

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-370-14 改2
提出年月日	平成30年10月2日

建物・構築物の耐震計算についての補足説明資料

補足-370-14【タービン建屋の耐震性評価に関する補足説明】

平成30年10月

日本原子力発電株式会社

目次

1. 概要.....	1
2. 地震応答解析モデルのモデル化について.....	2
2.1 各軸の分割と耐震要素.....	2
2.2 基礎構造部のモデル化について.....	6
2.3 入力地震動について.....	9
3. 地盤物性のばらつきを考慮した地震応答解析結果.....	10
3.1 地盤物性のばらつきの設定.....	10
3.2 固有値解析結果.....	10
3.3 地震応答解析結果.....	13
4. 原子炉建屋への影響の評価.....	20
4.1 建屋間の最大相対変位.....	20
4.2 原子炉建屋のねじれを考慮した検討.....	29

別紙1 タービン建屋のEW方向の地震応答解析結果

1. 概要

本資料は、タービン建屋の耐震性評価についての補足説明資料であり、以下の添付資料の補足説明をするものである。

- ・添付書類「V-2-11-2-13 タービン建屋の耐震計算書」

以下、本資料の概要を示す。

第2章「地震応答解析モデルのモデル化について」では、多軸応答解析モデルにおける各軸の分割（支配領域）と耐震要素について示しており、耐震壁以外について、フレーム部の柱の復元力特性及び床ばねについて説明している。また、杭及びケーソンを有する基礎構造部のモデル化及び建屋への入力地震動（切欠き力も含む）に対する設定の考え方について説明している。

第3章「地盤物性のばらつきを考慮した地震応答解析結果」では、地盤物性のばらつきを考慮した基準地震動 S_s に対する地震応答解析結果について、許容限界として設定した耐震壁の最大せん断ひずみ (4.0×10^{-3}) に十分に収まる結果を示している。

第4章「原子炉建屋への影響の評価」では、地盤物性のばらつきを考慮した上で原子炉建屋間との絶対値による最大相対変位を評価している。その評価結果として、絶対値和による最大相対変位が建屋間のクリアランス (50 mm) を超過した。そのため、詳細な時刻歴応答変位による時刻歴相対変位の最大値を評価した結果、地盤物性のばらつき ($+1\sigma$) を考慮した $S_s - 3.1$ 地震時に最大 33.2 mm で、建屋間のクリアランス (50 mm) 以下となることを確認している。

また、原子炉建屋のねじれを考慮した検討では、絶対値和による最大相対変位が建屋間のクリアランス (50 mm) を超過した。そのため、詳細な時刻歴相対変位は地盤物性のばらつき ($+1\sigma$) を考慮した $S_s - 3.1$ 地震時に最大 30.9 mm であり、建屋間のクリアランス (50 mm) 以下となることを確認している。

別紙1「タービン建屋のEW方向の地震応答解析結果」では、タービン建屋のEW方向（原子炉建屋に対して平行方向）について、NS方向モデルと同様に、EW方向についても解析モデル諸元等を示すとともに、地盤物性のばらつきを考慮した基準地震動 S_s に対する地震応答解析結果を確認している。その結果、耐震壁のせん断ひずみは、Q-γスケルトン上の第二折れ点以下に収まる程度であり、NS方向加振時に許容限界として設定した耐震壁の最大せん断ひずみ (4.0×10^{-3}) に十分に収まることを確認した。

2. 地震応答解析モデルのモデル化について

2.1 各軸の分割と耐震要素

タービン建屋の地震応答解析モデル（NS 方向）を図 2-1 に示す。タービン建屋の中央部には T/G 架台が配置されているため、NS 方向の地震応答解析モデルは建屋部を東西南北の 4 軸に分割し、T/G 架台と合わせて 5 軸でモデル化し、T/G 架台を除く各軸は床の面内せん断剛性を考慮した床ばねで接続している。各軸の支配領域と耐震要素を図 2-2 に示す。

建屋南側の軸と EL. 28.00m 以上の北側の軸については、モデル化した領域内に耐震壁が存在しないため、柱部材の曲げせん断剛性を等価なせん断剛性に置換してモデル化している。等価なせん断剛性の算定式を以下に示す。

$$\frac{1}{K_e} = \frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_l}$$
$$K_s = \frac{GA_s}{h}$$
$$K_s = 2(1+\nu)G \frac{12I}{h^3}$$

ここで、 K_e は等価なせん断ばね定数を示し、 G はコンクリートのせん断弾性係数、 ν はコンクリートのポアソン比、 I は柱の断面二次モーメント、 A_s は柱のせん断面積、 h は柱の高さを示す。

柱部材をモデル化した軸に対する復元力特性は、各柱部材のひび割れモーメント、降伏モーメント及び全塑性モーメントを算出し、これらのモーメントが材端に生じる時のせん断力を第一折点、第二折点、終曲点としている。また、柱部材をモデル化した軸は複数の柱部材で構成されるため、柱部材ごとに求めた復元力特性を合計し 3 折線で設定する。復元力特性の設定方法の概念図を図 2-4 に示す。

床ばねの算定領域を図 2-3 に示す。床ばね算定に当たっては、材長として東西の外壁から建屋中心までの距離を用いているため、軸間をつなぐばね定数は床の面内せん断変形を実状より大きく評価していることになる。したがって、原子炉建屋と接する南側の軸の変形については実状よりも大きく評価していることになる。

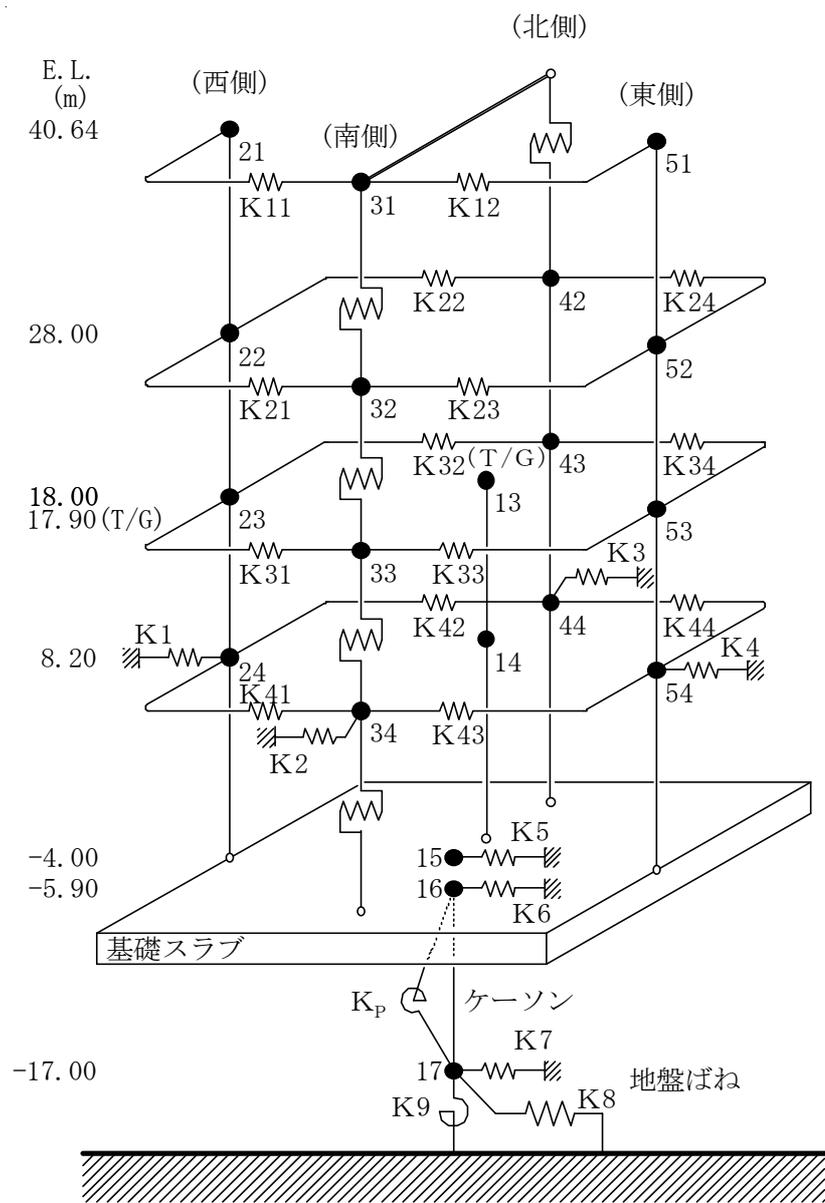


図 2-1 タービン建屋の地震応答解析モデル(NS 方向)

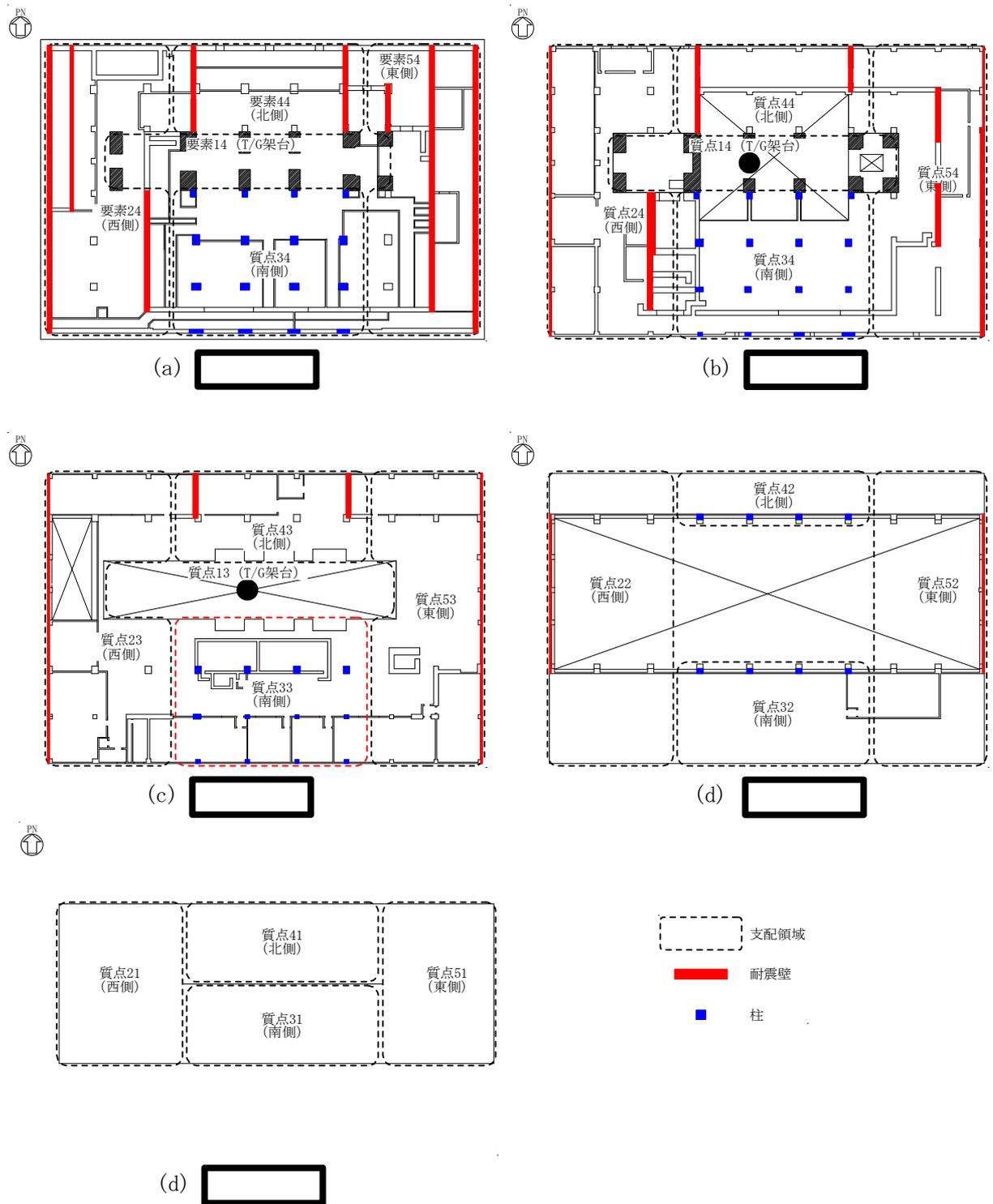


図 2-2 地震応答解析モデル (NS 方向) の各軸の支配領域と耐震要素

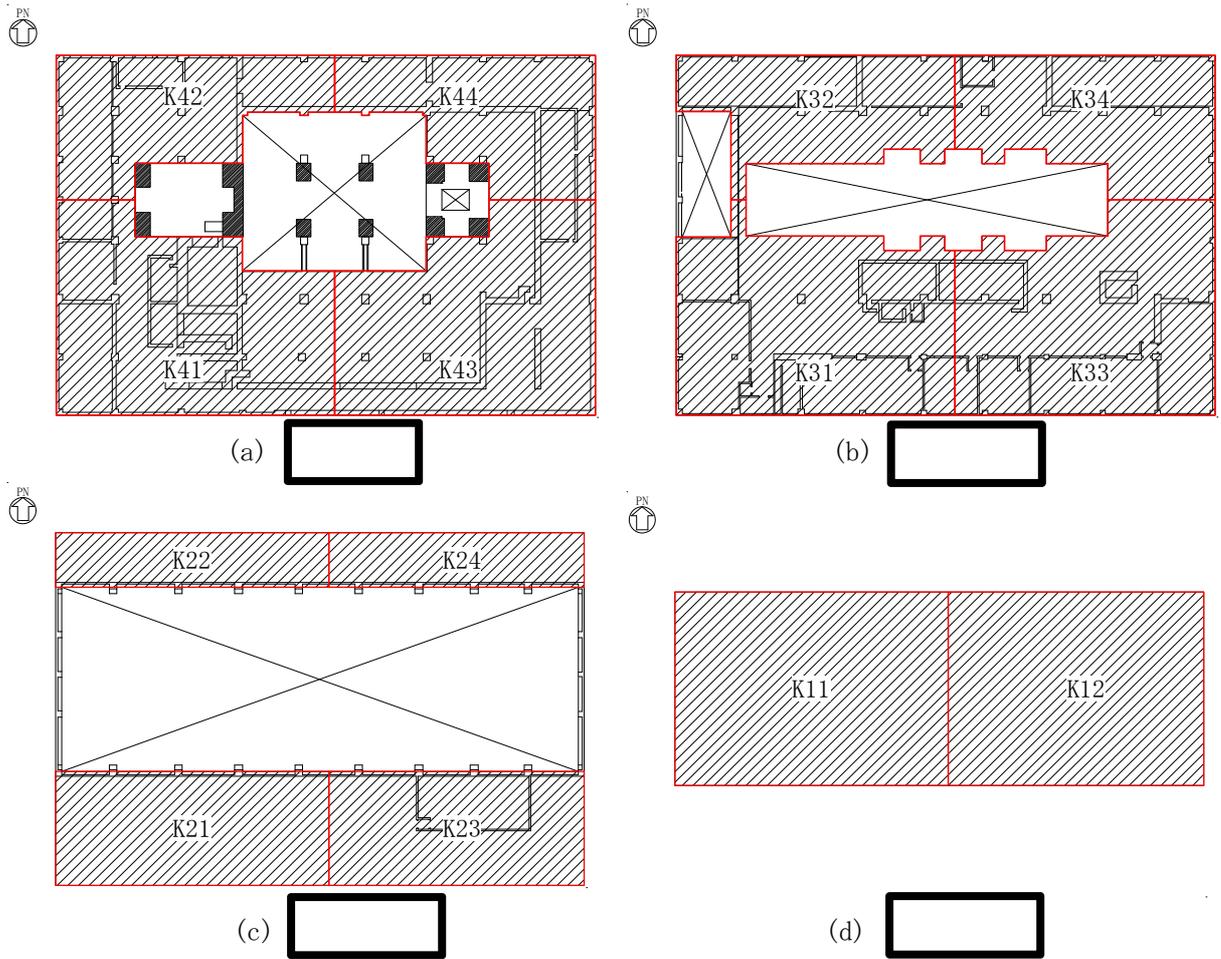


図 2-3 地震応答解析モデル(NS 方向)の床ばねの算定領域

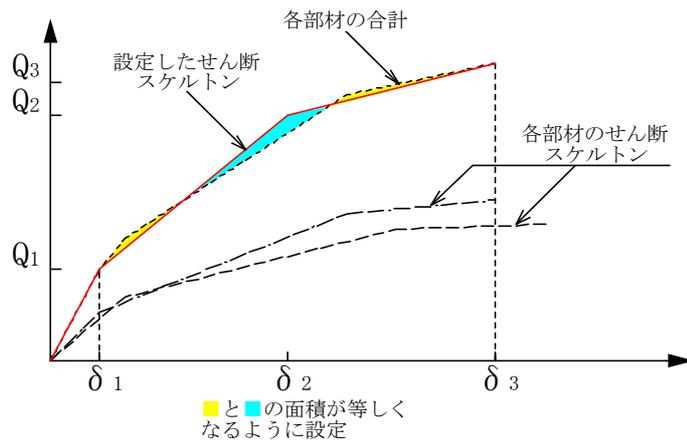


図 2-4 柱部材をモデル化した軸の復元力設定の概念図

2.2 基礎構造部のモデル化について

東海第二発電所タービン建屋の質点系地震応答解析モデルの EL. -4.0m~-17.0m の範囲（以下、基礎構造部という）のモデル化について説明する。タービン建屋は原子炉建屋に接する南側はケーソン、その他の外周部は場所打ちコンクリート杭を介して、砂質泥岩である久米層に支持されている。

タービン建屋の基礎伏図を図 2-5 に示す。タービン建屋の地下 1 階の NS 方向耐震壁のせん断断面積の合計は約 397 m² であり、ケーソンの加振方向と平行に配置された壁の断面積は 816 m² で、地下 1 階の耐震壁に対して約 2 倍のせん断断面積を有している。杭の断面積は軸部で 330 m²、底部で 790m² となっており、軸部の軸断面積のみでも地下 1 階の耐震壁のせん断断面積と同程度となっている。ケーソン及び杭はその断面積が地下部の耐震壁と比較しても大きく、埋戻土に設置されることから上部構造に生じる水平地震力と転倒モーメントは主に杭及びケーソンにより支持される。したがって、タービン建屋の基礎スラブ下端以深については、ケーソンと杭を周辺の地盤と一体となった地盤ばねとしてモデル化せず、せん断棒と回転ばねでモデル化する。ここで、せん断棒のせん断断面積にはケーソンの水平剛性のみを考慮し、回転ばねはケーソンと杭の軸剛性より求める。

ケーソン及び杭の下端には振動アドミッタンスより求めた底面地盤ばねをモデル化する。水平力は主にケーソンが負担し、転倒モーメントは杭とケーソンが負担するが、タービン建屋の地震応答解析は、原子炉建屋に与える波及的影響検討が目的であるため、地盤ばねの算定に当たってはケーソン部の外形面積と等価な矩形断面を用い、回転ばねの評価が実状より小さくなり、建屋のロッキングによる変形が大きくなるように評価する。図 2-6 に、基礎構造部のモデル化の概念図を示す。

ケーソンと杭は負担する地震力が異なるため、全体に生じる地震力が各々をモデル化した要素に伝達されるように、上端と下端に質点を設けることとし、各質点の負担重量は、質点間の中央高さで分割した支配領域の重量とする。図中の質点 16 は、基礎スラブ下端位置(EL.-5.9m)の質点を表し、質点 16 の重量は基礎スラブ版厚中心より下部の重量と、ケーソンの中心深さより上部のケーソン及び杭の重量を集約している。質点 17 はケーソン下端位置 (EL. -17.0m) の質点を表し、質点 17 の重量はケーソンの中心深さより下部のケーソン及び杭の重量を集約している。なお、質点 15 は、基礎スラブ上端位置 (EL. -4.0m) の質点を表し、質点 15 の重量は、基礎スラブ版厚中心より上部の重量と 1 階の階高中央より下部の重量を集約している。

側面地盤ばねは、地盤ばねの取り付く質点レベル間の中央位置までを支配領域として考慮する。図中の K 5、K 6 および K 7 は側面地盤ばねを表し、K 5 は基礎上端と地表面の中央から基礎スラブ版厚中心までの地盤を、K 6 は基礎スラブ版厚中心からケーソンの中心深さまでの地盤を、K 7 はケーソンの中心深さからケーソン下端までの地盤を考慮した側方ばねとして設定している。ここで、図 2-6 に示すようにケーソンと杭は密に配置されていることから、ケーソン間ならびにケーソン及び杭間の地盤は一体で挙動するものとして、側面地盤ばねは建屋外形に基づき算定している。

一方、K 8 は底面地盤ばね（水平）を表し、ケーソンの外形に基づいた矩形の基礎（NS：62.0m×EW：64.6m）に対して算定している。また、K 9 は底面地盤ばね（回転）を表し、杭が軸力を負担することからケーソンおよび杭を含めた建屋外形に基づいた矩形の基礎（NS：

71.0m×EW : 105.5m) に対して算定している。

K_p は、杭の軸剛性を回転ばねに置き換えたばねで、ケーソンおよび杭の図心位置を回転中心とし、杭の軸剛性および図心間距離に基づき剛性を算定している。

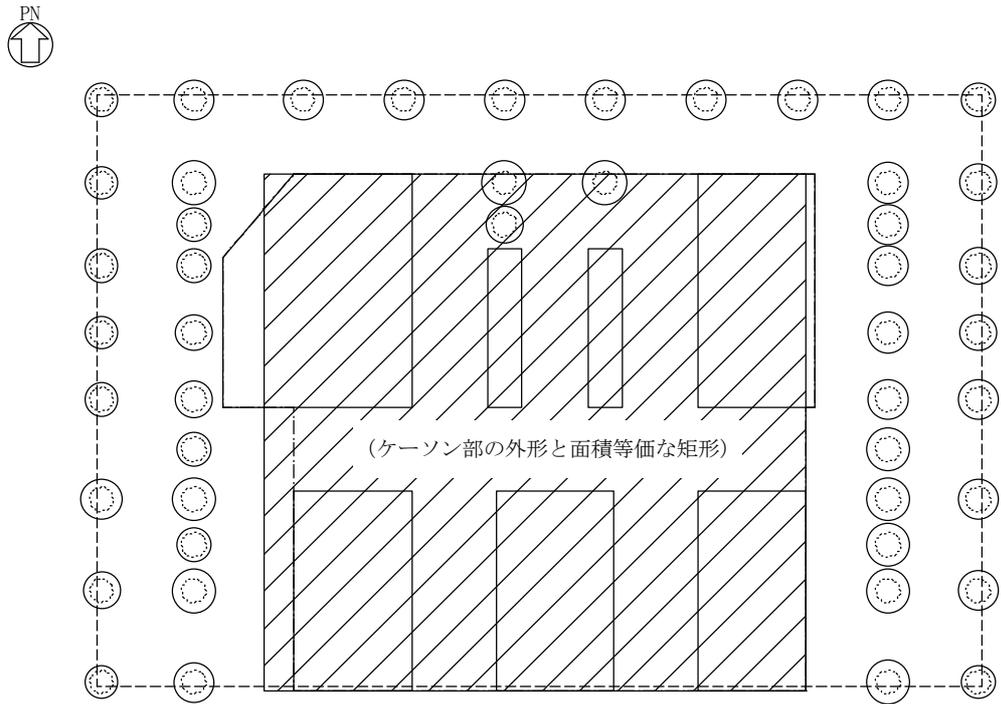
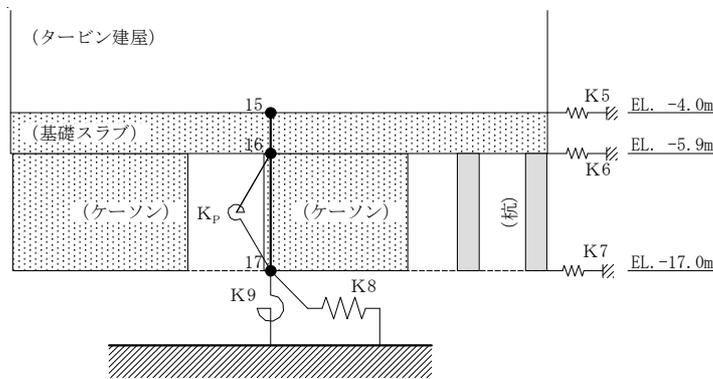
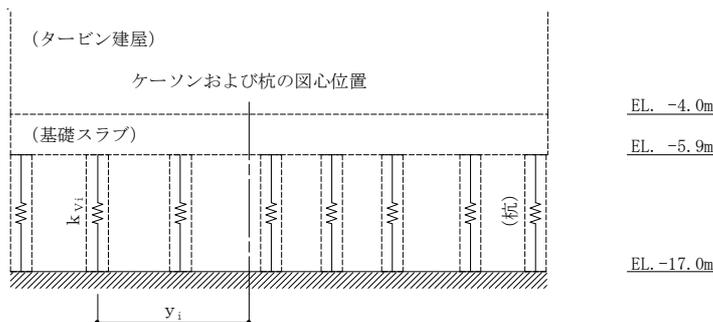


図 2-5 タービン建屋の基礎伏



(K_Pのばね剛性の算出)



- 質点 15 : 基礎下端質点
- 質点 16 : 基礎下端質点
- 質点 17 : ケーソン下端質点
- K5 : 建屋および基礎スラブの側面地盤ばね
- K6 : 基礎スラブおよびケーソンの側面地盤ばね
- K7 : ケーソンの側面地盤ばね
- K8 : 底面地盤ばね (水平)
- K9 : 底面地盤ばね (回転)
- K_P : 杭の軸剛性を置き換えた回転ばね

$$K_P = \sum_{i=1}^n k_{v_i} \cdot y_i^2$$

ここで、

- n : 杭の総本数
- k_{v_i} : i 番目の杭の軸剛性
- y_i : i 番目の杭の図心間距離

図 2-6 基礎構造部のモデル化概念図

2.3 入力地震動について

入力地震動は、一次元波動論に基づき、解放基盤表面レベルで定義される基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する建屋基礎底面及び側面地盤ばねレベルでの地盤の応答として評価する。また、建屋基礎底面レベルにおけるせん断力（以下、「切欠き力」という。）を入力地震動に付加することにより、地盤の切欠き効果を考慮する。ここで、自由地盤の応答は表層地盤の増幅の影響によりケーソン及び杭の下端レベルに比べ建屋基礎底面レベルでの応答が大きくなる。このため、切欠き力もケーソン及び杭の下端レベルに比べ建屋基礎底面レベルで大きくなる。切欠き力は自由地盤の地中の応答（ $E+F$ ）を掘削形状に応じて地表面の応答（ $2E$ ）に補正するものであり、切欠き効果として、保守的に建屋基礎スラブ底面積に応じた切欠き力を考慮する。図 2-7 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。入力地震動の算定には、解析コード「KSHAKE ver.2.0」を用いる。解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、付録 31「計算機プログラム（解析コード）の概要・KSHAKE」に示す。

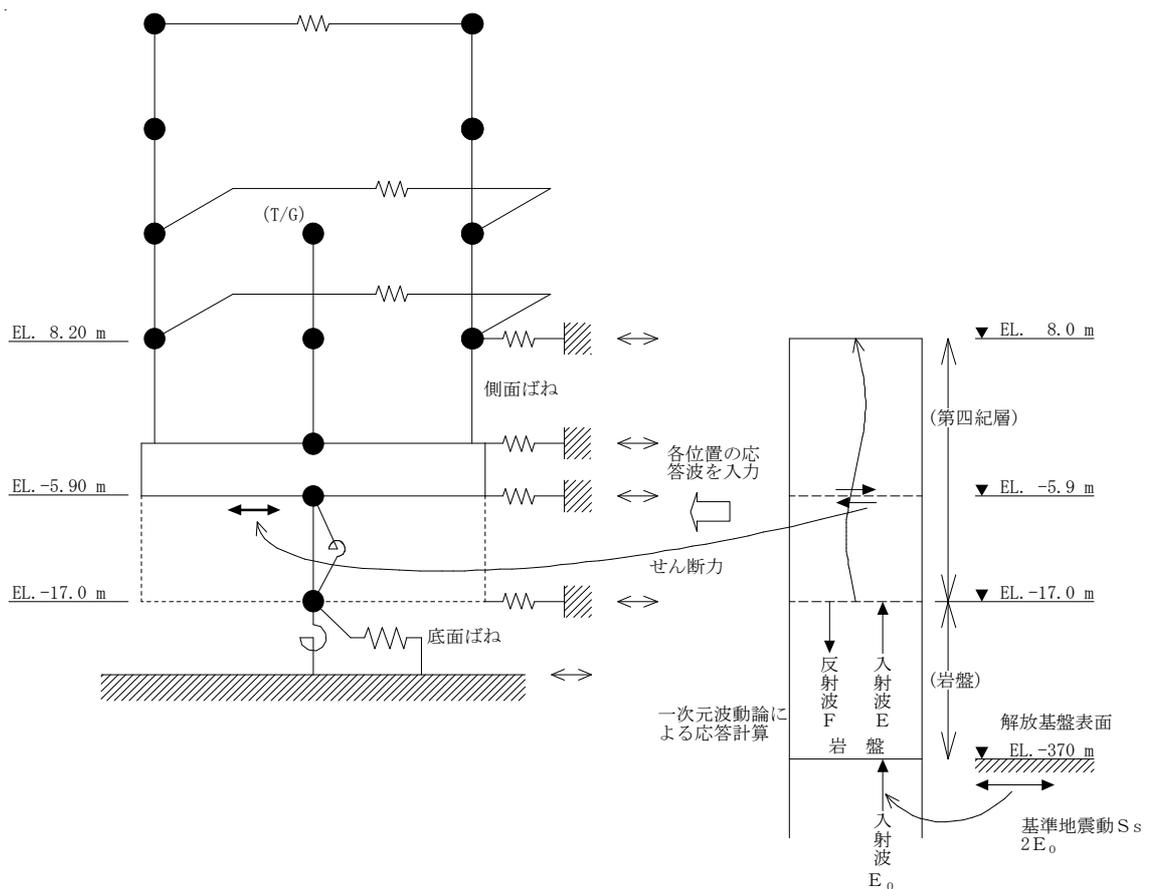


図 2-7 地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図（水平方向）

3. 地盤物性のばらつきを考慮した地震応答解析結果

3.1 地盤物性のばらつきの設定

地盤物性のばらつきは、使用済燃料乾式貯蔵設備設置時に実施した弾性波速度試験結果に基づく地盤のせん断波速度を基本ケースとし、地盤のせん断波速度の変動係数から求めた変動の比率（ $\pm\sigma$ 相当）として考慮する。

原子炉建屋における地盤物性のばらつきを考慮した地震応答解析ケースを表 3-1 に示す。

表 3-1 地盤物性のばらつきを考慮した地震応答解析ケース

	モデル名称	地盤物性
基本ケース	工認モデル	標準地盤
地盤物性の変動による影響	地盤物性+ σ 考慮モデル	標準地盤+ σ 相当
	地盤物性- σ 考慮モデル	標準地盤- σ 相当

3.2 固有値解析結果

基本ケースの地震応答解析モデルの固有値解析結果（固有周期，固有振動数及び刺激係数）を表 3-2 に示す。

表 3-2 (1/2) 固有値解析結果 (NS 方向)

(a) $S_s - D 1$

次 数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.453	2.21	1.846
2	0.274	3.65	-0.747
3	0.249	4.01	-0.539
4	0.235	4.25	-0.607
5	0.210	4.75	-0.921
6	0.202	4.95	-0.705

(b) $S_s - 1 1$

次 数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.435	2.30	1.918
2	0.273	3.66	-0.730
3	0.249	4.02	-0.538
4	0.234	4.27	-0.512
5	0.207	4.83	-0.651
6	0.199	5.02	-0.949

(c) $S_s - 1 2$

次 数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.440	2.27	1.894
2	0.273	3.66	-0.733
3	0.249	4.02	-0.539
4	0.234	4.27	-0.558
5	0.208	4.80	-0.807
6	0.200	4.99	-0.726

(d) $S_s - 1 3$

次 数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.440	2.28	1.899
2	0.273	3.66	-0.733
3	0.249	4.02	-0.539
4	0.234	4.27	-0.546
5	0.208	4.81	-0.777
6	0.200	5.00	-0.781

表 3-2 (1/2) 固有値解析結果 (NS 方向)

(e) Ss-14

次 数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.437	2.29	1.911
2	0.273	3.66	-0.731
3	0.249	4.02	-0.540
4	0.234	4.27	-0.532
5	0.207	4.82	-0.719
6	0.200	5.01	-0.872

(f) Ss-21

次 数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.443	2.26	1.887
2	0.273	3.66	-0.735
3	0.249	4.01	-0.536
4	0.234	4.26	-0.544
5	0.208	4.80	-0.801
6	0.200	4.99	-0.720

(g) Ss-22

次 数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.444	2.25	1.882
2	0.273	3.66	-0.737
3	0.249	4.01	-0.534
4	0.235	4.26	-0.540
5	0.208	4.80	-0.810
6	0.201	4.98	-0.751

(f) Ss-31

次 数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.458	2.18	1.827
2	0.274	3.65	-0.754
3	0.249	4.01	-0.544
4	0.236	4.24	-0.644
5	0.212	4.72	-0.904
6	0.202	4.94	-0.639

3.3 地震応答解析結果

タービン建屋の地盤物性のばらつきを考慮した基準地震動 S_s に対する地震応答解析結果について、最大応答変位を表 3-3～表 3-5 及び図 3-1～図 3-3 に、耐震壁のせん断スケルトンカーブ上の最大応答値を図 3-4～図 3-6 に示す。

表 3-3 最大応答変位一覧 (基準地震動 Ss, 工認モデル, NS 方向)

部位	EL. (m)	質点 番号	最大応答変位 (cm)							
			Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31
西側	40.64	21	3.03	0.89	1.19	1.24	1.09	2.26	2.74	4.25
	28.00	22	2.43	0.70	1.00	1.02	0.89	1.74	2.06	3.56
	18.00	23	1.79	0.53	0.79	0.81	0.68	1.22	1.24	2.27
	8.20	24	1.21	0.39	0.60	0.62	0.50	0.77	0.69	1.31
南側	40.64	31	3.53	1.31	1.64	1.67	1.33	2.84	3.02	4.46
	28.00	32	4.11	1.31	1.74	1.65	1.26	3.74	3.97	5.62
	18.00	33	2.71	0.88	1.13	1.11	1.05	2.23	2.15	3.12
	8.20	34	2.16	0.76	1.07	1.04	0.85	1.76	1.46	2.27
北側	40.64	41	3.53	1.31	1.64	1.67	1.33	2.84	3.02	4.46
	28.00	42	3.32	1.08	1.32	1.28	1.19	2.74	2.69	4.20
	18.00	43	2.30	0.64	0.93	0.91	0.83	1.73	1.68	2.83
	8.20	44	1.40	0.41	0.64	0.64	0.55	0.93	0.86	1.62
東側	40.64	51	2.94	0.86	1.17	1.21	1.09	2.25	2.38	4.06
	28.00	52	2.42	0.70	1.00	1.02	0.89	1.74	1.85	3.56
	18.00	53	1.81	0.53	0.80	0.81	0.68	1.22	1.16	2.28
	8.20	54	1.22	0.39	0.61	0.62	0.51	0.78	0.70	1.33
基礎上端	-4.00	15	0.70	0.24	0.40	0.41	0.32	0.45	0.43	0.80

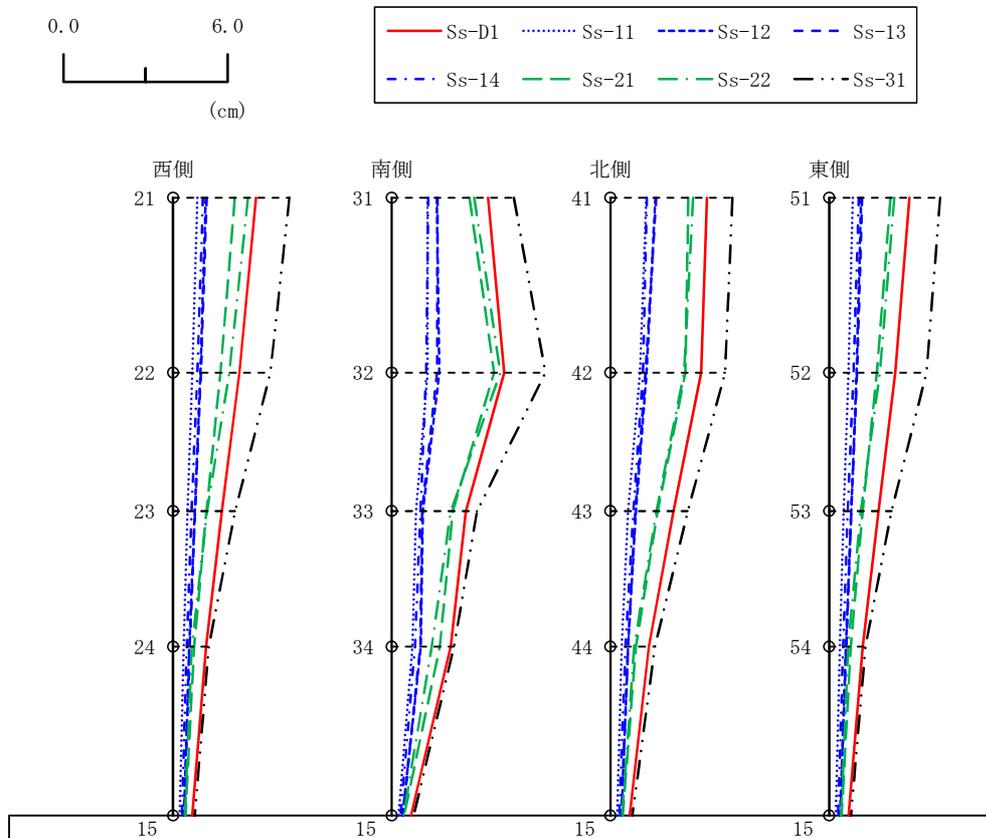


図 3-1 最大応答変位 (基準地震動 Ss, 工認モデル, NS 方向)

表 3-4 最大応答変位一覧（基準地震動 S_s, 地盤+σ 考慮モデル, NS 方向）

部位	EL. (m)	質点 番号	最大応答変位 (cm)			
			S _s -D1	S _s -21	S _s -22	S _s -31
西側	40.64	21	3.03	2.38	3.18	4.43
	28.00	22	2.43	1.81	2.35	3.78
	18.00	23	1.66	1.19	1.27	2.26
	8.20	24	1.06	0.72	0.70	1.24
南側	40.64	31	3.60	2.87	3.34	4.71
	28.00	32	4.45	4.39	4.51	5.76
	18.00	33	2.63	2.33	2.15	3.05
	8.20	34	2.04	1.79	1.46	2.13
北側	40.64	41	3.60	2.87	3.34	4.71
	28.00	42	3.44	2.91	3.11	4.32
	18.00	43	2.26	1.77	1.82	2.86
	8.20	44	1.28	0.89	0.82	1.58
東側	40.64	51	2.99	2.29	2.62	4.27
	28.00	52	2.48	1.84	2.12	3.78
	18.00	53	1.74	1.20	1.17	2.26
	8.20	54	1.08	0.74	0.65	1.27
基礎上端	-4.00	15	0.59	0.43	0.43	0.74

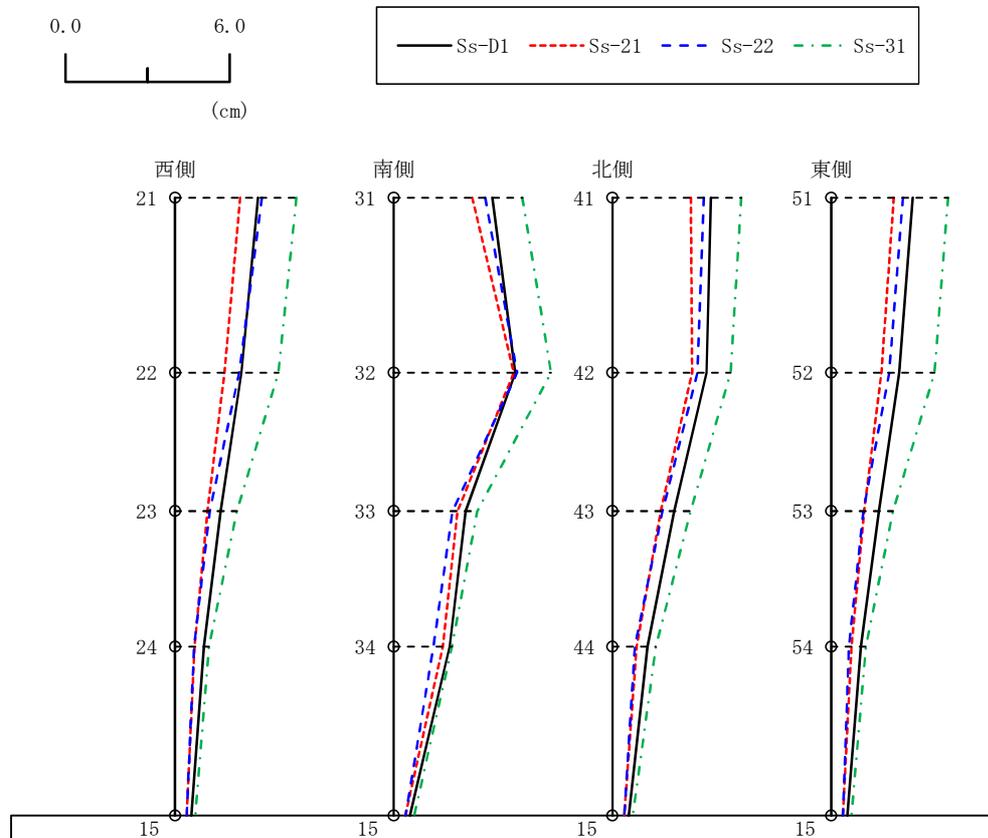


図 3-2 最大応答変位（基準地震動 S_s, 地盤+σ 考慮モデル, NS 方向）

表 3-5 最大応答変位一覧（基準地震動 Ss, 地盤- σ 考慮モデル, NS 方向）

部位	EL. (m)	質点 番号	最大応答変位 (cm)			
			Ss-D1	Ss-21	Ss-22	Ss-31
西側	40.64	21	3.31	2.23	2.74	5.11
	28.00	22	2.66	1.72	2.07	4.21
	18.00	23	1.99	1.24	1.32	2.93
	8.20	24	1.43	0.85	0.80	1.87
南側	40.64	31	3.78	2.74	3.07	5.35
	28.00	32	4.10	3.77	4.17	6.15
	18.00	33	2.83	2.09	2.11	3.80
	8.20	34	2.37	1.69	1.64	3.15
北側	40.64	41	3.78	2.74	3.07	5.35
	28.00	42	3.39	2.58	2.62	5.04
	18.00	43	2.45	1.69	1.70	3.53
	8.20	44	1.60	0.95	0.95	2.19
東側	40.64	51	3.20	2.21	2.41	4.88
	28.00	52	2.64	1.71	1.88	4.23
	18.00	53	1.99	1.24	1.26	2.96
	8.20	54	1.44	0.86	0.81	1.96
基礎上端	-4.00	15	0.88	0.55	0.50	1.09

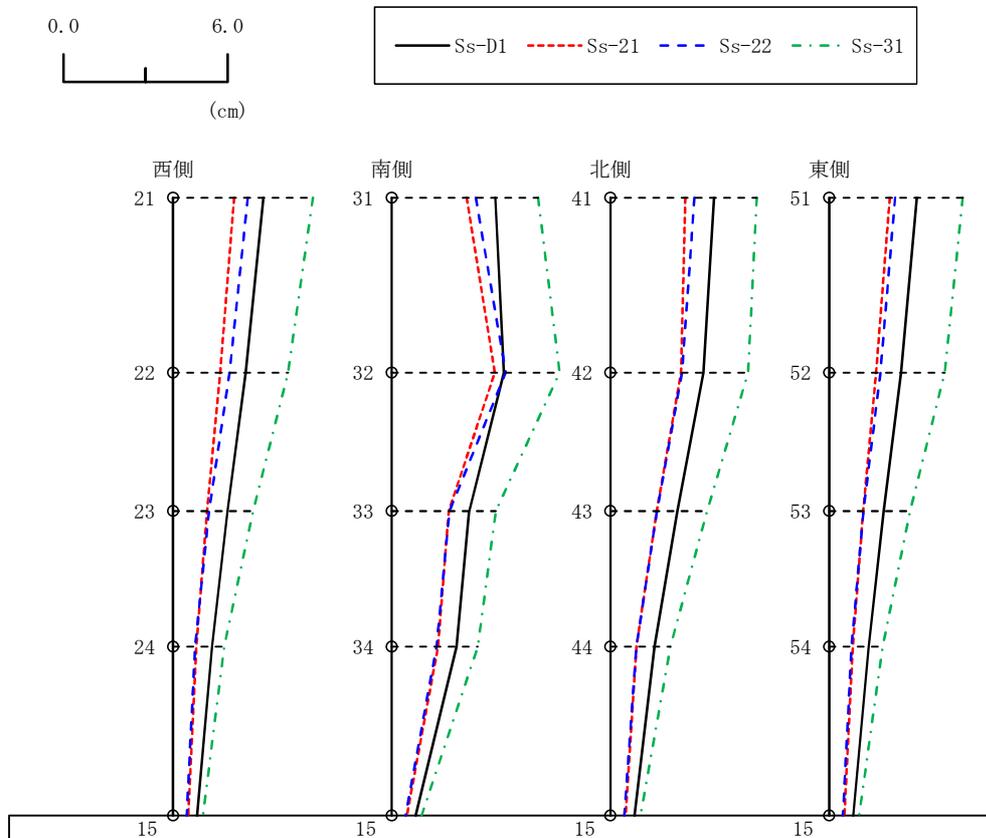
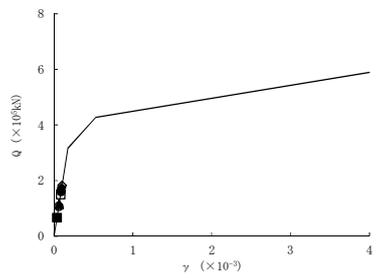
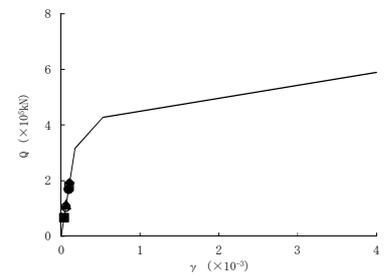


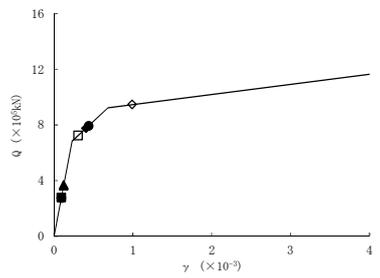
図 3-3 最大応答変位（基準地震動 Ss, 地盤- σ 考慮モデル, NS 方向）



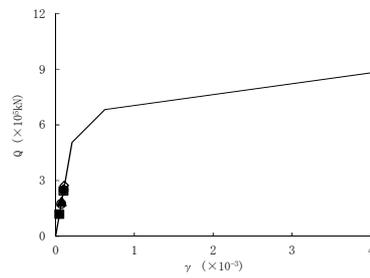
要素 21



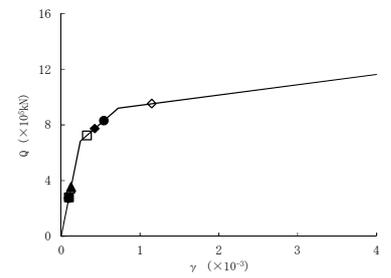
要素 51



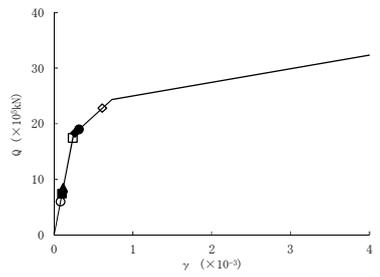
要素 22



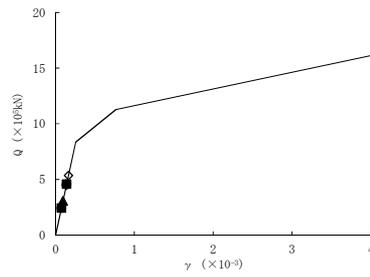
要素 42



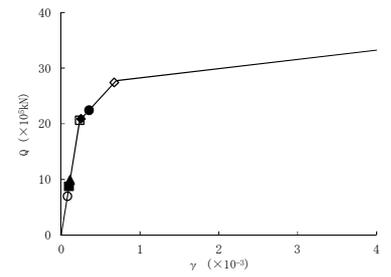
要素 52



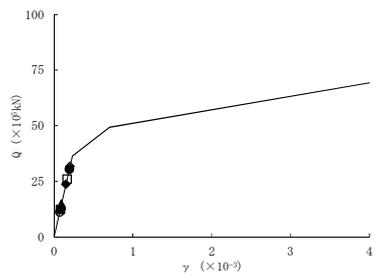
要素 23



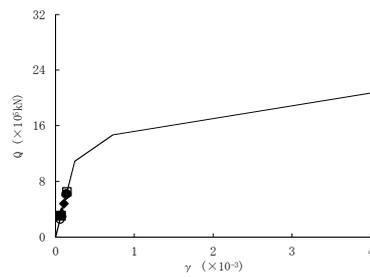
要素 43



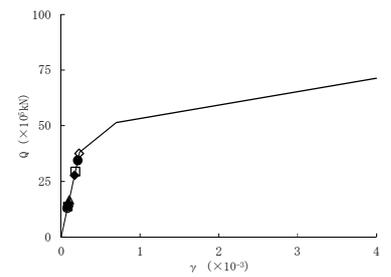
要素 53



要素 24



要素 44



要素 54

図 3-4 せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (基準地震動 Ss, 工認モデル, NS 方向)

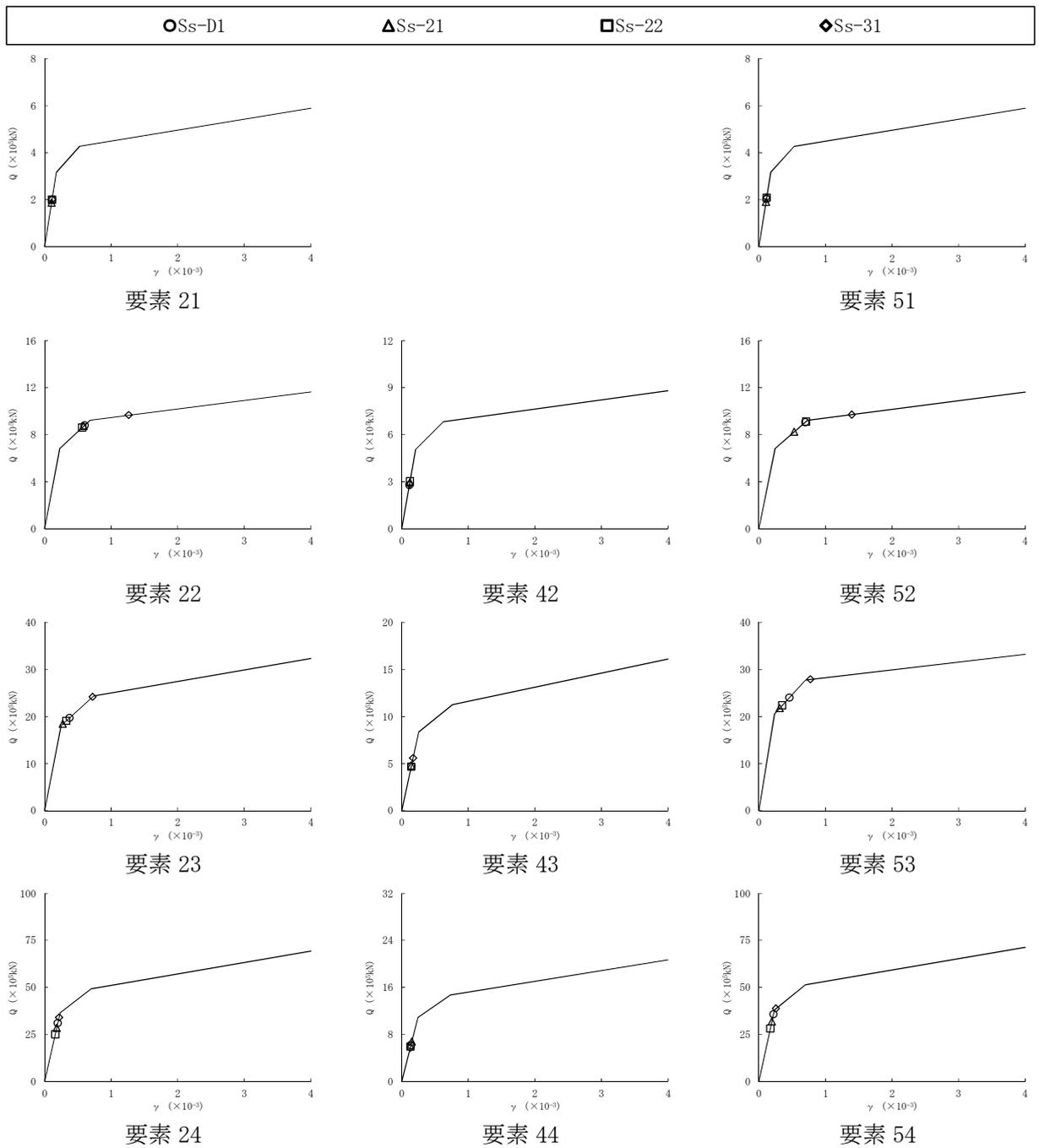
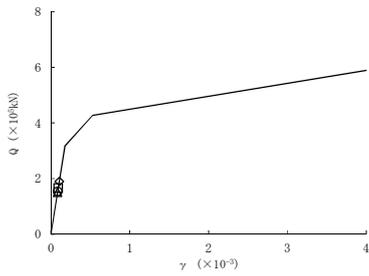
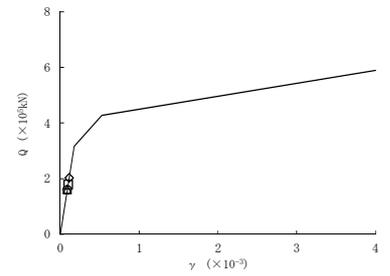


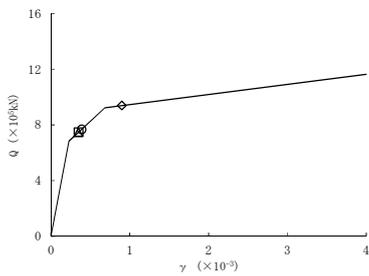
図 3-5 せん断スケルトンカーブ上の最大応答値（基準地震動 Ss，地盤+ σ 考慮モデル，NS 方向）



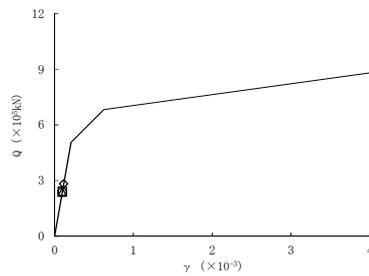
要素 21



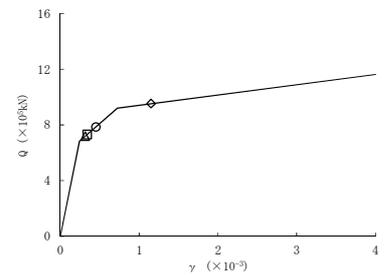
要素 51



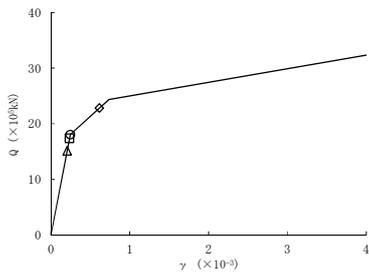
要素 22



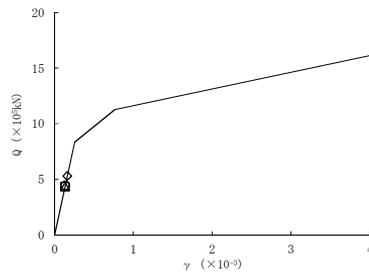
要素 42



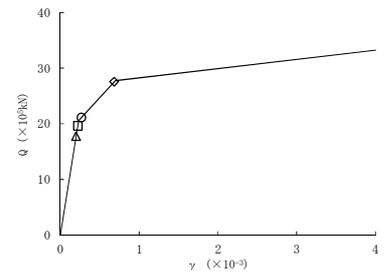
要素 52



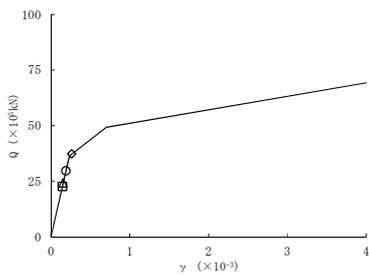
要素 23



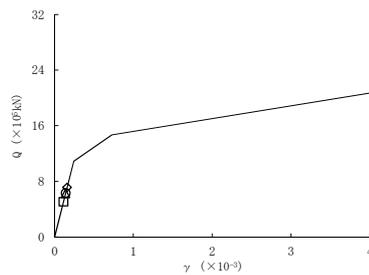
要素 43



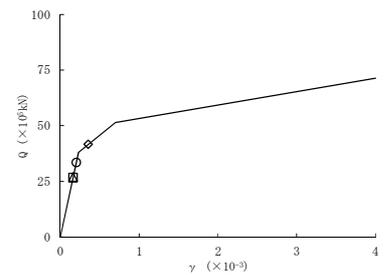
要素 53



要素 24



要素 44



要素 54

図 3-6 せん断スケルトンカーブ上の最大応答値（基準地震動 Ss，地盤-σ 考慮モデル，NS 方向）

4. 原子炉建屋への影響の評価

4.1 建屋間の最大相対変位

最大相対変位は「3. 地盤物性のばらつきを考慮した地震応答解析結果」に示すタービン建屋の最大変位と資料V-2-2-2「原子炉建屋の地震応答計算書」及び補足-400-3「地震応答解析における材料物性のばらつきに関する検討」における地震応答解析結果から求める。

タービン建屋と原子炉建屋の最大相対変位を表 4-1 に示す。なお、最大相対変位は各建屋の最大変位の絶対値和として求める。

最大相対変位は、 S_s-D1 、 S_s-21 、 S_s-22 及び S_s-31 のタービン建屋質点レベル EL. 28.0 m と S_s-31 のタービン建屋質点レベル EL. 18.00 m 及び EL. 8.20 m において、建屋間のクリアランス (50 mm) を超える。

最大相対変位が建屋間のクリアランスを超える箇所について、時刻歴応答変位による時刻歴相対変位の最大値を表 4-2 及び図 4-1～図 4-3 に示す。時刻歴相対変位は地盤物性のばらつき (+1 σ) を考慮した S_s-31 地震時に最大 33.2 mm であり、建屋間のクリアランス (50 mm) 以下となる。

表 4-1 タービン建屋と原子炉建屋との絶対値和による最大相対変位

(1) 基本ケース (1/2)

タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点番号	高さ (EL. +m)	質点番号	高さ (EL. +m)	S _s -D 1	S _s -1 1	S _s -1 2	S _s -1 3
32	28.00	6	29.00	<u>63.4</u>	20.1	27.0	25.7
33	18.00	7	20.30	45.4	14.6	19.4	18.9
34	8.20	8	8.20	34.7	11.8	16.6	16.4
15	-4.00	11	-4.00	15.4	5.4	8.1	8.2

(2) 基本ケース (2/2)

タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点番号	高さ (EL. +m)	質点番号	高さ (EL. +m)	S _s -1 4	S _s -2 1	S _s -2 2	S _s -3 1
32	28.00	6	29.00	21.0	<u>55.2</u>	<u>57.8</u>	<u>85.6</u>
33	18.00	7	20.30	17.5	36.4	35.8	<u>54.7</u>
34	8.20	8	8.20	13.6	27.2	24.0	38.2
15	-4.00	11	-4.00	6.6	10.5	9.5	17.1

(3) 地盤物性のばらつきを考慮 (+1σ)

タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点番号	高さ (EL. +m)	質点番号	高さ (EL. +m)	S _s -D 1	S _s -2 1	S _s -2 2	S _s -3 1
32	28.00	6	29.00	<u>64.1</u>	<u>60.5</u>	<u>63.8</u>	<u>85.5</u>
33	18.00	7	20.30	42.2	36.7	36.1	<u>52.4</u>
34	8.20	8	8.20	31.6	27.0	23.7	35.2
15	-4.00	11	-4.00	12.9	9.9	9.1	15.6

(4) 地盤物性のばらつきを考慮 (-1σ)

タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点番号	高さ (EL. +m)	質点番号	高さ (EL. +m)	S _s -D 1	S _s -2 1	S _s -2 2	S _s -3 1
32	28.00	6	29.00	<u>66.5</u>	<u>55.8</u>	<u>59.6</u>	<u>98.2</u>
33	18.00	7	20.30	49.5	35.1	35.4	<u>68.1</u>
34	8.20	8	8.20	39.1	26.7	25.9	<u>52.6</u>
15	-4.00	11	-4.00	19.0	11.9	10.7	24.3

※1：タービン建屋及び原子炉建屋の質点の高さが異なる場合の最大相対変位については、タービン建屋の質点に対して、その直上の原子炉建屋質点の応答を用いて最大相対変位を算定する。

※2：アンダーラインは建屋間のクリアランス (50mm) を超える値を示す。

※3：網掛けは各基準地震動 S_s における最大値を示す。

表 4-2 タービン建屋と原子炉建屋との時刻歴相対変位の最大値

(1) 基本ケース

タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点 番号	高さ (EL. +m)	質点 番号	高さ (EL. +m)	S _s -D 1	S _s -2 1	S _s -2 2	S _s -3 1
32	28.00	6	29.00	28.6	26.0	26.1	28.4
33	18.00	7	20.30	—	—	—	8.3

(2) 地盤物性のばらつきを考慮 (+1σ)

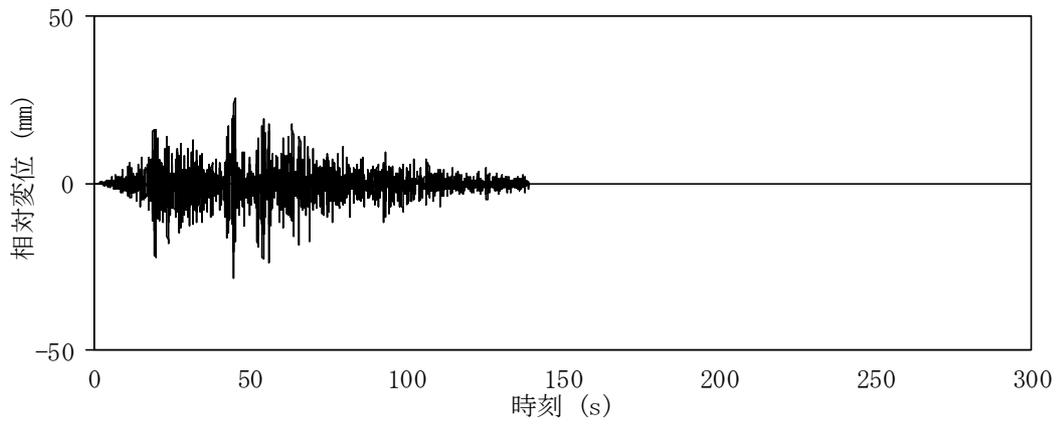
タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点 番号	高さ (EL. +m)	質点 番号	高さ (EL. +m)	S _s -D 1	S _s -2 1	S _s -2 2	S _s -3 1
32	28.00	6	29.00	30.7	32.3	32.1	33.2
33	18.00	7	20.30	—	—	—	11.7

(3) 地盤物性のばらつきを考慮 (-1σ)

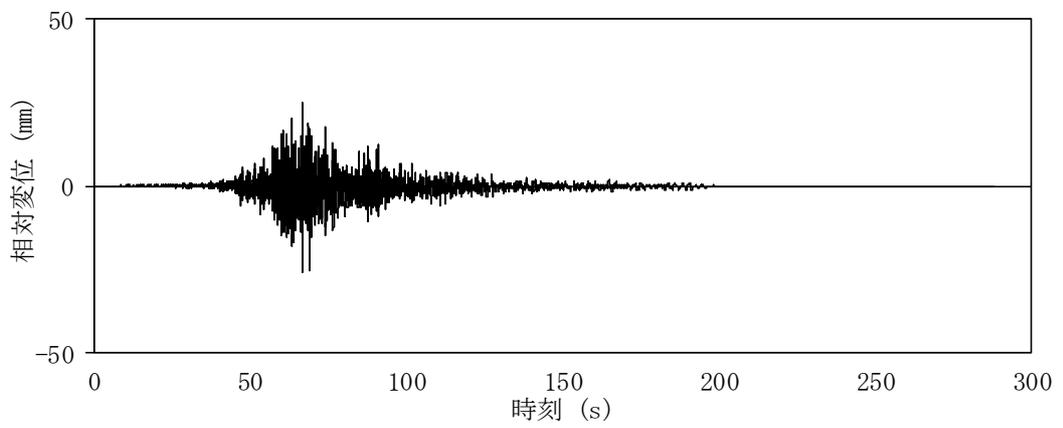
タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点 番号	高さ (EL. +m)	質点 番号	高さ (EL. +m)	S _s -D 1	S _s -2 1	S _s -2 2	S _s -3 1
32	28.00	6	29.00	30.2	27.5	27.8	25.3
33	18.00	7	20.30	—	—	—	8.9
34	8.20	8	8.20	—	—	—	10.9

※1：タービン建屋及び原子炉建屋の質点の高さが異なる場合の時刻歴相対変位については、タービン建屋の質点に対して、その直上の原子炉建屋質点の応答を用いて最大相対変位を算定する。

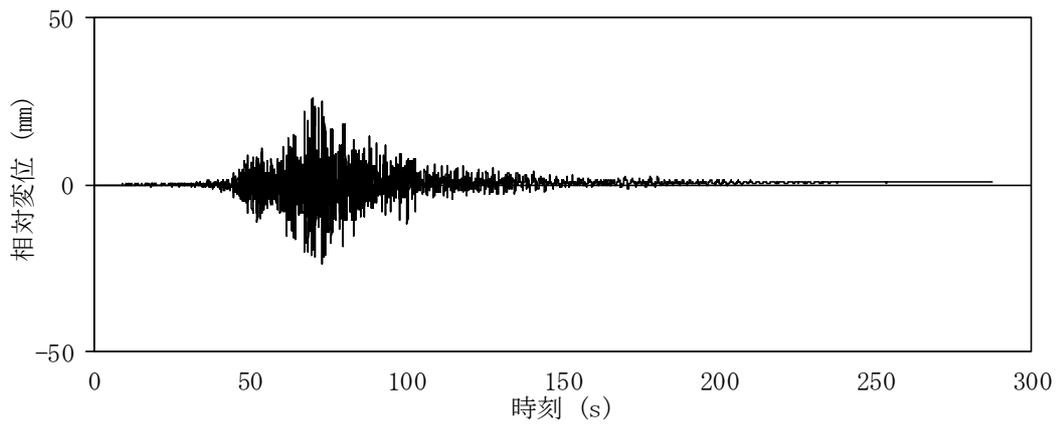
※2：網掛けは各基準地震動 S_s における最大値を示す。



(1) $S_s - D 1$, EL. 28.00 m

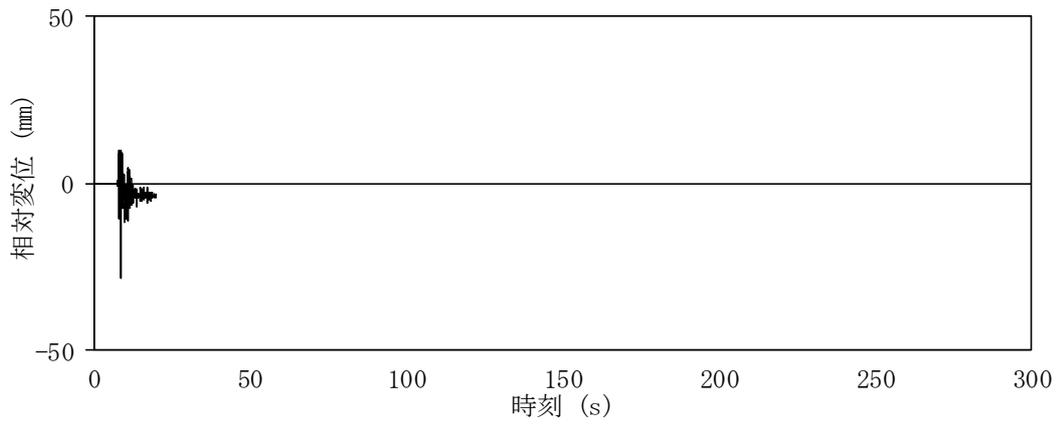


(2) $S_s - 2 1$, EL. 28.00 m

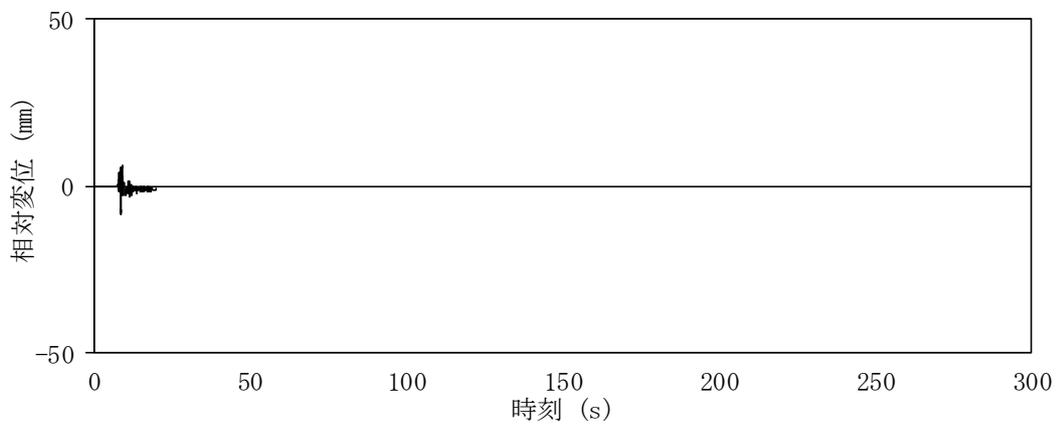


(3) $S_s - 2 2$, EL. 28.00 m

図 4-1(1/2) 時刻歴相対変位 (基本ケース)

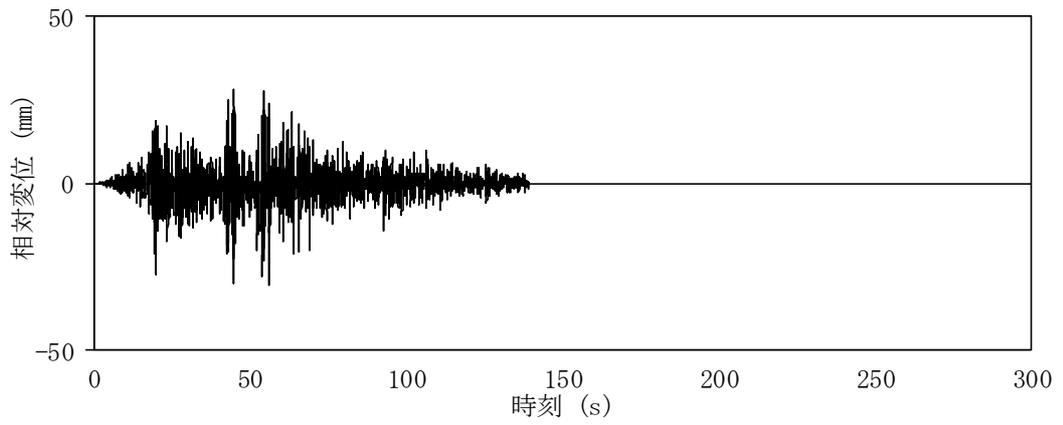


(4) S_s - 3 1, EL. 28.00 m

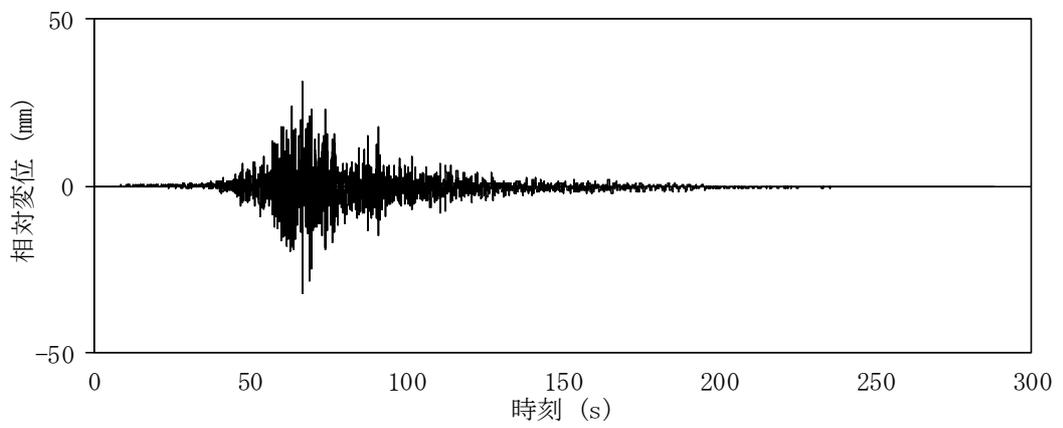


(5) S_s - 3 1, EL. 18.00 m

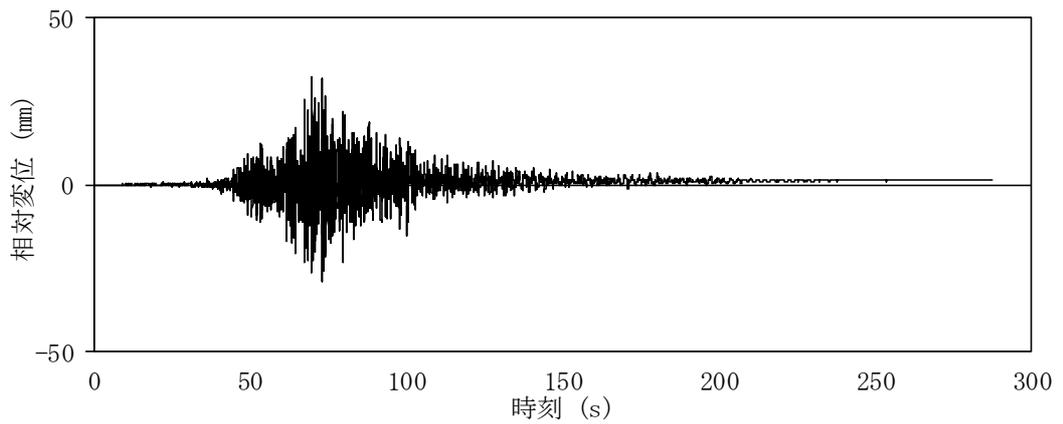
図 4-1(2/2) 時刻歴相対変位 (基本ケース)



(1) $S_s - D 1$, EL. 28.00 m

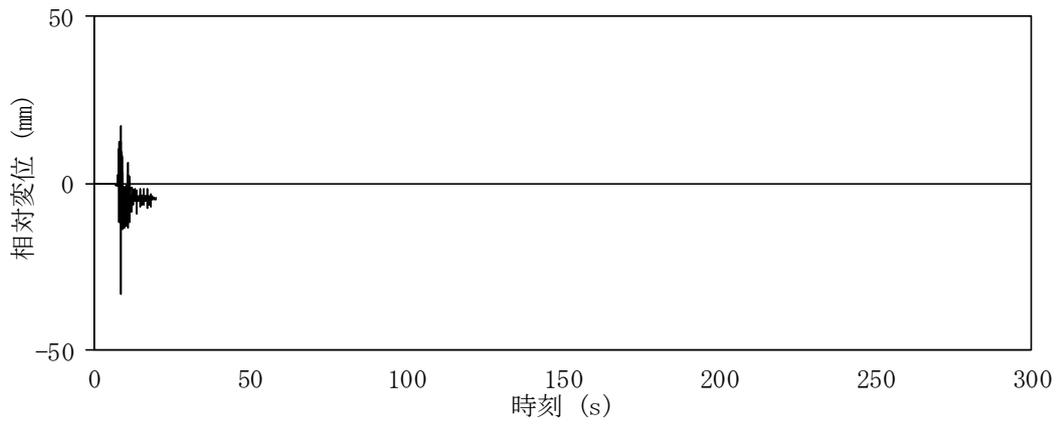


(2) $S_s - 2 1$, EL. 28.00 m

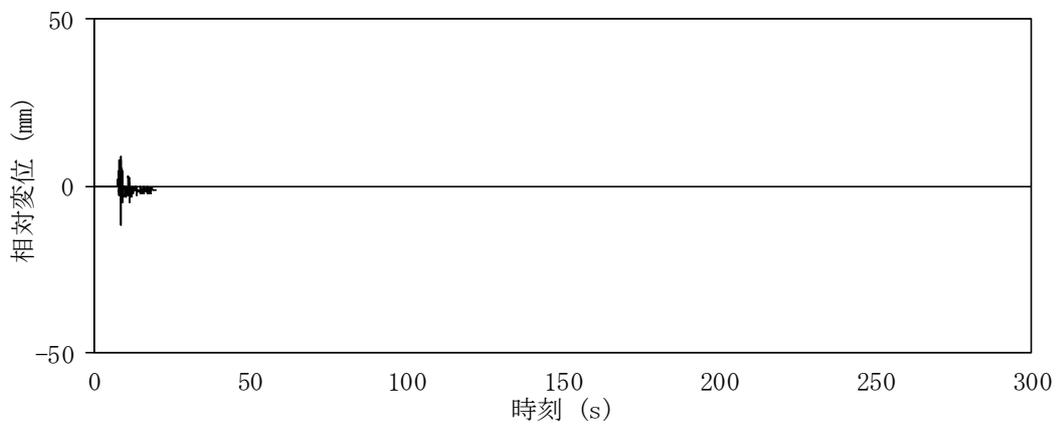


(3) $S_s - 2 2$, EL. 28.00 m

図 4-2(1/2) 時刻歴相対変位 (地盤物性のばらつきを考慮, $+1\sigma$)

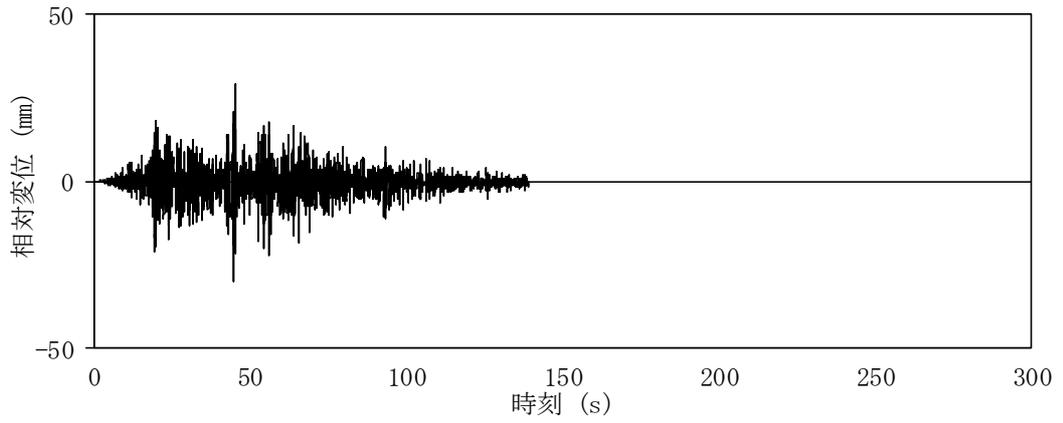


(4) $S_s - 3 1$, EL. 28.00 m

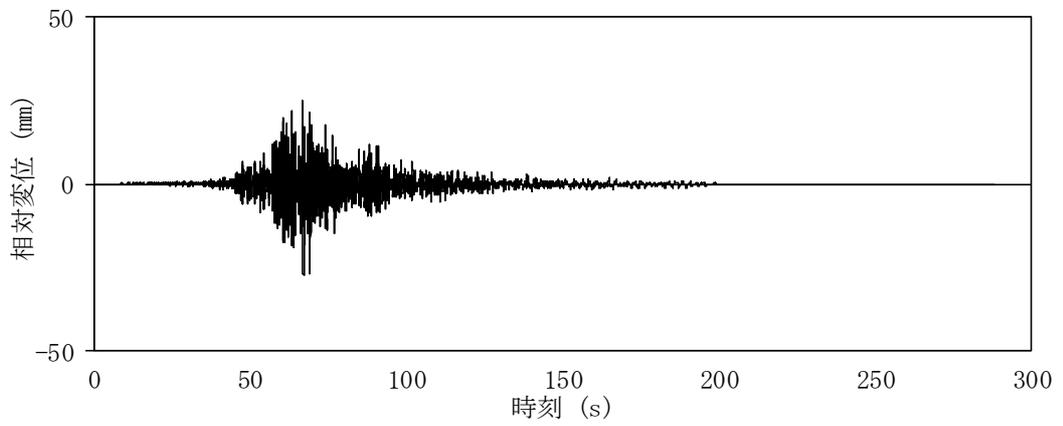


(5) $S_s - 3 1$, EL. 18.00 m

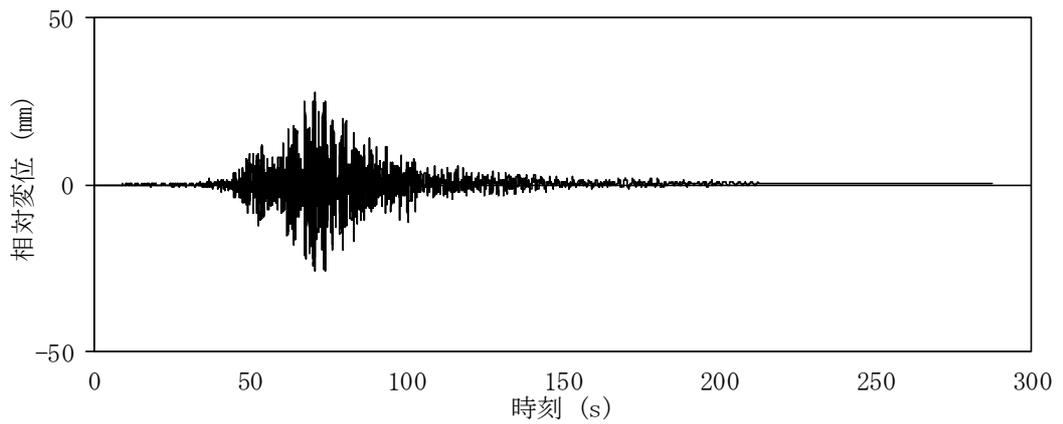
図 4-2(2/2) 時刻歴相対変位 (地盤物性のばらつきを考慮, $+1\sigma$)



(1) $S_s - D 1$, EL. 28.00 m

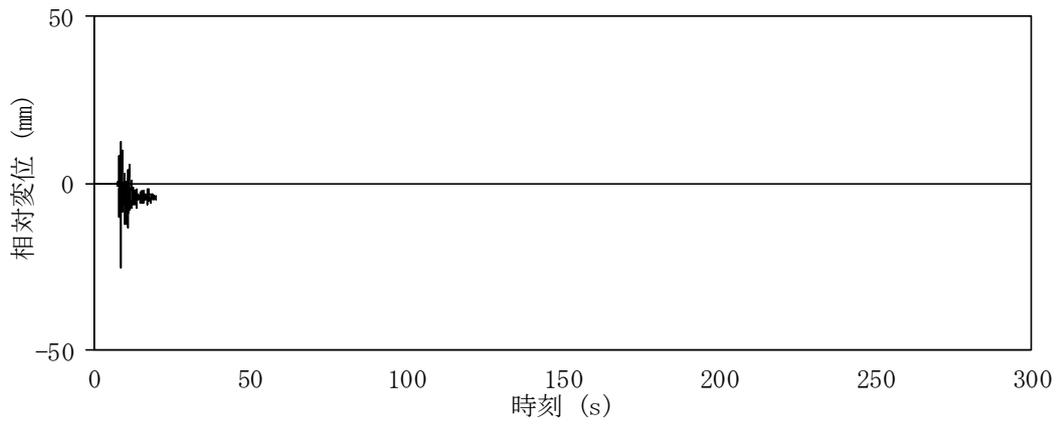


(2) $S_s - 2 1$, EL. 28.00 m

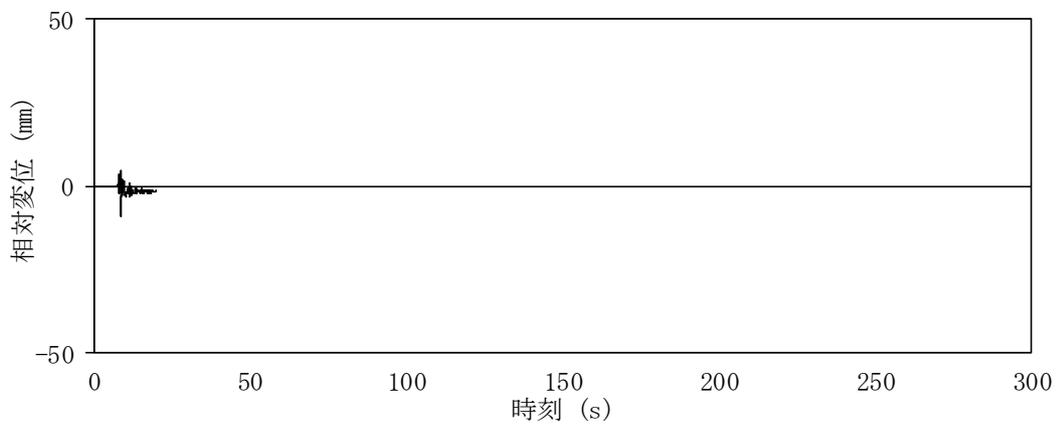


(3) $S_s - 2 2$, EL. 28.00 m

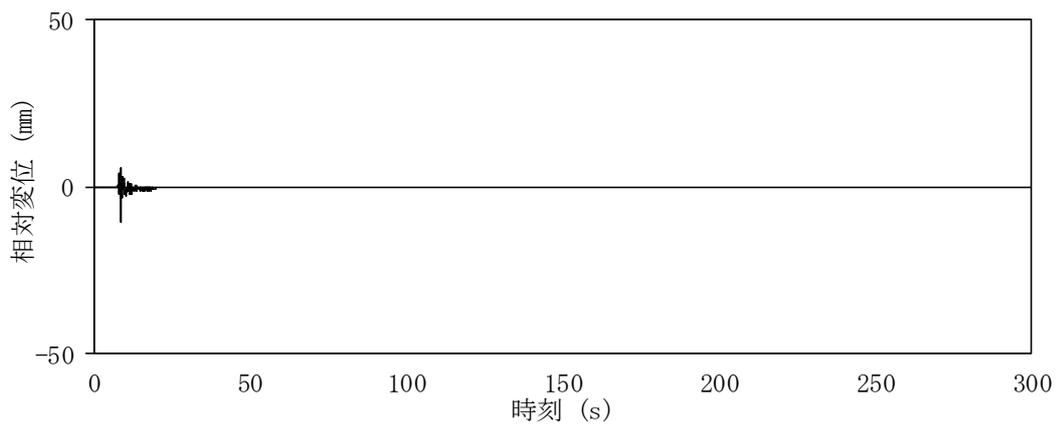
図 4-3(1/2) 時刻歴相対変位 (地盤物性のばらつきを考慮, -1σ)



(4) $S_s - 31$, EL. 28.00 m



(5) $S_s - 31$, EL. 18.00 m



(6) $S_s - 31$, EL. 8.20 m

図 4-3(2/2) 時刻歴相対変位 (地盤物性のばらつきを考慮, -1σ)

4.2 原子炉建屋のねじれを考慮した検討

補足-340-11「原子炉建屋の耐震性評価に関する補足説明」に示すように、原子炉建屋では設定した地震力を各耐震壁のせん断力に分配する際に偏心の影響を考慮している。ここでは、原子炉建屋の応答変位にねじれ補正係数 α を乗じてねじれ振動を考慮した応答変位を求め、タービン建屋との相対変位を算出し、原子炉建屋のねじれ振動による影響を評価する。

既工事計画認可申請書 第1回申請 添付書類「Ⅲ-5 原子炉建屋の強度計算書」に示される原子炉建屋のNS方向のねじれ補正係数 α の最大値を表4-3に、タービン建屋とねじれ補正係数を考慮した原子炉建屋の相対変位の絶対値和を表4-4に示す。ここで、タービン建屋については多軸モデルを床ばねで接続した地震応答解析モデルを用いており、建屋平面全体の重心と剛心の差が建屋応答に与える影響は考慮されている。表4-4に示すように絶対値和による最大相対変位は建屋間のクリアランス50mmを超過する。

絶対値和による最大相対変位が建屋間のクリアランスを超える箇所について、時刻歴応答変位による時刻歴相対変位の最大値を表4-4及び図4-4～図4-6に示す。原子炉建屋の応答変位時刻歴にねじれ振動を考慮すると、時刻歴相対変位は地盤物性のばらつき(+1 σ)を考慮したS_s-31地震時に最大30.9mmであり、建屋間のクリアランス(50mm)以下となる。

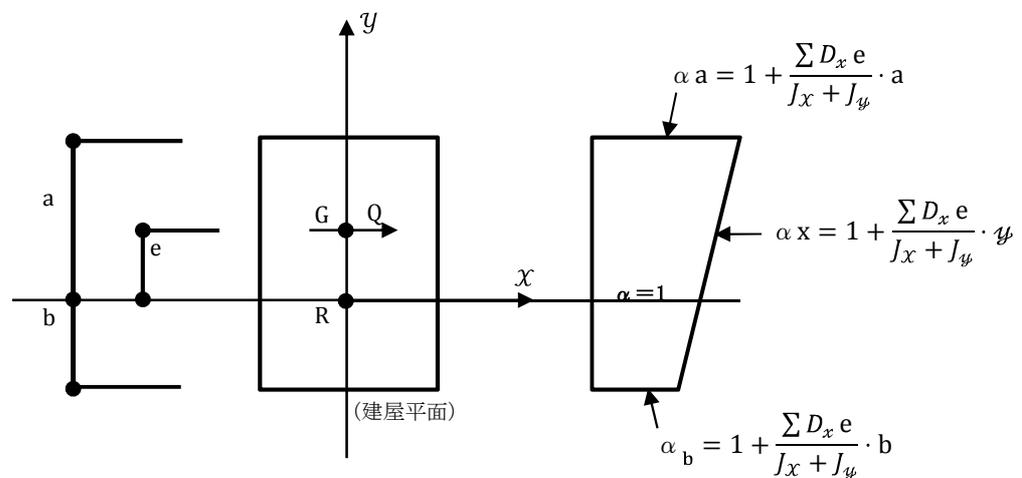
表 4-3 原子炉建屋のねじれ補正係数 α

地震応答 解析モデル 質点番号	EL. (m)	ねじれ補正係数 α
1	63.65	1.000
2	57.00	1.000
3	46.50	1.019
4	38.80	1.030
5	34.70	1.030
6	29.00	1.171
7	20.30	1.231
8	14.00	1.306
9	8.20	1.014
10	2.00	1.014

[原子炉建屋のねじれ補正係数 α の設定]

ねじれ補正係数 α の設定については、既工事計画認可申請書 第 1 回申請 添付書類「Ⅲ-5 原子炉建屋の強度計算書」に記載される。

以下に、ねじれ補正係数 α の設定について示す。



G : 重心 (剪断力中心) R : 剛心

Q : 層剪断力

D_x : x 方向の剛性 D_y : y 方向の剛性

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

e : 偏心距離 α : 振れ補正係数

表 4-4 タービン建屋と原子炉建屋との絶対値和による最大相対変位
(原子炉建屋のねじれ影響考慮)

(1) 基本ケース (1/2)

タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点 番号	高さ (EL. +m)	質点 番号	高さ (EL. +m)	S _s -D 1	S _s -1 1	S _s -1 2	S _s -1 3
32	28.00	6	29.00	<u>67.2</u>	21.2	28.6	27.2
33	18.00	7	20.30	49.6	15.9	21.2	20.7
34	8.20	8	8.20	34.9	11.9	16.7	16.5
15	-4.00	11	-4.00	15.5	5.4	8.1	8.2

(2) 基本ケース (2/2)

タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点 番号	高さ (EL. +m)	質点 番号	高さ (EL. +m)	S _s -1 4	S _s -2 1	S _s -2 2	S _s -3 1
32	28.00	6	29.00	22.4	<u>58.3</u>	<u>60.8</u>	<u>90.7</u>
33	18.00	7	20.30	19.0	39.6	39.1	<u>60.1</u>
34	8.20	8	8.20	13.7	27.3	24.1	38.5
15	-4.00	11	-4.00	6.7	10.6	9.6	17.2

(3) 地盤物性のばらつきを考慮 (+1σ)

タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点 番号	高さ (EL. +m)	質点 番号	高さ (EL. +m)	S _s -D 1	S _s -2 1	S _s -2 2	S _s -3 1
32	28.00	6	29.00	<u>67.5</u>	<u>63.4</u>	<u>67.0</u>	<u>90.2</u>
33	18.00	7	20.30	45.9	39.8	39.4	<u>57.4</u>
34	8.20	8	8.20	31.8	27.1	23.8	35.4
15	-4.00	11	-4.00	13.0	9.9	9.1	15.8

(4) 地盤物性のばらつきを考慮 (-1σ)

タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点 番号	高さ (EL. +m)	質点 番号	高さ (EL. +m)	S _s -D 1	S _s -2 1	S _s -2 2	S _s -3 1
32	28.00	6	29.00	<u>70.9</u>	<u>58.9</u>	<u>62.7</u>	<u>104.5</u>
33	18.00	7	20.30	<u>54.4</u>	38.4	38.7	<u>75.1</u>
34	8.20	8	8.20	39.3	26.8	26.1	<u>52.9</u>
15	-4.00	11	-4.00	19.1	12.0	10.7	24.5

※1：タービン建屋及び原子炉建屋の質点の高さが異なる場合の最大相対変位については、タービン建屋の質点に対して、その直上の原子炉建屋質点の応答を用いて最大相対変位を算定する。

※2：アンダーラインは建屋間のクリアランス (50mm) を超える値を示す。

※3：網掛けは各基準地震動 S_s における最大値を示す。

表 4-5 タービン建屋と原子炉建屋との時刻歴相対変位の最大値
(原子炉建屋のねじれ影響考慮)

(1) 基本ケース

タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点 番号	高さ (EL. +m)	質点 番号	高さ (EL. +m)	S _s -D 1	S _s -2 1	S _s -2 2	S _s -3 1
32	28.00	6	29.00	27.0	24.0	23.7	24.0
33	18.00	7	20.30	—	—	—	7.4

(3) 地盤物性のばらつきを考慮 (+1σ)

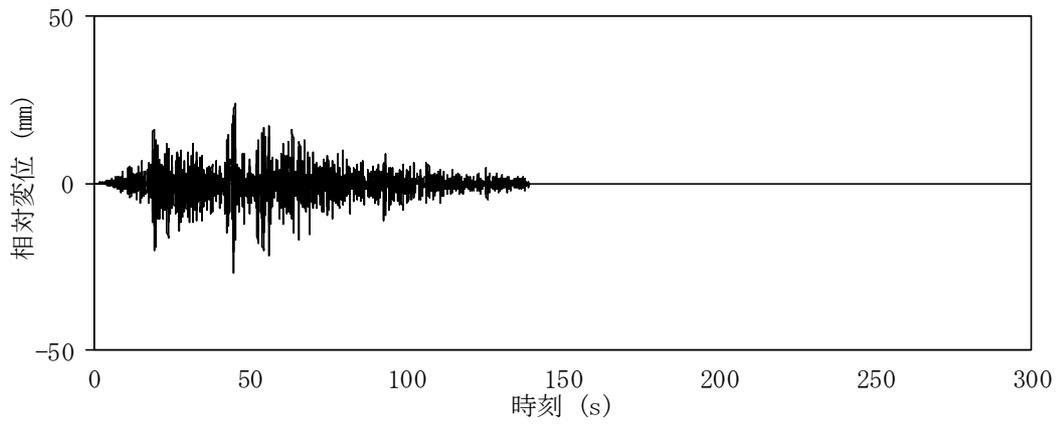
タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点 番号	高さ (EL. +m)	質点 番号	高さ (EL. +m)	S _s -D 1	S _s -2 1	S _s -2 2	S _s -3 1
32	28.00	6	29.00	29.3	30.4	30.9	29.4
33	18.00	7	20.30	—	—	—	10.0

(4) 地盤物性のばらつきを考慮 (-1σ)

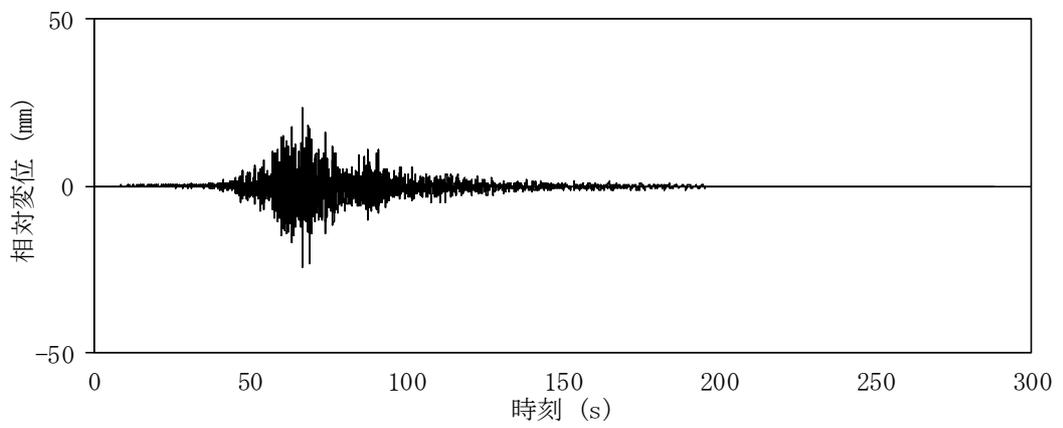
タービン建屋		原子炉建屋		最大相対変位 ^{※1} (mm)			
質点 番号	高さ (EL. +m)	質点 番号	高さ (EL. +m)	S _s -D 1	S _s -2 1	S _s -2 2	S _s -3 1
32	28.00	6	29.00	28.6	25.8	25.5	19.6
33	18.00	7	20.30	3.7	—	—	4.5
34	8.20	8	8.20	—	—	—	10.6

※1：タービン建屋及び原子炉建屋の質点の高さが異なる場合の時刻歴相対変位については、タービン建屋の質点に対して、その直上の原子炉建屋質点の応答を用いて最大相対変位を算定する。

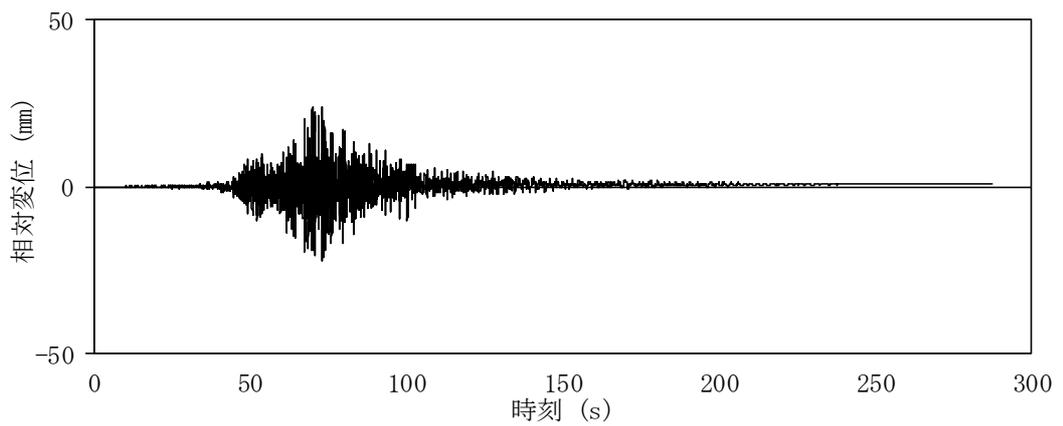
※2：網掛けは各基準地震動 S_s における最大値を示す。



(1) $S_s - D 1$, EL. 28.00 m

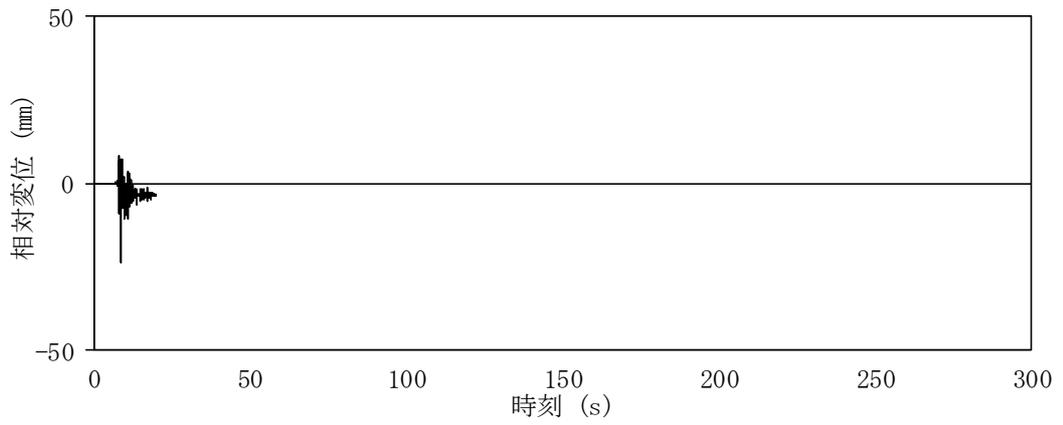


(2) $S_s - 2 1$, EL. 28.00 m

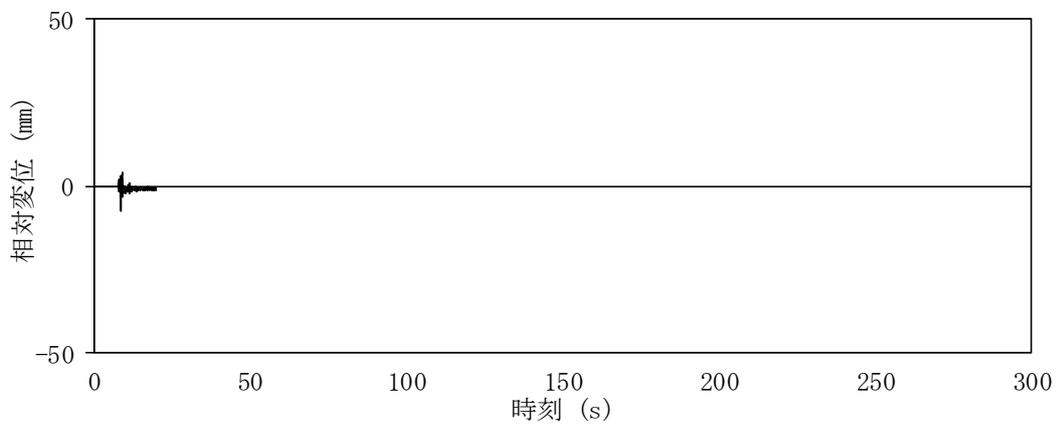


(3) $S_s - 2 2$, EL. 28.00 m

図 4-4(1/2) 時刻歴相対変位 (基本ケース)

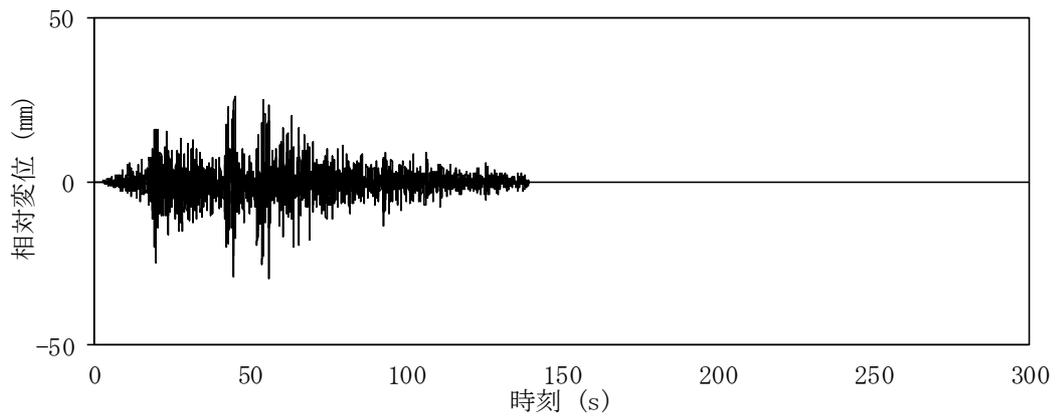


(4) S_s - 3 1, EL. 28.00 m

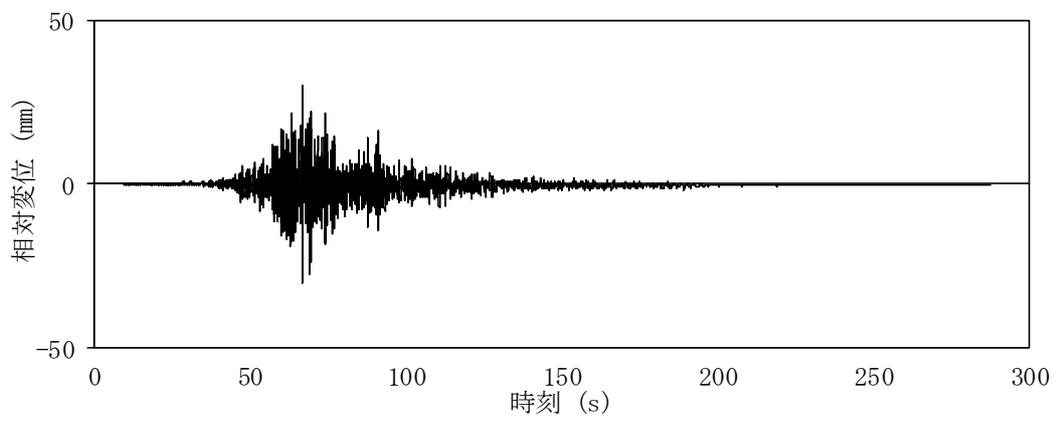


(5) S_s - 3 1, EL. 18.00 m

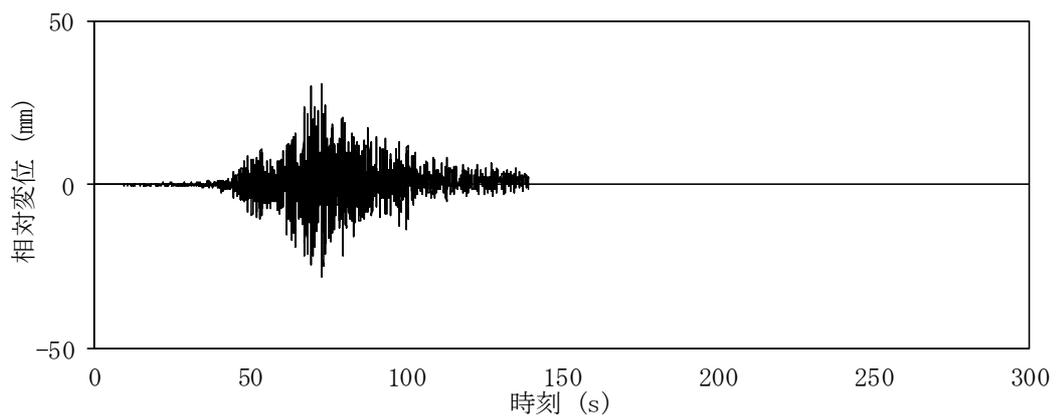
図 4-4(2/2) 時刻歴相対変位 (基本ケース)



(1) $S_s - D 1$, EL. 28.00 m

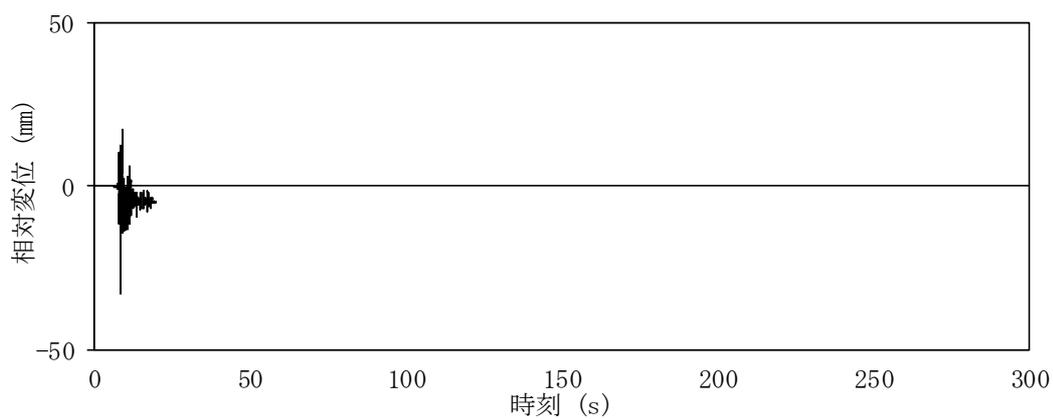


(2) $S_s - 2 1$, EL. 28.00 m

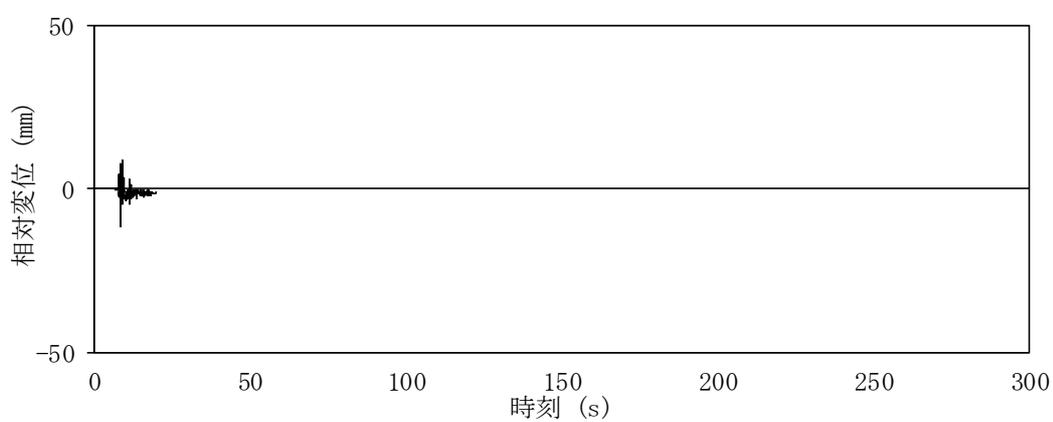


(3) $S_s - 2 2$, EL. 28.00 m

図 4-5(1/2) 時刻歴相対変位 (地盤物性のばらつきを考慮, $+1\sigma$)

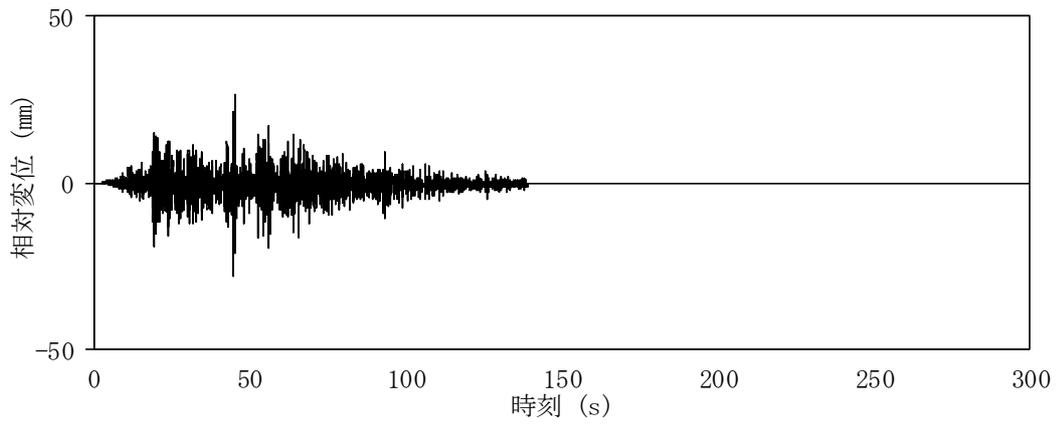


(4) $S_s - 3 1$, EL. 28.00 m

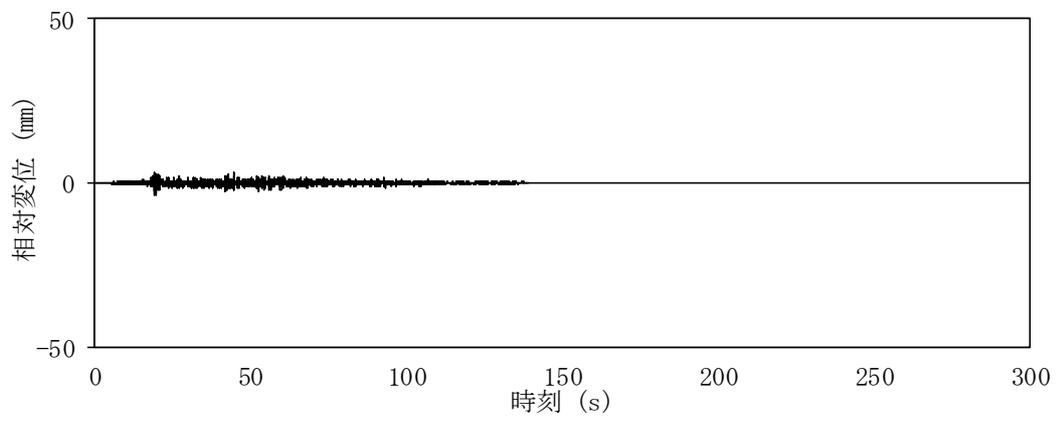


(5) $S_s - 3 1$, EL. 18.00 m

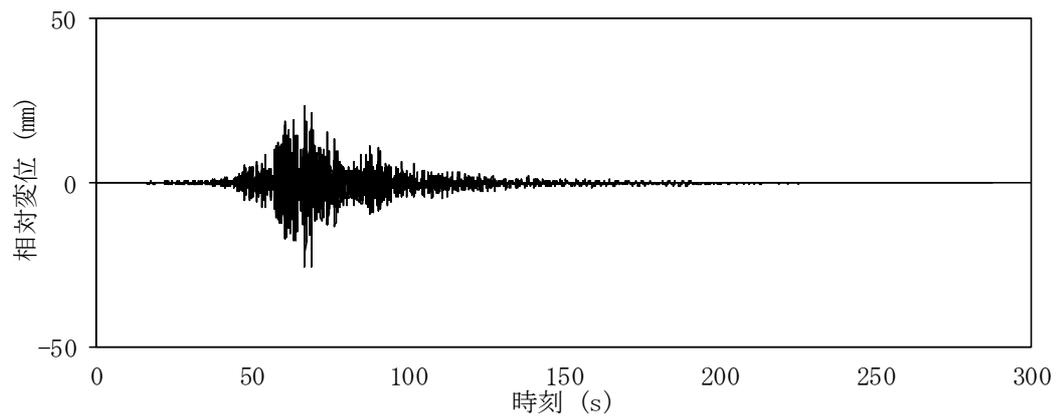
図 4-5(2/2) 時刻歴相対変位 (地盤物性のばらつきを考慮, $+1\sigma$)



(1) S_s - D 1, EL. 28.00 m

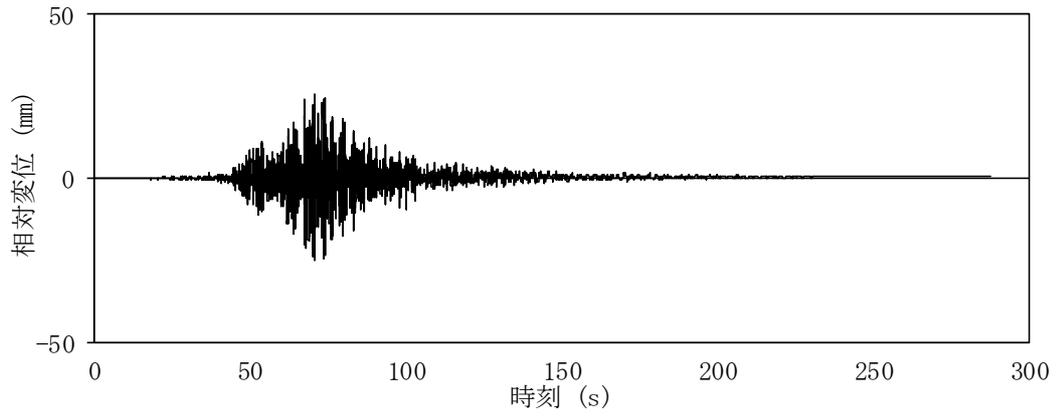


(2) S_s - D 1, EL. 18.00 m

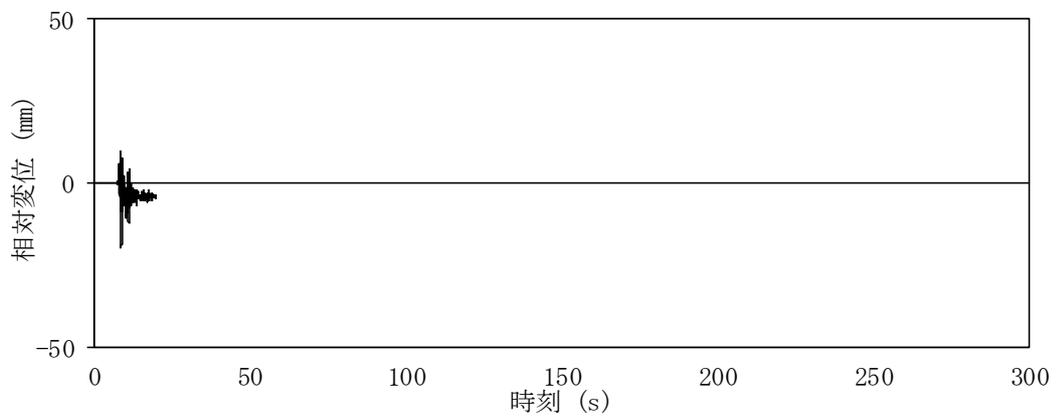


(3) S_s - 2 1, EL. 28.00 m

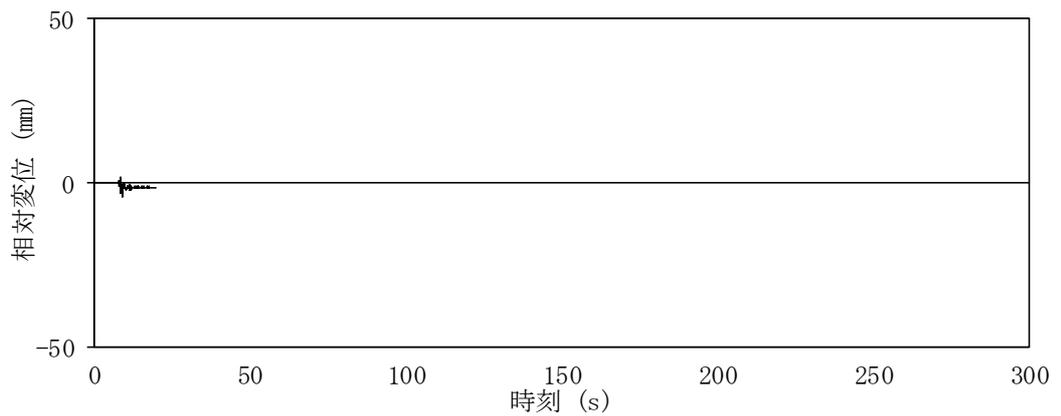
図 4-6(1/3) 時刻歴相対変位 (地盤物性のばらつきを考慮, -1σ)



(4) S_s - 2 2, EL. 28.00 m

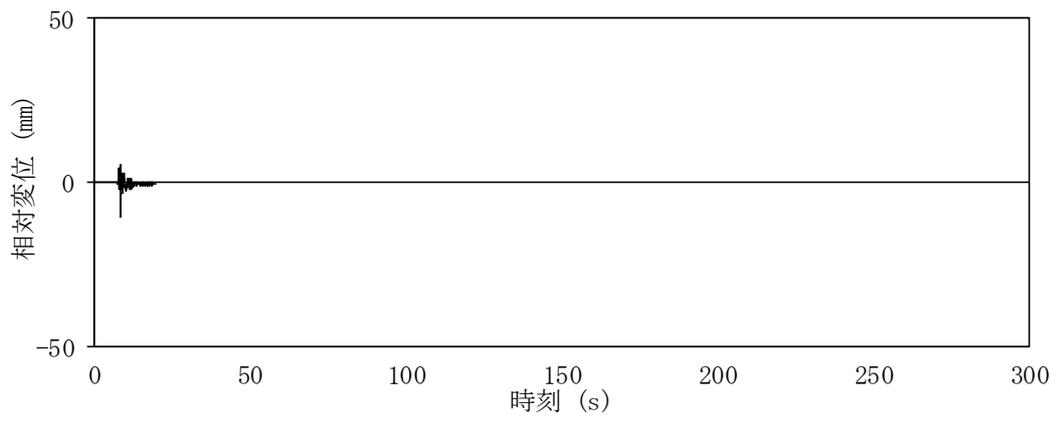


(5) S_s - 3 1, EL. 28.00 m



(6) S_s - 3 1, EL. 18.00 m

図 4-6(2/3) 時刻歴相対変位 (地盤物性のばらつきを考慮, -1σ)



(7) $S_s - 31$, EL. 8.20 m

図 4-6(3/3) 時刻歴相対変位 (地盤物性のばらつきを考慮, -1σ)

別紙 1 タービン建屋の EW 方向の地震応答解析結果

目次

1. 検討概要.....	別紙 1-1
2. 地震応答解析モデル.....	別紙 1-1
3. 地震応答解析結果.....	別紙 1-7

1. 検討概要

タービン建屋の EW 方向について、地盤物性のばらつきを考慮した基準地震動 S_s に対する地震応答解析結果を確認する。確認する応答は耐震壁のせん断ひずみとする。

2. 地震応答解析モデル

タービン建屋の EW 方向の地震応答解析モデルを図 2-1 に、地震応答解析モデルの設定に用いた建物・構築物の物性値を表 2-1 に、諸元を表 2-2 に示す。

建物・構築物の鉄筋コンクリート耐震壁については、せん断剛性として地震方向耐震壁のウェブ部分のせん断剛性を考慮し、曲げ剛性として地震方向耐震壁のウェブ部分に加えて、フランジ部分の曲げ剛性を考慮する。

復元力特性は、耐震壁のせん断及び曲げ剛性については、建屋の EW 方向に層を単位として、「J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版」に基づいて設定する。タービン建屋の各部材について算出したせん断及び曲げのスケルトン曲線の諸数値を表 2-3 及び表 2-4 に示す。

NS 方向と同様にタービン建屋の中央部には T/G 架台が配置されているため、EW 方向の地震応答解析モデルは建屋部を南北の 2 軸に分割し、T/G 架台と合せて 3 軸でモデル化し、T/G 架台を除く各軸は床の面内せん断剛性を考慮した床ばねで接続している。

各軸の支配領域と耐震要素を図 2-2 に、床ばねの算定領域を図 2-3 に示す。

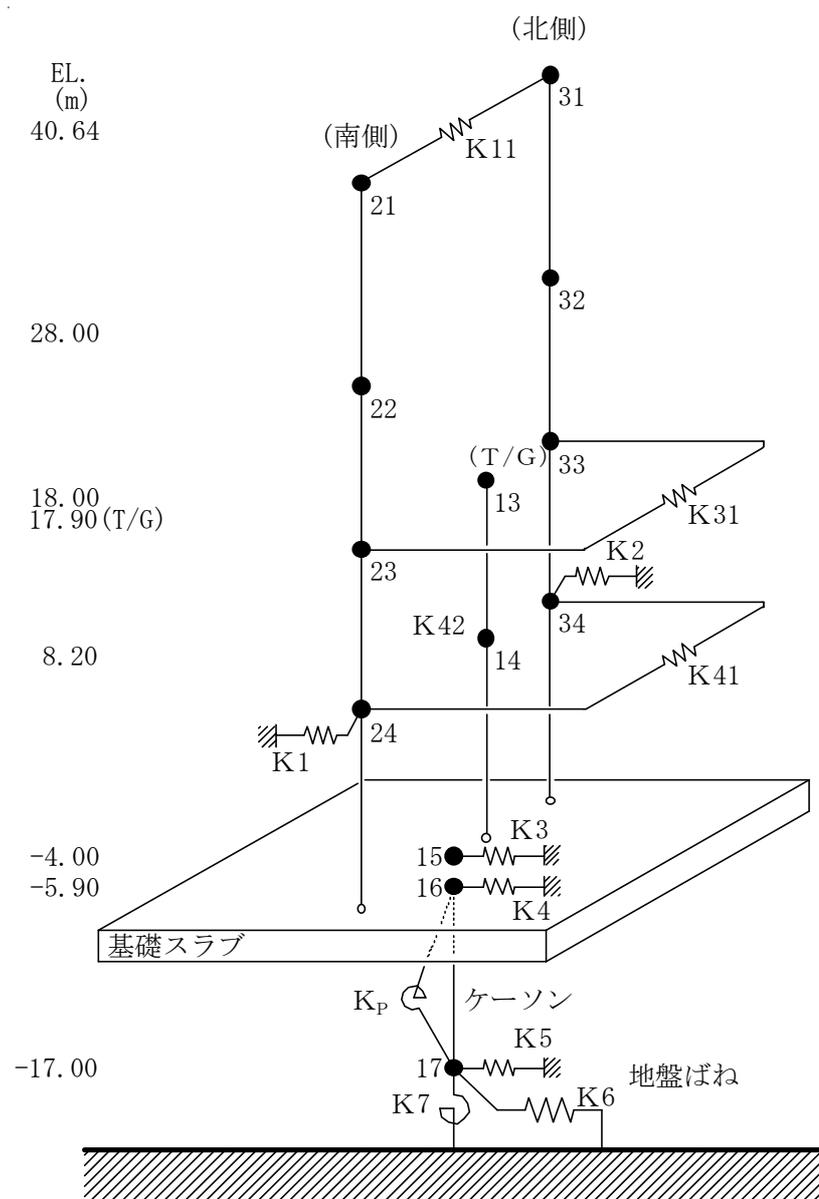


図 2-1 タービン建屋の地震応答解析モデル (EW 方向)

表 2-1 建物・構築物の物性値

建物・構築物	使用材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断 弾性係数 G (N/mm ²)	減衰定数 h (%)
タービン建屋	鉄筋コンクリート コンクリート： Fc=22.1 (N/mm ²) (Fc=225 (kgf/cm ²)) 鉄筋：SD35 (SD345 相当)	2.21×10 ⁴	9.21×10 ³	5

表 2-2 地震応答解析モデル諸元 (EW 方向)

部位	高さ	質点 番号	質点重量	回転慣性 重量	要素 番号	せん断 断面積	断面2次 モーメント	部位	高さ	質点 番号	質点重量	回転慣性 重量	要素 番号	せん断 断面積	断面2次 モーメント	
	m		kN	×10 ⁵ kN・m ²		m ²	×10 ³ m ⁴		m		kN	×10 ⁵ kN・m ²		m ²	×10 ³ m ⁴	
E. L.		W	I _g	A _s		I		E. L.		W	I _g	A _s		I		
北側	40.64	31	23,100	214.3	31	31.7	32.8	南側	40.64	21	23,810	220.8	21	31.7	32.8	
	28.00	32	93,860	871.5		45.5	51.5		28.00	22	140,400	1,303.0		22	61.0	52.9
	18.00	33	217,810	2,028.2		73.1	73.0		18.00	23	321,430	3,144.6		23	107	88.8
	8.20	34	185,900	2,208.7		150	173.7		8.20	24	338,250	3,557.6		24	185	162.3
	-4.00	15	—	—		—	—		-4.00	15	—	—		—	—	—
T/G	17.90	13	157,990	666.3	13	36.6	89.1	床ばね K ₁₁ = 38.0×10 ⁵ kN/m K ₃₁ = 61.7×10 ⁵ kN/m K ₄₁ = 62.5×10 ⁵ kN/m								
	8.20	14	58,180	232.3		24.9	95.6	基礎スラブ下端回転拘束ばね K _p =9.08×10 ¹¹ kN・m/rad								
	-4.00	15	—	—		—	—	—								
基礎	-4.00	15	518,590	5,090.7	15	8,029	7,876.6									
	-5.90	16	667,550	6,580.1		577	564.4									
	-17.00	17	292,080	2,895.4		—	—									
総重量		2,215,060														

表 2-3 せん断力のスケルトン曲線

EL. m	要素 番号	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
40.64 ~ 28.00	(21)	1.62	2.19	3.74	0.176	0.528	4.0
28.00 ~ 18.00	(22)	2.13	2.88	4.19	0.231	0.693	4.0
18.00 ~ 8.20	(23)	2.22	3.00	4.15	0.241	0.723	4.0
8.20 ~ -4.00	(24)	2.32	3.13	4.15	0.252	0.756	4.0
40.64 ~ 28.00	(31)	1.62	2.19	3.74	0.176	0.528	4.0
28.00 ~ 18.00	(32)	1.96	2.65	4.03	0.213	0.639	4.0
18.00 ~ 8.20	(33)	2.12	2.86	4.30	0.230	0.690	4.0
8.20 ~ -4.00	(34)	2.11	2.85	4.13	0.229	0.687	4.0

表 2-4 曲げスケルトン曲線 (M- ϕ 関係)

EL. m	要素 番号	M_1 ($\times 10^6$ kN·m)	M_2 ($\times 10^6$ kN·m)	M_3 ($\times 10^6$ kN·m)	ϕ_1 ($\times 10^{-5}$ 1/m)	ϕ_2 ($\times 10^{-5}$ 1/m)	ϕ_3 ($\times 10^{-5}$ 1/m)
40.64 ~ 28.00	(21)	1.46	2.75	4.47	0.201	2.56	39.3
28.00 ~ 18.00	(22)	2.79	5.77	8.23	0.239	2.52	26.4
18.00 ~ 8.20	(23)	6.33	12.2	17.1	0.323	3.00	24.1
8.20 ~ -4.00	(24)	11.1	22.2	30.3	0.309	2.80	23.6
40.64 ~ 28.00	(31)	1.46	2.75	4.47	0.201	2.56	39.3
28.00 ~ 18.00	(32)	2.02	4.18	5.99	0.177	2.12	19.7
18.00 ~ 8.20	(33)	2.58	6.12	8.59	0.160	1.58	9.77
8.20 ~ -4.00	(34)	9.59	20.7	29.7	0.250	2.39	16.7

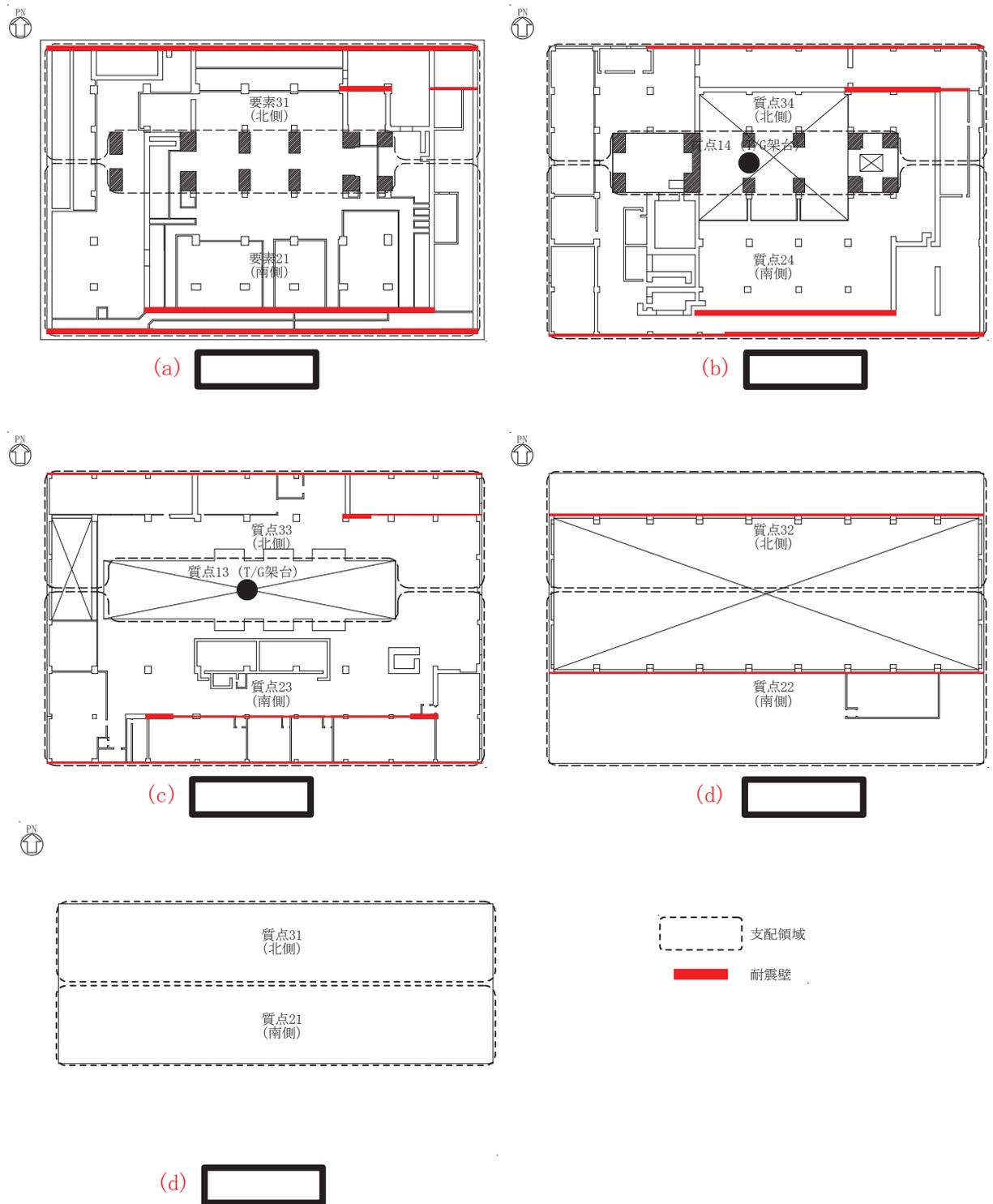


図 2-2 地震応答解析モデル(EW 方向)の各軸の支配領域と耐震要素

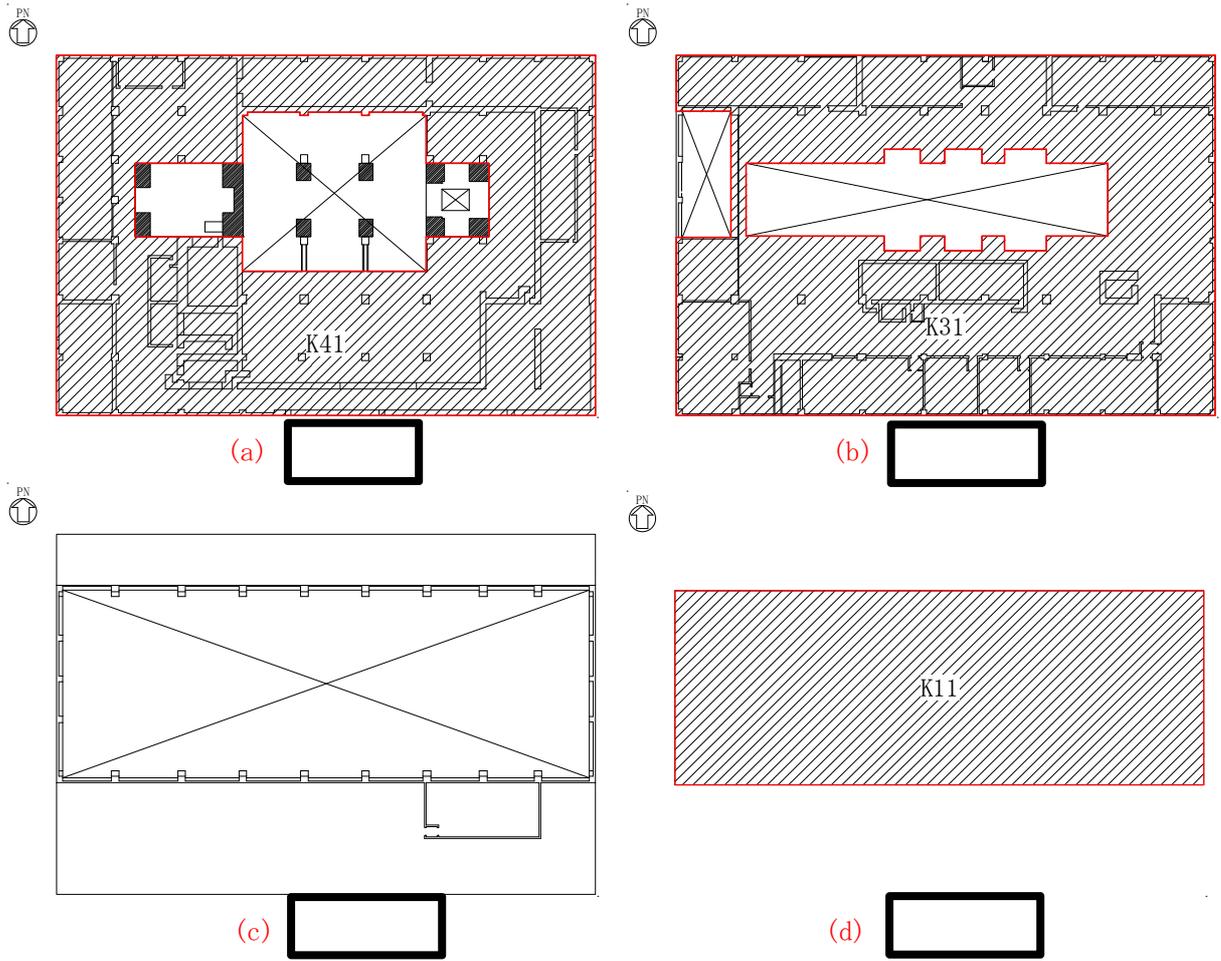
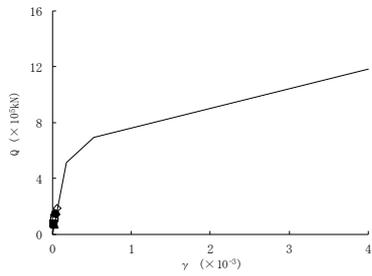


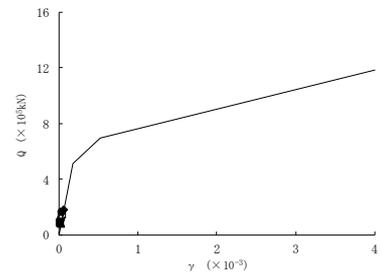
図 2-3 地震応答解析モデル(NS 方向)の床ばねの算定領域

3. 地震応答解析結果

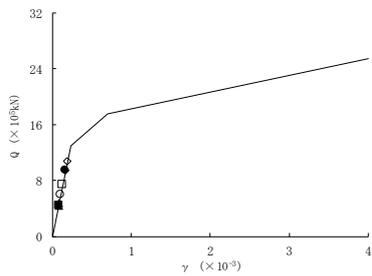
タービン建屋の地盤物性のばらつきを考慮した基準地震動 S_s に対する地震応答解析結果について、耐震壁のせん断スケルトンカーブ上の最大応答値を図 3-1～図 3-3 に示す。



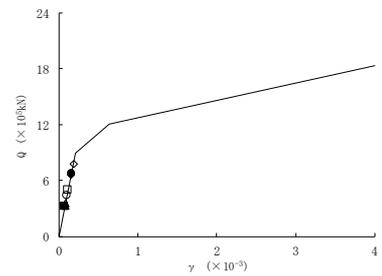
要素 21



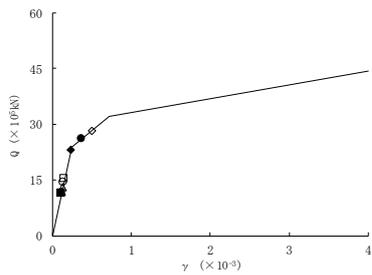
要素 31



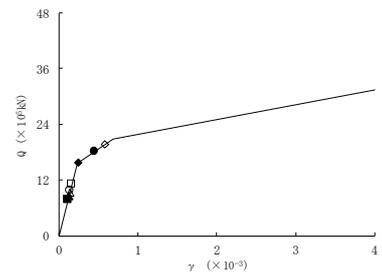
要素 22



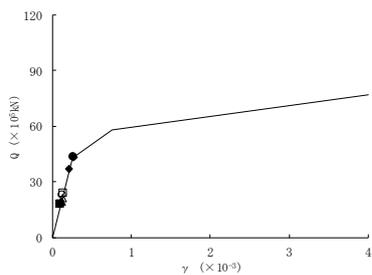
要素 32



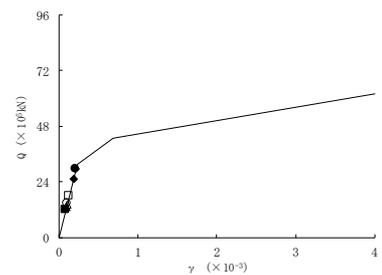
要素 23



要素 33

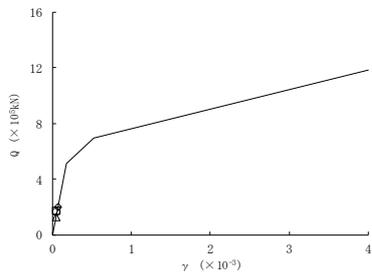


要素 24

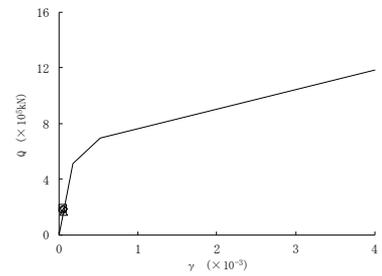


要素 34

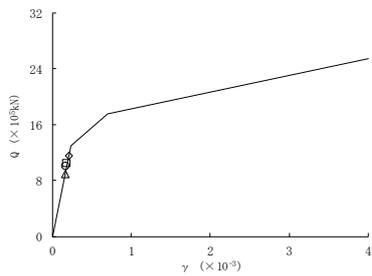
図 3-1 セン断スケルトンカーブ上の最大応答値 (基準地震動 Ss, 工認モデル, EW 方向)



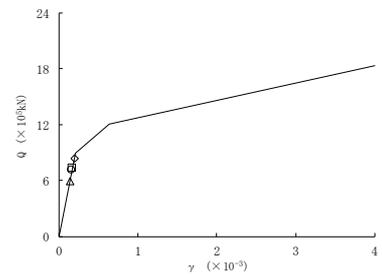
要素 21



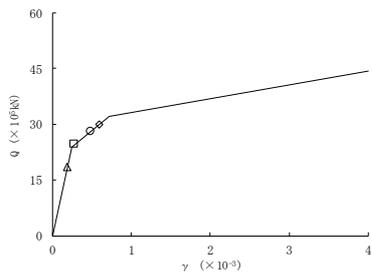
要素 31



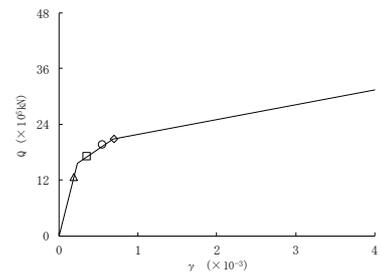
要素 22



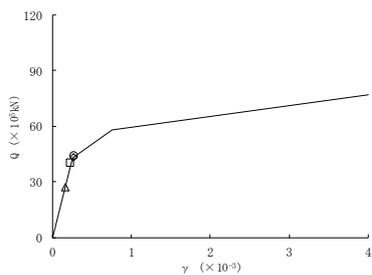
要素 32



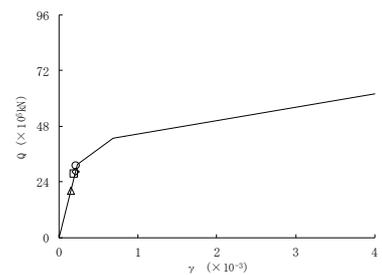
要素 23



要素 33



要素 24



要素 34

図 3-2 せん断スケルトンカーブ上の最大応答値（基準地震動 Ss，地盤+σ考慮モデル，EW 方向）

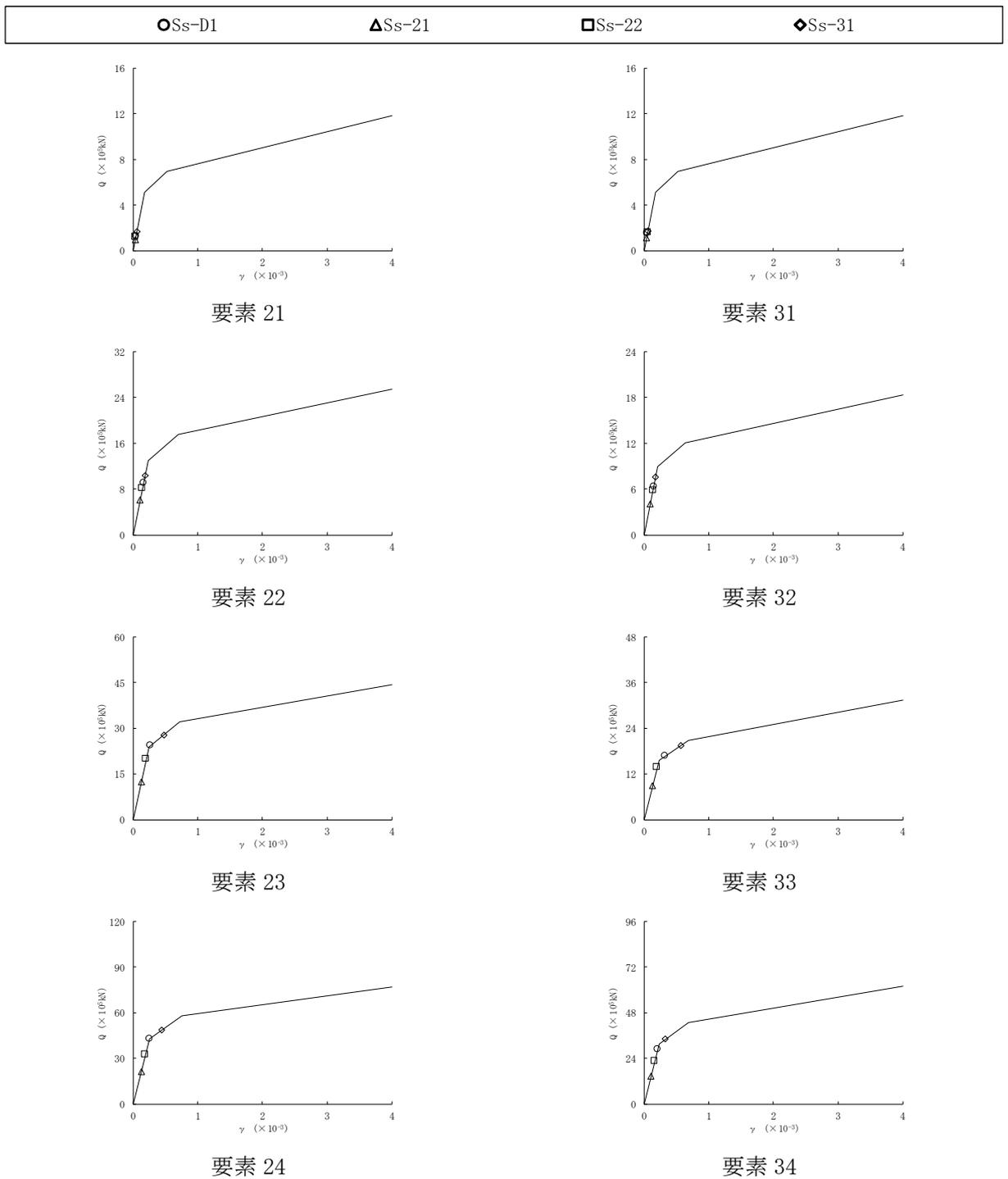


図 3-3 せん断スケルトンカーブ上の最大応答値（基準地震動 Ss，地盤-σ 考慮モデル，EW 方向）