

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360227

研究課題名(和文) 長周期地震動に対する複合制震ダンパーを用いた免震建物の構造設計法および耐震補強法

研究課題名(英文) Structural design and seismic retrofit for seismic isolated building subject to long-period earthquake by means of hybrid aseismic damper system

研究代表者

辻 聖晃 (TSUJI, Masaaki)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00243121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：(1)免震層と一般層の両方に設置する制震ダンパーの複合的效果により、免震層に生じる最大層間変位と、一般層に生じる最大層間変位および最大絶対加速度を、通常の免震構造に比べて大幅に抑制できる「複合制震ダンパーを用いた免震構造」を提案し、その基本特性を明らかにするとともに、構造設計の基本方針を提案した。

(2)基礎免震建物の一般層の一つの層を新たにもう一つの免震層とし、複数の免震層に変形を分散させることによって長周期地震動に対する免震層の過大な変形を抑制することが可能な「多段免震構造」を提案し、その基本特性を明らかにするとともに、二つの免震層の構造設計法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Two new seismic isolation systems for long-period earthquake are proposed. The first is a seismic isolation system using hybrid aseismic dampers installed into isolation story and isolated stories. The second is a multiple isolation system having two or more isolation stories. Basic characteristics of the proposed seismic systems are disclosed by theoretical study on simplified models of the systems. Response reduction effect to long-period earthquakes compared with normal base-isolation system is verified by numerical and experimental studies.

研究分野：建築構造力学

キーワード：免震構造 長周期地震動 耐震補強 多段免震構造 免震制震ハイブリッド構造 慣性接続要素

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震においては、仙台沖を震源地とする長周期地震動により、東北地方に存在する免震建物の免震装置や周辺地盤とのエキスパンションジョイント部分に、少なくない被害が生じた[1]。また、首都圏や関西圏にある超高層建物には、長時間の振動が発生し、主たる構造部材への被害は報告されていないものの、非構造部材やエレベータ等の設備機器への被害が生じ、一部の建物は地震後暫くの間は使用ができない状態となった[1]。

このように、一般には高い耐震性を有していると考えられている免震建物や超高層建物に、長周期に大きな成分を持ち、かつ、地震動の継続時間も長時間に及ぶような長周期長時間地震動が作用した場合、主たる構造部材には大きな損傷が生じなくとも、非構造部材や設備機器の損傷や、それとともなって建物が使用不能となることによる、大きな経済的損失が生じる可能性があることは、以前からも指摘がされていたものの[2]、この地震によりあらためて脚光を浴びることとなった。

免震建物や超高層建物は、災害時に復旧の拠点となることを想定された建物も多く、大地震時に構造部材に損傷がないだけでなく、大地震後に直ちに建物として使用可能となることを期待されている。しかしながら、現状の耐震設計基準は、「極めて稀に発生する地震に対しても、建物が倒壊しないこと」を設計目標としており、免震建物や超高層建物であっても、経済的な観点から、この設計目標を大幅に上回るような高い目標が設定されることは極めて少ない。

上記のような観点から、既存の免震建物や超高層建物に「大地震後も直ちに建物として使用可能な極めて高い耐震性能」を、現実的な技術とコストと付与できる「既存高性能建物の耐震性能向上法」の開発が強く求められている。しかしながら、もともと一般の建物に比較して高い性能を有する免震建物や超高層建物の高性能化は、一般的な建物の耐震補強に比べて困難である。このため、既往の制震(制振)技術や免震技術を複合的に組み合わせ、新しい高性能化技術の開発が必要となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下に示すとおりである。

(1) 免震層に設置する制震ダンパーと、免震層以外の一般層に設置する制震ダンパーの複合的効果により、免震層に生じる最大層間変位と、一般層に生じる最大層間変位および最大絶対加速度を、免震層にのみ制震ダンパーを設置した通常の免震工法に比べて大幅に抑制できる「複合制震ダンパーを用いた免震構造」(図1右)ならびに、その構造設計法を提案すること。

(2) 基礎免震建物の一般層の一つの層を新たにもう一つの免震層とし、複数の免震層に変

形を分散させることによって長周期地震動に対する免震層の過大な変形を抑制することが可能な「多段免震構造」(図2右)を提案し、その基本特性を明らかにするとともに、二つの免震層の設計法(既存免震建物の場合には、既存免震層の剛性ならびに減衰の必要増加量の決定法)を提案すること。

(3) 提案した複合制震ダンパーを用いた免震構造や多段免震構造に長周期地震動が作用した場合の挙動を振動実験により明らかにするため、実質量の数十倍の仮想質量を慣性接続要素により供試体に与え、一般的な実験装置では実現困難な長周期での振動実験を可能とした「慣性接続要素を用いた仮想質量機構付き振動実験システム」を提案すること。

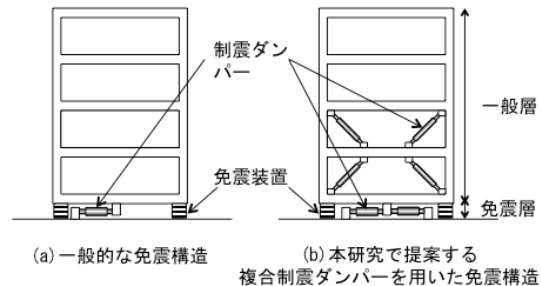


図1 複合制震ダンパーを用いた免震構造(右)

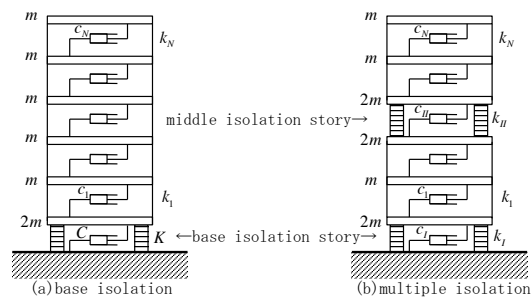


図2 基礎免震構造(左)と多段免震構造(右)

3. 研究の方法

本研究で免震構造の高性能化のために提案する2つの構造システム「複合制震ダンパーを用いた免震構造」および「多段免震構造」の基本的特性を明らかにし、その設計法を構築するために、以下の方法を組み合わせられた研究を実施した。

(1) 単純モデルを用いた理論的検討：

免震構造建物は、免震層と一般層(非免震層)の剛性や減衰に大きな差があるため、一般層を剛体に置き換えた単純モデルによって、免震層に生じる地震時最大層間変位や、一般層に生じる地震時最大加速度を近似的に評価可能であることが知られている。本研究でもこのことを利用して、比較のための基本構造となる基礎免震構造、および、複合制震ダンパーを用いた免震構造を1自由度モデルに、多段免震構造を2自由度モデルとした単純モデルにそれぞれ置き換え(図3)、実固有値解析を用いた固有振動特性の数式表示、ならびに、複素固有値解析を用いた固有振動特性の定量的評価を行い、複合制震ダンパー

を用いた免震構造と多段免震構造の基本的振動特性の解明を行った。

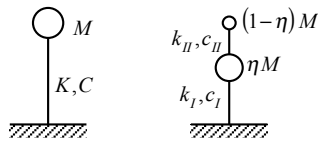


図3 理論的検討に用いる単純モデル
(左：基礎免震構造，右：多段免震構造)

(2) 応答スペクトル法と時刻歴応答解析による地震時最大応答の定量的評価と、逆問題型定式化に基づく設計公式の提示：

上記(1)で検討を加えた単純モデルは、本研究で提案する新しい免震構造の基本的な動特性を理論的に明らかにするには大変有効である。しかしながら、このような単純モデルは、地震時応答における高次モードの効果や、ダンパーや免震装置の非線形化の効果、ダンパーの偏在による非比例減衰の効果が直接的には評価できないという欠点もある。そこで、非比例減衰の効果を高い精度で考慮できる応答スペクトル法と、高次モードやダンパー・免震装置非線形化の効果を考慮できる時刻歴応答解析を用いて、提案する免震構造の地震時応答の定量的評価を行い、(1)で得られた成果と比較することにより、単純モデルでは考慮できない種々の効果による影響を明らかにする。

さらに、「地震時最大応答が指定した値に一致するような、構造物の剛性や減衰を直接的に見出す」という逆問題型定式化に基づいて、複合制震ダンパーを用いた免震構造に設置するダンパー量や、多段免震構造の2つの免震層に設置する免震装置とダンパーの特性に対する設計公式を提示する。

(3) 提案する免震構造およびダンパーに対する動的載荷実験ならびに振動台実験：

これまでにないような新しい考え方に基づく免震構造や制震構造では、理論的方法による性能の検証では不十分な場合がある。そこで本研究でも、提案する免震構造や、そこに設置するダンパーに対する動的載荷実験ならびに振動台実験を実施して、免震構造に対する応答評価法の妥当性を検証するとともに、理論的・数値的検討では顕在化することがなかった課題の洗い出しと、問題点克服のための検討を実施する。

4. 研究成果

本研究による研究成果を、項目に分けて以下に示す。また、最後に今後の展望を示す。

(1) 複合制震ダンパーを用いた免震構造の提案：

①一般層（非免震層）に粘性系のダンパーあるいは履歴系のダンパーを設置し、免震層には通常的基础免震構造に比べて容量の大きなオイルダンパーを設置することにより、地震時に免震層に生じる最大層間変位と、一般層に生じる最大加速度を、一般的な基礎免震構造よりも大幅に低減可能な「複合制震ダ

ンパーを用いた免震構造」について、免震層および一般層へのダンパー設置に伴う固有周期および減衰定数の変化の一般的傾向を明らかにした(図4)。また、ダンパーの増設による地震時応答の変化と、上記の固有周期および減衰定数の変化の関係にもとづいて、建物に対する要求性能に応じた、複合制震ダンパーを用いた免震構造に対する設計フローチャートを作成した(図5)。

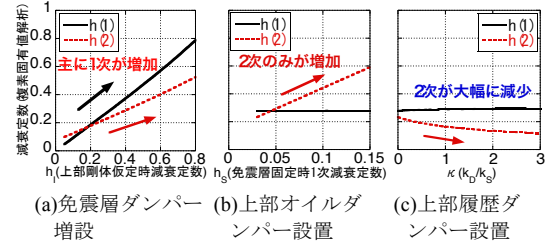


図4 免震構造へのダンパー設置による減衰定数の変化

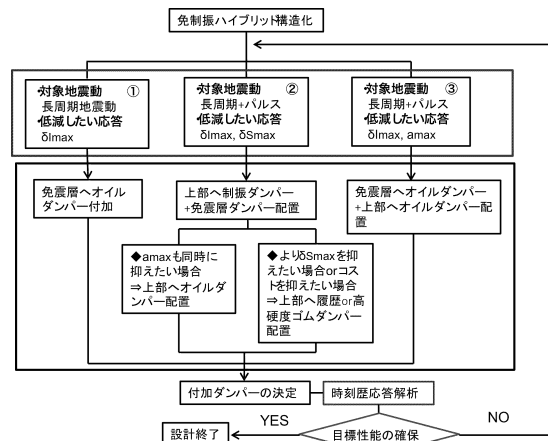


図5 免震制震ハイブリッド構造の設計フローチャート

②建物の用途などの問題から、一般層に制震ダンパーの設置が困難な場合に、一般の免震構造と同等の免震効果(=加速度低減効果)を確保しつつ、長周期地震動に対する免震層の最大層間変位を抑制するための新しい免震構造として、地下階に大質量TMDを設置した免震制震ハイブリッド構造を提案した(図6)。TMDの変位を抑制するために、TMDと免震層床面をつなぐためのダンパーとして、慣性質量ダンパーを導入した。さらに、慣性質量ダンパーによる過大な反力を抑制するために、慣性質量ダンパーの取り付け部には応力制限機構を組み込んだ。一般的な免震構造と比較して、大質量TMDの設置によって、一般層に生じる加速度応答と、免震層に生じる層間変位を大幅に低減できることを示した(図7)。さらに、提案した免震制震ハイブリッド構造に組み込む慣性質量ダンパーの効果を確認するために、小型模型を用いた振動台実験を実施した。実験の結果、慣性質量ダンパーの設置により、免震効果を保持しながらTMDの変位を抑制できることを確認した。

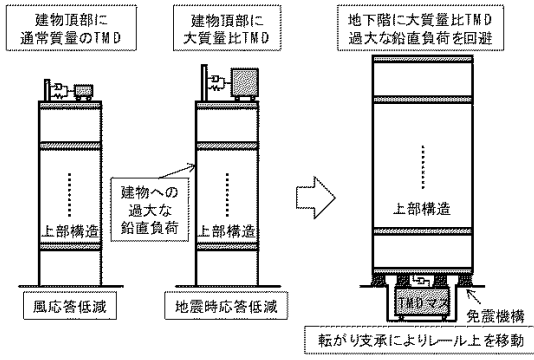


図6 地下階に大質量TMDを設置した免震制震ハイブリッド構造

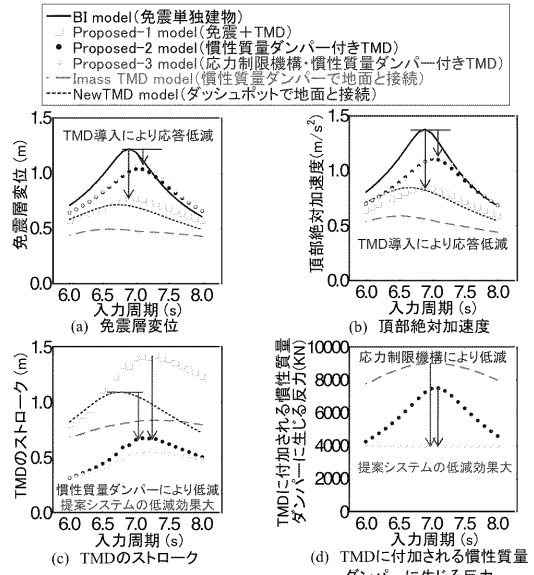


図7 模擬長周期地震動に対する免震制震ハイブリッド構造と他の構造の応答比較

(2) 多段免震構造の提案，ならびに，既存免震建物の多段免震化による耐震性能向上法の提案：

① 多段免震構造を2自由度モデルに単純化し，固有周期や減衰定数の解析解を導出することにより，基礎免震構造と多段免震構造の基本的振動特性の違いを明らかにした。

② 一般層にも自由度を設けた多自由度モデルに対する時刻歴応答解析により，基礎免震構造と多段免震構造の地震時応答の違いについて以下の点を明らかにした(図8)。

・基礎免震建物と同じ1次固有周期と減衰定数をもつ多段免震建物においては，基礎免震層の地震時最大層間変位の比は，基礎免震層の層間変位に対応する1次刺激関数の比に比例する。この結果，中間免震層を建物の中央層付近に設置した場合，基礎免震層の地震時最大層間変位を，基礎免震構造物の約60%に低減することができる。ただし，地震動の卓越周期と多段免震構造物の2次固有周期が近接する場合，応答低減効果はこの値よりも低下する。

・上記のような多段免震建物における一般層の地震時最大層間変位分布は，基礎免震建物での分布とほぼ相似形状である。

・地震時最大絶対加速度においては，多段免震化により，一般的，あるいは，パルス性の高い地震動では中間免震層よりも下層で，長周期地震動では中間免震層よりも上層で，加速度の増大が生じる。

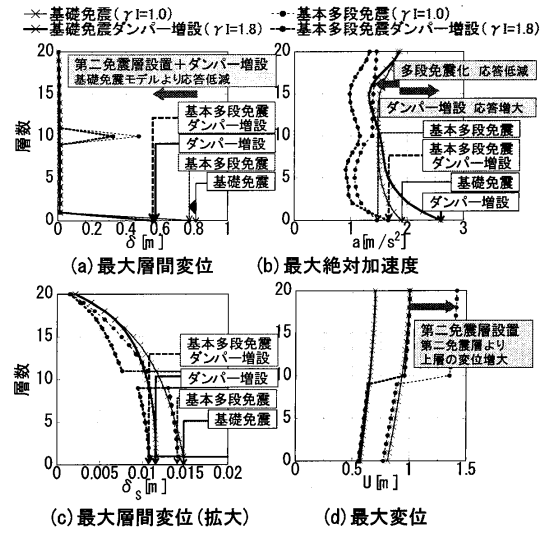


図8 基礎免震建物の多段免震化による地震時最大応答の変化の一般的傾向

③ 前記の②で明らかになったように，多段免震化により一部の層で応答加速度の増大がみられる。このことを抑制し，基礎免震構造と同等あるいはそれ以下の応答加速度とするためには，中間免震層にオイルダンパーを増設することが有効であることを明らかにした(図9)。また，中間免震層へのダンパーの増設は，基礎免震層の地震時最大層間変位にはほとんど影響を与えないものの，超高層免震建物(図中のN=40のケース)では，有意な影響を与える場合があることを示した(図10)。

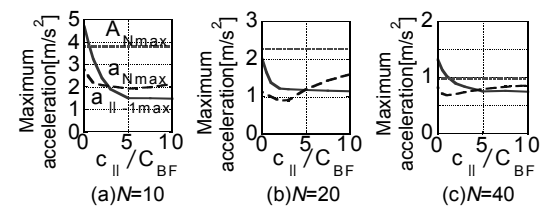


図9 中間免震層へのダンパー付加に伴う地震時最大加速度の変化

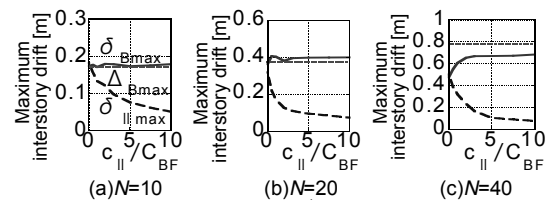


図10 中間免震層へのダンパー付加に伴う基礎免震層の地震時最大層間変位の変化

④ 多段免震構造と基礎免震構造の応答特性の違いを確認するために，小型模型を用いた振動台実験を実施した(図11)。実験の結果，多段免震化により，伝達関数のピークが長周

期側に移動するとともに、免震層における減衰効果によって伝達関数のピーク値にも多段免震化による減少効果が確認できた（図12）。

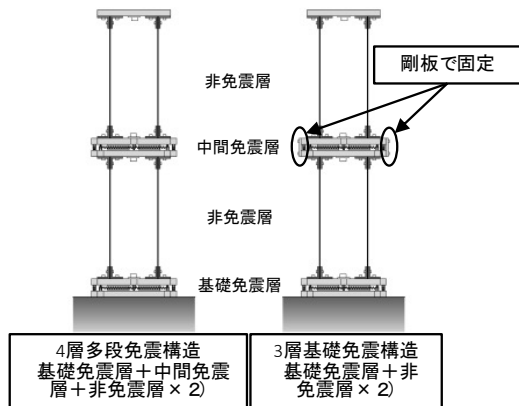


図11 基礎免震構造と多段免震構造の耐震性能を比較するための実験供試体

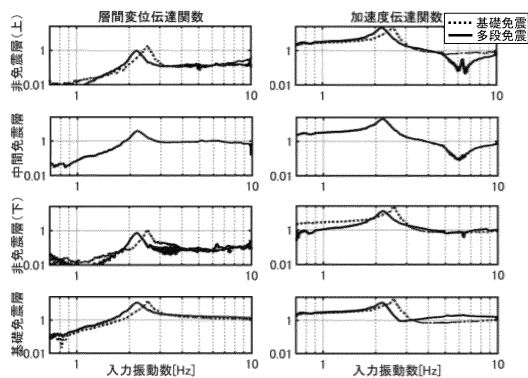


図12 基礎免震構造と多段免震構造の伝達関数の比較（実験による結果）

(3) 慣性接続要素を用いた仮想質量機構付き振動実験システムの提案：

実質量1[t]、仮想質量が68[t]の慣性接続要素を、ダンパーの性能確認実験用の吊りフレームに設置することで、吊りフレームの剛性を変更することなく、固有周期を0.4[s]から3[s]に伸長できることを実証した。さらに、この吊りフレームを用いて、高硬度ゴムを用いた制震ダンパーの自由振動実験を実施し、免震建物や超高層建物のような長周期の建物に対しても、高硬度ゴムを用いた制震ダンパーが振動の早期減衰に効果的であることを実証した。

(4) 今後の展望

本研究で提案した、複合制震ダンパーを用いた免震構造および多段免震構造は、まだ提案の段階に留まっており、実建物への適用には、コスト評価や地震後の回復性の評価など、既往の技術に対する優位性を実証する必要がある。モデル建物に対する試設計や、企業との共同研究を通じ、研究成果の社会還元に向けて努力を続けたい。

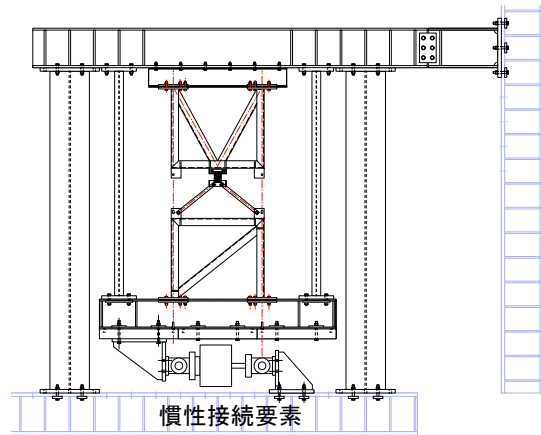
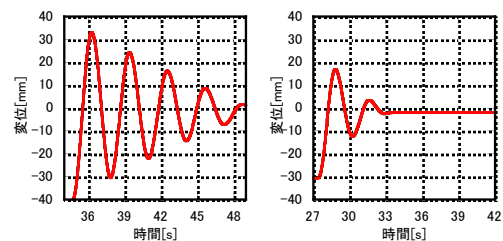


図13 慣性接続要素を用いた仮想質量機構付き振動実験システム



(a)ダンパーなし (b)ダンパーあり
図14 仮想質量機構付き振動実験システムの自由振動波形

<引用文献>

- [1]建築研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震調査研究報告，<http://www.kenken.go.jp/japanese/content/topics/20110311/0311report.html>
[2]東野さやか，北村春幸：長周期地震動に対する既存免震建物の耐震安全性評価，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），（2005.9）

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12件）

- ①片岡奈々美，合田圭吾，藤田皓平，辻聖晃：竹脇出：免震と制振のハイブリッド構造における免震層の設計領域，日本建築学会近畿支部研究報告集，査読無，第53号，pp.137-140（2013.6）
②合田圭吾，片岡奈々美，藤田皓平，辻聖晃，田中和宏：3段ユニット間柱型粘弾性ダンパーシステムの大振幅自由振動実験，日本建築学会近畿支部研究報告集，査読無，第53号，pp.85-88（2013.6）
③片岡奈々美，合田圭吾，辻聖晃：免震効果と免震層変形の抑制を両立させる多段免震構法，日本建築学会近畿支部研究報告集，査読無，第54号，pp.193-196（2014.6）
④合田圭吾，片岡奈々美，辻聖晃：制振免震ハイブリッド構造を用いた高層建物の安全性と居住性を確保する設計法，日本建築学会

近畿支部研究報告集，査読無，第 54 号，pp. 221-224 (2014. 6)

⑤橋本拓哉，藤田皓平，辻聖晃，竹脇出：地下階に大質量比 TMD を有する免震建物の種々のタイプの地震動に対する応答抑制効果，日本建築学会近畿支部研究報告集，査読無，第 54 号，pp. 245-248 (2014. 6)

⑥辻聖晃，辻千佳，片岡奈々美：複数の免震層を有する多段免震構造の地震応答特性，日本建築学会構造系論文集，査読有，No. 705，pp. 1613-1623 (2014. 11)

⑦橋本拓哉，藤田皓平，辻聖晃，竹脇出：地下階に大質量比 TMD を有する免震建物の種々のタイプの地震動に対する応答低減効果，日本建築学会近畿支部研究報告集，査読無，第 55 号，pp. 85-88 (2015. 6)

⑧中川將，吉富信太：基礎免震構造に対する多段免震化による免震効果の検討，日本建築学会近畿支部研究報告集，査読無，第 55 号，pp. 57-60 (2015. 6)

⑨小嶋健太郎，吉富信太：基礎免震と連結制振のハイブリッドシステムに対する連結ダンパーの最適配置法の提案および最適解特性の分析，日本建築学会近畿支部研究報告集，査読無，第 55 号，pp. 57-60 (2015. 6)

⑩辻千佳，辻聖晃：既存基礎免震建物の多段免震化による地震時応答低減，構造工学論文集，査読有，Vol. 62B，pp. 355-362 (2016. 4)

⑪三浦俊哉，藤田皓平，辻聖晃，竹脇出：硬化型の免震層特性を有する多段免震構造に関する実験的研究，日本建築学会近畿支部研究報告集，査読無，第 56 号，pp. 249-252 (2016. 6)

⑫辻千佳，辻聖晃：免震層変位と上部構造加速度を目標性能にした多段免震建物の設計法，査読無，第 56 号，pp. 253-256 (2016. 6)

[学会発表] (計 7 件)

①山下陽子，吉富信太：慣性接続要素を用いた複合制振ダンパーの応答低減特性及び最適配置に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，北海道大学，構造 II，pp. 999-1000 (2013. 8)

②辻聖晃，片岡奈々美，合田圭吾，藤田皓平，竹脇出：安全性と快適性を両立させる免震・制振ハイブリッド構造における免震層特性の設計領域，第 13 回「運動と振動の制御」シンポジウム (MoViC2013)，九州産業大学 (2013. 8)

③横山祐樹，吉富信太：慣性接続要素を用いた免震構造の応答低減特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，神戸大学，構造 II，pp. 509-510 (2014. 8)

④山上雄平，吉富信太：建築構造物の動的応答を考慮した高精度縮約モデルを用いたオイルダンパーの最適配置法，日本建築学会大会学術講演梗概集，神戸大学，pp. 715-716 (2014. 8)

⑤井尾公彦，吉富信太：アウトフレーム型連結制振構法における連結ダンパーおよびア

ウトフレーム剛性の設計法，日本建築学会大会学術講演梗概集，神戸大学，pp. 709-710 (2014. 8)

⑥辻千佳，辻聖晃：非線形特性を有する免震装置を用いた多段免震化による免震層変位と建物頂部加速度の低減効果，第 14 回「運動と振動の制御」シンポジウム (MoViC2015)，栃木県総合文化センター (2015. 6)

⑦辻千佳，藤田皓平，辻聖晃，竹脇出：地盤特性と免震装置のばらつきを考慮した多段免震構造における最悪な変動パラメータの解析，日本地震工学会・大会-2015 梗概集，東京大学 (2015. 11)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻聖晃 (TSUJI, Masaaki)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号： 00243121

(2) 研究分担者

吉富信太 (YOSHITOMI, Shinta)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号： 30432363