

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-026-13
提出年月日	2022年11月14日

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～
ガスタービン発電機）の地震応答計算書及び
耐震性についての計算書に関する補足説明資料

2022年11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	8
2.4 評価対象断面の選定	9
2.5 使用材料及び材料の物性値	11
2.6 地盤物性値	12
2.7 評価構造物諸元	13
2.8 地下水位	14
2.9 耐震評価フロー	15
3. 地震応答解析	16
3.1 地震応答解析手法	16
3.2 地震応答解析モデルの設定	19
3.2.1 解析モデル領域	19
3.2.2 境界条件	20
3.2.3 構造物のモデル化	23
3.2.4 隣接構造物のモデル化	23
3.2.5 地盤及びMMRのモデル化	23
3.2.6 地震応答解析モデル	24
3.2.7 ジョイント要素の設定	25
3.2.8 材料特性の設定	28
3.3 減衰定数	30
3.4 荷重及び荷重の組合せ	36
3.4.1 固定荷重	37
3.4.2 機器・配管荷重	38
3.4.3 積雪荷重	38
3.5 地震応答解析の解析ケース	39
3.5.1 耐震評価における解析ケース	39
3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース	42

4.	評価内容	44
4.1	入力地震動の設定	44
4.2	許容限界の設定	61
4.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	61
4.2.2	せん断の破壊に対する許容限界	63
4.2.3	基礎地盤の支持性能に対する許容限界	66
5.	評価結果	67
5.1	地震応答解析結果	67
5.1.1	解析ケース	67
5.1.2	ひずみの時刻歴波形	68
5.1.3	断面力分布（せん断破壊に対する照査）	69
5.1.4	最大せん断ひずみ分布	70
5.2	構造部材の健全性に対する評価結果	72
5.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果	72
5.2.2	せん断破壊に対する評価結果	73
5.3	基礎地盤の支持性能に対する評価結果	75
5.3.1	基礎地盤	75
5.3.2	MMR	76
6.	まとめ	79

参考資料 1 機器・配管系の耐震評価に適用する影響検討ケース

参考資料 2 ダクト蓋に関する照査

1. 評価方法

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）は、常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備であるガスタービン発電機用燃料移送配管・弁を間接支持する重大事故等対処施設である。

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

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）に要求される機能の維持を確認するにあたっては、地震応答解析に基づく構造部材の健全性評価及び基礎地盤の支持性能評価により行う。

2. 評価条件

2.1 適用規格

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の耐震評価にあたっては、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（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 2005」という。）及びコンクリート標準示方書 2002を適用する。また、基礎地盤及びMMR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，基準値	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 ）
荷重及び荷重の組み合わせ	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）	永久荷重，偶発荷重等の適切な組み合わせを検討
許容限界	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）	曲げ・軸力系の破壊に対する照査は，発生ひずみが限界ひずみ（圧縮縁コンクリートひずみ 1.0%）以下であることを確認 せん断破壊に対する照査は，発生せん断力がせん断耐力を下回ることを確認
	コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（土木学会 2002 年制定）	MMR の支持性能に対する照査は，基礎地盤に発生する応力が極限支持力度を下回ることを確認
	道路橋示方書・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，基礎地盤に発生する応力が極限支持力度を下回ることを確認
地震応答解析	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

2.2 構造概要

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の位置図を図 2-1 に，平面図を図 2-2 に，断面図を図 2-3 及び図 2-4 に，概略配筋図を図 2-5 に，評価対象断面位置図及び評価対象地質断面図及び評価対象地質断面図を図 2-6 示す。

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）は，ガスタービン発電機用燃料移送配管・弁を間接支持する延長約 55.5m，幅 2.8m，高さ 1.8m の鉄筋コンクリート造の地中構造物であり，マンメイドロック（以下「MMR」という。）を介して十分な支持性能を有する C_L 級岩盤に支持される。

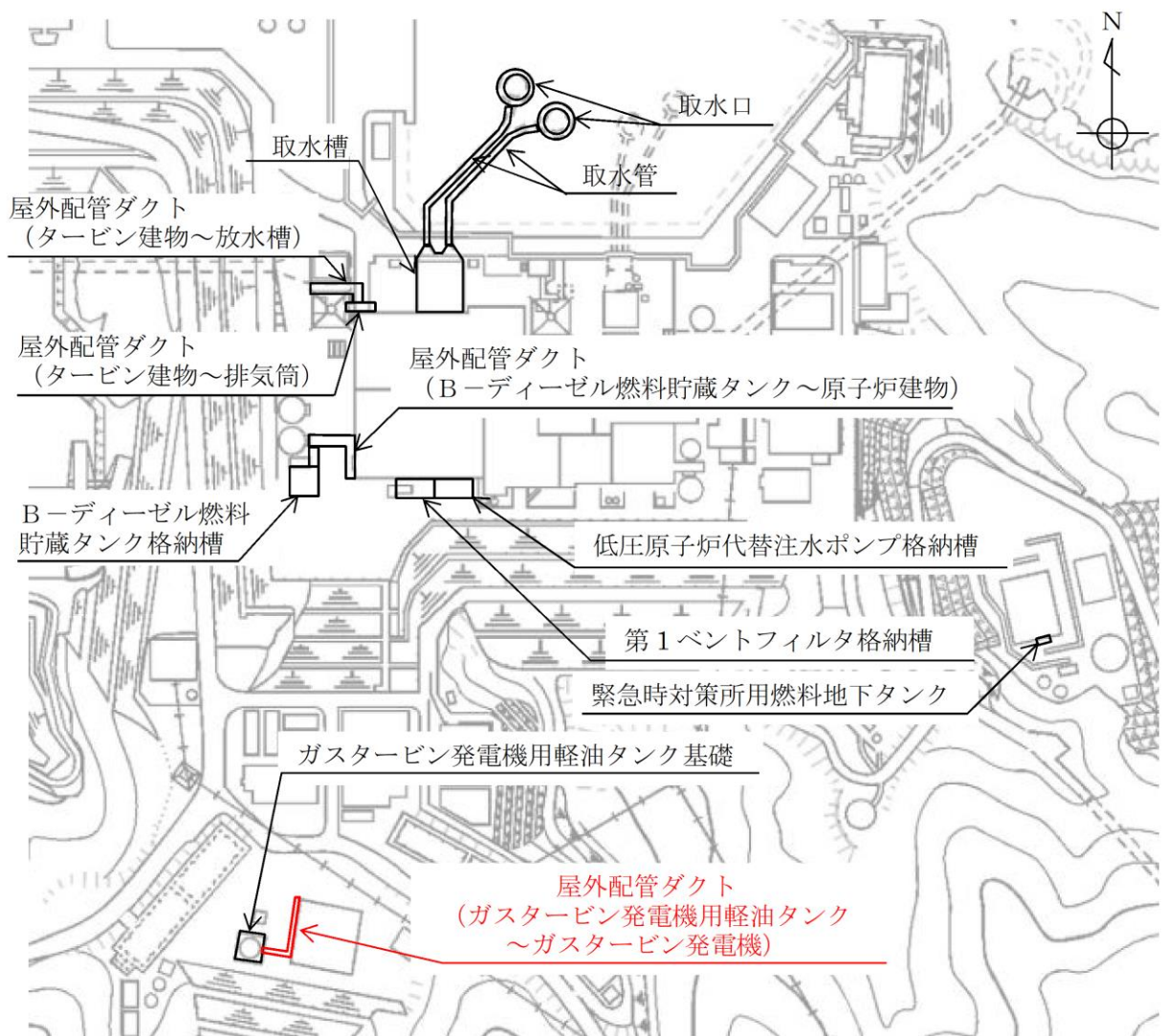


図 2-1 屋外配管ダクト (ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)
位置図

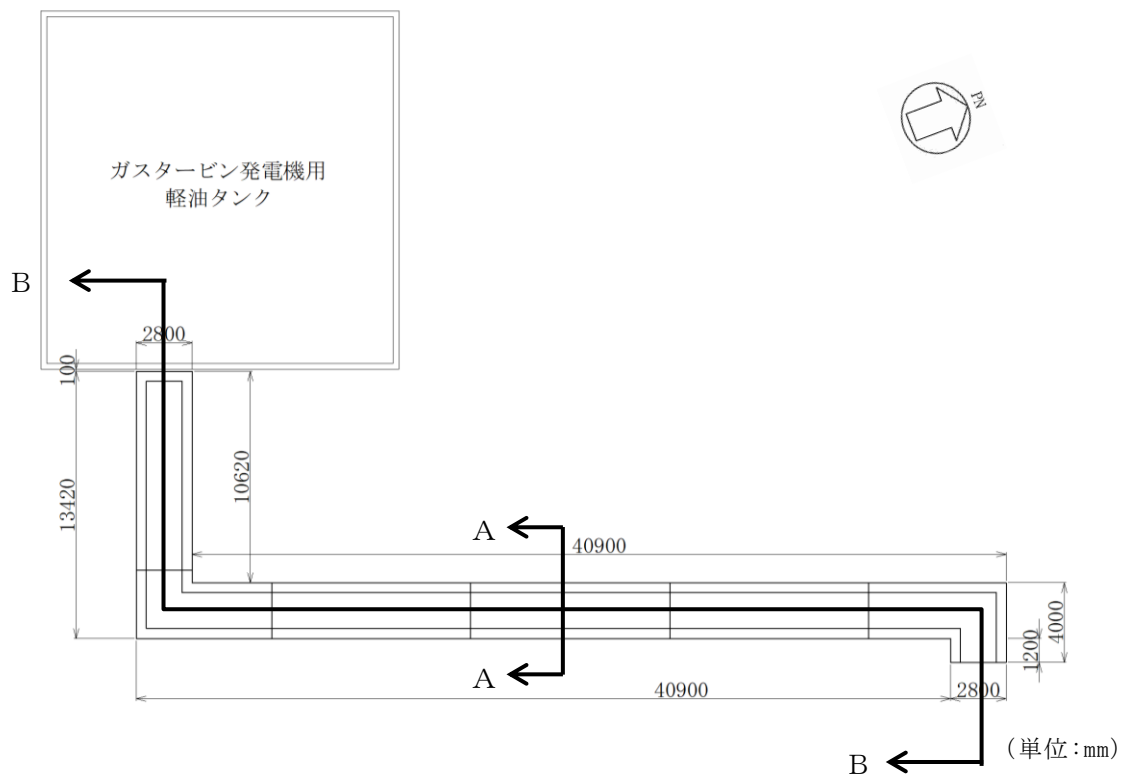


図 2-2 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）
平面図

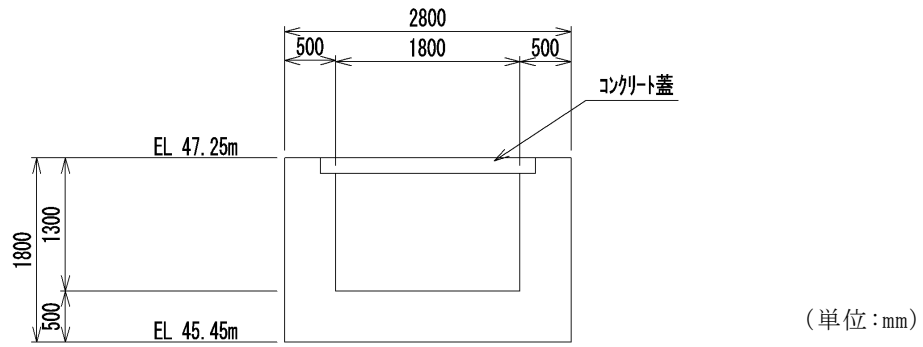


図 2-3 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）
断面図（A-A 断面）

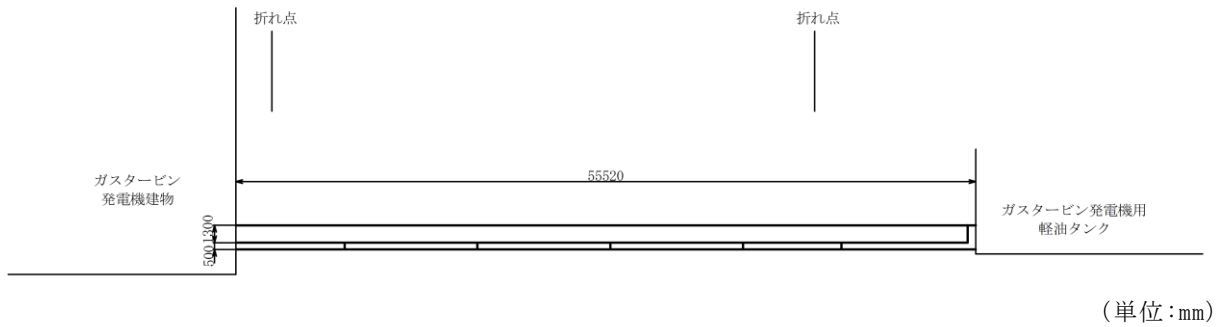


図 2-4 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）
断面図（B-B 断面）

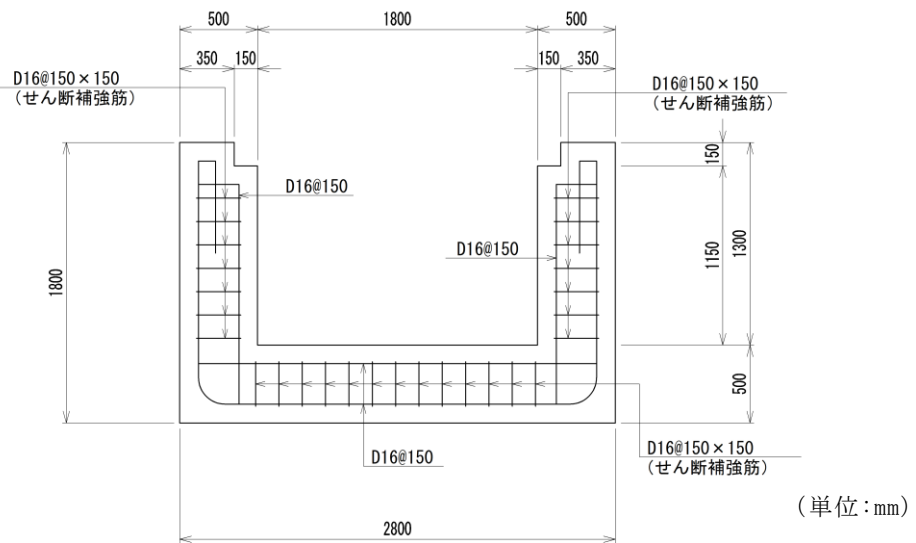


図 2-5 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）
概略配筋図（A-A 断面）

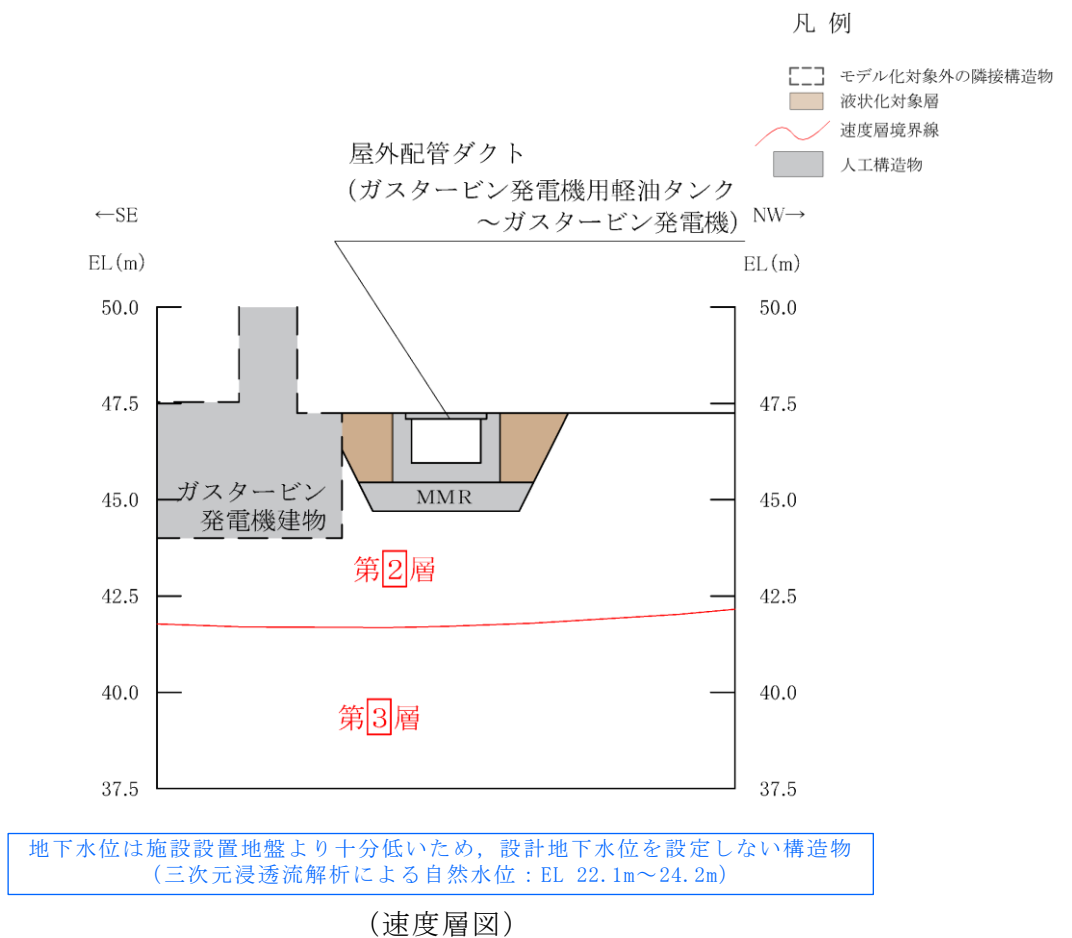
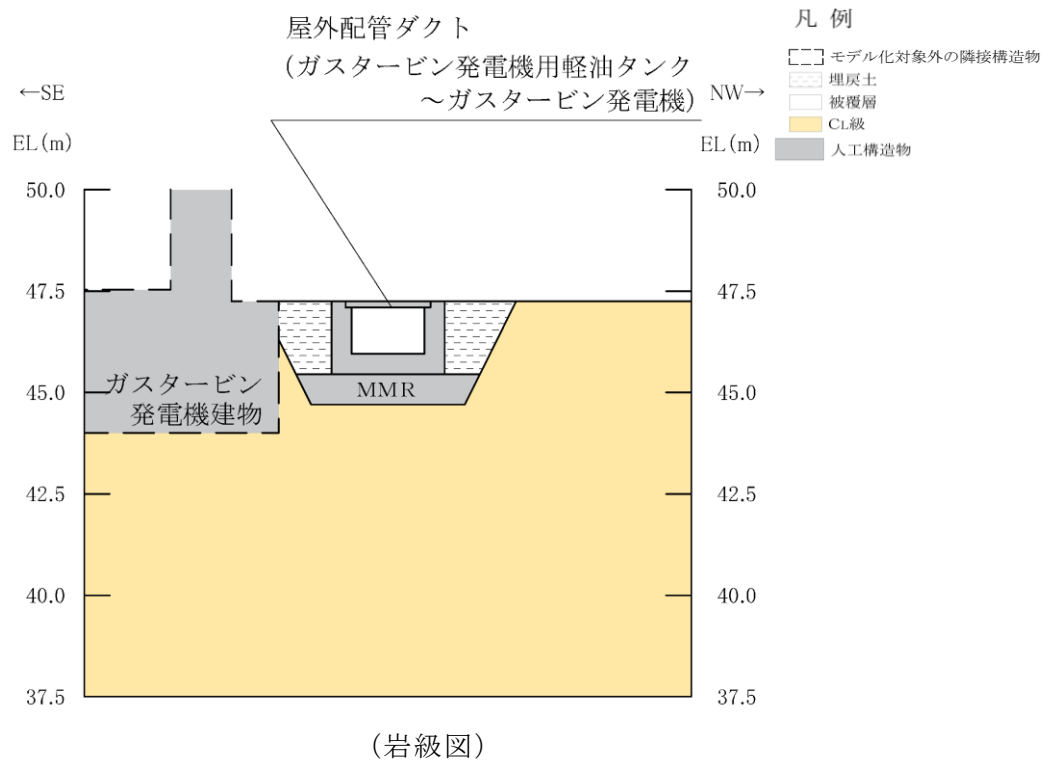
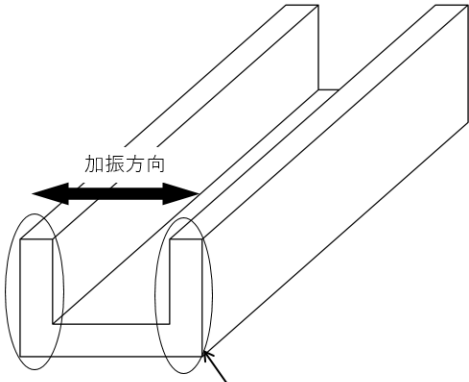
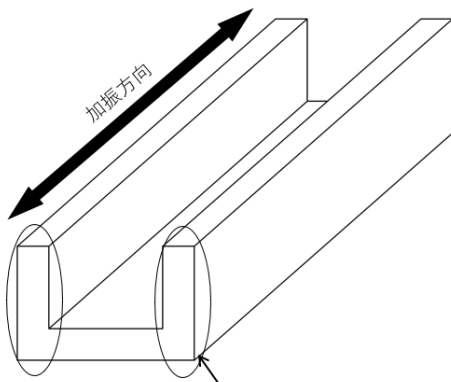


図 2-6 屋外配管ダクト (ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)
評価対象断面図 (A-A断面)

2.3 評価対象断面の方向

評価対象断面の方向の選定に係る考え方を表 2-2 に示す。間接支持する配管の管軸方向と直交する方向に配置される壁部材が少ないため、管軸直交方向（横断方向）が明確な弱軸方向となり、側壁が耐震要素として機能する管軸方向（延長方向）が強軸方向となる。

表 2-2 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）
の評価対象断面の方向の選定

	管軸直交方向（横断方向）	管軸方向（延長方向）
屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）	 <p>加振方向に抵抗する部材が少ない ⇒弱軸</p>	 <p>側壁が加振方向に抵抗する ⇒強軸</p>
	管軸直交方向は、加振方向に平行な壁部材がなく、弱軸方向にあたる。	管軸方向は、加振方向に平行な部材全体を耐震設計上見込むことができ、強軸方向にあたる。
	弱軸方向を評価対象断面とする。	

2.4 評価対象断面の選定

評価対象断面は、「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「4.15 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の断面選定の考え方」に示すとおり，構造的特徴や周辺状況等を踏まえ選定する。明確な弱軸方向となる横断方向のA-A断面を評価対象断面として選定する。また，A-A断面は最も長い直線区間の中心付近を通る位置とする。

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の評価対象断面位置図及び評価対象地質断面図及び評価対象地質断面図を図2-7に示す。

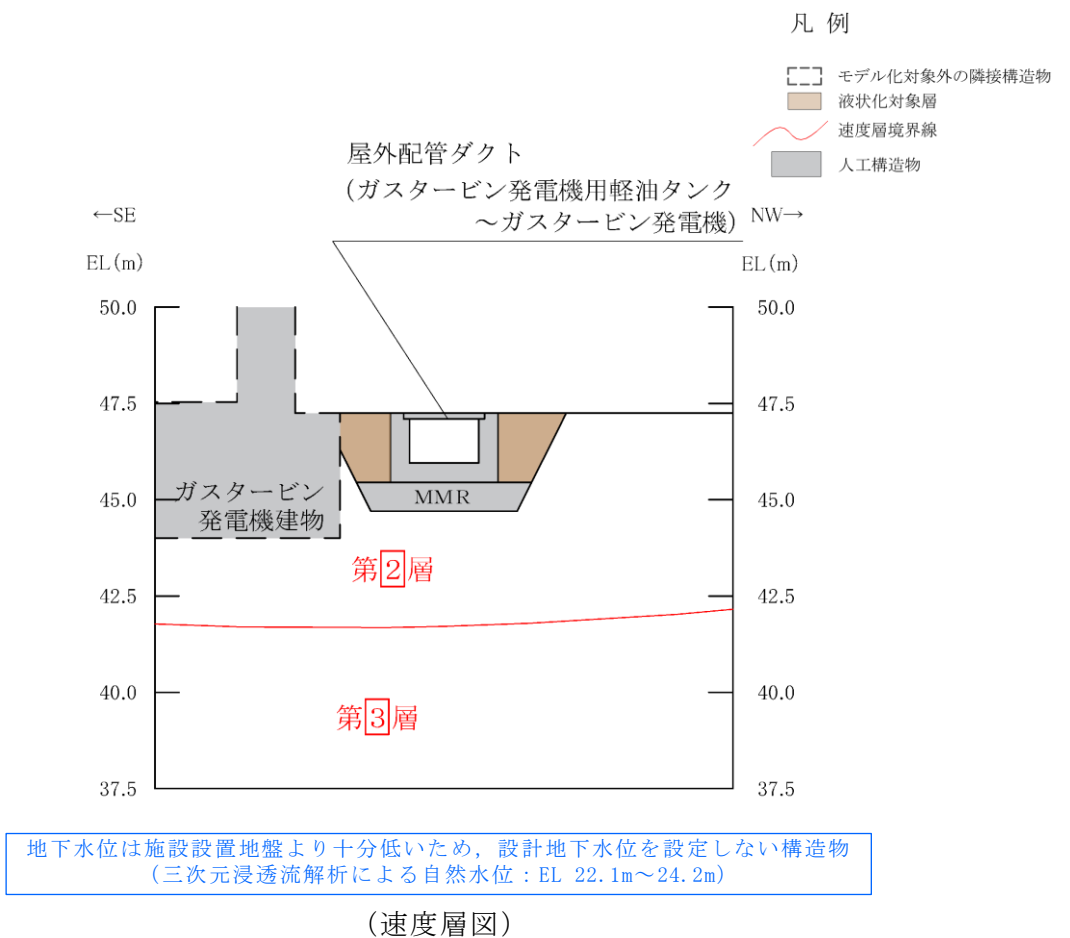
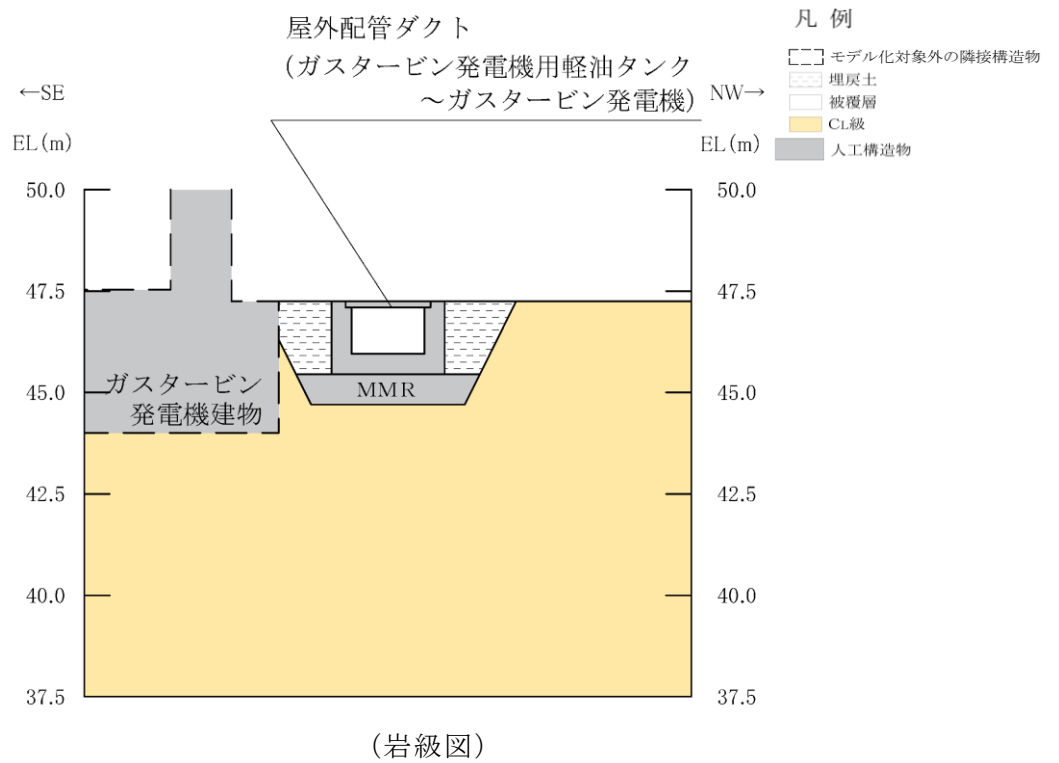


図 2-7 屋外配管ダクト (ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)
評価対象断面図 (A-A断面)

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 24.0N/mm ²
	鉄筋	SD345
MMR		設計基準強度 18.0N/mm ²

表 2-4 材料の物性値

材料	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比
構造物	2.50×10 ⁴	24.0 ^{*1}	0.2
MMR	2.20×10 ⁴	22.6 ^{*2}	

注記*1：鉄筋コンクリートの単位体積重量を示す。

*2：無筋コンクリートの単位体積重量を示す。

2.6 地盤物性値

地盤については，VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」にて設定している物性値を用いる。地盤の物性値を表2-5及び表2-6に示す。

表2-5 地盤の解析用物性値（岩盤）

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

注記*：入力地震動の算定においてのみ用いる解析用物性値

表2-6 地盤の解析用物性値（埋戻土）

		解析用物性値	
		埋戻土	
物理特性	密度 ρ_s (g/cm ³)	2.11	
強度特性	初期せん断強度 τ_0 (N/mm ²)	0.22	
	内部摩擦角 ϕ (°)	22	
動的変形特性	動せん断弾性係数 G_d (N/mm ²)	$G_0=749 \sigma^{0.66}$ (N/mm ²) $G/G_0=1/(1+\gamma/0.00027)$	
	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（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の諸元を表 2-7 に評価部位を図 2-8 に示す。

表 2-7 評価部位とその仕様(A-A断面)

部位		仕様		材料		要求性能
		部材幅 (mm)	部材厚 (mm)	コンクリート 設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)	鉄筋	
側壁	① ②	1300	500	24.0	SD345	支持機能
底版	③	1800	500	24.0	SD345	

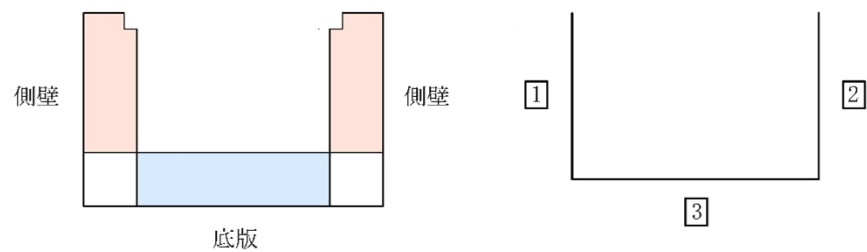


図 2-8 評価部位位置図

2.8 地下水位

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

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

表2-8 設計地下水位の一覧

施設名称	解析断面	設計地下水位 (ELm)	備考
屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）	A-A断面	地下水位が構造物基礎下端より十分低いため考慮しない。	三次元浸透流解析による自然水位：EL 22.1m～24.2m

2.9 耐震評価フロー

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の耐震評価フローを図 2-9 に示す。

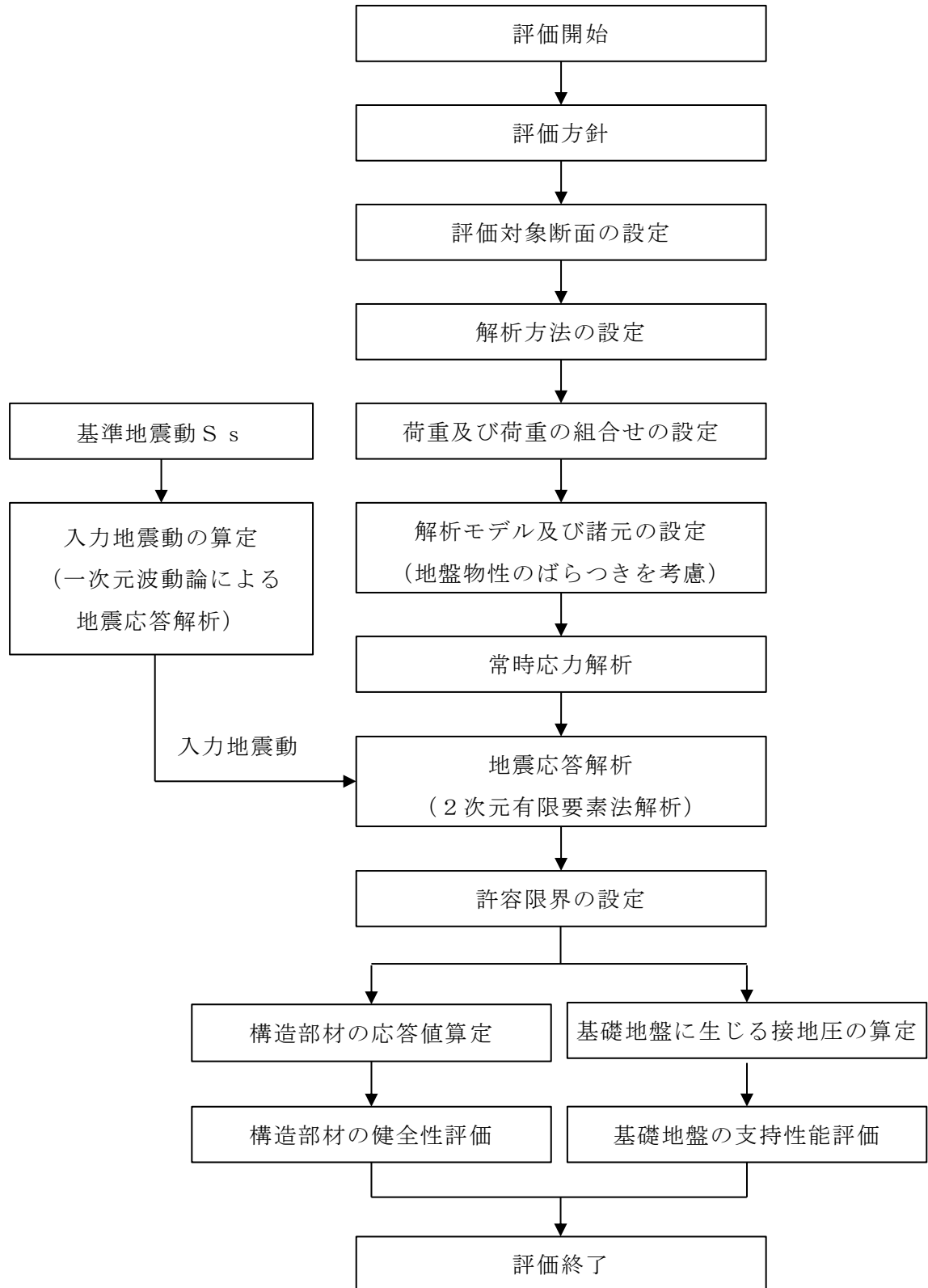


図 2-9 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の耐震評価フロー

3. 地震応答解析

3.1 地震応答解析手法

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

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の施設周辺の地下水位は底版より低いため、解析手法の選定フローに基づき「①全応力解析」を選択する。

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

地震応答解析手法の選定フローを図3-2に示す。

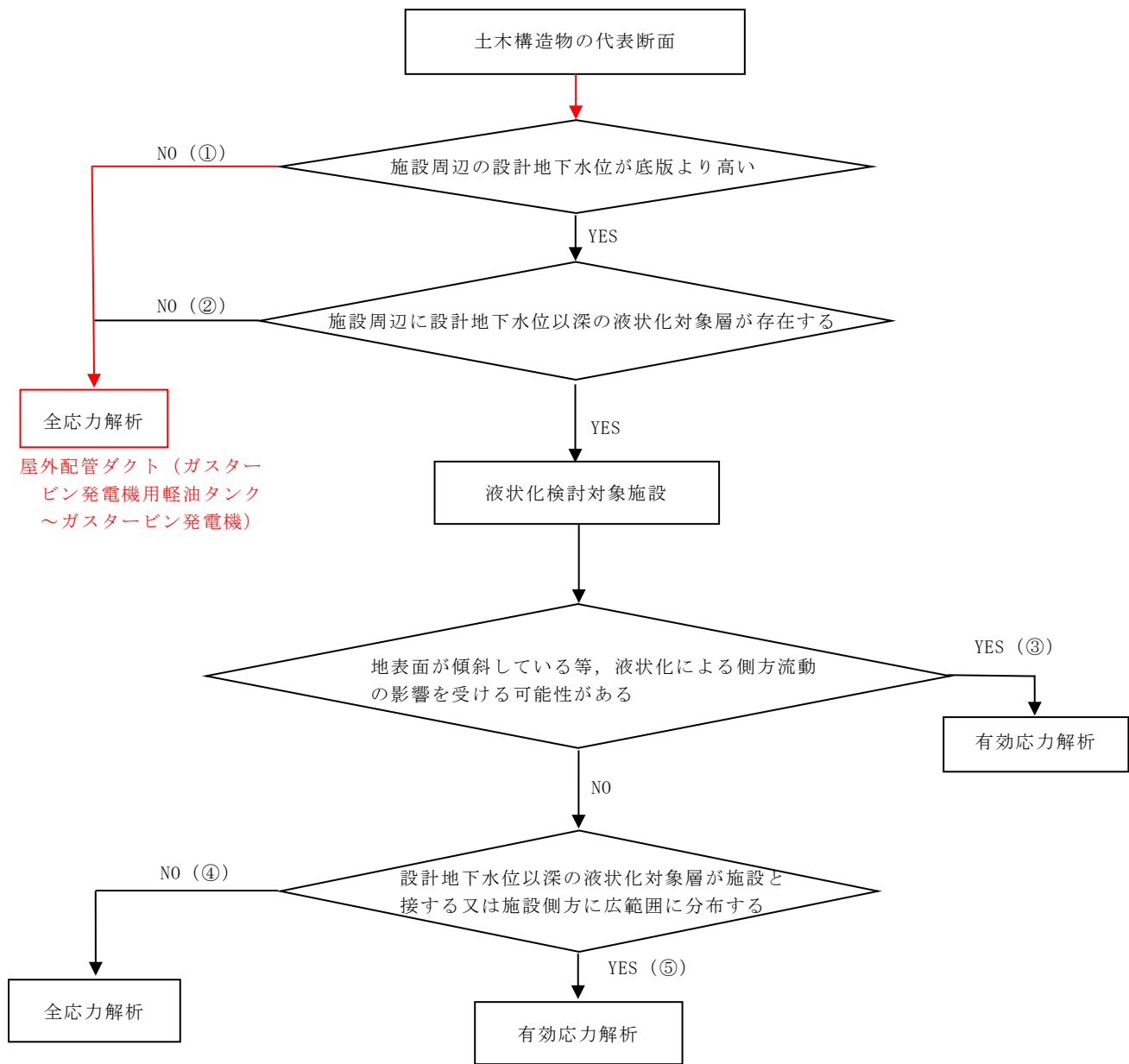


図 3-1 解析手法の選定フロー

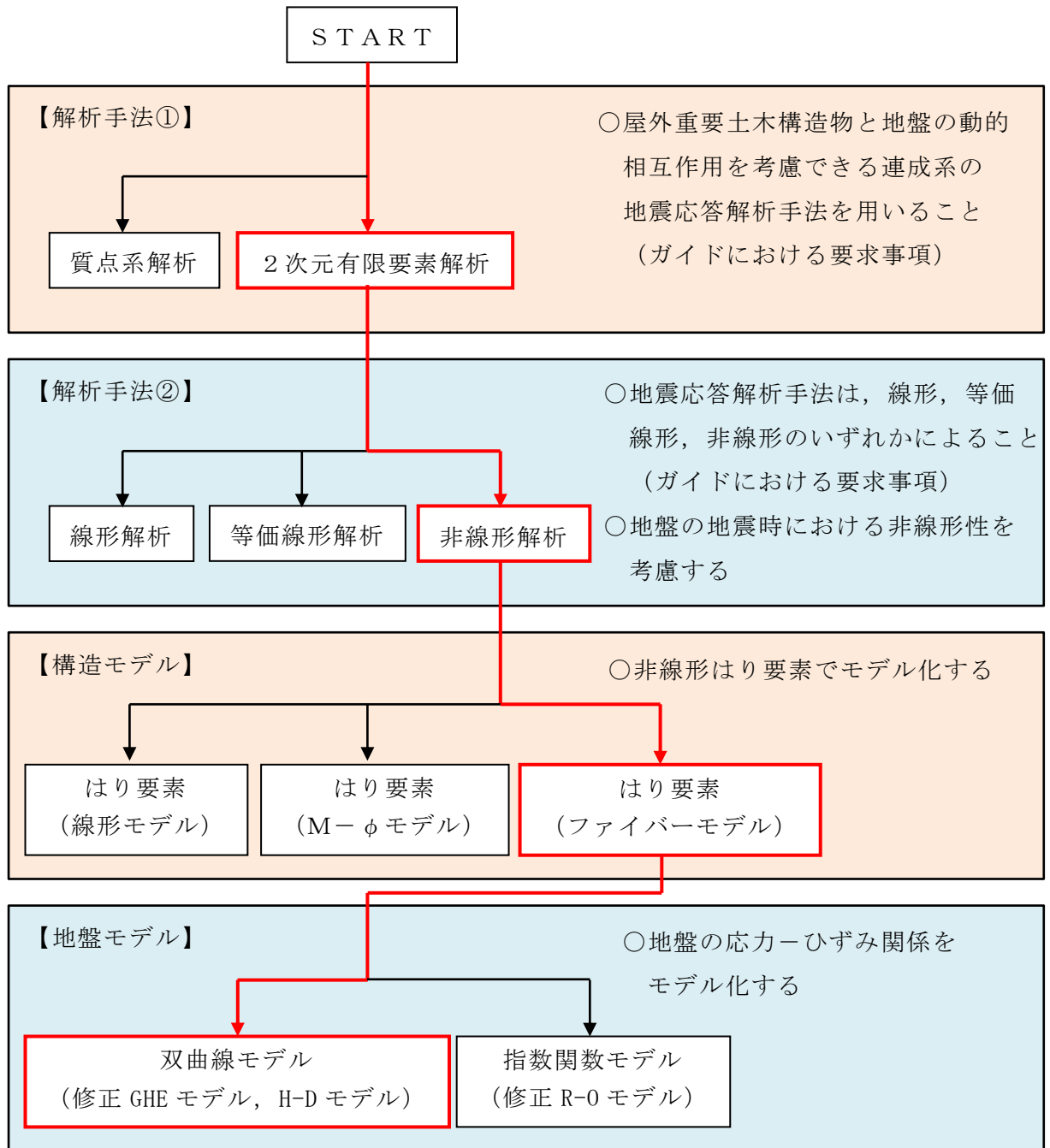


図 3-2 地震応答解析手法の選定フロー

3.2 地震応答解析モデルの設定

3.2.1 解析モデル領域

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

なお、解析モデルの境界条件は、側面及び底面ともに粘性境界とする。

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

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

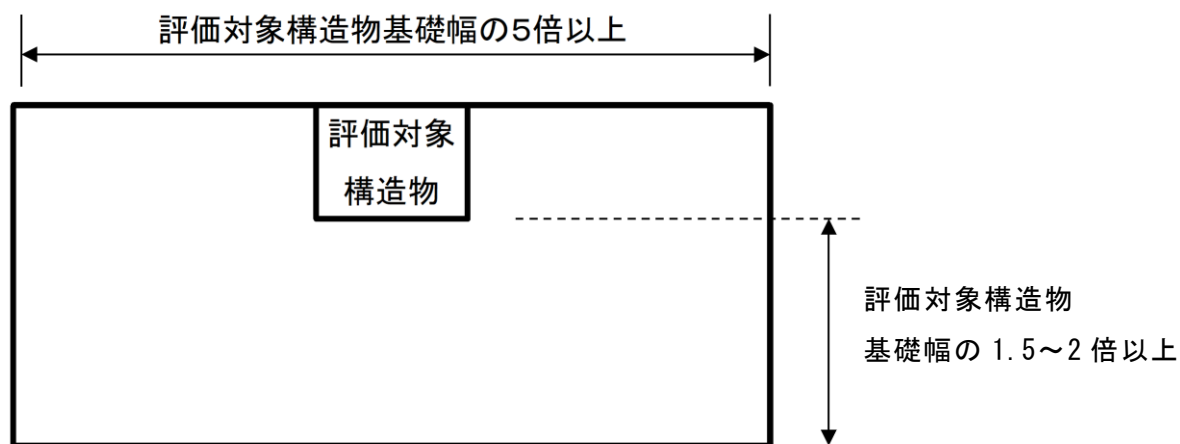


図 3-3 モデル化範囲の考え方

3.2.2 境界条件

(1) 固有値解析時

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

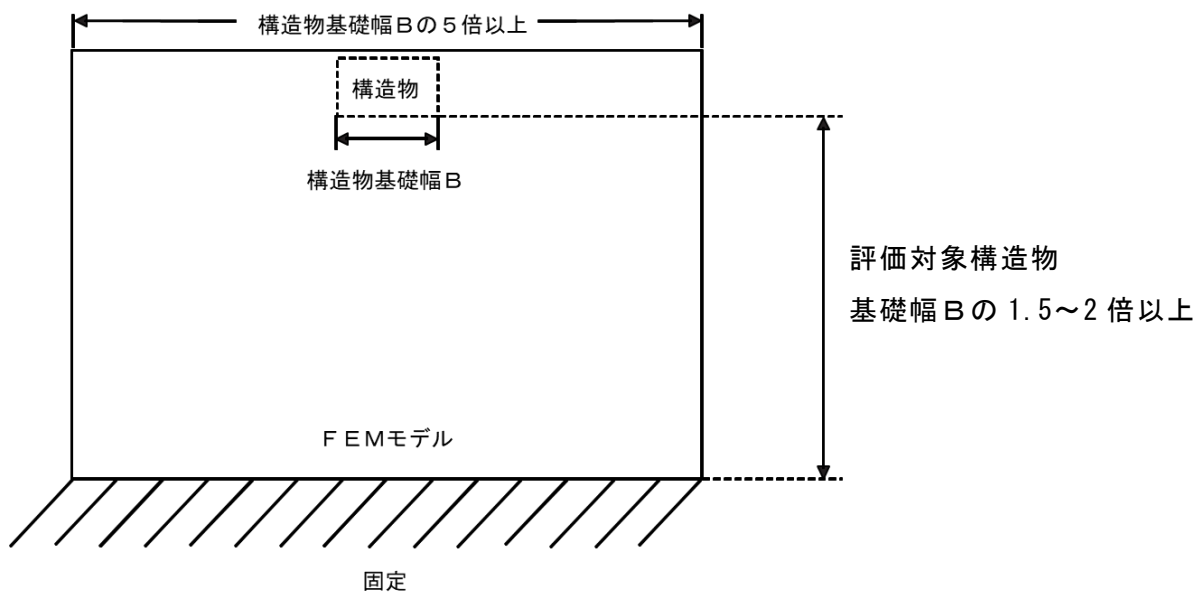


図3-4 固有値解析における境界条件の概念図

(2) 常時応力解析時

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

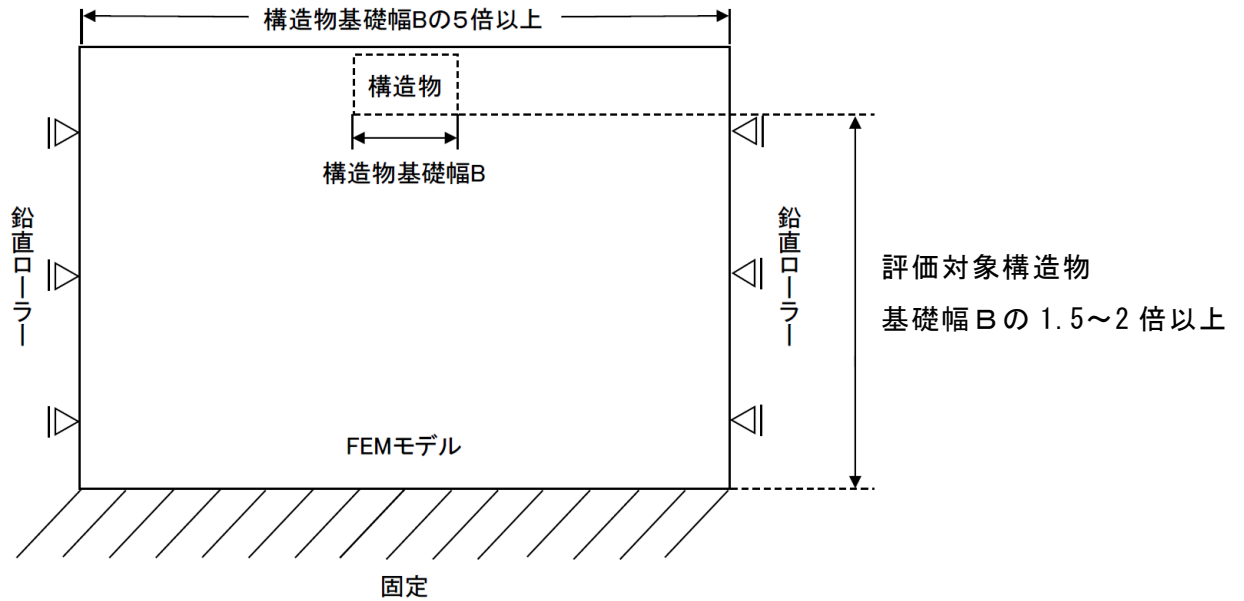


図 3-5 常時応力解析における境界条件の概念図

(3) 地震応答解析時

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

境界条件の概念図を図 3-6 に示す。

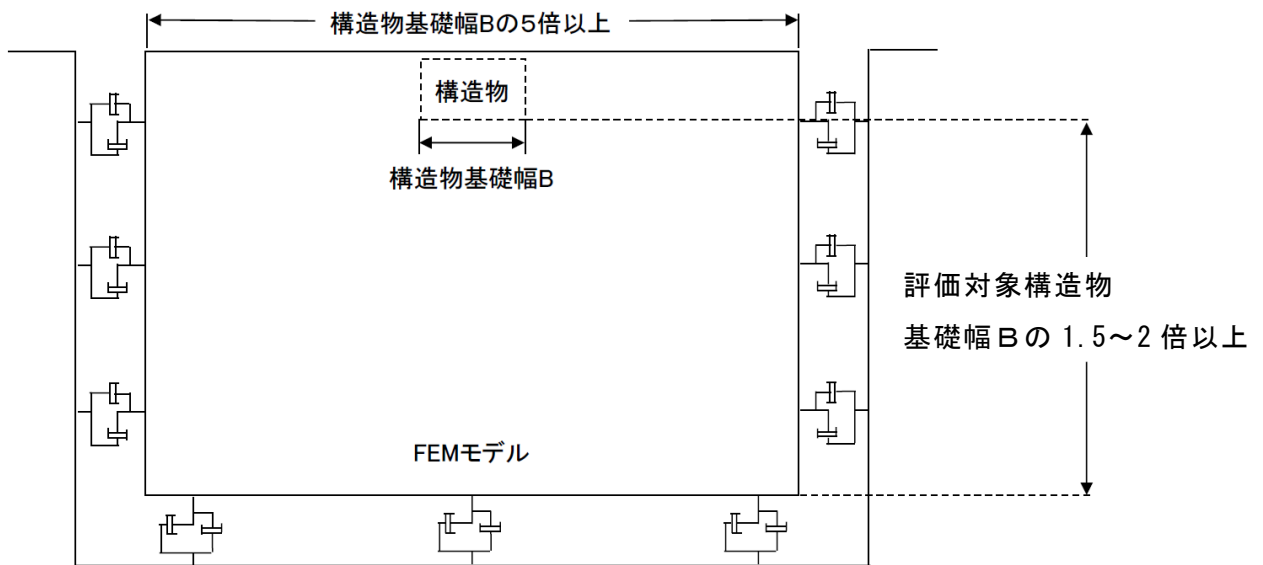


図 3-6 地震応答解析における境界条件の概念図

3.2.3 構造物のモデル化

鉄筋コンクリート部材は非線形はり要素によりモデル化する。

また、ダクト上部のコンクリート蓋はモデル化せず、コンクリート蓋の自重及び蓋に堆積する積雪荷重を付加質量として蓋掛り部に考慮する。

機器・配管荷重は解析モデルに付加質量として与えることで考慮する。

3.2.4 隣接構造物のモデル化

A-A断面の解析モデル範囲において隣接するガスタービン発電機建物は、地表面付近の岩盤上に設置され、埋込は有していない。また、地下部の基礎は岩盤と同程度の剛性のため、屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）へ与える応答の影響は小さいことから隣接構造物としてモデル化しない。

3.2.5 地盤及びMMRのモデル化

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

地盤のモデル化に用いる、地質断面図を図3-7に示す。

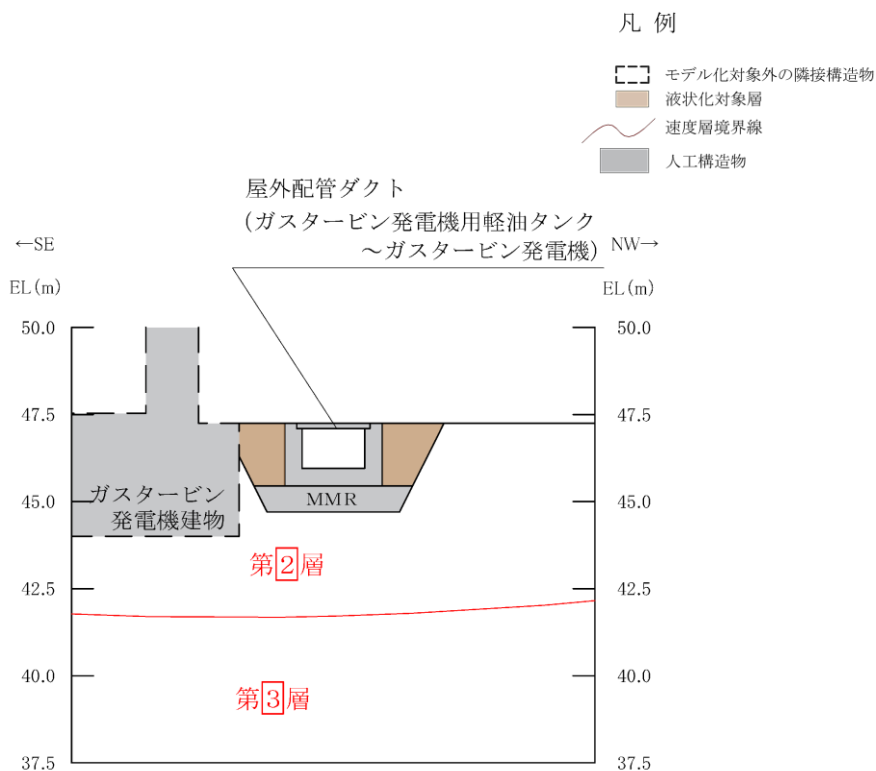


図3-7 評価対象地質断面図

3.2.6 地震応答解析モデル

評価対象地質断面図を踏まえて設定した地震応答解析モデル図を図 3-8 に示す。

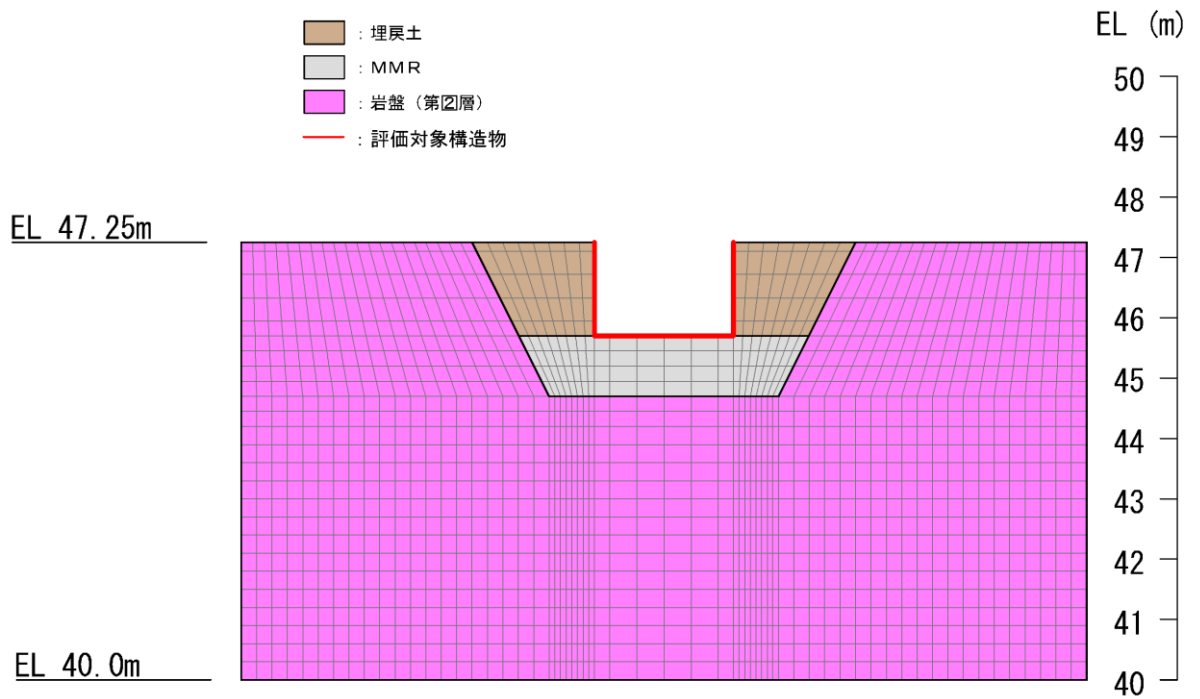


図 3-8 地震応答解析モデル図

3.2.7 ジョイント要素の設定

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

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

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

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

ここに、 τ_f : せん断強度

c : 粘着力 (=初期せん断強度 τ_0)

ϕ : 内部摩擦角

表 3-1 周辺地盤との境界に用いる強度特性

地盤	粘着力 c (N/mm ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
岩盤 (C _L 級)	0.56	37
埋戻土	0.22	22
MMR ($f'_c = 18.0$ N/mm ²)	3.58	40

表 3-2 要素間の粘着力と内部摩擦角

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

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

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

また，ジョイント要素の力学特性を図 3-9 に，ジョイント要素の配置を図 3-10 に示す。

表 3-3 ジョイント要素のばね定数

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

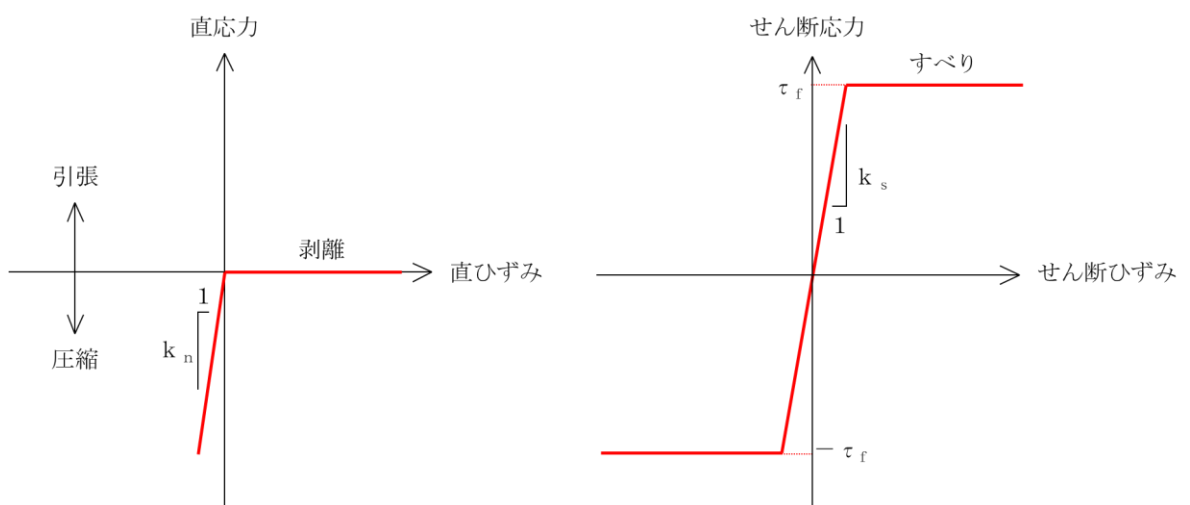


図 3-9 ジョイント要素の力学特性

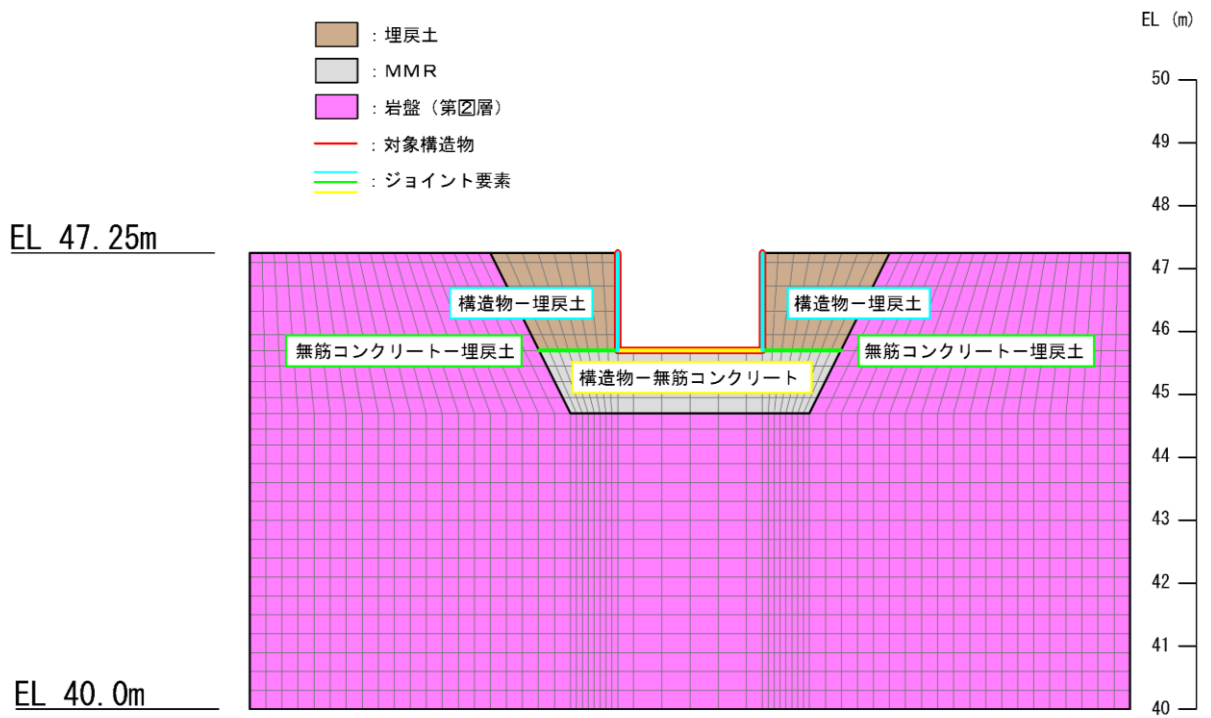


図 3-10 ジョイント要素の配置

3.2.8 材料特性の設定

鉄筋コンクリート部材は、ファイバーモデルによる非線形はり要素でモデル化する。ファイバーモデルは、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。

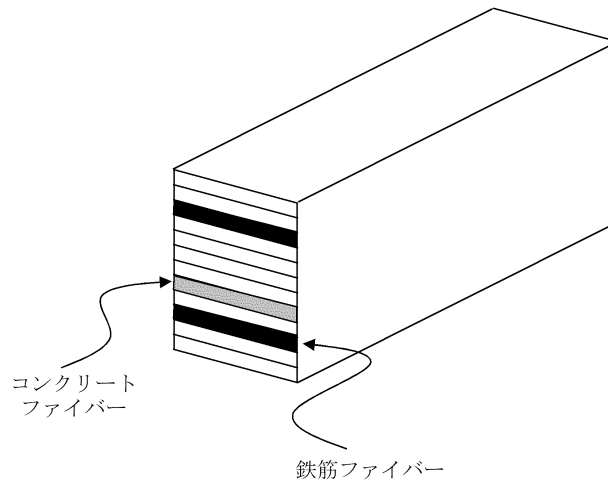
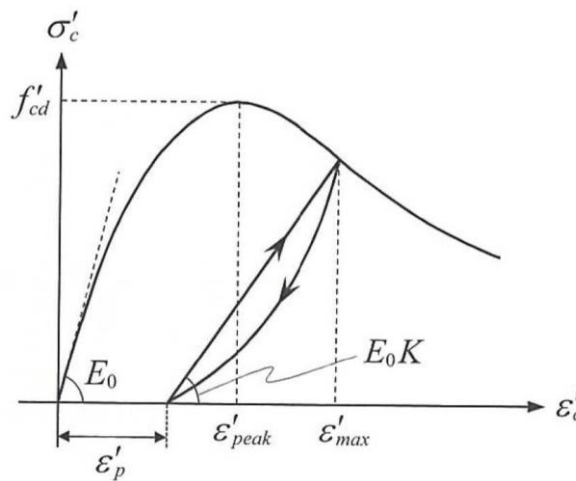
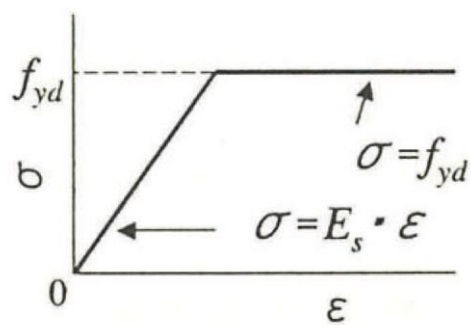


図3-11 ファイバーモデルの概念図



（コンクリート標準示方書[設計編]（土木学会，2017年制定）より引用）

図3-12 構造部材の非線形特性（コンクリートの応力-ひずみ関係）



(コンクリート標準示方書[構造性能照査編] (土木学会, 2002年制定) より引用)

図 3-13 構造部材の非線形特性 (鉄筋の応力-ひずみ関係)

3.3 減衰定数

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

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

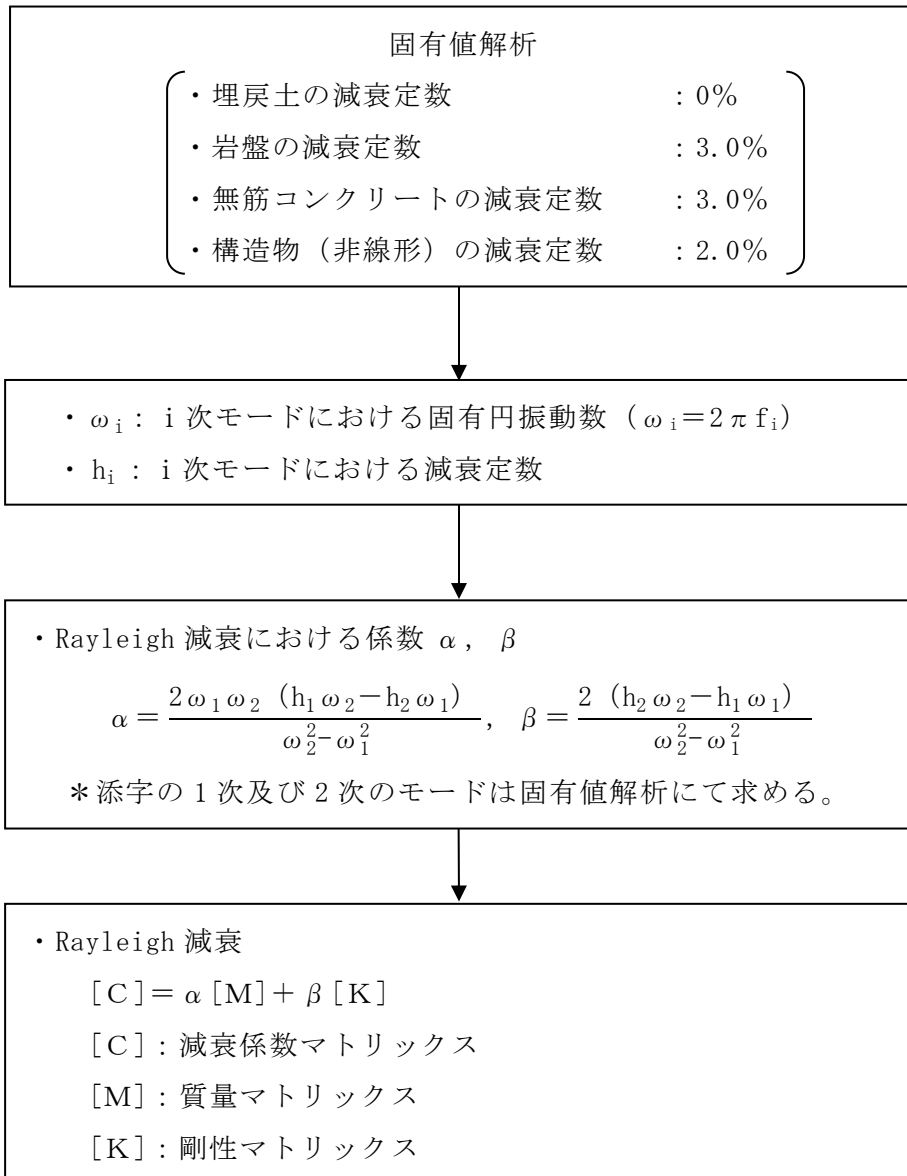


図 3-14 Rayleigh 減衰の設定フロー

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。なお、卓越するモードは全体系の固有値解析における刺激係数及びモード図にて決定するが、係数 α , β が負値となる場合は当該モードを選定しない。

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

表 3-4 固有値解析結果

	固有振動数 (Hz)	有効質量比 (%)		刺激係数		備考
		Tx	Ty	β_x	β_y	
1	26.650	74	0	13.06	0.00	1次として採用
2	44.821	0	4	0.00	-3.21	—
3	50.597	0	20	0.00	-6.71	—
4	50.750	1	0	1.55	0.00	—
5	58.362	8	0	-4.35	0.00	2次として採用
6	60.076	0	21	0.00	6.99	—
7	67.637	4	0	-2.93	0.00	—
8	73.782	0	14	0.00	5.61	—
9	74.829	0	0	0.54	0.00	—
10	80.145	0	14	0.00	5.61	—

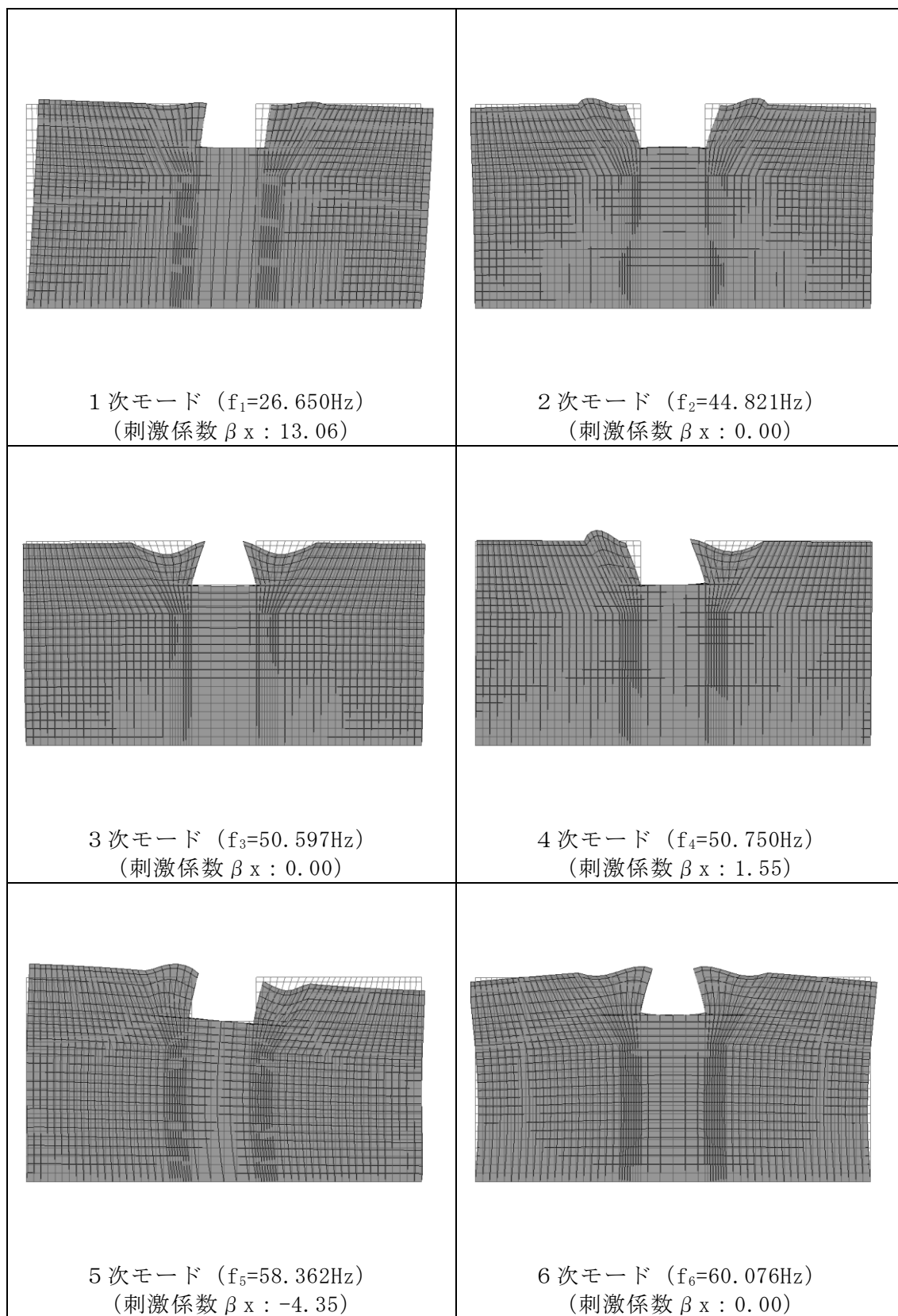


図 3-15 固有値解析結果 (モード図)

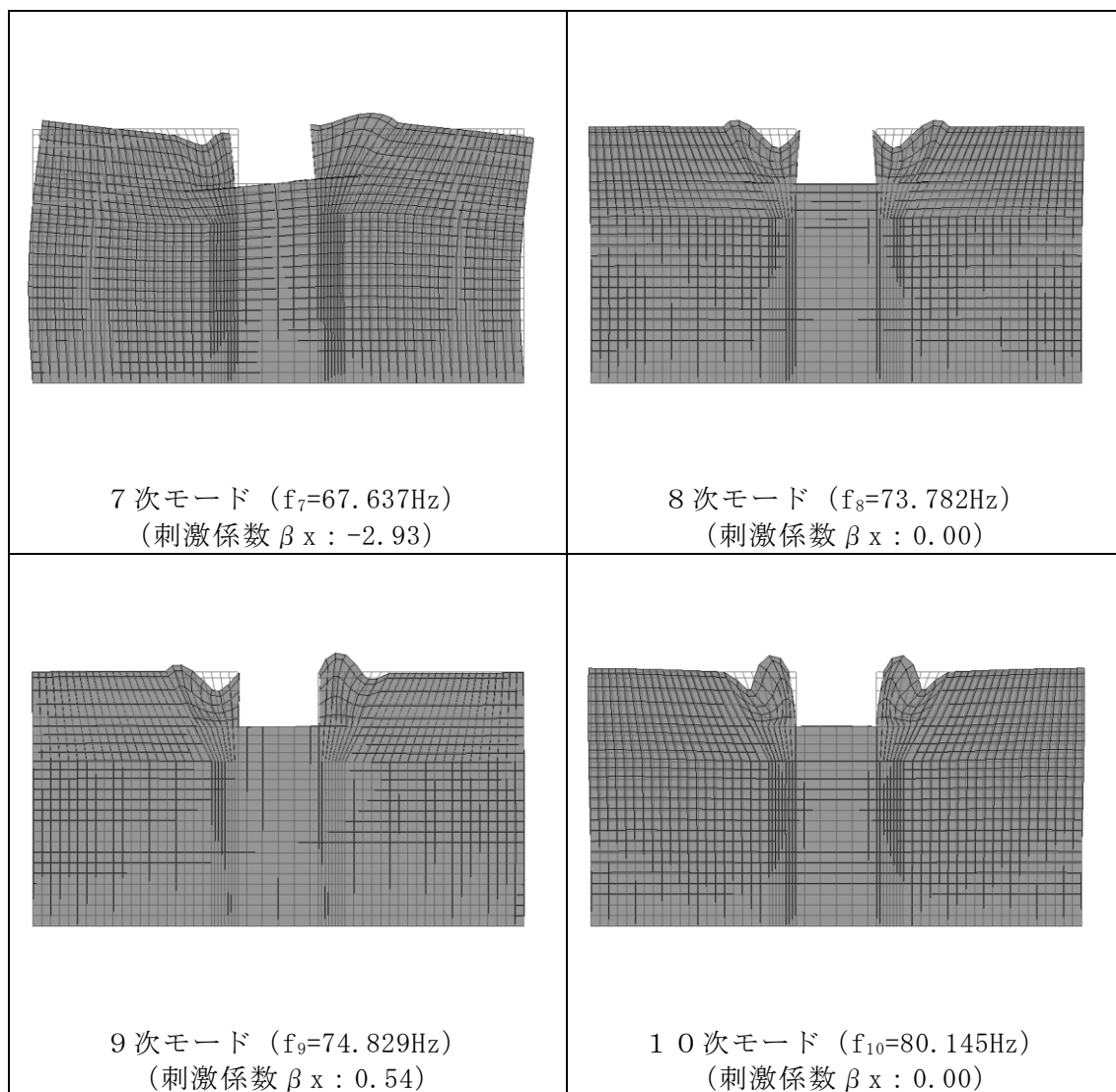


図 3-16 固有値解析結果 (モード図)

表 3-5 Rayleigh 減衰における係数 α , β の設定結果

評価対象断面	α	β
A-A断面	6.834	1.059×10^{-4}

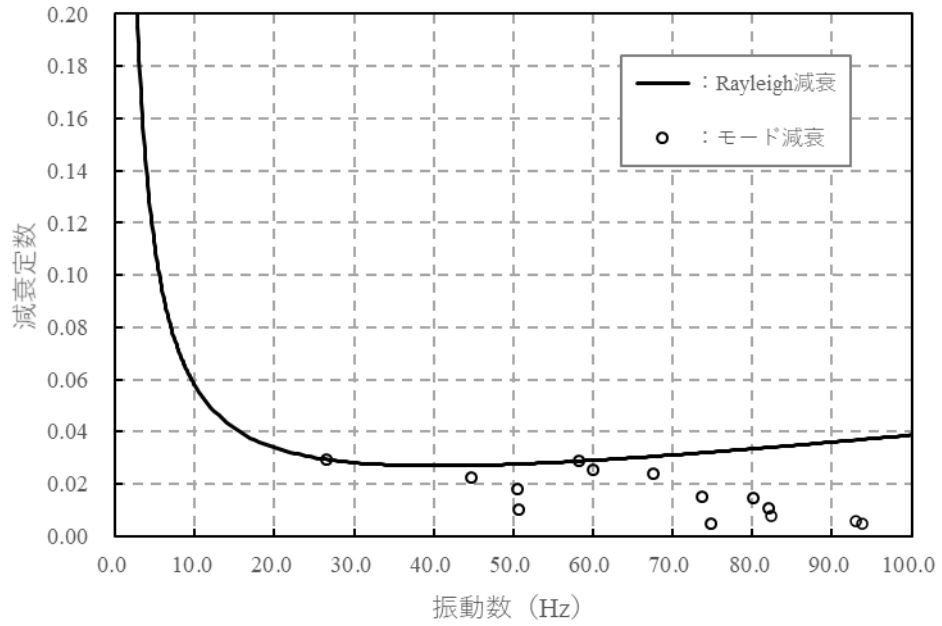


図 3-17 設定した Rayleigh 減衰

3.4 荷重及び荷重の組合せ

耐震評価にて考慮する荷重は、通常運転時の荷重（永久荷重）及び地震荷重を抽出し、それぞれを組み合わせで設定する。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（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）に作用する機器・配管系からの反力については、機器・配管系を解析モデルに付加質量として与えることで考慮する。

なお、屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の運転時、設計基準事故時及び重大事故時の状態における荷重条件は変わらないため、評価は設計基準対象施設の評価結果に包括されることから、設計基準対象施設の評価結果を用いた重大事故等対処施設の評価を行う。

荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

種別	荷重		算定方法の概要
永久荷重 (常時荷重)	固定荷重	躯体自重	○ 設計図書に基づいて、対象構造物の体積に材料の密度を乗じて設定する。
		機器・配管荷重	○ 機器・配管系の重量に基づいて設定する。
	積載荷重	静止土圧	○ 常時応力解析により設定する。
		外水圧	— 地下水位が構造物基礎下端より十分低いため考慮しない。
		積雪荷重	○ 構造物上（蓋を含む）に考慮する。
		土被り荷重	— 土被りが無いことから考慮しない。
	永久上載荷重	— 地表面に恒常的に置かれる設備等はないことから考慮しない。	
偶発荷重 (地震荷重)	水平地震動	○	基準地震動 S_s による水平・鉛直同時加振を考慮する。
	鉛直地震動	○	

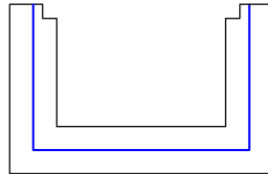
3.4.1 固定荷重

躯体自重のうち，構造物の断面部材として見込んでいないダクト蓋重量 $3.6\text{kN}/\text{m}^2$ を両側壁の上端で負担する。

また，構造物の部材断面として見込んでいない底版側溝底面より上方の 2 次コンクリート重量を，底版への荷重として考慮する。

3.4.2 機器・配管荷重

地震時に屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）に作用する機器・配管系の荷重図を図3-18に示す。機器・配管荷重は、常時・地震時ともに付加質量でモデル化する。



— 機器・配管重量 1.0kN/m^2 を考慮する部材

図3-18 解析用機器・配管荷重図

3.4.3 積雪荷重

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

3.5 地震応答解析の解析ケース

3.5.1 耐震評価における解析ケース

(1) 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

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

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）は、MMR 上に設置され、側面に埋戻土が分布し、主たる荷重は埋戻土の土圧となることから、埋戻土の初期せん断弾性係数のばらつきを考慮する。

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

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

表 3-7 解析ケース

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

(2) 耐震評価における解析ケースの組合せ

耐震評価においては、基準地震動 S_s 全波（6波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（6波）を加えた全12波に対し、基本ケース（ケース①）を実施する。基本ケースにおいて、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び地盤の支持力照査の照査項目ごとに照査値が0.5を超える照査項目に対して、最も厳しい地震動を用いて、表3-8に示す解析ケース（ケース②及び③）を実施する。すべての照査項目の照査値がいずれも0.5以下の場合、照査値が最も厳しくなる地震動を用いて、解析ケース②及び③を実施する。耐震評価における解析ケースを表3-8に示す。また、追加解析ケースを実施する地震動の選定フローを図3-19に示す。

表3-8 耐震評価における解析ケース

解析ケース		ケース①	ケース②	ケース③
		基本ケース	地盤物性のばらつき (+1 σ) を考慮した解析ケース	地盤物性のばらつき (-1 σ) を考慮した解析ケース
地盤物性		平均値	平均値 + 1 σ	平均値 - 1 σ
地震動 (位相)	$S_s - D$	++* ¹	○	基準地震動 S_s (6波) に位相反転を考慮した地震動 (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、照査値が最も厳しくなる地震動を用いてケース②及び③を実施する。
		-+* ¹	-* ²	
		+-* ¹	○	
		--* ¹	-* ²	
	$S_s - F1$	++* ¹	○	
	$S_s - F2$	++* ¹	○	
	$S_s - N1$	++* ¹	○	
		-+* ¹	-* ²	
	$S_s - N2$ (NS)	++* ¹	○	
		-+* ¹	-* ²	
$S_s - N2$ (EW)	++* ¹	○		
	-+* ¹	-* ²		

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

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

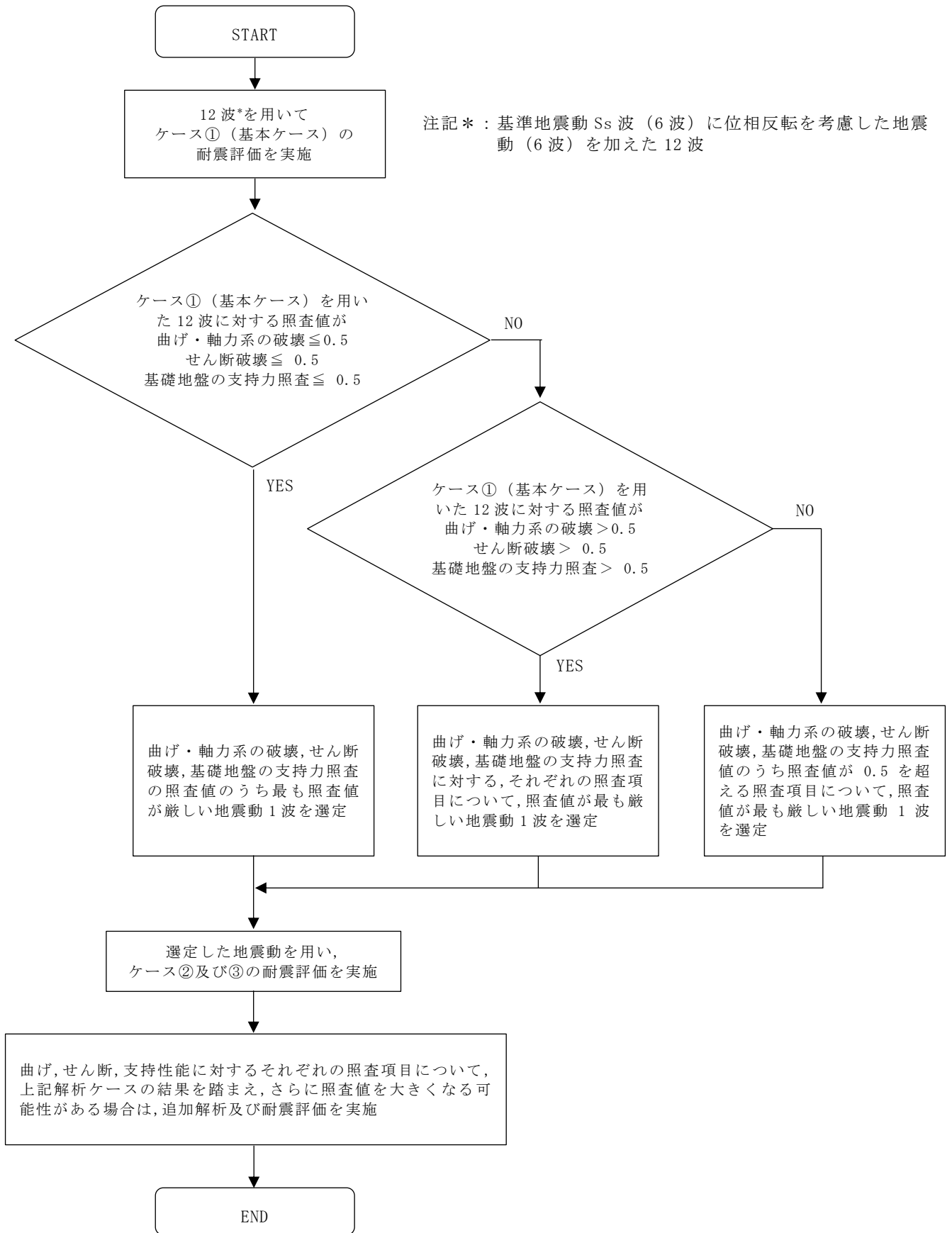


図 3-19 追加解析を実施する地震動の選定フロー

3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース

(1) 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

「3.5.1 耐震評価における解析ケース」と同様に、地盤物性のばらつきを考慮する（表 3-9 に示すケース②及び③）。

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

設定した、圧縮強度及びヤング係数を表 3-10 に示す。

表 3-9 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_o : 初期せん断弾性係数)	岩盤 (G_a : 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	コンクリート 実強度

表 3-10 コンクリート実強度を考慮した物性値

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

(3) 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケースの組合せ

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

また、構造物の延長において、選定された断面（A-A断面）と直交する断面も含むことから、機器・配管系に対する床応答加速度への保守的な配慮として、A-A断面の検討の際に、A-A断面と直交する方向の成分の地震動も含めて評価する。

表 3-11 機器・配管系の応答加速度抽出のための解析ケース

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

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

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

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

4. 評価内容

4.1 入力地震動の設定

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

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

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

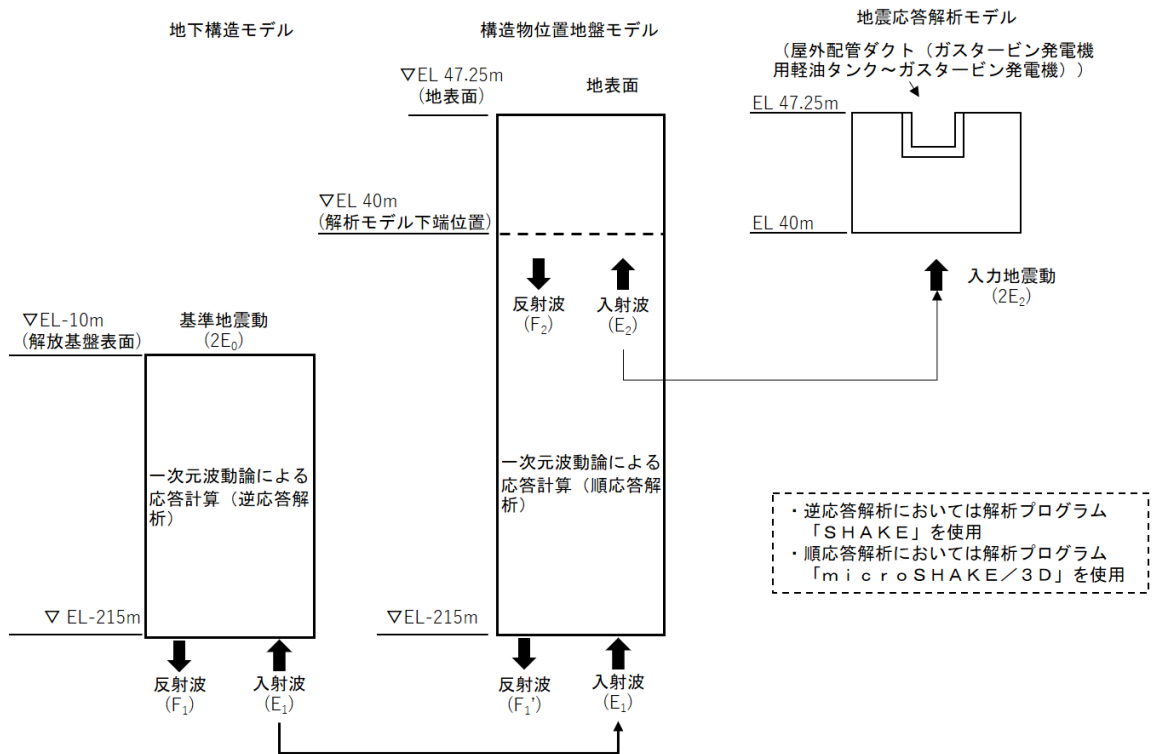
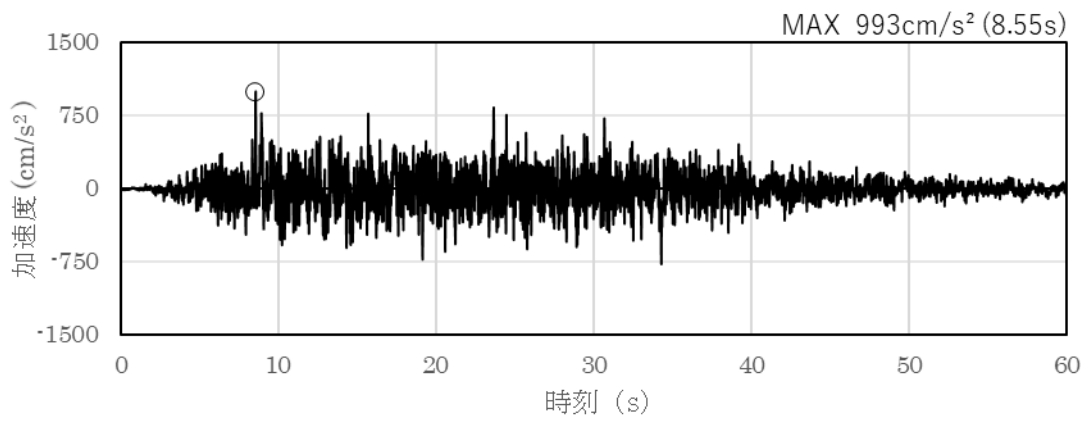
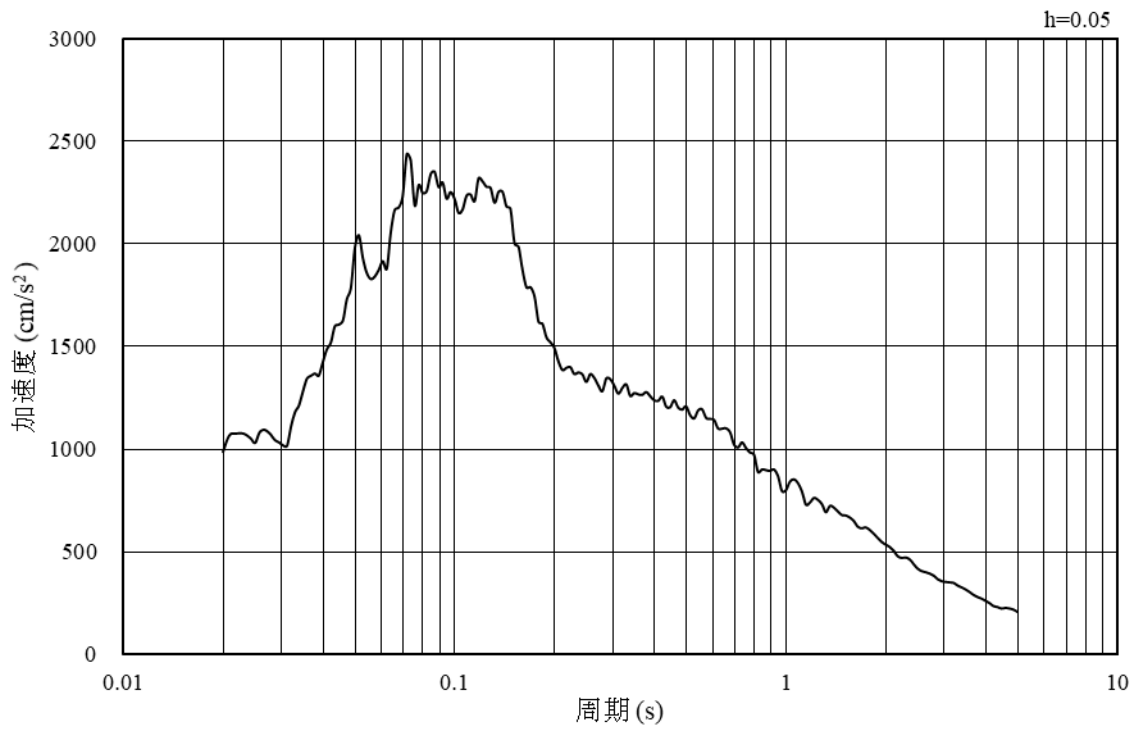


図4-1 入力地震動算定の概念図

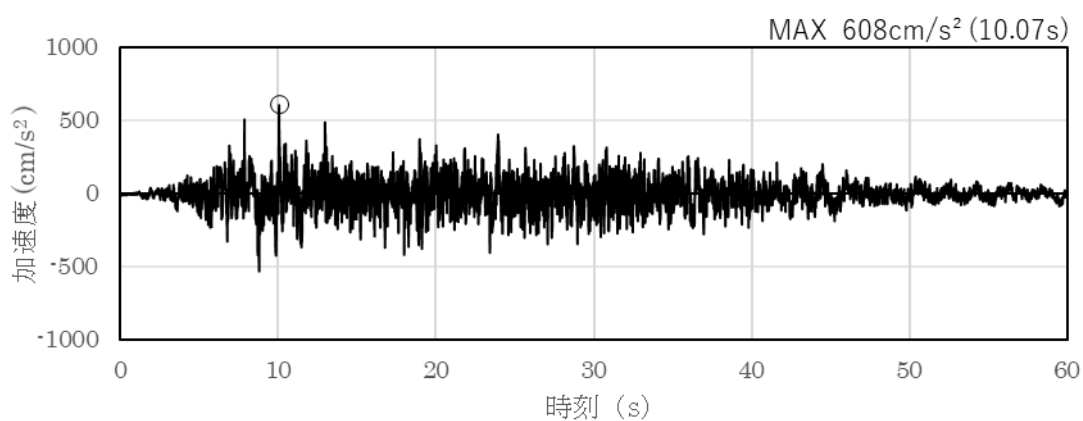


(a) 加速度時刻歴波形

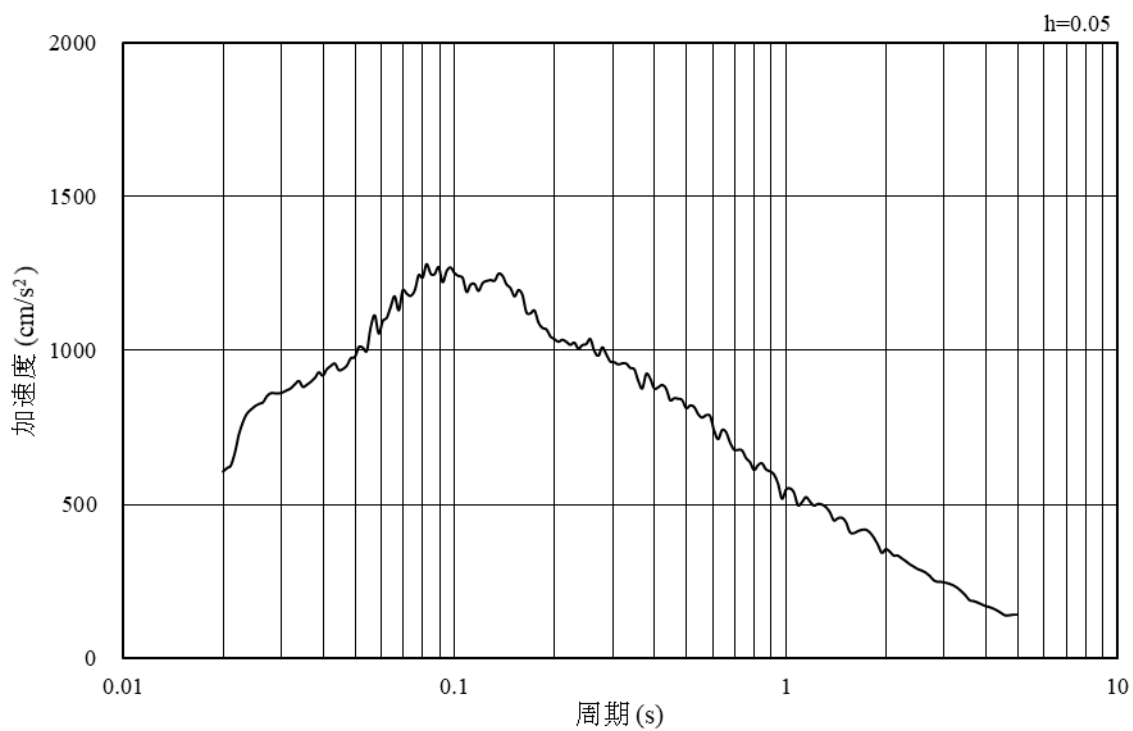


(b) 加速度応答スペクトル

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)

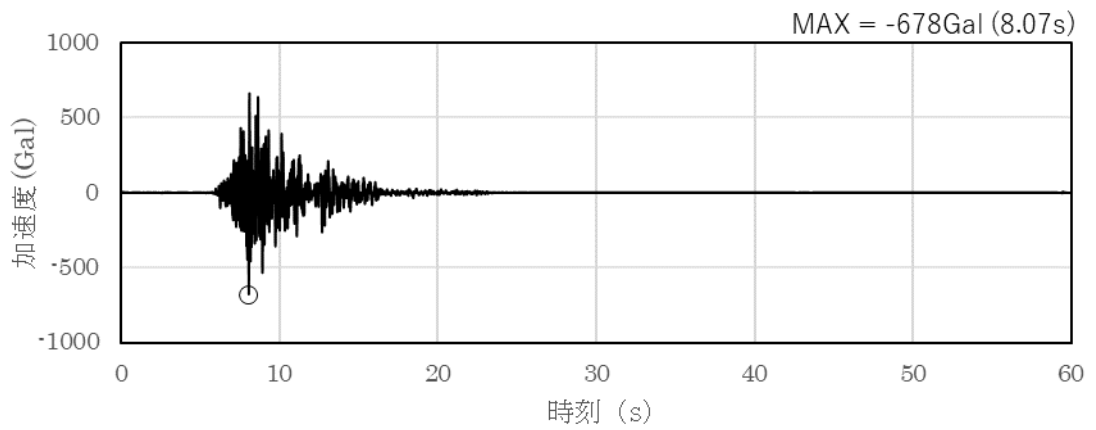


(a) 加速度時刻歴波形

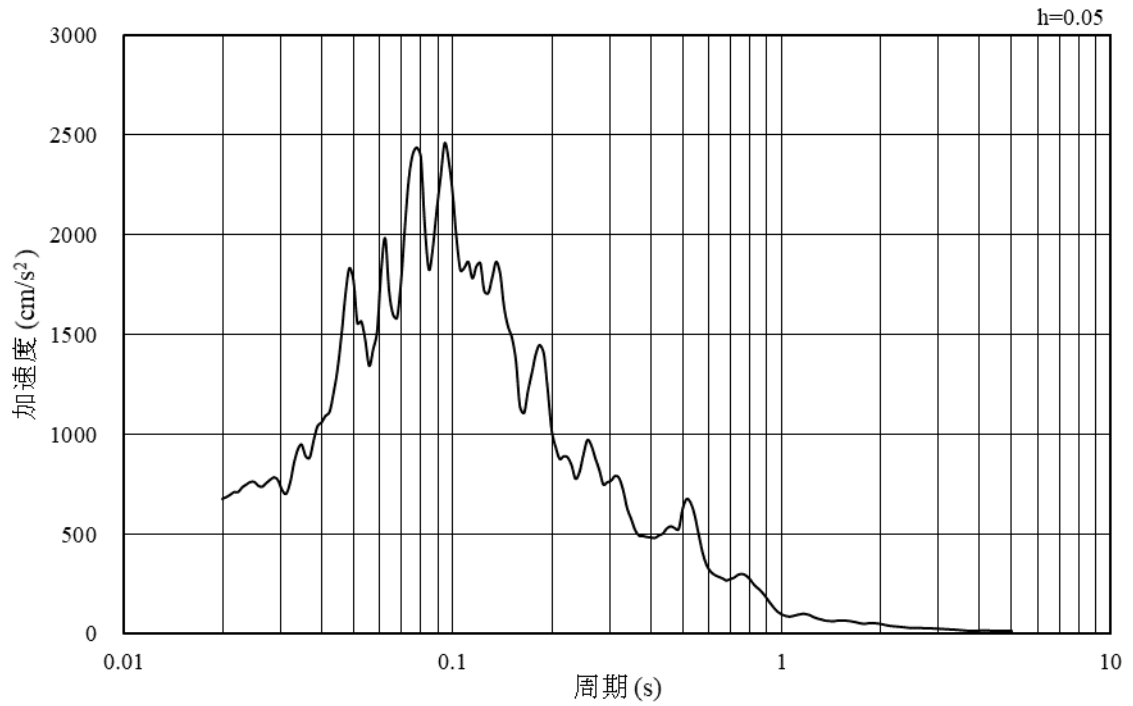


(b) 加速度応答スペクトル

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)

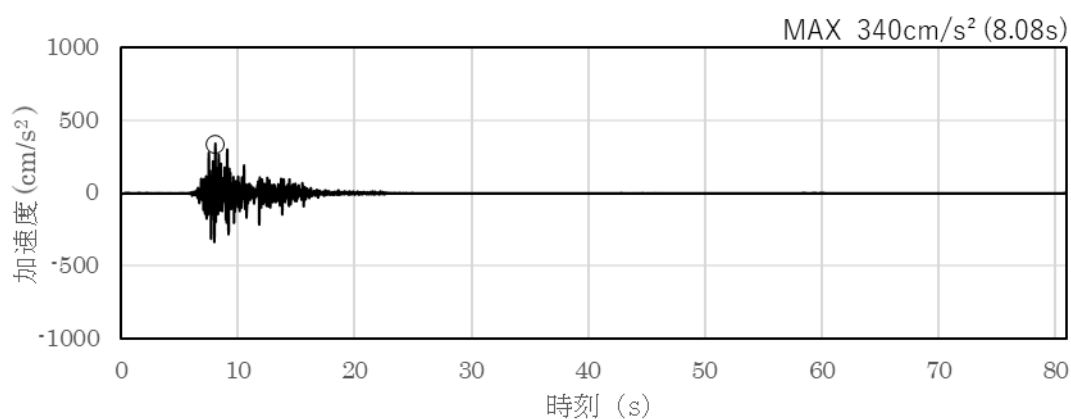


(a) 加速度時刻歴波形

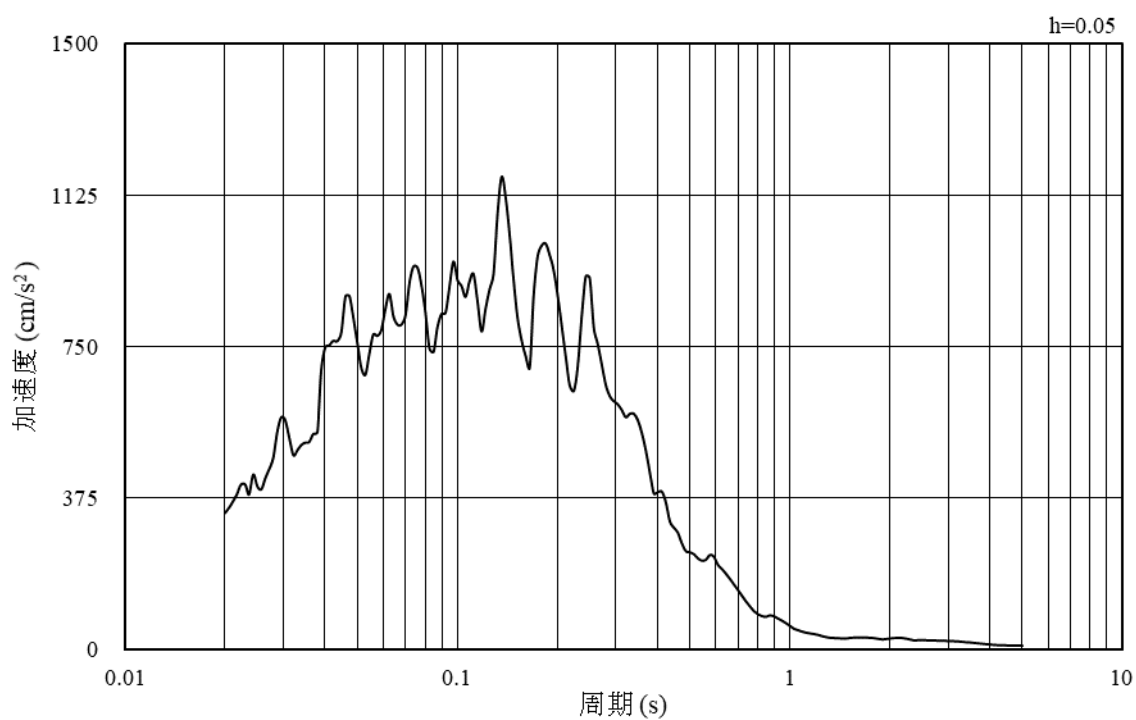


(b) 加速度応答スペクトル

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)

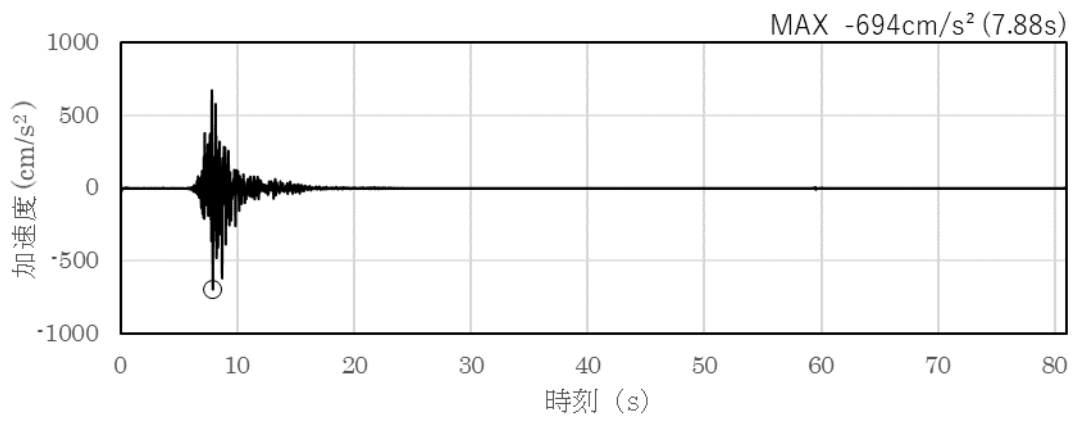


(a) 加速度時刻歴波形

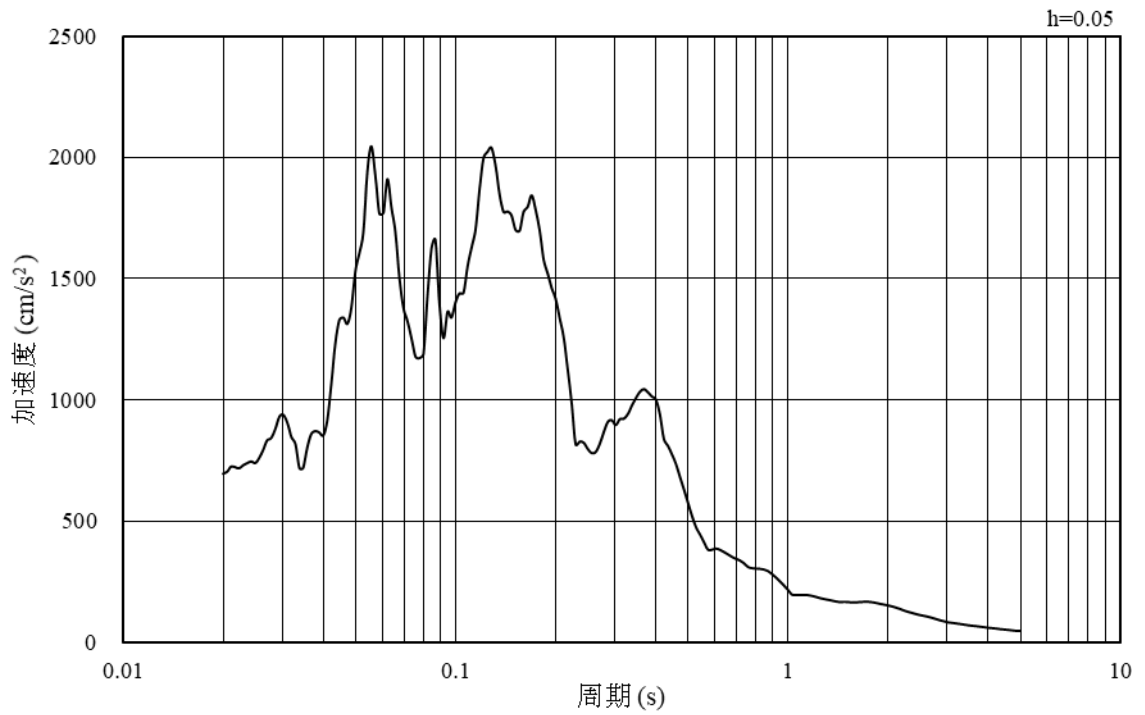


(b) 加速度応答スペクトル

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)

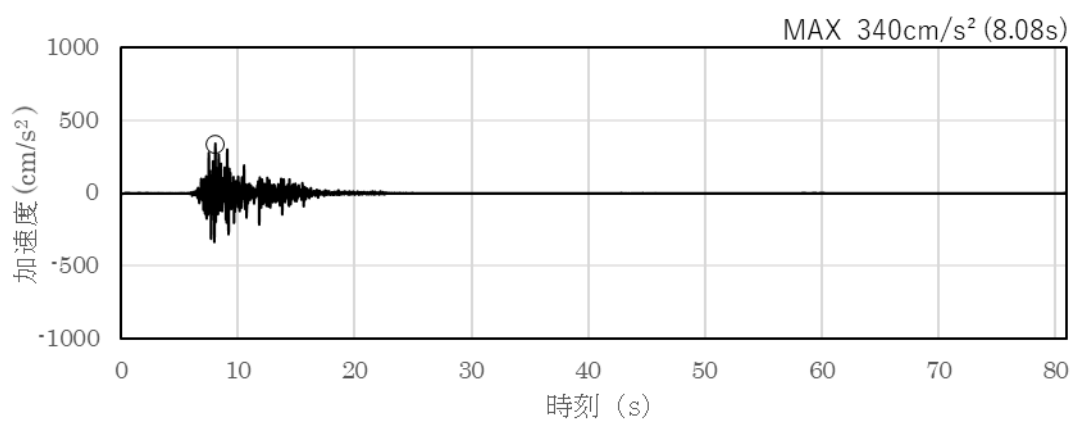


(a) 加速度時刻歴波形

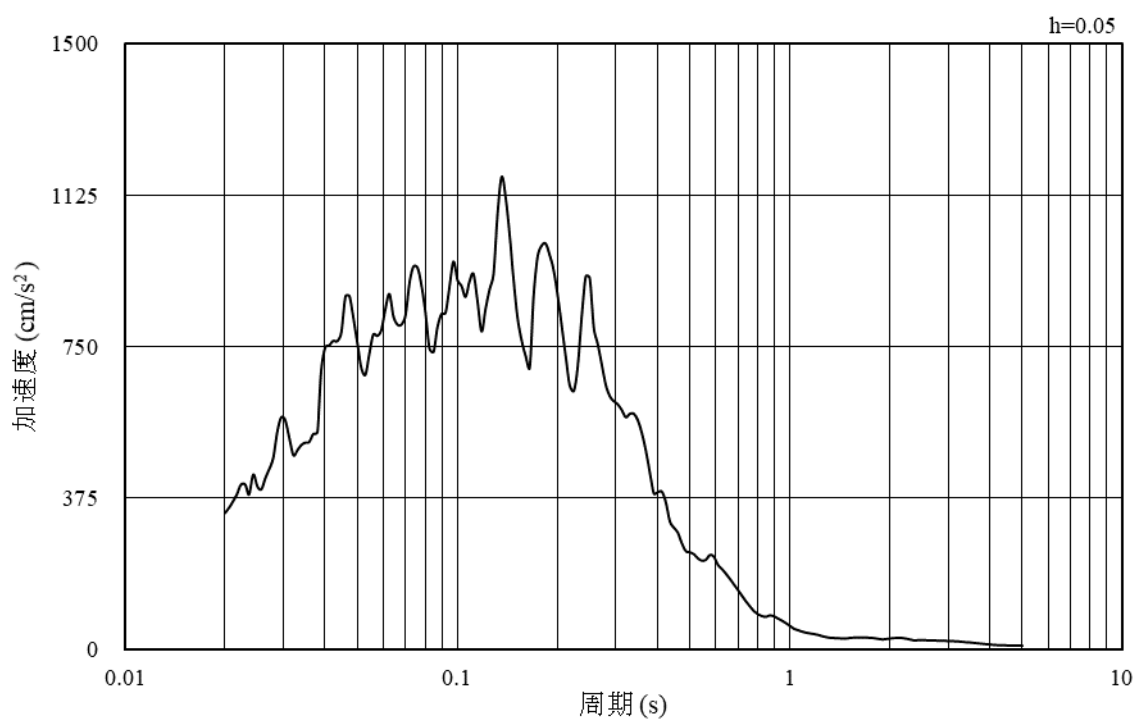


(b) 加速度応答スペクトル

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，EW方向)

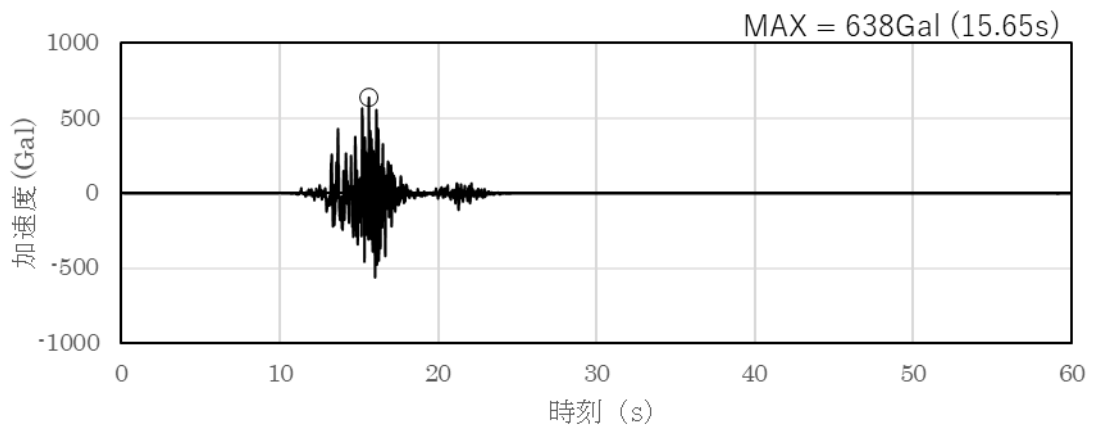


(a) 加速度時刻歴波形

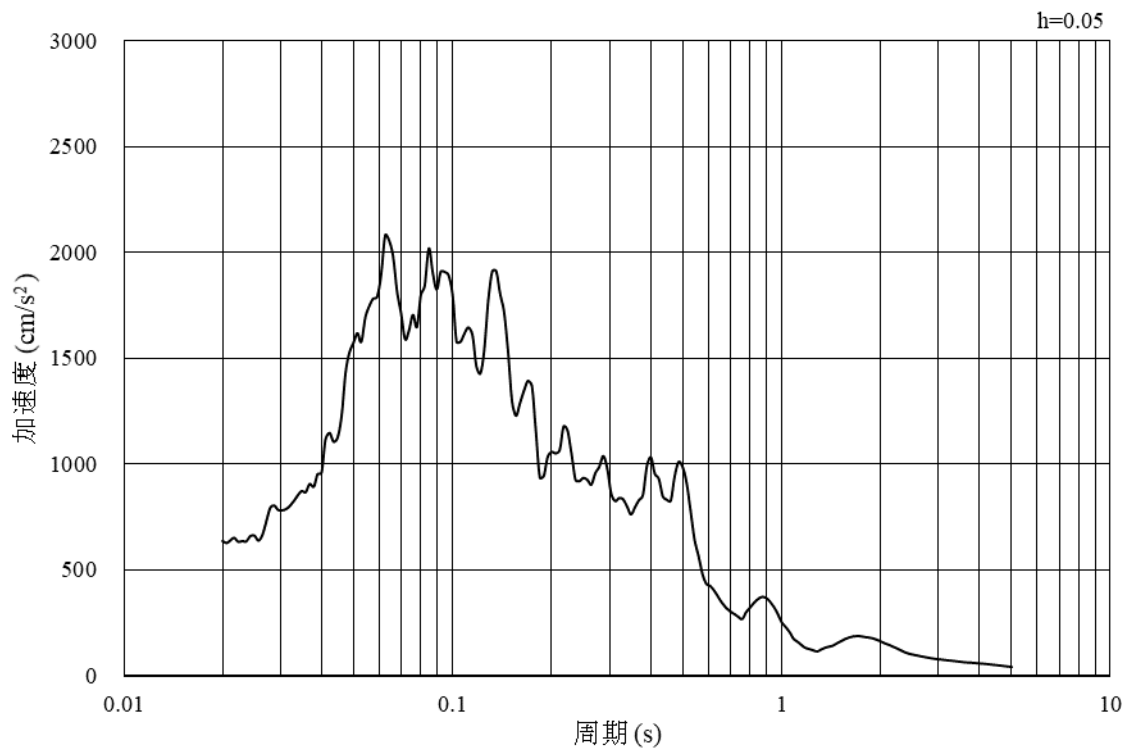


(b) 加速度応答スペクトル

図 4—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)

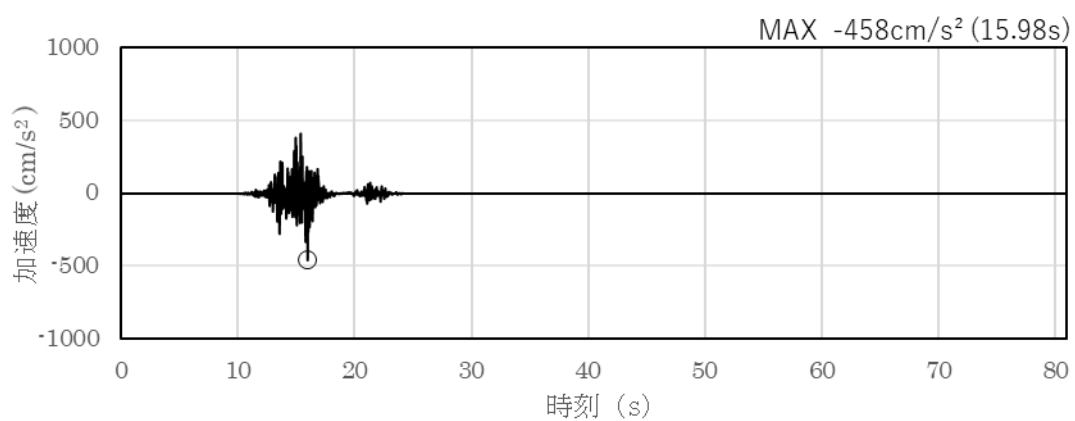


(a) 加速度時刻歴波形

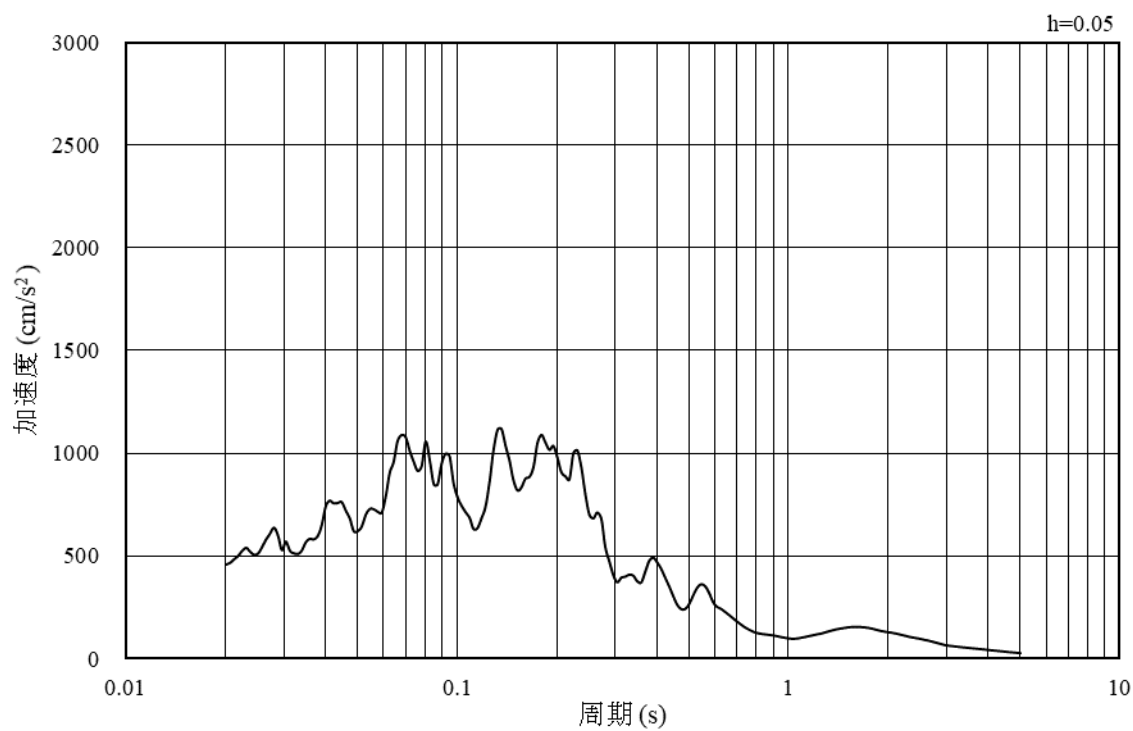


(b) 加速度応答スペクトル

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)

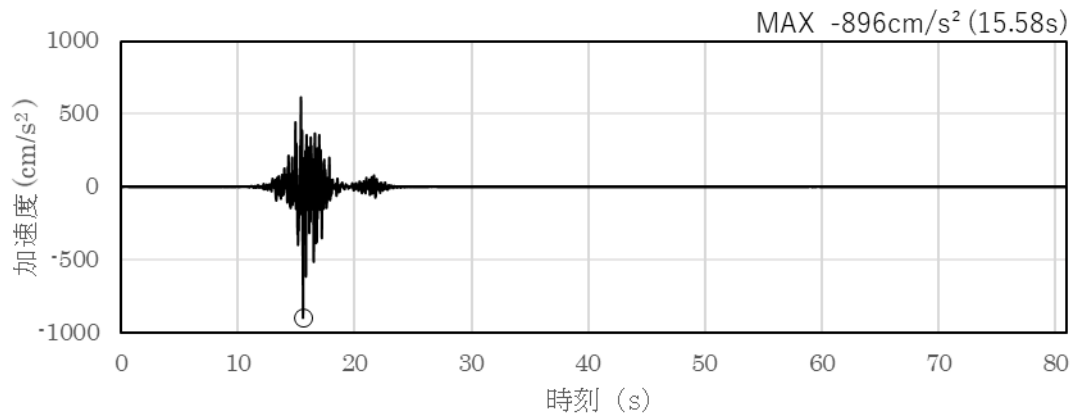


(a) 加速度時刻歴波形

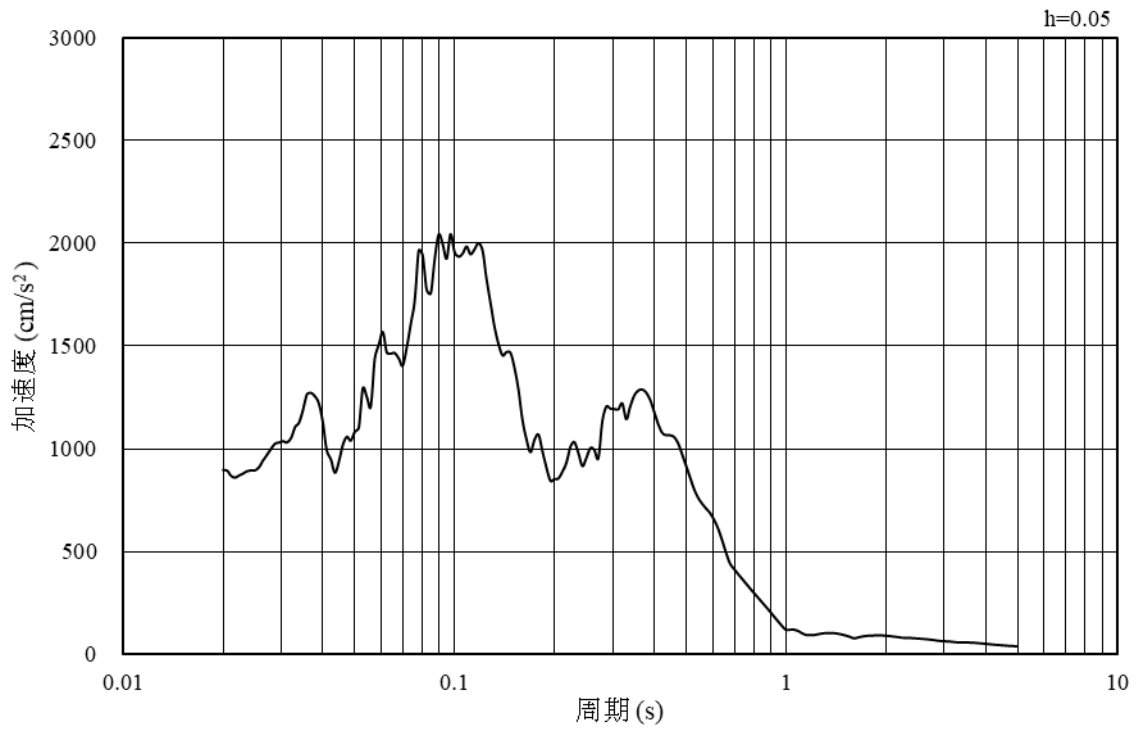


(b) 加速度応答スペクトル

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)

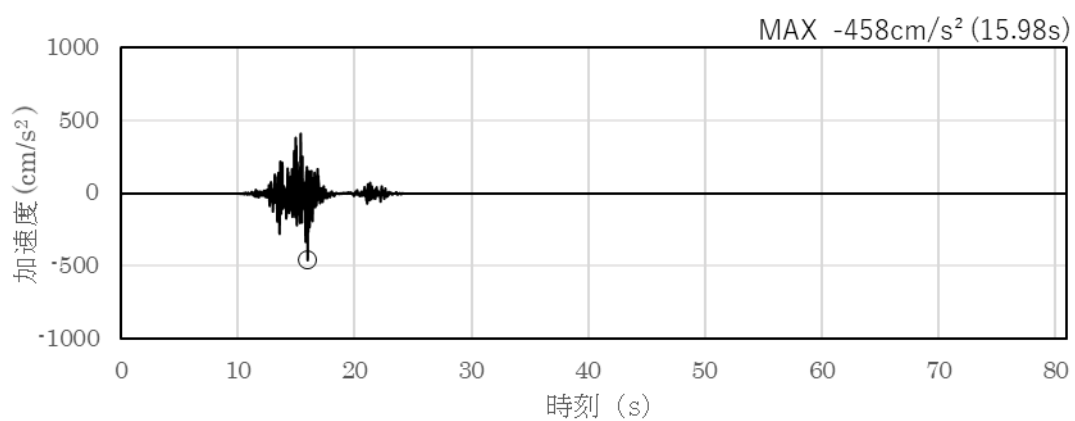


(a) 加速度時刻歴波形

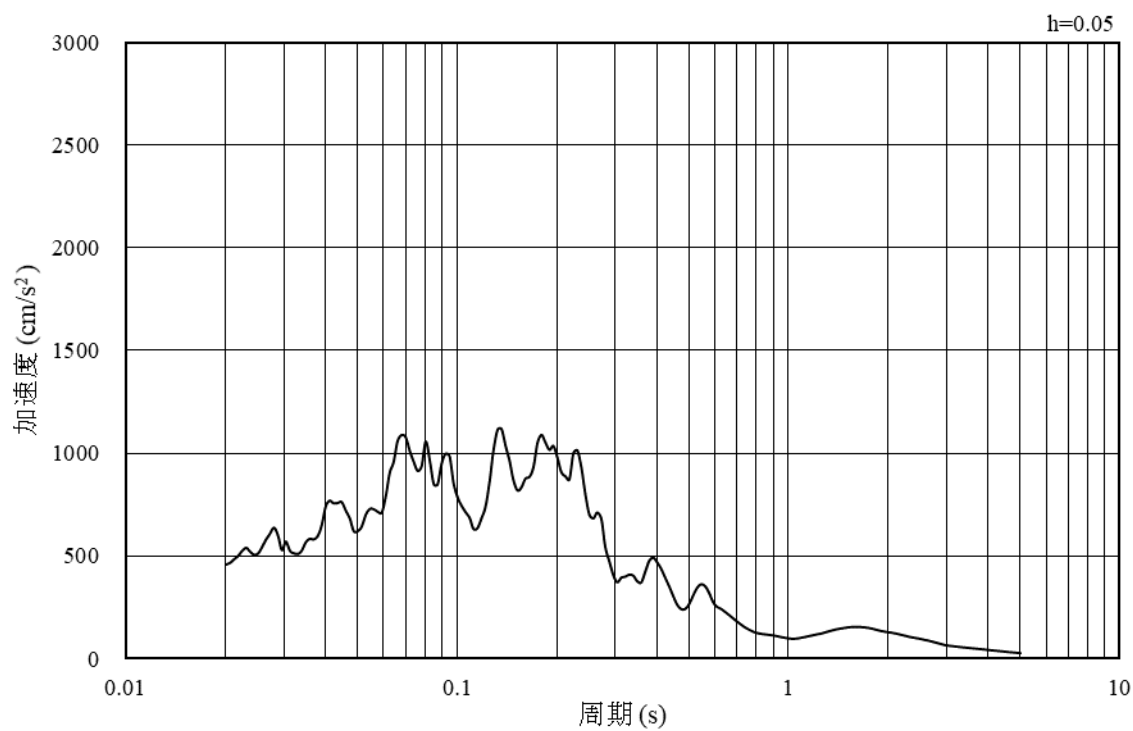


(b) 加速度応答スペクトル

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)

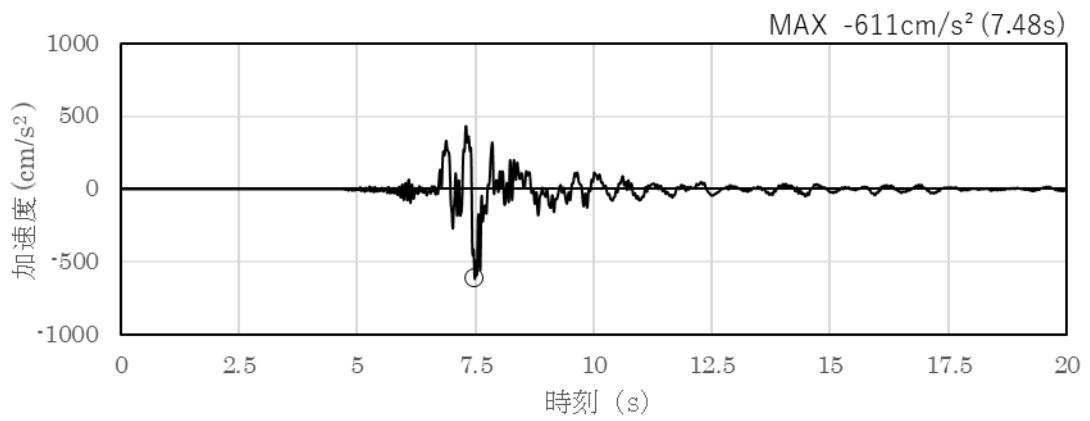


(a) 加速度時刻歴波形

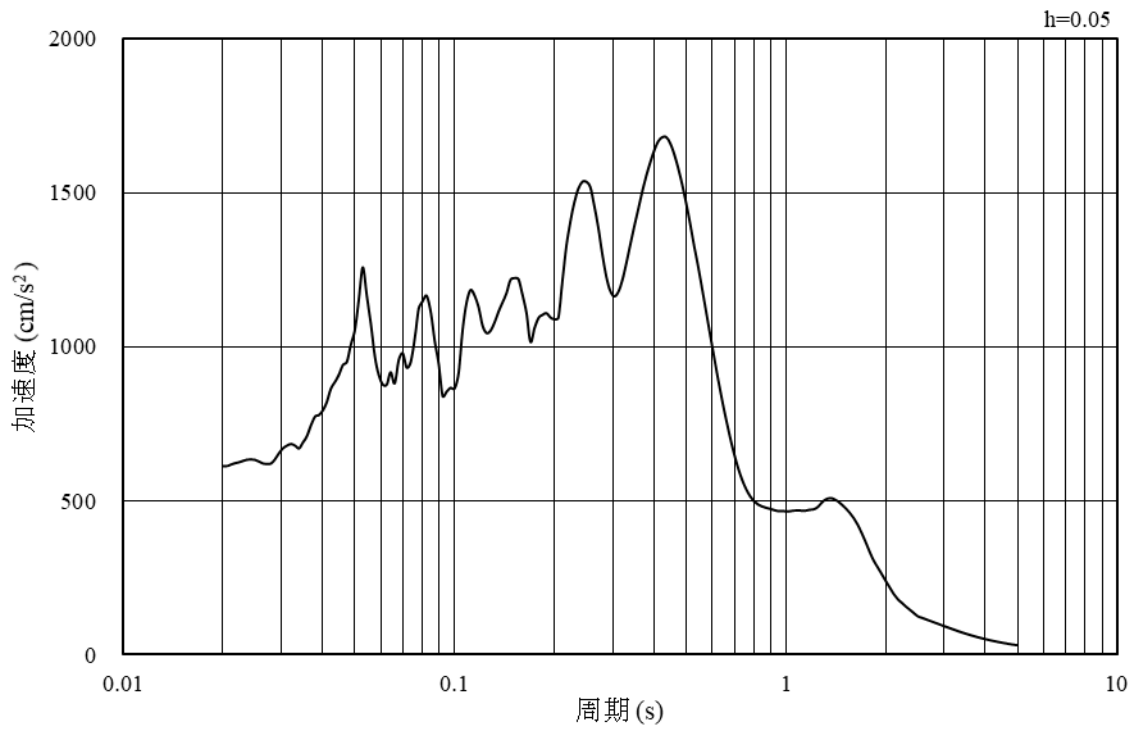


(b) 加速度応答スペクトル

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)

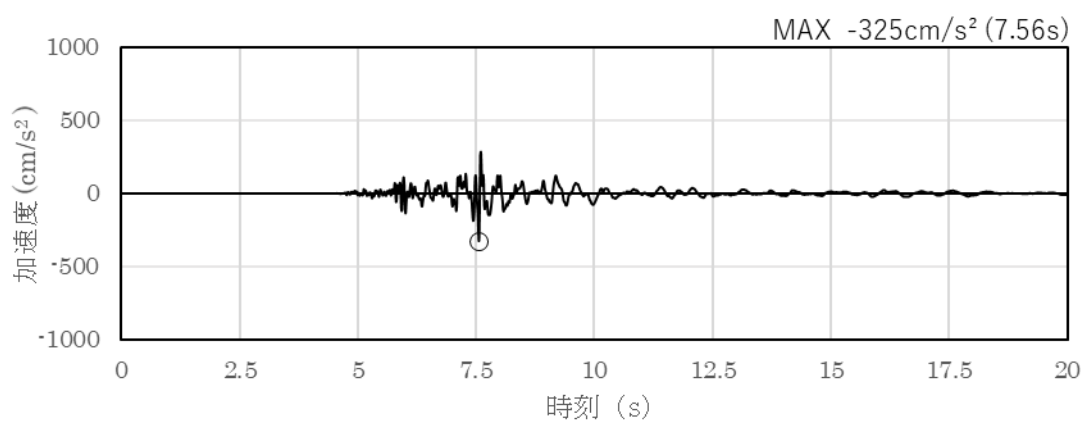


(a) 加速度時刻歴波形

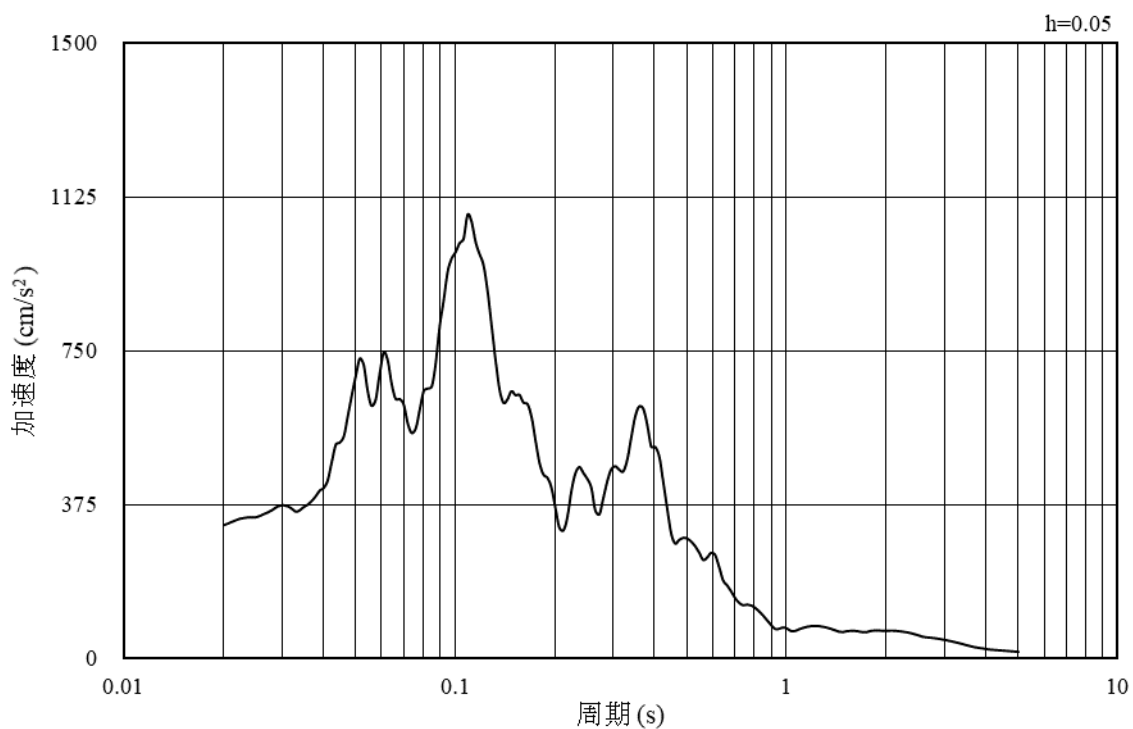


(b) 加速度応答スペクトル

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)

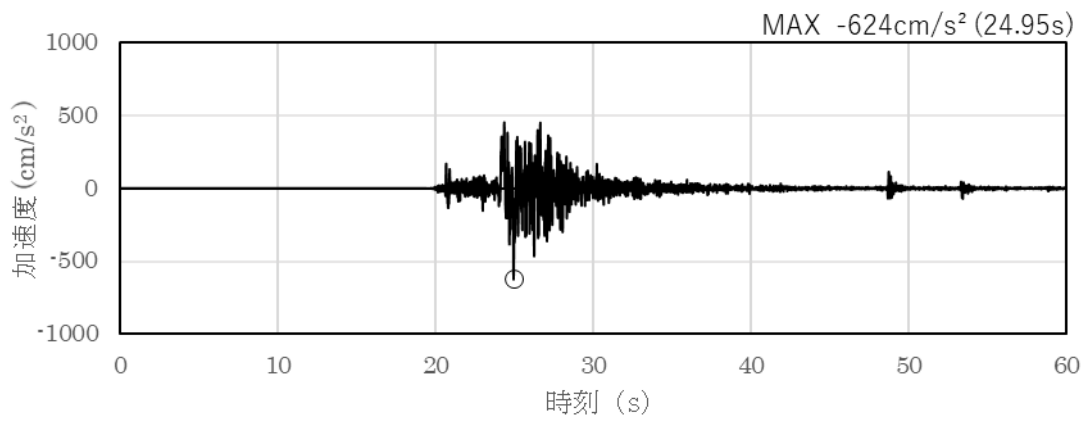


(a) 加速度時刻歴波形

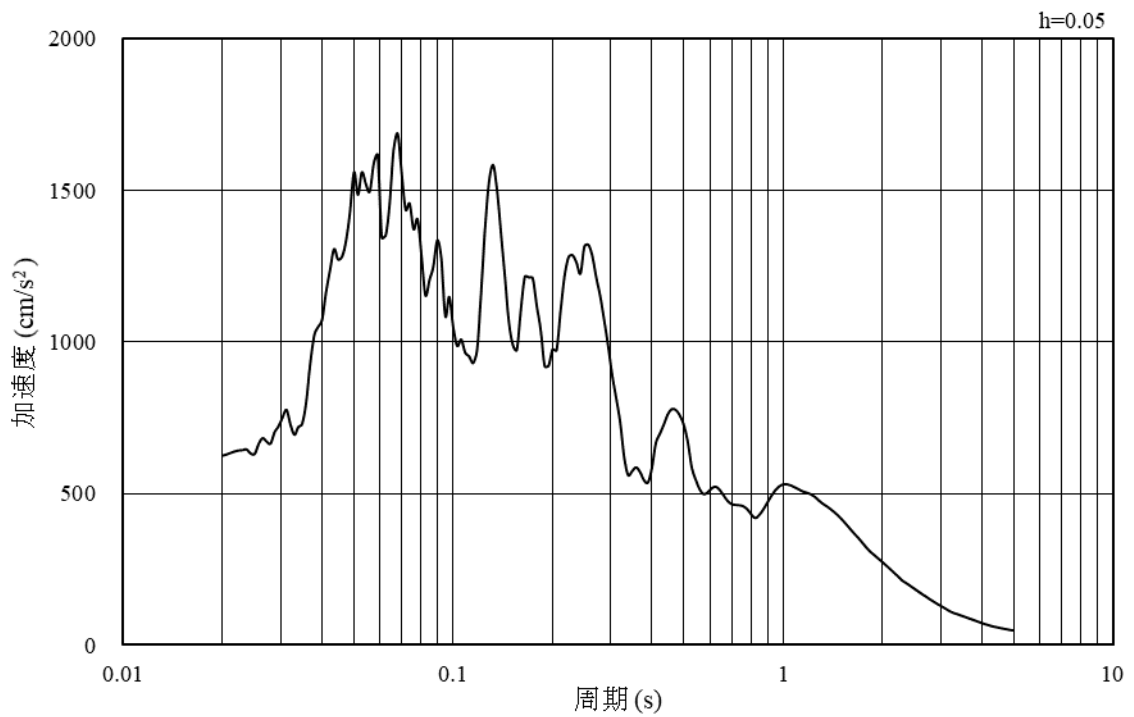


(b) 加速度応答スペクトル

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)

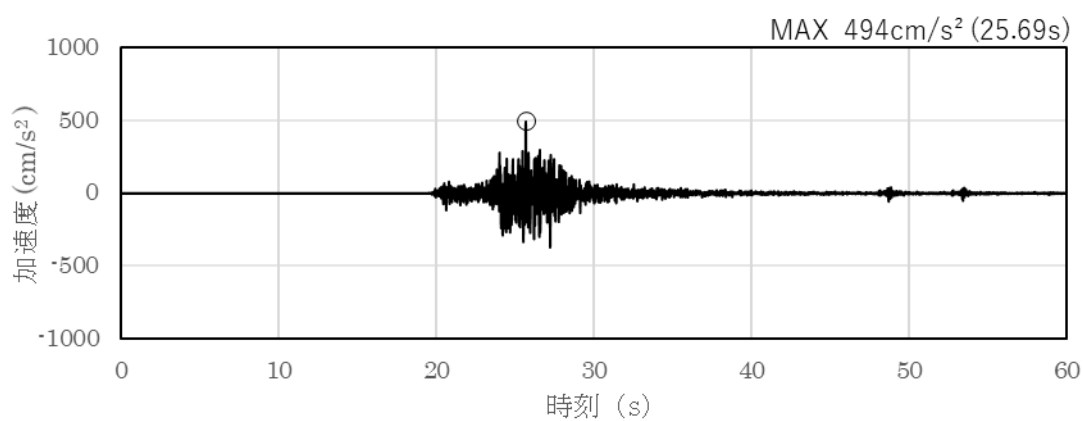


(a) 加速度時刻歴波形

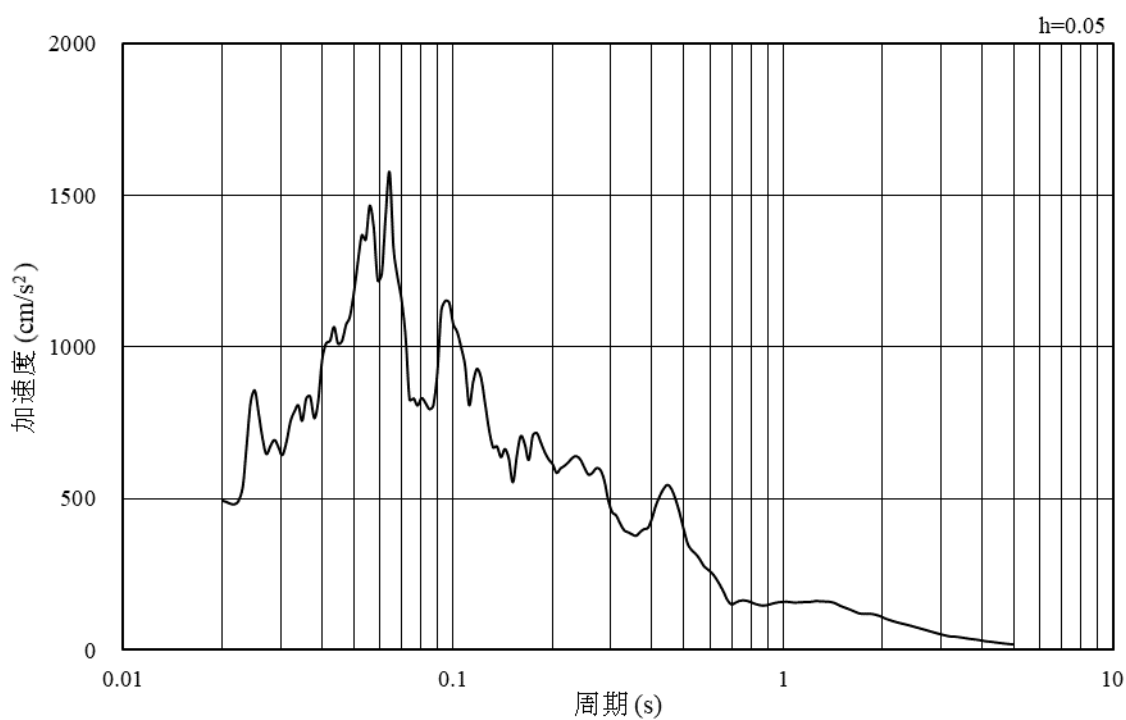


(b) 加速度応答スペクトル

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)

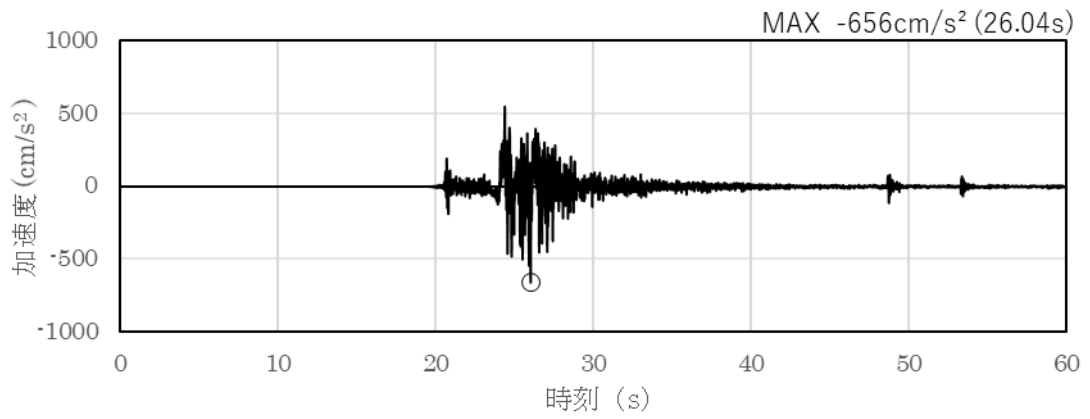


(a) 加速度時刻歴波形

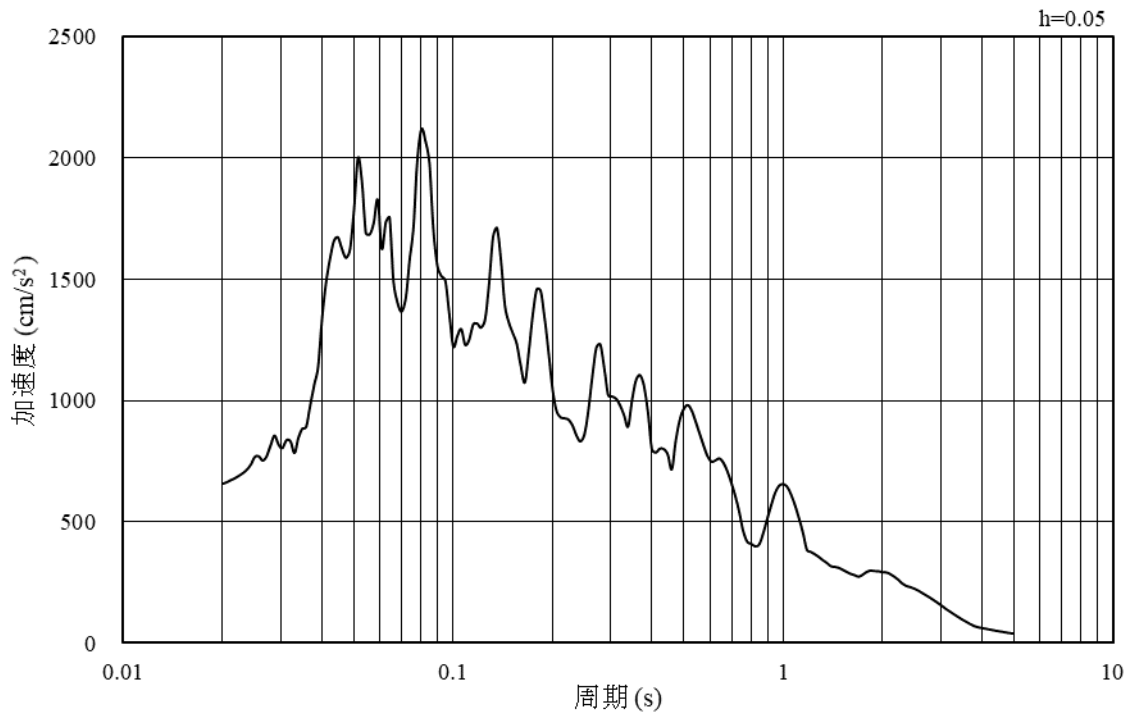


(b) 加速度応答スペクトル

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)

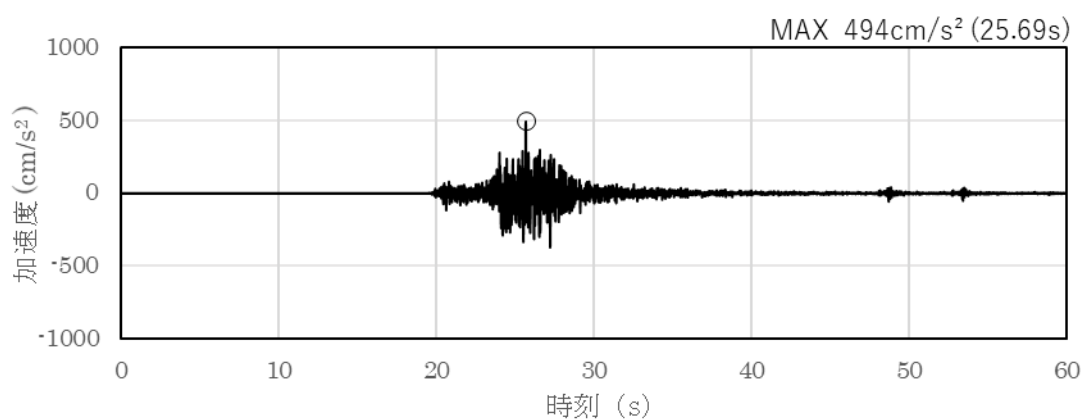


(a) 加速度時刻歴波形

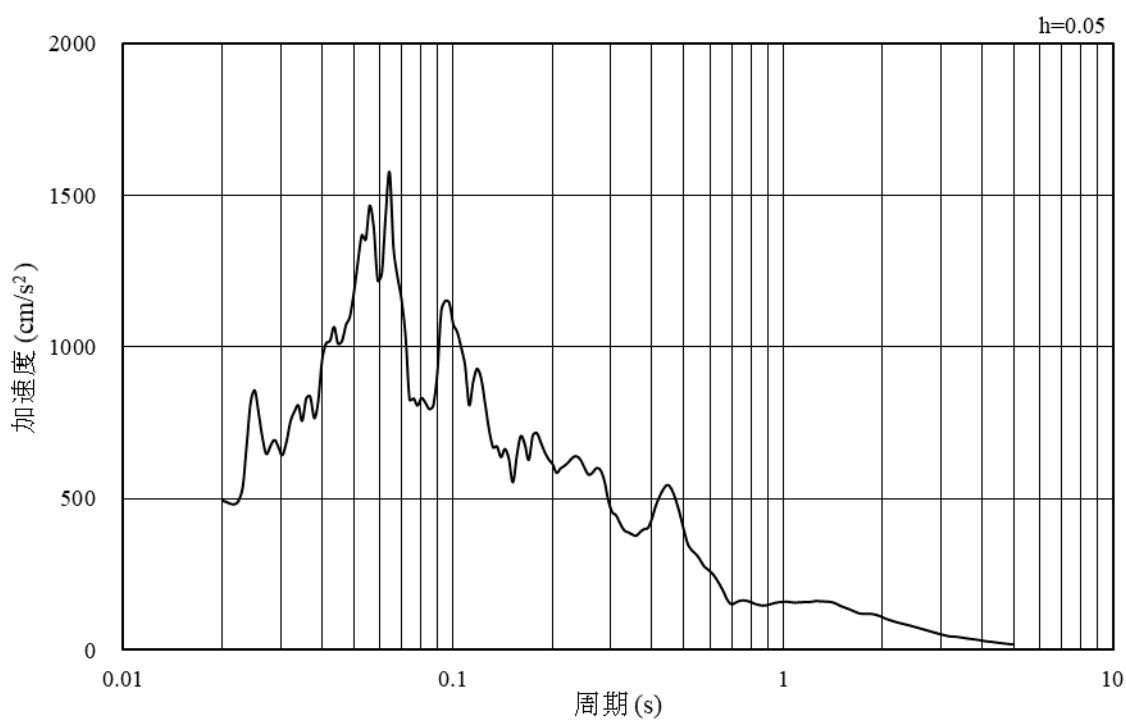


(b) 加速度応答スペクトル

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)

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、「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、原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005年）（以下「土木学会マニュアル」という。）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 (圧縮縁コンクリートひずみ 10000 μ)

ε_d : 照査用ひずみ ($\varepsilon_d = \gamma_a \cdot \varepsilon$)

γ_a : 構造物解析係数 ($\gamma_a = 1.2$)

ε : 圧縮縁の発生ひずみ

4.2.2 せん断の破壊に対する許容限界

構造部材のせん断破壊に対する許容限界は、棒部材式で求まるせん断耐力とする。

棒部材式

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

ここで、 $V_{y d}$: せん断耐力

$V_{c d}$: コンクリートが分担するせん断耐力

$V_{s d}$: せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \beta_n &= 1 + M_o / M_d \quad (N_d \geq 0) \quad \text{ただし, } \beta_n > 2.0 \quad \text{となる場合は } \beta_n = 2.0 \\ &= 1 + 2M_o / M_d \quad (N_d < 0) \quad \text{ただし, } \beta_n < 0 \quad \text{となる場合は } \beta_n = 0 \end{aligned}$$

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

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

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

A_s : 引張側鋼材の断面積

b_w : 部材の有効幅

d : 部材の有効高さ

N'_d : 設計軸圧縮力

M_d : 設計曲げモーメント

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

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

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

- ここで、 A_w : 区間 s におけるせん断補強鉄筋の総断面積
 f_{wyd} : せん断補強鉄筋の降伏強度を γ_{ms} で除したもので、 400N/mm^2 以下とする。ただし、コンクリート圧縮強度の特性値 f'_{ck} が 60N/mm^2 以上のときは 800N/mm^2 以下とする。
 α : せん断補強鉄筋と部材軸のなす角度
 s : せん断補強鉄筋の配置間隔
 z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で $d/1.15$ とする。
 γ_{bs} : 部材係数

また、土木学会マニュアル 2005 におけるせん断耐力式による評価においては、表 4-2 に示すとおり、複数の安全係数が見込まれていることから、せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施することが可能である。

表 4-2 せん断耐力式による評価において考慮している安全係数

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

注記*：土木学会マニュアルでは、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 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

(1) 基礎地盤

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

基礎地盤の支持性能に対する許容限界を表4-3に示す。

表4-3 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

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

(2) MMR

(a) 接地圧に対する許容限界

MMRに発生する接地圧に対する許容限界は、「コンクリート標準示方書2002」に基づき、コンクリートの支圧強度とする。

MMRの支持性能に対する許容限界を表4-4に示す。

表4-4 MMRの支持性能に対する許容限界

評価項目		基礎地盤	許容限界 (N/mm ²)
支圧強度	A-A断面	コンクリート ($f'_{c k} = 18.0 \text{ N/mm}^2$)	$f'_a = 18.0$

(b) 健全性に対する許容限界

MMRの健全性に対する許容限界は、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」に基づき、表4-5に示すせん断強度及び引張強度とする。

表4-5 MMRのせん断強度及び引張強度

	評価項目	算定式	許容限界
MMR $f'_{c k} = 18.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	せん断強度 (N/mm ²)	$1/5 f'_{c k}$	3.60
	引張強度 (N/mm ²)	$0.23 f'_{c k}^{2/3}$	1.57

5. 評価結果

5.1 地震応答解析結果

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

5.1.1 解析ケース

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

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

解析ケース②及び③を実施する地震動について，表5-1に示す。

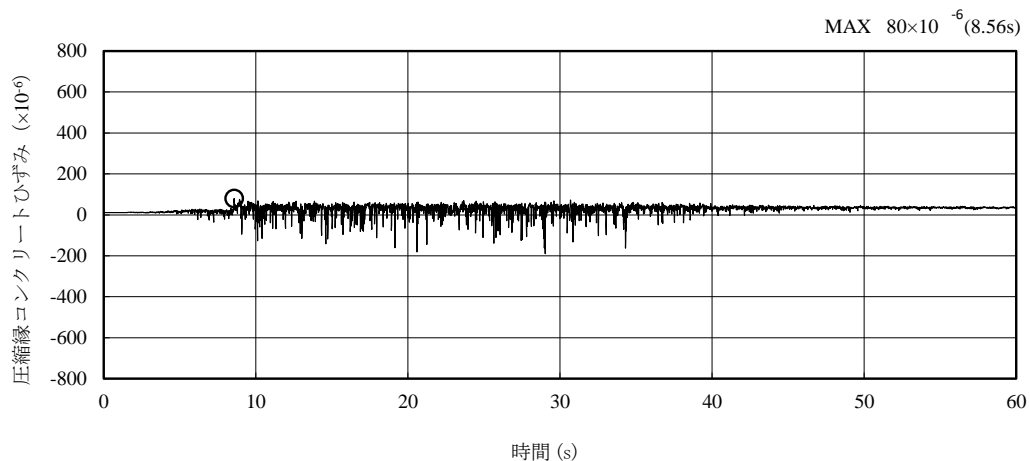
上記実施ケースの結果を踏まえ，照査値に十分な裕度を有することから，追加解析を実施しない。

表5-1 解析ケース②及び③を実施する地震動

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

5.1.2 ひずみの時刻歴波形

曲げ・軸力系の破壊に対する照査において、最も厳しい照査値となる解析ケースの照査時刻における断面力分布図（曲げモーメント、軸力、せん断力）を図5-1に示す。



注：圧縮を正で示す。

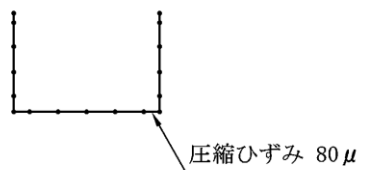
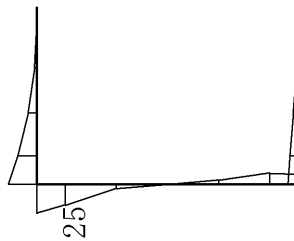


図5-1 曲げ・軸力系の破壊に対する照査が最も厳しくなるケースの圧縮縁コンクリートひずみの時刻歴波形（解析ケース③，S s - D (+ -))

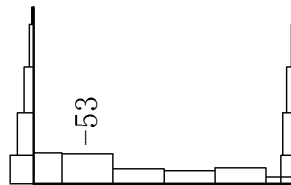
5.1.3 断面力分布（せん断破壊に対する照査）

せん断破壊に対する照査において、最も厳しい照査値となる解析ケースの照査時刻における断面力分布図（曲げモーメント、軸力、せん断力）を図5-2に示す。



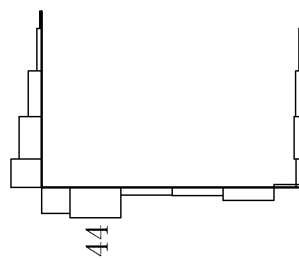
数値：評価位置における断面力

(a) 曲げモーメント (kN・m)



数値：評価位置における断面力

(b) 軸力 (kN) (+：引張，-：圧縮)



数値：評価位置における断面力

(c) せん断力 (kN)

図5-2 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力図
(解析ケース③， $S_s - D (+)$ ， $t = 21.23s$)

5.1.4 最大せん断ひずみ分布

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

最大照査値を示す解析ケースの一覧を表 5-2 に、最大せん断ひずみ分布図を図 5-3 に示す。

埋戻土に発生するせん断ひずみは最大でも 1 % 以下であり、試験において確認しているひずみの範囲内であることを確認した。

表 5-2 最大照査値を示すケースの一覧

評価項目	せん断破壊に対する照査
地震動	ケース③ S s - D (+ -)

最大せん断ひずみ ($\times 10^{-4} \gamma_{max}$)

: 埋戻土の範囲

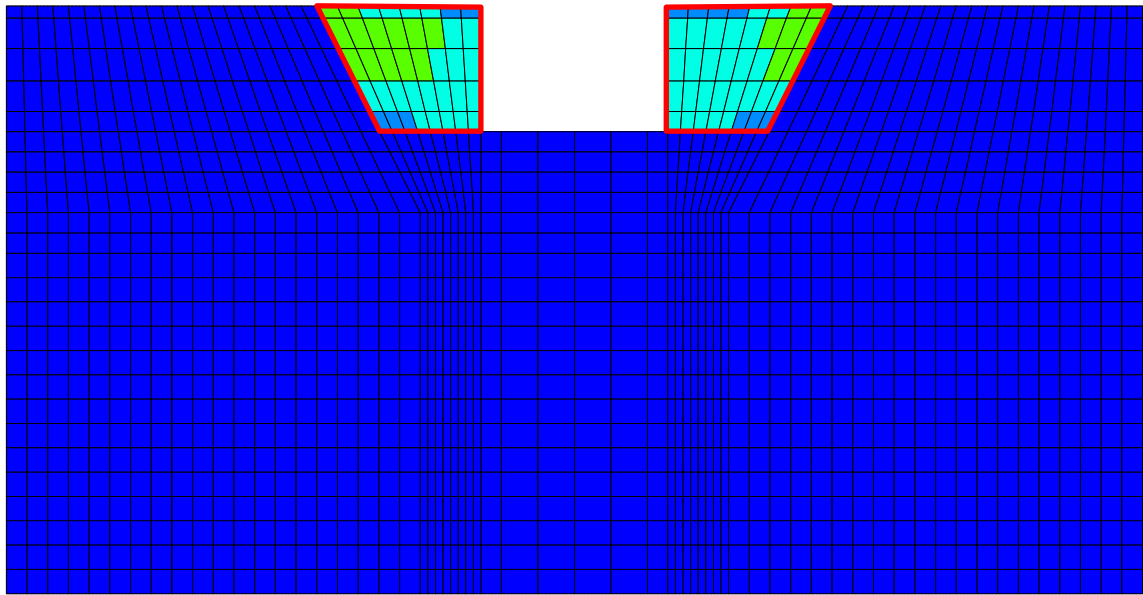
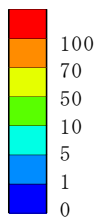


図 5-3 最大せん断ひずみ分布図 (A-A 断面) (解析ケース③, S_s-D (+-))
曲げ・軸力系の破壊に対する照査で照査値が最も厳しい解析ケース

5.2 構造部材の健全性に対する評価結果

5.2.1 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果

構造強度を有することの確認における曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果を表5-3に示す。照査値は、応力度を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。同表のとおり、全地震動において照査用ひずみは限界ひずみを下回ることを確認した。

表5-3 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果
(構造強度を有することの確認)

解析ケース	地震動		照査用ひずみ*	限界ひずみ	照査値
			ϵ_d	ϵ_R	ϵ_d / ϵ_R
①	S s - D	++	93 μ	10000 μ	0.01
		+ -	94 μ	10000 μ	0.01
	S s - F 1	++	68 μ	10000 μ	0.01
	S s - F 2	++	78 μ	10000 μ	0.01
	S s - N 1	++	60 μ	10000 μ	0.01
	S s - N 2 (E W)	++	71 μ	10000 μ	0.01
	S s - N 2 (N S)	++	56 μ	10000 μ	0.01
②	S s - D	+ -	91 μ	10000 μ	0.01
③	S s - D	+ -	96 μ	10000 μ	0.01

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

5.2.2 せん断破壊に対する評価結果

構造強度を有することの確認におけるせん断破壊に対する評価結果を表 5-4 に示す。照査値は、応力度を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。

同表より、全部材で照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認した。

表 5-4 せん断破壊に対する評価結果

解析 ケース	地震動		評価位置*1	照査用	せん断	照査値 $V_d/V_{y d}$
				せん断力 V_d *2(kN)	耐力 $V_{y d}$ (kN)	
①	S s - D	++	側壁	34	1064	0.04
			底版	43	1081	0.05
		+-	側壁	35	1065	0.04
			底版	45	1078	0.05
	S s - F 1	++	側壁	27	1070	0.03
			底版	34	1082	0.04
	S s - F 2	++	側壁	29	1066	0.03
			底版	40	1080	0.04
	S s - N 1	++	側壁	23	1073	0.03
			底版	29	1083	0.03
	S s - N 2 (E W)	++	側壁	27	1067	0.03
			底版	35	1080	0.04
	S s - N 2 (N S)	++	側壁	22	1070	0.03
			底版	28	1083	0.03
②	S s - D	+-	側壁	35	1066	0.04
			底版	44	1082	0.05
③	S s - D	+-	側壁	36	1065	0.04
			底版	46	1078	0.05

注記*1：評価位置は図 5-4 に示す。

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

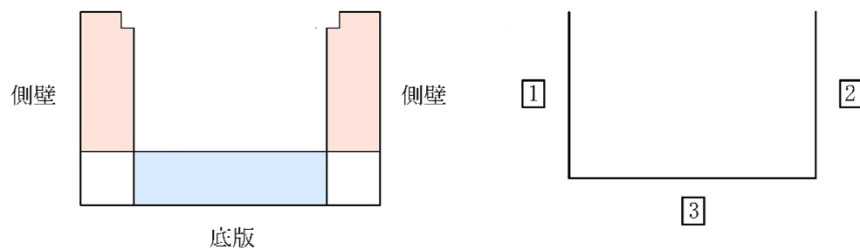


図 5-4 評価位置図 (A-A 断面)

5.3 基礎地盤の支持性能に対する評価結果

5.3.1 基礎地盤

基礎地盤の支持性能に対する評価結果を表5-5に示す。また、最大接地圧分布図を図5-5に示す。同表より、基礎地盤に発生する接地圧が極限支持力度を下回ることを確認した。

表5-5 基礎地盤の支持性能に対する評価結果

解析ケース	地震動		最大接地圧 R_d (N/mm ²)	極限支持力度 R_u (N/mm ²)	照査値 R_d / R_u
①	S _s -D	++	0.10	3.9	0.03
		+ -	0.09	3.9	0.03
	S _s -F1	++	0.08	3.9	0.03
	S _s -F2	++	0.09	3.9	0.03
	S _s -N1	++	0.08	3.9	0.02
	S _s -N2 (EW)	++	0.09	3.9	0.03
	S _s -N2 (NS)	++	0.09	3.9	0.03
②	S _s -D	+ -	0.09	3.9	0.03
③	S _s -D	+ -	0.09	3.9	0.03

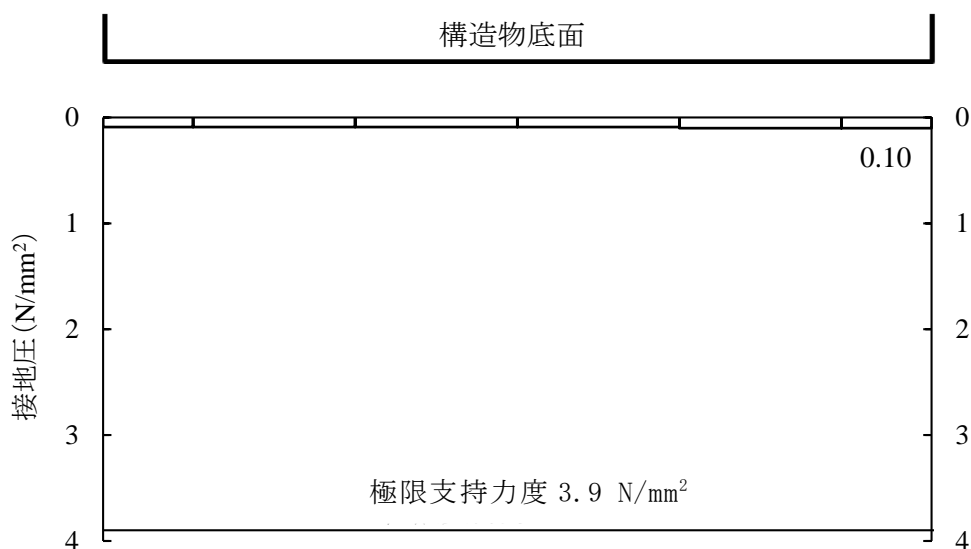


図5-5 基礎地盤の最大接地圧分布図 (A-A断面)
(解析ケース①, S_s-D (++))

5.3.2 MMR

(1) 支持性能評価

MMRの支持性能に対する評価結果を表5-6に示す。また、最大接地圧分布図を図5-6に示す。

同表より、MMRに発生する接地圧が支圧強度を下回ることを確認した。

表5-6 MMRの支持性能に対する評価結果

解析ケース	地震動		最大接地圧	支圧強度	照査値
			R_d (N/mm ²)	f'_a (N/mm ²)	R_d / f'_a
①	S _s -D	++	0.10	18.0	0.01
		+ -	0.12	18.0	0.01
	S _s -F1	++	0.09	18.0	0.01
	S _s -F2	++	0.09	18.0	0.01
	S _s -N1	++	0.09	18.0	0.01
	S _s -N2 (EW)	++	0.08	18.0	0.01
	S _s -N2 (NS)	++	0.08	18.0	0.01
②	S _s -D	+ -	0.11	18.0	0.01
③	S _s -D	+ -	0.12	18.0	0.01

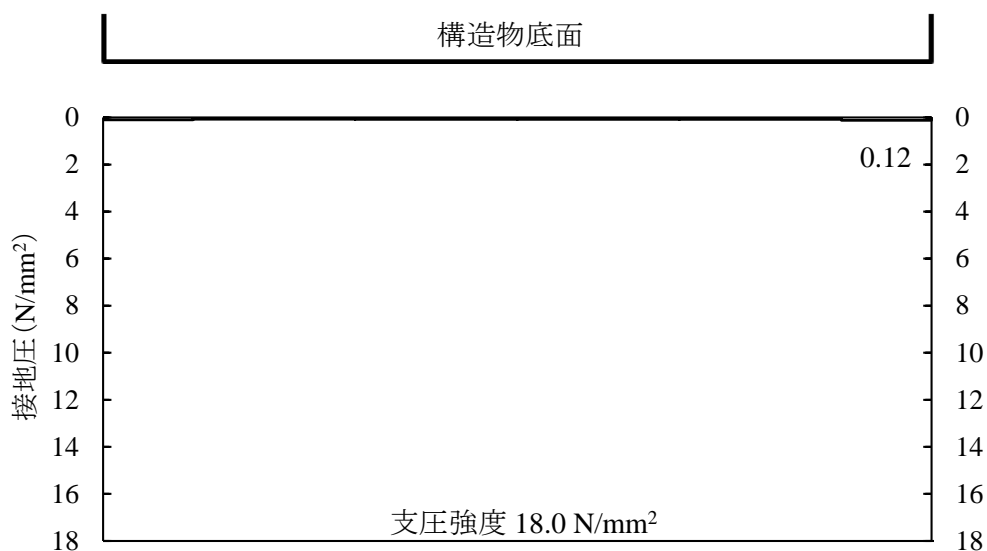


図5-6 MMRの最大接地圧分布図 (A-A断面)
(解析ケース③, S_s-D (+ -))

(2) 健全性評価

MMRのせん断破壊に対する局所安全係数を表5-7に、引張破壊に対する局所安全係数を表5-8に示す。

局所安全係数は全時刻において最小となる値を記載する。

$$f_s = R / S$$

ここに、 f_s : 局所安全係数

R : せん断強度又は引張強度

S : 発生せん断応力又は発生引張応力

表5-7及び表5-8より、全ての局所安全係数が1.0を上回ることから、MMRが健全であることを確認した。

表5-7 MMRのせん断破壊に対する局所安全係数

解析ケース	地震動		せん断応力 S (N/mm ²)	せん断強度 R (N/mm ²)	局所安全係数 f_s
①	S _s -D	++	0.10	3.60	37.80
		+ -	0.09	3.60	38.36
	S _s -F1	++	0.07	3.60	52.08
	S _s -F2	++	0.08	3.60	45.01
	S _s -N1	++	0.06	3.60	56.79
	S _s -N2 (EW)	++	0.07	3.60	55.01
	S _s -N2 (NS)	++	0.06	3.60	59.44
②	S _s -N2 (NS)	++	0.06	3.60	59.77
③	S _s -N2 (NS)	++	0.06	3.60	59.27

表 5-8 MMR の引張破壊に対する局所安全係数

解析ケース	地震動		引張応力 S (N/mm ²)	引張強度 R (N/mm ²)	局所安全係数 f _s
①	S _s -D	++	0.09	1.57	17.96
		+ -	0.09	1.57	18.26
	S _s -F 1	++	0.05	1.57	29.26
	S _s -F 2	++	0.07	1.57	21.35
	S _s -N 1	++	0.05	1.57	34.57
	S _s -N 2 (EW)	++	0.05	1.57	31.50
	S _s -N 2 (NS)	++	0.05	1.57	32.21
②	S _s -N 1	+ -	0.05	1.57	34.23
③	S _s -N 1	+ -	0.05	1.57	34.77

6. まとめ

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

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

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

以上から、屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）、基準地震動 S_s による地震力に対して、構造強度を有すること、支持機能を損なわないことを確認した。

参考資料 1 機器・配管系の耐震評価に適用する影響検討ケース

目 次

1. コンクリート実強度を反映した解析ケース	1
1.1 はじめに	1
1.2 解析方針	1
1.3 解析結果	2

1. コンクリート実強度を反映した解析ケース

1.1 はじめに

屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）について、構造物の機器・配管系の耐震評価に適用する床応答への保守的な配慮として、コンクリートの物性値を実強度に変更し、ケース①の解析を実施している。

コンクリートの実強度の設定方法は、本文「3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース」に示す。

1.2 解析方針

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

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

表 1-1 材料の物性値

材料		仕様	ヤング係数 (kN/mm^2)
構造物	コンクリート	実強度 $36.1N/mm^2$	29.8

1.3 解析結果

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

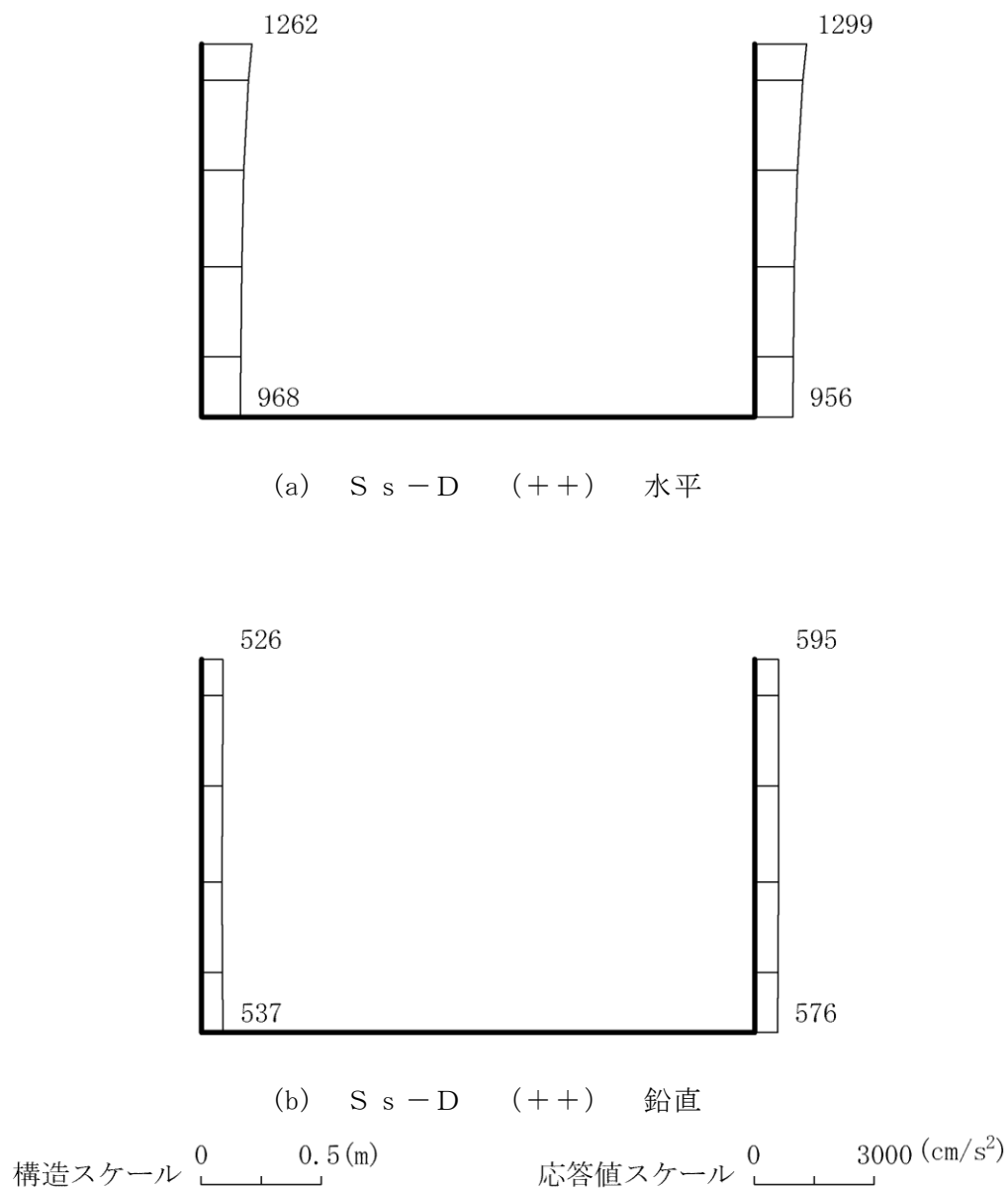


図 1-11 最大応答加速度分布図 (解析ケース④)