

I-21

3次元動的FEMを用いたRC構造物の耐震設計について

東北電力株式会社 正会員 ○平田 一穂
東北電力株式会社 正会員 安田 悟

1. まえがき

女川原子力発電所第3号機海水ポンプ室の耐震設計に当たって、地震動に対する構造物長手方向の構造物-地盤系の動的挙動の違いを考慮するための手法として、3次元動的有限要素法解析を採用したので、その概要を報告する。

2. 構造概要

構造概要図を図-1に示す。海水ポンプ室は、幅32.1m×高さ29.0m、長さ55.0m、壁厚1.5m～3.0mの鉄筋コンクリート構造物で、岩盤上に構築された後、その周囲は掘削残土により埋戻す。躯体上部は機器・配管類が設置され、而震壁により2エリアに区分される。躯体下部は、4連及び2連の水路となっている。本構造物の北側3.6mの位置には、海水熱交換器建屋が設置される。

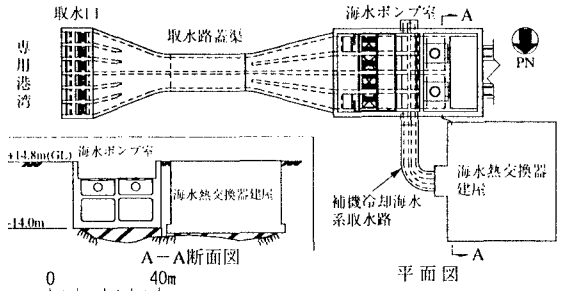


図-1 海水ポンプ室の構造概要図

3. 設計手順

設計は図-2の設計フローに従い進めた。その概要は以下のとおりである。

(1)地震応答解析

地盤の不整形性及び構造物と周辺地盤の動的相互作用が評価できるように、構造物-地盤連成系の有限要素法（以下、「FEM」と呼ぶ）によって地震応答解析を行うこととした。解析精度及び使用可能な要素数を考慮し、動土圧及び慣性力の大きさの深さ方向の分布は、2次元動的FEM解析法（解析プログラム：Super FLUSH）を用いて算定し、構造物長手方向の動土圧及び慣性力の分布形状は、3次元動的FEM解析法（解析プログラム：TDAP III）を用いて設定した。解析は、横断方向及び縦断方向について行なった。

a. 地盤-構造物系の2次元動的FEMモデル

躯体の長手方向において水路部の隔壁の数が変化し、而震壁が設置されること、ならびに様々な機器・配管が設置されることから、躯体の剛性・重量分布が長手方向で変化する。そのため、構造物モデルの作成は以下の手順によった。

①躯体全体をシェル要素から成る3次元静的FEMモデルに置換し、弾性解析により単位荷重作用時の変位を算定する。

②はり要素（スラブ、隔壁等）及び平面応力要素（而震壁）

を用いて躯体の2次元動的FEMモデルを作成し、弾性解析により単位荷重作用時の変位を算定する。

③上記①及び②の変位が等しくなるよう、2次元動的FEMモデルの要素剛性を補正する。

④躯体重量及び機器・配管荷重を2次元に投影し、単位幅当たりの重量分布を算定する。

解析に用いる地盤断面は、構造物周辺での応答が顕著となる位置とし、地盤のFEM要素分割においては、せん断波速度に応じて各要素の大きさを定めた。モデルの概要を図-3に示す。加速度伝達関数から求めた構造物周辺地盤での卓越振動数は、約0.9Hz～約1.3Hzであった。

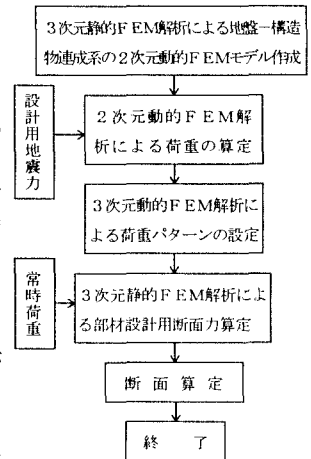


図-2 設計フロー

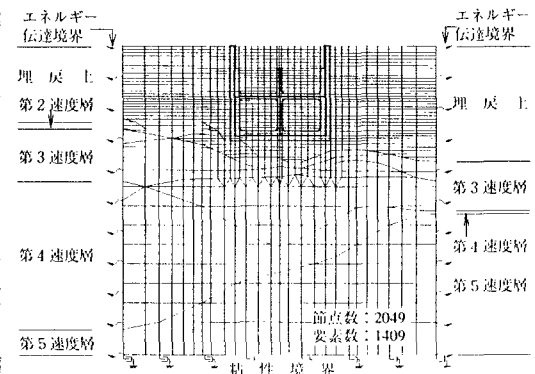


図-3 2次元動的FEMモデル

b. 地盤一構造物系の3次元動的FEMモデル

構造物は、スラブ及び壁の軸線位置でシェル要素を用いてモデル化した。大きな開口は、開口部としてモデル化し、小さな開口は、剛性及び重量が等価となるようにモデル化した。機器・配管重量は、節点又は要素への付加重量としてモデル化した。地盤は、岩盤等高線図（速度層及び岩盤分類）に基づきソリッド要素を用いてモデル化し、各要素に該当する地盤物性値を与えた。線形解析であるため、ひずみ依存性の土質材料の物性値については、1次元応答解析による収束値を与えた。土載荷重（1.0tf/m²）は、最上層要素の付加重量として与えた。考慮した最高モード次数は、卓越周波数や要素サイズ等を考慮し、300次（約4.4Hz）とした。モデルの概要を図-4に示す。

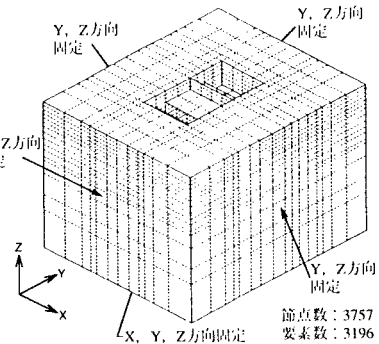


図-4 3次元動的FEMモデル

c. 地震応答解析結果と設計用荷重の設定

設計用模擬地震波（最大325gal）に対する2次元動的FEM解析結果に基づき、動土圧の大きさと深さ方向の分布形状を決定した（図-5）。この動土圧分布を基本として、以下の手順により、部材設計用断面力算定（3次元静的FEM解析）に用いる荷重パターンを決定した。

- ①曲げモーメント（ M_x 及び M_y ）の経歴変化を把握するために、代表要素（部材隅角部付近）を選定する。
- ②代表要素の最大の M_x 及び M_y の発生時刻（ $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ ）を調べる。
- ③時刻 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ の中から、躯体全体に対して設計上厳しい時刻（ $T_1, T_2, T_3, \dots, T_k$ ）を抽出する。
- ④時刻 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_k$ における動土圧を、発生時刻に着目して幾つかのグループに分類する。
- ⑤傾向の類似した複数のグループをまとめ、各グループについて設計用動土圧分布パターンを設定する。また、各グループにおける深さ方向の動土圧分布を調べることで、構造物周辺の掘削形状による影響を把握し、構造物長手方向の動土圧の分布形状を深さ方向毎に決定する。
- ⑥⑤で設定した各グループと同一の時刻における加速度の分布状況を調べ、動土圧同様に設計用水平加速度分布パターンを設定する。
- ⑦隣接構造物の影響を考慮するため、⑤で設定した設計用動土圧分布パターンにおいて、構造物間の埋め戻し土による慣性力等に基づき当該部分の動土圧分布形状を設定する。

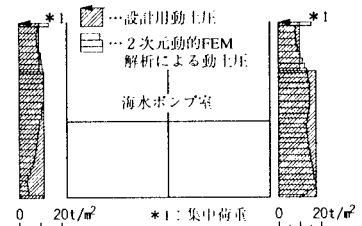


図-5 深さ方向の動土圧分布形状

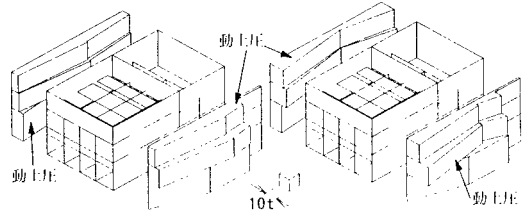


図-6 荷重パターンの例（動土圧）

以上の手順により設定した荷重パターンのうち、動土圧についての例を図-6に示す。

②部材設計用断面力算定及び断面算定

部材設計に当たっては、前述の3次元静的FEMモデルに対して、常時荷重（固定荷重、機器・配管荷重、静止土圧、地下水圧、内水圧、地表面土載荷重等）及び地震時荷重（水平及び垂直地震力による動土圧及び慣性力）を適宜組み合わせ弾性解析を行い、断面力を算定した。水平地震力については、①項で設定した荷重の分布パターンを考慮した。各要素では板の曲げ及び膜応力を考慮すると共に、板の曲げには面外せん断変形の影響も考慮した。また、支持地盤は等価な弾性ばね（「田治見の振動アドミタンス理論」に基づく静的ばね）として評価し、モデル底面に付加した。

上記条件の下で、各荷重ケースについて解析し、要素毎に得られた断面力に対して断面算定及び配筋設計を行なった。

4. あとがき

3次元動的FEM解析により、構造物-地盤系の3次元動的挙動が把握でき、適切な荷重パターンを設定できた。同時に、同解析法を採用したことにより、複雑なRC構造物を等価な2次元FEMモデルに置換することの妥当性を確認できた。