

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-002-08
提出年月日	2023年1月23日

VI-2-2-8 タービン建物の耐震性についての計算書

2023年1月

中国電力株式会社

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	3
2.3 評価方針	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法	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	18
4.2.1 荷重	18
4.2.2 荷重の組合せ	26
4.3 許容限界	27
4.4 解析モデル及び諸元	30
4.4.1 モデル化の基本方針	30
4.4.2 解析諸元	32
4.4.3 材料構成則	33
4.5 評価方法	35
4.5.1 応力解析方法	35
4.5.2 断面の評価方法	38
5. 地震応答解析による評価結果	40
5.1 耐震壁のせん断ひずみの評価結果	40
5.2 接地圧の評価結果	47
5.3 保有水平耐力の評価結果	48
6. 応力解析による評価結果	49
7. 引用文献	56

1. 概要

本資料は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき、タービン建物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。

タービン建物は、建物内部に基準地震動 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「常設重大事故緩和設備及び常設重大事故防止設備（設計基準拡張）（当該施設が属する耐震重要度分類がSクラスのものの間接支持構造物）」に分類される。

以下、タービン建物の「Sクラスの施設の間接支持構造物」及び「常設重大事故緩和設備及び常設重大事故防止設備（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

タービン建物の設置位置を図 2-1 に示す。

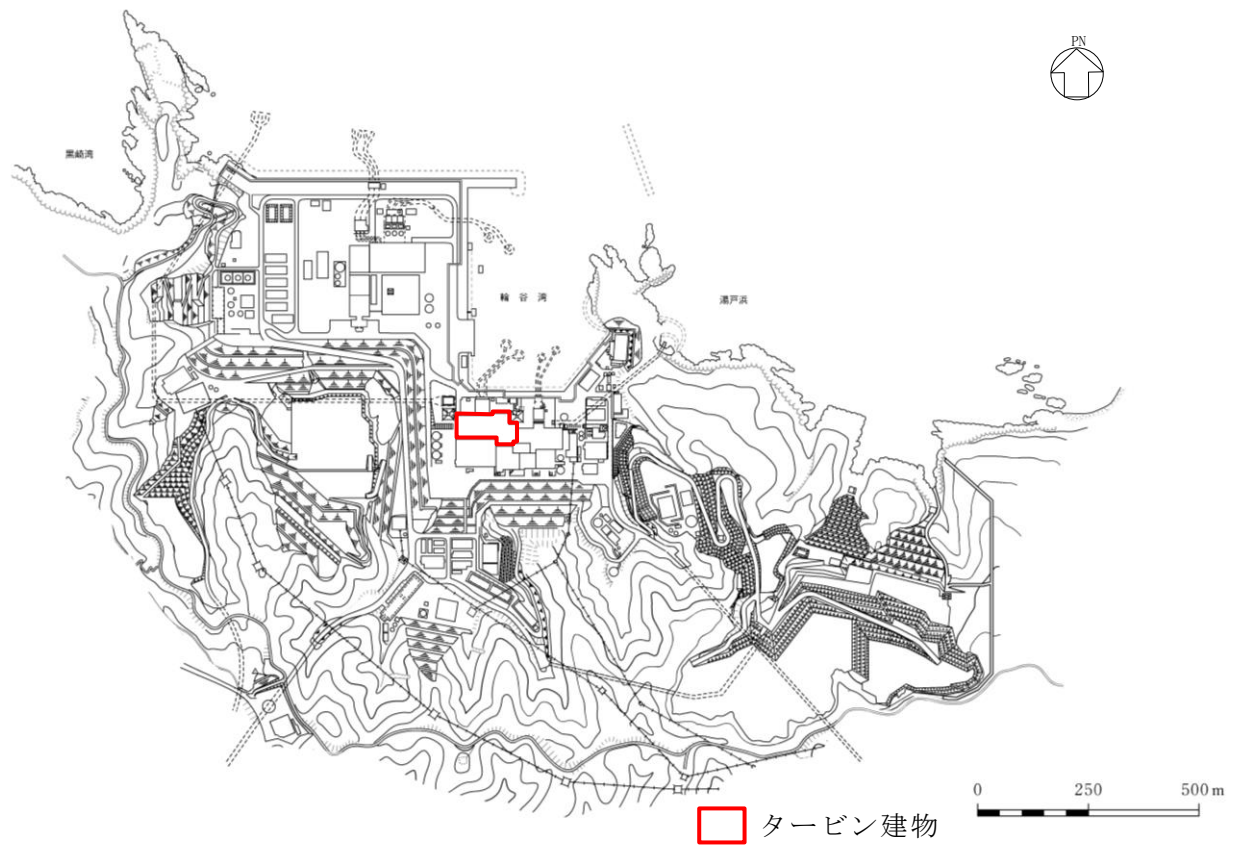


図 2-1 タービン建物の設置位置

2.2 構造概要

タービン建物は、地上 3 階（一部地上 4 階）、地下 1 階建の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）の建物である。

タービン建物の平面寸法は 72.0m（一部 51.4m）*（N S）×138.0m*（E W）である。基礎スラブ底面からの高さは 41.6m である。また、タービン建物は隣接する他の建物と構造的に分離している。

タービン建物の基礎は厚さ 2.0m～2.5m のべた基礎で、岩盤に直接設置している。

建物に加わる地震時の水平力は、すべて耐震壁及びフレームに負担させている。

タービン建物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。

注記*：建物寸法は壁外面寸法とする。

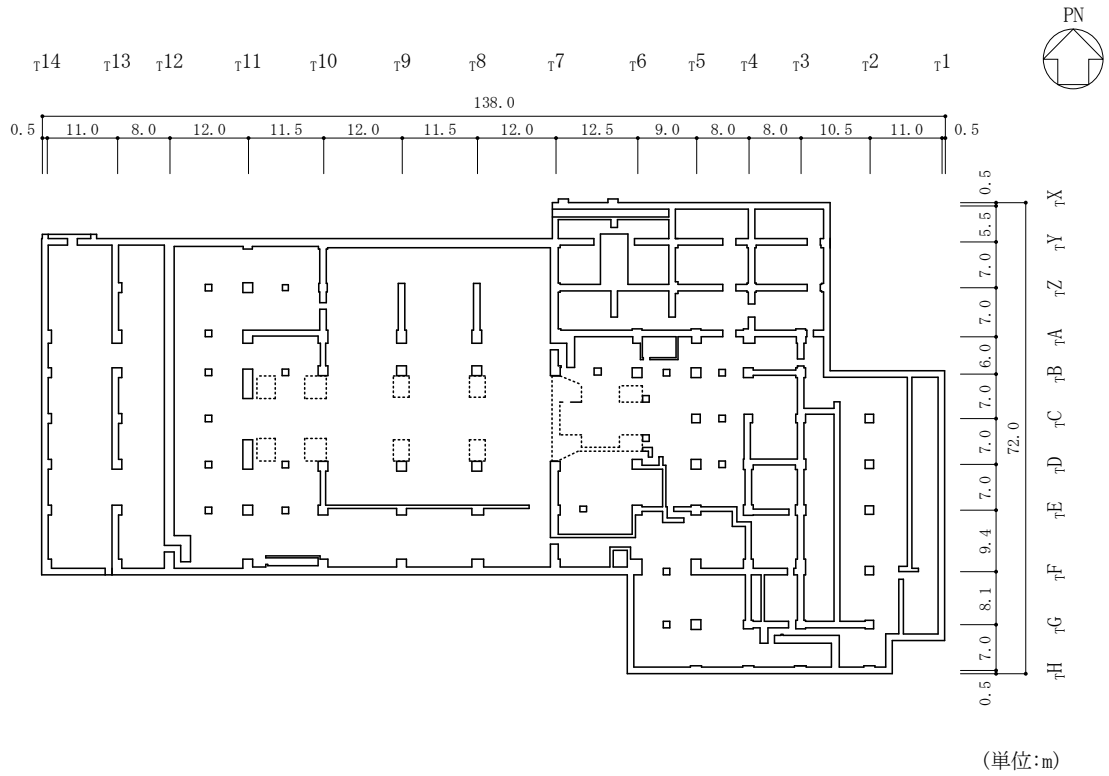


図 2-2(1) タービン建物の概略平面図 (EL 2.0m*)

注記* : 「EL」は東京湾平均海面 (T.P.) を基準としたレベルを示す。

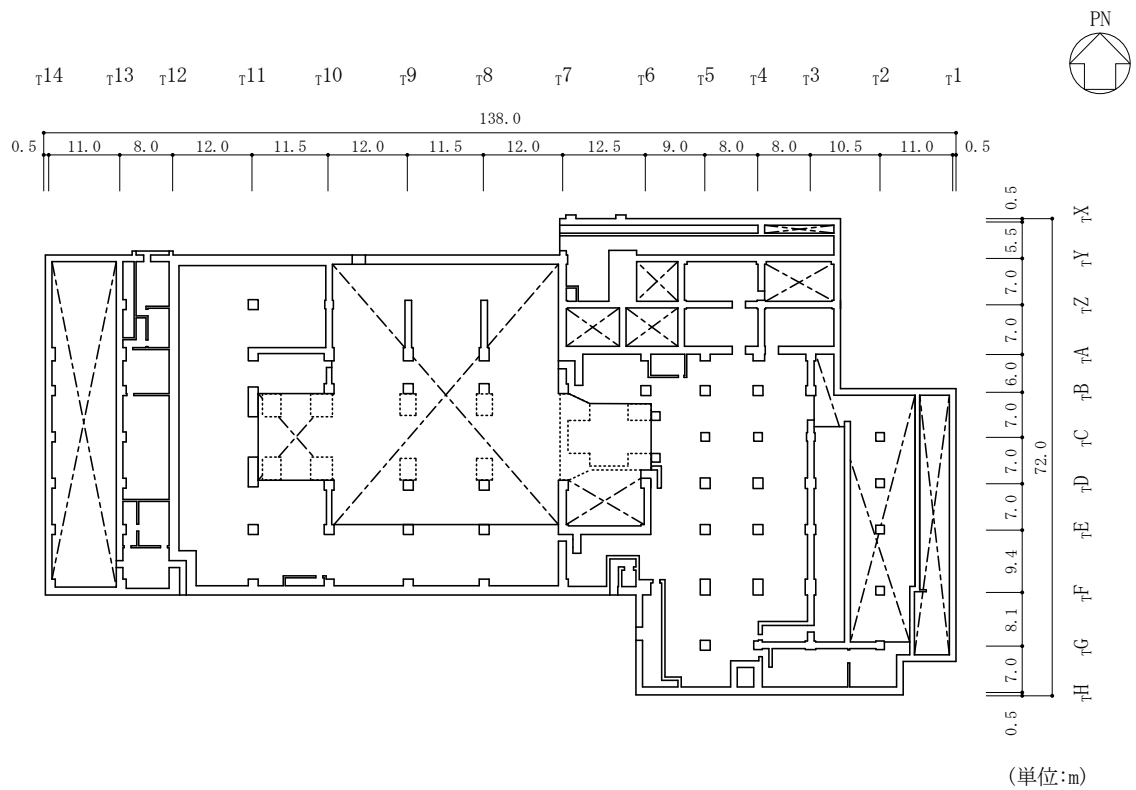


図 2-2(2) タービン建物の概略平面図 (EL 5.5m)

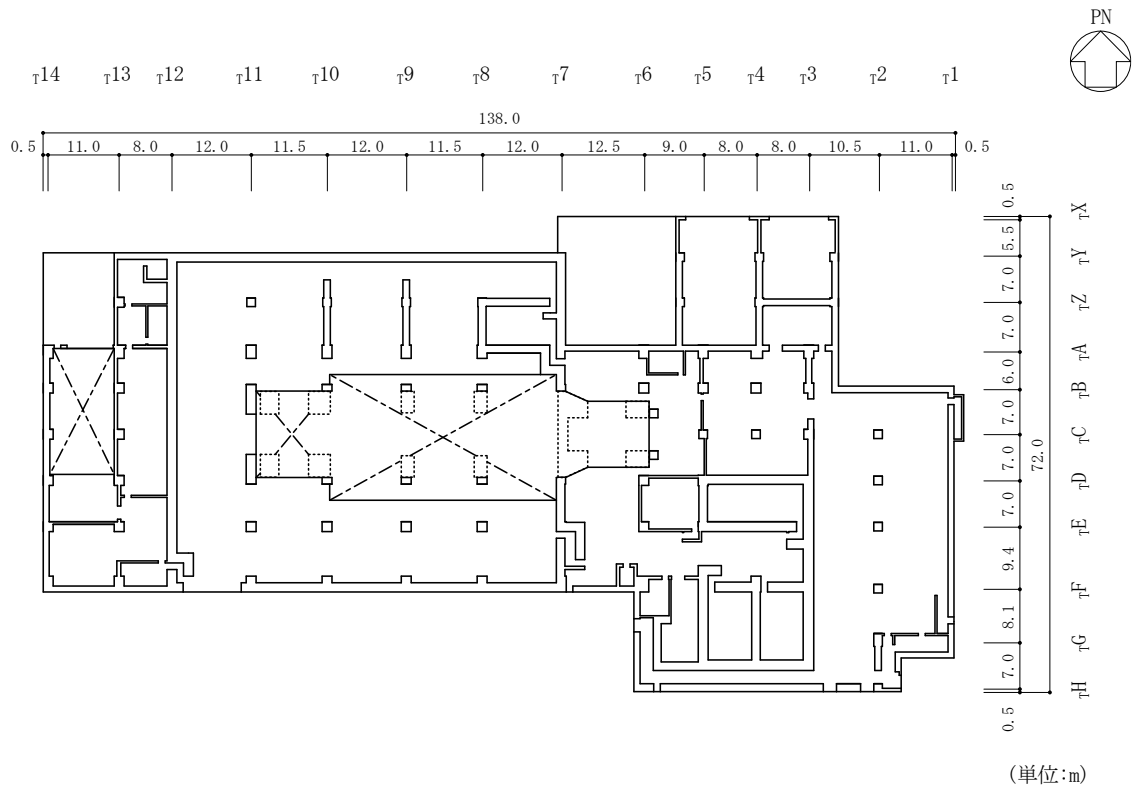


図 2-2(3) タービン建物の概略平面図 (EL 12.5m)

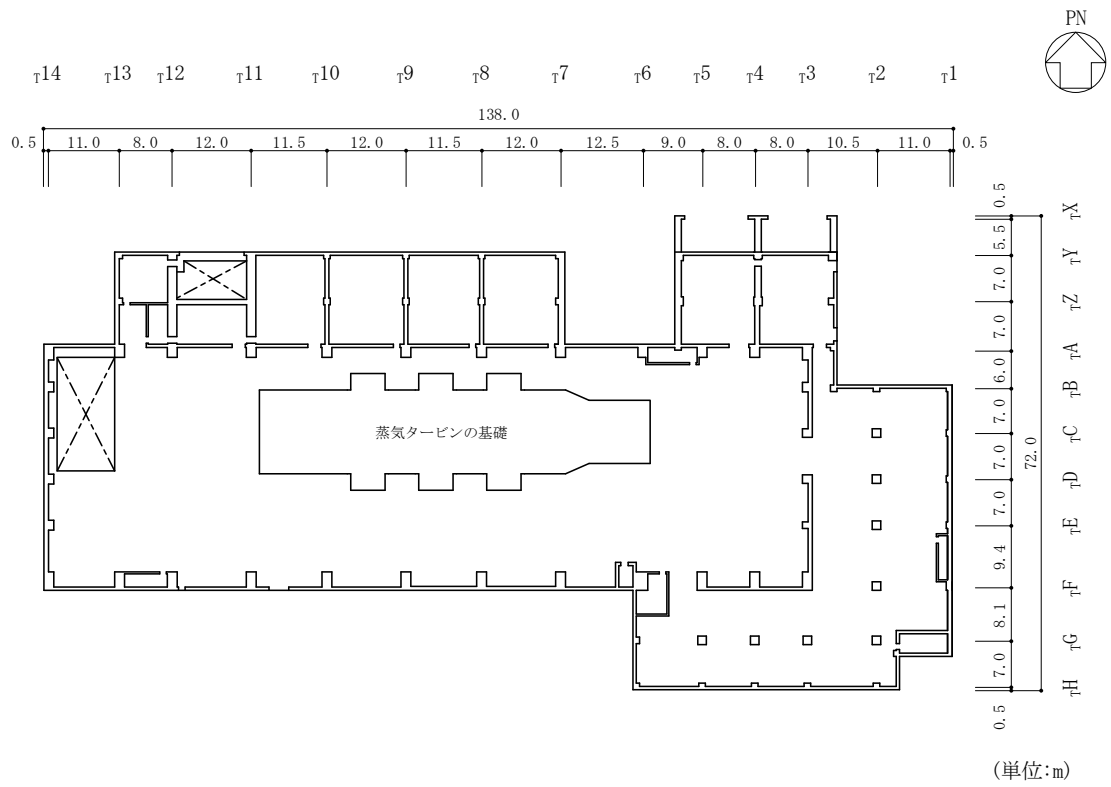


図 2-2(4) タービン建物の概略平面図 (EL 20.6m)

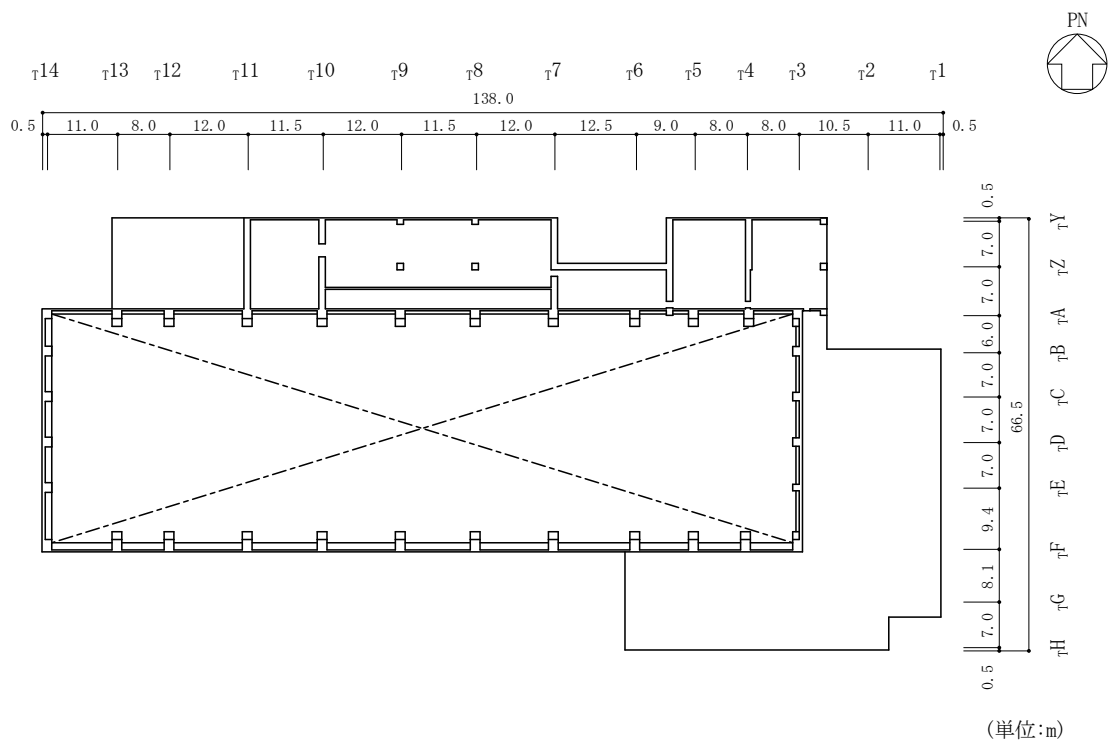


図 2-2(5) タービン建物の概略平面図 (EL 32.0m)

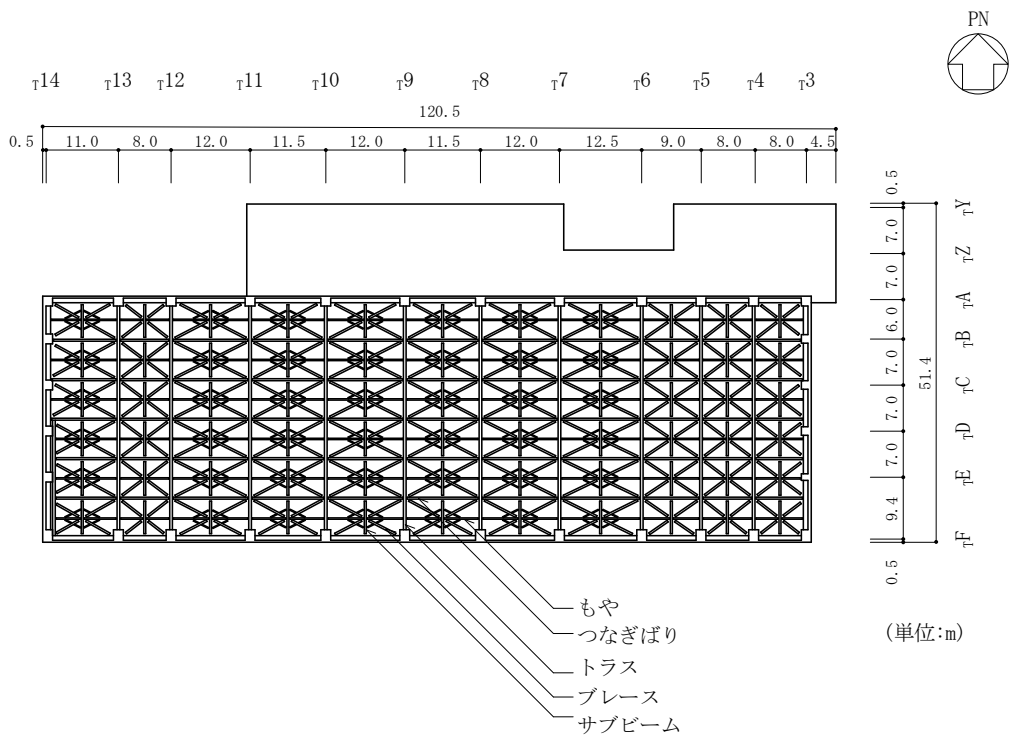


図 2-2(6) タービン建物の概略平面図 (EL 41.6m)

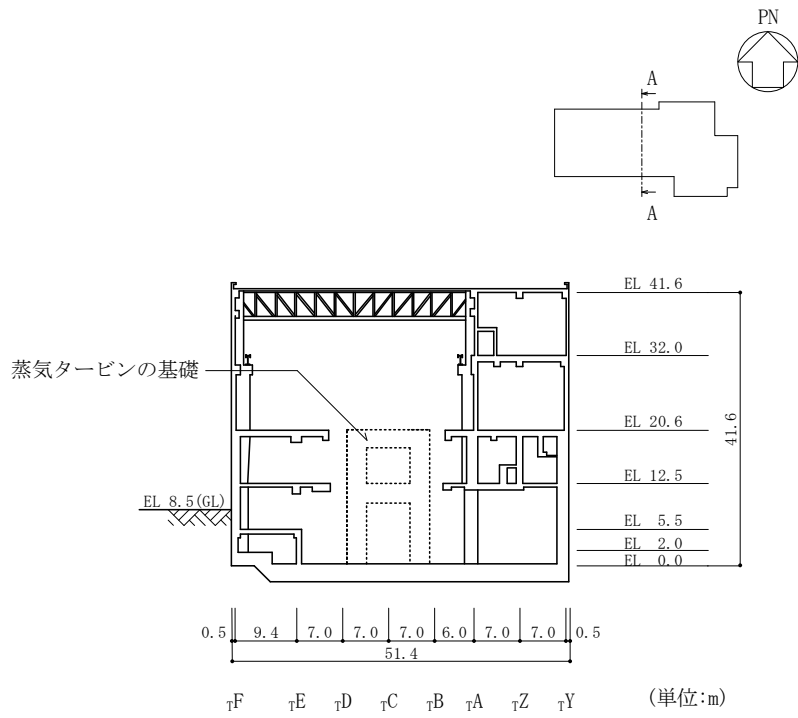


図 2-3(1) タービン建物の概略断面図 (A-A 断面, N S 方向)

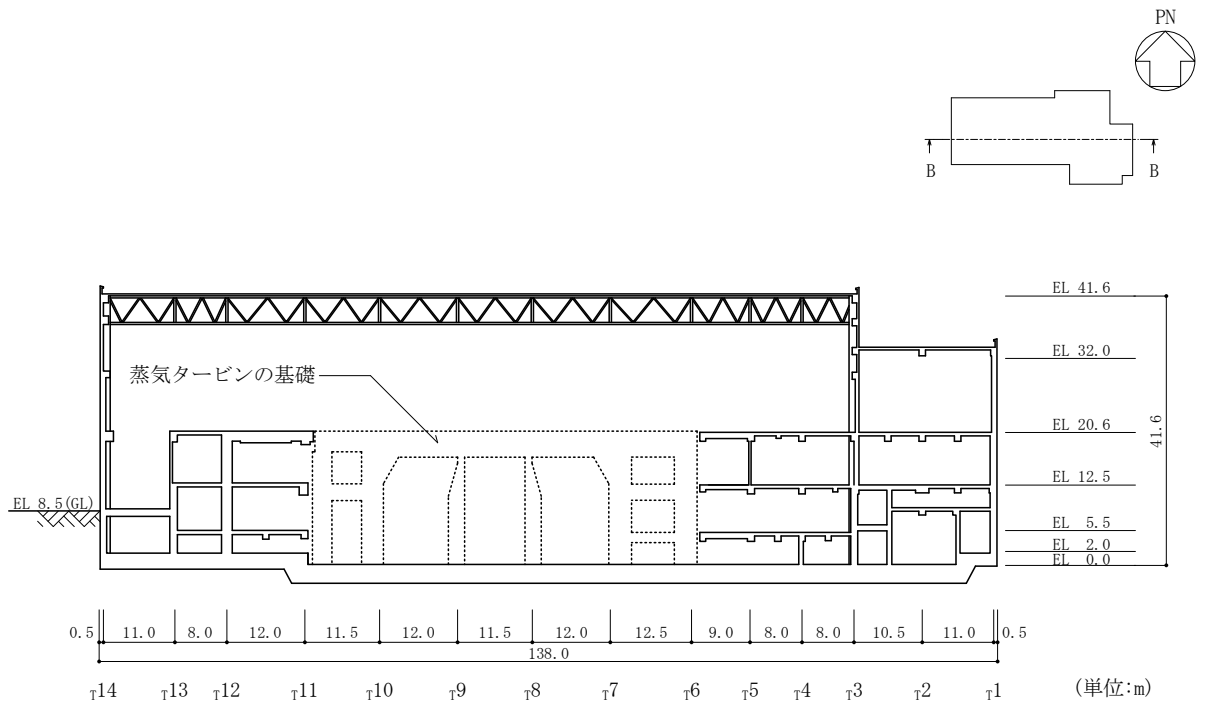


図 2-3(2) タービン建物の概略断面図 (B-B 断面, E W 方向)

2.3 評価方針

タービン建物は、建物内部に基準地震動 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「常設重大事故緩和設備及び常設重大事故防止設備（設計基準拡張）（当該施設が属する耐震重要度分類がSクラスのもの）の間接支持構造物」に分類される。

タービン建物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。）、弾性設計用地震動 S_d による地震力に対する評価（以下「 S_d 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、VI-2-2-7「タービン建物の地震応答計算書」の結果を踏まえたものとする。タービン建物の評価は、VI-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、タービン建物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。

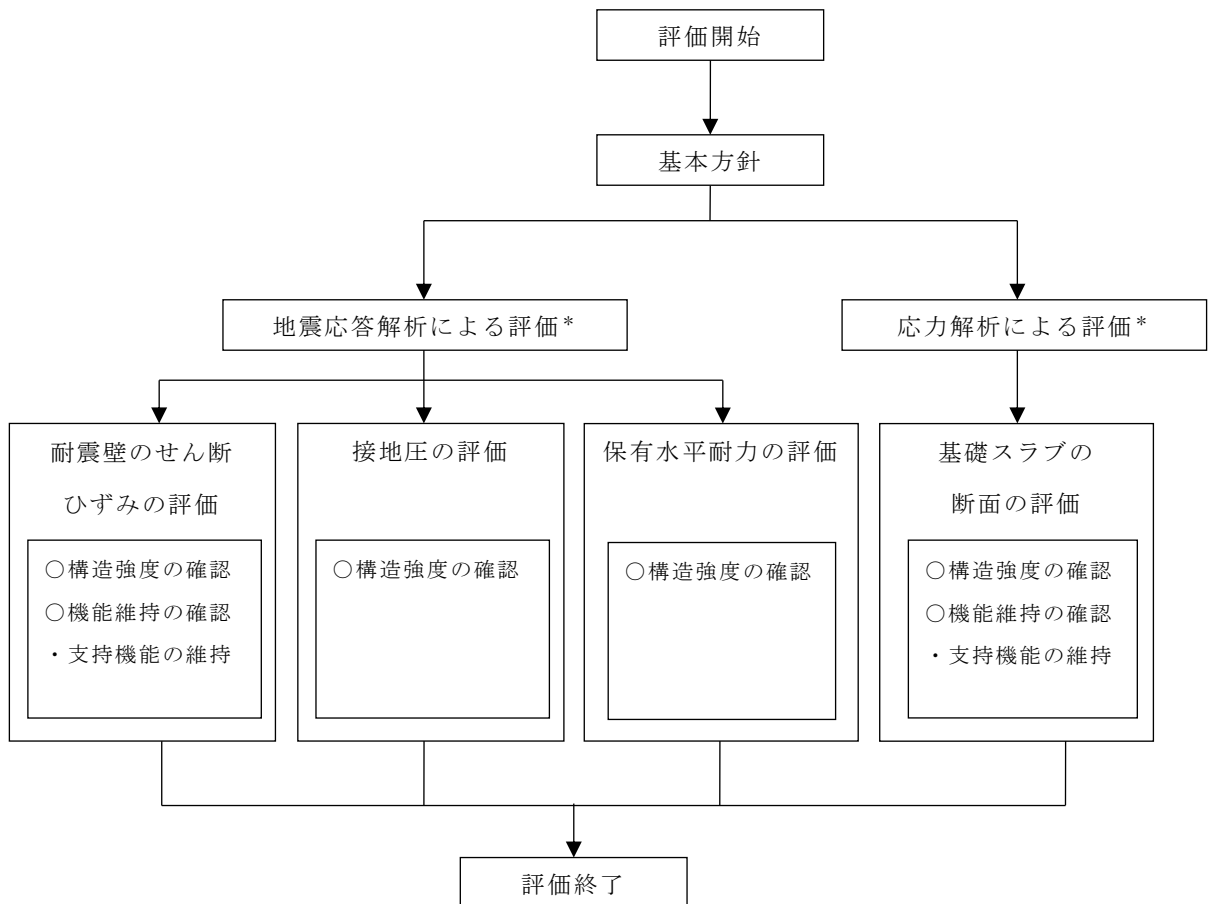
また、重大事故等対処施設としての評価においては、 S_s 地震時に対する評価及び保有水平耐力の評価を行う。ここで、タービン建物では、運転時、設計基準事故時及び重大事故等時の状態において、圧力、温度等の条件について有意な差異がないことから、重大事故等対処施設としての評価は、設計基準対象施設としての評価と同一となる。

図 2-4 にタービン建物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	地盤物性	備考
ケース 1 (工認モデル)	設計基準強度	標準地盤	基本ケース
ケース 2 (地盤物性 + σ)	設計基準強度	標準地盤 + σ (+10%, +20%)	
ケース 3 (地盤物性 - σ)	設計基準強度	標準地盤 - σ (-10%, -20%)	
ケース 4 (積雪)	設計基準強度	標準地盤	積雪荷重との 組合せを考慮



注記* : VI-2-2-7「タービン建物の地震応答計算書」の結果を踏まえた評価を行う。

図 2-4 タービン建物の評価フロー

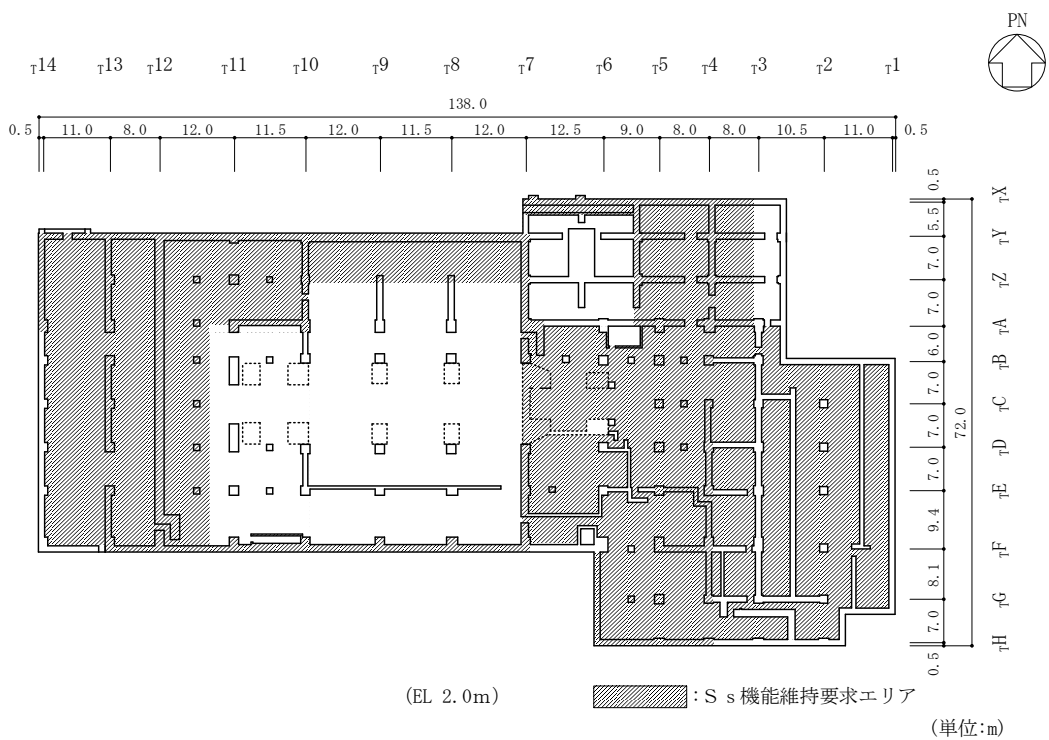


図 2-5(1) 基準地震動 S s 及び弾性設計用地震動 S d に対する機能維持要求エリア

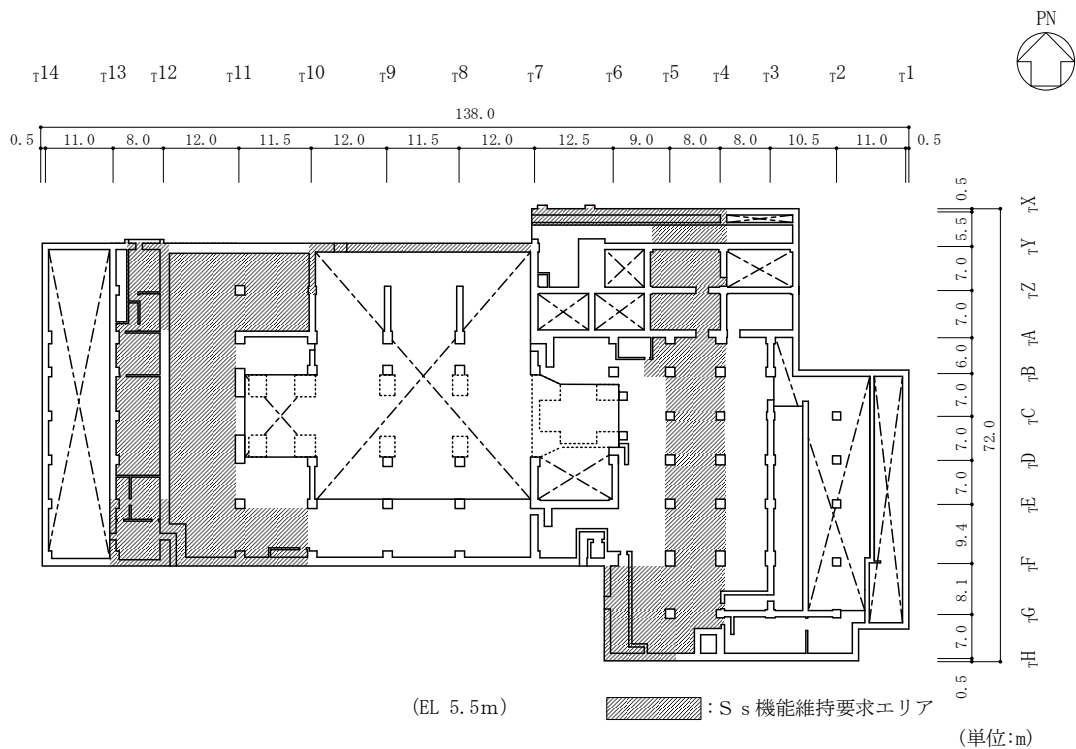


図 2-5(2) 基準地震動 S s 及び弾性設計用地震動 S d に対する機能維持要求エリア

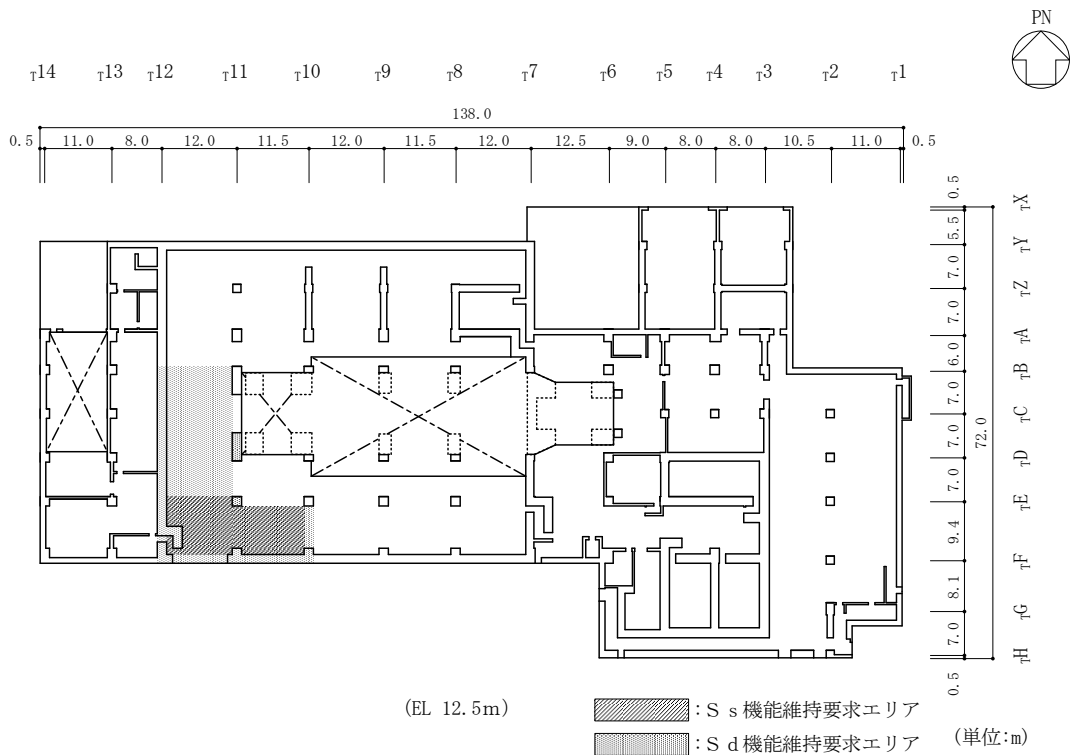


図 2-5(3) 基準地震動 S s 及び弾性設計用地震動 S d に対する機能維持要求エリア

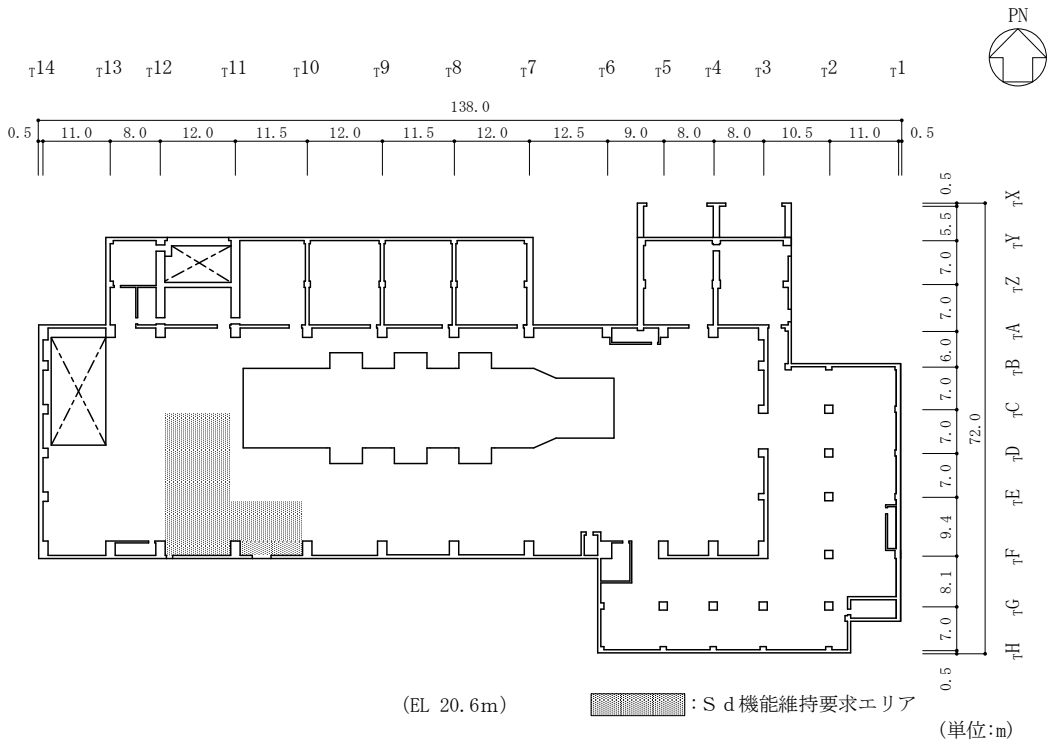


図 2-5(4) 基準地震動 S s 及び弾性設計用地震動 S d に対する機能維持要求エリア

2.4 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。

- ・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 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 -1991 追補版 ((社) 日本電気協会)
- ・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)
- ・鋼構造設計規準 ー許容応力度設計法ー ((社) 日本建築学会, 2005 改定)
- ・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)
- ・2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書 (国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所)

3. 地震応答解析による評価方法

タービン建物の構造強度については、VI-2-2-7「タービン建物の地震応答計算書」に基づき、材料物性の不確かさを考慮した耐震壁の最大応答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、VI-2-2-7「タービン建物の地震応答計算書」に基づき、材料物性の不確かさを考慮した耐震壁の最大応答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物の許容限界は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」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 _s	耐震壁* ¹	最大応答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 ⁻³
		弾性設計用 地震動 S _d			せん断ひずみ 2.0×10 ⁻³
		基準地震動 S _s	基礎地盤	最大接地圧が地盤の支持力度を超えないことを確認	極限支持力度* ² (9.8×10 ³ kN/m ²)
		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 _s	耐震壁* ¹	最大応答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 ⁻³
		弾性設計用 地震動 S _d			せん断ひずみ 2.0×10 ⁻³

注記*1：建物全体としては、耐震壁で地震力を負担する構造となっており、剛性の高い耐震壁の変形に追従する柱、はり、間仕切壁等の部材の層間変形は十分小さいこと、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ことから、各層の耐震壁の最大応答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。

*2：支持地盤に発生する接地圧に対する許容限界は、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき、岩盤の極限支持力度とする。

*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 _s	耐震壁*1	最大応答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 ⁻³
			基礎地盤	最大接地圧が地盤の支持力度を超えないことを確認	極限支持力度*2 (9.8×10 ³ kN/m ²)
		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 _s	耐震壁*1	最大応答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 ⁻³

注記*1：建物全体としては、耐震壁で地震力を負担する構造となっており、剛性の高い耐震壁の変形に追従する柱、はり、間仕切壁等の部材の層間変形は十分小さいこと、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ことから、各層の耐震壁の最大応答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。

*2：支持地盤に発生する接地圧に対する許容限界は、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき、岩盤の極限支持力度とする。

*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。

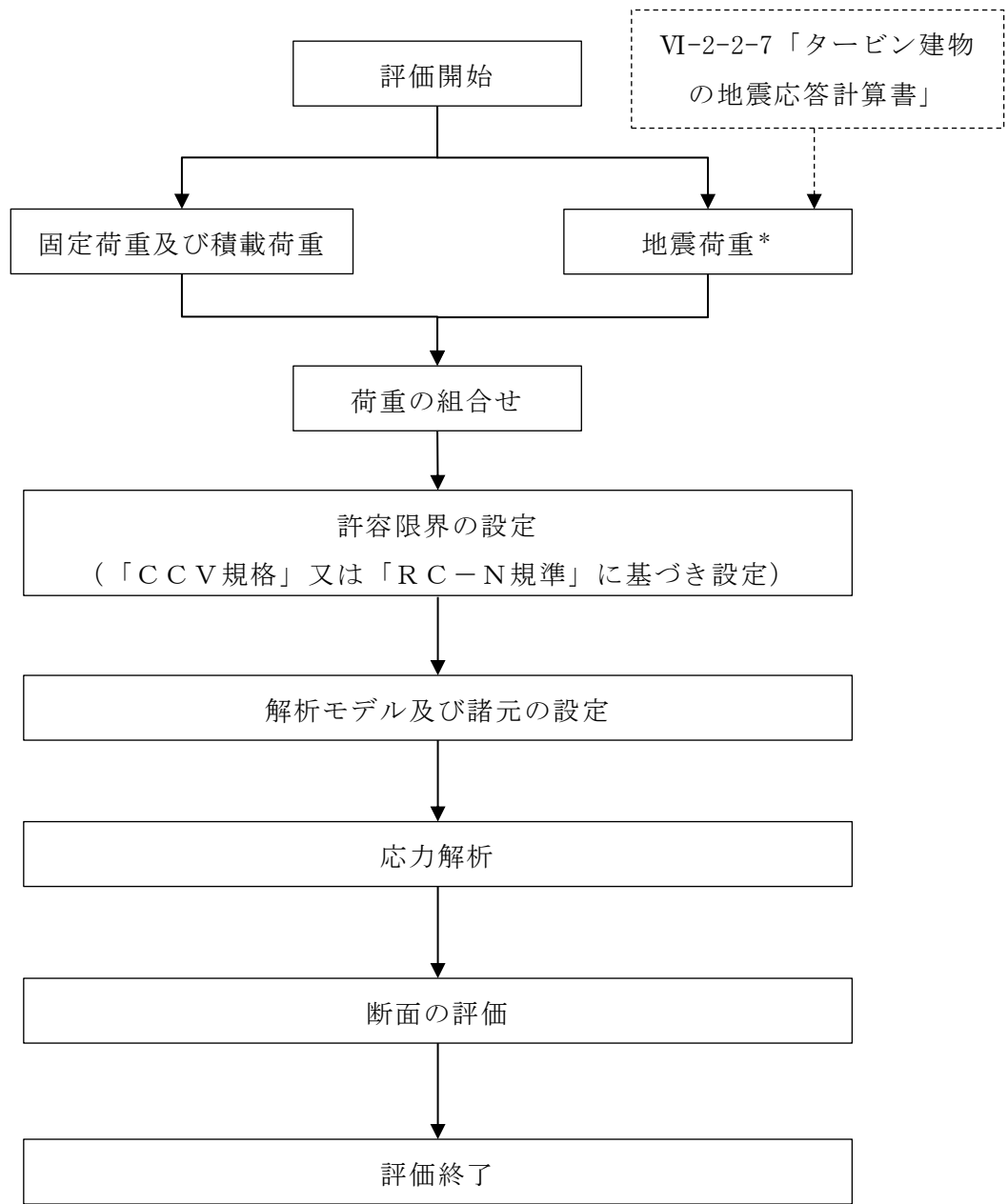
4. 応力解析による評価方法

4.1 評価対象部位及び評価方針

タービン建物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モデルを用いた弾塑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、発生する応力又はひずみが、「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。）又は「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モデルを用いた弾塑性応力解析にあたっては、VI-2-2-7「タービン建物の地震応答計算書」により得られた結果を用いて、荷重の組合せを行う。応力解析による評価フローを図4-1に示す。



注記*：材料物性の不確かさを考慮する。

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，VI-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) 固定荷重及び積載荷重

固定荷重及び積載荷重は，建物自重，機器，配管等の重量を考慮する。浮力（ 19.6kN/m^2 ）を考慮する。

(2) 地震荷重

a. 地震荷重

水平地震力及び鉛直地震力は，基準地震動 S_s に対する地震応答解析より算定される動的地震力及び軸力係数より設定する。このとき，基準地震動 S_s に対する地震応答解析より算定される動的地震力及び軸力係数は，VI-2-2-7「タービン建物の地震応答計算書」に基づき，材料物性の不確かさを考慮して設定する。

地震荷重を表 4-1～表 4-3 に示す。

表 4-1(1) 地震荷重 (せん断力)

(a) N S 方向

部 位	せん断力 ($\times 10^3 \text{kN}$)
	S s
耐震壁 (τ_1 通り)	79.1
耐震壁 (τ_2 通り)	1.61
耐震壁 (τ_3 通り)	157
耐震壁 (τ_4 通り)	94.2
耐震壁 (τ_5 通り)	58.3
耐震壁 (τ_6 通り)	79.6
耐震壁 (τ_7 通り, τ_A 通り側)	54.6
耐震壁 (τ_7 通り, τ_F 通り側)	43.8
耐震壁 (τ_8 通り, τ_A 通り側)	26.7
耐震壁 (τ_8 通り, τ_F 通り側)	5.16
耐震壁 (τ_9 通り, τ_A 通り側)	26.1
耐震壁 (τ_9 通り, τ_F 通り側)	5.24
耐震壁 (τ_{10} 通り, τ_A 通り側)	35.7
耐震壁 (τ_{10} 通り, τ_F 通り側)	21.4
耐震壁 (τ_{11} 通り)	46.0
耐震壁 (τ_{12} 通り)	159
耐震壁 (τ_{13} 通り)	81.2
耐震壁 (τ_{14} 通り)	58.7

表 4-1(2) 地震荷重 (せん断力)

(b) E W方向

部 位	せん断力 ($\times 10^3$ kN)
	S s
耐震壁 (τ X 通り)	27.6
耐震壁 (τ Y 通り)	269
耐震壁 (τ Z 通り, τ 1 通り側)	84.4
耐震壁 (τ Z 通り, τ 14 通り側)	10.0
耐震壁 (τ A 通り, τ 1 通り側)	119
耐震壁 (τ A 通り, τ 14 通り側)	53.8
耐震壁 (τ B 通り, τ 1 通り側)	70.8
耐震壁 (τ B 通り, τ 14 通り側)	6.17
耐震壁 (τ C 通り, τ 1 通り側)	0.52
耐震壁 (τ C 通り, τ 14 通り側)	3.23
耐震壁 (τ D 通り, τ 1 通り側)	20.2
耐震壁 (τ D 通り, τ 14 通り側)	5.43
耐震壁 (τ E 通り)	81.6
耐震壁 (τ F 通り)	315
耐震壁 (τ G 通り)	48.5
耐震壁 (τ H 通り)	90.8

表 4-2(1) 地震荷重 (曲げモーメント)

(a) N S 方向

部 位	曲げモーメント ($\times 10^4 \text{kN}\cdot\text{m}$)
	S s
耐震壁 (τ_1 通り)	147
耐震壁 (τ_2 通り)	6.03
耐震壁 (τ_3 通り)	376
耐震壁 (τ_4 通り)	167
耐震壁 (τ_5 通り)	184
耐震壁 (τ_6 通り)	112
耐震壁 (τ_7 通り, τ_A 通り側)	129
耐震壁 (τ_7 通り, τ_F 通り側)	62.4
耐震壁 (τ_8 通り, τ_A 通り側)	66.2
耐震壁 (τ_8 通り, τ_F 通り側)	6.76
耐震壁 (τ_9 通り, τ_A 通り側)	62.3
耐震壁 (τ_9 通り, τ_F 通り側)	6.62
耐震壁 (τ_{10} 通り, τ_A 通り側)	83.6
耐震壁 (τ_{10} 通り, τ_F 通り側)	24.0
耐震壁 (τ_{11} 通り)	161
耐震壁 (τ_{12} 通り)	294
耐震壁 (τ_{13} 通り)	133
耐震壁 (τ_{14} 通り)	190

表 4-2(2) 地震荷重 (曲げモーメント)

(b) E W方向

部 位	曲げモーメント ($\times 10^4 \text{kN}\cdot\text{m}$)
	S s
耐震壁 (τ X 通り)	18.7
耐震壁 (τ Y 通り)	568
耐震壁 (τ Z 通り, τ 1 通り側)	131
耐震壁 (τ Z 通り, τ 14 通り側)	97.7
耐震壁 (τ A 通り, τ 1 通り側)	275
耐震壁 (τ A 通り, τ 14 通り側)	237
耐震壁 (τ B 通り, τ 1 通り側)	129
耐震壁 (τ B 通り, τ 14 通り側)	3.01
耐震壁 (τ C 通り, τ 1 通り側)	1.51
耐震壁 (τ C 通り, τ 14 通り側)	1.64
耐震壁 (τ D 通り, τ 1 通り側)	32.2
耐震壁 (τ D 通り, τ 14 通り側)	5.70
耐震壁 (τ E 通り)	108
耐震壁 (τ F 通り)	748
耐震壁 (τ G 通り)	60.9
耐震壁 (τ H 通り)	179

表 4-3 鉛直地震荷重 (軸力係数)

部 位	軸力係数
	S s
上部構造物	0.81
基礎スラブ	0.34

b. 地震時土圧荷重

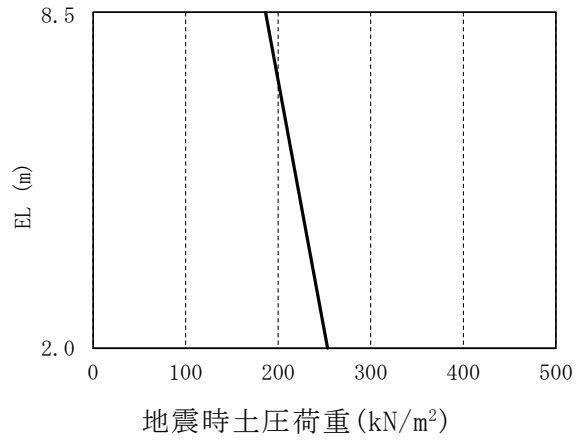
地震時土圧荷重は、地震時土圧により地下外壁を介して作用する荷重として、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（（社）日本電気協会）」に基づき算出し、常時土圧に地震時増分土圧を加えて算定した地震時土圧を設定する。地震時土圧荷重を表 4-4 に、地震時土圧による荷重分布を図 4-2 に示す。なお、南側は原子炉建物、廃棄物処理建物及び制御室建物、東側の一部は 1 号機タービン建物、北側の一部は取水槽が隣接しており、構造物が隣接する部分については、地震時土圧荷重を考慮しない。

表 4-4 地震時土圧荷重

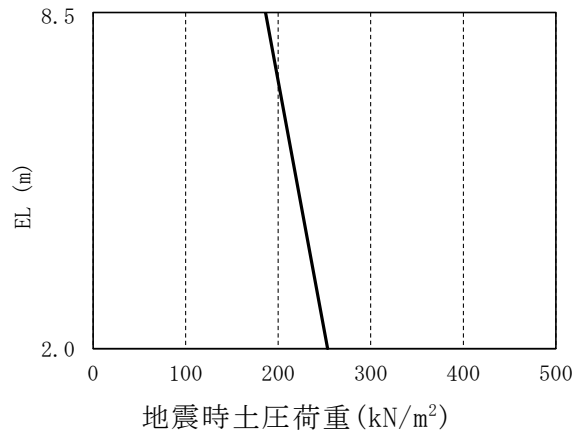
EL (m)	地震時土圧荷重 (kN/m ²)		
	北側	東側	西側
15.0 ~2.0	—	—	186.2+0.5・γ・h (_r B 通り - _r F 通り間)
8.5~ 2.0	186.2+0.5・γ・h (_r 1 通り - _r 7 通り間) (_r 10 通り - _r 14 通り間)	186.2+0.5・γ・h (_r X 通り - _r C 通り間)	186.2+0.5・γ・h (_r Y 通り - _r B 通り間)

γ : 土の単位体積重量 (kN/m³)

h : 地表面からの深さ (m)

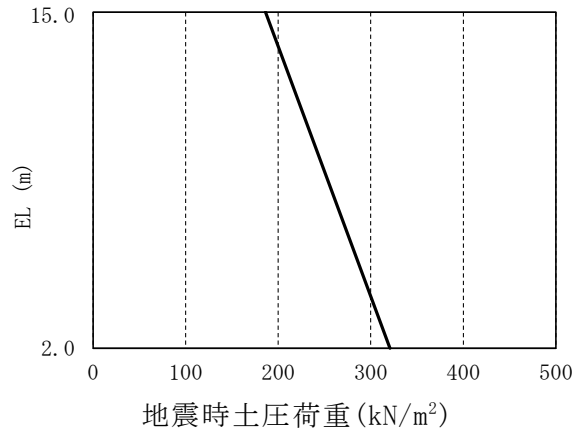


(a) 北側 (τ1 通り - τ7 通り間, τ10 通り - τ14 通り間)

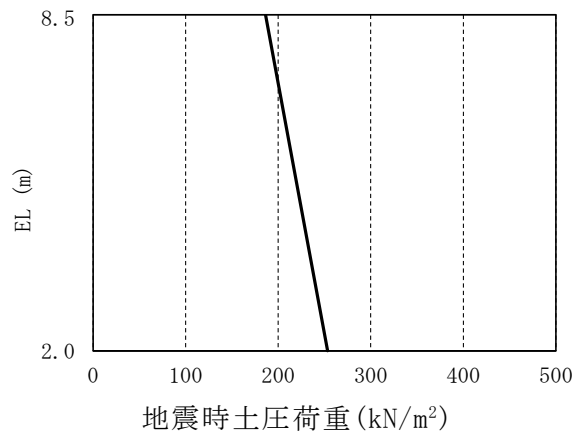


(b) 東側 (τX 通り - τC 通り間)

図 4-2(1) 地震時土圧による荷重分布



(c) 西側 (τ_B 通り - τ_F 通り間)



(d) 西側 (τ_Y 通り - τ_B 通り間)

図 4-2(2) 地震時土圧による荷重分布

4.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 4-5 に示す。

表 4-5 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
S _s 地震時	G + P + S _s

G : 固定荷重

P : 積載荷重

S_s : 地震荷重 (地震時土圧荷重を含む)

4.3 許容限界

応力解析による評価におけるタービン建物の基礎スラブの許容限界は、VI-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の方針に基づき、表 4-6 及び表 4-7 のとおり設定する。

また、コンクリート及び鉄筋の許容応力度を表 4-8 及び表 4-9 に、コンクリート及び鉄筋の許容ひずみを表 4-10 に示す。

表 4-6 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_s	基礎スラブ	部材に生じる応力及び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	<ul style="list-style-type: none"> ひずみ*1 コンクリート 3.0×10^{-3} (圧縮) 鉄筋 5.0×10^{-3} (圧縮及び引張) 面外せん断力*2 短期許容せん断力*3
支持機能*4	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_s	基礎スラブ	部材に生じる応力及び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	<ul style="list-style-type: none"> ひずみ*1 コンクリート 3.0×10^{-3} (圧縮) 鉄筋 5.0×10^{-3} (圧縮及び引張) 面外せん断力*2 短期許容せん断力*3

注記*1: 「CCV規格」に基づく。

*2: 「RC-N規準」に基づく。

*3: 許容限界は終局耐力に対し妥当な安全余裕を有したものとして設定することとし、さらなる安全余裕を考慮して短期許容せん断力とする。

*4: 「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 4-7 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 s	基礎スラブ	部材に生じる応力及び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	<ul style="list-style-type: none"> ・ひずみ^{*1} コンクリート 3.0×10⁻³ (圧縮) 鉄筋 5.0×10⁻³ (圧縮及び引張) ・面外せん断力^{*2} 短期許容せん断力^{*3}
支持機能 ^{*4}	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 s	基礎スラブ	部材に生じる応力及び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	<ul style="list-style-type: none"> ・ひずみ^{*1} コンクリート 3.0×10⁻³ (圧縮) 鉄筋 5.0×10⁻³ (圧縮及び引張) ・面外せん断力^{*2} 短期許容せん断力^{*3}

注記*1: 「CCV規格」に基づく。

*2: 「RC-N規準」に基づく。

*3: 許容限界は終局耐力に対し妥当な安全余裕を有したものとして設定することとし、さらなる安全余裕を考慮して短期許容せん断力とする。

*4: 「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 4-8 コンクリートの短期許容応力度

(単位：N/mm²)

設計基準強度 F_c	せん断
23.5	1.08

表 4-9 鉄筋の短期許容応力度

(単位：N/mm²)

種別	引張及び圧縮	せん断
SD35 (SD345 相当)	345	345

表 4-10 コンクリート及び鉄筋の許容ひずみ

コンクリート (圧縮ひずみ)	鉄筋 (圧縮ひずみ及び引張ひずみ)
0.003	0.005

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モデルを用いた弾塑性応力解析とする。解析には、解析コード「ABAQUS」を用いる。また、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「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、EL 0.0m～EL 2.0mをモデル化する。上部構造については、EL 2.0m～EL 20.6mをモデル化し、剛性を考慮する。応力解析における評価対象部位は、基礎スラブであるが、各部の荷重伝達を考慮するために周辺部を含むモデルを用いることとした。解析モデルを図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積層シェル要素とする。上部構造として、基礎スラブより立ち上がっている壁については、EL 2.0m～EL 20.6mを積層シェル要素として剛性を考慮する。また、EL 5.5m～EL 20.6mの床スラブについては、積層シェル要素として剛性を考慮する。基礎スラブの積層シェル要素は、鉄筋層をモデル化した異方性材料による要素である。

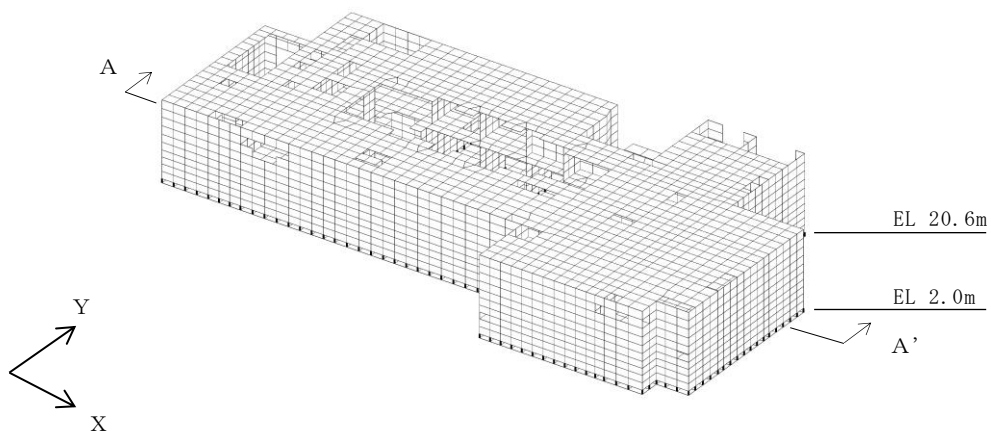
各要素には、板の曲げと軸力を同時に考えるが、板の曲げには面外せん断変形の影響も考慮する。

解析モデルの節点数は9929、要素数は12652である。

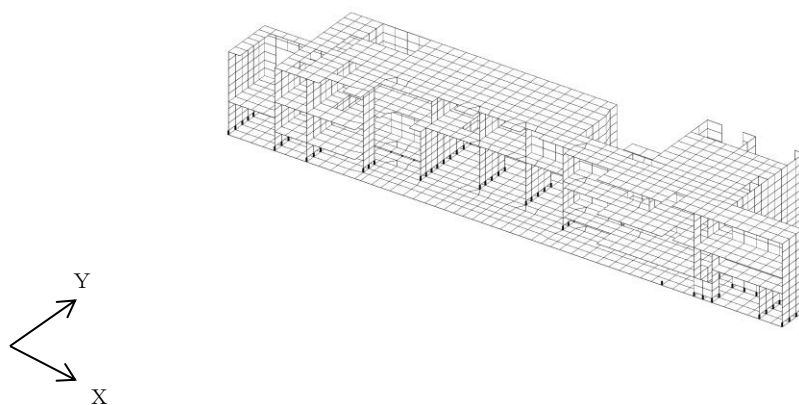
(3) 境界条件

3次元FEMモデルの基礎スラブ底面に、VI-2-2-7「タービン建物の地震応答計算書」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。

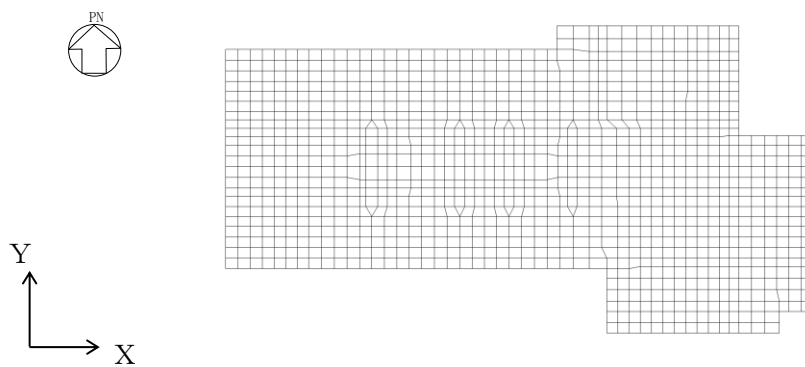
なお、基礎スラブ底面の地盤ばねについては、引張力が発生したときに浮上りを考慮する。



(a) 全体鳥瞰図



(b) 全体鳥瞰断面図 (A-A' 断面)



(c) 基礎スラブ要素分割図

図 4-3 解析モデル

4.4.2 解析諸元

使用材料の物性値を表 4-11 及び表 4-12 に示す。

表 4-11 コンクリートの物性値

部 位	設計基準強度 F_c (N/mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν
基礎スラブ・壁・ 床スラブ	23.5	2.25×10^4	0.2

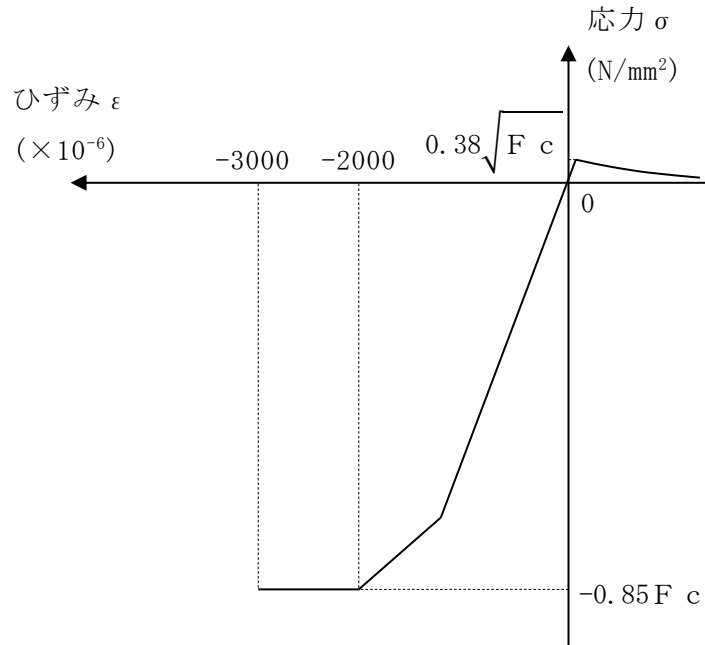
表 4-12 鉄筋の物性値

部 位	鉄筋の種類	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)
基礎スラブ	SD35 (SD345 相当)	345	2.05×10^5

4.4.3 材料構成則

材料構成則を図 4-4 に示す。

コンクリートのヤング係数及び圧縮強度については、設計基準強度に基づき算定した値とする。



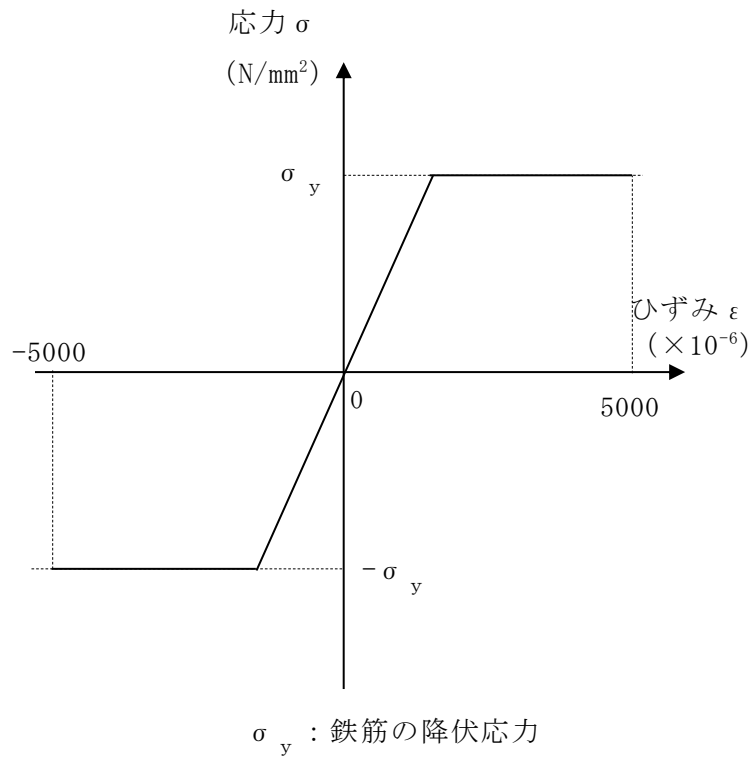
F_c : コンクリートの設計基準強度

項目	設定
圧縮強度	$\sigma_c = -0.85 F_c$ (「CCV規格」)
終局圧縮ひずみ	-3000×10^{-6} (「CCV規格」)
圧縮側のコンクリート構成則	CEB-FIP Model code に基づき設定 (引用文献(1)参照)
ひび割れ発生後の引張軟化曲線	出雲ほか (1987) による式 ($c = 0.4$) (引用文献(2)参照)
引張強度	$\sigma_t = 0.38 \sqrt{F_c}$ (鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 一許容応 力度設計法一 ((社) 日本建築学会, 1999 改定))

注：引張方向の符号を正とする。

(a) コンクリートの応力-ひずみ関係

図 4-4(1) 材料構成則



項目	設定
鉄筋の構成則	バイリニア型 (「CCV規格」)
終局ひずみ	$\pm 5000 \times 10^{-6}$ (「CCV規格」)

注：引張方向の符号を正とする。

(b) 鉄筋の応力－ひずみ関係

図 4-4(2) 材料構成則

4.5 評価方法

4.5.1 応力解析方法

タービン建物の基礎スラブについて、 S_s 地震時に対して3次元FEMモデルを用いた弾塑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、次の荷重を組み合わせる。

G	: 固定荷重
P	: 積載荷重
$S_{S_{SN}}$: $S \rightarrow N$ 方向 S_s 地震荷重 (地震時土圧を含む)
$S_{S_{NS}}$: $N \rightarrow S$ 方向 S_s 地震荷重 (地震時土圧を含む)
$S_{S_{EW}}$: $E \rightarrow W$ 方向 S_s 地震荷重 (地震時土圧を含む)
$S_{S_{WE}}$: $W \rightarrow E$ 方向 S_s 地震荷重 (地震時土圧を含む)
$S_{S_{UD}}$: 鉛直方向 (下向き) S_s 地震荷重
$S_{S_{DU}}$: 鉛直方向 (上向き) S_s 地震荷重

(2) 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 4-13 に示す。

水平地震力と鉛直地震力の組合せは、「原子力発電所耐震設計技術規程 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 4-13 荷重の組合せケース

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
S s 地震時	1	$G + P + 1.0 S s_{SN} + 0.4 S s_{UD}$
	2	$G + P + 1.0 S s_{NS} + 0.4 S s_{UD}$
	3	$G + P + 1.0 S s_{SN} + 0.4 S s_{DU}$
	4	$G + P + 1.0 S s_{NS} + 0.4 S s_{DU}$
	5	$G + P + 1.0 S s_{WE} + 0.4 S s_{UD}$
	6	$G + P + 1.0 S s_{EW} + 0.4 S s_{UD}$
	7	$G + P + 1.0 S s_{WE} + 0.4 S s_{DU}$
	8	$G + P + 1.0 S s_{EW} + 0.4 S s_{DU}$
	9	$G + P + 0.4 S s_{SN} + 1.0 S s_{UD}$
	10	$G + P + 0.4 S s_{NS} + 1.0 S s_{UD}$
	11	$G + P + 0.4 S s_{SN} + 1.0 S s_{DU}$
	12	$G + P + 0.4 S s_{NS} + 1.0 S s_{DU}$
	13	$G + P + 0.4 S s_{WE} + 1.0 S s_{UD}$
	14	$G + P + 0.4 S s_{EW} + 1.0 S s_{UD}$
	15	$G + P + 0.4 S s_{WE} + 1.0 S s_{DU}$
	16	$G + P + 0.4 S s_{EW} + 1.0 S s_{DU}$

(3) 荷重の入力方法

a. 地震荷重

基礎スラブに上部構造物から作用する水平地震力については、上部構造物からのせん断力及び曲げモーメントを基礎スラブの当該位置の節点に離散化して節点荷重として入力する。

基礎スラブに上部構造物から作用する鉛直地震力については、上部構造物からの軸力とし、鉛直力に置換し、モデル上の各節点における支配面積に応じた節点荷重として入力する。

基礎スラブ内に作用する荷重については、地震時の上部構造物からの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。

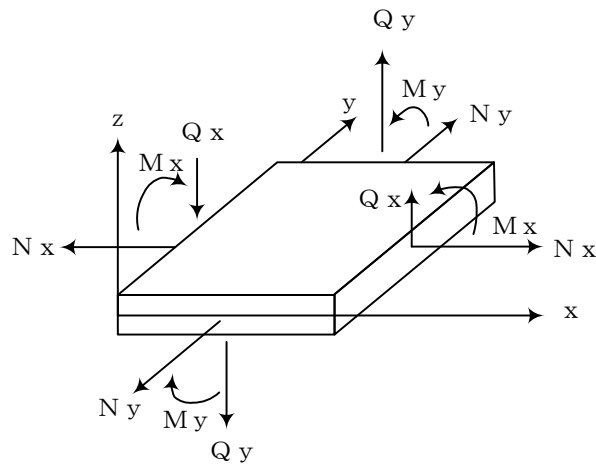
b. 地震荷重以外の荷重

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

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並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認する。断面力成分を図4-5に示す。

なお、3次元FEMモデルを用いた応力の算定において、FEM要素に応力集中等が見られる場合については、「RC-N規準」に基づき、応力の再配分等を考慮してある一定の領域の応力を平均化したうえで断面の評価を行う。



M_x, M_y : 曲げモーメント $\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$
 Q_x, Q_y : せん断力 kN/m
 N_x, N_y : 軸力 kN/m
 応力の符号 (矢印の方向を正とする。)

図4-5 断面力成分

(1) 軸力及び曲げモーメントに対する断面の評価方法

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が、「CCV規格」に基づき、表4-10に示す許容ひずみを超えないことを確認する。

(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」に基づき行う。

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。

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

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)

α : 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、引張軸応力度が 2N/mm^2 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)

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度で、表4-8に示す値 (N/mm^2)

$w f_t$: せん断補強筋の短期許容引張応力度で、表4-9に示す値 (N/mm^2)

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^2)

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、 S_s 地震時及び S_d 地震時の最大応答せん断ひずみが許容限界 (2.0×10^{-3}) を超えないことを確認する。

S_s 地震時における材料物性の不確かさを考慮した最大応答せん断ひずみは 0.75×10^{-3} (NS方向, S_s-D , ケース3, 要素番号23) であり, 許容限界 (2.0×10^{-3}) を超えないことを確認した。また, S_d 地震時における材料物性の不確かさを考慮した最大応答せん断ひずみは 0.34×10^{-3} (EW方向, S_d-1 , ケース3, 要素番号19) であり, 許容限界 (2.0×10^{-3}) を超えないことを確認した。

S_s 地震時及び S_d 地震時における各要素の耐震壁の最大応答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, 各要素の最大応答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及び図5-2に示す。

表 5-1(1) 最大応答せん断ひずみ一覧 (S s 地震時, NS 方向)

部位	EL (m)	要素番号	最大応答せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)
T3-T6	12.5~5.5	12	0.69	2.0
	5.5~2.0	13	0.36	
T7-T10(TA側)	12.5~5.5	17	0.22	
	5.5~2.0	18	0.23	
T7-T10(TF側)	12.5~5.5	22	0.49	
	5.5~2.0	23	0.75	
T11-T13	12.5~5.5	29	0.18	
	5.5~2.0	30	0.32	
T14	12.5~2.0	34	0.15	

注：ハッチングは各要素の最大応答せん断ひずみのうち最も大きい値を表示。

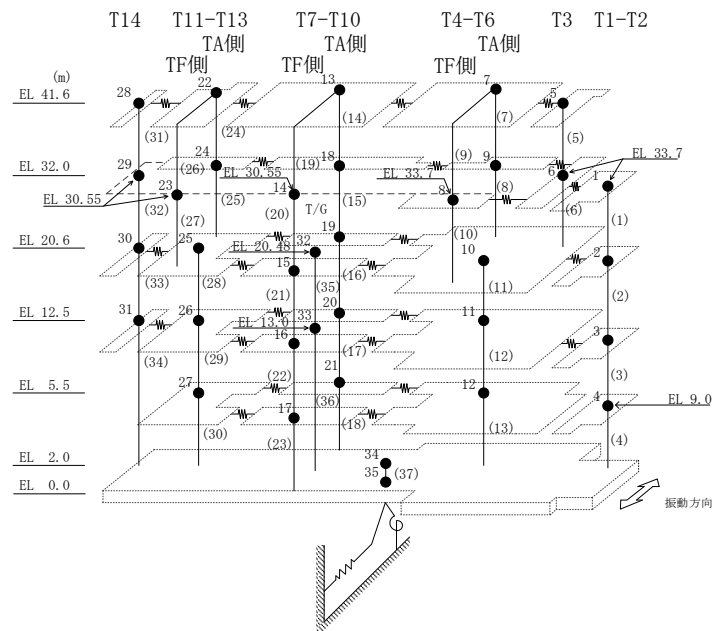


表 5-1(2) 最大応答せん断ひずみ一覧 (S s 地震時, EW方向)

部位	EL (m)	要素番号	最大応答せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)
TX-TZ (T14側)	12.5~5.5	4	0.63	2.0
TX-TZ (T1側)	8.8~5.5	7	0.11	
TX-TZ	5.5~2.0	8	0.25	
TA-TC (T14側)	5.5~2.0	13	0.47	
TA-TC (T1側)	5.5~2.0	15	0.42	
TC-TF	12.5~5.5	19	0.74	
	5.5~2.0	20	0.51	
TG-TH	12.5~5.5	23	0.56	
	5.5~2.0	24	0.53	

注：ハッチングは各要素の最大応答せん断ひずみのうち最も大きい値を表示。

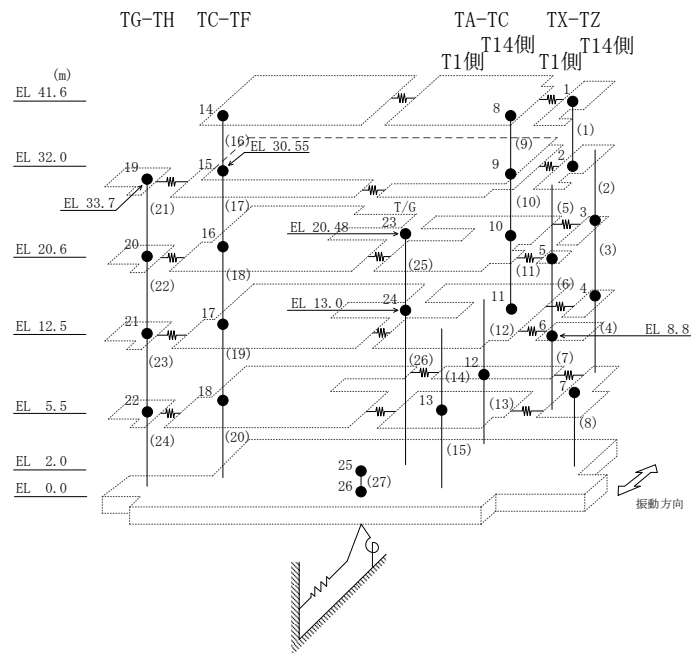


表 5-2(1) 最大応答せん断ひずみ一覧 (S d 地震時, N S 方向)

部位	EL (m)	要素番号	最大応答せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)
T7-T10(TF側)	20.6~12.5	21	0.33	2.0
	12.5~5.5	22	0.24	
T11-T13	20.6~12.5	28	0.11	
	12.5~5.5	29	0.11	

注：ハッチングは各要素の最大応答せん断ひずみのうち最も大きい値を表示。

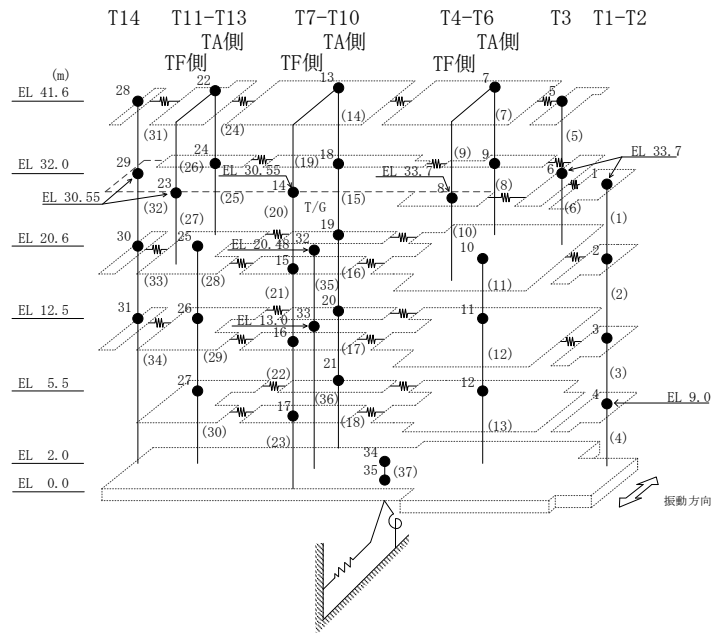
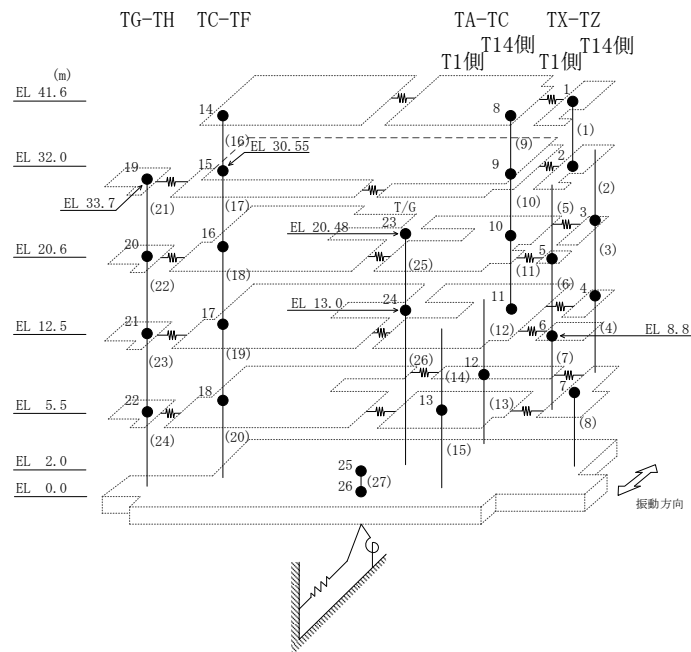
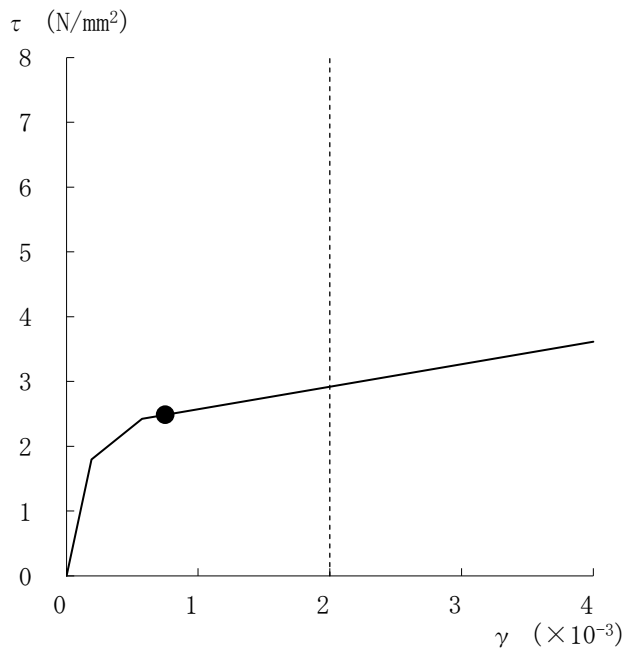


表 5-2(2) 最大応答せん断ひずみ一覧 (Sd地震時, EW方向)

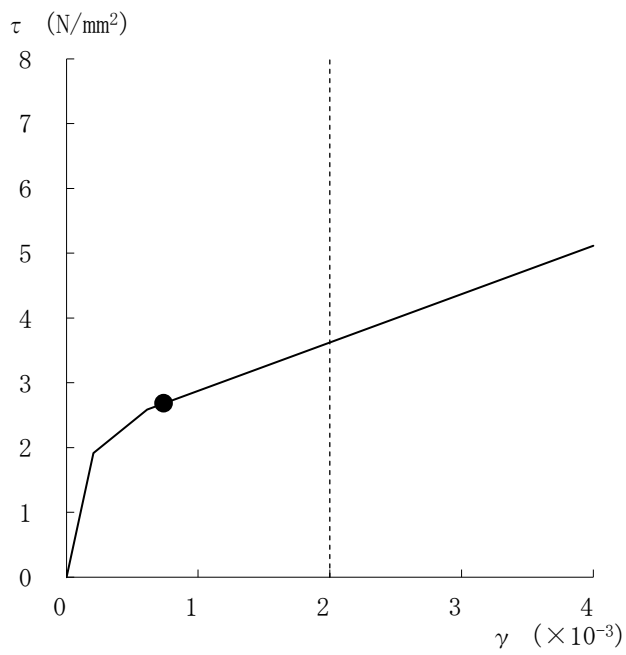
部位	EL (m)	要素番号	最大応答せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)
TA-TC	20.6~12.5	11	0.27	2.0
TA-TC(T14側)	12.5~5.5	12	0.23	
TC-TF	20.6~12.5	18	0.12	
	12.5~5.5	19	0.34	

注：ハッチングは各要素の最大応答せん断ひずみのうち最も大きい値を表示。



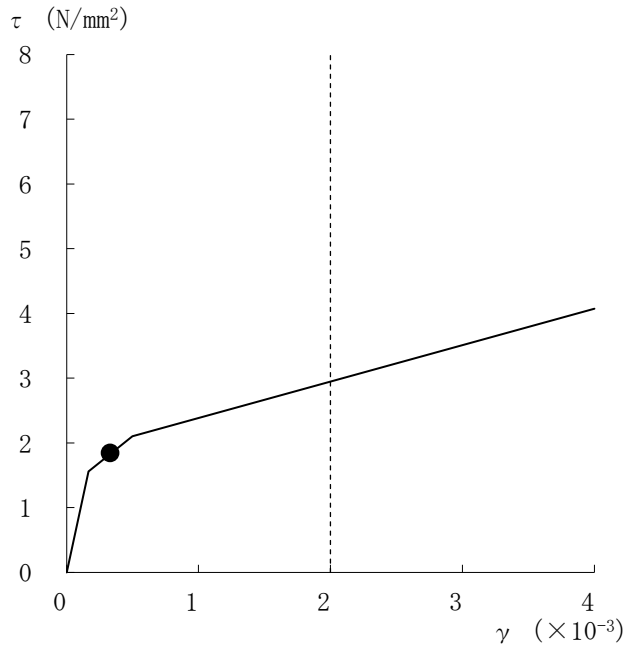


(a) NS方向 (S_s-D, ケース 3, 要素番号 23)

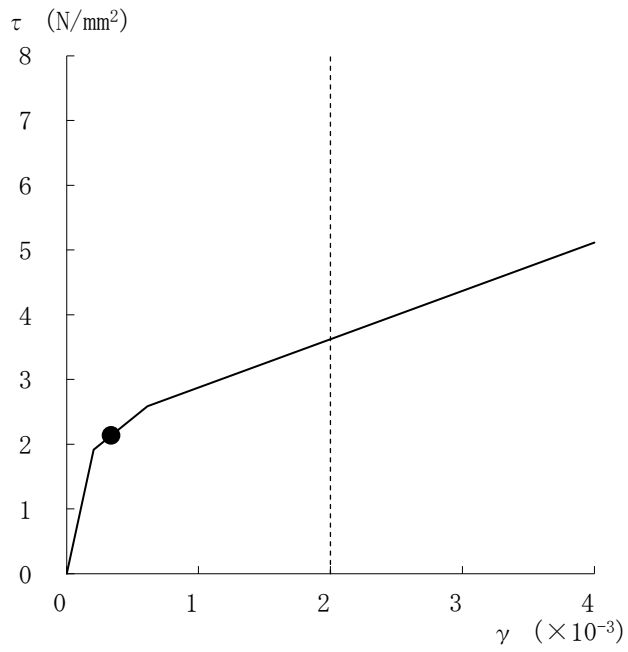


(b) EW方向 (S_s-D, ケース 3, 要素番号 19)

図 5-1 せん断スケルトン曲線上の最大応答せん断ひずみ (S_s地震時)



(a) NS方向 (S d-D, ケース 3, 要素番号 21)



(b) EW方向 (S d-1, ケース 3, 要素番号 19)

図 5-2 せん断スケルトン曲線上の最大応答せん断ひずみ (S d 地震時)

5.2 接地圧の評価結果

S s 地震時の最大接地圧が、地盤の許容限界を超えないことを確認する。

材料物性の不確かさを考慮した地震時の最大接地圧が $0.660 \times 10^3 \text{kN/m}^2$ (S s - N 1, N S 方向, ケース 3) であることから、岩盤の極限支持力度 ($9.8 \times 10^3 \text{kN/m}^2$) を超えないことを確認した。

S s 地震時の最大接地圧を表 5-3 に示す。

表 5-3 S s 地震時の最大接地圧

検討ケース	N S 方向	E W 方向
	S s - N 1, ケース 3	S s - D, ケース 3
鉛直力 N ($\times 10^4 \text{kN}$)	90.9	133
転倒モーメント M ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	26.1	29.0
最大接地圧 ($\times 10^3 \text{kN/m}^2$)	0.660	0.525

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} に対して妥当な安全余裕を有していることを確認する。なお、各層の保有水平耐力 Q_u は昭和59年9月17日付け59資庁第8283号にて認可された工事計画のIV-2-7「タービン建物の耐震性についての計算書」によるものとする。

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1.72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

(a) NS方向

EL (m)	必要保有水平耐力 Q_{un} ($\times 10^3$ kN)	保有水平耐力 Q_u ($\times 10^3$ kN)	Q_u/Q_{un}
41.6~32.0	145.99	251.64	1.72
32.0~20.6	268.20	488.57	1.82
20.6~12.5	402.70	864.75	2.14
12.5~5.5	504.81	1067.55	2.11
5.5~2.0	546.43	1261.92	2.30

(b) EW方向

EL (m)	必要保有水平耐力 Q_{un} ($\times 10^3$ kN)	保有水平耐力 Q_u ($\times 10^3$ kN)	Q_u/Q_{un}
41.6~32.0	96.31	276.35	2.86
32.0~20.6	214.68	569.67	2.65
20.6~12.5	374.16	1061.96	2.83
12.5~5.5	495.06	1143.16	2.30
5.5~2.0	546.43	1533.76	2.80

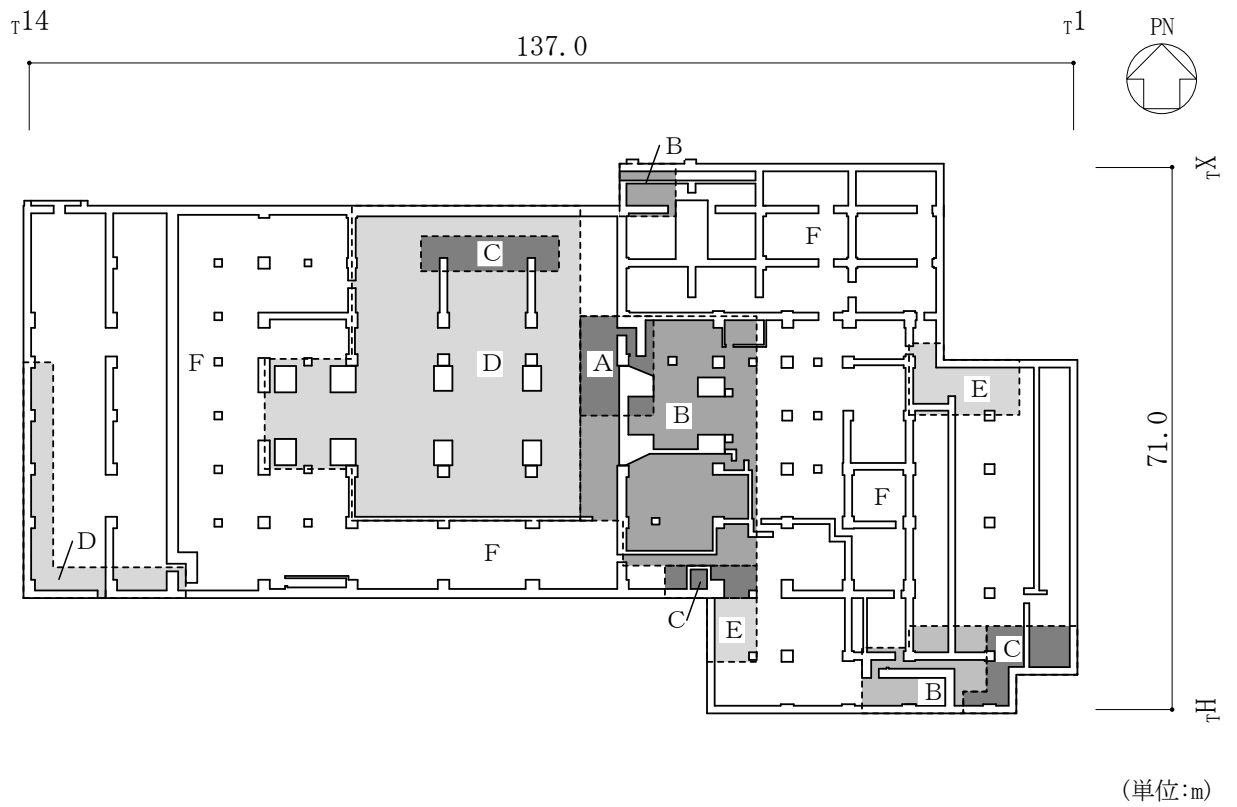
6. 応力解析による評価結果

「4.5.2 断面の評価方法」に基づいた断面の評価結果を以下に示す。また、3次元FEMモデルの配筋領域図を図6-1に、配筋一覧を表6-1に示す。

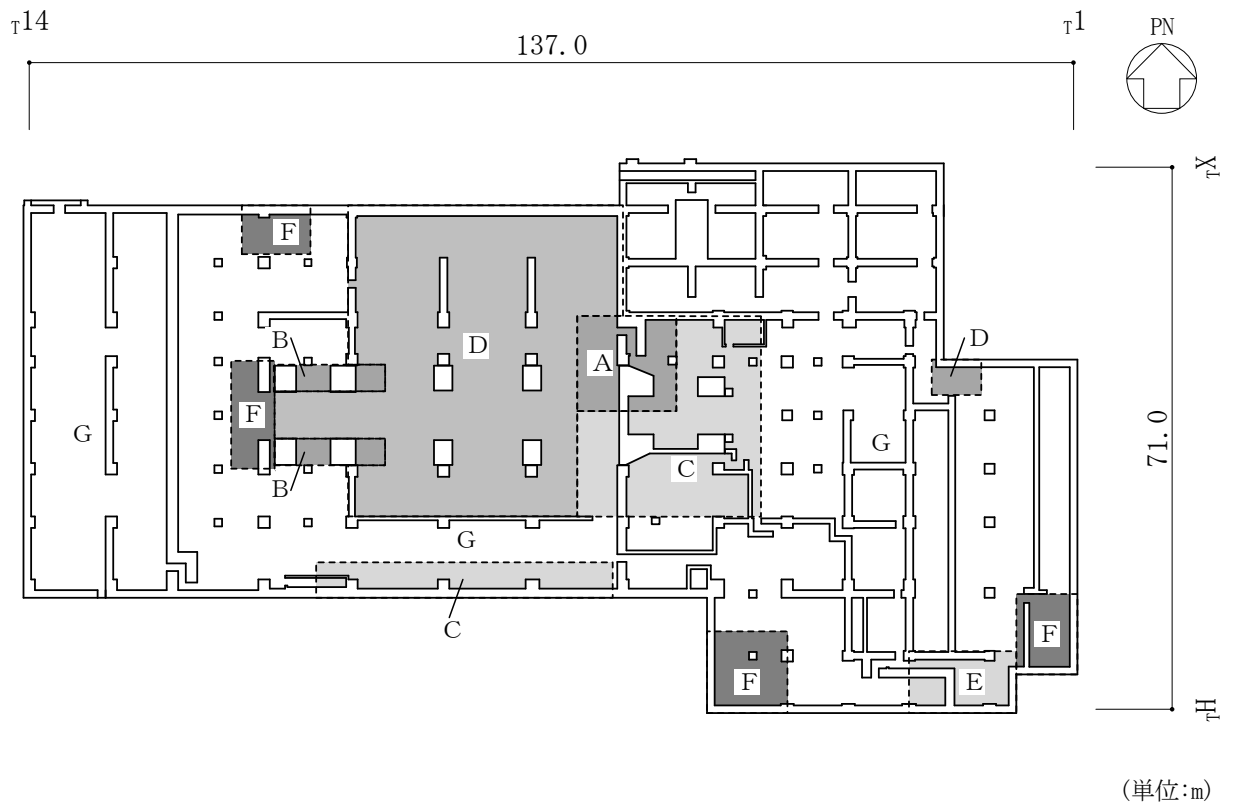
断面の評価結果を記載する要素は、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断力に対する評価において、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素とする。

選定した要素の位置を図6-2に、評価結果を表6-2に示す。

Ss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並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。

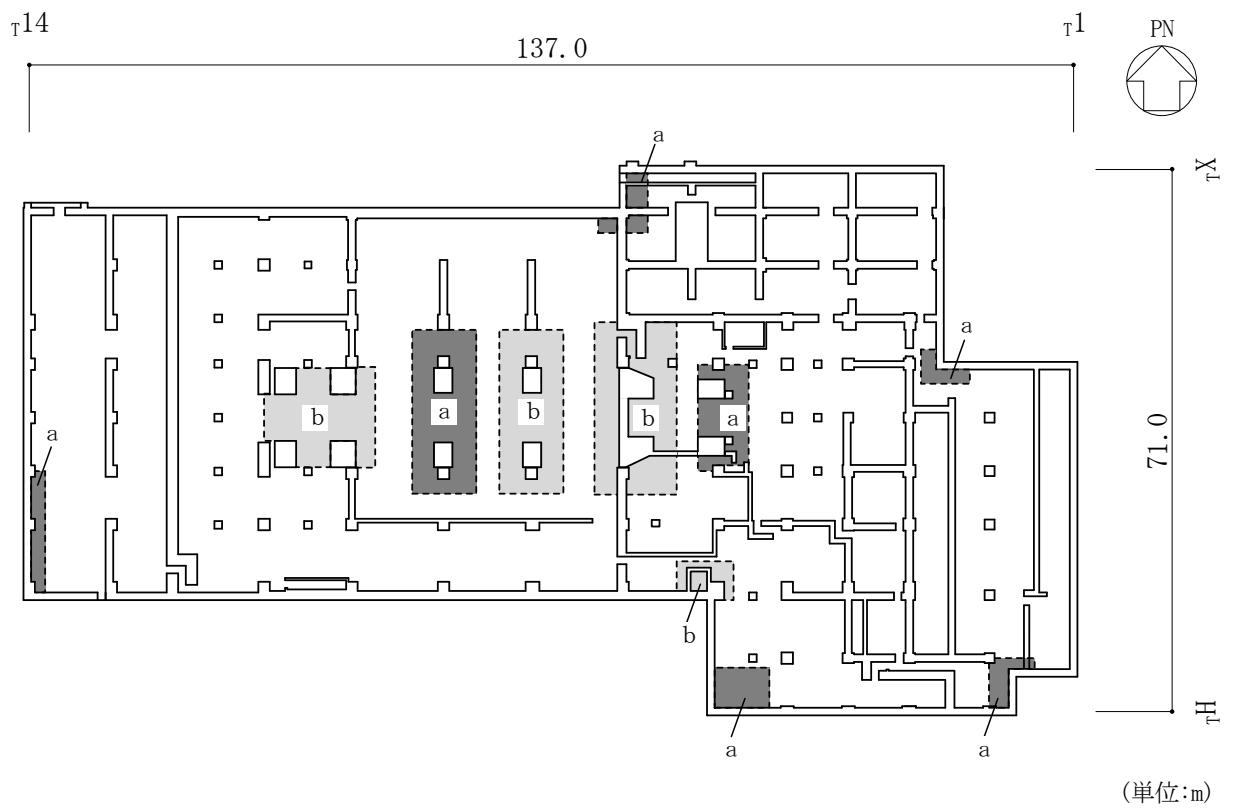


(a) 主筋 (下ば筋)



(b) 主筋 (上ば筋)

図 6-1(1) 配筋領域図



(c) せん断補強筋

図 6-1(2) 配筋領域図

表 6-1(1) 配筋一覧

(a) 主筋 (下ば筋)

領域	方向	配筋
A	N S	3-D32@200
	E W	3-D32@200
B	N S	2-D32@200
	E W	2-D32@200
C	N S	2-D32@200 + D32@400
	E W	2-D32@200 + D32@400
D	N S	D32@200 + D32@400
	E W	2-D32@200
E	N S	2-D32@200
	E W	D32@200 + D32@400
F	N S	D32@200
	E W	D32@200

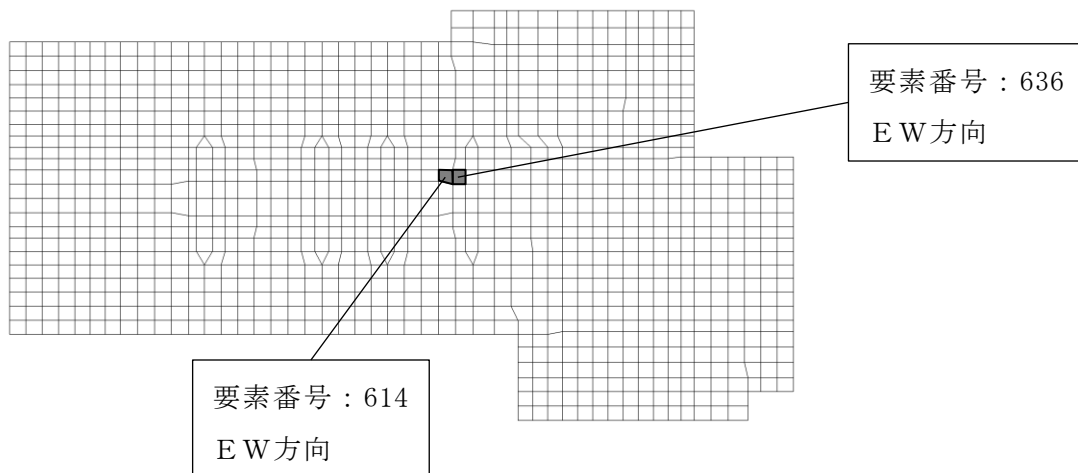
表 6-1(2) 配筋一覧

(b) 主筋 (上ば筋)

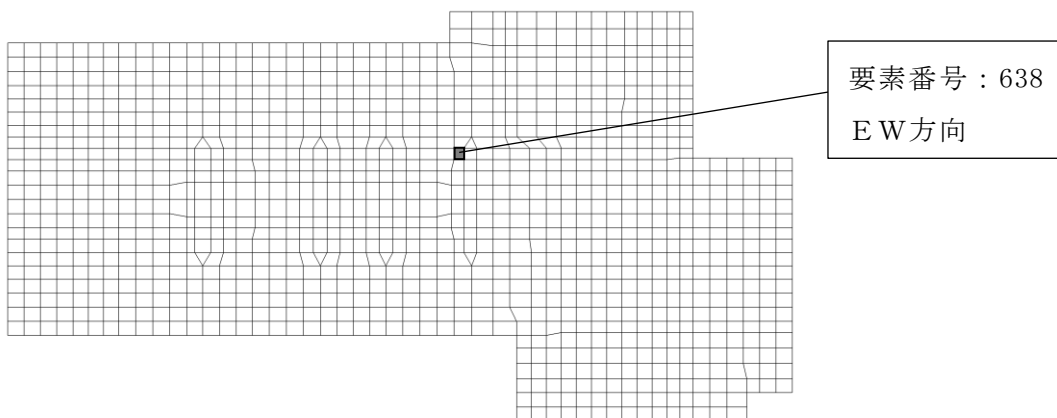
領域	方向	配筋
A	N S	2-D38@200 + D32@400
	E W	2-D38@200 + D32@200
B	N S	2-D32@200 + D32@400
	E W	2-D32@200 + D32@400
C	N S	2-D32@200
	E W	2-D32@200
D	N S	D32@200 + D32@400
	E W	2-D32@200
E	N S	2-D32@200
	E W	D32@200 + D32@400
F	N S	D32@200 + D32@400
	E W	D32@200 + D32@400
G	N S	D32@200
	E W	D32@200

(c) せん断補強筋

領域	配筋
a	D32@400 × 400
b	D38@400 × 400



(a) 軸力+曲げモーメント



(b) 面外せん断力

図 6-2 選定した要素の位置

表 6-2 評価結果 (S s 地震時)

評価項目		方向	要素 番号	組合せ ケース	発生値	許容値
軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	E W	636	8	0.344	3.00
	鉄筋圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	E W	614	7	0.576	5.00
面外せん断力	面外せん断力 ($\times 10^3 \text{kN/m}$)	E W	638	4	2.98*	4.83

注記*：応力の再配分等を考慮して、応力平均化を行った結果。

7. 引用文献

- (1) Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE) ,
1993
- (2) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫 : 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル,
コンクリート工学, Vol.25, No.9, 1987.9