

## 審査の結果の要旨

氏名 大西 直毅

過去の地震被害では、類似の構造物であっても立地条件によって大きく地震被害の様相は異なることが知られている。したがって、構造物の耐震安全性や耐震機能性を合理的に確保する設計を行う上で、さまざまな地盤上に立地する構造物の極大地震時の損傷推定技術の開発は極めて重要な耐震工学の課題となっている。本論文は、この課題を根本的に解決するために、3次元非線形地盤を含む構造物の動的応答解析手法に取り組んだものである。具体的には、計算の大規模化に対応する一つの方法として並列計算を取り上げ、その具体的な既往の適用手法について検討し、これに基づいて実際の解析コードを開発し、その適用性・有用性について論じたものであり、以下の5章から構成される。

第1章「序論」においては、3次元非線形地盤を含む構造物の動的応答解析が必要とされる背景として、構造物と地盤の相互作用の解明が必要とされており、入力との相互作用と慣性の相互作用の他、地盤の非線形性や地盤と構造物の境界での滑動、浮き上がりなどの非線形性、および非線形相互作用を材料特性に基づいたその正確な理解が必要であることを述べている。そのためには3次元有限要素法の適用が必要であるが、この場合、計算規模が地盤の自由度数の増加とともに飛躍的に増大するため、処理時間の短縮を図るためには、計算速度の向上が必須であり、それに対処するため本論文ではその一つの方法として並列計算を取り上げ、弾塑性地盤を含む構造物の動的応答解析を行うために必要な手法についてまとめることを目的とするものとしている。

第2章「並列計算」においては、既往の研究と本論文において採用する数値解析手法の選択の背景と理由について述べている。並列計算における分散メモリ型並列計算のための計算機間の通信方法に関するメッセージパッシングインターフェイス (MPI) について述べ、さらにそれを扱いやすくしたハイパフォーマンスフォートラン (HPF) と比較し、本論文で後者を採用した理由について述べている。また有限要素解析に並列計算を適用することが可能な数値解析手法について述べ、領域分割法は、並列計算における各計算機の負荷を均等にし、計算機間の通信をなるべく減らすことができるために並列化に向いていること、大規模連立方程式の数値解法には、係数行列の格納に圧縮行格納方式 (CRS) を用いた共役勾配法が計算量削減に特に有効であることを述べている。

第3章「3次元地盤モデル」においては、本論文で採用する3次元非線形地盤の動的応答解析に必要な手法として、1) 運動方程式の定式化、2) 3次元粘性境界、3) 地盤の完全弾塑性モデルについて述べ、それらと領域分割法を組み合わせて解くための解析コードの開発について述べている。そして、作成したコードを使って、領域分割数と並列プロセス数が計算時間に与える影響について検討している。また高速化のための最適な計算機台数を、領域の分割数や通信のオーバーヘッドとの関係で論じている。また、領域分割の粗さがほぼ同じ場合での計算時間を比較すると、要素数が増えるに従い通信のオーバーヘッドと収束回数の増加などにより計算時間が大幅に伸びるとしている。最後に、CPU数が8コアの場合の並列計算の計算時間の一例として、自由度数153015、増分ステップ数1000、領域分割法の不釣合力の許容誤差を10の-8乗、正弦波加速度を入力とした、仮想的な3次元弾塑性地盤の解析を行い、計算に約12時間を要したとしている。

第4章「構造物と地盤の動的相互作用解析」においては、第3章で作成した3次元非線形地盤モデルに上部構造物を加え、それらの動的相互作用解析モデルを作成する方法について述べている。まず、地盤の一部を剛体とし基礎と見立てるために、領域分割法において地盤の一部を剛体として処理する手法について述べ、さらに全体を上部構造物と剛体を含む地盤とに分けて行う動的応答計算におけるサブストラクチャ法について述べている。最後に、解析例として、上部建物と地盤を弾性とした自由振動解析結果を示して、解析手法の妥当性を検討している。解析時間は地盤の自由度数に比例することを確認し、自由振動解析の変位応答波形から対数減衰率による減衰定数を求め、建物の弾性一次固有周期を0.4秒、地盤の弾性一次固有周期を0.53秒としたとき、地盤の逸散による減衰定数は約2.2%となったとしている。

第5章「結論」においては、本論文で得られた成果と論文全体の結論を次のように述べている。すなわち、3次元有限要素法でモデル化した大規模な地盤の解析では、領域分割法による解析領域の分割とHPFによる並列化が有効な方法であり、さらに係数行列にCRSを用いて必要メモリと計算量の削減を行うことも効果的である。また、本研究で作成した並列プログラムは領域分割法における領域境界上節点での適合条件を満足するように収束する部分があるために、領域分割法を用いないプログラムに比べて余計な計算が必要であるものの、計算規模が大きくなったときに領域分割による高速化と並列計算による高速化により領域分割法を用いないプログラムよりも高速化することが可能である。

このように、本研究は、非線形3次元有限要素法を用いた構造物と地盤の連成する大規模な問題の地震応答解析法を確立するための基礎的な研究である。非線形3次元有限要素法

は、地盤の複雑な構造や非線形性を材料と寸法のみに基づいて合理的に推定できるというメリットがあるが、一般に計算量が膨大になり現在のスカラ計算機では、処理速度とメモリの性能が不足している。そこで、1990年代後半に情報処理の分野で開発された分散メモリ型の並列計算を建築構造物の耐震設計における未解決な問題の解決に結びつけようとしたものである。具体的なコードを自ら作成することにより、これまでの研究ではあまり扱われていない非線形解法への適用性も実証している。また、問題サイズとノード数の関係、計算のボトルネックの発生などの問題を丹念に調べ、今後の実用的な数値解析における具体的な応用の方向性を示せたことは、大きな成果である。これらの開発と、計算時間や精度に及ぼす具体的な検討は、さまざまな地盤上に立地する構造物の極大地震時の地震応答解析手法の実用化、ひいては合理的な耐震設計法の確立に欠かせないものであり、耐震工学の進歩に大きく貢献している。

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。