

積荷・什器類を対象とした 地震時挙動シミュレーション Physics Simulation of Stacked Cargoes and Furniture due to Seismic Motion

吉田 治 Osamu Yoshida
石川 理都子 Ritsuko Ishikawa
三浦 耕太 Kota Miura
青山 優也 Yuya Aoyama

1. はじめに

東日本大震災以降、各企業においては地震被害に対するBCP対策が急務となっている。対策を立案するにあたり、物流施設や生産施設等の倉庫では、保管されている積荷の地震時挙動を把握することが重要となっている。また、病院など地震災害時に拠点となる施設では、施設内の機器や什器の地震時挙動を把握することが求められる。

しかしながら、このような転倒や落下、移動を伴う物体の挙動は複雑であり、正確に把握しようとする、実大振動台実験によってその挙動を再現するしかないが、実験では費用も時間も限定されるため、全ての積荷、機器、什器等を網羅することは不可能である。

一方で、最近では、解析技術の進歩により、剛体物理解析エンジンを利用して、家具の転倒や機器類の地震時挙動が再現可能になってきている^{1),2),3)}。

そこで、剛体物理解析エンジンを搭載したソフトウェア開発環境を用いて、積荷等の地震時挙動を再現するシミュレーション手法(ツール)を開発した。このツールでは、地震動の動きを再現できる仮想の振動台(以下、数値振動台)を設定し、その数値振動台上に積荷等を搭載することで、それらの地震時挙動を再現する。

本報では、開発したツールの概要と過去に振動台で行った積荷転倒実験等の再現性検証結果について紹介する。

2. 地震時挙動再現ツールの概要

積荷・什器類の地震時挙動を再現するためのツールの作成には、剛体物理解析エンジンを搭載したソフトウェア開発環境Unity⁴⁾を用いた。

2.1 パラメータの設定

Unityでは、シミュレーションの対象とする積荷や什器などの物体を剛体としてモデル化し、形状、寸法、質量及び材質を設定する。材質において、静摩擦係数、動摩擦係数及び反発係数が任意に設定できるようになっている。

これらのパラメータの中で、最も重要なのが静摩擦係数と動摩擦係数である。しかしながら、実測した摩擦係数をそのまま設定しても実際の挙動とは合わないことがわかった。そこで、実測した摩擦係数をもとに、実際の挙動と合うように摩擦係数を調整する手法を考案した。

2.2 地震時挙動のシミュレーション手法

対象物が地面や基礎に置かれている場合には、設定した数値振動台に地震波そのものを入力し、建物上層階やラック内など構造物内に置かれている場合には、別途地震応答解析によって求めた構造物の応答波を数値振動台に入力してシミュレーションを行う。

数値振動台を地震波や応答波で加振する方法としては、①数値振動台に強制変位を与える、②数値振動台に地震波による慣性力を外力として与える、の2通りが考えられる。ここでは、ユーザーの利便性を考慮して、地震波や応答波の加速度波形をそのまま入力できる②を選択した。ただし、時間の経過とともに振動台の変位に偏りが生じるのを防ぐために、振動台に対して制御力を与えている。また、シミュレーション対象物からの反力の影響を無視できるように、振動台の質量は対象物と比較して非常に大きな値とした。

2.3 シミュレーションツールの作成

2.1~2.2節で述べた手法により、地震時挙動シミュレーションを行うツールを作成した。このツールの中では、

- ・ 地震波の選択、入力レベルの変更
- ・ 地震波の加速度、速度、変位の表示
- ・ 対象物の最大移動量、評価結果の表示
- ・ 視点の移動、回転
- ・ シミュレーションの一時停止、コマ送り
- ・ 結果の出力

などができるようにした。作成したプロトタイプモデルをFig. 1に示す。

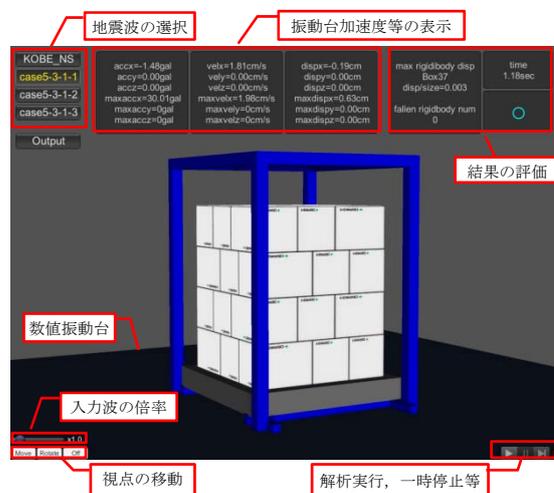


Fig. 1 開発したツールのプロトタイプモデル
Prototype Model of Developed Simulation Tool

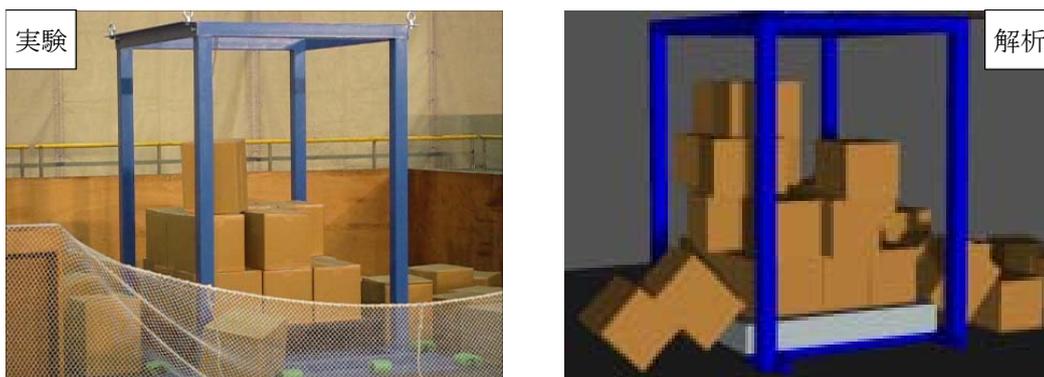


Fig. 2 積荷転倒実験の検証例 (正弦波 1 秒, 400cm/s²)
Verification Example of Experimental Results

3. 地震時挙動再現性の検証

開発した地震時挙動シミュレーション手法の精度を検証するため、振動台を用いて行った積荷転倒実験の結果及び「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領」⁵⁾に示されている剛体の転倒限界曲線と比較検証を行った。

3.1 積荷転倒実験結果の検証

対象の積荷は、385mm×275mm×295mm(H)の段ボール 8 個を 4 段積としたものである。各段ボールには木粉がほぼ均等に充填されており、段ボール 1 個あたりの質量は 5kg である。実験は、周期 2 秒, 1 秒, 0.25 秒, 0.125 秒の正弦波, 地震波, 応答波を用いて行った。この実験で計測された振動台入力を用いてシミュレーションを行い、積荷の転倒, 荷ずれについて、実験結果を再現できるか検証した。その検証例を Fig. 2 に示す。

その結果、転倒または荷ずれするかの判定については、シミュレーションで実験結果を十分な精度で再現できることを確認した。

3.2 剛体の転倒限界曲線の検証

幅 385mm 及び 275mm, 高さ 295mm~1180mm の剛体を対象として、正弦波入力に対するシミュレーションを行い、剛体がロッキングする加速度, 転倒する加速度について評価した。その結果を文献 5)の剛体の転倒限界曲線と比較し、剛体がロッキングを開始すると転倒限界曲線の「転倒の可能性が高い」領域に入ることを確認した。その検証結果例を Fig. 3 に示す。

4. まとめ

剛体物理解析エンジンを搭載したソフトウェア開発環境を用いて、シミュレーションシーンの中に地震動の動きを再現できる数値振動台を設定し、積荷等の地震時挙動を再現するシミュレーションツールを開発した。このツールを用いて、振動台で行った積荷転倒実験及び「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施

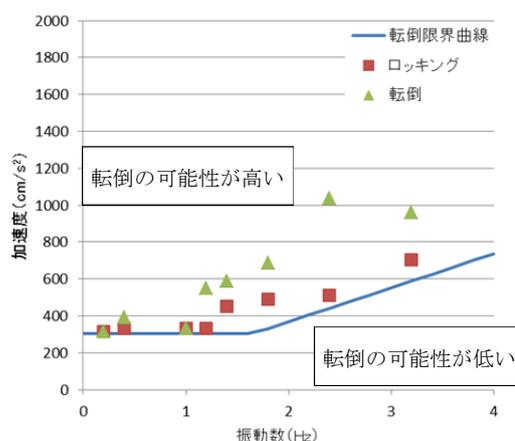


Fig. 3 転倒限界曲線の検証例 (幅 275mm, 高さ 88mm)
Verification Example of Overturning Criteria

工要領」に示された剛体の転倒限界曲線についてシミュレーションを行い、十分な精度で再現できることを確認した。これにより、本ツールを実務に適用できることがわかった。

また、本ツールを用いれば、超高層建物の頂部の室内状況についてもシミュレーションできるため、長周期地震動に対する什器固定の要否についても検討可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 正月俊行：屋内収納物の転倒・落下シミュレーション, structure, 126, pp.38-41, 2013.4
- 2) 山本雅史, 他：地震時の室内における家具類の状況についての研究(その 1)~(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.663-666, 2013.8
- 3) 松下卓矢, 他：振動台実験に基づく地震時室内被災状況のモニタリング技術とシミュレーションの開発, 日本建築学会技術報告集, 19-43, pp.871-874, 2013.10
- 4) Unity web page : <http://japan.unity3d.com/>, 2016.9.21 閲覧
- 5) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領, pp.270-275, 2003.1