

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添-2-018 改1
提出年月日	2020年7月1日

V-2-2-6 タービン建屋の耐震性についての計算書

2020年7月

東京電力ホールディングス株式会社

V-2-2-6 タービン建屋の耐震性についての計算書

## 目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	3
2.3 評価方針	8
2.4 適用規格・基準等	12
3. 地震応答解析による評価方法	13
4. 応力解析による評価方針	16
4.1 評価対象部位及び評価方針	16
4.2 荷重及び荷重の組合せ	17
4.2.1 荷重	17
4.2.2 荷重の組合せ	21
4.3 許容限界	22
4.4 解析モデル及び諸元	24
4.4.1 モデル化の基本方針	24
4.4.2 解析諸元	26
4.5 評価方法	27
4.5.1 応力解析方法	27
4.5.2 断面の評価方法	29
5. 地震応答解析による評価結果	31
5.1 耐震壁のせん断ひずみの評価結果	31
5.2 接地圧の評価結果	34
5.3 保有水平耐力の評価結果	35
6. 応力解析による評価結果	36

## 1. 概要

本資料は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき、タービン建屋の地震時の構造強度及び機能維持の確認について説明するものであり、その評価は、地震応答解析による評価及び応力解析による評価により行う。

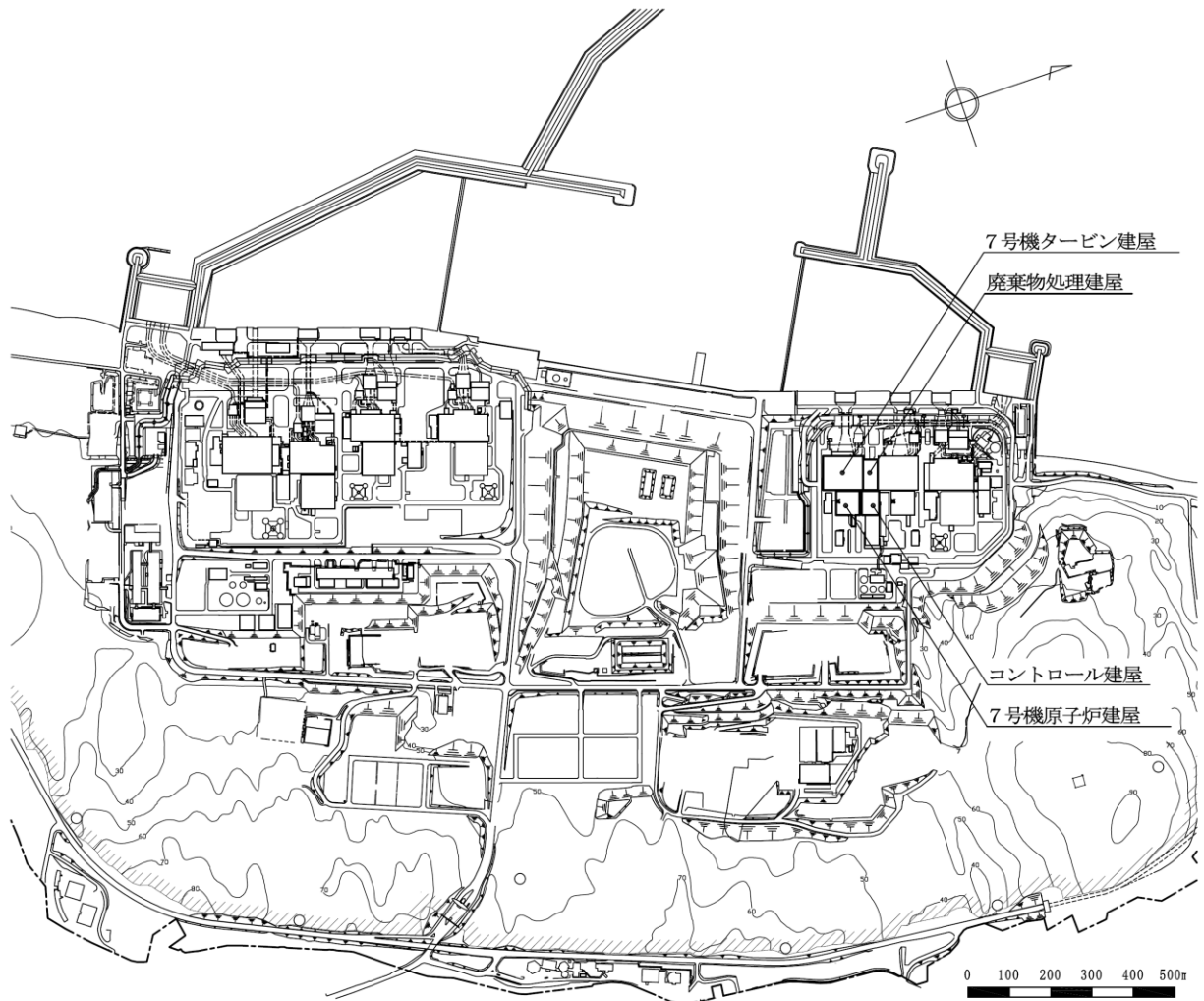
タービン建屋は建屋内部の一部に基準地震動  $S_s$  及び弾性設計用地震動  $S_d$  に対して機能維持が要求される施設が収納されており、設計基準対象施設においては「Sクラスの施設の間接支持構造物」に、重大事故等対処施設においては「常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故防止設備（設計基準拡張）及び常設重大事故緩和設備（設計基準拡張）の間接支持構造物」に分類される。

以下、タービン建屋の「Sクラスの施設の間接支持構造物」及び「常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故防止設備（設計基準拡張）及び常設重大事故緩和設備（設計基準拡張）の間接支持構造物」としての分類に応じた耐震評価を示す。

## 2. 基本方針

### 2.1 位置

タービン建屋の設置位置を図 2-1 に示す。



K7 ① V-2-2-6 R0

図 2-1 タービン建屋の設置位置

## 2.2 構造概要

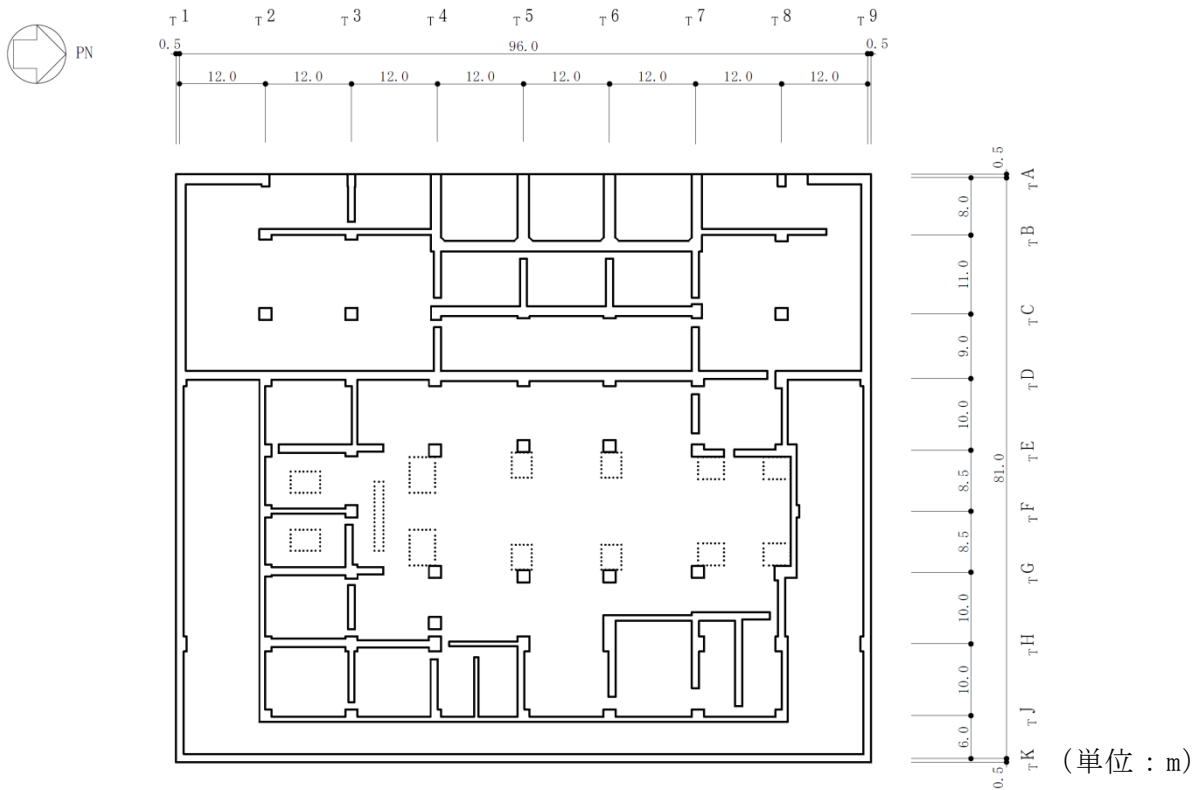
タービン建屋は、地上2階（一部3階）、地下2階建ての鉄筋コンクリート造を主体とした建物で、屋根部分が鉄骨造（トラス構造）となっている。タービン建屋の概略平面図及び概略断面図を図2-2及び図2-3に示す。

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又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2-2及び図2-3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 2-2 タービン建屋の概略平面図 (B2F, T.M.S.L. -5.1m) (1/6)

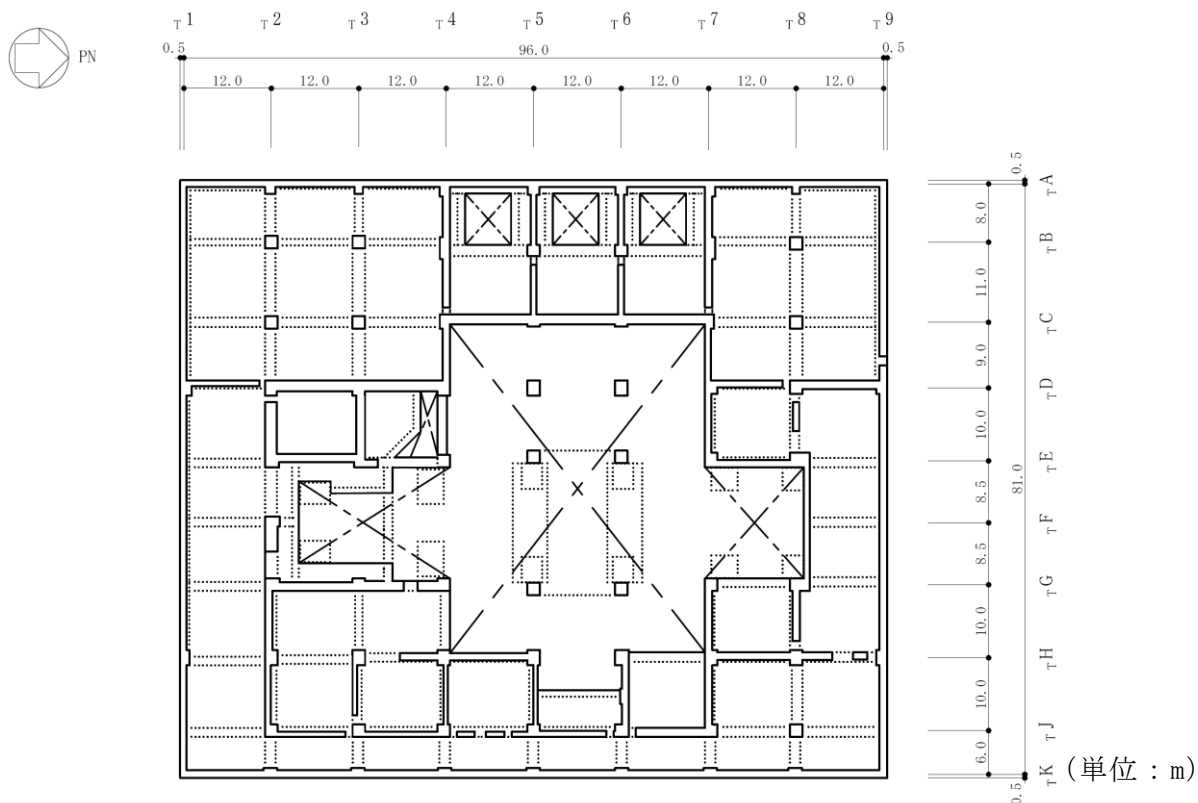


図 2-2 タービン建屋の概略平面図 (B1F, T.M.S.L. 4.9m) (2/6)

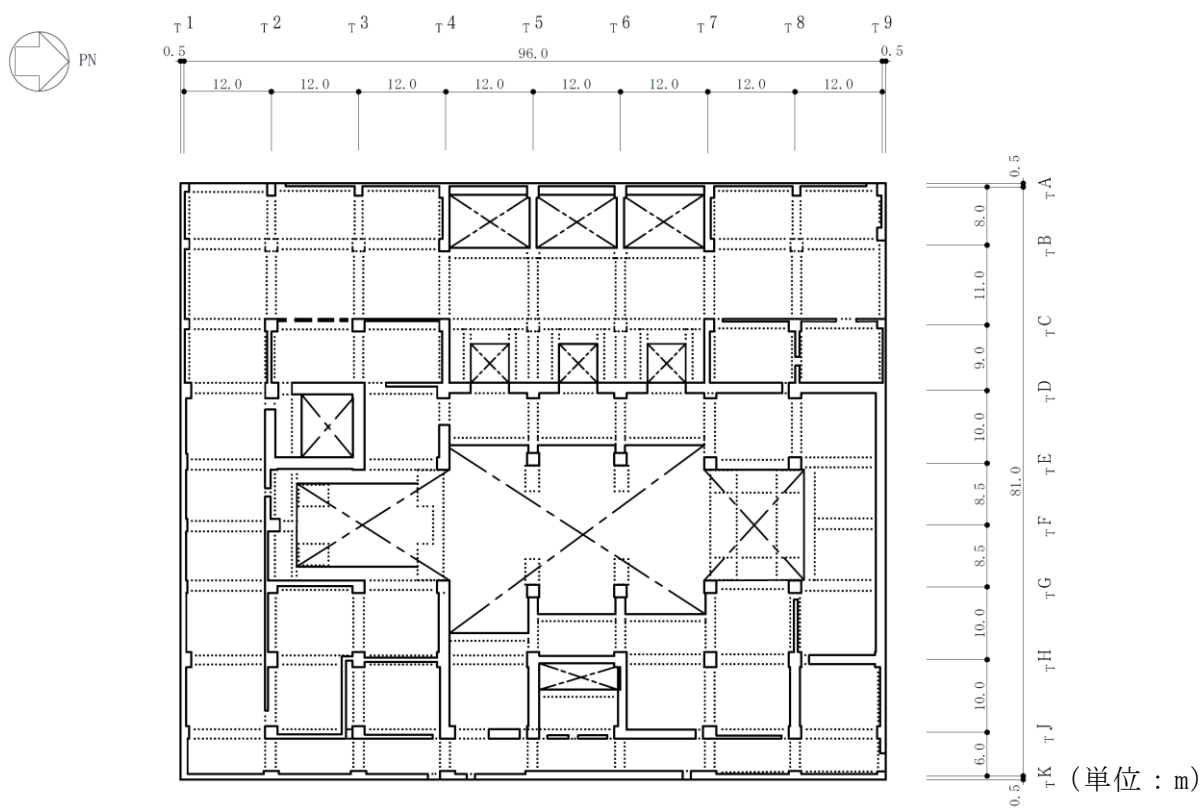


図 2-2 タービン建屋の概略平面図 (1F, T.M.S.L. 12.3m) (3/6)

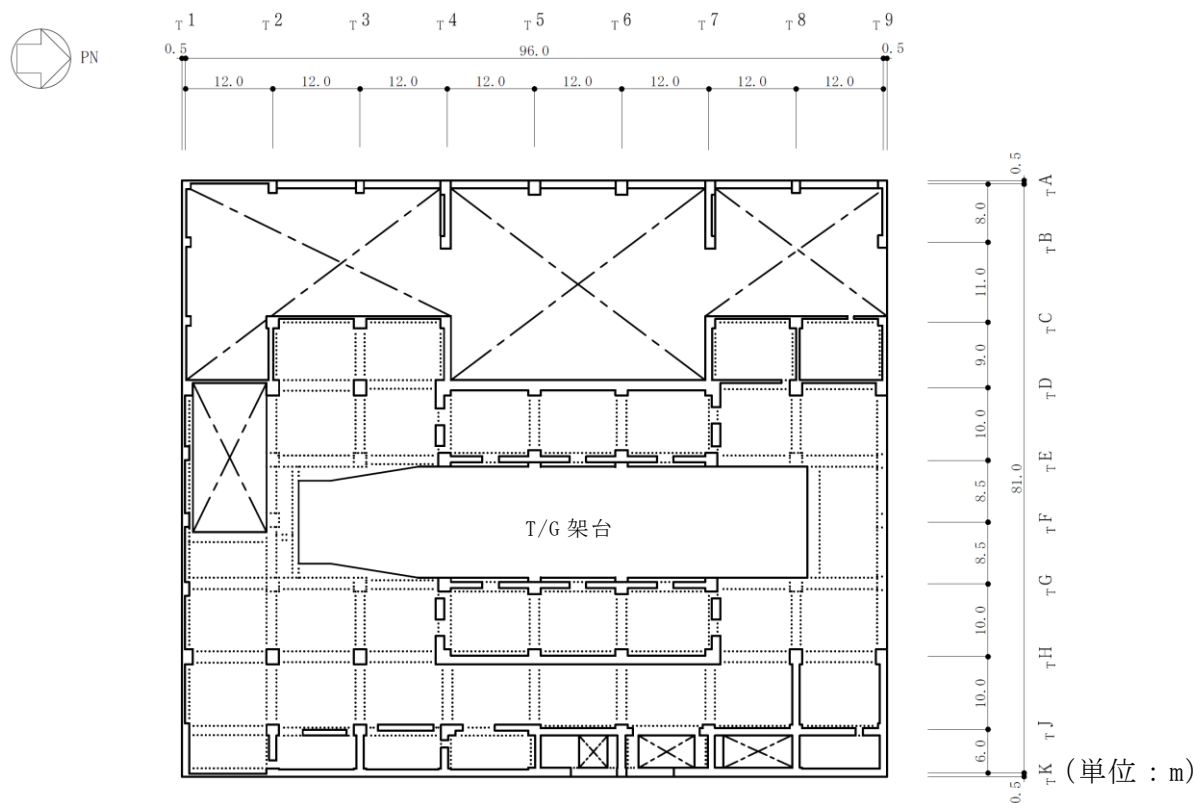


図 2-2 タービン建屋の概略平面図 (2F, T.M.S.L. 20.4m) (4/6)



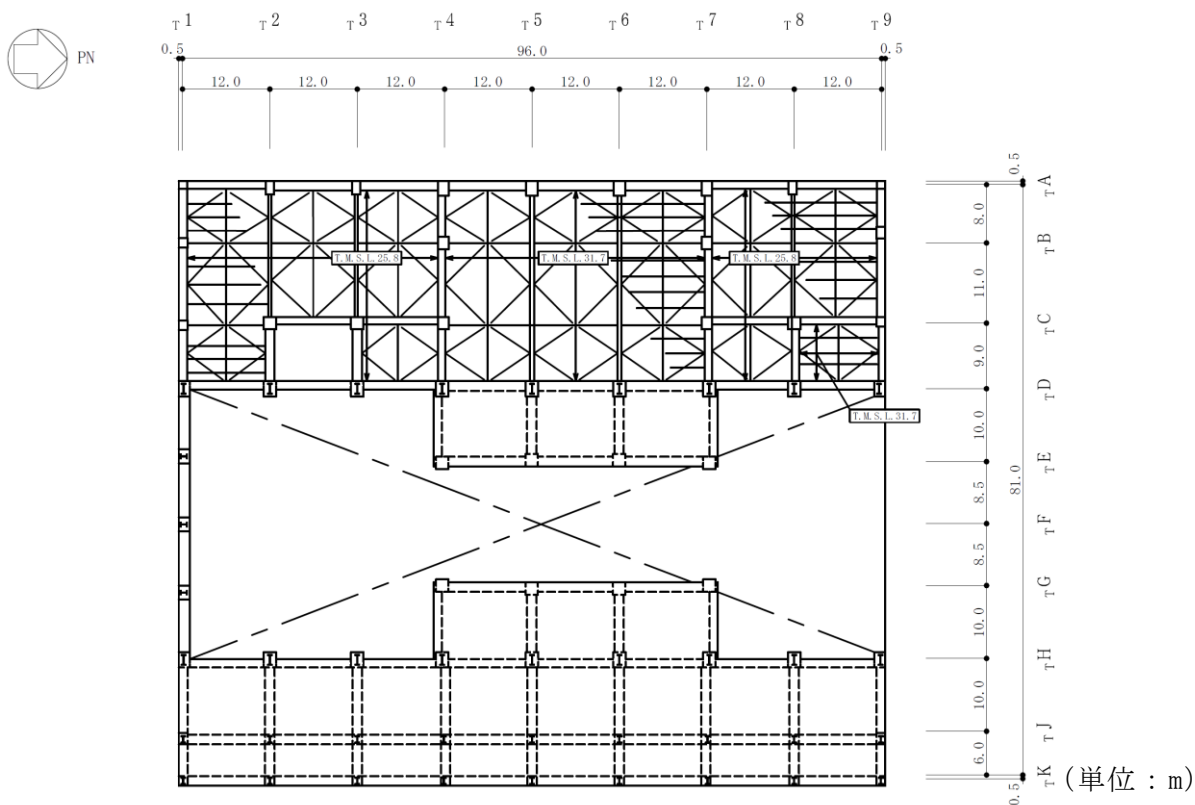


図 2-2 タービン建屋の概略平面図 (3F, T.M.S.L. 30.9m) (5/6)

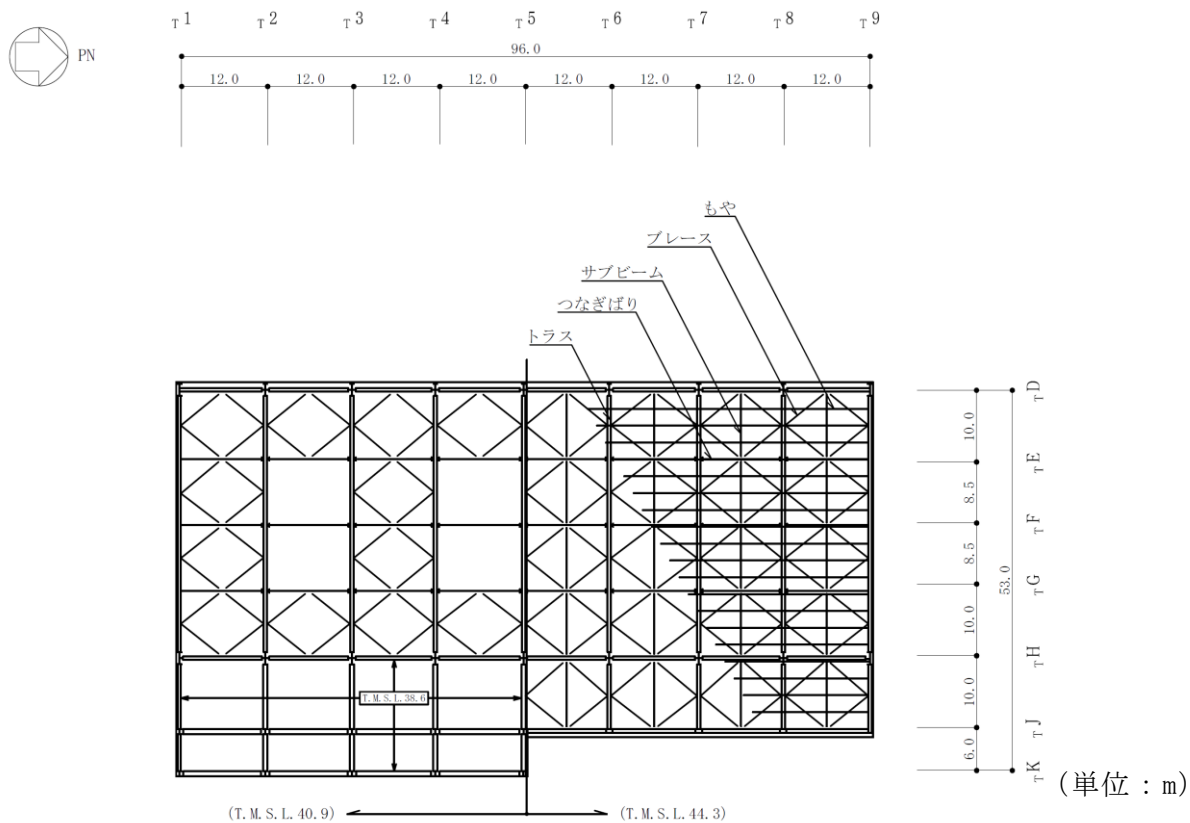
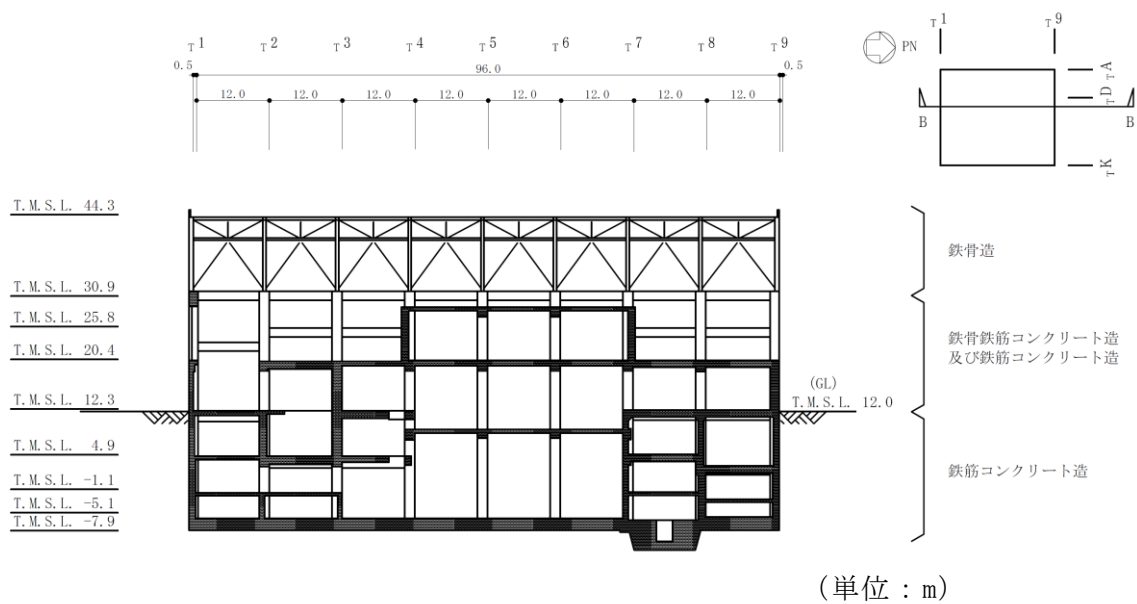
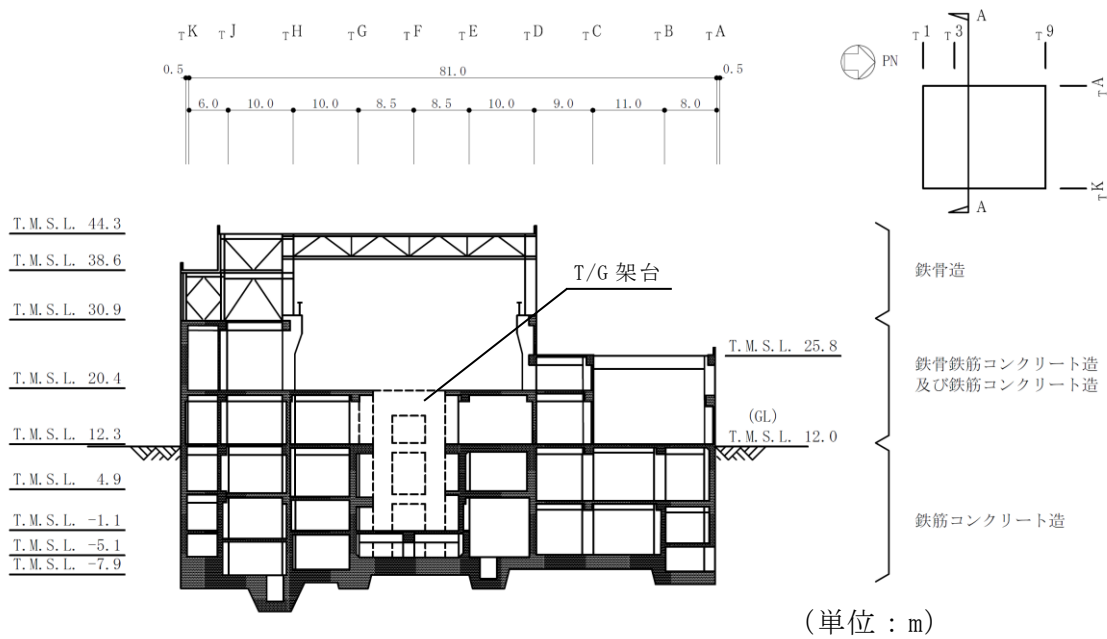


図 2-2 タービン建屋の概略平面図 (RF, T.M.S.L. 44.3m) (6/6)



NS 方向断面



EW 方向断面

図 2-3 タービン建屋の概略断面図

### 2.3 評価方針

タービン建屋は、建屋内部の一部に基準地震動  $S_s$  及び弾性設計用地震動  $S_d$  に対して機能維持が要求される施設が収納されており、設計基準対象施設においては「Sクラスの施設の間接支持構造物」に、重大事故等対処施設においては「常設耐震重要重大事故防止設備，常設重大事故防止設備（設計基準拡張）及び常設重大事故緩和設備（設計基準拡張）の間接支持構造物」に分類される。

タービン建屋の設計基準対象施設としての評価においては、基準地震動  $S_s$  による地震力に対する評価（以下「 $S_s$ 地震時に対する評価」という。）及び保有水平耐力の評価を行うこととし、それぞれの評価は、V-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」の結果を踏まえたものとする。タービン建屋の評価は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき、地震応答解析による評価においては耐震壁のせん断ひずみ、接地圧及び保有水平耐力の評価を、応力解析による評価においては、基礎スラブの断面の評価を行うことで、タービン建屋の地震時の構造強度及び機能維持の確認を行う。評価にあたっては、材料物性の不確かさを考慮する。表 2-1 に材料物性の不確かさを考慮する解析ケースを示す。

また、重大事故等対処施設としての評価においては、 $S_s$ 地震時に対する評価及び保有水平耐力の評価を行う。ここで、タービン建屋では、運転時、設計基準事故時及び重大事故等時の状態において、圧力、温度等の条件について有意な差異がないことから、重大事故等対処施設としての評価は、設計基準対象施設としての評価と同一となる。

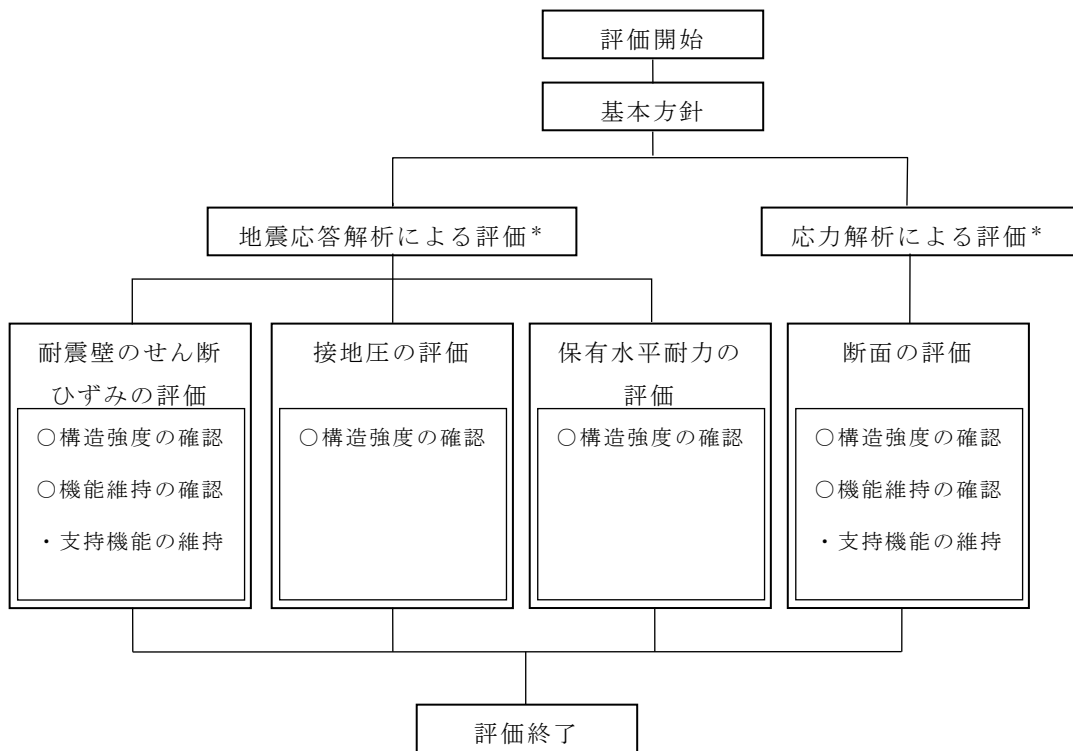
図 2-4 にタービン建屋の評価フローを示す。

図 2-5 に基準地震動  $S_s$  及び弾性設計用地震動  $S_d$  に対する機能維持要求エリアを示す。

表 2-1 材料物性の不確かさを考慮する解析ケース

検討ケース	コンクリート剛性	地盤剛性
①ケース 1 (工認モデル)	実強度 (43.1N/mm <sup>2</sup> )	標準地盤
②ケース 2 (建屋剛性 + $\sigma$ , 地盤剛性 + $\sigma$ )	実強度 + $\sigma$ (46.0N/mm <sup>2</sup> )	標準地盤 + $\sigma$ (砂層 + 13%, 古安田層 + 25%, 西山層 + 10%)
③ケース 3 (建屋剛性 - $\sigma$ , 地盤剛性 - $\sigma$ )	実強度 - $\sigma$ (40.2N/mm <sup>2</sup> )	標準地盤 - $\sigma$ (砂層 - 13%, 古安田層 - 25%, 西山層 - 10%)
④ケース 4 (建屋剛性コア平均)	実強度 (コア平均) (55.7N/mm <sup>2</sup> )	標準地盤
⑤ケース 5 (建屋剛性 - 2 $\sigma$ )	実強度 - 2 $\sigma$ (37.2N/mm <sup>2</sup> )	標準地盤

K7 ① V-2-2-6 R0



注記\* : V-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」の結果を踏まえた評価を行う。

図 2-4 タービン建屋の評価フロー

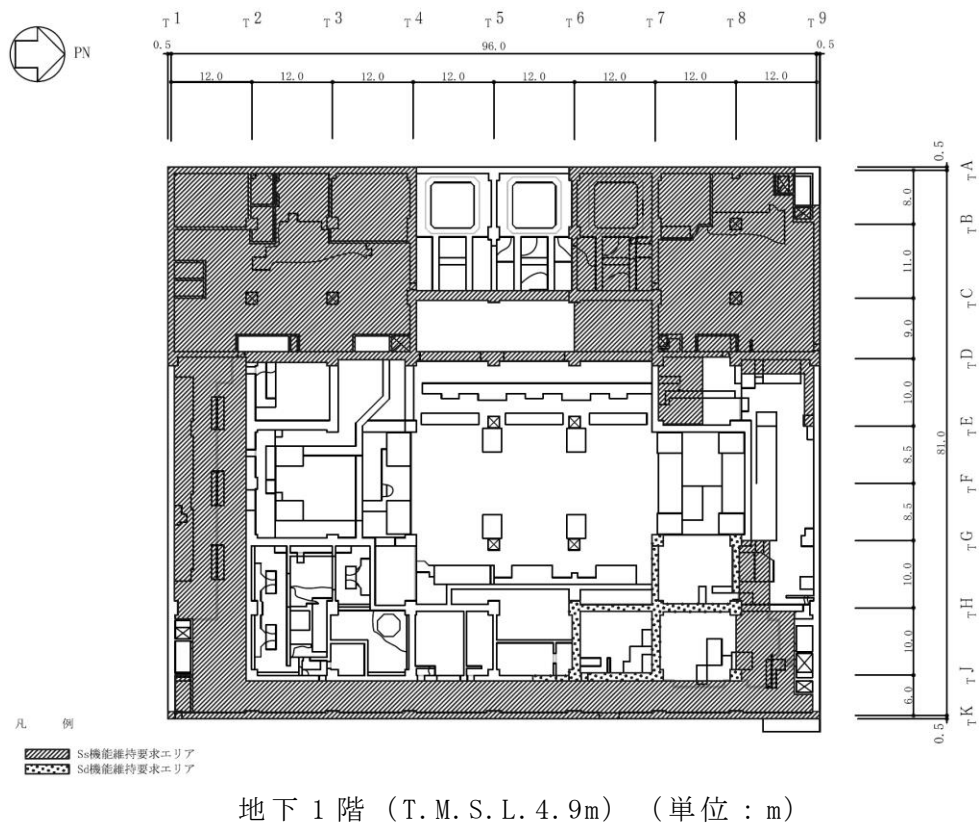
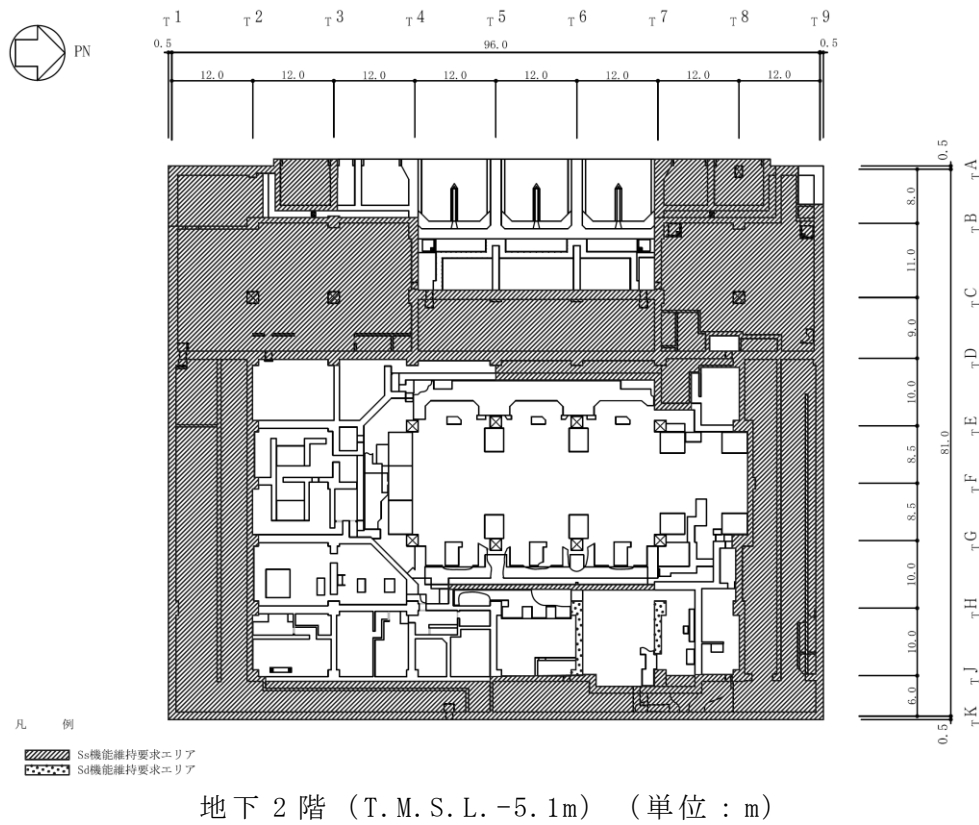
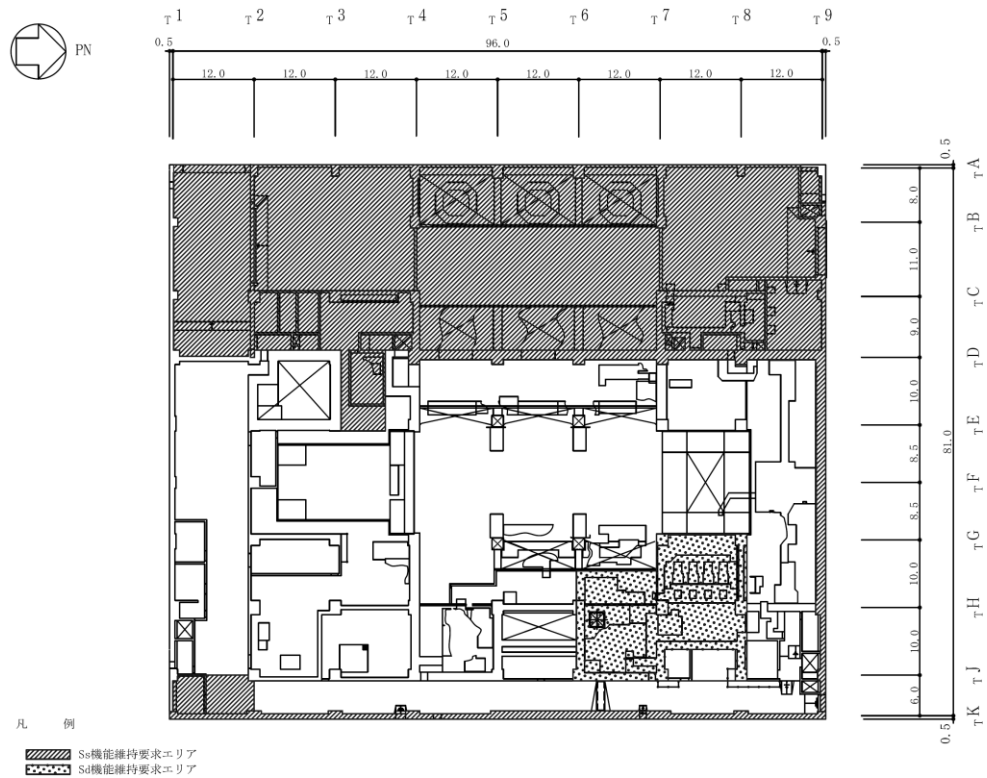
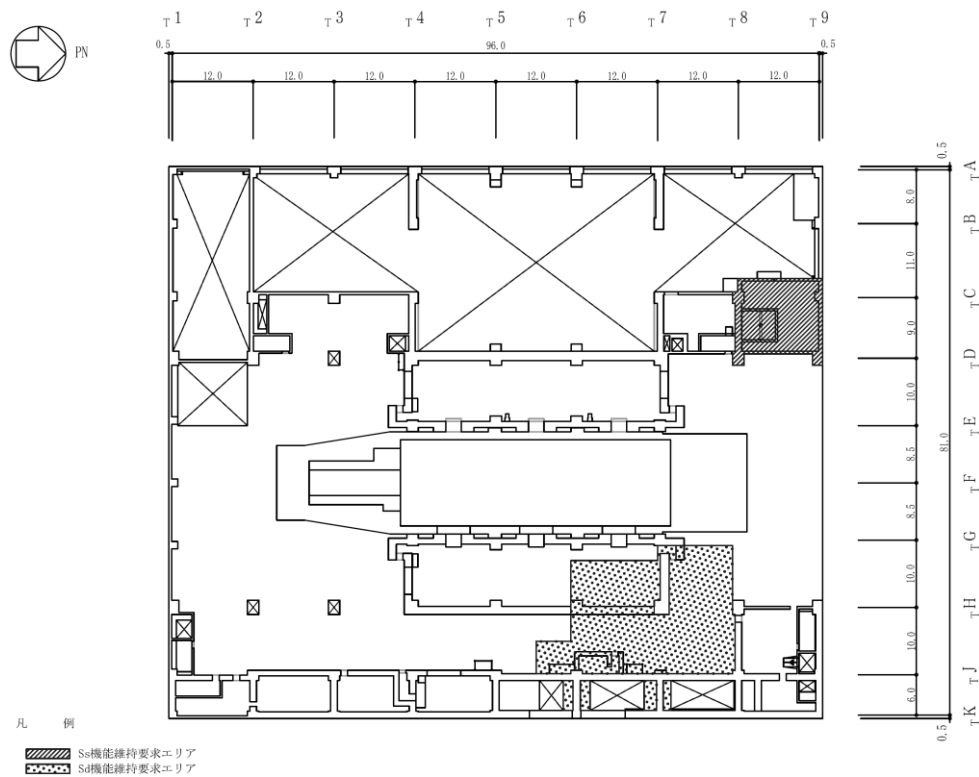


図 2-5 基準地震動  $S_s$  及び弾性設計用地震動  $S_d$  に対する機能維持要求エリア (1/2)



1階 (T.M.S.L. 12.3m) (単位 : m)



2階 (T.M.S.L. 20.4m) (単位 : m)

図 2-5 基準地震動  $S_s$  及び弾性設計用地震動  $S_d$  に対する機能維持要求エリア (2/2)

## 2.4 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- 建築基準法・同施行令
- 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ー許容応力度設計法ー ((社) 日本建築学会, 1999改定)
- 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ((社) 日本建築学会2005制定)
- 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984 ((社) 日本電気協会)
- 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 ((社) 日本電気協会)
- 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)
- 発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格 ((社) 日本機械学会, 2003)

### 3. 地震応答解析による評価方法

タービン建屋の構造強度については、V-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」に基づき、材料物性の不確かさを考慮した耐震壁の最大せん断ひずみ及び最大接地圧が許容限界を超えないこと並びに保有水平耐力が必要保有水平耐力に対して妥当な安全余裕を有することを確認する。

また、支持機能の維持については、V-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」に基づき、材料物性の不確かさを考慮した耐震壁の最大せん断ひずみが許容限界を超えないことを確認する。

地震応答解析による評価におけるタービン建屋の許容限界は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」に記載の構造強度上の制限及び機能維持方針に基づき、表 3-1 及び表 3-2 のとおり設定する。



表 3-1 地震応答解析による評価における許容限界  
(設計基準対象施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部位	機能維持のための考え方	許容限界(評価基準値)
—	構造強度を有すること	基準地震動 S <sub>s</sub>	耐震壁*1	最大せん断ひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10 <sup>-3</sup>
			基礎地盤	最大接地圧が地盤の極限支持力度を超えないことを確認	極限支持力度*2 6170 kN/m <sup>2</sup>
		保有水平耐力	構造物全体	保有水平耐力が必要保有水平耐力に対して妥当な安全余裕を有することを確認	必要保有水平耐力
支持機能*3	機器・配管系等の設備を支持する機能を損なわないこと	基準地震動 S <sub>s</sub>	耐震壁*1	最大せん断ひずみが支持機能を維持するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10 <sup>-3</sup>

注記\*1 : 建屋全体としては、地震力を主に耐震壁で負担する構造となっており、柱、はり、間仕切壁等が耐震壁の変形に追従すること、また、全体に剛性の高い構造となっており複数の耐震壁間の相対変形が小さく床スラブの変形が抑えられるため、各層の耐震壁の最大せん断ひずみが許容限界を満足していれば、建物・構築物に要求される機能は維持される。また、V-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」に補助壁を耐震要素とした地震応答解析を行っているため、評価対象部位には補助壁を含む。

\*2 : 地盤の支持力試験の最大荷重に基づき設定する。

\*3 : 「支持機能」の確認には、「内包する設備に対する波及的影響の確認」が含まれる。

表 3-2 地震応答解析による評価における許容限界  
(重大事故等対処施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部位	機能維持のための考え方	許容限界(評価基準値)
—	構造強度を有すること	基準地震動 S <sub>s</sub>	耐震壁*1	最大せん断ひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10 <sup>-3</sup>
			基礎地盤	最大接地圧が地盤の極限支持力度を超えないことを確認	極限支持力度*2 6170 kN/m <sup>2</sup>
		保有水平耐力	構造物全体	保有水平耐力が必要保有水平耐力に対して妥当な安全余裕を有することを確認	必要保有水平耐力
支持機能*3	機器・配管系等の設備を支持する機能を損なわないこと	基準地震動 S <sub>s</sub>	耐震壁*1	最大せん断ひずみが支持機能を維持するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10 <sup>-3</sup>

注記\*1 : 建屋全体としては、地震力を主に耐震壁で負担する構造となっており、柱、はり、間仕切壁等が耐震壁の変形に追従すること、また、全体に剛性の高い構造となっており複数の耐震壁間の相対変形が小さく床スラブの変形が抑えられるため、各層の耐震壁の最大せん断ひずみが許容限界を満足していれば、建物・構築物に要求される機能は維持される。また、V-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」に補助壁を耐震要素とした地震応答解析を行っているため、評価対象部位には補助壁を含む。

\*2 : 地盤の支持力試験の最大荷重に基づき設定する。

\*3 : 「支持機能」の確認には、「内包する設備に対する波及的影響の確認」が含まれる。

#### 4. 応力解析による評価方針

##### 4.1 評価対象部位及び評価方針

タービン建屋の応力解析による評価対象部位は、基礎スラブとし、 $S_s$ 地震時に対して以下の方針に基づき評価を行う。

$S_s$ 地震時に対する評価は、3次元 FEM モデルを用いた弾性応力解析によることとし、地震力と地震力以外の荷重の組合せの結果、発生する応力が「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格（（社）日本機械学会，2003）」（以下「CCV 規格」という。）及び「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）」（以下「RC-N 規準」という。）に基づき設定した許容限界を超えないことを確認する。

3次元 FEM モデルを用いた弾性応力解析にあたっては、V-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」より得られた結果を用いて、荷重の組合せを行う。また、断面の評価については、材料物性の不確かさを考慮した断面力に対して行うこととする。図 4-1 に応力解析による評価フローを示す。

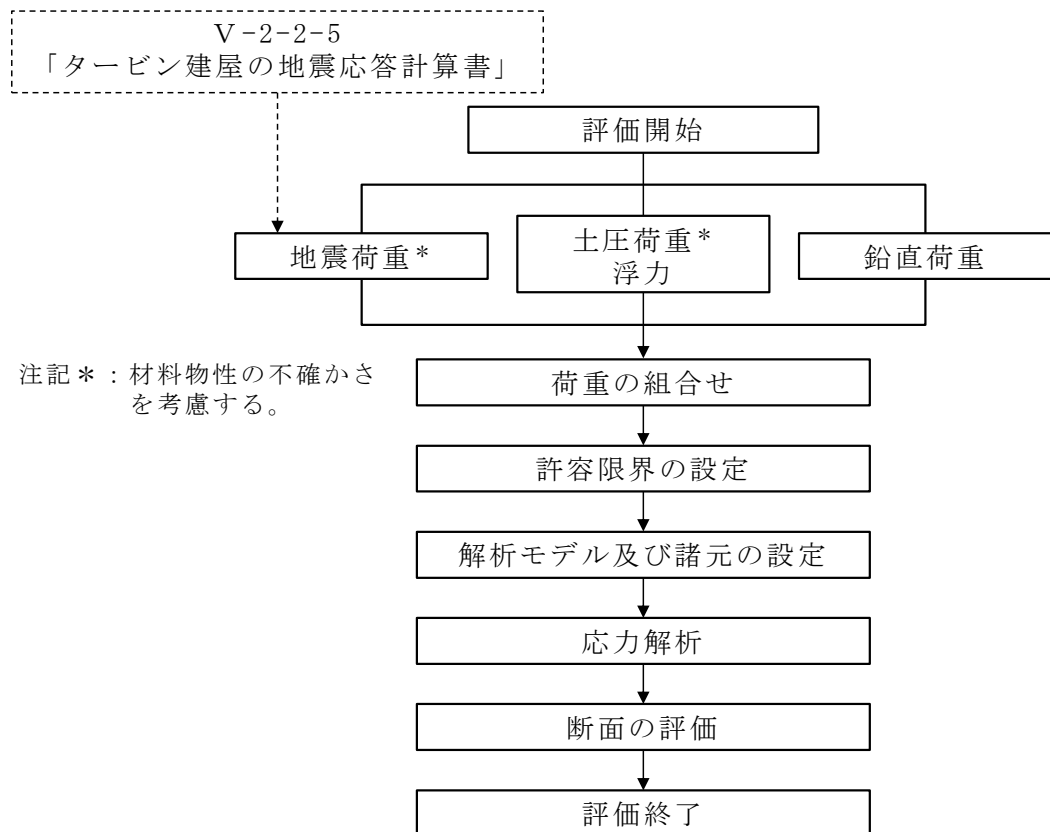


図 4-1 応力解析による評価フロー

## 4.2 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは、V-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している荷重及び荷重の組合せを用いる。

### 4.2.1 荷重

#### (1) 鉛直荷重

鉛直荷重は固定荷重，機器荷重，配管荷重，積載荷重及び積雪荷重とする。なお，積雪量は170cmとし，地震荷重と組み合わせるため，その0.35倍の積雪荷重を考慮する。

#### (2) 水平地震荷重

水平地震荷重は，基準地震動 $S_s$ による地震応答解析結果より設定する。なお，水平地震荷重は材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果を包絡したものとする。表4-1に応力解析で考慮した基準地震動 $S_s$ 時の地震荷重を示す。

#### (3) 鉛直地震荷重

鉛直地震荷重は，基準地震動 $S_s$ による地震応答解析結果による基礎スラブ部分の最大鉛直震度を用いる。なお，最大鉛直震度は材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果を包絡したものとする。表4-2に応力解析で考慮した基準地震動 $S_s$ 時の地震荷重を示す。

#### (4) 地震時土圧

地震時土圧は，常時土圧に地震時増分土圧を加えて算出する。地震時増分土圧は材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果をもとにして「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）」の地震時増分土圧算定式から加力側増分土圧及び支持側増分土圧を包絡したものとする。図4-2に地震時土圧を示す。

#### (5) 浮力

浮力は，地下水位面を基礎スラブ上端（T.M.S.L.-5.1m）とし，基礎スラブに一様に $27.5\text{kN/m}^2$ の上向きの等分布荷重として入力する。

表 4-1 最大応答せん断力(1/2)

(a) NS 方向

部位	部材番号	( $\times 10^3 \text{kN}$ )	部位	部材番号	( $\times 10^3 \text{kN}$ )	部位	部材番号	( $\times 10^3 \text{kN}$ )
a 軸	1	90.3	b 軸	9	41.2	c 軸	16	10.8
	2	145		10	74.4		17	44.1
	3	245		11	110			
	4	425		12	205			
	5	554		13	396			
	6	674		14	605			
	7	753		15	794			

注：表中の値は材料物性の不確かさを考慮した包絡値を示す。

K7 ① V-2-2-6 R0

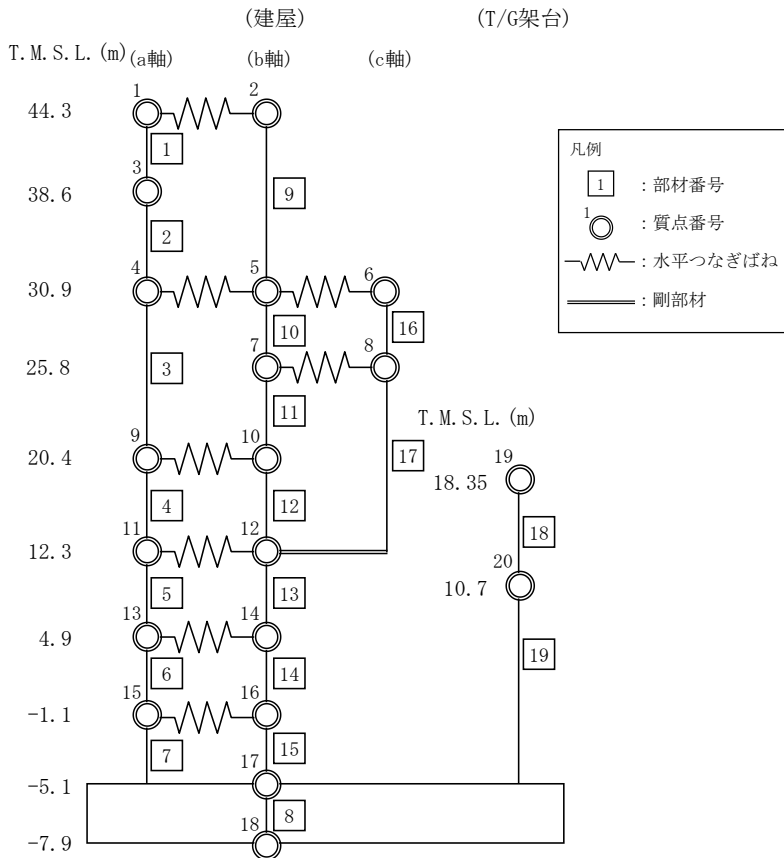


表 4-1 最大応答せん断力 (2/2)

(b) EW 方向

部位	部材番号	( $\times 10^3$ kN)	部位	部材番号	( $\times 10^3$ kN)	部位	部材番号	( $\times 10^3$ kN)	部位	部材番号	( $\times 10^3$ kN)	部位	部材番号	( $\times 10^3$ kN)
a 軸	1	42.5	b 軸	10	25.2	c 軸	14	6.17	d 軸	17	25.2	e 軸	22	16.0
	2	74.3		11	32.2		15	7.17		18	40.6		23	65.3
	3	112		12	33.5		16	20.4		19	40.3		24	63.8
	4	117		13	171		20	56.6		25	54.8			
	5	124				21	137	26		124				
	6	350						27	198					
	7	983						28	298					
	8	1220												
f 軸	29	25.2	g 軸	33	19.6	h 軸	37	23.0	i 軸	42	15.4			
	30	55.3		34	63.3		38	46.8		43	17.1			
	31	37.5		35	63.0		39	63.6		44	24.1			
	32	43.2		36	30.8		40	231						
				41	295									

注：表中の値は材料物性の不確かさを考慮した包絡値を示す。

K7 ① V-2-2-6 R0

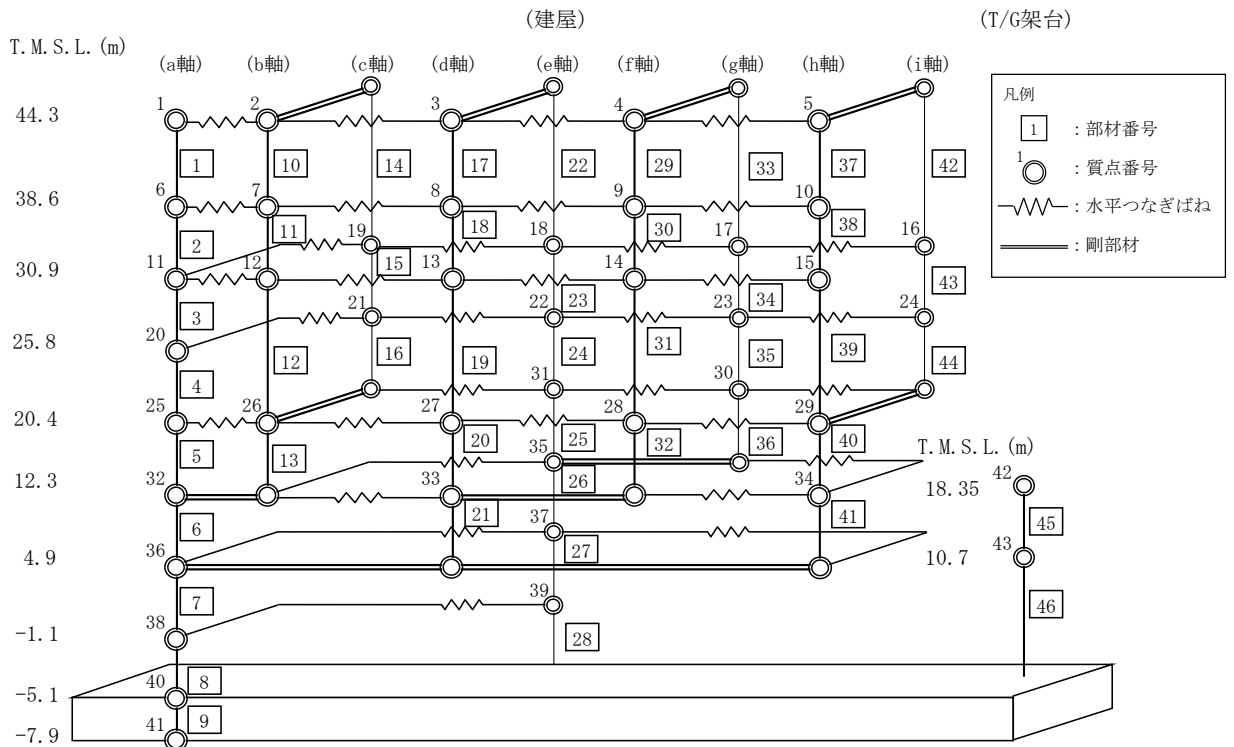


表 4-2 鉛直地震荷重

	鉛直軸力 ( $\times 10^3 \text{kN}$ )	鉛直震度
基礎下端	1910	0.75

注：表中の値は材料物性の不確かさを考慮した包絡値を示す。

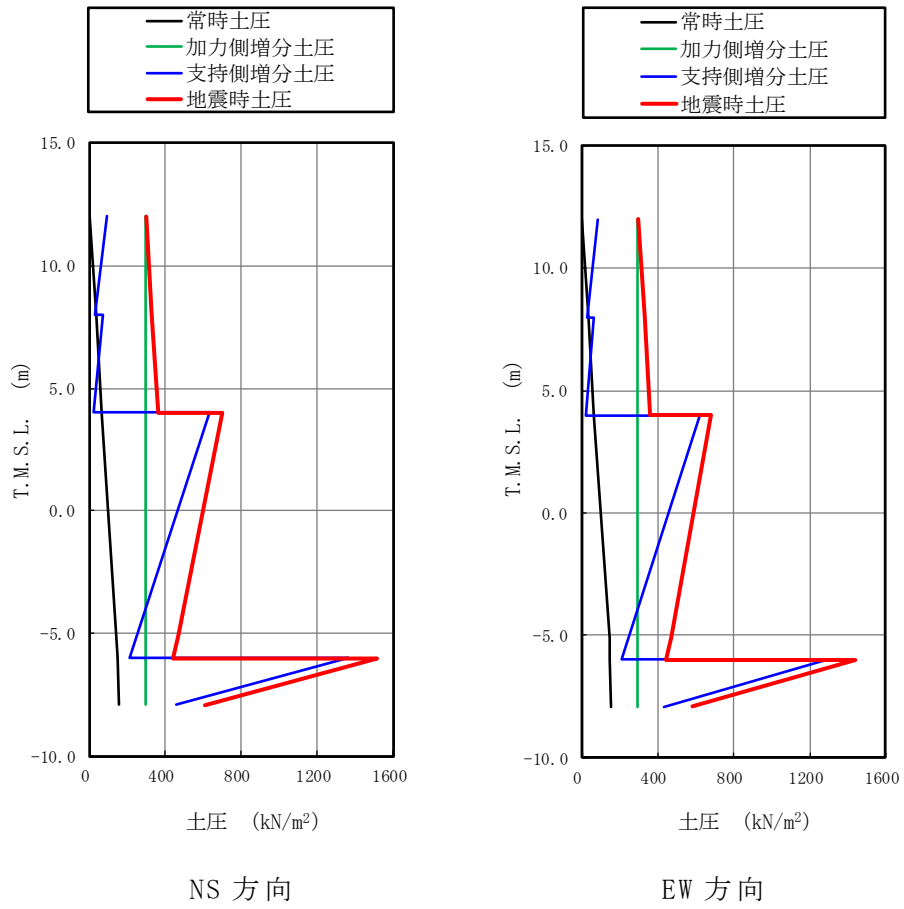


図 4-2 地震時土圧

K7 ① V-2-2-6 R0

#### 4.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 4-3 に示す。

表 4-3 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
S <sub>s</sub> 地震時	V L + S <sub>s</sub> + S O E + B L

V L : 鉛直荷重

S<sub>s</sub> : 地震荷重

S O E : 土圧荷重

B L : 浮力



### 4.3 許容限界

基礎スラブに作用する軸力及び曲げモーメントによるコンクリートの圧縮ひずみ及び鉄筋のひずみ並びに面外せん断力が許容限界以下となることを応力解析により確認する。なお，許容限界は「RC-N 規準」を基本とし，ひずみの許容限界については「CCV 規格」に基づく。

表 4-4 及び表 4-5 に応力解析による許容限界を示す。

また，コンクリート及び鉄筋の許容応力度を表 4-6 及び表 4-7 に示す。

表 4-4 応力解析による評価における許容限界  
(設計基準対象施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部位	機能維持のための考え方	許容限界 (評価基準値)
—	構造強度を有すること	基準地震動 S <sub>s</sub>	基礎 スラブ	部材に生じるひずみ及び応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ひずみ*<sup>1</sup> コンクリート 3.0×10<sup>-3</sup> (圧縮)</li> <li>鉄筋 5.0×10<sup>-3</sup></li> <li>・面外せん断力*<sup>2</sup> 短期許容せん断力</li> </ul>
支持機能* <sup>3</sup>	機器・配管系等の設備を支持する機能を損なわないこと	基準地震動 S <sub>s</sub>	基礎 スラブ	部材に生じるひずみ及び応力が支持機能を維持するための許容限界を超えないことを確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ひずみ*<sup>1</sup> コンクリート 3.0×10<sup>-3</sup> (圧縮)</li> <li>鉄筋 5.0×10<sup>-3</sup></li> <li>・面外せん断力*<sup>2</sup> 短期許容せん断力</li> </ul>

注記\*1 : CCV 規格に基づく。

\*2 : RC-N 規準に基づく。

\*3 : 「支持機能」の確認には，「内包する設備に対する波及的影響の確認」が含まれる。

表 4-5 応力解析による評価における許容限界  
(重大事故等対処施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部位	機能維持のための考え方	許容限界 (評価基準値)
—	構造強度を有すること	基準地震動 S <sub>s</sub>	基礎 スラブ	部材に生じるひずみ及び応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ひずみ*<sup>1</sup> コンクリート 3.0×10<sup>-3</sup> (圧縮) 鉄筋 5.0×10<sup>-3</sup></li> <li>• 面外せん断力*<sup>2</sup> 短期許容せん断力</li> </ul>
支持機能* <sup>3</sup>	機器・配管系等の設備を支持する機能を損なわないこと	基準地震動 S <sub>s</sub>	基礎 スラブ	部材に生じるひずみ及び応力が支持機能を維持するための許容限界を超えないことを確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ひずみ*<sup>1</sup> コンクリート 3.0×10<sup>-3</sup> (圧縮) 鉄筋 5.0×10<sup>-3</sup></li> <li>• 面外せん断力*<sup>2</sup> 短期許容せん断力</li> </ul>

注記\*1 : CCV 規格に基づく。

\*2 : RC-N 規準に基づく。

\*3 : 「支持機能」の確認には、「内包する設備に対する波及的影響の確認」が含まれる。

K7 ① V-2-2-6 R0

表 4-6 コンクリートの許容応力度

(単位 : N/mm<sup>2</sup>)

設計基準強度 F <sub>c</sub>	圧縮	せん断
29.4	19.6	1.17

表 4-7 鉄筋の許容応力度

(単位 : N/mm<sup>2</sup>)

種別	引張及び圧縮	面外せん断補強
SD35 (SD345 相当)	345	345

#### 4.4 解析モデル及び諸元

##### 4.4.1 モデル化の基本方針

###### (1) 基本方針

応力解析は，3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析とする。解析には，「MSC NASTRAN」を用いる。解析コードの検証及び妥当性確認の概要については，別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

基礎スラブについては，段差等による凹凸が存在するが，平板としてモデル化する。板厚は一般部で2.0m，蒸気タービンの基礎スラブ部及び $\tau$ H～ $\tau$ K間では，2.8mとする。上部構造の剛性を考慮するために基礎スラブより上部の構造躯体もFEMモデル化する。基礎スラブのモデル図を図4-3に示す。

###### (2) 使用要素

解析モデルに使用するFEM要素は，基礎スラブについてはシェル要素とする。また，基礎スラブより立ち上がっている耐震壁については，シェル要素，柱及びはりはり要素として剛性を考慮する。解析モデルの節点数は19086，要素数は10769である。

###### (3) 境界条件

3次元FEMモデルの基礎スラブ底面に，V-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」に示す地盤ばねを離散化して，水平方向及び鉛直方向のばねを設ける。3次元FEMモデルの水平方向のばねについては，地震応答解析モデルのスウェイばねを，鉛直方向のばねについては，地震応答解析モデルのロッキングばねを基に設定を行う。

なお，基礎スラブ底面の地盤ばねについては，引張力が発生した時に浮上りを考慮する。

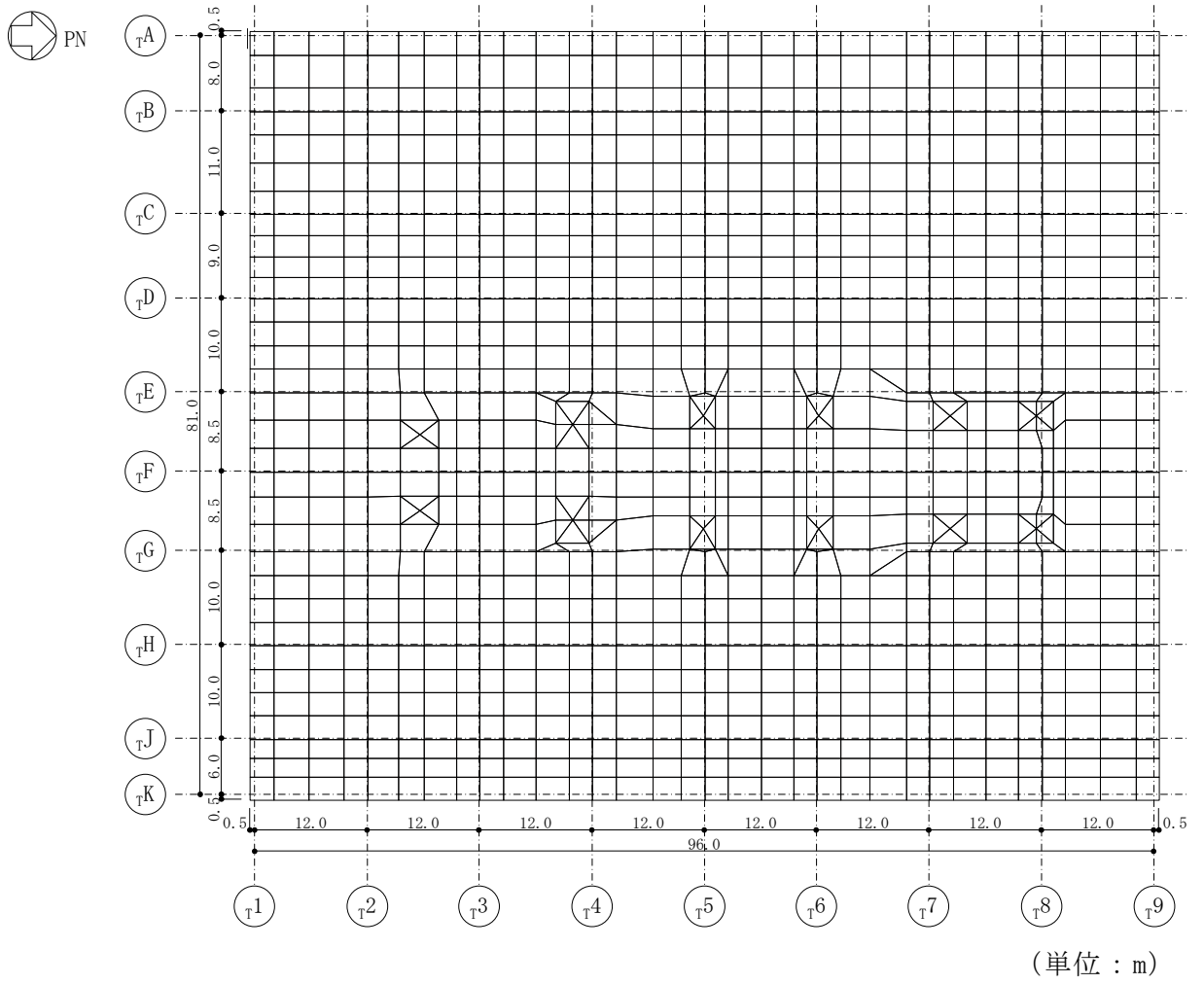


図 4-3 基礎スラブの解析モデル図

#### 4.4.2 解析諸元

使用材料の物性値を表 4-8 及び表 4-9 に示す。

表 4-8 コンクリートの物性値

諸元	物性値
ヤング係数	$2.79 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
ポアソン比	0.2

注：剛性はコンクリートの実強度（ $39.2 \text{ N/mm}^2$ ）に基づく

表 4-9 鉄筋の物性値

諸元	物性値
鋼材種	SD35 (SD345 相当)
ヤング係数	$2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$

## 4.5 評価方法

### 4.5.1 応力解析方法

タービン建屋基礎スラブについて、 $S_s$ 地震時に対して3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析を実施する。

#### (1) 荷重ケース

$S_s$ 地震時の応力は、次の荷重ケースによる応力を組み合わせて求める。

- $V_L$  : 鉛直荷重
- $S_{S_{SN}}$  : 水平地震荷重 (S→N 入力, NS 方向)
- $S_{S_{NS}}$  : 水平地震荷重 (N→S 入力, NS 方向)
- $S_{S_{EW}}$  : 水平地震荷重 (E→W 入力, EW 方向)
- $S_{S_{WE}}$  : 水平地震荷重 (W→E 入力, EW 方向)
- $K_v$  : 鉛直震度
- $S_{OE}$  : 土圧荷重
- $B_L$  : 浮力

(2) 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 4-10 に示す。

水平方向と鉛直方向の荷重の組合せは、「原子力発電所耐震設計技術規定 J E A C 4 6 0 1 -2008 ( (社) 日本電気協会)」を参考に、組合せ係数法 (組合せ係数は 1.0 と 0.4) を用いるものとする。

表 4-10 荷重の組合せケース

ケース No.	水平 : 鉛直	鉛直震度	荷重の組合せケース
1	1.0 : 0.4	下向き	$(1.0+0.4K_v) V L + S s_{SN} + S O E + B L$
2		上向き	$(1.0-0.4K_v) V L + S s_{SN} + S O E + B L$
3		下向き	$(1.0+0.4K_v) V L + S s_{NS} + S O E + B L$
4		上向き	$(1.0-0.4K_v) V L + S s_{NS} + S O E + B L$
5		下向き	$(1.0+0.4K_v) V L + S s_{EW} + S O E + B L$
6		上向き	$(1.0-0.4K_v) V L + S s_{EW} + S O E + B L$
7		下向き	$(1.0+0.4K_v) V L + S s_{WE} + S O E + B L$
8		上向き	$(1.0-0.4K_v) V L + S s_{WE} + S O E + B L$
9	0.4 : 1.0	下向き	$(1.0+K_v) V L + 0.4 S s_{SN} + 0.4 S O E + B L$
10		上向き	$(1.0-K_v) V L + 0.4 S s_{SN} + 0.4 S O E + B L$
11		下向き	$(1.0+K_v) V L + 0.4 S s_{NS} + 0.4 S O E + B L$
12		上向き	$(1.0-K_v) V L + 0.4 S s_{NS} + 0.4 S O E + B L$
13		下向き	$(1.0+K_v) V L + 0.4 S s_{EW} + 0.4 S O E + B L$
14		上向き	$(1.0-K_v) V L + 0.4 S s_{EW} + 0.4 S O E + B L$
15		下向き	$(1.0+K_v) V L + 0.4 S s_{WE} + 0.4 S O E + B L$
16		上向き	$(1.0-K_v) V L + 0.4 S s_{WE} + 0.4 S O E + B L$

### (3) 荷重の入力方法

#### a. 地震荷重

地震荷重は，上部構造物の慣性力を考慮する。基礎スラブ底面に生じる反力が，基準地震動  $S_s$  に対する地震応答解析結果と等価になるように設定する。基礎スラブ内に作用する荷重は， $S_s$  地震時の上部構造による入力荷重と基礎スラブ底面に発生する荷重の差を FEM モデルの各要素の大きさに応じて分配し，節点荷重として入力する。

#### b. 地震荷重以外の荷重

地震荷重以外の荷重については，FEM モデルの各節点又は各要素に，集中荷重又は分布荷重として入力する。

### 4.5.2 断面の評価方法

#### (1) 軸力及び曲げモーメントに対する断面の評価方法

各断面は，軸力及び曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリート造長方形仮想柱として評価する。 $S_s$  地震時において，軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみを評価する際は，「CCV 規格」に基づいた許容限界を超えないことを確認する。ここで，鉄筋のひずみ算定において，発生応力が鉄筋の降伏応力度を超える場合は，エネルギー一定則に基づいた等価ひずみを算定する。



## (2) 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N 規準」に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断力が、次式を基に算定した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \{ \alpha \cdot f_s + 0.5 \cdot {}_w f_t \cdot (p_w - 0.002) \}$$

ここで、

$Q_A$  : 許容面外せん断力 (N)

$b$  : 断面の幅 (mm)

$j$  : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

$f_s$  : コンクリートの短期許容せん断応力度で、表 4-6 に示す値 (N/mm<sup>2</sup>)

$\alpha$  : 許容せん断力の割増し係数

(2 を超える場合は 2, 1 未満の場合は 1 とする。また、引張軸力が 2N/mm<sup>2</sup> を超える場合は 1 とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M/(Q \cdot d) + 1}$$

$M$  : 曲げモーメント (N・mm)

$Q$  : せん断力 (N)

$d$  : 断面の有効せい (mm)

${}_w f_t$  : せん断補強筋の引張応力度で、表 4-7 に示す値 (N/mm<sup>2</sup>)

$p_w$  : せん断補強筋比で、次式による。(0.002 以上とする。\*)

$$p_w = \frac{a_w}{b \cdot x}$$

$a_w$  : せん断補強筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$x$  : せん断補強筋の間隔 (mm)

注記\* : せん断補強筋がない領域については、第 2 項を 0 とする。

5. 地震応答解析による評価結果

5.1 耐震壁のせん断ひずみの評価結果

鉄筋コンクリート造耐震壁について、Ss地震時の各層の最大せん断ひずみが許容限界 ( $2.0 \times 10^{-3}$ ) を超えないことを確認する。

材料特性の不確かさを考慮した最大せん断ひずみは  $0.659 \times 10^{-3}$  (EW 方向, Ss-7, ケース 5) であり、許容限界 ( $2.0 \times 10^{-3}$ ) を超えないことを確認した。各階の耐震壁の最大せん断ひずみ一覧を表 5-1 及び表 5-2 に示す。各表において、各階の最大せん断ひずみのうち最も大きい値について、せん断スケルトン曲線上にプロットした図を図 5-1 に示す。

表 5-1 耐震壁の最大せん断ひずみ (NS 方向)

部位	T.M.S.L. (m)	地震応答解析 モデルの部材 番号	最大せん断 ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	許容限界 ( $\times 10^{-3}$ )
a 軸	20.4~12.3	4	0.223	2.0
	12.3~4.9	5	0.176	
	4.9~-1.1	6	0.288	
	-1.1~-5.1	7	0.310	
b 軸	25.8~20.4	11	0.0745	
	20.4~12.3	12	0.112	
	12.3~4.9	13	0.119	
	4.9~-1.1	14	0.132	
	-1.1~-5.1	15	0.173	

注：ハッチングは各階の最大せん断ひずみのうち最も大きい値を表示

表 5-2 耐震壁の最大せん断ひずみ (EW 方向)

部位	T.M.S.L. (m)	地震応答解析 モデルの部材 番号	最大せん断 ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	許容限界 ( $\times 10^{-3}$ )
a 軸	20.4~12.3	5	0.172	2.0
	12.3~4.9	6	0.171	
	4.9~-1.1	7	0.197	
	-1.1~-5.1	8	0.309	
b 軸	20.4~12.3	13	0.317	
c 軸	25.8~20.4	16	0.188	
d 軸	20.4~12.3	20	0.106	
	12.3~4.9	21	0.179	
e 軸	25.8~20.4	24	0.263	
	20.4~12.3	25	0.125	
	12.3~4.9	26	0.0977	
	4.9~-1.1	27	0.132	
	-1.1~-5.1	28	0.165	
f 軸	20.4~12.3	32	0.659	
g 軸	25.8~20.4	35	0.195	
	20.4~12.3	36	0.135	
h 軸	20.4~12.3	40	0.184	
	12.3~4.9	41	0.387	
i 軸	25.8~20.4	44	0.0842	

注：ハッチングは各階の最大せん断ひずみのうち最も大きい値を表示

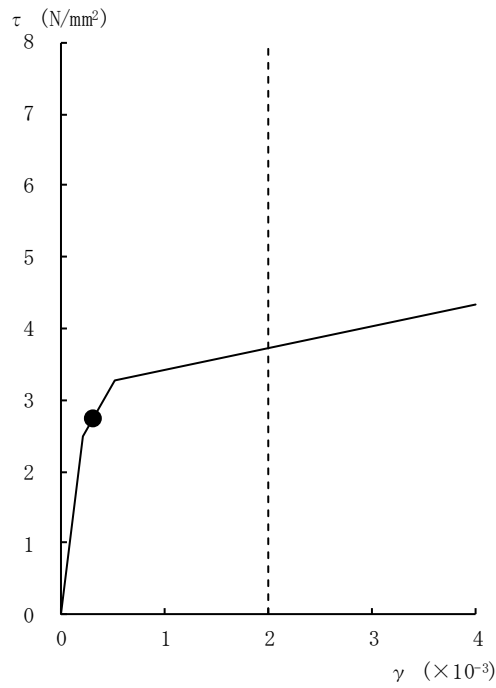


図 5-1 せん断スケルトン曲線上の最大せん断ひずみ (1/2)  
(NS 方向, Ss-1, ケース 3, 部材 7)

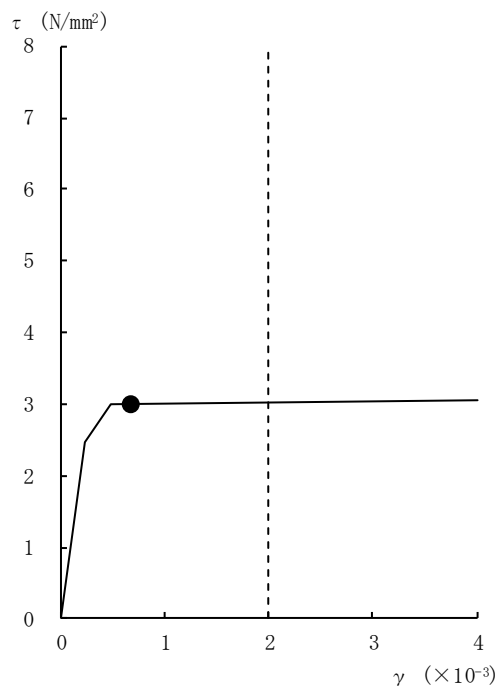


図 5-1 せん断スケルトン曲線上の最大せん断ひずみ (2/2)  
(EW 方向, Ss-7, ケース 5, 部材 32)

## 5.2 接地圧の評価結果

S s 地震時の最大接地圧が、地盤の極限支持力度（6170kN/m<sup>2</sup>）を超えないことを確認する。

材料特性の不確かさを考慮した S s 地震時の最大接地圧は 748 kN/m<sup>2</sup> であることから、地盤の極限支持力度を超えないことを確認した。

地震時の最大接地圧を表 5-3 に示す。

表 5-3 最大接地圧

	NS 方向	EW 方向
検討ケース	Ss-1, ケース 3	Ss-1, ケース 4
鉛直力 N (×10 <sup>5</sup> kN)	33.0	33.1
転倒モーメント M (×10 <sup>6</sup> kN・m)	41.5	35.9
最大接地圧 (kN/m <sup>2</sup> )	739	748

### 5.3 保有水平耐力の評価結果

各層において、保有水平耐力  $Q_u$  が必要保有水平耐力  $Q_{un}$  に対して安全余裕を有していることを確認する。なお、各要素の保有水平耐力  $Q_u$  及び必要保有水平耐力  $Q_{un}$  は平成 3 年 8 月 23 日付け 3 資庁第 6675 号にて認可された工事計画の添付資料「IV-2-9 タービン建屋の耐震性についての計算書」（以下「既工認」という。）によるものとする。

今回工認の地震応答解析モデルにおいては建屋重量の変更及び補助壁の考慮等の変更点があるが、保有水平耐力  $Q_u$  については補助壁を考慮しない既工認の値を用いることは保守的な評価となる。また、必要保有水平耐力  $Q_{un}$  の算定における形状特性係数  $F_s$  及び高さ方向の分布係数  $A_i$  については、既工認と今回工認の値はおおむね同等である。以上より、保有水平耐力の評価において既工認の値を用いることは妥当である。

必要保有水平耐力  $Q_{un}$  と保有水平耐力  $Q_u$  の比較結果を表 5-4 に示す。各層において保有水平耐力  $Q_u$  が必要保有水平耐力  $Q_{un}$  に対して妥当な安全余裕を有していることを確認した。なお、必要保有水平耐力  $Q_{un}$  に対する保有水平耐力  $Q_u$  の比は最小で 1.31 である。

表 5-4 必要保有水平耐力  $Q_{un}$  と保有水平耐力  $Q_u$  の比較結果

T. M. S. L. (m)	EW方向		
	$Q_{un}$ ( $\times 10^3$ kN)	$Q_u$ ( $\times 10^3$ kN)	$Q_u/Q_{un}$
44.3 ～ 38.6	123.56	161.81	1.31
38.6 ～ 30.9	209.86	315.77	1.50
30.9 ～ 25.8	176.52	310.87	1.76
25.8 ～ 20.4	193.19	376.58	1.95
20.4 ～ 12.3	269.68	544.27	2.02
12.3 ～ 4.9	(372.65)	843.37	2.26
4.9 ～ -1.1	(456.99)	983.61	2.15
-1.1 ～ -5.1	(506.02)	1146.40	2.27

注：( )内数値は地下震度式を使用した場合を示す。

## 6. 応力解析による評価結果

タービン建屋の基礎スラブの配筋領域図を図 6-1～図 6-5 に，配筋一覧を表 6-1～表 6-5 に示す。

基礎スラブの評価対象部位におけるコンクリート及び鉄筋の最大ひずみ並びに最大面外せん断力を表 6-6 に示す。また，最大値が発生した位置を図 6-6 に示す。これより，評価対象部位では最大ひずみ，最大面外せん断力ともに許容限界を超えないことを確認した。

表 6-1 基礎スラブの配筋 (NS 方向, 上ば筋)

	一段目	二段目	三段目	断面積 (mm <sup>2</sup> /m)
領域 A	D35@200	—	—	4785
領域 B	D35@200	D35@400	—	7178
領域 C	D35@200	D35@200	—	9570
領域 D	D35@200	D35@200	D35@400	11960
領域 E	D35@200	D35@200	D35@200	14360
領域 F	D38@200	—	—	5700
領域 G	D38@200	D38@400	—	8550
領域 H	D38@200	D38@200	—	11400
領域 I	D38@200	D38@200	D38@400	14250

K7 ① V-2-2-6 R0

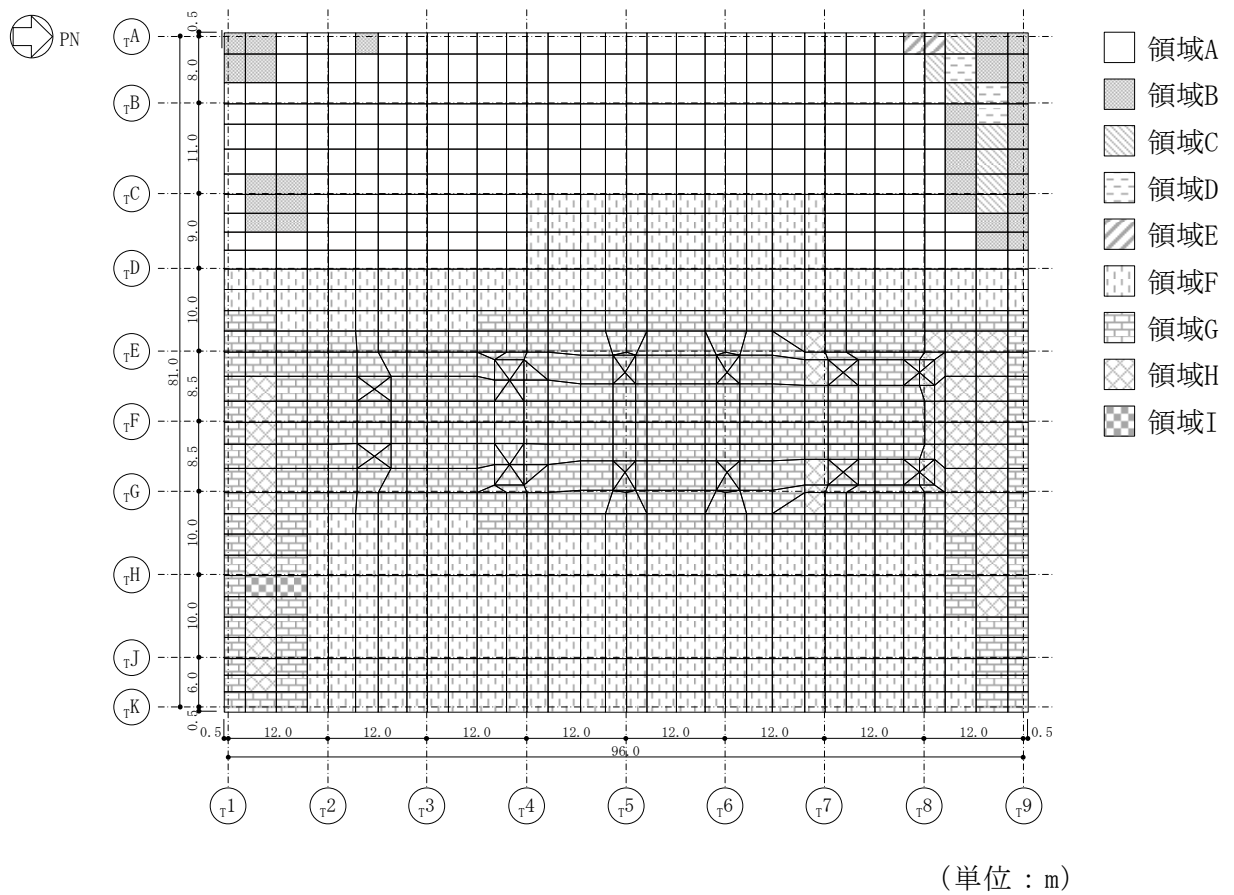


図 6-1 基礎スラブの配筋領域図 (NS 方向, 上ば筋)



表 6-2 基礎スラブの配筋 (NS 方向, 下ば筋)

	一段目	二段目	三段目	断面積 (mm <sup>2</sup> /m)
領域 A	D35@200	—	—	4785
領域 B	D35@200	D35@400	—	7178
領域 C	D35@200	D35@200	—	9570
領域 D	D35@200	D35@200	D35@400	11960
領域 E	D35@200	D35@200	D35@200	14360
領域 F	D38@200	—	—	5700
領域 G	D38@200	D38@400	—	8550
領域 H	D38@200	D38@200	—	11400
領域 I	D38@200	D38@200	D38@400	14250

K7 ① V-2-2-6 R0

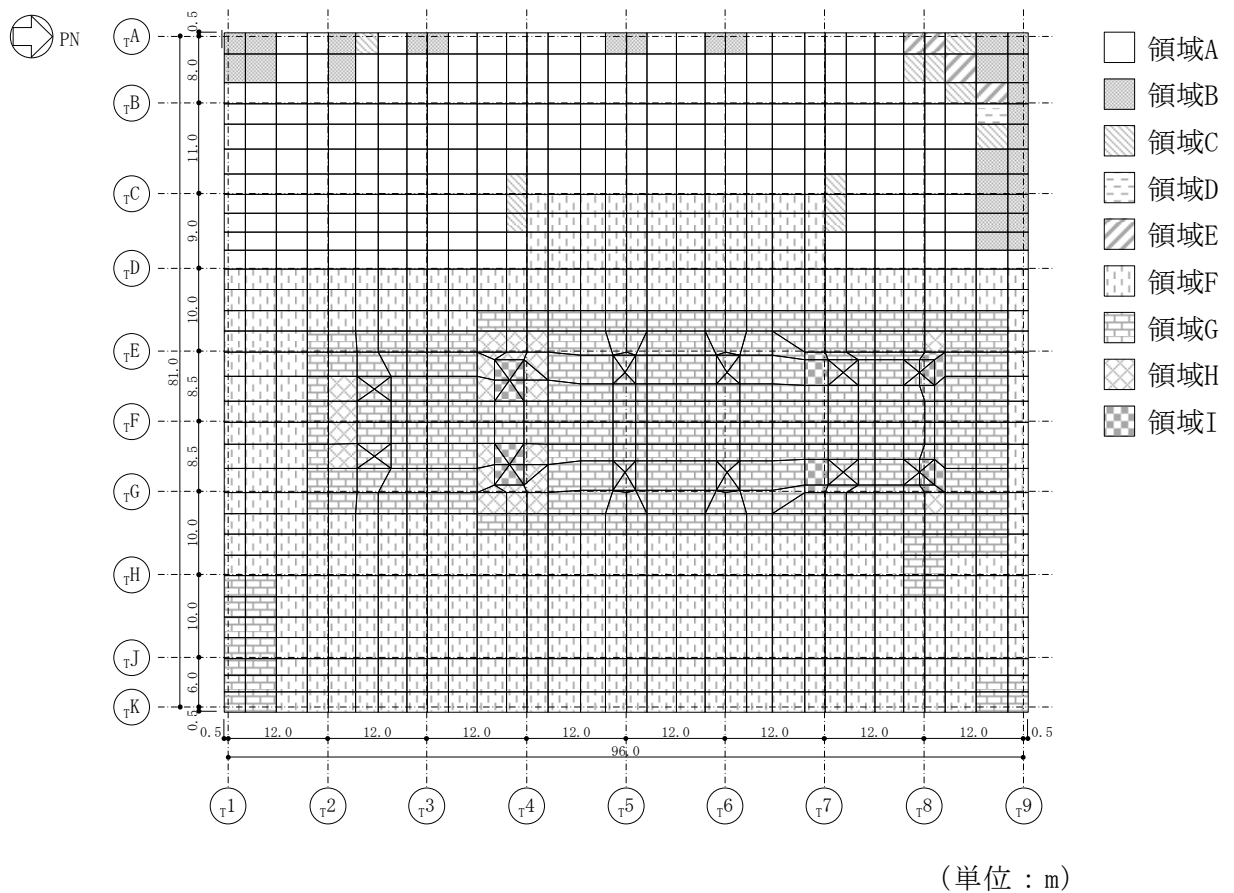


図 6-2 基礎スラブの配筋領域図 (NS 方向, 下ば筋)

表 6-3 基礎スラブの配筋 (EW 方向, 上ば筋)

	一段目	二段目	三段目	断面積 (mm <sup>2</sup> /m)
領域 A	D35@200	—	—	4785
領域 B	D35@200	D35@400	—	7178
領域 C	D38@200	—	—	5700
領域 D	D38@200	D38@400	—	8550
領域 E	D38@200	D38@200	—	11400
領域 F	D38@200	D38@200	D38@400	14250

K7 ① V-2-2-6 R0

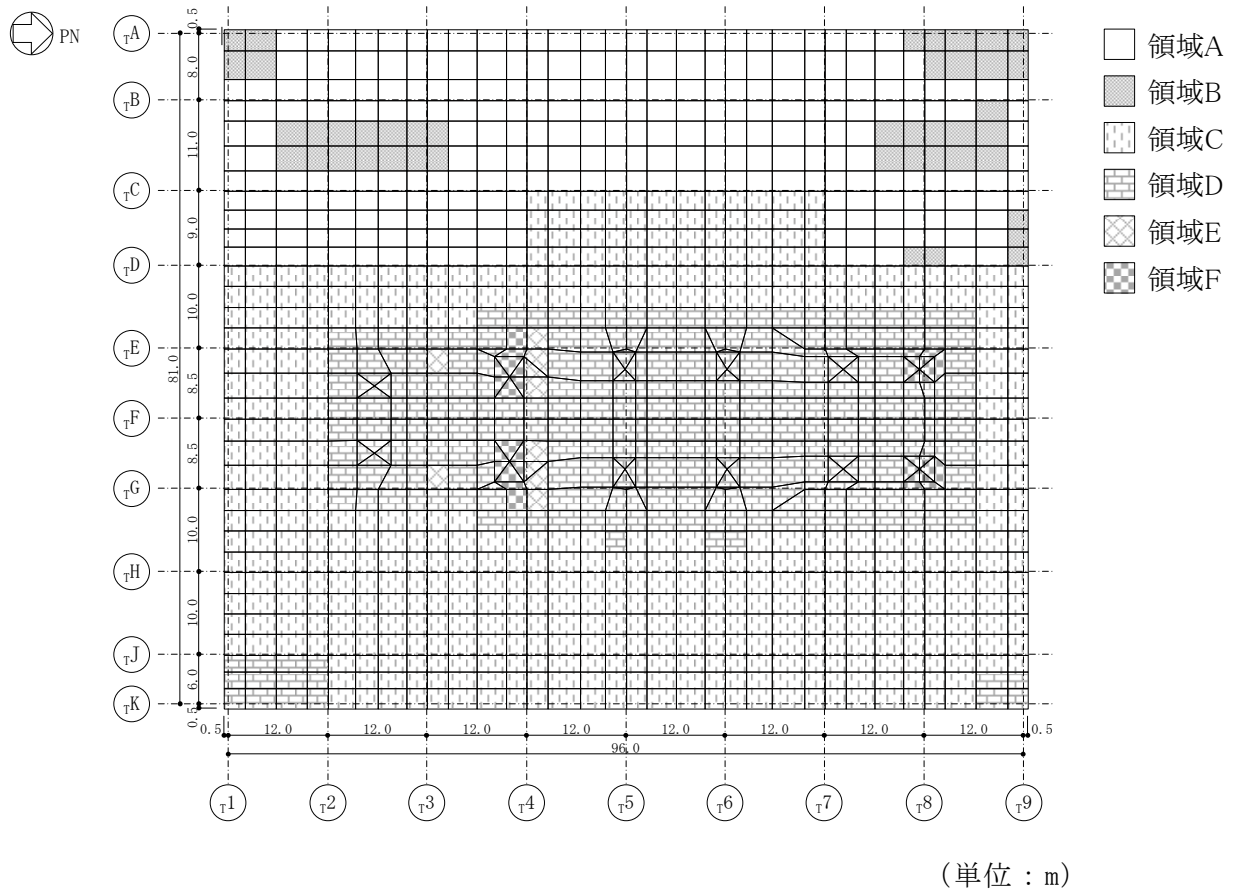


図 6-3 基礎スラブの配筋領域図 (EW 方向, 上ば筋)

表 6-4 基礎スラブの配筋 (EW 方向, 下ば筋)

	一段目	二段目	三段目	断面積 (mm <sup>2</sup> /m)
領域 A	D35@200	—	—	4785
領域 B	D35@200	D35@400	—	7178
領域 C	D35@200	D35@200	—	9570
領域 D	D38@200	—	—	5700
領域 E	D38@200	D38@400	—	8550
領域 F	D38@200	D38@200	—	11400
領域 G	D38@200	D38@200	D38@400	14250

K7 ① V-2-2-6 R0

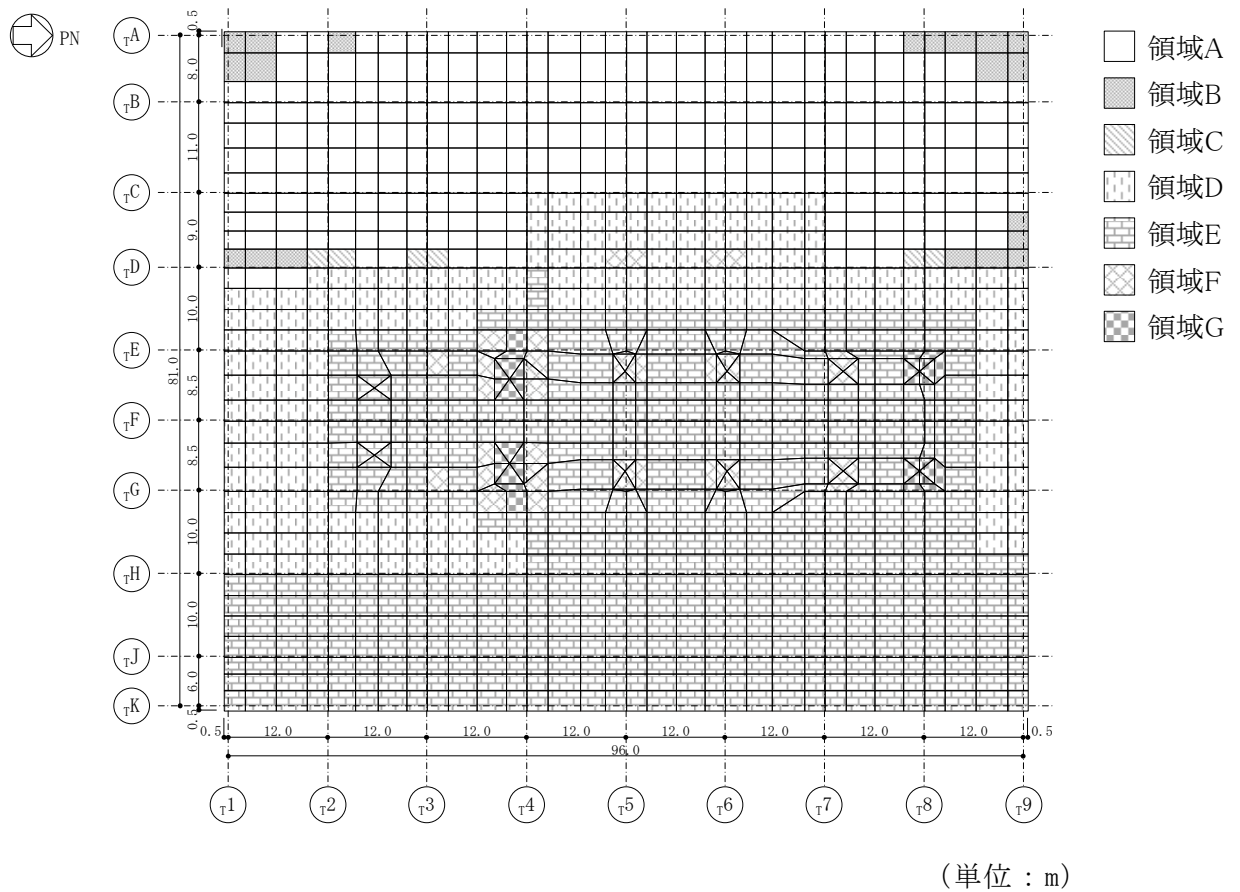


図 6-4 基礎スラブの配筋領域図 (EW 方向, 下ば筋)

表 6-5 基礎スラブの配筋（せん断補強筋）

	鉄筋	ピッチ	断面積 (mm <sup>2</sup> /m)
領域 A	D22	@400×@400	2419
領域 B	D25	@400×@400	3169
領域 C	D25	@400×@200	6338

K7 ① V-2-2-6 R0

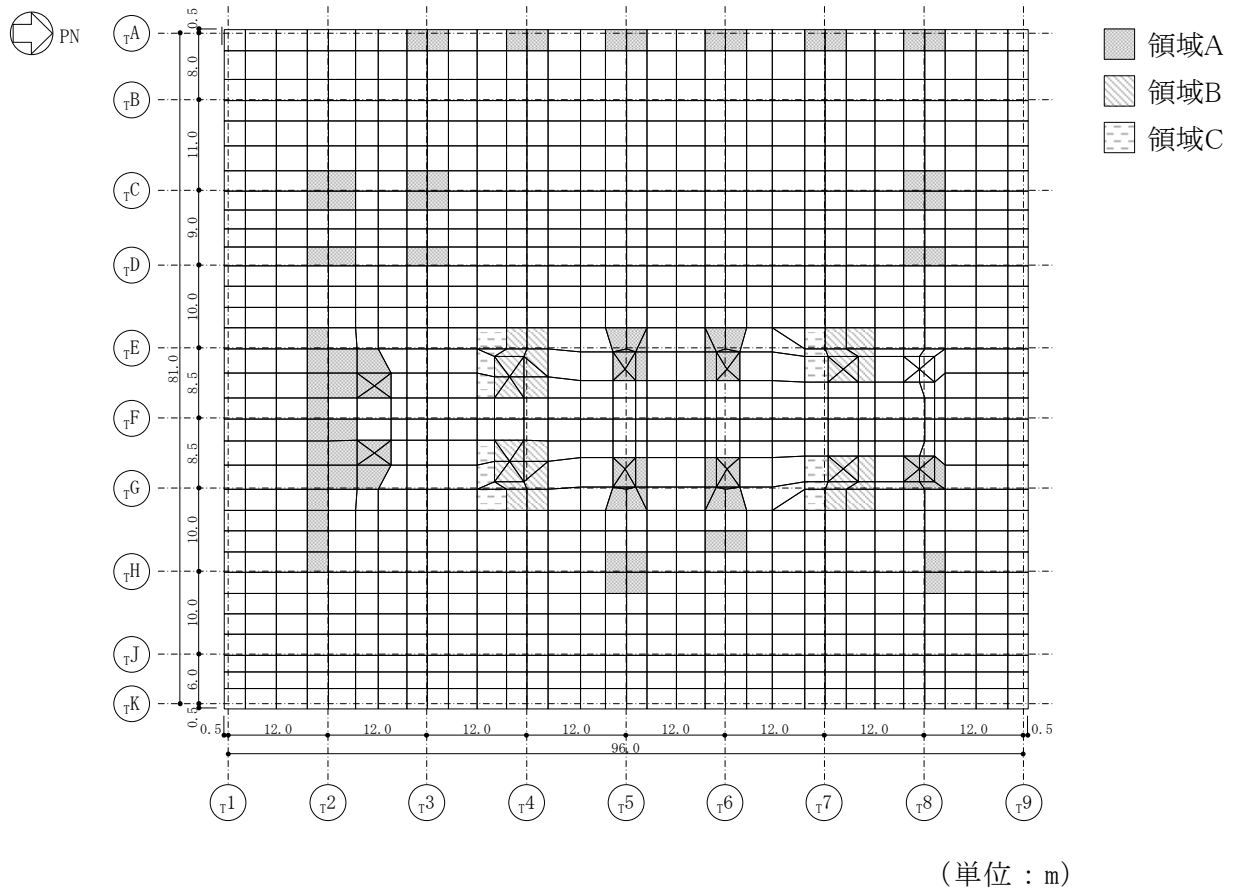


図 6-5 基礎スラブの配筋領域図（せん断補強筋）

表 6-6 最大値一覧

項目	方向	要素番号	荷重ケース	解析結果	許容限界
コンクリート 最大圧縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	NS	875	1	541	3000
	EW	751	5	461	3000
鉄筋最大ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	NS	1073	7	2251	5000
	EW	61	1	1265	5000
面外せん断力 (kN/m)	NS	325	3	3218	3924
	EW	29	7	3920	5453

K7 ① V-2-2-6 ROE

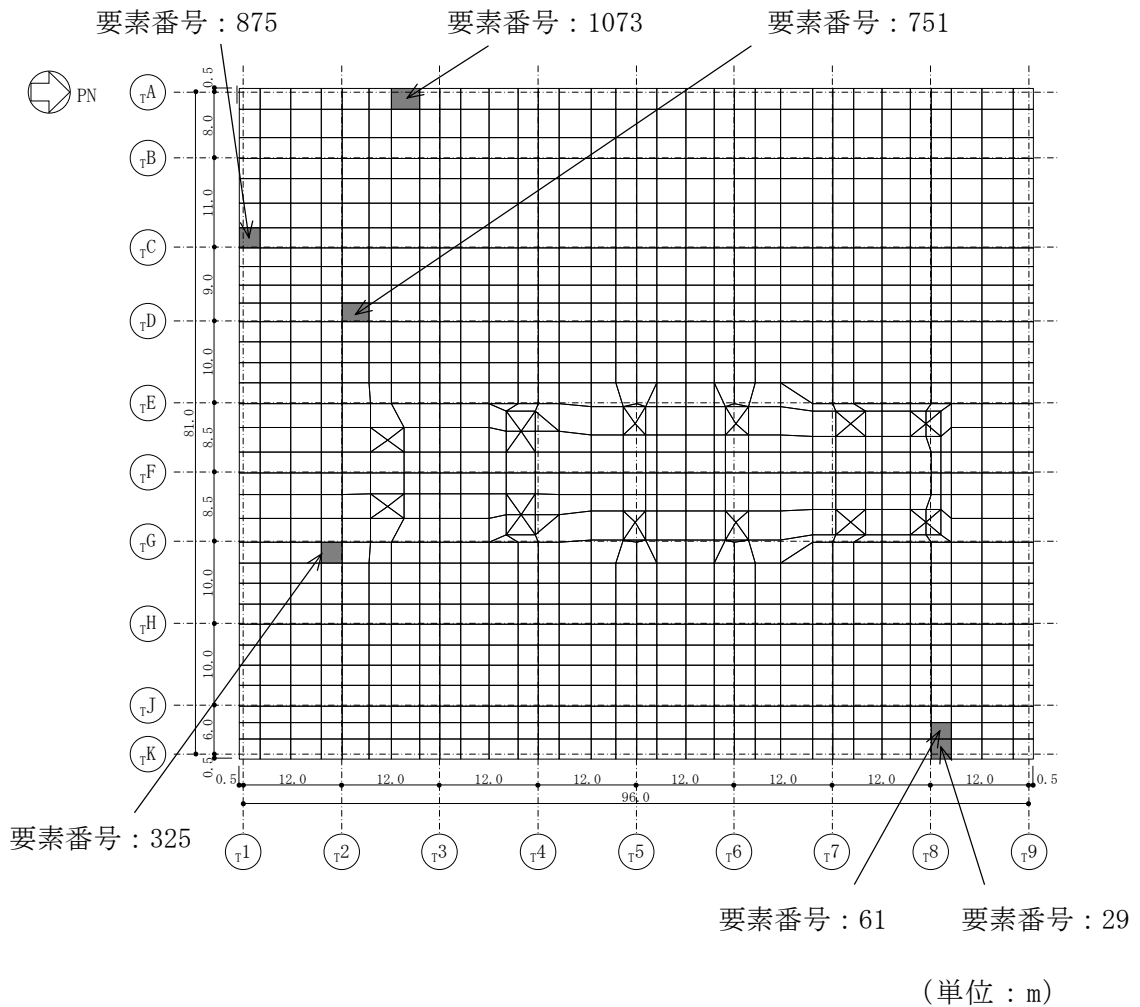


図 6-6 最大値発生位置