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－

INDOOR DAMAGES OF SUPER HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE BASED ON STRONG MOTION RECORDS AND QUESTIONNAIRE SURVEY

－ Study on anxiety, action difficulty and overturning ratio of furniture －

肥田 剛典*, 永野 正行**

Takenori HIDA and Masayuki NAGANO

This study investigates the relationship between the strong motion records of super high-rise RC residential buildings and the indoor damages during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake based on a questionnaire survey. The indoor damages, including the anxiety, the action difficulty and the overturning ratio of furniture were discussed in comparison with previous studies. The following conclusions were reached; 1) Levels of the anxiety and the action difficulty were greater than results in Takahashi et al. (2010) based on shaking table tests. 2) The overturning ratios of furniture were fairly consistent with Kaneko et al. (2002). 3) At the acceleration and the velocity which the overturning ratio of furniture starts to increase, most of residents felt difficulty in moving.

Keywords: *The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Questionnaire survey,*

Super high-rise residential buildings, Anxiety, Action difficulty, Overturning ratio of furniture

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, 不安度, 行動難度, 家具の転倒率

1. はじめに

現在、関東平野、大阪平野等の大都市部では多数の超高層集合住宅が建設されており、長周期地震動による建物被害が懸念されている。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の際には、東京都内の超高層建物では甚大な構造被害は報告されていないものの、オフィス空間内において書類等の散乱や天井の一部落下、ドアの開閉障害、本棚やパーティションの転倒等の被害が報告されている¹⁾³⁾。これに鑑みれば、超高層集合住宅においても、家具の転倒、小物の散乱・落下等の室内での被害が発生したケースも多いと考えられる。揺れの最中における家具の転倒状況や居住者の行動難度を検討することは、地震時室内被害の軽減対策を考える上で重要であると言える。

これまで、アンケート調査に基づく地震時の被害状況に関する研究が行われており、アンケート震度^{4), 5)}と木造住宅の被害の関係⁶⁾や、建物内外の非構造部材⁷⁾、病院施設の被害⁸⁾等の調査例が報告されている。これらはいずれも低・中層建物を検討対象としており、超高層建物は対象外である。また、揺れの最中における人間の心理

状況や行動難度の評価はなされていない。これに対し、高橋ら^{9), 10)}は振動台上に人間を乗せて加振を行い、実験後に被験者に対して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と振動台の加振周期および速度の関係について調べている。その結果、揺れの最中の行動難度と不安度は短周期領域では速度に比例するが、長周期領域では加速度に比例する傾向にあることを指摘している。ただしこの検討結果は1軸正弦波加振実験に基づくものであり、実地震時の人間の心理状況や行動難度と異なる可能性がある。また、避難行動の障害となり得る家具の転倒等の影響は考慮されていない。

地震時における家具の転倒に関する検討は、これまで様々行われてきた^{11), 12)}。金子ら¹³⁾⁻¹⁷⁾は、実験と解析から家具の転倒率を加振振動数と加速度および速度で整理している。その結果から、家具の転倒率は低振動数領域で加速度に、高振動数領域で速度に依存することを示し、家具の転倒率評価曲線を提案している。岡田ら¹⁸⁾⁻²⁰⁾は居住者の年齢および地震発生の時間帯に依存する災害回避行動能力を提案し、これと家具の転倒率に基づいて、震度と受傷可能性の関係について検討している。これは東京都の震度階解説表を定量化して

* 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.

求めた震度と家具の転倒率および被害回避行動能力の関係²¹⁾に基づく検討結果であり、地震時における建物の実際の揺れとの対応関係については検討されていない。翠川ら²²⁾²⁴⁾は、強震観測記録に基づく建物の応答解析を行って各階の床応答速度を求め、これと災害回避行動能力および家具の転倒率の関係をもとに負傷率を予測している。しかし、これらは主にオフィスビルに関する検討であり、超高層集合住宅の被害様相と異なる可能性がある。

以上のように、大地震時における超高層集合住宅内の居住者の心理状況や、行動難度および家具の転倒率と建物の揺れのレベルの対応関係を包括的に調査した研究例は少ないのが現状である。そこで筆者らは、関東、関西地域に建設されている24階建て以上のRC系（RC造、SRC造、CFT造）の超高層集合住宅のうち、強震観測²⁵⁾が行われている14棟を対象にアンケート調査²⁶⁾を実施し、2011年東北地方太平洋沖地震時における居住者の不安度や行動難度、家具の移動・転倒状況と建物の揺れのレベルに関する定量的な関係を調べた。

2. 強震記録とアンケート調査の概要

本研究で対象とする建物の建設位置を図1に示す。対象建物は関東地域で8棟、関西地域で6棟である。全て24階建て以上の超高層集合住宅であり、賃貸物件である。いずれも関東平野、大阪平野内に位置し、本震時の長周期地震動の影響を受けているものと考えられる。

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、調査用紙を集合ポストに投函する形で実施した。各建物において、強震計が設置されている階に近い連続した5層分の住戸を対象にアンケート用紙を配布した。回答は同封した返信用封筒により回収した。有効回答数は460であり、本震時に住戸内にいた割合はほぼ半数であった²⁶⁾。

関東における検討対象建物と強震記録²⁵⁾およびアンケート調査²⁶⁾の概要を表1に、関西におけるそれらを表2に示す。強震記録の速度は加速度を時間で積分して求めた。最大加速度と最大速度は、各強震計で最大となる方角の値を示している。本研究では、入力地震動と建物の振動特性を含んだ床応答とアンケートの回答結果を比較するため、バンド幅0.1HzのParzen windowで平滑化したフーリエ振幅スペクトルのピーク周期を用いて検討する。これを卓越周期

図1 検討対象建物建設位置

表1 関東における検討対象建物の強震記録とアンケート調査の概要^{25), 26)}

建物の概要				強震記録の概要						アンケート調査の概要		
地域	名称	階数	構造	強震計設置階	最大加速度 A_{max} (cm/s ²)	最大速度 V_{max} (cm/s)	計測震度	卓越周期 (s)	等価振動数 F_e (Hz)	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
関東	A	30	RC	B1F	99.5	23.2	4.8	1.23	0.68	5-9	30	13
				15F	173.3	51.2	5.3	2.16	0.54	13-18	21	13
				RF	352.0	100.6	6.0	2.32	0.56	26-30	21	10
関東	B	25	RC	1F	100.4	16.6	4.5	0.83	0.96	2-6	15	6
				RF	382.3	61.1	5.7	1.56	1.00	21, 22, 24, 25	10	5
関東	C	30	RC	1F	91.3	18.6	4.5	2.87	0.78	3-6	13	8
				30F	363.8	62.1	5.7	2.04	0.93	26, 28-30	12	7
関東	D	24	RC	B1F	82.9	15.7	4.4	1.30	0.84	3-7	13	2
				12F	165.1	30.4	5.1	0.54	0.86	10-14	10	1
				RF	302.8	47.0	5.5	1.39	1.03	20, 22-24	7	3
関東	E	32	RC	1F	110.5	22.6	4.8	0.75	0.78	2-6	15	6
				14F	217.4	52.0	5.4	3.06	0.67	12-16	15	5
				24F	188.3	68.3	5.3	3.05	0.44	22, 24-26	10	4
				RF	374.7	91.2	5.8	3.02	0.65	28-30	13	9
関東	F	33	RC	B1F	67.5	17.3	4.3	6.74	0.62	2-6	7	1
				17F	142.0	31.6	5.0	2.45	0.72	15-19	10	5
				33F	294.0	55.6	5.5	2.37	0.84	29-33	10	3
関東	G	28	RC	1F	104.6	23.6	4.7	1.56	0.71	2-6	12	8
				10F	184.8	59.1	5.3	2.41	0.50	8-12	9	6
				28F	375.4	122.1	6.0	2.40	0.49	24-28	10	8
関東	H	24	RC	1F	146.4	19.6	5.0	0.81	1.19	2, 3, 5, 6	7	4
				RF	478.5	68.3	6.0	1.76	1.12	20-24	11	4

表 2 関西における検討対象建物の強震記録とアンケート調査の概要^{25), 26)}

建物の概要				強震記録の概要						アンケートの概要		
地域	名称	階数	構造	強震計設置階	最大加速度 $A_{\max}$ (cm/s ²)	最大速度 $V_{\max}$ (cm/s)	計測震度	卓越周期 (s)	等価振動数 F_e (Hz)	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
関西	I	33	RC	B1F	5.0	2.8	2.3	3.32	0.28	4-6	6	1
				16F	15.6	6.4	3.3	1.85	0.39	15-18	7	2
				33F	29.9	9.8	3.8	1.83	0.49	30-33	7	2
関西	J	36	RC	1F	4.7	2.4	2.2	3.94	0.31	4-7	7	4
				14F	16.1	6.4	3.4	2.15	0.40	12, 14	5	3
				36F	40.5	13.4	4.2	2.13	0.48	32-36	12	10
関西	K	25	SRC	5F	6.6	3.0	2.4	3.98	0.35	2, 5-9	13	10
				24F	26.1	8.4	3.8	1.90	0.49	19, 21-23	9	8
関西	L	43	RC	B2F	10.0	5.6	2.8	5.45	0.28	6-10	13	12
				15F	16.0	8.1	3.1	2.99	0.31	13-17, 21	19	10
				30F	22.6	10.7	3.5	2.91	0.34	28-31	10	5
				43F	30.4	13.1	3.8	2.85	0.37	38-42	7	3
関西	M	40	S, CFT	B1F	13.6	8.8	3.0	6.17	0.25	2-6	10	7
				12F	25.2	14.6	3.6	3.50	0.27	10-15	14	8
				26F	52.0	28.3	4.1	3.48	0.29	24, 26, 27	8	6
				40F	81.6	42.5	4.6	3.48	0.31	38-40	5	3
関西	N	31	RC	1F	11.8	6.4	2.9	6.00	0.29	2, 4-6	8	4
				16F	39.2	19.4	4.1	2.44	0.32	14, 16-18	9	5
				31F	75.5	29.9	4.6	2.43	0.40	27-30	10	4

として表 1, 2 に示した。表中の等価振動数 F_e は、後述する家具の転倒率¹⁶⁾を求める際に用いるものであり、次式により算出される。

$$F_e = \frac{A_{\max}}{V_{\max} 2\pi} \quad (1)$$

ここに、 $A_{\max}$ と $V_{\max}$ は家具への入力最大加速度(cm/s²)と最大速度(cm/s)である。建物 A, I, J および L では低層階に住戸が無いため、低層において強震計が設置されている階とアンケート回答者の居住階が若干離れている。関東において、ほぼ全ての建物で高層階ほど加速度が大きい。また、全ての建物において高層階ほど速度および計測震度が大きい。液状化被害が顕著であった地域に位置する建物 G の最上階における最大速度は、他の建物より大きい。建物 A の最上階の最大速度も比較的大きい。この建物は埼玉県の中川低地に位置し、1923 年関東地震時の震度が大きかった²⁷⁾。関東の各階の卓越周期は、低層階で短く高層階で長い傾向にある。関西において、全ての建物で高層階ほど加速度および速度、計測震度が大きい。神戸市街地に建つ建物 I, J, K の加速度と速度は小さく、大阪府の湾岸部に近い建物 M, N の加速度と速度は比較的大きい。

本震時に住戸に滞在していた回答者のみを対象とし、揺れの体感に関する質問をした。不安度の質問項目を表 3 に、行動難度の質問項目を表 4 に示す。各表には、Takahashi et al.¹⁰⁾の振動台実験（以降、振動台実験）の質問項目と不安度および行動難度も示している。不安度、行動難度とも、本調査の質問項目は振動台実験のそれらと概ね対応している。そこで振動台実験の評価基準に基づき、本調査の不安度と行動難度を 0 から 4 の 5 段階で評価して以降の検討で用いることとした。

次に、本震時に住戸に滞在していなかった回答者を含む全ての居住者に対し、家具の固定と本震後の家具の移動・転倒状況に関する質問をした。タンス、冷蔵庫、本棚、食器棚の固定に関する回答項

表 3 不安度

本調査の回答項目	振動台実験 ¹⁰⁾	
	回答項目	不安度
非常に怖かった	anxious very much	4
怖かった	anxious a lot	3
少し怖かった	anxious	2
あまり怖くなかった	anxious a little	1
怖くなかった	-	0

表 4 行動難度

本調査の回答項目	振動台実験 ¹⁰⁾	
	回答項目	行動難度
揺れに翻弄され、自分の意志で何も行動できなかった	impossible	4
立っていることができなかった	much unstable and hard to action	3
歩いたり動いたりすることに、やや支障があった	unstable but possible to action	2
はっきりした揺れを感じたが、行動には支障がなかった	slightly unstable but possible to action	1
わずかに揺れを感じたが、行動には支障がなかった	—	0

表 5 タンス、冷蔵庫、本棚、食器棚の固定の回答項目と固定度

回答項目	家具の固定度
十分にしていた	4
↑中間↓	3
ある程度していた	2
↑中間↓	1
全くしていない（動く家具がない）	0

表 6 家具の移動・転倒状況の回答項目と転倒率

回答項目	転倒率
多くのものが転倒または移動した	0.8
↑中間↓	0.6
一部転倒または移動した	0.4
↑中間↓	0.2
全く動いていない	0

目と家具の固定度を表5に、それらの家具の移動・転倒に関する回答項目と家具の転倒率を表6に示す。家具の固定度は0（全くしていない）から4（十分にしていた）の5段階で評価した。転倒率は「全く動いていない」を0, 「多くのものが転倒または移動した」を0.8とした。

以降、アンケート回答結果の不安度、行動難度および家具の転倒率は表3, 4, 6の数値で評価し、表1, 2に示した各強震計設置階に近い階の居住者の回答を平均して用いる。

3. 本震時の不安度と行動難度

強震記録の最大加速度および最大速度と不安度の関係を図2に示す。ここでは、表1, 2に示した各建物における強震計設置階の最下階付近の住戸を「低層」、最上階付近の住戸を「高層」、それ以外の住戸を「中層」として示している。なお、回答数が3以下であった層は、地域や層の区分によらず×で示した。図中には、全データを用いた相関係数 r と、回答数が3より多かったデータに基づく相関係数 r' も示している。最大加速度および最大速度と不安度の間には、正の相関関係が若干認められる。最大加速度と不安度の相関係数は、最大速度と不安度のそれと同程度である。回答数が3より多かったデータに基づく最大加速度および最大速度と不安度の相関係数は、全データを用いた場合のそれらより若干高い。最大加速度100cm/s²以下および最大速度20cm/s以下の範囲において、回答数が3以下の不安度は0~4であり、ばらつきが大きい。この加速度・速度の範囲における回答数が3より多い場合の不安度は2~3.5程度である。最大加速度100cm/s²以上および最大速度20cm/s以上の範囲では、不安度は2.5~4程度となっている。関東では高層ほど加速度および速度が大きい傾向にあるものの、不安度は2.5以上であり、層によらず多くの居住者が不安を感じたことが分かる。揺れの最中の状況に関する質問の自由記述欄には、関東の低層で建物がきしむ音や家具等がぶつかる音を聞いたことによって不安感が増したとの回答も多く見受けられた。また、筆者らが行った同地震時の追加アンケート調査²⁸⁾において、建物がきしむ音や家具等がぶつかる音を聞いたと回答した居住者は低層で多く、音を聞いた頻度とそれによる不安度に正の相関関係が見られた。このことから、揺れの大きかった関東の高層のみならず、建物がきしむ音を聞いた頻度が高かった関東の低層でも不安度が高くなったと考えられる。

最大加速度および最大速度と行動難度の関係を図3に示す。最大加速度および最大速度と行動難度の間に正の相関関係が認められる。加速度および速度と行動難度の相関係数は、加速度および速度と不安度の相関係数（図2）より高い。回答数が3以下のデータはばらつきが大きく、全体的な傾向から外れている。回答数が3より多かったデータの相関係数は、全データを用いた相関係数より高い。特に、回答数が3より多かったデータによる最大速度と行動難度の相

図2 最大加速度および最大速度と不安度の関係

図3 最大加速度および最大速度と行動難度の関係

関係数は0.87であり、明確な正の相関関係が認められる。回答数が3より多い場合、関西の行動難度は1から2.5程度にかけて分布し、関東の行動難度は1.5から3.5程度にかけて分布している。

本調査と振動台実験の不安度を比較するため、本調査における強震記録の最大速度と卓越周期を説明変数、不安度を目的変数として、薄板平滑化スプライン (Thin-Plate Spline²⁹⁾)によりコンター図を求める。薄板平滑化スプライン関数 $s(x_{1i}, x_{2i})$ は、次式で表されるペナルティ付き残差平方和RSSを最小にすることによって求められる。

$$RSS = \sum_{i=1}^n [y_i - s(x_{1i}, x_{2i})]^2 + \frac{\lambda}{2} \iint \left[\left(\frac{\partial^2 s(x_{1i}, x_{2i})}{\partial x_1^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 s(x_{1i}, x_{2i})}{\partial x_1 \partial x_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 s(x_{1i}, x_{2i})}{\partial x_2^2} \right)^2 \right] dx_1 dx_2 \quad (2)$$

ここに、 y_i は目的変数、 x_{1i} と x_{2i} は説明変数、 λ は平滑化パラメータである。平滑化した結果を本調査における不安度評価曲線とし、振動台実験の不安度評価曲線と比較して図4に示す。ここでは図2, 3に関する考察に基づき、外れ値の影響を排除するため、回答数が3以下の層のデータは除外した。本調査の不安度評価曲線において、不安度4に対応する線は外挿となるため表示していない。振動台実験および本調査とも、速度が大きいくほど不安度が高くなる傾向が認められる。これは、本調査において速度と不安度に正の相関関係があること（図2b）に対応している。振動台実験では、周期が長くなるほど、ある速度における不安度が低くなる傾向があるのに対し、

本調査ではその傾向は認められない。本調査の不安度 3 に対応する速度は、全ての周期帯で振動台実験の不安度 1 に対応する速度より小さい。このことは、振動台実験に比べ、実地震時には小さい速度から不安度が極めて高くなることを示している。

次に、本調査と振動台実験の行動難度を比較するため、本調査における最大速度と卓越周期を説明変数、行動難度を目的変数として、薄板平滑化スプラインによりコンター図を求めた。ここでも不安度の評価曲線と同様、外れ値の影響を排除するため、回答数が 3 以下であったデータは除外した。得られた結果を本調査における行動難度評価曲線とし、振動台実験の行動難度評価曲線と比較して図 5 に示す。振動台実験および本調査とも、速度が大きくなるに従って行

動難度が高くなる傾向が認められる。これは、本調査において速度と行動難度に正の相関関係があること（図 3 b）と対応している。振動台実験の行動難度評価曲線は、周期が長くなるほど、ある速度における行動難度は低くなる傾向を示している。一方、本調査における行動難度評価曲線では、周期依存性は明確ではない。振動台実験の行動難度評価曲線において、周期 1 秒、速度 20 cm/s に対する行動難度は 1 より小さいのに対し、同じ周期・速度における本調査の行動難度は 2 程度である。また、振動台実験の評価曲線において、周期 2 秒、速度 70 cm/s に対する行動難度は 2 程度であるのに対し、同じ周期・速度における本調査の行動難度は 3 程度である。

このように、本調査で得られた不安度および行動難度は、同じ周

a) 振動台実験¹⁰⁾（網掛け部は実験範囲）

b) 本調査

図 4 アンケート調査と強震記録に基づく不安度評価曲線と振動台実験結果との比較

a) 振動台実験¹⁰⁾（網掛け部は実験範囲）

b) 本調査

図 5 アンケート調査と強震記録に基づく行動難度評価曲線と振動台実験結果との比較

期・速度における振動台実験時のそれより高くなった。振動台実験は1軸正弦波加振であるのに対し、実地震時には3方向にかつ不規則に揺れ、大きく状況異なることが一因と考えられる。また、地震の発生は居住者にとって予想し得ないものであるため、実験を実施することがあらかじめ被験者に知らされている振動台実験に比べ、実地震時の居住者の心理的な前提条件は異なる。また、実験において振動台に乗せられるのは被験者のみであり、家具類の存在やそれらの移動・転倒が被験者の心理状況や行動難度に及ぼす影響は考慮されていない。また、先に述べたような、建物がきしむ音や家具等がぶつかる音による恐怖感の増大は、振動台実験では再現できない。これらのことが複合することにより、本調査における不安度および行動難度が振動台実験のそれらより高くなったものと推定される。

4. 本震後の家具の転倒率

家具の固定度が家具の転倒率に及ぼす影響を検討するため、家具の固定度別の最大加速度および最大速度と家具の転倒率の関係を図6に示す。家具の固定度が3以下の場合、加速度および速度の増大に伴って家具の転倒率が高くなる。家具の固定度が4の場合、家具の転倒率が0.4と比較的高くなるケースもあるものの、多くのケースは0.2以下となる。ほとんどのケースにおいて、固定度4の転倒率は、同程度の加速度・速度における固定度3以下の転倒率より低い。このことから、家具の固定が家具の転倒に対して有効であったことが分かる。

金子ら^{16), 17)}は、実験や解析、過去の被害地震における家具の転倒と強震記録の調査から、家具転倒率の評価曲線を提案している。これによれば、家具の転倒率 R は次式によって算定できる。

$$R = \alpha \cdot \Phi \left(\frac{(\ln A_{\max} - \lambda)}{\zeta} \right) \quad (3)$$

$$e^{\lambda} = \begin{cases} A_{cr} \left(1 + \frac{B}{H} \right) = \frac{B}{H} g \left(1 + \frac{B}{H} \right), & F_e \leq F_b' \\ V_{cr} \left(1 + \frac{B}{H} \right)^{2.5} \cdot 2\pi F_e = 10 \frac{B}{\sqrt{H}} \left(1 + \frac{B}{H} \right)^{2.5} \cdot 2\pi F_e, & F_e > F_b' \end{cases} \quad (4)$$

$$F_b' = \frac{15.6}{\sqrt{H}} \left(1 + \frac{B}{H} \right)^{-1.5} \quad (5)$$

ここに、 Φ は平均値 λ 、標準偏差 ζ の正規分布関数、 α は滑りの影響を表す係数、 $A_{\max}$ は家具への入力最大加速度(cm/s^2)、 B と H は家具の幅と高さ(cm)、 A_{cr} と V_{cr} は家具に転倒危険性が生じる最小の加速度(cm/s^2)と速度(cm/s)、 g は重力加速度(cm/s^2)、 F_e は(1)式で算出される入力の等価振動数(Hz)、 F_b' は境界振動数(Hz)である。 B 、 H 、 ζ

図6 家具の固定度別の強震記録と家具の転倒率の関係

表7 家具の転倒率推定のためのパラメータ

家具の幅 B (cm)	家具の高さ H (cm)	ζ	α
45	160	0.5	0.8

図7 強震記録と家具の転倒率の関係 (家具の固定度0~1)

および α は、文献¹⁷⁾を参考に表7に示す通りとした。ここで設定した B および H に対応する境界振動数 F_b' は0.85 Hzとなる。入力の等価振動数 F_e が境界振動数 F_b' 以下である場合は家具の転倒率が入力の加速度に依存し、 F_e が F_b' より高い場合は家具の転倒率が入力の速度に依存する。

等価振動数 F_e を境界振動数 F_b' で分け、最大加速度および最大速度と家具の転倒率の関係を、(3)~(5)式で求められる転倒率評価曲線と比較して図7に示す。(3)~(5)式による転倒率評価曲線は固定されていない家具の転倒率を求めるものであることを考慮し、本調査において家具を固定していない(表5に示した家具の固定度が0~1)と回答した居住者の家具の転倒率のみを用いた。図中には相関係数 r も示している。最大加速度および最大速度が大きくなるほど家具の転倒率が高くなる傾向が認められる。最大加速度および最大速度と家具の転倒率の相関係数は極めて高い。関西では加速度が小さく、家具の転倒率も0.1以下と極めて低い。関東の低層と中層でも転倒率は0.2以下と低く、高層の転倒率は0.1~0.5程度となる。本調査における家具の転倒率は、(3)~(5)式による転倒率と概ね対応した。

強震記録の等価振動数と最大加速度の関係を、地域・層に分けて図8に示す。関東の高層には、建物の名称およびアンケート回答結果の家具の固定度0～1における家具転倒率を併記している。図中には(3)～(5)式で求めた家具の転倒率を点線で示した。関東の最大加速度と等価振動数は関西より概ね高い。関西は層によらず(3)～(5)式による転倒率が0.1以下となる範囲に分布し、関東の低層と中層は転倒率0.2より小さい範囲に分布している。関東の高層は(3)～(5)式による転倒率0.2～0.5の範囲に分布している。建物G、AおよびEの高層における等価振動数は境界振動数より低く、最大加速度は350～380cm/s²程度である。本調査におけるこれらの建物の家具の転倒率は0.37～0.53であり、(3)～(5)式による転倒率0.4～0.5と概ね対応している。建物Hの高層は最大加速度が470cm/s²程度で最も大きい。家具の転倒率は0.4であり、建物GやAの高層における転倒率より低い。この建物の等価振動数は境界振動数より高く、(3)～(5)式の転倒率0.4と対応している。このように、本調査における家具の転倒率は、(3)～(5)式で求められる家具の転倒率評価曲線と概ね対応した。

5. 行動難度と家具の転倒率の関係

最後に、本調査における強震記録の最大加速度および最大速度と行動難度、家具の転倒率の関係について検討する。最大加速度または最大速度と加速度フーリエ振幅スペクトルのピーク周期を説明変数とし、行動難度および家具の転倒率を目的変数として、薄板平滑化スプラインにより求めた各指標の評価曲線を図9、10に示す。ここでは、卓越周期1.5秒と3秒における評価曲線を示している。家具の転倒率は固定度0～1のデータを用いた。行動難度、家具の転倒率とも、周期1.5秒と3秒の差異は極めて小さい。加速度および速度が大きくなるに従って行動難度と家具の転倒率は高くなる。加速度250cm/s²、速度60cm/s程度で行動難度は3に達し、多くの居住者が行動困難となる。この時の家具の転倒率は0.2程度と低い。これ以上の加速度・速度では、行動難度の増分は極めて小さい。一方、最大加速度・最大速度の増大とともに家具の転倒率はさらに上昇し、加速度400cm/s²、速度100cm/sで家具の転倒率は0.4程度となる。以上から、家具が移動・転倒し始める加速度・速度では、多くの居

住者が行動困難となる。

6. 結論

関東、関西地域の超高層集合住宅の居住者を対象にアンケート調査を行い、2011年東北地方太平洋沖地震時における居住者の不安度や行動難度、家具の転倒率を調べた。さらに、振動台実験に基づく揺れの最中の行動難度および不安度の調査結果や、既往の家具転倒率評価手法と本調査結果を比較した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 本調査における行動難度および不安度は、振動台実験の同じ周期・速度におけるそれらより高くなった。これは、振動台実験では1軸正弦波加振であるのに対し、実地震時には3方向かつ不規則に揺れること等に起因すると考えられる。
- 2) 床応答の等価振動数が境界振動数より低い場合、家具の転倒率が加速度に依存し、等価振動数が境界振動数より高い場合、家具の転倒率が速度に依存した。本調査の家具の転倒率は、既往の家具転倒率評価手法と概ね対応した。

図8 強震記録の等価振動数と最大加速度の関係
(数字：アンケートによる家具の転倒率(家具の固定度0～1))

図9 最大加速度と行動難度および家具の転倒率の関係

図10 最大速度と行動難度および家具の転倒率の関係

3) 周期 1.5 秒から 3 秒の地震時の揺れにおいて、加速度 250cm/s^2 、速度 60cm/s 程度で多くの居住者が行動困難となる。この時の家具の転倒率は 0.2 程度と低いが、最大加速度・最大速度の増大とともに家具の転倒率はさらに上昇し、加速度 400cm/s^2 、速度 100cm/s で家具の転倒率は 0.4 程度となる。これらのことから、家具が移動・転倒し始める加速度・速度では、多くの居住者が行動困難となる。

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。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。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) 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
- 3) 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
- 4) 太田裕, 後藤典俊, 大橋ひとみ: アンケート調査による地震時の震度の推定, 北海道大学工学部研究報告, 第 92 号, pp. 117-128, 1979
- 5) 太田裕, 小山真紀, 中川康一: アンケート震度算定法の改訂-高震度領域-, 自然災害科学, Vol. 16, No. 4, pp. 307-323, 1998. 2
- 6) 岩井哲, 浅野照雄: 平成 13 年芸予地震による丘陵造成地の木造住宅瓦屋根被害と地盤の常時微動特性, 自然災害科学, Vol. 22, No. 4, pp. 429-440, 2004
- 7) 神原浩, 林康裕, 田村和夫: アンケート調査に基づく建物の非構造部材被害と地震動強さとの関係, 日本建築学会構造系論文集, No. 578, pp. 155-161, 2004. 4
- 8) 郭耕杖, 林康裕, 神原浩: アンケート調査に基づく病院の地震被害と震度との関係, 日本建築学会構造系論文集, No. 586, pp. 63-69, 2004. 12
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 志賀敏男, 渋谷純一, 鈴木和仁: 地震による家具の転倒に関する調査と

解析, 日本建築学会東北支部研究報告, pp. 97-100, 1979. 3

- 12) Ishiyama, Y.: Criteria for Overturning of Bodies by Earthquake Excitations, Transactions of the Architectural Institute of Japan. No. 317, pp. 1-14, 1982. 7
- 13) 金子美香, 林康裕: 剛体の転倒限界に関する基礎的検討, 日本建築学会構造系論文集, No. 479, pp. 41-49, 1996. 1
- 14) 金子美香, 林康裕: 地震時の剛体の転倒限界と移動量に関する検討, 構造工学論文集, Vol. 43B, pp. 451-458, 1997. 3
- 15) 金子美香, 林康裕: 剛体の転倒率曲線の提案, 日本建築学会構造系論文集, No. 536, pp. 55-62, 2000. 10
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 岡田成幸: 地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究－その 1 居住空間危険度マイクロゾーニングの提案－, 日本建築学会構造系論文集, No. 454, pp. 39-49, 1993. 12
- 19) 岡田成幸: 地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究－その 2 1993 年釧路沖地震にみる揺れている最中の災害回避行動－, 日本建築学会構造系論文集, No. 481, pp. 27-36, 1996. 3
- 20) 岡田成幸, 黒田誠宏: 地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究－その 3 室外への避難脱出経路の危険度評価法の提案－, 日本建築学会構造系論文集, No. 563, pp. 83-89, 2003. 1
- 21) 岡田成幸, 鏡味洋史: 震度による地震被害系統評価のためのバルナラビリティ関数群の構成, 地震, 第 2 輯, 第 44 巻, pp. 93-108, 1991
- 22) 翠川三郎, 佐藤俊明, 松岡昌志: 1993 年釧路沖地震での釧路市役所および釧路気象台での家具の転倒調査－家具転倒率と設置状態の関係－, 日本建築学会構造系論文集, No.461, pp. 11-17, 1994. 7
- 23) 翠川三郎, 佐藤俊明: 1993 年釧路沖地震での釧路市役所および釧路気象台での家具の転倒調査－家具転倒率と床応答の関係－, 日本建築学会構造系論文集, No.469, pp. 53-60, 1995. 3
- 24) 翠川三郎, 佐伯琢磨: オフィスビル群における地震時の室内負傷者発生予測, 日本建築学会構造系論文集, No. 476, pp. 49-56, 1995. 10
- 25) 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
- 26) 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
- 27) 武村雅之, 諸井孝文: 地質調査所データに基づく 1923 年関東地震の詳細震度分布 その 2 埼玉県, 日本地震工学会論文集, Vol. 2, No. 2, pp. 55-73, 2002
- 28) 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超高層集合住宅の室内被害－追加アンケート調査に基づく揺れと被害の分析－, 2011 年度日本建築学会関東支部研究報告集, 2012. 3
- 29) 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

(2011年12月10日原稿受理, 2012年4月12日採用決定)