# 詳細モデルを用いた原子力発電所建屋の地震応答解析の安定化および高速化の基礎検討

香川大学　正会員　○本山　紘希
東京大学　正会員　堀　宗朗
電力中央研究所　正会員　澤田　昌孝

## １．はじめに

原子力発電所の建屋の地震応答解析では，一般に質点系のモデルが使用されることが多い．一方で，昨今の巨大地震による被害に鑑みると，ソリッド要素の詳細モデルを用いた解析手法を適用することで，より大きな地震荷重に対する適用性や精度を確保することも重要である．計算機の性能の向上により，解析規模としては十分に現実性が出てきたと考えられる．ここでは，著者らのグループが，オープンソースの並列有限要素法のソフトウェア（FrontISTR，東大生産研）をベースに開発している，鉄筋コンクリート構造物のための地震応答解析ソフトウェアについて，特に解析の安定化と高速化のための開発について示す．また，ソフトウェアを原子力発電所の建屋を模したモデルに適用し，その有効性を示す．

## ２．ソフトウェアの開発

ソフトウェアの開発において，鉄筋コンクリート構造物を対象とすることから，コンクリート構成則および非線形解析手法の実装を実施した．前川らの提案するコンクリート構成則[1)]を使用している．実装においては，山下らが示した計算コストの小さい定式化[2)]を用いた．

本構成則は複雑な構成式となっており，実装の当初は，解析の安定化に課題があった．ベースとしたソフトウェアでは，ある時間ステップにおける力の釣合いのための繰返し計算において，変位を推定するごとに，剛性や状態変数および増分計算のためのひずみ・応力の基準となる値を更新している．つまり，各時間ステップ内で，剛性・状態変数および増分の方向が細かく変化する可能性のある実装である．特に増分の方向が細かく変化すると，載荷と除荷の状態が細かく変動し，解の収束が安定して確保できないことが分かった．ある時間ステップにおいては，常に応力とひずみの基準の値を前ステップの収束値として固定し，剛性・状態変数も基準の値に対して算定する手法を実装した．繰返し計算により発生する増分も，基準点からの変化として計算することで，載荷・除荷の状態が細かく変動しないものとした．この非線形解析手法の実装により，解析の安定化が一定程度に達成された．

さらに，安定化と高速化のため，ニュートン法による非線形解析から修正ニュートン法による非線形解析に移行した．安定化は，並列計算の有限要素法の高速ソルバに関わる問題である．一般に，並列計算の有限要素法のソルバにはCG法のソルバが使用される．CG法のソルバは剛性行列に正定値性を要求するため，コンクリート材料のように負の剛性が現れる材料を扱う場合には，安定して解を得られない．時間刻みを細かくすることで改善が見られるが，安定化に限界があるとともに，解析ステップ数増加による解析時間の増加が問題となることが分かった．そこで，常に剛性行列が正定値となる修正ニュートン法へ移行した．CG法の計算が安定化するとともに，時間刻みを大きく設定できることで，トータルの計算時間を低減できることが分かった．さらに，重要なポイントとして，剛性行列が塑性化の影響を受けにくいことから，剛性行列の条件数が解析途中で悪化せず，解析の最後までCG法の一回の計算にかかる時間が変化しにくいことが分かった[3)]．修正ニュートン法への移行により，解析の安定化と高速化が達成された．

上記の開発の検証は，小型のコンクリート構造物で実施してきた[3)]が，以下の章において，原子力発電所の建屋を模した簡易なモデルに適用し，計算のパフォーマンスや解析の有効性について確認する．

## ３．対象の解析モデル

図１に解析モデルの概要を示す．建屋の構造を簡略化したものとなっている．鉄筋コンクリートの壁および

キーワード　地震応答解析，大規模鉄筋コンクリート構造物，高性能計算
連絡先　〒760-8521　香川県高松市幸町 1-1　香川大学四国危機管理機構　ＴＥＬ087-832-1749


© Japan Society of Civil Engineers

スラブで構成される構造となっている．鉄筋コンクリートの壁およびスラブは，形状をコンクリート材料を適用したソリッド要素でモデル化し，これと重ねて鉄筋群を鉄筋の重心位置にシェル要素でモデル化した．解析の規模を表 1 に示す．約 15 万自由度程度の解析規模となっている．モデルの底面に地震動を境界条件として設定した．地震動は継続時間が 22.08 秒のものを使用し，時間刻みを 0.01 秒として設定した．約 2,000 ステップの解析である．時間刻みについては，ここでは安定性を見るため，比較的大きな設定としている．

## ４．解析のパフォーマンスおよび解析結果の例

解析は 2 コアを使用した小規模な並列計算により約 3 時間の実行時間であった．より規模の大きなモデルで検証の必要はあるものの，現状においては，十分な解析速度と考えられる．また，0.01 秒の時間刻みで，解析が安定して最後まで実行できることを確認した．なお，著者らは，本ソフトウェアに以降する前に別ソフトウェアによりニュートン法による解析を実施している．この時，解析の安定化を得るためには時間刻みを最も大きくて 0.0005 秒とする必要があった．修正ニュートン法に移行することで解析が大幅に安定化されていることが分かる．解析ステップ数も 1/20 であり，結果として解析時間も短縮されている．

図 2 に解析結果の例として異なる 2 つ時刻のせん断ひずみ分布を示す．下部の箱型の構造の長手方向が Y 軸，上下方向が Z 軸であり，結果はせん断ひずみの YZ 成分を示した．図の円筒形の構造（外周コンクリート部）の手前側の鉄筋コンクリート壁のせん断変形に着目したものである．図から分かるように下部の箱型の構造との接続部において比較的大きなひずみが発生する結果となった．コンクリート材料の非線形性を表現しながら安定して解析が実行できたことが分かる．得られる結果も解像度が高いものであり，入力地震動に合わせて，ひずみの発生箇所・応力の集中箇所が議論できるものとなった．耐震性の詳細な評価には重要であると考えられる．

## ５．まとめ

原子力発電所建屋のような大規模な鉄筋コンクリート構造物の地震応答解析について，安定化・高速化の面から開発について説明した．また開発したソフトウェアにより，簡易ではあるが 15 万自由度程度の建屋を模した解析モデルの地震応答解析を実施した．解析の安定化および高速化について確認された．今後もさらなる安定化・高速化を実施するとともに，詳細なモデルへの適用や建屋の地震応答解析の品質保証の問題に取り組む．本研究の一部は，資源エネルギー庁による平成３０年度原子力の安全性向上に資する共通基盤整備のための技術開発事業（原子力発電所のリスク評価，研究に係る基盤整備）として実施したものである．ここに記して謝意を表する．

表 1　解析規模

| 節点数 | 要素数 | 自由度数 |
|---|---|---|
| 41,419 | 36,608 | 164,535 |

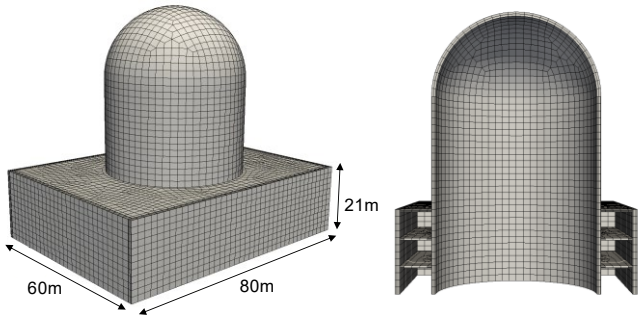


図 1　解析モデルの概要

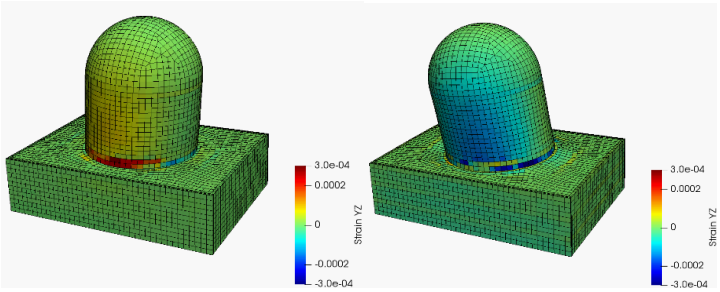


図 2 解析結果の例（せん断ひずみ分布）

## 参考文献

1) Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A.: Nonlinear Mechanics of Reinforce Concrete, Taylor & Francis, 2003. 2)山下，堀，小国，岡澤，牧，高橋：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，2011. 3) 本山，園部，堀田，鈴木，堀：大規模鉄筋コンクリート構造物の詳細モデルを用いた地震応答解析手法の開発とその妥当性確認に関する基礎検討，2018.

© Japan Society of Civil Engineers