

I-20

地震動による物体の衝突転倒シミュレーションと上下動の影響

北海道大学工学部	学生員	菊田 悦二
北海道大学工学部	正会員	佐々木康彦
北海道大学工学部	正会員	三上 隆

1. まえがき

建築物内に設置されている設備機器や家具類は、基本的に“重力による安定性”を期待する物体である。このような物体に地震外乱が作用すると、床面や壁面との衝突現象を含んだ複雑な非線形挙動を示すとともに、転倒破壊の危険性が危惧される。

この研究では反発や摩擦の影響も考慮しながら平面内での物体のロッキング・スリップ運動をモデル化し、その複雑な地震時挙動に関して数値シミュレーションによる再現化・可視化を試みた。さらに、本研究では一昨年の阪神・淡路大震災で問題とされた上下動の影響についても比較検討を行った。

2. 物体のロッキング・スリップ運動の定式化

2.1 物体のモデル

ここでは物体を幅 $2b$ 、高さ $2h$ の長方形の剛体と仮定し、剛床上での2次元平面内での運動について解析する。

物体の挙動を示す未知量としては、図1に示すように、重心での回転角 θ および水平・鉛直変位 x, y を定める。 $\ddot{x}$ および $\ddot{y}$ は床面の水平・鉛直方向の入力加速度である。

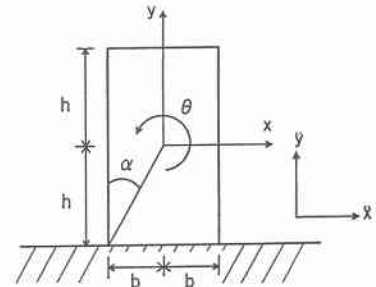


図1 物体のモデル

2.2 運動形態の分類

物体の運動は図2に示すように(1)静止(REST)、(2)滑動(SLIDE)、(3)回転(ROTATION)、(4)滑動回転(SLIDE ROTATION)の4つの形態に分類する。

本研究では鉛直加速度を $1G$ 以下と仮定しているので、物体の下端が床から離れるジャンプ運動は考えない。

2.3 回転角に関する運動方程式

上述の4つの運動形態についてそれぞれ運動方程式をたてるが、解析を進めるにあたりここでは衝突は極めて短時間で終われ、その間物体は同じ位置を占めると仮定している。運動方程式の1例として回転運動の場合の回転角 θ についての非線形運動方程式を次ページに示す。

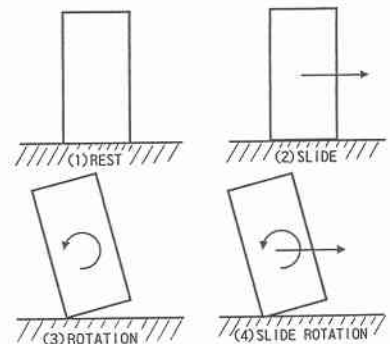


図2 物体の運動形態の分類

Dynamic Behavior and Overturning Simulation of Bodies by Horizontal and Vertical Earthquake Motions by SASAKI Yasuhiko, KUTA Etsuji and MIKAMI Takasi

回転角 θ に関する非線形運動方程式：

$$\ddot{\theta} = \frac{r}{i^2 + r^2} \left\{ \ddot{X} \cos(\alpha - |\theta|) - S(g + \ddot{Y}) \sin(\alpha - |\theta|) \right\} \quad (1)$$

ここに r は物体の重心から底端部までの距離、 i は重心回りの回転半径、 g は重力加速度、 S は符号関数であり $S = \text{sgn}(\dot{\theta})$ で表す。

2.4 運動形態の移行条件

上述の4つの運動形態のうちどの形態に移行するかは、床からの水平方向および鉛直方向の反力 R_x, R_y 、静止摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数 μ_k および物体の幅と高さの比 b/h （以下、縦横比と呼ぶ。）によって定まる。つまり水平反力が摩擦力より大きい時 ($|R_x| > \mu_s R_y$) に活動をし、また $|R_x| > (b/h) R_y$ が回転の開始の条件である。ちなみに鉛直加速度が作用しない場合には $\mu_s > b/h$ （回転から滑動回転への移行の時は $\mu_k > b/h$ ）が条件となる。

2.5 数値解析法

非線形運動方程式を解くにあたり、滑動時にはニューマーク β 法 ($\beta = 1/4$) を用いて Δt 秒後の重心位置での変位、速度および加速度を求める。また回転および滑動回転時にはこれに加えてニュートン・ラプソン法を用いて、近似的に回転角 θ に関する非線形方程式(1)等を解く。この場合の x, y 方向の変位・速度および加速度はすべて回転角 θ に依存しているのでこれによって物体の挙動を知ることができる。

3. 物体の数値シミュレーション結果

3.1 自由振動

ロッキングの周期は厳密には意味を持たないとされているが、ここでは反発の影響の研究も兼ねて物体の形状（縦横比）と見掛けの固有周期との関連性を求めた。

図3は縦横比の値を定め、それぞれ応答振幅（回転角）と見掛けの固有周期との関係をグラフにしたものである。

この結果、縦横比の値が小さい程見かけの固有周期は大きくなった。これは図1と(1)式からわかるように縦横比の値が小さいと角 α の値が小さくなるために重力による復元力が小さくなるためである。また、形状の変化によって慣性モーメントが増大することによっても見掛けの固有周期は大きくなる。

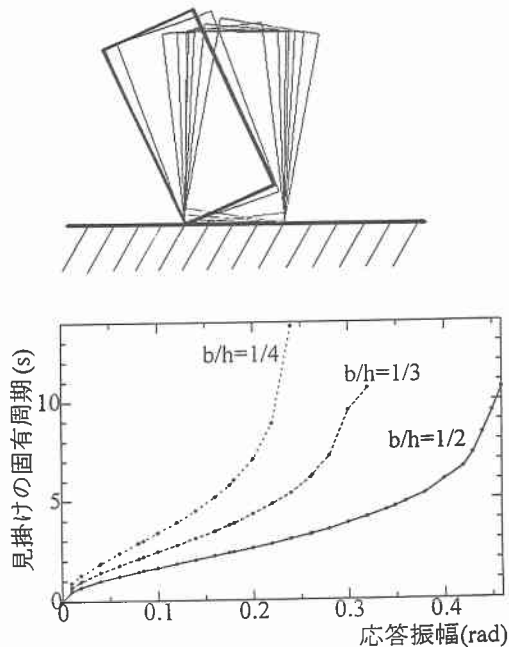


図3 見掛けの固有周期

3.2 正弦波加振による転倒シミュレーション

正弦波による水平・鉛直加速度を入力して物体の転倒に要する水平加速度と鉛直加速度の関係を求め、鉛直加速度がどのような影響を持っているかを検討する。以下の数値計算では幅 $2b=1.0\text{m}$ 、高さ $2h=2.0\text{m}$ とする。図4は最大水平加速度 500gal 、最大鉛直加速度 250gal の場合の転倒シミュレーション例である。

図5は横軸に水平加速度、縦軸に鉛直加速度をとり、水平加速度の加振周期(T_H)を $3.0(\text{s})$ で一定として鉛直加速度の加振周期(T_V)を変化させた場合にそれぞれが転倒に到るのに要する水平・鉛直加速度の関係を(a)滑りにくい場合と(b)滑りやすい場合において、グラフにしたものである。いずれも線よりも右側が転倒領域である。

(a)滑りにくい場合には物体はロッキング運動をする。この時すべてのグラフが右下がりのグラフとなり、鉛直加速度が大きければより小さな水平加速度でも転倒に到るという結果になっている。これは鉛直加速度の値が負になった時に回転に対する復元力となる鉛直力が減少し、転倒しやすくなるのである。

これに対し(b)滑りやすい場合には物体は滑動運動をする。この時は加振周期によって大きく結果が異なり、鉛直加速度が大きい程転倒しにくくなる場合が生じた。これは滑りのない時と同様に鉛直力が弱くなった時、滑りのある場合には大きな滑りが生じることになる。つまり滑りが生じることによって、その結果転倒しにくくなるものと考えられる。

3.3 滑りによる損失エネルギー

正弦波加振によるシミュレーションの結果から、滑りによってエネルギーが消費され、その結果物体が転倒しにくい場合があるという結果がえられた。そこで滑りによる損失エネルギーを計算してみた。

$T_H=T_V=3.0(\text{s})$ とし、動摩擦係数 μ_k の値を変えてそれぞれ数値シミュレーションを行った。図6はその結果であり、グラフはそれぞれの場合の滑りによる損失エネルギーの累積値を表す。図のように物体の持つエネルギーの一部が滑りによって随時消費されるため物体は転倒しにくくなるのである。

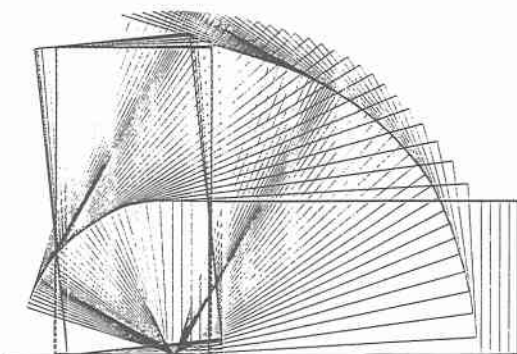


図4 物体の転倒シミュレーション例

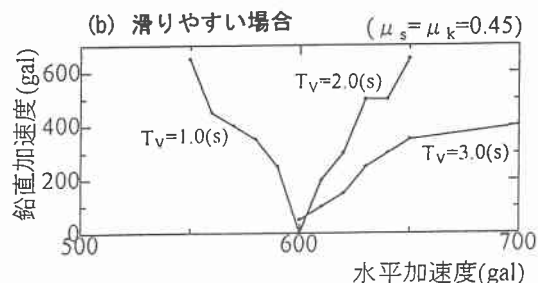
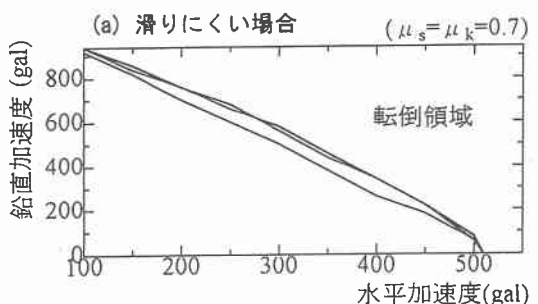


図5(a),(b) 転倒に要する水平・鉛直加速度

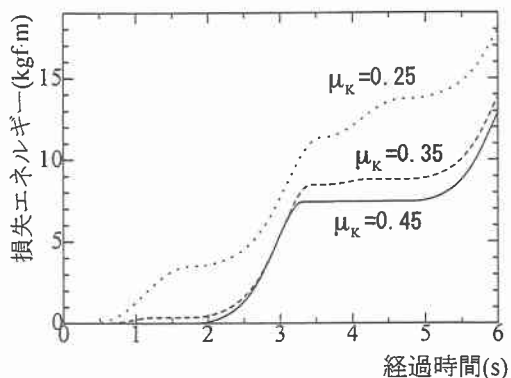


図6 滑りによる損失エネルギー

3.4 地震波による転倒と上下動の影響

実際に地震波を入力してその時の物体の挙動について解析を行う。ここで用いた地震波の卓越周期は0.3秒と1.0秒である。

ここではこの地震波の最大加速度を変えて水平・鉛直方向別に入力するので、水平方向と鉛直方向からそれぞれ入力される地震波は同一の地震波であり、卓越周期は同じで最大加速度のみが異なる。

図7(a),(b)はその結果を(a)滑りにくい場合と(b)滑りやすい場合の2通り分けて図示したものであり、○印が転倒したケースである。

この図から判断できることとして、正弦波加振の時と同様にやはり鉛直加速度が大きい場合の方が小さい水平加速度で物体が転倒に至ると言うことである。しかしながら、図7(a),(b)から見てとれるように明らかな転倒領域の中にも転倒しないケースがある。つまり地震波を入力した場合には正弦波加振の場合のように明確な転倒領域、すなわち転倒する領域としない領域との明確な境界

は求められない。これは地震波が不規則波であることによるものと考えられる。また、滑りやすい場合と滑りにくい場合を比較すると明らかに滑りやすい場合では転倒するケースが少ない。これからも滑りによって転倒しにくくなっていると考えることができる。

4. まとめ

本研究では地震時における上下動の影響について明らかにすることを主たる目的としているため、正弦波加振・地震波加振いずれの場合も水平・鉛直加速度を様々な値に取り数多くのデータを取った。またその際に滑りが生じることによる影響が発生したため、その点についても研究を行った。その結果以下のことが判明した。

- 1) 一般的には水平動のみの加振時と比較して上下動が加わった場合の方が転倒に到りやすいが摩擦係数などの要因によっては必ずしも上下動が物体の転倒を助長しない。
- 2) 滑りによるエネルギー損失によって転倒が防止されることがある。

【参考文献】

- 1) Ishiyama, Y: Motions of Rigid Bodies in Response to Earthquake Excitations, 日本建築学会論文報告集, 第314号, pp.33-47, 1982.
- 2) Ishiyama, Y: Criteria for Overturning of Bodies by Earthquake Excitations, 日本建築学会論文報告集, 第317号, pp.1-14, 1982.

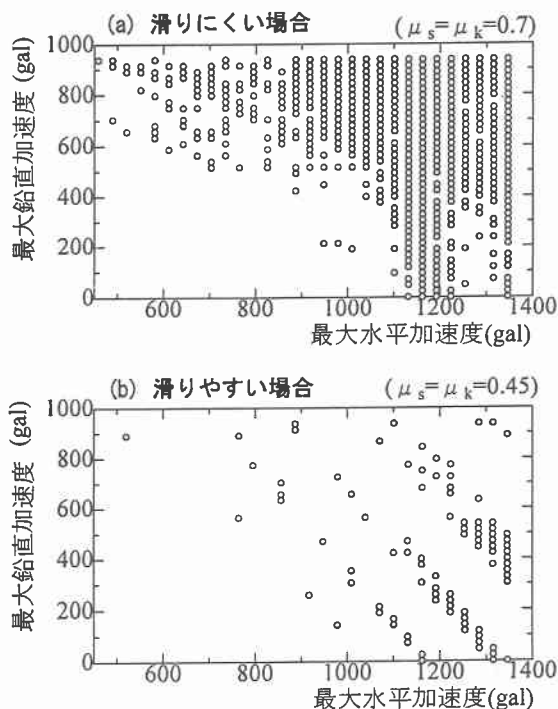


図7(a),(b) 地震波による転倒と上下動の影響