

# 地震時の室内の安全性評価のための 家具の地震時挙動と転倒防止装置効果の実験的・数値解析的検証

目黒 公郎<sup>1)</sup>, 吉村 美保<sup>2)</sup>, 伊東 大輔<sup>3)</sup>, 佐藤 芳仁<sup>3)</sup>

- 1) 東京大学生産技術研究所, 都市基盤安全工学国際研究センター, meguro@iis.u-tokyo.ac.jp
- 2) 東京大学生産技術研究所, 都市基盤安全工学国際研究センター, yosimura@iis.u-tokyo.ac.jp
- 3) 東京大学大学院工学系研究科

## 1. はじめに

現在わが国は、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、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<sup>1)</sup>。これらの大きな原因の1つに、多くの人々の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数値解析し、その結果をアニメーションとして提示するとともに、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

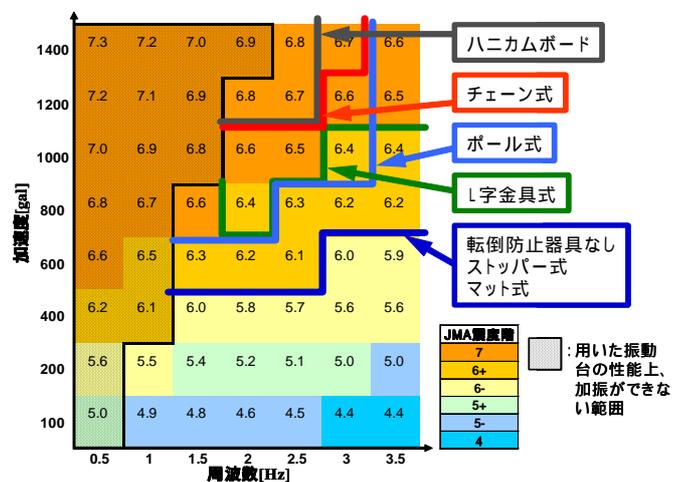
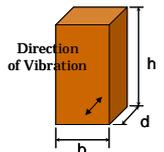
地震時の家具の動的挙動の把握と転倒防止装置の効果の評価するために、木製ブロックと実物の家具を用いた振動台実験を行なった。木製ブロックを用いた実験は、実家具の実験の導入として行ったものであり、同時に数値解析の精度を確認する情報を得るために行ったものである。以下に概要と結果を説明する。

### 2.1 木製ブロックを用いた振動台実験とその結果

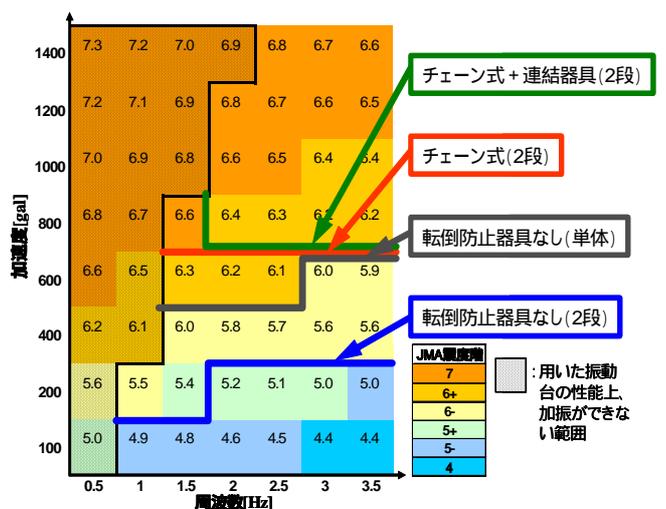
まず最初に、内部まで木材で充たされている木製

表1 木製ブロックの諸元

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



(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)

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。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，くさび型ストッパー式，ジェルマット式，ポール式，ハニカムボードを使用した。ハニカムボードとは，段ボール紙を幾層にも張り合わせた箱状のもので，段ボール箱に衣類を詰め込んだ程度の硬さを有している。これをポール式と同様に，家具と天井との間に挟みこんで転倒防止する。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，その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。くさび型ストッパー式，ジェルマット式，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。実験は供試体の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。ここでは紙面の制約から床面がフローリングの場合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場合についても同様の検証を行った。図1を見ると，単体ブロックのケースでは，くさび型ストッパー式やジェルマット式の効果は低く，ハニカムボードやチェーン式の効果が高いことがわかった。

## 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。

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

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には器具が損傷した。ベルトや取り付け器具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

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 ○ : ロッキング ○ : 変位なし
	畳	○	●	-	-	
ベルト式	30° 上	○	○	○	-	
	30° 下	○	○	○	○	
ポール式	板なし	○	○	○	●	
	板あり	-	-	-	○	

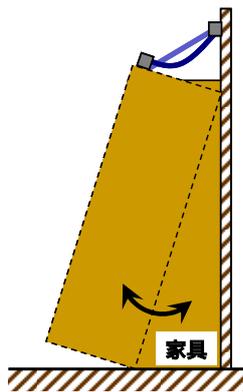


図 3 ベルト式を斜め上方向に設置した場合の家具の挙動

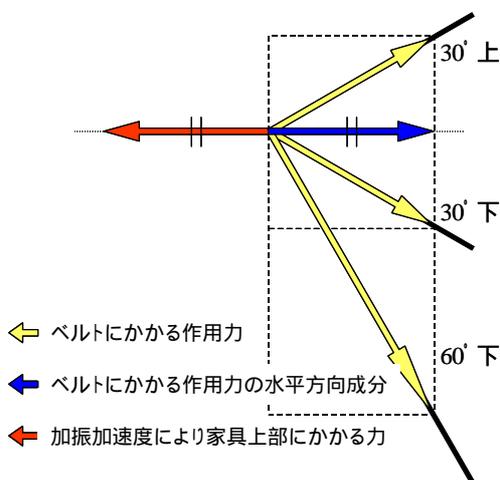


図 4 ベルトに作用する力の関係

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。

### 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, 87m<sup>2</sup>）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時刻暦の床応答を求め、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事前の検討から保障されている。

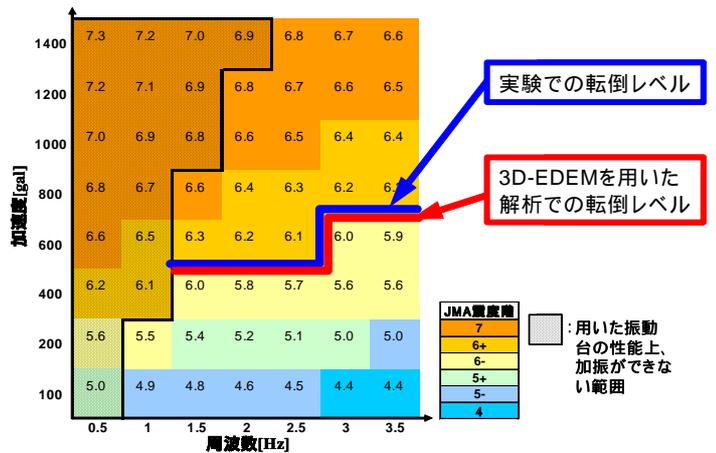


図 5 3D-EDEM と実験の転倒レベルの比較（床面：フローリング）

#### 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]	[kg/cm <sup>3</sup> ]
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

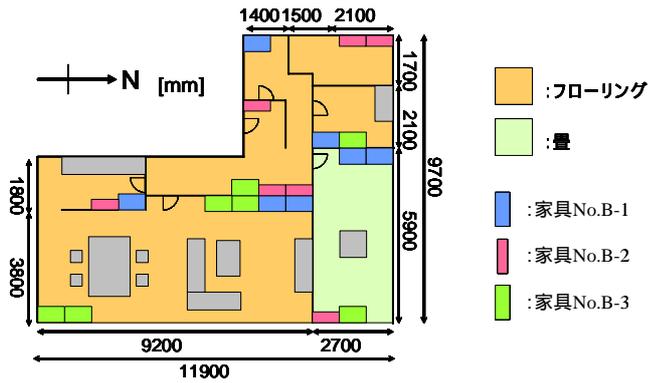


図 6 モデルルーム内家具の設置状況

### 3.2 多質点系パネ-マスモデルによる床入力データの作成

表 5 に示す K-NET<sup>2</sup>)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パネ マスモデルとしてモデル化した時刻暦応答解析行って、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の時刻暦波形から求めた気象庁震度階(計測震度)の関係を示す。なお、現行の気象庁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。

### 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)<sup>3</sup>)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パネによってモデル化している。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。

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	16	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	6.8	18	4.49	4.50
2004/9/5	紀伊半島南東沖	白山	6.8	18	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	13	6.73	0.60
2005/3/20	福岡県西方沖	平戸	7.0	9	5.09	0.46

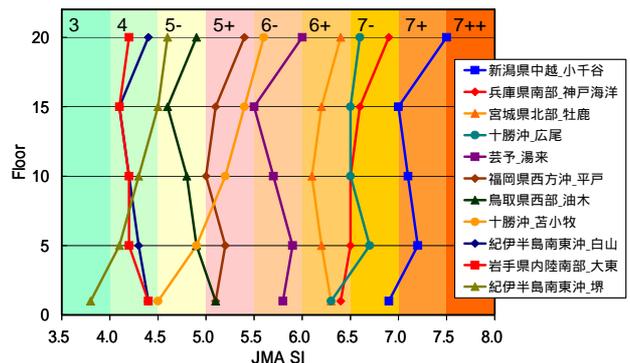


図 7 床応答データのフロアと計測震度の関係

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。

### 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%となり安全とは言い難い。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。( )何らかのより効果的な転倒防止装置を開発する。( )建物に免震、又は制震装置を取り付け、生活空間への床入力(計測震度)を低減する。(iii)通常の家具の利用は避け、ビルドインタイプのものとする。

図 10 を見ると、今回のケースでは、免震・制震装置により、床の入力震度 7++ 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ことがわかる。



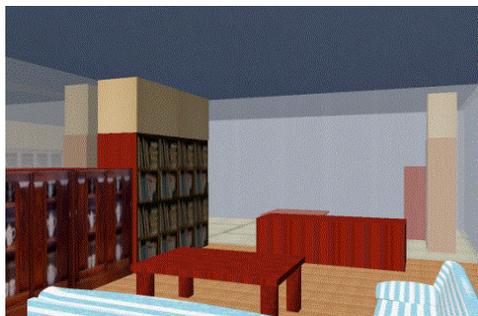
ケース(a)の 3 秒後



ケース(a)の 9 秒後



ケース(c)の 3 秒後



ケース(c)の 9 秒後

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)

#### 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 (3D-EDEM) 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」を高められる。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、振動が増幅され、床の応答は震度 7+や 7++にいたる非常に強い揺れになる。このレベルの入力地震動の場合では、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。

日本人の家具を用いる生活は、平屋建てとか、二階建てとかの中で培われた文化であり、高層ビルでの生活を前提としたものではない。もちろん日本でも揺れても大丈夫なように工夫した家具としては、船筆筒のようなものもあるわけで、地震時の高層ビルの上層階は船の中と同様だという認識を持てば、低層建物の場合とは異なる発想で対処しなくてはいけない。

地震時の床応答が大きくなる高層ビルの上層階では、ビルドインタイプの家具に限定するとか、家具をなるべく用いない生活スタイル、それを可能にする室内設計が求められる。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，日本地震学会大会 2005 梗概集，2005.11，p60-61

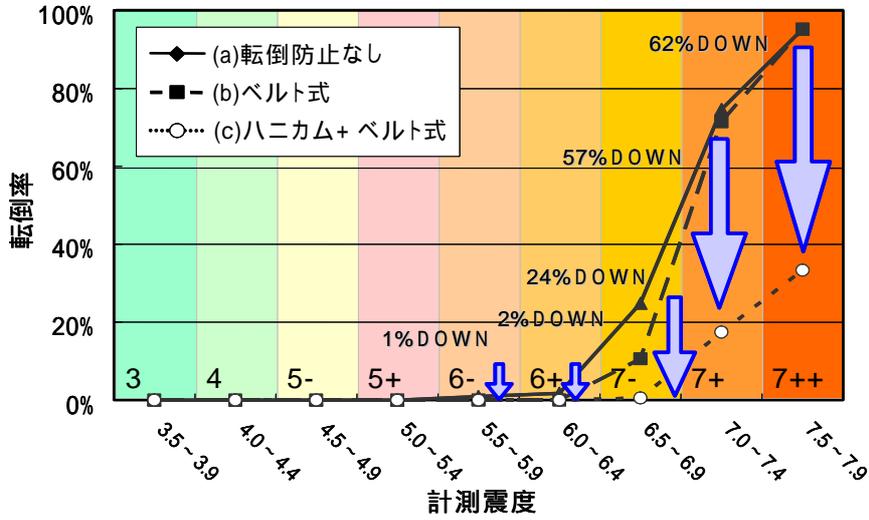


図9 各ケースの計測震度と転倒率の関係

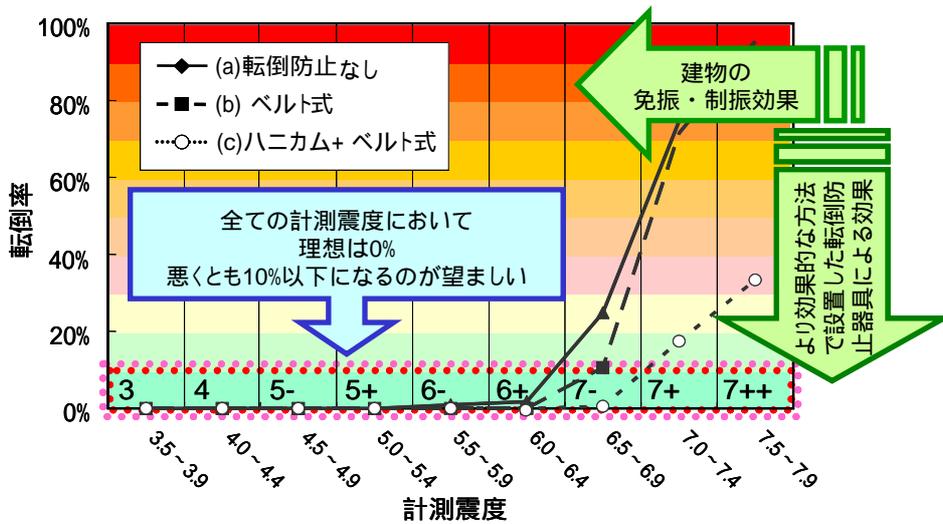


図10 安全性考慮のための計測震度と転倒率の関係