

地震時における剛体運動シミュレーション

山口大学工学部 正会員○清野純史
 広銀システムサービス(株) 上田陽子

1. はじめに

地震時の剛体の運動の研究の歴史はほぼ 100 年にもおよび、剛体が転倒する現象に関して、様々な研究が行われてきた。初期の段階では、剛体の運動から地震記録が得られていない場所での地震のピーク加速度を推測することに関心がよせられたが、最近では地震時における家具などの転倒を防ぐために適用できることで注目されている。本研究では、剛体の運動を 6 タイプに分類し、それらの運動を、その運動相互の遷移も含めて数値的に解くアルゴリズムを構築した。

2. 剛体運動のモデル化

本研究では、Ishiyama¹⁾にならい、地震時における剛体の運動を 6 タイプに分類した。すなわち、

(1) rest (静止)、(2) slide (滑っている状態)、(3) rotation (回転)、(4) slide rotation (滑りながらの回転)、(5) translation jump (平行移動のジャンプ)、(6) rotation jump (回転しながらのジャンプ) である。

本研究では、剛体の平面運動(水平 1 成分、鉛直 1 成分)のみを考えているので、この 6 タイプで、平面での剛体の運動は、すべて表すことができる。

3. 剛体運動のシミュレーション結果

各運動の運動方程式および衝突後の運動に関する方程式^{1),2)}を導くとともに、各運動間の遷移を考慮した計算アルゴリズムを構築した。剛体運動の推移の基準、および運動間の遷移と衝突に関する表とフローチャートを示したものが、それぞれ表 1、図 1, 2 である。

(1) 正弦波を入力した場合のシミュレーション

地面の震動として正弦波を入力した場合のシミュレーションを行った(図 3)。震動強度に対する剛体の運動を調べるために、振幅と振動数を変化させた結果、剛体の運動は、既存の研究¹⁾で述べられている転倒基準にほぼ一致し、大きく 4 つの領域に分類できた。また、1968 年の十勝沖地震における八戸の記録を適用した結果も、この範疇のなかに収まることがわかった。これを示したものが図 4, 5 である。

(2) 兵庫県南部地震における神戸での地震記録の入力

1995 年兵庫県南部地震での神戸海洋気象台で観測された地震波を入力し、床の上に置かれたタンスや本棚などがどのような動きをするかをシミュレートしたものが図 6 である。剛体のサイズとしては、180×50cm および 190×50cm の 2 パターンを用いた。この結果、剛体は幅と高さの比のわずかな違いによって転倒する場合と転倒しない場合にわかれることから、家具などの幅と高さの比の微妙な相違が、その挙動に大きく影響することがわかった。

4. まとめ

本研究で行ったような微分方程式の数値解析に基づく解法では、3 次元化や複数要素の扱いには限界がある。今後の課題としては、剛体要素の運動方程式を要素間のやりとりを考慮して、それぞれ独立に解くことのできる個別要素法(distinct element method;DEM)の適用と、3 次元化の可能性についての検討である。

参考文献

- 1) Yuji Ishiyama, 'Motions of Rigid Bodies and Criteria for Overturning by Earthquake Excitations', EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, VOL.10, p635-650, 1982
- 2) Yuji Ishiyama, 'Review and Discussion on Overturning of Bodies by Earthquake Motions', Building Research Institute, Ministry of Construction (June 1980), p58-60, p71-75

表1 剛体運動の遷移

現在の状態	次の運動に移るための条件	次の状態
rest (静止状態)	$ X > \mu_s \cdot \frac{b}{h}$	slide
	$\frac{h}{b} \cdot \frac{g + \ddot{y}}{g} > \mu_s$	rotation
	$\mu_s > \frac{h}{b}$	translation jump
	$\ddot{y} + \ddot{y} < -g$	rest
	$\ddot{x}_0 = 0$	slide rotation
slide (滑っている状態)	$\ddot{y} + \ddot{y} < -g$	translation jump
	$\ddot{x}_0 = 0$	rest
rotation (回転状態)	$ X + \ddot{x} > \mu_s(g + \ddot{y})$	slide rotation
	$\ddot{y} + \ddot{y} < -g$	rotation jump
slide rotation (滑りながら回転している状態)	$ X + \ddot{x} < \mu_s(g + \ddot{y})$	rotation
	$\theta = 0, \dot{\theta} = 0$	slide
translation jump (平行移動ジャンプ)	$\ddot{y} + \ddot{y} < -g$	rotation jump
	$ X > 0$	rotation jump
rotation jump (回転ジャンプ)	$\theta = 0, \dot{\theta} = 0$	translation jump

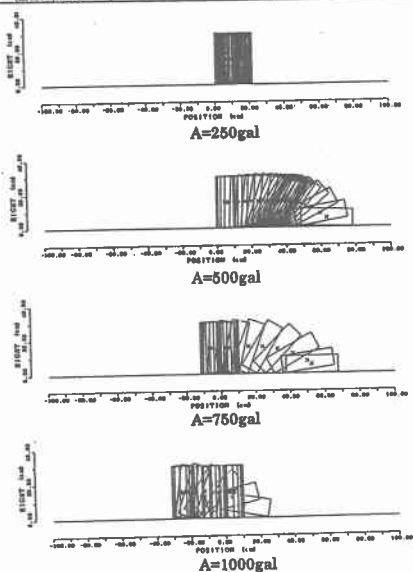
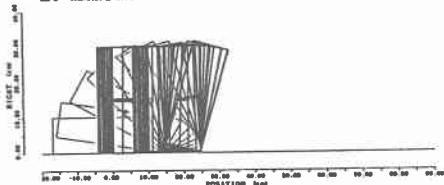
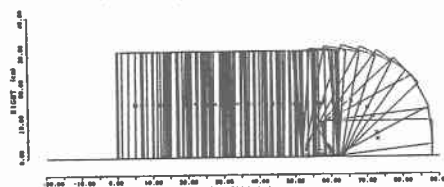
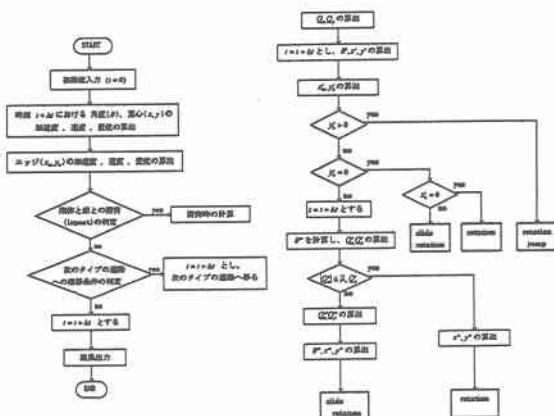
図3 振動数を1.0Hzに固定した場合($\ddot{x} = A \sin \omega t, \ddot{y} = A \sin \omega t; \omega = 1.01 \text{ rad/s}$)図4(a) 十勝沖地震における八戸の地震波を入力した場合のシミュレーション結果 (NS:18~25s, UD:18~25s; R.M.B.:850gal, $\theta \times h = 3 \times 15 \text{ cm}; \mu_s = 0.4, \mu_r = 0.3; e_s = -1.0, e_r = 0.0$)図4(b) 水平動および鉛直動を正弦波として入力した場合のシミュレーション結果($\ddot{x} = A \sin \omega t, \ddot{y} = A \sin \omega t; A=800 \text{ gal}, f=2.0 \text{ Hz}$)

図5 各運動におけるフローチャート 図6 衝突時の計算におけるフローチャート

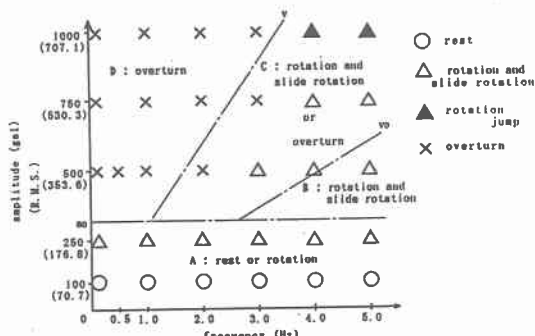
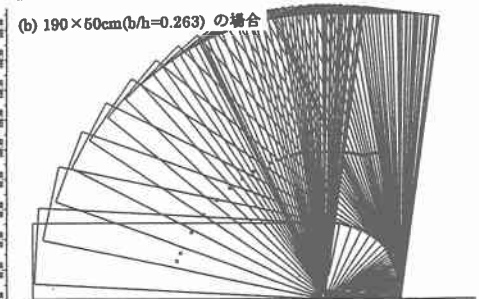
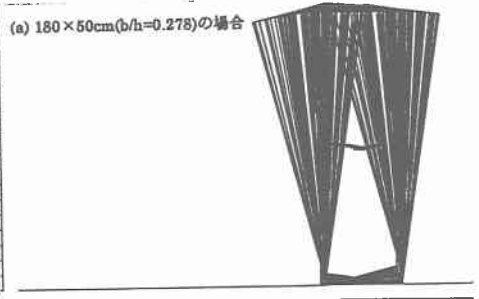
図6 水平動および鉛直動を正弦波として入力した場合の剛体の運動 ($\theta \times h = 3 \times 15 \text{ cm}; \mu_s = 0.4, \mu_r = 0.3; e_s = -1.0, e_r = 0.0$)

図7 兵庫県南部地震における神戸海洋気象台での地震波を入力した場合のシミュレーション結果