

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 TIMSINA KISHOR

ネパールは、インド・オーストラリアプレートとユーラシアプレートの 2 つの巨大なプレートの境界に位置するために、高い地震リスクを有している。一方で、世界人口の 6 割以上が使用し、同国の典型的な建物でもある組積造構造物はノンエンジニアド構造物である。2015 年 4 月 25 日のゴルカ地震では、9 千人を超える死者と GDP の約 1/3 の経済損失を受けた。

本研究では、上のような状況を踏まえ、同国の脆弱な既存建物の耐震補強を推進するためのツールの開発を目指す。具体的には、3 次元応用要素法 (3D-AEM) を用いて比較的容易に高精度の解析が可能となる効率的なモデル更新手法を開発するが、開発するモデル更新型 3D-AEM は、構造物の破壊挙動をリーズナブルな計算時間で精度高く解析できるものである。

提案するモデル更新手法は、大きく次の 4 つに分けられる。①ネパールで典型的な建物タイプに適合するモデル更新のための最少二乗問題の開発、②新しいモデル更新法の 3D-AEM モデルへの統合、③3D-AEM ツールの計算効率の向上法の提案、④実構造物の観測データを用いた既存建物の耐震脆弱性の評価。本研究では、以上の内容を以下で説明する 7 章の論文としてまとめた。

第 1 章は導入章である。研究の背景と現状の課題の説明と関連する先行研究の文献レビューを行うとともに、研究の目的、大正範囲、論文の全体構成を説明している。

第 2 章はネパール国内で最も一般的な低中層建物に適したモデル更新のための最小二乗問題の開発について解説している。この方法は実験から観測されたモード特性と解析的なモード特性との相対残差ベクトルから定式化される。解析から得られるモード特性は、数値モデルの材料特性 (ヤング率/剛性) であるモデル更新用の更新パラメータの初期推定を用いて計算する。具体的には、最小化問題の目的関数として定式化された最小二乗問題を使用して、Levenberg-Marquardt アルゴリズムを使用して、更新パラメータの最適値を取得する。せん断フレームモデルを対象に、まず、モデル更新のための少数の測定自由度 (DOF) とモード数の異なる各種のシナリオを使用して、構造システムの剛性更新

の精度を評価した。この評価結果から、構造解析で高次モードの取得が困難になるとともに、減衰が増加してモデルの更新精度が低下することが確認された。しかし、測定された少数の自由度(DOF)とモードを使用した構造モデルの更新は可能である。ただし、周波数パラメータに関しては比較的正確な値の取得は可能だが、モード形状パラメータの精度は高くはない。この改善策としては、モデル更新プロセスにおいて、固有値を含む残差に高い重みを与えることが考えられる。

第3章では、模型実験に対するモデル更新手法を紹介している。この目的は、実験室での簡易建物模型を用いて、健全な場合と階のボルトを緩めた場合の振動測定から得られたモードデータを使用して、階の剛性を特定し、対象模型の損傷を検出することである。分析結果からは、階の剛性の変化、損傷の程度が評価できることが明らかになった。すなわち、提案手法で、構造物が受けた損傷を定量化することが可能となった。

第4章では、数値解析ツール 3D-AEM の理論的な説明と先行研究の実験結果を用いた静的および動的解析の検証と、感度ベースのモデル更新の 3D-AEM 統合の方法論について説明している。前者では 3D-AEM で実際の既存の構造をモデル化するが、そのためには 3D-AEM で使用されている現在のソルバーとストレージシステムを改善する必要があった。各種のソルバーとストレージシステムを比較した結果、CPU のマルチ スレッドを使用するトリプレットストレージフォーマットの並列ダイレクトスパースソルバー(PARDISO)が最も効率的であることがわかったので、これを 3D-AEM に実装した。

さらに、後者の研究では、4 階建て RC 建物の 3D-AEM モデルを作成し、これを対象とした更新法を実装した。剛性は、更新パラメータとして機能する梁/スラブ、柱、充填壁のプロパティの 3 つのグループに分類した。3D-AEM に統合された ARPACK-Arnoldi パッケージを利用して解析のモード特性を取得し、実験および解析のモード特性の残差に基づいて最小二乗問題を定式化した。そして、Levenberg-Marquardt アルゴリズムを適用して更新パラメータを取得した。更新された構造のヤング率とモードの情報を想定値と比較するとよく一致し、更新法の精度が検証された。

第5章では、第4章で検証した 3D-AEM を使用して構造物の静的および動的解析を行い、耐震性を評価した。全体的な損傷と局所的な損傷の定量化は、一般的には、層間変位、周波数劣化、構造の変形に基づいた議論される。本章の静的プッシュオーバー解析では、上層階と比較して1階の層間変位が高く、1階に変位が集中する軟層の挙動が示された。観察された破壊パターンは、面内せん断亀裂、組積壁の面内破壊、および梁柱接合部での引張破壊である。周波数劣化曲線は、横方向の変位が増加するにつれて剛性が低下することを示した。さまざまな地震動に対する提案モデルの増分動的解析により、建物の耐震性能の理解が深

まり、変形、損傷レベル、破損メカニズムに関する情報が得られた。

第 6 章では、実際の RC 構造物から観測された振動データを用いて、提案手法による 3D-AEM 解析を行った。構造のヤング率(剛性)を未知とし、ランダムな初期値を用いた。要素は、床梁/スラブ、柱、耐震壁、充填壁を含む 11 の異なるグループに分け、更新パラメータとした。更新された構造のヤング率(剛性)とモードを実際の測定地と比較することで、3D-AEM モデル更新手法が検証された。この研究では、3D-AEM での正確な数値モデルの更新は、現場から得られた限られた数のデータで実現可能であるが、その精度は更新パラメータの初期推定に大きく依存することを示している。次に、更新された構造に対して静的プッシュオーバー解析を使用して非線形解析を実行し、構造の挙動を分析した。

第 7 章では、本研究の結論と将来的に実施すべき研究課題を説明している。

以上のように、本研究では、少数のモード情報と測定値から、ネパールで最も一般的な低中層の RC 建物に適したモデル更新法を開発し、その精度を模型実験、3D-AEM モデル、実際の RC 建物を対象にした観測と数値解析の結果とを比較することで確認した。以上の研究成果によって、実構造物の振動データを使用することで、実際の既存建物の耐震脆弱性評価が可能になった。また、3D-AEM ツールの計算効率も、並列直接ソルバー(PARDISO)の使用により大幅に向上した。なお、上記の研究成果の一部は共著による論文として発表されているが、申請者の貢献が大きい。

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。