

審査の結果の要旨

氏名 ラメッシュ グラガイン

ネパールは地震に対して脆弱で、これまで多くの人的・物的被害を受けてきた。地震に対して強靱な社会を実現するための効果的な対策の立案の最初のステップは、地域の地震災害リスクの適切な評価である。本論文は、技術的にもコスト的にも制約が多い途上国の代表としてネパールを取り上げ、評価対象エリアのサイズと利用可能な情報の違いを考慮した上で、様々な対象地域の地震災害リスクを、可能な限り精度高く評価するツール（地震リスク評価システム）について研究したものである。また地震災害リスクの評価において最も重要な構造物の被害関数（地震動に対する構造物の脆弱性を表す関数）に関して、これまで提案されていなかったネパールの各種の組積造建物に関する被害関数を、現場での材料試験、振動台を使った動的破壊試験、さらに完全崩壊までのシミュレーションが可能な応用要素法（AEM）を用いた数値解析によって提案した。新しく提案した各種のレンガ積み組積造建物と石積み組積造建物の被害関数を用いた地震災害リスク評価から、効果の高いリスク軽減対策が地域別に具体的に提示できるとともに、対策の効果の定量的な評価が可能となった。最後に、本研究で提案した地震災害リスク評価法を世界の他の地域で活用する場合のフロートチャートと今後の課題を整理した。

本研究では、以上の内容を以下で説明する9章からなる論文としてまとめた。

第1章では、ネパールの地震に対する脆弱性について述べるとともに、地震災害リスク評価の重要性を含む本論文の背景をまとめ、本論文の全体構成について解説した。

第2章では、これまでにネパールのいくつかの都市とコミュニティを対象に実施された地震災害リスク評価において用いられた8種類の手法とツールを、評価において関与するステークホルダーの違い、インプットとアウトプットの詳細、評価に必要なリソース、利用における簡便さ、利用に適した空間サイズ（国家レベルや都市レベルなど）、システム本体と周辺システムがオープンソースで提供されているか否か、などの観点から比較した。その結果、HAZUSとOpen Quakeは国家レベルの評価に、RADIUSとCAPRA GISは都市レベルの評価に適していることが判明した。ただし、RADIUSは建築物や社会基盤施設のGIS情報を整備していない都市、CAPRA GISは個別の建築物や社会基盤施設のGIS情報が利用可能な都市に適している。

第3章では、実際の建物の構造材料として利用されているレンガなどの材料特性を、ネパールの既存の建物を対象に調査した結果をまとめている。材料定数は利用環境によって大きく変わるが、実際の利用環境を研究室内で再現することは困難である。そこでネパールの既存の組積造建物を対象に、実際の利用環境下での実験を行うことにより、現実に即した材料特性を求めた。これらのデータは、次章以下で行う数値解析を行う上で不可欠な情報である。

第4章と第5章では、応用要素法（AEM）を用いて、耐震性の低いノン・エンジニアード建物（工学の専門性を有していない人が耐震基準に従わないで建設した建物）の地震に対する被害関数を作成した。AEM解析用のソフトとしては、米国ASI社のExtreme Loading for Structures（ELS）を用いた。AEM解析の結果を振動台実験と比較した結果、両者は大変良く一致し、AEMによる組積

造建物のモデルの信頼性が証明された。そこで第4章では、この結果を踏まえ、ネパールで良く見られる階数や形状の異なる様々なレンガ組積造建物モデルを作成し、それぞれの建物の材料強度を第3章で説明した現場実験から得られたデータを踏まえて、「強い、平均的、弱い」に分け、建物様式、材料強度、地震動を変えた AEM シミュレーションを行った。そして地震動強度（最大加速度：PGA）に応じた被害の程度を分析し、ネパールに存在する典型的な3タイプのレンガ組積造建物（フレキシブルな床と屋根を有するセメントモルタルを用いたレンガ造、フレキシブルな床と屋根を有する粘土モルタルを用いたレンガ造、剛な床と屋根を有するセメントモルタルを用いたレンガ造）に対し、4つの被害程度（崩壊、大被害、中被害、軽微な被害）に応じた累積確率を求め、被害関数を作成した。

第5章では、第4章と同様の手法で、石積み組積造建物の被害関数を構築した。不規則な形状の石を組み上げた組積造建物の AEM 解析では、3次元の多面体要素をいくつか連結した要素（連結要素）を用いる方法を提案した。数値解析手法の信頼性の確認のために、一方向載荷と動的交番載荷用の2種類のモデルを用意して AEM 解析を行い、この結果を実験結果と比較した。一方向載荷実験では、力-変位関係とひび割れ分布を比較し、両者の良好な一致を確認した。動的交番載荷の AEM 解析の結果は振動台実験の結果と比較した。具体的には、ひび割れの発生と進展の仕方、入力に応じた建物の加速度応答、崩壊に至るまでの建物全体の被害の様子を比較した。結果は、すべての項目において両者が良く一致した。これらの結果から、石積み組積造建物の地震時の挙動は本研究で提案する連結要素を用いた AEM 解析によって高い精度で解析できることが分かった。そこでレンガ組積造と同様に、階数や形状の異なる数種類の石積み組積造建物モデルを作成し、材料強度と地震動を変えたシミュレーションを行い、ネパールの石積み組積造建物の被害関数を作成した。

第6章では、ネパールのような開発途上国における脆弱な建物の耐震補強は、利用できる技術とコストの面で制約が厳しいので、性能とコストの両者の条件を満足する簡便な技術として、鉄筋コンクリートバンド（RCバンド）と PP-バンド補強を組み合わせた補強法を提案し、その効果を振動台を用いた動的破壊実験によって評価した。具体的には、地震に対して最も脆弱な建物モデルとして、不規則な形状の石と強度の弱いモルタル（石灰モルタル）を用いた2階建て石積み組積造建物を2つ作成し、一方は建物の周辺部のみを RC バンドで補強し（壁の部分は補強していない）、もう一方は周辺部の RC バンド補強に加えて壁部分を PP-バンドで補強した上で、両者の供試体に対して振幅と周波数の異なる正弦波を振動台に入力した実験を行った。補強法の異なる2つの供試体の破壊性状（ひび割れの進展の様子、被害の程度、応力-変位の履歴曲線、エネルギー吸収性能など）を比較した結果、RC バンドと PP-バンドを組み合わせて補強した供試体では、コストの増分が軽微であるにも関わらず、耐震性能が格段に向上することが確認できた。すなわち、強度と変形性能、エネルギー吸収能力を格段に向上するとともに壁の崩落も防ぐことから、利用者の安全性を大幅に高めることができるので、ネパールの小規模の学校建物の耐震補強に適した工法であることがわかった。

第7章では、耐震性の向上が将来の地震被害の軽減に与える影響を定量的に示した。具体的には、現在のネパールの耐震基準に沿って建設されたレンガ造建物（フレキシブルな床と屋根を有するセメントモルタルを用いたもの）と同様のタイプだが基準に従っていないレンガ造建物を対象に、同じシナリオ地震（想定地震）に対する被害の違いを分析し、建物の耐震性の向上による

被害軽減効果を定量的に評価し、耐震基準の整備と普及が地域の地震災害リスクを大幅に軽減できることが定量的に示した。この検討では、現行の基準に従ったレンガ造建物の被害関数を AEM 解析によって開発して用いた。また既存の建物に関しては、第 5 章で開発した被害関数を用いた。

第 8 章では、カトマンズ盆地内の複数エリアを対象に、これまで用いられてきた既存の被害関数と本研究で新しく提案した被害関数を用いた被害想定を行い、両者の違いを分析した。分析結果からは、新しい提案手法を用いることで、より詳細な被害算定が可能になるとともに、効果的な防災対策を実施すべき地域と構造種別に提案でき、従来は不可能であった効果的に対策の立案と実施が可能になることが判明した。また、本研究で提案した地震災害リスク評価手法を他の地域に適用する際のフローチャートと留意点を整理した。

第 9 章では、本論文を総括し得られた成果の要約を記載した。

以上のように、本論文は技術的にもコスト的にも制約が多い途上国の代表としてネパールを取り上げ、評価対象エリアのサイズと利用可能な情報の違いを考慮した上で、様々な対象地域の地震災害リスクを可能な限り精度高く評価するシステムを提案するものであり、ネパールはもとより、世界の各地の地震に対して脆弱な途上国の地震防災力の向上に大きく貢献する研究成果として高く評価できる。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。