

平成 30 年 9 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26242034

研究課題名(和文) 巨大地震の長周期地震動による超高層住宅の生活継続プランの構築に関する系統的研究

研究課題名(英文) Systematic studies on Life-Continuation Plan of high-rise buildings from long-period ground motions due to Mega-thrust events

研究代表者

川瀬 博 (KAWASE, Hiroshi)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：30311856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 23,900,000円

研究成果の概要(和文)：東北地方太平洋沖地震のデータから、震源過程、伝播経路特性、サイト特性をモデル化し、広周期帯域地震動の高精度予測を行った。次に、3次元立体フレームモデルにより長周期建築物の非線形応答を求め、その相対層間変形角から機能維持被害ポテンシャルを求めた。また長周期振動台を用いた超高層建物内の室内家具の転倒実験に基づき、高層階での床応答と室内被害の関係を求めた。

機能維持被害ポテンシャルを低減するための耐震補強用制震ダンパーを振動台実験および実大鉄骨架構を用いた実証観測により実用化した。さらに予測された機能維持被害の影響を最小限に留める生活継続計画と避難計画の立案および滞留者予測に関する研究を実施した。

研究成果の概要(英文)：Using the modeling of the seismic source process based on the Tohoku Earthquake and the latest propagation path and site characteristics from the observed records, the quantitative broad-band seismic motions were predicted. Then nonlinear response of a long-period building was calculated by a three-dimensional frame model to obtain the functional damage potential. Based on the experiments of indoor furniture using a long-period shaking table, the relationship between floor response and indoor damage was established. Damper as an earthquake-resistant reinforcement for reducing functional damage potential was put into practical use through the shaking table test of a model structure and the field observation of a real steel frame. Finally we studied soft countermeasures assuming damage prescribed above. We integrated the above results and conducted studies on the life continuity plans and evacuation plans with evacuee predictions that minimized the impact of expected functional damage.

研究分野：都市災害管理学

キーワード：長周期地震動 超高層建物 生活継続計画 家具転倒 避難 滞留者予測

## 1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震では、震源から760km離れた大阪府の咲洲庁舎の本体最上部の52階において、最大変位130cm、最大加速度130cm/s<sup>2</sup>の大きな応答が観測され、非構造部材にも大きな被害が生じた。震源から遠く離れた堆積盆地上の超高層構造物に対して大きな被害が生じた事例としては1985年メキシコ地震が有名であり、400km離れたメキシコシティの超高層建物が多数崩壊して大被害をもたらしたが、これは基本的に靱性不足により大変形に耐えられなかったことが原因であり、我が国の超高層構造物で同様のことが起こるとは考えにくい。実際、震源域近傍の仙台平野は基盤深さが浅かったこともあり、超高層建築物に大きな被害をもたらすことはなかった。一方、関東平野においては東京都内の超高層建築物に長時間続く大きな揺れをもたらし、幸い主要構造材の深刻な被害は報告されていないものの、機器や非構造部材・室内状況等に多くの被害が生じた。それら機器・非構造部材・室内状況の被害に加え、大規模停電の影響もあって超高層住宅・オフィスから多くの居住者・使用者が路上にあふれ一時的避難者となる結果をもたらした。

西南日本では南海トラフ沿いの海溝性巨大地震として、東海・東南海地震や南海地震の再来が想定され、申請者のグループでも強震動予測をしてきているが、東日本大震災以降これらの震源域が連動して発生する可能性も考慮する必要性が生じ、実際中央防災会議では日向灘を含む4連動モデルによるM9クラス地震の被害予測を実施、最大死者32万人という予測結果を公表した。しかし、そこで用いられている強震動予測手法は従来型のもので、東北地方太平洋沖地震の観測結果の分析から得られた地震動の発生過程や伝播経路特性、サイト特性に関する最新の知見は活かされていない。またこれまでの長周期構造物に対する被害予測ではもっぱら構造的被害のみが着目され、概ね問題なしとされてきているが、都市居住者の社会生活に多大な影響を与える機器・非構造部材への機能的被害や室内被害が超高層生活にもたらす影響をシステムティックに考慮しない限り、その地震時の大都市での発災インパクトを総合的に把握できたとはいえない。

## 2. 研究の目的

大都市に多数現存する超高層建築物の災害脆弱性は、その耐震安全性にあるというよりもその機能維持性、すなわち「生活継続可能性」にある。すなわち発生が危惧される南海トラフ沿いの海溝型超巨大地震や首都直下大地震に対して、建築物の「生活継続可能性」を十分に確保する必要がある。そのため、まず対象大都市の地盤増幅特性を考慮した予測強震動を用いて、実構造物の挙動を再現できるモデルによってその応答(層間変形角

等)を評価する必要がある。さらにその応答による機器・非構造部材の被害や室内被害をモデルと実験・経験式によって予測し、得られた被害に応じた対策を立案することが重要である。よって本研究では、想定巨大地震による周期0.2~20秒の広周期帯域地震動に着目し、1)東北地方太平洋沖地震から得られた知見を活かしてサイトを特定して高精度に広周期帯域地震動を予測し、2)予測地震動に対する住宅の非線形応答を高精度に計算してその応答を定量的に評価、機器・非構造部材の被害・室内被害を定量的に予測し、さらに3)ハード対策としてその予測された「機能維持破壊ポテンシャル」を低減させるのに必要な制震ダンパー工法の実用化を図るとともに、4)ソフト対策として事前準備の有効な施策を提案することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、大きく4つのメインタスクに分けて研究を遂行する。

- 1) 高精度地震動予測：東北地方太平洋沖地震の分析から得た知見に基づいた震源過程のモデル化と、観測記録から抽出した海溝型地震に対する最新の伝播経路特性およびサイト特性モデルを用いて、広周期帯域地震動の高精度予測を行う。
- 2) 建築物の被害予測：3次元立体フレームモデルにより長周期建築物の非線形応答を求め、東北地方太平洋沖地震の被害調査や長周期振動台を用いた振動実験に基づき、機能維持被害ポテンシャルを求める。
- 3) ハード対策：過大な機能維持被害ポテンシャルを低減するための耐震補強用制震ダンパーを振動台実験および実大鉄骨架構を用いた実証観測により実用化する。
- 4) ソフト対策：以上の成果を統合し、予測された機能維持被害の影響を最小限に留める生活継続プランを立案する。

## 4. 研究成果

各メインタスクにおいては多くの検討を行った。各項目で最初に個別研究成果の概要を報告し、その後特定の研究事例について少し詳しく報告する。

### (1) 定量的強震動予測

①過去モデル化された日本国内の海溝型地震の強震動生成域モデルを収集・整理したところ海溝型地震の強震動生成域の総面積は同規模の内陸地殻内地震の3分の1であることを明らかにした。また応力降下量分布・すべり分布と相関する破壊伝播をモデル化するため、応力降下量分布・破壊開始点からの距離と破壊伝播速度の間の経験式を用いて不均質破壊伝播モデルを構築した。

②海溝型地震の応力降下量に関して深さとの関係を整理し、さらに個別地震の応力降下量を強震動予測式に組み入れることによって予測のばらつきがどの程度減るのかについて検討した。その結果、フーリエスペクト

ル場合には応力降下量が短周期スペクトルと対応していることがわかった。同じことを応答スペクトルに対して適用すると、ばらつきは周波数を問わず減少することがわかった。

③2011年東北地方太平洋沖地震の本震および最大余震を対象に、震源域から大阪盆地までの長周期地震動について、三次元有限差分法によるシミュレーションを行った。また同地震の逆算した震源モデルを収集し、統一スケールで比較し相違点を把握した。またプレート境界地震の面積と応力降下量の関係を調べたところ、面積が小さいと応力降下量のばらつきが大きくなることがわかった。さらに表層地盤が線形あるいは非線形であるときの震度の関係式を作成し、統計的グリーン関数法により1923年関東地震の広帯域強震動再現を行った。

④高知県黒潮町での固有サイト特性を考慮した強震動予測について少し詳しく報告する。

#### 1) サイト増幅特性の把握

地震動のサイト増幅特性は地域固有のものであるため、黒潮町において地盤構造を同定し、その地盤構造から増幅特性の算出を行った。地盤構造の同定は黒潮町における常時微動の観測記録を用いた。常時微動の観測記録からHVR（鉛直方向のスペクトルの比に対する水平方向のスペクトルの比）を算出した。その後、森・他(2016)によって経験的に求められた微動のHVRと地震動のHVRの比を用いて疑似的な地震動のHVRを算出した。

次に長嶋・他(2014)の方法、ハイブリットヒューリスティック探査法を用いて地盤構造の同定を行った。まず0.5-20Hzの探査領域で地盤構造を同定した後、仲野・他(2014)が求めたJMA黒潮町の地震動HVRをターゲットに同定した地盤構造に深部構造を置き換え、それらの層の地盤のパラメータを固定し、地盤構造の同定を再度0.1-20Hzの範囲で行った。同定された地盤構造から算出したHVRと観測記録から求めた疑似的な地震動のHVRの比較を図1に、同定結果から算出されたサイト増幅特性の一例を図2に示す。

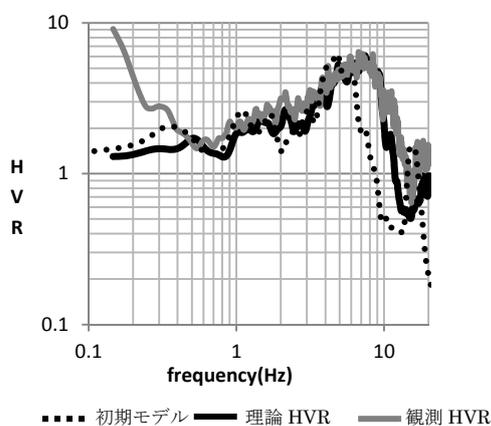


図1 同定された地盤構造から算出したHVR

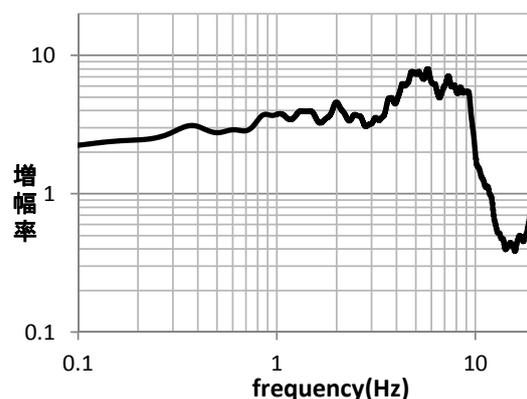


図2 算出されたサイト増幅特性の一例

#### 2) 予測地震動と被害予測

南海トラフ地震発生時の予測地震動は地域地盤環境研究所の鶴来らによって作成されたものを用いる。断層モデルは内閣府によるモデルが用いられている。地震動はJMA黒潮町における予測地震動が算出されている。地震動は断層の破壊開始点別に3ケース用意され、東破壊、中央破壊、西破壊の3ケースである。

鶴来らによって求められた地震動をJMA黒潮町の地震基盤から地表面までのサイト増幅特性で除し、その後、各微動観測点のサイト増幅特性を乗ずることで各観測点における予測地震動を算出した。波形の例を図3に示す。これは1-3地点での西破壊のケースのEW方向の加速度波形である。前半の振幅が大きくなっている。

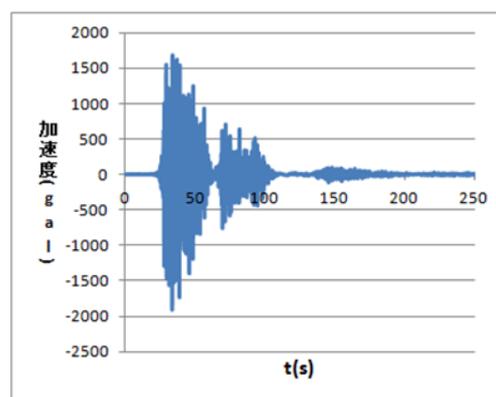


図3 シミュレーション波形の例(1-3地点の西破壊ケース、EW成分)

次に、予測地震動と黒潮町に対応した木造建物群を用いて黒潮町における被害予測を行った。予測被害率を図4に示す。図より観測点1-3で予測被害率が高いこと、中央破壊、東破壊、西破壊のケース順に被害率が高いことが分かる。前者は観測点1-3では1Hz周辺の増幅率が高くその影響が生じたことため、後者は中央破壊、東破壊、西破壊のケース順に入射波の応答スペクトルが大きいためと考えられる。

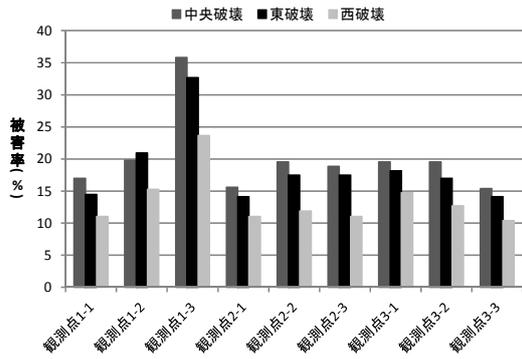


図4 各地点での予測被害率

## (2) 構造物の被害予測

①地震時の室内安全性、特に長周期地震動による超高層建物内における室内被害を念頭に置いて、まず長周期振動台により長周期地震動による家具転倒実験を行い、それが短周期地震動と同様に加速度で支配されていることを明らかにした。さらに鉄筋コンクリート造 25 階建て集合住宅を想定して、既往の家具転倒実験を再現するよう作成した 3D-CG モデルに入力し、床の傾きが家具転倒に及ぼす影響について検討した。

②長周期振動台を用いて家具の転倒実験を行い、その結果を整理した。実験結果から、転倒するかしないかの線引きは実験からかなり制度良く求めることができること、基本的には加速度値で転倒限界が決まっている場合が多いことなどがわかった。実験した長周期域の範囲では周波数依存性は大きくないこと、床や周辺壁の影響が大きいことを明らかにした。

③海溝型地震による大加速度により大きな建物被害は生じていないことから、兵庫県南部地震の被害をもとに作成された非線形応答解析による被害予測モデルでは計算被害率が過大評価されているため、短周期の多く含まれる記録や予測波形に対してローパスフィルターを適用することで内陸地震に対しては大きな被害が再現され、海溝型じしんに対しては観測と同等に小さい被害が再現されるようなフィルター定数を探索した。その結果 1Hz~2Hz でローパスフィルターを作用させると両者とも満足できる被害予測が得られることがわかった。

## (3) ハード対策

①超高層建物用のダンパーとして用いるため、乾式工法で破れ目地状に組積したコンクリートブロック壁の頂部面内方向に正負交番の静的繰返し水平載荷実験を行ったところ、破れ目地状に組積した試験体は芋目地状に組積した試験体より履歴吸収エネルギーは大きいことがわかった。さらに超高層建物を対象に長周期・長時間地震動を考慮した様々なタイプとレベルを持つ地震動に対し

ダンパー補強による耐震性能の評価を行い、効率的なダンパー配置を提案した。

②乾式ブロック造制震壁の摩擦接合方法としてアルミニウム座金を摺動部に用いた新しい摩擦接合ダンパーを製作し、面内方向の水平載荷室内試験を行いその基本性状を調べた。その結果安定した剛塑性型の履歴を示すこと、導入張力が大きいほど摩擦係数が大きくなることがわかった。

③既存構造物耐震改修用の摩擦制震壁について、実大レベルの施工を通して効果を検証した。まず設置する 5 層鉄骨フレーム構造物の物理パラメーターを、回転慣性を含む曲げせん断モデルで同定したところ、観測結果をよく説明するパラメータが得られた。次に実際に制震壁を設置して共振振動数の変化から制震壁による剛性増加を把握した。さらに隣接する 3 層建物から反力をとって油圧ジャッキで水平方向静的載荷試験を実施し、大変形時の挙動を把握した。これらの観測結果から制震壁のトリリニア復元力モデルを構築し動的シミュレーションを行った。その結果提案する制震壁は構造物の地震時応答を低減させるに十分な実用性を有していることが示された。

④摩擦制震壁の動的挙動に関する模型振動実験について少し詳しく報告する。

### 1) 超高層模型試験体

本研究では 2013 年に実施した予備的振動実験の結果を受けて新たに製作した改良型縮約模型で振動台実験を行った。制振装置としては提案している乾式ブロック摩擦制震壁を組み込み、装置の地震時挙動を把握した。

本研究ではモデル化の容易なせん断変形のみに着目し、層間のせん断変形量と固有周期が実値となるような縮約模型の設計を行う。図5に縮約模型の概観を示す。縮約模型は 4 層構造で各層の柱頭部分にはローラーが設置されており、水平荷重を負担しない構造となっている。また層の復元力を与える部材として、ジュラルミン製の板ばねを設置している。改良型模型ではこの板ばね接合部をローラーピン接合とすることで材端の鉛直変位および回転を許容する機構とした。予備解析では試験体の固有周期は約 5.9 秒となり、実験で使用する入力地震動に対して弾性範囲の応答を示し安全であることを確認した。



図5 超高層縮約模型概観

## 2) 摩擦制震ダンパー

摩擦制震壁ボルトを0本、4本、8本、12本とした場合の各パターンについて、履歴曲線を図6に示す。摩擦ダンパーに生じる摩擦力は設計上0であるが、本実験では摩擦ダンパー設置の際に壁体面外方向の施工誤差によりCT鋼と平鋼が接触することによる摩擦力が生じ、ボルト0本のパターンについてもある程度のエネルギー吸収が行われていることが分かる。ボルト4本、8本のパターンについて、摩擦ダンパーの摺動部が滑り出した後は矩形のループを描き、安定した履歴吸収を行っている。ボルト12本のパターンについては摩擦ダンパーが明確に滑り出したケースが無く、楕円形のループを描いた。

各加振ケースの滑り耐力を読み取り、ボルト本数毎に集計した結果を表1に示す。算出した摩擦係数はボルト本数4本と8本のパターンではほぼ同じ値となっており、安定した挙動をしていることが分かる。ボルト本数12本のパターンでは滑り耐力が突出して大きく、施工時に何らかの原因で摩擦ダンパーのプレストレス力が4kNよりも大きくなり、滑り耐力が想定よりも高くなっているものと考えられる。

表1 制震壁の滑り耐力

ボルト本数	総プレストレス	滑り耐力	摩擦係数
0本	0 kN	2.43 kN	
4本	16 kN	5.98 kN	0.19
8本	32 kN	12.32 kN	0.19
12本	48 kN	39.97 kN	0.42

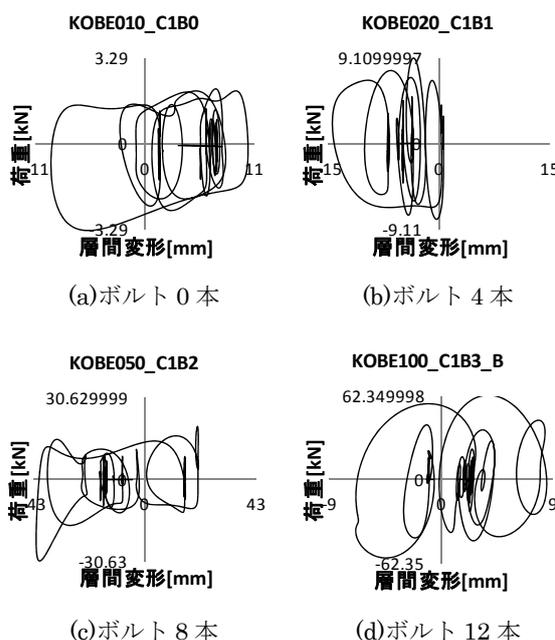


図6 摩擦制震壁の履歴特性

## 3) 構造物への適用シミュレーション

摩擦制震壁の応答は2線形逆行型の減衰力特性を用いることで、妥当な最大値予測が可能であることを確認した後、今回の実験で得られた制震壁の振動特性を用いて地震応答シミュレーションを行った。改良型縮約模型と同じ固有周期をもつ52階建超高層建物を想定し、縮約された4質点せん断型の解析モデルにて制震壁の最適配置を求め、層方向に漸減するような配置で最も高い制震効率を得られることを明らかにした。

### (4) ソフト対策

①新宿駅周辺を対象地域として250mメッシュ単位での屋内・屋外・地下街等の滞留者数の推計を行った。それから地震時を想定した避難行動シミュレーションを実施した。その結果屋内滞留者が発災後に職場等での待機に成功し、かつ屋外・地下街等滞留者が避難場所に向かうことで、数時間程度で混乱が収束することを明らかにした。

②従来の方法では動的に地域内人口を把握することが難しい新宿駅西口地域の高層ビル街を対象に、NTTドコモのモバイル空間統計を活用して、避難者・滞留者予測モデル用の季節別・性別・年齢別・居住地別の時系列流動人口データベースを構築した。

③超高層ビル街における地震後の建物被害確認と即時脂溶性判定に関する研究を実施し、情報端末を利用した被害情報収集システムの提案を行った。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計27件)

① Asano Kimiyuki, Source Modeling of an Mw 5.9 Earthquake in the Nankai Trough, Southwest Japan, Using Offshore and Onshore Strong Motion Waveform Records, Bull. Seismo. Soc. Am., 査読有、108、2018、1231-1239、DOI: 10.1785/0120170357

② 村上正浩, 中心市街地の災害対応力向上のための教育・訓練プログラム—新宿駅周辺地域における実践事例—、危機管理レビュー、査読無、9、2018、15-25

③ 中西真子, 久田嘉章, 山下哲郎, 笠井和彦, 長周期・長時間地震動や活断層近傍の強震動など極大地震動を考慮した都心に建つ既存高層建築の制振補強に関する研究、日本地震工学会論文集、査読有、2、2018、2\_62-2\_81、DOI: 10.5610/jaee.18.2\_62

④ Kawase Hiroshi, Yuta Mori, Fumiaki Nagashima, Difference of Horizontal-to-Vertical spectral ratios of observed earthquakes and microtremors and its application to S-wave velocity inversion based on the diffuse field concept, Earth, Planets and Space、査読有、70:1、DOI:10.1186/s40623-017-0766-4

⑤ Shinichi Matsushima, H. Kosaka, Hiroshi Kawase, Directionally dependent

horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors at Onahama, Fukushima, Japan, Earth, Planets and Space, 査読有、69:96、2017、DOI:10.1186/s40623-017-0680-9

⑥Hiroshi Kawase、Shinichi Matsushima、Fumiaki Nagashima、Baoyintu、Kenichi Nakano、The cause of heavy damage concentration in downtown Mashiki inferred from observed data and field survey, Earth, Planets and Space, 査読有、69:3、2017、DOI:10.1186/s40623-016-0591-1.

⑦森勇太、川瀬博、松島信一、長嶋史明、微動と地震動の観測水平上下スペクトル比の相違とそれに着目した地盤構造同定手法、日本地震工学会論文集、査読有、16-9、2016、13-32

⑧小阪宏之、川瀬博、松島信一、長嶋史明、微動と地震動観測記録及び MASW 手法に基づいた港湾地域強震観測網仙台観測点における S 波速度構造推定、日本地震工学会論文集、査読有 16-4、2016、167-183

⑨森勇太、川瀬博、松島信一、竹内義高、稲葉学、免震建物の過大変位制御を目的としたフォールト・トレラント機構に関する研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、722、2016、695-702

⑩伊藤恵理、川瀬博、松島信一、畑山満則、予測強震動を用いた建物倒壊想定に伴う道路閉塞を考慮した津波避難シミュレーション、日本地震工学会論文集、査読有、15-5、2015、17-30

〔学会発表〕(計 31 件)

①柳田悠太郎、村上正浩、新宿駅周辺地域を対象としたエリア災害対応支援システムの開発、日本建築学会関東支部研究発表会、2018 年 3 月 1 日～3 月 2 日、東京都千代田区  
②須藤峻介、中村友紀子、高橋徹、強震時の建物の床の傾きを考慮した家具の挙動に関する研究、日本建築学会関東支部研究発表会、2018 年 3 月 1 日～3 月 2 日、東京都千代田区  
③吉田真央、山口謙太郎、川瀬博、石倉大暉、乾式工法で芋目地状に組積したコンクリートブロック壁の力学特性 その 2 壁体の摩擦滑り耐力と面内初期剛性、2017 年日本建築学会大会、2017 年 8 月 31 日～9 月 3 日、広島県広島市

④関口春子、浅野公之、岩田知孝、A heterogeneous SMGA model for plate boundary earthquakes、日本地球惑星科学連合、2017 年 5 月 20 日～5 月 25 日、千葉県幕張市

⑤萬保篤人、川瀬博、松島信一、実大鉄骨架構を用いた摩擦制震壁の性能評価およびその改良に関する実験的研究、2016 年日本建築学会大会、2016 年 8 月 24 日～8 月 26 日、福

岡山福岡市

⑥長嶋史明、川瀬博、松島信一、拡散波動場理論に基づく地震動水平上下スペクトル比を用いた S 波速度および P 波速度構造の同定、2016 年日本建築学会大会、2016 年 8 月 24 日～8 月 26 日、福岡県福岡市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川瀬 博 (KAWASE, Hiroshi)  
京都大学・防災研究所・特定教授  
研究者番号：30311856

### (2) 研究分担者

佐藤 智美 (SATO, Toshimi)  
清水建設(株)・技術研究所・上席研究員  
研究者番号：00393562

山口 謙太郎 (YAMAGUCHI, Kentaro)  
九州大学大学院・人間環境学研究院・准教授  
研究者番号：10274490

中村 友紀子 (NAKAMURA, Yukiko)  
千葉大学大学院・工学研究院・准教授  
研究者番号：20313504

関口 春子 (SEKIGUCHI, Haruko)  
京都大学・防災研究所・准教授  
研究者番号：20357320

松島 信一 (MATSUSHIMA, Shinichi)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号：30393565

久田 嘉章 (HISADA, Yoshiaki)  
工学院大学・建築学部・教授  
研究者番号：70218709

浅野 公之 (ASANO, Kimiyuki)  
京都大学・防災研究所・准教授  
研究者番号：80452324

村上 正浩 (MURAKAMI, Masahiro)  
工学院大学・建築学部・教授  
研究者番号：90348863

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

長嶋 史明 (NAGASHIMA, Fumiaki)  
森 勇太 (MORI, Uta)  
仲野 健一 (NAKANO, Kenichi)  
伊藤 恵理 (ITO, Eri)  
宝音 図 (BAOYINTU)