

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 補足-026-4 改3
提出年月日	2020年7月8日

廃棄物処理建屋の耐震性についての計算書に関する補足説明資料

2020年7月

東京電力ホールディングス株式会社

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

V-2-2-12「廃棄物処理建屋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。

別紙 1 応力解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

別紙 2 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 3 地震荷重の入力方法

別紙 4 応力解析における断面の評価部位の選定

別紙 5 応力解析における応力平均化の考え方

別紙 6 水平・鉛直を分離した解析について

下線：今回ご提示資料

別紙 3 地震荷重の入力方法

目 次

1. 概要 別紙 3-1
2. 地震荷重の入力方法 別紙 3-2

1. 概要

本資料は、廃棄物処理建屋基礎スラブ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. 地震荷重の入力方法

廃棄物処理建屋基礎スラブの応力解析に当たっては、FEM モデルに入力する地震荷重として、水平地震力及び鉛直地震力を考慮する。なお、FEM モデルについては、評価対象である基礎スラブに加え、基礎スラブに作用する上部構造物からの地震時反力を適切に評価するため、建屋全体をモデル化している。

地震荷重の入力は、基準地震動 S_s に対する地震応答解析結果を考慮し、FEM モデルに入力する最大応答せん断力、最大応答曲げモーメント及び最大応答軸力により算定した水平地震力及び鉛直地震力が、質点位置で地震応答解析結果と等価になるように設定する。

具体的には、FEM モデルに入力する水平地震力については、地震応答解析により求まる各層の最大応答せん断力に基づく水平力を、地震応答解析モデルの質点が支配する領域の床スラブに分配した面荷重として入力する。

曲げモーメントについては、地震応答解析により求まる各質点の最大応答曲げモーメントと FEM モデルに作用した水平力により発生する曲げモーメントの差分（以下「付加曲げモーメント」という。）を、地震応答解析モデルの質点が支配する領域の床スラブに偶力として分配した節点力として入力する。

鉛直地震力については、地震応答解析により求まる基礎底面地盤ばねの最大応答軸力から、地震時の鉛直震度を求め、FEM モデルの常時の鉛直荷重に荷重係数として乗じる。なお、常時の鉛直荷重は単位体積重量、面荷重として入力する。また、表 1-1 に示すとおり、誘発上下動を考慮しない組合せ係数法により求めた接地圧は、水平・鉛直同時入力解析により得られた時刻歴最大接地圧よりも大きな値を与えることから、基礎スラブの応力解析において誘発上下動を考慮しない組合せ係数法を採用することは、保守的な評価となる。なお、V-2-2-11「廃棄物処理建屋の地震応答計算書」に示すとおり、接地圧は誘発上下動を考慮するモデルを採用している NS 方向、 S_s-8 で最大となるため、表 1-1 には NS 方向、 S_s-8 による検討結果を示す。

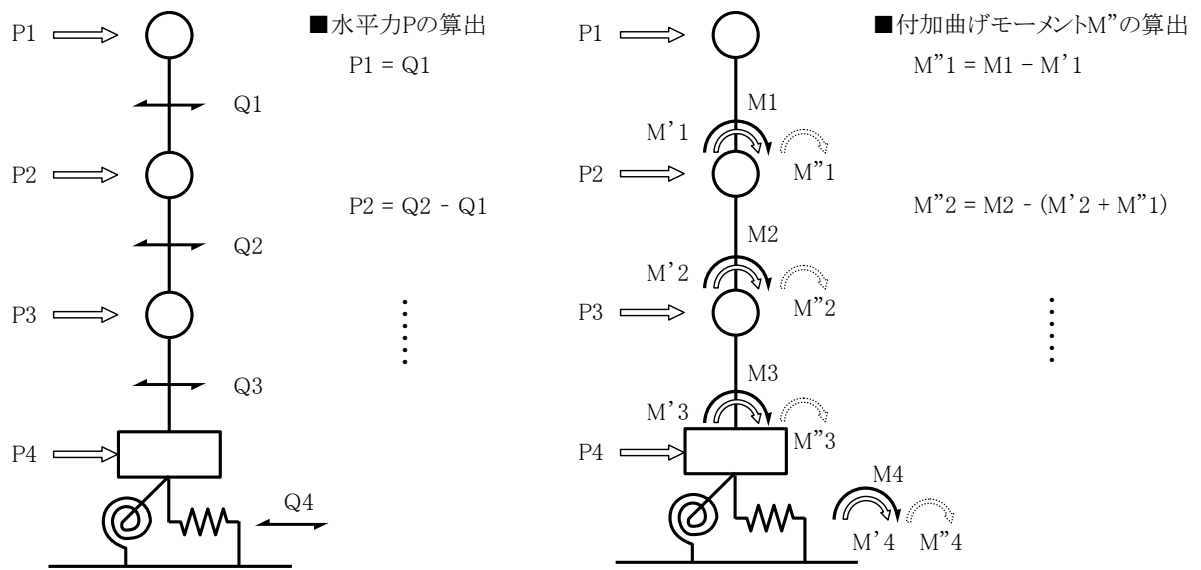
地震時増分土圧荷重については、加力側、支持側の地震時増分土圧の包絡値を、FEM モデルの土と接する地下外壁（西側）に面荷重として入力する。

FEM モデルに入力する地震荷重の概念図を図 2-1 に示す。FEM モデルに入力する水平地震力、付加曲げモーメント及び鉛直地震力並びに地震時増分土圧荷重の概要を図 2-2～図 2-7 に示す。

表 1-1 水平・鉛直同時入力解析による時刻歴最大接地圧と組合せ係数法による接地圧の比較

(NS 方向)		
(kN/m ²)		
基準地震動	組合せ係数法による接地圧 (誘発上下動を考慮しない)	水平・鉛直同時入力時 時刻歴最大接地圧*
S_s-8	3850	3230

注記*：廃棄物処理建屋の耐震性についての計算書に関する補足説明資料別紙 6「水平・鉛直を分離した解析について」より抜粋



- Q_i : 地震応答解析による最大応答せん断力
- M_i : 地震応答解析による最大応答曲げモーメント
- P_i : FEMに入力する水平力
- M'_i : FEMに入力した水平力により発生する曲げモーメント
- M''_i : FEMに入力する付加曲げモーメント
(最大応答曲げモーメントと水平力により発生する曲げモーメントの差分)

地震応答解析モデルが地盤3次元FEMモデルの場合、最大応答せん断力及び最大応答曲げモーメントは、次式で示す地盤ばね反力の最大値とする。

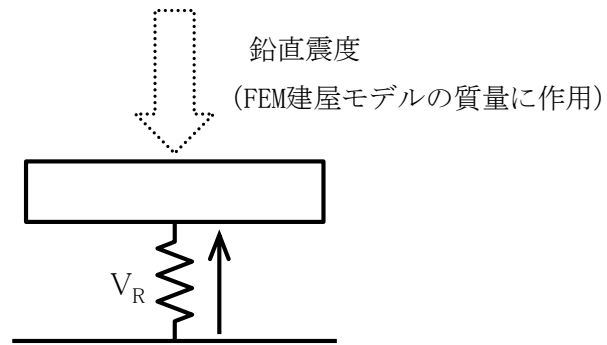
$$Q_s = Q_b + W_b \cdot a_b$$

$$M_s = M_b + I_b \cdot \theta_b$$

ここで、

- Q_s : 水平の地盤ばね反力
- Q_b : 基礎要素の応答せん断力
- W_b : 基礎下端質点の質量
- a_b : 基礎下端質点の水平応答加速度
- M_s : 回転の地盤ばね反力
- M_b : 基礎要素下端の応答曲げモーメント
- I_b : 基礎下端質点の回転慣性質量
- θ_b : 基礎下端質点の回転応答角加速度

図2-1 FEMモデルに入力する地震荷重の概念図（水平地震力）



V_R : 地震応答解析より設定した基礎スラブ底面に生じる軸力

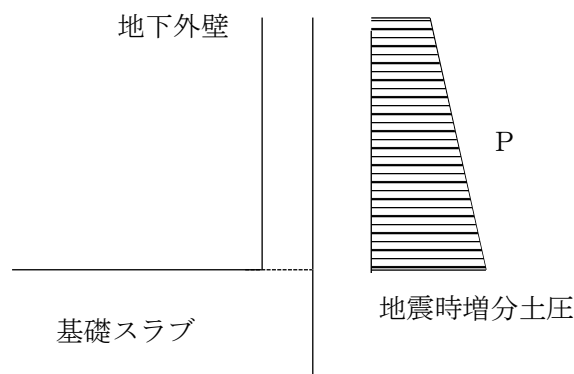
地震応答解析モデルが地盤 3 次元 FEM モデルの場合、最大応答軸力は、次式で示す地盤ばね反力の最大値とする。

$$V_s = V_b + W_b \cdot a_b$$

ここで、

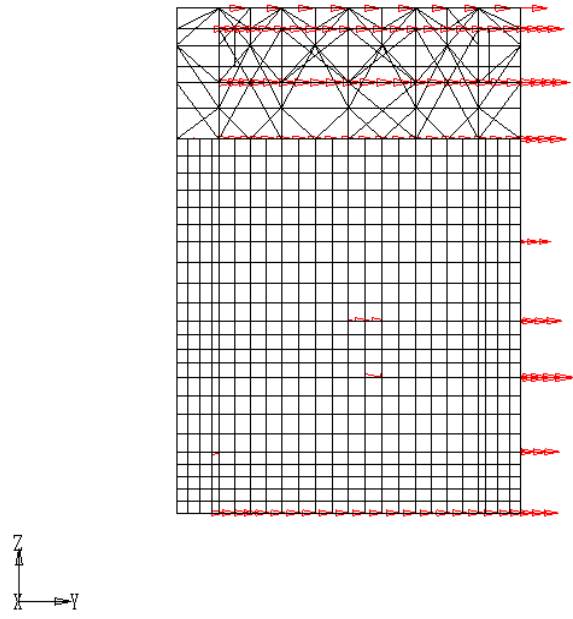
- V_s : 鉛直の地盤ばね反力
- V_b : 基礎要素の応答軸力
- W_b : 基礎下端質点の質量
- a_b : 基礎下端質点の鉛直応答加速度

図 2-1 FEM モデルに入力する地震荷重の概念図 (鉛直地震力)

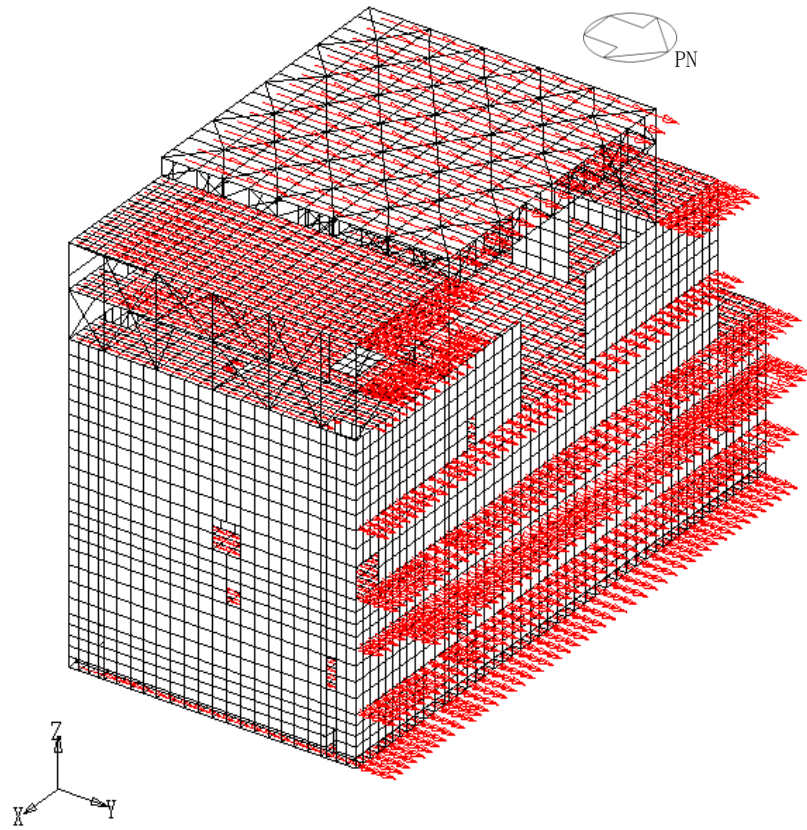


P : 地震時増分土圧

図 2-1 FEM モデルに入力する地震荷重の概念図 (地震時増分土圧)

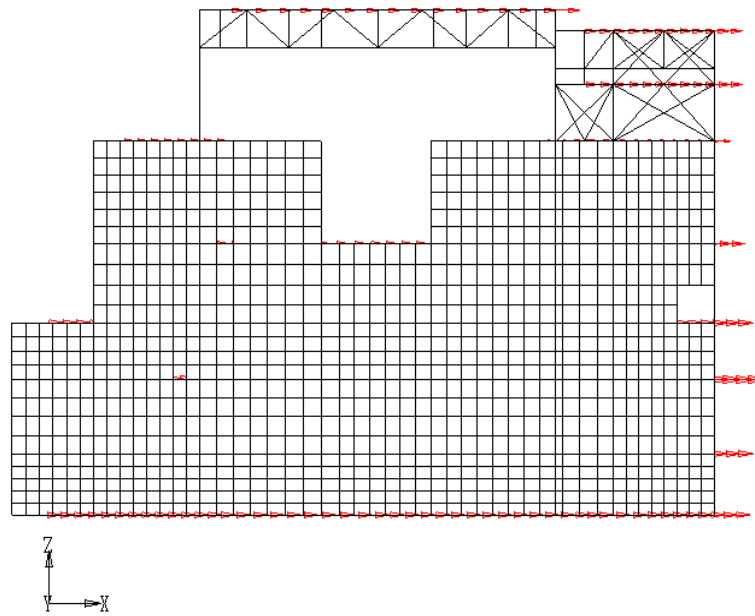


(a) 断面荷重図

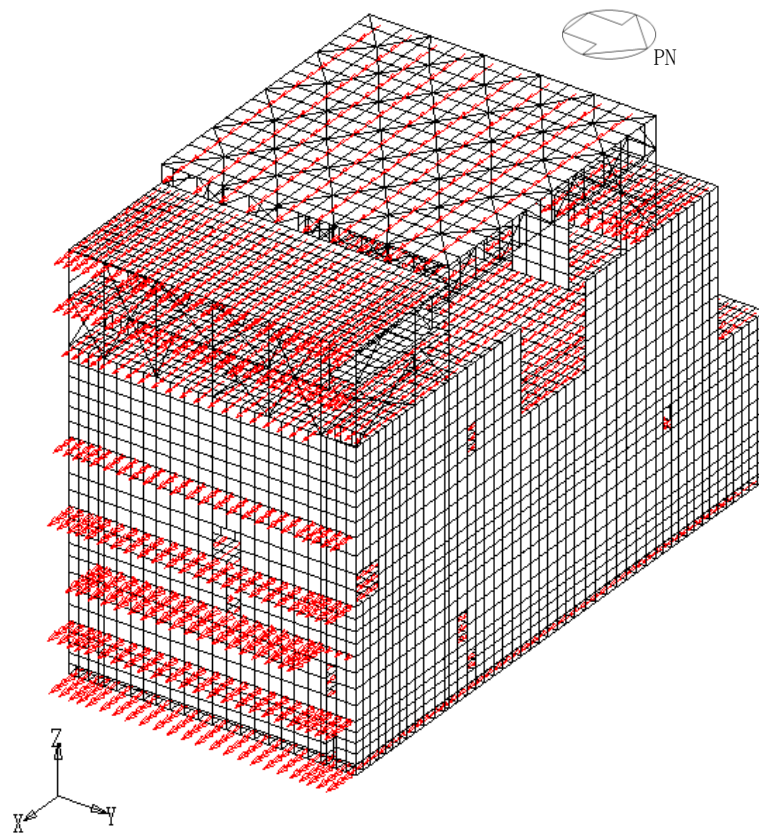


(b) 鳥瞰荷重図

図 2-2 FEM モデルに入力する水平地震力 (NS 方向)



(a) 断面荷重図



(b) 鳥瞰荷重図

図 2-3 FEM モデルに入力する水平地震力 (EW 方向)

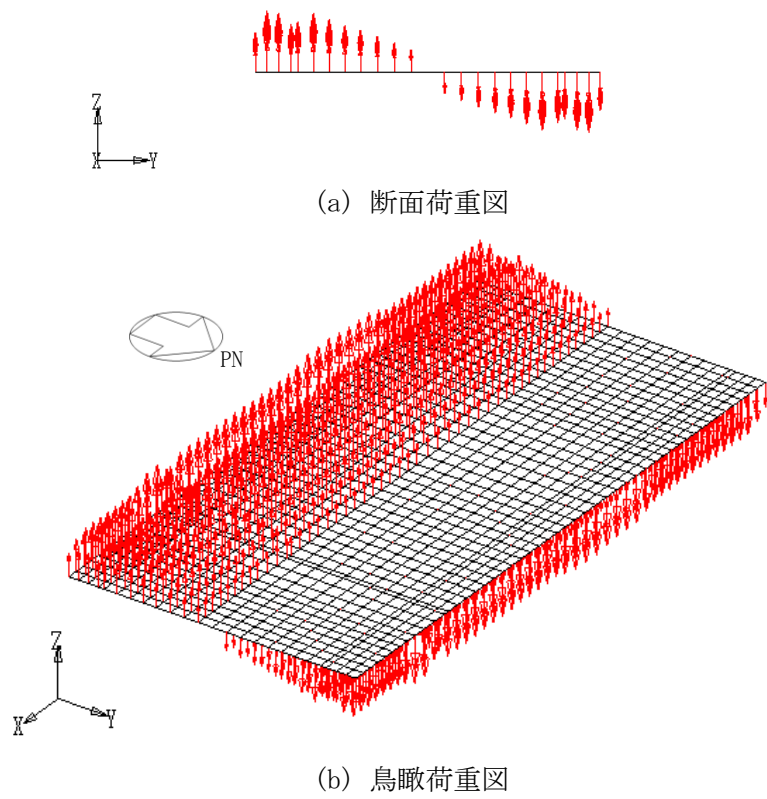


図 2-4 FEM モデルに入力する付加曲げモーメント (NS 方向)

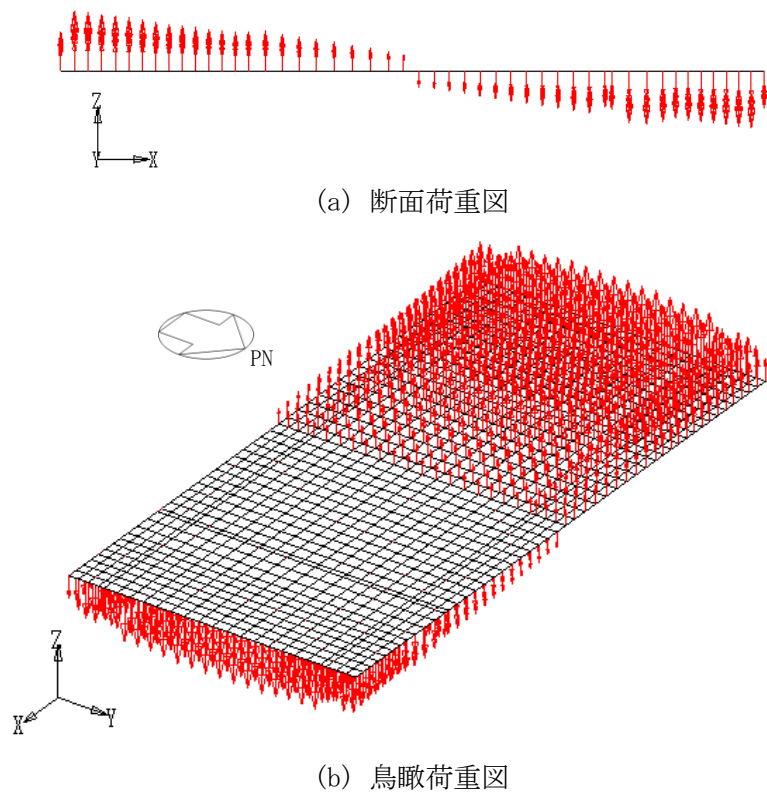
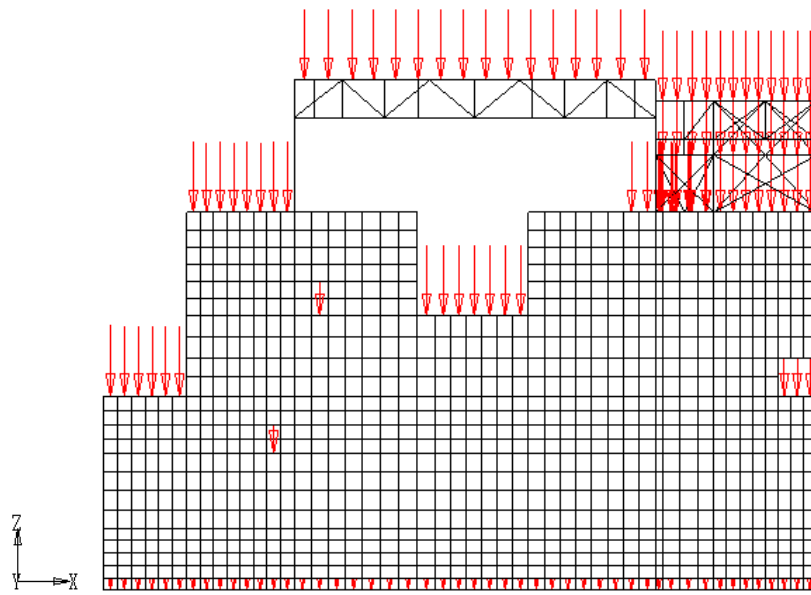
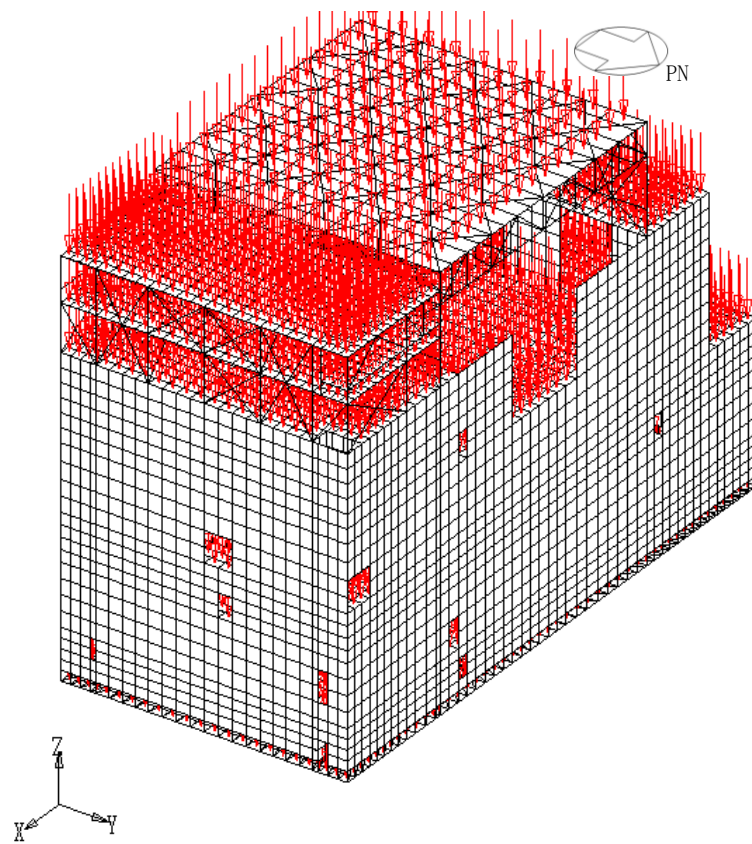


図 2-5 FEM モデルに入力する付加曲げモーメント (EW 方向)

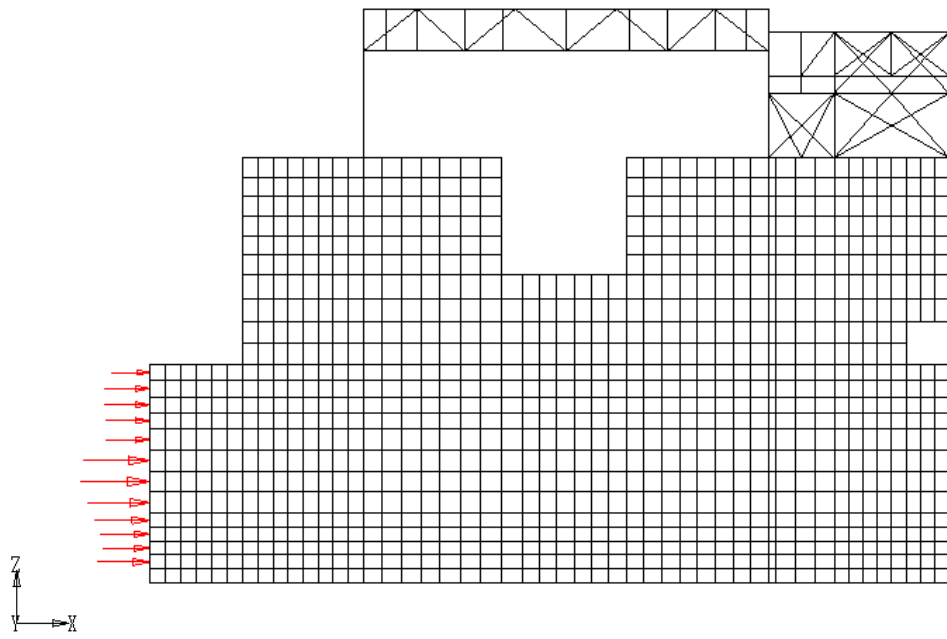


(a) 断面荷重図

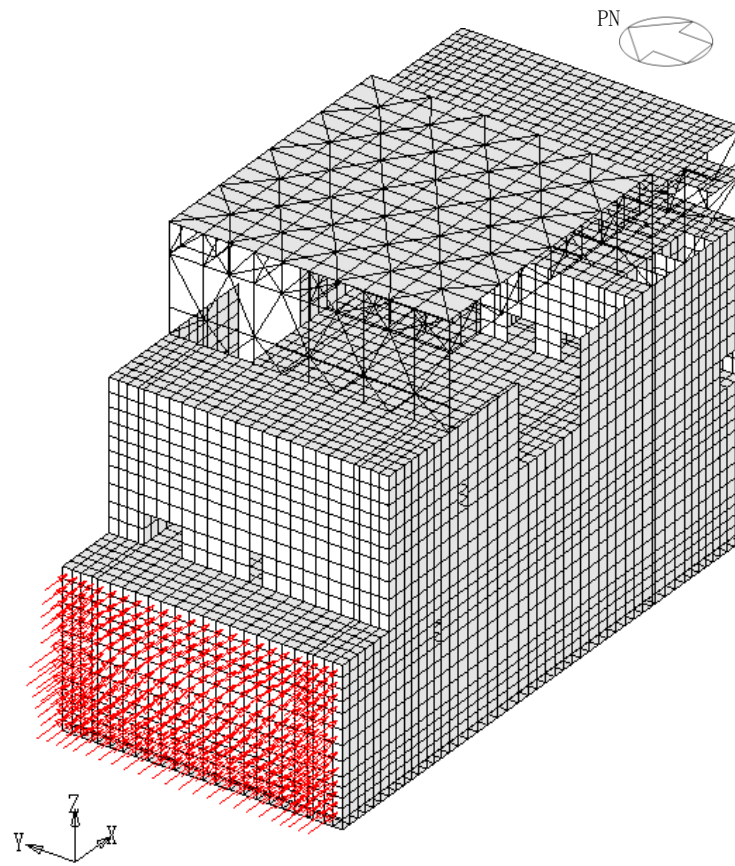


(b) 鳥瞰荷重図

図 2-6 FEM モデルに入力する鉛直地震力



(a) 断面荷重図



(b) 鳥瞰荷重図

図 2-7 FEM モデルに入力する地震時増分土圧荷重

別紙 6 水平・鉛直を分離した解析について

目 次

1. 概要	別紙 6-1
2. 水平・鉛直同時入力による地震応答解析に基づく接地率	別紙 6-3
2.1 解析モデル	別紙 6-5
2.2 入力地震動	別紙 6-6
2.3 接地率の比較	別紙 6-7
3. 組合せ係数法の検討	別紙 6-9
4. まとめ	別紙 6-11

1. 概要

水平方向の動的地震力と鉛直方向の動的地震力の算定に当たっては、それぞれ個別のモデルを用いて地震応答解析を行っている。また、V-2-2-12「廃棄物処理建屋の耐震性についての計算書」においては、基礎スラブの応力解析では水平方向の地震力に対して得られた基礎スラブ応力と鉛直方向の地震力に対して得られた基礎スラブ応力を個別に算定し、それらの応力を同時に不利な方向に作用させて組合せ応力を算定している。

本資料は、次の2点に着目した検討を行うことにより、基礎スラブの応力解析では水平方向と鉛直方向の地震荷重に対して、それぞれ分離して個別に解析できることを確認する。

- ①水平方向地震荷重に基づき算定した応力解析用モデルによる接地率は、水平・鉛直同時入力による動的解析で得られた時刻歴最小接地率と同等又は保守的な評価となることを確認する。これは、静的解析では水平地震荷重と鉛直地震荷重を同時に作用させると解けない解析が、動的解析では解けることを示すことになる。
- ②組合せ係数法による接地率は、水平・鉛直同時入力による動的解析で得られた時刻歴最大接地率と同等又は保守的な評価となることを確認する。

なお、①の検討の位置付けは、図 1-1 基礎スラブの応力解析における接地率に示すように、従来、水平方向の応答解析から得られた水平荷重 (M, Q) と鉛直方向の応答解析から得られた鉛直荷重 (N) を、適切な組み合わせにより基礎スラブの応力解析を行っていたものが、水平荷重だけによる応力解析でも水平・鉛直同時入力による接地率と同等又は保守的な接地率を与えることができることを示すものである。

一方、②の検討の位置付けは、接地率は基礎スラブに加わる地震力に対する反力に相当するため、接地率をみることで荷重の与え方の妥当性を確認するものである。

	従来の考え方	動的と静的な接地率の関係
動的解析	<p>水平方向 鉛直方向</p> <p>接地率：${}_1\eta_A$ 水平方向の応答解析 鉛直方向の応答解析</p>	<p>水平方向</p> <p>接地率：${}_2\eta_A$ 水平・鉛直同時入力への応答解析</p>
応力解析	<p>自重 - 0.4N</p> <p>接地率：${}_1\eta_B$ 水平・鉛直同時加力による静的解析</p>	<p>自重</p> <p>接地率：${}_2\eta_B$ 水平加力による静的解析</p>
	<p>上向きの鉛直地震荷重の場合は 動的解析よりも浮上りが大きくなり ${}_1\eta_B \leq {}_1\eta_A$となる したがって、上向きの鉛直地震荷重が 大きい場合は解析できないことがある</p>	<p>動的な鉛直地震荷重は 接地率には寄与しないため ${}_2\eta_B \leq {}_2\eta_A$となる したがって、接地率の評価時の応力解析で は鉛直地震荷重を考慮しなくても良い</p>

図 1-1 基礎スラブの応力解析における接地率

2. 水平・鉛直同時入力による地震応答解析に基づく接地率

廃棄物処理建屋の基準地震動 Ss に対する NS 方向の地震応答解析では、SR モデルを用いた解析で接地率が 50%以下になるケースがあるため、それらのケースに対しては地盤 3 次元 FEM モデルによる地震応答解析を行っている。表 2-1 に地震応答解析に採用した解析モデルを示す。ここでは、この地盤 3 次元 FEM モデルを用いて、水平・鉛直同時入力による地震応答解析を実施し、動的地震時の接地率評価を行う。この動的な接地率を水平方向地震荷重に基づき算定した応力解析用モデルによる接地率と比較する。接地率の比較フローを図 2-1 に示す。なお、地盤 3 次元 FEM モデルを用いた地震応答解析の接地率は、基礎底面のジョイント要素の支配面積に基づく接地面積の総和を基礎底面積で除した値とし、応力解析用モデルを用いた応力解析の接地率は、地盤ばね要素の接地面積を基礎底面積で除した値とする。

表 2-1 地震応答解析に採用した解析モデル

基本 ケース	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	Ss-6	Ss-7	Ss-8
NS 方向	③	②	③	①	①	①	①	③
EW 方向	①	①	①	①	①	①	①	①

凡例

- ①：誘発上下動を考慮しないモデル
(基礎浮上り非線形モデル)
- ②：誘発上下動を考慮するモデル
- ③：地盤 3 次元 FEM モデル

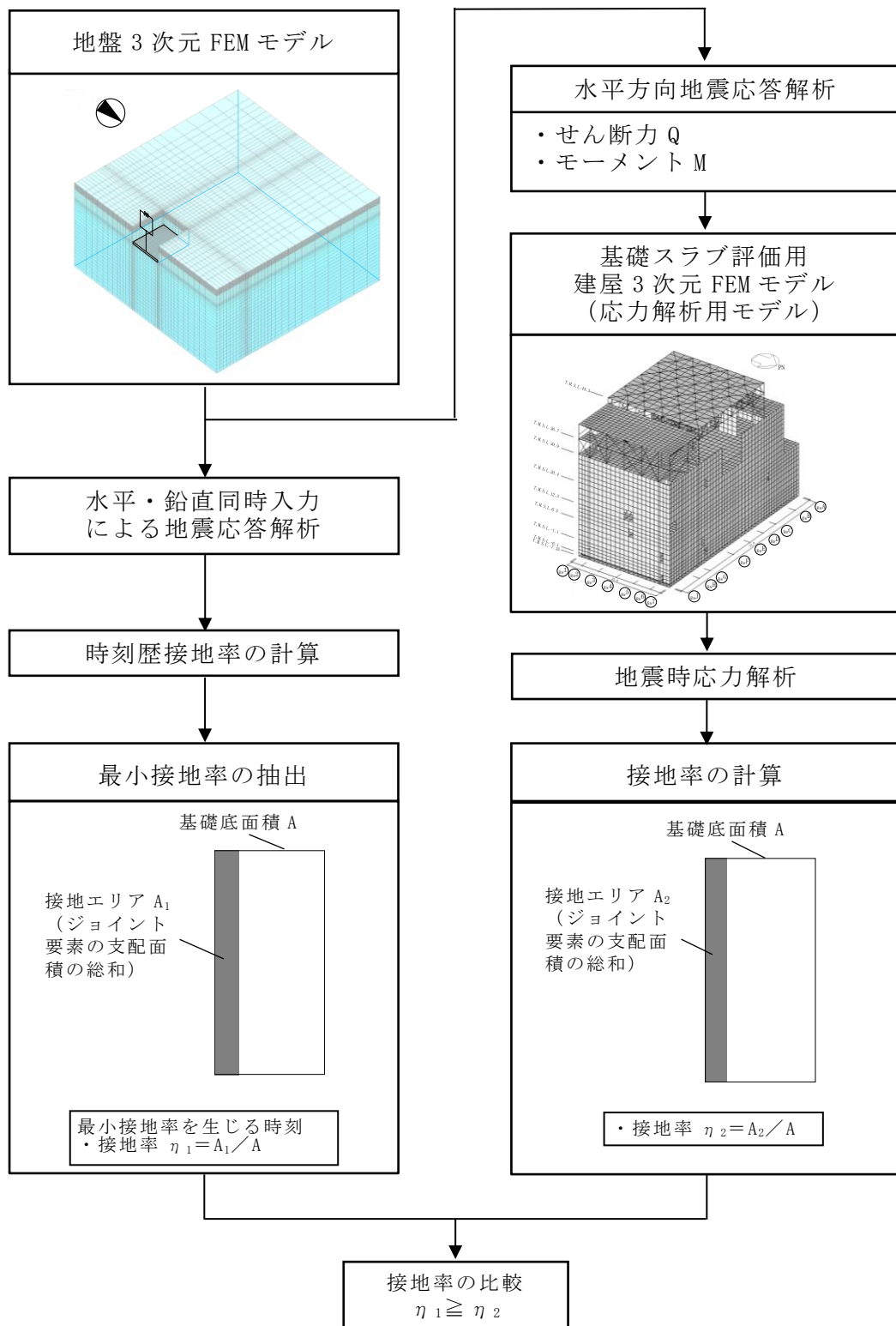


図 2-1 接地率の比較フロー

2.1 解析モデル

地盤 3 次元 FEM モデル (NS 方向) を図 2-2 に示す。建屋モデルの水平方向については、曲げ及びせん断剛性に対し非線形特性を考慮し、鉛直方向については、軸剛性に対し線形応答とする。

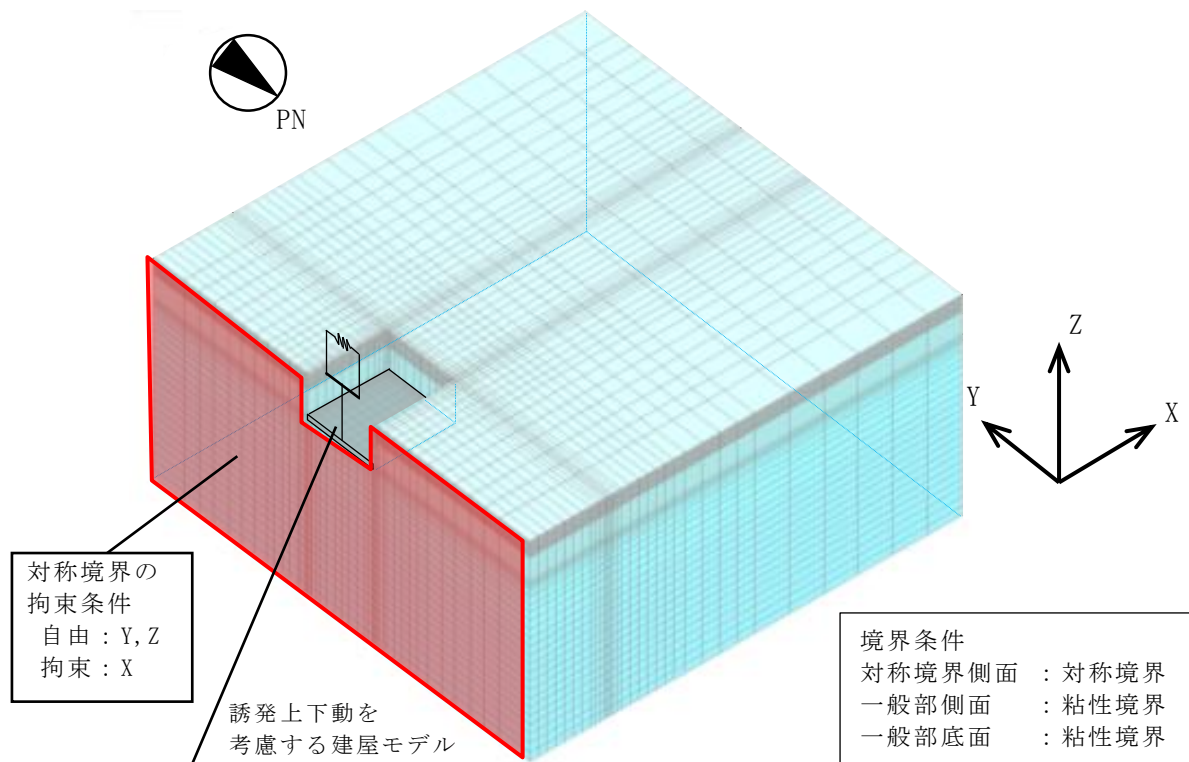


図 2-2 廃棄物処理建屋の地盤 3 次元 FEM モデルの地震応答解析モデル (NS 方向)

2.2 入力地震動

基準地震動 S_s に対する地震応答解析（基本ケース）により算定された接地率を表 2-2 に示す。この表に基づき接地率が最も小さい S_s -8 と 2 番目に小さい S_s -3 を代表として選出する。

表 2-2 基準地震動 S_s による地震応答解析結果に基づく接地率（NS 方向）*

基準地震動 S_s	最大接地圧 (kN/m^2)	最大転倒モーメント ($\times 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m}$)	最小接地率 (%)
S_s -1	2730	14.4	30.7
S_s -2	1380	10.7	62.7
S_s -3	3030	14.8	27.2
S_s -4	868	6.46	96.5
S_s -5	1080	8.81	77.0
S_s -6	890	6.78	93.9
S_s -7	947	7.51	87.8
S_s -8	4030	15.7	20.3

注記*：V-2-2-11「廃棄物処理建屋の地震応答計算書」より抜粋

2.3 接地率の比較

水平・鉛直同時入力による地震応答解析で得られた「時刻歴最小接地率」を生ずる時刻における接地面及び接地率と、基礎スラブ評価用建屋 3 次元 FEM モデルに水平地震力のみを与えた時の接地面及び接地率を比較して図 2-3 に示す。なお、基礎スラブ評価用建屋 3 次元 FEM モデルに生じる転倒モーメントは、表 2-2 の Ss-3, Ss-8 の最大転倒モーメントと一致する。図 2-3 によると、Ss-3 では時刻歴最小接地率 η_1 は 41.3%であるのに対し、基礎スラブ評価用建屋 3 次元 FEM モデルによる接地率 η_2 は 28.2%となっている。Ss-8 では時刻歴最小接地率 η_1 は 22.2%であるのに対し、基礎スラブ評価用建屋 3 次元 FEM モデルによる接地率 η_2 は 19.1%となっている。Ss-3, Ss-8 とともに η_2 の方が小さい評価結果となっている。

以上より、基礎スラブ評価用建屋 3 次元 FEM モデルに水平地震力のみを与えて求めた接地率は、保守的な評価となることを確認した。

なお、同じ鉛直荷重を考えた場合は、接地率が小さい方が接地圧が大きくなり基礎スラブの応力評価においては厳しい評価となるものと考えられる。上記の検討では鉛直動を考えていないため、鉛直動を考慮した検討については「3. 組合せ係数法の検討」において確認する。

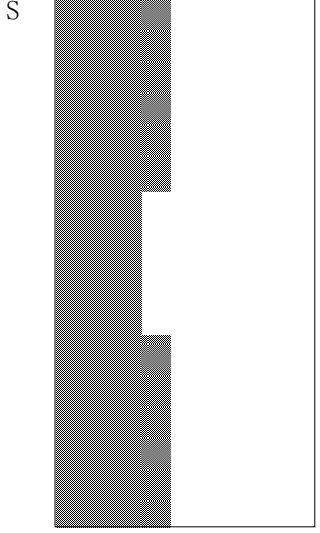
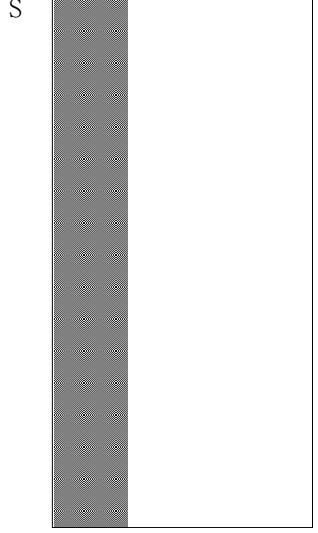
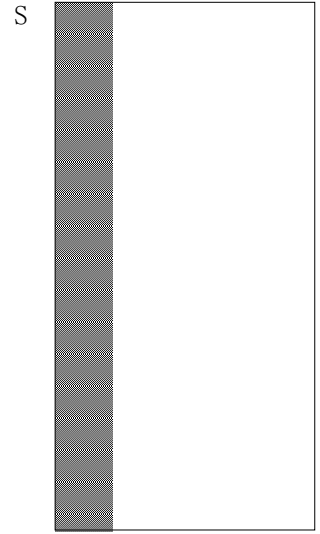
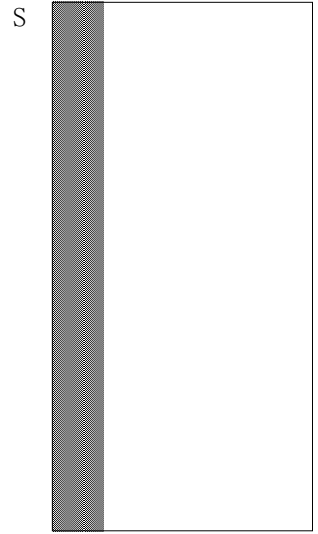
地震動	地盤 3 次元 FEM モデル 水平・鉛直同時入力による動的解析	建屋 3 次元 FEM モデル 水平荷重のみによる静的応力解析
Ss-3	 <div data-bbox="432 965 890 1048" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>最小接地率を生じる時刻 : 21.27 s ・ 接地率 η_1 : 41.3%</p> </div>	 <div data-bbox="978 965 1436 1048" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>加振方向 : S←N ・ 接地率 η_2 : 28.2%</p> </div>
Ss-8	 <div data-bbox="432 1659 890 1742" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>最小接地率を生じる時刻 : 8.08 s ・ 接地率 η_1 : 22.2%</p> </div>	 <div data-bbox="978 1659 1436 1742" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>加振方向 : S←N ・ 接地率 η_2 : 19.1%</p> </div>

図 2-3 接地面及び接地率の比較

3. 組合せ係数法の検討

廃棄物処理建屋の基礎スラブの応力解析では、水平地震荷重に対する応力と鉛直地震荷重による応力を別々に算定し、組合せ係数法を用いて応力解析を行っている。前章の検討によれば、基礎スラブ評価用建屋 3 次元 FEM モデルに水平地震力のみを与えて求めた接地率は、保守的な評価となることを確認したことから、この時の基礎応力も水平・鉛直同時入力時の応力よりも保守的な応力になっているものと考えられる。

しかし、地盤 3 次元 FEM 解析モデルでは直接的に基礎スラブ応力を評価することができないため、その代わりに接地圧を比較する。接地圧は基礎スラブに加わる地震力に対する反力に相当するため、接地圧をみることで応力評価の妥当性を判断することができる。

以上のことを踏まえて、図 3-1 組合せ係数法の検討フローに示すように接地圧評価における組合せ係数法の妥当性確認を行う。

水平・鉛直同時入力解析により得られた「時刻歴最大接地圧」と水平地震荷重に対する応力と鉛直地震荷重による応力を別々に算定し、組合せ係数法により求めた接地圧を比較して表 3-1 に示す。なお、水平・鉛直同時入力解析により得られた「時刻歴最大接地圧」は 3 次元地盤要素の接地圧の時刻歴における最大値とし、組合せ係数法により求めた接地圧は三角形の地盤反力分布を仮定し、自重と転倒モーメント及び鉛直地盤ばね反力をもとに組合せ係数法で合算した値とする。

表 3-1 より、Ss-3, Ss-8 とともに組合せ係数法により求めた接地圧は水平・鉛直同時入力解析により得られた時刻歴最大接地圧よりも大きな値を与えることから、基礎スラブの応力解析において組合せ係数法を採用することは保守的な評価となることを確認した。

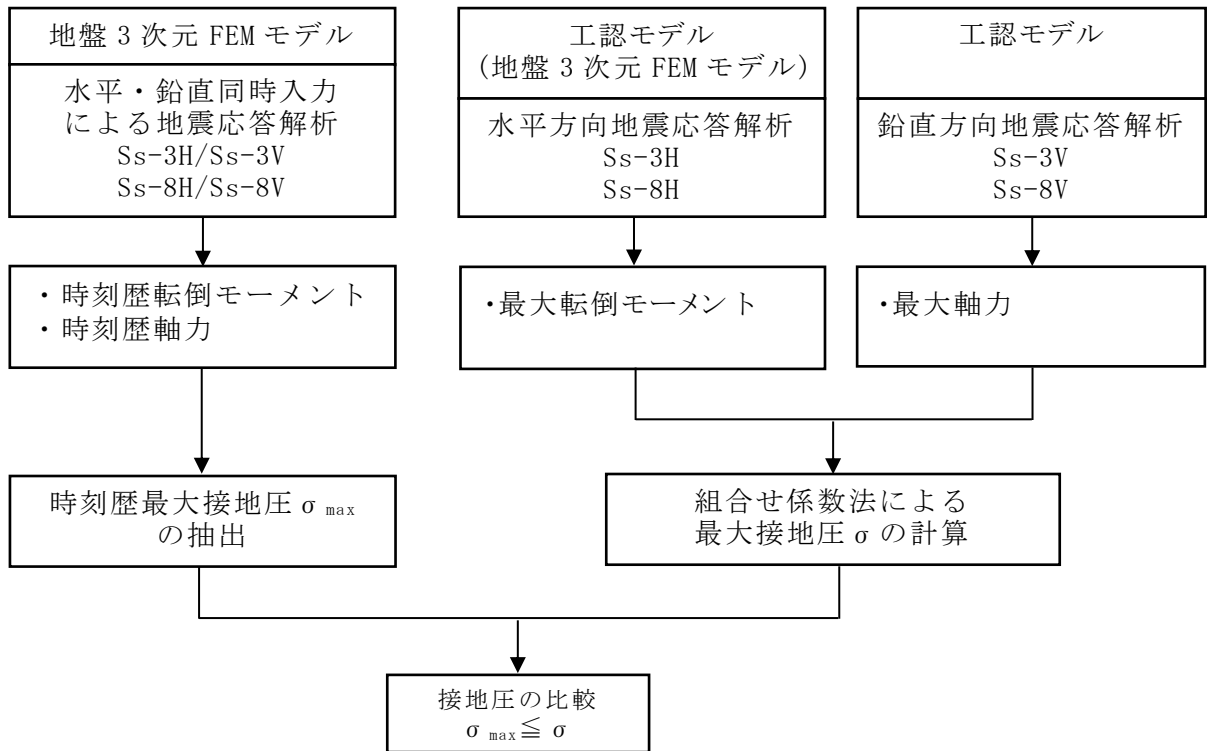


図 3-1 組合せ係数法の検討フロー

表 3-1 時刻歴最大接地圧と組合せ係数法による接地圧の比較

地震動	時刻歴最大接地圧	組合せ係数法による接地圧
	最大接地圧 (kN/m ²)	最大接地圧 (kN/m ²)
Ss-3	2630	3030
Ss-8	3230	4030

4. まとめ

地盤 3 次元 FEM モデルを用いて水平・鉛直同時入力による地震応答解析を行い，接地率の検討及び組合せ係数法の検討を行い，次のことを確認した。

- ①基礎スラブ評価用建屋 3 次元 FEM モデルに水平地震力のみを与えて求めた接地率は，水平・鉛直同時入力による動的解析で得られた時刻歴最小接地率と比べ，保守的な評価となる。併せて，静的解析では水平地震荷重と鉛直地震荷重を同時に作用させると解けない解析が，動的解析では解けることを確認した。
- ②基礎スラブの応力解析において組合せ係数法による接地圧は，水平・鉛直同時入力による動的解析で得られた時刻歴最大接地圧と比べ，保守的な評価となる。

以上のことから，廃棄物処理建屋の基礎スラブの応力評価において，水平荷重と鉛直荷重を別々に評価することは妥当であることを確認した。