

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 18 日現在

機関番号：82113

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04943

研究課題名（和文）繰り返し大地震による木造住宅の劣化挙動の解明と評価法の提案

研究課題名（英文）Study on Deterioration Behavior of Wooden Houses Subjected to Repeated Large Earthquakes and Proposal of the Evaluation Method

研究代表者

山崎 義弘 (Yamazaki, Yoshihiro)

国立研究開発法人建築研究所・材料研究グループ・主任研究員

研究者番号：70644425

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,800,000円

研究成果の概要（和文）：2016年熊本地震を代表に、近年は建築物が複数回の激震に襲われ、大きな被害が生じたことが知られているが、木造住宅を対象とした既往実験では地震中に耐力、エネルギー吸収性能が劣化していくことが明らかとなっており、これが繰り返しの地震による被害を助長させている可能性がある。本研究では、上述の劣化特性を既存の設計法の枠組みで考慮するための評価法を検討する。主要な耐力壁を対象に、静的載荷実験では載荷履歴を、振動台実験では地震動の継続時間を変動要因とし、劣化特性を調べた。また、繰り返し地震動の影響をエネルギー入力観点で考慮した最大応答予測法を検討し、最大変位を安全側に予測できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現行の耐震設計では、限界耐力計算は最大応答を、エネルギー法は累積応答を設計規範としているが、実際の建築構造物の倒壊現象は、最大応答・累積応答の両者が関連付けられることが知られている。本研究では、累積応答による性能低下を考慮しつつ、最大応答を予測する既存設計法に展開する手法を提案しており、新たな設計規範を構築するための理論整備を行うことができた。本設計法は、一度大地震を継続した後の継続使用性、および残余性能の評価に活用することができ、地震後の経済的損失を抑えることに貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Force and deformation capacity of timber shear walls is affected by loading protocol due to the fatigue behavior. Therefore, repeated severe earthquakes have a high possibility of increasing seismic damages of buildings even though they are designed following current design codes. This research proposes evaluation method of strength and equivalent damping ratio of timber shear walls subjected to various deformation history. Static loading tests and shaking table tests for wooden brace walls and plywood sheathing walls were conducted, and the behavior could be predicted by proposed formulae. Then, hysteresis model for time history analysis was proposed. The model could precisely trace the hysteresis loop, and analyze the maximum deformation of shaking table test. Finally, maximum response prediction method considering energy spectrum as well as response spectrum was also proposed. The prediction method could simulate the test results with acceptable accuracy.

研究分野：建築構造

キーワード：木造耐力壁 性能劣化 応答スペクトル エネルギースペクトル 等価減衰定数 累積損傷則

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2016年熊本地震を代表に、近年は建築物が複数回の激震に襲われ、大きな被害が生じたことが知られているが、木造住宅を対象とした既往実験では地震中に耐力、エネルギー吸収性能が劣化していくことが明らかとなっており、これが繰り返しの地震による被害を助長させている可能性がある。一方で、木造住宅の主たる耐震要素である耐力壁の面内せん断性能は、指針で定められた荷履歴に基づく実験により、設計のための評価値(許容せん断耐力、あるいは壁倍率)が得られるため、指針の荷履歴よりサイクル数の多い地震応答に対する安全性や、一度地震を経験した後の継続使用性を評価するためのデータ・理論も十分に整備されていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、上述の劣化特性を既存の設計法の枠組みで考慮するための評価法を検討する。まずは主要な耐力壁を対象に、静的荷履歴実験では荷履歴を、振動台実験では地震動の継続時間を変動要因とし、劣化特性を調べる。また、繰り返し地震動の影響をエネルギー入力観点で考慮した最大応答予測法を検討し、最大変位を安全側に予測できることを示す。

3. 研究の方法

本研究では、上記の研究目的に対応して、以下の二つの研究項目について検討を行う。

1) 任意の繰り返し変形を受けた際の耐力および等価減衰定数の評価法の検討

筋かい耐力壁(二つ割り、表面に石膏ボードを施工)と合板耐力壁($t=9$, $N50@150\text{mm}$)を対象に、静的荷履歴実験と振動台実験を行った(図1, 図2)。静的荷履歴実験では荷履歴をパラメータとし、せん断力-変形角関係や等価減衰定数への影響を調べた。振動台実験では応答スペクトルは概ね等しいが、継続時間および入力エネルギーが異なる2種類の位相(神戸位相と八戸位相)をもつ模擬地震動を用い、最大応答変位の相違を調べた。

2) 地震動の応答スペクトルとエネルギースペクトルを用いた最大応答予測法の検討

振動台実験より、応答スペクトルが等しくても地震動の継続時間(あるいは入力エネルギー)が異なれば、耐力やエネルギー吸収性能の劣化傾向も異なり、最大応答も大きく変化することが明らかとなった。現行の限界耐力計算ではこのような挙動を考慮することができないため、応答スペクトルだけでなくエネルギースペクトルも参照した最大応答予測法を検討した。

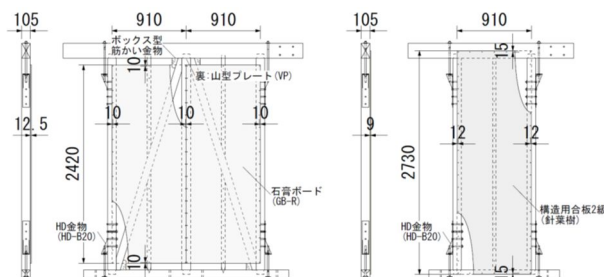


図1 耐力壁試験体(左:筋かい、右:合板)

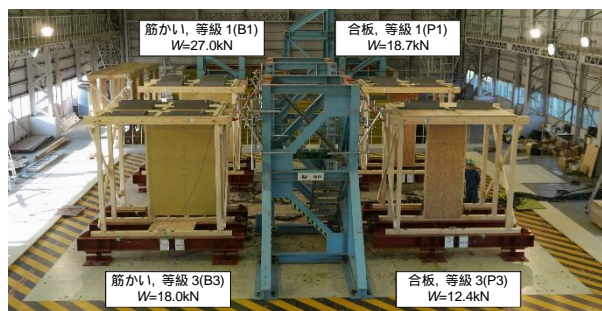


図2 振動台実験のセットアップ

4. 研究成果

1) 任意の繰り返し変形を受けた際の耐力および等価減衰定数の評価法の検討

図3は包絡線の比較であり、単調荷時の包絡線(破線)に比べ、繰り返し荷時の包絡線(実線)が下方に遷移する、すなわち耐力が低下したことがわかる。また、文献1で提案した評価式により、単調荷時の包絡線に対する低下度合い(丸プロット)が繰り返し荷時の実験結果を概ね予測できていることがわかる。

図4は経験最大変形の終局変形に対する比(n/n_0)と等価減衰定数の関係を示す。耐力は経験振幅とそのサイクル数に応じて劣化するのに対し、等価減衰定数は経験最大振幅のみに依存することがわかる。また、振動台実験(図中赤丸)では多少増加するものの、概ね破線に示す近

似式で傾向が表されることがわかった。

図 5 に振動台実験の各加振における最大層間変形角を示す。等級によらず神戸波より継続時間の長い八戸波の方が変形の増大が速いことがわかる。等級 3 相当 (B3 および P3) では $1/3 \delta_u$ 以下 (δ_u は単調载荷時の終局変形角) の劣化の小さい範囲では地震波による違いが小さいが、劣化が進行し非線形化してくると顕著に違いが表れた。換言すると、大地震に対しても最大応答変形角を $1/3 \delta_u$ 以下に抑えることを設計目標とすれば、継続使用性も確保できることが明らかとなった。

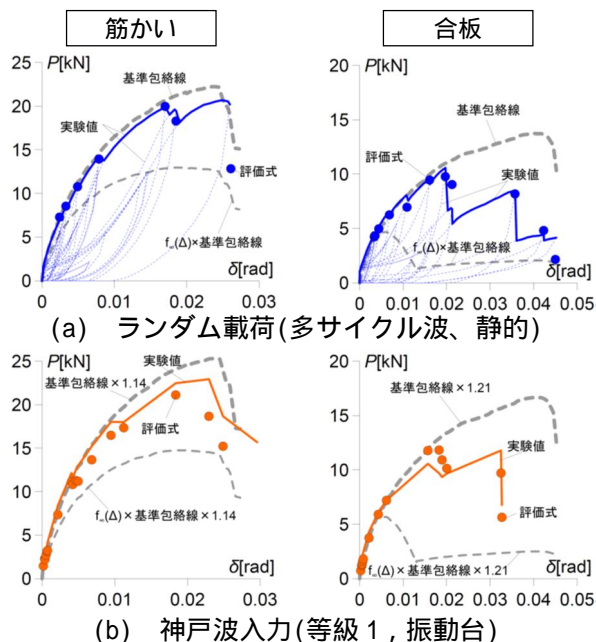


図 3 せん断力 - 変形角関係の包絡線¹⁾

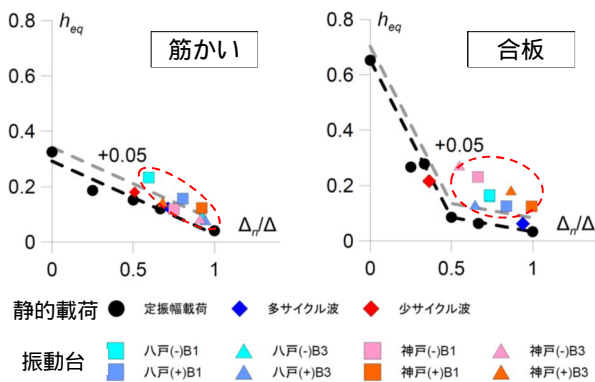


図 4 等価減衰定数

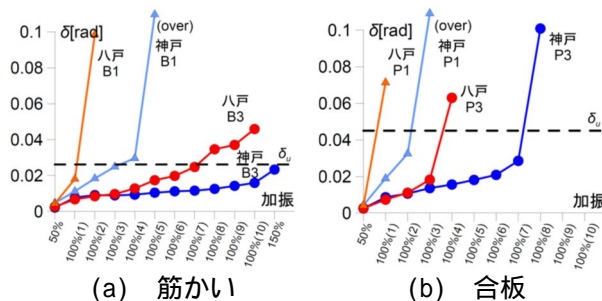


図 5 最大層間変形角

2) 地震動の応答スペクトルとエネルギースペクトルを用いた最大応答予測法の検討

耐力の劣化は、経験振幅とそのサイクル数が支配する劣化係数 ($f(\delta, n)$), 図 3) で表され、等価減衰定数の劣化は、経験最大振幅 (δ_r/n) が支配する近似式 (図 4) で表される。この傾向を多数の地震応答解析を行って調査した結果が図 6, 7 である。モデルは耐震等級 1 相当であ

り、35種の地震動に対してそれぞれ終局変形に到達するように入力倍率を調節した。図6,7の横軸はエネルギースペクトルの平均値であり、地震動によりばらつきはあるものの、 $f(\Delta, n)$ の下限値、および $n/$ の上限値を包絡するような近似式が得られた。これを従来の応答スペクトル法に組み込み、耐力と等価減衰定数の劣化を考慮して、終局変形に到達する地震入力倍率を予測したところ、安全側の精度で予測することができた(図8)。

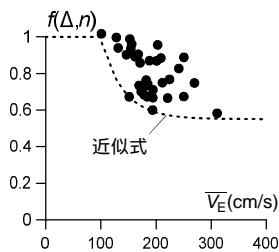


図6 $f(\Delta, n) - \bar{V}_E$ 関係

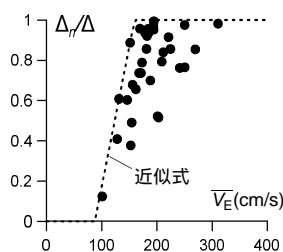


図7 $n/ - \bar{V}_E$ 関係

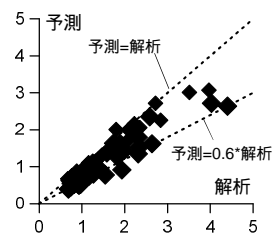


図8 入力倍率の予測精度

参考文献

- 1) 山崎義弘, 神田健吾, 坂田弘安 : 任意変形履歴を受ける木造耐力壁の耐力およびエネルギー吸収性能 繰り返し地震動を受ける木質構造物の劣化挙動に関する研究 その1, 日本建築学会構造系論文集, 第84巻, 第765号, pp.1443-1451, 2019.11

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 YAMAZAKI Yoshihiro, SAKATA Hiroyasu	4. 巻 85
2. 論文標題 SIMPLIFIED EVALUATION OF MEMBER FORCE FOR WOODEN HORIZONTAL HYBRID STRUCTURE CONSIDERING NONLINEARITY OF WOODEN ELEMENTS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 241 ~ 250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.85.241	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 YAMAZAKI Yoshihiro, KANDA Kengo, SAKATA Hiroyasu	4. 巻 84
2. 論文標題 STRENGTH AND ENERGY DISSIPATION OF TIMBER SHEAR WALLS SUBJECTED TO ARBITRARY DEFORMATION HISTORY	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1443 ~ 1451
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.84.1443	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 YAMAZAKI Yoshihiro, NEMOTO Kaho, ISODA Hiroshi, ARAKI Yasuhiro, SAKATA Hiroyasu	4. 巻 84
2. 論文標題 A STUDY ON SHEAR PERFORMANCE OF GABLE ROOF FRAME IN TRADITIONAL WOODEN BUILDING	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1453 ~ 1463
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.84.1453	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 YAMAZAKI Yoshihiro, SAKATA Hiroyasu	4. 巻 83
2. 論文標題 SIMPLIFIED EVALUATION METHOD OF DYNAMIC PROPERTIES FOR SINGLE-STORY WOODEN STRUCTURE HAVING FLEXIBLE FLOOR DIAPHRAGM	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1833 ~ 1843
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.83.1833	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 Wu Di, Yamazaki Yoshihiro, Sawada Sayoko, Sakata Hiroyasu	4. 巻 182
2. 論文標題 Experiment-based numerical simulation of hybrid structure consisting of wooden frame and rigid core	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 473 ~ 486
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.engstruct.2018.12.085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 山崎 義弘、坂田 弘安	4. 巻 83
2. 論文標題 偏心を有する2層木質構造物における変位モードの簡易評価法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 467 ~ 477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.83.467	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 山崎 義弘、坂田 弘安	4. 巻 82
2. 論文標題 非剛床をもつ1層木質構造物における動的抜け効果と簡易評価法	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1413 ~ 1423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.82.1413	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 飯山かほり、盛川仁、市村強、堀宗朗、山崎義弘、坂田弘安、大野晋、柴山明寛	4. 巻 64B
2. 論文標題 都市の地震応答シミュレーションのための木造建物モデル設定に関する一検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 47 ~ 53
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 森貴禎, 山崎義弘, 坂田弘安, 池上寛樹	4. 巻 64B
2. 論文標題 相欠き直交梁と 4 本柱からなるボルト接合式木質柱梁接合部の力学的挙動に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 445 ~ 451
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21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 山崎義弘, 神田健吾, 中西理, 坂田弘安
2. 発表標題 繰り返し載荷を受ける木造耐力壁の耐力およびエネルギー吸収性能の劣化挙動に関する実験研究 その3 応答スペクトル法の適用性に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎義弘, 神田健吾, 坂田弘安
2. 発表標題 繰り返し地震動を受ける木造耐力壁構造の性能劣化挙動
3. 学会等名 日本地震工学会第14回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神田健吾, 中西理, 山崎義弘, 坂田弘安
2. 発表標題 繰り返し載荷を受ける木造耐力壁の耐力およびエネルギー吸収性能の劣化挙動に関する実験研究 その2 性能劣化の評価式の提案
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中西理, 神田健吾, 山崎義弘, 坂田弘安
2. 発表標題 繰り返し載荷を受ける木造耐力壁の耐力およびエネルギー吸収性能の劣化挙動に関する実験研究 その1 静的ランダム載荷実験と振動台実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上村実那, 金井建二, 家住良太, 笠井和彦, 坂田弘安, 松田和浩, 山崎義弘
2. 発表標題 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その59 振動台実験による耐震・制振改修の有効性の検証
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金井建二, 上村実那, 家住良太, 笠井和彦, 坂田弘安, 松田和浩, 山崎義弘
2. 発表標題 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その58 木質制振架構の振動台実験計画概要
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木直人, 根本夏帆, 山崎義弘, 五十田博, 荒木康弘, 坂田弘安
2. 発表標題 伝統的木造建築物における小屋ばり組切妻屋根のせん断性能に関する研究 その3 平面モデルの数値解析と性能評価
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 根本夏帆, 鈴木直人, 山崎義弘, 五十田博, 荒木康弘, 坂田弘安
2. 発表標題 伝統的木造建築物における小屋ばり組切妻屋根のせん断性能に関する研究 その2 小屋ばり組切妻屋根実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志水真央, 根本夏帆, 鈴木直人, 山崎義弘, 五十田博, 荒木康弘, 坂田弘安
2. 発表標題 伝統的木造建築物における小屋ばり組切妻屋根のせん断性能に関する研究 その1 研究概要と各要素実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshihiro Yamazaki and Hiroyasu Sakata
2. 発表標題 Evaluation Method of Dynamic Torsional Coupling for Single-story Wooden Structure Considering In-plane flexibility of Floor Diaphragm
3. 学会等名 2018 World Conference on Timber Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎義弘, 神田健吾, 坂田弘安
2. 発表標題 繰り返し載荷を受ける木造耐力壁の耐力劣化挙動 その1 : 実験概要
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神田健吾, 山崎義弘, 坂田弘安
2. 発表標題 繰り返し載荷を受ける木造耐力壁の耐力劣化挙動 その2 : 実験結果と評価式の提案
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎義弘, 神田健吾, 坂田弘安
2. 発表標題 繰り返し載荷を受ける木造耐力壁の耐力およびエネルギー吸収性能の劣化挙動
3. 学会等名 日本地震工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中西理, 山崎義弘, 坂田弘安
2. 発表標題 木質制振住宅の繰り返し地震入力に対する性能評価方法の提案
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金井建二, 上村実那, 家住良太, 笠井和彦, 坂田弘安, 松田和浩, 山崎義弘
2. 発表標題 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その56 振動台実験における木質制振架構の動的性状と特性
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上村実那, 金井建二, 家住良太, 笠井和彦, 坂田弘安, 松田和浩, 山崎義弘
2. 発表標題 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その57 振動台実験における木質制振架構の動的性状と特性
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎義弘, 坂田弘安
2. 発表標題 非剛床をもつ1層木質構造物における動的捩れ効果と簡易評価法
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(中国)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 神田健吾, 野村佳亮, 山崎義弘, 坂田弘安, 五十田博
2. 発表標題 筋かい金物の仕様が耐力壁の力学的挙動に与える影響に関する実験研究 その2 実験結果と考察
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(中国)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野村佳亮, 神田健吾, 山崎義弘, 坂田弘安, 五十田博
2. 発表標題 筋かい金物の仕様が耐力壁の力学的挙動に与える影響に関する実験研究 その1 実験概要と破壊性状
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(中国)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 上村実那, 金井建二, 家住良太, 笠井和彦, 坂田弘安, 松田和浩, 山崎義弘
2. 発表標題 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その55 振動台実験における木質制振架構の動的性状と特性
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(中国)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金井建二, 上村実那, 家住良太, 笠井和彦, 坂田弘安, 松田和浩, 山崎義弘
2. 発表標題 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その54 振動台実験における木質制振架構の動的性状と特性
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(中国)
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