

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25249077

研究課題名(和文) 東日本大震災に学ぶ南海トラフ巨大地震での長周期建物の挙動予測・再現と耐震対策促進

研究課題名(英文) Prediction of Dynamic Behavior of Long-period Buildings during Great Nankai Trough Earthquake and Promotion of Aseismic Design Learned by Great East Japan Earthquake

研究代表者

福和 伸夫 (Fukuwa, Nobuo)

名古屋大学・減災連携研究センター・教授

研究者番号：20238520

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,600,000円

研究成果の概要(和文)：長周期地震動への対策を進めるために、地震動と建物の応答特性の把握および対策促進の方策を提案した。まず、堆積盆地構造が地震動に与える影響について、有限差分法と相反定理を用いて検討した。次に、建物の固有周期特性と減衰特性を明らかにするために、建設時と解体時の高層建物を対象に継続して微動計測と強震観測を行い、振動特性の建物階数依存性を明確にした。また、構造物を連続体置換することにより、動的相互作用が応答に及ぼす影響を波動論に基づいて明らかにした。さらに、実大構造物の加振実験環境と振動モニタリングシステムを構築し、長周期建築物の耐震対策や家具固定の促進のためのシステム開発事例を提示した。

研究成果の概要(英文)：Characteristics of long-period seismic ground motion and response of tall buildings are investigated to promote earthquake proof countermeasures. The finite difference method and the reciprocal theorem are used to examine the effect of sedimentary basin structures on seismic wave amplification. Natural period and damping of tall buildings are evaluated by ambient vibration tests and earthquake response observation during construction or demolition of the buildings. The effects of dynamic soil-structure interaction on response amplification of tall buildings are confirmed applying wave propagation theory to a continuum building model. Finally, a base-isolated building is introduced for full-scale long-period shaking experiment. Experience of long-period shaking in the building is also available with virtual reality view of indoor damage, which is effective for promotion of seismic countermeasures such as fixing furniture.

研究分野：地震防災

キーワード：長周期地震動 高層建物 免震建物 耐震対策 強震動予測 相反定理

1. 研究開始当初の背景

2011年東日本大震災では、東京や大阪を中心に、長周期地震動による高層建物や免震建物の共振応答が問題になった。震災発生時点は、長周期地震動に対する懸念は呈されていたものの、高層建物や免震建物の具体的な耐震化対策は手つかずのまま、制振補強などの対策事例は、新宿センタービルに限られていた。長周期地震動問題は、従来から、一部の研究者によって取り組まれてきたが、地震観測に基づく現象の理解や真理探究的な研究が優先されており、実験的研究も文部科学省の首都直下地震防災・減災特別プロジェクトによる E-Defense 実験に限られていた。

そのような中、内閣府からの依頼で日本建築学会は長周期建物地震対応 WG を設置し、高層建物の長周期地震動対策を検討し、震災の2日前の3月9日に「長周期地震動対策に関する日本建築学会の取り組み」と題して記者発表を行っていた。

研究代表者は、文部科学省プロジェクトや建築学会での取り組みに参画すると共に、東日本大震災後、大阪府咲洲庁舎や戸建免震住宅の長周期地震動対策、内閣府の南海トラフ巨大地震対策、気象庁の長周期地震動対策などの検討会に関わった。

こういった中、長周期地震動対策を具現化するには、長周期地震動の予測技術の構築、高層建物や免震建物の長周期応答特性の解明と長周期地震動対策技術の構築、長周期地震動対策を進めるための啓発ツールの開発などが必要であり、これらを通して、長周期地震動対策の社会運動化を進めることが急務と強く感じるようになった。

そこで、本研究では、社会が長周期地震動対策の必要性を実感し、建物所有者が耐震化を決断・実践することを促す研究を総合的に推進することとした。

2. 研究の目的

東日本大震災で問題となった長周期地震動問題に対応するため、高層建物や免震建物の耐震対策を促進することを目的として、長周期地震動の特性の把握、高層建物や免震建物の応答特性の把握、及び、地震対策の促進方策の検討を行う。

このために、最初に、東日本大震災における長周期地震動の建築物への影響を、大阪や東京に建設されていた高層建築の強震観測記録や、被災地（東北地方や小田原）に建設されていた免震戸建住宅の免震装置の損壊状況などを分析し、長周期地震動による建築物の被害状況を把握し、問題が生じた原因を分析する。

次に、堆積盆地構造が地震動の増幅特性にどのような影響を与えるかを、三次元有限差分法と相反定理を用いた方法により検討する。ここでは、大阪府咲洲庁舎が立地する大阪平野と、南海トラフ地震の中心被災地の濃尾平野を中心に検討する。

さらに、建築物の固有周期特性と減衰特性

を明らかにするために、建設時及び解体時の高層建物を対象に、継続的な微動計測、強震観測を行った結果を分析し、振動特性の建物階数依存性を明確にする。また、構造物を連続体に置換することにより、地盤-構造物の動的相互作用が応答増幅効果に及ぼす影響を、波動論に基づいて明らかにする。

最後に、実在するダブル免震建物（名古屋大学減災館）にアクチュエータとジャッキを付設することで、実大構造物を加振実験できるシステムを実現し、加速度計及び土圧計からなる振動モニタリングシステムを構築する。この環境を活用することで、長周期建物の耐震対策や、家具固定などの室内安全対策の促進のためのシステムを提示する。

さらに、長周期大振幅クローラ式振動台とバーチャル視聴覚環境を組み合わせたり、クラウドサーバーとスマホアプリを利用したバーチャル視聴覚環境を構築することで、長周期建築物の共振時応答の再現や制振改修効果を把握できる環境を整える。併せて、得られた成果を新たに作成した電子絵本や模型教材などを通して広く社会に周知する。

こういった環境を総合的に整えることで、日本社会が長周期地震動による共振問題を共有し、対策を本格化させる環境を整える。

3. 研究の方法

研究の方法は、下記の通りである。

① 社会が長周期地震動問題の存在とその重要性を納得するための基礎資料を獲得するため、東日本大震災における長周期地震動による被害状況を把握すると共に、その原因を分析する。具体的には、大阪府咲洲庁舎の共振応答と、宮城県と神奈川県足柄平野に存在する免震戸建住宅の長周期地震動応答を中心にその実態把握と原因把握を行う。

② 来るべき南海トラフ巨大地震に対する長周期地震動の性状を把握するため、濃尾平野を対象に、震源の位置、伝播経路、堆積平野の盆地構造などによる干渉効果などについて、観測と理論解析を通して分析し、堆積平野の長周期地震動特性を明らかにする。

③ 建物建設時データも含め、多様な建築物の強震観測記録の分析を通して、高層建物や免震建物などの応答特性についての基礎資料を整備する。併せて、動的相互作用効果を考慮した構造物の波動解析理論を構築し、構造物の応答性状を理論的に明らかにする。

④ ダブル免震構造の名古屋大学減災館を利用して、長周期の揺れを実大免震建物で再現できる環境を作ると共に、免震建物の応答性状を実験的に明らかにする。

⑤ 長周期地震動問題を社会に伝達するための教材として電子絵本を作成したり、長周期の揺れを実体感できる長周期振動応答装置を開発すると共に、VR環境を利用して長周期の揺れや制振対策効果を仮想体験できる環境を整える。

4. 研究成果

(1) 東日本大震災での長周期構造物の被害分析

東日本大震災では震源から 700 km も離れた高さ 256 m の大阪湾岸の高層ビルで片振幅 137cm もの大振幅の床応答が記録された。図 1 に、52 階と 1 階の短辺方向の速度波形、近接する KiKnet 此花地点の地表と地下 1600 m の EW 方向の加速度波形と、フーリエスペクトル比、速度応答スペクトルを示す。図のように、周期 6~7 s の揺れが、基盤から地表、建物の 1 階から 52 階で大きく増幅し、基盤から建物 52 階で約 1000 倍もの増幅となっている。応答増幅の主たる原因は、地表地震動の卓越周期と建物の固有周期が近接による。

此花地点の地下構造は、厚さ 600 m の S 波速度 500 m/s の地層の下に、S 波速度 900 m/s の層が 1000 m 程度堆積し、その下に S 波速度 3000 m/s 程度の地震基盤が存在している。成層構造を仮定すると、鉛直下方から S 波が入射した場合の周期は 7.4 s、増幅度は 20 倍であり、観測記録の方が短周期で、大きな増幅度を示している。また、図 2 に示すように、此花地点で観測された 4 地震の地表地震動の観測記録のフーリエスペクトルを比較すると、地震によって地震動の卓越周期に変動が認められる。このような、堆積地盤での大きな応答増幅や周期の変動の原因の一つとして、大阪平野の堆積盆地構造の不整形性が考えられる。そこで、大阪平野の堆積盆地構造が地震動の増幅特性に与える影響を検討した。

ここで用いた方法は、三次元有限差分法とグリーン関数の相反定理を利用した新たな解析方法であり (15)、震源のモーメントテンソルと観測点の変位ベクトルとの関係をグリーン関数として定義し、三次元有限差分法でグリーン関数を算出した上で、グリーン関数の相反性を利用している。この方法は、多数の震源断層に対して、特定の観測点の揺れを予測するのに適している。大阪平野の堆積盆地構造には、地震調査研究推進本部による地盤モデルを利用し、観測点は、此花地点の地表、観測点からの視線方向に対して 22.5° の走向を有し、傾斜角が 90°、深さ 10 km、モーメントマグニチュード 7.0 の横ずれ断層を考えた。

図 3 に、同じ震央距離の震源に対しての此花地点の地表と地震基盤での変位波形・変位軌跡・速度応答スペクトルを示す。変位軌跡の原点が震央位置に相当する。図より同じ震央距離にも関わらず、震源の方位によって振幅や変位軌跡の方向性が異なることがわかる。これは、大阪平野の堆積盆地形状によって生じたと考えられる。

この検討成果は、⑧と②に公表している。なお、当該建築物については、その後、制振装置による改修が行われている。

一方、東日本大震災では、戸建免震住宅にも支障が生じる事例が認められた。震災時点で全国に 7000 棟を超える免震建物が存在し、4200 棟は戸建免震住宅であった。そのうちの 3800 棟は同一住宅メーカーによるものであ

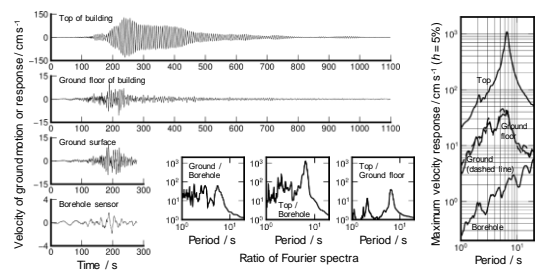


図 1 東北地方太平洋沖地震で大阪府咲洲庁舎と近傍地盤で観測された速度波形、フーリエスペクトル比、速度応答スペクトル

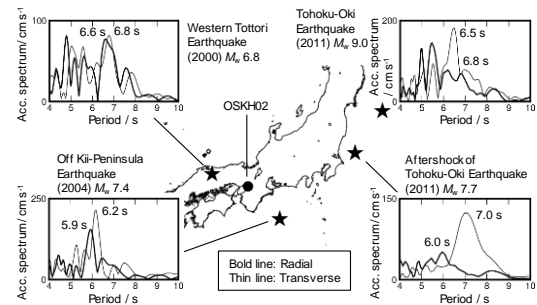


図 2 此花地点で観測された複数の地震の地表観測波の加速度フーリエスペクトル

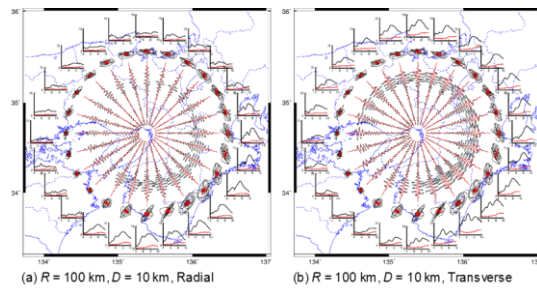


図 3 地表と基盤の計算変位波形・軌跡・速度応答スペクトル (黒: 地表、赤: 基盤)

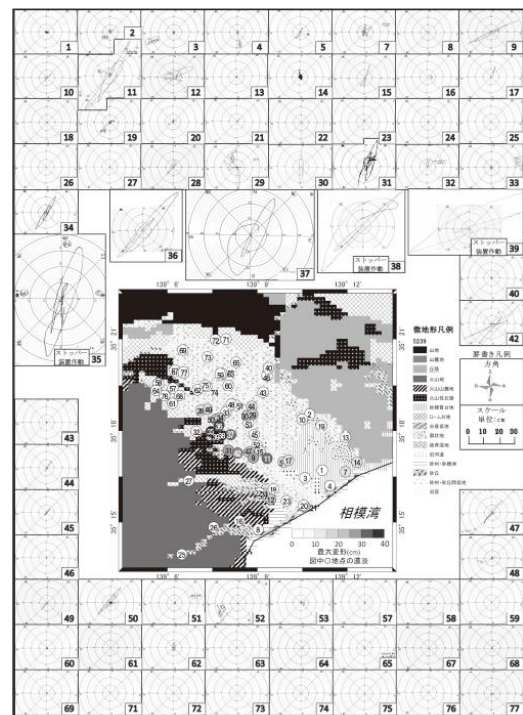


図 4 小田原平野周辺に位置する戸建木造免震住宅の免震装置の変位軌跡

り、共通の免震システム（低弾性積層ゴムとすべり支承）と上部構造形式が採用されている。そこで、これらを対象に免震住宅の長周期地震動に対する応答特性を分析した。

震災では、震度5弱以上の市町村に854棟が存在し、震災後にすべての煤書記録が回収された。その結果、363棟で滑動が認められた。これらのうち、宮城県下で3棟、神奈川県下で4棟が30cm以上の大きな滑動を示していた。神奈川県下のものはいずれも足柄平野に立地していた。図4に、足柄平野周辺に位置する免震住宅の免震装置の変位軌跡を一覧する。図のように特定の地域で大きな変位を示している。本研究では、大きな滑りを生じた原因を解明するため、足柄平野周辺と宮城県下の全ての住宅で単点微動計測を実施し、その原因が地盤振動特性にあることを明らかにした。その成果は、⑭と⑩に公表している。また、過大な変位応答を抑制するための新たなダンパーシステムを開発し、その成果を⑬に公表した。

(2) 濃尾平野の長周期地震動特性の分析

大阪平野の長周期地震動特性の分析から、地震動の伝播経路や堆積盆地の3次元形状に伴う波動の干渉効果の重要性が認識された。そこで、中京地域を対象に、多数の地震に対する地震観測記録を分析したところ、新潟周辺に震源がある場合に、中京地域での長周期地震動が卓越していた。そこで、三次元有限差分法による分析を行ったところ、図5に示すように、新潟堆積盆地を波動が通過することで長周期地震動が成長することが明らかになった。また、震源位置による濃尾平野の応答性状の変動について、相反定理を利用した方法により分析した。一例として、名古屋駅地点での結果を図6に示す。図のように、高層ビルが林立する名古屋駅地点では、南海トラフ地震発生方向に震源がある場合に、付加体の存在で地震動が伸長すること、盆地端部での波動の干渉で揺れが増幅することが明らかになった。

これらの検討結果は、③に公表すると共に、さらなる成果については、現在、論文査読中である。なお、これらの検討には、地下構造モデルの構築が不可欠であり、その成果は④に公表している。また、ここで用いた強震動の予測方法については、⑦に成果をまとめている。

(3) 高層建物の応答性状

建築物の応答特性は、固有周期とモード減衰定数で表現され、一般に、1次固有周期は建物高さと共に線形的に増大し、モード減衰定数は逆比例になると考えられている。しかし、そのデータは十分に蓄積されていない。

そこで、当研究グループが長年にわたって常時微動計測を実施してきた9棟の建物について、1次固有周期と減衰定数の高さ依存性をまとめた。これらはいずれも建設時もしくは解体時に継続的な振動観測を行うことで、共通の基礎・地盤条件で、高さが異なる複数

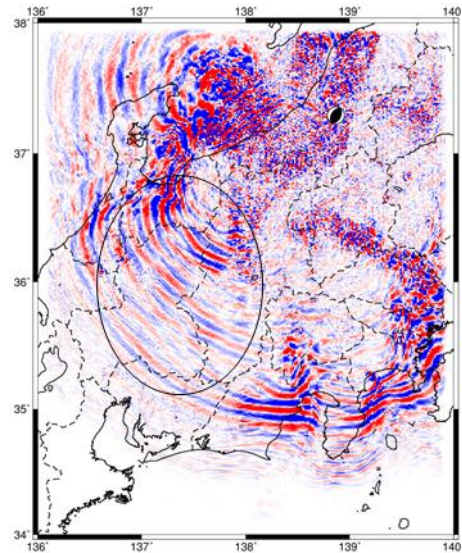


図5 新潟平野周辺の地震による波動伝播

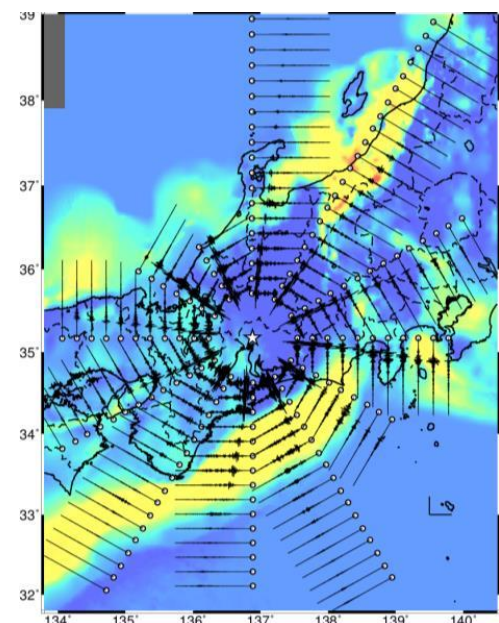


図6 名古屋駅地点の地表応答の震源位置による変動

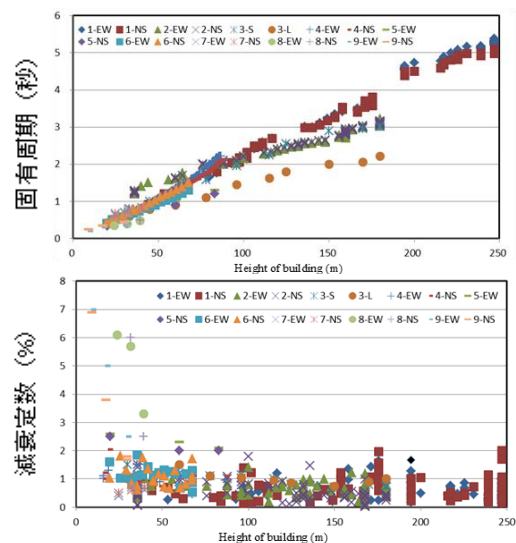


図7 計測時の建物高さと1次固有周期・減衰定数の関係

の状態での振動特性が得られている。ちなみに、9 棟のうち、5 棟は超高層建物で上部構造は鉄骨造であり、4 棟は中層建物で鉄骨造、RC 造、PC 造などさまざまである。

図7に計測時の建物高さ、1次固有周期、減衰定数の関係を示す。図から、1次固有周期は全体に高さに比例する傾向がみられる。構造種別や水平2方向の構造形式により傾きに相違はあり、鉄骨造は周期が長めで、逆にRC造や剛性の高い楕円コアを持つ鉄骨造の周期は短めの傾向がみられる。また、減衰定数については、ばらつきが大きいものの、高さが高いほど減衰が小さくなる傾向は読み取れる。特に、鉄骨造超高層では減衰が1%以下の場合が多く、長周期・長時間地震動に対して共振した際の応答増幅が大きくなることわかる。

なお、これらの特性を解析的に説明するため、構造物を連続体置換した理論的な波動解析法を開発し、現象の理解を進めた。

以上の成果は、⑫、⑨、②に公表している。また、地盤との動的相互作用を考慮した分析については、⑥に成果を公表している。

(4) 名古屋大学減災館の実験環境の構築

長周期地震動に対する建築物及び室内の対策を進めるためには、長周期地震動に対する建物応答の再現・体感環境を構築する必要がある。そこで、名古屋大学減災館を活用し、長周期の揺れの実験環境を実現した。

減災館は、基礎免震構造の鉄筋コンクリート造で、地下1階・地上5階、延床面積2,898㎡、平面形状が三角形の免震建物である。積層ゴム、直動転がり支承、オイルダンパーからなる弾性免震を採用しており、免震周期は5.2秒として、2.6秒程度の地盤の卓越周期と隔離している。免震層クリアランスは90cmである。5階の減災・体感実験室も周期5.2秒の免震構造であり、ダブル免震構造となっている。また、建物そのものを耐震実験可能にしており、屋上実験室は、重量410トンの免震構造であり、アクチュエータで共振させながら加振すると、片振幅70cm程度まで応答増幅することができる。屋上実験室の揺れを起振力として利用することで、40トン程度の慣性力を生み出すことができ、5600トンの建物本体を5cm程度の変位振幅で加振できる。

また、地下の免震層にも新規に開発した引張ジャッキを設置しており、15cm程度の強制変位を与えて自由振動実験を行うことができる。すなわち、図8のように、屋上での調和加振実験と、地下での自由振動実験により、本物の建物をいつでも揺ることができる環境を整えたことになる。

建物本体と屋上実験室は何れも設計固有周期が5.2秒となっているので、これを地盤と建物と見立てれば、高層建物の共振応答を再現できるので、共振回避のための制振工法の研究開発にも活用できる。

さらに、オンオフ切り替え型のオイルダンパーを屋上に設置することで、ダンパーを付

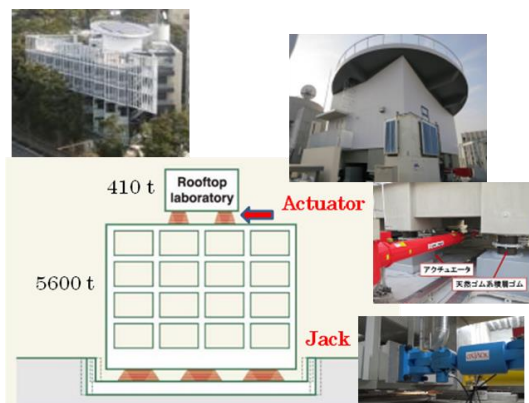
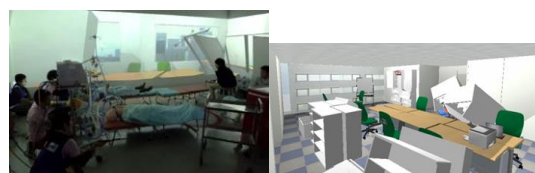


図8 名古屋大学減災館で実現した実建物加振環境



(a)減災館屋上実験室のVR環境



(b)HMD やスマホを用いたVRシステム

図9 長周期地震動対策の啓発ツール

加しての強風対策用TMDの有効性を検討することができる。また、屋上実験室を加振するアクチュエータにはフィードバック型の制御機能も内蔵しているので、AMDを用いた絶対免震の開発にも利用が可能である。

建物には、多数の地震計や、土圧計、変位計を設置しているため、建物の振動挙動、建物や免震システムの経年変化、地震時土圧の分担性状の解明などにも活用が可能である。

なお、これらの成果については①に公表している。

(5) 長周期地震動対策誘導の啓発ツール

長周期地震動対策を誘発するために、図9に示すように、様々な啓発ツールを開発した。減災館の屋上実験室の室内には、揺れと同期する映像・音響設備を設置し、震災時の状況を再現するバーチャルリアリティシステムを実現した。音響の自動生成のためには、Causal FFTを用いて振動波形から音声を再現する方法を開発し(⑪)。また、室内の家具の転倒・移動の挙動の再現に、ゲームなどに用いられる物体挙動のシミュレーションソフトを活用した(⑨)。これを用いて、地震時の心理実験や災害対応訓練ができる。

また、南海トラフ地震を対象に、任意地点の任意階数の高層ビルの任意階の床応答を再現し、家具転倒シミュレーションをクラウドサーバー上で行った結果をパソコン～HMDで3D画像を体験したり、スマホを通して体験できるVRシステムを開発した(⑤)。

さらに、インターネット上で、地震時の高層マンションの状況を解説した電子絵本を作成した (<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/data/escape/index.html>)。また、地震時のシナリオを学会出版物として取りまとめた (⑩)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 35 件)

① 成澤健太、福和伸夫、飛田潤：実在免震建物を利用した振動実験環境の構築、構造工学論文集、Vol.63B、2017.4、査読有 (掲載決定)

② N.Fukuwa、T.Hirai、J.Tobita and K.Kurata：Dynamic Response of Tall Buildings on Sedimentary Basin to Long-Period Seismic Ground Motion, Journal of disaster research, Vol.11, No.5, pp.857-869, 2016.10、査読有

③ 山田沙代、平井敬、福和伸夫：地震動観記録と有限差分解析に基づく中京地域で観測される長周期地震動の震源位置依存性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 81 巻、第 728 号、pp.1647-1656、2016.10、査読有

④ 高橋広人、福和伸夫、岸浦正樹：表層地盤モデルに基づく 1944 年東南海地震による名古屋市の住家被害と地盤特性に関する研究、日本地震工学会論文集、第 16 巻、第 9 号、pp.46-66、2016.8、査読有

⑤ 倉田和己、福和伸夫：仮想現実ソフトウェアと震動体感環境の融合による効果的な減災啓発ツールの開発、災害情報、No.14、pp.83-92、2016.6、査読有

⑥ X.Wen, F.Zhou, N.Fukuwa and H.Zhu：A simplified method for impedance and foundation input motion of a foundation supported by pile groups and its application, Computers And Geotechnics, Vol.69, pp. 301-319, 2015.9、査読有

⑦ 平井敬、福和伸夫：地盤モデルに基づく伝達関数を用いた任意震源よる地震動予測、日本建築学会構造系論文集、第 80 巻、第 714 号、pp.1227-1237、2015.8、査読有

⑧ 寺島芳洋、平井敬、福和伸夫：堆積盆地構造が地震動の周期特性に与える影響、日本建築学会構造系論文集、第 80 巻、第 708 号、pp.219-229、2015.2、査読有

⑨ 松下卓矢、西澤崇雄、飛田潤、福和伸夫：振動実験・強震観測に基づく超高層建物の振動特性とその変化、日本建築学会技術報告集、Vol.20、No.46、pp.879-884、2014.10

⑩ 高橋武宏、福和伸夫：2011 年東北地方太平洋沖地震における宮城県内に建設された戸建免震住宅の免震層変形と地盤震動特性との関係、日本建築学会構造系論文集、第 79

巻、第 704 号、pp.1469-1479、2014.10、査読有

⑪ T.Hirai and N.Fukuwa：Synthesis of Earthquake Sound Using Seismic Ground Motion Records, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.104, No.4, pp.1777-1784, 2014.8、査読有

⑫ 天竺貴仁、高橋武宏、福和伸夫、護雅史、飛田潤：継続的な地震観測及び微動計測に基づく高層免震建物の建設時における振動特性の変化、日本建築学会構造系論文集、第 79 巻、第 700 号、pp.721-730、2014.6、査読有

⑬ 高橋武宏、天竺貴仁、福和伸夫：実大震動台実験に基づく戸建免震住宅の免震層変形抑制に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 79 巻、第 699 号、pp.565-574、2014.5、査読有

⑭ 高橋武宏、福和伸夫：2011 年東北地方太平洋沖地震における戸建免震住宅の免震層変形と足柄平野の地盤震動特性との関係、日本建築学会構造系論文集、第 78 巻、第 694 号、pp.2123-2131、2013.12、査読有

⑮ 平井敬、福和伸夫：3次元有限差分法と相反定理を用いた堆積盆地の地盤震動性状の評価手法、日本建築学会構造系論文集、第 78 巻、第 694 号、pp.2083-2192、2013.12、査読有

〔学会発表〕 (計 47 件)

〔図書〕 (計 2 件)

⑯ 日本建築学会：長周期地震動と超高層建物の対応策 ―専門家として知っておきたいこと―、pp. 358-373、513p.、2013. 10

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福和伸夫 (FUKUWA NOBUO)

名古屋大学・減災連携研究センター・教授
研究者番号：20238520

(2) 研究分担者

飛田潤 (TOBITA JUN)

名古屋大学・災害対策室・教授
研究者番号：90217521

護雅史 (MORI MASAFUMI)

名古屋大学・減災連携研究センター・教授
研究者番号：40447842

倉田和己 (KURATA KAZUMI)

名古屋大学・減災連携研究センター・助教
研究者番号：50579604

長江拓也 (NAGAE TAKUYA)

名古屋大学・減災連携研究センター・准教授
研究者番号：90402932

平井敬 (HIRAI TAKASHI)

名古屋大学・大学院環境学研究科・助教
研究者番号：00708373

(3) 連携研究者

宮腰淳一 (MIYAKOSHI JUNICHI)

清水建設・技術研究所・グループ長
研究者番号：00393570