

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 補足-025-2 改7
提出年月日	2020年9月2日

タービン建屋の地震応答計算書に関する補足説明資料

2020年9月

東京電力ホールディングス株式会社

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

V-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。

別紙 1 地震応答解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

別紙 1-1 タービン建屋の地震応答解析モデルの変更点について

別紙 2 地震応答解析における耐震壁及び鉄骨部のせん断スケルトン曲線の設定

別紙 3 地震応答解析における材料物性の不確かさに関する検討

別紙 3-1 材料物性の不確かさを考慮した検討に用いる地震動の選定について

別紙 3-2 材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析

別紙 4 タービン建屋のねじれによる影響について

別紙 5 水平つなぎばねの諸元及び非線形性を考慮した解析

別紙 6 タービン建屋と T/G 架台の相対変位について

下線部：今回ご提示資料

別紙 4 タービン建屋のねじれによる影響について

目 次

1. 検討概要	別紙 4-1
1.1 構造概要	別紙 4-1
1.2 3次元 FEM モデルによるねじれの影響評価方針	別紙 4-6
2. 3次元 FEM モデルの構築	別紙 4-8
2.1 タービン建屋の3次元 FEM モデル	別紙 4-8
2.1.1 モデル化の基本方針	別紙 4-8
2.1.2 荷重	別紙 4-13
2.1.3 建屋－地盤の相互作用	別紙 4-13
2.2 固有値解析	別紙 4-17
3. 3次元 FEM モデルによる評価	別紙 4-22
3.1 地震応答解析の概要	別紙 4-22
3.1.1 入力地震動	別紙 4-22
3.2 ねじれの影響の把握	別紙 4-24
3.2.1 建屋のねじれの影響	別紙 4-24
3.2.2 機器へのねじれの影響	別紙 4-27

1. 検討概要

7号機タービン建屋の質点系モデルは、建屋耐震要素の配置状況を踏まえ、多軸モデルを採用している。本資料では、建屋上部のねじれの影響を確認するという目的から、3次元FEMモデルによる地震応答解析を行う。

1.1 構造概要

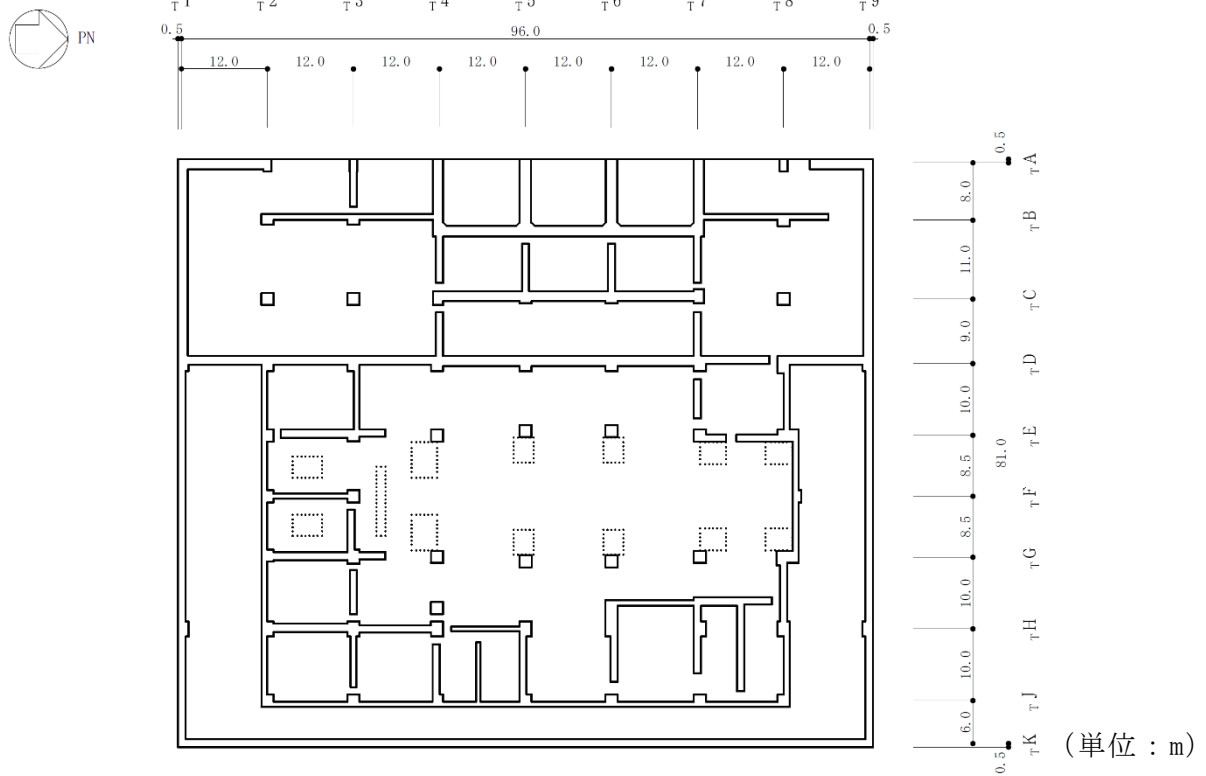
タービン建屋は、地上2階（一部3階）、地下2階建ての鉄筋コンクリート造を主体とした建物で、屋根部分が鉄骨造（トラス構造）となっている。タービン建屋の概略平面図及び概略断面図を図1-1及び図1-2に示す。

タービン建屋の平面は、地下部分では97.0m（NS方向）×82.0m（EW方向）、最上階は97.0m（NS方向）×48.9m（EW方向）である。基礎スラブ底面からの高さは52.2mであり、地上高さは32.3mである。また、タービン建屋は隣接する原子炉建屋及び廃棄物処理建屋と構造的に分離している。

タービン建屋の基礎は厚さ2.0m（蒸気タービンの基礎のうちラーメン構造部（以降、T/G架台と称す）部分及びその周辺部は厚さ2.8m）のべた基礎で、支持地盤である泥岩上に直接またはマンメイドロックを介して設置している。

蒸気タービンの基礎とは、図1-1及び図1-2に示すように、タービン建屋のほぼ中央に位置するタービン発電機を支える柱及びはりによって構成される鉄筋コンクリート造のラーメン構造部及びそれを支持する基礎スラブ部をいう。

ラーメン構造部は高さ25.5m、長さ69.7m、幅約16.3mの大きさとタービン建屋とは基礎スラブ部で接続する以外は構造的に分離する。



注：東京湾平均海面（以下、「T.M.S.L.」という。）

図 1-1 タービン建屋の概略平面図 (B2F, T.M.S.L. -5.1m) (1/6)

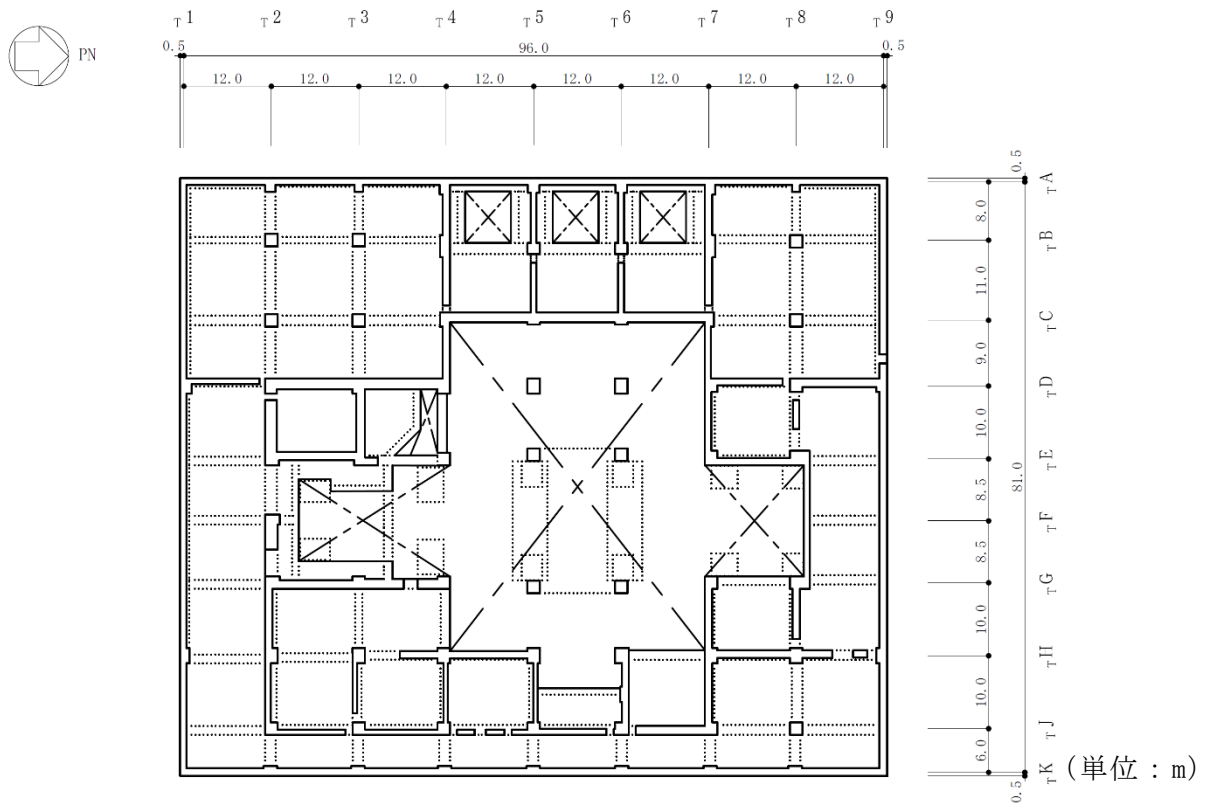


図 1-1 タービン建屋の概略平面図 (B1F, T.M.S.L. 4.9m) (2/6)

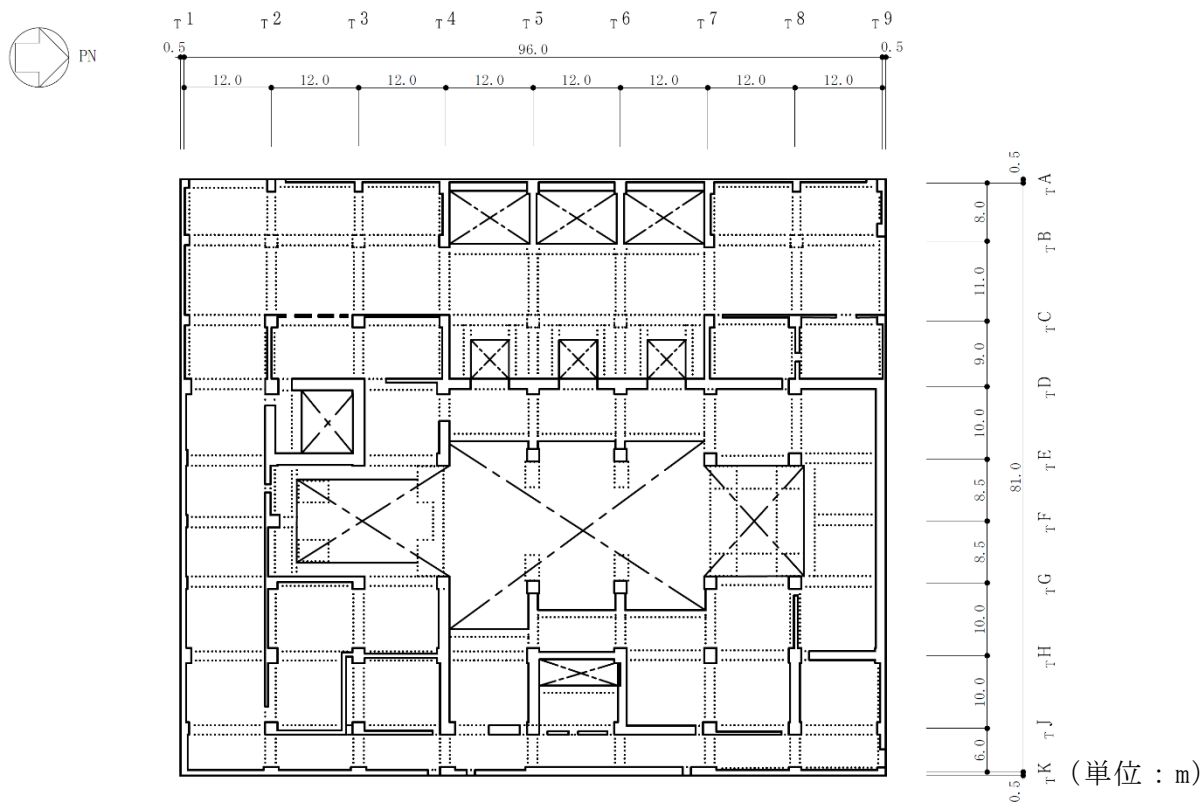


図 1-1 タービン建屋の概略平面図 (1F, T.M.S.L. 12.3m) (3/6)

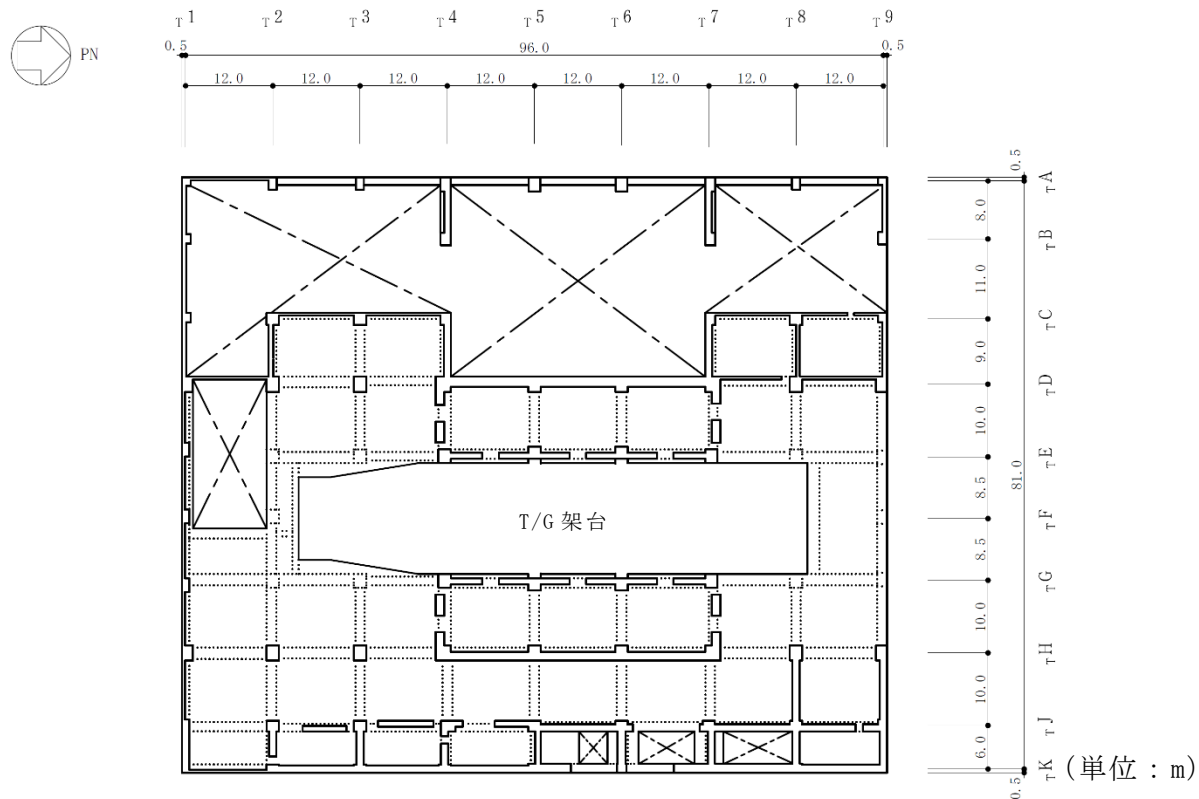


図 1-1 タービン建屋の概略平面図 (2F, T.M.S.L. 20.4m) (4/6)

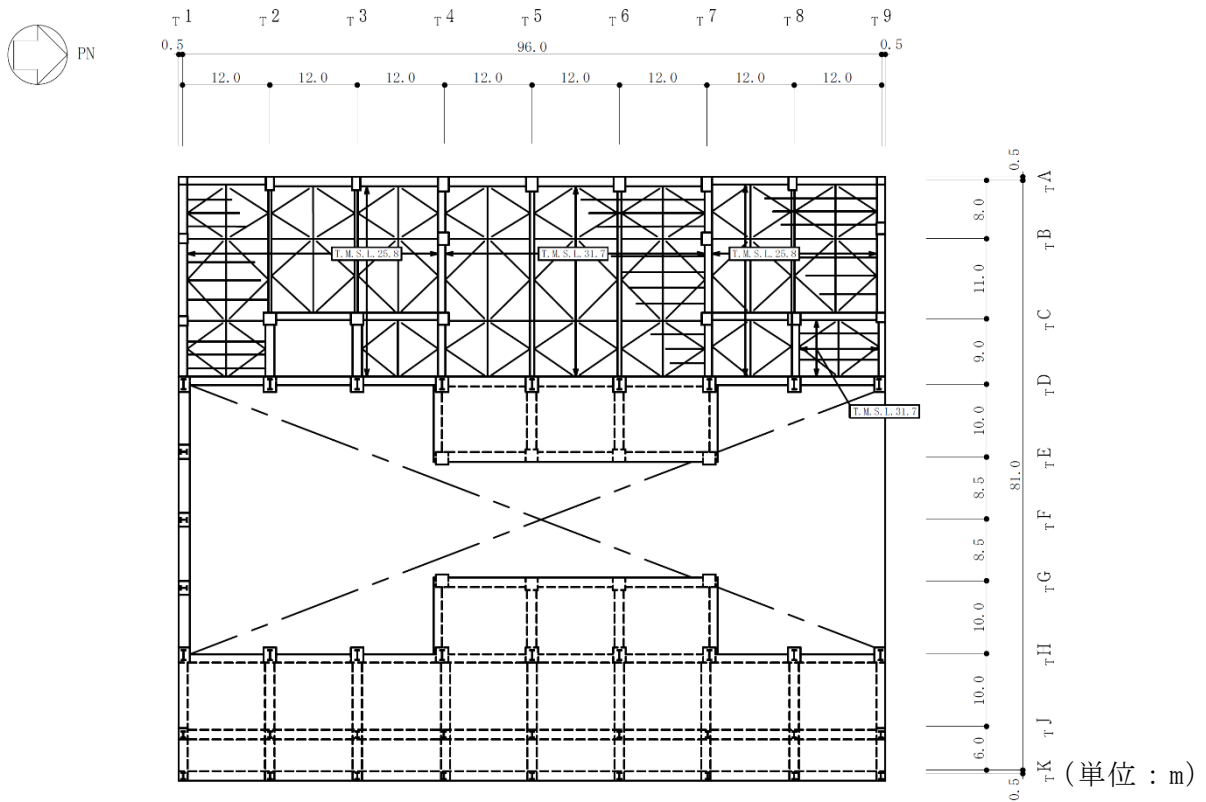


図 1-1 タービン建屋の概略平面図 (3F, T.M.S.L. 30.9m) (5/6)

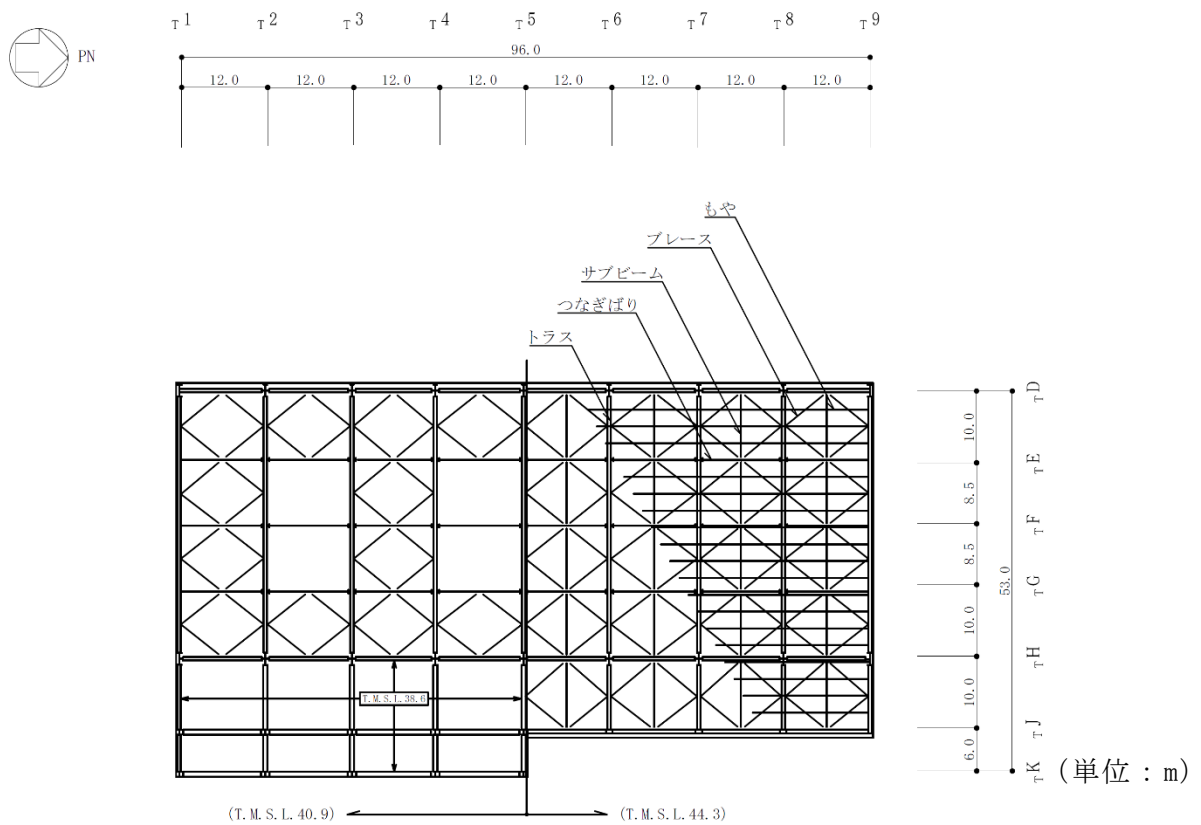
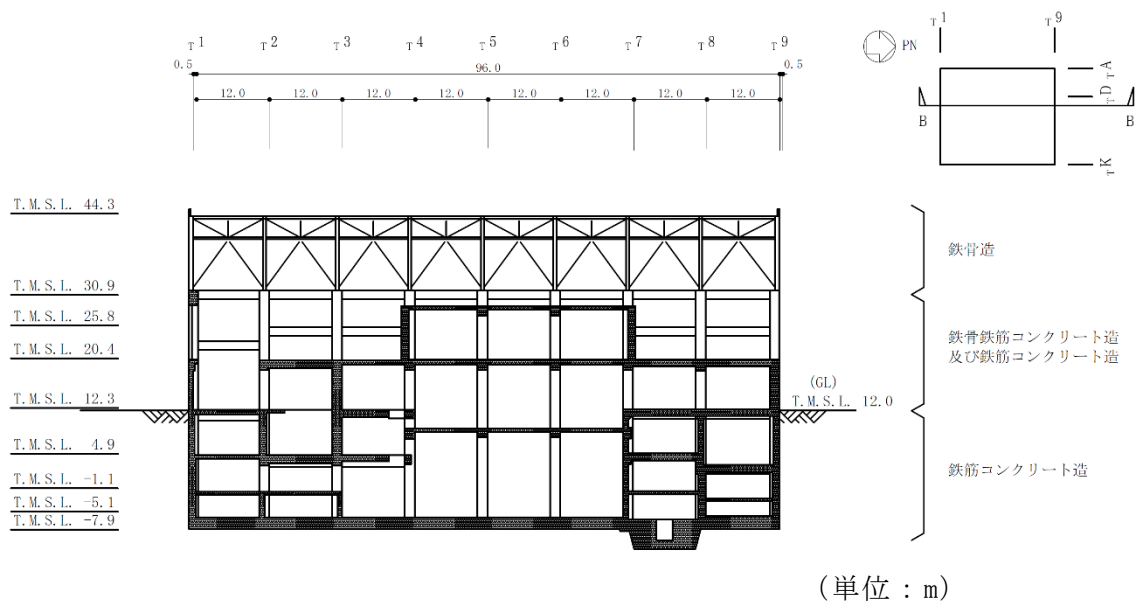
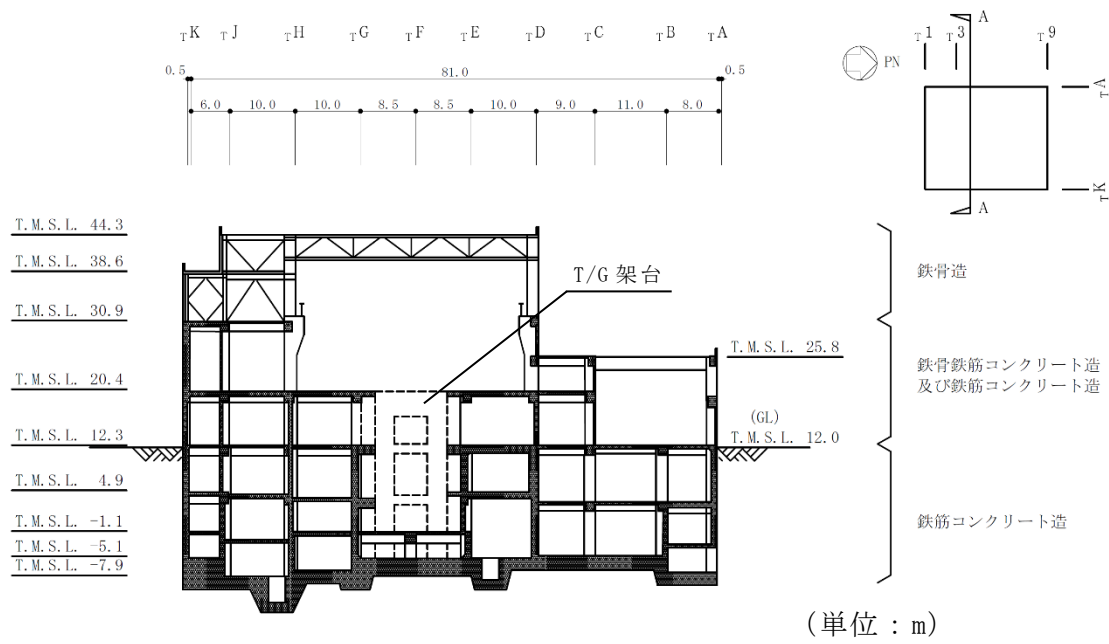


図 1-1 タービン建屋の概略平面図 (RF, T.M.S.L. 44.3m) (6/6)



NS 方向断面



EW 方向断面

図 1-2 タービン建屋の概略断面図

1.2 3次元 FEM モデルによるねじれの影響評価方針

本検討では、オペフロより上部における上部鉄骨部のねじれが、機能維持エリアに与える影響の有無を確認する目的で表 1-1 に示す建屋の実状を模擬した 3次元 FEM モデルを構築する。

3次元 FEM モデルの妥当性確認のために、V-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」の地震応答解析モデルの固有値解析結果及び上部構造の固有モードを確認した上で、弾性設計用地震動 Sd-1 による地震応答解析を行う。

地震応答解析結果の確認は、上部鉄骨部が 20.4m 以下の機能維持エリアに及ぼすねじれによる影響を確認するという観点から、3次元 FEM モデル及び質点系モデルの加振方向及び加振直交方向の最大応答変位を比較し、分析する。

3次元 FEM モデルによる建屋のねじれ評価フローを図 1-3 に示す。なお、解析には解析コード「MSC NASTRAN」を用いる。

表 1-1 解析モデルのケース

モデル ケース	床の モデル化	地盤の モデル化	コンクリート 剛性の設定	積雪荷重	非線形特性
3次元 FEM モデル	床柔	相互作用考慮	実強度	考慮	考慮せず

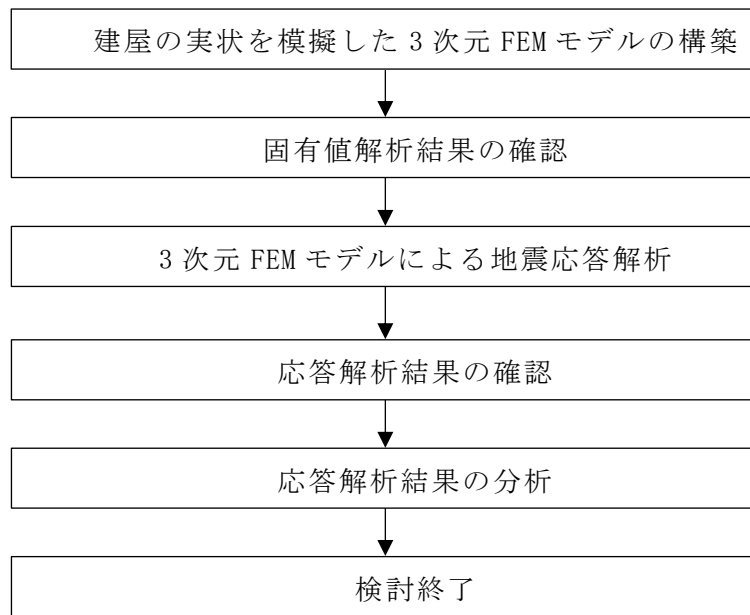


図 1-3 3次元 FEM モデルによる建屋のねじれ評価フロー

2. 3次元 FEM モデルの構築

2.1 タービン建屋の 3次元 FEM モデル

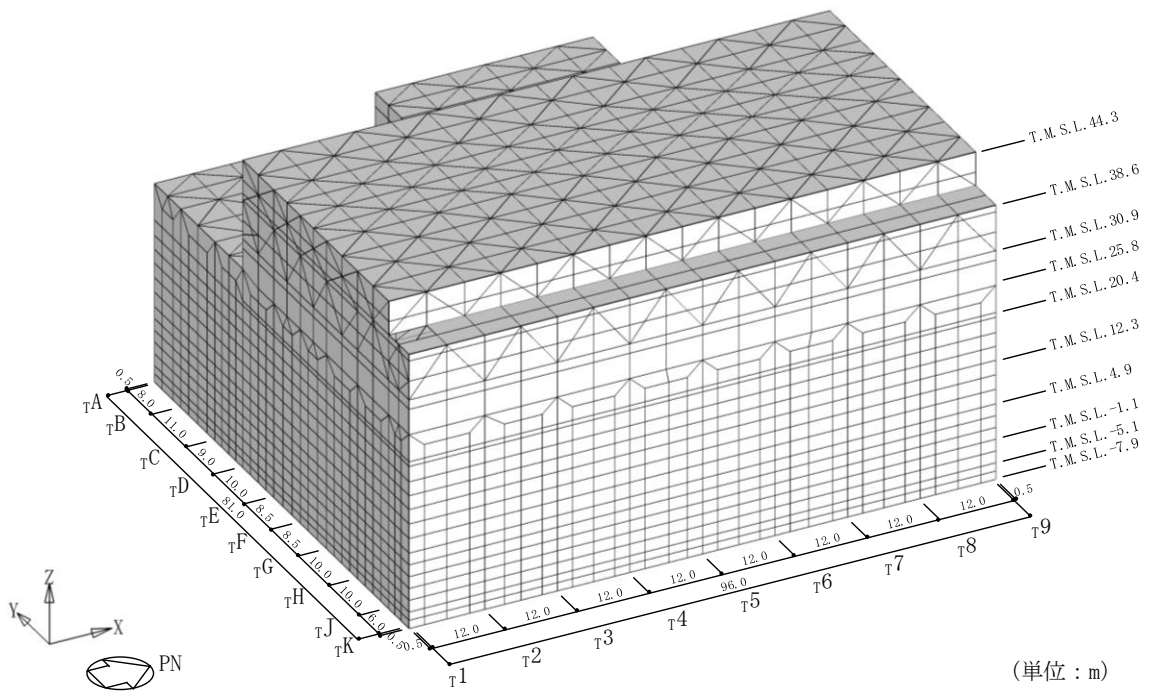
2.1.1 モデル化の基本方針

タービン建屋の 3次元 FEM モデルを図 2-1 に示す。また、タービン建屋の 3次元 FEM モデルの概要を以下に示す。

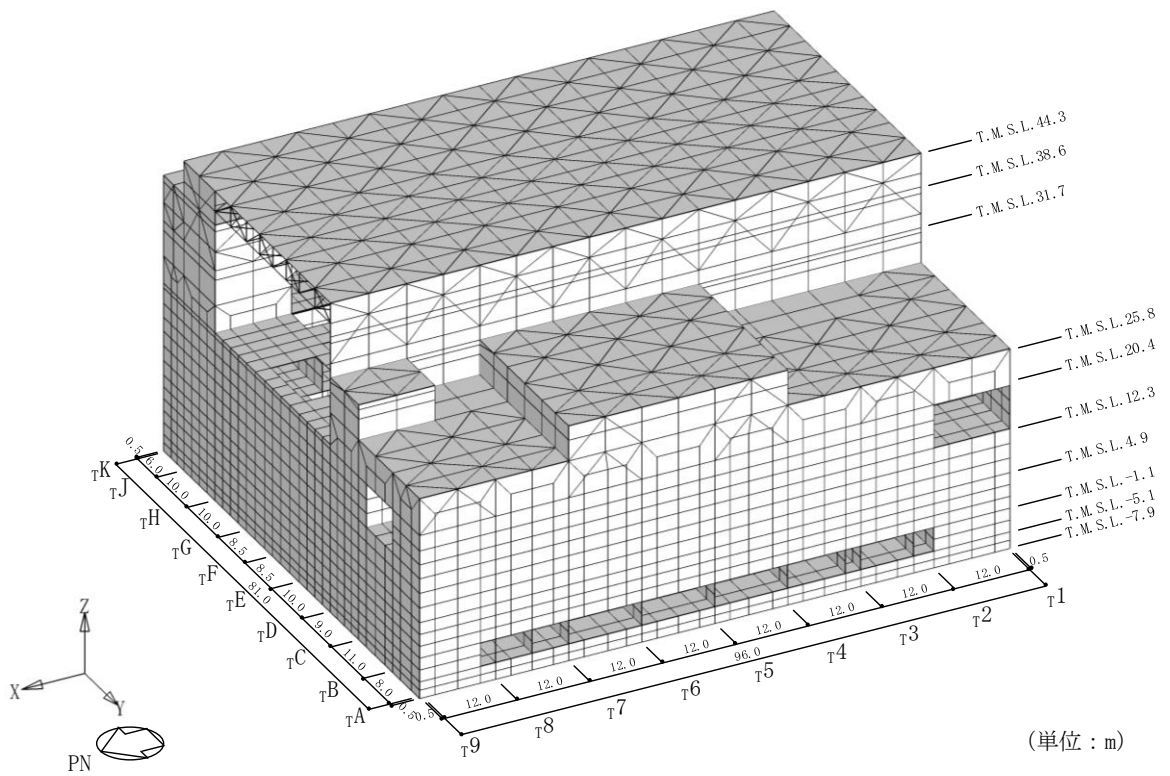
3次元 FEM モデルで設定する各部材の要素種別は、以下のとおりである。床スラブ及び壁は、面材で軸剛性、せん断剛性及び曲げ剛性を評価するためシェル要素（約 9900 要素）とする。基礎スラブは、床スラブと同一の面材であるが、床スラブに比べ、スラブ厚が大きいことからソリッド要素（約 2200 要素）とする。柱、はり及び屋根トラスの上下弦材は、線材で軸剛性、せん断剛性及び曲げ剛性を評価するためはり要素（約 3900 要素）とし、斜材、束材及び水平ブレースは線材で軸剛性のみ評価するため、トラス要素（約 800 要素）でモデル化する。なお、壁及び床の開口部については、主要な開口部のみモデル化する。

要素サイズは、水平方向及び高さ方向ともに 2～3m 程度とし、屋根トラスは 1部材 1要素、壁及び床スラブは 4～6m 程度とする。

3次元 FEM モデルにおける使用材料の物性値を表 2-1 に示す。また、地盤物性値を表 2-2 に示す。

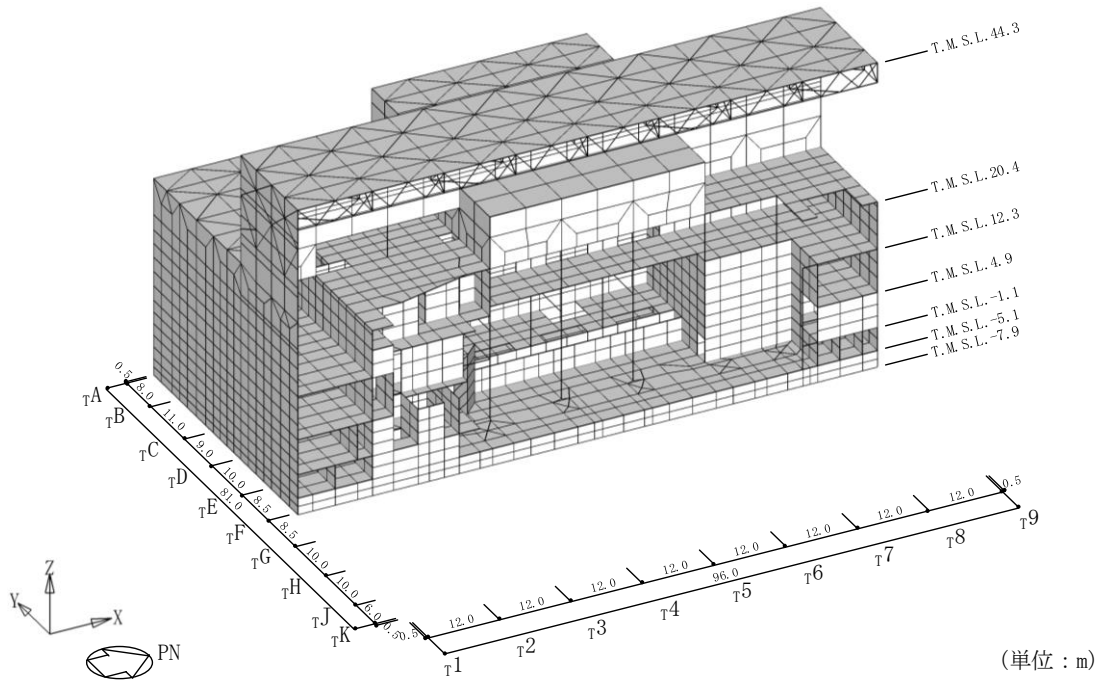


(a) 建屋全景 (南東面)

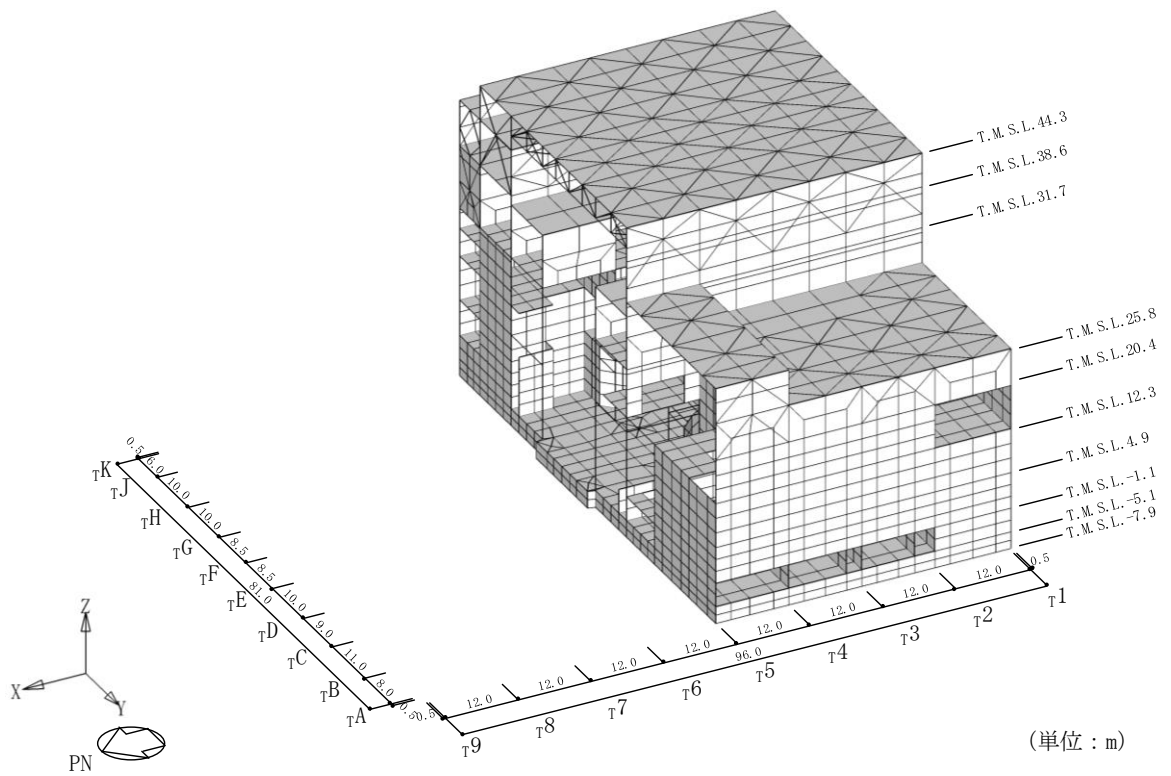


(b) 建屋全景 (北西面)

図 2-1 解析モデル (1/2)



(c) NS 断面図 (南東面)



(d) EW 断面図 (北西面)

図 2-1 解析モデル (2/2)

表 2-1 使用材料の物性値

部位	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 (%)
建屋部及びT/G架台	コンクリート* : $\sigma_c = 43.1$ (N/mm ²) ($\sigma_c = 440$ kgf/cm ²) 鉄筋 : SD35 (SD345相当)	2.88×10^4	1.20×10^4	5
基礎スラブ	コンクリート* : $\sigma_c = 39.2$ (N/mm ²) ($\sigma_c = 400$ kgf/cm ²) 鉄筋 : SD35 (SD345相当)	2.79×10^4	1.16×10^4	5
屋根トラス部	鉄骨 : SS41 (SS400相当)	2.05×10^5	0.79×10^5	2
	鉄骨 : SM41A (SM400A相当)	2.05×10^5	0.79×10^5	2
	鉄骨 : SM50A (SM490A相当)	2.05×10^5	0.79×10^5	2

注記* : 実強度に基づくコンクリート強度。

表 2-2 地盤定数 (Sd-1)

標高 T. M. S. L. (m)	地層	せん断波 速度 V_s (m/s)	単位体積 重量 γ_t (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断 弾性係数 G ($\times 10^5$ kN/m ²)	初期せん断 弾性係数 G_0 ($\times 10^5$ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G_0	減衰 定数 h (%)
+12.0	新期砂層	150	16.1	0.347	0.140	0.369	0.38	19
+8.0		200	16.1	0.308	0.170	0.657	0.26	23
+4.0	古安田層	330	17.3	0.462	1.26	1.92	0.66	4
-6.0	西山層	490	17.0	0.451	4.03	4.16	0.97	3
-33.0		530	16.6	0.446	4.51	4.75	0.95	3
-90.0		590	17.3	0.432	5.83	6.14	0.95	3
-136.0		650	19.3	0.424	7.90	8.32	0.95	3
-155.0		椎谷層	720	19.9	0.416	10.5	10.5	1.00
∞								

2.1.2 荷重

固定荷重，積載荷重，積雪荷重及び機器・配管荷重を考慮する。各部について，質点系モデルの重量と整合するよう 3次元 FEM モデルの重量を調整する。

2.1.3 建屋－地盤の相互作用

建屋－地盤の相互作用は，V-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」における質点系モデルの弾性設計用地震動 Sd-1 での基礎底面地盤ばね及び側面地盤ばねと整合するよう，地盤をばね要素でそれぞれモデル化することで考慮する。

基礎底面地盤ばねについては，質点系モデルで考慮したスウェイ，ロッキング及び鉛直ばねの値を元に，3次元 FEM モデルの基礎底面の各節点位置に要素面積に応じて離散化する。ただし，鉛直ばねのうち，水平方向加振用は，基礎底面ロッキングばねを元に設定する。

側面の地盤ばねについては，質点系モデルで考慮している側面水平ばねの値を元に，各質点レベルに対応する節点位置に要素面積に応じて離散化する。側面地盤のばね値は，基礎側面位置の地盤の物性値を用いて「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 ((社) 日本電気協会)」の Novak ばねとして評価する。このばね値を 3次元 FEM モデルの側面埋め込み部の節点位置の要素面積に応じて離散化する。

地盤ばね諸元については表 2-3～表 2-5 に，底面地盤ばねと側面地盤ばね設置図について図 2-2 に示す。

表 2-3 底面地盤ばね定数と減衰係数（水平方向）

地震動	NS 方向		EW 方向	
	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
Sd-1	1.21×10^8	7.09×10^6	1.24×10^8	7.37×10^6

表 2-4 底面地盤ばね定数と減衰係数（鉛直方向）

(a) 底面回転ばね

地震動		回転方向	
		ばね定数 (kN・m/rad)	減衰係数 (kN・m・s/rad)
Sd-1	NS 方向加振時	3.37×10^{11}	7.83×10^9
	EW 方向加振時	2.60×10^{11}	5.01×10^9

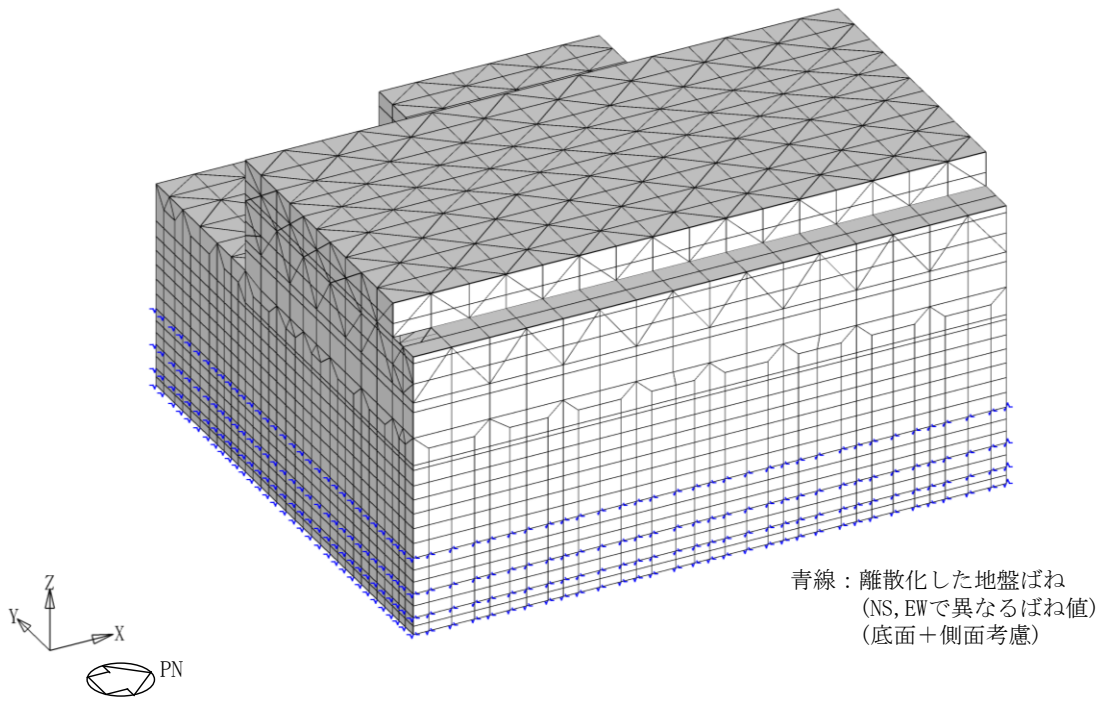
注*：底面回転ばねについては，鉛直ばねに置換してモデル化する。

(b) 底面鉛直ばね

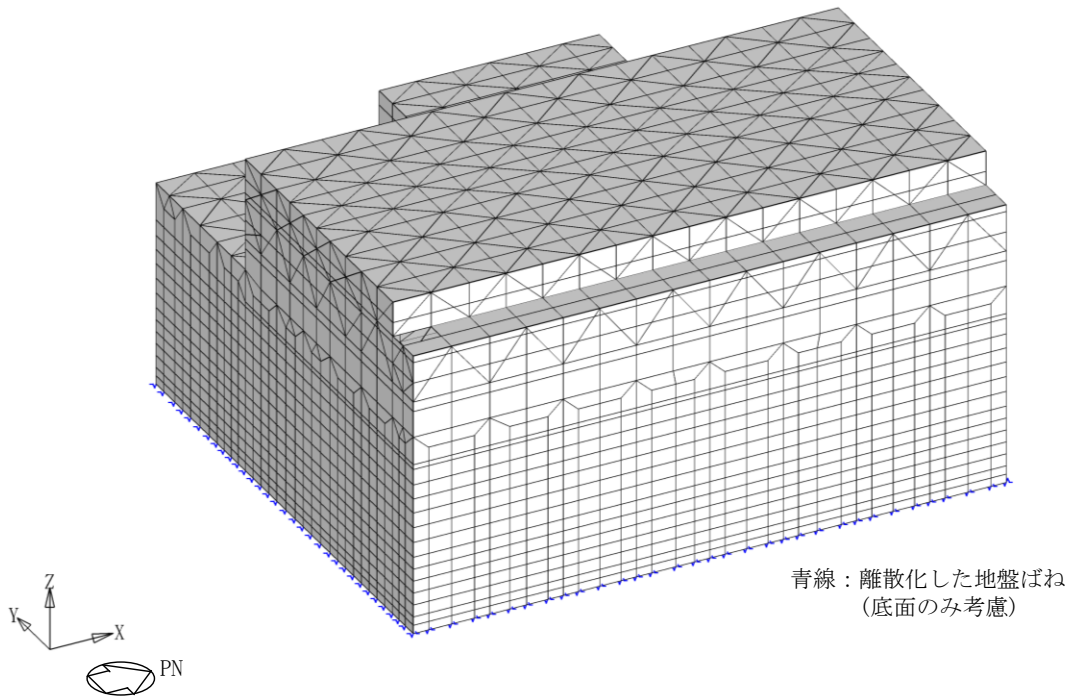
地盤ばね		UD 方向	
		ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
Sd-1	UD 方向加振時	2.10×10^8	1.79×10^7

表 2-5 側面水平ばね定数と減衰係数（水平方向）

地震動	T. M. S. L. (m)	NS 方向		EW 方向	
		ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
Sd-1	4.9	1.15×10^6	6.89×10^5	1.15×10^6	6.79×10^5
	-1.1	2.73×10^6	1.64×10^6	2.73×10^6	1.62×10^6
	-5.1	2.41×10^6	1.20×10^6	2.41×10^6	1.19×10^6
	-7.9	2.43×10^6	7.08×10^5	2.43×10^6	7.03×10^5



(a) 水平方向解析時



(b) 鉛直方向解析時

図 2-2 地盤ばねの設置図

2.2 固有値解析

質点系モデル及び3次元FEMモデルの弾性設計用地震動 Sd-1 に対する固有値解析結果（固有振動数及び固有モード，建屋－地盤連成1次及び2次）を表2-6及び表2-8に示す。また，ねじれの有無を確認するため，T.M.S.L. 44.3mにおける3次元FEMモデルのモード図（1次）を図2-3に示す。図2-3より，加振方向と比較して加振直交方向のモード変位は小さいこと確認した。

なお，タービン建屋のEW方向については，多軸でモデル化していること及びT9通り（北側）にはT1通り（南側）と比較して妻壁がないことを鑑み，参考として3次の固有値解析結果を表2-7及び表2-9に示す。質点系モデルについては，T.M.S.L. 44.3mにおけるa軸（南側）とh軸及びi軸（北側）の刺激関数を比較すると，h軸及びi軸の方が大きい値となっており，3次元FEMモデルについても質点系モデルと同様の傾向にあることを確認した。

以上より，両モデルのNS方向及びEW方向の固有振動数は1次及び2次においてよく対応しており，3次元FEMモデルの設定は固有値解析の結果においては妥当なものであることを確認した。

表2-6 固有値解析結果

次数	方向	振動数 (Hz)	
		質点系モデル	3次元 FEM モデル
1次	NS	2.78	2.69
	EW	2.59	2.54
2次	NS	3.43	3.22
	EW	3.23	2.95

表2-7 固有値解析結果（参考）

次数	方向	振動数 (Hz)	
		質点系モデル	3次元 FEM モデル
3次	EW	3.99	4.19

表 2-8 質点系モデルの刺激関数と 3次元 FEM モデルの固有モードの比較

(a) NS 方向

	質点系モデル	3次元 FEM モデル
1 次	<p>T.M.S.L. (m) (a軸) (b軸) (c軸) (T/G架台)</p> <p>2.78Hz (1 次)</p>	<p>2.69Hz (1 次)</p>
2 次	<p>T.M.S.L. (m) (a軸) (b軸) (c軸) (T/G架台)</p> <p>3.43Hz (2 次)</p>	<p>3.22Hz (2 次)</p>

表 2-8 質点系モデルの刺激関数と 3次元 FEM モデルの固有モードの比較 (b) EW 方向

	質点系モデル	3次元 FEM モデル
1 次	<p>T.M.S.L.(m) (a軸) (b軸) (c軸) (d軸) (e軸) (f軸) (g軸) (h軸) (i軸) (T/C架台)</p> <p>2.59Hz (1 次)</p>	<p>2.54Hz (1 次)</p>
2 次	<p>T.M.S.L.(m) (a軸) (b軸) (c軸) (d軸) (e軸) (f軸) (g軸) (h軸) (i軸) (T/C架台)</p> <p>3.23Hz (2 次)</p>	<p>2.95Hz (2 次)</p>

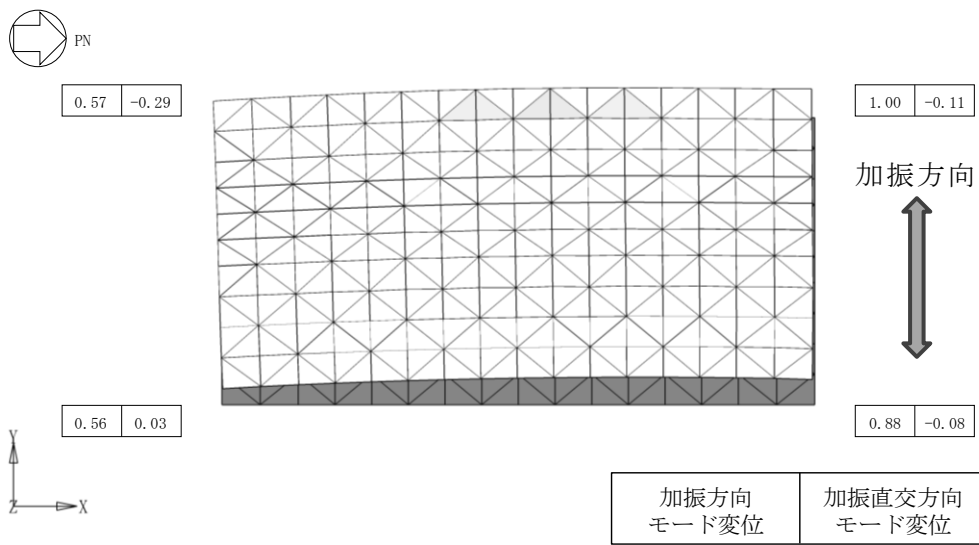
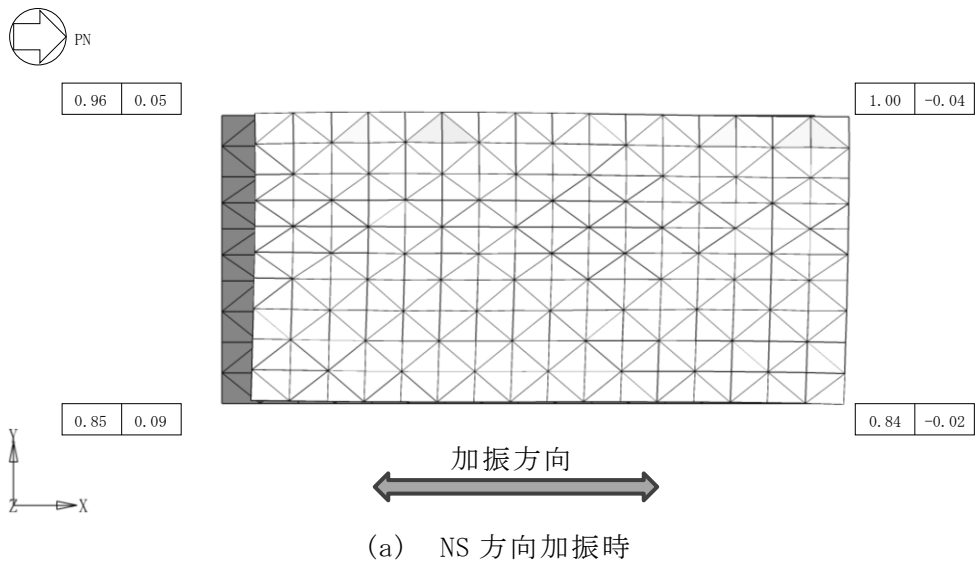


図 2-3 3次元 FEM モデルのモード図 (1次, T.M.S.L. 44.3m)

表 2-9 質点系モデルの刺激関数と 3 次元 FEM モデルの固有モードの比較 (参考)

	質点系モデル	3次元 FEM モデル
3 次		
	<p>3.99Hz (3次)</p>	<p>4.19Hz (3次)</p>

3. 3次元 FEM モデルによる評価

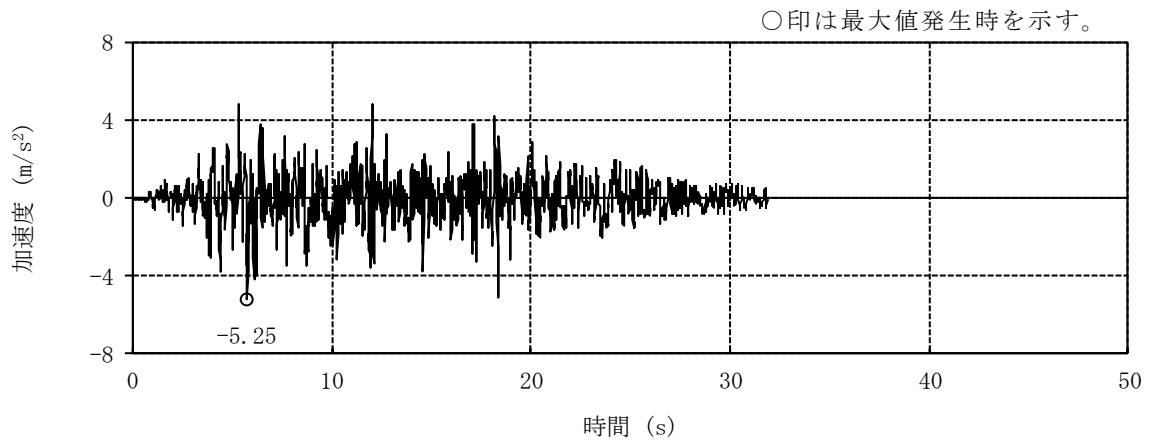
3.1 地震応答解析の概要

タービン建屋の上部鉄骨構造部のねじれによる影響を把握するために、3次元 FEM モデルを用いて、全周期帯の応答が大きく、耐震評価への影響も大きい弾性設計用地震動 Sd-1 に対する地震応答解析を行う。

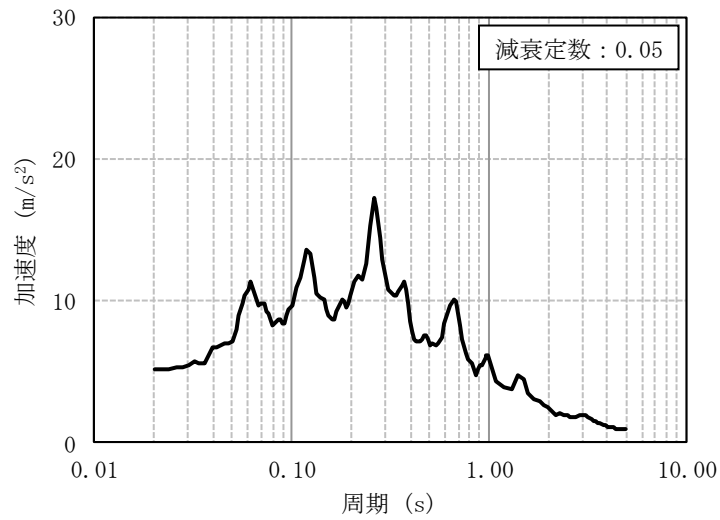
3次元 FEM モデルによる地震応答解析は弾性応答解析としていることから、一次元波動論に基づき、V-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」に示す解放基盤表面レベルに想定する弾性設計用地震動 Sd-1 に対する建屋基礎底面及び側面地盤ばねレベルでの地盤の応答を、地盤ばねを介して入力し、上部鉄骨構造部のねじれによる影響を把握する。

3.1.1 入力地震動

地震応答解析に用いる弾性設計用地震動 Sd-1H の時刻歴加速度波形及び加速度応答スペクトルを図 3-1 に示す。3次元 FEM モデルを用いた地震応答解析は、NS 方向及び EW 方向に対して行う。



(a) 水平方向 (Sd-1H) 時刻歴加速度波形



(b) 水平方向 (Sd-1H) 加速度応答スペクトル

図 3-1 入力地震動 (Sd-1H)

3.2 ねじれの影響の把握

図1-3の評価フローに基づき、3次元FEMモデルの加振方向及び加振直交方向の応答変位を比較することで、建屋のねじれの影響の把握を行う。

3.2.1 建屋のねじれの影響

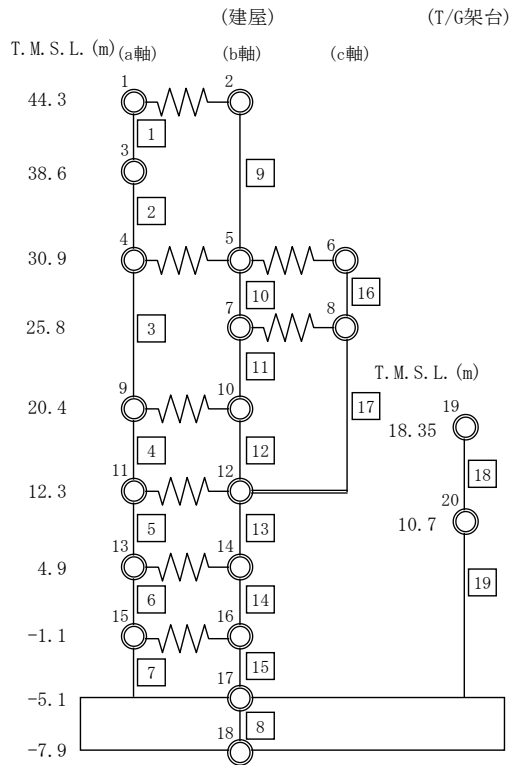
弾性設計用地震動 Sd-1 に対する 3次元 FEM モデル及び質点系モデルの応答変位を比較した結果を図 3-2 及び図 3-3 に示す。なお、3次元 FEM モデルの応答値は、質点系モデルの質点に相当する領域の 4 隅の節点応答値の平均とする。

図 3-2 では NS 方向の応答に着目し、3次元 FEM モデルと質点系モデルの最大応答変位を比較している。上部鉄骨部が 20.4m 以下の機能維持エリアに及ぼすねじれによる影響を確認する目的で、3次元 FEM モデルの NS 方向入力時の最大応答変位（赤線）と質点系モデルの最大応答変位（黒線）を比較する。20.4m 以下の機能維持エリアにおいては、質点系モデルと 3次元 FEM モデルはよく対応していることを確認した。

次に、図 3-2 の EW 方向入力時の最大応答変位（青線）に着目し、ねじれの有無を確認する。20.4m 以上の上部鉄骨部においては、特に b 軸にて加振直交方向の変位が生じており、ねじれが発生していると考えられる。しかし、20.4m 以下の機能維持エリアで生じている変位は上部と比較して小さい。以上より、20.4m 以下の機能維持エリアに対するねじれによる影響はないことを確認した。

図 3-3 では EW 方向の応答に着目し、3次元 FEM モデルと質点系モデルの最大応答変位を比較している。上部鉄骨部が 20.4m 以下の機能維持エリアに及ぼすねじれによる影響を確認する目的で、3次元 FEM モデルの EW 方向入力時の最大応答変位（青線）と質点系モデルの最大応答変位（黒線）を比較する。20.4m 以下の機能維持エリアにおいては、質点系モデルと 3次元 FEM モデルはよく対応していることを確認した。

次に、図 3-3 の NS 方向入力時の最大応答変位（赤線）に着目し、ねじれの有無を確認する。図 3-2 と同様に、上部鉄骨部と比較して機能維持エリアで生じている変位は小さいことから、20.4m 以下の機能維持エリアに対するねじれの影響はないことを確認した。



- 質点系モデル (NS 方向加振時)
- 3次元 FEM モデル (NS 方向加振時)
- 3次元 FEM モデル (EW 方向加振時)

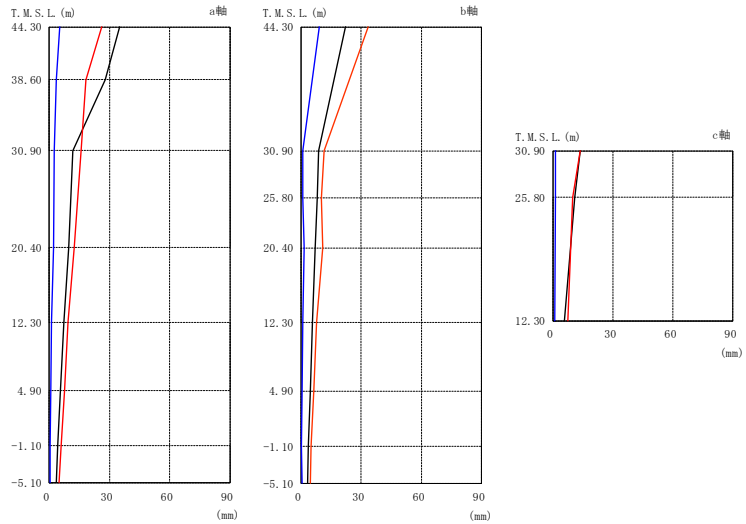
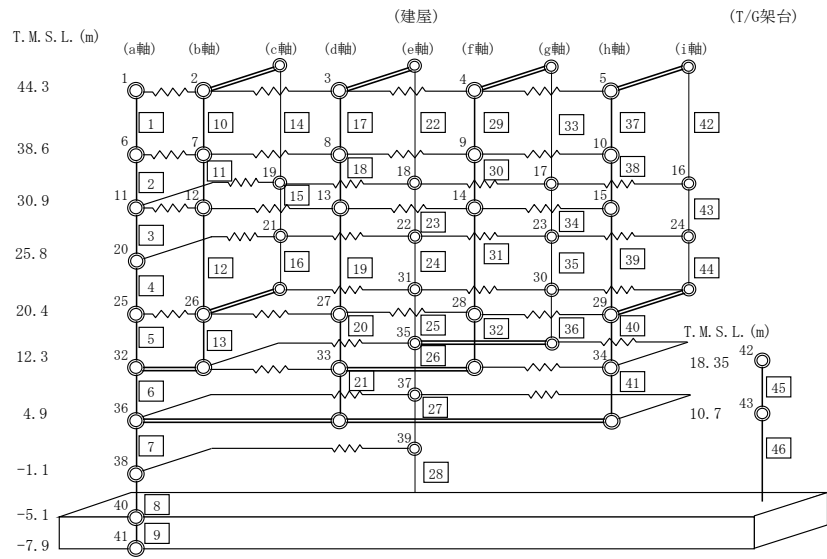


図 3-2 最大応答変位の比較 (Sd-1, NS 方向応答)



- 質点系モデル (EW 方向加振時)
- 3次元 FEM モデル (NS 方向加振時)
- 3次元 FEM モデル (EW 方向加振時)

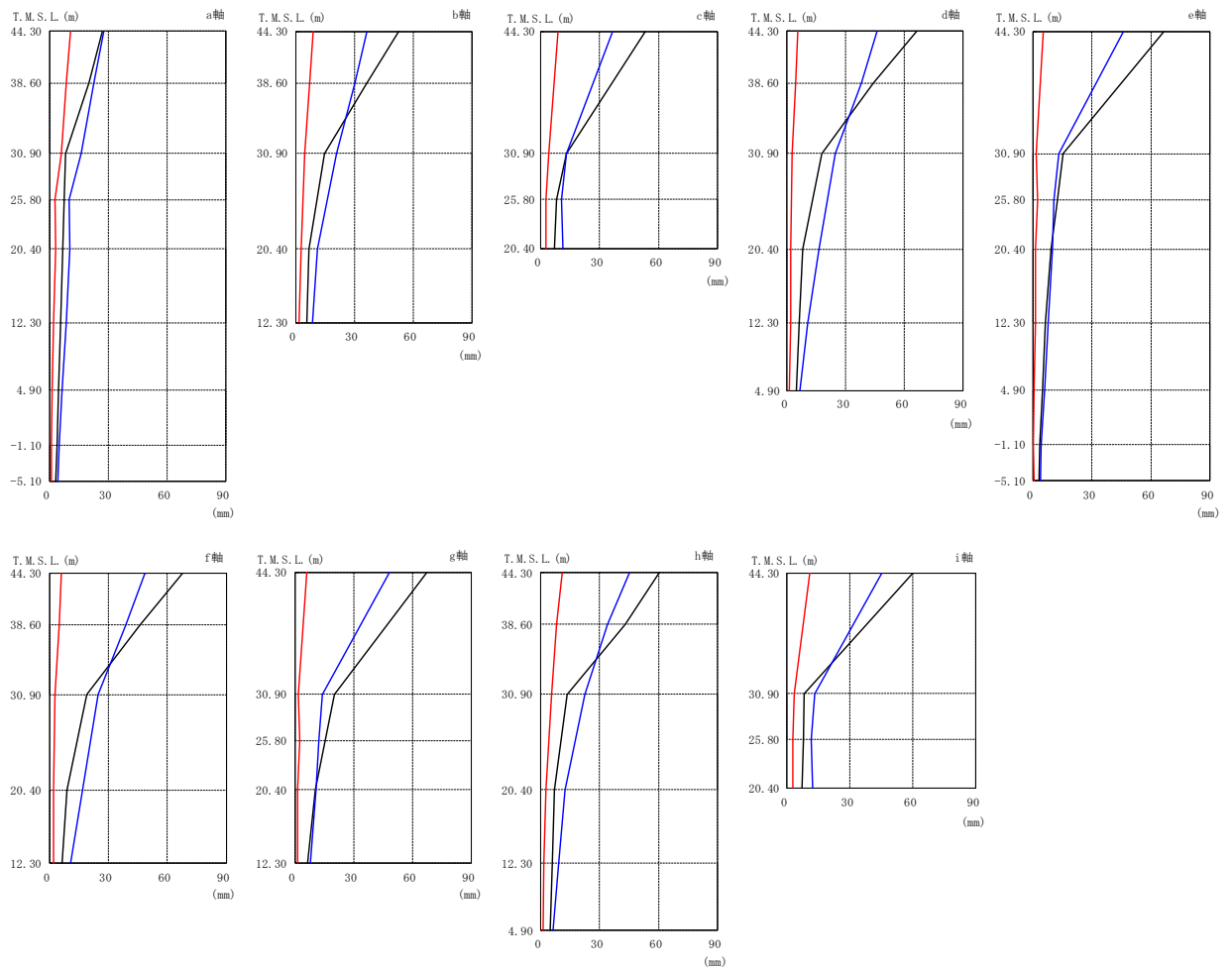


図 3-3 最大応答変位の比較 (Sd-1, EW 方向応答)

3.2.2 機器へのねじれの影響

タービン建屋の機能維持エリアにおける機器・配管系へのねじれの影響については、加速度応答スペクトルに対するねじれの影響を確認する。3次元 FEM モデルにおける各階の床の四隅の節点について、Sd-1 に対する加振方向及び加振直交方向の加速度応答スペクトルを表 3-1～表 3-4 に示す。NS 方向及び EW 方向ともに加振方向と比較して加振直交方向の加速度応答スペクトルは概ね小さいものの、表 3-1 に示す T.M.S.L. 20.4m における NS 方向加振時の EW 方向応答については、一部周期帯において応答が大きくなっていることから機器の耐震性への影響を確認する。なお、T.M.S.L. 20.4m における EW 方向加振時の EW 方向応答について、節点 No. 130033 が他の節点と異なる傾向を示している。これは、当該節点周辺における床スラブの開口等の影響と考えられる。

Sd-1 に対する 3次元 FEM モデルにおける加速度応答スペクトルと質点系モデルにおける加速度応答スペクトルを図 3-4 に示す。3次元 FEM モデルにおける加速度応答スペクトルは、節点 No. 130001, 130033, 130849, 120910 における NS 方向加振時の EW 方向応答と EW 方向加振時の EW 方向応答を合算した時刻歴応答加速度により算定した加速度応答スペクトルと、NS 方向加振時の NS 方向応答と EW 方向加振時の NS 方向応答を合算した時刻歴応答加速度により算定した加速度応答スペクトルを包絡したものである。一方、質点系モデルにおける加速度応答スペクトルは、基本ケースの T.M.S.L. 20.4m に位置する質点の NS 方向及び EW 方向の加速度応答スペクトルを包絡して拡張したものである。固有周期が 0.3 秒を超える周期帯で、3次元 FEM モデルにおける応答が質点系モデルにおける応答を一部上回ることがあるものの、機器の固有周期帯は概ね 0.2 秒よりも短周期側であるため、機器の耐震性へのねじれの影響はないと考えられる。

表 3-1 3次元 FEM モデルの水平方向の応答比較 (Sd-1, T.M.S.L. 20.4m)

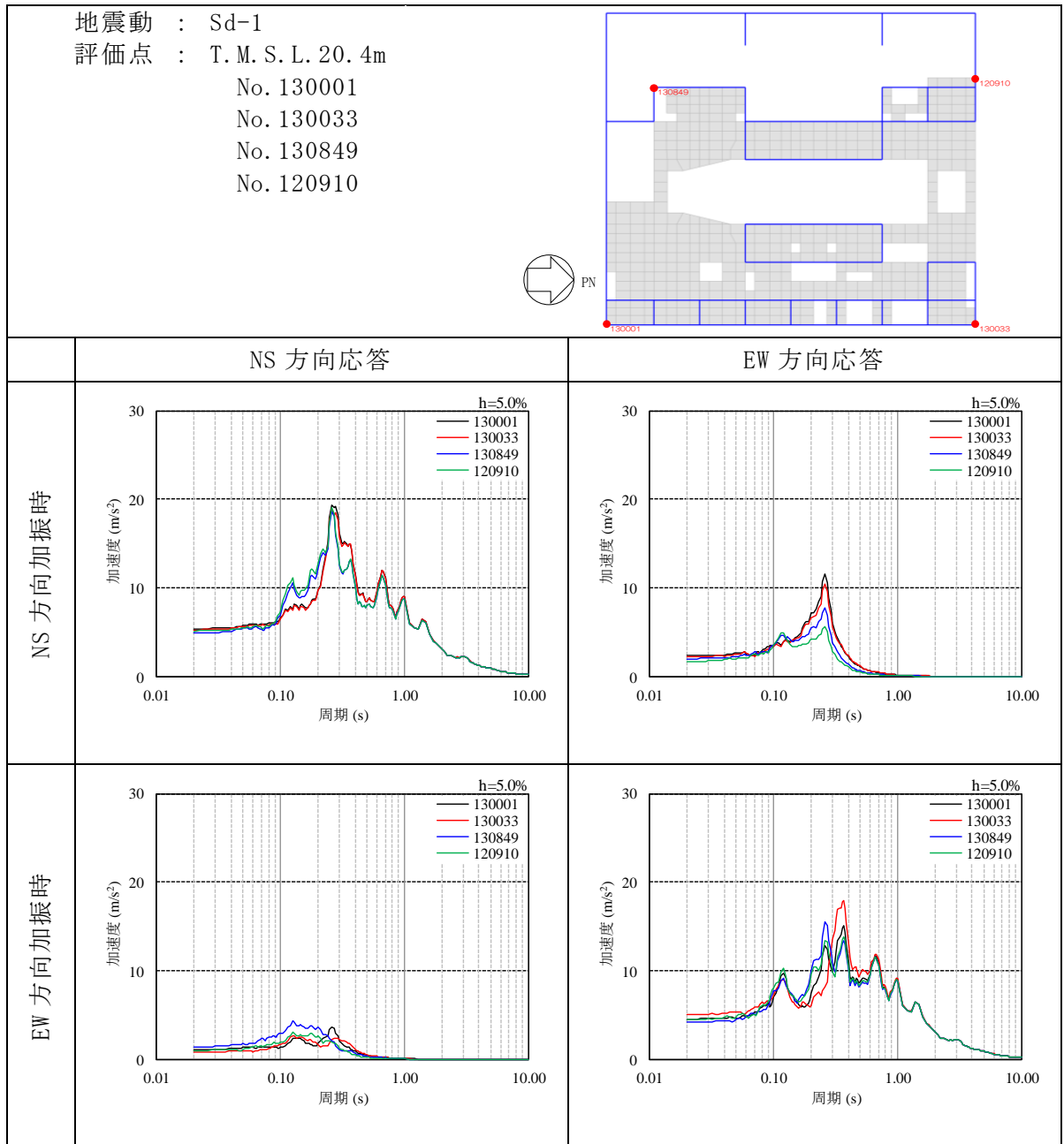


表 3-2 3次元 FEM モデルの水平方向の応答比較 (Sd-1, T.M.S.L. 12.3m)

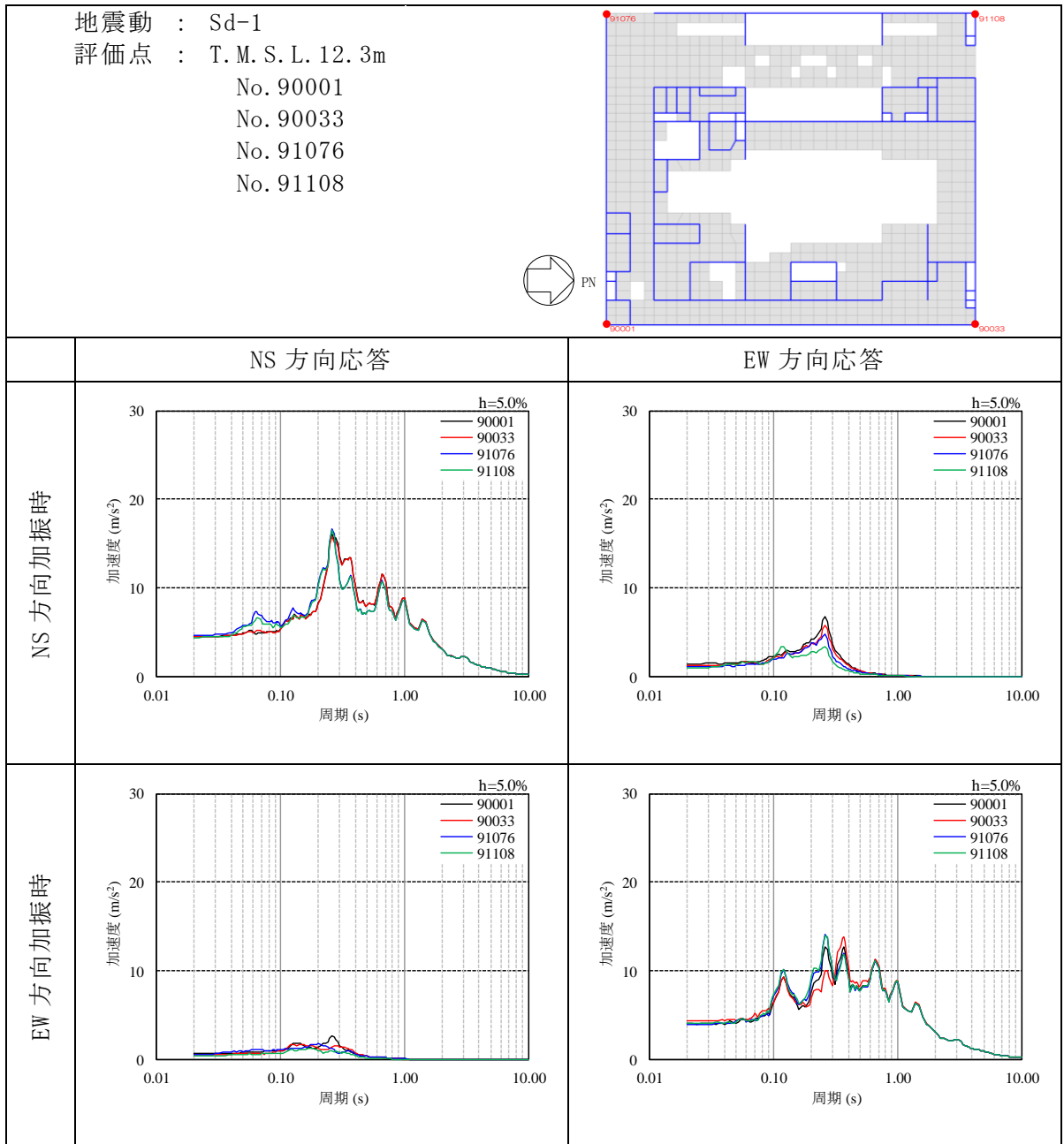


表 3-3 3次元 FEM モデルの水平方向の応答比較 (Sd-1, T.M.S.L. 4.9m)

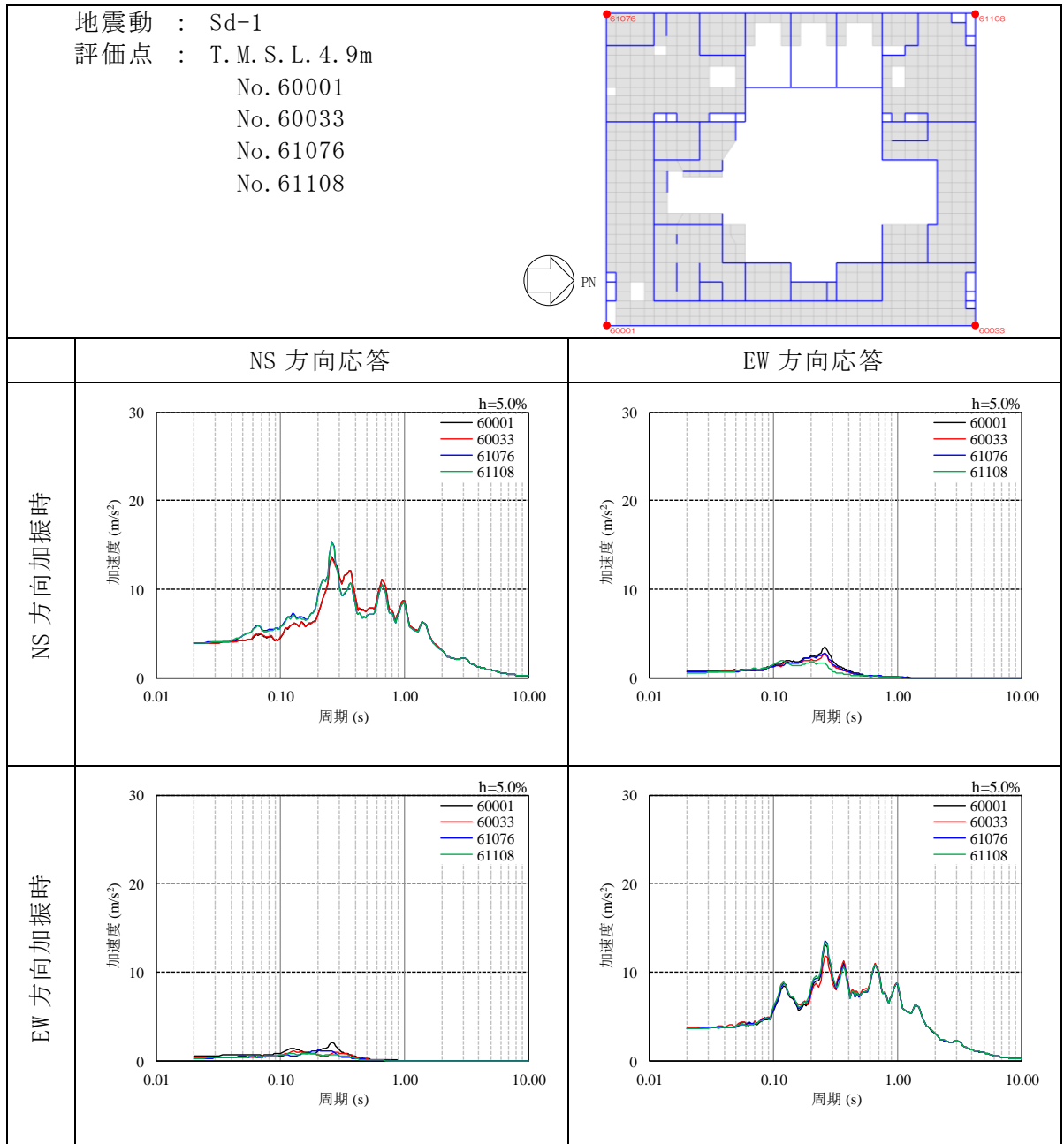
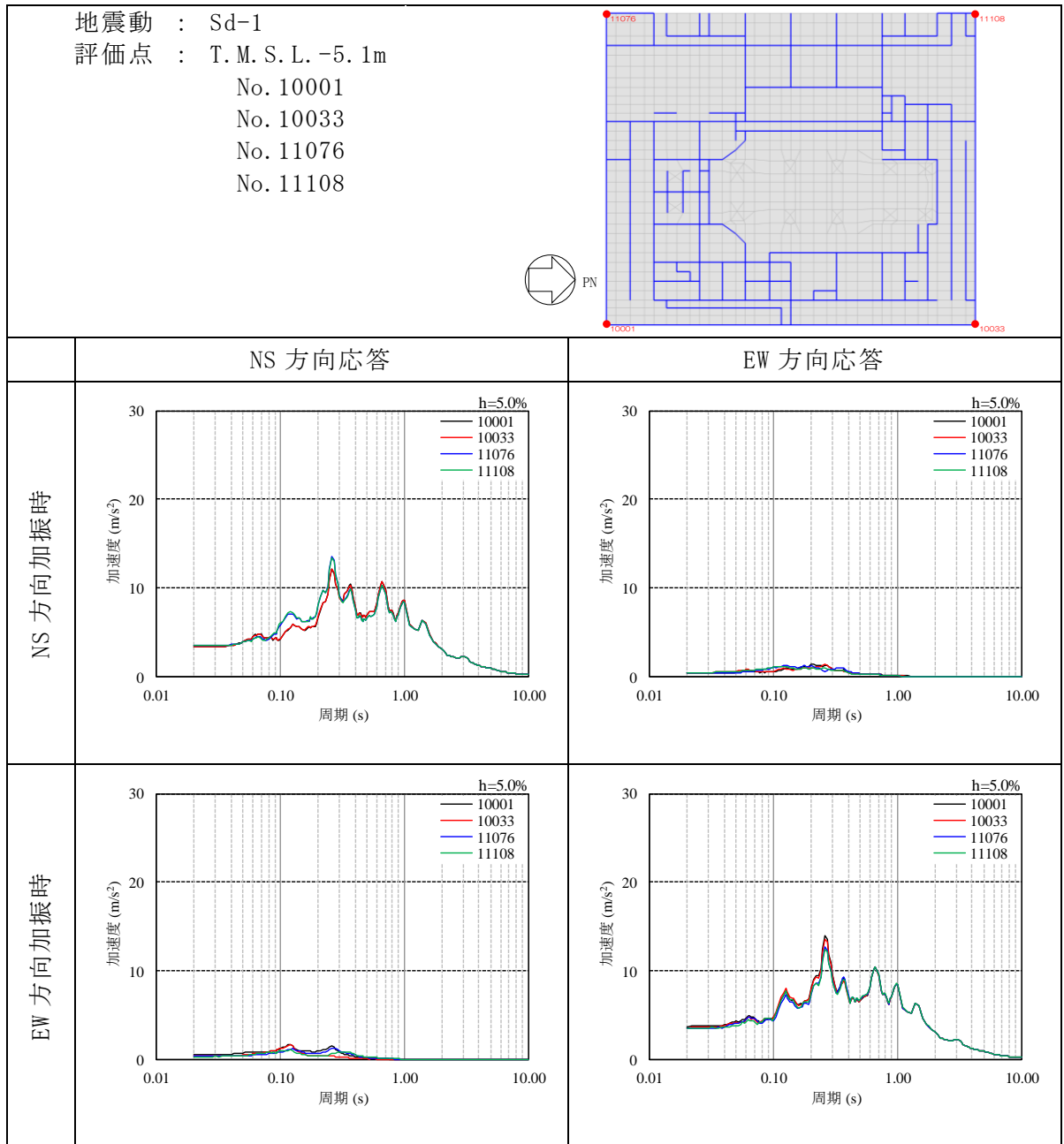


表 3-4 3次元 FEM モデルの水平方向の応答比較 (Sd-1, T.M.S.L. -5.1m)



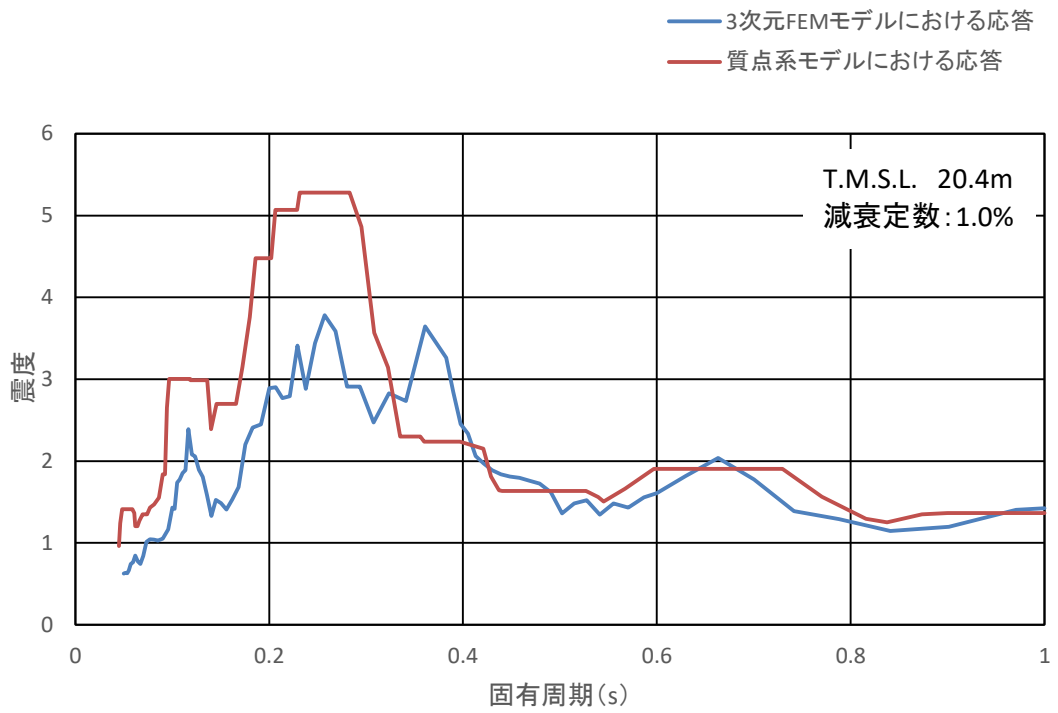


図 3-4 Sd-1 に対する 3 次元 FEM モデル及び質点系モデルにおける応答