



市販の家具転倒防止装置の効果に関する実験・数値解析的検証

目黒公郎¹⁾・吉村美保²⁾・伊東大輔³⁾・佐藤芳仁³⁾

1) 正会員 東京大学生産技術研究所、教授 工博

e-mail : meguro@iis.u-tokyo.ac.jp

2) 正会員 東京大学生産技術研究所、助教 博士(工学)

e-mail : yosimura@iis.u-tokyo.ac.jp

3) 東京大学大学院工学系研究科

要約

現在、日本は地震学的に活動度の高い時期を迎えている。今後想定される地震による被害を軽減するためには、「建物の耐震性を向上させる」、「家具の転倒防止措置を行う」など、市民1人1人の自発的な被害軽減行動が最も効果的かつ不可欠である。しかし、兵庫県南部地震以後、居住施設の耐震化や家具の転倒防止策による居住空間の安全性確保が謳われる一方で、実態としてはほとんど対策が進んでいないとの報告がある。これらの大きな原因の1つに、多くの人々が地震災害に対する適切なイメージを持つことができず、結果として具体的な防災対策を講じられないでいる状況が挙げられる。そこで本研究では、この災害状況を適切にイメージできる能力を向上し、具体的な防災対策を講じてもらうために、まず最初に木製ブロックと実物家具を用いた振動台実験により、地震時の家具の動的挙動を記録し、これを分析する。次に転倒防止器具を取り付けた実験を行い、その効果や限界を分析し、それらの結果に基づいて、転倒防止器具の効果的な使用方法を提案する。そして最後に、利用者自身の生活空間を対象とした地震時の家具の挙動を3次元拡張個別要素法でシミュレーションし、その結果をアニメーションとして表現するとともに、その転倒率を示すことにより「危険やリスクの認知」を高める。さらに転倒防止器具の効果を示すことで「防災対策効果の認知」を促進させ、最終的に地震時の家具の挙動による被害を軽減する具体的な対策を講じる環境整備につとめる。

キーワード：地震防災、振動台実験、家具、転倒防止器具、拡張個別要素法、安全性評価

1. はじめに

今後想定される地震による被害を軽減するためには、市民1人1人の自発的な被害軽減行動が最も効果的かつ不可欠である。しかし、兵庫県南部地震以後、居住施設の耐震補強や家具の転倒防止対策による居住空間の安全性確保が謳われる一方で、実態としては対策はほとんど進んでいないとの報告がある¹⁾。これらの大きな原因の1つに、多くの人々が地震災害を具体的にイメージする能力が乏しいことが挙げられる。そこで本研究では、この災害状況を適切にイメージできる能力を向上し、具体的な防災対策を講じてもらうために、まず最初に木製ブロックと実物家具を用いた振動台実験により、地震時の家具の動的挙動を記録し、これを分析した。次に転倒防止器具を取り付けた実験を行い、その効果や限界を分析し、それらの結果に基づいて、転倒防止器具の効果的な使用方法を提案する。さらに利用者の生活空間を対象とした地震時の家具の挙動を3次元拡張個別要素法でシミュレーションし、その結果をアニメーションとして表現するとともに、その転倒率を示すことにより「危険・リスクの認知」を促進する。また自分の生活空間を対象に転倒防止器具を設置した場合の転倒率の低減効果を示すことで、「防災対策効果の認知」を促進させる。

2. 振動台を用いた木製ブロックと家具の動的挙動の実験

地震時の家具の動的挙動の把握と転倒防止装置の効果を評価するために、木製ブロックと実物の家具を用いた振動台実験を行なった。木製ブロックを用いた実験は、実家具の実験の導入として行ったものであり、同時に数値解析の精度を確認する情報を得るために行ったものである。以下に概要と結果を説明する。

2.1 木製ブロックを用いた振動台実験とその結果

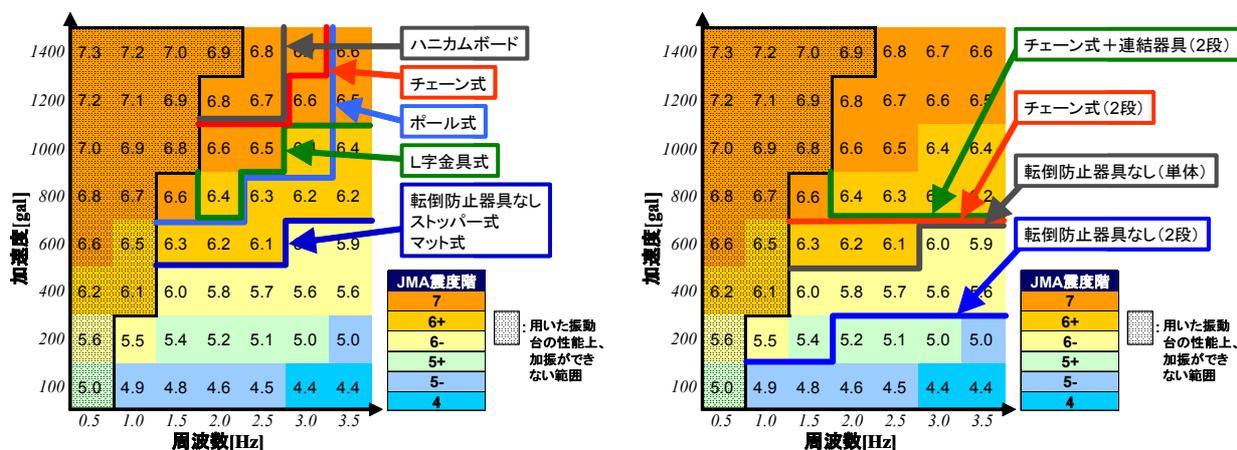
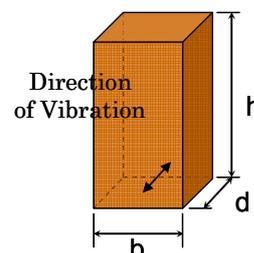
まず最初に、内部まで木材で充たされている木製ブロックを用いた振動台実験を行った。使用した振動台のサイズは1.5×1.5[m]である。用いた供試体の諸元は表1に示す通りであり、供試体No. A-1は単体で使用し、供試体No. A-2は2段重ねとして使用した。入力振動としては図1に示す38種類の正弦波加速度(振幅:100~1400Gal、周波数:0.5~3.5Hz)を用いた。なお、図中の数字はそれぞれの入力振動から求めた計測震度を表している。転倒防止器具には市販されているチェーン式、L字金具式、ストッパー式、マット式、ポール式、ハニカムボードを使用した。チェーン式とL字金具式については器具に付属の木ネジより小さいサイズのものを使用した。サイズは実物家具と実験に用いた木製ブロックの重量比を考慮して定めた。ストッパー式、マット式、ポール式についてはスケール比を考慮し、縮小サイズのものを作成して用いた。実験は供試体を背面を壁に接する状態で設置して行った。

図1の中の実線は周波数と振幅の異なる各正弦波を入力した際に、転倒防止器具を取り付けた木製ブロックが転倒した境界である。この線より上側が転倒してしまう地震動の範囲を示している。チェーン式転倒防止器具とL字金具式転倒防止器具は、事前に行った、用いる材料や器具の強度特性を調べる実験で得られた結果と同じように、取り付け用木ねじが引き抜けてしまうことにより、転倒防止

の効果がなくなってしまうという結果が得られた。ここでは紙面の制約から床面がフローリング、壁面が合板材、天井の剛性が比較的低い条件での実験結果のみを載せているが、床面が畳(逆目、順目)、壁面が石膏ボード、天井の剛性が異なる条件についても同様の検証を行った。

表1 木製ブロックの諸元

block	size			V [cm ³]	m [kg]	d/h
	h [cm]	b [cm]	d [cm]			
No.A-1	75	37.5	22.5	63,281	41.55	0.3
No.A-2	50	25	15	18,750	11.20	0.3



(1) 供試体：1段の場合(ブロック No. A-1) (2) 供試体：2段重ねの場合(ブロック No. A-2)

図1 振動台実験により求められた転倒挙動の境界値(床面：フローリング、壁面：合板材)

2.2 実物家具を用いた振動台実験とその結果

次に、木製ブロックの実験結果の実物家具への適応性を検証するため、また本研究で提案するより効果的な転倒防止器具の設置方法の効果を確認するため、市販されている家具(実物家具)を用いた振動台実験を行った。実験に用いた振動台のサイズは4.0×4.0[m]である。供試体には市販の組み立て式の食器棚を用いた。サイズは高さ180[cm]、幅59[cm]、奥行き39[cm]である。本体の重量は24.5[kg]であるが、一般的な利用状況を踏まえて、60.2[kg]の錘を家具の本体に設置した。入力地震動としては表2のように兵庫県南部地震(神戸海洋気象台)と新潟県中越地震(K-NET小千谷)²⁾を用い、前者については最大振幅を調整することで用意した震度5強、6弱、6強(オリジナル)のものを用いた。床面はフローリングと畳の2ケースとし、転倒防止器具は木製ブロックの実験において高い効果を発揮したチェーン式と同じタイプのベルト式とポール式を使用した。実験は供試体は背面を壁に接する状態で行った。

より効果的な転倒防止器具の設置方法を検討するため、ベルト式に関しては、ベルト式器具を家具上部との角度を変えながら設置した場合(図2-(1))と、ポール式器具の上部に合板材を設置した場合の実験を行った。ポール式では、図2-(2)のようにポールの上部に合板材を両面テープにより固定した。ただし板と天井、ポールと家具上面の固定は行っていない。

各ケースでの家具の挙動を表3に示す。ベルト式は一般的には斜め上方向(30°～60°程度)に設置するが、斜め下方向に取り付けることで、家具を下方に押さえることができる。これにより、家具下部が前方向に滑り出して大きく変位したり、倒れたりする挙動(図3)を抑えることができた。ただし、図4に示すように斜め下方向に取り付ける際の角度を大きくすると、家具上部が前方への加速度を受け、それがベルト式転倒防止器具へ作用する力が大きくなるため、ベルト式を60°下に取り付けた場合では器具が損傷した。ベルトへの負担を考慮すると30°程度下方への設置が高い効果を得られる設置方法と考えられる。ポール式では、家具上面の両端に設置したポールが別々の挙動をして、器具が落下することが原因で転倒に至った。ポールの上部に合板材を取り付けることにより、両方のポールが一体となった挙動をすること、また天井を面で支えることでハニカムボードのような役割を示し、新潟県中越地震の地震動を入力した場合には家具を転倒させずに、微小なロッキング運動のみに抑えることができた。

表2 使用した地震動の最大加速度と JMA 震度階

地震名称	観測地	最大加速度 [gal]			JMA震度階
		X方向	Y方向	Z方向	
兵庫県南部地震	神戸海洋気象台	818	617	332	6強
		491	370	119	6弱
		276	208	112	5強
新潟県中越地震	K-NET小千谷	1310	1110	781	7



(1) ベルト式 (30° 下取り付け)



(2) ポール式+合板材

図2 より有効な転倒防止器具の設置方法

表3 各加振, 設置状況による家具の挙動

		兵庫県南部地震			新潟県中越地震	
		5強	6弱	6強	7	
器具なし	フローリング	●	●	—	—	● : 転倒 ● : 器具の損傷 ● : 水平方向変位 ○ : 変位なし
	畳	●	●	—	—	
ベルト式	30°上	●	●	●	—	
	30°下	○	○	●	●	
	60°上	—	—	●	—	
ポール式	板なし	○	○	○	●	
	板あり	—	—	—	●	

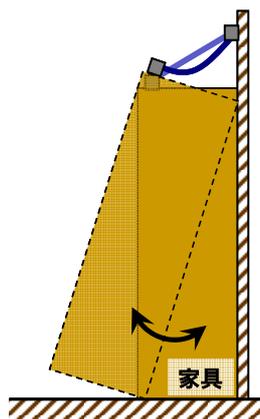


図3 ベルト式を斜め上方向に設置した場合の家具の挙動

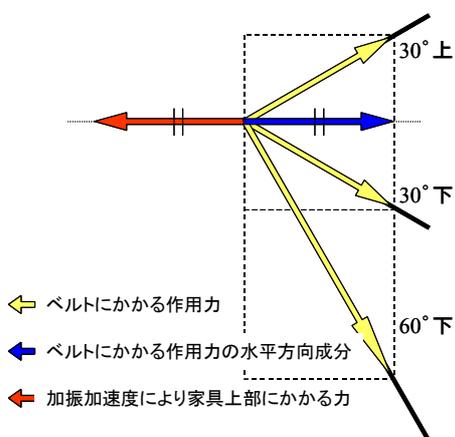


図4 ベルトに作用する力の関係

3. 生活空間の安全性評価

地震時の家具の転倒挙動を指標とした生活空間の安全性評価を行うために、モデル建物（鉄筋コンクリート造 20 階建）とその中に存在するモデルルーム（1LDK, 87m²）を対象に、3次元拡張個別要素法（3D-EDEM）を用いたシミュレーションを行った。

モデルルームへの入力振動は、地震動を受けた建物の各階の床応答を求め、この中からモデルルームの存在する階の床応答を選んで用いる。この振動を受ける室内の家具が、転倒防止器具の有無や種類によってどのように変化するかをシミュレーションし、その結果から安全性を評価する。なお、ここで用いる 3D-EDEM は、図 5 に示すように、振動台実験の結果を高精度に再現できることが保障されている。

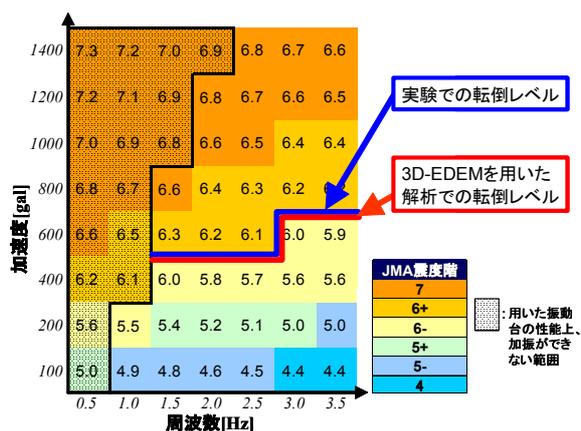


図5 3D-EDEM と実験の転倒レベルの比較（床面：フローリング）

3.1 評価の対象とする生活空間

対象とする家具は表4に示す3種類（No. B-1～B-3）とした。サイズと材料特性は表4に示す通りである。対象とする生活空間は図6のようなモデルルームとし、空間内には、3種類の家具をそれぞれ7個ずつ、他にテーブルやイス等も設置した。

表4 解析対象とした家具のサイズと材料特性

	h [cm]	d [cm]	b [cm]	d/h	m [kg]	ρ [kg/cm ³]
No.B-1	180	54	90	0.3	200	2.29E-04
No.B-2	180	36	90	0.2	133.3	2.29E-04
No.B-3	135	54	90	0.4	150	2.29E-04

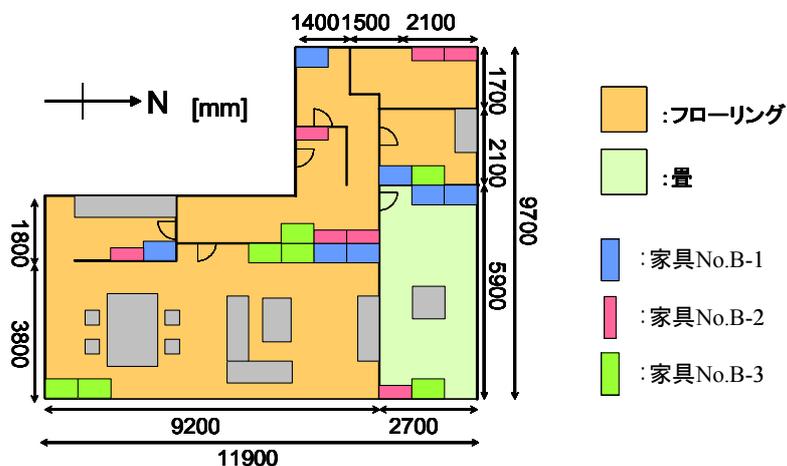


図6 モデルルーム内家具の設置状況

3.2 多質点系バネ-マスモデルによる床入力データの作成

表5に示すK-NET²⁾より取得した卓越周期の異なる11地震動（N-S, E-W, U-D方向）記録を入力とし、鉄筋コンクリート造20階建ての建物を多質点系バネ-マスモデルとしてモデル化した時刻歴応答解析行って、各階の床の応答を求めた。今回の検討では、これらの中から5フロア（1, 5, 10, 15, 20階）の応答を床応答データとして用いることとした。

図7は、5つのフロアでの床応答と計測震度の関係を示す。なお、現行の気象庁による震度階では計測震度6.5以上を全て震度7としているが、本研究では7- (計測震度6.5~6.9)、7+ (計測震度7.0~7.4)、7++ (計測震度7.5~7.9)と定義した。以上のように作成した計55の床応答データを、対象とする生活空間への変位入力とする。

表5 床入力データ作成に用いた実地震動

発生日	地震名	観測地	マグニチュード [M]	震源深さ [km]	計測震度	卓越周期 [sec]
1995/1/17	兵庫県南部地震	神戸海洋気象台	7.3	20	6.40	0.71
2000/10/6	鳥取県西部	油木	7.3	11	5.06	0.29
2001/3/24	芸予	湯来	6.4	51	5.71	0.46
2001/12/2	岩手県内陸南部	大東	6.4	122	4.49	0.11
2003/5/26	宮城県北部	牡鹿	7.0	71	6.20	0.37
2003/9/26	十勝沖	広尾	8.0	42	6.07	0.27
2003/9/26	十勝沖	苫小牧	8.0	42	4.49	4.50
2004/9/5	紀伊半島南東沖	白山	7.4	44	4.69	0.18
2004/9/5	紀伊半島南東沖	堺	7.4	44	3.76	6.40
2004/10/23	新潟県中越	小千谷	6.8	20	6.73	0.60
2005/3/20	福岡県西方沖	平戸	7.0	9	5.09	0.46

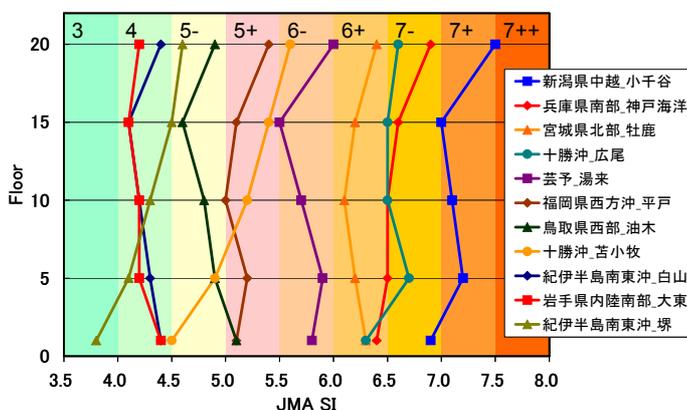


図7 床応答データのフロアと計測震度の関係

3.3 家具の転倒率の算出

解析は対象とした家具に、(a)転倒防止器具を設置しない、(b)全ての家具にベルト式転倒防止器具を設置する、(c)家具 No. B-1, No. B-2 にハニカムボードを、背の低い家具 No. B-3 にベルト式を設置する、という3ケースについて行った。室内の家具の挙動を3次元拡張個別要素法(3D-EDEM)³⁾によりシミュレーションした結果を図8に示す。図8の画像はバーチャルリアリティー技術(VR)を用いて作成しているが、VRを用いることでユーザーは、仮想空間内を自由に動きまわることができる。ここでは、ベルト式の転倒防止器具は壁面と家具上面を繋ぐバネによってモデル化している。設置位置は推奨される設置方法である家具上面とベルトの成す角が30°になる位置とする。バネの材料特性は引張剛性が 4.0×10^3 [N/cm]であり、引張限界力が 4.0×10^3 [N]を超えると以後は塑性的に伸び、歪みが3[cm]を超えると破断とみなし、力の伝達を行わないモデルとしている。ハニカムボードは家具の上面と天井とを充填することにより転倒防止効果を得る間隙材であり、ダンボールを敷き詰めるのと同様の剛性と密度を持つブロックとしてモデル化した。

図9に室内全体での転倒率と各ケースでのフロアの計測震度との関係を示す。(a)においては、計測震度6+を超えると急激に転倒の危険性が高まった。(b)では全ての家具にベルト式転倒防止器具を設置しているものの、器具が破断してしまい効果が得られていない。(c)では高い計測震度の場合にも転倒率を大きく下げることができ、転倒防止効果が高いことが示された。

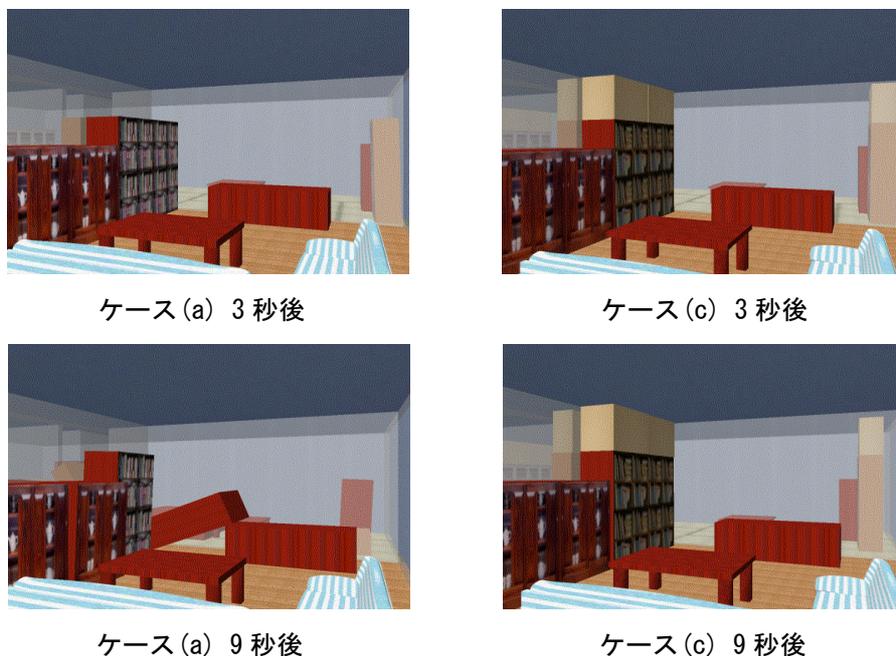


図8 新潟県中越地震(小千谷波)でのシミュレーション結果
(1Fを対象としたケース(a)と(c)の比較)

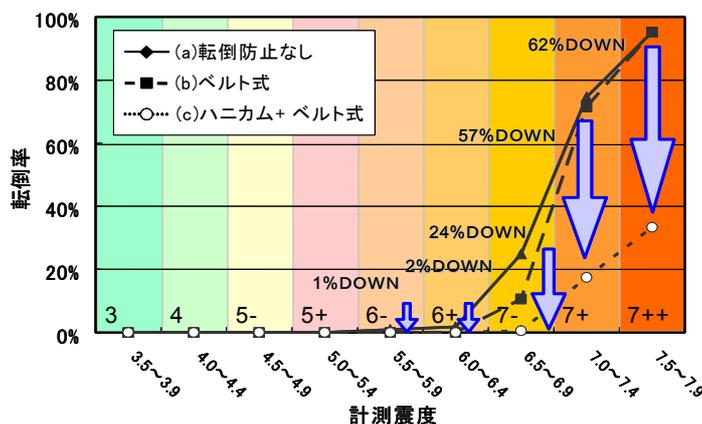


図9 各ケースの計測震度と転倒率の関係

3.4 家具の転倒率による生活空間の安全性評価

住民が長時間過ごす生活空間では、地震時の家具の転倒率をなるべく低く抑える対策を講じることが重要である。特に、寝ぼけていてとっさの行動が取りにくい寝室などでは、なおさらである。しかし、今回の結果からは、市販の器具の中で最も効果の高かった(c)の措置でも震度7+, 7++の床入力における転倒率がそれぞれ17.5%, 33.3%と安全とは言い難い。ここで、震度7+, 7++のような烈震にお

いても家具の転倒率を可能な限り0%に近づけ、生活空間の安全性を確保するためには次のような方法が考えられる。(i)何らかのより効果的な転倒防止装置を開発する。(ii)建物に免震、又は制震装置を取り付け、生活空間の床入力(計測震度)を低減する。今回のケースでは、図10のように、免震・制震装置により、震度7++の入力を震度7-まで下げることができれば、(c)の措置によって家具の転倒率を0%に近づけることができる。

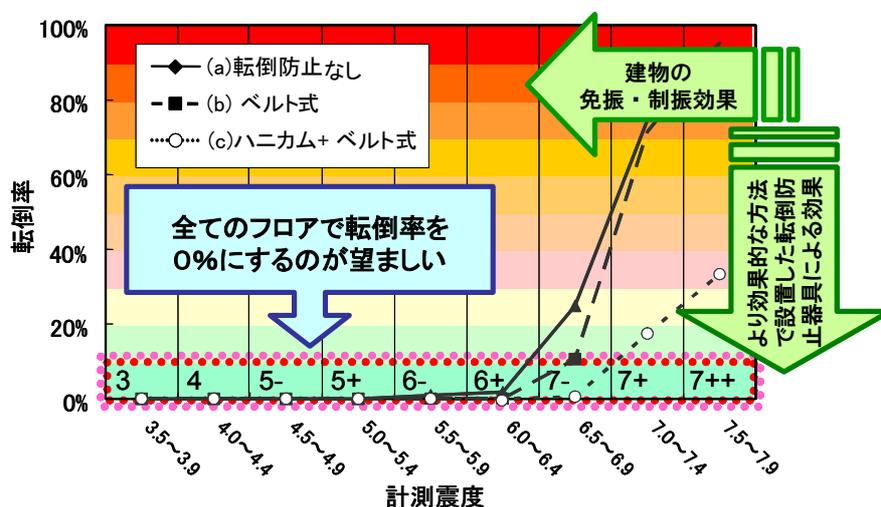


図10 安全性考慮のための計測震度と転倒率の関係

4. 結論ならびに今後の課題

本研究では、まずは家具の転倒防止器具の効果を検証するために、木製ブロックと実物家具を用いた振動台実験を行った。後者の実物家具の実験においては、より効果的な転倒防止器具の設置方法の検証を行った。次に、解析精度を確認済の3次元拡張個別要素法を用いた家具の動的挙動シミュレーションとVR技術を用いて、生活空間の安全性評価を行った。

本研究成果は、地震に関する専門知識のない一般市民の「危険・リスクの認知」と「対処・効果の認知」を高めると思われる。結果として、市民の防災意識の向上と具体的な防災対策が促進され、地震時の人的被害を軽減させることが期待される。

また今回の検討結果からは、20階を越えるようなビルの上層階では、床の応答は震度7+や7++にいたる非常に強い揺れになり、市販の転倒防止器具だけでは、安全性を確保することは難しいことがわかった。このような状況では、自分の現在の生活空間を対象に、部屋ごとの地震時の家具の転倒率を求め、それと自分の生活とを比較して、部屋の利用法を変えたり、家具を移動したりするなどの検討が求められる。さらには、今後は地震時の床応答が大きくなる高層ビルの上層階では、家具をなるべく用いない生活スタイルと、それを可能にする室内設計が求められよう。このような検討を合理的に行う上でも、本研究による成果が有効であると考えられる。

謝辞

本研究は、文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト テーマ4：耐震研究の地震防災対

策への反映」における研究課題「耐震補強を推進するための制度・システムの提案に関する研究(研究代表:目黒公郎)」の一環として実施した。また、実物家具を用いた振動台実験では清水建設(株)技術研究所の中村豊研究員、金子美香研究員に大変なご助力をいただいた。記して深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 内閣府:住宅における地震被害軽減に関する指針, 2004.8, p.1
- 2) 防災科学技術研究所:強震ネットワーク(K-NET), <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 3) 伊東大輔, 目黒公郎:地震時の家具転倒に関する安全性評価手法の開発, 日本地震工学会大会 2005 梗概集, 2005.11, p60-61

(受理:2006年6月20日)

(掲載決定2007年5月28日)

Experimental and Numerical Verification of the Effect of Furniture Overturning Prevention Devices

MEGRO Kimiro¹⁾, YOSHIMURA Miho²⁾, ITOH Daisuke³⁾, SATO Yoshihito⁴⁾

1) Member, Professor, The University of Tokyo, Dr. Eng

2) Member, Research Associate, The University of Tokyo, Dr. Eng

3), 4) Graduate Student, School of Engineering, The University of Tokyo

ABSTRACT

To reduce earthquake damage in the future, it is very important for each of us to take voluntary countermeasures. After the 1995 Kobe Earthquake, it was clear that the main countermeasures to prevent future disaster were to retrofit low earthquake prevent structures and to fix furniture. However, these measures have not been properly implemented mainly because many people can not imagine a disaster situation. In this study, we try to improve the people's capacity to imagine disasters so that they implement specific disaster countermeasures. At first, we analyze the effect of furniture overturning prevention devices and evaluate its efficiency by shaking table tests. Then, we try to promote people's risk awareness by showing animations of dynamic behavior of furniture in their own living spaces when earthquake occurs. Finally, we promote people's recognition of disaster countermeasures by discussing the furniture overturning ratio decline when overturning prevention devices are installed.

Key Words: Earthquake Disaster Reduction, Shaking Table Test, Furniture, Furniture Overturning Prevention Devices, Safety Evaluation, Extended Distinct Element Method