

論文の内容の要旨

Title of Thesis : Development of Earthquake Risk Assessment System for Nepal

(ネパールを対象とした地震リスク評価システムの開発)

氏 名 ラメッシュ グラガイン

地震はネパールで最も重要な自然災害の一つであり、これまでに多数の構造物被害と甚大な人的被害を受け続けた長い歴史を有している。地震に対して強靱な社会を実現するための効果的な都市計画と地震災害リスクの軽減、さらに地震災害への事前の備えを実現する上での最初のステップは、地域の地震災害リスクを適切に評価することである。これによって地震防災上、地域が抱える様々な問題とその深刻度が理解される。これまでネパールでは、限られたいくつかの都市で異なる手法を用いた地震災害リスクの評価が行われたが、現在求められていることは、ネパールの国レベルと国内の数多くの都市に対して、地震災害リスクの評価が行われることである。そのためにはネパール国を対象に、空間スケールの異なる様々な対象地域の地震災害リスクの評価を可能とする適切なツールを提案する手法やシステムの研究が必要であり、そのシステムには、ネパール国内に存在する様々な構造物の地震に対する脆弱性を評価するタイプ別の被害関数を提示するとともに、各種の対策によって地震災害リスクがどの程度低減するのかを示す機能が求められる。

本研究では、まず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 種類の異なる手法とツールを、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わかった。ただし、RADIUS は建造物や社会基盤施設の GIS 情報を整備していない都市、CAPRA GIS は個別の建造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。

次に、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勝手に建設した建物）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。非線形解析において重要になる既存組積造建物のせん断力などの材料定数は、実際の現場で行った直接せん断試験から入手した。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 解析の信頼性が証明された。この結果を踏まえ、AEM 解析用に階数や形状の異なる 3 種類の組積造建物モデルを作成し、モルタル強度と地震動を変えた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記録し、ネパールに存在する典型的な 3 タイプの組積造建物の被害程度（崩壊、大被害、中被害、軽微な被害の 4 レベル）に応じた累積確率を求め、被害関数を作成した。

石組み組積造建物に関する被害関数は、AEM 解析の要素として3次元の多面体要素をいくつか連結した要素（連結要素）を用いる新しいアプローチ法を提案した。数値解析用に、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し方、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ところ、すべての項目において両者が良く一致することを確認した。これらの結果から、石造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。またレンガ組積造同様に、階数や形状の異なる数種類の石組み組積造建物モデルを作成し、モルタル強度と地震動の変えたシミュレーションを行って、ネパールの石組み組積造建物の被害関数を作成した。

ネパールのような開発途上国における組積造建物の耐震補遺強は費用の面で非常に難しい課題である。そこで本研究では、性能とコストの両者の条件を満足する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、振動台実験によってその効果を評価した。具体的には、地震に対して最も脆弱な成形されていない石積み組積造建物（目地材は石灰と砂を水で混ぜ合わせた非常に弱いモルタル）を対象に、建物の周辺のみを RC バンドで補強し、壁の部分は補強していない供試体モデルと周辺の RC バンド補強に加え壁部分を PP-バンドで補強した供試体モデルの2種類の供試体を作成して、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種類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。両者の結果からは、RC バンドと PP-バンドを組み合わせて補強した供試体の耐震性能が価格の増分はほとんど生じないにも関わらず格段に高いことが分かった。

AEM 解析用にネパールの耐震基準に従った組積造建物モデルを作成し、これが既存の脆弱な組積造建物と入れ替わった場合の被害関数の変化を分析した。その結果、両者には大きな違いがあり、耐震基準に従った組積造建物モデルでは地域の安全性が大きく向上することが分かった。最後に同じシナリオ地震（想定地震）に対して現在の建物を対象とした想定被害量が、既存の建物被害関数を用いた場合と本研究で新しく提案した被害関数を用いた場合にどのように変化するかを調査した。その結果、提案手法を用いることで、被害推定結果としては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が規定され、より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。