

論文題目

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)

氏名

大塚悠一

地震工学分野の耐震設計業務において、有限要素法 (Fine 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。したがって、解析対象物の幾何形状を忠実に再現できる三次元解析が望ましい。しかしながら、耐震設計業務における地震応答解析では、解析時間の長さや解析結果の吟味の困難さから三次元解析は稀であり、依然として二次元解析に留まっている。

一方で研究分野においては、並列計算機を前提とした大規模数値計算、HPC (High Performance Computing)を利用した FEM が開発されており、数千万自由度の大規模な三次元解析モデルの解析も実行可能になりつつある。この HPC-FEM を耐震設計業務において実用化することは必要不可欠である。

以上の背景から、本研究では、地震工学分野で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を行なった。FEM を構成する主要要素として、解析モデルを構築する「プリプロセス」、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」の三つが挙げられる。また、解析の前提となる土の構成則も主要な要素である。本研究では、これらのうち、ソルバ、ポストプロセス、そして土の構成則について、HPC-FEM の実用化にむけた課題を検討し、改善を行なった。

まず、ソルバの課題として、耐震設計業務で用いられている既往の FEM プログラムへの HPC-FEM のソルバである共役勾配法 (conjugate gradient method, CG 法)の実装と高速化が挙げられる。業務において実績がある既往の FEM プログラムに HPC-FEM のソルバを実装し、計算の高速化を行う。本研究では、代表的な有効応力解析ソフトである FLIP3D を対象に適切な HPC-FEM の技術を取り入れ、ソルバの高速化を行なった。導入したソルバを用いて、業務で扱ういくつかの構造物-地盤系の解析モデルを対象に数値実験を行なった結果、FLIP3D の従来のソルバであった直接法と比べて、500 倍程度速くなり、数百万自由度の解析モデルを一日程度で解けることを示し、三次元解析が業務を実施できる見通しを立てた。また、本研究の手法では、クラウドコンピューティングで調達しやすい共有メモリ型の並列計算機を用いた。企業は、クラウドコンピューティングを通して必要な計算機を調達し、業務に必要な多数ケースの数値解析を行うことができる。また数値実験による検証の過程で、計算の並列数が変わると構造物と地盤の境界上で解が変化する現象を確認した。検証の結

果、液状化によって剛性が低下した地盤と構造物の間で生じた大きな剛性差が数値誤差を生み、今回の解の変化に繋がったと分かった。この問題に対して、ソルバである CG 法とソルバが解く連立方程式の組み立てにおいて 4 倍精度を導入し、演算精度を上げることで解の変化を無くすことに成功した。

次にプリプロセスの課題として、大規模三次元解析モデルから生み出される大量の解析結果の吟味の困難さが挙げられる。HPC-FEM では、数千万自由度のソリッド要素モデルを扱い、モデルの解は各節点の変位や応力であるが、耐震設計業務では、梁やシェルで代表される構造要素モデルを扱い、解の吟味は部材の平均的な変形や断面力に基づいて行なう。したがって、HPC-FEM を耐震設計業務で扱うには、ソリッドモデルの節点の変位や応力を構造要素モデルの変形や断面力に変換する必要がある。従来の耐震設計業務では、この変換作業を手作業で行なっていた。本研究では、構造要素モデルの解がソリッド要素モデルの解の数理的な近似解であることを証明するメタモデリング理論に基づいて、ソリッドモデルの解である変位や応力を、構造要素である梁やシェルの解である変形や断面力に自動的に変換する手法を開発した。開発した手法を用いて、片持ち梁、板部材、円筒などを対象に数値実験を行い、提案する手法の有効性を検討した。検証の結果、構造部材の端部や荷重端における応力の乱れも追従でき、それ以外の箇所では理論値と整合した値を算出し、手法の有効性が確認された。

最後に土の構成則の課題として、二次元の構成則と三次元の構成則の違いの明確化が挙げられる。現在の耐震設計業務は二次元解析が主流である。HPC-FEM を用いた三次元解析を行なう上で、現在の二次元解析の比較を行なう必要がある。この観点において、二次元と三次元の土の構成則の違いを明確化することは必要である。本研究では、業務において土の構成則として代表的であるマルチスプリングモデルを取り上げた。マルチスプリングモデルは一次元の非線形せん断ばねを任意の方向に配置して、各ばねの力とせん断剛性の集積を偏差応力、剛性マトリックスとして計算する。二次元のマルチスプリングモデルと三次元のマルチスプリングモデルは、同じ平面ひずみ状態の問題であっても解に差があることは既往の研究で分かっていたが、その原因に関する理論的な分析はされていなかった。本研究ではその差を理論的に分析し、原因は二次元のマルチスプリングモデルは面外方向のせん断ばねの力や剛性を考慮できない点にあり、体積方向の剛性が三次元に比べて小さいことを示した。また、この分析に基づいて、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手法を提案した。