

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-工-B-19-0102_改5
提出年月日	2021年11月8日

VI-2-2-29 第3号機海水熱交換器建屋の地震応答計算書

2021年11月
東北電力株式会社

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 解析方針	10
2.4 適用規格・基準等	12
3. 解析方法	13
3.1 設計に用いる地震波	13
3.2 地震応答解析モデル	21
3.2.1 水平方向	21
3.2.2 鉛直方向	35
3.3 解析方法	38
3.3.1 解析方法	38
3.3.2 必要保有水平耐力	39
3.4 解析条件	41
3.4.1 建物・構築物の復元力特性	41
3.4.2 地盤の回転ばねの復元力特性	48
3.4.3 誘発上下動を考慮する基礎浮上り評価法	49
3.4.4 材料物性の不確かさ	51
4. 解析結果	54
4.1 動的解析	54
4.1.1 基本ケースの地震応答解析結果	53
4.1.2 材料物性の不確かさを考慮したケースの地震応答解析結果	68
4.2 必要保有水平耐力	92

別紙 1 第 3 号機海水熱交換器建屋の弾性設計用地震動 S d - D 2 による地震応答解析結果について

 本日の説明範囲

3.2 地震応答解析モデル

地震応答解析モデルは、添付書類「VI-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に記載の解析モデルの設定方針に基づき、水平方向及び鉛直方向についてそれぞれ設定する。地震応答解析モデルの設定に用いた使用材料の物性値を表 3-2 に示す。

表 3-2 使用材料の物性値

使用材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断 弾性係数 G (N/mm ²)	減衰定数 h (%)	備考
鉄筋コンクリート コンクリート： F _c = 32.4 (N/mm ²) (F _c = 330 (kgf/cm ²)) 鉄筋：SD345	2.65 × 10 ⁴	1.14 × 10 ⁴	5	

3.2.1 水平方向

(1) 地震応答解析モデル

水平方向の地震応答解析モデルは、建屋を曲げ変形とせん断変形をする耐震壁部からなる質点系モデルとし、地盤を等価なばねで評価した建屋－地盤連成モデルとする。

水平方向の地震応答解析モデルについては、図 3-4 のフローに示すとおり、「原子力発電所耐震設計技術規程（J E A C 4 6 0 1 -2015）」の基礎浮上りの評価法を参考に、応答のレベルに応じて 3 種類の地震応答解析モデルを用いる。地震応答解析モデル及び諸元を図 3-5 に示す。図 3-5 (a)に誘発上下動を考慮しない場合の地震応答解析モデル、図 3-5 (b)に誘発上下動を考慮する場合の地震応答解析モデル、図 3-5 (c)に地盤を 3 次元 FEM でモデル化した場合の 3 次元 FEM 地盤モデルを示す。

このうち、図 3-5 (b)に示す誘発上下動を考慮する場合のモデルは、水平加振により励起される上下応答を評価するために、後述の鉛直方向の地震応答解析モデルの諸元（図 3-10）及び接地率に応じて変化する回転・鉛直連成ばねについても考慮している。

図 3-5 (c)のモデルは、地盤を 3 次元 FEM でモデル化し、地盤－建屋の一体モデルとしている。地盤は、表 3-5 の物性値を用いた水平成層地盤とし、モデル化にあたっては対称性を考慮して 1/2 のモデルを用いる。対称境界の拘束条件は、図 3-5(c)に示すとおり、X 方向及び Z 方向には自由度を持つが、対称境界面と直交する Y 方向は拘束している。建屋側方の地盤については、図 3-5 (a)及び(b)のモデルと同様に考慮しない。また、基礎スラブは基礎下端レベルに設定した仮想節点を多点拘束することで剛板を表現し、仮想節点と地盤節点をジョイント要素で接続することで接触・剥離を表現する。なお、建屋については、水平と鉛直の自由度を設定することで図 3-5(b)のモデルと同様に誘発上下動を考慮する。

なお、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震等の地震やコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ等に伴う初期剛性の低下について、観測記録を用いた検討により確認したことから解析モデルに考慮する。復元力特性の設定にあたっては、地震やコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ等の要因は初期剛性及びその後の剛性を低下させるが、機能維持限界耐力及び終局耐力は既工認の復元力特性の各耐力を上回っていることを試験等により確認したことから、この復元力特性に初期剛性低下を反映して適用する。耐震壁の初期剛性の設計値に対する補正係数を表 3-3 に示す。

(2) 地盤ばね・地盤モデル

図 3-5(a)及び図 3-5(b)のモデルについては、基礎版底面下の地盤は、水平方向の地震応答解析モデルにおいては水平ばね及び回転ばねで置換している。この水平ばね及び回転ばねは、「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」により、基礎版底面下の地盤を等価な半無限地盤と見なして、振動アドミタンス理論に基づいて評価している。いずれのばねも振動数に依存した複素剛性として表現されるが、図 3-6 に示すようにばね定数として、実部の静的な値(K_0)を、また、減衰係数(C_0)として、建屋-地盤連成モデルの 1 次固有円振動数(ω_1)に対応する虚部の値と原点を結ぶ直線の傾きを採用することにより近似する。このうち、回転ばねには、基礎浮上りによる幾何学的非線形性を考慮する。基礎底面ばねの評価には解析コード「ADMITHF」を用いる。評価に用いる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。地盤ばね定数及び減衰係数を表 3-4 に、地盤モデルの物性値を表 3-5 に示す。

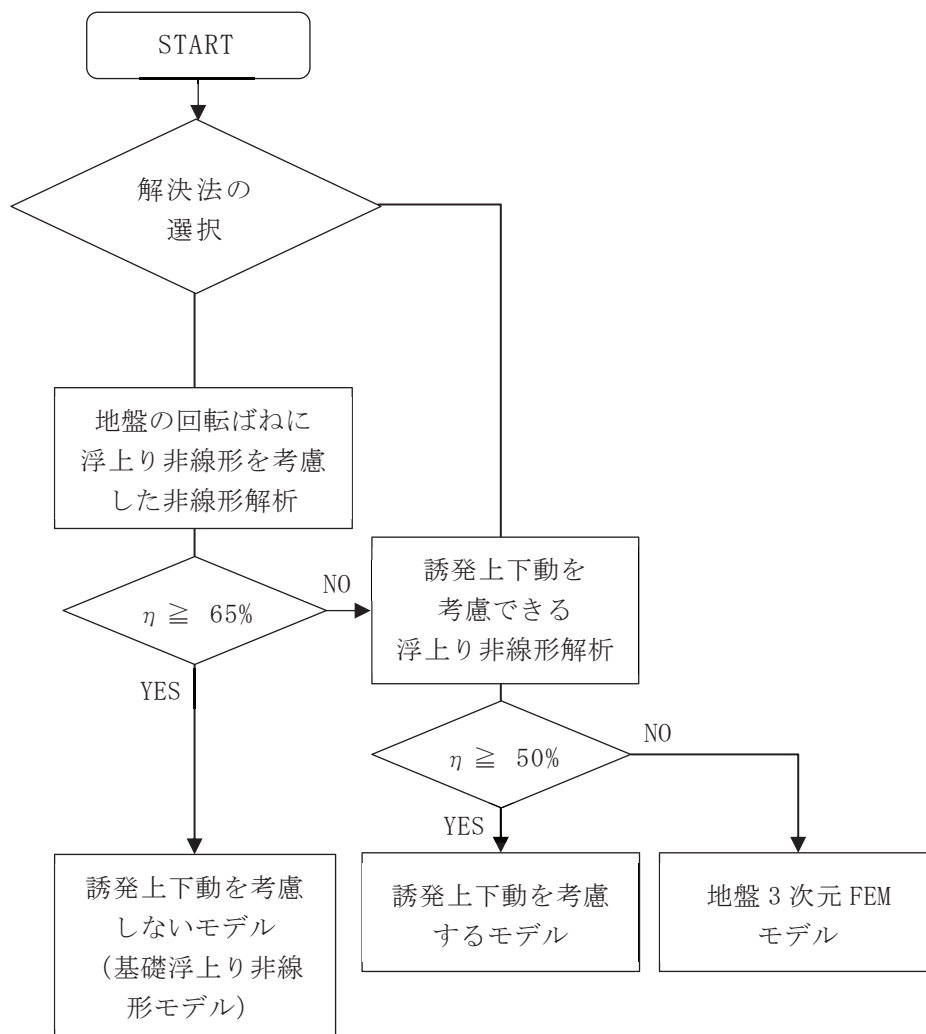
図 3-5(c)の地盤 3 次元 FEM モデルについては、基礎底面下の地盤の剛性及び減衰をソリッド要素並びに FEM 地盤モデルの側面及び底面の粘性境界で表現している。また、基礎底面と地盤の各節点の間にはジョイント要素を設けることにより基礎の浮上りを評価する。基礎底面のジョイント要素のばね定数は、解析上不安定な挙動を起こさない程度に十分大きい値とする。

(3) 入力地震動

地震応答解析モデルへの入力地震動は、解放基盤表面レベルで定義される基準地震動 S_s から以下の手順で算定する。図 3-5(a)及び図 3-5(b)のモデルについては、まず、解放基盤表面相当以深の地盤を一次元地盤としてモデル化し、解析コード「SHAKE」を用いて一次元波動論に基づく評価により 0.P.-200m の入射波を算定する。次に、解析コード「mflow」を用いて、解析コード「SHAKE」により算定した 0.P.-200m の入射波を、表層地盤の非線形性を考慮した一次元地盤モデルに入力して逐次非線形解析を行い、建屋基礎底面での地盤の応答を評価して入力地震動とする。また、建屋基礎底面レベルにおけるせん断力(以下「補正水平力」という。)を入力地震動に付加することにより、地盤の切欠き効果を考慮する。表 3-4 に示す地盤モデルのうち表層地盤(0.P. 14.8m~0.P.-12.5m)には、地盤調査結果に基づき、初期せん断剛性 G_0 、 $G/G_0-\gamma$ 曲線及び $h-\gamma$ 曲線の非線形特性を設定した。 $G/G_0-\gamma$ 曲線及び $h-\gamma$ 曲線の非線形特性を図 3-7 及び図 3-8 に示す。図 3-9 に地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図を、設定した地盤定数に基づき算定した基礎底面位置(0.P.-12.5m)における入力地震動の加速度応答スペクトルを図 3-10 に示す。入力地震動の算定において、一次

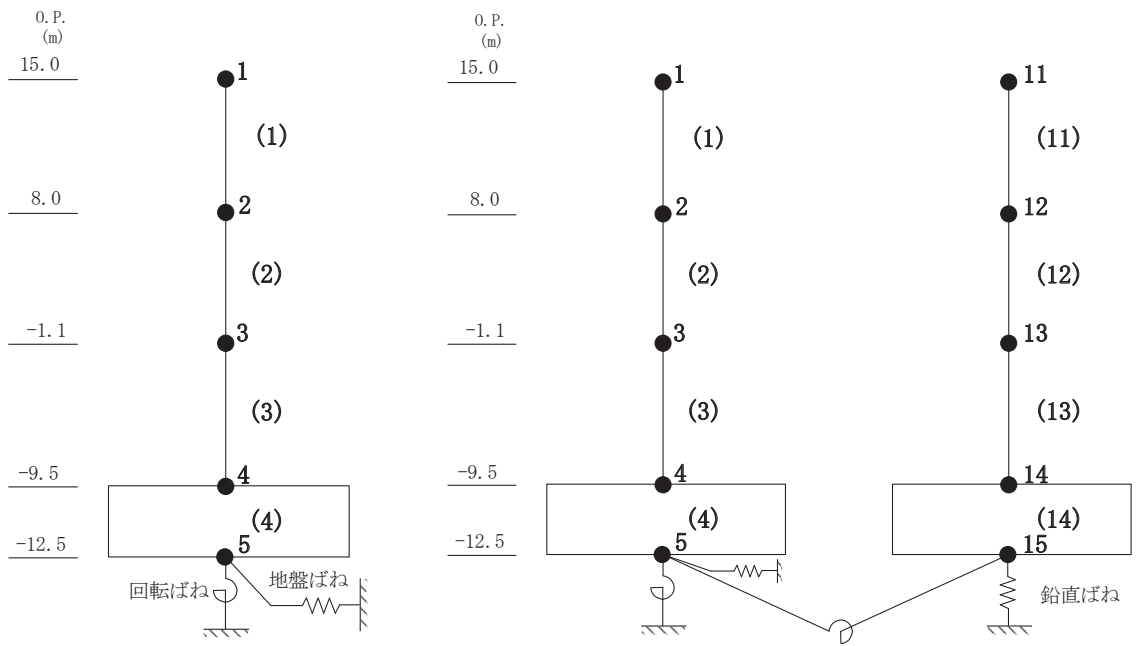
元波動論に基づく評価には解析コード「SHAKE」、逐次非線形解析には解析コード「mflow」を用いる。評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

また、図 3-5(c)のモデルについては、地盤を 3 次元 FEM でモデル化していることから、基礎底面レベルにおける地盤の応答が上記入力地震動と一致するように補正した地震動をモデル底面に入力する。図 3-11 に入力の補正方法を示す。



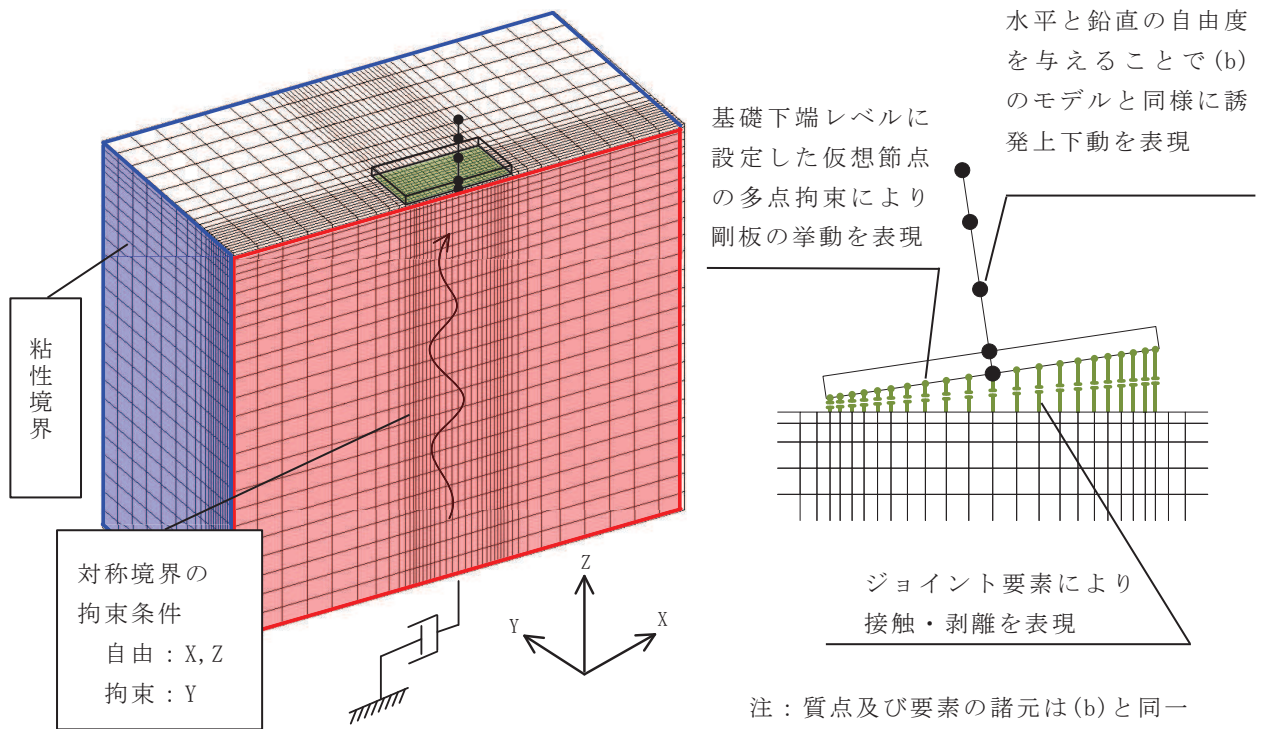
η : 接地率

図 3-4 解析モデルの選定フロー



(a) 誘発上下動を考慮しないモデル
($\eta \geq 65\%$)

(b) 誘発上下動を考慮するモデル
($65\% > \eta \geq 50\%$)



(c) 地盤 3次元 FEM モデル ($50\% > \eta$)

図 3-5(1) 地震応答解析モデル及び諸元 (1/2)

標高 O. P. (m)	質点 番号	質点重量 ($\times 10$ kN)	回転慣性重量 ($\times 10^6$ kN \cdot m ²)		要素 番号	せん断断面積 (m ²)		断面二次モーメント ($\times 10^3$ m ⁴)	
			NS方向	EW方向		NS方向	EW方向	NS方向	EW方向
15.0	1	6921	9.5	7.9					
					(1)	81.0	74.0	23.9	21.6
8.0	2	9209	12.6	10.6	(2)	97.2	103.6	30.4	28.8
-1.1	3	13497	18.6	15.6	(3)	143.5	103.6	42.6	28.8
-9.5	4	11687	18.5	15.7	(4)	1740.0	1740.0	274.4	232.0
-12.5	5	10980	17.4	14.7					

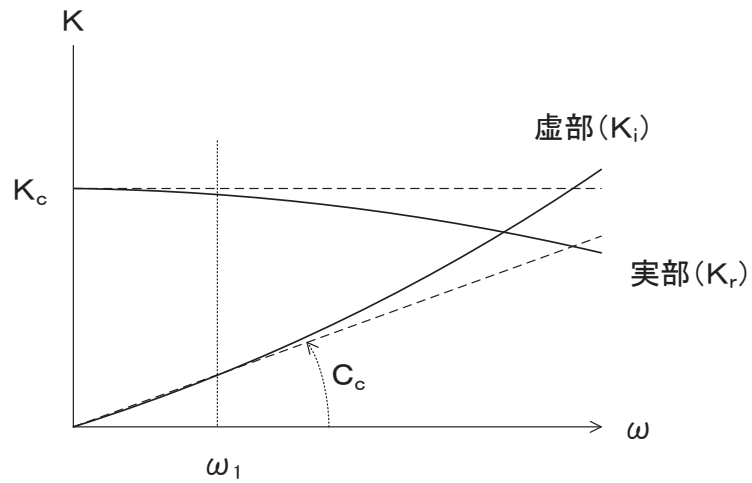
注：図 3-5 (b) 及び (c) の誘発上下を考慮するモデルにおける質点 11～15 及び要素 (11)～(14) の諸元は，図 3-12 における質点 1～5 及び要素 (1)～(4) の諸元に対応する。

(d) 諸元

図 3-5 (2) 地震応答解析モデル及び諸元 (2/2)

表 3-3 耐震壁の初期剛性の設計値に対する補正係数

方向	耐震壁の初期剛性の設計値に対する補正係数
NS	0.80
EW	0.80



ばね定数：底面ばねは 0Hz のばね定数 K_c で定数化

減衰係数：建屋—地盤連成系の 1 次固有円振動数 ω_1 に対応する虚部の値と原点とを結ぶ直線の傾き C_c で定数化

図 3-6 地盤ばねの定数化の概要

表 3-4 地盤ばね定数と減衰係数

(a)NS 方向

地盤ばね 成分	ばね定数 K_c	減衰係数 C_c
底面・水平	9.743×10^8 (kN/m)	6.764×10^6 (kN・s/m)
底面・回転	5.067×10^{11} (kN・m/rad)	4.207×10^8 (kN・m・s/rad)

(b)EW 方向

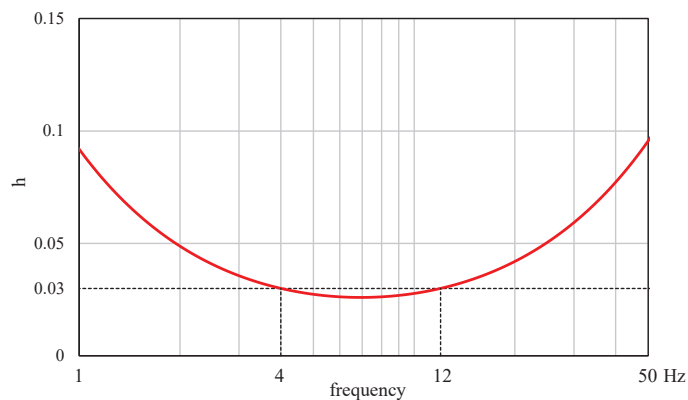
地盤ばね 成分	ばね定数 K_c	減衰係数 C_c
底面・水平	9.821×10^8 (kN/m)	6.870×10^6 (kN・s/m)
底面・回転	4.499×10^{11} (kN・m/rad)	2.948×10^8 (kN・m・s/rad)

表 3-5 第 3 号機海水熱交換器建屋の地震応答解析に用いる地盤モデルの地盤物性値

	地層レベル O.P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	減衰定数 ^{*2} h (%)
表層地盤	14.80	18.6	*1	3 ^{*3}
底面地盤	-12.50	26.1	1360	3
	-27.00	26.4	2040	3
	-50.00	26.5	2520	3
	-200.0	26.5	2520	3

注記*1：O.P. 14.8m～O.P. -12.5m は，上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期せん断剛性 G_0 を設定する。また，ひずみ依存による非線形特性を考慮する。地盤の応答解析においては 20 層に分割する。

*2：O.P. 14.8m～O.P. -12.5m の表層地盤の 1 次振動数及び 2 次振動数を基準として，レーリー減衰を 4Hz 及び 12Hz で設定する。



*3：ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

初期せん断剛性 G_0 は、PS 検層結果により次式で設定する。

$$G_0 = 1787 \cdot \sigma_c^{0.84} \quad (3.1)$$

ここで、

$$\sigma_c = Z \cdot \rho_t \cdot 2/3 \text{ (MN/m}^2\text{)}$$

Z : 深度 (m)

$$\rho_t = 18.6 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$G/G_0 - \gamma$ 曲線は、原位置せん断試験結果による強度定数と拘束圧から求めたせん断強度 τ_m と初期せん断剛性 G_0 から、基準ひずみ γ_m を算定し次式により求める。

$$G/G_0 = 1 / (1 + \gamma / \gamma_m) \quad (3.2)$$

ここで、

$$\gamma_m = \tau_m / G_0$$

$$\tau_m = \tau_0 + \sigma_m \cdot \tan \phi \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\tau_0 = 0.1 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\phi = 33.9 \text{ (}^\circ\text{)}$$

$$\sigma_m = 3/4 \cdot Z \cdot \rho_t \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$h - \gamma$ 曲線は、繰返し三軸試験結果に基づき次式により求める。

$$h = 0.183 \cdot \gamma / (\gamma + 0.000261) \quad (3.3)$$

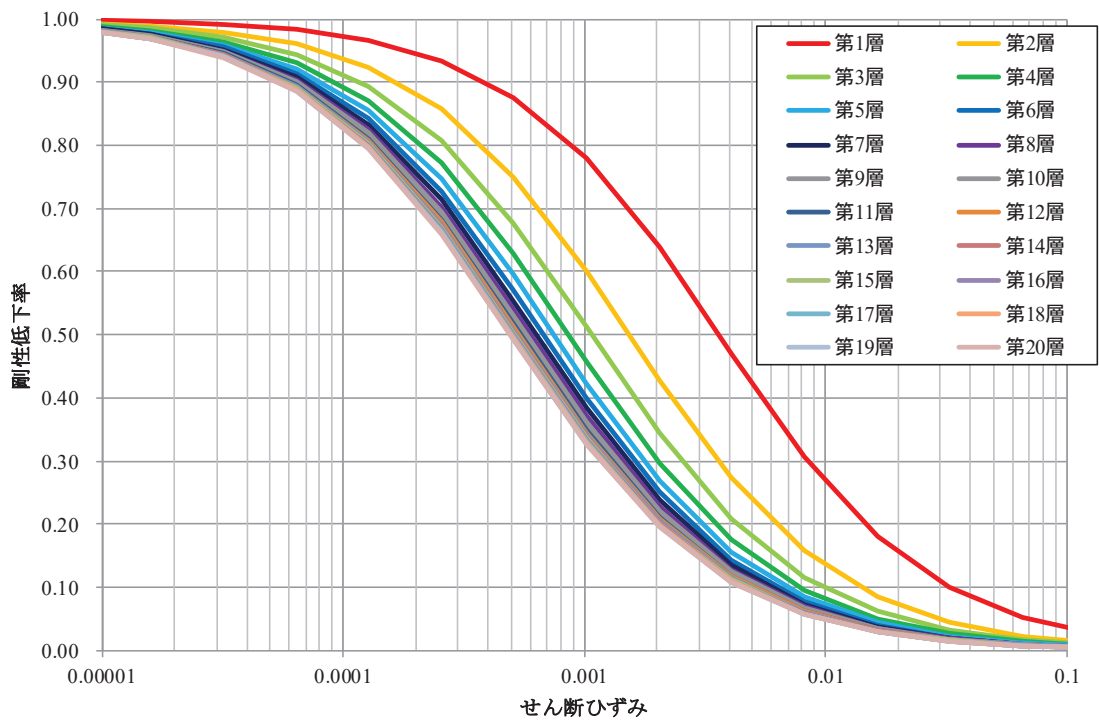


図 3-7 $G/G_0 - \gamma$ 曲線

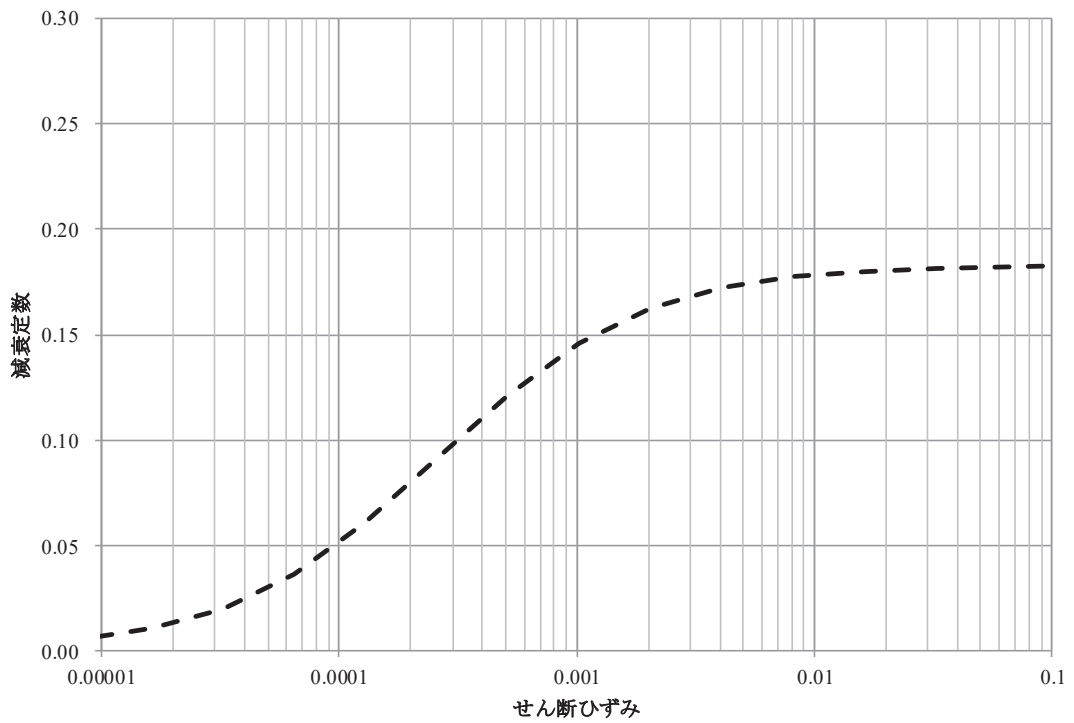


図 3-8 $h - \gamma$ 曲線

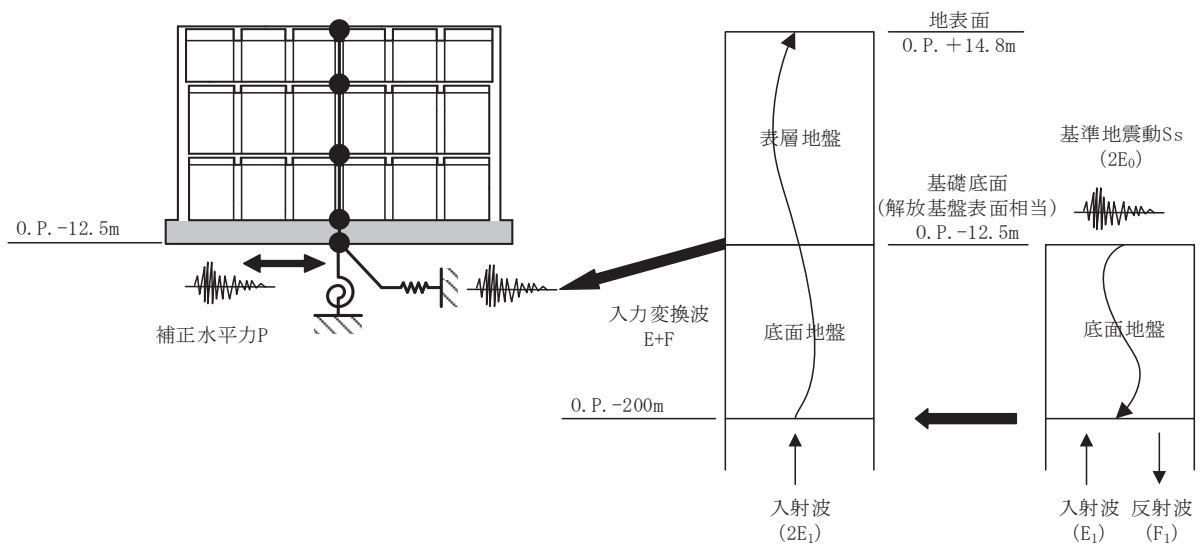


図 3-9 地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図 (水平方向)

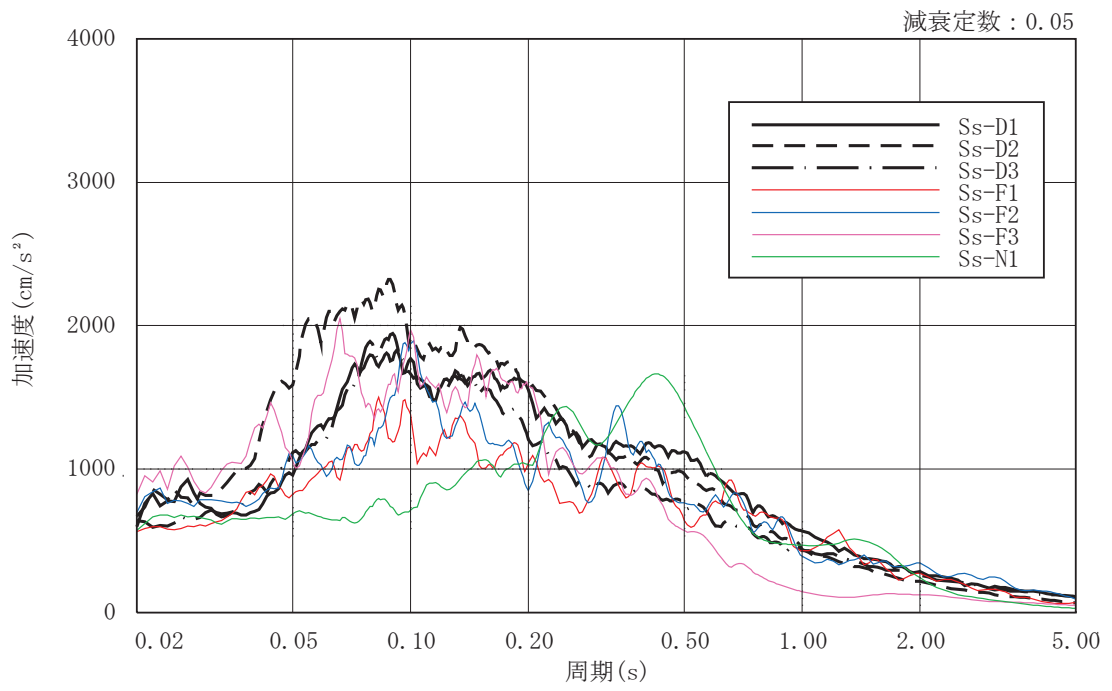
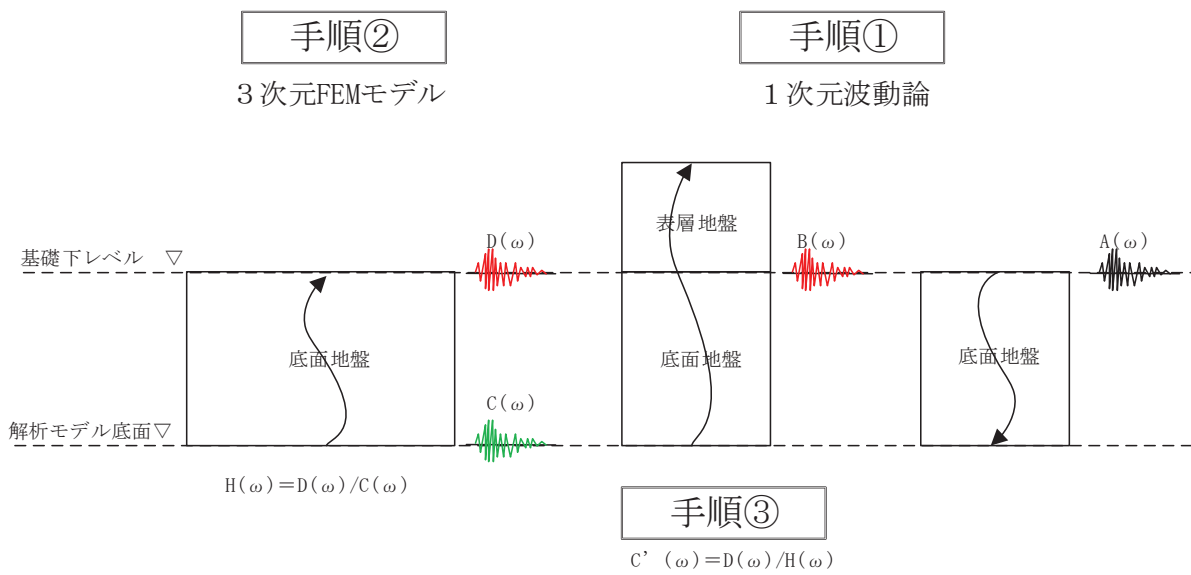


図 3-10 入力地震動の加速度応答スペクトル
(基準地震動 S_s, 0.P.-12.5m)



- ① 一次元波動論に基づき、解放基礎表面に評価対象の基準地震動(2E)($A(\omega)$ とする)を入力したときの建屋基礎下レベルの自由地盤応答(E+F)($B(\omega)$ とする)を求める。
- ② 3次元FEMモデルに基づき、解析モデル底面にホワイトノイズ(2E)($C(\omega)$ とする)を入力したときの建屋基礎下レベルの自由地盤応答(2E)($D(\omega)$ とする)を求める。このときの伝達関数を $H(\omega) = D(\omega) / C(\omega)$ とする。
- ③ 3次元FEMモデルの建屋基礎下レベルで $B(\omega)$ となるように、 $C'(\omega) = B(\omega) / H(\omega)$ の補正した地震動を解析モデル底面での入力地震動とする。

図 3-11 3次元 FEM モデルへの入力地震動の補正方法

3.2.2 鉛直方向

(1) 地震応答解析モデル

鉛直方向の地震応答解析モデルは、耐震壁部の軸剛性を評価した質点系モデルとし、地盤を等価なばねで評価した建屋－地盤連成モデルとする。

鉛直方向の地震応答解析モデル及び諸元を図 3-12 に示す。なお、鉛直方向の軸剛性に関しては、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震等の地震やコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ等に伴う初期剛性の低下の影響が確認されなかったことから、設計剛性とする。

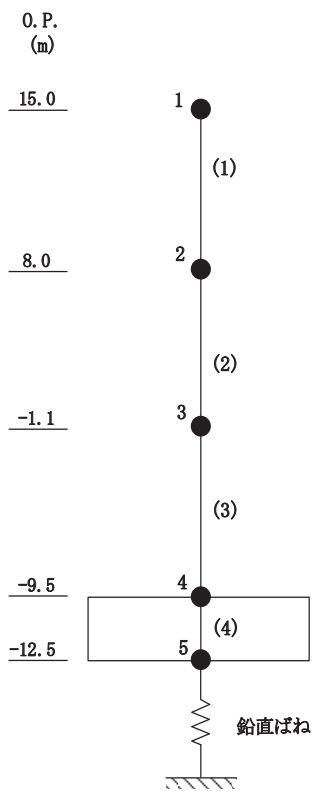
(2) 地盤ばね

基礎版底面下の地盤は、鉛直方向の地震応答解析モデルにおいては鉛直ばねで置換している。この鉛直ばねは、「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」により、基礎版底面下の地盤を等価な半無限地盤と見なして、振動アドミッタンス理論に基づいて評価しており、振動数に依存した複素剛性として表現される。図 3-6 に示すようにばね定数として、実部の静的な値(K_0)を、また、減衰係数(C_0)として、建屋－地盤連成モデルの 1 次固有円振動数(ω_1)に対応する虚部の値と原点を結ぶ直線の傾きを採用することにより近似する。基礎底面ばねの評価には解析コード「ADMITHF」を用いる。評価に用いる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。

地盤ばね定数及び減衰係数を表 3-6 に示す。

(3) 入力地震動

地震応答解析モデルへの入力地震動は、「3.1 設計に用いる地震波」に示す基準地震動 S_s とし、基礎底面レベルに直接入力する。図 3-13 に地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図を示す。



標高 O. P. (m)	質点 番号	質点重量 ($\times 10$ kN)	要素 番号	軸断面積 (m^2)
15.0	1	6921		
			(1)	260.7
8.0	2	9209		
			(2)	318.0
-1.1	3	13497		
			(3)	342.1
-9.5	4	11687		
			(4)	1740.0
-12.5	5	10980		

図 3-12 地震応答解析モデル及び諸元 (鉛直方向)

表 3-6 地盤ばね定数と減衰係数（鉛直方向）

地盤ばね 成分	ばね定数 K_c	減衰係数 C_c
底面・鉛直	1.310×10^9 (kN/m)	1.327×10^7 (kN·s/m)

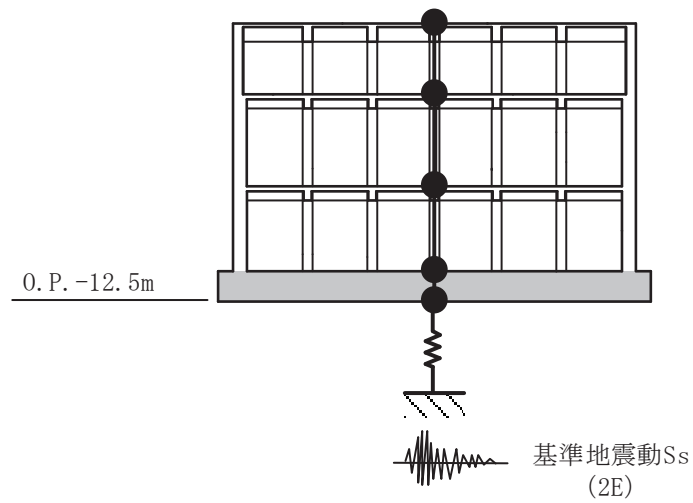


図 3-13 地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図（鉛直方向）