

長周期地震動等に伴う室内安全に関する検証（その1）

（家具の共振周波数〔固有周期〕と対策器具の有効性）

寺屋 充彦*, 田鍋 憲一*, 尾寄 純*

概 要

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震以後、長周期地震動に対する世間の関心が高まり、地震への備え（家具類の転倒・落下・移動防止対策、出火防止等）、地震時の行動、揺れが収まった後の行動が注目を浴びている。

本検証では、長周期地震動に潜む危険性を把握することを目的とし、室内安全、中でも床材の違いや家具転倒防止対策器具（以下「対策器具」という。）の取付方法の違いに起因する家具の挙動について振動装置を用いた実験を実施したほか、既往研究結果との比較を行った。

検証の結果、実験により家具ごとの固有周期の存在、床材の違いによる家具の転倒、滑動の傾向、対策器具の取付方法の違いによる安全性の傾向等を確認した。このほか、既往研究結果との比較により、今後発生が危惧される大規模地震による危険性を考慮した室内安全に関する知見を得た。

1 はじめに

(1) 現状と課題

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震による震災被害は、東京都内で同規模の地震が発生した場合、一層深刻な大惨事となることを連想させた。

また、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震は、津波被害の甚大さに加え、震源から離れた場所においても被害の発生に至る「長周期地震動」の脅威を都民に知らしめた。

そして現在は、首都直下地震、東海地震、東南海、南海地震など、甚大な被害をもたらす恐れのある巨大地震の発生が危惧されている。

このような中、今後懸念される巨大地震による被害、特に人的被害を抑制するためには、長周期地震動等に潜む危険性を把握するとともに既往研究により得た知見を併せ持った総合的な室内安全対策（地震への備え〔家具類の転倒・落下・移動防止対策、出火防止等〕、地震時の行動、揺れが収まった後の行動）を前進させ、都民への普及を推進していくことが喫緊の課題である。

(2) 既往研究の概要

これまで消防技術安全所（前：消防科学研究所）で実施した、地震時の家具等の挙動に関する主な研究概要を以下に示す。

ア 家具等の転倒防止用具の振動実験について（昭和58,59年度実施）¹⁾

地震動によって家具が転倒・落下し受傷する事例が多い。しかし、都内における調査結果（当時）によると、家庭内における転倒防止措置の実施率は25%に過ぎな

い。このことから家具転倒防止措置の励行をさらに啓蒙していく必要があるが、取付けに際する留意事項を検討するため、家庭内において一般的に用いられているいくつかの転倒防止用金具類についての振動実験を実施した。

その結果、静的強度を持った素材や構造の転倒防止対策器具（T字、L字金具）や木ネジであっても取付形態に起因して生じる、振動の撃力によって破壊する場合があること、転倒せずとも収容物飛散防止の対策が必要であること等が確認された。

イ 電子レンジの地震時の挙動及び安全対策に関する研究（平成11年度実施）²⁾

近年の住宅環境は、多くの家具や電気製品等に囲まれた快適な生活空間を有している。しかし、兵庫県南部地震で実証されたとおり、地震時には、これらの家具等が転倒・落下等により凶器となって人命に大きな影響を及ぼしたり、避難経路を封鎖するなど様々な被害を引き起こす要因ともなる。

この研究では、兵庫県南部地震において、振動の影響を最も強く受けた、家具上に置かれた電子レンジを対象として、家具等を壁などに固定する方法と、壁への固定はせずに当該家具等と電子レンジを固定する方法とを比較検討した。

その結果、電子レンジとレンジ台を固定し一体化すると重心が高くなり転倒危険が増すこと、レンジをレンジ台の天板に固定すると、レンジ台のロックにより壁への衝突により固定が外れ、落下危険が増すこと等が確認された。

ウ 大型家電製品の対震挙動及び安全対策に関する研究

*消防技術課

(平成 12 年度実施) ³⁾

過去の大きな地震においては家電製品の転倒・落下による人的被害や避難障害が数多く報告されている。昨今、家電製品が大型化、重量化したことによりその被害等がますます大きくなることが予想されることから、大型テレビについて地震時の挙動、安全対策について研究した。

その結果、テレビ(当時はブラウン管)は固定しないと地震動により後方へ移動し、壁との衝突により前方へ転倒、落下すること、テレビと台を固定し一体化すると重心が高くなり、転倒危険が増すこと等が確認された。

エ 冷蔵庫の対震挙動及び安全対策に関する研究(平成 13 年度実施) ⁴⁾

阪神・淡路大震災の被害では、建物等の躯体に被害は見られずとも、室内では家具や家電製品が転倒し被害をもたらした例が数多くあった。そこで本研究では、家電製品のうち冷蔵庫を取り上げ、地震時における冷蔵庫の対震挙動を調べた上で、有効とされている固定方法の検証を行った。

その結果、床材がじゅうたん等の摩擦の大きな物の場合、転倒危険性があること、ポール式の転倒防止対策器具は変形、飛散等により冷蔵庫の固定効果が低いこと等が確認された。

(3) 今回実施した検証

当庁の推進する室内安全対策は、地震への備え(家具類の転倒・落下・移動防止対策、出火防止等)、地震時の行動、揺れが収まった後の行動、に分類される。本検証ではその中で家具類の転倒・落下・移動防止対策に焦点を当て、長周期地震動特有の危険性の抽出を目的に、振動装置を活用し、家具(10種12品目)、対策器具(9種17品目)、床材(2種類)及び振動波(3種類)を変化させ次の3つの検証を実施した。

ア 家具特有の転倒危険性周期の検証

長周期地震動の周期範囲に家具特有の転倒しやすい共振周波数(固有周期)の存在を確認した。

イ 対策器具の各施工方法による効果の確認検証

家具転倒防止対策器具を正規の方法で取付けた場合(以下「完全施工」という。)、誤った取付けをした場合(以下「不完全施工」という。)、及び対策器具を増強し2か所に施工した場合(以下「完全二重施工」という。)の転倒防止効果について確認した。

ウ 対策器具が不完全な施工による転倒防止効果の低下に関する確認検証

従来の短周期地震動に有効とされる汎用の対策器具が、長周期地震動においてもその効果が認められるか、また、その施工が不完全であった場合の効果のさらなる低下度合を確認した。

このほか、今回の長周期地震動を主として実施した実験結果と、短周期地震動を主として実施した既往研究の結果を踏まえた家具転倒・落下・移動防止対策に関する提言を行った。

2 実験条件等

(1) 実験期間

平成 26 年 11 月 14 日から平成 26 年 11 月 21 日まで

(2) 実験場所

独立行政法人都市再生機構技術研究所振動実験棟

(3) 実験環境

ア 振動台

本検証に使用した振動台は、独立行政法人都市再生機構技術研究所の所有する振動台である。概観及び諸元・性能等は写真 1 及び表 1 のとおりである。



写真 1 振動台

表 1 振動台の諸元・性能

| 項目 | 性能 |
|-------|----------------------------------|
| テーブル | 4m×3m |
| 積載重量 | 4tf |
| 最大変位 | X : ±250mm Y : ±200mm Z : ±100mm |
| 最大速度 | X, Y, Z: 750mm/s |
| 最大加速度 | X, Y : ±1.2G Z: ±0.8G |

イ 鉄骨フレーム

本検証に使用したフレームは、独立行政法人都市再生機構技術研究所の所有する振動実験用フレームである。幅 130mm、180mm の H 鋼を使用して組上げられており、内寸法は幅 3,040mm× 奥行 1,623mm× 高さ 2,370mm である(写真 2 参照)。

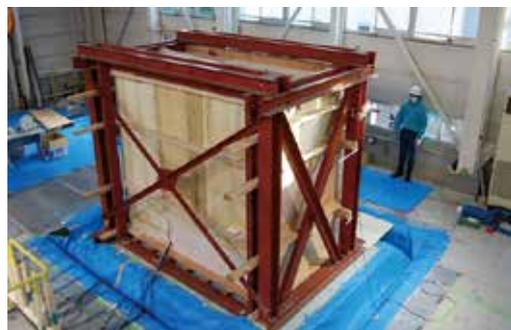


写真 2 鉄骨フレーム(壁体を施工した状態)

ウ 室内模型

前イの鉄骨フレームにクランプで角材を固定し、その

上に厚さ 15mm のベニヤ板に釘を打込み壁を構成した。写真 3 に床材をじゅうたんとした室内模型の例を示す。



写真 3 室内模型 (家具等配置)

エ 床材

床材はじゅうたん及びフローリングの 2 種を使用した。

オ 計測機器

計測には、加速度計及び変位計を用いた。

加速度計は共和電業社製小型低容量加速度変換器 AS-GB を、変位計は株式会社キーエンス製レーザ変位センサ LB-300 を用いた。

加速度計の諸元・性能を表 2 に、変位計の諸元・性能を表 3 に示す。

表 2 加速度計の諸元・性能

| 項目 | 性能 |
|-------|---|
| 定格要領 | $\pm 19.61\text{m/s}^2 (\pm 2\text{G})$ |
| 定格出力 | 0.5mV/V ($1,000 \times 10^{-6}$ ひずみ)以上 |
| 応答周波数 | DC~60Hz |
| 許容過負荷 | 300% |
| 質量 | 25g |

表 3 変位計の諸元・性能

| 項目 | 性能 |
|------|-------------------------------|
| 基準距離 | 300mm |
| 測定範囲 | $\pm 100\text{mm}$ |
| 光源 | 赤外線半導体レーザー、波長 JIS クラス 3B、15mw |
| 質量 | 約 250g |

カ 振動波

本検証には、以下に示す東北地方太平洋沖地震の地震波、正弦波、8 の字運動波の 3 種類の振動波を用いた。

(ア) 東北地方太平洋沖地震波

長周期地震動実測波を代表し、東北地方太平洋沖地震の千代田区大手町における気象庁観測波 (以下「東日本波」という。) を用いた。

(イ) 正弦波

長周期地震動の中にも強い衝撃が点在し、それにより家具の転倒、ロッキング等が考えられることから家具ごとの共振周波数 (固有周期) の存在を検証するため、正弦波を使用した。

正弦波の周期帯は、東日本波の変位に関するフーリエスペクトル (図 1 参照) を基に、大きな振幅 (概ね 10 cm 以上) が現れる 0.1Hz~3.0Hz の周期帯とした。

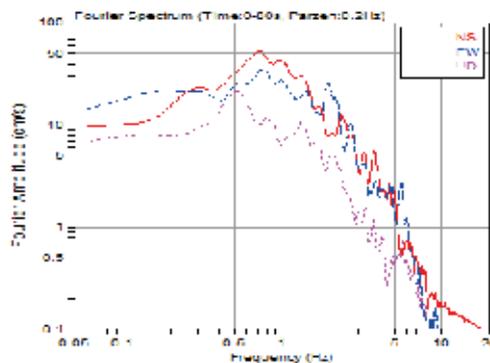


図 1 東日本波の変位に関するフーリエスペクトル

(ウ) 8 の字運動波

長周期地震動による各試験体の挙動分析に際し、既存の長周期地震動の実測波を用いることは、その複雑さにより挙動発生メカニズムを明確に把握することに困難を生じる。

そこで本検証では各試験体の挙動分析、検討等での活用を目的に、長周期地震動の特徴を維持し、一定の規則性を持ち、かつ簡便な振動波を以下の内容で考案した。

まず、長周期地震動の実測波を 2 次元平面に射影すると 8 の字を描くような軌跡を形成している (図 2 参照)。

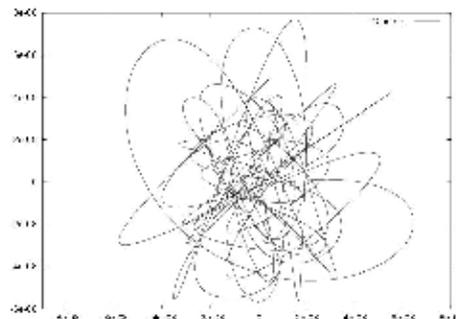


図 2 長周期地震動を二次元上に射影した波形例

実験ではこれを図 3 のように単純かつ規則性を持つ 8 の字型と設定し、振動台の最大振幅 ($\pm 250\text{mm}$ 、 $\pm 200\text{mm}$ 、X-Y 方向) 及び振動台の最大速度 750mm/s を活かす 8 の字運動波形の寸法を算出した。

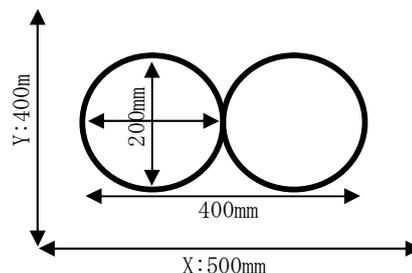


図 3 8 の字運動波形

この波形は1行程が約1256.6mmであることから、1周期を2秒と決め、これらを基にX、Y方向別の入力加速度(振動数)をX方向100.0gal(0.5Hz)、Y方向400.0gal(1.0Hz)を導出し、使用した。

なおこの振動波は、局所的に震度5弱相当の揺れを含む⁶⁾ものである。

(4) 実験対象

ア 使用した家具

実験に使用した家具は、本棚、レンジ台、電子レンジ、冷蔵庫、食器棚、テレビ、テレビスタンド、OAデスク、OAチェア、木製チェアの10種12品目とした。詳細を表4に示す。

表4 使用した家具

| No. | 家具 | 寸法(単位=mm) (幅×奥行×高さ) | 質量 (単位=kg) | 備考 |
|-----|-------------|------------------------|---------------|----------------------------------|
| ① | 本棚1 | 900×300×1800 | 32.0 | 棚板耐荷重20kg 地板は転倒防止の為80mm前方に突出。 |
| ② | 本棚2 | 450×290×1800 | 18.5 | 棚板耐荷重10kg |
| ③ | レンジ台 | 540×450×1010 | 27.0 | 耐荷重約8kg スライダテーブル25cm張出 |
| ④ | 電子レンジ | 490×430×365 | 16.5 | 最高出力1,000W、 過熱水蒸気オーブレンジ |
| ⑤ | 冷蔵庫 | 650×640×1803 | 92.0 | 定格内容量400L 4輪キャスター |
| ⑥ | 食器棚1 | 580×300×1820 | 31.0 | 棚板耐荷重7kg |
| ⑦ | 食器棚2 | 586×359×1779 | 34.2 | 棚板耐荷重7kg |
| ⑧ | テレビ | 926×200×603 | 11.5 | 液晶テレビ40Vワイド |
| ⑨ | テレビ スタンド | 1243×843×1420 | 15.5 | キャスター移動式 |
| ⑩ | OAデスク | 800×700×700 | 22.2 | 総耐荷重100kg |
| ⑪ | OAチェア | 800×700×700 | 10.0 | 座席幅W450×D400mm |
| ⑫ | 木製チェア | 395×445×900 | 12.0 | 座面高さ440mm 天然木 |

イ 使用した対策器具等

実験に使用した対策器具は、マット式、ポール式、ホールド式、ストッパー式、ベルト式、キャスター下皿、ワイヤー式、滑り材、戸開き防止器具の9種17品目とした。図4に使用した対策器具の一部のイメージを、表5に使用した対策器具を示す。

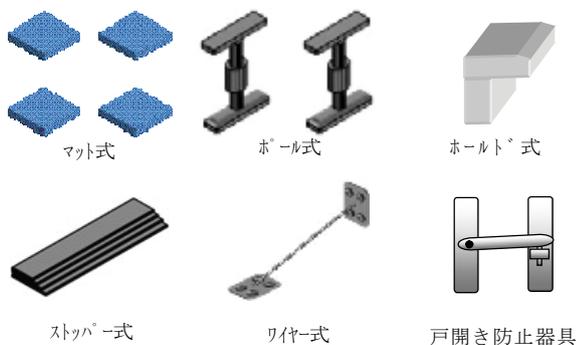


図4 使用した対策器具のイメージ(一部抜粋)

表5 使用した対策器具等

| No. | 対策器具 | 規格 |
|-----|----------|--|
| ① | マット式1 | 縦50×横50×厚5mm、4枚組、透明ポリウレタン、耐荷重100kg、耐用年数10年 |
| ② | マット式2 | 円形φ30mm、4枚、透明ポリウレタン、耐荷重25kg、耐用年数10年 |
| ③ | マット式3 | 幅103.5×奥72.5×厚24.5mm、3枚1セット(2枚は角有)、透明(ジェル部分)、ポリウレタン/スチール/ゴム、耐荷重200kg、耐用年数10年 |
| ④ | マット式4 | 縦40×横40×厚5mm、4枚、黒、スレン系ポリマー、耐荷重60kg、耐用年数10年 |
| ⑤ | ホールド式1 | ベース部:縦70×横50mm、アーム部:縦40×横35mm、2個、高剛性ABS樹脂、重量目安60kg |
| ⑥ | ホールド式2 | ベース部:縦70×横50mm、アーム部:縦50×横35mm、2個、高剛性ABS樹脂、重量目安60kg |
| ⑦ | ホールド式3 | ベース部:縦90×横50mm、アーム部:縦90×横50mm、2枚、高剛性ABS樹脂、重量目安100kg |
| ⑧ | ポール式 | 縦252×横60×高420~800mm、2本、アルミ/鉄/ABS樹脂/ウレタン/ゴム、スレン系ポリマー、耐圧最大2t |
| ⑨ | ストッパー式 | 幅1200×奥44×厚10mm(反対側3mm)、1本、合成樹脂エラストマー |
| ⑩ | ベルト式 | 幅42×長さ110mm ABS樹脂製、耐荷重80kg |
| ⑪ | キャスター下皿1 | 円形、内径55mm、外形88mm、厚み5mm、2皿、透明(ジェル部分)、ポリウレタン/ステンレス、耐荷重200kg、耐用年数10年 |
| ⑫ | キャスター下皿2 | 円形、内径55mm、外形60mm、厚み22mm、4皿、透明(ジェル部分)、ポリウレタン/シリコン、耐荷重120kg、耐用年数10年 |
| ⑬ | ワイヤー式1 | 本体:縦70×横30×12mm、2個、亜鉛めっき、ワイヤー長1m(ステンレス)、耐荷重90kg |
| ⑭ | ワイヤー式2 | 本体:縦53×横100×厚14mm、1個、亜鉛めっき、ワイヤー長1m(ステンレス)、耐荷重90kg |
| ⑮ | すべり材 | 縦200×横270×厚1mm、フッ素樹脂 |
| ⑯ | 戸開き防止器具1 | 耐圧30kg |
| ⑰ | 戸開き防止器具2 | 幅39×高58~88×奥63mm、ABS樹脂 |

3 実験方法

各試験体等を配置させ、以下に示す10項目の観点で合計35パターンの振動実験を実施した。

(1) 東日本波による家具挙動の再現検証

東日本波を使用し、床材がフローリングとじゅうたんである場合とで比較した(表6参照)。

なお家具は本棚、電子レンジ、レンジ台、冷蔵庫、テレビを使用し、対策器具は使用しなかった。

表6 (1)に関する実験パターン

| 実験No. | 各要素 | | | 対策器具 |
|-------|------|-----|--------|------|
| | 振動波 | 周期等 | 床材 | |
| 01 | 東日本波 | — | フローリング | 不使用 |
| 02 | | | じゅうたん | |

(2) 家具の共振周波数の検証

加速度一定(240gal)の正弦波で一方向(X軸)のみ加振し、振動周波数を変化させた場合の家具の共振周波数の有無について検証した(表7参照)。

なお家具は本棚、電子レンジ、レンジ台、冷蔵庫、テレビを使用し、対策器具は使用しなかった。

表7 (2)に関する実験パターン

| 実験 No. | 各要素 | | | |
|-----------|-----|-------|-------|------|
| | 振動波 | 周期等 | 床材 | 対策器具 |
| 03 | 正弦波 | 3.0Hz | じゅうたん | 不使用 |
| 04 | 正弦波 | 2.8Hz | じゅうたん | 不使用 |
| 05 | 正弦波 | 2.6Hz | じゅうたん | 不使用 |
| 06 | 正弦波 | 2.4Hz | じゅうたん | 不使用 |
| 07 | 正弦波 | 2.2Hz | じゅうたん | 不使用 |
| 08 | 正弦波 | 2.0Hz | じゅうたん | 不使用 |
| 09 | 正弦波 | 1.8Hz | じゅうたん | 不使用 |
| 10 | 正弦波 | 1.6Hz | じゅうたん | 不使用 |
| 11 | 正弦波 | 1.4Hz | じゅうたん | 不使用 |
| 12 | 正弦波 | 1.2Hz | じゅうたん | 不使用 |
| 13 | 正弦波 | 1.0Hz | じゅうたん | 不使用 |
| 14 | 正弦波 | 0.8Hz | じゅうたん | 不使用 |
| 15 | 正弦波 | 0.6Hz | じゅうたん | 不使用 |
| 16 | 正弦波 | 0.4Hz | じゅうたん | 不使用 |

(3) じゅうたんとフローリングにおける家具の挙動特性の検証

(2)において、家具の転倒・落下・移動が顕著にみられた周波数(2.0Hz、1.6Hz、1.0Hz、0.6Hz)の振動波をフローリングに適用し、じゅうたんとフローリングにおける家具の挙動の違いを検証した(表8参照)。

なお家具は本棚、電子レンジ、レンジ台、冷蔵庫、テレビを使用し、対策器具は使用しなかった。

表8 (3)に関する実験パターン

| 実験 No. | 各要素 | | | |
|-----------|-----|-------|---------|------|
| | 振動波 | 周期等 | 床材 | 対策器具 |
| 17 | 正弦波 | 2.0Hz | フローリング* | 不使用 |
| 18 | 正弦波 | 1.6Hz | フローリング* | 不使用 |
| 19 | 正弦波 | 1.0Hz | フローリング* | 不使用 |
| 20 | 正弦波 | 0.6Hz | フローリング* | 不使用 |

(4) 対策器具を施工した場合の長周期地震動に対する挙動特性検証

長周期とされる周波数(1.0Hz、0.6Hz)の正弦波を用いて、対策器具を施工した場合における家具の挙動特性を検証した(表9参照)。

なお家具は本棚、電子レンジ、レンジ台、冷蔵庫、食器棚、テレビ、OAデスクを使用し、対策器具はマット式、ポール式、ストッパー式を使用した。

表9 (4)に関する実験パターン

| 実験 No. | 各要素 | | | |
|-----------|-----|-------|---------|------|
| | 振動波 | 周期等 | 床材 | 対策器具 |
| 21 | 正弦波 | 1.0Hz | フローリング* | 使用 |
| 22 | | 0.6Hz | | 使用 |

(5) テレビスタンドの危険性の確認

重心位置が高く不安定とされるテレビスタンドの挙動について東日本波を用いて検証した(表10参照)。

なお家具はテレビ(テレビスタンドにキャスターを設定)を使用し、対策器具は使用しなかった。

表10 (5)に関する実験パターン

| 実験 No. | 各要素 | | | |
|-----------|------|-----|---------|------|
| | 振動波 | 周期等 | 床材 | 対策器具 |
| 23 | 東日本波 | — | フローリング* | 不使用 |

(6) 対策器具の施工方法による効果の違いの確認

長周期地震動に対する対策器具の施工方法(完全施工、不完全施工、完全二重施工)による効果の違いについて8の字運動波を用いて検証した(表11参照)。

なお家具は本棚、電子レンジ、レンジ台、冷蔵庫、食器棚、テレビ、OAデスクを使用し、対策器具はマット式、ポール式、ストッパー式、キャスター受け皿、ベルト式を使用した。

表11 (6)に関する実験パターン

| 実験 No. | 各要素 | | | |
|-----------|--------|------------------------------------|---------|--------|
| | 振動波 | 周期等 | 床材 | 対策器具 |
| 24 | 8の字運動波 | X:0.5Hz, 100gal Y:1.0Hz, 400gal | フローリング* | 完全施工 |
| 25 | | | | 不完全施工 |
| 26 | | | | 完全二重施工 |

(7) 8の字運動波において、加速度を弱めた場合の挙動の確認

対策器具が不完全施工である場合の危険性を詳細に把握するために、X、Y軸についての加速度を半分の50gal(X軸)に、200gal(Y軸)にした8の字運動波(局所的に震度4相当の揺れを含む⁶⁾)で実験を実施した(表12参照)。

なお家具は本棚、電子レンジ、レンジ台、冷蔵庫、食器棚、テレビ、OAデスクを使用し、対策器具はマット式、ポール式、ストッパー式、ワイヤー式を使用した。

表12 (7)に関する実験パターン

| 実験 No. | 各要素 | | | |
|-----------|--------|-----------------------------------|---------|---|
| | 振動波 | 周期等 | 床材 | 対策器具 |
| 27 | 8の字運動波 | X:0.5Hz, 50gal Y:1.0Hz, 200gal | フローリング* | ホールド式:片方 マット式:3か所 ポール式:1本 ストッパー式:裏返し |
| 28 | | | | ホールド式:片方 マット式:1か所 |
| 29 | | | | ホールド式:片方 ワイヤー式:緩み及びフック逆 |

(8) 粘着力低下における危険性の確認

ホールド式対策器具のシール部分及びマット式対策器具のゲル部分の粘着力を低下させた場合における危険性に関する検証を実施した(表13参照)。

なお家具は本棚、電子レンジ、レンジ台、冷蔵庫、食器棚、テレビ、OAデスクを使用し、対策器具はマット式、ホールド式を使用した。

表 13 (8)に関する実験パターン

| 実験 No. | 各要素 | | | |
|--------|--------|-----------------------------------|--------|---|
| | 振動波 | 周期等 | 床材 | 対策器具 |
| 30 | 8の字運動波 | X:0.5Hz, 50gal Y:1.0Hz, 200gal | フローリング | レンジ、冷蔵庫、食器棚、テレビ：マット式 本棚、レンジ台、OAデスク：ホールド式 |
| 31 | | | | 本棚：マット式 レンジ、レンジ台、冷蔵庫、食器棚、テレビ、OAデスク：ホールド式 |

(9) フローリングにおけるすべり材の用途外使用による危険性の検証

家具上部に対策器具を、下部にすべり材を使用した場合の危険性について検証した(表14参照)。

なお家具は本棚、電子レンジ、レンジ台、冷蔵庫、食器棚、テレビ、OAデスク、OAチェアを使用し、対策器具はマット式、ホールド式、ポール式、すべり材を使用した。

表 14 (9)に関する実験パターン

| 実験 No. | 各要素 | | | |
|--------|--------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
| | 振動波 | 周期等 | 床材 | 対策器具 |
| 32 | 8の字運動波 | X:0.5Hz, 50gal Y:1.0Hz, 200gal | フローリング | 上部：ホールド式、ポール式 下部：マット式、すべり材 |

(10) 背の高い家具の危険性に関する検証

寝室において、背の高い家具が長周期地震動波によって起こす危険性について検証した(表15参照)。

なお家具は本棚(2種類)、食器棚(2種類)を使用し、対策器具はストッパー式を使用したほか、床上に等身大の人形を配置した。

表 15 (10)に関する実験パターン

| 実験 No. | 各要素 | | | |
|--------|--------|-----------------------------------|--------|------------------------------------|
| | 振動波 | 周期等 | 床材 | 対策器具等 |
| 33 | 8の字運動波 | X:0.5Hz, 50gal Y:1.0Hz, 200gal | フローリング | 下部：ストッパー式 人形横置き |
| 34 | | | | 下部：ストッパー式 人形縦置き |
| 35 | | | | X:0.5Hz, 100gal Y:1.0Hz, 400gal |

4 実験結果

(1) 東日本波による家具挙動の再現検証

実験No.01及び実験No.02の結果を表16に示す。

表 16 東日本波による家具挙動の実験結果

| 実験No. | 家具等の挙動 |
|-------|-------------|
| 01 | 本棚ロッキング、本落下 |
| 02 | 本棚ロッキング |

双方の実験において本棚のロッキング等が発生したが、その他の大きな危険性は認められず、フローリングとじゅうたんによる挙動の違いを確認するには至らなかった。

(2) 家具の共振周波数の検証

実験No.03から実験No.16までの結果を表17に示す。

表 17 じゅうたんでの共振周波数の実験結果

| 実験 No. | 周波数 | テレビ(スタント) | 電子レンジ | レンジ台 | 本棚 | 冷蔵庫 |
|--------|-------|---------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| 03 | 3.0Hz | 横 3.0 | 横 2.5 | 横 2.5 | なし | 横 3.0 |
| 04 | 2.8Hz | 横 2.0 | なし | 横 5.0 縦 5.0 | 横 1.0 | 横 3.0 |
| 05 | 2.6Hz | 横 3.0 | 横 2.0 | 横 3.0 | なし | 横 3.0 |
| 06 | 2.4Hz | 横 4.0 | 横 2.0 | 横 5.0 | 横 5.0 | 横 3.0 |
| 07 | 2.2Hz | スタント たわみ 横 2.0 | 横 1.0 | 横 2.0 | ロッキング | なし |
| 08 | 2.0Hz | スタント たわみ | 横 2.0 | ロッキング 横 1.0 | ロッキング 横 4.0 | なし |
| 09 | 1.8Hz | ロッキング 横 5.0 | 横 1.0 | 横 4.0 縦 20.0 | ロッキング 横 6.0 | 横 3.0 |
| 10 | 1.6Hz | ロッキング 横 6.0 | 横 1.0 | ロッキング | ロッキング 横 1.0 | 横 2.0 |
| 11 | 1.4Hz | ロッキング 横 30.0 縦 19.0 | なし | ロッキング 横 21.0 | 横 2.0 縦 4.0 | なし |
| 12 | 1.2Hz | 横 80.0 縦 39.0 | 横 3.0 縦 2.0 | ロッキング 横 8.0 縦 4.0 | ロッキング 横 2.0 縦 2.0 | 横 2.5 |
| 13 | 1.0Hz | なし | 落下 | 転倒 | 転倒 | 横 3.0 |
| 14 | 0.8Hz | 縦 3.0 | 横 5.0 縦 4.0 | ロッキング 横 8.0 縦 5.0 | 転倒 | なし |
| 15 | 0.6Hz | 横 10.0 縦 2.0 | 横 2.0 縦 2.0 | ロッキング 横 1.0 縦 2.0 | 転倒 | なし |
| 16 | 0.4Hz | 強制停止 | 強制停止 | 強制停止 | 転倒 | 強制停止 |

※数値は移動距離 (cm)、横：振動方向、縦：振動方向に対して垂直方向

実験では、テレビは1.8Hz～1.4Hzでロッキングが生じた。電子レンジは、1.0Hzで転倒、落下し、本棚にあっては2.2Hz～1.2Hzでロッキングが発生し、1.0Hz～0.6Hzで転倒した。以上の挙動から、家具ごとに共振周波数が存在することが窺えた。

(3) じゅうたんとフローリングにおける家具の挙動特性の検証

実験No.17から実験No.20までの結果を表18に示す。

表 18 フローリングでの共振周波数の実験結果

| 実験 No. | 周波数 | テレビ(スタント) | 電子レンジ | レンジ台 | 本棚 | 冷蔵庫 |
|--------|-------|------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|----------------|
| 17 | 2.0Hz | 横 2.0 縦 2.0 | 横 29.0 縦 5.0 | 横 31.0 縦 5.0 | 本落下 | 横 3.0 |
| 18 | 1.6Hz | 横 48.0 縦 13.0 | 横 7.0 | 横 10.0 | 本落下 横 1.0 縦 1.0 | 横 3.5 縦 1.0 |
| 19 | 1.0Hz | 横 22.0 | 横 6.5 縦 1.0 | 左 5.0 縦 3.0 | 本落下 横 5.0 縦 4.0 | 横 3.5 縦 1.0 |
| 20 | 0.6Hz | 横 12.0 縦 26.0 | 横 6.5 縦 2.0 | テーブル 張出 横 6.5 | 転倒 | 横 4.0 縦 3.0 |

※数値は移動距離 (cm)、横：振動方向、縦：振動方向に対して垂直方向

実験から、テレビ、レンジ、冷蔵庫においてロッキング等は発生しなかった。本棚は2.0Hz～0.6Hzにおいて

本が落下し、0.6Hzで転倒した。

以上の結果及び前(2)の実験から、じゅうたんよりフローリングの方がより長周期側の振動数で危険性が高くなる傾向が窺えた。

(4) 対策器具を施工した場合の長周期地震動に対する挙動特性検証

実験No.21及び実験No.22の結果を表19に示す。

表19 対策器具を施工した場合の挙動特性

| 実験No. | 家具等の挙動 |
|-------|--------------------|
| 21 | 食器棚ロッキング、OAデスク若干移動 |
| 22 | 食器棚転倒、OAデスク移動 |

1.0Hzの実験No.21において、OAデスクの±5.0cm程度移動はあったが、対策器具等の効果と思われる耐性があり、試験前後で変化はみられなかった。

0.6Hzの実験No.22において、ストッパー式の対策器具を施工した食器棚は転倒し、ホールド式対策器具を施工したOAデスクは、対策器具が外れ大きく滑動した。

以上の結果より、1.0Hzの揺れよりも、長周期側の0.6Hzの揺れの方が対策器具の効果が低く、危険性が高いことが窺えた。

(5) テレビスタンドの危険性の確認

実験No.23において、東日本大震災の揺れでは若干の移動にとどまり、大きな危険性は窺えなかった。

(6) 対策器具の施工方法による効果の違いの確認

実験No.24から実験No.26の結果を表20に示す。

表20 対策器具を施工方法による効果の違い

| 実験No. | 家具等の挙動 |
|-------|---|
| 24 | 本棚ロッキング、本落下、レンジ落下、食器棚戸開き防止金具はずれ、食器飛散、テレビ転倒、マット剥がれ |
| 25 | 本棚ロッキング、本落下、レンジ対策器具外れ、冷蔵庫ホール式対策器具外れ、食器棚戸開き防止金具外れ、食器飛散、テレビ落下、対策器具の机からの外れ |
| 26 | 本棚ロッキング、本落下、食器棚ロッキング |

実験結果から、不完全施工より、完全施工、完全二重施工になるにつれて被害軽減効果は上がることが窺えた。

また、完全施工の場合であっても転倒等の危険性は依然として高いことが窺えた。

(7) 8の字運動波において、加速度を弱めた場合の挙動の確認

実験No.27から実験No.29の結果を表21に示す。

表21 対策器具の不完全施工の危険性

| 実験No. | 家具等の挙動 |
|-------|--|
| 27 | 本落下、食器棚移動 |
| 28 | 本落下、本棚対策器具外れ、食器棚転倒、食器飛散、テレビ対策器具外れ、OAデスク対策器具壁から外れ |
| 29 | 本棚ロッキング、本落下、食器棚ロッキング、テレビ転倒、OAデスク対策器具机から外れ |

実験結果から、対策器具の施工が不完全であった場合は震度4相当の揺れにおいても、ロッキング、本落下、

食器飛散等の危険性があることが窺えた。

(8) 粘着力低下における危険性の確認

実験No.30及び実験No.31の結果を表22に示す。

表22 粘着力が低下している場合の挙動特性

| 実験No. | 家具等の挙動 |
|-------|--|
| 30 | 本落下、対策器具壁から剥がれ、OAデスク若干移動、対策器具机から剥がれ |
| 31 | 対策器具レンジから剥がれ、食器棚転倒、対策器具棚から剥がれ、OAデスク移動、対策器具壁から剥がれ |

実験結果から、家具上部やOAデスクに施工したホールド式対策器具は剥がれやすく対策器具の効果が低下することがわかった。

一方、マット式対策器具を使用した家具（実験No.30ではレンジ、冷蔵庫、食器棚、実験No.31では本棚）については、大きな危険は確認されなかった。

(9) フローリングにおける家具すべり材の用途外使用による危険性の検証

実験から、OAデスクの移動、本棚のポール式対策器具の曲がり、本の落下、食器棚のポール式対策器具の曲がりなど、すべり材に起因する家具の滑動による家具上部の対策器具への影響の可能性が窺えた。

(10) 背の高い家具の危険性に関する検証

実験No.33から実験No.35の結果を表23に示す。

表23 背の高い家具の挙動特性

| 実験No. | 家具等の挙動 | 周期等 |
|-------|-------------|---------------------------------|
| 33 | 本落下、本棚ロッキング | X:0.5Hz, 50gal Y:1.0Hz, 200gal |
| 34 | 本落下、本棚ロッキング | X:0.5Hz, 50gal Y:1.0Hz, 200gal |
| 35 | 本棚転倒、食器飛散 | X:0.5Hz, 100gal Y:1.0Hz, 400gal |

実験結果から、本棚が転倒しないまでも落下した本が人形の頭部に当たる等した結果から、寝室に背の高い家具を置くと、それだけ人命危険が高くなることが窺えた。

5 結論

(1) 家具特有の転倒危険性周期の検証について

3(2)の実験により、それぞれの家具における、転倒しやすい共振周波数（固有周期）の存在が示唆された。

テレビ（スタンド付き）は、床材がじゅうたんの場合は1.6Hz（周期0.63秒）で、フローリングの場合は0.6Hz（周期1.67秒）において家具上部における計測加速度が大きくなる傾向が窺えた。

電子レンジは、床材がじゅうたんの場合は1.0Hz（周期1秒）で計測加速度が大きくなる傾向が窺えた。フローリングの場合は、周波数による大きな変化はみられなかった。これは、レンジ台の滑動の影響が考えられる。

本棚は、床材がじゅうたんの場合は長周期側の1.0Hz、0.6Hzで転倒した。また、フローリングの場合は特定の周波数（0.6Hz）で加速度が大きくなる傾向が窺えた。

冷蔵庫は、床材がじゅうたんの場合は大きな変化はな

かったが、フローリングの場合は、周期が長くなるにつれて移動量が大きくなる傾向が窺えた。

ここで、2.0Hz、1.6Hz、1.0Hz、0.6Hz の周波数で実施した振動実験におけるテレビ、電子レンジ、本棚及び冷蔵庫の上部で検出した加速度の範囲を表 24 から表 27 に示す。

表 24 テレビ（スタンドつき）の加速度 (gal)

| 床材 | 2.0Hz | 1.6Hz | 1.0Hz | 0.6Hz |
|--------|-----------|------------|------------|------------|
| じゅうたん | -1500~900 | -1700~1200 | -1400~1100 | -800~500 |
| フローリング | -1500~900 | -1800~900 | -1600~1600 | -1800~1800 |

表 25 電子レンジの加速度 (gal)

| 床材 | 2.0Hz | 1.6Hz | 1.0Hz | 0.6Hz |
|--------|-----------|-----------|------------|-----------|
| じゅうたん | -2500~600 | -2300~600 | -3200~3200 | -1200~400 |
| フローリング | -400~500 | -300~400 | -300~300 | -300~300 |

表 26 本棚の加速度 (gal)

| 床材 | 2.0Hz | 1.6Hz | 1.0Hz | 0.6Hz |
|--------|----------|----------|------------|------------|
| じゅうたん | -300~300 | -400~300 | -2100~2700 | -1600~200 |
| フローリング | -400~400 | -500~400 | -600~1900 | -3000~1800 |

表 27 冷蔵庫の加速度 (gal)

| 床材 | 2.0Hz | 1.6Hz | 1.0Hz | 0.6Hz |
|--------|----------|-----------|-----------|-----------|
| じゅうたん | -400~400 | -1300~500 | -3700~600 | -400~300 |
| フローリング | -900~300 | -1000~400 | -1300~300 | -1700~500 |

これらの表から、床材の違いによる加速度の範囲を家具ごとに比較すると、加速度絶対値が最大となる周期は、じゅうたんよりフローリングの方が長周期側（周波数が小となる方向）に若干寄っている様子が窺える。

床材の違いによる共振周波数の変化は、じゅうたん和フローリングによる摩擦抵抗の違いによるものと考えられるが、詳細については更なる分析が必要である。

(2) 対策器具の各施工方法による効果について

大きく長く揺れる長周期地震動において、対策器具の員数が足りない、又は裏表反対等の誤った施工方法であった場合などでは、対策器具の効果は、著しく低下することがわかった。

一方で、対策器具 2 種類を組合せて使用した場合、効果は大きく向上した。

ここで、完全二重施工、完全施工、不完全施工それぞれにおける加速度絶対値の最大について、振動台の加速度振幅を 1 とした場合の倍数を表 28 に示す。

表 28 最大加速度振幅の倍数

| 家具名 | 完全二重施工 | | 完全施工 | | 不完全施工 | |
|-------|--------|-----|------|------|-------|------|
| | X | Y | X | Y | X | Y |
| テレビ | - | 3.1 | - | 4.0 | - | 4.4 |
| 電子レンジ | 2 | 1.6 | 6.1 | 2.2 | 6.1 | 2.2 |
| 本棚 | 9.3* | 7.5 | 6.0 | 7.0 | 7.4 | 6.2 |
| 食器棚 | 5.3 | 3.9 | 13.1 | 12.1 | 14.4 | 13.0 |
| 冷蔵庫 | 2.2 | 1.6 | 3.7 | 1.2 | 13.4 | 2.4 |

※壁への衝突によるものと考えられる。

振動台の加速度に対して家具の加速度は、完全二重施工（2 種類の対策器具を施工）、完全施工（1 種類の対策器具を施工）、不完全施工の順番で増加した。

これらを折れ線グラフに表現したものを図 5 に示す。

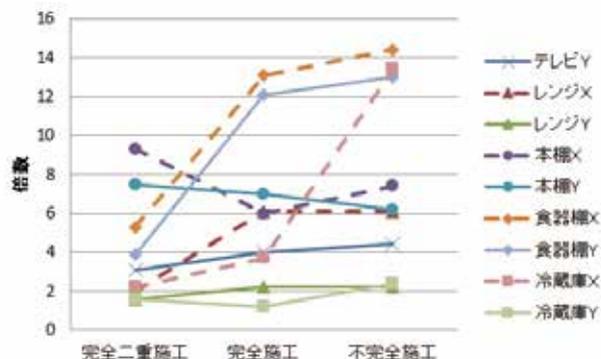


図 5 最大加速度振幅の倍数

この図から、本棚以外においては、対策器具を完全二重施工した場合と比較し、完全施工、不完全施工になるにつれて、加速度振幅の振動台に対する倍数は増加しており、対策器具の完全二重施工が室内安全対策に重要な役割を果たしていることが窺える。

同時に、本検証で用いた振動波は瞬間的に震度 5 弱相当の揺れを含むが、完全施工していても長周期地震動で家具が転倒する可能性があることが分かった。

(3) 対策器具が不完全な施工による転倒防止効果の低下について

前(2)の結果から、対策器具を完全施工していても長周期地震動において一定の危険性があり、不完全施工であれば一層危険は大きくなることが予想された。

そこで数量不足、粘着力低下、ワイヤー張力の弛緩した、対策器具の不完全施工の状態、震度 4 相当の揺れを含む若干弱い長周期地震動において実験したところ、対策器具が外れ、家具の滑動や転倒が発生した。

このことから、たとえ震度 4 相当の揺れを含む長周期地震動であっても依然として危険性が存在することが窺えた。また、対策器具は一度施工するとその後自主的な確認、維持管理を実施するとは考えにくく、外れたり、粘着力低下等の経年劣化や微細なずれに起因する危険性の増大が危惧される。

6 おわりに

本検証は、長周期地震動等に潜む危険性を把握し、そこで得た知見と既往研究結果と併せ持った総合的な室内安全対策を前進させることを目的に実施し、多くの考察すべき点や課題を得ることができた。以下にその一部を述べる。

(1) 既往研究及び本検証結果を踏まえた考察

ア 本棚について

本棚については、既往研究及び本検証の双方において、

家具上部に掛かる加速度が大きいことが確認されたことから、対策器具にはたらく力も大きくなることが推定され、対策器具の確実かつ強固な施工の必要性が窺えた。

イ テレビについて

テレビについては、用いた試験体として現代の薄型テレビとそれ以前のブラウン管テレビの差異はあるものの、既往研究及び本検証双方において転倒、ロッキング、移動など、地震に起因する挙動に依然として危険性が存在することが窺えた。

ウ 電子レンジについて

電子レンジについては、既往研究及び本研究双方においてロッキングを起し易いことが確認され、対策器具の確実かつ強固な施工の必要性が窺えた。

エ 冷蔵庫について

冷蔵庫については、既往研究結果に対し本検証では転倒しにくくなっている可能性が考えられる一方で、ある種の対策器具（ポール式）の効果の低さが確認された。

(2) 8の字運動波について

実際に発生した長周期地震動の観測波はさまざまな要素が複雑に絡み合っており構成されていることから、簡便な8の字運動波を考案し、振動実験に適用した。

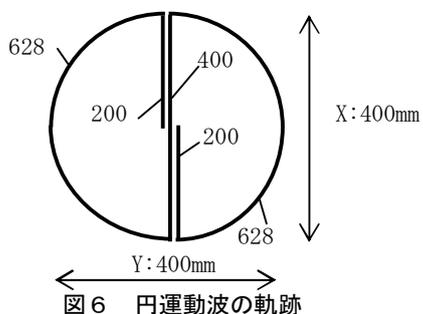
この振動波は、動きが簡易的で規則性を持ち、一行程あたり一定の距離を確保でき、更にXY方向の加速度を変化させることができたことから、各種挙動解析には一定の効果があったと考えられる。

一方、分析用の長周期地震動波として一層現実味を持たせるため、時折発生する衝撃（実測波に局所的に含まれる強い短周期成分の加速度）の要素を取入れられていることが望ましい。

そこで、本検証では実現できなかったが、次のメカニズムを持つ分析用振動波（円運動波）を提案する。

ア 軌跡、寸法等

円運動波の軌跡は図6のとおりとし、円周に沿って動く部分、直線部分及び直角に曲がる部分から構成されるものである。



イ 加速度制御による具現化

振動台における任意の挙動形態は、制御装置への加速度入力によって制御するが、その際、振動台の自重や駆動部分の摩擦等、固有の減衰が発生するほか、台上に設

置する試験体等の重さも影響し、制御に向けた加速度入力において理論上の計算と実際の挙動が乖離する。

このような理由で、具現化には多くの時間と試行を要すると考えられる。

ウ 活用性

円運動波が実現すると、長周期地震動の特徴である周期、一行程あたりの距離、より現実的な動きの成分（円弧や直線、急な方向転換へ導く短周期成分など）を持ち、かつ規則性を持った動きとして数値制御ができるため、解析結果について、より一般性の確保が期待できる。

(3) 本検証における結果について

今回の検証は35回（パターン）の振動実験を実施したが、室内安全対策について一層科学的根拠を持つために、家具類や対策器具類の個別実験の実施、パラメータの設定の詳細化、同条件での繰り返し実験が必要となる。

(4) 長周期地震動の捉え方について

現在、気象庁では、地震動に含まれる周期1.6秒（約0.6Hz）から7.8秒までの地震動がもたらす人の行動の困難さの程度や家具や什器の移動・転倒などの被害の程度から4つの段階に区分した揺れの大きさを、長周期地震動階級としている。一方、東京消防庁では周期1秒（1.0Hz）以上の周期を長周期として扱っている。

大きく長く揺れる長周期地震動による被害の有無と危険性を考慮するのであれば、長周期地震動は、表24から表27より周期1秒となる1.0Hzから含める方がより安全を意識した値となることが考えられる。

(5) 包括的な室内安全対策について

「長周期地震動」、「短周期地震動」とはそれぞれ気象庁により区分された別々の震度階等を持ち、表現される。

しかし、実際に発生する地震動は周期、加速度、速度、振幅、継続時間等様々な要素が混在しているほか、今後発生する地震が長周期成分を多く持つ地震動であるかどうかは予測できない。

このことから、本検証結果のみを基にした断片的な対策でなく、長周期地震動、短周期地震動双方を包括した室内安全対策を推進することが必要である。

[参考文献]

- 1) 東京消防庁：家具等の転倒防止用具の振動実験について、昭和59年消防科学研究所報21号、1984年
- 2) 東京消防庁：電子レンジの地震時の挙動及び安全対策に関する研究、平成12年消防科学研究所報37号、2000年
- 3) 東京消防庁：大型家電製品の対震挙動及び安全対策に関する研究、平成13年消防科学研究所報38号、2001年
- 4) 東京消防庁：冷蔵庫の対震挙動及び安全対策に関する研究、平成14年消防科学研究所報39号、2002年
- 5) 気象庁：平成23年東北地方太平洋沖地震、東京都千代田区観測データ
- 6) 気象庁：震度と加速度、周期および加速度と震度（理論値）の関係

Study on the Indoor Safety in Connection with
Long-Duration Seismic Waves (Part 1)
(Resonance Frequencies (Natural Periods/Cycles) of Furniture and the
Effectiveness of Earthquake Safety Devices)

Mitsuhiko TERAYA*, Kenichi TANABE*, Jun OZAKI*

Abstract

Ever since the earthquake that occurred off the Pacific coast of the Tohoku region on March 11, 2011, public attention has been increasingly focused on long-duration seismic waves, earthquake preparedness (ex., countermeasures against the tipping, falling and moving of furniture, fire prevention, and so on), and the human behavior during and after earthquakes.

The goal of this study was to understand the risks that long-duration seismic waves may present. Vibratory devices were used in experiments to examine indoor safety- to make clear the behavior of furniture stemming from the differences in flooring and in the way of installing earthquake safety devices. The experiment results were then compared with those drawn from previous research.

This time, the results confirmed the existence of natural periods/cycles for each piece of furniture, as well as the different trends in the tipping and sliding of furniture depending on flooring types, and the trends in safety based on the differences in the way of installing earthquake safety devices. In addition, comparisons with the results of previous research provided knowledge regarding indoor safety that takes into account the risks associated with the major earthquakes expected to occur.