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

本山紘希¹⁾, 園部秀明²⁾, 堀田渉³⁾, 鈴木俊一⁴⁾, 堀宗朗⁵⁾

1) 非会員 香川大学 四国危機管理教育・研究・地域連携推進機構, 教員 博士 (工学)

e-mail : motoyama@cc.kagawa-u.ac.jp

2) 非会員 大成建設株式会社 原子力本部 修士 (工学)

e-mail : snbhda00@pub.taisei.co.jp

3) 非会員 大成建設株式会社 原子力本部 博士 (工学)

e-mail : ht-wtr00@pub.taisei.co.jp

4) 非会員 大成建設株式会社 原子力本部 博士 (工学)

e-mail : shun1@cc.taisei.co.jp

5) 正会員 東京大学 地震研究所, 教授 博士 (工学)

e-mail : hori@eri.u-tokyo.ac.jp

要 約

原子力発電所の建屋のような大規模鉄筋コンクリート構造物に適用可能な詳細モデルによる地震応答解析手法の開発について示す. 具体的な開発項目として, 高性能計算の有限要素法のソルバの活用を考慮したコンクリート構成則および非線形解析手法の実装を示す. 高性能計算の有限要素法ではソルバにCG法を使用するため, 剛性マトリクスが正定値性を失わない実装が特に重要である. 開発した手法を鉄筋コンクリート構造物の載荷実験の再現解析に適用することで, 手法のパフォーマンスを示す. また, モデル化手法の妥当性の確認に関する基礎検討として, 鉄筋コンクリート構造物の応答解析における解の収束性を確認し, 結果について考察を行う. 上記手法により原子力発電所の建屋を簡易に模した解析モデルの地震応答解析を実施し, 解析速度の観点で手法の適用性を示す.

キーワード: 大規模鉄筋コンクリート構造物, 高性能計算, 妥当性の確認, 収束性

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の地震応答解析を行う場合, 質点系の簡易なモデルを用いることが一般的である¹⁾²⁾³⁾など. 質点系モデルの使用は, 実験により適用性が十分に確認された構造物においては, 解析コストを抑えつつ十分な精度で解析が可能であり, 極めて合理的である. また, 非線形解析では, 部材や部材群に非線形の荷重-変位関係を考慮するが, 部材の実験結果を適用する際にも便利である.

一方で部材をベースとした質点系モデルを用いる場合には, 検証を行った実験の適用範囲に注意が必要である. 昨今は, 相次ぐ巨大地震を経験し, 設計地震荷重以上の地震荷重に対する挙動の把握が重要視されている. このような場合には, 検討する地震荷重が検証実験の適用範囲内であるか吟味する必要がある. 適用性の確認が十分に行えない時には, 質点系モデルではなく, 荷重による適用性で使い分け

なくて良いソリッド要素によるモデルを用いる必要がある。原子力発電所の建屋は、高い安全性を確保するため、設計荷重に対して比較的小さな変形に留めるよう設計されている³⁾。被災時の影響の大きさを考えると、事前に設計以上の変形レベルを想定した検討の意義は大きく、検討の際にはソリッド要素を使用した詳細な解析モデルの使用も選択肢となる。

しかしながら、原子力発電所の建屋のような大規模鉄筋コンクリート構造物にソリッド要素を適用すると自由度が大きくなり、既存の耐震設計で使用されてきた有限要素法のプログラムでは、解析に時間がかかりすぎるため実務での利用は困難である。将来的に上述のような検討を実施するためには、まず、大規模鉄筋コンクリート構造物の詳細なモデルを利用した地震応答解析手法の開発が必要である。ポイントとなるのは、高性能計算の利用と合理的なモデル化である。

高性能計算の重要な要件の1つが高速ソルバであるが、このソルバには通常CG法⁴⁾をベースとしたソルバが使われる。一方、CG法は剛性マトリクスに正定値性を要求するため、コンクリート材料のようにひずみの増加に合わせて応力が開放される負の剛性が現れる問題で解が得られることが保証されていない。このため、CG法をベースとしたソルバを有する高性能計算の有限要素法を利用してコンクリート構造物を解析するには、コンクリート構成則の実装、非線形解析手法の選択および実装に注意を要する。当然、いくつかの組合せが考えられるが、解析時間を考慮して、トータルの計算時間を可能な限り短くする手法を検討する必要がある。

高性能計算を使用する場合にも、モデル化において適切な自由度の縮約を検討するのが合理的である。適切な自由度の縮約とは、梁要素、シェル要素、ばね等の構造要素の利用である。この時、精度を十分に確保することが構造要素の利用の条件であり、モデル化における妥当性の確認が重要である。

上記に鑑み、まずは、コンクリート構成則の実装と非線形解析手法の組合せの最適化の検討を行う。本検討は、著者らがこれまで開発してきた手法⁵⁾の高速化として実施する（これまで開発してきた手法は本論文では従来手法と呼称して示した）。小型の鉄筋コンクリート構造物の解析時間を調べ、パフォーマンスについて基礎的な検討を行う。また、モデル化手法の開発として、鉄筋コンクリート壁のモデル化において、構造要素を使った自由度の縮約手法を示し、妥当性の確認の基礎検討を行う。解の収束性やモデルの適用性に着目して議論する。最後に、一連の検討により得られた手法を用いて、原子力発電所の建屋をデフォルメした解析モデルの地震応答解析を実施し、手法の適用性について検討する。

2. 開発の問題点の整理

高性能計算でコンクリート構造物を計算する場合の開発上の問題を整理する。まず、ここで使用するコンクリート構成則の概要を示し、解析の安定や解析時間の観点で問題となる点を示す。

本研究では、前川らの提案するコンクリート構成則⁶⁾を使用している。本構成則は、ひび割れの発生する前の応力-ひずみ関係を弾塑性破壊モデルで表現し、ひび割れ後は、ひび割れの向きに応じた応力-ひずみ関係を与える。ひび割れ発生前の応力-ひずみ関係およびひび割れ発生後のひび割れに垂直な方向の引張応力-引張ひずみ関係について、概要図を図1に示す。

上述の構成則を高性能計算で扱い、解析時間を可能な限り短縮することを考える際に、2点の問題がある。1つ目は、詳細な構成則であるため、構成則に関する計算量が多いことと、2つ目は前章でも触れたように、ひずみの増加とともに応力が開放される負の剛性（図1）が発生するため、剛性マトリクスの正定値性の確保に工夫が必要になる点である。

高性能計算では、要素の計算は並列化によるスケーラビリティを確保しやすい計算であるが、全積分点で計算されることを考えると、構成則に関わる計算コストが小さいことは重要である。本研究で使用するコンクリート構成則では弾塑性テンソルの計算に逆テンソルの計算が必要であることが問題である。これについては、山下らの研究⁷⁾で再構築されたコンクリート構成則が示されており、本研究ではこれを採用した。詳細は文献によるが、簡単に示すと、前川らのオリジナルの構成則で示される下式(1)を等価な式(2)の形で書き換えるテンソル $\mathbf{L}$ を導出したものである。

$$\mathbf{c}^{EP} = (\mathbf{c} + \nabla \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon}^E)(\mathbf{I} + \mathbf{L})^{-1} \quad (1)$$

$$\mathbf{c}^{EP} = (\mathbf{c} + \nabla \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon}^E)(\mathbf{I} - \mathbf{L}) \quad (2)$$

図1 コンクリート構成則⁶⁾に示された応力-ひずみ関係の概要

ここで、 $\mathbf{c}^{EP}$ は弾塑性テンソル、 $\mathbf{c}$ は弾性テンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}^E$ は弾性ひずみテンソル、 $\mathbf{I}$ は単位テンソルであり、 $\mathbf{l}$ は弾性ひずみ増分テンソルと塑性ひずみ増分テンソルを関係づける本コンクリート構成則に特徴的なテンソルである。 $\mathbf{L}$ はひずみ増分テンソルと塑性ひずみ増分テンソルを関係づけるテンソルとして導出される。式(2)では逆テンソルの計算が不要であり、計算コストが小さい。下記では、剛性マトリクスの計算に弾塑性テンソルを計算しない非線形解析手法が検討されるが、式(1)に示されるテンソル $\mathbf{l}$ を使用する定式化では、塑性ひずみの計算に式中の逆テンソルの計算が必要であり、非線形解析手法に関わらず式(2)の定式化の方が計算コストは小さい。なお、これを踏まえた構成則全体の実装は、著者らの既往の研究による⁵⁾。

コンクリート構成則のもう1つの問題である剛性マトリクスの正定値性の確保は難しい問題として残っている。著者らは、まず、上記で示した弾塑性テンソルを直接用いて、剛性マトリクスを計算する手法を検討した⁵⁾。この時、ひずみの大きな領域では、剛性マトリクス単体では正定値性を確保できない。しかし、対象が地震応答解析であることから、行列形式の方程式 $\hat{\mathbf{R}}\mathbf{x} = \mathbf{f}$ の剛性に相当する行列 $\hat{\mathbf{R}}$ は動的な影響を含むものである。つまり、 $\hat{\mathbf{R}} \approx 1/dt^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}$ (dt は時間ステップの間隔、 $\hat{\mathbf{R}}$ の表現は数値積分法や減衰の考慮で異なる)である。 dt を小さく設定することで、動的な影響を含む剛性マトリクス $\hat{\mathbf{R}}$ の条件数が改善され、CG法の適用性が向上する。上述の検討では、 dt を十分小さく設定することで解析を安定化させる手法を選択し、開発を行った。構成則の実装において、安定化と非線形の繰返し計算のコストの削減のため、1時間ステップの間で剛性を変化させない(線形化する)対応を施すことで一定の成果が得られた。

本手法には dt の設定が解析対象や解析条件に依存する問題がある。実際に規模の大きな問題に適用した際に dt を小さく設定する必要があると、解析ステップ数が多くなることで、実用的な計算時間で解析が終えられない場合があることが確認された。解析の安定性が dt に依存しない手法を検討する必要がある。著者らはここで非線形解析手法に着目した。詳細は後述するが、変位増分の推定の際の計算に弾性テンソルから計算した剛性マトリクスを使用する手法を検討する。本手法では、 dt を大きく設定しても行列形式の方程式の求解は安定することが期待される。この方法では、変位増分の推定に誤差が大きくなるため、非線形の繰返し計算の回数は増加する。従来手法と解析のパフォーマンスの比較を行い、高性能計算でコンクリート構造物を扱う時に適した非線形解析手法を選択する必要がある。

さて、非線形解析手法に関する検討を行い、十分に高速な解析手法が実装できたとしても、解析モデルの自由度の縮約は検討すべき課題である。鉄筋コンクリートのモデル化において、鉄筋までソリッド要素で要素分割するのは非合理である。一方、鉄筋コンクリートを一つの材料として要素分割する手法では、モデルの解像度を向上させるような検討が実施しにくい。鉄筋または鉄筋群を構造要素でモデル化することによる自由度の縮約が考えられる。著者らは、ソリッド要素に構造要素を併用してモデル化する解析モデルをハイブリッド解析モデルと呼称して開発を進めている。

数値解析の品質保証にはモデル化の妥当性の確認が必要になる。本研究では、基礎的な項目として解の収束性の検討から着手する。これは、鉄筋コンクリート壁の載荷の解析では、壁をどれくらいの要素数でモデル化すれば十分な精度が得られるか、という検討である。また、コンクリートのように負の剛性が現れる構造解析では、要素サイズを小さくするとひずみが局所化する問題が発生することが知られ

ている⁸⁾⁹⁾。最も単純な解決として、要素サイズの下限に関する検討が必要である。つまり、要素サイズの適用範囲の中での収束性を調べるのが、コンクリート構造物の解析モデルの妥当性の確認の最初の課題である。

次章で本研究に使用する解析モデルについて説明し、続く2つの章で、本章で整理した非線形解析手法の問題の検討および解析モデルの妥当性の確認の基礎検討について示す。

3. 検討に使用する解析モデル

本研究では、羽場崎ら¹⁰⁾が実施した鉄筋コンクリート構造物の交番载荷試験をモデル化し、解析を実施する。本実験は、鉄筋コンクリート壁4組により構成されるボックス型の構造の载荷試験を行ったものである。各壁の厚さは75 mmで、2組の向かい合う壁の軸線の間隔は1500 mmである。壁筋はSD345相当品のD6が使用され鉄筋比は1.2%に設定されている。壁の高さを変更した実験が行われているが、この内、1000 mmのものを対象とした。また、载荷角度に関する検討がなされているが、主にせん断を受ける壁に対する加力方向の角度が0度となるケースを対象とした。物性は、文献に公開されている値を元に設定した。

本実験に対し、構築した解析モデルの概要を図2(a)に示す。コンクリート材料のモデル化に六面体一次要素を使用した。壁の上部に200 mmの厚さの载荷スラブが設定されている。载荷スラブは剛体としてモデル化した。境界条件として、底面は完全固定とし、载荷はスラブの中心に変位拘束条件を設定した。図2(b)に壁の断面を示す。鉄筋群をシェル要素によりモデル化することで自由度の縮約を試みたモデルとなっている。

現状の解析モデルにより、最大耐力点を目安に解析を実施し、実験と比較を行った。図3に結果の例を示す。実験結果には、文献からトレースしたものを使用した。材料パラメータのうち、結果に感度の大きい引張耐力のみ、損傷発生時の変形から同定したものを設定した。

図2 検討に使用する解析モデル

図3 解析結果と実験の比較

荷重－変位関係の骨格曲線はある程度表現できていることから、コンクリート構造物の損傷の発展も適切に計算できていると考えられ、鉄筋群のシェル要素によるモデル化も含めた本モデルによる解析がある程度の精度を有するという意味で、妥当なモデルとなっていると考えられる。特に本研究の検討項目である、コンクリート構造物に適切な非線形解析の検討および要素サイズによる収束性や適用範囲の検討には使用できると判断できる。以下の章では、本解析モデルにより検討を行う。

4. コンクリート構造物に適した非線形解析手法の検討

4.1 検討する解析手法

従来の手法と比較して検討を行う解析手法について説明する。ここでは、便宜的に改良手法と呼称する。

改良手法では、2章で説明した従来手法とは異なり、剛性マトリクスを弾性テンソルから計算する手法を取る。これにより、弾塑性テンソルに現れる負の剛性を考慮せずに剛性マトリクスを計算できるので、剛性マトリクスは常に正定値性を確保できる。図1に示すようにコンクリート構成則では、弾性剛性がひずみの関数として定義される破壊パラメータにより変化することに注意して実装する必要がある。その上で解析の安定化を考え、各時間ステップ内では剛性を変化させない実装とした。弾性剛性が変化することを除けば修正ニュートン法と等価な手法である。検討する解析手法のイメージを図4に示す。

図4 検討する解析手法

4.2 パフォーマンスの検討

前節に示した2つの解析の解析時間や解析ステップ数などを比較することで、計算のパフォーマンスの基礎検討を行う。ソルバはCG法を使用し、SSOR前処理を適用する。解析は、図3に示した解析のうち変位角にして0.002 rad相当までの単調荷重を実施する。前述のように従来手法は、時間ステップ間隔 dt を考慮して解析することから、解析は動的とし、解析時間を10秒とし、0.002 radまで一定速度で境界条件を設定した。また、従来手法は dt に依存して解析の安定・不安定が変わることから、 $dt = 0.1, 0.01, 0.001$ の3パターンで解析を実施する。また、各時間ステップ内では剛性を一定とし（線形化し）、応力の増分を計算する。これにより非線形の繰返し計算は生じない。改良手法は、 $dt=0.01$ のみ実施する。

ところで、コンクリート構成則を扱う場合に非線形計算の残差力がなかなか収束しない場合が多い。ここでは、収束計算の繰返し回数の上限を5回として設定し、残差力が収束しない場合は、次ステップに残差力を持越すアルゴリズムを実装した。本手法は、一般的に用いられる手法であるが、本来は解析手法の検証や妥当性の確認が必要な項目である。ここでは、これらの詳細な検討は今後の課題としてパフォーマンスの検討を実施した。

図5に計算した4ケース（従来手法の $dt = 0.1, 0.01, 0.001$ および改良手法の $dt = 0.01$ ）について解析結果を示す。本解析では、従来手法が $dt = 0.001$ でも十分に安定化せず、CG法の計算が途中で発散する結果となった。 dt が細くなるにつれ解析可能な変位量が増えるのは想定した挙動である。改良手法は設定した荷重において最後まで解析が実施できている。改良手法では解析が安定する。なお、従来手法で dt をさらに細かく設定する検討は、改良手法とのパフォーマンスの比較を考えても意味がないので実施しない。

図5 パフォーマンスの検討に用いた解析の結果（荷重－変位関係）

表1 解析パフォーマンスの比較

	従来手法 ($dt=0.1$)	従来手法 ($dt=0.01$)	従来手法 ($dt=0.001$)	改良手法 ($dt=0.01$)
非線形解析の ステップ数	100回 (25回)	1000回 (304回)	10000回 (3278回)	3485回
1ステップあたりの ソルバの実行時間	0.328秒	0.332秒	0.300秒	0.322秒
1ステップあたりの CG法の繰返し回数	898.5回	894.5回	786.4回	800.9回

次に解析のパフォーマンスを示すため、解析ステップ数と解析時間を比較する。解析ステップ数は、非線形の繰返し計算の回数であり、ソルバが呼び出された回数に等しい。解析時間は1ステップあたりのソルバの実行時間を整理する。1ステップあたりのCG法の繰返し回数も整理する。結果を表1に示す。なお、従来手法は解析が途中でストップしているため、本来想定されたステップ数を示した。括弧書きで示したステップ数は、解析が止まったステップ数を示している。

従来手法は解析が終了していないため、 $dt=0.001$ で本来想定された解析ステップ数を元に改良手法と比較を行う。改良手法は解析ステップ数がおおよそ3分の1程度まで低減していることが分かる。1ステップあたりのソルバの実行時間は、従来手法の $dt=0.001$ で動的な項の影響により条件数が改善される影響と考えられるが、改良手法の方が10%程度計算時間は延びている。CG法の繰返し回数からも概ねこの傾向が把握される。1ステップの計算時間の増加を考慮しても改良手法のパフォーマンスが良い。従来手法で計算を収束させるには dt をより小さく設定する必要があることから、本解析モデルに対してはパフォーマンスの差はここで整理した以上であると推測される。

さらに、従来手法の $dt=0.001$ のケースと改良手法で、载荷ステップの経過によるCG法の繰返し回数の変化を比較する。結果を図6に示した。横軸は変位を取り、従来手法で計算できた0.4 mmの载荷までを示した。縦軸にその変位でのCG法の繰返し回数を示した。図から分かるように、従来手法では、条件数が悪化することから変形が大きくなるに従って、CG法の繰返し数が増加する。一方、弾性剛性を使用する改良手法では、条件数の変化が小さいことからCG法の繰返し数の変動は少ない。変形が大きくなるにつれて従来手法ではCG法の繰返し数が増加していくことが想定されるため、上記で整理したソルバの実行時間も解析領域全体で考えれば、改良手法の方が短縮される可能性が高い。CG法の繰返し数の変動が少ないため、解析時間の推定を行う場合にも改良手法が有利であると考えられる。

以上より、改良手法の解析のパフォーマンスは従来手法より高いことが示された。また、解析の安定性も向上することが示された。

図6 荷重変位ごとのCG法の繰返し回数の比較

図7 収束性を検討するための解析モデル（要素サイズ最大および最小）

5. 解析モデルの妥当性の確認の基礎検討

上述の鉄筋群をシェル要素でモデル化した解析モデル（ハイブリッド解析モデル）の妥当性の確認の基礎検討として、要素数による解の収束および要素サイズの適用性を検討する。

検討のために、要素サイズを変化させたモデルを4つ作成した。要素サイズの代表的な大きさはそれぞれ大きい方から、375mm, 250mm, 150mm, 75mmである。壁の幅方向の要素数は、4, 6, 10, 20、高さ方向の要素数は、3, 4, 8, 16である。最大のものと最小のものを図7に示す。各解析モデルについて、図3に結果を示した解析と同条件（交番荷重）で解析を実施する。

結果は、解析の各変形角における荷重荷重を整理する。結果は図8に示す。変形角ごとに一本の直線で、要素サイズに対応する荷重荷重の結果が整理されている。横軸が、各解析ケースの代表的な要素サイズである。値が小さくなるほど詳細なモデルであり、一般に、解は収束する傾向にある。縦軸が、荷重荷重である。変形角の小さなグラフ、つまり下部に位置するプロットを見て分かるように、要素サイズに比例して荷重が小さくなっている様子が分かる。一次要素を使用する場合の解の収束の一般的な傾向が捉えられている。

さて、変形角が0.002 rad程度までは荷重は一般的な収束の傾向を示している。この範囲で解の収束性を判断すると、要素サイズが75mm（高さ方向に要素数が16に相当）の最も詳細な計算に対して、要素サイズが250mm（高さ方向の要素数が4に相当）のモデルまでは、誤差が10%前後である。詳細には、変形角0.0005 radおよび0.001 radのケースで5～7%、0.002 radのケースで約11%である。逆に言えば、非線形性の小さい領域での議論となるが、高さ方向に4要素程度あれば、荷重の誤差を10%程度として、壁の変形を計算できる。この要素数は、壁のモデル化において基準として良いと考えられる。なお、文献6)で示される妥当性の確認では、より少ない要素数で妥当性が示されている。

変形角が0.004 radを超えると、要素サイズが小さい時に荷重が一様でない変化をする。特に変形角0.006 radを超える2ケースでは顕著である。上述したように、ひずみが局所化することで、全体の塑性化が大

きく評価されているものと考えられる。各変形角のプロットを総合的に比較すると、250 mm～150 mmの要素サイズへの変更で荷重の変化の様相が大きく変化することが分かる。ひずみの局所化が各変形角において、どの要素サイズから発生するかを詳細に検討するには、荷重の変化の様相が大きく変わるまでの250 mm以上の要素サイズを詳細に見る必要があるが、要素サイズ375 mmと250 mmのケースでは高さ方向に1要素の違いであり、これ以上の詳細な検討は難しい。これらを踏まえて、本検討の範囲では、少なくとも250 mmを下回る要素サイズでは、ひずみの局所化の影響が顕在化する可能性を考慮すべきと整理する。

本章では、収束性の検討をすることで、要素数や要素サイズの妥当性について議論した。上記2つの要素数および要素サイズに関する考察を整理すると、ここで使用した構成則で壁のせん断変形を主とする解析を行う際は、壁の変形を10%程度の誤差で表現するには高さ方向に4要素を取る必要があるが、要素を細かくしていく際には要素サイズが250 mmを下回る時にひずみの局所化があることに注意すべきであることが分かる。

図8 荷重レベル（変形角）ごとの解の収束性

6. 簡易な建屋モデルによる手法の適用性の検討

規模の大きな問題に対する基礎的な適用性について示す。図9に使用する解析モデルの概要を示す。建屋の構造を簡略化したものであり、著者らが文献5)で使用したモデルである。鉄筋コンクリートの壁およびスラブから構成される構造となっている。上述と同様のハイブリッド解析モデルによりモデル化している。壁の厚さ方向にソリッド要素で4分割し、鉄筋群は重心位置にシェル要素でモデル化した。表2に解析規模を整理した。約16万自由度程度の解析モデルである。入力地震動には加藤らの文献に示されたスペクトルの適合波を使用した¹¹⁾。物性、入力地震動の詳細は文献5)によるものとし、本論文では省略する。

本解析では、主に円筒形の構造（建屋の外周コンクリート（OS）に相当する構造）に変形が発生する。前章までの検討のように箱型ではないが、外周の4分の1の長さが16要素の分割となっている。高さ方向も同じ解像度での分割である。前章で主に議論したモデルが高さ方向に4要素の分割であることを考えると、壁の変形は十分に表現できる要素数となっていると考えられる。また、要素サイズは1m～2mの間であり、上記で検討した要素サイズの下限250 mmよりも十分に大きく、ひずみの局所化の影響も限定的であると考えられる。詳細な検討は必要であるが、対象構造の応答を十分な精度で表現できるモデルと考えられる。検討に用いた計算機のCPUは、Intel Xeon Gold 6140（18コア、2.3GHz）である。

図9 簡易な建屋モデルの概要

表2 建屋モデルの解析規模

節点数	要素数	自由度数
41,419	36,608	164,535

図10 解析結果の例（せん断ひずみ分布）

図10に解析結果の例として壁に発生するせん断ひずみ分布を示した。モデル下部の箱型の構造の長手方向がY軸方向であり、上下方向がZ軸方向となっており、結果はせん断ひずみのYZ成分を示している。つまり、OS部の図の手前側の壁のせん断変形に着目した図となっている。構造の接合部で比較的大きなひずみが発生しており、塑性化が確認された。解析結果の詳細はモデルと同様、本論文では省略する。

解析で使用した上述の適合波は、22.08秒の継続時間の地震動である。時間刻みを0.01秒として2,208ステップの解析を実施した。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。まず、特筆すべきは、比較的大きな時間刻みに対して、安定して解が得られたことである。文献5)の検討では、本論文の従来手法で検討を実施したものである。使用のソフトウェアが異なること、ソルバも異なること（CG法より悪条件に対して安定しやすいと考えられるGPBiCG法を用いた）などから直接の比較とはならないが、当該検討では、解を得るために時間刻みを0.0005秒以下にする必要があった。本研究の手法では時間ステップ数が20分の1となっている。結果として得られる3時間の実行時間は実用的である。

本章では、簡易な建屋のモデルを用いて本論文に示した手法の適用性を示した。鉄筋コンクリート壁のモデルは、ソリッド要素をベースとしつつ、鉄筋群をシェル要素でモデル化するハイブリッド解析モデルを使用した。十分な精度が得られると考えられる要素分割でモデル化した。そのモデルに対して、開発した計算手法で地震応答解析を実施することにより、実用的な解析時間で計算が可能であることを示した。特に本研究で着目した時間刻みを大きくして安定する手法の貢献が大きい。実構造物を対象とする場合、構造は複雑化し、地盤も合わせて考える必要があるが、開発しているソフトウェアのソルバは、並列計算に使用するコア数に対してある程度スケラビリティが得られるものとなっており、安定して解が得られる本論文の手法は十分適用可能であると考えられる。

7. まとめ

本研究では、大規模鉄筋コンクリートの地震応答解析の手法の開発として、非線形解析の検討と、自由度を縮約できるハイブリッド解析モデルでの妥当性の確認の基礎検討について示した。非線形解析の検討では、常に剛性マトリクスの正定値性を確保可能な手法を用いることで、従来開発していた手法より解析時間を大幅に短縮できることを示した。また、ハイブリッド解析モデルについては、解の収束性が確認できたことから、妥当性の確認の前提条件はクリアできた。合わせて、コンクリート構成則で懸念されるひずみの局所化について検討を行い、詳細な妥当性の確認を行う上での要素サイズの適用性を示した。検討した手法により原子力発電所の建屋を簡易に模したモデルに対して地震応答解析を実施した。十分に詳細なモデルに対して、約2,000ステップの計算を約3時間で実施可能であることが確認できた。原子力発電所の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対して、適用可能であることが示唆される結果である。

今後は、実際の構造物に適用することで、パフォーマンスの観点から、さらなる解析手法・解析条件の最適化を行う。また、実験解析における詳細な材料パラメータの設定などを踏まえて、解析モデルの妥当性の確認を進めていく。

謝 辞

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。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説，2004.
- 2) 日本建築学会：原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2013.
- 3) 濱田政則，曾田五也，久野通也：原子力耐震工学，鹿島出版会，2014.
- 4) Hestenes, M. R. and Stiefel, E.: Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear System, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 49, No.6, 1952.
- 5) 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ク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. I_211-I_221, 2017.
- 6) Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A.: Nonlinear Mechanics of Reinforce Concrete, Taylor & Francis, 2003.
- 7) 山下拓三，堀宗朗，小国健二，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.
- 8) Bazant, Z.: Recent advances in failure localization and nonlocal models, *Micromechanics of Failure of Quasi-Ductile Materials*, Elsevier Applied Science, pp. 12-32, 1990.
- 9) 村上澄男：連続体損傷力学 損傷・破壊解析の連続体力学的方法，森北出版，2008.
- 10) 羽場崎淳，北田義夫，鳥田晴彦，西川孝夫：斜め方向入力を受ける RC ボックス型耐震壁の復元力特性，日本建築学会構造系論文集，No. 541, pp. 129-136, 2001.
- 11) 加藤研一，宮腰勝義，武村雅之，井上大榮，上田圭一，壇一男：震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベルー地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討ー，日本地震工学会論文集，第4 巻，第4 号，2004.

(受理：2019年4月3日)
(掲載決定：2019年7月24日)

Basic Study on Development and Validation of Seismic Response Analysis Using High-Fidelity Model for Large-Scale Reinforced Concrete Structures

MOTOYAMA Hiroki ¹⁾, SONOBE Hideaki ²⁾, HOTTA Wataru ³⁾,
SUZUKI Shunichi ⁴⁾ and HORI Muneo ⁵⁾

1) Assistant Professor, Kagawa University

2) Taisei Corporation

3) Manager, Taisei Corporation

4) Manager, Taisei Corporation

5) Professor, University of Tokyo

ABSTRACT

A seismic response analysis method using high-fidelity model for large-scale reinforced concrete structures is being developed. In this research, implementation of a constitutive relation of concrete and an appropriate model contraction method for reinforced concrete structures are described. Especially, implementation of the constitutive relation of concrete which is suitable for conjugate gradient method is important. We show the performance of the developed method using analysis of loading tests of a reinforced concrete structure. We also show the convergence check of analysis of reinforced concrete structures as basic validation of the developed method. We finally apply above method to a seismic response analysis of a simple nuclear power plant building model and discuss applicability of the method.

Keywords: Large-scale reinforced concrete structure, High performance computing, Validation, Convergence