

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-002-39改01
提出年月日	2023年5月10日

VI-2-2-39 屋外配管ダクト（排気筒）の耐震性についての
計算書

2023年5月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目次

1.	概要	1
2.	基本方針	2
2.1	位置	2
2.2	構造概要	3
2.3	評価方針	5
2.4	適用規格・基準等	8
3.	耐震評価	9
3.1	評価対象断面	9
3.2	解析方法	11
3.2.1	構造部材	11
3.2.2	地盤	13
3.2.3	減衰定数	14
3.2.4	耐震評価における解析ケースの選定	15
3.3	荷重及び荷重の組合せ	16
3.3.1	耐震評価上考慮する状態	16
3.3.2	荷重	16
3.3.3	荷重の組合せ	17
3.4	入力地震動	18
3.5	解析モデル及び諸元	31
3.5.1	解析モデル	31
3.5.2	使用材料及び材料の物性値	33
3.5.3	地盤の物性値	33
3.5.4	地下水位	34
3.6	許容限界	35
3.6.1	曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	35
3.6.2	せん断破壊に対する許容限界	35
3.6.3	基礎コンクリートの支持性能に対する許容限界	35
3.7	評価方法	36
4.	耐震評価結果	38
4.1	構造部材の健全性に対する評価結果	38
4.2	基礎コンクリートの支持性能に対する評価結果	40

1. 概要

本資料は、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（排気筒）が基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有していることを確認するものである。

屋外配管ダクト（排気筒）に要求される機能維持の確認は、地震応答解析に基づく構造部材の健全性評価及び基礎コンクリートの支持性能評価により行う。

2. 基本方針

2.1 位置

屋外配管ダクト（排気筒）の位置図を図 2-1 に示す。

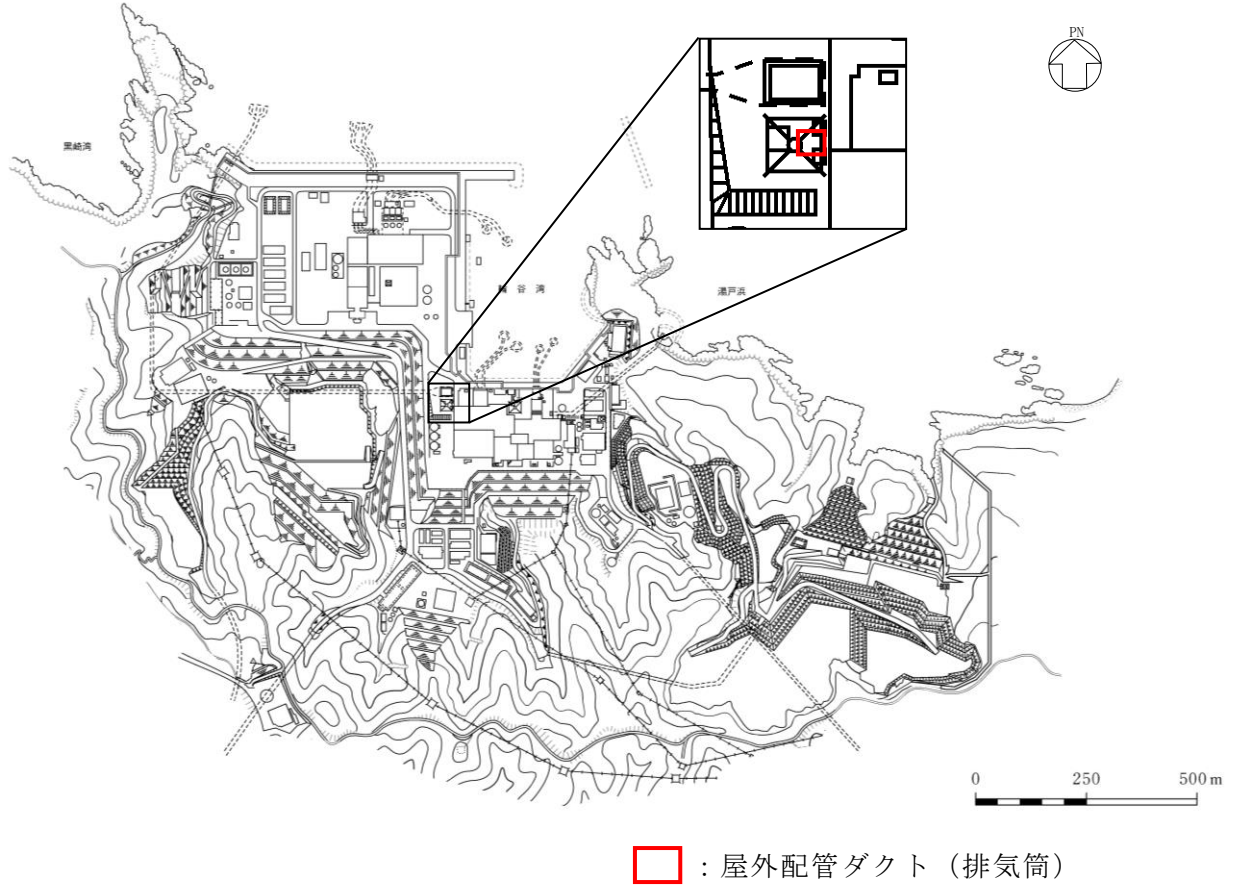


図 2-1 屋外配管ダクト（排気筒） 位置図

2.2 構造概要

屋外配管ダクト（排気筒）の平面図を図 2-2 に、断面図を図 2-3 に、概略配筋図を 2-4 に示す。

屋外配管ダクト（排気筒）は表 1-1 に示す S クラス施設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、マンメイドロック（以下「MMR」という。）を介して、同じく S クラス施設の間接支持構造物である排気筒基礎に支持される。

表 1-1 S クラス施設一覧

屋外配管ダクト（排気筒）が間接支持する S クラス施設の一覧
非常用ガス処理系配管
A-ディーゼル燃料移送ポンプ電線管
高圧炉心スプレイ系ディーゼル燃料移送ポンプ電線管
A-ディーゼル燃料移送配管
高圧炉心スプレイ系ディーゼル燃料移送配管

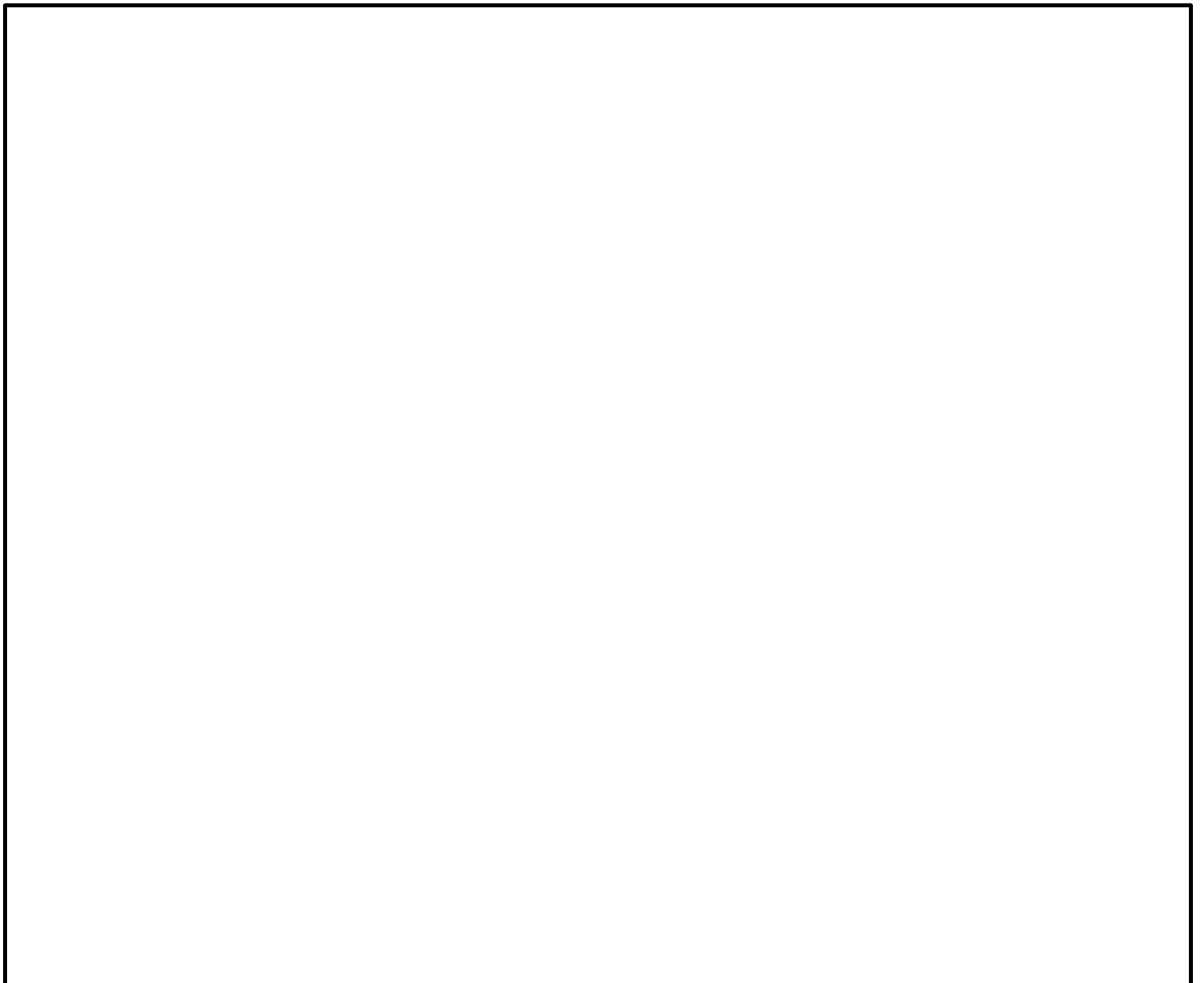


図 2-2 屋外配管ダクト（排気筒） 平面図

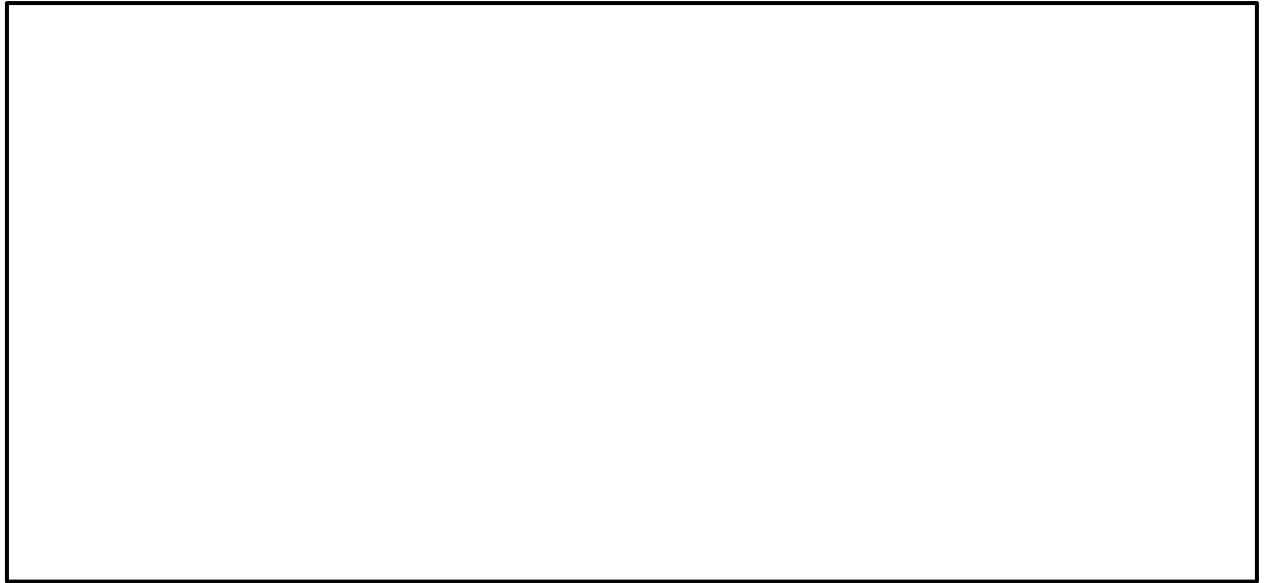
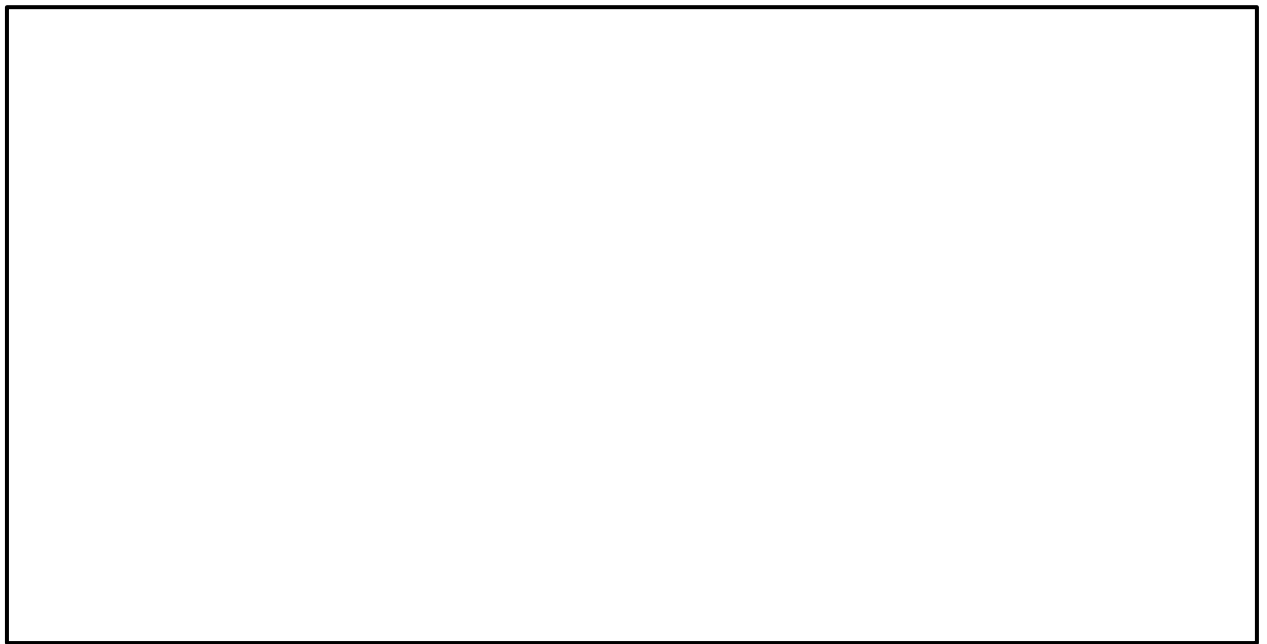


図 2-3 屋外配管ダクト（排気筒） 断面図（A-A断面）



2-4 屋外配管ダクト（排気筒） 概略配筋図（A-A断面）

2.3 評価方針

屋外配管ダクト（排気筒）の耐震評価フローを図 2-5 に示す。

屋外配管ダクト（排気筒）の耐震評価は，地震応答解析により得られた解析結果に基づき，表 2-1 の屋外配管ダクト（排気筒）の評価項目に示すとおり，構造部材の健全性評価及び基礎コンクリートの支持性能評価を行う。

構造部材の健全性評価については，VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき，曲げ・軸力系の破壊については構造部材の照査用ひずみが許容限界以下であることを確認する。せん断破壊に対しては照査用せん断力が許容限界以下であることを確認する。

基礎コンクリートの支持性能評価については，基礎コンクリートに生じる接地圧がコンクリートの支圧強度に基づく許容限界以下であることを確認する。

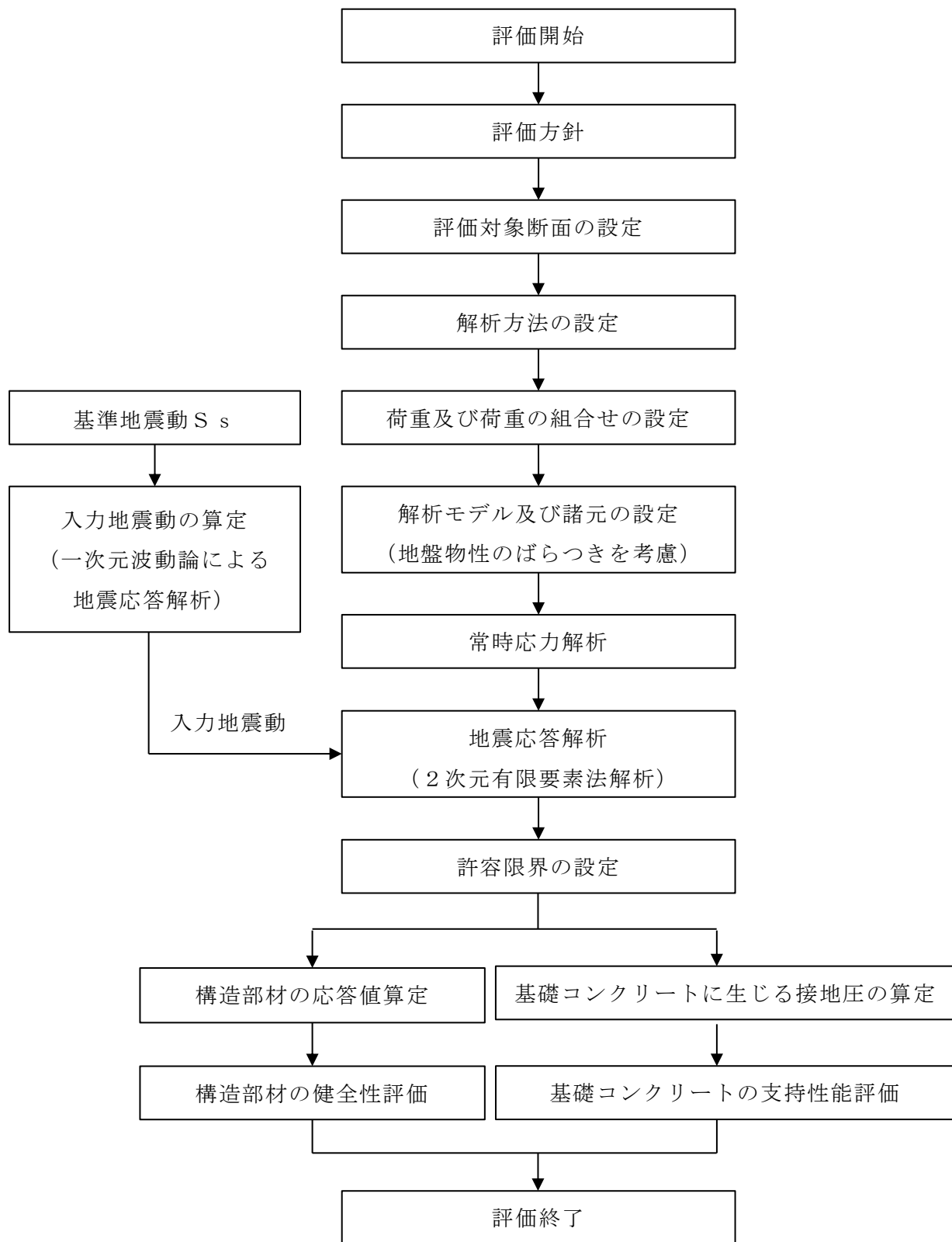


図 2-5 屋外配管ダクト（排気筒）耐震評価フロー

表 2-1 屋外配管ダクト（排気筒）の評価項目

評価項目	部位	評価方法	許容限界	
			曲げ・軸力	限界ひずみ*
構造部材の健全性	鉄筋コンクリート部材	照査用ひずみ及び照査用せん断力が許容限界を下回ることを確認	曲げ・軸力	限界ひずみ*
			せん断力	せん断耐力*
基礎コンクリートの支持性能	基礎コンクリート	接地圧が許容限界以下であることを確認	基礎コンクリートの支圧強度	

注記*： 妥当な安全余裕を考慮する。

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・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）
- ・コンクリート標準示方書[設計編]（土木学会，2017年制定）
- ・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）

3. 耐震評価

3.1 評価対象断面

屋外配管ダクト（排気筒）の評価対象断面位置を図 3-1 に示す。構造物の耐震設計における評価対象断面は，図 3-1 に示すとおり，内空幅が広く保守的な断面となる A-A 断面とする。耐震設計における評価対象断面図を図 3-2 に示す。

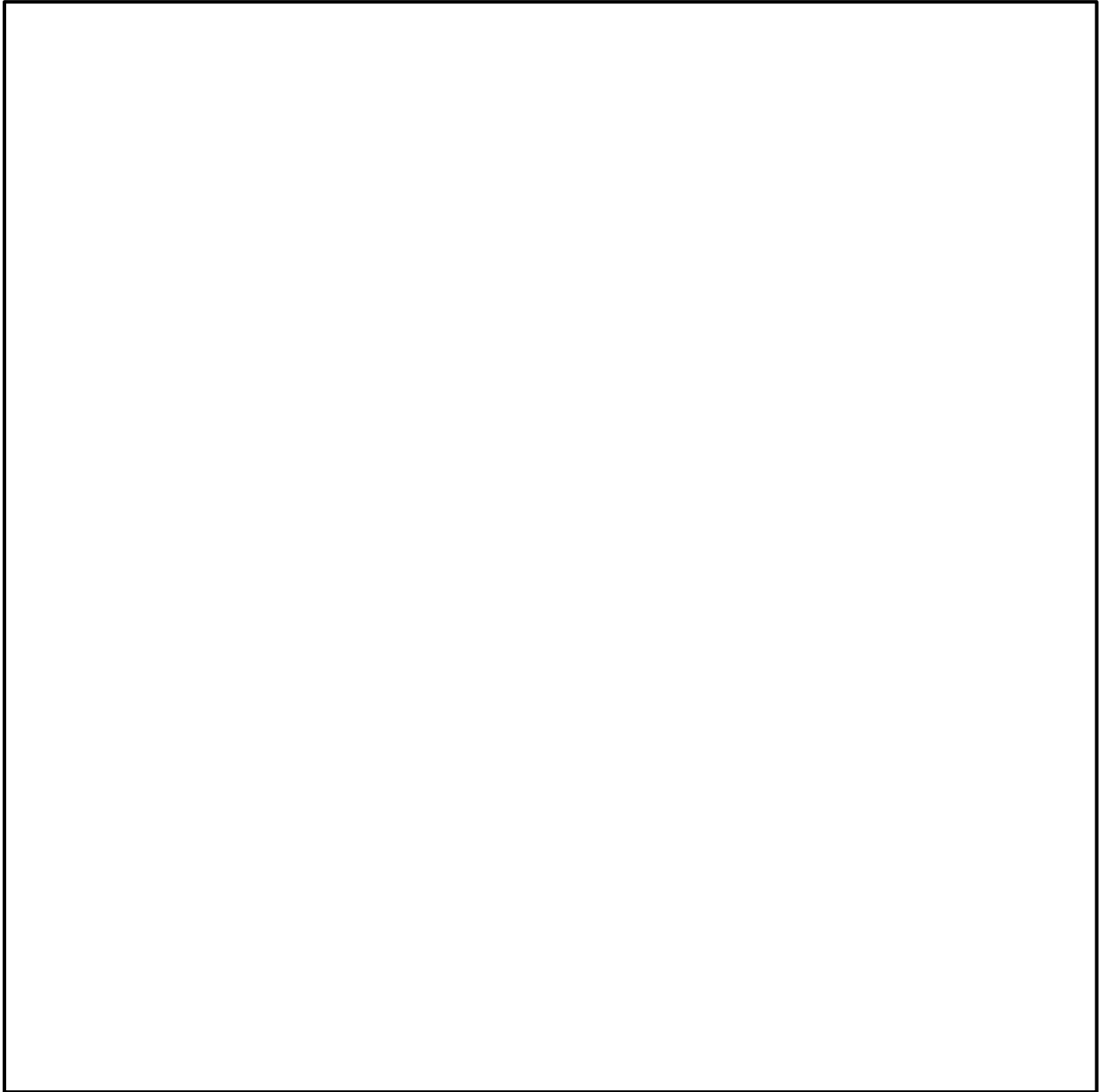


図 3-1 屋外配管ダクト（排気筒） 評価対象断面位置図

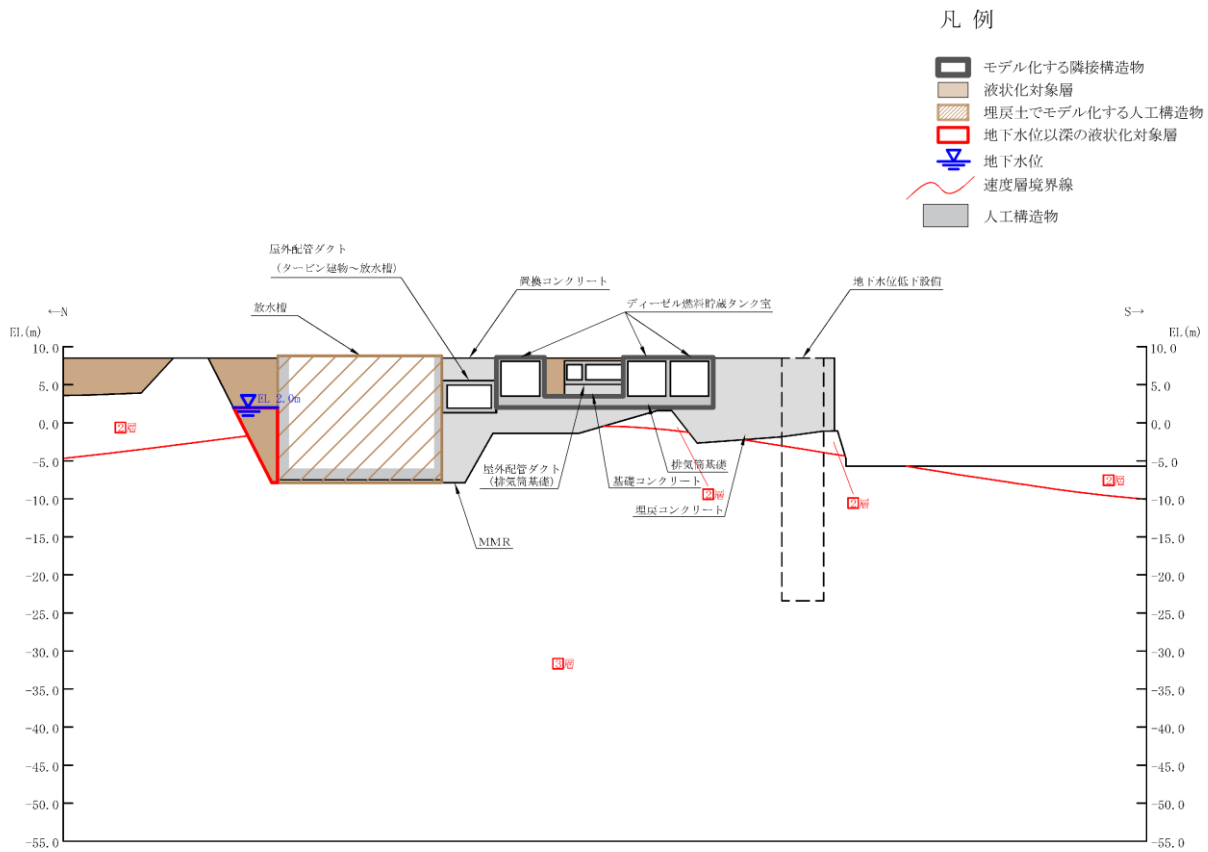


図 3-2 屋外配管ダクト (排気筒) 評価対象地質断面図 (A-A 断面位置)

3.2 解析方法

屋外配管ダクト（排気筒）の地震応答解析は、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」に示す解析方法及び解析モデルに準じて実施する。

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次元有限要素法解析を用いて、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直接積分法の時刻歴応答解析により行う。屋外配管ダクト（排気筒）周辺の地下水位が屋外配管ダクト（排気筒）下端より低いことから、解析手法は全応力解析とする。

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。

3.2.1 構造部材

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3-3参照）、図3-4に示すコンクリートの応力-ひずみ関係及び図3-5に示す鉄筋の応力-ひずみ関係を考慮する。

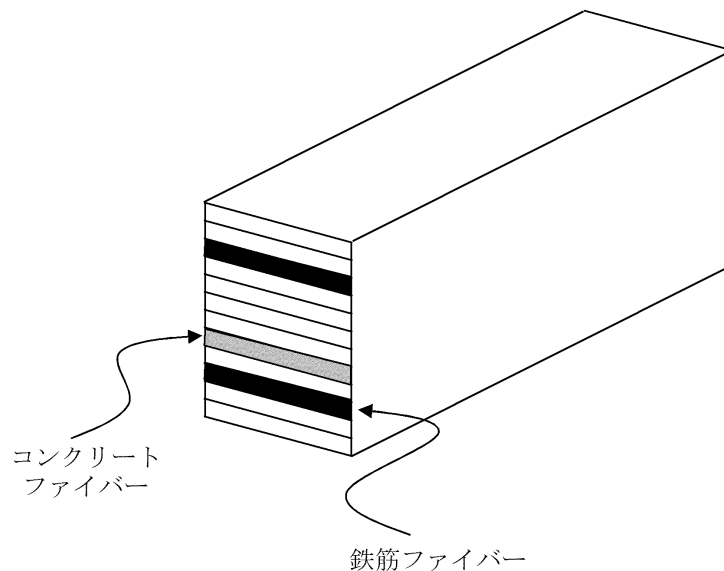
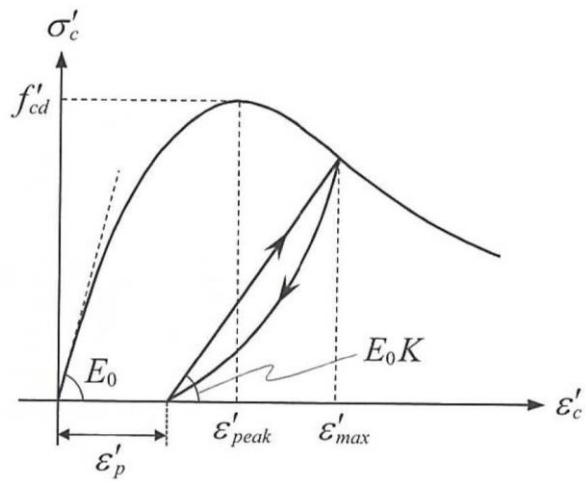
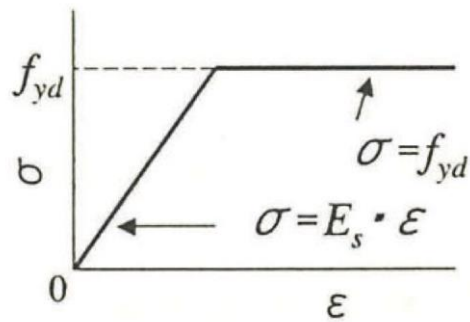


図 3-3 ファイバーモデルの概念図



(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 3-4 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 3-5 構造部材の非線形特性 (鉄筋の応力-ひずみ関係)

3.2.2 地盤

地盤物性のばらつきの影響を考慮するため、表 3-1 に示す解析ケースを設定する。

屋外配管ダクト（排気筒）は、側方に埋戻土が分布し、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。

詳細な解析ケースの考え方は、「3.2.4 耐震評価における解析ケースの選定」に示す。

表 3-1 解析ケース（A-A断面）

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

3.2.3 減衰定数

構造部材の減衰定数は、粘性減衰で考慮する。

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。固有値解析結果に基づき設定した α 、 β を表 3-2 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

表 3-2 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	1.595	2.241×10^{-4}

3.2.4 耐震評価における解析ケースの選定

耐震評価においては、基準地震動 S_s 全波（6波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（6波）を加えた全12波に対し、基本ケース（解析ケース①）を実施する。基本ケースにおいて、曲げ・軸力系の破壊及びせん断破壊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3-1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、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3-3に示す。

表 3-3 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・軸力系の破壊及びせん断破壊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。	
		-+*	○		
		+ - *	○		
		--*	○		
	$S_s - F 1$	++*	○		
	$S_s - F 2$	++*	○		
	$S_s - N 1$	++*	○		
		-+*	○		
	$S_s - N 2$ (NS)	++*	○		
		-+*	○		
$S_s - N 2$ (EW)	++*	○			
	-+*	○			

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

3.3 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき設定する。

3.3.1 耐震評価上考慮する状態

屋外配管ダクト（排気筒）の地震応答解析において、地震以外に考慮する状態を以下に示す。

(1) 運転時の状態

発電用原子炉施設が運転状態にあり、通常の条件下におかれている状態。ただし、運転時の異常な過渡変化時の影響を受けないことから考慮しない。

(2) 設計基準事故時の状態

設計基準事故時の影響を受けないことから考慮しない。

(3) 設計用自然条件

積雪を考慮する。風の影響は地震力と比較して小さいため考慮しない。

(4) 重大事故等時の状態

重大事故等時の影響を受けないことから考慮しない。

3.3.2 荷重

屋外配管ダクト（排気筒）の地震応答解析において、考慮する荷重を以下に示す。

(1) 固定荷重（G）

固定荷重として、躯体重量、機器・配管荷重及び排気筒モニタ室の重量を考慮する。

(2) 積載荷重（P）

積載荷重として、水圧、土圧及び積雪荷重 P_s を考慮する。

(3) 積雪荷重（ P_s ）

積雪荷重として、発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上1位の月最深積雪100cmに平均的な積雪荷重を与えるための係数0.35を考慮し35.0cm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。

(4) 地震荷重（ S_s ）

基準地震動 S_s による荷重を考慮する。

3.3.3 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-4 に示す。

表 3-4 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
地震時 (S_s)	$G + P + S_s$

G : 固定荷重

P : 積載荷重

S_s : 地震荷重 (基準地震動 S_s)

3.4 入力地震動

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に準じて設定する。

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3-6に入力地震動算定の概念図を、図3-7～図3-18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。

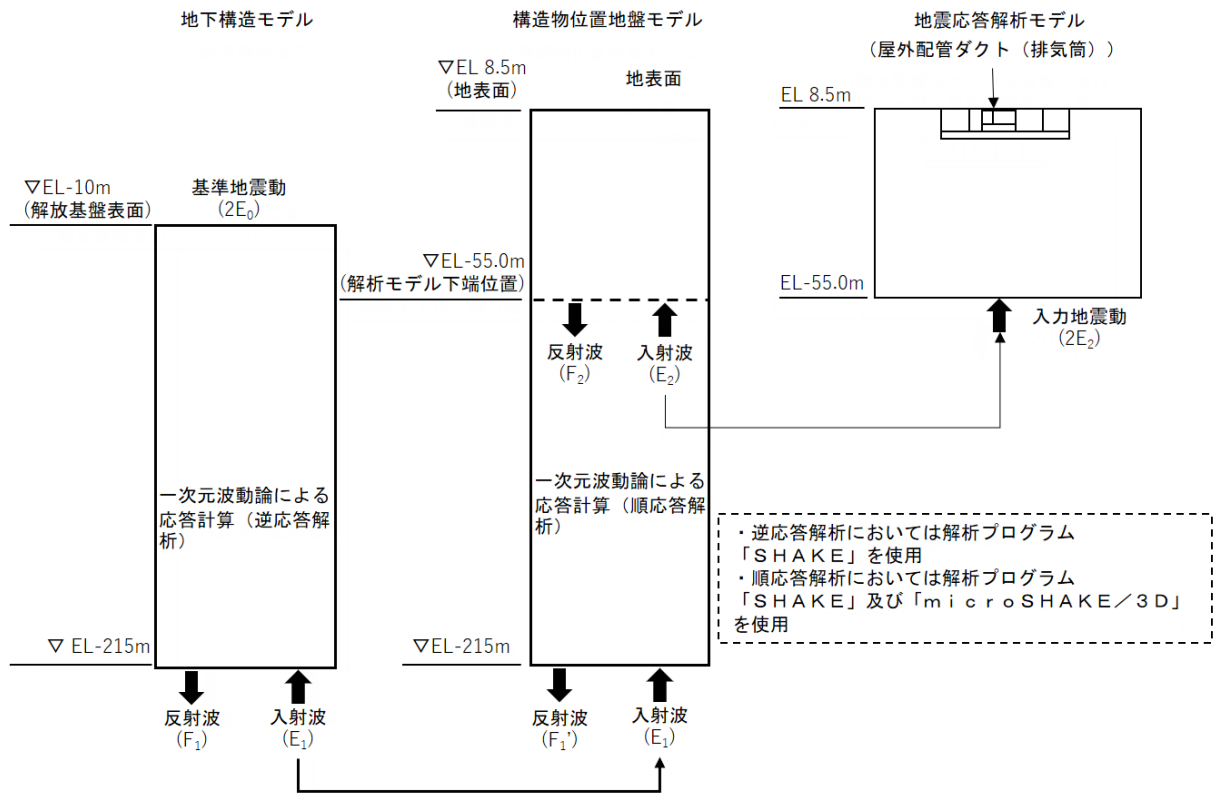
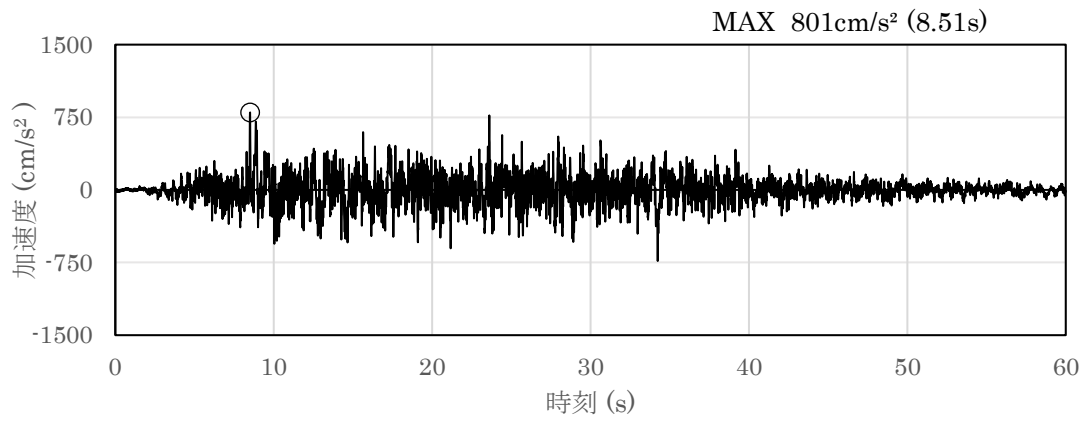
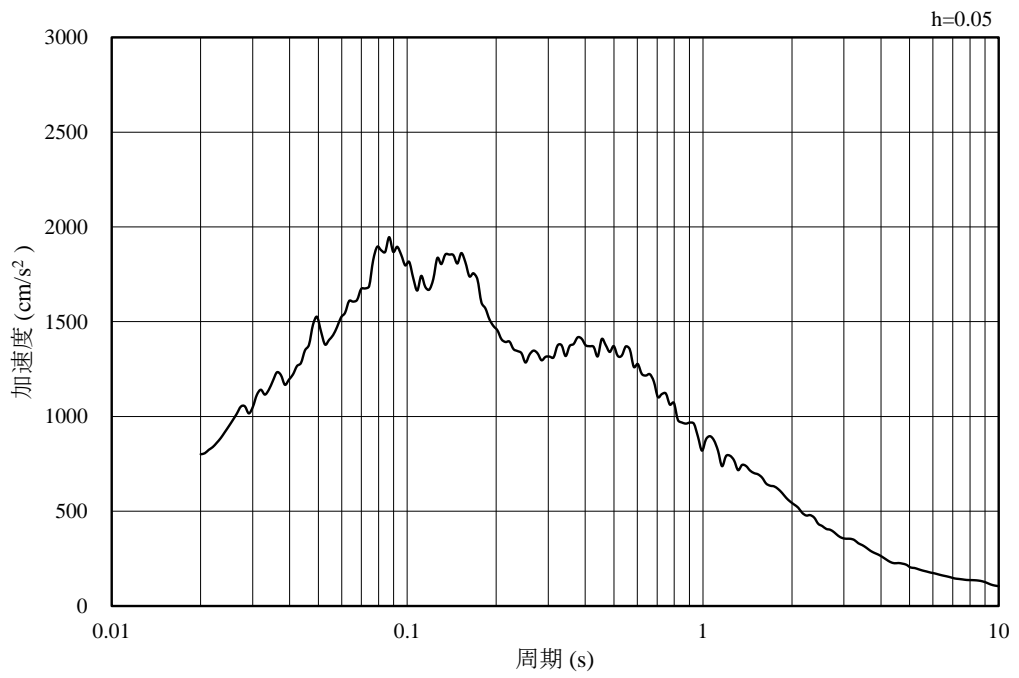


図3-6 入力地震動算定の概念図

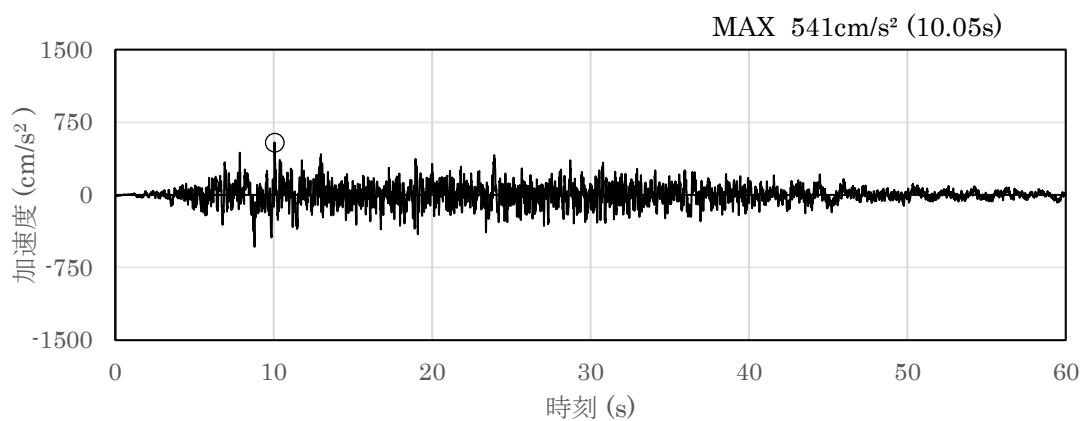


(a) 加速度時刻歴波形

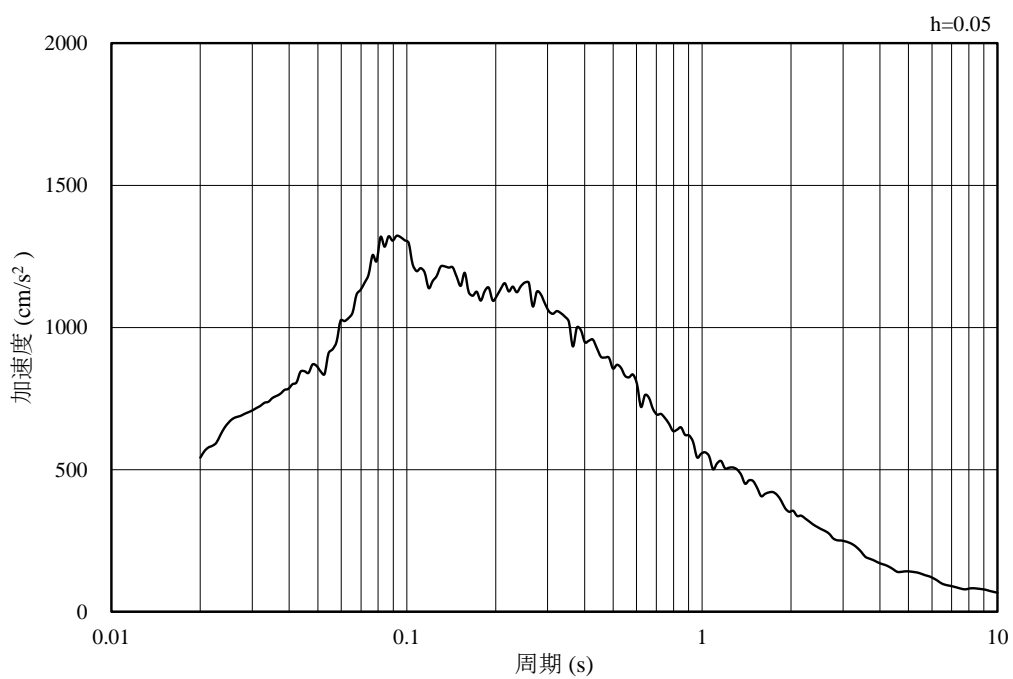


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-7 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
(水平成分：S s - D)

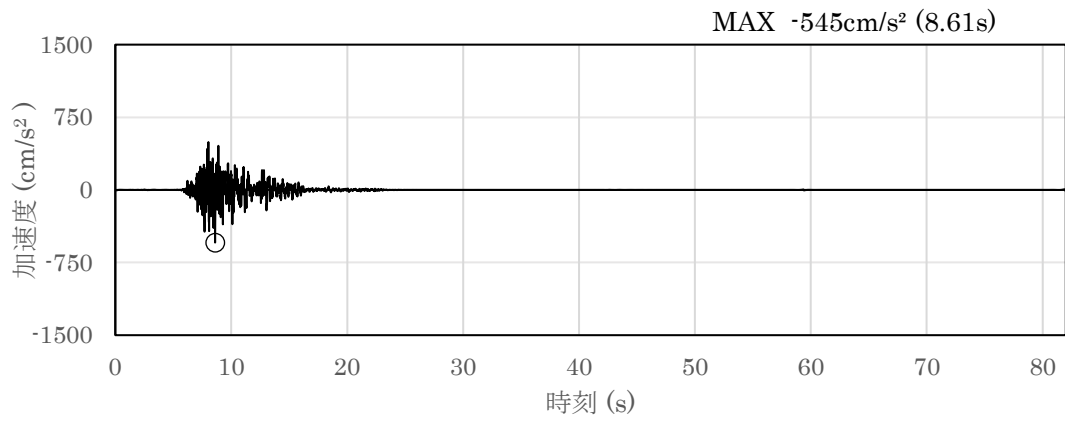


(a) 加速度時刻歴波形

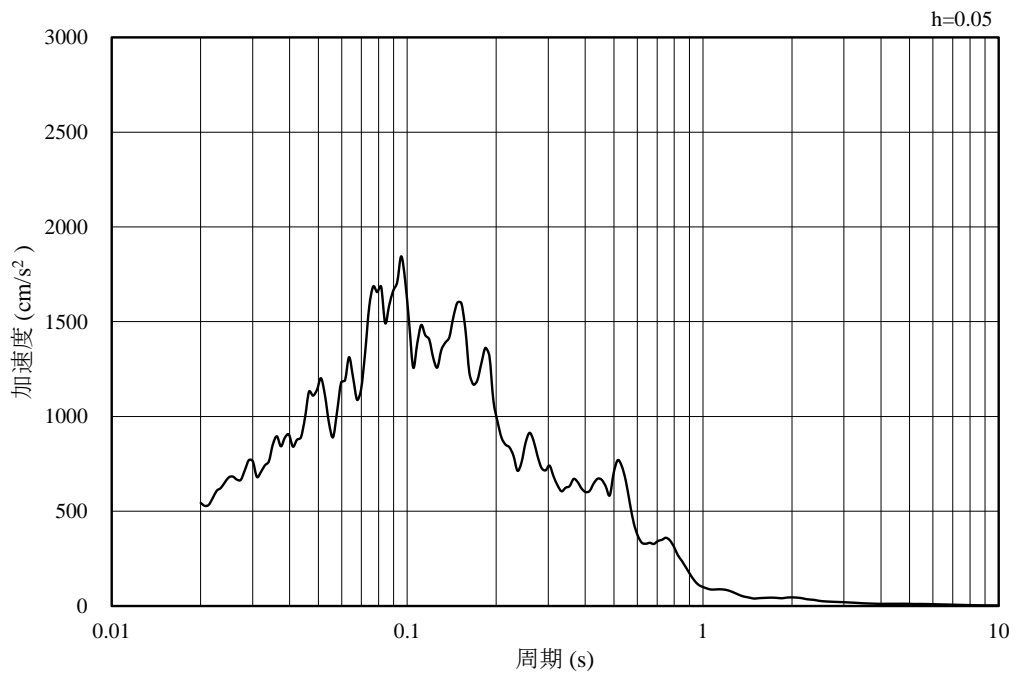


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-8 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
(鉛直成分：S s - D)

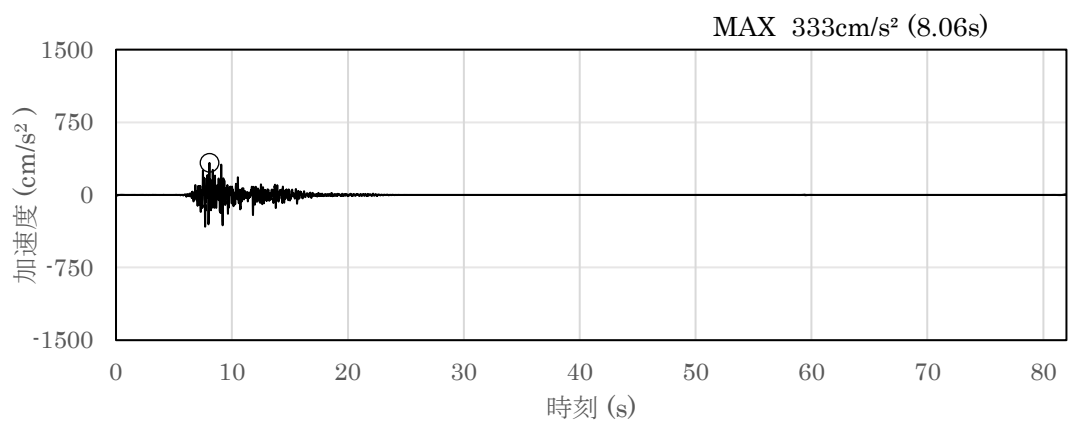


(a) 加速度時刻歴波形

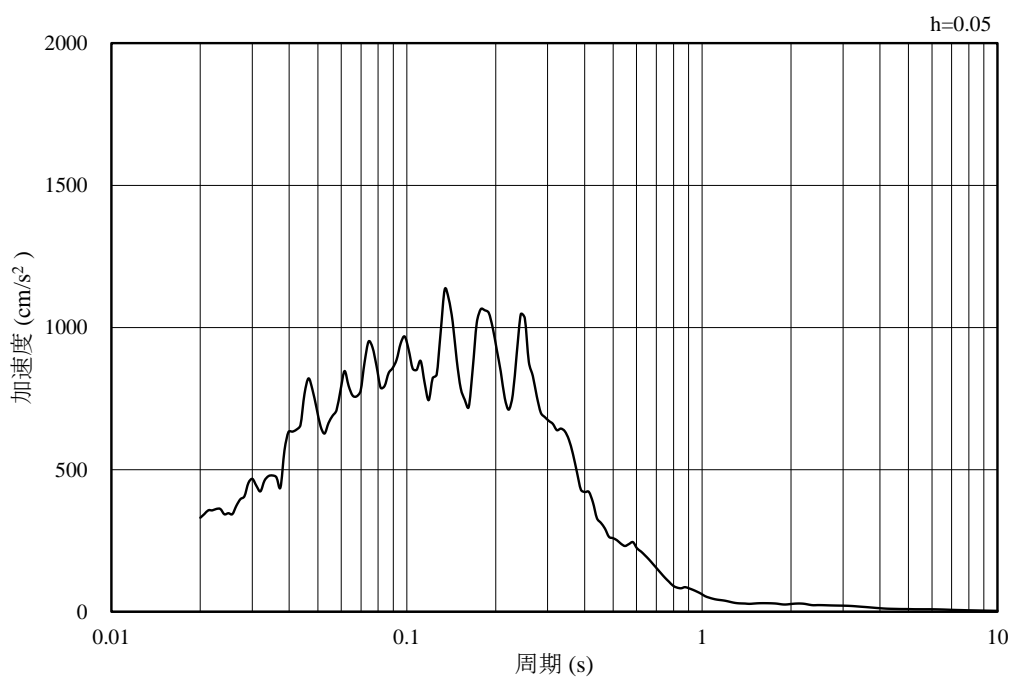


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-9 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
(水平成分 : S s - F 1 (N S))

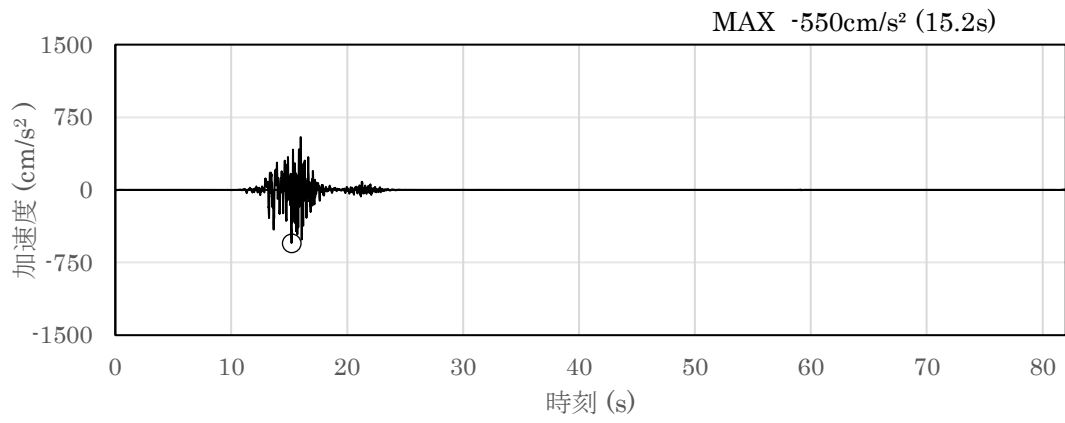


(a) 加速度時刻歴波形

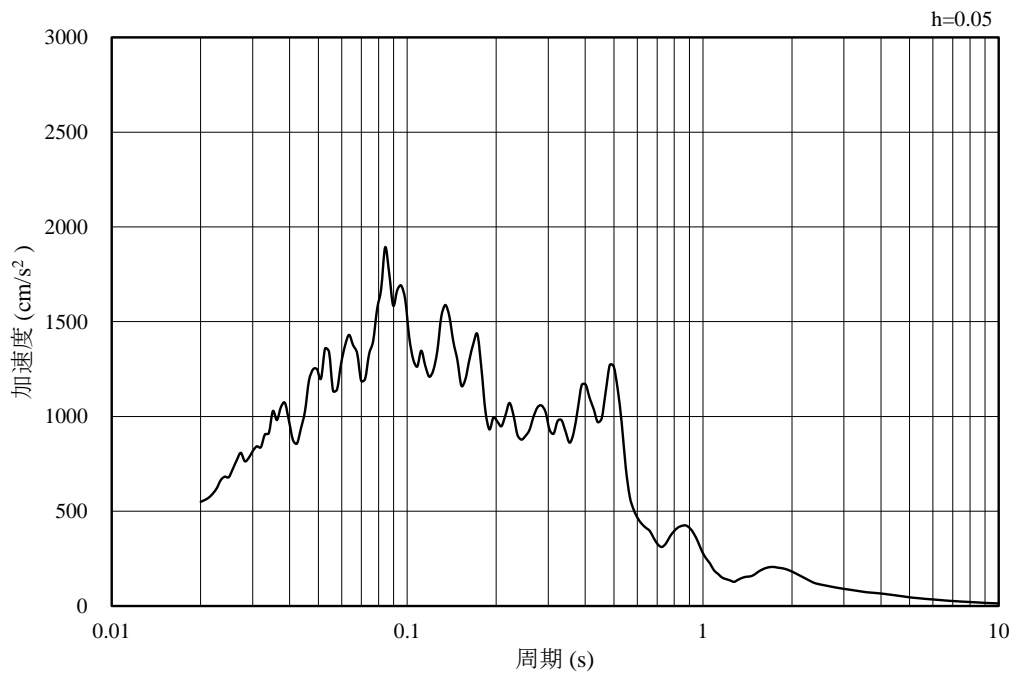


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-10 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
(鉛直成分：S s - F 1 (N S))

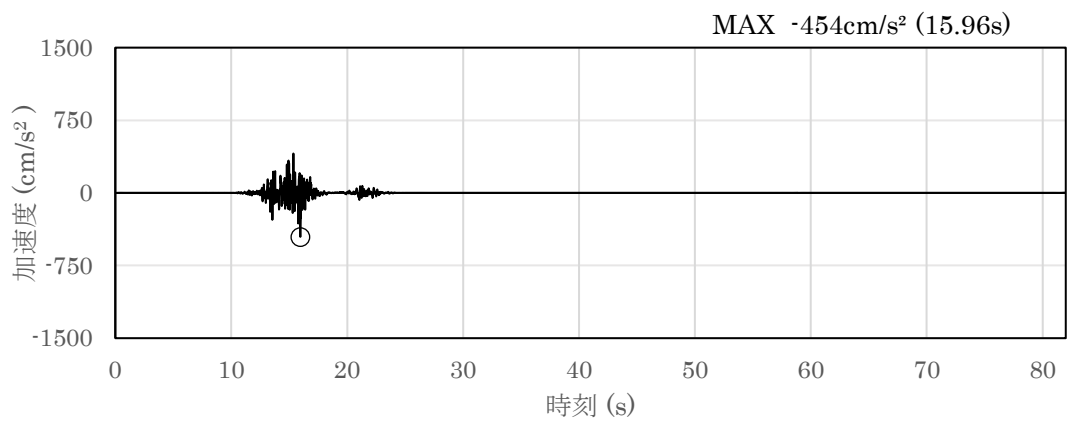


(a) 加速度時刻歴波形

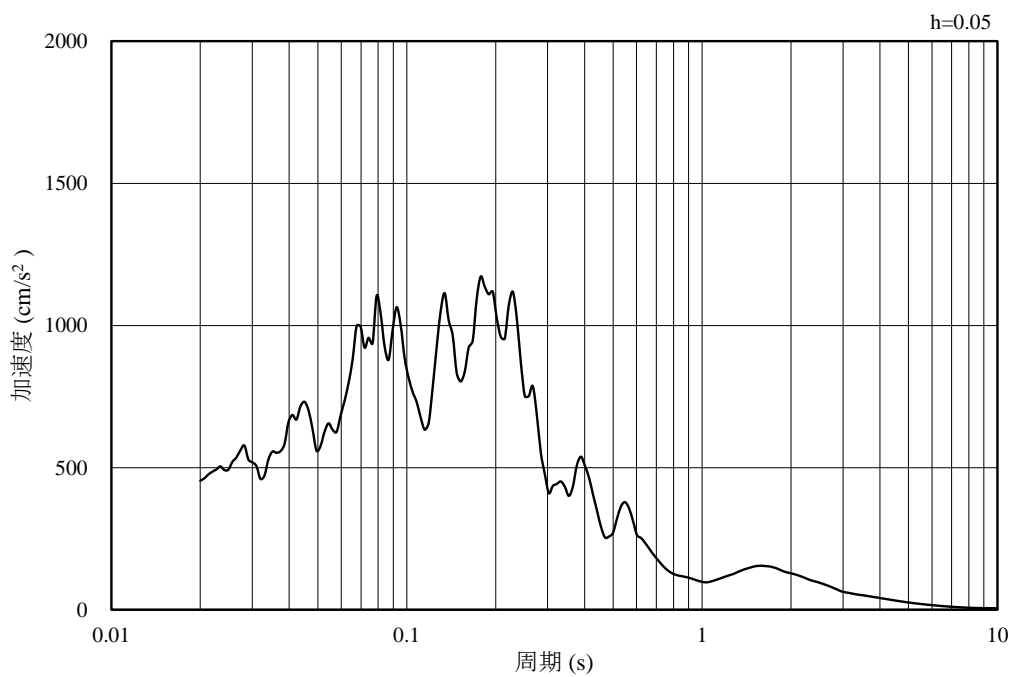


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-11 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
(水平成分 : S s - F 2 (N S))

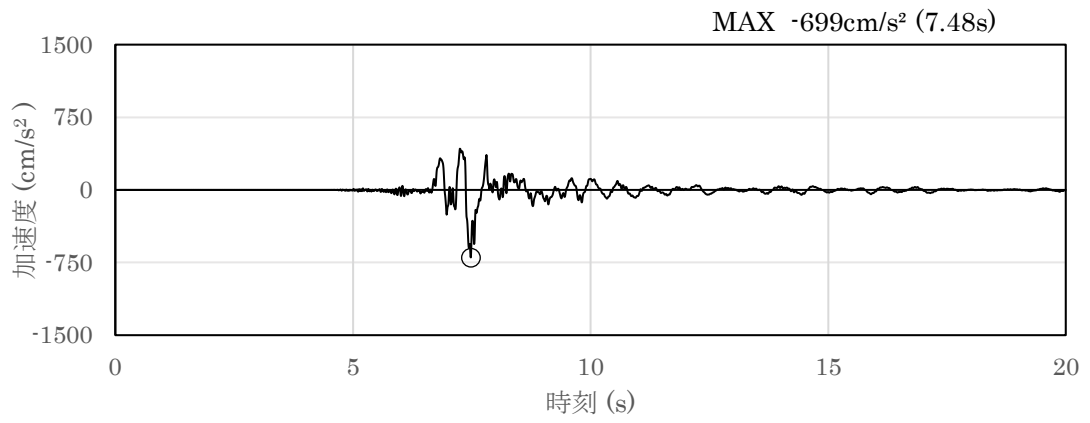


(a) 加速度時刻歴波形

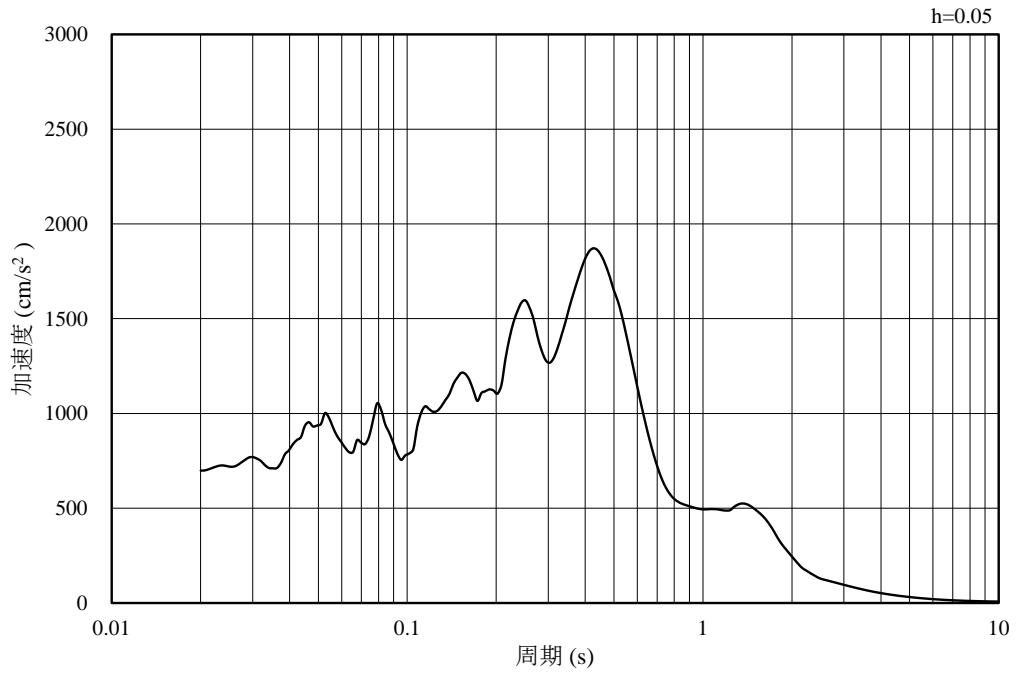


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-12 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
(鉛直成分：S s - F 2 (NS))

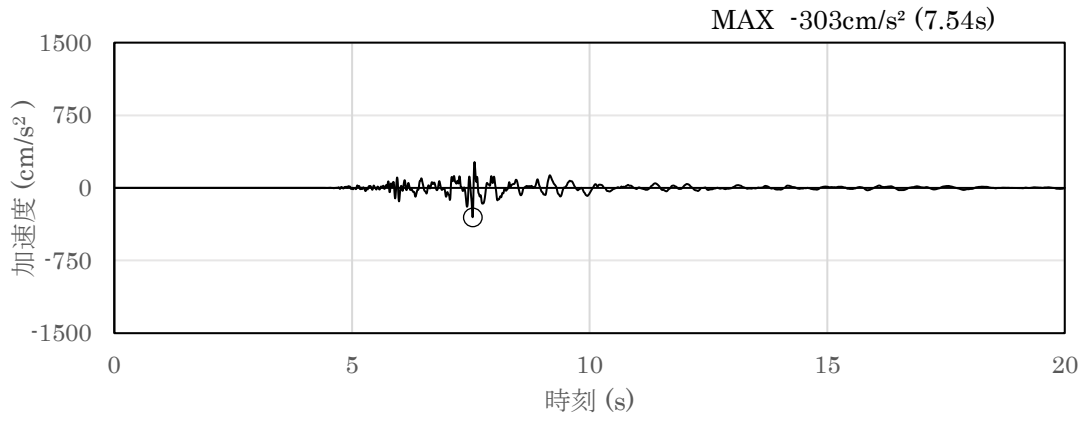


(a) 加速度時刻歴波形

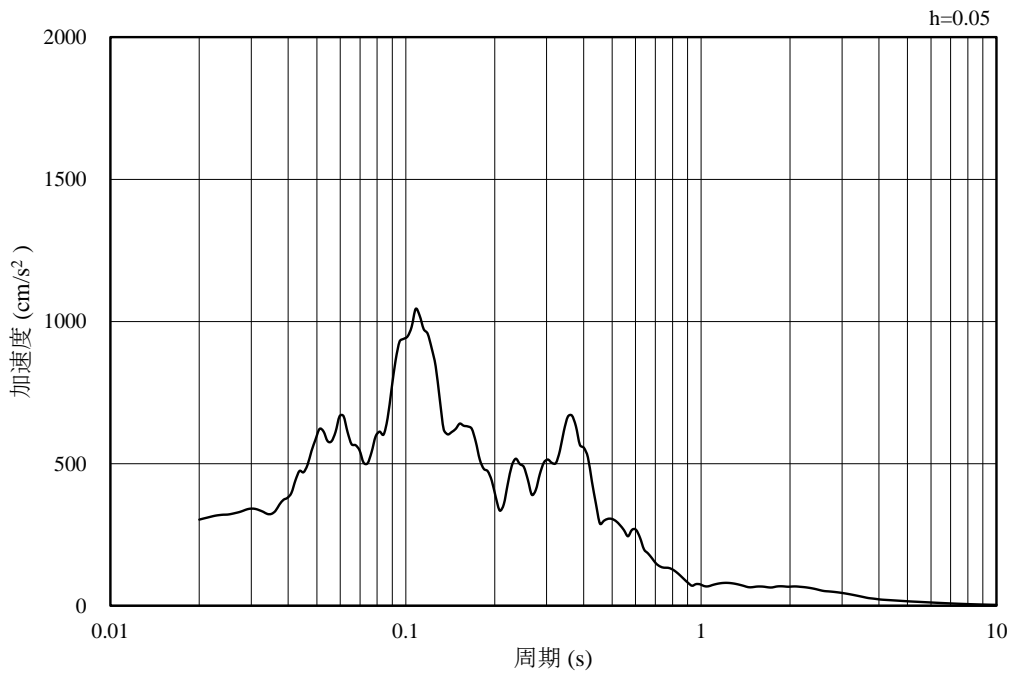


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-13 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
(水平成分：S s - N 1)

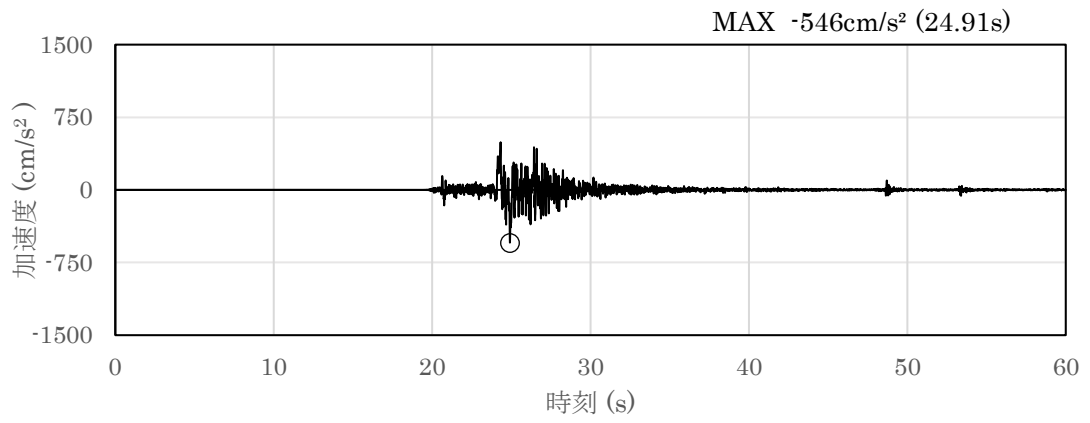


(a) 加速度時刻歴波形

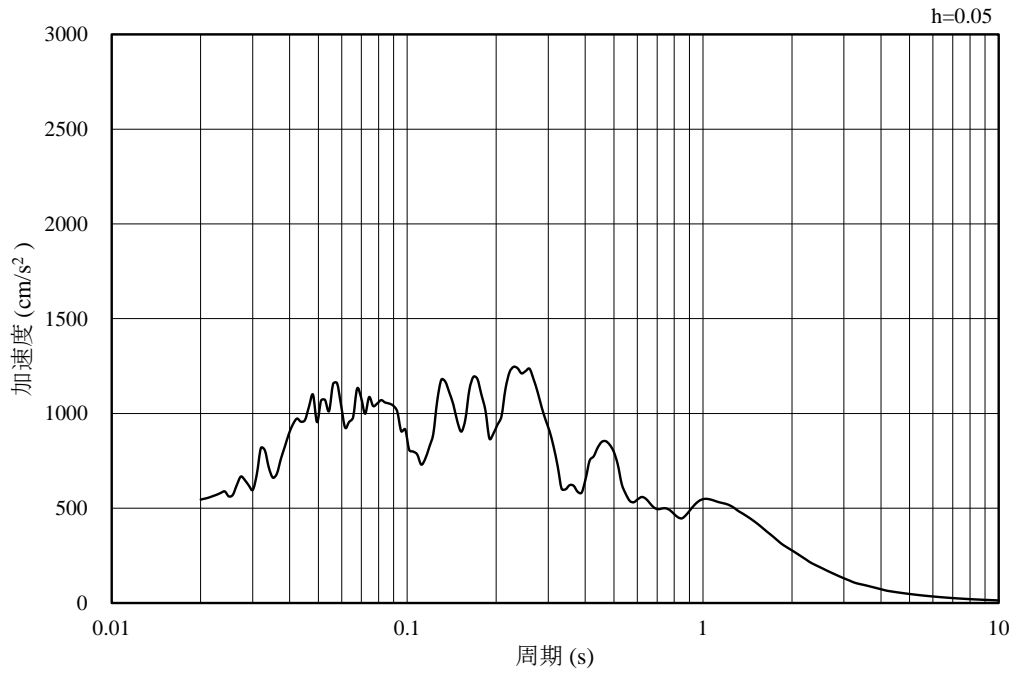


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-14 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
(鉛直成分：S s - N 1)

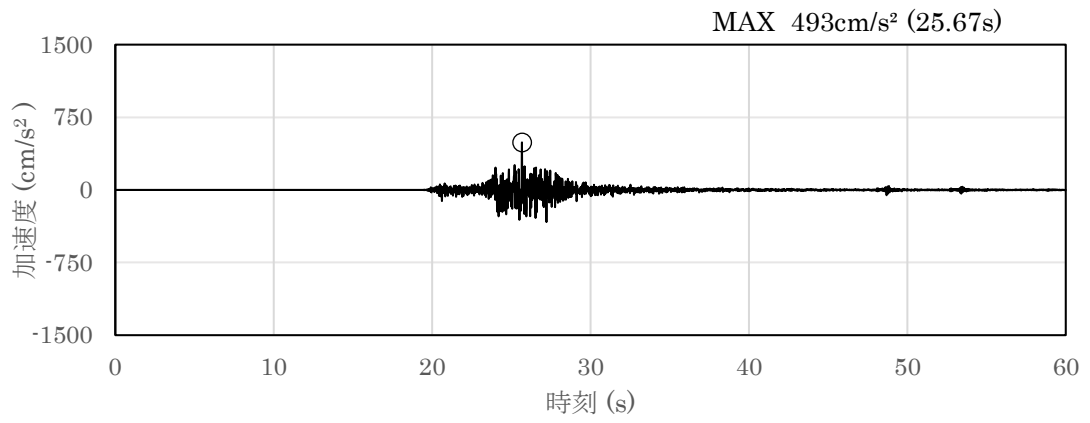


(a) 加速度時刻歴波形

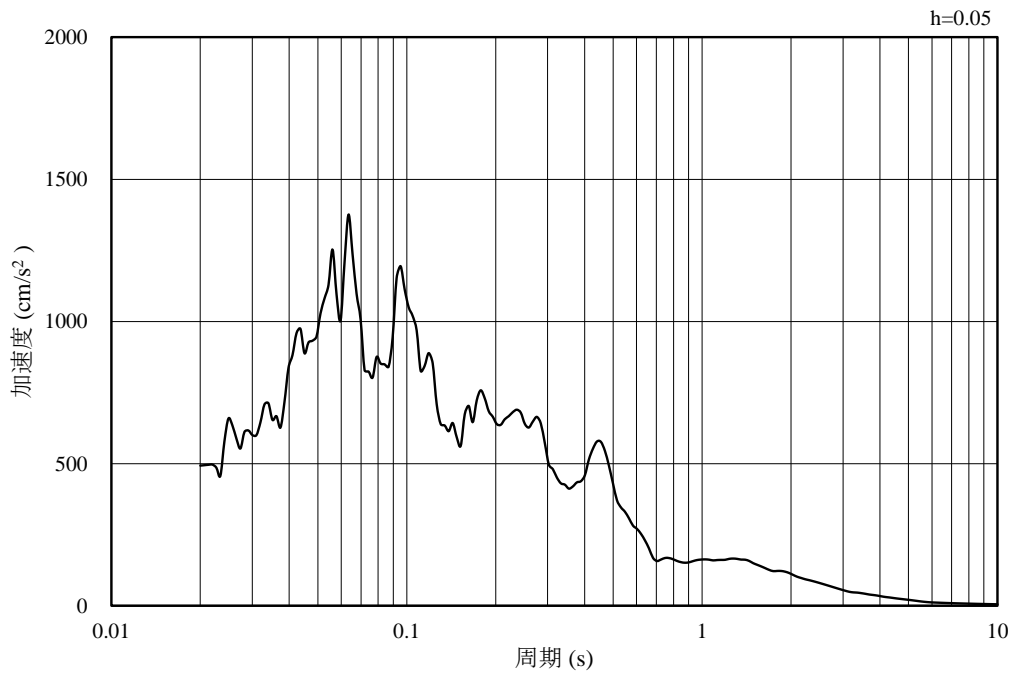


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-15 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
(水平成分 : S s - N 2 (N S))

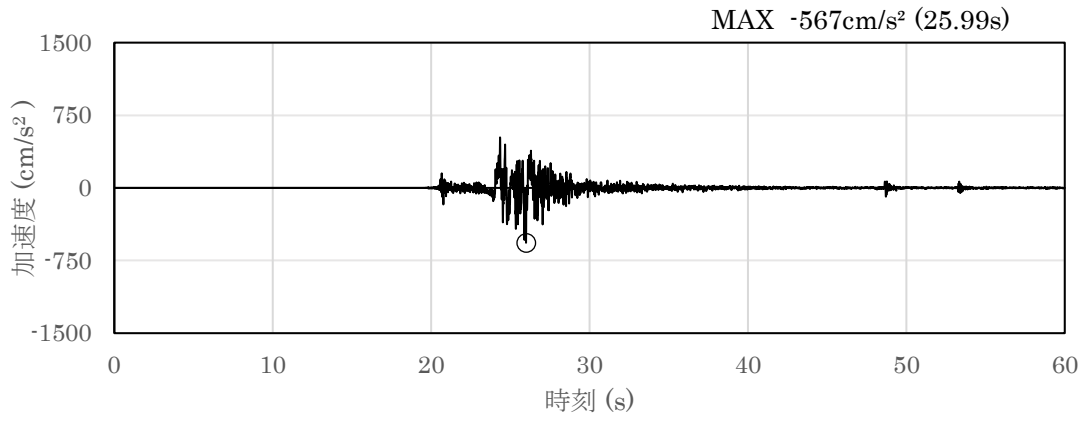


(a) 加速度時刻歴波形

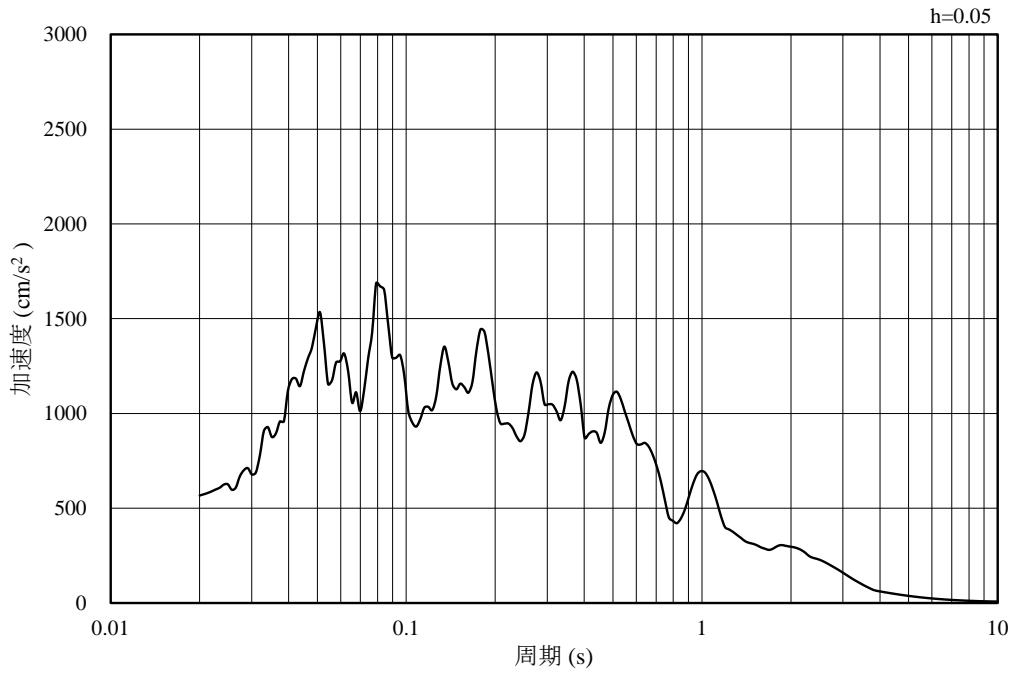


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-16 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
(鉛直成分：S s - N 2 (N S))

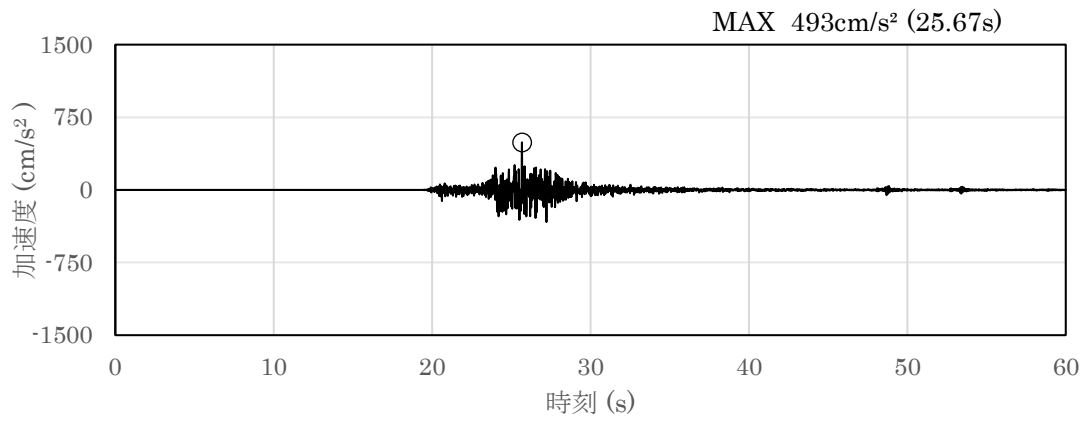


(a) 加速度時刻歴波形

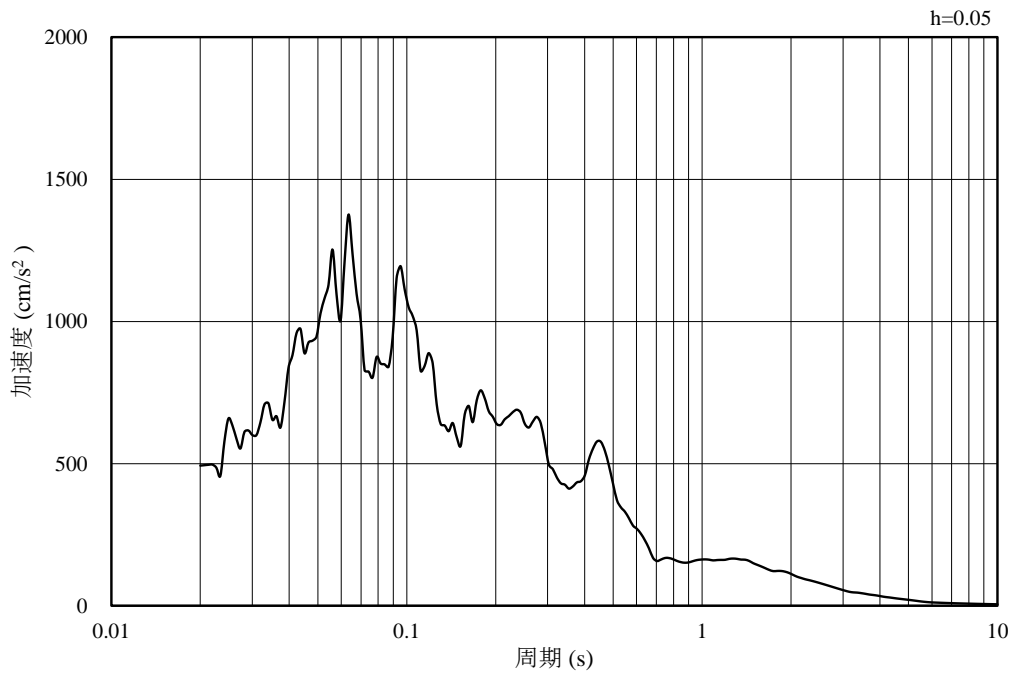


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-17 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
(水平成分 : S s - N 2 (E W))



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 3-18 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
(鉛直成分：S s - N 2 (E W))

3.5 解析モデル及び諸元

3.5.1 解析モデル

屋外配管ダクト（排気筒）の地震応答解析モデルを図 3-19 に示す。

(1) 解析領域

解析領域は，側方境界及び底面境界が構造物の応答に影響しないよう，構造物と側方境界及び底面境界との距離を十分に大きく設定する。

(2) 境界条件

解析領域の側方及び底面には，エネルギーの逸散効果を考慮するため，粘性境界を設ける。

(3) 構造物のモデル化

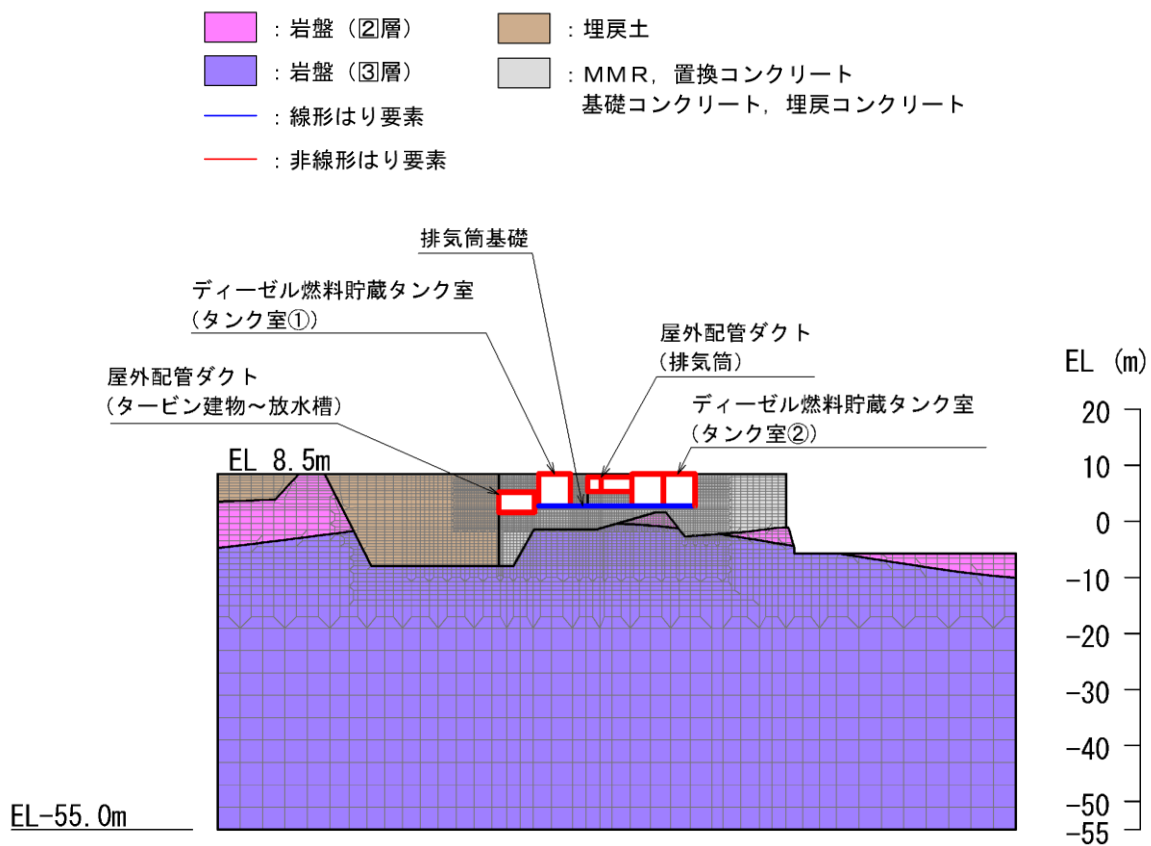
鉄筋コンクリート部材は，非線形はり要素によりモデル化する。

(4) 地盤及び無筋コンクリートのモデル化

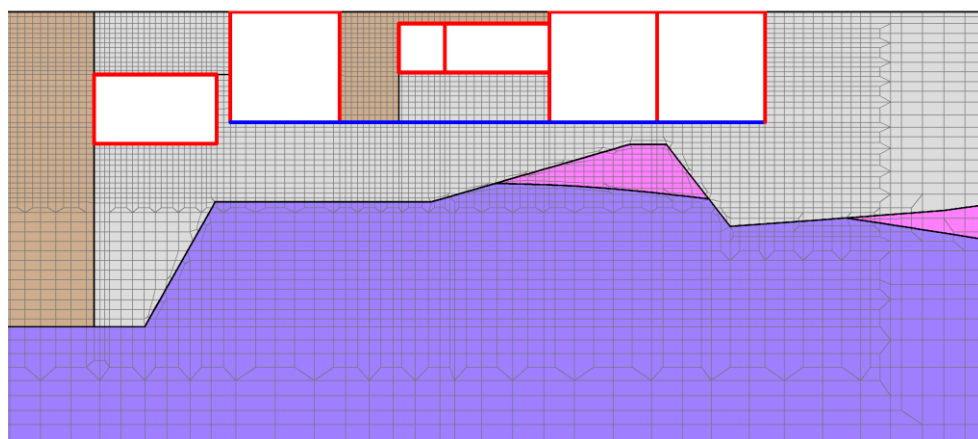
岩盤及び無筋コンクリート（MMR，置換コンクリート，基礎コンクリート及び埋戻コンクリートの総称）は線形の平面ひずみ要素でモデル化する。また，埋戻土は，地盤の非線形性をマルチスプリング要素で考慮した平面ひずみ要素でモデル化する。

(5) ジョイント要素の設定

地震時の「構造物と無筋コンクリート」，「構造物と埋戻土」，「無筋コンクリートと埋戻土」及び「無筋コンクリートと無筋コンクリート」の接合面における接触，剥離及びすべりを考慮するため，これらの接合面にジョイント要素を設定する。



(全体図)



(拡大図)

図 3-19 地震応答解析モデル図 (A-A断面)

3.5.2 使用材料及び材料の物性値

構造物の使用材料を表 3-5 に、材料の物性値を表 3-6 に示す。

表 3-5 使用材料

材料		仕様
構造物 (鉄筋コンクリート)	構造部材	設計基準強度 20.6N/mm ²
	鉄筋	SD345
MMR		設計基準強度 15.6N/mm ²
基礎コンクリート		
埋戻コンクリート		設計基準強度 18.0N/mm ²
置換コンクリート		設計基準強度 24.0N/mm ²

表 3-6 材料の物性値

材料	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比
構造物 (鉄筋コンクリート)	2.33×10 ⁴	24.0* ¹	0.2
MMR	2.08×10 ⁴	22.6* ²	
基礎コンクリート			
埋戻コンクリート			
置換コンクリート			

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。

3.5.3 地盤の物性値

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。

3.5.4 地下水位

設計地下水位は屋外配管ダクト（排気筒）が設置される排気筒基礎の設計地下水位とし、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき設定する。設計地下水位を表3-7に示す。

表3-7 屋外配管ダクト（排気筒） 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（排気筒） （排気筒基礎の設計地下水位を使用）	A-A断面	2.0

3.6 許容限界

許容限界は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき設定する。

3.6.1 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2005」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2005では、曲げ・軸力系の破壊に対する限界状態は、コンクリートの圧縮縁のかぶりが剥落しないこととされており、圧縮縁コンクリートひずみ1.0%の状態は、かぶりコンクリートが剥落する前の状態であることが、屋外重要土木構造物を模したラーメン構造の破壊実験及び数値シミュレーション等の結果より確認されている。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。

3.6.2 せん断破壊に対する許容限界

構造部材のせん断破壊に対する許容限界は、土木学会マニュアル2005に基づき、棒部材式で求まるせん断耐力とする。

3.6.3 基礎コンクリートの支持性能に対する許容限界

基礎コンクリート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〔構造性能照査編〕（土木学会，2002年）」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3-8に示す。

表3-8 基礎コンクリートの支持性能に対する許容限界

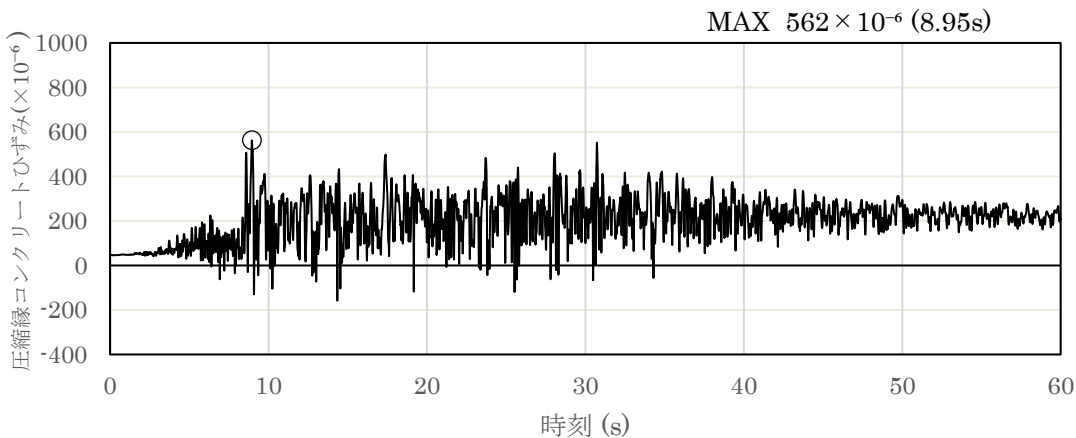
評価項目	基礎地盤	許容限界 (N/mm ²)
支圧強度	基礎コンクリート ($f'_{ck} = 15.6 \text{ N/mm}^2$)	$f'_a = 15.6$

3.7 評価方法

地震応答解析により算定した照査用応答値が、「3.6 許容限界」に示す許容限界以下であることを確認する。

構造部材の曲げ・軸力系及びせん断破壊に対する照査に対して、地震応答解析により算定した照査用ひずみ及び照査用せん断力が許容限界以下であることを確認する。

曲げ・軸力系の破壊に対して照査値が最大となる地震動及び解析ケースでのひずみの時刻歴波形及び発生位置を図 3-20 に、せん断破壊に対する照査値最大時の断面力図を図 3-21 に示す。



(圧縮を正で示す。)

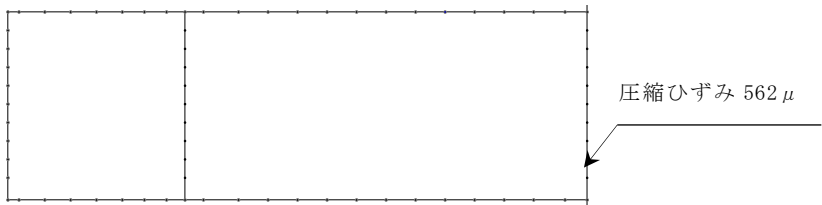
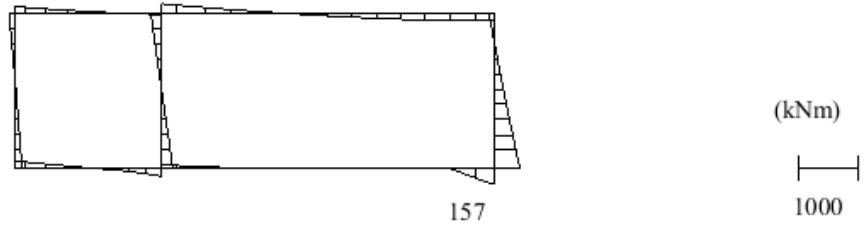
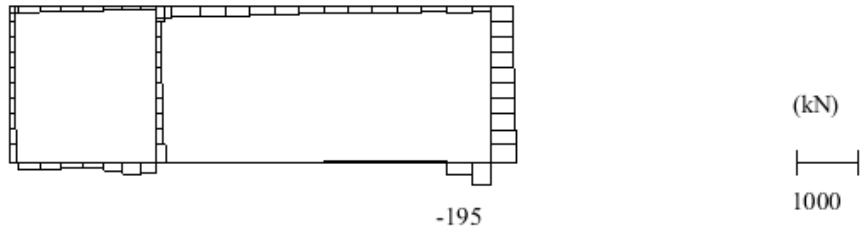


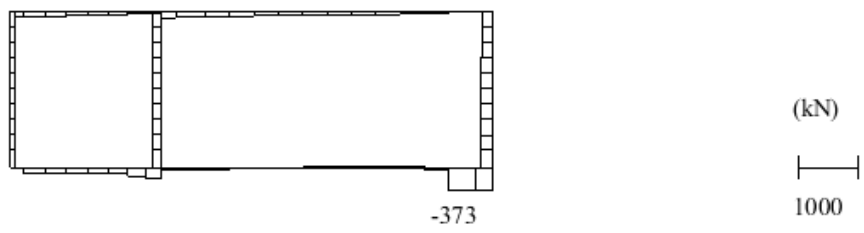
図 3-20 曲げ・軸力系の破壊に対する照査におけるひずみの時刻歴波形
(解析ケース②, S s - D (+ -))



数值：評価位置における断面力
(a) 曲げモーメント (kN・m)



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



数值：評価位置における断面力
(c) せん断力 (kN)

図 3-21 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①, $S_s - D (+ -)$)

4. 耐震評価結果

4.1 構造部材の健全性に対する評価結果

構造部材の曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値を表 4-1 に、せん断破壊に対する各評価位置での最大照査値を表 4-2 に示す。

表 4-1 曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値

解析 ケース	地震動	照査用ひずみ* ε_d	限界ひずみ ε_R	照査値 $\varepsilon_d / \varepsilon_R$
②	S s - D (+-)	675 μ	10000 μ	0.07

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

表 4-2 せん断破壊に対する最大照査値

評価位置*1		解析 ケース	地震動	照査用 せん断力*2 V_d (kN)	せん断耐力 $V_{y d}$ (kN)	照査値 $V_d / V_{y d}$
頂版	2	①	S s - N 2 (E W) (-+)	151	171	0.89
側壁	4	①	S s - D (++)	271	218	1.25*3
隔壁	5	③	S s - D (+-)	193	150	1.29*3
底版	7	①	S s - D (+-)	392	182	2.16*3

注記*1：評価位置は図 4-1 に示す。

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

*3：線形被害則又は材料非線形解析を適用（結果は追而）

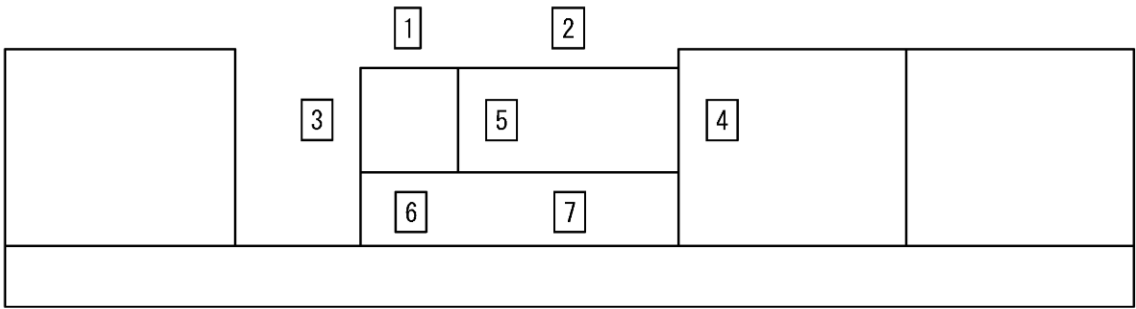
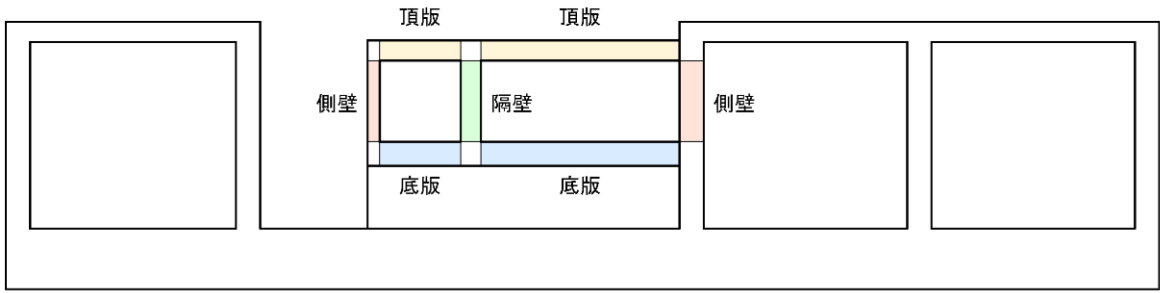


図 4-1 評価位置

4.2 基礎コンクリートの支持性能に対する評価結果

追而