

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0610-16_改 1
提出年月日	2021年 4月 12日

補足-610-16 排気筒基礎の耐震性についての計算書に関する  
補足説明資料

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

添付書類「VI-2-2-25 排気筒基礎の地震応答計算書」、添付書類「VI-2-2-26 排気筒基礎の耐震性についての計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。また、排気筒基礎及び排気筒の解析フローに対する、補足説明箇所を図-1及び図-2に示す。

別紙 1 既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

別紙 2 排気筒基礎の地震応答解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件の考え方

別紙 3 排気筒基礎の地震応答解析における地盤物性及び材料物性の不確かさに関する検討

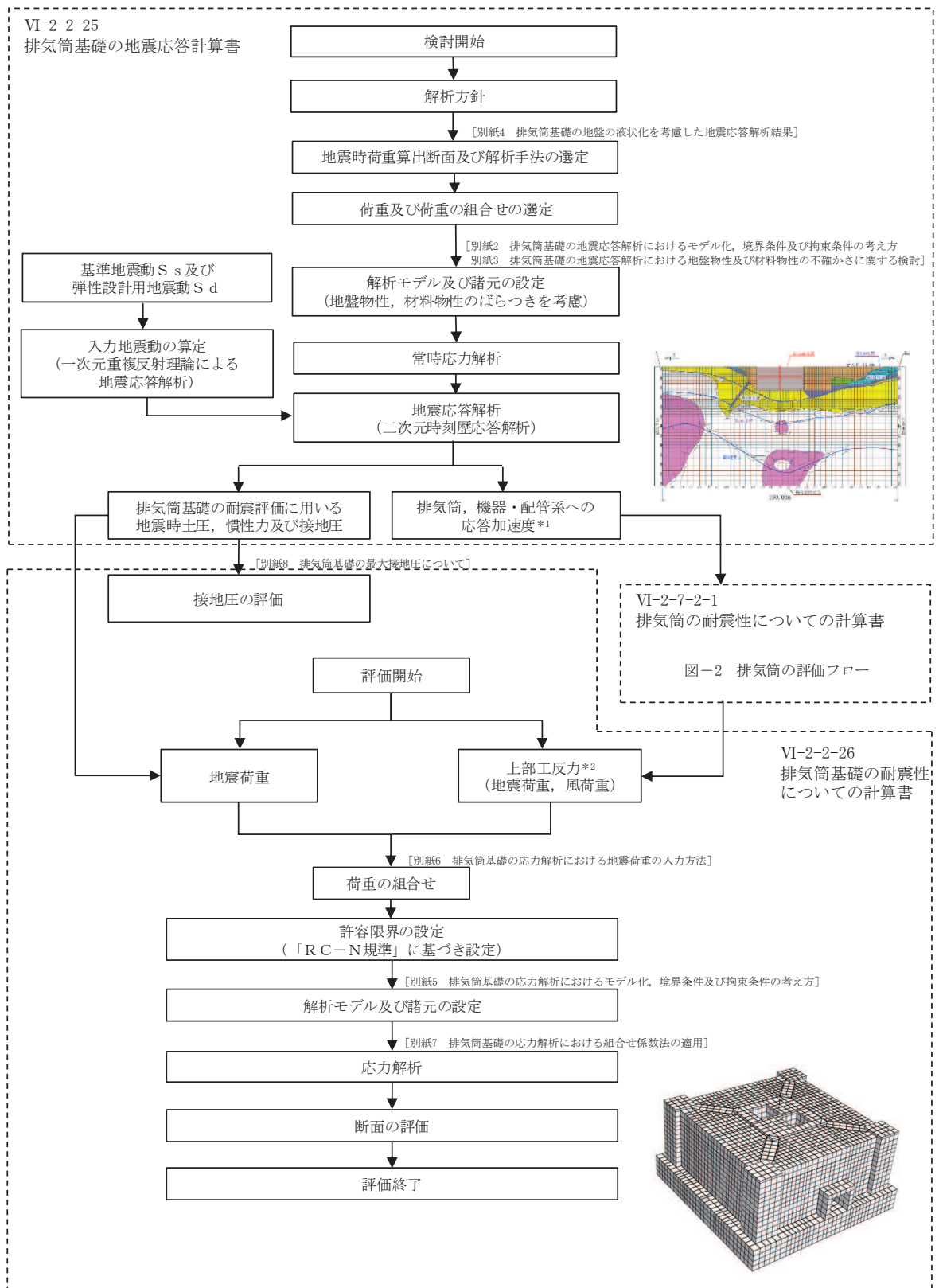
別紙 4 排気筒基礎の地盤の液状化を考慮した地震応答解析結果

別紙 5 排気筒基礎の応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件の考え方

別紙 6 排気筒基礎の応力解析における地震荷重の入力方法

別紙 7 排気筒基礎の応力解析における組合せ係数法の適用

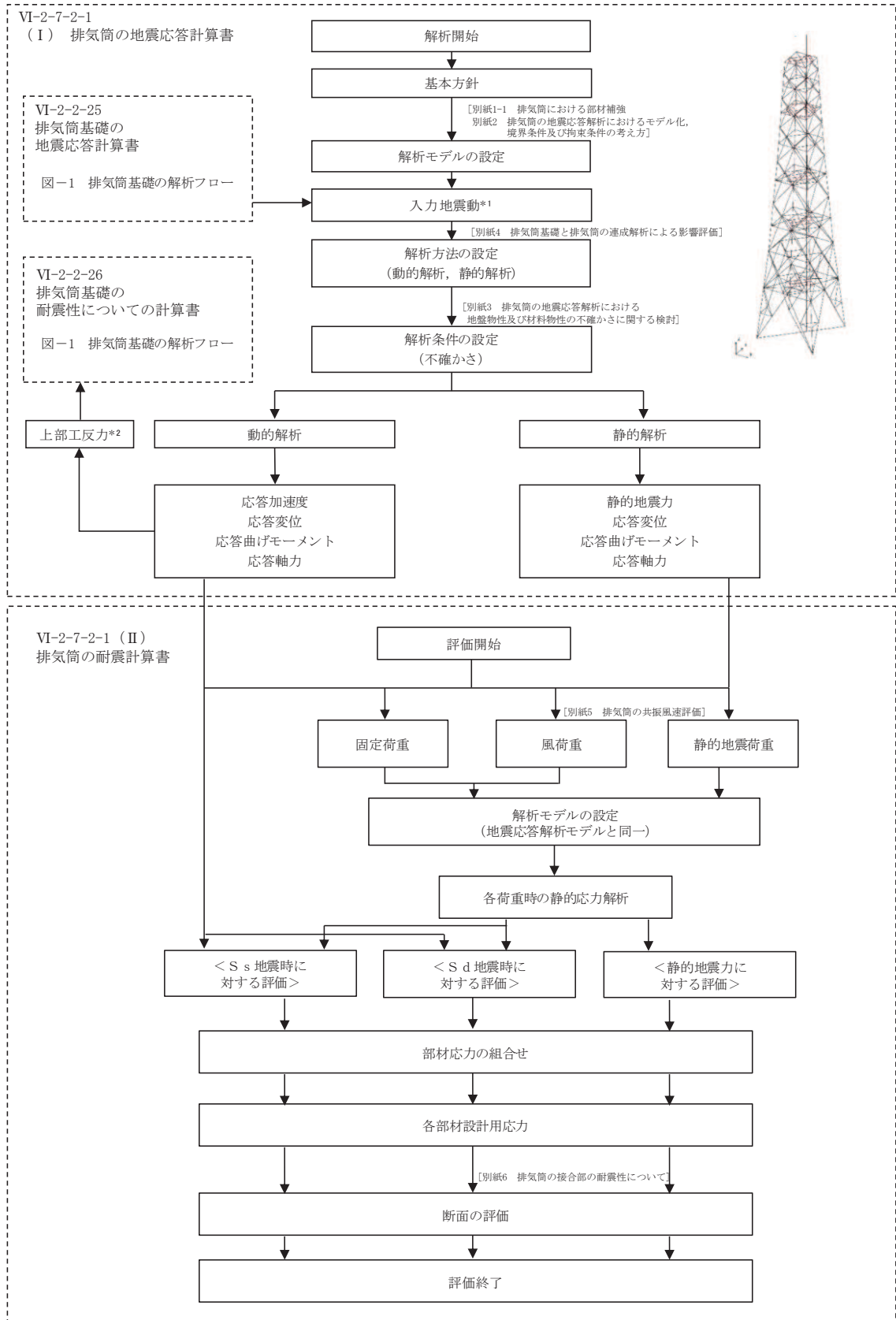
別紙 8 排気筒基礎の最大接地圧について



注記\*1：排気筒への応答加速度を示す。  
\*2：排気筒からの上部工反力を示す。

図-1 排気筒基礎の解析フロー

(補足-610-16 排気筒基礎の耐震性についての計算書に関する補足説明資料)



注記\*1: 排気筒基礎からの応答加速度を示す。  
\*2: 排気筒基礎への上部工反力を示す。

図-2 排気筒の評価フロー

(補足-610-17 排気筒の耐震性についての計算書に関する補足説明資料)

## 別紙 1 既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

## 目次

1. 概要..... 別紙 1-1
2. 解析モデル及び手法の比較..... 別紙 1-1

## 1. 概要

本資料は、排気筒及び排気筒基礎の既工認時及び今回工認時の解析モデル及び手法の比較を示すものである。

## 2. 解析モデル及び手法の比較

排気筒及び排気筒基礎の地震応答解析モデル及び手法の比較を表 2-1 に、応力解析モデル及び手法の比較を表 2-2 に示す。

比較に用いる既工認時の地震応答解析モデル及び手法は、女川原子力発電所第 2 号機「女川原子力発電所第 2 号機の工事計画の認可について」(3 資庁第 10518 号 平成 4 年 1 月 13 日)(以下「建設時工認(認可)という。))と女川原子力発電所第 2 号機「工事計画届出書」(東北電土火第 1 号 平成 21 年 7 月 31 日)(以下「耐震設計審査指針の改定に伴う補強時(届出)」という。))のものである。

建設時工認(認可)及び耐震設計審査指針の改定に伴う補強時(届出)時と今回工認での大きな変更点は、建設時工認(認可)及び耐震設計審査指針の改定に伴う補強時(届出)時に用いた排気筒及び排気筒基礎を一体化した SR モデルを用いているのに対し、今回工認では、排気筒基礎を二次元 FEM モデル、排気筒を三次元立体フレームモデル(質点系)に変更している。

図 2-1 に建設時工認(認可)の地震応答解析モデルを、図 2-2 に耐震設計審査指針の改定に伴う補強時(届出)時の地震応答解析モデルを、図 2-3 に今回工認モデルを示す。

建設時工認(認可)、耐震設計審査指針の改定に伴う補強時(届出)時及び今回工認で共通となるのは、解放基盤表面(0.P.-14.1m)で定義された基準地震動を用いて引戻しを行い、0.P.-200m の位置における地震動(上昇波)となる。

建設時工認(認可)は、地震動(上昇波)を排気筒位置における地盤モデルに入力し、解析モデル底面位置(0.P.-4.0m)における地震動を出力し、構造物-地震連成モデルへの入力地震動とする。

耐震設計審査指針の改定に伴う補強時(届出)時は、地震動(上昇波)を排気筒位置における地盤モデルの入力は同じとなるが、排気筒基礎の埋込み部各位置の地盤応答(E+F 波)及び基礎底面位置の補正水平力(切欠き力)を抽出して、これを構造物-地盤連成モデルへの入力地震動と変更している。

今回工認は、地震動(上昇波)を排気筒位置における地盤モデルに入力し、二次元 FEM 解析モデル底面位置(0.P.-80.0m)における地震動を出力し、排気筒基礎の二次元 FEM 解析モデルへの入力地震動と変更している。さらに、2 次元 FEM 解析モデルにおける地震応答解析から得られる基礎天端レベル(0.P.15.3m)の応答値を出力し、排気筒の三次元立体フレームモデル(質点系)への入力地震動と変更している。今回工認において二次元 FEM モデルによる入力地震動の作成に変更した理由として、硬質岩盤では「JEA

G 4 6 0 1-1991 追補版」による側面地盤ばね（Novak ばね）の評価に課題があることを踏まえ、周辺地盤の応答を詳細に評価するため「J E A G 4601-1991 追補版」に示される評価方法の一つである二次元 FEM モデルにより、地盤のモデル化を行っている。

また、今回工認時の地震応答解析モデルを図 2-4～図 2-6 に、排気筒の地震応答解析モデルを図 2-7 に、排気筒基礎の応力解析モデルを図 2-8 及び図 2-9 に示す。



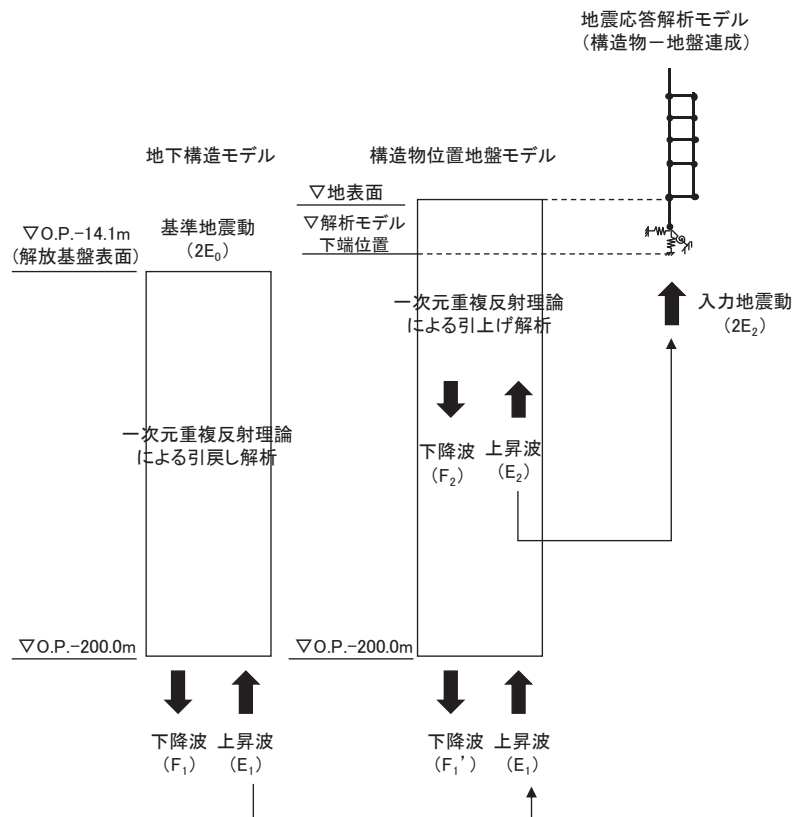


図 2-1 建設時工認（許可）の地震応答解析モデル

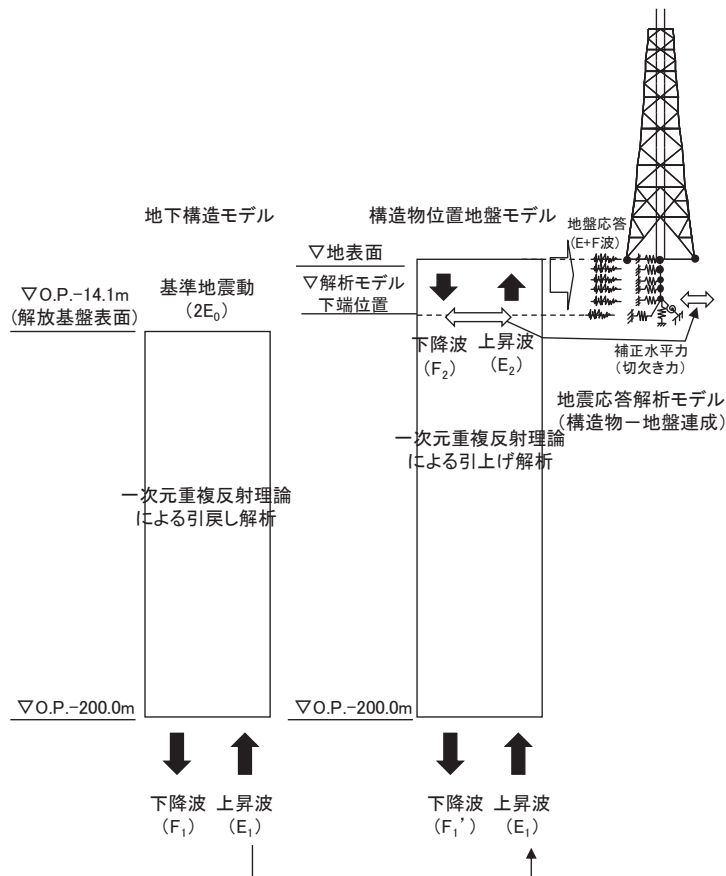


図 2-2 耐震設計審査指針の改定に伴う補強時（届出）時の地震応答解析モデル

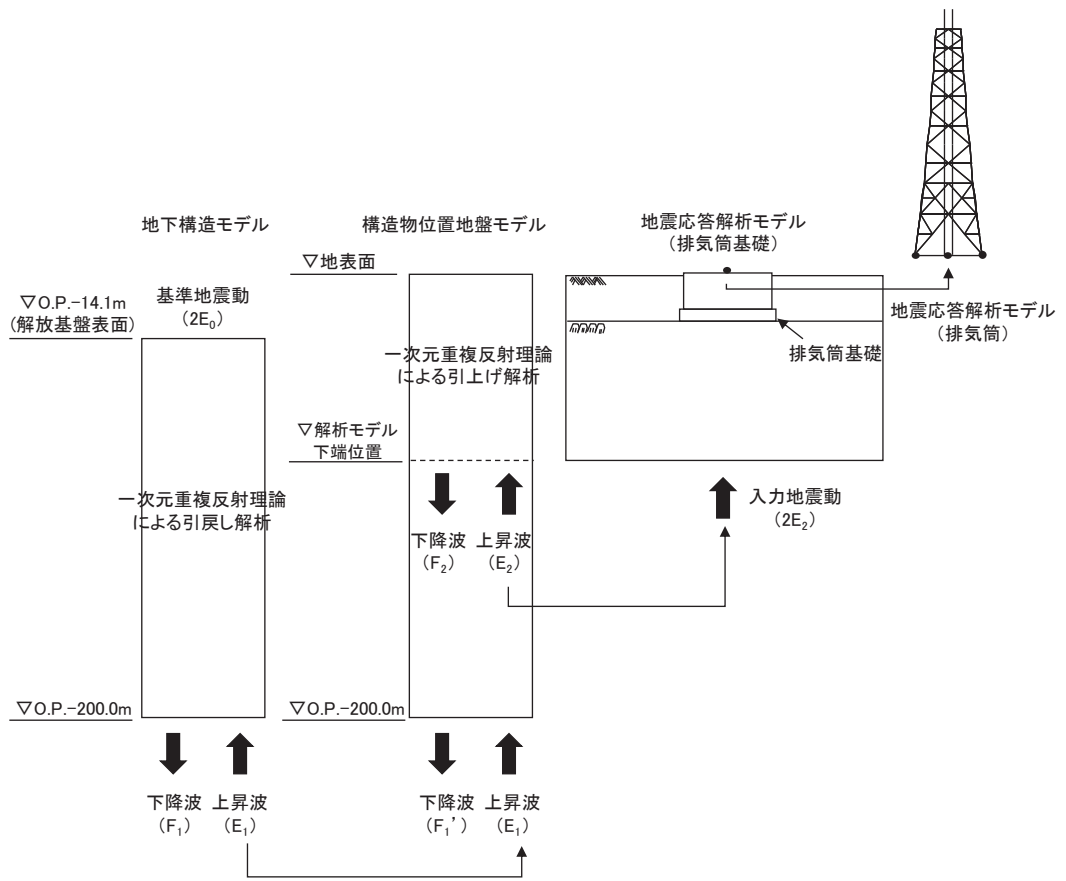


図 2-3 今回工認の地震応答解析モデル

表2-1 (1/3) 地震応答解析モデル及び手法の比較

項目	内容	建設時工認（認可）*1	耐震設計審査指針の改定に伴う補強時（届出）	今回工認		備考
				排気筒	基礎	
入力地震動の算定法	水平	基準地震動を用いて、一次元重複反射理論により、基礎下端（O.P.-4.0m）の応答値を抽出し、入力地震動を算定	基準地震動を用いて、一次元重複反射理論により、基礎下端及び基礎の埋込み部各位置（質点）での地盤応答、及び基礎底面位置での補正水平力（切欠き力）を抽出し、入力地震動を算定	基礎部の地震応答解析から得られる基礎天端レベル（O.P.15.3m）の応答値を抽出し、入力地震動を算定	基準地震動を用いて、一次元重複反射理論により、解析モデル下端（O.P.-80.0m）の応答値を抽出し、入力地震動を算定	(1)
	鉛直	—	基準地震動の最大加速度振幅の1/2より定まる震度			(1)
解析手法	質点系モデル（2軸）を用いた時刻歴応答解析（SRモデル）	三次元立体フレームモデル（質点系）を用いた時刻歴応答解析（SRモデル）	三次元立体フレームモデル（質点系）を用いた時刻歴応答解析	二次元FEMモデルを用いた時刻歴応答解析		(1)
解析コード	NUPP-II	SLAP	DYNA2E	TDAP		—

表 2-1 (2/3) 地震応答解析モデル及び手法の比較

項目	内容	建設時工認 (認可)	耐震設計審査指針の改定に伴う補強時 (届出)	今回工認		備考
				排気筒	基礎	
排気筒及び基礎のモデル化	モデル	鉄塔部と筒身部分けた質点系モデル (排気筒部と基礎部を一体化したSRモデル)	三次元立体フレームモデル (3号機筒身部を含む) (排気筒部と基礎部を一体化したSRモデル)	三次元立体フレームモデル (3号機筒身部を含む)	排気筒基礎は質点系モデル (構造物中心位置に構造梁でモデル化し, 側方地盤との離隔を模擬するため, 剛梁を水平方向に配置) とし, 排気筒は質点でモデル化	—
	材料物性	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼材のヤング係数, ポアソン比  <math>E = 2100 \text{ t/cm}^2</math>  <math>\nu = 0.3</math></li> <li>コンクリートのヤング係数, ポアソン比*<sup>2</sup>  <math>E = 2.35 \times 10^6 \text{ tf/m}^2</math>  <math>\nu = 0.2</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼材のヤング係数, ポアソン比  <math>E = 2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2</math>  <math>\nu = 0.3</math></li> <li>コンクリートのヤング係数, ポアソン比*<sup>2</sup>  <math>E = 2.15 \times 10^4 \text{ N/mm}^2</math>  <math>E = 2.06 \times 10^4 \text{ N/mm}^2</math>                      (基礎内側の充填コンクリート)  <math>\nu = 0.2</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼材のヤング係数, ポアソン比  <math>E = 2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2</math>  <math>\nu = 0.3</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリートのヤング係数, ポアソン比*<sup>2</sup>  <math>E = 2.15 \times 10^4 \text{ N/mm}^2</math>  <math>E = 2.06 \times 10^4 \text{ N/mm}^2</math>                      (基礎内側の充填コンクリート)  <math>\nu = 0.2</math></li> </ul>	—
	要素分割	<ul style="list-style-type: none"> <li>はり要素 鉄塔部 (支柱材, 水平材, 斜材), 筒身部及び基礎</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>はり要素 鉄塔部 (支柱材, 水平材, 斜材), 筒身部及び基礎, 弾塑性ダンパ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>はり要素 鉄塔部 (支柱材, 水平材, 斜材), 筒身部, オイルダンパ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>はり要素</li> </ul>	—
	減衰定数	鋼材1%, コンクリート5%	筒身1%, 鉄塔2%, コンクリート5%	筒身1%, 鉄塔2%,	コンクリート5%	(2)
	減衰	ひずみエネルギー比例型減衰	同左	同左	Rayleigh減衰	—
	筒身支持点	0. P. 161. 8m, 0. P. 134. 8m, 0. P. 98. 8m, 0. P. 74. 8m, 0. P. 41. 8m	同左	0. P. 161. 8m, 0. P. 134. 8m, 0. P. 74. 8m, 0. P. 41. 8m (0. P. 98. 8mは解除)	—	—
	制震装置	—	弾塑性ダンパ (高さ方向5段の支持点位置に対し, 各高さに8台設置)	オイルダンパ (0. P. 134. 8mに8台設置)	—	(3)

表2-1 (3/3) 地震応答解析モデル及び手法の比較

項目	内容	建設時工認（認可）	耐震設計審査指針の改定に伴う補強時（届出）	今回工認		備考
				排気筒	基礎	
地盤のモデル化	底面ばね	水平ばね，回転ばねを考慮	水平ばね，回転ばね，鉛直ばねを考慮	—	平面ひずみ要素	(4)
	側面ばね	考慮せず	水平ばねを考慮（NOVAKの方法による）	—		
非線形特性	弾塑性ダンパ	—	・水平方向 弾塑性ダンパの荷重－変位の履歴特性を考慮	—	—	(3)

注記\*1：建設時工認（認可）は，水平方向のみ地震応答解析を実施した。耐震設計審査指針の改定に伴う補強時（届出）は，水平方向の地震応答解析を実施し，鉛直方向は静的地震力を考慮した。

\*2：建設時工認（認可）は，「コンクリート標準示方書[設計編]（土木学会，1986年制定）」に基づく。耐震設計審査指針の改訂時は，「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，1999）」に基づく。

**【具体的な反映事項】**（表の備考欄に対応）

- （1）建設時工認（認可）及び耐震設計審査指針の改定に伴う補強時（届出）は、基礎部と排気筒部を一体化したSRモデルとしており、解放基盤表面で定義される基準地震動を用いて、一次元波動論により算定し、基礎下端での応答波を入力した。今回工認では、基礎部と排気筒部を分けて入力地震動を算定しており、基礎部については、解放基盤表面で定義される基準地震動を用いて一次元波動論により算定し、地震応答解析モデル（二次元FEMモデル）の底面（O.P. -80.0m）位置での応答波を水平・鉛直同時入力した。また、排気筒部については、基礎部の地震応答解析により得られる基礎部天端での応答波を抽出し、地震応答解析モデル（三次元立体フレームモデル）の下端に入力した。
- （2）今回工認では、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（（社）日本電気協会）」に基づき、溶接構造（筒身）は減衰1%、ボルト及びリベット構造物（鉄塔）は減衰2%とした。
- （3）耐震設計審査指針の改定に伴う補強時（届出）は、耐震上の余裕を向上させることを目的として、支持鉄塔の補強（補強材の配置）及び基礎の内側の埋戻土を無筋コンクリートによる置換えを行うとともに、制震装置（弾塑性ダンパ）を各筒身支持点に設置した。今回工認では、O.P. 134.8mの支持点において、弾塑性ダンパをオイルダンパに変更し、O.P. 98.8mの支持点を解放し、その他の支持点を固定した。このことから、今回工認では、O.P. 134.8mの支持点のオイルダンパのばね-ダッシュポットの直列モデルを応答解析モデルに考慮した。
- （4）今回工認では、基礎部の地震応答解析モデル（二次元有限要素法）において、**D**級を除く岩盤は線形の平面ひずみ要素でモデル化し、盛土・旧表土、**D**級岩盤は、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。

表2-2 応力解析モデル及び手法の比較

項目	内容	建設時工認（認可）	耐震設計審査指針の改定に伴う補強時（届出）	今回工認	備考
排気筒 （上部構造物）	解析手法	鉄塔部と筒身部に分けた質点系モデルを用いた応力解析（但し、地震荷重は地震応答解析から直接算出）	三次元フレームモデルを用いた応力解析（但し、地震荷重は地震応答解析から直接算出）	同左	—
	解析コード	NASTRAN	SCOND	DYNA2E	—
	要素種別	はり要素	同左	同左	—
	地震荷重との組み合わせ	荷重状態①：G + K 荷重状態②：G + W G：固定荷重 K：地震荷重 W：風荷重	荷重状態①：G + K 荷重状態②：G + W G：固定荷重 K：地震荷重 W：風荷重	荷重状態：G + S <sub>s</sub> + P <sub>k</sub> G：固定荷重 S <sub>s</sub> ：地震荷重 P <sub>k</sub> ：風荷重	(1)
	評価方法	発生応力が短期許容応力度を超えないことを確認	発生応力が短期許容応力度を超えないことを確認（ただし、弾塑性ダンバは応答値が許容値以内であることを確認）	発生応力が弾性限強度を超えないことを確認（ただし、オイルダンバは応答値が許容値以内であることを確認）	—
排気筒 （基礎）	解析手法	三次元フレームモデル（質点系）を用いた応力解析	二次元FEMモデルを用いた応力解析	三次元FEMモデルを用いた応力解析	(2)
	解析コード	NASTRAN	SLAP	SLAP	—
	要素種別	・柱，はり：はり要素 ・基礎版：板要素 〔一部（基礎版上の排気筒連絡ダクト）はビーム要素〕	・柱，はり，基礎版：はり要素 ・充填コンクリート* <sup>1</sup> ：ソリッド要素	柱，梁，基礎版，充填コンクリート：ソリッド要素	—
	地震荷重との組み合わせ	荷重状態①：G + K 荷重状態②：G + W G：固定荷重 K：地震荷重 W：風荷重	荷重状態①：G + K 荷重状態②：G + W G：固定荷重 K：地震荷重 W：風荷重	荷重状態：G + S <sub>s</sub> + P <sub>k</sub> + P <sub>s</sub> G：固定荷重 S <sub>s</sub> ：地震荷重* <sup>2</sup> P <sub>k</sub> ：風荷重* <sup>3</sup> P <sub>s</sub> ：積雪荷重	(1)
	評価方法	発生応力が短期許容応力度を超えないことを確認	同左	同左	(3)

注記\*1：耐震設計審査指針の改定に伴う補強時（届出）は，耐震上の余裕を向上させる対策として，鉄塔柱，梁，基礎版で囲まれる内側の埋戻土を無筋コンクリートによる置換えを実施した。

\*2：地震荷重については，排気筒（上部構造物）の地震応答解析により，筒身，鉄塔それぞれについて上部工反力を算出している。

\*3：風荷重については，排気筒（上部構造物）の静的応力解析により，筒身，鉄塔それぞれについて上部工反力を算出している。

【具体的な反映事項】（表の備考欄に対応）

- （1）今回工認においては，地震荷重と風荷重の組み合わせを考慮した。地震と重畳させる風荷重の算出の際には，ガスト影響係数を1.0に設定。
- （2）今回工認においては，二次元FEMモデルから，より精緻な応力評価が可能となる三次元ソリッド要素に解析モデルを変更。
- （3）今回工認においては，非常用ガス処理系配管および排気筒の間接支持構造物として，短期許容応力度設計を行うこととおおむね弾性範囲内となることを確認。



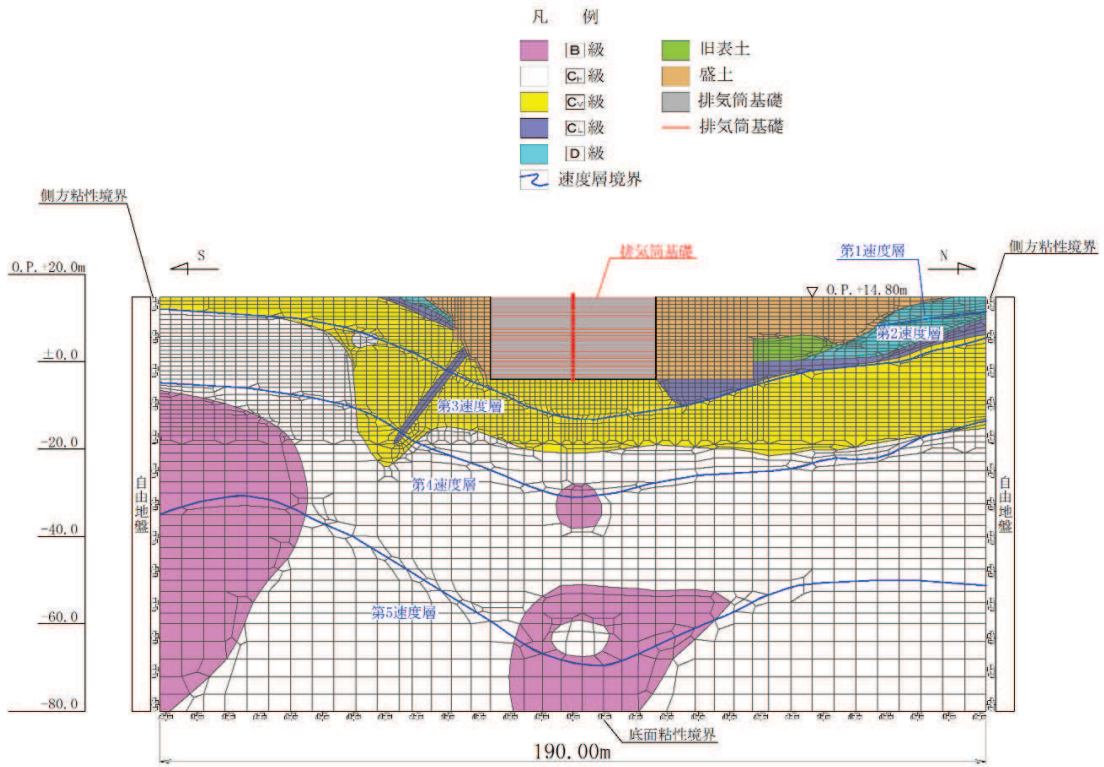


図2-4 排気筒基礎の地震応答解析モデル (NS断面)

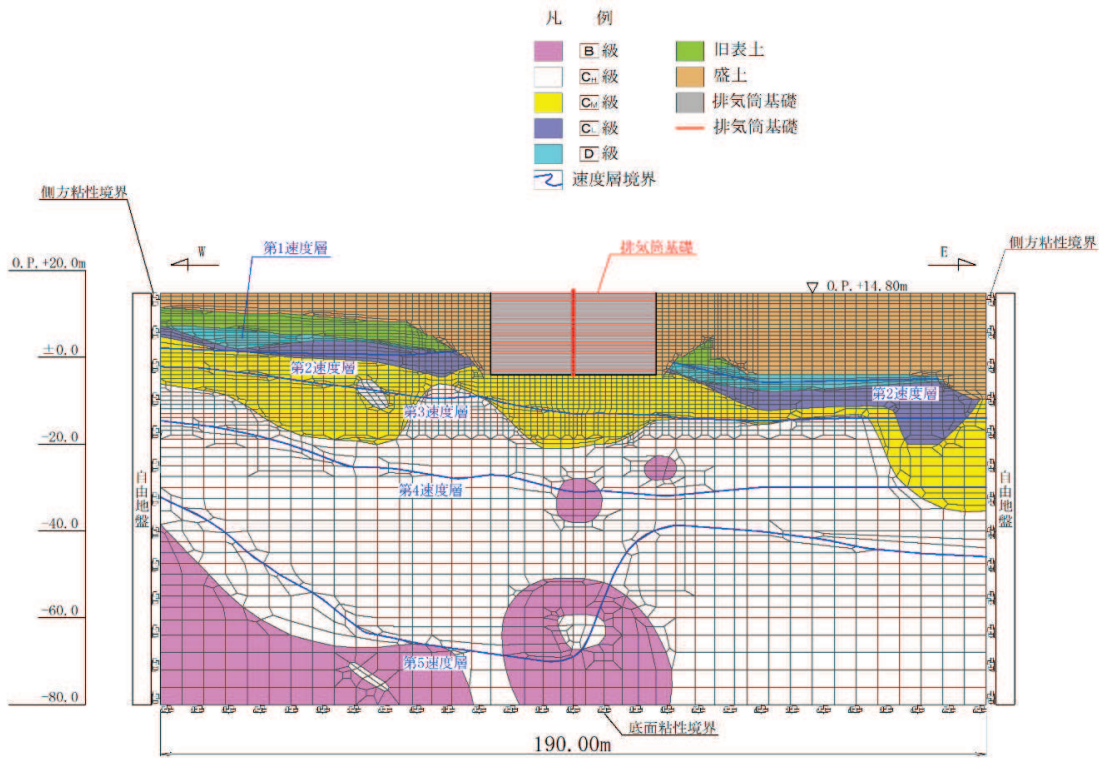


図2-5 排気筒基礎の地震応答解析モデル (EW断面)

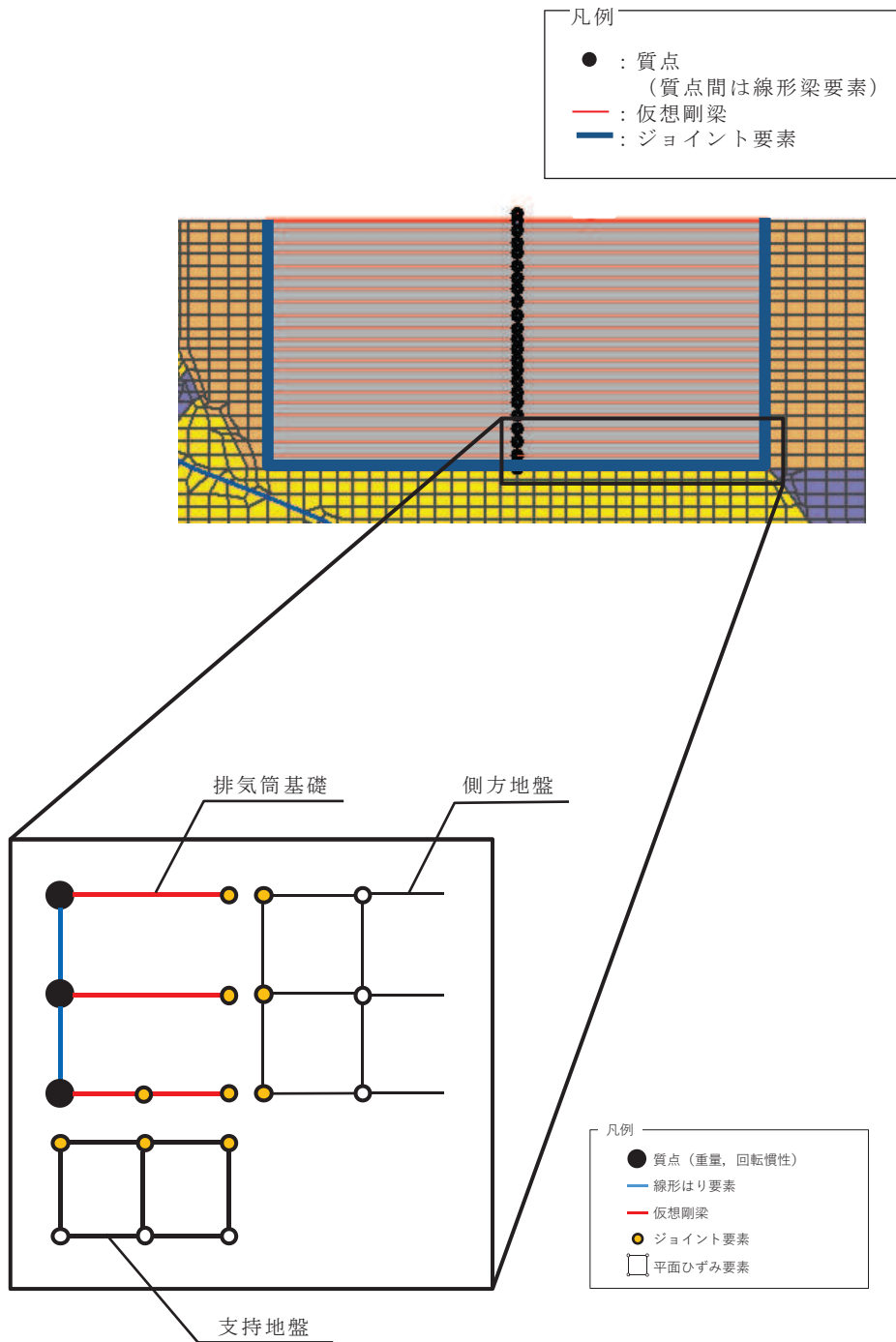
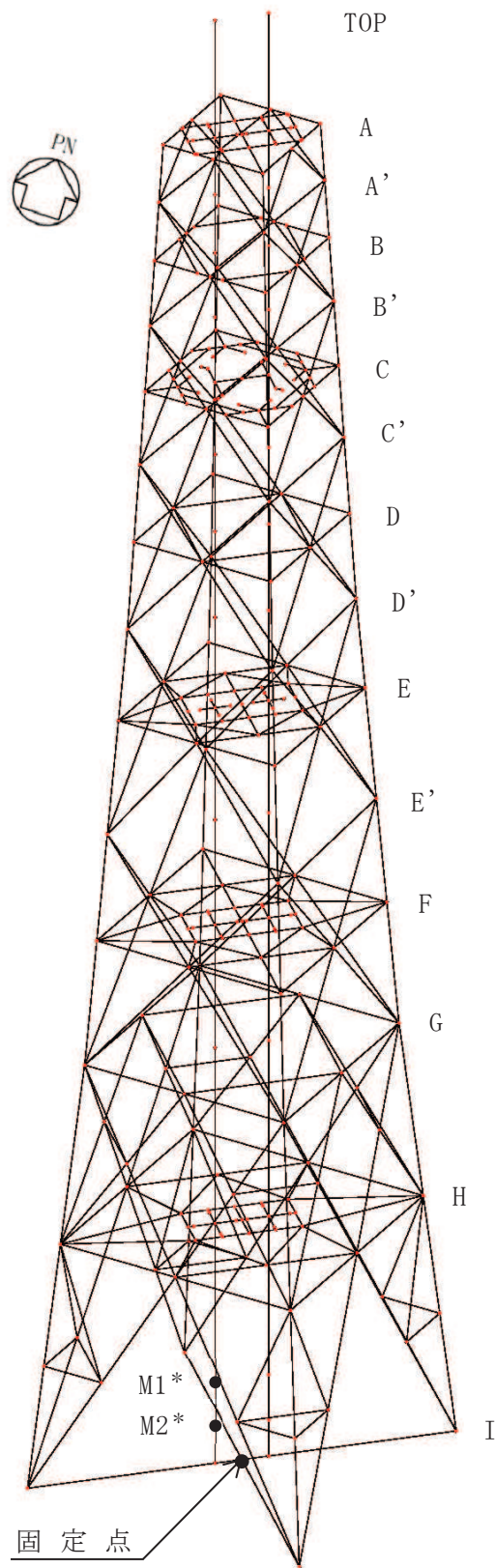


図 2-6 排気筒基礎の地震応答解析モデル (拡大図, 模式図)



注記\* : M1 は筒身の内径 3.0m, M2 は筒身の内径 3.7m の位置を示す。

図2-7 排気筒の地震応答解析モデル



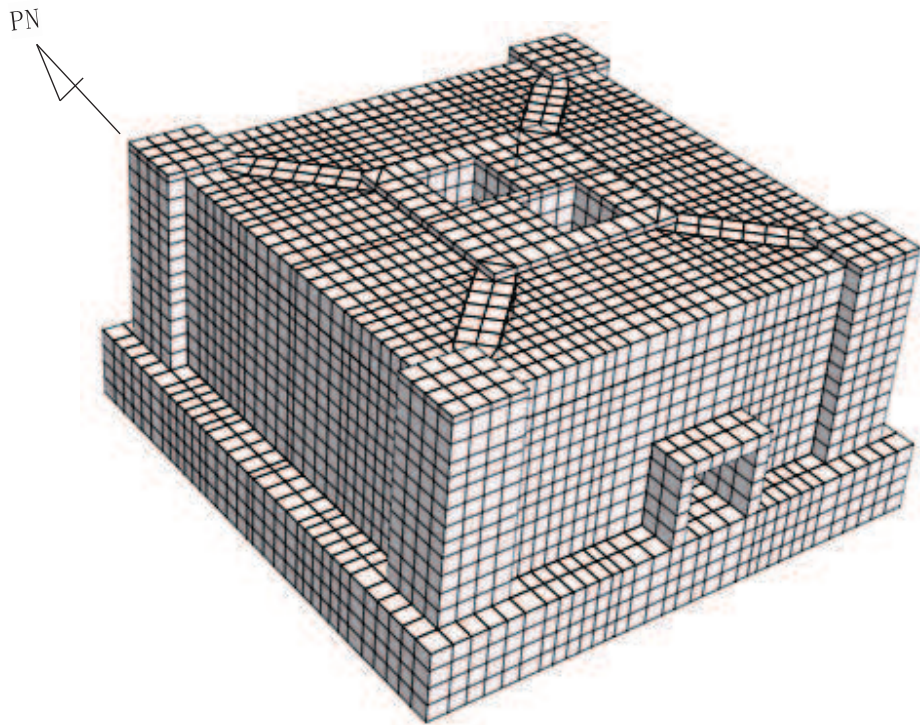


図 2-8 排気筒基礎の応力解析モデル（鳥瞰図）

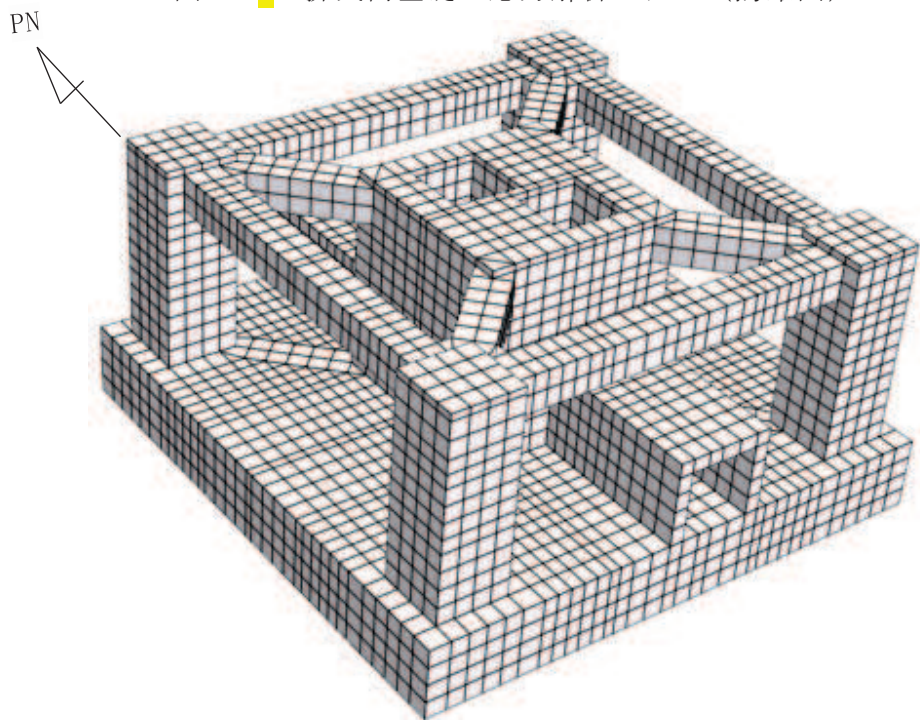


図 2-9 排気筒基礎の応力解析モデル（鳥瞰図（充填コンクリート非表示））

別紙 2 排気筒基礎の地震応答解析におけるモデル化，境界条件  
及び拘束条件の考え方

## 目次

1. 概要…………… 別紙 2-1
2. 排気筒基礎の地震応答解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件…………… 別紙 2-1
  - 2.1 要素分割の考え方…………… 別紙 2-1
  - 2.2 減衰定数…………… 別紙 2-6

## 1. 概要

本資料は、排気筒基礎の地震応答解析におけるモデル化、排気筒のモデル化、境界条件及び拘束条件についての概要を示すものである。

## 2. 排気筒基礎の地震応答解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件

### 2.1 要素分割の考え方

排気筒基礎の地震応答解析モデルを図 2-1 に、基礎のモデルを図 2-2 に示す。また、O.P. 3.8m 及び O.P. 8.505m の平面図を図 2-3 及び図 2-4 に示す。

排気筒の質点は、排気筒基礎の上端となる節点 No. 101 (O.P. 15.3m) に設けており、表 2-1 に示す単位奥行辺りの質量を考慮している。回転慣性質量については、排気筒基礎に比べ、排気筒の質量が非常に小さいことから、影響がほとんど無いと考えられることから、考慮していない。

排気筒基礎の質点は、筒身柱、鉄塔柱、つなぎはり及び基礎版の質量を考慮しており、耐震設計審査指針の改定に伴う補強時（届出）における質点位置となる節点 No. 1 (O.P. 14.8m), No. 6 (O.P. 10.41m), No. 10 (O.P. 6.6m), No. 17 (O.P. 1.0m), No. 22 (O.P. -4.0m) に質点を置くことを基本に、構造物脇における地盤のメッシュサイズ(高さ 1.0m 程度)に合わせて質点を設けている。質点の質量及び回転慣性質量を表 2-2 に示す。

排気筒基礎の剛性は、筒身柱、鉄塔柱、つなぎはり及び基礎版の剛性を、構造物中心位置において各構造部材と等価な剛性を有する線形はり要素でモデル化しており、線形はり要素のモデル諸元を表 2-3 に示す。充填コンクリートは、構造物中心位置での線形はり要素に質量と剛性を考慮する。また、基礎の構造部材と地盤の相互作用を考慮するため、構造部材に対して十分に剛な断面性能を有する仮想剛梁を水平方向に配置する。

なお、SGTS 配管の支持点は O.P. 14.8m 以上には延びておらず、節点 No. 1 (O.P. 14.8m), No. 6 (O.P. 10.41m), No. 10 (O.P. 6.6m), No. 17 (O.P. 1.0m) の 4 点で支持されている。

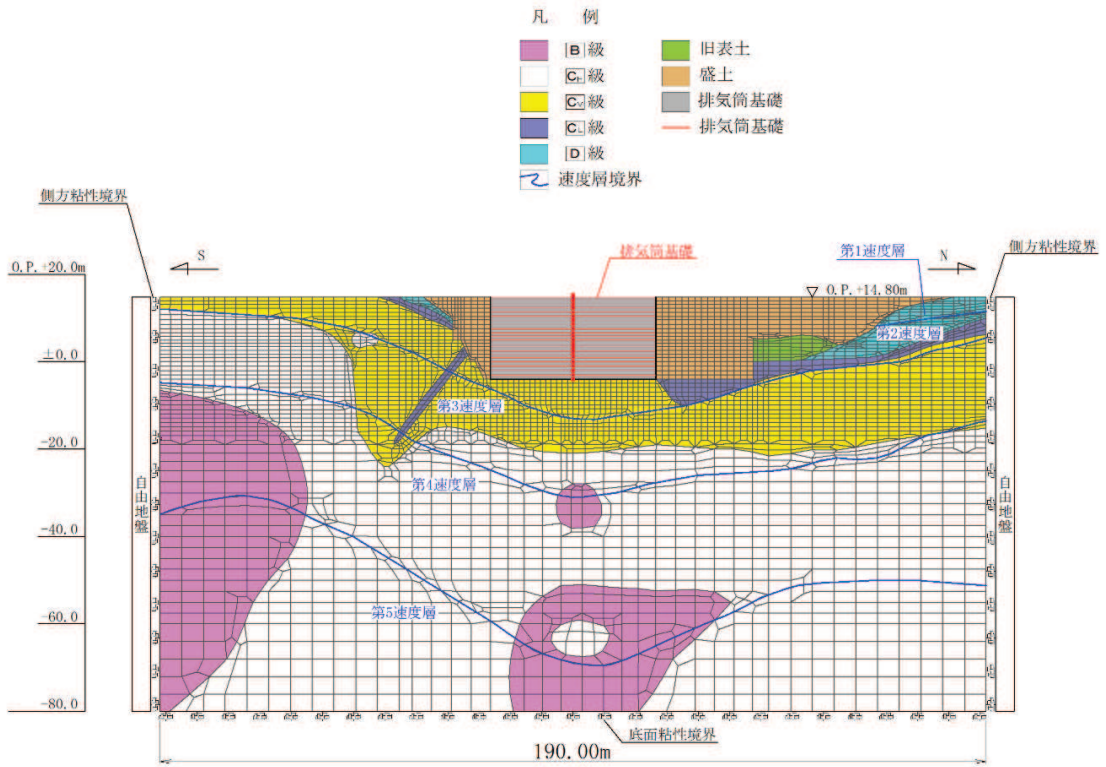


図 2-1 排気筒基礎の地震応答解析モデル図 (NS 断面)

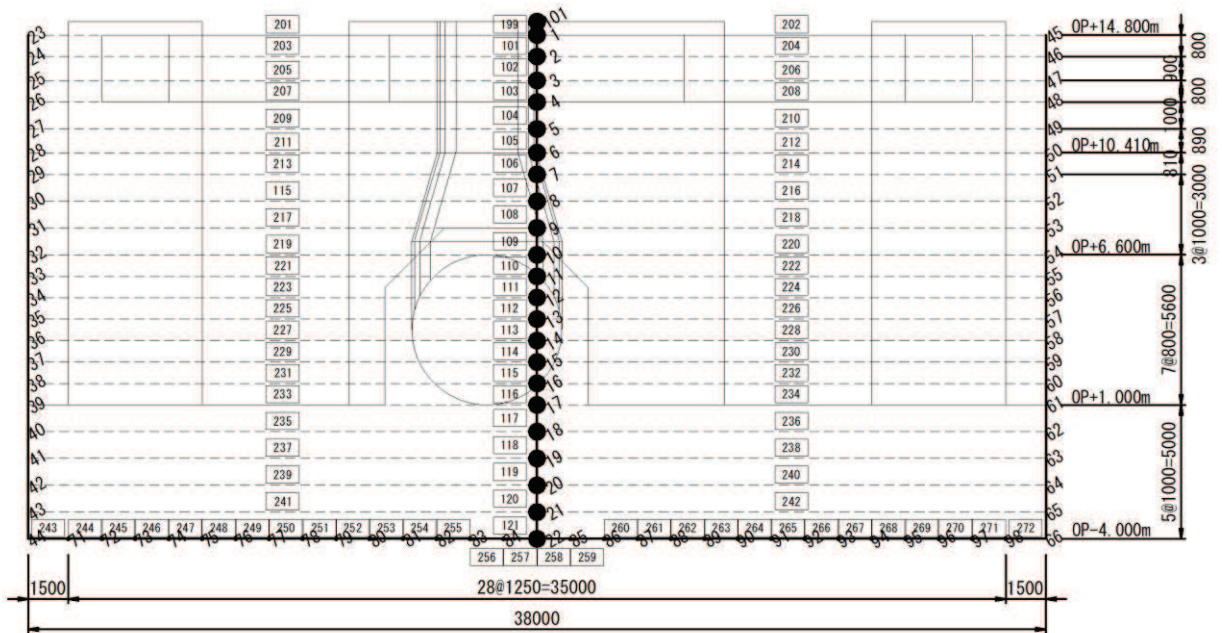


図 2-2 排気筒基礎モデル



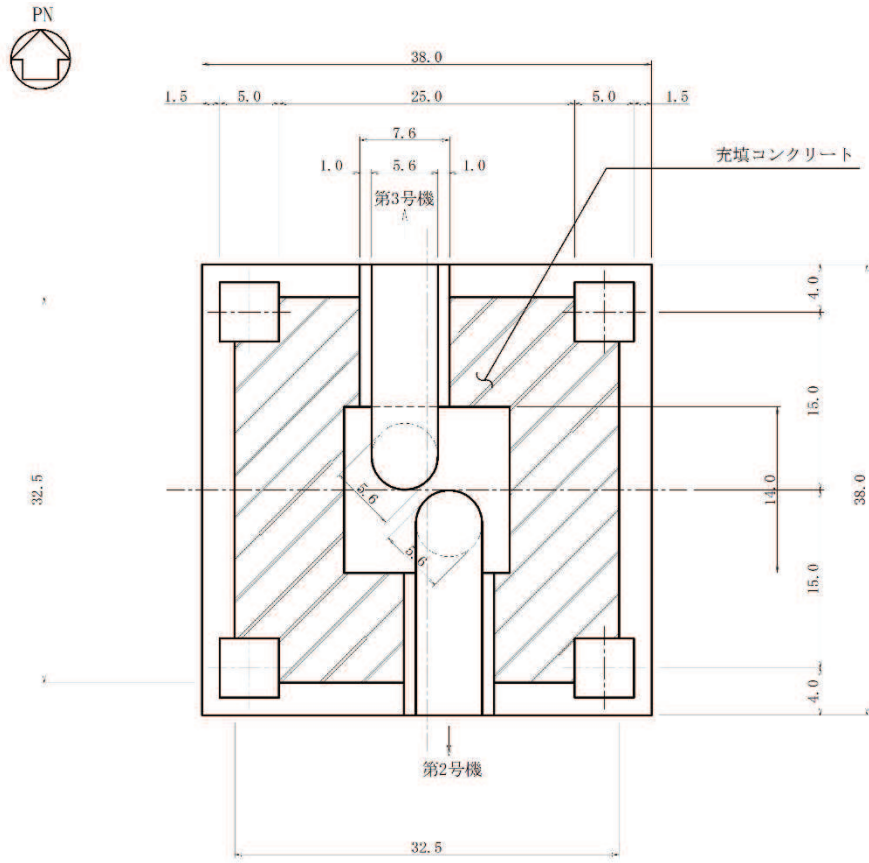


図 2-3 排気筒基礎平面図 (O.P. 3.8m)

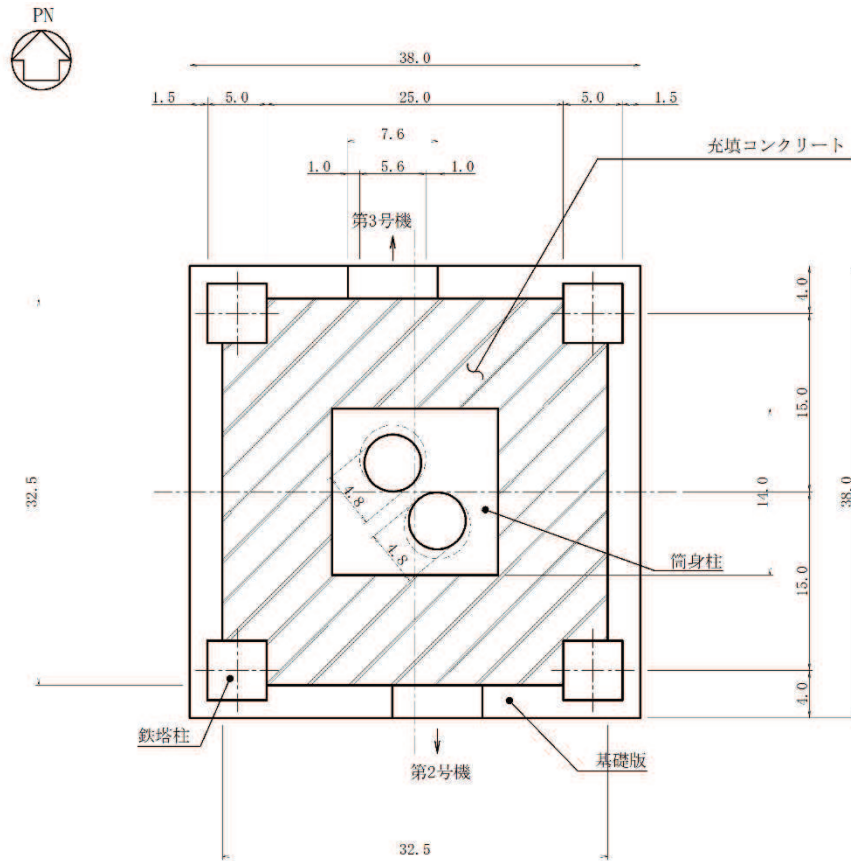


図 2-4 排気筒基礎平面図 (O.P. 8.505m)

表 2-1 排気筒基礎のモデル諸元（上部工質点）

節点 No.	質点位置	単位奥行き
		質量 (tf/m)
101	15.300	33.54

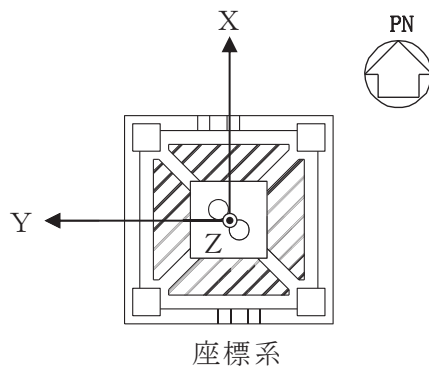
注：上部工重量を奥行 38m と  $g=9.80665\text{m/s}^2$  で除した。

表 2-2 排気筒基礎のモデル諸元（基礎質点）

節点 No.	質点位置	単位奥行き		
		質量 (tf/m)	回転慣性質量( $\text{tf} \cdot \text{m}^2/\text{m}$ )	
			X軸回り (EW断面)	Y軸回り (NS断面)
1	14.800	43.87	5.021E+03	5.021E+03
2	14.000	74.31	8.900E+03	8.900E+03
3	13.100	74.31	8.900E+03	8.900E+03
4	12.300	78.23	9.366E+03	9.366E+03
5	11.300	81.77	9.786E+03	9.786E+03
6	10.410	73.51	8.801E+03	8.801E+03
7	9.600	77.94	9.370E+03	9.368E+03
8	8.600	85.63	1.035E+04	1.035E+04
9	7.600	85.22	1.035E+04	1.038E+04
10	6.600	75.34	9.307E+03	9.173E+03
11	5.800	62.89	8.252E+03	7.492E+03
12	5.000	61.21	8.239E+03	7.231E+03
13	4.200	60.44	8.230E+03	7.115E+03
14	3.400	60.45	8.229E+03	7.115E+03
15	2.600	61.31	8.237E+03	7.232E+03
16	1.800	63.47	8.256E+03	7.512E+03
17	1.000	81.72	9.750E+03	9.802E+03
18	0.000	93.10	1.121E+04	1.121E+04
19	-1.000	93.10	1.121E+04	1.121E+04
20	-2.000	93.10	1.121E+04	1.121E+04
21	-3.000	93.10	1.121E+04	1.121E+04
22	-4.000	46.55	5.605E+03	5.605E+03
計		1621		

表 2-3 排気筒基礎のモデル諸元 (線形はり要素)

部材	部材 No.	節点 No.		単位奥行き				ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	備考
		I端	J端	断面積 (m <sup>2</sup> /m)	有効せん断面積率	断面二次モーメント (m <sup>4</sup> /m)				
						X軸回り (EW断面)	Y軸回り (NS断面)			
OP+14.800m ~10.410m	101	1	2	28.38	0.8333	2734	2734	2.084E+04	8.682E+03	
	102	2	3	28.38	0.8333	2734	2734	2.084E+04	8.682E+03	
	103	3	4	28.38	0.8333	2734	2734	2.084E+04	8.682E+03	
	104	4	5	28.38	0.8333	2734	2734	2.084E+04	8.682E+03	
	105	5	6	28.38	0.8333	2734	2734	2.084E+04	8.682E+03	
OP+8.505m 断面	106	6	7	27.99	0.8333	2732	2730	2.083E+04	8.678E+03	
	107	7	8	27.99	0.8333	2732	2730	2.083E+04	8.678E+03	
	108	8	9	27.99	0.8333	2732	2730	2.083E+04	8.678E+03	
	109	9	10	27.99	0.8333	2732	2730	2.083E+04	8.678E+03	
OP+3.800m 断面	110	10	11	24.34	0.8333	2709	2316	2.086E+04	8.693E+03	
	111	11	12	24.34	0.8333	2709	2316	2.086E+04	8.693E+03	
	112	12	13	24.34	0.8333	2709	2316	2.086E+04	8.693E+03	
	113	13	14	24.34	0.8333	2709	2316	2.086E+04	8.693E+03	
	114	14	15	24.34	0.8333	2709	2316	2.086E+04	8.693E+03	
	115	15	16	24.34	0.8333	2709	2316	2.086E+04	8.693E+03	
基礎版	116	16	17	24.34	0.8333	2709	2316	2.086E+04	8.693E+03	
	117	17	18	38.00	0.8333	4573	4573	2.155E+04	8.977E+03	
	118	18	19	38.00	0.8333	4573	4573	2.155E+04	8.977E+03	
	119	19	20	38.00	0.8333	4573	4573	2.155E+04	8.977E+03	
	120	20	21	38.00	0.8333	4573	4573	2.155E+04	8.977E+03	
	121	21	22	38.00	0.8333	4573	4573	2.155E+04	8.977E+03	



## 2.2 減衰定数

時刻歴応答解析における構造物及び地盤の減衰定数は、履歴減衰及び粘性減衰で考慮している。

履歴減衰は、応力－ひずみ関係の非線形性に起因する減衰であり、履歴曲線が面積を持つとき、その分だけ力学的なエネルギーが失われ、振動が小さくなる現象として現れる。構造物の履歴減衰は構造部材の非線形性（曲げモーメント－曲率関係又はコンクリート、鉄筋の応力－ひずみ関係）の程度に応じた値、地盤の履歴減衰は地盤の非線形性（せん断剛性－せん断ひずみ関係）の程度に応じた値となる。

粘性減衰は、時刻歴数値解析において急変時等に対して計算を安定させるために用いられる数値粘性の一種で、解析モデルに減衰を付加するものであり、実現象に影響を与えない程度に小さな減衰として与えることが推奨される。今回採用する Rayleigh 減衰は、実務的によく用いられる粘性減衰であり、質量マトリックス及び剛性マトリックスの線形結合で式 (2.1) のとおり表される。

排気筒の耐震計算では、Rayleigh 減衰を解析モデル全体に与えており、固有値解析にて求められる解析モデル全体の固有周期と各材料の減衰比に基づき設定している。

なお、構造物及び地盤のモデル化方法（線形又は非線形）によらず、係数  $\alpha$ 、 $\beta$  の設定方法は同一としており、構造物及び地盤を線形でモデル化する場合は、Rayleigh 減衰のみを設定する。

$$[c] = \alpha [m] + \beta [k] \quad \dots \dots \dots \text{式 (2.1)}$$

[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

$\alpha$ ,  $\beta$  : 係数

全応力による時刻歴応答解析では、「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）」に準拠し、質量比例型減衰と剛性比例型減衰の組み合わせ（ $\alpha$ ,  $\beta > 0$ ）による Rayleigh 減衰を設定する。Rayleigh 減衰の設定フローを図 2-5 に示す。

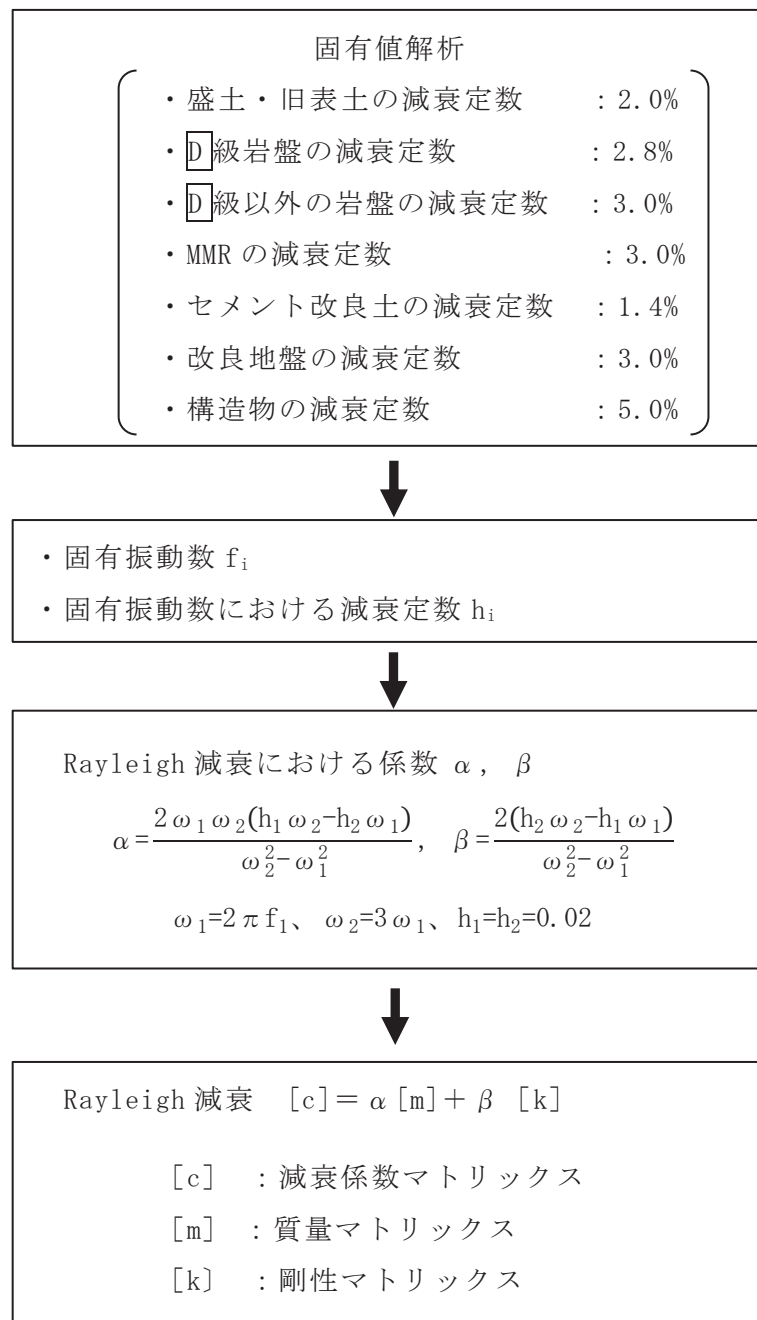


図 2-5 Rayleigh 減衰の設定フロー

減衰定数 ( $h_1, h_2$ ) については、地震応答解析の解析モデルに占める割合の大きい盛土及び旧表土の挙動が支配的となることから、「補足-600-1 地盤の支持性能について」に示す盛土及び旧表土の繰返し三軸試験結果に基づき 0.02 を採用している。なお、減衰定数 0.02 は、盛土及び旧表土の微小ひずみ領域における減衰定数であるため、地震時の履歴減衰と比較して十分に小さい値である。

Rayleigh 減衰における係数  $\alpha$  ,  $\beta$  の設定にあたっては、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、1 次及び 2 次モードの固有振動数において、過大な減衰とならないよう定めている。

1 次固有振動数 ( $f_1$ ) は、地震応答解析の解析モデルの固有値解析結果から算定する。2 次固有振動数 ( $f_2$ ) は、図 2-6 に示すとおり、水平成層地盤の 2 次固有振動数が 1 次固有振動数の 3 倍であることから、固有値解析から算定した 1 次固有振動数の 3 倍とする。

2 次固有振動数を 1 次固有振動数の 3 倍として設定することの保守性を確認するために、2 次固有振動数を 1 次固有振動数と同様に地震応答解析モデルの固有値解析結果から算定し設定した Rayleigh 減衰との比較を行う。地震応答解析モデル図と設定した Rayleigh 減衰を図 2-7 に示す。

図 2-5 に示すように、構造物周囲の地質状況に係わらず 2 次固有振動数を 1 次固有振動数の 3 倍とした方が、各振動数における減衰が小さくなり保守的な設定であることが確認できる。

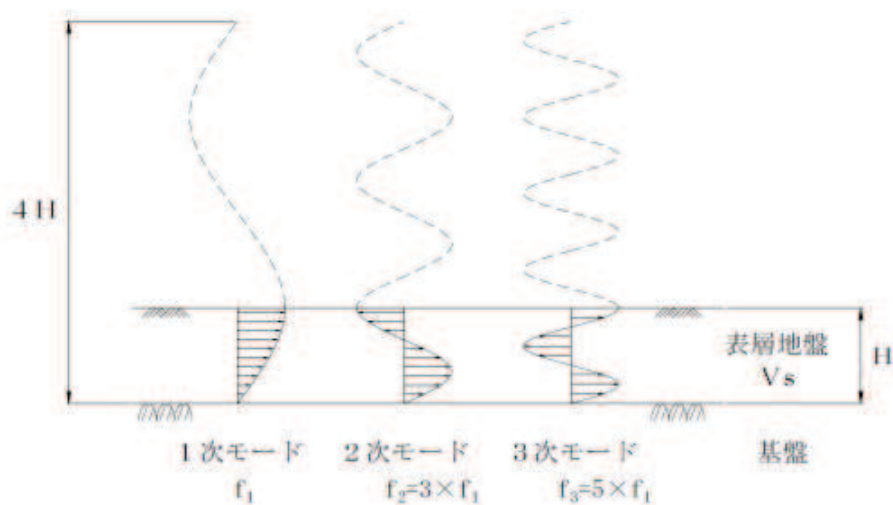
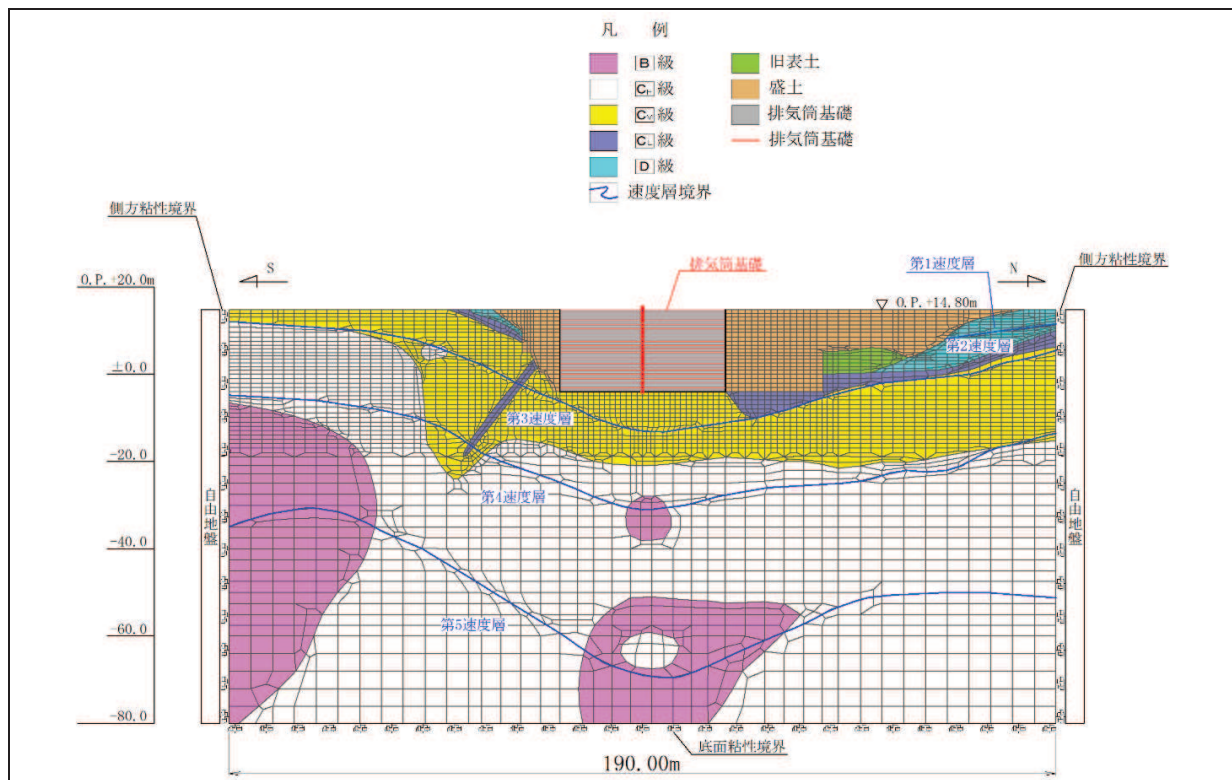
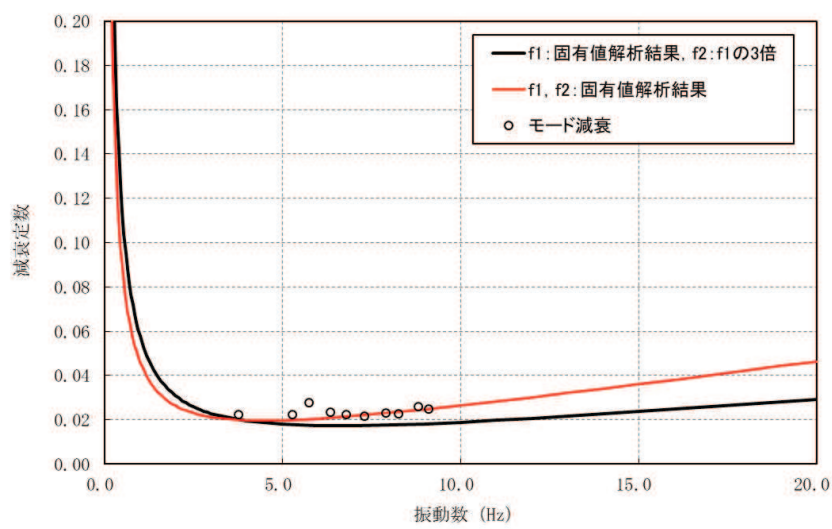


図 2-6 せん断振動の固有振動モード  
(実務に役立つ耐震設計入門 (土木学会, 2011))



地震応答解析モデル



Rayleigh 減衰

図 2-7 Rayleigh 減衰の比較 (NS 断面)

別紙 3 排気筒基礎の地震応答解析における地盤物性及び  
材料物性の不確かさに関する検討



## 目次

1. 概要	別紙 3-1
1.1 検討概要	別紙 3-1
1.2 検討方針	別紙 3-1
2. 排気筒基礎の耐震評価に及ぼす地盤物性の不確かさの影響検討	別紙 3-3
2.1 不確かさの影響検討を行う地震動の設定方法	別紙 3-3
2.2 地震動の選定	別紙 3-4
2.3 地盤物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果	別紙 3-11

## 1. 概要

### 1.1 検討概要

本資料では、地盤物性及び材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析を行い、地盤物性及び材料物性の不確かさが排気筒及び排気筒基礎の評価に及ぼす影響について確認する。

### 1.2 検討方針

女川原子力発電所第2号機排気筒は、排気筒基礎（基礎部）と排気筒（排気筒部）を分けて地震応答解析を実施している。このことから、排気筒基礎及び排気筒に及ぼす地盤物性及び材料物性の不確かさの影響は、基礎部と排気筒部に分け、基準地震動  $S_s$ （全7波）を用いた地震応答解析により確認を行う。

排気筒基礎の不確かさ検討ケースを表1-1に示す。排気筒基礎の耐震評価については、許容応力度法により設計を行っており、十分に裕度を確保した設計としていることから、材料物性（コンクリート物性）のばらつきを考慮した耐震評価は実施せず、地盤物性のばらつきを考慮する。

地盤物性のばらつきについて、排気筒基礎の地震時の応答は、構造物と周辺地盤の相互作用によることから、地盤物性のばらつきの影響を評価するに当たっては、解析モデルに分布する地盤のうち、主に構造物の応答に支配的となる地盤を選定する。排気筒基礎は、岩盤上に直接構築され、基礎の質量が大きく、作用する慣性力が主たる荷重となる他、盛土等の土圧も主たる荷重となることから、すべての地盤のせん断弾性係数のばらつきを考慮する（ケース②，ケース③）。

一方、機器・配管系に対する応答加速度抽出においては、地盤物性に加え材料物性のばらつきを考慮し、コンクリートの実強度及び初期剛性低下を考慮したばらつきを考慮する（ケース④，ケース⑤）。

なお、本検討においては、排気筒基礎の耐震評価に着目し、地盤物性のばらつき（ケース①～ケース③）の影響について確認を行う。

表 1-1 排気筒基礎の解析ケース

解析ケース	材料物性 (コンクリート) ( $E_0$ : ヤング係数)	地盤物性
		旧表土, 盛土, D級岩盤 C <sub>L</sub> 級岩盤, C <sub>M</sub> 級岩盤, C <sub>H</sub> 級岩盤, B級岩盤 (G: せん断弾性係数)
ケース① (基本ケース)	設計基準強度	平均値
ケース②	設計基準強度	平均値 + 1 $\sigma$
ケース③	設計基準強度	平均値 - 1 $\sigma$
ケース④	実強度に基づく 圧縮強度* <sup>1</sup>	平均値
ケース⑤	設計基準強度 × 0.75* <sup>2</sup>	平均値

注記\*1: 既設構造物のコア採取による圧縮強度試験の結果を使用する。

\*2: 原子炉建屋の剛性低下率のうち特異的なオペフロの値を除いた中で最大となる NS 方向の剛性低下率を設定する。

## 2. 排気筒基礎の耐震評価に及ぼす地盤物性の不確かさの影響検討

### 2.1 不確かさの影響検討を行う地震動の設定方法

不確かさを考慮したケースにおける排気筒基礎の評価にあたっては、基準地震動  $S_s$  (7波) 及びこれらに水平動の位相反転を考慮した地震動 (7波) を加えた全 14 波を用いてケース① (基本ケース) における評価結果を確認したうえで、排気筒基礎の応答への影響の大きい基準地震動に対して実施する。

ケース①において、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び基礎地盤の支持力照査の照査項目ごとに照査値が 0.5 以上となる照査項目に対して、最も厳しい地震動を用いて、ケース②及びケース③を実施する。図 2-1 に地盤物性の不確かさを考慮した検討に用いる地震動の選定フローを示す。

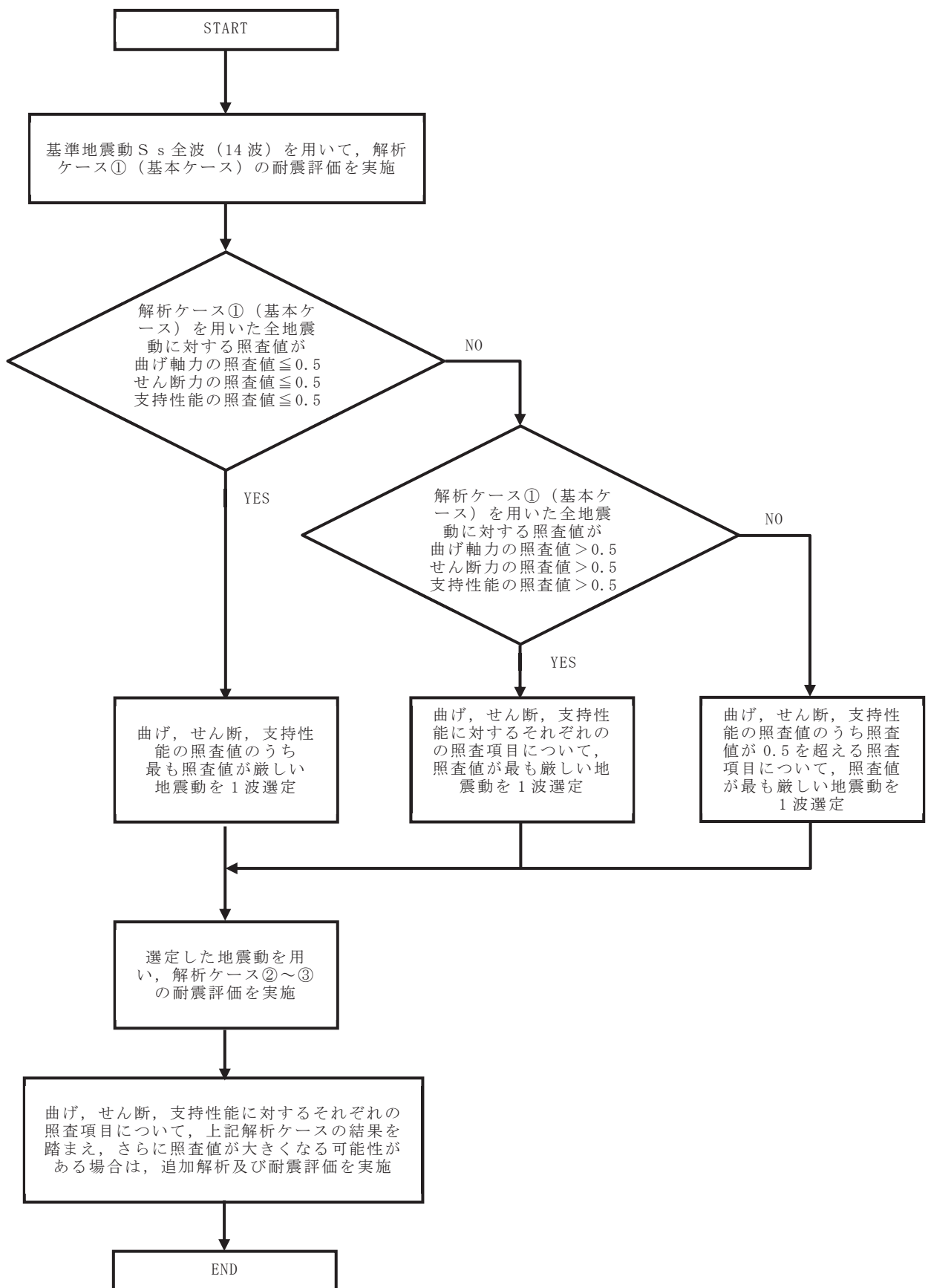


図2-1 地盤物性の不確かさを考慮した検討に用いる地震動の選定法のフロー

## 2.2 地震動の選定

排気筒基礎の基準地震動  $S_s$  に対する地震動の選定過程を以下に示す。排気筒基礎の基準地震動  $S_s$  に対する照査値を表 2-1～表 2-3 に示す。

「2.1 不確かさの影響検討を行う地震動の設定方法」に基づき確認した結果、 $S_s - D 2 (-+)$  が、照査値が最も厳しくなるせん断破壊に対する評価結果が最大となることから、 $S_s - D 2 (-+)$  を地盤物性の不確かさの影響検討に用いる地震動とする。

表 2-1(1)  $S_s$  地震時における曲げ・軸力系の破壊に対する照査結果  
(コンクリート, NS 断面)

		曲げ・軸力系の破壊に対する 照査結果		
		ケース①	ケース②	ケース③
$S_s - D 1$	++	0.13		
	-+	0.13		
$S_s - D 2$	++	0.23		
	-+	0.14		
$S_s - D 3$	++	0.14		
	-+	0.11		
$S_s - F 1$	++	0.11		
	-+	0.10		
$S_s - F 2$	++	0.13		
	-+	0.12		
$S_s - F 3$	++	0.16		
	-+	0.12		
$S_s - N 1$	++	0.10		
	-+	0.09		

表 2-1(2) S s 地震時における曲げ・軸力系の破壊に対する照査結果  
(コンクリート, EW 断面)

		曲げ・軸力系の破壊に対する 照査結果		
		ケース①	ケース②	ケース③
S s - D 1	++	0.21		
	-+	0.20		
S s - D 2	++	0.30		
	-+	0.23	0.27	0.21
S s - D 3	++	0.17		
	-+	0.17		
S s - F 1	++	0.14		
	-+	0.13		
S s - F 2	++	0.23		
	-+	0.24		
S s - F 3	++	0.20		
	-+	0.21		
S s - N 1	++	0.14		
	-+	0.15		

表 2-2(1) S s 地震時における曲げ・軸力系の破壊に対する照査結果  
(鉄筋, NS 断面)

		曲げ・軸力系の破壊に対する 照査結果		
		ケース①	ケース②	ケース③
S s - D 1	++	0.36		
	-+	0.37		
S s - D 2	++	0.36		
	-+	0.38		
S s - D 3	++	0.37		
	-+	0.37		
S s - F 1	++	0.37		
	-+	0.37		
S s - F 2	++	0.37		
	-+	0.36		
S s - F 3	++	0.36		
	-+	0.35		
S s - N 1	++	0.36		
	-+	0.37		



表 2-2(2) S s 地震時における曲げ・軸力系の破壊に対する照査結果  
(鉄筋, EW 断面)

		曲げ・軸力系の破壊に対する 照査結果		
		ケース①	ケース②	ケース③
S s - D 1	++	0.35		
	-+	0.35		
S s - D 2	++	0.35		
	-+	0.35	0.35	0.35
S s - D 3	++	0.35		
	-+	0.35		
S s - F 1	++	0.35		
	-+	0.35		
S s - F 2	++	0.35		
	-+	0.35		
S s - F 3	++	0.34		
	-+	0.35		
S s - N 1	++	0.35		
	-+	0.35		

表 2-3(1) S s 地震時におけるせん断破壊に対する照査結果 (NS 断面)

		せん断破壊に対する照査結果		
		ケース①	ケース②	ケース③
S s - D 1	++	0.55		
	-+	0.53		
S s - D 2	++	0.58		
	-+	0.55		
S s - D 3	++	0.49		
	-+	0.47		
S s - F 1	++	0.48		
	-+	0.46		
S s - F 2	++	0.48		
	-+	0.49		
S s - F 3	++	0.53		
	-+	0.46		
S s - N 1	++	0.48		
	-+	0.44		

表 2-3(2) S s 地震時におけるせん断破壊に対する照査結果 (EW 断面)

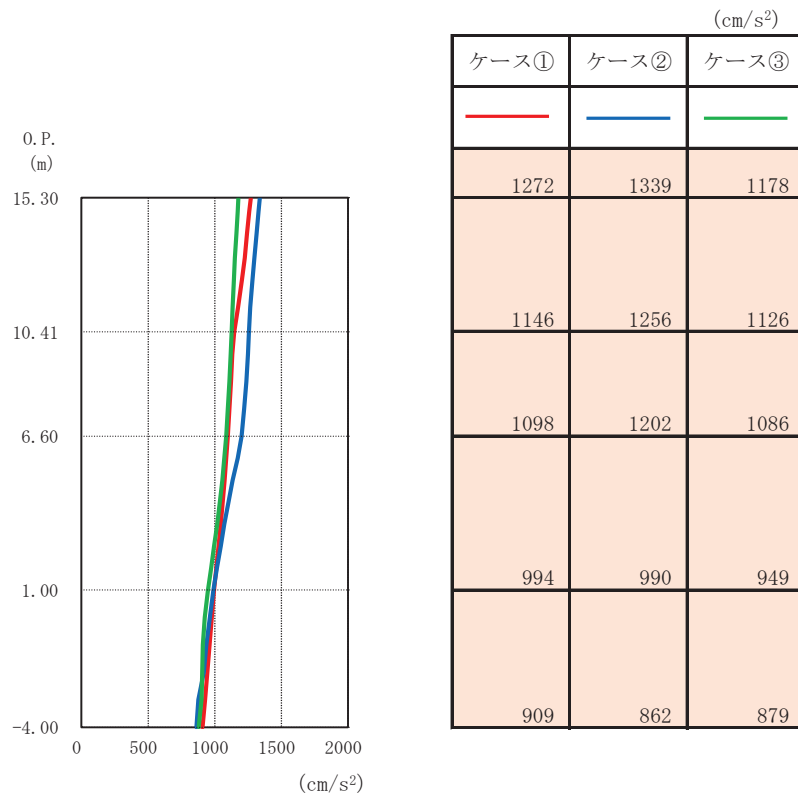
		せん断破壊に対する照査結果		
		ケース①	ケース②	ケース③
S s - D 1	++	0.65		
	-+	0.64		
S s - D 2	++	0.68		
	-+	0.69	0.68	0.68
S s - D 3	++	0.57		
	-+	0.58		
S s - F 1	++	0.50		
	-+	0.51		
S s - F 2	++	0.56		
	-+	0.58		
S s - F 3	++	0.64		
	-+	0.61		
S s - N 1	++	0.52		
	-+	0.51		

### 2.3 地盤物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果

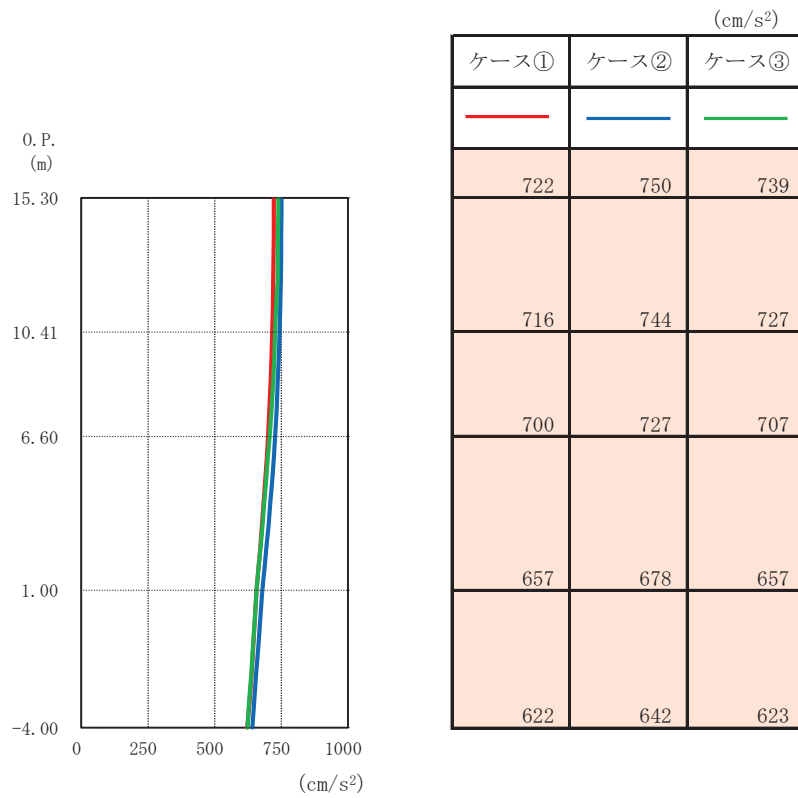
基本ケースの地震応答解析結果は、添付書類「VI-2-2-25 排気筒基礎の地震応答計算書」に示していることから、ここでは地盤物性の不確かさを考慮した基準地震動  $S_s$  に対する地震応答解析結果を図 2-2 に示す。

地盤物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果より、以下の傾向を確認した。

- ・ 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項目で 0.5 以上となるせん断破壊に対する評価結果から， $S_s - D2 (-+)$  が排気筒基礎の耐震評価に最も厳しい基準地震動となった。
- ・  $S_s - D2 (-+)$  による地盤物性の不確かさの評価結果から，排気筒基礎における地盤物性の不確かさについての影響は小さい結果となった。



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図 2-2 最大応答加速度 (基準地震動  $S_s$ ,  $S_s - D2$  (-+), EW 断面)

別紙 4 排気筒基礎の地盤の液状化を考慮した地震応答解析結果

## 目次

1. 概要	別紙 4-1
2. 検討方針	別紙 4-2
3. 解析方法	別紙 4-3
3.1 入力地震動	別紙 4-3
3.2 解析モデル及び諸元	別紙 4-3
4. 地震応答解析結果	別紙 4-8
5. 耐震評価に与える影響	別紙 4-19
5.1 排気筒基礎の評価に与える影響	別紙 4-19
5.2 排気筒の評価に与える影響	別紙 4-22
5.3 配管の評価に与える影響	別紙 4-30

## 1. 概要

排気筒基礎の設計用地下水位は地表面（O. P. 14. 8m）に設定しており、また、周辺の地盤は液状化検討対象層（盛土、旧表土）が分布している。建物・構築物である排気筒基礎は、土圧による影響が支配的な屋外重要土木構造物と異なり、入力地震動との共振振動により発生する構造物の慣性力による影響が大きいことから、地盤の液状化、非液状化による土圧の影響は少ないと考え、全応力解析を基本としている。

本資料では、周辺地盤の液状化による影響を確認するため、地盤の有効応力の変化を考慮した地震応答解析（以下「有効応力解析」という。）を行い、排気筒基礎、排気筒及び配管に与える影響を確認するものである。具体的には、排気筒基礎に発生する慣性力及び排気筒、配管の共振への影響を確認するため、排気筒基礎の地震応答解析から求めた応答加速度を確認する。また、排気筒基礎は、地盤からの土圧も作用することから、モデルに発生する断面力についても確認する。



## 2. 検討方針

排気筒基礎の有効応力解析は、添付書類「VI-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に基づいて行う。

有効応力解析フローを図 2-1 に示す。

有効応力解析は、「3.1 入力地震動」において設定した入力地震動を用いて実施することとし、「3.2 解析モデル及び諸元」において設定した有効応力解析モデル及び条件に基づき、「4. 地震応答解析結果」及び「5. 耐震評価に与える影響」において排気筒基礎の各種応答値を算出し、有効応力解析による影響を確認する。

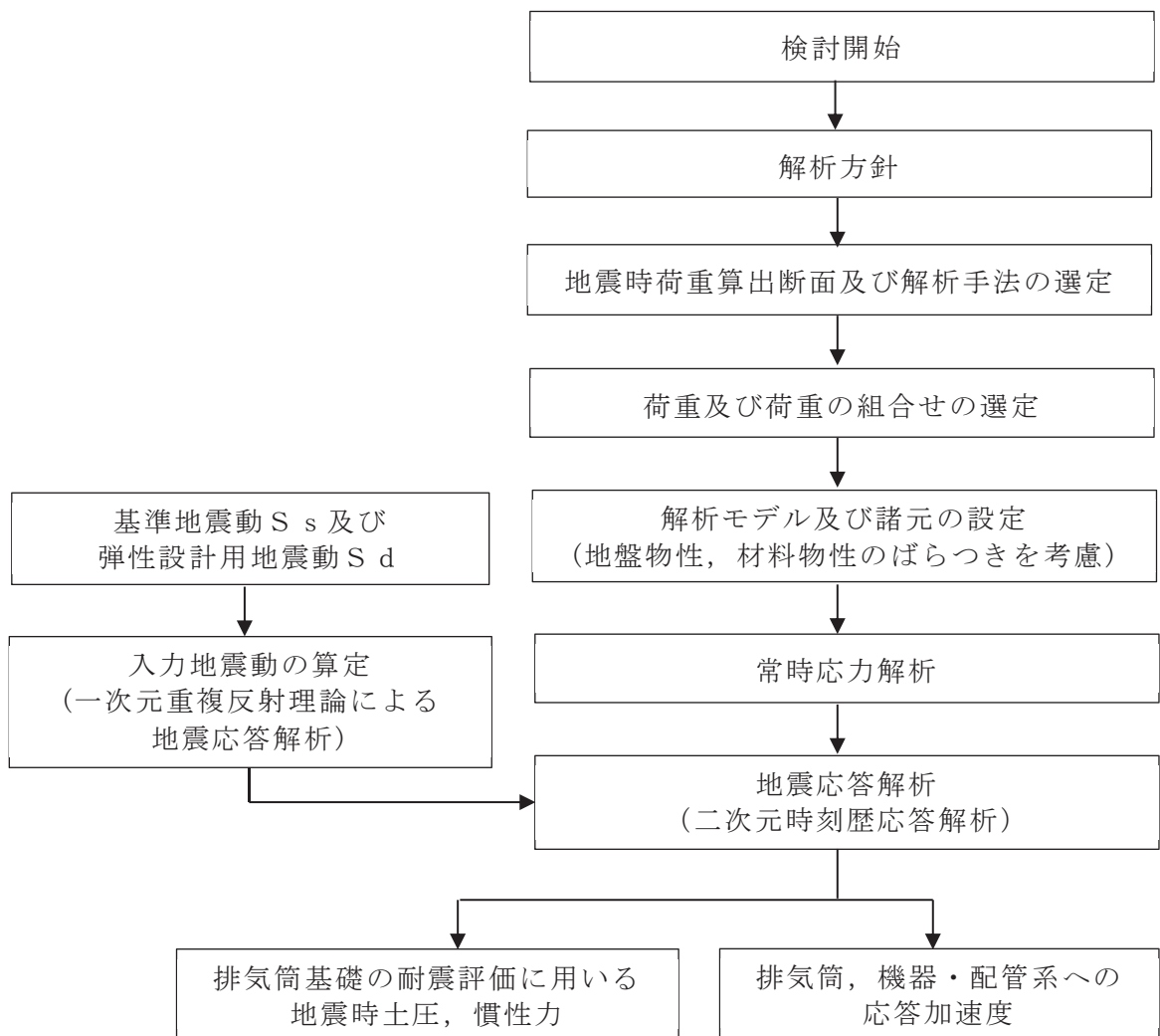


図 2-1 排気筒基礎の有効応力解析フロー

### 3. 解析方法

#### 3.1 入力地震動

有効応力解析に用いる入力地震動は、添付書類「VI-2-2-25 排気筒基礎の地震応答計算書」と同一とし、解放基盤表面で定義される基準地震動  $S_s$  を一次元重複反射理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。

#### 3.2 解析モデル及び諸元

有効応力解析に用いる解析モデル及び諸元は、添付書類「VI-2-2-25 排気筒基礎の地震応答計算書」と同一とし、以下に示すものをを用いる。地震応答解析については、解析コード「FLIP Ver7.3.0\_2」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、添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

##### 3.2.1 解析モデル及び諸元

排気筒基礎の地震応答解析モデルを図 3-1～図 3-3 に示す。

###### (1) 解析領域

二次元有限要素法による時刻歴応答解析の解析モデルの解析領域は、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、十分に広い領域とする。

###### (2) 境界条件

二次元有限要素法による時刻歴応答解析の解析モデル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。

###### (3) 構造物のモデル化

筒身柱、鉄塔柱、つなぎはり及び基礎版の剛性を、構造物中心位置において各構造部材と等価な剛性を有する線形はり要素と等価な質量を有する質点でモデル化する。排気筒は基礎の上端に質点として考慮する。また、基礎の構造部材と地盤の相互作用を考慮するため、構造部材に対して十分に剛な断面性能を有する仮想剛梁を水平方向に配置する。

###### (4) 地盤のモデル化

D<sub>1</sub>級を除く岩盤は、線形の平面ひずみ要素でモデル化する。また、盛土・旧表土及び D<sub>2</sub>級岩盤は、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。充填コンクリートは、構造物中心位置での線形はり要素に質量と剛性を考慮する。

###### (5) 隣接構造物のモデル化

NS 方向において隣接構造物となる排気筒連絡ダクト、第 3 号機排気筒連絡ダクトは、排気筒基礎の耐震評価において保守的な評価となるよう盛土としてモデル化する。

(6) ジョイント要素の設定

地震時の「地盤と構造物」との接合面における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。

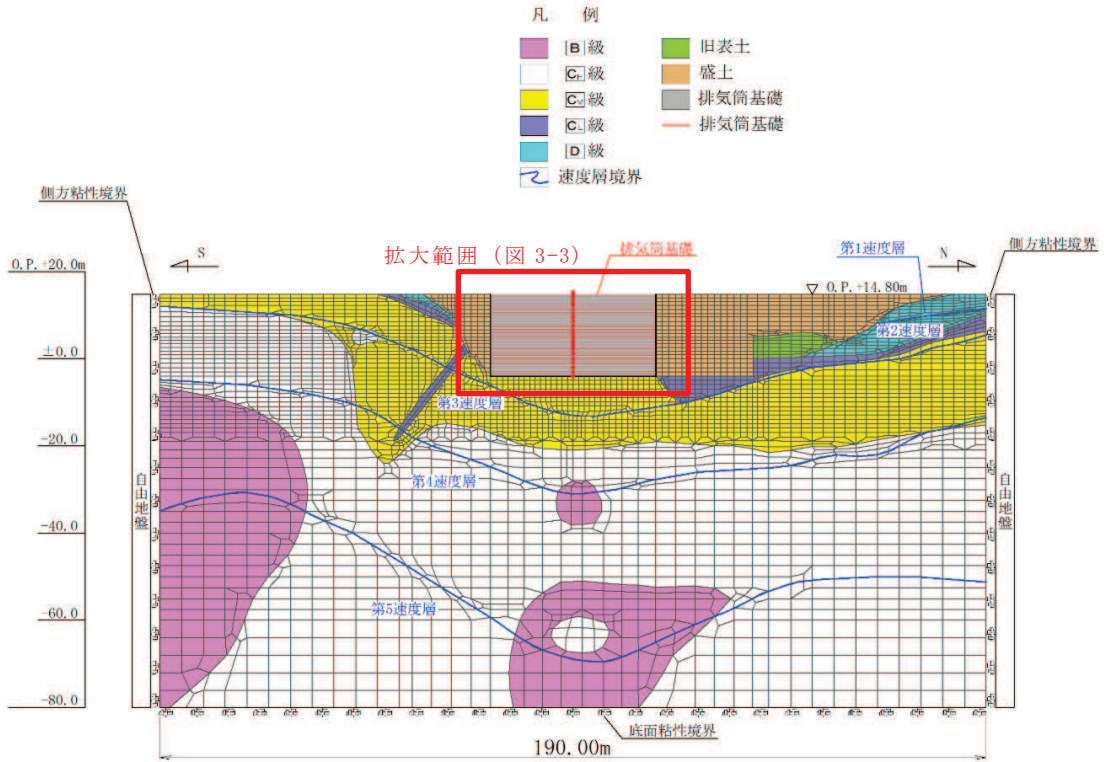


図 3-1 排気筒基礎の地震応答解析モデル図 (NS 断面)

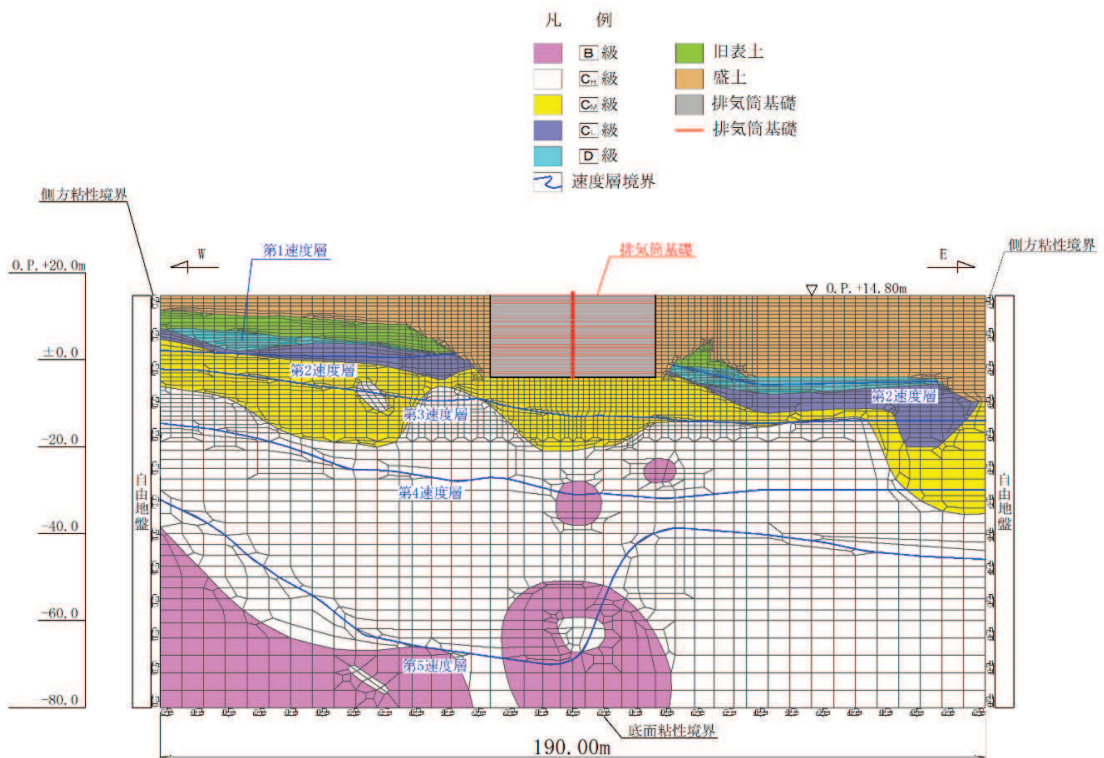


図 3-2 排気筒基礎の地震応答解析モデル図 (EW 断面)

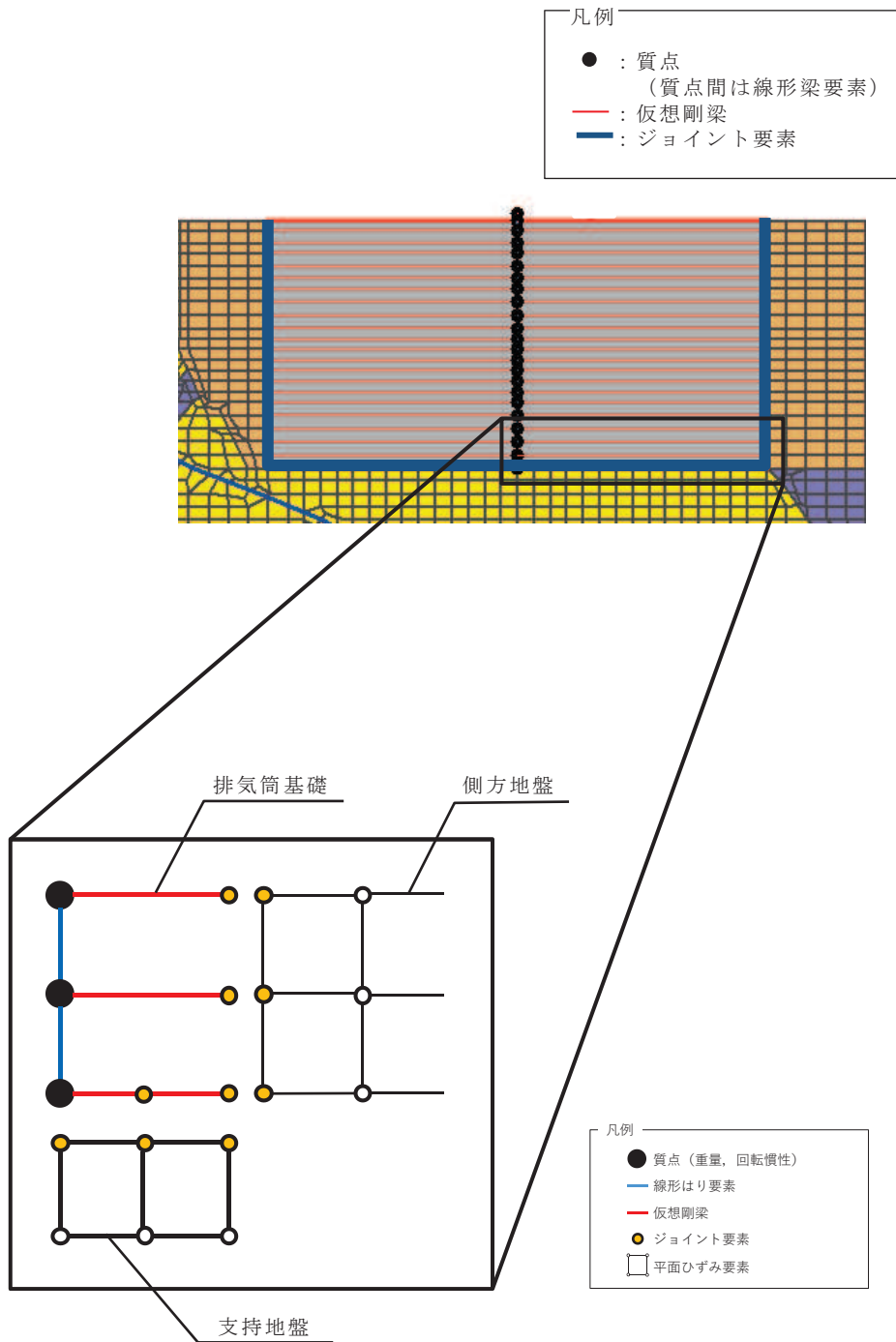


図 3-3 排気筒基礎の地震応答解析モデル (拡大図, 模式図)

### 3.2.2 使用材料及び材料の物性値

構造物の使用材料を表3-1に示す。

表 3-1 使用材料の材料定数

使用材料	ヤング係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	備考
鉄筋コンクリート コンクリート： F <sub>c</sub> = 20.5 (N/mm <sup>2</sup> ) 鉄筋：SD345	2.15 × 10 <sup>4</sup>	0.2	鉄筋コンクリート部 (筒身柱，鉄塔柱，つ なぎはり，基礎版)
コンクリート： F <sub>c</sub> = 18.0 (N/mm <sup>2</sup> )	2.06 × 10 <sup>4</sup>	0.2	充填コンクリート部

### 3.2.3 地盤の物性値

地盤については，添付書類「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。



### 3.2.4 地下水位

設計用地下水位は、添付書類「VI-2-1-3 地盤の支持性能に係る基本方針」に従い、地表面に設定する。設計用地下水位の一覧を表3-2に、設計用地下水位を図3-4及び図3-5に示す。

表 3-2 設計用地下水位の一覧

施設名称	地震時荷重算出断面	設計用地下水位
排気筒基礎	NS 断面	0. P. 14. 8m
	EW 断面	0. P. 14. 8m

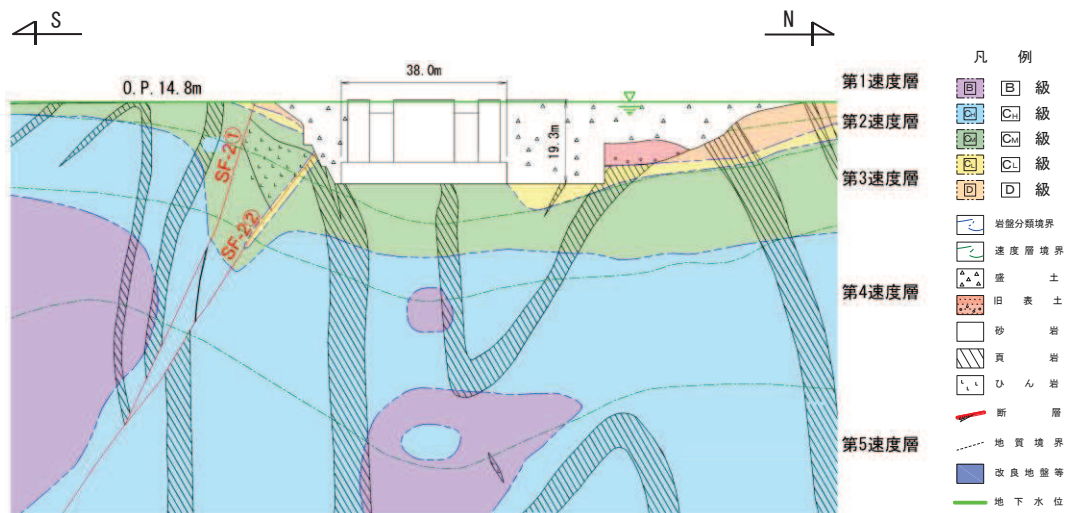


図 3-4 設計用地下水位 (NS 断面)

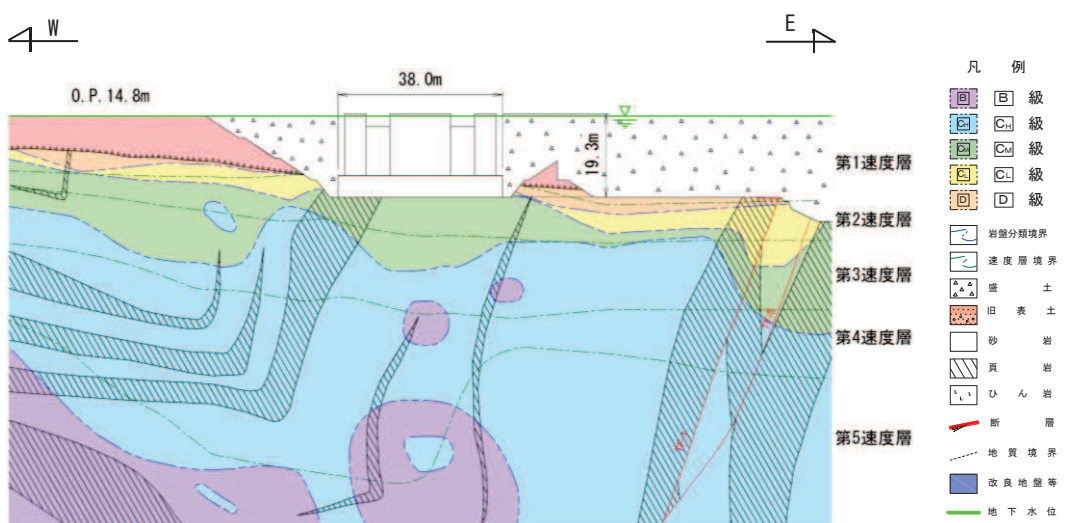


図 3-5 設計用地下水位 (EW 断面)

#### 4. 地震応答解析結果

有効応力解析に基づく基準地震動  $S_s$  ごとの最大過剰間隙水圧比を図 4-1 及び図 4-2 に示す。排気筒基礎は構造物の構築のため原地盤を掘削し、盛土に置き換えていることから、排気筒基礎の近傍は盛土に囲まれており、周辺に旧表土が残っている。排気筒基礎周辺の盛土における最大過剰間隙水圧比は、地表面付近(1~2m 以浅)で一部 95% を超える場合があるものの、ほとんどの範囲で最大過剰間隙水圧比が 95% を下回ることを確認した。

基準地震動  $S_s$  の全応力解析及び有効応力解析による応答スペクトルを図 4-3 及び図 4-4 に示す。また、基準地震動  $S_s$  の全応力解析及び有効応力解析による最大応答加速度分布図を図 4-5 及び図 4-6 に示す。

EW 断面の応答スペクトル及び応答加速度は、全応力解析と有効応力解析結果が同等となっている。一方、NS 断面の応答スペクトル及び応答加速度は、EW 断面に比べ小さな応答となっており、かつ、有効応力解析に比べ全応力解析の応答値が大きくなっていることがわかる。

NS 断面においては、排気筒南側に岩盤が分布しており、振動を拘束する効果があるため、EW 断面に比べ応答が小さくなっていると考えられる。また、有効応力解析の応答が小さくなっているのは、排気筒北側の盛土の剛性低下の影響によるものと考えられる。

EW 断面においては、有効応力解析における過剰間隙水圧の上昇による地盤の剛性の低下に伴い、主動働土圧、受働働土圧とも小さくなったことにより、応答加速度が変わらないと考える。

解析結果は有効応力解析と全応力解析で同等と考えられるが、非液状化対象層が局所的に分布する場合には、全応力解析が保守的な結果になると考えられる。

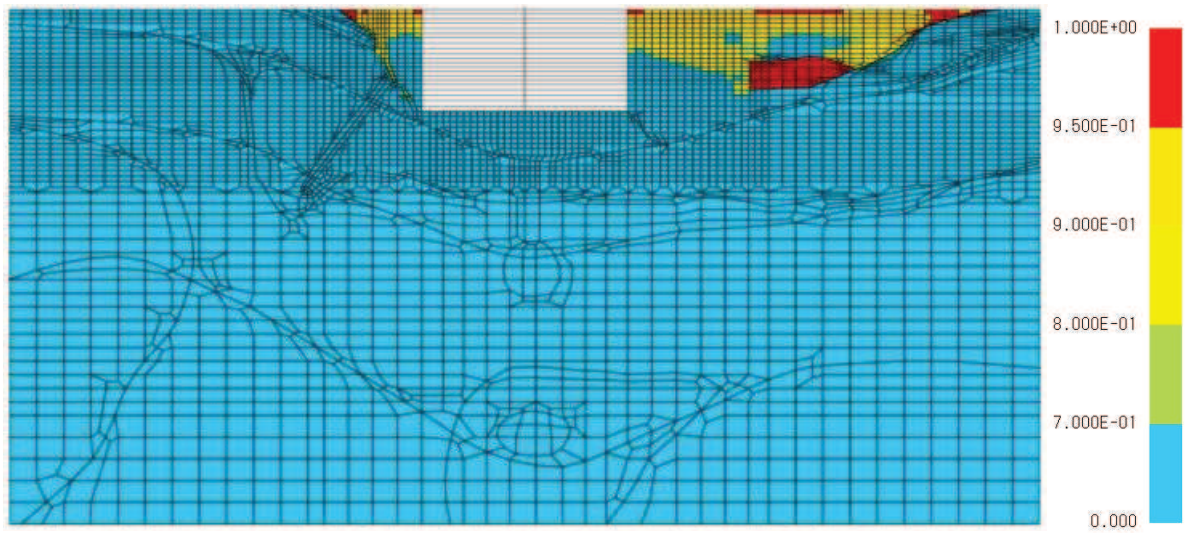


図 4-1(1) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (NS 断面,  $S_s - D 1 (++)$ )

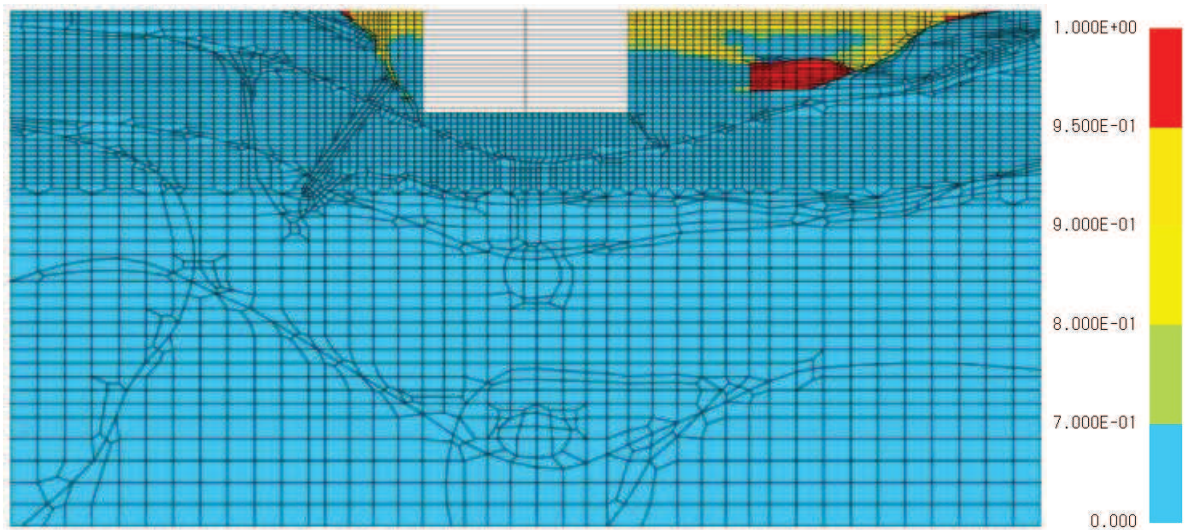


図 4-1(2) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (NS 断面,  $S_s - D 2 (++)$ )



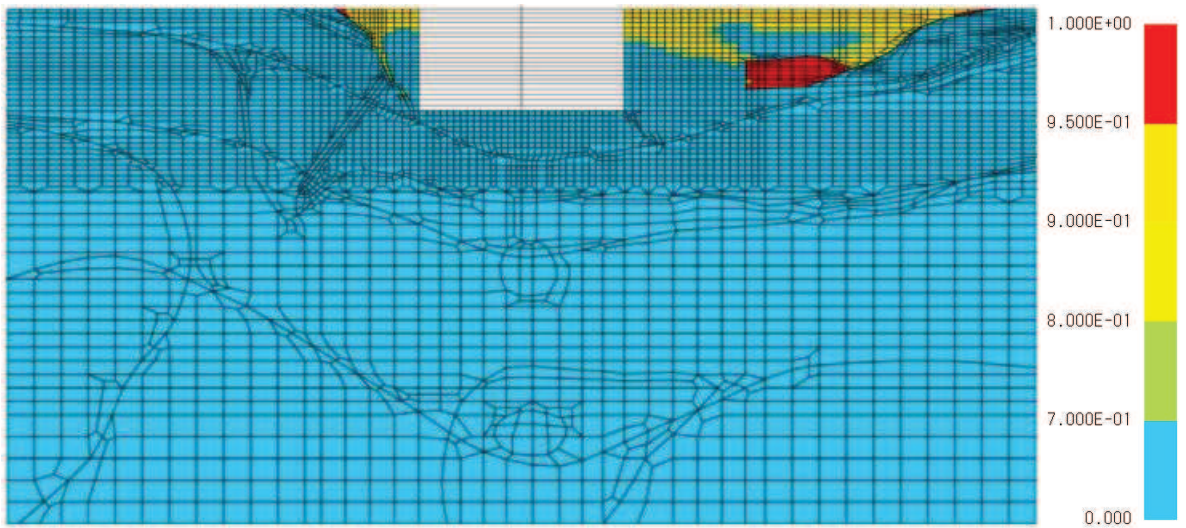


図 4-1(3) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (NS 断面,  $S_s - D 3 (++)$ )

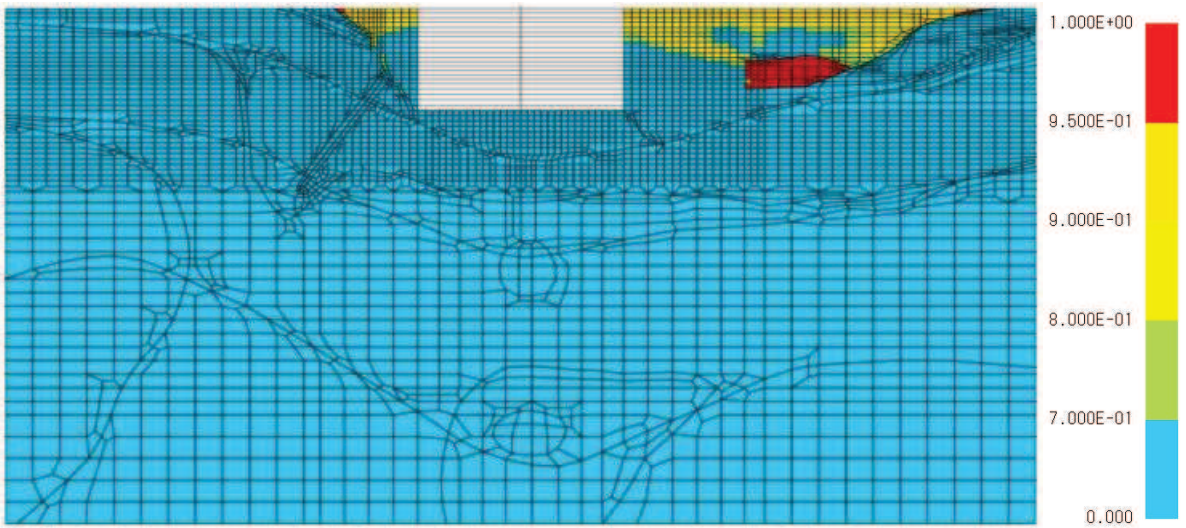


図 4-1(4) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (NS 断面,  $S_s - F 1 (++)$ )

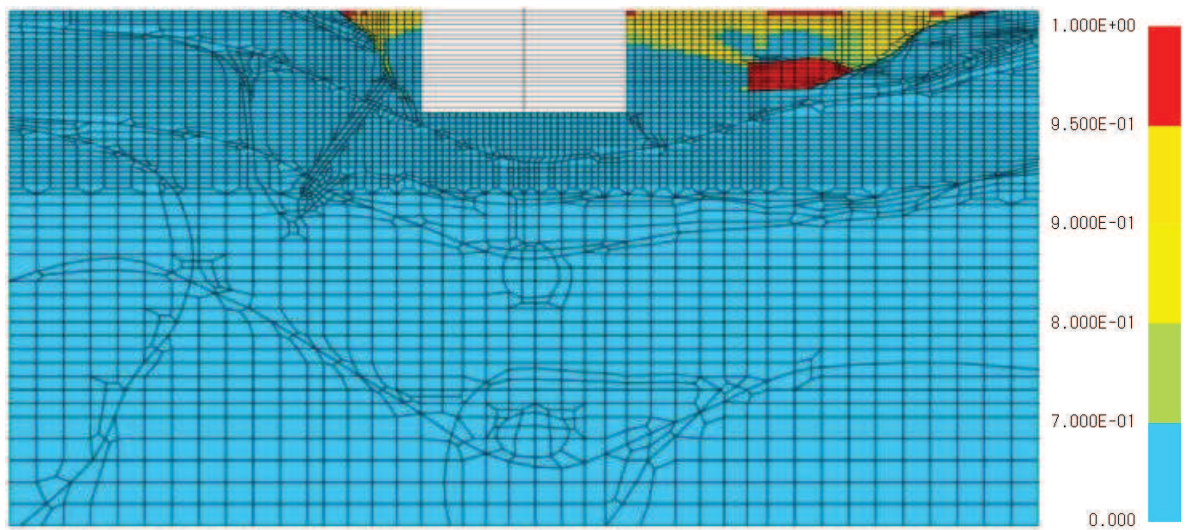


図 4-1(5) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (NS 断面,  $S_s - F 2 (++)$ )

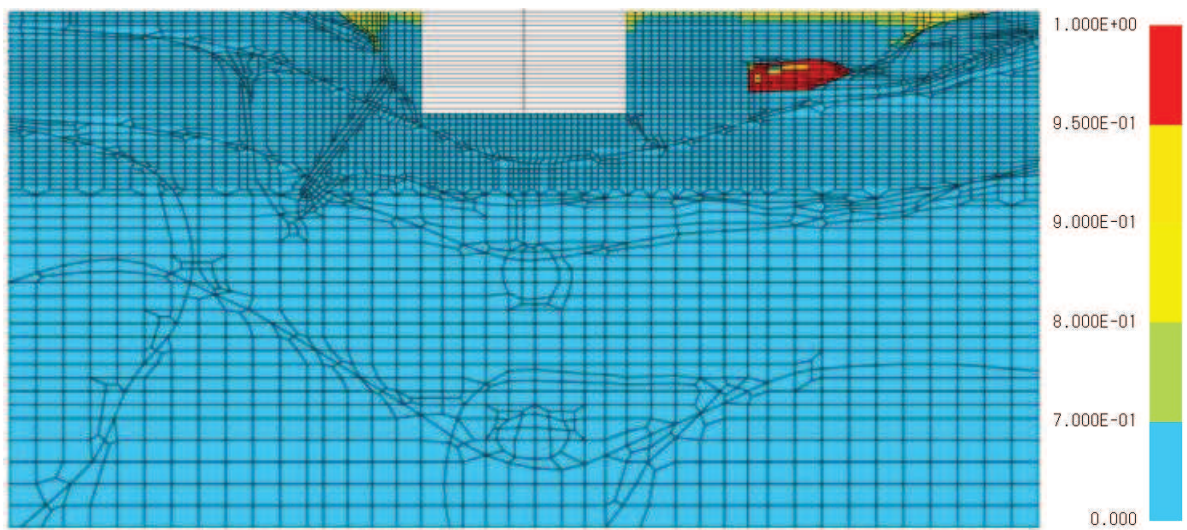


図 4-1(6) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (NS 断面,  $S_s - F 3 (++)$ )



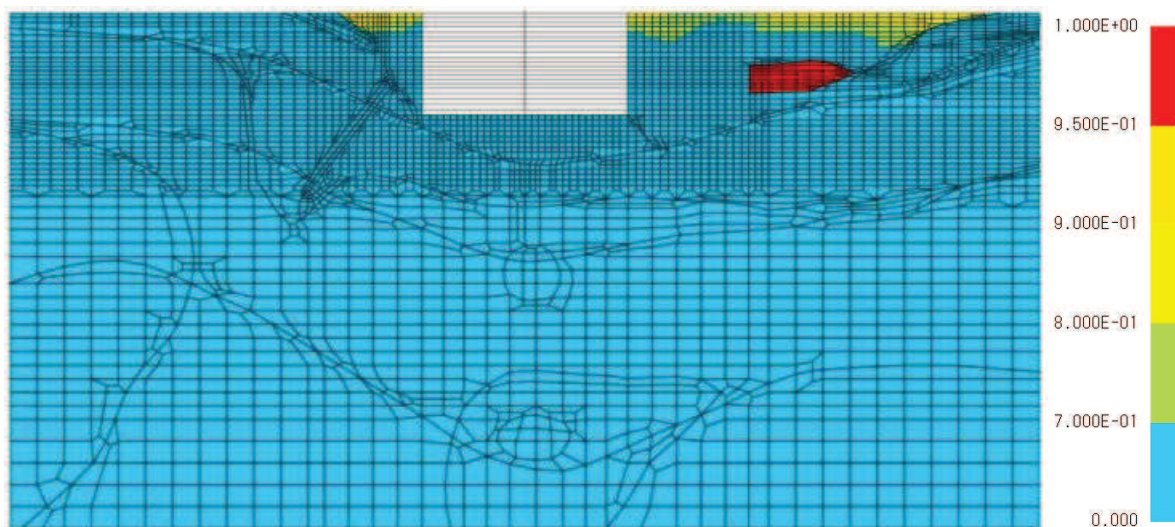


図 4-1(7) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (NS 断面, S s - N 1 (++) )

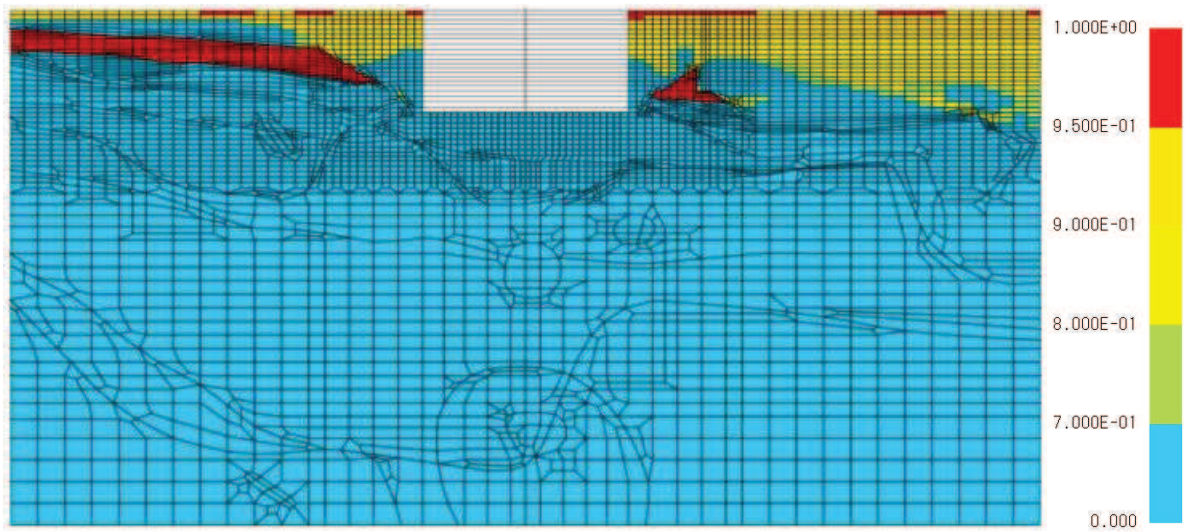


図 4-2(1) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (EW 断面,  $S_s - D 1$  (++) )

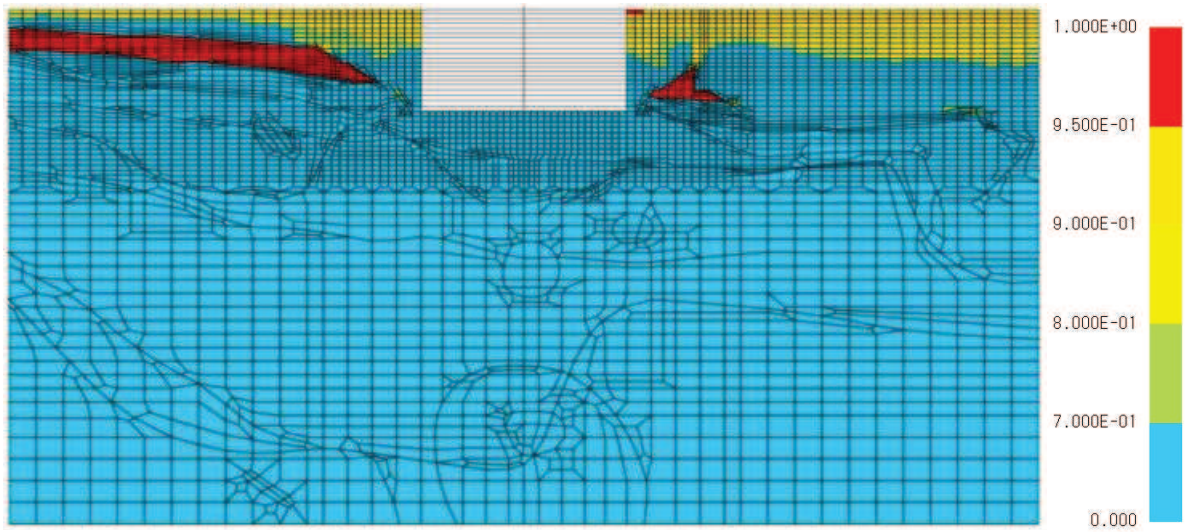


図 4-2(2) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (EW 断面,  $S_s - D 2$  (++) )



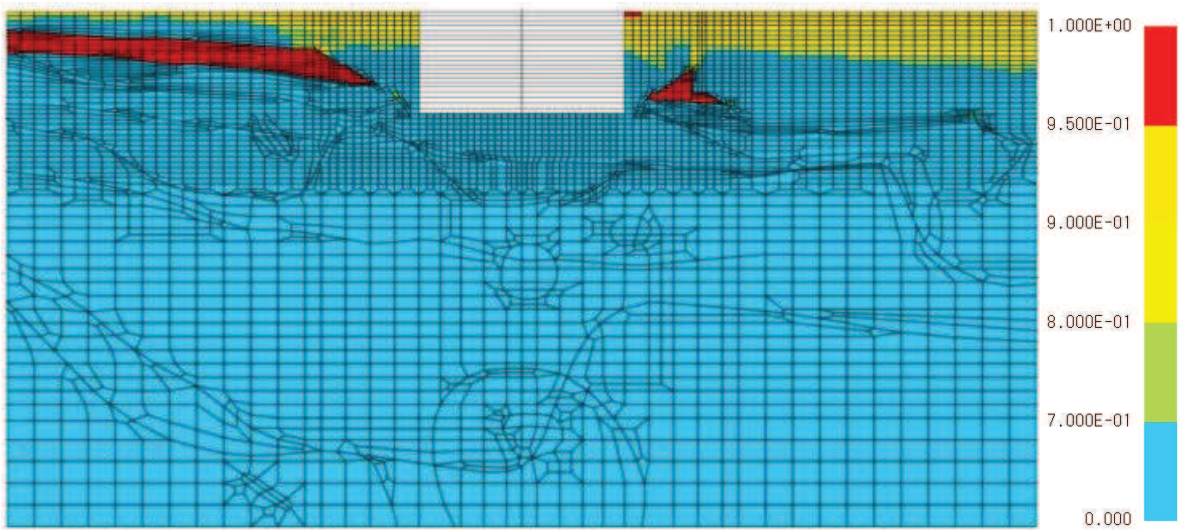


図 4-2(3) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (EW 断面,  $S_s - D3$  (++) )

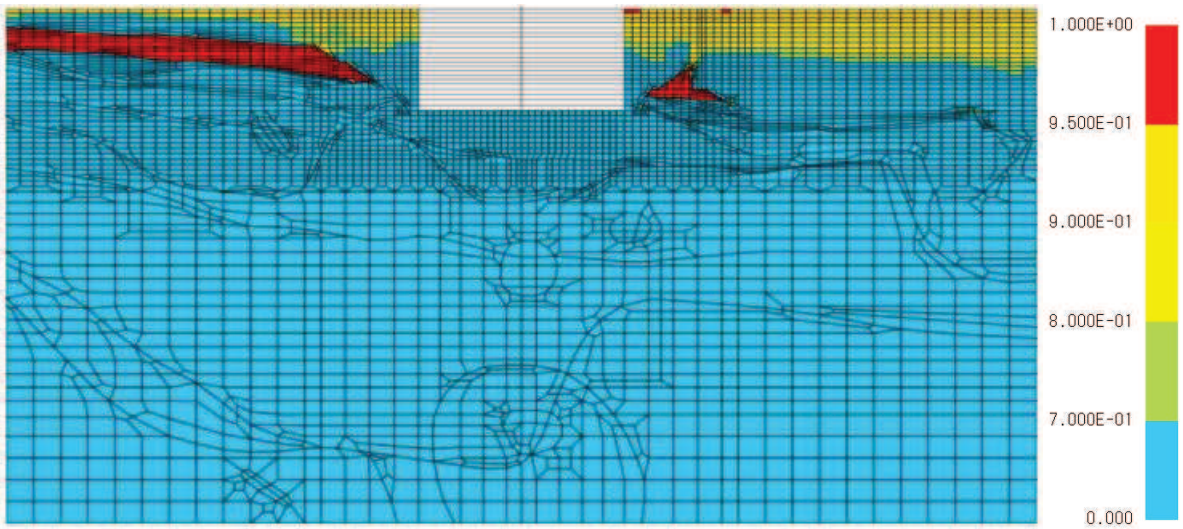


図 4-2(4) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (EW 断面,  $S_s - F1$  (++) )

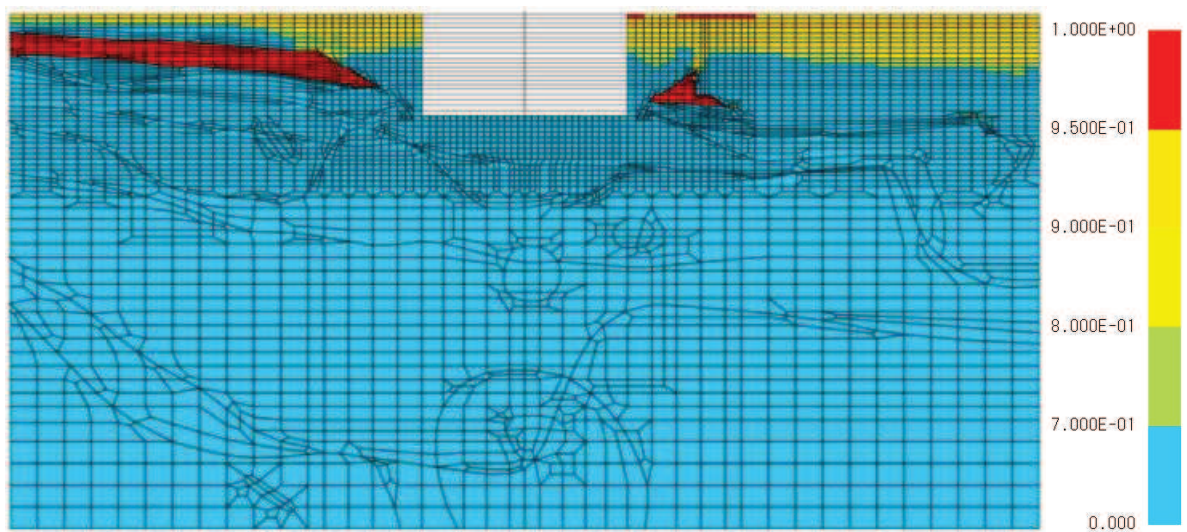


図 4-2(5) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (EW 断面,  $S_s - F_2$  (++) )

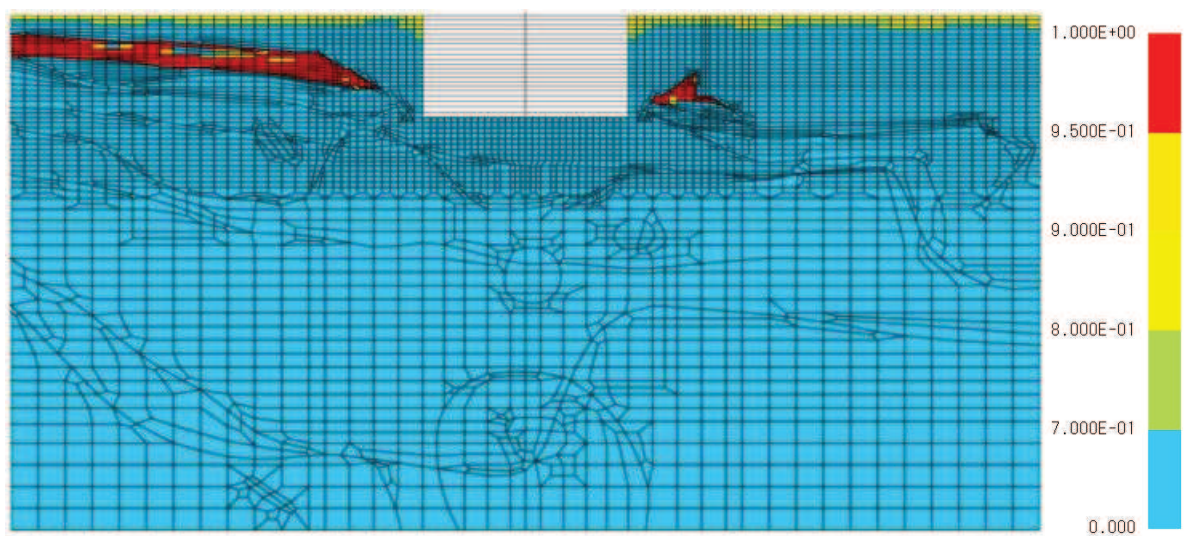


図 4-2(6) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (EW 断面,  $S_s - F_3$  (++) )



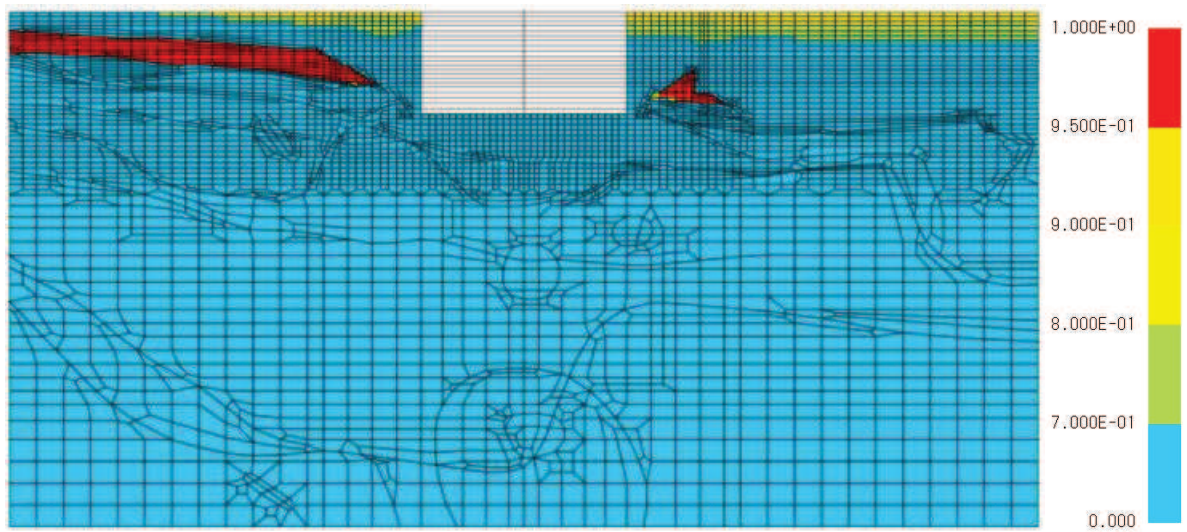


図 4-2(7) 地盤の最大過剰間隙水圧比 (EW 断面, S s - N 1 (++) )

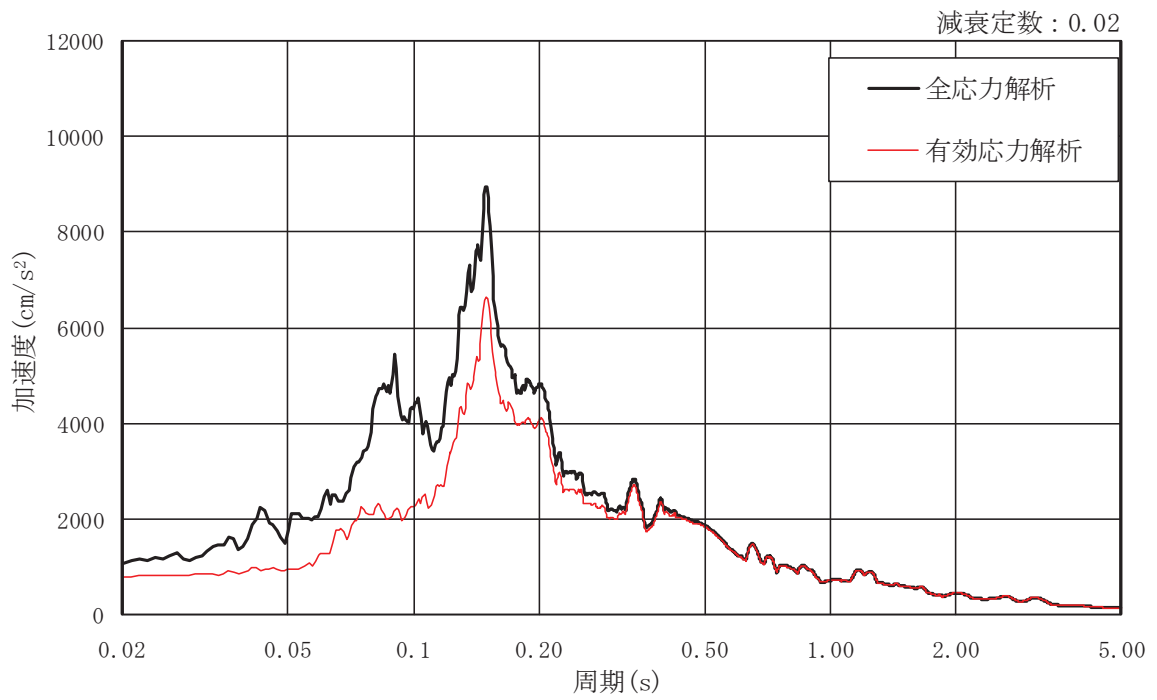


図 4-3 応答スペクトルの比較 (NS 断面, 包絡値)

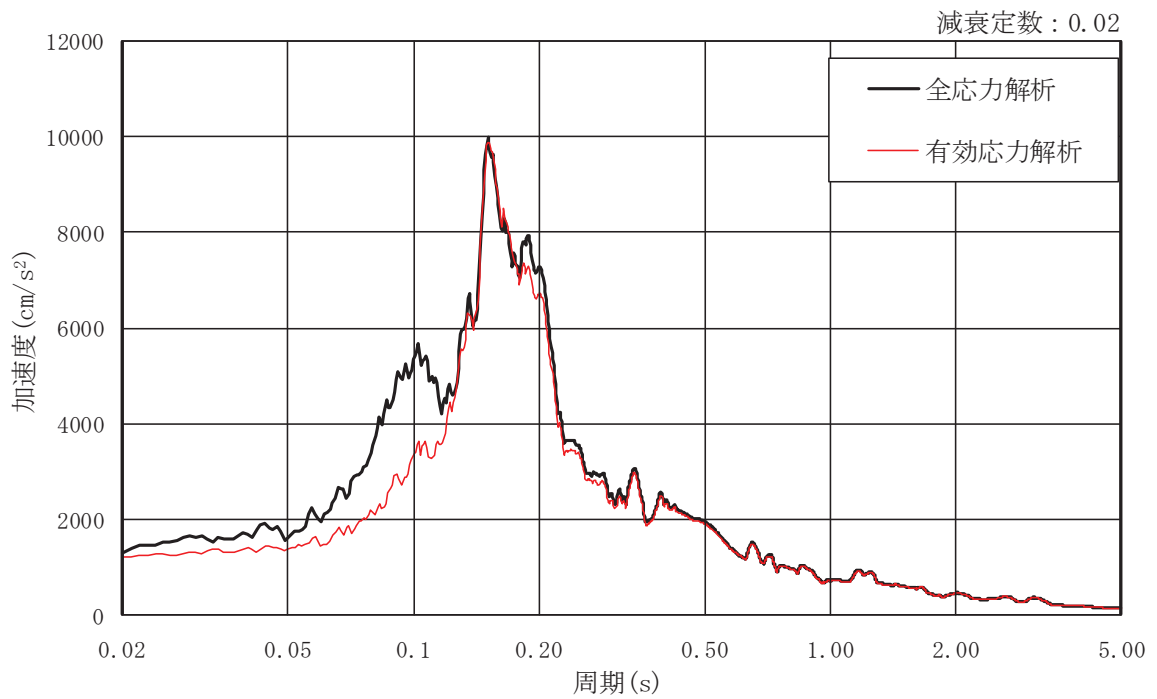
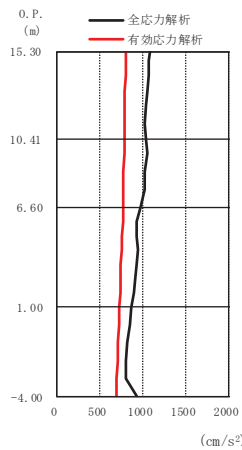


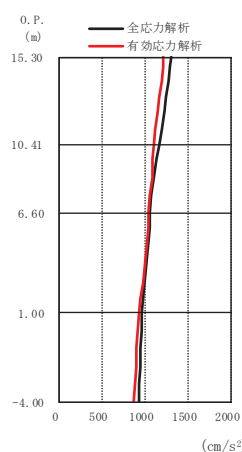
図 4-4 応答スペクトルの比較 (EW 断面, 包絡値)





有効応力解析								全応力解析
Ss-D1	Ss-D2	Ss-D3	Ss-F1	Ss-F2	Ss-F3	Ss-N1	包絡値	包絡値
783	798	683	641	727	743	715	798	1075
777	771	642	621	706	706	705	777	1024
763	742	615	599	684	665	695	763	964
721	682	581	551	650	606	678	721	863
687	639	556	515	616	573	666	687	920

図 4-5 最大応答加速度 (NS 断面, 基準地震動 S s (++) )



有効応力解析								全応力解析
Ss-D1	Ss-D2	Ss-D3	Ss-F1	Ss-F2	Ss-F3	Ss-N1	包絡値	包絡値
1098	1224	1051	801	945	1062	845	1224	1307
1065	1110	973	752	892	1014	829	1110	1170
1025	1051	899	719	841	965	812	1051	1067
937	940	769	682	754	877	779	940	968
867	846	705	651	705	807	758	867	932

図 4-6 最大応答加速度 (EW 断面, 基準地震動 S s (++) )

## 5. 耐震評価に与える影響

前章により，全応力解析と有効応力解析はほぼ同等の解析手法となると考えるが，排気筒基礎に作用する断面力及び排気筒，配管の固有周期に着目して，影響を確認する。

### 5.1 排気筒基礎の評価に与える影響

排気筒基礎の評価は，図 5-1 及び図 5-2 に示す最大応答せん断力，図 5-3 及び図 5-4 に示す最大応答曲げモーメント，図 5-5 及び図 5-6 に示す最大応答軸力の比較を行う。

断面力を比較した結果，全応力解析と有効応力解析はほぼ同等の解析結果となったことから，全応力解析が妥当な解析手法と考える。

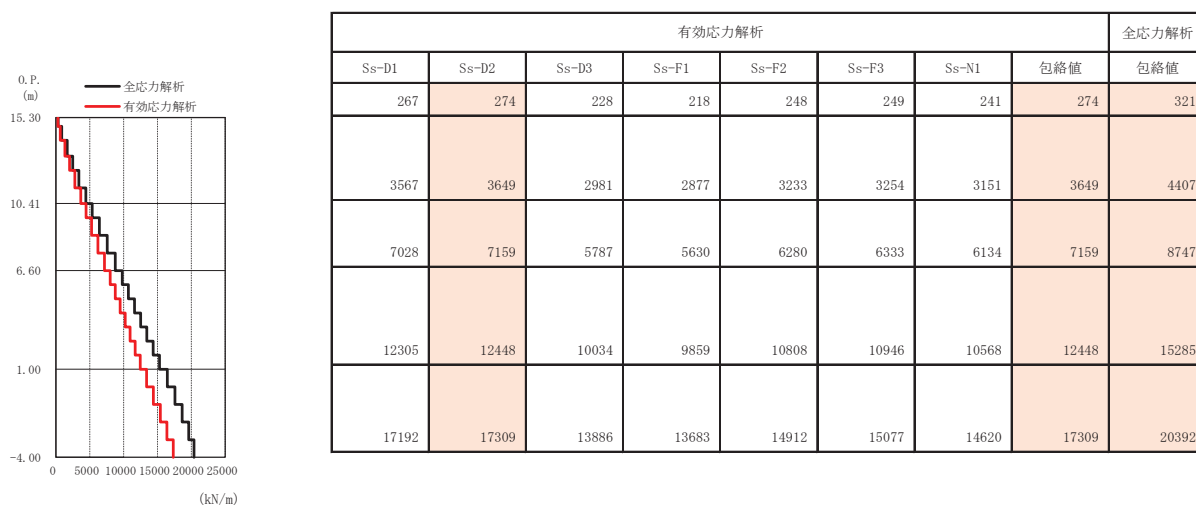


図 5-1 最大応答せん断力 (NS 断面，基準地震動  $S_s$  (++))

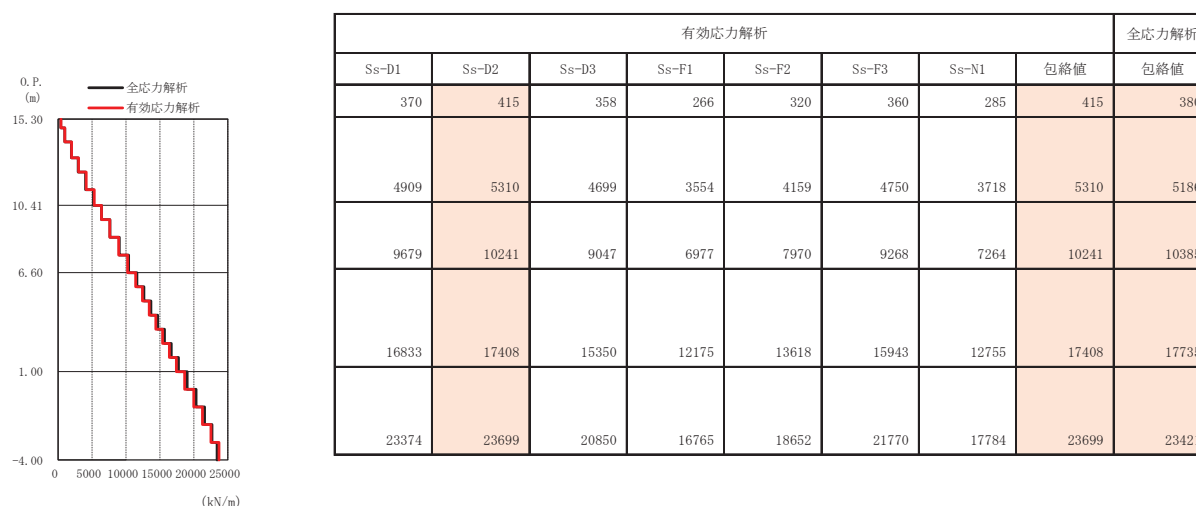
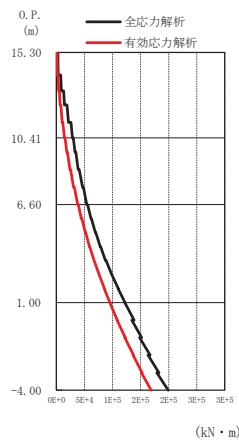
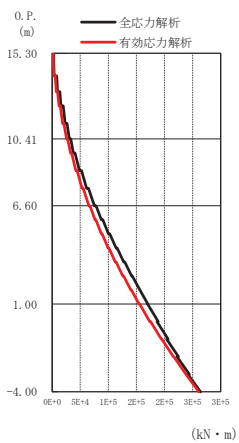


図 5-2 最大応答せん断力 (EW 断面，基準地震動  $S_s$  (++))



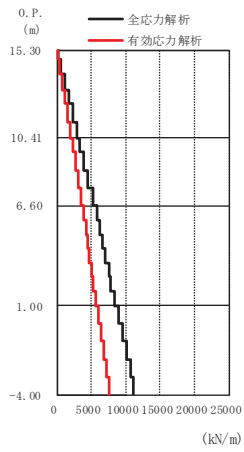
有効応力解析								全応力解析	
Ss-D1	Ss-D2	Ss-D3	Ss-F1	Ss-F2	Ss-F3	Ss-N1	包絡値	包絡値	
997	971	932	746	761	1023	519	1023	2561	
14246	13469	11950	11370	11432	13723	10859	14246	28466	
37904	37171	32196	31809	32599	36422	30946	37904	54209	
95000	95305	80490	78970	83078	86431	78686	95305	122269	
167567	168802	140295	136747	146265	148390	140362	168802	199240	

図 5-3 最大応答曲げモーメント (NS 断面, 基準地震動 S s (++) )



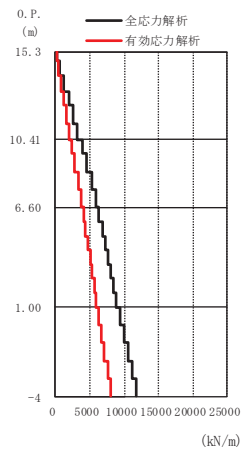
有効応力解析								全応力解析	
Ss-D1	Ss-D2	Ss-D3	Ss-F1	Ss-F2	Ss-F3	Ss-N1	包絡値	包絡値	
1429	1901	1400	1218	1092	1569	636	1901	2819	
20582	25559	21181	17169	17253	20503	13015	25559	30426	
55117	65303	55425	43648	46100	51274	38103	65303	75214	
136823	154620	133351	100592	113572	127199	97378	154620	170391	
237052	261316	227666	168404	195588	222232	172279	261316	264153	

図 5-4 最大応答曲げモーメント (EW 断面, 基準地震動 S s (++) )



有効応力解析								全応力解析	
Ss-D1	Ss-D2	Ss-D3	Ss-F1	Ss-F2	Ss-F3	Ss-N1	包絡値	包絡値	
150	169	169	120	131	155	101	169	254	
1738	1948	1918	1383	1495	1779	1175	1948	2942	
3209	3531	3479	2513	2774	3281	2107	3531	5192	
5215	5587	5518	4061	4605	5320	3333	5587	8293	
7141	7555	7350	5584	6312	7268	4583	7555	11173	

図 5-5 最大応答軸力 (NS 断面, 基準地震動 S<sub>s</sub> (++) )



有効応力解析								全応力解析	
Ss-D1	Ss-D2	Ss-D3	Ss-F1	Ss-F2	Ss-F3	Ss-N1	包絡値	包絡値	
170	177	179	125	139	165	103	179	260	
1953	2026	2048	1438	1602	1900	1177	2048	3204	
3586	3676	3706	2595	2962	3452	2158	3706	5825	
5849	5839	5876	4142	4904	5489	3481	5876	8811	
8020	7915	7900	5716	6671	7531	4721	8020	11759	

図 5-6 最大応答軸力 (EW 断面, 基準地震動 S<sub>s</sub> (++) )

## 5.2 排気筒の評価に与える影響

排気筒における入力地震動ごとの応答スペクトルについて、全応力解析及び有効応力解析の結果を図 5-7, 図 5-8, 図 5-10 及び図 5-11 に示す。また、基準地震動  $S_s$  7 波を包絡した応答スペクトルを図 5-9, 図 5-12 に、全応力解析と有効応力解析の応答スペクトルの比較結果を表 5-1～表 5-4 に示す。なお、排気筒の減衰定数は筒身で 0.01, 鉄塔で 0.02 と値が異なるため、それぞれの値を用いた解析結果を示す。排気筒における主要モードである 1 次モード～5 次モードを比べると、全ての応答スペクトルにおいて、全応力解析と有効応力解析はほぼ同等の解析結果となったことから、全応力解析が妥当な解析手法と考える。

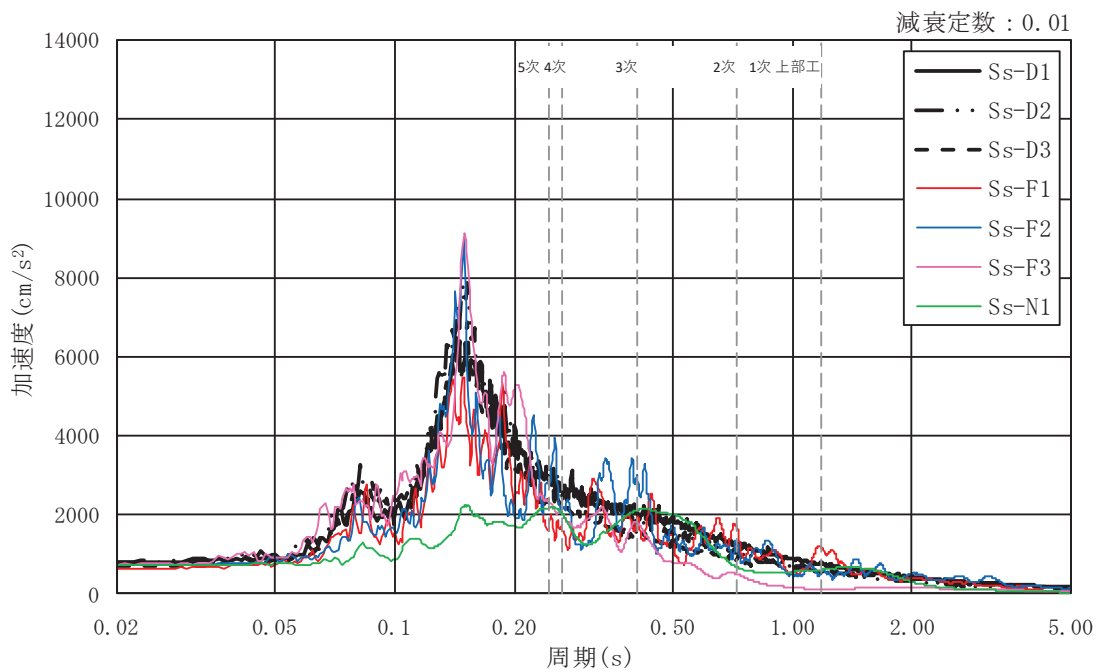
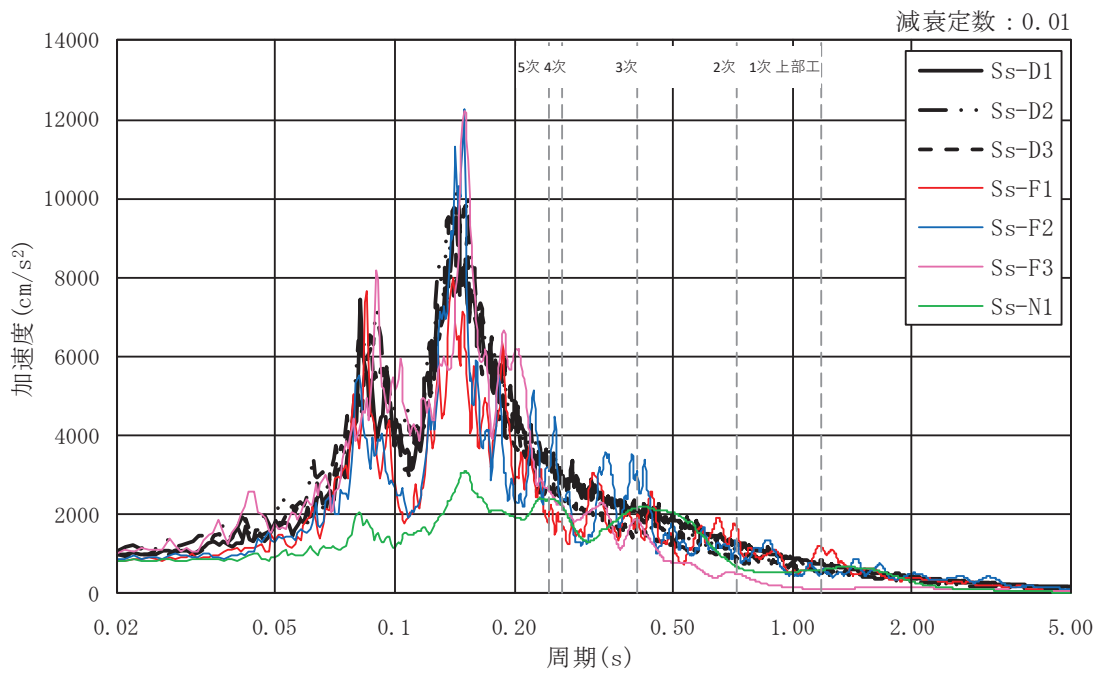


図 5-7 基準地震動 S s 7 波による応答スペクトル (NS 断面,  $h = 0.01$ )

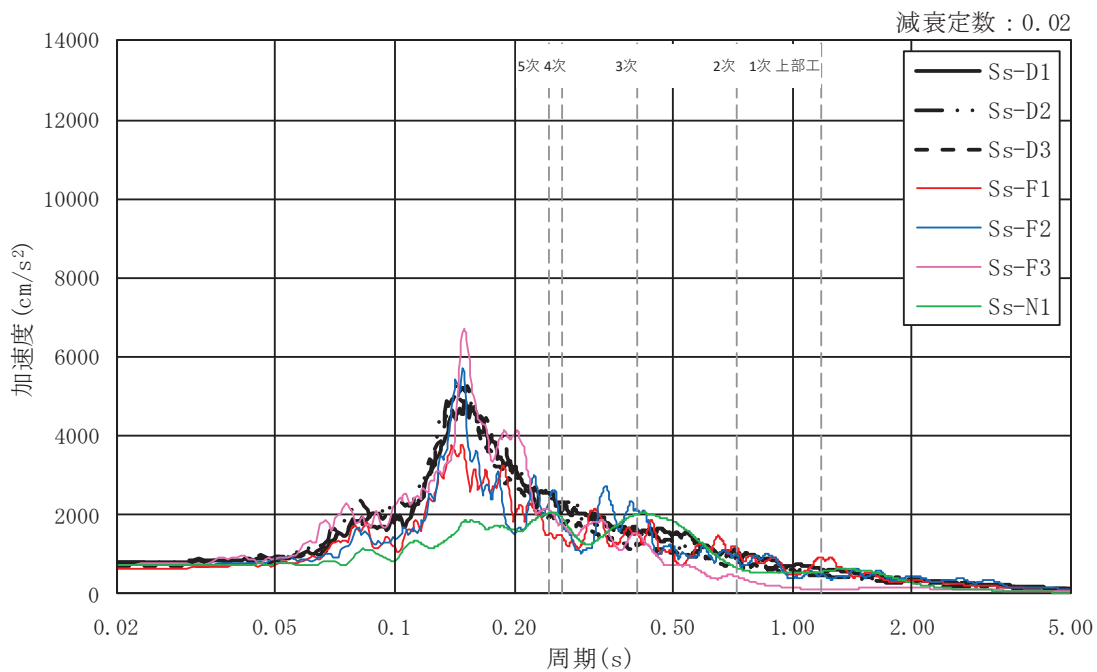
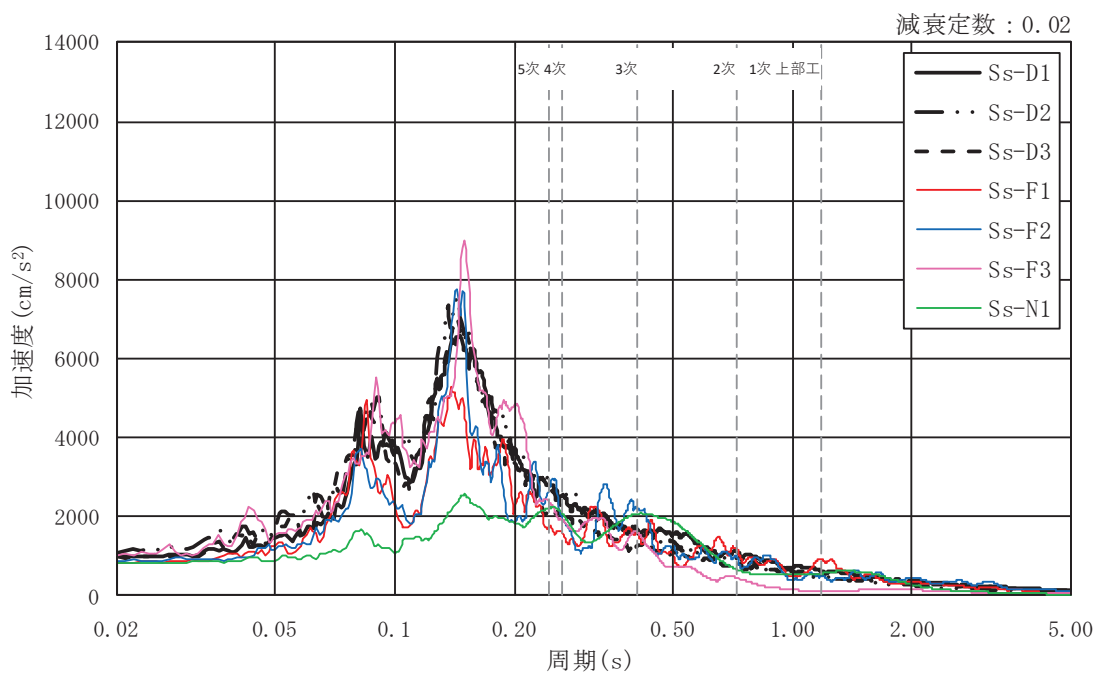
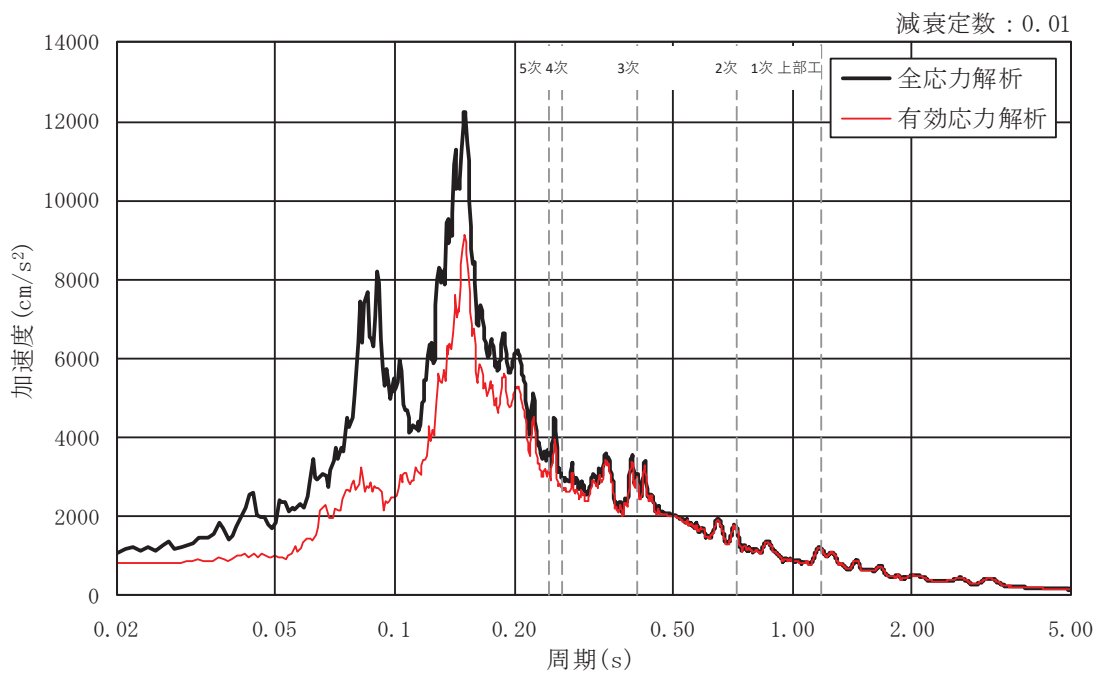
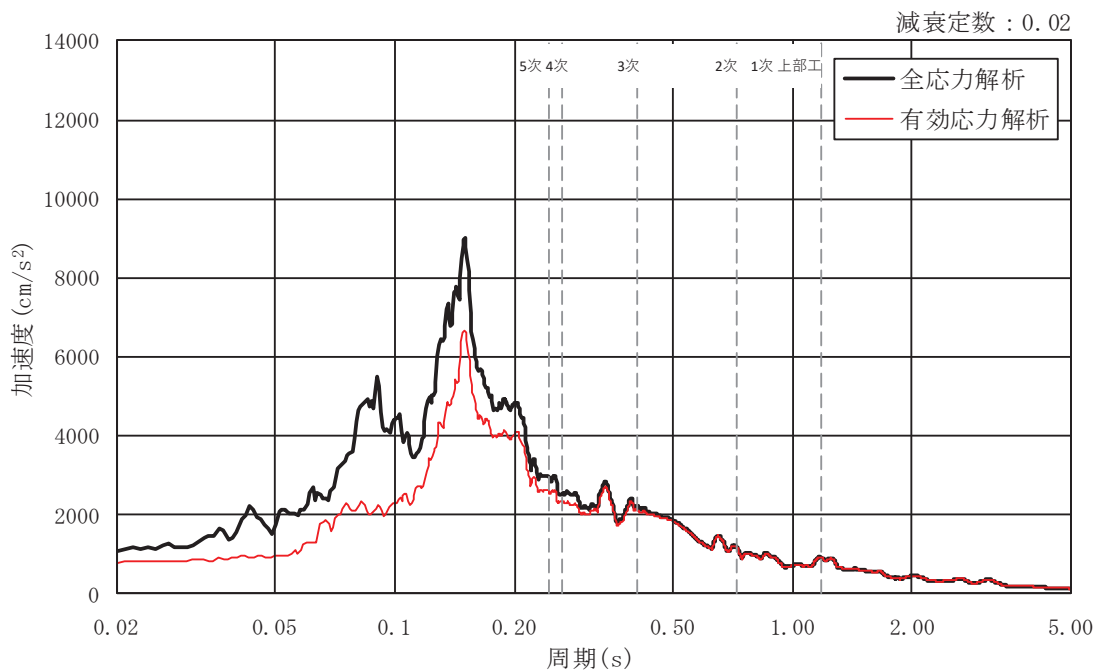


図 5-8 基準地震動 S s 7 波による応答スペクトル (NS 断面,  $h = 0.02$ )



(a)  $h = 0.01$



(b)  $h = 0.02$

図 5-9 応答スペクトルの比較 (NS 断面, 包絡値)



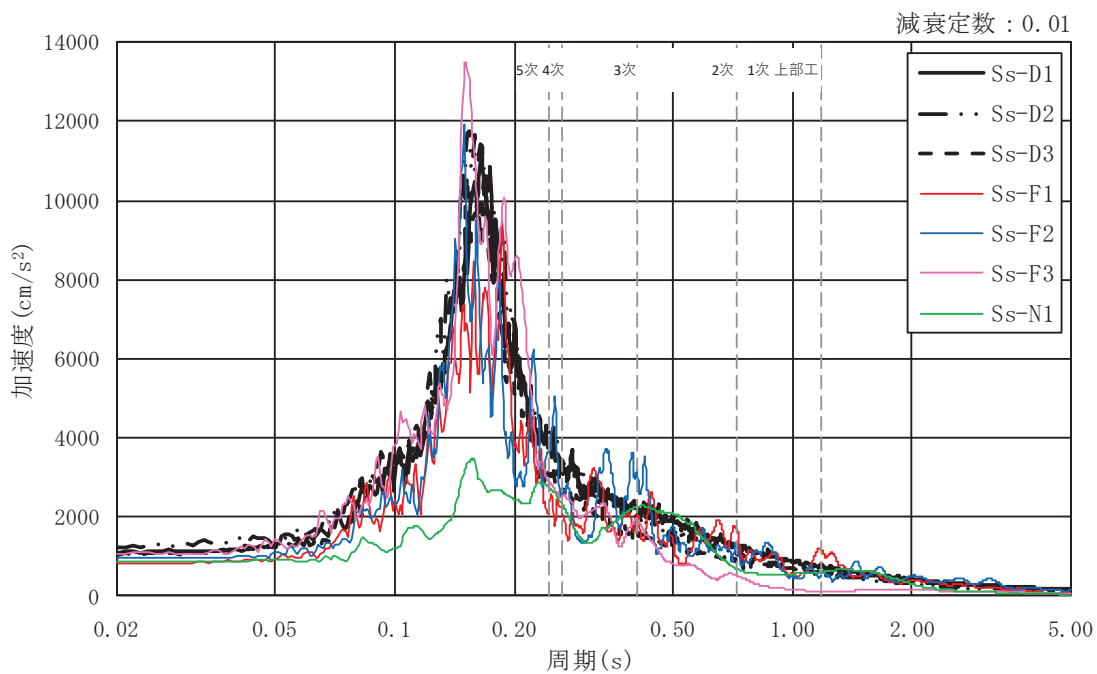
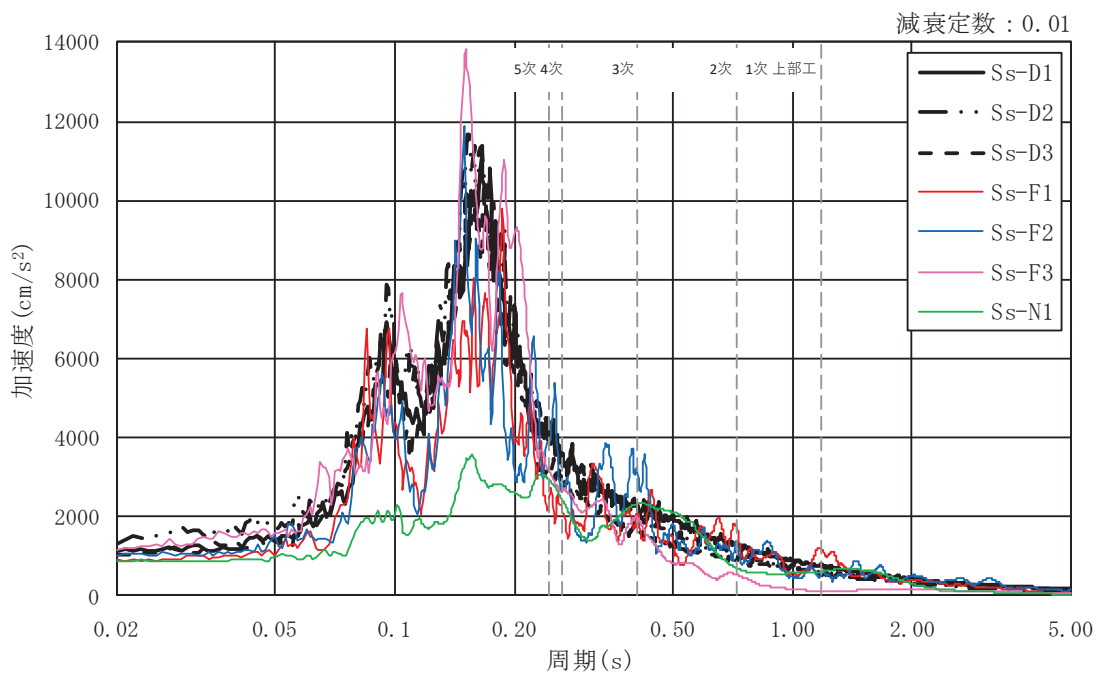
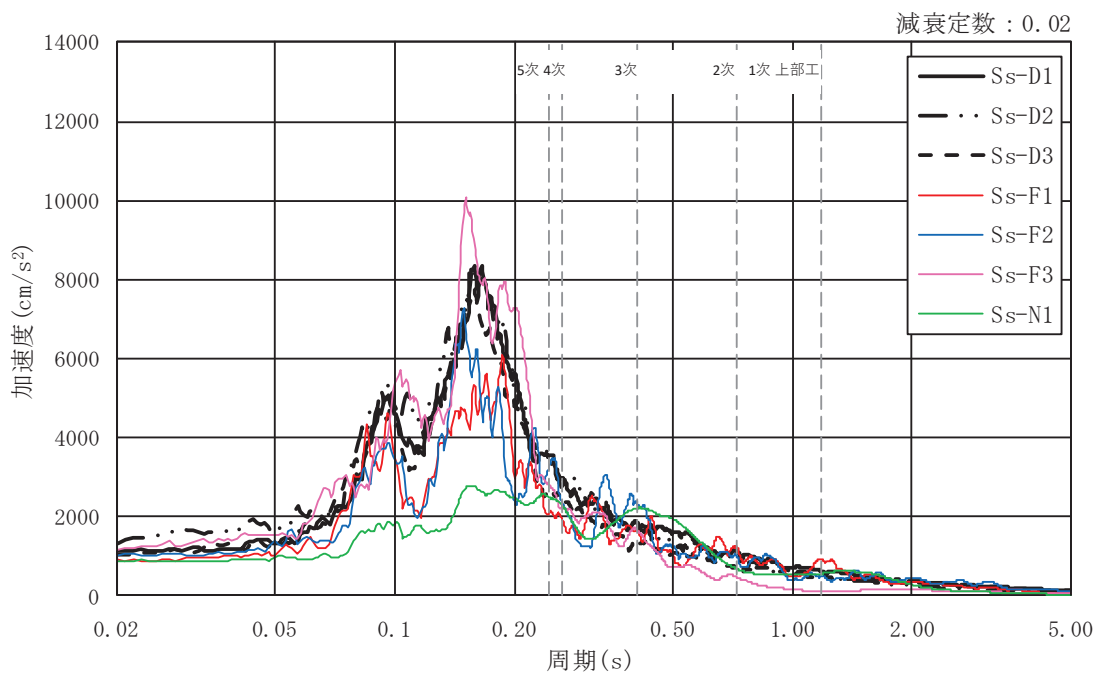
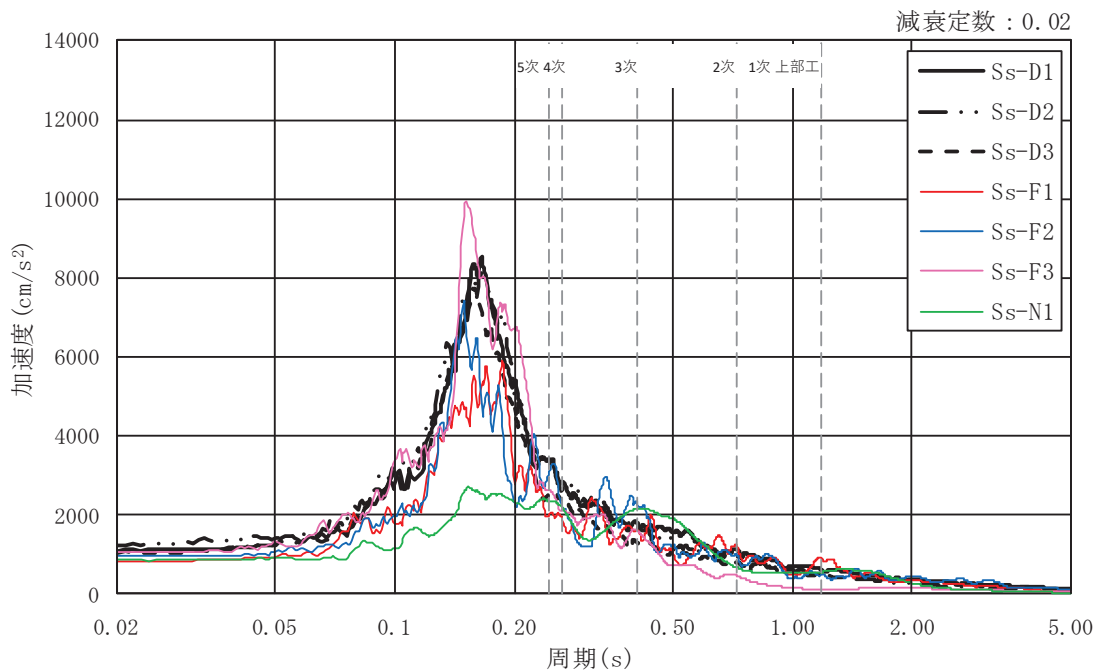


図 5-10 基準地震動 S s 7 波による応答スペクトル (EW 断面,  $h = 0.01$ )



(a) 全応力解析



(b) 有効応力解析

図 5-11 基準地震動 S s 7 波による応答スペクトル (EW 断面, h = 0.02)

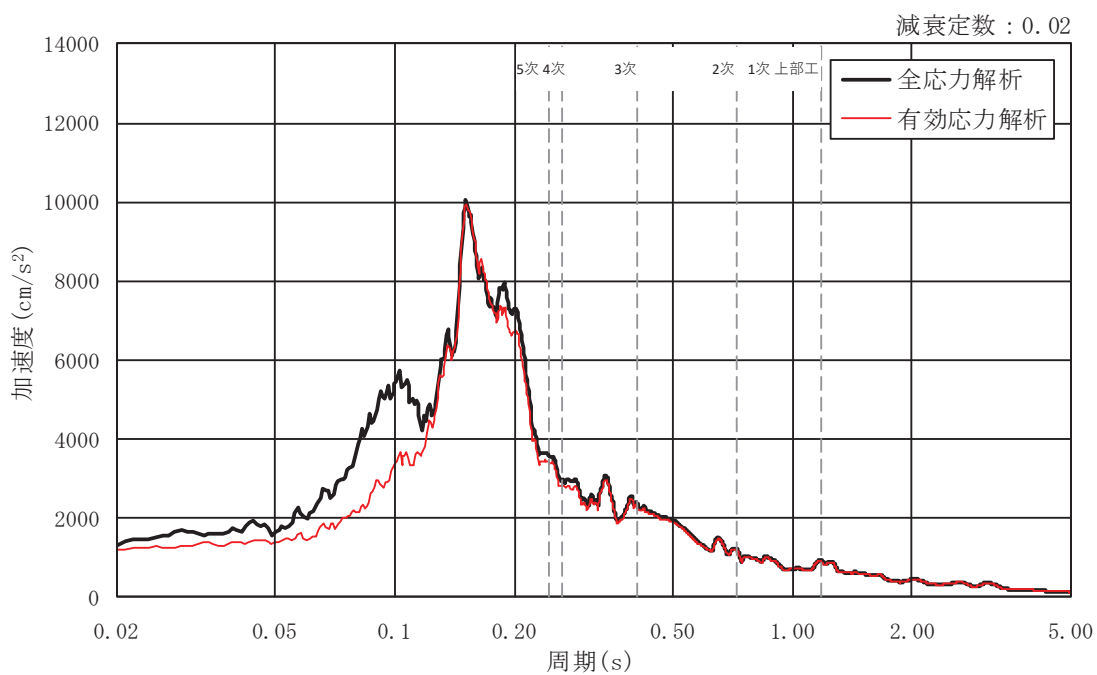
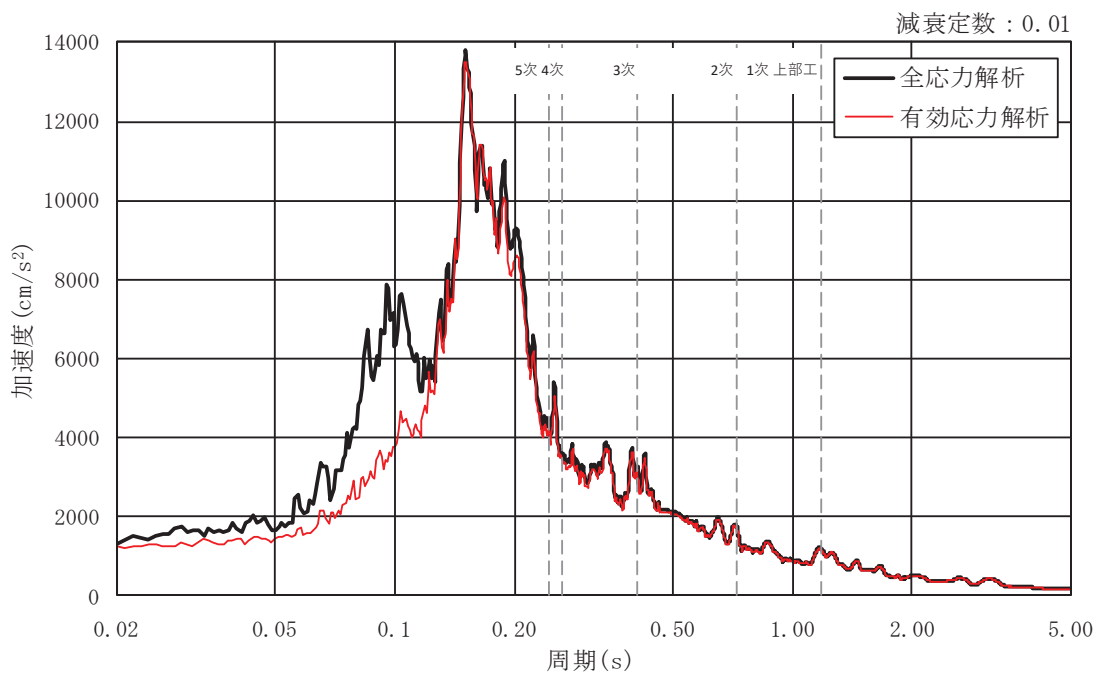


図 5-12 応答スペクトルの比較 (EW 断面, 包絡値)

表 5-1 応答スペクトルの比較結果 (NS 断面, h = 0.01)

モード No.	固有周期 (s)	応答加速度 (m/s <sup>2</sup> )		(b)/(a)
		全応力解析 (a)	有効応力解析 (b)	
1	1.175	11.89	11.84	1.00
2	0.721	17.23	17.09	0.99
3	0.408	30.33	29.48	0.97
4	0.262	30.54	27.16	0.89
5	0.245	35.65	31.18	0.87

表 5-2 応答スペクトルの比較結果 (NS 断面, h = 0.02)

モード No.	固有周期 (s)	応答加速度 (m/s <sup>2</sup> )		(b)/(a)
		全応力解析 (a)	有効応力解析 (b)	
1	1.175	9.24	9.21	1.00
2	0.721	12.10	11.98	0.99
3	0.408	22.03	21.26	0.97
4	0.262	25.20	23.28	0.92
5	0.245	29.23	25.38	0.87

表 5-3 応答スペクトルの比較結果 (EW 断面, h = 0.01)

モード No.	固有周期 (s)	応答加速度 (m/s <sup>2</sup> )		(b)/(a)
		全応力解析 (a)	有効応力解析 (b)	
1	1.175	11.92	11.70	0.98
2	0.721	17.72	17.40	0.98
3	0.408	31.92	31.08	0.97
4	0.262	36.19	34.72	0.96
5	0.245	43.36	40.86	0.94

表 5-4 応答スペクトルの比較結果 (EW 断面, h = 0.02)

モード No.	固有周期 (s)	応答加速度 (m/s <sup>2</sup> )		(b)/(a)
		全応力解析 (a)	有効応力解析 (b)	
1	1.175	9.29	9.15	0.99
2	0.721	12.48	12.25	0.98
3	0.408	23.29	22.66	0.97
4	0.262	29.60	28.25	0.95
5	0.245	35.70	33.86	0.95

### 5.3 配管の評価に与える影響

配管における入力地震動ごとの応答スペクトルについて、全応力解析及び有効応力解析の結果を図 5-13 及び図 5-14 に示す。また、基準地震動 S s 7 波を包絡した応答スペクトルをを図 5-15 及び図 5-16 に、全応力解析と有効応力解析の応答スペクトルの比較結果を表 5-5 及び表 5-6 に示す。なお、配管の床応答は基礎の最大応答加速度により標高が高いほど加速度が大きくなることから、O.P. 14.8m の支持点における応答スペクトルを比較する。排気筒における主要モードである 1 次モード～3 次モードを比べると、全応力解析と有効応力解析はほぼ同等の解析結果となったことから、全応力解析が妥当な解析手法と考える。また、全応力解析による設計用床応答曲線を見ると、有効応力解析の結果も包絡していることから、全応力解析による評価は安全側の評価になると考える。

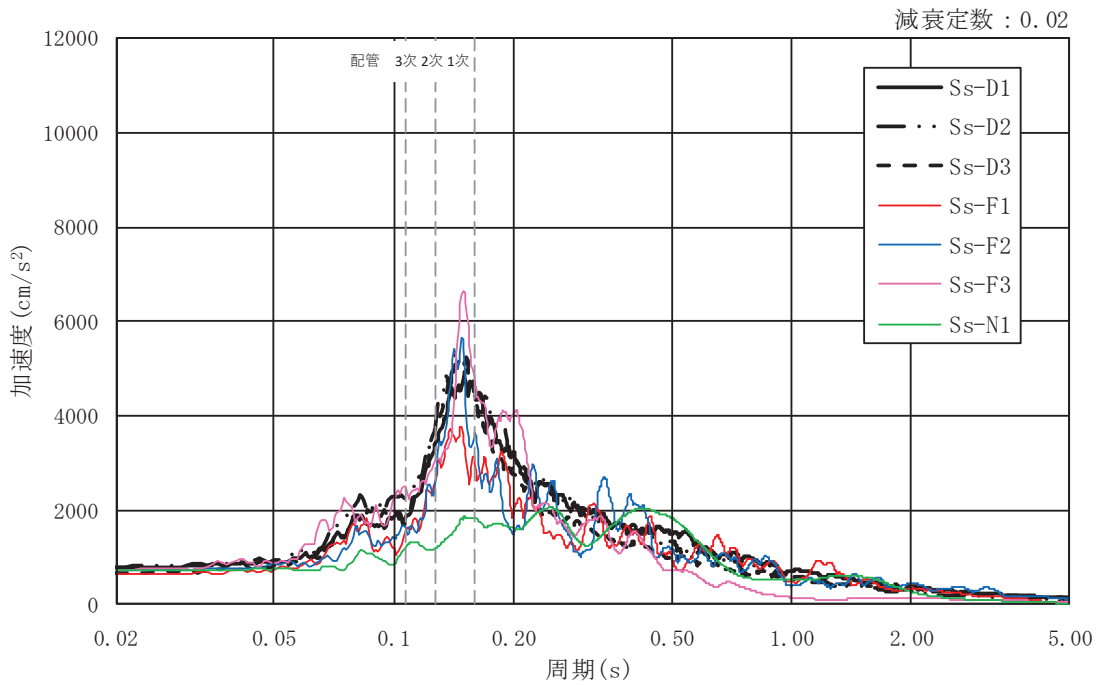
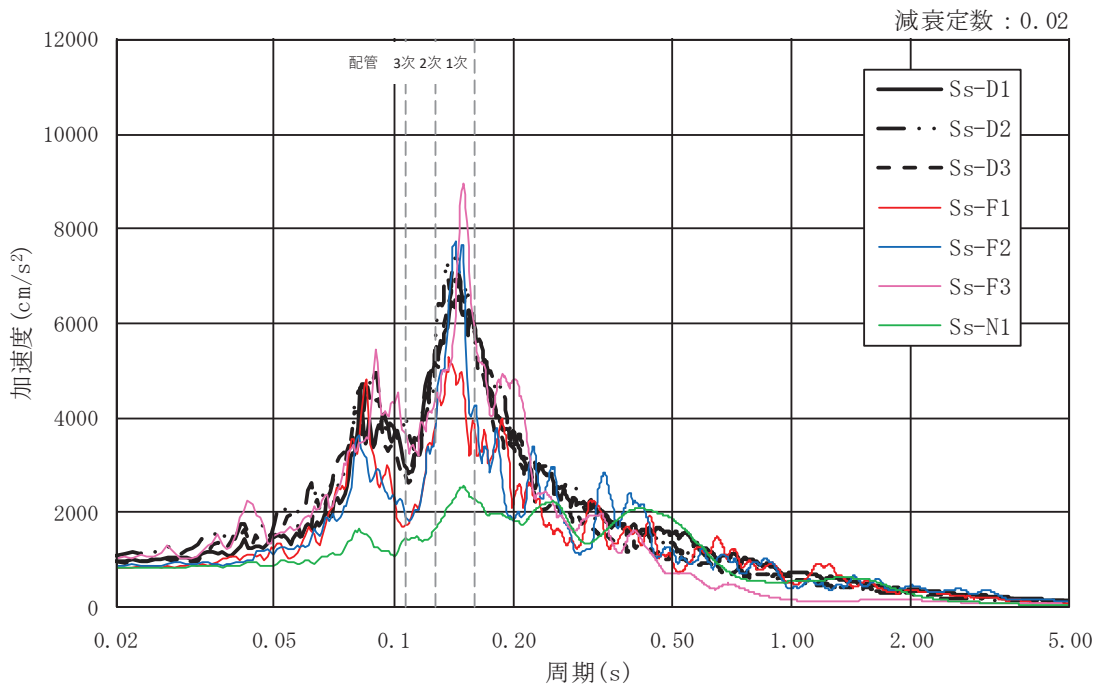
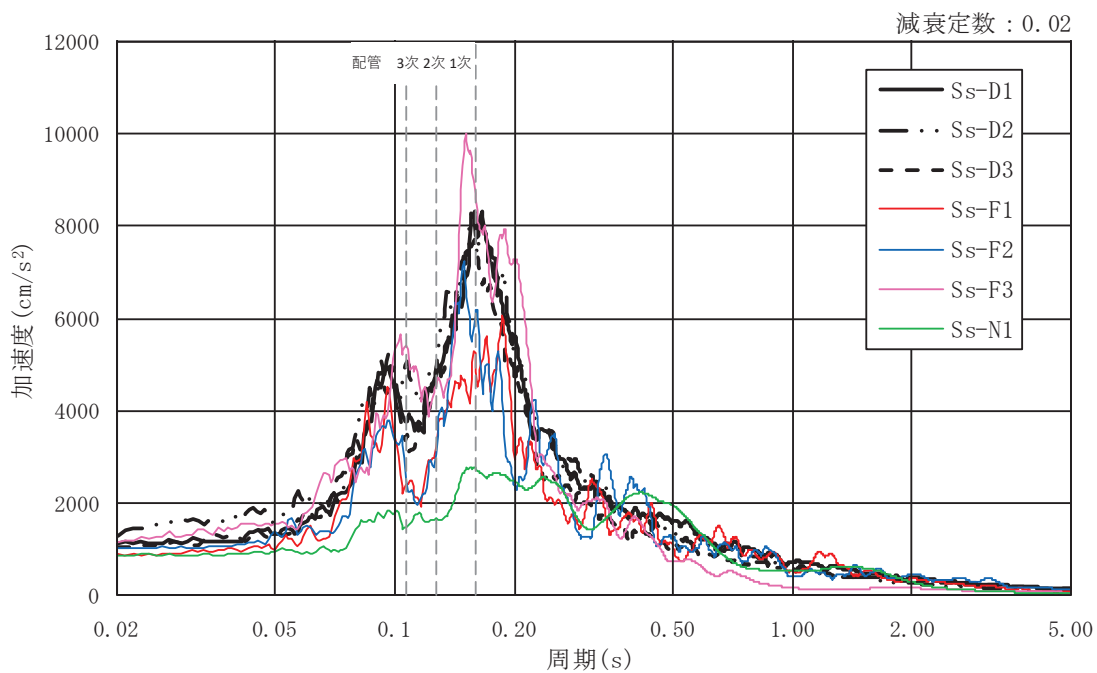
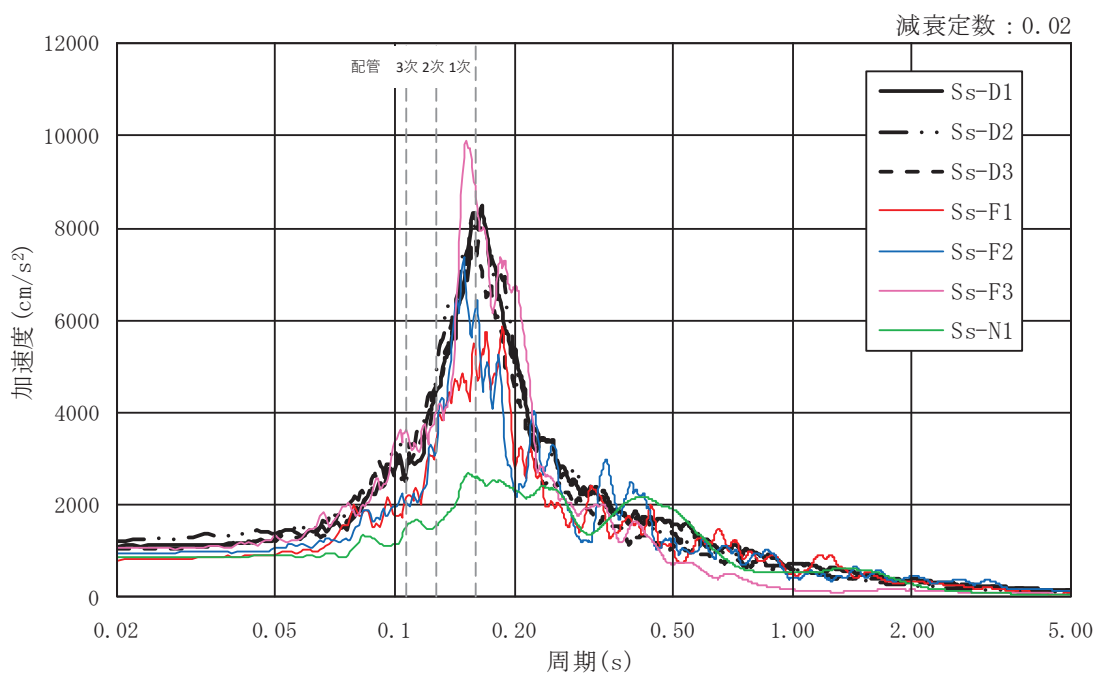


図 5-13 基準地震動 S s 7 波による応答スペクトル (NS 断面,  $h = 0.02$ )



(a) 全応力解析



(b) 有効応力解析

図 5-14 基準地震動 S s 7 波による応答スペクトル (EW 断面, h = 0.02)

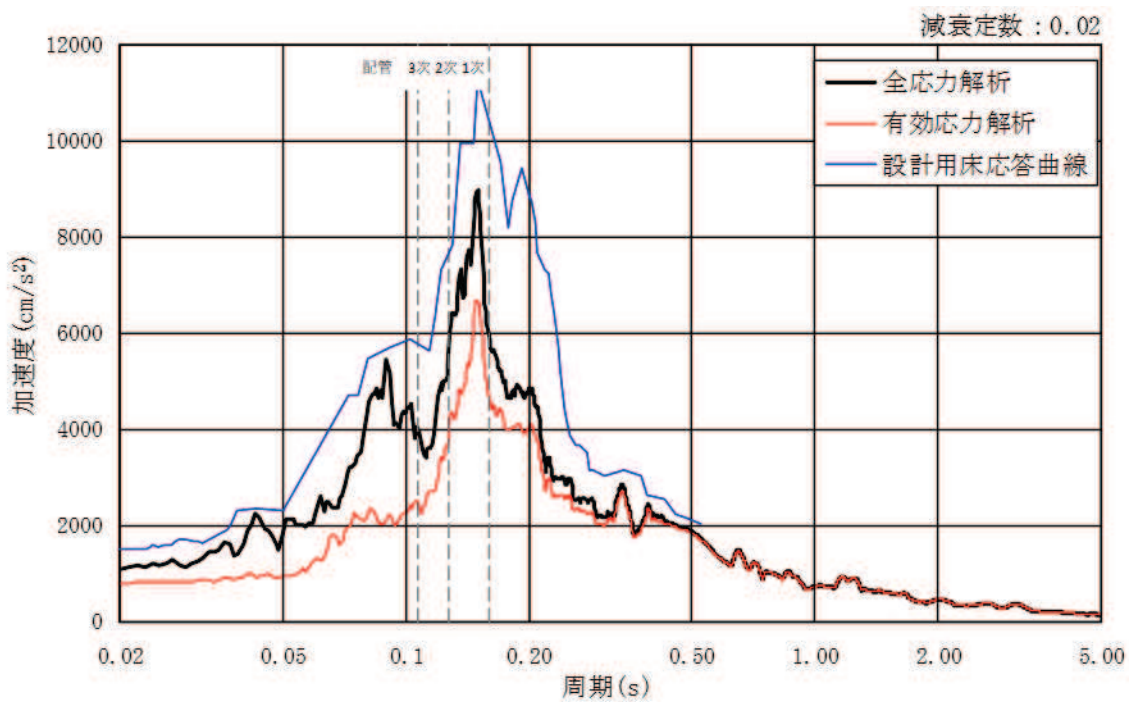


図 5-15 応答スペクトルの比較 (NS 断面, 包絡値)

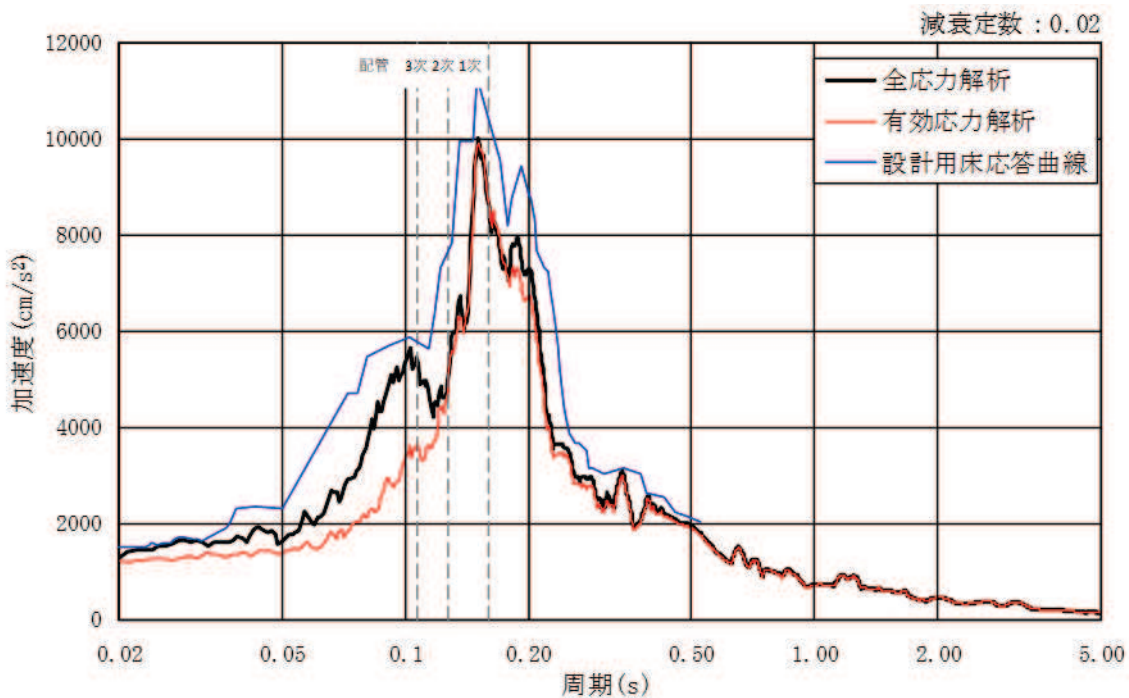


図 5-16 応答スペクトルの比較 (EW 断面, 包絡値)



表 5-5 応答スペクトルの比較結果 (NS 断面, O.P. 14.8m)

モード No.	固有周期 (s)	応答加速度 (m/s <sup>2</sup> )			(b)/(a)
		全応力 解析(a)	有効応力 解析(b)	設計用床応 答曲線(c)	
1	0.160	58.44	46.57	<u>99.51</u>	0.80
2	0.127	53.43	36.87	<u>72.91</u>	0.69
3	0.107	40.27	25.12	<u>57.09</u>	0.62

注記\* : 下線応答スペクトルの最大値を示す

表 5-6 応答スペクトルの比較結果 (EW 断面, O.P. 14.8m)

モード No.	固有周期 (s)	応答加速度 (m/s <sup>2</sup> )			(b)/(a)
		全応力 解析(a)	有効応力 解析(b)	設計用床応 答曲線(c)	
1	0.160	85.84	86.75	<u>99.51</u>	1.01
2	0.127	48.68	47.38	<u>72.91</u>	0.97
3	0.107	54.25	36.43	<u>57.09</u>	0.67

注記\* : 下線応答スペクトルの最大値を示す

別紙 5 排気筒基礎の応力解析におけるモデル化，境界条件  
及び拘束条件の考え方

## 目次

1. 概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 別紙 5-1
2. 排気筒基礎の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件・・・・・・・・ 別紙 5-2
  - 2.1 底面地盤ばね及び要素分割の考え方・・・・・・・・ 別紙 5-2
  - 2.2 モデルの概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 別紙 5-4

## 1. 概要

本資料は、排気筒基礎の応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件についての概要を示すものである。

## 2. 排気筒基礎の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件

### 2.1 底面地盤ばね及び要素分割の考え方

排気筒基礎の応力解析モデルを図 2-1 及び図 2-2 に示す。

応力解析にあたって，排気筒基礎の各部位（筒身柱，鉄塔柱，つなぎはり及び基礎版）を線形ソリッド要素にてモデル化し，これらの構造部材を耐震評価する。なお，応力の伝達を考慮するため，充填コンクリートについても線形ソリッド要素にてモデル化する。

三次元 FEM モデルの基礎版底面に設ける水平方向及び鉛直方向の地盤ばねについては，「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に記載の振動アドミッタンス理論に基づいて評価する。

基礎版の底面地盤ばねの設定における基本的な考え方は，以下のとおり。

- ・ 水平ばね剛性

振動アドミッタンス理論に基づく水平ばねにより算出する。

- ・ 鉛直ばね剛性

基礎浮上りを考慮し，回転ばね反力として生じる転倒モーメントを適切に評価するため，振動アドミッタンス理論に基づく回転ばねにより算出する。

有限要素法を用いた解析モデルにおける要素分割の考え方\*については，以下のとおり。

- ・ ソリッド要素

ソリッド要素の要素高さは，地震応答解析モデルの側方地盤の要素高さと同様に 1.0m を目安として設定する。また，ソリッド要素の要素幅は，要素形状の縦横比（アスペクト比）が 1：2 程度以下となるように設定する。

注記\*：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（非線形 CAE 協会，2008 年）

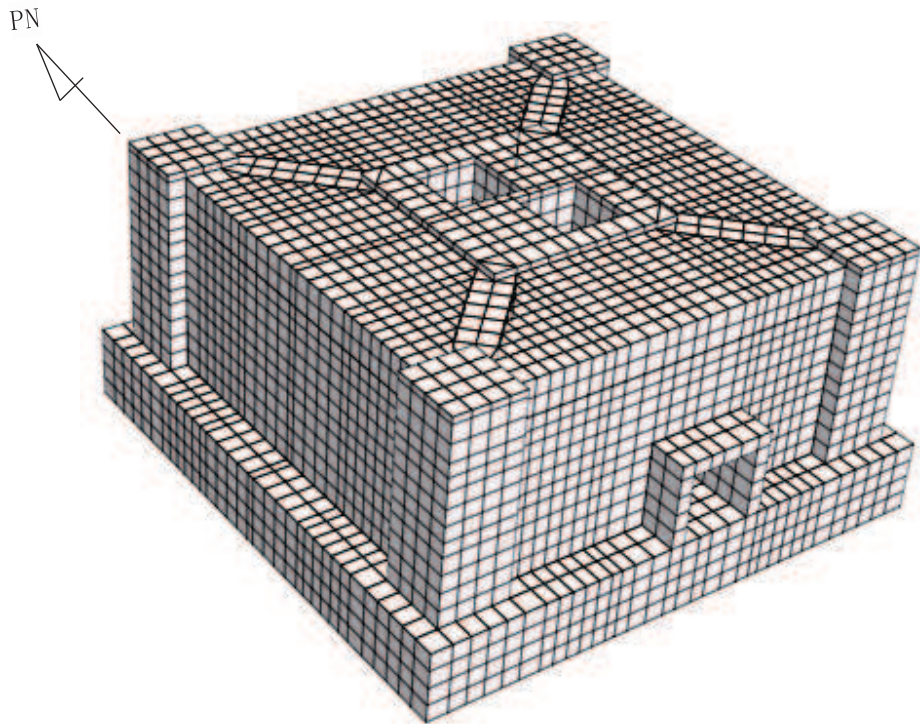


図 2-1 排気筒基礎の応力解析モデル（鳥瞰図）

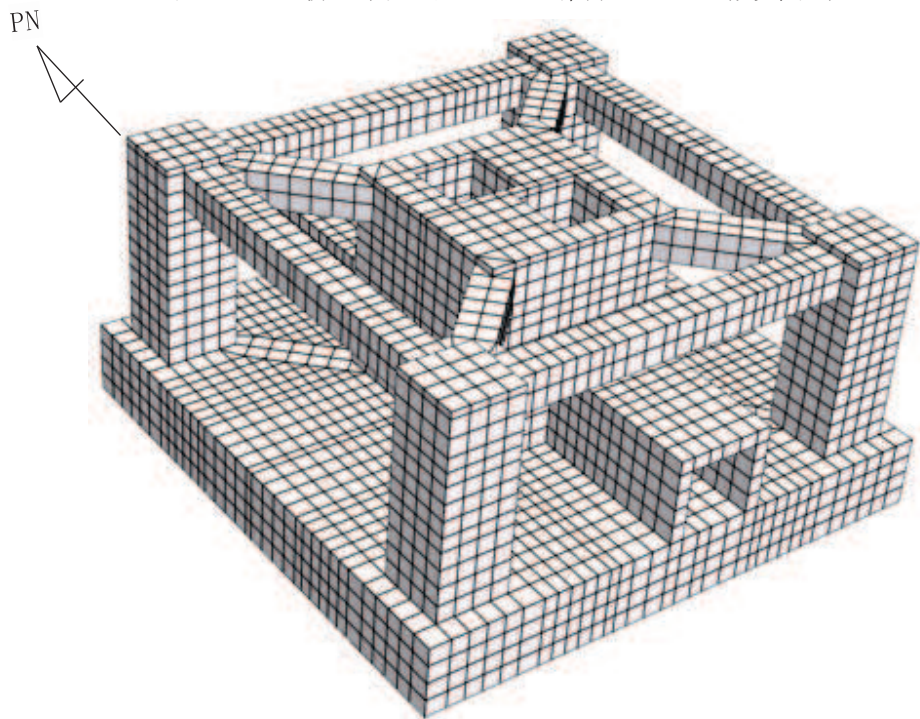


図 2-2 排気筒基礎の応力解析モデル（鳥瞰図（充填コンクリート非表示））

## 2.2 モデルの概要

- ①モデル化範囲：筒身柱，鉄塔柱，つなぎはり，基礎版及び充填コンクリートをモデル化する。
- ②使用要素：ソリッド要素
- ③要素分割：要素の一辺の長さを 0.6m～1.5m 程度とし，排気筒の開口を考慮して分割する。
- ④排気筒基礎と地盤の境界

底面地盤ばねのモデル概要を図 3-1 に示す。

- ・側面地盤は考慮しない。
- ・基礎版の節点には，底面地盤を表現するばね要素を設ける。解析では鉛直方向の底面地盤ばねに引張力が作用した場合，鉛直方向及び水平方向の合計 2 つのばね剛性をゼロとすることにより，基礎の浮上りを表現する。
- ・底面地盤ばねの水平ばね剛性及び鉛直ばね剛性は以下のとおり設定する。
- ・水平ばね剛性：振動アドミッタンス理論による水平ばね  $K_H$  を節点支配面積  $A_i$  で離散化。

$$K_{H i} = (K_H / A) \times A_i$$

ここで，

A：排気筒基礎の底面積

- ・鉛直ばね剛性：転倒モーメントが支配的となるため振動アドミッタンス理論による回転ばね  $K_R$  を節点支配面積  $A_i$  で離散化。

$$K_{V i} = (K_R / I) \times A_i$$

ここで，

I：排気筒基礎版の断面二次モーメント

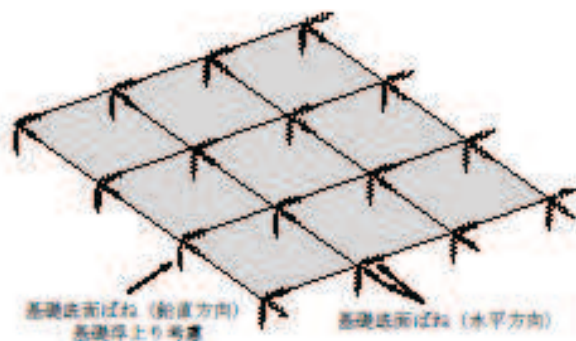


図 2-3 モデル概要

## 別紙 6 排気筒基礎の応力解析における地震荷重の入力方法



## 目次

1. 概要..... 別紙 6-1
2. 三次元 FEM モデルに入力する荷重の入力方法..... 別紙 6-1

## 1. 概要

本資料は、排気筒基礎に作用する地震荷重の入力方法について示すものである。

## 2. 三次元 FEM モデルに入力する荷重の入力方法

排気筒基礎の応力解析にあたっては、表 2-1 の荷重を組合せる。

表 2-1 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
S <sub>s</sub> 地震時	G + P <sub>s</sub> + P <sub>k</sub> + S <sub>s</sub>

G : 固定荷重

P<sub>s</sub> : 積雪荷重

P<sub>k</sub> : 風荷重

S<sub>s</sub> : 基準地震動 S<sub>s</sub> による地震力 (S<sub>s</sub> = K<sub>s</sub> + E<sub>s</sub> + U<sub>s</sub>)

K<sub>s</sub> : 基準地震動 S<sub>s</sub> による慣性力

E<sub>s</sub> : 基準地震動 S<sub>s</sub> による地震時土圧荷重

U<sub>s</sub> : 基準地震動 S<sub>s</sub> による地震時の上部工反力

三次元 FEM モデルに入力する基準地震動 S<sub>s</sub> による水平地震力及び鉛直地震力の入力  
は、基準地震動 S<sub>s</sub> に対する排気筒基礎の地震応答解析における全時刻の最大応答せん  
断力、最大応答曲げモーメント及び最大応答軸力を考慮し、三次元 FEM モデルにおける  
各層の最大応答せん断力、最大応答曲げモーメント及び最大応答軸力が地震応答解析結  
果と等価になるように設定する。

三次元 FEM モデルに入力する地震荷重の概念図を図 2-1 及び図 2-2 に示す。

三次元 FEM モデルに入力する水平地震力のうち慣性力は、二次元 FEM モデルにおける  
層せん断力 (Q<sub>i</sub> - Q<sub>i-1</sub>) を各節点の支配面積に応じて分配し、地震時最大土圧 (P<sub>i</sub>)  
を差し引き、水平慣性力 (F<sub>i</sub>) から求めた水平震度 (α<sub>h i</sub>) を用いる。

曲げモーメントについては、地震応答解析により求まる最大転倒モーメント (M<sub>max</sub>)  
と三次元 FEM モデルに作用した水平荷重により発生する曲げモーメント (M<sub>c</sub>) の差分  
(以下「付加曲げモーメント」という。) を考慮する。排気筒基礎に作用する付加曲げモ  
ーメント (M') は、基礎の節点に支配面積と中心位置からの距離 (L<sub>i</sub>) に応じて鉛直  
方向の偶力 (V<sub>i</sub>) に置換して分配し、節点荷重として入力する。また、二次元 FEM モ  
デルにおける接地圧係数に比べ、組合せ係数法による応力解析の接地圧係数が上回る場合  
は、排気筒基礎底版に別紙 7 に示す鉛直力を付加する。

三次元 FEM モデルに入力する水平地震力のうち地震時土圧荷重は、構造物の左右に発  
生した地震時土圧を全時刻包絡することで、加力側の土圧荷重を安全側に設定する。支  
持側の土圧荷重については、保守的に考慮しない。

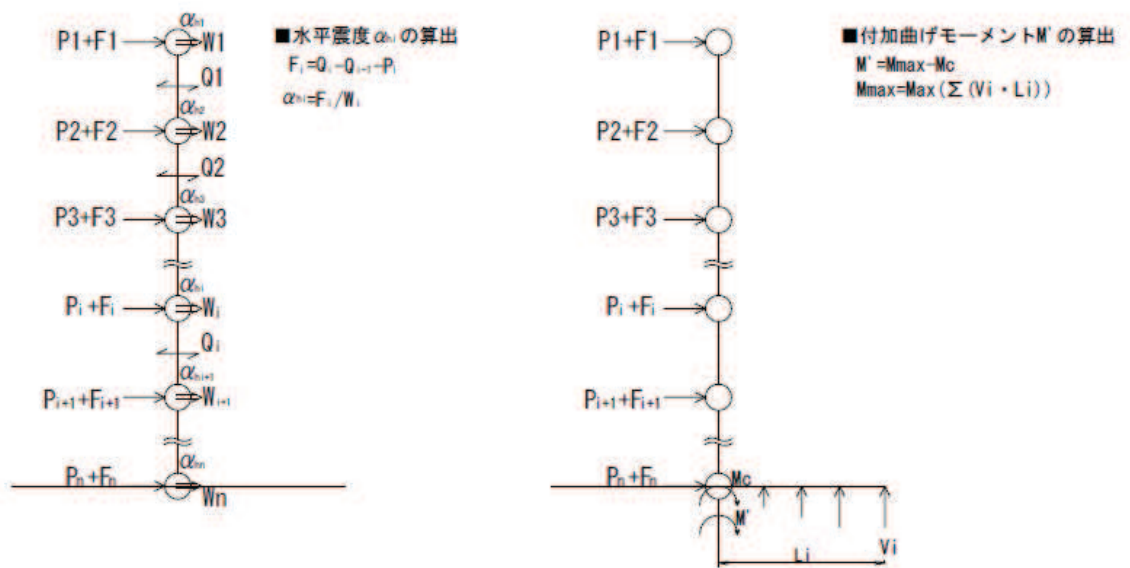
三次元 FEM モデルに入力する鉛直地震力は，二次元 FEM モデルにおける最大応答軸力の差分 ( $N_i - N_{i-1}$ ) を各節点の支配面積に応じて分配した鉛直慣性力 ( $F_i$ ) から求めた鉛直震度 ( $\alpha_{vi}$ ) を用いる。

排気筒からの地震時の上部工反力の入力は，排気筒の地震応答解析により設定する。

具体的には，排気筒に地震荷重が作用した際の水平反力(せん断力, 曲げモーメント)・鉛直反力(軸力)について，排気筒を支持する筒身柱，鉄塔柱の上端に節点荷重として入力する。

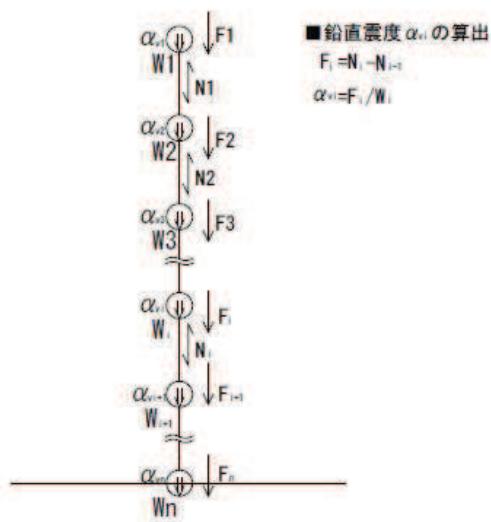
また，風荷重の入力は，排気筒の静的応力解析により設定した上部工反力を，地震時の上部工反力と同様に入力する。

三次元 FEM モデルに入力する水平地震力，付加曲げモーメント，付加鉛直力，鉛直地震力，地震時増分土圧及び上部工反力の概要を図 2-3～図 2-10 に示す。



- $W_i$  : 地震応答解析モデルの質点重量
- $Q_i$  : 地震応答解析による最大応答せん断力
- $P_i$  : 地震応答解析による地震時最大土圧（三次元 FEM に入力する地震時土圧）
- $V_i$  : 地震応答解析による地盤反力
- $M_{max}$  : 地震応答解析による基礎の最大転倒モーメント
- $F_i$  : 水平慣性力
- $\alpha_{hi}$  : 三次元 FEM に入力する水平震度
- $M_c$  : 三次元 FEM に入力した水平荷重により発生する転倒モーメント
- $M'$  : 三次元 FEM に入力する付加曲げモーメント  
(最大転倒モーメントと水平荷重により発生する転倒モーメントの差分)

図2-1 三次元FEMモデルに入力する地震荷重の概念図(水平地震力)



- $W_i$  : 地震応答解析モデルの質点重量
- $N_i$  : 地震応答解析による最大応答軸力
- $F_i$  : 鉛直慣性力
- $\alpha_{v i}$  : FEM に入力する鉛直震度

図2-2 三次元FEMモデルに入力する地震荷重の概念図(鉛直地震力)

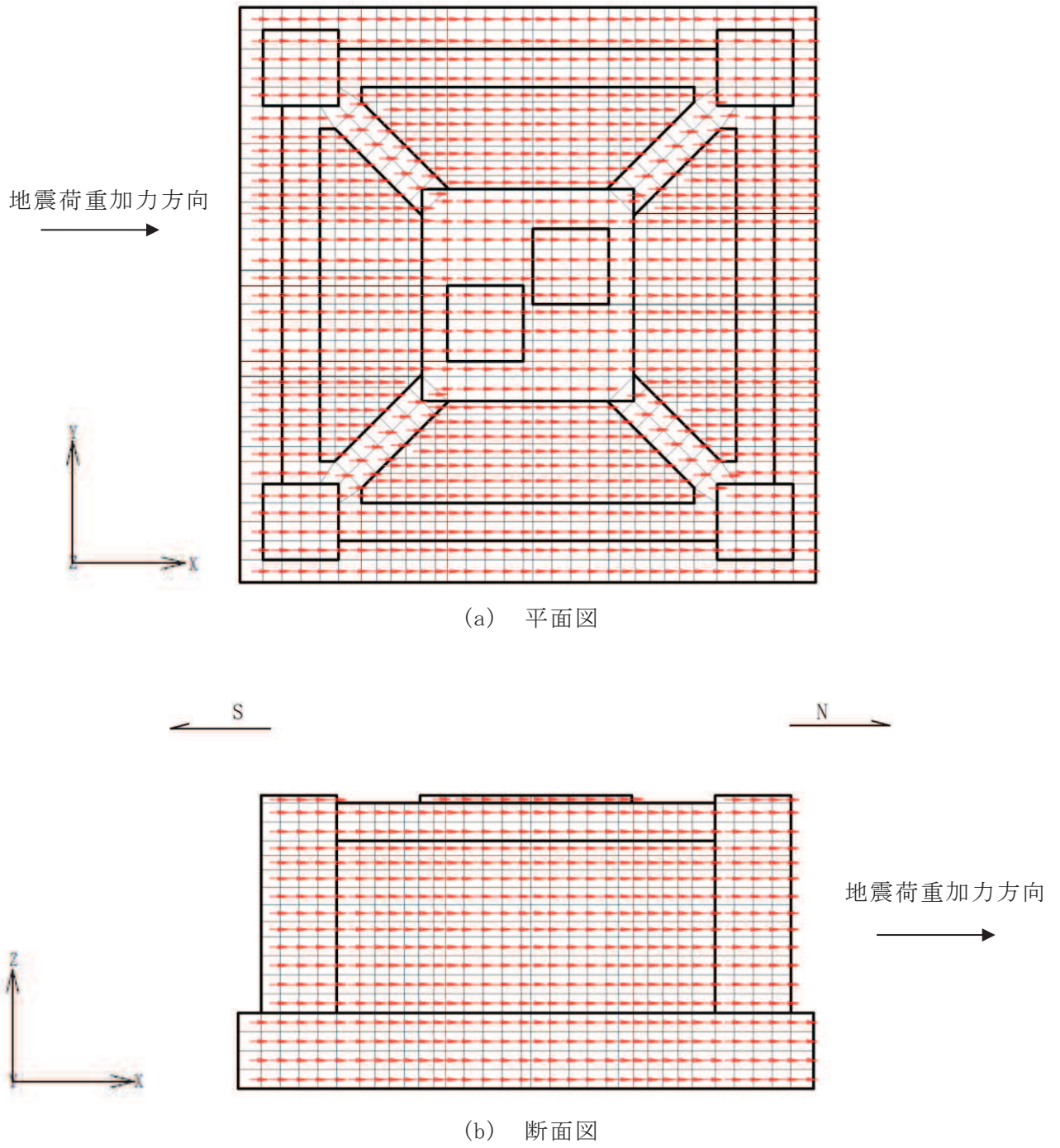
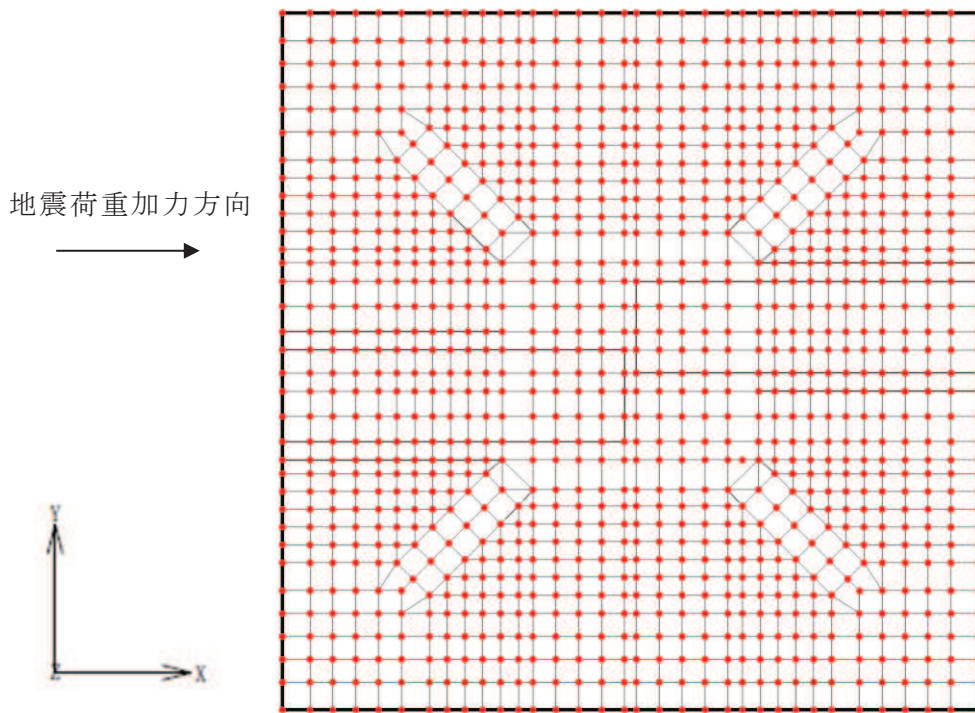
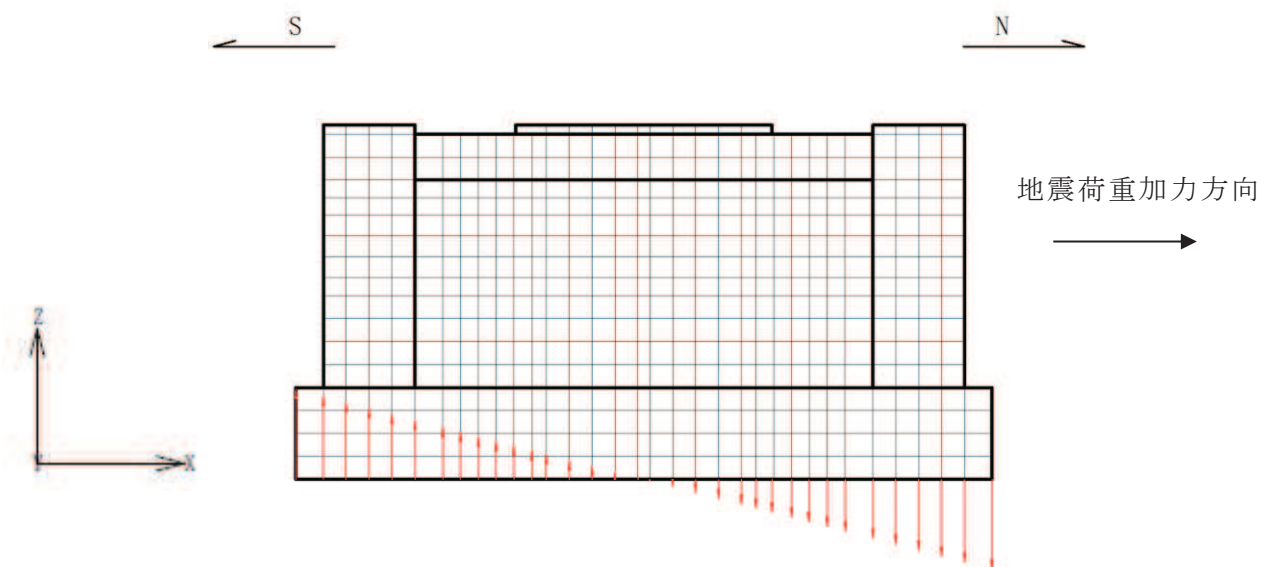


図2-3 三次元FEMモデルに入力する水平地震力(NS断面)



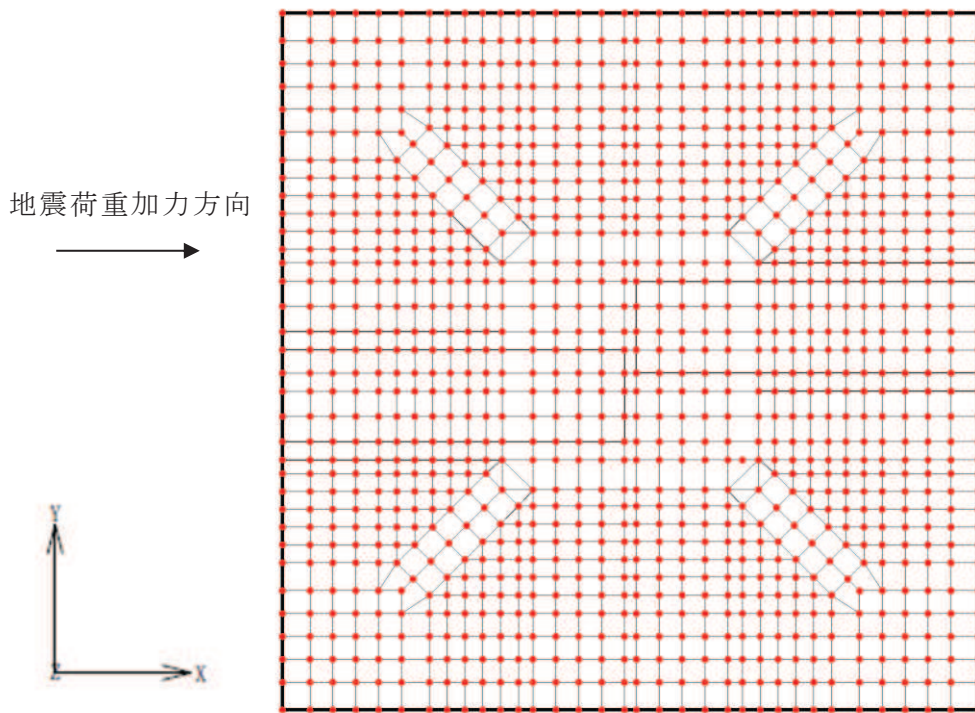
(a) 平面図



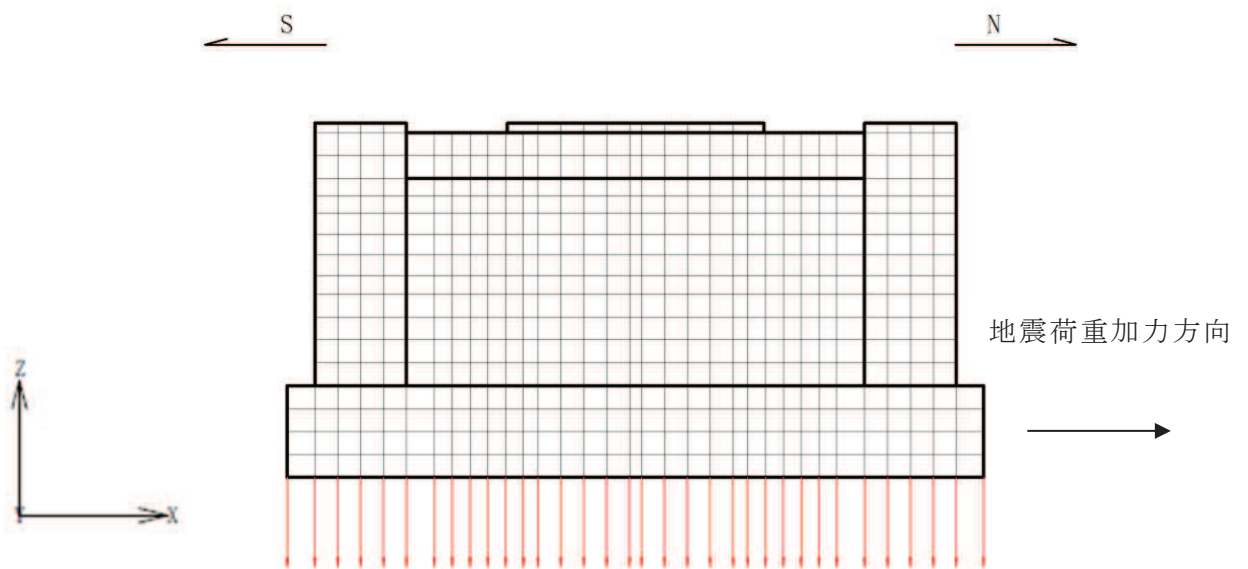
(b) 断面図

図2-4 三次元FEMモデルに入力する付加曲げモーメント(NS断面)





(a) 平面図

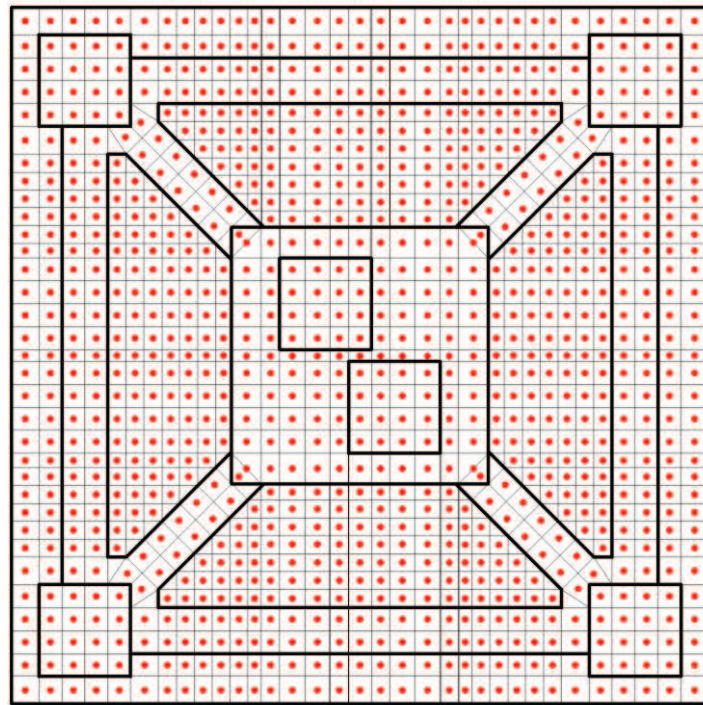
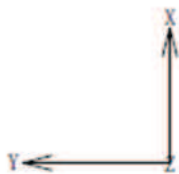


(b) 断面図

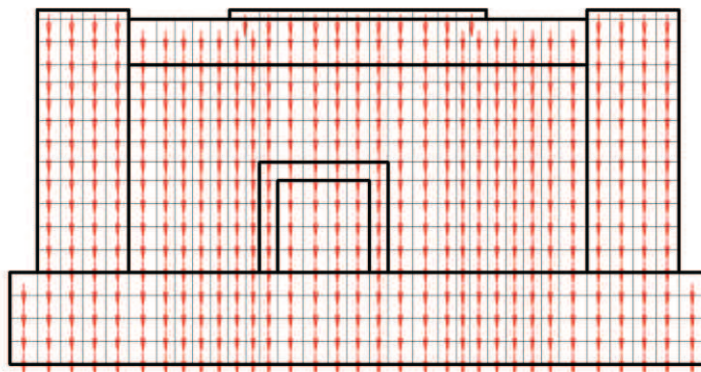
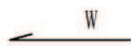
図2-5 三次元FEMモデルに入力する付加鉛直力(NS断面)



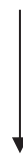
地震荷重加力方向



(a) 平面図

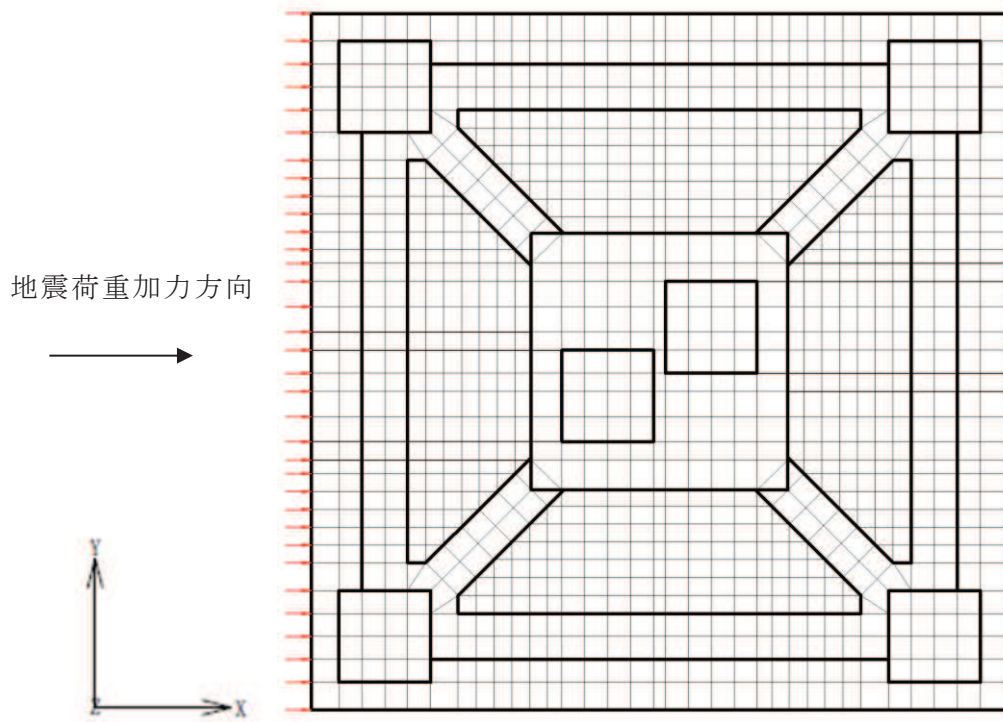


地震荷重加力方向

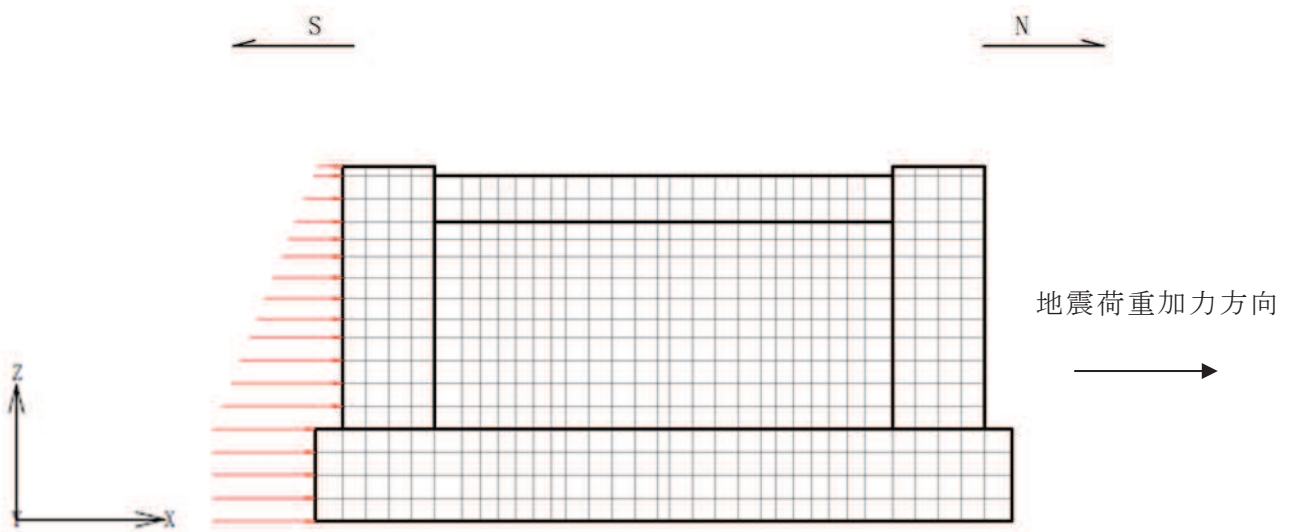


(b) 断面図

図2-6 三次元FEMモデルに入力する鉛直地震力



(a) 平面図



(b) 断面図

図2-7 三次元FEMモデルに入力する地震時増分土圧荷重(NS断面)



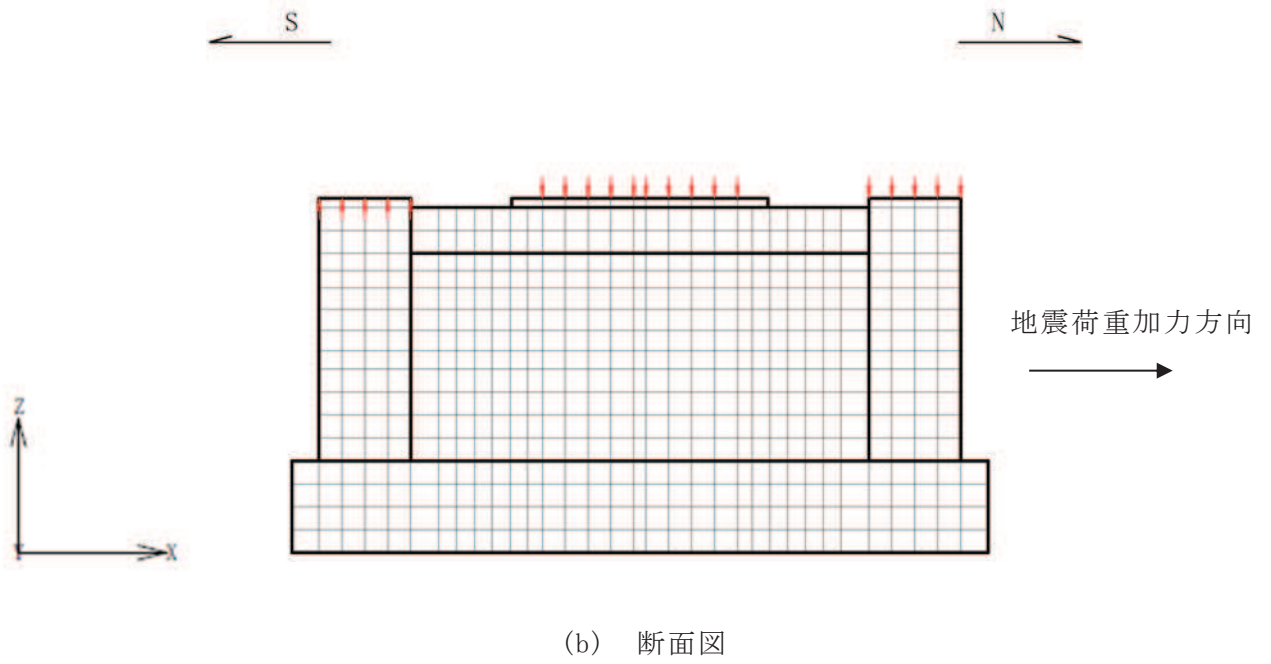
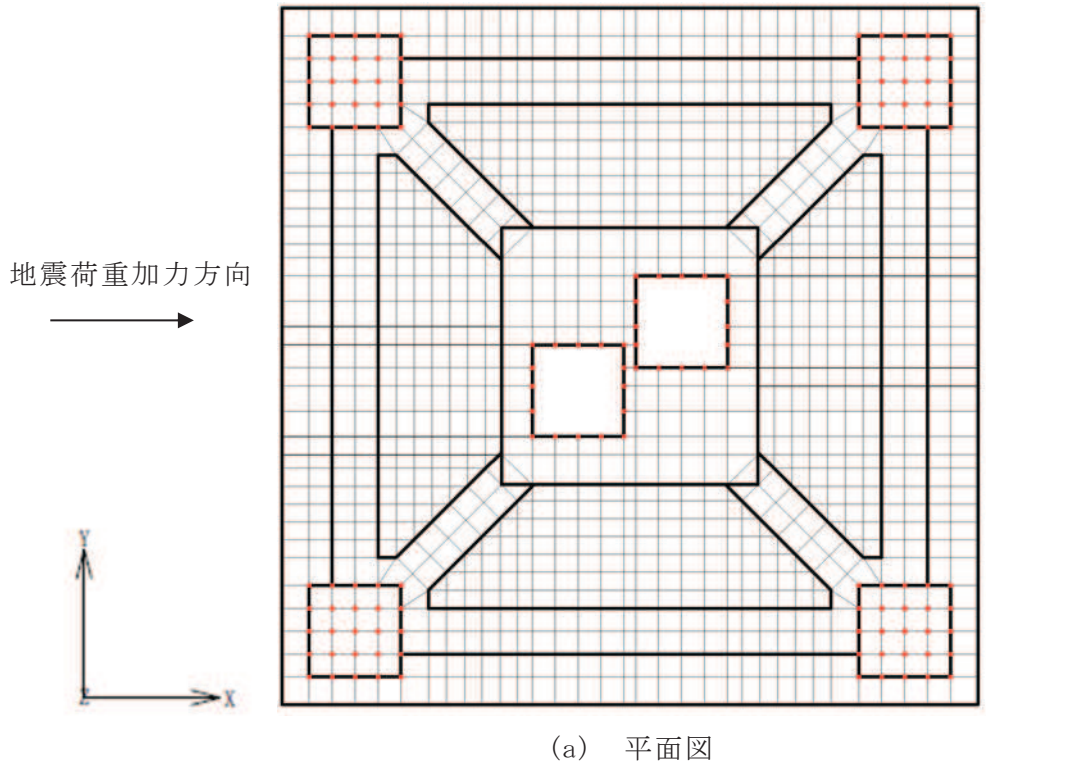


図2-9 三次元FEMモデルに入力する上部工の鉛直荷重(NS断面)



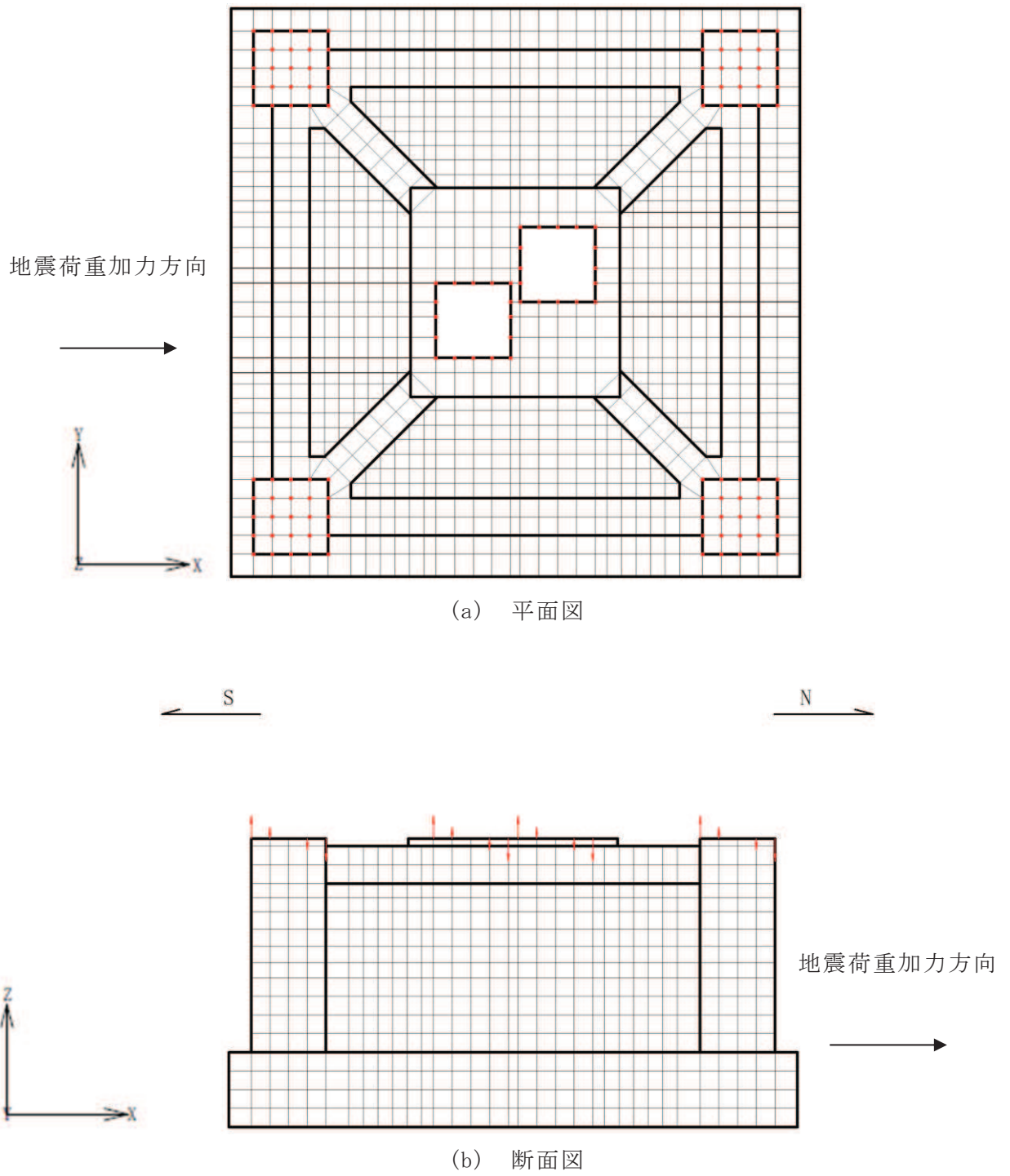


図2-10 三次元FEMモデルに入力する上部工の曲げモーメント(NS断面)

別紙 7 排気筒基礎の応力解析における組合せ係数法の適用

## 目次

1. 概要	別紙 7-1
1.1 検討概要	別紙 7-1
1.2 検討方針	別紙 7-1
2. 検討結果	別紙 7-4
2.1 検討内容	別紙 7-4
2.2 検討結果	別紙 7-10
2.3 考察	別紙 7-12

## 1. 概要

### 1.1 検討概要

本資料は、排気筒基礎の耐震評価における組合せ係数法の適用性について説明するものである。

建物・構築物の耐震評価として行う水平及び鉛直方向の荷重の組合せを考慮した評価において、地震応答の最大値を用いた組合せ係数法による評価値と地震応答の時刻歴和による評価値の比較を行うことで、組合せ係数法の適用性を確認する。なお、排気筒基礎は、地震応答解析により求めた応答を三次元 FEM モデルに入力することにより耐震評価を行うため、時刻選定の妥当性検証を必要とせず、保守的な評価を行うことが可能な組合せ係数法を適用している。

### 1.2 検討方針

建物・構築物の耐震評価に考慮する荷重の組合せにおいては、以下に示す組合せ係数法を適用し、水平及び鉛直方向の地震力が同時に不利な方向に作用するものとして評価を実施している。

- ①  $1.0 \times$  水平地震力による荷重  $\pm 0.4 \times$  鉛直地震力による荷重
- ②  $0.4 \times$  水平地震力による荷重  $\pm 1.0 \times$  鉛直地震力による荷重

建物・構築物の耐震評価における組合せ係数法の適用性を検討するにあたっては、水平及び鉛直方向の荷重の組合せに、地震応答の最大値を用いた組合せ係数法を適用した場合の評価結果が、水平及び鉛直方向の地震応答を時々刻々組合せた場合の評価結果と同等又は保守的であることを確認する。

排気筒基礎の評価対象部位は、「基礎地盤」及び「基礎」に分類される。

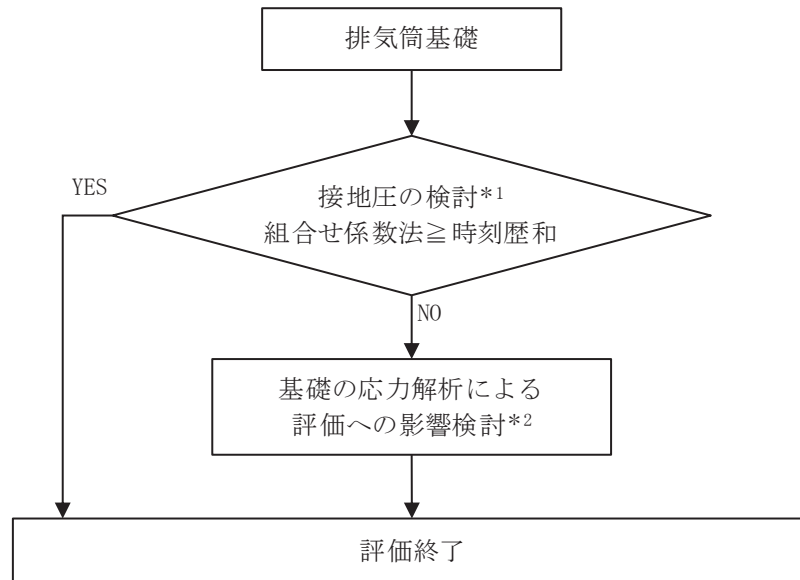
基礎地盤（接地圧）の検討としては、地震応答解析による評価において、水平・鉛直同時入力による地震応答解析の最大地盤反力度が、地盤の極限支持力度を超えないことを確認している（VI-2-2-26「排気筒基礎の耐震性についての計算書」）。

基礎の検討としては、応力解析による評価において、組合せ係数法を採用している。評価対象部位は、基礎版・柱部材・はり部材に分類されるが、各々の部材は充填コンクリートを介した一体挙動を示し、各部材に発生する断面力は基礎版下の接地圧と相関する。そこで、地震応答の最大値を用いた組合せ係数法を適用した場合の接地圧が、地震応答を時々刻々組合せた場合の最大接地圧と同等又は保守的であることを確認することで、組合せ係数法の適用性を確認する。

組合せ係数法を適用した場合の評価結果と、地震応答を時々刻々組合せた場合の評価結果との比較は、VI-2-2-25「排気筒基礎の地震応答計算書」に示す基本ケースの結果を用いる。



検討フローを図 1-1 に示す。また、地震応答解析モデルを図 1-2 及び図 1-3 に示す。



注記

\*1：基本ケースによる検討

\*2：地盤物性及び材料物性の不確かさを考慮した検討

図 1-1 検討フロー

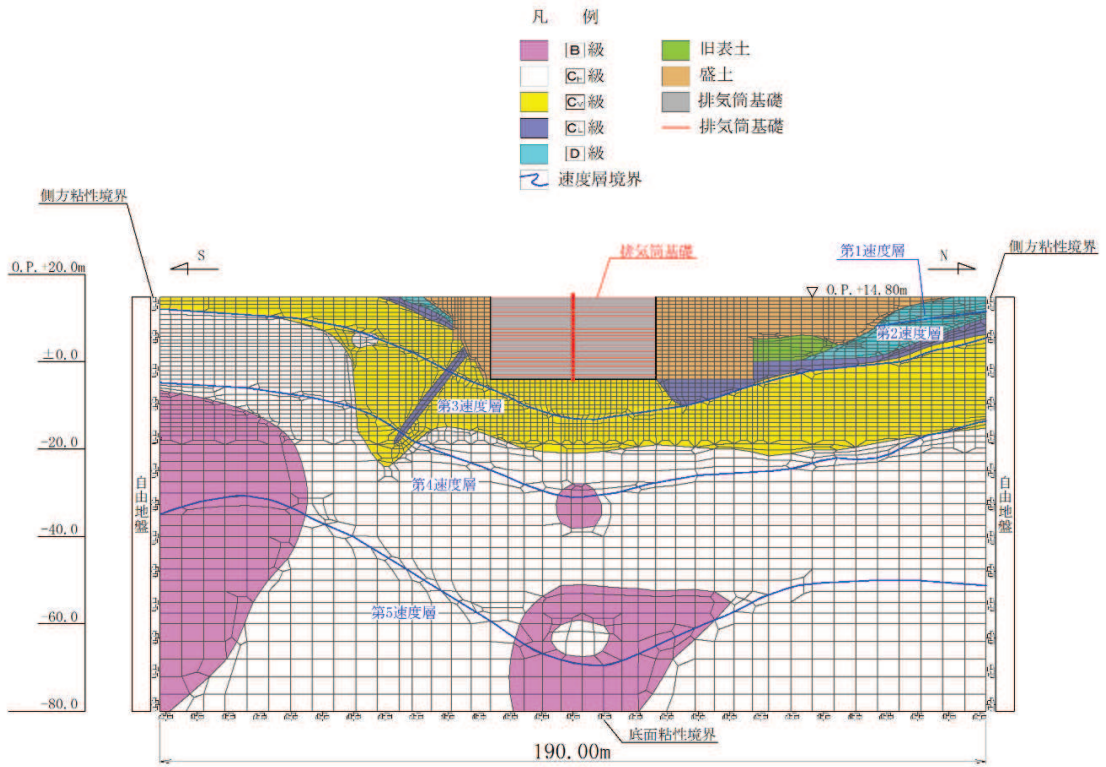


図 1-2 排気筒基礎の地震応答解析モデル図 (NS 断面)

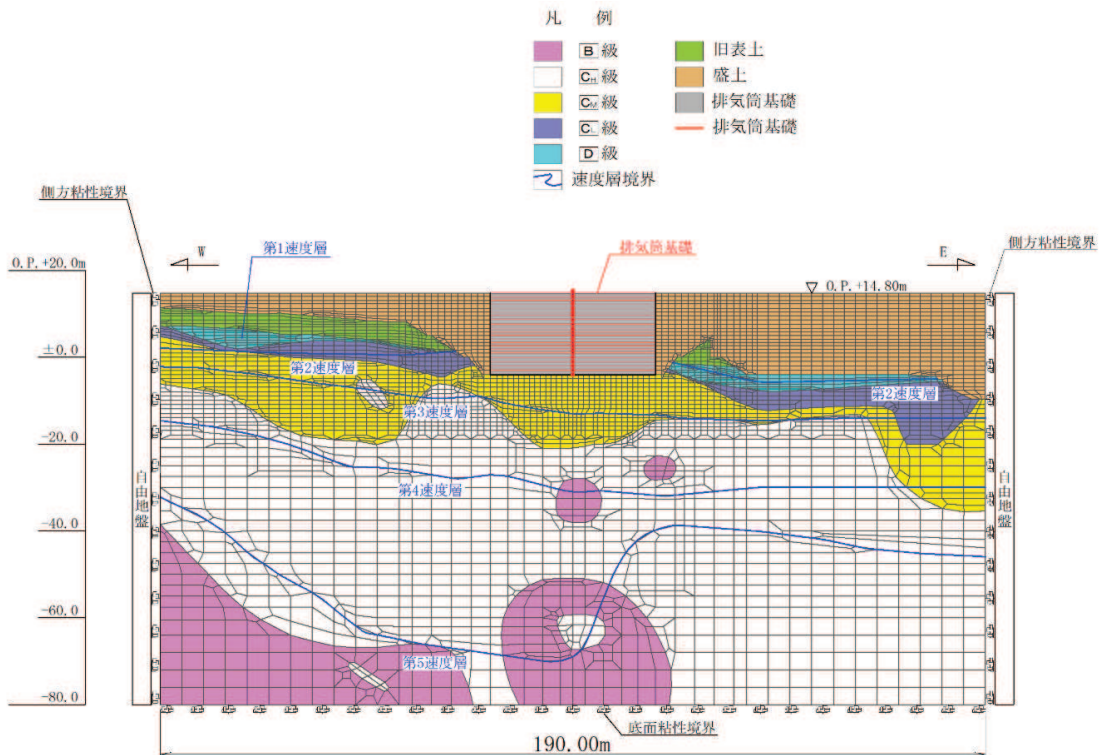


図 1-3 排気筒基礎の地震応答解析モデル図 (EW 断面)

## 2. 検討結果

### 2.1 検討内容

基礎の応力解析による評価における，組合せ係数法の適用性の確認において，検討に用いる地震動は基準地震動  $S_s$  7 波（全波）とする。また，時刻歴和による算定において，水平地震力による荷重には転倒モーメントを，鉛直地震力による荷重には鉛直反力を用いる。

組合せ係数法の最大接地圧については，最大転倒モーメントの 1.0 倍を乗じた値と最大鉛直反力の 0.4 倍を乗じた値の和，又は最大転倒モーメントの 0.4 倍を乗じた値と最大鉛直反力の 1.0 倍を乗じた値の和から算定している。

これに対して，時刻歴和による最大接地圧は，時刻歴転倒モーメント及び時刻歴鉛直反力から時刻毎に算定した接地圧の最大値とする。

排気筒基礎の検討フローを図 2-1 に示す。

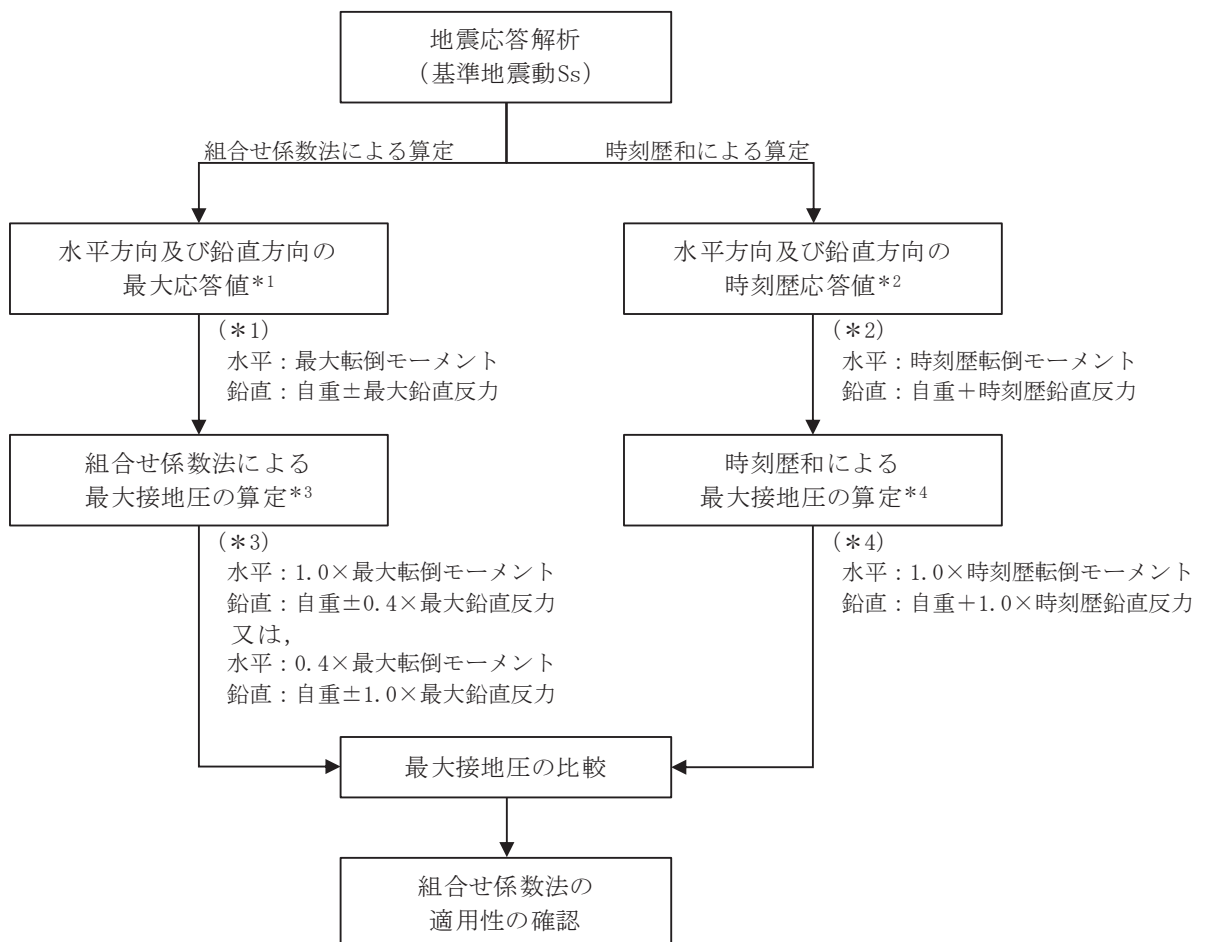


図 2-1 排気筒基礎の検討フロー

ここで、接地圧  $\sigma$  の評価式を下式に、転倒モーメントと鉛直反力の関係を図 2-2 に示す。

$$\sigma = \frac{W'}{B \cdot L} \cdot \alpha$$

ここで、

$\alpha$  : 接地圧係数

$e / L \leq 1/6$  のとき

$$\alpha = 1 + 6 \cdot \frac{e}{L}$$

$1/6 < e / L < 1/2$  のとき

$$\alpha = \frac{2}{3 \left( \frac{1}{2} - \frac{e}{L} \right)}$$

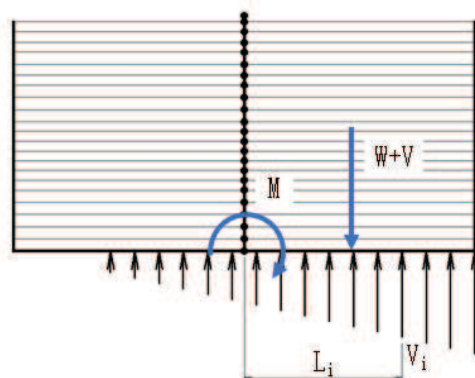
$$e = |M| / W'$$

- $M$  : 基礎底面における転倒モーメント  
 $W'$  : 鉛直地震荷重を考慮した総重量 ( $=W+V$ )  
 $B$  : 地震直交方向の基礎幅  
 $L$  : 地震方向の基礎幅

また、地盤反力を三角形分布と仮定した場合の基礎の接地率  $\eta$  は、次式で評価できる。

$$\eta = 3 \left( \frac{1}{2} - \frac{e}{L} \right)$$

ただし、 $e / L < 1/2$



■ 転倒モーメント  $M$  の算出

$$M = \Sigma (V_i \cdot L_i)$$

$V_i$  : 地震応答解析による鉛直方向地盤反力

$L_i$  : 基礎中心から  $V_i$  抽出位置までの水平距離

■ 鉛直反力  $V$  の算出

$$V = \Sigma V_i - W$$

$W$  : 自重

図 2-2 転倒モーメントと鉛直反力の関係

接地圧の評価式の特性上、鉛直方向の軸力変動が大きく、かつ水平最大応答時に鉛直上向きの応答が大きくなるような場合、図 2-3 に示すとおり、 $e/L = 1/6$  を超えると接地圧係数  $\alpha$  が加速的に大きくなり、 $e/L = 1/2 (=0.50)$  で  $\alpha$  が  $\infty$  に発散する。その場合、接地率  $\eta$  が零に近づき、地震応答解析では安定していた基礎が、組合せ係数法による応力解析では不安定となって解析できないことがある。

そこで、組合せ係数法による応力解析では、地震応答の時刻歴和による  $\eta$  の最小値を下回らないように  $e/L$  を補正する。具体的には、 $e/L$  の変数  $e$  が転倒モーメント  $M$  と鉛直地震荷重を考慮した総重量  $W'$  の関数であることから、接地圧  $\sigma$  が大きくなるように  $M$  を固定して  $W'$  を大きくし、組合せ係数法による  $e/L$  を各地震動による地震応答の時刻歴和による最大  $e/L$  と一致するよう、排気筒基礎底版に鉛直力を付加する。

$e/L$  の補正の概念図を図 2-4 に、 $e/L$  の補正結果を表 2-1 及び表 2-2 に示す。

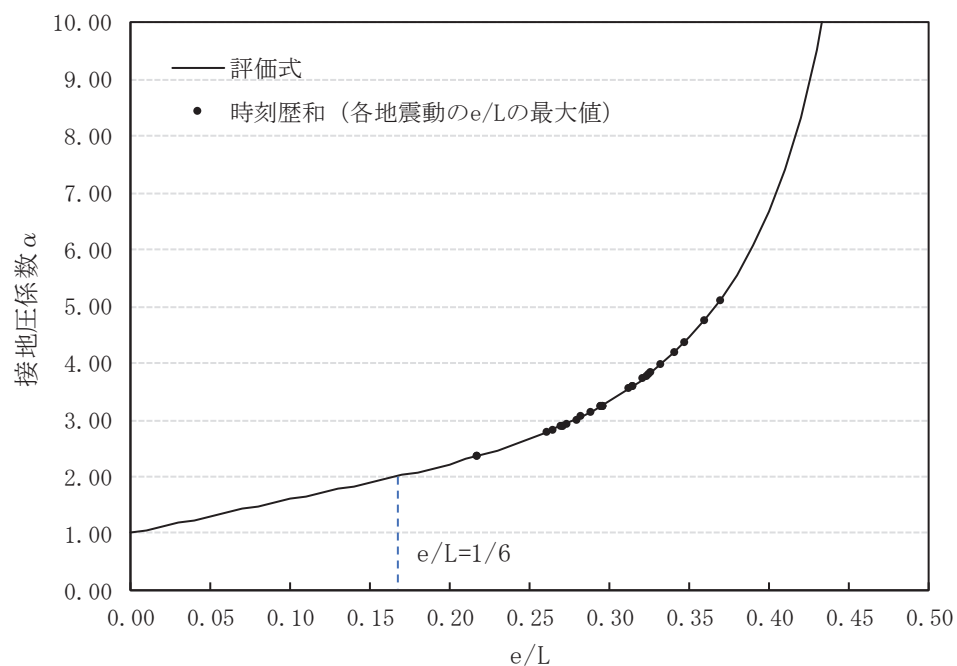


図 2-3  $e/L$  と接地圧係数  $\alpha$  の関係

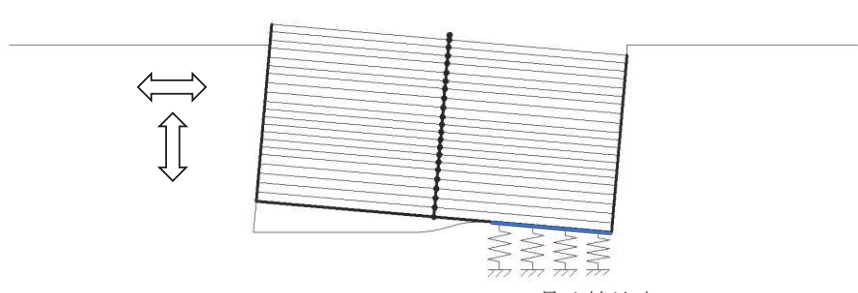
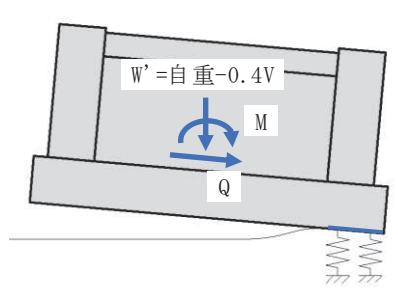
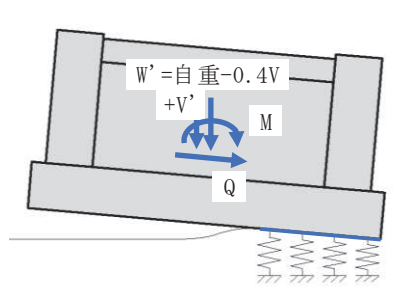
	e/Lの補正なし	e/Lの補正あり
地震応答解析	 <p>最小接地率: <math>\eta_A</math></p> <p>水平・鉛直同時入力による地震応答解析</p>	
応力解析	 <p>接地率: <math>\eta_B \leq \eta_A</math></p>	 <p>接地率: <math>\eta_C = \eta_A</math></p>
	<p>上向きの鉛直地震荷重が大きい場合は地震応答解析よりも浮上りが大きくなり、解析できないことがある。</p>	<p>上向きの鉛直地震荷重が大きい場合に解析できなくなることを避けるため、地震応答解析の最小接地率と一致するように、かつ、接地圧が大きくなるように鉛直力<math>V'</math>を付加する。</p>

図 2-4 e / L の補正の概念図

表 2-1 e / L の補正結果 (水平 1.0, 鉛直上向き 0.4 の場合)

(a) NS 断面

地震動	組合せ係数法							時刻歴和			
	最大値		偏心量	接地圧係数	補正後			偏心量最大時		偏心量	接地圧係数
	転倒モーメント M	総重量 W' = W - 0.4V	e/L (e=M/W')	$\alpha$	総重量 W''	e' / L (e' = M/W'')	$\alpha$	転倒モーメント M	総重量 W'	e/L (e=M/W')	$\alpha$
Ss-D1(++)	181974	12188	0.393	6.22	16281	0.294	3.24	173943	15562	0.294	3.24
Ss-D2(++)	183713	12014	0.402	6.83	13095	0.369	5.10	134561	9591	0.369	5.10
Ss-D3(++)	157673	12057	0.344	4.28	14105	0.294	3.24	143214	12811	0.294	3.24
Ss-F1(++)	164768	13518	0.321	3.72	15891	0.273	2.93	140578	13558	0.273	2.93
Ss-F2(++)	159362	13338	0.314	3.59	14863	0.282	3.06	155518	14505	0.282	3.06
Ss-F3(++)	182992	11640	0.414	7.72	14126	0.341	4.19	140644	10857	0.341	4.19
Ss-N1(++)	152653	13663	0.294	3.24	18478	0.217	2.36	131087	15868	0.217	2.36
Ss-D1(-+)	181724	12090	0.396	6.38	16182	0.296	3.26	107501	9572	0.296	3.26
Ss-D2(-+)	203140	11805	0.453	14.13	17015	0.314	3.59	164504	13779	0.314	3.59
Ss-D3(-+)	150161	11606	0.340	4.18	15195	0.260	2.78	129808	13135	0.260	2.78
Ss-F1(-+)	158246	12952	0.322	3.74	15393	0.271	2.91	158246	15393	0.271	2.91
Ss-F2(-+)	162735	13166	0.325	3.82	15895	0.269	2.89	148254	14481	0.269	2.89
Ss-F3(-+)	162102	12609	0.338	4.12	14448	0.295	3.26	147007	13102	0.295	3.26
Ss-N1(-+)	141151	13679	0.272	2.92	17082	0.217	2.36	118080	14290	0.217	2.36

(b) EW 断面

地震動	組合せ係数法							時刻歴和			
	最大値		偏心量	接地圧係数	補正後			偏心量最大時		偏心量	接地圧係数
	転倒モーメント M	総重量 W' = W - 0.4V	e/L (e=M/W')	$\alpha$	総重量 W''	e' / L (e' = M/W'')	$\alpha$	転倒モーメント M	総重量 W'	e/L (e=M/W')	$\alpha$
Ss-D1(++)	213699	11788	0.477	29.09	17259	0.326	3.83	78476	6338	0.326	3.83
Ss-D2(++)	243729	11713	0.548	適用外	17839	0.360	4.75	180690	13225	0.360	4.75
Ss-D3(++)	190954	11864	0.424	8.72	15991	0.314	3.59	190954	15991	0.314	3.59
Ss-F1(++)	169062	13602	0.327	3.86	16437	0.271	2.91	135111	13136	0.271	2.91
Ss-F2(++)	181657	12219	0.391	6.13	13770	0.347	4.36	107369	8139	0.347	4.36
Ss-F3(++)	213280	12573	0.446	12.44	17298	0.324	3.80	178156	14449	0.324	3.80
Ss-N1(++)	162007	13500	0.316	3.62	15276	0.279	3.02	120755	11386	0.279	3.02
Ss-D1(-+)	211976	11688	0.477	29.32	17869	0.312	3.55	84334	7109	0.312	3.55
Ss-D2(-+)	239426	11617	0.542	適用外	19490	0.323	3.77	169537	13801	0.323	3.77
Ss-D3(-+)	193686	11688	0.436	10.43	17239	0.296	3.26	161652	14388	0.296	3.26
Ss-F1(-+)	174380	13452	0.341	4.20	17336	0.265	2.83	148633	14777	0.265	2.83
Ss-F2(-+)	186569	12511	0.392	6.20	14778	0.332	3.97	124008	9823	0.332	3.97
Ss-F3(-+)	204672	12930	0.417	7.99	16760	0.321	3.73	146181	11970	0.321	3.73
Ss-N1(-+)	163519	13634	0.316	3.62	14934	0.288	3.15	132590	12109	0.288	3.15

表 2-2 e / L の補正結果 (水平 0.4, 鉛直上向き 1.0 の場合)

(a) NS 断面

地震動	組合せ係数法							時刻歴和			
	最大値		偏心量	接地圧係数	補正後			偏心量最大時		偏心量	接地圧係数
	転倒モーメント $M' = 0.4M$	総重量 $W' = W - 1.0V$	$e/L$ ( $e=M'/W'$ )	$\alpha$	総重量 $W''$	$e'/L$ ( $e'=M'/W''$ )	$\alpha$	転倒モーメント $M$	総重量 $W'$	$e/L$ ( $e=M/W'$ )	$\alpha$
Ss-D1(++)	72790	6139	0.312	3.55	6512	0.294	3.24	173943	15562	0.294	3.24
Ss-D2(++)	73485	5704	0.339	4.14	5704	0.339	4.14	134561	9591	0.369	5.10
Ss-D3(++)	63069	5811	0.286	3.11	5811	0.286	3.11	143214	12811	0.294	3.24
Ss-F1(++)	65907	9462	0.183	2.11	9462	0.183	2.11	140578	13558	0.273	2.93
Ss-F2(++)	63745	9012	0.186	2.12	9012	0.186	2.12	155518	14505	0.282	3.06
Ss-F3(++)	73197	4769	0.404	6.94	5650	0.341	4.19	140644	10857	0.341	4.19
Ss-N1(++)	61061	9826	0.164	1.98	9826	0.164	1.98	131087	15868	0.217	2.36
Ss-D1(-+)	72689	5894	0.325	3.80	6473	0.296	3.26	107501	9572	0.296	3.26
Ss-D2(-+)	81256	5181	0.413	7.64	6806	0.314	3.59	164504	13779	0.314	3.59
Ss-D3(-+)	60065	4683	0.338	4.10	6078	0.260	2.78	129808	13135	0.260	2.78
Ss-F1(-+)	63298	8049	0.207	2.27	8049	0.207	2.27	158246	15393	0.271	2.91
Ss-F2(-+)	65094	8583	0.200	2.22	8583	0.200	2.22	148254	14481	0.269	2.89
Ss-F3(-+)	64841	7191	0.237	2.54	7191	0.237	2.54	147007	13102	0.295	3.26
Ss-N1(-+)	56460	9865	0.151	1.90	9865	0.151	1.90	118080	14290	0.217	2.36

(b) EW 断面

地震動	組合せ係数法							時刻歴和			
	最大値		偏心量	接地圧係数	補正後			偏心量最大時		偏心量	接地圧係数
	転倒モーメント $M' = 0.4M$	総重量 $W' = W - 1.0V$	$e/L$ ( $e=M'/W'$ )	$\alpha$	総重量 $W''$	$e'/L$ ( $e'=M'/W''$ )	$\alpha$	転倒モーメント $M$	総重量 $W'$	$e/L$ ( $e=M/W'$ )	$\alpha$
Ss-D1(++)	85479	5137	0.438	10.73	6904	0.326	3.83	78476	6338	0.326	3.83
Ss-D2(++)	97492	4951	0.518	適用外	7136	0.360	4.75	180690	13225	0.360	4.75
Ss-D3(++)	76382	5327	0.377	5.43	6396	0.314	3.59	190954	15991	0.314	3.59
Ss-F1(++)	67625	9673	0.184	2.11	9673	0.184	2.11	135111	13136	0.271	2.91
Ss-F2(++)	72663	6217	0.308	3.46	6217	0.308	3.46	107369	8139	0.347	4.36
Ss-F3(++)	85312	7102	0.316	3.63	7102	0.316	3.63	178156	14449	0.324	3.80
Ss-N1(++)	64803	9417	0.181	2.09	9417	0.181	2.09	120755	11386	0.279	3.02
Ss-D1(-+)	84790	4888	0.456	15.31	7147	0.312	3.55	84334	7109	0.312	3.55
Ss-D2(-+)	95770	4710	0.535	適用外	7796	0.323	3.77	169537	13801	0.323	3.77
Ss-D3(-+)	77474	4887	0.417	8.05	6896	0.296	3.26	161652	14388	0.296	3.26
Ss-F1(-+)	69752	9298	0.197	2.20	9298	0.197	2.20	148633	14777	0.265	2.83
Ss-F2(-+)	74627	6945	0.283	3.07	6945	0.283	3.07	124008	9823	0.332	3.97
Ss-F3(-+)	81869	7993	0.270	2.89	7993	0.270	2.89	146181	11970	0.321	3.73
Ss-N1(-+)	65408	9753	0.176	2.06	9753	0.176	2.06	132590	12109	0.288	3.15



## 2.2 検討結果

表 2-3 に地震動毎に組合せ係数法を適用して算出した最大接地圧 (①), ①のうち全ての地震動の中での最大接地圧 (②), 時刻歴和による接地圧の最大値 (③), 接地圧の最大値の比 (①/③及び②/③) を示す。

組合せ係数法を適用して算出した接地圧の最大値 (②) が, 時刻歴和による接地圧の最大値 (③) よりも大きい値 (②/③が 1.0 以上) となっていることから, 基礎の評価における組合せ係数法の適用性を確認した。

表 2-3 最大接地圧の比較

(a) NS 断面

地震動	組合せ係数法による 最大接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )		③時刻歴接地圧の 最大値 (kN/m <sup>2</sup> )	最大接地圧の比 ①/③	最大接地圧の比 ②/③
	①地震動毎	②Ss最大値			
Ss-D1(++)	1387	1756	1344	1.032	1.307
Ss-D2(++)	1756	1756	1505	1.167	1.167
Ss-D3(++)	1206	1756	1171	1.030	1.500
Ss-F1(++)	1227	1756	1217	1.008	1.443
Ss-F2(++)	1197	1756	1186	1.009	1.481
Ss-F3(++)	1558	1756	1362	1.143	1.289
Ss-N1(++)	1152	1756	1163	0.990	1.510
Ss-D1(--)	1388	1756	1351	1.028	1.300
Ss-D2(--)	1606	1756	1533	1.048	1.145
Ss-D3(--)	1178	1756	1130	1.042	1.554
Ss-F1(--)	1194	1756	1177	1.015	1.492
Ss-F2(--)	1217	1756	1204	1.011	1.458
Ss-F3(--)	1238	1756	1276	0.971	1.377
Ss-N1(--)	1090	1756	1077	1.012	1.631

(b) EW 断面

地震動	組合せ係数法による 最大接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )		③時刻歴接地圧の 最大値 (kN/m <sup>2</sup> )	最大接地圧の比 ①/③	最大接地圧の比 ②/③
	①地震動毎	②Ss最大値			
Ss-D1(++)	1739	2228	1613	1.078	1.381
Ss-D2(++)	2228	2228	1913	1.165	1.165
Ss-D3(++)	1510	2228	1510	1.000	1.475
Ss-F1(++)	1257	2228	1252	1.005	1.780
Ss-F2(++)	1581	2228	1428	1.107	1.560
Ss-F3(++)	1729	2228	1575	1.097	1.414
Ss-N1(++)	1213	2228	1217	0.997	1.831
Ss-D1(--)	1669	2228	1645	1.015	1.355
Ss-D2(--)	1935	2228	1805	1.072	1.235
Ss-D3(--)	1480	2228	1479	1.001	1.507
Ss-F1(--)	1293	2228	1289	1.003	1.729
Ss-F2(--)	1545	2228	1409	1.097	1.581
Ss-F3(--)	1646	2228	1600	1.029	1.393
Ss-N1(--)	1237	2228	1215	1.018	1.833

### 2.3 考察

地震応答の時刻歴和による  $e/L$  は最大で 0.369 であるのに対し，組合せ係数法による  $e/L$  は最大で 0.548 ( $\geq 1/2$ ) と，接地率  $\eta$  の計算式の適用外となるケースも見られる。そのため，組合せ係数法で考慮する鉛直力を大きくして， $e/L$  を地震応答解析の時刻歴和の最大値と一致するように補正した。

補正した  $e/L$  に基づく組合せ係数法による接地圧と時刻歴和による偏心量  $e/L$  最大時の接地圧の評価結果を表 2-4 に示す。組合せ係数法による接地圧 (①)，時刻歴和による接地圧 (②)，接地圧の比 (①/②) を比較すると，全ての地震動において組合せ係数法による接地圧は時刻歴和による接地圧以上 (①/②が 1.0 以上) となり，基礎の評価において  $e/L$  を補正することの保守性が確認された。

表 2-4 接地圧の比較

(a) NS 断面

地震動	組合せ係数法 (補正後)		時刻歴和 偏心量最大時		接地圧の比 ①/②
	e'/L	①接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )	e/L	②接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )	
Ss-D1(++)	0.294	1387	0.294	1326	1.046
Ss-D2(++)	0.369	1756	0.369	1286	1.365
Ss-D3(++)	0.294	1202	0.294	1092	1.101
Ss-F1(++)	0.273	1227	0.273	1047	1.172
Ss-F2(++)	0.282	1197	0.282	1168	1.025
Ss-F3(++)	0.341	1558	0.341	1197	1.301
Ss-N1(++)	0.217	1147	0.217	985	1.165
Ss-D1(--)	0.296	1388	0.296	821	1.690
Ss-D2(--)	0.314	1606	0.314	1301	1.235
Ss-D3(--)	0.260	1111	0.260	960	1.157
Ss-F1(--)	0.271	1177	0.271	1177	1.000
Ss-F2(--)	0.269	1209	0.269	1102	1.098
Ss-F3(--)	0.295	1238	0.295	1123	1.103
Ss-N1(--)	0.217	1061	0.217	887	1.195

(b) EW 断面

地震動	組合せ係数法 (補正後)		時刻歴和 偏心量最大時		接地圧の比 ①/②
	e'/L	①接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )	e/L	②接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )	
Ss-D1(++)	0.326	1739	0.326	638	2.723
Ss-D2(++)	0.360	2228	0.360	1652	1.349
Ss-D3(++)	0.314	1510	0.314	1510	1.000
Ss-F1(++)	0.271	1257	0.271	1005	1.251
Ss-F2(++)	0.347	1581	0.347	934	1.692
Ss-F3(++)	0.324	1729	0.324	1444	1.197
Ss-N1(++)	0.279	1213	0.279	904	1.342
Ss-D1(--)	0.312	1669	0.312	664	2.514
Ss-D2(--)	0.323	1935	0.323	1370	1.412
Ss-D3(--)	0.296	1480	0.296	1235	1.198
Ss-F1(--)	0.265	1293	0.265	1102	1.173
Ss-F2(--)	0.332	1545	0.332	1027	1.504
Ss-F3(--)	0.321	1646	0.321	1176	1.400
Ss-N1(--)	0.288	1237	0.288	1003	1.233

別紙 8 排気筒基礎の最大接地圧について

## 目次

1. 概要..... 別紙 8-1
2. 接地圧..... 別紙 8-2

## 1. 概要

本資料は、排気筒基礎の基準地震動  $S_s$  による地震力（以下「 $S_s$  地震時」という。）に対する接地圧を示すものである。

## 2. 接地圧

S<sub>s</sub>地震時の最大接地圧が、地盤の極限支持力度（11400kN/m<sup>2</sup>）を超えないことを確認する。

基本ケースの接地圧を表 2-1～表 2-4 に、地盤物性及び材料物性の不確かさを考慮したケースの最大接地圧を表 2-5 に示す。S<sub>s</sub>地震時の最大接地圧は 4170kN/m<sup>2</sup>であることから、地盤の極限支持力度を超えないことを確認した。

表 2-1 S<sub>s</sub>地震時の接地圧（基本ケース（++），NS 断面）

基準地震動 S <sub>s</sub>	鉛直力 N（×10 <sup>4</sup> kN）	転倒モーメント M（×10 <sup>5</sup> kN・m）	最大接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )
S <sub>s</sub> -D 1	2.59	1.82	2550
S <sub>s</sub> -D 2	2.59	1.84	2870
S <sub>s</sub> -D 3	2.66	1.58	2450
S <sub>s</sub> -F 1	2.30	1.65	2250
S <sub>s</sub> -F 2	2.15	1.59	2280
S <sub>s</sub> -F 3	2.77	1.83	2650
S <sub>s</sub> -N 1	2.26	1.53	2120

表 2-2 S<sub>s</sub>地震時の接地圧（基本ケース（++），EW 断面）

基準地震動 S <sub>s</sub>	鉛直力 N（×10 <sup>4</sup> kN）	転倒モーメント M（×10 <sup>5</sup> kN・m）	最大接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )
S <sub>s</sub> -D 1	2.55	2.14	3530
S <sub>s</sub> -D 2	2.71	2.44	3960
S <sub>s</sub> -D 3	2.71	1.91	3020
S <sub>s</sub> -F 1	2.28	1.69	2830
S <sub>s</sub> -F 2	2.17	1.82	2820
S <sub>s</sub> -F 3	2.53	2.13	3410
S <sub>s</sub> -N 1	2.30	1.62	2380



表 2-3 S<sub>s</sub>地震時の接地圧 (基本ケース (-+), NS 断面)

基準地震動 S <sub>s</sub>	鉛直力 N (×10 <sup>4</sup> kN)	転倒モーメント M (×10 <sup>5</sup> kN・m)	最大接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )
S <sub>s</sub> -D 1	2.62	1.82	2840
S <sub>s</sub> -D 2	2.66	2.03	3260
S <sub>s</sub> -D 3	2.78	1.50	2290
S <sub>s</sub> -F 1	2.44	1.58	2290
S <sub>s</sub> -F 2	2.26	1.63	2380
S <sub>s</sub> -F 3	2.43	1.62	2860
S <sub>s</sub> -N 1	2.26	1.41	1780

表 2-4 S<sub>s</sub>地震時の接地圧 (基本ケース (-+), EW 断面)

基準地震動 S <sub>s</sub>	鉛直力 N (×10 <sup>4</sup> kN)	転倒モーメント M (×10 <sup>5</sup> kN・m)	最大接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )
S <sub>s</sub> -D 1	2.65	2.12	3290
S <sub>s</sub> -D 2	2.77	2.39	4170
S <sub>s</sub> -D 3	2.76	1.94	3110
S <sub>s</sub> -F 1	2.31	1.74	2770
S <sub>s</sub> -F 2	2.20	1.87	2850
S <sub>s</sub> -F 3	2.43	2.05	3280
S <sub>s</sub> -N 1	2.27	1.64	2300

表 2-5 S<sub>s</sub>地震時の接地圧 (ばらつきケース, S<sub>s</sub>-D2 (-+), EW断面)

解析ケース	鉛直力 N (×10 <sup>4</sup> kN)	転倒モーメント M (×10 <sup>5</sup> kN・m)	最大接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )
ケース②	2.75	2.40	4160
ケース③	2.78	2.16	3700