

地中構造物・地盤連成系非線形地震応答解析の高速化に関する研究

大成建設（株） 正会員 ○堀田 渉 正会員 宍倉 佳浩 正会員 鈴木 俊一

1. はじめに

原子力発電所などの重要インフラ施設は、将来の災害に対する被害予測や災害後の早期の復旧が必要であり、構造物単体の被害評価ができるだけではなく、自然災害下で、その構造物固有の機能が維持できるか否かの評価が重要となる。このような重要インフラ施設の機能維持を評価するためには、それらの構造物を対象にした構造全体から部材単位に解像度を向上させて、速やかに詳細な被害を予測する必要がある。

本稿では、速やかな被害予測の実現を目的に、地中構造物と地盤の連成を考慮したソリッドモデルによる地震応答解析の高速化を検討する。まず、数値計算の安定性の観点から、適切な鉄筋コンクリート（RC）の FEM モデル化方法を提案する。次に、並列有限要素法プログラムを用いて、RC 非線形を考慮した地震応答解析の応答結果および計算速度について分析する。ここで、コンクリートの非線形性については、山下ら¹⁾、本山ら²⁾の構成則を使用した。本構成則は、Maekawa ら³⁾から、大規模計算に適した再構築・再定式化が行われている。

2. RC の FEM モデル化方法

RC 地中構造物のソリッドモデルでは、鉄筋のモデル化が必要となるが、このモデル化方法としては、離散鉄筋モデルまたは埋込鉄筋モデル⁴⁾が考えられる。離散鉄筋モデルの節点は、コンクリートのソリッド要素を構成する節点と共有する必要があり、要素のアスペクト比がかぶりコンクリートによって制限され、過度に要素が細くなる可能性がある。一方、ソリッド要素と節点を共有しない埋込鉄筋モデルは、そのような制約はなく、要素分割を適切に設定可能となる（図 1）。

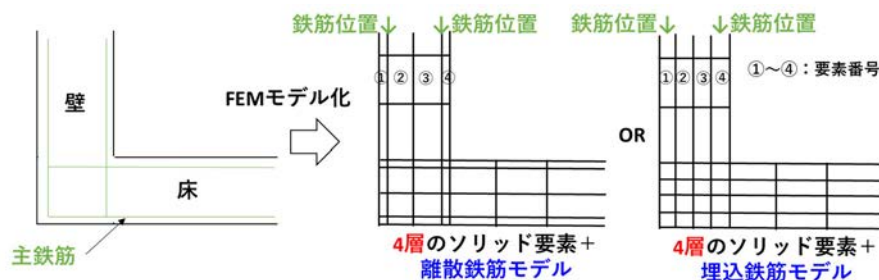


図 1 RC の FEM モデル化方法

図 2 に示す解析モデルを用いて交番载荷を実施し、相関変形角 1/100 程度となった時点の応答比較を行った。コンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2 、鉄筋の降伏強度は 345N/mm^2 とした。鉄筋は平面応力要素でモデル化した。

図 3 に解析結果を示す。要素レベルの歪応答はわずかに異なっているが、変位荷重の全体挙動の差異は小さい結果となった。最大主歪分布が異なる理由として、積分点位置の違いによるものと考えられる。離散鉄筋モデルでは、壁の表面の積分点はより引っ張られ、それに伴いひずみが増幅する。一方、埋込鉄筋モデルは、壁の表面～内部で積分点のひずみは平均化される。全体挙動は両モデルに大きな違いは生じないが、埋込鉄筋モデルの計算時間は離散鉄筋モデルの 3/4 となった。

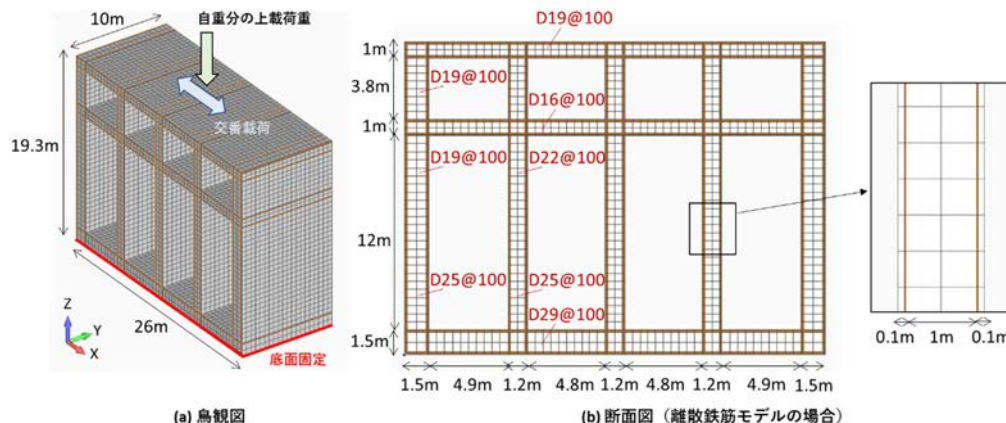


図 2 4 連のカルバートモデル

考える。

キーワード 並列有限要素法, 非線形解析, 鉄筋コンクリート構造物, 地盤-構造物連成

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株)原子力本部 TEL 03-5381-5196

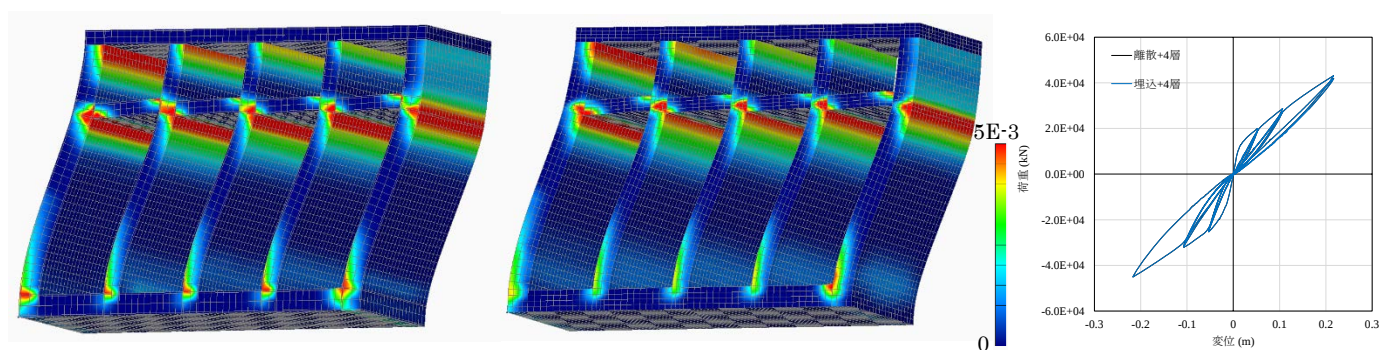


図3 解析結果（左：離散鉄筋モデルの最大主歪分布，中：埋込鉄筋モデルの最大主歪分布，右：変位荷重関係）

3. 地中構造物-地盤連成系の地震応答解析

解析モデルを図4に示す。本モデルは、「原子力発電所屋外重要構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例」に記載のある地中構造物-地盤連成モデルを参考に構築した。入力物性値も本資料を参考に設定した。鉄筋は埋込鉄筋モデルを採用し、節点位置に依存せず鉄筋を任意の位置に設定可能となったことにより、地中構造物の壁厚方向のメッシュ分割は4要素で等間隔とした。境界条件は、底面、側面ともに粘性境界を設定した。入力地震動は阪神・淡路大震災の神戸海洋気象台の地震記録のうち主要動20秒（最大818gal）をモデル底面よりY方向に入力した。総ステップ数は10,000step（積分間隔0.002秒/step）である。

相關変形角最大時刻における取水ピットの最大主歪分布を図5に示す。断面によって応答結果は異なっていた。特に、妻壁にひずみは集中し、その影響により、手前の壁の応答が低減しており、2次元解析では再現できない3次元の拘束効果が確認できた。

本解析は、並列有限要素法プログラムを用いて実施している。図6に示すようなスケーラビリティが確認でき、128並列の場合、51分で解析が実施できた。

4. まとめ

本稿では、地中構造物-地盤連成モデルによる非線形地震応答解析を実施し、使用した並列FEMプラットフォームにおいて、高速かつロバストな計算が実現できたことを確認した。構造物-地盤連成系の数値解析においては、地盤や接触面の非線形性も考慮する必要がある、今後の課題である。

参考文献

- 山下拓三，堀宗朗，小國健二，岡澤重信，牧剛史，高橋良和：大規模有限要素法解析のためのコンクリートの非線形構成則の再定式化，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.67，No.1，pp.145-154，2011。
- 本山紘希，堀宗朗，秋葉博，田中聖三：コンクリート構成則を用いた大規模有限要素解析のスケーラビリティの観点からの実用性検証，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.73，No.2，pp.211-221，2017。
- Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A.: *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Taylor & Francis, 2003.
- 黒田一郎，太田俊昭，日野伸一，石橋宏典：埋め込み鉄筋モデルを用いた鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，pp.1229-1234，1995。

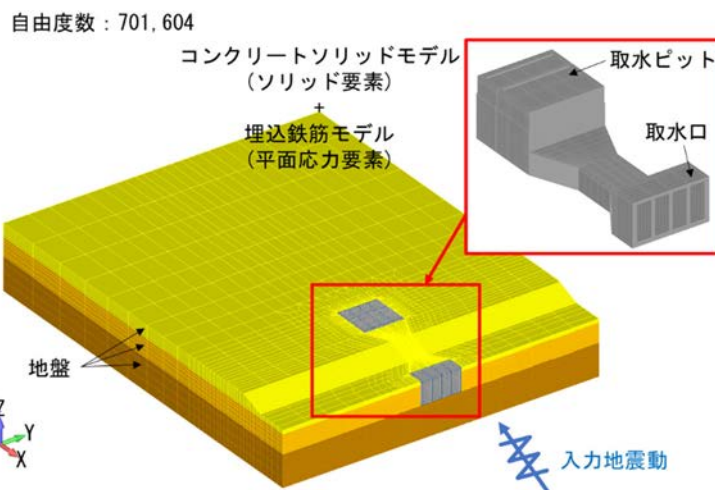


図4 地中構造物-地盤連成モデル

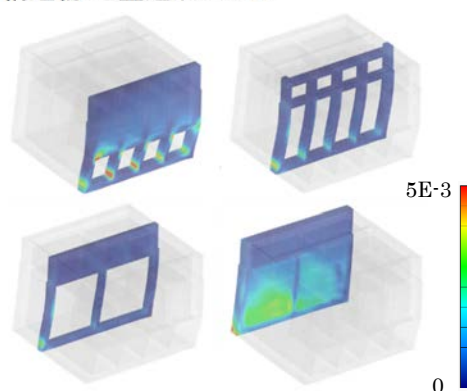


図5 取水ピットの最大主歪分布（相關変形角最大時刻）

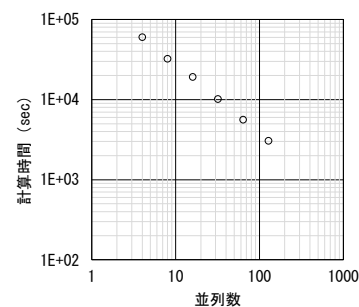


図6 並列コア数と計算時間