

# 地震時の家具の転倒特性の検討

1090469 徳久環奈

高知工科大学 工学部 社会システム工学科

地震時の家具の転倒限界および転倒防止金物の必要性能を明らかにすることを目的とし、様々な条件下でのロッキング解析を行い、転倒限界および転倒抑止力について調べた。

家具の転倒特性については、伊藤が模型実験の結果を報告している。しかし、模型実験では転倒限界を求めることが困難であり、また初期位相の設定が不可能なため、本研究では数値解析によって解を求め、実験結果を比較した。

解析の結果、初期変位や位相により発生する現象が異なること、ロッキングには強制振動と固有振動の2種類のロッキングがあることが分かった。強制振動からの転倒限界は加速度で決まり、固有振動からの転倒限界は変位で決まるように思われた。また、固有振動の周期は外力の周期の奇数倍になることが分かった。

金物による固定を想定したケースで解析を行い、加振時の家具の転倒抑止力を算出した。その結果、全慣性力の約1/2の力が、金物にかかる抑止力とであることが分かった。この結果は伊藤の行った実験結果と整合するものである。

**Key Words:** ロッキング現象 限界振幅 限界加速度 転倒防止金物

## 1. はじめに

地震時には家の崩壊は免れたものの、家具が転倒し、死傷者が出ることが少なくない。これを防ぐため、家具の転倒を防止する金物は多々販売されている。しかし、実際に家具に金物を取り付ける場合、どのような家具にどの程度の抑止力が求められているのかは明らかでない。

伊藤は、想定した家具の1/5模型と振動台を用いて家具の転倒特性や金物に要求される抑止力に関する実験を行っている<sup>1)</sup>。実験の結果、家具のロッキングには強制振動と固有振動の2種類があること、ロッキング限界は低振動数では加速度で、高振動数では変位振幅で与えられることを報告しているが、その理由は明らかにされていない。また、抑止力は家具に働く慣性力の1/2という結果を得ているが、模型の剪断変形が大きいためであろうとしており、家具の剛性が変化した場合の抑止力を一般的に求めるには至っていない。

測定開始時の位相を制御できないこと、また転倒の限界を求めるのが極めて困難なことなど、実験には限界があり、解析的な手法での解明が必要と考えられる。そこで、本研究では、地震時の家具の転倒を防止する金物に必要とされる抑止力の導出を最終目的として、解析的に家具の転倒特性を調べることとする。

## 2. 解析方法

### (1) 解析対象

実験結果と比較することを考え、解析対象は伊藤が実験に用いたModel-2000の諸元を持つ模型家具とした。解析対象の諸元を表2-1に示す。

表2-1 Model-2000の諸元

高さ(mm)	400
幅(mm)	200
奥行き(mm)	80
重量(kg)	1.467
重心回りの極慣性モーメント(kg・mm <sup>2</sup> )	20341.4

### (2) ロッキング解析の考え方

金物による固定がない場合の剛体のロッキングと金物による固定がある場合の2ケースの解析を行なうこととする。実験時の条件に合わせて、本研究では床面と家具の間に滑りがない場合だけを考える。完全に剛な固定はあり得ないこと、剛体の場合、完全に剛とすると不静定となって方程式を立てられない可能性が高いことから、弾性を持ったバネによって家具を拘束し、バネ反力をもって金物による抑止力と考えることにする。方向別に抑止力を評価できることから、独立な鉛直バネと水平バネを用いることとする。

(3)剛体の運動方程式

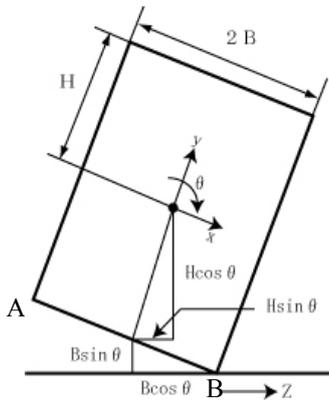


図 2-1

図2-1のような重心高さH、底辺の幅2Bの模型のロッキングを考える。模型はA点、およびB点を中心とする回転運動が交互におこる形でロッキングするものとする。重心の水平変位、鉛直変位をx, y, 重心回りの回転変位をθ, 床の水平変位をzとする。模型は完全な剛体と仮定し、変形は考えない。

θが正の場合、すなわち模型がB点で床と接し、B点を中心とする回転運動が生じている状態を考える。B点において床から模型に作用する反力をF<sub>x</sub>, F<sub>y</sub>とすれば、x方向、y方向、およびθ方向の運動方程式は次のようになる。

$$m\ddot{x} = F_x$$

$$m\ddot{y} = F_y - mg$$

$$I\ddot{\theta} = -F_x(H \cos \theta + B \sin \theta) - F_y(B \cos \theta - H \sin \theta)$$

上式からF<sub>x</sub>, F<sub>y</sub>を消去し、さらにx, yとθの間の幾何学的関係を考慮すれば、最終的にθに関する運動方程式が次のように得られる。

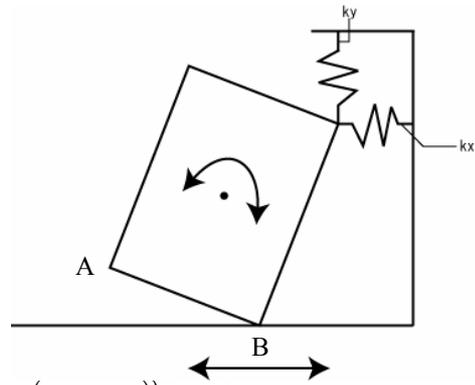
$$\{I + m(B^2 + H^2)\}\ddot{\theta} + mg(B \cos \theta - H \sin \theta) = -m\ddot{z}(B \sin \theta + H \cos \theta)$$

転倒に至る大振幅の解析を行なうため、微小変形を仮定した線形化は行なわない。

模型がA点で床に接している場合の方程式も、同様にして導かれる。解析においては、θ=0, すなわち模型が完全に床に平行に接した状態を判断し、上記の2方程式を交互に切り替えた。切り替え時の初期条件は変位は0, 床への衝突によるエネルギー減衰を考慮して速度は直前の速度の0.9倍とした。

(4) 金物による固定ありの場合の運動方程式

金物による固定を表現するバネのバネ定数を横方向k<sub>x</sub>, 縦方向k<sub>y</sub>とする。B点で床に接している場合の運動方程式は次のようになる。



$$\{I + m(B^2 + H^2)\}\ddot{\theta} + 2(k_x \cdot 2H \sin \theta \cdot H \cos \theta) + mg(B \cos \theta - H \sin \theta) + 2\{k_y \cdot 2H(1 - \cos \theta) \cdot H \sin \theta\} = -m\ddot{z}(B \sin \theta + H \cos \theta)$$

A点で接している場合の方程式も、同様な手順で導いた。

3. ロッキングの特性と転倒の限界

(1)解析条件

上述の非線形常微分方程式を数値的に解いた。ソルバーには、市販ソフトMATLABに標準的に備えられているODE45を使用した。

初期変位は、実験と同じように、図3-1のB点で床に接し、A点が床上1mmにある状態とした。初期状態の速度は0である。床振動の位相に関しては、時刻t=0からsin波で始まる状態を位相0°と定義し、以下30°ピッチで330°までの位相における運動を解析した。床振動の振動数範囲は1~9Hzとした。振幅は微小振幅から転倒が生じるまでとした。

(2) ロッキングの特性

伊藤が報告している2種類のロッキングが解析でも再現された。1つは床と同じ周期で振動する強制振動、もう1つは床とは異なる周期で振動する固有振動である。

床振動の振幅が十分小さい場合、ロッキング振動は減衰して静止に至る。ある程度振幅を増加させると、初めに強制振動が発生する。強制振動の振幅は床振動の振幅増加とともに増加し、床振動の振幅がある値を超えると固有振動に遷移する。固有振動の振幅は床振動の振幅によらず一定値を保持する傾向がある。ただし、床振動の振動数が4Hz未満と低い場合は固有振動への遷移が生じず、強制振動の振幅増加の末、転倒に至る。

図3-1に固有振動時のロッキング波形の例を示す。図から明らかなように、家具のロッキング周期は床振動の周期の3倍となっている。条件によっては5倍となることを確認しているが、偶数倍となることはない。1周期の運動を詳細に分析した結果、偶数倍の周期では家具が静止状態に戻ろうとするタイミングで床がロッキングを増加させる方向に運動するためであることが分かった。床が振動していない場合の解析結果から、ロッキングでは振幅と周期に密接な関係があり、振幅の減少とともに周

期も減少する。従って、床振動の周期の3倍にロックされた状態では、この周期に対応する振幅での振動が持続すると推定される。これが床振動の振幅によらず固有振動の振幅が一定となる原因と推測される。

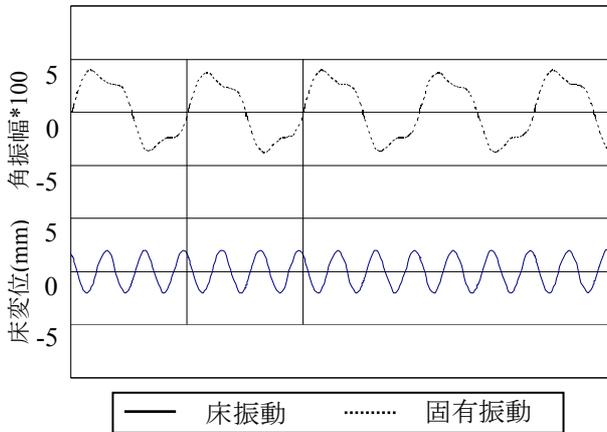


図 3-1 固有振動波形の例

### (3) 転倒の限界

図3-2に転倒が発生する限界振幅，図3-3に転倒が発生する限界加速度を示す。転倒するか否かは初期条件として与えた位相にも依存する。そこで、少なくとも1つの位相で転倒が生じた場合を転倒開始，半分以上の位相で転倒が生じた場合を半分転倒と表記した。図から明らかなように、振動数が約4Hz以上の高振動数域では転倒の限界は振幅で、低振動数域では加速度で決まっているように見える。この結果は伊藤の実験結果と整合する。図3-2によれば、4Hz以上では強制振動から固有振動へ遷移した後に転倒が生じる。一方、低振動数域では固有振動が発生する前に転倒する。前述の固有振動の特性を考えると、低振動数域での固有振動の振幅はかなり大きくなるはずであり、固有振動が発生する前に転倒の限界に達するのではないかと考えられる。また、強制振動、および固有振動の特性を考えると、転倒限界が振幅で決まるか、加速度で決まるかは振動数の高低によるというよりも、固有振動から転倒に至るか、強制振動から直接転倒に至るかによるのではないかと考えられる。

## 4. ロッキング抑止力の算定

### (1) バネ定数の設定

抑止力の算定に先立って、バネ定数を変化させて解析した結果、バネ定数がある限界値以上とすればロッキングが減衰して安定化することが分かった。バネ反力から抑止力を求める方法では、安定な場合の抑止力は0となる。現実には完全に剛な家具は存在しないから、この状態は解析モデル特有の仮想的なものと考えられるが、少なくとも金物はできるだけ剛な方が望ましいとは言えるように思われる。なお、鉛直バネの剛性を増した場合、計算上は安定には至

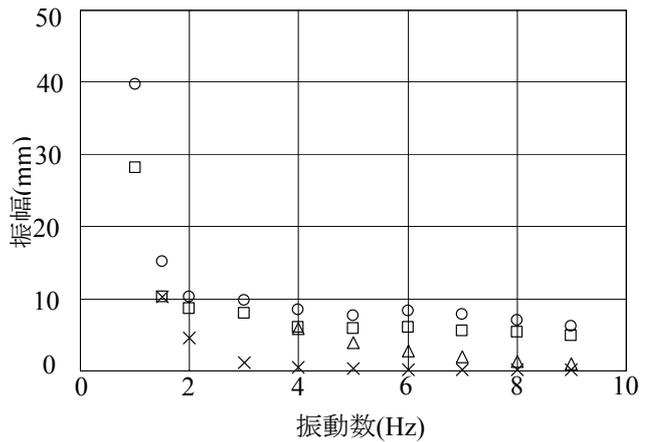


図 3-2 転倒が発生する限界振幅

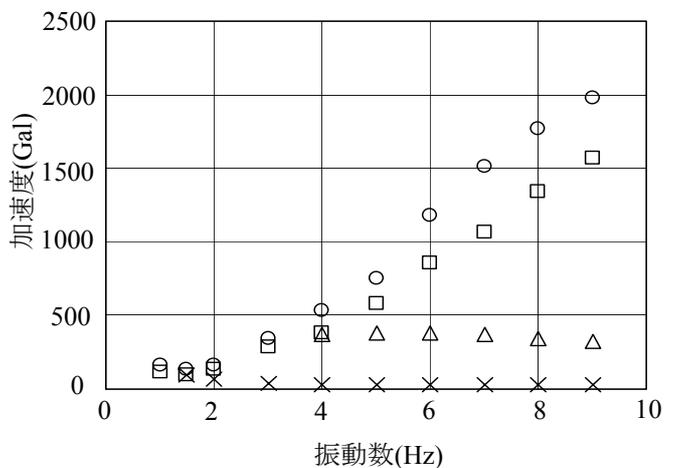
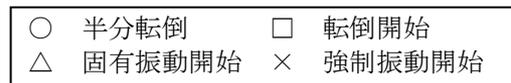


図 3-3 転倒が発生する限界加速度



らなかった。従って、天井に固定する形式の金物は効率が悪くと言えよう。

逆にバネ定数を低下させた場合は、固定バネと家具の質量による共振が発生し、異常に大きなバネ反力が計算される。反力を計算するためのバネ定数を試行錯誤的に探った結果、共振するバネ定数と安定化するバネ定数の相乗平均とすれば、ほぼ共振の影響がない反力が求められることが分かった。

### (2) 算定結果

算定結果を表4-1～3に示す。表中の安定バネ定数はロッキングが発生しなくなる限界のバネ定数、平均バネ定数は限界と共振の相乗平均バネ定数、角振幅はロッキングの振幅(rad.)、反力振幅は角振幅に模型高さ、および平均ばね定数を乗じて求めた反力(N)である。

表4-1 床振動の振動数4Hz

振幅 (m)	安定ばね定数(N/m)	平均ばね定数(N/m)	角振幅 (rad)	反力振幅 (N)
0.01	12000	2050	0.0047	3.854
0.015	19000	2580	0.0083	8.5656
0.02	30000	3240	0.00875	11.34
0.03	43000	3880	0.0103	15.9856
0.04	44000	3924	0.01355	21.26808
0.05	50000	4180	0.0153	25.5816

6Hz

振幅 (m)	安定ばね定数(N/m)	平均ばね定数(N/m)	角振幅 (rad)	反力振幅 (N)
0.01	43000	5820	0.0059	13.7352
0.015	54000	6520	0.00825	21.516
0.02	87000	8280	0.0072	23.8464
0.03	130000	10120	0.084	34.0032
0.04	160000	11230	0.00995	44.6954
0.05	190000	12240	0.01135	55.5696

8Hz

振幅 (m)	安定ばね定数(N/m)	平均ばね定数(N/m)	角振幅 (rad)	反力振幅 (N)
0.01	110000	12410	0.005	24.82
0.015	150000	14500	0.0055	31.9
0.02	180000	15880	0.0064	40.6528
0.03	240000	18340	0.0082	60.1552
0.04	310000	20840	0.0095	79.192
0.05	370000	22770	0.0108	98.3664

求めた反力と慣性力の1/2の関係を図4-1に示す。ここで慣性力とは、床振動の加速度に模型質量を乗じた値である。図の横軸は反力(抑止力)、縦軸は慣性力の1/2である。

図より、抑止力と慣性力の1/2はほぼ1対1となっている。この結果は、伊藤の模型実験とよく整合する。伊藤は、ロッキングが生じていないにも関わらず慣性力の1/2の抑止力となったのは、模型の剪断変形に原因があり抑止力の算定には家具の剪断剛性を考える必要があると結論しているが、今回の解析によれば、慣性力の1/2という結果は家具の剛性とは関係なく、転倒防止金物の本質的な特性を示しているのではないかと考えられる。

## 5. 結論

加振時のロッキングには大きく分けて固有振動と強制振動の2種類がある。固有振動の周期は外力の周期の奇数倍になる。

転倒限界は、強制振動から転倒する場合は加速度で、固有振動から転倒する場合は変位で決まると考えられる。

抑止力は慣性力のほぼ1/2となる。よって、家具に金物をつける場合は、家具が受ける慣性力の1/2に耐えられる金物をつければ良い。

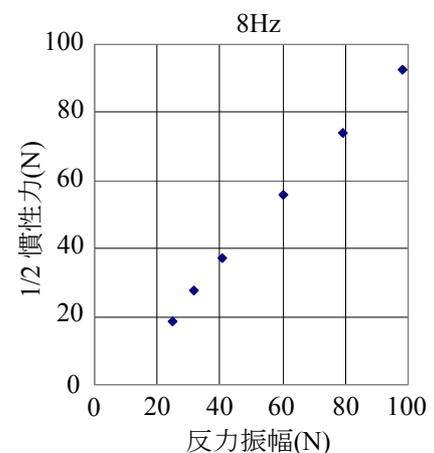
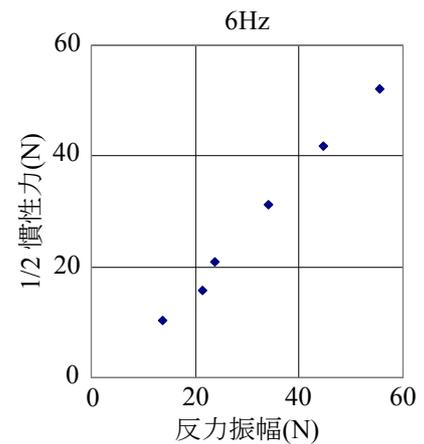
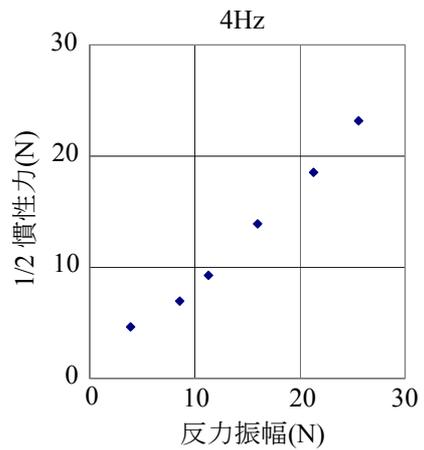


図4-1 抑止力と慣性力の1/2の関係

## 6. 今後の課題

今後の課題として、家具と床の間の滑りの影響、家具の剪断剛性の影響を考慮した解析が考えられる。

### 参考文献

- 1) 伊藤理恵, 「地震時の家具の転倒特性に関する基礎実験」, 日本建築学会四国支部研究報告集, 第8号, 2008年5月