

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-19-0018_改5
提出年月日	2021年10月4日

VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書

2021年10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	12
2.4	適用規格・基準等	14
3.	解析方法	15
3.1	設計に用いる地震波	15
3.2	地震応答解析モデル	30
3.2.1	水平方向	31
3.2.2	鉛直方向	43
3.3	解析方法	46
3.3.1	動的解析	46
3.3.2	静的解析	46
3.4	解析条件	49
3.4.1	建物・構築物の復元力特性	49
3.4.2	地盤の回転ばねの復元力特性	63
3.4.3	誘発上下動を考慮する基礎浮上り評価法	64
3.4.4	材料物性の不確かさ	66
4.	解析結果	69
4.1	動的解析	69
4.1.1	基本ケースの地震応答解析結果	69
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	135
4.2	静的解析	251
4.3	必要保有水平耐力	253

 : 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には耐震補強工事を反映する。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：SD35 (SD345 相当)	2.65 × 10 ⁴	1.14 × 10 ⁴	5	既設部
鉄筋コンクリート コンクリート： F _c = 33 (N/mm ²) 鉄筋：SD345	2.52 × 10 ⁴	1.05 × 10 ⁴	5	追設部
鉄骨：SS41 (SS400 相当) SM50A (SM490A 相当)	2.05 × 10 ⁵	7.90 × 10 ⁴	2	屋根トラス
鉄骨：SN400B SN490B BCR295	2.05 × 10 ⁵	7.90 × 10 ⁴	2	追設ブレース

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シェル壁、耐震壁部、鉄骨ブレース部及び面内せん断変形をする床スラブ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及び諸元を図 3-5 に示す。図 3-5(3)及び図 3-5(4)に示す誘発上下動を考慮する場合の地震応答解析モデルについては、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A C 4 6 0 1 -2015 ((社)日本電気協会)」を参考に、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 3-11)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。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は、観測記録や試験データなどから適切に地震応答解析モデルへ反映し、保守性を確認した上で適用する。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。

また、せん断耐力の向上を目的とした耐震補強工事において追設した部材として、内部ボックス壁と同じ構面において 3 階(0.P.33.2m~0.P.41.2m)には耐震壁を、クレーン階(0.P.41.2m~0.P.50.5m)には鉄骨ブレースを地震応答解析モデルに反映している。

(2) 地盤ばね

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。

(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 及び弾性設計用地震動 S_d から以下の手順で算定する。まず、解放基盤表面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 O.P. -200m の入射波を算定する。次に、解析コード「mflow」を用いて、「SHAKE」により算定した O.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 P」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 3-5 に示す地盤モデルのうち表層地盤 (O.P. 14.8m~O.P. 0m) 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 (O.P. -14.1m) 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「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。

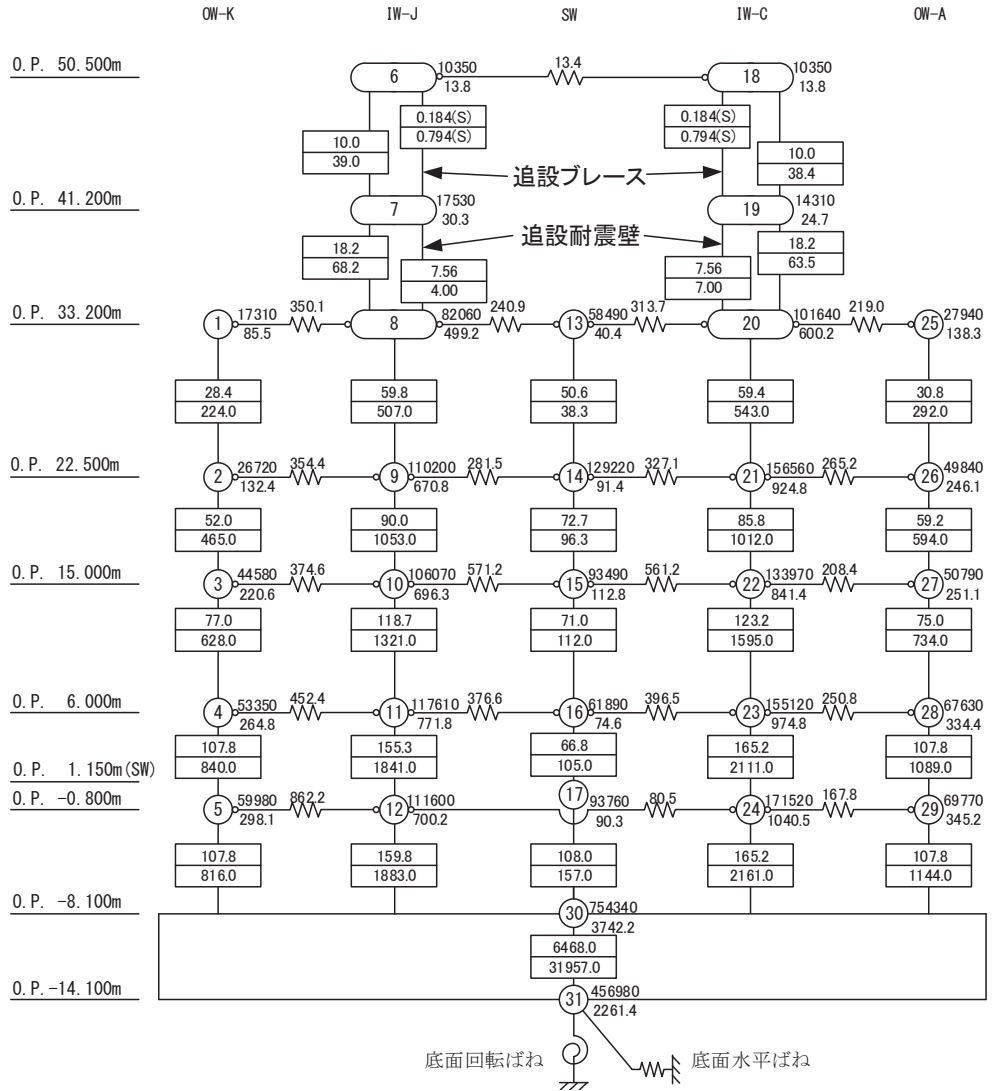
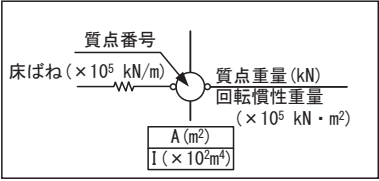
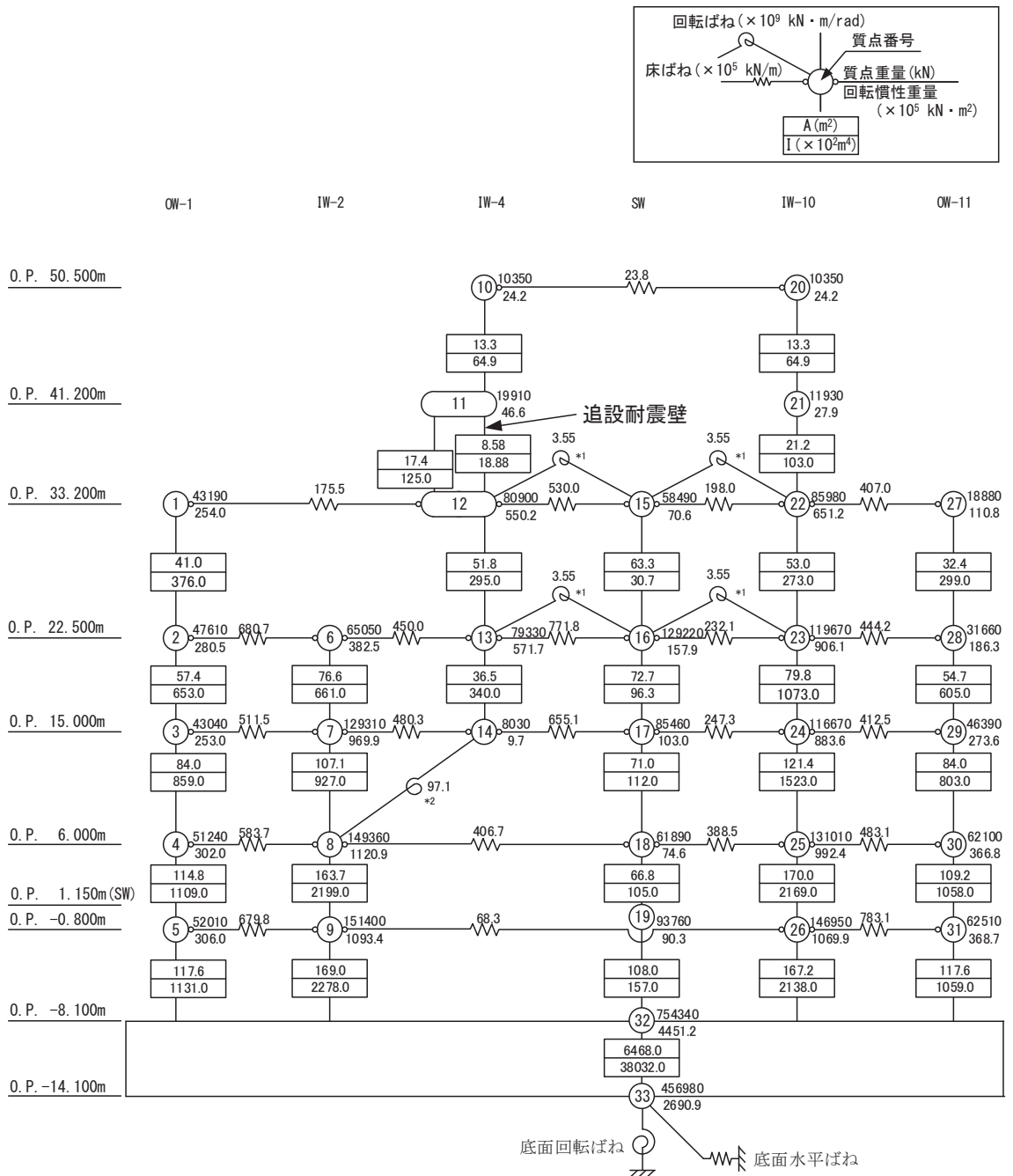


図 3-5(1) 地震応答解析モデル及び諸元 (NS 方向)



注記*1：プール壁の回転ばね

*2：内部ボックス壁の軸抵抗を考慮した回転ばね

図 3-5(2) 地震応答解析モデル及び諸元 (EW 方向)

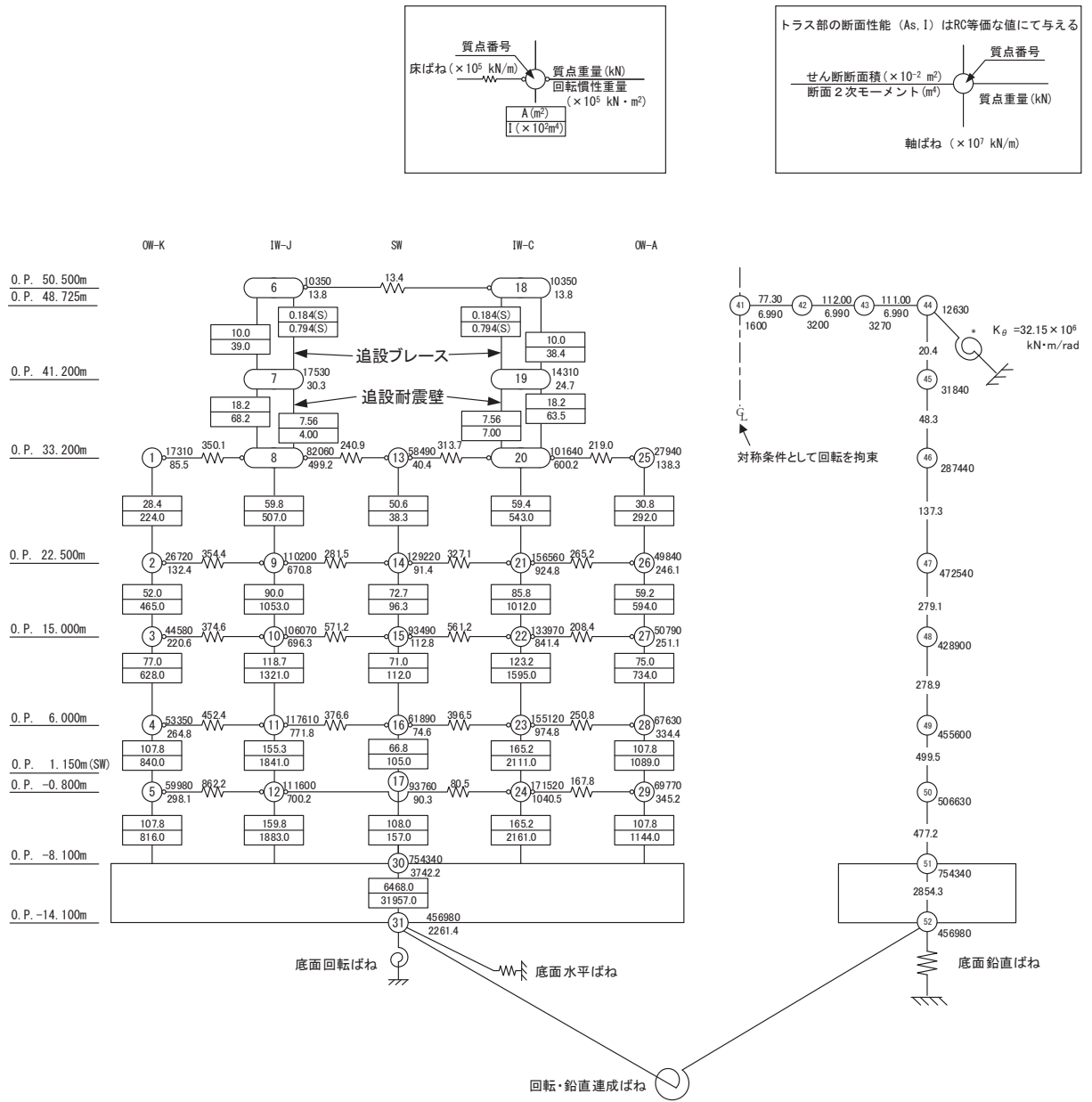
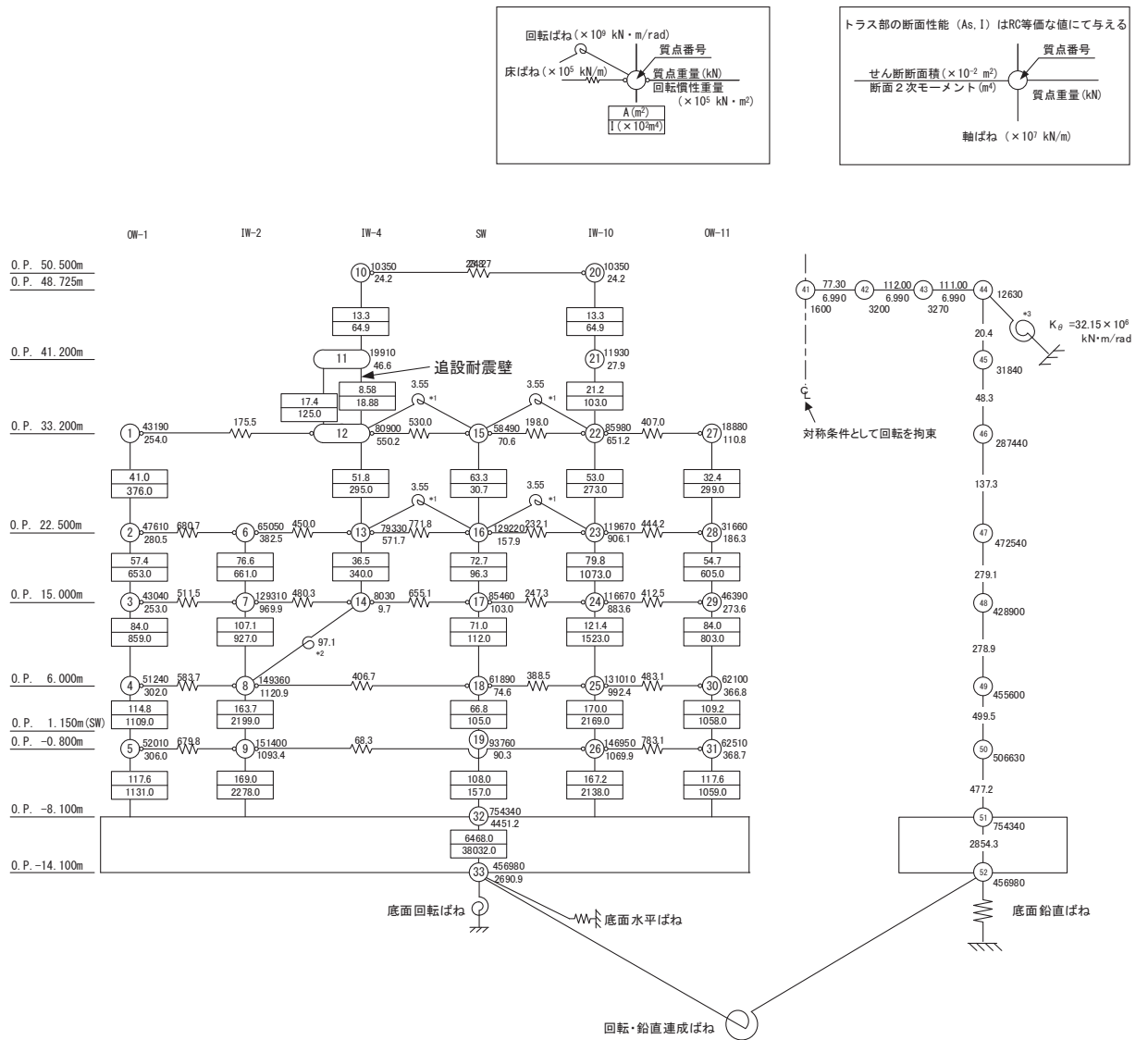


図 3-5(3) 地震応答解析モデル及び諸元 (誘発上下動考慮, NS 方向)



注記*1：プール壁の回転ばね

*2：内部ボックス壁の軸抵抗を考慮した回転ばね

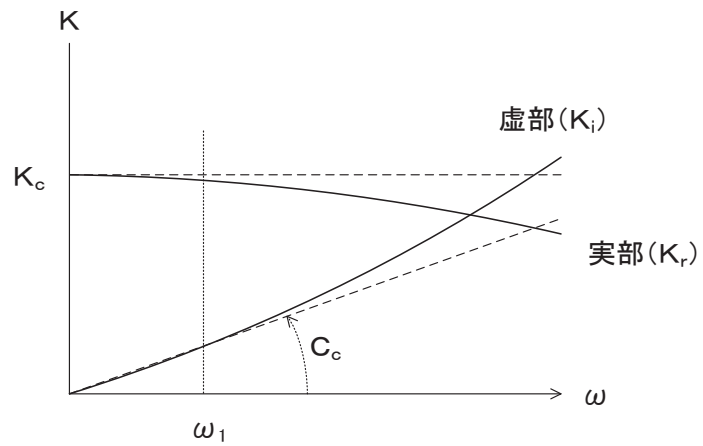
*3：屋根トラス端部回転拘束ばね

図 3-5(4) 地震応答解析モデル及び諸元（誘発上下動考慮，EW 方向）

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	地上 3 階及びクレーン階 (O. P. 33. 2m より上部)	地下 3 階～地上 2 階 (O. P. 33. 2m より下部)
NS	0. 30	0. 75
EW	0. 50	0. 80

注：追設耐震壁については補正を行わない。



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	1.742×10^9 (kN/m)	2.351×10^7 (kN・s/m)
底面・回転	2.994×10^{12} (kN・m/rad)	5.100×10^9 (kN・m・s/rad)

(b)EW 方向

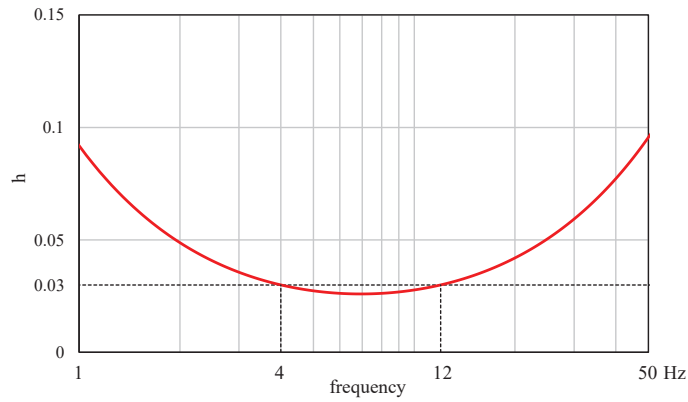
地盤ばね 成分	ばね定数 K_c	減衰係数 C_c
底面・水平	1.727×10^9 (kN/m)	2.309×10^7 (kN・s/m)
底面・回転	3.386×10^{12} (kN・m/rad)	6.732×10^9 (kN・m・s/rad)

表 3-5 原子炉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
	0.00	23.3	900* ⁴	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3

注記*1：O. P. 14.8m～O. P. 0m 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10層に分割する。

* 2 : 0. P. 14. 8m ~ 0. P. -14. 1m 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。

* 4 : PS 検層結果と観測記録の分析より設定

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、

$$\gamma_m = \tau_m / G_0$$

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

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

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

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

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

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

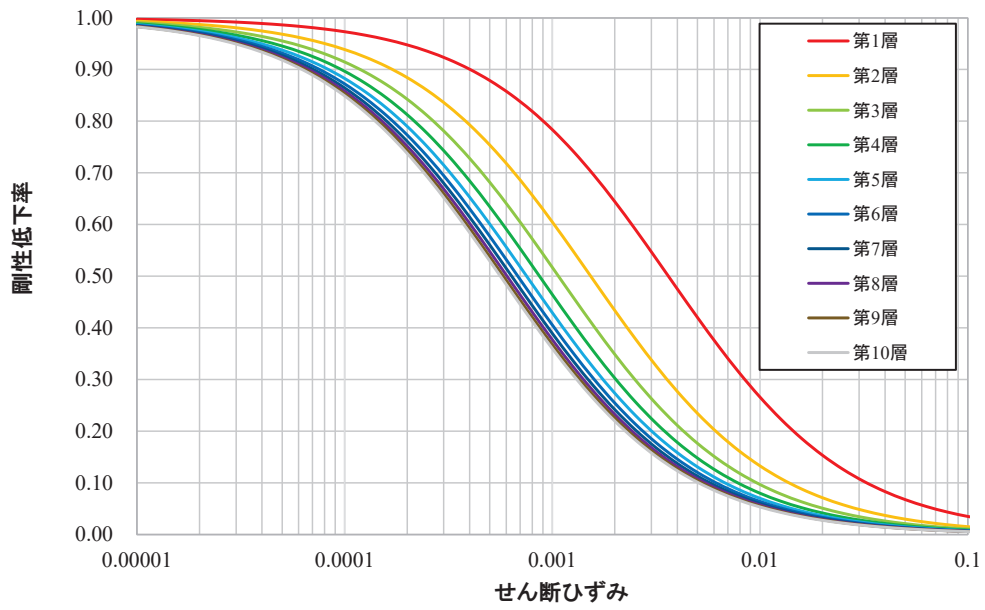


図 3-7 $G/G_0 - \gamma$ 曲線

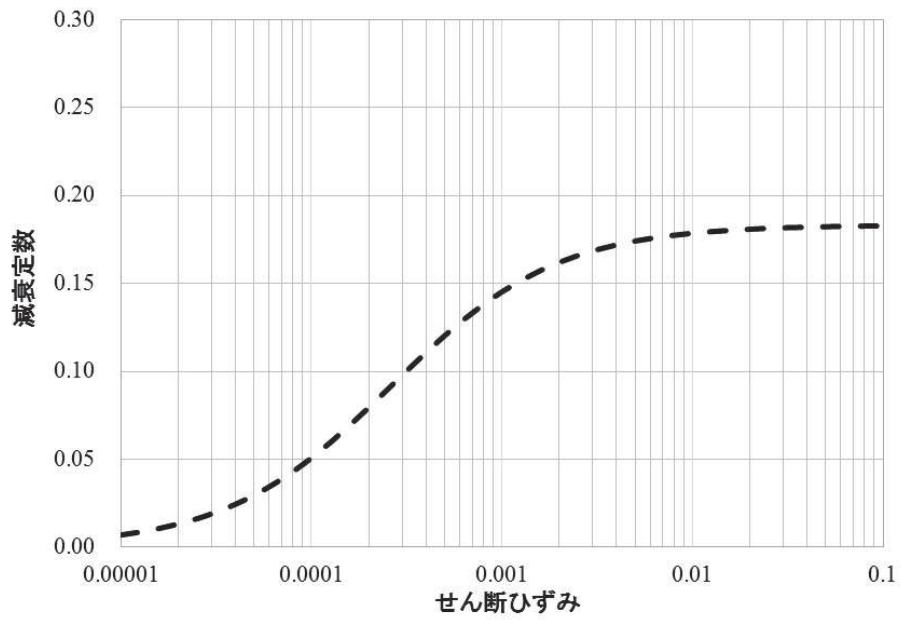


図 3-8 $h - \gamma$ 曲線

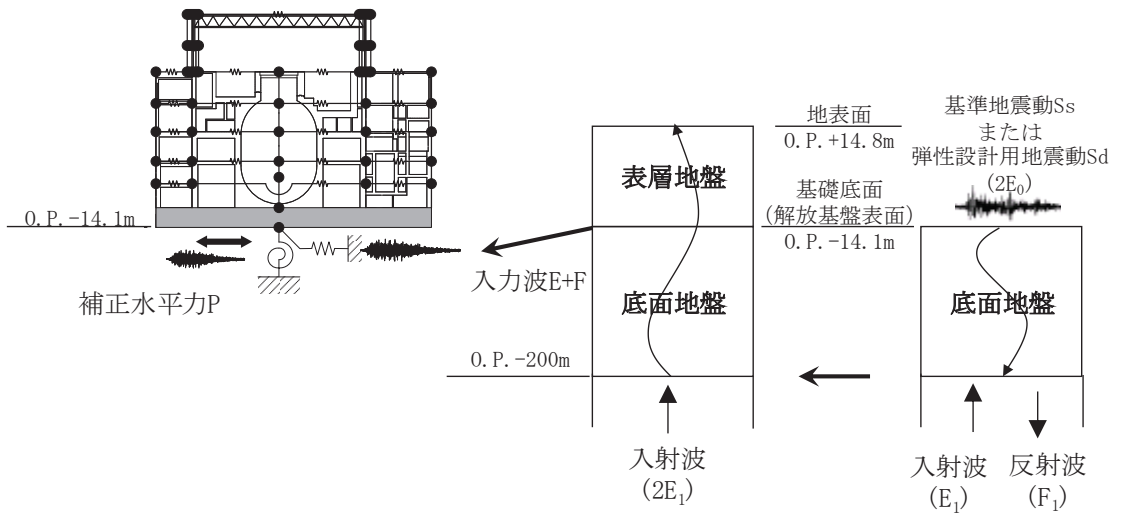


図 3-9 地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図 (水平方向)

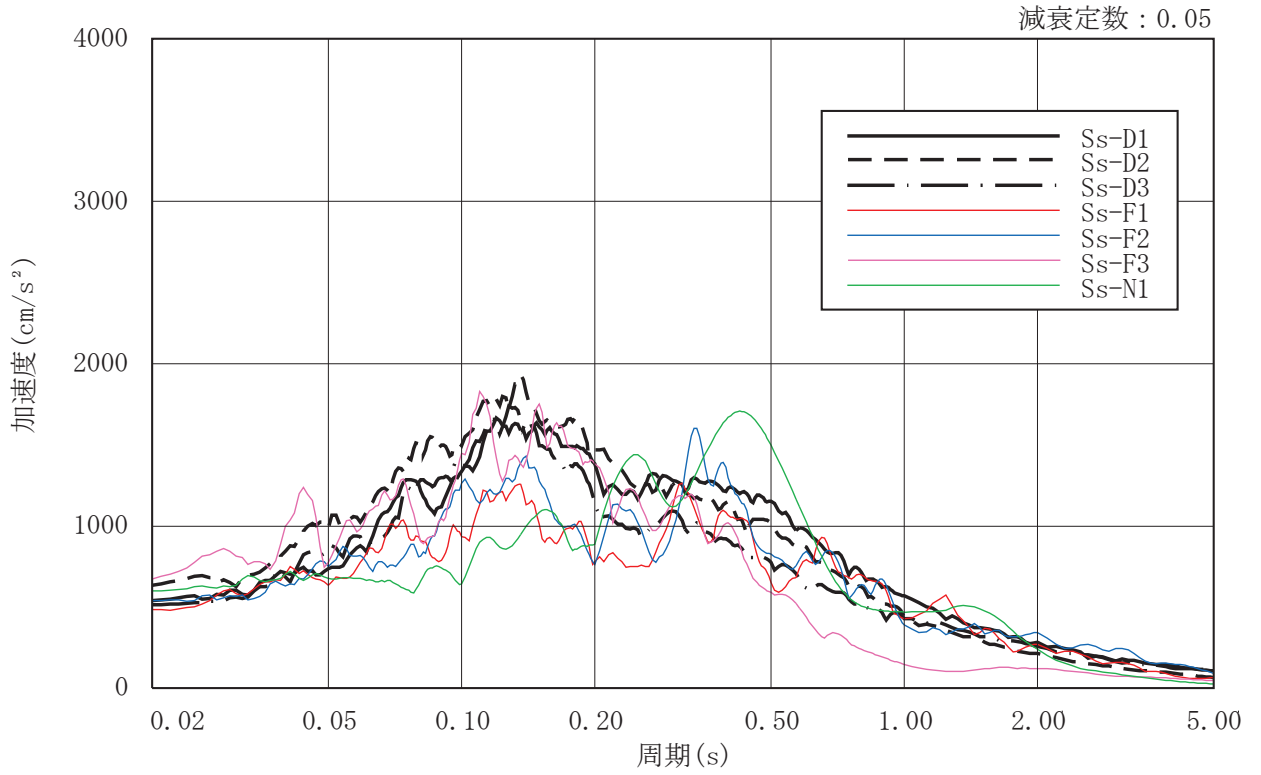


図 3-10(1) 入力地震動の加速度応答スペクトル
(基準地震動 S_s , O.P. -14.1m)

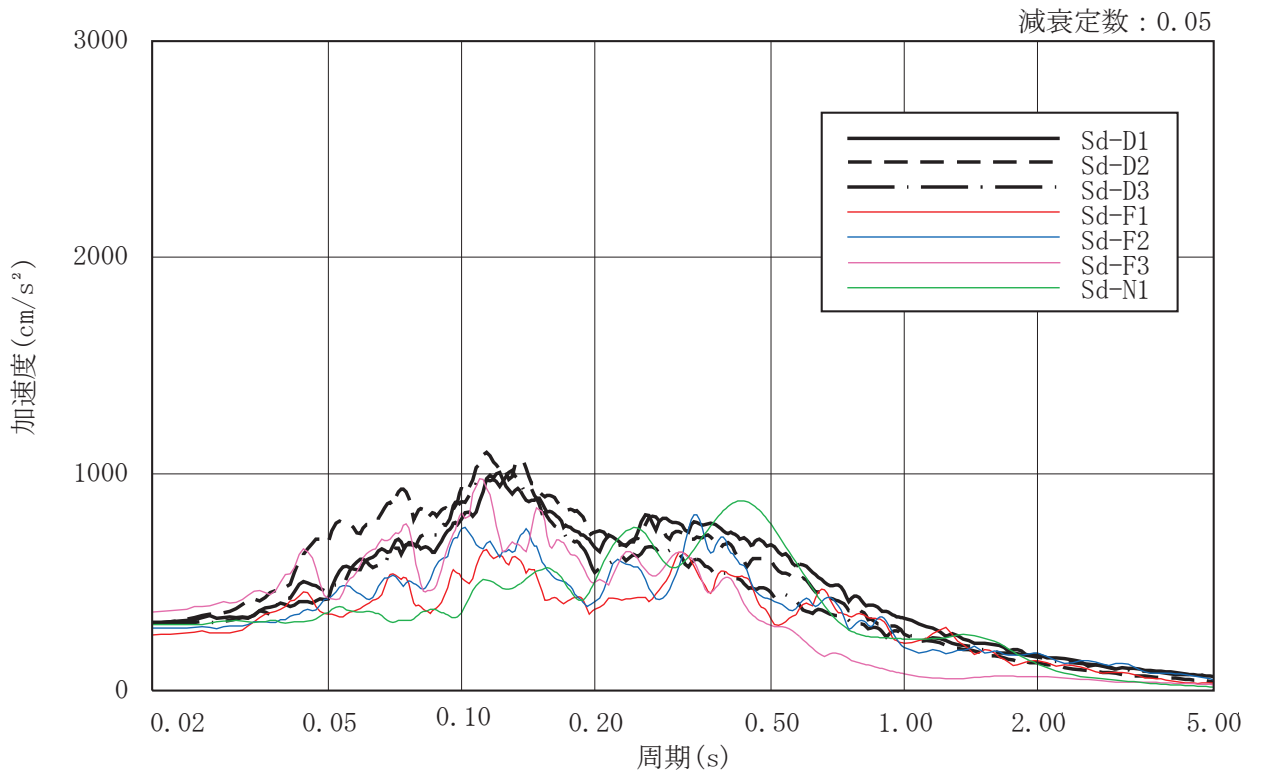


図 3-10(2) 入力地震動の加速度応答スペクトル
(弾性設計用地震動 S_d , O.P. -14.1m)

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、軸変形をするシェル壁・耐震壁部と、曲げ変形とせん断変形をする屋根トラス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。

鉛直方向の地震応答解析モデル及び諸元を図 3-11 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。

また、耐震補強工事で追設した部材として、3 階の追設耐震壁を軸剛性として評価し、地震応答解析モデルに反映している。

(2) 地盤ばね

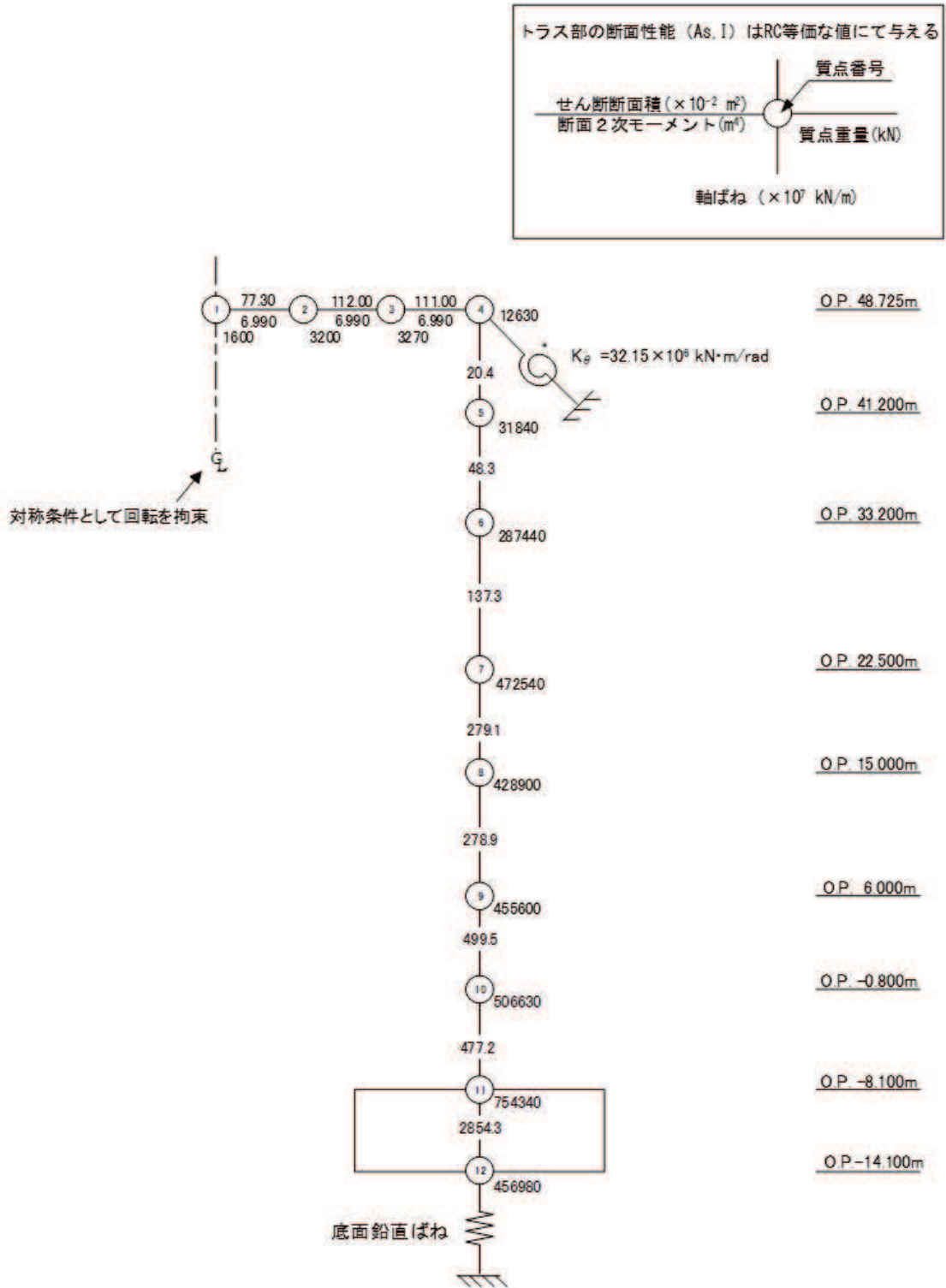
基礎版底面下の地盤は、鉛直方向の地震応答解析モデルにおいては鉛直ばねで置換している。この鉛直ばねは、「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」により、基礎版底面下の地盤を等価な半無限地盤と見なして、振動アドミッタンス理論に基づいて評価しており、振動数に依存した複素剛性として表現される。図 3-6 に示すようにばね定数として、実部の静的な値(K_0)を、また、減衰係数(C_0)として、建屋－地盤連成モデルの 1 次固有円振動数(ω_1)に対応する虚部の値と原点を結ぶ直線の傾きを採用することにより近似する。基礎底面ばねの評価には解析コード「ADMITHF」を用いる。評価に用いる解析コー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

図 3-12 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。



注記* : 屋根トラス端部回転拘束ばね

図 3-11 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	2.350×10^9 (kN/m)	4.605×10^7 (kN·s/m)

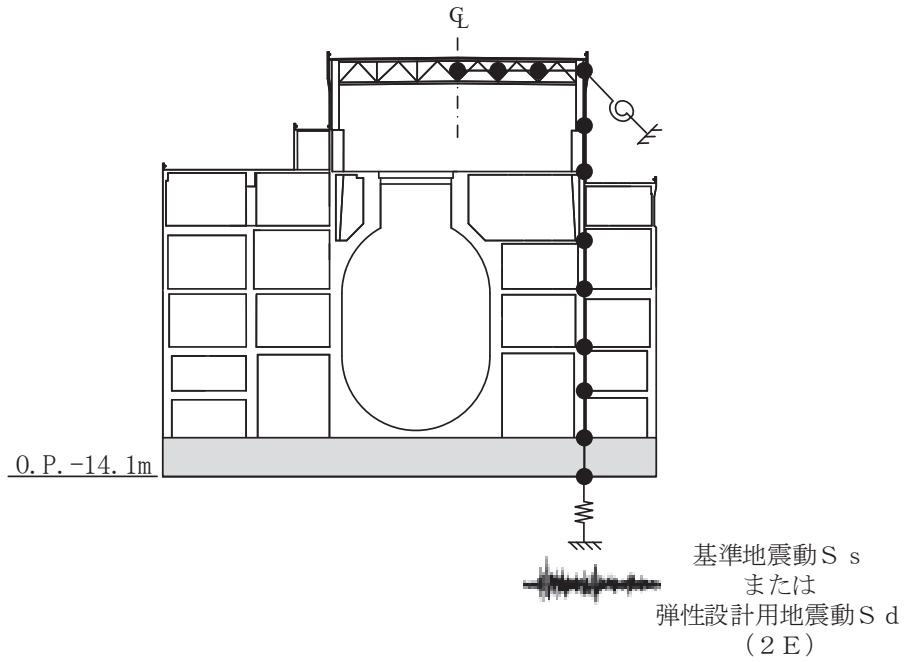


図 3-12 地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図（鉛直方向）