

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（A）
研究期間：2005～2008
課題番号：17206058
研究課題名（和文） 制震要素を用いた既存鋼構造建築物の統合的耐震性能向上技術の開発
研究課題名（英文） Development of integrated techniques for seismic retrofit of existing steel buildings using energy dissipation devices
研究代表者
井上 一郎（INOUE KAZUO）
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：40029294

研究成果の概要：

本研究では、空間を遮断しない間柱形式の制震部材による耐震補強方法を提案している。この制震部材の既存建物への取付施工時に溶接機などの火気の使用は不要で、かつ大型の揚重機を必要とせず、既設のエレベータを用いて設置現場に搬入し、組立・設置を可能としている。また、耐震補強設計に必要な支援ソフトや構造体の損傷調査方法も併せて開発の対称として耐震性能向上技術を確立した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	17,900,000	5,370,000	23,270,000
2006 年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2007 年度	10,900,000	3,270,000	14,170,000
2008 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
総計	37,800,000	11,340,000	49,140,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：鋼構造／制震要素／機械式接合／耐震補修・補強／非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

制震要素の開発については、国内外を通じてこれまでに多数の研究が行われており、制震要素の配置計画に関する研究も数多く実施されている。制震要素の設置前後の構造性能の評価についても相当数の研究がある。しかしこれまでの研究では、制震要素の開発といったハード面と、制震要素の配置計画や既存建築物の保有構造性能といったソフト面が、別々に研究されることが圧倒的に多く、ソフト面とハード面を統合化した研究は見あたらない。

補修や補強は、既存建築物の保有構造性能

の診断・評価に始まり、設計・施工を経る統合的な技術である。また、特に新しい制震要素を開発する場合、実験段階から設計法や配置計画、さらには施工前後の構造性能評価法を含めて総合的に検討しておくことは補修・補強技術の普及にも必要なことである。しかし、このような研究は行われていなかったのが研究開始当初の背景であった。

2. 研究の目的

既存鋼構造建築物の長寿命化と安全性確保のため、制震要素を用いた耐震性能向上技術をハード・ソフト・診断の各面から統合的

に開発することを研究目的とする。具体的課題は以下のとおりである。

- (1) 高力ボルト接合による機械式接合を用いた制震要素の開発と設計法・施工法の構築
- (2) 制震要素を用いた補修・補強計画支援のための基礎理論の構築とソフトウェアの開発
- (3) 既存建築物の補修・補強前後の保有構造性能を簡便かつ的確に診断する技術の開発

3. 研究の方法

上記 (1)、(2)、(3) のそれぞれの研究課題に対して、下記のような方法をとっている。

(1) 制震要素の開発と設計法・施工法

図 1 に示すように、2本の直立した鋼製間柱の間に、直立させたオイルダンパー、あるいは、低降伏点鋼を用いたシアパネル型履歴ダンパーを設置し、建物に生じる層間変形をダンパーの変形に変換してエネルギー吸収を行う間柱型制震機構について、以下の手順で研究を実施した。

- ① 水平枕材、鉛直間柱、ダンパー要素からなる制震機構単体のみの実物大供試体を作成し、載荷用フレーム内に設置して、静的（履歴ダンパーの場合）あるいは動的（オイルダンパーの場合）載荷実験を実施した。
- ② 制震機構を構成する部材の変形や、間柱と枕材の接合部の「開き」も考慮できるシミュレーションモデルを作成し、実験結果と比較して、シミュレーションモデルの妥当性を検証した。
- ③ 提案する制震機構を、既存鋼構造建築に組み込むことを想定して、天井側の鋼製梁と、床側の鉄筋コンクリート製床スラブに、現場での溶接を必要とせず組み込むための接合方法を提案した。具体的には、天井側は、既存梁の下側フランジの上側に補強用プレートを設置したうえで、制震装置枕材と既存梁の下側フランジを高力ボルトによる摩擦接合を行い（図 2）、床側は、制震装置枕材と床スラブの間に無収縮モルタルを充填するとともに、両者を PC 鋼棒で一体化する（図 3）。
- ④ 床スラブ - 枕材接合部の実物大供試体を作成し、単純せん断実験を実施した。実験パラメタとしては、床スラブ目荒らしの有無、モルタル内の割裂補強鉄筋の有無を採用した。
- ⑤ 提案する制震機構を、既存鋼構造建築を想定した部分骨組供試体に、提案した接合方法を用いて設置した実物大供試体について、静的（履歴ダンパーの場合）あるいは動的（オイルダンパーの場合）載荷実験を実施した。
- ⑥ 提案するダンパーを多層建築に組み込んだ際に得られる等価減衰定数を簡便に算

出する方法を構築した。

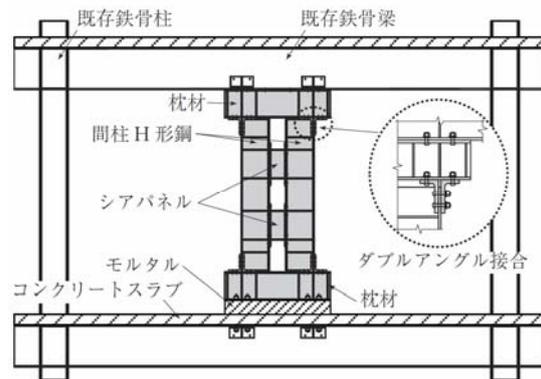


図 1 制震部材の設置状況

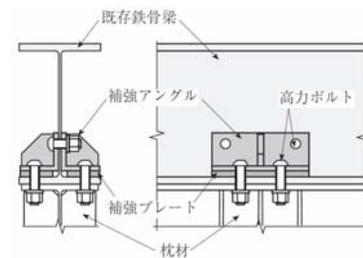


図 2 天井側取付部詳細

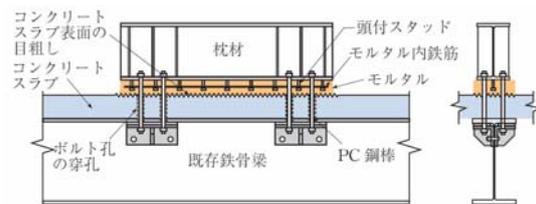


図 3 床側取付部詳細

(2) 補修・補強計画支援ソフトウェアの開発

既存構造物の保有性能に応じた制震要素を用いて補修・補強を適切に計画するには、多大な設計コスト・期間が必要である。特に経験の蓄積がない新しいタイプの制震要素を用いる場合、設計のコストと期間の増大が顕著となる。限られた設計期間と費用の中で制震要素を用いて既存建築物の耐震性能を最大限に向上させることを目的として、数値計画法を援用した補修・補強計画支援ソフトウェアの開発を目標とした研究を行った。

さらに、補修・補強計画支援ソフトウェアでは弾塑性解析法の安定性と解析速度の向上が大きな課題の一つとなる。ここでは塑性ヒンジ法を用いた鋼構造骨組の弾塑性解析法の解析速度と安定性を高めることを目的として、降伏曲面の特異点に関する問題点を整理した上でこれらの問題を解決する手法を提案し、数値例を通じて提案手法の妥当性を検証した。平成 18 年度は平面骨組を対象とし、平成 19 年度は立体骨組を対象として研究を行い所定の研究目的を達成した。

(3) 補修・補強前後の構造性能の診断技術

ガイド波の一種である板波 (Lamb 波) を利用して、耐火被覆をできる限り取り除く事なく鋼構造部材の亀裂や破断などの損傷の有無や程度を把握する手法を開発するための基礎資料を得ることを目的として、鋼平板に模擬損傷 (クラック) を与えた時の板波の波動伝播特性の変化を調べる実験を行った。実験では、損傷部からの反射波による観測信号の変化と、損傷部を通過する透過波の変化に着目した。

4. 研究成果

(1) 制震要素の開発と設計法・施工法

①制震機構単体および制震機構を部分骨組に組み込んだ供試体に対する実験より、提案した制震機構は、想定したエネルギー吸収性能を発揮できることを示した。

②制震機構を部分骨組に組み込んだ供試体に対する実験より、既存鋼構造建物に組み込むことを想定して提案した、現場溶接を必要としない本制震機構の設置方法は、必要とされる耐力と変形性能を有していることを示した。

(2) 補修・補強計画支援ソフトウェアの開発

①制震要素を用いた補修・補強計画では動的応答の評価が不可欠であるが、実務設計で一般的に用いられる弾塑性時刻歴応答解析に必要な計算量は静的解析に比べて格段に大きい。このような制震要素を有する構造物の最適設計問題に対して、計算機実験に基づく確率・統計的な応答予測を用いる方法を提案した。応答スペクトル法に必要な計算量は時刻歴応答解析に必要な計算量に比べてわずかなものであることを利用し、応答スペクトル法により求められる応答量から時刻歴応答解析により求められる応答量を統計的に予測する手法を構成し、その有効性を数値解析例により確認した。

②確率・統計的手法においては何らかの確率モデルを仮定する必要があるが、現実的な状況では設定した確率モデルが真の関数を含まないことが多い。そのような状況においては、不確定性を考慮した手法が有効である。制震要素の配置量および主体架構の骨組断面の同時最適化問題に対して、前述の方法において不確定な誤差を考慮した方法を構成し、数値解析例を通じてその有効性を確認した。

③さらに補修・補強計画支援ソフトウェアの開発として、構造設計に一般的に用いられる外法一定H形鋼材の部材断面の特徴を精度良く表した混合回帰モデルによる最適設計法、および建物の保有水平耐力性能とそれに必要な鋼材量を最適化手法により把握する方法を提案し、数値解析例を通じてそれらの有効性を確認した。

(3) 補修・補強前後の構造性能の診断技術
実験結果に基づき、損傷の有無を判断する手法を提案した。具体的な成果として、厚さ19mmの鋼平板に模擬クラックを与えた時の板波の伝播特性の変化を調べる実験を行い、以下の結論を得た。

①クラックからの反射波による観測波形の変化はノイズと比較してわずかであり、損傷の有無や位置を推定する指標として適さない。

②クラックを透過する波動の到達時刻における振幅の変化は顕著であり、損傷の有無を推定するための指標に適している。

③損傷指標として透過波の到達時刻における振幅の低減を用いることを提案した。また、時間周波数解析結果と板波の伝播速度の理論予測値を利用して損傷指標を具体的に求める手法を提示した。

④提案損傷指標を用いれば、板の幅の1/15程度の小さな損傷であっても損傷を検出できることを例示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

① 伊藤幸、辻聖晃、吉富信太、竹脇出：アウトフレーム連結制振耐震補強のための連結ダンパーの合理的決定法、日本建築学会構造系論文集、No. 636、pp. 273-281、2009. 査読有

② 伊藤幸、辻聖晃、吉富信太、竹脇出：アウトフレーム連結制振構法による既存建物耐震補強の逆問題型アプローチ、日本建築学会構造系論文集、No. 627、pp. 725-732、2008. 査読有

③ M. Yamakawa、Y. Nagano、Y. Lee、K. Uetani：Optimum Design Method of Viscous Dampers in Building Frames Using Calibration Model、14th World Conference on Earthquake Engineering、CD-ROM、2008. 査読有

④ 宋昶、山川誠、吉富信太、上谷宏二：Ds値の不連続性を考慮したブレース付き骨組の最小重量設計法、鋼構造年次論文集第16巻、pp. 407-412、2008. 査読有

⑤ 荒木慶一、崔炳賢：ガイド波を用いた鋼構造部材の亀裂・破断探査に関する基礎研究、鋼構造年次論文報告集、Vol. 16、pp. 635-640、2008. 査読有

⑥ 多幾山法子、荒木慶一、上谷宏二：一般化塑性ヒンジの降伏曲面頂点における三次元梁-柱要素の接線剛性行列、日本建築学会構造系論文集、第634号、pp. 2129-2134、2008. 査読有

⑦ 山川誠、上谷宏二：混合回帰モデルによ

り外法一定H形鋼規格を考慮した最適設計法、鋼構造年次論文報告集、第15巻、pp. 33-40、2007. 査読有

- ⑧ 多幾山法子、荒木慶一、多田元英：両端に一般化塑性ヒンジを持つ梁-柱要素の定式化_移動硬化則の特異降伏曲面への適用に関する再検討、日本建築学会構造系論文集、第620号、pp. 51-58、2007. 査読有
- ⑨ 辻聖晃、羽生昇平、竹脇出：オイルダンパーを用いた省スペース間柱型制振機構の開発、第12回日本地震工学シンポジウムCD-ROM、pp. 862-865、2006. 査読有
- ⑩ 山川 誠、辻聖晃、上谷 宏二、中川 佳久：応答補正モデルを用いた鋼構造骨組の粘性ダンパー量最適設計法、日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集、第14巻、pp. 401-407、2006. 査読有

[学会発表] (計7件)

- ① 坂井悠佑、松尾真太郎、井上一朗：間柱型制振ダンパーを用いた既存鋼構造建物の耐震補強実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、構造III、689-690、2008. 9. 19 (広島大学)
- ② 羽生昇平、辻聖晃、吉富信太、竹脇出：オイルダンパーを用いた間柱型制振機構の開発(その3 鉄骨骨組に組み込んだ実大供試体の動的載荷実験)、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、構造II、499-500、2008. 9. 18 (広島大学)
- ③ 坂井悠佑、羽生昇平、松尾真太郎、辻聖晃：既存鋼構造建物の床スラブと間柱型制振ダンパーの接合部のせん断加力実験(その2 実験結果と考察)、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、構造III、943-944、2007. 8. 29 (福岡大学)
- ④ 羽生昇平、松尾真太郎、坂井悠佑、辻聖晃：既存鋼構造建物の床スラブと間柱型制振ダンパーの接合部のせん断加力実験(その1 実験概要)、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、構造III、941-942、2007. 8. 29 (福岡大学)
- ⑤ 坂井悠佑、松尾真太郎、井上一朗：シアパネルをエネルギー吸収要素とする間柱型制震ダンパーの力学性能に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、構造III、761-762、2006. 9. 8 (神奈川大学)
- ⑥ 羽生昇平、辻聖晃、竹脇出：オイルダンパーを用いた間柱型制振機構の開発(その2 性能評価シミュレーション)、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、構造II、787-788、2006. 9. 8 (神奈川大学)
- ⑦ 辻聖晃、羽生昇平、竹脇出：オイルダンパーを用いた間柱型制振機構の開発(その1 実大模型を用いた動的載荷実験)、日本建

築学会大会学術講演梗概集(関東)、構造II、785-786、2006. 9. 8 (神奈川大学)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 一朗 (INOUE KAZUO)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40029294

(2) 研究分担者

竹脇出 (TAKEWAKI IZURU)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20155055

辻 聖晃 (TSUJI MASAOKI)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00243121

荒木 慶一 (ARAKI YOSHIKAZU)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50324653

山川 誠 (YAMAKAWA MAKOTO)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50378816

桑原 進 (KUWAHARA SUSUMU)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10243172

聲高 裕治 (KOETAKA YUUJI)

大阪工業大学・工学部・講師

研究者番号：80343234

諸岡 繁洋 (MOROOKA SHIGEHIRO)

東海大学・工学部・助教授

研究者番号：80273522