

氏名（本籍） ^{もり}森 ^{けんじろう}健士郎（北海道）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 甲第970号
学位授与の日付 2018年3月19日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目 被災した鉄骨骨組の補修工法及び補修後の限界状態関数と卓越崩壊モードの評価法に関する研究

論文審査委員 （主査）教授 栗田 哲
教授 伊藤 裕久 教授 今本 啓一
教授 倉渕 隆 教授 高橋 治
准教授 伊藤 拓海 教授 河野 守
教授 永野 正行
東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 教授 高田 毅士

論文内容の要旨

近年、巨大地震などで被災した建物が国内外で数多く報告されている。また、今後発生が予想されている巨大地震により、多くの建物に甚大な被害が発生することが危惧されている。震災時には、避難所生活や災害復旧本部などの拠点として利用される学校の体育館や公的庁舎などが被災した場合は、特に迅速な復旧が望まれる。これらのことから、被災した建物に対して、修復性や、復興力や機能維持能力を意味する“レジリエンス”が注目され、耐震設計学への導入が検討されている。さらに、近年の環境・資源問題の議論に対し、被災した建物を修復し、持続的に使用することの重要性も増してきている。

現行の耐震設計では、損傷が生じないための使用限界（許容応力度設計）と、強震時に倒壊しないための安全限界（終局耐力設計）を目標性能としている。過去の地震被害報告によると、多数の被災建物の被災度レベルは、これらの中間的な領域にある。従って、被災建物の持続的な使用を議論するためには、この中間領域の建造物の被災度と残存保有性能を評価し、修復後の目標性能に応じた修復計画を立案する手法が必要となる。被災建物の残存耐震性能評価と修復・復旧方法に関しては、「震災建物の被災度区分判定と復旧技術指針」（以降、復旧指針と呼ぶ）で提案されているが、損傷に対する補修法と補修後性能の関係性の研究は限られており、補修による性能回復性は暫定的に決定されているのが現状

である。そこで、設計法・技術体系の確立と整備のためには、以下の課題が挙げられる。

- ・現状の診断・評価：被災建物の損傷部位の特定と残存耐震性能の評価法の確立
- ・補修技術の提供：損傷した耐震部材に対する適切な補修法の選択方法と方針
- ・補修効果の評価法：補修した建物の目標耐震性能の設定と評価法の確立

本論では、上記の3つの課題に対し、以下の5つの研究テーマを定めた。すなわち、補修法の有効性と補修した骨組の耐震挙動に関わる実験的研究、補修した部材の復元力特性モデルと補修した骨組の力学モデルの確立、ならびに弾塑性解析手法と終局耐震限界状態に関わる解析的研究を、研究の基盤とした。

5つの研究テーマ：

- ①鉄骨部材の損傷判定法と累積損傷評価法の確立
- ②補修した鉄骨部材の補修後の力学挙動と復元力特性の検証
- ③補修した鉄骨骨組の力学モデルと終局耐震限界状態の評価法の確立
- ④被災した鉄骨骨組の補修法と終局限界状態の評価
- ⑤補修後の終局限界状態評価に基づく修復計画法

具体的には、被災した鉄骨骨組において、局部座屈を伴う損傷に関して、既往の膨大な実験データを収集し、データベース化して損傷と保有性能に関わる分析を行い、損傷評価法を構築している。また、鉄骨部材の局部座屈に対する補修法を検討し、補修後性能の実験的検討を行い、力学的挙動や復元力特性を整理している。さらに、これらの検討に基づき、被災鉄骨骨組を補修した状態の力学モデルを提案し、終局耐震限界状態の評価手法を提案している。終局耐震設計では、骨組の目標崩壊機構形成の保証が設計目標の一つとなる。そこで、補修した骨組の目標崩壊機構の形成を保証するため、終局耐震限界状態評価手法により、修復計画を立案する方法を検討し、その有効性を示している。

第1章 “序論” では、本研究の背景と目的を述べる。

第2章 “繰返し塑性振幅を受ける鉄骨部材の累積損傷評価法” では、ランダム塑性振幅を受ける鉄骨部材の損傷判定と累積塑性率の評価法を提案している。地震動などによるランダム応答下の復元力特性と保有性能は、部材の断面形状情報に加えて、履歴変数の影響などにより複雑な様相を呈し、損傷評価の力学的な表現と定式化が困難である。そこで、国内で蓄積されてきた鉄骨部材の多数の実験報告から、実験結果のデータベースを構築し、損傷と保有性能について分析・解析し、局部座屈で耐力劣化する鉄骨部材の累積損傷評価法を提案している。本評価法により、ランダム応答下の損傷評価を可能にした。

第3章 “局部座屈で耐力劣化した鉄骨骨組の補修法と補修後の力学特性と復元力特性” では、補修による耐震性の回復に関する補修効果の実験的検討、弾塑性挙動の評価に関する

る解析手法を提案している。鉄骨骨組の柱・梁に多用されている H 形断面鋼と角形断面鋼を対象とし、被災状況を実験で再現し、損傷状況や塑性変形を分析して、具体的な補修方法の適用性や作業性を検討している。実験結果に基づき、元の状態と補修した状態の復元力特性や耐荷機構、補修効果を明らかにし、力学モデルを提案している。提案モデルの骨組レベルへの適用性について、十字形部分鉄骨骨組の試験模型を実施し、実証している。また、補修による周辺部材の弾塑性挙動や骨組の全体挙動への影響を示している。以上、これまで暫定的に決定されていた鉄骨部材の局部座屈に対する補修法と補修後性能の関係について、静的載荷実験により補修効果と補修後の弾塑性挙動を検証している。

第 4 章 “補修した鉄骨骨組の終局耐震限界状態と弾塑性挙動” では、第 3 章の実験結果に基づき、補修した部材の復元力特性と解析モデルを提示し、補修した多層鉄骨骨組の終局耐震性能と終局耐震挙動の解析手法を示している。提案モデルによる解析的検討により、補修した骨組において、元の状態の骨組の設計時に想定した崩壊機構が形成されず、卓越崩壊モードが変化する可能性について示している。また、補修した骨組の塑性ヒンジ形成位置が変化することで、骨組の保有水平耐力が変化することを示し、補修によって卓越崩壊モードが変化するメカニズムを明らかにしている。

第 5 章 “被災した鉄骨骨組の補修法と終局耐震限界状態の評価法” では、補修した鉄骨骨組の限界状態関数を定義し、地震荷重効果をモデル化し、近似信頼性解析により終局耐震限界状態の設計点の評価法を示している。本検討では、損傷部位の補修により部材の剛性や耐力が変化することで、補修した骨組全体の終局耐震限界状態に与える影響を検討し、補修後の終局耐震挙動を検討するための近似信頼性解析による耐震安全性の照査点（設計点）の評価法を提案した。

第 6 章 “近似信頼性解析による被災した鉄骨骨組の修復計画法” では、第 5 章の近似信頼性解析による補修骨組の設計点の評価法を利用した修復計画法を示し、中低層鉄骨ラーメン骨組モデルを対象として検討している。また、弾塑性応答解析により設計点の妥当性を検証し、その有効性を示している。その結果、目標性能として、補修した骨組の塑性崩壊機構を保証するための修復計画法を提案している。本手法により、地震応答下において、補修した骨組の塑性変形能に優れた目標崩壊機構形成を実現できることを示している。

第 7 章 “結論” では、各章で得られた知見を要約することで本研究の結論とし、今後の研究課題と展望について整理した。

論文審査の結果の要旨

本審査論文に対して、9名の審査委員にて構成される審査委員会を組織し、申請のあった博士学位論文について審査を行った。

第1回審査委員会では、冒頭に、申請者が海外発表論文の概要を英語で説明し、英語能力を確認した。引き続き、学位論文に関連する本審査では、学位論文に関する研究の背景と目的、当該分野の既往研究、研究論文の構成、研究の手法と結果、成果など、論文全般について各審査委員による審査、ならびに申請者との質疑応答を行った。

審査委員との協議では、学位論文の新規性や優位性、論文の構成、専門用語の見直し、解析手法や条件について指摘があった。特に、被災した鉄骨骨組の補修・復旧に関する用語の定義と整理、従来の補修法と復旧フローに対して本論文の位置づけと新規性、過去の地震被害と本論文の被災建物の関係を示すことについて、指摘がなされた。また、各章の内容や構成について、2章の鉄骨部材の損傷評価法の位置づけを明確にすること、4章～6章の補修した鉄骨骨組の解析手法の新規性を明示すること、など、本論文の構成や各章の内容と関係を整理し、明確にするべきであるとの指摘がなされた。さらに、3章の損傷した鉄骨部材の補修法の概略や新規性を明確にするとともに、実スケールの建物への適用性、実験結果に基づく解析手法と力学モデルの説明を見直し、追記することなど、実験結果と解析手法の説明について指摘がなされた。また、4章以降の補修した鉄骨骨組の解析法と評価法に関して、終局限界状態関数と卓越崩壊モードの評価法が本論文の新規性であることから、各章の内容と論文の構成について指摘がなされた。以上、各章の内容や構成、解析法の説明と新規性を明確にするとともに、各章で検討された研究成果と今後の課題を整理し、結論の修正を検討するべきであるとの指摘がなされた。

第2回審査委員会では、第1回審査委員会での質問・指摘事項に対する回答や対応について申請者から説明があり、学位論文として全般的に審査を行った。論文の構成と位置づけ、用語の整理と定義の説明、研究内容や解析手法の説明について回答と対応がなされていることを確認した。また、解析手法と力学モデルの説明がなされていることを確認した。解析条件については、実際の設計建物の条件に基づいて、追加で検討することとした。本論文の新規性は、被災した鉄骨骨組の補修の要否を判定するための損傷評価法、耐力劣化した鉄骨部材の補修法と部材・骨組の解析手法、さらに補修した鉄骨骨組の終局耐震限界状態関数と卓越崩壊モードの評価法にあることを確認し、本論文に適切な説明と補足、修正を加えることとし、最終の審査委員会を開催することを了承した。

最終の審査委員会では、これまでの審査委員会における指摘事項、協議事項を十分に反映させた内容に基づき、公聴会を開催した。公聴会による質疑応答の内容を踏まえ、最終審査として審査委員会を開催した。申請者に対し、学位論文に関連した関連研究の背景や論文の位置付け、論文に関する今後の展開などに関して、各審査委員により多角的な視点から口頭試問による試験を行った。その結果、学位論文の内容、ならびに関連する専門分野に関して十分な理解があり、学位（博士）の授与に値する学力と専門性を

十分に有していると判断し、合格と判定した。

本論文は、既往研究で十分に解明がなされていない、被災した鉄骨骨組の補修の要否判断の一つの目安となる、柱・梁部材が耐力劣化域に達したかどうか、すなわち最大耐力到達の判定法を提案し、その有効性を示している。さらに、損傷により耐力劣化し、耐震性が低下した鉄骨骨組に対して、具体的な補修工法の提示とその適用性・有効性を検討し、補修後の復元力特性や力学モデルを提案して、補修した鉄骨骨組の解析モデルと耐震性に関わる評価法を提案している。これにより、補修した骨組の限界状態関数と卓越崩壊モードの評価を可能とし、塑性変形能力に富んだ崩壊メカニズムの卓越を保証するための解析手法を示し、被災した鉄骨骨組の補修・復旧の解析・設計に資する有用な研究成果を挙げていると評価することができる。

以上、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。