

地震時の家具の転倒特性の検討

株式会社高知銀行 ○徳久 環奈

(研究当時高知工科大学 学生会員)

高知工科大学 フェロー 藤澤 伸光

1. はじめに 地震時には家屋の倒壊は免れたものの、家具が転倒して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が販売されているが、実際に金物を選定する場合、どのような家具にどの程度の強度の金物が必要かは明らかにされていない。

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作用する抑止力に関する実験を行っている¹⁾。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、金物に作用する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、転倒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、解析的な手法での研究が必要と考えられる。本研究では、地震時の家具の転倒防止金物に必要な強度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た。

2. 解析方法 解析対象は文献1)で実験に用いた次の諸元を持つ模型家具とした。高さ $2H=400\text{mm}$ 、幅 $2B=200\text{mm}$ 、質量 $m=1.467\text{kg}$ 、重心回りの極慣性モーメント $I=20341.1\text{kg}\cdot\text{mm}^2$ 。

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った。実験時の条件に合わせて、床面と家具の間に滑りがない場合だけを考えた。完全に剛な固定はあり得ないこと、家具が剛体の場合、金物も完全に剛とすると抑止力の算定が不可能となる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した。また、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考えた。

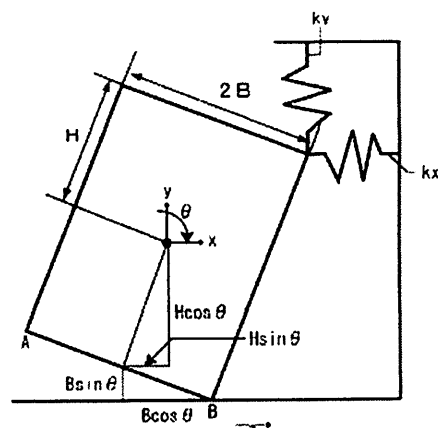


図2-1 金物による固定ありの場合

図2-1の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。

$$\begin{aligned} & \{I + m(B^2 + H^2)\}\ddot{\theta} + 2(kx \cdot 2H \sin \theta \cdot H \cos \theta) \\ & + mg(B \cos \theta - H \sin \theta) + 2\{ky \cdot 2H(1 - \cos \theta) \cdot H \sin \theta\} \\ & = -m\ddot{z}(B \sin \theta + H \cos \theta) \end{aligned}$$

3. ロッキングの特性と転倒の限界 前述の非線形常微分方程式を数値的に解いた。初期変位は実験に合わせて、図2-1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、振幅は微小振幅から転倒が生じるまでとした。

解析の結果、実験で発生した2種類のロッキングが再現された。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移移する。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移移が生じず、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倍となることがあ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ことが分かっている。従って、床

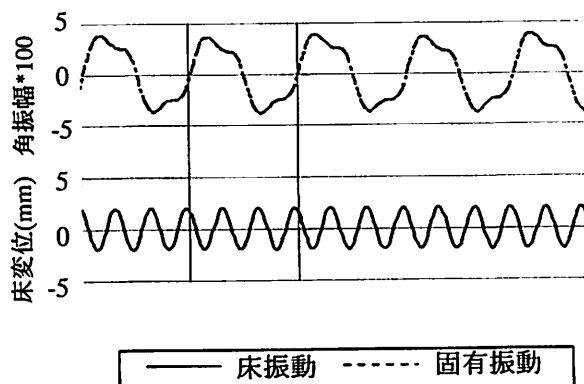


図3-1 固有振動波形の例

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、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考えられる。

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。この結果は文献1)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 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、少なくとも金物で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いと言えよう。よって、以下では水平バネによって拘束した場合の抑止力だけを検討した。

試行錯誤的にバネ定数を変化させて解析した結果、共振が生じるバネ定数とロッキングが安定化するバネ定数の相乗平均を用いれば、ほぼ共振の影響がない状態での反力を求められることが分かった。

例として、床振動の振動数が4Hzの場合の算定結果を表4-1に示す。反力はロッキングの角振幅に模型高さ、および平均バネ定数を乗じて求めた。表には、床振動の加速度に模型質量を乗じた慣性力も合わせて示した。

表から、反力、すなわち金具に作用する抑止力は、ほぼ慣性力の1/2となっていることが分かる。この結果は、文献1)の模型実験結果とよく整合する。文献1)では、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、金物を選定する場合、家具に作用する慣性力の1/2を、強度の目安とすればよい。

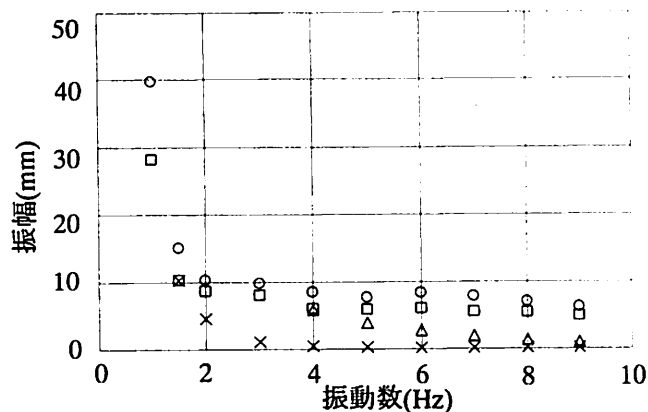


図 3-2 転倒が発生する限界振幅

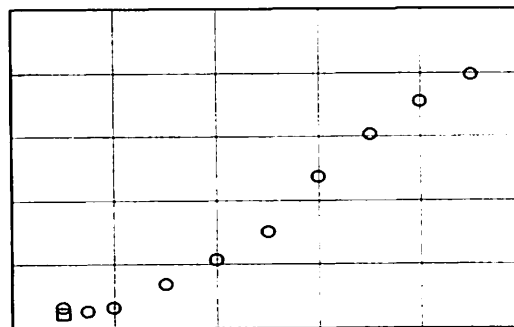


図 3-3 転倒が発生する限界加速度

振幅 (m)	反力 (N)	慣性力 (N)
0.01	3.854	9.2663
0.015	8.5656	13.8995
0.02	11.34	18.5327
0.03	15.9856	27.7991
0.04	21.268	37.0655
0.05	25.5816	46.3318

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