

# 耐震対策が施された家具の地震時挙動解析

## Motion Analysis of Quake-Proof Furniture under Seismic Excitation

小林康一<sup>1)</sup>, 磯部大吾郎<sup>2)</sup>

Koichi Kobayashi and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: koikoba0509@gmail.com)

2) 博(工) 筑波大学教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

Recently, quake proof furniture are getting popular to prevent accidents from earthquakes. In this research, the behaviors of such furniture under seismic excitation are simulated, using the ASI (Adaptively Shifted Integration)-Gauss code in which the frictional contact algorithm based on the sophisticated penalty method is introduced.

**Key Words :** Finite element method, Motion analysis, Quake-proof furniture, ASI-Gauss code

### 1. 緒言

日本は世界有数の地震大国であり、数多くの地震が発生している。特に1995年の阪神・淡路大震災では、多くの構造物が倒壊した。また、地震による家具などの内部設備の転倒・損傷が発生し、人的被害も生じた。2011年の東日本大震災では、震源から遠く離れた首都圏などで、建物自体への被害は少なかったが、家具や内装設備に大きな被害をもたらした。東日本大震災に伴い東京消防庁が都内で実施したアンケート調査によると、約20%の回答者が家具類の転倒・落下、さらに移動(家具類が転倒せず、概ね60cm以上移動したもの)があったと回答している。さらに、階層が上層になるほど家具類の転倒・落下・移動が発生したと回答した割合が増加する傾向にあった[1]。

近年発生した大きな地震の負傷原因を分析すると、30～50%の人が、家具類の転倒・落下により負傷している[2]。将来的に発生が予想される南海トラフ地震や首都直下型地震では、建物内の家具などが転倒・落下することにより引き起こされる人的被害が懸念される。特に、長周期地震に見舞われた高層ビルの上層部では、建物の損傷は小さくても家具の転倒・落下・移動により大きな人的被害が生じる危険性がある。また、家具等が散乱した場合は避難の妨げとなる可能性もある。

近年、家具などの什器を固定するなどして転倒を防ぎ、被害を未然に防ぐ措置が実施されている。これらの対策の有効性は、加振実験を行うことにより検証することが

できるが、コストや時間がかかり繰り返し行うことは困難である。そこで本研究では、ペナルティ接触理論に基づく接触アルゴリズムをASI-Gauss法[3]に導入した転倒挙動解析コード[4]を用いて、耐震対策を施した家具の地震時挙動解析を行い、耐震対策の検証、考案を行っている。

### 2. 解析モデル

表1に、解析対象とした家具モデルの寸法・重量・重心位置・静止摩擦係数を示す。静止摩擦係数は、防災科学技術研究所で行われた実験で、ベルトを巻いた家具を引き、動き出した際の荷重を重量で除した値の平均値である。モデル化にはすべて線形チモシェンコはり要素を用いた。耐震器具として、L字金具および転倒防止ベルトをモデル化した。L字金具を上部・側部、転倒防止ベルトを取り付けた家具モデル(以後、各々L字上部モデル、L字側部モデル、ベルトモデルと記す)の概観を図1に示す。なお、構成する各部材の密度を調整することにより、家具の重心位置を表現した。L字金具は、1部材2要素のねじ要素を用いて家具に取り付けた。L字側部モデルでは、L字金具の位置を家具の重心高さとした。転倒防止ベルトと家具との角度は、最適な角度とされている30°とした[5]。素材をスチールとし、10要素のトラス構造とした。耐震器具と壁との取り付けは、ねじ要素の端節点を拘束することにより表現した。モデルの要素数と節点数は、L字金具を取り付けた家具モデルがそれぞれ1,984と1,503、転倒防止ベルトを取り付けた家具モデル

表-1 家具の諸元と静止摩擦係数

寸法[mm]			重量 [kg]	重心位置			静止摩擦係数	
W	D	H		w	d	h	X軸方向	Y軸方向
600	417	1800	157	300	278.9	888.9	0.297	0.292

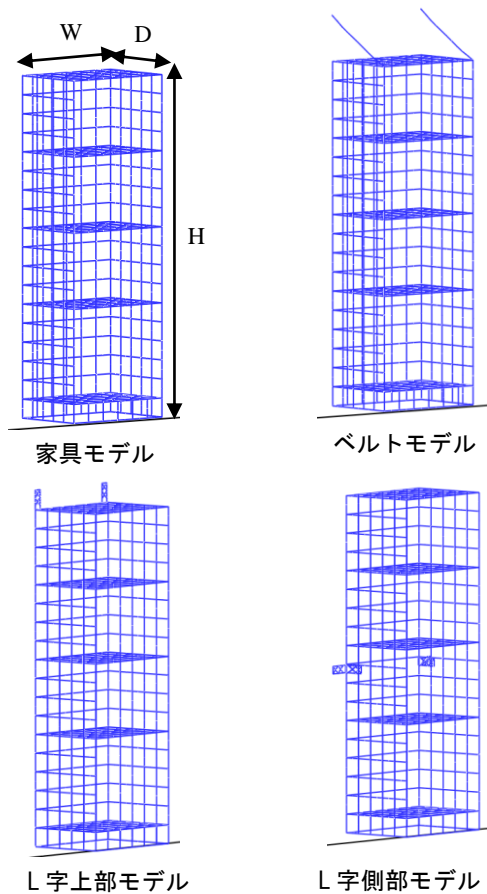


図-1 解析モデル概観

ルがそれぞれ 1,840 と 1,395 である。

本研究で用いた接触アルゴリズムでは、床と壁の要素分割が粗いと、床と壁の要素と家具の要素とが接触判定されない可能性がある。しかし、床と壁の要素分割を細かくすると、計算コストが極端に増加してしまう。そのため、床と壁は要素分割せず剛体であると仮定した。接触判定は、接触要素の節点座標値と壁および床の座標値の差を用いて、数値的に行った。本研究では先行研究[4][6]で有効な値とされた、ペナルティ定数  $\alpha$  は対象物の重量と同一の値、ペナルティ指数  $q$  は 1.0、減衰に関する係数  $D_c$  は  $\alpha$  の 120% と設定し、動摩擦係数は静止摩擦係数の 80% とした。なお、本研究では耐震器具と家具との接触は考慮していない。また、L 字金具と転倒防止ベルトの動摩擦係数は家具と同一の値とした。

### 3. 解析条件

解析の加振波には、10 階 RC 構造物に神戸波 50% (以後、RAW50 と記す)、神戸波 100% (以後、RAW100)、神戸波 50% および神戸波 100% を入力した際に 10 階で計測された床応答加速度 (以後、各々 10F50, 10F100 と記す) を用いた。RAW100 の卓越周期は X 軸方向 0.39 秒、Y 軸方向 0.36 秒であった。また、10F50 は X 軸方向 0.36 秒、Y 軸方向 0.81 秒、10F100 は X 軸方向 0.36 秒、Y 軸方向 0.99 秒であった。

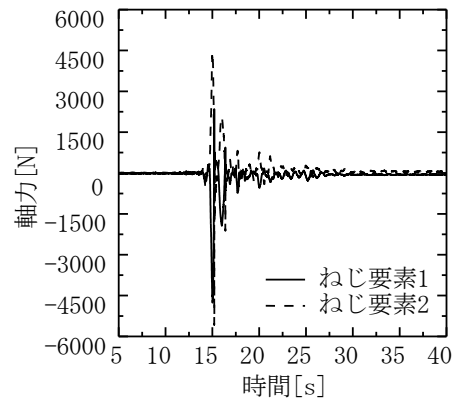


図-2 L 字上部モデルのねじ要素に加わる軸力 (10F50)

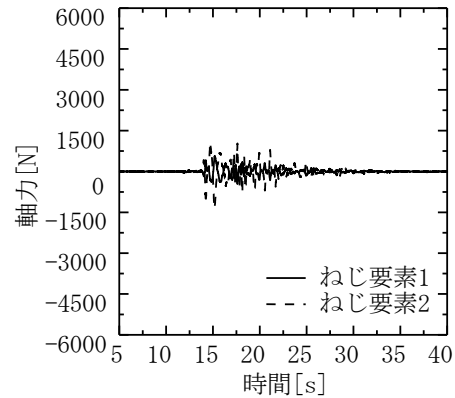


図-3 L 字側部モデルのねじ要素に加わる軸力 (10F50)

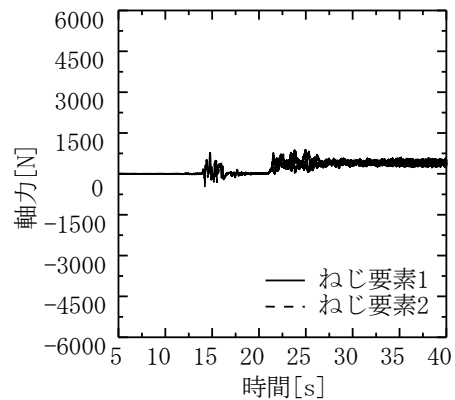


図-4 ベルトモデルのねじ要素に加わる軸力 (10F50)

### 4. ねじ要素の破断を考慮しない弾性解析

本研究では、ねじに作用する軸力が引き抜き荷重以上になった場合、ねじ要素を破断させることでねじの引き抜きを表現する。そこでまず、ねじ要素の破断を考慮せず、全要素の塑性化が起らない弾性解析で、耐震器具と壁を固定するねじ要素に加わる軸力を評価した。入力波は 10F50 とした。L 字上部モデルのねじ要素に加わる軸力の結果を図 2 に、L 字側部モデルのねじ要素に加わる軸力の結果を図 3 に、ベルトモデルのねじ要素に加わる軸力の結果を図 4 に示す。図 2 に示すように、L 字上部モデルでは、ねじ要素に加わる軸力が大きくなった。これは、ねじの取り付け位置から家具の重心位置までの距離

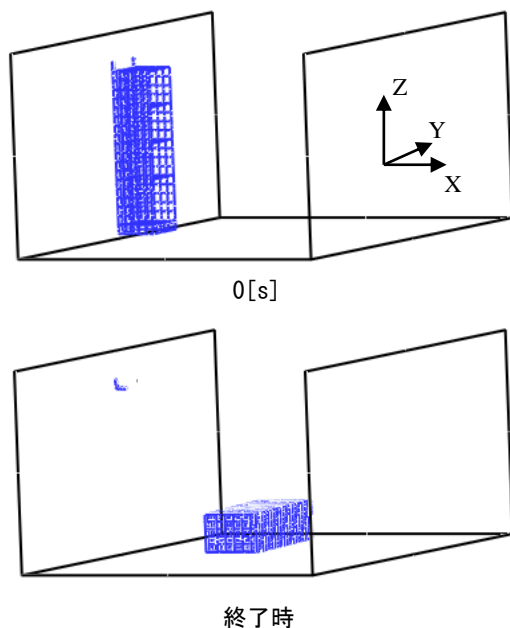


図-5 L字上部モデルの解析結果(10F100)

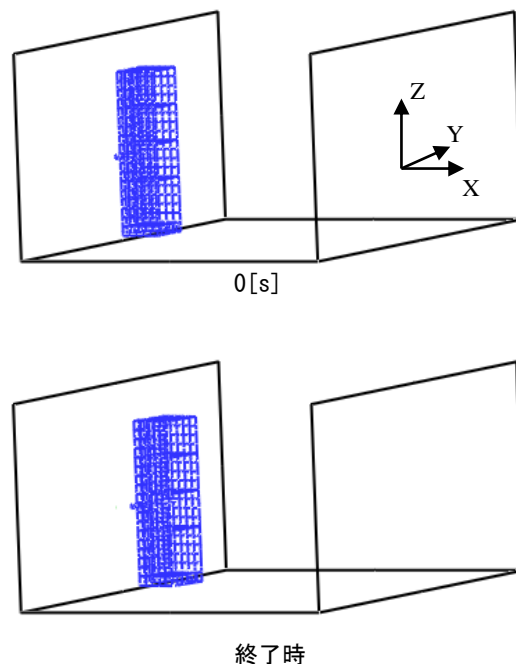


図-6 L字側部モデルの解析結果(10F100)

が遠く、地震時に家具に生じる慣性力により、大きなモーメントが発生したためであると考えられる。一方、図3に示すように、L字側部モデルでは、ねじ要素に加わる軸力は上部に取り付けた家具モデルより小さくなった。これは、ねじの取り付け位置から家具の重心位置までの距離が近く、また、L字金具取り付け部分が家具重心位置に対して線対称に取り付けられており、ねじ要素と家具が小さな力でつりあったためだと考えられる。図2～図4を比較すると、ベルトモデルでは、L字上部・側部モデルよりねじ要素に加わる軸力は小さくなった。これは、転倒防止ベルトは部材要素の節点をピン接合としており、家具の慣性力によって生じる力の伝達が小さいためだと考えられる。なお、解析終了時に軸力が残留しているのは、家具が壁にもたれかかった状態となったためである。

##### 5. ねじ要素の破断を考慮した弾塑性解析

本研究では、ねじ要素に加わる軸力が特定の引き抜き荷重以上になった場合、その要素を破断させることで引き抜きを表現することとし、その荷重を150kgfとした。入力波として、RAW50、RAW100、10F50、10F100を用いた。図5～図7は、それぞれ入力波を10F100とした場合のL字上部モデル、L字側部モデル、ベルトモデルの解析結果である。表2に各入力波に対するモデルの転倒状況およびねじ要素の破断状況をまとめて示す。また、図8には各入力波での、解析終了時に初期位置から最も遠くまで移動した節点の変位を示す。L字上部モデルの場合、RAW50およびRAW100では転倒しなかったが、ねじの引き抜き状態に差異が出た。さらに10F50、10F100では、ねじが引き抜かれ転倒した。L字側部モデルでは、10F100のみでねじの引き抜きが生じたが、家具の移動距離は小さかった。ベルトモデルは、RAW50およびRAW100

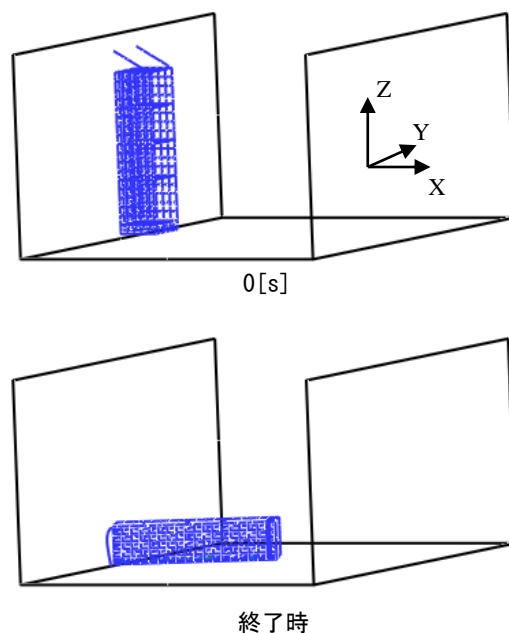


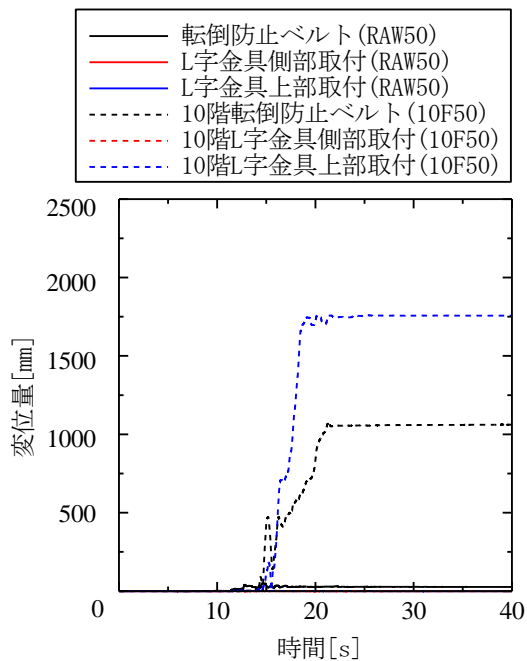
図-7 ベルトモデルの解析結果(10F100)

表-2 各入力波に対するモデルの転倒状況  
およびねじ要素の破断状況

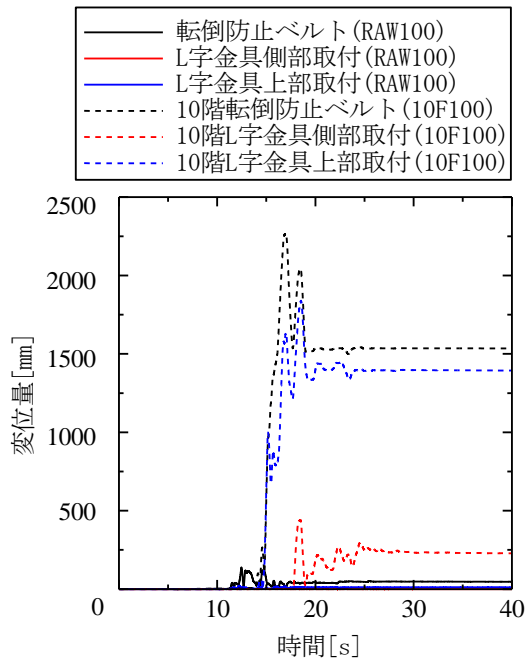
モデル	RAW50	RAW100	10F50	10F100
L字上部モデル	転倒せず 破断せず	転倒せず 破断	転倒 破断	転倒 破断
L字側部モデル	転倒せず 破断せず	転倒せず 破断せず	転倒せず 破断せず	転倒せず 破断
ベルトモデル	転倒せず 破断せず	転倒せず 破断せず	壁に転倒 破断せず	転倒 破断

上段：家具の転倒状況

下段：ねじ要素の破断状況



(a) 神戸波 50%



(b) 神戸波 100%

図-8 原波と 10 階床応答加速度を入力した際の最大節点変位の比較

では転倒しなかったが、10F50、10F100 となるにつれ挙動が大きくなり、10F100 ではついにねじが引き抜かれ転倒した。

以上より、L 字上部モデルおよびベルトモデルは、高層階では大きく移動する結果となった。L 字上部モデルの場合、地震動入力直後にねじに大きな軸力が加わり、引き抜かれたためであり、ベルトモデルは、家具に対しての固定が不十分であったためと考えられる。一方、L 字側部モデルは、各入力波に対して大きな移動が生じない結果となった。これは、前節に示したように、ねじの

取り付け位置から家具の重心位置までの距離が近く、家具の転倒モーメントが相対的に小さくなったためと考えられる。

## 6. 結言

本研究では、L 字金具を上部、側部に取り付けた家具モデル、転倒防止ベルトを取り付けた家具モデルでの地震時挙動解析を行った。高層階では、L 字上部モデルおよびベルトモデルは、大きな挙動となり転倒する結果となった。このうち L 字上部モデルは、家具を十分に固定できるが、大きな地震動下ではねじに大きな力が加わるため、固定部分が破壊され、耐震器具として機能しなくなる可能性がある。ベルトモデルは、ねじの固定部分は破壊される可能性が低い、家具の固定が不十分であるため、家具が大きな挙動をしてしまう恐れがある。一方、L 字側部モデルは、ねじの取り付け位置から家具の重心位置までの距離が近く、また、L 字金具取り付け部分が家具重心位置に対して線対称に取り付けてある。そのため、ねじに対して大きな力が加わらないため、ねじ固定部分が破壊されず、また、家具を十分に固定できるため、耐震器具として機能し続ける可能性が高い。以上より、家具などの内部設備は、高層階になると耐震対策を施していても地震時に大きな挙動となり、危険性が高まることが示唆された。家具などの内部設備の転倒・落下による人的被害を小さくするためには、固定が十分である耐震器具を内部設備の重心位置に応じて取り付ける必要があるものと考えられる。

## 参考文献

- [1] 東京消防庁：平成23年度 長周期地震動に対する高層階の室内安全対策専門委員会報告書。
- [2] 東京消防庁：オフィス家具類・一般家電製品の転倒・落下防止対策に関する指針。
- [3] 磯部 大吾郎, チョウ ミヨウ リン：飛行機の衝突に伴う骨組鋼構造の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第579号, (2004), pp. 39-46.
- [4] 磯部 大吾郎, 山下 拓三, 田川 浩之, 金子 美香, 高橋 徹, 元結 正次郎：有限要素法を用いた地震時における家具の挙動解析, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第718号, (2015), pp. 1891-1900.
- [5] 東京都防災ホームページ：  
<http://www.bousai.metro.tokyo.jp/bousai/1000027/1000289.html>
- [6] 荻野 弘明, 山下 拓三, 金子 美香, 磯部 大吾郎：家具・什器の地震時挙動を再現する有限要素解析手法の開発, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第717号, (2015), pp. 1687-1697.