

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01475

研究課題名(和文) 京都の歴史的大地震でも倒壊を免れた伝統木造建物の要因分析

研究課題名(英文) Factor Analysis of Traditional Wooden Buildings that Survived Major Historical Earthquakes in Kyoto

研究代表者

杉野 未奈 (Sugino, Mina)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80758368

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、京都の歴史的大地震を検証することで、なぜ特定の伝統木造建物が地震で倒壊を免れることができたのかを、地震学的・構造的な両面から原因に迫ることを目標として研究を行った。その結果、活断層から同程度の距離に立地する2つの寺院で被害様相に差が生じていたのは、地盤増幅特性の差が一因であることを解析により明らかにした。また、歴史地震発生時に存在していたであろう町家を模した建物モデルに対する応答解析や、歴史地震時から現在まで実存している門の縮小試験体の静的加力実験やシミュレーション解析を通して、歴史地震時に存在していた建物の耐震性能について評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

京都には、寺社などの歴史的な価値のある伝統木造建物が多数現存する。一方、京都に複数存在する花折断層帯などの活断層により内陸地殻内地震が生じた場合、震源近傍では継続時間は短いものの大振幅であるパルス性地震動が生じて甚大な建物被害が生じる可能性があるため、来る大地震に備えて適切な対策を講じることが望ましい。建物の倒壊要因だけでなく、どのような立地のどのような構造の建物がなぜ倒壊を免れることができたのかを解明することができれば、耐震性能の高い伝統木造建物を理解することができ、建物の耐震性能を向上させるためのヒントとなるという点で意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, we examined historical earthquakes in Kyoto to investigate the causes of why certain traditional wooden buildings were able to survive the earthquakes without collapsing, from both seismological and structural engineering perspective. As a result, our analysis revealed that the difference in damage between two temples located at similar distances from the active fault was due in part to differences in ground amplification characteristics. In addition, we evaluated the seismic performance of buildings that existed at the time of the historical earthquakes through response analysis of building models that imitated Machiya townhouses that may have existed at the time of the historical earthquake, as well as static loading tests and simulation analysis of reduced-scale specimen of the gate that has existed from the time of the historical earthquake to the present day.

研究分野：建築構造

キーワード：伝統木造建物 歴史地震 固有振動数 地震動予測 応答解析

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

京都には、寺社などの歴史的な価値のある伝統木造建物が多数現存する。一方、京都に複数存在する花折断層帯などの活断層により内陸地殻内地震が生じた場合、震源近傍では継続時間は短いものの大振幅であるパルス性地震動が生じて甚大な建物被害が生じる可能性があるため、来る地震に備えて適切な対策を講じることが望ましい。

伝統木造建物の耐震性能を知るためには、過去の地震被害から学ぶことが有益であると考えられる。しかし、近年の大地震時における文化財建造物の被害事例は数が限られている。一方で、京都は過去に複数の大地震を経験し、歴史地震の地震被害についても他地域に比べて記録が残されているといえる。それらの歴史地震を紐解くと、周辺建物が倒壊している中で、倒壊しなかった建物が存在していることが確認できる。例えば、1596年慶長伏見地震において、教王護国寺（以下、東寺）では同じ境内の八脚門であっても倒壊・非倒壊の差が生じているなど、倒壊した建物と倒壊しなかった建物が境内に混在していた¹⁾。また、1596年慶長伏見地震の起震断層の一部と見られる宇治川断層から同程度の距離に立地する東寺と東福寺では、東福寺のほうが倒壊した建物が少ない傾向にあった²⁾。

建物の倒壊要因だけでなく、どのような立地のどのような構造の建物がなぜ倒壊を免れることができたのかを解明することができれば、耐震性能の高い伝統木造建物を理解することができ、建物の耐震性能を向上させるためのヒントとなると考え、本研究を計画するに至った。

2. 研究の目的

本研究では、京都の歴史的な大地震を検証することで、なぜ特定の伝統木造建物が地震で倒壊を免れることができたのかを、地震学的・構造学的な両面から原因に迫ることを目的とした。非倒壊・倒壊を区別した要因として、i) 活断層・被害分布・建物立地点の地盤条件などから推定される地震動特性、ii) 建物の構造特性（耐力・変形性能・振動特性）の差異が挙げられると考え、本研究ではそれらが伝統木造建物の被害に及ぼす影響を検討した。

3. 研究の方法

以上の目的に対して、以下の項目について研究を進めた。

(1) 地震被害のデータベース化

1596年慶長伏見地震、1662年寛文近江若狭地震、1830年文政京都地震（以下、代表地震）を対象として、地震被害に関する情報をデータベース化する。

(1-1) 地震環境の把握

文献調査により、京都に伏在する活断層の位置や断層長さ、京都市域全体の地形区分や地盤構造を把握する。また、当時や現在の建物立地点での地盤の常時微動計測を実施する。得られた地盤情報や常時微動計測結果から、建物立地点の地盤の揺れやすさを分析する。そして、予測地震動の推定に必要な要素地震のデータについても収集を行う。

(1-2) 歴史地震の分析

代表地震での住宅・寺社の被害分布を把握する。寺社のみならず、住宅を対象とするのは、寺社は点在するが住宅は分布しているため被害範囲の特定に有効と考えたためである。非倒壊建物の中でも特に、周辺の住宅や寺社が倒壊しているにも関わらず、倒壊しなかった建物の情報は重要となる。ここでは、a) 市街地分布の把握、b) 住宅の構造の変遷、c) 被害範囲の把握、を行う。

(1-3) 建物の振動特性評価

建物の地震時最大応答変形角を略算する際に用いる固有振動数や固有モードを推定することを目的に、東福寺、東寺境内の建物や構造物について常時微動計測を実施して固有振動数を評価する。また、室内に入ることができない建物や加速度計を設置できない構造物に対しても固有振動数を評価することができるように、レーザードップラー速度計による非接触の常時微動計測を実施する。その際に、加速度計を設置して計測を行った伝統木造建物について計測結果を比較するとともに、レーザードップラー速度計の計測方法（レーザー照射位置・分析方法等）を確立する。また、固有モードについても非接触で評価できるように、2台のレーザードップラー速度計を用いた計測も行う。

(2) 地震動評価と建物の応答評価

地震環境のデータベースに基づいて、地震動評価を行う。また、各歴史地震当時の住宅を簡略的に模した建物モデルの応答解析を実施することにより、建物による応答の違いを分析する。

(2-1) 地震動評価

経験的グリーン関数法により1596年慶長伏見地震を対象として地震動を推定する。観測点の選定と要素地震は、(1-1)の結果を用いる。

(2-2) 建物の応答評価

各歴史地震時に存在していたであろう町家を対象として、応答スペクトル法により最大応答変形角を求める。入力は、特性化パルス地震動を入力として周期や振幅、継続時間が変化した場合の応答の変化を確認する。

(3) 架構の実験および解析

1596年慶長伏見地震時から現在まで実存している門を対象として、縮小模型の静的加力実験と2次元骨組モデルのシミュレーション解析を実施することにより、門の地震時の抵抗機構について分析する。

(3-1) 静的加力実験

1596年慶長伏見地震時から現在まで実存している東福寺の門の縮小試験体を製作し、静的加力実験を実施する。

(3-2) シミュレーション解析

(3-1)で実施した縮小試験体の2次元骨組解析モデルを弾塑性解析ソフトウェアによって構築し、シミュレーション解析を実施する。

4. 研究成果

以上の研究方法で研究を行い、以下の成果を得た。

(1) 地震被害のデータベース化

(1-1) 地震環境の把握

活断層の位置や断層長さ、京都市域全体の地形区分やボーリングデータ等の地盤情報を文献により収集した。地震動評価の準備については、地震動の推定に必要な要素地震として近年の余震記録を防災科学技術研究所強震観測網より収集した。

また、東寺と被害様相の差異が確認された東福寺の境内および周辺での地盤の常時微動計測を多数実施した。得られた地盤の常時微動計測結果や既往の第3次京都市地震被害想定で用いられている地盤のせん断波速度構造に基づいて、東寺・東福寺付近を通る東西断面の地盤を2次元FEMでモデル化し解析を行った。その結果、東寺と比べて東福寺では、京都盆地東縁部の地下構造に起因してパルス性地震動の増幅特性に差が見られたことが、東福寺の建物が倒壊被害を被ってこなかった一因と考えられることを確認した¹⁾。

同様に、1596年慶長伏見地震当時に下京・上京の町並みが存在していた地域においても広範囲の地盤の常時微動計測を実施した。得られた地盤の常時微動計測結果や既往の地盤調査結果に基づいて地盤モデルを作成し、等価線形化手法に基づく一次元地盤の地震応答解析によりパルス性地震動に対する増幅特性を評価した²⁾。

(1-2) 歴史地震の分析

代表地震での住宅・寺社の被害分布を把握した。まず、「a) 市街地分布の把握」として、文献史料に被害が見当たらない場合に建物が存在していないか、被害がなかったのかを確認するために、代表地震の生じた時期の市街地分布を文献史料により調査した。次に、「b) 住宅の構造の変遷として」、住宅の耐震性能の変遷を確認するために、各時代の構造的特徴（間取り・壁などの構造部材・屋根葺材など）を文献史料や絵図などから調べた。そして、「c) 被害範囲の把握」として歴史地震に対して、住宅については文献上確認しうる被害範囲を、寺社に関しては具体的な被害建物を調べてGIS上にまとめた²⁾。

(1-3) 建物の振動特性評価

東福寺境内の構造物（建物・門・鐘楼・木橋・築地塀）を対象として、加速度計を用いた多点同時計測による常時微動計測を実施して振動特性（固有振動数と固有モード）を評価した¹⁾。

東福寺境内の計測では、室内に入ることができない建物や加速度計を設置できない構造物に対しても固有振動数を把握することができるように、レーザードップラー速度計による非接触の常時微動計測も同時に実施し、レーザードップラー速度計による計測の有用性を確認するとともに、レーザードップラー速度計を用いた非接触振動計測法を構築した³⁾。

また、1596年慶長伏見地震において倒壊・非倒壊の建物が混在していたことが確認されている東寺の建物の振動計測を³⁾で構築した非接触振動計測法を用いて行った。更に、2台のレーザードップラー速度計で同時計測を行うことで、境内の五重塔（図1）などの大規模な伝統木造建物の固有振動数や固有モードを評価可能であることを確認した⁴⁾。

(2) 地震動評価と建物の応答評価

(2-1) 地震動推定

経験的グリーン関数法により1596年慶長伏見地震の地震動の再現を行った。2018年大阪北部地震の余震の観測記録を用い、京都周辺の3地点の地震動を破壊開始点の違いによって複数パターン推定した⁵⁾。

(2-2) 建物の応答評価

(1-2)の文献調査結果に基づいて、各歴史地震時に存在していたであろう町家の仕様（屋根葺材や階数）から町家を取りうる固有振動数の範囲を定め、地震時の剛性低下を表す動的変形特性を用いて、簡略的に町家をモデル化した。応答スペクトル法によって、周期や振幅、継続時間が変化した場合の特性化パルス性地震動に対する町家の最大応答変形角を評価した。解析から得られた結果の例として、屋根葺材の異なる町家でも入力地震動の周期によっては、最大応答変形角が同程度になることが確認された⁶⁾。

(3) 架構の実験および解析

(3-1) 静的加力実験

1596年慶長伏見地震時から現在まで実存している東福寺の門の縮小試験体を製作し、静的加力実験を実施した。門の梁間方向の架構を試験体とし、修理報告書の図面や写真、修理当時の記録などを参照して、建物の構造要素を抽出した縮小試験体を設計した。実験結果に基づいて、試験体の復元力特性や変形状、応力伝達機構や破壊性状を分析した⁷⁾。

(3-2) シミュレーション解析

(3-1)で実施した試験体の2次元骨組解析モデルを弾塑性解析ソフトウェアを用いて構築し、シミュレーション解析を実施した。まずは、復元力特性や接合部の挙動など、実験結果を追跡できることを確認した。次に、実験では計測できていない部材の応力状態を解析結果により明らかにした。また、柱脚や組物などのモデル化の違いが解析結果に及ぼす影響について分析し、モデル化によって変形挙動やそれに伴うモーメント分布等が変化することを確認した⁷⁾。

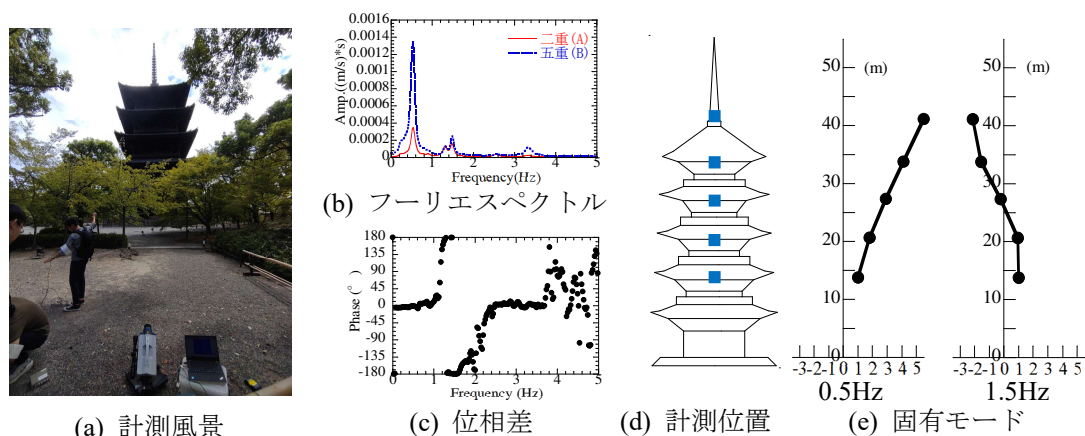


図1 レーザードップラー速度計での計測例⁴⁾

【参考文献】

- 1) 杉野未奈, 谷嶋航, 高石響平, 吉川峻平, 鶴岡典慶, 林康裕: 1596年慶長伏見地震における伝統木造建物被害の分析, 構造工学論文集 B, Vol.69B, 2023.
- 2) 石坂梨緒: 京都の歴史地震における建物被害の要因分析, 京都大学修士論文, 2023.
- 3) 符栄吉, 山本歩実, 杉野未奈: レーザードップラー速度計を用いた伝統木造建物の非接触常時微動計測法の提案, 日本建築学会技術報告集, Vol.30, pp.716-721, 2024.
- 4) 山中宏起, 符栄吉, 鶴岡典慶, 杉野未奈: 2台のレーザードップラー速度計の同時計測による伝統木造建物の振動特性評価, 令和6年度日本建築学会近畿支部研究発表会, 2024.
- 5) 脇山爽太: 経験的グリーン関数法による1596年慶長伏見地震の地震動の再現, 熊本大学修士論文, 2024.
- 6) 石坂梨緒, 杉野未奈, 林康裕: 京都における町家の構造的特徴の時代変遷が地震時応答に及ぼす影響, 2022年度日本建築学会大会(北海道)学術講演会, 構造 III, pp. 273-274, 2022.
- 7) 高石響平: 伝統構法による門の力学特性に関する実験的研究, 京都大学修士論文, 2024.

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 3件）

1. 著者名 杉野未奈, 谷嶋航, 高石響平, 吉川峻平, 鶴岡典慶, 林康裕	4. 巻 69B
2. 論文標題 1596年慶長伏見地震における伝統木造建物被害の分析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造工学論文集B	6. 最初と最後の頁 49 ~ 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijse.69B.0_49	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 壇一男	4. 巻 87
2. 論文標題 経験的グリーン関数法による強震動の再現と予測に用いられる震源モデルの変遷	5. 発行年 2022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 350 ~ 361
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.87.350	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 符栄吉, 山本歩実, 杉野未奈	4. 巻 30
2. 論文標題 レーザードップラー速度計を用いた伝統木造建物の非接触常時微動計測法の提案	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 716 ~ 721
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.30.716	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山本歩実, 符栄吉, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 レーザードップラー速度計を用いた伝統木造建物の非接触振動計測(その1)計測方法の検討
3. 学会等名 2023年度日本建築学会大会(近畿)学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 符栄吉, 山本歩実, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 レーザードップラー速度計を用いた伝統木造建物の非接触振動計測(その2)計測結果
3. 学会等名 2023年度日本建築学会大会(近畿)学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高石響平, 吉川峻平, 杉野未奈, 鶴岡典慶, 林康裕
2. 発表標題 東福寺内伝統木造建物の振動特性評価に関する研究
3. 学会等名 令和4年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川峻平, 高石響平, 杉野未奈, 鶴岡典慶, 林康裕
2. 発表標題 東福寺の振動計測に基づく1596年慶長伏見地震の被害分析
3. 学会等名 令和4年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石坂梨緒, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 京都における町家の構造的特徴の時代変遷が地震時応答に及ぼす影響
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会(北海道)学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川峻平, 高石響平, 杉野未奈, 鶴岡典慶, 林康裕
2. 発表標題 1596年慶長伏見地震における東福寺の被害に関する分析(その1) 地盤の微動計測
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会(北海道) 学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高石響平, 吉川峻平, 杉野未奈, 鶴岡典慶, 林康裕
2. 発表標題 1596年慶長伏見地震における東福寺の被害に関する分析(その2) 構造物の微動計測
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会(北海道) 学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷嶋航, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 1596年慶長伏見地震における東福寺の被害に関する分析(その3) 地震動の増幅特性に関する検討
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会(北海道) 学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小菅正太郎, 杉野未奈
2. 発表標題 木材の微破壊を許容した密度推定法
3. 学会等名 令和6年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山中宏起, 符栄吉, 鶴岡典慶, 杉野未奈
2. 発表標題 2台のレーザードップラー速度計の同時計測による伝統木造建物の振動特性評価
3. 学会等名 令和6年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2024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
研究分担者	林 康裕 (Hayashi Yasuhiro) (70324704)	舞鶴工業高等専門学校・その他部局等・教授 (54301)	
研究分担者	鶴岡 典慶 (Tsuruoka Noriyoshi) (80883628)	京都女子大学・家政学部・教授 (34305)	
研究分担者	壇 一男 (Dan Kazuo) (90393561)	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・教授 (17401)	

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
---------	---------