

剛体の地震時挙動シミュレーションに関する基礎的研究

徳島大学大学院 学生員 ○須知 晃一 富士ハウス株式会社 川並 修司
徳島大学工学部 正会員 成行 義文 徳島大学工学部 フォロー 平尾 潔

1. はじめに 大地震時には、大型家具の転倒等により、多くの人が負傷したり生命の危険に晒されることは過去の震災が物語っている。家具の耐震対策として多種多様な器具が開発されているが、それらの効果を一般の人達が実感することは難しい。本研究では、家具の耐震化を数値実験的に検討し得る解析ツール作成のための基礎的研究として、剛体の地震時挙動シミュレーションプログラムを作成し、2・3の解析例に基づきその妥当性を検討した。

2. 解析モデル 本研究では図-1に示すような2次元剛体モデルを対象とする。ただし、重心Gはその中心にあり、また剛体と接触する床面および壁面も剛であると仮定する。

3. 剛体の地震時挙動 剛体の代表的な地震時挙動として、一般に、静止、停止、滑動、ロッキング振動、衝突、転倒が挙げられる。滑動とロッキング振動はそれぞれ単独で生じる場合と複合する場合があるが、本研究では、基礎的研究の段階のため、より支配的であると考えられる前者のみ考慮した。

4. 基本式 前述の剛体の地震時挙動（静止除く）は以下のように定式化される（式中の記号は本章末参照）。

・停止（ $\ddot{x}_G$ ：地動加速度）

$$\text{i) } \ddot{x}_G > 0 \text{ のとき } m\ddot{x}_G - F_0 = 0 \quad (1)$$

$$\text{ii) } \ddot{x}_G < 0 \text{ のとき } m\ddot{x}_G + F_0 = 0 \quad (2)$$

・滑動（図-2）

$$\text{i) } \dot{X} > \dot{x}_G \text{ のとき } m(\ddot{x}_G + \ddot{x}') + F' = 0 \quad (3)$$

$$\text{ii) } \dot{X} < \dot{x}_G \text{ のとき } m(\ddot{x}_G + \ddot{x}') - F' = 0 \quad (4)$$

・ロッキング振動¹⁾（図-3）

$$\text{i) A 点まわりに回転運動をする場合} \quad J\ddot{\theta}_A + mgr \sin(\alpha - \theta_A) = m\ddot{x}_G r \cos(\alpha - \theta_A) \quad (5)$$

$$\text{ii) B 点まわりに回転運動をする場合} \quad J\ddot{\theta}_B + mgr \sin(\alpha - \theta_B) = -m\ddot{x}_G r \cos(\alpha - \theta_B) \quad (6)$$

・衝突

i) 地面との衝突（支点の移行を伴う）

$$\dot{\theta}' = \frac{J_G + mr^2 \cos 2\alpha}{J_G + mr^2} \cdot e \cdot \dot{\theta} \quad (7)$$

ii) 壁および他物体との衝突（図-4）

$$\dot{\theta}' = e_w \cdot \dot{\theta} \quad (8)$$

・転倒： $\theta = 90^\circ$ となるときの転倒と判断する。

ここに、 $\theta_A, \dot{\theta}_A, \ddot{\theta}_A, \theta_B, \dot{\theta}_B, \ddot{\theta}_B$ ：各支点まわりの角変位、角速度、角加速度、 J, J_G ：支点および重心まわりの回転慣性モーメント、 F_0, F' ：床との最大静止摩擦力および動摩擦力、 $\dot{\theta}, \dot{\theta}'$ ：衝突前および衝突後の角速度、 $\theta_{\max}$ ：壁面衝突時の回転角、 e, e_w ：床および壁との反発係数、 h, b, r, α ：剛体の形状を示す変数（図-1 参照）、 m ：質量、 g ：重力加速度である。

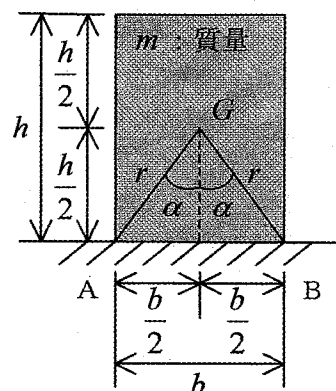


図-1 剛体モデル

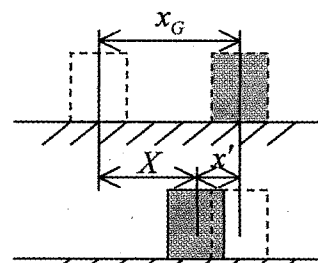


図-2 滑動時の変位

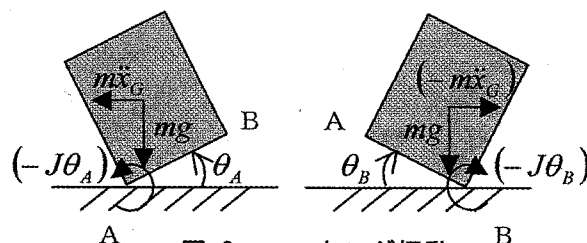


図-3 ロッキング振動

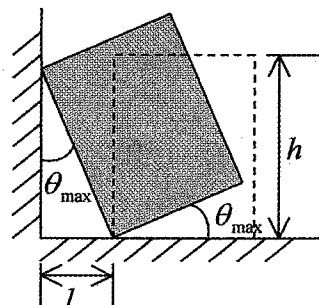


図-4 壁面との衝突

5. 入力地震波および構造特性

本研究で用いた入力地震動加速度波形ならびに構造特性等は図-5～7ならびに表-1のようである。なお各波の卓越周期 T_p は図中に示す通りである。

6. 解析結果 図-8および図-9は、幅 $b=0.5m$ の剛体モデルに前述の図-6および図-7の実地震加速度記録を入力した場合の剛体の重心 G の水平変位の時刻歴を示したものである。

図-8および図-9の各(a)図は、ロッキング挙動を無視した場合(式(1)～(4)を使用)であり、一方各(b)図は滑動現象を無視した場合(式(1), (2), (5)～(8)を使用)の結果である。

図-8(b)より、入力地震動の強震部で周期が約1.6秒のロッキング振動が発生していることがわかる。図-9(b)より、El Centro地震では、その強震部において剛体はA点を支点として一度だけ若干浮き上がるものの、その後のロッキング挙動は見られない。

図-8(a)および図-9(a)より、各地動による剛体の元位置からの滑動状態がよくわかる。図-10は、剛体と壁との間隔 l_w を変化させた場合のロッキング振動による転倒時間を示したものである。全体としては l_w が大きくなるにつれて転倒時間は徐々に短くなる傾向にあるが、部分的に l_w が小さいにもかかわらず、早期に転倒するケースも見られる(○で囲まれた部分)。

表-2は l_w ならびに b/h が転倒所要時間に及ぼす影響について比較したものである。表中○および×は転倒有および無を表わしている。同表上部は図-10において前述の傾向を示す l_w をピックアップして、転倒時間等を示したものである。また、同表下部は、 b/h を5種類に変化させた場合の結果を示している。これより、 b/h が大きくなるほど転倒しにくくなり、転倒の場合の所要時間も長くなることがわかる。

7. おわりに 本研究では、剛体の地震時挙動をビジュアルにシミュレーションするためのソフトを開発した。剛体の重心位置の自由設定ならびにロッキング振動と滑動の複合挙動の考慮等が今後の課題である。なお、本手法は墓石の地震時挙動の解析にも将来適用可能であると考えられる。

8. 参考文献 1) 武藤清：構造物の動的解析，耐震シリーズ4，pp.185-205，丸善株式会社，1971.9。

表-1 構造特性

剛体	質量 m	100kg
	高さ h	1.5m
	幅 b	0.15～1.5m
	形状比 b/h	0.1～1.0
床	反発係数 e	0.6
	最大静止摩擦係数 μ	0.62
	動摩擦係数 μ'	0.48
壁	反発係数 e_w	0.6
	剛体との距離 l_w	0.001～0.1m

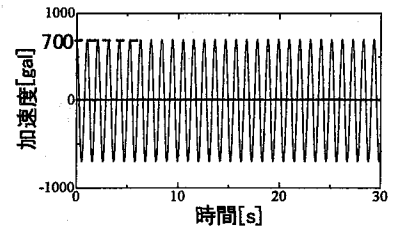


図-5 sin波 ($T_p = 1.04 s$)

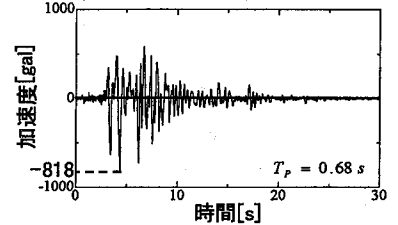


図-6 兵庫県南部地震

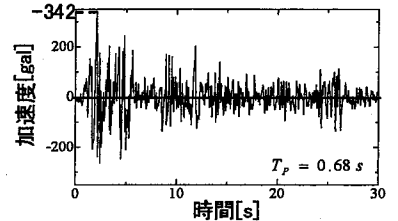


図-7 El Centro地震

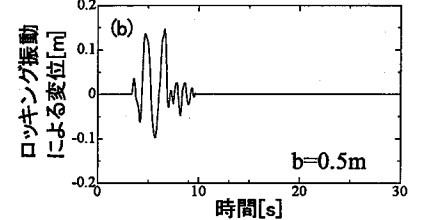
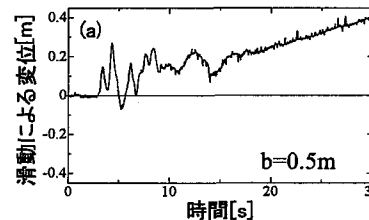


図-8 滑動およびロッキング振動の解析結果(兵庫県南部地震)

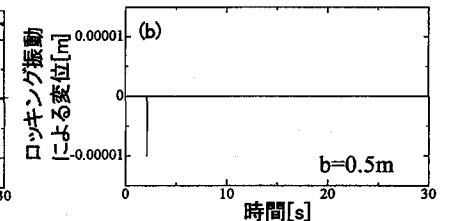
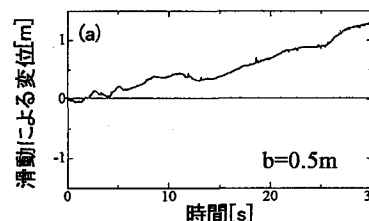


図-9 滑動およびロッキング振動の解析結果(El Centro地震)

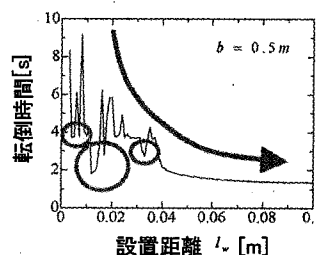


図-10 転倒時間と設置距離の関係

表-2 l_w および b/h が転倒時間に及ぼす影響

$l_w[m]$	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1
転倒	×	○	○	○	○
所要時間[s]		3.750	3.796	1.714	1.353
b/h	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0
転倒	○	○	×	×	×
所要時間[s]	1.296	2.016			