ASI-Gauss法を用いた家具の転倒挙動解析

Motion Analysis on Overturning Behavior of Furniture Using ASI-Gauss Technique

賀 鐘輝[1)], 磯部大吾郎[2)], 金子 美香[3)], 堀 宗朗[4)]

Zhonghui He, Daigoro Isobe, Mika Kaneko and Muneo Hori

1) 筑波大学大学院（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, s1120989@u.tsukuba.ac.jp)

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

3) 博（工） 清水建設(株)技術研究所 (〒135-0044 東京都江東区越中島3-4-17, mika@shimz.co.jp)

4) 工博 東京大学教授 (〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1, hori@eri.u-tokyo.ac.jp)

Improperly secured furniture, especially on the upper floors of high-rise buildings under long-period ground motion, can become dangerous objects for human life. In this study, we developed an effective numerical code to analyze the overturning behaviors of furniture subjected to seismic excitation with the adaptively shifted integration (ASI) – Gauss technique. The frictional contact between objects was fully considered by employing a sophisticated penalty method. A basic evaluation was carried out by comparing the results of certain experiments with analyses of motion behaviors of steel cabinets excited by sine waves.

Key Words : Furniture, ASI-Gauss technique, Motion Analysis

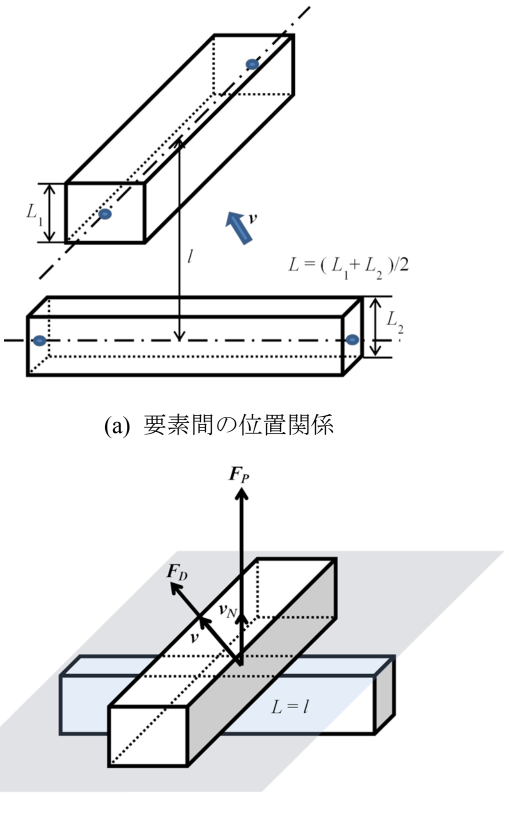
1. はじめに

長周期地震に見舞われた高層ビルの上層部では，家具の転倒により人身に危害が加えられる危険性がある．学校では，散乱した椅子や机などが避難の障害となる可能性がある．防災科学技術研究所のE-Defenseでは，家具の地震時挙動を再現するために，超高層建物の頂部を部分的に切り出した実大寸法の試験体を3次元振動台上で加振し，家具の転倒および外壁，天井等非構造部材の損傷など室内外で起こりうる現象を検証している[1]．一般的に家具等の転倒解析には個別要素法(DEM)[2]がよく用いられるが，DEMは家具等を剛体として扱うために，壁や人身等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．

そこで本研究では，E-Defenseが進めている数値震動台（E-Simulator）プロジェクトの一環として，家具の地震時挙動を再現するための転倒挙動解析コードを開発することを目的とした．解析コードには，大規模な骨組構造解析において計算コストを最小限に抑えることが可能な，ASI-Gauss法[3]を用いた．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導入した．さらに，正弦波振動下における家具の転倒実験結果との比較により，解析コードの有効性を検証した．実験結果との比較には，全体像の目視によるものとモーションキャプチャシステムによる計測結果を用いた．

2. 摩擦力を考慮した接触アルゴリズム

家具間の様々な接触現象を再現するために，本研究ではペナルティ接触理論を導入した．図1に示すように，相対速度$\boldsymbol{v}$を持つ要素間の接触を考える．要素軸間の最短距離lが要素幅の平均値Lより小さくなった際に，次式に示すペナルティ力$\boldsymbol{F_P}$が接触面の法線方向に作用することとする．



(a) 要素間の位置関係

(b) 要素間に作用するペナルティ力と動摩擦力

図 1　要素間の位置関係および接触力

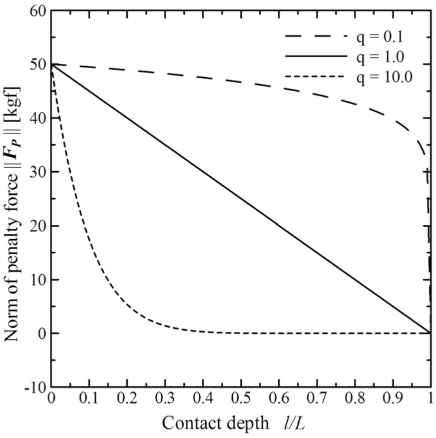


図 2 食い込み量とペナルティ力の関係

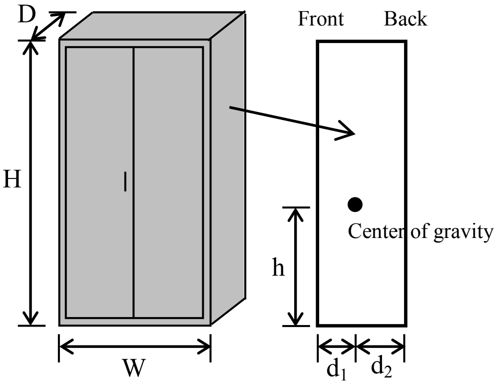
$$\boldsymbol{F_P} = \alpha\left(1-\frac{l}{L}\right)^q \frac{\boldsymbol{v_N}}{\|\boldsymbol{v_N}\|},\ \text{where}\ \ (l \le L) \qquad (1)$$

ここで，α: ペナルティ係数，q: ペナルティ指数，$\boldsymbol{v_N}$: 相対速度$\boldsymbol{v}$の法線方向成分である．αを50 kgfとし，qを変えた場合に得られる食い込み量l/Lに対する$\boldsymbol{F_P}$のノルム値の分布を図2に示す．

次に，次式に示す動摩擦力$\boldsymbol{F_D}$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．

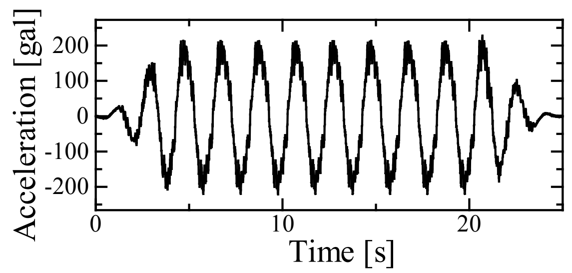
$$\boldsymbol{F_D} = \mu\alpha\left(1-\frac{l}{L}\right)^q \frac{\boldsymbol{v}}{\|\boldsymbol{v}\|},\ \text{where}\ \ (l \le L) \qquad (2)$$

ここで，μ: 動摩擦係数である．動摩擦力の法線方向成分は減衰力として作用し，数値安定性の向上に寄与する．

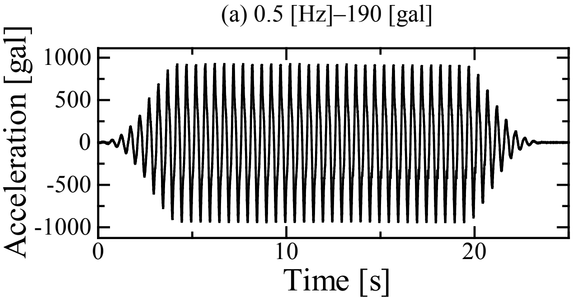


寸法 [cm]	H=179 W=88 D=38
重心位置 [cm]	h=87 d_1=16 d_2=22
重量 [kg]	41

図 3 試験体の寸法と重心位置



(a) 0.5 [Hz]–190 [gal]



(b) 2 [Hz]–700 [gal]

図 4 入力正弦波

3. 家具の転倒挙動解析

3-1 解析モデルおよび解析条件

開発した解析コードを用いて家具の転倒挙動解析を行い，転倒挙動実験結果[4]と比較した．図3に示すオフィス用のスチール製家具を2つ振動台上に設置し，図4に示す(a)0.5Hz-190galと(b)2Hz-700galの2種類の正弦波を入力した．Case(a)では1つの家具を振動台中央に置き，もう1つを壁際に設置した．Case(b)では1つを横にした状態で振動台中央に置き，もう1つを壁際に設置した．家具と振動台ともに1部材当り2つの線形チモシェンコはり要素でモデル化し，家具の重心位置は要素の密度を変えることで調整した．モデル全体では総要素数2280，総節点数1745，総自由度数10398 である．ペナルティ係数αを50 kgf，ペナルティ指数 qを1とし，動摩擦係数μを一律に0.6とした．また，ソルバーには共役傾斜法(CG法)，非線形増分理論にはupdated Lagrangian formulation，時間積分には数値減衰を考慮した Newmarkのβ法(β=4/9)を用い，時間増分を1 msと設定した．一般PCによる計算にほぼ 4 時間を要した(CPU: 2.0 GHZ Xeon).

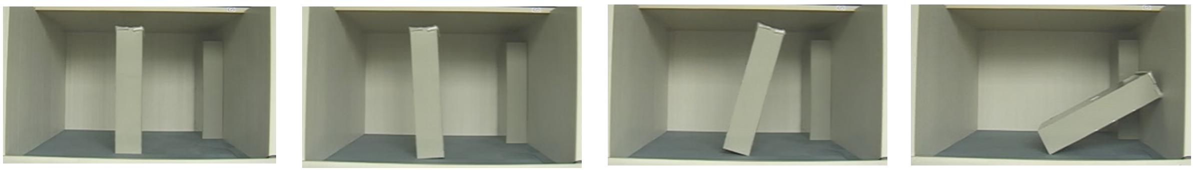
3-2 実験結果と解析結果の比較

図5，図6にCase(a)およびCase(b)の実験結果と解析結果を示す. Case(a)においては, 実験および解析とも加振の約6秒後に中央の家具が転倒した. また, Case(b)においては, 加振の約4秒後に壁際に設置した家具が転倒した．入力波の周期の相違による家具の挙動の変化が解析でも再現され，解析コードの有効性が確認された．

4. モーションキャプチャシステムを用いた実験結果と解析結果の比較

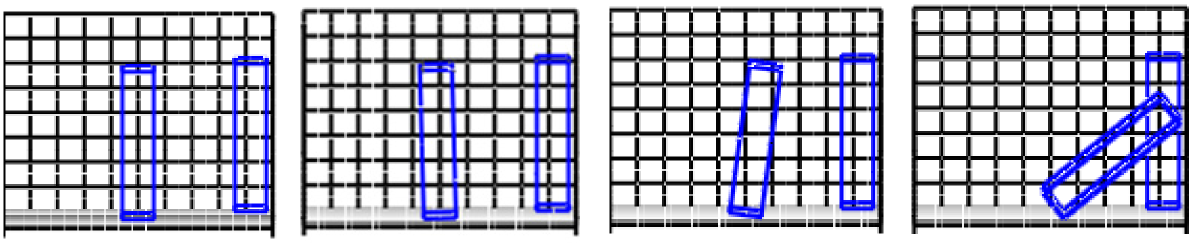
4-1 解析モデルおよび解析条件

本節では，家具の挙動をモーションキャプチャシステ



0 [s]　　4 [s]　　5 [s]　　6 [s]

(a)　実験結果



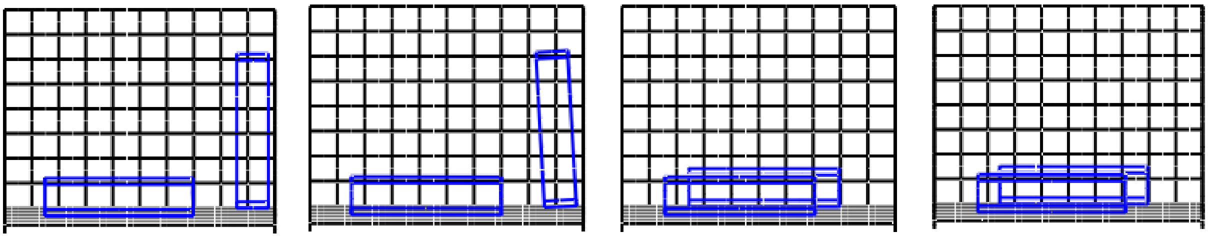
0 [s]　　4 [s]　　5 [s]　　6 [s]

(b)　解析結果

図 5 実験結果と解析結果の比較 (0.5 [Hz]–190 [gal])

0 [s]　　4 [s]　　6 [s]　　16 [s]

(a)　実験結果



0 [s]　　4 [s]　　6 [s]　　16 [s]

(b)　解析結果

図 6 実験結果と解析結果の比較 (2 [Hz]–700 [gal])

ムにより精度良く計測した実験結果と解析結果との比較を行う．実験には，図7, 図8に示すスチール製の組み立て家具の1段目中央部にスチール製のボックスを置いたものを試験体として用いた．解析モデルは総要素数432, 総節点数346, 総自由度数2004 である．これを2Hz-0.3Gの正弦波で加振した．図9にモーションキャプチャシステムで

図 7 試験体の外形

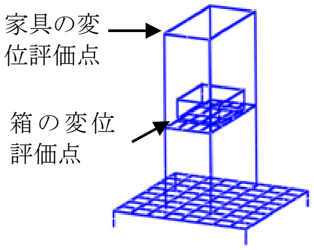
計測した台上加速度を示す．これを解析での入力波とした．α, q, μは前節と同様に設定した．

4-2 実験結果と解析結果の比較

図10にモーションキャプチャシステムによる計測画像を，図11には解析により得られた家具の挙動を示す．図12には, 家具評価点と箱評価点におけるX軸方向変位応答値を示す．箱に関しては，家具上で滑りを起こしたために応答値に相違が見られるが，振幅は良好に一致している．家具に関しては，応答値，振幅ともに実験結果と概ね一致することが確認できた．

5. おわりに

本研究では，家具の転倒挙動を再現する有限要素解析コードを開発した．正弦波加振時の実験との比較により，解析コードの有効性を検証した．今後は，建物そのものとともに建物内に設置された設備品や椅子，机等をモデ



家具の寸法 [cm]	1 段目高さ=52 2 段目高さ=60 短辺= 34 長辺= 74
家具の重量 [kg]	5.3
箱の寸法 [cm]	短辺= 32 長辺=40 高さ=12
箱の重量 [kg]	3.3

図 8 試験体モデルと寸法

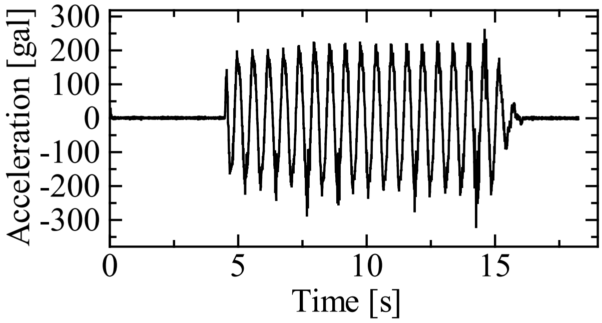


図 9 計測された台上加速度

ル化し，大規模な数値解析を進めていく予定である．

参考文献

[1] E-defense, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. 2009. http://www.bosai.go.jp/hyogo/index.html.

[2] Cundall, P.A.: A Computer Model for simulatinProgressive, Large-scale Movement in Blocky Rock System, *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics* II-8: 129-136, 1971.

[3] Lynn, K.M. & Isobe, D.: Finite Element Code for Impact Collapse Problems of Framed Structures, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering* 69(12): 2538-2563, 2007.

[4] 金子美香，中村豊，田村和夫，神原浩:配置によるオフィス家具の転倒挙動の違い，構造工学論文集 50B: 679-685, 2004.

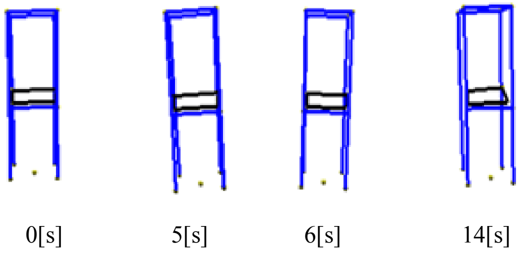


図 10 モーションキャプチャシステムによる計測画像

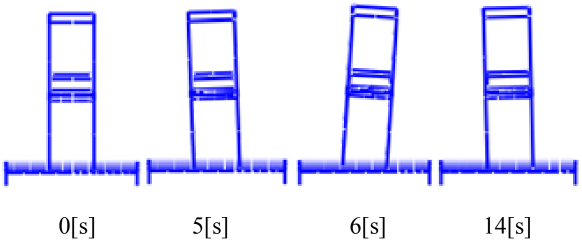
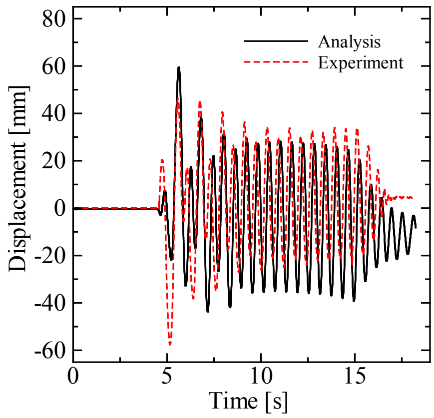
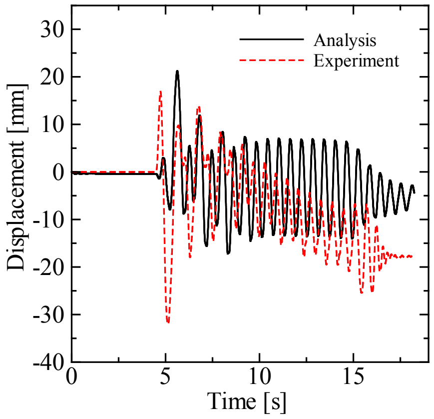


図 11　解析結果



(a) 家具の変位応答



(b) 箱の変位応答

図 12　X 軸方向変位応答値の比較