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

永野正行¹⁾、肥田剛典²⁾、田沼毅彦³⁾、中村充⁴⁾、井川望⁵⁾、
保井美敏⁶⁾、境茂樹⁷⁾、森下真行⁸⁾、北堀隆司⁹⁾、上林宏敏¹⁰⁾

1) 正会員 東京理科大学理工学部建築学科、教授 博士（工学）

e-mail : nagano-m@rs.noda.tus.ac.jp

2) 正会員 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 助教 博士（工学）

e-mail : hida@load.arch.t.u-tokyo.ac.jp

3) 正会員 都市再生機構

e-mail : t-tanuma@ur-net.go.jp

4) 非会員 大林組 技術研究所 博士（工学）

e-mail : nakamura.mitsuru@obayashi.co.jp

5) 非会員 鴻池組 技術研究所 博士（工学）

e-mail : ikawa_no@konoike.co.jp

6) 正会員 戸田建設 技術開発センター

e-mail : mitoshi.yasui@toda.co.jp

7) 正会員 安藤ハザマ 技術研究所

e-mail : sakai.shigeki@ad-hzm.co.jp

8) 正会員 前田建設工業 技術研究所

e-mail : morisita@jcity.maeda.co.jp

9) 正会員 URリンケージ 都市・居住本部 構造技術部

e-mail : kitahori-t@urlk.co.jp

10) 正会員 京都大学 原子炉実験所 博士（工学）

e-mail : uebayash@rri.kyoto-u.ac.jp

要 約

2011年東北地方太平洋沖地震以降、超高層集合住宅で強震観測を実施している企業の担当者を中心に『超高層集合住宅地震観測合同研究会』を立ち上げ、強震記録の分析、シミュレーション解析を進めてきた。同時に、首都圏で得られた地表地震記録の収集・分析、居住者を対象とした室内被害のアンケート調査、微動計測、振動台搭乗実験等を実施し、強震下の超高層集合住宅の挙動と室内被害の解明、動特性把握と大地震時の被害推定に向け取り組んできた。得られた資料は、今後発生が予測される南海トラフの海溝型巨大地震、都市直下の内陸地殻内で発生する大地震後の、超高層集合住宅を対象とした即時被災度判定、復旧対策等への活用が期待される。

キーワード： 超高層集合住宅、強震記録、動特性、アンケート調査、微動

1. はじめに

関東、関西には多数の超高層集合住宅が建設され、すでに国内に建設される超高層構造物のうち、かなりの割合を占めるようになってきている。超高層集合住宅の多くは、人口密集地である関東平野、大阪平野などの厚い堆積層で覆われた場所に建設されている。このような地域では、大地震発生時に長周期成分を含む地盤増幅の影響を受けた地震動が発生する。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0、以降3.11本震)では、首都圏で継続時間が10分を超える強震データが多数得られた。首都圏に建つ超高層集合住宅は比較的振幅の大きい地震動入力を経験したことから、建物内での地震動の増幅、それに伴う室内被害やRC造特有の動特性変化を把握する必要があった。

3.11本震後に日本建築学会で『長周期建物地震対応小委員会』（委員長：北村春幸・東京理科大学教授）の活動が開始し、国内の超高層建物を中心に強震記録の収集やアンケート調査による被害解明が進められた¹⁾。この一貫として、首都圏等而建つ超高層集合住宅での強震記録の収集や分析を行い²⁾、さらに居住者を対象にアンケート調査を実施し強震記録との対応を検討してきた^{3,4)}。東日本大震災前までは建物毎に強震記録の分析は行われてきたが、それを横断的に検討する機会にはなかった。そこで、3.11本震時の記録分析やシミュレーション結果等を共有し、得られた貴重な成果の対外発表を促すため、超高層集合住宅の強震観測を所掌する機関とそれを共同で実施するゼネコンを中心とした委員で、『超高層集合住宅地震観測合同研究会』を結成した。多数の超高層集合住宅で得られた記録を比較して整理するのは勿論のこと、上記のアンケート調査結果に基づき、強震記録と室内被害、人的被害との対応関係を詳細に調査した。さらに大学側委員を中心に多数の超高層集合住宅で微動計測を実施し、強震記録との対応を調べるとともに、今後発生が予測される大地震時の損傷推定に向けた検討を実施してきた。

本稿では強震下における超高層集合住宅の被害低減を目指し、3.11本震後に本研究会で実施してきた超高層集合住宅の動特性や室内被害等の解明に向けた取り組みを紹介する。

2. 検討対象とした超高層集合住宅

本研究会で検討対象とする建物を図1、表1に示す。図1には長周期地震動予測地図2012年試作版⁵⁾による、関東、大阪平野の地震基盤（S波速度で概ね3km/s以上の地層）の深度コンタを示す。すべての建物

図1 検討対象とする超高層集合住宅の建設位置（口の大きさは建物階数を示す）

が関東平野、もしくは大阪平野の厚い堆積層上に建設されている。全27棟のうち、関東地域に建つのが21棟で、関西地域は6棟である。その多くはRC造の純ラーメン構造であるが、SRC造が3棟、CFTが1棟含まれている。竣工年は1990年代が13棟と最も多く、1980年代以前が4棟、2000年代が10棟となっている。居住用の最上階は、全て24階以上となっており、20階台が8棟、30階台が14棟、40階台が5棟となっている。全ての建物で3.11本震後の微動計測を、建物AA,AB,ACの3棟を除く建物で室内被害に関するアンケート調査を行っている。またいくつかの建物を対象に、震災後、居住者から修理の申し出があった室内被害内容が記載された資料に基づく被害調査を行っている⁶⁾。

表 1 検討対象建物一覧

地域	名称	階数	軒高(m)	竣工年	構造	3.11本震時の 強震記録(階)	3.11本震時の 頂部最大 水平加速度	3.11本震時の 初期、最大 固有周期(s)	微動計測 時の固有 周期(s)	被害調 査
関東	建物A	30	95.9	1999	RC、純ラーメン	B1,15,R(31)	307cm/s ²	1.73, 2.38	1.92	○
"	建物B	25	74.9	1995	RC、純ラーメン	1,R(26)	353cm/s ²	1.31, 1.66	1.39	○
"	建物C	30	88.35	1989	RC、純ラーメン	杭先端,30	343cm/s ²	1.54, 2.16	1.67	○
"	建物D	24	72.55	1988	RC、純ラーメン	B1,12,R(25)	301cm/s ²	1.26, 1.76	1.32	○
"	建物E	32	103.8	2000	RC、純ラーメン	1,14,24,R(33)	327cm/s ²	1.90, 3.05	2.27	○
"	建物F	33	99.95	1996	RC、純ラーメン	B1,17,R(34)(EW)	294cm/s ²	1.83, 2.58	1.96	○
"	建物G	28	81.5	1996	RC、純ラーメン	1,10,28	367cm/s ²	1.53, 2.48	1.79	○
"	建物H	24	69.95	1993	RC、純ラーメン	1,R(25)	463cm/s ²	1.15, 1.70	1.33	○
関西	建物I	33	108.45	1999	RC、純ラーメン	1,17,R(34)	25cm/s ²	1.71, 1.86	1.75	—
"	建物J	36	111.65	1999	RC、純ラーメン	1,14,36	39cm/s ²	2.02, 2.10	2.00	—
"	建物K	25	81.65	1977	SRC、純ラーメン	B1,5,24	26cm/s ²	1.83, 1.90	1.54	—
"	建物L	43	135.68	1999	RC、純ラーメン	B2,15,30,43	26cm/s ²	2.77, 2.95	2.63	—
"	建物M	40	122.2	1999	CFT、純ラーメン	B1,12,26,40	81cm/s ²	3.32, 3.57	3.03	—
"	建物N	31	92.5	1989	RC、純ラーメン	1,16,31	72cm/s ²	1.92, 2.38	1.92	—
関東	建物O	41	134.22	2009	RC、純ラーメン	—	—	—	2.94	—
"	建物P	37	130	2008	RC、純ラーメン	—	—	—	2.33	—
"	建物Q	38	123.2	2000	RC、純ラーメン	—	—	—	2.44	○
"	建物R	32	95.9	1994	RC、純ラーメン	—	—	—	1.92	—
"	建物S	30	100	2003	RC、純ラーメン	—	—	—	1.89	○
"	建物T	35	109.98	2004	RC、純ラーメン	—	—	—	2.33	—
"	建物U	40	119.43	2000	SRC、純ラーメン	—	—	—	3.07	—
"	建物V	24	86.27	2006	RC、純ラーメン	—	—	—	1.70	—
"	建物W	37	113.6	1991	SRC、純ラーメン	—	—	—	2.86	○
"	建物X	43	134.55	2000	RC、純ラーメン	—	—	—	2.78	○
"	建物AA	30	90.3	1992	RC、純ラーメン	—	—	—	1.85	—
"	建物AB	26	77.3	1995	RC、純ラーメン	—	—	—	1.43	—
"	建物AC	28	87.1	2001	RC、純ラーメン	—	—	—	1.43	—

頂部最大加速度、固有周期は水平2方向のうち数値が大きい方向

3. 建物の強震記録の分析と振動特性

3.1 建物の強震記録の分析と動特性の変化

3.11本震を含む強震記録の検討対象とする建物は、図1、表1のうち建物A～Nの14棟である。関東地域に立つ超高層建物について、建物A～Hでは、竣工時から現在に至るまで強震観測が継続され、観測記録の中で3.11本震が最大振幅となっている。関西地域では建物I～Nで竣工時から強震観測が実施されている。1995年以前に竣工された建物K、建物Nは1995年兵庫県南部地震(M_J7.3)、ほかの建物では2000年鳥取県西部地震(M_J7.3)もしくは2004年9月5日三重県南東沖の地震(M_J7.4)が最大の記録となっている。建物Kについては1995年以降、強震計が一新されている。加速度データは建物を所有する機関、もしくは共同観測を実施している建設会社各社との共同で保管されている。

すべての建物で最上層と最下層で強震観測を実施していることから、これを利用して建物の動特性(固有振動数、モード減衰定数)の変化を捉えることができる。関東地域に建つ建物A⁷⁾、B⁸⁾、C⁹⁾、E¹⁰⁾、H⁸⁾等では、計測開始からの固有周期、固有振動数の経時変化が示されている。多くのケースでは竣工時に

は設計時振動数よりも高い固有振動数であった。その後、経時変化により3.11直前までに1割程度固有振動数が低下する。このような傾向は他のRC系の建物^(例えば11)でも見られる。

3.11本震時には、関東地域に建つ対象建物の多くで、10分間近くの長い継続時間を有する強震記録が得られた。すべての建物を対象に、3.11本震時の固有振動数と減衰定数の経時変化を調べた。その結果、関東地域では建物の相対変位が大きくなる時間で、記録初期時に比べ固有振動数が2～4割程度低下した。減衰定数については、ばらつきは大きいものの4%前後であった。最大10分の継続時間内で、低下した固有振動数が初期状態に戻ることはなかった。関西地域では固有振動数の低下は10～20%で、関東地域ほど大きくはなく、また記録時間内に元に戻る傾向を示した²⁾。

建物の最上層と最下層で得られた加速度波形を積分した変位波形から層上層の最大相対変位を求め、これを両地点の高さで割った値を、建物の最大頂部変形角とした。図2(a)に示すように最大頂部変形角が大きいほど、固有振動数の低下が大きくなった。これと最小固有振動数比から等価な力と変形の関係に変換すると、図2(b)に示す6/10000radを折れ点とするバイリニア特性が得られた²⁾¹²⁾。これは図2(c)に示す耐震設計に用いられる動的解析モデルのひび割れ耐力時の変形レベル¹³⁾と対応する。最大頂部変形角の最大が1/200強のレベルであるため降伏耐力に相当する第2折れ点を確認できるレベルではないが、耐震設計で用いられる振動解析モデルと整合する非線形特性を呈する。等価減衰定数については、ばらつきは大きいものの、ひび割れ耐力時の変形に対する塑性率の関数として近似されている¹²⁾。

図2 3.11本震時の等価固有振動数から求めたバイリニア特性と設計モデルの層間変形角²⁾¹³⁾

関東地域に建つ建物について、3.11本震時に大きく低下した固有振動数は、3.11後数年経っても3.11直前の値までには戻っていない^(例えば8)。首都圏に建つ多くの建物では固有振動数が3.11本震前に比べ低下し、動特性が変化しているものと推定される。これは次に示す3.11本震後の建物のシミュレーション解析にも影響を与えることになる。

3.2 建物記録のシミュレーション解析

強震記録が得られている建物について、関東地域の建物を対象に、3.11本震時の記録を用いたシミュレーション解析が行われている⁹⁾¹⁰⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。耐震設計時に用いた多質点せん断モデル、もしくは曲げせん断モデルに基づく振動解析モデルが用いられる場合が多いが、柱・梁部材ごとにモデル化したフレーム解析も行われている¹⁶⁾¹⁷⁾。等価固有振動数が低下していることから、非線形解析は必須である。超高層集合住宅では杭基礎のロッキング地盤ばねによる相互作用効果も見られるため、最下層で得られた記録を入力地震動としロッキングモデルとして検討した事例も多い。また上部構造と杭基礎をPenzien型モデルで一体解析した検討も行われている¹⁸⁾。建物Cでは3.11本震時の記録が1Fでは欠測だったため、杭先端での記録から相互作用モデルを用いて1Fの入力動を推定した検討も行っている⁹⁾。

検討事例の多くでは、3.11本震時の主要動直前の固有振動数と整合させるため、建物剛性の調整を行

っている。3.11本震の検討では、建物の波形や応答スペクトルに見られる卓越周期等は概ね再現されている。シミュレーション解析時の減衰定数は、観測記録と整合するように調整されている。設計時よりも小さい減衰定数を仮定し、高次の応答を合わせるためにレイリー減衰等を用いたケースもある。一方、図3に示すように建物頂部の最大加速度については観測記録に比べやや過小評価となっているケースも見られ、さらなる検討が必要である。

図3 3.11本震時のシミュレーション解析結果の一例

最大層間変形角は図2と同様に、ひび割れ変形角と降伏変形角の間にある。全般的に最大層間変形角は低層部で大きくなる傾向が見られ、後に述べる室内被害の分布とも対応する¹⁹⁾。一方、3.11本震時の最大層間変形角のピークが中層部や上層部で現れる建物もあり⁹⁾²⁰⁾、すべての建物で最大層間変形角が低層部で大きくなっているわけではない。3.11本震時の最大層間変形角は主に1次固有モードによるものであるが、弾性時のモードのみでは低層部の層間変形角の増加を再現することができない⁶⁾。

3.11本震と併せ前震、余震のシミュレーション解析も行われており、3.11本震を経験しない解析モデルと経験した解析モデルの両方で検討されている。先に述べたように、首都圏に建つ建物では固有振動数が3.11本震前に比べ低下し動特性が変化していることから、3.11本震を経験しない解析モデルではその後発生した余震記録を再現できないことが指摘されている⁹⁾¹⁰⁾¹⁷⁾。より大振幅レベルの地震動入力に対する建物応答予測は、3.11本震の経験有無による違いが出る場合もあるため注意が必要である¹⁷⁾。

3.3 微動計測による動特性の把握

関東地域の建物について、3.11本震時に大きく低下した固有振動数は、3.11後数年経っても3.11直前の値までには戻っていない。このため、本震時の固有周期の変化と3.11本震後の微動振動数の関係から、3.11本震時の損傷程度を推定できる可能性がある。建物Aでは同地震前の1999年の微動固有振動数が得られている。3.11本震時の固有振動数の経時変化と対応させると、3.11本震前後の微動振動数の低減と3.11本震時の低減が概ね対応している。強震観測が実施されている建物は全体のごくわずかであるが、微動計測であれば比較的簡単にできることから、将来大地震が発生する際に被災度を簡便に評価する方法として利用可能と考えられる。

図1、表1に示すすべての超高層集合住宅を対象に、微動計測を実施した²¹⁾²²⁾。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を示した。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。理想的には全ての建物で強震観測を実施することであるが、金銭面、メンテナンス、維持管理の問題等もあり、現実ではそれも難しい。最低でも現時点で微動計測を実施しておけば、将来大地震が発生する際の簡易的な被災度推定に利用できるものと期待できる。

3.4 設計用振動解析モデルの分析

超高層RC造建物の耐震設計時のデータは、日本建築センター・ビルディングレターの超高層建築物性能評価・評定シートに基本情報が掲載されている。これらのデータにより、軒高、固有周期、設計用ベースシア係数等の基本性状がまとめられている。一方、質量や剛性分布、復元力特性の高さ方向の分布については公開データには掲載されておらず、その特性が十分に把握されているとは言い難い。そこで図1、表1に示す超高層集合住宅の評定資料を整理し、耐震設計時の振動解析に用いられたモデルを分析し、質量や剛性分布、復元力特性の高さ分布を調べた¹³⁾。設計用ベースシア係数で規準化したひび割れ耐力や降伏耐力の建物間での違いは小さいことが分かった。

これらのモデルを用いて3.11本震時の非線形地震応答解析を実施した結果、アンケート調査結果等に見られた低層部での損傷を再現できるケースもあれば、再現できないケースもあった²⁰⁾。また非線形応答時の最大層間変形角分布は、弾性時の固有モードの重ね合わせだけでは表現できない¹³⁾ことも示されており、振動解析モデルベースでの応答予測には十分注意する必要があることが示唆される。

4. アンケート調査に基づく3.11本震時の室内被害の検討

4.1 アンケート調査と結果の分析

3.11本震時の室内被害、人的被害を把握するために、居住者を対象にアンケート調査を実施した³⁴⁾。2011年7月下旬に関東・関西地域に建つ建物A～Nを対象に、2011年10月中旬に関東地域に建つ建物O～Vを対象にアンケート用紙を配布した。建物A～Nでは強震観測が行われている階付近の5フロア分の居住者を、建物O～Vでは全体を低層、中層、高層に分類したときの各エリアの居住者を対象とした。この時点で約5000枚の配布に対し、約1000の回答が得られている。このときの集計結果より以下の知見が得られた¹⁴⁾。①体感震度や行動難度、揺れの最中の不安感の高さは高層>中層>低層となっており、関東地域の高層部における体感震度は記録と概ね対応した。②関東地域の家具等の転倒、移動も高層>中層>低層となっていた。関西地域ではほとんど見られなかった。③室内の壁紙等の亀裂は、上記とは逆に高層<中層<低層となっていた。④東京湾沿岸部での室内の壁紙等の亀裂は、内陸部よりも大きかった。(後出の図4参照)

3.11本震からやや時間がたつが、2013年1月下旬には、中央区に建つ建物W、Xの全フロアの居住者を対象に、アンケート用紙を配布した。このとき、2012年12月7日に発生した三陸沖の地震($M_j7.4$)との比較を行うとともに、今後の地震被害への意識に関する調査を行っている²³⁾。

4.2 強震動レベルと室内被害等の分析

強震記録が得られた建物A～Nを対象に、行動難度、不安感、家具の転倒、移動等のアンケート調査結果と3.11本震時の床応答を対応させた検討を行った³⁴⁾。既往の研究成果と対比させた結果、次の知見が得られた。①行動難度、不安度は振動台実験に基づく高橋らによる結果²⁴⁾に比べ小さい床応答レベルで高めに見られた。②家具の転倒、移動は金子による既往の研究²⁵⁾²⁶⁾とほぼ整合する結果が得られた。

次に、建物A～Nの強震記録から、行動難度、家具の転倒が床応答の最大加速度、速度指標と対応することを確認し、回帰計算を行った。この結果より、3.11本震時の強震記録がない建物O～Vの床応答を推定した。3.11本震時にはMeSO-netによりGL-20mでの強震記録が首都圏で多数得られており、各建物の低層階の推定値は、建物に最も近いMeSO-net観測点での最大加速度、速度と同じ振幅レベルとなることを示した⁴⁾。

3.11本震時には首都圏で膨大な数の地表記録等が得られており、これを収集し最大値等の空間分布を分析した²⁷⁾。首都圏での計測震度は5弱～5強であり、地域による明瞭な差異は見られなかった。次に、超高層集合住宅の3.11本震時の等価固有周期が1.5～3.5sであったことから、入力地震動の2方向合成 $pS_v(h=5\%)$ の周期1.5s～3.5sの最大値 $pS_{v1.5-3.5}$ を調べた。この結果、図4に示すように東京湾沿岸部と内陸部では明らかな違いが現れ、東京湾沿岸部では80cm/sを超える地点が多数見られた。

図4 首都圏における強震動の $pSV_{1.5-3.5}$ と超高層集合住宅低層部における室内壁紙等の亀裂指標¹⁾

さらに、アンケート調査による室内の壁紙等の亀裂を地域ごとに調べた結果、図4の棒グラフに示すように東京湾沿岸部で被害率が高いことが分かった。この傾向を整理するために、超高層集合住宅低層部での室内の壁紙の亀裂率と最大頂部変形角、最大頂部変形角と最大値 $pSV_{1.5-3.5}$ で相関があることを示し、これらの回帰式を作成した⁴⁾。

以上の結果から、3.11本震時には東京湾沿岸部において地震動の周期1.5～3.5秒の長周期成分が増幅し、これが超高層集合住宅の室内被害に影響を与えたことを、強震記録の分析と室内被害調査の両面から明らかにした。この領域は、埋め立て地や河川下流部に相当する。検討対象領域では地震基盤の深さに大きな違いはないことから、この周期帯での増幅が、深部地盤ではなく工学的基盤より浅部の表層地盤であることが推定される²⁸⁾。これらの知見は、今後大地震が発生するときの大都市における広域的な早期損傷度評価にも活用することができる²⁹⁾。

4.3 室内被害に関する各種検討

アンケート調査の人的被害（行動難度、不安度）に関する結果をより詳細に分析するために、振動台搭乗実験とアンケート調査により地震時避難行動不可能率を検討した³⁰⁾。また、振動台搭乗実験中の頭部の動きをモーションキャプチャにより捉え、アンケート調査結果との関係を調べた³¹⁾³²⁾。

地震時における超高層集合住宅のエレベータ稼働は、高層階の住人にとって重要な問題となる。3.11本震時におけるエレベータの運行状況について、中央監査室の監視員による報告記録とエレベータ会社からのヒアリング、アンケート調査における自由コメントとの対応を検討した³³⁾。この結果、関東地方で調査対象とした全ての建物でエレベータが停止したこと、遅くとも本震後24時間以内には全ての建物で一部復旧したこと、停止時間が長引いた建物では住民の生活への影響が大きく、それがアンケートコメントにも反映されていることを明らかにした。これらの検討は、大地震中の超高層集合住宅の居住者の避難行動や、地震後の生活継続性能（Life Continuity Performance、LCP）を考察するうえで重要となる。

5. 最後に

本稿では、2011年東日本大震災以降、筆者らが進めてきた強震下の超高層集合住宅の挙動と室内被害の解明、動特性把握と被害推定への取り組みについて、超高層集合住宅地震観測合同研究会での活動成果を中心に紹介した。建物内での強震記録とともに、多数地点で得られた地表記録、アンケート調査、被害調査、微動調査、振動台実験等を通して、3.11本震時に超高層集合住宅で何が起きたかについて、

多角的な分析を行うことができたものとする。

上記の成果は、3.11本震時に超高層集合住宅内で得られた多数の強震記録の存在抜きではありえないものであり、建物内での強震観測の地道な継続が重要であることが改めて認識される。また今後の地震被害への意識に関する調査では、居住階の被害や建物が揺れた強さ等の情報に比べ、今後も建物に住めるかどうかの情報を必要とする居住者が多く、地震後の建物の継続使用可否への関心が高い²³⁾。地震直後の被害分析はもちろんのこと、住民のLCPに向けた情報伝達の観点でも、超高層集合住宅内での強震観測を積極的に展開する必要がある。

謝 辞

超高層集合住宅地震観測合同研究会の設立および研究遂行にあたり、都市再生機構・技術調査室・渡辺一弘氏には多大なるご協力をいただきました。超高層集合住宅の居住者の皆様には、微動計測やアンケート調査にご協力いただきました。本研究の一部は科研費基盤研究(C)No.25420589(代表者:永野正行)の助成を受けました。URリンケージ・金子知宣氏には強震観測の維持、記録整理にご尽力いただいております。本稿では以下に示す超高層集合住宅地震観測合同研究会の委員の成果を利用させていただきました。ここに記して御礼申し上げます。

【超高層集合住宅地震観測合同研究会構成メンバー 永野正行(東京理科大学)、肥田剛典(東京大学)、田沼毅彦(UR)、中村充(大林組)、井川望(鴻池組)、保井美敏、山本健史(戸田建設)、境茂樹、加藤貴司、仲野健一(安藤ハザマ)、森下真行(前田建設工業)、鈴木亨、川島学(三井住友建設)、金子知宣、北堀隆司(URリンケージ)、上林宏敏(京都大学)、久田嘉章(工学院大学)】

参考文献

- 1) 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、2013.10.
- 2) 永野正行、肥田剛典、渡辺一弘、田沼毅彦、中村充、井川望、保井美敏、境茂樹、森下真行、川島学：2011年東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく関東、関西地域に建つ超高層集合住宅の動特性、日本地震工学会論文集 第12巻、第4号(特集号)、pp.65-79、2012.9.
- 3) 肥田剛典、永野正行：アンケート調査に基づく2011年東北地方太平洋沖地震時の超高層集合住宅の揺れと被害、日本建築学会技術報告集、第18巻、第39号、pp.579-584、2012.6.
- 4) 肥田剛典、永野正行：2011年東北地方太平洋沖地震時における強震記録とアンケート調査に基づく超高層集合住宅の応答の推定、日本建築学会構造系論文集、第78巻、第683号、pp.51-60、2013.1.
- 5) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：「長周期地震動予測地図」2012年試作版、平成24年1月13日、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/index.htm.
- 6) 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、第20巻、第44号、pp.67-72、2014.2.
- 7) 保井美敏、他：軟弱地盤に建つ超高層RC造集合住宅の地震観測(その1 地震観測の概要と観測記録)、日本地震工学会大会－2011梗概集、pp.376-377、2011.11.
- 8) 森下真行、齊藤芳人、龍神弘明、田沼毅彦、渡辺一弘：RC造超高層建物の長期地震観測結果に基づく動特性評価、日本建築学会技術報告集、第20巻、第45号、pp.527-532、2014.6.
- 9) 北堀隆司、永野正行、田沼毅彦：2011年東北地方太平洋沖地震時に1階の地震記録が欠測した超高層集合住宅の地震応答解析、日本建築学会技術報告集、第20巻、第46号、pp.911-916、2014.10.
- 10) 井川望、古城豊光、渡辺一弘、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地震応答評価、日本建築学会技術報告集、第18巻、第40号、pp.859-864、2012.10.
- 11) 川島学、永野正行、鹿嶋俊英、井口道雄：長期間に亘る地震観測記録より観察される建物動特性の変化と回帰推定式による予測精度、第13回日本地震工学シンポジウム、GO14-Fri-AM-2、pp.1530-1537、2010.
- 12) 上林宏敏、永野正行：超高層建物の強震観測記録に基づく増幅特性と動特性評価、日本建築学会技術報告集、第19巻、第42号、pp.435-440、2013.6.

- 13) 山根義康、永野正行、肥田剛典、田沼毅彦：超高層RC造集合住宅の設計用動解モデルの分析、日本地震工学会、大会2013、pp.103-104、2013.11.
- 14) 井川望、伊藤真二、古城豊光、渡辺一弘、田沼毅彦：東北地方太平洋沖地震における超高層集合住宅の地震応答、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.1133-1134、2012.9.
- 15) 山本健史、永野正行、保井美敏、肥田剛典、田沼毅彦、渡辺一弘：軟弱地盤に建つ超高層RC造集合住宅の地震応答評価と被害との対応 -2011年東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく検討-、日本建築学会技術報告集、第19巻、第42号、pp.447-452、2013.6.
- 16) 森下真行、齊藤芳人、龍神弘明、永野正行、肥田剛典、渡辺一弘、田沼毅彦：RC造超高層建物の立体解析モデルによる建物応答評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.1081-1082、2014.9.
- 17) 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、第20巻、第44号、pp.49-54、2014.2.
- 18) 山本健史、保井美敏、永野正行、肥田剛典、田沼毅彦、渡辺一弘：地盤-杭-建物の動的相互作用を考慮した超高層RC造集合住宅の地震応答シミュレーション解析と入力動評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.33-34、2014.9.
- 19) 山本健史、保井美敏、永野正行、肥田剛典、田沼毅彦、渡辺一弘：軟弱地盤に建つ超高層RC造集合住宅の地震応答評価と被害との対応 -2011年東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく検討-、日本建築学会技術報告集、第19巻、第42号、pp.447-452、2013.6.
- 20) 山根義康、永野正行、肥田剛典、田沼毅彦：設計用動解モデルの地震応答解析に基づく超高層RC造建物の最大応答値分布の分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.1087-1088、2014.9.
- 21) 金子知宣、永野正行、上林宏敏、肥田剛典、田沼毅彦：微動観測に基づく超高層鉄筋コンクリート建物の強震時における動特性変化量推定の可能性 その1 微動観測概要と固有周期の分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、21294、pp.587-588、2013.8.
- 22) 上林宏敏、永野正行、肥田剛典、田沼毅彦、金子知宣、保井美敏、山本健史：微動観測に基づく超高層鉄筋コンクリート建物の強震時における動特性変化量推定の可能性 その2 動特性変化量の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、21295、pp.589-590、2013.8.
- 23) 坂本あいの、永野正行、肥田剛典、山根義康、岩岡竜夫：アンケート調査に基づく2地震時における超高層住宅の揺れ、被害と今後の地震被害に関する意識分析、日本地震工学会、大会2013、pp.213-214、2013.11.
- 24) 高橋徹、貞弘雅晴、斉藤大樹、小豆畑達哉、森田高市、野口和也、箕輪親宏：長周期地震動を考慮した人間の避難行動限界評価曲線の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集B2、pp.497-498、2007. 8.
- 25) 金子美香：地震時における家具の転倒率推定法、日本建築学会構造系論文集、No. 551、pp. 61-68、2002. 1.
- 26) 金子美香：地震時における家具転倒率の簡易推定法の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集B2、pp. 61-62、2003. 9.
- 27) 永野正行：地震動の特徴—2011年東北地方太平洋沖地震時の強震記録から見る地盤増幅—、第9回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム「最近の被害地震における地盤震動、動的相互作用の現象把握と構造設計への取り組み」、pp.5-16、日本建築学会、2013.1.
- 28) 永野正行、肥田剛典、田沼毅彦、渡辺一弘、井川望、伊藤真二：2011年東北地方太平洋沖地震時の東京湾沿岸部における基盤波推定と長周期地震動の地盤増幅特性、日本建築学会技術報告集、第19巻、第43号、pp.849-854、2013.10.
- 29) 上林宏敏、永野正行、川辺秀憲、釜江克宏：超高層RC造建物の長周期地震動による損傷度の早期評価、第14回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.1462-1471、2014.12.
- 30) 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、2014.6.
- 31) 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、2014.9.

32) 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2 モーションキャプチャによる人間頭部の応答調査—、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、2014.9.

33) 野木淑裕、永野正行、肥田剛典：東日本大震災発生時の超高層集合住宅におけるエレベータ稼働状況に関する調査、日本地震工学会、大会2012、pp.30-31、2012.11.

(原稿受理日：2015年4月24日)

(掲載決定日：2015年9月26日)

Elucidation of Dynamic Behavior of Super High-Rise Residential Buildings during Massive Earthquake and Activities for Mitigation of Seismic Damages in Future

NAGANO Masayuki ¹⁾, HIDA Takenori ²⁾, TANUMA Takehiko ³⁾,
NAKAMURA Mitsuru ⁴⁾, IKAWA Nozomu ⁵⁾, YASUI Mitoshi ⁶⁾,
SAKAI Shigeki ⁷⁾, MORISHITA Tadayuki ⁸⁾, KITAHORI Takashi ⁹⁾
and UEBAYASHI Hiroto ¹⁰⁾

1) Member, Professor, Tokyo University of Science, Dr. Eng., 2) Member, University of Tokyo, 3) Member, Urban Renaissance Agency, 4) Obayashi Corporation, 5) Konoike Construction, 6) Member, Toda Corporation, 7) Member, Hazama Ando Corporation, 8) Member, Maeda Corporation, 9) Member, UR Linkage, 10) Member, Kyoto University

ABSTRACT

This paper summarizes our activities for elucidation of dynamic characteristics of super high-rise residential buildings during the 2011.3.11 Tohoku Earthquake and for mitigation of seismic damages during the future massive earthquakes. We organized the "Joint Study Group on Earthquake Observation Records in Super High-Rise Residential Buildings" after the 3.11 Earthquake, where we share information and the outcomes from the analyses of the recorded motions. In addition to that, we carried out questionnaire survey for residents, simulation analyses, microtremor measurements, shaking table tests, etc, toward comprehensive understanding of what happened during the 3.11 Earthquake. The obtained results will be available for mitigation of seismic damages during the future massive earthquakes. We must emphasize, last but not least, that strong motion observation in building is inevitable in terms not only of post-earthquake damage evaluation, but of services for residents in related with the life continuity planning.

Keywords: Super high-rise residential building, Strong motion records, Dynamic characteristics, Questionnaire survey, Ambient vibration