

審査の結果の要旨

氏名 大塚 悠一

本論文の題目は「FUNDAMENTAL STUDIES ON UTILIZATION OF HPC-FEM IN PRACTICAL SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF GROUND (地盤工学分野の耐震設計業務における HPC-FEM の実用化に向けた基礎的研究)」である。地震工学分野の耐震設計業務において、有限要素法 (Finite Element Method, FEM) による構造物-地盤系の地震応答解析は主要な要素であり、生産性や解析の精度の向上が常に求められている。一方で近年計算科学の分野において、高性能計算 (High Performance Computing, HPC) を利用した非線形有限要素法、いわゆる HPC-FEM の研究が行なわれており、大規模な三次元解析モデルの自動構築や解析が可能になりつつある。そこで本研究では、耐震設計業務における HPC-FEM の実用化に向けて、有限要素法を構成する主な要素である、一次連立方程式を解く「ソルバ」、解析結果を吟味する「ポストプロセス」、そして地盤の構成則について、基礎的課題を検討し、改善を行なった。

ソルバでは、耐震設計業務で用いられている既往の FEM プログラムに対し、HPC-FEM のソルバである共役勾配法 (Conjugate Gradient 法, CG 法) の実装と計算の高速化を行なった。Adaptive CG 法と部分コレスキー分解を組み合わせた前処理を用いることで、共役勾配法の収束性が悪い構造物-地盤系の問題を高速に解けるようになり、数百万自由度の解析モデルを一日程度で解けることが説明された。また、CG 法とソルバが解く連立方程式の組み立てにおいて、4 倍精度の演算を導入して、演算精度を上げることで、並列数の違いによる解の変化の問題を解消された。

ポストプロセスでは、HPC-FEM で扱うソリッド要素の膨大な変位や応力の出力を耐震設計で用いる構造要素の変形や断面力に縮約する手法を開発した。本手法は、近年提案されたメタモデリング理論を利用し、ソリッド要素の解を適切に構造要素の解へ縮約を行なっている。また、モデルの形状に沿った曲面座標系のシェル要素を用いて、手法の精度を向上させた。開発した手法を用いて、円筒を対象に数値解析を行い、手法の有効性が説明された。

最後に地盤の構成則では、地盤の構成則であるマルチスプリングモデルを取り上げ、二次元の構成則と三次元の構成則の理論の整理を行い、二次元と三次元の差を明確化した。マルチスプリングモデルは、任意の方向に配置された一次元の非線形せん断ばねの集合であるが、二次元のモデルは、面外方向のせん断ばねの力や剛性を考慮できず、体積弾性係数に対応する剛性が三次元に比べて小さいことが説明された。また、非線形せん断ばねが弾性に近い挙動において、二次元と三次元の解析が同等になるようなパラメ

タ設定手法が提案された。

審査の主な論点は、1)開発されたソルバの適用範囲について、2)開発されたソルバの解の品質保証について、3)ポストプロセスの縮約手法の有効性について、という三点である。開発されたソルバの手法の特徴の説明がなされ、数値実験を通して、剛な構造物を含んだ構造-地盤系に数値解析においても安定した性能を示されたことで、耐震設計業務で扱う対象物に対しては十分な高速化がなされていることが回答された。ソルバの品質保証については、オリジナルのプログラムとの比較による検証を行なっていること、必要であれば4倍精度の演算を導入して演算精度の向上を行なっていることが回答された。最後に、ポストプロセスの縮約手法では、シェル要素を用いることで、構造物の曲面に沿った断面力を適切に評価できることが回答され、演算に必要な積分点数についても補足説明がなされた。

本論文は、地盤の耐震設計業務において、高性能計算を利用する非線形有限要素法の実用化を検討した基礎的研究である。既往の解析理論・手法を実装し実務利用可能な高速ソルバを開発した点、高性能計算の膨大な出力を適切に縮約し設計に利用できる処理を開発した点、地盤構成則の基本的な課題を指摘し改善点を明示した点は、十分高く評価できる。この基礎研究を基に顕在化した課題も整理されており、高性能有限要素法の実用も期待できるものとなっている。以上の理由をもって、本論文を合格と判定した。また、学位申請者が学位に値する専門的な学識を有していることも了解された。この結果、学位にふさわしい論文であると判断された。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。