

高性能計算を使った鉄筋コンクリート構造物の応答解析における 非線形解析手法の最適化による高速化の基礎検討

香川大学 正会員 ○本山 紘希
 東京大学 正会員 堀 宗朗
 大成建設 正会員 園部 秀明

1. はじめに

原子力発電所のような大規模鉄筋コンクリート（RC）構造物の地震応答解析においてソリッド要素による詳細なモデルを使用する場合、高性能計算の利用が必須である。著者らのこれまでの検討により、高性能計算の有限要素法へのコンクリート構成則¹⁾の実装は達成された²⁾。一方で、高速化や安定化については、引き続き、検討が必要な状況である。ここで着目する非線形解析手法の最適化による高速化では、コンクリート材料の強い非線形性を対象としつつ、解析時間間隔を可能な限り大きく設定可能な手法を開発することがポイントと考えている。コンクリート構成則の弾塑性テンソルを使用して全体剛性マトリクスを作成する場合、時間間隔を大きく設定すると、負の剛性が現れた時に、高性能計算の一般的なソルバであるCG法で解が得られない可能性があることが問題である。この問題点を踏まえて、本研究では、解析の高速化のためのコンクリート構造物の高性能計算での非線形解析手法の最適化について基礎的な検討を実施する。

2. 検討内容

非線形解析について2点に着目している。1点目がニュートン法の繰返し計算において全体剛性行列の算定手法、2点目が応力の更新方法である。全体剛性行列の算定手法は、コンクリート構成則では、弾塑性テンソルを用いて算定するか、弾性テンソルを用いて算定するかを検討する必要がある。弾塑性テンソルを用いる場合、耐力を超えると負の剛性が現れる。この時、CG法を用いたソルバでニュートン法の各ステップの変位増分を算定するには、動的解析において時間間隔を細かく設定する等の運用上の対応が必要である。一方で、弾性テンソルを使用する場合は、繰返し計算の回数が増加する。応力の更新方法は、陽的な手法によるか陰的な手法によるかを検討する必要がある。陽的な手法では時間間隔を細かく設定する必要がある。

2ケースの非線形解析手法について比較する。1ケース目は、既往の研究において実装していた全体剛性行列を弾塑性テンソルで算定し、応力の更新には陽的な手法を使用する方法（以下、陽的手法）である。上記の通り、時間間隔を細かく設定することが運用上求められる。2ケース目は、全体剛性行列を弾性テンソルで算定し、応力の更新に陰的な手法を使用する方法（以下、陰的手法）である。弾性テンソルを使用して作成した全体剛性行列は正定値性を有するため、時間間隔を細かくするなどの工夫は不要であり、応力の更新を陰的な手法とすることで、時間間隔を比較的粗く設定できると考えられる。また、ニュートン法の収束性が悪くなることが懸念されるため、ニュートン法の繰返し回数に上限を設定し、残差力を持ち越せるような工夫を行った。この2ケースについて、計算の繰返し回数や実行時間により、適切な非線形解析の方法について考察する。解析モデルには、図1に示したRCボックス型の耐震壁載荷実験³⁾を模したものを使用する。底面は固定条件とし、載荷は剛体として設定した天端スラブの中央への載荷として単純化している。載荷は単調載荷とし、目標の変位を2mmとした。載荷時間は10秒とし、陽的手法では時間間隔 Δt を0.001秒、陰的手法では Δt を0.01秒とした。CG法の前処理にはSSOR前処理を使用した。陰的手法において、ニュートン法の繰返しの上限を5回とした。本検討には、FrontISTR⁴⁾をベースに大規模RC構造物の地震応答解析のための機能を実装したE-FrontISTRを使用している。

キーワード 高性能計算, 非線形解析, 鉄筋コンクリート構造物, 高速化

連絡先 〒760-8521 香川県高松市幸町1-1 四国危機管理教育・研究・地域連携推進機構 TEL087-832-1749

3. 数値解析の結果と考察

まず、検討の2ケースについて、図2に得られた荷重—変位関係を示す。陽的手法では、 $dt=0.001$ では解が得られなかった。また、現状解が得られている範囲でも解が大きく振動して安定した解となっていないことが分かる。これ以上細かく設定すると陰的なケースに対して時間ステップだけで100倍のステップの増加になるため、ここでは検討しない。陰的手法では、最後まで解析が実施でき、時間ステップが1000ステップの解析で、ニュートン法の繰返し計算は3385回であった。1ステップに平均3~4回程度の繰返し計算となっている。仮に陽的手法 $dt=0.001$ で計算が可能だったとしても、陰的手法の解析回数はその3分の1程度である。

陽的において解析が安定に実施できた2130ステップ分、陰的手法では213ステップ分の解析（変位0.4mm相当）について詳細に比較する。CG法のソルバの繰返し計算の回数の変化を横軸を載荷変位としたグラフで示す（図3）。平均値は陽的手法が835.0回、陰的手法が805.1回であった。陽的手法では徐々に条件数が悪化していると推察される。陰的手法では、弾性テンソルを用いて全体剛性行列を計算するため、条件数が悪化しにくいことも分かる。トータルのニュートン法の計算回数は陽的手法が2130回、陰的が300回である。ソルバの前処理および実行の時間の合計は陽的手法が1022秒、陰的手法が134秒である。最終的な時間は、陽的手法に比べて陰的手法はおおよそ8分の1となった。

以上より、陰的手法を用いることで、陽的手法に比べて格段に解析間隔を大きく設定できる可能性があり、結果として、ニュートン法の繰返し計算のトータルの回数を少なく抑えることが可能であることが分かる。また、全体剛性行列の条件数の悪化の影響が小さいことから、CG法の繰返し計算の回数も増加しにくく、解析全体にわたってほぼ一定と考えることができる。結果、陰的手法と呼称した非線形解析手法では、解析時間が大幅に短縮される。上記では陽的手法は、解を得るためにはさらに時間ステップを細かくすることが必要であると考えられ、陰的手法の方が容易に安定して解が得られることも重要である。高性能計算でコンクリート材料を扱う応答解析を実施する際には、陰的手法をベースに非線形解析の最適化を行うのが良いと考えられる。

4. まとめ

高性能計算で大規模RC構造物の詳細モデルによる応答解析を実施する際の非線形解析の最適化について基礎的な検討を実施した。各ニュートン法の計算で弾性テンソルにより全体剛性行列を計算し、陰的な手法で応力を算定することで、解析時間を短縮できることが分かった。今後は、本手法を大規模RC構造物の地震応答解析に適用する。

本研究の一部は、2017年度資源エネルギー庁公募研究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) Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A.: Nonlinear Mechanics of Reinforce Concrete, Taylor & Francis, 2003. 2) 本山, 堀, 秋葉, 田中: 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ラビリティの観点からの実用性検証, 土木学会論文集 A2, Vol.73, No.2, 2017. 3) 羽場崎, 北田, 鳥田, 西川: 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, 2001. 4) FrontISTR 研究会 HP.

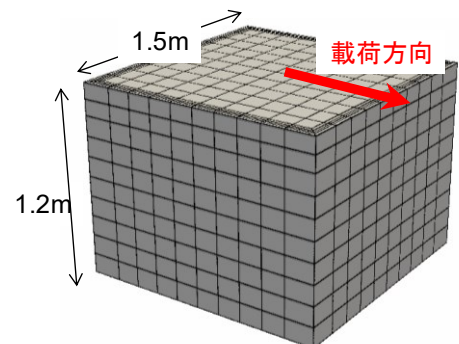


図1 解析モデル

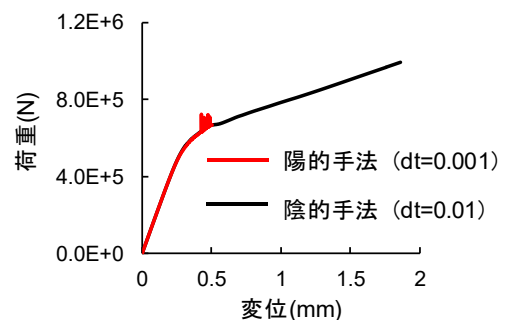


図2 荷重—変位関係

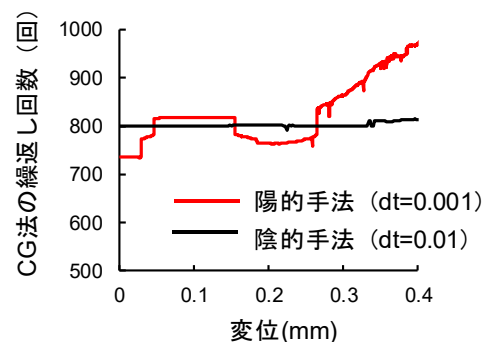


図3 CG法の繰返し数の変化