

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06655

研究課題名（和文）シェルター連結による既存木造住宅の地震応答制御

研究課題名（英文）Seismic Response Control of Existing Wooden Houses by Connecting with Shelter

研究代表者

小澤 雄樹（Ozawa, Yuki）

芝浦工業大学・建築学部・教授

研究者番号：50388120

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、耐震性能の不足する既存木造住宅内部にシェルターを挿入し、これと木造住宅をオイルダンパー等で連結することで、建物の応答抑制及び倒壊危険性低減を図る手法を提案する。剛な連結部材を用いた場合と比較して、ダンパーを用いることでエネルギー吸収効果により建物の応答を抑制できると同時に、シェルターへの過剰な水平力流入を防ぐ効果が確認された。また、倒壊解析手法を用いた検討では、シェルター連結により建物の偏心挙動を抑えられることがわかった。また2階建てモデルの1階にシェルターを挿入した場合、ダンパーを用いることで1階の応答を低減しつつ2階部分の応答増大を大幅に抑制できることなどが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

震度6弱以上の地震で倒壊危険性のある建物は国内に未だ多数存在しており、これら既存住宅の耐震性能を向上させることは社会的に喫緊の課題である。住人にとって比較的小さな負担で安全性を高める手段の一つに耐震シェルターがあるが、建物自体の耐震性能向上は期待できないことが大きな課題となっていた。本研究で提案する手法は、シェルターと既存住宅を連結することで、大地震時の建物倒壊の危険性を大幅に低減しつつ、万が一倒壊に至った場合でもシェルター内の安全性を確保できる、2段構えの安全性向上策が図られている点に特色がある。既存住宅の耐震性向上を図る上で、有効な選択肢の一つとして利用されることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a method to suppress building response and reduce the risk of collapse by connecting seismic shelter inserted inside existing wooden houses with insufficient seismic performance to the wooden house with oil dampers or other means. Compared to the use of rigid connection members, the use of dampers was confirmed to be effective in reducing the building response through energy absorption and preventing excessive horizontal forces from flowing into the shelter. The collapsing analysis method was used in the study, and it was found that the shelter connection can suppress the torsional behavior of the building. In addition, when a shelter is inserted into the first floor of a two-story model, it was found that the use of dampers can significantly reduce the increase in the response of the second floor while decreasing the response of the first floor.

研究分野：建築構造

キーワード：既存木造住宅 シェルター オイルダンパー 倒壊危険性 倒壊解析 応答制御 耐震補強

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

2016年4月に発生した熊本地震では再び、多数の木造住宅が倒壊した。震度6弱の地震で倒壊の恐れのある建物は全国で数百万戸を超えとも言われており、耐震化が急務となっているが、その実施は思う様に進んでいないのが実情である。通常の耐震改修工事は費用や仮住まいへの移転などの点で住人の負担が大きい。耐震改修に代わる安価かつ容易な手法を模索していく必要がある。

費用・労力の面で比較的負担の少ない方法として、近年注目されているものの一つに「耐震シェルター」がある。剛強なシェルターを屋内に配置することで、建物倒壊時のシェルター内部の安全性を確保する。建物本体に手を加える必要がないため設置が容易である一方、地震発生時に必ずしも住人がシェルター内にいるとは限らず、その場合の安全性が保障されないことが最大の課題となっている。

### 2. 研究の目的

本研究で提案する手法は、既存木造住宅を内部に挿入したシェルターと連結することで、地震応答制御の手段として利用するものである（図1）。これまでの研究において、柔構造（木造住宅）と剛構造（シェルター）との連成振動系は複雑な地震応答を示すが、柔構造部分の応答低減に極めて有効であることを示す結果が得られている<sup>12)</sup>。本研究の目的はこれを発展させ、数値解析により本手法の建物応答制御手法としての有効性を検証し、住人負担の少ない耐震性能向上の手段として提供することである。また、制振機構を組み込むことでその効果を増大させる手法についても検討する。

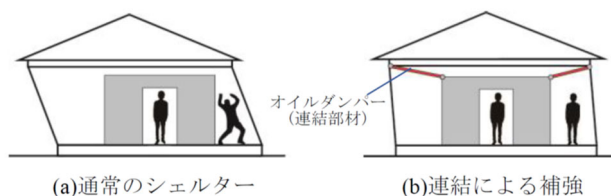


図1：シェルター連結による既存木造住宅の補

### 3. 研究の方法

以下の2段階で研究を進める。

#### (1) ダンパー連結による応答制御手法の検証

研究の第一段階として、平屋木造住宅にシェルターを挿入し、ダンパーを用いて連結した場合の検討を行う。ダンパーを用いることで、エネルギー吸収による耐震性能向上を図ると同時に、シェルターに過剰な水平力が流入することを防ぐことを目的としている。

木造住宅は平屋から3階建てまで様々なものがあり、シェルターの配置も単体として利用する場合から平面的あるいは立面的に複数個配置するものまで様々なパターンが考えられるが、ここでは基礎的な知見を得ることを目的とし、既存住宅としては平屋建て、シェルターは単体で利用する場合を想定する。

#### (2) 倒壊解析を用いた倒壊抑制効果の確認

(1)の研究に引き続き、より一般的な建物を検討対象とするため、対象とする既存住宅を偏心を有する平屋及び2階建て（偏心なし）の2種類に広げ、本手法の有効性を確認する。2階建て既存住宅においては1階の耐震性能が不足しているものとし、1階にのみシェルターを設置、連結する場合を想定する。検討には京大生存圏研究所が公開している木造住宅倒壊解析ソフトウェア wallstat を用いて解析モデルを作成し、倒壊を考慮した解析を行う。

### 4. 研究成果

#### 4.1 ダンパー連結による応答制御手法の検証

補強対象となる既存住宅は平面10m×10m、高さ3mで屋根質量15,000kgの平屋建て木造軸組構法、シェルターは平面2.73m×2.73m、高さ2.4mで屋根質量1,500kgの木造枠組壁工法を想定する。

平面解析とし、既存住宅とシェルターを連結部材で繋ぐことで連成形としての挙動を再現できるモデルとする。モデル化上、両モデルは図2に示すような二次元のブレース構造に置換して解析を行う。

既存住宅とシェルターの復元力特性を、地震時の滑りや劣化挙動を考慮してスリップ+バイリニア型とする（図3）。スリップ型とバイリニア型は8.5:1.5の比率で組み合わせ、剛性低下率はそれぞれ0.00、0.05とする<sup>3)</sup>。上部の2つの質点には、モデルのそれぞれの質量を等分割して与え、モデルの下部はXY方向を拘束したピン支持とする。

連結部材に用いるダンパーはリリーフ弁を持つバイリニア型（図4）とし、二次粘性減衰係数は0.05で統一する。本研究ではリリーフ荷重とリリーフ速度の異なるダンパー6種類を用いたDモデルと、比較のためにNモデル（シェルター無し。既存住宅は補強されない）及びCモデル（鋼製ケーブルφ20、引張専用）を用いた場合の計8種類で解析を行う。

また、既存住宅の耐震率（=存在壁量/建築基準法で定められた必要壁量）を20%から100%まで、20%刻みで変化させてパラメータとする。

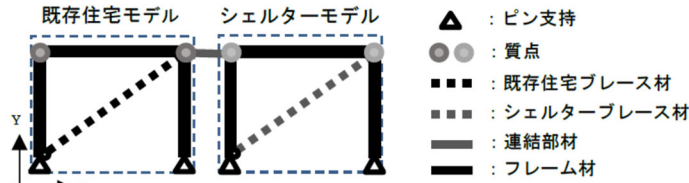


図2 平面解析のモデル化

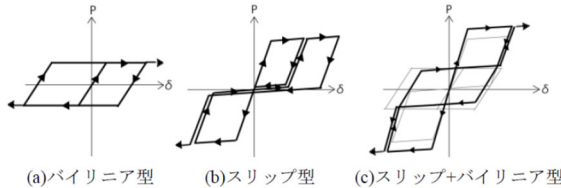


図3 既存木造住宅及びシェルターの復元力特性

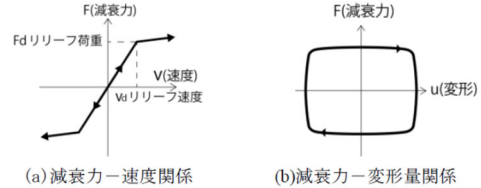


図4 ダンパーの減衰特性

数値解析ソフトウェア MATLAB にて作成したプログラムを用いて時刻歴応答解析を行い、連結部材の違いが応答制御効果に与える影響を把握する。解析に用いる入力地震波は、中地震を想定した BCJ-L1 及び大地震を想定した BCJ-L2、JR 鷹取 NS、JMA-Kobe NS の計 4 種類とする。

大地震時を想定した検討では、全体としてシェルターと連結することで応答が大幅に低減されている (図 5)。D40 の方が D20 モデルと比較して応答が抑えられていた。

シェルターの有無の比較では、シェルター有りの場合の方が、既存住宅における最大変位及び最大負担せん断力を低減できている。ダンパーの違いの比較では、リリース荷重が大きい D40 モデルの方が、最大変位と最大負担せん断力を低減できている。リリース機構が機能することでシェルターに流入する水平力が制限され、シェルターの損傷を防いでいることが分かる。

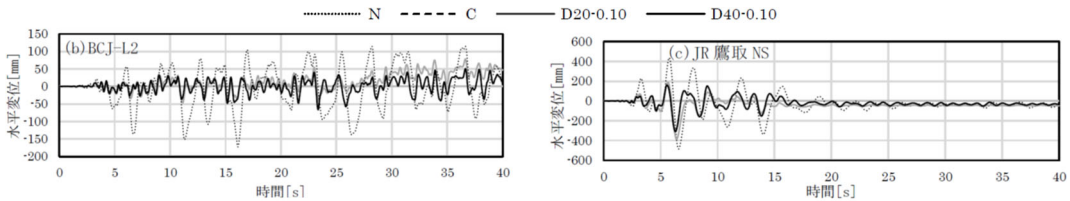


図5 各モデルの変位応答の比較

各地震波の応答を横断的に見るために、耐震率 20%、60%、100%の場合について、シェルター無しモデル(Nモデル)の最大変位を横軸に、シェルター連結モデルの最大変位を縦軸に取った関係図を示す(図6)。グラフの対角線が低減率0%を表す基準線で、横軸に近づくほど低減率が向上することを示す。

全体として基準線より下側に位置しているため制御効果が見られ、概ね 20%~60%程度の低減率となっている。また、連結部材の違いで見ると、Cモデルと比較して、Dモデルの方が低減率が大きいことがわかる。

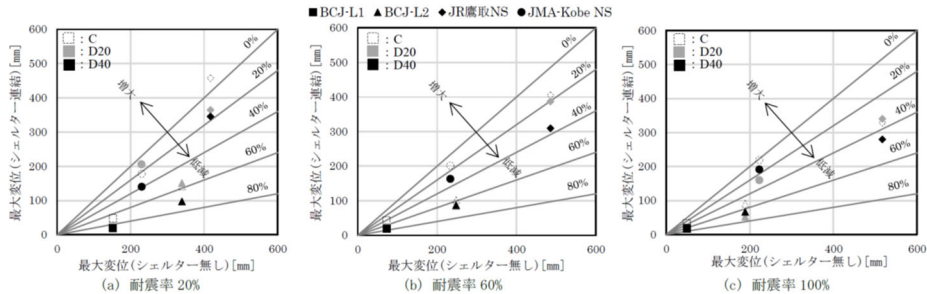


図6 耐震率ごとの最大変位低減率

まとめ

耐震性能が不足している既存木造住宅にダンパーを介してシェルターを連結することによる応答制御手法を提案し、その効果を、時刻効に低減可能であることを確認した。また、使用するダンパーのリリース荷重とリリース速度の違いを把握したりリリース荷重が大きいものほど既存木造住宅の応答を低減できるが、その反面、シェルターに過大な水平力が流入する恐れがある。シェルターの性能に応じて適切なダンパーを選択することが重要である。



## 4.2 倒壊解析を用いた倒壊抑制効果の確認

### (1) 木造住宅倒壊解析ソフトウェア wallstat の概要とモデル化

ここでは、木造住宅倒壊解析ソフトウェア wallstat を用いた、建物の倒壊挙動まで含めたより詳細な検討を行う。

wallstat は、木造軸組構法住宅の建物全体の大地震時の損傷状況や倒壊過程をシミュレートできるように開発された数値解析プログラムである<sup>4)</sup>。倒壊挙動の再現は、接合部の破壊や部材の飛散等の破壊の際に観測される非線形の応答挙動を考慮する必要があり、従来の解析手法では困難とされてきたが、個別要素法という非連続解析法を基本理論としたオリジナルの解析手法を用いることによってそれを可能にしている。

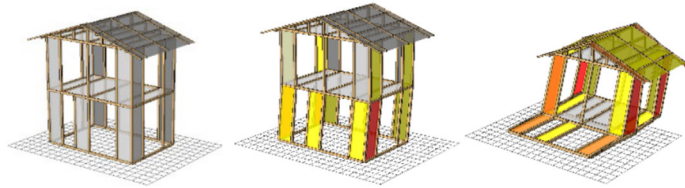


図7 wallstat による倒壊解析結果の例

### 既存住宅及びシェルターの復元力特性

補強対象となる既存住宅は、平面10m×10m、階高3mの木造軸組構法を想定する。検討に用いるモデルは平屋と2階建ての2種類とする。平屋モデルは偏心の有無を考慮したモデルとし、中央部にシェルターを挿入し、連結部材4本で既存住宅側の周囲のフレームと連結する。2階建てモデルでは1階部分のみにシェルターを挿入する。

既存住宅及びシェルターの壁の復元力特性は、(1)の研究と同じく、地震時の滑りや劣化挙動を考慮したスリップ+バイリニア型とする。

連結部材はダンパー及び一般構造用鋼管(φ60.5×3.2)とし、シェルターの四隅に計4本使用する。ダンパーはリリーフ弁を持つバイリニア型とし、軸方向のリリーフ速度を0.10m/s、1本あたりのリリーフ荷重を10kN、二次粘性減衰係数比を0.05とする。ダンパー取り付け部は十分な耐力を持つピン接合としてモデル化を行う。

解析に用いる入力地震波は、BCJ-L2及び観測波であるJR鷹取NS、JMA-Kobe NS、El Centro NSの最大速度をそれぞれ50kineに基準化したものの計4種類とし、X方向の1方向のみに入力する。

### (2) 平屋既存住宅を対象とした解析

偏心の有無を考慮した検討を行うため、偏心率0及び0.3の2種類の解析モデルを作成する。なお、偏心はX方向のみに発生しているものとし、建物全体の総壁量は変化させないまま、Y0壁(Y=0通りの壁)とY10壁(Y=10通りの壁)の壁量を調整することで偏心率0.3を発生させる。

シェルターを連結していないH0-N及びH0.3-NではBCJ-L2入力時に倒壊した。また、H0-NはJR鷹取NS 50kine入力時でも倒壊し、その他の入力地震波においても大きな残留変形が生じている。シェルターを連結することによって、すべての地震波で倒壊を防いでおり、40～90%程度の応答低減効果が確認された。連結部材の違いによる比較では、偏心率0.3のEl Centro NS 50kine入力時を除き、P(鋼管)の方がD(ダンパー)に比べ応答低減効果は大きくなっている。

一方、応答の後半部分に着目すれば、Dはダンパーのエネルギー吸収効果により、Pよりも応答が早く収束していることが分かる。また、特にJMA-Kobe NS 50kineでは、Dにおいて大きな残留変形が生じているが、これはダンパーが変位に対する復元力を持たないためである。

同時刻におけるY0壁とY10壁の変位差の最大値を見ると、シェルターを連結することで最大変位差が小さくなっており、ねじれ振動を抑える効果が確認できた。

### (3) 2階建て既存住宅を対象とした解析

平屋解析モデルと同様に、2階建て解析モデルのパラメータを算出する。1階部分の耐震性能が不足する2階建てモデルを対象に、1階部分にシェルターを連結することによる本手法の有効性を確認する。既存住宅の壁量充足率は、40%と80%の2種類とする。

図8に壁量充足率40%の場合のJR鷹取NS 50kine及びJMA-Kobe NS 50kineの各階の応答を示す。1階壁量充足率40%のNではBCJ-L2入力時に倒壊が確認され、その他の入力地震波においても残留変形が生じている。一方、シェルターを連結したP及びDでは倒壊や大きな残留変形は生じておらず、応答は低減されている。また、どちらの壁量充足率においても、ダンパーのエネルギー吸収効果によりDの方がNやPに比べ早く振動が収まる傾向が確認できる。

既存住宅2階の変位応答については、倒壊に至ったBCJ-L2入力時のE40-N以外、2階の応答は非常に小さい。特に壁量充足率40%では2階応答が小さいが、これは1階の耐震性能が低く損傷が1階に集中したためである。シェルター連結により2階の応答はいずれも増大する結果となっている。

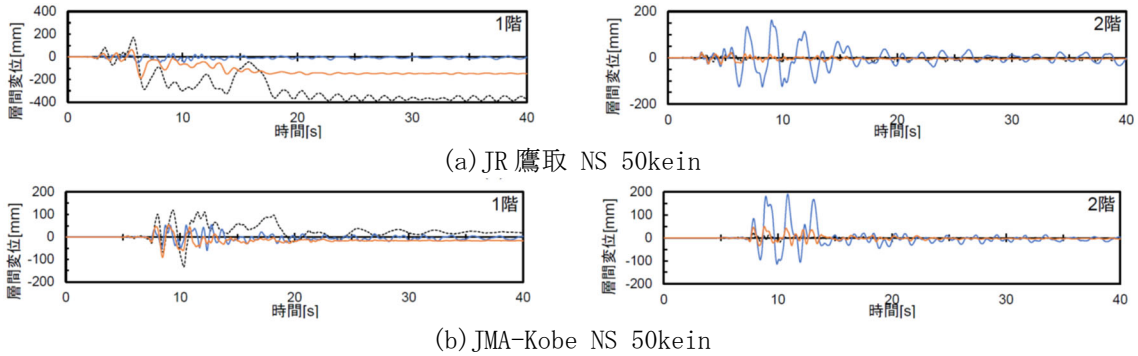


図8 壁量充足率40%の場合の各階変位応答

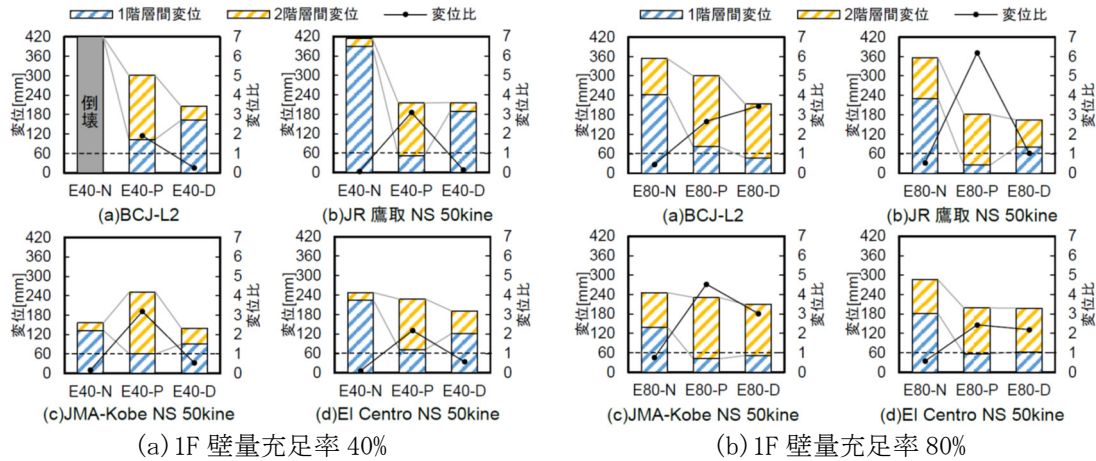


図9 各地震波に対する各階変位及び変位比

既存住宅各階の最大変位に着目し、連結部材が応答に与える影響について考察する。図9に各階最大応答及び変位比を示す。

既存住宅1階の最大変位増減率はすべて負の値となっており、応答は低減されている。連結部材の違いで比較すると、Dに比べPの方が低減率は大きい傾向がある。一方、既存住宅2階の最大変位増減率は1階壁量充足率80%のJR 鷹取 NS 50kein 入力時を除いて正の値となっており、応答は大きく増大している。その増大率はDに比べPの方が大幅に大きくなっており、連結部材にダンパーを用いることで2階の応答の増大を抑制することができる。

木造住宅では特に、剛性の低い層に地震エネルギーが集中し、層崩壊を起こしやすい性質がある。1階と2階の最大変位比が1に近いほど上下階の剛性のバランスが良いことを示し、安全性が高いことのひとつの指標となる。

1階壁量充足率40%のモデルではNモデルの変位比が非常に小さい一方、シェルターを連結することで変位比は大きくなっている。Pでは1を大きく超え、反対に2階での層崩壊の危険性が高まっているが、Dでは増大は抑制されている。

#### まとめ

耐震性能が不足している既存住宅にダンパーを介してシェルター連結することによる地震時の応答抑制効果を、木造住宅倒壊解析ソフトウェア wallstat を用いた時刻歴応答解析を通して確認した。

#### 参考文献

- 1) 呉嘉瑞他: シェルター連結による既存木造住宅の応答制御に関する基礎的研究 その1 モデル化及びシェルター有無の比較 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 481-482, 2017. 7
- 2) 市川瑞生他: シェルター連結による既存木造住宅の応答制御に関する基礎的研究 その2 応答低減効果の確認 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 483-484, 2017. 7
- 3) 梶川久光他: スリップ型復元力特性を有する1質点系弾塑性構造における地震最大応答予測に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻, 第660号, pp. 353-362, 2011. 2
- 4) 中川貴文 他: 大地震時における木造軸組構法住宅の倒壊解析手法の開発, 建築研究資料, 第128号, 2010. 11

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Honjo, K. Goto, Y. Ozawa	4. 巻 -
2. 論文標題 A NEW METHOD OF RESPONSE CONTROL FOR WOODEN HOUSES BY CONNECTING TO SEISMIC SHELTER WITH DAMPER	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 17th World Conference on Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 -
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 後藤圭佑、篠原大貴、小澤 雄樹	4. 巻 59
2. 論文標題 ダンパーを介してシェルター連結した木造住宅の応答制御に関する基礎的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 147 ~ 150
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 松本直巳、松本紘治、小澤雄樹	4. 巻 68B
2. 論文標題 シェルター連結による木造住宅の応答制御手法に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 442 ~ 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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松本紘治、松本直巳、小澤雄樹
2. 発表標題 シェルター連結による木造住宅の応答制御手法に関する研究 その1：既存住宅の偏心による影響
3. 学会等名 日本建築学会大会（東海）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本直巳、松本紘治、小澤雄樹
2. 発表標題 シェルター連結による木造住宅の応答制御手法に関する研究 その2：2階建て木造住宅を用いた検討
3. 学会等名 日本建築学会大会（東海）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本 紘治、湯本 梨奈、小澤 雄樹
2. 発表標題 シェルター連結により応答制御された木造住宅の振動特性 倒壊解析ソフトウェアを用いた検討
3. 学会等名 日本建築学会大会（関東）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 湯本梨奈、後藤圭佑、小澤雄樹
2. 発表標題 シェルター連結による木造住宅の応答制御に関する研究 その1 オイルダンパーを用いたモデル化と解析結果概要
3. 学会等名 日本建築学会大会（北陸）
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 後藤圭佑、湯本梨奈、小澤雄樹
2. 発表標題 シェルター連結による木造住宅の応答制御に関する研究 その2 応答制御効果の比較
3. 学会等名 日本建築学会大会（北陸）
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 篠原大貴、後藤圭佑、小澤雄樹
2. 発表標題 ダンパーを介してシェルター連結した木造住宅の応答制御 その1 オイルダンパーを用いたモデル化
3. 学会等名 日本建築学会大会（東北）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤圭佑、篠原大貴、小澤雄樹
2. 発表標題 ダンパーを介してシェルター連結した木造住宅の応答制御 その2 応答制御効果の確認
3. 学会等名 日本建築学会大会（東北）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本紘治、小澤雄樹
2. 発表標題 シェルター連結による応答制御手法に関する木造住宅の倒壊危険度評価（2 /
3. 学会等名 日本建築学会大会（北海道）
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------