

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-026-2 改4
提出年月日	2020年9月2日

タービン建屋の耐震性についての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-2-2-6「タービン建屋の耐震性についての計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。

別紙 1 応力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 2 応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件の考え方

別紙 3 地震荷重の入力方法

別紙 4 応力解析における断面の評価部位の選定

別紙 5 タービン建屋の上部鉄骨部の逆せん断の発生について

別紙 6 基礎スラブの応力解析における諸条件の変更に伴う影響検討

下線部：今回ご提示資料

別紙 1 応力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

目 次

1. 概要 別紙 1-1
2. 応力解析モデル及び手法の比較 別紙 1-2

1. 概要

本資料は、タービン建屋基礎スラブの既工認時及び今回工認時の応力解析モデル及び手法の比較を示すものである。

2. 応力解析モデル及び手法の比較

タービン建屋の応力解析モデル及び手法の比較を表 2-1 に示す。また、今回工認時の応力解析モデルを図 2-1 に示す。

比較に用いる既工認時の地震応答解析モデル及び手法は、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。）のものである。

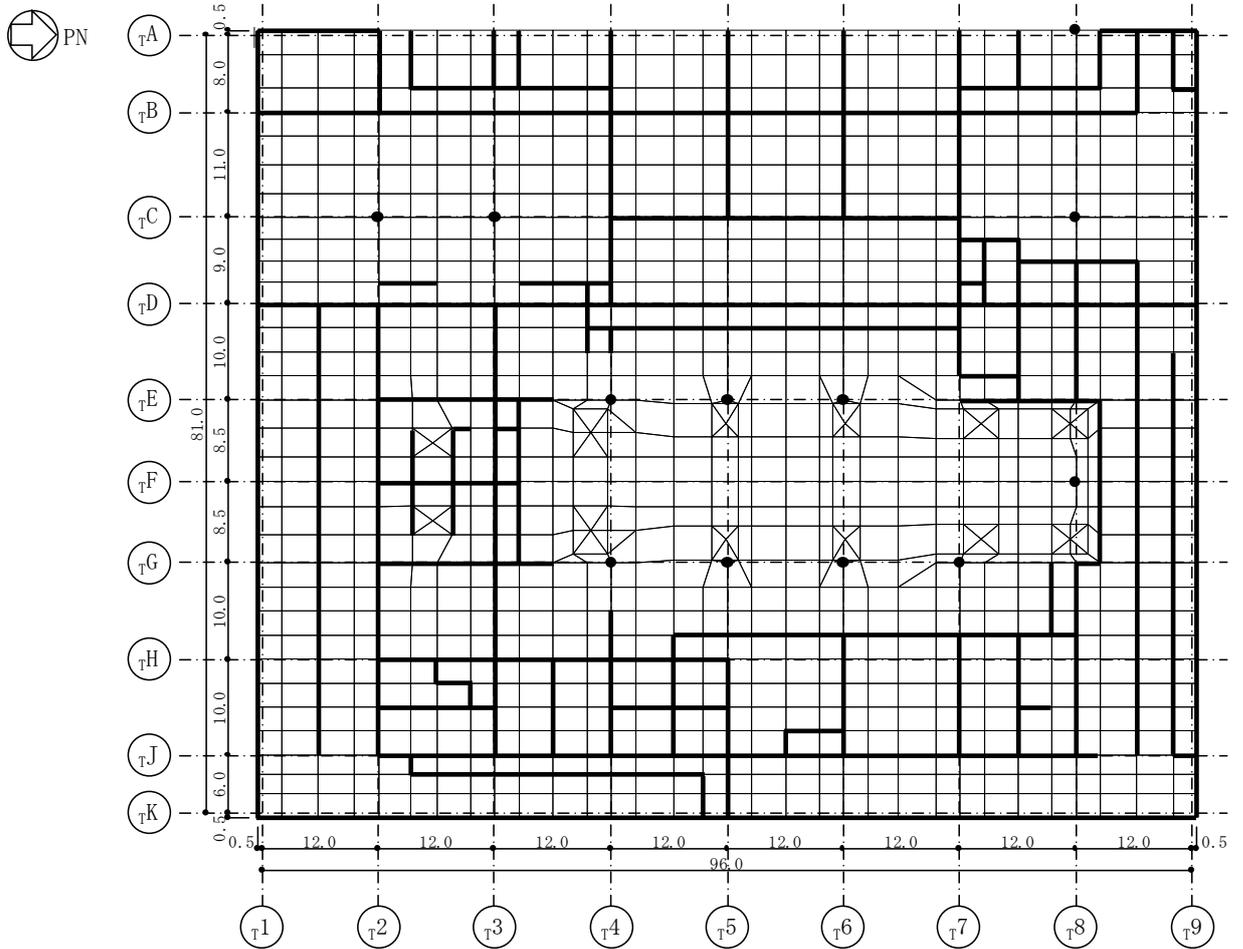
表 2-1 応力解析モデル及び手法の比較 (タービン建屋基礎スラブ)

項目	内容	既工認	今回工認	備考
解析手法		・ 3次元 FEM モデルを用いた応力解析 (弾性解析)	・ 同左	—
解析コード		・ N A S T R A N	・ M S C N A S T R A N	—
モデル	モデル化範囲	・ 基礎スラブ	(基礎スラブモデル部分) ・ 同左 (上部構造モデル部分) ・ 建屋全体でモデル化	—
	材料物性	検討時の各規準, コンクリートの設計基準強度に基づき設定 ・ コンクリートのヤング係数: $E = 2.55 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ (SI 換算) ・ コンクリートのポアソン比: $\nu = 0.167$	適用規準等の見直しによる再設定 ・ コンクリートのヤング係数: $E = 2.79 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ ・ コンクリートのポアソン比: $\nu = 0.2$ ・ 鋼材のヤング係数: $E = 2.05 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ・ 鋼材のポアソン比: $\nu = 0.3$	① ② ③ ④
	要素種別	・ 基礎スラブ: シェル要素 ・ 耐震壁: はり要素	・ 基礎スラブ, スラブ, 壁: シェル要素 ・ 柱, はり, プレース: はり要素, トラス要素	—
	境界条件	・ 底面を弾性地盤ばねにより支持 ・ 底面の弾性地盤ばねは, 浮上りを考慮 ・ 側面の水平ばね及び回転ばねは考慮せず	・ 同左	—
	非線形特性	・ 考慮しない	・ 同左	—
地震荷重との 組合せ	V L + S + S O E V L : 鉛直荷重 (固定荷重, 機器荷重, 配管荷重, 積載荷重, 積雪荷重, クレーン荷重, T/G 架台の柱脚応力, 浮力) S : 地震荷重 S O E : 地震時土圧	V L + S s + S O E + B L V L : 鉛直荷重 (固定荷重, 機器荷重, 配管荷重, 積載荷重, 積雪荷重, クレーン荷重, T/G 架台の柱脚応力) S s : 地震荷重 S O E : 地震時土圧 B L : 浮力	⑤	
荷重 の 設定	固定荷重	・ 構造体の自重を考慮	・ 同左	—
	地震荷重	・ 基礎自体の物体力及び基礎上端面における上部構造からの地震力 (転倒モーメント, 水平力, 鉛直力) を入力	・ 上部構造の各階床位置に水平力, 付加曲げモーメントを入力 ・ 鉛直震度は地震応答解析モデルの基礎底面位置における鉛直力から算定	—
	地震時土圧荷重	$P_a = 10.0 + 0.65 \cdot \gamma \cdot h$ γ : 土の単位体積重量 (t/m^3) h : 地表面からの深度 (m)	常時土圧 $P_0 = 0.5 \cdot \gamma \cdot h$ γ : 土の単位体積重量 (kN/m^3) h : 地表面からの深度 (m) 地震時増分土圧 ・ (加力側) $P_a = 0.6 \cdot r \cdot \rho \cdot H_a \cdot \alpha_{\max}$ ・ (支持側) $P_{s_i} = \beta_i \cdot F / (B \cdot H_i)$ r : 埋戻し土部分の補正係数 ρ : 地盤一般部の密度 ($\times 10^3 \text{kg/m}^3$) H_a : 地盤一般部の厚さ (m) α_{\max} : 地表面の最大加速度 (m/s^2) β_i : 建物・構築物の慣性力に対する側方地盤部 i 層の分担率	⑥

			F : 建物・構築物の慣性力 (kN) B : 建物・構築物の奥行幅 (m) H_i : i 層の厚さ (m) 地震時土圧 $P = P_0 + \max(P_a, P_{s_i})$	
評価方法	応力解析	・発生応力が許容応力度を超えないことを確認	・発生応力が許容応力度を超えないこと、鉄筋及びコンクリートのひずみが評価基準値を超えないことを確認	⑦

【具体的な反映事項】(表の備考欄に対応)

- ① コンクリートのヤング係数及びせん断弾性係数については、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説－許容応力度設計法」((社)日本建築学会, 1999 改定)に基づき再計算
- ② 「鋼構造設計規準－許容応力度設計法」((社)日本建築学会, 2005 改定)に基づき設定
- ③ コンクリートのヤング係数を算出するための圧縮強度は実強度, 断面の評価のための圧縮強度は設計基準強度を採用
- ④ 建設工認時には耐震要素として考慮しなかったが, 実際には耐震壁と考慮可能であると考えられる壁を補助壁として, その分の剛性を考慮
- ⑤ 既工認と今回工認で凡例の記載が異なっているが, 既工認から考慮している荷重は変更しておらず, 浮力算定時の地下水位面の設定も変更していない
- ⑥ 「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)」に基づき再計算し, 詳細は図 2-2 に示す
- ⑦ 「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。), 「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)に基づき評価する。鉄筋及びコンクリートのひずみ算定においては, エネルギー一定則に基づいた等価ひずみを算定する, 詳細は図 2-3 及び図 2-4 に示す



注：太線部は耐震壁及び補助壁，黒丸は独立柱の位置を示す。 (単位：m)

(c) 基礎スラブ水平面投影図

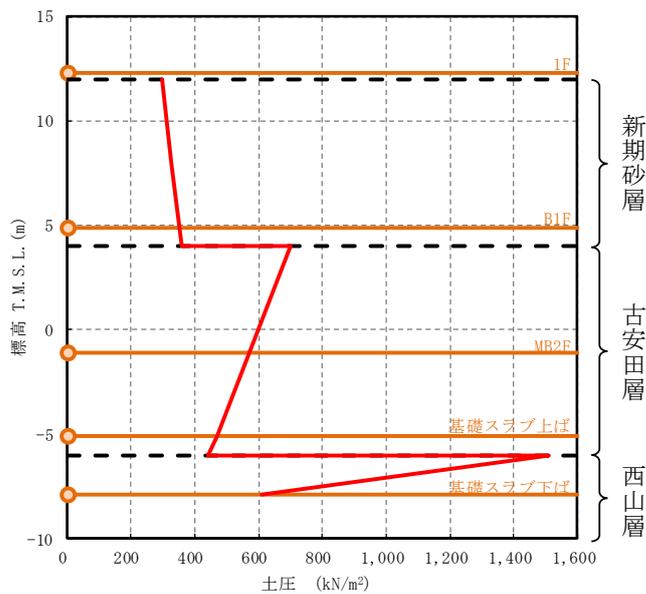
図 2-1 応力解析モデル図 (2/2)

(1) 地震時土圧荷重の算定方法

図 2-2 に地震時土圧荷重の算定方法を示す。地震時土圧荷重は、「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、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包絡させて設定する。

地震時増分土圧は、建物・構築物に対し加力側に作用する地震時増分土圧と建物・構築物を支える支持側の地震時増分土圧を算定し、地盤一般部は加力側増分土圧及び支持側増分土圧を包絡した値とし、岩盤部は支持側増分土圧とする。

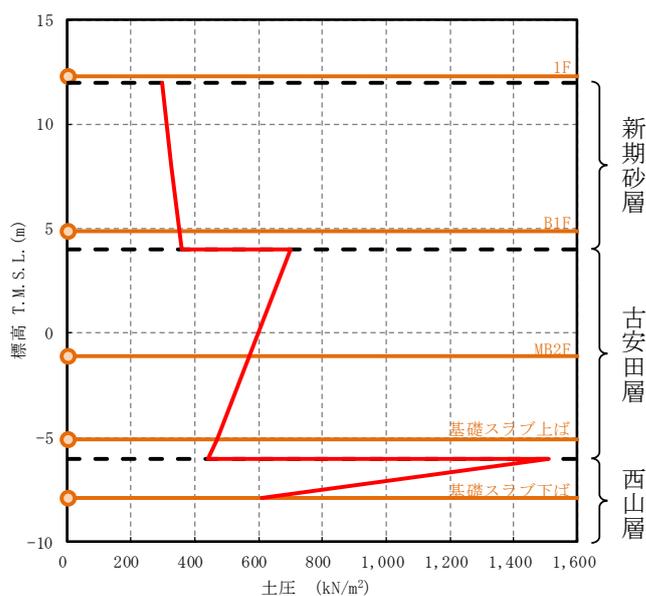
地震時土圧荷重は、基本ケース及びパラスタケースごとに算定した地震時土圧を包絡するように設定する。



(a) NS 方向

T. M. S. L (m)	決定ケース
4.0~12.0	Ss-1 ケース2
-6.0~4.0	Ss-1 ケース2
-7.9~-6.0	Ss-1 ケース3

— 地震時土圧包絡値



(b) EW 方向

T. M. S. L (m)	決定ケース
4.0~12.0	Ss-1 ケース2
-6.0~4.0	Ss-1 ケース2
-7.9~-6.0	Ss-1 ケース3

— 地震時土圧包絡値

注：東京湾平均海面（以下、「T. M. S. L.」という。）

図 2-2 地震時土圧荷重の算定方法

(2) 基礎スラブの弾性応力解析における等価ひずみの採用について

基礎スラブのコンクリート及び鉄筋のひずみ評価結果は、以下のとおりである。

コンクリートひずみについては、別紙4「応力解析における断面の評価部位の選定」に示すとおり、コンクリート最大圧縮ひずみは要素番号 875 の 541×10^{-6} （許容限界 3000×10^{-6} ）であり、最大圧縮ひずみにおいても許容限界に対して大きな余裕がある。なお、コンクリートのひずみコンター図を図 2-3 に示す。

鉄筋ひずみについては、荷重の組合せ全 16 ケースのうち、発生応力に対応するひずみが降伏時ひずみ（ 1683×10^{-6} ）を超えるケースが 3 ケース（計 4 要素）あったため、これらの要素についてはエネルギー一定則に基づく等価ひずみの評価を行った。鉄筋の最大ひずみは要素番号 1073 において生じ、鉄筋最大ひずみは 2251×10^{-6} （許容限界 5000×10^{-6} ）となっている。検定値が最大となる鉄筋のひずみコンター図を図 2-4 に示す。

この結果より発生ひずみが降伏時ひずみを超える要素は局所的であり、当該要素の周辺要素には大きなひずみが生じていないことが確認できることから、当該要素においては周辺要素との応力の再分配が期待でき、エネルギー一定則に基づく等価ひずみによる断面評価を行うことが十分に可能であると考えられる。

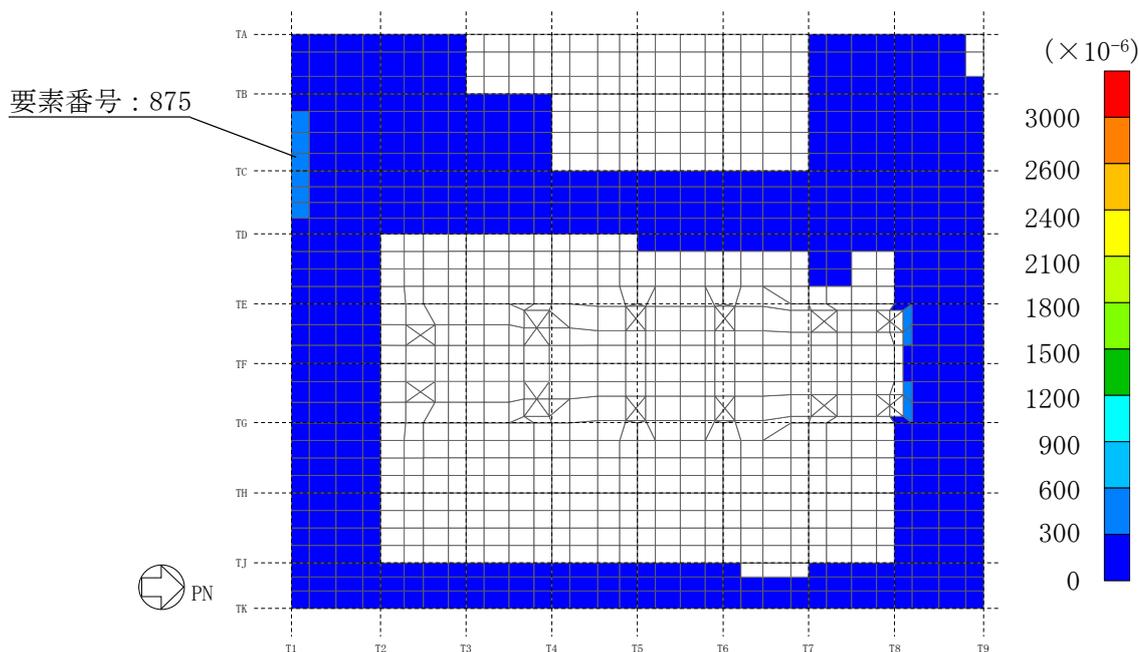


図 2-3 コンクリートのひずみコンター図
(CASE1)

要素番号：1073

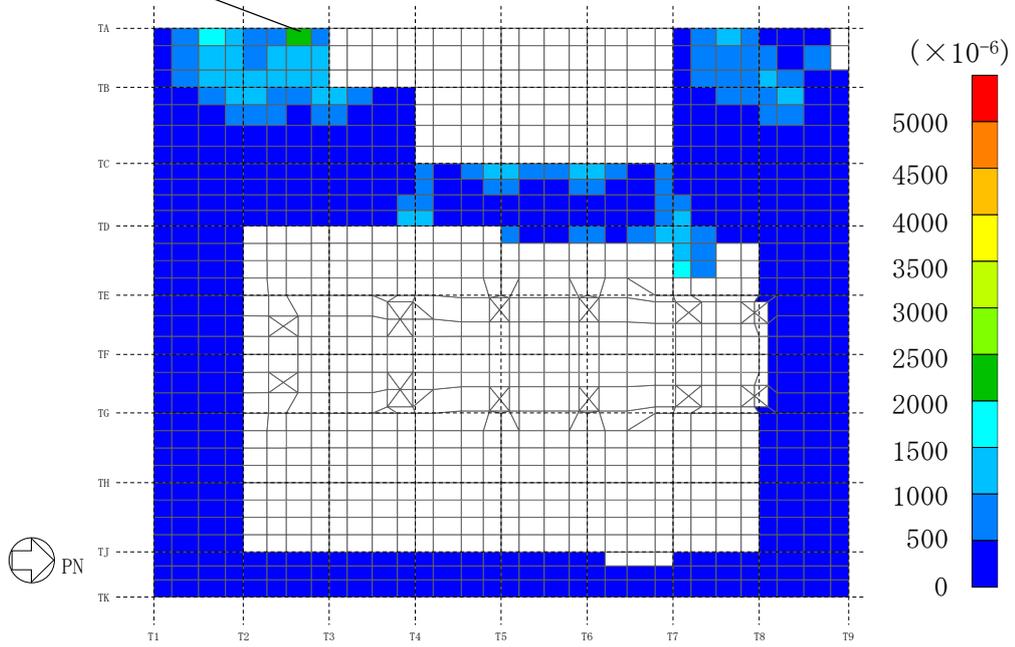


図 2-4 鉄筋のひずみコンター図
(CASE7, 鉄筋降伏時ひずみ : 1683×10^{-6})

別紙2 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方

目 次

1. 概要 別紙 2-1
2. 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件 別紙 2-2

1. 概要

本資料は、タービン建屋基礎スラブの応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件についての概要を示すものである。

2. 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件

タービン建屋基礎スラブの応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件を表 2-1 に示す。

直接基礎の底面地盤ばねの設定における基本的な考え方は，以下のとおり。

- ・ 水平ばね

振動アドミタンス理論に基づく水平ばねにより算出する。

- ・ 鉛直ばね

基礎浮上りを考慮し，回転ばね反力として生じる転倒モーメントを適切に評価するため，振動アドミタンス理論に基づく回転ばねより算出する。

有限要素法を用いた解析モデルにおける要素分割の考え方*については，以下のとおり。

- ・ シェル要素

要素分割は，基本的には発生する応力状態によって決まり，構造形状と荷重状態より要素分割数を考慮する。要素形状の縦横比（アスペクト比）は，重要部分で 1：2 以下，その他の領域や応力変化が少ない領域では，1：3 程度までで，分割に際しては 4 角形要素を利用して格子状とするのが一般的である。曲面版構造の場合は，平板要素や軸対象シェル要素の大きさは，集中荷重や不連続部を含む曲面部近傍では $2.5\sqrt{R/t}$ を 10～20 分割すると適切な応力分布が求められ，構造物の半径（R）と板厚（t）が考慮されている。また，面内曲げ・軸力及び面外のせん断や曲げを受ける部材のシェル要素の辺の長さは，シェルの広がり方向の応力分布の状態から決まり，応力変化が大きい領域は要素を小さくする必要がある。

注記*：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（非線形 CAE 協会，2008 年）

表 2-1 タービン建屋基礎スラブ(1/3)

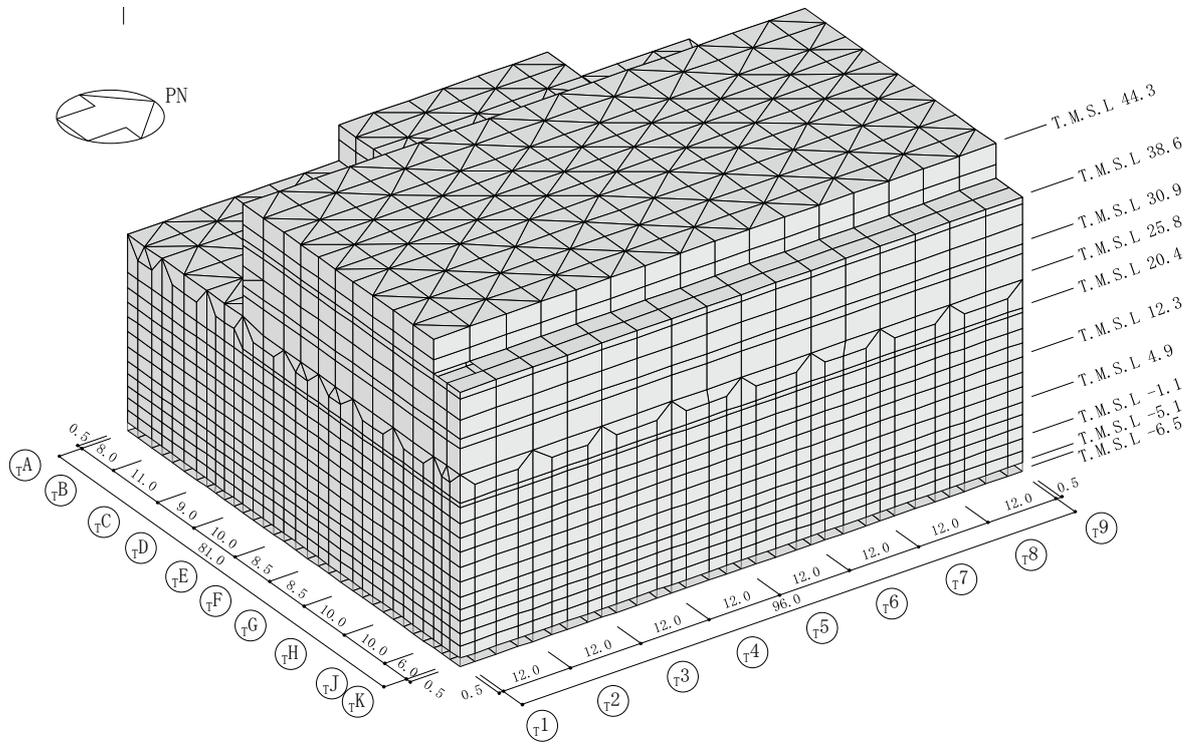
モデル概要

○モデル化範囲

- ・基礎スラブ及び上部構造をモデル化する。

○使用要素

- ・基礎スラブ，スラブ，壁：シェル要素
- ・柱，はり，ブレース：はり要素，トラス要素



(単位：m)

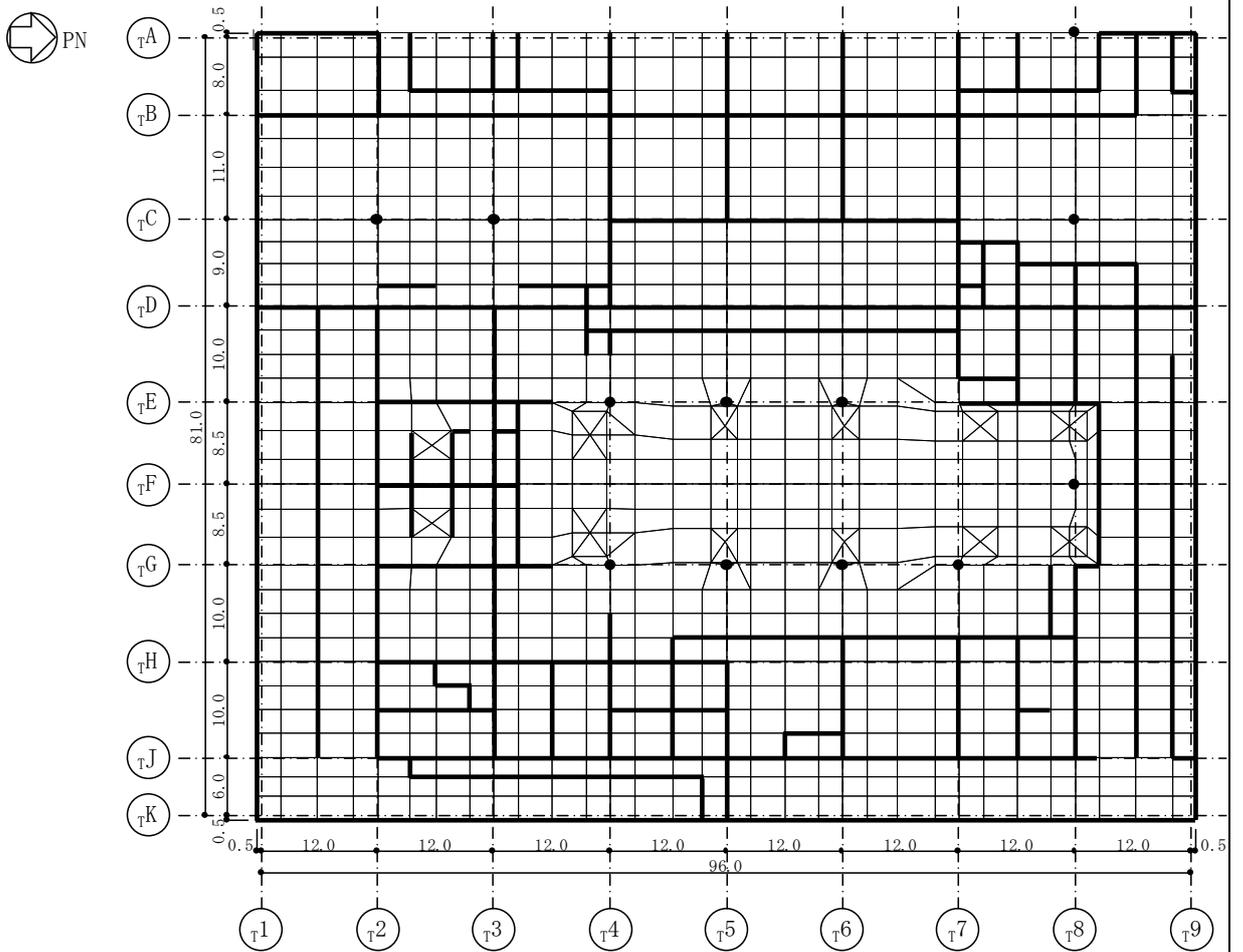
モデル概要 (全体図)

表 2-1 タービン建屋基礎スラブ(2/3)

モデル概要

○要素分割

- 要素の一辺の長さを 2~3m 程度とし、壁及び柱位置を考慮して分割する。T/G 架台脚部は断面が大きいため、架台脚部の断面形状に合わせて分割する。



注：太線部は耐震壁及び補助壁，黒丸は独立柱の位置を示す。

(単位：m)

モデル概要 (基礎スラブ)

表 2-1 タービン建屋基礎スラブ (3/3)

境界条件, 拘束条件
<p>上部構造物と基礎スラブの境界</p> <ul style="list-style-type: none"> 基礎スラブと上部構造物との境界部においては, 上部構造物の剛性を考慮することで, 基礎スラブの応力・変形状態を評価する。 主要な開口部については, 要素を設置しないことで考慮する。 基礎スラブから立ち上がる独立柱については, 上部構造物から基礎スラブへの地震荷重を適切に入力する目的でその剛性を考慮する。
<p>基礎スラブと地盤の境界</p> <ul style="list-style-type: none"> 応力解析モデルへの地震荷重の入力について, 基礎スラブの応力解析モデル上は, 地震応答解析結果と等価となるように設定を行う。タービン建屋基礎スラブモデル部に入力する付加せん断力は, 側面地盤ばねを応力解析モデルにモデル化していないことから, 基礎底面ばねに生じる水平力と基礎スラブより上部の部材から伝わる水平力の差から算出する。付加曲げモーメントは, 最大応答曲げモーメントと水平力により発生する曲げモーメントの差分から算出する。以上より, 地震応答解析で求まる応力と等価となる。 基礎スラブの節点には, 底面地盤を表現するばね要素を設ける。解析では鉛直方向の底面地盤ばねに引張力が作用すると, 鉛直方向及び水平方向 (2 方向) の合計 3 つのばね剛性をゼロとすることにより, 基礎の浮上りを表現する。 水平剛性及び鉛直剛性は以下のとおり設定する。 <ul style="list-style-type: none"> 水平剛性: 振動アドミッタンス理論による水平ばね $K_{H NS(EW)}$ を節点支配面積 A_i で離散化。 $K_{Hi NS(EW)} = (K_{H NS(EW)} / A) \times A_i$ A: 基礎スラブの底面積 鉛直剛性: 転倒モーメントが支配的となるため振動アドミッタンス理論による回転ばね K_R を節点支配面積 A_i で離散化。 $K_{Vi} = (K_{R NS} / I_{NS} + K_{R EW} / I_{EW}) / 2 \times A_i$ I: 基礎スラブの断面二次モーメント
<p style="text-align: center;">モデル概要</p>