# 汎用並列地震応答解析手法の開発と応用

堀 宗朗 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門

澤田 昌孝*1，園部 秀明*2，大塚 悠一*3，羽場 一基*2，堀 宗朗*4

*1 電力中央研究所サステナブルシステム研究本部，*2 大成建設㈱原子力本部，*3 東電設計㈱ 新領域研究開発推進室，*4 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門

**キーワード**：並列有限要素法，地震応答解析，断層挙動解析，解析モデル自動構築

## 1. はじめに

高速化・大規模化に加え廉価化の結果，並列計算機の実務利用が進み，並列計算機の性能を活かす高性能のプログラムも必要となっている．これを背景に，本研究は，地震工学分野での汎用並列有限要素法の開発と，実務利用のための解析モデル構築の検討を目的としている．

本年度の開発と応用の具体的対象は，二つの重要構造物の地震応答解析と地表地震断層である．汎用並列有限要素法は一定の性能を安定して発揮するようになっている．100 万程度の自由度であるが，解析モデルの自動構築を目指すことが課題である．

## 2. 重要構造物（1）

解析モデルの詳細度は要素寸法で決定される．応力が設計指標となる機械系構造物と異なり，断面力が設計指標となる建設系構造物では，要素寸法は相対的に大きくしてよい．一方，巨大な構造物では，自由度を抑えるために要素寸法を小さくする必要もある．本節では，解析モデルの要素寸法が精度等に与える影響を確認する．

解析モデルは、原子力施設の耐震評価に用いられる米エネルギー省モデル（DOE モデル）である．DOE モデルでは，図 1 のように部材間を剛なばね要素で接続する．手動の接続は容易ではないため，代替として MPC による自動接続を検討する．

表 1 に対象とする解析モデルの諸元を示す．モデル 1 は DOE モデルに MPC を適用し，要素寸法を約 2.5 m としている．モデル 2 とモデル 3 は要素寸法を約 1.2 m と約 0.8 m に設定している．図 1 にモデル 1 とモデル 2 の概観図を示す。橙色に着色した MPC を設定した面を図 2 に示す．

ES で実施した静的自重解析において，要素寸法の影響を検討した．図 3 にストロングスケーリングの結果を示す．モデル 1 では 100MPI 並列数でスケールしなくなるが，モデル 2 では 500 と 2,000MPI 並列数までスケールする．応答に関して，ドーム頂部の節点変位を利用した．モデル 1 は 0.00115 m，モデル 2 は 0.00118 m であった。モデル 2 の変位が大きいが、MPC 面の領域が狭まったことが原因である．

表 1 解析モデルの諸元

| | 要素数 | 節点数 |
|---|---|---|
| モデル 1 | 56,520 | 80,029 |
| モデル 2 | 416,992 | 503,980 |
| モデル 3 | 3,195,264 | 3,528,850 |

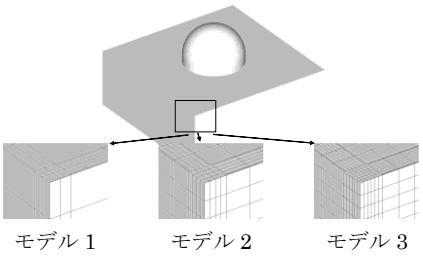


図 1 重要構造物の解析モデル

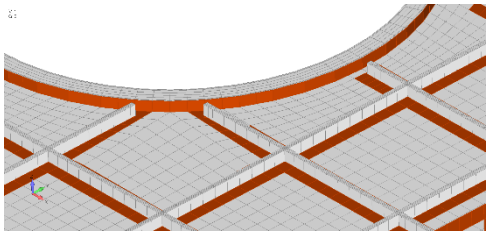

図 2 上層階に設定された MPC

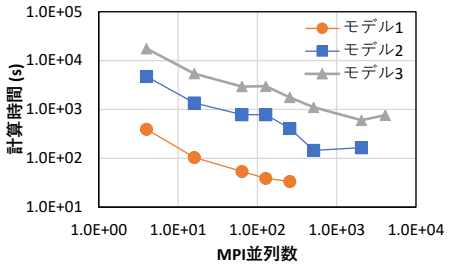


図 3 静的自重解析のストロングスケール

今後，モデル 3 の MPC の構築，ひずみ応力成分の影響，構造物全体の分布の確認等を検討していく予定である．

## 3．重要構造物（2）

本節では，公開資料を基に作成した柏崎刈羽原子力発電所 7 号機の解析モデルを用いて，解析モデル構築方法を検討した．部材間を節点共有で接続したモデルと MPC を用いて面接触させた 2 つの解析モデルを構築し，要素寸法を変えた．鉄骨部は，簡略化のためモデルに加えていない．コンクリート部の物性値は公開資料を利用する．解析モデルの概要を表 2 と図 4 に示す．なお，表中で網掛けされたモデルは，要素品質向上のために，要素分割の補助線設定等の手作業を加えている．

表 2　検討された解析モデルの節点・要素数

| 接続方法 | 要素タイプ | メッシュサイズ(mm) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 1000 | 500 | 350 | 250 |
| 節点共有 | 4 面体 1 次 | 51 万 | 223 万 | 551 万 | 1,298 万 |
| 節点共有 | 4 面体 2 次 | 345 万 | 1,564 万 | — | — |
| MPC | 6 面体 1 次 | 51 万 | 244 万 | 621 万 | — |

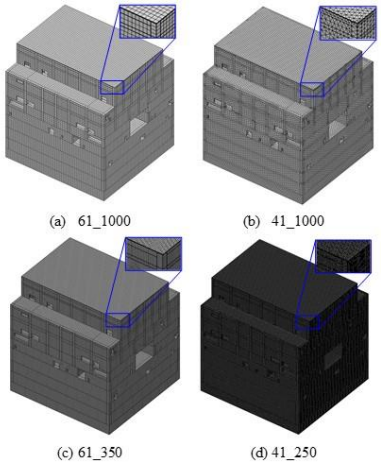


図 4　検討された解析モデルの俯瞰図（61_1000 はメッシュサイズ 1000 mm の 6 面体 1 次要素）

建屋底面に EL CENTRO 波を入力し，計算時間と，各フロアの隅角部の加速度応答スペクトルを用いて，解析モデルの有効性を検討した．特に，加速度応答スペクトルに関して，要素寸法に対する収束性を判定した．並列数は 128 並列（MPI のみ）である．

今回の検討で得られた知見を以下に記す．

- 柱最小寸法の 2 分割以上の要素寸法の解析モデルの応答は，要素タイプによらず概ね同等の応答となる．
- 4 面体 2 次要素を用いた場合でも，柱最小寸法の要素寸法では不十分である．
- MPC の面接触は，MPC の処理のため，節点共有より計算時間を要する．この傾向は，解析モデルの自由度が小さいほど顕著となる．
- 解析モデルの構築と計算の時間からは，61_500 が適している（表 3 参照）．柱最小寸法の 2 分割以上の要素寸法が必要な点，41_500 は計算時間は短いものの，分割補助線を設定する等の手作業に要する時間がかかる．

表 2　検討された解析モデルの計算時間 (h)

| 接続方法 | 要素タイプ | 要素寸法 (mm) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 1000 | 500 | 350 | 250 |
| 節点共有 | 4 面体 1 次 | 0.09 | 0.37 | 0.95 | 2.25 |
| 節点共有 | 4 面体 2 次 | 0.41 | 2.52 | — | — |
| MPC | 6 面体 1 次 | 0.19 | 0.68 | 1.25 | — |

## 4. 断層変位

大規模内陸地震で発生する地表断層変位は，近傍の構造物に大きな影響を与える可能性があるため，重要構造物に対して，その安全性評価の必要性が指摘されている．浅部に発生する副断層は地表付近の岩盤の破壊に起因する．そのため，フリングステップを含む地震動による岩盤の応力を評価することで，岩盤の強度との関係から，発生位置を推定することができると考えられる．本年度は，2014 年長野県北部の地震を対象にした解析結果を示す．

副断層が観測された 2014 年長野県北部の地震を対象として運動学的な地震動解析を実施した．解析対象領域は，震源断層全域を含む領域とした．地層構造は，J-SHIS 深部地盤データ及び全国 1 次地下構造モデル(暫定版)に基づき，7 層の地層を考慮した．対象周波数を 2.5 Hz として，四面体 2 次要素によりモデル化し，総自由度数は 228,465,240 である．岩盤は線形弾性体とし，物性値は各地層に定義された動的特性を用いて設定した(図 5 参照)．解析モデルの側面及び底面には粘性境界を設定し，解析は 0.01 秒刻みで 20 秒まで実施した．

岩盤応力に基づき副断層発生領域を推定する．岩盤の破壊の指標として，破壊に対する余裕度を表す局所安全係数（LSF）を用いた．図 6 に，地表断層変位が観測された領域（10 km×10 km）での，地表面の LSF のコンター図を示す．LSF が小さい帯が 2 本確認できる．−x 側の帯は LSF が 1 を切る領域が y 方向に連続しており，主断層の観測結果と一致する．また，主断層と平行な+x 側の帯は副断層の観測結果と一致する．さらに，主断層から 1 km 程度離れた領域では，1 は切らないものの，LSF が相対的に小さい領域があり，これも副断層に対応している．

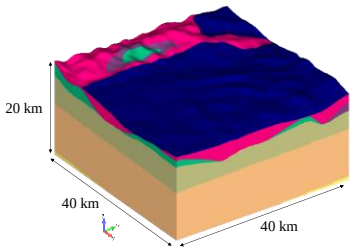


図 5　解析モデル

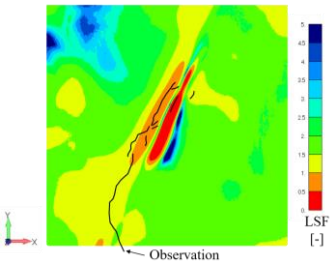


図 6　最大せん断応力コンター図（地表面）