

有限要素法による 10 階建て鉄筋コンクリート造建物と 室内家具の地震応答解析

Seismic response analysis of 10-story reinforced concrete building
and installed furniture using finite element method

山下拓三¹⁾ 磯部大吾郎²⁾ 宮村倫司³⁾ 大崎 純⁴⁾

Takuzo Yamashita, Daigoro Isobe, Tomoshi Miyamura and Makoto Ohsaki

¹⁾博 (工) 防災科学技術研究所 主任研究員 (〒 305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

²⁾博 (工) 筑波大学 教授 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

³⁾博 (工) 日本大学工学部情報工学科 准教授 (〒 963-8642 郡山市田村町徳定字中河原 1 番地)
(防災科学技術研究所 客員研究員)

⁴⁾博 (工) 京都大学大学院工学研究科教授 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

A seismic response analysis for the shake table test of 10-story RC structure against the JMA Kobe wave were conducted by using a detailed finite element model and a nonlinear concrete constitutive model considering compressive failure and tensile crack. Motion analyses of furniture installed in each floor are conducted using boundary values extracted from the structural analysis. These two analyses are integrated by using coupling interface and indoor damage is visualized.

Key Words : Seismic Response Analysis, Indoor Damage, Coupling Interface, Finite Element Method

1. はじめに

防災科学技術研究所では、地震による構造物の地震被害を精緻に予測する数値シミュレーションシステム(数値震動台) [1] を開発している。数値震動台では、構造物の局所的な損傷・破壊挙動と構造物の全体挙動を同時にシミュレートするために、ソリッド要素による大規模詳細モデルを用いた地震応答解析(以降、構造解析)技術 [2],[3] を開発している。また、非構造部材や設備機器の地震時における変形、脱落、転倒といった被害の状況を再現するために、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 [4] に導入した梁要素モデルによる地震応答解析(以降、室内解析)技術 [5],[6] を開発している。

本報では、構造解析と室内解析と新たに開発した片連成解析インターフェースを用いて、10 階建て鉄筋コンクリート (RC) 造建物の各階の家具の転倒被害の予測シミュレーションを実施する。

2. 10 階建て RC 造建物の地震応答解析

(1) 解析対象

構造解析の対象は 2015 年度に E - ディフェンスで実施された 10 階建て RC 造建物実験 [7] である。図-1 に対象構造物を示す。対象構造物は長辺方向 (x 方向) が 3 スパンで構造形式は純フレーム構造であり、短辺方向 (y 方向) が 3 スパンで構造形式は 7 層まで中央に連層耐震壁を有する連層耐震壁フレーム構造である。ここでは、JMA 神戸波 100%加振に対する地震応答解析を実施する。

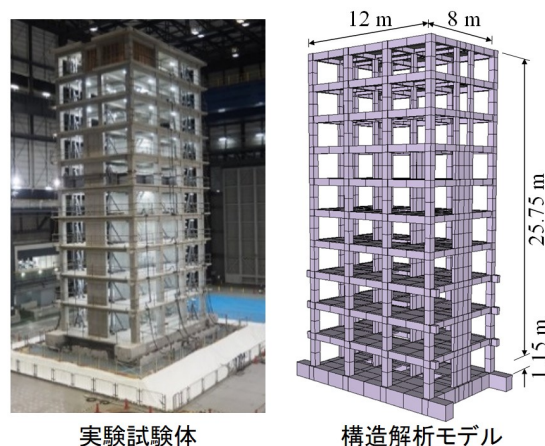


図-1 対象構造物

(2) 解析モデルと解析条件

図-2 に構造解析モデルのメッシュを示す。コンクリート部材は 6 面体 1 次要素を用いて要素分割し、鉄筋はトラス要素を用いて要素分割する。6 面体要素の数は 1,340,824 で、トラス要素の数は 656,865 であり、要素の総数は 1,997,689 である。節点と自由度の総数はそれぞれ 1,652,041 と 4,956,123 である。

境界条件について、解析モデルの底面の節点に JMA 神戸波 100%加振時に震動台で計測された加速度波形(図-3)を強制加速度入力する。 x 方向に NS 成分の波形を、 y 方向に EW 成分の逆位相の波形を、 z 方向に UD 成分の波形を入力する。

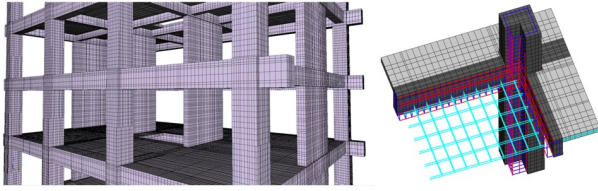


図-2 構造解析モデルのメッシュ

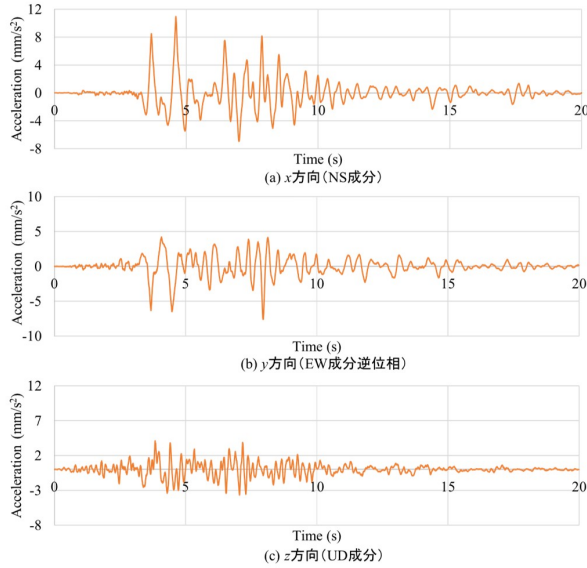


図-3 入力加速度

(3) 材料構成則

a) コンクリートの弾塑性損傷モデル

コンクリート構成則は, 式(1)で表される拡張 Drucker-Prager 型の降伏関数を用いて, 関連流れ則とする。

$$F = G = \sqrt{l^2 + q^2} - p \tan \theta - d' \quad (1)$$

ここに,

$$l = \epsilon \sigma_0^y \tan \theta, \quad d' = \sqrt{l^2 + (\sigma_0^y)^2} - \frac{\sigma_0^y}{3} \tan \theta$$

であり, p は静水圧, q は相当応力, ϵ は双曲線パラメータ, θ は内部摩擦角, σ_0^y は降伏応力, σ_0^y は初期降伏応力である。

損傷モデルとして式(2)を用いて, 損傷によるヤング率の低下を表現する。

$$E = (1 - D)E_0 \quad (2)$$

ここに, E_0 は初期ヤング率であり, 損傷変数 D を式(3)でモデル化する。

$$D = \begin{cases} 0 & \text{if } \bar{\epsilon}_c^p \leq e_0 \\ D_{max} \frac{\bar{\epsilon}_c^p - e_0}{e_1 - e_0} & \text{if } e_0 \leq \bar{\epsilon}_c^p \leq e_1 \\ D_{max} & \text{if } e_1 \leq \bar{\epsilon}_c^p \end{cases} \quad (3)$$

ここに, $\bar{\epsilon}_c^p$ は圧縮側累積塑性ひずみであり, D_{max} は損傷変数の最大値であり, e_0, e_1 は材料パラメータである。

b) コンクリートのクラックモデル

まず, クラック座標系でのひずみについて, 式(4)で加算分解する。

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{\epsilon}^{el} + \tilde{\epsilon}^{pl} + \tilde{\epsilon}^{cr} \quad (4)$$

ここに, $\tilde{\epsilon}^{el}$ は弾性ひずみ, $\tilde{\epsilon}^{pl}$ は塑性ひずみ, $\tilde{\epsilon}^{cr}$ はクラックひずみである。式中の上付きの $\sim$ はクラック座標系での変数を表す。

クラックが発生していない時の ii 成分の応力は式(5)で表される。

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_{ii} &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \{(1-\nu)\tilde{\epsilon}_{ii}^{el} + \nu(\tilde{\epsilon}_{jj}^{el} + \tilde{\epsilon}_{kk}^{el})\} \\ &= \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\tilde{\epsilon}_{ii}^{el} - \tilde{\epsilon}_{ii}^o) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに, ν はポアソン比であり,

$$\tilde{\epsilon}_{ii}^o := -\frac{\nu}{1-\nu} (\tilde{\epsilon}_{jj}^{el} + \tilde{\epsilon}_{kk}^{el})$$

と定義した。

クラック発生時の負荷状態での ii 成分の応力とひずみの関係を式(6)と式(7)でモデル化した。

$$\tilde{\sigma}_{ii} = \sigma_{cr} \exp\left(-\frac{\sigma_{cr} l_r}{G_f} \tilde{\epsilon}^{cr}\right) \quad (6)$$

$$\tilde{\sigma}_{ii} = E_{iiii} (\tilde{\epsilon}_{ii} - \tilde{\epsilon}_{ii}^{pl} - \tilde{\epsilon}_{ii}^o - \tilde{\epsilon}_{ii}^{cr}) \quad (7)$$

ここに, σ_{cr} はクラック発生応力, l_r は要素代表長さ, G_f は破壊エネルギーである。

クラック発生時の除荷状態での ii 成分の応力とひずみの関係を式(7)と式(8)でモデル化した。

$$\tilde{\sigma}_{ii} = \frac{\tilde{\sigma}_{ii,r}}{\tilde{\epsilon}_{ii,r} - \tilde{\epsilon}_{ii}^o} (\tilde{\epsilon}_{ii} - \tilde{\epsilon}_{ii}^o) \quad (8)$$

ここに, 下添字の r は除荷開始時の値を意味している。

c) コンクリートの材料パラメータ

材料パラメータはコンクリート共試体の1軸圧縮試験結果の初期剛性と圧縮強度が対応するように決定した。図-4に材料試験と解析の軸応力軸ひずみ関係を示す。以上により決定された材料パラメータを表-1に, 1F-2Fのコンクリート材料の降伏曲面の形状を図-5に示す。引張クラックに関するパラメータについて, クラック発生応力 σ_{cr} は σ_0^y の1/10とし, 要素代表長さは100mm, 破壊エネルギーは0.1(N/mm)とした。

d) 鋼材構成則

鉄筋に用いる鋼材の弾塑性構成則として Von Mises 型の降伏曲面の等方硬化則を用いた。表-2に鋼材の材料パラメータを示す。

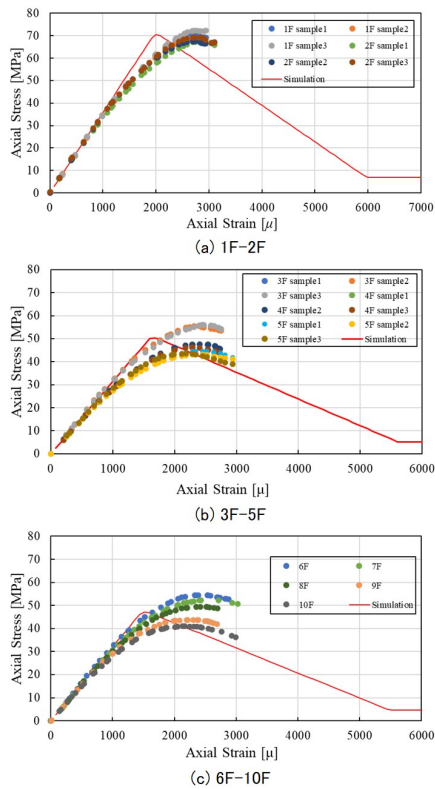


図-4 材料試験と解析の軸応力軸ひずみ関係

表-1 コンクリートの材料パラメータ	1F-2F	3F-5F	6F-10F
E_0 (MPa)	70.381	50.391	47.088
F_c (MPa)	35892	31339	32061
ν	0.2		
$\rho(\text{g/cm}^3)$	2.60		
ϵ	0.0		
ϕ (deg.)	60.0		
σ_o^y (MPa)	70.381	50.391	47.088
$H' = \partial\sigma^y/\partial\epsilon^p$ (MPa)	58890	13390	20610
(D_{max}, e_0, e_1)	(0.9, 0.0001, 0.004)		

(4) 固有値解析

固有値解析と実験より得られた固有振動数を表-3 に、1 次から 3 次までのモード形状を図-6 に示す。実験に比べて解析のほうが固有振動数が高い結果となっている。実験は対象としている加振の前に複数回の大きな地震入力を受けており、ある程度の損傷を経験していることがこの差異の一因と考えられる。

(5) 地震応答解析

地震応答解析の減衰モデルとして Rayleigh モデルを用いた。1 次モードと 4 次モードの円振動数 ω_1, ω_4 を用いて、式 (9) より質量比例係数 α と、式 (10) より剛

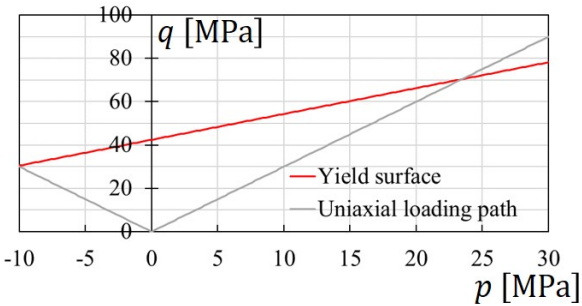


図-5 1F-2F のコンクリート材料の降伏曲面

表-2 鋼材の材料パラメータ

	SDA295A	SD345	KSS785
E (MPa)	205000		
σ_0^y	295	345	785
$H' = \partial\sigma^y/\partial\epsilon^p$ (MPa)	205		
ν	0.3		
$\rho(\text{g/cm}^3)$	5.25(= 7.85 - 2.6)		

表-3 数値解析と実験の固有振動数 (Hz)

モード 次数	1 次	2 次	3 次	4 次
モード 形状	x 方向 並進	y 方向 並進	z 軸回り 回転	x 方向 並進
数値解析	1.95	2.53	2.93	5.56
実験	1.19	1.77	—	6.62

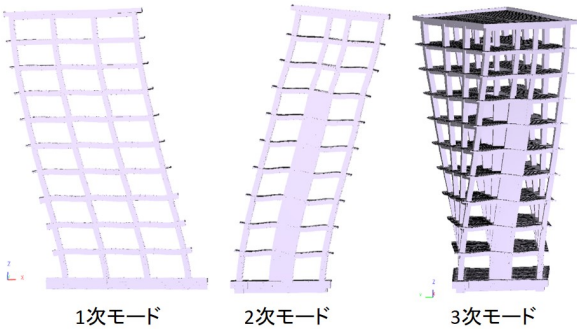


図-6 モード形状

性比例係数 β を求めた。

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_4(c_1\omega_4 - c_4\omega_1)}{\omega_4^2 - \omega_1^2} \tag{9}$$

$$\beta = \frac{2(c_4\omega_4 - c_1\omega_1)}{\omega_4^2 - \omega_1^2} \tag{10}$$

表-4 に地震応答解析に用いる Rayleigh モデルのパラメータを示す。

表-4 解析の減衰定数

	コンクリート	鋼材
c_1	0.05	0.05
c_4	0.02	0.02
α	9.07×10^{-1}	3.63×10^{-1}
β	2.12×10^{-3}	0.85×10^{-3}

地震応答解析結果として、図-7にクラックひずみが大きくなった4.82秒でのクラックひずみ ϵ_{xx}^{cr} のコンターを、図-8に解析終了時の鉄筋の相当塑性ひずみを示す。クラックひずみは梁端に集中して、下層階から中層階でその値は大きく、中層階から上層階にいくに従ってその値は小さくなっている。相当塑性ひずみが発生している場所はクラックひずみが発生している箇所と対応が見られる。

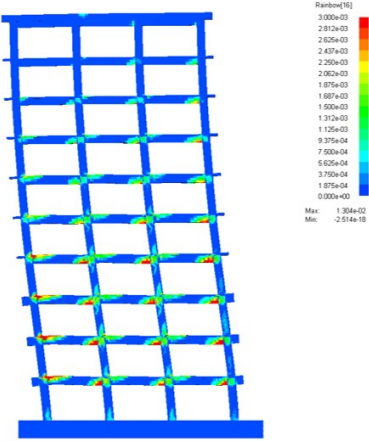


図-7 クラックひずみ ϵ_{xx}^{cr} のコンター（4.82 秒）

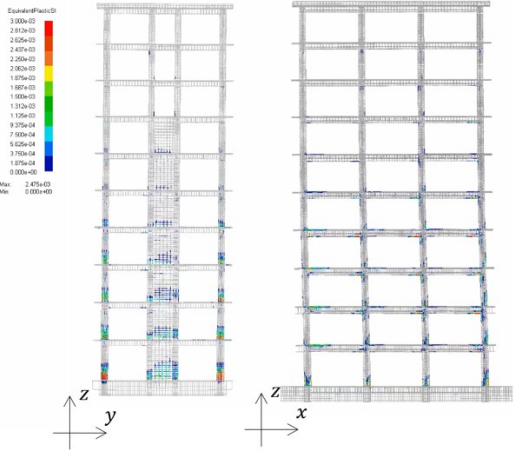


図-8 鉄筋の相当塑性ひずみのコンター

3. 構造解析と室内解析の統合

図-9に構造解析と室内解析の統合の流れを示す。前節で述べた10階建てRC建物の構造解析を実行した後、各階の床応答加速度を室内解析の境界値として抽出する。図-10に抽出した各階の床応答加速度3成分の時刻歴波形を示す。

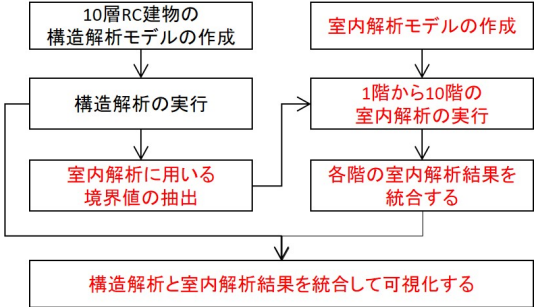


図-9 構造解析と室内解析の統合の流れ

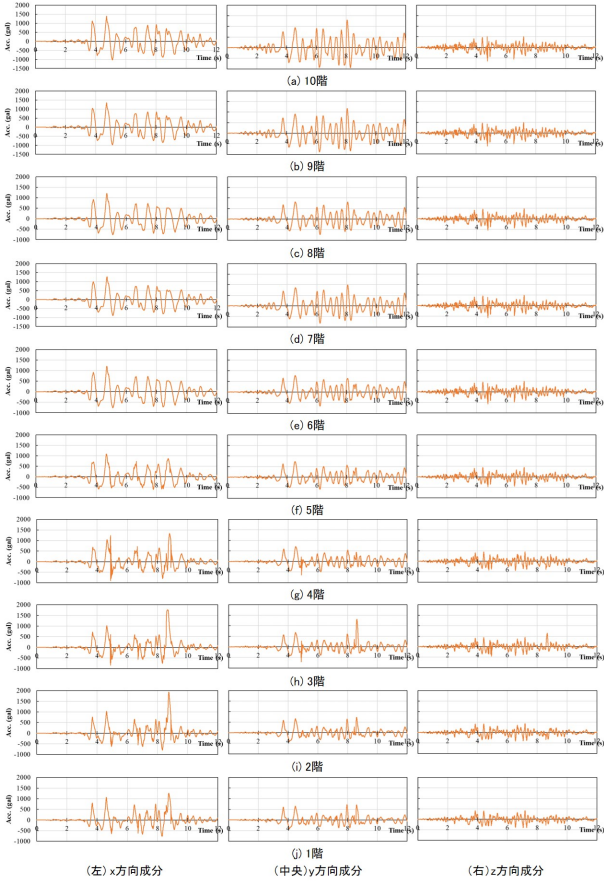


図-10 各階の床応答加速度

室内解析については、まず室内解析モデルを作成する。図-11に示すように、まず、P1とP2の2点を選択して解析領域を設定する。続いて、offset vectorを設定して独立に作成した家具モデルを1階から10階までの各階に配置する。最後に、境界条件を設定する解析領域の面を指定する。ここでは、それぞれの階毎の床応

答加速度を境界値として用いるが、同一階の境界条件設定面では境界値は一樣とした。図-12に室内解析モデルが構造解析モデルに配置された状況を示す。各階の解析モデルが作成できると、次に、各階の室内解析を独立して実行し、それらの解析結果を統合する。最後に、構造解析と全階の室内解析の結果を統合して可視化を行う。

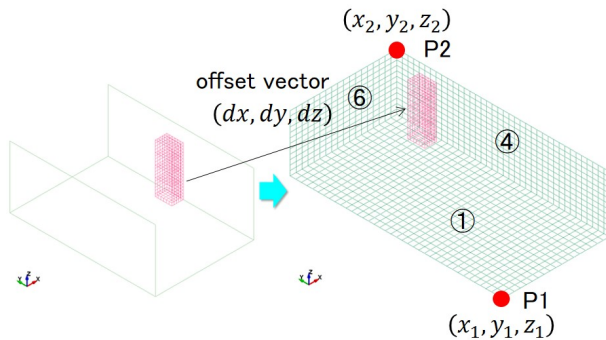


図-11 室内解析モデル作成の流れ

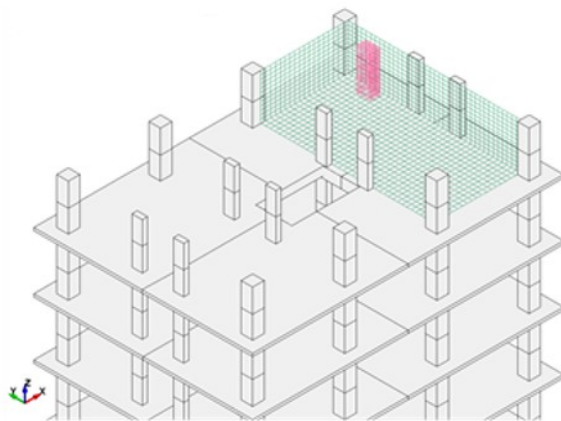


図-12 室内解析モデルの構造解析モデルへの配置

図-13に5.72秒での家具の転倒状況を示す。上階のほうが加速度が大きくなる傾向があり最終的には3階より上の階の家具が全て転倒したが、5階、6階、7階の家具が先に転倒する結果となった。

4. おわりに

本報では、10階建てRC建物の震動台実験を対象として、詳細有限要素モデルとコンクリートの非線形構成則を用いた地震応答解析を実施した。続いて、各階に仮想的に配置した家具の転倒挙動解析を実施して、それらの解析結果を構造解析結果と統合して室内被害を可視化した。

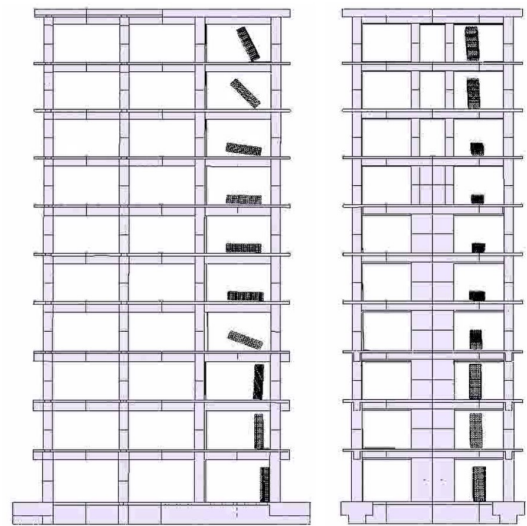


図-13 家具の転倒状況 (5.72 秒)

参考文献

- [1] Yamashita T, Hori M, and Kajiwar K. Petascale computation for earthquake engineering. *Computing in Science and Engineering*. 2014; 13(4):44-49.
- [2] Miyamura T, Yamashita T, Akiba H, Ohsaki M. Dynamic FE Simulation of Four-Story Steel Frame Modeled by Solid Elements and Its Validation Using Results of Full-Scale Shake-Table Test. *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2014; 44(9):1449-1469.
- [3] Ohsaki M, Miyamura T, Kohiyama M, Yamashita T, Yamamoto M Nakamura N. Finite Element Analysis of Laminated Rubber Bearing of Building Frame under Seismic Excitation. *Earthquake Engng Struct.* 2015; 44(11):1881-1898.
- [4] 磯部大吾郎, チョウミョウリン, 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, pp.39-46, 2004.
- [5] Isobe D, Yamashita T, Tagawa H, Kaneko M, Takahashi T, Motoyui S. Motion Analysis of Furniture under Seismic Excitation Using the Finite Element Method. *Jpn Archit Rev.* 2018; 1(1):44-55.
- [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, 80巻, 717号, pp.1687-1697, 2015.
- [7] 土佐内優介, 他: 大型震動台による10階建て鉄筋コンクリート造建物の三次元振動実験(2015) - 基礎すべり建物の実験方法と応答 -, 日本建築学会構造系論文集, 83巻, 750号, pp.1139-1149, 2018.