

地震時における剛体の三次元運動について

山口大学工学部 正会員 ○清野 純史
 山口大学工学部 正会員 三浦 房紀
 NTT 小川 誠之

1. はじめに

最近の設計技術・建築技術・建材技術の発達により、地震による建物の倒壊からの危険性は減少したかのように思われていたが、1995年の阪神大震災では死者の約89%が家屋や家具類の倒壊による圧迫死や窒息死であったという報告がなされている¹⁾。また、建物が倒壊に至らないまでも、地震が起こった際の建物内部にある物の移動（棚・家具の転倒・散乱、頭上への物の落下など）による被害は我々の予想を上回るものであり、依然として居住者の安全性は保証されていない。本研究では問題空間を三次元に設定し、剛体運動の解析およびその検討を行った。

2. 三次元剛体運動のモデル化と定式化

本研究では、剛体の運動は重心(x,y,z)の変位とx軸、y軸、z軸まわりのそれぞれの回転角(θ_x , θ_y , θ_z)の6自由度系として表現することにする。

また、この剛体の運動を既存の二次元の研究²⁾にならい、Rest（静止）、Slide（滑っている状態）、Rotation（回転）、Slide rotation（滑りながらの回転）、Translation jump（平行移動のジャンプ）、Rotation jump（回転しながらのジャンプ）のように大きく6つのタイプに分類を行った。

これら、剛体の6つのタイプを推移させることによりすべての剛体の動きを表現することが可能となる。方程式は1つの自由度に対して変位・速度・加速度を求める3元の実線形連立方程式であり、系は6自由度であるため、複雑な式の展開と繰り返し計算を必要とする。例えば、Rotationの問題ではx軸まわりの角加速度は以下ようになる。

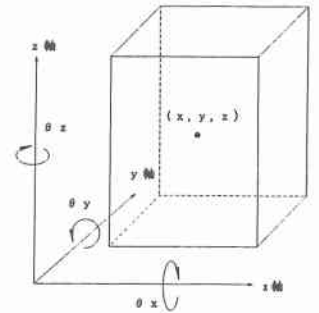


図1 剛体のモデル

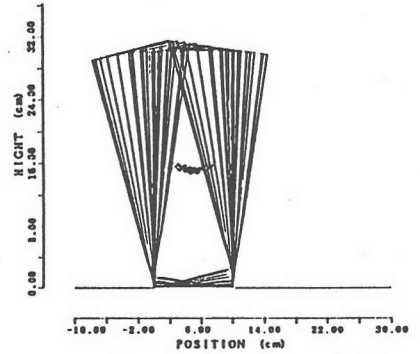
$$\ddot{\theta}_x = \frac{1}{I_{xx}^2 + (y^2 + z^2)} \times \left[\ddot{Y} \sqrt{b^2 + r_{yz}^2 \cos^2(\alpha_x - |\theta_x|)} \cos(\alpha_{xy} - |\theta_y|) - S_x (\ddot{Z} + g) \sqrt{\{b^2 + r_{yz}^2 \cos^2(\alpha_x - |\theta_x|)\} \sin^2(\alpha_{xy} - |\theta_y|) + r_{yz}^2 \sin^2(\alpha_x - |\theta_x|) \cos(\alpha_{yz} - |\theta_z|)} \right] \quad (1)$$

3. 剛体運動のシミュレーション

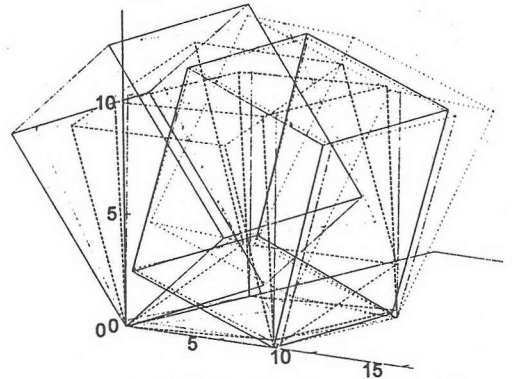
各タイプの運動方程式および衝突後の運動に関する方程式を導くとともに、各運動間の遷移を考慮した計算アルゴリズムを構築した。表1はこの運動の推移条件を示したものである。そして、これらの方程式を線形加速度法によって数値的に解くプログラムを作成し、これを地震時における剛体運動のシミュレーションに適用した。まず、三次元運動方程式を用いて、一定に傾けた剛体が重力の影響からひとりでに倒れ始める自由振動（フリーロッキング）のシミュレーションを行った。図2は二次元³⁾と三次元のフリーロッキングの比較である。

表 1 状態推移条件

現在の状態	推移条件	次の状態	現在の状態	推移条件	次の状態
Rest	$ x > \bar{\mu}(s+2)$ $\cap \mu_c < \frac{h}{h}$ または $ y > \bar{\mu}(s+2)$ $\cap \mu_c < \frac{w}{h}$	Slide	Rotation	$\left\{ \begin{matrix} \theta_c = 0 \\ \phi_c = 0 \end{matrix} \right. \cap \left\{ \begin{matrix} \theta_c = 0 \\ \phi_c = 0 \end{matrix} \right. \cap \phi_c = 0$ または $ x \cdot j > \bar{\mu}(s+2+j)$ または $ y \cdot j > \bar{\mu}(s+2+j)$ $2 \cdot j < -g$	Rest
					Slide
	$\frac{h}{b} > \frac{s+2}{ x }$ $\cap \mu_c \geq \frac{ x }{s+2}$ $\cap \mu_c > \frac{h}{h}$ または $\frac{h}{w} > \frac{s+2}{ y }$ $\cap \mu_c \geq \frac{ y }{s+2}$ $\cap \mu_c > \frac{w}{h}$	Rotation	$ x \cdot j < \bar{\mu}(s+2+j)$ かつ $ y \cdot j < \bar{\mu}(s+2+j)$ $\left\{ \begin{matrix} \theta_c = 0 \\ \phi_c = 0 \end{matrix} \right. \cap \left\{ \begin{matrix} \theta_c = 0 \\ \phi_c = 0 \end{matrix} \right. \cap \phi_c = 0$ $2 \cdot j < -g$	Rotation	
				Jump	
Slide	$2 \cdot j < -g$	Translation	Translation	$ \omega > 0 \cup \alpha > 0 \cup \beta > 0$	Rotation
					Jump
	$\Delta = 0 \cap f = 0$ $\bar{\mu} > \frac{h}{h} \cap f = 0$ または $\bar{\mu} > \frac{w}{h} \cap f = 0$	Rotation	$\left\{ \begin{matrix} \theta_c = 0 \\ \phi_c = 0 \end{matrix} \right. \cap \left\{ \begin{matrix} \theta_c = 0 \\ \phi_c = 0 \end{matrix} \right. \cap \phi_c = 0$	Translation	
				Jump	



(a) 二次元シミュレーション結果



(b) 三次元シミュレーション結果

図 2 フリーロッキングシミュレーション

次に静止している剛体の底面から正弦波振動を入力した場合のシミュレーションを行った。入力パターンとして①水平方向 1 成分のみ、②水平方向 2 成分、③水平方向 2 成分と鉛直方向 1 成分とした。このうち 3 成分の例を示したものが図 3 である。既存の二次元の研究では剛体の転倒のきっかけは高さとの比によって決まるが、三次元解析においてはこれに奥行きと高さの比が関係してくるので複雑な様相を呈することがわかる。

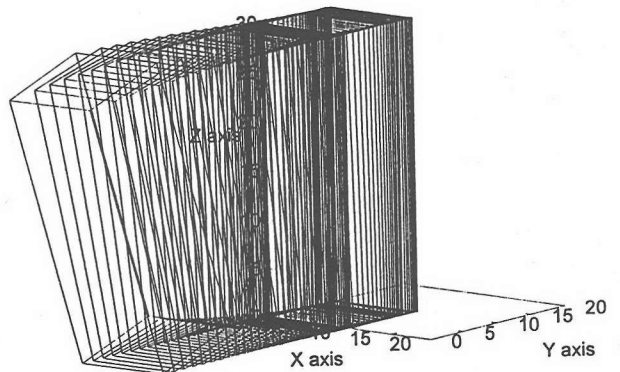


図 3 正弦波を入力した場合のシミュレーション

参考文献

- 1) 日本建築学会建築計画委員会兵庫県南部地震調査研究部会：
“阪神淡路大震災住宅内部被害調査報告書”，1996
- 2) YUJI ISHIYAMA: “REVIEW AND DISCUSSION ON OVERTURNING OF BODIES BY EARTHQUAKE MOTIONS”，
Building Research Institute Ministry of Construction, 1980
- 3) 上田陽子：“地震時における剛体運動のシミュレーション”，山口大学卒業論文, 1995