

審査の結果の要旨

氏名 ガダガンマ チャイタニャ クリシュナ

都市部への人口集中や脆弱な建物や施設の増加から、世界規模で地震災害のリスクが高まっている。特に社会的・経済的な問題を原因として、その傾向は途上国で著しい。将来の地震被害を軽減する上では、まずは脆弱な建物や社会基盤施設（社会インフラ）の耐震性を評価することが重要である。しかし、構造物の性能を知る上で重要な計算書や図面が無いことも多いし、実際の構造物がこれらの資料通りに施工されていないケースも多い。さらに不適切に建て増しされている建物も少なくない。このような悪条件の中でも、ある一定レベルの精度を確保した上で、構造物の耐震性能を評価することが求められている。

ところで世界の建物の構造種別を見ると、都市部では鉄筋コンクリート造建物（RC 建物）の割合が高く、この中の脆弱な建物が被災することで大勢の死傷者を出すとともに地震被害の規模を増大させる大きな原因になっている。そこで本研究では、RC 建物を対象に、現地で入手可能な情報を効果的に活用して、その耐震性能を評価できる手法の開発を試みる。

一般に RC 建物の耐震性能を評価するには、剛性、強度、質量、鉄筋量や配筋、コンクリートの特性など、数多くのパラメータを決定する必要があるが、現場でこれらの全てを評価することは難しい。そこで本研究では、まずは建物の動特性に大きな影響を及ぼす剛性をターゲットとして評価を試みる。その際には、目視評価（RVS : Rapid Visual Screening）や過去の実験結果に基づいて問題を単純化するとともに、他のパラメータに関しては一般的な値を仮定する。なお本研究では、次の3つ方法を組み合わせることで、建物の剛性の評価を試みる。1) 構造物を正確にモデル化できる数値解析手法、2) 材料特性を評価するシステム同定手法、3) 建物の脆弱性評価のための信頼性の高い性能定量化スキーム。

以上の内容を以下で説明する 6 章から構成される研究論文としてまとめているが、上記の 1) ~3) はそれぞれ、1) は 2 章で、2) は 3 章、3) は 4、6 章でそれぞれ詳しく取り上げている。

第 1 章では、本研究の背景と目的、関連する過去の研究成果のレビューと現時点での課題を整理している。さらに提案する手法に関して簡単に説明するとともに、論文の構成についても説明している。

第 2 章は本研究で用いる数値解析手法である応用要素法（AEM）に関して説明している。構造物の性能を評価するには数値解析ツールが必要であるが、本研究では連続体から非連続体に至る非線形挙動を比較的簡単に扱うことができる AEM を用いている。AEM は論文提出者の指導教員である目黒らによって開発された解析手法で、有限要素法（FEM）と個別要素法（DEM）の長所を組み合わせた手法である。RC 建物の被災程度や被災箇所、塑性ヒンジの特性などの分析を行うに適している。本研究に実際に利用する前に、AEM の精度を確認するために過去に実施された RC 柱をはじめとする破壊実験を再現し、これを確認するとともに必要な改良を加えた。具体的には、用いる要素サイズに応じた破壊エネルギーの変化を材料モデルに取り込む改良などを行い、

実験データとの比較から解析モデルの精度を確認した。

第3章では本研究で用いた同定の手法の説明と評価を行っている。本研究では、最初に固有周波数とモード形状を OMA (Operational Modal Analysis) 法を用いて求める。次に、2つの手法を組み合わせた2ステップのシステム同定手法で剛性を評価する方法を提案している。最初のステップで、従来のモード形と固有周波数から剛性を求める。この時、建物の剛性を高精度に評価するには、対象建物の高次のモード特性に関する情報が必要になるが、一般的にこれを観測から得ることは難しい。そこで本研究では、第1ステップで得られた固有周波数とモード形に関する誤差を最小化する最適化手法(第2ステップ)によって、高次のモード特性が得られない問題を克服した。

第4章では前章で提案した方法論を実際の建物で確認するためにネパールのカトマンズで実施した現地観測調査について報告している。カトマンズ市内の比較的構造の簡単な18棟のRC建物を選び、目視評価(RVS)による定性的な評価に加え、RC建物の動特性を測定するための微動観測などを行った。しかし高次のモード特性を観測することは困難であった。また OMA (Operational Modal Analysis) 分析を行い、建物の固有周波数とモード形を推定した。

第5章ではRC建物の耐震性能の推定を AEM 解析で行っている。ネパールの実際のRC建物の各層の剛性を用いた AEM 解析から、対象建物の脆弱性を分析した。建物の全体としての脆弱性は、AEM 解析から得られた各構造部材の被災程度から得られる指標 (damage Indices) に層間変形による重み付けして判定した。いくつかの建物に関して、各所に被害を与えたモデルを用いて、将来の地震時の被害程度を評価する被害関数を作成した。常にノイズを受けている実際の構造物と違い、モデル構造物を対象とした数値解析では、質量の違いや入力の違いなどをダイレクトに考慮できるので、実際の現場観測の際に直面した問題の解決策や改善策の検討も行った。

第6章は結論の章で、全体のまとめと現在の課題、さらに将来の研究の方向性について整理している。

以上のように、本論文は構造物の性能を知る上で重要な計算書や図面が無かったり、不適切な建て増しや図面通りに施工されていなかったりする建物であっても、ある一定レベルの精度を確保した上で、構造物の耐震性を評価することを試みたものである。まずは建物の動特性に大きな影響を及ぼす剛性の評価を試みたが、本研究で提案する手法によって、現地で観測できる情報のみからでも定量的な評価が可能であることが確認された。

今回は時間的な制約もあり、現地観測に基づいた十分な検討ができなかったが、建物のフロアごとの質量や入力と応答の正確な比などが把握できれば、剛性のみならず他の重要なパラメータの評価も可能になることが、本研究の理論と数値解析から判明している。これらは非接触型高精度応答観測装置 U ドップラーを活用して観測点数を増やしたり、構造物への入力振動をコントロールできる起振機の利用によって入力と応答の関係の定量的に分析したりすることで実現可能なことから、本研究の成果が将来の効率的な地震対策を実現に与える影響は大きい。また提案する手法は、地震の後の被災建物の残存耐震性評価にも利用でき、世界の地震安全性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。