

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-026-03 改 01
提出年月日	2023年2月28日

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）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

2023年2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 構造及び対策工事の概要	3
2.3 評価対象断面の方向	13
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	16
2.6 地盤物性値	17
2.7 評価構造物諸元	19
2.8 地下水位	20
2.9 耐震評価フロー	21
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	29
3.2.5 地盤及びMMRのモデル化	30
3.2.6 地震応答解析モデル	31
3.2.7 ジョイント要素の設定	32
3.2.8 材料特性の設定	35
3.3 減衰定数	37
3.4 荷重及び荷重の組合せ	40
3.4.1 機器・配管荷重	41
3.4.2 外水圧	42
3.4.3 積雪荷重	42
3.5 地震応答解析の解析ケース	43
3.5.1 耐震評価における解析ケース	43
3.5.2 機器・配管系の耐震評価に適用する解析ケース	46
4. 評価内容	53
4.1 入力地震動の設定	53
4.2 許容限界の設定	88
4.2.1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	88

4.2.2	せん断破壊に対する許容限界	89
4.2.3	せん断破壊に対する許容限界（線形被害則による照査方法）	93
4.2.4	基礎地盤の支持性能に対する許容限界	98
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	
5.3.1	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）の 3次元静的非線形解析による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	
参考資料 4	対策工事に伴い設置する発砲ポリエチレン板の影響について	

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の健全性評価として、MMR及びに発生するせん断応力及び引張応力が許容限界を下回ることを確認する。

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2002」という。）、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987（社団法人 日本電気協会 電気技術基準調査委員会）（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（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。）及び「コンクリート標準示方書〔設計編〕」（土木学会，2007年制定）（以下「コンクリート標準示方書2007」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。

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	<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)
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*
	<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) ・コンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会, 2007 年制定) 	<ul style="list-style-type: none"> ・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"> ・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"> ・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 (社団法人 日本電気協会 電気技術基準調査委員会) 	<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) ((社) 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 構造及び対策工事の概要

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 2-6 に、概略配筋図を図 2-7 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。

一体構造であることを考慮した屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）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 1 に記載する。

一体化部のイメージ図を図 2-8 に示す。

構造目地については、目地材（厚さ 60mm）、ゴム止水板（幅 300mm）及びシール材により構成されており、断面形状によってタイプ 1 及びタイプ 2 に分けられる。

構造目地の構造詳細図を図 2-9 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。

また、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の耐震性を確保するため、タービン建物からの荷重伝達を無くすことを目的とした対策工事を実施する。具体的には、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）とタービン建物間の埋戻土を撤去し、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）側に発泡ポリスチレン板（厚さ 50mm）を設置した上で、埋戻コンクリートによる埋戻しを実施する。対策工事の概要を図 2-10 に示す。

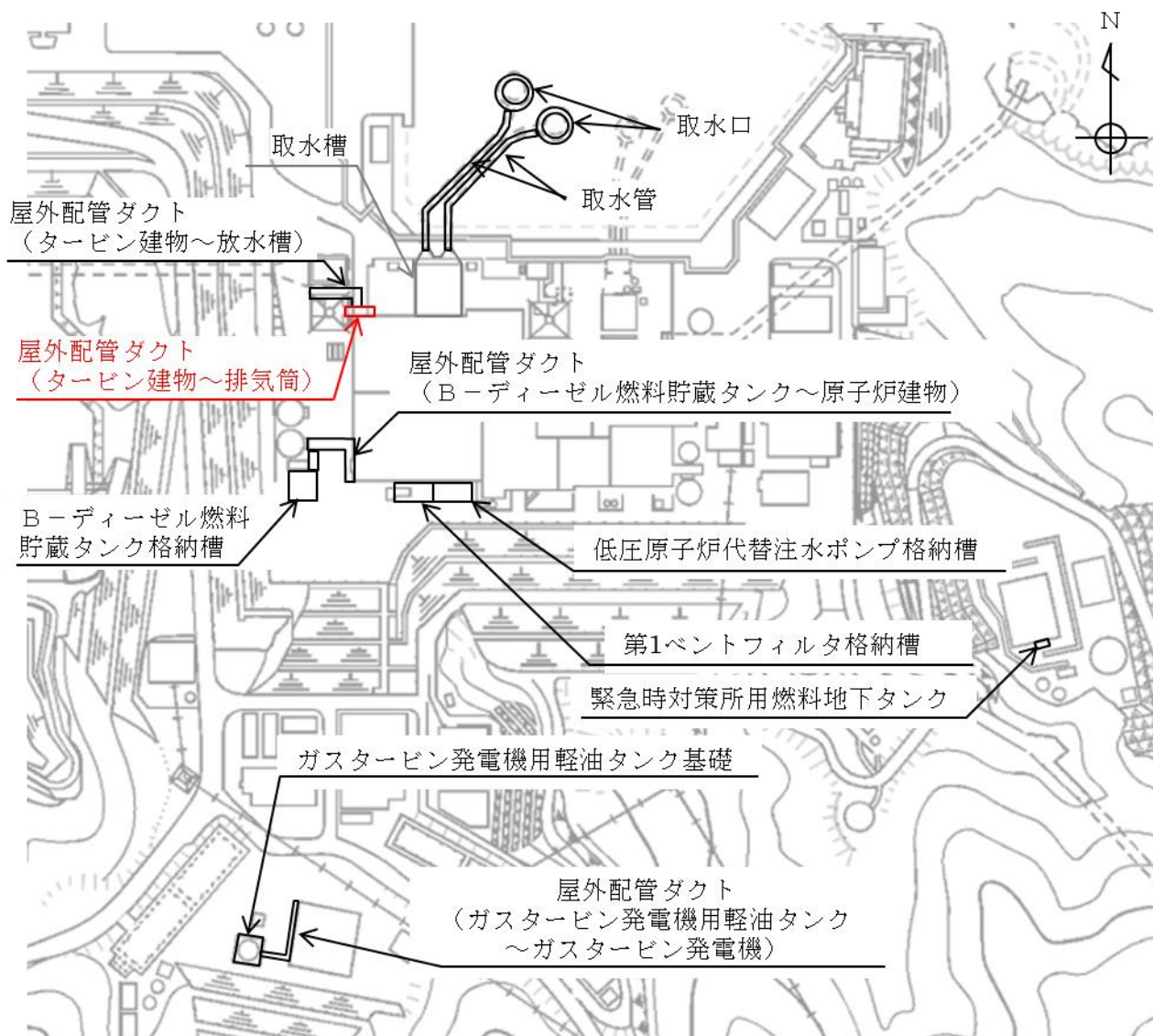


図 2-1 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 位置図

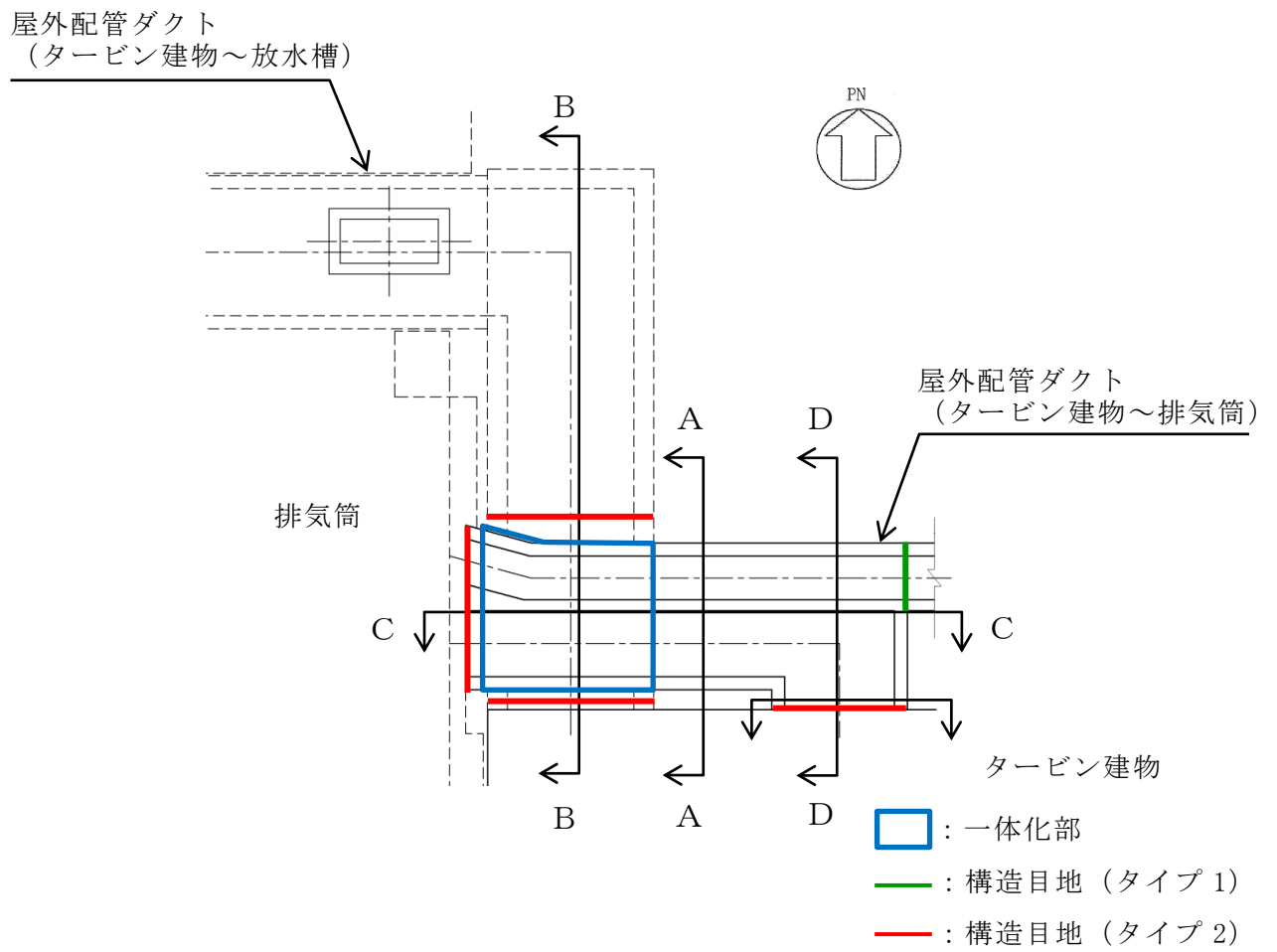


図 2-2 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 平面図

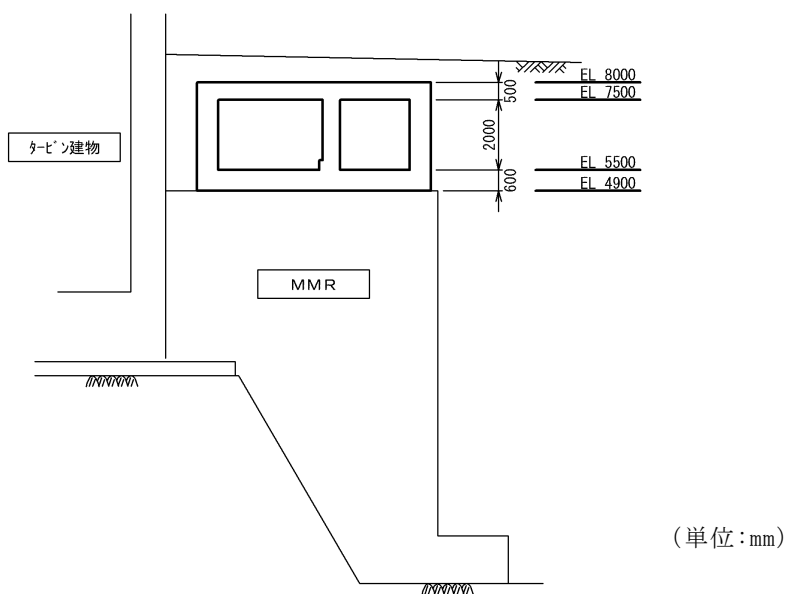


図 2-3 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 断面図 (A-A 断面)

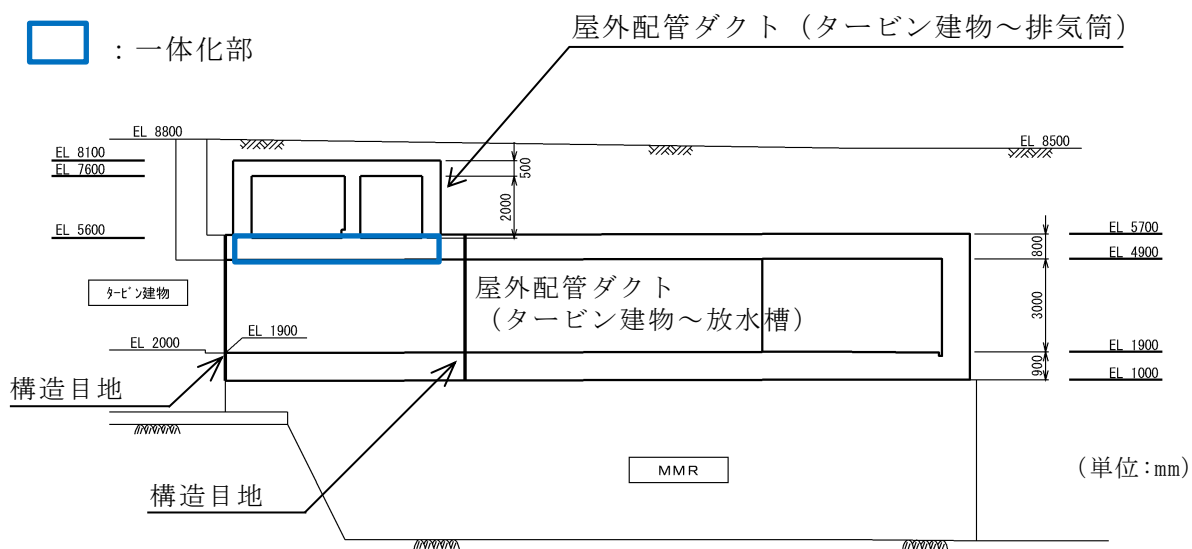


図 2-4 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 断面図 (B-B 断面)

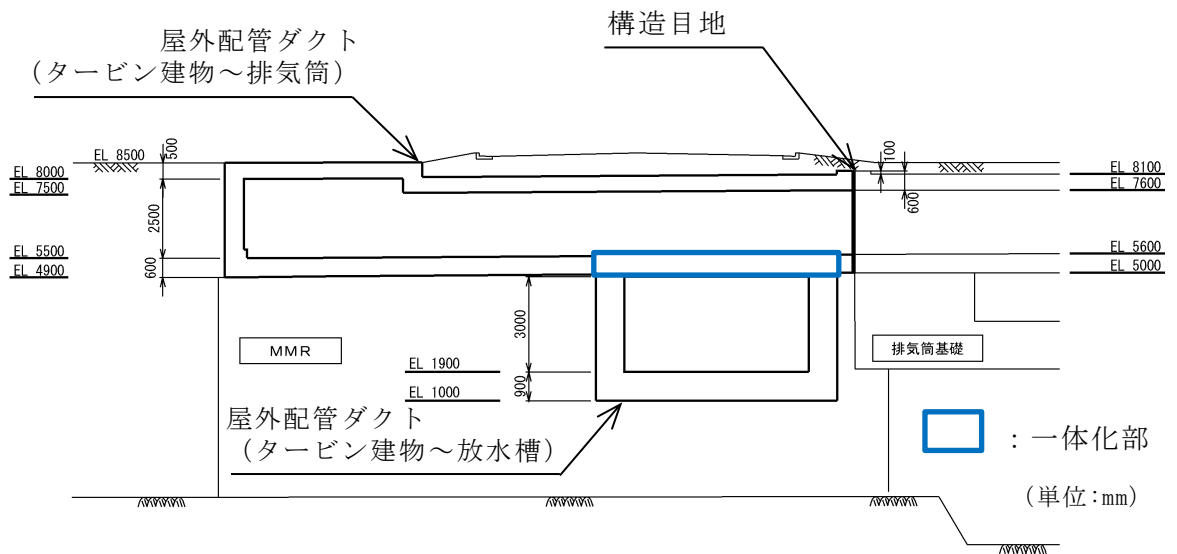


図 2-5 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 断面図 (C-C 断面)

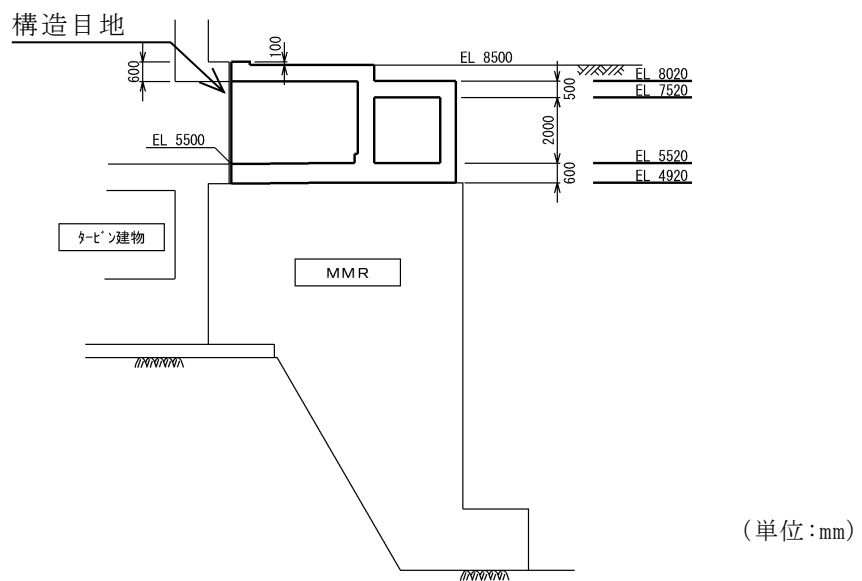


図 2-6 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 断面図 (D-D 断面)

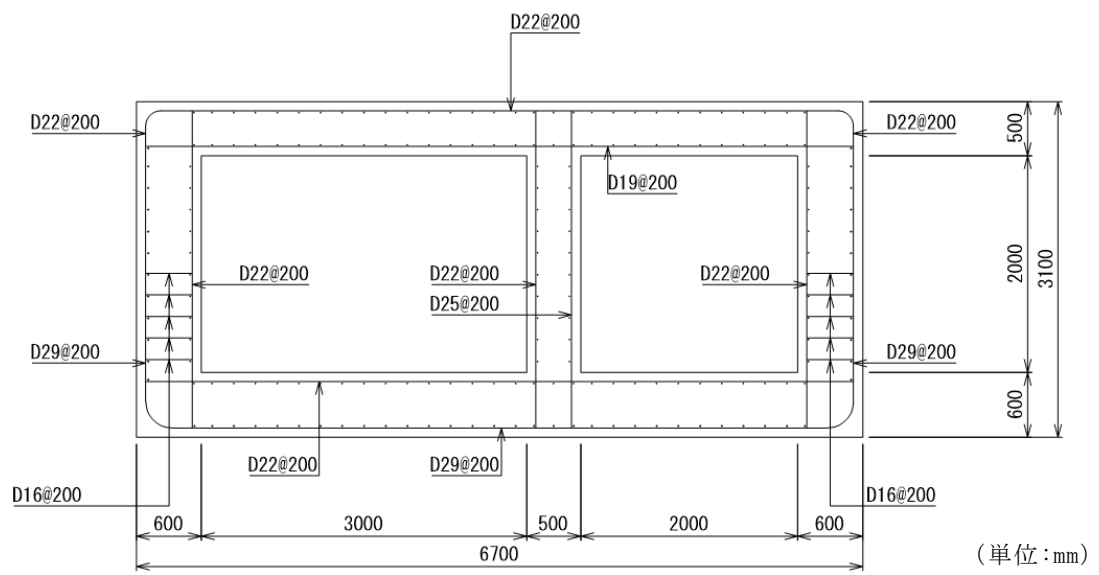


図 2-7 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 概略配筋図

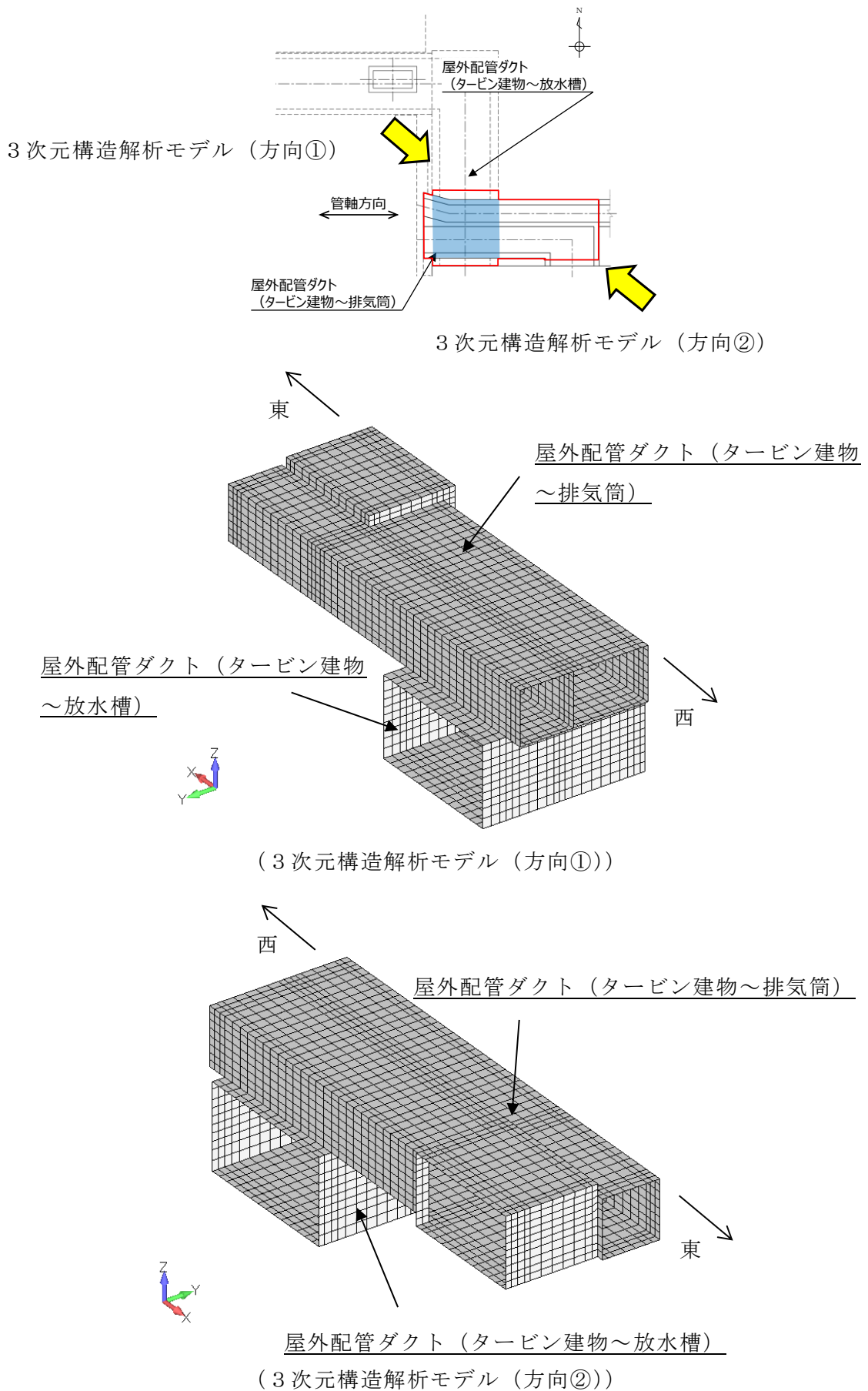
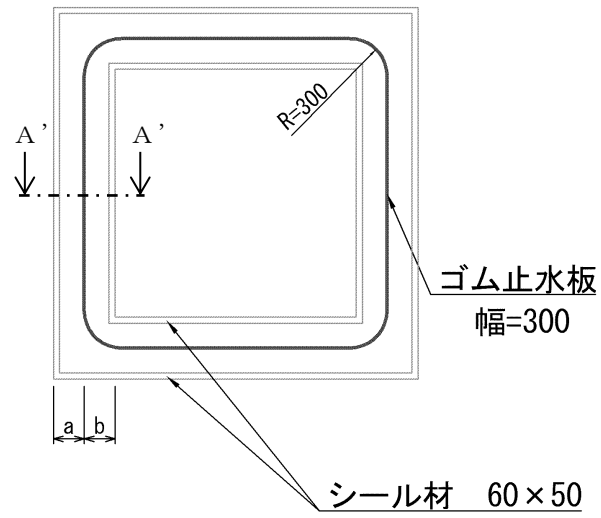
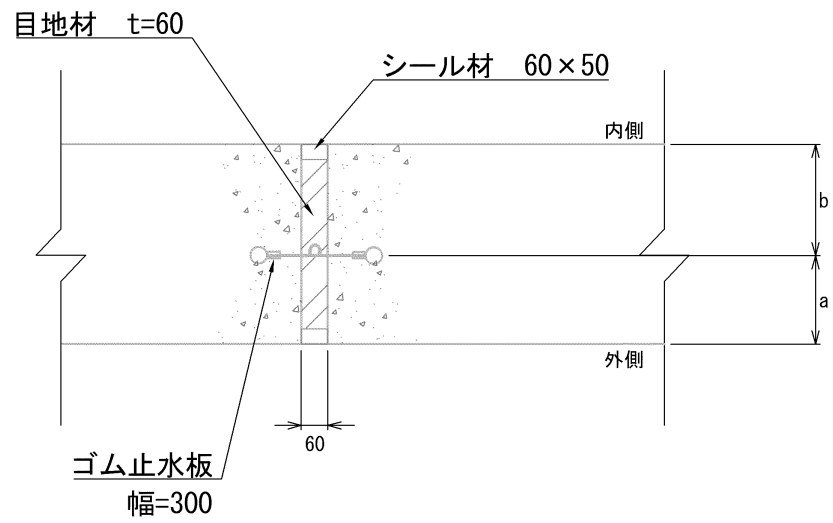


図 2-8 屋外配管ダクト (タービン建物~排気筒) 一体化部のイメージ図



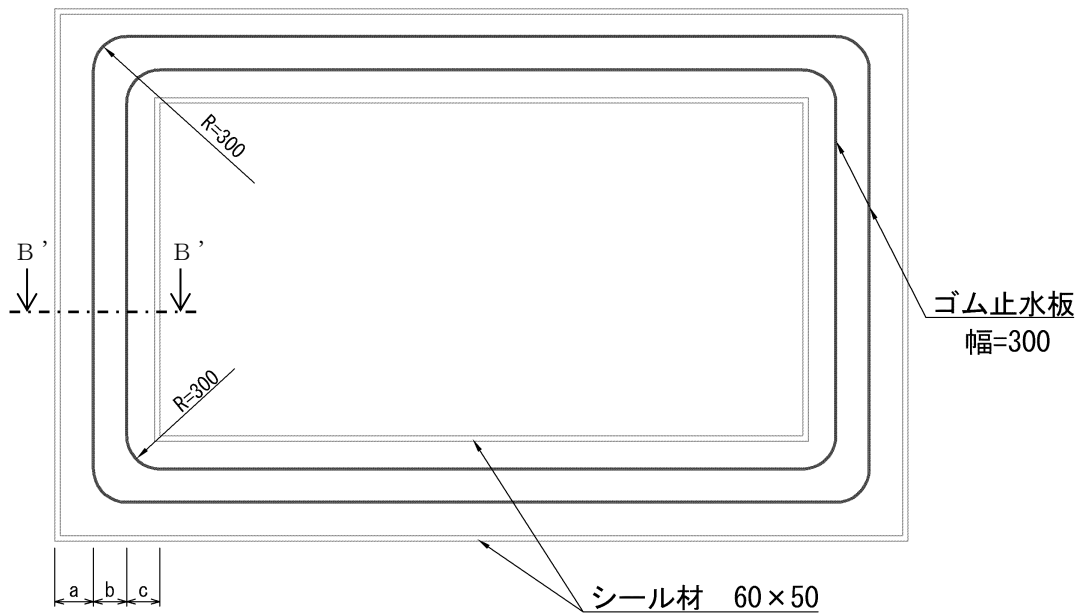
(タイプ1 : 正面図)



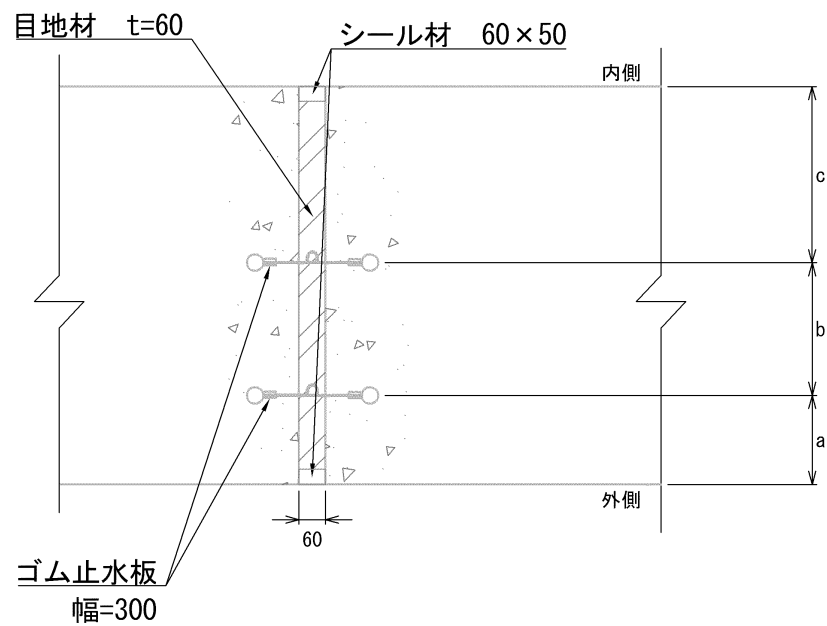
(タイプ1 : 断面詳細図 (A'-A'断面))

(単位:mm)

図 2-9 (1) 構造詳細図



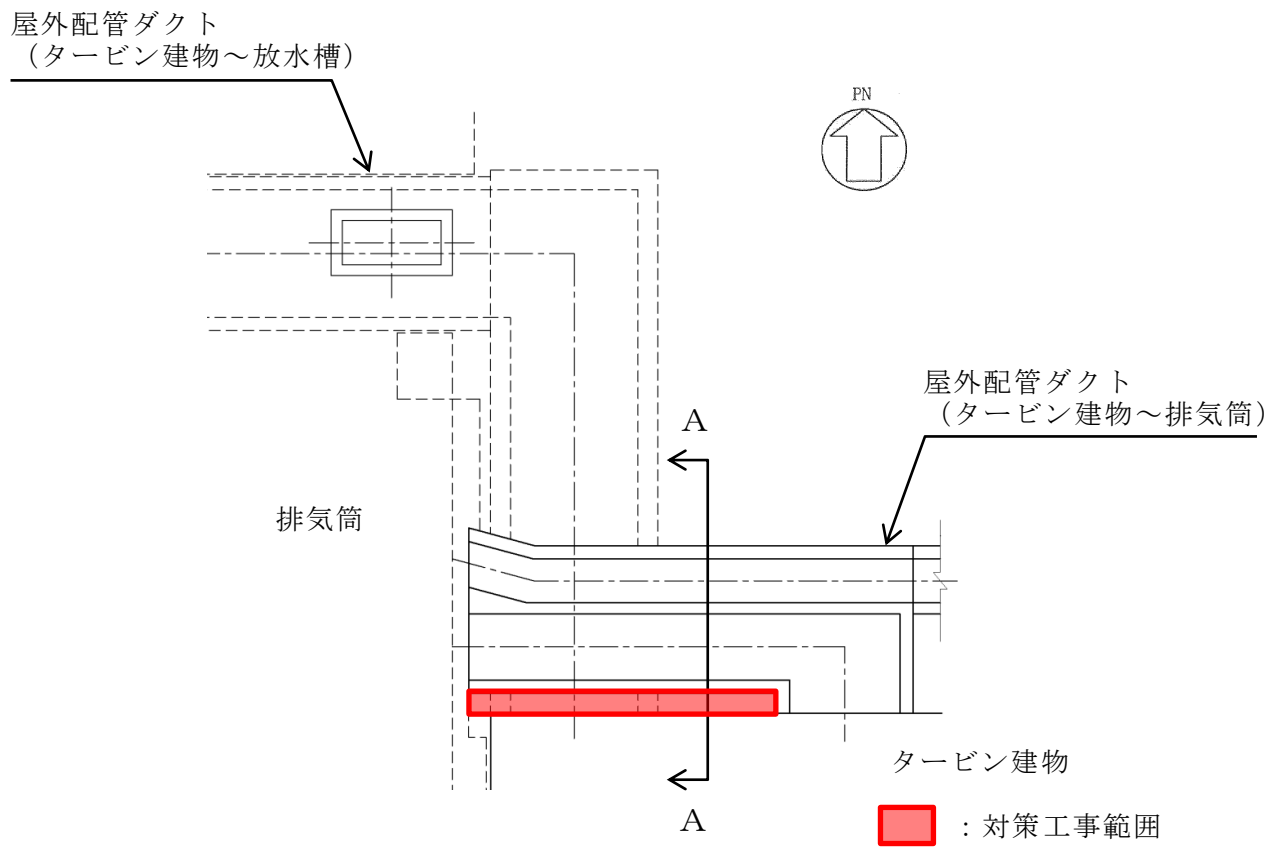
(タイプ 2 : 正面図)



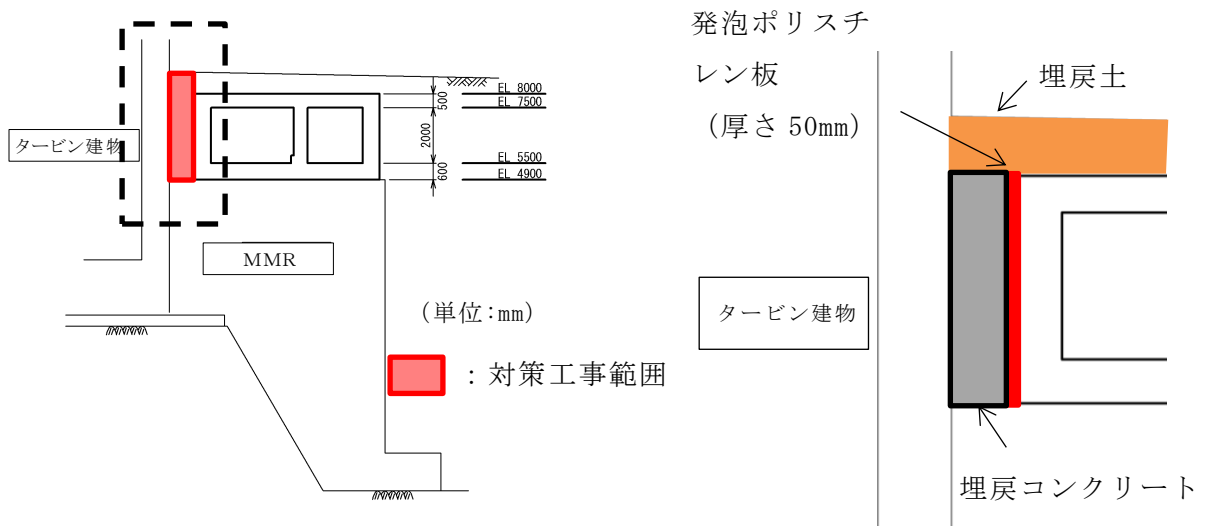
(タイプ 2 : 断面詳細図 (B'-B'断面))

(単位 : mm)

図 2-9 (2) 構造詳細図



(平面図)



(A-A断面)

(拡大図)

図 2-10 対策工事の概要

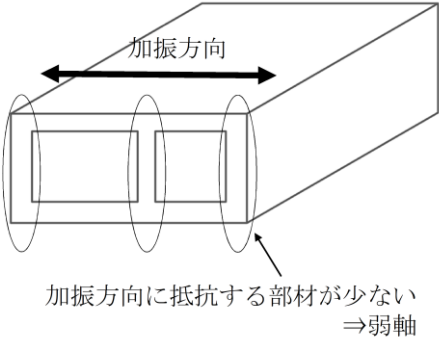
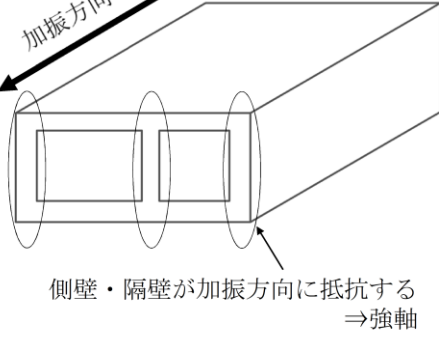
2.3 評価対象断面の方向

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）の横断方向の断面を評価対象断面の方向として選定する。

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、**構造的特徴や周辺状況等を踏まえ選定する。**

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）との一体化部と、それ以外の標準的な断面形状区間（以下「一般部」という。）に分けられる。

標準的な断面形状**である一般部の**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2-11に示す。

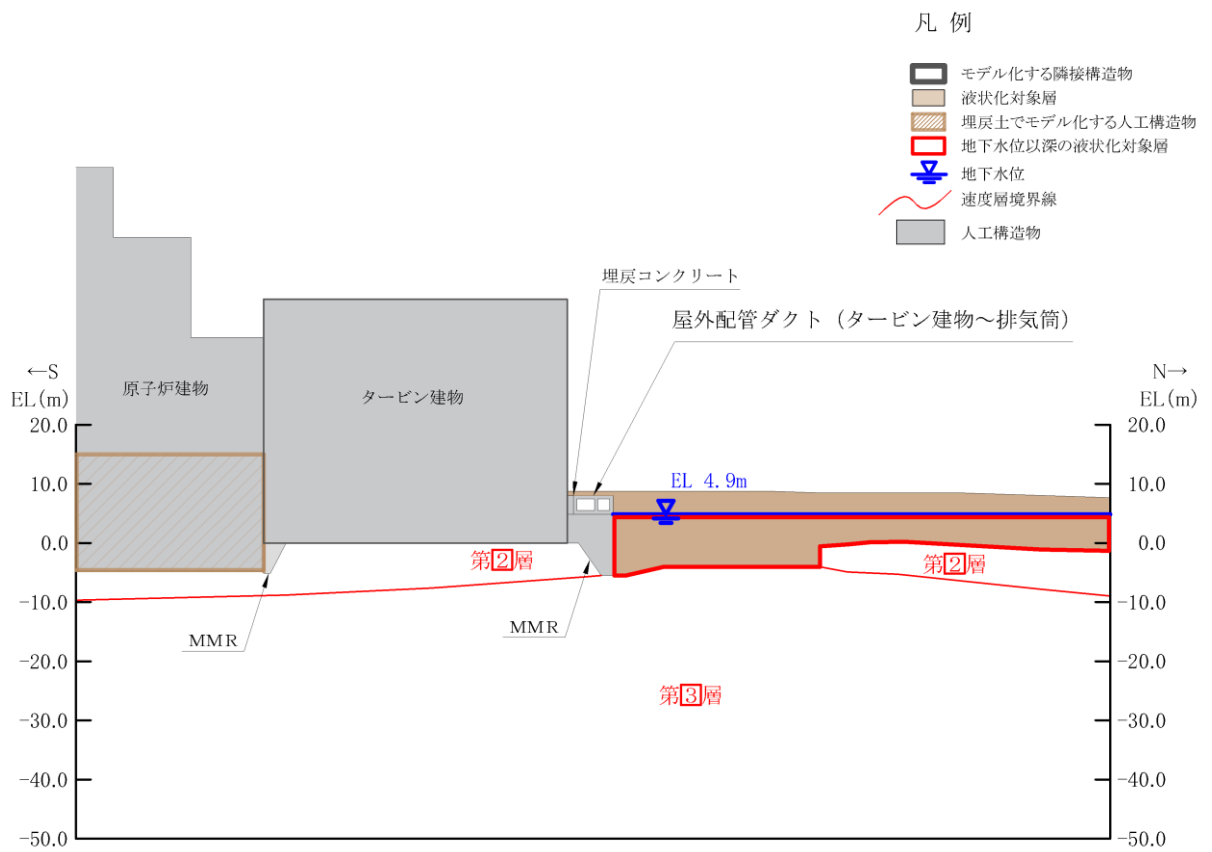


図 2-11 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)

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
埋戻コンクリート		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	2.33×10 ⁴	24.0* ¹	0.2
MMR	2.08×10 ⁴	22.6* ²	
埋戻コンクリート	2.20×10 ⁴		

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 ($\times 10^5$ 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(2) 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	$h = 0.0958 \times (1 - G/G_0)^{0.85}$

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**評価部位とその仕様**を表 2-6 に、評価部位を図 2-12 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	

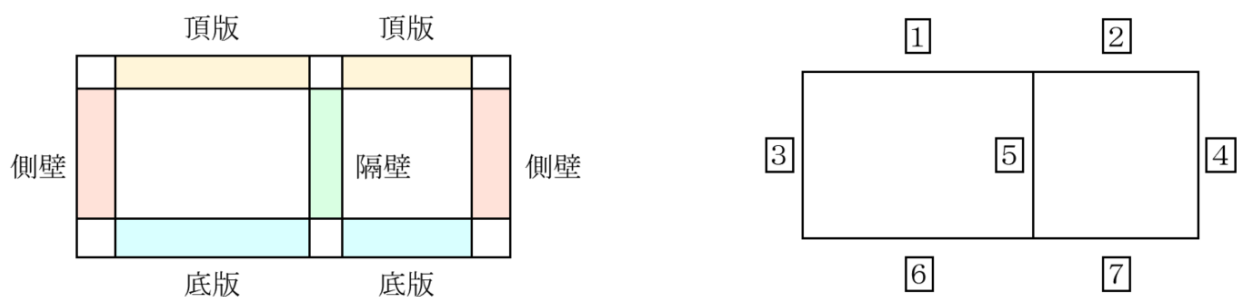


図 2-12 評価部位

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。設計地下水位を表 2-7 に示す。

表 2-7 設計地下水位

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）の耐震評価フローを図 2-13 に示す。

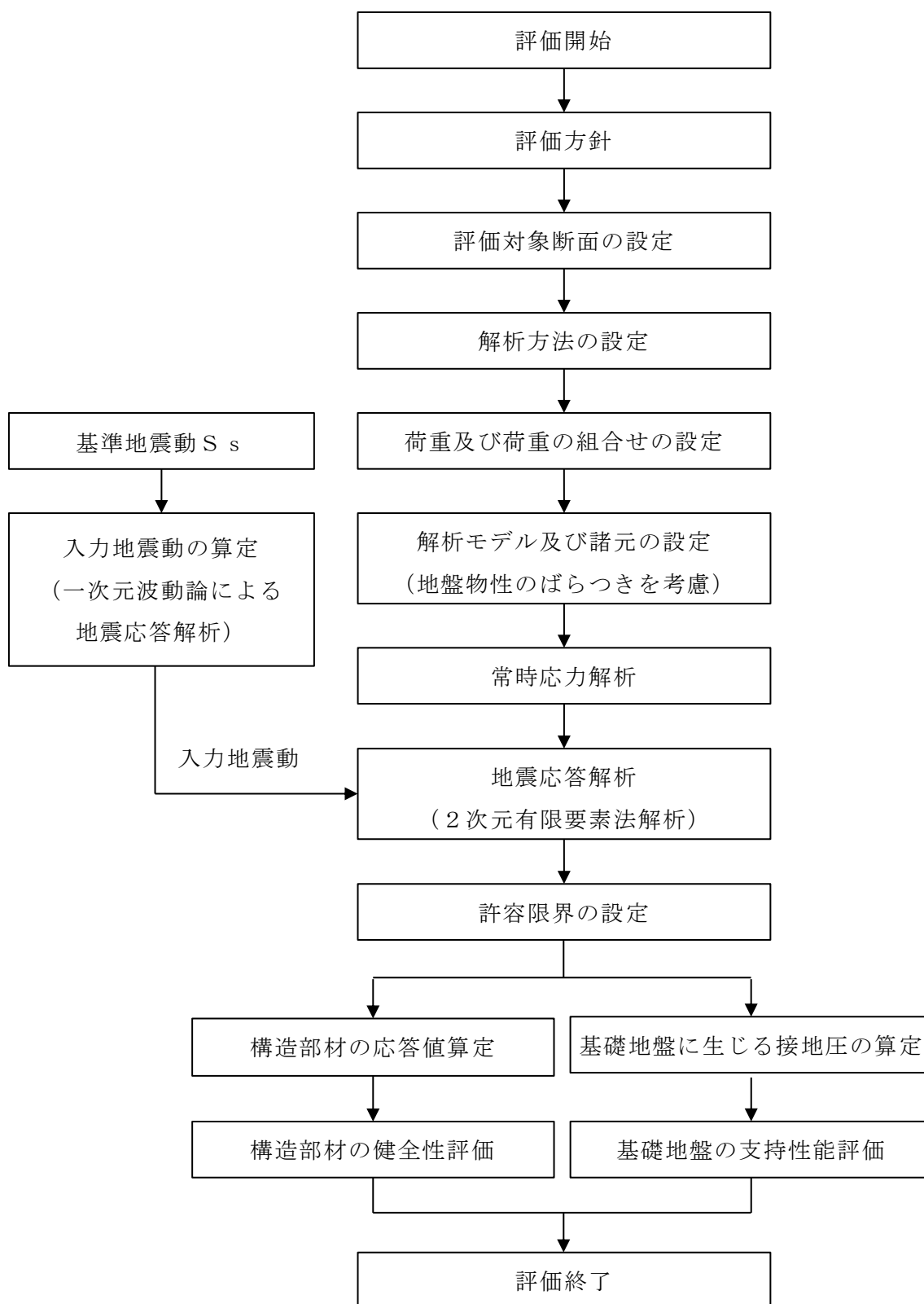


図 2-13 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の耐震評価フロー

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。

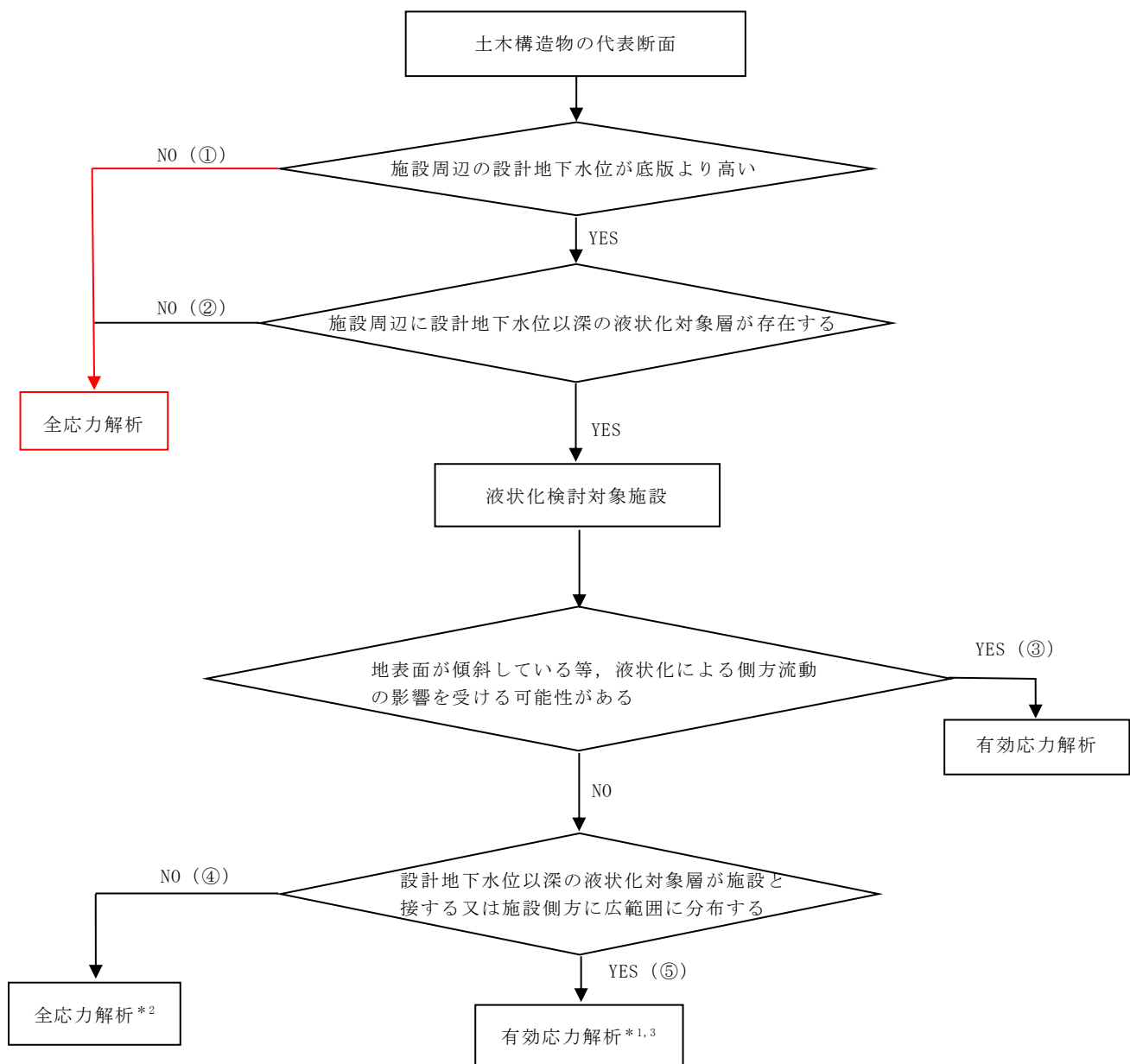
屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）周辺の地下水位は、構造物底版よりも低く、延長方向に一様であるため、解析手法のフローに基づき「①全応力解析」を選定する。

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

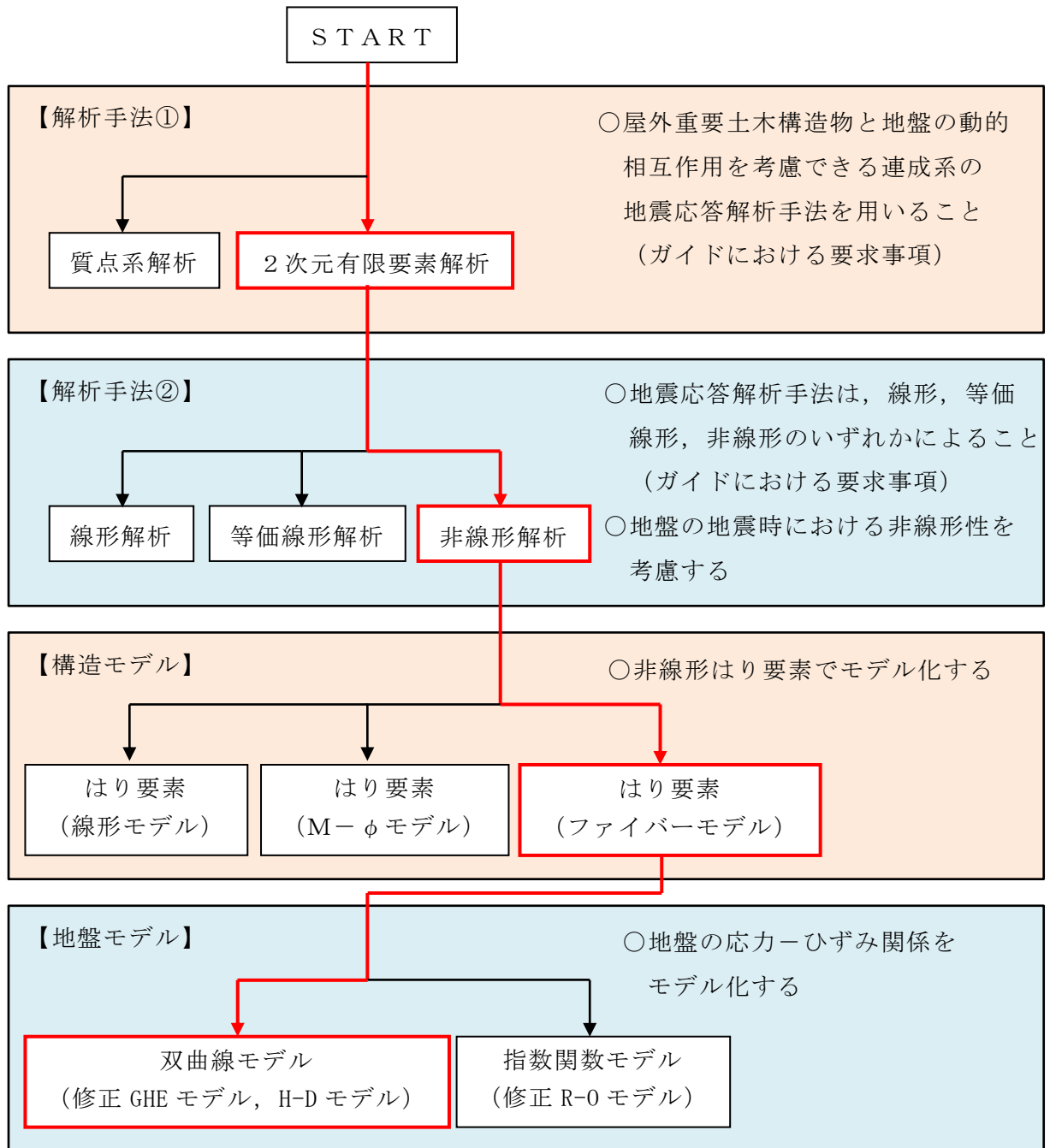


図 3-2 地震応答解析の選定フロー

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。

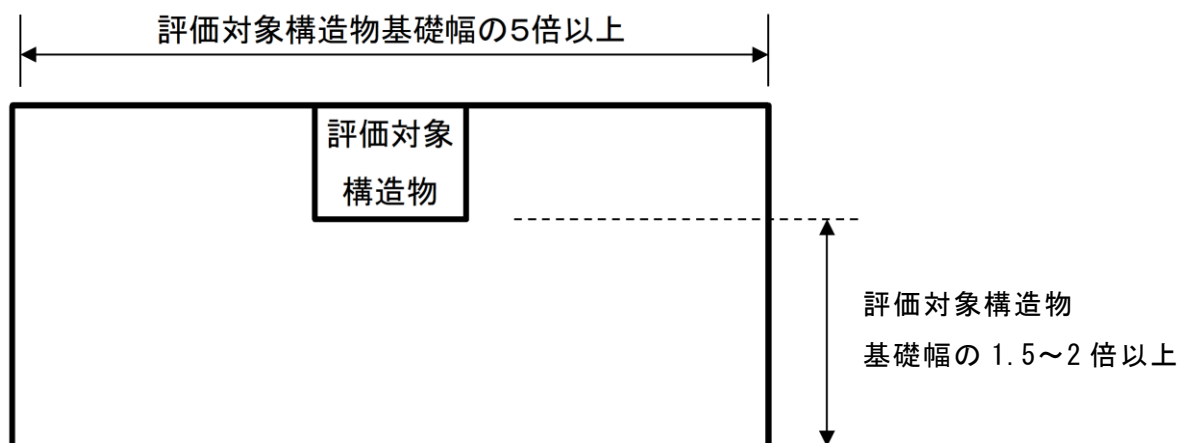


図 3-3 モデル化範囲の考え方

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。

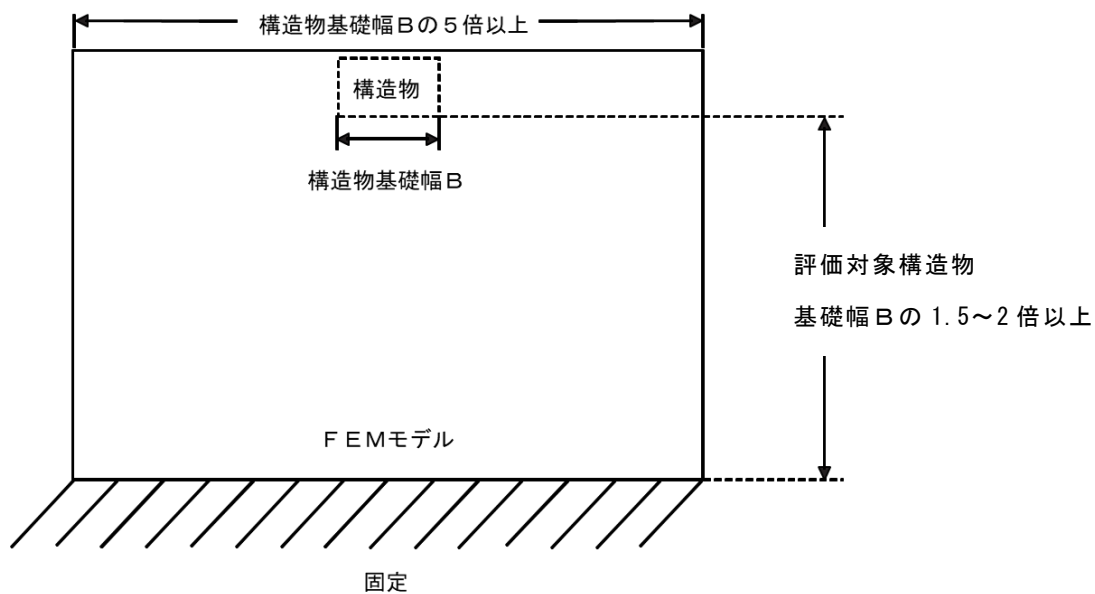


図 3-4 固有値解析における境界条件の概念図

(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。

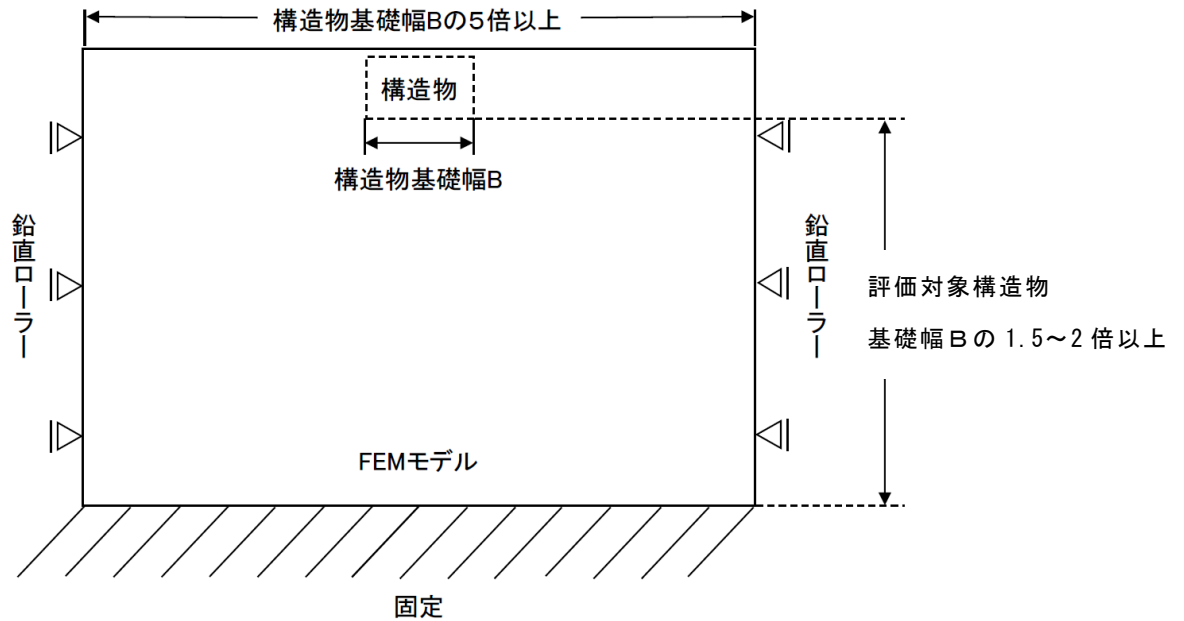


図3-5 常時応力解析における境界条件の概念図

(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。

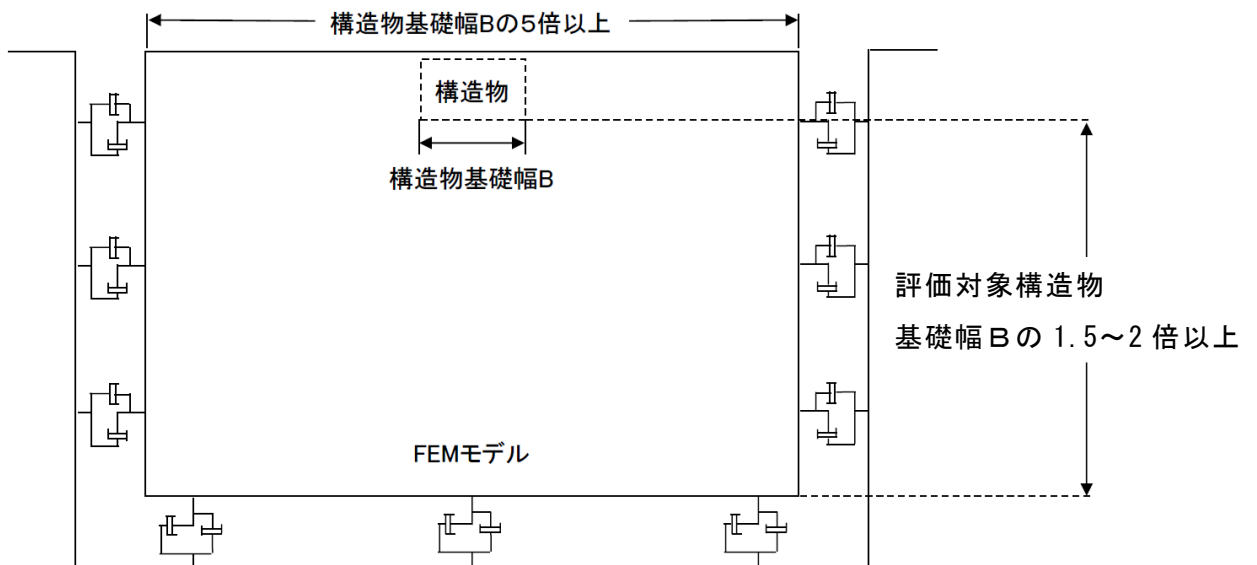


図3-6 地震応答解析における境界条件の概念図

3.2.3 構造物のモデル化

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

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3-7に、多質点系モデルと有限要素モデルの固有周期（1次モード）の比較を表3-1に示す。

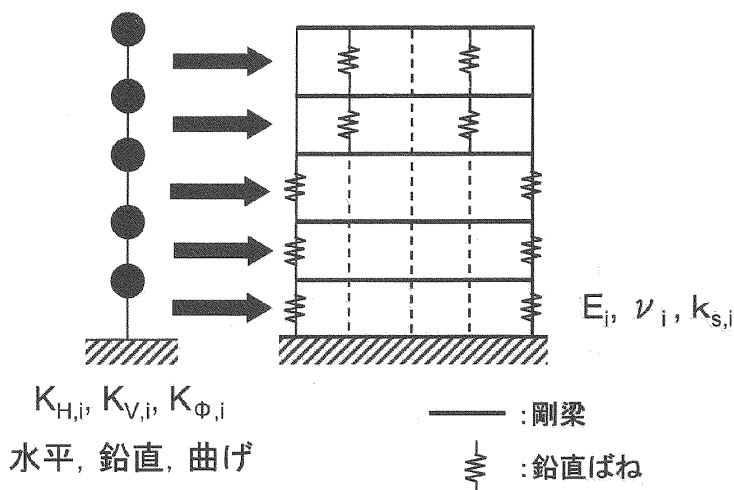


図3-7 タービン建物のモデル化概要

(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。

地盤のモデル化に用いる、地質断面図を図3-8に示す。

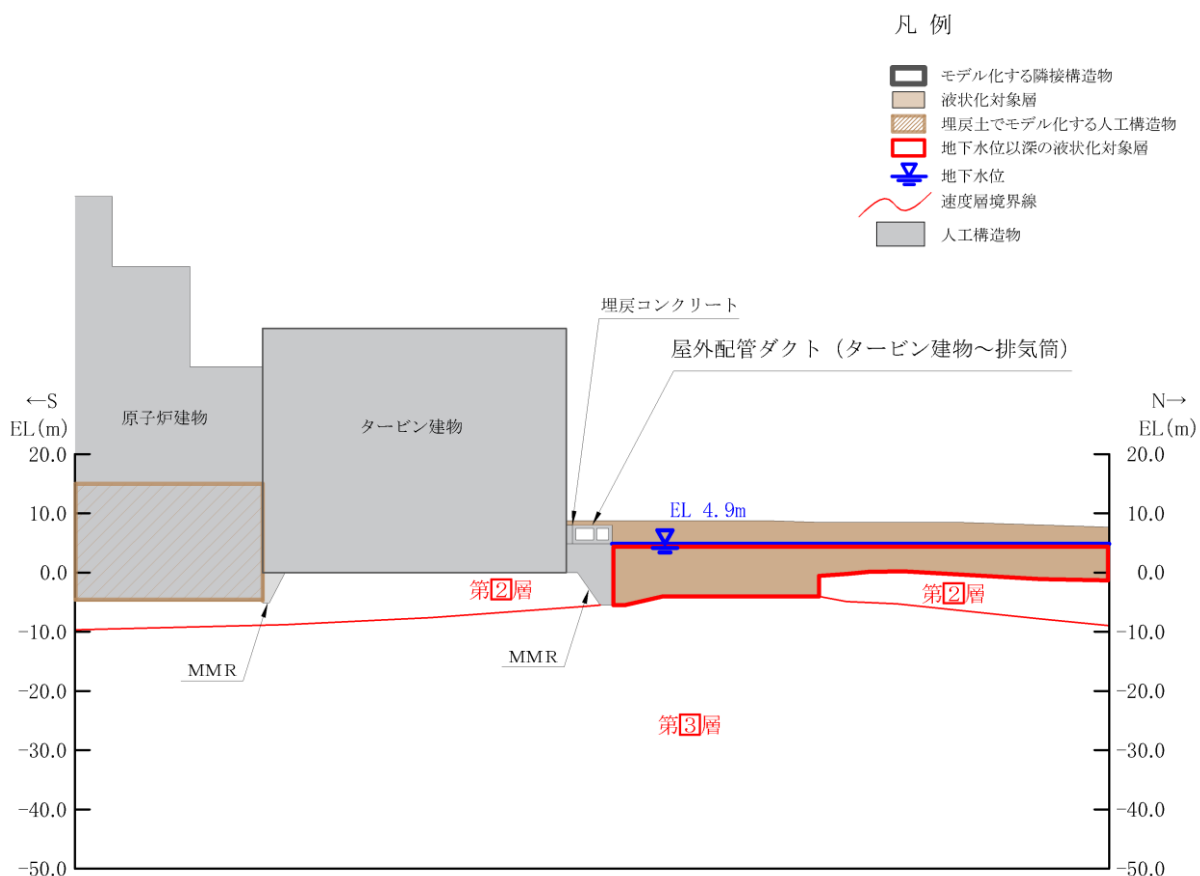


図3-8 評価対象地質断面図

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 3-9 に示す。

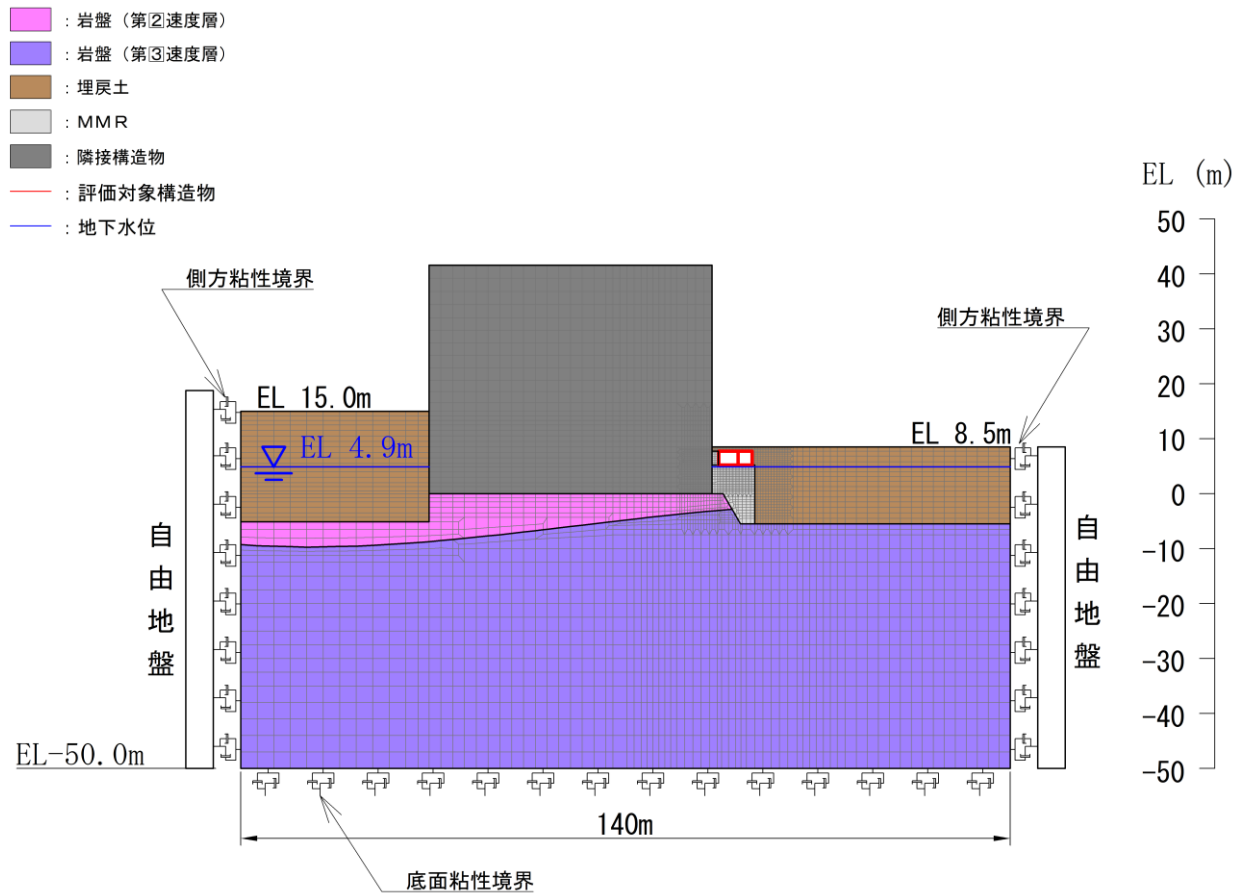


図 3-9 地震応答解析モデル図

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 3-2 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。

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

ここに， τ_f : せん断強度

c : 粘着力 (= 初期せん断強度 τ 。)

σ : 垂直応力

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 ($f'_{ck} = 15.6\text{N/mm}^2$)	3.10	40
埋戻コンクリート ($f'_{ck} = 18.0\text{N/mm}^2$)	3.58	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	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	無筋コンクリート	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	- *	- *

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 3-10 に、ジョイント要素の配置を図 3-11 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

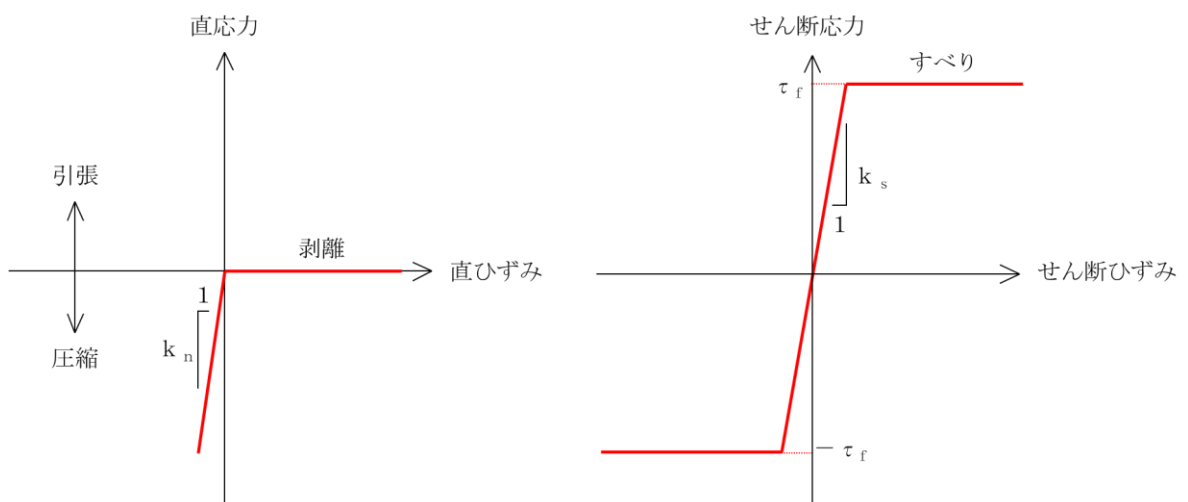
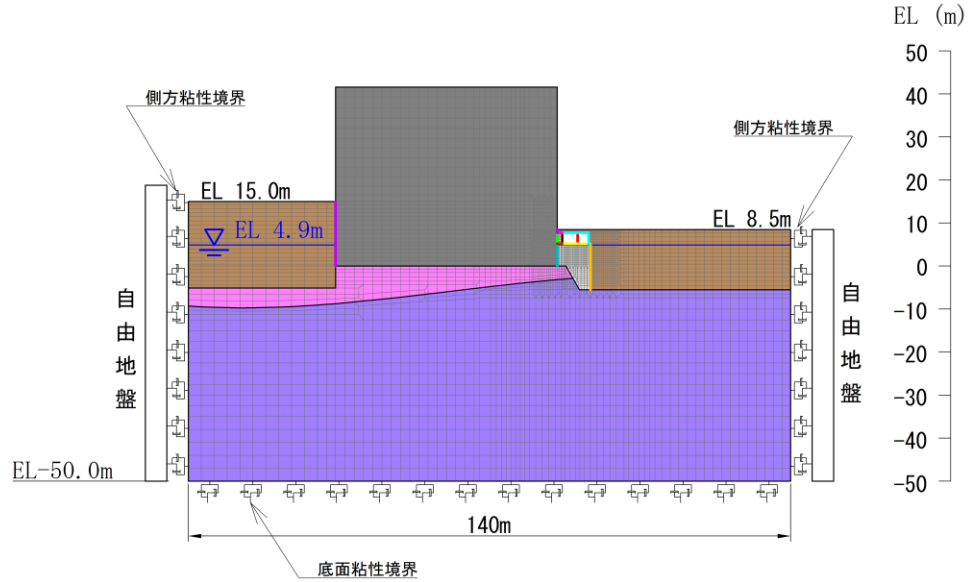


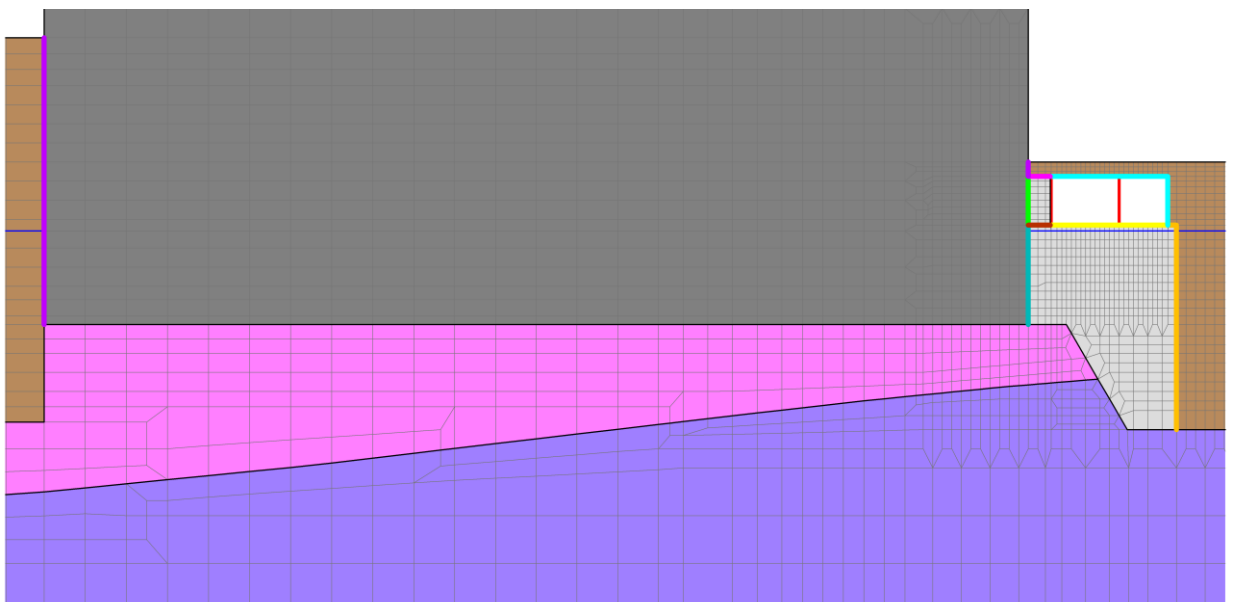
図 3-10 ジョイント要素の力学特性

- : 岩盤 (第②速度層)
- : 岩盤 (第③速度層)
- : 埋戻土
- : MMR
- : 隣接構造物
- : 評価対象構造物
- : 地下水位
- : ジョイント要素



(全体図)

- : 構造物-埋戻土 ジョイント要素
- : 構造物-MMR ジョイント要素
- : 埋戻土-埋戻土 ジョイント要素
- : 埋戻土-タービン建物 ジョイント要素
- : 埋戻土-タービン建物 ジョイント要素
- : 埋戻土-MMR ジョイント要素
- : MMR-タービン建物 ジョイント要素
- : タービン建物-埋戻土 ジョイント要素



(拡大図)

図 3-11 ジョイント要素の配置 (A-A断面)

3.2.8 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3-12参照）、図3-13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3-14に鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。

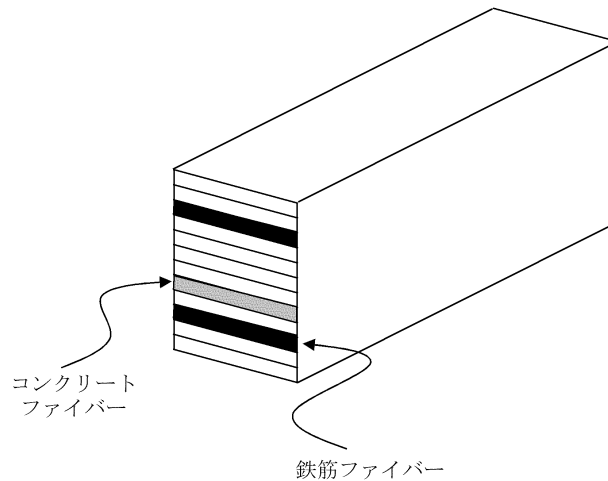
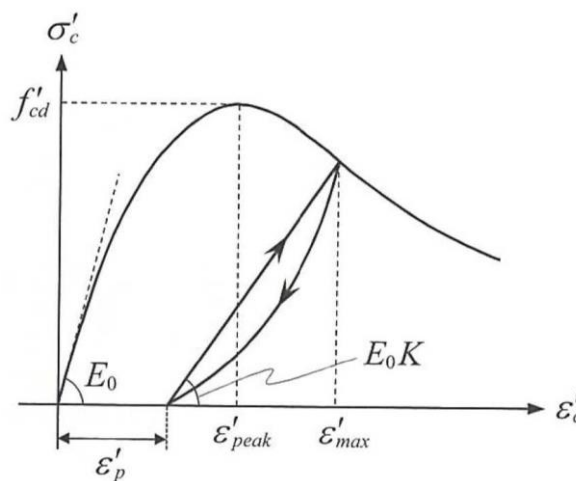
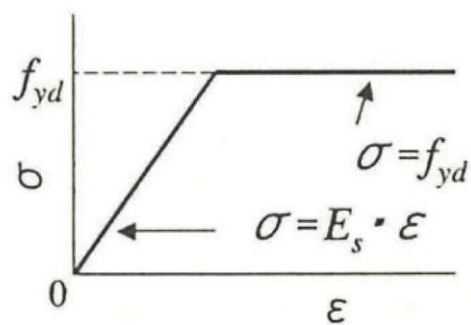


図3-12 ファイバーモデルの概念図



(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

図3-13 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 3-14 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。

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 3-15 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

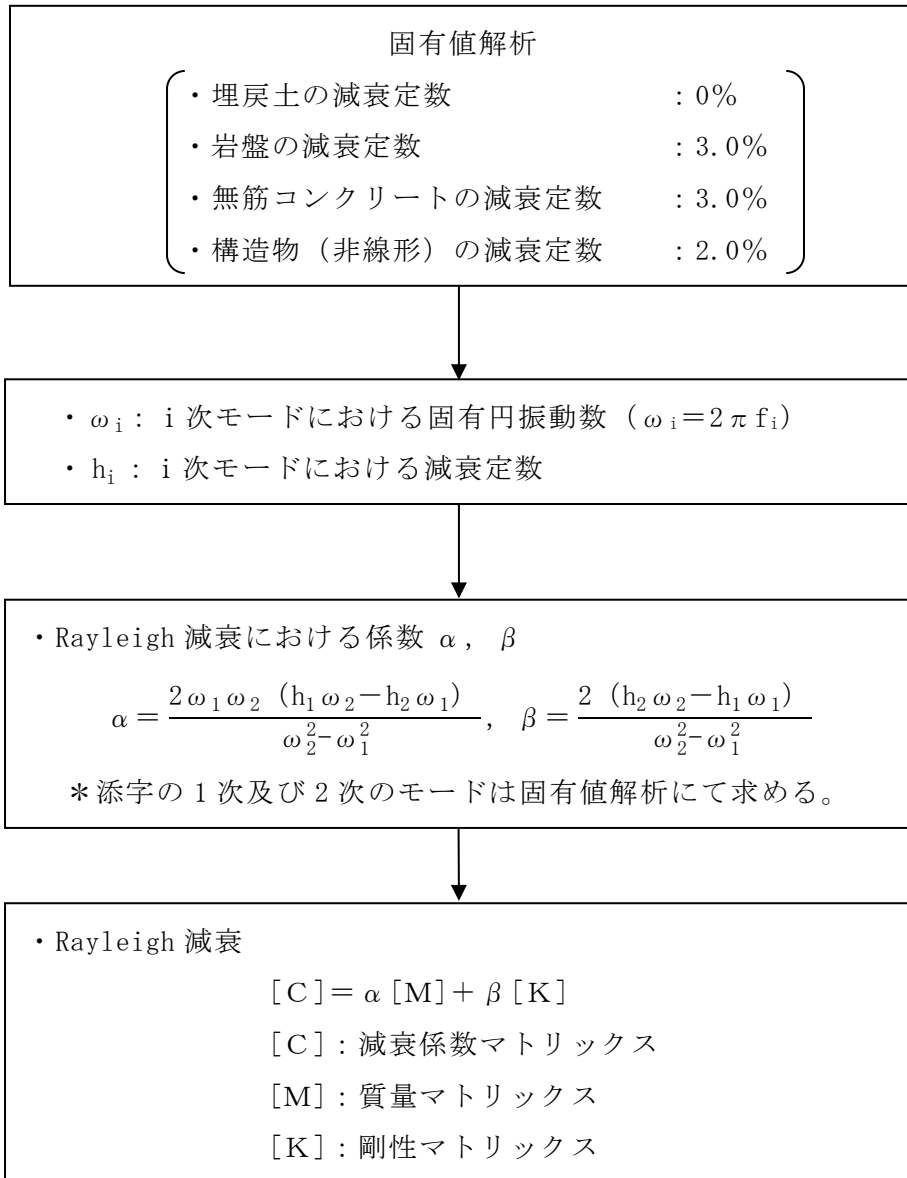


図 3-15 Rayleigh 減衰の設定フロー

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。

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。

固有値解析結果については追而とする。

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、永久荷重（常時荷重）及び偶発荷重（地震荷重）を抽出し、それぞれを組合せて設定する。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（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。

なお、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）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 3-5 に示す。

表 3-5 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 3-6 に、荷重図を図 3-16 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。

表 3-6 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	⑤北側壁
1.334 (2.019kN/m ²)*	0.737	3.582	1.117	2.522

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）頂版には括弧内の値を作用させる。

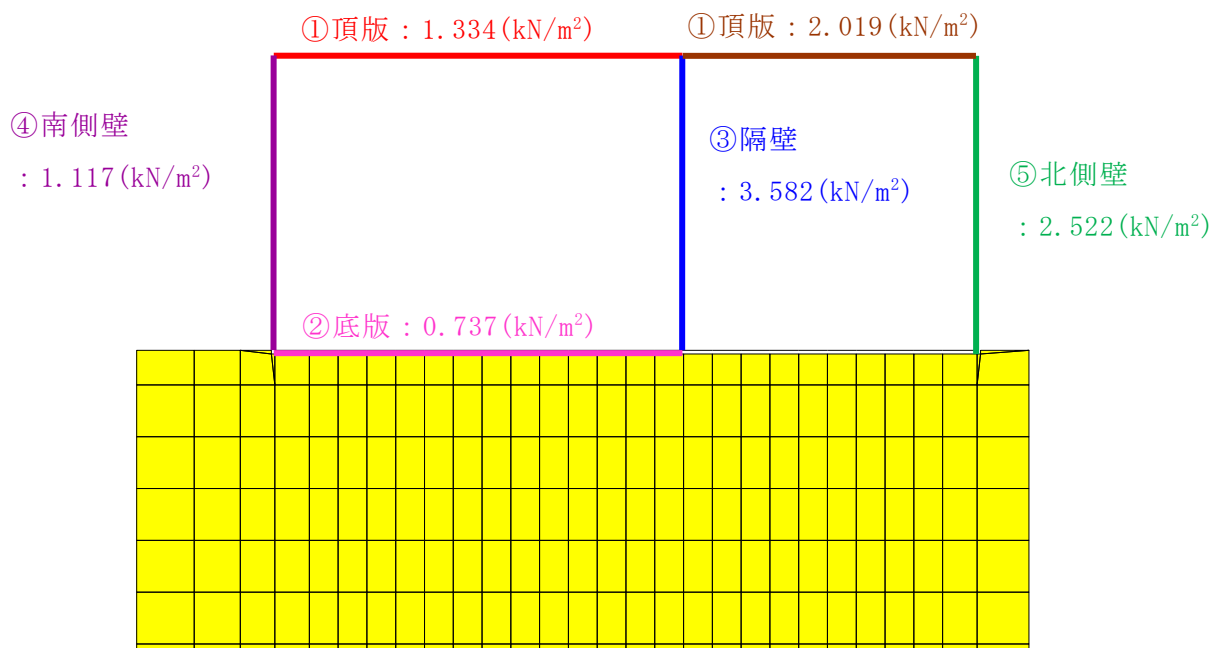


図 3-16 解析用機器・配管荷重図

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 1.00g/cm^3 を考慮する。

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。

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，埋戻土の初期せん断弾性係数のばらつきを考慮する。

解析ケースについては，せん断弾性係数の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 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）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	
		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3-7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3-7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3-8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3-17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)	$S_s - D$	++*	○	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。			
		-+*	○				
		+ -*	○				
		--*	○				
	$S_s - F1$	++*	○				
	$S_s - F2$	++*	○				
	$S_s - N1$	++*	○				
		-+*	○				
	$S_s - N2$ (NS)	++*	○				
		-+*	○				
$S_s - N2$ (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。

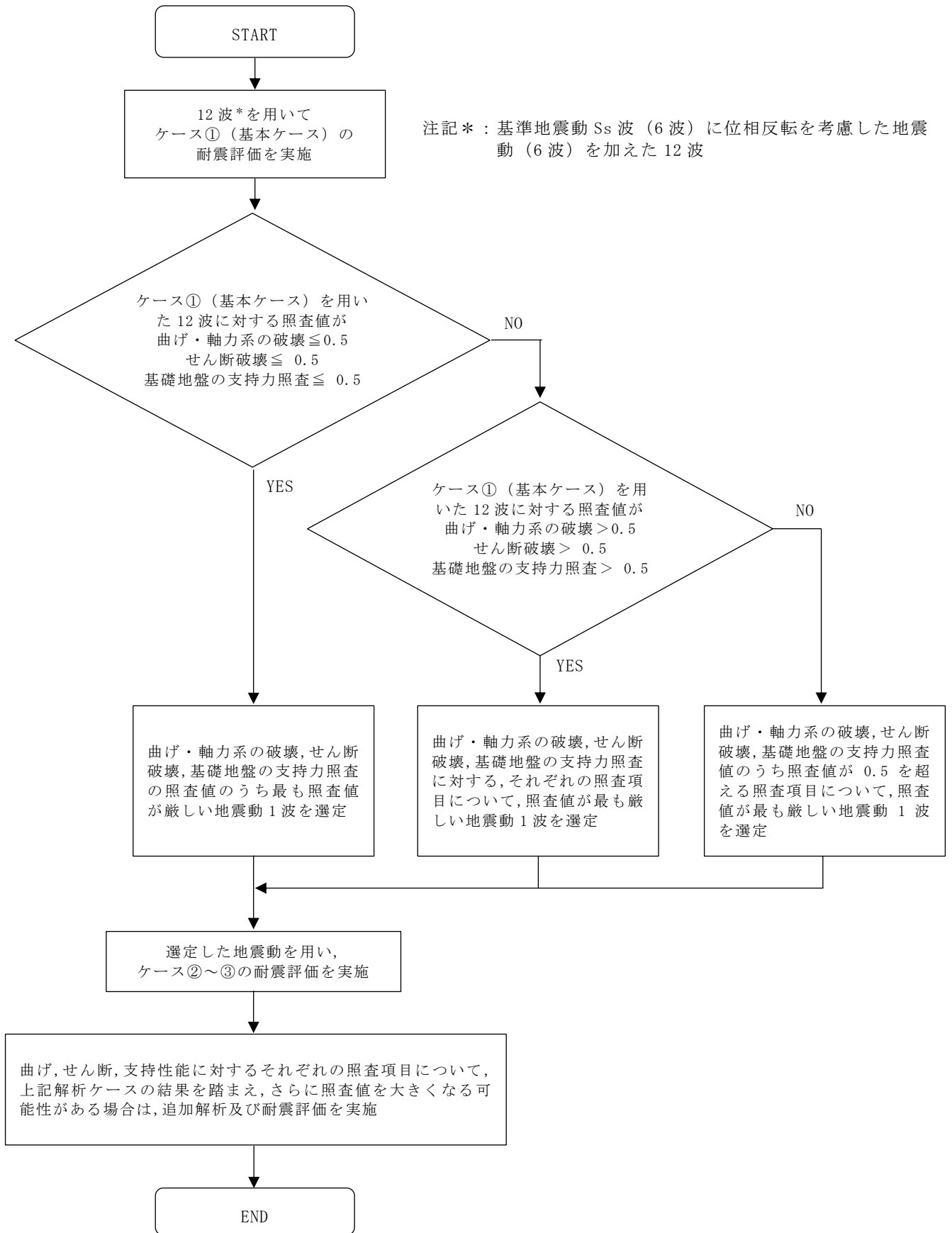


図 3-17 追加解析を実施する地震動の選定フロー

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 3-9 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*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 3-9 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。

(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 3-9 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 3-18 及び図 3-19 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 3-10 に、コア採取による圧縮強度試験結果を表 3-11 に示す。

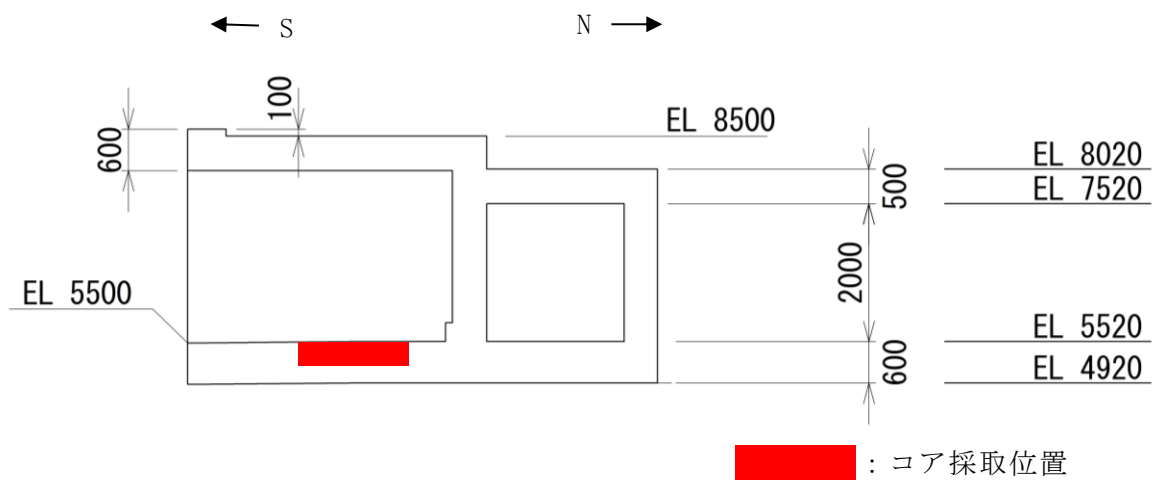
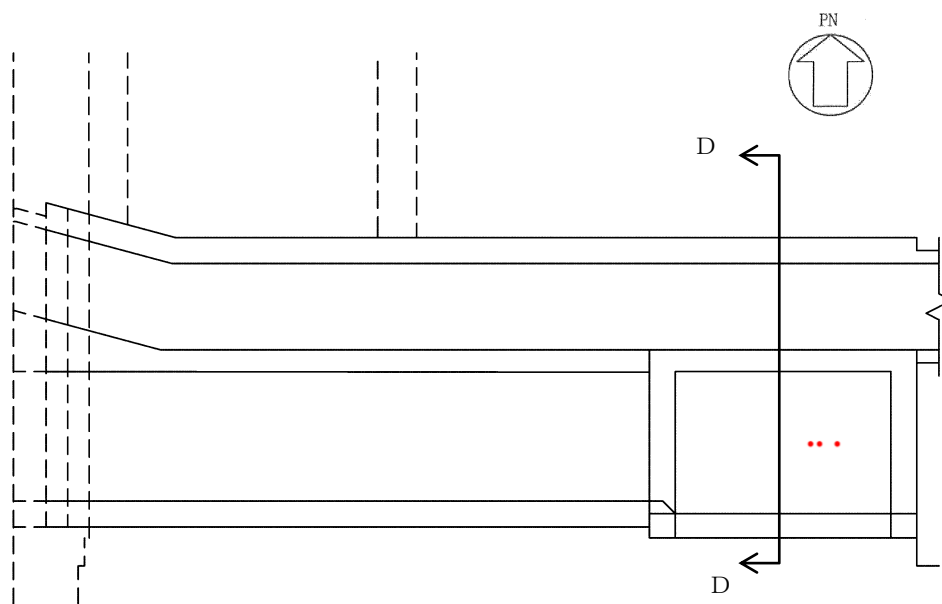


図 3-18(1) コア採取位置概念図 (D-D 断面)



注：EL 5.50m 平面位置を示す。

図 3-18(2) コア採取位置図

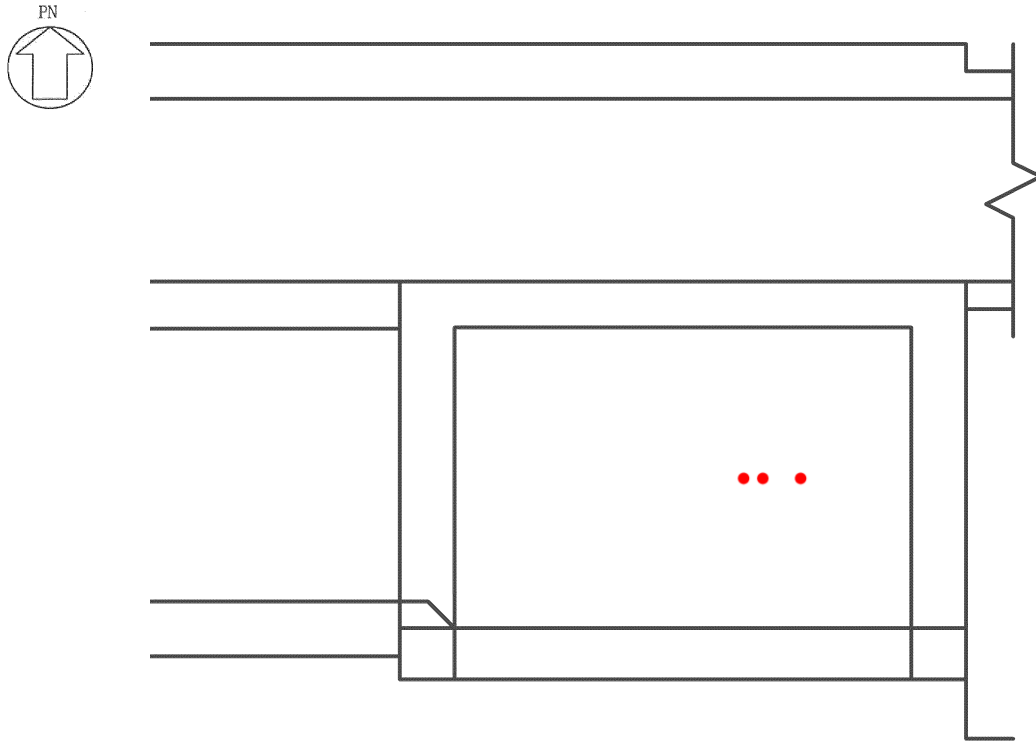


図 3-19 コア採取位置拡大図

表 3-10 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 3-11 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 3-11 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 3-18 及び図 3-19 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 3-9 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 波を用いて表 3-12 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 3-13 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 3-12 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 3-13 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 (NS)	++*	○	○	○	○	○
		-+*	○	○	○	○	○
	S d - N 2 (EW)	++*	○	○	○	○	○
		-+*	○	○	○	○	○
	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。

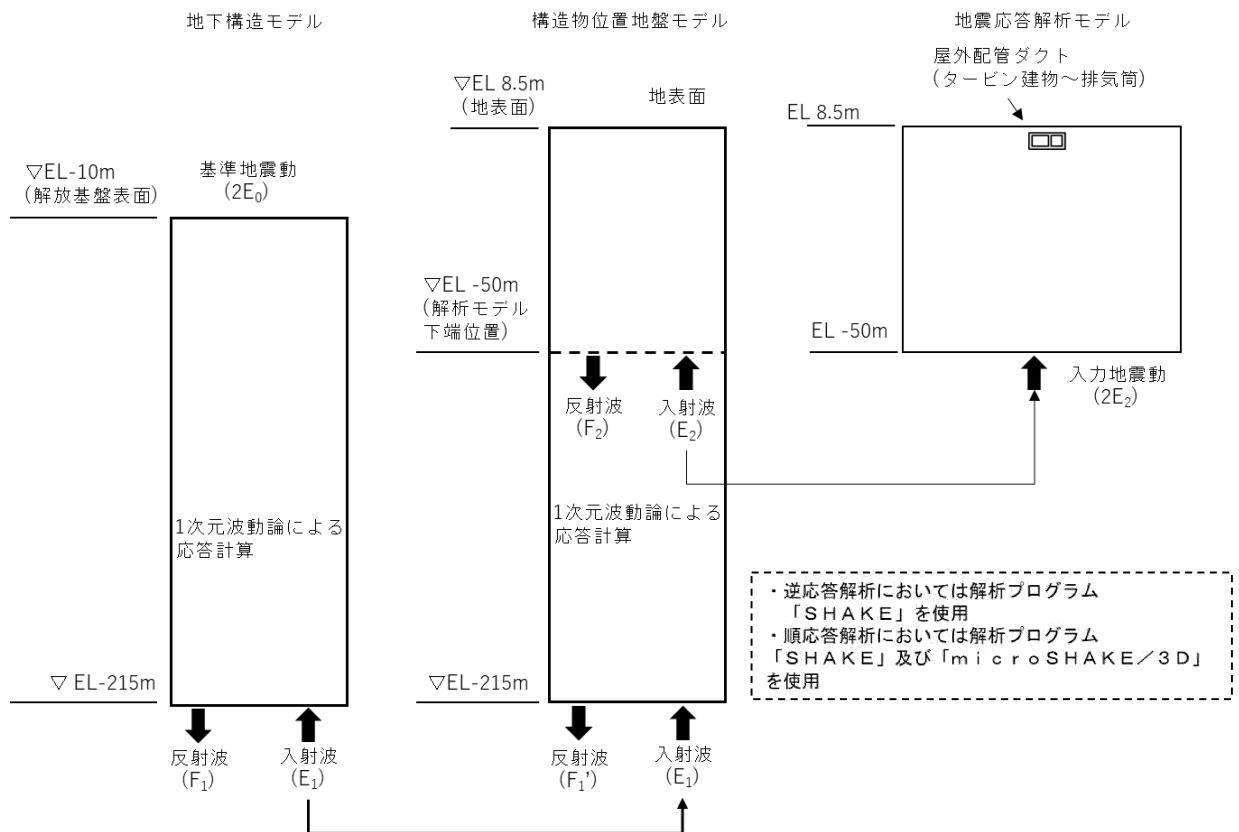
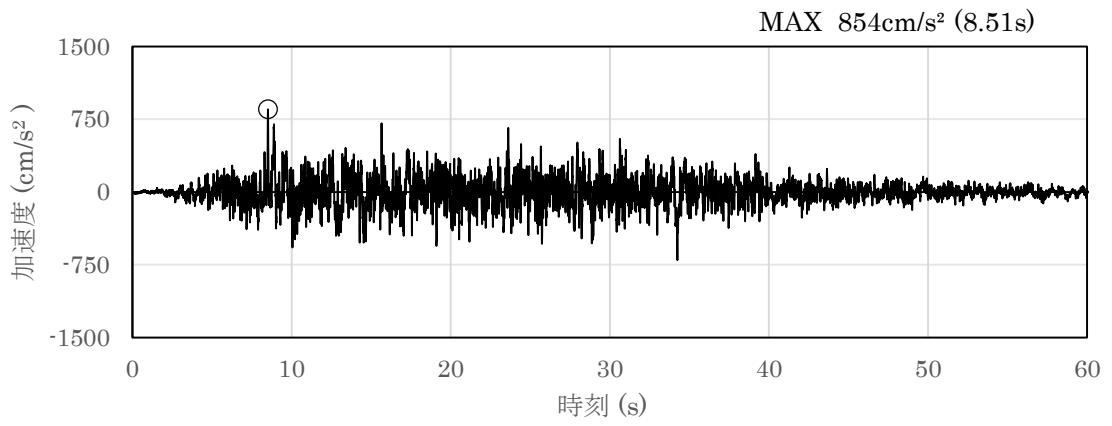
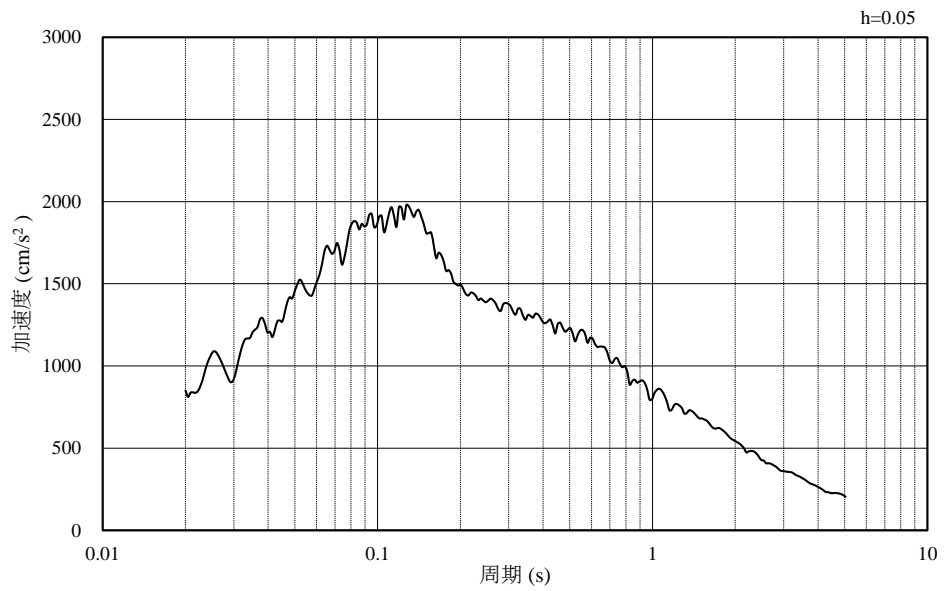


図4-1 入力地震動算定の概念図

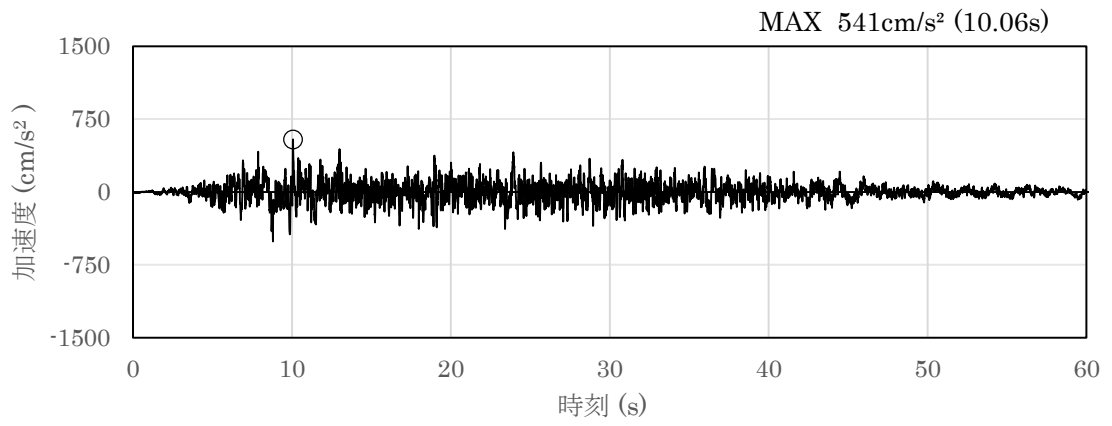


(a) 加速度時刻歴波形

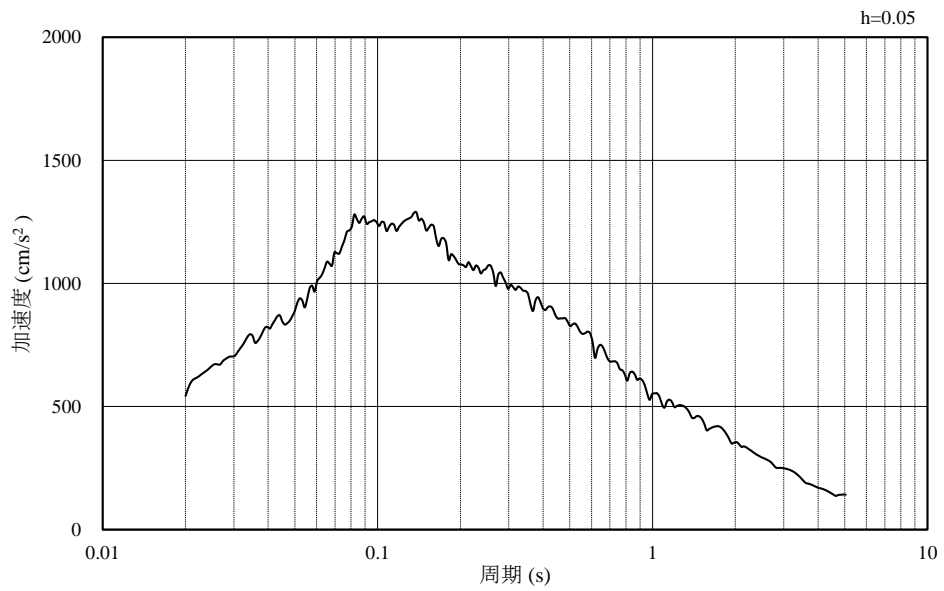


(b) 加速度応答スペクトル

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)

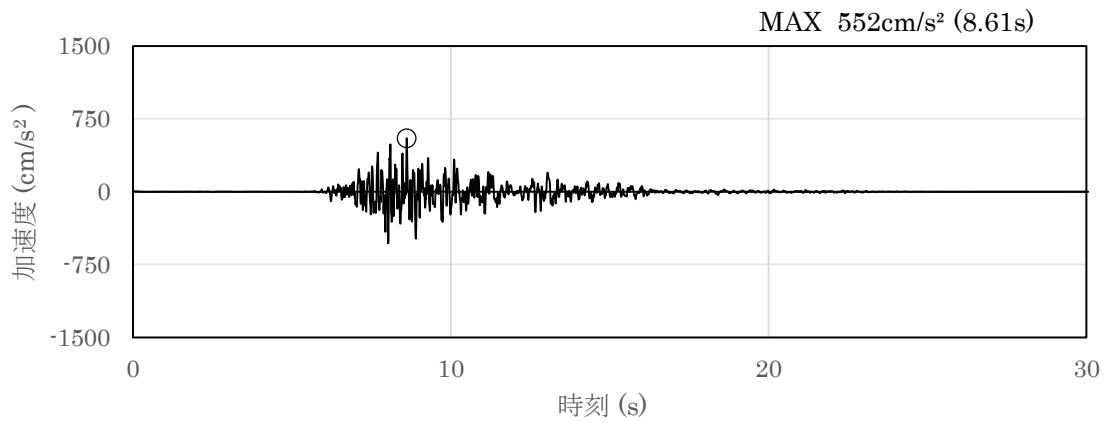


(a) 加速度時刻歴波形

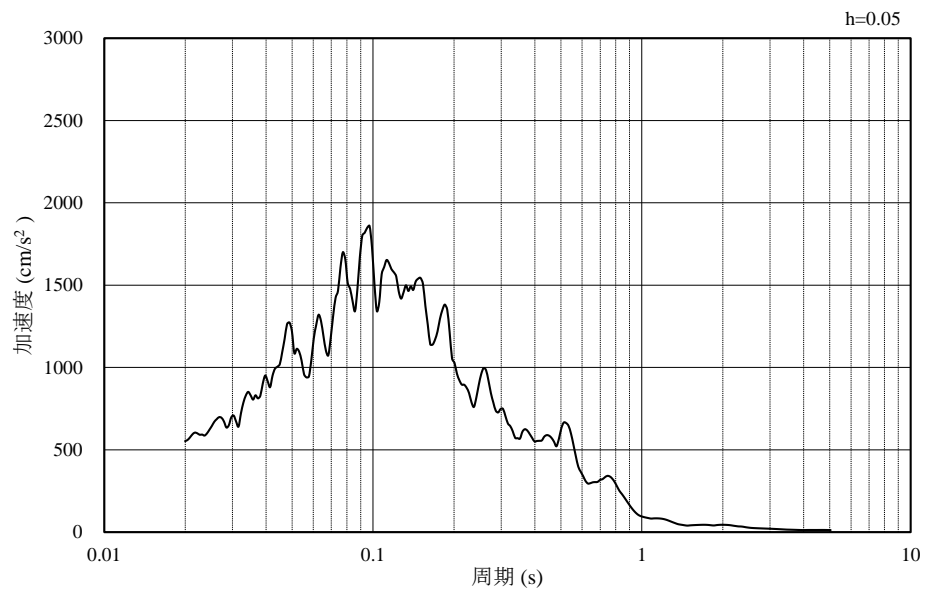


(b) 加速度応答スペクトル

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)

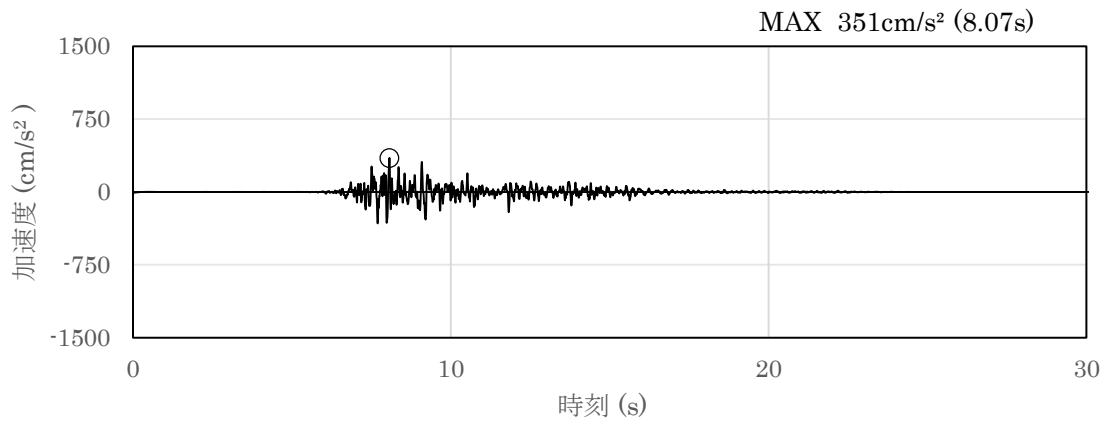


(a) 加速度時刻歴波形

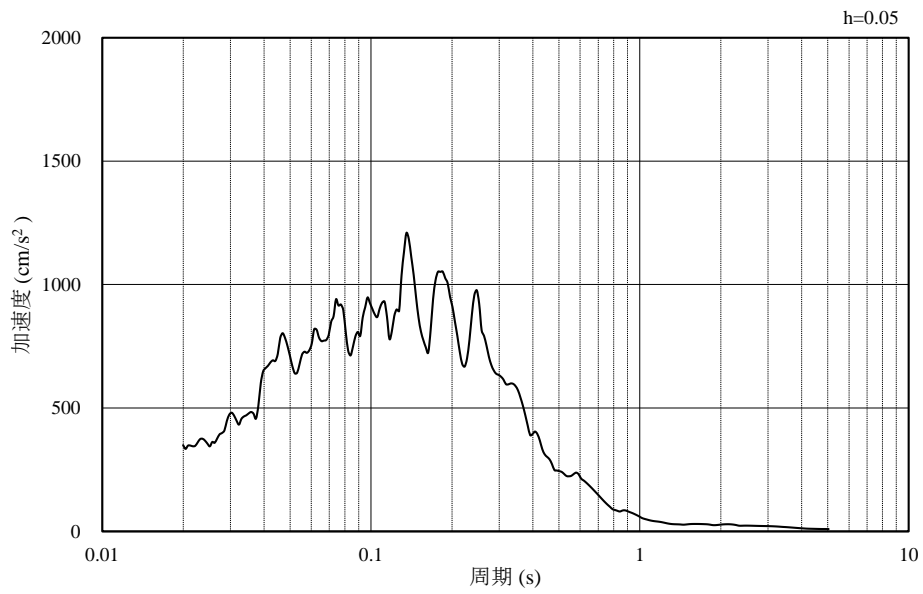


(b) 加速度応答スペクトル

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)

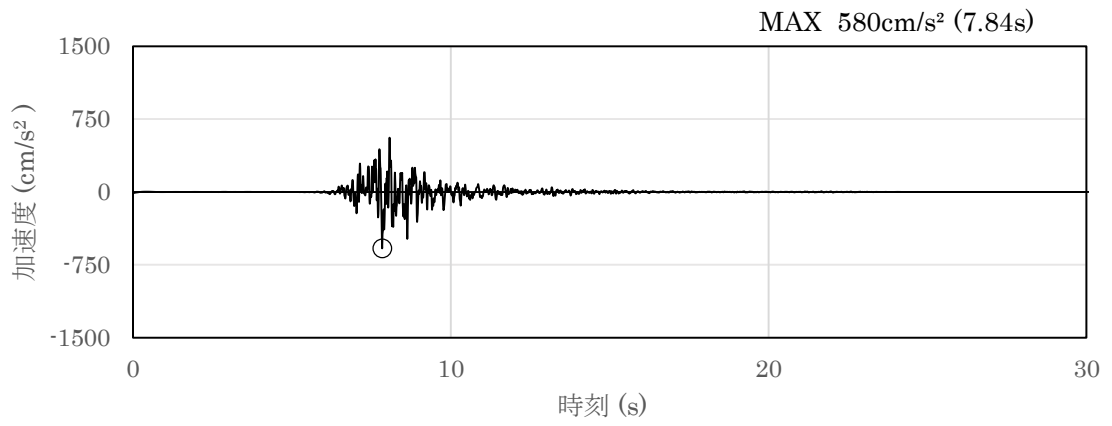


(a) 加速度時刻歴波形

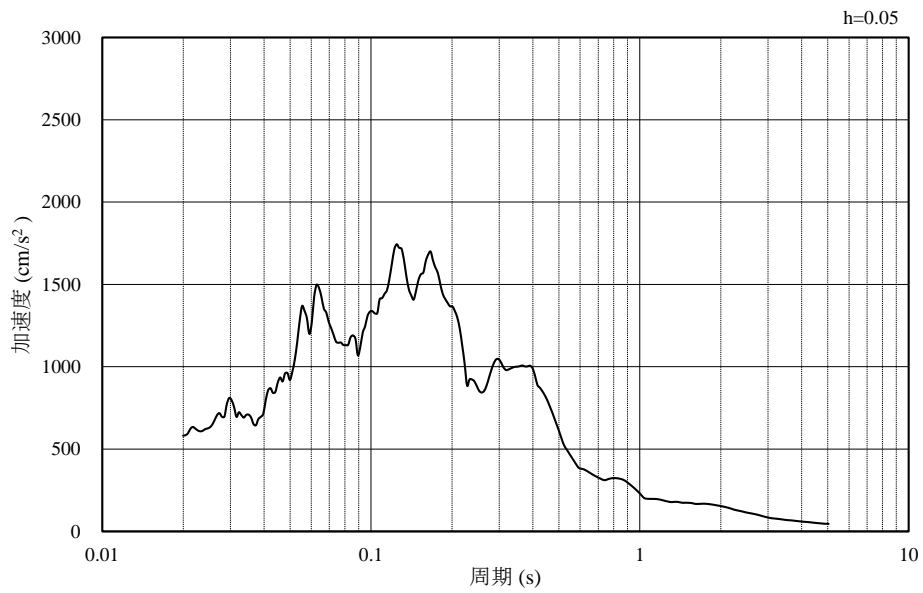


(b) 加速度応答スペクトル

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)

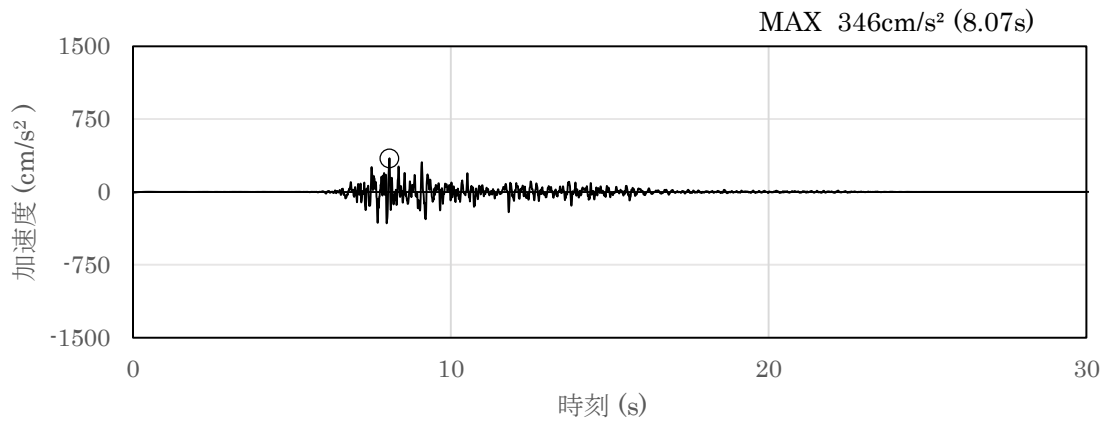


(a) 加速度時刻歴波形

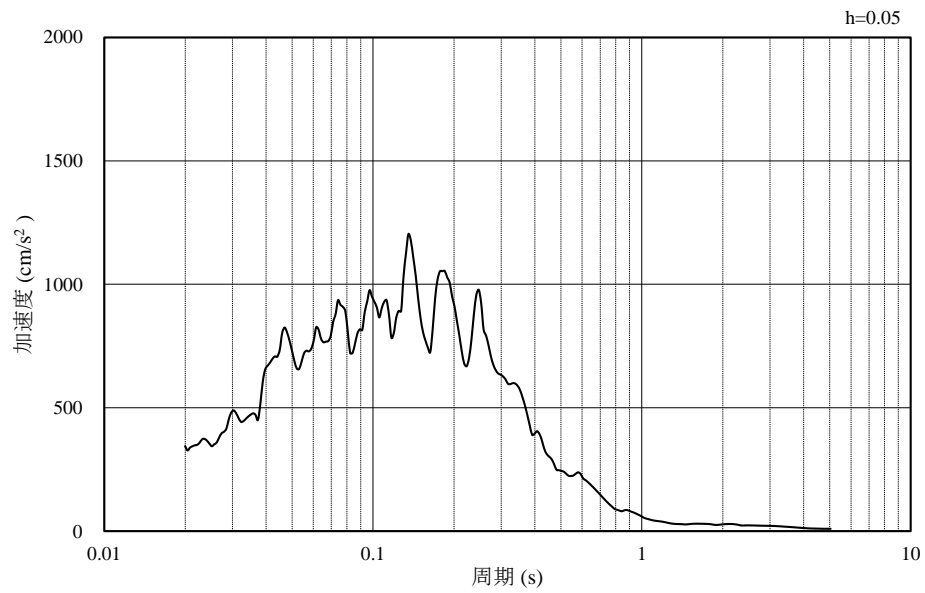


(b) 加速度応答スペクトル

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)

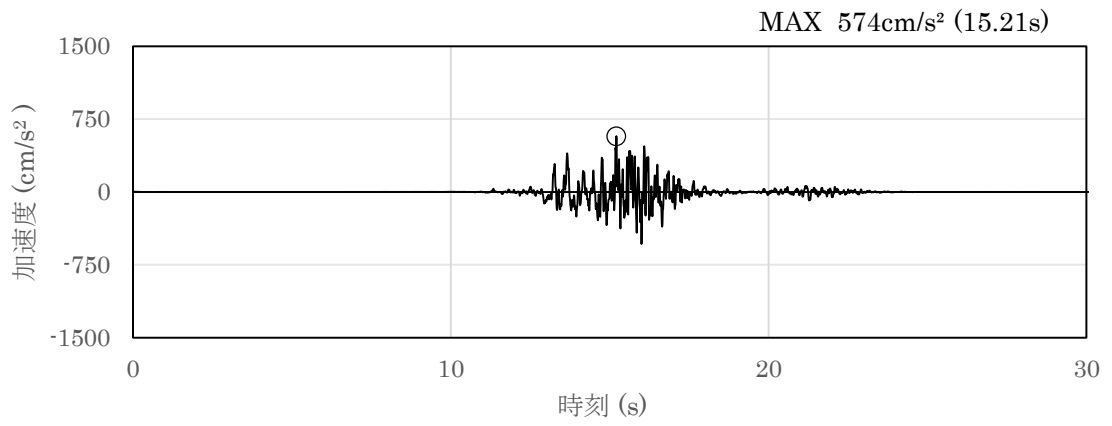


(a) 加速度時刻歴波形

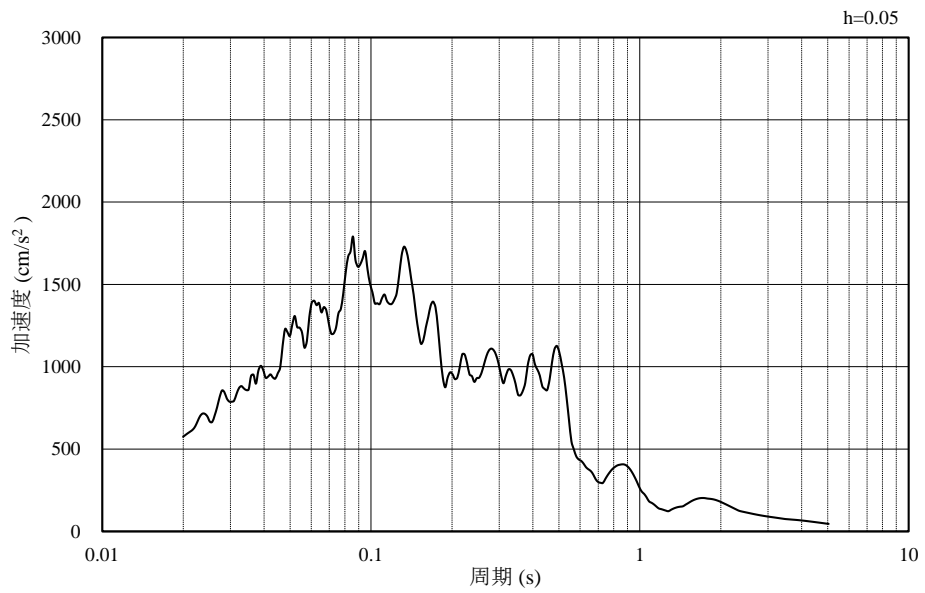


(b) 加速度応答スペクトル

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)

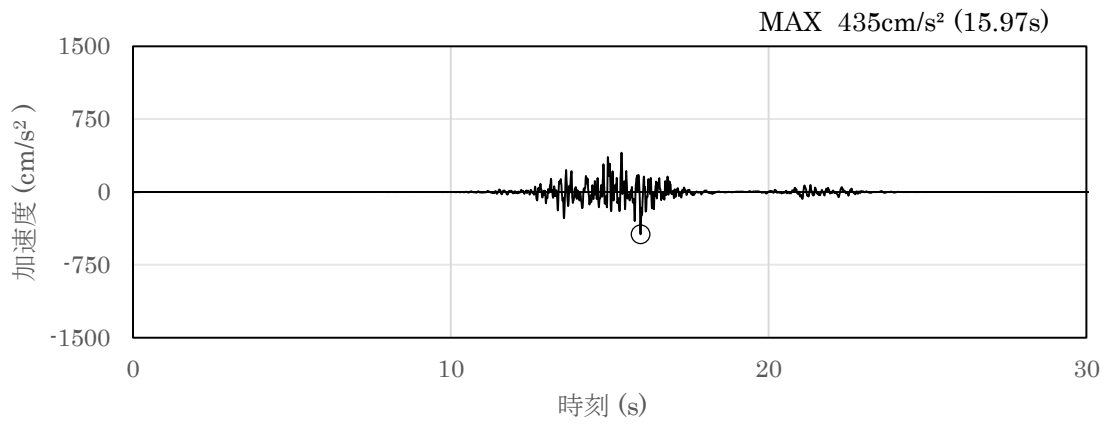


(a) 加速度時刻歴波形

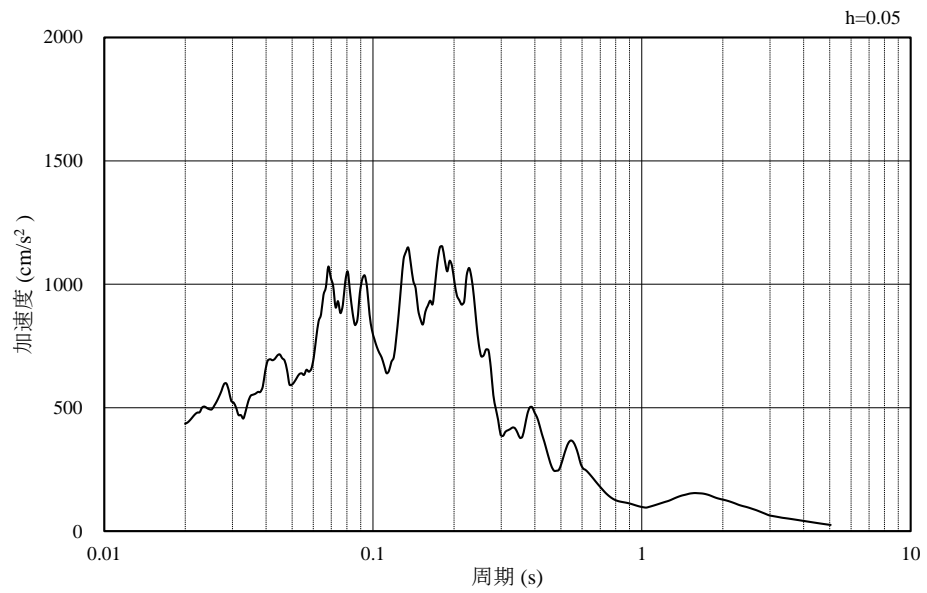


(b) 加速度応答スペクトル

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)

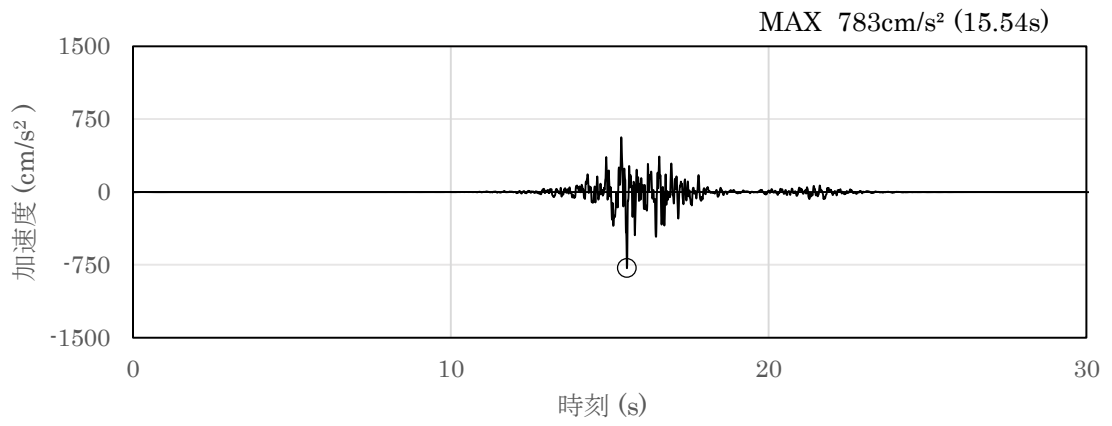


(a) 加速度時刻歴波形

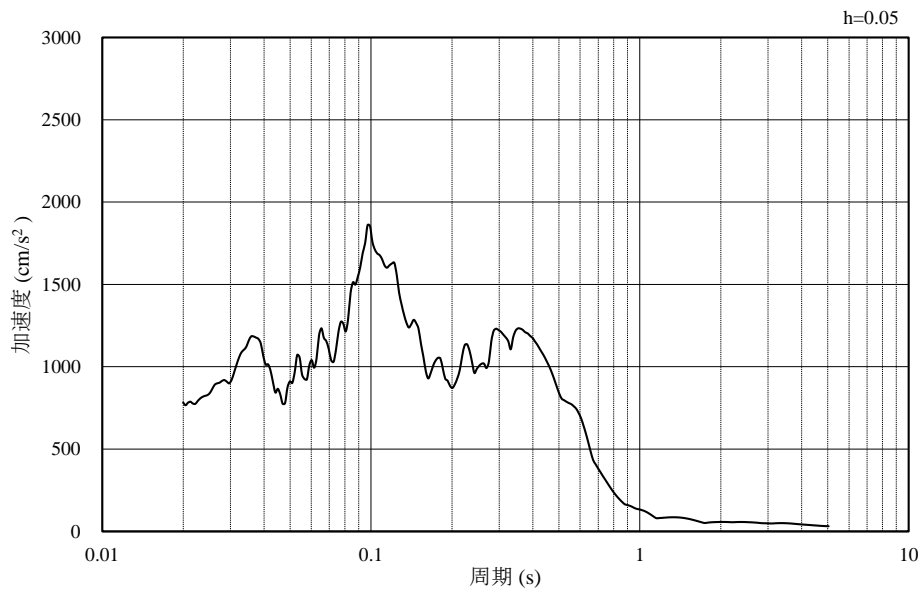


(b) 加速度応答スペクトル

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)

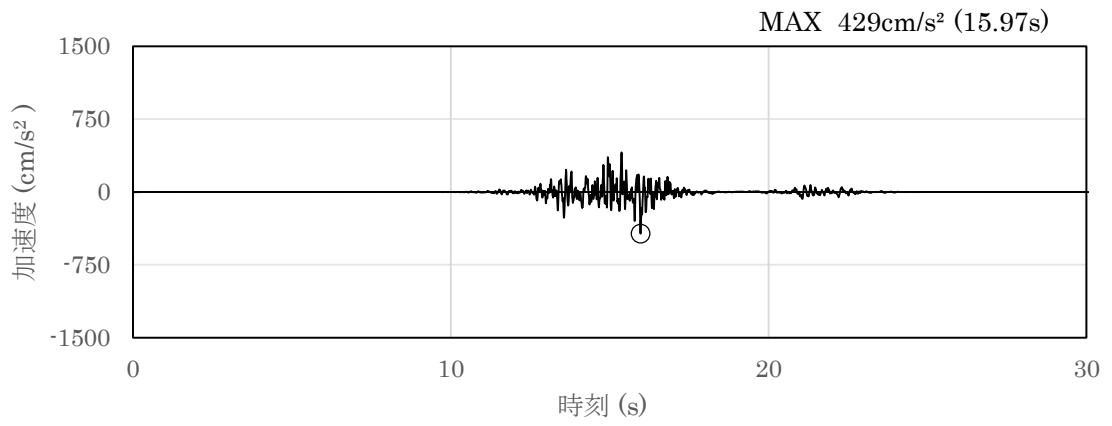


(a) 加速度時刻歴波形

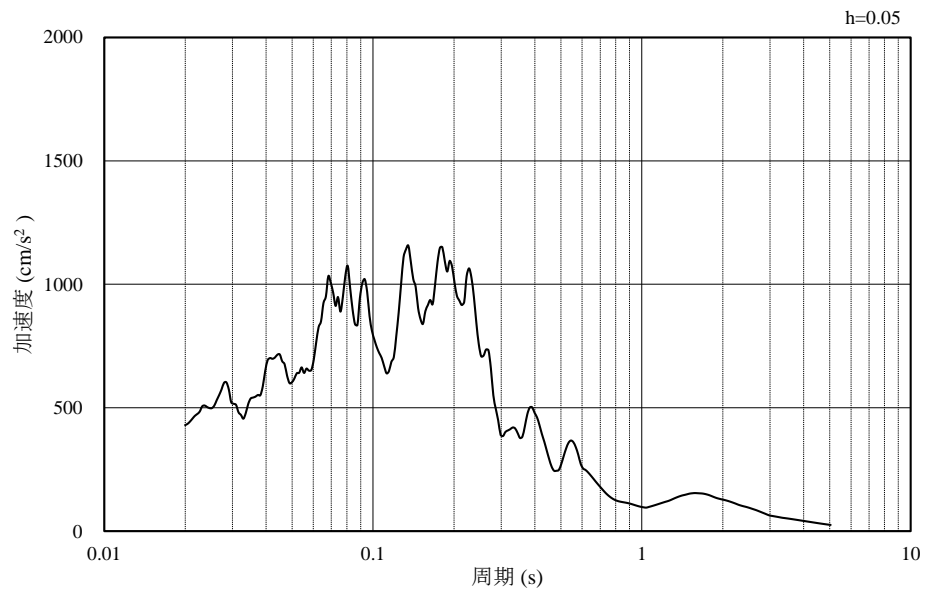


(b) 加速度応答スペクトル

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)

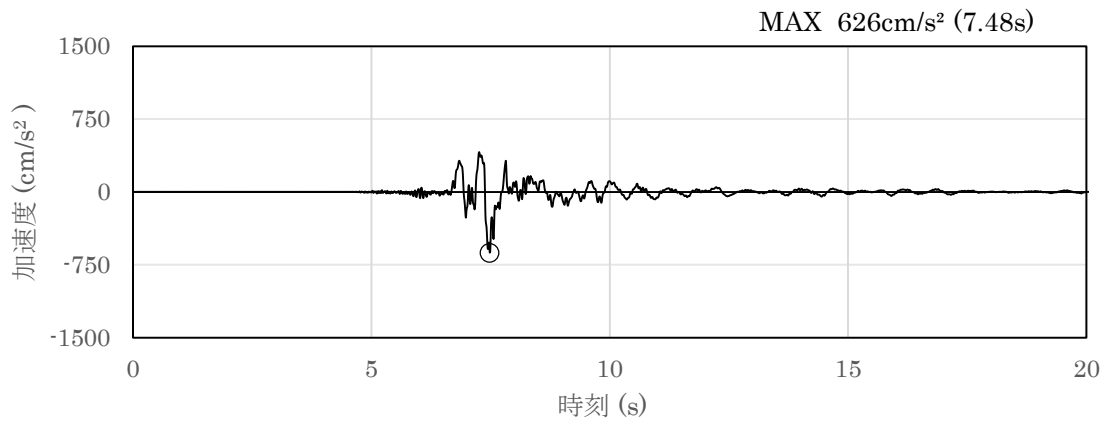


(a) 加速度時刻歴波形

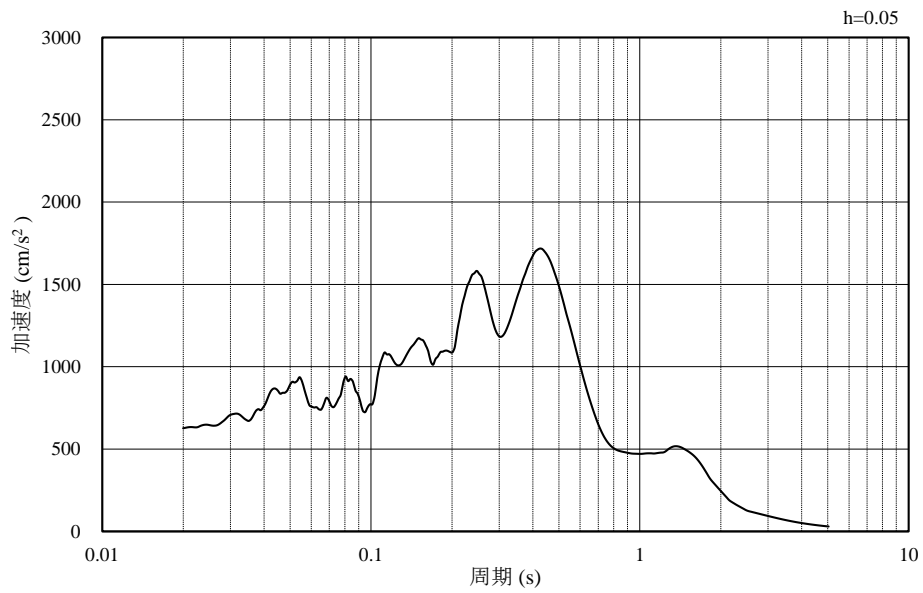


(b) 加速度応答スペクトル

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)

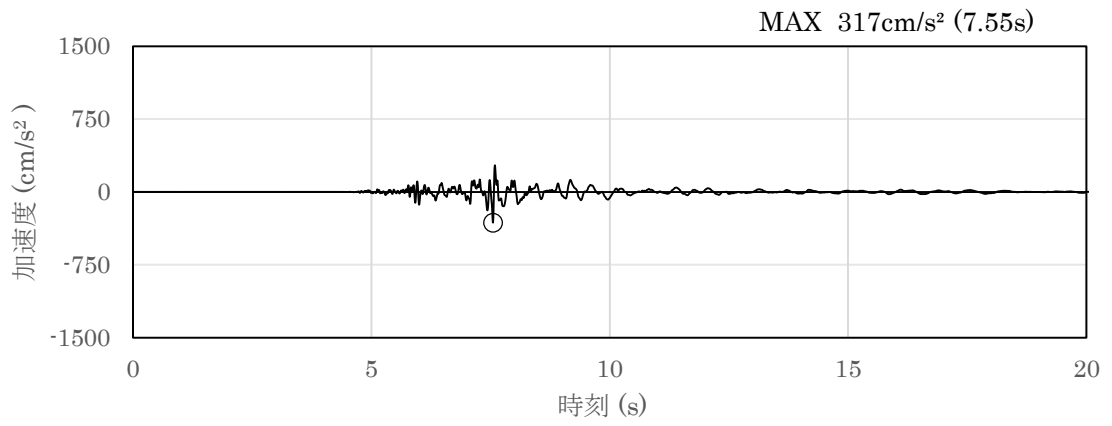


(a) 加速度時刻歴波形

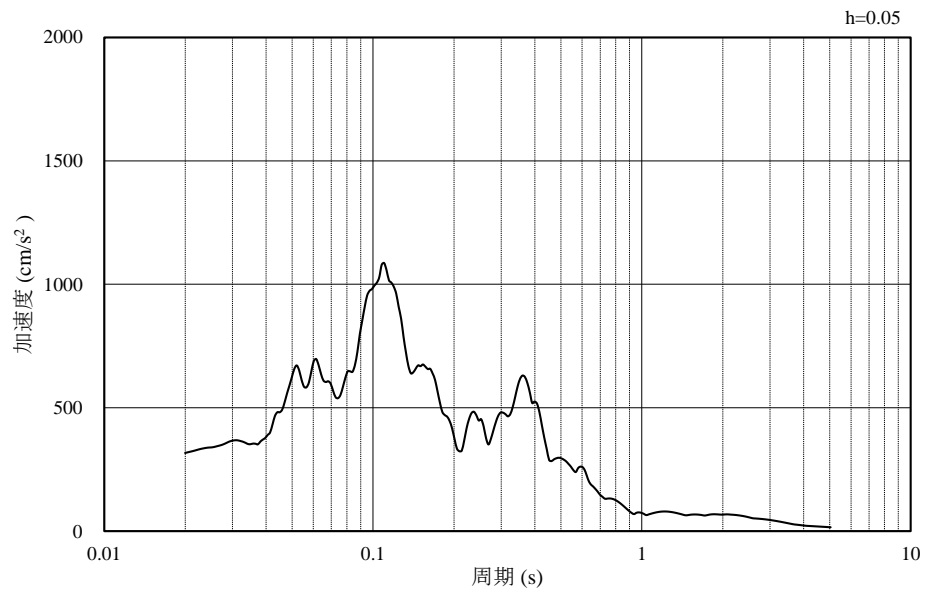


(b) 加速度応答スペクトル

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)

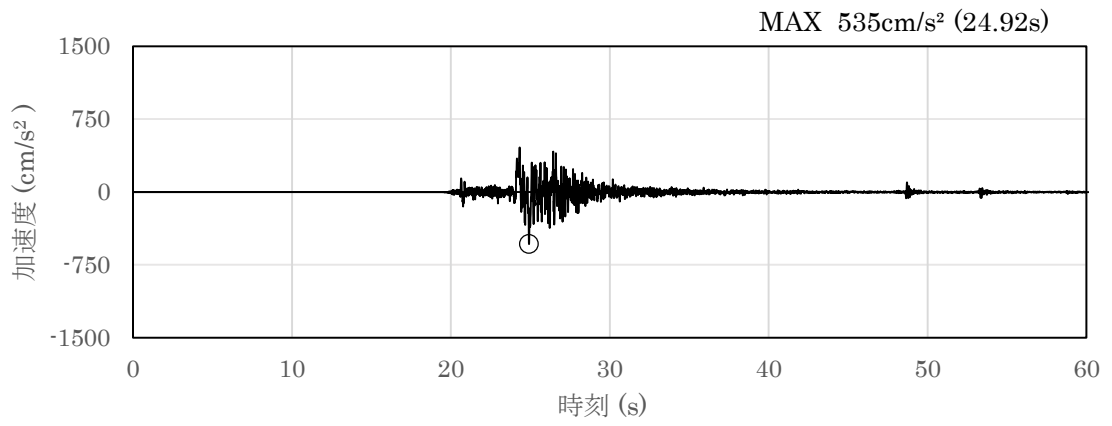


(a) 加速度時刻歴波形

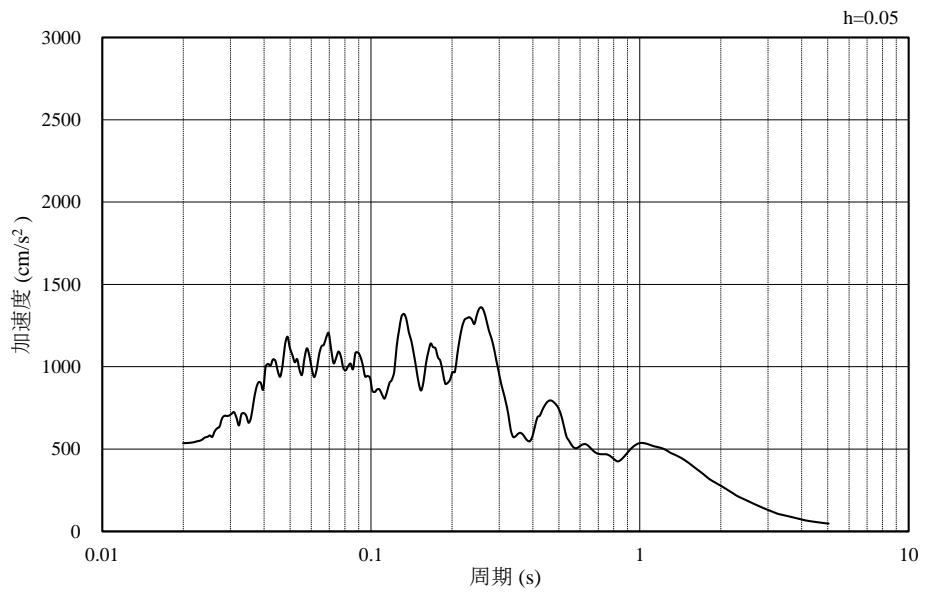


(b) 加速度応答スペクトル

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)

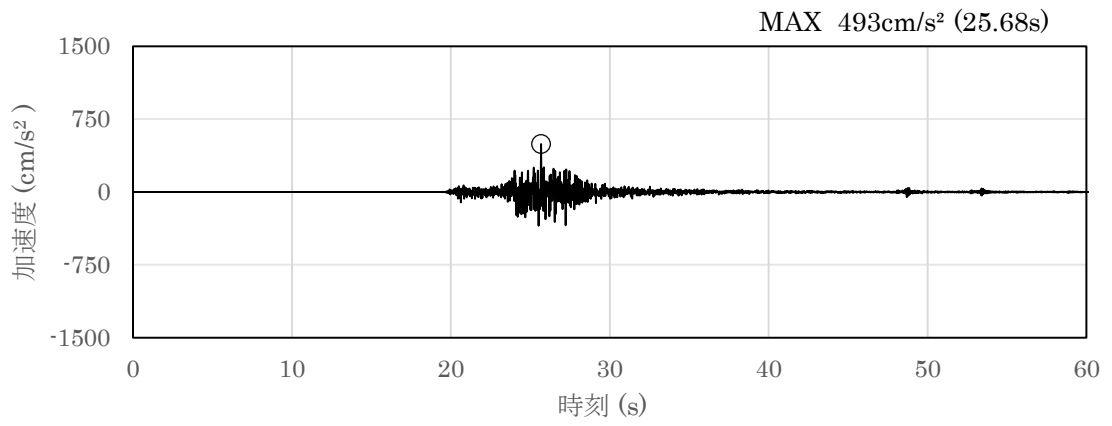


(a) 加速度時刻歴波形

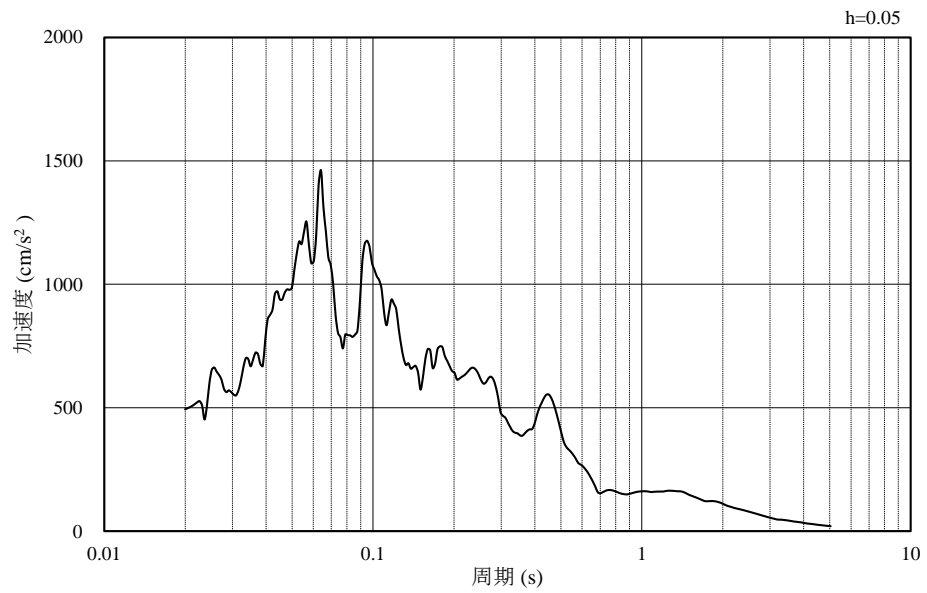


(b) 加速度応答スペクトル

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)

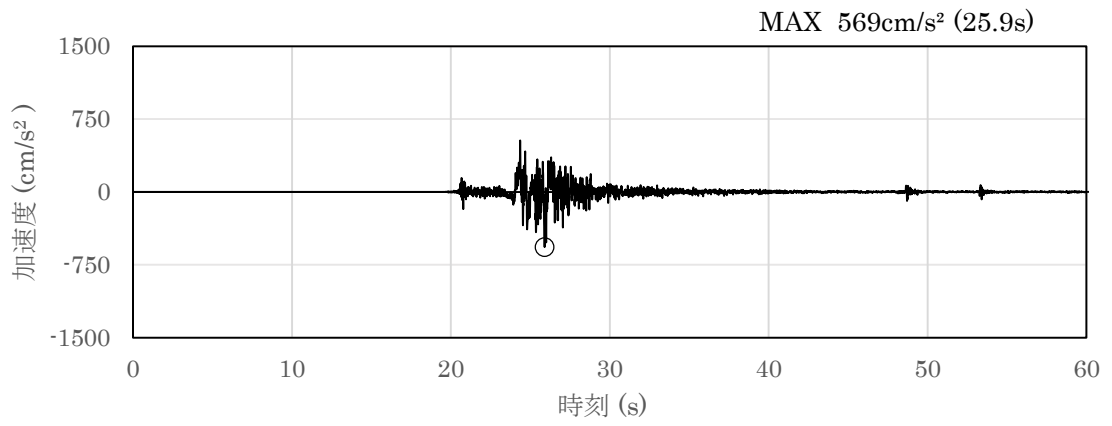


(a) 加速度時刻歴波形

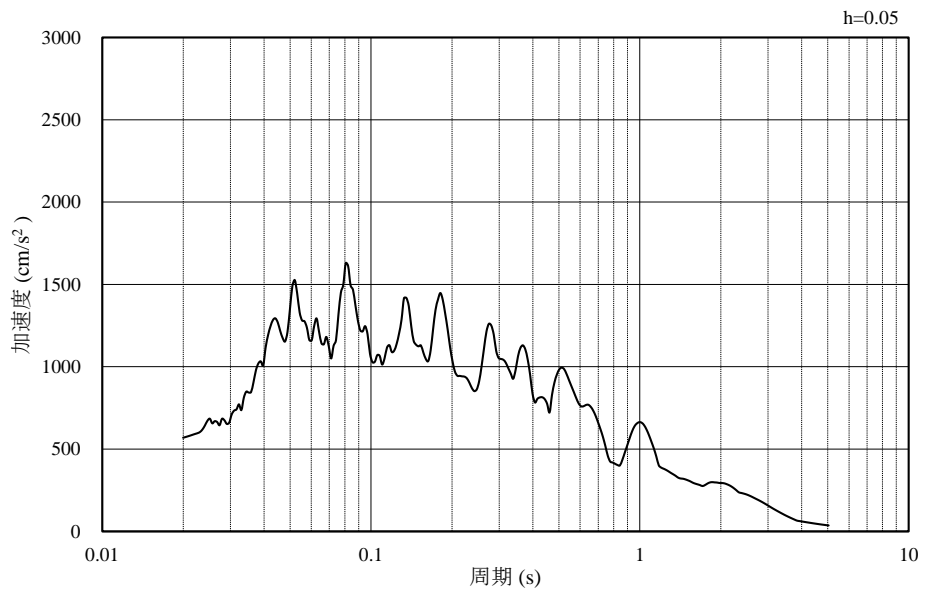


(b) 加速度応答スペクトル

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)

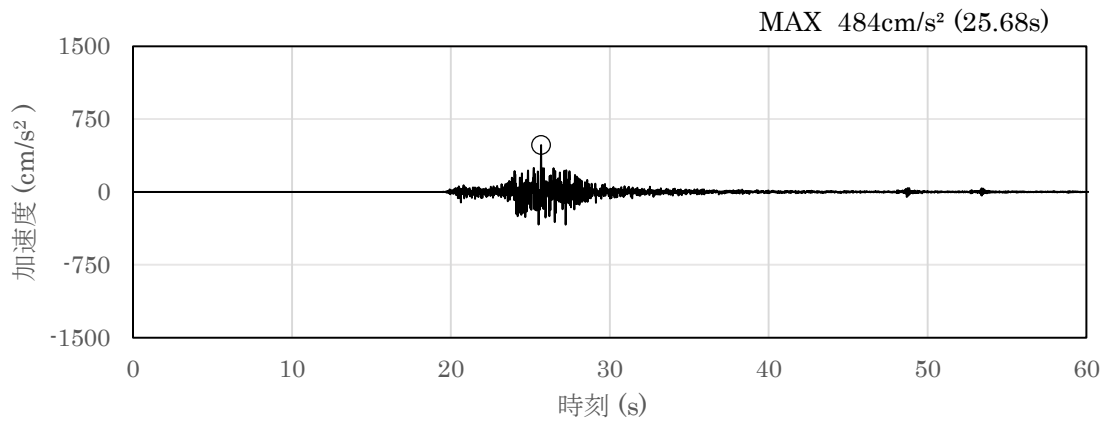


(a) 加速度時刻歴波形

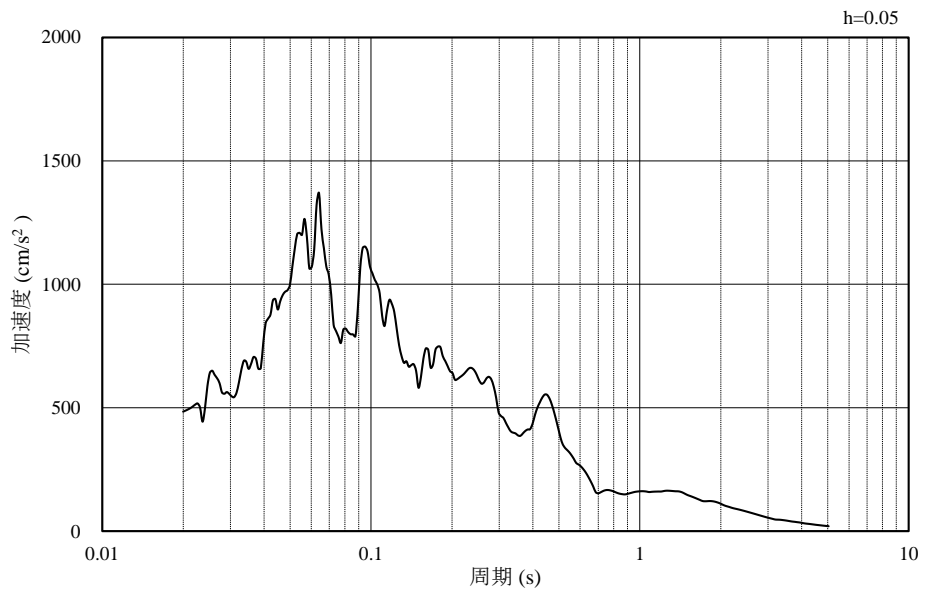


(b) 加速度応答スペクトル

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)

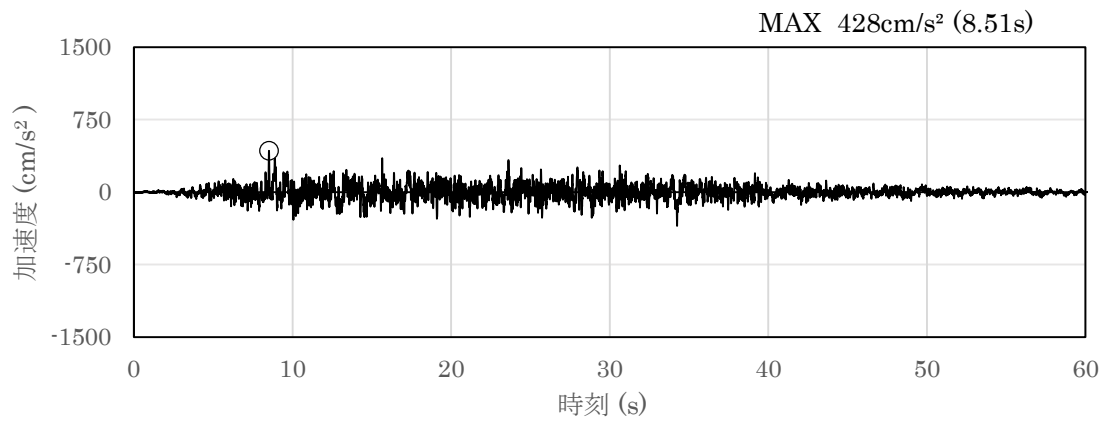


(a) 加速度時刻歴波形

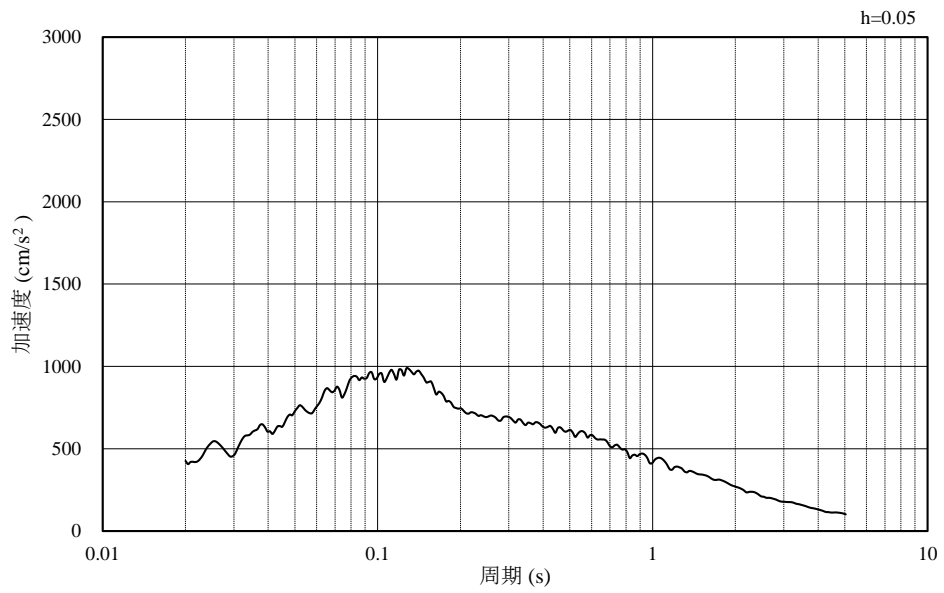


(b) 加速度応答スペクトル

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)

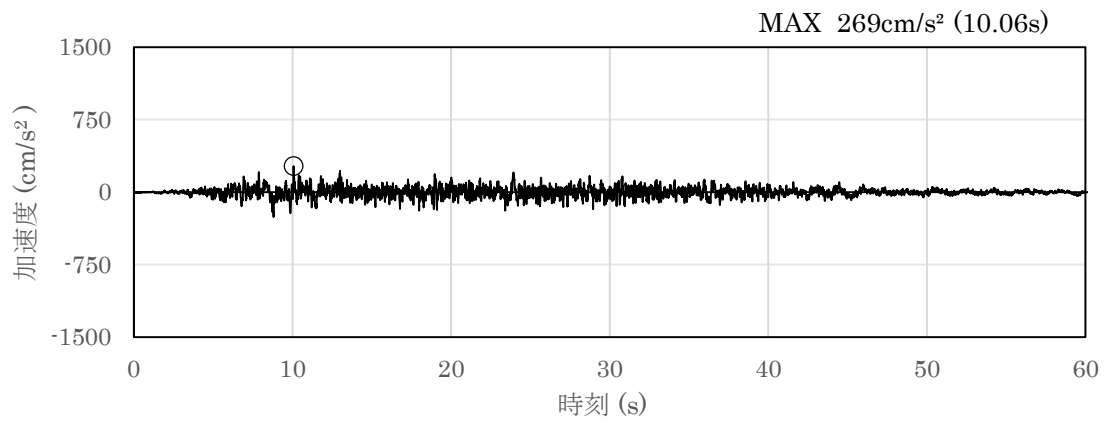


(a) 加速度時刻歴波形

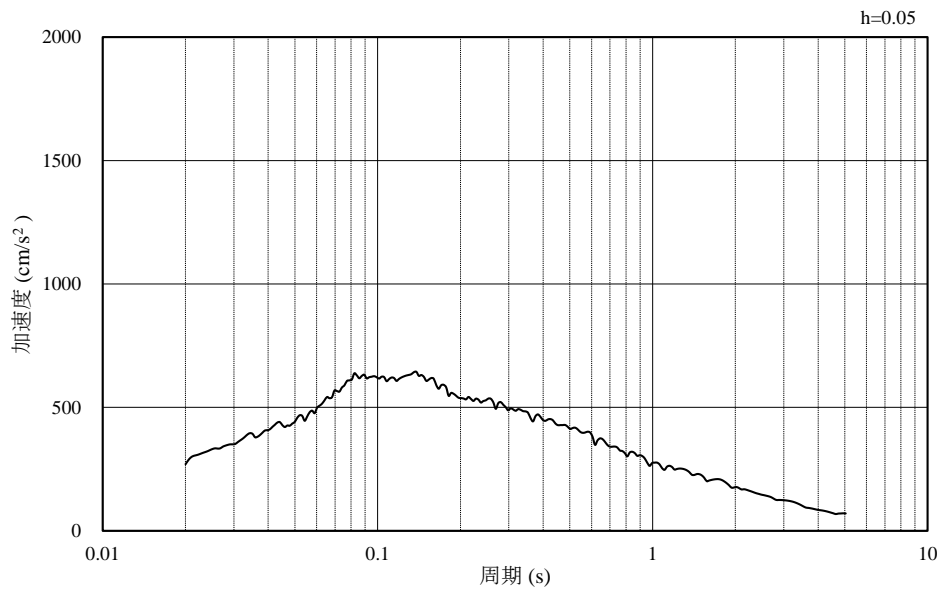


(b) 加速度応答スペクトル

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)

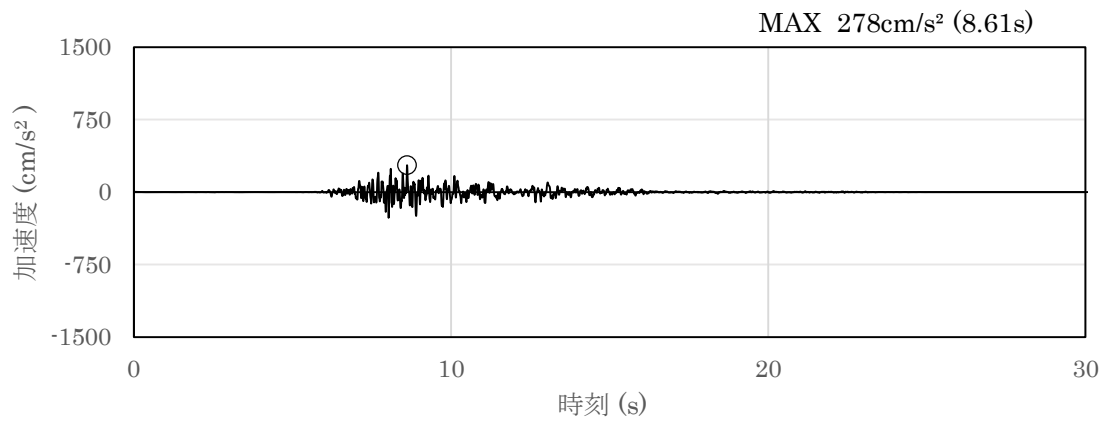


(a) 加速度時刻歴波形

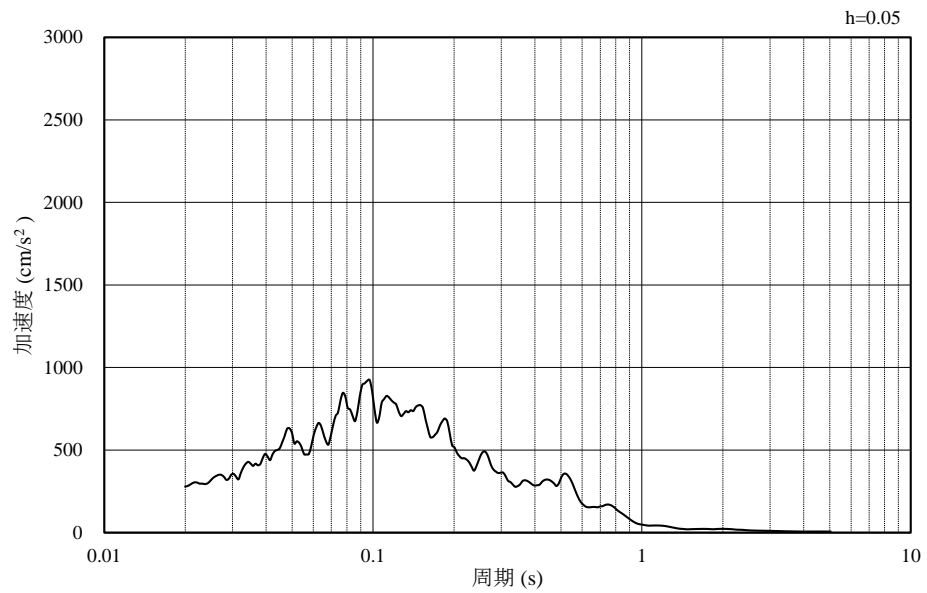


(b) 加速度応答スペクトル

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)

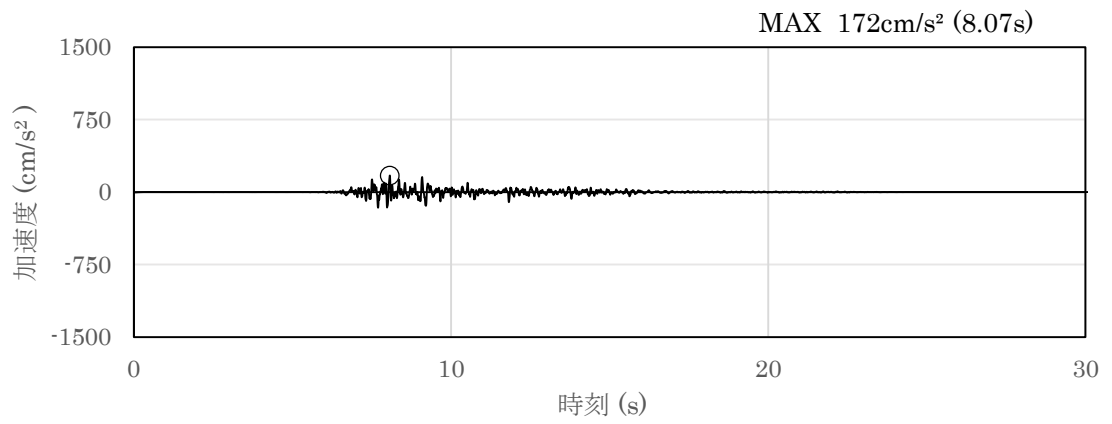


(a) 加速度時刻歴波形

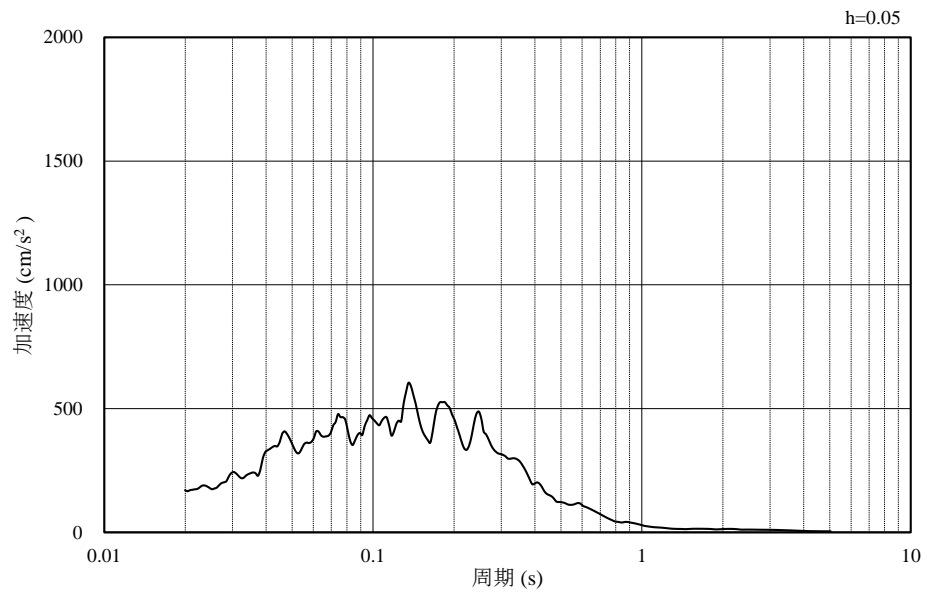


(b) 加速度応答スペクトル

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)

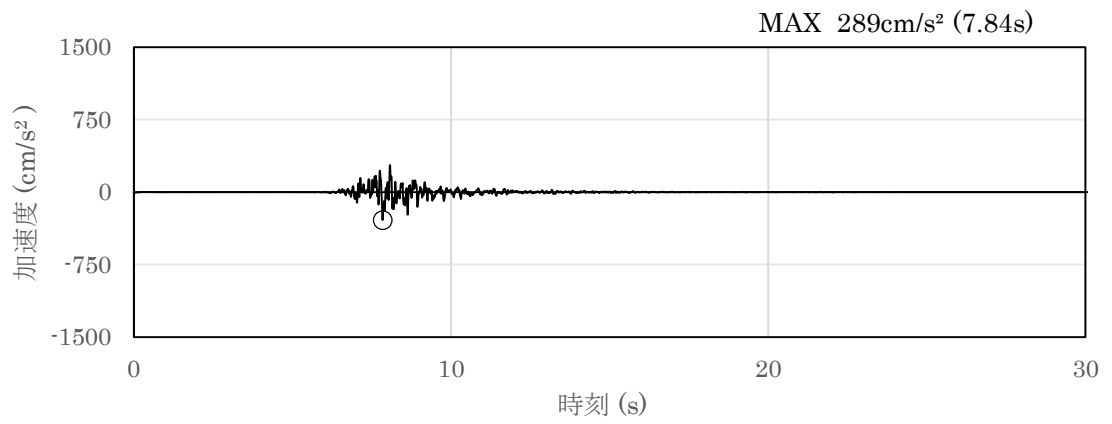


(a) 加速度時刻歴波形

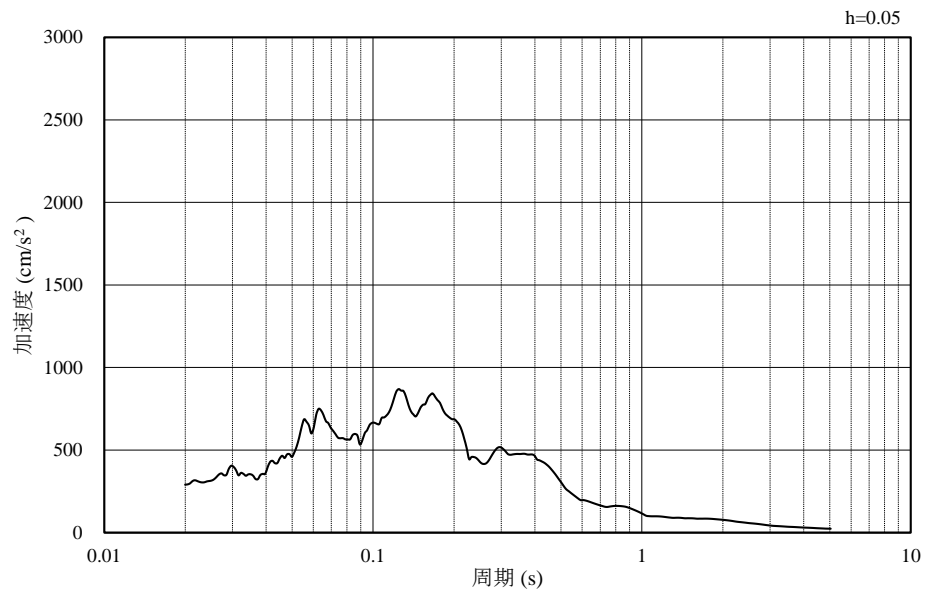


(b) 加速度応答スペクトル

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)

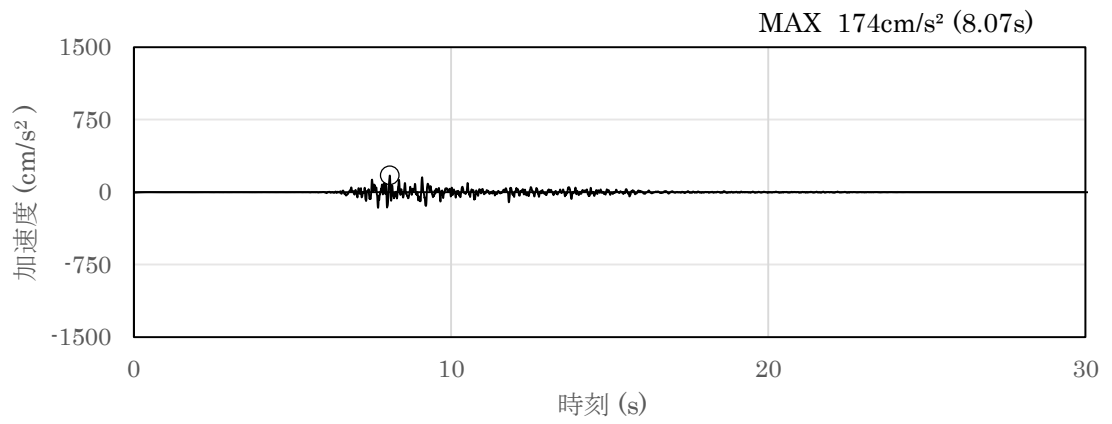


(a) 加速度時刻歴波形

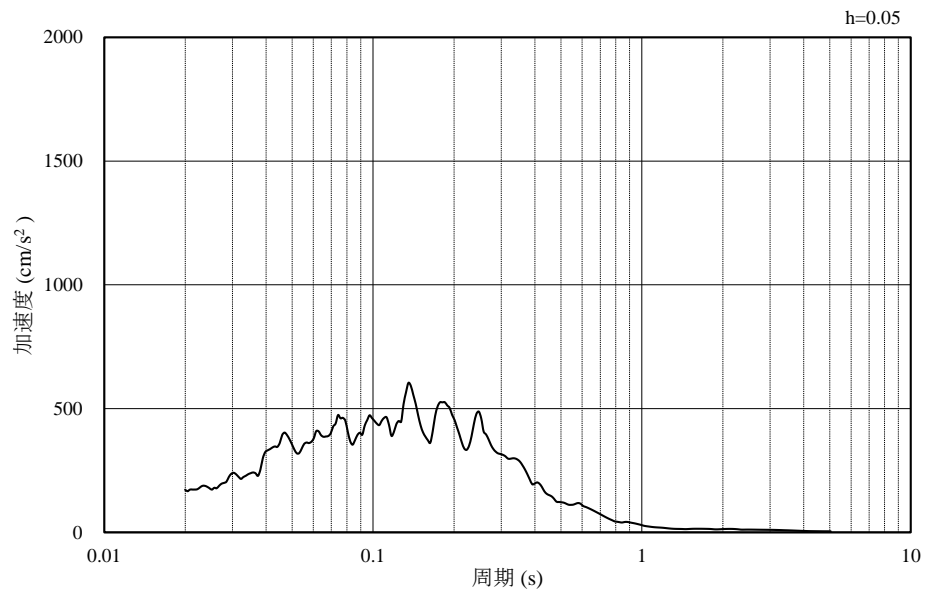


(b) 加速度応答スペクトル

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)

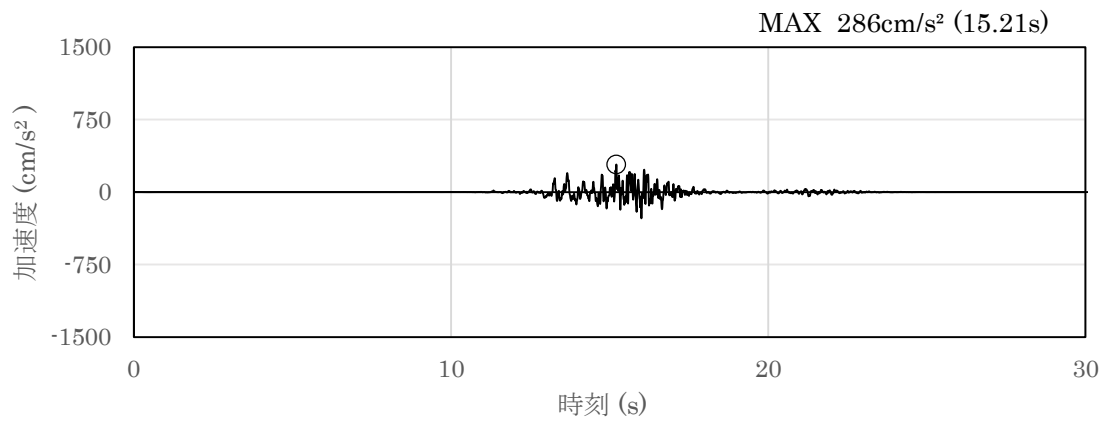


(a) 加速度時刻歴波形

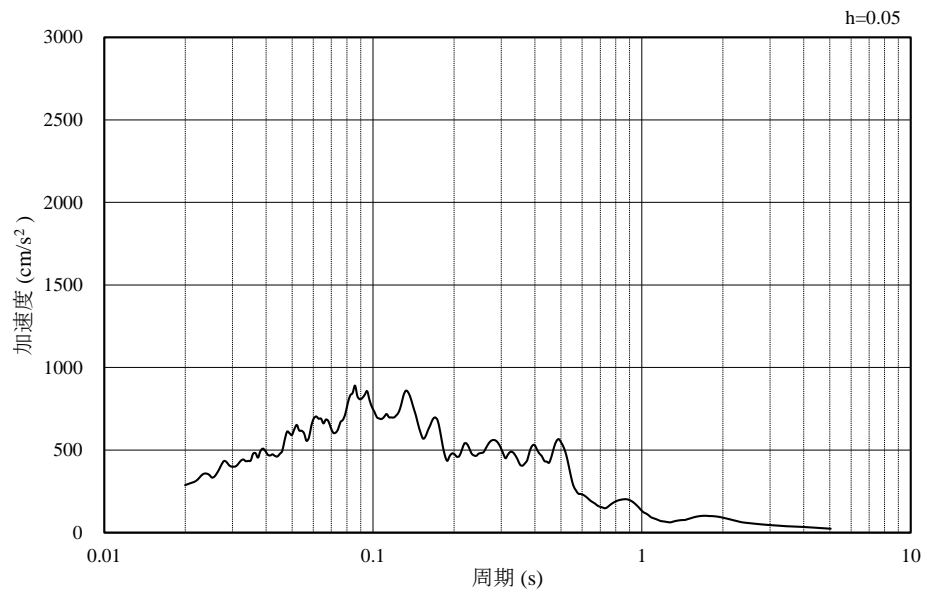


(b) 加速度応答スペクトル

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)

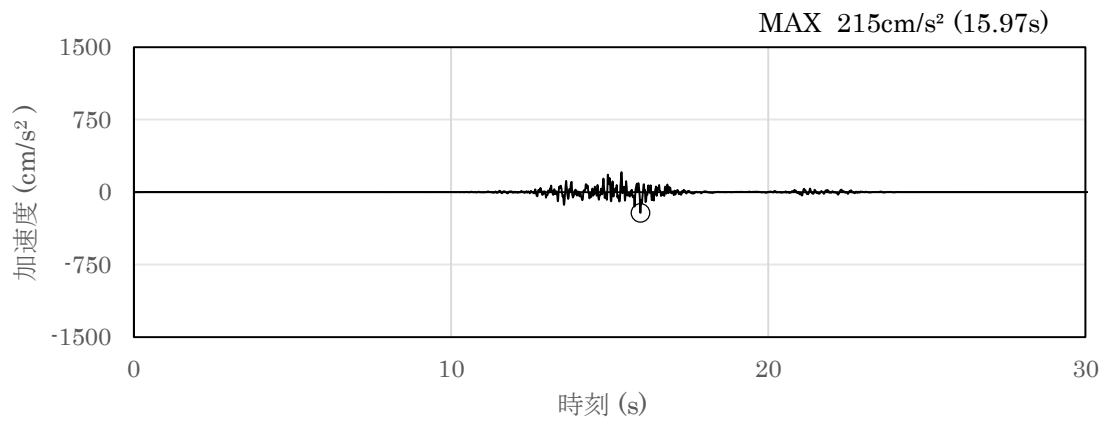


(a) 加速度時刻歴波形

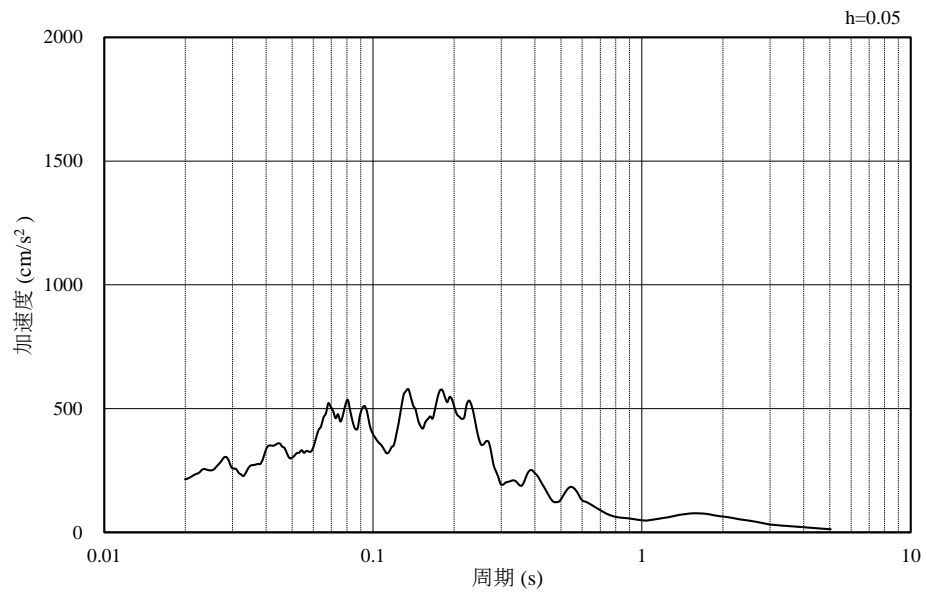


(b) 加速度応答スペクトル

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)

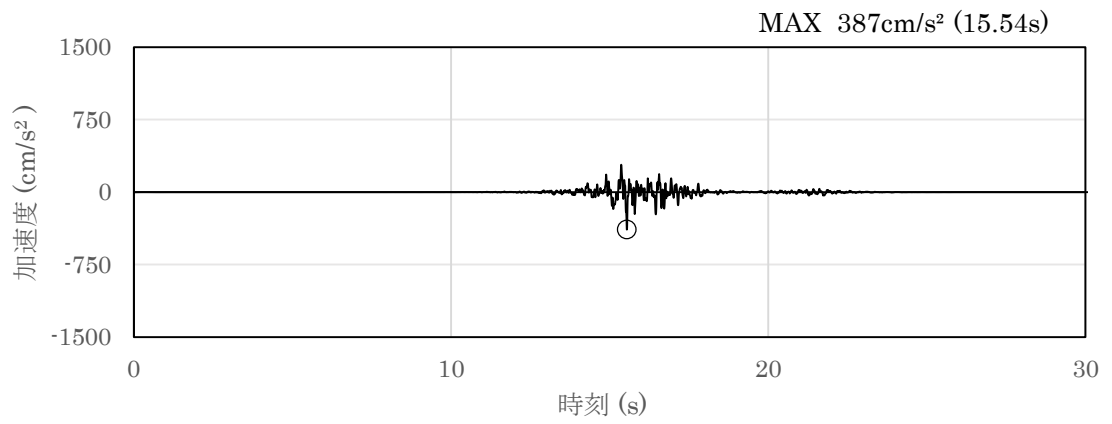


(a) 加速度時刻歴波形

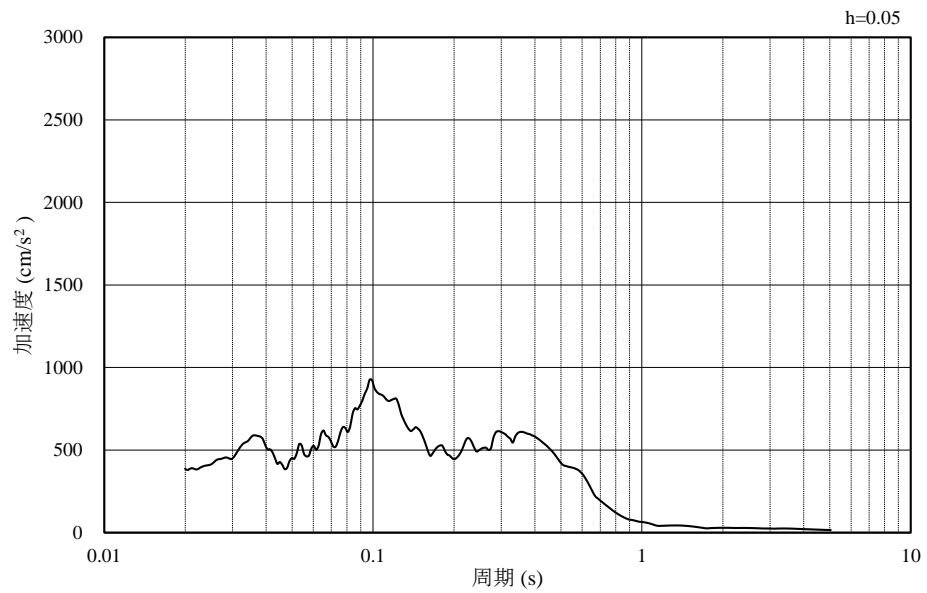


(b) 加速度応答スペクトル

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)

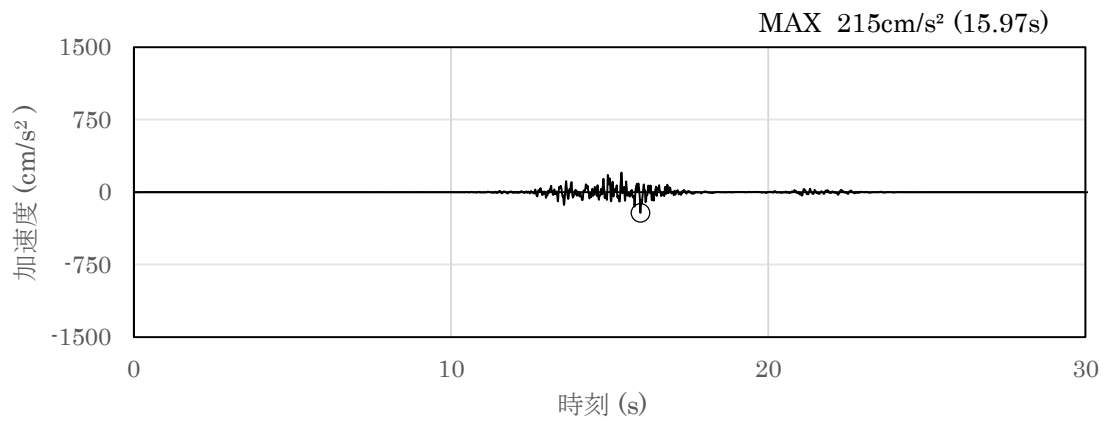


(a) 加速度時刻歴波形

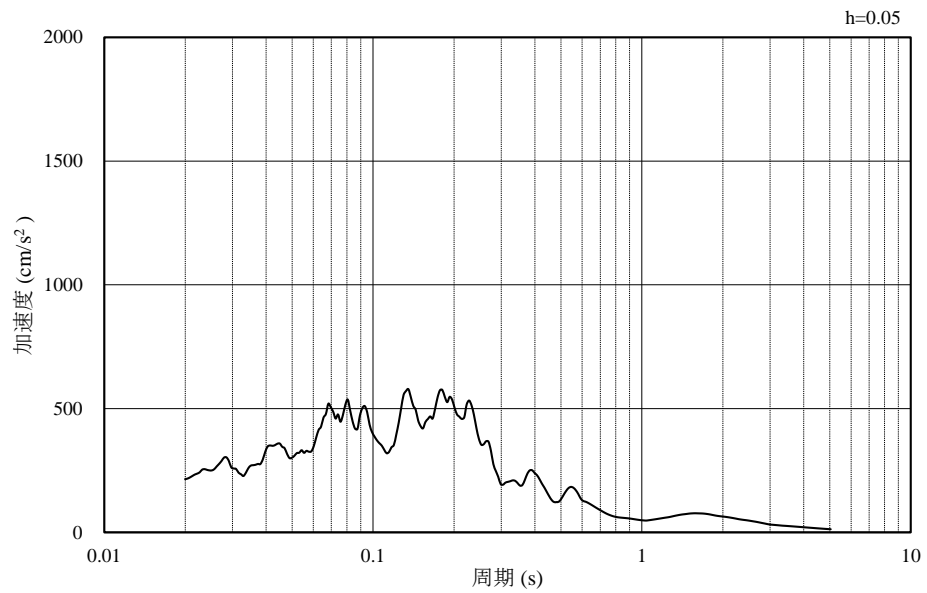


(b) 加速度応答スペクトル

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)

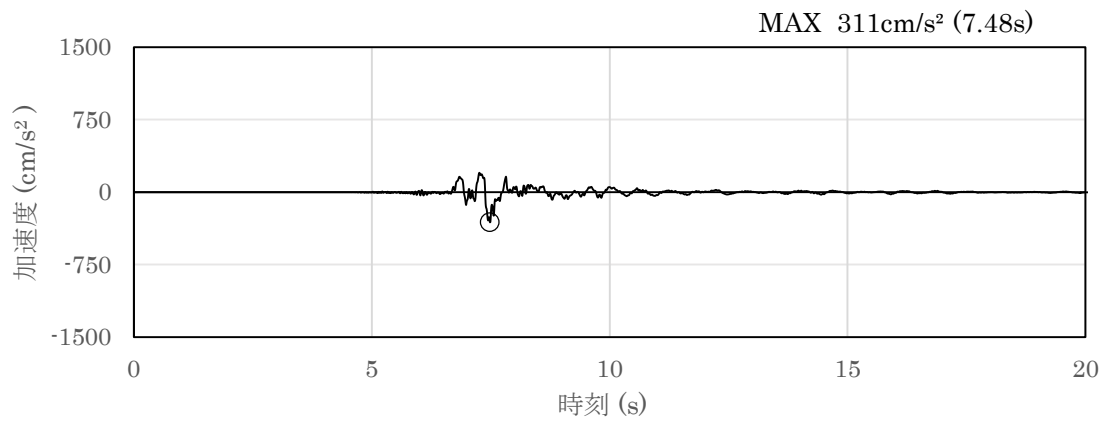


(a) 加速度時刻歴波形

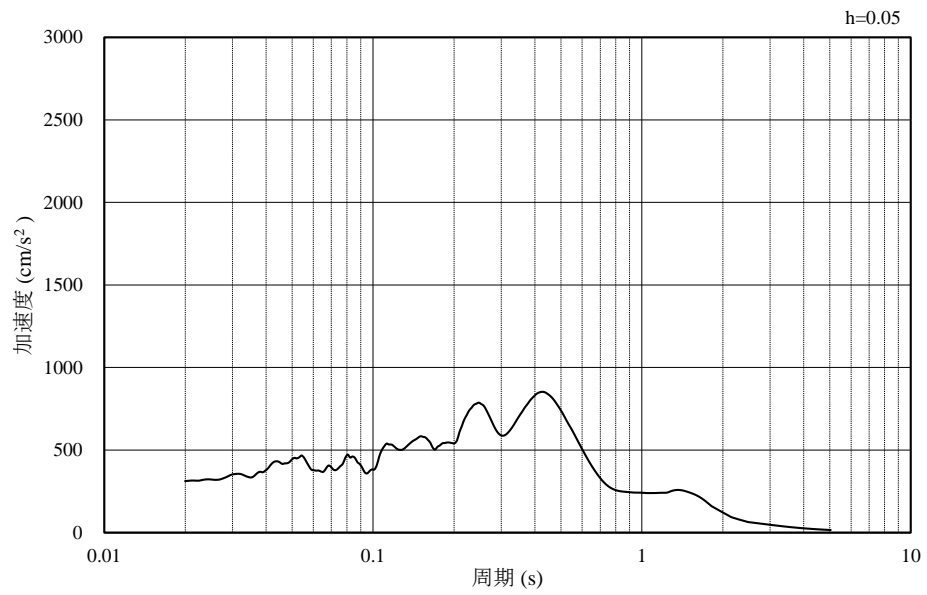


(b) 加速度応答スペクトル

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)

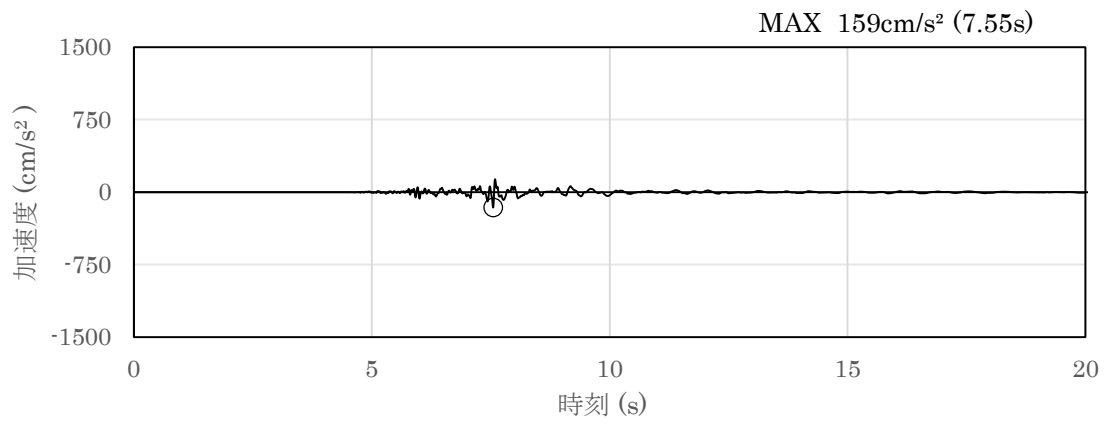


(a) 加速度時刻歴波形

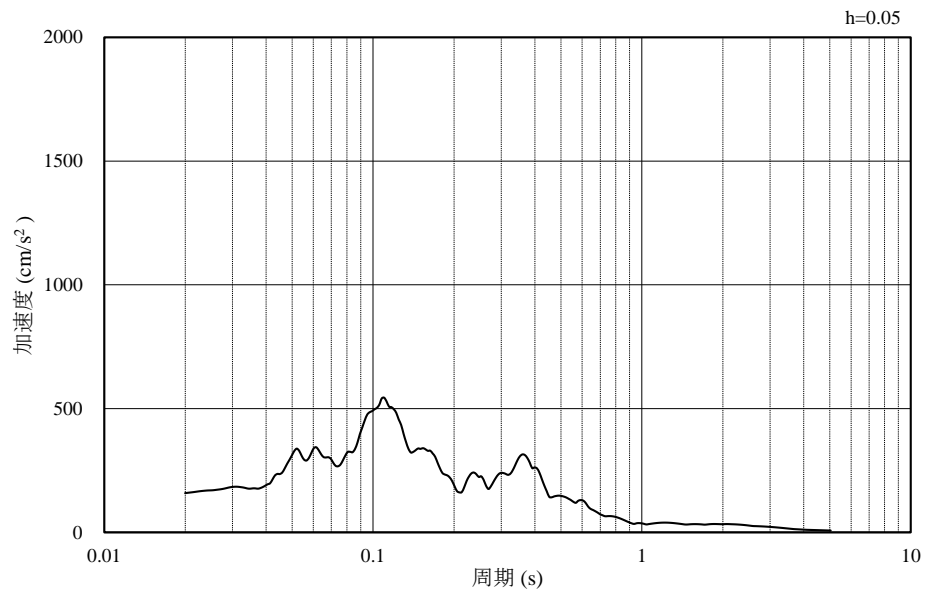


(b) 加速度応答スペクトル

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)

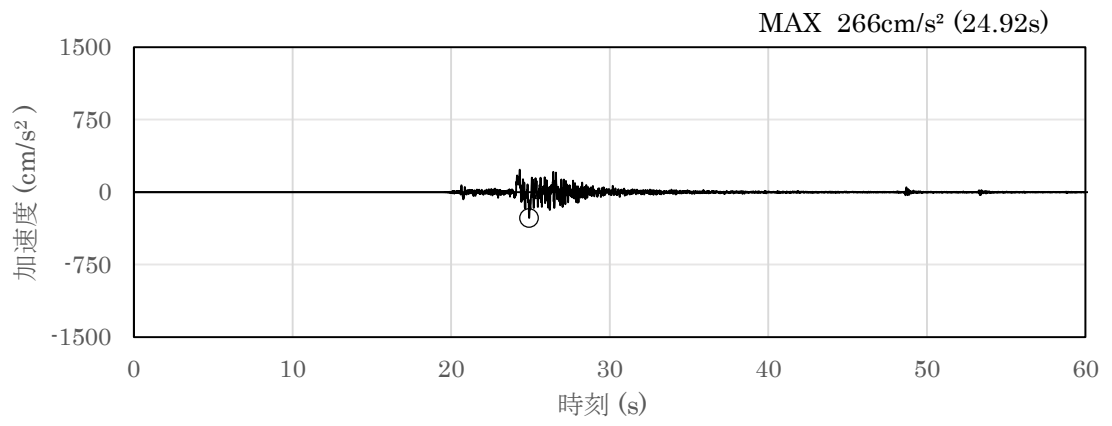


(a) 加速度時刻歴波形

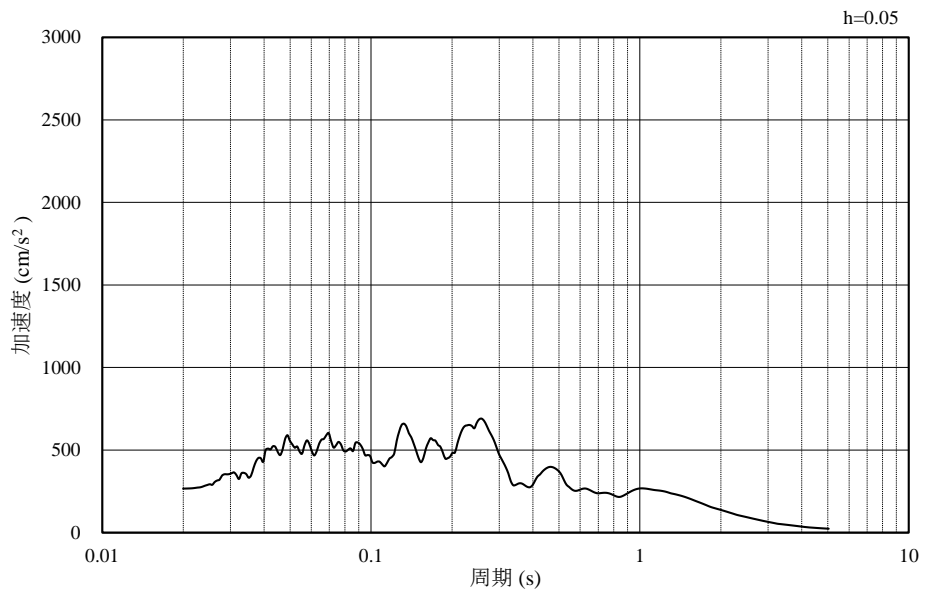


(b) 加速度応答スペクトル

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)

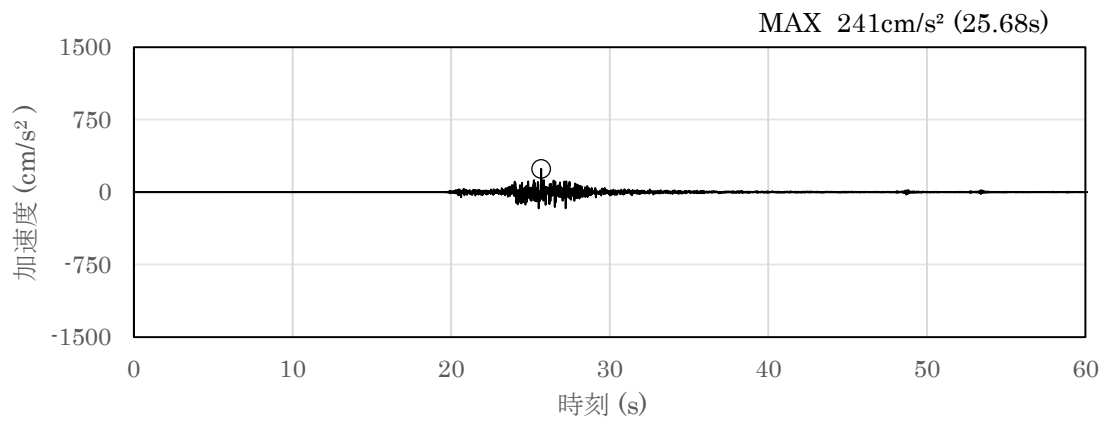


(a) 加速度時刻歴波形

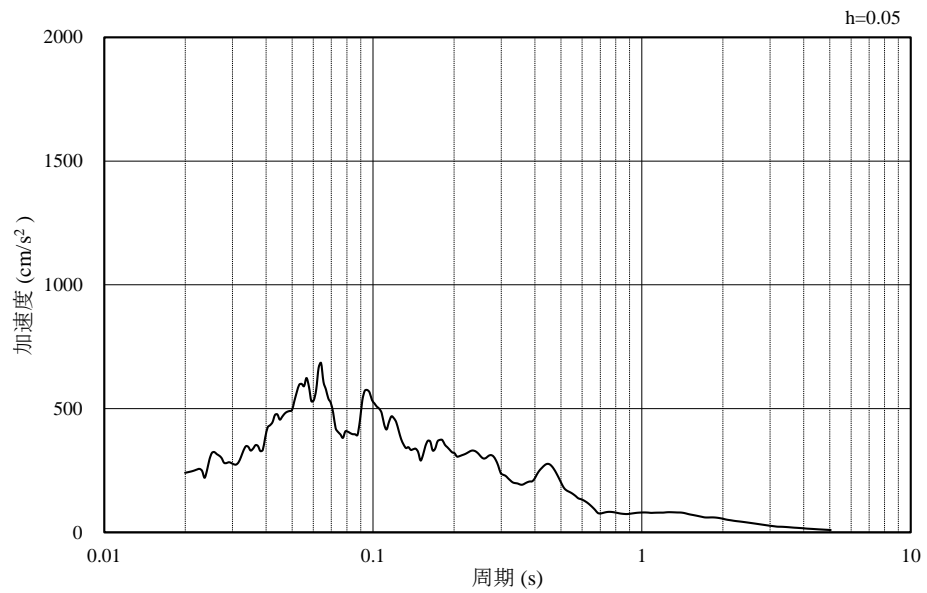


(b) 加速度応答スペクトル

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)

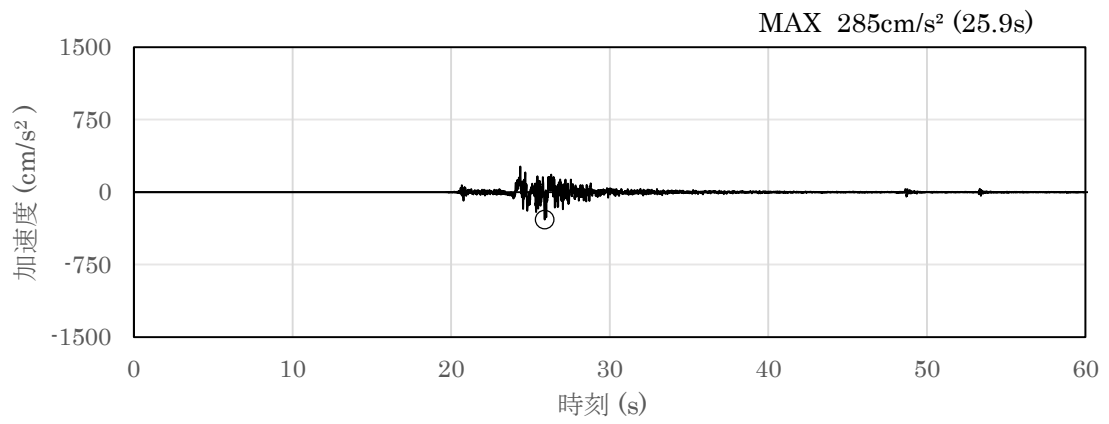


(a) 加速度時刻歴波形

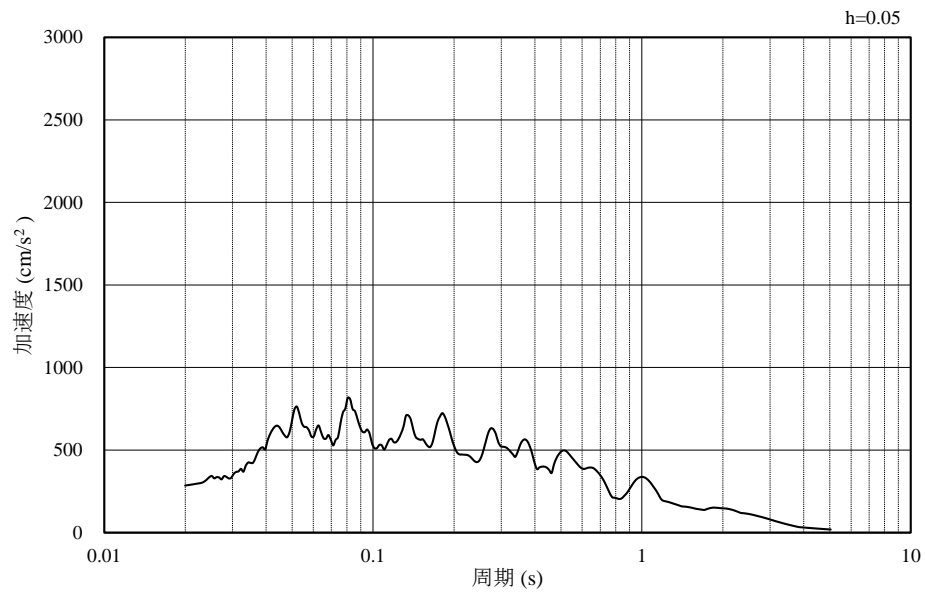


(b) 加速度応答スペクトル

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)

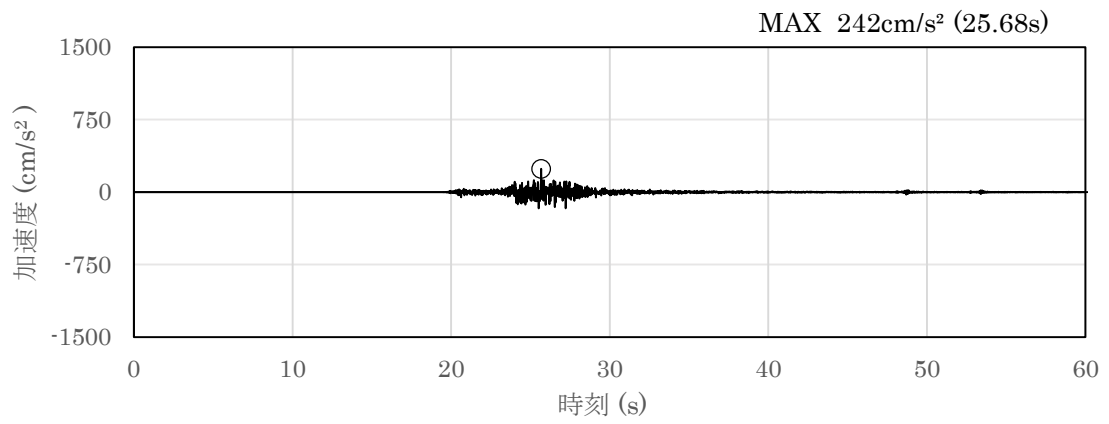


(a) 加速度時刻歴波形

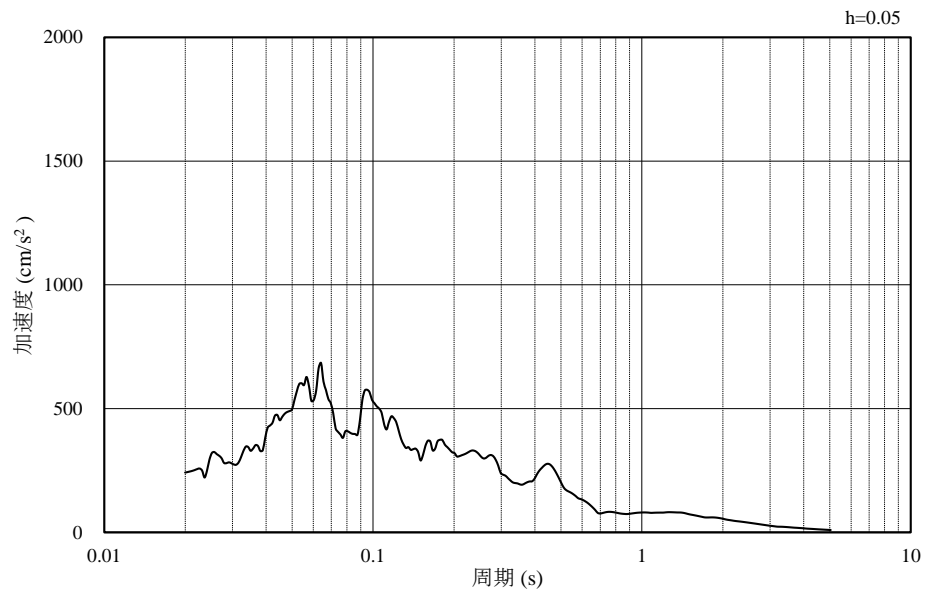


(b) 加速度応答スペクトル

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)

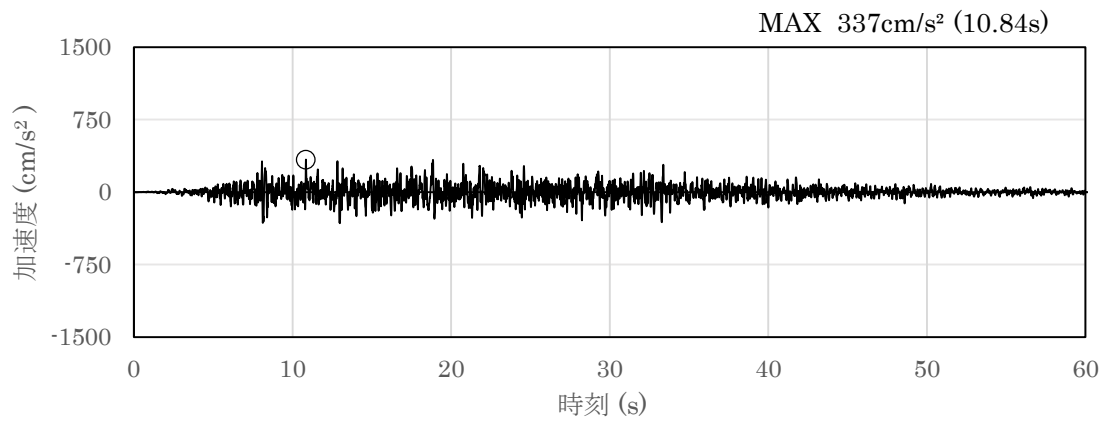


(a) 加速度時刻歴波形

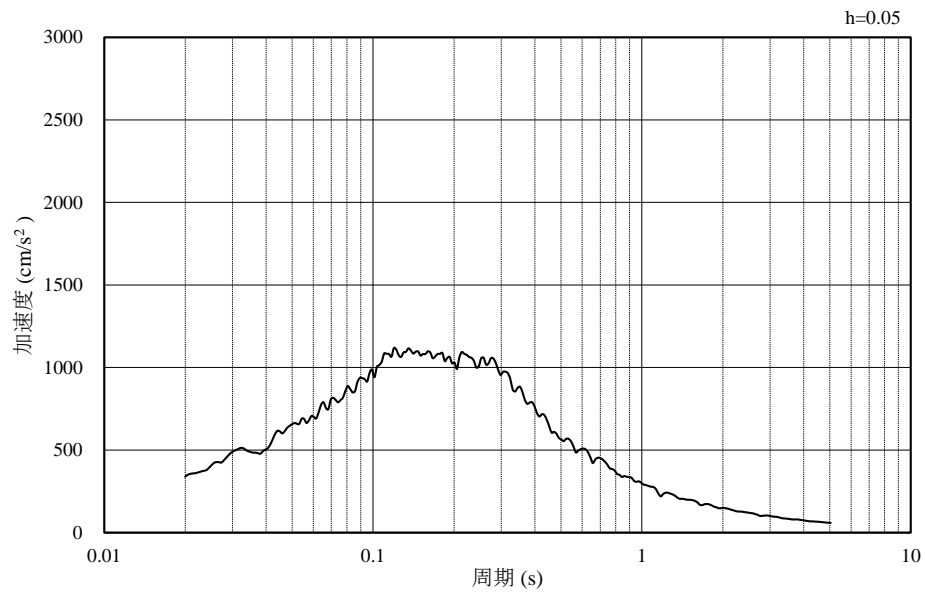


(b) 加速度応答スペクトル

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)

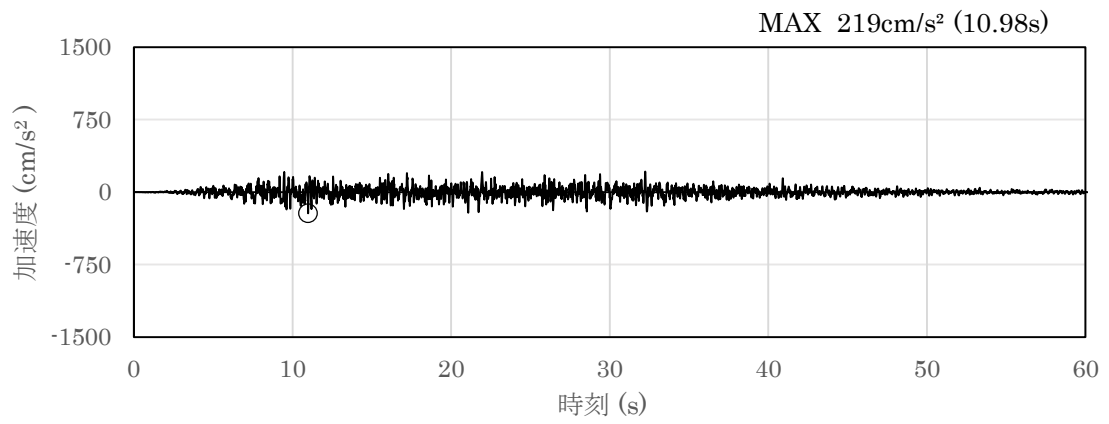


(a) 加速度時刻歴波形

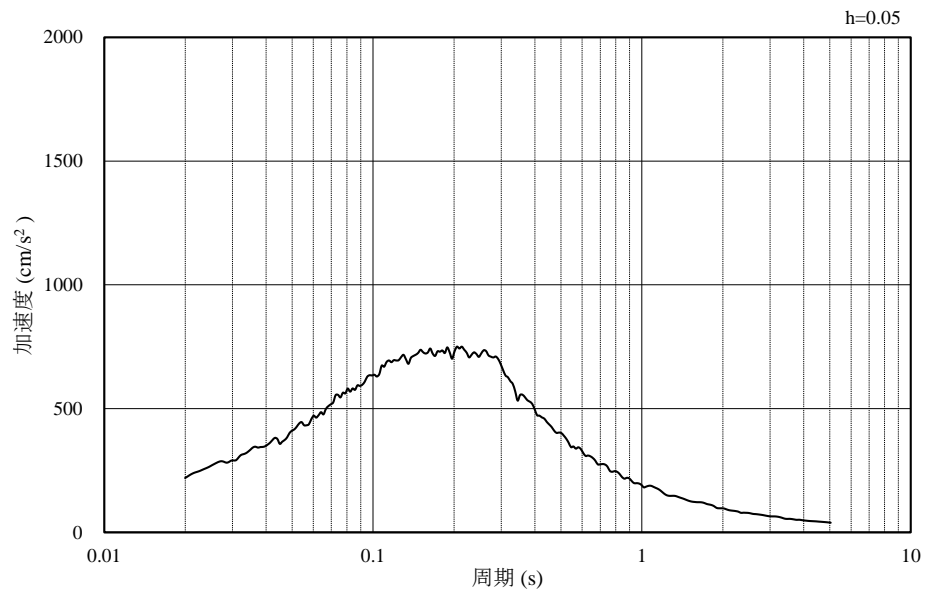


(b) 加速度応答スペクトル

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

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

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。

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
 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

せん断耐力は、「土木学会マニュアル」及び「コンクリート標準示方書 2007」に基づき「(1) 棒部材式」を適用することとし、ディープビームとなる部材についても、「(1) 棒部材式」を用いることで安全側の評価とする。

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、線形被害則による照査を実施する。

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

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 4-2 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 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	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。解析結果から屋外配管ダクト(タービン建物～排気筒)の鉄筋コンクリート部材については降伏が認められなかったため、 $\gamma_{b2} = 1.0$ とする。

(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

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

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

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

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

$$\beta_n = 1 + 2M_0 / M_{ud} \quad (N'_d \geq 0) \quad \text{ただし, } \beta_n > 2.0 \text{ となる場合は } \beta_n = 2.0$$

$$= 1 + 4M_0 / M_{ud} \quad (N'_d < 0) \quad \text{ただし, } \beta_n < 0 \text{ となる場合は } \beta_n = 0$$

$$\beta_a = 1$$

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

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

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。

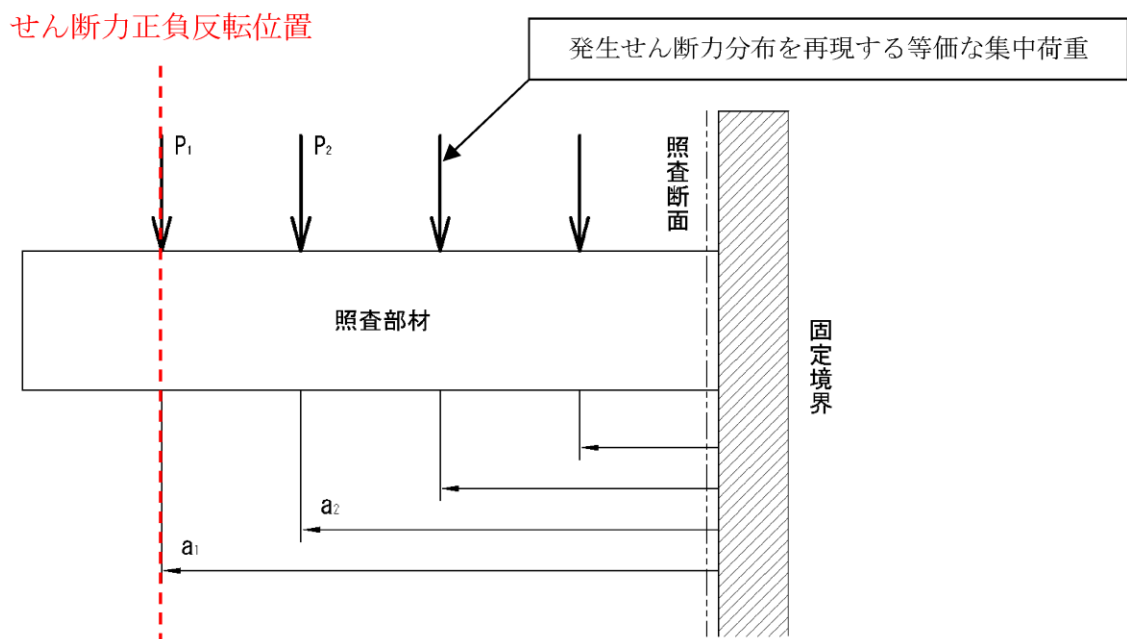
γ_{bs} : 部材係数

γ_{ms} : 材料係数

4.2.3 せん断破壊に対する許容限界（線形被害則による照査方法）

「4.2.2 せん断破壊に対する許容限界」に示したせん断耐力式による照査において照査用せん断力がせん断耐力を上回る場合、分布荷重下にある部材のせん断耐力照査を合理的に行う手法として、土木学会マニュアルに基づき、線形被害則による照査を行う。照査手順を以下に記載し、線形被害則による照査方法を図 4-36 に示す。また、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）における線形被害則を適用した部材における照査結果を参考資料 4 に示す。

- ①ある照査対象時刻の地震応答解析結果より、着目する部材の発生せん断力が正負反転する節点までを照査対象範囲として設定し、発生せん断力分布を再現する等価な集中荷重を算定する。
- ②各集中荷重の作用位置に基づいて、せん断スパンを設定し、せん断スパン比から算定式を選定する。
- ③照査断面を設定し、各集中荷重に対する照査断面のせん断耐力を算定する。
- ④各集中荷重とせん断耐力の比（＝被害度）の総和をとり、構造物係数 γ_i を乗じた値が評価基準値 1.0 以下になることを確認する。



$$\gamma_i \cdot \left(\frac{P_1 \cdot \gamma_a}{V_1} + \frac{P_2 \cdot \gamma_a}{V_2} + \dots \right) \leq 1.0$$

γ_i : 構造物係数

γ_a : 構造解析係数

V_1 : 照査断面における P_1 に対するせん断耐力

V_2 : 照査断面における P_2 に対するせん断耐力

⋮

V_n : 照査断面における P_n に対するせん断耐力

図 4-36 線形被害則による照査方法

(1) 発生せん断力分布を再現する等価な集中荷重及びせん断スパンの算定

地震応答解析より得られた、分布荷重下にある部材に発生するせん断力分布を再現する等価な集中荷重の算定方法を図 4-37 に、土木学会マニュアルにおけるせん断スパン比の取り方を図 4-38 に示す。

等価な集中荷重は、隣り合う要素に発生するせん断力の差であり、当該要素間の節点位置に作用させる。また、せん断スパンは、各集中荷重の作用位置と支承前面間の距離とする。なお、土木学会マニュアルでは、せん断スパン比にハンチを考慮することができるが、ハンチは考慮しないものとする。

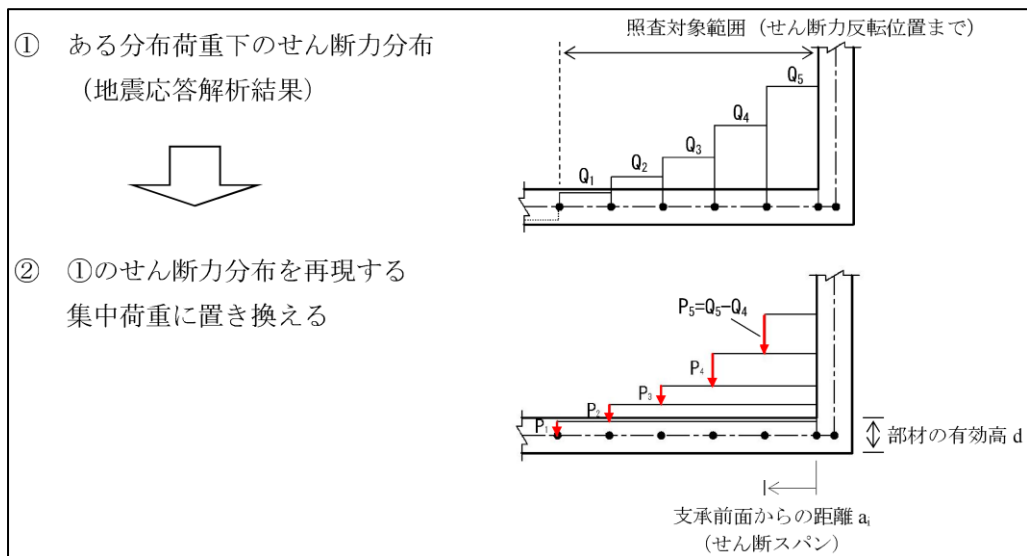


図 4-37 集中荷重の算定方法

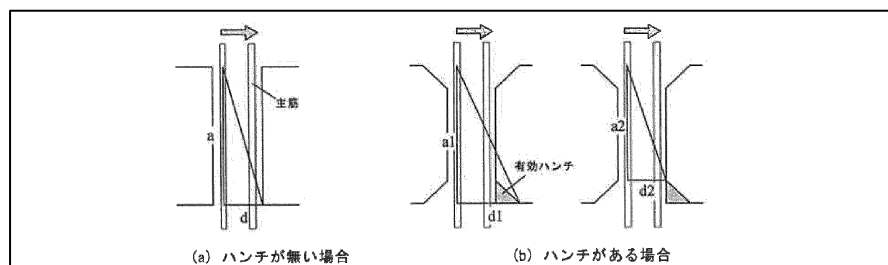


図 6.3-2 せん断スパン比 a/d の取り方

(3) せん断スパン比 a/d の取り方 (図 6.3-2 参照)

(a) ハンチが無い場合

部材の内法長さを a とし、有効部材厚を d とする。

(b) ハンチがある場合

ハンチの効果を以下の要領で考慮することができる。

- ① 荷重を受ける側にあり、なおかつ曲げ圧縮を受けているハンチを有効とする。
- ② 部材の内法長さを a_1 とし、引張鉄筋位置から、直交部材前面とハンチの交点までの距離を d_1 とする。
- ③ 部材の一端から、部材主要部とハンチの交点までの距離を a_2 とし、部材主要部の有効部材厚を d_2 とする。
- ④ a_1/d_1 と a_2/d_2 の大きい方を a/d として採用する。

図 4-38 せん断スパン比の取り方

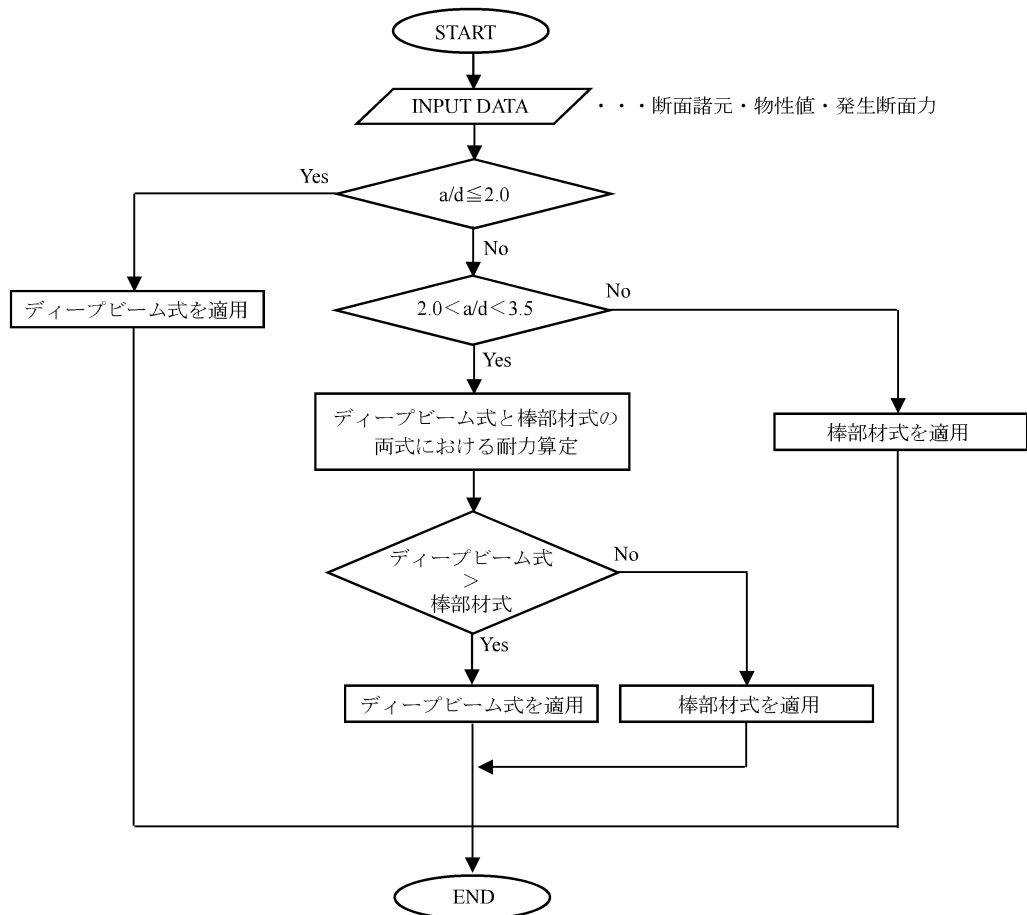
(2) 照査断面の設定

照査断面は、照査対象範囲の中でせん断応力度（応答せん断力を断面積で除した値）が最大となる断面とする。また、照査断面よりも支点寄りにある作用点の影響は考慮しない。

(3) 各集中荷重に対するせん断耐力の算定

各集中荷重に対する照査断面のせん断耐力は、土木学会マニュアルに基づくせん断耐力評価式により、棒部材式あるいはディープビーム式を用いて算定する。

棒部材式及びディープビーム式の適用フローを図 4-39 に、棒部材式とディープビーム式の適用区分を図 4-40 に、せん断耐力の基本式（ディープビーム式）を図 4-41 に示す。



せん断スパン比 (a/d) の一般的な判定目安 (『土木学会指針 2005 (マニュアル)』より)

$0 < a/d \leq 2.0$	ディープビーム式の適用範囲
$2.0 < a/d < 3.5$	ディープビーム式 or 棒部材式の耐力が大きい方 (遷移領域)
$3.5 \leq a/d$	棒部材式の適用範囲

図 4-39 棒部材式及びディープビーム式の適用フロー

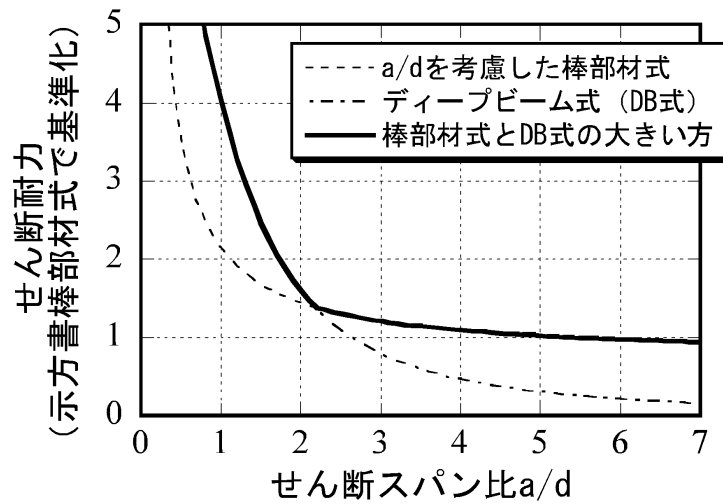


図 4-40 棒部材式とディープビーム式の適用区分
(土木学会マニュアル, p. 126 より抜粋)

b. ディープビーム式

$$V_{yddl} = V_{cddl} + V_{sddl} \quad (6.3-6)$$

ここに, V_{cddl} : コンクリートが分担するせん断耐力

V_{sddl} : せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力

$$V_{cddl} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_{bc} \quad (6.3-7)$$

$$f_{dd} = 0.19 \sqrt{f'_{cd}}$$

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

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

$$\beta_a = \frac{5}{1 + (a/d)^2}$$

γ_{bc} : 部材係数 (表 6.1-1 参照, コンクリート寄与分用の値)

$$V_{sddl} = \phi \cdot V_{sd} \quad (6.3-8)$$

$$\phi = -0.17 + 0.3 a/d + 0.33/p_{wb} \quad \text{ただし, } 0 \leq \phi \leq 1$$

V_{sd} : (6.3-5)式による

p_{wb} : せん断補強鉄筋比[%]

図 4-41 せん断耐力の基本式 (ディープビーム式)
(土木学会マニュアル, p. 126 より抜粋)

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 4-3 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	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 4-4 に示す。

表 4-4 MMRの支持性能に対する許容限界

評価項目	基礎地盤	許容限界 (N/mm ²)
支圧強度	MMR ($f'_{ck} = 15.6 \text{ N/mm}^2$)	$f'_a = 15.6$

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
$f'_{ck} = 15.6 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	せん断強度 (N/mm ²)	$1/5 f'_{ck}$	3.12
	引張強度 (N/mm ²)	$0.23 f'_{ck}^{2/3}$	1.43

参考資料1 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）
の3次元静的非線形解析による耐震安全性評価について

1.	概要	1
2.	評価方法	5
3.	評価条件	5
3.1	適用規格	5
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	16
3.5	地盤物性値	16
3.6	評価構造物諸元	16
3.7	地下水位	18
4.	地震応答解析	19
4.1	地震応答解析手法	19
4.2	地震応答解析モデルの設定	21
4.2.1	解析モデル領域	21
4.2.2	境界条件	21
4.2.3	構造物のモデル化	25
4.2.4	隣接構造物のモデル化	39
4.2.5	地盤及びMMRのモデル化	40
4.2.6	ジョイント要素の設定	40
4.3	減衰定数	44
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	67
5.3	照査時刻の選定	74

5.4	入力荷重	78
5.4.1	常時荷重	80
5.4.2	慣性力	84
5.4.3	地震時増分土圧・地震時増分水圧及び周面せん断力	87
6.	評価内容	92
6.1	入力地震動の設定	92
6.2	許容限界の設定	92
6.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	92
6.2.2	せん断破壊に対する許容限界	92
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～放水槽）と一体構造であることに着目し、複雑な構造における立体的な作用荷重を精緻に評価するため、地震応答解析に基づく構造部材の健全性評価において、最も照査値が厳しい地震動に対して、3次元構造解析モデルにて耐震評価を実施する。

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～図1-5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1-6に示す。

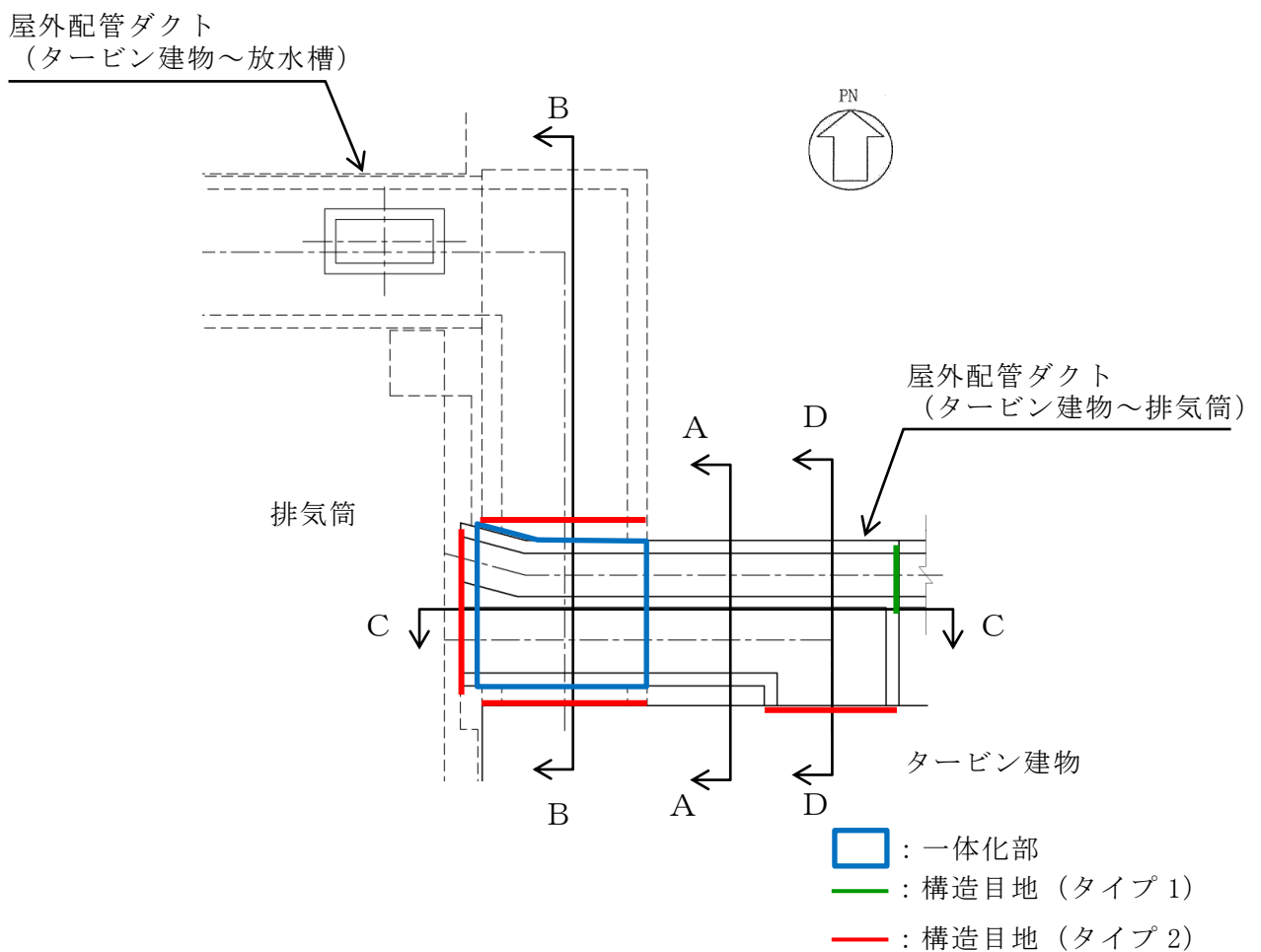


図1-1 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 平面図

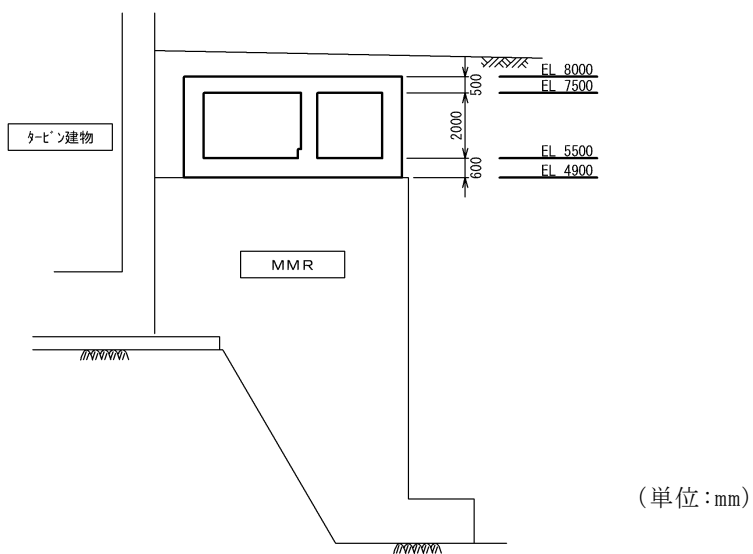


図 1-2 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 断面図 (A-A 断面)

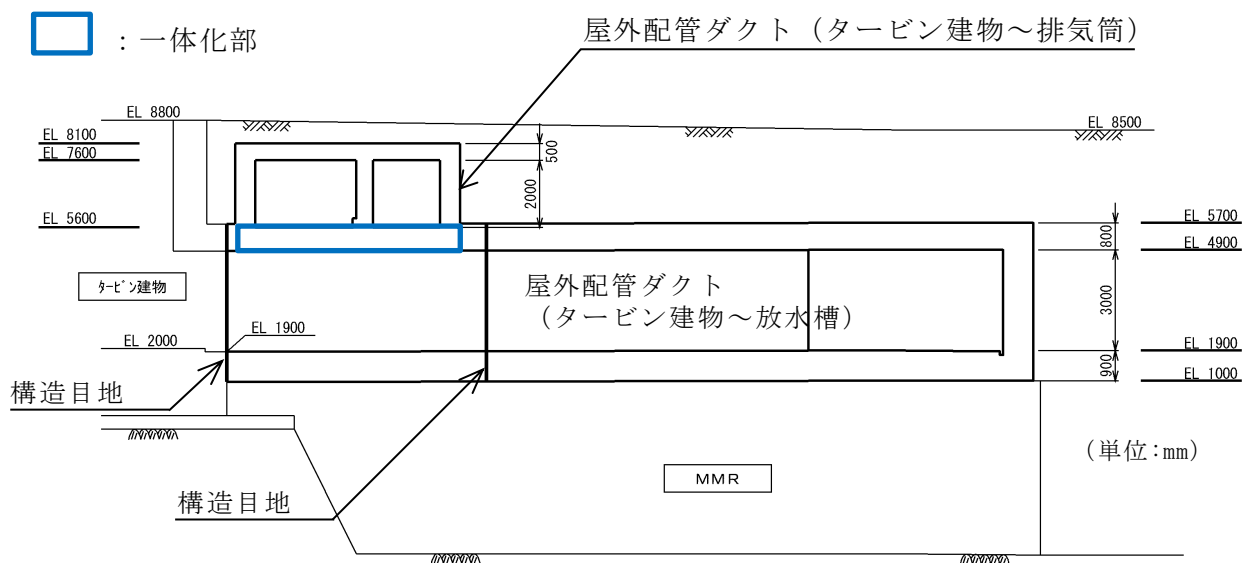


図 1-3 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 断面図 (B-B 断面)

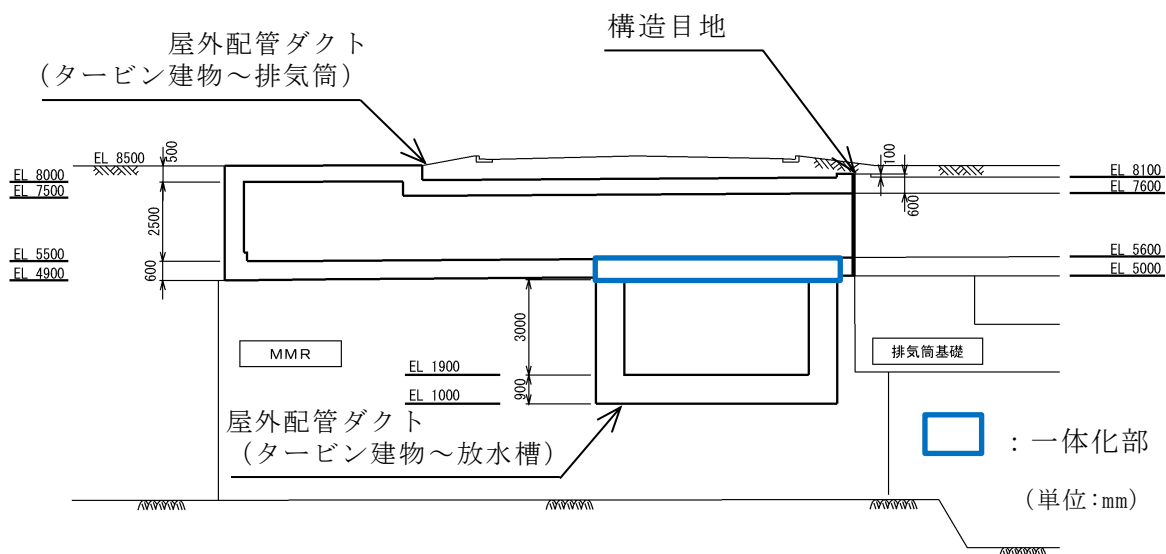


図 1-4 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 断面図 (C-C 断面)

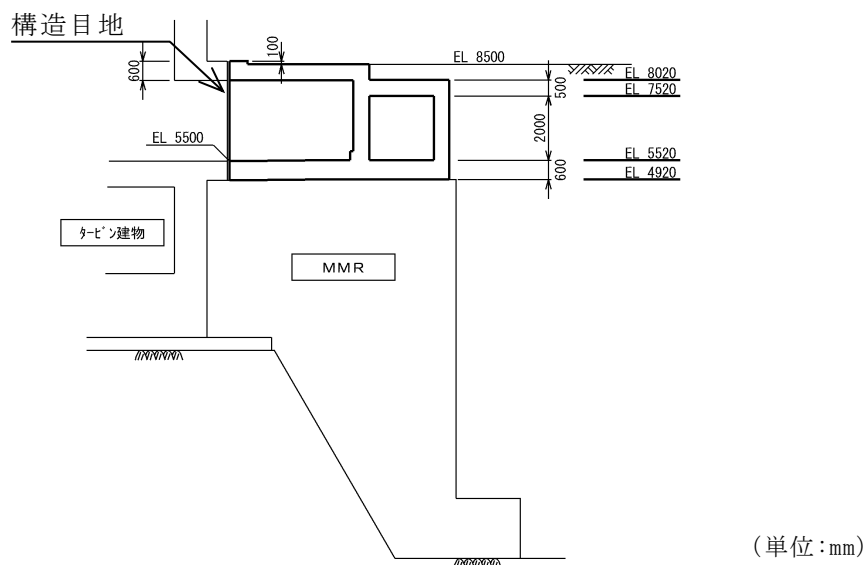


図 1-5 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 断面図 (D-D 断面)

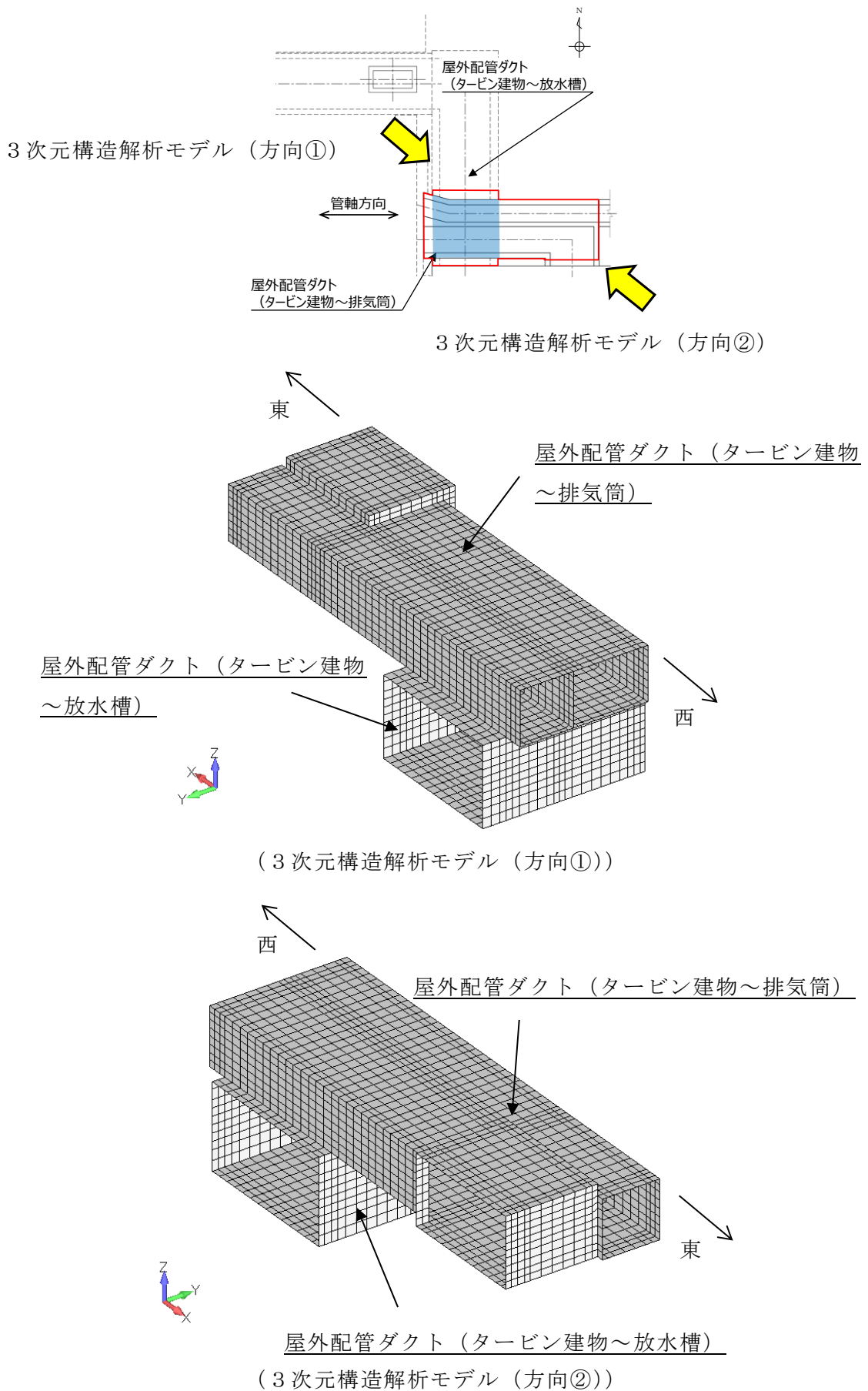


図 1-6 屋外配管ダクト (タービン建物~排気筒) 一体化部のイメージ図
参考 1-4

2. 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）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、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。

なお、構造部材の健全性評価については、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体構造を踏まえ、影響が大きいと考えられる構造部材について、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。）及び「コンクリート標準示方書[設計編]」（土木学会，2007年制定）（以下「コンクリート標準示方書2007」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 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 [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*
	・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) ・コンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会, 2007 年制定)	・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
	・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*
地震応答解析	・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)	・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) ((社) 日本道路協会 平成 14 年 3 月)	
構造解析	・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)	・地盤反力係数 (3 次元構造解析に用いる係数)
	・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)	

注記* : 妥当な安全余裕を考慮する。

3.2 耐震評価フロー

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）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～排気筒）は、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）と一体構造であることによる立体的な作用荷重を精緻に評価するため、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、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 方向荷重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。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増分土圧・地震時増分水圧、周面せん断力及び慣性力である。

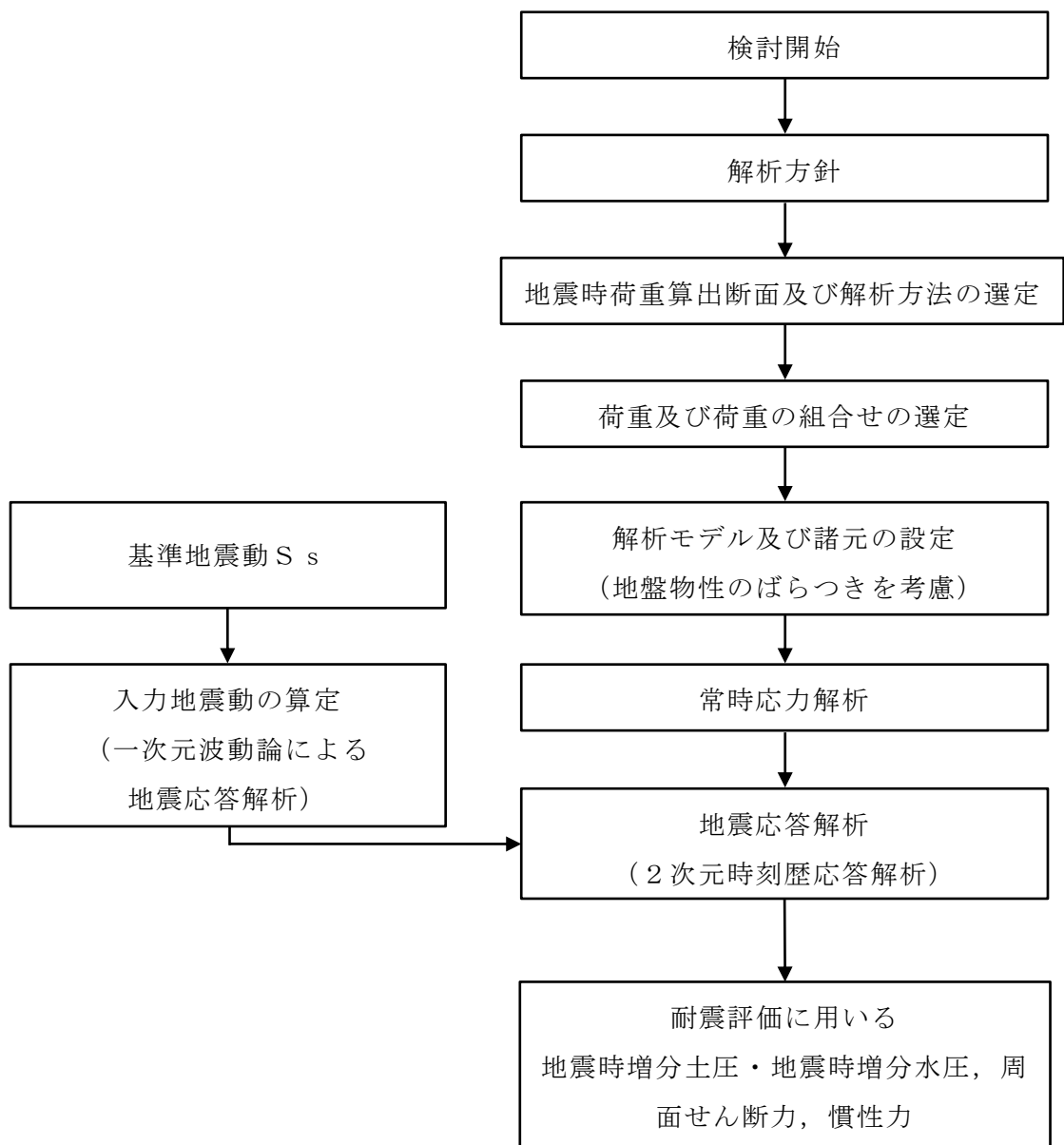


図 3-1 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答解析フロー

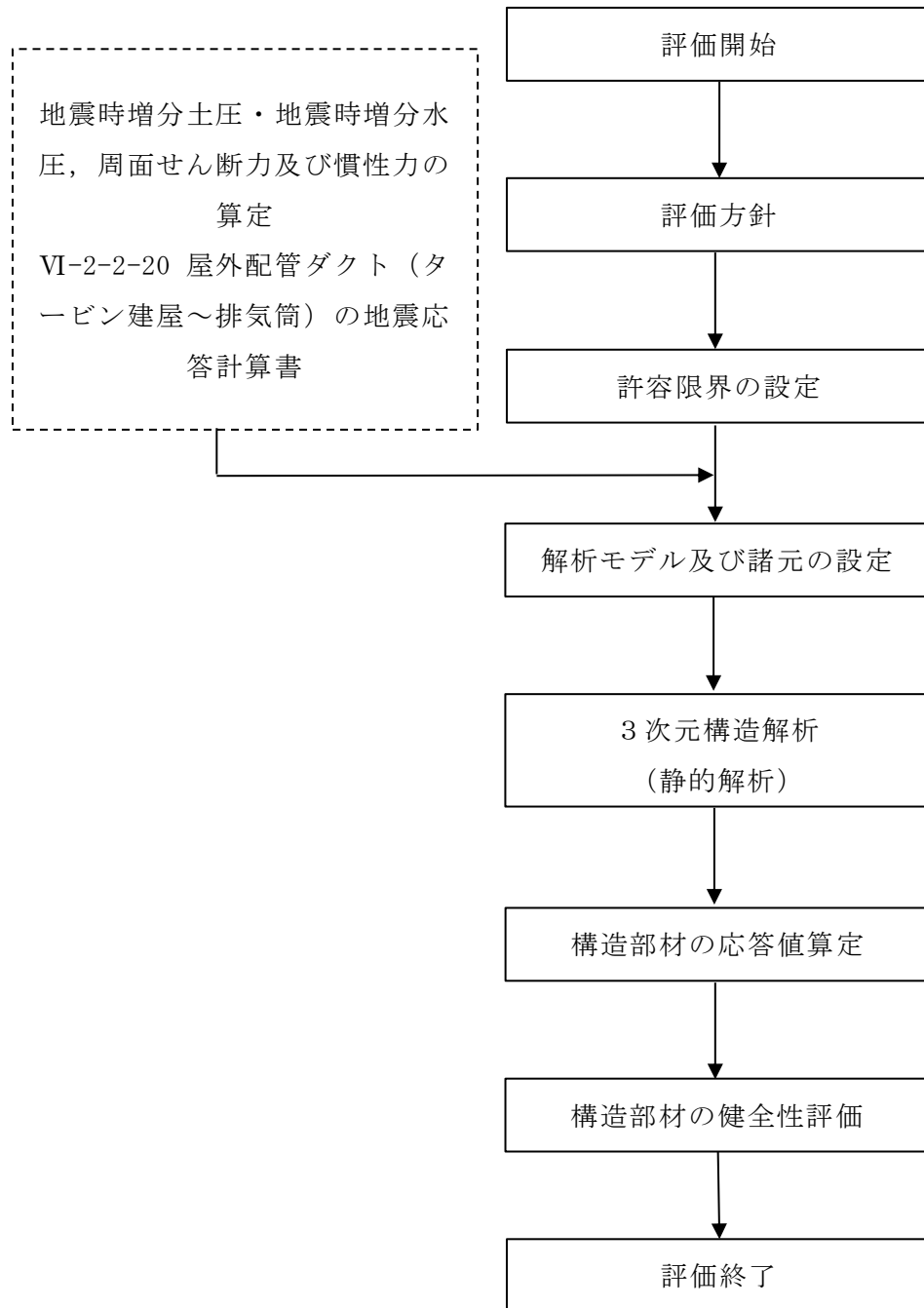


図 3-2 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の耐震評価フロー

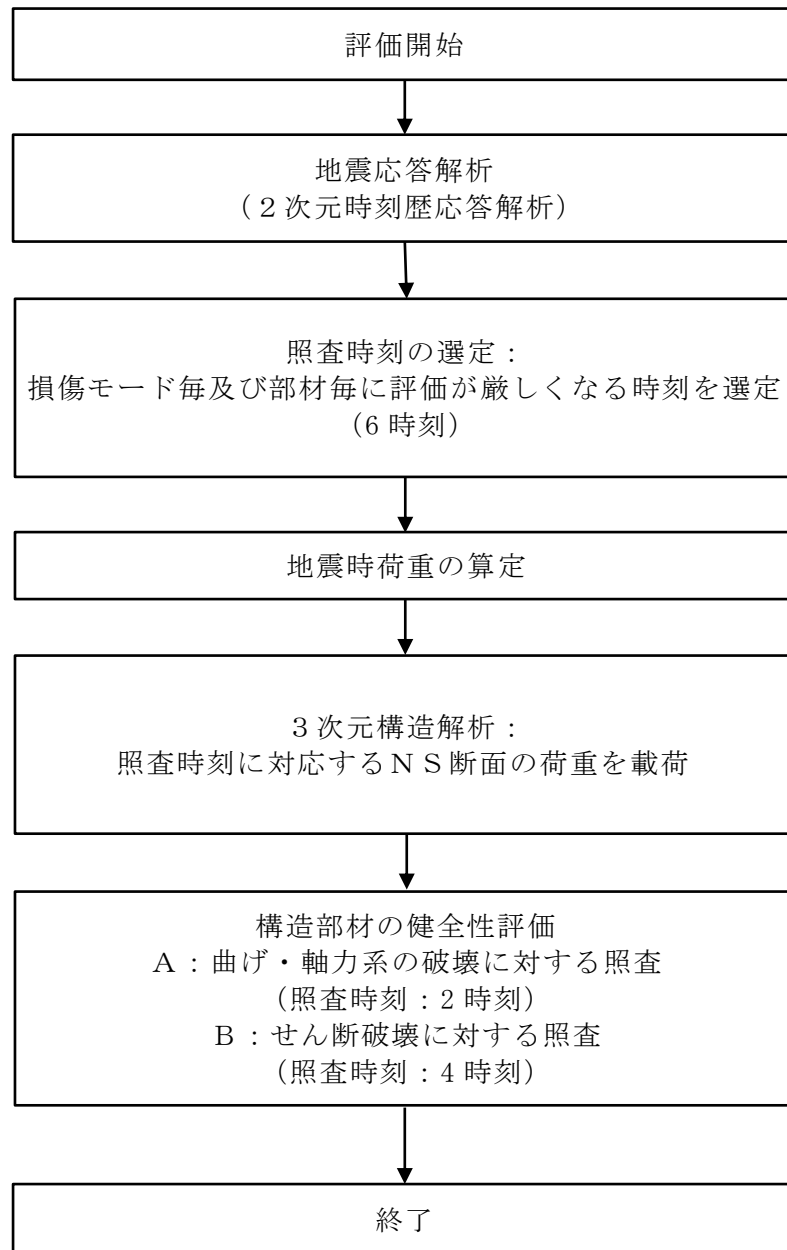
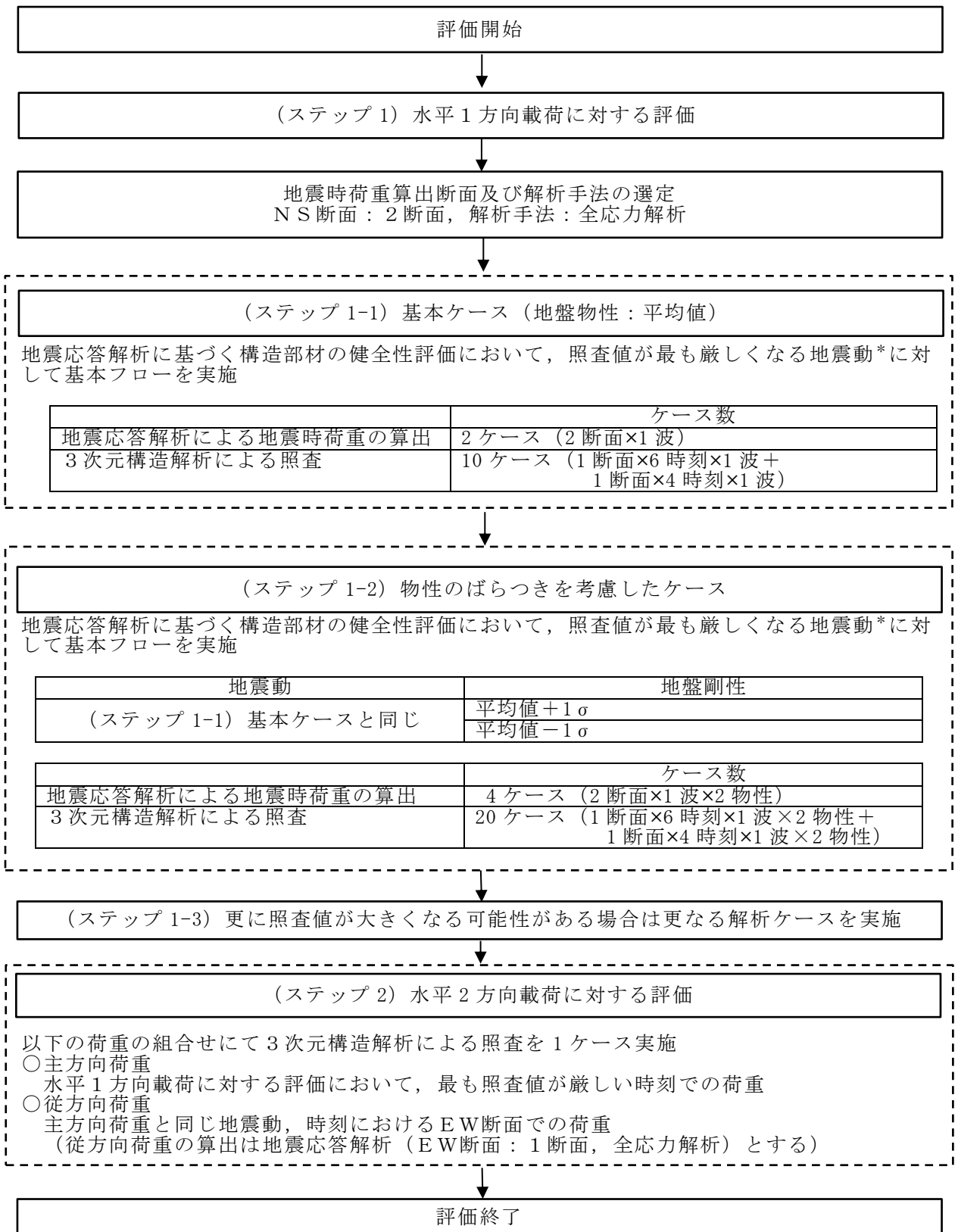


図 3-3 基本フロー



注記*：解析ケース①において、曲げ・軸力系の破壊及びせん断破壊の照査項目における照査値が最も厳しい地震動を用いて 3次元構造解析を実施する。

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
参考 1-11

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、**構造的特徴や周辺状況等を踏まえ選定する。**

弱軸となる南北方向については、周辺状況の差異を踏まえ、標準断面のA-A断面に加えて、下部に屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）が位置するB-B断面を選定する。

また、水平2方向載荷時における東西方向の地震時荷重算出断面としてC-C断面を選定する。

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～図3-7に示す。

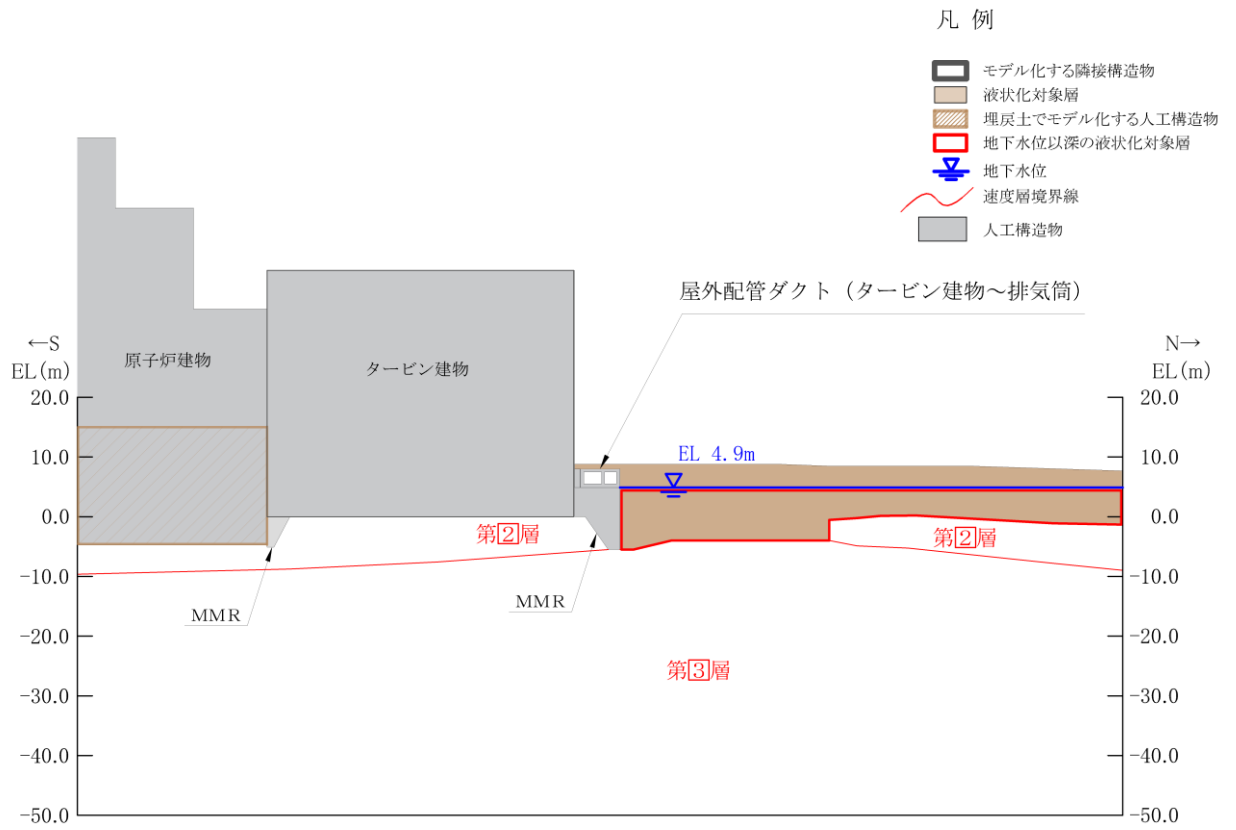


図 3-5 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)

地震時荷重算出断面図 (A-A 断面)

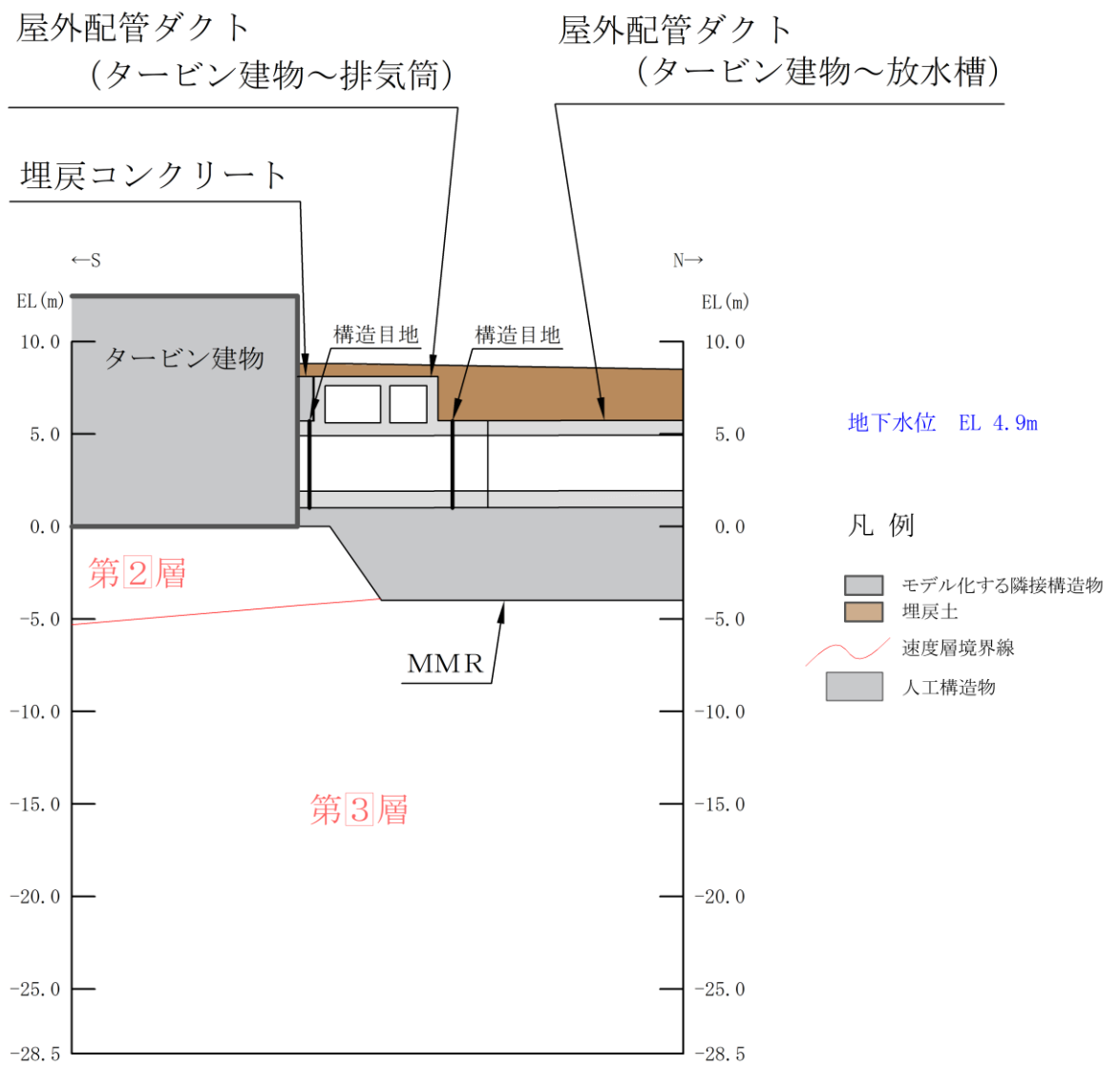


図 3-6 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)

地震時荷重算出断面図 (B-B断面)

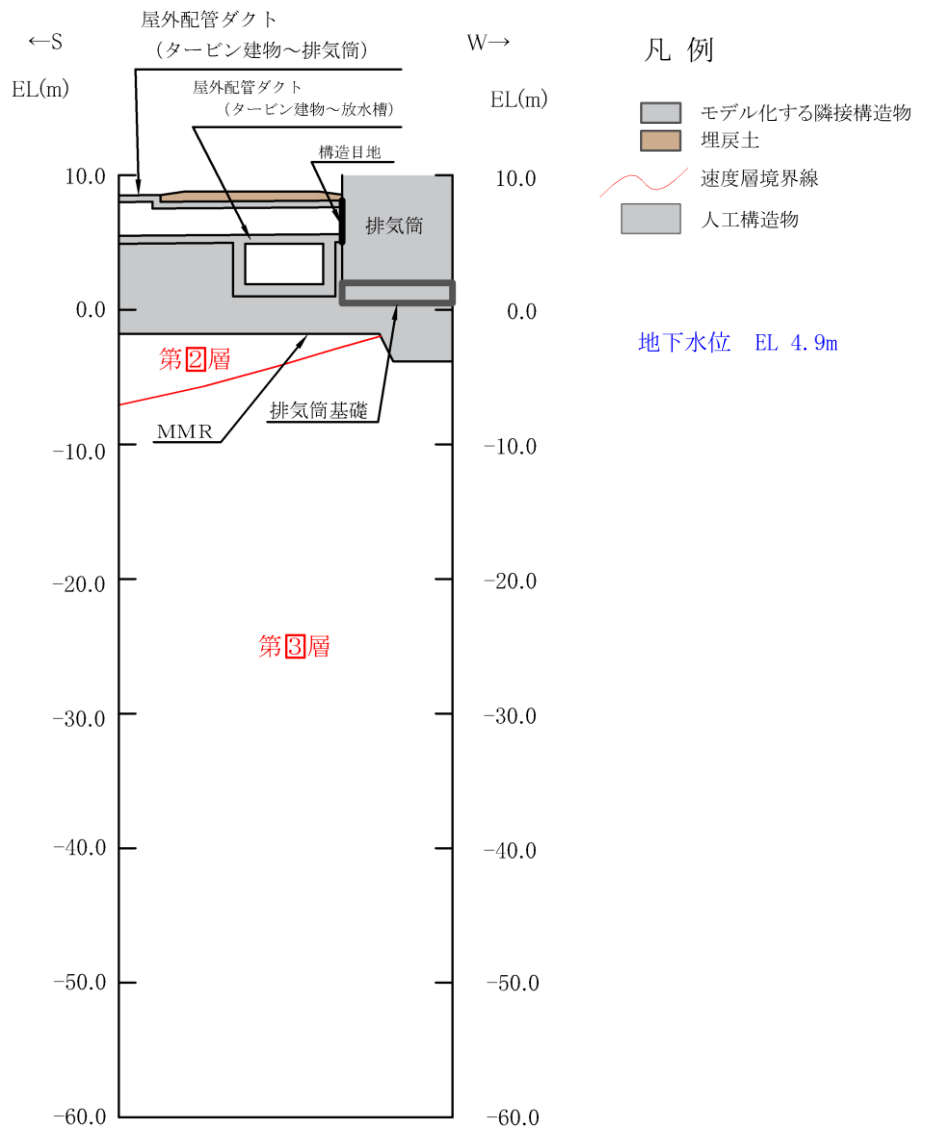


図 3-7 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)

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

評価構造の諸元については、本文「2.7 評価構造物諸元」と同様である。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の一体化部は、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）に拘束されており、複雑な構造を有することから評価対象とする。

また、東西方向に伸びる3次元構造解析モデルに対して、西側は一体化部に拘束され、変形が抑制されるため、東西方向ねじれの影響が考えられる。そのため、3次元構造解析モデルにて耐震評価を実施するにあたっては、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の延長方向に伸びる部材として、頂版、底版、側壁及び隔壁を3次元構造解析の評価対象とする。

評価部位を図3-8に示す。

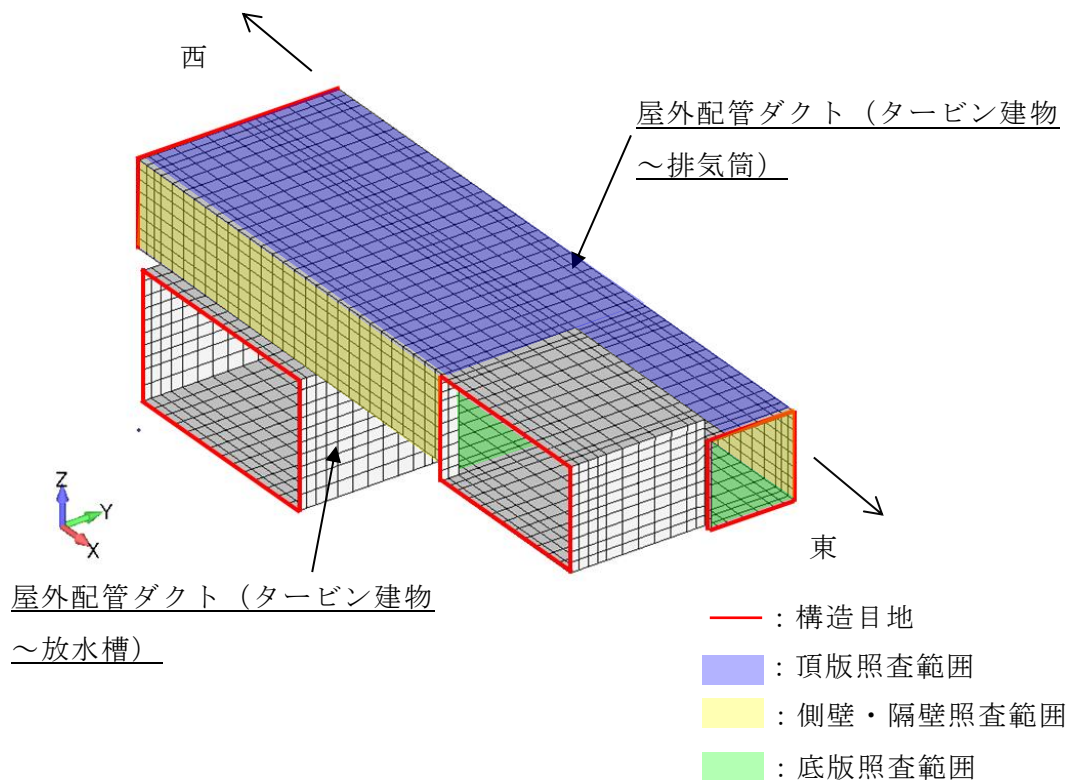


図3-8 (1) 評価部位

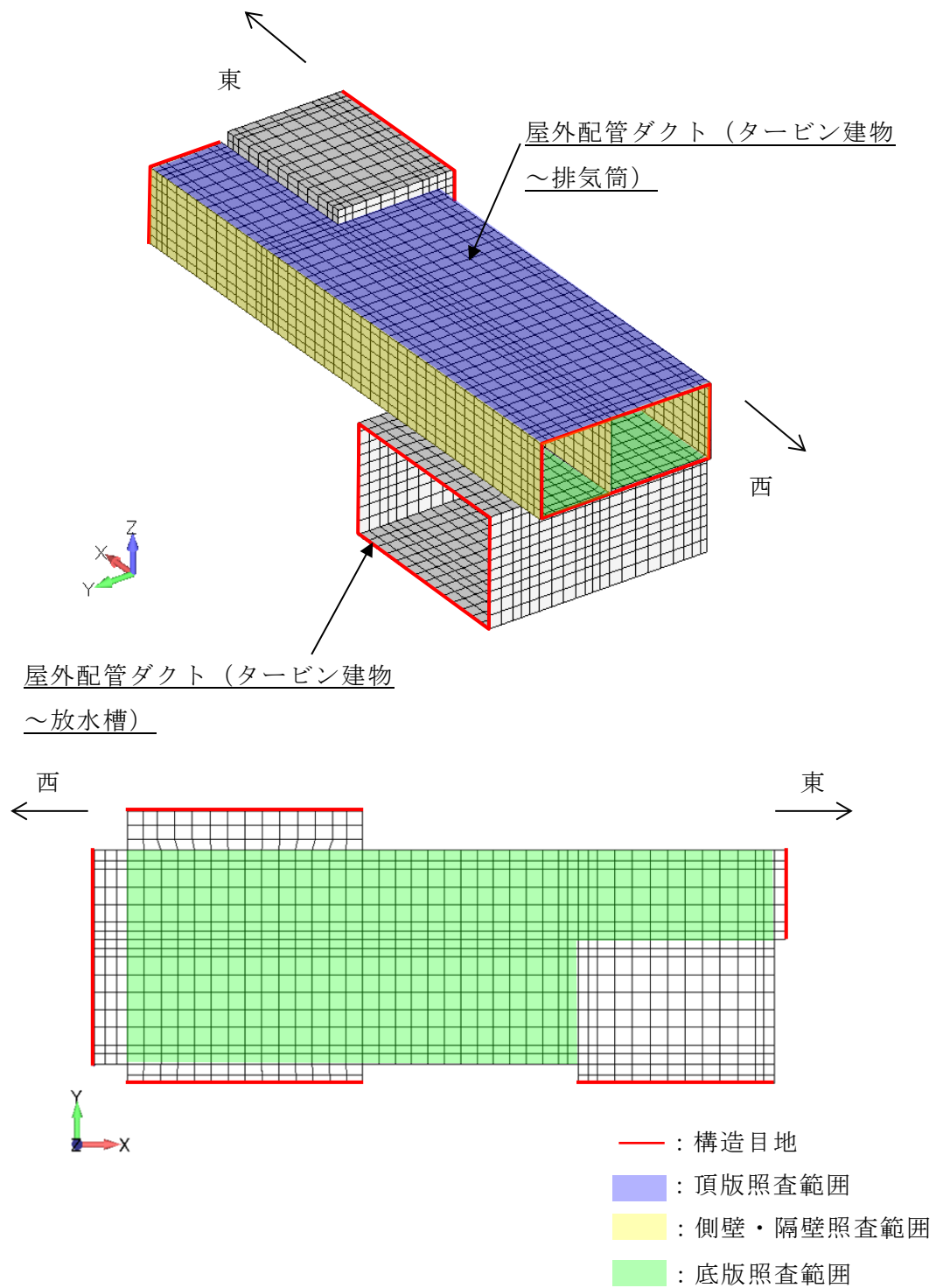


図 3-8 (2) 評価部位

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、本文「3.1 地震応答解析手法」のとおり、評価対象となる屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）周辺の地下水位が構造物底版よりも低いため、「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「TDAPⅢ」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。

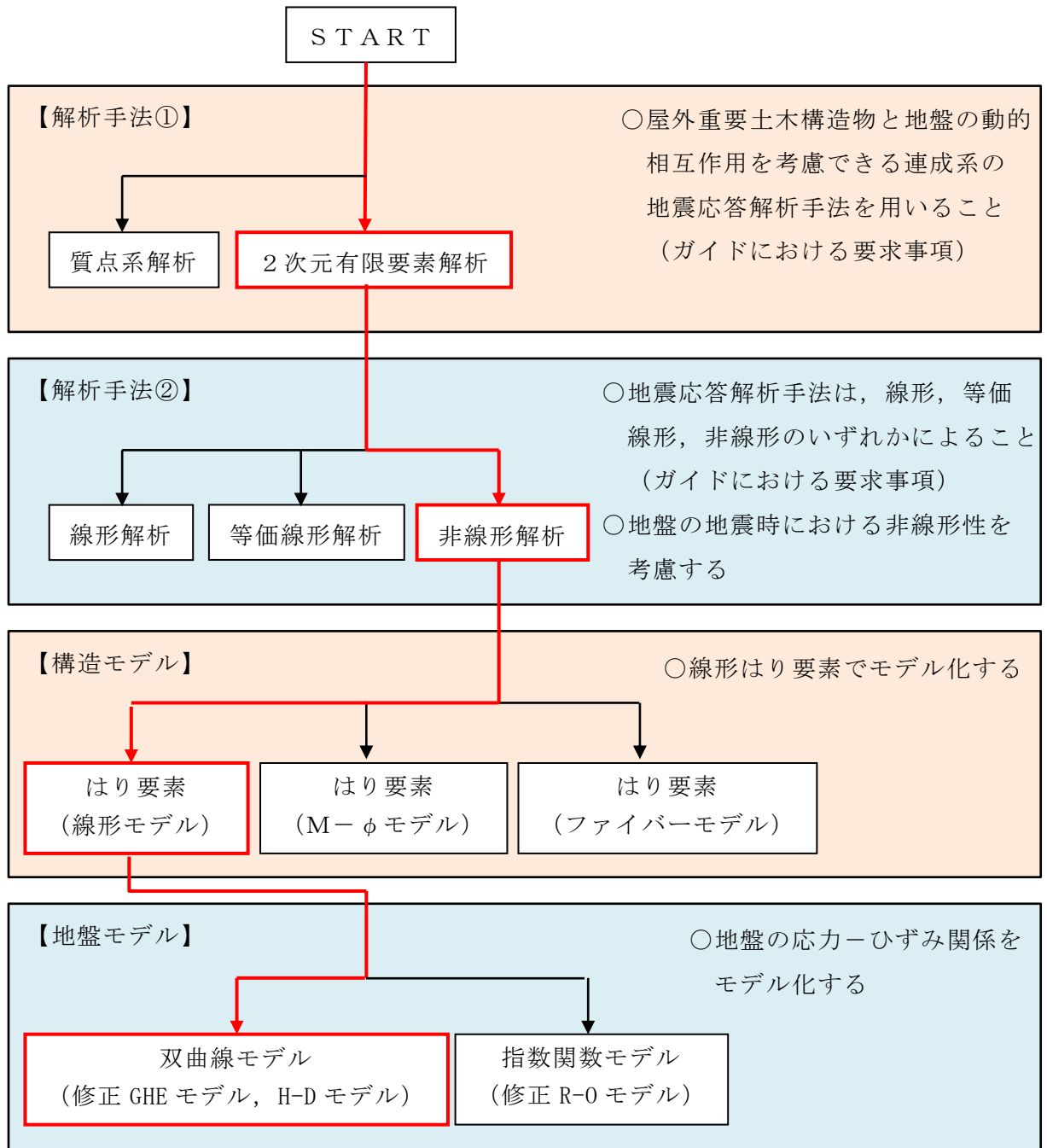


図 4-1 地震応答解析の選定フロー

4.2 地震応答解析モデルの設定

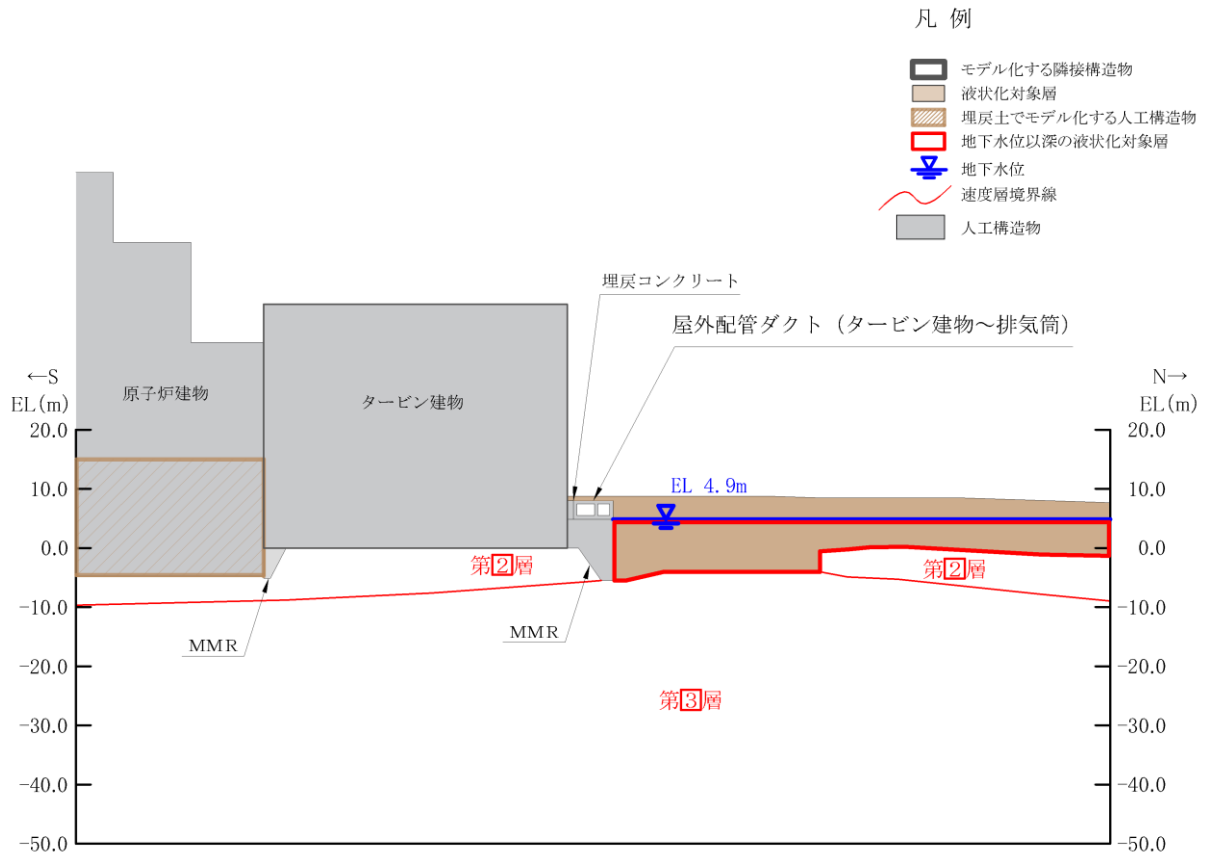
4.2.1 解析モデル領域

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。

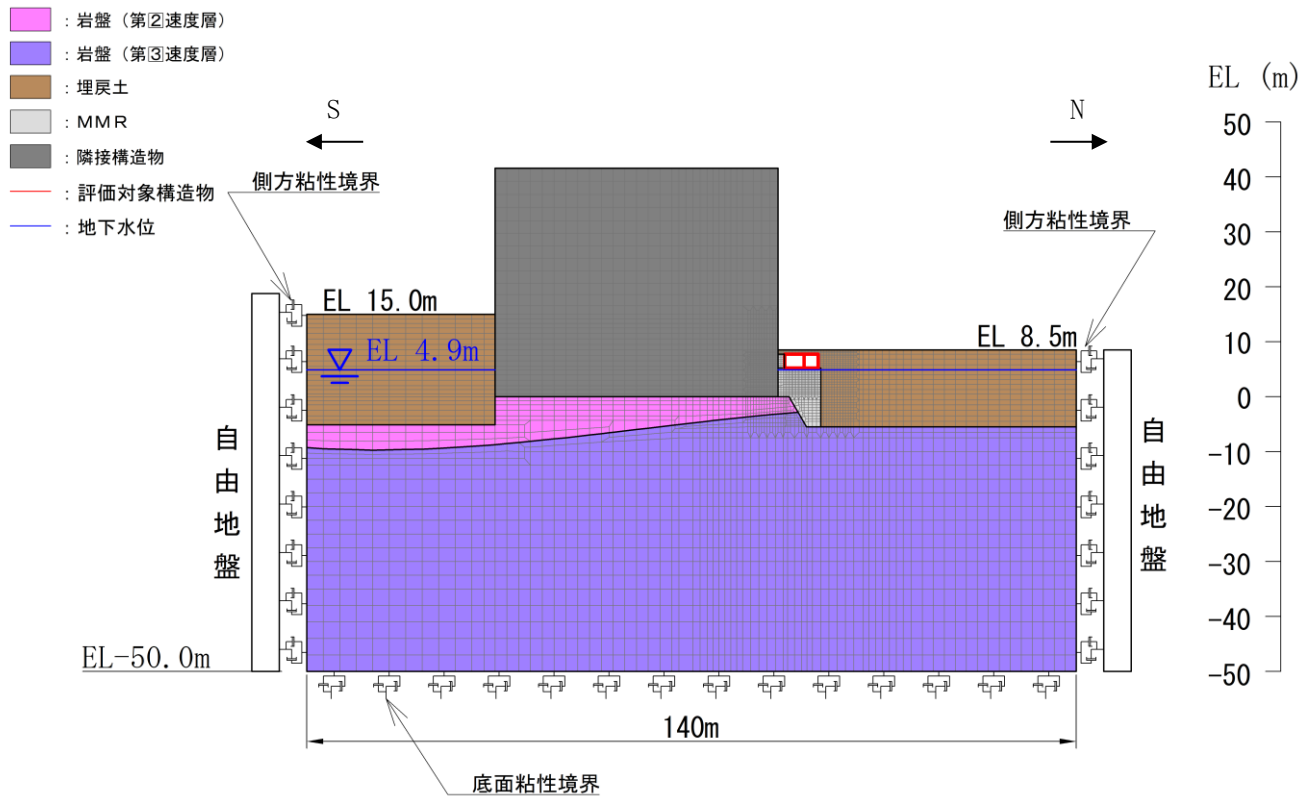
4.2.2 境界条件

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～図 4-4 に示す。

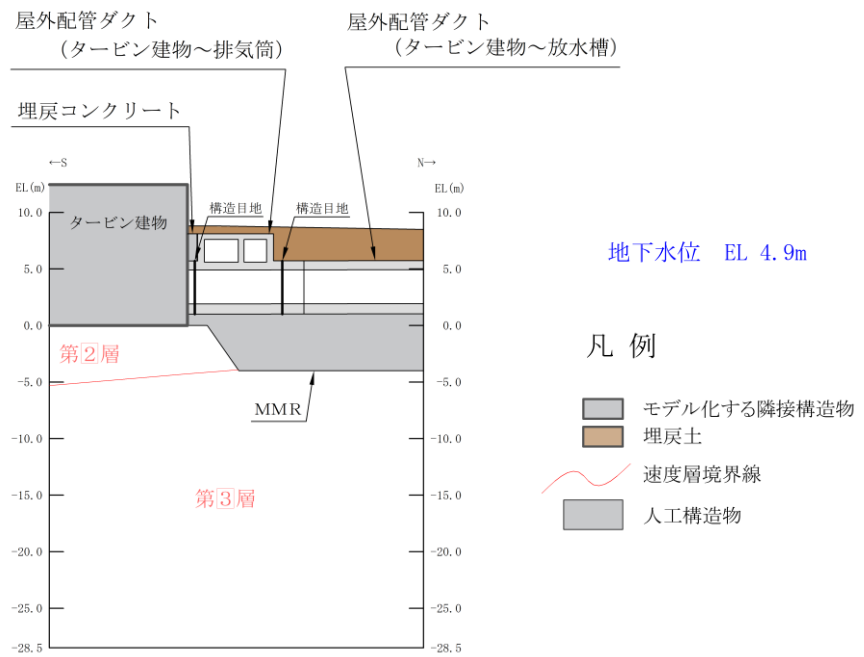


(a) 地震時荷重算出用地質断面図

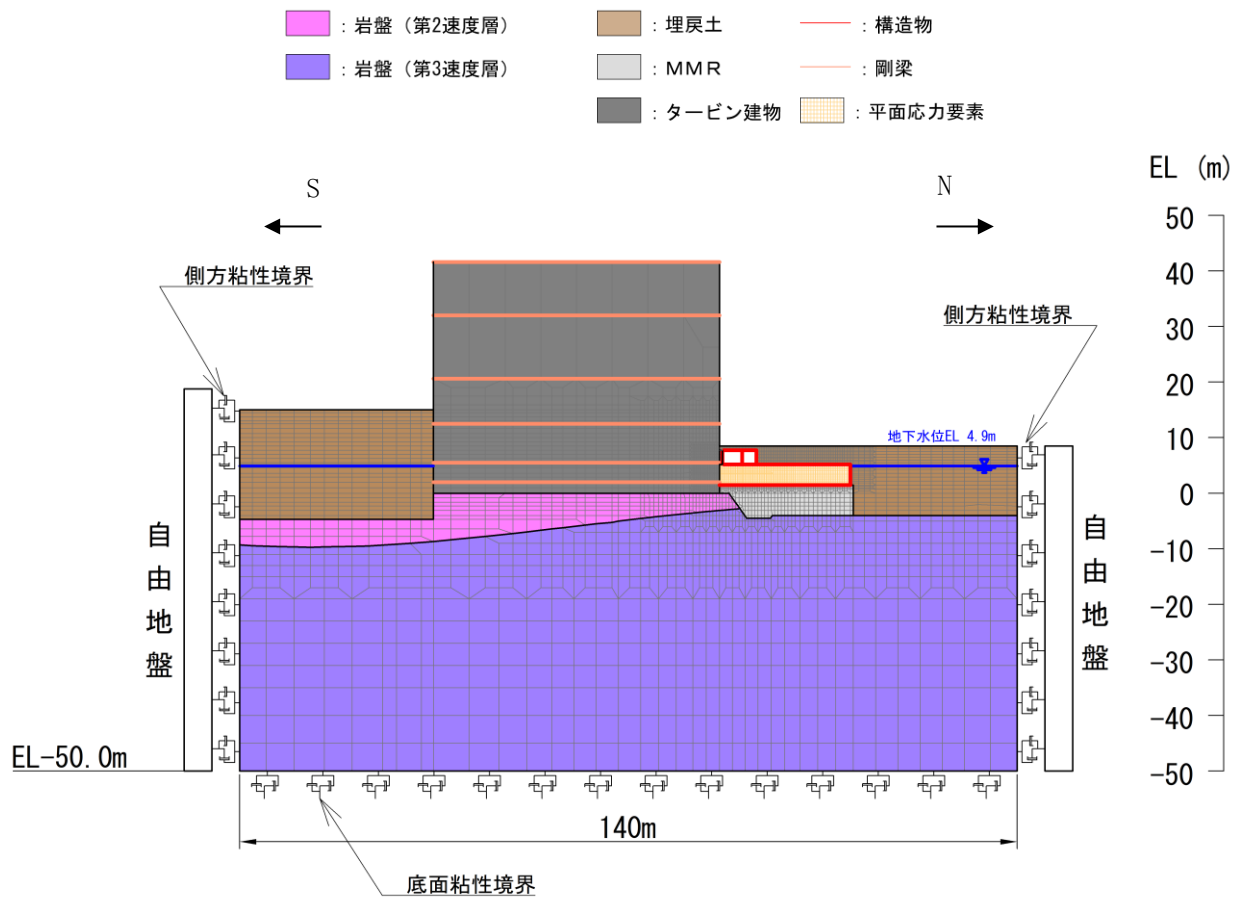


(b) 地震応答解析モデル図

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 (A-A 断面)
参考 1-22

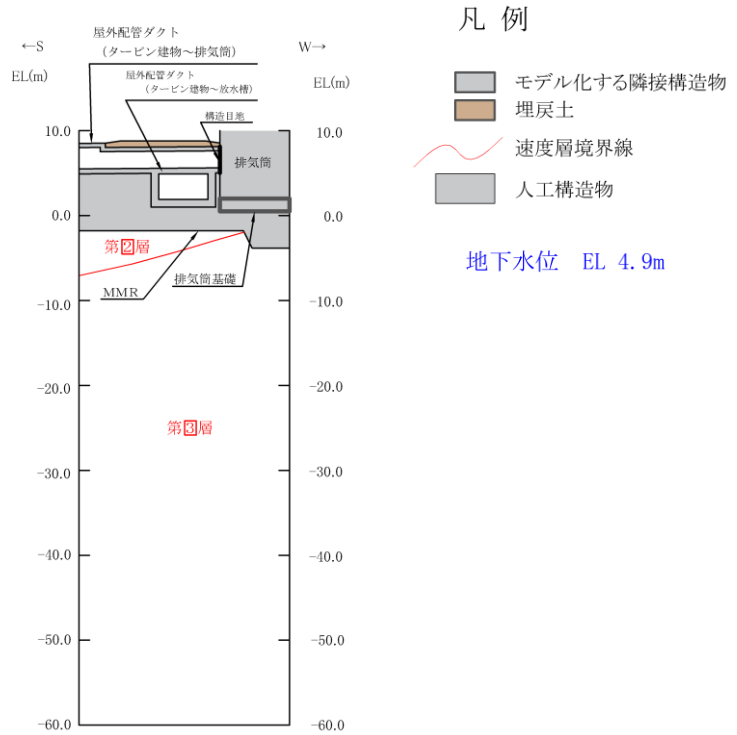


(a)地震時荷重算出用地質断面図

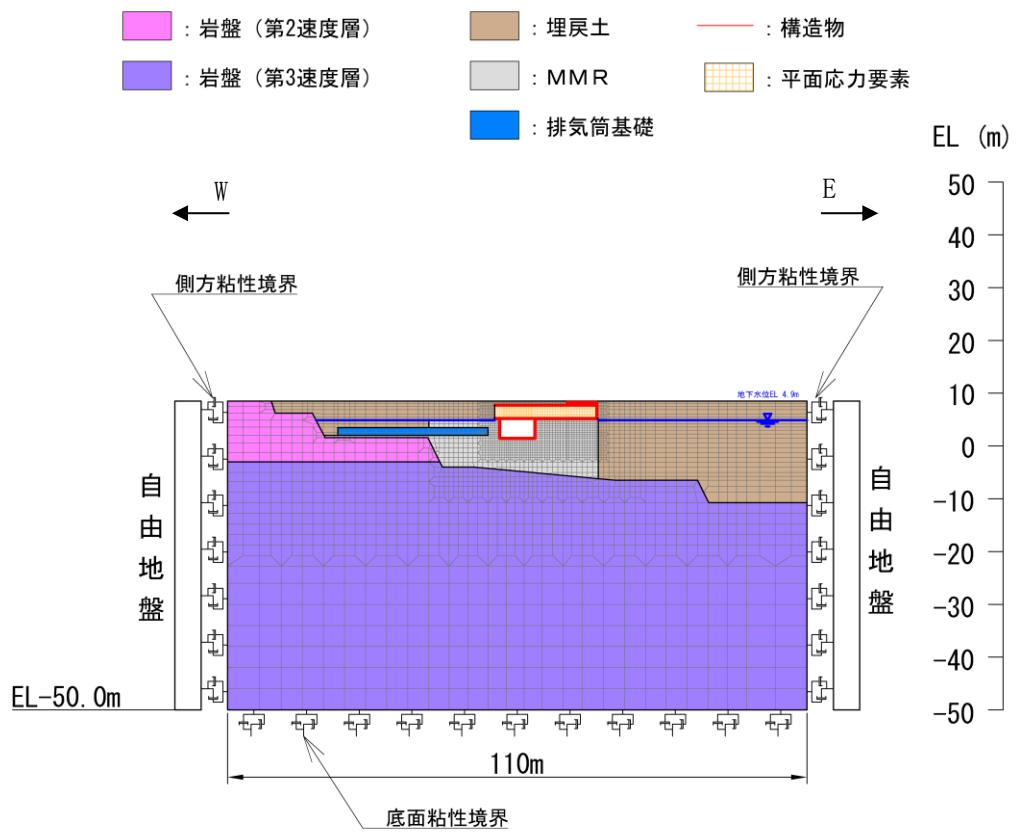


(b)地震応答解析モデル図

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 (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 4-4 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。

B-B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、**妻壁**までを南北方向のモデル化範囲とする。

C-C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。

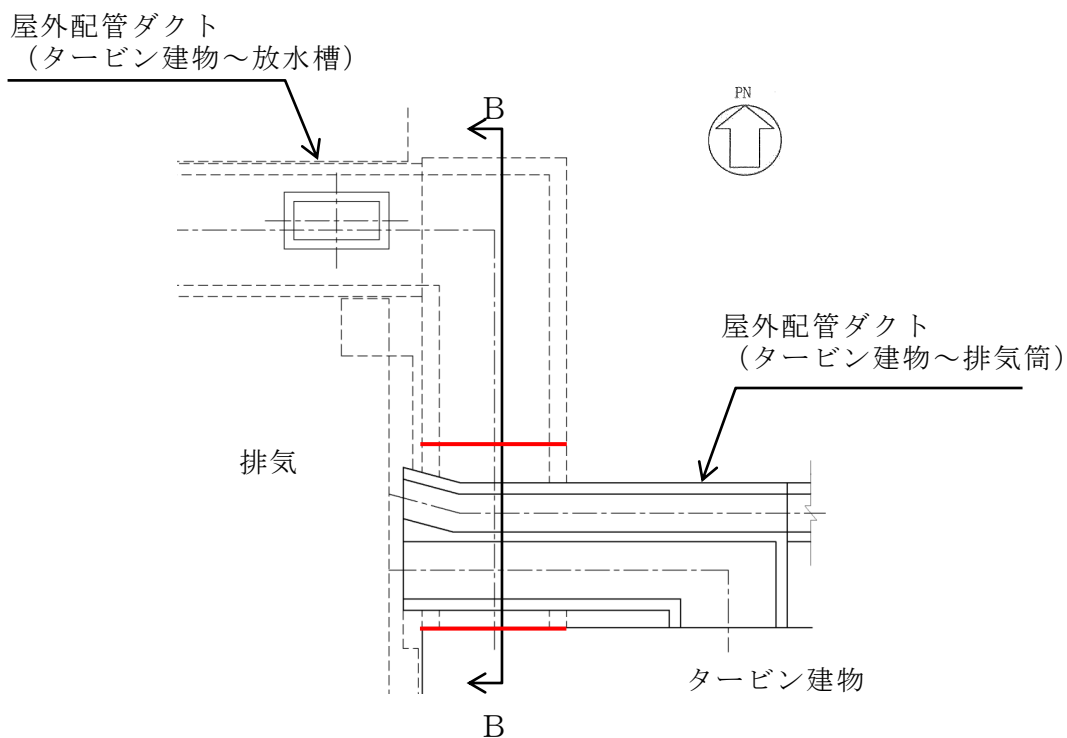
手順1として、エリア奥行長さに対する部材の奥行長さの比率から補正係数 α を線形はり要素に設定する。

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/m^2 ）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。

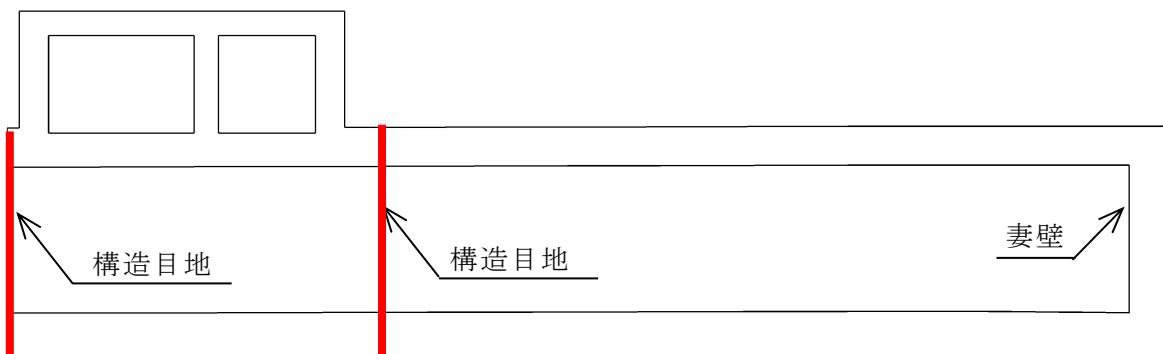
剛性調整の方法を図4-6に示す。なお、単位荷重を載荷させる3次元モデル及び2次元モデルの底面の境界条件は、構造物の変位に着目するため固定境界とする。

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。

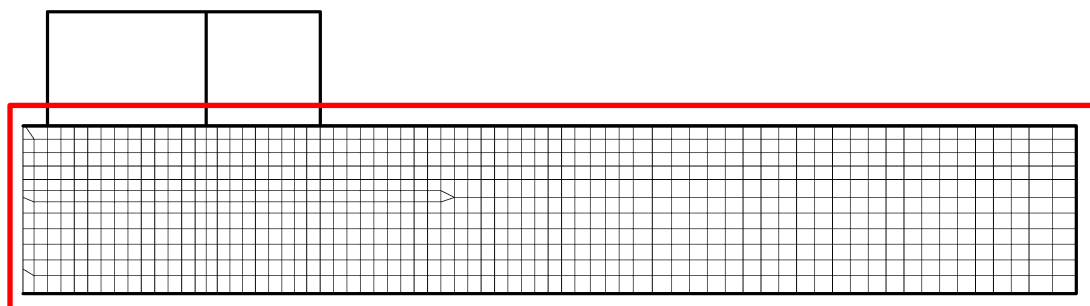


— : 屋外配管ダクト (タービン建物～放水槽) 構造目地

(B - B 断面構造目地位置)



(B - B 断面構造概要)

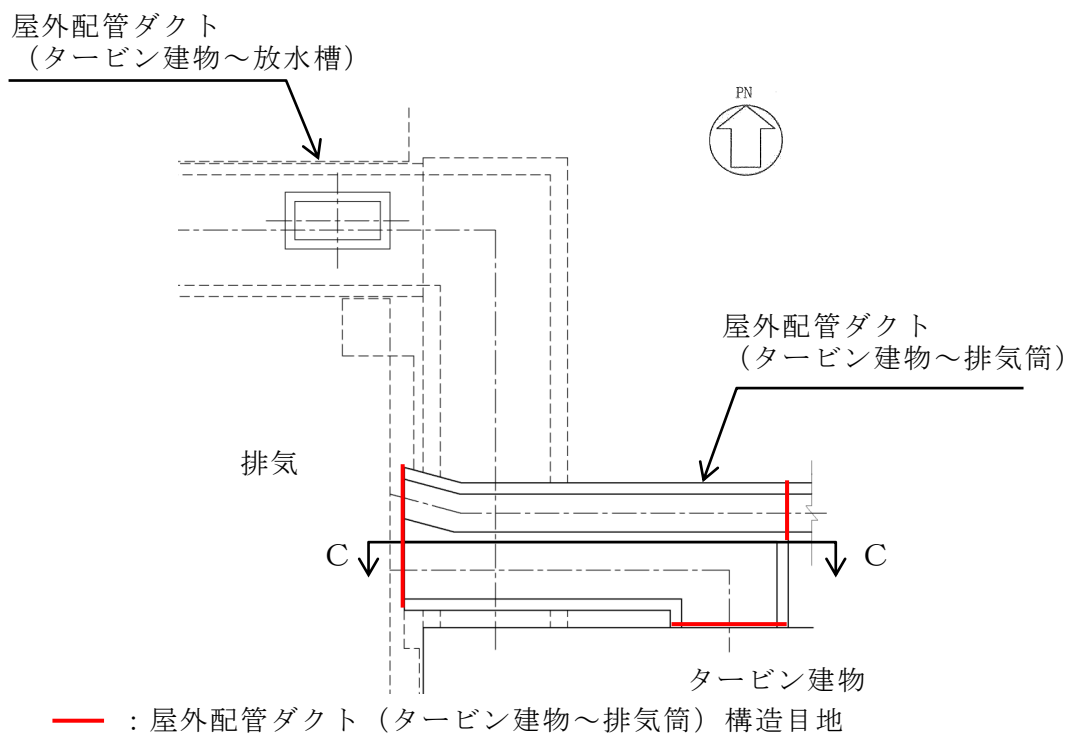


□ : 屋外配管ダクト (タービン建物～放水槽) のモデル化範囲

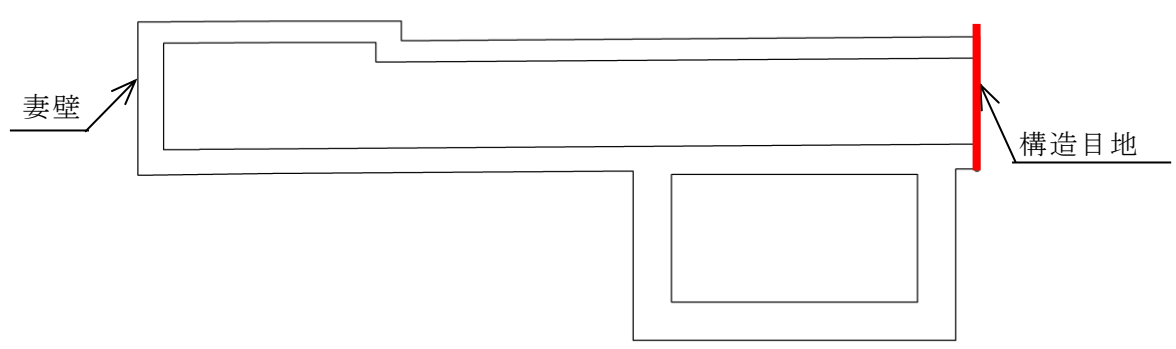
(B - B 断面解析モデル概要)

図 4-4 B - B 断面モデル化範囲概念図

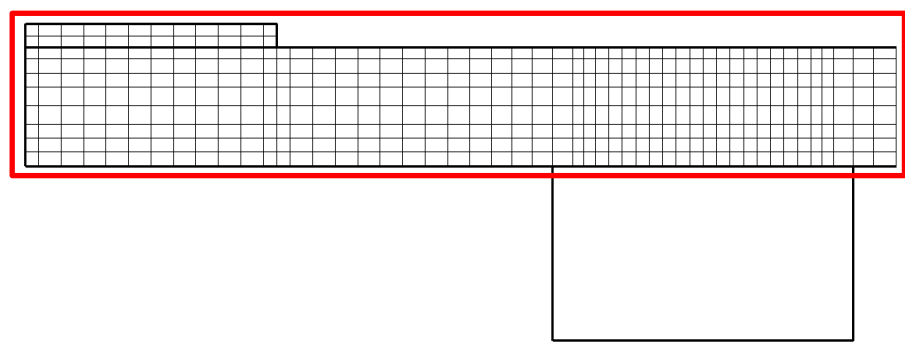
参考 1-26



(C-C断面構造目地位置)



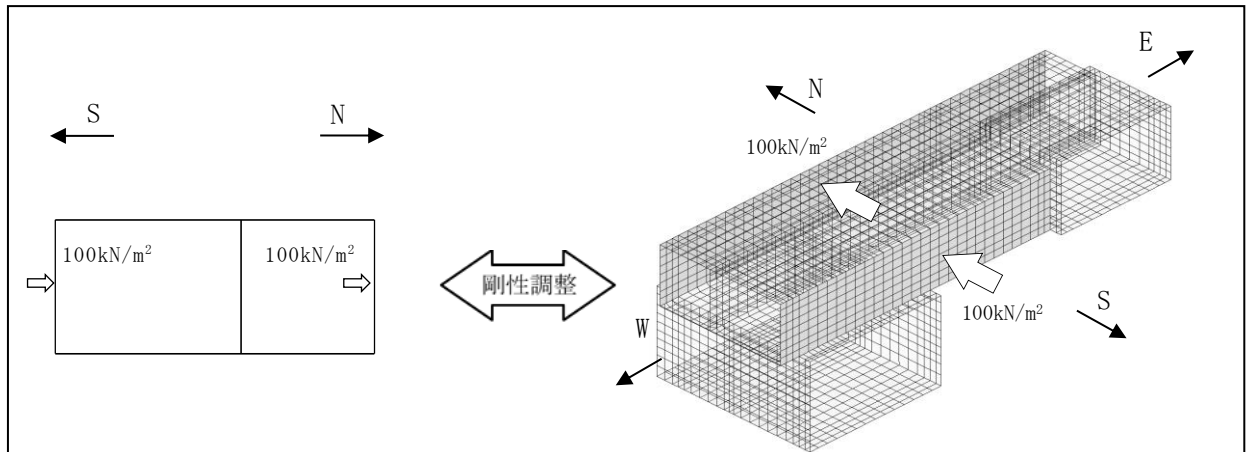
(C-C断面構造概要)



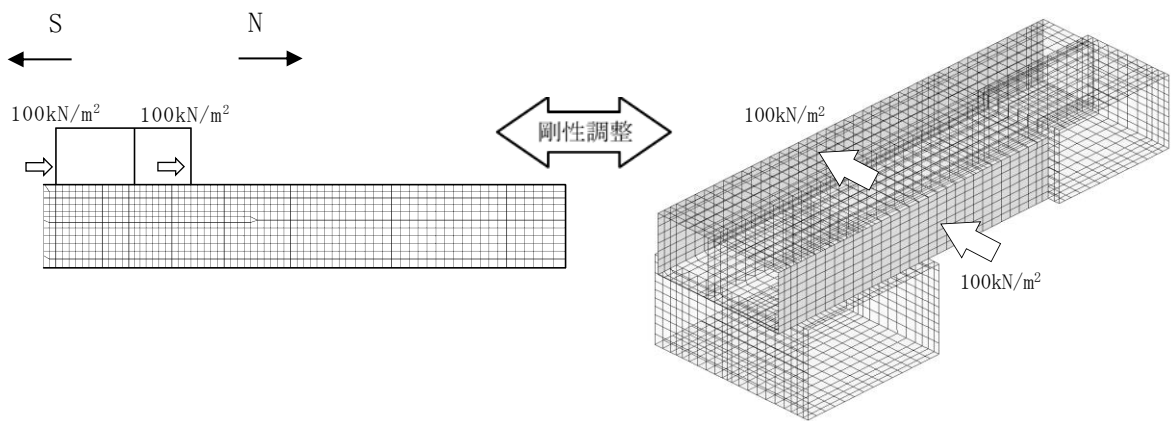
□ : 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) のモデル化範囲

(C-C断面解析モデル概要)

図 4-5 C-C断面モデル化範囲概念図
参考 1-27



(A-A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）



(B-B断面：屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）東西壁）

図 NS加振時における3次元モデルと等価剛性モデルの変位比較

剛性の設定手順

各部材の剛性は、以下の式に基づき設定する。

$$E = E_c \times \alpha \times \beta$$

ここで、

E：等価剛性モデルの弾性係数

E_c ：コンクリートの弾性係数

α ：構造物の奥行長さに対する各部材の奥行長さの比率 (L_o / L)

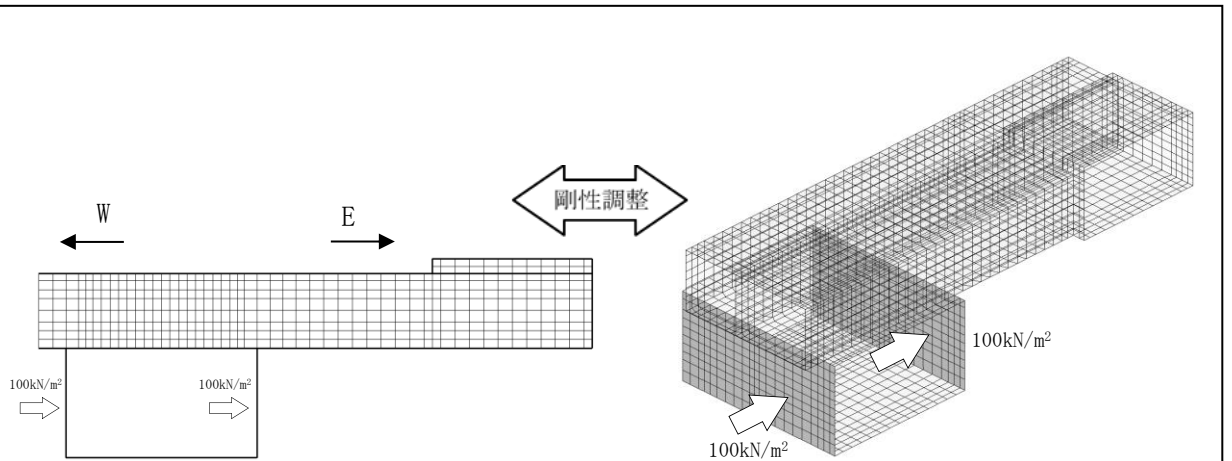
L_o ：部材の奥行長さ

L：構造物の奥行長さ

β ：変位を合わせるための弾性係数の補正係数

図 4-6 (1) 剛性の調整方法

参考 1-28



(C-C断面：屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）東西壁）

図 EW加振時における3次元モデルと等価剛性モデルの変位比較
剛性の設定手順

各部材の剛性は、以下の式に基づき設定する。

$$E = E_c \times \alpha \times \beta$$

ここで、

E：等価剛性モデルの弾性係数

E_c ：コンクリートの弾性係数

α ：構造物の奥行長さに対する各部材の奥行長さの比率 (L_e / L)

L_e ：部材の奥行長さ

L：構造物の奥行長さ

β ：変位を合わせるための弾性係数の補正係数

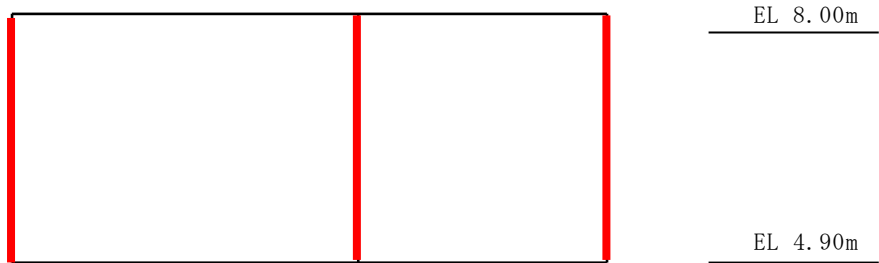
図 4-6 (2) 剛性の調整方法

(1) 南北方向

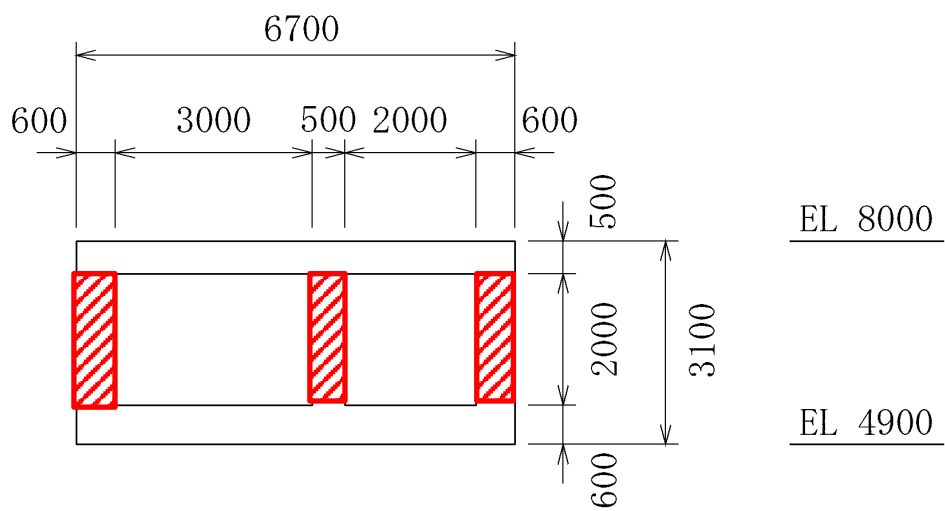
南北方向の A-A 断面及び B-B 断面は、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）のような、加振に対して面外変形で抵抗する構造物は、線形はり要素にてモデル化し、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）のような、加振に対して面内変形で抵抗する構造物は、平面応力要素にてモデル化する。

A-A 断面及び B-B 断面の等価剛性モデル概念図を図 4-7 及び図 4-8 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 4-9 及び図 4-10 に、B-B 断面における剛性調整結果を図 4-11 に、補正係数の計算結果を表 4-1 に示す。

なお、A-A 断面における剛性調整結果及び補正係数の計算結果については、追而とする。

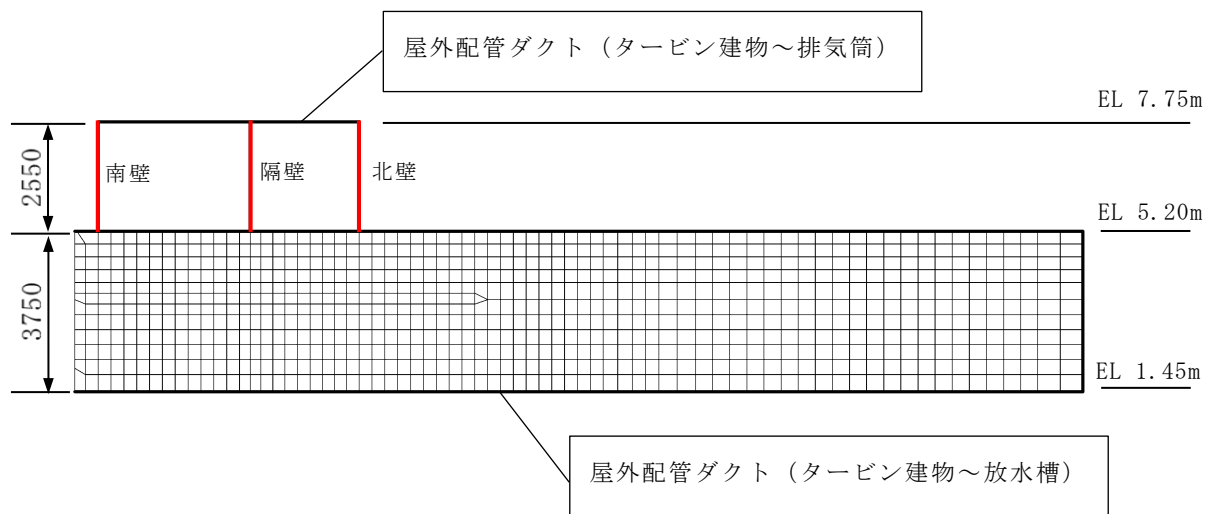


(A-A断面断面等価剛性モデル)

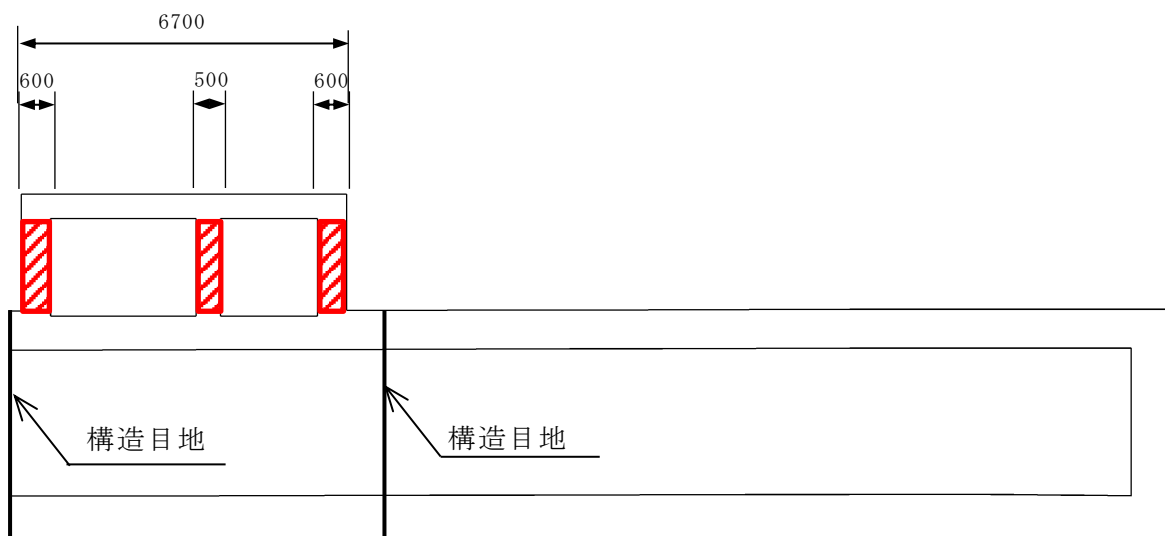


(A-A断面断面構造概要)

図 4-7 等価剛性モデル概念図 (A-A断面)



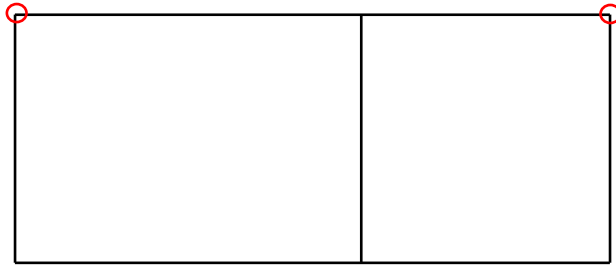
(B-B断面等価剛性モデル)



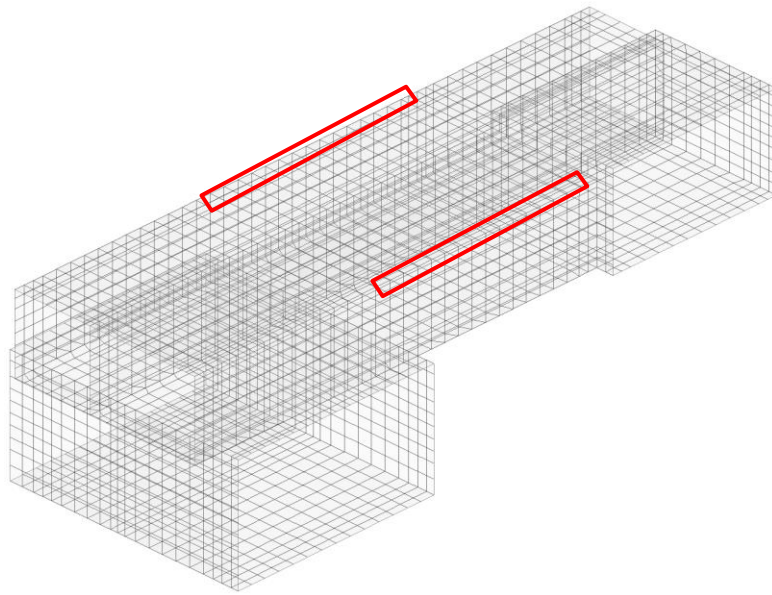
(B-B断面構造概要)

(単位:mm)

図 4-8 等価剛性モデル概念図 (B-B断面)



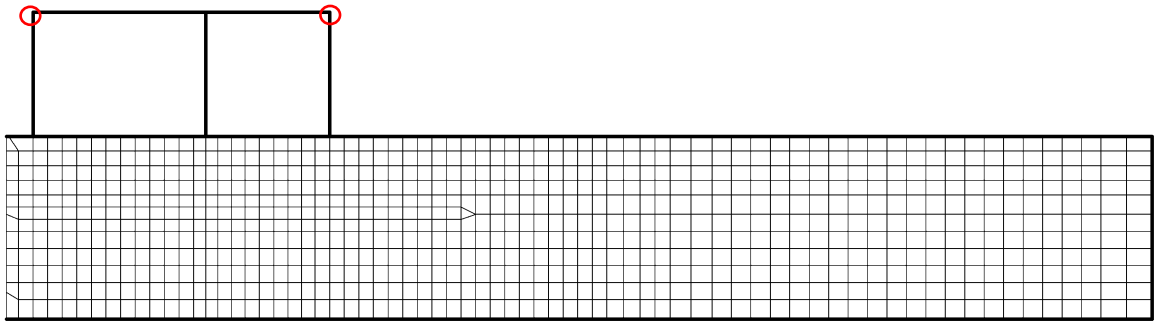
等価剛性モデル



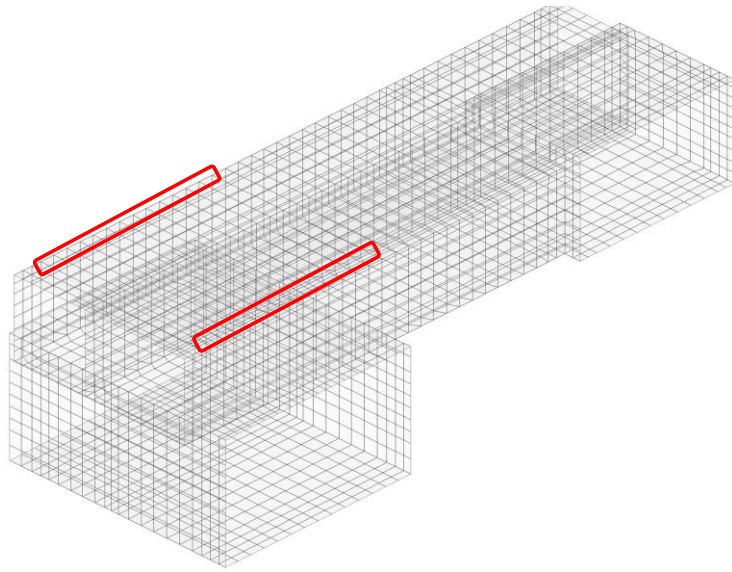
3次元構造解析モデル

(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 4-9 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 (A-A 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 4-10 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）

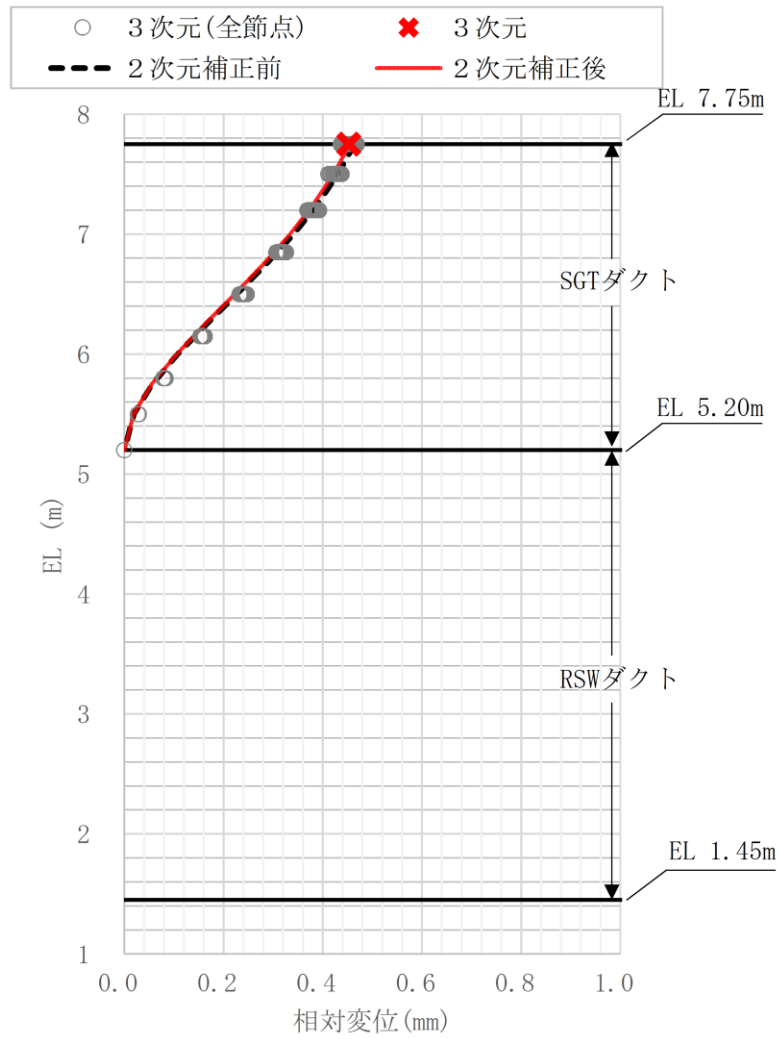


図 4-11 剛性調整結果 (B-B 断面)

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 [-]
B-B 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4-12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4-13に、剛性調整結果を図4-14に、補正係数の計算結果を表4-2に示す。

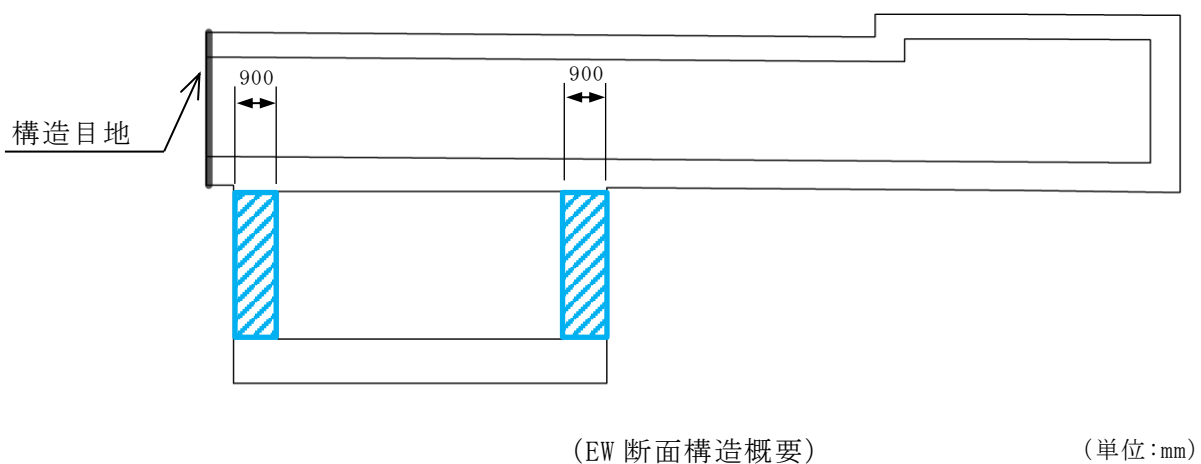
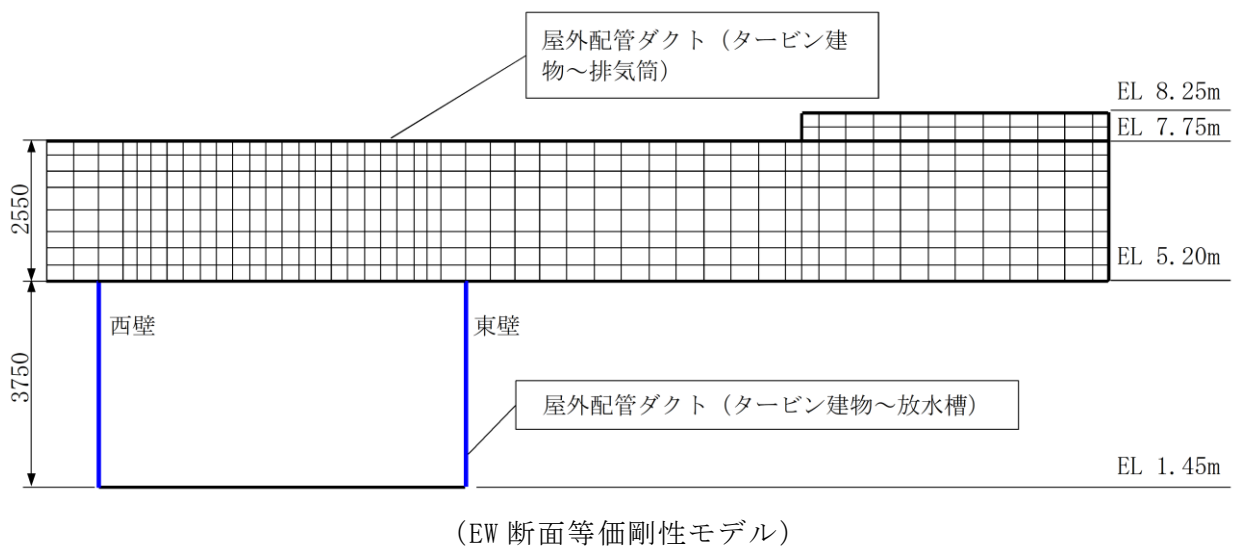
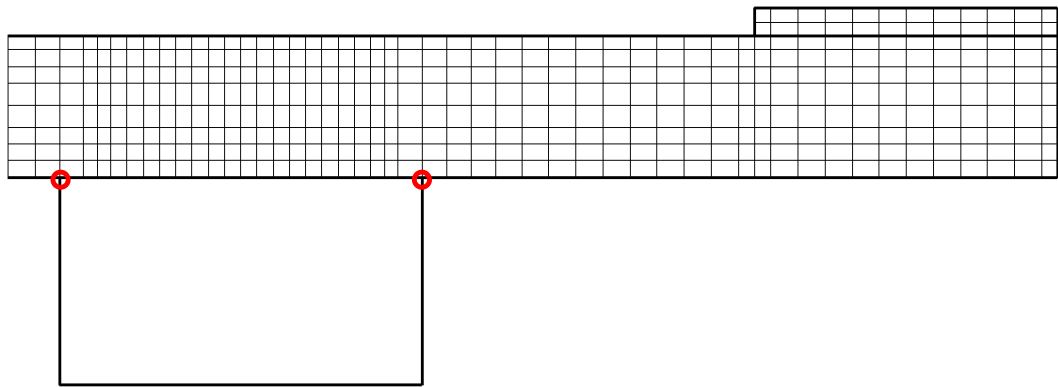
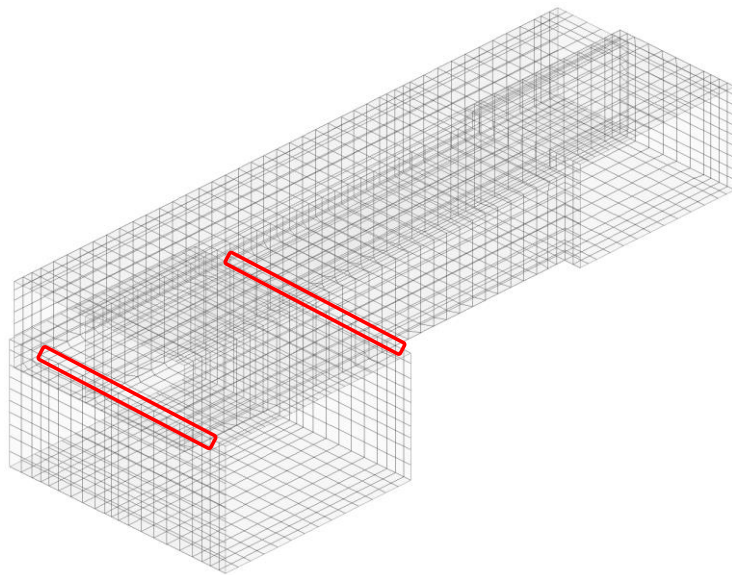


図4-12 等価剛性モデル概念図 (C-C断面)



等価剛性モデル



3次元構造解析モデル

(EW断面, 屋外配管ダクト(タービン建物~放水槽)東西壁)

図 4-13 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)

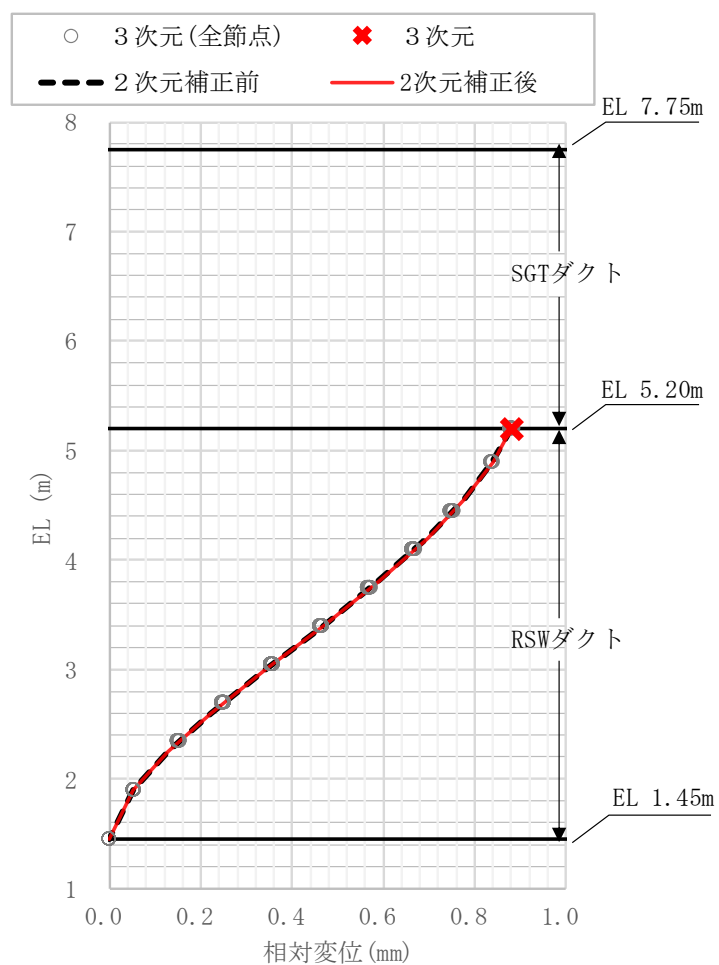


図 4-14 剛性調整結果 (C-C 断面)

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 [-]
C-C 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、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

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	24.0	0.2

4.2.5 地盤及びMMRのモデル化

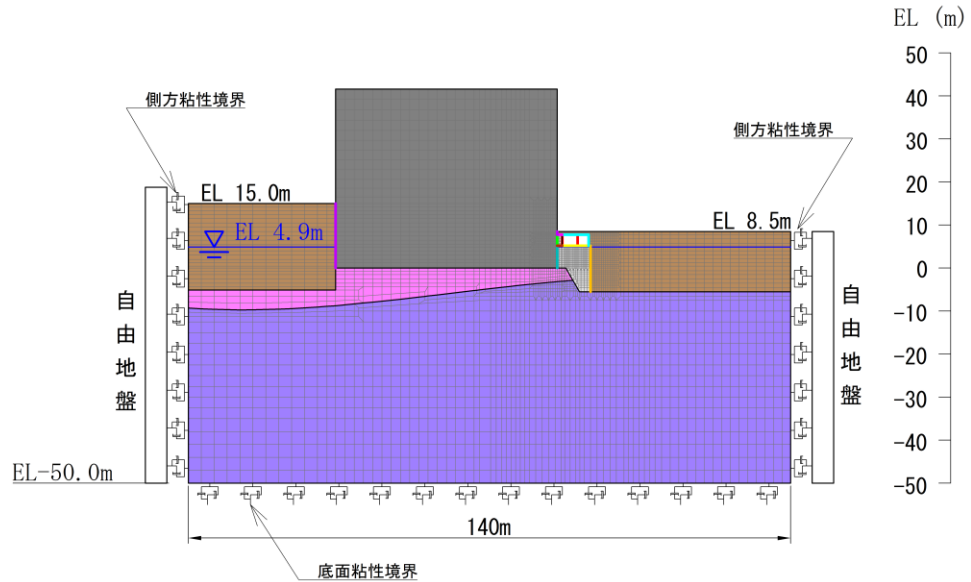
岩盤及びMMRは線形の平面ひずみ要素でモデル化する。また、埋戻土は、地盤の剛性及び減衰のひずみ依存性を考慮できるマルチスプリング要素でモデル化する。

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「3.2.7 ジョイント要素の設定」に基づき設定する。

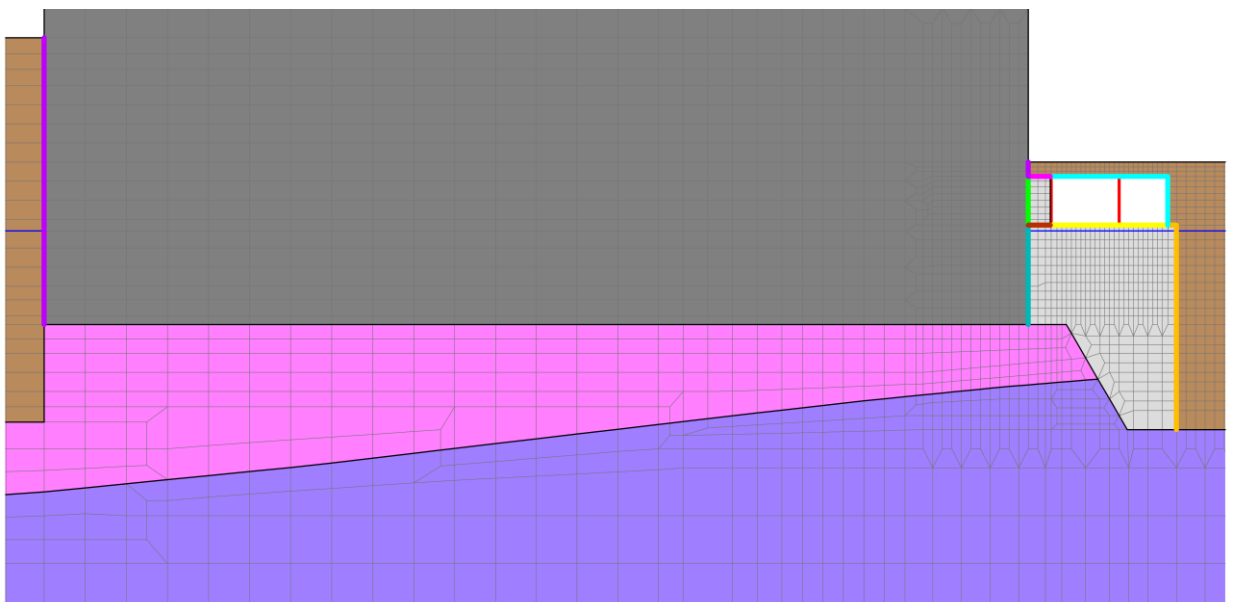
ジョイント要素の配置を図4-15～図4-17に示す。

- : 岩盤 (第②速度層)
- : 岩盤 (第③速度層)
- : 埋戻土
- : MMR
- : 隣接構造物
- : 評価対象構造物
- : 地下水位
- : ジョイント要素



(全体図)

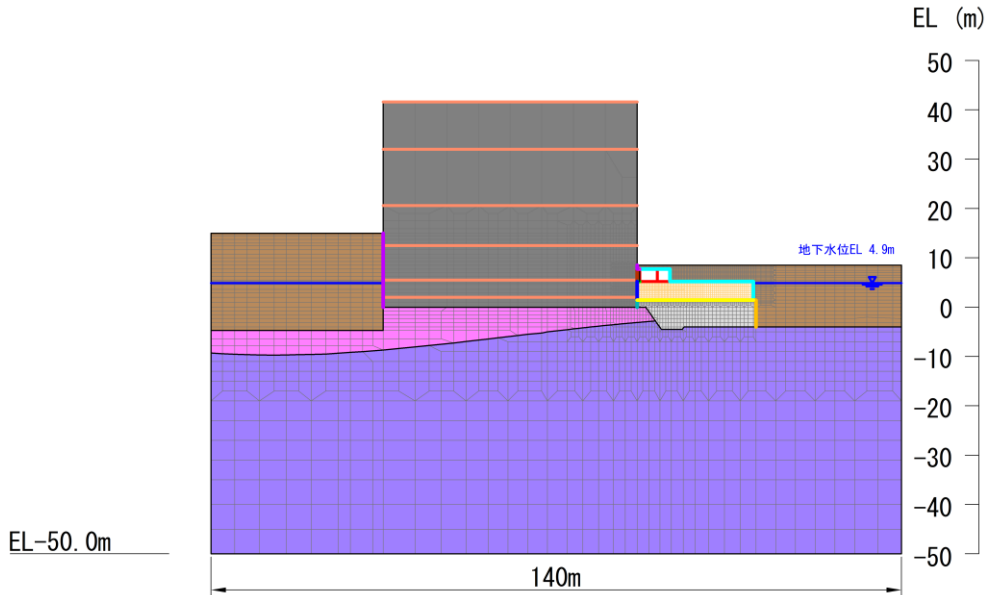
- : 構造物-埋戻土 ジョイント要素
- : 構造物-MMR ジョイント要素
- : 埋戻土コンクリート-埋戻土 ジョイント要素
- : 埋戻土コンクリート-タービン建物 ジョイント要素
- : 埋戻土コンクリート-MMR ジョイント要素
- : MMR-埋戻土 ジョイント要素
- : MMR-タービン建物 ジョイント要素
- : タービン建物-埋戻土 ジョイント要素



(拡大図)

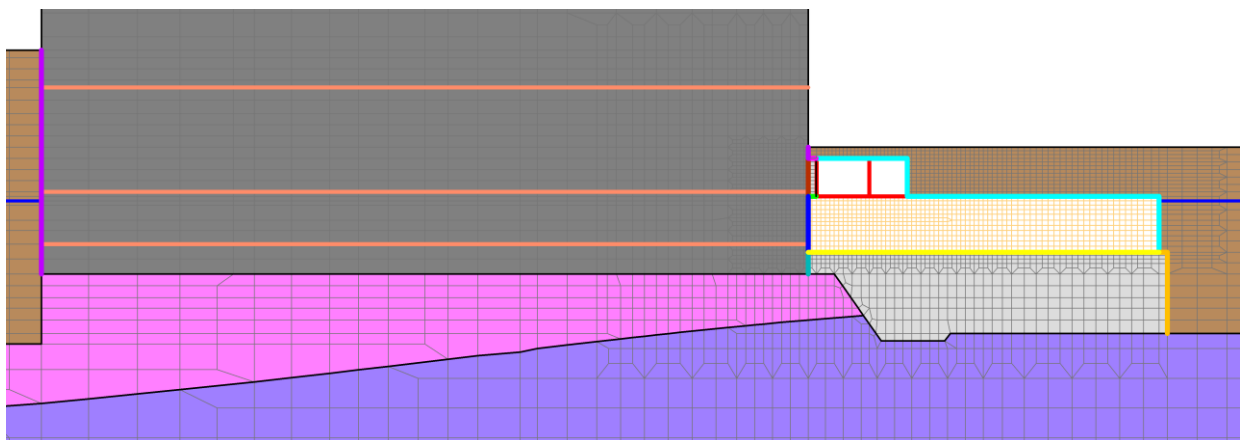
図 4-15 ジョイント要素の配置 (A-A断面)
参考 1-41

- : 岩盤 (第②速度層)
- : 岩盤 (第③速度層)
- : 埋戻土
- : MMR
- : タービン建物
- : 評価対象構造物
- : 地下水位
- : 平面応力要素
- : ジョイント要素












(全体図)

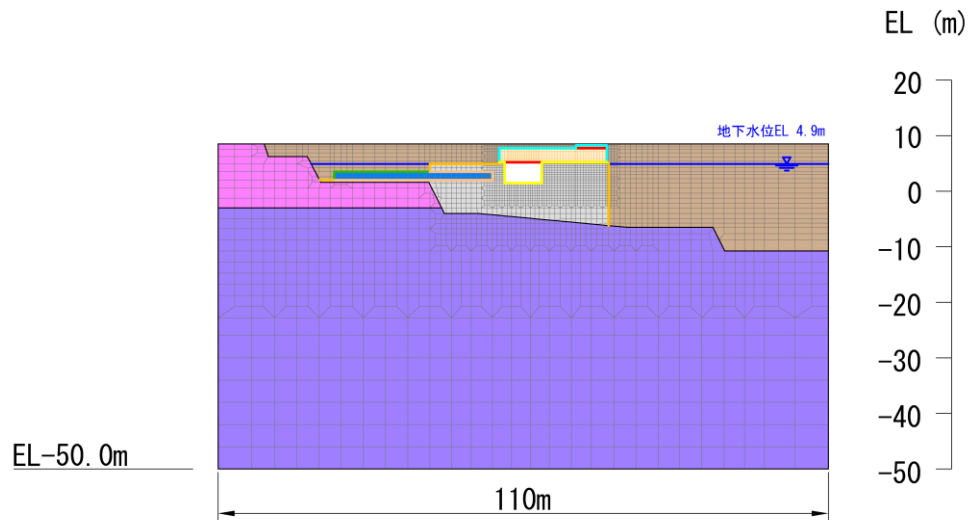
- : 構造物-埋戻土 ジョイント要素
- : 構造物-埋戻コンクリート ジョイント要素
- : 構造物-タービン建物 ジョイント要素
- : 構造物-MMR ジョイント要素
- : 埋戻コンクリート-タービン建物 ジョイント要素
- : 埋戻コンクリート-埋戻土 ジョイント要素
- : MMR-埋戻土 ジョイント要素
- : MMR-タービン建物 ジョイント要素
- : タービン建物-埋戻土 ジョイント要素



(拡大図)

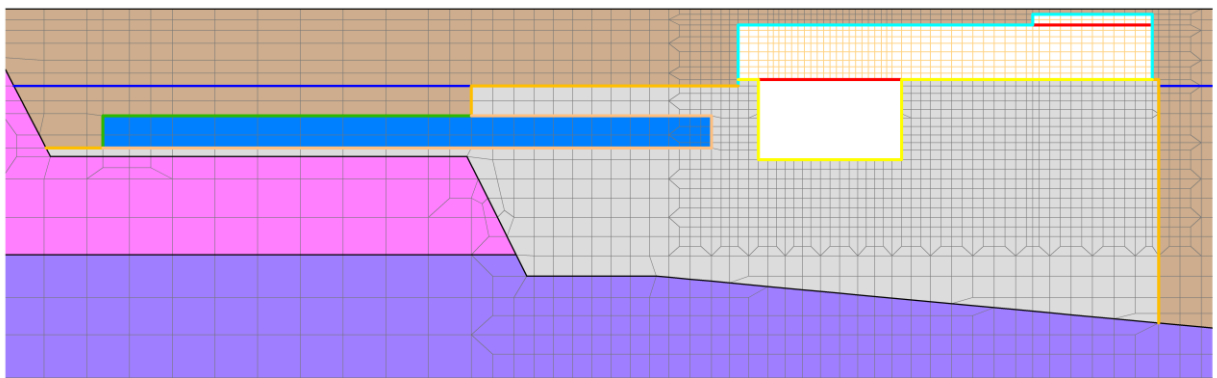
図 4-16 ジョイント要素の配置 (B-B断面)

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



(全体図)

- | | | | |
|---|---------------------|---|---------------------|
|  | : 構造物-埋戻土 ジョイント要素 |  | : 排気筒基礎-MMR ジョイント要素 |
|  | : 構造物-MMR ジョイント要素 |  | : MMR-埋戻土 ジョイント要素 |
|  | : 排気筒基礎-埋戻土 ジョイント要素 | | |



(拡大図)

図 4-17 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 4-18 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

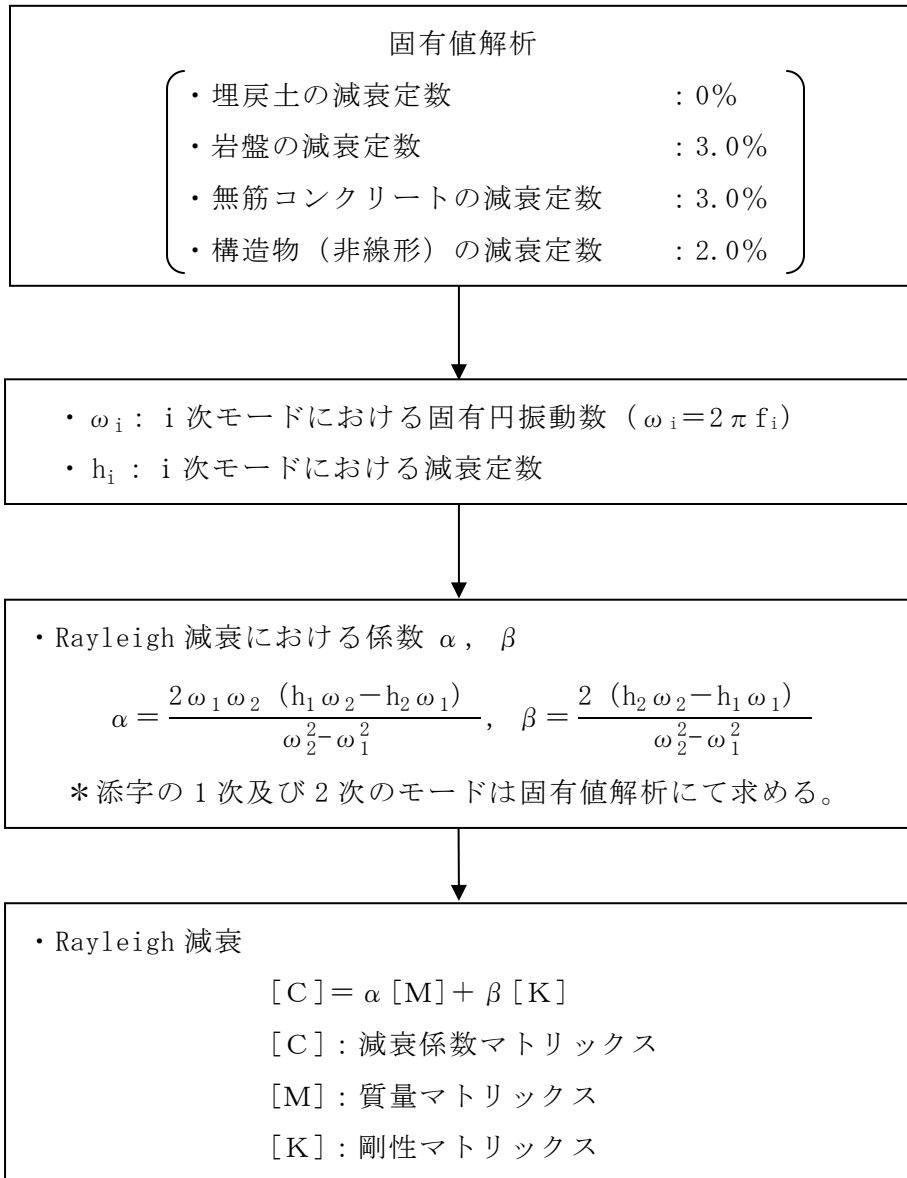


図 4-18 Rayleigh 減衰の設定フロー

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。

なお、各断面における固有値解析結果、固有値解析におけるモード図及び固有値解析結果に基づき設定した Rayleigh 減衰については、追而とする。

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、永久荷重（常時荷重）及び偶発荷重（地震荷重）を抽出し、それぞれを組合せて設定する。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（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 4-4 に示す。

表 4-4 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）に作用する機器・配管系の荷重一覧を表 4-5 に、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 4-6 に、荷重図を図 4-19 示す。

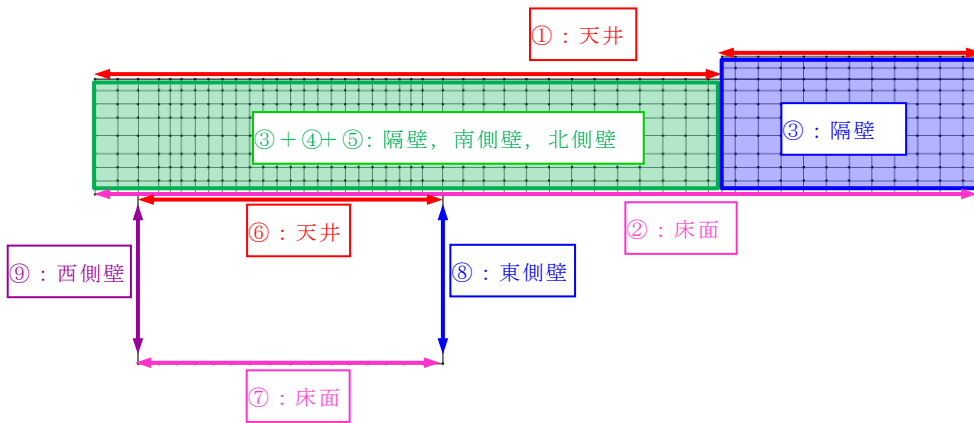
表 4-5 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の機器・配管系の荷重一覧

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	⑤北側壁
屋外配管ダクト (タービン建物～ 排気筒)	1.334 (2.019kN/m ²)*	0.737	3.582	1.117	2.522

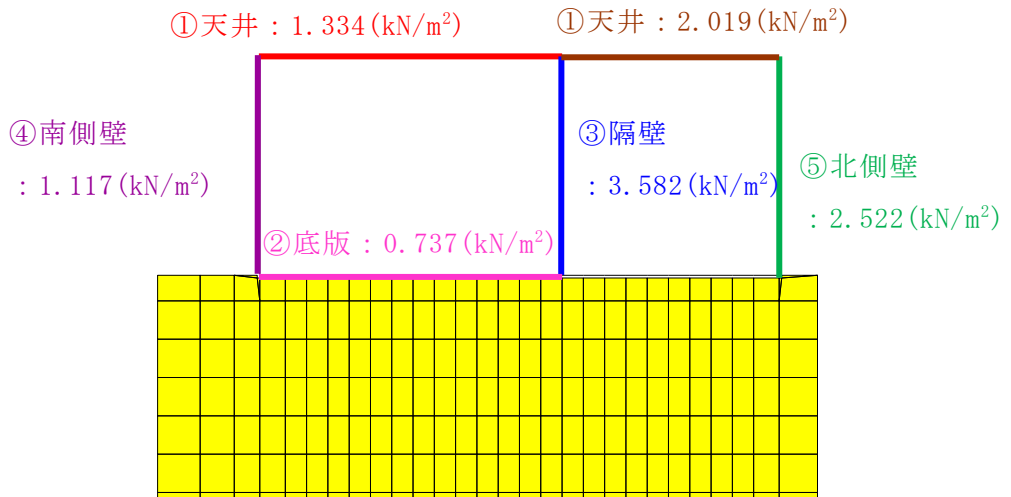
注記*：隔壁より北側の屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）頂版には括弧内の値を作用させる。

表 4-6 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の機器・配管系の荷重一覧

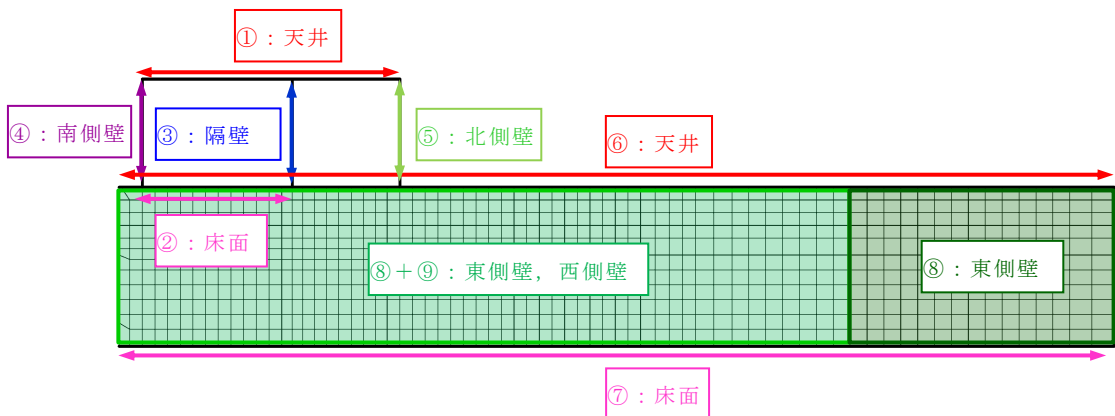
対象構造物	配管敷設面における単位面積あたりの質量 (kN/m ²)			
	⑥天井	⑦床面	⑧東側壁	⑨西側壁
屋外配管ダクト (タービン建物～ 放水槽)	1.180	3.581	0	0.247



EW方向：(C-C断面)
配管荷重設定概要



NS方向：(A-A断面)



NS方向：(B-B断面)
配管荷重設定概要

図 4-19 解析用機器・配管荷重図
参考 1-49

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、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。

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

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「5.2 構造部材の健全性に対する評価結果」より、曲げ・軸力系及びせん断破壊に対する照査において、最も厳しい地震動における基本ケース及び地盤物性のばらつきを考慮した解析ケースの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）と一体構造であることを踏まえ、複雑な構造における立体的な作用荷重を精緻に評価するため、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～排気筒）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～排気筒）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。3次元構造解析モデルにおける照査範囲を示したモデル概念図を図5-1に、各部材の要素座標系を図5-2に示す。

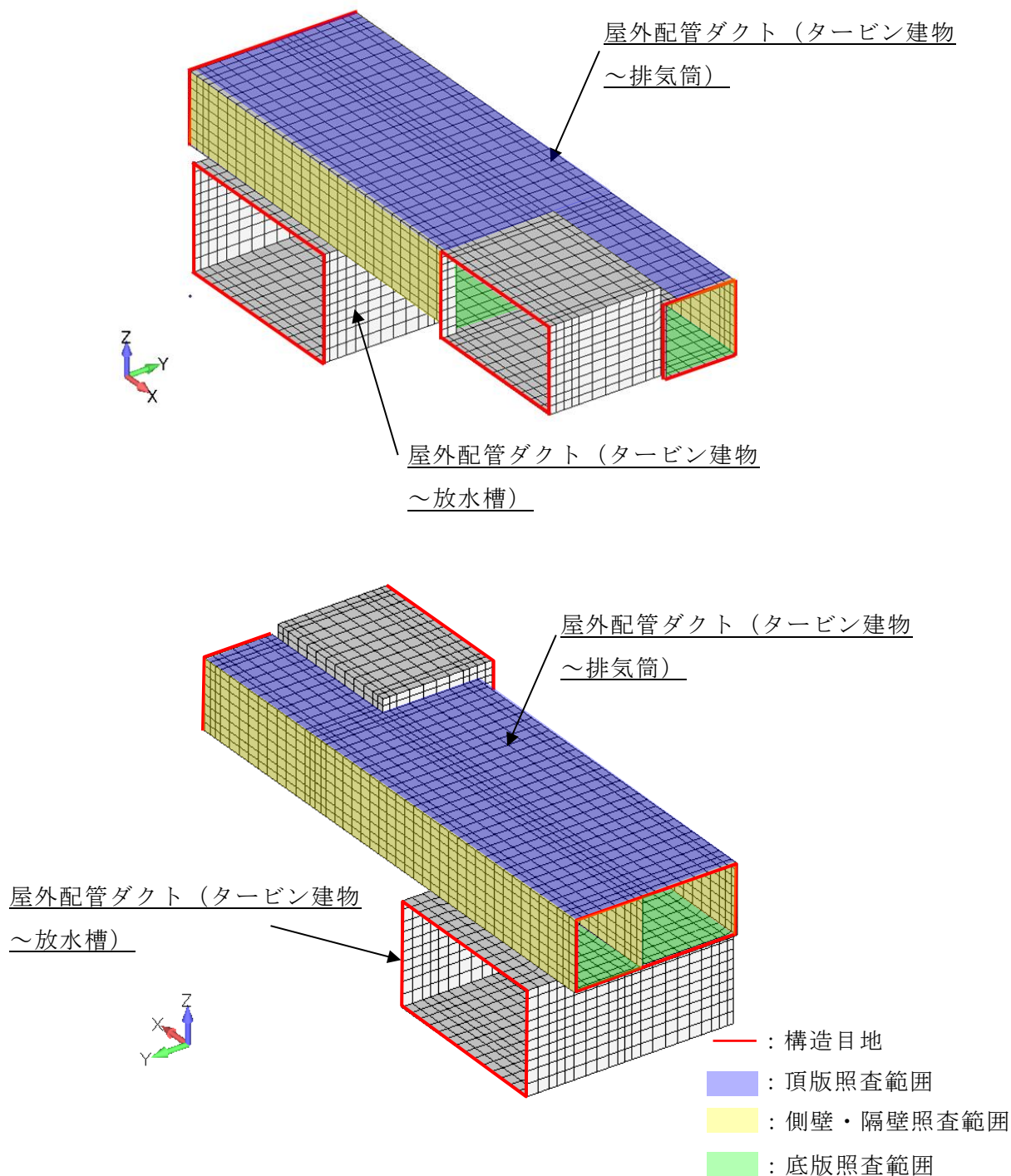


図5-1 3次元構造解析モデルの概念図

参考1-53

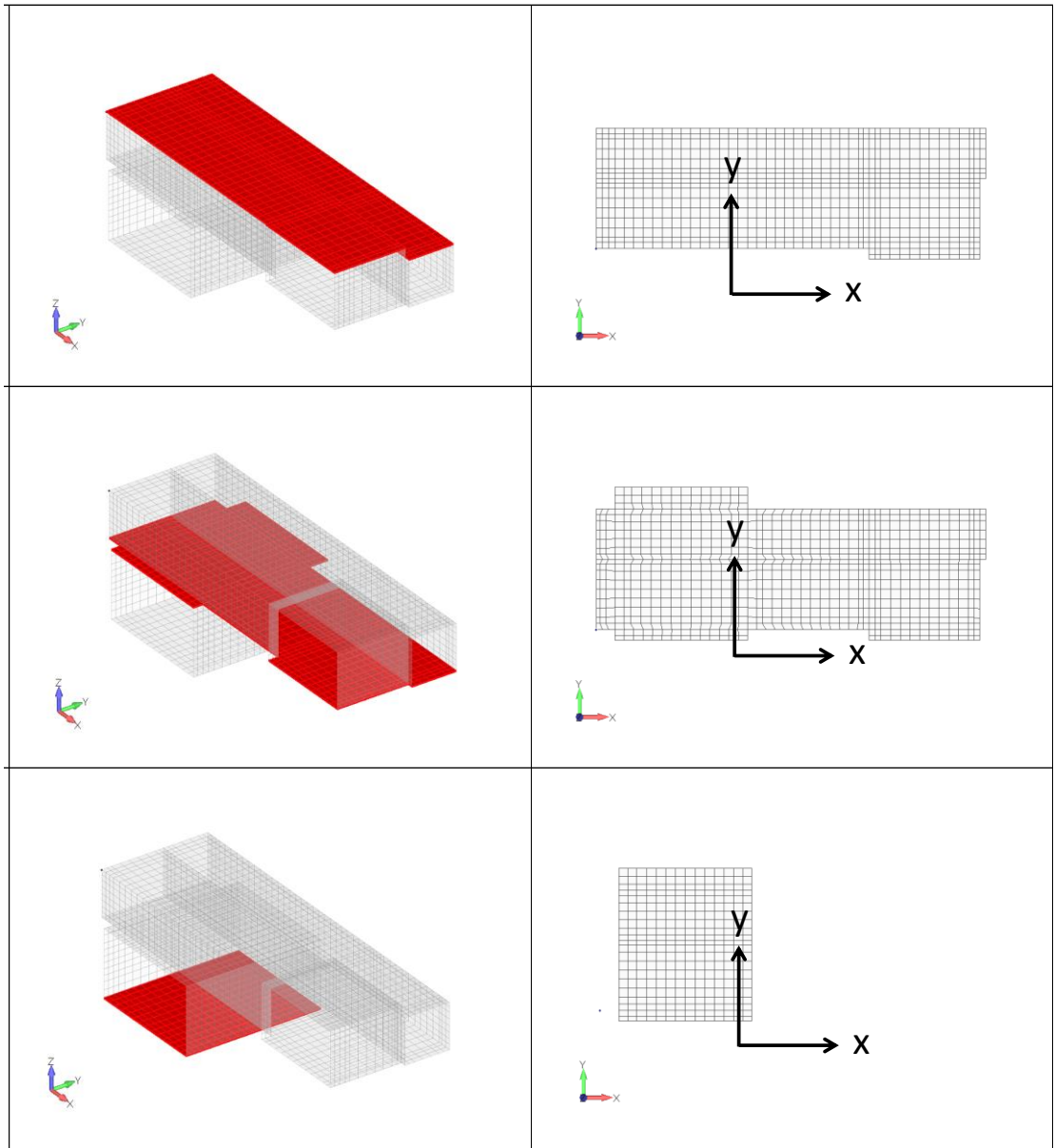


図 5-2 (1) 頂版・底版の要素座標系

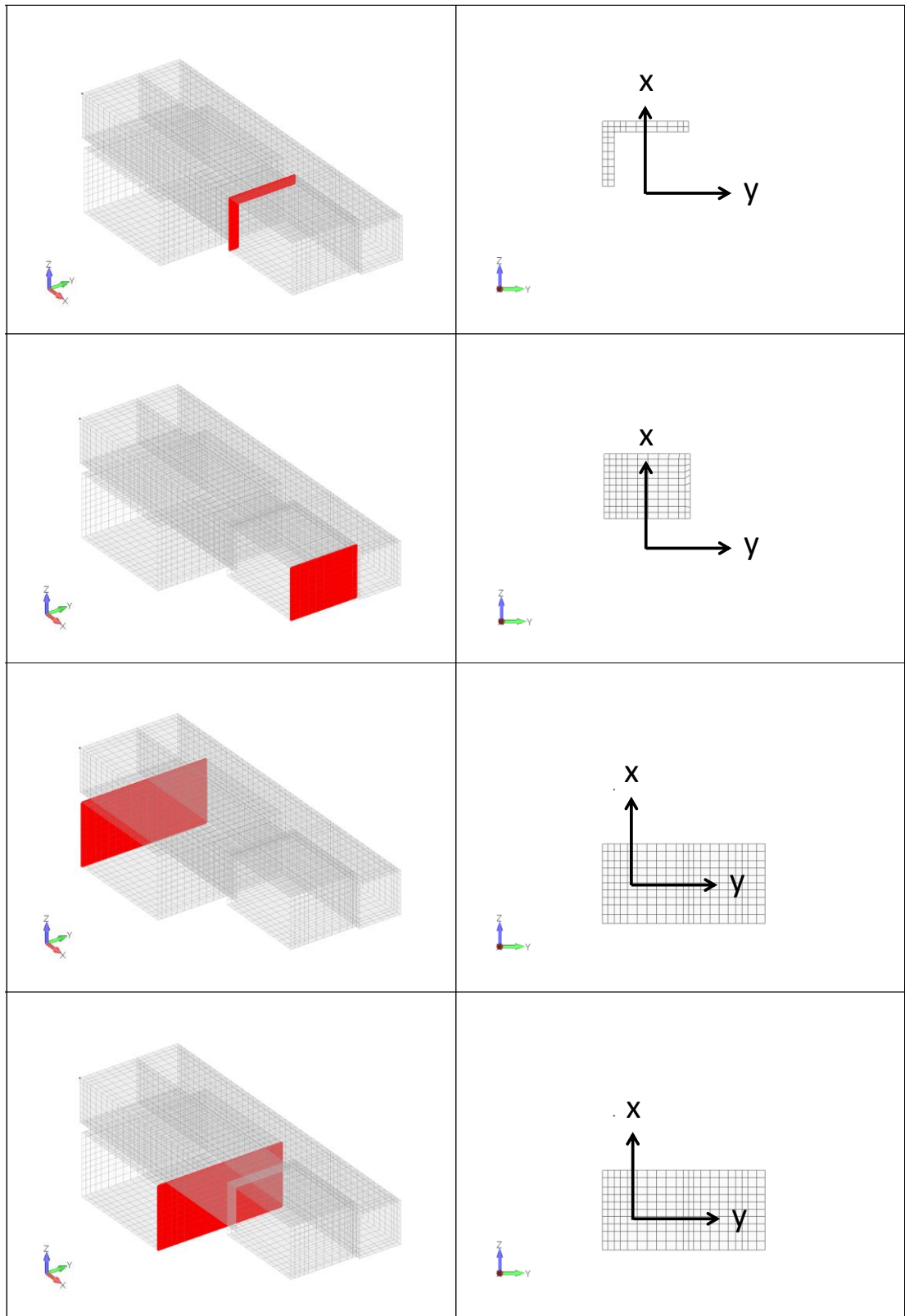


図 5-2 (2) 側壁の要素座標系

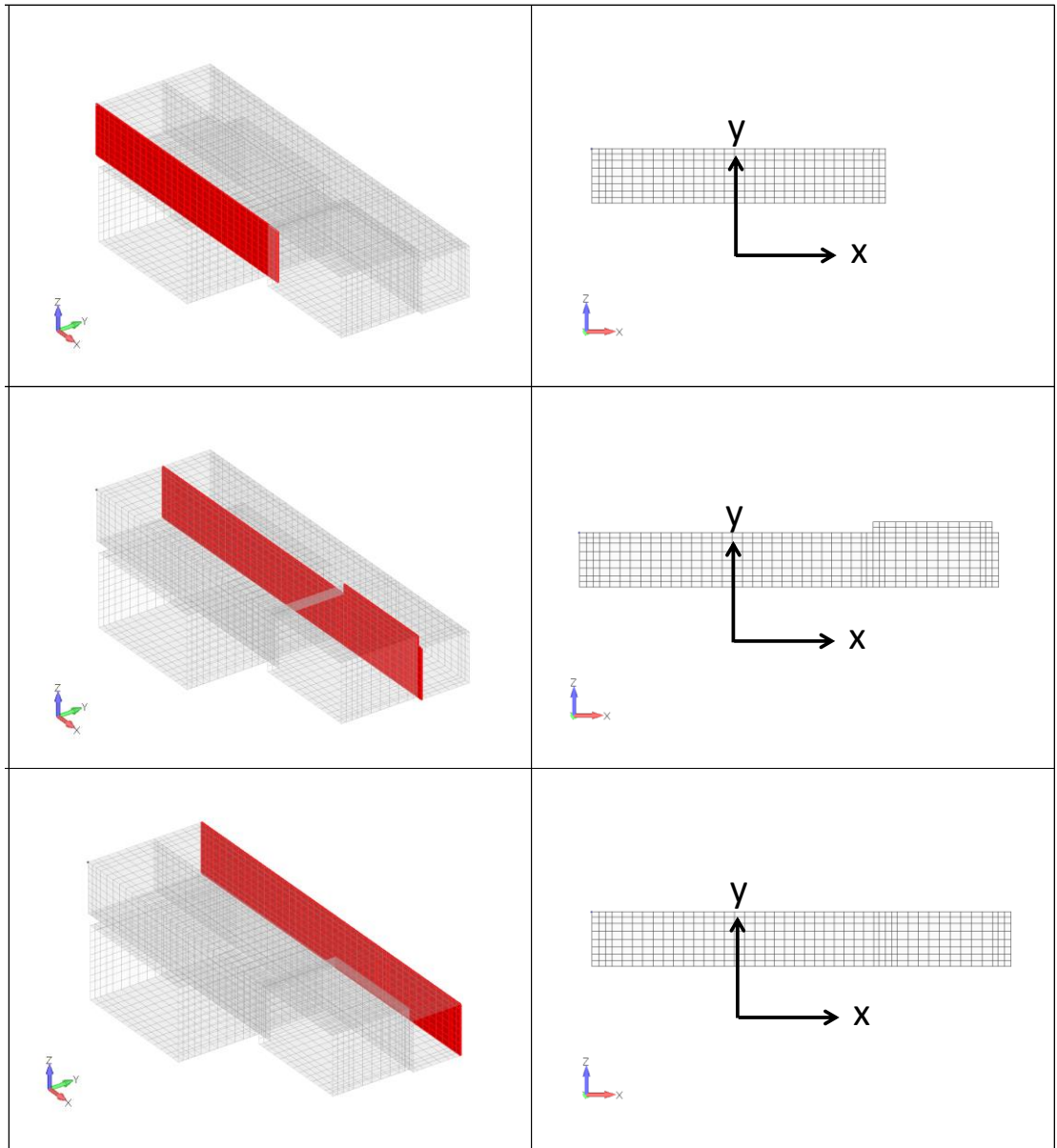


図 5-2 (3) 側壁の要素座標系

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、剛域を設定しないことで、構造物全体のせん断剛性が相対的に小さくなり、その結果、変形の応答値が過大となるため、変形による性能照査の体系では安全側の結果となることから、3次元構造解析において基本的には剛域を設定しない。

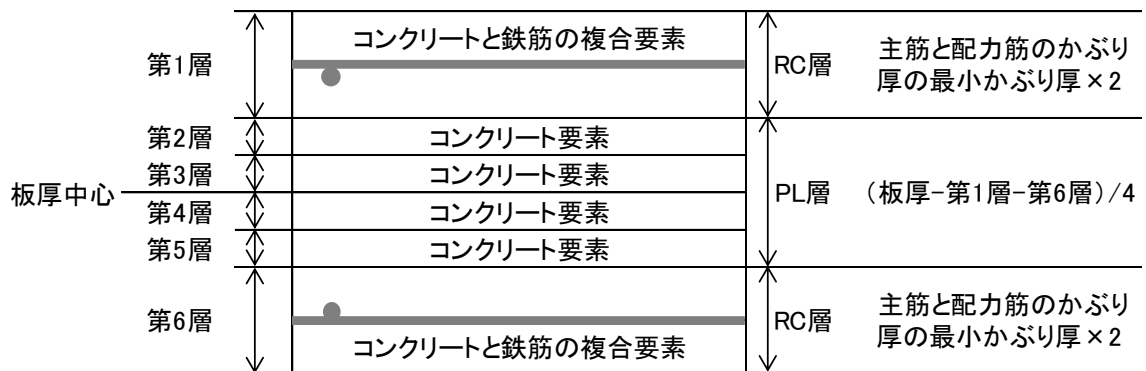
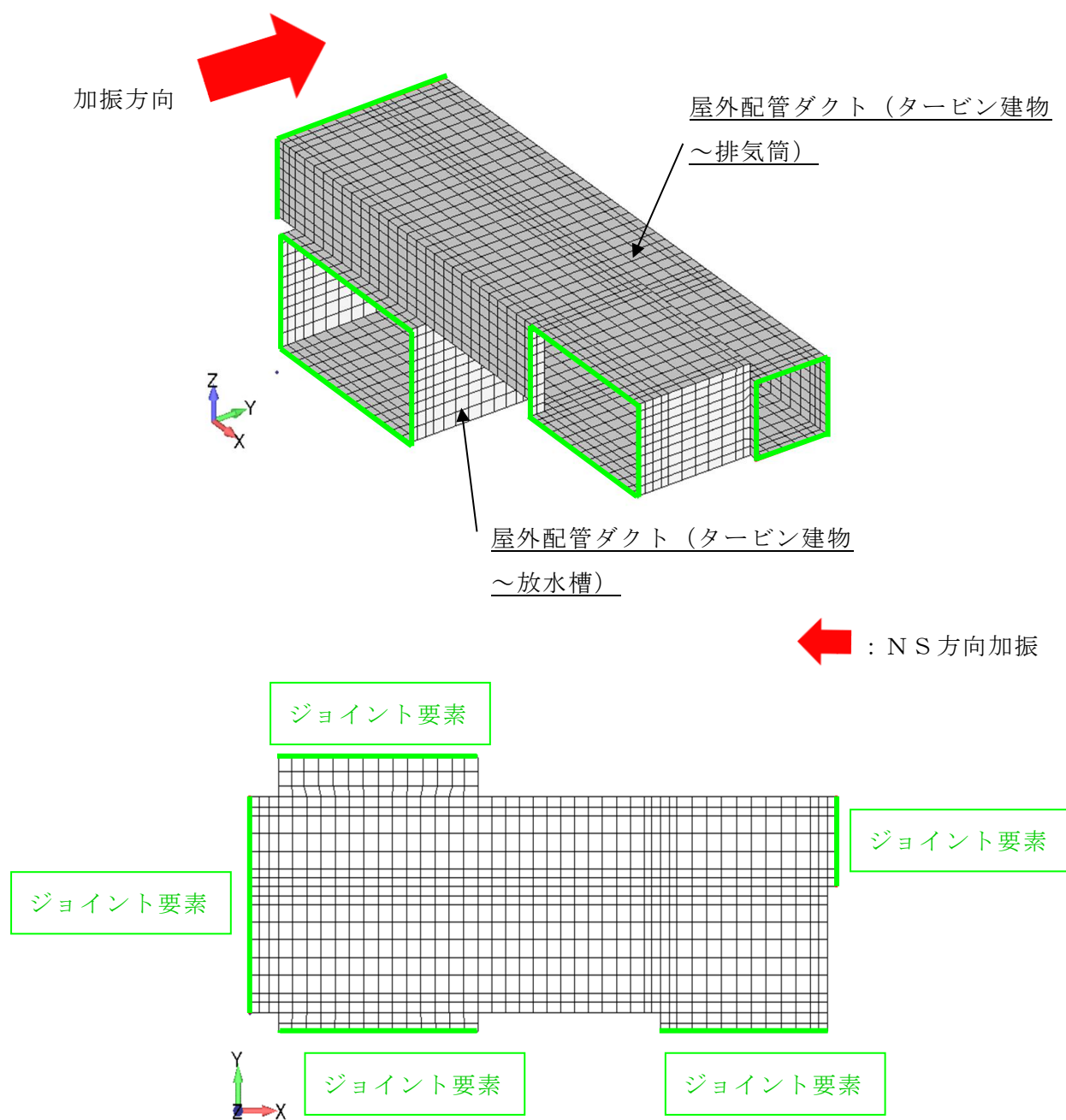


図 5-3 非線形シェル要素の概念図

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。ジョイント要素は構造目地の挙動を考慮し，軸方向のみにジョイント要素を設定し，引張力に対しては剥離を考慮する。

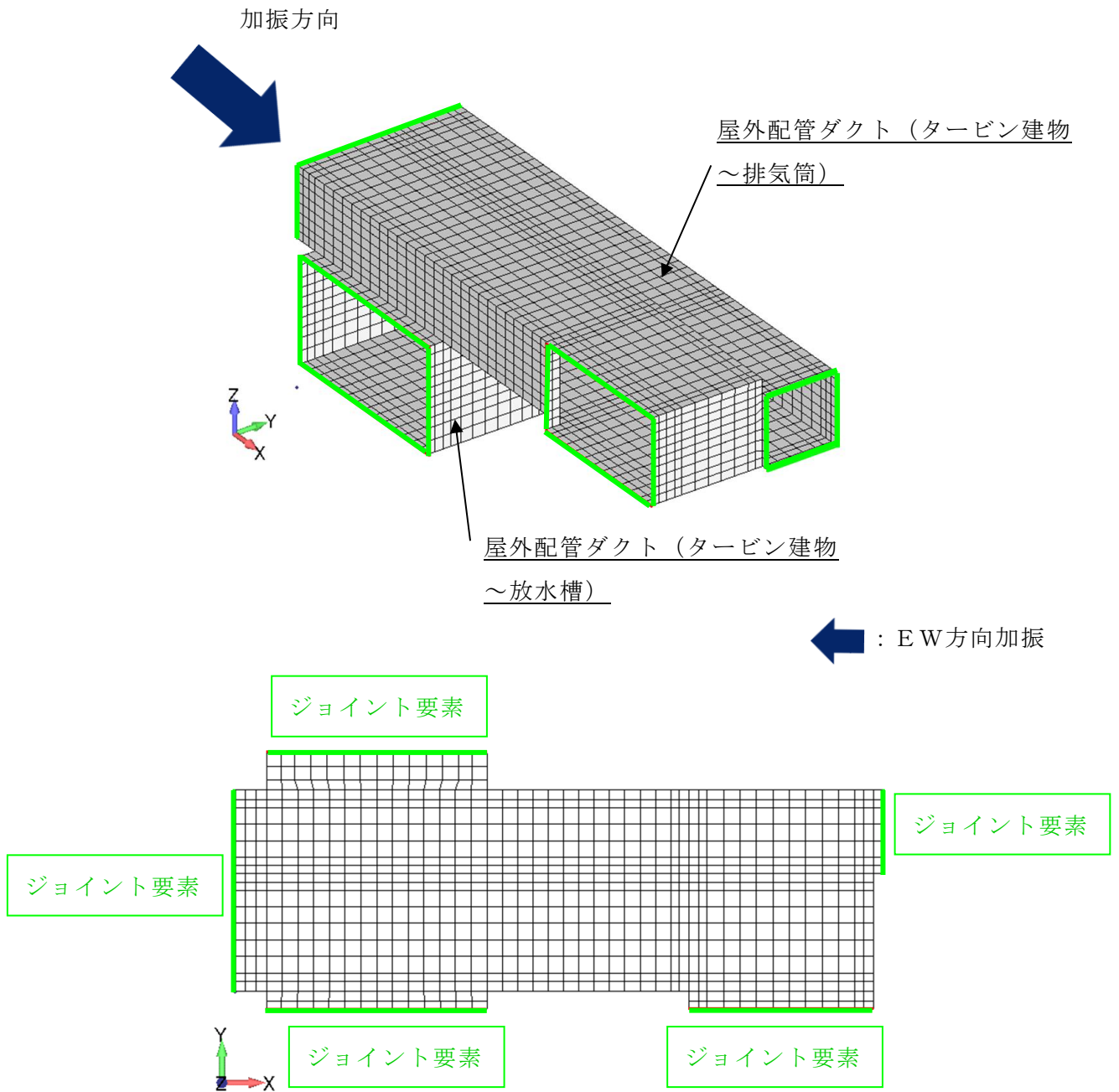
境界条件の概念図を図5-5に，ジョイント要素の設定条件を表5-1に示す。



（NS方向加振）

図5-5(1) 境界条件の概念図

参考1-58



(E W方向加振)

図 5-5(2) 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方向荷時には、荷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）の側面は常時土圧を作用させる。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。

注記*：非線形ばねに剥離、すべりを考慮しないばねとする。

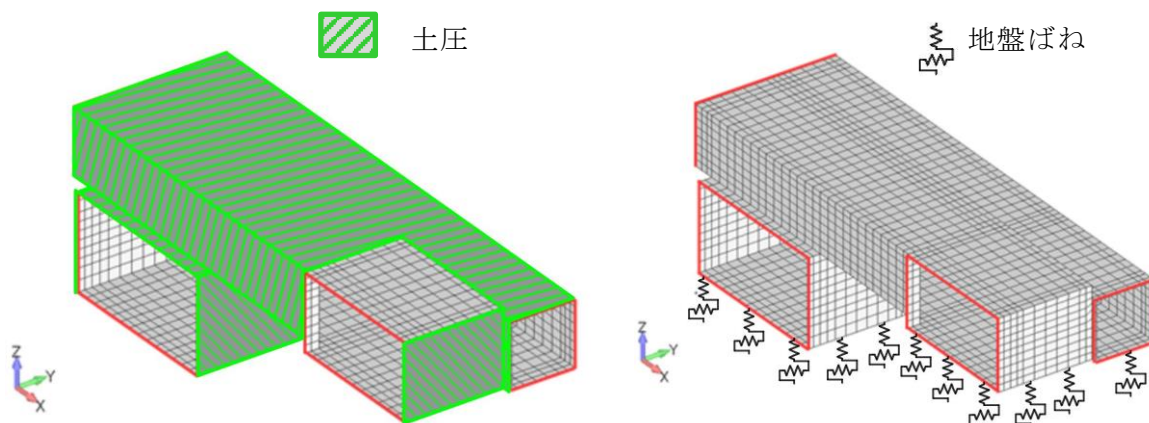


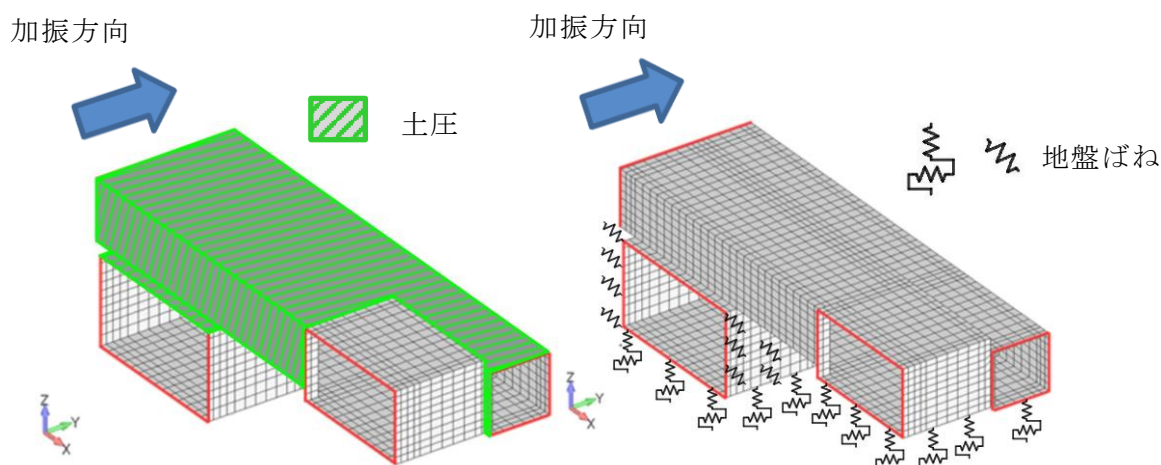
図5-6 地盤ばねの設定イメージ

b. 地震時

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）にとって明確な弱軸方向となる NS 方向加振について，屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の側面は地震時増分土圧を作用させ，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，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。



(NS 方向加振)

図 5-7 地盤ばねの設定イメージ

(2) 2方向载荷時

a. 常時

1方向载荷時と同様に、側面は常時土圧を作用させ、底面においては、線形の地盤ばね*でモデル化する。

注記*：非線形ばねに剥離，すべりを考慮しないばねとする。

b. 地震時

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の側面は地震時増分土圧を作用させ、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方向载荷時（NS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、地震時増分土圧を作用させる。

地盤ばねの設定イメージを図5-8に示す。

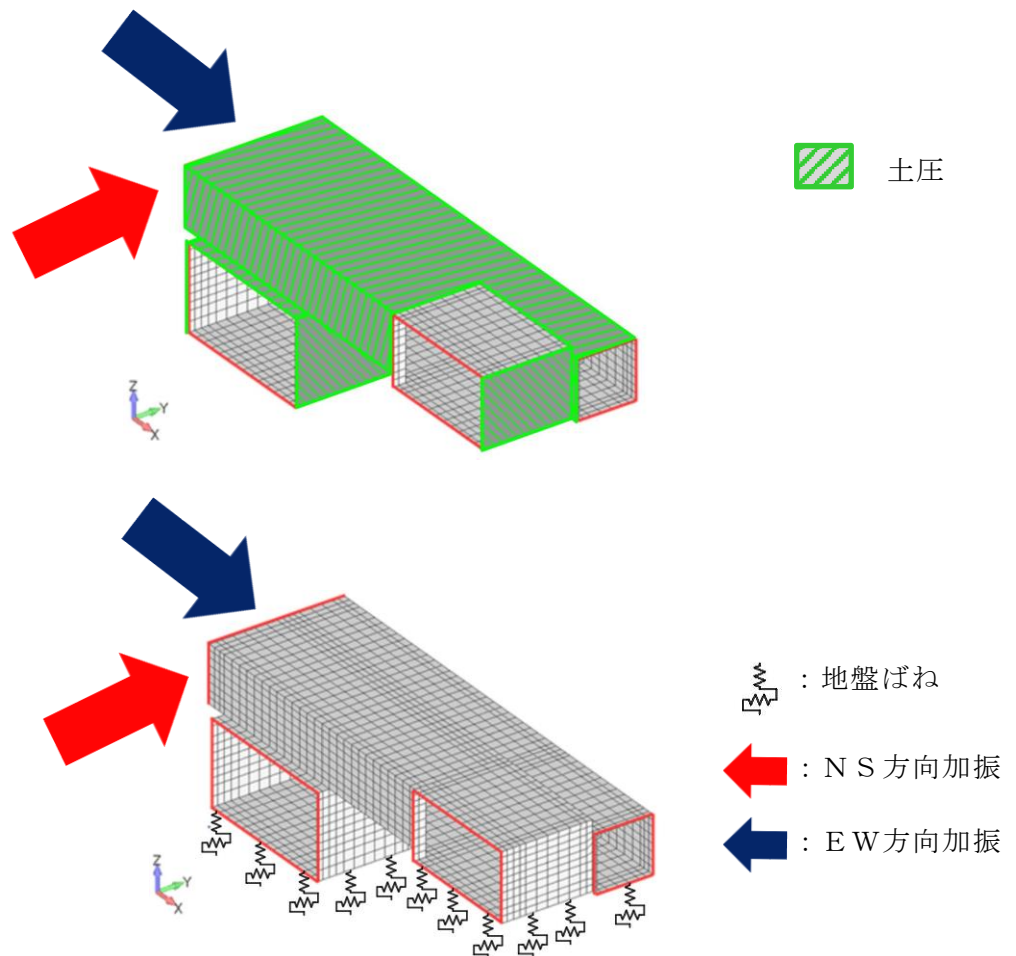


図5-8 地盤ばねの設定イメージ
参考 1-63

(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)

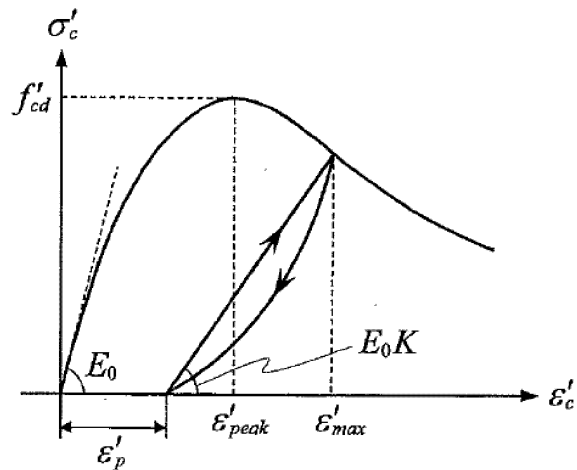
5.2.4 材料の非線形特性

(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)

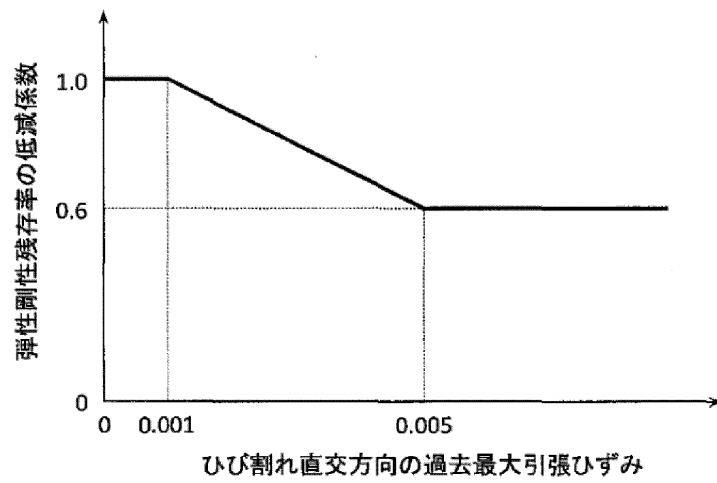
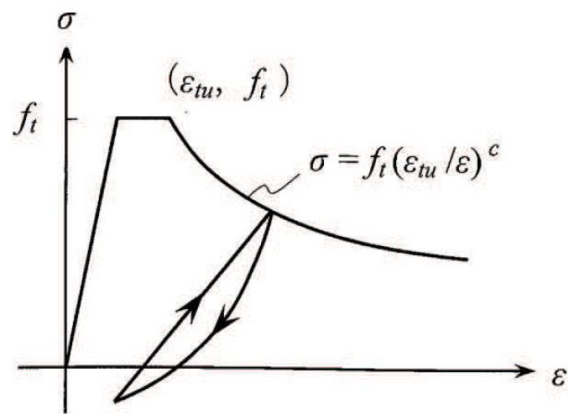


図 5-10 弾性剛性残存率の低減係数
 (「コンクリート標準示方書 2017」より引用)

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。



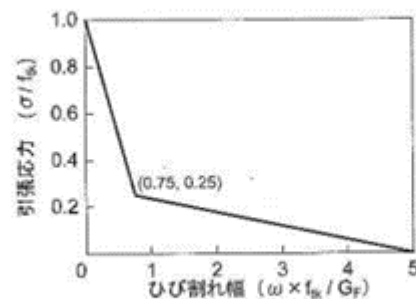
ここに、 f_t : 引張強度

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。



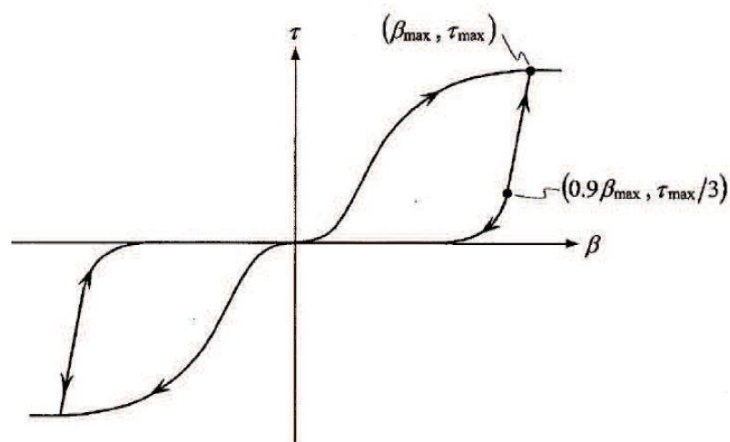
解説 図 5.3.4 引張軟化曲線

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

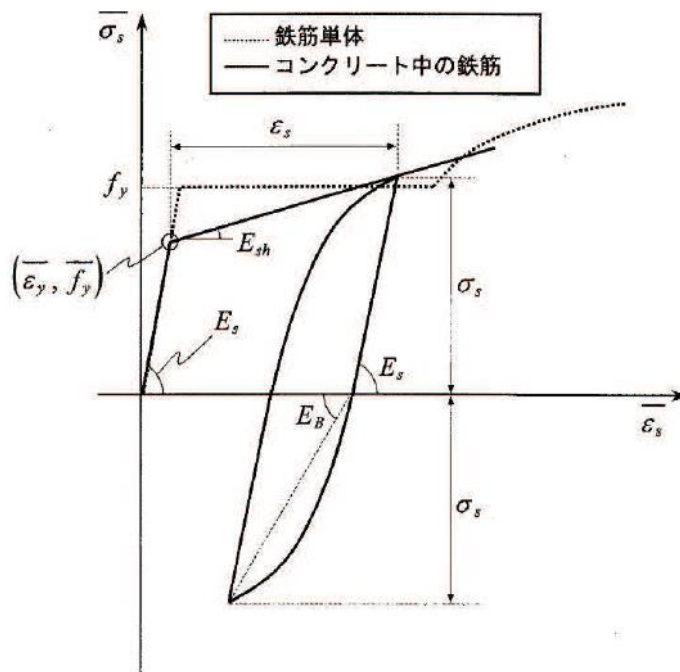
τ_{max} : 除荷開始時せん断応力

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。



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

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

ε_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～排気筒）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。

一体化部の特徴として、上部に屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）、下部に屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）が直交する方向に位置しているため、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の変位及び荷重に着目した時刻から照査時刻を選定するだけでなく、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）の変形方向に着目した時刻についても、照査時刻として選定することとした。

表 5-2 に照査時刻の選定の考え方を示す。また、照査時刻における荷重抽出概念図を図 5-16～図 5-19 に示す。

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 照査時刻の選定の考え方

照査時刻	損傷モード	着目する構造物	変形方向*1	着目部位	荷重抽出時刻	抽出応答値
時刻 1-1	曲げ・軸力系の破壊	屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	北側	はり要素壁（面外）	頂底板間の相対変位最大時刻	隅角部節点の応答変位を用いて回転成分を除去した層間変位
時刻 1-2			南側			
時刻 2-1*2	せん断破壊	屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）	北側	はり要素壁（面外）	各側壁の水平荷重最大時刻	側面地盤水平土圧と側壁の慣性力の積算値
時刻 2-2*2			南側			
時刻 3-1*3	せん断破壊	屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）	北側	平面応力要素壁（面内）	頂底板間の相対変位最大時刻	隅角部節点の応答変位を用いて回転成分を除去した層間変位
時刻 3-2*3			南側			

注記*1：構造物の変形方向は、層間変位の符号確認により実施する。

層間変位の算出概念図を図 5-15 に示す。

*2：時刻 2-1 は、南側壁の水平荷重最大時刻とし、時刻 2-2 は、北側壁の水平荷重最大時刻とする。

*3：時刻 3-1 及び時刻 3-2 は、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）をモデル化する B-B 断面のみが対象

$$\delta_s = \frac{b(\Delta x_1 + \Delta x_2 - \Delta x_3 - \Delta x_4) + h(-\Delta y_1 + \Delta y_2 - \Delta y_3 + \Delta y_4)}{2b}$$

ここで、 δ_s : せん断変形量
 b : 構造物の幅
 h : 構造物の高さ
 $\Delta X, \Delta Y$: X 方向及び Y 方向の変位

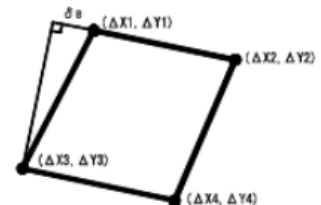
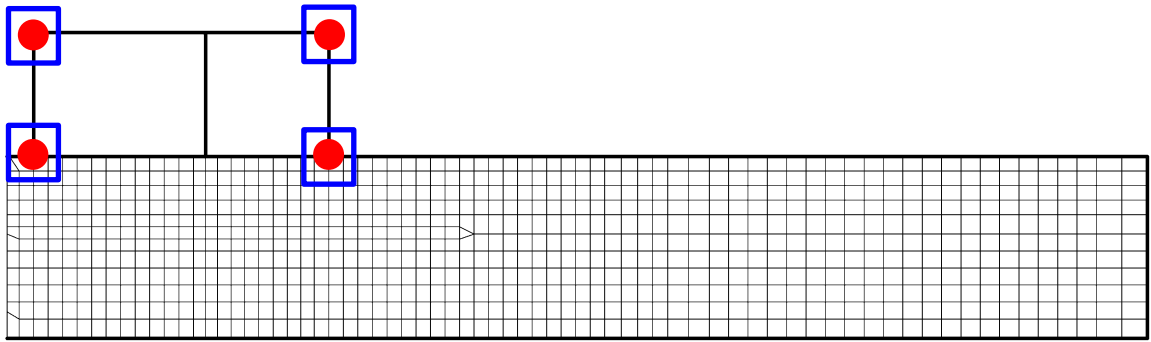


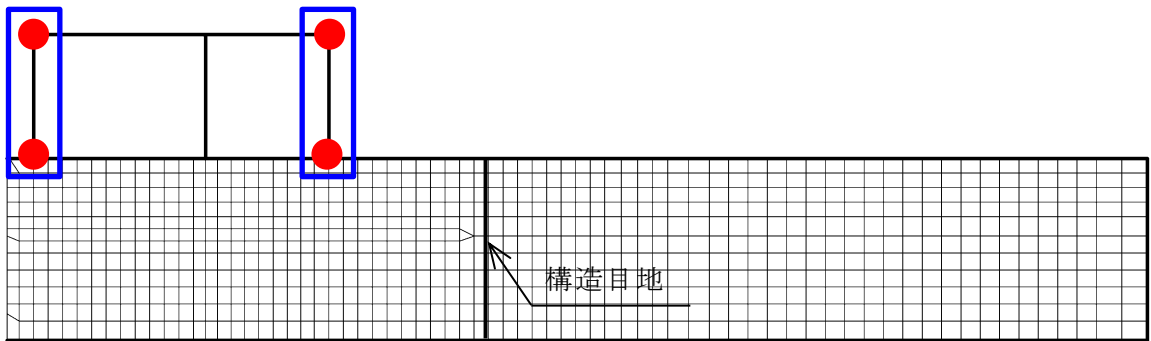
図 5-15 層間変位の算出概念図



● : 層間変位算出のための着目節点

□ : 頂底版間の相対変位算出のための着目節点

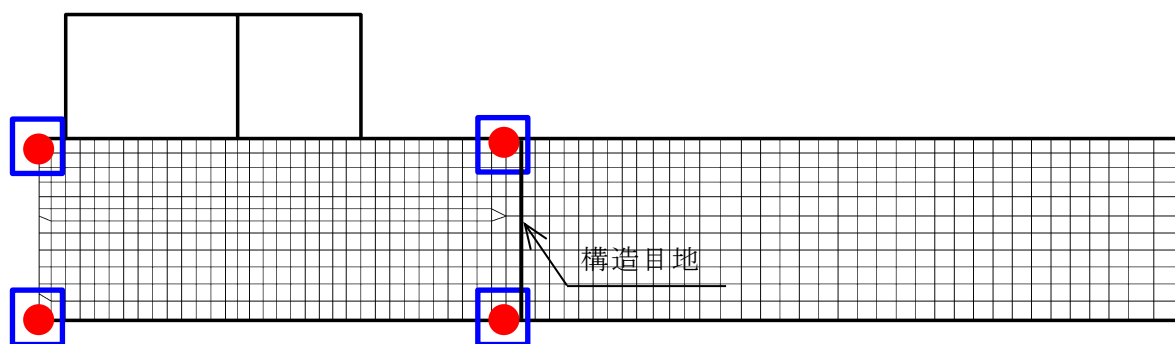
図 5-16 時刻 1-1 及び 1-2 における荷重抽出概念図



● : 層間変位算出のための着目節点

□ : 各側壁の水平荷重算出のための着目要素

図 5-17 時刻 2-1 及び 2-2 における荷重抽出概念図



- : 層間変位算出のための着目節点
- : 頂底板間の相対変位算出のための着目節点

図 5-18 時刻 3-1 及び 3-2 における荷重抽出概念図

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5-19に示す。常時荷重は、表4-4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
地震時増分土圧・地震時増分水圧		土圧・水圧	作用位置
周面せん断力		土圧	作用位置

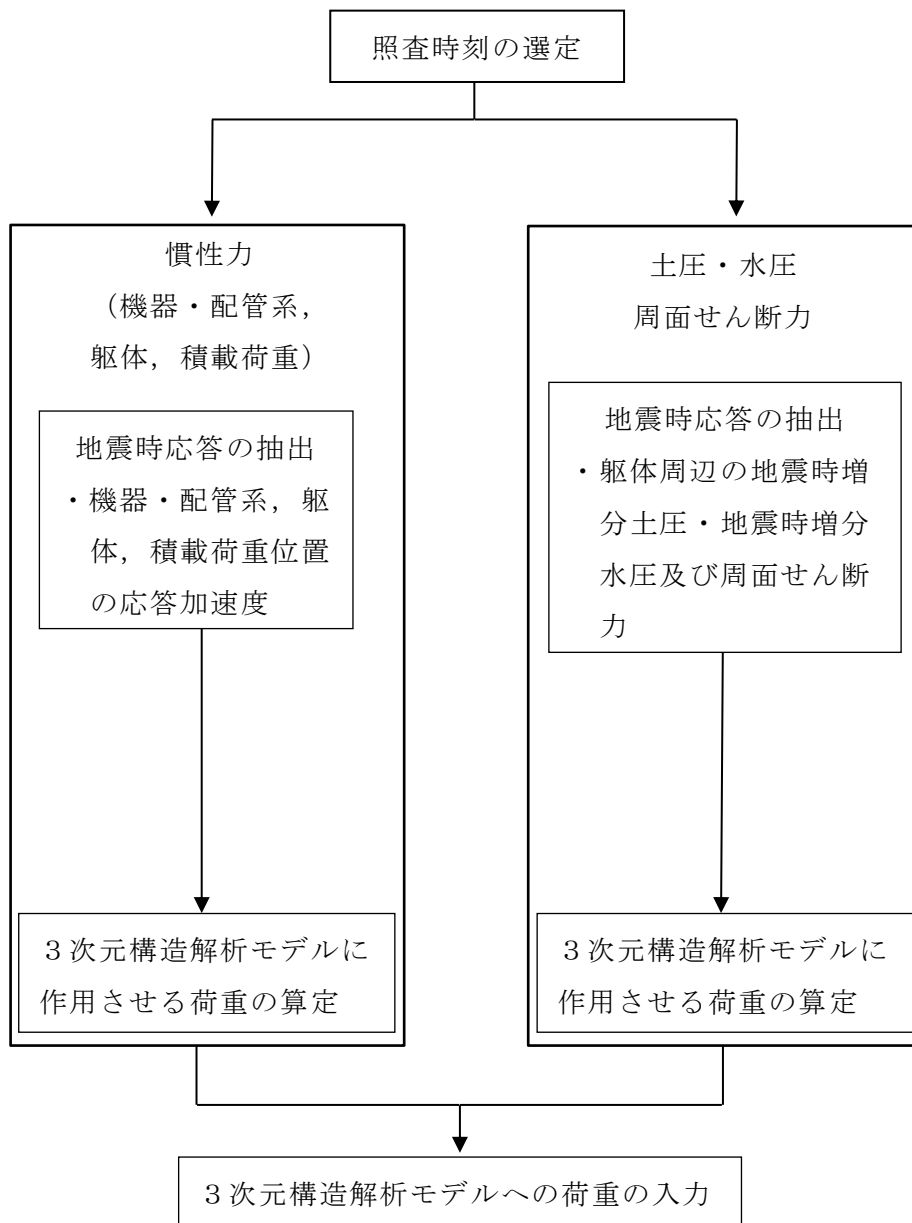


図 5-19 各入力荷重の算定フロー

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を躯体側面に作用させる。

また、外水圧は設計地下水位は、EL 4.9m に応じた静水圧を分布荷重で作用させる。屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）に設定した静止土圧の概念図を図 5-20 に、外水圧の概念図を図 5-21 に示す。なお、静止土圧及び外水圧は、奥行方向に一様に载荷する。

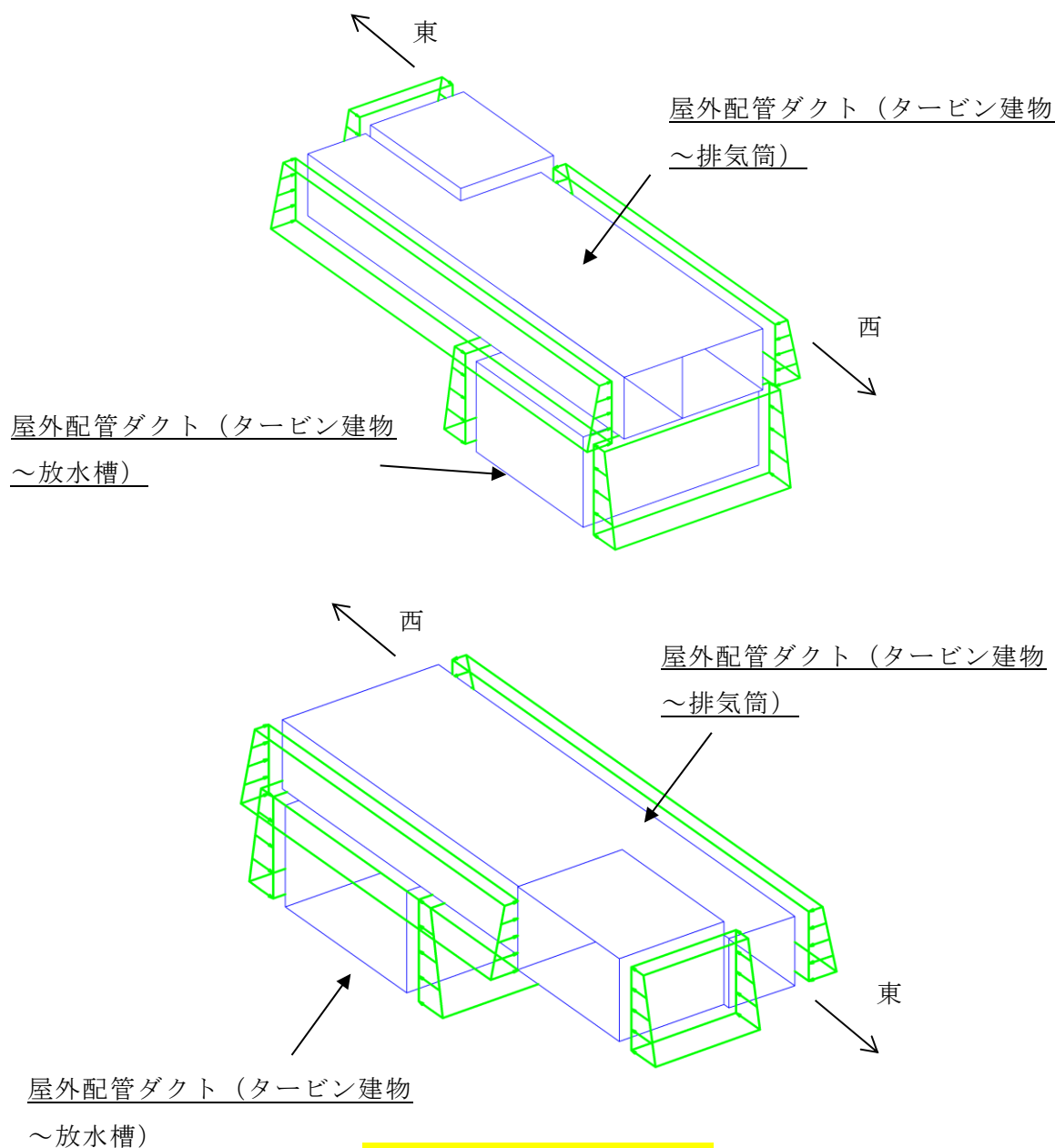


図 5-20 静止土圧の概念図

参考 1-80

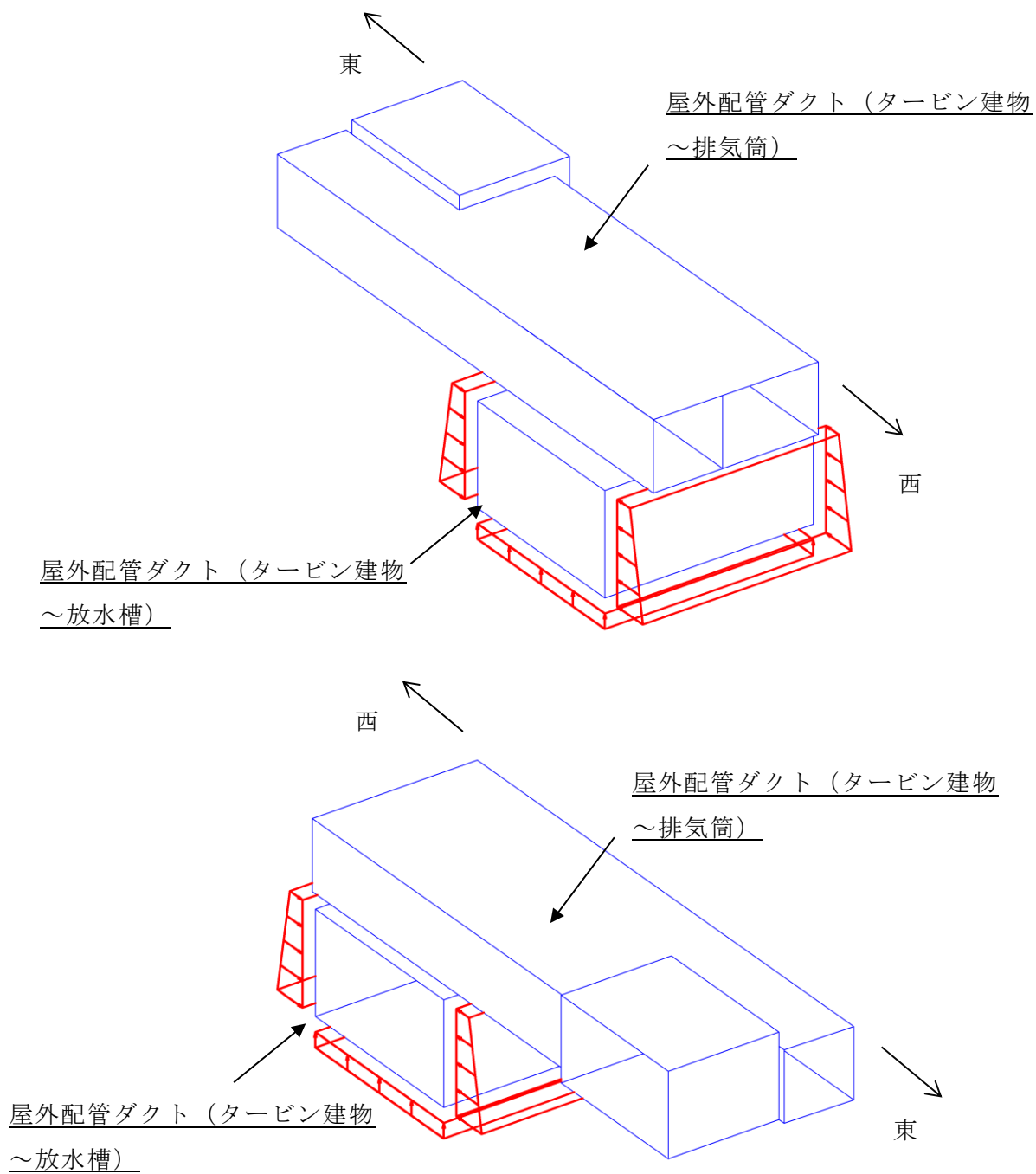
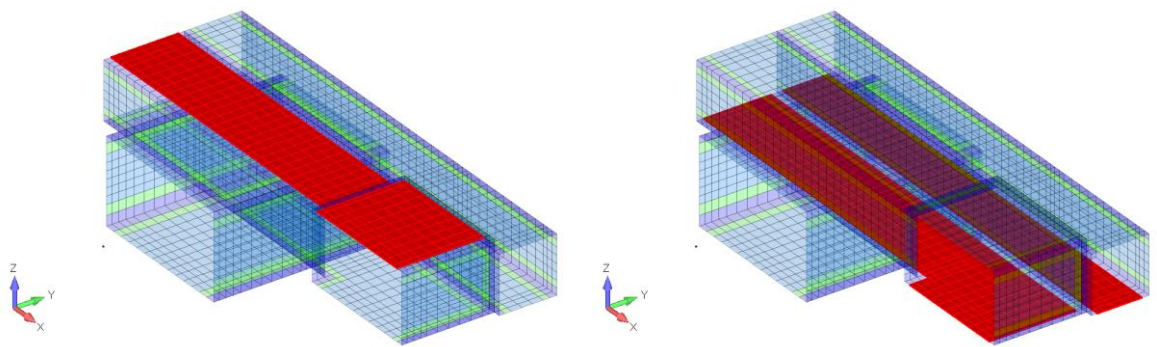


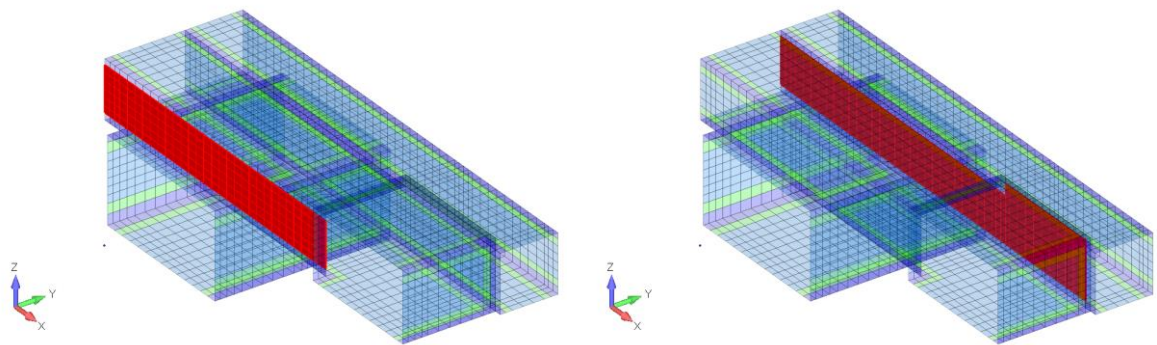
図 5-21 外水圧の概念図

(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 5-22 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 5-23 に示す。

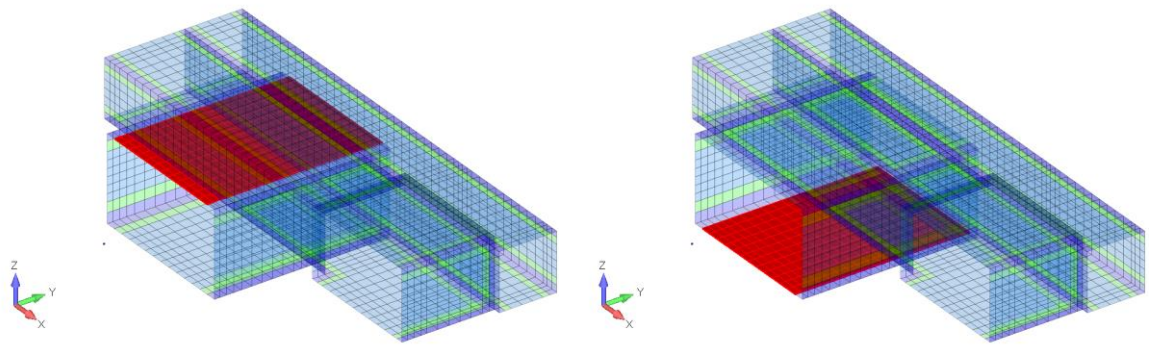


(頂版及び底面)

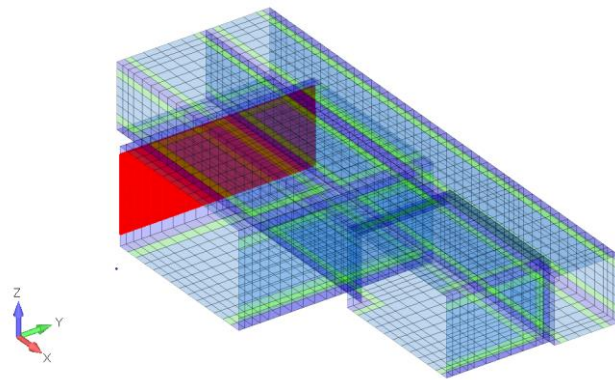


(南側壁及び隔壁)

図 5-22 機器・配管荷重図



(頂版及び底面)



(西側壁)

図 5-23 機器・配管荷重図

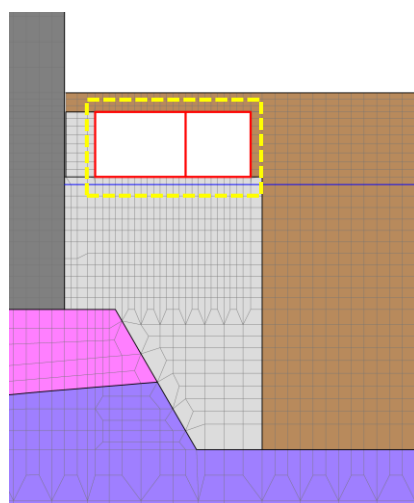
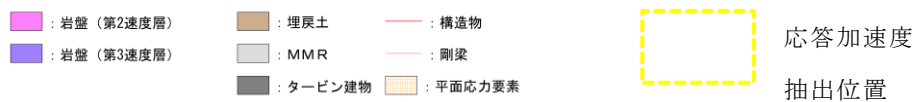
(4) 積載荷重

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。

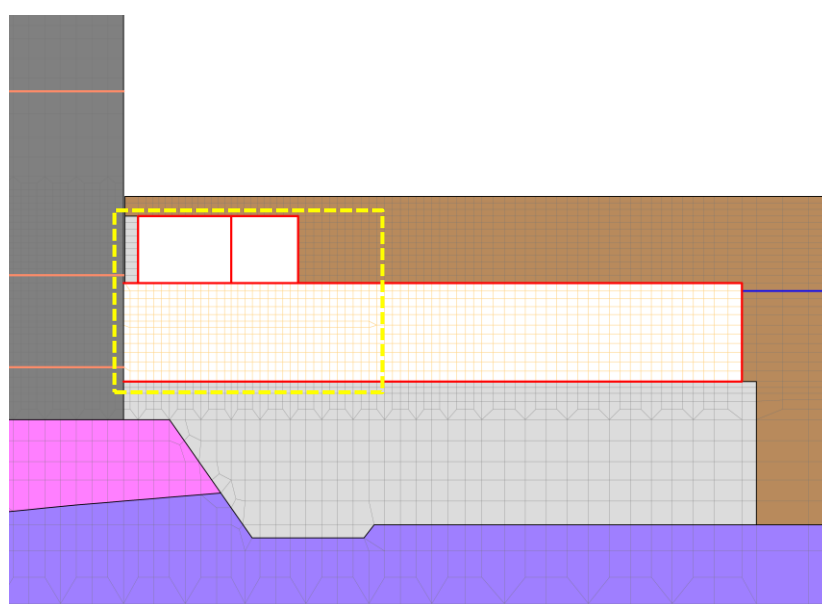
5.4.2 慣性力

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 5-24 に，3次元構造解析モデルに入力する慣性力の概念図を図 5-25 に示す。

算定した慣性力は，図 5-25 に示すとおり，3次元構造解析モデルに入力する。

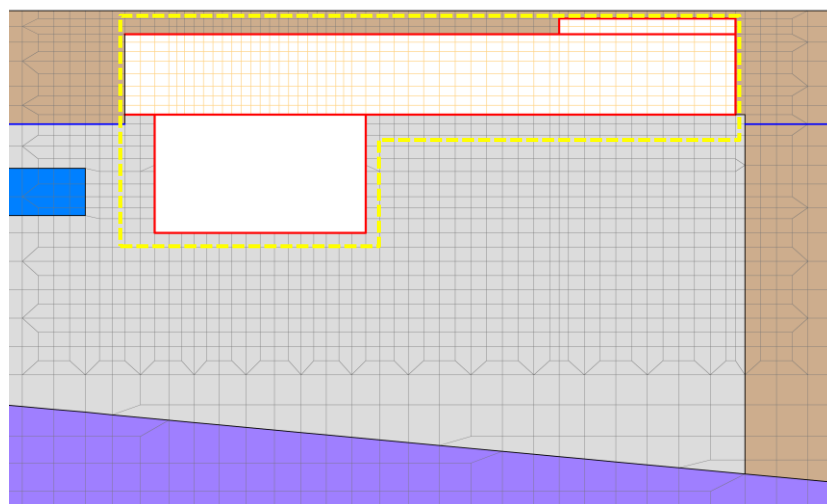
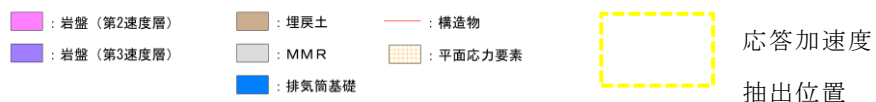


(NS 方向 : A - A 断面)



(NS 方向 : B - B 断面)

図 5-24 (1) 応答加速度の抽出位置
参考 1-84



(E-W方向：C-C断面)

図 5-24 (2) 応答加速度の抽出位置

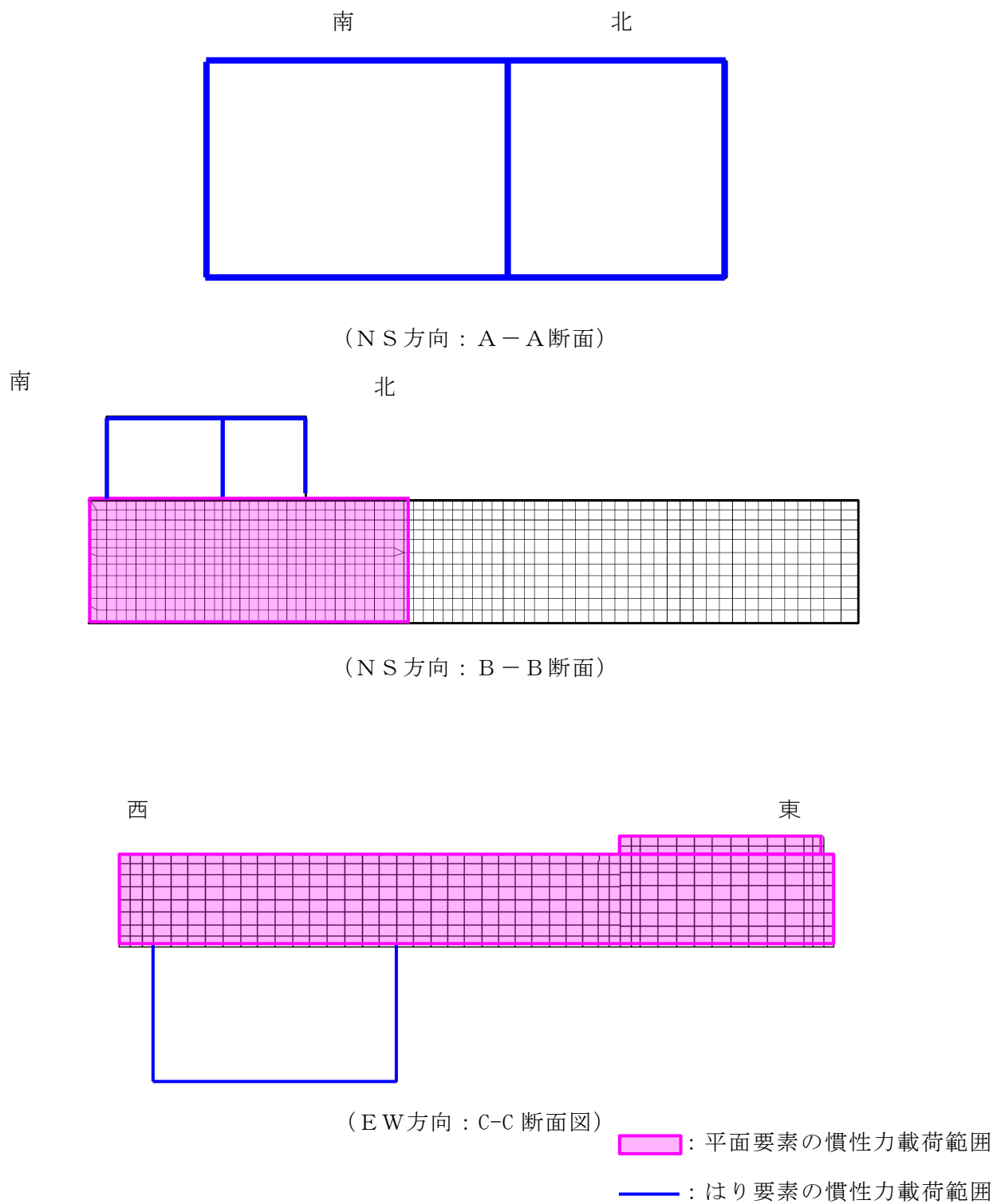


図 5-25 3次元構造解析モデルに入力する慣性力の概念図

5.4.3 地震時増分土圧・地震時増分水圧及び周面せん断力

躯体側面に作用する地震時増分土圧・地震時増分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。

地震時増分土圧は、地震応答解析より算定した土圧から、静止土圧を差し引いた値を3次元構造解析モデルに作用させる。

地震時増分水圧については、地震応答解析により地震時増分の水圧が算定されることから、地震応答解析より算定した水圧を地震時増分水圧として3次元構造解析モデルに作用させる。

また、周面せん断力は、常時応力解析にて構造物と埋戻土のジョイント要素のせん断剛性を考慮しないため、地震応答解析より算定した周面せん断力を、3次元構造解析モデルに作用させる。

地震時増分土圧・地震時増分水圧及び周面せん断力の抽出位置を図5-26に、地震時増分土圧・地震時増分水圧及び周面せん断力の概念図を図5-27に示す。

算定した地震時増分土圧・地震時増分水圧及び周面せん断力は、図5-27に示すとおり、3次元構造解析モデルに入力する。

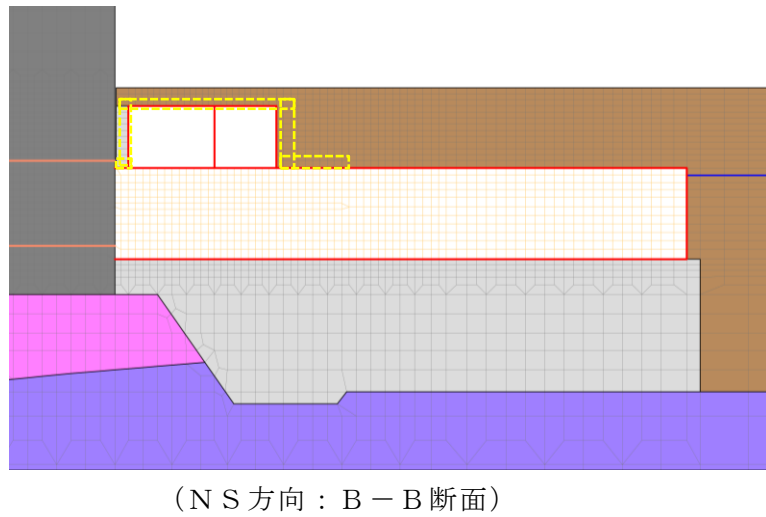
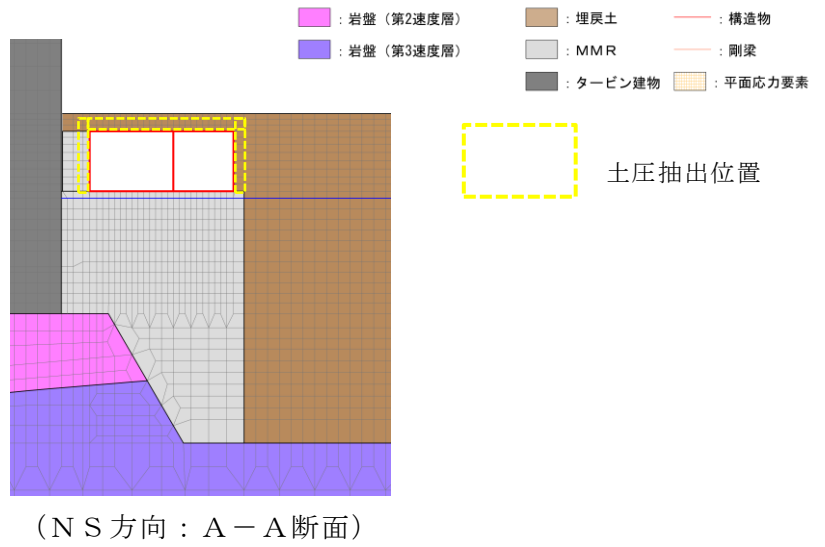


図 5-26 (1) 地震時増分土圧・地震時増分水圧及び周面せん断力抽出位置

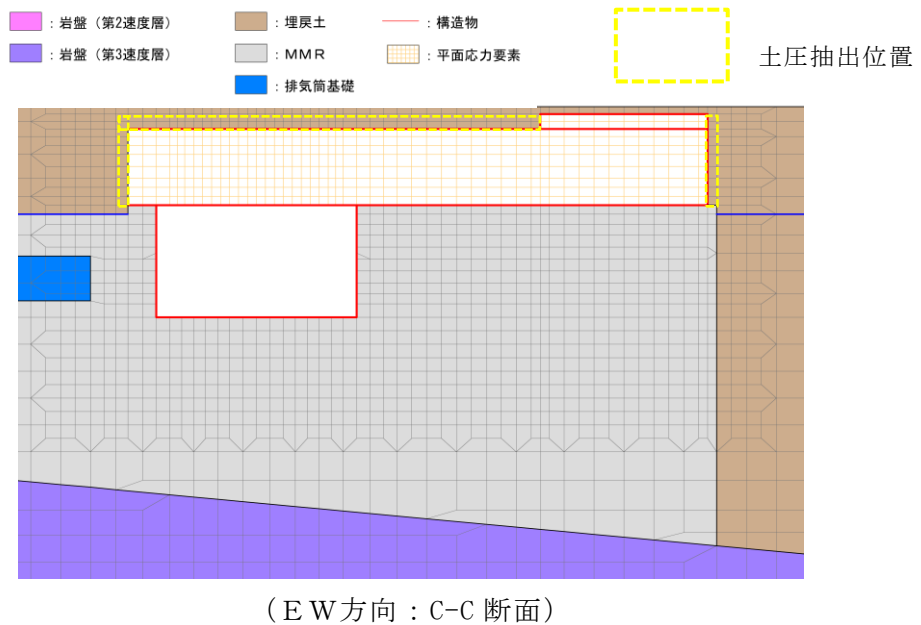
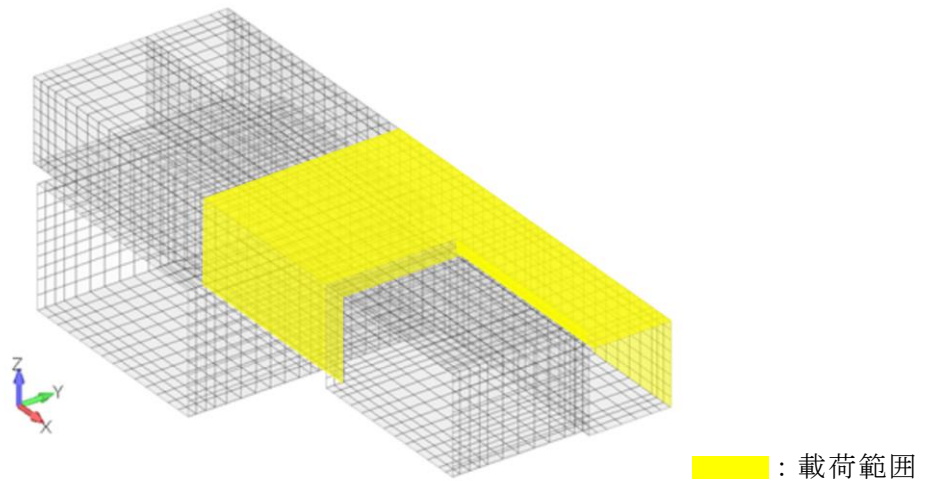
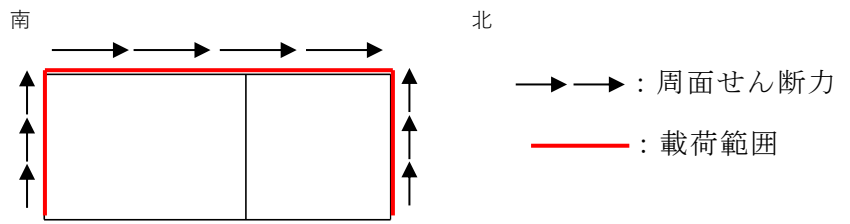
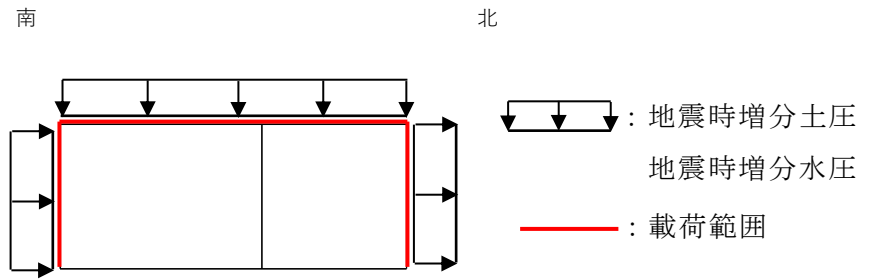


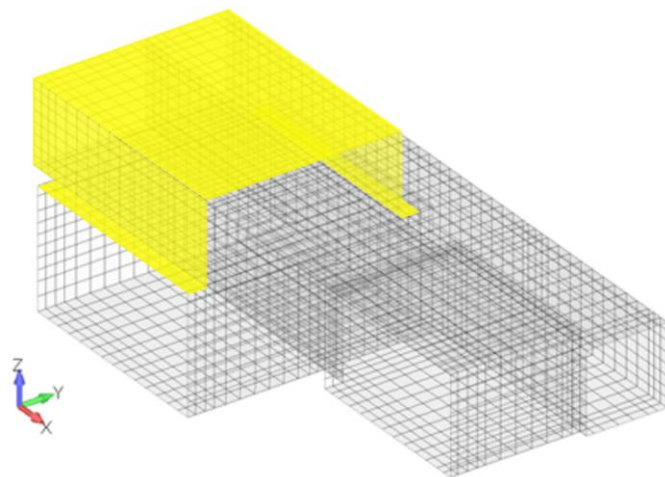
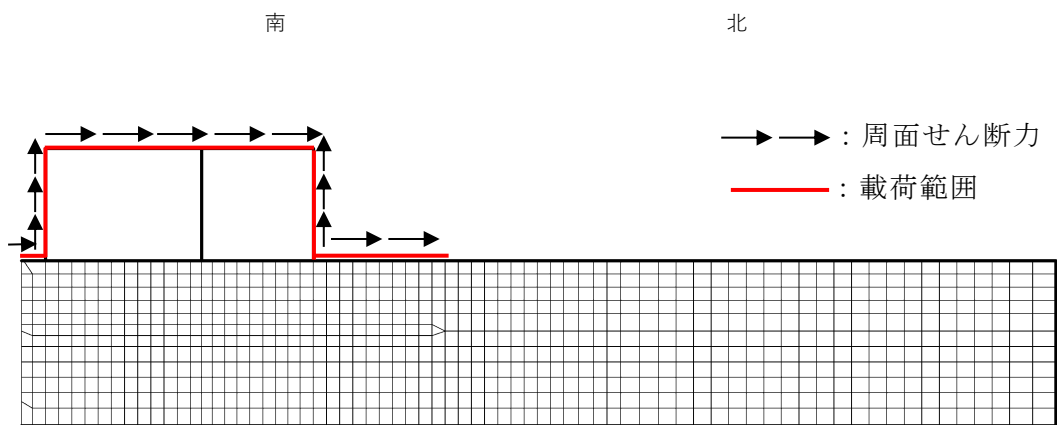
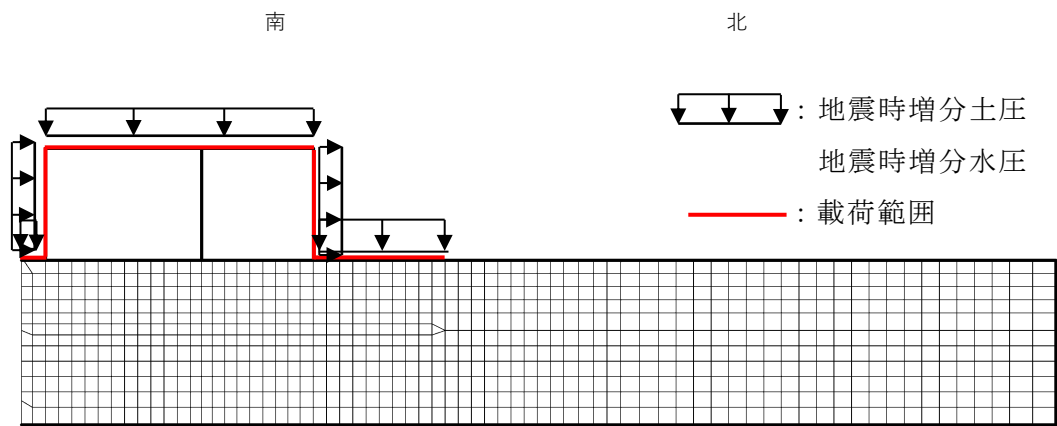
図 5-26 (2) 地震時増分土圧・地震時増分水圧及び周面せん断力抽出位置

参考 1-88



(NS方向：A-A断面)

図 5-27(1) 地震時増分土圧・地震時水圧増分及び周面せん断力の概念図



(NS方向 : B-B断面)

■ : 载荷範囲

図 5-27 (2) 地震時増分土圧・地震時水圧増分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

せん断耐力は、「土木学会マニュアル」及び「コンクリート標準示方書 2007」に基づき「(1) 棒部材式」を適用することとし、ディープビームとなる部材についても、「(1) 棒部材式」を用いることとした。

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。

表 6-1 に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を示す。

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

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

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 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	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。解析結果から屋外配管ダクト(タービン建物～排気筒)の鉄筋コンクリート部材については降伏が認められなかったため、 $\gamma_{b2} = 1.0$ とする。

(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

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

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

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

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

$$\beta_n = 1 + 2M_0 / M_{ud} \quad (N'_d \geq 0) \quad \text{ただし, } \beta_n > 2.0 \text{ となる場合は } \beta_n = 2.0$$

$$= 1 + 4M_0 / M_{ud} \quad (N'_d < 0) \quad \text{ただし, } \beta_n < 0 \text{ となる場合は } \beta_n = 0$$

$$\beta_a = 1$$

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、 $400\text{N}/\text{mm}^2$ 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 $60\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の時は、 $800\text{N}/\text{mm}^2$ 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