

6.2 シミュレーションモデルとの固有値の比較

工認モデルとシミュレーションモデルのNS方向の固有値を比較して表6-1に示す。工認モデルのNS方向の1次周期については、シミュレーションモデルからわずかに小さくなる程度であるが、刺激係数が小さくなる。工認モデルは、地上3階より上部の剛性が高くなったことにより、NS方向の2次周期はシミュレーションモデルより短くなる。

表 6-1 地震応答解析モデル固有周期 (NS 方向)

NS 方向	シミュレーション モデル	工認モデル
1 次周期 (刺激係数)	0.240 (2.756)	0.237 (2.203)
2 次周期 (刺激係数)	0.150 (2.652)	0.123 (2.718)

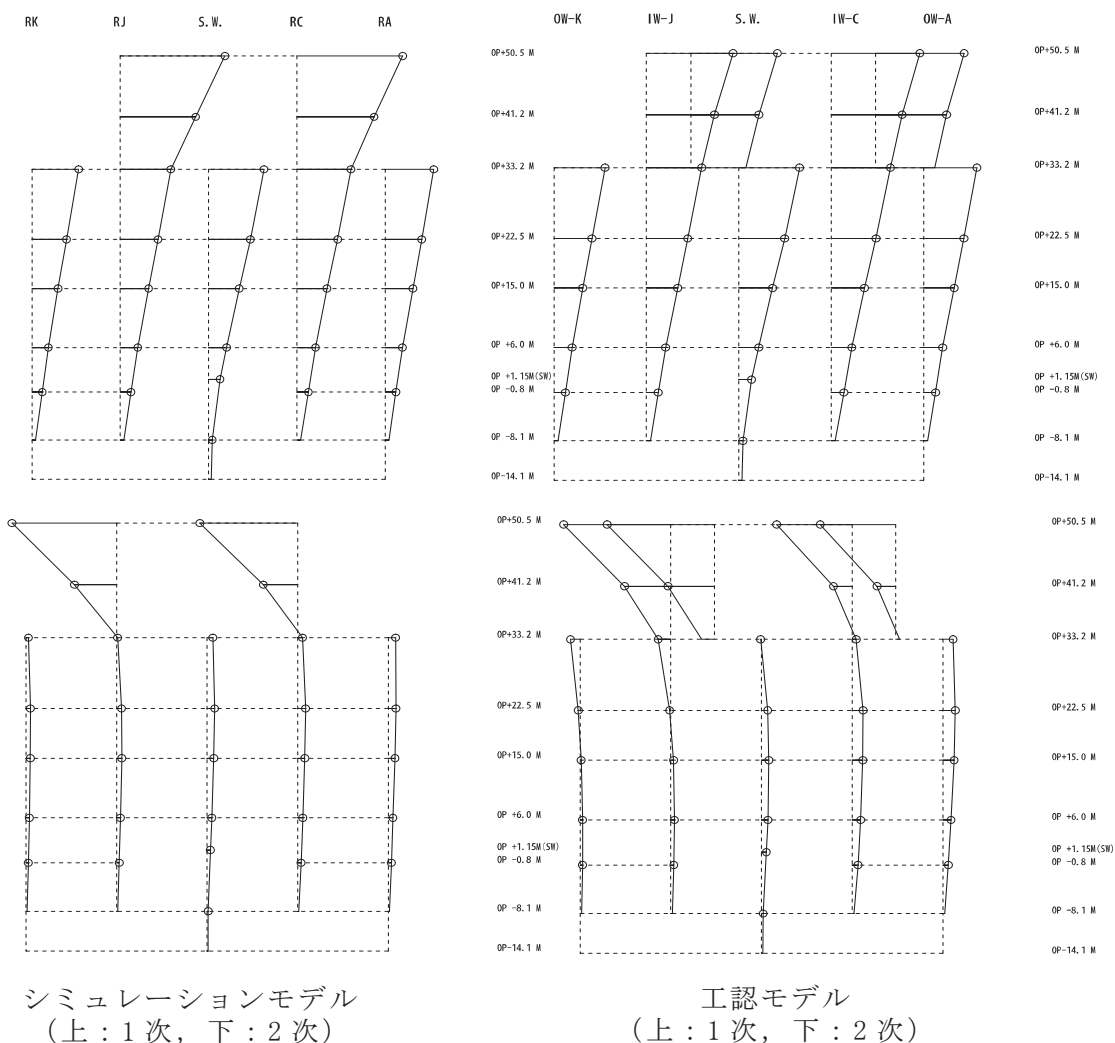


図 6-5 固有振動モード (NS 方向)

EW 方向の 1 次周期及び 2 次周期を表 6-2 に示す。1 次周期及び 2 次周期については、耐震補強による変化はほとんどない。工認モデルの EW 方向の刺激係数は 1 次、2 次ともに小さくなる。

表 6-2 地震応答解析モデル固有周期 (EW 方向)

EW 方向	シミュレーションモデル	工認モデル
1 次周期 (刺激係数)	0.230 (2.312)	0.230 (2.179)
2 次周期 (刺激係数)	0.127 (2.350)	0.125 (1.925)

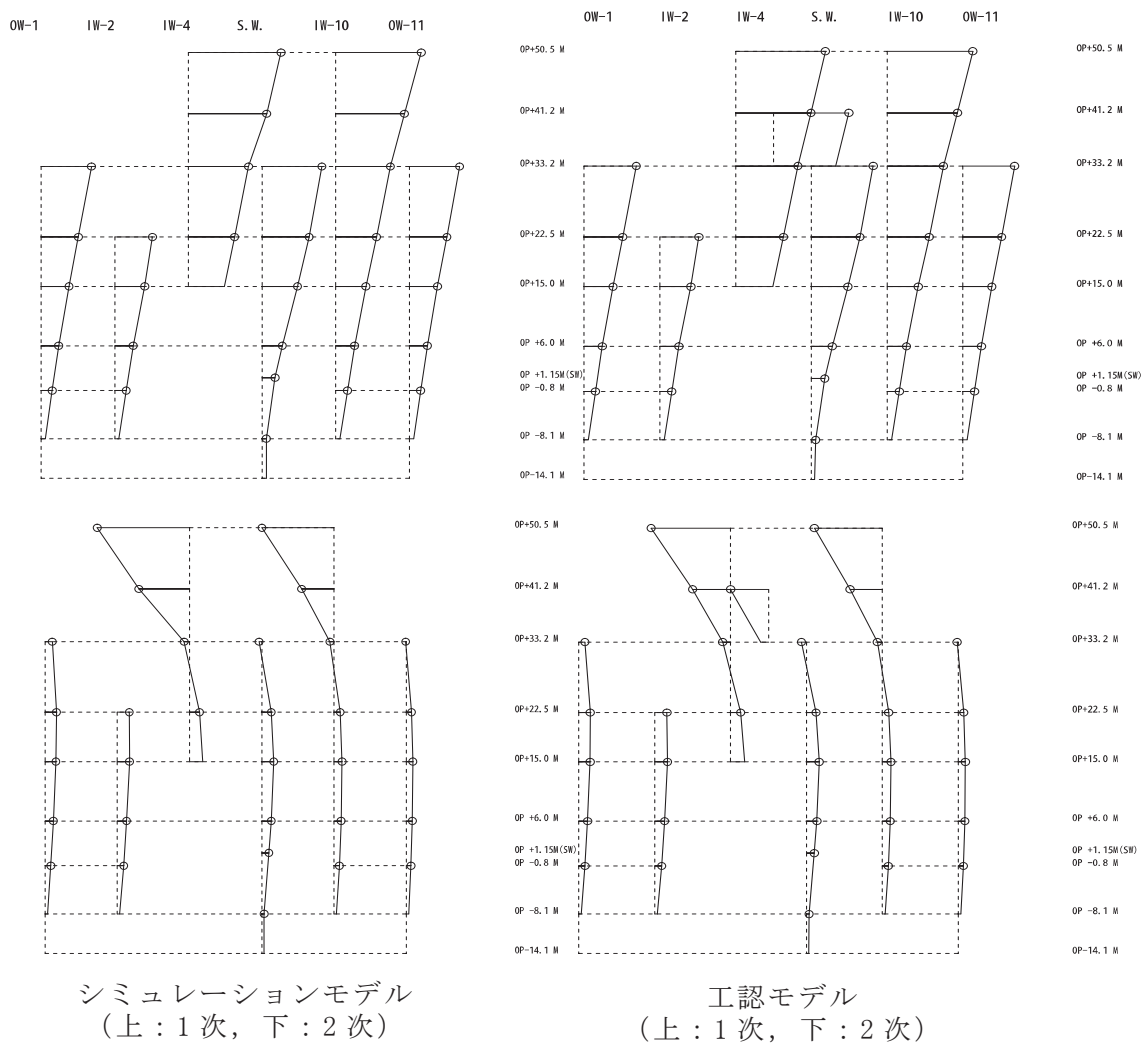


図 6-6 固有振動モード (EW 方向)

6.3 耐震補強工事前後の保有水平耐力の比較

耐震補強工事前後について、クレーン階及び地上3階の保有水平耐力を比較した。

耐震補強工事前に比べて、NS方向では、クレーン階で約1.58倍、地上3階で約1.36倍、EW方向では、地上3階で約1.18倍となっており、保有水平耐力が向上していることを確認した。

なお、NS方向クレーン階の補強部材の保有水平耐力は、既存躯体との接合部を含めた補強部材の終局せん断耐力の最小値とし、既存の耐震壁の終局耐力は、せん断ひずみ 4×10^{-3} と仮定して、クレーン階の補強部材はこのひずみにおける耐力を算定している。

表 6-3 耐震補強前後の保有水平耐力の比較

レベル	方向	保有水平耐力 Q_u (kN)		補強後 ΣQ_u (kN)
		既設躯体	補強部材	
クレーン階	NS	106,422	61,200	167,622
	EW	133,625	—	133,625
地上3階	NS	187,974	67,060	255,034
	EW	194,132	35,044	229,176

6.4 耐震補強工事前後の剛性の比較

耐震補強工事を行った NS 方向 C 通り，NS 方向 J 通り，EW 方向 4 通り F 通りの耐震補強工事前後の地震応答解析モデルのせん断剛性及び曲げ剛性を比較して表 6-4 及び表 6-5 に示す。

耐震補強工事前に比べて，せん断剛性は，NS 方向ではクレーン階で約 1.43 倍，地上 3 階で約 2.28 倍，EW 方向では地上 3 階で約 1.91 倍となっている。曲げ剛性は，NS 方向ではクレーン階で約 1.53 倍以上，地上 3 階で約 1.19 倍以上，EW 方向では地上 3 階で約 1.29 倍となっている。

耐震補強工事の実施により，オペフロ上部のせん断剛性及び曲げ剛性も向上していることを確認した。

表 6-4 耐震補強前後の地震応答解析モデルのせん断剛性の比較

方向	通り	階	設計時 GA (kN)	補強前 GA (kN)	補強部材 GA (kN)	増加率 (補強後/設計時)	増加率 (補強後/補強前)
NS	IW-C	地上 3 階	2.07×10^8	6.21×10^7	7.94×10^7	0.68	2.28
		クレーン階	1.14×10^8	3.41×10^7	1.46×10^7	0.43	1.43
	IW-J	地上 3 階	2.07×10^8	6.21×10^7	7.94×10^7	0.68	2.28
		クレーン階	1.14×10^8	3.41×10^7	1.46×10^7	0.43	1.43
EW	IW-4	地上 3 階	1.98×10^8	9.90×10^7	9.01×10^7	0.95	1.91

表 6-5 耐震補強前後の地震応答解析モデルの曲げ剛性の比較

方向	通り	階	設計時 EI (kN・m ²)	補強前 EI (kN・m ²)	補強部材 EI (kN・m ²)	増加率 (補強後/設計時)	増加率 (補強後/補強前)
NS	IW-C	地上 3 階	1.68×10^{11}	5.04×10^{10}	1.76×10^{10}	0.40	1.35
		クレーン階	1.02×10^{11}	3.05×10^{10}	1.63×10^{10}	0.46	1.54
	IW-J	地上 3 階	1.81×10^{11}	5.42×10^{10}	1.01×10^{10}	0.36	1.19
		クレーン階	1.03×10^{11}	3.10×10^{10}	1.63×10^{10}	0.46	1.53
EW	IW-4	地上 3 階	3.31×10^{11}	1.66×10^{11}	4.76×10^{10}	0.64	1.29

6.5 追設耐震壁に発生する曲げモーメントの応力伝達

耐震補強工事でオペフロ上部に設置する追設耐震壁は、せん断耐力を向上させることを目的として設置したものである。一方で、水平方向地震時においては、当該層に発生する曲げモーメントの一部を負担する。追設耐震壁は構面内の既存の柱とクレーン階レベルに追設したはりで構成されるフレーム内に配置していることから、当該層が水平地震時に受ける曲げモーメントに対しては、構面内の既存の耐震壁と一体で曲げ変形するとして、曲げモーメントの中立軸は既設耐震壁と同一としている。

地震応答解析モデルでは、上記の中立軸に対して評価した曲げ剛性を有する曲げせん断要素として追設耐震壁は既設耐震壁と個別にモデル化しており、地震応答解析の結果、当該層に作用する曲げモーメントは剛性に応じて既設耐震壁と追設耐震壁に分配される。

中立軸から離れた位置にある追設耐震壁では、曲げモーメントにより軸方向引張力及び圧縮力が作用する。追設耐震壁は周囲のフレームにより拘束されているため、曲げモーメントにより発生する引張力は、隣接するフレームの柱を介して下階に伝達されると考えられる。隣接する柱に伝達する引張力は曲げモーメントの値に応じて変動するが、設計においては、追設耐震壁の鉄筋が全て降伏した状態を仮定した場合に追設耐震壁に作用する引張力に対しても、隣接する柱の主筋または鉄骨で全て負担できることを追設耐震壁の鉄筋量と隣接柱の鉄筋及び鉄骨の量の比較により確認している。曲げモーメントに対する追設耐震壁の設計での考え方について図 6-7 に、追設耐震壁と隣接柱の鉄筋量の比較を表 6-6 に示す。

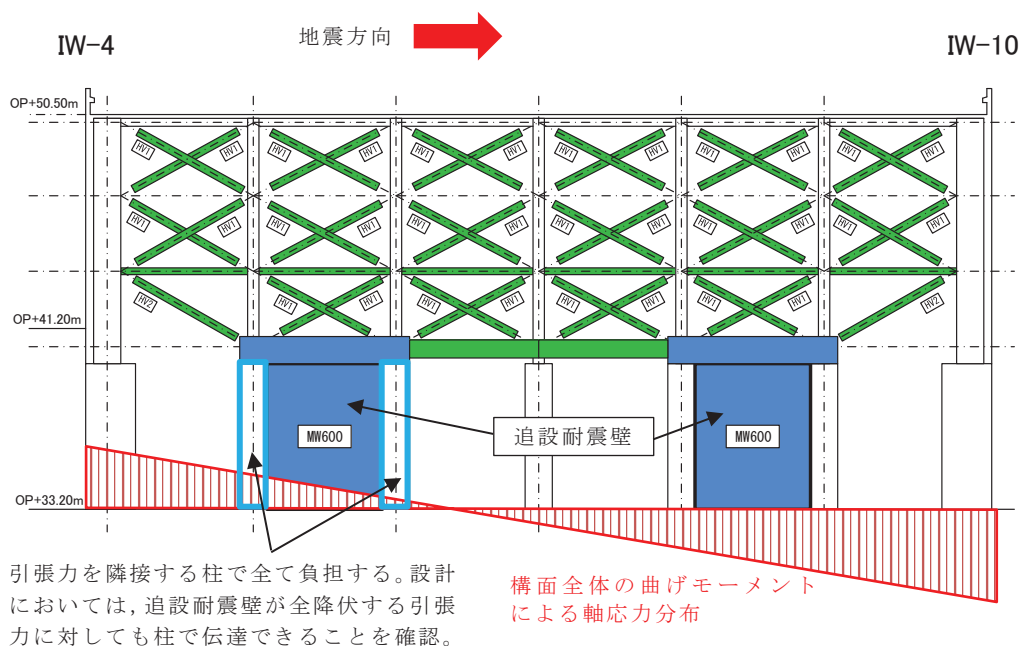


図 6-7 追設耐震壁の曲げモーメントに対する設計での考え方

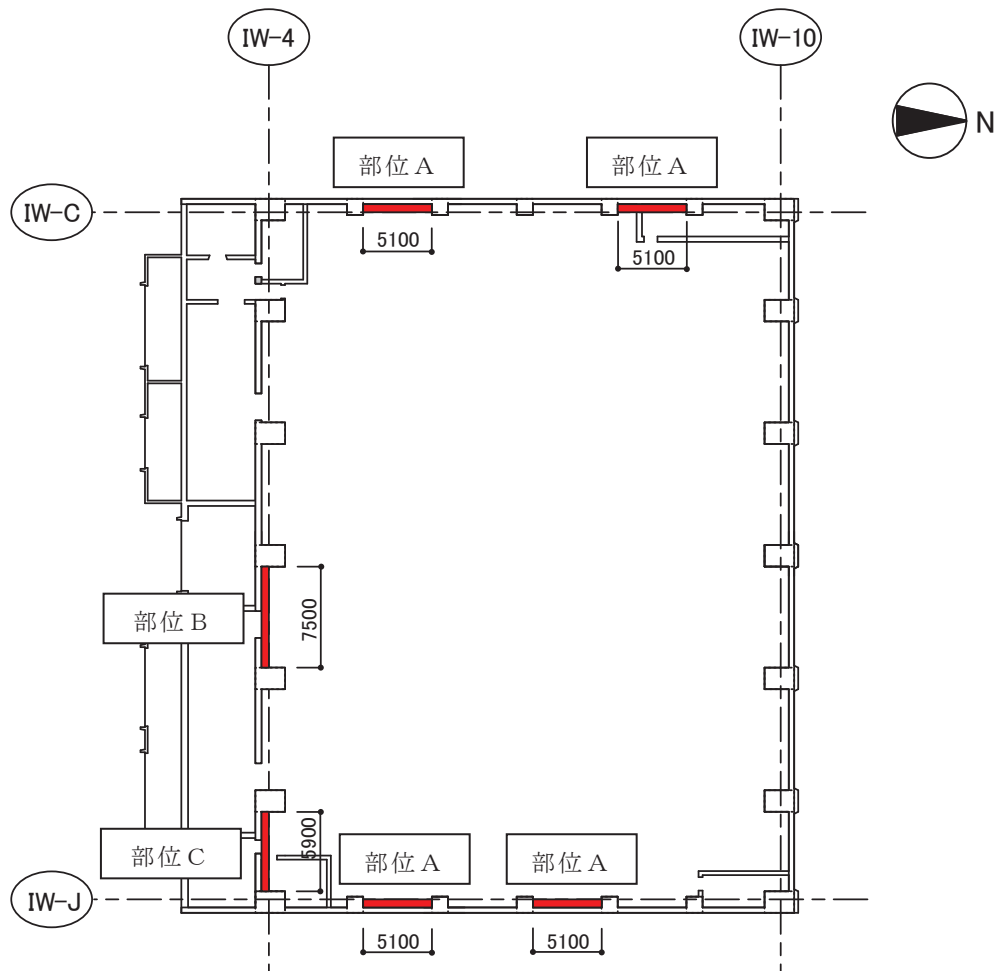
表 6-6 追設耐震壁と隣接柱の鉄筋量の比較

方向	通り	部位	追設耐震壁		隣接柱		比率 (①/④)
			①鉄筋量* ¹ (mm ²)	②鉄筋量* ¹ (mm ²)	③鉄骨量* ^{1*2} (mm ²)	④合計* ¹ (②+③) (mm ²)	
NS	IW-C	A	12191	13680	—	13680	0.90
	IW-J						
EW	IW-4	B	17618	15960	47742	63702	0.28
		C	14520	6840* ³	47742* ³	54582* ³	0.27

注記*1 : 追設耐震壁はスパン半分の値, 隣接柱は片側 1 本分の値とする。地震応答解析モデルで既設耐震壁及び追設耐震壁として剛性評価している部分は柱の鉄筋量または鉄骨量に参入しない。

*2 : 柱主筋 (SD345 相当) と鉄骨 (SM490A) の降伏耐力比 (325/345) により補正した値。なお, 隣接柱の鉄骨はオペフロの下層 (O.P. 22.55m または O.P. 24.85m) から立ち上がっていることから, 曲げモーメントに対する抵抗要素として寄与するものと判断した。

*3 : 柱主筋の少ない RJ 通り側柱の値とする。



別紙 19-1 耐震補強による地震応答特性への影響について

目 次

1.	検討の目的と概要.....	別紙 19-1- 1
2.	ねじれ応答増幅による影響検討.....	別紙 19-1- 3
2.1	ねじれ補正係数による検討.....	別紙 19-1- 3
2.2	地震応答解析による検討.....	別紙 19-1-11
2.3	地震観測記録による検討.....	別紙 19-1-30
3.	面外応答増幅による影響検討.....	別紙 19-1-43
3.1	妻壁の面外応答の検討.....	別紙 19-1-43
4.	まとめ.....	別紙 19-1-54

1. 検討の目的と概要

原子炉建屋の地上3階から屋上階までの耐震壁には、RC造耐震壁及び鉄骨造ブレース等による耐震補強を実施している。

耐震補強前後の地震観測記録のNS方向の地上3階に対する屋上階の伝達関数の分析では、1次ピーク振動数が高振動数側に移動したことから、耐震補強により地上3階より上部の建屋剛性が向上したことを示している。また、耐震補強後は地上3階に対する屋上階の伝達関数の1次ピーク振動数の高振動数側への移動が見られる一方、振動数のピークが2山に分かれる現象も確認されており、ねじれによる影響の可能性が考えられる。

また、耐震補強部材の追設による躯体重量増加に伴う面外応答への影響も考えられる。

本検討では、耐震補強によるねじれ応答等の地震応答特性への影響について検討することを目的とし、以下の4点について検討を行った。本検討の全体概要を図1-1に示す。

- ① ねじれ補正係数による検討
- ② 地震応答解析による検討
- ③ 地震観測記録による検討
- ④ 妻壁の面外応答の検討

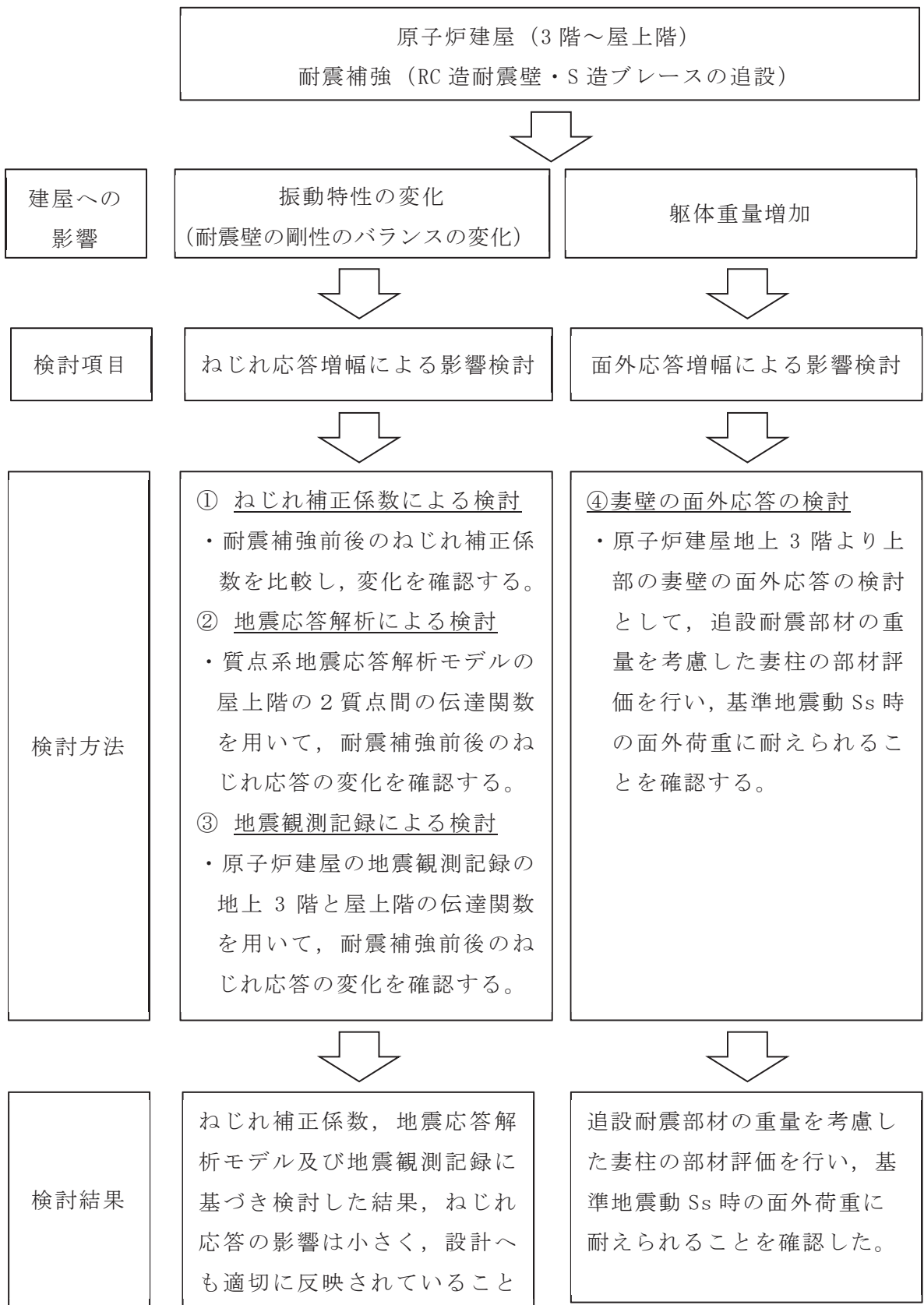


図 1-1 全体概要

2. ねじれ応答増幅による影響検討

2.1 ねじれ補正係数による検討

2.1.1 検討目的

本検討は、構造設計の観点から、耐震補強前後の建屋の偏心率、形状特性係数及びねじれ補正係数を比較し、耐震補強の振動特性への影響を確認することを目的とする。

2.1.2 検討方法

耐震補強後の建屋の偏心率、形状特性係数及びねじれ補正係数を、既工認時の構造計算書に従い算定し、耐震補強前後のねじれ補正係数を比較する。

2.1.3 地震応答解析モデル

原子炉建屋の地震応答解析モデルを図 2-1～図 2-2 に示す。

Fc=	32.4	N/mm ²
	33	N/mm ² (補強耐震壁)
Ec=	19860	N/mm ²
	7940	N/mm ² (オペフロ上部)
	25200	N/mm ² (補強耐震壁)
Gc=	8530	N/mm ²
	3410	N/mm ² (オペフロ上部)
	10500	N/mm ² (補強耐震壁)
Es=	205900	N/mm ² (鉄骨ブレース)
Gs=	79400	N/mm ² (鉄骨ブレース)

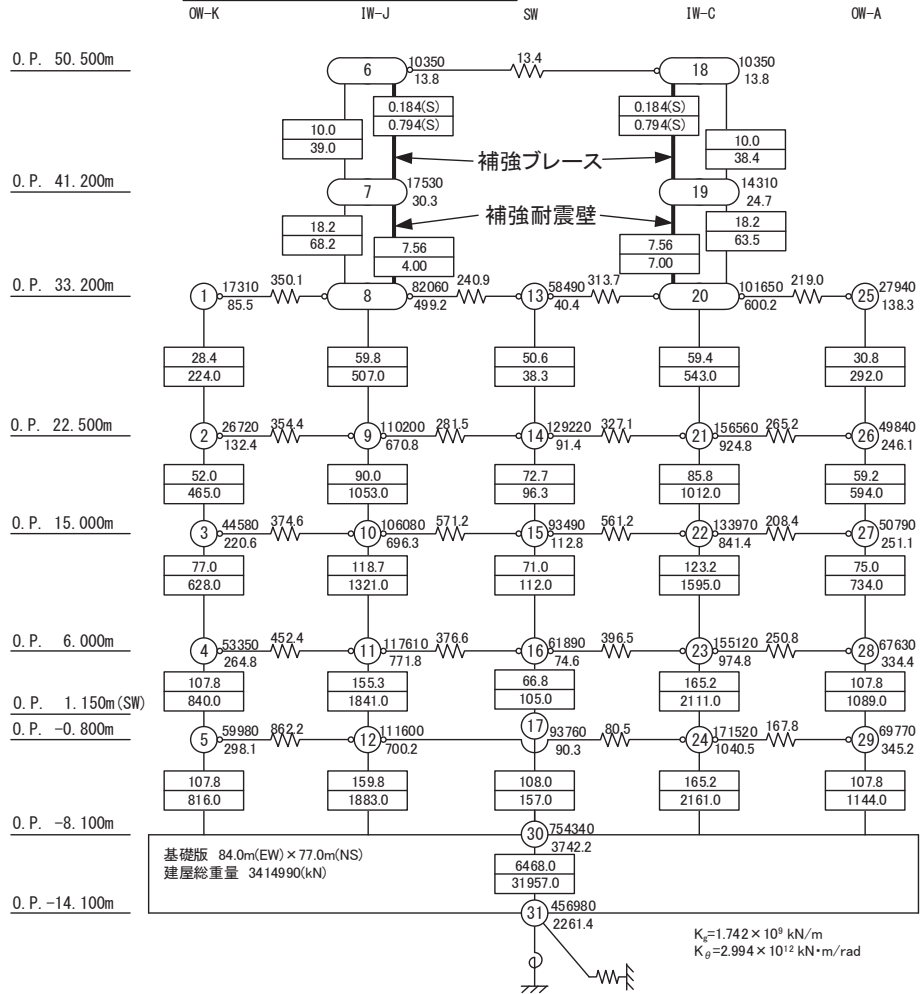
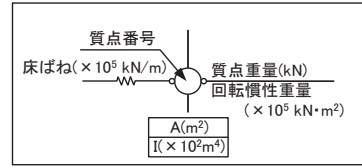
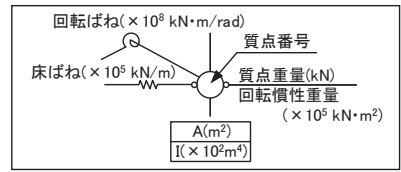


図 2-1 原子炉建屋地震応答解析モデル (NS 方向)

$F_c =$	32.4	N/mm ²
	33	N/mm ² (補強耐震壁)
$E_c =$	21180	N/mm ²
	13240	N/mm ² (オペフロ上部)
	25200	N/mm ² (補強耐震壁)
$G_c =$	9100	N/mm ²
	5690	N/mm ² (オペフロ上部)
	10500	N/mm ² (補強耐震壁)



OW-1 IW-2 IW-4 SW IW-10 OW-11

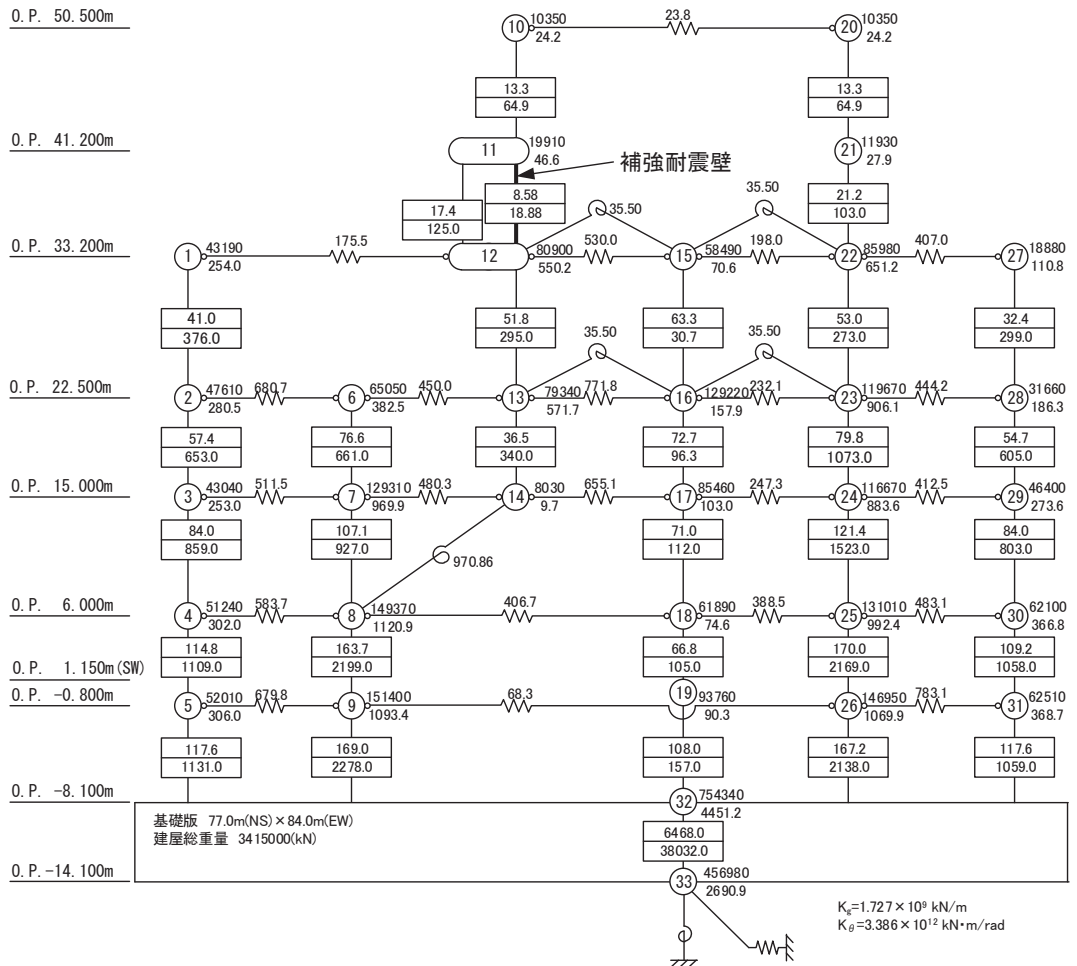


図 2-2 原子炉建屋地震応答解析モデル (EW 方向)

2.1.4 偏心率の算定

偏心率を算定する際に用いる座標は、原点を 0W-1 通り-1.0m, 0W-K 通り-1.0m とする。各階の重心は、地震応答解析モデルの質点重量を算定するために用いた平面区画に基づき、それらの区画の図心に負担軸力が作用するとして求める。各階の偏心率は、下式により算定する。

$$\text{Re}_x = \frac{e_y}{re_x}, \quad \text{Re}_y = \frac{e_x}{re_y}$$
$$re_x = \sqrt{\frac{J_x + J_y}{\sum D_x}}, \quad re_y = \sqrt{\frac{J_x + J_y}{\sum D_y}}$$

ここで、 Re_x , Re_y : x 方向及び y 方向の偏心率

e_x , e_y : 重心と剛心の距離 (偏心距離)

D_x , D_y : x 方向及び y 方向の剛性 (各耐震要素のせん断断面積とする)

J_x , J_y : 剛心に対する D_x 及び D_y の二次モーメント

$$J_x = \sum (D_x \cdot y^2), \quad J_y = \sum (D_y \cdot x^2)$$

x, y : 剛心を原点とする座標

増設鉄骨ブレース及び増設耐震壁の D_x , D_y については、オペフロ上部 (既存部) のせん断弾性係数 G_c (op) と、増設鉄骨ブレースのせん断弾性係数 G_s 及び増設耐震壁のせん断弾性係数 G_c (w) との比率を、せん断断面積に乗じた値とする。偏心率の算定結果を表 2-1 に示す。

表 2-1 偏心率

レベル (m)	Kr (m ⁴)	rey (m)	rex (m)	ex (m)	ey (m)	Rey	Rex
OP+41.2	15064.2	33.65	32.14	0.00	0.00	0.00	0.00
OP+33.2	49909.7	37.69	29.48	6.14	0.01	0.16	0.00
OP+22.5	261033.6	36.76	38.99	-1.45	1.67	-0.04	0.04
OP+15.0	464396.7	39.20	40.77	1.11	1.41	0.03	0.03
OP+ 6.0	651297.6	41.73	42.21	-2.13	0.99	-0.05	0.02
OP+ 0.8	850957.6	41.27	42.55	-0.87	0.91	-0.02	0.02
OP- 8.1	870893.9	40.03	41.42	-0.55	1.25	-0.01	0.03

Kr : 剛心周りのねじり剛性 $\Sigma Kx + \Sigma Ky$
 rey : 弾力半径 $\sqrt{Kr / \Sigma Diy}$
 rex : 弾力半径 $\sqrt{Kr / \Sigma Dix}$
 ex, ey : 偏心距離 (重心が剛心より座標負方向にある場合負値となる)
 Rey : 偏心率 ex/rey
 Rex : 偏心率 ey/rex

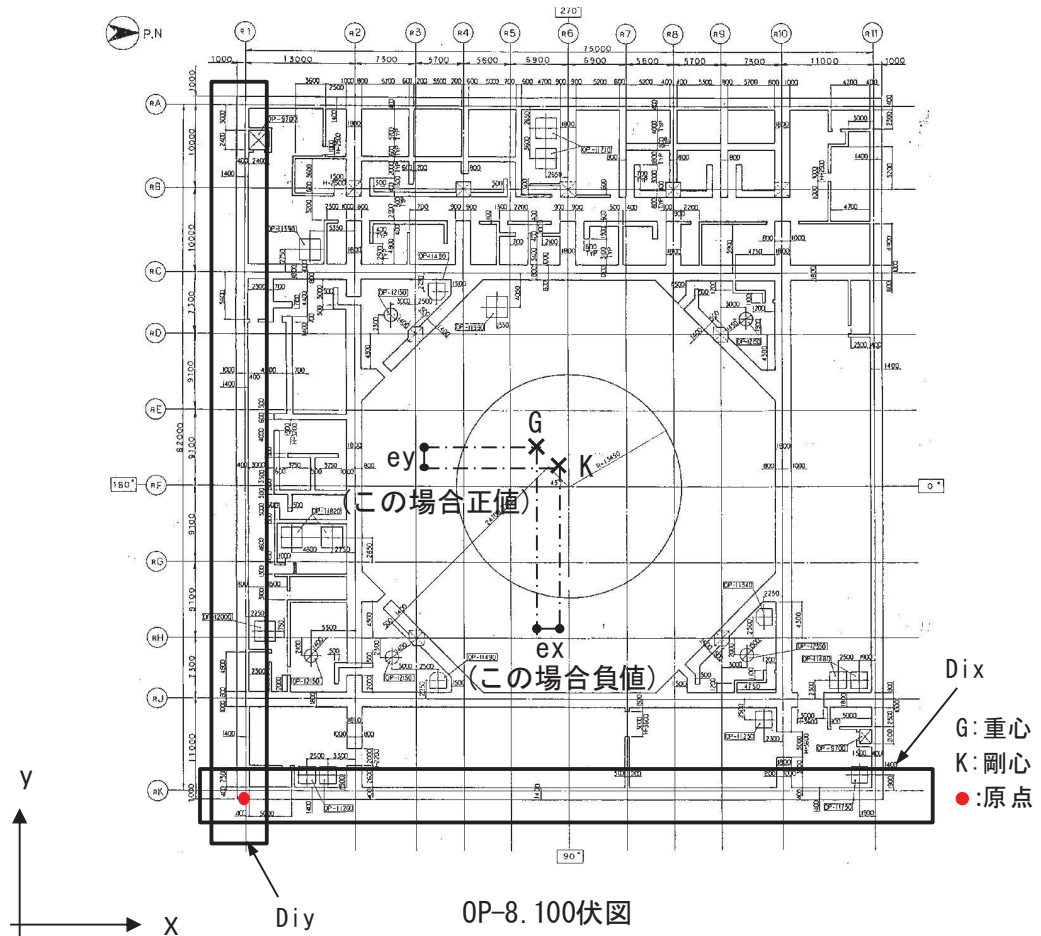


図 2-3 原子炉建屋の重心と剛心の位置

2.1.5 形状特性係数の算定

各層の形状特性係数は、下式により求める。

$$F_{es} = F_s \cdot F_e$$

ここで、 F_{es} ：形状特性係数

F_s ：剛性率による割り増し係数

F_e ：偏心率による割り増し係数

偏心率	F_e
$Re \leq 0.15$	1.0
$0.15 < Re < 0.3$	直線補間
$Re \geq 0.3$	1.5

必要保有水平耐力を算定するにあたり、スペクトルモーダル解析から求めた Ai 分布を用いている。よって、外力分布に各振動モードの寄与分が反映されているため、剛性率による割り増し係数は既に考慮されているものと考え、 $F_s = 1.0$ とする。

また、偏心率による割り増し係数は偏心率が 0.15 を上回った地上 3 階 EW 方向のみ $F_e = 1.03$ とし、それ以外は $F_e = 1.0$ とする。

以上より、形状特性係数は地上 3 階 EW 方向のみ $F_{es} = 1.03$ で、それ以外は $F_{es} = 1.0$ （設計時と同じ）となる。安全余裕度（保有水平耐力の必要保有水平耐力に対する比）を表 2-2 に示す。

表 2-2 安全余裕度

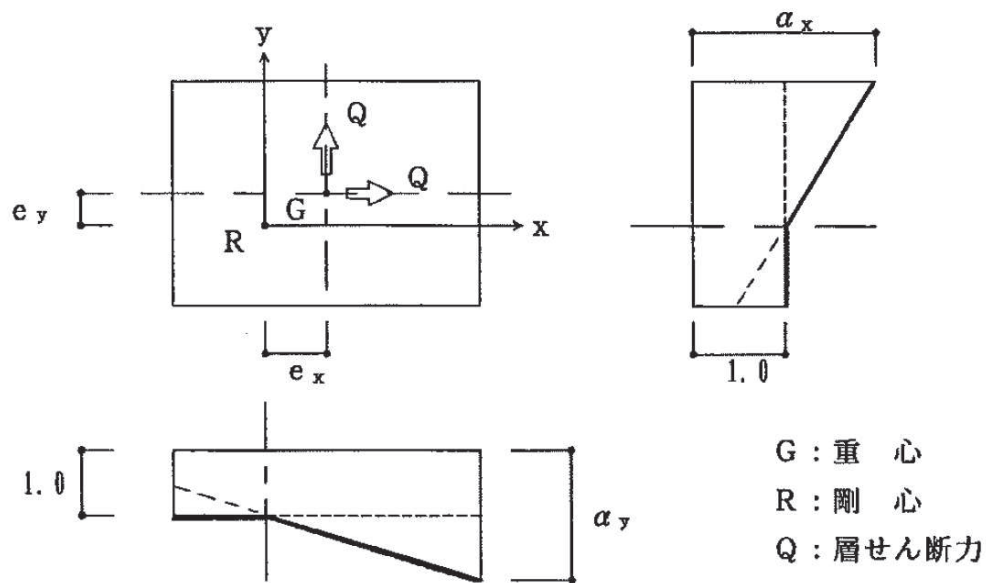
NS方向				EW方向			
NS	Qu (t)	Qun (t)	Qu/Qun	EW	Qu (t)	Qun (t)	Qu/Qun
クレーン階	17093	4270	4.00	クレーン階	13626	4192	3.25
3階	26006	7495	3.47	3階	23369	7882	2.96
2階	107200	29574	3.62	2階	114077	30069	3.79
1階	171313	57600	2.97	1階	180584	57874	3.12
地下1階	233674	76587	3.05	地下1階	235959	76657	3.08
地下2階	298566	89371	3.34	地下2階	309920	89275	3.47
地下3階	322048	98872	3.26	地下3階	335096	98872	3.39

2.1.6 ねじれ補正係数の算定

ねじれ補正係数は、層せん断力の作用線（重心）と剛心のずれ（ねじれ）の影響を考慮して、下式により算定する。

$$\alpha_x = 1 + \frac{\sum D_x \cdot e_y}{J_x + J_y} \cdot y, \quad \alpha_y = 1 + \frac{\sum D_y \cdot e_x}{J_x + J_y} \cdot x$$

ここで、 α_x 、 α_y ：x方向及びy方向のねじれ補正係数



2.1.7 ねじれ補正係数による検討結果

既工認時と新たに算定したねじれ補正係数の比較を表 2-3 に示す。

両者を比較した結果，耐震補強部材を考慮しても，ねじれ補正係数の変化は少なく，建屋の振動特性への影響は小さいことを確認した。

表 2-3 ねじれ補正係数の比較

NS方向

レベル	RK		RJ		SHELL		RC		RB		RA		備考
	補強後	補強前 (既工認時)	補強後	補強前 (既工認時)	補強後	補強前 (既工認時)	補強後	補強前 (既工認時)	補強後	補強前 (既工認時)	補強後	補強前 (既工認時)	
OP+41.2	—	—	1.00	1.00	—	—	1.00	1.00	—	—	—	—	新設ブレース
	—	—	1.00	—	—	—	1.00	—	—	—	—	—	
OP+33.2	—	—	1.00	1.00	—	—	1.00	1.00	—	—	—	—	新設壁
	—	—	1.00	—	—	—	1.00	—	—	—	—	—	
OP+22.5	0.96	0.95	0.97	0.97	1.00	1.00	1.03	1.03	—	—	1.05	1.05	
OP+15.0	0.96	0.96	0.97	0.97	1.00	1.00	1.02	1.02	1.03	—	1.04	1.04	
OP+6.0	0.98	0.98	0.98	0.98	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	—	1.02	1.03	
OP+0.8	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	—	1.02	1.02	
OP-8.1	0.97	0.97	0.98	0.98	1.00	1.00	1.02	1.02	1.02	—	1.03	1.03	

EW方向

レベル	R1		R2		R4		SHELL		R10		R11		備考
	補強後	補強前 (既工認時)	補強後	補強前 (既工認時)	補強後	補強前 (既工認時)	補強後	補強前 (既工認時)	補強後	補強前 (既工認時)	補強後	補強前 (既工認時)	
OP+41.2	—	—	—	—	1.00	1.00	—	—	1.00	1.00	—	—	
OP+33.2	—	—	—	—	0.97	0.98	—	—	1.05	1.03	—	—	新設壁
	—	—	—	—	0.97	—	—	—	—	—	—	—	
OP+22.5	1.04	1.04	—	—	1.01	1.01	1.00	1.00	0.97	0.97	0.96	0.96	
OP+15.0	0.97	1.00	0.98	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.02	1.00	1.03	1.00	
OP+6.0	1.05	1.05	1.03	1.03	—	—	1.00	1.00	0.97	0.97	0.96	0.96	
OP+0.8	1.02	1.02	1.01	1.01	—	—	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	
OP-8.1	1.01	1.01	1.01	1.01	—	—	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	

2.2 地震応答解析による検討

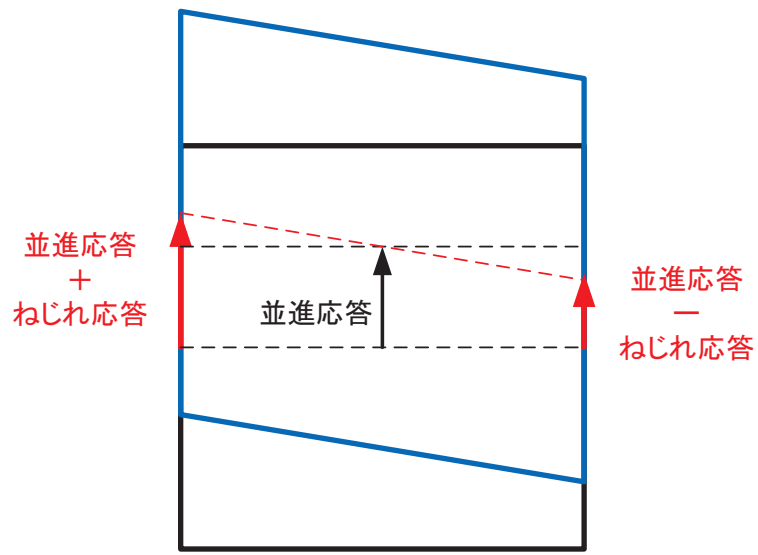
2.2.1 検討目的

本検討は、質点系地震応答解析モデルにおける、耐震補強前後のねじれ応答の変化を確認することを目的とする。

2.2.2 検討方法

耐震補強前後の質点系地震応答解析モデルについて、屋上階の2つの質点の伝達関数を算出し、2つの質点の応答で 180° の位相差が生じる振動数に着目し、耐震補強前後での振動特性の変化を確認する。この振動数では、2つの質点が互いに逆方向に振動していることになるため、この振動数をねじれ応答が生じる振動数であると判断する。

耐震補強後のモデルの伝達関数において、ねじれ応答が生じる振動数が存在しても、その振動数での入力地震動の増幅が小さければ、ねじれ応答の影響は小さいと判断できるため、基礎版上質点に対する屋上質点の伝達関数を算出し、ねじれ応答が生じる振動数での地震動の増幅を確認し、ねじれ応答の影響を評価する。



並進応答とねじれ応答の概念

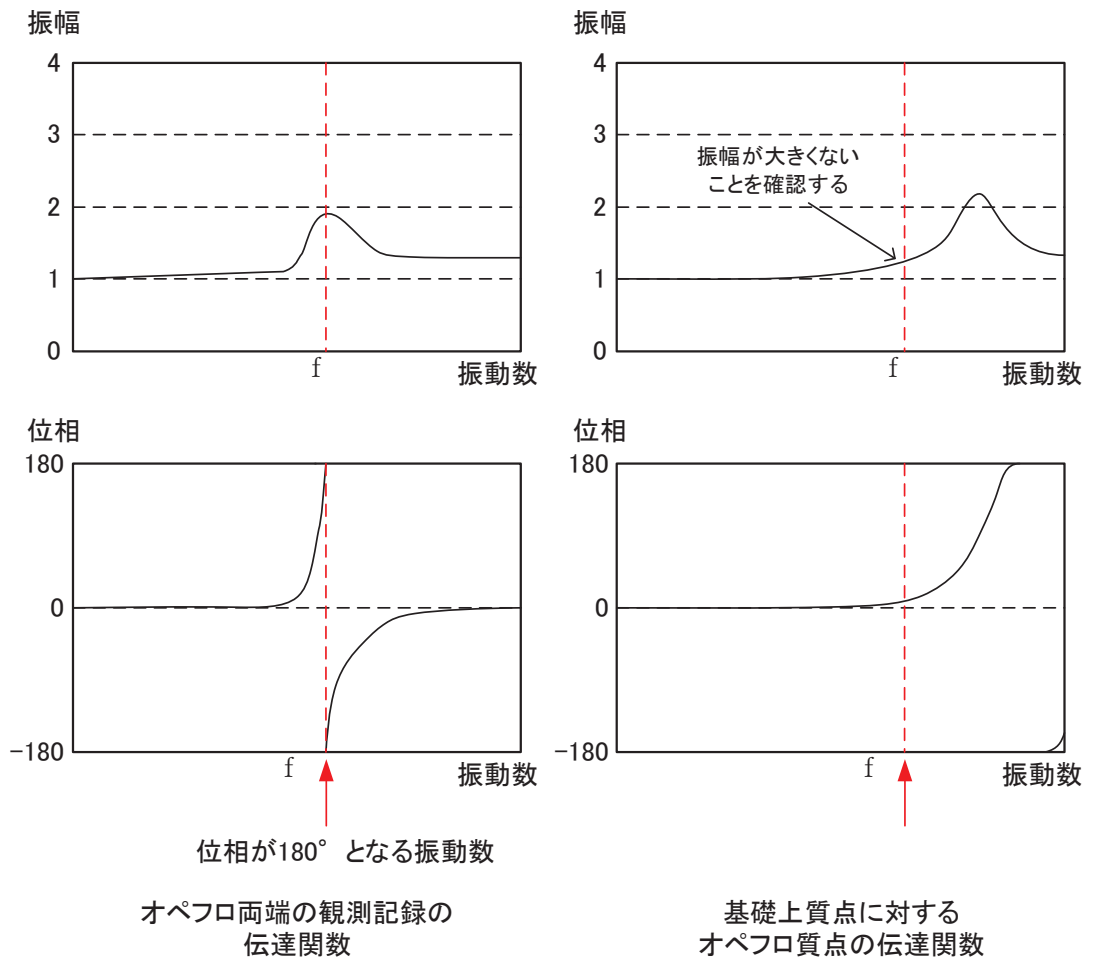
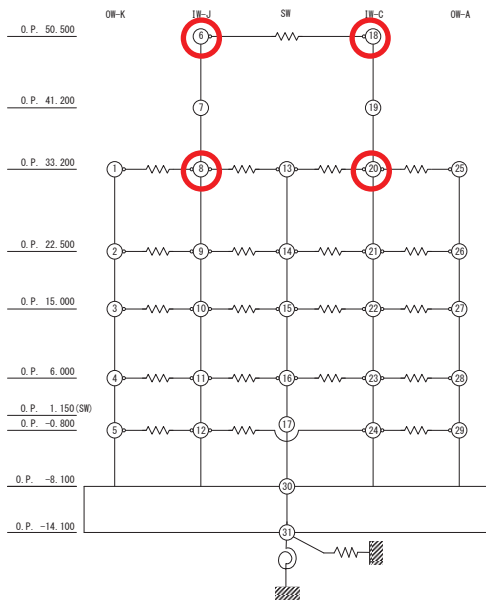


図 2-4 ねじれ応答の影響の検討方法の概念

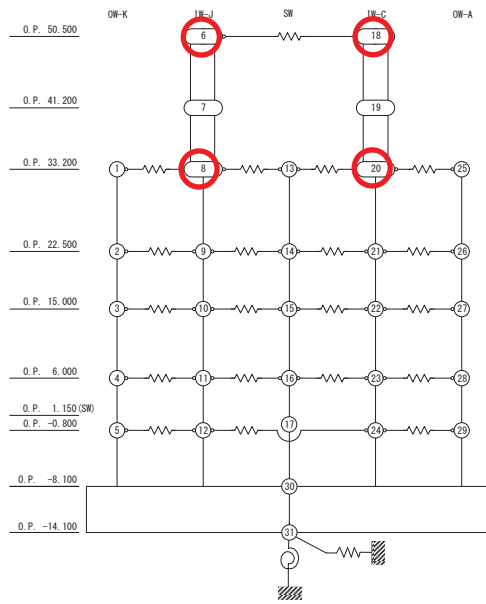
2.2.3 耐震補強前後の地上3階より上部のねじれ応答の変化

質点系モデルの屋上質点間の伝達関数の位相差が 180° となる振動数を確認することにより、耐震補強前後の地上3階より上部のねじれ応答について検討する。図2-5及び図2-6に屋上階のねじれ応答の検討に用いる質点系モデルの床応答評価位置を赤色の丸印で示す。

図2-7及び図2-8に耐震補強前後の質点系地震応答解析モデルの屋上階の伝達関数を比較して示す。NS方向については、耐震補強前はねじれ応答が生じる振動数は見られないが、耐震補強後のモデルでは14.2Hz付近で位相差が 180° となっており、ねじれ応答が生じることがわかる。EW方向では、耐震補強前のモデルでは13.6Hz付近、耐震補強後のモデルでは0.6Hz程度高振動数側の14.2Hz付近で位相差が 180° となっており、ねじれ応答が生じている。



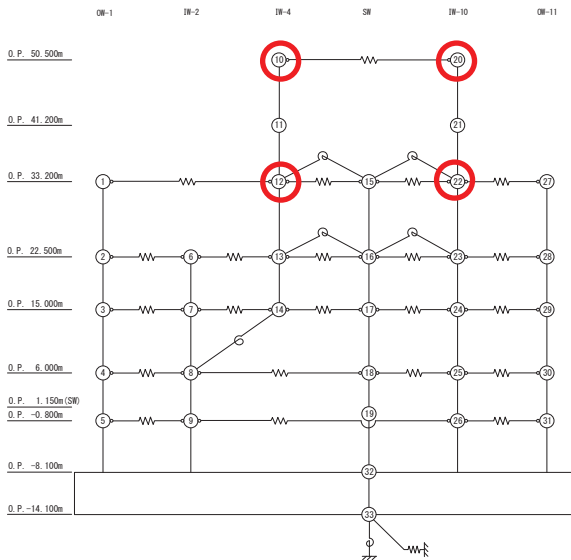
補強なし



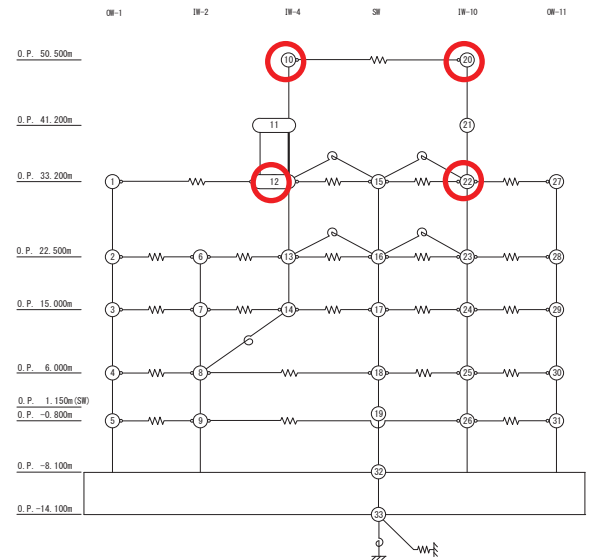
補強あり

○はねじれ応答の検討に用いる床応答の評価位置

図 2-5 質点系モデルによる応答評価位置 (NS 方向)



補強なし



補強あり

○はねじれ応答の検討に用いる床応答の評価位置

図 2-6 質点系モデルによる応答評価位置 (EW 方向)

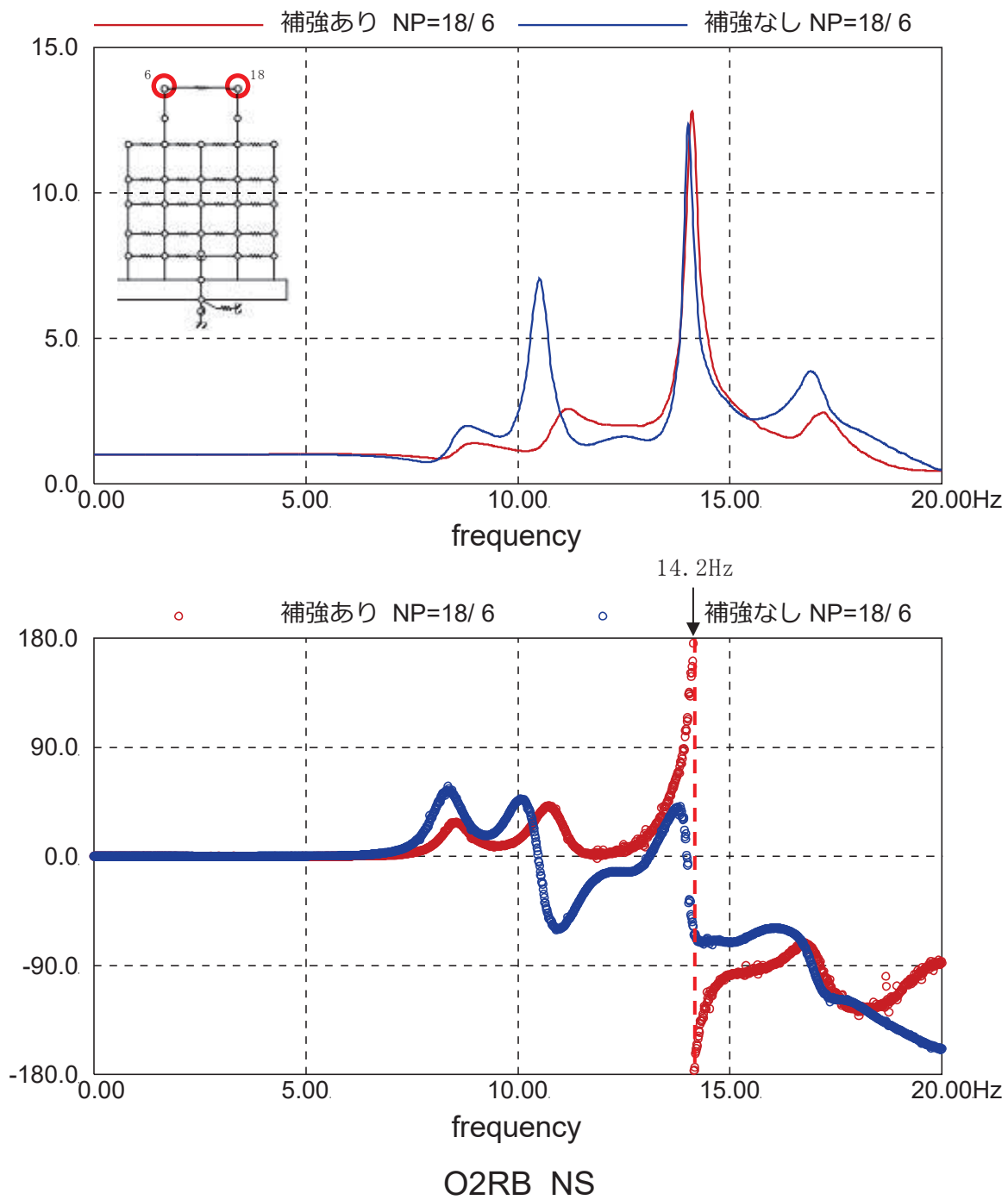


図 2-7 質点系モデル屋上質点間の伝達関数 (NS 方向)

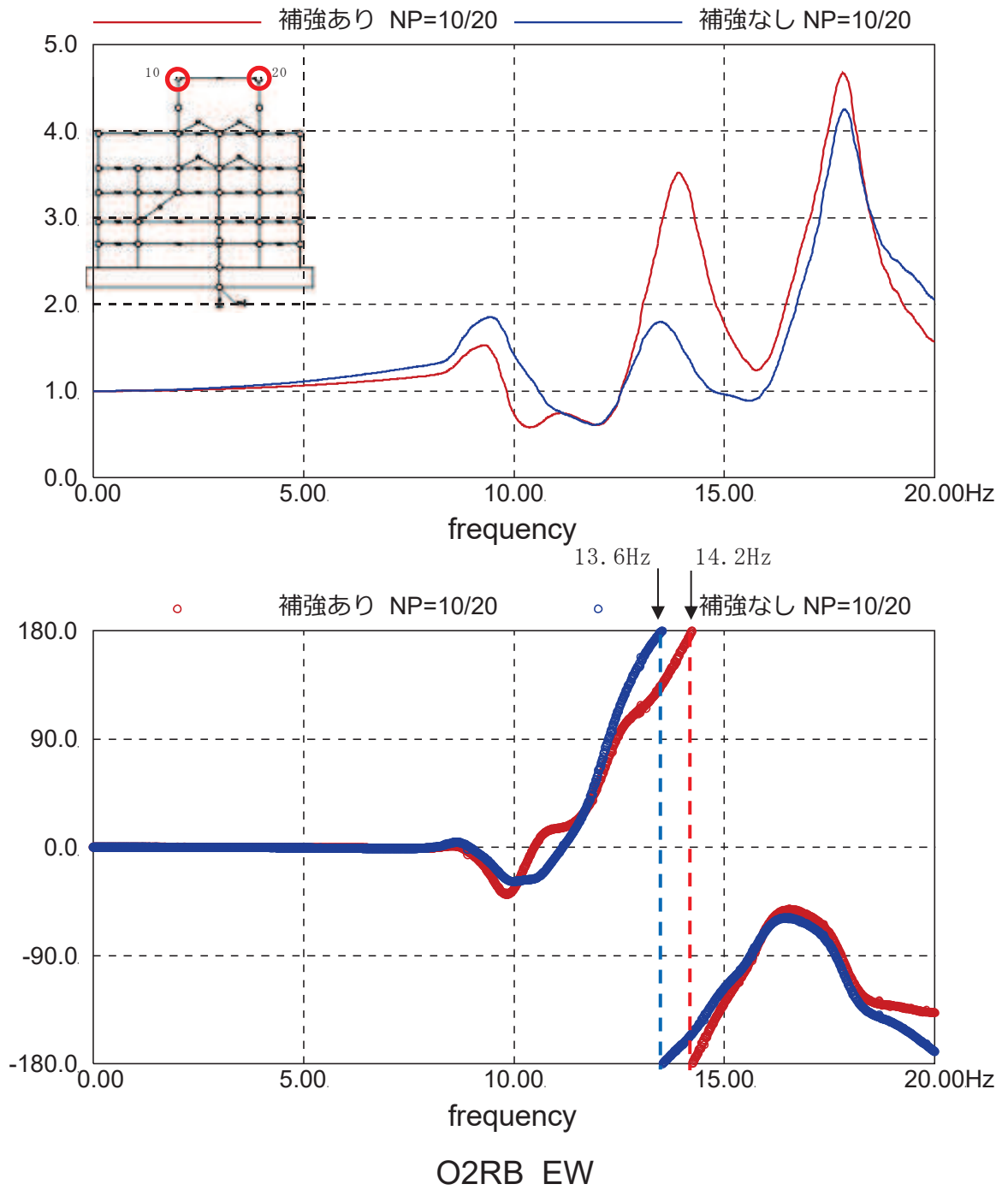


図 2-8 質点系モデル屋上質点間の伝達関数 (EW 方向)

2.2.4 地上3階より上部のねじれ応答の影響評価

「2.2.3 耐震補強前後の地上3階より上部のねじれ応答の変化」にて確認したねじれ応答が生じる振動数付近の建屋応答の増幅について基礎版上質点に対する屋上質点の伝達関数を用いて検討する。

図2-9～図2-12に耐震補強前後のNS方向及びEW方向の基礎版上質点に対する屋上質点の伝達関数を示す。

NS方向IW-C通りでは、耐震補強後に屋上のねじれ応答が生じる振動数である14.2Hz付近の振幅は4程度であり、1次振動数である4.4Hz付近の23程度、2次振動数である8.5Hz付近の振幅20程度に比べて小さく、ねじれ応答の影響は小さいと判断される。

NS方向IW-J通りでは、14.2Hz付近の振幅は1以下となっている。

EW方向IW-4通りについては、耐震補強前のねじれ応答の振動数13.6Hz付近の振幅は7程度であり、耐震補強後の14.2Hz付近の振幅は9程度で若干増加するが変化は小さい。

EW方向IW-10通りについては、耐震補強前後のねじれ応答の振動数付近の振幅は4から3程度に減少している。

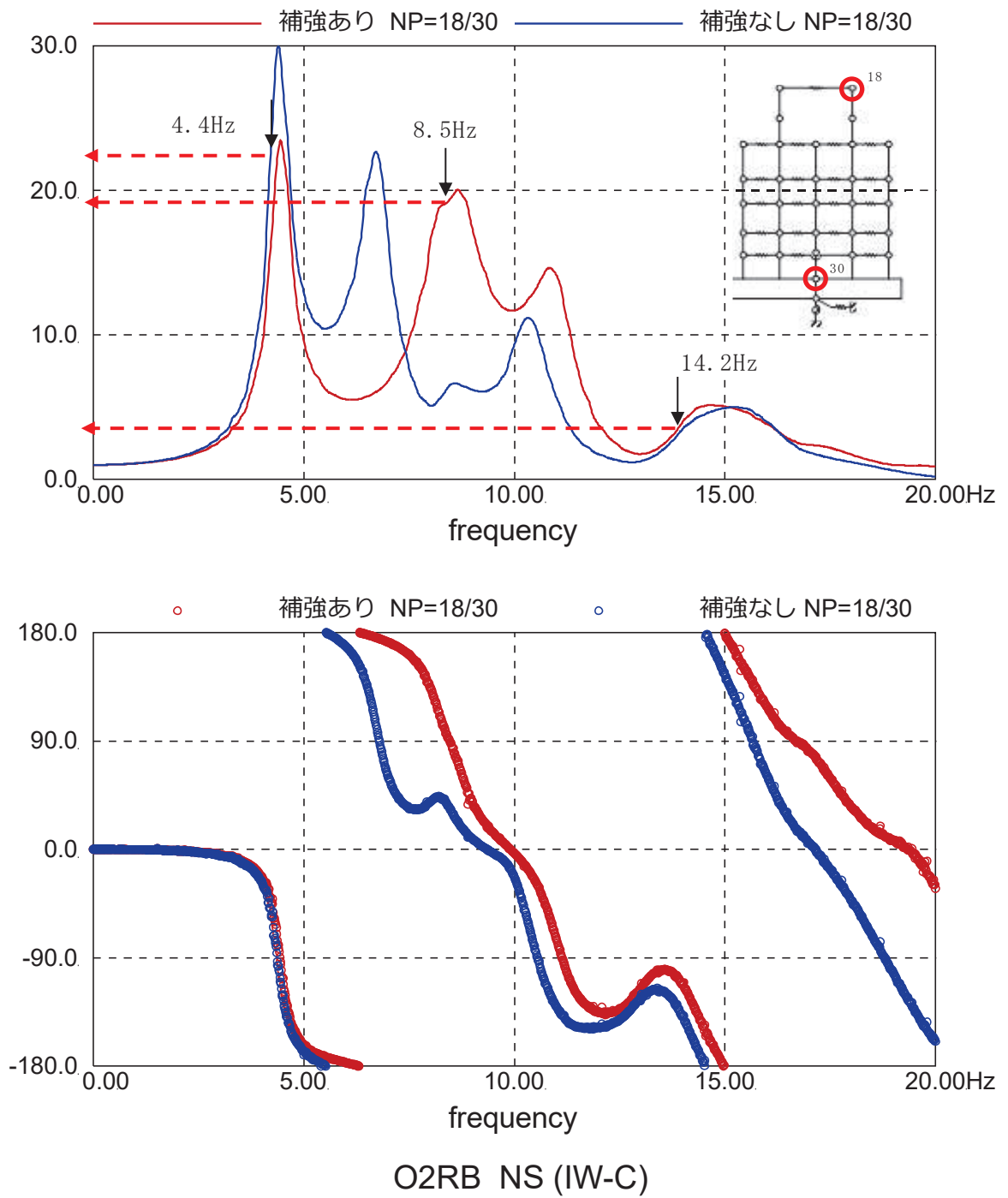


図 2-9 基礎版上質点に対する屋上質点の伝達関数 (NS 方向 IW-C 通り)

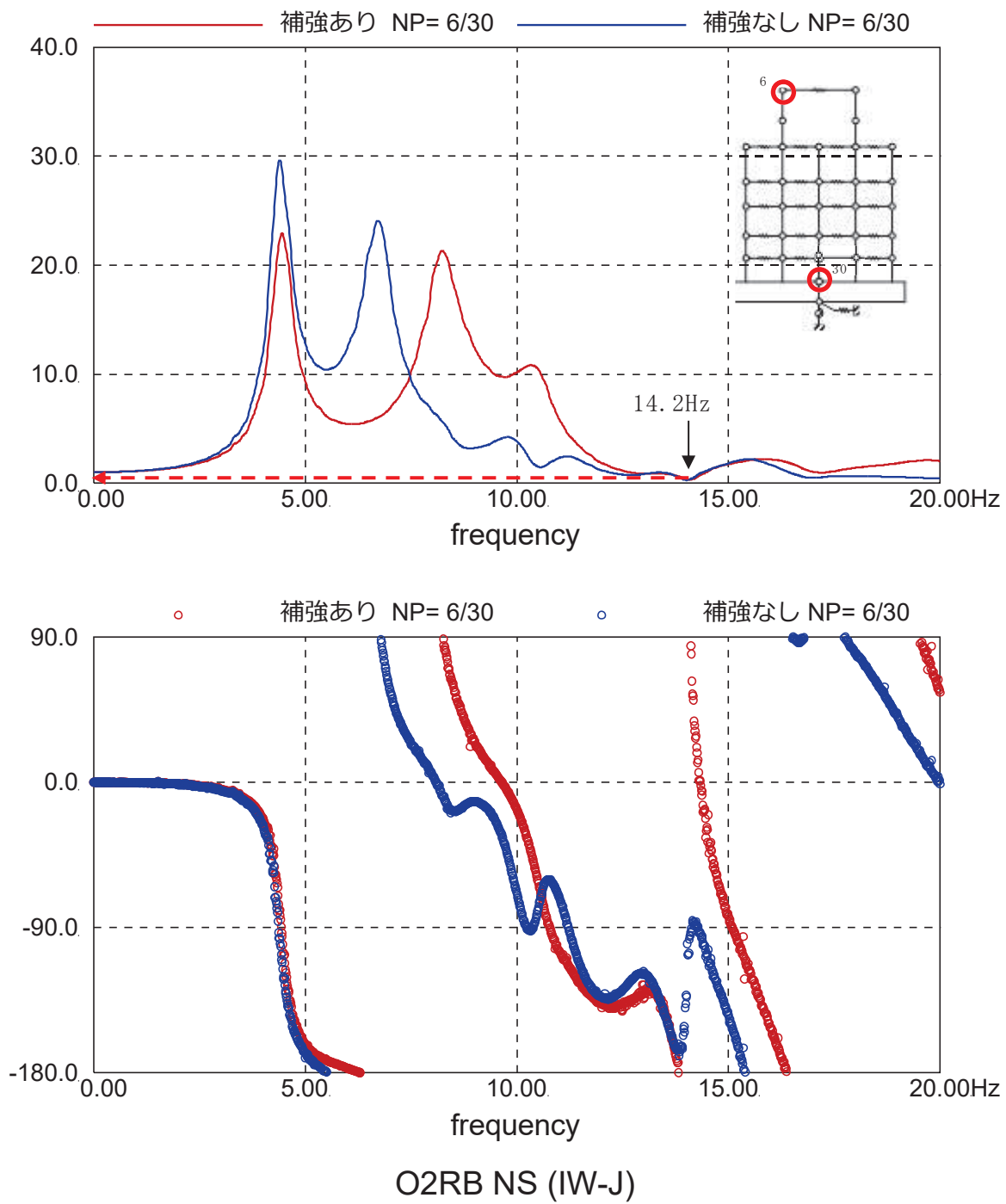


図 2-10 基礎版上質点に対する屋上質点の伝達関数 (NS 方向 IW-J 通り)

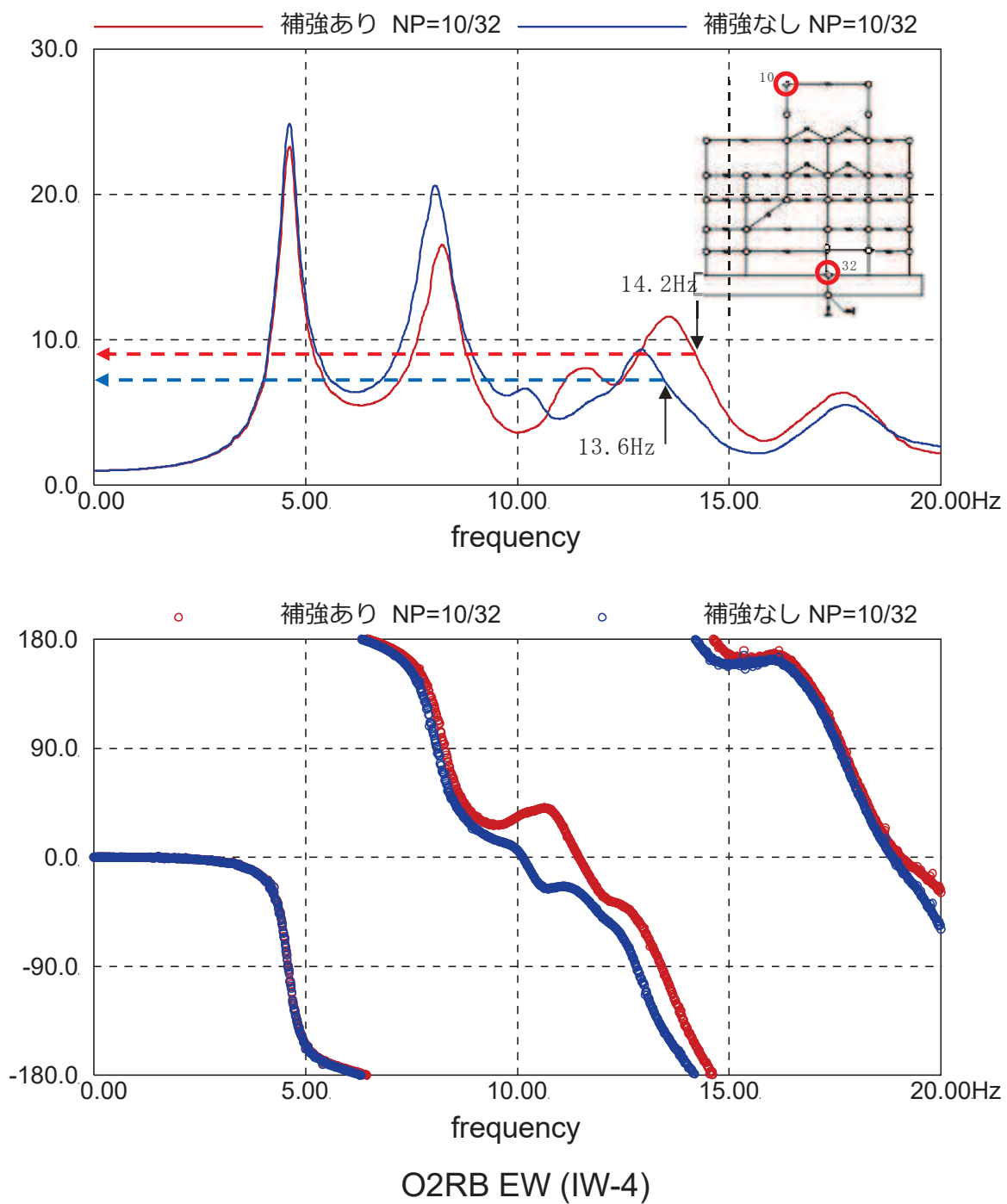


図 2-11 基礎版上質点に対する屋上質点の伝達関数 (EW 方向 IW-4 通り)

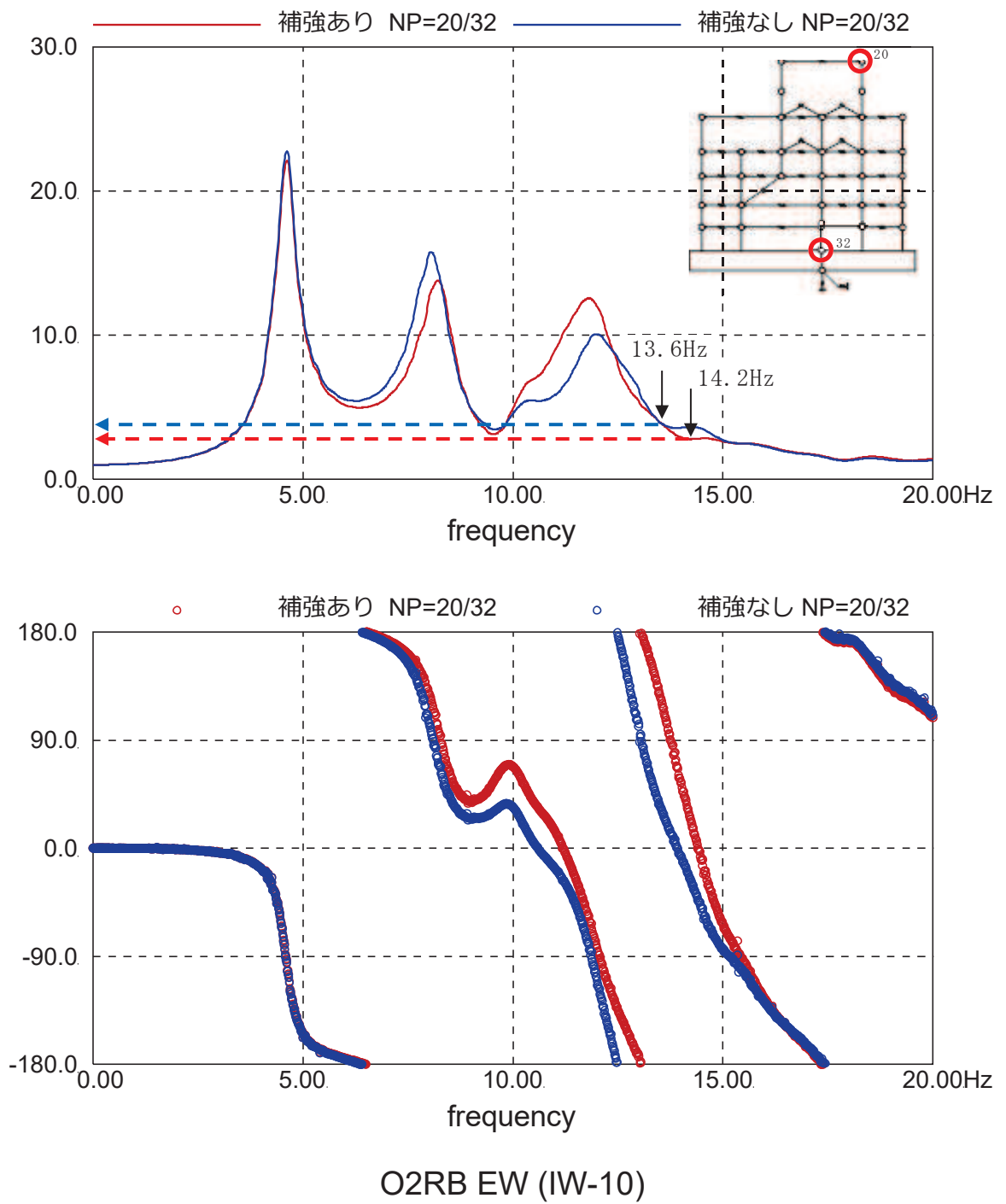


図 2-12 基礎版上質点に対する屋上質点の伝達関数 (EW 方向 IW-10 通り)

2.2.5 耐震補強前後の地上3階のねじれ応答の変化

次に、耐震補強後の地上3階に対する屋上階のNS方向の伝達関数のピークが2山に分かれる現象の検討を行う。

図2-13に基礎版上質点に対する地上3階西側質点の伝達関数を示す。また、図2-14及び図2-15に耐震補強前後のモデルの地上3階質点間の伝達関数を比較して示す。

NS方向について、図2-13で耐震補強前後を比較すると、耐震補強後には8.4Hz付近にピークがあることがわかる。また、図2-14で、補強前のモデルでは位相差が 180° になる振動数は見られないが、補強後のモデルでは8.4Hz付近で位相差が 180° となっており、ねじれ応答が生じることがわかる。なお、8.4Hzは別紙8で観測記録の分析から評価した地上3階床のねじれ振動数9Hz程度と概ね整合している。

一方、EW方向では、図2-15で、耐震補強前後のモデルの伝達関数の差は小さい。なお、8.6Hz付近で位相差が変化しており、この部分がねじれのモードに近い応答となっていると考えられる。これも、別紙8の観測記録の分析結果と概ね整合している。

図2-16～図2-19には地上3階に対する屋上の伝達関数を示す。図2-16に示したNS方向IW-C通りの伝達関数は、耐震補強前は6.3Hz付近に1山のピークがある形状であったが、耐震補強後は8.0Hzと9.2Hz付近の2山に伝達関数のピークが見られる。これは、耐震補強後のモデルでは図2-13に示したように地上3階のねじれ応答が8.4Hz付近に生じたことにより、IW-C通りの地上3階床の伝達関数の振幅が8.4Hz付近にピークを持つような形となったため、地上3階床の応答を分母とする屋上階/地上3階の伝達関数の振幅には8.4Hz付近に谷が生じることとなり、2山の形状になったと分析される。

2.2.6 地震応答解析による検討結果

耐震補強前後の質点系地震応答解析モデルにおける屋上質点間の伝達関数の比較から、NS方向、EW方向ともに地上3階より上部のねじれ応答が生じる振動数に変化があり、耐震補強による建屋の振動特性への影響が確認された。

一方、基礎版上質点に対する屋上質点の伝達関数から、ねじれ応答が生じる振動数における振幅を確認したところ、1次固有周期付近の振幅に比べて十分に小さく、ねじれ応答の影響は小さいと判断した。

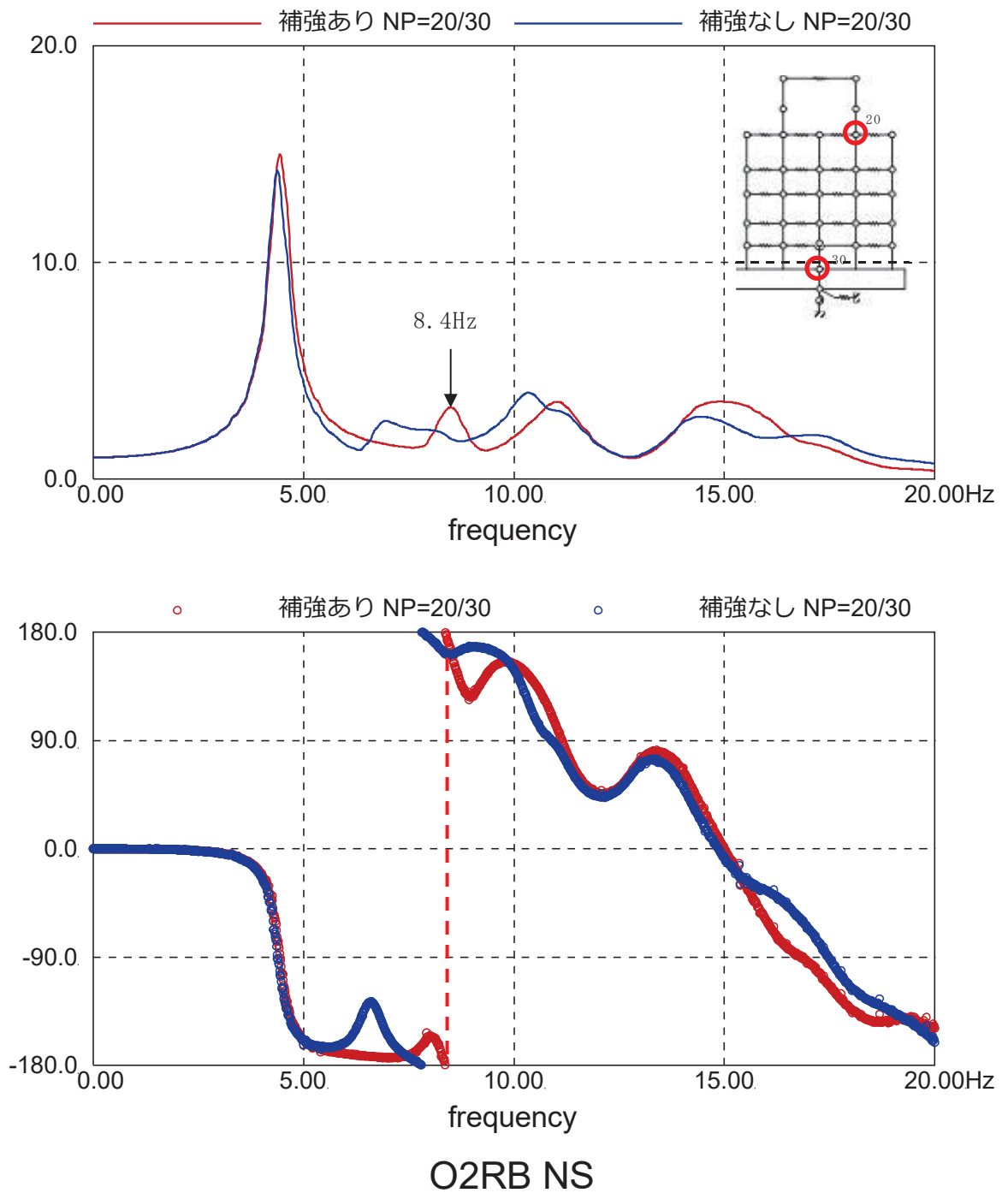


図 2-13 基礎版上質点に対する地上 3 階質点の伝達関数 (NS 方向 IW-C 通り)

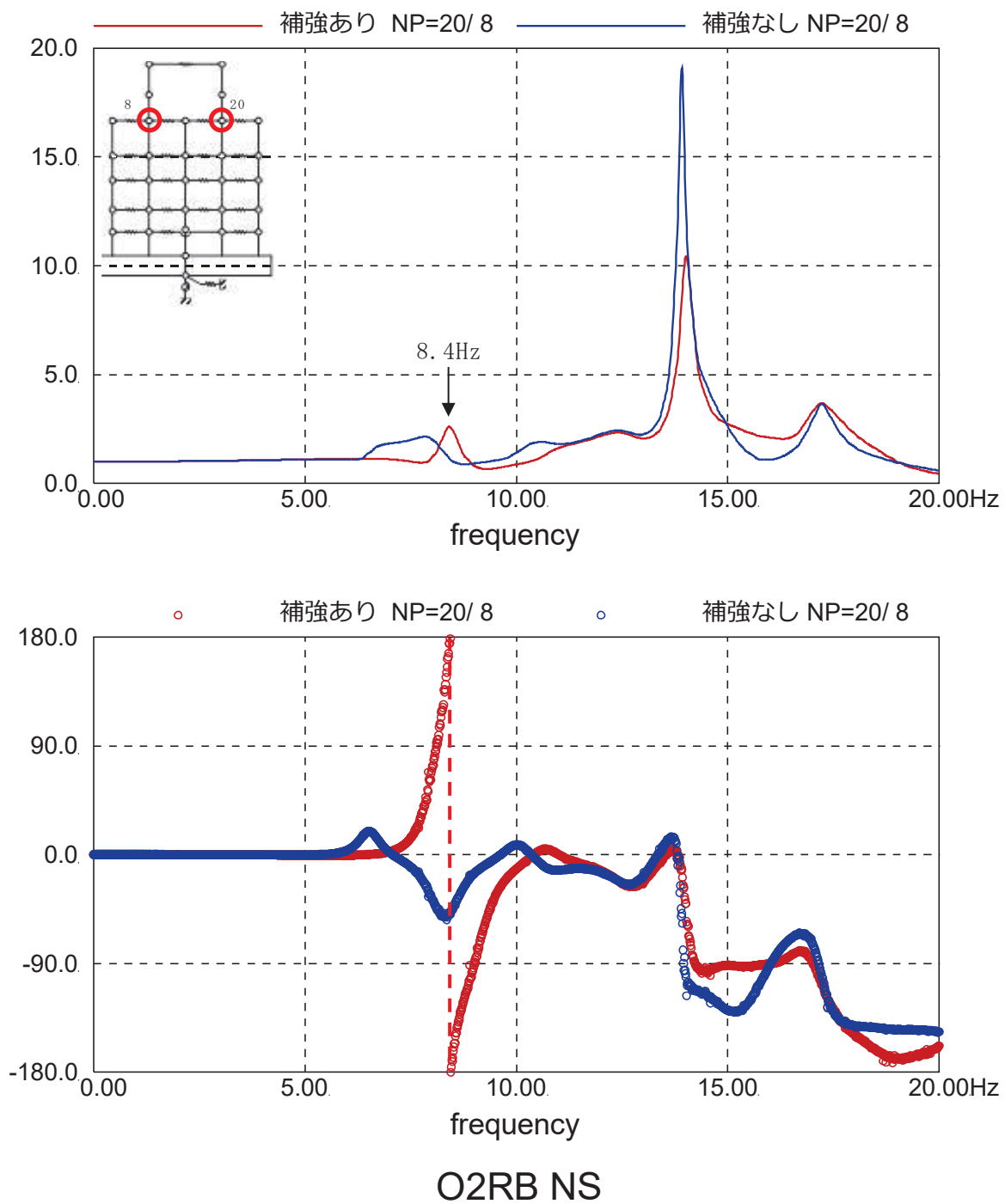


図 2-14 地上 3 階質点間の伝達関数 (NS 方向)

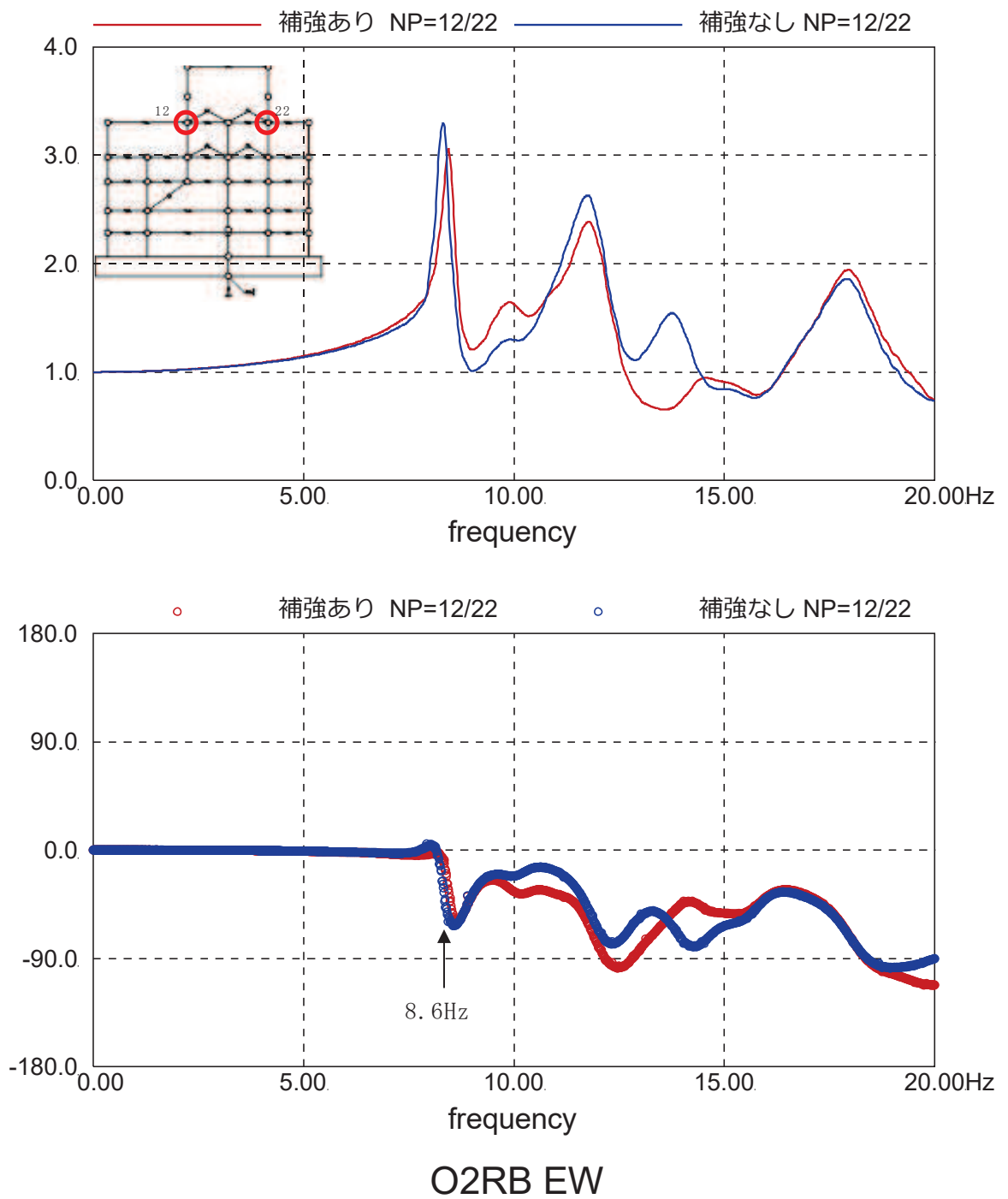
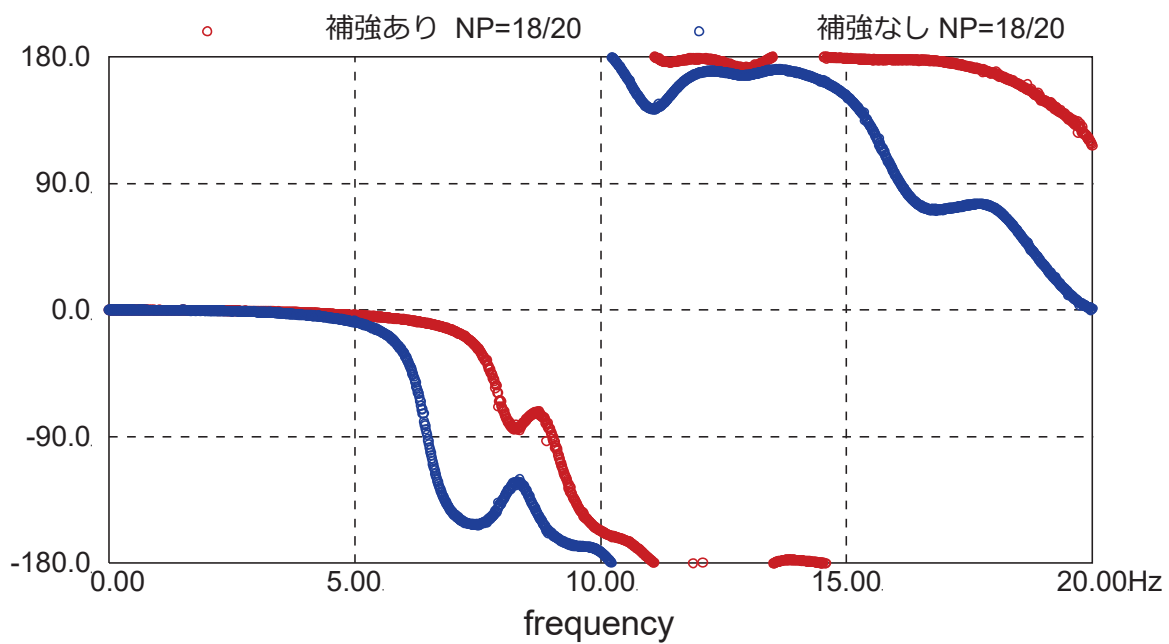
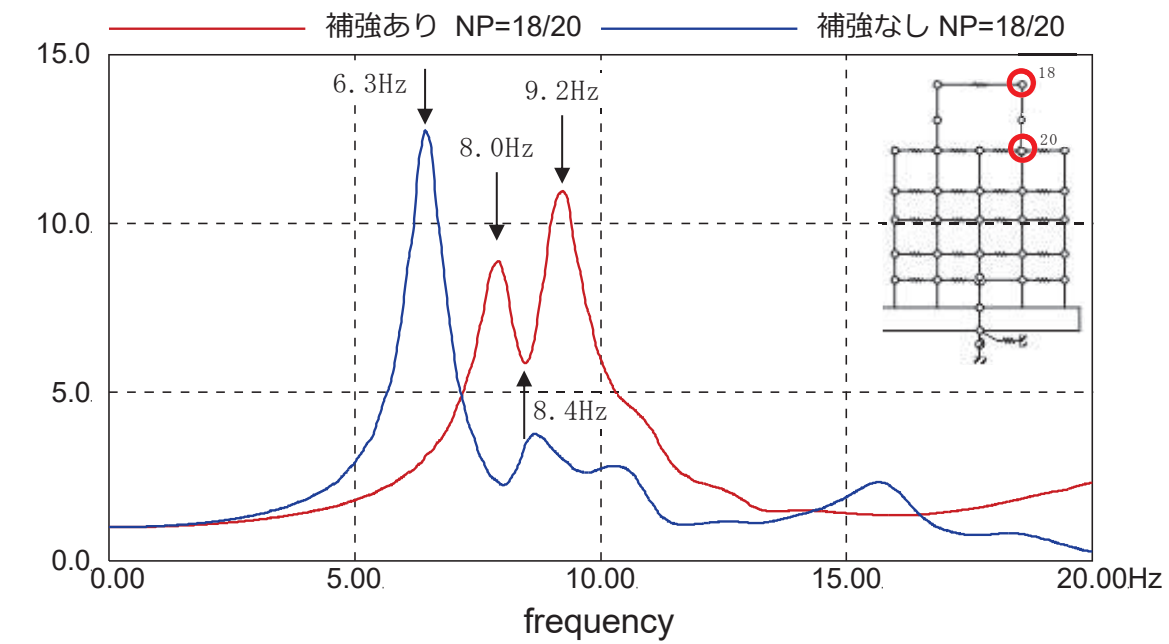


図 2-15 地上 3 階質点間の伝達関数 (EW 方向)



O2RB NS

図 2-16 地上 3 階質点に対する屋上質点の伝達関数 (NS 方向 IW-C 通り)

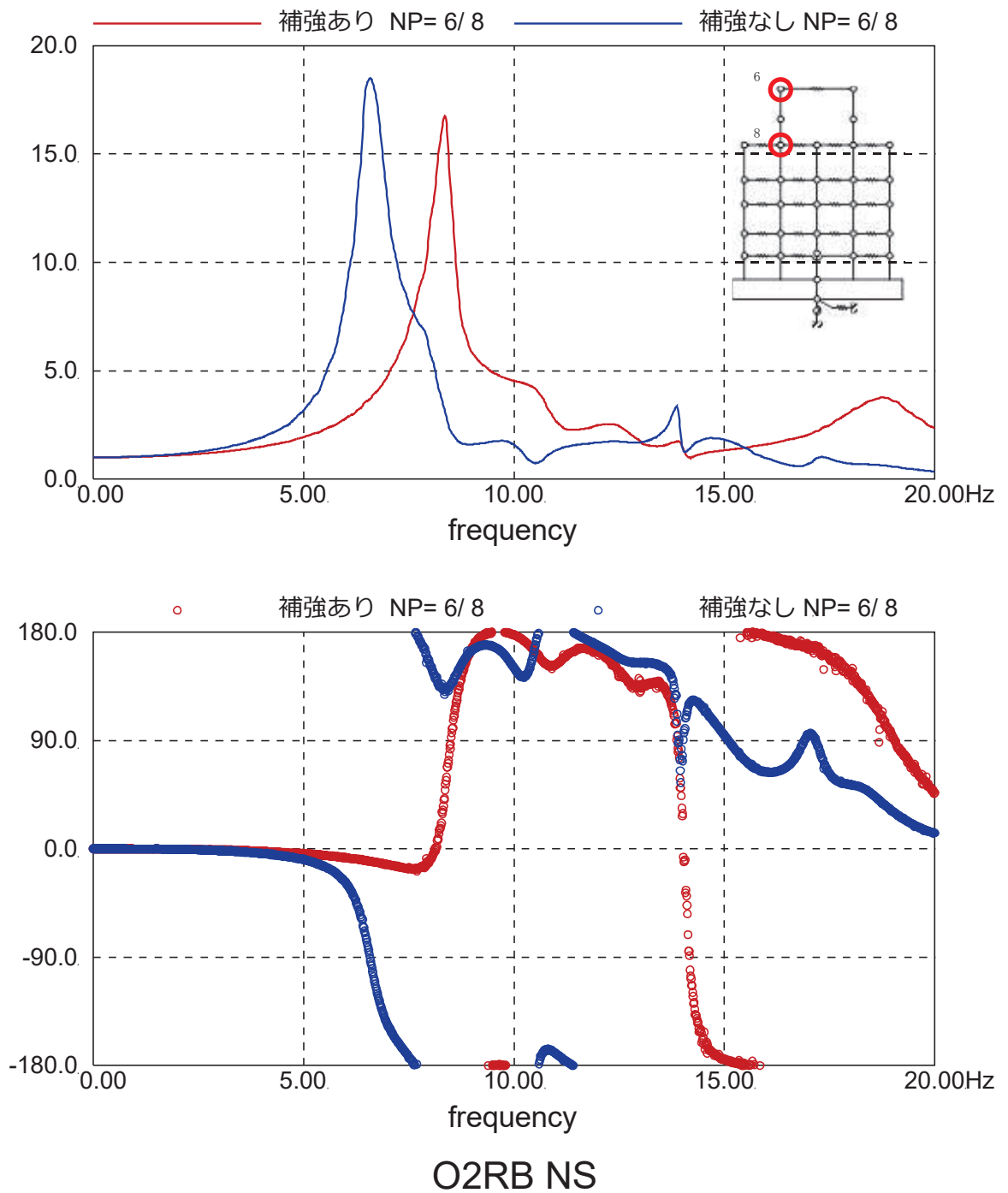
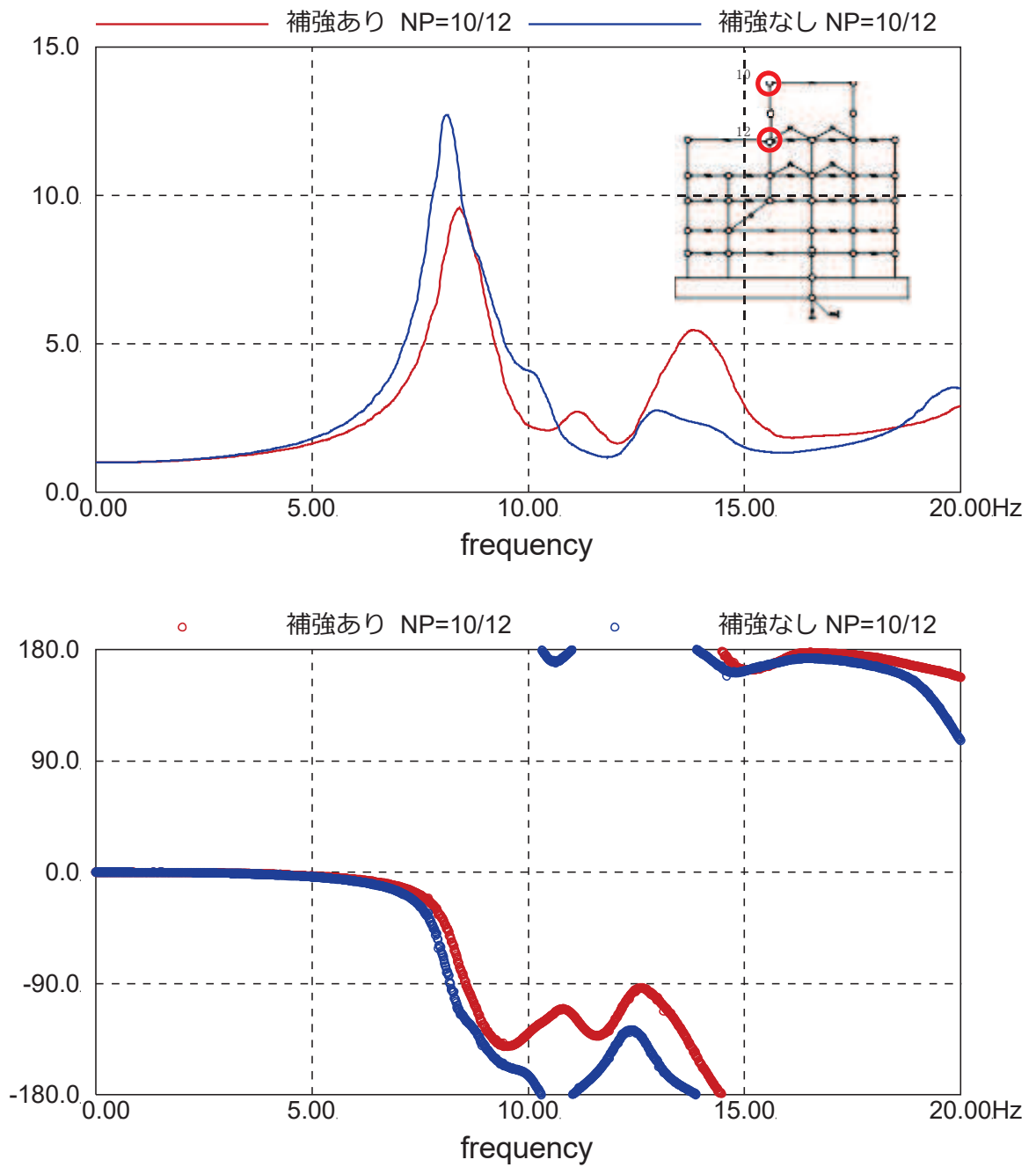


図 2-17 地上 3 階質点に対する屋上質点の伝達関数 (NS 方向 IW-J 通り)



O2RB EW

図 2-18 地上 3 階質点に対する屋上質点の伝達関数 (EW 方向 IW-4 通り)

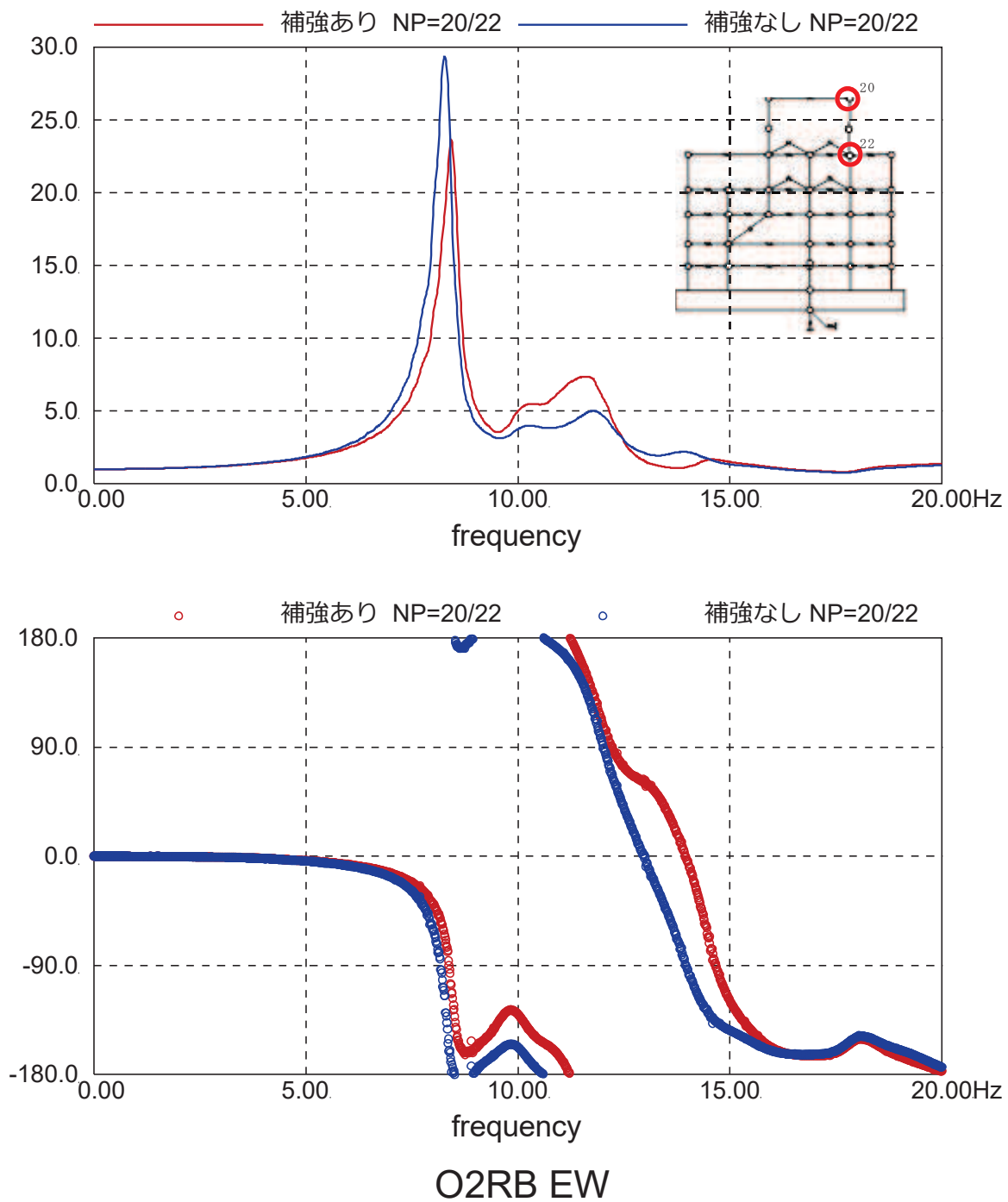


図 2-19 地上 3 階質点に対する屋上質点の伝達関数 (EW 方向 IW-10 通り)

2.3 地震観測記録による検討

2.3.1 検討目的

本検討は、原子炉建屋の地震観測記録において、耐震補強前後のねじれ応答の変化を確認し、「2.2 地震応答解析による検討」で確認した質点系地震応答解析モデルにおける耐震補強前後のねじれ応答の変化と比較することを目的とする。

2.3.2 検討方法

原子炉建屋の地震計の配置を図 2-20 及び図 2-21 に示す。

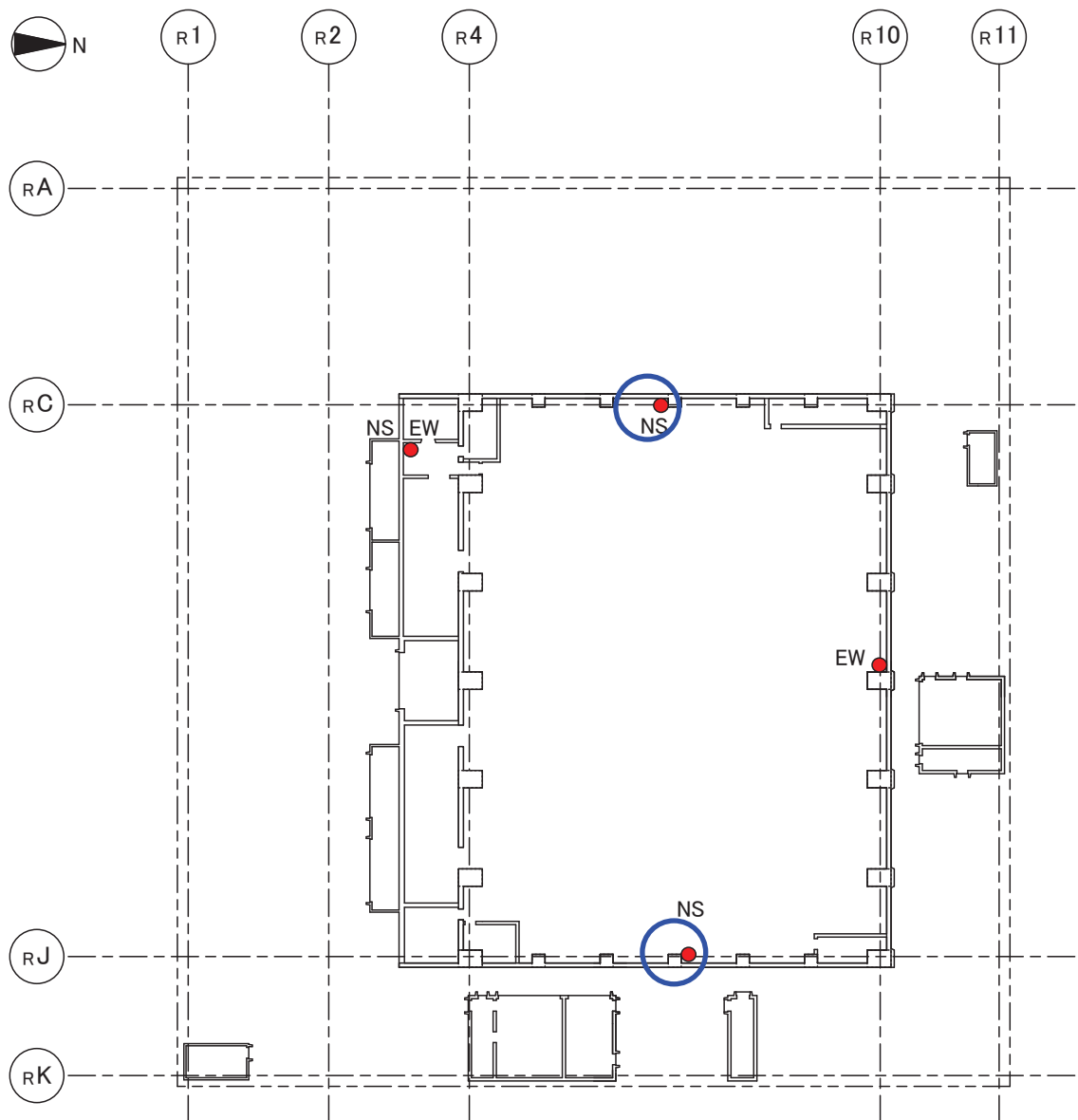
地上 3 階で NS 方向は 3 箇所、EW 方向は 2 箇所に地震計が配置されている（図 2-20 参照）が、屋上階の地震観測装置は北西角の 1 か所のみを設置されている（図 2-21 参照）。このため、屋上階のねじれ応答を屋上階の地震観測記録のみを用いて評価することは困難であるため、地上 3 階と屋上階の観測記録の伝達関数の分析からねじれ応答の影響について分析を行う。

本検討では、地上 3 階東側に対する屋上階北西角の NS 方向の平均伝達関数を、以下の 3 つの期間に分類して比較することで、耐震補強前後の振動性状の変化を確認する。

- ① 3.11 地震以前の観測記録
- ② 3.11 地震以降耐震補強前までの観測記録
- ③ 耐震補強以降の観測記録

なお、耐震補強工事期間中は過渡的な振動性状であったと考えられるため評価対象から除外した。

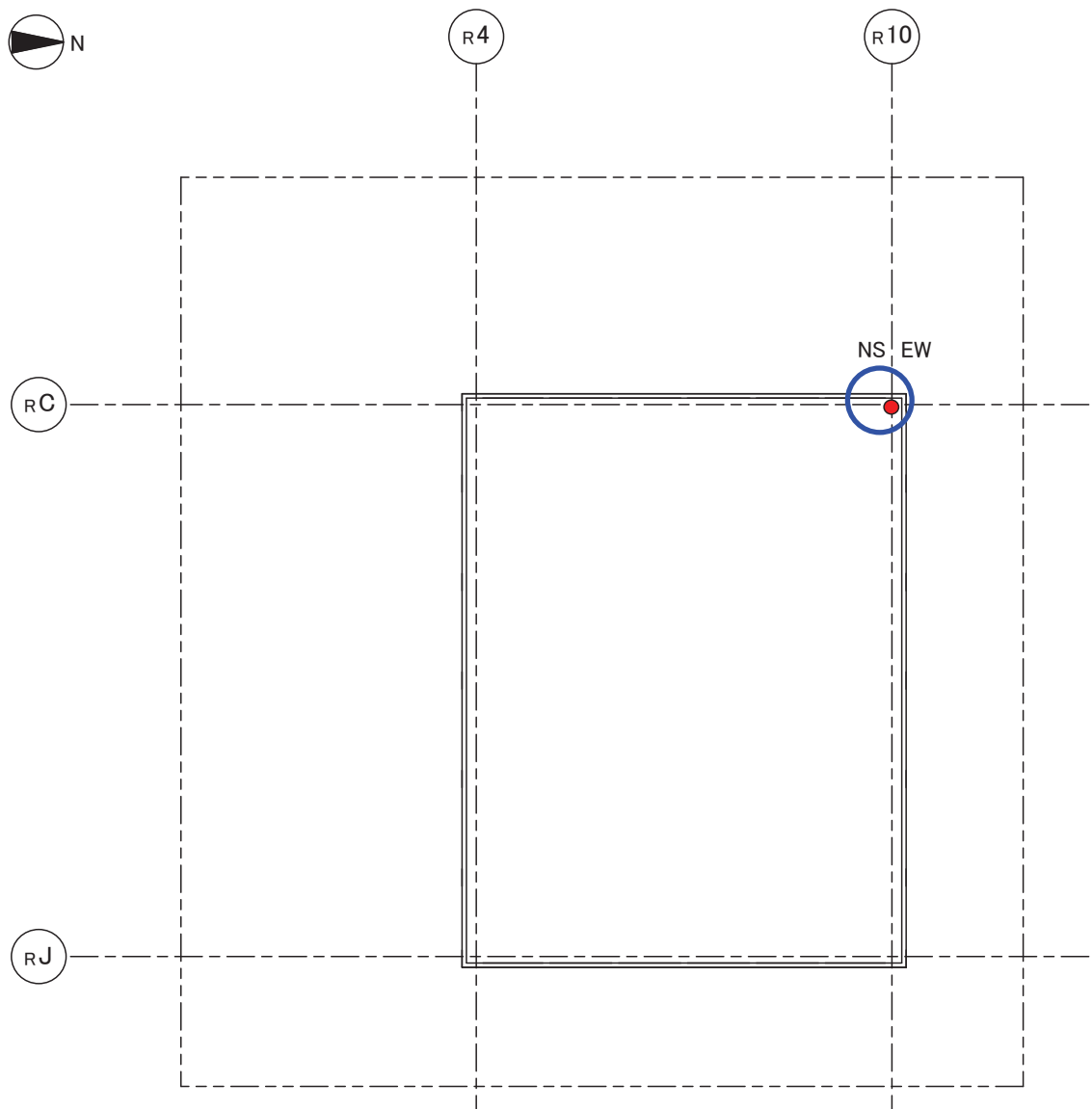
対象とする観測地震は、原子炉建屋の現在の地震観測装置の配置となった 2008 年 12 月 26 日以降の地震観測記録から、基礎版上の加速度が 5Gal 以上の条件を目安に分析対象地震を選定し、3.11 地震以前の 14 地震、3.11 地震以降耐震補強前までの 117 地震、耐震補強完了後の 61 地震の 3 つのグループに分類した。表 2-4～表 2-6 に分析に用いた観測地震を示す。



3F(OP 33.200)

○が今回の分析に用いた観測記録

図 2-20 原子炉建屋地上 3 階の地震計配置



RF(OP 50.670)

○が今回の分析に用いた観測記録

図 2-21 原子炉建屋屋上階の地震計配置

表 2-4 伝達関数の評価対象地震 (3.11 地震以前の 14 地震)

	日付	時刻	震源地	M	深さ (km)	震央距 離 (km)
1	2009.02.16	7:39	宮城県東方沖	4.0	50	30
2	2009.02.18	21:45	宮城県東方沖	4.1	47	34
3	2009.03.25	10:23	宮城県東方沖	3.9	46	38
4	2009.04.21	18:57	福島県東方沖	5.2	45	118
5	2009.05.05	4:51	宮城県北部	3.9	71	36
6	2009.06.01	0:33	福島県東方沖	4.6	59	70
7	2009.06.23	16:37	宮城県東方沖	5.6	39	105
8	2009.07.02	12:50	宮城県南東沖	4.3	41	68
9	2009.12.19	4:30	宮城県南東沖	4.6	45	53
10	2010.01.29	0:25	宮城県東方沖	4.3	38	75
11	2010.03.13	21:46	福島県東方沖	5.5	78	88
12	2010.03.14	17:08	福島県東方沖	6.7	40	80
13	2010.06.13	12:32	福島県東方沖	6.2	40	115
14	2011.03.09	11:45	宮城県東方はるか沖	7.3	8	156

表 2-5 (1) 伝達関数の評価対象地震 (1/3)
(3.11 地震以降補強工事前までの 117 地震)

	日付	時刻	震源地	M	深さ (km)	震央距離 (km)
1	2011.03.11	14:46	宮城県東方はるか沖	9.0	24	124
2	2011.03.11	16:28	岩手県東方沖	6.6	17	99
3	2011.03.11	18:04	茨城県東方沖	5.3	17	211
4	2011.03.11	20:36	岩手県東方沖	6.7	24	131
5	2011.03.15	4:28	金華山付近	5.0	51	43
6	2011.03.16	12:52	銚子付近	6.1	10	290
7	2011.03.19	18:56	茨城県北部	6.1	5	197
8	2011.03.20	14:55	福島県東方沖	5.4	42	83
9	2011.03.20	21:03	岩手県東方沖	5.9	48	115
10	2011.03.28	7:23	宮城県東方沖	6.5	32	74
11	2011.04.07	23:32	宮城県東方沖	7.2	66	43
12	2011.04.09	18:42	宮城県東方沖	5.4	58	33
13	2011.04.11	17:16	福島県東部	7.0	6	177
14	2011.04.12	14:07	福島県東部	6.4	15	168
15	2011.04.21	17:18	宮城県東方沖	5.2	31	65
16	2011.04.22	1:11	福島県東方沖	5.6	48	99
17	2011.04.23	19:12	三陸東方はるか沖	6.1	35	154
18	2011.04.28	18:27	福島県東方沖	5.7	44	113
19	2011.06.18	20:31	福島県東方沖	6.0	28	92
20	2011.06.23	6:50	岩手県東方沖	6.9	36	196
21	2011.06.23	19:35	金華山付近	5.3	57	12
22	2011.07.10	9:57	宮城県東方はるか沖	7.3	34	181
23	2011.07.11	13:29	岩手県東方沖	5.1	48	115
24	2011.07.12	17:59	金華山付近	4.8	57	63
25	2011.07.13	0:37	宮城県東方沖	5.1	47	45
26	2011.07.19	10:38	福島県東方沖	5.4	31	122
27	2011.07.23	13:34	金華山付近	6.4	47	74
28	2011.07.25	0:07	金華山付近	5.2	44	73
29	2011.07.25	3:51	福島県東方沖	6.3	46	78
30	2011.07.25	20:04	宮城県東方沖	5.2	45	54
31	2011.07.31	3:53	福島県東方沖	6.5	57	168
32	2011.08.01	22:44	岩手県東方沖	5.8	43	170
33	2011.08.10	2:44	金華山付近	4.1	52	37
34	2011.08.11	22:31	宮城県東方沖	5.3	30	64
35	2011.08.12	3:22	福島県東方沖	6.1	52	162
36	2011.08.17	12:05	宮城県東方沖	5.1	31	61
37	2011.08.17	20:44	本州中部東方はるか沖	6.2	52	270
38	2011.08.19	14:36	福島県東方沖	6.5	51	88
39	2011.08.21	4:37	金華山付近	4.4	49	43
40	2011.08.21	7:58	宮城県東方沖	4.8	50	47
41	2011.09.07	2:54	茨城県東方沖	5.2	36	194
42	2011.09.08	22:38	福島県東方沖	5.2	40	131
43	2011.09.15	17:00	茨城県東方はるか沖	6.3	51	238

表 2-5 (2) 伝達関数の評価対象地震 (2/3)

(3.11 地震以降補強工事前までの 117 地震)

	日付	時刻	震源地	M	深さ (km)	震央距 離(km)
44	2011.09.17	4:26	岩手県北東沖	6.6	7	247
45	2011.09.19	3:32	福島県東方沖	5.2	48	71
46	2011.09.21	5:59	金華山付近	4.8	51	32
47	2011.09.21	22:30	茨城県北部	5.2	9	202
48	2011.10.10	11:45	福島県東方沖	5.6	47	99
49	2011.11.24	4:24	福島県東方沖	6.1	45	120
50	2011.12.10	15:08	金華山付近	4.7	45	37
51	2012.01.26	5:42	宮城県東方沖	5.2	51	31
52	2012.06.30	16:11	宮城県東方沖	4.8	64	40
53	2012.08.30	4:05	宮城県東方沖	5.6	60	36
54	2012.10.25	19:32	宮城県東方沖	5.6	48	34
55	2012.12.07	17:18	宮城県東方はるか沖	7.3	49	212
56	2013.02.02	23:17	十勝地方	6.5	102	499
57	2013.04.17	21:03	金華山付近	5.9	58	13
58	2013.05.18	14:47	福島県東方沖	6.0	46	78
59	2013.07.22	18:45	金華山付近	4.1	52	19
60	2013.07.29	18:19	宮城県北部	4.0	68	41
61	2013.08.04	12:28	宮城県東方沖	6.0	58	38
62	2013.08.04	13:08	宮城県東方沖	3.8	57	34
63	2013.08.06	0:35	宮城県東方沖	3.9	56	30
64	2013.08.06	2:20	宮城県東方沖	4.1	55	37
65	2013.08.07	3:54	金華山付近	3.5	54	17
66	2013.08.13	10:01	宮城県東方沖	4.3	35	94
67	2013.08.25	18:18	金華山付近	4.1	55	14
68	2013.09.04	9:18	鳥島近海	6.8	445	959
69	2013.09.05	21:24	宮城県東方沖	3.9	58	29
70	2013.09.18	9:27	宮城県東方沖	4.9	39	78
71	2013.09.20	2:25	福島県東部	5.9	17	166
72	2013.10.03	14:12	金華山付近	4.0	51	26
73	2013.10.05	16:41	宮城県東方沖	3.9	46	40
74	2013.10.14	12:21	金華山付近	3.7	54	17
75	2013.10.15	6:02	金華山付近	3.8	62	11
76	2013.10.16	1:34	金華山付近	3.7	54	24
77	2013.10.19	11:08	金華山付近	4.0	51	21
78	2013.10.20	0:14	宮城県東方沖	5.1	51	31
79	2013.10.22	10:18	宮城県南東沖	5.3	26	84
80	2013.10.25	7:12	宮城県東方沖	3.6	47	37
81	2013.10.26	2:10	本州北部東方はるか沖	7.1	56	302
82	2013.10.26	5:24	宮城県東方沖	3.9	58	31
83	2013.10.26	23:36	宮城県東方沖	4.4	55	36
84	2013.10.31	5:24	金華山付近	3.5	54	14
85	2013.10.31	21:37	金華山付近	3.8	57	40
86	2013.11.01	0:01	宮城県東方はるか沖	5.2	27	112

表 2-5 (3) 伝達関数の評価対象地震 (3/3)

(3.11 地震以降補強工事前までの 117 地震)

	日付	時刻	震源地	M	深さ (km)	震央距 離 (km)
87	2013.11.02	3:16	金華山付近	3.6	53	19
88	2013.11.03	17:52	宮城県東方はるか沖	5.3	31	111
89	2013.11.09	15:48	金華山付近	3.5	51	25
90	2013.11.12	5:54	宮城県東方沖	4.5	41	69
91	2013.11.16	17:14	福島県東方沖	4.8	49	67
92	2013.11.21	12:37	福島県東方沖	4.9	38	98
93	2013.11.22	8:13	宮城県東方沖	3.5	38	50
94	2013.11.26	0:43	金華山付近	4.9	51	31
95	2013.11.30	14:40	宮城県東方沖	4.0	47	33
96	2013.12.03	18:16	茨城県東方沖	5.5	47	205
97	2013.12.04	4:55	金華山付近	4.2	49	43
98	2013.12.05	11:23	宮城県東方沖	3.7	56	32
99	2013.12.15	3:34	宮城県東方沖	3.7	55	34
100	2013.12.15	6:31	金華山付近	3.6	48	44
101	2013.12.18	19:14	宮城県東方沖	4.7	41	82
102	2013.12.29	10:22	宮城県東方沖	4.4	56	39
103	2013.12.31	2:39	宮城県東方沖	3.1	56	32
104	2014.01.03	18:16	金華山付近	3.8	54	24
105	2014.01.16	22:28	宮城県東方沖	4.0	56	39
106	2014.01.17	4:32	宮城県東方沖	3.8	50	27
107	2014.02.04	9:35	福島県東方沖	4.7	48	70
108	2014.02.06	2:32	宮城県東方沖	5.3	40	85
109	2014.02.06	21:10	宮城県東方沖	4.2	62	36
110	2014.02.08	2:18	福島県東方沖	5.0	48	98
111	2014.02.09	19:54	宮城県東方沖	4.2	57	47
112	2014.02.12	6:34	金華山付近	4.2	19	12
113	2014.02.14	10:45	金華山付近	3.1	18	12
114	2014.02.18	13:56	宮城県東方沖	4.1	48	48
115	2014.02.22	12:02	金華山付近	3.7	48	44
116	2014.02.24	16:39	宮城県北部	3.9	69	44
117	2014.02.25	20:59	宮城県東方沖	3.9	55	28

表 2-6 (1) 伝達関数の評価対象地震 (1/2)
(補強工事後の 61 地震)

	日付	時刻	震源地	M	深さ (km)	震央距離 (km)
1	2014.12.25	8:06	福島県東方沖	5.6	36	131
2	2014.12.27	6:04	宮城県東方沖	4.3	63	32
3	2015.01.01	14:01	金華山付近	4.5	44	73
4	2015.01.07	18:58	宮城県東方沖	4.2	43	48
5	2015.01.10	8:02	金華山付近	3.9	54	14
6	2015.02.06	5:28	金華山付近	4.1	48	42
7	2015.02.11	4:23	宮城県東方沖	4.2	47	33
8	2015.02.17	8:06	三陸東方はるか沖	6.9	13	219
9	2015.02.17	10:46	宮城県東方沖	4.2	61	66
10	2015.02.26	10:11	宮城県東方沖	5.0	50	53
11	2015.03.19	10:33	金華山付近	4.8	50	31
12	2015.03.27	2:28	宮城県東方沖	3.9	50	30
13	2015.04.03	4:04	宮城県東方沖	4.6	52	50
14	2015.04.12	13:33	宮城県東方沖	4.3	47	31
15	2015.04.16	1:58	宮城県東方沖	3.9	50	33
16	2015.04.16	5:16	宮城県東方沖	4.1	40	55
17	2015.04.23	19:17	金華山付近	4.2	49	44
18	2015.05.03	13:02	福島県東方沖	5.0	45	100
19	2015.05.13	6:12	宮城県東方沖	6.8	46	76
20	2015.05.20	11:03	金華山付近	3.7	54	24
21	2015.06.21	13:16	宮城県東方沖	4.0	50	30
22	2015.06.28	7:58	宮城県東方沖	4.0	43	54
23	2015.07.02	15:05	宮城県東方沖	4.7	57	38
24	2015.07.04	13:23	宮城県東方沖	4.7	39	76
25	2015.07.05	19:41	宮城県東方沖	4.5	42	71
26	2015.07.10	3:32	岩手県北部	5.7	88	217
27	2015.07.16	14:39	宮城県東方沖	4.1	37	55
28	2015.07.21	18:16	宮城県南東沖	4.9	65	65
29	2015.08.01	23:24	宮城県東方沖	4.7	63	29
30	2015.08.03	6:57	金華山付近	3.5	53	17
31	2015.08.03	14:30	福島県東方沖	5.1	49	71
32	2015.08.05	20:56	福島県東方沖	5.0	50	98
33	2015.08.09	11:08	金華山付近	3.9	66	21
34	2015.08.10	5:36	宮城県東方沖	3.9	47	33
35	2015.08.10	11:34	宮城県北部	4.4	75	52
36	2015.08.10	22:31	宮城県東方沖	4.3	47	32
37	2015.08.14	5:13	福島県東方沖	5.1	49	138
38	2015.08.25	3:24	宮城県東方沖	4.6	41	70
39	2015.08.25	6:14	金華山付近	3.7	53	24
40	2015.09.04	1:51	福島県東方はるか沖	5.3	54	220
41	2015.09.05	12:13	金華山付近	4.5	51	32
42	2015.09.05	13:18	宮城県東方沖	4.5	42	65
43	2015.10.06	18:32	宮城県東方沖	5.0	39	73

表 2-6 (2) 伝達関数の評価対象地震 (2/2)
(補強工事後の 61 地震)

	日付	時刻	震源地	M	深さ (km)	震央距 離(km)
44	2015.10.21	15:04	福島県東方沖	5.3	37	124
45	2015.12.02	7:48	宮城県東方沖	4.6	39	74
46	2015.12.02	13:41	宮城県東方沖	4.6	63	32
47	2016.01.26	20:37	宮城県東方沖	4.5	51	37
48	2016.02.09	1:54	宮城県東方沖	4.3	48	52
49	2016.02.25	1:10	宮城県東方沖	4.6	46	35
50	2016.04.27	0:01	宮城県東方沖	5.0	52	30
51	2016.05.05	1:10	金華山付近	4.8	50	31
52	2016.05.09	17:18	宮城県東方沖	4.2	47	32
53	2016.07.29	12:42	宮城県東方沖	4.2	29	63
54	2016.08.22	15:11	宮城県東方沖	5.3	33	59
55	2016.10.16	14:38	金華山付近	3.8	20	9
56	2016.10.16	16:37	金華山付近	5.2	20	9
57	2016.10.16	16:58	金華山付近	4.2	18	9
58	2016.11.10	7:20	宮城県東方沖	5.1	39	75
59	2016.11.12	6:43	金華山付近	5.9	58	12
60	2016.11.22	5:59	福島県東方沖	7.4	25	117
61	2016.12.07	8:17	宮城県東方沖	3.8	50	27

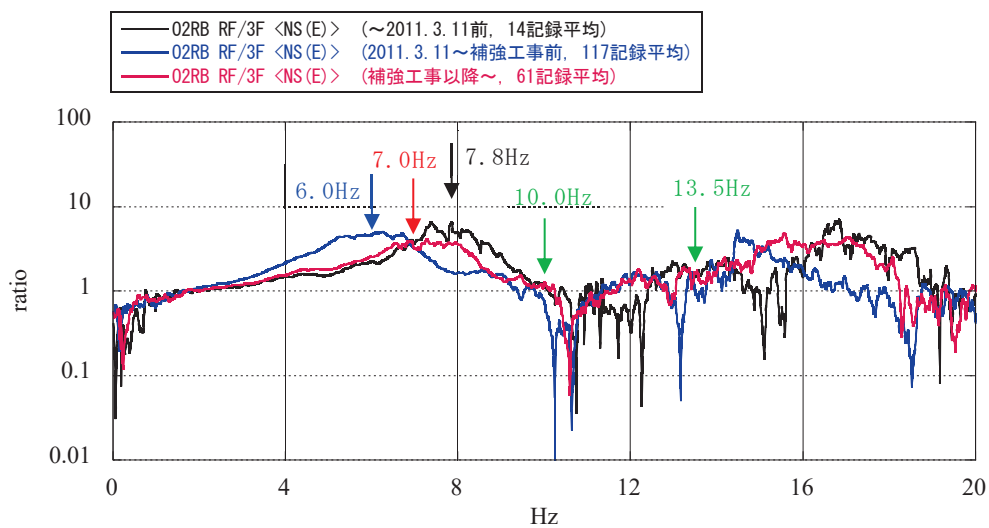
2.3.3 耐震補強前後の地上3階より上部のねじれ応答の変化

図2-22は、原子炉建屋における、地上3階東側に対する屋上階西側のNS方向の伝達関数の振幅と位相を示している。

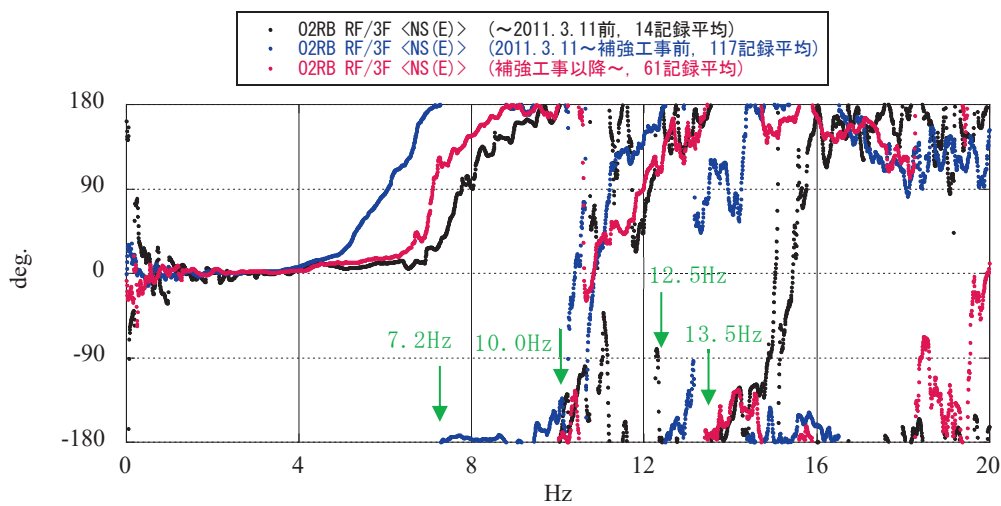
図2-22の平均伝達関数のピーク振動数を、位相曲線が 90° と交差する振動数から読み取ると、3.11地震以前は7.8Hz付近に伝達関数の1次ピーク振動数があったのに対し、3.11地震以降耐震補強前までは6.0Hz付近まで1次ピーク振動数が低下している。耐震補強以降は7.0Hz程度まで1次ピーク振動数が回復している。

一方、位相曲線が 180° となる振動数付近には、東側の耐震壁と西側の耐震壁が逆位相で振動するねじれ応答のモードがあると考えられる。

位相曲線が 180° となる振動数は、3.11地震以前の地震と耐震補強後の地震は10.0Hzと13.5Hz、3.11地震以降耐震補強前の地震では7.2Hzと12.5Hzと読み取れる。耐震補強後の地震における13.5Hzのねじれ応答は、質点系地震応答解析モデルの検討で示した耐震補強後の地上3階より上部のねじれ応答の振動数14.2Hzと概ね整合している。



(a) 振幅



(b) 位相

図 2-22 原子炉建屋の平均伝達関数の比較（屋上/地上 3 階東）

2.3.4 地上3階より上部のねじれ応答の影響評価

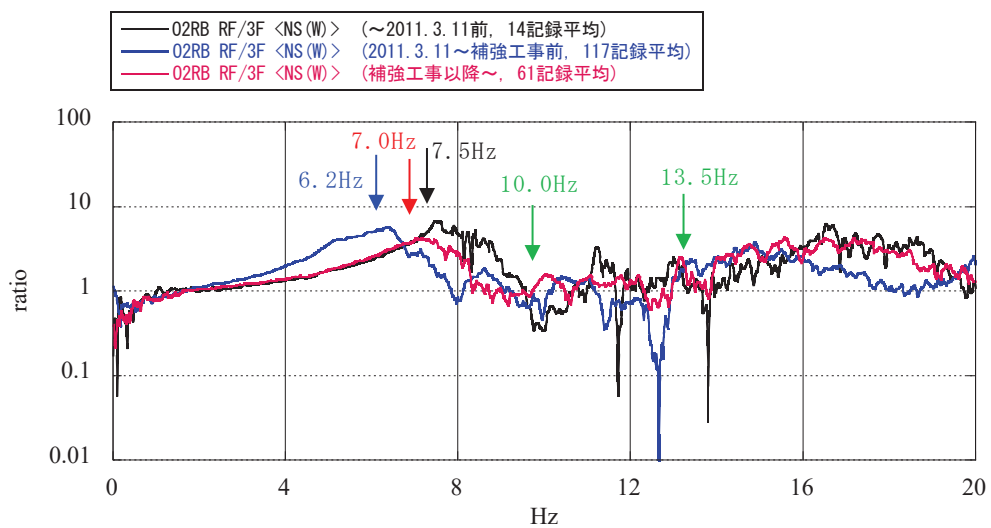
耐震補強後の地震の13.5Hz付近での伝達関数の振幅は1前後の値であり、ねじれが生じる振動数付近で地上3階から屋上の応答が大きく増幅する傾向は見られない。したがって、地震観測記録の分析からは耐震補強によりねじれ応答の影響が大きくなる傾向は見られない。

図2-23に示した伝達関数は、地上3階西側の観測記録に対する屋上階西側の観測記録の伝達関数の振幅と位相を示している。これらの伝達関数の振幅は西側の耐震壁上での地上3階から屋上の増幅を表している。屋上にねじれが生じる振動数10.0Hz付近と13.5Hz付近では、耐震補強後に振幅が大きく増幅する傾向は見られない。

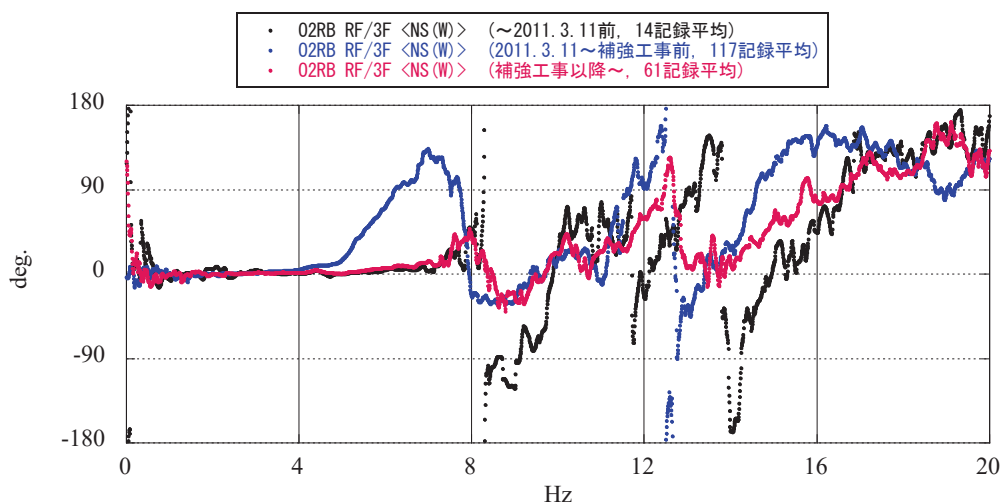
2.3.5 地震観測記録による検討結果

耐震補強前後の地震観測記録における地上3階東側に対する屋上階西側のNS方向の伝達関数の比較から、地上3階より上部のねじれ応答が生じる振動数に変化があり、耐震補強による建屋の振動特性への影響が確認された。

一方、ねじれ応答が生じる振動数における振幅は耐震補強後で1前後であり、1次固有周期付近の振幅に比べて十分に小さく、ねじれ応答の影響は小さいと判断した。



(a) 振幅



(b) 位相

図 2-23 原子炉建屋の平均伝達関数の比較 (屋上/地上 3 階西)

3. 面外応答増幅による影響検討

3.1 妻壁の面外応答の検討

3.1.1 検討目的

本検討は、耐震補強部材の追設による躯体重量増加に伴う面外応答への影響を確認することを目的とする。

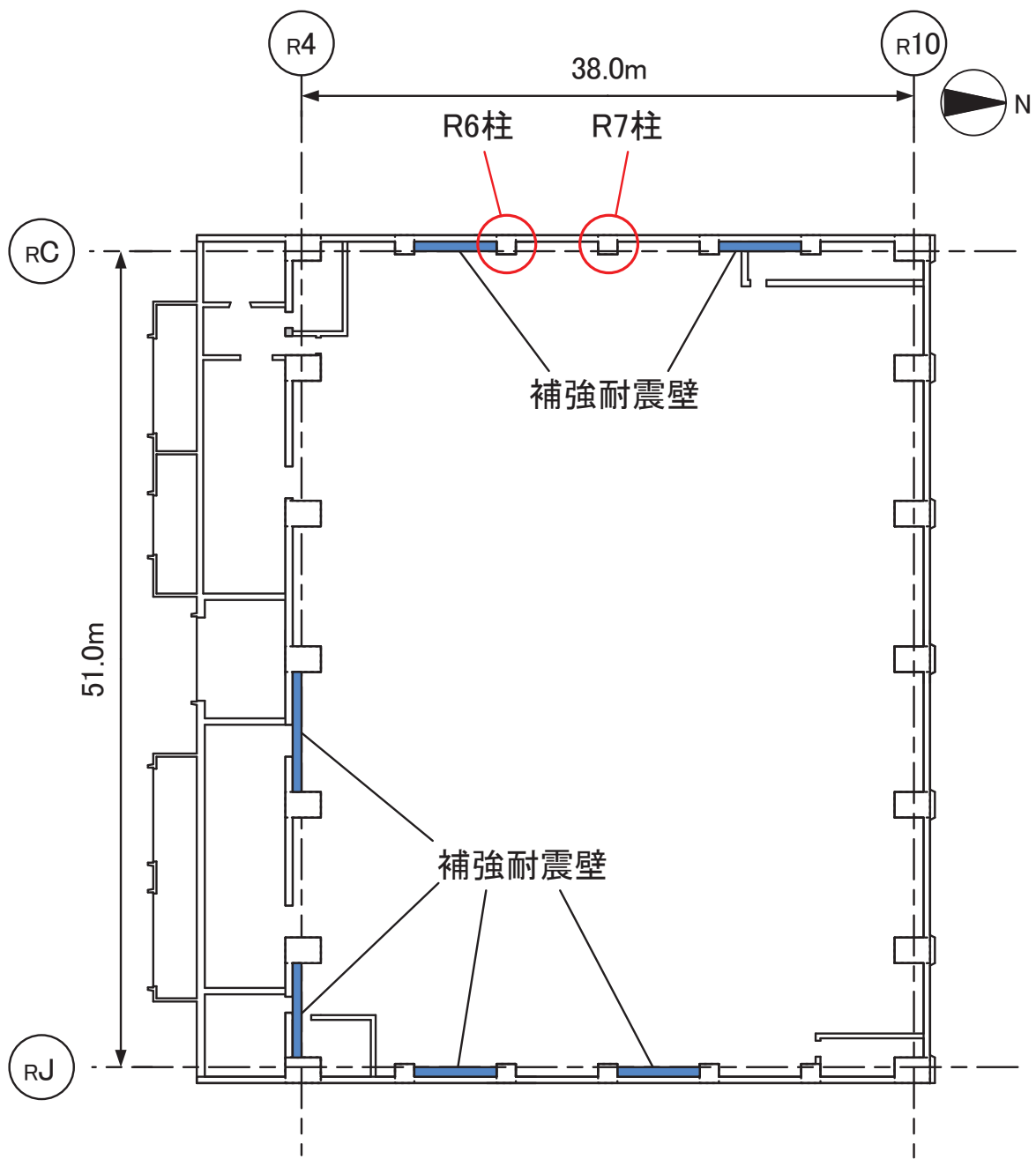
3.1.2 検討方法

原子炉建屋地上3階より上部東面と西面の妻壁の面外応答に対する検討として、妻柱について、耐震補強により追設した部材の重量を考慮した場合における、面外方向の部材評価を行う。

検討用の解析モデルは、地上3階床（O.P. 33.2m）から屋上スラブ下のサブトラス上弦材の鉄骨芯（O.P. 50.375）までを梁モデルでモデル化する。O.P. 39.6mより下部は1.2m×1.2mのRC柱、O.P. 39.6mより上部はBH-500×500×19×32の鉄骨柱断面で梁モデルとし、既設の躯体重量に補強部材の重量を考慮して、基準地震動S_s-D2の地震応答解析結果から評価した水平震度による地震時水平荷重に対する検討を行う。

3.1.3 検討対象部位の選定

原子炉建屋の耐震補強部位のうち、IW-C通りのR6通りの柱とR7通りの柱を検討対象とする。R6通りの柱は片側に補強耐震壁がある柱、R7通りの柱は両側に耐震壁がない柱の代表として選定した。すべての柱はこのいずれかの条件になっている。図3-1及び図3-2に検討対象部位の平面図及び立面図を示す。



地上3階（0. P. 33.2m）平面図

図3-1 検討対象とする柱の平面位置

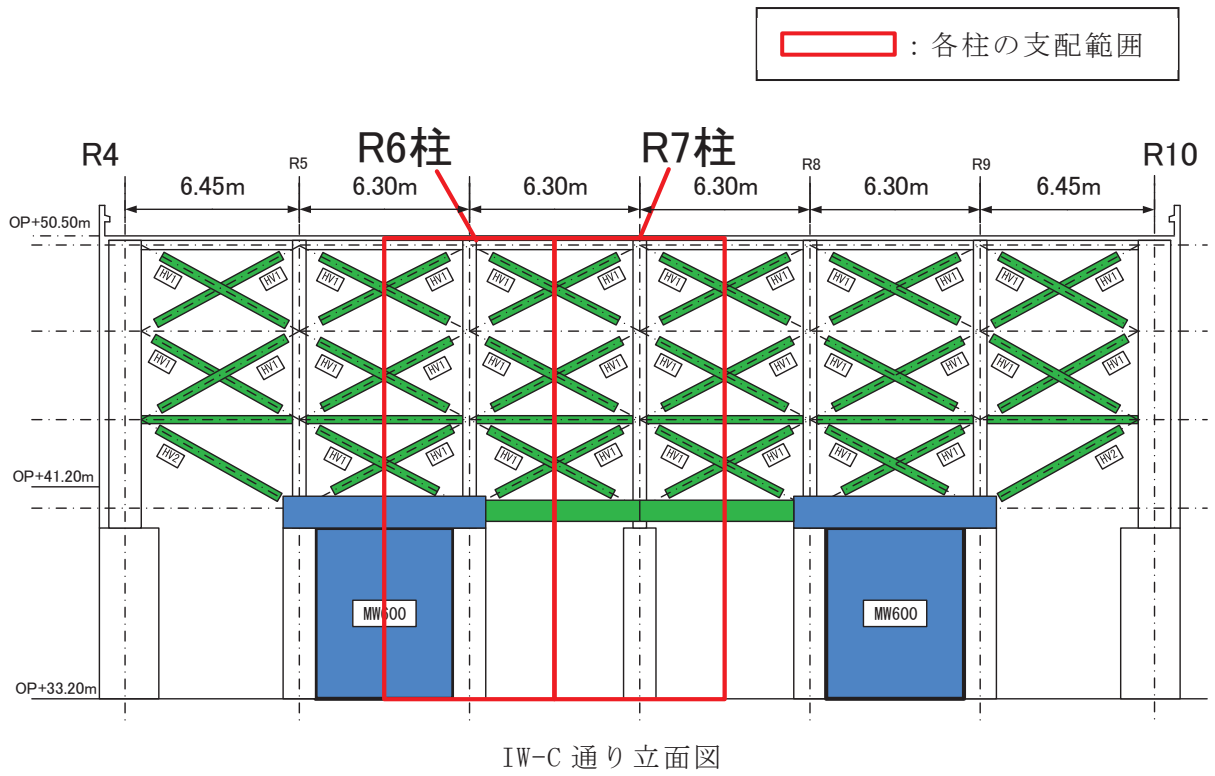


図 3-2 検討対象とする柱の立面

3.1.4 解析モデル

検討用の解析モデルは、地上3階床（O.P. 33.2m）から屋上スラブ下のサブトラス上弦材の鉄骨芯（O.P. 50.375）までを梁モデルでモデル化する。O.P. 39.6mより下部はRC部の断面をモデル化して1.2m×1.2mのRC柱とし、O.P. 39.6mより上部はBH-500×500×19×32の鉄骨柱断面の梁モデルを用いる。モデル上端のサブトラス上弦材の鉄骨芯及びサブトラス下弦材の鉄骨芯はピン支持とする。地上3階床部分は固定端とする。解析モデルを図3-3に示す。既設の躯体重量に補強部材の重量を考慮して、基準地震動S_s-D2の地震応答解析結果から評価した水平震度による地震時水平荷重に対する検討を行う。

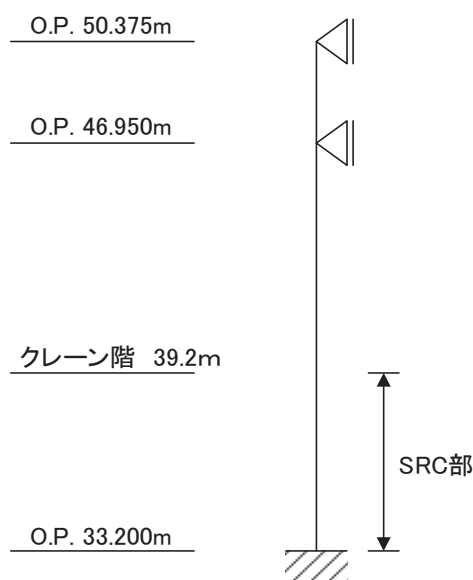


図 3-3 梁モデル

3.1.5 水平震度の評価

面外方向の水平震度は、EW方向地震応答解析モデルの基準地震動 $S_s - D2$ の地上3階、クレーン階及び屋上質点の床応答の加速度を用いて算定する。水平震度の算定に用いる質点位置を図3-4に、水平震度の算定結果を表3-1に示す。

各部材位置での水平震度は上下の階の水平震度を高さ方向に線形補間して算定する。

算定した水平震度に、柱の支配範囲の部材重量を乗じて地震時水平荷重を算定する。

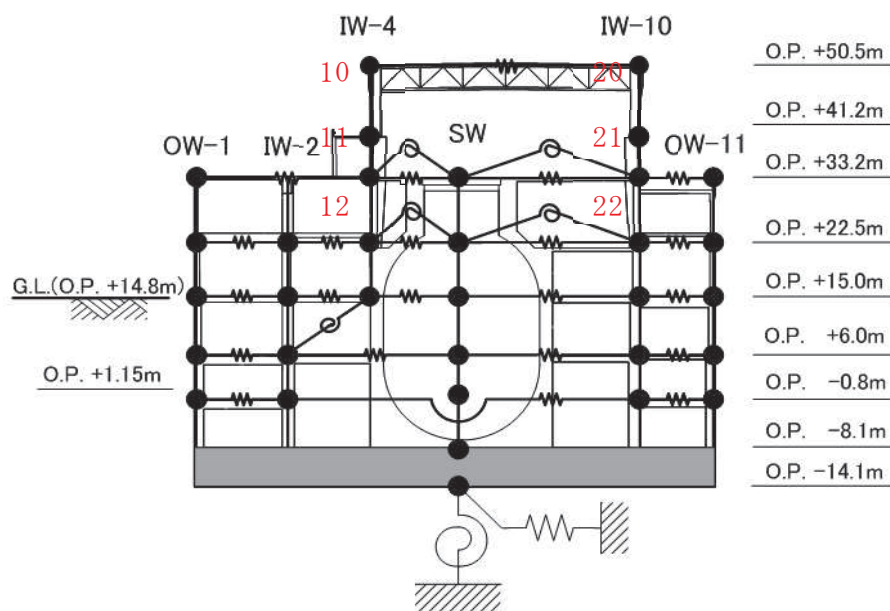


図 3-4 面外方向水平震度算定に用いる質点

表 3-1 水平震度の算定結果

	節点	応答加速度(cm/s^2)	平均応答加速度(cm/s^2)	震度
OP.50.5m 震度	10	3838.3	3870	3.95
	20	3901.7		
OP.41.2m 震度	11	2367.7	2361.4	2.41
	21	2355.1		
OP.33.2m 震度	12	1765.4	1733.75	1.77
	22	1702.1		

3.1.6 部材応力の算定

解析モデルに水平震度から算定した面外方向の荷重を作用させた場合の応力を
図 3-5～図 3-8 に示す。

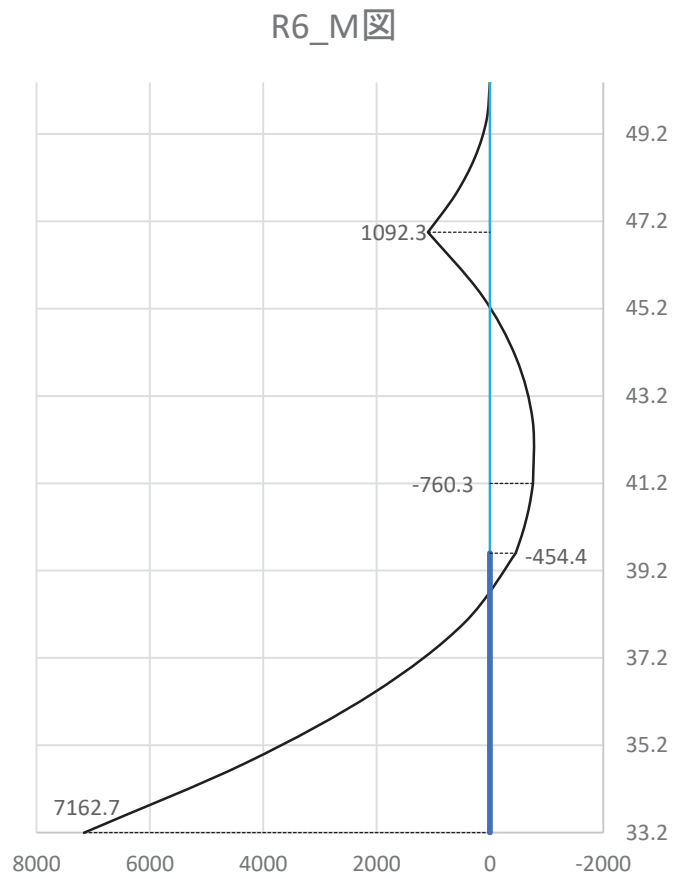


図 3-5 曲げモーメント図 (単位 : kN·m) (R6 柱)



図 3-6 せん断力図 (単位 : kN) (R6 柱)

R7_M図

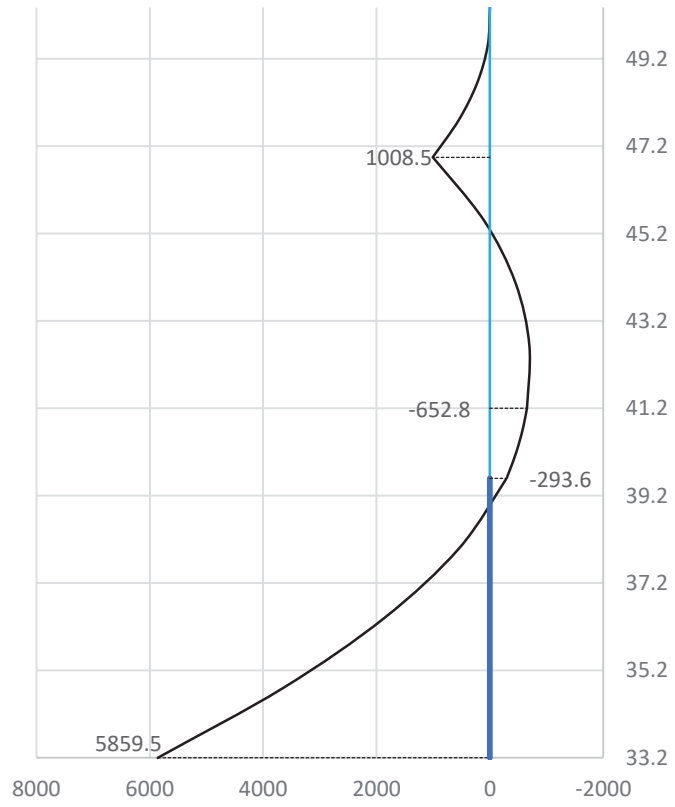


図 3-7 曲げモーメント図 (単位 : kN·m) (R7 柱)



図 3-8 せん断力図 (単位 : kN) (R7 柱)

3.1.7 断面算定結果

出力した部材応力に対する断面算定結果を表 3-2, 表 3-3 に示す。

鉄骨柱部分の応力と, SRC 柱部のせん断力は短期許容せん断力を下回っている。

表 3-2 断面算定結果 (R6 柱)

部材	S 柱 O.P. 50.375 ~ O.P. 41.2			
断面寸法	BH-500×500×19×32 (SM50A)			
部位	項目	許容応力 (N/mm ²)	発生応力 (N/mm ²)	検定比
フランジ	σ_b	325	156	0.48
	σ_c	249	7.14	0.03
	$\sigma_b / f_b + \sigma_c / f_c$			0.51
ウェブ	τ	188	94.67	0.51
	σ_c	249	7.14	0.03
	$\sqrt{(\sigma_c^2 + 3\tau^2)}/f_t$			0.51
部材	SRC 柱 O.P. 41.2 ~ O.P. 33.2			
断面寸法	B×D = 1200 ×1200 (F _c = 330, SD35)			
部位	項目	許容値 (kN)	発生値 (kN)	検定比
SRC 柱 RC 断面	せん断力	2029.5	1968.2	0.97

表 3-3 断面算定結果 (R7 柱)

部材	S 柱 O.P. 50.375 ~ O.P. 41.2			
断面寸法	BH-500×500×19×32 (SM50A)			
部位	項目	許容応力 (N/mm ²)	発生応力 (N/mm ²)	検定比
フランジ	σ_b	325	144	0.45
	σ_c	249	7.14	0.03
	$\sigma_b / f_b + \sigma_c / f_c$			0.51
ウェブ	τ	188	90.65	0.49
	σ_c	249	7.14	0.03
	$\sqrt{(\sigma_c^2 + 3\tau^2)}/f_t$			0.51
部材	SRC 柱 O.P. 41.2 ~ O.P. 33.2			
断面寸法	B×D = 1200 ×1200 (F _c = 330, SD35)			
部位	項目	許容値 (kN)	発生値 (kN)	検定比
SRC 柱 RC 断面	せん断力	2029.5	1511.7	0.75

4. まとめ

構造設計の観点で、原子炉建屋の耐震補強後の偏心率、形状特性係数及びねじれ補正係数の確認を行った。耐震補強部材を考慮しても、ねじれ補正係数の変化は少ないことを確認した。

質点系地震応答解析モデルの屋上階の伝達関数の分析から、耐震補強を考慮した地震応答解析モデルでは、NS 方向の 14.2Hz 付近でねじれ応答が生じるが、この振動数での基礎版上端から屋上までの増幅倍率は建屋全体の 1 次振動数や 2 次振動数に比べて小さいことを確認した。

なお、NS 方向 IW-C 通りの耐震補強後の地上 3 階に対する屋上の伝達関数が 2 山に分かれる現象については、地上 3 階床のねじれ応答により地上 3 階の床の伝達関数が 8.4Hz 付近でピークを持つようになるため、それを分母とする伝達関数は 8.4Hz 付近に谷ができるため、見かけ上 2 山の伝達関数となると分析した。

また、原子炉建屋の地上 3 階と屋上の NS 方向の観測記録の伝達関数の分析により、耐震補強前後で建屋上部のねじれ応答が生じる振動数に大きな変化が生じておらず、耐震補強後のねじれ応答の振動数 13.5Hz 付近で伝達関数の増幅する傾向がないことを確認した。なお、13.5Hz は上記の質点系地震応答解析モデルの伝達関数の分析結果と概ね整合する。

地上 3 階より上部の妻壁の耐震補強部材の重量増加による面外応答への影響について、妻柱の面外荷重に対する検討を行い、基準地震動 S_s に対して安全であることを確認した。

以上のことから、耐震補強によるねじれ応答等の地震応答特性への影響は小さく、設計上適切に考慮されていることを確認した。

別紙 20 地震応答解析モデルの基本ケースと不確かさケースの
設定

目 次

1. 概要.....	別紙 20- 1
2. 設計体系への反映事項について.....	別紙 20- 2
2.1 設計体系と設計に反映する事項.....	別紙 20- 2
2.2 建屋地震応答解析モデル策定の基本的な考え方.....	別紙 20- 2
2.2.1 水平方向.....	別紙 20- 2
2.2.2 鉛直方向.....	別紙 20- 3
2.3 地震応答解析モデルの策定.....	別紙 20- 6
2.3.1 基本モデル策定の考え方.....	別紙 20- 6
2.3.2 原子炉建屋の基本モデルの諸元.....	別紙 20- 9
2.3.3 設計用地震力の評価方針.....	別紙 20-12
2.4 地震応答解析モデルに考慮する不確かさに関する検討.....	別紙 20-17
別紙 20-1 建屋初期剛性の不確かさケースの剛性低下量の設定	
別紙 20-2 原子炉建屋の観測記録の分析例	
別紙 20-3 床ばねの初期剛性低下に関する影響検討	

1. 概要

原子炉建屋の今回工認における地震応答解析モデルでは、3.11地震等を踏まえた建屋初期剛性の低下、入力地震動の低減、耐震補強を考慮したモデルとし設計へ反映している。

これらの原子炉建屋の解析モデルに考慮した事項については、種々の検討、評価によりその妥当性、適用性を確認したうえでモデルに取込んでいる。

ここでは、これらの設計へ反映する事項を整理する。

2. 設計体系への反映事項について

2.1 設計体系と設計に反映する事項

建屋設計における設計フローを図 2-1 に示す。

また、建屋剛性低下に係る検討と設計体系への反映との関係を図 2-2 に示す。以下に地震応答解析モデル策定の基本的な考え方を示す。

2.2 建屋地震応答解析モデル策定の基本的な考え方

2.2.1 水平方向

建設当初からの地震観測記録による固有振動数の分析では、水平方向の建屋剛性が徐々に低下している。3.11 地震、4.7 地震時に当初設計よりもさらに初期剛性が低下した要因としては、3.11 地震等の影響に加え、コンクリートの乾燥収縮の影響が重畳したものと考えられる。なお、固有振動数の低下や建屋剛性即ち耐震壁の剛性との関係を検討する際には、主に建屋 1 次モードと関連する地上 3 階より下階の耐震壁を対象としている。

このうち、地震動による影響については、事前損傷が J E A G 式の評価基準値や終局耐力付近の値に影響を与えないことを耐震実験で確認している。(別紙 18)

一方、乾燥収縮の影響を考慮した耐震実験において、初期剛性については 3.11 地震による建屋の応答と同様に J E A G 式を下回るものの、J E A G 式の評価基準値や終局耐力付近では J E A G 式を上回ることを確認している。この傾向は最近の他の研究機関による既往式との比較をした研究成果とも整合している。(別紙 13, 別紙 15)

また、耐震実験では加力時の収縮率が約 800μ で、これは女川のコンクリートを用いた乾燥収縮迅速試験、長さ変化試験の評価値とほぼ同じ値であること、女川 2 号機は建設から 25 年が経過し、乾燥状態としてはほぼ収束状態にある。(別紙 14, 別紙 15)

したがって、今後の乾燥収縮の影響を考慮したとしても、スケルトン曲線は J E A G 式をベースとし、3.11 地震等による影響を考慮して初期剛性を低下させるが、実験結果等を踏まえて耐力については J E A G 式の評価基準値や終局耐力付近では J E A G 式をそのまま用いる。

なお、オペフロ上部の初期剛性の低下と耐力の評価については、オペフロ下部の耐震壁とは違い、耐震壁が比較的薄く、トラスによる大きな空間(大架構)とであることを考慮する必要があることから、3次元 FEM 解析による検討を実施している。(別紙 11)

別紙 11 から、初期剛性低下はオペフロ下部と同様の要因と大架構に要因が重畳したものと考えられる。また、終局耐力については J E A G 式による評価をそのまま用いることができる結果となっている。

したがって、オペフロ上部の耐震壁についてもスケルトン曲線はJ E A G式をベースとし、3.11地震等による影響を考慮して初期剛性を低下させるが、耐力についてはJ E A G式の評価基準値や終局耐力付近ではJ E A G式をそのまま用いる。

2.2.2 鉛直方向

建設当初からの地震観測記録による固有振動数の分析では、水平方向と同様に鉛直方向も剛性が徐々に低下しているが、水平動に比べて剛性の低下率は小さく、3.11地震等の建屋シミュレーション解析では既工認モデルで観測記録を再現できたことから、既工認モデルを今回工認の設計モデルとする。(別紙1, 別紙2)

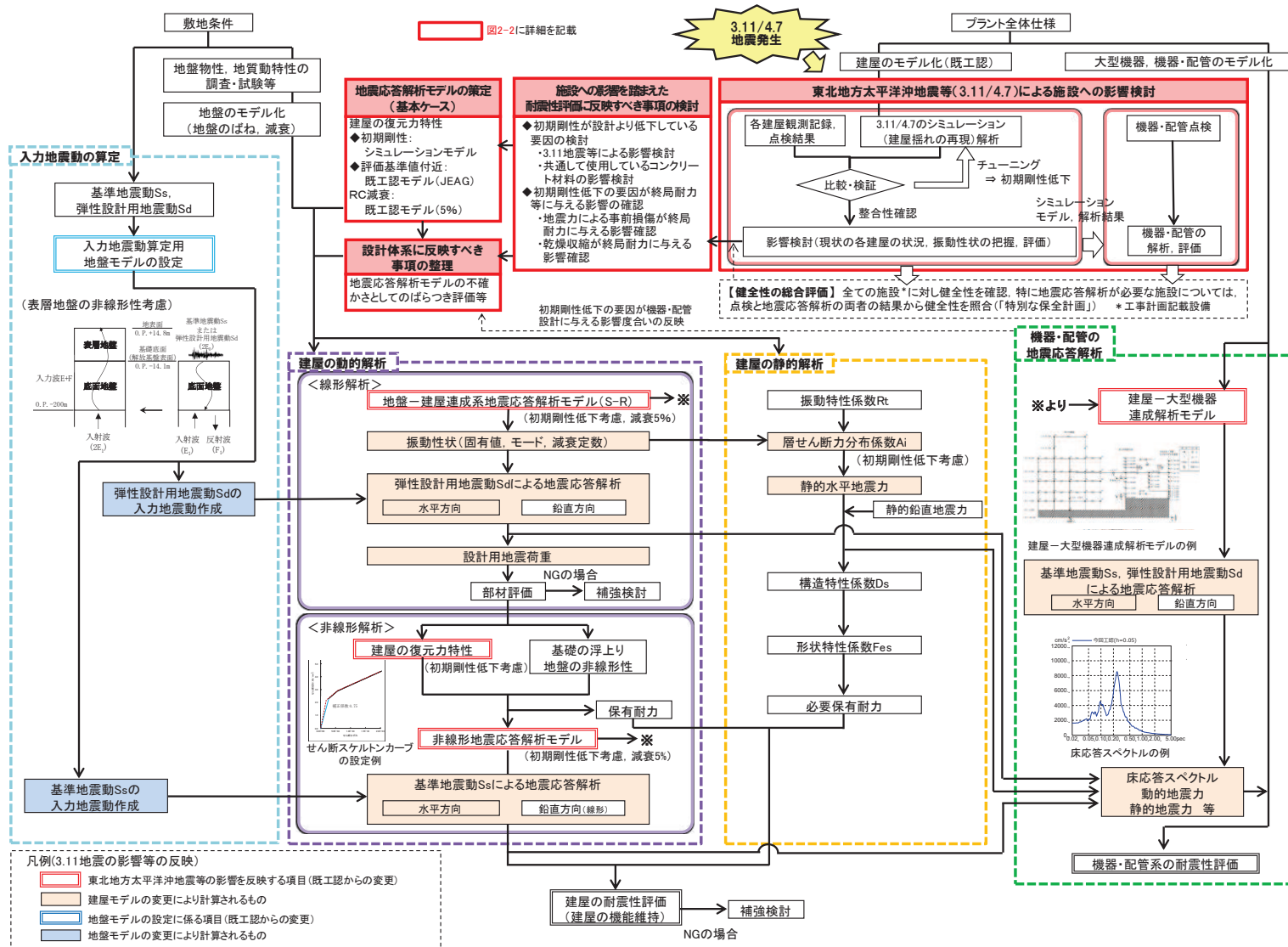


図 2-1 建屋設計における設計フロー

原子炉建屋や機器・配管類の耐震設計では基準地震動Ss(水平動)による地震応答解析結果の影響が支配的になる。また、建屋の地震応答解析の不確かさケースの設定にあたっては、建屋の初期剛性低下の不確かさ設定の影響が大きい。

- 初期剛性低下に関し、基本モデルについては、耐震実験等から初期剛性低下要因がJEAG式の評価基準値(せん断変形角: 2.0×10^{-3})付近での耐力低下につながることを確認したこと等から、復元力特性モデルはJEAG式をベースに、初期剛性は3.11地震のシミュレーション解析で得られた剛性低下を反映するスケルトンカーブを採用する。なお、建屋の内部減衰は保守的に5%(シミュレーション解析では7%)を採用する。
- 不確かさモデルについては、初期剛性の更なる低下を不確かさケースとして考慮する。具体的には基本モデルに基準地震動Ssを入力し、JEAG式に従い低下した建屋剛性を建屋の初期剛性低下とみなして適用したモデルを不確かさモデルとする。不確かさモデルにおいても、建屋の内部減衰は5%を採用する。

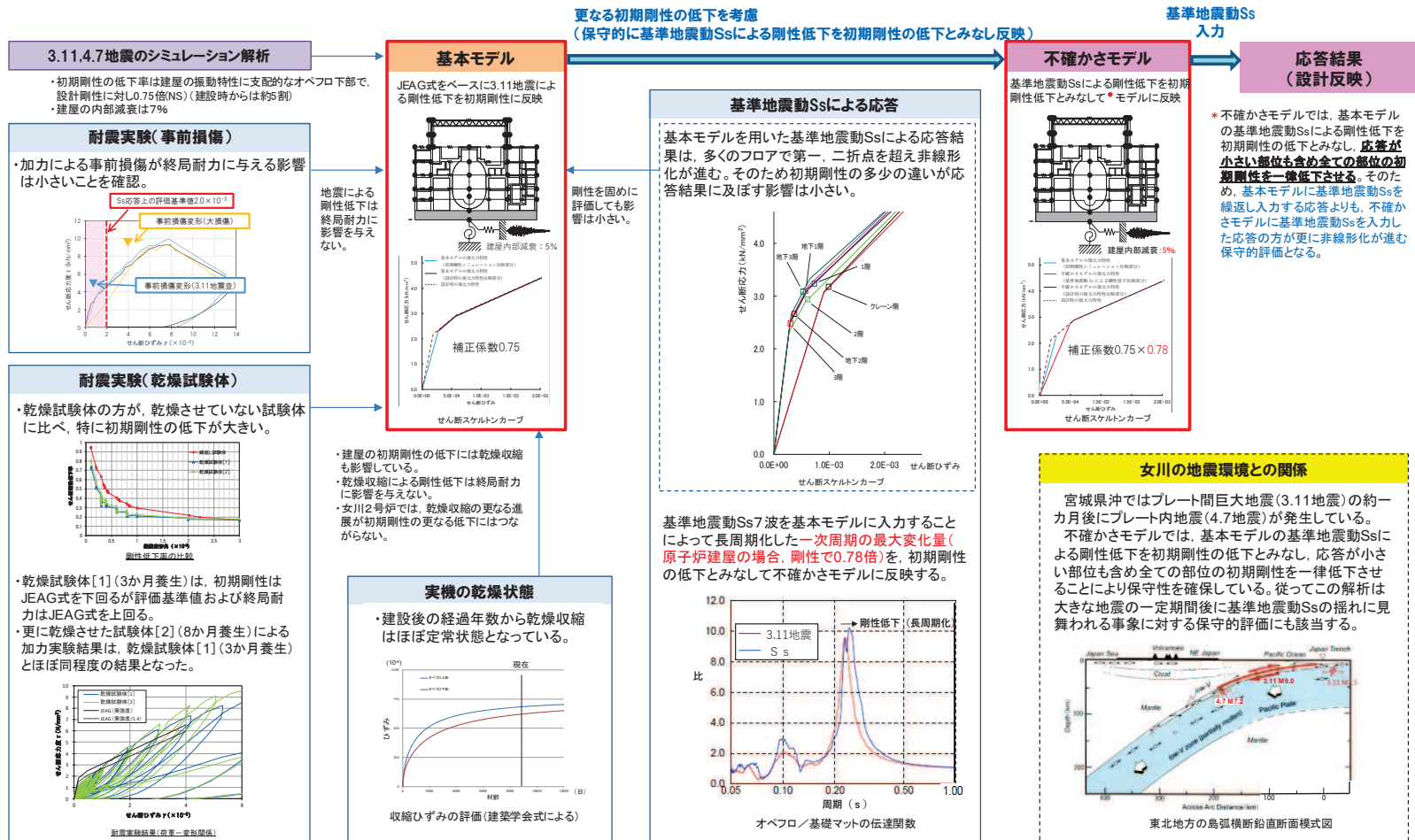


図 2-2 建屋剛性低下に係る検討と設計体系への反映との関係

2.3 地震応答解析モデルの策定

2.3.1 基本モデル策定の考え方

設計よりも初期剛性が低下した要因は、3.11 地震等の地震力の影響と乾燥収縮の影響の重畳と考えられることから、その要因と今後の進展に関するこれまでの検討内容を踏まえて、基本モデルのスケルトン曲線を設定する。

(1) 基本モデルのスケルトン曲線の設定の考え方

事前損傷、乾燥収縮及び大架構は、J E A G 式の評価基準値付近に影響を与えないこと、実機の乾燥収縮はほぼ定常状態にあることから、ベースとするスケルトン曲線は、既工認と同様、J E A G 式を基本モデルに適用する。また、初期剛性の考え方は以下のとおりとし、せん断スケルトン曲線の設定を図 2-3 に、初期剛性を低下させたせん断力復元力特性の設定を図 2-4 に示す。

① 建屋の初期剛性（水平動）

初期剛性を低下させた 3.11 地震等のシミュレーション解析において、オペフロ上部のように折点を超えるような応答に対しても十分観測記録との整合性が確保できること、また、基準地震動 S_s に対しては第 1、第 2 折点を越えた応答となるため、初期剛性の違いが応答結果に与える影響が小さくなることも踏まえ、初期剛性は 3.11 地震、4.7 地震時の低下した状態を採用する。

② 建屋の初期剛性（鉛直動）

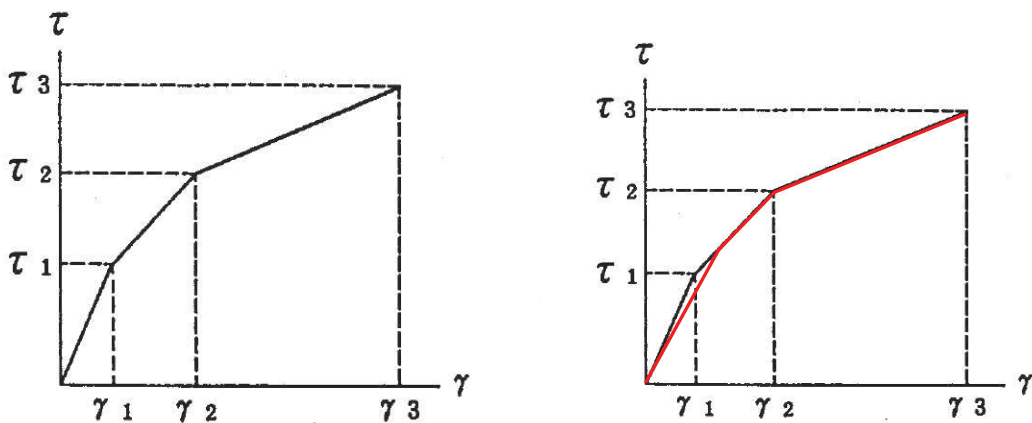
水平動に比べ建設時からの剛性低下は小さく、これまでの地震の経験において設計剛性を下回っていないこと、建屋シミュレーション解析では既工認モデルで記録を再現できたことから、既工認モデルの剛性を採用する。

③ 基本モデルのせん断スケルトン曲線の概要

- ・耐震壁の初期剛性低下の影響については、トリリニア型スケルトン曲線の第一勾配を緩く傾斜させ、元の J E A G のスケルトン曲線に接続することで考慮している。
- ・せん断力復元力特性モデルは、元の復元力特性の考え方で剛性が低下していった場合と同様とし、最大点指向型履歴ループを用いる。
- ・初期剛性は、現在の建屋状態に合わせているが、そのカー変形関係は基本的に J E A G に則った復元力特性を用いており、J E A G に適合するものとしている。
- ・このような初期剛性を低下させた復元力特性モデルでは、最大加速度が 3.11 地震、弾性設計用地震動 S_d レベルの入力の場合には第 1 勾配内での応答と

なり等価線形応答となる。最大加速度が弾性設計用地震動 S_d を超え基準地震動 S_s レベルの入力になると、応答が大きくなり第2勾配（又は第3勾配）に入る非線形応答となる。

- ・なお、曲げスケルトン曲線についても J E A G に基づく復元力特性とし、初期剛性はせん断と同様に低下させたモデルとする。



設計時のスケルトン曲線

初期剛性を低下させた場合のスケルトン曲線

図 2-3 せん断スケルトン曲線の設定

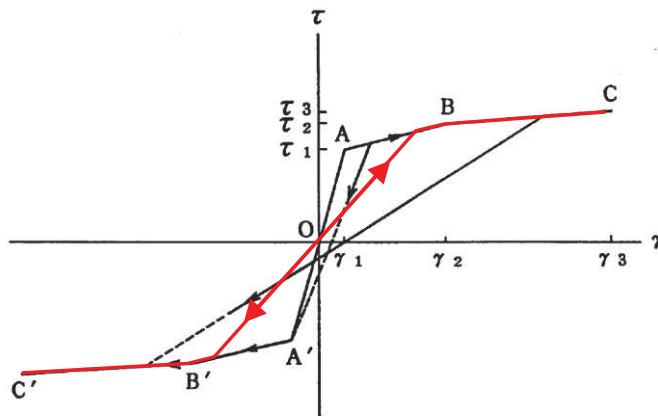


図 2-4 初期剛性を低下させたせん断力復元力特性の設定

(2) 基本モデル策定の考え方（その他の解析物性値の設定）

基本モデルの解析物性値の内、スケルトン曲線以外の建屋減衰等の設定は、3.11地震等の傾向、地盤調査結果及び耐震補強工事を反映する。

表 2-1 に基本モデル策定の考え方を整理した表を示す。

表 2-1 基本モデル策定の考え方（その他の解析物性値の設定）

項目	基本モデルへの適用
建屋減衰	<p>【水平動】</p> <ul style="list-style-type: none">・3.11 地震における建屋減衰は 7% と評価されており、これは初期剛性の低下の影響（履歴的な減衰効果）も含まれたものと考えられる。基本モデルにおいては、この効果を安全側に無視し、既工認と同様の建屋減衰 5% を採用する。 <p>【鉛直動】</p> <ul style="list-style-type: none">・3.11 地震のシミュレーション解析では既工認と同様の建屋減衰（5%）を採用し観測記録を再現出来たことから、5% を採用する。
底面地盤ばね	<ul style="list-style-type: none">・底面地盤については実測した地盤のせん断波速度の平均値を採用。建屋直下の PS 検層を 9 箇所実施し、その平均値よりせん断波速度を設定。
耐震補強部材の反映	<ul style="list-style-type: none">・地上 3 階～屋上階には耐震補強工事を実施していることから、追設ブレース及び追設耐震壁をモデルに反映する。・追設耐震壁は、既存躯体及び鋼製型枠により覆われているため、乾燥収縮の影響を受けにくい構造であり、また、大きな地震を経験していないことから、初期剛性低下は考慮しないこととする。なお、初期剛性の不確かさケースにおいては、追設耐震壁についても一律初期剛性低下を考慮する。

2.3.2 原子炉建屋の基本モデルの諸元

原子炉建屋の基本モデルの諸元を表 2-2 及び図 2-5 に示す。また、既工認モデルとの差異を表 2-3 に示す。

表 2-2 コンクリート壁の初期剛性の設計値に対する補正係数と建屋減衰

号機 建屋	方向	コンクリート壁の初期剛性の設計値に対する 補正係数		減衰定数 h (%)
		地上 3 階 クレーン階	地下 3 階～地上 2 階	
0-2 R/B	NS	0.30	0.75	5
	EW	0.50	0.80	5
	UD	1.00	1.00	5

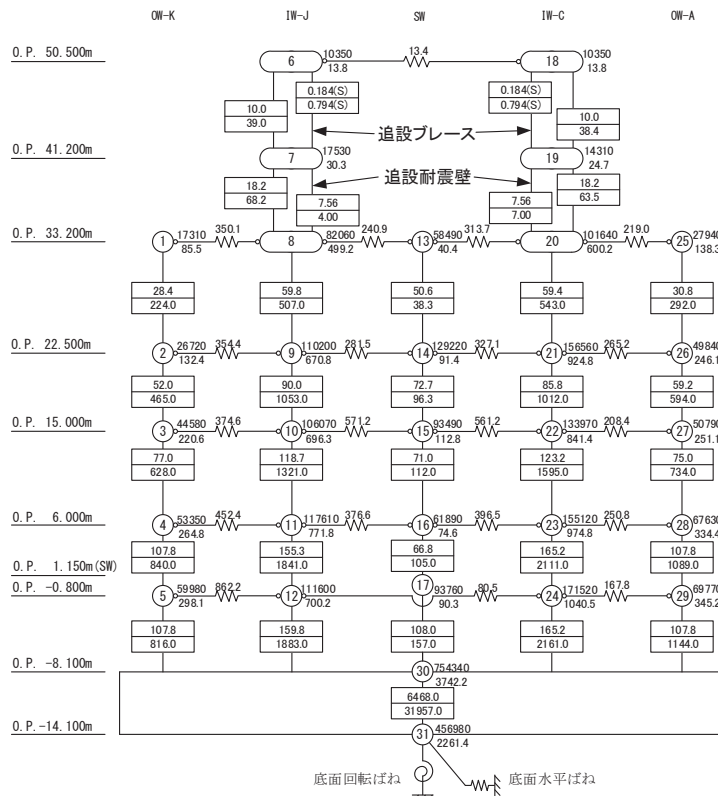
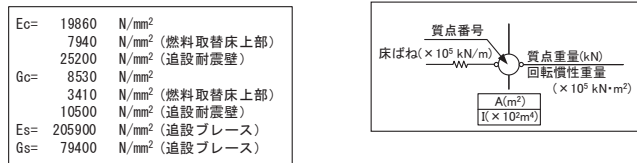


図 2-5 (1) 原子炉建屋 地震応答解析モデル (NS 方向)

$E_c =$	21180	N/mm ²
	13240	N/mm ² (燃料取替床上部)
	25200	N/mm ² (追設耐震壁)
$G_c =$	9100	N/mm ²
	5690	N/mm ² (燃料取替床上部)
	10500	N/mm ² (追設耐震壁)

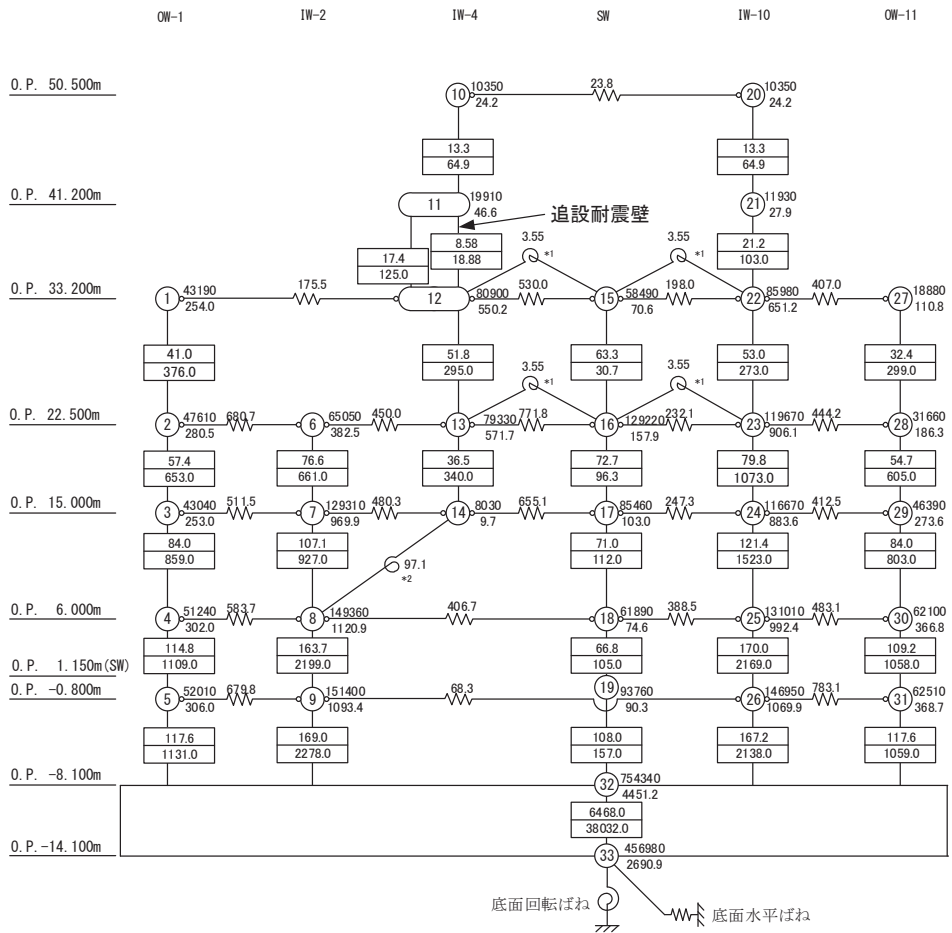
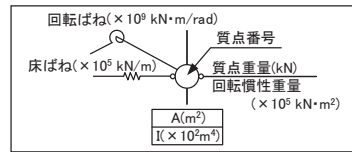


図 2-5 (2) 原子炉建屋 地震応答解析モデル (EW 方向)

表 2-3 既工認モデルとの差異

項目		既工認モデル	今回工認モデル
入力地震動		直接入力	表層地盤の影響を考慮して基礎下の入力地震動を算定
応答計算法		時刻歴応答解析 (非線形解析)	同左
建屋モデル		質点系多軸モデル・床剛 (側面地盤との相互作用は考慮しない)	質点系多軸モデル・床の柔性考慮 (側面地盤との相互作用は考慮しない)
剛性 評価 (RC)	考慮範囲	耐震壁	同左
	ヤング係数 せん断弾性 係数	コンクリートの設計基準強度より算定	3.11 地震等の観測記録との整合を踏まえて剛性低下を考慮
建屋 減衰	鉄筋コンクリート	5%	5% (3.11 地震等のシミュレーション解析では 7%相当であるが保守的に設定)
解析 モデル	建屋-地盤相互作用	スウェイ・ロッキングモデル (側面地盤との相互作用は考慮しない)	同左
地盤ばね		J E A Gによる近似法	同左

2.3.3 設計用地震力の評価方針

(1) 設計用地震力の設定方針

静的地震力の算定に用いる A_i 分布は、初期剛性の低下を考慮した今回工認モデルが現状の地震時の振動特性を持つ精緻なモデルであるため、これにより A_i 分布を算定する。ただし、念のため初期剛性低下を考慮しない設計剛性モデルでの A_i 分布も確認する。

今回工認における設計用地震力は、静的地震力、弾性設計用地震動 S_d による動的地震力により設定し、既工認における設計用地震力も包絡する。

(2) 静的地震力、必要保有水平耐力の設定方法

① 静的地震力（水平）

原子炉建屋の水平の静的地震力は算定用の基準面を基礎スラブ上端(0.P.-8.1m)とし、地震層せん断力係数を用いて次式によって算定する。

$$Q_i = n \cdot Z \cdot C_i \cdot W_i$$

$$C_i = \beta \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0$$

② 静的地震力（鉛直）

鉛直の静的地震力は、次式による鉛直震度から算定する。

$$K_v = R_v \cdot 0.3$$

③ 必要保有水平耐力

必要保有水平耐力は、次式によって算定する。

$$Q_{un} = D_s \cdot F_{es} \cdot Q_{ud}$$

$$Q_{ud} = n \cdot Z \cdot C_i \cdot W_i$$

$$C_i = R_t \cdot A_i \cdot C_0$$

ここで,

Q_i : 基準面より上の部分に作用する水平地震力

n : 施設の重要度分類に応じた係数(3.0)

Z : 地震地域係数(1.0 とする)

C_i : 地震層せん断力係数

W_i : 当該部分が支える固定荷重と積載荷重の和

R_t : 振動特性係数(1.0 とし, β で補正する)

β : 補正係数(0.8)

A_i : 地震層せん断力係数の高さ方向の分布係数

C_0 : 標準せん断力係数

(静的地震力 : 0.2, 必要保有水平耐力 : 1.0 とする)

K_v : 鉛直震度

R_v : 鉛直方向振動特性係数(0.8)

Q_{un} : 各層の必要保有水平耐力

D_s : 各層の構造特性係数(0.55 とする)

F_{es} : 各層の形状特性係数

Q_{un} : 地震力によって各層に生じる水平力

(3) 静的地震力と動的地震力の比較

今回工認では、すべての階で静的地震力に比べて弾性設計用地震動 S d による動的地震力の方が大きくなっている。なお、既工認時では、静的地震力に比べて基準地震動 S 1 による動的地震力の方が大部分の階で大きく、動的地震力により設計断面が決定される箇所が多い。静的地震力と動的地震力の比較を表 2-4 に示す。

表 2-4 (1) 静的地震力と動的地震力の比較 (NS 方向)

レベル O. P. (m)	階高 (m)	今回工認 静的地震力	弾性設計用 地震動 S d	既工認 設計用地震 力	(参考) 既工認 静的地震力	(参考) 既工認 動的地震力 (基準地震動 S1)
		Qi (kN)	Qi (kN)	Qi (kN)	Qi (kN)	Qi (kN)
50.5						
	9.3	45670	60948	51799	50289	34206
41.2						
	8.0	80218	98979	84376	81915	59742
33.2						
	10.7	316519	383901	362787	314166	342203
22.5						
	7.5	615887	664155	788386	596970	723799
15.0						
	9.0	819336	882255	1069582	797310	1005152
6.0						
	6.8	955423	1096217	1287996	942762	1226586
-0.8						
	7.3	1057755	1252113	1493474	1057059	1419140
-8.1						

表 2-4 (2) 静的地震力と動的地震力の比較 (EW 方向)

レベル O. P. (m)	階高 (m)	今回工認 静的地震力	弾性設計用 地震動 S d	既工認 設計用地震 力	(参考) 既工認 静的地震力	(参考) 既工認 動的地震力 (基準地震動 S1)
		Qi (kN)	Qi (kN)	Qi (kN)	Qi (kN)	Qi (kN)
50.5						
	9.3	44836	48867	44983	43679	29341
41.2						
	8.0	81846	96890	78914	76610	60281
33.2						
	10.7	321619	426109	362797	309812	337800
22.5						
	7.5	619143	676276	779129	600226	700312
15.0						
	9.0	820581	864829	1045850	804773	961022
6.0						
	6.8	955423	1054833	1229519	946146	1153723
-0.8						
	7.3	1057755	1207993	1426730	1057069	1334842
-8.1						

(4) 必要保有水平耐力の比較

既工認と今回工認における必要保有水平耐力は、概ね同程度の値となっている。地上3階より上部では、地震等による初期剛性低下や耐震補強工事等の影響により、 A_i 分布が変動した影響として、今回工認モデルの方が、必要保有水平耐力が小さくなっている。必要保有水平耐力の比較を表2-5に示す。

表2-5 既工認と今回工認における必要保有水平耐力の比較

レベル O. P. (m)	階高 (m)	既工認 Qun (kN)		今回工認 Qun (kN)	
		NS	EW	NS	EW
50.5	9.3	46101	40041	41874	41109
41.2					
33.2	8.0	75060	70235	73501	75040
22.5	10.7	288002	283942	290022	294876
	7.5	546927	550496	564863	567550
15.0	9.0	731105	737244	751062	751748
6.0					
-0.8	6.8	863564	867300	876430	875489
	7.3	968985	968985	969603	969603
-8.1					

2.4 地震応答解析モデルに考慮する不確かさに関する検討

耐震設計に係わる工認審査ガイドでは、

- ① 地震応答解析に用いる材料定数のうち解析モデルの剛性評価に用いる定数については、材料のばらつきによる定数の変動幅が適切に設定されていること
- ② 材料定数の変動が建物・構築物の振動性状（固有周期、固有モード、等）や応答性状に及ぼす影響を検討し、必要に応じて、建物・構築物の地震力や機器・配管系の入力地震力に及ぼす影響を設計に考慮すること

を要求している。

ここでは、女川原子力発電所の特徴を踏まえて、地震応答解析結果へ影響を与える材料物性値について検討の上、ばらつきによる変動幅を考慮する項目を抽出する。

建屋の耐震評価に用いる動的地震力は、地震応答解析（時刻歴応答解析法）により求められており、地盤物性、建屋剛性、地盤のばね定数及び減衰定数、地震動の位相特性などの影響を受ける。特に床応答スペクトルの変動に影響を及ぼす要因は、建物剛性及び地盤物性であることが確認されている。

女川では 3.11 地震等の記録によって初期剛性が低下していることが確認されていることから、剛性低下の要因（地震による影響（大架構の影響含む）、乾燥収縮による影響）が建屋初期剛性や終局耐力に与える検討結果を踏まえ、これらの要因に対する不確かさケースについて検討する。また、3.11 地震に対する原子炉建屋のシミュレーション解析では、建屋減衰として 7%の値を採用することにより観測記録との整合性が図られており、建屋減衰に対する不確かさケースについて検討を行う。

建屋と地盤との相互作用を考慮したモデルによる地震応答解析においては、地盤物性は地盤調査結果から地盤のせん断波速度を用いて算出していること、また、入力地震動の評価において表層地盤の影響を考慮しているが、これについても調査結果を踏まえて地盤モデルを設定していることから、地盤物性に対する不確かさケースについて検討を行う。

以上より、建屋の地震応答解析における材料物性値の内、

①建屋初期剛性、②終局耐力、③建屋減衰、④地盤物性についてばらつきによる変動幅を検討する。

以上を踏まえた地震応答解析モデルへの反映に際しての考え方を表 2-6 に、検討ケース一覧を表 2-7 に示す。

表 2-6 (1) 基準地震動 S_s に対する不確かさケースの設定の考え方 (1/4)

項目	基本ケースへの適用	不確かさケースへの適用
建屋 初期 剛性	<p>【建屋の初期剛性（水平動）】</p> <ul style="list-style-type: none"> 初期剛性を低下させた等価線形解析によるシミュレーション解析では、オペフロ上部のように折点を超えるような応答に対しても十分観測記録との整合性が確保できること、また、基準地震動 S_s に対しては第一、第二折点を越えた応答となるため、初期剛性の多少の違いが応答結果に与える影響は小さいことも踏まえ、初期剛性は 3.11 地震等によって低下した状態を採用する。 	<p>【建屋の初期剛性（水平）】</p> <ul style="list-style-type: none"> 初期剛性の多少の違いが応答結果に与える影響は小さいが、一方で、過去の中小地震も含めた記録では時間経過に伴い剛性が低下する傾向の他に、更新地震によっても剛性が低下する傾向が認められていることから、初期剛性低下の影響を保守的に反映するモデルを不確かさケースとして採用する。 具体的には、更なる剛性低下として、基本モデルを用いた基準地震動 S_s の応答結果として得られる剛性低下（原子炉建屋の場合 0.78 倍）を考慮する。また、不確かさモデルへの適用にあたっては、この非線形化による剛性低下を初期剛性低下とみなし、全ての耐震壁におけるスケルトン曲線の初期剛性の低下として一律に考慮することにより保守性を確保する。 採用する初期剛性低下が、女川の観測記録から類推される基準地震動 S_s 時の剛性低下量よりも小さいことも合わせて確認する。 なお、宮城県沖では、3.11 地震（巨大プレート間地震）の約一カ月後に 4.7 地震（海洋プレート内地震）が発生しているが、不確かさケースは大きな地震の一定期間後に基準地震動 S_s の揺れに見舞われる事象に対する保守的評価にも該当する。

表 2-6 (2) 基準地震動 S_s に対する不確かさケースの設定の考え方 (2/4)

項目	基本ケースへの適用	不確かさケースへの適用
建屋 初期 剛性	<p>【建屋の初期剛性（鉛直動）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 水平動に比べ剛性の低下率は小さく、これまでの経年変化によって設計剛性を下回っていないこと、建屋シミュレーション解析では既工認モデルで記録を再現できたことから、既工認モデルの剛性を採用する。 	<p>【建屋の初期剛性（鉛直）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 水平動に比べ剛性の低下率は小さく、これまでの経年変化によって設計剛性を下回っていないこと、建屋シミュレーション解析では既工認モデルで記録を再現できたこと、また、剛性の変化が建屋応答に与える感度が小さいことから、鉛直動に対しては初期剛性の不確かさは考慮しない。
終局 耐力	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地震による事前損傷は、J E A G 式の評価基準値付近の耐力低下要因とはならない。 ・ 乾燥収縮は初期剛性低下に寄与するものの、J E A G 式の評価基準値付近での耐力は J E A G 式を上回る。乾燥度合が進行したとしても、更なる剛性低下に寄与しない。 ・ 建設後の経過年数から第 2 号機建屋の乾燥状態はほぼ定常状態にある。 ・ オペフロ上部の大架構は、設計の評価法に比べ実際の初期剛性は小さいが J E A G 式の評価基準値付近では評価式と同程度。 <ul style="list-style-type: none"> → 以上を踏まえ、評価基準値付近のスケルトン曲線については、既工認と同様、J E A G 式を基本ケースに適用する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実機のコンクリート強度は設計基準強度より高い傾向にあり、終局耐力はその分高い方に上振れすることが考えられるが、終局耐力の増加は建屋の変形を抑制する方向の評価となることから、これを考慮しない。

表 2-6 (3) 基準地震動 S_s に対する不確かさケースの設定の考え方 (3/4)

項目	基本ケースへの適用	不確かさケースへの適用
建屋 減衰	<p>【水平動】</p> <ul style="list-style-type: none"> 3.11 地震における建屋減衰は 7%と評価されており、これは初期剛性の低下の影響（履歴的な減衰効果）も含まれたものと考えられる。基本ケースにおいては、この効果を安全側に無視し、既工認と同様の建屋減衰 5%を採用する。 <p>【鉛直動】</p> <ul style="list-style-type: none"> 3.11 地震のシミュレーション解析では既工認と同様の建屋減衰（5%）を採用し観測記録を再現出来たことから、5%を採用する。 	<p>【水平動】</p> <ul style="list-style-type: none"> 基本的には、基本ケースに採用した建屋減衰の値を適用する。 基本モデルを用いた基準地震動 S_s の応答値が多く部位で第二折点を越えるような場合は、剛性低下量を初期剛性に反映した不確かさモデルでは履歴減衰が考慮されないため、建屋減衰として基本ケースよりも大きい値が採用可能か検討した上でその値を採用する。 <p>【鉛直動】</p> <ul style="list-style-type: none"> 鉛直動シミュレーションでは建屋減衰 5%を採用しており、不確かさケースでもこれを用いる。
地盤 物性	<ul style="list-style-type: none"> 底面地盤については実測した地盤のせん断波速度の平均値を採用。 入力地震動の算定に用いる表層地盤上部、下部とも 3.11 地震等のシミュレーション解析結果を踏まえた値・手法を採用。 	<ul style="list-style-type: none"> 底面地盤については、実測値のばらつきを考慮。 表層地盤のばらつきが建屋応答に与える影響は小さいが、表層地盤下部については非線形性を考慮せず一定値を採用しているため、底面地盤と同程度のばらつきとして、せん断波速度 $\pm 100\text{m/s}$ を考慮する。

表 2-6 (4) 弾性設計用地震動 S d に対する不確かさケースの設定の考え方 (4/4)

項目	基本ケースへの適用	不確かさケースへの適用
建屋 剛性 建屋 減衰	<ul style="list-style-type: none"> 弾性設計用地震動 S d の建屋応答は 3.11 地震による応答と同程度あることから、3.11 建屋シミュレーション解析の剛性を採用する。 建屋減衰について、3.11 地震における建屋減衰は 7% と評価されたが、保守的に 5% を採用する。 	<ul style="list-style-type: none"> 先行プラントでは構造の複雑さによる減衰効果が期待しにくい単純な構造の建物に建屋減衰 3% を適用しているが、女川の原子炉建屋では弾性設計用地震動 S d と同等レベルの 3.11 地震において建屋減衰 7% の評価結果が得られており、建屋減衰 3% の不確かさは考慮しない。他の建屋については、3.11 地震の傾向や建屋の特徴も踏まえて必要に応じ考慮する。

表 2-7 検討ケース一覧

対象地震動	ケース名	スケルトン曲線		建屋減衰	地盤物性	
		初期剛性	終局耐力		入力地震動	底面地盤ばね
基準地震動 S _s (水平動)	ケース 1 (基本ケース)	3.11 地震 シミュレーション	設計基準強度を用い J E A G 式で評価 (=既工認)	5% (=既工認)	表層上部非線形 表層下部 V _s 900m/s	標準地盤 (=既工認)
	ケース 2	同上	同上	同上	表層上部非線形 表層下部 V _s 900+100m/s	標準地盤 + σ
	ケース 3				表層上部非線形 表層下部 V _s 900-100m/s	標準地盤 - σ
	ケース 4	基本ケースの 0.78 倍 (原子炉建屋の場合)	同上	5% (原子炉建屋の場合)	表層上部非線形 表層下部 V _s 900m/s	標準地盤 (=既工認)
	ケース 5				表層上部非線形 表層下部 V _s 900+100m/s	標準地盤 + σ
	ケース 6				表層上部非線形 表層下部 V _s 900-100m/s	標準地盤 - σ
基準地震動 S _s (鉛直動)	ケース 1 (基本ケース)	3.11 地震 シミュレーション (=既工認)	—	5% (3.11 地震シミュレーシ ョン) (=既工認)	直接入力 (=既工認)	標準地盤 (=既工認)
	ケース 2	同上	—	同上	同上	標準地盤 + σ
	ケース 3					標準地盤 - σ
弾性設計用 地震動 S _d (水平, 鉛直)	ケース 1 (基本ケース)	3.11 地震 シミュレーション	—	5% (水平, 鉛直とも) (=既工認)	(水平) 表層上部非線形 表層下部 V _s 900m/s (鉛直) 直接入力	標準地盤 (=既工認)
	ケース 2	同上	—	同上	表層上部非線形 表層下部 V _s 900+100m/s	標準地盤 + σ
	ケース 3				表層上部非線形 表層下部 V _s 900-100m/s	標準地盤 - σ

別紙 20-1 建屋初期剛性の不確かさケースの剛性低下量の設定

1. 不確かさケースの設定の考え方

基本モデルを用いた基準地震動 S_s による応答結果は、多くのフロアでせん断スケルトンカーブの折点（第 1, 第 2 折点）を超え非線形化が進むため、初期剛性の違いが応答結果に及ぼす影響は小さいと考えられるが、基準地震動 S_s を経験するまでに最大限低下する場合を初期剛性低下の不確かさケースとして考慮する。

2. 設定方法

基準地震動 S_s 時の不確かさケースに設定する剛性低下量は、基準地震動 S_s 入力前後の 1 次ピーク振動数の比 ($f_{S_s \text{ 後}}/f_{S_s \text{ 前}}$) から算定した剛性比を基本ケースの初期剛性に掛けることによって算定する。

基準地震動 S_s 入力前の 1 次ピーク振動数 $f_{S_s \text{ 前}}$ は、基本ケースに $1/2 \times S_d$ を入力した際の基礎版から各階の伝達関数の 1 次ピーク振動数の平均より求める。基準地震動 S_s 入力後の 1 次ピーク振動数 $f_{S_s \text{ 後}}$ は、基本ケースに各基準地震動 S_s を入力した後に $1/2 \times S_d$ を入力した際の基礎版から各階の伝達関数（各階／基礎版）の 1 次ピーク振動数の平均より求める。ここで $1/2 \times S_d$ を使っているが、初期剛性を確認するために小振幅の地震動として入力したものである。

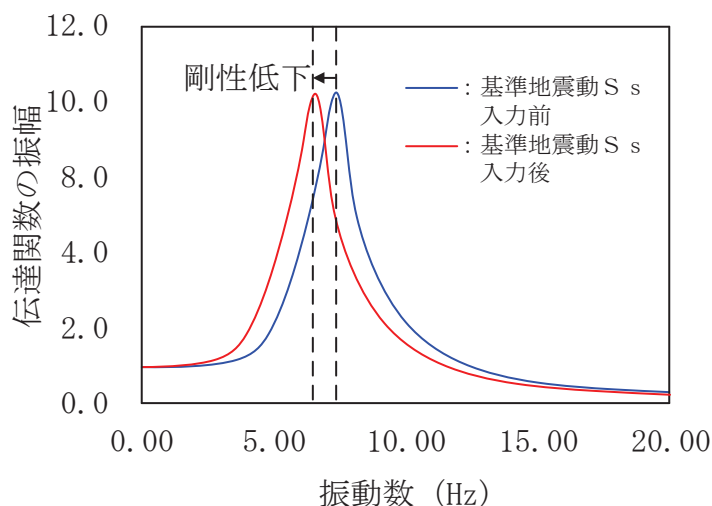


図 2-1 各階／基礎版の伝達関数イメージ

3. 各建屋の基準地震動 S s 入力前後の剛性比

3.1 原子炉建屋

表 3-1 に原子炉建屋の基準地震動 S s 入力前後の 1 次ピーク振動数の比から算定した剛性比を示す。

表 3-1 原子炉建屋の基準地震動 S s 前後の建屋剛性比

(NS 方向)

基準地震動	Ss 後の 1 次ピーク ($f_{Ss \text{ 後}}$) (Hz)	Ss 前の 1 次ピーク ($f_{Ss \text{ 前}}$) (Hz)	Ss 前後の 1 次ピークの比 ($f_{Ss \text{ 後}}/f_{Ss \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	3.90	4.43	0.88	0.78
Ss-D2	3.90	4.42	0.88	0.78
Ss-D3	4.23	4.41	0.96	0.92
Ss-F1	4.40	4.42	1.00	0.99
Ss-F2	4.12	4.39	0.94	0.88
Ss-F3	4.19	4.42	0.95	0.90
Ss-N1	4.00	4.42	0.91	0.82

(EW 方向)

基準地震動	Ss 後の 1 次ピーク ($f_{Ss \text{ 後}}$) (Hz)	Ss 前の 1 次ピーク ($f_{Ss \text{ 前}}$) (Hz)	Ss 前後の 1 次ピークの比 ($f_{Ss \text{ 後}}/f_{Ss \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	4.06	4.58	0.89	0.79
Ss-D2	4.08	4.59	0.89	0.79
Ss-D3	4.38	4.57	0.96	0.92
Ss-F1	4.57	4.58	1.00	0.99
Ss-F2	4.29	4.62	0.93	0.86
Ss-F3	4.45	4.57	0.97	0.95
Ss-N1	4.26	4.60	0.93	0.86

注 1：網掛け部分は各方向，各基準地震動 S s のうち最も小さい値を示す。

注 2：剛性比は 1 次ピーク振動数の比の 2 乗として算定する。

3.2 制御建屋

表3-2に制御建屋の基準地震動 S s 入力前後の1次ピーク振動数の比から算定した剛性比を示す。

表 3-2 制御建屋の基準地震動 S s 前後の建屋剛性比

(NS 方向)

基準地震動	Ss 後の 1 次ピーク ($f_{Ss \text{ 後}}$) (Hz)	Ss 前の 1 次ピーク ($f_{Ss \text{ 前}}$) (Hz)	Ss 前後の 1 次ピークの比 ($f_{Ss \text{ 後}}/f_{Ss \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	4.31	4.60	0.94	0.88
Ss-D2	4.22	4.63	0.91	0.83
Ss-D3	4.48	4.60	0.97	0.94
Ss-F1	4.62	4.62	1.00	1.00
Ss-F2	4.44	4.66	0.95	0.91
Ss-F3	4.48	4.60	0.97	0.94
Ss-N1	4.56	4.63	0.99	0.97

(EW 方向)

基準地震動	Ss 後の 1 次ピーク ($f_{Ss \text{ 後}}$) (Hz)	Ss 前の 1 次ピーク ($f_{Ss \text{ 前}}$) (Hz)	Ss 前後の 1 次ピークの比 ($f_{Ss \text{ 後}}/f_{Ss \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	4.39	5.00	0.88	0.77
Ss-D2	4.16	4.98	0.83	0.70
Ss-D3	4.44	5.00	0.89	0.79
Ss-F1	4.85	4.98	0.97	0.95
Ss-F2	4.95	4.99	0.99	0.98
Ss-F3	4.43	5.00	0.88	0.78
Ss-N1	4.92	4.97	0.99	0.98

注 1：網掛け部分は各方向，各基準地震動 S s のうち最も小さい値を示す。

注 2：剛性比は 1 次ピーク振動数の比の 2 乗として算定する。

3.3 第3号機海水熱交換器建屋

表3-3に第3号機海水熱交換器建屋の基準地震動S_s入力前後の1次ピーク振動数の比から算定した剛性比を示す。

表3-3 第3号機海水熱交換器建屋の基準地震動S_s前後の建屋剛性比

(NS方向)

基準地震動	S _s 後の1次ピーク (f _{S_s後}) (Hz)	S _s 前の1次ピーク (f _{S_s前}) (Hz)	S _s 前後の1次ピークの比 (f _{S_s後} /f _{S_s前})	剛性比
S _s -D1	6.44	7.54	0.85	0.73
S _s -D2	6.26	7.54	0.83	0.69
S _s -D3	6.70	7.54	0.89	0.79
S _s -F1	7.25	7.52	0.96	0.93
S _s -F2	6.92	7.53	0.92	0.84
S _s -F3	6.62	7.52	0.88	0.78
S _s -N1	7.55	7.55	1.00	1.00

(EW方向)

基準地震動	S _s 後の1次ピーク (f _{S_s後}) (Hz)	S _s 前の1次ピーク (f _{S_s前}) (Hz)	S _s 前後の1次ピークの比 (f _{S_s後} /f _{S_s前})	剛性比
S _s -D1	5.45	6.88	0.79	0.63
S _s -D2	5.01	6.92	0.72	0.53
S _s -D3	5.52	6.91	0.80	0.64
S _s -F1	6.52	6.91	0.94	0.89
S _s -F2	6.11	6.91	0.88	0.78
S _s -F3	5.03	6.90	0.73	0.53
S _s -N1	6.53	6.92	0.94	0.89

注1：網掛け部分は各方向、各基準地震動S_sのうち最も小さい値を示す。

注2：剛性比は1次ピーク振動数の比の2乗として算定する。

3.4 タービン建屋

表3-4にタービン建屋の基準地震動 S_s 入力前後の1次ピーク振動数の比から算定した剛性比を示す。

表 3-4 タービン建屋の基準地震動 S_s 前後の建屋剛性比

(NS 方向)

基準地震動	S_s 後の1次ピーク ($f_{S_s \text{ 後}}$) (Hz)	S_s 前の1次ピーク ($f_{S_s \text{ 前}}$) (Hz)	S_s 前後の1次ピークの比 ($f_{S_s \text{ 後}}/f_{S_s \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	3.92	4.26	0.92	0.85
Ss-D2	3.89	4.23	0.92	0.84
Ss-D3	4.12	4.25	0.97	0.94
Ss-F1	4.20	4.24	0.99	0.98
Ss-F2	3.94	4.25	0.93	0.86
Ss-F3	3.98	4.24	0.94	0.88
Ss-N1	4.07	4.25	0.96	0.92

(EW 方向)

基準地震動	S_s 後の1次ピーク ($f_{S_s \text{ 後}}$) (Hz)	S_s 前の1次ピーク ($f_{S_s \text{ 前}}$) (Hz)	S_s 前後の1次ピークの比 ($f_{S_s \text{ 後}}/f_{S_s \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	3.27	3.52	0.93	0.86
Ss-D2	3.19	3.54	0.90	0.81
Ss-D3	3.35	3.53	0.95	0.90
Ss-F1	3.49	3.55	0.98	0.97
Ss-F2	3.48	3.51	0.99	0.98
Ss-F3	3.37	3.53	0.96	0.91
Ss-N1	3.42	3.52	0.97	0.95

注1：網掛け部分は各方向，各基準地震動 S_s のうち最も小さい値を示す。

注2：剛性比は1次ピーク振動数の比の2乗として算定する。

3.5 補助ボイラー建屋

表3-5に補助ボイラー建屋の基準地震動 S_s 入力前後の1次ピーク振動数の比から算定した剛性比を示す。

表 3-5 補助ボイラー建屋の基準地震動 S_s 前後の建屋剛性比

(NS 方向)

基準地震動	S_s 後の1次ピーク ($f_{S_s \text{ 後}}$) (Hz)	S_s 前の1次ピーク ($f_{S_s \text{ 前}}$) (Hz)	S_s 前後の1次ピークの比 ($f_{S_s \text{ 後}}/f_{S_s \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	9.03	11.89	0.76	0.58
Ss-D2	8.47	11.89	0.71	0.51
Ss-D3	8.54	11.91	0.72	0.51
Ss-F1	10.88	11.94	0.91	0.83
Ss-F2	10.52	11.90	0.88	0.78
Ss-F3	9.46	11.91	0.79	0.63
Ss-N1	11.88	11.88	1.00	1.00

(EW 方向)

基準地震動	S_s 後の1次ピーク ($f_{S_s \text{ 後}}$) (Hz)	S_s 前の1次ピーク ($f_{S_s \text{ 前}}$) (Hz)	S_s 前後の1次ピークの比 ($f_{S_s \text{ 後}}/f_{S_s \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	5.94	9.33	0.64	0.41
Ss-D2	5.72	9.33	0.61	0.38
Ss-D3	6.36	9.32	0.68	0.47
Ss-F1	7.49	9.34	0.80	0.64
Ss-F2	6.71	9.32	0.72	0.52
Ss-F3	5.86	9.32	0.63	0.39
Ss-N1	8.84	9.34	0.95	0.89

注1：網掛け部分は各方向，各基準地震動 S_s のうち最も小さい値を示す。

注2：剛性比は1次ピーク振動数の比の2乗として算定する。

3.6 第1号機制御建屋

表3-6に第1号機制御建屋の基準地震動S_s入力前後の1次ピーク振動数の比から算定した剛性比を示す。

表3-6 第1号機制御建屋の基準地震動S_s前後の建屋剛性比

(NS方向)

基準地震動	S _s 後の1次ピーク (f _{S_s後}) (Hz)	S _s 前の1次ピーク (f _{S_s前}) (Hz)	S _s 前後の1次ピークの比 (f _{S_s後} /f _{S_s前})	剛性比
S _s -D1	3.99	4.30	0.93	0.86
S _s -D2	4.01	4.28	0.94	0.88
S _s -D3	4.20	4.28	0.98	0.96
S _s -F1	4.27	4.29	1.00	0.99
S _s -F2	4.05	4.28	0.95	0.90
S _s -F3	4.16	4.29	0.97	0.94
S _s -N1	4.13	4.28	0.96	0.93

(EW方向)

基準地震動	S _s 後の1次ピーク (f _{S_s後}) (Hz)	S _s 前の1次ピーク (f _{S_s前}) (Hz)	S _s 前後の1次ピークの比 (f _{S_s後} /f _{S_s前})	剛性比
S _s -D1	4.31	4.82	0.89	0.80
S _s -D2	4.17	4.81	0.87	0.75
S _s -D3	4.40	4.83	0.91	0.83
S _s -F1	4.76	4.82	0.99	0.97
S _s -F2	4.72	4.81	0.98	0.96
S _s -F3	4.41	4.81	0.92	0.84
S _s -N1	4.74	4.87	0.97	0.95

注1：網掛け部分は各方向，各基準地震動S_sのうち最も小さい値を示す。

注2：剛性比は1次ピーク振動数の比の2乗として算定する。

別紙 20-2 原子炉建屋の観測記録の分析例

1. 概要

原子炉建屋では、別紙 2 に示すように建屋の剛性低下（固有振動数低下）について、地震観測記録による傾向分析を実施している。

過去の地震観測では、経年的な固有振動数の低下や比較的加速度の大きい地震における顕著な固有振動数の低下が見られている。

ここでは、過去の固有振動数と地震動の揺れの大きさ（振幅）との関係から、想定される基準地震動 S_s 時の固有振動数を外挿して算定することを検討する。

2. 原子炉建屋の観測記録の分析

(ARX モデルによる基準地震動 S s 時の固有振動数)

2.1 原子炉建屋の固有振動数の低下傾向

別紙 2 に示す原子炉建屋の ARX モデルによる固有振動数の評価結果を地震毎に経年的にプロットした図を図 2-1 に示す。

建設当初から徐々に振動数が低下しており、水平方向の建屋剛性が徐々に低下している。

大きく振動数が低下している地震は、基礎版上の加速度が大きいものであり、加速度の大きさに依存している傾向が見られる。

そこで、図 2-1 から、地震発生時に過去のそれまでの地震入力の最大値を更新した地震のみを取り出し、地震入力の最大値と固有振動数との関係を検討した。地震入力の指標としては、基礎版上の地震観測記録のパワースペクトルの平均値の平方根を採用した。

図 2-2 に固有振動数と基礎版上のパワースペクトルの平均値の平方根との関係を示す。

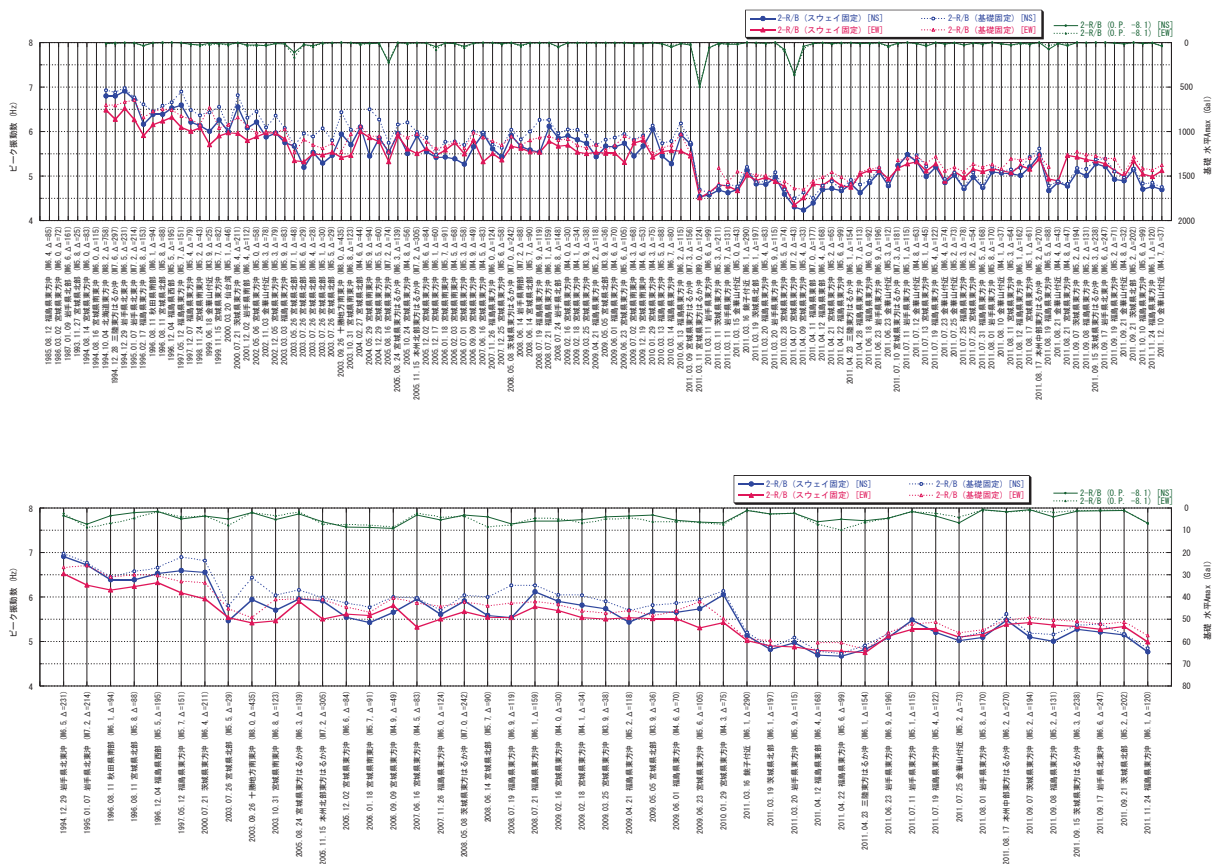


図 2-1 ピーク振動数の評価結果 (原子炉建屋)

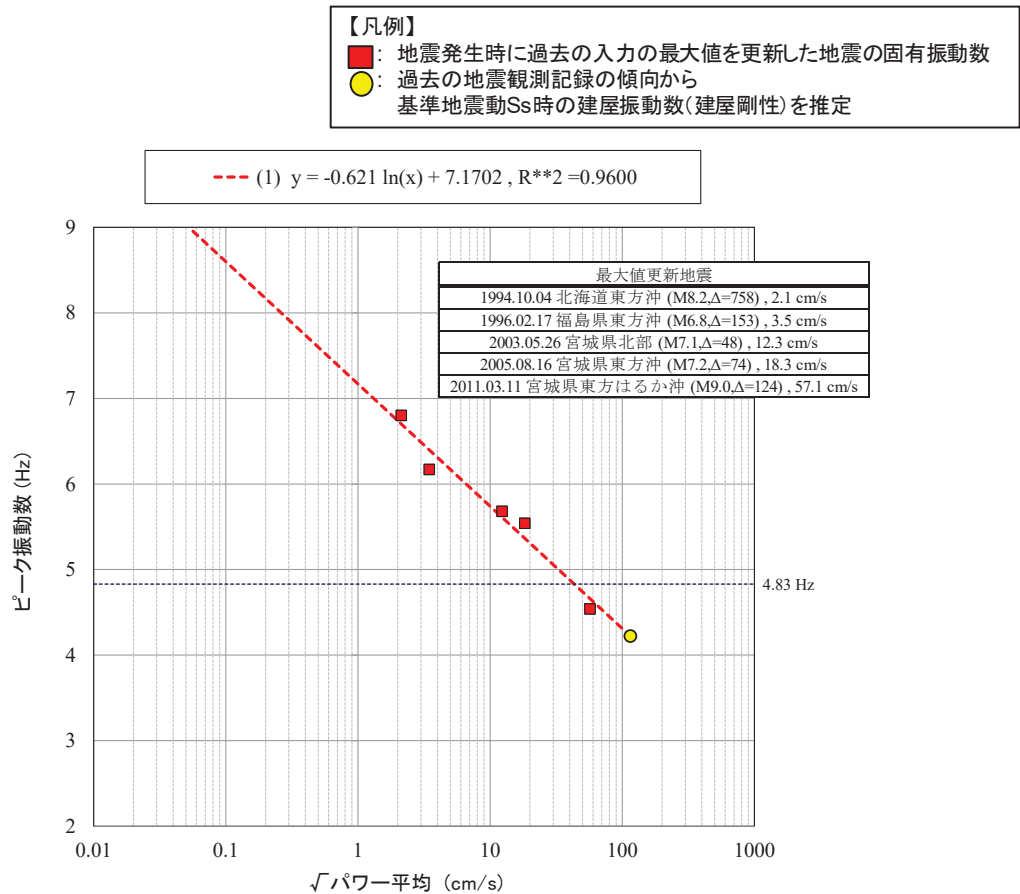


図 2-2 固有振動数と基礎版上のパワースペクトルの平均値の平方根との関係(NS 方向)

2.2 検討結果

図 2-2 の固有振動数と基礎版上のパワースペクトルの平均値の平方根との関係から、過去の入力地震の振幅を更新する地震による固有振動数の低下傾向は、片対数軸上ではほぼ直線となることが確認できる。

このことから、基準地震動 $S_s - D2$ 時に想定される固有振動数を外挿により算定すると、4.22Hz となり、3.11 地震に対する建屋の剛性比は 0.86 となった(表 2-1)。

したがって、基準地震動 $S_s - D2$ 時には、現状よりもさらに非線形化が進み約 0.86 倍の建屋剛性となることが想定される。

表 2-1 建屋剛性比の検討

	固有振動数(Hz)	3.11 地震に対する剛性比
3.11 地震 (基礎版上 57.1cm/s)	4.54	1.0
基準地震動 $S_s - D2$ (基礎版上 115.2cm/s)	4.22	0.86

3. まとめ

原子炉建屋の地震観測記録による ARX モデルを用いた固有振動数低下（剛性低下）の傾向分析から、基準地震動 S s - D 2 時における固有振動数（剛性低下）を検討した。

その結果、基準地震動 S s - D 2 時には、現状よりもさらに非線形化が進み約 0.86 倍の建屋剛性となることが想定される。

別紙 20-3 床ばねの初期剛性低下に関する影響検討

1. 検討目的

3.11 地震に対するシミュレーション解析では耐震壁の剛性を低下させることで観測記録との整合性を図っている。基準地震動 S_s に対する地震応答解析モデルも同様に耐震壁の初期剛性を低下させているが、これは建屋の剛性低下の要因を全て耐震壁に持たせていることと等価であり、基準地震動 S_s に対する機能維持として耐震壁のせん断ひずみを評価基準としていることを踏まえると保守的な評価となる。

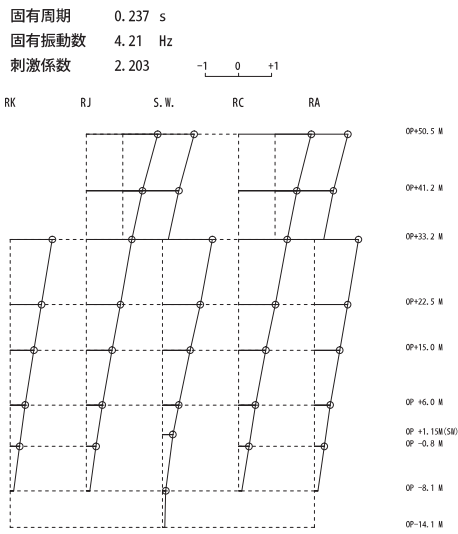
実際は、床スラブも鉄筋コンクリート造であることから、初期剛性が低下している可能性があるが、今回工認では、床の柔性を考慮したモデルを採用し軸同士の拘束をかけていないことから、床スラブの剛性低下の影響は顕著ではないと考えられ、それを解析的に確認する。

2. 検討方法

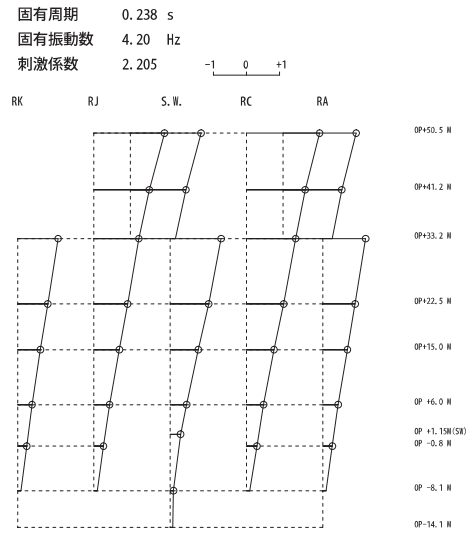
3.11 地震等のシミュレーション解析では床ばねのせん断応力度は耐震壁よりも小さい。したがって、床の剛性低下量としては耐震壁で考慮した剛性低下量より小さいと考えられるが、ここではオペフロ下部の耐震壁の低下量（0.75 倍）を適用した場合の影響を確認する。

3. 検討結果

図 3-1 に固有モード図の比較を、図 3-2 に最大加速度分布図を、図 3-3 にせん断ひずみの比較を、図 3-4 に床応答スペクトルの比較を示す。基準地震動 $S_s - D2$ に対する基本ケースと床ばねの初期剛性低下ケースは概ね同等の解析結果となっている。

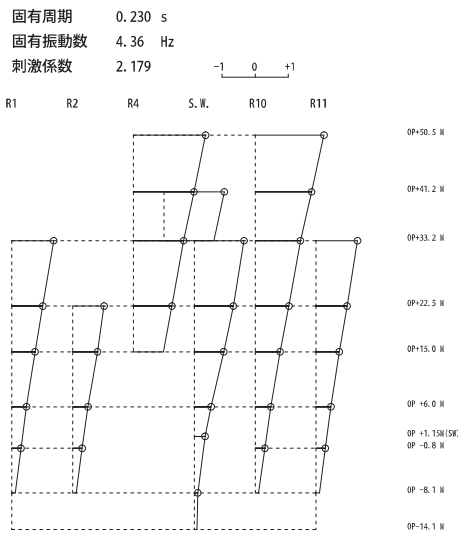


基本モデル

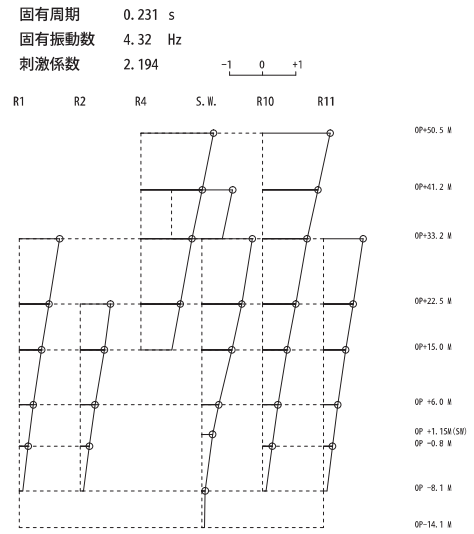


床ばね 0.75 倍

(a) NS 方向



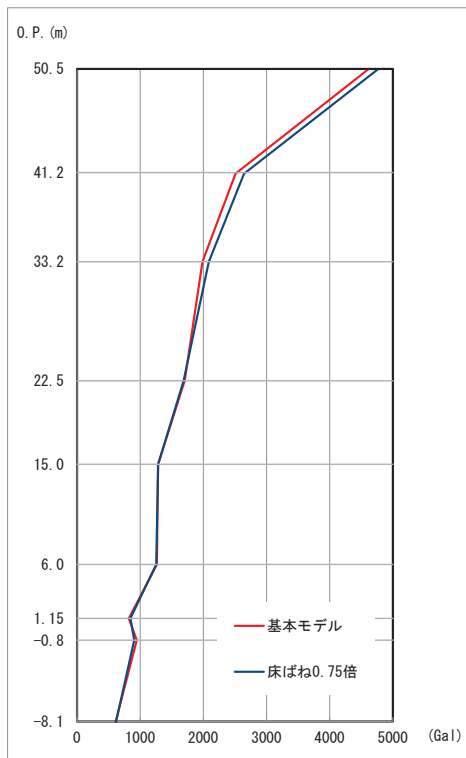
基本モデル



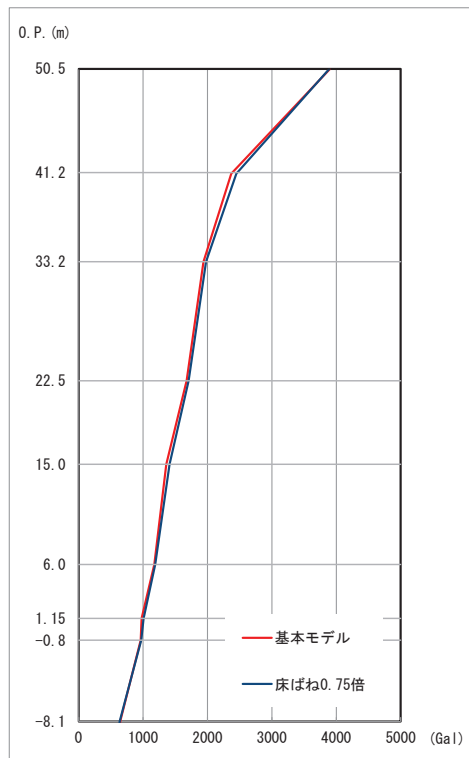
床ばね 0.75 倍

(b) EW 方向

図 3-1 固有モード図の比較 (原子炉建屋)

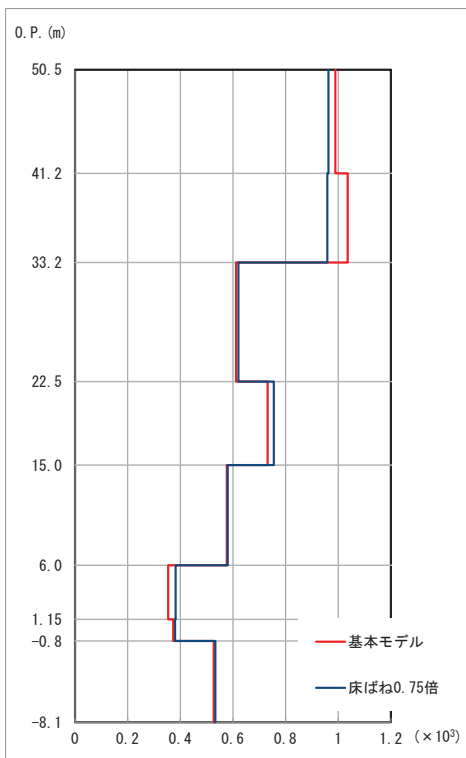


NS 方向

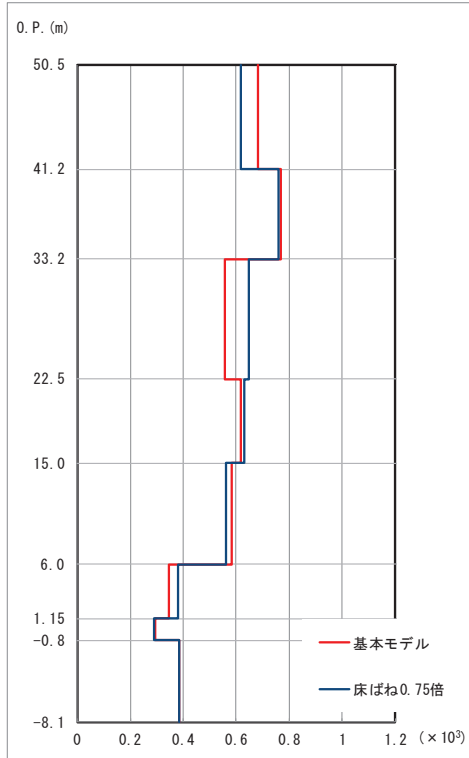


EW 方向

図 3-2 最大加速度分布図 (原子炉建屋, 基準地震動 $S_s - D2$)



NS 方向



EW 方向

図 3-3 せん断ひずみ (原子炉建屋, 基準地震動 $S_s - D2$)

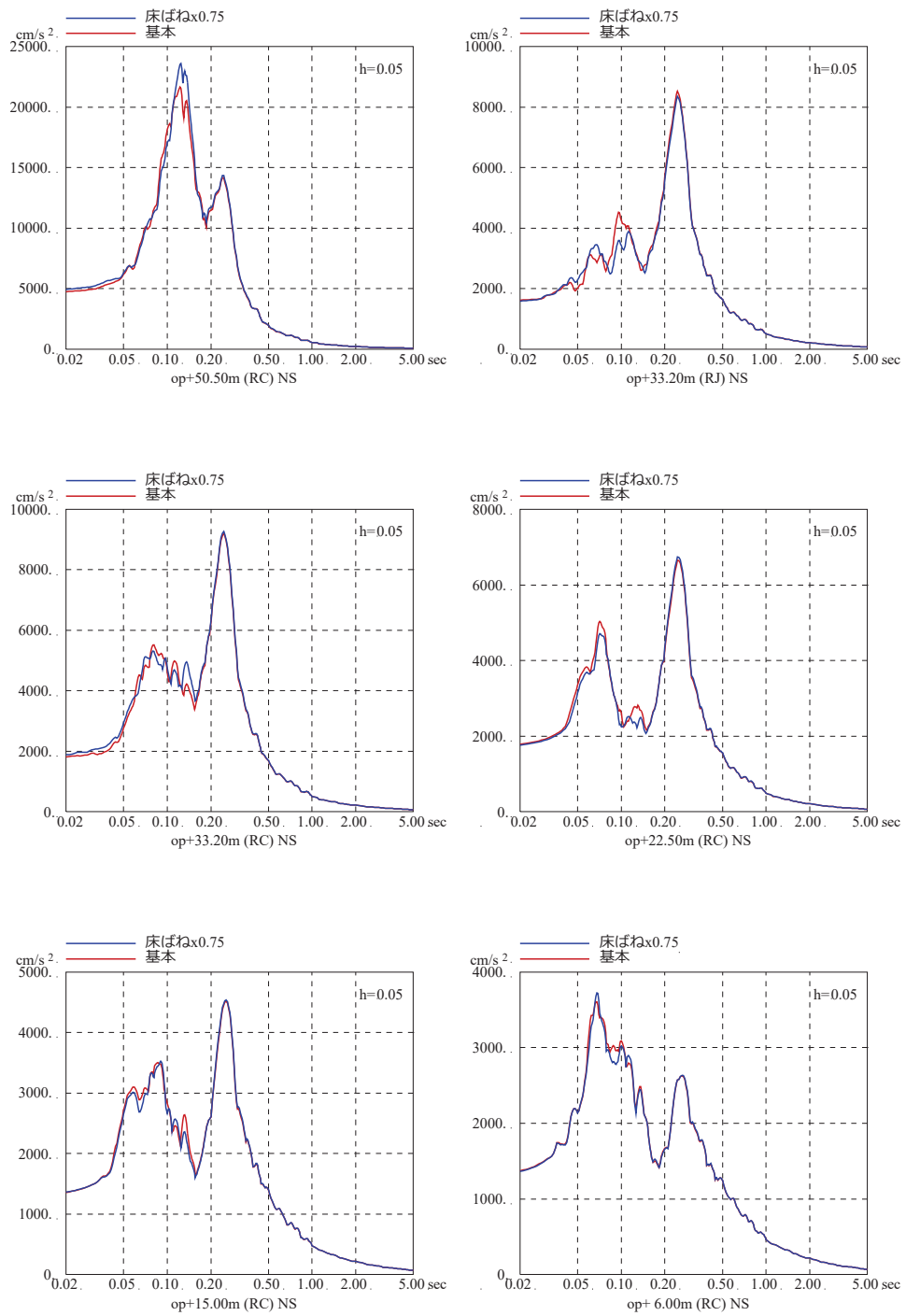


図 3-4 (1) 床応答スペクトルの比較 (基準地震動 $S_s - D2$, $h=5\%$) (NS 方向)

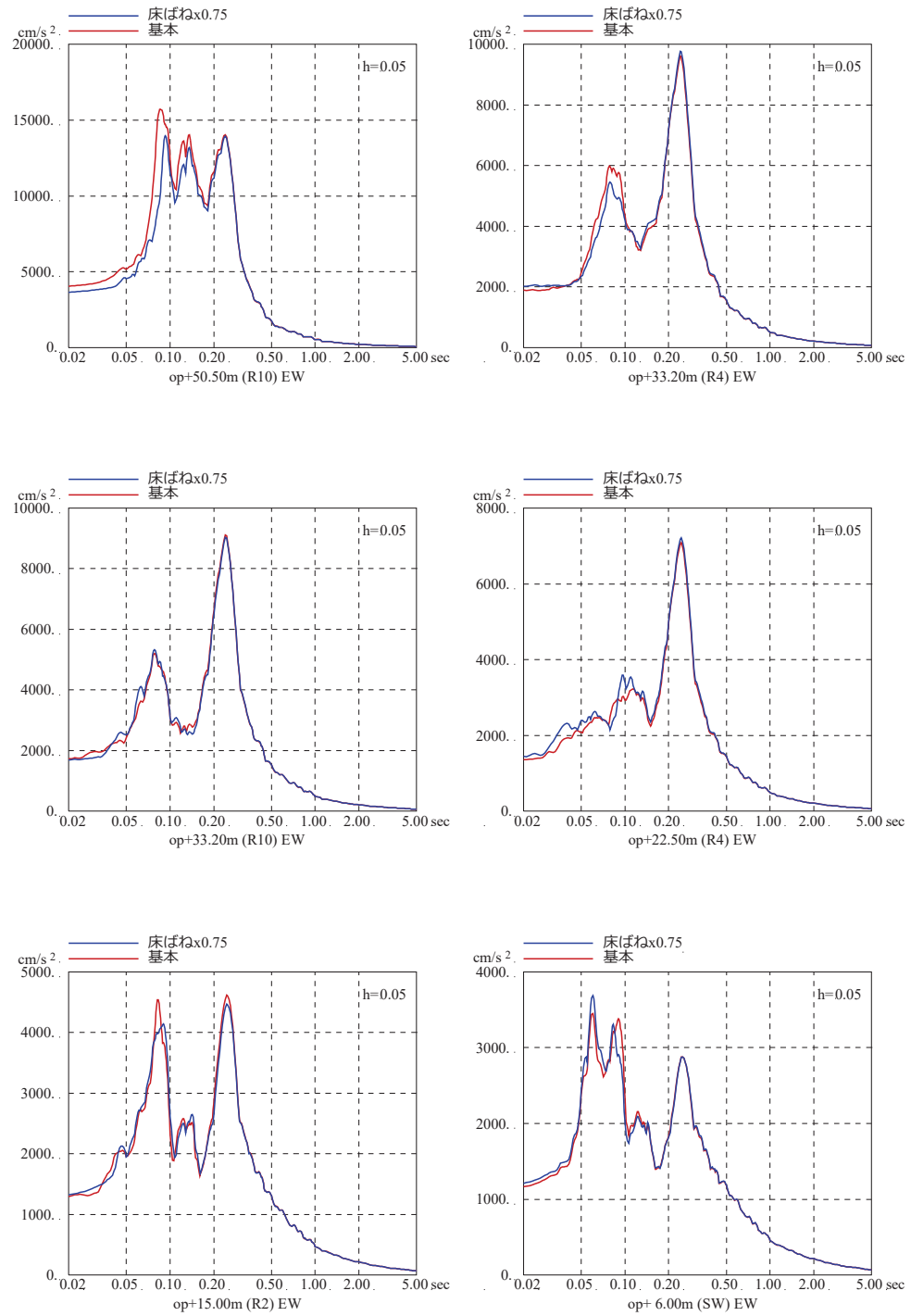


図 3-4 (2) 床応答スペクトルの比較 (基準地震動 $S_s - D_2$, $h=5\%$) (EW 方向)

別紙 21 乾燥収縮ひび割れによる機器アンカーへの影響検討

目 次

1. はじめに..... 別紙 21- 1
2. 乾燥収縮ひび割れの特徴に関する文献レビュー..... 別紙 21- 2
3. ひび割れがあるアンカー部の耐力試験（文献レビュー）..... 別紙 21- 3
4. 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験（文献レビュー）..... 別紙 21- 5
5. 機器アンカーの鉄筋による拘束効果（文献レビュー）..... 別紙 21- 8
6. 乾燥収縮が地震によるひび割れの進展に与える影響..... 別紙 21- 9
7. 実機における乾燥収縮ひび割れの傾向..... 別紙 21-10
8. 機器アンカーと躯体の位置関係..... 別紙 21-11
9. まとめ..... 別紙 21-12

1. はじめに

乾燥収縮によるひび割れの機器アンカーへの影響について、文献レビュー、実機のひび割れ傾向の確認等から、乾燥収縮ひび割れが機器アンカーに及ぼす影響について検討を行った。

2. 乾燥収縮ひび割れの特徴に関する文献レビュー

「日本建築学会 2006年 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説」によれば、コンクリートは乾燥に伴い収縮する性質を有しており、収縮ひび割れはコンクリート部材が自由に収縮しようとしたときに、それが何らかの形で拘束されることによって生じる。

拘束には外部から受けるもの（外部拘束）と内部から受けるもの（内部拘束）とがあり、拘束を受けることによってコンクリートに引張応力が生じ、コンクリートの引張強度を超えたときにひび割れが発生する。

外部拘束を引き起こす例としては、壁を取り囲む柱や梁、さらには内部の鉄筋等がある。

一方、内部拘束はコンクリート部材内部で生じる拘束である。表面部分と内部とでは、乾燥の程度に応じて収縮する量が異なるが、実際には部材は一体となって収縮するため、表面は引張力を、内部は圧縮力を受けた状態となる。（図2-1（3）の状態）

一般に、乾燥収縮試験において測定されているコンクリートの自由収縮といえ、図2-1（3）右側に示す状態での収縮を意味している。

したがって、たとえ自由収縮の場合であっても表面にはひび割れが発生する可能性があり、外部拘束にしても内部拘束にしても、コンクリートにひび割れが発生すると、応力緩和が生じる。

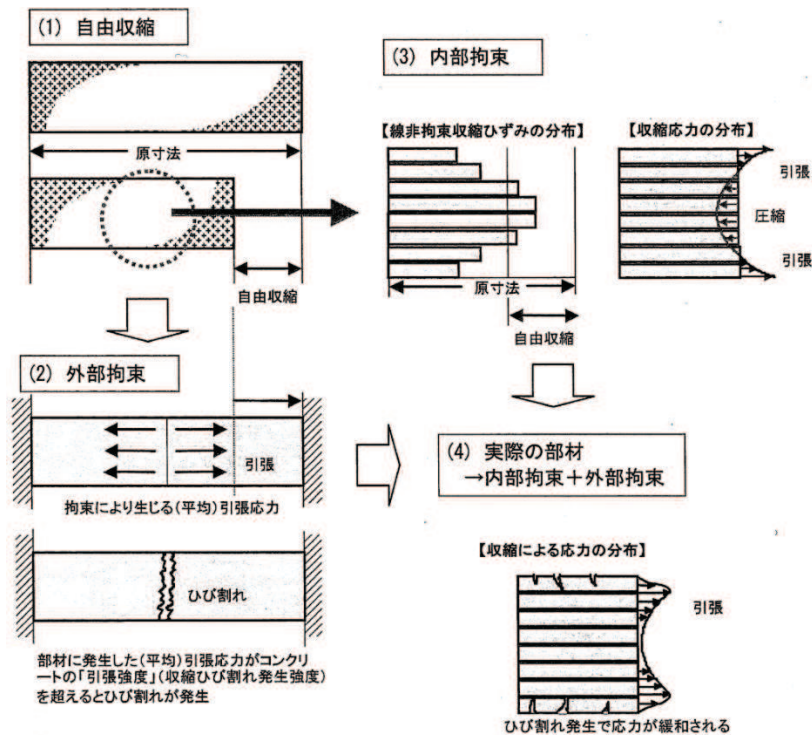


図 2-1 乾燥収縮ひび割れの発生メカニズム

（日本建築学会 2006年 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説, P. 51-52 記載抜粋）

3. ひび割れがあるアンカー部の耐力試験（文献レビュー）

電力共通研究*1として、乾燥収縮ひび割れが機器支持部アンカーに与える影響を把握するために、アンカー部試験体にひび割れを導入し、ひび割れがアンカーのコーン破壊挙動に及ぼす影響を把握するための耐力試験を実施している。

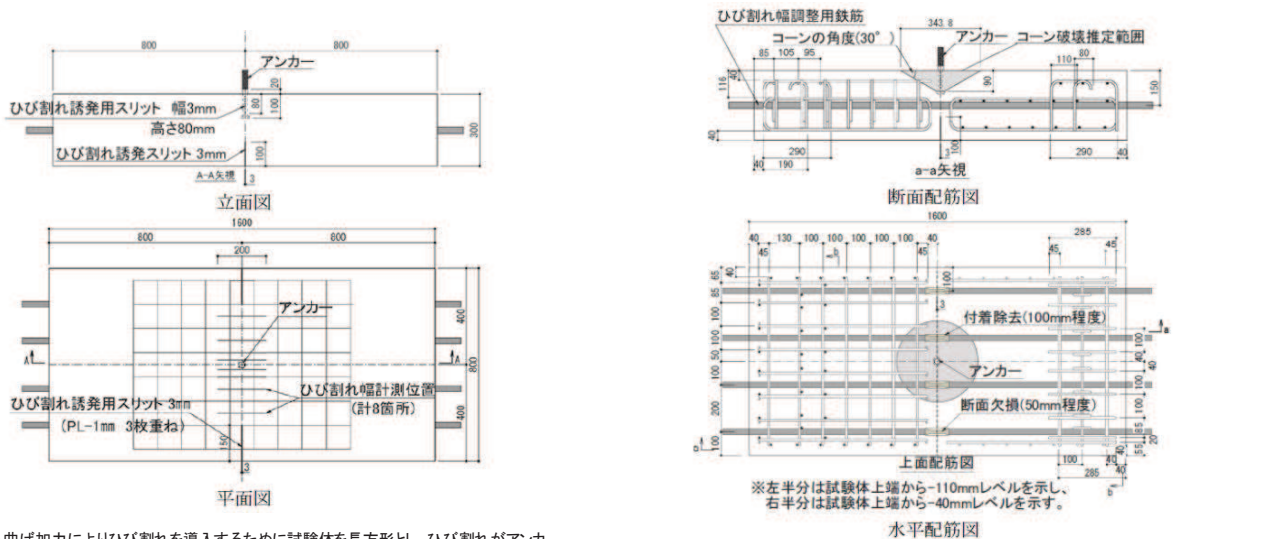
その結果、アンカー部を貫通するひび割れのひび割れ幅が 0.4mm の場合では、貫通ひび割れが存在するにもかかわらず、円形ではないものの貫通ひび割れの両側にひび割れが進展しており、ひび割れが存在しても、その幅によっては引張力が伝達されることを示していると考えられる、とされている。また、ひび割れが無い場合の 70%程度の耐力を示し、「日本建築学会 2010 年 各種合成構造設計指針・同解説」によるアンカー部の短期許容引張力*2を上回っていることが確認されている。

注記*1：中村ほか（2018） ひび割れがあるアンカー部の耐力試験（その1：試験計画・ひび割れ導入）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）

水谷ほか（2018） ひび割れがあるアンカー部の耐力試験（その2：ひび割れがアンカー耐力に及ぼす影響）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）

*2：短期許容引張力の算定式： $2/3 \times 0.31Ac\sqrt{Fc}$

（参考） J E A G 4 6 0 1 におけるコンクリート躯体がコーン状破壊する場合の基礎ボルト 1 本当たりの許容引張荷重は、 $0.31K1Ac\sqrt{Fc}$ ($K1 = 0.6$ [許容応力状態：IVAS]) で算定されることから、実験結果は J E A G 4 6 0 1 の許容引張荷重を上回っている。



・曲げ加力によりひび割れを導入するために試験体を長方形とし、ひび割れがアンカー位置を貫通するように、試験体の上下面および側面にスリットを設けている。
 ・アンカーを貫通するひび割れ幅をパラメータ(0.0, 0.4, 1.0mm)とし、ひび割れ幅の違いがアンカーのコーン破壊挙動に及ぼす影響について検討している。

配筋がコーン破壊挙動に影響を及ぼさないように、コンクリートのコーン破壊推定領域として、コーンの角度を保守的に30度と仮定し、さらに余裕を考慮した外側の領域も含めて一切鉄筋を配筋しない設計としている。

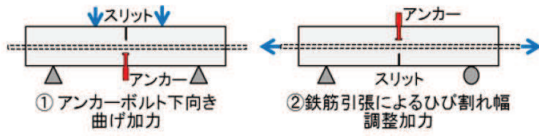
ひび割れアンカー試験体の概要

アンカー試験体の配筋図

図 3-1 (1) ひび割れがあるアンカー部の耐力試験概要 (1/2)

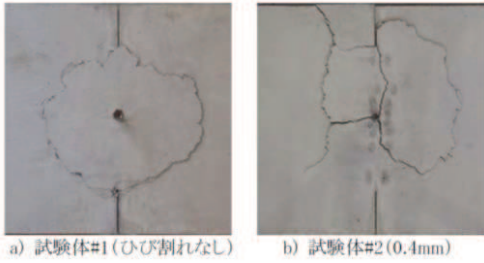
試験ケース

ひび割れ幅 (mm)	補修なし	エポキシ系補修材	セメント系補修材
なし	#1	—	—
0.4	#2	—	—
1.0	#3, #6	#4	#5



ひび割れ導入方法

アンカーボルト下向き状態での4点加力により、アンカー位置に曲げひび割れを発生させた。(上図①参照)
 曲げ加力だけでは断面を貫通するひび割れを導入することができないので、ひび割れ幅調整用鉄筋4本を同時に引張り、鉄筋を塑性化させることにより、ひび割れを全断面に貫通させ、ひび割れ幅を調整した。

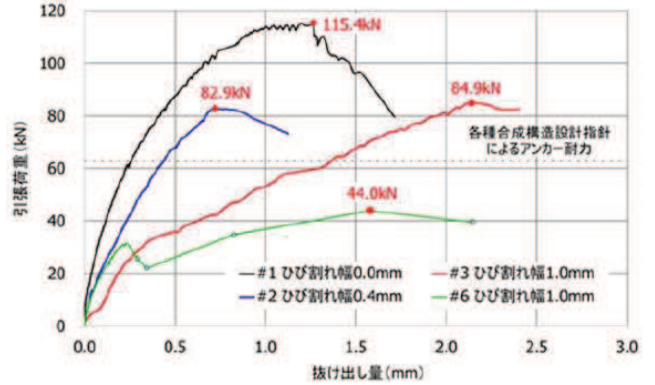


コーンひび割れ形状

アンカー試験結果(アンカー耐力検討)

試験体番号	ひび割れ幅 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	最大荷重 (kN)	抜け出し量 (mm)
#1	なし	35.6	33.0	3.19	115.4	1.27
#2	0.4	34.1	33.0	3.23	82.9	0.72
#3	1.0	34.1	33.0	3.23	84.9	2.14
#6	1.0	34.5	34.5	3.11	44.0	1.58

AII 各種合成構造設計指針による 4 試験体のアンカー耐力平均値: 62.9kN、
 4 試験体のアンカーの短期/長期許容引張力平均値: 41.9kN/21.0kN



アンカーボルトの抜け出し量—引張荷重関係

図 3-1 (2) ひび割れがあるアンカー部の耐力試験概要 (2/2)

4. 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験（文献レビュー）

J N E S の試験*では、機器アンカー部に事前に初期加力によるひび割れを生じさせた状態で試験が実施されており、その状態であっても J E A G の許容耐力の低減値を満足することが確認されている。

また、第2号機建屋のコンクリートの乾燥収縮ひずみは、コンクリートの試験結果より最大約 800μ と測定されている。このひずみがすべて地震により生じたと仮定した場合であっても、J N E S の試験における初期加力条件に含まれていることから、その影響は、J E A G における許容範囲内のものになり、特にアンカー耐力の低下につながるものではない。

注記*：J N E S 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験に係る報告書

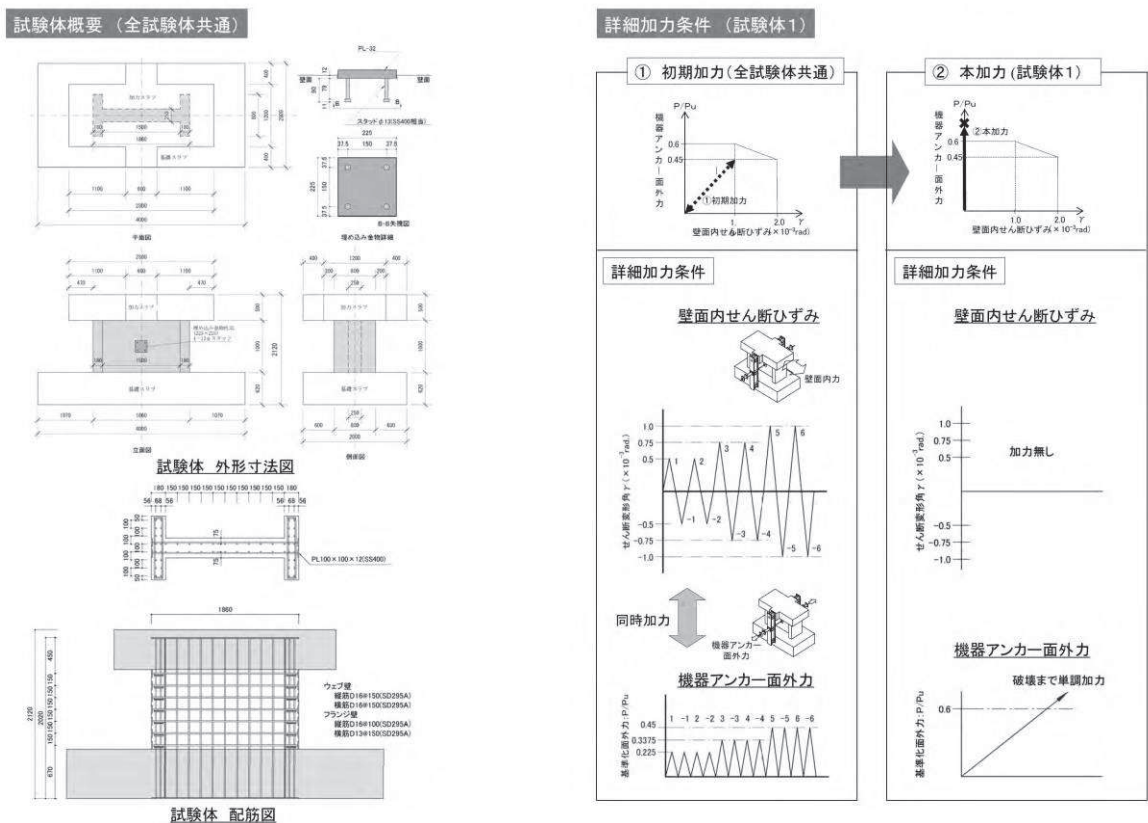
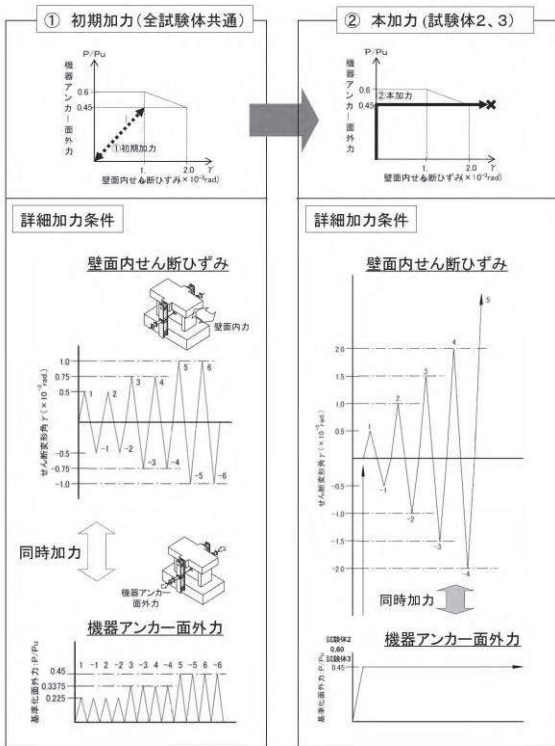


図 4-1 (1) 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験の概要 (1/5)

詳細加力条件 (試験体2, 3)



詳細加力条件 (試験体4)

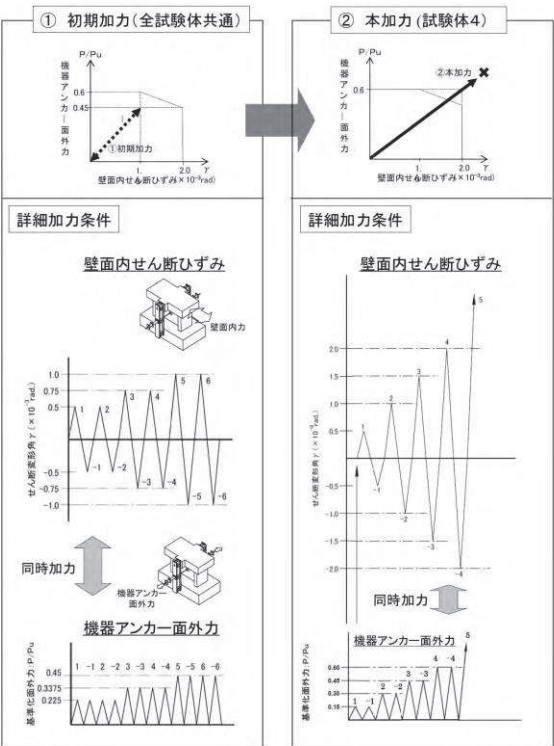


図 4-1 (2) 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験の概要 (2/5)

試験状況写真

2000kN押引油圧ジャッキ (10形壁試験体せん断載荷用)

R/C 壁試験体 (高梁埋込金物付)

2000kN押引油圧ジャッキ (10形壁試験体せん断載荷用)

試験体: 西面
裏面: 東面

計測フレーム

埋込金物

500kN油圧ジャッキ (埋込金物引張用)

試験体1 結果概要

荷重—変形 関係

壁面内せん断力—せん断変形角(ひずみ) γ

初期加力終了時

本加力終了時

埋込金物破壊状況 (シアコン破壊)

機器アンカー面外力—面外変形

初期加力

本加力

初期加力終了時

本加力終了時

埋込金物破壊状況 (シアコン破壊)

図 4-1 (3) 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験の概要 (3/5)

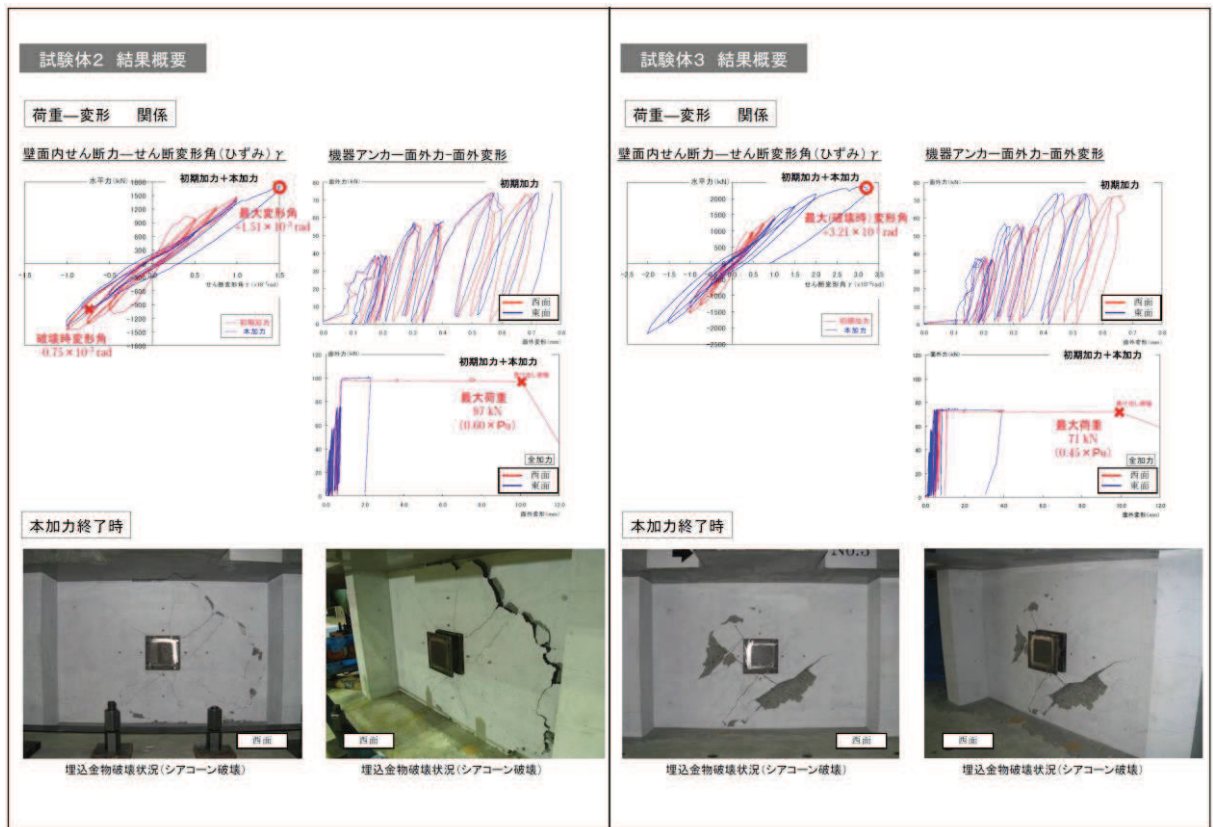


図 4-1 (4) 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験の概要 (4/5)

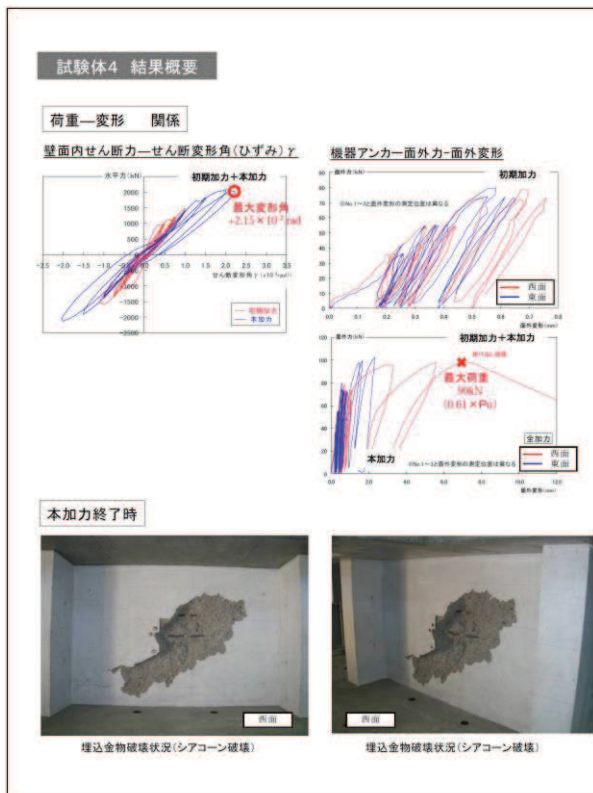


表 6.1.1-1 機器アンカー部(埋込金物)の引抜耐力に及ぼす地震履歴の影響

加力条件	地震履歴(初期加力 ^{a)} の影響 各面外力0.45Pa、面内せん断変形角(ひずみ) γ 1.0×10^{-3} rad	JEC4601 設計許容限界(案)との関係
面外力のみ (試験体1)	既往の初期加力無しの場合に比し、引抜耐力が低下した。	引抜耐力は設計許容限界(面外力で0.6Pa)を上回った。
面外力と面内せん断変形角(ひずみ)の組合せ	面外力一定 (試験体2,3)	既往の初期加力無しの場合に比し、同等以上の面内せん断変形角(ひずみ)で破壊した。 引抜耐力は設計許容限界(面外力、面内せん断変形角(ひずみ)で0.6Pa、 1×10^{-3} rad)、0.45Pa、 2×10^{-3} rad)を上回った。
	共に漸増 (試験体4)	既往の初期加力無しの場合に比し、引抜耐力が20~30%程度低下した。 引抜耐力は設計許容限界(面外力、面内せん断変形角(ひずみ)で0.5Pa、 1.67×10^{-3} rad)を上回った。

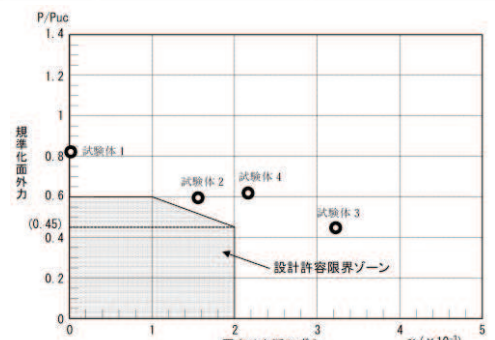


図 6.1.1-8 本試験結果と設計許容限界ゾーン(JEC4601案)との比較

図 4-1 (5) 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験の概要 (5/5)

5. 機器アンカーの鉄筋による拘束効果（文献レビュー）

松尾・金津（2014）*では、鉄筋コンクリート部材に生じる曲げ損傷がアンカーの破壊性状に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、アンカーの引き抜き実験を実施している。

その中で、アンカーの埋込長がかぶり厚さよりも長い場合には、鉄筋の効果でコーン状破壊の破壊面積は増大することが確認されている。

鉄筋が降伏する段階では、ボルト長が 100mm の場合、コーン状破壊後に割裂ひび割れを伴って終局に至っているが、ボルト長が 200mm の場合は、主筋が持ち上がり、破壊面が部材全域に広がるような状況が観察された。

これは、コーン状の破壊面が主筋にかかり、主筋ごと引っ張りあげられるためと考えられる。このため、ボルト頭部が主筋や配力筋の内側に位置する場合には、通常のコーン状破壊よりも引き抜き破壊面積が大きくなると考えられる。

注記*：曲げ損傷を受けた鉄筋コンクリート部材に定着されたアンカーの引張耐力に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，2014

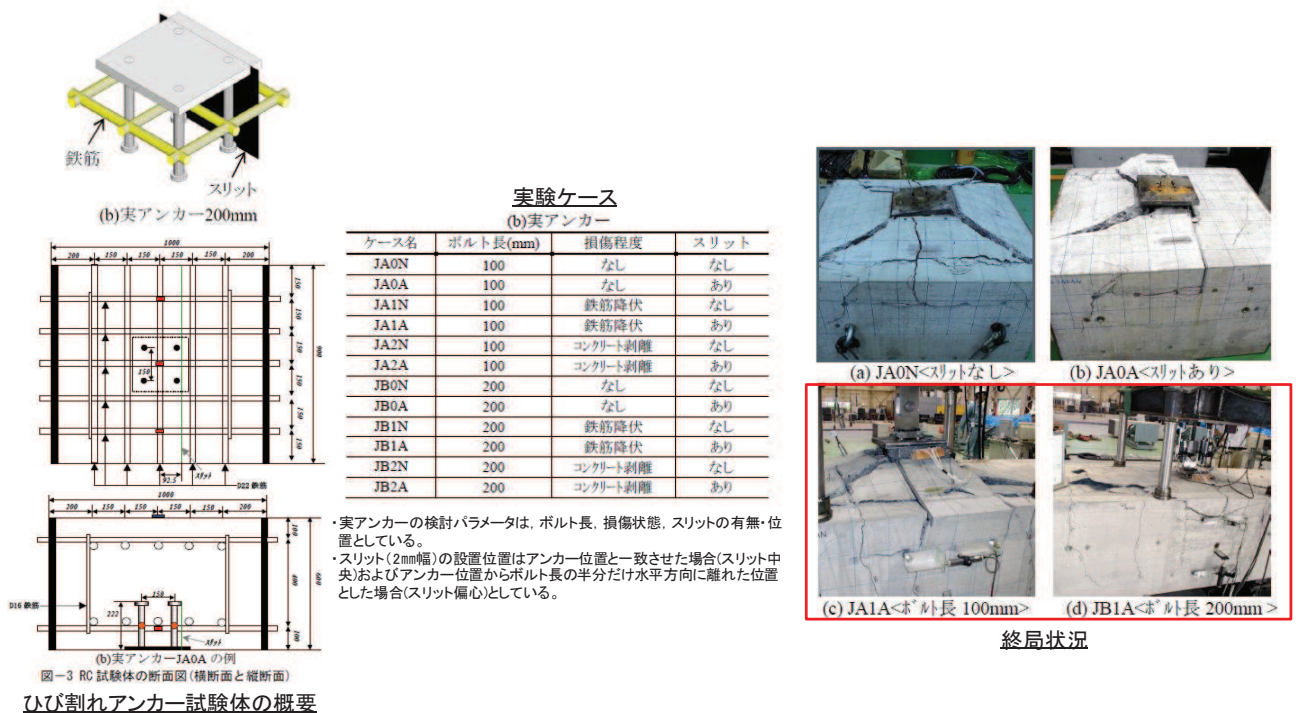


図 5-1 機器アンカーの鉄筋による拘束効果に関する実験概要

6. 乾燥収縮が地震によるひび割れの進展に与える影響

当社で実施した耐震実験（別紙 12，別紙 15）における総ひび割れ長さと層間変形角関係及びひび割れ状況図から，乾燥試験体は加力前に乾燥収縮ひび割れが生じているが，加力後に生じるひび割れ（地震時ひび割れ）長さは，乾燥させない試験体と同等のひび割れ長さとなっている。したがって，加力前に生じている乾燥収縮ひび割れは，地震時のひび割れの発生の仕方には大きな影響を与えないことが確認できる。

また，地震によるひび割れが進展した状態では，ひび割れの量は地震によるひび割れが多くなるため，乾燥収縮ひび割れの影響はその点からも小さいものとなる。

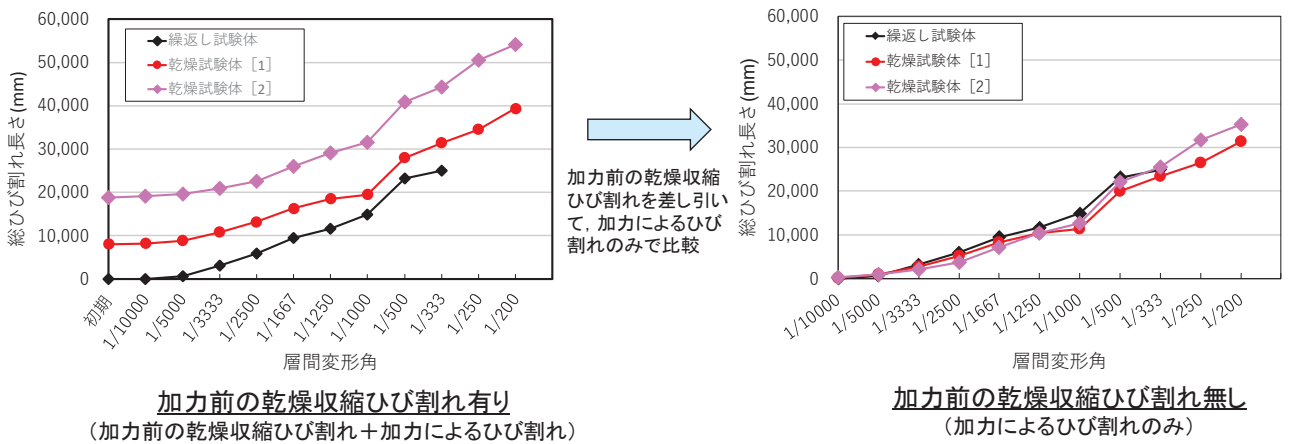


図 6-1 耐震実験における総ひび割れ長さ－層間変形角関係

7. 実機における乾燥収縮ひび割れの傾向

原子炉建屋の乾燥収縮ひび割れ調査結果（別紙 14）によるひび割れ幅の度数分布から、乾燥収縮ひび割れによるひび割れ幅は、0.05mm 以下が約 56%、0.05mm を超えて 0.1mm 以下が約 39%の微小なひび割れであり、3.11 地震時に生じたひび割れ幅（大部分は幅 0～0.3mm 未満）に比較して非常に小さい。

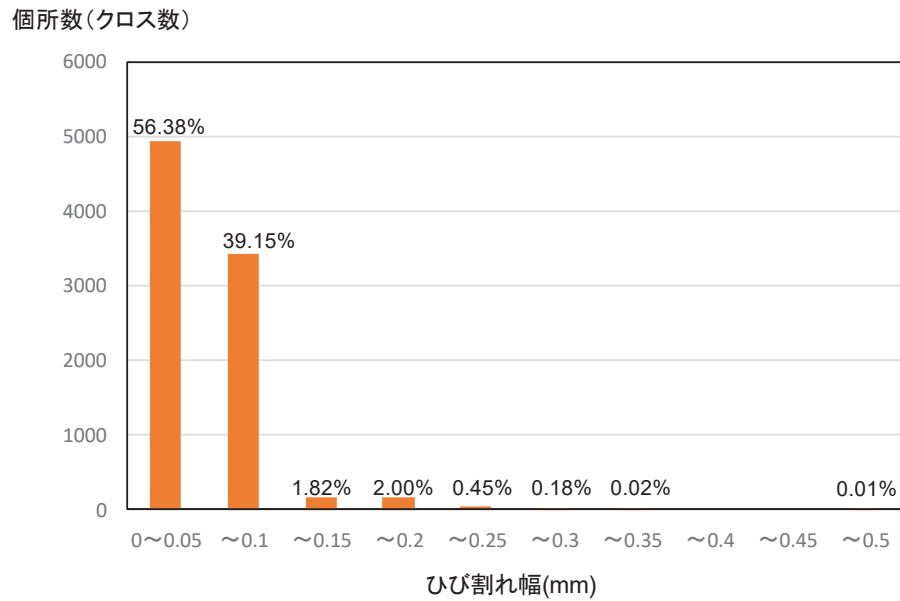


図 7-1 乾燥収縮ひび割れ調査結果（原子炉建屋）

8. 機器アンカーと躯体の位置関係

鉄筋による拘束によって、アンカーのコーン状破壊の破壊面積が増大することが確認されており（松尾・金津（2014））、アンカーが鉄筋位置より深い位置で配置されると、ひび割れの影響はさらに低減される。

実機におけるアンカー部の埋め込み深さは、標準的な埋込金物で 100～300 mm であり、アンカー部の端部は鉄筋位置よりもおおむね深くなっている。

また、躯体表面に乾燥収縮ひび割れが生じている箇所から採取したコンクリートコアでは、乾燥収縮ひび割れ深さは鉄筋位置程度となっている。

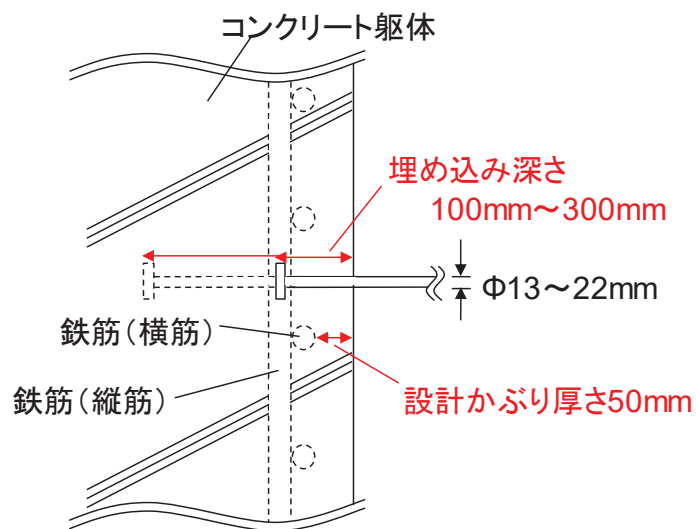
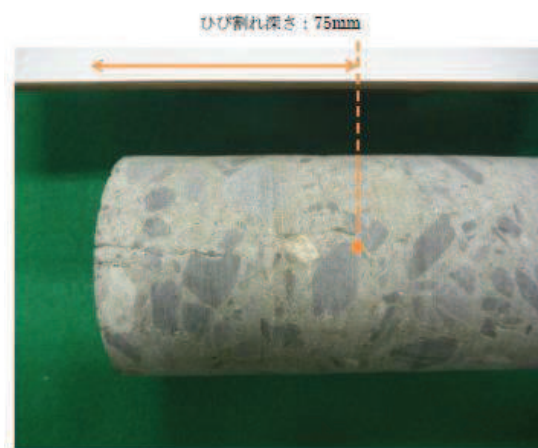


図 8-1 実機における機器アンカーと RC 造建屋躯体及び配筋の位置関係（例）



本コアの例ではひび割れ深さが75mm程度であり、横筋表面よりも深い位置となっている。

図 8-2 ひび割れ箇所から採取したコンクリートコアの例

9. まとめ

「3. ひび割れがあるアンカー部の耐力試験（文献レビュー）」及び「7. 実機における乾燥収縮ひび割れの傾向」より，電力共通研究のひび割れ幅が 0.4mm の場合の試験結果から，引張力が十分伝達されること，日本建築学会の指針類及び J E A G 4 6 0 1 の許容耐力を上回ることを確認できたが，実機の乾燥収縮ひび割れ幅は 0.4mm に対して有意に小さく，その影響は小さいと考えられる。

「4. 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験（文献レビュー）」及び「6. 乾燥収縮が地震によるひび割れの進展に与える影響」より，J N E S の試験結果を踏まえた考察として，女川の乾燥状態のひずみが J E A G 4 6 0 1 による設計に与える影響は小さいこと，また，当社実施の耐震実験から，乾燥収縮ひび割れは地震時のひび割れの発生の仕方には大きな影響を与えないことを確認した。

「5. 機器アンカーの鉄筋による拘束効果（文献レビュー）」及び「8. 機器アンカーと躯体の位置関係」より，実機においては標準的なアンカー部はかぶり厚さより深いことから，鉄筋の拘束効果もあり，耐力に余裕があると考えられる。

以上のことから，乾燥収縮ひび割れが生じていても，アンカー部への影響は小さく，地震力が大きくなりひずみが進んだ状態においては，地震によるひび割れが支配的となり，J E A G 4 6 0 1 に基づく設計が適用できると考えられる。

別紙 22 床応答スペクトルの拡幅率について

目 次

1. 既往知見を踏まえた考察..... 別紙 22- 1
2. 床剛モデルと床柔モデルの床応答スペクトルの比較..... 別紙 22- 4
3. まとめ..... 別紙 22-20

1. 既往知見を踏まえた考察

機器・配管系の設備評価にあたり, 既工認において床応答スペクトルの拡幅率を±10%としていることについての妥当性を示す。

通商産業省（現：経済産業省）において検討が進められた軽水炉の改良・標準化の中でまとめられた「昭和 55 年度耐震設計の標準化に関する調査報告書別冊 2（機器系）」では, BWR 1, 100MW e 級基本モデルを用いた標準的原子炉建屋を対象として, 地盤ばねを考慮した 1 軸多質点系モデルを用いた解析を行い, その応答結果（質点番号 3 及び質点番号 7）を用いて, 各パラメータが床応答スペクトルに与える影響を検討し, 床応答スペクトルの拡幅率 10%としている。解析モデル及び検討条件を図 1-1 及び表 1-1 に示す。

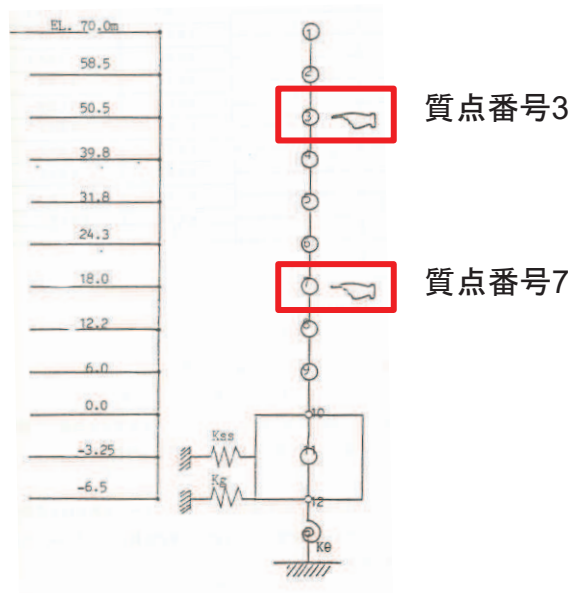


図 1-1 1 軸多質点系モデルの概要図

表 1-1 検討条件

地盤剛性	$E=7 \times 10^4 \sim 4 \times 10^6 \text{t/m}^2$ で変動
地盤ばね定数の算出方法	標準地盤 ($V_s=500, 1,000, 1,500\text{m/s}$) から算出 田治見式, Whitman 式, Barkan 式 の 3 式を使用
建屋剛性 (ばらつき考慮)	±20%のばらつきを考慮し, 建屋剛性を 0.8 倍, 1.0 倍, 1.2 倍に設定
地盤ばねの減衰定数	一定値 ($K_H=20\%, K_\theta=7.5\%, K_{SS}=5\%$) 及び 逸散減衰定数 (振動アドミタンス)
入力地震波	高地震地帯向 S1 (遠地) M8.4 286.15Gal

検討結果としては、「地盤 E の変動による床応答スペクトル変動を論議する際には現実的な地盤減衰定数をカップルして考えることが必須であり、このベースに立てば、E の変動範囲中、機器設計に対して最も厳しい（剛側の）地盤 E を基準とすれば拡幅率±10%は十分安全側である。地盤 E の変動に建屋剛性の±20%程度までの変動を重ねて考えても、地盤減衰定数にアドミッタンスを適用すれば拡幅率は±10%程度で包絡可能と推測される。」と結論づけられている。

検討条件に対する女川の特徴を踏まえると、既工認と同様の±10%拡幅の採用は、以下のとおり、既工認と同等の保守性を有していると考えられる。

- ・地盤剛性、地盤ばね定数の算出方法及び地盤ばねの減衰定数については、J E A G 4 6 0 1に基づく手法を採用しており、また、女川は硬質岩盤であることから、その変動の影響は小さい。
- ・入力地震波については、強震記録を用いた検討を踏まえ、入力地震動には表層地盤の影響を考慮しており、その精度は高い。
- ・建屋剛性（ばらつき考慮）については、建屋剛性のばらつき要因として、設計基準強度と実強度の乖離、間仕切り壁の影響、床の柔性の影響等が考えられるが、女川の場合、強震動記録により、現状の建屋剛性が精度良く把握されている。
- ・地震応答解析結果がおおむね弾性範囲の場合、今回採用している地震応答解析モデルは、3.11地震の観測記録を精度良く表現できるモデルを採用しており、既工認時に比べて弾性範囲内の応答に対しては床応答スペクトルの精度が向上している。この場合の拡幅スペクトルで考慮される周期帯のイメージを図 1-2 に示す。

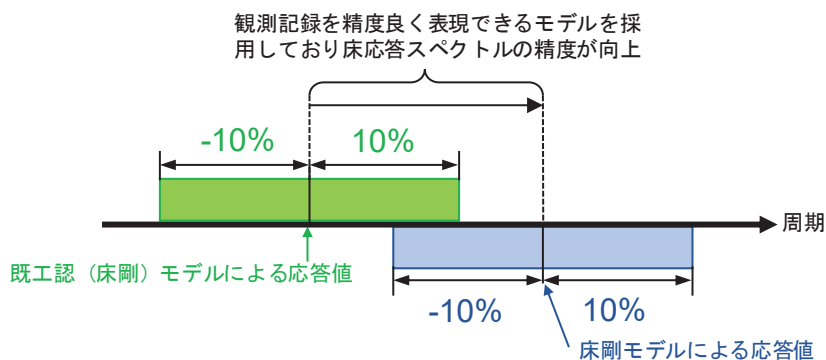


図 1-2 拡幅スペクトルで考慮される周期帯のイメージ図

- また、今回工認では、地震観測記録を精度良く表現できる地震応答解析モデルに床の柔性も考慮しているため同一標高の床に対して複数の応答値が出力され、これらの床応答スペクトルをベースに±10%の拡幅スペクトルを作成することは、幅広い周期帯を包絡する拡幅スペクトルとなり既工認と比べて保守的な評価となっている。床柔を採用した場合と床剛を採用した場合の拡幅スペクトルで考慮される周期帯のイメージを図 1-3 に示す。

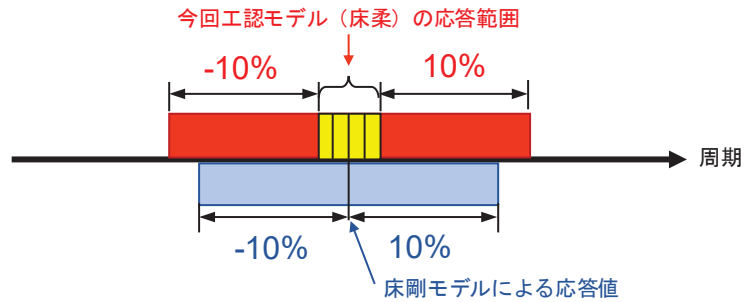


図 1-3 拡幅スペクトルで考慮される周期帯のイメージ図 (床柔と床剛の比較)

- 地震応答解析結果が非線形に及ぶ場合には、初期剛性の低下要因の検討を踏まえ、基準地震動 S_s に対する地震応答解析モデルのスケルトンカーブにおける評価基準値付近の非線形特性は既工認と同じ J E A G 式を採用している。したがって、基準地震動 S_s によって強非線形状態となった場合の地震応答解析の精度は既工認モデルと同等である。今回工認で採用するスケルトンカーブを図 1-4 に示す。

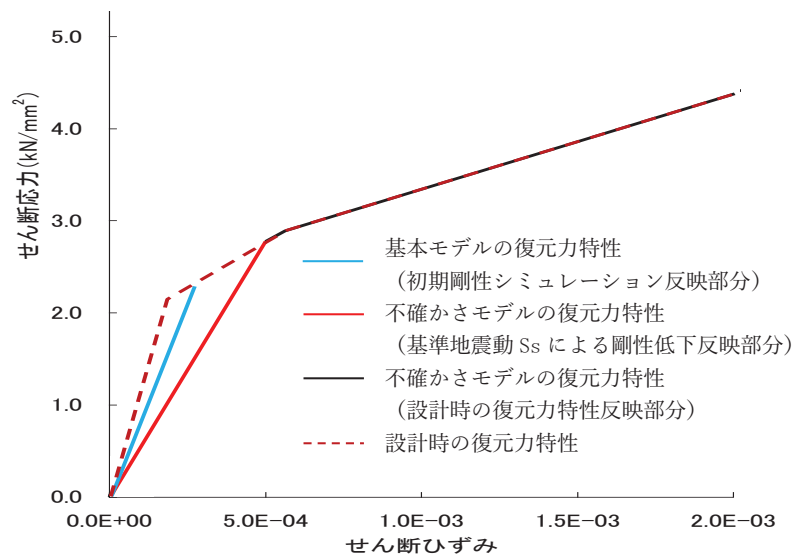


図 1-4 今回工認で採用するスケルトンカーブ

2. 床剛モデルと床柔モデルの床応答スペクトルの比較

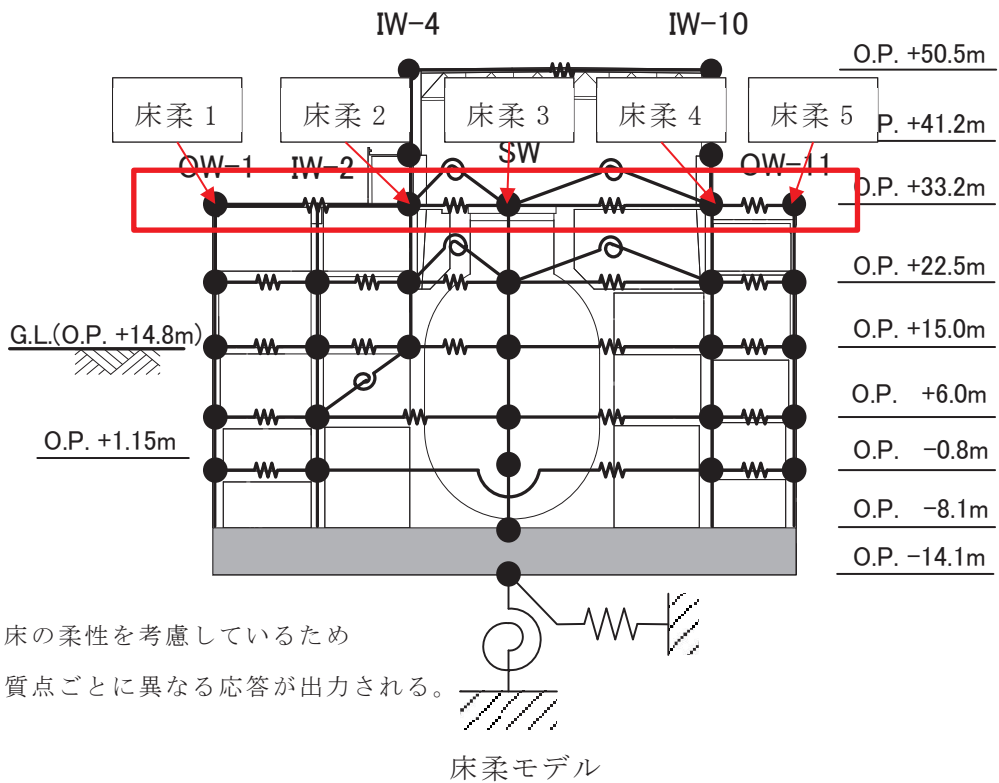
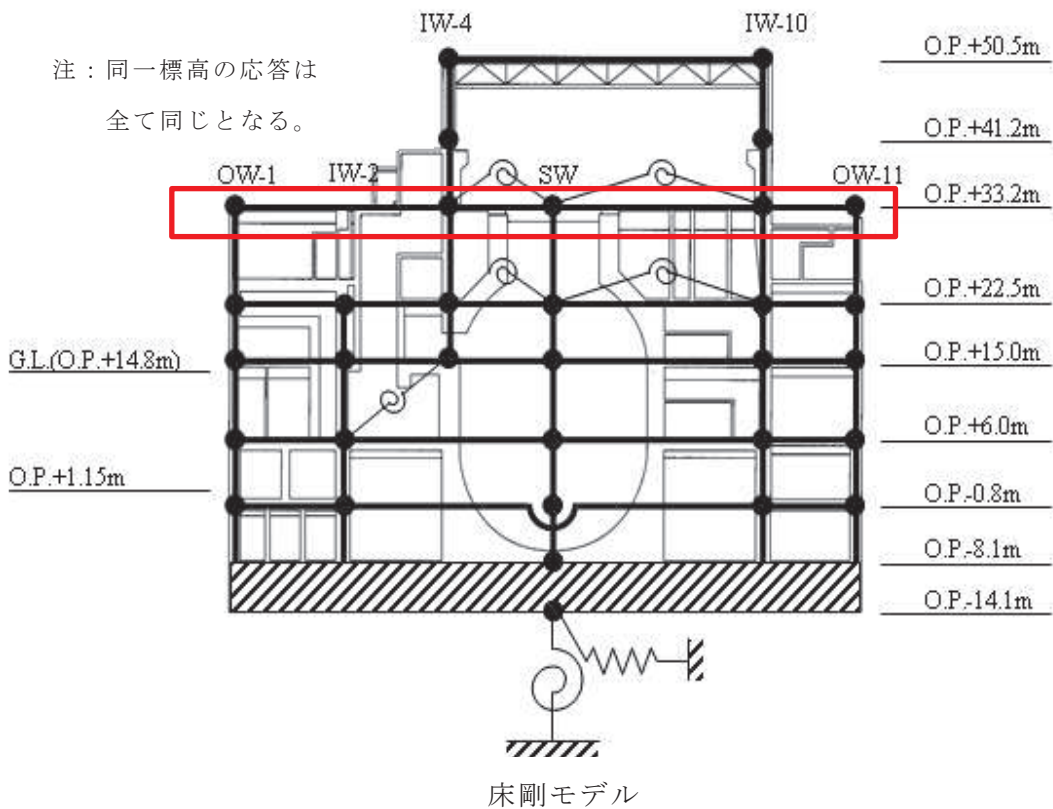
前項で説明した調査報告書では、振幅率を検討する際に、1軸の質点系地震応答解析モデル（床剛モデル）を基にしているが、女川では観測記録を用いたシミュレーション解析に基づき床の柔性を考慮した多軸の質点系地震応答解析モデル（床柔モデル）を採用している。

ここでは、床剛の地震応答解析モデルを採用した場合と床柔の地震応答解析モデルを採用した場合の床応答スペクトルを比較し、振幅スペクトルに与える影響について確認する。比較に用いる原子炉建屋の地震応答解析モデルを図2-1、固有値解析結果を表2-1、刺激関数図を図2-2～2-3に示す。なお、床剛モデルと床柔モデルの耐震壁の剛性補正係数は同一としている。

また、原子炉建屋 O.P. 33.2m における基準地震動 $S_s - D_2$ による床応答を例に、床剛モデルと床柔モデルの床応答スペクトルを比較した結果を図2-4～図2-7に示す。床応答スペクトルの比較にあたっては、床柔モデルの原子炉建屋 O.P. 33.2m における質点を図2-1に示すように左から床柔1、床柔2、床柔3、床柔4、床柔5として、床剛モデルの応答と比較している。

図2-4～図2-7の床応答スペクトルを比較した結果について、周期方向に着目すると、図1-3に示した通り床柔モデルの方が床剛モデルよりも幅広い周期帯で高い震度を示しており、床柔モデルにおいて、各フロアの床応答スペクトルとして全ての質点の振幅スペクトルを包絡するスペクトルを採用した場合、床剛モデルの振幅スペクトルに比べ保守的となる。今回工認における床応答スペクトルは、基本的に同一標高の全ての質点の振幅スペクトルを包絡するスペクトルを採用している。

床柔モデルの床応答スペクトルの方が保守的となる要因としては、床剛モデルでは同一標高の床応答は質点によらず全て同じとなるが、床柔モデルの場合は各質点で異なり、解析モデル全体の振動性状が変化することが考えられる。図2-2～2-3の床剛モデル及び床柔モデルの刺激関数図を比較すると、建屋全体の1次モードや2次モードでは大きな差は生じていないが、周期0.1秒前後の周期において、床柔モデルのオペフロ階から屋上階などで床剛モデルにはない振動モードが生じており、O.P. 33.2mの質点の応答スペクトルに影響しているためと考えられる。



注：床の柔性を考慮しているため
質点ごとに異なる応答が出力される。

図 2-1 原子炉建屋質点系モデル

表 2-1(1) 原子炉建屋質点系モデルの固有値解析結果 (NS 方向) (1/2)
(a) 床剛モデル

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.235	4.26	2.215	全体 1 次
2	0.120	8.30	2.914	全体 2 次
3	0.094	10.59	1.765	全体 3 次
4	0.089	11.21	0.329	
5	0.085	11.80	0.135	
6	0.068	14.73	0.147	
7	0.064	15.54	0.024	
8	0.062	16.09	1.034	全体 4 次
9	0.059	16.96	0.009	
10	0.054	18.37	0.555	

注：刺激係数は、各次の固有ベクトル{u}に対し、最大振幅が 1.0 となるように規準化した値を示す。

表 2-1(2) 原子炉建屋質点系モデルの固有値解析結果 (NS 方向) (2/2)

(b) 床柔モデル

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.237	4.21	2.203	全体 1 次
2	0.123	8.12	2.718	全体 2 次
3	0.116	8.61	1.167	
4	0.097	10.33	2.095	全体 3 次
5	0.093	10.76	1.110	
6	0.089	11.21	0.270	
7	0.082	12.27	0.002	
8	0.074	13.46	0.347	
9	0.072	13.90	0.487	
10	0.068	14.68	0.339	
11	0.066	15.18	0.730	全体 4 次
12	0.064	15.70	0.261	
13	0.060	16.55	0.212	
14	0.059	17.01	0.187	
15	0.054	18.63	0.218	
16	0.052	19.27	0.691	
17	0.051	19.65	0.396	
18	0.050	19.88	0.283	

注：刺激係数は、各次の固有ベクトル {u} に対し、最大振幅が 1.0 となるように規準化した値を示す。

表 2-1(3) 原子炉建屋質点系モデルの固有値解析結果 (EW 方向) (1/2)

(a) 床剛モデル

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.223	4.47	2.144	全体 1 次
2	0.121	8.24	1.844	全体 2 次
3	0.095	10.48	0.281	
4	0.090	11.17	0.111	
5	0.082	12.19	1.534	全体 3 次
6	0.070	14.36	0.079	
7	0.068	14.79	0.040	
8	0.060	16.67	0.114	
9	0.059	17.01	0.052	
10	0.059	17.05	0.499	全体 4 次
11	0.055	18.13	0.089	

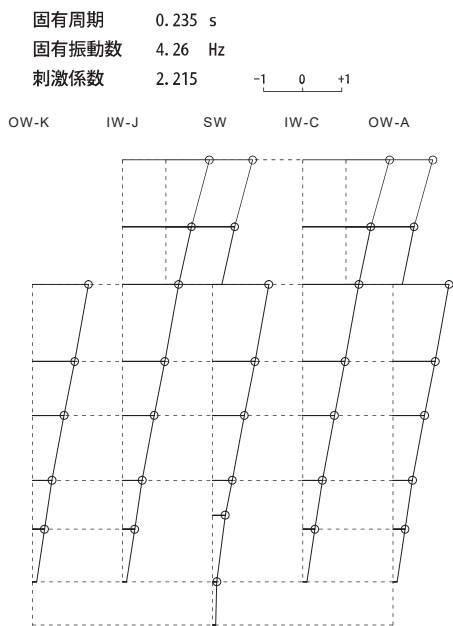
注：刺激係数は、各次の固有ベクトル{u}に対し、最大振幅が 1.0 となるように規準化した値を示す。

表 2-1(4) 原子炉建屋質点系モデルの固有値解析結果 (EW 方向) (2/2)

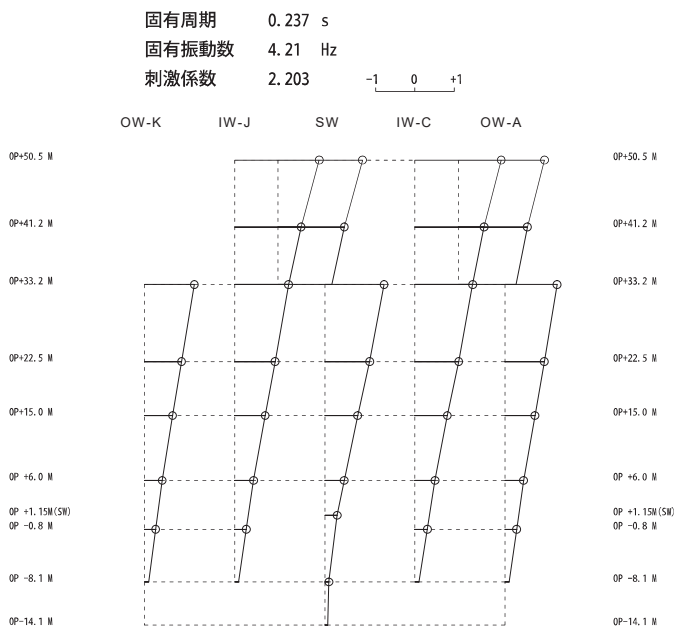
(b) 床柔モデル

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.230	4.36	2.179	全体 1 次
2	0.125	8.01	1.925	全体 2 次
3	0.116	8.64	0.074	
4	0.098	10.15	0.651	
5	0.091	10.93	0.835	
6	0.087	11.46	2.442	全体 3 次
7	0.078	12.80	0.662	
8	0.074	13.45	0.500	
9	0.070	14.30	0.164	
10	0.068	14.69	0.444	
11	0.064	15.55	0.292	
12	0.062	16.11	0.245	
13	0.060	16.68	0.957	全体 4 次
14	0.059	17.05	0.087	
15	0.055	18.06	0.102	
16	0.054	18.54	0.376	
17	0.050	19.96	0.324	

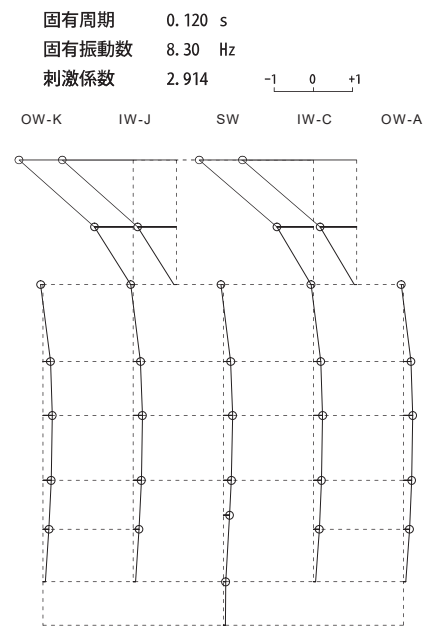
注：刺激係数は、各次の固有ベクトル{u}に対し、最大振幅が 1.0 となるように規準化した値を示す。



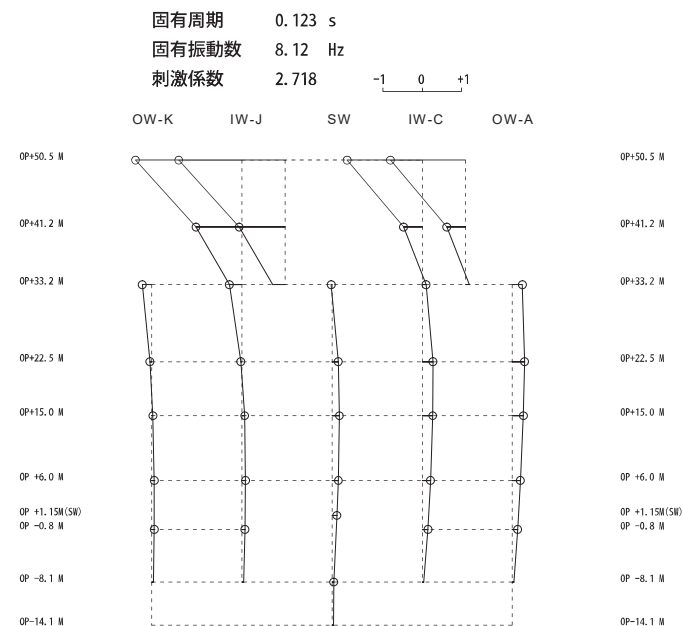
床剛モデル 1次



床柔モデル 1次



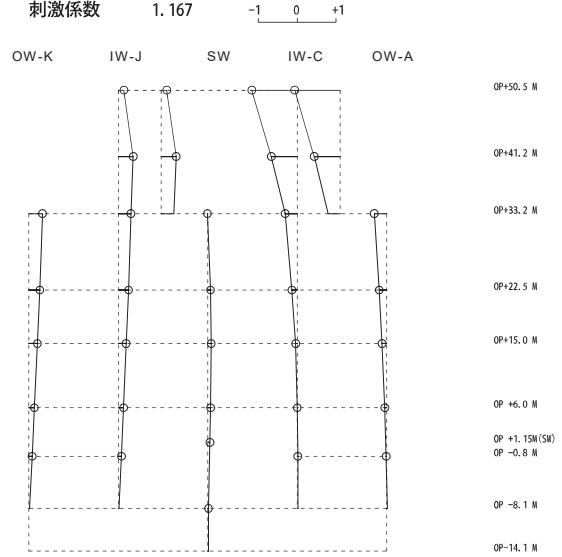
床剛モデル 2次



床柔モデル 2次

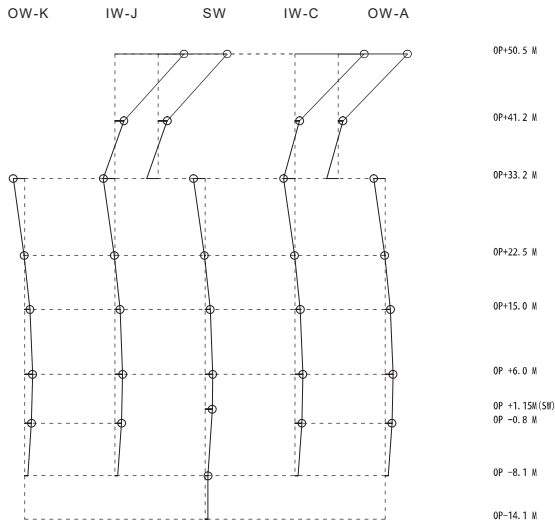
図 2-2(1) 原子炉建屋質点系モデルの刺激関数図 (NS 方向) (1/4)

固有周期 0.116 s
 固有振動数 8.61 Hz
 刺激係数 1.167



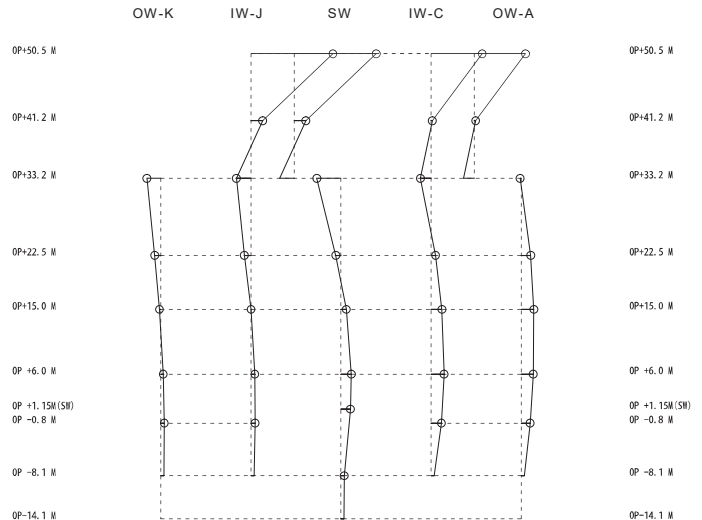
床柔モデル 3次

固有周期 0.094 s
 固有振動数 10.59 Hz
 刺激係数 1.765



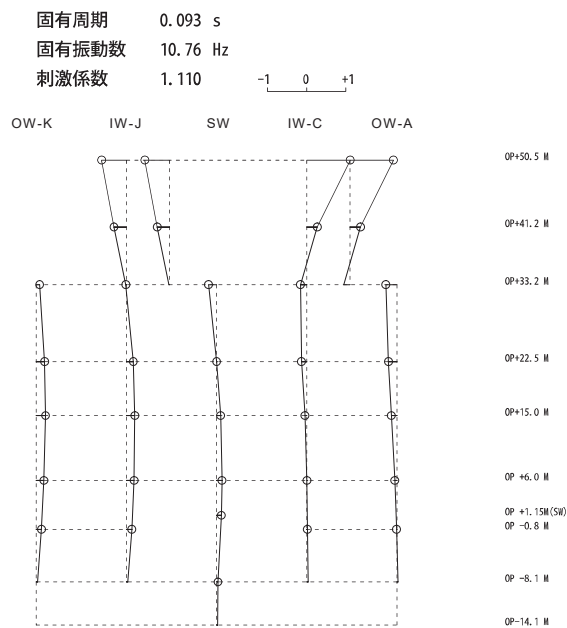
床剛モデル 3次

固有周期 0.097 s
 固有振動数 10.33 Hz
 刺激係数 2.095

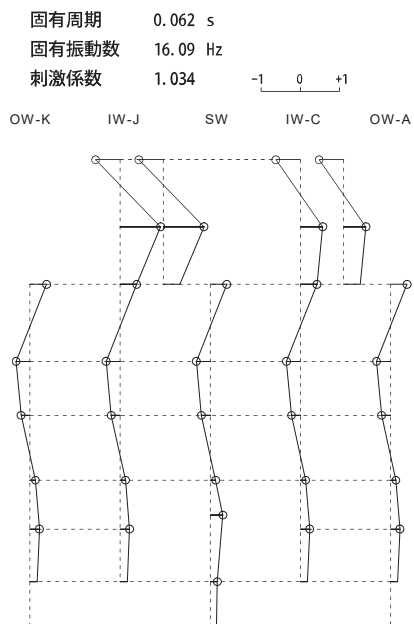


床柔モデル 4次

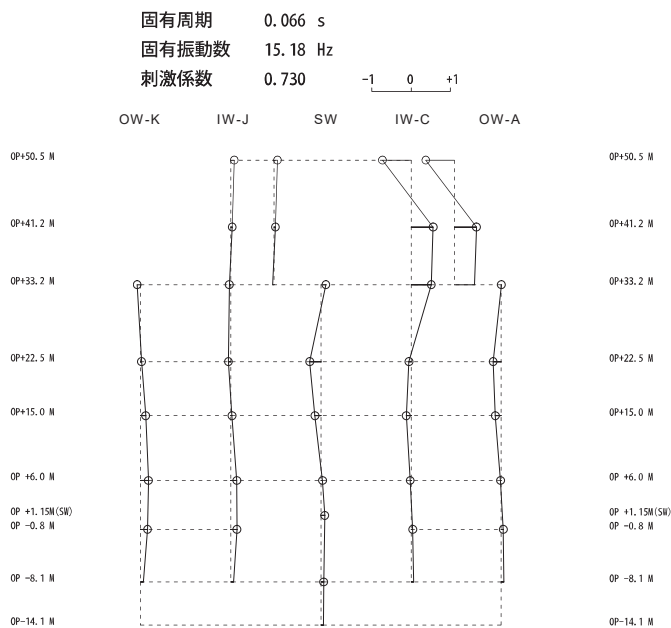
図 2-2(2) 原子炉建屋質点系モデルの刺激関数図 (NS 方向) (2/4)



床柔モデル 5 次

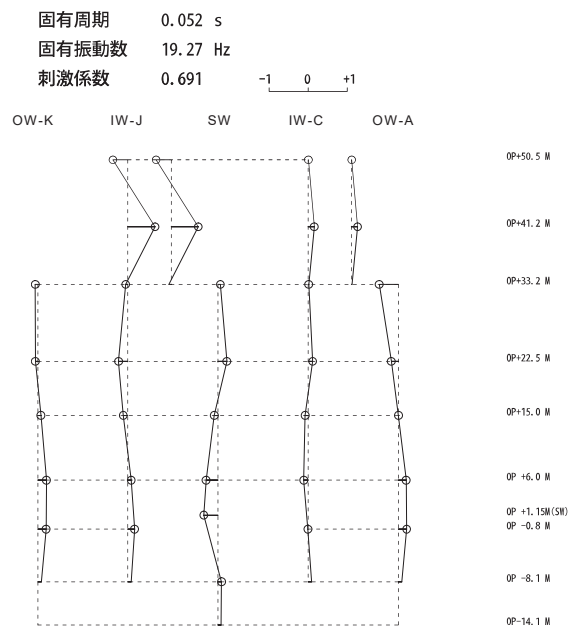


床剛モデル 8 次



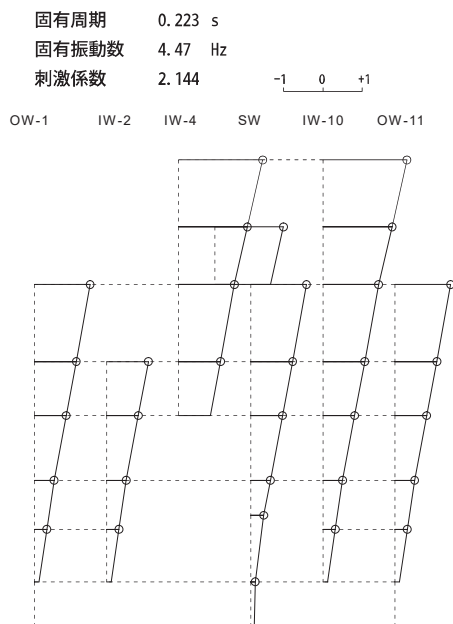
床柔モデル 11 次

図 2-2(3) 原子炉建屋質点系モデルの刺激関数図 (NS 方向) (3/4)

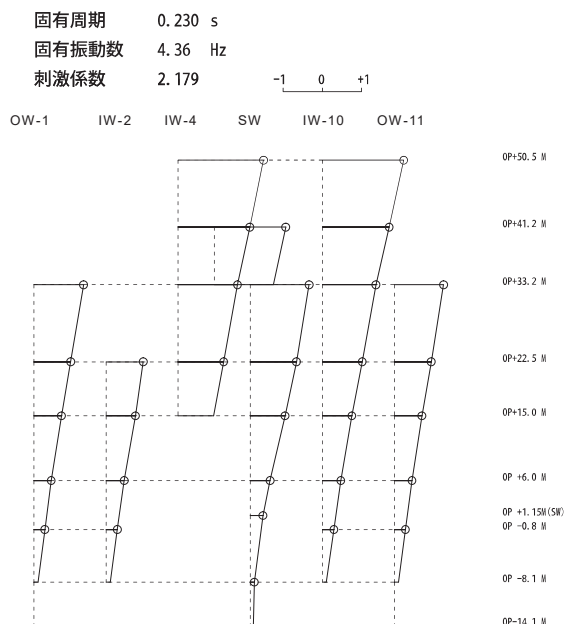


床柔モデル 16 次

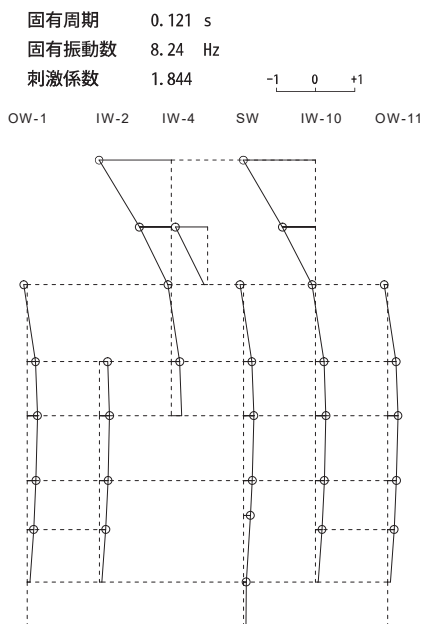
図 2-2(4) 原子炉建屋質点系モデルの刺激関数図 (NS 方向) (4/4)



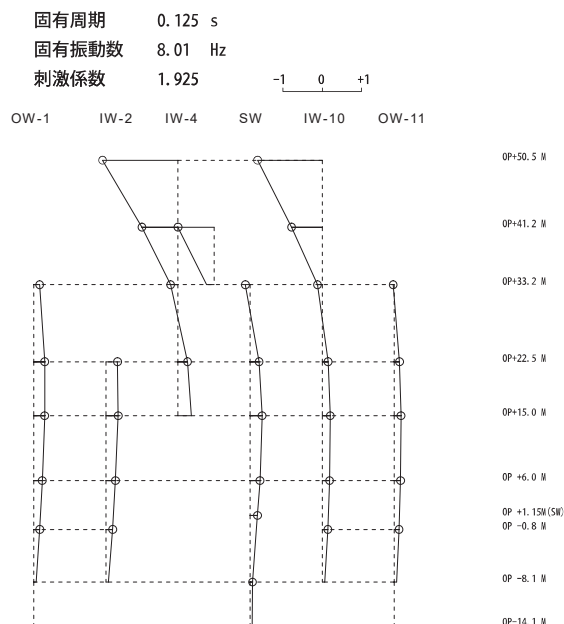
床剛モデル 1次



床柔モデル 1次

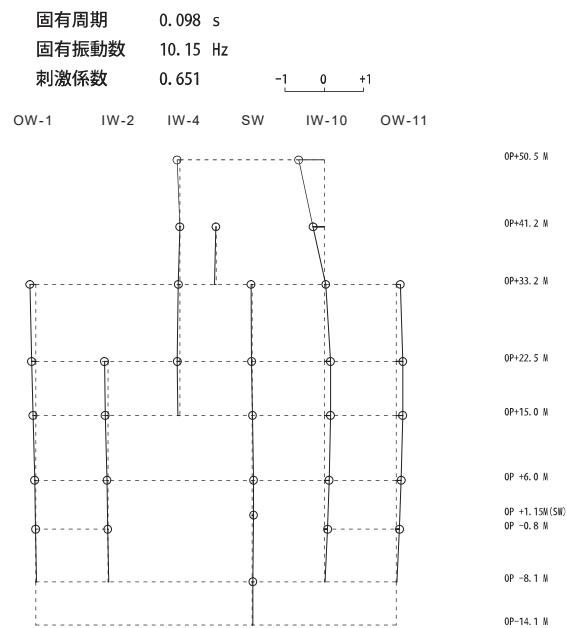


床剛モデル 2次

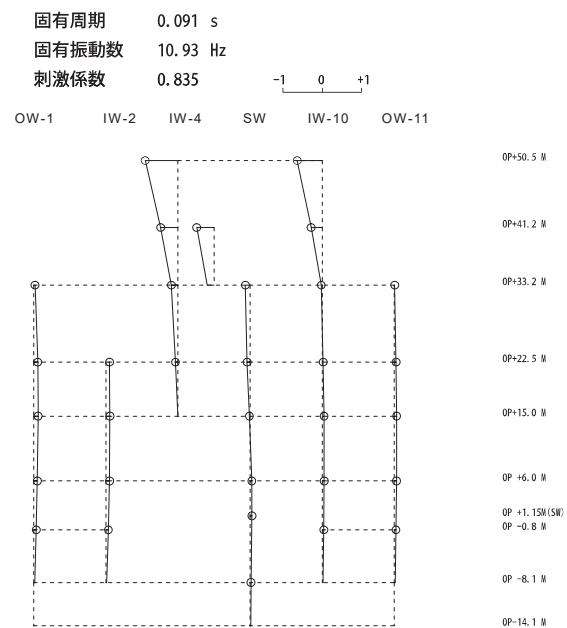


床柔モデル 2次

図 2-3(1) 原子炉建屋質点系モデルの刺激関数図 (EW 方向) (1/4)

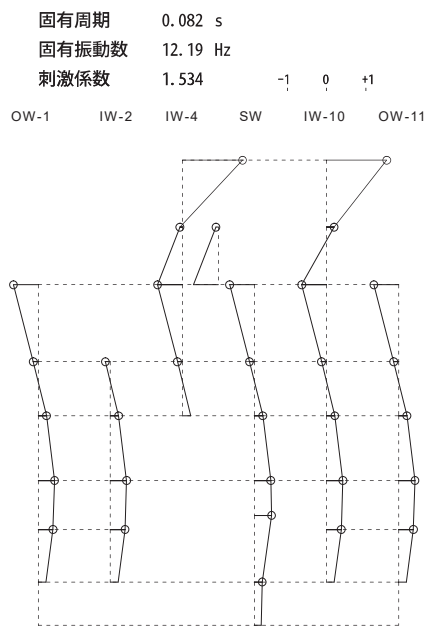


床柔モデル 4 次

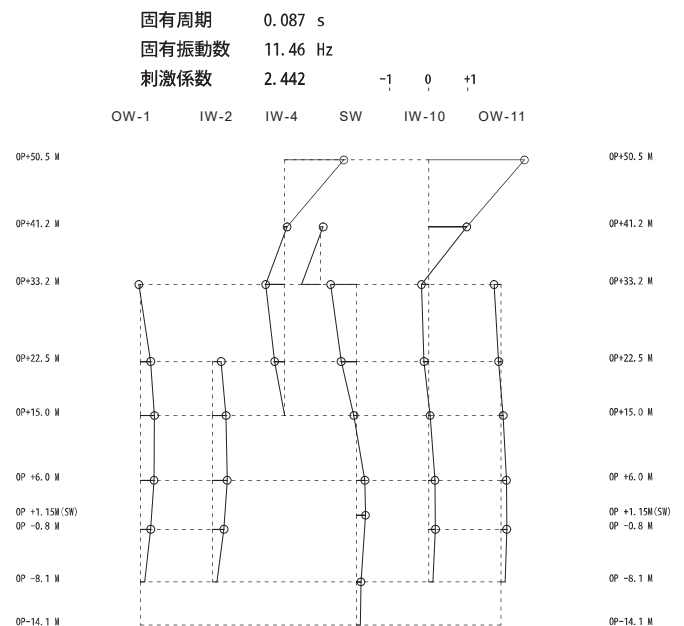


床柔モデル 5 次

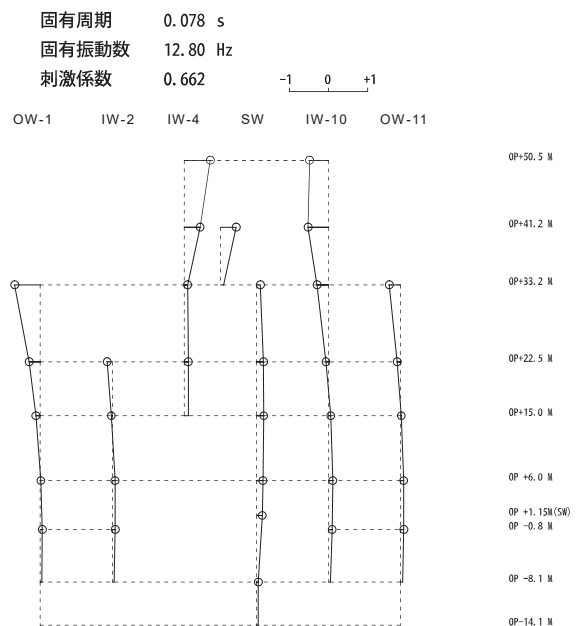
図 2-3(2) 原子炉建屋質点系モデルの刺激関数図 (EW 方向) (2/4)



床剛モデル 5 次



床柔モデル 6 次

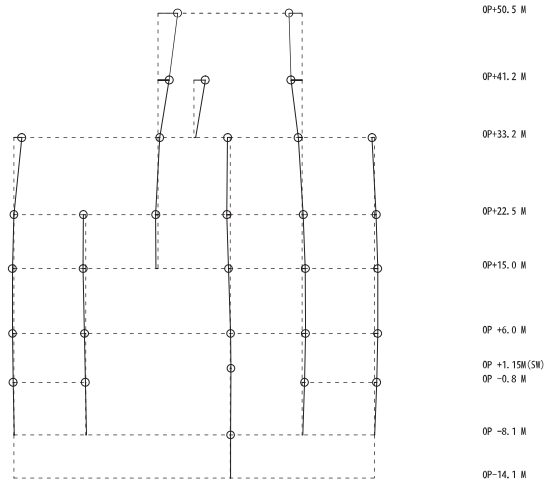


床柔モデル 7 次

図 2-3(3) 原子炉建屋質点系モデルの刺激関数図 (EW 方向) (3/4)

固有周期 0.074 s
 固有振動数 13.45 Hz
 刺激係数 0.500

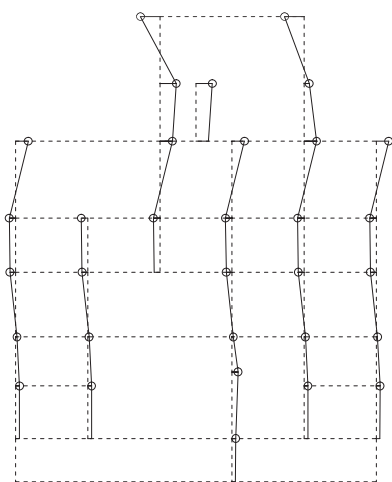
OW-1 IW-2 IW-4 SW IW-10 OW-11



床柔モデル 8 次

固有周期 0.059 s
 固有振動数 17.05 Hz
 刺激係数 0.499

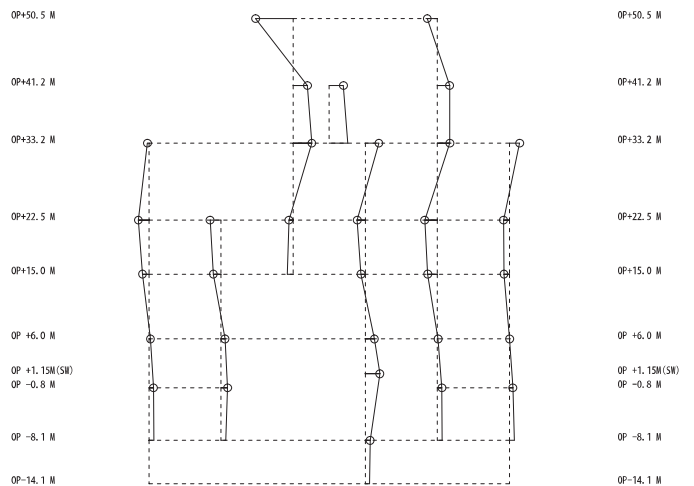
OW-1 IW-2 IW-4 SW IW-10 OW-11



床剛モデル 10 次

固有周期 0.060 s
 固有振動数 16.68 Hz
 刺激係数 0.957

OW-1 IW-2 IW-4 SW IW-10 OW-11



床柔モデル 13 次

図 2-3(4) 原子炉建屋質点系モデルの刺激関数図 (EW 方向) (4/4)

構造物名：原子炉建屋 標高：O.P. 33. 200m NS方向
 減衰定数：2.0% 波形名：基準地震動S s-D 2

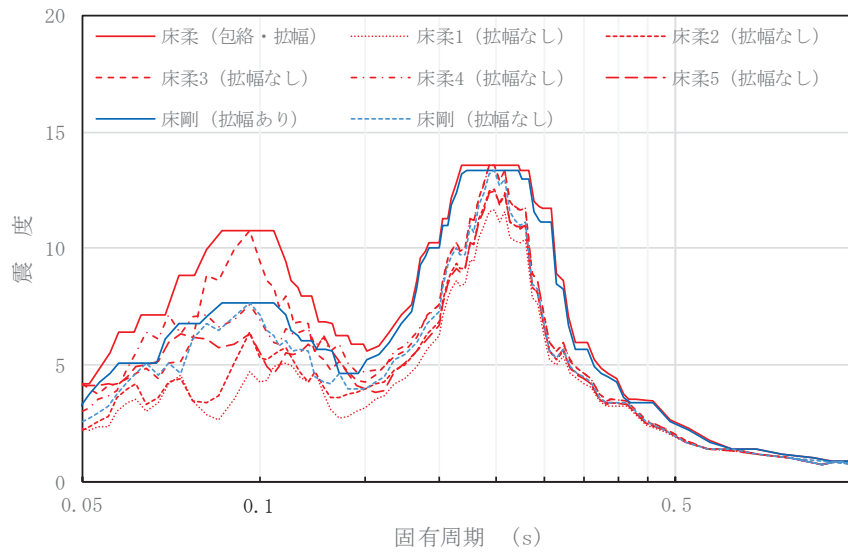
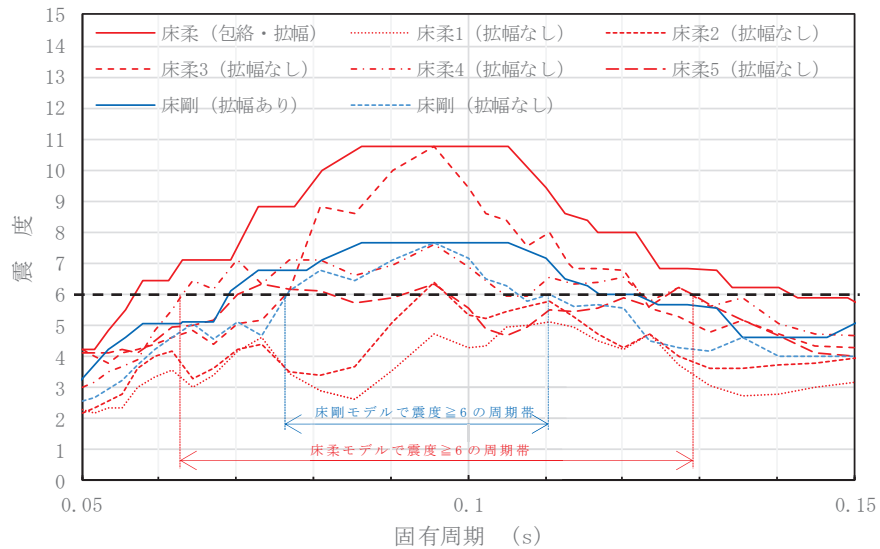


図 2-4 床柔モデルと床剛モデルの床応答スペクトルの比較 (NS 方向)

構造物名：原子炉建屋 標高：O.P. 33. 200m NS方向
 減衰定数：2.0% 波形名：基準地震動S s-D 2



注：黒点線は床剛モデルと床柔モデルの比較に当たり
 震度 6 以上となる周期帯 (拡幅前) の目安として図示

図 2-5 床柔モデルと床剛モデルの床応答スペクトルの比較 (NS 方向, 短周期拡大)

構造物名：原子炉建屋 標高：O.P. 33.200m EW方向
 減衰定数：2.0% 波形名：基準地震動 S s - D 2

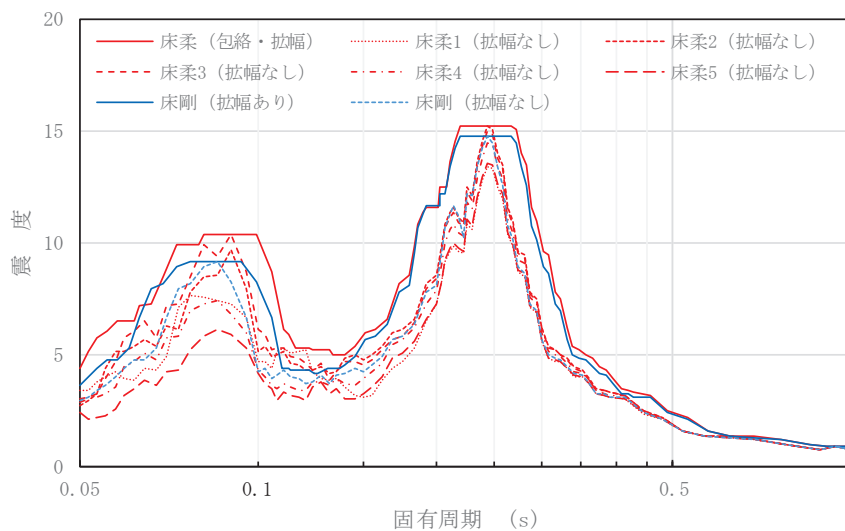
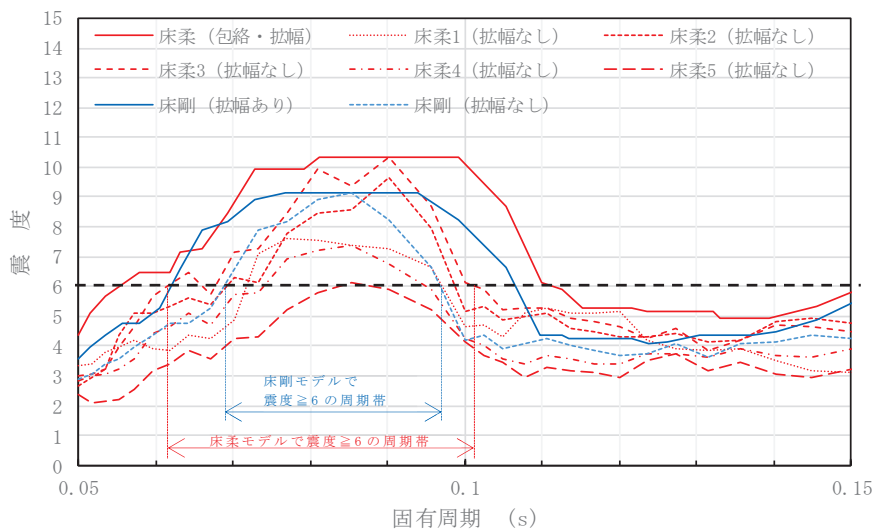


図 2-6 床柔モデルと床剛モデルの床応答スペクトルの比較 (EW 方向)

構造物名：原子炉建屋 標高：O.P. 33.200m EW方向
 減衰定数：2.0% 波形名：基準地震動 S s - D 2



注：黒点線は床剛モデルと床柔モデルの比較に当たり
 震度 6 以上となる周期帯 (拡幅前) の目安として図示

図 2-7 床柔モデルと床剛モデルの床応答スペクトルの比較 (EW 方向, 短周期拡大)

3. まとめ

機器・配管系の設備評価にあたり，以下の理由から今回工認モデル（床柔モデル）においても既工認時同様に床応答スペクトルの拡幅率を±10%とすることは妥当であると考ええる。

- ・地震応答解析結果がおおむね弾性範囲の場合，今回採用している地震応答解析モデルは，3.11 地震の観測記録を精度良く表現できるモデルを採用しており，既工認時に比べて弾性範囲内の応答に対して床応答スペクトルの精度が向上していること。
- ・地震応答解析結果が非線形に及ぶ場合のスケルトンカーブは，既工認と同じ J E A G 式を採用しており，地震応答解析の精度は既工認モデルと同等であること。
- ・床柔モデルと床剛モデルの床応答スペクトルを比較すると，床柔モデルの方が幅広い周期帯で高い震度を示しており，今回工認においては，本検討と同様に同一標高の全ての質点の拡幅スペクトルを包絡するスペクトルを採用する方針としていることから，床柔モデルの拡幅スペクトルは床剛モデルに比べ保守的であること。

(参考資料)

軽水炉改良標準化耐震設計小委員会 昭和 55 年度耐震設計の標準化に関する調査報告書 別冊 2 (機器系)

別紙 23 鉄筋コンクリート躯体のひび割れ（乾燥収縮・地震）による影響評価が必要となる対象条文の抽出について

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第三条（設計基準対象施設の地盤）				
	設計基準対象施設は、次条第二項の規定により算定する地震力（設計基準対象施設のうち、地震の発生によって生ずるおそれがあるその安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度が特に大きいもの（以下「耐震重要施設」という。）にあっては、同条第三項に規定する基準地震動による地震力を含む。）が作用した場合においても当該設計基準対象施設を十分に支持することができる地盤に設けなければならない。	地盤の支持性能への影響評価	○	設計基準対象施設に要求される共通条文であり、要求対象となる個別条文側での再掲は省略
	2 耐震重要施設は、変形した場合においてもその安全機能が損なわれるおそれがない地盤に設けなければならない。	— (地盤そのものに対する要求)	—	
	3 耐震重要施設は、変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない。			
第四条（地震による損傷の防止）				
	設計基準対象施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。	耐震性（建屋，土木構造物，機器・配管系）への影響	○	設計基準対象施設に要求される共通条文であり、要求対象となる個別条文側での再掲は省略
	2 前項の地震力は、地震の発生によって生ずるおそれがある設計基準対象施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度に応じて算定しなければならない。			
	3 耐震重要施設は、その供用中に当該耐震重要施設に大きな影響を及ぼすおそれがある地震による加速度によって作用する地震力（以下「基準地震動による地震力」という。）に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。			
	4 耐震重要施設は、前項の地震の発生によって生ずるおそれがある斜面の崩壊に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	— (周辺斜面に対する要求)	—	
	5 炉心内の燃料被覆材は、基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	— (燃料被覆材に対する要求)	—	

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第五条（津波による損傷の防止）				
	設計基準対象施設は、その供用中に当該設計基準対象施設に大きな影響を及ぼすおそれがある津波（以下「基準津波」という。）に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	浸水防護（止水性）への影響 （貯水機能については、第 22 条に記載）	○	設計基準対象施設に要求される共通条文であり、要求対象となる個別条文側での再掲は省略
第六条（外部からの衝撃による損傷の防止）				
	安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。	建屋の構造健全性（外殻としての機能，耐熱性，止水性，気密性）への影響	○	安全施設（一部，重要安全施設に限る）に要求される共通条文であり，要求対象となる個別条文側での再掲は省略
	2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。			
	3 安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して安全機能を損なわないものでなければならない。			
第七条（発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止）				
	工場等には、発電用原子炉施設への人の不法な侵入、発電用原子炉施設に不正に爆発性又は易燃性を有する物件その他人に危害を与え、又は他の物件を損傷するおそれがある物件が持ち込まれること及び不正アクセス行為（不正アクセス行為の禁止等に関する法律（平成十一年法律第百二十八号）第二条第四項に規定する不正アクセス行為をいう。第二十四条第六号において同じ。）を防止するための設備を設けなければならない。	侵入等の防止（必要となるコンクリート厚さの維持）への影響	○	

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第八条（火災による損傷の防止）				
	設計基準対象施設は、火災により発電用原子炉施設の安全性が損なわれないよう、火災の発生を防止することができ、かつ、早期に火災発生を感知する設備（以下「火災感知設備」という。）及び消火を行う設備（以下「消火設備」といい、安全施設に属するものに限る。）並びに火災の影響を軽減する機能を有するものでなければならない。	耐火性（遮熱性）への影響	○	設計基準対象施設に要求される共通条文であり、要求対象となる個別条文側での再掲は省略
	2 消火設備（安全施設に属するものに限る。）は、破損、誤作動又は誤操作が起きた場合においても発電用原子炉を安全に停止させるための機能を損なわないものでなければならない。	— (第九条第1項にて評価)	—	
第九条（溢水による損傷の防止等）				
	安全施設は、発電用原子炉施設内における溢水が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。	止水性への影響	○	安全施設に要求される共通条文であり、要求対象となる個別条文側での再掲は省略
	2 設計基準対象施設は、発電用原子炉施設内の放射性物質を含む液体を内包する容器、配管その他の設備から放射性物質を含む液体があふれ出た場合において、当該液体が管理区域外へ漏えいしないものでなければならない。			
第十条（誤操作の防止）				
	設計基準対象施設は、誤操作を防止するための措置を講じたものでなければならない。	操作性への影響	○	設計基準対象施設、安全施設に要求される共通条文であり、要求対象となる個別条文側での再掲は省略
	2 安全施設は、容易に操作することができるものでなければならない。			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第十一条（安全避難通路等）				
発電用原子炉施設には、次に掲げる設備を設けなければならない。		安全避難通路確保への影響	○	設計基準対象施設, 安全施設に要求される共通条文であり, 要求対象となる個別条文側での再掲は省略
一 その位置を明確かつ恒久的に表示することにより容易に識別できる安全避難通路				
二 照明用の電源が喪失した場合においても機能を損なわない避難用の照明				
三 設計基準事故が発生した場合に用いる照明（前号の避難用の照明を除く。）及びその専用の電源				
第十二条（安全施設）				
安全施設は、その安全機能の重要度に応じて、安全機能が確保されたものでなければならない。		— (コンクリートの評価に影響しない)	—	安全施設に要求される共通条文であり, 要求対象となる個別条文側での再掲は省略
2 安全機能を有する系統のうち、安全機能の重要度が特に高い安全機能を有するものは、当該系統を構成する機械又は器具の単一故障（単一の原因によって一つの機械又は器具が所定の安全機能を失うこと（従属要因による多重故障を含む。）をいう。以下同じ。）が発生した場合であって、外部電源が利用できない場合においても機能できるよう、当該系統を構成する機械又は器具の機能、構造及び動作原理を考慮して、多重性又は多様性を確保し、及び独立性を確保するものでなければならない。				
3 安全施設は、設計基準事故時及び設計基準事故に至るまでの間に想定される全ての環境条件において、その機能を発揮することができるものでなければならない。		安全機能の確保への影響	○	
4 安全施設は、その健全性及び能力を確認するため、その安全機能の重要度に応じ、発電用原子炉の運転中又は停止中に試験又は検査ができるものでなければならない。		— (試験・検査実施に対する要求)	—	
5 安全施設は、蒸気タービン、ポンプその他の機器又は配管の損壊に伴う飛散物により、安全性を損なわないものでなければならない。		— (コンクリートの評価に影響しない)	—	

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第十二条（安全施設）				
6	重要安全施設は、二以上の発電用原子炉施設において共用し、又は相互に接続するものであってはならない。ただし、二以上の発電用原子炉施設と共用し、又は相互に接続することによって当該二以上の発電用原子炉施設の安全性が向上する場合は、この限りでない。	— (共用・相互接続に対する要求)	—	
第十三条（運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止）				
	設計基準対象施設は、次に掲げる要件を満たすものでなければならない。 一 運転時の異常な過渡変化時において次に掲げる要件を満たすものであること。 イ 最小限界熱流束比（燃料被覆材から冷却材への熱伝達が低下し、燃料被覆材の温度が急上昇し始める時の熱流束（単位時間及び単位面積当たりの熱量をいう。以下同じ。）と運転時の熱流束との比の最小値をいう。）又は最小限界出力比（燃料体に沸騰遷移が発生した時の燃料体の出力と運転時の燃料体の出力との比の最小値をいう。）が許容限界値以上であること。 ロ 燃料被覆材が破損しないものであること。 ハ 燃料材のエンタルピーが燃料要素の許容損傷限界を超えないこと。 ニ 原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力が最高使用圧力の一・一倍以下となること。	— (コンクリートの評価に影響しない)	—	

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第十三条（運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止）				
<p>二 設計基準事故時において次に掲げる要件を満たすものであること。</p> <p>イ 炉心の著しい損傷が発生するおそれがないものであり、かつ、炉心を十分に冷却できるものであること。</p> <p>ロ 燃料材のエンタルピーが炉心及び原子炉冷却材圧力バウンダリの健全性を維持するための制限値を超えないこと。</p> <p>ハ 原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力が最高使用圧力の一・二倍以下となること。</p> <p>ニ 原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力及び原子炉格納容器バウンダリにおける温度が最高使用圧力及び最高使用温度以下となること。</p> <p>ホ 設計基準対象施設が工場等周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないものであること。</p>	遮蔽性への影響	○	設計基準対象施設に要求される共通条文であり、要求対象となる個別条文側での再掲は省略	
第十四条（全交流動力電源喪失対策設備）				
<p>発電用原子炉施設には、全交流動力電源喪失時から重大事故等に対処するために必要な電力の供給が交流動力電源設備から開始されるまでの間、発電用原子炉を安全に停止し、かつ、発電用原子炉の停止後に炉心を冷却するための設備が動作するとともに、原子炉格納容器の健全性を確保するための設備が動作することができるよう、これらの設備の動作に必要な容量を有する蓄電池その他の設計基準事故に対処するための電源設備（安全施設に属するものに限る。）を設けなければならない。</p>	— (個別設備の設置要求)	—		
第十五条（炉心等）				
<p>設計基準対象施設は、原子炉固有の出力抑制特性を有するとともに、発電用原子炉の反応度を制御することにより核分裂の連鎖反応を制御できる能力を有するものでなければならない。</p>	— (燃料に対する要求事項)	—		

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第十五条（炉心等）				
	2 炉心は、通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時に発電用原子炉の運転に支障が生ずる場合において、原子炉冷却系統、原子炉停止系統、反応度制御系統、計測制御系統及び安全保護回路の機能と併せて機能することにより燃料要素の許容損傷限界を超えないものでなければならない。	— (燃料に対する要求事項)	—	
	3 燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物は、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、発電用原子炉を安全に停止し、かつ、停止後に炉心の冷却機能を維持できるものでなければならない。			
	4 燃料体及び反射材並びに炉心支持構造物、熱遮蔽材並びに一次冷却系統に係る容器、管、ポンプ及び弁は、一次冷却材又は二次冷却材の循環、沸騰その他の一次冷却材又は二次冷却材の挙動により生ずる流体振動又は温度差のある流体の混合その他の一次冷却材又は二次冷却材の挙動により生ずる温度変動により損傷を受けないものでなければならない。			
	5 燃料体は、通常運転時における圧力、温度及び放射線に起因する最も厳しい条件において、必要な物理的及び化学的性質を保持するものでなければならない。			
	6 燃料体は、次に掲げるものでなければならない。			
	一 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の燃料体に加わる負荷に耐えるものとする。			
	二 輸送中又は取扱中において、著しい変形を生じないものとする。			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考					
		評価が必要となる内容	評価対象						
第十六条（燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設）									
発電用原子炉施設には、次に掲げるところにより、通常運転時に使用する燃料体又は使用済燃料（以下この条において「燃料体等」という。）の取扱施設（安全施設に係るものに限る。）を設けなければならない。 一 燃料体等を取り扱う能力を有するものとする事。 二 燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする事。 三 崩壊熱により燃料体等が溶融しないものとする事。 四 使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする事。 五 燃料体等の取扱中における燃料体等の落下を防止できるものとする事。	重量物落下に関する影響	○							
					2 発電用原子炉施設には、次に掲げるところにより、燃料体等の貯蔵施設（安全施設に属するものに限る。以下この項において同じ。）を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—		
					一 燃料体等の貯蔵施設は、次に掲げるものであること。				
					イ 燃料体等の落下により燃料体等が破損して放射性物質の放出により公衆に放射線障害を及ぼすおそれがある場合において、放射性物質の放出による公衆への影響を低減するため、燃料貯蔵設備を格納するもの及び放射性物質の放出を低減するものとする事。				
					ロ 燃料体等を必要に応じて貯蔵することができる容量を有するものとする事。				
ハ 燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする事。									

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第十六条（燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設）				
	<p>二 使用済燃料の貯蔵施設（使用済燃料を工場等内に貯蔵する乾式キャスク（以下「キャスク」という。）を除く。）にあつては、前号に掲げるもののほか、次に掲げるものであること。</p> <p>イ 使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする事</p> <p>ロ 貯蔵された使用済燃料が崩壊熱により溶融しないものであつて、最終ヒートシンクへ熱を輸送できる設備及びその浄化系を有するものとする事。</p> <p>ハ 使用済燃料貯蔵槽（安全施設に属するものに限る。以下この項及び次項において同じ。）から放射性物質を含む水があふれ、又は漏れないものであつて、使用済燃料貯蔵槽から水が漏れ出した場合において水の漏れを検知することができるものとする事。</p> <p>ニ 燃料体等の取扱中に想定される燃料体等の落下時及び重量物の落下時においてもその機能が損なわれないものとする事。</p>	遮蔽性、重量物落下に関する影響	○	
	<p>3 発電用原子炉施設には、次に掲げるところにより、使用済燃料貯蔵槽の水位及び水温並びに燃料取扱場所の放射線量を測定できる設備を設けなければならない。</p>	— (個別設備の設置要求)	—	
	<p>一 使用済燃料貯蔵槽の水位及び水温並びに燃料取扱場所の放射線量の異常を検知し、それを原子炉制御室に伝え、又は異常が生じた水位及び水温を自動的に制御し、並びに放射線量を自動的に抑制することができるものとする事。</p>			
	<p>二 外部電源が利用できない場合においても温度、水位その他の発電用原子炉施設の状態を示す事項（以下「パラメータ」という。）を監視することができるものとする事。</p>			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第十六条（燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設）				
4	キャスクを設ける場合には、そのキャスクは、第二項第一号に定めるもののほか、次に掲げるものでなければならない。	-	-	
一	使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。			
二	使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。			
三	使用済燃料が内包する放射性物質を閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができるものとする。			
第十七条（原子炉冷却材圧力バウンダリ）				
	発電用原子炉施設には、次に掲げるところにより、原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器（安全施設に属するものに限る。以下この条において同じ。）を設けなければならない。	-	-	
一	通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に生ずる衝撃、炉心の反応度の変化による荷重の増加その他の原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器に加わる負荷に耐えるものとする。			
二	原子炉冷却材の流出を制限するため隔離装置を有するものとする。			
三	通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に瞬間的破壊が生じないよう、十分な破壊じん性を有するものとする。			
四	原子炉冷却材圧力バウンダリからの原子炉冷却材の漏えいを検出する装置を有するものとする。			

設置許可基準規則	【STEP1】対象条文の抽出		設置許可基準規則
	評価が必要となる内容	評価対象	
第十八条（蒸気タービン）			
蒸気タービン（安全施設に属するものに限る。以下この条において同じ。）は、当該蒸気タービンが損壊し、又は故障した場合においても、発電用原子炉施設の安全性を損なわないものでなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
2 蒸気タービンには、当該蒸気タービンが損壊し、又は故障した場合においても発電用原子炉施設の安全性を損なわないよう、その運転状態を監視できる設備を設けなければならない。			
第十九条（非常用炉心冷却設備）			
発電用原子炉施設には、次に掲げるところにより、非常用炉心冷却設備（安全施設に属するものに限る。）を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	関連する条文第 22 条 (最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設備)の記載は再掲しない
一 一次冷却材を喪失した場合においても、燃料被覆材の温度が燃料材の溶融又は燃料体の著しい損傷を生ずる温度を超えて上昇することを防止できるものとする。			
二 一次冷却材を喪失した場合においても、燃料被覆材と冷却材との反応により著しく多量の水素を生じないものとする。			
第二十条（一次冷却材の減少分を補給する設備）			
発電用原子炉施設には、通常運転時又は一次冷却材の小規模漏えい時に発生した一次冷却材の減少分を補給する設備（安全施設に属するものに限る。）を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
第二十一条（残留熱を除去することができる設備）			
発電用原子炉施設には、発電用原子炉を停止した場合において、燃料要素の許容損傷限界及び原子炉冷却材圧力バウンダリの健全性を維持するために必要なパラメータが設計値を超えないようにするため、原子炉圧力容器内において発生した残留熱を除去することができる設備（安全施設に属するものに限る。）を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	関連する条文第 22 条 (最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設備)の記載は再掲しない

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		設置許可基準規則
		評価が必要となる内容	評価対象	
第二十二條（最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設備）				
	<p>発電用原子炉施設には、次に掲げるところにより、最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設備（安全施設に属するものに限る。）を設けなければならない。</p> <p>一 原子炉圧力容器内において発生した残留熱及び重要安全施設において発生した熱を除去することができるものとする。</p> <p>二 津波、溢水又は工場等内若しくはその周辺における発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であつて人為によるものに対して安全性を損なわないものとする。</p>	通水機能、貯水機能への影響	○	第十九條及び第二十一條にも適用
第二十三條（計測制御系統施設）				
	<p>発電用原子炉施設には、次に掲げるところにより、計測制御系統施設を設けなければならない。</p> <p>一 炉心、原子炉冷却材圧力バウンダリ及び原子炉格納容器バウンダリ並びにこれらに関連する系統の健全性を確保するために監視することが必要なパラメータは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時においても想定される範囲内に制御できるものとする。</p> <p>二 前号のパラメータは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時においても想定される範囲内で監視できるものとする。</p> <p>三 設計基準事故が発生した場合の状況を把握し、及び対策を講じるために必要なパラメータは、設計基準事故時に想定される環境下において、十分な測定範囲及び期間にわたり監視できるものとする。</p>	— (個別設備の設置要求)	—	

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第二十三条（計測制御系統施設）				
	四 前号のパラメータのうち、発電用原子炉の停止及び炉心の冷却に係るものについては、設計基準事故時においても二種類以上監視し、又は推定することができるものとする。	— (個別設備の設置要求)	—	
	五 発電用原子炉の停止及び炉心の冷却並びに放射性物質の閉じ込めの機能の状況を監視するために必要なパラメータは、設計基準事故時においても確実に記録され、及び当該記録が保存されるものとする。			
第二十四条（安全保護回路）				
	発電用原子炉施設には、次に掲げるところにより、安全保護回路（安全施設に属するものに限る。以下この条において同じ。）を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
	一 運転時の異常な過渡変化が発生する場合において、その異常な状態を検知し、及び原子炉停止系統その他系統と併せて機能することにより、燃料要素の許容損傷限界を超えないようにできるものとする。			
	二 設計基準事故が発生する場合において、その異常な状態を検知し、原子炉停止系統及び工学的安全施設を自動的に作動させるものとする。			
	三 安全保護回路を構成する機械若しくは器具又はチャンネルは、単一故障が起きた場合又は使用状態からの単一の取り外しを行った場合において、安全保護機能を失わないよう、多重性を確保するものとする。			
	四 安全保護回路を構成するチャンネルは、それぞれ互いに分離し、それぞれのチャンネル間において安全保護機能を失わないように独立性を確保するものとする。			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第二十四条（安全保護回路）				
五	駆動源の喪失、系統の遮断その他の不利な状況が発生した場合においても、発電用原子炉施設をより安全な状態に移行するか、又は当該状態を維持することにより、発電用原子炉施設の安全上支障がない状態を維持できるものとする。	— (個別設備の設置要求)	—	
六	不正アクセス行為その他の電子計算機に使用目的に沿うべき動作をさせず、又は使用目的に反する動作をさせる行為による被害を防止することができるものとする。			
七	計測制御系統施設の一部を安全保護回路と共用する場合には、その安全保護機能を失わないよう、計測制御系統施設から機能的に分離されたものとする。			
第二十五条（反応度制御系統及び原子炉停止系統）				
	発電用原子炉施設には、反応度制御系統（原子炉停止系統を含み、安全施設に係るものに限る。次項において同じ。）を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
2	反応度制御系統は、計画的な出力変化に伴う反応度変化を燃料要素の許容損傷限界を超えることなく制御できる能力を有し、かつ、次に掲げるものでなければならない。			
一	制御棒、液体制御材その他反応度を制御するものによる二以上の独立した系統を有するものとする。			
二	通常運転時の高温状態において、二以上の独立した系統がそれぞれ発電用原子炉を未臨界に移行し、及び未臨界を維持できるものであり、かつ、運転時の異常な過渡変化時の高温状態においても反応度制御系統のうち少なくとも一つは、燃料要素の許容損傷限界を超えることなく発電用原子炉を未臨界に移行し、及び未臨界を維持できること。この場合において、非常用炉心冷却設備その他の発電用原子炉施設の安全性を損なうおそれがある場合に作動する設備の作動に伴って注入される液体制御材による反応度値を加えることができる。			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第二十五条（反応度制御系統及び原子炉停止系統）				
	三 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における低温状態において、反応度制御系統のうち少なくとも一つは、発電用原子炉を未臨界に移行し、及び未臨界を維持できること。	— (個別設備の設置要求) (第4項に対しては、12条第3項で評価)	—	
	四 一次冷却材喪失その他の設計基準事故時において、反応度制御系統のうち少なくとも一つは、発電用原子炉を未臨界へ移行することができ、かつ、少なくとも一つは、発電用原子炉を未臨界に維持できること。この場合において、非常用炉心冷却設備その他の発電用原子炉施設の安全性を損なうおそれがある場合に作動する設備の作動に伴って注入される液体制御材による反応度価値を加えることができる。			
	五 制御棒を用いる場合にあつては、反応度価値の最も大きな制御棒一本が固着した場合においても第二号から前号までの規定に適合すること。			
	3 制御棒の最大反応度価値及び反応度添加率は、想定される反応度投入事象（発電用原子炉に反応度が異常に投入される事象をいう。）に対して原子炉冷却材圧力バウンダリを破損せず、かつ、炉心の冷却機能を損なうような炉心、炉心支持構造物及び原子炉圧力容器内部構造物の損壊を起こさないものでなければならない。			
	4 制御棒、液体制御材その他の反応度を制御する設備は、通常運転時における圧力、温度及び放射線に起因する最も厳しい条件において、必要な物理的及び化学的性質を保持するものでなければならない。			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第二十六条（原子炉制御室等）				
	<p>発電用原子炉施設には、次に掲げるところにより、原子炉制御室（安全施設に属するものに限る。以下この条において同じ。）を設けなければならない。</p> <p>一 設計基準対象施設の健全性を確保するために必要なパラメータを監視できるものとする。</p> <p>二 発電用原子炉施設の外の状況を把握する設備を有するものとする。</p> <p>三 発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な操作を手動により行うことができるものとする。</p>	-	-	
	<p>2 発電用原子炉施設には、火災その他の異常な事態により原子炉制御室が使用できない場合において、原子炉制御室以外の場所から発電用原子炉を高温停止の状態に直ちに移行させ、及び必要なパラメータを想定される範囲内に制御し、その後、発電用原子炉を安全な低温停止の状態に移行させ、及び低温停止の状態を維持させるために必要な機能を有する装置を設けなければならない。</p>			
	<p>3 一次冷却系統に係る発電用原子炉施設の損壊又は故障その他の異常が発生した場合に発電用原子炉の運転の停止その他の発電用原子炉施設の安全性を確保するための措置をとるため、従事者が支障なく原子炉制御室に入り、又は一定期間とどまり、かつ、当該措置をとるための操作を行うことができるよう、次の各号に掲げる場所の区分に応じ、当該各号に定める設備を設けなければならない。</p> <p>一 原子炉制御室及びその近傍並びに有毒ガスの発生源の近傍 工場等内における有毒ガスの発生を検出するための装置及び当該装置が有毒ガスの発生を検出した場合に原子炉制御室において自動的に警報するための装置</p>	<p>居住性確保（気密性、遮蔽性）への影響</p>	○	

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第二十六条（原子炉制御室等）				
	二 原子炉制御室及びこれに連絡する通路並びに運転員その他の従事者が原子炉制御室に出入りするための区域 遮蔽壁その他の適切に放射線から防護するための設備、気体状の放射性物質及び原子炉制御室外の火災により発生する燃焼ガスに対し換気設備を隔離するための設備その他の適切に防護するための設備	居住性確保（気密性，遮蔽性）への影響	○	
第二十七条（放射性廃棄物の処理施設）				
	工場等には、次に掲げるところにより、通常運転時において放射性廃棄物（実用炉規則第二条第二項第二号に規定する放射性廃棄物をいう。以下同じ。）を処理する施設（安全施設に係るものに限る。以下この条において同じ。）を設けなければならない。	止水性への影響	○	
	一 周辺監視区域の外の空气中及び周辺監視区域の境界における水中の放射性物質の濃度を十分に低減できるよう、発電用原子炉施設において発生する放射性廃棄物を処理する能力を有するものとする。			
	二 液体状の放射性廃棄物の処理に係るものにあつては、放射性物質を処理する施設から液体状の放射性廃棄物が漏えいすることを防止し、及び工場等外へ液体状の放射性廃棄物が漏えいすることを防止できるものとする。			
	三 固体状の放射性廃棄物の処理に係るものにあつては、放射性廃棄物を処理する過程において放射性物質が散逸し難いものとする。			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第二十八条（放射性廃棄物の貯蔵施設）				
	工場等には、次に掲げるところにより、発電用原子炉施設において発生する放射性廃棄物を貯蔵する施設（安全施設に係るものに限る。）を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
	一 放射性廃棄物が漏えいし難いものとする事。			
	二 固体状の放射性廃棄物を貯蔵する設備を設けるものにあつては、放射性廃棄物による汚染が広がらないものとする事。			
第二十九条（工場等周辺における直接ガンマ線等からの防護）				
	設計基準対象施設は、通常運転時において発電用原子炉施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による工場等周辺の空間線量率が十分に低減できるものでなければならない。	遮蔽性への影響	○	
第三十条（放射線からの放射線業務従事者の防護）				
	設計基準対象施設は、外部放射線による放射線障害を防止する必要がある場合には、次に掲げるものでなければならない。	遮蔽性、気密性、止水性への影響	○	
	一 放射線業務従事者（実用炉規則第二条第二項第七号に規定する放射線業務従事者をいう。以下同じ。）が業務に従事する場所における放射線量を低減できるものとする事。			
	二 放射線業務従事者が運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、迅速な対応をするために必要な操作ができるものとする事。			
	2 工場等には、放射線から放射線業務従事者を防護するため、放射線管理施設を設けなければならない。			
	3 放射線管理施設には、放射線管理に必要な情報を原子炉制御室その他当該情報を伝達する必要がある場所に表示できる設備（安全施設に属するものに限る。）を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第三十一条（監視設備）				
	発電用原子炉施設には、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、当該発電用原子炉施設及びその境界付近における放射性物質の濃度及び放射線量を監視し、及び測定し、並びに設計基準事故時における迅速な対応のために必要な情報を原子炉制御室その他当該情報を伝達する必要がある場所に表示できる設備（安全施設に属するものに限る。）を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
第三十二条（原子炉格納施設）				
	原子炉格納容器は、一次冷却系統に係る発電用原子炉施設が損壊し、又は故障した場合において漏えいする放射性物質が公衆に放射線障害を及ぼさないようにするため、想定される最大の圧力、最高の温度及び適切な地震力に十分に耐えることができ、かつ、適切に作動する隔離機能と併せて所定の漏えい率を超えることがないものでなければならない。	— (個別設備に対する要求)	—	
	2 原子炉格納容器バウンダリを構成する設備は、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に瞬間的破壊が生じないよう、十分な破壊じん性を有するものでなければならない。			
	3 原子炉格納容器を貫通する配管には、隔離弁（安全施設に属するものに限る。次項及び第五項において同じ。）を設けなければならない。ただし、計測装置又は制御棒駆動装置に関連する配管であって、当該配管を通じての漏えい量が十分許容される程度に抑制されているものについては、この限りでない。			
	4 主要な配管（事故の収束に必要な系統の配管を除く。）に設ける隔離弁は、設計基準事故時に隔離機能の確保が必要となる場合において、自動的、かつ、確実に閉止される機能を有するものでなければならない。			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第三十二条（原子炉格納施設）				
5	発電用原子炉施設には、次に掲げるところにより隔離弁を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
一	原子炉格納容器に近接した箇所に設置するものとする。			
二	原子炉格納容器内に開口部がある配管又は原子炉冷却材圧力バウンダリに接続している配管のうち、原子炉格納容器の外側で閉じていないものにあつては、原子炉格納容器の内側及び外側にそれぞれ一個の隔離弁を設けるものとする。ただし、その一方の側の設置箇所における配管の隔離弁の機能が、湿気その他隔離弁の機能に影響を与える環境条件によって著しく低下するおそれがあると認められるときは、貫通箇所の外側であつて近接した箇所に二個の隔離弁を設けることをもって、これに代えることができる。			
三	原子炉格納容器を貫通し、貫通箇所の内側又は外側において閉じている配管にあつては、原子炉格納容器の外側に一個の隔離弁を設けるものとする。ただし、当該格納容器の外側に隔離弁を設けることが困難である場合においては、原子炉格納容器の内側に一個の隔離弁を適切に設けることをもって、これに代えることができる。			
四	前二号の規定にかかわらず、配管に圧力開放板を適切に設けるときは、原子炉格納容器の内側又は外側に通常時において閉止された一個の隔離弁を設けることをもって、前二号の規定による隔離弁の設置に代えることができる。			
五	閉止後において駆動動力源が喪失した場合においても隔離機能が失われぬものとする。			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第三十二条（原子炉格納施設）				
6	発電用原子炉施設には、一次冷却系統に係る発電用原子炉施設が損壊し、又は故障した際に生ずる原子炉格納容器内の圧力及び温度の上昇により原子炉格納容器の健全性に支障が生ずることを防止するため、原子炉格納容器内において発生した熱を除去する設備（安全施設に属するものに限る。）を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
7	発電用原子炉施設には、一次冷却系統に係る発電用原子炉施設が損壊し、又は故障した際に原子炉格納容器から気体状の放射性物質が漏えいすることにより公衆に放射線障害を及ぼすおそれがある場合は、放射性物質の濃度を低減させるため、原子炉格納施設内の雰囲気浄化系（安全施設に係るものに限る。）を設けなければならない。	気密性への影響	○	
8	発電用原子炉施設には、一次冷却系統に係る発電用原子炉施設が損壊し、又は故障した際に生ずる水素及び酸素により原子炉格納容器の健全性を損なうおそれがある場合は、水素及び酸素の濃度を抑制するため、可燃性ガス濃度制御系（安全施設に係るものに限る。）を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
第三十三条（保安電源設備）				
	発電用原子炉施設は、重要安全施設がその機能を維持するために必要となる電力を当該重要安全施設に供給するため、電力系統に連系したものでなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
2	発電用原子炉施設には、非常用電源設備（安全施設に属するものに限る。以下この条において同じ。）を設けなければならない。			
3	保安電源設備（安全施設へ電力を供給するための設備をいう。）は、電線路、発電用原子炉施設において常時使用される発電機及び非常用電源設備から安全施設への電力の供給が停止することがないよう、機器の損壊、故障その他の異常を検知するとともに、その拡大を防止するものでなければならない。			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第三十三条（保安電源設備）				
4	設計基準対象施設に接続する電線路のうち少なくとも二回線は、それぞれ互いに独立したものであって、当該設計基準対象施設において受電可能なものであり、かつ、それにより当該設計基準対象施設を電力系統に連系するものでなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
5	前項の電線路のうち少なくとも一回線は、設計基準対象施設において他の回線と物理的に分離して受電できるものでなければならない。			
6	設計基準対象施設に接続する電線路は、同一の工場等の二以上の発電用原子炉施設を電力系統に連系する場合には、いずれの二回線が喪失した場合においても電力系統からこれらの発電用原子炉施設への電力の供給が同時に停止しないものでなければならない。			
7	非常用電源設備及びその附属設備は、多重性又は多様性を確保し、及び独立性を確保し、その系統を構成する機械又は器具の単一故障が発生した場合であっても、運転時の異常な過渡変化時又は設計基準事故時において工学的安全施設及び設計基準事故に対処するための設備がその機能を確保するために十分な容量を有するものでなければならない。			
8	設計基準対象施設は、他の発電用原子炉施設に属する非常用電源設備及びその附属設備から受電する場合には、当該非常用電源設備から供給される電力に過度に依存しないものでなければならない。			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第三十四条（緊急時対策所）				
	工場等には、一次冷却系統に係る発電用原子炉施設の損壊その他の異常が発生した場合に適切な措置をとるため、緊急時対策所を原子炉制御室以外の場所に設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
	2 緊急時対策所及びその近傍並びに有毒ガスの発生源の近傍には、有毒ガスが発生した場合に適切な措置をとるため、工場等内における有毒ガスの発生を検出するための装置及び当該装置が有毒ガスの発生を検出した場合に緊急時対策所において自動的に警報するための装置その他の適切に防護するための設備を設けなければならない。	居住性確保（気密性、遮蔽性）への影響	○	
第三十五条（通信連絡設備）				
	工場等には、設計基準事故が発生した場合において工場等内の人に対し必要な指示ができるよう、警報装置（安全施設に属するものに限る。）及び多様性を確保した通信連絡設備（安全施設に属するものに限る。）を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
	2 工場等には、設計基準事故が発生した場合において発電用原子炉施設外の通信連絡をする必要がある場所と通信連絡ができるよう、多様性を確保した専用通信回線を設けなければならない。			
第三十六条（補助ボイラー）				
	発電用原子炉施設には、設計基準事故に至るまでの間に想定される使用条件に応じて必要な蒸気を供給する能力がある補助ボイラー（安全施設に属するものに限る。次項において同じ。）を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
	2 補助ボイラーは、発電用原子炉施設の安全性を損なわないものでなければならない。			

設置許可基準規則	【STEP1】対象条文の抽出		備考
	評価が必要となる内容	評価対象	
第三十七条（重大事故等の拡大の防止等）			
<p>発電用原子炉施設は、重大事故に至るおそれがある事故が発生した場合において、炉心の著しい損傷を防止するために必要な措置を講じたものでなければならない。</p> <p>2 発電用原子炉施設は、重大事故が発生した場合において、原子炉格納容器の破損及び工場等外への放射性物質の異常な水準の放出を防止するために必要な措置を講じたものでなければならない。</p> <p>3 発電用原子炉施設は、重大事故に至るおそれがある事故が発生した場合において、使用済燃料貯蔵槽内の燃料体又は使用済燃料（以下「貯蔵槽内燃料体等」という。）の著しい損傷を防止するために必要な措置を講じたものでなければならない。</p> <p>4 発電用原子炉施設は、重大事故に至るおそれがある事故が発生した場合において、運転停止中における発電用原子炉内の燃料体（以下「運転停止中原子炉内燃料体」という。）の著しい損傷を防止するために必要な措置を講じたものでなければならない。</p>	— (有効性評価に係る要求)	—	
第三十八条（重大事故等対処施設の地盤）			
<p>重大事故等対処施設は、次に掲げる施設の区分に応じ、それぞれ次に定める地盤に設けなければならない。</p> <p>一 重大事故防止設備のうち常設のもの（以下「常設重大事故防止設備」という。）であって、耐震重要施設に属する設計基準事故対処設備が有する機能を代替するもの（以下「常設耐震重要重大事故防止設備」という。）が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く。） 基準地震動による地震力が作用した場合においても当該重大事故等対処施設を十分に支持することができる地盤</p>	地盤の支持性能への影響	○	重大事故等対処施設に要求される共通条文であり、要求対象となる個別条文側での再掲は省略

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第三十八条（重大事故等対処施設の地盤）				
	二 常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く。） 第四条第二項の規定により算定する地震力が作用した場合においても当該重大事故等対処施設を十分に支持することができる地盤	地盤の支持性能への影響	○	重大事故等対処施設に要求される共通条文であり、要求対象となる個別条文側での再掲は省略
	三 重大事故緩和設備のうち常設のもの（以下「常設重大事故緩和設備」という。）が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く。） 基準地震動による地震力が作用した場合においても当該重大事故等対処施設を十分に支持することができる地盤			
	四 特定重大事故等対処施設 第四条第二項の規定により算定する地震力が作用した場合及び基準地震動による地震力が作用した場合においても当該特定重大事故等対処施設を十分に支持することができる地盤	申請対象外		
	2 重大事故等対処施設（前項第二号の重大事故等対処施設を除く。次項及び次条第二項において同じ。）は、変形した場合においても重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがない地盤に設けなければならない。	—	—	
	3 重大事故等対処施設は、変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない。	(地盤そのものに対する要求)		
第三十九条（地震による損傷の防止）				
	重大事故等対処施設は、次に掲げる施設の区分に応じ、それぞれ次に定める要件を満たすものでなければならない。	耐震性（建屋，土木構造物，機器・配管系）への影響	○	
	一 常設耐震重要重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く。） 基準地震動による地震力に対して重大事故に至るおそれがある事故に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないものであること。			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第三十九条（地震による損傷の防止）				
	二 常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く。） 第四条第二項の規定により算定する地震力に十分に耐えることができるものであること。	耐震性（建屋，土木構造物，機器・配管系）への影響	○	重大事故等対処施設に要求される共通条文であり，要求対象となる個別条文側での再掲は省略
	三 常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く。） 基準地震動による地震力に対して重大事故に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないものであること。			
	四 特定重大事故等対処施設 第四条第二項の規定により算定する地震力に十分に耐えることができ、かつ、基準地震動による地震力に対して重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないものであること。	申請対象外		
	2 重大事故等対処施設は、第四条第三項の地震の発生によって生ずるおそれがある斜面の崩壊に対して重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	— (周辺斜面に対する要求)	—	
第四十条（津波による損傷の防止）				
	重大事故等対処施設は、基準津波に対して重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	浸水防護（止水性）への影響	○	
第四十一条（火災による損傷の防止）				
	重大事故等対処施設は、火災により重大事故等に対処するために必要な機能を損なうおそれがないよう、火災の発生を防止することができ、かつ、火災感知設備及び消火設備を有するものでなければならない。	耐火性（遮熱性）への影響	○	
第四十二条（特定重大事故等対処施設）				
	申請対象外			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第四十三条（重大事故等対処設備）				
	重大事故等対処設備は、次に掲げるものでなければならない。	耐震性（建屋，土木構造物，機器・配管系），浸水防護（止水性），建屋の構造健全性（外殻としての機能，耐熱性，止水性，気密性），耐火性（遮熱性），止水性，遮蔽性，アクセス通路等の確保への影響	○	重大事故等対処設備に要求される共通条文であり，要求対象となる個別条文側での再掲は省略
	一 想定される重大事故等が発生した場合における温度、放射線、荷重その他の使用条件において、重大事故等に対処するために必要な機能を有効に発揮するものであること。			
	二 想定される重大事故等が発生した場合において確実に操作できるものであること。			
	三 健全性及び能力を確認するため、発電用原子炉の運転中又は停止中に試験又は検査ができるものであること。			
	四 本来の用途以外の用途として重大事故等に対処するために使用する設備にあつては、通常時に使用する系統から速やかに切り替えられる機能を備えるものであること。	－ （重大事故等対処設備の系統構成に係る要求）		
	五 工場等内の他の設備に対して悪影響を及ぼさないものであること。			
	六 想定される重大事故等が発生した場合において重大事故等対処設備の操作及び復旧作業を行うことができるよう、放射線量が高くなるおそれが少ない設置場所の選定、設置場所への遮蔽物の設置その他の適切な措置を講じたものであること。			
	2 重大事故等対処設備のうち常設のもの（重大事故等対処設備のうち可搬型のもの（以下「可搬型重大事故等対処設備」という。）と接続するものにあつては、当該可搬型重大事故等対処設備と接続するために必要な発電用原子炉施設内の常設の配管、弁、ケーブルその他の機器を含む。以下「常設重大事故等対処設備」という。）は、前項に定めるもののほか、次に掲げるものでなければならない。	耐震性（建屋，土木構造物，機器・配管系），浸水防護（止水性），建屋の構造健全性（外殻としての機能，耐熱性，止水性，気密性），耐火性（遮熱性），止水性，遮蔽性，アクセス通路等の確保への影響		
	一 想定される重大事故等の収束に必要な容量を有するものであること。			

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第四十三条（重大事故等対処設備）				
	二 二以上の発電用原子炉施設において共用するものでないこと。ただし、二以上の発電用原子炉施設と共用することによって当該二以上の発電用原子炉施設の安全性が向上する場合であって、同一の工場等内の他の発電用原子炉施設に対して悪影響を及ぼさない場合は、この限りでない。	— （重大事故等対処設備の系統構成に係る要求）	○	重大事故等対処設備に要求される共通条文であり、要求対象となる個別条文側での再掲は省略
	三 常設重大事故防止設備は、共通要因によって設計基準事故対処設備の安全機能と同時にその機能が損なわれるおそれがないよう、適切な措置を講じたものであること。	耐震性（建屋、土木構造物、機器・配管系）、浸水防護（止水性）、建屋の構造健全性（外殻としての機能、耐熱性、止水性、気密性）、耐火性（遮熱性）、止水性、遮蔽性、アクセス通路等の確保への影響		
	3 可搬型重大事故等対処設備に関しては、第一項に定めるもののほか、次に掲げるものでなければならない。			
	一 想定される重大事故等の収束に必要な容量に加え、十分に余裕のある容量を有するものであること。			
	二 常設設備（発電用原子炉施設と接続されている設備又は短時間に発電用原子炉施設と接続することができる常設の設備をいう。以下同じ。）と接続するものにあつては、当該常設設備と容易かつ確実に接続することができ、かつ、二以上の系統又は発電用原子炉施設が相互に使用することができるよう、接続部の規格の統一その他の適切な措置を講じたものであること。	— （重大事故等対処設備の系統構成に係る要求）		
	三 常設設備と接続するものにあつては、共通要因によって接続することができなくなることを防止するため、可搬型重大事故等対処設備（原子炉建屋の外から水又は電力を供給するものに限る。）の接続口をそれぞれ互いに異なる複数の場所に設けるものであること。	耐震性（建屋、土木構造物、機器・配管系）、浸水防護（止水性）、建屋の構造健全性（外殻としての機能、耐熱性、止水性、気密性）、耐火性（遮熱性）、止水性、遮蔽性、アクセス通路等の確保への影響		

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第四十三条（重大事故等対処設備）				
	<p>四 想定される重大事故等が発生した場合において可搬型重大事故等対処設備を設置場所に据え付け、及び常設設備と接続することができるよう、放射線量が高くなるおそれが少ない設置場所の選定、設置場所への遮蔽物の設置その他の適切な措置を講じたものであること。</p> <p>五 地震、津波その他の自然現象又は故意による大型航空機の衝突その他のテロリズムによる影響、設計基準事故対処設備及び重大事故等対処設備の配置その他の条件を考慮した上で常設重大事故等対処設備と異なる保管場所に保管すること。</p> <p>六 想定される重大事故等が発生した場合において可搬型重大事故等対処設備を運搬し、又は他の設備の被害状況を把握するため、工場等内の道路及び通路が確保できるよう、適切な措置を講じたものであること。</p> <p>七 重大事故防止設備のうち可搬型のものは、共通要因によって、設計基準事故対処設備の安全機能、使用済燃料貯蔵槽の冷却機能若しくは注水機能又は常設重大事故防止設備の重大事故に至るおそれがある事故に対処するために必要な機能と同時にその機能が損なわれるおそれがないよう、適切な措置を講じたものであること。</p>	耐震性（建屋、土木構造物、機器・配管系）、浸水防護（止水性）、建屋の構造健全性（外殻としての機能、耐熱性、止水性、気密性）、耐火性（遮熱性）、止水性、遮蔽性、アクセス通路等の確保への影響	○	重大事故等対処設備に要求される共通条文であり、要求対象となる個別条文側での再掲は省略
第四十四条（緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備）				
	<p>発電用原子炉施設には、運転時の異常な過渡変化時において発電用原子炉の運転を緊急に停止することができない事象が発生するおそれがある場合又は当該事象が発生した場合においても炉心の著しい損傷を防止するため、原子炉冷却材圧力バウンダリ及び原子炉格納容器の健全性を維持するとともに、発電用原子炉を未臨界に移行するために必要な設備を設けなければならない。</p>	— (個別設備の設置要求)	—	

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第四十五条（原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備）				
	発電用原子炉施設には、原子炉冷却材圧力バウンダリが高圧の状態であって、設計基準事故対処設備が有する発電用原子炉の冷却機能が喪失した場合においても炉心の著しい損傷を防止するため、発電用原子炉を冷却するために必要な設備を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
第四十六条（原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備）				
	発電用原子炉施設には、原子炉冷却材圧力バウンダリが高圧の状態であって、設計基準事故対処設備が有する発電用原子炉の減圧機能が喪失した場合においても炉心の著しい損傷及び原子炉格納容器の破損を防止するため、原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するために必要な設備を設けなければならない。	流路機能（気密性）への影響	○	ブローアウトパネルによる蒸気排出機能への影響
第四十七条（原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備）				
	発電用原子炉施設には、原子炉冷却材圧力バウンダリが低圧の状態であって、設計基準事故対処設備が有する発電用原子炉の冷却機能が喪失した場合においても炉心の著しい損傷及び原子炉格納容器の破損を防止するため、発電用原子炉を冷却するために必要な設備を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	関連する条文第 48 条（最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備）の記載は再掲しない
第四十八条（最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備）				
	発電用原子炉施設には、設計基準事故対処設備が有する最終ヒートシンクへ熱を輸送する機能が喪失した場合において炉心の著しい損傷及び原子炉格納容器の破損（炉心の著しい損傷が発生する前に生ずるものに限る。）を防止するため、最終ヒートシンクへ熱を輸送するために必要な設備を設けなければならない。	通水機能、貯水機能への影響	○	第四十七，四十九条，五十条，五十一条，五十四条，五十六条にも適用

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考	
		評価が必要となる内容	評価対象		
第四十九条（原子炉格納容器内の冷却等のための設備）					
	発電用原子炉施設には、設計基準事故対処設備が有する原子炉格納容器内の冷却機能が喪失した場合において炉心の著しい損傷を防止するため、原子炉格納容器内の圧力及び温度を低下させるために必要な設備を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	関連する条文第 48 条 (最終ヒートシンク へ熱を輸送するための 設備)の記載は再掲 しない	
	2 発電用原子炉施設には、炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉格納容器の破損を防止するため、原子炉格納容器内の圧力及び温度並びに放射性物質の濃度を低下させるために必要な設備を設けなければならない。				
第五十条（原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備）					
	発電用原子炉施設には、炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉格納容器の過圧による破損を防止するため、原子炉格納容器バウンダリを維持しながら原子炉格納容器内の圧力及び温度を低下させるために必要な設備を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—		
	2 発電用原子炉施設（原子炉格納容器の構造上、炉心の著しい損傷が発生した場合において短時間のうちに原子炉格納容器の過圧による破損が発生するおそれがあるものに限る。）には、前項の設備に加えて、原子炉格納容器内の圧力を大気中に逃がすために必要な設備を設けなければならない。				
	3 前項の設備は、共通要因によって第一項の設備の過圧破損防止機能（炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉格納容器の過圧による破損を防止するために必要な機能をいう。）と同時にその機能が損なわれるおそれがないよう、適切な措置を講じたものでなければならない。				

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第五十一条（原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備）				
	発電用原子炉施設には、炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉格納容器の破損を防止するため、溶融し、原子炉格納容器の下部に落下した炉心を冷却するために必要な設備を設けなければならない。	溶融炉心・コンクリート相互作用、流路機能への影響	○	関連する条文第 48 条（最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備）の記載は再掲しない
第五十二条（水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備）				
	発電用原子炉施設には、炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉格納容器内における水素による爆発（以下「水素爆発」という。）による破損を防止する必要がある場合には、水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するために必要な設備を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	
第五十三条（水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備）				
	発電用原子炉施設には、炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉建屋その他の原子炉格納容器から漏えいする気体状の放射性物質を格納するための施設（以下「原子炉建屋等」という。）の水素爆発による損傷を防止する必要がある場合には、水素爆発による当該原子炉建屋等の損傷を防止するために必要な設備を設けなければならない。	流路機能（気密性）への影響	○	

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第五十四条（使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備）				
発電用原子炉施設には、使用済燃料貯蔵槽の冷却機能又は注水機能が喪失し、又は使用済燃料貯蔵槽からの水の漏えいその他の要因により当該使用済燃料貯蔵槽の水位が低下した場合において貯蔵槽内燃料体等を冷却し、放射線を遮蔽し、及び臨界を防止するために必要な設備を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	—	関連する条文第 48 条 (最終ヒートシンク へ熱を輸送するた めの設備)の記載は再掲 しない
2 発電用原子炉施設には、使用済燃料貯蔵槽からの大量の水の漏えいその他の要因により当該使用済燃料貯蔵槽の水位が異常に低下した場合において貯蔵槽内燃料体等の著しい損傷の進行を緩和し、及び臨界を防止するために必要な設備を設けなければならない。				
第五十五条（工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備）				
発電用原子炉施設には、炉心の著しい損傷及び原子炉格納容器の破損又は貯蔵槽内燃料体等の著しい損傷に至った場合において工場等外への放射性物質の拡散を抑制するために必要な設備を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	—	—
第五十六条（重大事故等の収束に必要となる水の供給設備）				
設計基準事故の収束に必要な水源とは別に、重大事故等の収束に必要となる十分な量の水を有する水源を確保することに加えて、発電用原子炉施設には、設計基準事故対処設備及び重大事故等対処設備に対して重大事故等の収束に必要となる十分な量の水を供給するために必要な設備を設けなければならない。	— (個別設備の設置要求)	—	—	関連する条文第 48 条 (最終ヒートシンク へ熱を輸送するた めの設備)の記載は再掲 しない

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第五十七条（電源設備）				
	発電用原子炉施設には、設計基準事故対処設備の電源が喪失したことにより重大事故等が発生した場合において炉心の著しい損傷、原子炉格納容器の破損、貯蔵槽内燃料体等の著しい損傷及び運転停止中原子炉内燃料体の著しい損傷を防止するために必要な電力を確保するために必要な設備を設けなければならない。	-	-	
	2 発電用原子炉施設には、第三十三条第二項の規定により設置される非常用電源設備及び前項の規定により設置される電源設備のほか、設計基準事故対処設備の電源が喪失したことにより重大事故等が発生した場合において炉心の著しい損傷、原子炉格納容器の破損、貯蔵槽内燃料体等の著しい損傷及び運転停止中原子炉内燃料体の著しい損傷を防止するための常設の直流電源設備を設けなければならない。			
第五十八条（計装設備）				
	発電用原子炉施設には、重大事故等が発生し、計測機器（非常用のものを含む。）の故障により当該重大事故等に対処するために監視することが必要なパラメータを計測することが困難となった場合において当該パラメータを推定するために有効な情報を把握できる設備を設けなければならない。	- (個別設備の設置要求)	-	
第五十九条（運転員が原子炉制御室にとどまるための設備）				
	発電用原子炉施設には、炉心の著しい損傷が発生した場合（重大事故等対処設備（特定重大事故等対処施設を構成するものを除く。）が有する原子炉格納容器の破損を防止するための機能が損なわれた場合を除く。）においても運転員が第二十六条第一項の規定により設置される原子炉制御室にとどまるために必要な設備を設けなければならない。	居住性確保（気密性、遮蔽性）への影響	○	

設置許可基準規則		【STEP1】対象条文の抽出		備考
		評価が必要となる内容	評価対象	
第六十条（監視測定設備）				
	発電用原子炉施設には、重大事故等が発生した場合に工場等及びその周辺（工場等の周辺海域を含む。）において発電用原子炉施設から放出される放射性物質の濃度及び放射線量を監視し、及び測定し、並びにその結果を記録することができる設備を設けなければならない。	— （個別設備の設置要求）	—	
	2 発電用原子炉施設には、重大事故等が発生した場合に工場等において風向、風速その他の気象条件を測定し、及びその結果を記録することができる設備を設けなければならない。			
第六十一条（緊急時対策所）				
	第三十四条の規定により設置される緊急時対策所は、重大事故等が発生した場合においても当該重大事故等に対処するための適切な措置が講じられるよう、次に掲げるものでなければならない。	居住性確保（気密性、遮蔽性）への影響	○	
	一 重大事故等に対処するために必要な指示を行う要員がとどまることができるよう、適切な措置を講じたものであること。			
	二 重大事故等に対処するために必要な指示ができるよう、重大事故等に対処するために必要な情報を把握できる設備を設けたものであること。			
	三 発電用原子炉施設の内外の通信連絡をする必要のある場所と通信連絡を行うために必要な設備を設けたものであること。			
第六十二条（通信連絡を行うために必要な設備）				
	発電用原子炉施設には、重大事故等が発生した場合において当該発電用原子炉施設の内外の通信連絡をする必要のある場所と通信連絡を行うために必要な設備を設けなければならない。	— （個別設備の設置要求）	—	

別紙 24 鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響を踏まえた要求機能に対する各条文の機能維持の方針の整理

No.	設置許可基準 規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の 乾燥収縮及び地震影響による 影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた 検討結果	影響 有無	影響因子を踏まえた 評価方針	設計 反映 有無
1	第三条	地盤 設計 基準 対象 施設 の	地盤の支持性能	乾燥収縮によるひび割れの影響により、建屋の振動特性が変化し、地震時に建屋から基礎地盤へ伝達される荷重が変わる可能性がある。	原子炉建屋基礎地盤	建屋の初期剛性	・地盤の安定性評価に、建屋の初期剛性低下を考慮する必要がある。	有	・初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルに基づき地盤安定解析用 FEM モデルを作成し、地盤の安定性を確認する。	有 (EP)
2	第四条	地震による 損傷の 防止	耐震性 (建屋)	建屋の振動特性が変化している。 (初期剛性の低下)	原子炉建屋等	建屋の初期剛性	・建屋の耐震設計に、初期剛性低下を考慮する必要がある。	有	・初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルに基づき耐震設計を行う。また、不確かさケースとしてさらに初期剛性が低下したケースによる評価も実施する。	有
3			気密性 (建屋) [地震起因]	地震時のひび割れの影響により、気密性が保てなくなり、放射性物質や有毒ガスが建屋内に流入する可能性がある。	原子炉建屋等	建屋の初期剛性 地震時のひび割れ幅	・地震時の気密性については、面内変形に対しては、耐震壁のせん断ひずみがおおむね弾性状態にとどまることを基本とし、おおむね弾性状態を超える場合は、地震応答解析による耐震壁のせん断ひずみから算定した空気漏えい量が設置する換気設備の性能を下回ることで必要な気密性を維持する設計とし、面外変形に対しては、地震時に生じる応力に対して鉄筋が降伏しないことを確認(鉄筋が降伏する場合は別途詳細検討)することで、気密性を維持する設計としているため、耐震壁のせん断ひずみ等の評価に建屋の初期剛性低下の影響を考慮する必要がある。	有	・地震時のひび割れについては、実験により乾燥収縮が地震時のひび割れ発生に大きな影響を与えないことを確認している。 ・初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いた地震応答解析によって、耐震壁のせん断ひずみ等を評価する。 ・空気漏洩量の算定においては、「原子炉建屋の弾塑性試験に関する報告書「耐震安全解析コード改良試験 原子炉建屋の弾塑性試験試験結果の評価に関する報告書 平成 5 年度」(財団法人 原子力発電技術機構)にて提案されている評価式について、乾燥収縮ひび割れのある建屋における気密性能検査から十分な保守性を確認した上で適用する。	有

No.	設置許可基準 規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の 乾燥収縮及び地震影響による 影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※		
	条文	項目					影響因子を踏まえた 検討結果	影響 有無	影響因子を踏まえた 評価方針	設計 反映 有無	
4	第四条	地震による 損傷の 防止	止水性 (建屋) [地震起因]	地震時のひび割れの影響により、使用済燃料プール等で発生したスロッシングによる溢水が想定していない経路を通じ他の区画に流入し、安全上特に重要な系統・設備が機能喪失する若しくは放射性物質を含む液体が管理区域外へ漏えいする可能性がある。	原子炉建屋内壁	地震時のひび割れ幅 建屋の初期剛性	・地震時の止水性については、せん断ひずみ度から残留ひび割れ幅を算定し、0.2mm 未満であることを確認することにより止水性を維持する方針であるため、せん断ひずみの算定において、建屋の初期剛性低下の影響を考慮する必要がある。	有	・地震時のひび割れについては、実験により乾燥収縮が地震時のひび割れ発生に大きな影響を与えないことを確認している。 ・初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いた地震応答解析によって、耐震壁のせん断ひずみを評価し、せん断ひずみ度から残留ひび割れ幅を算定し、0.2mm 未満であることを確認することにより止水性を維持する。	有	
5				屋外タンク等の地震時の破損による溢水影響評価において、地震時のひび割れの影響により、屋外の溢水が建屋内等に流入し、安全上特に重要な系統・設備が機能喪失する可能性がある。	原子炉建屋、 制御建屋外壁						
6				止水性 (土木構造物) [地震起因]	屋外タンク等の地震時の破損による溢水影響評価において、地震時のひび割れの影響により、屋外の溢水が建屋内等に流入し、安全上特に重要な系統・設備が機能喪失する可能性がある。	屋外重要土木 構造物	地震時のひび割れ幅	・地震によりコンクリートに生じたひび割れからの漏水について評価する必要がある。	有	・地震後に受ける荷重(水圧)として最も大きい津波時の評価[No.22 第五条 津波による損傷の防止 浸水防護(土木構造物の止水性)に同じ]で代表する。	有
7				遮蔽性 (建屋) [地震起因]	地震時のひび割れの影響により、遮蔽機能が低下する可能性がある。	原子炉建屋等	地震時の遮蔽体(壁)の 形状、厚さ 建屋の初期剛性	・地震動に対して構造強度を確保し、遮蔽体の形状及び厚さを確保することで、地震後における残留ひずみを小さくし、ひび割れがほぼ閉鎖し、貫通するひび割れが直線的に残留しないこととすることで、遮蔽性を維持する設計としていることから、地震時の耐震壁のせん断ひずみの算定において、建屋の初期剛性低下の影響を考慮する必要がある。	有	・初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いた地震応答解析によって、耐震壁のせん断ひずみを評価する。	有

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
8	第四条	地震による損傷の防止	安全避難通路の確保 (建屋) [地震起因]	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、安全避難通路を確保できなくなる可能性がある。	原子炉建屋等	コンクリート片の剥落等 建屋の初期剛性	・地震時に対象建屋が倒壊等によって波及的影響を与えないことを確認する際に、初期剛性低下を考慮する必要がある。	有	・初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いた地震応答解析によって、倒壊等しないことを評価する。	有
9			耐震性 (機器・配管系)	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、建物・構築物(土木構築物含む)の振動特性が変化し、地震時に建屋から機器・配管系へ伝達される荷重が変わる可能性がある。	建屋・土木構築物に設置されている機器・配管系の各設備	初期剛性	・初期剛性低下によって、建屋の振動特性が変化することが確認されたため、機器・配管系の耐震設計には、建屋の初期剛性低下を考慮する必要がある。 ・土木構築物は、地中構築物のため、応答は周囲の地盤の振動が支配的となることから、初期剛性の影響は小さい。	有	・初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルによる地震応答解析結果を用いて、各設備の耐震設計を行う。また、建屋一大型機器連成解析モデルにも建屋初期剛性低下を考慮し、耐震設計を行う。 ・土木構築物については、設計剛性を用いた地震応答解析モデルを基本とするが、念のため、初期剛性低下の影響を確認する。	有
10			乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、設備の振動特性が変化する可能性がある。	各設備のアンカー部	初期剛性	・建屋躯体と十分深い位置で定着させるため、振動特性への影響はない。	無	—	—	
11			機器の基礎台	初期剛性	・剛性が十分に大きくなるように設計しており、コンクリートにひび割れが生じた場合でも十分剛構造であることから、既工認と同様の設計で問題ない。	無	—	—		
12			乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、設備の発生応力が変化する可能性がある。	円筒形容器の基礎ボルト	コンクリートのヤング係数	・鋼材とコンクリートのヤング係数比に影響するが、基礎ボルトの引張応力が大きく算出されるようにヤング係数比を設定しているため、影響は小さい。	有	・ヤング係数比は、既工認と同様に、基礎ボルトの引張応力が大きく算出されるように設定する。	無	
13			乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、コンクリートのコーン状破壊に対する許容荷重が低下し、設備のアンカー部の支持性能が低下する可能性がある。	各設備のアンカー部	コンクリートのコーン状破壊に対する許容荷重	・コンクリートのコーン状破壊に対する許容荷重については、既往実験によりひび割れの影響が小さいことが確認されているが、適切な低減係数を考慮する必要がある。	有	・建屋及び屋外重要土木構築物に設置される設備の支持機能(アンカー部)は、既工認と同様にJEAG4601及び各種合成構造設計指針・同解説に基づき、低減係数を考慮した設計を実施する。	無	
14			乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、設備の耐力が低下する可能性がある。	機器の基礎台	コンクリートの設計基準強度	・ひび割れによってコンクリートの設計基準強度は低下しないことから、影響はない。	無	—	—	

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※			
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無		
15	第四条	地震による損傷の防止	耐震性 (土木構造物)	乾燥収縮によるひび割れによる初期剛性の低下により、地盤との動的相互作用が変化し、土圧等の評価が変わる可能性がある。	屋外重要土木構造物等 (RC 部材全般)	初期剛性	・土木構造物は、地中構造物のため応答は周囲の地盤の振動が支配的となるため、初期剛性の影響は小さい。	有	・土木構造物に作用する主たる荷重である土圧は、剛性が小さいほど小さく評価されることから、作用外力としては乾燥収縮と地震の重量による剛性低下を見込まないほうが安全側の評価となる。以上から初期剛性を低下させず地震応答解析を行う。	無		
16				乾燥収縮によるひび割れの影響により、終局状態に対する耐震性評価が変わる可能性がある。		終局耐力					・実験の結果、乾燥収縮ひび割れによる設計基準強度への影響は無いことから、終局耐力に影響はない。	無
17			通水機能 (土木構造物)	地震によるひび割れの影響により、取水路等からの溢水が発生し、十分な通水機能を確保できなくなる。	屋外重要土木構造物 (取水口～海水ポンプ室)	[No.15,16 第四条 地震による損傷の防止 耐震性(土木構造物)と同じ] ※一つの部材が終局状態に至った場合でも、直ちに通水断面が閉塞に繋がる事象には至らないが、保守的に、終局状態に至らないことを目標性能とすることから、耐震性(土木構造物)と同じ						
18			貯水機能 (土木構造物)	地震によるひび割れの影響により、取水路等からの溢水が発生し、十分な貯水量を確保できなくなる。	屋外重要土木構造物 (取水口～海水ポンプ室)	ひび割れ幅	・地震によりコンクリートに生じたひび割れからの津波時の漏水について評価する必要がある。	有	・貯水機能が要求される施設の周辺は盛土等の地盤であることから、概ね弾性範囲の設計とすることにより貯水性能への保守性を確保する。	有		
19			耐震性 (防潮壁)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、構造物の振動特性が変化し、部材の発生断面力等が変わる可能性がある。	防潮壁 (RC 遮水壁)	初期剛性	・地中に設置する杭と一体となった構造であり、応答は周囲の地盤の振動が支配的となるため、初期剛性の影響は小さい。	有	・設計剛性(設計基準強度)を用いた地震応答解析モデルを基本とするが、念のため、初期剛性低下の影響を考慮した地震応答解析を行い、部材の発生断面力等を確認する。	有		
20			耐震性 (防潮壁)			終局耐力	・実験の結果、設計基準強度への影響は無いことから、終局耐力に影響はない。	無	—	—		
21			耐震性 (防潮堤)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、構造物の振動特性が変化し、部材の発生断面力等が変わる可能性がある。	防潮堤 (置換コンクリート、鋼管杭等)	初期剛性	・防潮堤全体の応答は周囲の地盤の振動が支配的となるため、置換コンクリート等の初期剛性の影響は防潮堤を構成する部位に与える影響は小さい。	有	・設計剛性(設計基準強度)を用いた地震応答解析モデルを基本とするが、念のため、初期剛性低下の影響を考慮した地震応答解析を行い、置換コンクリートや鋼管杭等の発生断面力等に与える影響を確認する。	有		

No.	設置許可基準 規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の 乾燥収縮及び地震影響による 影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた 検討結果	影響 有無	影響因子を踏まえた 評価方針	設計 反映 有無
22	第五 条	津波による 損傷の防 止	浸水防護 (土木構造物の 止水性)	乾燥収縮によるひび割れ及び地 震によるひび割れの影響により、 津波時にコンクリートに生じたひ び割れから漏水し、止水性に影 響を及ぼす可能性がある。	海水ポンプ室 (スクリーンエ リアー補機ポ ンプエリア間 の隔壁等)	ひび割れ 幅	【通常時】 ・乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理を 実施することから、止水性に影響は無い。	無	—	—
			【地震時】 ・地震によりコンクリートに生じたひび割れから の津波時の漏水について評価する必要がある。	有	・耐震実験より乾燥収縮が地震時のひび割れ に影響を与えないことから、面内変形につい ては、地震応答解析から得られる変形により評 価する。 ・面外変形については、地震応答解析結果に 対し、顕著なひび割れの発生有無や解析等 により応答ひずみから想定されるひび割れ幅 に応じた漏水評価を行うか、許容値に対し裕 度を持たせる設計とする。	有				
			浸水防護 (津波防護施設 の止水性)	乾燥収縮によるひび割れ及び地 震によるひび割れの影響により、 津波時にコンクリートに生じたひ び割れから漏水し、止水性に影 響を及ぼす可能性がある。	防潮壁 (RC 遮水壁)	ひび割れ 幅	【通常時】 [No.22 第五条 津波による損傷の防止 浸水 防護(土木構造物の止水性)に同じ] 【地震時】 [No.22 第五条 津波による損傷の防止 浸水防護(土木構造物の止水性)に同じ]	無	—	—
24			乾燥収縮によるひび割れ及び地 震によるひび割れの影響により、 津波時にコンクリートに生じたひ び割れから漏水し、止水性に影 響を及ぼす可能性がある。	防潮堤 (置換コンク リート等)	ひび割れ 幅	【通常時】 [No.22 第五条 津波による損傷の防止 浸水 防護(土木構造物の止水性)に同じ] 【地震時】 ・地震によりコンクリートに生じたひび割れから の津波時の漏水について評価する必要がある。	無	—	—	
			【地震時】 ・地震に伴うひび割れの影響は軽微であること を地震応答解析による要素破壊判定により確 認する。 ・なお、置換コンクリート等を保守的に盛土相当 の透水係数とした場合の浸透流解析により津 波時の止水機能に影響が無いことを確認して いる(EP)。	有	有					
25	第六 条	損傷の防 止 外部から の衝 撃による	風(台風)に対 する建屋の構 造健全性(外殻 としての機能)	風(台風)の荷重の影響について は、竜巻の風荷重による評価に 崩落されるため、[No.26 第六 条 外部からの衝撃による損傷の防 止(竜巻)]に記載。	—	—	—	—	—	—

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
26	第六条	外部からの衝撃による損傷の防止	竜巻に対する建屋の構造健全性(外殻としての機能)	乾燥収縮ひび割れの影響によるコンクリートの圧縮強度低下によって、竜巻の荷重に対する建屋等の構造健全性(外殻としての機能等)が低下する可能性がある。	原子炉建屋 制御建屋 タービン建屋 軽油タンク室	コンクリートの構造体としての健全性、圧縮強度	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥収縮は、建屋等の剛性として力学的性質に影響を与えるが、乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質であり、実機からのコア抜きによりコンクリートの圧縮強度が設計基準強度を上回っていること、また、耐震実験により乾燥収縮が終局耐力に影響を与えないことを確認しており構造体として問題はない。 竜巻飛来物に対する躯体の裏面剥離評価としては、Chang の式により、飛来物の全運動エネルギーと板の変形による吸収エネルギーのつり合いからコンクリートの設計基準強度を用いて、裏面剥離限界厚さを評価しており、上記のことから外殻としての機能の評価への影響はない。 	無	—	—
						コンクリートの構造体の変形	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋等の全体の変形に対して、乾燥収縮等の影響を考慮した評価が必要である。 	有	<ul style="list-style-type: none"> 竜巻による各荷重に対する原子炉建屋等の全体の変形評価においては、初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデルの荷重-変形関係を用い、乾燥収縮等の影響を考慮した評価を実施する。 	有
27			竜巻随伴事象(火災)に対する建屋の構造健全性(外殻としての機能)	竜巻の随伴事象である火災については、建屋外の火災が考えられるが、[No.39 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止 (外部火災)]の影響評価と同様である。	—	—	—	—	—	—
28			竜巻随伴事象(溢水)に対する建屋の構造健全性(外殻としての機能)	竜巻の随伴事象である溢水については、建屋外の溢水が考えられるが、[No.45 第九条 溢水による損傷の防止等 止水性]の影響評価と同様である。	—	—	—	—	—	—

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※		
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無	
29	第六条	外部からの衝撃による損傷の防止	竜巻随伴事象（外部電源喪失）に対する建屋の構造健全性(外殻としての機能)	外部電源喪失はコンクリートの圧縮強度低下による建屋等の構造健全性(外殻としての機能等)に影響しない。	—	—	—	—	—	—	
30			凍結に対する建屋の構造健全性(外殻としての機能)	乾燥収縮によるひび割れ部の内部で凍結が発生することで、ひびが進展し、建屋等の構造健全性(外殻としての機能等)が低下する可能性がある。	原子炉建屋 制御建屋 タービン建屋 軽油タンク室	コンクリートの構造体のひび割れ幅	<ul style="list-style-type: none"> 建屋屋根スラブはアスファルト防水等により機能を確保しており、また、外壁部については、防食塗装を施工している。アスファルト防水等及び外壁塗装は乾燥収縮によるひび割れに追従する構造であるため、水の侵入による凍結の影響はない。 その他の設備は乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから影響はない。 	無	—	—	
31			流体の凍結による配管等の閉塞は鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮に影響しない。	—	—	—	—	—	—	—	—
32			降水に対する建屋の構造健全性(止水性)	乾燥収縮によるひび割れを通じ、降水により建屋内等への漏水が発生し、安全機能が喪失する可能性がある。	原子炉建屋 制御建屋 タービン建屋 軽油タンク室	コンクリートの構造体のひび割れ幅	<ul style="list-style-type: none"> 建屋屋根スラブはアスファルト防水等により機能を確保しており、また、外壁部については、防食塗装を施工している。アスファルト防水等及び外壁塗装は乾燥収縮によるひび割れに追従する構造であるため、浸水の影響はない。 その他の設備は乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから影響はない。 	無	—	—	—
33			積雪に対する建屋の構造健全性(外殻としての機能)	乾燥収縮ひび割れの影響によるコンクリートの圧縮強度低下によって、積雪の荷重に対する建屋等の構造健全性(外殻としての機能等)が低下する可能性がある。	原子炉建屋 制御建屋 タービン建屋 軽油タンク室	コンクリートの構造体としての健全性、圧縮強度	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥収縮は、建屋等の剛性として力学的性質に影響を与えるが、乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質であり、実機からのコア抜きによりコンクリートの圧縮強度が設計基準強度を上回っていること、また、耐震実験により乾燥収縮が終局耐力に影響を与えないことを確認しており構造体として問題はなく外殻としての機能の評価への影響はない。 	無	—	—	—

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
34	第六条	外部からの衝撃による損傷の防止	落雷に対する建屋の構造健全性(外殻としての機能)	落雷による雷撃電流に対して、避雷設備を設ける等の対策をしている。また、電気的影響は鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響に影響しない。	-	-	-	-	-	-
35			火山(降下火砕物の荷重)に対する建屋の構造健全性(外殻としての機能)	コンクリートの圧縮強度低下により、降下火砕物の荷重に対して、建屋当の構造健全性(外殻としての機能等)が低下する可能性がある。	原子炉建屋制御建屋タービン建屋軽油タンク室	コンクリートの構造体としての健全性、圧縮強度	・乾燥収縮は、建屋等の剛性として力学的性質に影響を与えるが、乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質であり、実機からのコア抜きによりコンクリートの圧縮強度が設計基準強度を上回っていること、また、耐震実験により乾燥収縮が終局耐力に影響を与えないことを確認しており構造体として問題はなく外殻としての機能の評価への影響はない。	無	-	-
36			火山(降下火砕物による腐食)に対する建屋の構造健全性(外殻としての機能)	乾燥収縮によるひび割れ部に降下火砕物が侵入した場合にコンクリートの腐食が助長される可能性によって、建屋等の構造健全性(外殻としての機能等)が低下する可能性がある。	原子炉建屋制御建屋タービン建屋軽油タンク室	コンクリートの構造体のひび割れ幅	・建屋屋根スラブはアスファルト防水等により機能を確保しており、また、外壁部については、防食塗装を施工している。アスファルト防水等及び外壁塗装は乾燥収縮及び地震によるひび割れに追従する構造であるため影響はない。 ・その他の設備は乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから影響はない。	無	-	-
37			火山(降下火砕物による閉塞・摩耗、絶縁低下、大気汚染等)に対する建屋の構造健全性(外殻としての機能)	降下火砕物による閉塞・摩耗、絶縁低下、大気汚染及び間接的影響としての外部電源喪失、アクセス制限は鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響に影響しない。	-	-	-	-	-	-
38			生物学的事象に対する建屋の構造健全性(外殻としての機能)	生物学的事象による閉塞や電気的影響は鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響に影響しない。	-	-	-	-	-	-

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
39	第六条	外部からの衝撃による損傷の防止	外部火災（森林火災及び近隣工場等の火災）に対する建屋の構造健全性（耐熱性）	乾燥収縮によるひび割れの影響により、コンクリート温度伝導率に影響が及ぶ場合は、原子炉施設の外壁等の輻射熱に対する耐熱性を示す危険輻射強度が低下する可能性がある。	原子炉建屋外壁等	コンクリート温度伝導率（密度、熱伝導率、比熱）	<ul style="list-style-type: none"> 建屋の外壁の耐熱性は壁厚、コンクリート温度伝導率（密度、熱伝導率、比熱）に左右され、外壁の温度がコンクリートの健全性が確保される 200℃（加熱温度と圧縮強度の関係を実験で確認した文献より設定）に到達する外部火災の輻射強度を危険輻射強度として、外部火災により外部事象防護対象施設の安全性を損なわない制限値としている。 乾燥収縮ひび割れがコンクリート温度伝導率（密度、熱伝導率、比熱）に影響を与え、危険輻射強度が変動する可能性がある。 	有	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥収縮ひび割れがコンクリート温度伝導率（密度、熱伝導率、比熱）に与える影響を保守的に考慮して、外部火災に対する建屋外壁の危険輻射強度を算定した結果、最も評価が厳しい漂流船舶の火災影響評価においても、その影響は現状の評価結果である 1086.9W/m² に対して 1.1W/m² の変動であり僅かであることから、評価結果に影響を与えないことを確認した。 	無
40			有毒ガスに対する建屋の構造健全性（気密性）	乾燥収縮によるひび割れの影響により、気密性が保てなくなり、有毒ガスが建屋内に流入する可能性がある。	原子炉建屋制御建屋	コンクリートの構造体のひび割れ幅	<ul style="list-style-type: none"> 通常時の気密性については、乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから影響はない。 	無	—	—
41	第七条	止 発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止	侵入等の防止	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、必要なコンクリート厚さが維持できなくなる可能性がある。	原子炉建屋外壁等、土木構造物、津波防護施設等	鉄筋コンクリートの躯体厚さ	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート厚さが要求事項となるが、実際の建屋外壁は要求の閾値に対して、十分な余裕を確保した厚さを有しており、ひび割れによる影響はない。 	無	—	—
42	第八条	火災による損傷の防止	耐火性（遮熱性）	内部火災の耐火性の評価としては、150mm 以上のコンクリート壁が 3 時間耐火性能をもつことを文献で確認している。乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、3 時間耐火性能が確保できなくなる可能性がある。	3 時間耐火壁（原子炉建屋内壁、制御建屋内壁、海水ポンプ室隔壁等）	鉄筋コンクリートの躯体厚さ、遮熱特性係数	<ul style="list-style-type: none"> 壁厚やコンクリートの種類に応じた遮熱特性係数により耐火性能時間を算定しており、乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質で、躯体厚さや遮熱特性係数へ影響を及ぼすものではないことから、内部火災の耐火性に影響を与えるものではない。 	無	—	—

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
43	第九条	溢水による損傷の防止等	止水性	常用海水系の想定破損による溢水影響評価において、乾燥収縮によるひび割れからの漏水が発生し、安全上特に重要な系統・設備が機能喪失する可能性がある。	海水ポンプ室（循環水ポンプエリアー補機ポンプエリア間の隔壁）	コンクリートの構造体のひび割れ幅	・乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理を実施することから、止水性に影響はない。	無	—	—
44			想定破損による溢水影響評価において、乾燥収縮によるひび割れの影響により、溢水が想定していない経路を通じ他の区画に流入し、安全上特に重要な系統・設備が機能喪失する可能性がある。	原子炉建屋内壁 制御建屋内壁 屋外重要土木構造物	コンクリートの構造体のひび割れ幅	・乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理を実施することから、乾燥収縮によるひび割れの影響により、溢水が想定していない経路を通じ他の区画に流入することはなく、安全上特に重要な系統・設備がその機能を喪失することはない。	無	—	—	
45			屋外タンク等の地震時の破損による溢水影響評価において、乾燥収縮によるひび割れの影響により、屋外の溢水が建屋内等に流入し、安全上特に重要な系統・設備が機能喪失する可能性がある。	原子炉建屋外壁 制御建屋外壁 屋外重要土木構造物	コンクリートの構造体のひび割れ幅	・屋外タンク等の破損による溢水の影響を受ける外壁部については、防食塗装を施工している。外壁の塗装は乾燥収縮によるひび割れに追従する構造であるため影響はない。 ・その他の設備は乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから影響はない。 ・地震時のひび割れに対しては、[No.4 第四条 地震による損傷の防止 止水性(建屋) [地震起因]]に同じ。	無	—	—	
46	第十条	止 誤操作の防	操作性	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、運転員が容易に設備を運転できなくなる可能性がある。	制御建屋等	[No.2～21 第四条 地震による損傷の防止]に同じ [No.22～24 第五条 津波による損傷の防止]に同じ [No.25～40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止]に同じ [No.42 第八条 火災による損傷の防止]に同じ [No.43～45 第九条 溢水による損傷の防止等]に同じ				
47	第十一条	路等 安全避難通	安全避難通路の確保	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、安全避難通路を確保できなくなる可能性がある。	原子炉建屋等	[No.2～21 第四条 地震による損傷の防止]に同じ [No.22～24 第五条 津波による損傷の防止]に同じ [No.25～40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止]に同じ [No.42 第八条 火災による損傷の防止]に同じ [No.43～45 第九条 溢水による損傷の防止等]に同じ				

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
48	第十二条	安全施設	安全機能の確保	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、安全機能を確保できなくなる可能性がある。	原子炉建屋等	[No.2～21 第四条 地震による損傷の防止]に同じ [No.22～24 第五条 津波による損傷の防止]に同じ [No.25～40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止]に同じ [No.42 第八条 火災による損傷の防止]に同じ [No.43～45 第九条 溢水による損傷の防止等]に同じ				
49	第十三条	運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止	遮蔽性	乾燥収縮によるひび割れの影響により、遮蔽機能が低下する可能性がある。	原子炉建屋等	通常時の遮蔽体(壁)の形状, 厚さ, 密度	<ul style="list-style-type: none"> ・通常時は、乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理を実施することから、安全上特に重要な系統・設備がその機能を喪失することはない。 ・乾燥収縮ひび割れは躯体の形状, 厚さに影響を及ぼさないため、遮蔽機能への影響はない。 ・遮蔽計算に用いるコンクリートの密度は、建設時に乾燥単位容積質量で管理を実施していることから乾燥収縮の影響はない。 ・地震時のひび割れに対しては、[No.7 第四条 地震による損傷の防止 遮蔽性(建屋) [地震起因]]に同じ。 	無	—	—
50	第十六条	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	想定外の重量物落下が生じないこと	乾燥収縮によるひび割れの影響で、屋根スラブ等の強度が低下し、コンクリート片が使用済燃料プールへ落下する可能性がある。	原子炉建屋屋根	コンクリート片の剥落等	・屋根スラブは、鋼板(デッキプレート)の上に鉄筋コンクリート造の屋根を設けた構造であり、地震により剥落しない設計であることから影響はない。	無	—	—
51					原子炉建屋壁(地上3階床面より上部を構成する壁)	コンクリート片の剥落等	・地上3階床面より上部を構成する壁については、鉄筋コンクリート造の耐震壁であり、地上3階床面より下部の耐震壁とあわせて地震により落下しないことを確認するが、建屋の初期剛性低下の影響を考慮する必要がある。	有	・地震応答解析においては、初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから、乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。	有
52					原子炉建屋	建屋の初期剛性	・天井クレーンの間接支持構造物としての原子炉建屋の耐震設計に、初期剛性低下を考慮する必要がある。	有	・地震応答解析においては、初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから、乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。	有
53						遮蔽性	乾燥収縮によるひび割れの影響により、遮蔽機能が低下する可能性がある。	使用済燃料プール内面壁, 底部壁	通常時の遮蔽体(壁)の形状, 厚さ	[No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止 遮蔽性]に同じ

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
54	第二十二條	備 最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設	通水機能 (土木構造物)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、取水路等からの溢水が発生し、十分な通水機能を確保できなくなる。	屋外重要土木構造物 (取水口～海水ポンプ室)	通常時のひび割れ幅	<ul style="list-style-type: none"> ・通常時は、乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理を実施することから、通水機能への影響はない。 ・地震時のひび割れに対しては、[No.17 第四條 地震による損傷の防止 通水機能(土木構造物)]に同じ。 	無	—	—
55			貯水機能 (土木構造物)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、取水路等からの溢水が発生し、十分な貯水量を確保できなくなる。	屋外重要土木構造物 (取水口～海水ポンプ室)	通常時のひび割れ幅	<ul style="list-style-type: none"> ・通常時は、乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理を実施することから、貯水機能への影響はない。 ・地震時のひび割れに対しては、[No.18 第四條 地震による損傷の防止 貯水機能(土木構造物)]に同じ。 	無	—	—
56	第二十六條	原子炉制御室等	居住性確保 (気密性)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、気密性が保てなくなり、放射性物質や有毒ガスが原子炉制御室に流入する可能性がある。	原子炉制御室	[No.3 第四條 地震による損傷の防止 気密性(建屋)[地震起因]]に同じ [No.40 第六條 外部からの衝撃による損傷の防止 有毒ガス(気密性)]に同じ				
57			居住性確保 (遮蔽性)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、遮蔽機能が低下し、原子炉制御室にいる運転員の被爆量が増加する可能性がある。	原子炉制御室	[No.49 第十三條 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止 遮蔽性]に同じ				
58	第二十七條	施設 放射線廃棄物の処理	止水性	乾燥収縮によるひび割れの影響により、液体状の放射性廃棄物が漏えいする可能性がある。	原子炉建屋等	[No.43 第九條 溢水による損傷の防止等 止水性]に同じ				

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
59	第二十九条	工場等周辺における直接ガンマ線等からの防護	遮蔽性	乾燥収縮によるひび割れの影響により、遮蔽機能が低下し、発電所周辺の空間線量率が上昇する可能性がある。	原子炉建屋等	[No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止 遮蔽性]	同じ	[No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止 遮蔽性]に同じ		
60			地震時のひび割れの影響により、遮蔽機能が低下し、発電所周辺の空間線量率が上昇する可能性がある。	原子炉建屋等	[No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止 遮蔽性]	同じ	[No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止 遮蔽性]に同じ			
61	第三十条	放射線からの放射線業務従事者の防護	遮蔽性	乾燥収縮によるひび割れの影響により、遮蔽機能が低下し、放射線業務従事者の作業性等に影響を与える可能性がある。	原子炉建屋等	[No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止 遮蔽性]	同じ	[No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止 遮蔽性]に同じ		
62			気密性	乾燥収縮によるひび割れの影響により、気密性が保てなくなり、放射線業務従事者の作業性等に影響を与える可能性がある。	原子炉建屋等	[No.3 第四条 地震による損傷の防止 気密性(建屋)[地震起因]]に同じ [No.40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止 有毒ガス(気密性)]に同じ	同じ	[No.3 第四条 地震による損傷の防止 気密性(建屋)[地震起因]]に同じ [No.40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止 有毒ガス(気密性)]に同じ		
63			止水性	乾燥収縮によるひび割れの影響により、止水性が保てなくなり、放射線業務従事者の作業性等に影響を与える可能性がある。	原子炉建屋等	[No.32 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止 降水(止水性)]に同じ [No.43 第九条 溢水による損傷の防止等 止水性]に同じ	同じ	[No.32 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止 降水(止水性)]に同じ [No.43 第九条 溢水による損傷の防止等 止水性]に同じ		
64	第三十二条	設 原子炉格納施	気密性	乾燥収縮によるひび割れの影響により、気密性が保てなくなり、非常用ガス処理系の放射性物質の濃度低減機能が維持できなくなる可能性がある。	原子炉建屋等	[No.3 第四条 地震による損傷の防止 気密性(建屋)[地震起因]]に同じ [No.40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止 有毒ガス(気密性)]に同じ	同じ	[No.3 第四条 地震による損傷の防止 気密性(建屋)[地震起因]]に同じ [No.40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止 有毒ガス(気密性)]に同じ		

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
65	第三十四条	緊急時対策所	居住性確保(気密性)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、気密性が保てなくなり、放射性物質や有毒ガスが緊急時対策所に流入する可能性がある。	緊急時対策所	[No.3 第四条 地震による損傷の防止 気密性(建屋)[地震起因]]に同じ [No.40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止 有毒ガス(気密性)]に同じ				
66			居住性確保(遮蔽性)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、遮蔽機能が低下し、緊急時対策所にいる対応要員の被爆量が増加する可能性がある。	緊急時対策所	[No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止 遮蔽性]に同じ				
67	第三十八条	地盤 重大事故等対処施設の	地盤の支持性能	乾燥収縮によるひび割れの影響により、建屋の振動特性が変化し、地震時に建屋から基礎地盤へ伝達される荷重が変わる可能性がある。	緊急時対策建屋基礎地盤 [新設建屋]	建屋の初期剛性	・地震の影響を受けていないこと、建屋の設計は基準地震動Ssに対しておおむね弾性範囲にとどめる設計とすることから、設計剛性を用いた地震応答解析モデルに基づき、FEM モデルを作成し地盤の安定性を確保する。	無	— ※初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルにより基礎地盤へ伝達される荷重が変わらないことを確認している。(EP)	—
68	第三十九条	地震による損傷の防止	耐震性(建屋)	建屋の振動特性が変化する可能性がある。 (初期剛性の低下)	緊急時対策建屋等 [新設建屋]	建屋の初期剛性	・地震の影響を受けていないこと、基準地震動Ssに対しておおむね弾性範囲に留める設計を目指していることから初期剛性低下の影響は無い。	無	—	—
69					原子炉建屋等 [既設建屋]	[No.2 第四条 地震による損傷の防止 耐震性(建屋)]に同じ				
70			アクセス通路等の確保 [地震起因]	地震時のひび割れの影響により、コンクリート片等が落下することにより、可搬型重大事故等対処設備を運搬し、又は他の設備の被害状況を把握するための道路及び通路が確保できなくなる可能性がある。	原子炉建屋等	コンクリート片の剥落等 建屋の初期剛性	・地震時に対象建屋が倒壊などによって波及的影響を与えないことを確認する際に、初期剛性低下を考慮する必要がある。	有	・初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いた地震応答解析によって、倒壊などしないことを評価する。	有

No.	設置許可基準 規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の 乾燥収縮及び地震影響による 影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた 検討結果	影響 有無	影響因子を踏まえた 評価方針	設計 反映 有無
71	第三十九条	地震による損傷の防止	耐震性(機器・配管系)	建屋の振動特性が変化し、地震時に建屋から機器・配管系へ伝達される荷重が変わる可能性がある。	建屋内に設置されている機器・配管系の各設備(緊急時対策建屋等)[新設建屋]	建屋の初期剛性	・新施設は、地震の影響を受けていないことから、新施設に設置される機器・配管系の設備への影響は無い。	無	—	—
72				建屋内に設置されている機器・配管系の各設備(原子炉建屋等)[既設建屋]	[No.9 第四条 地震による損傷の防止 耐震性(機器・配管系)]に同じ					
73			乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、設備の振動特性が変化する可能性がある。	各設備のアンカ [■] 部(緊急時対策建屋等)[新設建屋]	初期剛性	・新施設は、乾燥収縮及び地震の影響を受けていないことから、新施設に設置される機器・配管系の設備への影響は無い。	無	—	—	
74			各設備のアンカ [■] 部(原子炉建屋等)[既設建屋]	[No.10 第四条 地震による損傷の防止 耐震性(機器・配管系)]に同じ						
75			機器の基礎台(緊急時対策建屋等)[新設建屋]	初期剛性	・新施設は、乾燥収縮及び地震の影響を受けていないことから、新施設に設置される機器・配管系の設備への影響は無い。	無	—	—		
76			機器の基礎台(原子炉建屋等)[既設建屋]	[No.11 第四条 地震による損傷の防止 耐震性(機器・配管系)]に同じ						

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
77	第三十九条	地震による損傷の防止	耐震性(機器・配管系)	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、設備の発生応力が変化する可能性がある。	円筒形容器の基礎ボルト(緊急時対策建屋等) [新設建屋]	コンクリートのヤング係数	・新施設は、乾燥収縮及び地震の影響を受けていないことから、新施設に設置される機器・配管系の設備への影響は無い。	無	—	—
78				乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、設備の発生応力が変化する可能性がある。	円筒形容器の基礎ボルト(原子炉建屋等) [既設建屋]	[No.12 第四条 地震による損傷の防止 耐震性(機器・配管系)]に同じ				
79				乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、コンクリートのコーン状破壊に対する許容荷重が低下し、設備のアンカー部の支持性能が低下する可能性がある。	各設備のアンカー部(緊急時対策建屋等) [新設建屋]	コンクリートのコーン状破壊に対する許容荷重	・新施設は、乾燥収縮及び地震の影響を受けていないことから、新施設に設置される機器・配管系の設備への影響は無い。	無	—	—
80				各設備のアンカー部(原子炉建屋等) [既設建屋]	[No.13 第四条 地震による損傷の防止 耐震性(機器・配管系)]に同じ					
81				乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、設備の耐力が低下する可能性がある。	機器の基礎台(緊急時対策建屋等) [新設建屋]	コンクリートの設計基準強度	・新施設は、乾燥収縮及び地震の影響を受けていないことから、新施設に設置される機器・配管系の設備への影響は無い。	無	—	—
82				機器の基礎台(原子炉建屋等) [既設建屋]	[No.14 第四条 地震による損傷の防止 耐震性(機器・配管系)]に同じ					

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※			
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無		
83	第三十九条	地震による損傷の防止	耐震性 (土木構造物)	乾燥収縮によるひび割れによる初期剛性の低下により、土木構造物の剛性低下により、地盤との動的相互作用が変化し、土圧等の評価が変わる可能性がある。	土木構造物 (屋外重要土木構造物等のRC部材全般)	[No.15,16 第四条 地震による損傷の防止 耐震性(土木構造物)]と同じ						
84				乾燥収縮によるひび割れの影響により、終局状態に対する耐震性評価が変わる可能性がある。								
85			通水機能 (土木構造物)	地震によるひび割れの影響により、取水路等からの溢水が発生し、十分な通水機能を確保できなくなる。	屋外重要土木構造物 (取水口～海水ポンプ室)	[No.17 第四条 地震による損傷の防止 通水機能(土木構造物)]と同じ						
86			貯水機能 (土木構造物)	地震によるひび割れの影響により、取水路等からの溢水が発生し、十分な貯水量を確保できなくなる。	屋外重要土木構造物 (取水口～海水ポンプ室)	[No.18 第四条 地震による損傷の防止 貯水機能(土木構造物)]と同じ						
87			耐震性 (防潮壁)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、構造物の振動特性が変化し、部材の発生断面力等が変わる可能性がある。	防潮壁 (RC遮水壁)	[No.19,20 第四条 地震による損傷の防止 耐震性(防潮壁)]と同じ						
88												
89			耐震性 (防潮堤)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、構造物の振動特性が変化し、部材の発生断面力等が変わる可能性がある。	防潮堤 (置換コンクリート、鋼管杭等)	[No.21 第四条 地震による損傷の防止 耐震性(防潮堤)]と同じ						

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
90	第四十条	津波による損傷の防止	浸水防護 (土木構造物の止水性)	乾燥収縮によるひび割れ及び地震によるひび割れの影響により、津波時にコンクリートに生じたひび割れから漏水し、止水性に影響を及ぼす可能性がある。	海水ポンプ室 (スクリーンエリア補機ポンプエリア間の隔壁等)	[No.22 第五条 津波による損傷の防止 浸水防護(土木構造物の止水性)]に同じ				
91			浸水防護 (津波防護施設の止水性)	乾燥収縮によるひび割れ及び地震によるひび割れの影響により、津波時にコンクリートに生じたひび割れから漏水し、止水性に影響を及ぼす可能性がある。	防潮壁 (RC 遮水壁)	[No.23 第五条 津波による損傷の防止 浸水防護(津波防護施設の止水性)]に同じ				
92			浸水防護 (津波防護施設の止水性)	乾燥収縮によるひび割れ及び地震によるひび割れの影響により、津波時にコンクリートに生じたひび割れから漏水し、止水性に影響を及ぼす可能性がある。	防潮堤 (置換コンクリート等)	[No.24 第五条 津波による損傷の防止 浸水防護(津波防護施設の止水性)]に同じ				
93	第四十一条	火災による損傷の防止	耐火性 (遮熱性)	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、3 時間耐火性能が確保できなくなる可能性がある。	3 時間耐火壁 (原子炉建屋内壁, 制御建屋内壁, 海水ポンプ室隔壁等)	[No.42 第八条 火災による損傷の防止 耐火性(遮熱性)]に同じ				
94	第四十三条	重大事故等対処設備	環境条件	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、重大事故等対処設備の環境条件(温度, 湿度, 圧力, 放射線)を維持できず、重大事故等対処設備の機能を損なう可能性がある。	原子炉建屋等	[No.2~21 第四条 地震による損傷の防止]に同じ [No.22~24 第五条 津波による損傷の防止]に同じ [No.25~40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止]に同じ [No.42 第八条 火災による損傷の防止]に同じ [No.43~45 第九条 溢水による損傷の防止等]に同じ [No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止]に同じ				
95			操作性	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、重大事故等対処設備の確実な操作ができなくなる可能性がある。	原子炉建屋等	[No.2~21 第四条 地震による損傷の防止]に同じ [No.22~24 第五条 津波による損傷の防止]に同じ [No.25~40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止]に同じ [No.42 第八条 火災による損傷の防止]に同じ [No.43~45 第九条 溢水による損傷の防止等]に同じ [No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止]に同じ				

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
96	第四十三条	重大事故等対処設備	試験・検査性	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響による重大事故等対処設備の試験又は検査性への影響はない。	—	—	—	—	—	—
97			切替性	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響による重大事故等対処設備の切替性への影響はない。	—	—	—	—	—	—
98			悪影響防止	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響による重大事故等対処設備の他の設備に対する悪影響防止への影響はない。	—	—	—	—	—	—
99			設置場所	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、放射線量が高くなることで、重大事故等対処設備の操作及び想定される重大事故等の復旧作業への影響を生じる可能性がある。	原子炉建屋等	[No.2～21 第四条 地震による損傷の防止]に同じ [No.22～24 第五条 津波による損傷の防止]に同じ [No.25～40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止]に同じ [No.42 第八条 火災による損傷の防止]に同じ [No.43～45 第九条 溢水による損傷の防止等]に同じ [No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止]に同じ				
100			常設重大事故等対処設備の容量	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、重大事故等対処設備の必要な容量を確保できなくなる可能性がある。	原子炉建屋等	[No.2～21 第四条 地震による損傷の防止]に同じ [No.22～24 第五条 津波による損傷の防止]に同じ [No.25～40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止]に同じ [No.42 第八条 火災による損傷の防止]に同じ [No.43～45 第九条 溢水による損傷の防止等]に同じ [No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止]に同じ				
101			共用の禁止	女川2号機は単号機申請であるため、乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響による影響はない。	—	—	—	—	—	—
102	常設重大事故防止設備の共通要因故障防止	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、共通要因により常設重大事故防止設備が、設計基準事故対処設備等と同時に機能を損なう可能性がある。	原子炉建屋等	[No.2～21 第四条 地震による損傷の防止]に同じ [No.22～24 第五条 津波による損傷の防止]に同じ [No.25～40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止]に同じ [No.42 第八条 火災による損傷の防止]に同じ [No.43～45 第九条 溢水による損傷の防止等]に同じ [No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止]に同じ						

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
103	第四十三条	重大事故等対処設備	可搬型重大事故等対処設備の容量	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、重大事故等対処設備の必要な容量を確保できなくなる可能性がある。	原子炉建屋等	[No.2～21 第四条 地震による損傷の防止]に同じ [No.22～24 第五条 津波による損傷の防止]に同じ [No.25～40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止]に同じ [No.42 第八条 火災による損傷の防止]に同じ [No.43～45 第九条 溢水による損傷の防止等]に同じ [No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止]に同じ				
104			可搬型重大事故等対処設備の常設設備との接続性	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響による可搬型重大事故等対処設備が常設設備との接続性に対する影響はない。	—	—	—	—	—	—
105			異なる複数の接続箇所確保	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、可搬型重大事故等対処設備の常設設備との接続箇所が、共通要因により接続できなくなる可能性がある。	原子炉建屋等	[No.2～21 第四条 地震による損傷の防止]に同じ [No.22～24 第五条 津波による損傷の防止]に同じ [No.25～40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止]に同じ [No.42 第八条 火災による損傷の防止]に同じ [No.43～45 第九条 溢水による損傷の防止等]に同じ [No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止]に同じ				
106			可搬型重大事故等対処設備の設置場所	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、放射線量が高くなることで、可搬型重大事故等対処設備の設置場所への据え付け、常設設備との接続への影響が生じる可能性がある。	原子炉建屋等	[No.2～21 第四条 地震による損傷の防止]に同じ [No.22～24 第五条 津波による損傷の防止]に同じ [No.25～40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止]に同じ [No.42 第八条 火災による損傷の防止]に同じ [No.43～45 第九条 溢水による損傷の防止等]に同じ [No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止]に同じ				
107			可搬型重大事故等対処設備の保管場所	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、設計基準事故対処設備及び常設重大事故等対処設備との異なる保管場所を確保できなくなる可能性がある。	原子炉建屋等	[No.2～21 第四条 地震による損傷の防止]に同じ [No.22～24 第五条 津波による損傷の防止]に同じ [No.25～40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止]に同じ [No.42 第八条 火災による損傷の防止]に同じ [No.43～45 第九条 溢水による損傷の防止等]に同じ [No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止]に同じ				
108			アクセス通路等の確保	乾燥収縮によるひび割れの影響によりコンクリート片等が落下することにより、可搬型重大事故等対処設備を運搬し、又は他の設備の被害状況を把握するための道路及び通路が確保できなくなる可能性がある。	原子炉建屋等	コンクリート片の剥落等 ・通常時は、乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理を実施することから、コンクリート片等が落下することはない。 ・地震時については、[No.70 第三十九条 地震による損傷の防止 アクセス通路等の確保 [地震起因]]に同じ。		無	—	—

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
109	第四十三条	重大事故等対処設備	可搬型重大事故防止設備の共通要因故障防止	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、共通要因により可搬型重大事故防止設備が、設計基準事故対処設備等及び常設重大事故防止設備と同時に機能を損なう可能性がある。	原子炉建屋等	[No.2～21 第四条 地震による損傷の防止]に同じ [No.22～24 第五条 津波による損傷の防止]に同じ [No.25～40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止]に同じ [No.42 第八条 火災による損傷の防止]に同じ [No.43～45 第九条 溢水による損傷の防止等]に同じ [No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止]に同じ				
110	第四十六条	原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備	流路機能(気密性)	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、流路としての機能が保てなくなり、ブローアウトパネルによる蒸気排出機能が維持できなくなる可能性がある。	原子炉建屋原子炉棟	[No.3 第四条 地震による損傷の防止 気密性(建屋)[地震起因]]に同じ [No.40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止 有毒ガス(気密性)]に同じ				
111	第四十八条	最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設備	通水機能	乾燥収縮によるひび割れの影響により、取水路等からの溢水が発生し、十分な通水機能を確保できなくなる。	屋外重要土木構造物(取水口～海水ポンプ室)	[No.54 第二十二条 最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設備 通水機能(土木構造物)]に同じ				
112			貯水機能	乾燥収縮によるひび割れの影響により、取水路等からの溢水が発生し、十分な貯水量を確保できなくなる。	屋外重要土木構造物(取水口～海水ポンプ室)	[No.55 第二十二条 最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設備 貯水機能(土木構造物)]に同じ				

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
113	第五十一条	原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備	溶融炉心・コンクリート相互作用(MCCI)の抑制	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響がMCCIの抑制及び溶融炉心による原子炉格納容器バウンダリへの接触の防止を阻害する可能性がある。	原子炉格納容器下部 (ベDESTAL)	コンクリート侵食量	<ul style="list-style-type: none"> 格納容器下部の床面及び壁面は鋼板で覆われていることから、コンクリートの乾燥収縮の影響はない。 また、仮に乾燥収縮ひび割れを想定した場合であっても、女川2号機原子炉建屋のひび割れ調査による平均ひび割れ幅は最大でも約 0.07mm であり、ひび割れに入り込む溶融炉心の量は少量であるため、即座に除熱、固化することから影響はない。 なお、コンクリート侵食量評価の解析条件において最も支配的なのは溶融炉心からプール水への熱流束であり、コンクリートの変化による感度は小さい。乾燥収縮及び地震によるひび割れはコンクリートの成分に影響を与えるものではないため、コンクリート侵食量評価に影響はない。 	無	-	-
114			流路機能(止水性)	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、流路としての機能が保てなくなり、格納容器スプレイによる原子炉格納容器下部への注水機能を阻害する可能性がある。	原子炉格納容器 (ドライウエル床)	[No.43～45 第九条 溢水による損傷の防止等 止水性]に同じ				
115	第五十三条	水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備	流路機能(気密性)	乾燥収縮及び地震によるひび割れの影響により、流路としての機能が保てなくなり、静的触媒式水素再結合装置による原子炉建屋原子炉棟内の水素濃度上昇の抑制機能を阻害する可能性がある。	原子炉建屋原子炉棟	[No.3 第四条 地震による損傷の防止 気密性(建屋)[地震起因]]に同じ [No.40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止 有毒ガス(気密性)]に同じ				

No.	設置許可基準規則		要求機能	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響による影響の可能性	該当部	影響因子	【STEP2】事象としての影響検討		【STEP3】設計への反映※	
	条文	項目					影響因子を踏まえた検討結果	影響有無	影響因子を踏まえた評価方針	設計反映有無
116	第五十九条	運転員が原子炉制御室にとじまるための設備	居住性確保(気密性)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、気密性が保てなくなり、放射性物質や有毒ガスが原子炉制御室に流入する可能性がある。	原子炉制御室	[No.3 第四条 地震による損傷の防止 気密性(建屋)[地震起因]]に同じ [No.40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止 有毒ガス(気密性)]に同じ				
117			居住性確保(遮蔽性)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、遮蔽機能が低下し、原子炉制御室にいる運転員の被爆量が増加する可能性がある。	原子炉制御室	[No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止 遮蔽性]に同じ				
118	第六十一条	緊急時対策所	居住性確保(気密性)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、気密性が保てなくなり、放射性物質や有毒ガスが緊急時対策所に流入する可能性がある。	緊急時対策所	[No.3 第四条 地震による損傷の防止 気密性(建屋)[地震起因]]に同じ [No.40 第六条 外部からの衝撃による損傷の防止 有毒ガス(気密性)]に同じ				
119			居住性確保(遮蔽性)	乾燥収縮によるひび割れの影響により、遮蔽機能が低下し、緊急時対策所にいる対応要員の被爆量が増加する可能性がある。	緊急時対策所	[No.49 第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止 遮蔽性]に同じ				

別紙 25 耐震実験に関する補足説明資料

目 次

1. 初期剛性低下の要因とその影響に関する耐震実験についての比較..... 別紙 25-1
2. JEAG の既往耐震実験結果との比較 別紙 25-4
3. 耐震実験 [1], [2], [3] と実機及び JEAG の既往耐震実験の
パラメータ比較について 別紙 25-6
4. 耐震壁のせん断応力度－せん断ひずみ関係における履歴特性の
適用性について 別紙 25-8

1. 初期剛性低下の要因とその影響に関する耐震実験についての比較

表 1-1 に耐震実験 [1] (別紙 12), [3] (別紙 15), [2] (別紙 18) の目的, 実験概要, 実験結果等について比較して示す。

表 1-1(1) 初期剛性低下の要因とその影響に関する耐震実験についての比較 (1/2)

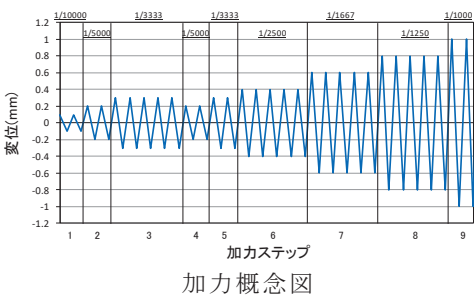
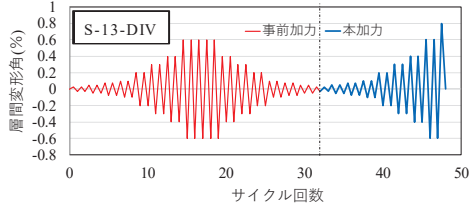
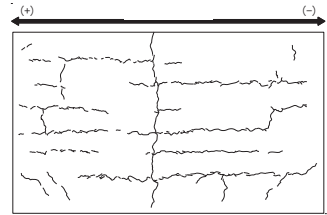
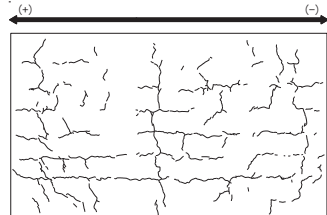
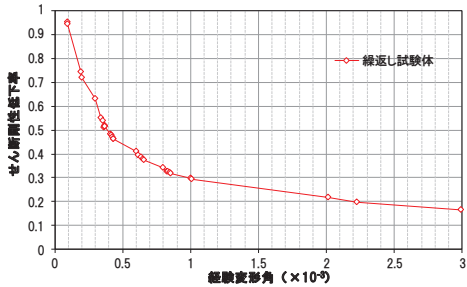
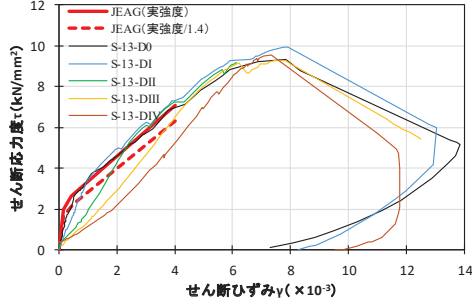
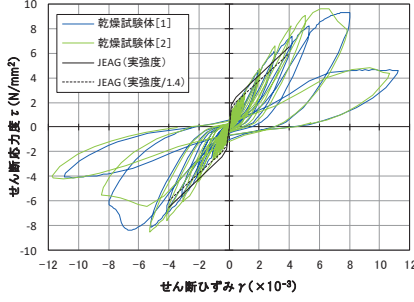
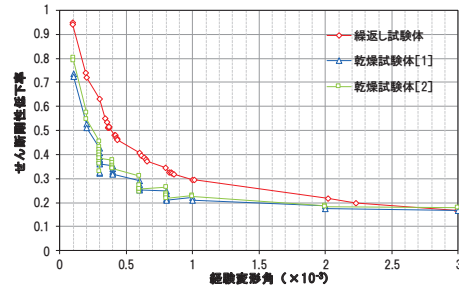
	耐震実験 [1]	耐震実験 [2]	耐震実験 [3]
目的	比較的大きな地震動を繰返し経験することで耐震壁の剛性が低下していく傾向が認められるかを確認	耐震壁の損傷程度の違いが耐震壁の初期の剛性や終局耐力に及ぼす影響について確認	乾燥収縮が、耐震壁の初期の剛性や終局耐力に及ぼす影響について確認
実験概要	<ul style="list-style-type: none"> ▶耐震壁に対する静的繰返し加力を行う耐震実験 ▶鉄筋比 1.4% ▶微小変形レベルでの繰返し加力時の剛性の低下傾向を確認するために、同一変位に対する繰返し加力のサイクル数は、最大 5 サイクル ▶経験した変形角よりも小さい変形角（インナーループ）での剛性低下挙動も検討するため、インナーループとなる繰返し加力を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ▶損傷度合いをパラメータとした静的加力による耐震実験 ▶加力パターンは、“事前加力”で損傷度合いに違いを与え、“本加力”によって、終局耐力まで加力 ▶損傷度合いは、無損傷、損傷度 I（層間変形角 0.75×10^{-3}）～IV（層間変形角 6.0×10^{-3}）の計 5 試験体 ▶鉄筋比 1.32% 	<ul style="list-style-type: none"> ▶試験体の大きさ・形状や配筋などは耐震実験 [1] と同じ ▶加力方法も耐震実験 [1] と同じで、繰返し加力、また、インナーループとなる繰返し加力を実施 ▶約 3 ヶ月間気中養生により壁部分を乾燥実験時のコンクリートの乾燥収縮率は約 800μ  <p>加力前の乾燥試験体 [1] 乾燥収縮ひび割れ状況</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶乾燥期間のパラメータスタディとして、約 8 ヶ月間気中養生により壁部分を乾燥 ▶実験時のコンクリートの乾燥収縮率は約 1000μ  <p>加力前の乾燥試験体 [2] 乾燥収縮ひび割れ状況</p>

表 1-1(2) 初期剛性低下の要因とその影響に関する耐震実験についての比較 (2/2)

	耐震実験 [1]	耐震実験 [2]	耐震実験 [3]
実験毎の成果	<p>▶ J E A G 式に対し、初期剛性、評価基準値付近、終局耐力付近すべてにおいて上回る結果となり、繰返し加力による有意な剛性低下は認められなかった</p> <p>▶ インナーループによる繰返し加力や主要変形角での 5 回の繰返し加力から、事前損傷が評価基準値付近の耐力や終局耐力に与える影響は小さいことを確認した</p> 	<p>▶ 損傷度 I ~ IV 全てのケースで終局耐力は、無損傷の試験体と同等であり、地震による事前損傷が、J E A G 式の終局耐力に与える影響は小さいことを確認した</p> <p>▶ 損傷度 I, II では、J E A G 式の評価基準値付近での耐力低下は認められなかった</p> <p>▶ 補足検討として実施した鉄筋比 0.66% とした場合でも、その傾向は変わらなかった</p> 	<p>▶ 乾燥試験体の初期剛性は J E A G 式より低下するものの、評価基準値付近や終局耐力では J E A G 式を上回ることを確認した。また、乾燥試験体 [1] [2] で、初期の剛性を含めて、荷重-変形関係は同等であった</p> <p>▶ インナーループによる繰返し加力や主要変形角での 5 回の繰返し加力から、乾燥させた試験体でも事前損傷が評価基準値付近の耐力や終局耐力に与える影響は小さいことを確認した</p> 
各実験の比較	<p>▶ 耐震実験 [1] と耐震実験 [3] との条件の違いは、乾燥収縮の有無であるが、剛性低下の傾向に違いが生じ、耐震実験 [3] の方が初期の剛性低下量が多い。なお、主要地震 (2005 年宮城県沖の地震や 3.11 地震) 時の原子炉建屋の建設当初から剛性低下量との整合性は耐震実験 [3] の方が良い</p> <p>▶ このことから、設計よりもさらに初期剛性が低下した要因として、地震の影響に加え、乾燥収縮の影響が重畳したことを示す結果となっている</p> <p>▶ また、インナーループでの繰返し加力や主要変形角での 5 回の繰返し加力の結果から、乾燥していない試験体 (耐震実験 [1]) と乾燥した試験体 (耐震実験 [3]) の事前損傷の影響による剛性低下の傾向はほとんど変わらないことを確認した</p>		
耐震実験結果まとめ	<p>▶ 繰返し加力による有意な剛性低下は認められなかった</p> <p>▶ 原子炉建屋の建設当初からの剛性低下量は、耐震実験 [3] の結果が、整合性が良い</p> <p>▶ 地震による事前損傷や乾燥収縮の影響が、原子力施設建屋の基準地震動 S_s に対する評価基準値 (せん断ひずみ: 2.0×10^{-3}) 付近の耐力や終局耐力に与える影響は小さい。</p>		

2. JEAG の既往耐震実験結果との比較

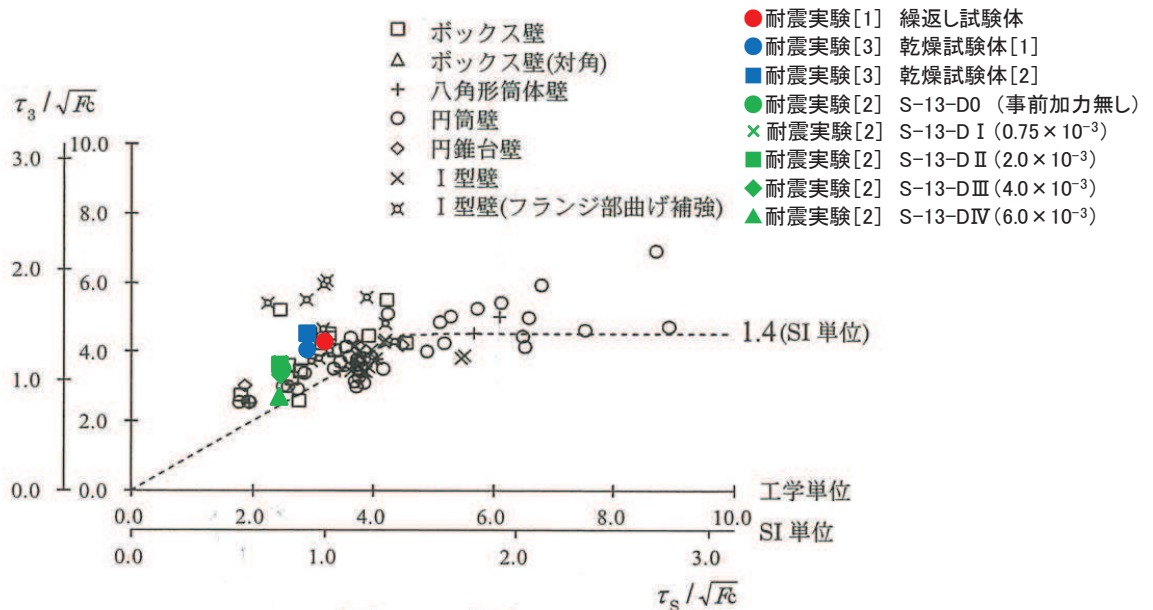
JEAG4601-1991（追補版）によると、「原子炉施設の耐震設計に用いる復元力特性評価法の設定に際しては、原子炉建屋の鉄筋コンクリート造耐震壁を対象とした既往の実験データの収集・整理、既往の算定式、各種基・規準の調査を行い、実験データに適合する復元力特性の評価法を検討するとともに、設定された復元力特性の耐震解析への実用性の検討も行っている」とされている。

ここでは、JEAG 式の基となった既往の耐震実験結果と、耐震実験 [1], [2], [3] の結果の比較を行い、その整合性について確認する。

図 2-1 に、JEAC4601-2015 に示される「 $\tau_s/\sqrt{F_c}$ と $\tau_3/\sqrt{F_c}$ （実験）との関係」の図*に、耐震実験 [1], [2], [3] の結果をプロットした図を示す。耐震実験 [1], [2], [3] の結果は既往耐震実験結果と良く対応している。

図 2-2 に、既往耐震実験結果のうち I 型壁を対象とした実験と計算値の比較結果（せん断応力度－せん断ひずみ関係）、耐震実験 [1], [2], [3] それぞれの結果と計算値（JEAG 式に基づく計算結果）の比較結果（せん断応力度－せん断ひずみ関係）について並べて示す。耐震実験 [3] は乾燥収縮の影響により初期剛性が低下しているが、評価基準値 (2.0×10^{-3}) 付近及び終局点 (4.0×10^{-3}) では、いずれの結果でも計算値を実験結果が上回る結果となっている。

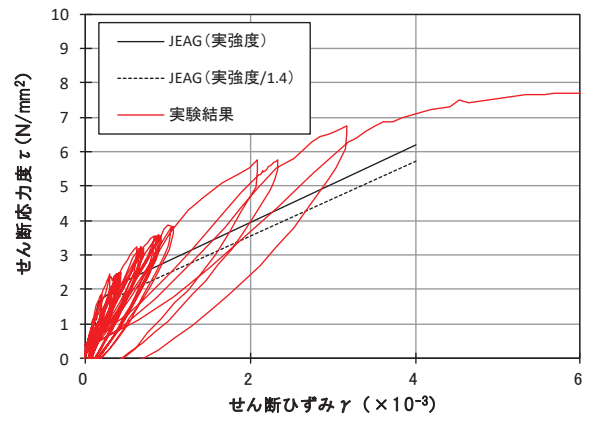
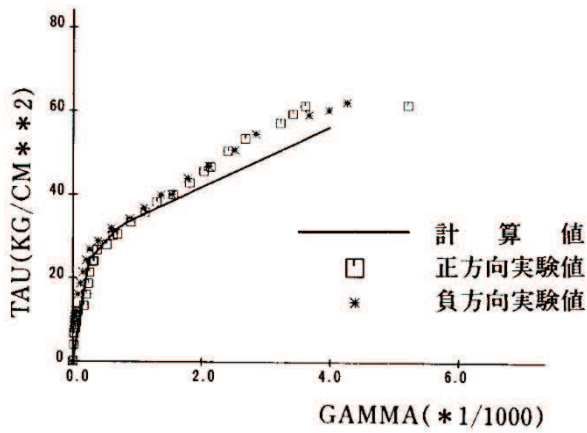
注記*：JEAG4601-1991（追補版）と JEAC4601-2015 には、同じ既往耐震実験結果を基に「 $\tau_s/\sqrt{F_c}$ と $\tau_3/\sqrt{F_c}$ （実験）との関係」の図が示されているが、JEAC4601-2015 の図では、SI 単位系でも作図されていること、円筒壁と I 型壁の区別がされていることを踏まえて JEAC4601-2015 の図を引用している。



附解図 3.7-2 $\tau_s/\sqrt{F_c}$ と $\tau_3/\sqrt{F_c}$ （実験）との関係

注： JEAC4601-2015 附解図 3.7-2 に加筆

図 2-1 既往耐震実験結果と耐震実験 [1], [2], [3] の結果の比較

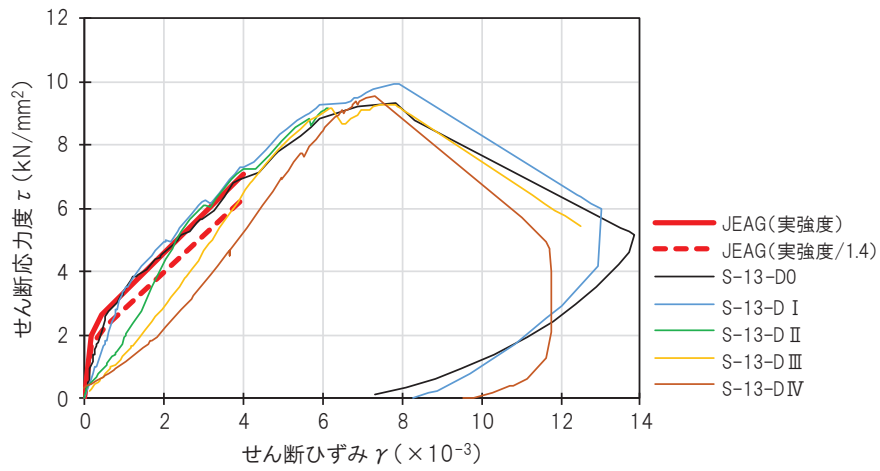


b) I型壁

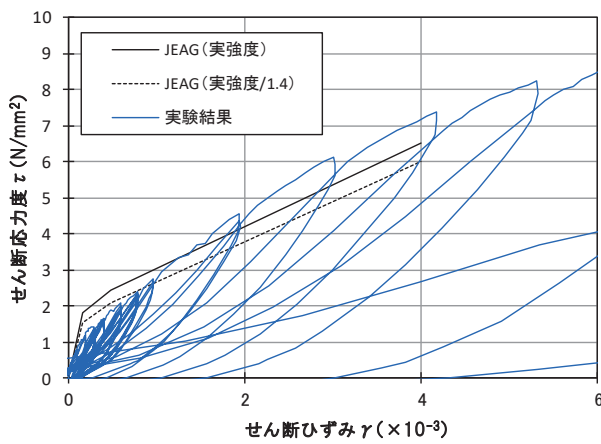
既往実験結果

耐震実験 [1]

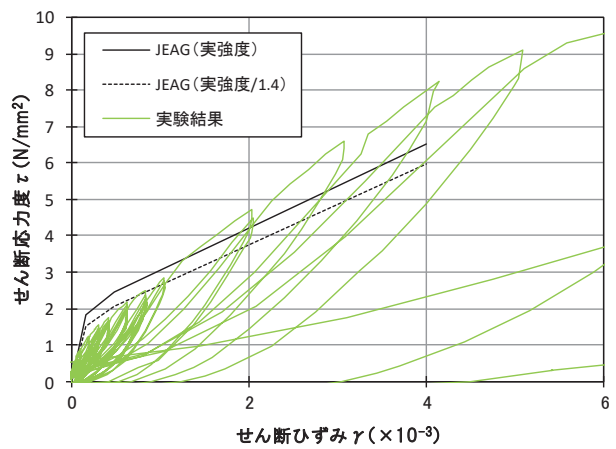
注：参考文献（1）図-1を引用。凡例の「計算値」はJEAG式を示す。



耐震実験 [2]



耐震実験 [3] 乾燥試験体 [1]



耐震実験 [3] 乾燥試験体 [2]

図 2-2 実験と計算値の比較

3. 耐震実験 [1], [2], [3] と実機及び JEAG の既往耐震実験のパラメータ比較について
耐震実験 [1], [2], [3] では、表 3-1 に示すコンクリート強度及び鉄筋比の試験体により実施しているが、ここでは、実機と比較することにより、耐震実験の実機への適用性を確認する。また、JEAG 式の基となった既往の耐震実験の試験体とも同様に確認を行う。表 3-2 に実機各建屋のコンクリート強度（設計基準強度）及び鉄筋比を、図 3-1 に既往耐震実験のコンクリート強度及び鉄筋比を示す。

コンクリート強度及び鉄筋比は、耐震実験と実機及び既往耐震実験とで対応しており、耐震実験結果は実機への適用性があることを確認した。

表 3-1 耐震実験のコンクリート強度及び鉄筋比

耐震実験	コンクリート強度 (実強度)	鉄筋比 (%)
耐震実験 [1]	28.3 (N/mm ²)	1.4
耐震実験 [2]	34.3~35.3 (N/mm ²)	1.32
耐震実験 [2] (参考検討)	31.9~33.2 (N/mm ²)	0.66
耐震実験 [3]	40.2~41.9 (N/mm ²)	1.4

表 3-2 各建屋の設計基準強度及び耐震壁の鉄筋比の範囲

建屋名	設計基準強度	鉄筋比 (%)
原子炉建屋	32.4 (N/mm ²) (330 (kgf/cm ²))	0.774~1.950
制御建屋		0.717~1.794
第 3 号機海水熱交換器建屋		0.794~1.367
タービン建屋		0.794~1.605
第 1 号機制御建屋		0.718~1.446

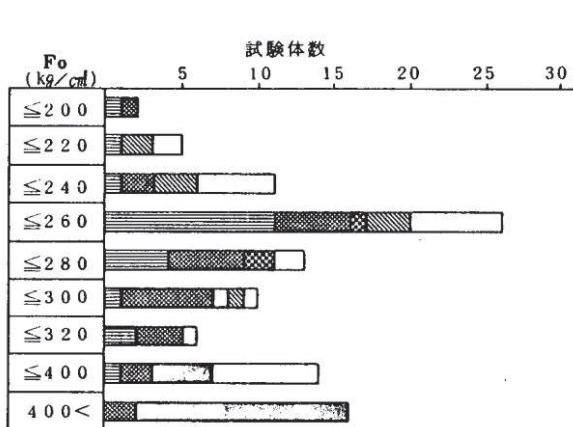


図-4 コンクリート圧縮強度の分布

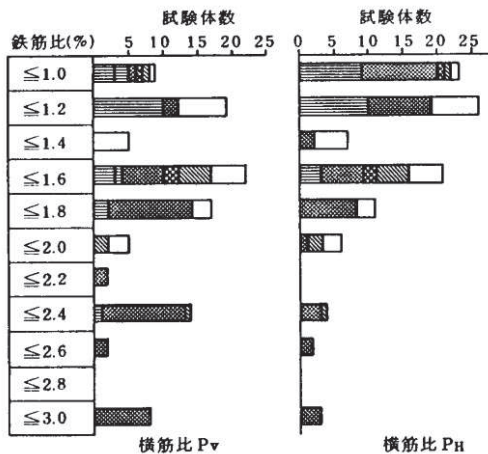


図-6 鉄筋比の分布

注：参考文献（2）図-4及び図-6を引用。

図 3-1 JEAG の既往耐震実験のコンクリート強度及び鉄筋比

[参考文献]

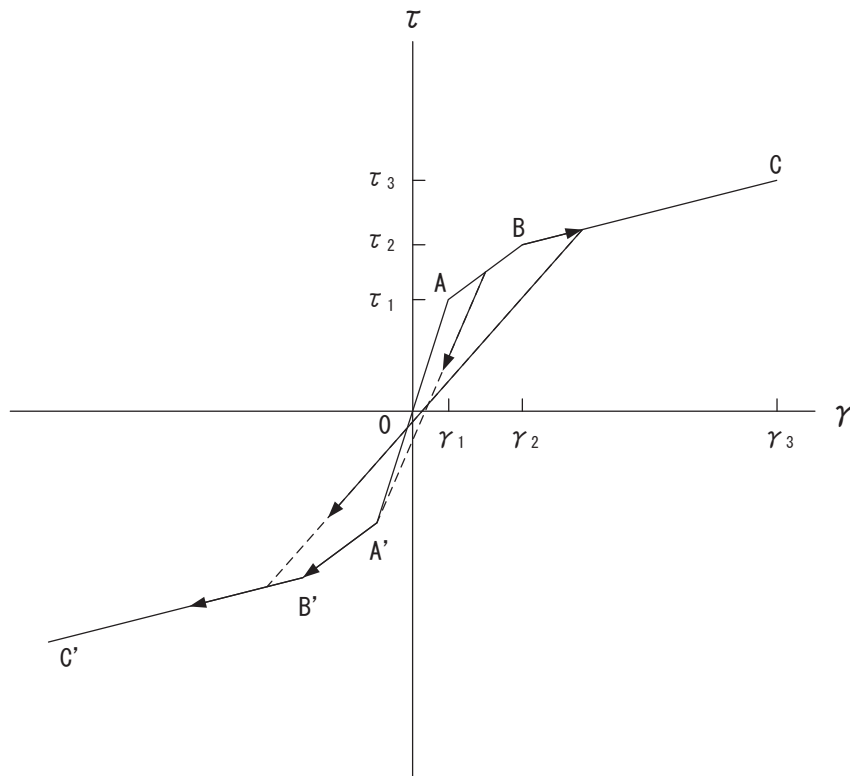
- (1) 江守他：原子炉建屋鉄筋コンクリート耐震壁の復元力特性評価法 その5．復元力特性スケルトンカーブと実験値の比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和62年10月
- (2) 吉崎他：原子炉建屋鉄筋コンクリート耐震壁の復元力特性評価法 その2．収集データの分析及び文献，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和62年10月

4. 耐震壁のせん断応力度－せん断ひずみ関係における履歴特性の適用性について

耐震壁のせん断応力度－せん断ひずみ関係の履歴特性は、「J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」に基づき、図 4-1 に示す最大点指向型モデルとしている。ここでは、剛性低下を考慮したスケルトンカーブを設定する際に、最大点指向型の履歴特性を適用することの妥当性について検討する。

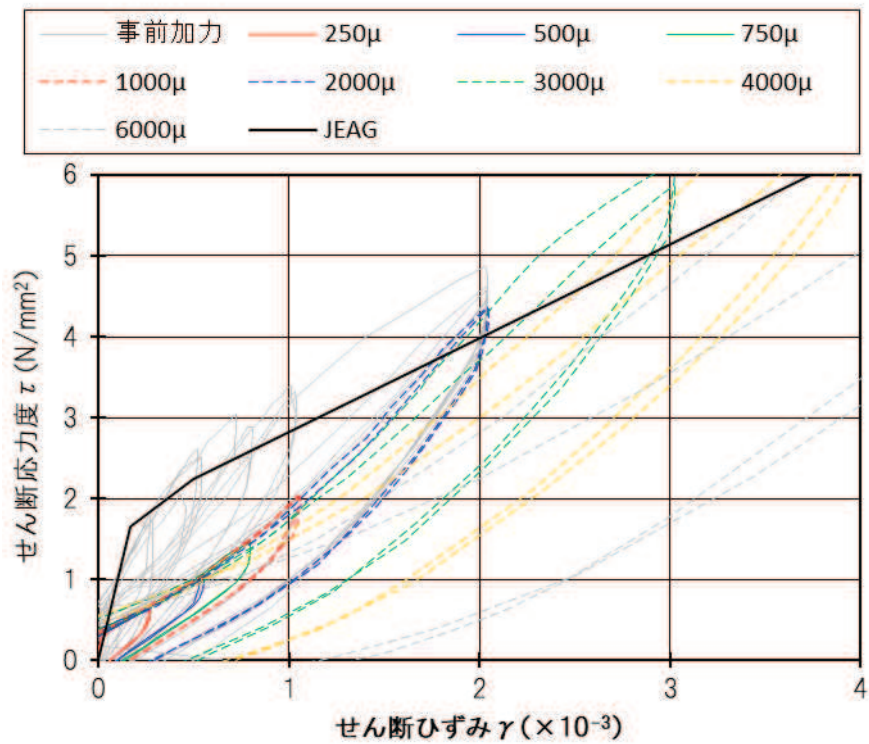
耐震実験[2]及び耐震実験[3]における各試験体のせん断応力度－せん断ひずみ関係（図 4-2）を確認すると、事前損傷を受けた試験体（S-13-D-II）、乾燥収縮の影響を受けた試験体（乾燥試験体[1]）ともに、図 4-1 に示す履歴特性と同様に、経験した最大点に向かう履歴を描いている。

以上のことから、剛性低下を考慮したスケルトンカーブを設定する際に、「J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」に基づく耐震壁のせん断応力度－せん断ひずみ関係の最大点指向型の履歴特性を適用することの妥当性を確認した。

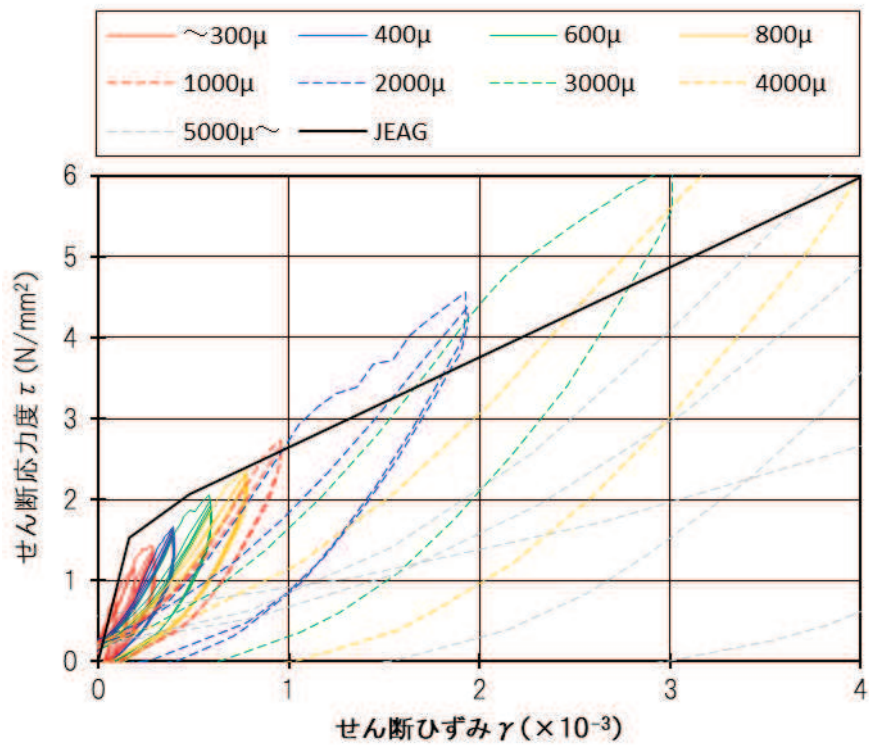


- a. 0-A 間：弾性範囲
- b. A-B 間：負側スケルトンが経験した最大点に向かう。ただし、負側最大点が第 1 折点を越えていない時は負側第 1 折点に向かう。
- c. B-C 間：負側最大点指向
- d. 各最大点は、スケルトン上を移動することにより更新される。
- e. 安定ループは面積を持たない。

図 4-1 耐震壁のせん断応力度－せん断ひずみ関係の履歴特性



(a) 耐震実験[2] (試験体 S-13-D II)



(b) 耐震実験[3] (乾燥試験体[1])

図 4-2 各試験体のせん断応力度-せん断ひずみ関係

別紙 26 第3号機海水熱交換器建屋と地中土木構造物の構造計画の
違いについて

目 次

1. はじめに..... 別紙 26-1
2. 第3号機海水熱交換器建屋と海水ポンプ室との構造比較..... 別紙 26-1
 - 2.1 第3号機海水熱交換器建屋..... 別紙 26-1
 - 2.2 海水ポンプ室..... 別紙 26-4
3. まとめ..... 別紙 26-6

1. はじめに

原子炉建屋等の鉄筋コンクリート構造を主体とした建屋については、地震観測記録の分析、評価を実施することにより、コンクリートの乾燥収縮と地震による揺れの重畳が要因である初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデルとしている。一方、鉄筋コンクリート構造を主体とする土木構造物では初期剛性低下を考慮していない。

本資料は、ほぼ地中構造物となる第3号機海水熱交換器建屋と海水ポンプ室等の地中土木構造物との構造計画の違いについて考察し、土木構造物で初期剛性低下を考慮していないことの適用性を検討する。

2. 第3号機海水熱交換器建屋と海水ポンプ室との構造比較

2.1 第3号機海水熱交換器建屋

第3号機海水熱交換器建屋は、図2-1に示すような箱型で地下3階、地上1階の建屋で地上部分はほとんどなくパイプスペースやルーバー室のみであり、建屋の大部分が地中に埋まっている構造である。

第3号機海水熱交換器建屋の地震応答解析モデルにおいては、各階床位置に質点を置き、床位置に作用する地震力（慣性力）を、耐震壁をモデル化した曲げせん断棒で負担する構造としており、耐震壁の面内方向に作用する地震力が支配的となる（図2-2参照）。したがって、地上部分はほとんどないが地下部分の構造は原子炉建屋地下部分と同様の考え方で設計されている。

基準地震動 S_s に対しては、耐震壁の荷重-変形関係に非線形履歴特性を持たせた質点系モデルによる弾塑性地震応答解析から求められる耐震壁の最大変形（せん断ひずみ）が判定基準値以内であることを確認している。地震観測記録の分析、評価から初期剛性低下が認められたこと、剛性を小さくした方が変形は大きく算定され、保守的な評価となることを踏まえて、初期剛性低下を考慮した設計としている。

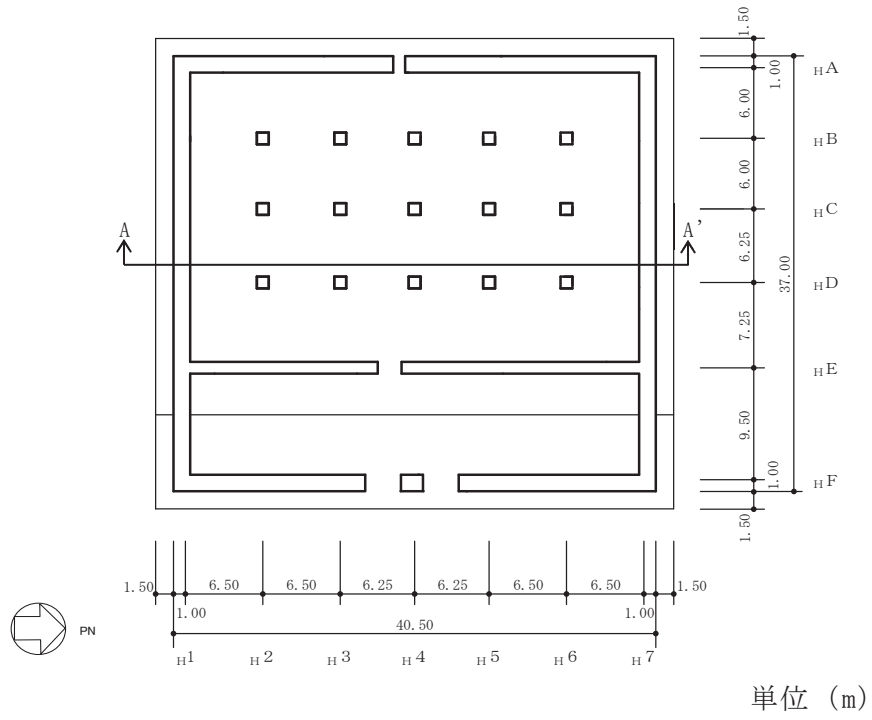
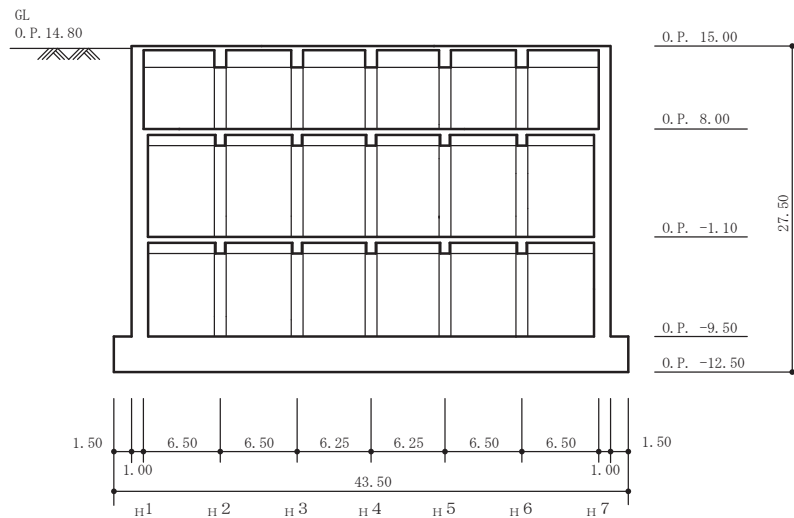


图 2-1(1) 第 3 号機海水熱交換器建屋 概要図 (平面図)



単位 (m)

図 2-1(2) 第 3 号機海水熱交換器建屋 概要図 (断面図 (A-A'))

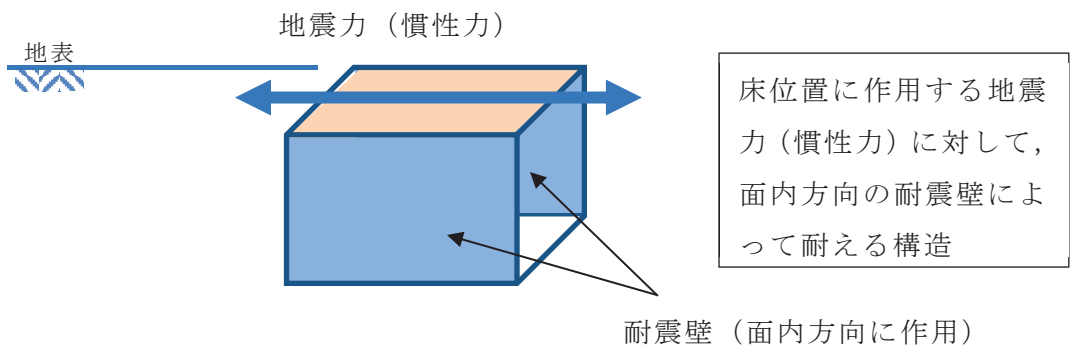


図 2-2 第 3 号機海水熱交換器建屋 耐震構造の概要

上記のように第 3 号機海水熱交換器建屋の耐震壁に生じる地震力は、慣性力が支配的と考えられるが、埋め込まれていることにより生じる土圧の影響について 2 次元 FEM モデルにより検討した結果を「別紙 26-1 第 3 号機海水熱交換器建屋の土圧の影響について」に示す。

「別紙 26-1」の分析結果から、第 3 号機海水熱交換器建屋のような埋め込まれた建屋では、耐震壁に生じるせん断力は土圧による影響が比較的大きいものの慣性力の方が支配的であることを確認した。また、埋込みを考慮した場合と埋込みを考慮しない場合の最大せん断力の大きさを比較すると、埋込みを考慮した場合では側方拘束効果による慣性力の低減と土圧による影響が相殺され、両者のせん断力の合計は概ね同等であることを確認した。

2.2 海水ポンプ室

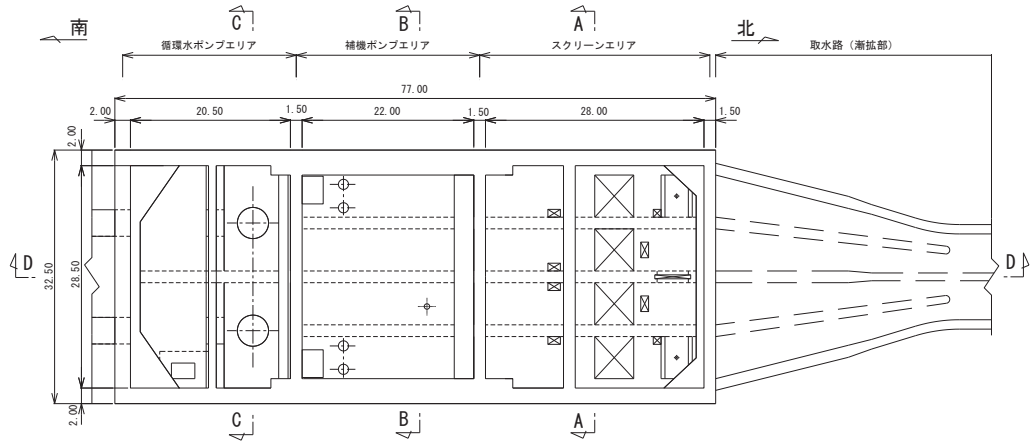
海水ポンプ室は、図 2-3 に示すような箱型の構造物であるが、地上部分は解放された状態で地中に埋まっている構造である。

ポンプやスクリーン等の機器を設置している中床版はあるものの、構造物の床面は基本的に底版であり、床面に作用する慣性力はそのまま基礎で負担する。

最下階より上部の構造物に作用する慣性力は主に構造躯体の自重に対して生じるものとなり、地上部に床がないことや部材は地盤と接して拘束されていることから、面内方向は耐力が大きい反面、大きな慣性力は作用しない。一方、面外方向は耐力が小さく、慣性力に加えて土圧が作用することから影響が大きいものとなる。したがって、土圧による外力が支配的となり、地中の外壁が土圧に対して面外方向に抵抗する構造となる。(図 2-4 参照)。

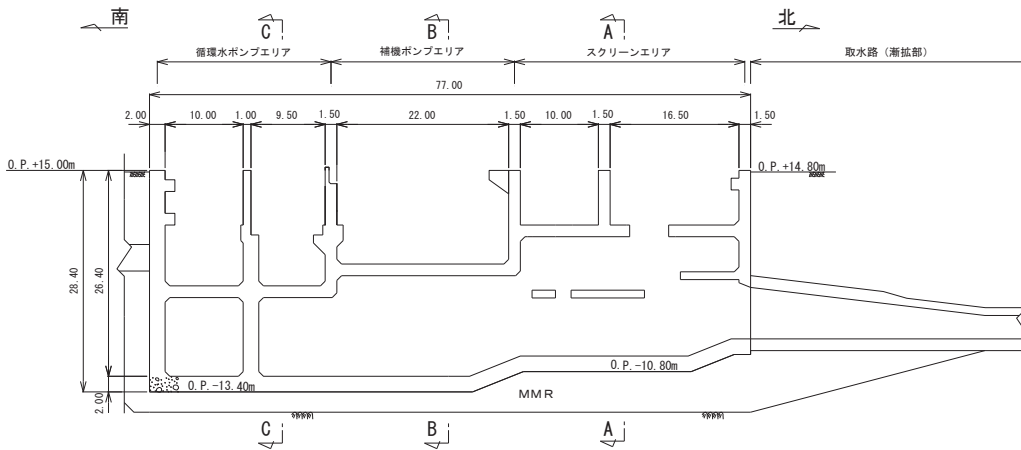
基準地震動 S_s に対しては、地盤-RC 構造物一体となった有限要素法による応力解析とし、各部材に生じる応力に対して断面照査により判定基準となる耐力と比較し評価している。

応力解析では、全体系に対して対象となる構造物を相対的に剛性を高くした方が応力値が高く計算されることから、コンクリートの初期剛性低下を考慮しない解析としている。(土圧に対して構造物の剛性が高い方が負担する応力は大きくなる。)



単位 (m)

図 2-3(1) 海水ポンプ室 概要図 (平面図)



単位 (m)

図 2-3(2) 海水ポンプ室 概要図 (断面図)

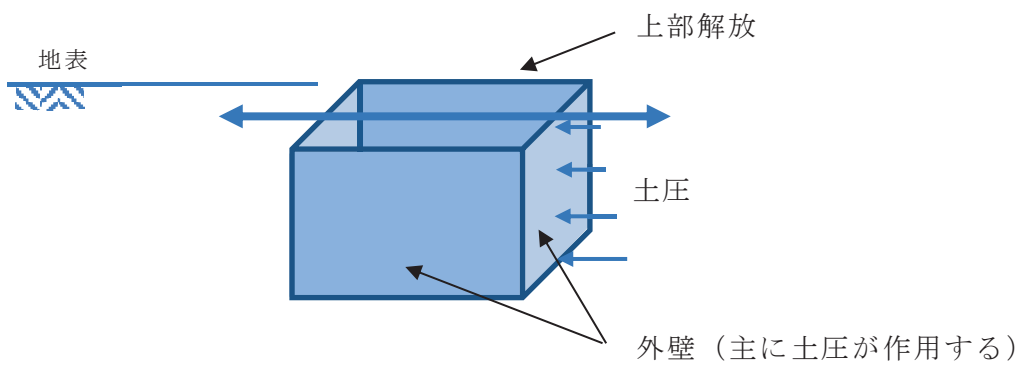


図 2-4 海水ポンプ室 土圧に対する構造の概要

3. まとめ

第3号機海水熱交換器建屋と海水ポンプ室は、同じ地中構造物であるがそれぞれの構造計画、設計の考え方（変形照査、応力照査）を確認した。

第3号機海水熱交換器建屋では地震力を耐震壁（面内方向）で負担する構造であり、原子炉建屋の地下部と同様の設計として初期剛性低下を考慮することとしている。

一方、土木構造物では、面外方向に作用する土圧を大きく評価するため、初期剛性低下を考慮しない設計手法が保守的であると考えられる。

別紙 26-1 第 3 号機海水熱交換器建屋の土圧の影響について

目 次

1. 概要.....	別紙 26-1- 1
2. 第 3 号機海水熱交換器建屋の応答性状について.....	別紙 26-1- 2
2.1 検討概要.....	別紙 26-1- 2
2.2 検討に用いる地震波.....	別紙 26-1- 3
2.3 地震応答解析モデル.....	別紙 26-1- 4
2.4 検討結果.....	別紙 26-1-17

1. 概要

本資料は、地中に埋め込まれた構造物である第3号機海水熱交換器建屋を対象に、2次元 FEM により周辺地盤と建屋を評価した地震応答解析を実施することにより、地震時の土圧の影響について分析し、添付書類「VI-2-2-29 第3号機海水熱交換器建屋の地震応答計算書」にて採用している埋め込みを考慮しない地震応答解析モデルの妥当性を示すものである。

また、本資料は、以下の添付書類の補足説明をするものである。

- ・添付書類「VI-2-2-29 第3号機海水熱交換器建屋の地震応答計算書」

2. 第3号機海水熱交換器建屋の応答性状について

2.1 検討概要

第3号機海水熱交換器建屋を対象に、建屋と側方地盤の相互作用に着目し、土圧を考慮しない場合と土圧を考慮した場合それぞれの2次元FEM解析を実施し、土圧が建屋の応答に与える影響を確認する。

検討に用いる地盤2次元FEMモデルを図2-1に示す。これは、第3号機海水熱交換器建屋(03Hx/B)及び隣接する第3号機原子炉機建屋(03R/B)を質点系でモデル化し、地盤を平面ひずみ要素でモデル化する。検討に用いる解析コードは、「SuperFLUSH/2D」とする。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、検討ケースは、基本ケースとし、検討方向及び検討波は、基本ケースにおいて耐震壁の応答せん断ひずみが最大となるEW方向のS_s-D₂とする。

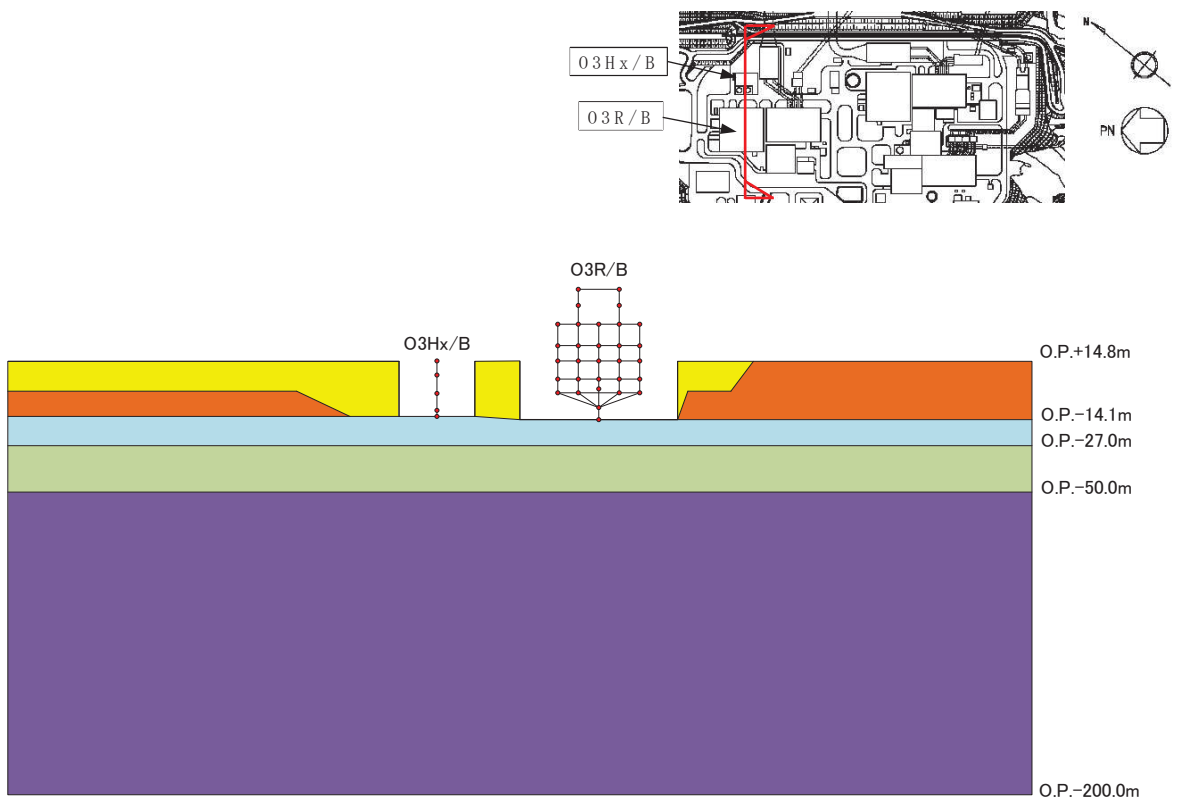


図2-1 地盤2次元FEMモデル

2.2 検討に用いる地震波

検討に用いる地震波は基準地震動 S_s を代表して $S_s - D2$ とする。基準地震動 $S_s - D2$ の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを図 2-2 及び図 2-3 に示す。

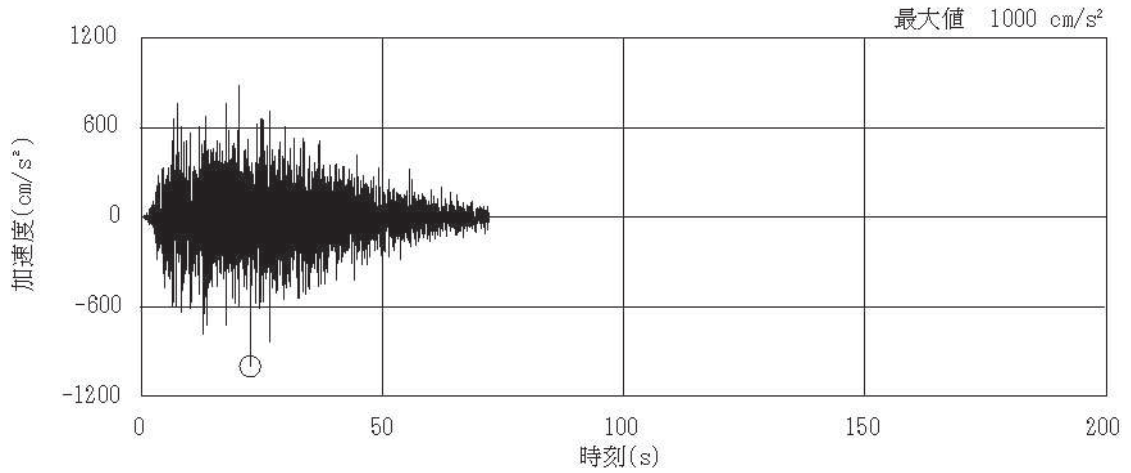


図 2-2 加速度時刻歴波形（基準地震動 $S_s - D2$ ，水平方向）

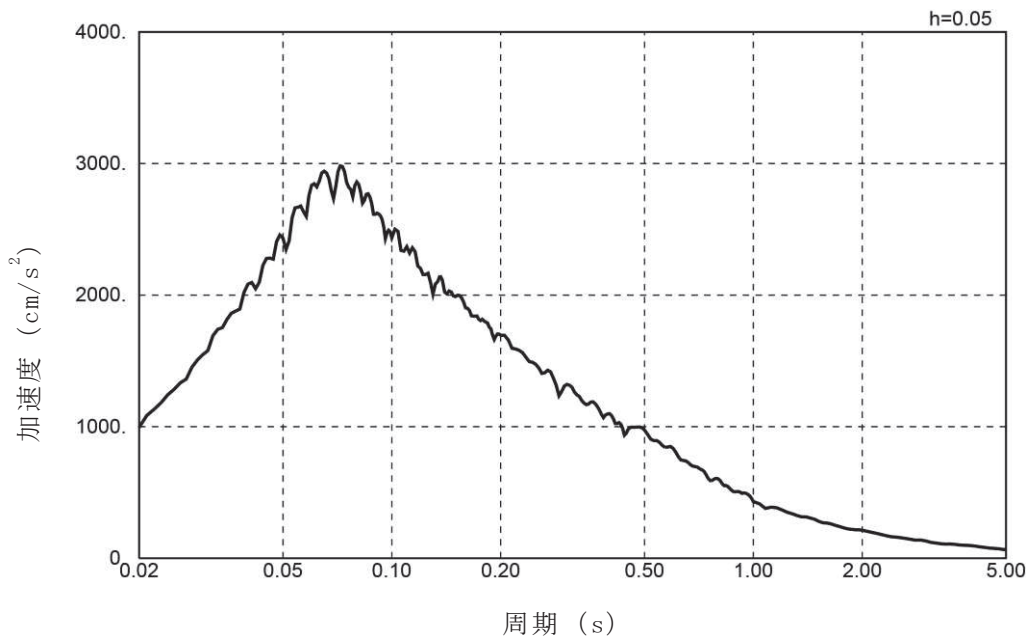


図 2-3 加速度応答スペクトル（基準地震動 $S_s - D2$ ，水平方向）

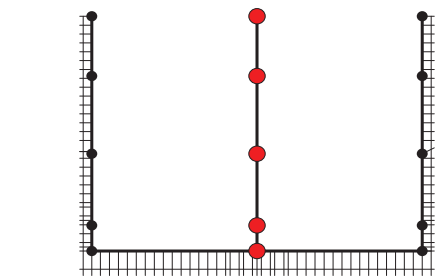
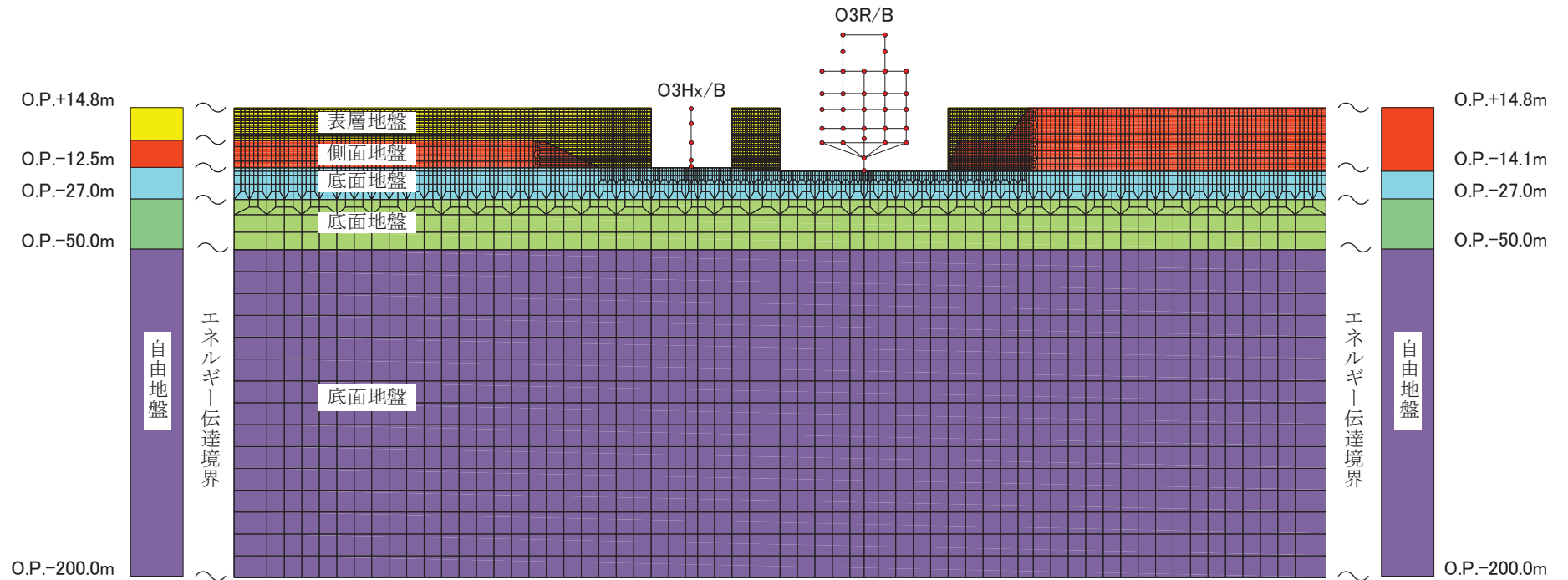
2.3 地震応答解析モデル

(1) 地震応答解析モデル

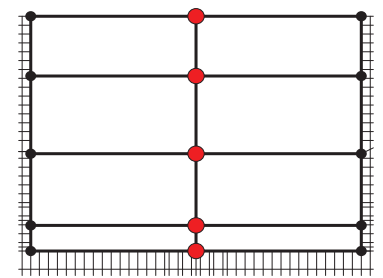
地震応答解析モデルは、建屋を曲げ変形とせん断変形をする耐震壁部からなる質点系モデルとし、地盤を2次元FEMで評価した建屋－地盤連成モデルとする。

土圧を考慮しない場合では、工認用地震応答解析モデルと同様に周辺地盤と建屋の間を分離した(埋込なし)モデルとする。一方、土圧を考慮した場合には、建屋が側方地盤から力を受けるように周辺地盤と建屋を接続した(埋込あり)モデルとする。図2-4に埋込なし及び埋込ありの場合の第3号機海水熱交換器建屋の建屋と周辺地盤のモデルを示す。

地震応答解析は周波数応答解析とし、建屋及び地盤の非線形性は次のとおりに設定する。建屋の剛性は予め工認地震応答解析モデルであるスウェイ・ロッキングモデルのひずみレベルに応じた剛性低下を考慮した等価剛性とする。一方、地盤の剛性はひずみレベルに応じた等価剛性を地震応答解析のなかで収束計算により設定することとする。



(埋込なしの O3HxB 建屋部)



(埋込ありの O3HxB 建屋部)

図 2-4 建屋と周辺地盤のモデル

(2) 建屋モデル

建屋モデルは、添付書類「VI-2-2-29 第3号機海水熱交換器建屋の地震応答計算書」に示す平成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を反映した質点系モデルを基に、地震時のひずみレベルに応じて地震時剛性低下率 α を考慮した等価剛性モデルとする。等価剛性モデルは次のとおりに設定する。

- ① 非線形質点系モデルの基準地震動 S_s 時の各床レベルの基礎に対する伝達関数を算定する。この伝達関数を1自由度系の伝達関数にフィッティングし、1次固有振動数 f_1 を算定する。
- ② 線形質点系モデルについて、①と同様に各床レベルの基礎に対する伝達関数を算定し、1次固有振動数 f_2 を算定する。
- ③ 地震時剛性低下率 α は、 $\alpha = f_1/f_2$ で算定する。

建屋の等価剛性の設定方法を図2-5に示し、設定した等価剛性モデル及び地震応答解析による伝達関数を図2-6に示す。また、第3号機海水熱交換器建屋の地震応答解析モデル及び諸元を図2-7に、物性を表2-1に示し、第3号機原子炉建屋の地震応答解析モデル及び諸元を図2-8に、物性を表2-2に示す。

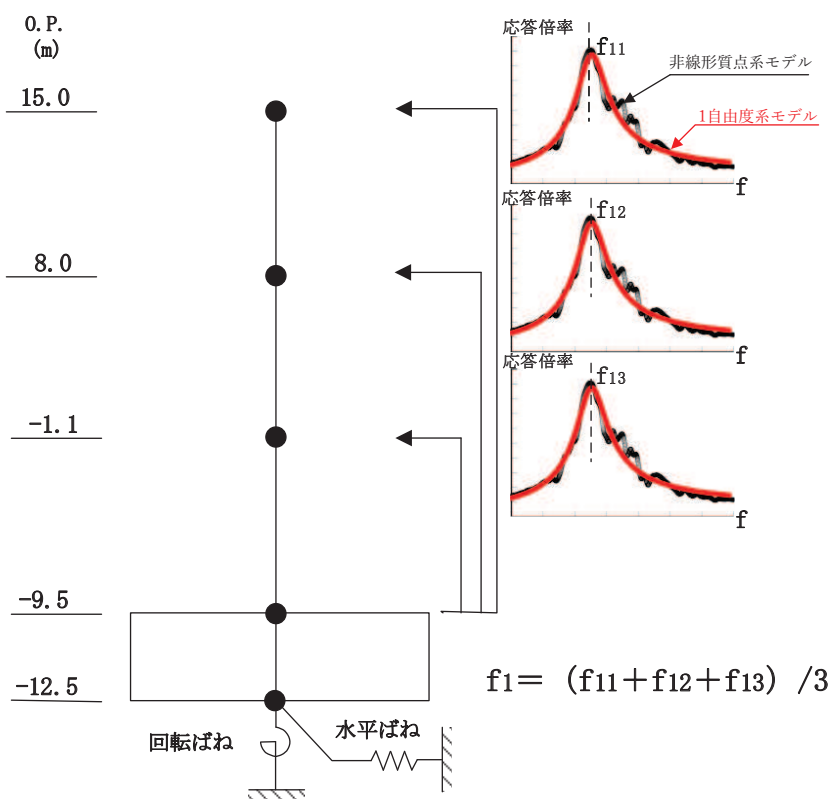
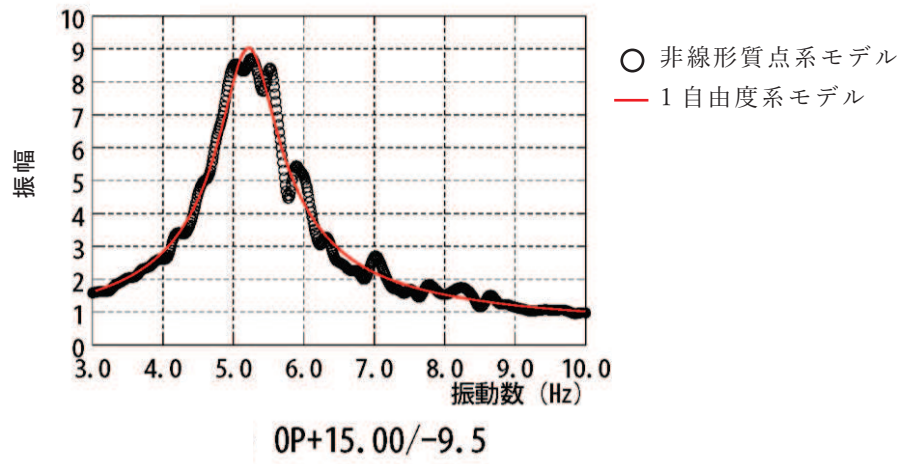
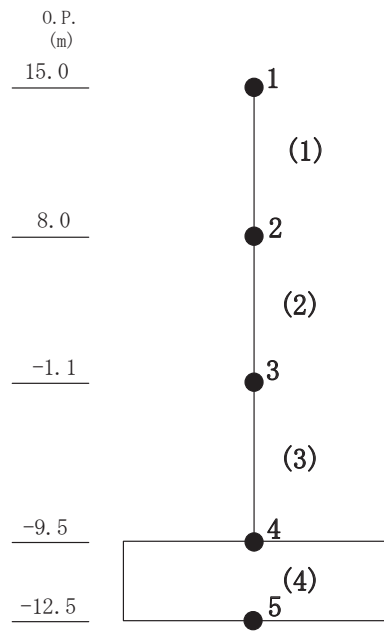


図2-5 建屋の等価剛性の設定方法



(1F / 基礎上)

図 2-6 非線形質点系モデル及び 1 自由度系モデル



(a) 建屋モデル

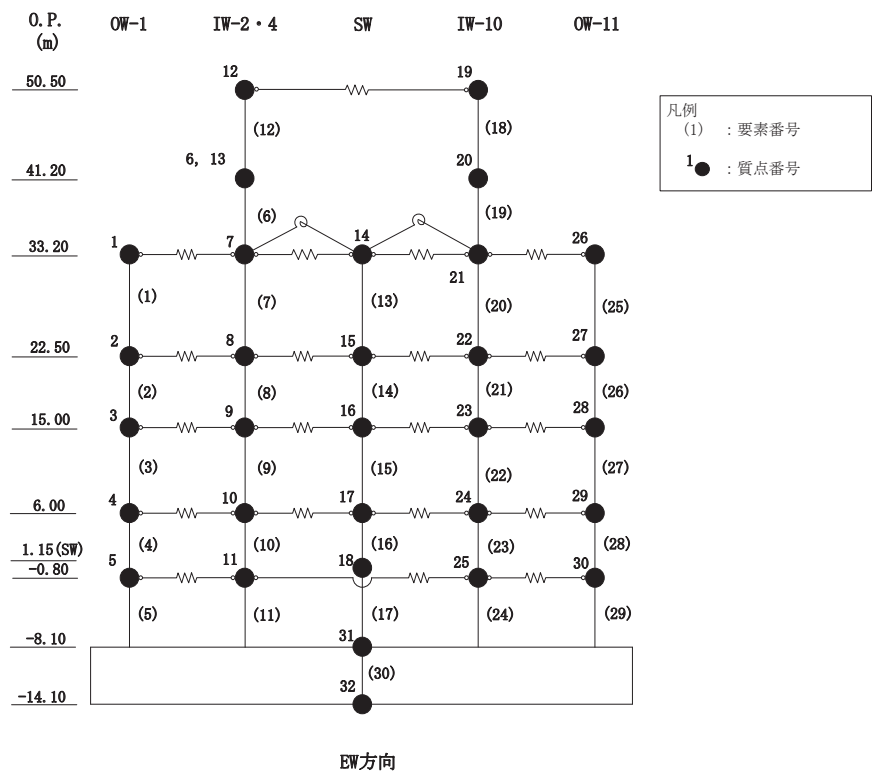
標高 O.P. (m)	質点 番号	質点重量 ($\times 10$ kN)	回転慣性重量 ($\times 10^6$ kN \cdot m 2)	要素 番号	せん断断面積 (m 2)	断面二次モーメント ($\times 10^3$ m 4)
			EW方向		EW方向	EW方向
15.0	1	6921	7.9			
				(1)	74.0	21.6
8.0	2	9209	10.6			
				(2)	103.6	28.8
-1.1	3	13497	15.6			
				(3)	103.6	28.8
-9.5	4	11687	15.7			
				(4)	1740.0	232.0
-12.5	5	10980	14.7			
総重量		52294				

(b) 諸元

図 2-7 地震応答解析モデル及び諸元 (03Hx/B)

表 2-1 物性 (03Hx/B)

方向	項目	初期剛性 補正係数	地震時 剛性低下率 α	ヤング係数 E ($\times 10^4$ N/mm 2)	せん断弾性 係数 G ($\times 10^4$ N/mm 2)	減衰定数 h (%)
EW	初期剛性	1.00	1.00	2.65	1.14	5
	等価剛性	0.80	0.57	1.22	0.52	



(a) 建屋モデル

図 2-8(1) 地震応答解析モデル及び諸元 (03R/B) (1/2)

標高 O.P (m)	建屋					
	OW-1	IW-2	IW-4	SW	IW-10	OW-11
50.50		12			19	
		10670			10670	
		25.0			25.0	
41.20		6	13		20	
		36770			12570	
		86.1			29.4	
33.20	1	7		14	21	26
	16210	86430		74590	71430	21600
	80.1	556.0		90.0	462.9	106.9
22.50	2	8		15	22	27
	31820	104520		156340	95530	28810
	156.9	672.7		191.2	619.8	142.2
15.00	3	9		16	23	28
	52500	130140		88150	112470	44990
	259.9	838.5		138.3	729.6	222.6
6.00	4	10		17	24	29
	56720	125950		64300	116120	52840
	280.5	811.0		101.0	754.1	261.8
1.15(SW)	5	11		18	25	30
-0.80	51620	124270		93950	109470	52520
	256.0	767.9		46.4	680.6	259.9
-8.10				31		
				677710		
				3360.7		
-14.10				32		
				436170		
				2158.4		

質点番号
質点重量(kN)
回転慣性重量($\times 10^5$ kN \cdot m 2)

(b) 重量及び回転慣性重量

標高 O.P (m)	建屋				
	OW-1	IW-2・4	SW	IW-10	OW-11
50.5		12		18	
		13.3		13.3	
		7.16		7.16	
41.2		6		19	
		36.3		21.2	
		21.7		10.3	
33.2	1	7	13	20	25
	29.6	56.9	63.3	54.4	27.6
	26.1	49.7	2.64	57.8	24.4
22.5	2	8	14	21	26
	89.2	81.0	72.7	81.0	53.2
	81.0	102.0	9.63	98.3	52.0
15.00	3	9	15	22	27
	74.6	111.0	71.4	110.1	77.0
	75.9	142.3	11.2	137.7	67.5
6.00	4	10	16	23	28
	103.6	155.5	66.1	153.4	107.8
	88.5	195.7	10.4	187.5	87.9
1.15(SW)	5	11	17	24	29
-0.80	107.8	151.8	108.0	155.9	107.8
	93.1	186.6	15.7	192.6	88.3
-8.10				30	
				6199.0	
				3062.6	

コンクリート

ヤング係数 E 2.65×10^4 (N/mm 2)
せん断弾性係数 G 1.13×10^4 (N/mm 2)
ポアソン比 ν 0.167
減衰定数 h 5%

基礎形状 80.5m(NS方向) \times 77.0m(EW方向)

要素番号
せん断断面積(m 2)
断面2次モーメント($\times 10^3$ m 4)

(c) 剛性

図 2-8(2) 地震応答解析モデル及び諸元 (03R/B) (2/2)

表 2-2 物性 (03R/B)

方向	項目	部位	初期剛性 補正係数	地震時 剛性低下 率 α	ヤング係 数 E ($\times 10^4$ N/mm ²)	せん断弾 性係数 G ($\times 10^4$ N/mm ²)	減衰定数 h (%)
EW	初期 剛性	オペフロ 上部	1.00	1.00	2.65	1.14	5
		オペフロ 下部	1.00	1.00	2.65	1.14	
	等価 剛性	オペフロ 上部	0.50	0.74	0.98	0.42	
		オペフロ 下部	0.85	0.74	1.67	0.72	

(3) 地盤モデル

地盤モデルは、平面ひずみ要素とし、側方にはエネルギー伝達境界を設定し、底面には粘性境界を設定することにより波動の逸散を考慮する。

地盤は、地盤調査に基づき、水平成層を基準とした上で建屋周辺部の掘削形状を考慮する。表 2-3 に示す地盤モデルのうち表層地盤 (O.P. 14.8m~O.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する。 $G/G_0-\gamma$ 曲線及び $h-\gamma$ 曲線の非線形特性を図 2-9 及び図 2-10 に示す。表層地盤の非線形性は、等価線形化法により要素ごとのひずみレベルに応じて収束計算を行うことにより考慮する。

(4) 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 を、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 の入射波を算定し、2次元地盤モデル底面に粘性境界の外から入力する。図 2-11 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。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。

表 2-3 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 h (%)
表層地盤	14.80	18.6	*1	*2
側面地盤	0.00	24.3	910	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：地層レベルは図 2-4 中の東側自由地盤のレベルで記載している。

注記*1：表層地盤の V_s 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。

*2：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 から計算される基準ひずみ γ_m に基づく次式により設定する。

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

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設定する。

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

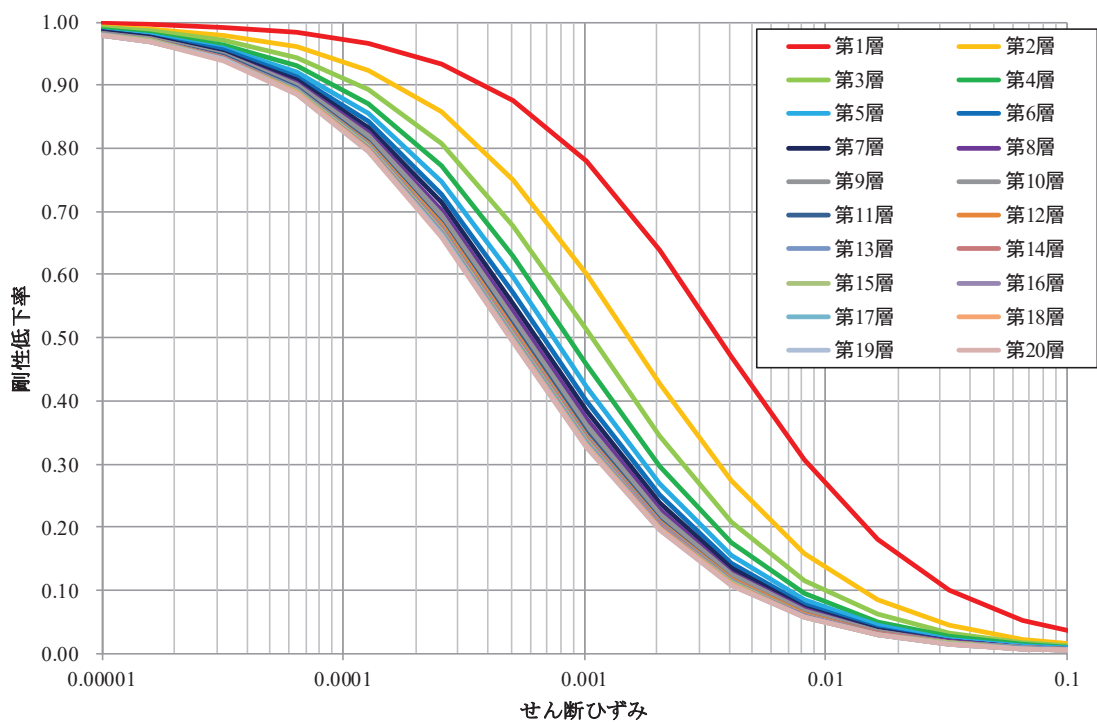


図 2-9 $G/G_0 - \gamma$ 曲線

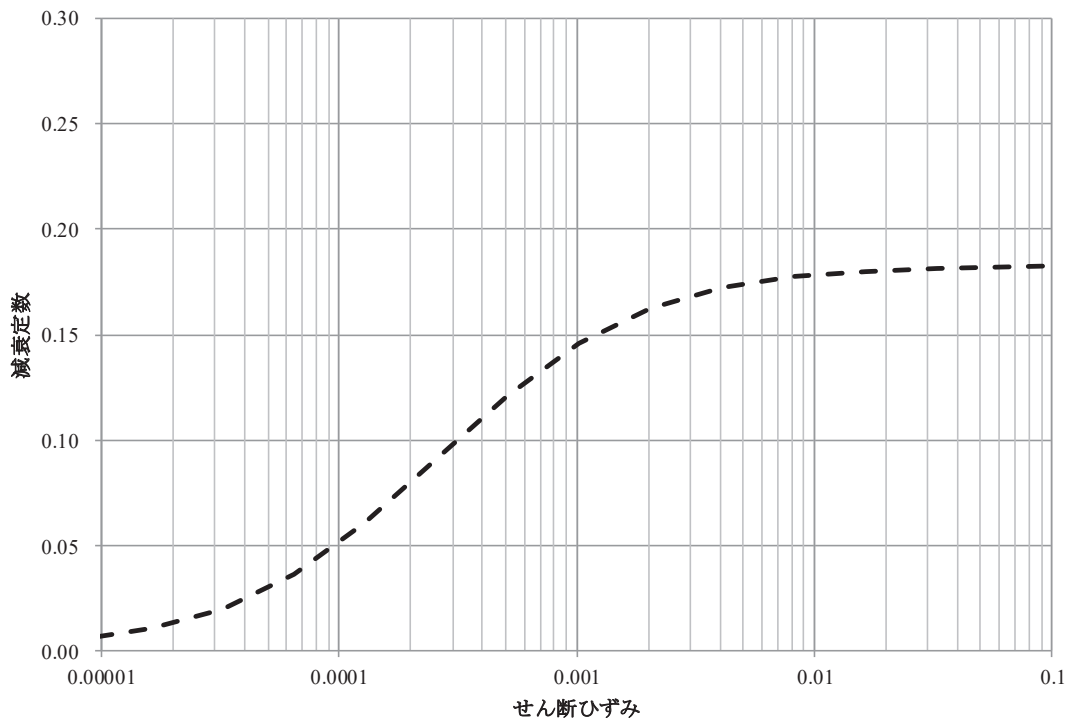


図 2-10 $h - \gamma$ 曲線

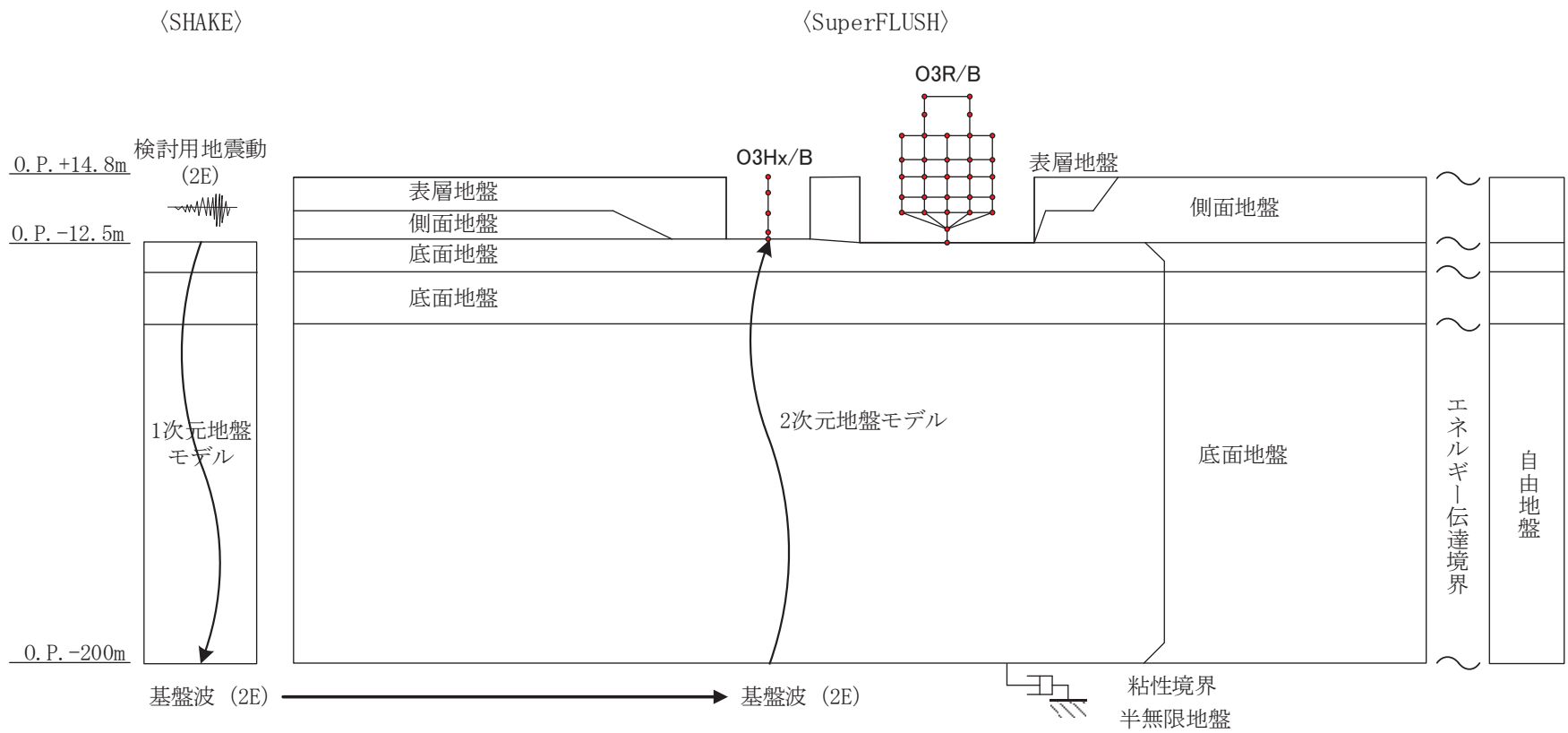


図 2-11 地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図 (水平方向)

2.4 検討結果

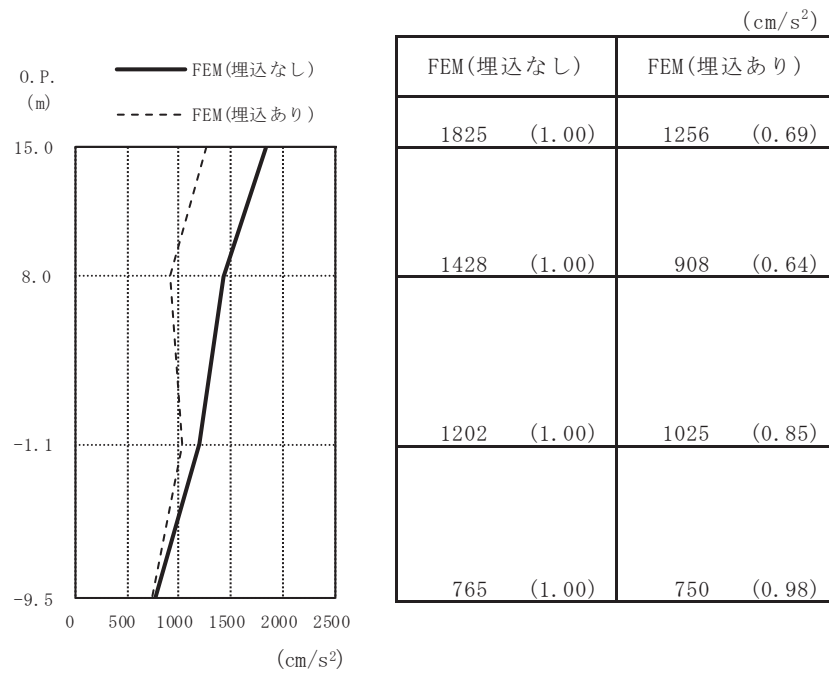
埋込なし及び埋込ありの地盤 2 次元 FEM モデルによる地震応答解析結果を比較して図 2-12 及び図 2-13 に示す。

最大応答加速度は、埋込なしの結果が埋込ありの結果を上回っている。これより、側方地盤の拘束効果により建屋の加速度応答が低減していることがわかる。一方、せん断力は埋込なしの結果と埋込ありの結果は基礎 (O. P. -9.5m~O. P. -12.5m) を除くと 10% 以内の差であり、概ね同等である。

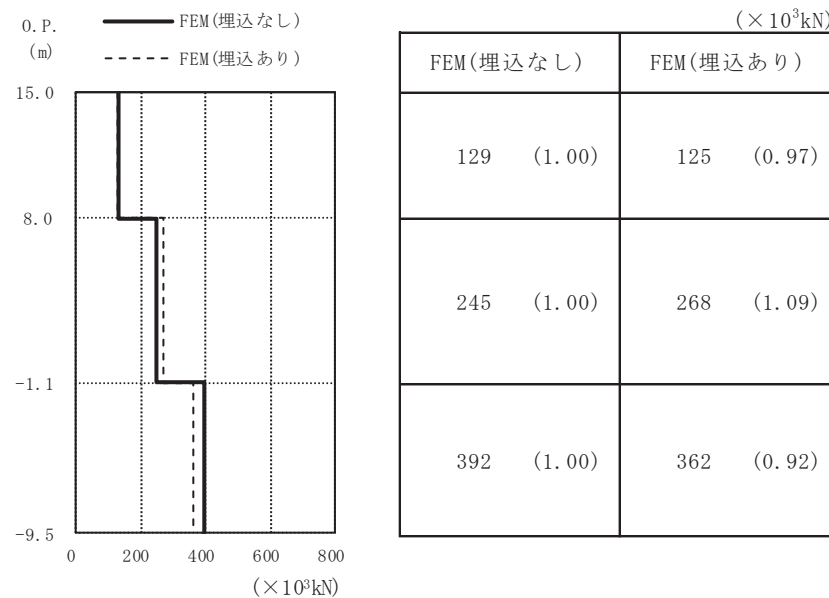
埋込ありの場合、せん断力は建屋加速度による慣性力と側方地盤からの土圧の和によって生じる。そこで、基礎上のせん断力が最大となる時刻に発生するせん断力の分布を用いて埋込ありの場合のせん断力を土圧分と慣性力分に分け、埋込なしの場合のせん断力と比較して図 2-14 に示す。

埋込ありの場合、せん断力のうち基礎を除き土圧分が最大で 42% であり、慣性力の方が若干大きい割合となった。これより、海水熱交換機建屋のように埋込みの深い構造物では、せん断力に及ぼす土圧の影響が比較的大きいが慣性力の方が支配的であると考えられる。一方、埋込みを考慮した場合と埋込みを考慮しない場合の最大せん断力の大きさを比較すると、埋込みを考慮した場合では側方拘束効果による慣性力の低減と土圧による影響が相殺され、両者のせん断力の合計は概ね同等となっている。最下階のベースシアで比較した場合では、埋込みを考慮しない場合の最大せん断力の方が僅かに大きい結果となった。

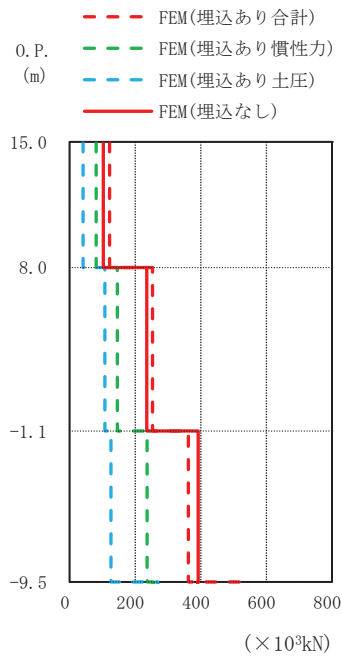
したがって、工認モデルとしている埋込みを考慮しないモデルは、埋込みを考慮したモデルと比較して、応答加速度は保守的に評価しており、せん断力は同等に評価しているため、土圧による影響に問題はないと考えられる。



注：() は FEM(埋込なし) の応答を 1 とした場合の比率を示す
 図 2-12 最大応答加速度 (基本ケース, S_s-D2, EW 方向)



注：() は FEM(埋込なし) の応答を 1 とした場合の比率を示す
 図 2-13 最大応答せん断力 (基本ケース, S_s-D2, EW 方向)



O.P. (m)	FEM (埋込あり) 合計		FEM (埋込なし)
	FEM (埋込あり) 慣性力	FEM (埋込あり) 土圧	
15.0～8.0	122 (1.00)		103 (0.84)
	81 (0.66)	41 (0.34)	
8.0～-1.1	253 (1.00)		235 (0.93)
	146 (0.58)	107 (0.42)	
-1.1～-9.5	362 (1.00)		392 (1.08)
	237 (0.65)	127 (0.35)	

注 1 : () は FEM (埋込あり) モデルの合計せん断力に対する比率を表す。

注 2 : 慣性力分のせん断力は概略評価として加速度応答に層重量を乗じて算出。

注 3 : 基礎上のせん断力 (ベースシア) が最大となる時刻の分布を表す。

図 2-14 各層せん断力の比率の比較

付録 1 計算機コードの概要・CARC-ASe

1. 一般事項

本書は、有限要素法による非線形構造解析プログラムである。材料非線形特性を考慮した構造物の静的応力変形解析や動的地震応答解析が可能である。

2. 本計算機コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- (1) 3次元問題を対象として、シェル要素，ソリッド要素，はり要素，ばね要素等が用意されており，原子力発電所建屋の地盤を含めた構造物の動的解析を行うことができる。
- (2) シェル要素は，積層シェル要素として，厚さ方向を分割し，各層のひび割れや圧縮軟化などの非線形特性を考慮することができる。
- (3) 鉄筋は，積層要素の指定した厚さ位置に，等価な厚さと軸方向のみ剛性を有する板としてモデル化できる。
- (4) 自由度の拘束方法は，取り扱う問題にあったものを選ぶことができる。

3. 解析理論

有限要素法による評価は、次の手順で行う。

- (1) 要素内の変位を仮定し、節点変位を使って要素内任意点の変位を表現する。

$$\{u\} = [N]\{u_e\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- $\{u\}$: 要素内任意点の変位
- $[N]$: 形状関数マトリックス
- $\{u_e\}$: 節点変位

- (2) 上記の変位を微分して、要素内任意点のひずみを節点変位により表す。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u_e\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- $\{\varepsilon\}$: 要素内任意点のひずみ
- $[B]$: ひずみマトリックス

- (3) 材料物性から求められる応力とひずみの関係式である(3)式より定められる弾性係数マトリックスを用いて、要素剛性マトリックスを(4)式より計算する。

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$[K_e] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

- $\{\sigma\}$: 要素内任意点の応力
- $[D]$: 材料の応力-ひずみ弾性係数マトリックス
- $[K_e]$: 要素剛性マトリックス

- (4) 全体の剛性マトリックスを要素剛性マトリックスの重ね合わせによって求め、力の釣合いより静的変位は(5)式、また動変位は(6)式より求める。

$$\{f\} = [K]\{\gamma\} \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$\{f\} = [M]\{\ddot{\gamma}\} + [C]\{\dot{\gamma}\} + [K]\{\gamma\} \cdots \cdots \cdots (6)$$

ここで、

$\{f\}$: 荷重ベクトル

$\{\gamma\}$: 構造全体の変位

$$\{\gamma\} = \left\{ \begin{array}{c} u_{e1} \\ u_{e2} \\ \vdots \\ \vdots \\ u_{en} \end{array} \right\}$$

$u_{e1}, u_{e2}, \dots, u_{en}$: 各節点の節点変位

$\{\dot{\gamma}\}$: 構造全体の速度

$\{\ddot{\gamma}\}$: 構造全体の加速度

$[M]$: 質量マトリックス

$[C]$: 減衰マトリックス

$[K]$: 剛性マトリックス

- (5) 変位が決まれば、(2)式、(3)式より各要素の応力が求められる。

4. 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを図 4-1 に示す。

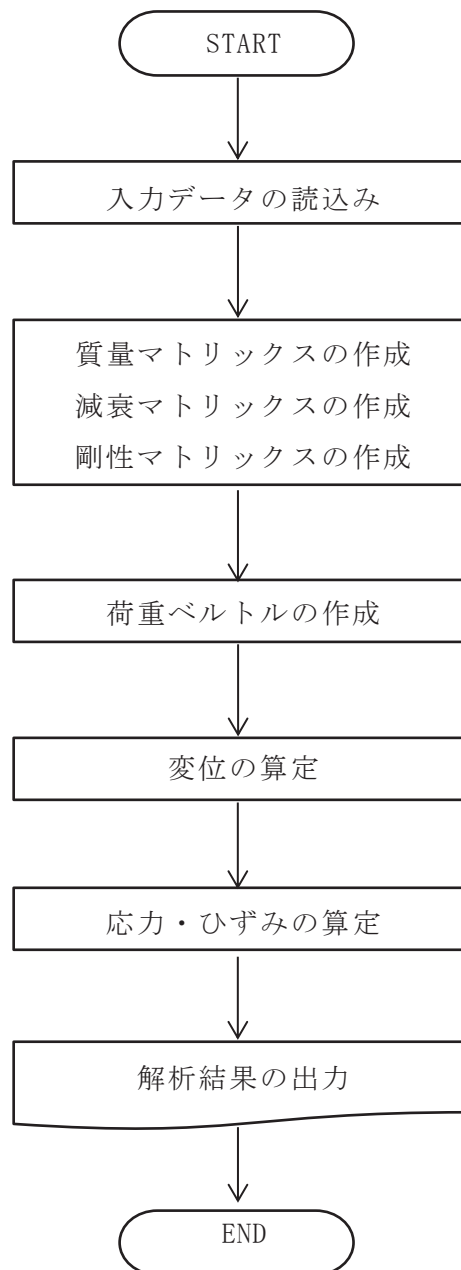


図 4-1 解析フローチャート

5. 検証(Verification)と妥当性確認(Validation)

本解析コードは、「3. 解析理論」に示した一般性のある理論モデルに基づき構築された解析コードであり、「4. 解析フローチャート」に示したプログラム構造を持っている。本解析コードは、土木及び建築などの様々な分野における使用実績を有しており、解析機能全般について十分な妥当性*1が確認されている。

こうした特徴を踏まえ、シェル要素の非線形解析機能に特化する形で、水平2方向荷重をうける鉄筋コンクリート造立体耐震壁の実験についてシミュレーション解析を行い、実験結果の荷重-変位関係と解析結果の比較を行う。また、鉄筋コンクリート造H型耐震壁の振動台実験のシミュレーション解析を行い、応答加速度や応答変位時刻歴を実験結果との比較を行い、本解析コードの当該解析機能の適切さを確認している。

a. 検証(Verification)

本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。

b. 妥当性確認(Validation)

(a) 妥当性確認方法

本解析コードによる妥当性確認は、以下の2つについて実施する。

- 1) 文献*2に示される水平2方荷重(矩形加力)を受ける鉄筋コンクリート造立体耐震壁の繰り返し載荷実験を、シェル要素と鉄筋層でモデル化し静的非線形解析を行い、実験結果の荷重-変位関係と解析結果の整合を確認する。
- 2) 文献*3に示される鉄筋コンクリート耐震壁の振動台実験の加速度や変位時刻歴について、シェル要素とソリッド要素を用いた地震応答解析を行い、実験結果と解析結果の整合を確認する。

注記*1：森川，小磯，福田：繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の非線形解析，鹿島技術研究所年報，Vol.54，pp. 57-62，2006.9.

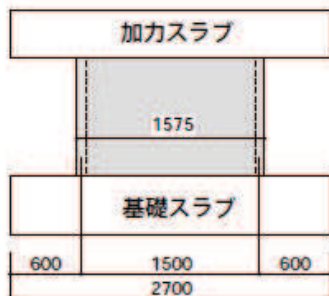
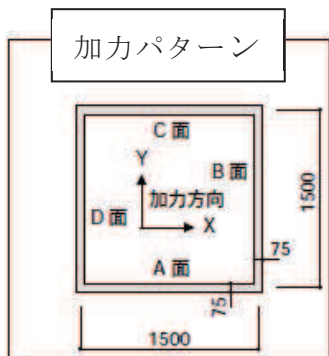
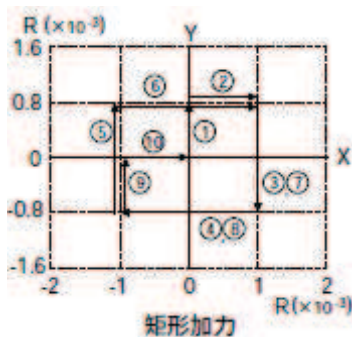
注記*2：渡辺，小野，北田，瀧口：水平2方向同時加力を受けるRC立体耐震壁の静的加力実験

注記*3：Seismic Shear Wal，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp. 631-636，2003. 1 ISP，NUPEC's Seismic Ultimate Dynamic Response Test，Comparison Report，Committee on the Safety of Nuclear Installation，OECD Nuclear Energy Agency，OECD/GD(96) 1996.

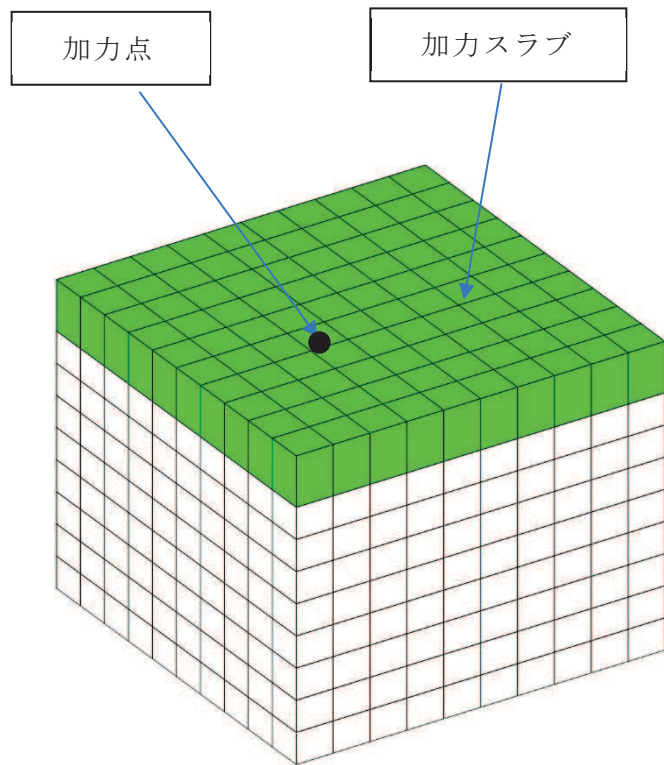
(b) 静的非線形解析による実験結果との比較

a) 試験体と解析モデル

図 5-1 に試験体概要と解析モデルを示す。壁厚 75mm, 内法高さ 1000mm, 壁筋比 1.2%, 壁芯間距離 1500mm のボックス型耐震壁で上下に十分な剛性を有する基礎と加力スラブを設けた試験体である。解析対象の矩形加力は, X 方向と Y 方向の変形比 1.0:0.8 で, 部材角 R を $0.5 \sim 8.0 \times 10^{-3}$ まで漸増载荷している。R= 11.1×10^{-3} で C 面が滑り破壊した。解析モデルは, すべてシェル要素でモデル化し, 加力スラブは弾性, 壁下部を固定としている。加力は加力スラブ中央を変位入力して载荷した。



ボックス壁
試験体形状



解析モデル

図 5-1 試験体概要と解析モデル

b) 材料物性

表 5-1 に解析に用いる材料物性値を示す。材料物性値は原則として試験結果の値を用いる。ただし、※印は、文献から得ることができないため仮定した値である。

コンクリートの弾塑性構成則は、4方向ひびわれを考慮する直交異方性モデル*⁴を用いる。また、鉄筋の弾塑性構成則は、バウシinger効果を考慮したバイリニア型 of 応力ひずみ関係を用いる。

表 5-1 解析に用いる材料物性値

		物性	数値
コン ク リ ー ト		ヤング率	30.7 GPa
		ポアソン比	0.18
	単 軸 特	圧縮強度	41.3 MPa
		圧縮強度時ひずみ	2.000×10^{-3} ※
引張強度		2.747 MPa※	
鉄 筋	鉄筋断面形状	D6	
	ヤング率	200 GPa	
	降伏強度	375 MPa	

[設定の考え方]

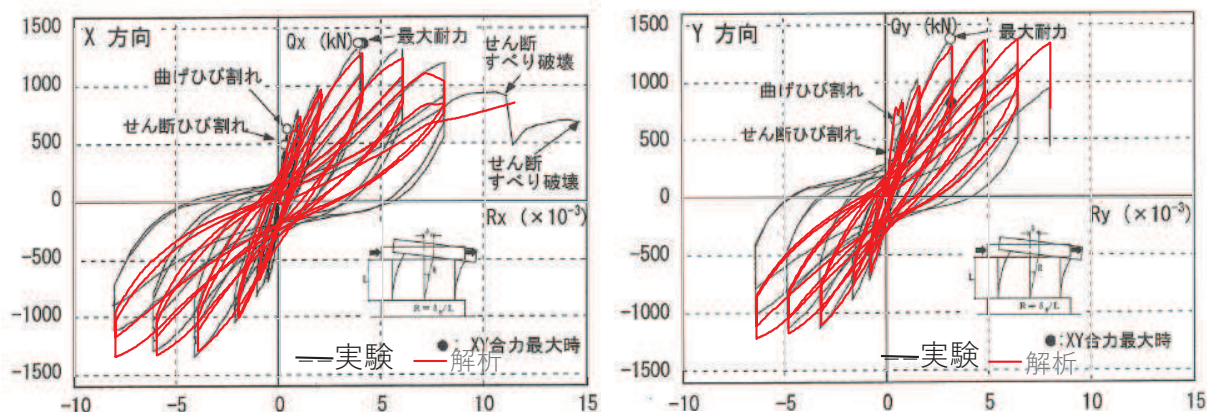
圧縮強度時ひずみ : 土木学会コンクリート標準示方書
引張強度 : 土木学会コンクリート標準示方書

注記*4: 前川宏一, 福浦尚之: 非直交する4方向ひび割れ群を有する平面RC要素の空間平均化構成則, 土木学会論文集, No. 634, pp177-195, 1999. 11.

c) 解析結果

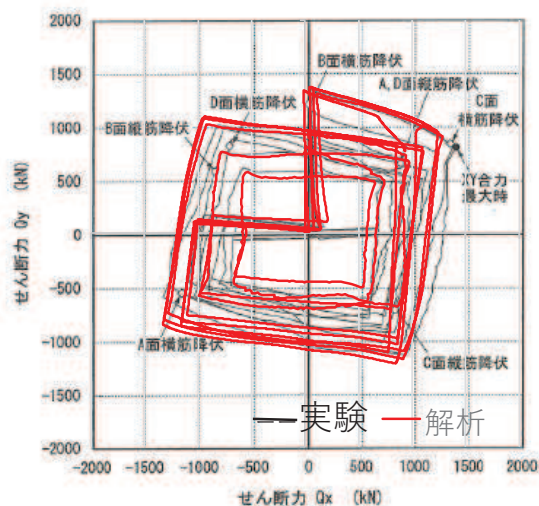
解析結果のせん断力-変形角関係を **図 5-2** に、また、X, Y 各方向のせん断力の軌跡を **図 5-3** に文献の図に重ねて示す。

最大耐力は、 $Q_x: 1376\text{kN}$ ($R=4.0 \times 10^{-3}$), $Q_y: 1381\text{kN}$ ($R=3.2 \times 10^{-3}$) の実験値に対し、解析結果は $Q_x: 1282\text{kN}$ (実験値比 0.93), $Q_y: 1312\text{kN}$ (実験値比 0.95) であり、両者は最大耐力を超えた後に耐力低下し滑り破壊に至る $R=8.0 \times 10^{-3}$ 以降まで概ね一致しており、本解析コードが妥当であると考えられる。



注記* : 本図は、実験結果のグラフに本解析コードの結果を重ねている。

図 5-2 実験と本解析コードの比較 (せん断力-全体変形角関係)



注記* : 本図は、実験結果のグラフに本解析コードの結果を重ねている。

図 5-3 実験と本解析コードの比較 (X方向とY方向せん断力の軌跡)

(c) 地震応答解析による実験結果との比較

a) 試験体と解析モデル

図 5-4 に試験体概要と解析モデルを示す。基礎スラブ上に H 型の耐震壁を配置したもので、その上部にスラブと付加重量 92.9tf が配置されている。加振は入力レベルを漸増させた Run1~Run5 までの加速度時刻歴波形からなり、最終の Run5 で、最大耐力に達し、壁下部で滑り破壊している。試験体は加振直交方向に対してウェブ壁中心面で対称であることから、1/2 部分をモデル化した。壁体部はシェル要素で、基礎、上部スラブおよび付加重量は、弾性ソリッド要素で置換した。固有振動数は、実験で 13.2Hz に対し、解析では 13.5Hz である。

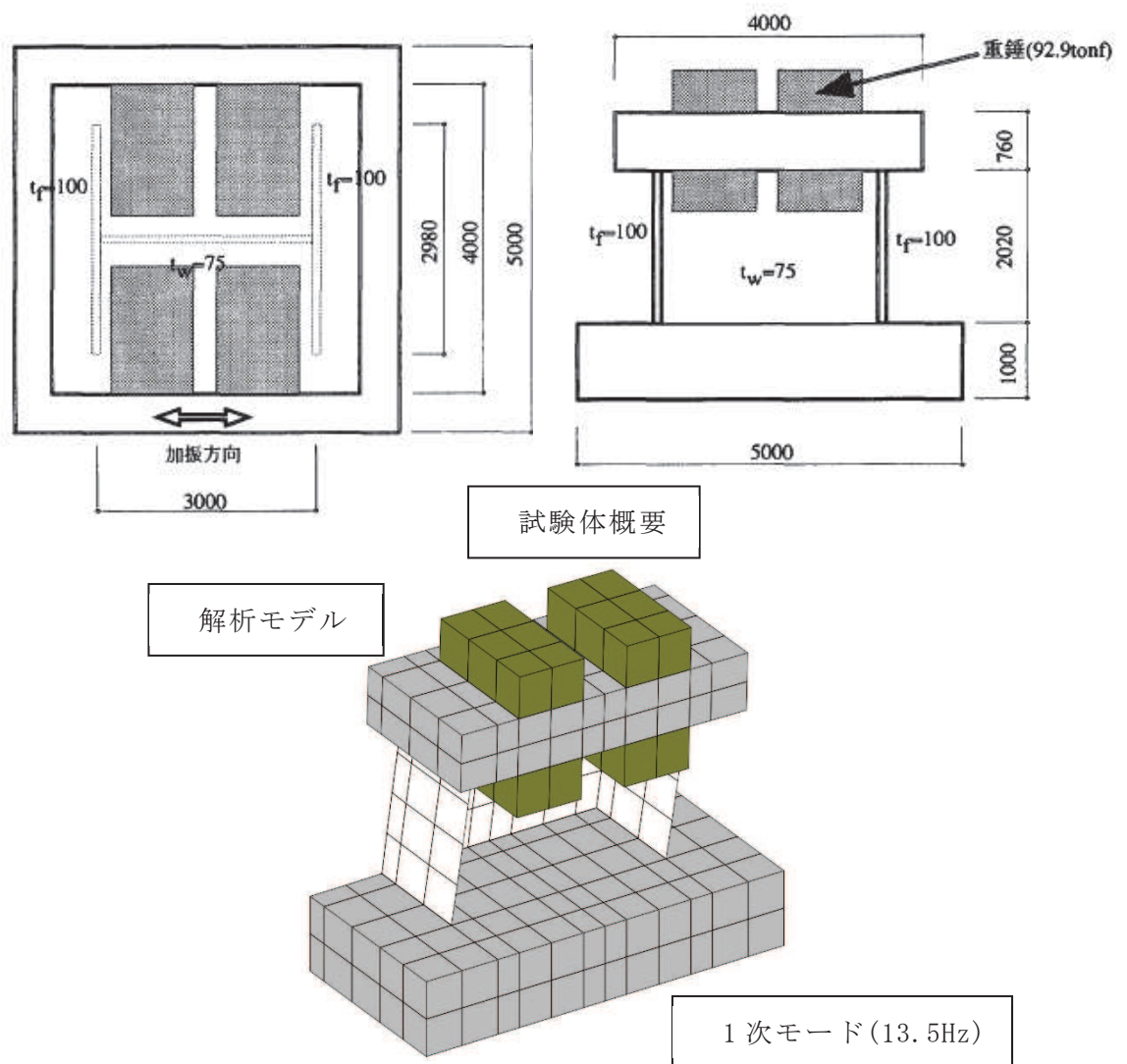


図 5-4 試験体概要と解析モデル

b) 材料物性と解析条件

表 5-2 に解析に用いる材料物性値を示す。材料物性値は原則として試験結果の値を用いる。ただし、※印は、文献から得ることができないため仮定した値である。

コンクリートの弾塑性構成則は、4 方向ひびわれを考慮する直交異方性モデルを用いる。また、鉄筋の弾塑性構成則は、古典的塑性モデルを用いる。

時刻歴応答解析では、Run2~Run5 の 4 波を入力する。各波の継続時間は 12.0s で、合計 48.0s 間とし、時間刻みは、計測された時間刻みを 5 分割し、 2.0×10^{-4} s とした。減衰は、一次固有振動数に対して、0.5%の剛性比例型減衰とした。

表 5-2 解析に用いる材料物性値

		物性	数値
コン ク リ ー ト		ヤング率	22.9 GPa
		ポアソン比	0.155
	単 軸 特	圧縮強度	28.6 MPa
		圧縮強度時ひずみ	2.400×10^{-3}
		引張強度	2.15 MPa ※
鉄 筋	鉄筋断面形状	D6	
	ヤング率	184 GPa	
	降伏強度	383 MPa	

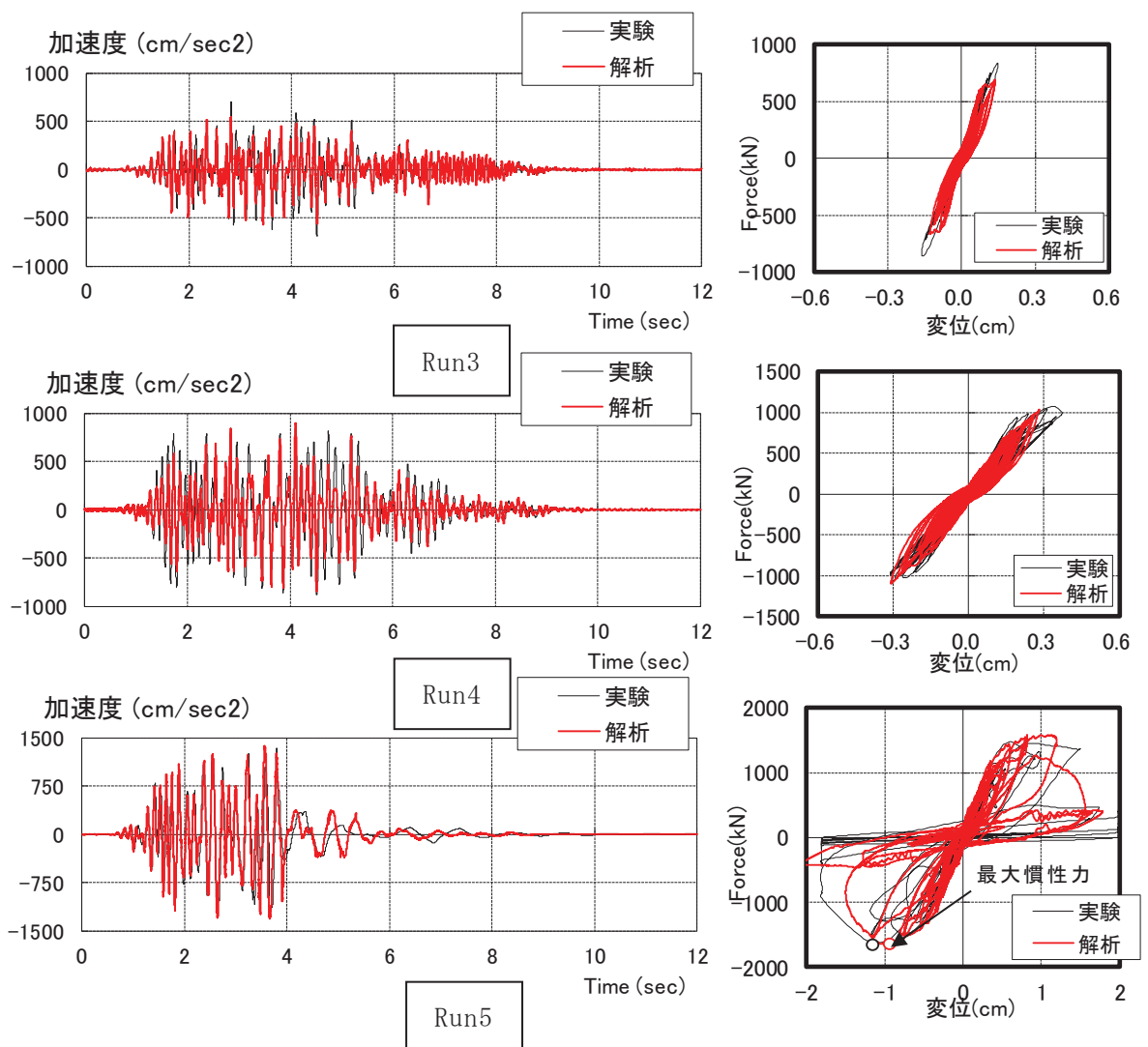
[設定の考え方]

引張強度 : 土木学会コンクリート標準示方書

c) 解析結果

上部スラブ中央位置の加速度波形と慣性力—変位関係を 図 5-5 に、実験結果を重ねて解析結果を示す。

Run3～Run4 の応答加速度波形を比較すると、概ね合致している。Run5 に関してストッパに接触した 4s 付近までを見ると、最大加速度は実験の 1340gal に対し解析では 1370gal(実験値比 1.02)、最大慣性力は、実験で-1630kN、変位-1.11cm に対し、解析では-1670kN(実験値比 1.02)、変位-0.95cm(実験値比 0.86)と良好に対応している。本解析コードが妥当であると考えられる。

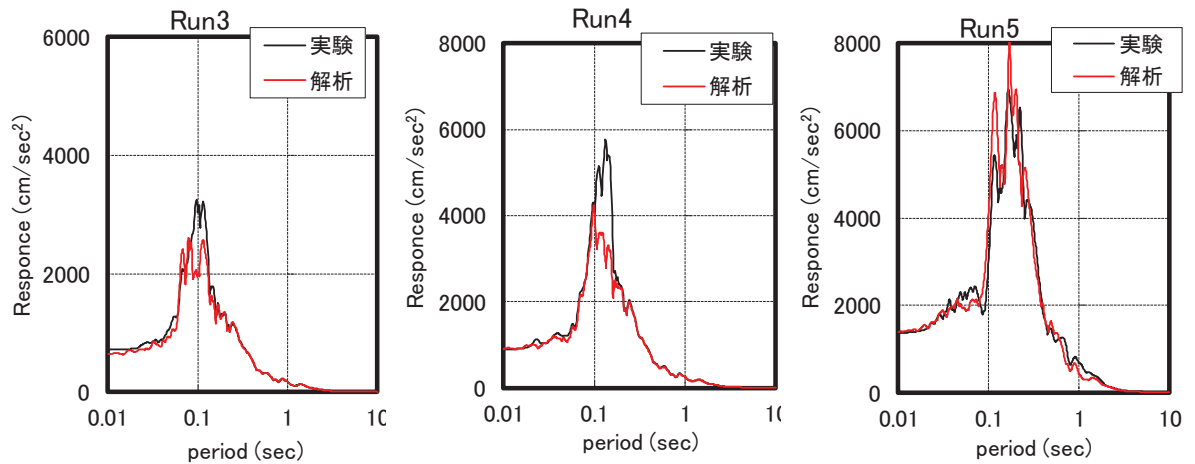


注記* : 本図は、実験結果のグラフに本解析コードの結果を重ねている。

図 5-5 実験と本解析コードの比較 (加速度波形と慣性力—変位関係)

図 5-6 に、加速度応答スペクトルを実験結果に重ねて解析結果を示す。

Run3～Run4 の加速度応答スペクトルについては、実験と解析の周期特性は合致しているが振幅は解析が若干小さい。Run5 については、ほぼ実験結果に合致している。本解析コードが妥当であると考えられる。



注記*：本図は、実験結果のグラフに本解析コードの結果を重ねている。

図 5-6 実験と本解析コードの比較（加速度応答スペクトル）

(d) 妥当性確認結果

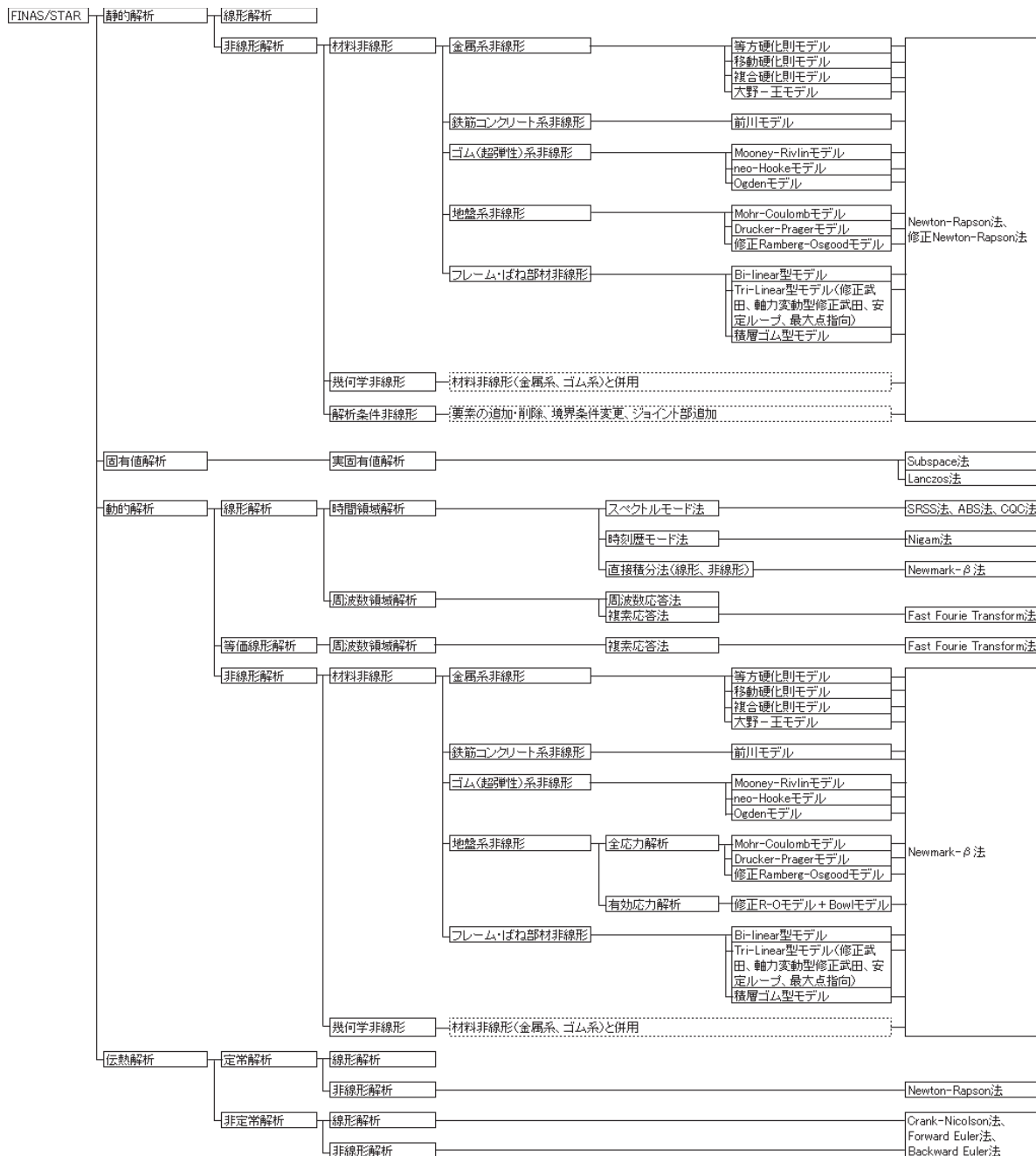
以上のとおり、本解析コードの解析機能について

- ・鉄筋コンクリート造立体耐震壁の2方向加力実験を本解析コードでシェル要素と鉄筋層を用いてシミュレーション解析し、最大耐力は $Q_x: 1376\text{kN}$ （部材角 $R = 4.0 \times 10^{-3}$ ）、 $Q_y: 1381\text{kN}$ ($R=3.2 \times 10^{-3}$) の実験値に対し、解析結果は $Q_x: 1282\text{kN}$ (実験値比 0.93)、 $Q_y: 1312\text{kN}$ (実験値比 0.95) であり、両者は最大耐力を超えた後に耐力低下し滑り破壊に至る $R=8.0 \times 10^{-3}$ 以降まで概ね一致することを確認した。
- ・鉄筋コンクリート造 H 型耐震壁の振動台実験をシェル要素とソリッド要素を用いて地震応答解析し、Run5 では、最大加速度は 1370gal (実験値比 1.02) で、最大慣性力は -1670kN (実験値比 1.02)、変位 -0.95cm (実験値比 0.86)、弾性域から破壊に至るまで試験体の動特性の変化を概ね再現できていることを確認した。従って、本解析コードの当該機能は妥当である。

付録 2 計算機コードの概要・FINAS/STAR

1. 解析コードの概要

本解析プログラムは、伊藤忠テクノソリューションズ(CTC)が開発した大規模・非線形構造解析コードで、主として静的非線形構造解析，時刻歴非線形応答解析に使用する。
 本解析プログラムの機能一覧を以下に示す。



注記* : 「http://www.engineering-eye.com/FINAS_STAR/function/index.html」より転記。

2. 解析コードの検証

「FINAS/STAR」の検証は、質点系モデルと FEM モデルを用いた線形地震応答解析を実施し、質点系モデルについては「DYNA2E*¹」、FEM モデルについては「NASTRAN*²」を用いた同一諸元、同一入力地震動による解析結果と比較を行い、「FINAS/STAR」の解析結果が妥当であることを確認する。

(1) 解析諸元

検証に用いる解析諸元を表 2-1、表 2-2 に、入力地震動を図 2-1 に示す。なお、表 2-2 に示す FEM モデルは、質点系モデルの質点レベルに位置する節点を剛体で繋ぎ、建屋中央部に集中マスとしてモデル化している。また、地盤ばねはモデル下端に設定した集中マスに、ばねとダッシュポットでモデル化する。

注記*1: DYNA2E は伊藤忠テクノソリューションズ(CTC)の開発した地震応答解析コードで許認可等に係る解析実績がある。

注記*2: NASTRAN は MSC ソフトウェアの開発した汎用有限要素法解析コードで許認可等に係る解析実績がある。

(2) 解析結果

1) 固有値解析結果

「FINAS/STAR」と「DYNA2E」及び「NASTRAN」の固有値解析結果の一覧を表 2-3 に示す。なお、質点系モデルについては「NASTRAN」による解析も実施した。

表 2-3 によれば、固有値解析結果は質点系モデルでは合致しており、FEM モデルもほぼ合致している。

2) 地震応答解析結果

質点系モデルによる「FINAS/STAR」と「DYNA2E」及び「NASTRAN」の最大応答加速度および最大応答せん断力、最大応答曲げモーメントの比較を表 2-4、図 2-2 に示す。各解析コードの最大応答結果はほぼ合致している。

FEM モデルによる「FINAS/STAR」と「NASTRAN」の最大応答加速度を表 2-5、図 2-3 に示す。両者の最大応答加速度はほぼ合致している。

3. 結論

以上より、解析結果の検証を行い本計算プログラムの妥当性を確認した。

表 2-1 地震応答解析モデル(質点系)



番号	高さ m	重量 ×10 ³ kN	回転慣性 重量 ×10 ³ kNm ²	せん断 断面積 m ²	断面2次 モーメント m ⁴
1	24.00	900	270,000	180	123,300
2	18.00	200	60,000		
3	12.00	200	60,000		
4	6.00	200	60,000		
5	0.00	500	150,000		

〈材料定数〉

$E=2.57 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$

$G=1.07 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$

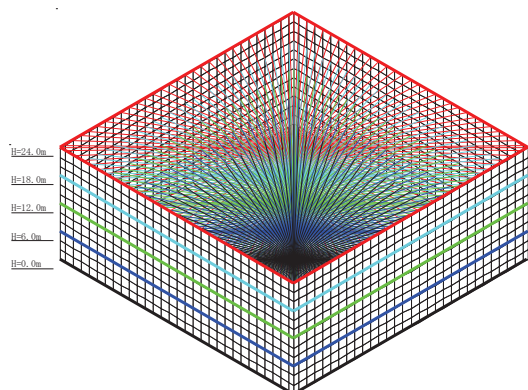
建屋減衰:5%

〈地盤ばね定数〉

$K_H=8.0 \times 10^7 \text{ kN/m}$, $K_R=8.0 \times 10^{10} \text{ kNm/rad}$

$C_H=3.0 \times 10^6 \text{ kNs/m}$, $C_R=6.0 \times 10^8 \text{ kNms/rad}$

表 2-2 地震応答解析モデル(FEM)



番号	高さ m	重量 ×10 ³ kN	回転慣性 重量 ×10 ³ kNm ²	耐震壁 ^{*1}	
				壁長 m	壁厚 m
1	24.00	900	270,000	60.0	1.50
2	18.00	200	60,000		
3	12.00	200	60,000		
4	6.00	200	60,000		
5	0.00	500	150,000		

合計 2,000

〈材料定数〉

$E=2.57 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$

$G=1.07 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$

建屋減衰:5%

〈地盤ばね定数〉

$K_H=8.0 \times 10^7 \text{ kN/m}$, $K_R=8.0 \times 10^{10} \text{ kNm/rad}$

$C_H=3.0 \times 10^6 \text{ kNs/m}$, $C_R=6.0 \times 10^8 \text{ kNms/rad}$

○最大値:450 gal

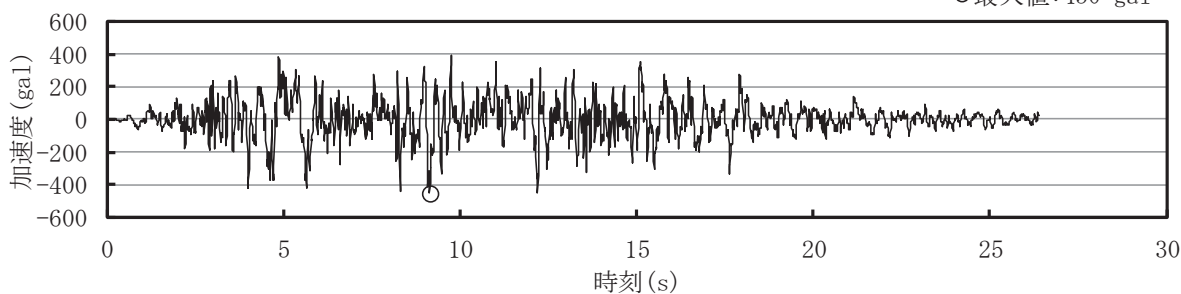


図 2-1 入力地震動(加速度時刻歴)

表 2-3 固有値解析結果

(1) 質点系モデル

質点系						
次数	振動数 (Hz)			刺激係数 (水平)		
	DYNA2E	NASTRAN	FINAS/STAR	DYNA2E	NASTRAN	FINAS/STAR
1	2.3358E+00	2.3358E+00	2.3358E+00	1.1149E+00	1.1149E+00	1.1149E+00
2	5.2100E+00	5.2100E+00	5.2100E+00	3.2824E-01	3.2824E-01	3.2824E-01
3	9.7177E+00	9.7177E+00	9.7177E+00	1.6812E-01	1.6812E-01	1.6812E-01
4	1.7483E+01	1.7483E+01	1.7483E+01	-4.1009E-02	-4.1009E-02	-4.1009E-02
5	2.0618E+01	2.0618E+01	2.0618E+01	-1.5800E-02	-1.5800E-02	-1.5800E-02
6	2.9317E+01	2.9317E+01	2.9317E+01	1.2569E-02	1.2569E-02	1.2569E-02
7	3.7125E+01	3.7125E+01	3.7125E+01	3.4770E-03	3.4770E-03	3.4770E-03
8	4.3738E+01	4.3738E+01	4.3738E+01	-1.5464E-05	-1.5464E-05	-1.5464E-05
9	6.9088E+01	6.9088E+01	6.9088E+01	-2.3802E-06	-2.3802E-06	-2.3802E-06
10	8.7090E+01	8.7090E+01	8.7090E+01	-9.4261E-07	-9.4260E-07	-9.4260E-07

(2) FEM モデル

FEM				
次数	振動数 (Hz)		刺激係数 (水平)	
	NASTRAN	FINAS/STAR	NASTRAN	FINAS/STAR
1	2.3817E+00	2.3856E+00	1.1165E+00	1.1159E+00
2	5.3786E+00	5.3791E+00	4.9418E-01	4.9426E-01
3	1.0122E+01	1.0173E+01	1.4854E-01	1.4707E-01
4	1.8964E+01	1.9073E+01	-4.9724E-02	-4.8909E-02
5	2.4680E+01	2.4702E+01	9.9642E-03	1.0206E-02
6	3.0663E+01	3.0862E+01	1.1461E-02	1.1307E-02
7	3.8770E+01	3.9024E+01	3.1769E-03	3.1345E-03
8	5.6419E+01	5.6429E+01	-5.2386E-05	5.4056E-05
9	8.9592E+01	8.9596E+01	-2.7406E-05	-2.7745E-05

表 2-4 地震応答解析結果(質点系モデル)

解析コード		DYNA2E				NASTRAN				FINAS/STAR				
解析モデル		質点系				質点系				質点系				
解析手法		時刻歴				時刻歴				時刻歴				
減衰		剛性比例(要素別)				剛性比例(要素別)				剛性比例(要素別)				
加速度	質点番号	水平		回転		水平		回転		水平		回転		
		最大値 m/s ²	発生時刻 秒	最大値 rad/s ²	発生時刻 秒	最大値 m/s ²	発生時刻 秒	最大値 rad/s ²	発生時刻 秒	最大値 m/s ²	発生時刻 秒	最大値 rad/s ²	発生時刻 秒	
		1	-9.07	9.24	-0.16	9.22	-9.18	9.23	-0.16	9.22	-9.07	9.24	-0.16	9.22
		2	-7.81	9.24	-0.15	9.22	-7.92	9.24	-0.15	9.22	-7.81	9.24	-0.15	9.22
		3	-6.51	9.24	-0.14	9.22	-6.62	9.24	-0.14	9.22	-6.51	9.24	-0.14	9.22
		4	-5.20	5.65	-0.13	9.22	-5.29	5.64	-0.13	9.22	-5.20	5.65	-0.13	9.22
	5	-4.66	5.65	-0.12	9.22	-4.89	5.64	-0.11	9.22	-4.66	5.65	-0.12	9.22	
要素力	要素番号	質点番号	せん断力		モーメント		せん断力		モーメント		せん断力		モーメント	
			最大値 m/s	発生時刻 秒	最大値 rad/s	発生時刻 秒	最大値 m/s	発生時刻 秒	最大値 rad/s	発生時刻 秒	最大値 m/s	発生時刻 秒	最大値 rad/s	発生時刻 秒
	101	1	830726	9.24	-4285640	9.23	-829065	9.24	4287336	9.23	830725	9.24	-4285640	9.23
	101	2	-830726	9.24	9215140	9.23			9206549	9.23	-830725	9.24	9215140	9.23
	102	2	989247	9.24	-10131300	9.23	-987336	9.24	10122540	9.23	989247	9.24	-10131300	9.23
	102	3	-989247	9.24	15996400	9.23			15974650	9.23	-989247	9.24	15996400	9.23
	103	3	1120780	9.24	-16860200	9.23			16837630	9.23	1120780	9.24	-16860200	9.23
	103	4	-1120780	9.24	23496100	9.23	-1118651	9.24	23458330	9.23	-1120780	9.24	23496100	9.23
	104	4	1225060	9.24	-24290000	9.23			24250960	9.23	1225060	9.24	-24290000	9.23
	104	5	-1225060	9.24	31531000	9.23	-1222540	9.24	31498980	9.24	-1225060	9.24	31531000	9.23

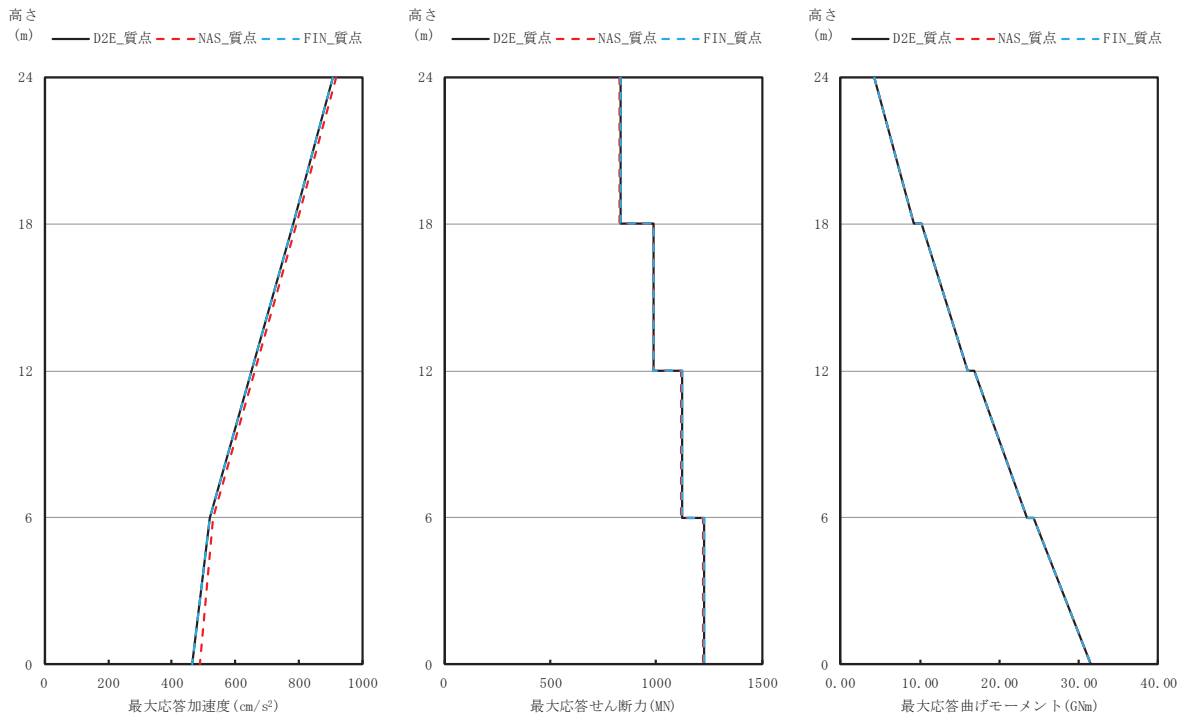


図 2-2 地震応答解析結果(質点系モデル)

表 2-5 地震応答解析結果 (FEM モデル)

解析コード		DYNA2E				NASTRAN				FINAS/STAR			
解析モデル		質点系				シェル要素				シェル要素			
解析手法		時刻歴				時刻歴				時刻歴			
減衰		剛性比例 (要素別)				剛性比例 (要素別)				剛性比例 (要素別)			
加速度	質点番号	水平		回転		水平		回転		水平		回転	
		最大値 m/s ²	発生時刻 秒	最大値 rad/s ²	発生時刻 秒	最大値 m/s ²	発生時刻 秒	最大値 rad/s ²	発生時刻 秒	最大値 m/s ²	発生時刻 秒	最大値 rad/s ²	発生時刻 秒
	1	-9.07	9.24	-0.16	9.22	-9.09	9.23	-0.14	9.22	-8.95	9.23	-0.14	9.21
	2	-7.81	9.24	-0.15	9.22	-7.92	9.23	-0.14	9.22	-7.78	9.23	-0.14	9.21
	3	-6.51	9.24	-0.14	9.22	-6.69	9.23	-0.13	9.22	-6.55	9.23	-0.13	9.22
	4	-5.20	5.65	-0.13	9.22	-5.42	9.23	-0.13	9.22	-5.33	9.24	-0.13	9.22
5	-4.66	5.65	-0.12	9.22	-4.88	5.64	-0.12	9.22	-4.67	5.65	-0.12	9.22	

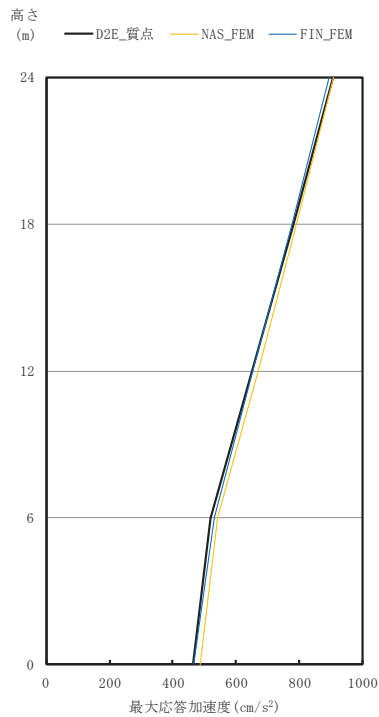


図 2-3 地震応答解析結果 (FEM モデル)