

東日本大震災後の超高層集合住宅のアンケート調査による室内被害と 強震記録との関係から推定される建物応答

INDOOR DAMAGES OF SUPER HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS BASED ON
QUESTIONNAIRE SURVEY AFTER THE GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE
AND STRUCTURAL RESPONSE DEDUCED FROM RELATIONSHIP
WITH STRONG MOTION RECORDS

肥田剛典*, 永野正行**
Takenori HIDA and Masayuki NAGANO

This study investigates structural responses of super high-rise residential buildings during the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake based on the questionnaire survey for the residents. Final results of the questionnaire survey conducted for 22 buildings in the Kanto and the Kansai areas indicate that action difficulty and overturning ratio of furniture at the higher floors were higher than that at the lower floors, and that cracking of the concrete and the wallpaper in the room were more frequent in lower floors. Peak floor responses can be fairly reproduced by action difficulty and overturning ratio of furniture in the questionnaire survey. Cracking of the concrete and the wallpaper is closely related with maximum averaged inter-story drift angles (IDA) evaluated from the recorded motion. The IDA is also correlated with averaged pseudo velocity spectra with a period range of 1.5-3.5 s, which was highlighted in the coastal area of the Tokyo Bay, where possible crack damages were inferred in the super high-rise residential buildings.

Keywords: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Questionnaire survey, Super high-rise residential buildings,

Indoor damage, Inter-story drift angle, Strong motion record

2011年東北地方太平洋沖地震, アンケート調査, 超高層集合住宅, 室内被害, 層間変形角, 強震記録

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)では、関東平野内に位置する大都市圏で継続時間の長い長周期地震動が観測された。震災後の初動調査^{1), 2)}により、首都圏における超高層建物内で家具の転倒、小物の散乱・落下等の被害が発生したことが報告されている。

その後、首都圏に建つ超高層建物のアンケート調査を中心に、多くの被害報告が示されている。東京消防庁³⁾では、防災管理対象物となる多数の建物について家具転倒等に関するアンケート調査を実施した。この中には20階以上の超高層建物も含まれ、個別の建物についての結果は示されていないものの、階数別によるオフィス家具の転倒率等が示されている。久保・他^{4), 5)}は西新宿に建つ大学建物と超高層事務所ビルを対象にアンケート調査を実施し、体感震度や内部の被災状況の他、初動行動や避難状況等を調べた。金子・他⁶⁾は首都圏に建つ12棟の超高層マンションを対象にアンケート調査を実施し、建物の揺れや室内被害に関する検討を実施した。Saito⁷⁾は2011年太平洋沖地震時における宮城県、埼玉県、東京都、神奈川県および大阪府に位置する11~26階建てのS造およびSRC造の防災施設管理者に対し、構造的被害やライフラインの被害、揺れの最中

の行動難度や不安度、家具の移動等に関するアンケート調査を行っている。気象庁によるアンケート調査⁸⁾では、長周期地震動の影響によって超高層建物の低層階と高層階で揺れの大きさが異なり、低層階に比べて高層階では入居者が大きな揺れを感じたことや、家具等の移動・転倒被害が多く見られたことが報告されている。また東京湾岸に建設される建物では、武蔵野台地上の建物に比べ行動難度や家具等の移動が大きいことが読み取れる。

近い将来の発生が懸念されている東海・東南海・南海地震への対策を考えるためにも、長周期地震動を受けた際の超高層建物の室内被害を即時に推定できる体制を整えることは急務である。しかし、地震後の超高層集合住宅内での被害に関する情報と建物の強震記録との関係を整理した例^{2), 9)}は極めて少ない。

筆者らは、地震発生から約4ヶ月半後の7月下旬に、強震観測¹⁰⁾が行われている建物を含む、24階建て以上のRC系の超高層集合住宅15棟を対象にアンケート調査を実施し¹¹⁾、揺れの最中の行動難度や家具の転倒率に関する既往の研究成果と比較検討した¹²⁾。この後、10月中旬に追加調査として関東地域で第2回アンケート調査を実施し、23区内を中心に、神奈川県、千葉県、埼玉県、東京都西部

* 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)

** 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

Assist. Prof., Department of Architecture, Tokyo University of Science, Dr. Eng.

Prof., Department of Architecture, Tokyo University of Science, Dr. Eng.

を含む全 22 棟の超高層集合住宅のアンケート回答を得た。このような構造的被害や室内被害のデータを蓄積し、それらのデータと強震記録との対応関係を検討することは、地震時の被害予測をするうえで極めて重要である。さらに、地表や建物の強震記録から超高層集合住宅の室内被害やその地理的空間分布を推定できれば、建物や地域ごとの地震直後における被害状況の把握や、その後の復旧への迅速な対応が可能となる。筆者らは、既報¹²⁾で建物の強震記録に基づく室内被害の推定について検討しているが、建物だけでなく地表の強震記録等も用いて 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の空間分布を推定することにより、今後発生する大地震時の被害推定を行うための貴重な資料となり得る。

本稿では、最初に上記のアンケート調査の最終結果を報告するとともに、2 回目のアンケート調査で行った性別、年齢および搖れの最も建物のきしみ音等に関する追加質問項目に関する回答を分析する。次に強震記録が示されている 14 棟の超高層集合住宅について、アンケート調査による被害と建物の床応答や層間変形との対応関係を調べる。これらの関係より、強震記録がない関東地域の 8 棟の最大床応答加速度、最大床応答速度や平均層間変形角を推定するとともに、首都圏で得られた多数の強震記録を用いて、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空間分布を検討する。

2. アンケート調査の対象建物

アンケート調査を実施した超高層集合住宅の建設位置を図 1 に示す。図中には関東、関西地域に建つ 20 階建て以上の超高層集合住宅の位置と階数^{13), 14)}を併せて示した。調査対象の建物は関東および関西に建設されている 24 階建て以上の 22 棟の超高層集合住宅であり、多くは賃貸物件である。アンケート調査は 2 回に分けて行っており、第 1 回アンケート調査は地震発生から約 4 ヶ月半後の 7 月下旬に、第 2 回アンケート調査は地震発生から約 7 ヶ月後の 10 月中旬に行った。第

1 回、第 2 回アンケート調査の対象建物と配布階、回答者数を表 1、表 2 に示す。第 1 回は関東地域と関西地域の 15 棟を、第 2 回は関東地域の 7 棟を対象とした。建物ごとに住戸のある階の最下層付近を低層、最上階付近を高層、それ以外を中層とし、各層において連続した 5~8 層分の住戸を対象にアンケート用紙を配布した。建物 A-N の 14 棟では本震時の強震記録が得られており、床応答等との対応を調べるため、その階を含む、もしくは近傍の層を調査対象とした。建物 P の住戸層は 10 階以上であったため、最下層も中層に分類した。調査用紙は集合ポストに投函し、同封した返信用封筒により回答を回収した。

本稿では既報¹¹⁾で示した第 1 回アンケート回答に加え、関東地域を対象に追加で実施した第 2 回アンケート回答と、第 1 回目の締め切りを過ぎて届いた回答を合わせた最終結果を示す。また第 2 回アンケート調査では、性別、年齢に加え、建物のきしみや内装材の亀裂、家具のぶつかりによる音に関する質問等を追加しており、これらの項目に関するクロス集計も検討する。アンケートの有効回答数は 985 であり、第 1 回が関東で 348、関西で 179、第 2 回が関東で 458 となっている。回答の回収率は総配布数の 2 割程度であった。

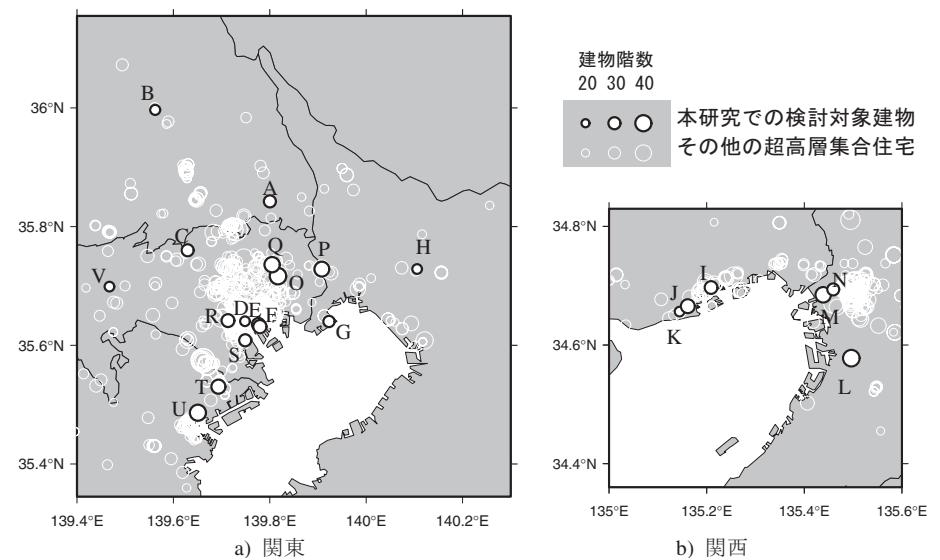


図 1 アンケート調査の対象とした超高層集合住宅の建設位置

表 1 第 1 回アンケート調査対象建物

建物の概要			アンケートの概要		
名称	地域	階数	構造	回答者の居住階	有効回答数
					本震時に住戸内にいた回答者数
A	関東	30	RC	5~9 低層	30 13
				13~18 中層	21 13
				26~30 高層	21 10
				2~6 低層	15 6
B	関東	25	RC	21, 22, 24, 25 高層	10 5
C	関東	30	RC	3~6 低層	13 8
D	関東	24	RC	26, 28~30 高層	12 7
E	関東	32	RC	3~7 低層	13 2
F	関東	33	RC	10~14 中層	10 1
G	関東	28	RC	20, 22~24 高層	7 3
H	関東	24	RC	2~6 低層	15 6
I	関西	33	RC	12~16 中層	15 5
J	関西	36	RC	22, 24~26 中層	10 4
K	関西	25	SRC	28~31 高層	13 9
L	関西	43	RC	2~6 低層	7 1
M	関西	40	S, CFT	10~15 中層	14 8
N	関西	31	RC	24, 26, 27 中層	8 6
O	関東	41	RC	36, 38~40 高層	5 3
				2, 4~6 低層	8 4
				14, 16~18 中層	9 5
				27~30 高層	10 4
				2~6 低層	15 6
				17~21 中層	18 5
				27~31 中層	20 7
				37~39, 41 高層	14 6

表 2 第 2 回アンケート調査対象建物

建物の概要			アンケートの概要		
名称	地域	階数	構造	回答者の居住階	有効回答数
					本震時に住戸内にいた回答者数
P	関東	37	RC	10~14 中層	21 9
				22~26 中層	29 8
				33~37 高層	17 8
Q	関東	38	RC	3~7 低層	18 7
				12~23 中層	18 6
				32~33 高層	25 11
R	関東	32	RC	2~8 低層	23 7
				13~16, 18~20 中層	31 14
				26~32 高層	19 5
S	関東	30	RC	2~7 低層	31 13
				14~18 中層	20 6
				23~30 高層	31 16
T	関東	35	RC	3~10 低層	23 9
				17~21 中層	13 4
				30~33, 35 高層	15 9
U	関東	40	CFT	1~6 低層	23 9
				17~23 中層	22 6
				34~40 高層	21 8
V	関東	24	RC	3~8 低層	23 12
				11~15 中層	17 7
				18~24 高層	18 8

3. アンケートの回答結果

3.1 第1回、第2回アンケート調査の最終結果

本震時における回答者の住戸滞在の有無を図2に示す。本震時に住戸内にいた回答者は約45%であった。これ以降、アンケートの回答結果は関東・関西地域、高・中・低層毎にまとめ、百分率に回答数を併記して示す。

本震時に住戸内に滞在していた回答者に対して、揺れの体感に関する質問をした。体感震度を図3に示す。なお、体感震度の質問に際して震度に関する説明はしていない。関西よりも関東で、低層よりも高層で体感震度が高くなる傾向が認められる。関東地域・高層での強震記録に基づく計測震度は震度6弱前後となっており¹⁰⁾、体感震度はこれと大きく外れるものではない。揺れの最中における行動難度^{15), 16)}に関する回答結果を図4に示す。高層ほど行動難度が高くなる傾向が認められることから、体感震度が高いほど行動難度が高くなる傾向が見られる。

揺れの最中における不安度^{15), 16)}に関する回答結果を図5に示す。関西では層による不安度の差異は明瞭ではない。関東では高層ほど不安度が高くなる傾向にあるが、体感震度や行動難度ほどの差異は見られない。関東の全ての層で、半数以上の居住者が「非常に怖かった」と回答している。

本震時に住戸内に滞在していなかった居住者を含めたすべての回

答者に対し、家具の固定状況の質問をした。タンス、冷蔵庫、本棚、食器棚等の固定の状況を図6に示す。「家具を全く固定していない」と回答した割合は、関東・関西両地域とも、全ての層で共通で60%程度であった。「ある程度していた」との回答数は20%程度であり、「十分にしていた」と回答した居住者はほとんどいなかった。

全ての居住者に対し、本震後の室内の状況に関する質問をした。タンス、冷蔵庫、食器棚等の移動状況を図7に示す。これらの家具類の移動は、関西より関東で多い。「全く動いていない」と回答した居住者の割合は関東の低層で70%以上であり、関東の高層では40%程度である。「多くのものが転倒または大きく移動した」と回答した居住者は、地域によらず全ての層で極めて少ない。関東地域において、「一部転倒または移動した」と回答した居住者の割合は高層ほど多くなっている。

食器、本、テーブル上の小物等の散乱状況を図8に示す。タンスや食器棚等の移動の傾向と同様、関西より関東で小物の移動・散乱が多い。「全く動いていない」の回答数の割合は関東の低層で50%程度、関東の中層および高層で30%程度である。「ある程度動き散らし、落ちたり壊れたりした」～「たくさんのが散らし、落ちたり壊れたりした」と回答した居住者の割合は、家具の移動の傾向と同様、高層階ほど多くなる。

全ての居住者に対し、室内的内装材等、壁紙の亀裂の状況や柱、

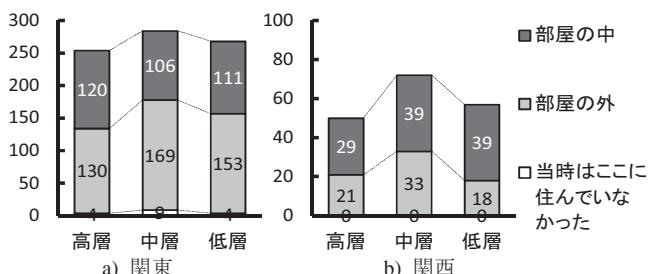


図2 有効回答数と本震時における住戸滞在の有無

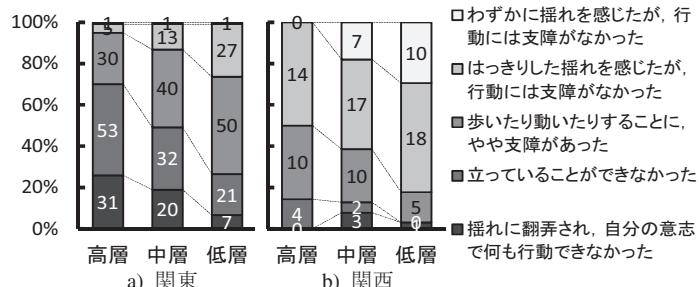


図4 あなたの感じた地震の揺れの大きさは、どのくらいでしたか。(行動難度)

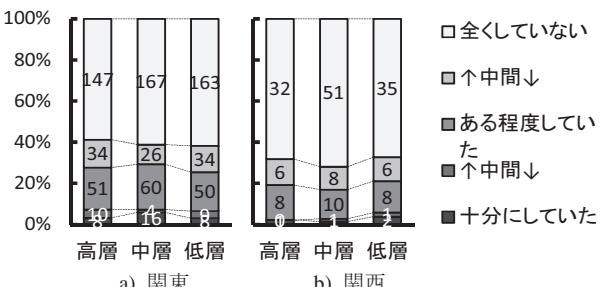


図6 タンス、冷蔵庫、本棚、食器棚などは動かないように固定していましたか。

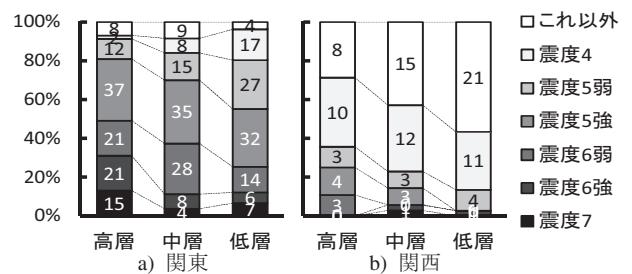


図3 お住まいはどの程度の揺れを感じましたか。(体感震度)

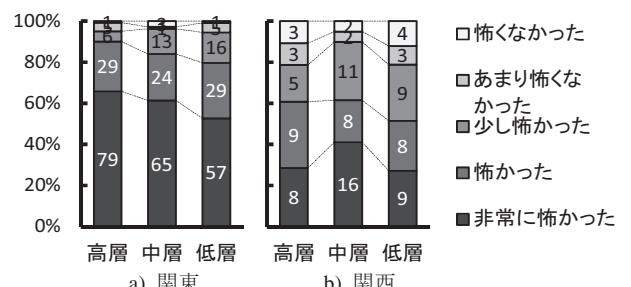


図5 大きな揺れの間は、怖いと感じましたか。(不安度)

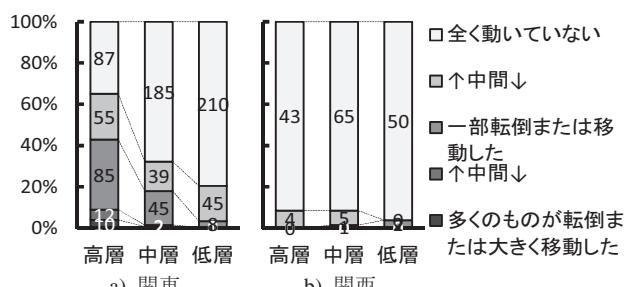


図7 タンス、冷蔵庫、食器棚などはどうなりましたか。

壁、梁等のコンクリート部分の亀裂の状況について質問した。それらの回答結果を図9、10に示す。関西では壁紙やコンクリート部の亀裂はほとんど見られない。これに対し、関東では亀裂が多く見られ、内装材、コンクリート部分とも、低層階ほど亀裂が多くなっている。この傾向は、体感震度（図3）や行動難度（図4）、家具や小物の移動（図7、8）の傾向と異なる。図3～10に示した最終結果は、第1回アンケート調査結果の傾向¹¹⁾と大きく異なるものではない。

3.2 第2回アンケート調査結果に基づく考察

関東地域を対象とした第2回アンケート調査では、本震および余震時における建物のきしみや内装材の亀裂、家具の衝突等による音に関する質問を追加した。その回答結果を図11に示す。頻繁に音を聞いたと回答した居住者の割合は低層階ほど多く、壁紙やコンクリート部分の亀裂の状況（図9、10）と同様な傾向となっている。

「揺れの最中に音を聞いた」と回答した居住者に対する、音を聞いた際の不安度に関する回答結果を図12に示す。高層階と中層階で「怖かった」と回答した居住者の割合は同程度である。低層階の音による不安度は、中・高層階のそれより高い。低層階できしみ音を聞いた頻度が高い（図11）ことから、その音を聞くことによって居住者の不安度が増した可能性が示唆される。

第2回アンケートで調べた性別や年齢を利用して、これらによる行動難度および不安度の違いを検討する。検討に際し、各質問項目

の回答を表3に示すように数値化し、各建物・各層ごとに平均した値を用いた。なお、ここでは回答数が3未満の建物・層は除外した。男性と女性の行動難度の関係を図13に、男性と女性の不安度の関係を図14に示す。女性の行動難度は男性よりわずかに高い傾向を示すものの、両者の差異は極めて小さい。一方、女性の不安度は男性のそれより高い傾向にある。高橋ら^{15)、16)}は、一軸正弦波加振による振動台搭乗実験を行って被験者にアンケート調査を実施し、揺れの最中の行動難度および不安度について検討している。その結果、女性の行動難度（避難行動不可能率¹⁷⁾は男性より高い傾向にあり、不安度の男女差は行動難度ほど大きくなことを報告している。この検討結果に対し、本調査では行動難度の男女差は極めて小さく、女性の不安度は男性より高くなつた。

20～30代の行動難度と40～80代のそれの関係を図15に、20～30代の不安度と40～80代のそれの関係を図16に示す。行動難度、不安度とも、40～80代より20～30代の方がわずかに高い傾向を示すものの、年齢による差異は極めて小さい。

次に、揺れの最中の音と内装材およびコンクリート部の亀裂の関係を考察する。表3に示した音を聞いた頻度に対し、4～2を「頻繁に音を聞いた回答者」とし、1～0を「音をあまり聞いていない回答者」としてそれぞれグループに分け、両グループの音を聞いた際の不安度（図12）の関係を図17に示す。不安度は表3に示した値

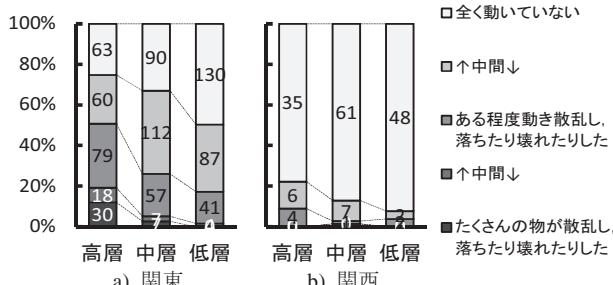


図8 食器、本、テーブル上の小物等はどうなりましたか。

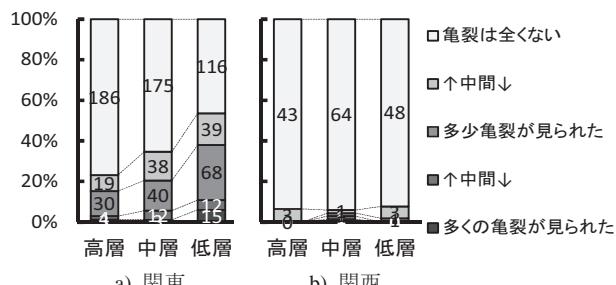


図10 柱、壁、梁などのコンクリート部分に亀裂は見られましたか。

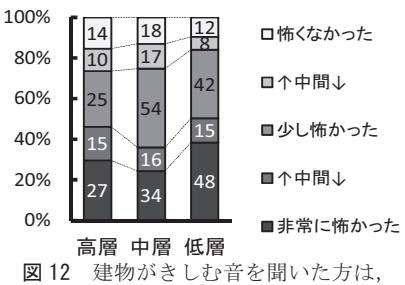


図12 建物がきしむ音を聞いた方は、どのように感じましたか。

表3 質問項目と数値				
	行動難度	不安度	音を聞いた頻度	内装材およびコンクリート部の亀裂
揺れに翻弄され、自分の意志で何も行動できなかった	非常に怖かった	非常に怖かった	かなり頻繁に大きな音を聞いた	多くの亀裂が見られた
立っていることができなかった	怖かった	↑中間↓	↑中間↓	↑中間↓
歩いたり動いたりすることに、やや支障があった	少し怖かった	頻繁に音を聞いた	多少亀裂が見られた	2
はつきりした揺れを感じたが、行動には支障がなかった	あまり怖くなかった	↑中間↓	↑中間↓	1
わずかに揺れを感じたが、行動には支障がなかった	怖くなかった	あまり聞いていない	亀裂は全くない	0

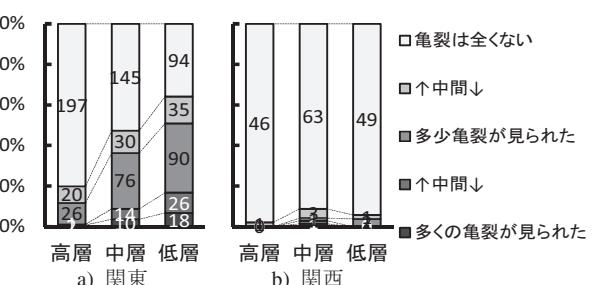


図9 室内の壁紙等の内装材に亀裂は見られましたか。

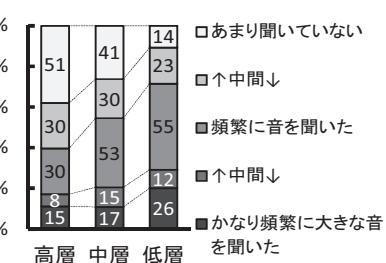


図11 本震や余震のとき、建物がきしんだり、内装材が壊れたり、家具がぶつかる音を聞きましたか。

で評価して各建物の層ごとに平均した。音をあまり聞いていない回答者の不安度は概ね0~3となっているのに対し、頻繁に音を聞いた回答者の不安度は2~4となっている。ほぼ全ての層で、頻繁に音を聞いた回答者の不安度の方が、あまり音を聞いていない回答者の不安度より高い。このことから、揺れの最中に建物のきしみ音や家具等がぶつかる音を聞いたことによって、居住者の不安度が高くなつた可能性が指摘される。

回答者の居住階別の家具の衝突や建物のきしみによる音を聞いた頻度と内装材の亀裂の関係を図18に、きしみ音とコンクリート部の亀裂の関係を図19に示す。図中には相関係数(r)も併記している。低層ほど亀裂を認めた程度と音を聞いた頻度が高くなる傾向にある。音と亀裂の相関係数は、内装材で0.67、コンクリート部で0.65であり、正の相関関係が見られる。本震や余震時に発生した音が内装材・コンクリート部の亀裂によっても生じている可能性が示唆される。

4. 建物別の室内被害の検討

検討対象建物は階数が各建物で異なり、建設位置も沿岸部や内陸部と様々である。このことから、建物や層によって揺れの大きさや体感が異なると考えられる。前項での検討と同様に、表4に示すように家具等の転倒率を設定し、各建物・各層ごとに平均した値を用いて検討した。

関東地域における建物を対象とした時の、回答者の居住階と家具等の転倒率の関係を図20に示す。図中のアルファベットは建物の名称を表す。第1回アンケート調査の対象建物の居住階は、強震観測が行われている階を示している。第2回調査の対象建物の居住階は、低層部を1階、高層部を各建物の最上階、中層部を調査対象とした5~8層の中間階を示している。低層階より高層階で家具等の転倒率が高い傾向は共通に見られる。家具類の移動は、建物A、B、E、G、Hの高層階で多く見られる。ここには示していないが、テレビ、電子レンジ、テーブル、ベッド、椅子等の移動傾向も同様であった。食器・本・テーブル上の小物等についても同様である。建物EやPでは中間層で結果が逆転する傾向も見られ、後述する強震記録の最大加速度・最大速度が中間層で逆転することに対応する。

関東地域における建物を対象と

した時の、回答者の居住階と亀裂の関係を図21に示す。亀裂の状況は、表3に示した数値で評価し、層ごとに平均して用いた。全ての建物において、内装材とコンクリート部の亀裂は高層階より低層階で多い。特に、建物Gの低層階における亀裂は極めて多い。建物T、Uは、家具等の移動・転倒は少なかった(図20)が、壁紙やコンクリート部の亀裂は多くなっている。建物Eの亀裂も比較的多い。

5. 建物の応答と被害の推定

5.1 最大床応答と行動難度、家具の転倒率の関係

アンケート調査結果に基づき、最大床応答¹²⁾と行動難度、家具の転倒率の関係を調べる。第1回アンケート調査では、回答者の性別や年齢を質問していないが、第2回アンケート調査結果では、不安度については男女差が見られたものの、揺れの最中の行動難度は年齢や性別による差異は極めて小さかった。このことから、アンケート調査による行動難度と家具の転倒率を用い、実測による建物応答との関係付けを試みた。

建物応答の推定は、図4に示した行動難度と図7に示したタンス・冷蔵庫・食器棚等の転倒率を説明変数、建物A-Nの強震記録^{10), 12)}から得られた床応答の最大加速度および最大速度をそれぞれ目的

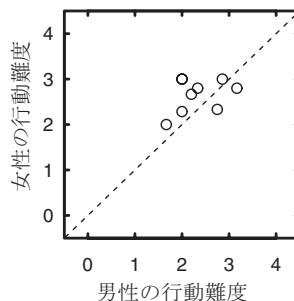


図13 男性と女性の行動難度の関係

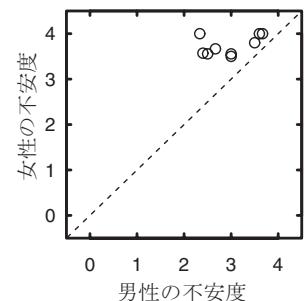


図14 男性と女性の不安度の関係

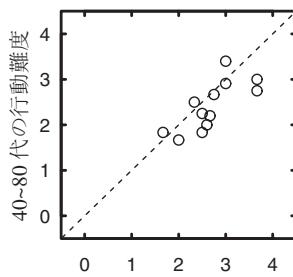


図15 20-30代と40-80代の行動難度の関係

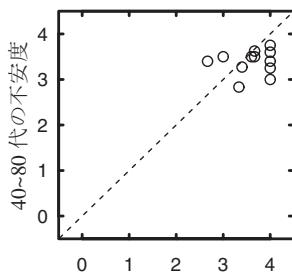


図16 20-30代と40-80代の不安度の関係

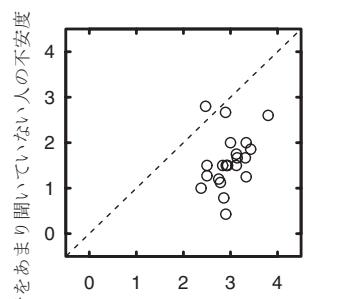


図17 音を聞いた頻度による不安度の比較

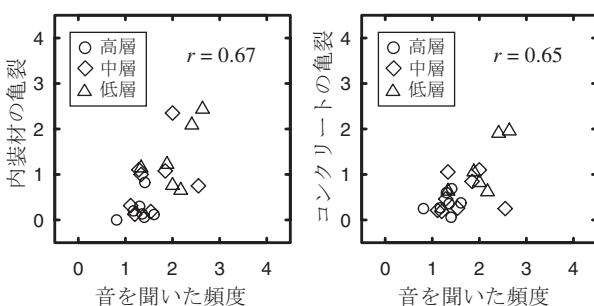


図18 音を聞いた頻度と内装材の亀裂の関係

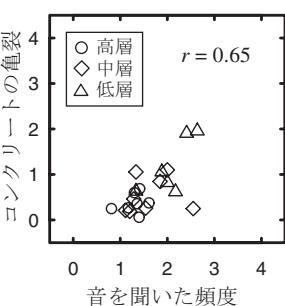


図19 音を聞いた頻度とコンクリート部の亀裂の関係

表4 家具等の移動・転倒に関する質問項目と転倒率

タンス、冷蔵庫、食器棚等	食器、本、テーブル上の小物等	転倒率
多くのものが転倒または大きく移動した	たくさんの物が散乱し、落ちたり壊れたりした	0.8
↑ 中間 ↓	↑ 中間 ↓	0.6
一部転倒または移動した	ある程度動き散乱し、落ちたり壊れたりした	0.4
↑ 中間 ↓	↑ 中間 ↓	0.2
全く動いていない	全く動いていない	0

変数とし、薄板スプライン平滑化手法¹⁸⁾により行う。最大加速度および最大速度は、水平2方向の合成最大値を利用した。行動難度と家具の転倒率および薄板スプライン法で求めた床応答加速度の関係を図22に、それらと床応答速度の関係を図23に示す。なお、ここでは外れ値の影響を排除するために、回答数が3以下の層は除外した¹²⁾。加速度および速度が大きくなるほど、行動難度および家具の転倒率が高くなる傾向にあることが分かる。

強震記録の最大加速度と推定された加速度の関係を図24に、強震記録の最大速度と推定された速度の関係を図25に示す。図中には、両者の相関係数を併記している。若干のばらつきはあるものの、観測記録と推定結果の相関係数は加速度で0.95、速度で0.97と極めて高い。のことから、超高層集合住宅でのアンケート調査における行動難度と家具の転倒率を用いて、床応答の最大加速度と最大速度を概ね良好に推定可能と判断される。

5.2 最大平均層間変形角と壁紙等の亀裂、応答スペクトルの関係

建物A-Nの強震記録から求めた最大平均層間変形角¹⁹⁾(以降、IDAと記す)と、アンケート調査による壁紙等の亀裂の関係を調べた。IDAは、建物頂部の建物最下部に対する相対変位を、2地点間の高さで割って求め、水平2方向のうち最大となる値をとった。壁紙等の亀裂は、各建物の低層階のアンケート回答結果を、表3に示した値で評価して各建物の層ごとに平均した。両者の関係を図26に示す。相関係数は0.93であり、IDAが大きくなるほど壁紙の亀裂が多くなる傾向が認められる。ここで、アンケート調査による壁紙の亀裂CとIDAの関係を、ワイルブル分布に基づく次式により近似する。

$$C = 4 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{IDA}{4.59 \times 10^{-3}} \right)^{1.82} \right] \right\} \quad (1)$$

同図に示す近似曲線は両者の関係を概ね再現している。

次に1階もしくは基礎位置での強震記録と最大平均層間変形角の関係を調べる。強震記録の指標として、擬似速度応答スペクトル(h=5%)を利用した。このときの周期は、本震時における本調査で対象とした各建物の1次固有周期を参照した。その際、各建物の最下層の強震記録を入力とし、中層階および高層階の強震記録を出力として、本震時における強震記録に対して20秒間ごとに部分空間法によるシステム同定²⁰⁾を行い、建物の1次固有周期の時間変化を求めた¹⁰⁾。強震記録の初期部から推定した初期固有周期と、地震動主要動部により伸びた固有周期の最大値の関係を図27に示す。初期固有周期に対し、最大固有周期は最大で1.5倍程度である。各建物の最大固有周期は1.5-3.5秒となっている。

建物への有効入力動の周期特性が建物の応答と被害に及ぼす影響を検討するため、建物最下層の強震記録における建物固有周期付近の擬似速度応答スペクトル振幅と建物の平均層間変形角の関係を検討する。建物の最大固有周期は1.5-3.5秒であった(図27)ことをふまえ、建物最下層の強

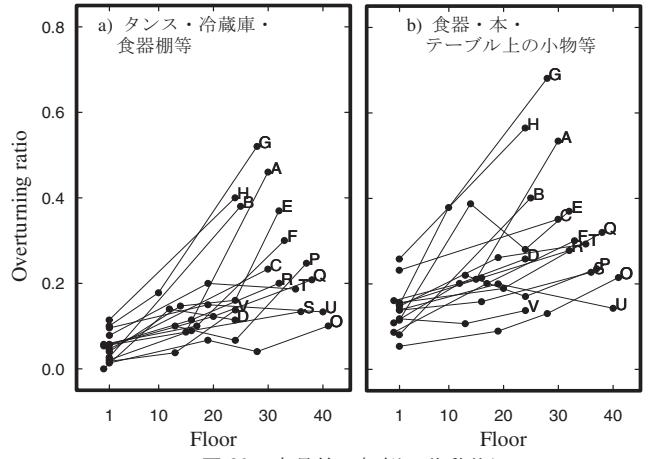


図20 家具等の転倒・移動状況

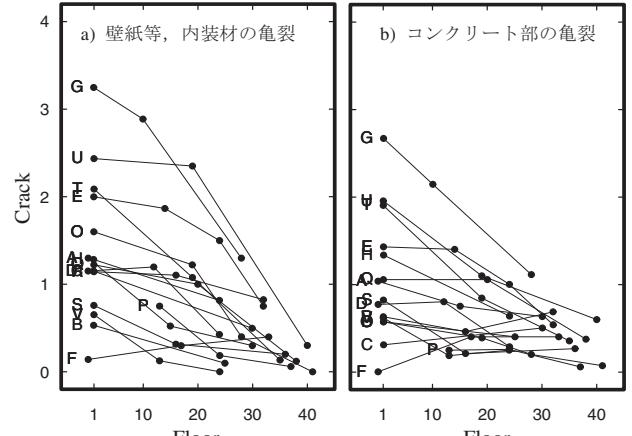


図21 内装材およびコンクリート部の亀裂の状況

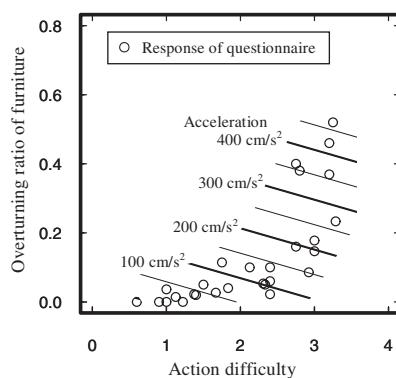


図22 行動難度と家具の転倒率および床応答加速度の関係

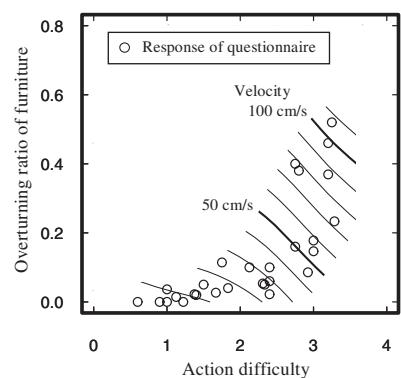


図23 行動難度と家具の転倒率および床応答速度の関係

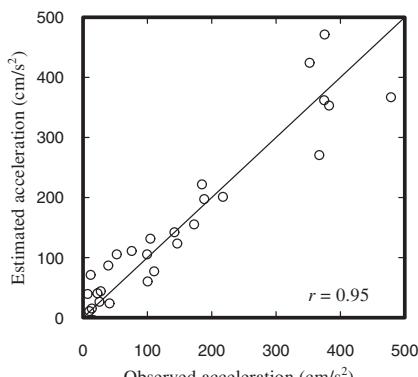


図24 強震記録の最大加速度と推定最大加速度の関係

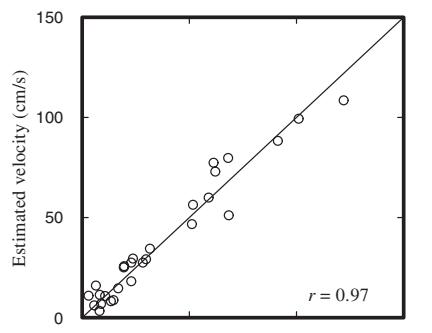


図25 強震記録の最大速度と推定最大速度の関係

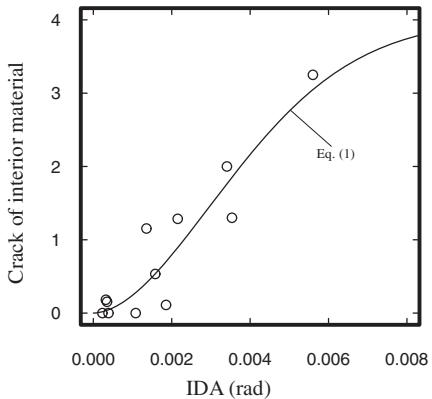


図 26 平均層間変形角と内装材の亀裂の関係

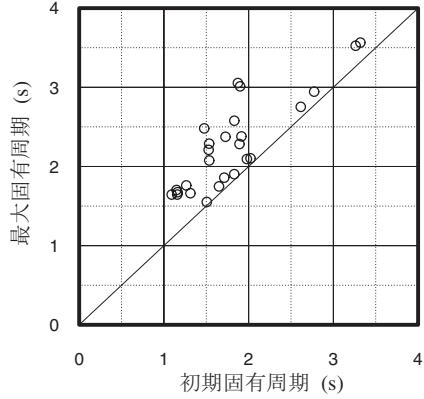


図 27 初期固有周期と最大固有周期の関係

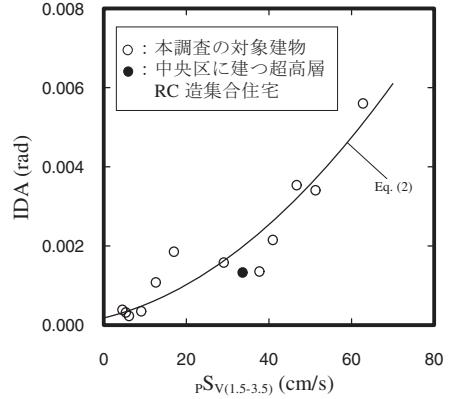


図 28 周期 1.5~3.5s における擬似速度応答スペクトルの平均値と平均層間変形角の関係

震記録の指標として、擬似速度応答スペクトル($h=5\%$)の周期 1.5~3.5s の区間の振幅を用いて評価する。擬似速度応答スペクトルは 0.02s 刻みで評価し、上記区間の振幅の平均値を水平 2 方向でそれぞれ求め、そのうちの大きい値を参照した。以降、これを $pS_{V(1.5-3.5)}$ と記す。IDA と $pS_{V(1.5-3.5)}$ の関係を図 28 に示す。 $pS_{V(1.5-3.5)}$ の増加に伴い、IDA も増加する。ここで、両者の関係を以下のように近似した。

$$IDA = (9.23 \times 10^{-4} \times pS_{V(1.5-3.5)} + 1.35 \times 10^{-2})^2 \quad (2)$$

この式の形は、速度スペクトル一定領域における弾塑性 1 質点系の層間変位と速度スペクトル値の関係式²¹⁾を参考した。近似曲線は両者の関係を良好に再現しており、 $pS_{V(1.5-3.5)}$ から IDA を良好に推定できると考えられる。中央区に建つ超高層 RC 造集合住宅の強震記録²²⁾から評価した IDA と $pS_{V(1.5-3.5)}$ の関係を図 28 に黒丸で示すが、これも式(2)に近い値を示す。(1), (2)式を用いて、 $pS_{V(1.5-3.5)}$ から本地震で発生した壁紙の亀裂状況を推定することが期待できる。

5.3 アンケート調査結果に基づく建物の床応答推定

以上の考察に基づき、アンケート調査の回答結果から、本震時ににおける建物の床応答等を推定した。関東地域に建つ建物 A-H, O-V のアンケート調査結果（行動難度、家具の転倒率）から、図 22, 図 23 を利用して推定した建物の最大応答加速度分布、速度分布を図 29, 図 30 に示す。アンケートの回答数が 3 以下の層は×で示した。建物 A-H については、強震記録の最大値分布を比較して示した。また同図には首都圏地震観測網（MeSO-net²³⁾）のうち、建設地点に最も近い地点における最大加速度、速度を併せて示す。MeSO-net は GL-20m の地中に設置されており、参考程度ではあるが、杭基礎、連壁、地下階等の拘束効果により短周期側の入力が低減する超高層集合住宅への入力動の目安とすることができる。

本震時の強震記録が得られている建物 A-H では、アンケート結果からの推定値により、最大床応答が概ね再現されている。また最下層の床応答は、建設地点に最も近い MeSO-net の最大値と同じ振幅レベルとなっている。強震記録の得られていない建物 O-V の最下層の床応答についても、建物 O の最大速度を除き、最も近い MeSO-net の最大値と振幅レベルは整合しており、アンケート結果に基づく最大床応答の推定値は概ね妥当であると判断される。強震記録が得られている建物 A-H では、頂部の最大加速度が 350cm/s^2 を超える建物が多い。一方、建物 O-V ではそれよりもやや小さめの 200cm/s^2 前後

となっているが、中央区に建つ超高層 RC 造集合住宅の頂部での最大加速度が 198cm/s^2 となっている²⁴⁾ことから、これと大きく外れるものではない。筆者らは既報¹²⁾において、床応答の最大加速度または最大速度が大きいほど揺れの最中の行動難度や家具の転倒率が高くなることを示した。図 29, 30 に示すように、本研究での全ての検討対象建物の最大加速度・最大速度は低層階より高層階で大きく、低層階より高層階で行動難度や家具の転倒率が高かった（図 4, 7）ことと対応している。建物 E の最大加速度や建物 P の最大加速度および最大速度は中間層で逆転しており、高次モードの影響が認められる。これから、建物 E, P において家具等の移動・転倒が中間層で逆転した（図 20）要因は高次モードの影響であると考えられる。

MeSO-net 観測地点および検討対象建物の震源距離と最大加速度の関係を図 31 に示す。震源距離の算定には、気象庁による震源データ（北緯 38 度 6.2 分、東経 142 度 51.6 分、深さ 24km）を用いた。検討対象建物の最大加速度は 1 階または地下階のものを示しており、建物 A-H は観測値を、建物 O-V は図 22 を利用して推定した値を示している。震源距離が大きいほど MeSO-net の最大加速度は小さくなる傾向を示す。建物の最大加速度は推定値において若干のばらつきがあるものの、MeSO-net の強震記録と同様の傾向を示す。

建物頂部の最大応答加速度の空間分布を図 32 に示す。建物 A-H については、建物頂部の強震記録の最大値を示した。同図には MeSO-net で得られた最大加速度を併せて示す。本震の震源に近い建物 H では頂部加速度も大きい。同じ首都圏内ではあっても、場所により頂部応答レベルの大きさは異なる。

5.4 アンケート調査結果に基づく最大平均層間変形角と被害推定

次に関東地域に建つ建物 O-V のアンケート調査による壁紙等の亀裂状況から、式(1)を利用して推定した最大平均層間変形角(IDA)を図 33 に示す。建物 A-H については、強震記録による IDA を示した。同図には首都圏で得られた強震記録を利用し算定した $pS_{V(1.5-3.5)}$ を併せて示した。利用したデータは MeSO-net の他、K-NET, KiK-net²⁵⁾, 港湾地域強震観測²⁶⁾, 気象庁²⁷⁾, 建築研究所²⁴⁾, 東京都港湾局²⁸⁾, 産業技術総合研究所²⁹⁾, 國土技術政策総合研究所・地震防災研究室(MLIT)³⁰⁾, 工学院大学³¹⁾, 首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net)³²⁾, 東京電力³³⁾の強震記録である。建築研究所、東京電力等では、建物の 1 階もしくは地下階での記録も含まれる。ただし、周期 1.5~3.5s の範囲では、地中や建物基礎等による拘束効果の影響は小さいもの

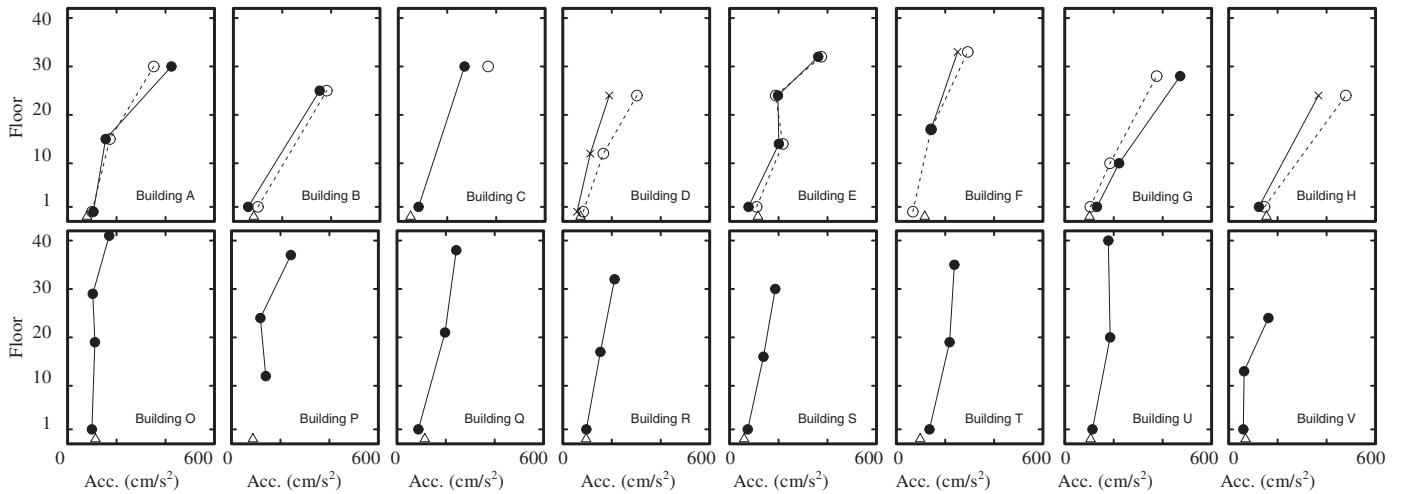


図 29 アンケート調査結果から推定した最大加速度の高さ方向の分布
(● : アンケート結果に基づく推定値, ○ : 観測値,
△ : MeSO-net の最近傍地点の最大加速度, × : アンケート回答数 3 以下)

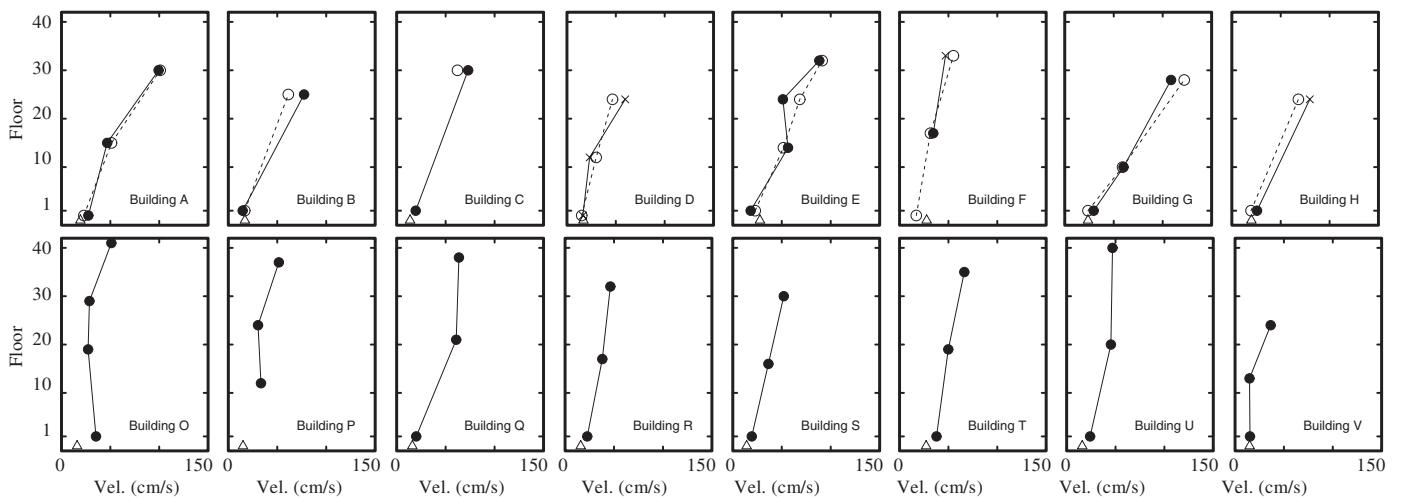


図 30 アンケート調査結果から推定した最大速度の高さ方向の分布
(● : アンケート結果に基づく推定値, ○ : 観測値,
△ : MeSO-net の最近傍地点の最大速度, × : アンケート回答数 3 以下)

と考えられる。

東京湾沿岸部に位置する建物 E, G, T, U の平均層間変形角が比較的大きい。このことは、これらの建物の低層階で亀裂が多く認められた(図 21)ことと対応する。強震記録の $pS_{V(1.5-3.5)}$ は、内陸部で小さく東京湾沿岸部で高い傾向にある。建物の最大平均層間変形角はその傾向と概ね対応していることから、東京湾沿岸部における超高層集合住宅の 1 次固有周期付近の揺れが大きかったため、層間変形角が大きくなり、低層階で亀裂が多く認められたものと推察される。

首都圏の微地形区分^{34), 35)}を図 34 に、(1), (2)式に基づき首都圏で得られた強震記録の $pS_{V(1.5-3.5)}$ から推定した壁紙等の亀裂の状況の空間分布を図 35 に示す。亀裂の推定値は首都圏の内陸部では小さいが、東京湾沿岸部では大きくなっている。微地形区分における埋立地や江戸川、多摩川下流域の三角州に対応する地域で大きい。東京湾沿岸部の埋立地を中心とする地域に建つ超高層集合住宅の低層部では、表 3 の「多少亀裂が見られた」と同程度もしくはそれ以上

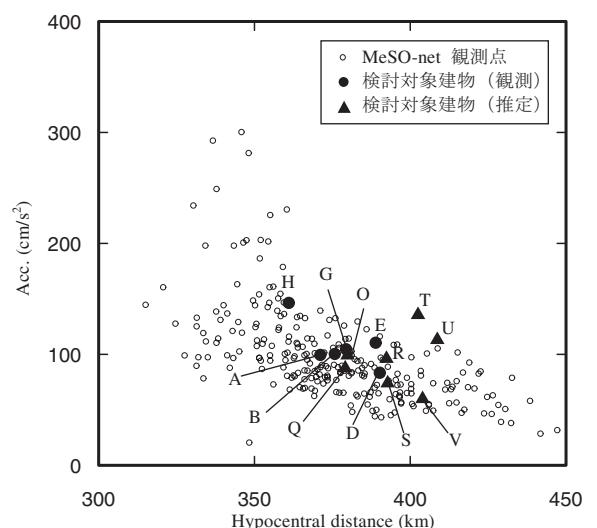


図 31 MeSo-net 観測点および検討対象建物の
震源距離と最大加速度の関係
(検討対象建物は 1 階または地下階の最大加速度,
アルファベットは検討対象建物名)

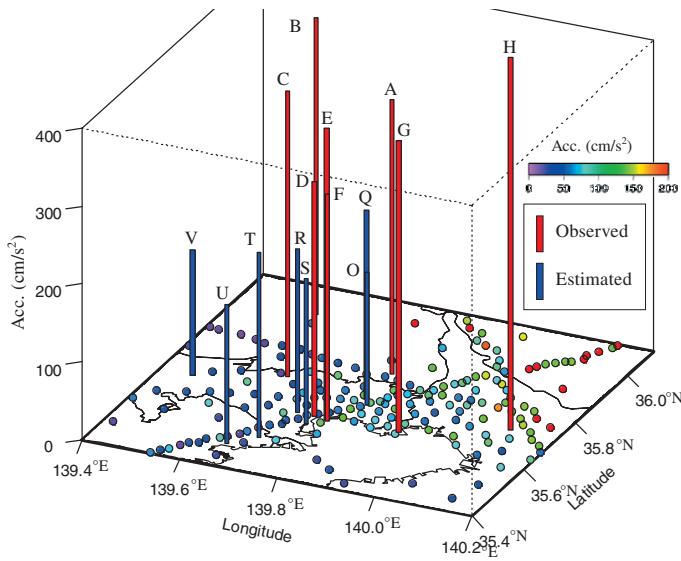


図 32 建物頂部の最大加速度と強震記録(MeSO-net)の最大加速度

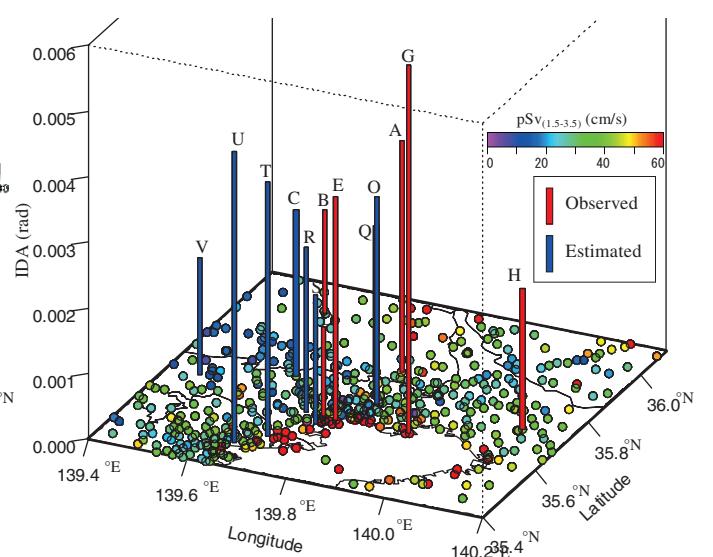


図 33 建物の最大平均層間変形角(IDA)と強震記録の擬似速度応答スペクトル $pSV_{(1.5-3.5)}$

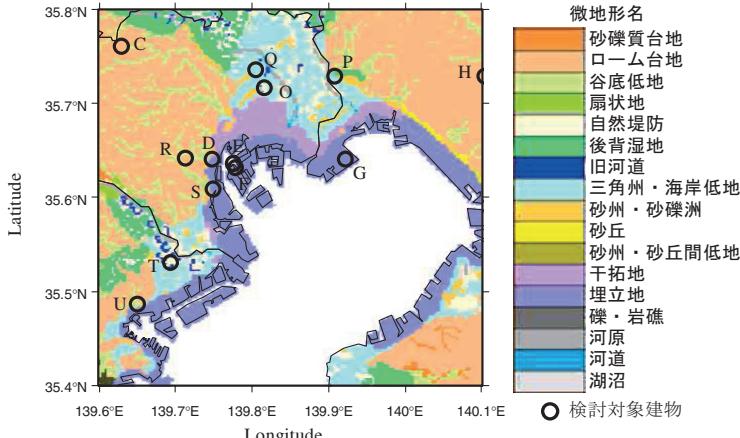


図 34 微地形区分^{34), 35)}と建物の建設位置

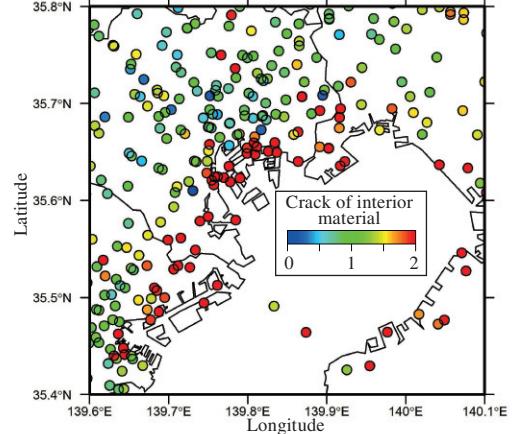


図 35 $pSV_{(1.5-3.5)}$ から推定した壁紙の亀裂の空間分布

の被害が発生したものと推定される。

6. 結論

関東、関西地域に建つ 22 棟の超高層集合住宅の居住者を対象に、2011 年東北地方太平洋沖地震における居住者の不安度や行動難度、家具の転倒状況に関するアンケート調査結果を分析した。その最終結果をまとめるとともに、2 回目のアンケート調査の追加項目について、集計結果を分析した。次に強震記録が得られている 14 棟の建物を対象に、アンケート回答による室内被害と床応答加速度などの建物応答との関係を検討した。これらの結果に基づき、本震時に強震記録が得られていない関東地域の 8 建物の床応答等を推定するとともに、首都圏で得られた多数の強震記録を用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震における超高層集合住宅の室内被害の空間分布を検討した。得られた知見を以下に示す。

1) 本震の最中における体感震度や行動難度は高層ほど高く、家具や小物の移動・散乱も高層ほど多かった。これは、床応答の最大加速度・最大速度は低層より高層で大きかったためである。一方、室内的壁紙やコンクリート部の亀裂は低層で多かった。この傾向

は第 1 回目のアンケート調査結果と同じであった。

- 2) 本調査における行動難度および不安度の性別による差異は既往の振動台搭乗実験結果と異なる傾向を示し、男性と女性の行動難度は同程度で、女性の不安度は男性より高い傾向を示した。
- 3) 本震や余震時に建物のきしみ音等を頻繁に聞いた回答者の不安度は、あまり音を聞いていない回答者より高く、これらの音によって不安感が増幅されたと考えられる。きしみ音と内装材・コンクリート部の亀裂の間には正の相関関係が見られ、きしみ音が内装材やコンクリート部の亀裂によって生じている可能性がある。
- 4) アンケート調査による行動難度、家具の転倒率から、建物の最大応答加速度および速度の高さ方向の分布を推定した。最下層の床応答は建物近傍の MeSO-net 記録と概ね同レベルにあることや、頂部応答は関東の震源に近い地域で大きく、震源から遠い地域で小さく、同じ首都圏でも床応答レベルに差異があることを示した。
- 5) アンケート調査による建物低層部の壁紙等の亀裂と、最大平均層間変形角、周期 1.5~3.5s 区間の擬似速度応答スペクトル($h=5\%$)の平均値との関係から、最大平均層間変形角が関東の内陸部で小さく、東京湾沿岸部で大きくなる傾向を示した。

- 6) 東京湾沿岸部の埋立地を中心とした地域に建つ超高層集合住宅の低層部では、アンケート調査の「多少亀裂が見られた」と同程度もしくはそれ以上の被害が発生したものと推定される。

謝辞

本研究で利用した超高層集合住宅の強震記録データは、UR と大林組、鹿島、鴻池組、戸田建設、ハザマ、前田建設工業各社との共同観測により得られたものであります。また本検討では、防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET,KiK-net)，国土交通省港湾局・独立行政法人港湾空港技術研究所：港湾地域強震観測、気象庁、独立行政法人建築研究所、東京都港湾局、産業技術総合研究所、国土技術政策総合研究所・地震防災研究室、工学院大学、東京大学地震研究所・首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net)，東京大学地震研究所・首都直下地震防災・減災特別プロジェクト(MeSO-net)，東京電力の各強震記録を利用させていただきました。貴重なデータの提供にご協力を頂きました関係各位に、ここに記して感謝の意を表します。アンケート調査は、日本建築学会・長周期建物地震対応小委員会（委員長：東京理科大学・北村春幸教授）の下で実施されました。アンケートに回答していただいた超高層集合住宅の居住者の皆様には大変貴重なご意見をいただきました。元東京理科大学学生の秋元沙織君、連辰徳君には、アンケートデータの集計作業を行っていただきました。千葉大学の高橋徹教授には、本調査結果について議論していただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, 2011. 11
- 2) 翠川三郎・三浦弘之・堀 苑子・鹿嶋俊英: 2011年東北地方太平洋沖地震における東京の超高層マンションでの揺れに関するアンケート調査, 地域安全学会梗概集 No.28, 2011. 5
- 3) 東京消防庁予防部: 東京消防庁管内における東北地方太平洋沖地震時の対応状況等の調査結果, 2011.8
<http://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-adati/tohokujishintaiou.pdf>(2012.5.6 確認)
- 4) 久保智弘、久田嘉章、相澤幸治、大宮憲司、小泉秀斗: 2011年東日本大震災における新宿西口・超高層建物のアンケート調査（その1）工学院大学新宿校舎における揺れとアンケート震度調査, 第8回日本地震工学会大会梗概集, pp. 36-37, 2011. 11
- 5) 新藤淳、平本達也、村上正浩、久田嘉章: 2011年東日本大震災における新宿西口・超高層建物のアンケート調査（その2）事業者を対象とした被害と初動対応に関するアンケート調査, 第8回日本地震工学会大会梗概集, pp. 38-39, 2011. 11
- 6) 金子美香・田村和夫・北村春幸・斎藤大樹: 東日本大震災における東京の高層住宅での室内被害および対応行動に関するアンケート調査, シンポジウム 東日本大震災からの教訓、これからの新しい国つくり, C1-3, pp.487-490, 日本建築学会, 2012.3
- 7) Saito, T.: Damage of buildings and actions taken during the 2011 great east Japan earthquake in the disaster prevention facilities, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, pp. 1250-1257, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan
- 8) 気象庁・長周期地震動に関する情報のあり方検討会, 気象庁地震火山部: 長周期地震動に関する情報のあり方報告書, 2012. 3
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tyoshuki_kentokai/hokoku/tyoshukikento_hokoku.html(2012.5.6 確認)
- 9) 北浦かほる、北原昭男: 地震時における建築内部空間の安全性, 京都大学防災研究所の助成による研究集会, pp. 13-18, 1997. 1
- 10) 永野正行、肥田剛典、田沼毅彦、渡辺一弘: 2011年東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく超高層集合住宅の動特性評価, 第8回日本地震工学会大会梗概集, pp. 32-33, 2011. 11
- 11) 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, 第 8 回日本地震工学会大会梗概集, pp. 34-35, 2011. 11
- 12) 肥田剛典、永野正行: アンケート調査と強震記録に基づく 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－不安度と行動難度および家具の転倒率の検討－, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 77, No. 677, pp. 1065-1072, 2012. 7
- 13) BLUE STYLE COM, <http://www.blue-style.com/index.html> (2012.5.6 確認)
- 14) 東京理科大学 寺本研究室: ビルディングレターに基づく高層建築物のデータベース
- 15) 高橋徹、貞弘雅晴、斎藤大樹、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
- 16) Takahashi, T., Suzuki, T., Saito, T., Azuhata, T. and Morita, K.: Shaking Table Test for Indoor Human Response and Evacuation Limit, journal of 5th International Conference on Earthquake Engineering, pp. 187-193, 2010. 3
- 17) 小谷俊介: 建築物内にいる人間の避難行動限界を考慮した構造性能指標の実用化に関する研究, 平成 17 年度～19 年度科学研究費補助金（基盤研究(B)）研究成果報告書, 2008
- 18) Fred L. Bookstein: Principal warps: Thin Plate Spline and the decomposition of deformations, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 11, No. 6, pp. 567-585, 1989. 11
- 19) 日本建築学会: 長周期地震動対策に関する公開研究集会, 2012. 3
- 20) 片山 徹: システム同定一部分空間法からのアプローチ, 朝倉書店, 2004.
- 21) 岡野創・宮本裕司: 等価線形化法に基づく応答評価式－エネルギーバランスに基づく考察と限界変形の超過確率の評価への適用－, 日本建築学会構造系論文集, 第 562 号, pp.45-52, 2002. 12
- 22) 日本免震構造協会応答制御建築物調査委員会: 6. 制振構造調査部会報告書 制振構造の地震応答および耐震構造との比較, 付録 B, 建物 D18, 2012.1
- 23) 笠原敬司・酒井慎一・他: 首都圏地震観測網(MeSO-net), 日本地震学会講演予稿集, 2011 年度秋季大会, P1-62, 2011.10
- 24) 独立行政法人建築研究所, <http://smo.kenken.go.jp/ja/smn> (2012.5.6 確認)
- 25) 防災科学技術研究所: 強震観測網(K-NET,KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2012.5.6 確認)
- 26) 國土交通省港湾局・独立行政法人港湾空港技術研究所: 港湾地域強震観測, <http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm> (2012.5.6 確認)
- 27) 気象庁: 強震波形 (平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震)
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/jishin/110311_tohokuchohi-taiheiyouki/index.html (2012.5.6 確認)
- 28) 東京都港湾局: 東京都港湾局地震観測所,
<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/business/kisojoho/jishindou.html> (2012.5.6 確認)
- 29) 産業技術総合研究所: 臨海副都心センター & 中川低地帯強震観測網 <http://tarō.eri.u-tokyo.ac.jp/saigai/20110311eq/data.html> (2012.5.6 確認)
- 30) 國土技術政策総合研究所・地震防災研究室: 河川・道路等施設の地震計ネットワーク,
<http://www.nilim.go.jp/japanese/database/nwdb/index.htm> (2012.5.6 確認)
- 31) 工学院大学: 地震動観測データ公開ページ,
http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/example/index_EQ_tohoku_taiheiyo_set1.html (2012.5.6 確認)
- 32) 東京大学地震研究所: 首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net)
<http://www.sknet.eri.u-tokyo.ac.jp/> (2012.5.6 確認)
- 33) 植竹富一: 2011 年東北地方太平洋沖地震による東京湾岸地域の長周期地震動, 日本地震学会講演予稿集, 2011 年度秋季大会, P2-19, 2011.10
- 34) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション(J-SHIS),
<http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2012.8.20 確認)
- 35) 若松加寿江、松岡昌志: 地形・地盤分類 250m メッシュマップ全国版の構築, 日本地震工学会大会-2008 梗概集, pp. 222-223, 2008

(2012年5月10日原稿受理, 2012年10月10日採用決定)