

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月10日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21686051

研究課題名（和文） 制振ダンパーの取り付け部とその周辺部材に要求される性能の分析・設計方法の構築

研究課題名（英文） Seismic Behavior of Damper Connection and its Surrounding Members in Passive-control Structures

研究代表者

吉敷 祥一（KISHIKI SHOICHI）

東京工業大学・応用セラミックス研究所・助教

研究者番号：00447525

研究成果の概要（和文）：パッシブ制振技術は幅広い入力レベルの地震動に対して従来の耐震構造よりも構造部材や非構造部材を守ることができるとされ、都市の耐震性能を向上させる上で極めて重要な建物の財産価値や機能の保持が期待できる。しかし、パッシブ制振技術は未だ大地震を経験しておらず、潜在的な問題が指摘されている。本研究課題ではダンパー取り付け部とその周辺部材に着目し、構造実験・数値解析を通してこれらの部位の力学挙動を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Passive-control is used for most major Japanese high-rise buildings after the 1995 Kobe earthquake. Nevertheless, the majority of these studies have tested isolated dampers or simple subassemblies which neglect the influence of the framing components and the damper connections on the system performance. In order to evaluate the elasto-plastic behavior of beam-column subassemblies with brace-type and wall-type damper connections, hybrid-control experiments and numerical studies are carried out.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	10,900,000	3,270,000	14,170,000

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：パッシブ制振構造、制振ダンパー、ダンパー取り付け部、ガセットプレート、弾性剛性、降伏耐力、塑性変形能力

1. 研究開始当初の背景

我が国は世界でも有数の地震発生国であり、過去の大地震によって多くの人命が失われた。研究者や構造技術者が地震被害から学ぶべきことは多く、建築構造物の耐震技術は震災の度に発展してきたと言える。特に1995年の阪神淡路大震災では経済活動が深刻な打撃を受け、大地震に対する建物の安全性の

確保だけでなく、財産価値や機能の保持が極めて重要であることが認識されるようになった。このような背景から幅広い入力レベルの地震動に対して従来の耐震構造よりも構造材や非構造材を守ることができると考えられている制振技術が注目され、高層建物を中心に広く普及し、さらには中低層建物や戸建住宅への適用も試みられるようになった。

現段階では制振、あるいは免震といった新しい技術や設計思想は有効であり、高層建物を中心とした多くは大地震時にも大きな被害を受けないと考えられている。しかし、耐震工学は経験科学であり、その歴史を振り返ってみれば建築構造物は常に技術と実践が先行し、それらが工学や科学になってきたことが分かる。制振技術を適用した建物は未だ本格的な地震被害を経験しておらず、実地震によって明るみに出ていない種々の問題が潜んでいる可能性がある。すなわち、地震被害による教訓となりうる、技術上の見落としがあると考えられる。特に制振構造は、座屈拘束筋違に代表される高性能なダンパーデバイスの開発や、それらの性能と非線形動的解析に基づいた建物全体の地震応答評価に重点が置かれて発展・普及してきた。例えば座屈拘束筋違は開発段階において数多くの载荷実験が行われてきたが、それらの約80%がダンパー単体の単純な実験であり、理想的な条件の下で検討された実験が圧倒的に多い。その結果、最近になって徐々にダンパーの取り付け部やその周辺部材に関する問題が指摘されてきている。米国では座屈拘束筋違を組み込んだ部分架構の実験が行われ、取り付け部であるガセットプレートと梁の溶接部近傍から破断が生じ、ダンパーが十分に機能しない結果が報告されている。また、国内ではガセットプレートやK形筋違の交叉部分の梁を含めた座屈拘束筋違の構面外座屈問題が指摘されている。さらに制振構造と並ぶ新技術である免震構造では、実際に2005年の福岡県西方沖地震においてダンパーの取り付け部が破壊する被害が報告されている。これら先駆的な研究で行われているダンパーの取り付け部を含めた検討は、都市部の高層建物の耐震性能を支える制振技術において早急に取り組むべき残された課題の一つである。

2. 研究の目的

本研究課題ではパッシブ制振構造に用いられるダンパーの取り付け部とその周辺部材に着目し、構造実験と数値解析を通じてそれらの力学挙動を明らかにすることを目的とする。主として以下の3項目について検討した。

(1) 筋違型ダンパーを対象としてガセットプレートと角形鋼管柱の接合ディテールや補強方法が周辺部材の力学挙動に及ぼす影響を解明する。

(2) 制振壁（壁型ダンパー）については、制振壁の取り付け架台と制振壁の復元力による曲げ戻しが周辺部材の力学挙動に及ぼす影響を解明する。

(3) ダンパー接合部が周辺部材の力学挙動に及ぼす影響を考慮した建物の地震応答解

析を行い、建物の全体応答に対してダンパー取り付け部が及ぼす影響を検討する。

3. 研究の方法

パッシブ制振構造に用いられるダンパーの取り付け部とその周辺部材の力学挙動を明らかにするため、構造実験と数値解析による検討を行った。

前述したように制振ダンパーについては開発段階において数多くの载荷実験が行われており、ダンパー単体の性能については既に多くの知見が得られている。そこで、本研究課題の実験では、ダンパー部分を荷重制御した油圧ジャッキにより再現した。ダンパー取り付け部とその周辺部材に着目するため、このような実験方法を採用した点が本研究課題の特徴である。

制振壁の取り付け架台とその周辺部材の力学挙動に着目して行った実験を例に、実験セットアップを図1に、実験における载荷方法を図2に示す。試験体は柱梁とダンパー接合部からなり、この実験では1層1スパンのH字形部分架構と梁中央部に接続したダンパーの取り付け架台を有する。ダンパーは小型の油圧ジャッキを荷重制御することによって再現し、取り付け架台と反力床あるいは载荷梁の間に設置する。実験では载荷梁に接続した油圧ジャッキを変位制御することで柱梁架構に層間変形を与え、得られた層間変形に応じて制振壁の復元力を小型の油圧ジャッキを荷重制御して与える。この作業をstep by stepで繰り返すことにより所定の層間変形と制振壁の抵抗力を再現する。

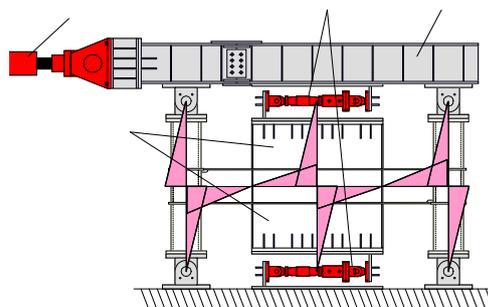


図1 実験セットアップの例（制振壁）

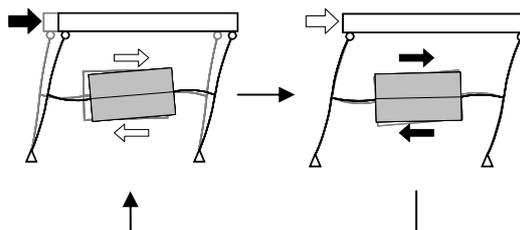


図2 実験における载荷方法の例（制振壁）

数値解析については、汎用解析プログラム ABAQUS を用いた有限要素法解析に加え、実験と有限要素法解析の結果を基に線材要素（曲げせん断棒・トラス）に適用可能な簡易な力学モデルを構築した。複雑な現象を線材要素により表現することで、線材要素からなる建物モデルの地震応答解析が比較的容易に可能となり、実設計者に対して有用なツールとして研究成果を提供できる。また、本研究課題においても最終的には建物モデルの地震応答解析を行い、ダンパー取り付け部が周辺部材に及ぼす影響を考慮し、建物の全体応答に対してダンパー取り付け部の存在が及ぼす影響を検討している。

4. 研究成果

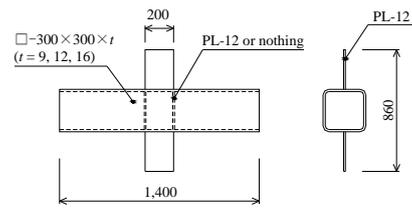
(1) 研究代表者がこれまでに行った研究成果より、筋違型ダンパーの取り付け部であるガセットプレートは柱梁交叉部において方杖のごとく働き、周辺部材の変形を抑制する効果があることが分かっている。ここではまず角形鋼管柱にガセットプレートが取り付けく場合を対象に、鋼管壁の面外剛性に及ぼす補強効果、および面外剛性と周辺部材に対する変形抑制の関係を明らかにした。

まず、角形鋼管の材と平行に取り付けた板によりガセットプレート部の面外剛性を、材に直交するように取り付けた板によりサイドスチフナ補強の面外剛性を、それぞれ引張実験により確認した。ガセットプレートと補強材（サイドスチフナ、内ダイアフラム）の要素実験に用いた試験体を図 3 に示す。

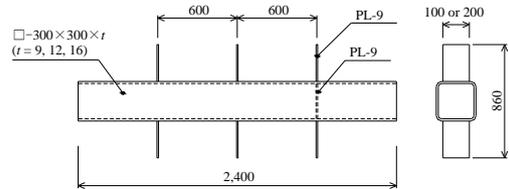
実験結果の一例としてガセットプレート試験体の荷重-変形関係を図 4 に示す。角形鋼管の板厚がもっとも薄い試験体を除き、ガセットプレート要素は±120kN の範囲で弾性挙動を示した。鋼管壁の曲げによって抵抗するため、弾性剛性は板厚の 3 乗に比例する。実験結果においても、板厚が 9mm から 12mm、16mm になると弾性剛性はそれぞれ 2.3 倍、5.7 倍になり、理論と概ね一致する。また、ガセットプレート端に内ダイアフラム補強を施すと格段に弾性剛性が大きくなり、無補強の場合の 55 倍程度になった。

次いで、これらの実験結果より得られたガセットプレート周辺部の補強効果を、図 5 に示すモデルを用いた有限要素解析を行うことで周辺部材に対する変形抑制効果（剛性上昇）との関係を考察する。縦軸に解析より得られた弾性剛性の純ラーメン架構に対する上昇率、横軸に実験等より評価した鋼管壁の面外剛性を取り、両者の関係を図 6 に示す。鋼管壁の面外剛性が大きくなるに従って、純ラーメン架構に対する弾性剛性の上昇が見られ、ガセットプレートの存在による周辺部材の変形抑制効果と、鋼管壁の面外剛性を

関係付けることができた。



(1) ガセットプレート要素試験体



(2) サイドスチフナ要素試験体

図 3 ガセットプレートと補強材の要素実験

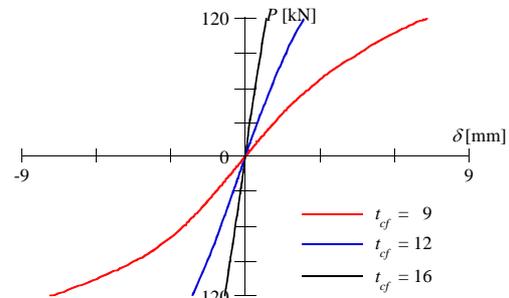


図 4 ガセットプレート要素の挙動

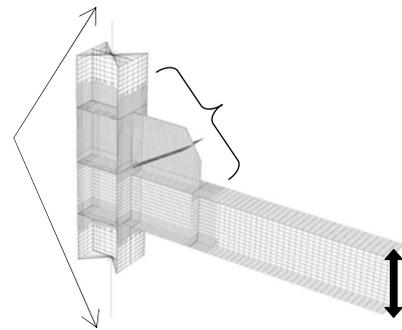


図 5 数値解析モデル

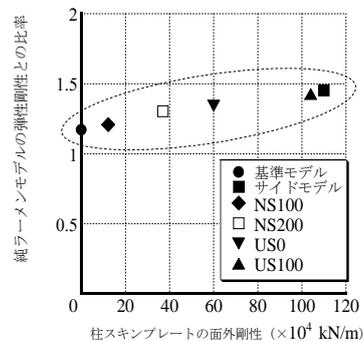


図 6 鋼管壁の面外剛性と変形抑制効果

(2) 次いで制振壁を有する柱梁架構を対象として、制振壁の取り付け架台とその周辺部材の力学挙動に着目して行った構造実験、数値解析の結果を示す。

試験体パラメータは制振壁の取り付け架台の幅と設置位置とした。実験計画に先立ち行った実建物の調査によれば、制振間柱を含む制振壁の幅とスパンの比はおおよそ 1:2 とした設計が多く、また制振壁をスパンの片側に偏在させた建物も多く存在した。このため、取付架台の幅とスパンの比を 1:2 にするとともに、設置位置をスパン中央にしたものを基準試験体とした。

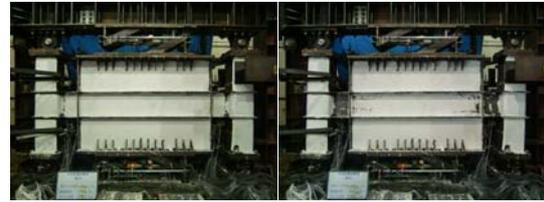
実験は正負交番の漸増繰返し载荷とし、梁端部が破断するまで载荷を行った。実験より得られた荷重-変形関係からは取り付け架台の幅や設置位置の違いによる影響はほとんど見られなかったが、梁端フランジの延性破断によって決定付けられる終局状態までのエネルギー吸収量、累積変形量は壁大がもっとも少なく、逆対称偏在、基準試験体、片側偏在の順に多くなった。取り付け架台のない梁部分の長さは壁大より逆対称偏在の方が両側 50mm ずつ短い、壁大の方が上下の取付架台による断面増加が大きいこと、制振壁の復元力により取付架台を有する梁部分に作用する曲げ戻しが逆対称偏在に比べて約 1.4 倍大きいことから、取付架台を有する梁部分の変形抑制が大きく、壁大の塑性変形能力が低い結果になったと考えられる。実験後の損傷状況を図 7 に示す。損傷部位は取り付け架台のない梁断面に集中していることが分かる。

次いで数値解析により架構の終局状態を決定付けた梁端フランジにおけるひずみ集中を考察する。解析モデルを図 8 に示す。部材はすべて線材要素とし、柱梁接合部パネルの変形を考慮しない代わりに純ラーメンについて実験結果と解析結果の剛性が一致するようにパネル内の柱側の剛域長さを調整した。また、梁端部ではスカラップなどによる梁ウェブのモーメント伝達能力の低下を考慮する。図 9 に示すように、解析結果と実験結果はよく対応しており、解析モデルの妥当性が確認できる。

この解析モデルより得られた層間変形と梁端ひずみの関係を図 10 に示す。純ラーメン架構に対して制振壁を設置することで梁端ひずみは最大で 1.38 倍程度になっている。また、材軸方向の曲率分布からは、制振壁を設置することで塑性化領域が純ラーメン架構に比べて狭くなっていることが確認された。以上の結果から、制振壁の復元力による曲げ戻しと取付架台による梁の断面増加の影響により梁の塑性化領域の拡大が阻害され、柱梁部分架構の塑性変形能力が低下する可能性があることが分かった。



(1) 基準となる制振壁を用いた場合



(2) 制振壁が大きい場合



(3) 上下層で逆対称偏在されている場合

図 7 制振壁付き架構の損傷状況

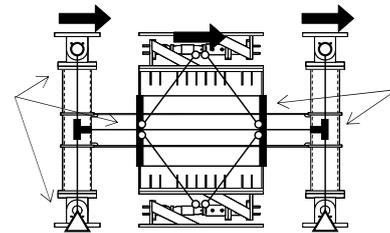


図 8 解析モデル (制振壁付き架構)

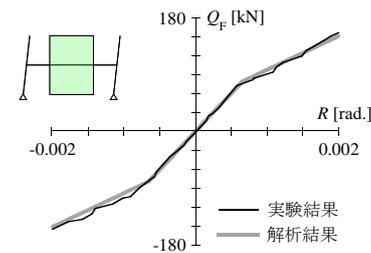


図 9 解析結果と実験結果の比較

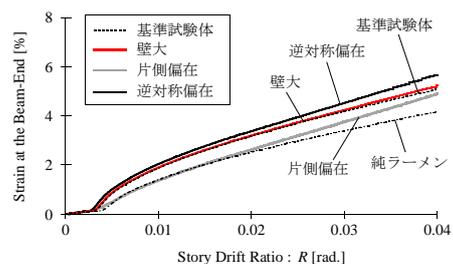


図 10 層間変形角と梁端ひずみの関係

(3) 最後に実建物を想定した建物モデルの地震応答解析を行い、筋違型ダンパーの取り付け部であるガセットプレート (G.PL) の存在を考慮した場合の損傷状況を考察した。想定した骨組モデルと取り付け部の力学モデルを図 11 に示す。G.PL はこれまでの研究成果を基に方杖としてモデル化した。モデル構築の段階で得た固有周期は、G.PL の存在を考慮した場合と無視した場合で変化がなかった。最上層の変位が建物高さの 2% に達するまで A_i 分布に従って荷重増分解析を行った結果を図 12 の左に示す。剛性は固有周期に違いがなかったことから明らかなように G.PL を考慮しても大きな差は生じていない。降伏耐力についても G.PL の存在を考慮することによる上昇は 3~4% 程度であった。

次いで、地震応答解析の結果を比較する。地震波として八戸 EW の最大速度を 75(cm/sec) に基準化した入力に対する結果を例示する。各層の最大層間変形角は、図 12 の右側に示すように両モデルではほぼ同様の結果を示している。また、エネルギーの収支を比較してもほぼ同様の結果であり、G.PL を考慮しても建物全体の挙動にはあまり影響を及ぼさないとと言える。

梁の損傷を表す塑性率 μ 、累積塑性変形倍率 η を図 13 に示す。梁の危険断面位置における最大回転角は G.PL を考慮してもほぼ同様の結果を示すが、梁の可撓長さが短くなることで G.PL を考慮したモデルの方が μ と η の値は最大で 1.3 倍ほど大きくなった。以上の結果から、G.PL の存在を考慮しても建物全体の応答は大きく変わらないが、梁の可撓長さが短くなるために梁に要求される回転性能は大きくなることが分かった。

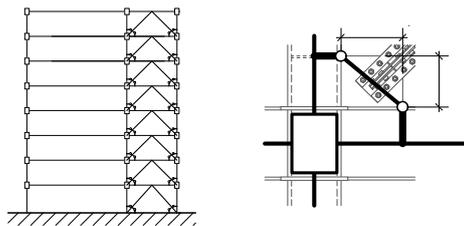


図 11 解析対象と取り付け部のモデル化

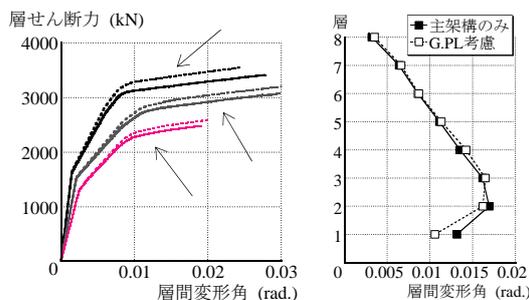


図 12 荷重増分解析結果と最大層間変形角

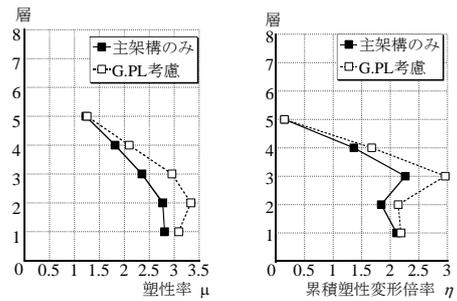


図 13 梁の塑性率と累積塑性変形倍率

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 3 件)

- ① 吉敷祥一、鴨下直登、和田 章、制振壁の復元力と層間変形を受ける柱梁部分架構の弾塑性挙動に関する実験—制振壁を有するパッシブ制振構造の終局耐震性能の評価—その 1—、日本建築学会構造系論文集、査読有、Vol. 77、2012、95-104
- ② 野々山昌峰、吉敷祥一、和田 章、浮き上がり挙動を伴う耐震要素の振動実験装置の開発と検証実験、第 13 回 日本地震工学シンポジウム、査読有、Vol. 13、2010、G05-Fri-AM-6
- ③ 吉敷祥一、鴨下直登、和田 章、制振壁を有する鋼構造柱梁部分架構の塑性変形能力に着目した研究、第 13 回 日本地震工学シンポジウム、査読有、Vol. 13、2010、G13-Fri-AM-4

[学会発表] (計 19 件)

- ① 崔 瑤、吉敷祥一、山田 哲、Experimental Study of Exposed Column Base in Buckling Restrained Braced Frames Part II Numerical Study、第 82 回 日本建築学会関東支部研究発表会、2012. 3. 10
- ② 崔 瑤、吉敷祥一、浅田勇人、山田 哲、Experimental Study of Exposed Column Base in Buckling Restrained Braced Base in Buckling Restrained Braced Frames Part I Experimental Study、第 82 回 日本建築学会関東支部研究発表会、2012. 3. 10
- ③ 齋藤 諭、吉敷祥一、浅田勇人、山田 哲、接合部を含む引張ブレース部材の面外変形と損傷の関係、第 82 回 日本建築学会関東支部研究発表会、2012. 3. 10
- ④ 毎田悠承、曲 哲、吉敷祥一、前川利雄、濱田 真、坂田弘安、和田 章、座屈拘束筋違を取り付けた鉄筋コンクリート骨組に関する研究—その 3—コッター接合

- 部のせん断抵抗機構、第 82 回 日本建築学会関東支部研究発表会、2012. 3. 9
- ⑤ 崔 瑤、吉敷祥一、山田 哲、Experimental Study of Exposed Column Base in Buckling Restrained Braced Frames、9th International Conference on Urban Earthquake Engineering & 4th Asia Conference on Earthquake Engineering、2012. 1. 9-11
- ⑥ 吉敷祥一、崔 瑤、浅田勇人、山田 哲、Experimental Study of Exposed Column Base in Buckling Restrained Braced Frames, Part2:Test Results、第 8 回 日本地震工学会大会、2011. 11. 10
- ⑦ 崔 瑤、吉敷祥一、浅田勇人、山田 哲、Experimental Study of Exposed Column Base in Buckling Restrained Braced Frames, Part1:Introduction、第 8 回 日本地震工学会大会、2011. 11. 10
- ⑧ 鴨下直登、野々山昌峰、吉敷祥一、和田章、壁型の制振部材が取り付いた柱梁架構の弾塑性挙動(その 2 力学モデルの構築と損傷の検討)、日本建築学会大会学術講演、2010. 9. 10
- ⑨ 野々山昌峰、鴨下直登、吉敷祥一、和田章、壁型の制振部材が取り付いた柱梁架構の弾塑性挙動(その 1 壁型の制振部材が取り付いた柱梁架構の実験)、日本建築学会大会学術講演、2010. 9. 10
- ⑩ 高橋聡史、吉敷祥一、和田章、ガセットプレートの影響を考慮した損傷制御構造の耐震性評価(その 4 接合部周辺の補強材が柱梁の力学挙動に及ぼす影響)、日本建築学会大会学術講演、2010. 9. 10
- ⑪ 吉敷祥一、高橋聡史、和田章、ガセットプレートの影響を考慮した損傷制御構造の耐震性評価(その 3 接合部の補強材を模した要素実験)、日本建築学会大会学術講演、2010. 9. 10
- ⑫ 野々山昌峰、吉敷祥一、和田章、浮き上がり挙動を伴う耐震要素の振動実験装置の開発と実験計画、第 80 回 日本建築学会関東支部研究発表会、2010. 3. 6
- ⑬ 鴨下直登、吉敷祥一、和田章、壁型の制振部材が取り付く柱梁架構の弾塑性挙動 その 2 複合載荷実験結果と解析モデルの検討、第 80 回 日本建築学会関東支部研究発表会、2010. 3. 4
- ⑭ 鴨下直登、吉敷祥一、和田章、壁型の制振部材が取り付く柱梁架構の弾塑性挙動 その 1 実験概要と実験結果、第 80 回 日本建築学会関東支部研究発表会、2010. 3. 4
- ⑮ 鴨下直登、吉敷祥一、和田章、間柱型や壁型の制振部材が取り付く柱梁架構に着目した研究 その 2 実験結果、第 7

- 回 日本地震工学会大会、2009. 11. 12
- ⑯ 吉敷祥一、鴨下直登、和田章、間柱型や壁型の制振部材が取り付く柱梁架構に着目した研究 その 1 実建物の調査と実験概要、第 7 回 日本地震工学会大会、2009. 11. 12
- ⑰ 野々山昌峰、吉敷祥一、和田章、浮き上がり挙動を伴う耐震要素の振動実験装置の開発、第 7 回 日本地震工学会大会、2009. 11. 12
- ⑱ 鴨下直登、高橋聡史、吉敷祥一、和田章、ガセットプレートの影響を考慮した損傷制御構造の耐震性評価(その 2 弾塑性挙動の考察と力学モデルの検証)、日本建築学会大会学術講演、2009. 8. 27
- ⑲ 高橋聡史、鴨下直登、吉敷祥一、和田章、ガセットプレートの影響を考慮した損傷制御構造の耐震性評価(その 1 ダンパー付き部分架構の実験)、日本建築学会大会学術講演、2009. 8. 27

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉敷 祥一 (KISHIKI SHOICHI)
東京工業大学・応用セラミックス研究所・助教
研究者番号：00447525

(2) 研究分担者 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：