

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 4 月 25 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420589

研究課題名(和文) 実被害データベースに基づく超高層集合住宅の耐震性能に関する統合評価システムの構築

研究課題名(英文) Construction of integrated evaluation system for structural seismic performance of super high-rise buildings based on actual damage database

研究代表者

永野 正行 (Nagano, Masayuki)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：60416865

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：2011年東北地方太平洋沖地震時に見られたRC造超高層建物の室内被害を分析するとともに、建物記録のシミュレーション解析等を通じ、実地震時の被害状況に基づく被災度の評価基準を確立した。国内に建つ1200棟を超えるRC造超高層建物のデータベースを構築し、将来大都市圏で発生が予測される大地震後の建物状態を即時に確認するとともに、居住者の安心、安全を目指した復旧計画に利用できるシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：This study investigates indoor damages of super high-rise residential RC buildings during the 2011 Tohoku earthquake. Through simulation analyses of strong motions recorded at buildings, estimation criteria for indoor damage index based on actual damage survey are determined. Based on structural database for more than 1,200 super high rise residential RC buildings, seismic performance of buildings during the future massive earthquake in urbanized area will be evaluated in short time to offer disaster recovery plan for life continuity management of residences.

研究分野：地震工学

キーワード：超高層集合住宅 データベース 被災度 ヘルスモニタリングシステム 地震被害調査 ネパール地震  
研究フォーラム 振動台搭載実験

## 1. 研究開始当初の背景

近年、超高層建築物が関東平野や濃尾平野、大阪平野等の大都市部に建設されている。これらの建物に対し、近年内の発生が確実視されている南海トラフ地震、首都直下型地震等の巨大地震時に、即座に復旧計画を立てるためには、各地の被害状況を迅速に把握することが重要である。

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震時の超高層集合住宅における室内被害データに基づいて、今後発生する地震時における建物の即時被災度判定を行い、居住者に建物の被災状況を通知するシステムを構築する。さらに、インターネットを利用して各地の被災度データを収集し、被害状況の地理的空間分布を即座に把握するシステムを構築し、地震時の広域的復旧計画の策定に資することを目的とする。

## 2. 研究の目的

### (1) 即時的地震被害判定システムの構築

大規模な地震が発生した場合、超高層集合住宅居住者にとって、地震後の建物の安全性を把握することは、避難や建物の改修を検討すべきか否かを検討する上で重要な情報となる。その一方で、地震時における超高層集合住宅の被害状況については、十分にデータが蓄積されているとは言い難いのが現状である。筆者らは前述のアンケート調査から、2011年東北地方太平洋沖地震時の超高層集合住宅の被害状況に関するデータを収集して来た。そのデータを詳細に分析することで、今後発生する地震による激甚災害時の被害状況を推定することが可能である。この知見を活かし、本研究では、超高層集合住宅の即時的地震被害判定システムを構築することを目的とする。

### (2) 地震時広域復旧計画策定システムの構築

巨大地震における激甚災害に対し、迅速に復旧計画を策定するためには、地震後即座に各地の被害状況を把握することが必要不可欠である。そこで本研究では、建物の地震観測・被災度判定・各地の被害状況の把握を一貫して行うシステムを構築する。

被災地域における多くの建物の被災度を即時的に判定し、それらのデータをインターネット経由で収集して一元管理するシステム構築に利用することができる。本研究では、今後発生する中小地震を含む強震記録に基づき、構築したシステムの妥当性および有用性を検証する。これにより、今後巨大地震が発生した際の迅速な復旧計画の策定に資するシステムを構築することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 2011年東北地方太平洋沖地震時における超高層集合住宅の被害調査と被害要因の検討

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震時における超高層集合住宅の被害状況を把

握するため、本震の前後において各建物の実被害データを収集し、それらに基づいて、大地震時における超高層集合住宅の実被害データベースを作成する。

また、本震時の建物応答を検討するため、フレームモデルを用いた地震応答解析を行う。解析モデルは各建物の設計図書に基づいてモデル化し、本震時に得られた最下階における実際の地震記録を入力して解析を行う。

以上の各種検討により、RC造超高層建物の実地震時被害状況に基づく被災度の評価基準を作成する。

### (2) 超高層集合住宅の被災度評価手法の検討と即時地震被害判定システムの構築

超高層集合住宅の全ての階に強震計を設置することは現実的ではなく、各階の地震時応答を観測することは難しい。そこで本研究では、建物応答の補間手法について検討する。これによって、超高層建物の全ての階に強震計を設置することなく、1つの建物あたり数点での強震観測のみで各階の地震応答や層間変形角を推定できる。

筆者らは、前述の2011年東北地方太平洋沖地震時の超高層集合住宅の強震記録に対し、部分空間法によるシステム同定手法を適用し、固有周期の変化を検討した。その結果、本震において建物の固有周期が伸び、地震終了まで固有振動数は回復していないことが明らかとなった。これらの結果と前述のアンケート調査結果と対応させることで、室内の内装材やコンクリート部の亀裂と固有周期の伸びの関係を把握できる。この知見から、システム同定により求めた固有周期の変化に基づき、建物に生じた亀裂等の被害を推定する。

本研究では本震時に強震観測が行われていなかった建物で常時微動観測を行い、これをもとに本震時の固有振動数の低下を検討する。これらとアンケート調査結果を比較し、本震時の超高層集合住宅被害の空間分布をさらに詳細に検討する。

### (3) 広域的地震時被害復旧計画策定システムの構築

以上で述べた各種法によるRC造超高層集合住宅の被災状況に関する総合的判断から、超高層集合住宅の被災度を即時的に推定するシステムを構築する。このシステムでは、各建物の被災度データをインターネット経由で収集し、一元管理することで、各地の超高層集合住宅の被災度の分布を地震発生後に即時的に把握することができる。これによって、被害が甚大である地域を地震後即座に把握することで、迅速な復旧計画を立てることが可能となる。

以上のように、本研究では、今後の発生が危惧される南海トラフ地震や首都直下地震等の巨大地震時において、RC造超高層集合住宅の建物安全性を居住者に即時的に通知し、かつ地震発生後の迅速な広域的復旧計画策定に資する総合的ヘルスマニタリングシ

システムの構築を目的とする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 大地震時における超高層集合住宅の実被害データベースの整理

2011年東北地方太平洋沖地震によって首都圏に建つRC造超高層集合住宅に発生した建物内部被害を小規模工事等受付台帳等から調査し、その高さ方向の分布を同地震時における当該住宅の居住者を対象としたアンケート調査結果と比較した。さらに、この地震時におけるこれら建物の最大層間変形角の推定手法を提案し、推定された最大層間変形角と被害の関係について検討した。これらは研究方法(1)(2)に該当する内容であり、2013年度に実施された。

得られた知見を以下に示す。①主な建物内部被害は、壁紙等の内装材の破損やALC壁等の非構造部材の破損、扉やサッシの開閉不良、タイル材の破損の4つが多かった。②内装材破損の被害件数が最も多く、タイル材の被害は少なかった。建物の内部被害の高さ方向の分布は低層から中層にかけて多く発生しており、高層では被害が少なかった。内装材の亀裂に関するアンケート調査からも同様の傾向が見られた。③2011年東北地方太平洋沖地震では、建物の1次モードに比べ高次モードの影響は小さかった。また、同地震時における建物の非線形性の影響により、下層階で層間変形が大きくなる傾向を示した。④線形時の1次モード形状を補正する関数を利用することにより、本震時における最大層間変形角を強震記録から簡便に推定する方法を示した。シミュレーション解析結果との比較により、その妥当性を検証した。⑤内装材の破損については、最大層間変形角 $5.0 \times 10^{-3}$ rad以降で被害が多くなる傾向が見られた。いずれの被害も、最大層間変形角が大きくなるほど多くなる傾向にあり、これは内装材の亀裂に関するアンケート結果とも対応した。

##### (2) 建物の設計時の振動解析モデルの収集と分析

超高層RC造集合住宅39棟を対象に評定資料に基づく設計用振動解析モデルのデータベースを作成し、復元力特性の高さ方向分布を分析した。また、これらの振動解析モデルを用いた固有値解析や、様々な観測波を用いた地震波と最大層間変形角の分布性状の関係性を調べた。これらは研究方法(2)(3)に該当する内容であり、2015年度に実施された。

得られた知見を以下に示す。①質量及び復元力特性は高さ方向で基準化することでほぼ同等の特性を有した。②質量と初期剛性より得られる刺激関数、また1次刺激関数の層間変形角についてはモデル間で大きな差はなかった。 $Q_c$ 、 $Q_y$ を設計用層せん断力 $Q_i$ で基準化した場合、図1に示すよう高さでは

ば一定となり、 $Q_c/Q_i$ は約0.3~0.5、 $Q_y/Q_i$ は1.5~2.0程度であった。③建物高さ1~3次固有周期の関係、設計用ベースシア係数と1次固有周期の関係について、全体的に既存超高層RC造集合住宅と同様の傾向を示していた。④様々な地震波を用いて検討対象建物39棟のそれぞれ2方向で地震応答解析を行った結果、最大応答加速度、最大応答層間変形角のそれぞれについて、全体的にほぼ同様の傾向を示した。

複数会社により評価された振動解析モデルを横並びで対応することはほとんどなされておらず、国内における超高層集合住宅の標準モデルの構築および今後の被害推定を行う上で欠かせない情報となる。

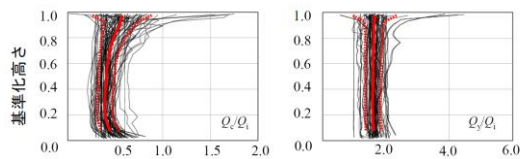


図1 設計用層せん断力の高さ方向分布

##### (3) 強震観測を行っていない建物の被災度判定のための微動計測

強震観測を行っていない建物の被災度判定を簡便にするアプローチとして微動計測に着目し、累計28棟の超高層集合住宅を対象に計測を行った。これらは研究方法(1)(2)(3)に関連する内容であり、2013、2014年度に実施された。

図2に示すように、伝達関数から推定した各建物の現時点の固有振動数は設計時振動数と概ね対応することが分かった。また関東地域では、3.11初期周期は微動時周期より短く、3.11終了周期、3.11最大周期は微動時周期より長い傾向がある。関西地域では、3.11初期周期、終了周期、最大周期ともに、微動時周期よりも長い。微動時周期との決定係数をみると、3.11初期周期、終了周期、最大周期ともに高い値となっている。このことから微動観測結果の1次固有周期から東北地方太平洋沖地震の1次固有周期の変化を推定できる可能性があることを示した。

これらのデータは、今後首都圏に南海トラフなどの巨大地震が発生した後の、建物の被災度を判定する上で重要となる。

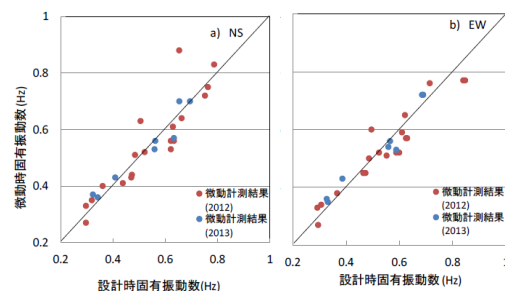


図2 各建物の微動、設計固有振動数

(4) 振動台搭乗実験に基づく地震時の揺れと体感の関係

大地震時における超高層集合住宅居住者の体感や行動難度を把握するため、2011年東北地方太平洋沖地震時に超高層集合住宅で得られた記録を用いて図3に示す振動台搭乗実験を3年間にわたって実施した。これらは研究方法(1)に関連する内容である。

振動台搭乗実験に際しては、アンケート調査を実施するとともに、頭部の加速度を計測しており、超高層集合住宅における地震時の揺れと体感の関係を把握するための基礎データを得た。

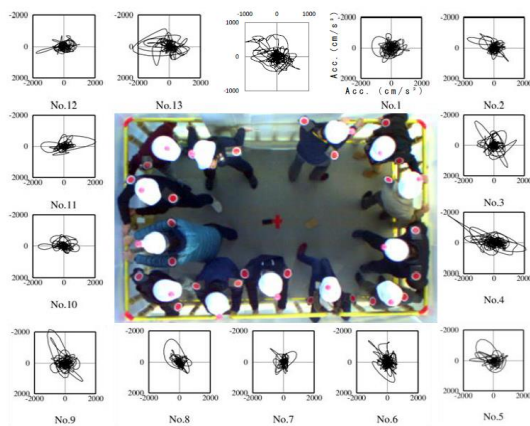


図3 振動台搭乗実験の様子と被験者頭部で得られた加速度の粒子軌跡の一例

一例として2013年度の実験から得られた知見を以下に記す。①モーションキャプチャによる加速度波形と振動台の加速度波形は良好に一致した。②図3に示すように、立ち位置によって頭部の最大加速度異なっていた。この一因として、加振時に振動台の手すりに接触した影響で最大加速度が大きくなったことが原因と推定される。③人間頭部の最大加速度の平均は、振動台の最大加速度の約2倍となった。④振動台上の人間頭部の応答スペクトルは、振動台とほぼ同じ周期特性になり、その振幅が約1.3倍となった。⑤行動難度と人間頭部の加速度の比較では、3.11本震時はあまり相関がみられなかったが、3.11本震と神戸波の比較では、加速度が大きくなるにつれて行動難度が高くなることがうかがえる。

(5) 超高層集合住宅の強震記録の分析と室内被害調査との対応評価

強震記録の分析として、建築研究所で強震観測を管理している超高層集合住宅2棟を追加し、2011年東北地方太平洋沖地震時データを検討した。既に分析済みの建物と併せて計16棟の建物について、動特性の変動をとりまとめた。次に中央区に隣接して建つ2棟の超高層集合住宅へのアンケート調査の分析とシミュレーション解析から、同一地域に建つ同規模の建物でも地震時応答の違いがあることを明らかにした。これらは研究方法(1)(2)

に関連する内容として、2013、2014年度に実施された。

(6) 分譲マンションを対象とした追加アンケート調査と構造形式により被害形態の違い把握

首都圏に建つ分譲マンションを対象に2011年東日本大震災時の室内被害に関する追加アンケートを実施し、より詳細な建物被害の分析を進め、被災度データベースの強化を図った。被災後に発生した修復費用の自己負担に関する調査するとともに、図4に示すように建物を耐震、制震、免震構造で分類し、耐震構造の分類により室内被害の程度が異なることを明らかにした。これらは研究方法(1)に関連する内容として、2015年度に実施された。

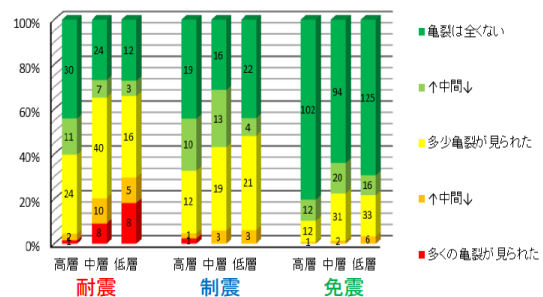


図4 室内の壁紙等の内装材の亀裂被害

(7) 全国超高層集合住宅データベースの構築と分析

国内に建つ20階建て以上の超高層集合住宅1200棟以上について、建設位置や階数等、構造形式等のデータベースを構築した。図5に建設位置を示す。

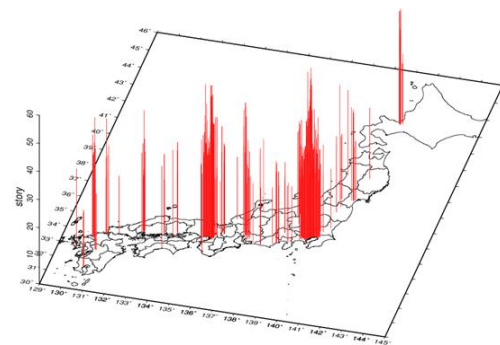


図5 国内超高層集合住宅の建設位置

国内における超高層集合住宅のデータベースを構築し、解析検討による2011年東北地方太平洋沖地震時と想定地震時のPIDAの空間分布を分析した。得られた知見を以下に示す。①現在までに国内で1221件の超高層集合住宅の竣工が確認でき、うち191棟(約16%)が免震建物であった。首都圏(東京都、千葉・埼玉・神奈川県)で全体の約58%を占めていた。関西では免震建物の竣工数が全体竣工数に対し約32.5%と、他の地域に比べ高い割合を示した。②非線形等価1質点系モデ

ルを用いた時刻歴応答解析により、2011年東北地方太平洋沖地震時の国内超高層集合住宅 1030 棟の PIDA を算定した。PIDA が  $5 \times 10^{-3}(\text{rad})$  を超えた超高層集合住宅 45 棟のうち 17 棟は埋立地に建設されており、震源から遠方の軟弱地盤において長周期地震動の影響を大きく受けたことが考えられる。③首都圏に建つ 640 棟の超高層集合住宅を対象に、今後発生が予測されている東京湾北部地震および都心東部直下地震時の PIDA を算定した。都心東部直下地震時に比べ、海溝型地震であり震源断層域が大きい東京湾北部地震時のほうが、首都圏の広範囲に亘って大きい応答を示している。

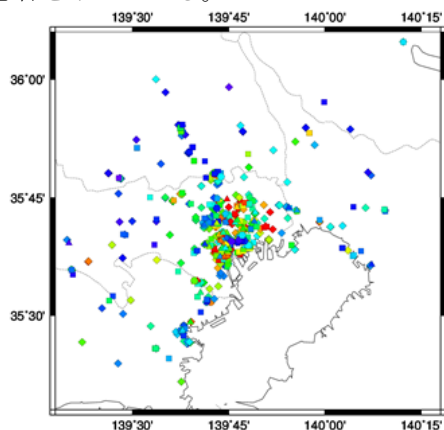


図 6 東京湾北部地震時に想定される超高層集合住宅の地震応答

これらは研究方法(3)に関連する内容として、2015 年度に実施された。ここで構築したデータベースにより、今後国内で大地震が発生した時の復旧計画策定に向けた計画が可能となる。

#### (8) ネパール・ゴルカ地震で被災した高層集合住宅の被害調査

2015 年 4 月 25 日に発生したネパール・ゴルカ地震ではカトマンズで大きな被害が現れた。2 回に分けてカトマンズを訪問し、被災した高層集合住宅の被害調査を実施した。微動計測を含めた分析より、以下の知見が得られた。①RC ラーメンで構成された構造躯体には顕著な損傷が見られず、レンガ造壁等の非構造材に被害が集中した。②図 7 に示すように、同一建物では低層部の損傷が、高層部の損傷に比べ甚大であった。③建物内部の損傷は、外観から確認できる損傷に比べ甚大であった。④Exp.J のクリアランスが小さく、建物同士が衝突した形跡が見られた。また、Exp.J カバーのはく離などの損傷も確認された。⑤独自の評価基準に基づく被災度判定を行い、実被害や生活継続の可能性と概ね対応した結果が得られた。⑥常時微動計測の結果から建物の 1 次固有周期を求め、方向別、計測点高さとの対応、設計用固有周期との対応を確認した。

海外での地震被害資料も、将来の国内での超高層集合住宅の地震被害軽減を策定する上で貴重な実被害データとなる。



図 7 ネパール地震での高層集合住宅の被害

#### (9) まとめ

研究期間全体を通じ、2011 年東北地方太平洋沖地震時の RC 造超高層建物の実地震時被害状況に基づく被災度の評価基準を構築するとともに、地震発生後の迅速な広域的復旧計画策定に資する総合的ヘルスマニタリングシステムを整備した。2015 年 4 月に発生したネパール地震では高層集合住宅の被害調査を追加し、被害データベースを充実させることができた。国内に建つ 1200 棟を超える RC 造超高層建物に対し、今後予測される大地震発生後の生活維持計画に資する成果が得られた。研究成果の一部はプレス記事で取り上げられ、また 2014 年には研究フォーラム「大地震時における超高層マンションの揺れと被害—東日本大震災の経験を踏まえて—」を開催し、成果を対外的にアピールすることができた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① 永野正行、肥田剛典、田沼毅彦、中村充、井川望、保井美敏、境茂樹、森下真行、北堀隆司、上林宏敏：強震下の超高層集合住宅の挙動解明と今後の被害低減に向けた取り組み、日本地震工学会論文集(特集号)、査読有、2016、(採用決定)
- ② 山根義康、永野正行、肥田剛典、田沼毅彦：設計用地震応答解析モデルに基づく超高層 RC 造建物における最大層間変形角の高さ分布、日本建築学会技術報告集、査読有、第 22 巻、第 50 号、2016.2、17-22
- ③ 坂本あいの、肥田剛典、山根義康、岩岡竜夫、永野正行：隣接する 2 棟の超高層集合住宅を対象としたアンケート調査と応答解析に基づく東日本大震災時における室内被害の推定、日本地震工学会論文集、査読有、第 15 巻、第 7 号(特集号)、2015.12、444-453
- ④ Hirotooshi Uebayashi、Masayuki Nagano、Takenori Hida、Takehiko Tanuma,

Mitoshi Yasui and Shigeki Sakai: Evaluation of the structural damage of high-rise reinforced concrete buildings using ambient vibrations recorded before and after damage, Earthquake Engng Struct. Dyn., Vol 45, 2, pp.213-228, 2015.9, Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/eqe.2624

- ⑤ 肥田剛典、永野正行: 部分空間法に基づくシステム同定による建物の固有振動数と減衰定数の推定精度、日本建築学会構造系論文集、査読有、第79巻、第701号、2014.7、923-932
- ⑥ 肥田剛典・永野正行・田沼毅彦・金子知宣: 超高層集合住宅における2011年東北地方太平洋沖地震時のアンケート調査および振動台搭乗実験に基づく地震時避難行動不可能率、日本建築学会技術報告集、査読有、第20巻、第45号、2014.06、521-526
- ⑦ 山根義康、永野正行、肥田剛典、保井美敏、山本健史、井川望、田沼毅彦: 2011年東北地方太平洋沖地震時における超高層集合住宅の室内被害の分析と建物応答との対応、日本建築学会技術報告集、査読有、第20巻、第44号、2014.2、67-72
- ⑧ 野木淑裕、永野正行、肥田剛典、山本健史、保井美敏、田沼毅彦、渡辺一弘: 東北地方太平洋沖地震を経験した超高層集合住宅の損傷推定とその後の耐震性能評価、日本建築学会技術報告集、査読有、第20巻、第44号、2014.2、49-54

[学会発表] (計26件)

- ① 鈴木賢人、永野正行、坂本あいの、渡邊藤一郎、成島慶: ネパール地震における高層RC造建物の被害状況と常時微動計測による固有周期の評価、日本地震工学会・大会 - 2015 梗概集、P2-23、p.10、2015.11.19-20、東京・東京大学生産技術研究所
- ② 肥田剛典、永野正行: アンケート調査と強震記録に基づく超高層集合住宅居住者の揺れの体感と建物応答の推定式の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.1047-1048、2015.9.4-6、東海大学
- ③ 坂本あいの、金子知宣、田沼毅彦、肥田剛典、永野正行: 振動台搭乗実験に基づく超高層集合住宅居住者の地震時の体感に関する検討 - その3 同一姿勢による振動台搭乗実験と体感に関するアンケート調査 -、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.1049-1050、2015.9.4-6、東海大学
- ④ 永野正行: 超高層建築物の揺れとその対策、東日本大震災のあの被害はどう解決されたのか - 液状化・高層ビル・天井落下・帰宅困難者 - 第19回震災対策技術展(横浜)関連シンポジウム、2015.2.5、日本建築学会

災害委員会、震災対策技術展・パシフィコ横浜・アネックスホール

- ⑤ 永野正行、肥田剛典、田沼毅彦、中村充、井川望、保井美敏、境茂樹、森下真行、北堀隆司、上林宏敏: 強震下の超高層集合住宅の挙動解明と今後の被害低減に向けた取り組み、第14回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.1452-1461、2014.12.4-6、千葉県幕張メッセ国際会議場
- ⑥ 肥田剛典、永野正行、佐藤利昭: 部分空間法に基づくシステム同定による建物の層剛性と減衰係数の推定精度に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.107-108、2014.9.12-14、神戸大学
- ⑦ 永野正行、肥田剛典、田沼毅彦: 2011年東北地方太平洋沖地震時の超高層RC造集合住宅の上下振動特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.977-978、2014.9.12-14、神戸大学
- ⑧ 金子知宣、坂本あいの、田沼毅彦、肥田剛典、永野正行: 振動台搭乗実験に基づく超高層集合住宅居住者の地震時の体感に関する検討 - その1 アンケート調査による行動難度と不安度の検討 -、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.141-142、2014.9.12-14、神戸大学
- ⑨ 永野正行: 建築分野での地震観測の活用 - 超高層集合住宅を対象とした成果、『特別講演: 地震観測の活用』、第17回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム、2014.7.2、土木学会講堂、東京四谷

[その他]

報道関連情報

- ① 2016年4月7日掲載、読売新聞夕刊、科学、高層階ほど大きく長い揺れ、長周期地震動
- ② 2016年3月2日掲載、毎日新聞朝刊千葉西北版、震災5年・ちば、超高層マンションの1000世帯アンケート
- ③ 2014年9月22日掲載、朝日新聞朝刊、「集合住宅 共に生きる、災害大国」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永野正行 (NAGANO, Masayuki)  
東京理科大学・理工学部・教授  
研究者番号: 60416865

(2) 研究分担者

肥田剛典 (HIDA, Takenori)  
東京大学・工学(系)研究科(研究員)・助教  
研究者番号: 60598598