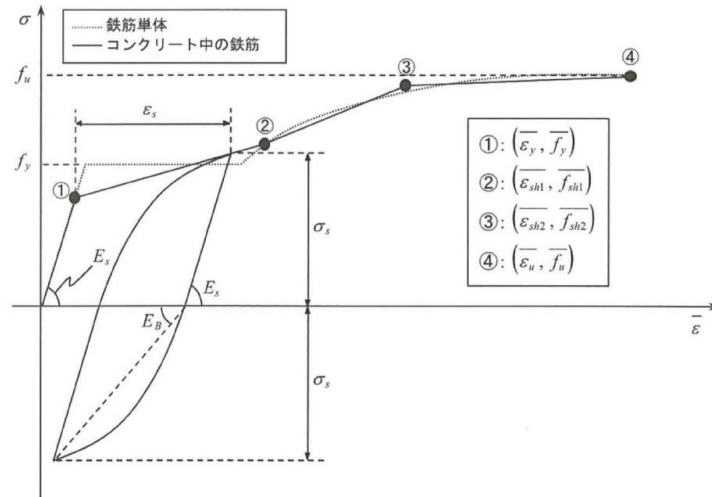


- β : ひび割れ面におけるせん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比 (γ/ε)
- τ : ひび割れ面でのせん断応力
- τ_{max} : 除荷開始時せん断応力
- β_{max} : 除荷開始時せん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比

図 4-42 ひび割れ面でのせん断伝達モデル

e. 鉄筋の非線形特性

ひび割れを複数含む領域におけるコンクリート中の鉄筋の平均応力ー平均ひずみ関係は、単体鉄筋の応力ーひずみ関係と異なり、図4-43に示すひずみ硬化特性を考慮する。



- f_y : 鉄筋単体の降伏強度 (N/mm²)
- f_u : 鉄筋単体の引張強度 (N/mm²)
- E_s : 鉄筋単体のヤング係数 (N/mm²)
- ϵ_y : 鉄筋単体の降伏ひずみ
- ϵ_{sh} : 鉄筋単体のひずみ硬化開始ひずみ
- p : 鉄筋比
- f_1 : コンクリートの引張強度 (N/mm²)

図 4-43 ひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の平均応力ー平均ひずみ関係

f. 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

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

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は、以下の式で表される。

$$\bar{\sigma}_{RC} = \frac{A_s}{A_{RC}} \bar{\sigma}_s + \frac{A_C}{A_{RC}} \bar{\sigma}_C$$

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

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

g. 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

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

(2) 評価内容

a. 耐震評価フロー

材料非線形解析を用いたせん断耐力評価の評価フローを図 4-44 に示す。

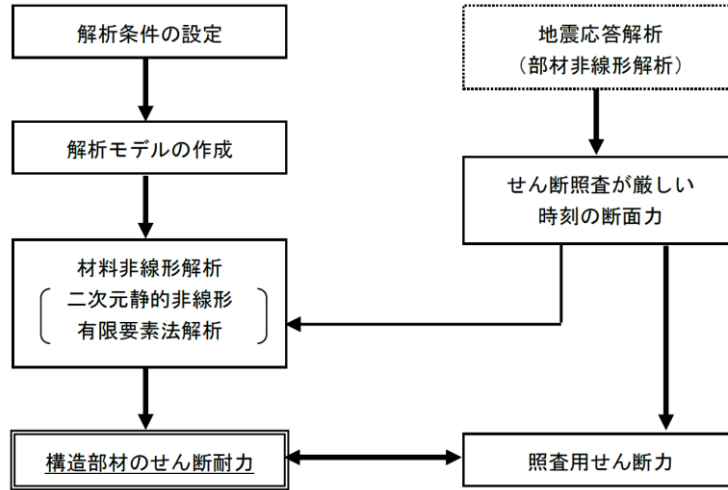


図 4-44 材料非線形解析の耐震評価フロー

b. 荷重の設定

材料非線形解析にて考慮する荷重は、地震応答解析（二次元時刻歴応答解析（全応力解析））から得られる荷重を考慮する。具体的には、地震応答解析で評価対象部材のせん断照査結果が厳しくなる時刻における断面力（曲げモーメント、軸力及びせん断力）を材料非線形解析モデルに図 4-45 に示すとおり作用させる。

材料非線形解析では、地震応答解析で得られた照査時刻の断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重比率を維持しながら漸増載荷する。作用荷重は、常時荷重及び地震時荷重を、図 4-46 に示すとおり载荷し材料非線形解析を実施する。

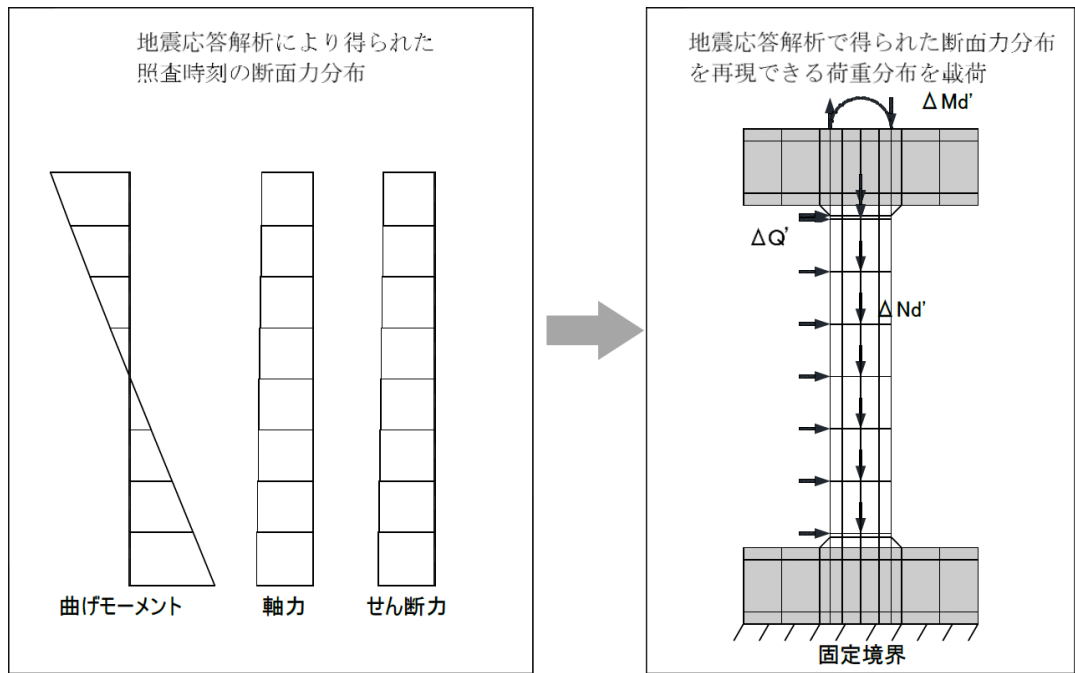


図 4-45 材料非線形解析における荷重状況

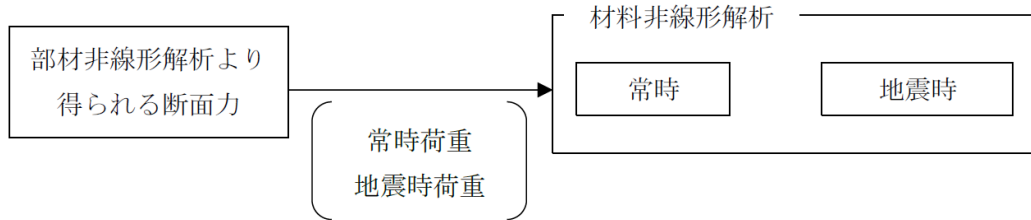


図 4-46 荷重の作用手順

c. せん断耐力

材料非線形解析を用いたせん断耐力は、材料非線形解析における固定端反力 P - 相対変位 δ 関係から設定する。具体的には、図 4-47 に示す例のとおり、固定端反力 P - 相対変位 δ 関係においてせん断力の増分に対して相対変位 δ が急増する直前の点を部材のせん断耐力と判断する。

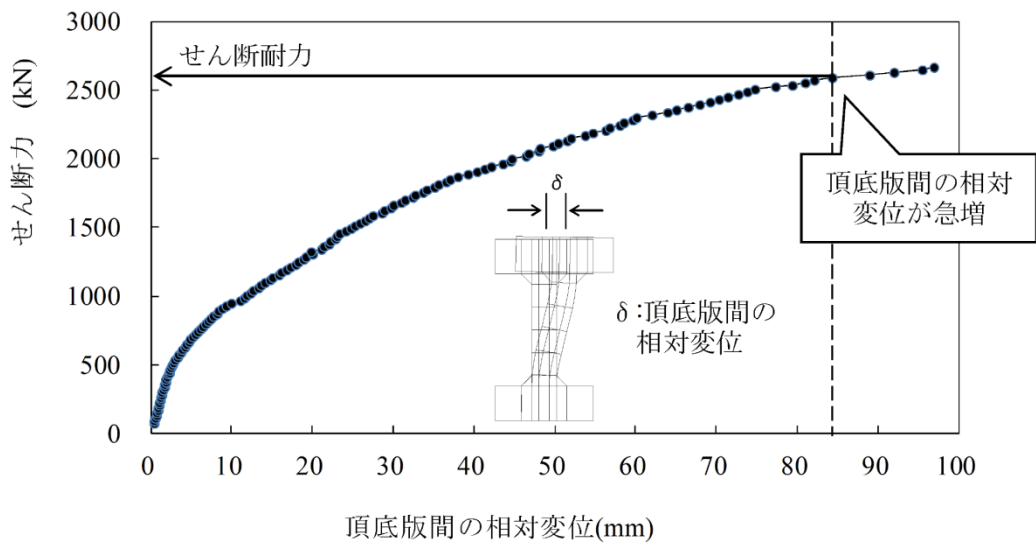


図 4-47 材料非線形解析を用いたせん断耐力の設定例

d. 安全係数の設定

材料非線形解析では，地震応答解析（二次元時刻歴応答解析（全応力解析））で得られる断面力（曲げモーメント，軸力及びせん断力）を材料非線形解析に作用させた時のせん断力 V と材料非線形解析で得られるせん断耐力 V_y に，以下のとおり部材係数 γ_{b1} ， γ_{b2} ，構造解析係数 γ_a ，構造物係数 γ_i を考慮し，照査用せん断力 V_d ，設計せん断耐力 V_{yd} を算定する。

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

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

考慮する安全係数の設定結果を表 4-8 に示す。ここで，部材係数 γ_{b1} については，実験又はせん断耐力式により得られるせん断耐力と材料非線形解析により得られるせん断耐力との比率により設定することとし，解析における構成則の相違や，要素の種類，要素分割，材料物性の設定，入力増分等，多岐にわたる解析者間の差を考慮する。

具体的には，土木学会マニュアルに示される 17 ケースの材料非線形解析を実施し，実験又はせん断耐力との差が最も大きい Case No. 8 の部材係数 1.15 を設定する（表 4-9）。

表 4-8 考慮する安全係数の設定結果

安全係数		値	設定根拠
部材係数	γ_{b1}	1.15	別途実施する材料非線形解析により設定
	γ_{b2}	1.0	地震応答解析による層間変形角より設定
構造物係数	γ_i	1.0	構造物の重要度は、基準地震動 S_s により評価することで包絡されていると判断
構造解析係数	γ_a	1.05	各種文献より保守的に設定
材料係数	γ_m	1.3	文献に基づく標準的な値を設定

表 4-9 部材係数 γ_{b1} の設定結果

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

4.2.4 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 4-10 に示す。

表 4-10 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	C _L 級岩盤	3.9

(2) MMR

a. 支持性能に対する許容限界

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 4-11 に示す。

表 4-11 MMR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)
支圧強度	コンクリート ($f'_{ck} = 15.6 \text{ N/mm}^2$)	$f'_a = 15.6$

b. 健全性に対する許容限界

MMRに発生するせん断応力に対する許容限界は、添付書類「VI-2-1-3 地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき、MMRのせん断強度 $\tau_f = \tau_0 = f'_{ck}/5$ とする。

また、せん断破壊に対する健全性の確認において参照する引張破壊については、コンクリート標準示方書に基づく引張強度を超える引張応力が発生した場合に引張破壊と判定する。

MMRのせん断強度及び引張強度を表 4-12 に示す。

表 4-12 MMRのせん断強度及び引張強度

せん断強度* ¹ (N/mm ²)	引張強度* ² (N/mm ²)
3.12	1.43

注記*1：せん断強度 τ_f は、粘着力 $\tau_0 = f'_{ck}/5$ のみ見込むこととし、
 $\sigma \tan \phi$ は考慮しないことで安全側に配慮する。

*2：コンクリート標準示方書に基づき設定

参考資料 1 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）
一体化部の耐震安全性評価について

1. 概要	1
2. 評価方法	4
3. 評価条件	4
3.1 適用規格	4
3.2 耐震評価フロー	7
3.3 地震時荷重算出断面の選定	12
3.4 使用材料及び材料の物性値	15
3.5 地盤物性値	15
3.6 評価構造物諸元	15
3.7 地下水位	16
4. 地震応答解析	17
4.1 地震応答解析手法	17
4.2 地震応答解析モデルの設定	19
4.2.1 解析モデル領域	19
4.2.2 境界条件	19
4.2.3 構造物のモデル化	22
4.2.4 隣接構造物のモデル化	33
4.2.5 地盤及びMMRのモデル化	34
4.2.6 ジョイント要素の設定	34
4.3 減衰定数	37
4.4 荷重及び荷重の組合せ	47
4.4.1 機器・配管荷重	48
4.4.2 外水圧	50
4.4.3 積雪荷重	50
4.5 地震応答解析の解析ケース	51
4.5.1 耐震評価における解析ケース	51
5. 3次元構造解析	52
5.1 解析手法	52
5.2 解析モデルの設定	53
5.2.1 構造物のモデル化	53
5.2.2 境界条件	58
5.2.3 地盤ばね要素	61
5.2.4 材料の非線形特性	69
5.3 照査時刻の選定	76

5.4	入力荷重	77
5.4.1	常時荷重	79
5.4.2	慣性力	82
5.4.3	地震時土圧及び周面せん断力	84
6.	評価内容	87
6.1	入力地震動の設定	87
6.2	許容限界の設定	87
6.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	87
6.2.2	せん断破壊に対する許容限界	87
7.	評価結果	
7.1	地震応答解析結果	
7.1.1	各照査時刻における荷重抽出時刻の算定結果	
7.1.2	作用荷重分布	
7.1.3	最大せん断ひずみ	
7.2	3次元構造解析結果	
7.2.1	解析ケースと照査値	
7.2.2	構造部材のひずみ分布（曲げ・軸力系破壊に対する照査）	
7.2.3	構造部材の断面力分布（せん断破壊に対する照査）	
7.3	構造部材の健全性に対する評価結果	
7.3.1	曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果	
7.3.2	せん断破壊に対する評価結果	
8.	まとめ	

1. 概要

本項では、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）のうち、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の一部と一体構造（以下「一体化部」という。）となっている底版が、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。

評価対象とする一体化部の平面図を図 1-1 に、断面図を図 1-2 及び図 1-3 に示す。

また、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部のイメージ図を図 1-4 に示す。

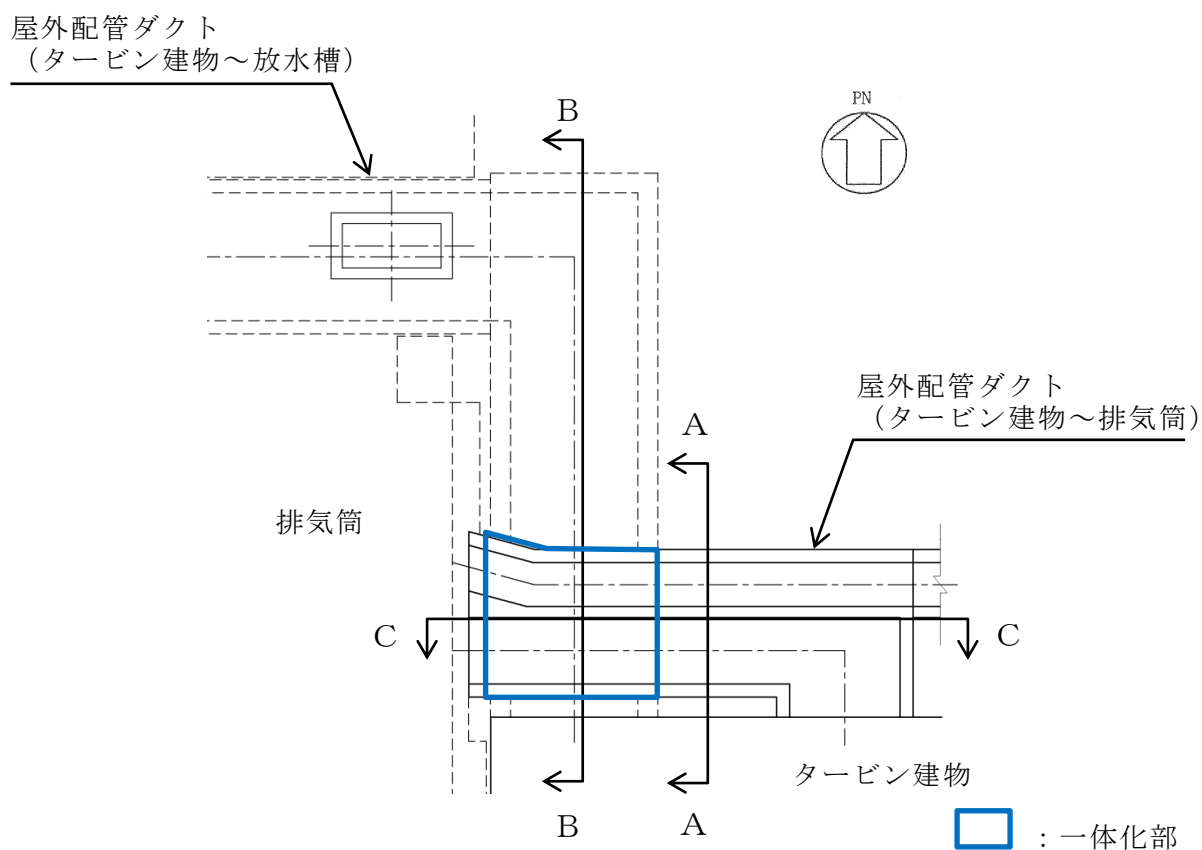


図 1-1 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 平面図

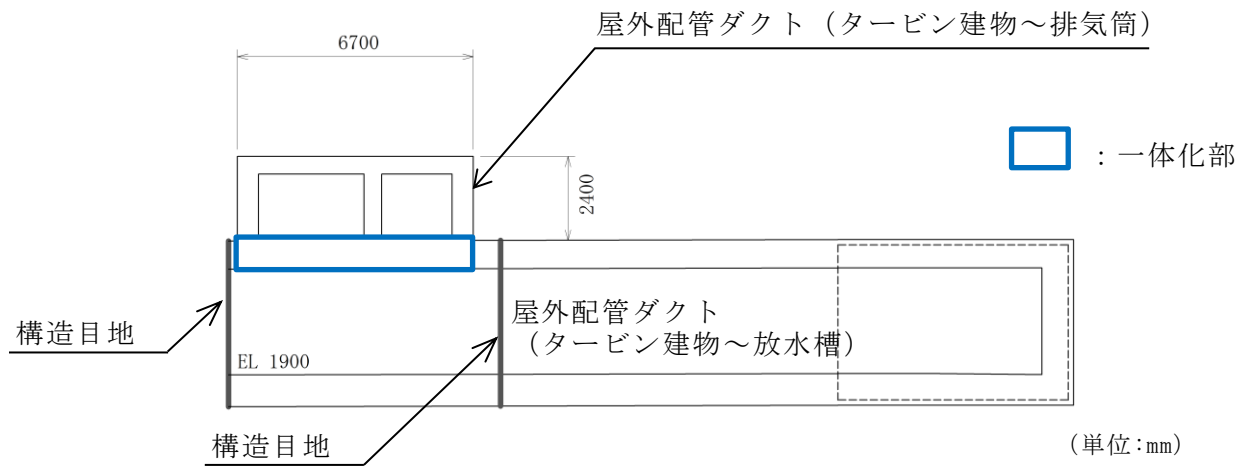


図 1-2 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 断面図 (B-B 断面)

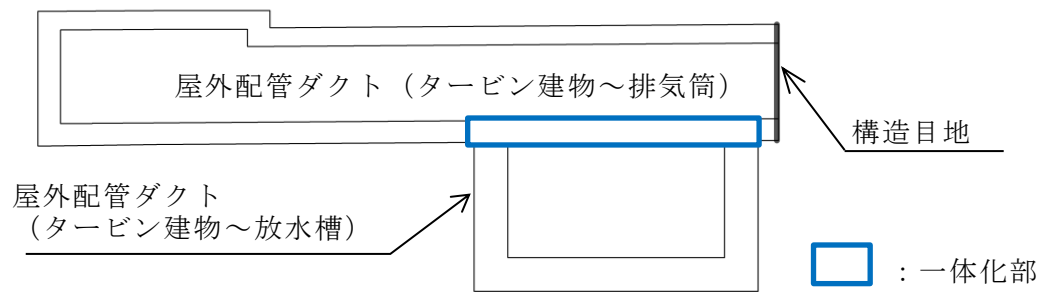
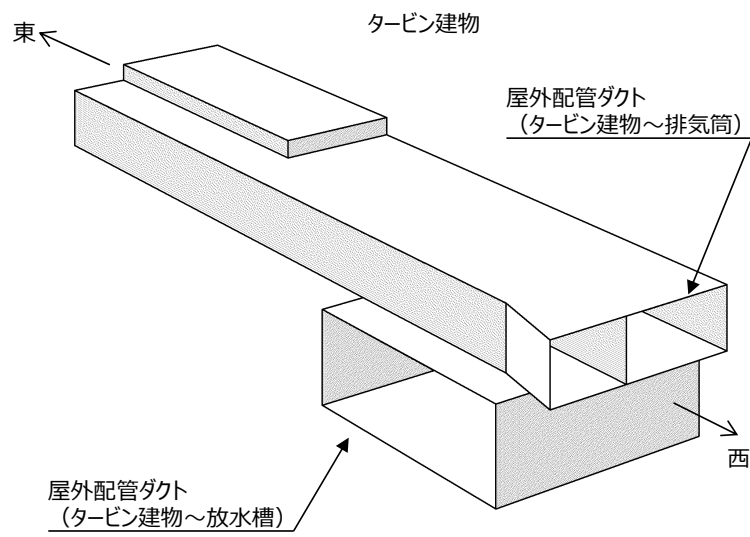
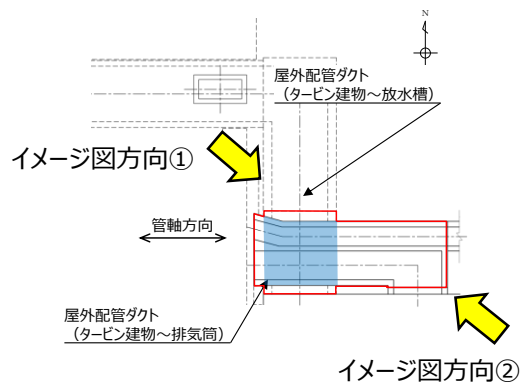
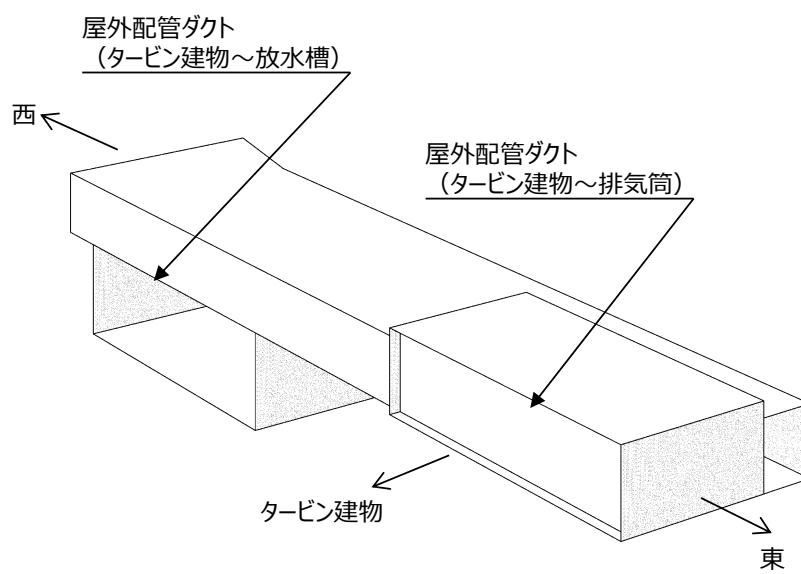


図 1-3 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 断面図 (C-C 断面)



(イメージ図方向①)



(イメージ図方向②)

図 1-4 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 一体化部のイメージ図

2. 評価方法

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部は、非常用ガス処理系配管・弁等を間接支持する支持機能が要求され、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、基準地震動 S_s に対して十分な支持機能を有していることを確認する。

要求される機能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により行う。

なお、構造部材の健全性評価については、鉄筋コンクリート部材の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する。

3. 評価条件

3.1 適用規格

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）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]（土木学会，2002年制定）（以下「コンクリート標準示方書」という。），原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1987（社団法人日本電気協会 電気技術基準調査委員会）を適用するが、鉄筋コンクリート部材の曲げ・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（土木学会 原子力土木委員会，2005年6月）（以下「土木学会マニュアル」という。）を適用する。3次元静的材料非線形解析（以下「3次元構造解析」という。）に用いる材料定数及びひずみを許容限界とする場合の限界値については、コンクリート標準示方書[設計編]（土木学会，2017年制定）（以下「コンクリート標準示方書 2017」という。）を適用する。また、3次元構造解析に用いる地盤反力係数については、道路橋示方書・同解説（I 共通編・IV 下部構造編）（(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。）及び道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編）（(社) 日本道路協会，平成 14 年 3 月）（以下「道示・V 耐震設計編」という。）を適用する。

表 3-1 に適用する規格，基準類を示す。

表 3-1 (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〔構造性能照査編〕(土木学会, 2002年制定)	・鉄筋コンクリートの材料諸元 (γ , E, ν)	—
	・コンクリート標準示方書〔設計編〕(土木学会, 2017年制定)	・コンクリートの材料定数(3次元構造解析に用いる材料定数)	—
荷重及び荷重の組合せ	・コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕	・永久荷重, 偶発荷重等の適切な組合せを検討	—
許容限界	・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル(土木学会, 原子力土木委員会, 2005年6月)	・曲げ・軸力系の破壊に対する照査において, 圧縮縁コンクリートひずみが 1.0% を下回ることを確認*	・構造強度を有すること
	・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*	・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*	・構造強度を有すること
地震応答解析	・道路橋示方書・同解説 (I 共通編・IV 下部構造編) (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, 基礎に発生する応力が極限支持力を下回ることを確認*	—
	・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1987	・有限要素法による 2 次元モデルを用いた時刻歴非線形解析	—
	・道路橋示方書・同解説 (I 共通編・IV 下部構造編) (日本道路協会 平成 14 年 3 月)		

注記* : 妥当な安全余裕を考慮する。

表 3-1 (2) 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
構造解析	<ul style="list-style-type: none"> ・道路橋示方書・同解説 (I 共通編・IV 下部構造編) ((社) 日本道路協会, 平成 14 年 3 月) 	<ul style="list-style-type: none"> ・地盤反力係数 (3 次元構造解析に用いる係数) 	—
	<ul style="list-style-type: none"> ・道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編) ((社) 日本道路協会, 平成 14 年 3 月) 		

3.2 耐震評価フロー

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部における地震応答解析フロー及び耐震評価フローを図 3-1 及び図 3-2 に示す。

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部は、複雑な構造を有することから、非線形シェル要素を用いた 3 次元構造解析による耐震評価を実施する。

また、地震動 1 波に対する評価内容を具体化したフローを図 3-3 に示す。さらに、3 次元構造解析における基本ケースから水平 2 方向载荷に至る一連の評価プロセスを図 3-4 に示す。

3 次元構造解析にあたっては、地震時荷重算出断面において 2 次元有限要素法を用いた地震応答解析により地震時荷重を算定し、算出された荷重を 3 次元構造解析モデルに作用させて耐震評価を実施する。よって、地震応答解析により抽出する応答値は、3 次元構造解析モデルに作用させる地震時土圧及び慣性力である。

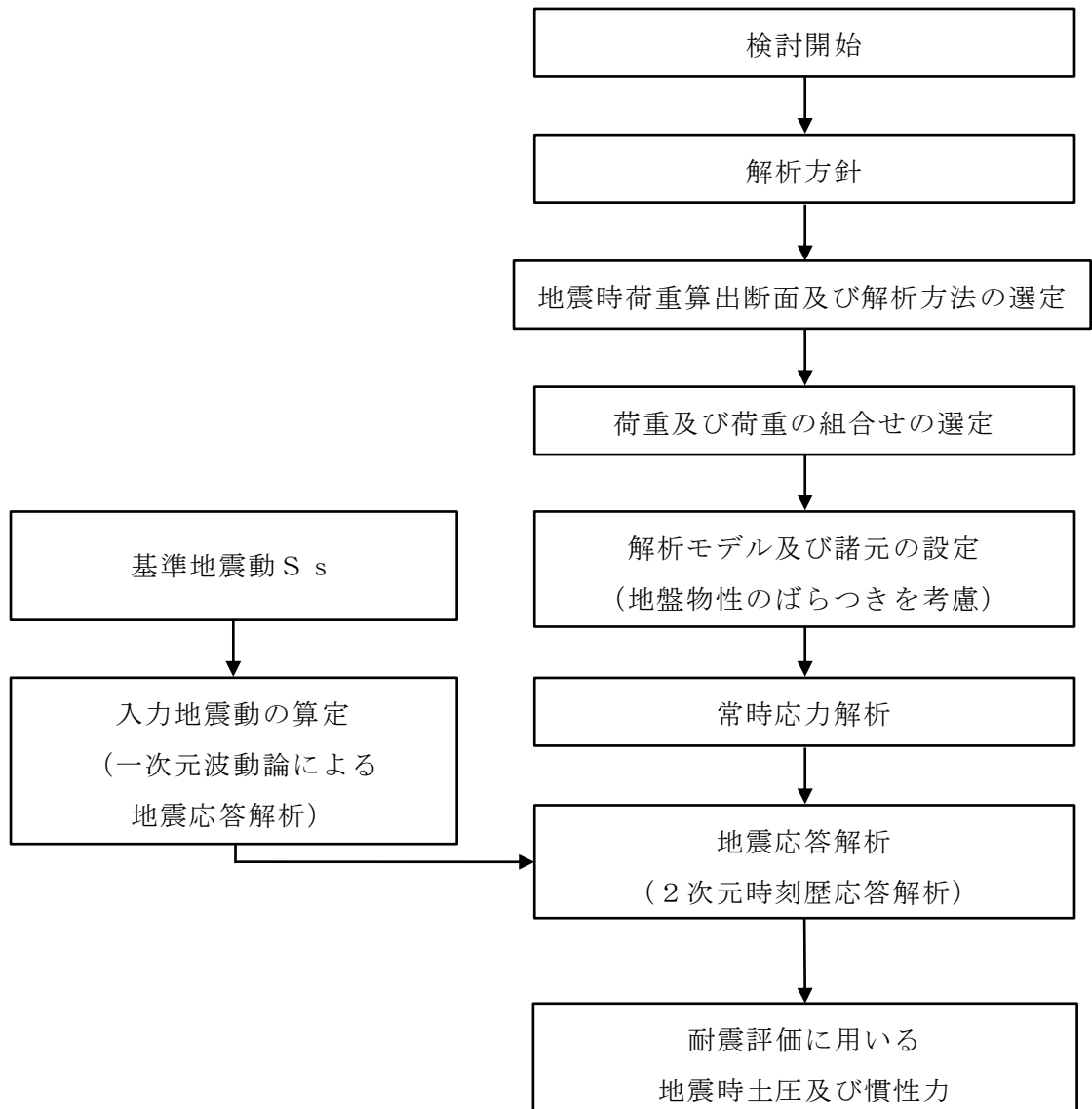


図 3-1 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答解析フロー

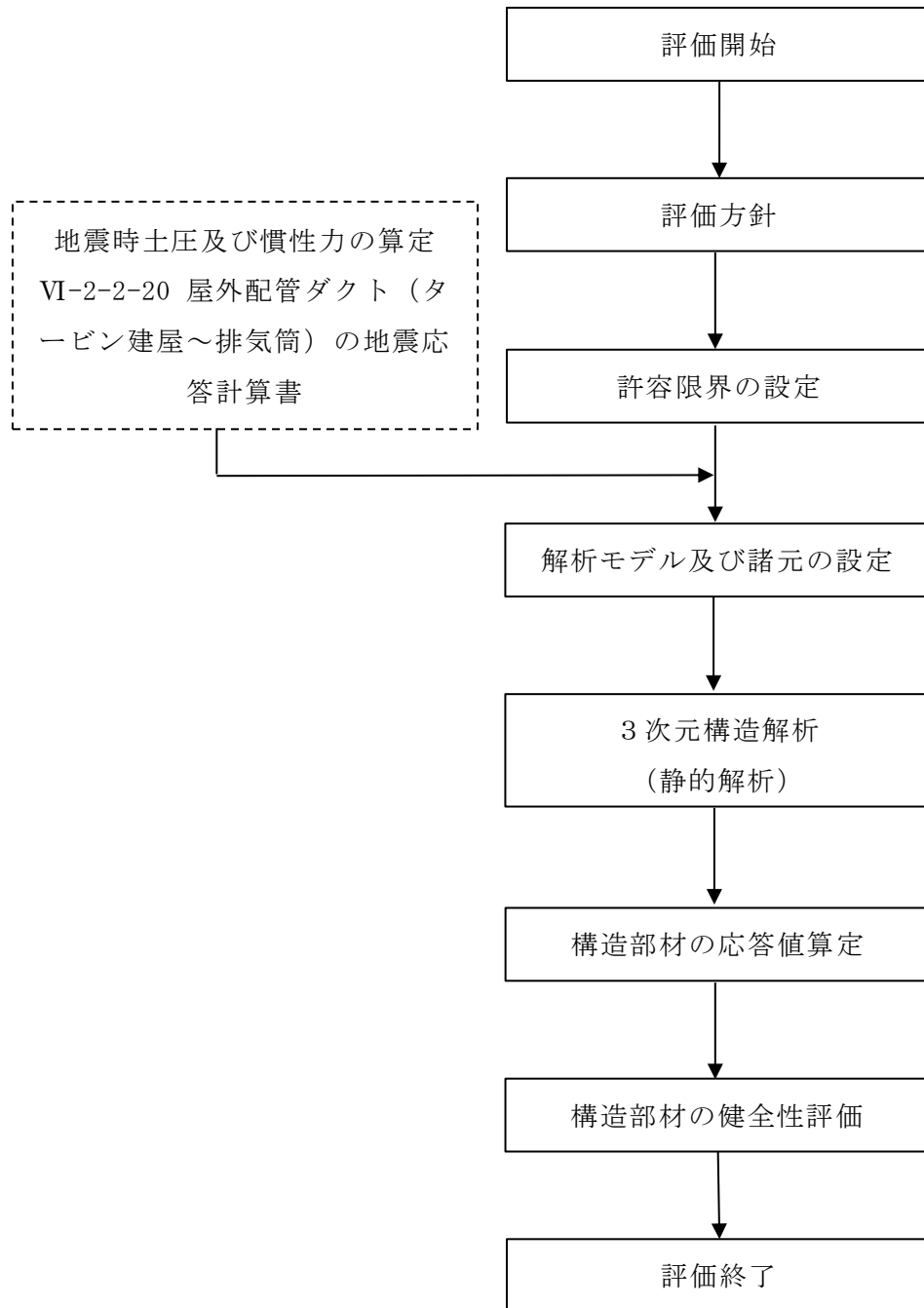


図 3-2 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) の耐震評価フロー

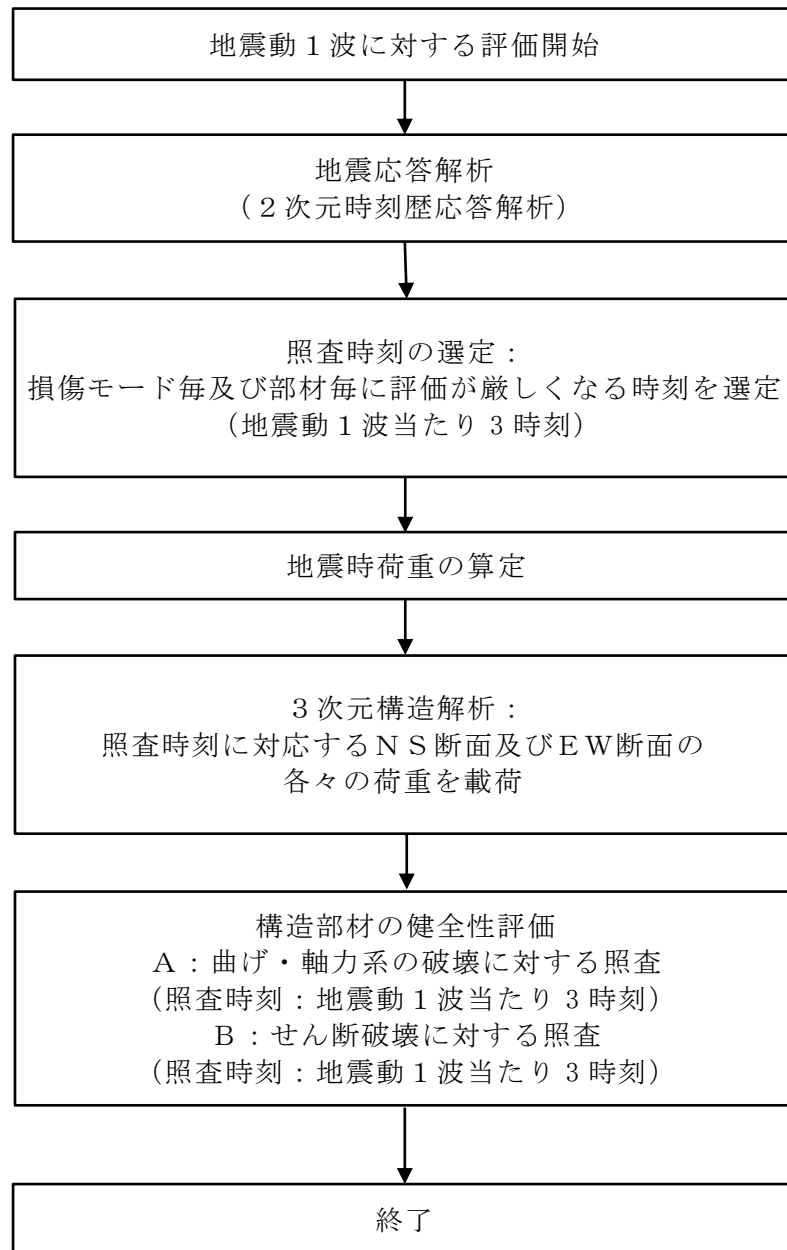


図 3-3 基本フロー（地震動 1 波に対する評価フロー）



図 3-4 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の 3次元構造解析フロー

3.3 地震時荷重算出断面の選定

地震時荷重算出断面は、「資料1 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」の「4.5 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の断面選定の考え方」に示すとおり、B-B断面及びC-C断面については、一体化した複雑な構造を有することから、3次元構造解析モデルを用いた耐震評価を実施するため、地震時荷重算出断面として選定する。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震時荷重算出断面図を図3-5及び図3-6に示す。

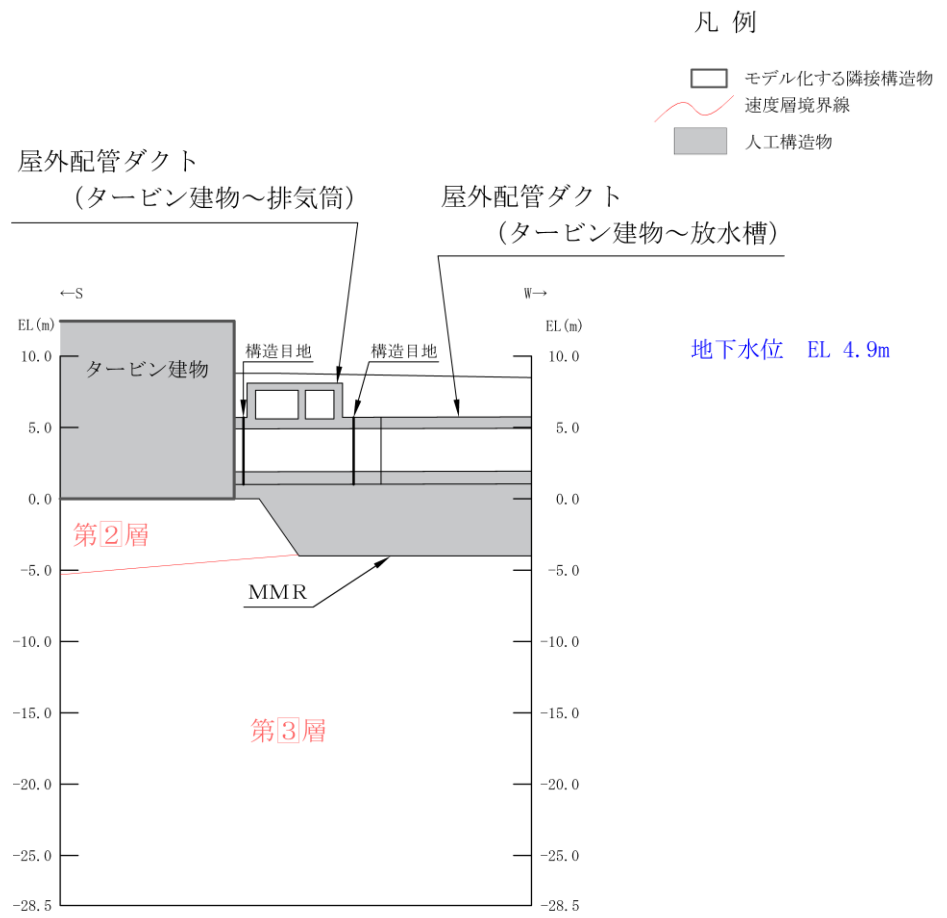


図 3-5 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)
地震時荷重算出断面図 (B-B 断面)

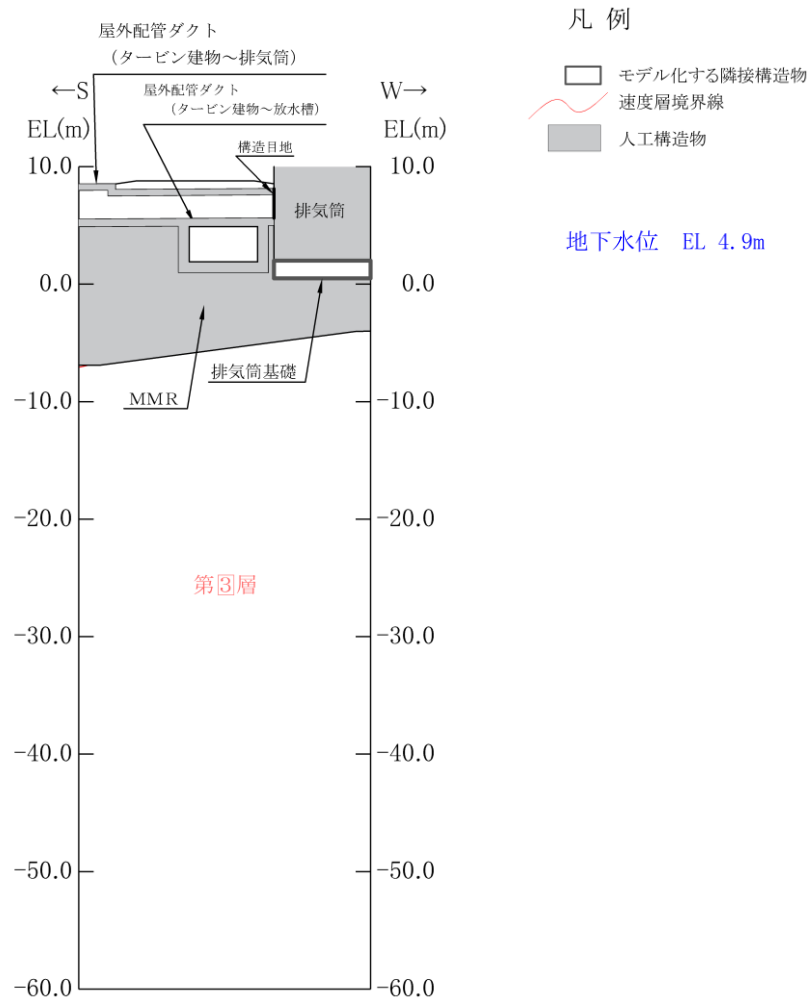


図 3-6 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)
地震時荷重算出断面図 (C-C 断面)

3.4 使用材料及び材料の物性値

使用材料及び材料の物性値については、本文「2.5 使用材料及び材料の物性値」にて設定している物性値を用いる。

3.5 地盤物性値

地盤については、本文「2.6 地盤物性値」にて設定している物性値を用いる。

3.6 評価構造物諸元

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部の諸元を表 3-2 に、評価部位を図 3-7 に示す。

表 3-2 評価部位とその仕様

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	
底版	6	3000	700	20.6	SD345	支持機能
底版	7	2000	700	20.6	SD345	

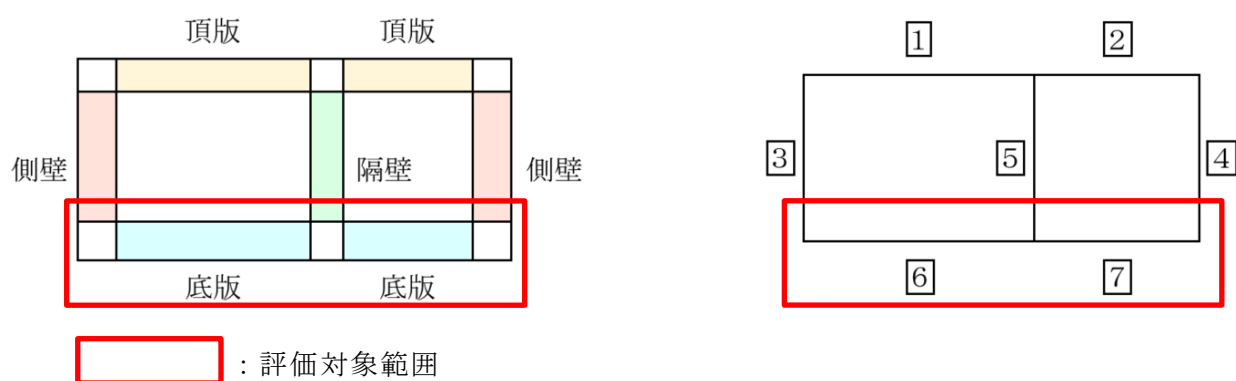


図 3-7 評価部位

3.7 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 3-3 に示す。

表 3-3 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)
屋外配管ダクト (タービン建物～ 排気筒)	B-B 断面	4.9
	C-C 断面	

4. 地震応答解析

4.1 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二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、本文「3.1 地震応答解析手法」に基づき「①全応力解析」を選定する。

B-B断面及びC-C断面について、線形はり要素及び平面応力要素でモデル化し、3次元構造解析モデルとの変位を整合させるためのヤング係数の調整を行い、3次元構造モデルと等価な剛性となるようモデル化する。

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、このうち岩盤及びマンメイドロック（以下「MMR」という。）については、線形要素でモデル化する。埋戻土については、地盤の剛性及び減衰のひずみ依存性を適切に考慮できるマルチスプリング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。

地盤応答解析手法の選定フローを図4-1に示す。

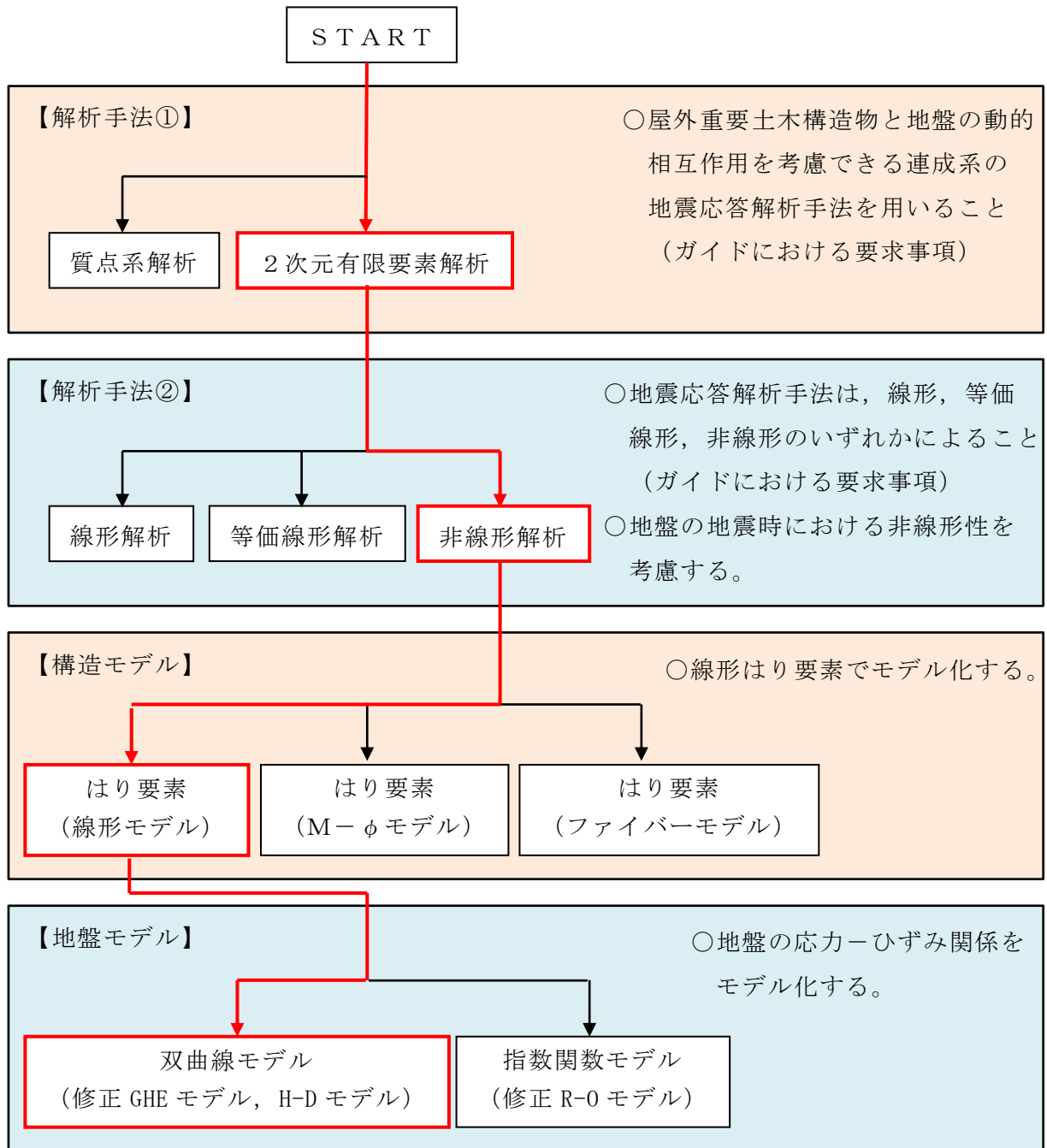


図 4-1 地震応答解析の選定フロー

4.2 地震応答解析モデルの設定

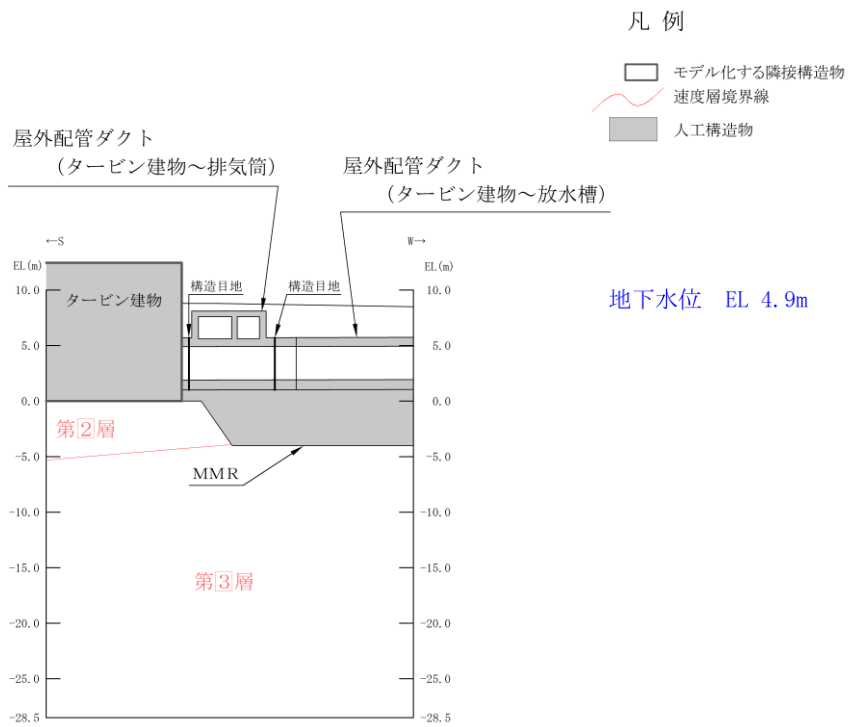
4.2.1 解析モデル領域

解析モデル領域については、本文「3.2.1 解析モデル領域」に従って解析モデル領域を設定する。

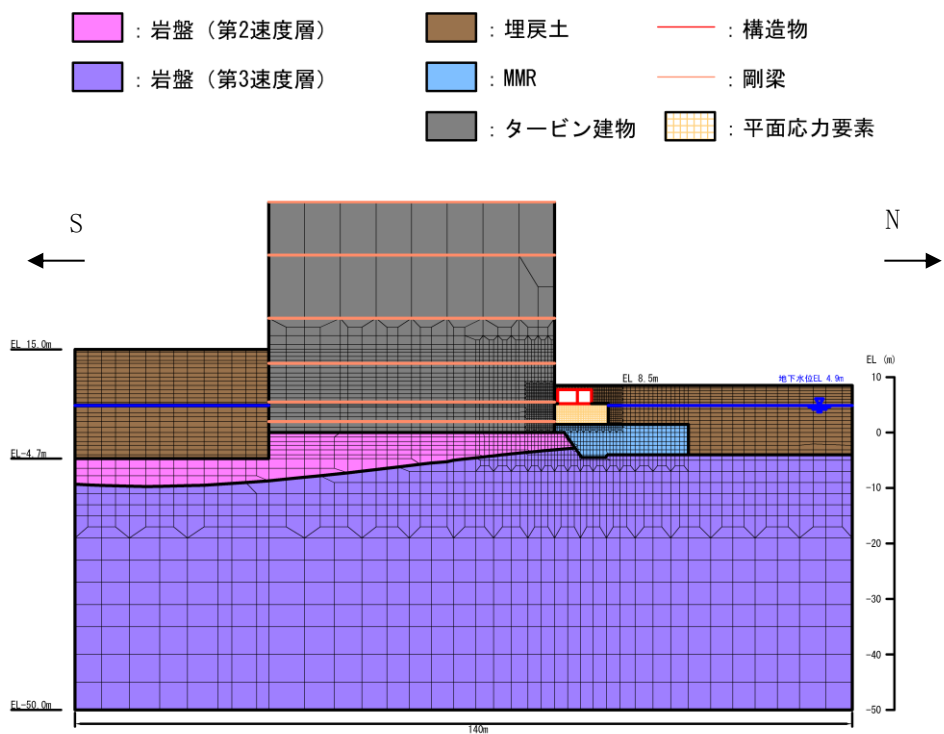
4.2.2 境界条件

固有値解析，常時応力解析及び地震応答解析においては、本文「3.2.2 境界条件」にて設定した境界条件を用いる。

地震時荷重算出用地質断面図及び地震応答解析モデル図を図 4-2 及び図 4-3 に示す。

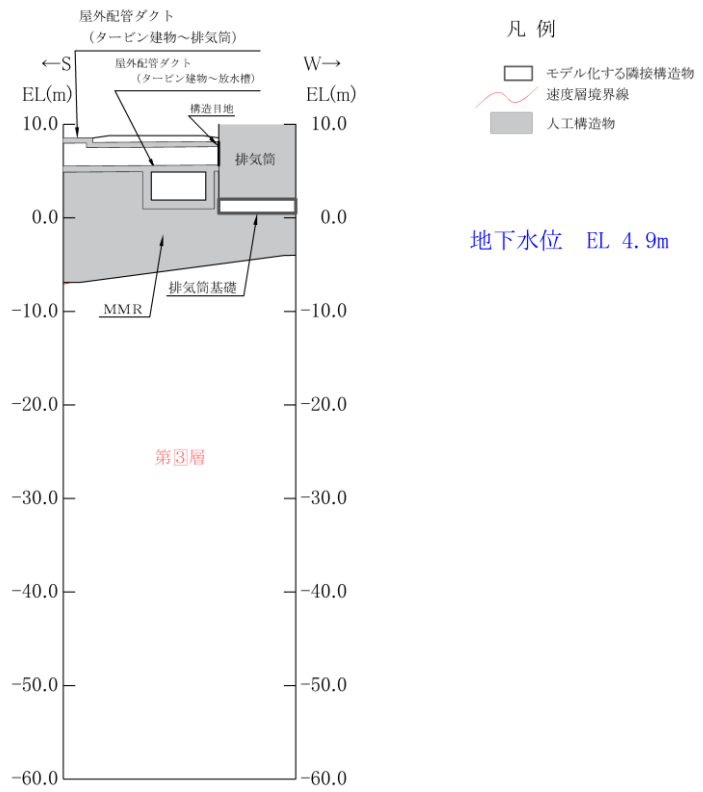


(a) 地震時荷重算出用地質断面図

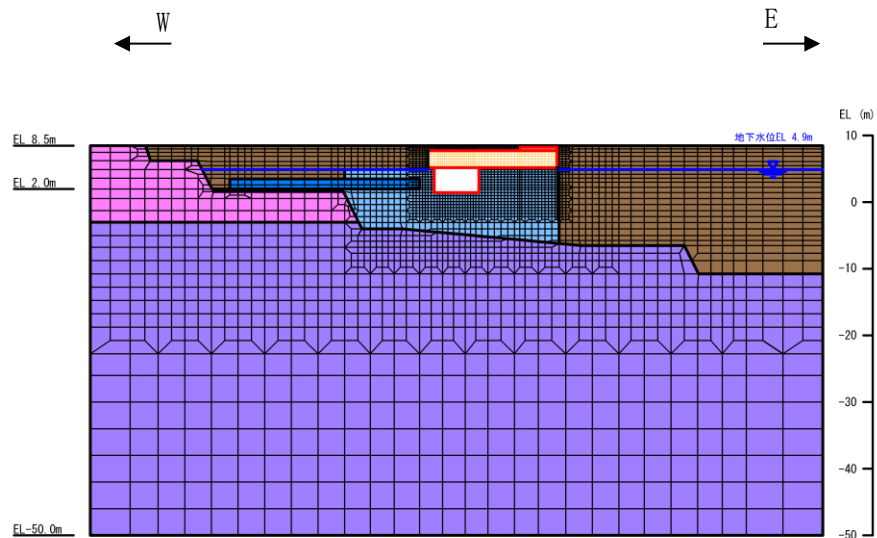
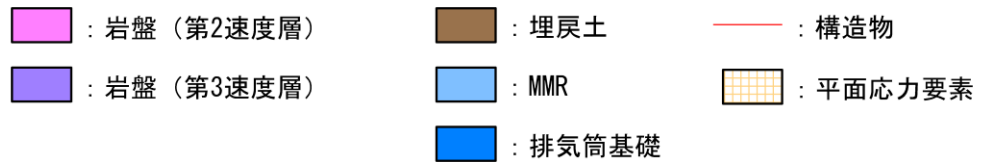


(b) 地震応答解析モデル図

図 4-2 地震時荷重算出用地質断面図及び地震応答解析モデル図 (B-B断面)



(a)地震時荷重算出用地質断面図



(b)地震応答解析モデル図

図 4-3 地震時荷重算出用地質断面図及び地震応答解析モデル図 (C-C断面)

4.2.3 構造物のモデル化

地盤応答解析においては、3次元構造解析モデルの応答との整合性を持たせるために屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）及び屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の側壁を対象とした等価剛性モデルを作成する。また、鉄筋コンクリート部材は、線形はり要素及び平面応力要素でモデル化する。

N-S断面において平面応力要素でモデル化する屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）は、タービン建物との取り合い部に設置された構造目地から、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）より北側に設置された構造目地までを南北方向のモデル化範囲とする。

E-W断面において平面応力要素でモデル化する屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は、妻壁から西側端部に存在する構造目地までを東西方向のモデル化範囲とする。

等価剛性の設定は以下の手順に基づき行う。

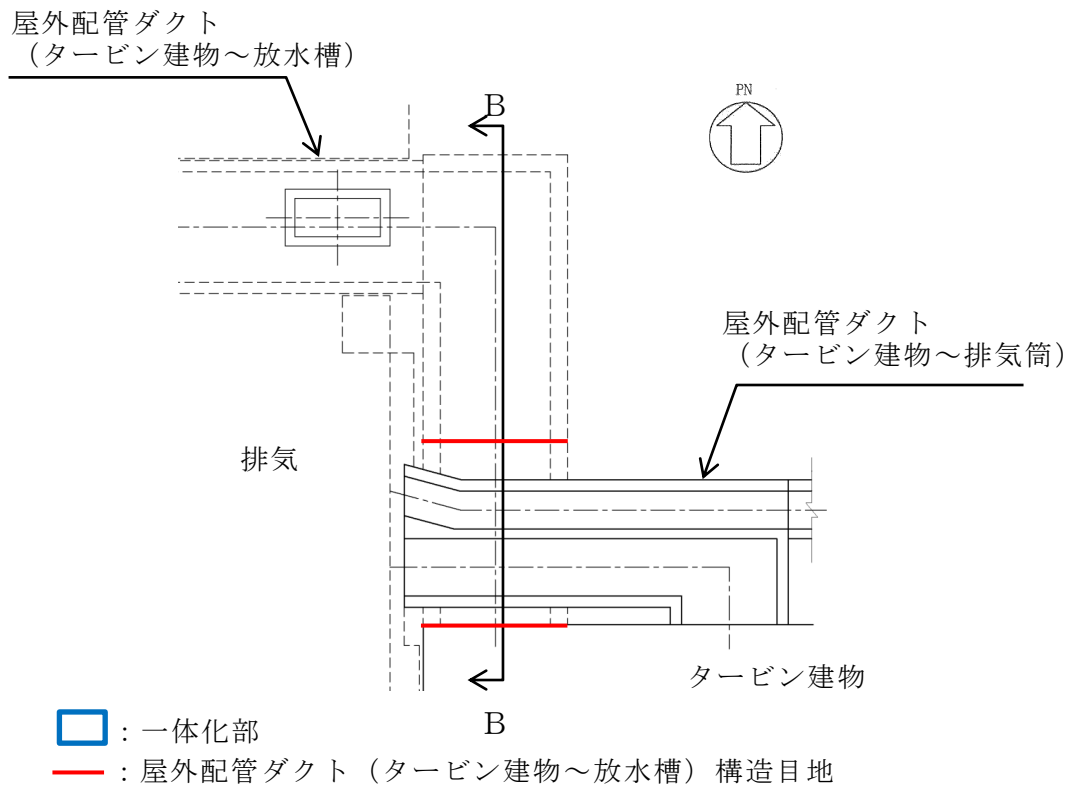
手順1として、エリア奥行長さに対する部材の奥行長さの比率から補正係数 α を線形はり要素に設定する。

手順2として、線形の3次元構造解析モデルに水平荷重として単位荷重（約100kN/m²）を作用させ、頂版位置での奥行方向の平均的な水平変位を算定する。さらに、補正係数 α を設定した2次元モデルに同じ単位荷重を作用させ、両側壁の頂版位置での平均変位が、3次元構造解析モデルの頂版位置での平均変位と等しくなるように補正係数 β を算定する。地震応答解析では、コンクリートの弾性係数 E_c に補正係数 α 、 β を乗じ、等価剛性モデルの弾性係数（剛性）を設定する。

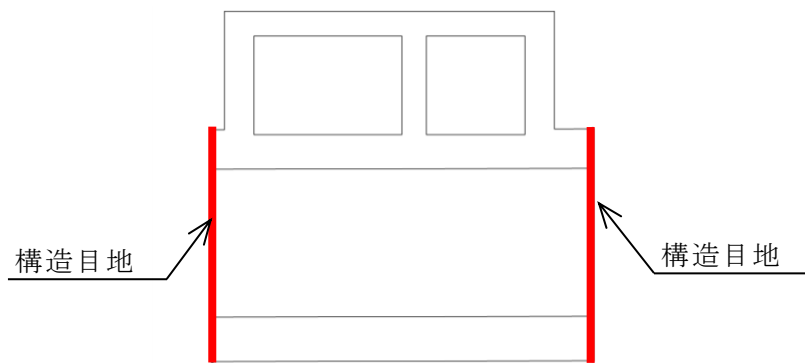
N-S断面において平面応力要素でモデル化する屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）のモデル化範囲を図4-4に、E-W断面において平面応力要素でモデル化する屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）のモデル化範囲を図4-5に示す。

剛性調整の方法を図4-6に示す。なお、単位荷重を載荷させる3次元モデル及び2次元モデルの底面の境界条件は、構造物の変位に着目するため固定境界とする。

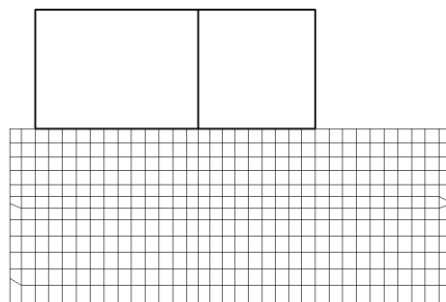
等価剛性モデルは、地震時荷重を保守的に評価するよう線形モデルとする。



(NS 断面構造目地位置)

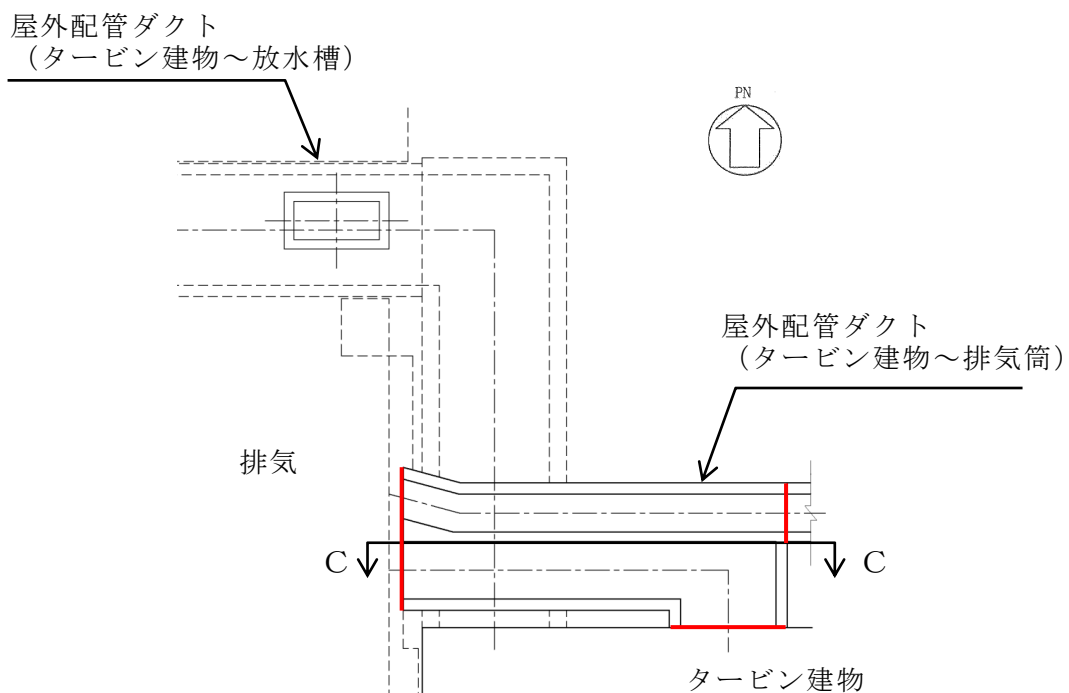


(NS 断面構造概要)



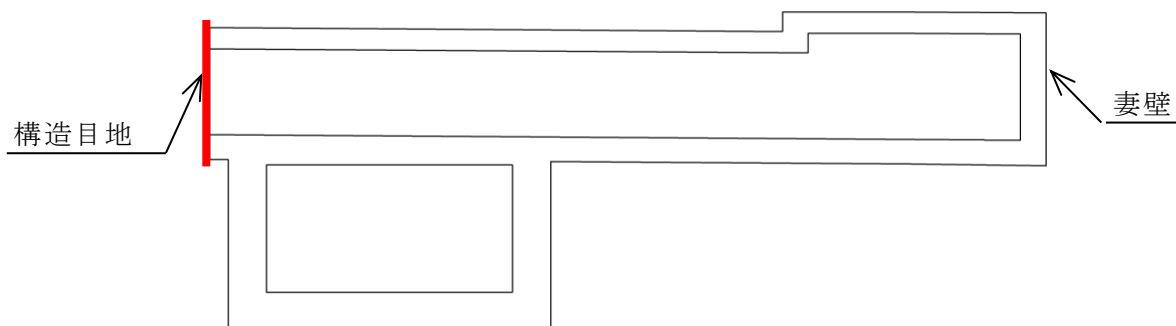
(NS 断面解析モデル概要)

図 4-4 NS 断面モデル化範囲概念図

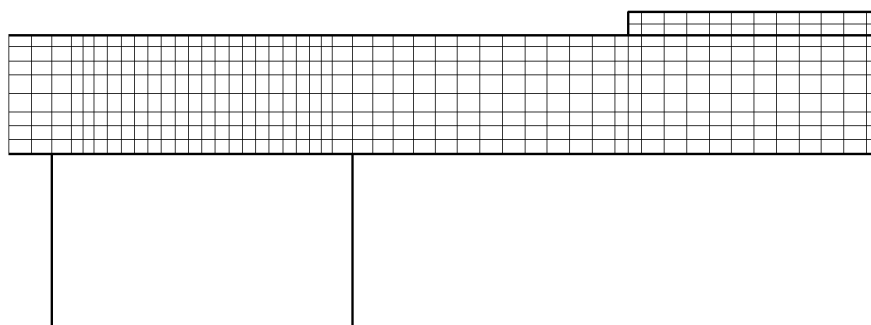


- : 一体化部
- : 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 構造目地

(E W断面構造目地位置)



(E W断面構造概要)



(E W断面解析モデル概要)

図 4-5 E W断面モデル化範囲概念図

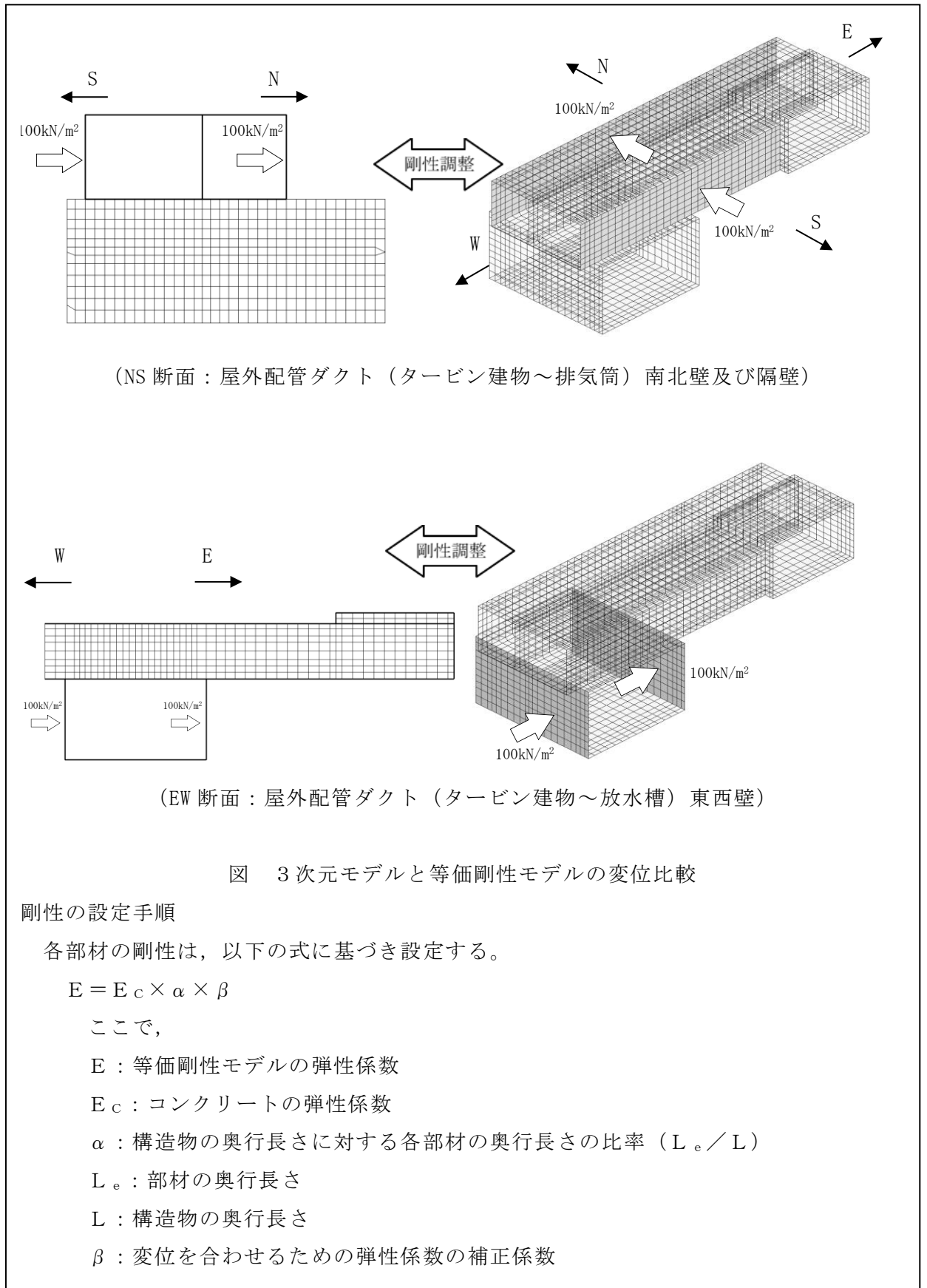
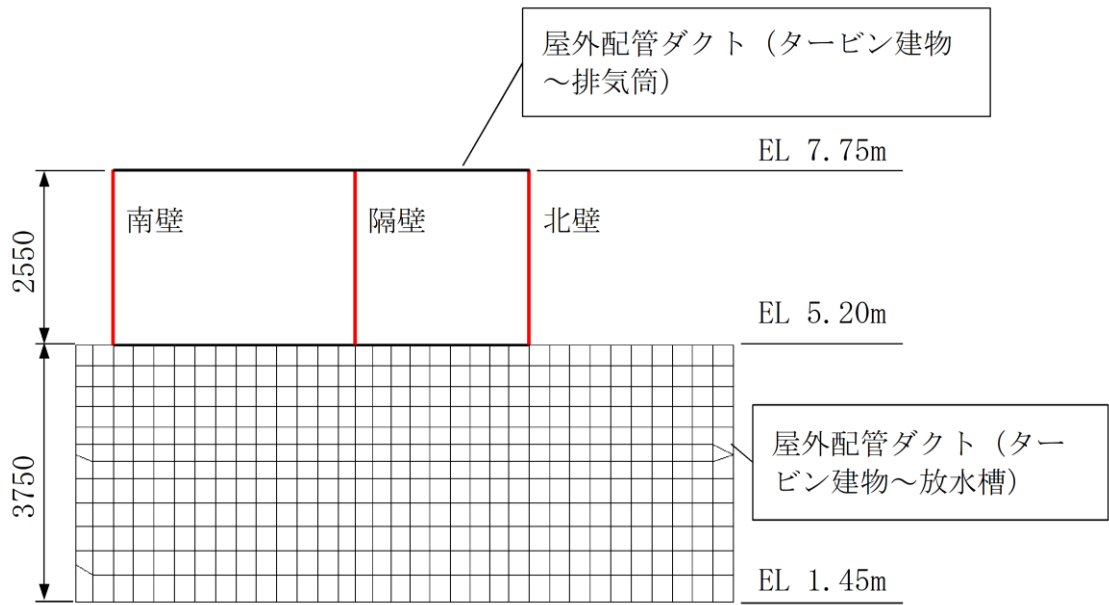


図 4-6 剛性の調整方法

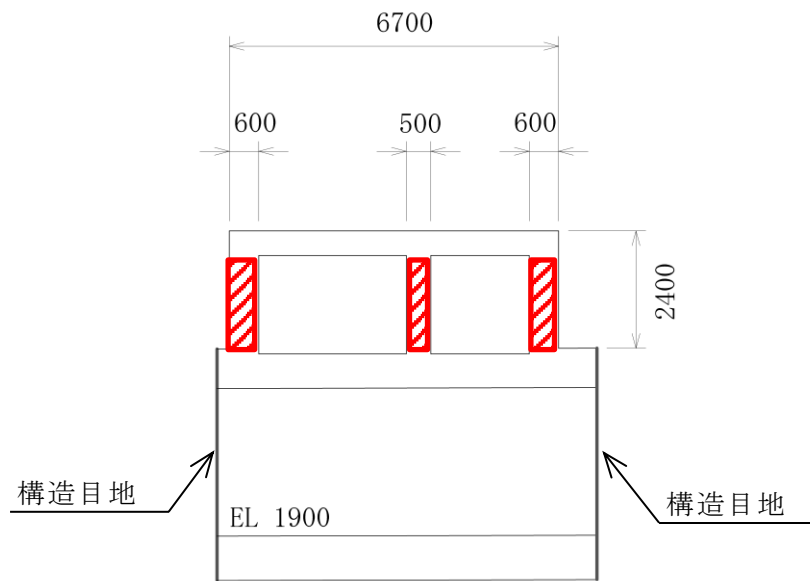
(1) 南北方向

南北方向のB-B断面は、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）のような加振に対して面外変形で抵抗する構造物は、線形はり要素にてモデル化し、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）のような加振に対して面内変形で抵抗する構造物は、平面応力要素にてモデル化する。

B-B断面の等価剛性モデル概念図を図4-7に、等価剛性モデルと3次元構造解析モデルの変位比較概念図を図4-8に、剛性調整結果を図4-9に、補正係数の計算結果を表4-1に示す。



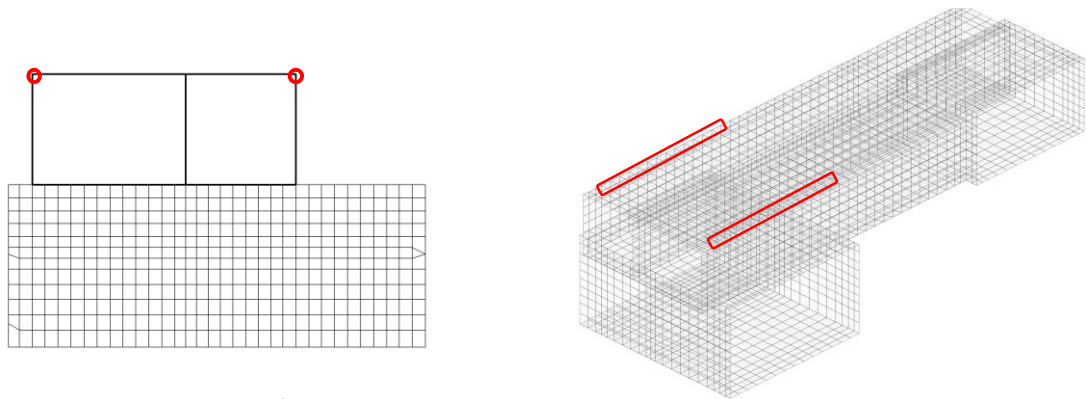
(NS 断面等価剛性モデル)



(NS 断面構造概要)

(単位: mm)

図 4-7 等価剛性モデル (B-B 断面)



等価剛性モデル

3次元構造解析モデル

(NS断面, 屋外配管ダクト (タービン建物~排気筒) 南北壁及び隔壁)

図 4-8 等価剛性モデルと3次元構造解析モデルの変位比較概念図 (B-B断面)

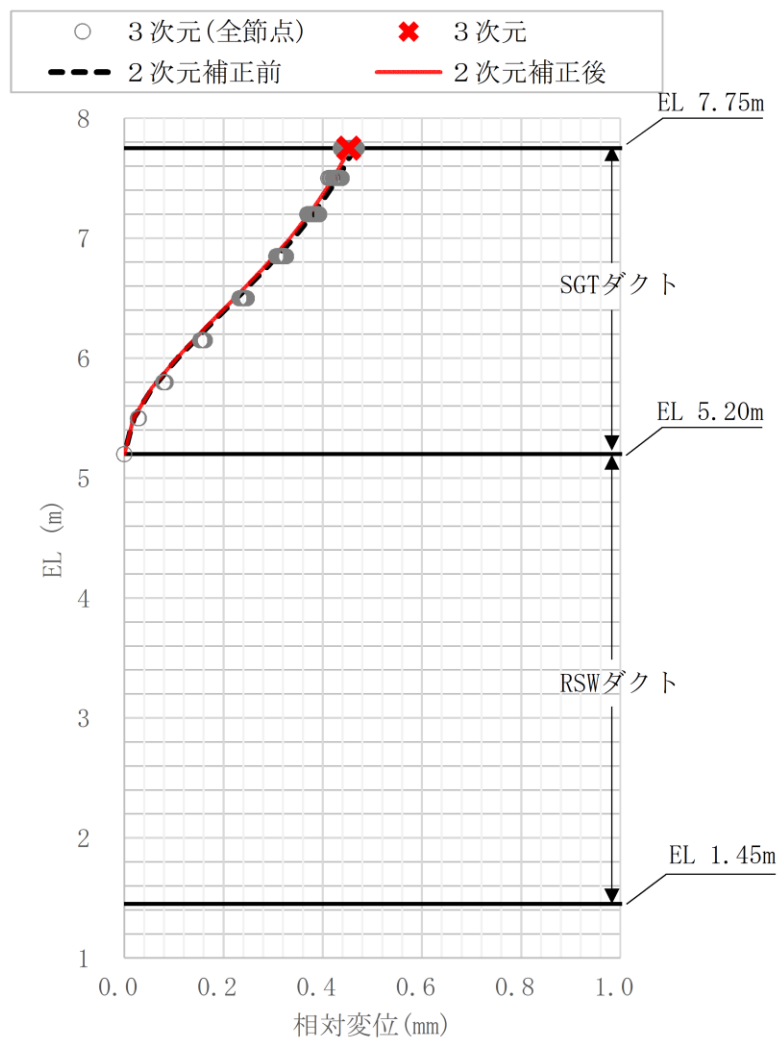


図 4-9 剛性調整結果 (B-B断面)

表 4-1 補正係数の計算結果 (B-B 断面)

対象断面	対象部位	奥行補正係数 α [-]	変位補正係数 β [-]
NS 断面	屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 南北壁及び隔壁	1.000	1.024

(2) 東西方向

東西方向のC-C断面は、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）のような加振に対して面外変形で抵抗する構造物は、線形はり要素にてモデル化し、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）のような加振に対して面内変形で抵抗する構造物は、平面応力要素にてモデル化する。

C-C断面の等価剛性モデル概念図を図4-10に、等価剛性モデルと3次元構造解析モデルの変位比較概念図を図4-11に、剛性調整結果を図4-12に、補正係数の計算結果を表4-2に示す。

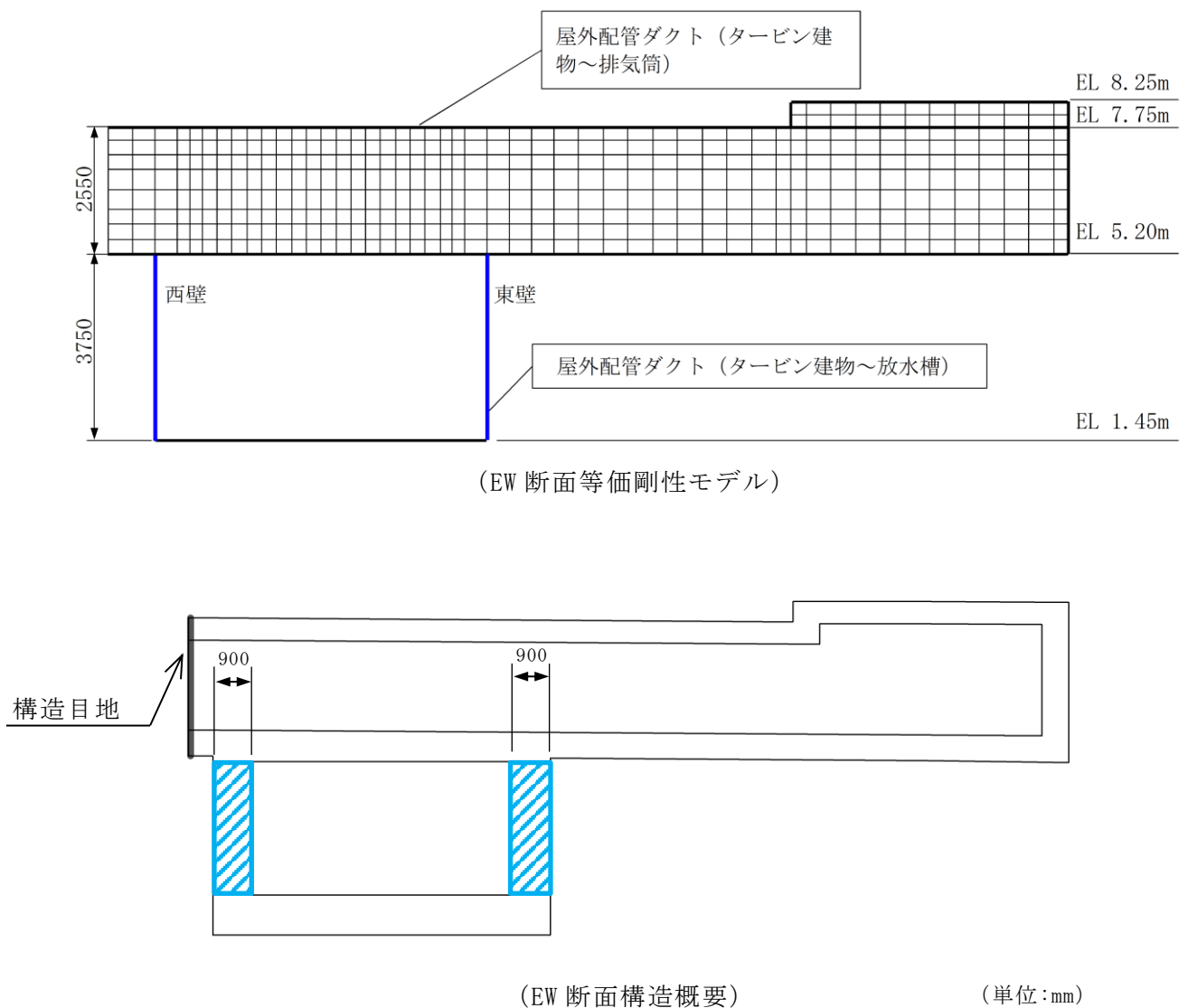
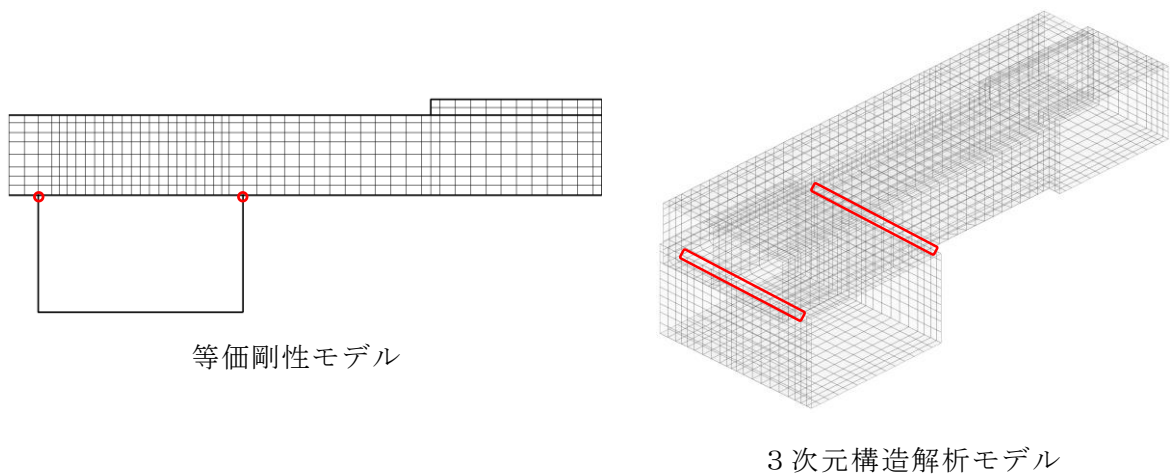


図4-10 等価剛性モデル (C-C断面)



(EW断面, 屋外配管ダクト (タービン建物~放水槽) 東西壁)

図 4-11 等価剛性モデルと 3次元構造解析モデルの変位比較概念図 (C-C断面)

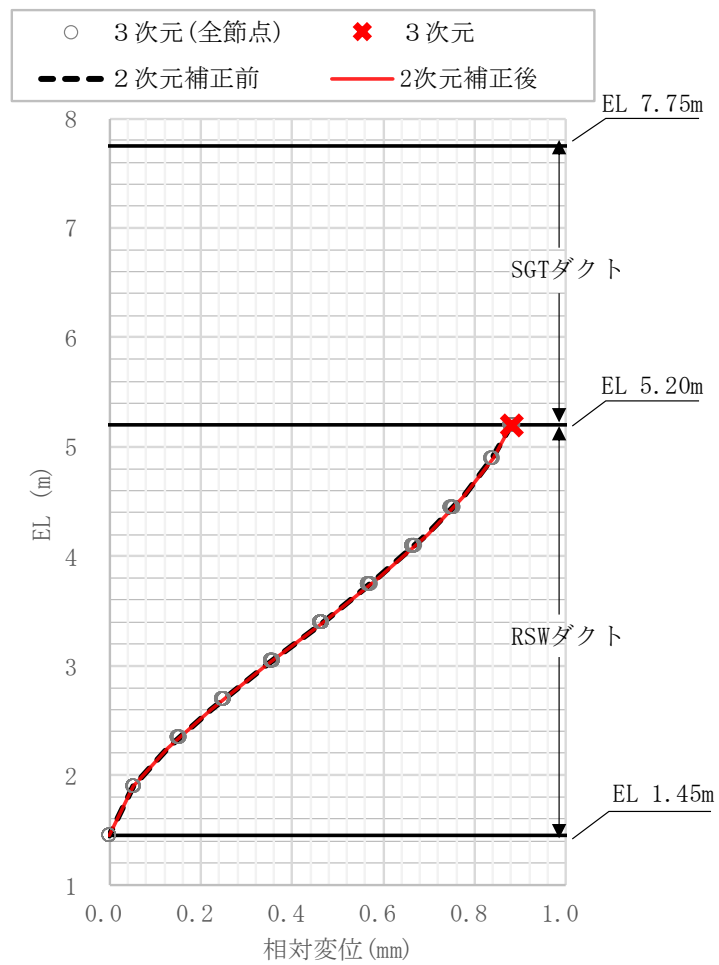


図 4-12 剛性調整結果 (C-C断面)

表 4-2 補正係数の計算結果 (C-C 断面)

対象断面	対象部位	奥行補正係数 α [-]	変位補正係数 β [-]
EW 断面	屋外配管ダクト (ター ビン建物～放水槽) 東西壁	1.000	0.998

4.2.4 隣接構造物のモデル化

解析モデル範囲において隣接構造物となるタービン建物及び排気筒基礎は、等価剛性として線形の平面ひずみ要素でモデル化する。

以下に、それぞれの構造物のモデル化方針を示す。

(1) タービン建物

タービン建物のモデル化方針については、本文「3.2.4 隣接構造物のモデル化」に基づきモデル化する。

(2) 排気筒基礎

等価剛性として線形の平面ひずみ要素でモデル化する。設定した物性値を表4-3に示す。

表 4-3 排気筒基礎の物性値

材料	設計基準強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比
排気筒基礎	20.6	2.33×10^4	22.6	0.2

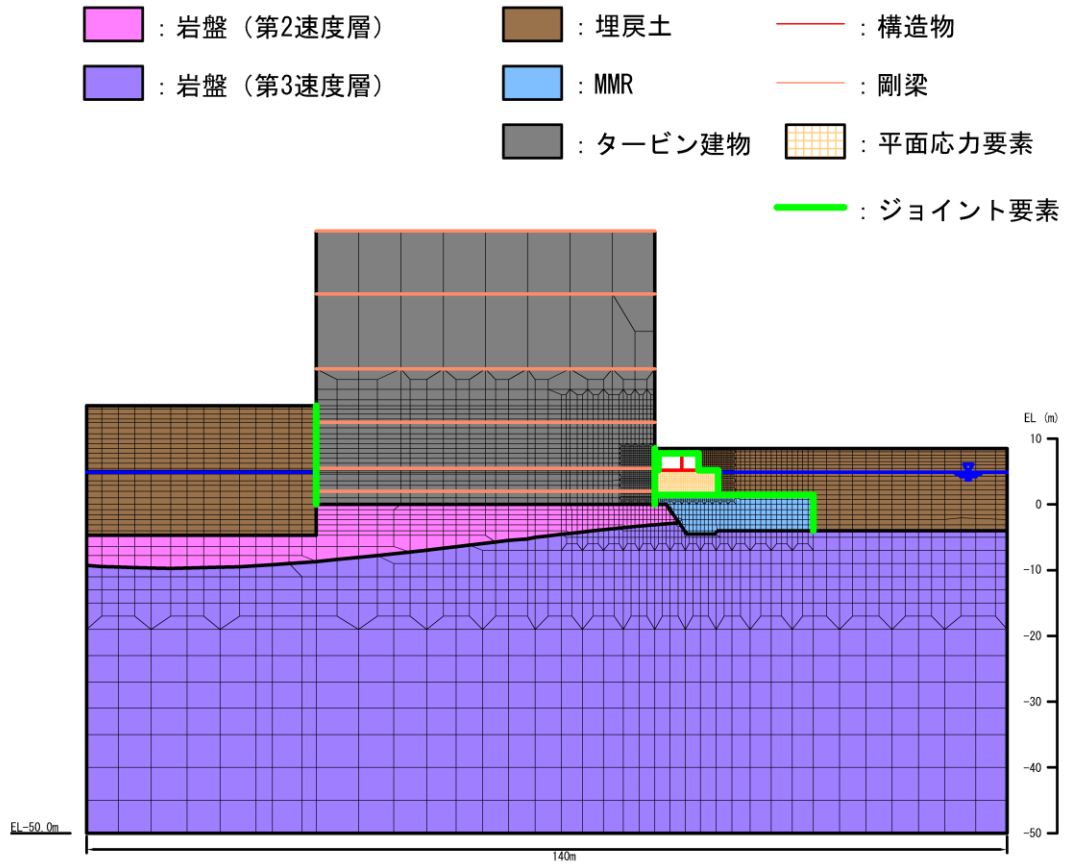
4.2.5 地盤及びMMRのモデル化

岩盤及びMMRは線形の平面ひずみ要素でモデル化する。また、埋戻土は、地盤の剛性及び減衰のひずみ依存性を考慮できるマルチスプリング要素でモデル化する。

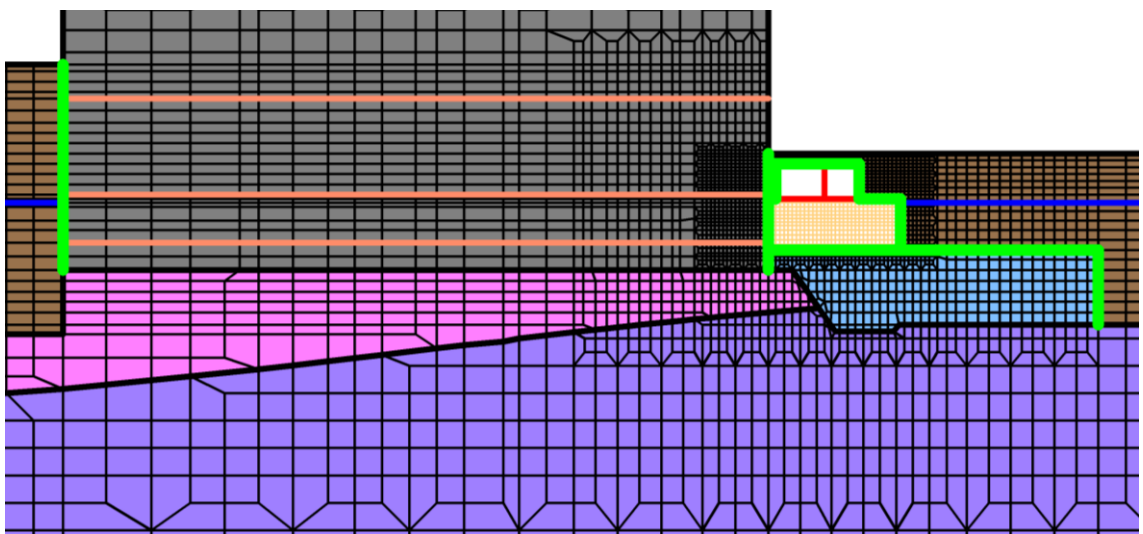
4.2.6 ジョイント要素の設定

ジョイント要素の設定については、本文「3.2.5 ジョイント要素の設定」に基づき設定する。

ジョイント要素の配置を図4-13及び図4-14に示す。











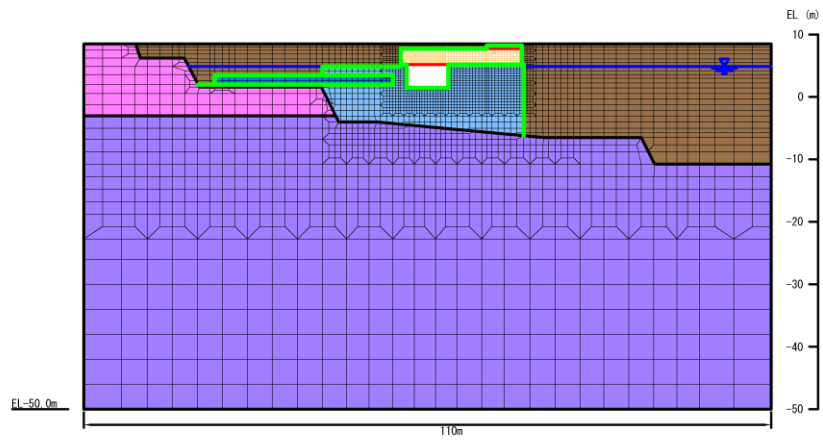
(全体図)



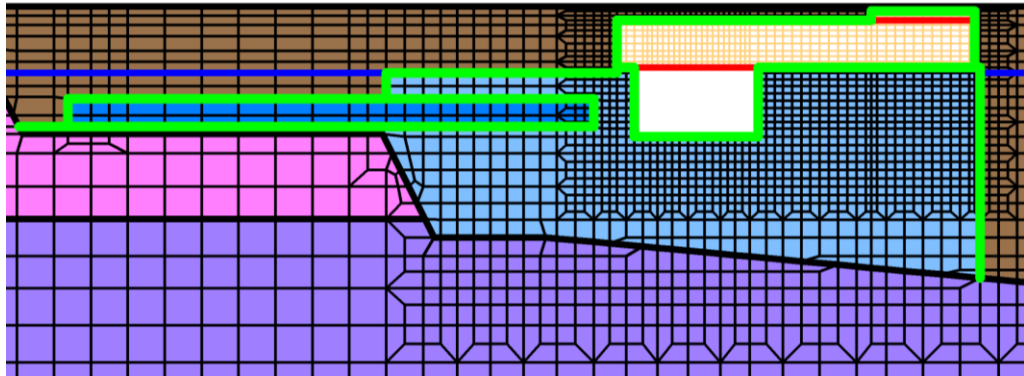
(拡大図)

図 4-13 ジョイント要素の配置 (B-B断面)

- | | | | | | |
|---|--------------|---|---------|---|-----------|
|  | : 岩盤 (第2速度層) |  | : 埋戻土 |  | : 構造物 |
|  | : 岩盤 (第3速度層) |  | : MMR |  | : 平面応力要素 |
| | |  | : 排気筒基礎 |  | : ジョイント要素 |



(全体図)



(拡大図)

図 4-14 ジョイント要素の配置 (C-C断面)

4.3 減衰定数

減衰定数は、「資料1 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 4-15 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

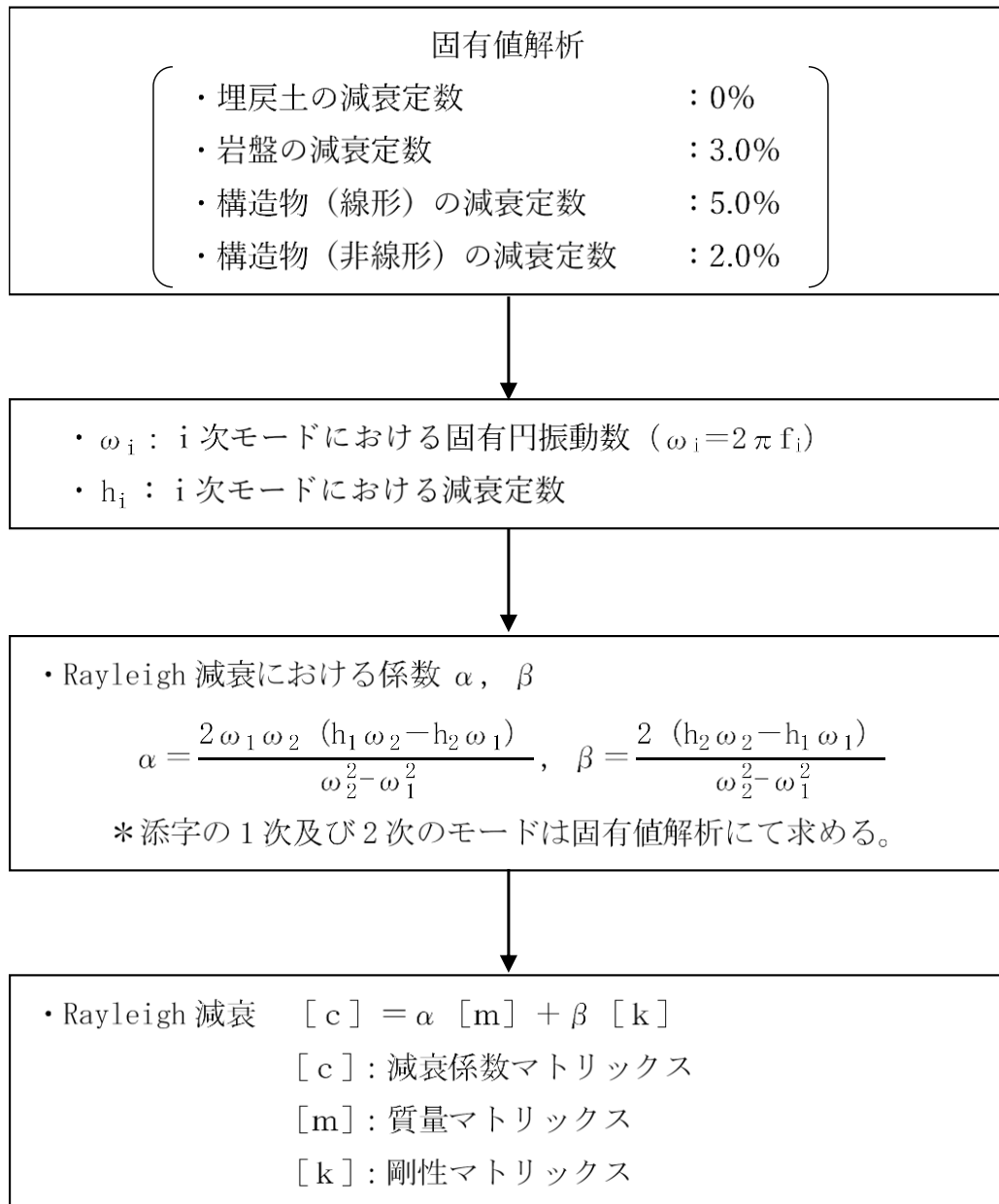


図 4-15 Rayleigh 減衰の設定フロー

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。

固有値解析結果の一覧を表 4-4 及び表 4-5 に、固有値解析におけるモード図を図 4-16 及び図 4-17 に、係数 α , β を表 4-6 に、固有値解析結果に基づき設定した Rayleigh 減衰を図 4-18 及び図 4-19 に示す。

表 4-4 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
		Tx	Ty	β_x	β_y	
1	4.049	23	1	67.850	10.060	1次として採用
2	4.991	12	0	-49.530	12.640	—
3	5.550	5	0	-30.790	2.670	—
4	7.203	25	0	69.990	5.022	2次として採用
5	7.796	6	1	35.570	-4.878	—
6	7.955	0	4	-4.270	31.240	—
7	8.545	7	1	-38.830	9.628	—
8	9.518	1	0	12.060	8.510	—
9	10.032	0	7	5.151	-37.690	—
10	10.085	0	7	1.608	35.200	—

表 4-5 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
		Tx	Ty	β_x	β_y	
1	4.083	15	1	48.120	-9.638	1次として採用
2	6.331	52	0	-88.310	-10.450	-
3	7.454	5	0	-27.380	2.445	2次として採用
4	7.934	0	4	4.120	22.050	-
5	9.170	1	1	-7.785	-11.940	-
6	10.326	0	7	-8.227	32.560	-
7	11.010	2	0	-16.560	-4.227	-
8	11.215	4	0	25.440	-4.781	-
9	11.733	1	2	10.960	16.920	-
10	12.188	3	12	-19.690	42.060	-

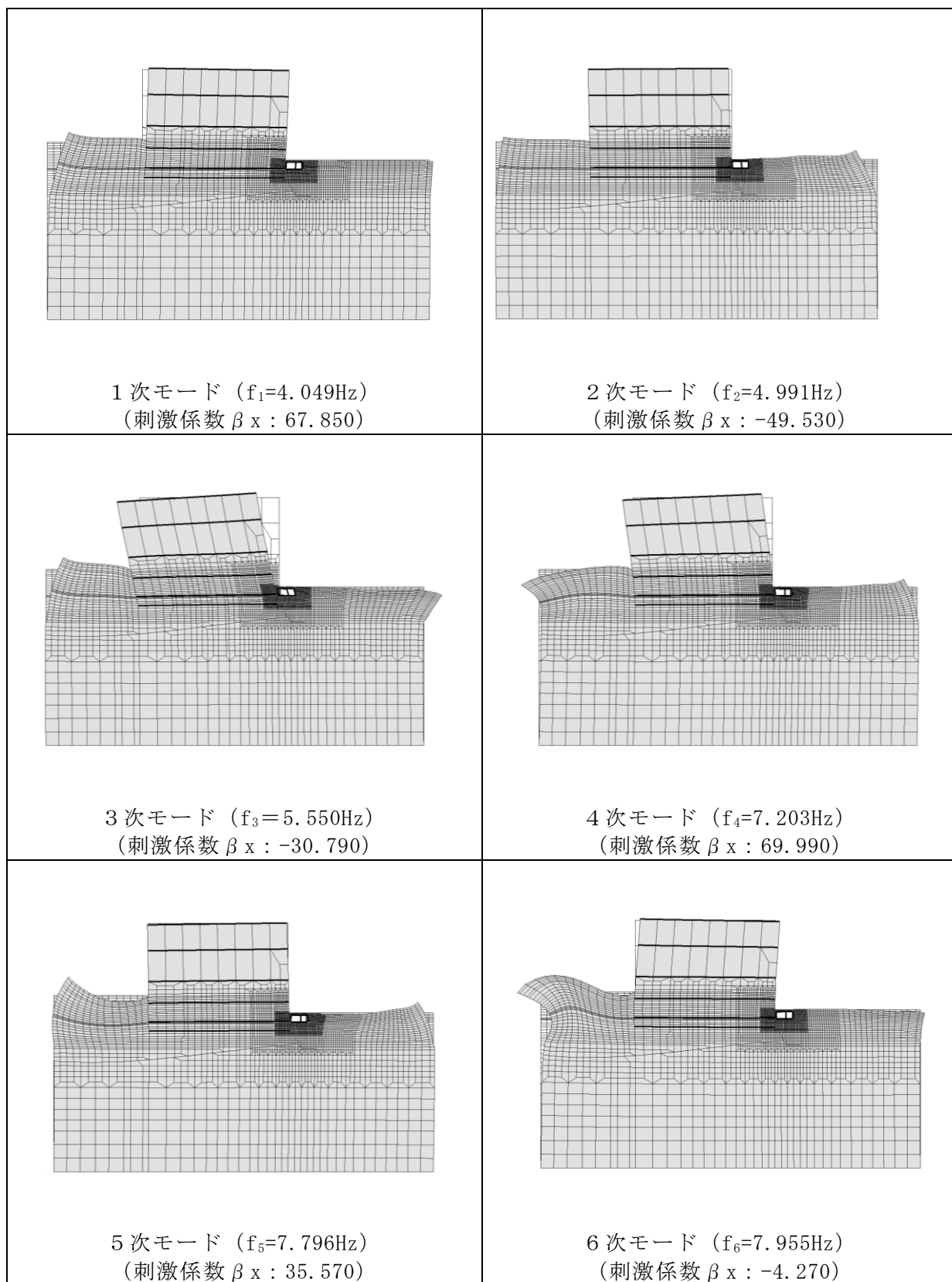


図 4-16(1) 固有値解析結果 (モード図) (B-B断面)

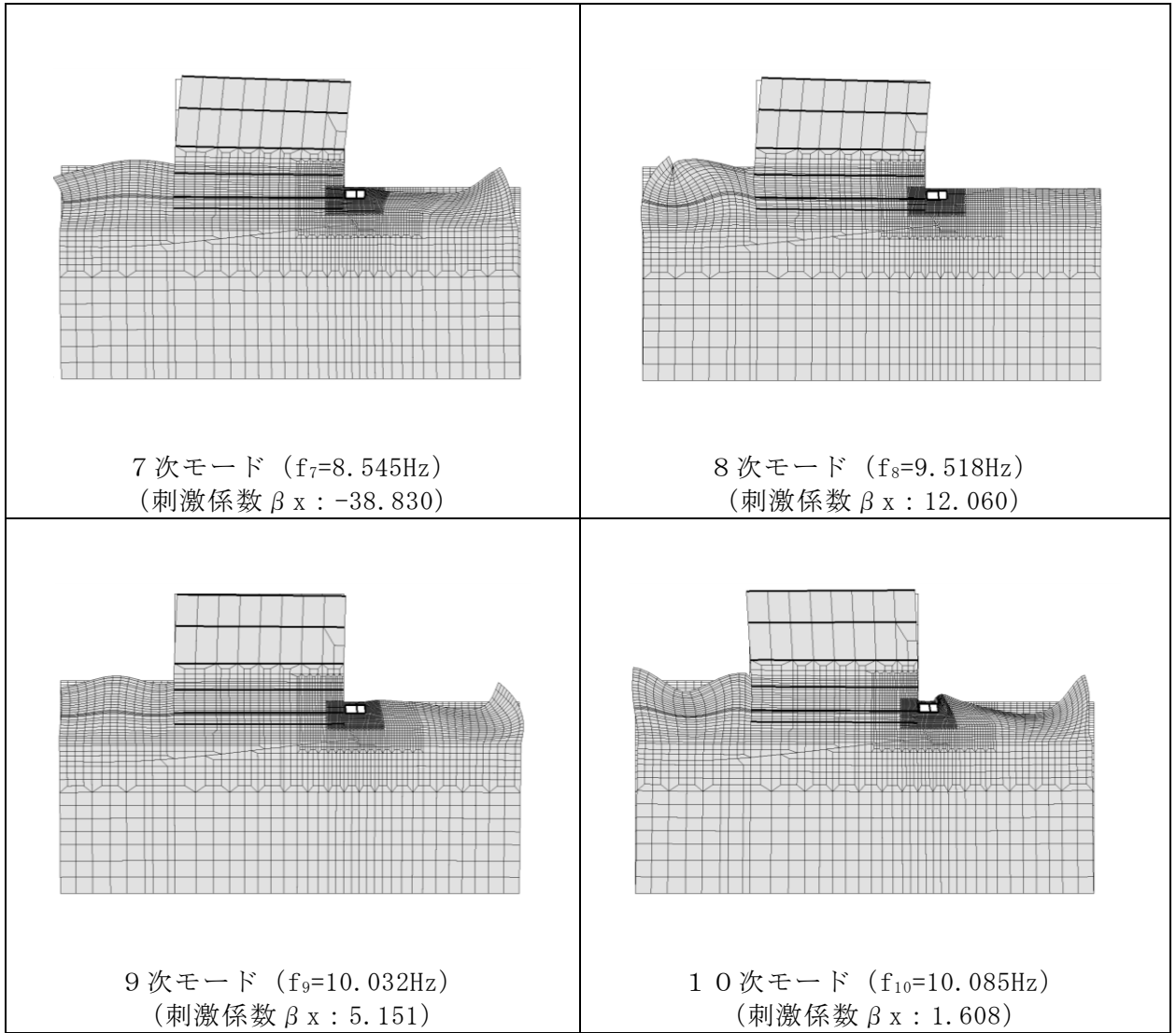


図 4-16(2) 固有値解析結果 (モード図) (B-B断面)

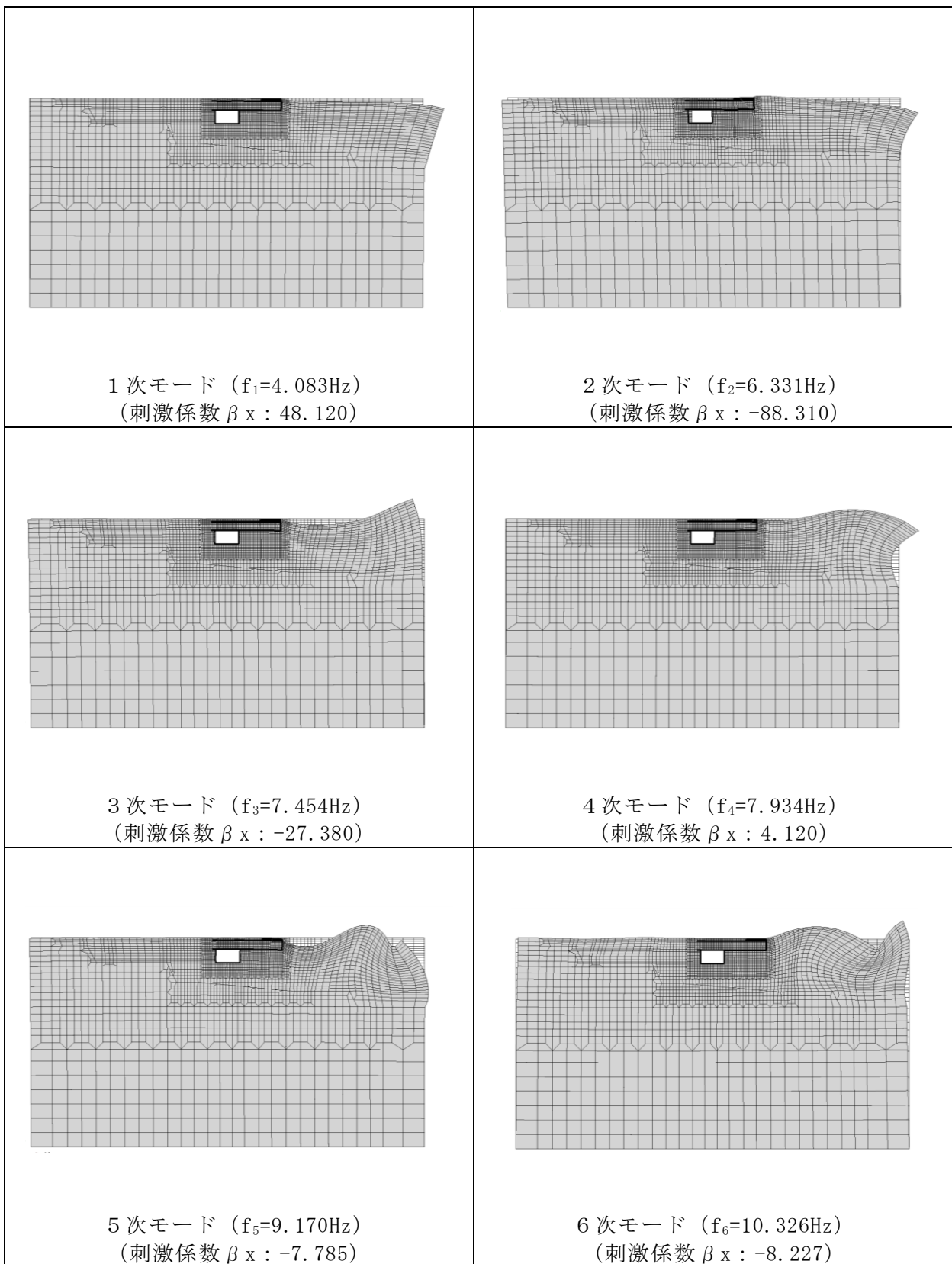


図 4-17(1) 固有値解析結果 (モード図) (C-C断面)

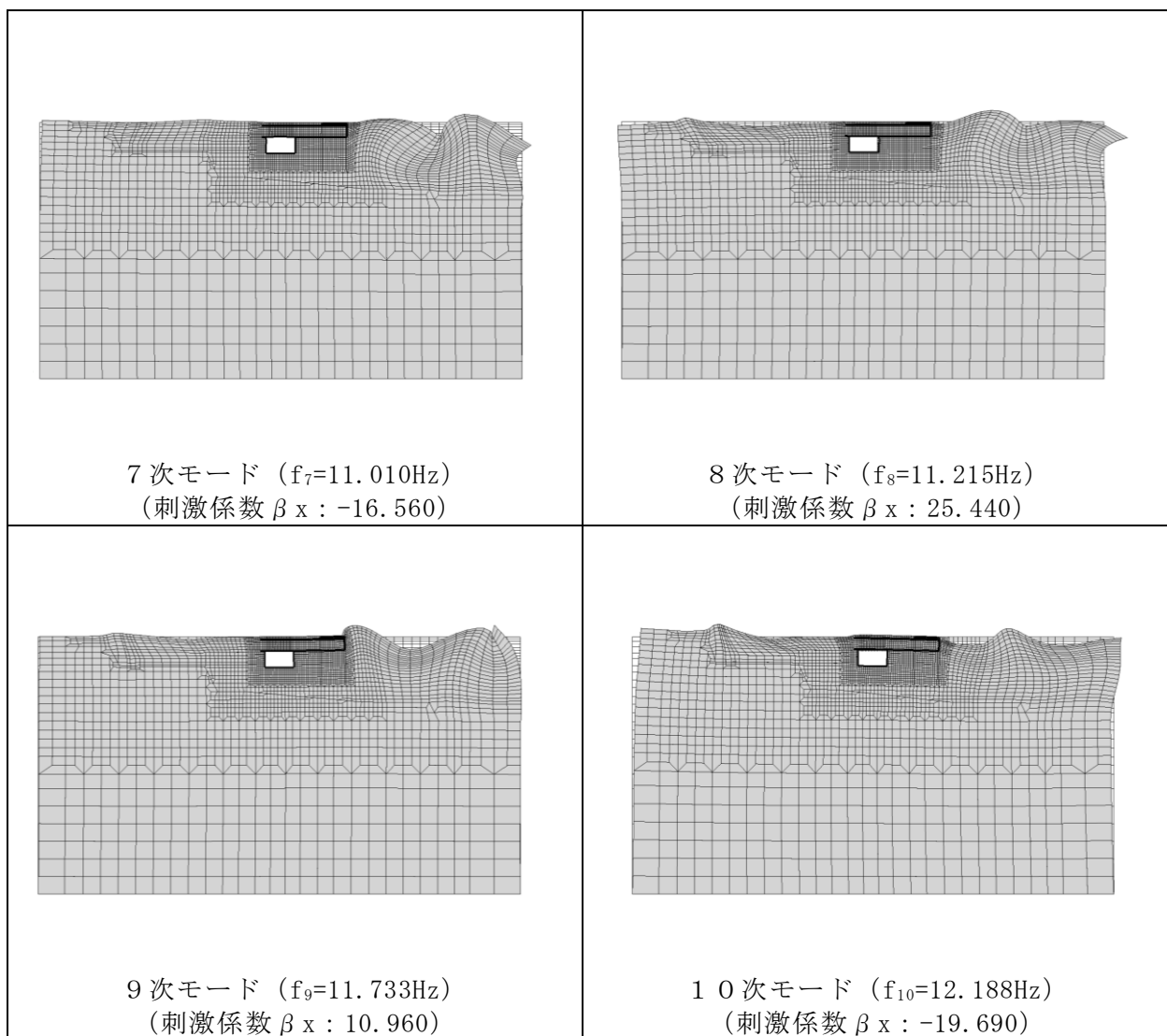


図 4-17(2) 固有値解析結果 (モード図) (C-C断面)

表 4-6 Rayleigh 減衰における係数 α , β の設定結果

地震時応答算出断面	α	β
B - B 断面	1.5868E-01	8.9474E-04
C - C 断面	1.8041E-01	1.3127E-04

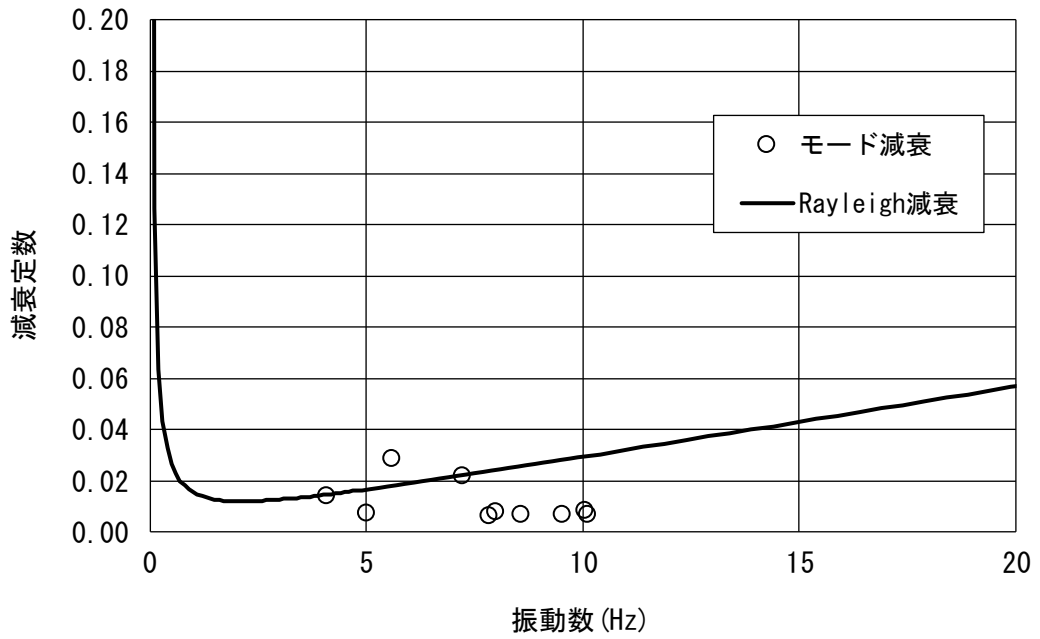


図 4-18 設定した Rayleigh 減衰 (B - B 断面)

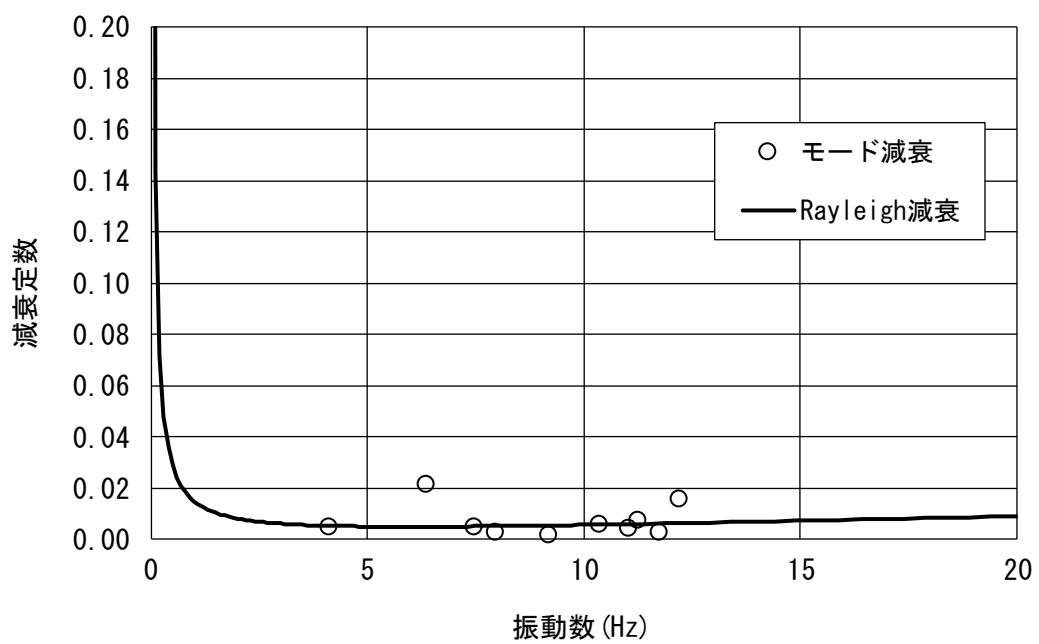


図 4-19 設定した Rayleigh 減衰 (C-C 断面)

4.4 荷重及び荷重の組合せ

耐震評価にて考慮する荷重は、常時の荷重（永久荷重）及び地震荷重を抽出し、それぞれを組み合わせで設定する。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（タービン建物～排気筒）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 4-7 に示す。

表 4-7 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。
		積雪荷重	○	・地表面及びタービン建物天端に考慮する。
		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	○		

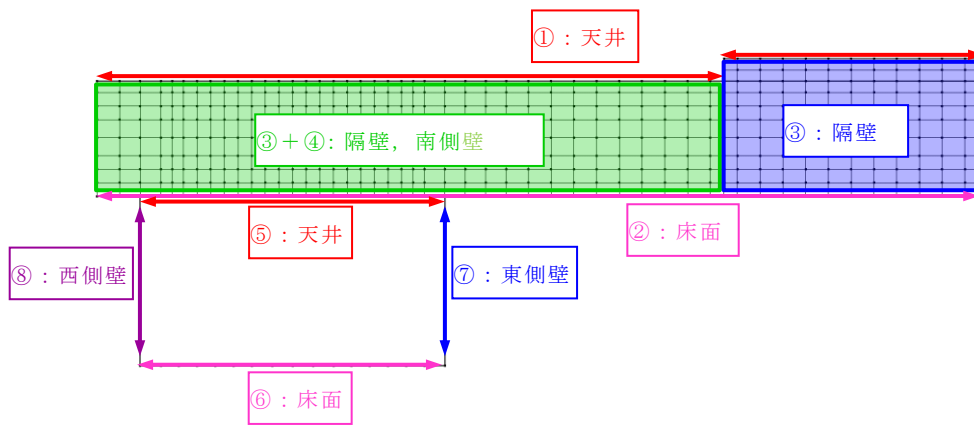
4.4.1 機器・配管荷重

地震時に屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）及び屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）に作用する機器・配管系の荷重一覧を表 4-8 に、荷重図を図 4-20 示す。

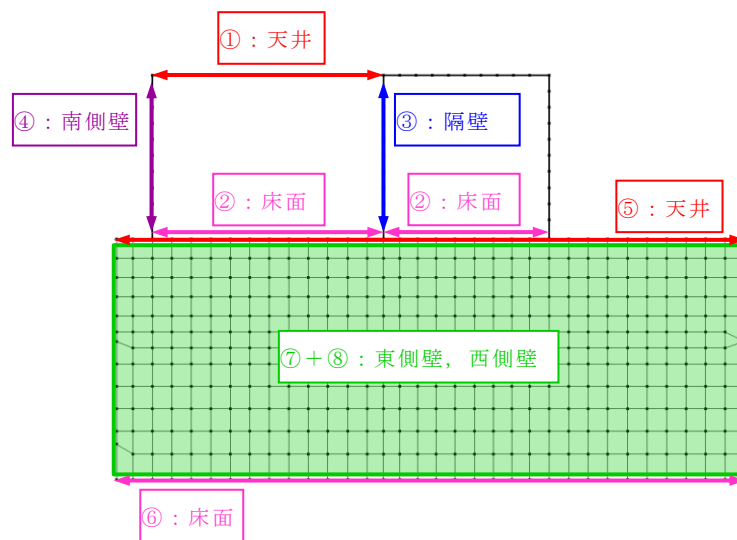
表 4-8 機器・配管荷重一覧

対象構造物	配管敷設面における単位面積あたりの質量 (kN/m ²)			
	①天井	②床面	③隔壁	④南側壁
屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	1.334	0.737 (7.35 kN/m ²)*	1.060	1.117
屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）	⑤天井	⑥床面	⑦東側壁	⑧西側壁
	1.180	3.581	0	0.247

注記*：隔壁より北側の屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）床面には括弧内の値を作用させる。



EW 断面 配管荷重設定概要



NS 断面 配管荷重設定概要

図 4-20 解析用機器・配管荷重図

4.4.2 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、「3.7 地下水位」のとおりとし、地下水の密度として 1.00g/cm^3 を考慮する。

4.4.3 積雪荷重

積雪荷重は、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。

地表面及びタービン建物天端の積雪荷重は、単位奥行 (1m) 当たりの付加重量として選定する。

4.5 地震応答解析の解析ケース

4.5.1 耐震評価における解析ケース

本文「3.5.1 耐震評価における解析ケース」における地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース及び解析ケースの組合せに従って地震応答解析を実施する。

5. 3次元構造解析

5.1 解析手法

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部については、複雑な構造を有し、3次元的な精緻な荷重の算出が必要であることから、構造部材の応答値の算出は、3次元構造解析により行い、構造物の各部材を非線形シェル要素でモデル化し、耐震評価を行う。

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部に作用する荷重は、2次元の地震応答解析において屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部の評価に支配的な荷重が作用する時刻を選定し、当該時刻における地震時応答から設定する。3次元構造解析には、解析コード「FINAS/STAR」を用いる。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。

5.2 解析モデルの設定

5.2.1 構造物のモデル化

構造物の各部材は、材料の非線形特性を考慮した非線形シェル要素でモデル化する。モデル概念図を図 5-1 に、各部材の要素座標系を図 5-2 に示す。

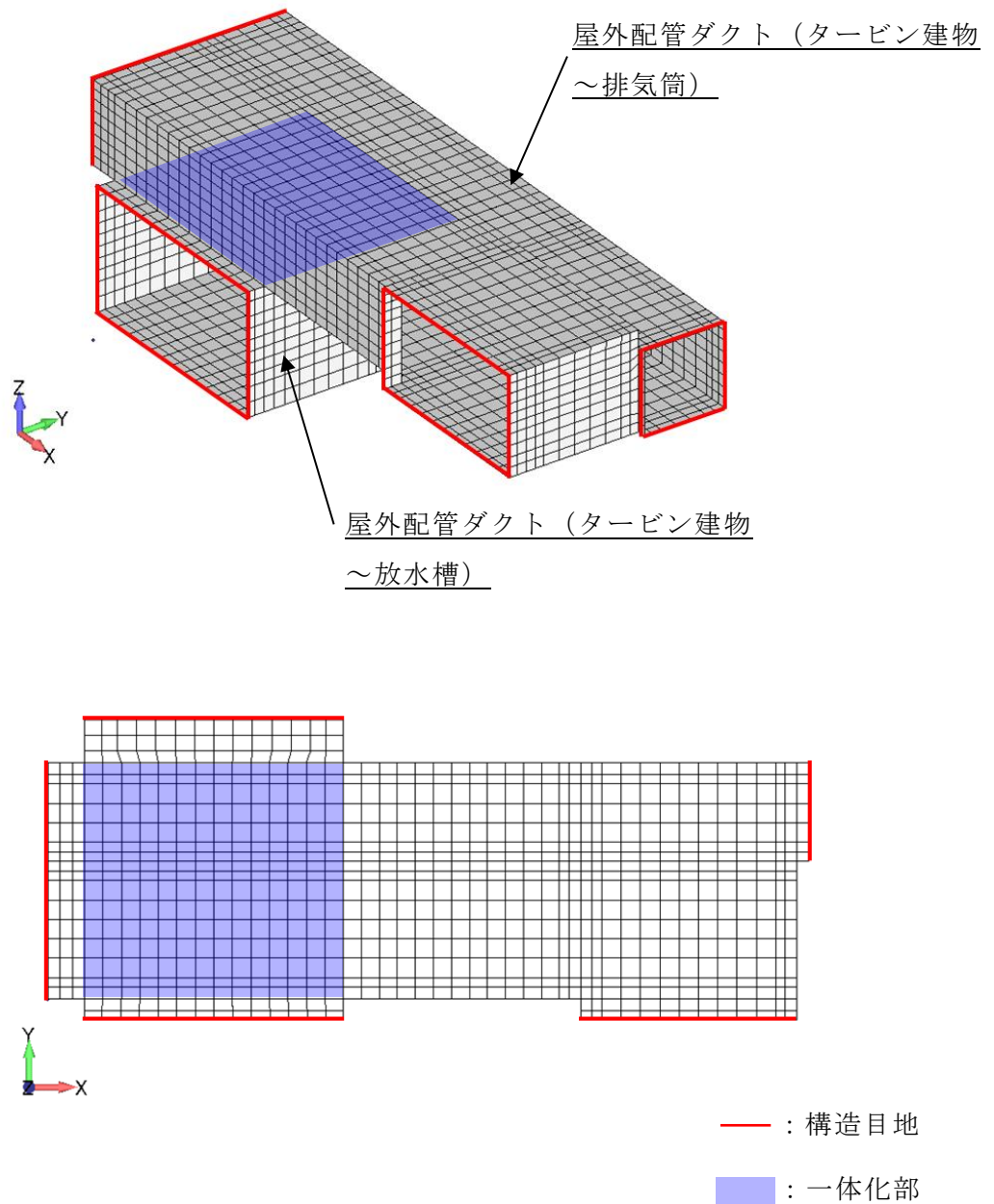


図 5-1 3次元構造解析モデルの概念図

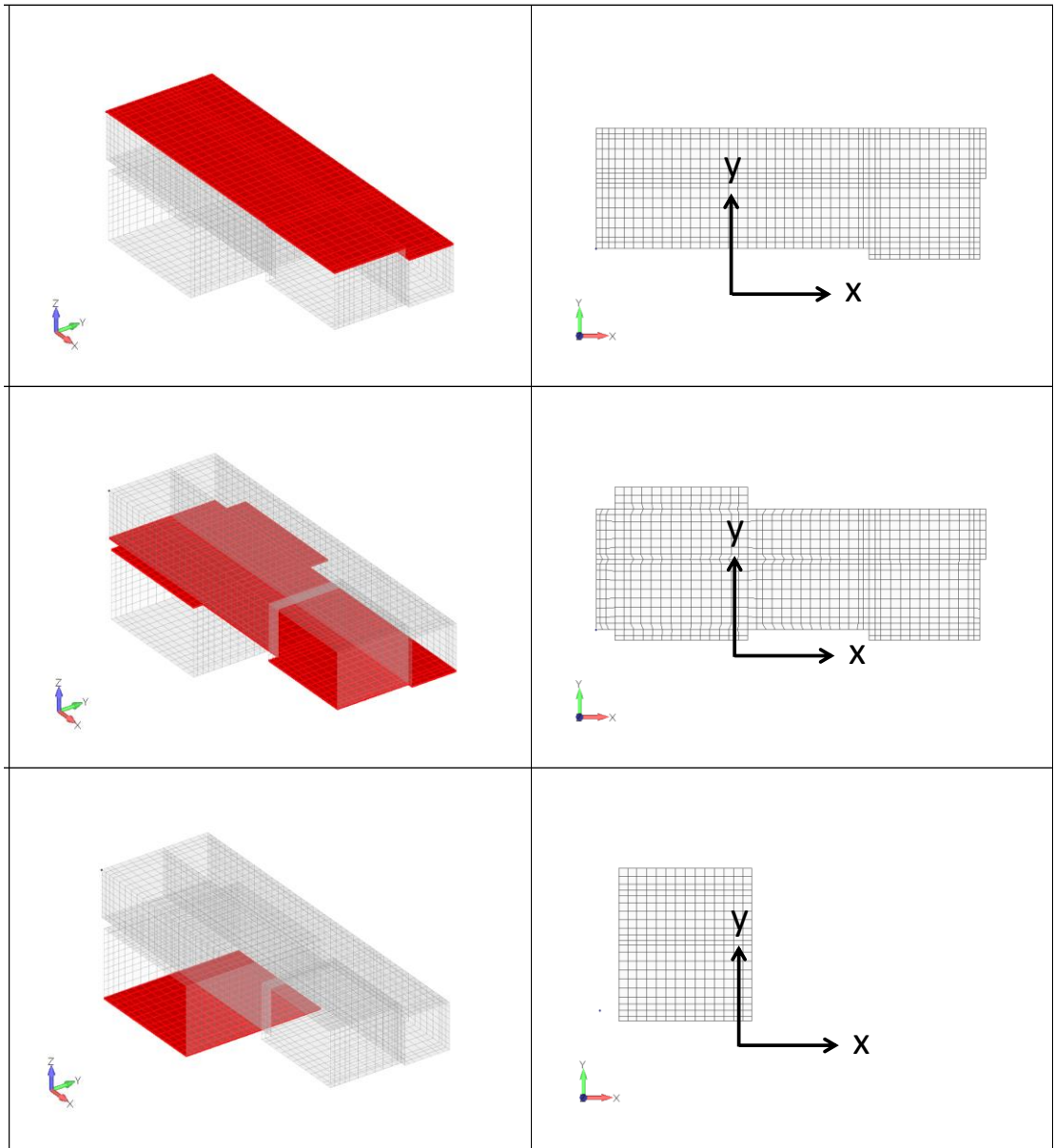


図 5-2 (1) 頂版・底版の要素座標系

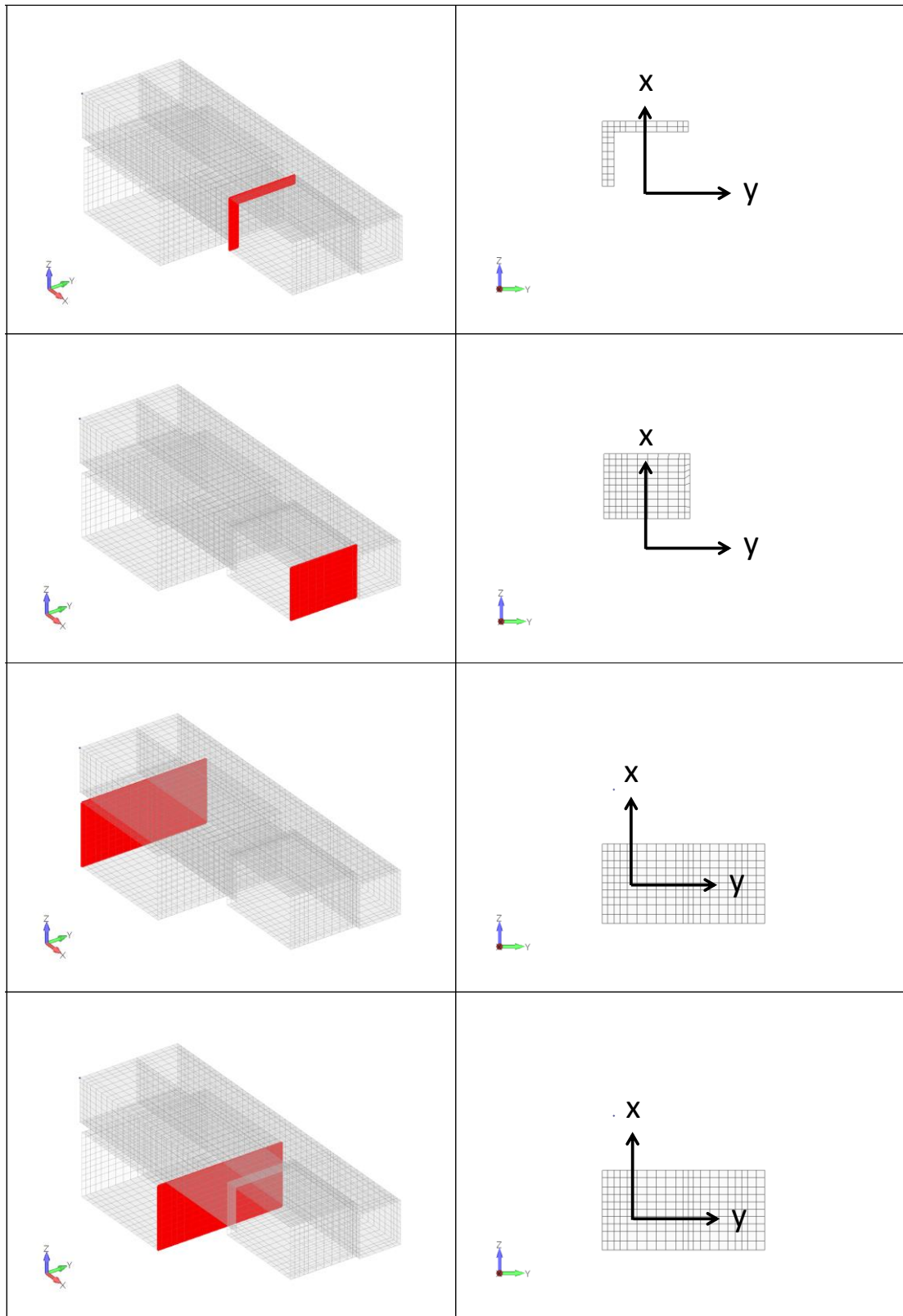


図 5-2 (2) 側壁の要素座標系

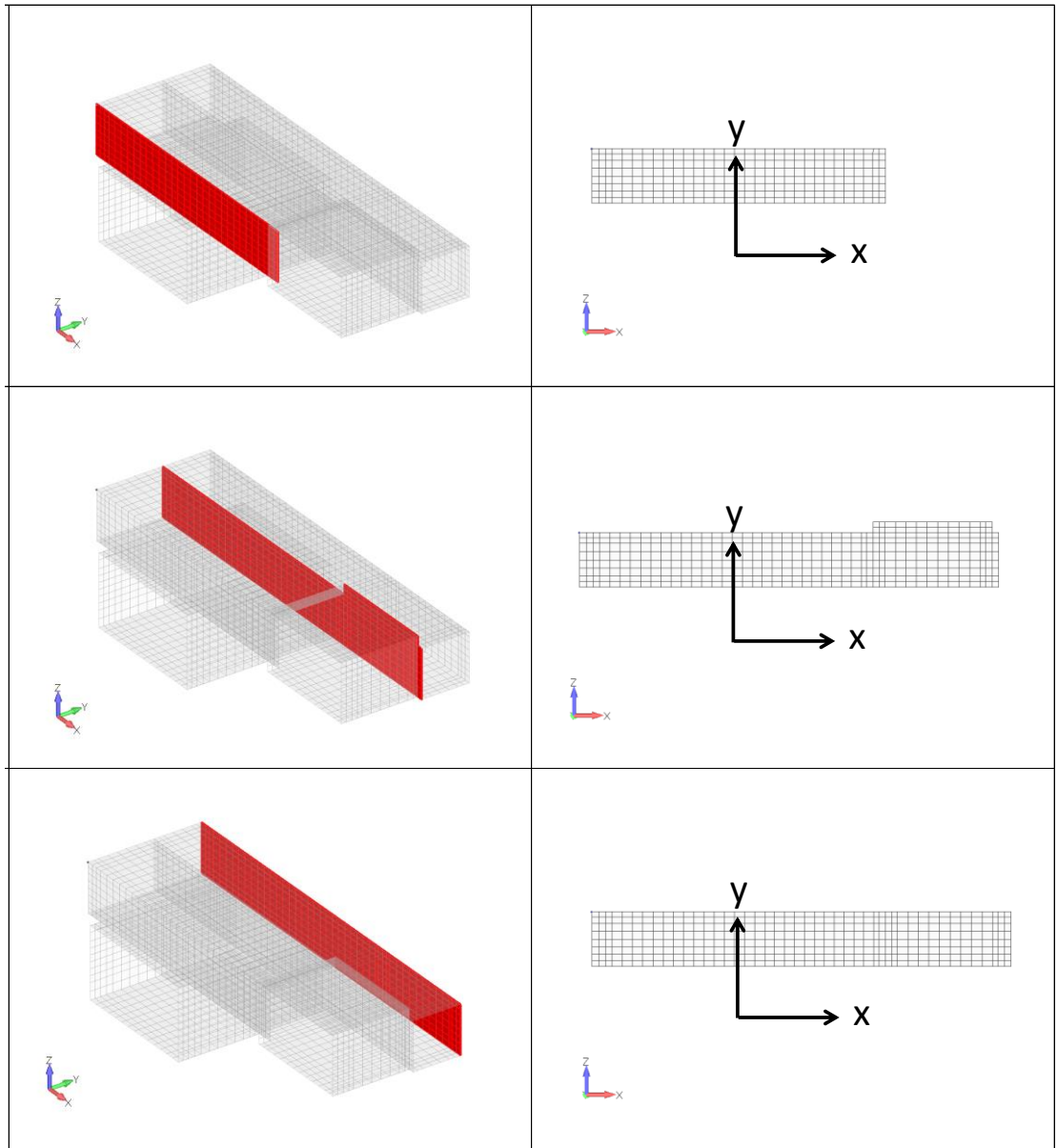


図 5-2 (3) 側壁の要素座標系

非線形シェル要素は、部材高さ方向に平面要素を重ね合わせて構成する。主筋の位置が層の中心となるよう上側、下側に鉄筋コンクリートの層を設定し、鉄筋コンクリート層を除く範囲は、無筋コンクリート層としてモデル化する。鉄筋コンクリート層の厚さは、土木学会マニュアルに示される一般的な分割方法に従い、かぶり厚さの2倍とする。各要素の鉄筋部分は、鉄筋の軸方向剛性のみを有する鉄筋層としてモデル化する。図5-3に非線形シェル要素の概念図を示す。

また、部材接合部の隅角部には剛域を設ける。剛域は、コンクリート標準示方書2017に基づき、図5-4のように設定する。ただし、剛域を設けることにより、要素が過度に扁平となる場合には設定しないこととする。

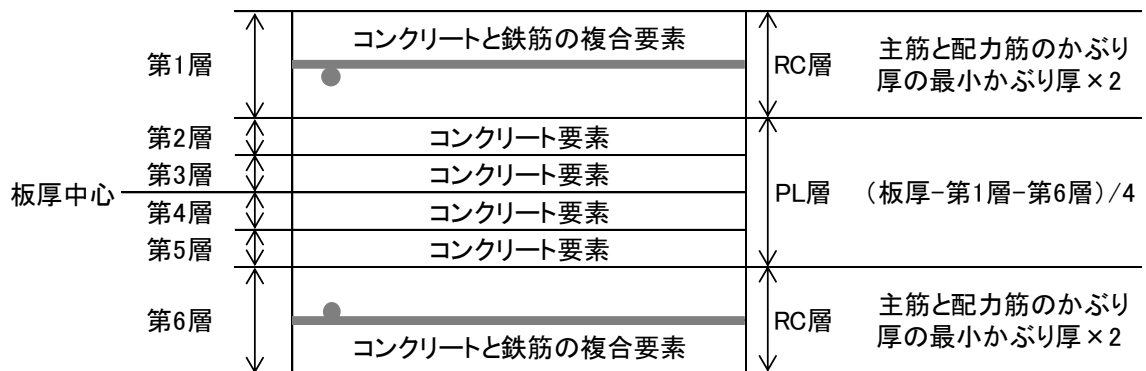
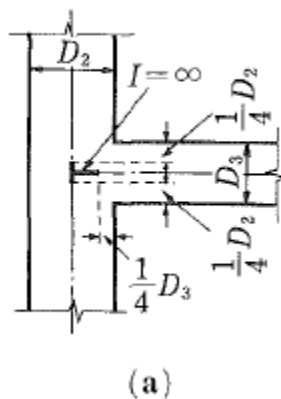


図5-3 非線形シェル要素の概念図



a. ハンチが無い場合は部材端から1/4入った断面より内部を剛域とする。

図5-4 剛域の設定（「コンクリート標準示方書2017」より引用）

5.2.2 境界条件

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）及び屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の隅角部には構造目地が設置されており，その挙動を3次元構造解析において正確に表現するために，3次元構造解析の境界条件として，ジョイント要素を設置する。

境界条件の概念図を図5-5に，ジョイント要素の設定条件を表5-1に示す。

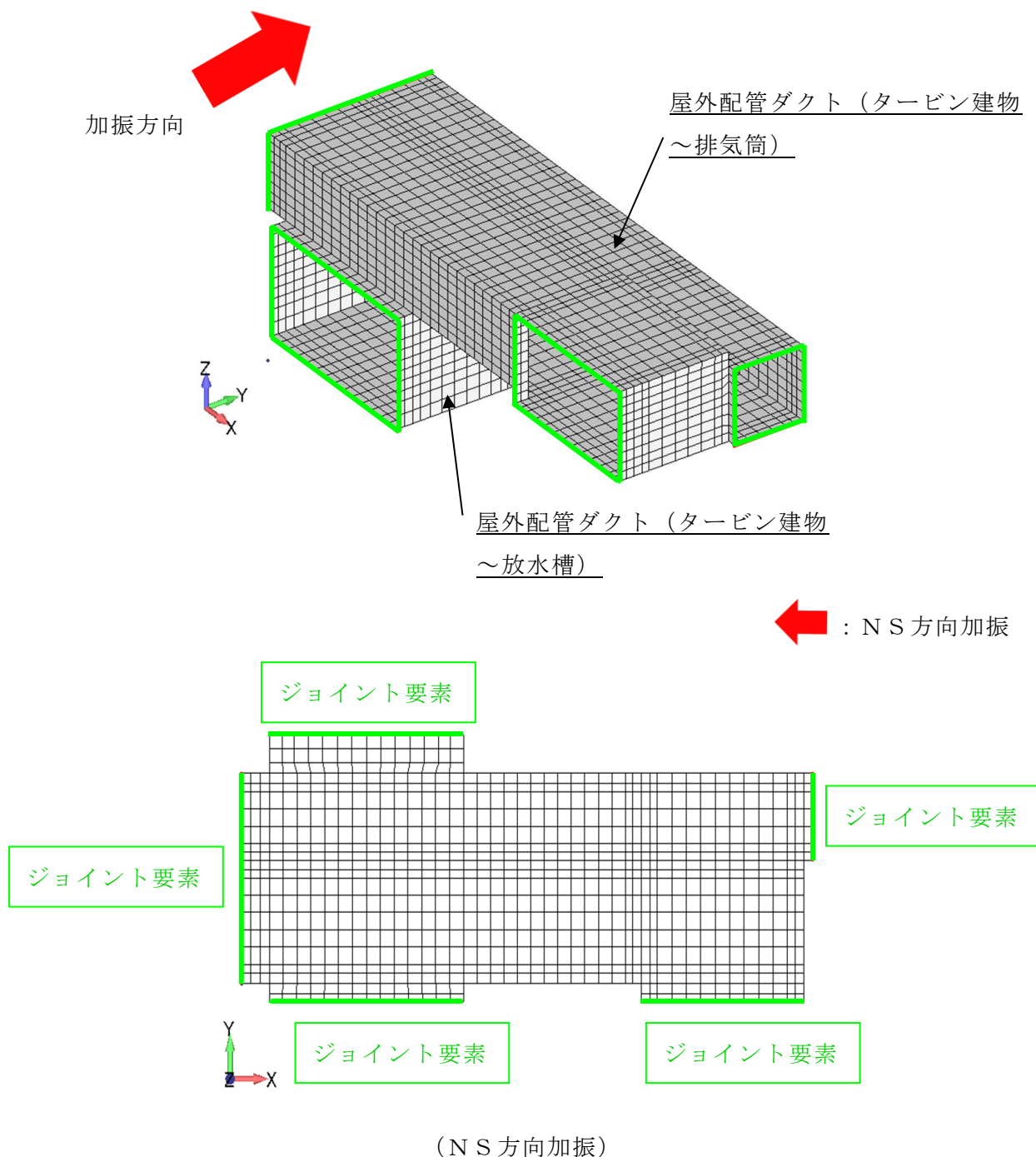
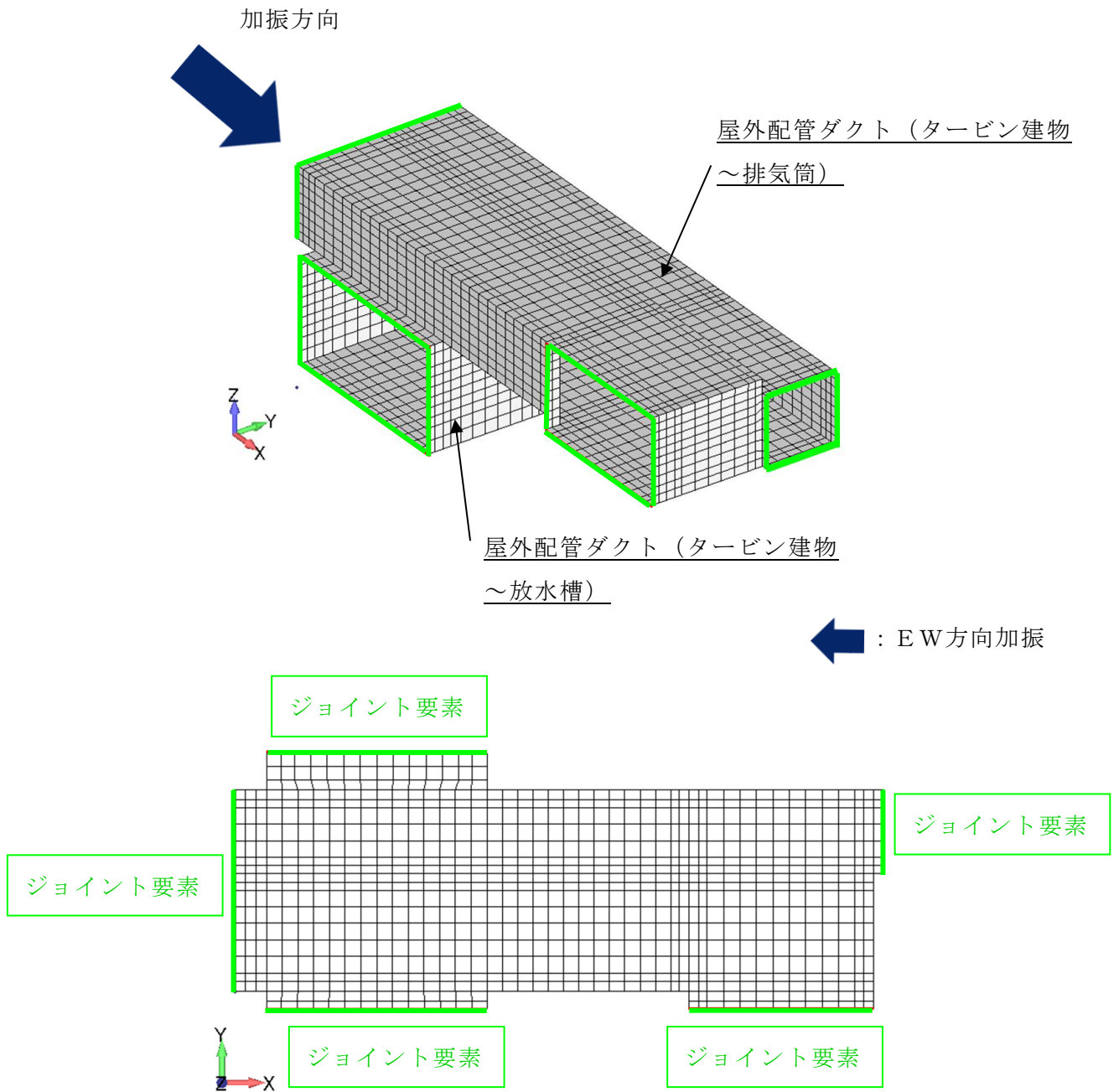


図5-5(1) 3次元構造解析モデルの境界条件の概念図



(E W方向加振)

図 5-5(2) 3次元構造解析モデルの境界条件の概念図

表 5-1 ジョイント要素の設定条件

ジョイント（軸方向）	ジョイント（せん断方向）
初期剛性 K_0 1.0×10^{10} (kN/m)（十分剛な値）	—
剥離後の剛性 K_0 1.0 (kN/m)（十分小さい値）	—

5.2.3 地盤ばね要素

常時解析において、支持地盤に設定する地盤ばねは基礎地盤に対する静的な荷重状態を想定して定義されている「道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編」に基づき設定する。

地震時解析において、支持地盤及び側方地盤に設定する地盤ばねは地盤と構造物間の剥離を考慮できる非線形ばねでモデル化し、「道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編」に基づき設定する。

1方向荷重時には、荷重方向と平行する壁に面直方向の地盤ばねを設定する。2方向荷重時には、構造物底面のみに面直方向及びせん断力方向の地盤ばねを設定する。

(1) 1方向荷重時

a. 常時

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）及び屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の側面は常時土圧でモデル化する。なお、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）及び屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の底面においては、線形ばねでモデル化する。

地盤ばねの設定イメージを図5-6に示す。

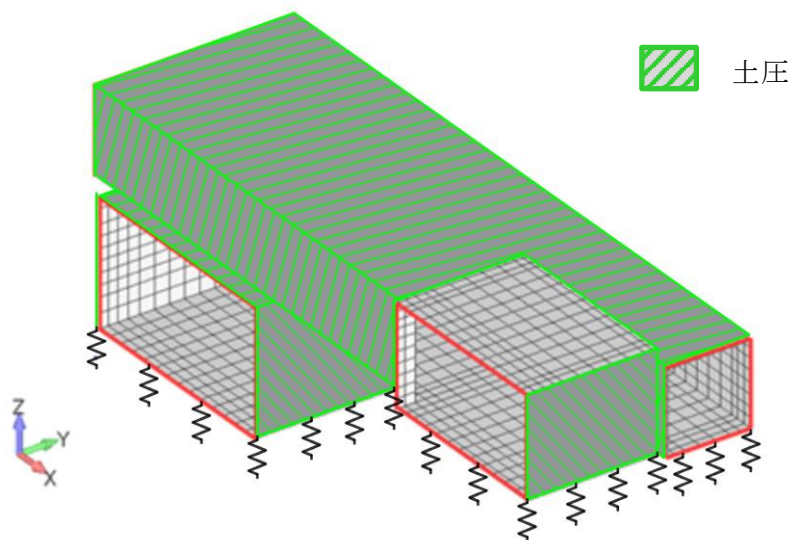


図5-6 地盤ばねの設定イメージ

b. 地震時

E W方向加振時においては、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の妻壁及び屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の側面は地震時土圧でモデル化する。屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の側面については、非線形の地盤ばねでモデル化することが考えられるが、周辺状況として埋戻土が一様に分布し、埋戻土の剛性は十分に小さく、構造物に与える影響が微小であることから、非線形の地盤ばねによるモデル化はしない。

なお、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）及び屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の底面については、非線形の地盤ばねでモデル化する。

N S方向加振時については、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の側面は地震時土圧でモデル化し、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の側面は非線形の地盤ばねでモデル化する。屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の妻壁については、E W加振時と同様に、埋戻土の剛性は十分に小さく、構造物に与える影響が微小であることから、非線形の地盤ばねによるモデル化はしない。

なお、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）及び屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の底面については、非線形の地盤ばねでモデル化する。

地盤ばねの設定イメージを図 5-7 に示す。

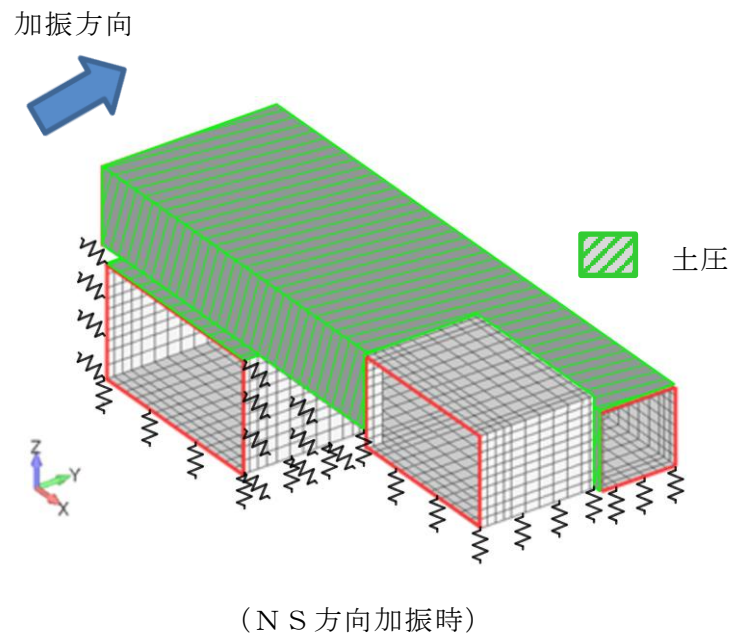
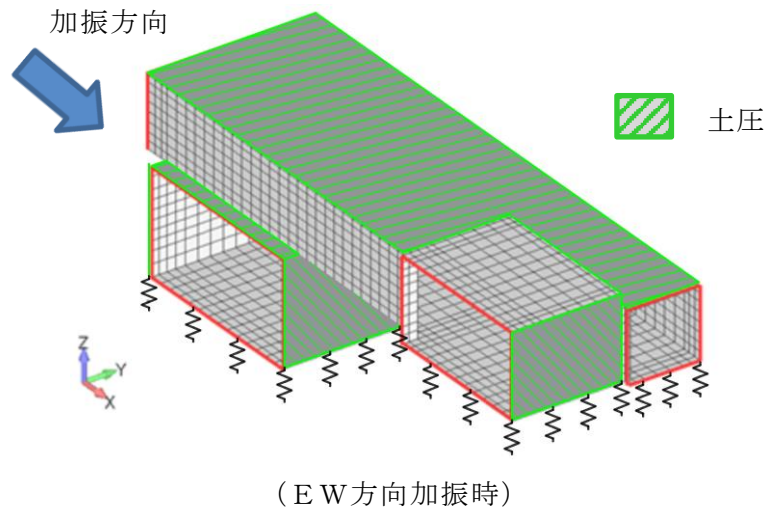


図 5-7 地盤ばねの設定イメージ

(2) 2 方向加振時

a. 常時

1 方向加振時と同様に，側面は地震時土圧でモデル化し，底面においては，線形ばねでモデル化する。

b. 地震時

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の側面は地震時土圧でモデル化し，屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の底面において，非線形の地盤ばねでモデル化する。1 方向加振時（N S 方向加振時）に非線形の地盤ばねでモデル化した屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の側面については，地震時土圧でモデル化する。

地盤ばねの設定イメージを図 5-8 に示す。

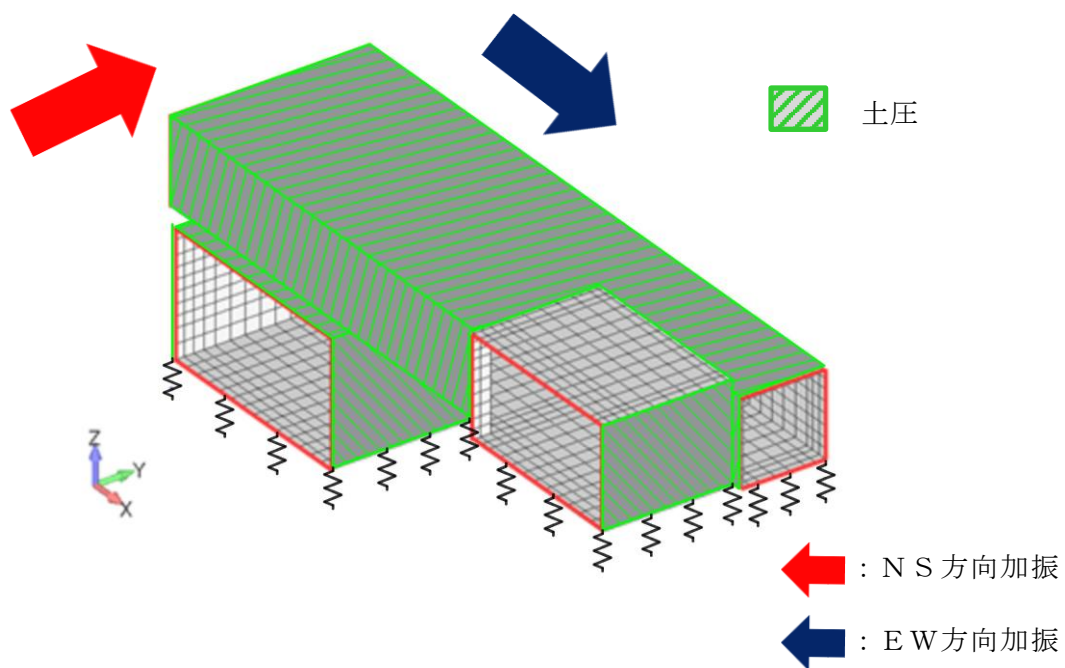


図 5-8 地盤ばねの設定イメージ

(3) 常時における地盤ばねの算出

常時における地盤ばねは、構造物の底面に面直ばねとせん断方向ばねを考慮する。面直ばねに設定する鉛直方向地盤反力係数 k_v 及びせん断方向ばねに設定する水平方向せん断地盤反力係数 k_s は、「道示・IV 下部構造編」により算出する。

a. 鉛直方向地盤反力係数

$$k_v = k_{v0} \left(\frac{B_v}{0.3} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

$$k_{v0} = \frac{1}{0.3} \alpha E_s$$

k_v : 鉛直方向地盤反力係数 (kN/m³)

k_{v0} : 鉛直方向地盤反力係数の基準値 (kN/m³)

B_v : 基礎の換算載荷幅 (m) $B_v = \sqrt{A_v}$

A_v : 鉛直方向の載荷面積 (m²)

E_s : 地盤の静的変形係数 (kN/m²)

α : 地盤反力係数の換算係数 ($\alpha = 1$)

b. 水平方向せん断地盤反力係数

$$k_s = \lambda k_v$$

ここで,

k_s : 水平方向せん断地盤反力係数 (kN/m³)

λ : 鉛直方向地盤反力係数に対する水平方向せん断地盤反力係数の比で,
 $\lambda = 0.3$ とする。

k_v : 鉛直方向地盤反力係数 (kN/m³)

(4) 地震時における地盤ばねの算出

地震時における地盤ばねは、構造物の底面に面直ばねとせん断方向ばねを考慮する。面直ばねに設定する鉛直方向地盤反力係数 k_v 及びせん断方向ばねに設定する水平方向せん断地盤反力係数 k_s は、「道示・IV 下部構造編」により算出し、面直方向地盤反力係数の基準値 k_{v0} は「道示・V 耐震設計編」に準拠して算出する。

a. 鉛直方向地盤反力係数

$$k_v = k_{v0} \left(\frac{B_v}{0.3} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

$$k_{v0} = \frac{1}{0.3} E_D$$

$$E_D = 2(1 + \nu_D) G_D$$

k_v : 鉛直方向地盤反力係数 (kN/m³)

k_{v0} : 鉛直方向地盤反力係数の基準値 (kN/m³)

B_v : 基礎の換算載荷幅 (m) $B_v = \sqrt{A_v}$

E_D : 地盤の動的変形係数 (kN/m²)

ν_D : 地盤の動的ポアソン比

G_D : 地盤の動的せん断変形係数 (kN/m²)

b. 水平方向せん断地盤反力係数

$$k_s = \lambda k_v$$

ここで、

k_s : 水平方向せん断地盤反力係数 (kN/m³)

λ : 鉛直方向地盤反力係数に対する水平方向せん断地盤反力係数の比で、
 $\lambda = 0.3$ とする。

k_v : 鉛直方向地盤反力係数 (kN/m³)

(5) 側方地盤ばねの算出

側方地盤ばねは，構造物の側面に面直ばねを考慮する。側面の面直方向の地盤反力係数 k_H は，「道示・IV下部構造編」に基づき設定する。そのうちの面直方向地盤反力係数の基準値 k_{H0} は「道示・V耐震設計編」に準拠して算出する。

$$k_H = k_{H0} \left(\frac{D_H}{0.3} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

$$k_{H0} = \frac{1}{0.3} E_D$$

$$E_D = 2(1 + \nu_D) G_D$$

$$D_H = D_e$$

$$\text{ただし, } D_H \leq \sqrt{D_e \cdot L_e}$$

k_H : 水平方向地盤反力係数 (kN/m³)

k_{H0} : 水平方向地盤反力係数の基準値 (kN/m³)

D_H : 基礎側面の換算載荷幅 (m)

E_D : 地盤の動的変形係数 (kN/m²)

ν_D : 地盤の動的ポアソン比

G_D : 地盤の動的せん断変形係数 (kN/m²)

D_e : 基礎の有効側面幅 (m)

L_e : 基礎の有効根入れ深さ (m)

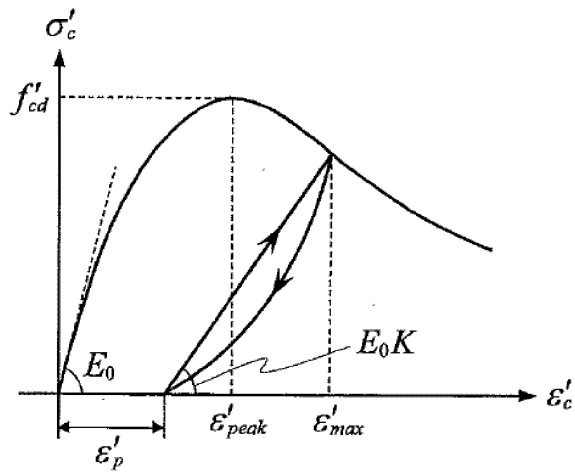
5.2.4 材料の非線形特性

(1) コンクリート

a. 圧縮応力下における応力-ひずみ関係

図 5-9 に一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。圧縮応力下の応力-ひずみの骨格曲線は、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を越えた軟化域で表され、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を考慮している。また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、図 5-10 に示す。

低減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮する。



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

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

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

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

ここに、 $f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_c$

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

ϵ'_{max} : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

ϵ'_p : 塑性ひずみ

K : 弾性剛性残存率

図 5-9 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性
(「コンクリート標準示方書 2017」より引用)

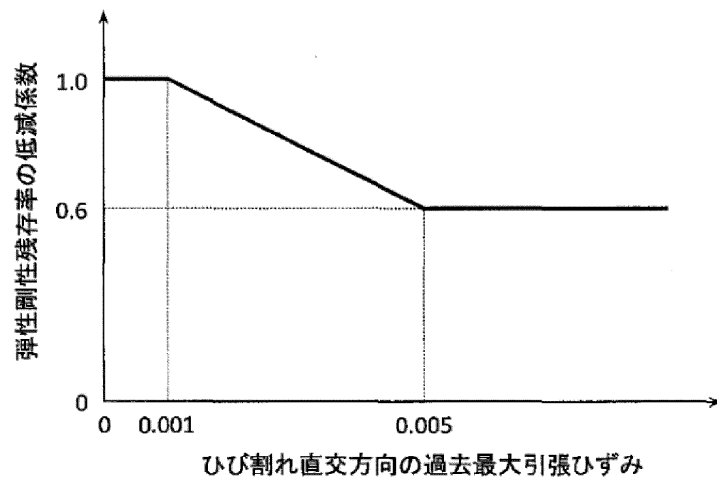
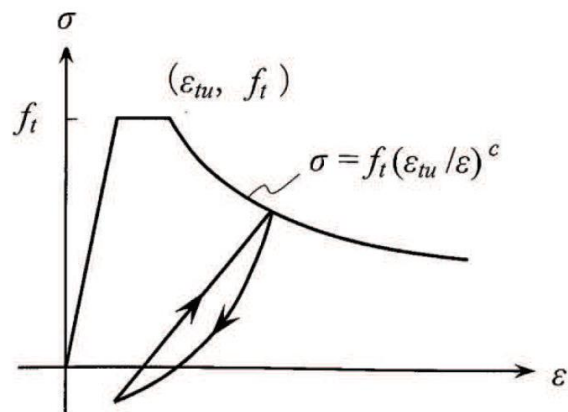


図 5-10 弾性剛性残存率の低減係数
 (「コンクリート標準示方書 2017」より引用)

b. 引張応力下における応力-ひずみ関係

引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、図 5-11 に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

引張力を受ける無筋コンクリート要素では、引張軟化挙動は、破壊エネルギーによって代表される。引張軟化挙動の考慮にあたっては、図 5-12 に示す引張軟化曲線を設定する。



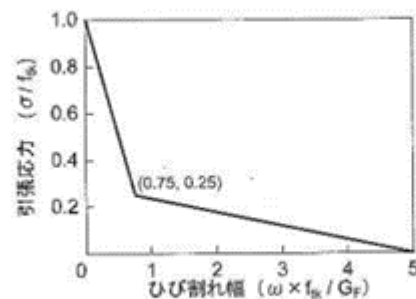
ここに、 f_t : 引張強度

ϵ_{tu} : 引張軟化開始ひずみ

c : 引張軟化特性を表す係数

図 5-11 引張応力下における鉄筋とコンクリートの付着効果を考慮した応力-ひずみ関係
 (「コンクリート標準示方書 2017」より引用)

コンクリートのモデル化された引張軟化曲線には、例えば解説 図 5.3.4 に示したものがある。



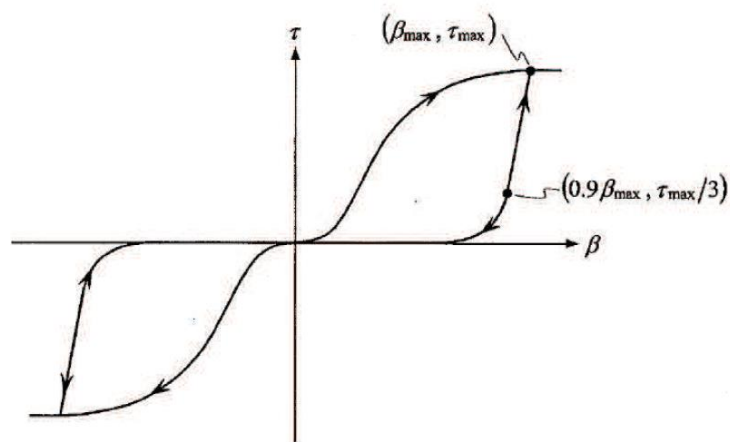
解説 図 5.3.4 引張軟化曲線

図 5-12 コンクリートの破壊エネルギー (「コンクリート標準示方書 2017」より引用)

c. ひび割れ面でのせん断伝達関係

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

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、図 5-13 に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。



ここに、 β : ひび割れ面におけるせん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比 (γ / ε)

τ : ひび割れ面でのせん断応力

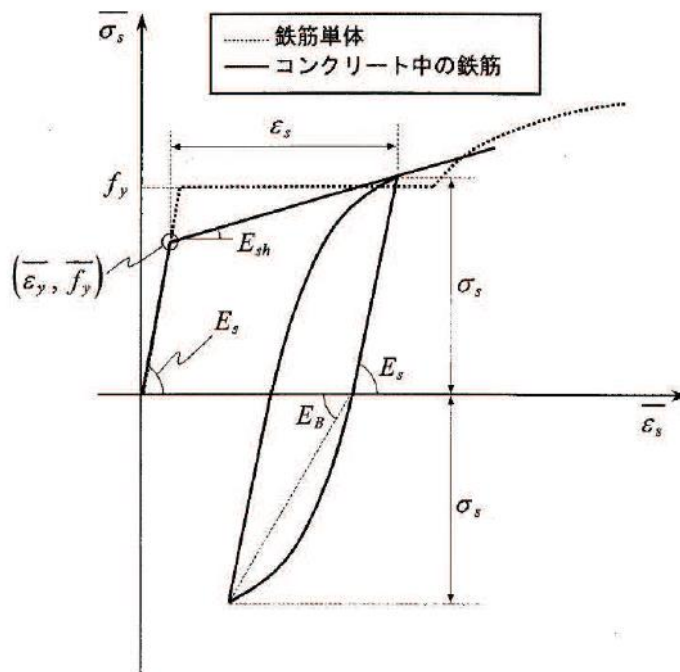
τ_{max} : 除荷開始時せん断応力

β_{max} : 除荷開始時せん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比

図 5-13 ひび割れ面でのせん断伝達モデル
(「コンクリート標準示方書 2017」より引用)

d. 鉄筋の非線形特性

ひび割れを複数含む領域におけるコンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は、単体鉄筋の応力-ひずみ関係と異なり、図 5-14 に示すひずみ硬化特性を考慮する。



$$\begin{aligned} \overline{\sigma}_s &= E_s \overline{\varepsilon}_s & (\overline{\varepsilon}_s \leq \overline{\varepsilon}_y) \\ &= \overline{f}_y + E_{sh} (\overline{\varepsilon}_s - \overline{\varepsilon}_y) & (\overline{\varepsilon}_y < \overline{\varepsilon}_s) \end{aligned}$$

ここに、 $\overline{\sigma}_s$: コンクリート中における鉄筋の平均応力

$\overline{\varepsilon}_s$: コンクリート中における鉄筋の平均ひずみ

f_y : 鉄筋単体の降伏強度

E_s : 鉄筋のヤング率

\overline{f}_y : コンクリート中における鉄筋の平均降伏強度

$\overline{\varepsilon}_y$: コンクリート中における鉄筋の平均降伏ひずみ

E_{sh} : コンクリート中における鉄筋の降伏後の二次勾配

図 5-14 ひずみ硬化域を簡略化した鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係
(コンクリート標準示方書[設計編] (土木学会, 2012 年制定) より引用)

e. 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

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

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は以下の式で表される。

$$\overline{\sigma_{RC}} = \frac{A_s}{A_{RC}} \overline{\sigma_s} + \frac{A_c}{A_{RC}} \overline{\sigma_c}$$

ここに、 $\overline{\sigma_s}$, $\overline{\sigma_c}$: それぞれ鉄筋とコンクリートの平面応力

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

5.3 照査時刻の選定

構造部材の健全性評価において、照査時刻は構造的特徴を踏まえ、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部の評価が厳しくなる時刻を地震時解析の結果から複数選定する。表 5-2 に照査時刻の選定の考え方を示す。なお、3次元構造解析モデルにおいては、表 5-2 に示すすべての時刻に対して照査を実施する。選定された時刻については、「7.1.1 各照査時刻における荷重抽出時刻の算定結果」に示す。

表 5-2 照査時刻の考え方

照査時刻	損傷モード	荷重抽出時刻
時刻 1	曲げ・軸力系の破壊	曲げモーメントが最大となる時刻*
時刻 2		軸力引張が最大となる時刻*
時刻 3	せん断破壊	せん断力が最大となる時刻*

注記*：全要素を対象として、全時刻のなかで最大となる時刻を選定する。

5.4 入力荷重

3次元構造解析の入力荷重は「5.3 照査時刻の選定」にて選定した照査時刻に対し、地震応答解析から同時刻における水平荷重及び鉛直荷重の応答値を抽出し、算定する。入力荷重の一覧を表5-3に、各入力荷重の算定フローを図5-15に示す。常時荷重は、表4-6に示す荷重を考慮する。

表5-3 入力荷重一覧

入力荷重		地震応答解析から抽出する応答値	載荷位置
慣性力	機器・配管の慣性力	応答加速度	設置位置
	躯体の慣性力	応答加速度	躯体全体
	積載荷重の慣性力	応答加速度	作用位置
地震時土圧・水圧		土圧・水圧	作用位置
周面せん断力		土圧・水圧	作用位置

注記*：動水圧は、地震時応答解析から抽出した応答加速度に基づき算定する。

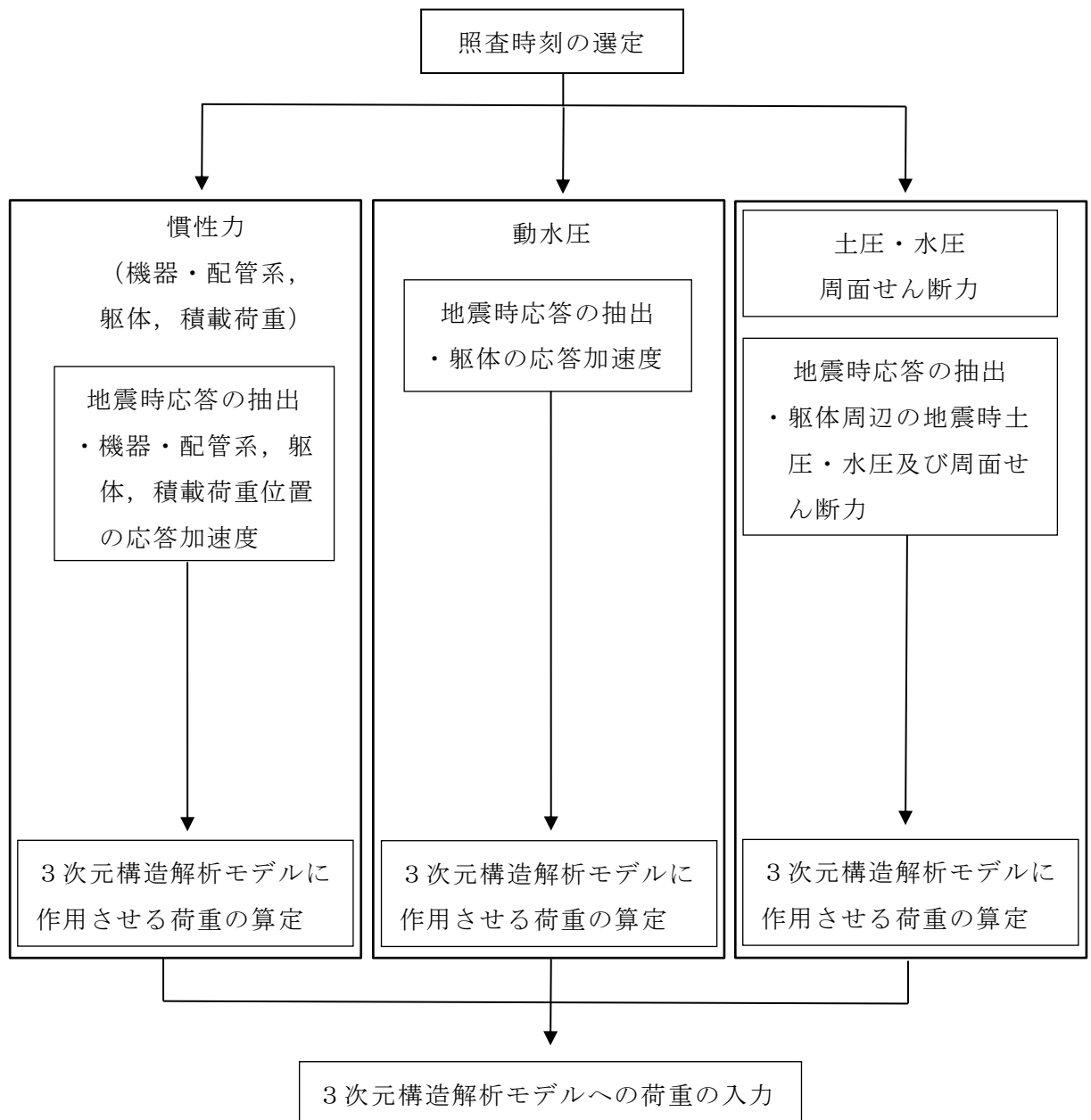


図 5-15 各入力荷重の算定フロー

5.4.1 常時荷重

(1) 躯体自重

躯体の体積に鉄筋コンクリートの密度を乗じて設定する。

(2) 静止土圧及び外水圧

地震応答解析の常時解析から求まる静止土圧及び外水圧を躯体側面に作用させる。設計地下水位は、EL 4.9m であり、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）に設定した外水圧のベクトル図を図 5-16 に示す。なお、静止土圧及び外水圧は、奥行方向に一様に載荷する。

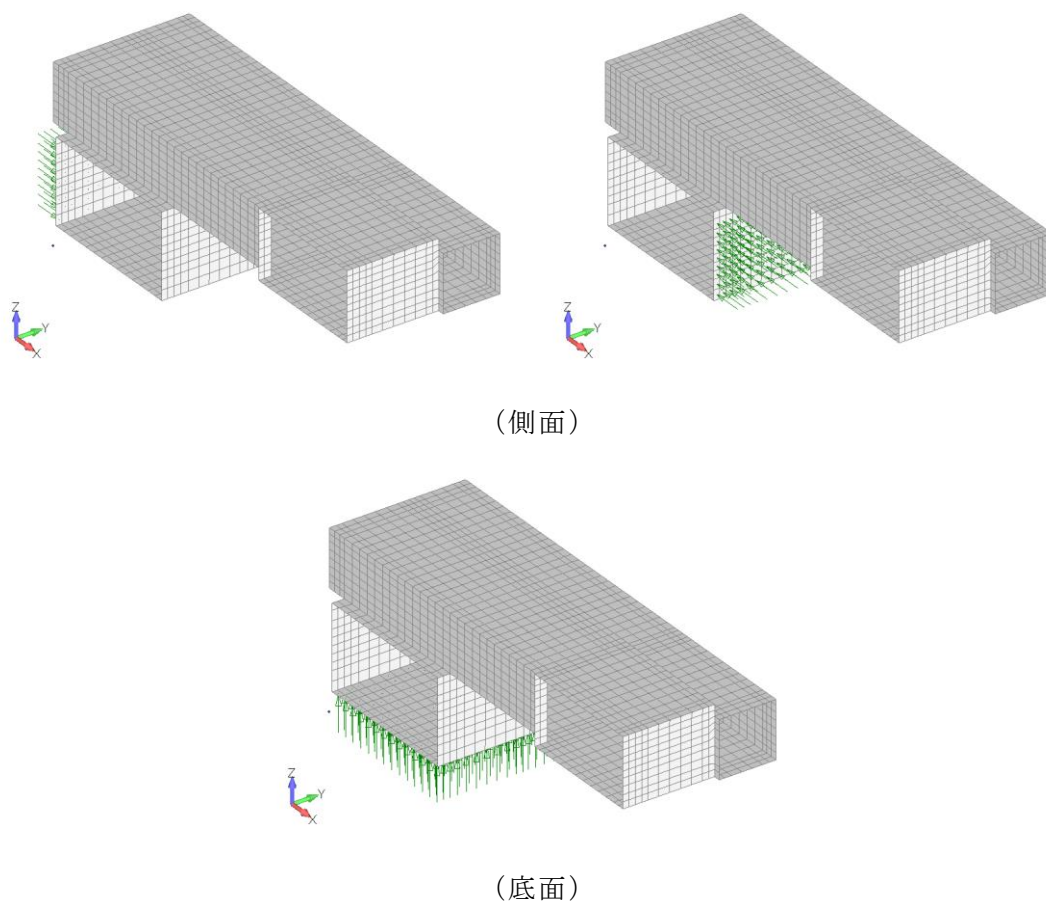
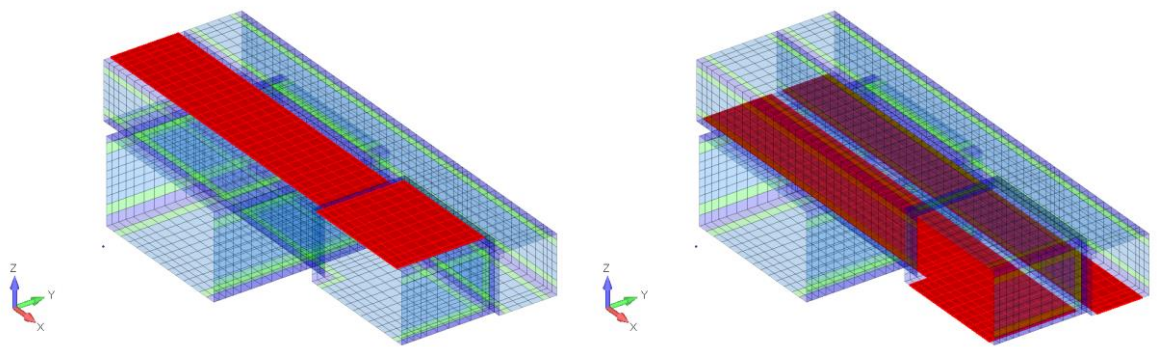


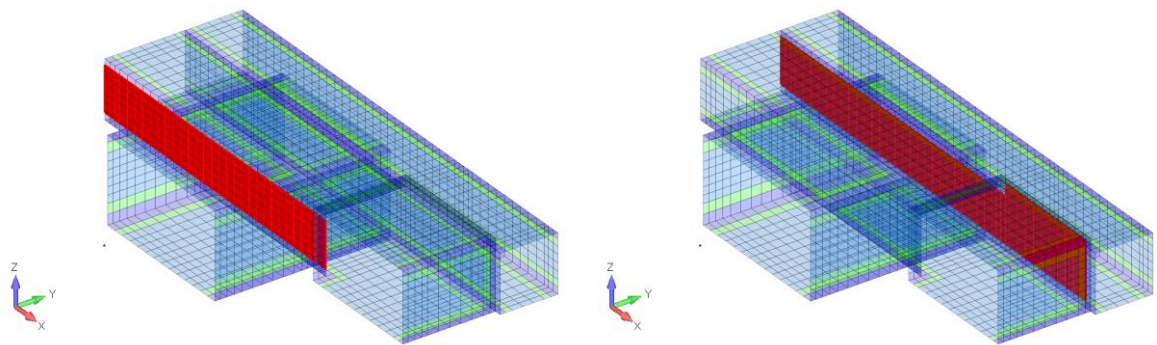
図 5-16 外水圧ベクトル図

(3) 機器・配管荷重

機器・配管の重量に基づいて設定する。屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）において考慮する機器・配管荷重図を図 5-17 に、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）において考慮する機器・配管荷重図を図 5-18 に示す。

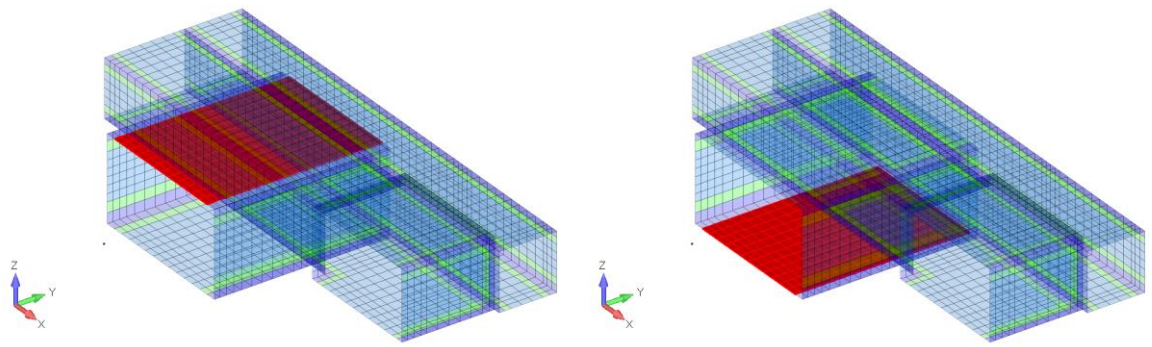


(頂版及び底面)

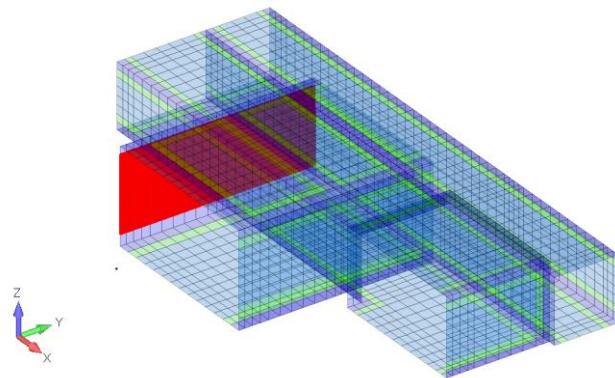


(南側壁及び隔壁)

図 5-17 機器・配管荷重図



(頂版及び底面)



(西側壁)

図 5-18 機器・配管荷重図

(4) 積載荷重

地震時に屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）及び屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）に作用する積載荷重として、積雪荷重を考慮する。なお，地表面に作用する積載荷重は，常時解析から得られる静止土圧に含まれる。

5.4.2 慣性力

機器・配管，躯体の慣性力は，地震応答解析モデルより算定される躯体及び機器・配管の位置の応答加速度から算定する。応答加速度の抽出位置を図5-19示す。

算定した慣性力は，図5-20に示すとおり，3次元構造解析モデルに入力する。

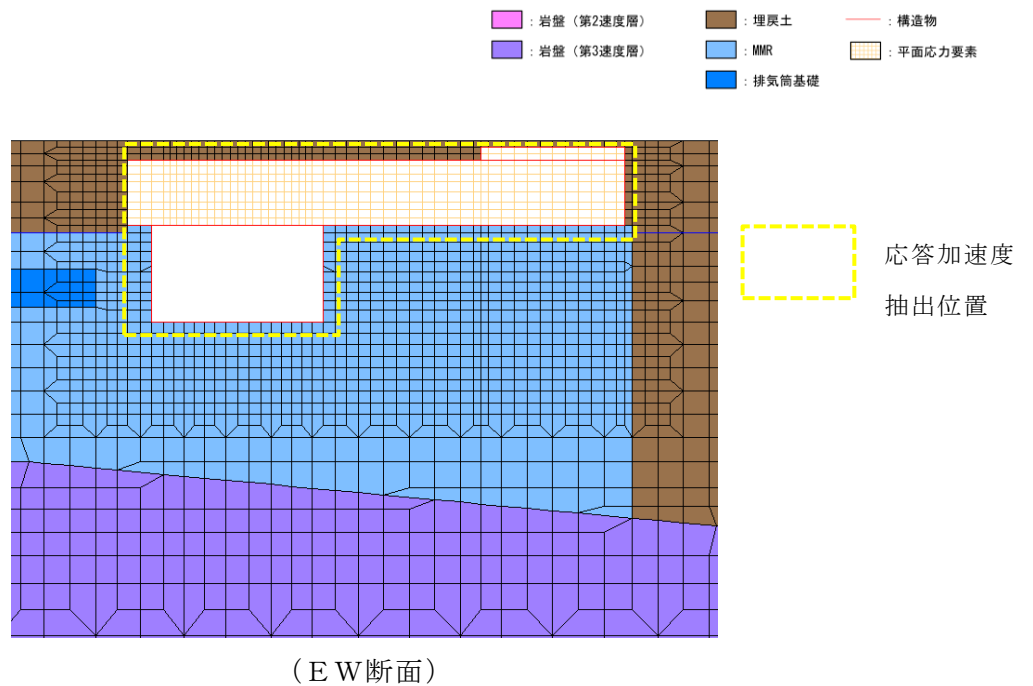
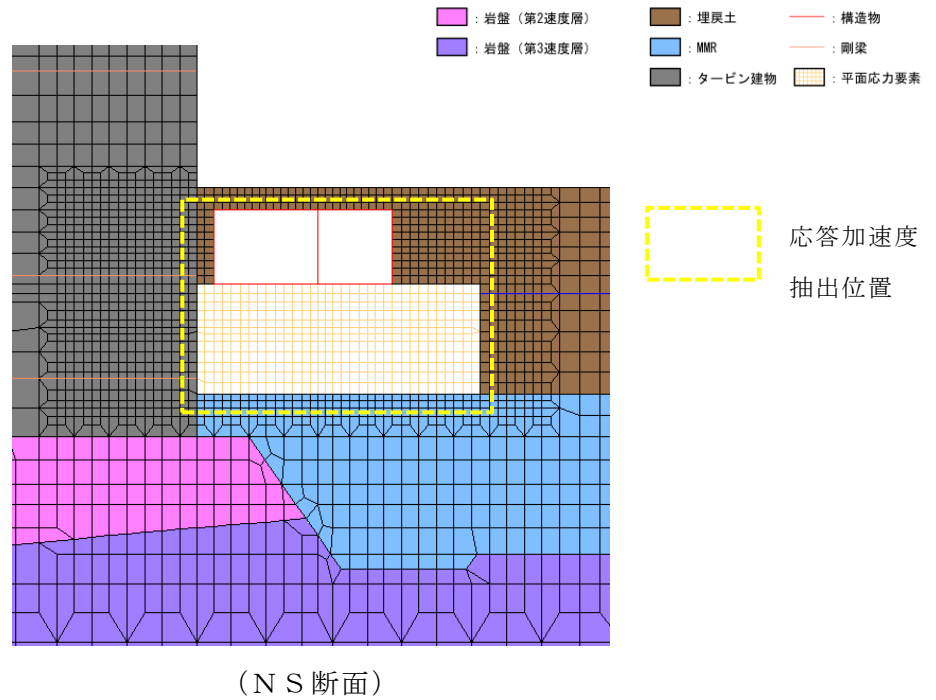


図5-19 応答加速度の抽出位置

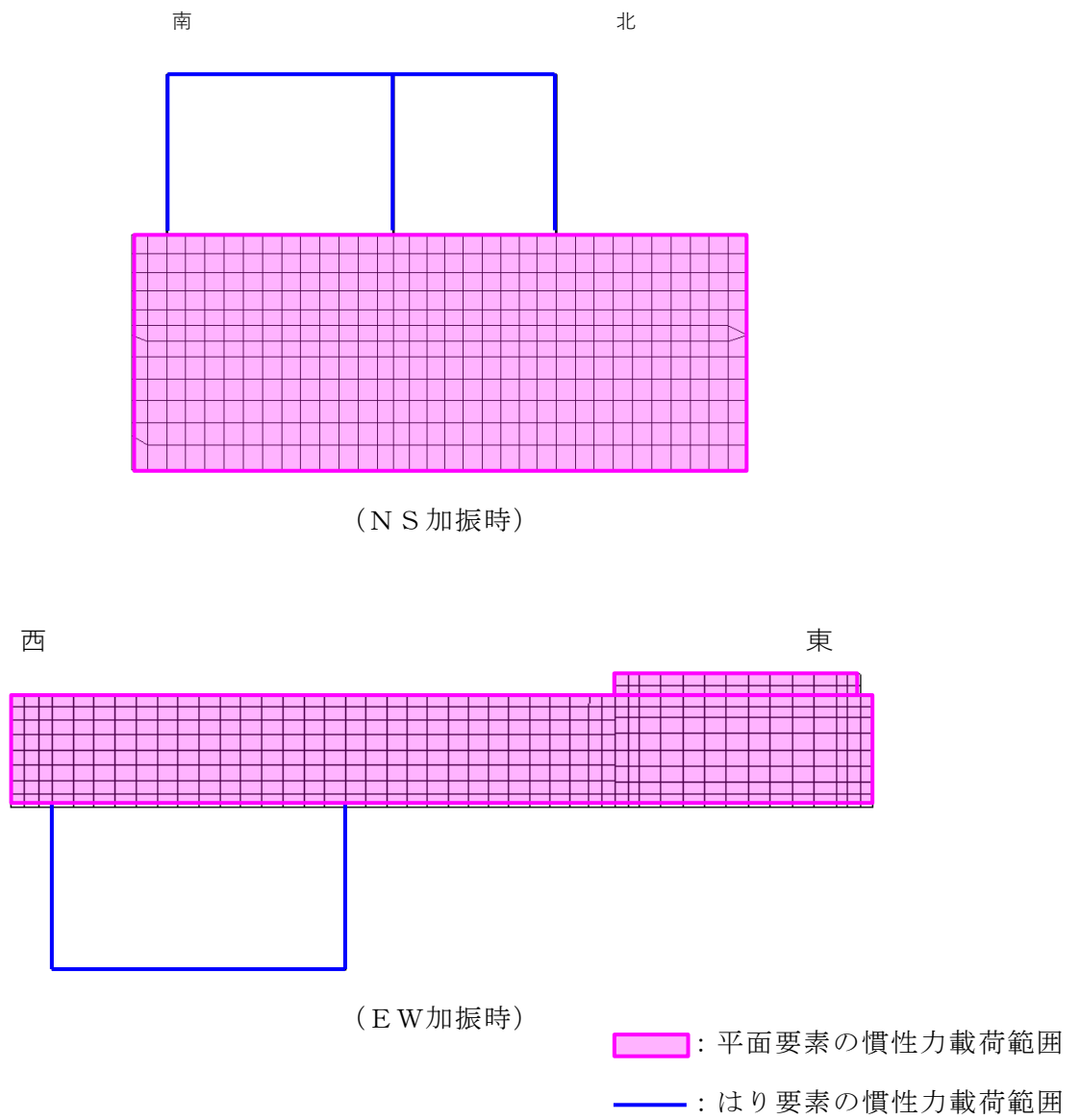


図 5-20 3次元構造解析モデルに入力する慣性力の概念図

5.4.3 地震時土圧及び周面せん断力

躯体側面に作用する地震時土圧・水圧及び周面せん断力は、地震応答解析モデルにおいて各部位に接する地盤要素の照査時刻における要素応力から算定する。地震時土圧・水圧及び周面せん断力の抽出位置を図5-21に示す。また、算定した地震時土圧・水圧及び周面せん断力は、図5-22に示すとおり、3次元構造解析モデルに入力する。

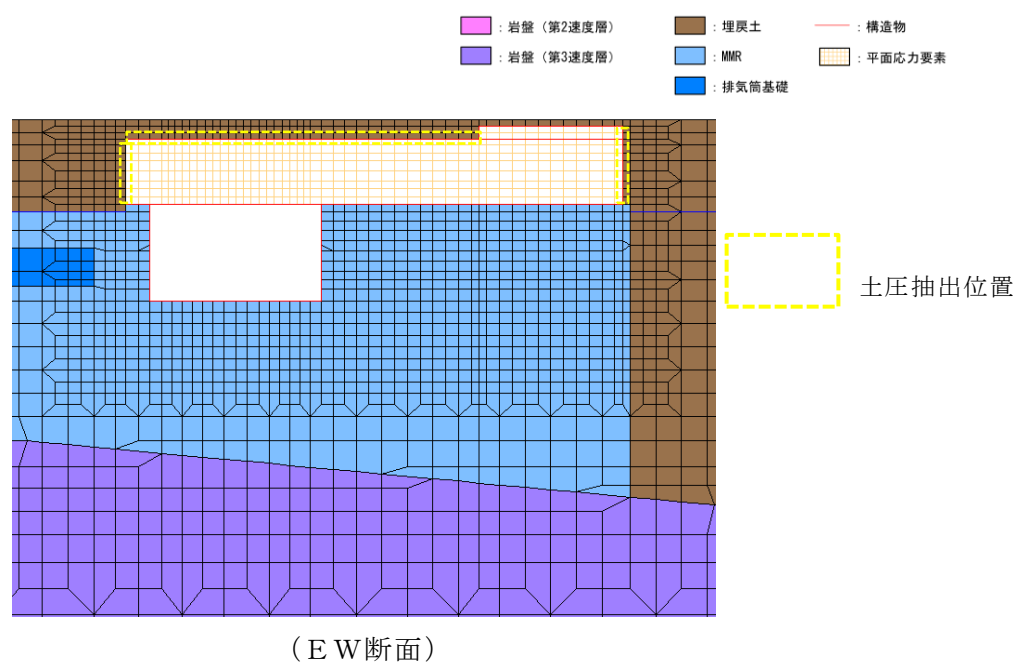
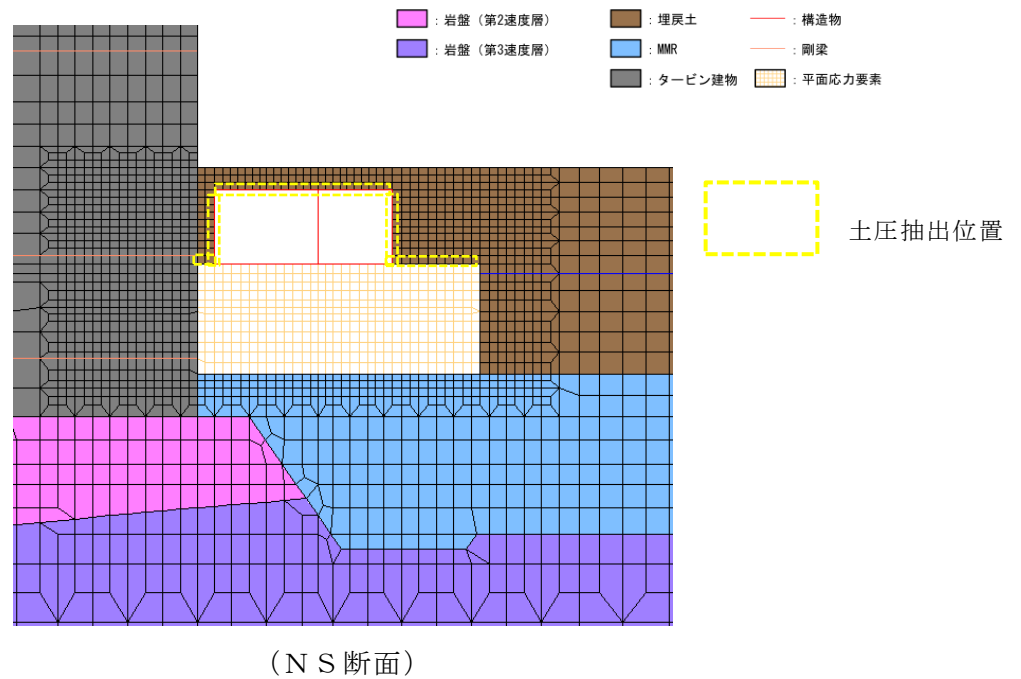
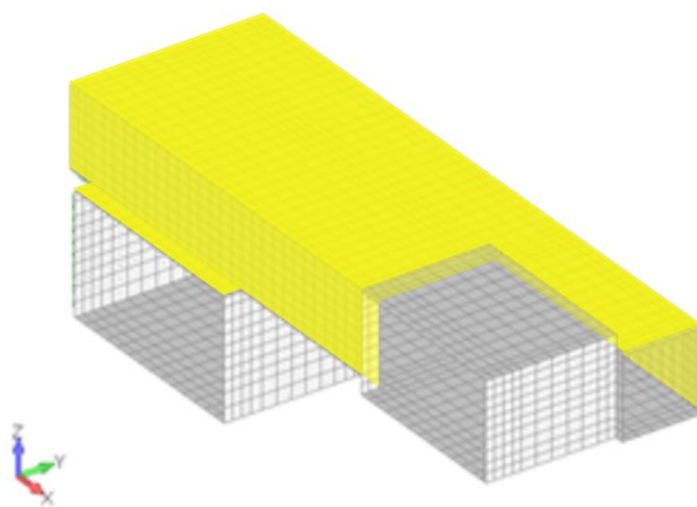
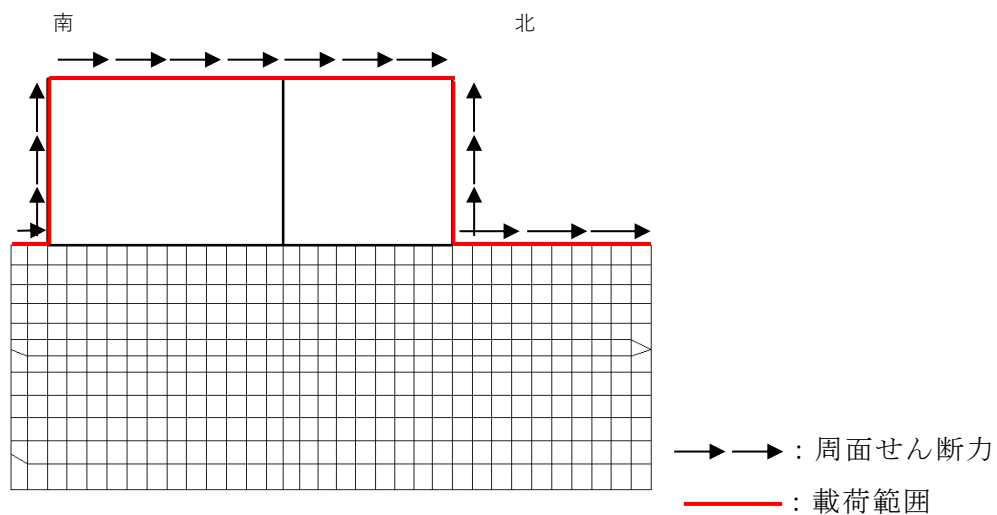
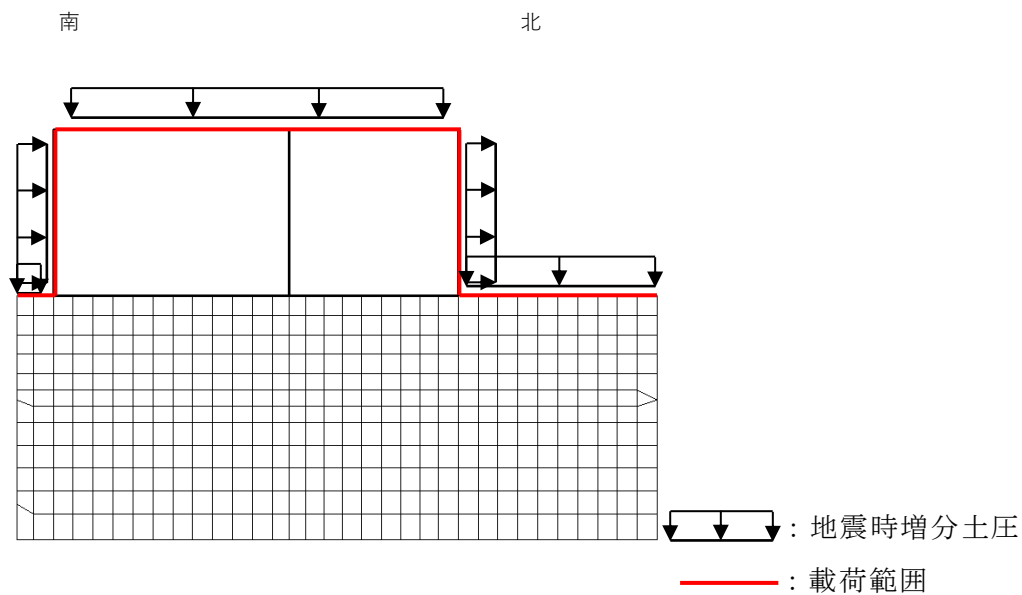


図5-21 地震時土圧及び周面せん断力抽出位置



(NS断面) ■ : 载荷範囲

図 5-22(1) 地震時土圧及び周面せん断力の概念図

6. 評価内容

6.1 入力地震動の設定

本文「4.1 入力地震動の設定」にて算定した地震動を用いる。

6.2 許容限界の設定

6.2.1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界については、本文「4.2.1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容値限界」にて設定している許容限界を用いる。

6.2.2 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。

鉄筋コンクリート部材のせん断照査に用いる照査用せん断力は、3次元構造解析により得られたせん断力に安全係数（構造解析係数）1.05 を乗じることにより、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。

$$\gamma_i \cdot \frac{V_d}{V_{yd}} < 1.0$$

ここで、 γ_i : 構造物係数 ($\gamma_i = 1.0$)

V_{yd} : せん断耐力

V_d : 照査用せん断力 ($V_d = \gamma_a \cdot V$)

γ_a : 構造解析係数 ($\gamma_a = 1.05$)

V : 発生せん断力

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6-1に示すとおり、複数の安全係数（材料係数、部材係数、構造解析係数）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 6-1 セン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	γ_{mc}	1.0	1.3	コンクリートの特性値 (圧縮強度)を低減
	鉄筋	γ_s	1.0	1.0	—
部材係数*	コンクリート	γ_{bc}	—	1.3	コンクリートが負担する せん断力を低減
	鉄筋	γ_{bs}	—	1.1	せん断補強筋が負担する せん断力を低減
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」では、部材係数 $\gamma_b = \gamma_{b1} \times \gamma_{b2}$

$$\gamma_{b1} = \begin{cases} 1.3 & (\text{コンクリート}) \\ 1.1 & (\text{鉄筋}) \end{cases}$$

$$\gamma_{b2} = \begin{cases} 1.0 & (R \leq 0.01) \\ \frac{100R+2}{3} & (0.01 < R \leq 0.025) \\ 1.5 & (R > 0.025) \end{cases}$$

ここで、R：応答層間変形角
とされている。

γ_{b2} 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、 $\gamma_{b2} = 1.0$ としてよいとされている。

(1) 棒部材式

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$$

ここで、 V_{yd} : せん断耐力

V_{cd} : コンクリートが負担するせん断耐力

V_{sd} : せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_{bc}$$

$f_{vcd} = 0.20^3 \sqrt{f_{cd}}$ ただし、 $f_{vcd} > 0.72(\text{N/mm}^2)$ となる場合は $f_{vcd} = 0.72(\text{N/mm}^2)$

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

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

$\beta_n = 1 + 2M_0 / M_{ud}$ ($N_d \geq 0$) ただし、 $\beta_n > 2.0$ となる場合は $\beta_n = 2.0$

$= 1 + 4M_0 / M_{ud}$ ($N_d < 0$) ただし、 $\beta_n < 0$ となる場合は $\beta_n = 0$

$\beta_a = 1$

ここで、

f'_{cd} : 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_{ck} を材料係数
 γ_{mc} で除したもの

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_{ud} : 軸方向力を考慮しない純曲げ耐力

M_0 : M_d に対する引張縁において、軸方向力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) $M_0 = N'_d \cdot D / 6$

D : 断面高さ

a/d : せん断スパン比

γ_{bc} : 部材係数

γ_{mc} : 材料係数

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

ここで、

A_w : 区間 s におけるせん断補強筋の総断面積

f_{wyd} : せん断補強筋の降伏強度の材料係数 γ_{ms} で除したもので、 400N/mm^2 以下とする。ただし、コンクリートの圧縮強度の特性値 f'_{ck} が 60N/mm^2 以上の時は、 800N/mm^2 以下としてよい。

α : せん断補強筋と部材軸のなす角度

s : せん断補強筋の配置間隔

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

γ_{ms} : 材料係数