

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-19-0056_改5
提出年月日	2021年11月8日

VI-2-11-2-3 タービン建屋の耐震性についての計算書

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	評価方針	12
2.4	適用規格・基準等	13
3.	評価方法	14
3.1	評価対象部位及び評価方針	14
3.2	評価に用いる地震波	16
3.3	荷重及び荷重の組合せ	20
3.4	許容限界	21
3.5	解析方法	22
3.6	解析条件	37
3.7	評価方法	51
4.	評価結果	52
4.1	固有値解析結果	52
4.2	構造物全体としての変形性能の評価結果	59
4.3	相対変位による評価結果	61

 本日の説明範囲

### 3.5 解析方法

#### 3.5.1 地震応答解析モデル

##### (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、せん断変形をするフレーム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。

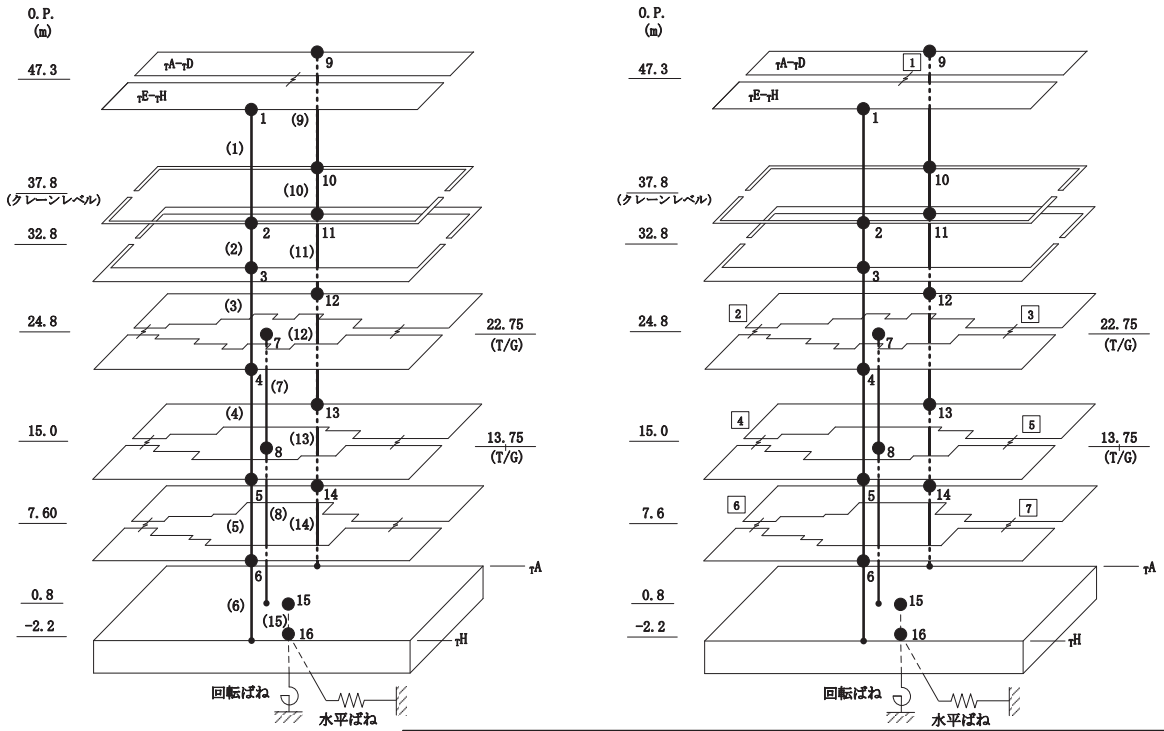
水平方向の地震応答解析モデル及び諸元を図 3-4 及び図 3-5 に示す。なお、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震等の地震やコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ等に伴う初期剛性の低下について、観測記録を用いた検討により確認したことから解析モデルに考慮する。復元力特性の設定にあたっては、地震やコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ等の要因は初期剛性及びその後の剛性を低下させるが、機能維持限界耐力及び終局耐力は既工認の復元力特性の各耐力を上回っていることを試験等により確認したことから、この復元力特性に初期剛性低下を反映して適用する。耐震壁の初期剛性の設計値に対する補正係数を表 3-5 に示す。

##### (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、振動アドミッ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 ( $\omega_1$ ) 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。地盤ばね定数及び減衰係数を表 3-6 に、地盤モデルの物性値を表 3-7 に示す。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。

### (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。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補正水平力（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 3-7 に示す地盤モデルのうち表層地盤（0. P. 14. 8m~0. 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（0. P. -2. 2m）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。



凡例  
 (1) : 要素番号      [1] : 床ばね番号      ● 1 : 質点番号  
 ——— : 床ばね      ——— : 鉄筋コンクリート部材

(a) モデル図

質点番号	
質点重量(×10kN)	

標高 O. P. (m)	建屋		
	<sub>T</sub> E- <sub>T</sub> H	T/G	<sub>T</sub> A- <sub>T</sub> D
47.3	1		9
	1942		1942
37.8	2		10
	1220		1220
32.8	3		11
	3713		4089
24.8	4		7
22.75 (T/G)	11060	7688	16545
15.0	5	8	13
13.75 (T/G)	13550	4982	17740
7.6	6		14
	12333		14234
0.8	15		
	36434		
-2.2	16		
	30430		

回転慣性重量\* =  $1.404 \times 10^9 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$

注記\* : 回転慣性重量は基礎下質点 (質点番号16) に集約している。

(b) 質点重量・回転慣性重量

図 3-4(1) 地震応答解析モデル (NS 方向) (1/3)

要素番号
せん断断面積 (m <sup>2</sup> )
断面2次モーメント (×10 <sup>2</sup> m <sup>4</sup> )

標高 O. P. (m)	建屋			
	γE-γH	T/G	γA-γD	
47.3	(1)		(9)	
	24.0		24.0	
	324.4		324.4	
37.8	(2)		(10)	
	24.0		24.0	
	324.4		324.4	
32.8	(3)		(11)	
	32.6		39.8	
	477.1		699.8	
24.8 22.75 (T/G)	(4)		(7)	(12)
	132.2		21.43	196.6
	1366.0	∞	1905.5	
15.0 13.75 (T/G)	(5)	(8)	(13)	
	148.6	10.43	192.7	
	1589.7	∞	1932.9	
7.6	(6)		(14)	
	177.6		198.8	
	2031.4		2130.1	
0.8	(15)			
	5539.2			
	42541.1			

①耐震壁 (O. P. 24.8mより上部) (要素1~3, 9~11)

ヤング係数	E	7.94 × 10 <sup>3</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
せん断弾性係数	G	3.41 × 10 <sup>3</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
ポアソン比	ν	0.167
減衰定数	h	5%

②耐震壁 (O. P. 24.8mより下部) (要素4~6, 12~15)

ヤング係数	E	9.27 × 10 <sup>3</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
せん断弾性係数	G	3.98 × 10 <sup>3</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
ポアソン比	ν	0.167
減衰定数	h	5%

③T/G架台 (要素7, 8)

ヤング係数	E	2.65 × 10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
せん断弾性係数	G	1.14 × 10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
ポアソン比	ν	0.167
減衰定数	h	5%

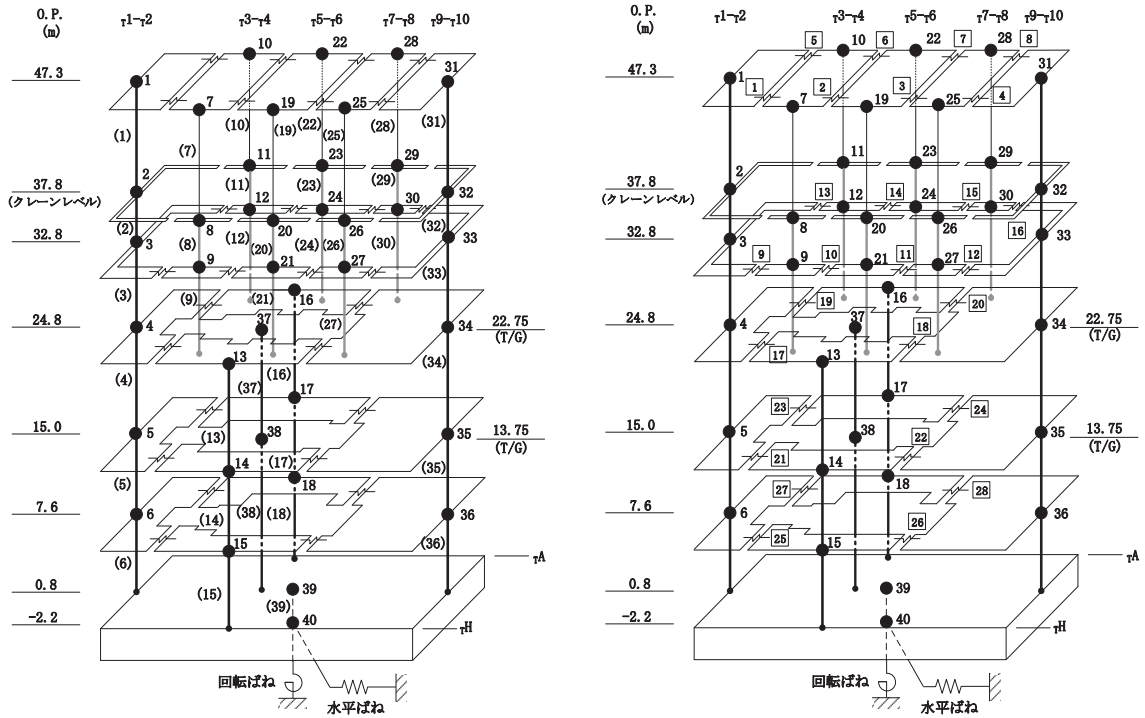
(c) せん断断面積・断面2次モーメント

図 3-4(2) 地震応答解析モデル (NS 方向) (2/3)

0. P. (m)	床ばね 番号	せん断ばね ( $\times 10^5$ kN/m)
47.3	1	73.0
24.8	2	53.2
	3	118.5
15.0	4	65.4
	5	107.9
7.6	6	57.2
	7	81.3

(d) 床ばねのばね定数

図 3-4(3) 地震応答解析モデル (NS 方向) (3/3)



凡例  
 (1) : 要素番号    ① : 床ばね番号    ● : 質点番号  
 ——— : 床ばね    ——— : 鉄筋コンクリート部材    ——— : 鉄骨部材    ——— : 鉄骨鉄筋コンクリート部材

(a) モデル図

質点番号
質点重量(×10kN)

標高 O.P. (m)	建屋								
	τ1-τ2	τ3-τ4		τ5-τ6		τ7-τ8		τ9-τ10	
47.3	1	7	10	19	22	25	28	31	
	740	391	391	435	435	379	379	733	
37.8	2	8	11	20	23	26	29	32	
	835	184	184	182	182	162	162	548	
32.8	3	9	12	21	24	27	30	33	
	1417	698	672	761	732	705	787	2030	
24.8	4	τ3-τ6 (TH側)		τ3-τ6 (TA側)		T/G	τ7-τ10		
	3993	4293		6178		7688	13140		
15.0	5	14		17		38	35		
13.75(T/G)	5621	5289		7306		4982	13074		
7.6	6	15		18			36		
	5122	4405		5863			11177		
0.8	39								
	36434								
-2.2	40								
	30430								

回転慣性重量\* =  $5.251 \times 10^8 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$   
 注記\* : 回転慣性重量は基礎下質点(質点番号40)に集約している。

(b) 質点重量・回転慣性重量

図 3-5(1) 地震応答解析モデル (EW 方向) (1/3)



要素番号
せん断断面積(m <sup>2</sup> )
断面2次モーメント(×10 <sup>2</sup> m <sup>4</sup> )

標高 O. P. (m)	建屋							
	τ1-τ2	τ3-τ4		τ5-τ6		τ7-τ8		τ9-τ10
47.3	(1)	(7)	(10)	(19)	(22)	(25)	(28)	(31)
	15.9	0.0216	0.0216	0.0216	0.0216	0.0216	0.0216	15.9
	75.2	∞	∞	∞	∞	∞	∞	75.2
37.8	(2)	(8)	(11)	(20)	(23)	(26)	(29)	(32)
	15.9	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	15.9
	75.2	∞	∞	∞	∞	∞	∞	75.2
32.8	(3)	(9)	(12)	(21)	(24)	(27)	(30)	(33)
	24.3	0.431	0.445	0.431	0.446	0.431	0.455	38.7
	132.8	∞	∞	∞	∞	∞	∞	196.8
24.8 22.75(T/G)	τ1-τ2	τ3-τ6 (TH側)		τ3-τ6 (TA側)		T/G	τ7-τ10	
	(4)	(13)		(16)		(37)	(34)	
	64.4	34.8		54.9		18.88	93.4	
15.0 13.75(T/G)	(5)	(14)		(17)		(38)	(35)	
	122.0	38.1		51.4		11.45	138.4	
	511.6	14.03		25.43			638.2	
7.6	(6)	(15)		(18)		∞	(36)	
	113.0	56.7		60.7			146.6	
	516.0	18.91		34.93		762.1		
0.8	(39)							
	5539.2							
	15368.0							

- ①耐震壁 (O. P. 24.8mより上部)  
 (要素1~3, 8, 9, 11, 12, 20, 21, 23, 24, 26, 27, 29, 30, 31~33)
- |         |   |   |
|---------|---|---|
| ヤング係数   | E | 9.27×10 <sup>3</sup> (N/mm <sup>2</sup> ) |
| せん断弾性係数 | G | 3.98×10 <sup>3</sup> (N/mm <sup>2</sup> ) |
| ポアソン比   | ν | 0.167                                     |
| 減衰定数    | h | 5%  |
- ②耐震壁 (O. P. 24.8mより下部)  
 (要素4~6, 13~15, 16~18, 34~36)
- |         |   |   |
|---------|---|---|
| ヤング係数   | E | 1.06×10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> ) |
| せん断弾性係数 | G | 4.55×10 <sup>3</sup> (N/mm <sup>2</sup> ) |
| ポアソン比   | ν | 0.167                                     |
| 減衰定数    | h | 5%  |
- ③T/G架台 (要素37, 38)
- |         |   |   |
|---------|---|---|
| ヤング係数   | E | 2.65×10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> ) |
| せん断弾性係数 | G | 1.14×10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> ) |
| ポアソン比   | ν | 0.167                                     |
| 減衰定数    | h | 5%  |
- ④鉄骨部 (要素7, 10, 19, 22, 25, 28)
- |         |   |   |
|---------|---|---|
| ヤング係数   | E | 2.05×10 <sup>5</sup> (N/mm <sup>2</sup> ) |
| せん断弾性係数 | G | 7.90×10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> ) |
| ポアソン比   | ν | 0.3                                       |
| 減衰定数    | h | 2%  |

(c) せん断断面積・断面2次モーメント

図3-5(2) 地震応答解析モデル(EW方向)(2/3)

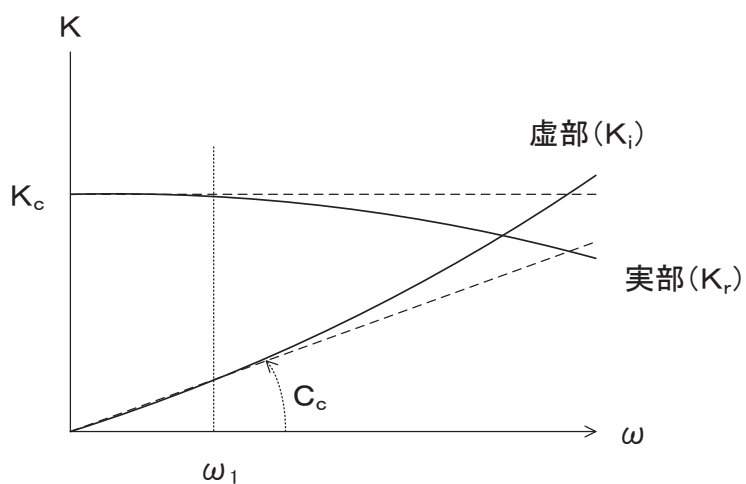
O.P. (m)	床ばね 番号	せん断ばね ( $\times 10^5$ kN/m)
47.3	1	21.2
	2	16.5
	3	16.8
	4	21.8
	5	21.2
	6	16.5
	7	16.8
	8	21.8
32.8	9	20.6
	10	12.2
	11	12.4
	12	21.2
	13	16.0
	14	9.4
	15	9.6
	16	16.5
24.8	17	35.8
	18	48.6
	19	65.9
	20	61.5
15.0	21	63.3
	22	31.5
	23	77.1
	24	39.5
7.6	25	58.8
	26	32.7
	27	60.3
	28	22.4

(d) 床ばねのばね定数

図 3-5(3) 地震応答解析モデル (EW 方向) (3/3)

表 3-5 耐震壁の初期剛性の設計値に対する補正係数

方向	地上 2 階及びクレーン階 (O. P. 24. 8m より上部)	地下 2 階～地上 1 階 (O. P. 24. 8m より下部)
NS	0. 30	0. 35
EW	0. 35	0. 40



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  $\omega_1$  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 3-6 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	$1.578 \times 10^9$ (kN/m)	$1.920 \times 10^7$ (kN·s/m)
底面・回転	$3.717 \times 10^{12}$ (kN·m/rad)	$7.495 \times 10^9$ (kN·m·s/rad)

(b) EW 方向

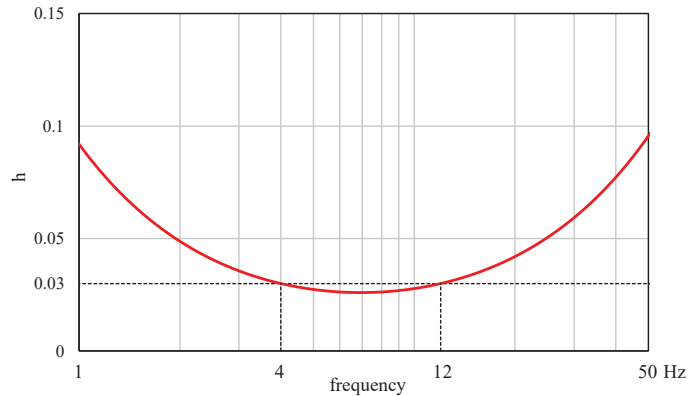
地盤ばね 成分	ばね定数 $K_c$	減衰係数 $C_c$
底面・水平	$1.685 \times 10^9$ (kN/m)	$2.195 \times 10^7$ (kN·s/m)
底面・回転	$1.778 \times 10^{12}$ (kN·m/rad)	$1.446 \times 10^9$ (kN·m·s/rad)

表 3-7 タービン建屋の地震応答解析に用いる地盤モデルの物性値

	地層レベル O.P. (m)	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	減衰定数* <sup>2</sup> h (%)
表層地盤	14.80	18.6	*1	3* <sup>3</sup>
	0.00	23.3	900* <sup>4</sup>	3
底面地盤	-2.20	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：O.P. 14.8m～O.P. 0m 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と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

O.P. 14.80m～O.P. 0m の表層地盤の初期せん断剛性 $G_0$ 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<sub>0</sub>-γ 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<sub>m</sub>と初期せん断剛性G<sub>0</sub>から，基準ひずみ γ<sub>m</sub>を算定し次式により求める。

$$G/G_0 = 1 / (1 + \gamma / \gamma_m) \tag{3.2}$$

ここで，

$$\gamma_m = \tau_m / G_0$$

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

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

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

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

h-γ 曲線は，繰返し三軸試験結果に基づき次式により求める。

$$h = 0.183 \cdot \gamma / (\gamma + 0.000261) \tag{3.3}$$

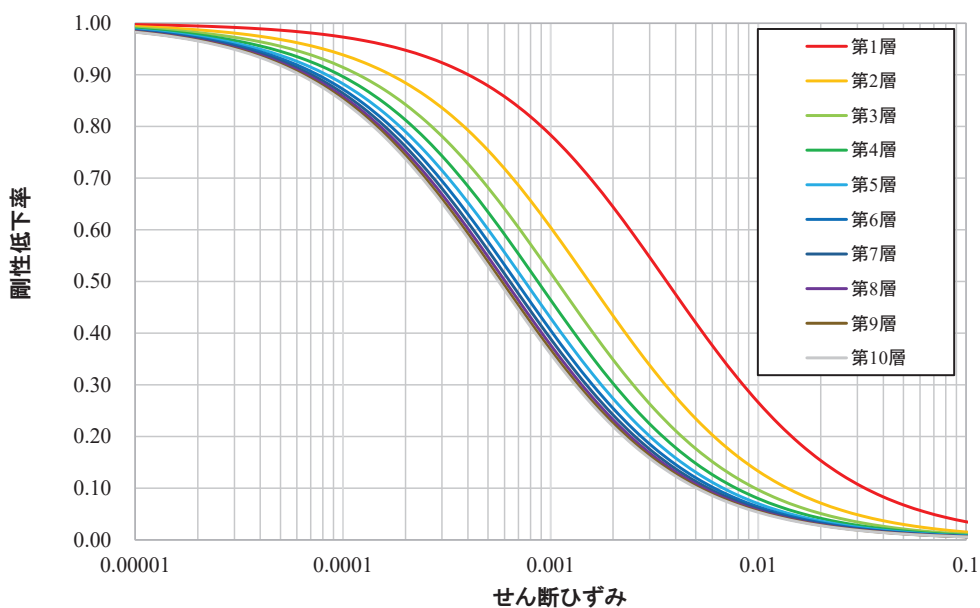


図 3-7 G/G<sub>0</sub>-γ 曲線

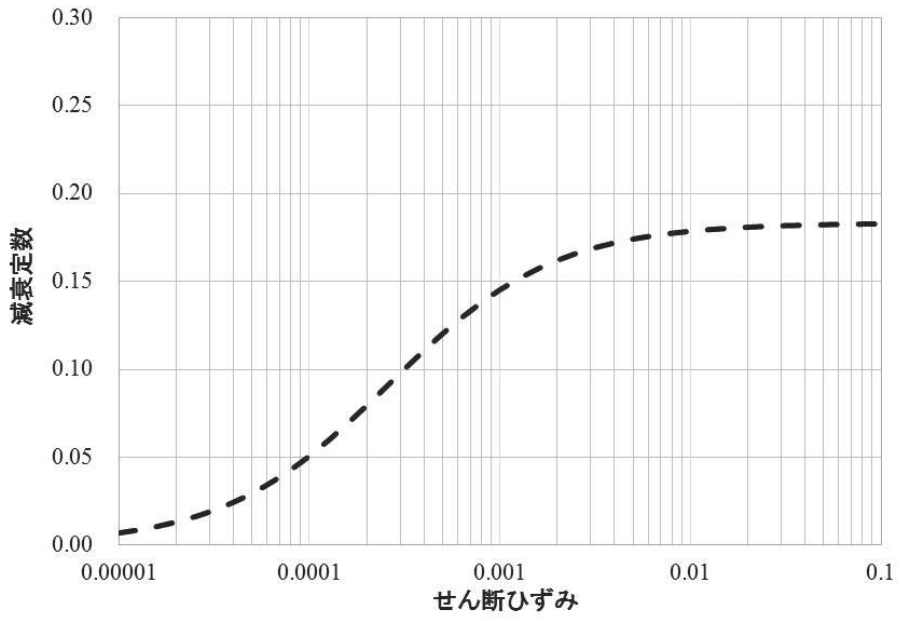


図 3-8 h- $\gamma$  曲線

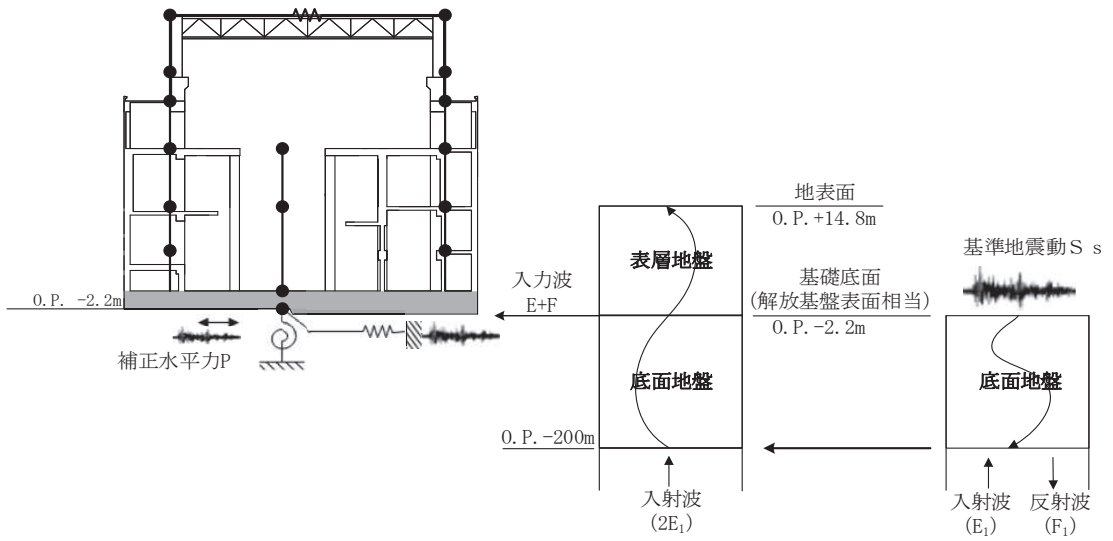


図 3-9 地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図（水平方向）

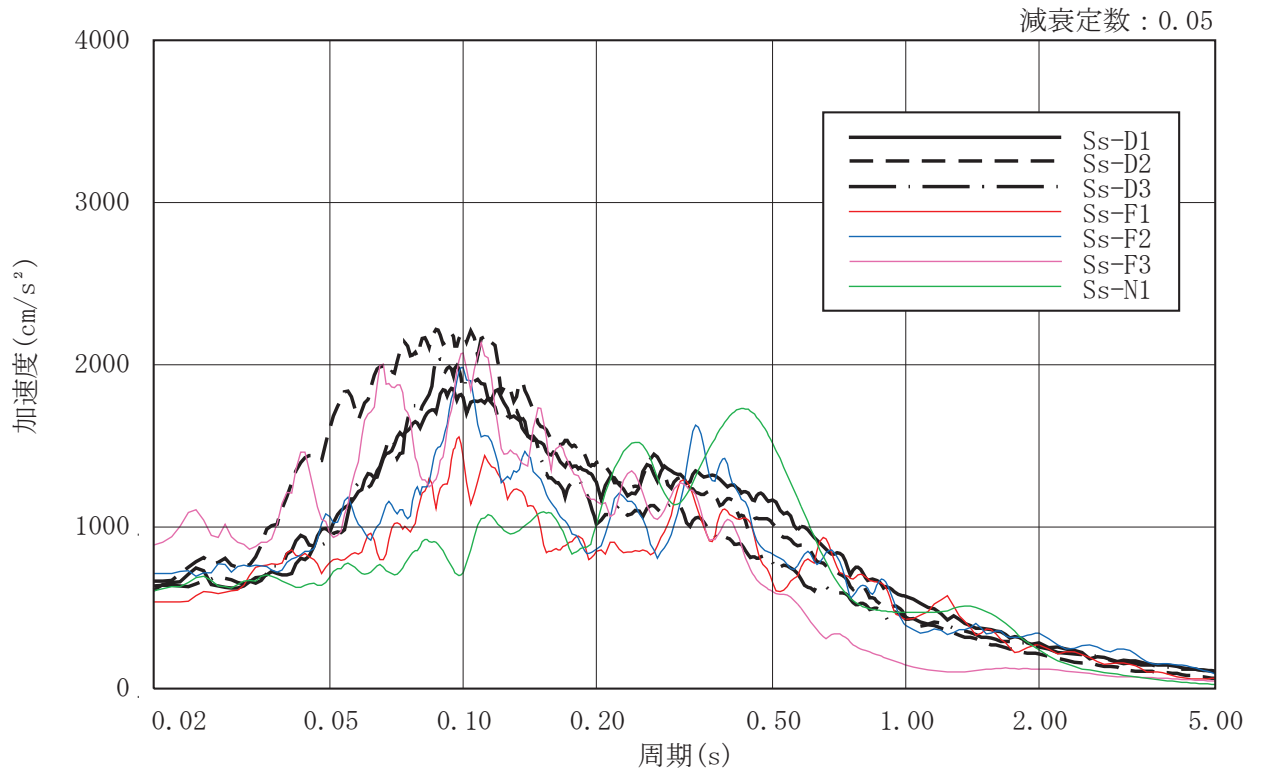


図 3-10 入力地震動の加速度応答スペクトル  
(基準地震動 S s , 0. P. -2. 2m)



### 3.5.2 解析方法

タービン建屋の地震応答解析には，解析コード「NUPP4」を用いる。

建物・構築物の地震応答解析は，添付書類「VI-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に記載の解析方法に基づき，時刻歴応答解析により実施する。

なお，地震応答解析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。