

3 方向地震入力を受ける家具の転倒挙動解析

その2. ASI-Gauss 法を用いた家具の挙動解析

正会員 〇顧 嘉捷*¹ 同 金子 美香*³
同 山下 拓三*² 同 磯部 大吾郎*⁴

数値震動台 ASI-Gauss 法 家具
転倒挙動解析 Validation

1. はじめに

(独) 防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター (E-ディフェンス) では、建築・土木構造物の仮想振動実験の実現を目指した数値震動台 (E-Simulator) の開発を進めている。E-Simulator 開発の一環として、地震時の室内安全性を検証するために、ASI-Gauss 法を用いた家具の転倒挙動解析コード¹⁾を開発している。

本研究では、モーションキャプチャシステムを用いた家具の振動台実験を実施し、家具が転倒に至るまでの3次元変位計測データを取得する。そのデータを活用して、3方向地震入力を受ける家具の地震時挙動の再現精度の向上を図り、解析の妥当性の確認 (Validation) を行う。本報では、転倒挙動解析コードの概要と地震入力を受ける家具の転倒挙動解析結果について報告する。

2. 解析概要

一般的に、家具等の転倒挙動解析には個別要素法 (DEM) がよく用いられるが、家具を剛体として扱うために、壁や人身と接触する際の変形や応力変化については検証できない。本研究では、建物の崩壊解析に用いられる ASI-Gauss 法による有限要素解析コードを挙動解析に適用した。また、接触・滑り状態をより詳細に表現するために、ペナルティ接触理論に基づいて摩擦力を考慮したアルゴリズムを ASI-Gauss 法に導入した。

2.1 ペナルティ理論に基づいた接触アルゴリズム

図1に示すように、任意の部材幅を持つ要素1と要素2の接触を考える。要素1は要素2に対して相対速度 \mathbf{v} のベクトルを持っているとする。本接触アルゴリズムでは、要素軸間の最短距離が2つの要素の部材幅の平均値より小さくなった場合、要素1に対し、式(1)に示すようなペナルティ力 \mathbf{F}_P が要素2の接触面の法線方向に作用することとする。

$$\mathbf{F}_P = \alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\mathbf{n}_2}{\|\mathbf{n}_2\|}, \text{ where } (l \leq L) \quad (1)$$

ここで、 α はペナルティ定数、 q はペナルティ指数、 l は2つの要素の部材幅の平均値、 L は両要素の軸間の最短距離、 \mathbf{n}_2 は要素2の接触面の法線ベクトルである。

また、ペナルティ力 \mathbf{F}_P が発生すると同時に、要素1に対し、式(2)に示す動摩擦力 \mathbf{F}_D が接触面の接線方向

および法線方向に作用することとする。

$$\mathbf{F}_D = \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_N, \text{ where } (l \leq L) \quad (2)$$

ここで、

$$\text{接線方向成分: } \mathbf{F}_T = -\mu\alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\mathbf{v}_T}{\|\mathbf{v}_T\|} \quad (3)$$

$$\text{法線方向成分: } \mathbf{F}_N = -D_c \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\mathbf{v}_N}{\|\mathbf{v}_N\|} \quad (4)$$

μ は動摩擦係数、 D_c は法線方向の減衰係数、 \mathbf{v}_T 、 \mathbf{v}_N はそれぞれ速度ベクトル \mathbf{v} の接線方向成分および法線方向成分である。 \mathbf{F}_N は減衰力として作用し、数値安定性の向上に寄与する。 \mathbf{F}_P と \mathbf{F}_D が要素に作用する様子を図1に示す。

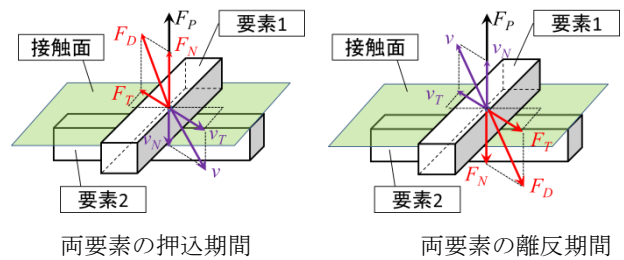


図1 要素間に作用するペナルティ力と動摩擦力

2.2 解析モデルおよび解析条件

今回の解析と比較を行う振動台実験の様子を図2に示す。4m x 4mの振動台 (清水建設) にカーペット床を敷きその上にキャビネットを配置した。背の高いキャビネットを①とし、二段に重ねたキャビネットの上段を②上段とし、下段を②下段とする。家具の諸元を図3と表1に示す。また、モデルはすべて線形チモシェンコはり要素でモデル化し、家具を構成する部材の密度を調整することで家具の重心を表現した。本接触アルゴリズムでは、一方の接触要素を細かく分割する必要があるため、1軸方向加振の場合には、振動台の床と壁および下段キャビネットの上端部分の要素を細かく分割した。モデルの総要素数は5,906、総節点数は4,485である。また、3軸方向加振の場合には、家具の側面に接触可能性があるため、家具の全面を細かく分割した。モデルの総要素数は

10,696, 総節点数は 8,072 である. ペナルティ定数 α を 30 kgf, ペナルティ指数 q を 1 とし, 動摩擦係数 μ と減衰係数 Dc を表 2 に示すようにそれぞれ設定した. 解析では, 表 3 に示す 4 種類の加振波を入力した際に測定された床応答加速度を入力した. 時間増分を 1 ms と設定した.

3. 解析結果

振動台実験での家具の転倒状況を表 4 に, 解析における転倒の様子を図 4 に示す. 実験, 解析ともに家具の転倒状況は概ね一致した. また, 1 軸方向加振における家具②上段の変位評価点の変位と, 振動台実験で得られた変位を比較したグラフを図 5 と図 6 に示す. 振動台実験の変位データは, モーションキャプチャシステムによる計測で取得した. 図より, 解析結果と実験結果は概ね一致していることが分かる. JMA 神戸波の卓越周期は 0.8~0.9 s であり, KiK-net 芳賀波の卓越周期は 0.2~0.3 s である. 解析では, 異なる卓越周期の地震動下における家具の挙動を同様に精度良く再現できた.

4. おわりに

ASI-Gauss 法を用いた家具の挙動解析を行い, 地震動下の家具の挙動を再現した. 本稿では, 一種類の配置ケースでの解析結果について報告した. 今後は, 別の配置ケースについても検証を行う予定である.

【参考文献】

- 1) 賀鐘輝, 磯部大吾郎, 金子美香, 堀宗朗, ASI-Gauss 法を用いた家具の転倒挙動解析, 計算工学講演会論文集, 第 17 巻, (2012).

変位評価点



図 2 家具の配置の様子

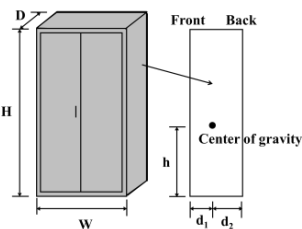


図 3 家具の寸法

表 1 家具の諸元

		①	②上段	②下段
Sizes [mm]	H	1850	730	1120
	W	900	900	900
	D	400	400	400
Position of the center of gravity [mm]	h	925	365.5	562
	d1	178	171	179
	d2	222	229	221
Weight [kg]	m	43.6	21.3	28.8

表 2 接触要素の各組み合わせにおけるパラメータ

接触要素の組み合わせ		μ	Dc [kgf]
床	家具	0.34	30
壁	家具	0.03	15
家具	家具	0.211	15

表 3 加振プログラム

加振波
地震波 (JMA 神戸波 100% の 1 軸&3 軸方向)
地震波 (KiK-net 芳賀波 100% の 1 軸&3 軸方向)

表 4 家具の転倒状況 (実験)

加振波形	方向	入力レベル	転倒家具
JMA 神戸	1 軸方向(NS)	100%	①, ②上下段
KiK-net 芳賀	1 軸方向(EW)	100%	①, ②上下段
JMA 神戸	3 軸方向	100%	①, ②上段
KiK-net 芳賀	3 軸方向	100%	①, ②上段

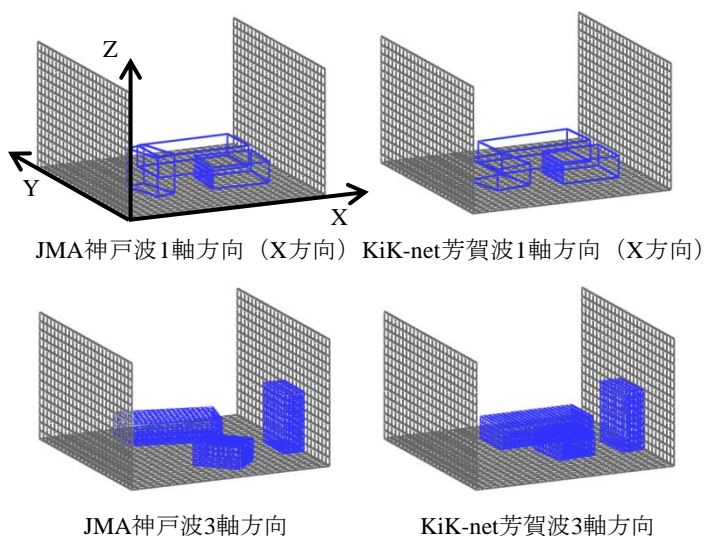


図 4 解析結果

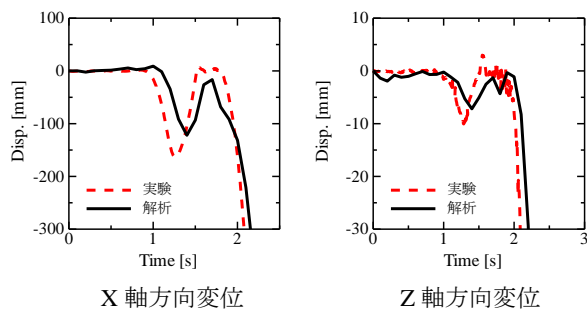


図 5 変位の比較(JMA神戸波 1軸方向)

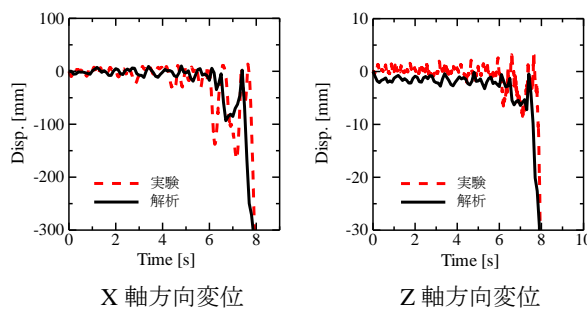


図 6 変位の比較(KiK-net芳賀波 1軸方向)

*1 筑波大学大学院 大学院生

*2 (独) 防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター 研究員・博士 (工学)

*3 清水建設 (株) 技術研究所 博士 (工学)

*4 筑波大学 教授 博士 (工学)

*1 Graduate Student, University of Tsukuba

*2 Researcher, Hyogo EERC, NIED, Dr. Eng.

*3 Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

*4 Professor, University of Tsukuba, Dr. Eng.