

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06108

研究課題名(和文) 建築ストックの有効活用を目指した局所変形制御型耐震補強法とその設計法の開発

研究課題名(英文) Seismic

研究代表者

倉田 真宏 (Kurata, Masahiro)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：70624592

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,100,000円

研究成果の概要(和文)：成熟社会における建築ストックの有効活用を命題に、鋼骨組を対象として、事業継続性を担保する低負荷な耐震補強法を開発した。低負荷耐震機構と名付けた本補強法の特徴は、既存骨組の損傷限界を決定する脆弱箇所の変形を集中的に低減し、耐力の上昇を巧みに抑えながら骨組全体の耐震性能を高めることにある。脆弱箇所を含む建物の一部を対象とした変形低減効果の評価実験環境を整備し、数値解析による検討と合わせて、低負荷な耐震補強法に見合った設計法を開発した。さらに、大型構造実験と数値解析により設計法の有効性を実証した。獲得した研究成果は、耐震工学分野で有力な国際SCI学術論文誌5編、査読付き国内学術誌2編、に発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存骨組の脆弱箇所が受ける局所的な変形の制御により、大規模な工事を必要とせずに耐震性能が不足する建築ストックを利活用するというコンセプトに基づいて、耐震補強機構のプロトタイプとその設計法を構築した。局所変形の制御を明示的な設計目標とした耐震補強の設計法を提案し、剛性と耐力の向上を設計目標とする従来の耐震補強の考え方に新風を吹き込んだ。脆弱部の変形を制御する手法により、人命の安全だけでなく建物の継続使用性を考えた耐震補強法の普及が期待される。日本発の新しい補強機構を用いた耐震補強方法とその設計法を示すことで、耐震工学における日本の開発力を世界に示すとともに、今後の国際連携の発展が期待される。

研究成果の概要(英文)：For the effective use of building stock in our matured society, a retrofit devise of existing steel frames with consideration on business continuity during construction and building space usage was developed. The named minimal-disturbance retrofit damper enhance the seismic capacity of the frames through the intensive reduction of the force and deformation demands at the frames' vulnerable components. The method also cap the increase of the frame' strength to avoid damage propagation to the un-retrofitted parts. The study evaluated the deformation reduction performance at the vulnerable components, i.e. beam ends, by large-scale structural tests and numerical analyse. In addition, a design method that is suitable for the retrofit method were proposed and its effectiveness was demonstrated through structural tests and numerical analyses. The research results were published in five leading international SCI journals, two peer-reviewed domestic journals.

研究分野：工学

キーワード：建築構造 鋼構造 耐震補強 性能設計

1. 研究開始当初の背景

建築ストックの利活用への課題：

わが国には、高度成長期に建設された膨大な数の建築ストックがある。精神的豊かさや生活の質の向上を重視する成熟社会においては、これらの財産を有効利用し、新たな産業の発展や高齢化社会への対応に生かすことが極めて重要である。しかしながら、近年その発生が危惧されている首都直下型地震や南海トラフ巨大地震に対して、耐震性能が十分でない建物が人命に及ぼす危険性や、それらの損傷による社会的機能の低下が問題視されている。そのような状況のなか東日本大震災の被害を受けて、2011年に建築基準法が改訂され、天井等の非構造部材に関する規制が追加され、2013年には「建築物の耐震改修の促進に関する法律」の改訂により、不特定かつ多数の者が利用する大規模な建築物等に耐震診断が義務付けられた。

低負荷な耐震補強法への社会的要望：

耐震性能が十分でない建築ストックの補強を目的とした工法の多くは、建物利用者の一時移転を必要とする大規模な工事を含み、施工費用に加えて移転や業務効率の低下などに関わる二次費用が発生する。また施工事例の多い耐震ブレースなどは建物の保有水平耐力を著しく向上するが、建物の利用スペースや窓からの景観との干渉が大きく、建築計画上の制約となる。

耐震補強に適した設計法の必要性：

建物の保有水平耐力や限界状態を設計目標とする現行設計法に準拠するため、従来の耐震補強では、部材や建物全体の耐力や剛性の向上をもって設計要件をクリアすることに主眼が置かれている。しかしながら、耐力を決定する脆弱な箇所の補強は周りの部材や基礎部に作用する地震力の増大につながり、結果的に構造躯体全体にわたる大掛かりな補強が必要となる。

2. 研究の目的

成熟社会における建築ストックの有効活用を命題に、鋼骨組を対象として、事業継続性を担保する低負荷な耐震補強法を開発する。本補強法の特徴は、既存骨組の損傷限界を決定する脆弱箇所の変形を集中的に低減し、耐力の上昇を巧みに抑えながら骨組全体の耐震性能を高めることにある。一方、現行設計法の考え方に拠れば、耐力や剛性の向上が補強の主な効果として評価されるため、脆弱箇所の変形低減を設計で十分に考慮するには、新しい設計法が必要となる。そこで、脆弱箇所を含む建物の一部を対象とした変形低減効果の評価実験環境を整備し、数値解析による検討と合わせて、低負荷な耐震補強法に見合った設計法の開発とその実証に取り組む。

期間内に目指す具体的な成果を以下のように設定する。

イ) 補強要素が既存骨組の耐震性能に及ぼす効果に関する実験データの獲得
提案する補強機構について、これまでの有限要素法解析と要素実験による基本性状の検証に加えて、本研究では、補強機構の取り付けによる既存骨組の脆弱な箇所の変形性能の変化を再現できる部分架構実験手法を新たに考案し、脆弱箇所の応力と塑性変形の低減効果を定量的に評価するための実験データを獲得する。

ロ) 局所的な変形の低減が地震応答に及ぼす影響の統計的評価
補強部材の取り付けによって生じる応力の再分配等を正確に再現できる数値解析モデルを構築し、提案する補強機構を鋼骨組に適用した場合の地震応答低減効果を統計的に評価する。得られたデータに基づき、補強機構に求められる物理的特性とそれに適した設計法への知見を得る。

ハ) 建物の脆弱箇所への局所的な変形を直接評価する設計法の提案
鉄骨構造を対象に、骨組内の脆弱箇所の局所変形の制御を設計目標に据えた設計法を提案する。部材が塑性化した後の安定変形限界に焦点を当て、1) 部材の局所変形と建物全体変形の関係付けと、2) 設計地震力に対する建物全体変形の推定、に基づく新しい設計法を提案する。

3. 研究の方法

局所変形の制御を主たる目標に加えた耐震補強機構とその設計法の開発を円滑に進めるために、研究課題を以下の4つのフェーズに分割した：A. 大型構造実験による低負荷耐震補強法の性能把握；B. 局所変形の低減を指向した耐震補強設計法の構築；C. 実験と地震

応答解析による設計法の実証；D. 設計法の一般化に向けた検討。

フェーズ A では、耐震補強機構の効果を定量的に評価するための部分骨組の実験環境を整備し、実験データを獲得した。フェーズ B では、実験データの検証及び補強機構のモデル化に取り組み、骨組の数値解析結果を用いて新しい設計法を構築した。フェーズ C では、京都大学の保有する大型振動台やオンライン自動加力実験装置を利用して補強機構及び設計法の検証に取り組んだ。フェーズ D では、階数やスパン数、及び部材の断面性能を変化させた骨組モデルに対するパラメトリック地震応答解析により、提案する設計法の適用範囲を検証した。さらに、現行の耐力や剛性の上昇を指向する耐震補強法との比較により開発した設計法の優位性を示し、提案設計法の体系化に挑んだ。

4. 研究成果

【平成 28 年度】

頑強な部材に頼らず既存鉄骨構造の耐震性（耐力、剛性、弾性限界、安定変形限界）を飛躍的に向上する手法として、補強部材の取り付けによって生じる応力の再分配等に着目し、既存部材への大幅な応力上昇を巧みに避けつつ変形性能を向上させる補強機構の性能を評価した。提案機構の性能把握を目的とし補強機構の取り付けによる既存骨組の脆弱な箇所の変形性能の変化を再現できる部分架構実験手法を新たに考案し、条件設定のため予備実験を実施した。予備実験の結果を踏まえて数値解析モデルを構築し、解析結果に基づき、補強機構の取り付けによる応力分布の変化を再現できる 1 層 2 スパン試験体を設計した。補強前の部分架構試験体の実験を実施し、耐力劣化性状や最大変形能力および架構内の応力分布を正確に把握した。さらにこれらの情報を数値解析モデルに反映し、補強機構の諸元を検討した。

4 年に一度開催される、世界中の耐震工学研究者が一堂に会する第 16 回世界地震工学会において、開発する低負荷補強機構を発表し、大きな反響を得た。また、ニュージーランド・オークランド大学、ならびにイタリア・カタニア大学の研究者と共同で耐震補強に関わる数値実験と大型構造実験を実施した。

【平成 29 年度】

前年度に構築した数値解析モデルを利用して、補強部材の取り付けによって生じる応力の再分配等検討し、補強機構を設計した。補強の対象とする部分架構に補強機構を取り付け、数値解析で想定する補強の効果を実験で確認するとともに、補強前と補強後の損傷の進行度や最大変形能力の差を定量的に把握した。梁要素からなる簡易な骨組モデルを構築し、提案する補強機構の解析モデルと組み合わせ、骨組頂部の変位を増分させる弾塑性静的増分解析および地震応答解析を実施した。補強による変形能力や梁端部の正曲げ塑性回転角の低減を評価するとともに、建物全体変形と脆弱箇所の応答量に注視して補強の効果を統計的に整理した。また梁端部の全塑性化後の補強効果の検証する部分架構モデルを構築し、梁端部の塑性変形角、層間変形角及び耐震補強機構の耐力の関係式を導出するとともに、局所変形の制御を指向する設計法の開発に着手した。

平成 28 年度と平成 29 年度の課題への取り組みを通して、1) 低負荷耐震補強機構による鋼骨組の局所変形制御型設計法の提案（Local Deformation Based Design of Minimal-Disturbance Arm Damper for Retrofitting Steel Moment-Resisting Frames）、2) 低負荷補強機構による鋼構造骨組の局所変形低減に関する実験、と題する 2 編の論文を有力な国際学術論文誌（査読付き）および国内学術論文誌（査読付き）に発表した。

【平成 30 年度】

局所変形の低減を指向した耐震補強設計法を構築し、予備検証用試験体の実験を実施した。具体的には、弾性域、塑性域、梁端破断後の大変形域のそれぞれにおいて性能（設計）目標を設定可能な耐震補強設計法の枠組みを検討した。また、各変形域における骨組の状態を反映した部分骨組の力学モデルを提案し、同モデルの構造解析により、目標とする耐震補強効果（曲げモーメントや塑性変形角の低減量、梁端破断後の骨組耐力の維持）と提案する補強機構の耐力や剛性を結び付ける設計式を誘導した。

1 層鋼構造部分骨組の予備検討用試験体を製作し、誘導した設計式を用いて設計した耐震補強機構による補強効果を検証した。実験結果をもとに、設計式に合成効果を考慮する改良などを加えた。さらに、精度検証用試験体を製作して、準静的載荷実験を実施した。

平成 28 年度および平成 29 年度の課題への取り組みを通して、1) 2 方向水平載荷に対応した低負荷耐震補強機構の開発（Development of a Minimal-Disturbance Rehabilitation System for Sustaining Bidirectional Loading）、2) 低負荷耐震補強機構による骨組内の応力分布変化（Force redistribution of steel moment-resisting frame retrofitted with a minimal disturbance arm damper）、と題する 2 編の論文を有力な国際学術論文誌（査読付き）に発表した。

【平成 31 年度】

複数の性能目標をもつ耐震補強設計法の実証：鋼骨組を対象に、地震力を受けたときに弾性域にとどまる場合、梁端部が塑性化する場合、梁端部が破断するなど大きく損傷した場合、の各状態について独立した性能目標を設定できる耐震補強法を構築してきた。実大規模の試験体を対象とした耐震補強実験の結果を利用して、提案する設計法ならびに各損傷状態に対して導出した設計式の精度を検証した。

階数やスパン数、および部材の断面性能を変化させた骨組モデルに対するパラメトリック地震応答解析により、提案する設計法の適用範囲を検証した。さら、現行の耐力や剛性の上昇を指向する耐震補強法との比較により開発した設計法の優位性を示し、提案設計法を体系化した。

平成 30 年度および平成 31 年度の課題への取り組みを通して、1) 多段階の性能限界を設けた場合の局所耐震補強設計法の提案と実証 (Multi Damage-State Retrofit of Steel Moment-Resisting Frames with Minimal Disturbance Arm Damper), 2) 補強効果の確率的評価および費用対効果に基づく設計 (Fragility Functions for Evaluation of Moment-Resisting Frames Retrofitted with the Minimal Disturbance Arm Damper), に関する 2 編の論文を有力な国際学術論文誌 (査読付き) および国内学術論文誌 (査読付き) に発表した。また、イギリス・バーミンガム大学の研究者と多段階の性能限界を設けた場合の設計方法について意見交換し、共同で論文を発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Marzano G., Skalomenos, K.A., Kurata, M.	4. 巻 -
2. 論文標題 Multi Damage-State Retrofit of Steel Moment-Resisting Frames with Minimal Disturbance Arm Damper	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Merzano, G., Skalomenos, K.A., Kurata, M., Sasaki, Y.	4. 巻 -
2. 論文標題 Fragility Functions for Evaluation of Moment-Resisting Frames Retrofitted with the Minimal Disturbance Arm Damper	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering (AIJ)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zhang L., Marzano G., Sasaki Y., Kurata M., Skalomenos K.	4. 巻 114
2. 論文標題 Force redistribution of steel moment-resisting frame retrofitted with a minimal disturbance arm damper	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Soil Dynamics and Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 159 ~ 173
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.06.035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zhang L., Kurata M., Marino E. M., Takeda T.	4. 巻 144
2. 論文標題 Development of a Minimal-Disturbance Rehabilitation System for Sustaining Bidirectional Loading	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002089	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Lavan, O., Sato, M., Kurata, M., Zhang, L.	4. 巻 46
2. 論文標題 Local Deformation Based Design of Minimal-Disturbance Arm Damper for Retrofitting Steel Moment-Resisting Frames	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earthquake Engineering and Structural Dynamics	6. 最初と最後の頁 1493 1509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1002/eqe.2866	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 佐々木雄河, 武田禎久, マルツァーノ・ジュゼッペ, 張雷, 倉田真宏	4. 巻 25
2. 論文標題 低負荷補強機構による鋼構造骨組の局所変形低減に関する実験	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 佐々木雄河, 武田禎久, Marzano Giuseppe, 張雷, 倉田真宏
2. 発表標題 低負荷耐震補強機構を用いた鋼骨組の補強実験 その1 実験計画
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 MARZANO Giuseppe, 佐々木雄河, 武田禎久, 張雷, 倉田真宏
2. 発表標題 Experimental Study of Steel Moment Resisting Frame Retrofitted with Minimal-Disturbance Arm Damper -Part II: Test Results-
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Lei ZHANG, Masahiro KURATA
2. 発表標題 Application of minimal-disturbance arm damper to 3D steel building
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐々木雄河, 武田禎久, Giuseppe MARZANO, 張雷, 倉田真宏: 低負荷耐震補強機構を用いた1層2スパン鋼骨組の補強実験 その1 実験計画, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 57, pp. 49-52, 2017.6
2. 発表標題 低負荷耐震補強機構を用いた1層2スパン鋼骨組の補強実験 その1 実験計画
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 MARZANO Giuseppe, 佐々木雄河, 武田禎久, 張雷, 倉田真宏
2. 発表標題 Test of Multi-Span Steel Moment-Resisting Frame Retrofitted with Minimal-Disturbance Arm Damper - Part II: Test Results -
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Lei ZHANG, Masahiro KURATA
2. 発表標題 Performance evaluation of 3D steel building model with biaxial minimal disturbance arm damper
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takeda, T., Sato, M., Lavan, O, Kurata, M.
2. 発表標題 Application of Local-Deformation Based Design Method to Various Steel Frames
3. 学会等名 the 16th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	レイ ジャン (Lei Zhang)	京都大学・工学研究科・大学院生 (14301)	
研究協力者	佐藤 美穂 (Sato Miho)	京都大学・工学研究科・大学院生 (14301)	
研究協力者	武田 禎久 (Takeda Sadahisa)	京都大学・工学研究科・大学院生 (14301)	
研究協力者	佐々木 雄河 (Sasaki Yuga)	京都大学・工学研究科・大学院生 (14301)	
研究協力者	マルツァーノ ジュゼッペ (Marzano Giuseppe)	京都大学・工学研究科・大学院生 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	ラバン オーレン (Lavan Oren)	京都大学・防災研究所・外国人共同研究者 (14301)	
研究協力者	マリノ エドゥアルド (Marino Edoardo)	京都大学・防災研究所・外国人共同研究者 (14301)	
研究協力者	スカロメノス コンスタンティノス (Skalomenos Konstantinos)	京都大学・防災研究所・特任助教 (14301)	