

令和元年6月20日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06293

研究課題名(和文) 鋼製独立柱とのダンパー連結を用いた木造戸建て住宅の耐震性能向上法

研究課題名(英文) Seismic Reinforcement of Wooden House by Damper Connection to Steel Column

研究代表者

辻 聖晃 (Tsuji, Masaaki)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：00243121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：耐震性能が不足している木造戸建て住宅に対して、建物とは独立して設置した鋼製柱と建物の床をオイルダンパーで連結することにより耐震性能を向上させる構法を提案し、数値解析および実験によってその耐震性能向上効果を実証した。特に本構法は、連続して発生する地震動に対して脆弱な木造建物に対して、複数回の大地震後でも耐震性能の低下がほとんど生じないようにすることが可能である点に特徴がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

耐震補強や建て替えによる公共建築物の耐震化は順調に進んでいるものの、私有建築物、特に戸建て住宅については、未だ数百万戸が耐震化されずに残っており、近い将来に発生が予想される大地震に対応するため、耐震化の促進が急務となっている。本研究で提案した、鋼製独立柱とのダンパー連結による耐震補強構法は、建物の大幅な改変が不要な点と、熊本地震のように連続して大地震が発生するような場合にも耐震性能向上効果がほとんど変化しない点で、既往の耐震壁の増設による耐震補強構法に対する利点がある。しかしながら、コストの面、設計の容易さの面では、既往の構法に未だ長所があり、この点の克服が本研究における今後の課題である。

研究成果の概要(英文)：For wooden houses lacking in seismic performance, a seismic reinforcement method is proposed that improves seismic performance by connecting steel columns installed independently of the building and the floor of the house with oil dampers. Numerical analyses and shaking table experiments are preformed to show the seismic performance improvement effect by the proposed method. In particular, this seismic reinforcement method is characterized in that it is possible to make the deterioration of the seismic performance hardly occur even after continuous large earthquakes for wooden houses which is vulnerable to continuous earthquake motions.

研究分野：建築構造力学

キーワード：木造住宅 耐震補強 オイルダンパー 連結制震 連続地震動 ダンパー損傷

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 日本国内において、防災拠点となる公共施設の耐震化率は、平成13年では50%以下であったのに対し、平成24年には80%を越え、防災計画が比較的順調に進捗していると言える<sup>1)</sup>。一方、住宅の耐震化率も、平成20年の推計値で約80%であり<sup>2)</sup>、数値の上では順調に進捗しているようにも見えるが、「耐震化されていない住宅の戸数」は約1,000万戸であり、居住者の数から考えれば、到底無視できる数ではない。また、耐震化されていない住宅の内、木造戸建て住宅は850万戸を占めており<sup>2)</sup>、その耐震化を進めることが喫緊の課題であることに異論の余地はない。

木造戸建て住宅の耐震化は、建て替えによる場合と、耐震補強による場合とがある。建て替えは、コストの問題と、同規模の建物を同じ敷地に新築することが現行の法規上困難ないしは不可能となる場合があり、耐震化の方法として耐震補強を選択せざるを得ない場合も多い。

(2) 木造戸建て住宅の耐震補強は、「不足している耐力を、壁や筋違の増設により補う」という「強度上昇型」の考え方にに基づき実施されるのが一般的である。耐震補強が必要とされる2階建て以上の木造戸建て住宅では、1階の耐力が必要とされる量に対して大幅に不足するケースがほとんどであるため、1階のみに耐震補強を実施することが多い。このような木造戸建て住宅に対する強度上昇型の耐震補強構法には、以下のような問題点が存在する。

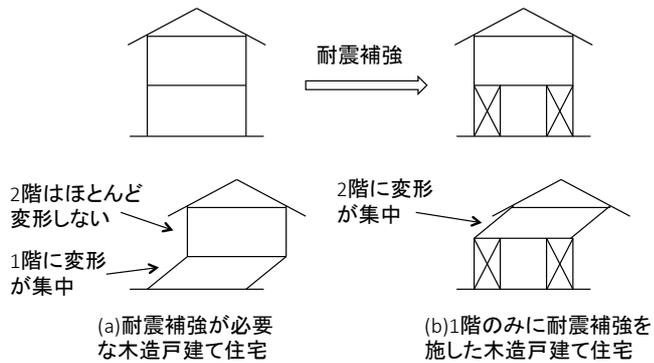


図1 1階のみに強度上昇型の耐震補強を施す場合の問題点

- ・ 耐力が大幅に不足している場合、必要となる筋違や壁の量が多くなりすぎ、コストや使い勝手の問題から、耐震補強を諦めざるを得ない場合がある。
- ・ 1階の過度の耐力上昇は、2階以上への変形の集中を招き、耐震補強を施していない階の耐震性能を却って低下させる場合がある（図1）。

本研究者はこれまでに、特に以下の観点に着目し、連結制震構法を用いた耐震性能向上法（既存建物の場合は耐震補強構法）を提案してきた<sup>3)</sup>など。

- (a) できるだけ施工箇所が少ないこと
- (b) 応答低減効果が確実に得られること

また、木造戸建て住宅を含む複数の建物が隣接して建ち、その中に特に剛性や耐力が大きな建物が存在する場合に、特性を適切に調整した速度依存型のダンパーで互いを連結することにより、連結された全ての建物の耐震性能を向上させることが可能であることを示し<sup>4)</sup>など、「耐震コア建物との制振（制震）連結による住宅密集地の地震防災性能向上法」を提案した<sup>5)</sup>。

(3) しかしながら、木造戸建て住宅の多くは個人資産であり、これを互いにダンパーで連結することには、所有者全員の合意の必要性や、法規上の問題が実務構造設計者より指摘され、現在のところ実現には至っていない。現在実際に適用されている耐震補強構法がそうであるように、戸建て住宅の耐震補強は、対象建物内で完結していることが、適用のための重要な要件となっている。

そこで、本研究者が提案する連結制震構法を用いた耐震性能向上法の「施工箇所の少なさ」と「耐震補強効果の確実性」を活かしながら、対象建物内で完結する、木造戸建て住宅に適用できる新しい耐震補強構法として、「鋼製独立柱とのダンパー連結を用いた木造戸建て住宅の耐震性能向上法」の着想に至った<sup>6)</sup>。右図に、提案する構法の模式図を示す。図中に示した鋼製独立柱を、建物内に2

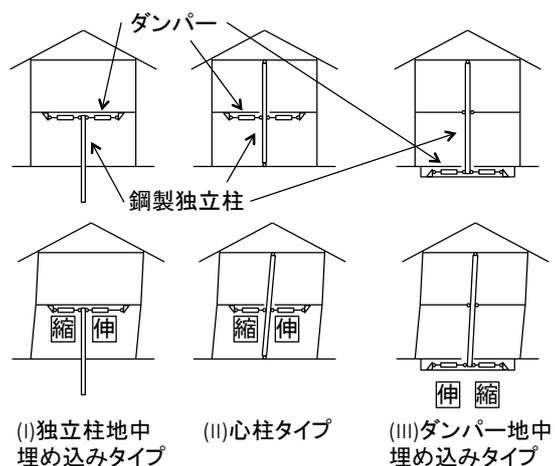


図2 鋼製独立柱とのダンパー連結を用いた木造戸建て住宅の耐震性能向上法の模式図

～4本設置し、これを速度依存型のダンパーを介して、2階ないしは1階の床構面と連結する。このことにより、木造戸建て住宅の「振動モードの適正化（特定層への変形集中の抑止）」と「速度依存型ダンパーによる確実な減衰性能の増大」を図る。Iのタイプでは、1階に生じる変位と独立柱の間の相対的な変位や速度を、IIとIIIのタイプでは、1階と2階に生じる層間変位や層間速度の差を、それぞれダンパーへの入力とする。

## 2. 研究の目的

本研究テーマに関して本研究者がすでに行った検討<sup>6)</sup>においては、対象となる木造戸建て住宅、鋼製独立柱、連結ダンパーについて、さまざまなモデル上の簡略化を行い、耐震性能向上効果を検討した。図3に検討に用いたモデルを示す。しかしながら、実際の建物に提案する構法を適用するためには、以下の点を明らかにしておく必要がある。

(1) 木造建物の床構面は面内剛性が低く、剛床仮定は一般には成立しない。本構法では、床の面内剛性が低いと、ダンパーに十分な減衰力が発生せず、期待した減衰性能を得ることができない。そこで、床構面の面内剛性が本構法による応答低減効果にどのような影響を与えるのかを明らかにする。

(2) 鋼製独立柱は、その端部ないしは中間部を、地盤への埋め込みや床構面とのピン接合によって拘束されるが、完全な剛支持やピン接合とすることは困難である。そこで、このときの固定度（理想的な剛支持やピン接合からの緩みの少なさ）の評価方法を構築し、鋼製独立柱の曲げ剛性と固定度が本構法による応答低減効果に与える影響を明らかにする。

本研究の目的は、上記の(1)と(2)を明らかにした上で、所定の応答低減効果を得るために必要な、鋼製独立柱の剛性とダンパー特性の設計式を構築することにある。

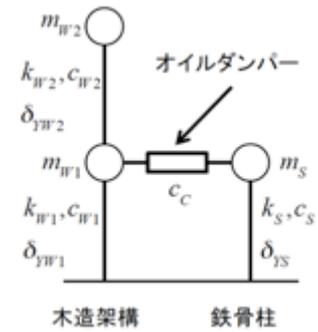


図3 引用文献6)で用いた簡略化モデル

## 3. 研究の方法

(1) 鋼製独立柱とダンパー連結された木造戸建て住宅に対して、木造建物の弾塑性復元力特性、床構面の面内剛性、鋼製柱の剛性、および、建物や基礎に鋼製柱が固定される箇所での固定度を考慮できるような、多構面並列系構造モデルを構築する。このモデルを用いて、様々な特性（振幅、位相、継続時間など）の地震動に対する最大応答を弾塑性時刻歴応答解析により評価するとともに、複素固有値解析を用いて、地震動の特性に依存しない応答特性を把握する。

(2) 鋼製独立柱を地中に埋め込んだ場合の固定度（回転バネの回転剛性で評価）を、鋼製柱の地中埋め込み部を曲げバネ、地盤を深さ方向に分布する連続バネ（Winklerバネ）とするモデルを用い、地盤のN値、埋め込みの深さ、根巻きコンクリートの有無とそのサイズをパラメータとして評価する。この結果を(1)の成果と合わせ、所定の応答低減効果を得るために必要となる、鋼製独立柱の埋め込み深さやその設置方法を決定するための資料とする。

(3) 前記の(1)、(2)の結果に基づき、木造戸建て建物の床構面の面内剛性や鋼製独立柱の固定度の影響も考慮したうえで、所定の応答低減効果を得るための鋼製独立柱とダンパーの設計式を構築する。

(4) 木造建物の振動特性を再現できる鋼製小型模型を作成し、大地震が連続して発生したときにも本耐震補強構法が高い耐震補強効果を発揮できることを実証する。

## 4. 研究成果

(1) 各層が劣化スリップ型の復元力特性を有する2層せん断型モデルと、ノルマルバイリニア型の復元力特性を有する1自由度モデルを、ダッシュポットで連結した3自由度モデルについて、ダッシュポットの減衰係数をパラメータとして種々の地震動に対する弾塑性時刻歴応答解析を実施し、以下のことを明らかにした。

- 本構法の適用によって木造住宅2階の変位応答が増大し、層間変形角が1/30を超える場合には、ダンパー連結と2階の耐震補強と併用することにより、1階、2階とも、レベル2相当の地震動に対しても層間変形角を1/30以下に抑制することが可能となる（図4）。
- 層間変位が1/30における等価弾性剛性を

用いて計算した1次減衰定数がピークとなる連結ダンパー量と、木造住宅の最大層間変位を最小にするようなダンパー量にはかなりの差があり、減衰定数をピークにするようなダンパー量よりも多くダンパーを入れることでさらに変位応答を低減することができる。

上記の成果は、学会発表⑨、学会発表⑩で発表した。

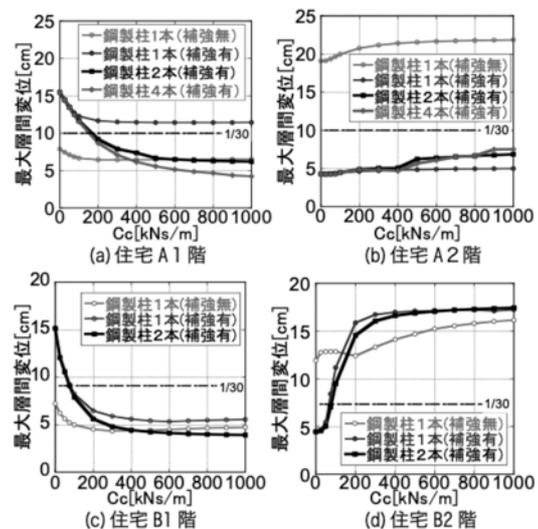


図4 連結ダンパー量と最大層間変位の関係 (JMA-Kobe波) 学会発表⑨

上記の成果は、学会発表⑨、学会発表⑩で発表した。

(2) 木造住宅の床の面内剛性を考慮するため、床の面内剛性を弾性バネで表現した2層4自由度モデル(図5)を導入し、床の面内剛性を無限大とした(1)の結果と比較することにより、以下のことを明らかにした。

- 床の面内剛性の木造建物の層剛性に対する比と、床の面内剛性の鋼製独立柱の剛性に対する比の両者が、本構法の性能に対して影響を与える。
- 上に示した2つの比がともに1以上あれば、本構法による地震時応答低減性能は剛床仮定によっても概ね評価できるが、いずれかが1を下回る場合には、床面内剛性が地震時応答低減性能に与える影響は無視できないため、床面内剛性を考慮できるモデルによる検討または床面内剛性の補強が必要である。
- 木造住宅の床面内剛性が与える影響について、等価Voigt要素を用いた簡略化モデルに対する理論的な検討により説明できることを示した。

上記の成果は、学会発表⑩、雑誌論文②で発表した。

(3) 耐震性能が不足している木造住宅の大部分を占める2階建て木造住宅について、提案する連結制震型耐震補強構法と、2階への一般的な構法(耐震壁の付加など)による耐震補強を併用するときの、連結オイルダンパーの容量(減衰係数)、独立鋼製柱の本数(剛性)および2階への補強量(付加する耐力)が、耐震補強効果に与える影響の傾向を、数値解析的な検討から明らかにした。また、この検討に基づき、連結オイルダンパーの容量、独立鋼製柱の本数および2階への補強量の設計フローを構築した(図6)。さらに、実在する木造住宅を元に作成した建物例に対して、構築した設計フローに基づいて耐震補強設計を実施し、設計フローの有効性を確認した。本成果については、雑誌論文③、学会発表⑤で発表した。

(4) 2016年4月に発生した熊本地震のような、震度6~7の大地震が短期間に連続して発生する地震動(連続地震動)に対して、木造住宅の地震時最大応答が地震動の作用回数ごとに増大する現象が、エネルギーの収支に基づいて説明できることを明らかにした。また、本課題で提案する連結制震型耐震補強構法を適用した場合には、連続地震動に対する地震動の作用回数ごとの最大応答の増大現象が、大幅に抑制できることを示した。さらに、木造住宅の復元力特性を模擬できるような工夫を施した鋼製小型模型を作成して、連続地震動に対する最大応答の増幅現象が振動台実験により再現できることを示した(図7)。本成果については、学会発表⑥、学会発表⑦で発表した。

(5) 本耐震補強構法について、鋼製独立柱の固定度(地盤が剛であるとしたときの、鋼製独立柱先端における水平剛性に対する、鋼製独立柱を固定した地盤の変形を考慮した鋼製独立柱先端における水平剛性の比)が耐震補強効果に大きな影響を与えることが明らかとなっている。この固定度を、地盤の平均N値、鋼製独立柱の地上部分の長さおよび地中部分の長さおよび曲げ剛性を用いて表した評価式を誘導し、固定度を向上させるには、地中部分の曲げ剛性が

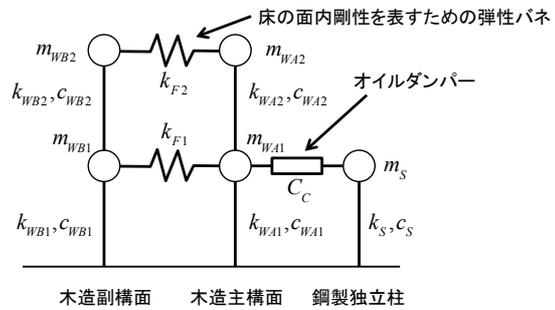


図5 床の面内剛性を考慮した解析モデル 学会発表⑩

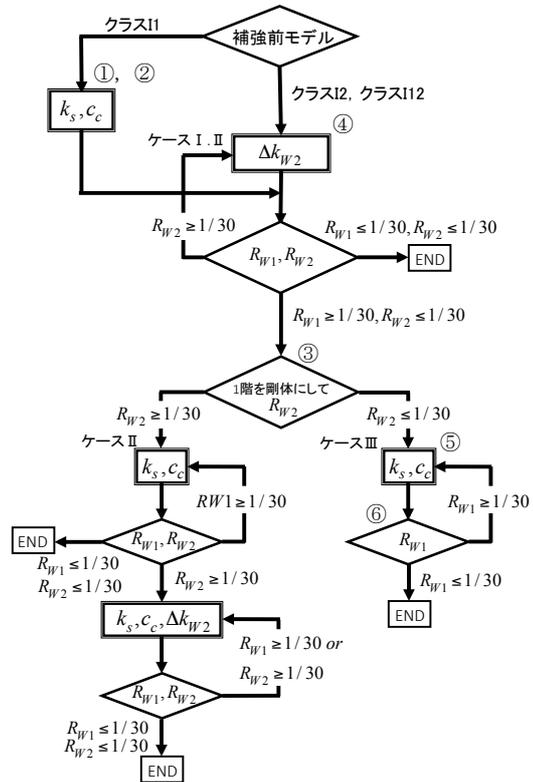


図6 設計フローチャート 雑誌論文③

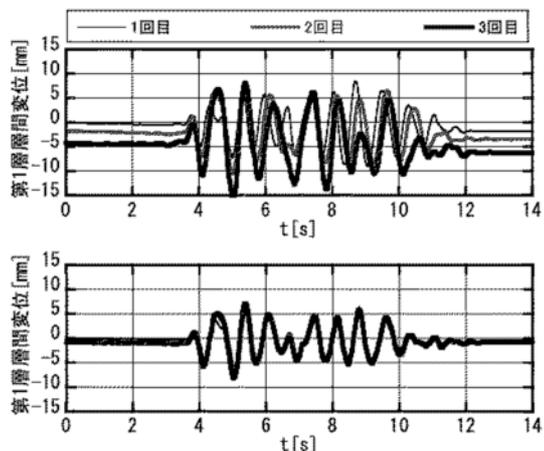


図7 JMA-Kobe1995NS地震動に対する第1層層間変位(上:連結なし, 下:ダンパー連結あり) 学会発表⑦

重要な役割を果たすことを明らかにした。本成果については、学会発表④で発表した。

(6)本耐震補強工法のように、オイルダンパーを用いた制震構法では、ダンパーがストロークの限界に達したり、ダンパーの取り付け部分の破損が生じると、ダンパーを設置していない場合に比べても、地震時最大応答が増幅する現象が生じることが明らかとなっている。本耐震補強構法においても、上記の現象が生じるため、この現象の発生メカニズムを、木造建物に甚大な地震被害を及ぼす可能性の高いパルス性地震動をモデル化したダブルインパルス入力を用いて、解析的に(式による表現で)明らかにした。また、1層建物モデルと独立柱をオイルダンパーで連結した小型建物モデルを作成し、これに対する振動実験を実施した。この建物モデルの最大の特徴は、オイルダンパー本体やダンパー取付部材の損傷を模擬できる装置を組み込んだことである。これを振動実験中の任意の時間に作動させて、ダンパーやその取付部材の地震作用中の損傷を模擬し、それによって生じることが予想されていた地震時最大応答逆転現象の発生を実証した(図8)。本成果については、雑誌論文①、学会発表③で発表し、学会発表①で発表予定である。

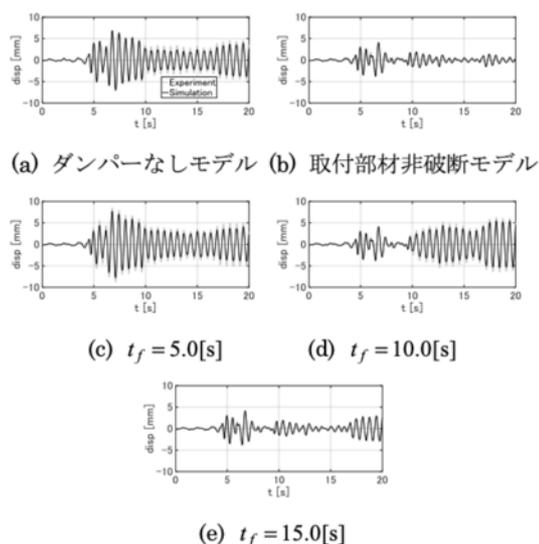


図8 様々なダンパー破断時刻  $t_f$  に対する応答の時刻歴 学会発表①

雑誌論文①、学会発表③で発表し、学会発表①で発表予定である。

(7)ダンパーと床の取付部に想定以上の地震力が生じて当該箇所に損傷が生じると、設計時に想定していたダンパーによる制震効果が発揮できないばかりか、ダンパーを設置していない場合に比べても地震時最大応答が増幅する可能性がある。このことを防ぐためには、ダンパーやその取付部に生じる地震力の高精度な予測が必要となる。本研究が対象としている木造戸建て住宅では、床の面内剛性が十分に確保できないことが多いため、一般的な建物のモデル化で採用される剛床仮定は、木造戸建て住宅に適用するには慎重を期する必要がある。そこで、木造建物における床の面内剛性が、木造建物のように柔な構造物と、ダンパーが取り付けられる独立柱のように剛な構造物との間に生じる地震力に与える影響の一般的傾向を、数値解析的検討により明らかにした。本成果については、学会発表②で発表予定である。

#### <引用文献>

- 1) 消防庁：防災拠点となる公共施設等の耐震化推進状況調査結果，報道資料，平成26年2月14日
- 2) 佐藤慶一：住宅・土地統計調査から見る住宅耐震化の趨勢，リサーチペーパー第28号，総務省統計研修所，平成23年9月
- 3) 半田潤，吉富信太，辻聖晃，竹脇出：建物の平面配置効果を考慮した2棟連結制振構法の特性解析，構造工学論文集，Vol. 57B，pp. 319-327 (2011.4)
- 4) 塚本渉，辻聖晃：粘性ダンパーを用いた連結制震構法による木構造建物群の耐震補強，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，構造 III，321-322 (2006)
- 5) 辻聖晃：耐震コア建物との制振連結による住宅密集地の地震防災性能向上法，平成18年度科学研究費補助金(基盤研究(C))研究成果報告書(2007)
- 6) 辻奈津子，長谷川薫，辻聖晃：独立柱とのダンパー連結による木造住宅の耐震性能向上法，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，構造 III，pp. 289-290 (2014.9)

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文] (計3件)

- ① 小川勇大，辻聖晃：ダンパー取付部材の破断によって生じる地震時最大応答逆転現象の発生条件の分析，構造工学論文集，Vol. 65B，pp. 265-271，2019.4【査読あり】
- ② 服部梨紗，辻聖晃：独立柱とのダンパー連結による木造住宅の耐震性能向上法(耐震補強設計フロー)，鋼構造論文集，第94号，pp. 23-34，2017.6【査読あり】
- ③ 辻奈津子，長谷川薫，服部梨紗，辻聖晃：鋼製独立柱との連結制震構法による木造戸建て住宅の耐震補強における床面内剛性の影響，構造工学論文集，Vol. 63B，pp. 33-40，2017.4【査読あり】

##### [学会発表] (計12件)

- ① 辻奈津子，長谷川薫，辻聖晃：平面混構造建物の接合部に生じる地震時断面力における床面内剛性の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，2019

- ② 辻聖晃, 藤田皓平, 小川勇大: ダンパー取付部材の破断によって生じる地震時最大応答逆転現象の数値解析による傾向分析と小型模型振動台加振実験による検証, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 59 号, 2019
- ③ 小川勇大, 辻聖晃: ダンパー取り付け部材の破断によって生じる地震時最大応答の逆転現象のメカニズム解明, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018
- ④ 辻奈津子, 長谷川薫, 辻聖晃: 独立柱とのダンパー連結による木造住宅の耐震性能向上法(その 7 鋼製独立柱の固定度の評価と改善方法), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018
- ⑤ 服部梨紗, 辻聖晃: 独立柱とのダンパー連結による木造住宅の耐震性能向上法(その 5 耐震補強設計フロー), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017
- ⑥ 森本将司, 服部梨紗, 辻聖晃: 連続地震動に対する木造住宅の耐震性能変化と補強効果(その 1 エネルギー収支に基づく検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017
- ⑦ 辻聖晃, 森本将司, 服部梨紗, 藤田皓平: 連続地震動に対する木造住宅の耐震性能変化と補強効果(その 2 小型模型に対する振動台実験を用いた検証), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017
- ⑧ 辻奈津子, 長谷川薫, 服部梨紗, 辻聖晃: 独立柱とのダンパー連結による木造住宅の耐震性能向上法(その 6 等価 Voigt モデルを用いた床面面内剛性の影響の評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017
- ⑨ 服部梨紗, 辻聖晃: 独立柱とのダンパー連結による木造住宅の耐震性能向上法(その 3 2 階補強の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016
- ⑩ 辻奈津子, 長谷川薫, 服部梨紗, 辻聖晃: 独立柱とのダンパー連結による木造住宅の耐震性能向上法(その 4 床面の面内剛性の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016
- ⑪ 服部梨紗, 辻聖晃: 独立柱とのダンパー連結による木造住宅の耐震性能向上法(2 階補強の影響および最適連結ダンパー量), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 56 号, 2016
- ⑫ 辻聖晃, 服部梨紗, 藤田皓平, 竹脇出: 連結制振構造の地震時最大応答評価における応答スペクトル法の適用限界, Movic2015, 2015

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名: 長谷川 薫

ローマ字氏名: (HASEGAWA, Kaoru)

研究協力者氏名: 辻 奈津子

ローマ字氏名: (TSUJII, Natsuko)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。