

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22246072

研究課題名(和文) 環境負荷低減を目指した既存木造住宅の低コスト耐震性能制御法の構築

研究課題名(英文) Development of Low-cost Seismic Performance Control Methods for Existing Wooden Houses Considering Reduction in Environment Load

研究代表者

林 康裕 (Hayashi, Yasuhiro)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70324704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,300,000円、(間接経費) 10,290,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地球環境負荷や地域固有の住文化の継承と良好な住宅ストック形成に配慮しつつ、既存伝統木造住宅の安全性向上の促進と地震被害の低減を目指して、下記のような研究・開発を行った。

a) 蟻害・腐朽による生物劣化や大地震による損傷後の残存耐震性能の評価技術を高度化した。b) 低コストで環境負荷に配慮した耐震性能評価法、耐震補強法や補修法の開発を行った。c) 費用対効果や環境負荷低減効果の観点から、耐震補強法や復旧方法の評価する法を構築し、全国各地の調査地域への適用性を検討した。

研究成果の概要(英文)：In this research, following researches and developments have been performed aiming at promotion of the improvement in seismic safety of the existing tradition timber-framed houses, and reduction of earthquake damage, considering succession of traditional living culture, environment load to each area, and good housing stock formation.

a) The evaluation technology of the residual seismic performance of houses after the biodeterioration by termite attack and suffering decay and big earthquakes have been developed. b) Seismic performance evaluation methods, seismic retrofit methods and repairing methods have been developed considering the environmental impacts and cost-benefit performance c) Evaluation methods for seismic retrofit methods and the restoration methods from viewpoints of cost-benefit performance and reduction effect in environmental impacts have been developed, and the applicability was examined to the several investigated districts.

研究分野：建築構造・材料

科研費の分科・細目：耐震設計

キーワード：生物劣化 伝統木造住宅 環境負荷 耐震診断 耐震補強

## 1. 研究開始当初の背景

南海地震・東南海地震・東海地震に代表されるプレート境界型の巨大地震や、その前後に多発する内陸活断層による直下地震の発生が切迫し、古い木造住宅の耐震性向上が急務となっている。ところが、特に過疎化・高齢化の進む地域では耐震化への動機付けが不十分な上に、所有者の経済力不足などから補修・改修費用の問題も障壁となり、耐震補強は進んでいない。一方、地球環境問題の観点から、近年では住宅の長寿命化・資源の有効活用・廃棄物削減の需要も高まり、地震対応技術についても環境負荷の低減を目指す傾向がある。

地震対策の費用対効果や環境負荷低減効果を考慮する上では、長期的な視点に立った評価が不可欠となる。例えば、地震の発生予測時期、木造住宅の耐久性や住人の生涯設計などの要因を踏まえた適切な対策や実施時期を検討する必要がある。

また、木造住宅の安全性や地震対策は、地域の地震危険度によって大きく異なる。その一方で、全国各地の伝統木造住宅は、地域特有の構法を有しており、その保全・再生は、日本の住文化を継承する上で極めて重要と考えられる。しかしながら、伝統木造住宅の構造の地域性は十分に把握されておらず、従って、固有の構法に適した耐震対策も十分に検討されていない。

## 2. 研究の目的

環境負荷に配慮しつつ、伝統木造住宅の安全性向上の促進と地震被害の低減を目指すとともに、地域固有の住文化の継承と良好な住宅ストックを形成することを目標とし、[開発項目 A,B,C]に従い、既存伝統木造住宅の地震対策技術の研究・開発を行った。

[A] 蟻害・腐朽による生物劣化や地震による損傷後の残存耐震性能評価技術の高度化を行った。

[B] 低コストで環境負荷に配慮した性能制御法(耐震補強法や応急復旧・恒久補修法)を開発した。

[C] 費用対効果や環境負荷低減効果の観点から、耐震補強法や復旧方法を決定する目標性能の評価法を構築した。

## 3. 研究の方法

### A. 残存性能の診断と評価

・生物劣化した試験体や特徴的な伝統木造軸組架構を用いて、静的実験とその分析を通じて劣化部や損傷部の力学特性を評価した。

・材料試験に基づき、既存木造住宅部材の完全非破壊材料特性評価法の構築した。

### B. 性能制御法の開発

・合理的な耐震補強法の提案を目指し、部材・接合部、1層骨組、2層平面骨組と段階的に静的加力実験や振動台実験を行い、力学特性の把握を行った。

・現地調査で見られた地域特有の構法(斜め

貫、板壁など)について静的加力実験を行い、耐震性能を把握と必要な耐震補強法について検討した。

### C. 目標性能の評価

・内陸地殻内地震を対象とした被害シミュレーションや、震源域で発生するパルス性地震動を対象に、被害率曲線を構築するとともに、必要な地震対策について検討した。

・全国各地の伝統木造住宅の構造調査やアンケート調査を行い、データベース化するとともに、構造の地域特性や住まいでの防災意識について分析し、必要な地震対策を提示した。

・地震対策を、費用対効果や環境負荷低減効果の観点から簡便に評価可能な評価手法を構築する。そして、調査地域に適用し、地域に適した地震対策を提示した。

## 4. 研究成果

代表的な研究成果事例を、以下に紹介する。

### [生物劣化を受けた柱脚接合部の残存強度]<sup>20)</sup>

生物劣化の代表格である蟻害と腐朽を受けた柱脚接合部の強度特性を評価するための実験を行った。蟻害については約2年の期間をかけて成り行きで食害させ、腐朽については2ヶ月、4ヶ月、12ヶ月に渡って強制腐朽させた。蟻害を受けた場合は、どの箇所に食害が集中したかによって強度特性が大きく異なり、込み栓接合部の込み栓のように耐力に大きく寄与する部分が食害された場合は、残存耐力が小さくなった。また、約1年に渡って強制腐朽させた場合でも、強度の変化はあまり見られず、全体的に錆の影響によるのか剛性の上昇が目立った。また、強制腐朽させた試験体については、実際の腐朽時に模した形の試験として高含水率状態の試験も行い、強度が低下する傾向を確認した。

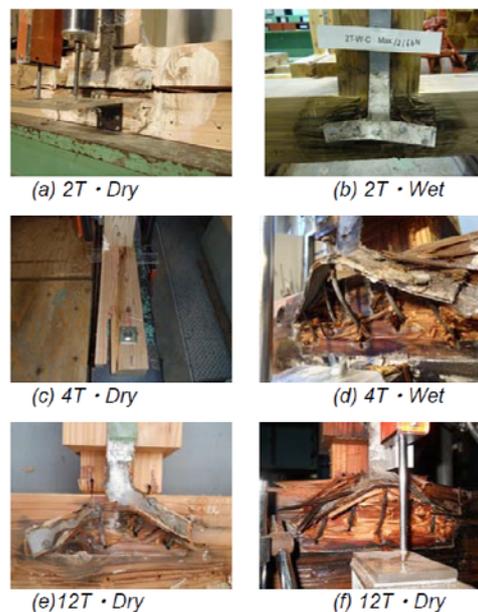


図1 生物劣化柱脚の破壊モード

#### [既存伝統木造建物部材の非破壊検査法]<sup>1)</sup>

既存伝統木造建物の柱部材の実強度推定を目的として、応力波伝播法を応用した完全非破壊型の材料試験法（計測装置・計測方法・推定方法）を提案した。まず、既存の計測装置では、釘状のピンを直接柱に打ち付ける必要があり、建物に傷をつけることが実用上の大きな制約であった。そこで、簡便な治具の追加による完全非破壊型の計測装置へと改良提案を行った上で、安定的に精度の高い試験結果が得られるように、計測装置の仕様と設置方法、および計測方法の標準化を行った。次に、ヤング係数の推定精度を向上するために、推定手法の改良を行った。さらに、推定したヤング係数より曲げ強度を推定するために、2種類の方法を提示した。最後に、提案手法を全国6地域（京都市、湯浅町、橋立、八峰町、関町、五條市）の伝統的木造住宅に適用し、ヤング係数と曲げ強度の推定事例を示した。その結果、スギやヒノキについては、樹種が同じであっても、地域や建物によってヤング係数や曲げ強度の推定値が大きく異なることを示し、試験実施の意義を明らかとした。

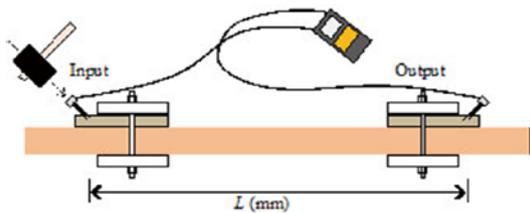


図2 既存木造建物の非破壊材料試験法

#### [梁柱接合部の耐震性評価]<sup>2)</sup>

差鴨居を有する単位軸組の静的水平荷重実験を行い、柱-差鴨居接合部におけるほぞの引抜量を把握した。また、柱-差鴨居接合部の復元力特性の設定に資する差鴨居ほぞの引抜試験を実施し、復元力特性や破壊性状の分析を行った。

得られた成果を以下に示す。

- 小変形時から大変形時に至る柱・栓の破壊モードを新たに分類し直すとともに、柱-差鴨居接合部の降伏耐力到達後の破壊の進展パターンについて分類を行った。
- 込栓接合部については、学会の設計マニュアルに示された初期剛性や降伏耐力の評価式に基づき、完全弾塑性モデルの初期剛性と降伏耐力の修正提案を行うとともに、最大耐力評価式を新たに提案した。鼻栓接合部については、初期剛性と降伏耐力の評価式を新たに構築した。

#### [2層伝統木造骨組みの振動台実験]<sup>5)</sup>

パルス性地震動に対する2階建伝統木造軸組架構の地震時挙動の把握を目的として、2階建伝統木造軸組架構の振動台実験を行った。試験体は、柱脚は石場建てで非対称な壁配置とし、2階のみに壁を有する場合と1階

と2階に壁を有して連層壁となる場合、通し柱の有無をパラメータとした。加振波は、加速度が正弦波パルスや Ricker wavelet とし、周期と変位振幅をパラメータとした。

得られた結果を以下に示す。

- 本実験では、ベースシア係数が最大で0.4程度と小さいため、柱脚の水平移動は5mm以下で小さかった。
- 連層壁を有する場合、柱脚の浮上りが生じ、1階壁周辺の軸組接合部に損傷が集中した。また、非対称な壁配置によって柱脚の浮上りが非対称に生じ、復元力特性も非対称となった。
- 1階壁抜けの場合、通し柱を有さない場合に比べ、通し柱を有する場合は1階の最大層間変形は小さくなるが、大変形時には通し柱が折損する可能性がある。
- 頂部の最大相対変形および各層の層間変形角は、地震動の変位振幅や周期、架構の1次等価固有周期などをもとに、変位応答スペクトルを用いて簡略的に評価可能とした。

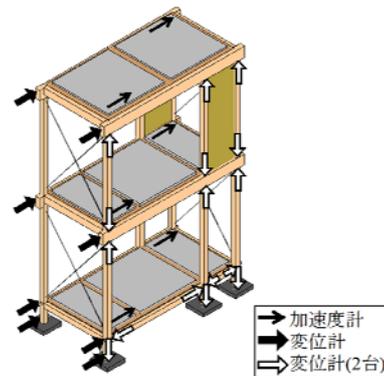


図3 既存木造軸組の非破壊材料試験法

#### [実大京町家試験体の静的水平加力実験]<sup>6)</sup>

京町家の地震時挙動の解明と合理的な耐震設計法の構築を目指して、大変形静的水平加力実験を行った。試験体は、標準的な京町家を想定し、大黒柱あるいは小黒柱を通る桁行方向の平面骨組（各D試験体とS試験体）試験体を作成して実験に用いた。水平加力には、実大2層平面架構骨組を、最大変形角約 $\pm 0.2\text{rad}$ まで加力可能なシステムを開発した。得られた知見を以下に示す。

- 変形角 $0.10\sim 0.15\text{rad}$ でも、土壁の破壊にともなう急激な耐力低下や特定層への変形集中はなかった。
- 背割りと込栓の相対的な位置関係から、柱に割裂が生じた接合部があり、接合部仕様に改善の余地を残した。
- 一部の柱の柱脚部で滑動が見られたが、架構全体の滑動は生じなかった。
- 1階の土壁周辺の柱で浮上りが生じた。浮上りの有無は加力方向によって異なり、土壁の損傷程度にも加力方向で差が見られた。
- 大黒柱に逆せん断力が生じたり、土壁や柱脚の浮上りに起因する非対称な復元力特

性を示す場合には、層の復元力を構造要素の復元力の単純累加として算定することが適切でない場合がある。

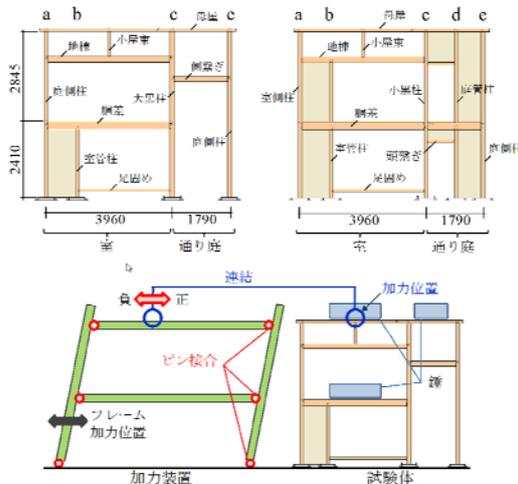


図4 京町家試験体と大変形静的加力試

[斜め貫架構の耐震性能評価 (伊根町)]<sup>7)</sup>

重伝建地区である京都府伊根町伊根浦における舟屋の斜め貫架構の力学特性を解明するため、現地調査、静的加力実験、架構せん断力評価法の構築を行った。

以上の結果、斜め貫架構に関して、斜め貫は梁接合部ではほぼ動かないが、柱接合部ではほぞ穴に抜き挿しする挙動を繰返し、約1/10radで斜め貫の折損に至った。また、柱梁接合部では柱の割裂が生じた。架構せん断力は斜め貫の折損と同時に低下し始めたが、1/6radまでの範囲内では顕著な低下はみれなかった。類似の方杖架構の変形限界 1/30radと比べて変形性能が格段に大きい。

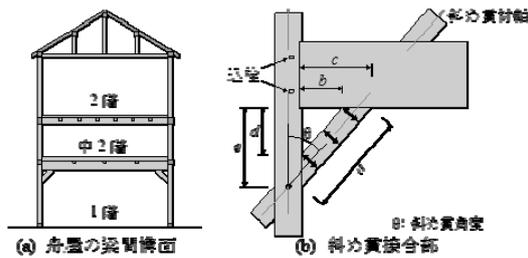


図5 伊根における舟屋の斜め貫架構

[大垂壁付き架構の耐震性評価 (湯浅町)]<sup>9)</sup>

南海・東南海地震による甚大な被害が懸念される重伝建地区の和歌山県湯浅町を対象とし、家屋の構造的特徴と振動特性を明らかにした。また、比較的大規模な家屋の吹き抜け部周辺に存在する特徴的な大垂壁の影響を考慮し、調査家屋の耐震性能を評価した。調査の結果、下記の事が指摘できる。

- a) 比較的規模の大きい家屋では、けた行方向の固有振動数が概ね3Hz以下であり、降伏せん断力係数も0.2程度と低い。
- b) 柱1本あたりの負担重量は、他地域の平

均値よりも大きい家屋が存在する。

c) 大垂壁周辺における通し柱の折損が数か所ではほぼ同時に生じ、柱の折損が生じた場合には倒壊に至る可能性が高い。



図6 湯浅町の大垂壁を有する町家

[パルス性地震動に対する地震対策]<sup>11)</sup>

内陸地殻内地震に対する伝統木造建物の被害予測と地震対策の合理化を目的として、震源近傍におけるパルス性地震動のパルス周期や木造建物の耐力分布の違いを簡易に反映可能な被害率曲線の構築を新たに行った。得られた結論を以下に記す。

- a) 被害率曲線は、地震動のパルス周期によって大きく変化する。
- b) 建物耐力上昇による被害率低減効果は、地域で想定される地震動のパルス周期によって大きな差がある。即ち、推定される地震動のパルス周期を十分に考慮した地震対策が必要と考えられる。

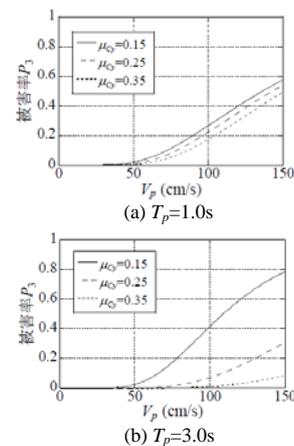


図7 パルス周期  $T_p$  や降伏ベースシア  $u_{cr}$  による被害率曲線の変化 (被害中)

[伝統木造の地域特性比較]

(A) 構造特性<sup>14)</sup>

重要伝統的建造物群保存地区 98 地区を対象として地震危険度の比較を行うとともに、構造詳細調査を実施した 8 地域(宮城、黒島、木曾平沢、美山、京都市、伊勢、湯浅、吉良川)の伝統的木造住宅を対象として、構造特性値の地域性について検討した。そして、下記のような傾向が定量的に確認できた。

- a) 98 地区の地震危険度には顕著な差が認められた。また、8 地域の住宅調査結果より、

高さ、床面積当りの重量、降伏せん断力係数、などに、明瞭な地域性が見られた。

b) 1階床面積当りの重量は、外壁や屋根などの仕様により地域性があるが、地域、階数などを特定すれば概ね一定値となるため、床面積から重量が概算可能と考えられる。

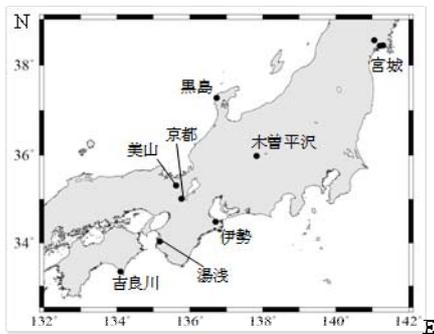
(B) 住まいでの意識<sup>15)</sup>

7地域で行ったアンケート調査を基に、住民の防災対策や家屋の維持管理に対する意識を分析した。得られた知見を以下に示す。

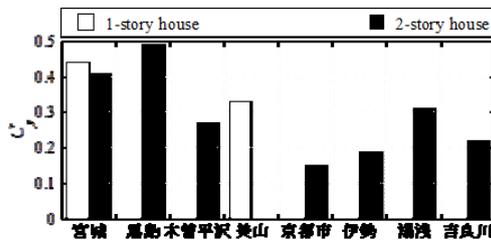
a) 住民は地震危険度に関係なく地震を心配しているが、耐震補強の実施割合は低い。経費の高さや子孫の不同居等の理由が多い。ただし、増築やリフォームの実施率は高く、同時に耐震補強の実施は可能と考えられる。

b) 蟻害腐朽被害実態を十分に把握できていない住民が多い。被害の生じやすい箇所や損傷程度を理解を促す必要がある。

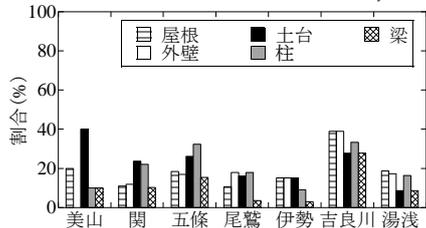
c) 維持管理を定期的に行っている家屋は少ない。耐震補強を直ぐに行うことが困難な状況下では、維持管理による耐震性能の維持は、実効性の高い地震対策と考えられる。



(a) 調査地域の例



(b) 降伏ベースシア係数  $C_y$



(c) 蟻害腐朽箇所

図8 全国各地の調査結果の比較

[対策の費用対効果・環境負荷低減効果]<sup>16-19)</sup>

大地震発生時の木造住宅の安全性に大きく関わると想定される、耐久性や劣化状況を反映可能な木造住宅の地震リスク評価手法を構築した。具体的には、耐震診断、耐久性診断、劣化診断の結果と地域の地震危険度解

析結果に基づいて地震損失期待値や環境負荷(CO<sub>2</sub>排出量や廃棄物量)を調べ、地震対策(耐震補強や維持管理など)を検討するための指標を提案した。そして、地震危険度の比較的高い高知市を対象として分析を行った。

得られた結果を以下に示す。

a) 耐震補強の実施による総支出の低減効果は、木造住宅の耐力が低いほど、使用期間が長いほど増加する。

b) 木造住宅の耐力が高くなれば、耐久性向上による耐用年数の長期化や定期的な維持管理による劣化防止を行っても損失低減効果は大きくない。

c) 地震によって全壊と判定されても、建て替えでなく補修を選択することで大幅な損失低減が期待できる。

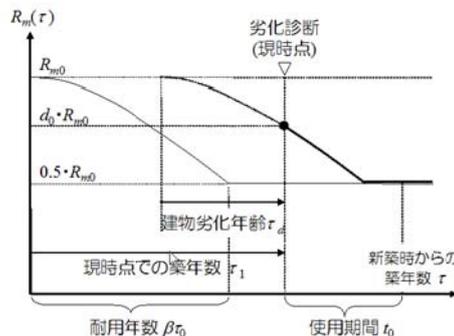


図9 既存建物の劣化曲線の模式図

次に、5地域(伊勢・吉良川・木曾平沢・京都・美山)における調査住宅を対象として地震リスク評価を実施し、建物戸別の耐震性や耐久性と地域の地震危険度を踏まえた、地震損失期待値・耐震補強の費用対効果を検討した。得られた結論を以下に示す。

a) 地震危険度の差により、建物耐力に関係なく早急な耐震補強が有効な地域(伊勢・吉良川)、耐力の低い建物を優先した耐震補強が有効な地域(木曾平沢・京都)、耐震補強の実施が効率的でない地域(美山)がある。

b) 劣化の程度により、耐震補強の効果に大きな差が生じる場合もあり、現状の劣化度を適切に耐震性能評価や地震対策立案に反映することが重要である。

## 5. 主な発表論文等

([http://www.hayashi.archi.kyoto-u.ac.jp/papers\\_j.html](http://www.hayashi.archi.kyoto-u.ac.jp/papers_j.html))

[雑誌論文] (計19件)

- 浪江和隆, 焦 鍵, 杉野未奈, 多幾山法子, 林康裕: 既存木造建物でのヤング係数の完全非破壊測定手法の提案 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, No.686, pp.833-838, 2013.4.
- 松本拓也, 多幾山法子, 林 康裕: 柱-差鴨居接合部の力学特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, No.675, pp.747-754, 2012.5.

- 3) 杉野未奈, 多幾山法子, 大西良広, 林康裕 : 地震時における伝統木造建物の振動特性変化と最大応答の簡易予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, No.672, pp.197-203, 2012.2.
- 4) 杉野未奈, 高橋遥希, 多幾山法子, 大西良広, 林康裕 : 連檐する伝統的木造建物群の地震時衝突挙動評価に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.58B, pp.163-168, 2012.3.
- 5) 杉野未奈, 中西統也, 守屋友貴, 多幾山法子, 林康裕 : パルス性地震動を用いた 2 層伝統木造軸組架構の振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, No.700, 2014.6.
- 6) 中川敦嗣, 多幾山法子, 林康裕 : 2 階建京町家を想定した実大平面架構の大変形静的加力実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, No.685, pp.513-520, 2013.3.
- 7) 多幾山法子, 南部恭広, 渡辺千明, 林康裕 : 斜め貫接合部を有する木造軸組架構の力学特性と耐震性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, No.701, 2014.7.(掲載予定)
- 8) 多幾山法子, 宮本慎宏, 水谷友紀, 松本拓也, 渡辺千明, 林康裕 : 京都府美山町における京都北山型住宅の構造調査と耐震性能評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, No.665, pp.1309-1318, 2011.7.
- 9) 南部恭広, 横部達也, 多幾山法子, 渡辺千明, 林康裕 : 和歌山県湯浅町における伝統木造家屋の耐震性評価 日本建築学会技術報告集, Vol.19, No.43, pp.909-912, 2013.10.
- 10) 中川貴文, 佐藤弘美, 多幾山法子, 腰原幹雄, 林康裕 : 2007 年能登半島地震における木造住宅の被害の再現, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, No.688, 2013.6.
- 11) 木村友香, 杉野未奈, 林康裕 : パルス性地震動に対する木造建物の被害率曲線の提案, 地域安全学会論文集, pp.45-50, 2013.11.
- 12) 大西良広, 鈴木恭平, 田中和樹, 林康裕 : 上町断層近傍の設計用地震荷重設定に考慮すべき断層パラメータ, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, No.665, pp.1263-1270, 2011.7.
- 13) 宮本慎宏, 杉野未奈, 林康裕 : パルス性地震動に対する木造建物の最大応答予測と必要耐震性能, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, No.675, pp.731-737, 2012.5.
- 14) 南部恭広, 焦鍵, 多幾山法子, 渡辺千明, 林康裕 : 伝統木造住宅における構造的特徴の地域性, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.59B, pp.585-592, 2013.3.
- 15) 岡沢理映, 焦鍵, 木村友香, 小林素直, 多幾山法子, 渡辺千明, 林康裕 : 伝統的木造家屋の防災対策および維持管理～災害危険度の異なる 7 地域の比較～, 日本建築学会技術報告集, Vol.20, No.46, 2014.10.(掲載予定).
- 16) 更谷安紀子, 長谷部裕, 水谷友紀, 林康裕 : 耐久性や劣化状況を考慮した木造住宅の地震リスク評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, No.655, pp.1609-1615, 2010.9.
- 17) 水谷友紀, 多幾山法子, 林康裕 : 環境負荷低減に着目した木造住宅の地震対策評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.17, No.35, p.411-416, 2011.2.
- 18) 水谷友紀, 多幾山法子, 大西良広, 田村和夫, 林康裕 : 環境負荷低減に着目した鉄骨造建物の地震対策評価, 第 7 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(A 論文), pp.313-319, 2011.10.
- 19) 更谷安紀子, 水谷友紀, 焦鍵, 林康裕 : 耐久性や劣化状況を考慮した地域型木造住宅の地震対策, 日本建築学会技術報告集, 第 18 巻, 第 39 号, pp.427-430, 2012.6.

[学会発表] (計 23 件)

- 20) T. Mori, K. Kawano, K. Tanaka, Y. Yanase, H. Kurisaki, M. Mori, Y. Noda, M. Inoue, Y. Hayashi, and K. Komatsu : Propose of decay-acceleration method for real size column-sill joint and evaluation of strength properties, , World Conference on Timber Engineering, 2012.
- 21) M.Sugino, T.Nakanishi, N.Takiyama, Y. Hayashi, Y.Moriya : Maximum Response Evaluation of Two-storied Traditional Wooden Buildings for Pulse-like Ground Motions, ICOSAR 2013.6.
- 22) 林康裕, 多幾山法子, 焦鍵, 南部恭広 : 地域特性を考慮した都市・建築物の地震対策のデザイン, Design シンポジウム 2012, pp.339-342, 2012.10.(他、20 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林 康裕 (HAYASHI YASUHIRO)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号 : 70324704

### (2) 研究分担者

腰原幹雄 (KOSHIHARA MIKIO)  
東京大学・生産技術研究所・教授  
研究者番号 : 50334321

森 拓郎 (MORI TAKURO)  
京都大学・生存圏研究所・助教  
研究者番号 : 00335225

川瀬 博 (KAWASE HIROSHI)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号 : 30311856

大西良広 (OHNISHI YOSHIHIRO)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号 : 00450916

多幾山法子 (TAKIYAMA NORIKO)  
首都大学東京・都市環境学部・准教授  
研究者番号 : 10565534

### (3) 連携研究者

田村和夫 (TAMURA KAZUO)  
千葉工業大学・工学部・教授  
研究者番号 : 50416822