

# RC建物内に配置した家具の地震時挙動解析

## Motion Analysis of Furniture Placed in RC Building under Seismic Excitation

三浦利季<sup>1)</sup>, 山下拓三<sup>2)</sup>, 磯部大吾郎<sup>3)</sup>

Toshiki Miura, Takuzo Yamashita and Daigoro Isoe

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: s1620924@s.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 防災科学技術研究所 (〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀谷1501-21, E-mail: tyamashi@bosai.go.jp)

3) 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)

In big earthquakes, tumbled furniture such as bookshelves and desks in rooms may become fatal obstacles that obstruct children from evacuating. It is important to understand the overturning behaviors of furniture under seismic excitations, as well as the behaviors and damages of the building itself. The motion behaviors were analyzed using the ASI (Adaptively Shifted Integration) -Gauss code including frictional contact algorithm based on the sophisticated penalty method. The numerical results were validated by comparing with the experimental results. The numerical code is also applied to a motion analysis of a furniture placed at each floor of an RC building.

**Key Words :** Furniture, Motion analysis, Shake-table test, ASI-Gauss code, Finite element method

### 1. はじめに

地震の際、建物自体の被害は少なくとも、家具の移動や転倒による人的被害や避難の遅れが生じる可能性がある[1]。家具に関しては、従来から例えば耐震具の有効性を検証するための加振実験などが行われている[2]。しかし、地震波や階層、部屋内の条件などを変更する度に実験を行うとコストや時間がかかるため、繰り返し実験を行うことは困難である。そのため、これらの非構造部材の挙動を容易に検証可能とする数値解析手法の確立が期待されている。一方、家具の解析には、一般的に物体の移動や衝突を効率よく解析できる個別要素法が用いられることが多いが、この手法は家具自体の変形や破断が表現できない。そこで本研究では、RC建物内に配置した家具の地震時挙動を解析できる有限要素解析コードの開発を目指した。

本稿では、防災科学技術研究所 (以下、NIED) で行われた実験に使用された建物をモデル化し、その室内に家具モデルを配置して解析を行った。解析には、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][5]を用いた。はじめに、実験から得られた床応答と解析結果を比較し、建物モデルの有効性について検討する。続いて、建物の10階に家具を配置した解析を実施し、その結果について考察を行う。

### 2. RC建物の加振実験および地震時挙動解析

#### (1) RC建物の解析モデル

現行の基準に基づいて設計された中層鉄筋コンクリート造骨組が崩壊現象に至るまでの実証データの取得を目

的とし、NIEDのE-ディフェンスで10層RC造建物の加振実験が実施された。実験に使用された10層RC造建物を有限要素モデル化したものを図-1に示す。モデル化した部材は柱、大梁、基礎梁、床、耐震壁である。建物の全高は27.6m、階高は1階が2.80m、2階から4階が各2.60m、5階から7階が各2.55m、8階から10階が各2.50mである。床は厚さ120mmのコンクリートスラブである。床部材に用いたはり要素の幅は、床が存在する両方向スパン長の半分の平均値とした。その面外剛性は、このように設定した床部材の寸法から求められる断面2次モーメントの値を用い、面内剛性は、床部材の寸法から求められる断面2次モーメントをさらに1,000倍した値を用いた。このように設定することで面外変形は許容するが、面内

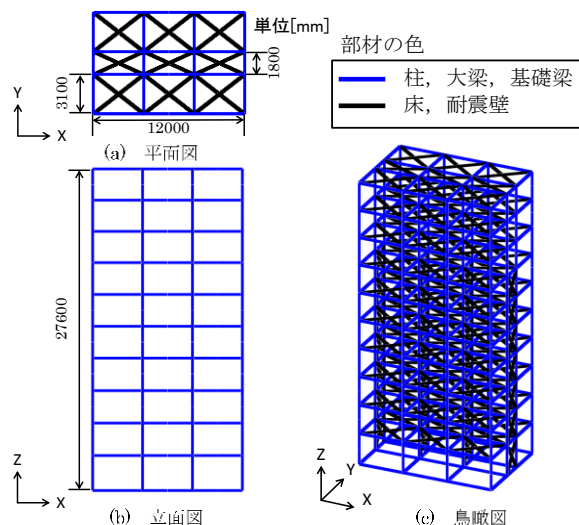


図-1 10層RC造建物モデル

変形は許容しない剛床を仮定した。床荷重には現実的な建物重量を考慮し、屋上では 3,500 N/m<sup>2</sup>、一般階では 4,750 N/m<sup>2</sup>と設定した。また、1階から7階の Y 軸（短辺）方向にのみ存在する耐震壁は、ラーメンブレース材を用いて表現した。耐震壁部材の厚みは 200 mm であるが、それをモデル化するより要素の断面寸法は、床部材と同様にその耐震壁が存在する梁と柱のそれぞれの長さの半分の平均値とした。その面外・面内剛性は床部材と同様の設定を行い、面内方向に剛な壁を仮定した。以上の条件で作成した解析モデルの総重量は 10.5 MN となり、固有周期は X 軸（長辺）方向が 0.65 s、Y 軸（短辺）方向が 0.61 s となった。略算式により求められる固有周期は 0.55 s であるため、解析モデルの固有周期は妥当な値と判断できる。また、Y 軸（短辺）方向の固有周期が X 軸（長辺）方向より短いのは、耐震壁が一方向にのみ存在するためである。モデルの要素数および節点数は 1,320, 718 である。

## (2) 解析条件

RC 部材の力学性状に影響を与えるパラメータとして、形状、配筋、材料特性はもちろん、応力条件などさまざまなものがある。よって、提案式または実験値におのずと適用範囲などの制限を受けるが、本解析ではこれらの制限事項を一部除外し、さらに部材が曲げモーメントおよびせん断力別々に独立して受けるという仮定に基づき理想化し、スケルトンカーブには Tri-linear モデルを用いる。

なお、RC 部材のひび割れ強度には粘性減衰効果を考慮し、降伏強度の 1/3 の値を用いた。また、軸剛性、ねじり剛性は弾性とする。さらに、繰り返し荷重を受ける場合の曲げ剛性の履歴特性には曲げ破壊する部材の挙動を良好に表現し、アルゴリズムも比較的単純なことから広く解析モデルに用いられる Degrading-tri-linear (D-tri) モデル [6][7]を採用した。また、部材は全て線形チモシェンコはり要素でモデル化し、解析手法には ASI-Gauss 法 [3]を用いた。入力地震波には、1995 年兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測された JMA 神戸波 100 %を用いた。解析の時間増分は 1 ms とした。

## (3) 結果と考察

JMA 神戸波 100 % を入力波とした場合の 10 階における床応答加速度および床応答速度を図 2、図 3 に示す。それぞれ実験および解析で得られた結果をプロットしている。実験の 10 階床応答速度は、低周波ノイズの影響を軽減するために、床応答加速度を基線補正し台形積分を行って求めた。図 2 の X, Y 軸方向の床応答加速度は、時間帯により異なっている箇所はあるものの、概ね近い振幅、周期を示している。Z 軸方向については、全体的に解析結果の方が大きい振幅となっている。また、図 3 の 10 階床応答速度でも、X, Y 軸方向の成分は概ね近い振幅、周期を示している。これらの結果から、建物は十分な精度でモデル化されているものと考えられる。

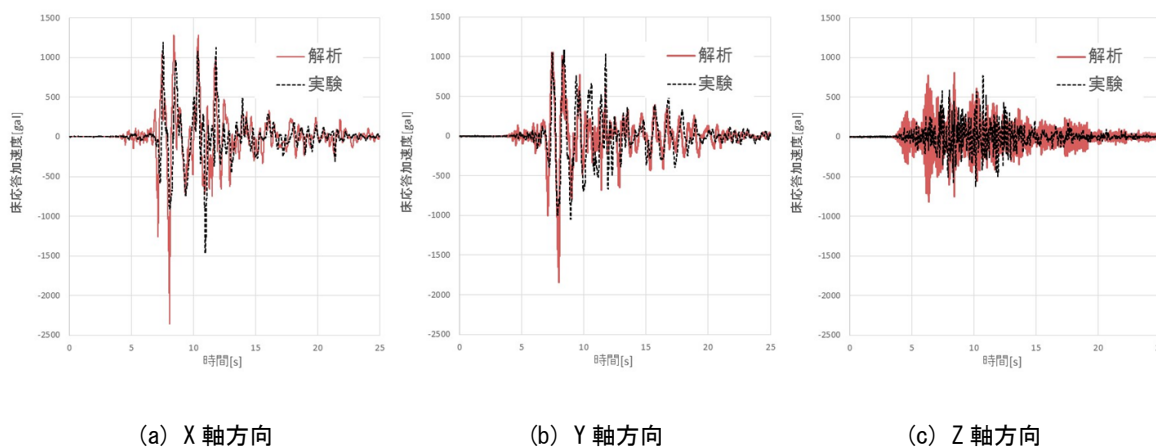


図-2 10階床応答加速度（JMA 神戸波 100 %）

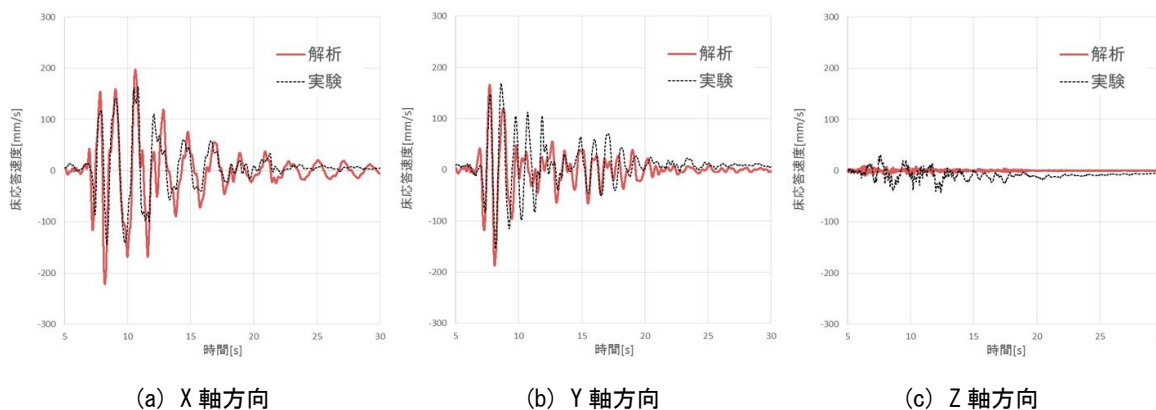


図-3 10階床応答速度（JMA 神戸波 100 %）

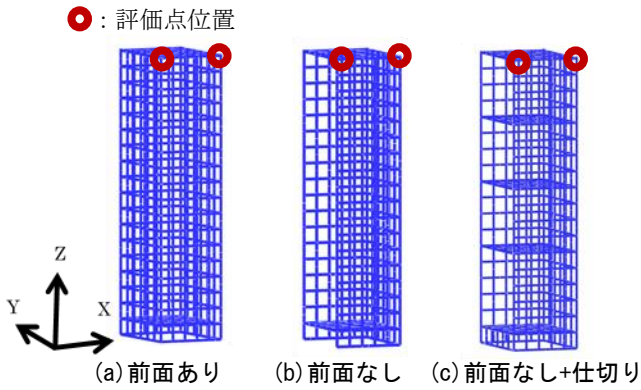


図-4 本棚モデルの概観

表-1 本棚モデルの諸元

寸法[mm]			重量[kg]	重心位置[mm]			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

表-2 接触パラメータ

什器の種類	$\alpha$ [kgf]	$q$	$D_C$ [kgf]
本棚	157	1	188.4

$\alpha$  : ペナルティ定数,  $q$  : ペナルティ指数

$D_C$  : 減衰に関する係数 ( $=\alpha \times 1.2$ )

### 3. 本棚の地震時挙動解析

#### (1) 解析モデル

地震の際に大きな危険が生じる現象として、質量が大きく、重心位置が高い家具の移動や転倒が考えられる。そこで、質量が大きい家具として本棚を対象とした挙動解析を行った。本棚モデルの概観を図-4に、その諸元を表-1に示す。モデル化の精度による挙動の違いを比較するため、本棚の (a) 前面あり, (b) 前面なし, (c) 前面なし+仕切りの3種類のモデルを作成した。全て線形モーションコはり要素を用いてモデル化しており、その要素数、節点数は、モデル (a) が 1,848, 1,374, モデル (b) が 1,464, 1,117, モデル (c) が 1,796, 1,299 である。実験に使用された本棚には前開き扉が付いていたが、全体剛性には寄与しないことが考えられるため、中に入っていた内容物とともにその重量のみを考慮した。本棚の重心は、構成部材毎に密度を調整して表現した。モデル (c) が構造上、最も試験体に近いモデルである。

#### (2) 接触の表現および解析条件

床や壁間の接触は、数値的に判定した。接触が判定された要素に対しては、2種類の接触力を作用させた。1つ目は次式に示すペナルティ力  $F_P$  であり、要素間で構成される接触面の法線方向のみに作用する。

$$F_P = \alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{n}{\|n\|}, \quad \text{if } l \leq L \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$  はペナルティ定数、 $q$  はペナルティ指数である。 $n$  は接触面の法線ベクトルであり、常に一定の方向を向いている。また、 $l$  は要素軸間の最短距離、 $L$  は接触する2

つの要素の部材幅の平均値である。2つ目の接触力は次式に示す動摩擦力  $F_D$  であり、接触面の接線方向と法線方向に作用する。

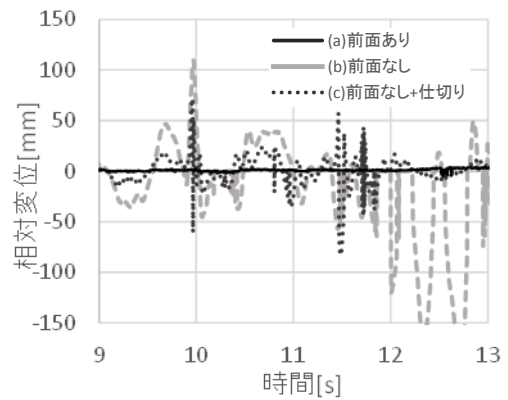
$$F_D = F_T + F_N, \quad \text{if } l \leq L \quad (2)$$

下付き添え字  $T, N$  は、それぞれ接触面に対する接線方向成分および法線方向成分であることを表す。次式に示すように、 $F_T, F_N$  は  $v$  のそれぞれの方向成分  $v_T, v_N$  に対して逆方向に作用する。

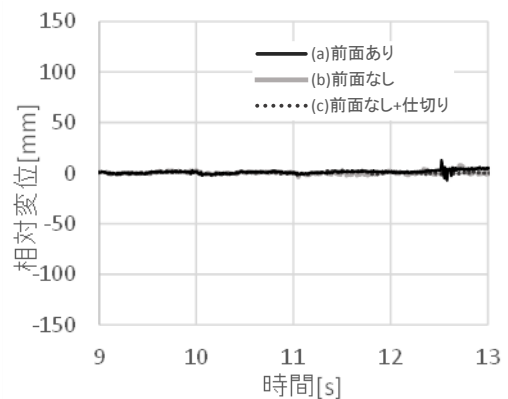
$$F_T = -\mu\alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{v_T}{\|v_T\|}, \quad \text{if } l \leq L \quad (3)$$

$$F_N = -D_C \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{v_N}{\|v_N\|}, \quad \text{if } l \leq L \quad (4)$$

次に、接触パラメータを表-2に示す。本研究では、先行研究 [4][5] で有効な値として示されている、ペナルティ定数  $\alpha$  は対象物の重量と同値、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、動摩擦係数は実験前に計測された静止摩擦係数の 80% とした。また、壁との摩擦係数は、床と接触する際の Y 軸方向成分と同じ値に設定した。解析の入力波には、JMA 神戸波 50% で加振された 10 層 RC 建造物の 10 階床応答加速度を用い、解析の時間増分は 1 ms とした。



(a) 前面側の相対変位



(b) 背面側の相対変位

図-5 y 軸方向相対変位の比較



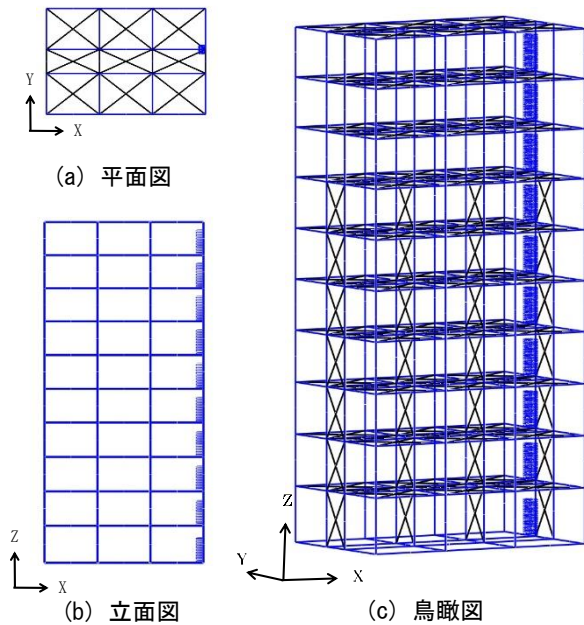


図-6 家具を配置した10層RC造建物モデル

### (3) 解析結果と考察

モデル(a)は、壁との接触により跳ね返り、滑りながら移動した後、ロッキングして反時計回りに約45°回転し、転倒した。モデル(b)、(c)は、ロッキング後に時計回りに約45°回転した。これらの挙動の相違を引き起こす原因としてモデル自体の変形量が異なることが考えられたため、相対変位を求めた。相対変位は、評価点位置において算出された変位から、底面を剛と仮定した場合の変位

を引いたものである。図-5に評価点位置においてモデルに生じるy軸方向相対変位(9~13s時)を示す。図より、前面ありのモデル(a)ではほとんど見られない本棚自体の変形が、前面がないモデル(b)、(c)では大きく見られた。また、モデル(b)、(c)の比較から仕切りも家具自体の剛性に寄与していることが考えられる。実験結果との比較による変形量の定量的な評価は今後の課題であるが、これらの結果から家具自体の変形も地震時の家具の挙動に影響があるものと思われる。

## 4. 建物内に配置された家具の地震時挙動解析

### (1) 解析モデル

3章で用いた家具モデル(c)を2章で用いたRC造建物の1~10階の各階に配置して解析を行った。このモデルを図-6に示す。解析モデルの総要素数、総節点数は19,280、13,708である。

### (2) 解析条件

家具と建物間の接触は3章と同様に数値的に判定した。3章では実験から得られた床応答加速度を用いて床を加振していたが、本解析では地震波によって揺れる建物内で、階層に応じて異なった加振力により家具が加振される。解析の入力波にはJMA神戸波100%を用い、解析の時間増分は1msとした。

### (3) 結果と考察

解析結果の全体立面図を図7に示す。また、図8に10階に配置された家具の様子を示す。図7から、約8s時に建物全体に大きな変形が生じ、家具にX軸方向の力が

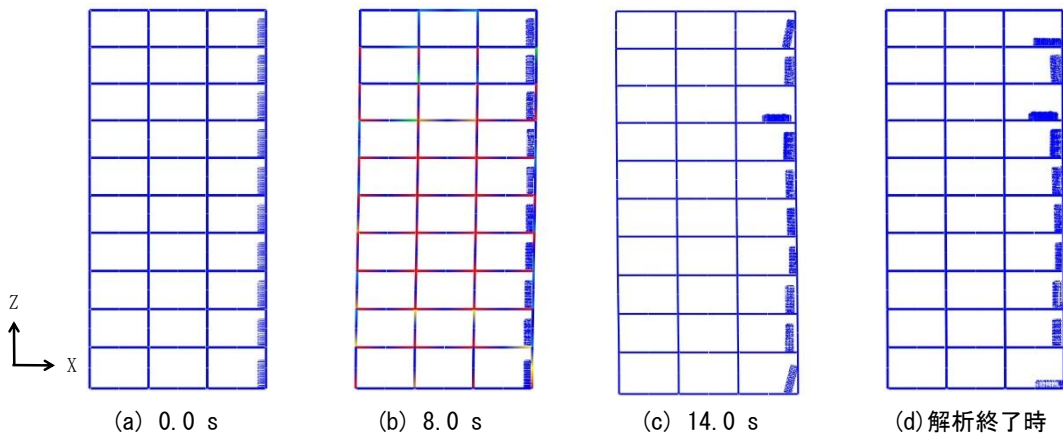


図-7 解析結果 (JMA 神戸波 100 %, 全体立面図)

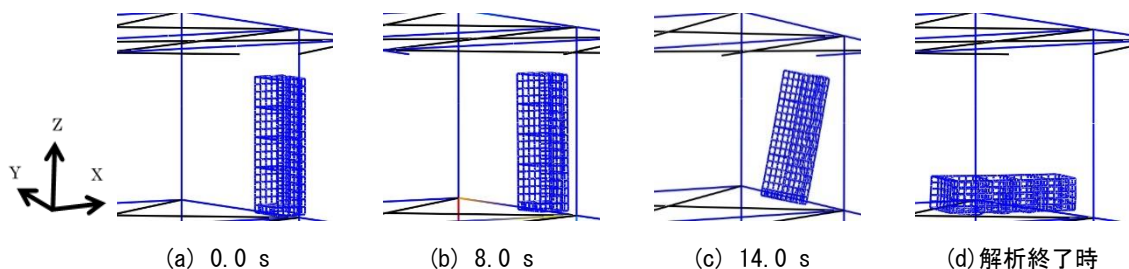


図-8 解析結果 (JMA 神戸波 100 %, 10階に配置された家具の様子)

かった事がわかる。その後、建物の変形が元に戻る際に家具は壁から押され-X 軸方向に力を受ける。今回の解析では、8 階に配置された家具が約 11 s 時に壁から押され-X 軸方向に力を受けることで前方に転倒した。また、1 階と 10 階に配置された家具は後方に転倒し、壁にもたれ掛かりながら仰向けに横たわる形となった。今回の結果から、階層によって転倒の有無や形態が異なることが確認された。現段階では、単一の地震波で行った結果であるため定性的な傾向は掴めないが、今後は様々な地震波を用いて解析を行うことで、地震波の周期や家具の設置階層が家具の挙動に対しどのように影響するか調査していく予定である。

## 5. おわりに

本研究では、NIEDで行われた実験に使用された建物をモデル化し、これに家具モデルを配置した解析を行った。はじめに、実験と解析から得られた床応答を比較した結果、解析で得られた10階床応答加速度および速度は実験で得られたものと概ね一致しており、建物モデルの有効性を示すことができた。続いて行った本棚の地震時挙動解析では、モデルの構造の相違による挙動の違いが見られ、家具自体の変形量が影響を与えていることが示唆された。最後に、建物の各階に家具を配置した解析を実施し、階層によって異なる挙動を示す家具の様子が再現できた。本研究で用いた解析コードは家具に生じる応力変化を把握できるため、今後は、家具の転倒時に生じる応力変化を調べ人体などへの被害評価を行ったり、地震波の

周期や家具の設置階層が家具の挙動に対し与える影響について調査する予定である。

## 参考文献

- [1] 東京都教育委員会補助教材「災害の発生と安全・健康～3.11を忘れない～」, (2011), <http://www.kyoiku.metro.tokyo.jp/press/pr111110b.htm>.
- [2] 梶原 浩一, 岡崎 太一郎, 清水 秀丸, 荒木 康弘, 難波 尚, 松森 泰造, 藤谷 秀雄: 既存木造校舎に関する E-ディフェンス実験: その 6 地震時の教室空間(振動台実験(1), 構造 III), 日本建築学会学術講演梗概集, (2011), pp. 523-524.
- [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] 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 718 号, (2015), pp. 1687-1697.
- [5] 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.
- [6] 河村 壯一: 耐震設計の基礎, オーム社, (1984).
- [7] 梅村 魁: 鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法: 中層編, 技報堂出版, (1982).