

| | |
|------------|---|
| 氏名 | しみず ゆかこ 清水 友香子 |
| 授与学位 | 博士(工学) |
| 学位授与年月日 | 平成22年12月8日 |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第4条第1項 |
| 研究科, 専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科(博士課程)都市・建築学専攻 |
| 学位論文題目 | 地震リスクに対する構造・非構造・設備の影響度に着目した 建築物の耐震性能評価に関する研究 |
| 指導教員 | 東北大学教授 源栄 正人 |
| 論文審査委員 | 主査 東北大学教授 源栄 正人 東北大学教授 井上 範夫 東北大学教授 植松 康 |

論文内容要旨

本研究では、地震リスクの観点からの安全性、修復性および使用性を総合的に評価する手法を構築した。同時に、地震動および建築物特性の相互関係により地震リスクに対する構造体、非構造部材および設備機器の影響度が変化することに着目して、多面的に地震リスクを評価する必要性を示した。これにより、経済的観点を中心であった既往研究とは異なった視点から、より適切な地震リスク低減対策への貢献を図ることを目的とした。本論文は6つの章により構成されている。

第1章 緒言

論文の緒言として、研究の背景、目的、意義を述べ、研究の視点や方向性を示した。まず、研究の発端となった背景について、「社会的背景」と「技術的背景」の2つの視点から述べた。「社会的背景」では、建築物の地震被害低減に向けた意思決定を支援する上で透明性および説明性の高い耐震性能評価が求められていることを示唆した。また、過去の被害地震を背景として、構造体だけでなく、非構造部材および設備機器を含め、トータルシステムとして耐震性能を確保することの必要性と、建築物単体ではなく、震源および地盤構造を含め、地震動および建築物特性の相互関係を考慮して耐震性能を評価する必要性と、それらの関係によって異なる各構成要素の被害特性を適切に把握することの必要性について述べた。「技術的背景」では、建築物に備わる様々な性能を総合して耐震性能を評価する手法の必要性を述べると共に、耐震性能評価手法の一つである地震リスク評価に関する既往研究では、経済的な観点以外での耐震性能評価は不十分であること、また地震リスクに対する各構成要素の影響度に着目している研究例は少ないことを指摘し、多面的に地震リスクを捉えた耐震性能評価手法の有用性および地震リスクに対する構成要素の影響度に着目してその意義を主張する研究の有効性について展望を述べた。さらに、地震リスク評価において地震動および建築物の相互関係を考慮するためには一貫して応答スペクトル法を用いることの有用性について述べた。

研究の目的を達成する上での課題として以下の5項目を掲げ、それぞれについて要点を述べると共に、これらを解決することが本研究の学術的な特徴であることを述べた。また、研究の意義について所信を述べた。

- ①地震動および建築物特性の相互関係に着目した地震リスクに対する構造・非構造・設備の影響度の把握
- ②地震リスクの観点からの安全性、修復性および使用性を総合した新たな耐震性能評価手法の提案
- ③安全性、修復性および使用性に関する地震リスク特性の把握
- ④提案手法の地震リスク低減対策への展開
- ⑤提案手法における要素技術の選定と課題の明記

研究の対象については、建築物として事務所ビル、既存建築物を対象とし、研究の範囲では目標性能の設定や性能表示は研究の範囲外としたこと等を述べた。さらに、研究方法の概要と論文の構成、用語の定義を示した。

第2章 地震動および建築物特性の相互関係に着目した損失率の地震リスクに対する構造・非構造・設備の影響度の把握

損失率の地震リスク評価を対象として、本研究の前提である「地震動および建築物特性の相互関係によって地震リスクの大きさおよび地震リスクに対する構造体、非構造部材および設備機器の影響度が変化する」ことを確認することを目的とした。また、検討を進める上で必要な、地震動および建築物特性を考慮した損失率の地震リスク評価手法の構築、地震リスクに対する各構成要素の影響度を評価する手法の提案を行った。

評価手法としては、震源モデルは地震調査推進本部のデータを用い、工学的基盤応答スペクトルの中央値は内山らの距離減衰式を設定し対数正規分布でばらつくことと仮定した。それを入力として、地盤の非線形増幅を考慮できる応答スペクトル法を用いて地表応答スペクトルを求め、相互作用を考慮した耐力スペクトル法により建築物応答値を算出した。次に、HAZUSのデータを用いて脆弱性関数を設定し、各被害状態に応じた損傷確率を求め、損傷割合と再調達価格モデルを用いて損失率の確率分布を算出した。最後に、地震発生確率を考慮して損失率の地震リスク曲線を算出した。また、「地震リスクの再分解」に基づき地震リスクに対する各構成要素の影響度を算出した。

評価条件は、地盤モデルは代表的な第1種地盤、第2種地盤、第3種地盤の3種類、建築物モデルは階数、ベースシア係数を組合せた32種類を設定し、計96ケースの検討モデルを設定した。

評価結果から、損失率の地震リスクの大きさは評価条件によって大きく変化することが認められた。また、地震リスクに対する各構成要素の影響度は、一般に建築物の耐力が大きいほど設備機器の影響度は大きくなり、構造体および非構造部材の影響度は小さくなるが、その度合は評価条件によって大きく異なることが確認できた。さらに、それらの現象が生じた理由として、地震動のピークと建築物の固有周期の関係が密接に関わっていることを、地震動および建築物のSa-Sd曲線を用いた考察、多変量回帰木を用いた考察から明らかとした。

第3章 地震リスクに基づく建築物の耐震性能評価手法の提案

地震リスクの観点からの安全性、修復性および使用性を総合的に評価する手法の構築を目的とした。

まず、基本構造性能である安全性、修復性および使用性の定義を解釈し、地震リスクの観点からの評価項目として、安全性は人的被害率（建築物内の全滞留人口あたりの地震による死者数）、修復性は損失率（再調達価格に対する地震時の損失額）、使用性は機能停止期間（地震時に機能が停止し復旧するまでの期間）を設定した。次に、各性能の評価項目に関する地震リスク評価手法として、損失率の地震リスク評価手法は第2章で示したものと同一とし、人的被害率および機能停止期間の地震リスク評価手法も“各被害状態に応じた損傷確率”の算定までは共通とし、その後の算定式をそれぞれ構築した。人的被害率については、事後対応では助けられない死を対象とし、構造体の大破以上の損傷確率と兵庫県南部地震の被害データを分析した既往の研究成果に基づき算定式を構築した。機能停止期間については、各階の構造体、非構造部材および設備機器（給排水・衛生設備、電気設備）の連関図を設定し、それによって求められる地震後のある経過日数における“全構成要素が回復する確率”および“全構成要素が機能停止する確率”を用いて、地震時の復旧曲線の面積で表わされる機能停止期間を評価する方法を構築した。また、機能停止期間の地震リスクに対する各構成要素の影響度を評価する手法も併せて構築した。最後に、損失率、人的被害率および機能停止期間の地震リスク曲線を基準値（許容値）により基準化し、その最大値（最悪の地震リスク）を建築物の耐震性能として評価する手法を構築した。

以上から、地震リスクの観点からの安全性、修復性および使用性を横並びで比較しそれらを総合することにより、経済的観点を中心であった既往研究とは異なる視点から、地震リスクに基づく耐震性能を評価することが可能となった。

第4章 安全性、修復性および使用性に関する地震リスク特性の把握

本提案手法の意義、即ち地震リスクの観点から安全性、修復性および使用性を総合的に評価する必要性を示すことを目的とした。ここでは、地盤および建築物に関する評価条件が、地震リスクの観点からの安全性（人的被害率）、修復性（損失率）および使用性（機能停止期間）に与える影響を詳細に考察した。

評価手法は第3章で提案したものをを用いた。評価条件は第2章と同様の計96ケースの検討モデルを設定した。

評価結果から、評価条件によっては、人的被害率、損失率および機能停止期間の地震リスクはトレードオフの関係となる可能性が確かめられた。これは、耐力の増加により応答変形は抑えられる一方で床応答加速度は増大するため、構造体および非構造部材の被害は低減し、設備機器の被害は増大する可能性が高く、さらに人的被害率は構造体の被害に相関するが、損失率および機能停止期間は各構成要素の被害を組合せた結果であるためであることが確認できた。なお、地震リスクに対する構造体、非構造部材および設備機器の影響度は、何れの性能に関しても同様の変化が認められた。

以上の検討を通して、地震動および建築物特性の関係によって複雑に変化する各構成要素の地震リスクに対す

る影響度のバランスを人的被害率、損失率および機能停止期間の3つの視点で評価することの有用性を示すと共に、本提案手法の意義を示した。

第5章 提案手法の地震リスク低減対策への展開

提案手法の地震リスク低減対策への展開可能性を示すことを目的として2つの検討を行った。

一つ目の検討として、従来の耐震性能評価（ I_s 値）に基づき耐震補強を実施した実物件に対し、提案手法を用いて耐震性能評価を行い、結果を考察した。対象とした建築物は、1981年竣工の地上6階建ての事務所ビルで、1階～5階の各階においてRC壁増打およびRC柱増打補強を実施したものである。補強前後の地震リスク評価結果を比較したところ、耐震補強により人的被害率および機能停止期間の50年10%超過値は低減しているが、反対に損失率のそれは増大していることが分かった。また、これは強度増加型の耐震補強により構造体の被害は低減したが、一方で床応答加速度の増加により設備機器の被害が増加したためであることも確認できた。さらに、全性能を総合して評価した地震リスク評価結果における50年10%超過値に着目すると、補強前は1.45、補強後は1.33となっており、補強前の0.92倍程度に地震リスクが低減していることが確認できた。また、基準値との比較を行った結果、50年10%超過値においては補強前後のどちらも基準値（1.0）を超えていることが分かり、意味のある基準値を設定することにより耐震補強の良し悪しの判断が可能となることを示唆した。以上から、本提案手法は、従来の耐震性能評価とは異なった視点から、構造体の補強による地震リスク低減効果を定量的に評価でき、より適切な補強対策の検討に貢献できる可能性を示した。

二つ目の検討として、行政レベルにおける地震被害低減対策への寄与を目的として、宮城県仙台市を対象に、提案手法に基づくゾーニングマップを検討した。その結果、長町—利府線断層帯より西側の洪積平野と東側の沖積平野が広がる地域では地震リスク評価結果が大きく変化することが確認でき、また地震リスクの地域内格差が定量的に評価できた。これにより、地震リスクの観点からの安全性、使用性および修復性を総合して、仙台地域内の災害脆弱地域の把握、耐震改修の補助金等による対策優遇地域の抽出に貢献できる可能性を示唆した。

第6章 結び

研究成果の概要を纏めると共に、検討を通して得られた知見による総合的な考察を通して、本提案手法の意義を確認すると共に、残された課題を整理し、今後の展開について展望した。本研究における提案手法と得られた知見は、今後の地震リスク低減対策に関わる意思決定支援および地震リスク分野の発展に対して資するところが大きいと考えるが、建築物応答値に対する修復期間、修復費用、人的被害についてのデータベース蓄積の必要性、および意思決定者に応じた目標性能（基準値）の設定に関する検討等の必要性を指摘した。

論文審査結果の要旨

本論文は、地震リスクの観点からの安全性、修復性および使用性を総合的に評価する建築物の耐震性能評価手法を提案すると共に、地震動および建築物特性の相互関係により地震リスクに対する構造体、非構造部材および設備機器の影響度が変化することに着目して、多面的に地震リスクを評価する必要性を示したものである。本論文は全編6章より構成されている。

第1章は序論である。

第2章では、地震動および建築物特性の相互関係が地震リスクに対する各構成要素の影響度に与える影響を確認することを目的に、代表的な地盤および建築物モデルを設定して損失率の地震リスクを対象に詳細な考察を行っている。その結果、損失率の地震リスクの大きさは評価条件によって大きく変化することを示すと共に、地震リスクに対する各構成要素の影響度は、一般に建築物の耐力が大きいほど設備の影響度は大きくなり、構造体および非構造部材のそれは小さくなるが、その度合は評価条件によって大きく異なるなど有用な知見を示している。また、検討の経過から地震動および建築物特性を考慮した損失率の地震リスク評価手法の構築、および地震リスクに対する各構成要素の影響度を評価する手法の提案を行っている。

第3章では、地震リスクの観点からの安全性、修復性および使用性を総合的に評価する手法の構築を行っている。安全性は人的被害率、修復性は損失率、使用性は機能停止期間を評価項目として設定し、各評価項目の地震リスク評価手法を構築すると共に、これらに関する地震リスク曲線を基準値（許容値）により基準化し、その最大値（最悪の地震リスク）を建築物の耐震性能として評価する手法を提案している。この手法により、経済的観点を中心であった既往研究とは異なる視点から、地震リスクに基づく耐震性能の評価が可能となることを示している。

第4章では、地震リスクの観点からの安全性、修復性および使用性を総合的に評価する必要性を示すことを目的に、代表的な地盤および建築物モデルを設定し、評価条件が各性能に関する地震リスク評価結果に与える影響を詳細に考察している。その結果、人的被害率は構造体の被害に相関するが、損失率および機能停止期間は各構成要素の被害を組合せた結果であるため、評価条件によっては各地震リスクはトレードオフの関係となるなど有用な知見を示している。

第5章では、提案手法の地震リスク低減対策への展開の可能性を示すことを目的に2つの検討を行っている。1つ目は、従来の耐震性能評価（ I_s 値）に基づき耐震補強を実施した実物件に対し、提案手法に基づき評価した補強前後の地震リスクを比較考察した結果、より適切な構造体の補強対策の検討に提案手法が貢献できることを示唆している。2つ目は、行政レベルにおける地震被害低減対策への寄与を目的に、仙台市域を対象に地盤条件の違いが地震リスクマップに及ぼす影響を検討することで、マイクロゾーニングのための有用な知見を示している。

第6章は結論である。

以上、本論文は地震リスクに対する各構成要素の影響度に着目して、地震リスクの観点からの安全性、使用性および修復性を総合して耐震性能を評価できる新たな手法を提案すると共に、その社会的有用性を示したものであり、地域の地震・地盤環境を考慮した都市・建築の合理的な地震対策の策定を可能とし、地震工学・耐震工学の発展に貢献することが期待される。

よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。