

地震時の転倒に及ぼす家具の剛性の影響

1100455 若枝克昌

高知工科大学工学部社会システム工学科

地震動による家具の剪断変形が、微小振幅のロッキングの安定性に及ぼす影響を明らかにすることを目的としたロッキング解析を行い、その安定性について調べた。

本研究では、剛体の場合では分からなかった剪断変形による重心移動を考慮した場合の運動方程式を導き、微小振幅のロッキングの安定性に及ぼす影響に着目した解析を行った。

解析の結果、1.86Hz付近で共振が発生しているであろうということ、剛体の場合と比較して固有振動数以下で転倒が発生する限界振幅は小さくなることが分かった。また今回のようなケースでは免震構造のような運動は示さず、地震時の家具の安定性を向上させるような効果はないと思われる。

Key Words : 地震 家具 ロッキング 共振 限界振幅

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。

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、伊藤は実験的研究を行い、徳久は解析的研究を報告している。

伊藤は家具の模型にさまざまな振動を与え、転倒限界および転倒抑止力について実験を行った。実験の結果、全慣性力の約 1/2 が、家具の上部の抑止力として測定された。しかしロッキング現象が起こらない加振時も、抑止力が測定されたことから、家具の剛性も転倒防止金物を考える際のパラメーターとして考える必要があるとしている¹⁾。

また伊藤の模型実験では転倒限界を求めることが困難であり初期位相の設定が不可能なため、徳久は数値解析によって解を求め実験結果と比較した。金物による固定を想定した解析の結果では、全慣性力の約 1/2 の力が、金物にかかる抑止力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²⁾。

このように過去の研究では転倒限界や転倒防止金物の必要性を明らかとすることを目的とした研究がされてきた。しかし上記の研究は剛体の場合の研究であるので、剛性を変化させた時については研究が行われていない。剛性を変化させた時に予想されることは、家具が地震力を受けて共振することである。またその逆に地震力を抑制するような免震構造に似た運動が起こることも考えられる。家具が共振した場合は小さい振幅での転倒も考えられ、地震時の家具の安定性の低下が懸念される。逆に免震構造に似た運動をする場合は転倒に対する安定性が増し金物

が不要となる可能性も考えられる。

そこで、本研究では、弾性変形による重心の移動を考慮したロッキングの解析を行い、地震時の家具の変形が転倒に対する安定性に及ぼす影響について考察する。

2. 剪断変形角 γ を用いたモデル

図1-1のような剪断変形を考慮したモデルで運動方程式を導いたが、高次の非線形となり、厳密解を求めることは困難であった。そこで、微小変位に基づいた近似を用いて状態方程式表示を得ることにした。剛性を増して限りなく剛体に近づけた解析と、昨年の剛体の解析結果を比較した結果、両解析結果はあまり整合せず、近似を用いた運動方程式には問題があることが分かった。

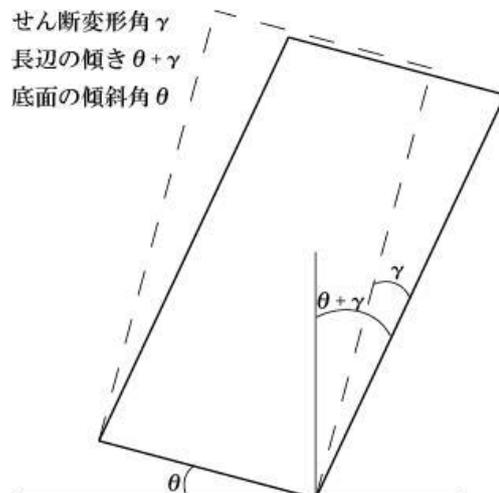


図 1-1 剪断変形角 γ を用いたモデル

3. 相対変位 η を用いたモデル

3.1 解析モデルの基本的考え方

剪断変形を導入したモデルが解析困難なことから、ここでは、変形による重心移動を考慮でき、かつ解析が容易なモデルとして、図1-2のように家具を上下に2分割し、上の質量の下面と下の質量の上面が接しているモデルを考えた。上下の質量は接している面に沿った相対運動のみが許されるように拘束しているものとし、相対変位が生じると復元力が発生するように両質量をバネで結ぶ。

3.2 運動方程式

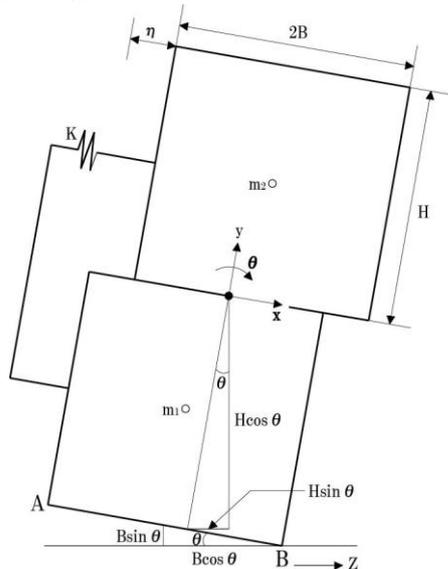


図 1-2 相対変位 η を用いたモデル

図1-2のような重心高さH、底辺の幅2Bのモデルのロッキングを考える。モデルは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、上下質量の相対変位を η 、重心回りの回転変位を θ 、床の水平変位をzとする。モデルは上質量の相対変位 η によって重心位置が変化する剛体として全体を解析する。

床との接触部の滑りを考えず、かつロッキング角が小さいことから、上質量の運動は基盤の地震動と質量、バネで決まる水平振動であると仮定する。この仮定から上側質量の運動方程式は次のようになる。

$$m_2 \ddot{\eta} = -K(\eta - z) - C(\dot{\eta} - \dot{z}) \quad \dots \dots (1)$$

次にモデル全体のロッキングについて考える。ロッキングに関しては、上側質量の移動によって重心位置が変化する以外は剛体のロッキングと変わらないと仮定する。 θ が正の場合、すなわちモデルが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点において床からモデルに作用する反力を F_x 、 F_y とすれば、上述の仮定から、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。

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

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

$$I \ddot{\theta} = -F_x \left\{ H \cos \theta + \left(B - \frac{\eta}{2} \right) \sin \theta \right\} - F_y \left\{ \left(B - \frac{\eta}{2} \right) \cos \theta - H \sin \theta \right\}$$

回転に関する方程式は重力による復元モーメントの項に重心移動を考慮した以外は剛体の場合の方程式と同じである。 F_x 、 F_y 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。

$$\left\{ I + m(B^2 + H^2) \right\} \ddot{\theta} + mg(B \cos \theta - H \sin \theta) + m \ddot{z} (H \cos \theta + B \sin \theta) - m \left(\dot{\theta}^2 H \frac{\eta}{2} + \ddot{\eta} \frac{\eta}{2} \sin \theta + g \frac{\eta}{2} \cos \theta \right) = 0 \quad \dots \dots (2)$$

(1)、(2)式を連立させて数値積分することによって図1-2に示したモデルの運動を解析する。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、 $\theta=0$ 、すなわちモデルが完全に床に平行に接した状態を判断し、A点で接している場合およびB点で接している場合の2方程式を交互に切り替えた。切り替え時の条件の変位は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。

3.3 解析対象

解析対象は伊藤が実験に用いたModel-2000の諸元を持ち、上下に2分割した模型家具とした。解析対象の諸元を表1に示す。

表 1 Model-2000 の諸元

高さ(mm)	400
幅(mm)	200
奥行き(mm)	80
上重量(kg)	0.7355
下重量(kg)	0.7355
剪断剛性(N/m)	100
剪断減衰(NS/m)	1
重心回りの極慣性モーメント(kg・mm ²)	20341.4

4. 転倒の限界とロッキングの特性

4.1 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。

4.2 転倒の限界

図1-3に弾性を考慮した転倒が発生する限界振幅、比較のために図1-4には剛体の転倒が発生する限界振幅を示す。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。

(1) 1Hzでの家具の安定性の低下について

図1-3と図1-4を比較すると、1Hzでの転倒が発生する限界振幅が5/8程度小さくなっていることが分かる。要するに小さい振幅でも転倒してしまい、家具の安定性は低下していると言える。1Hzでは振幅の増加とともに安定の状態から突然半分転倒に至る。ここで安定とは振動が徐々に減衰していき、やがて静止に至る状態である。1Hzでは、強制振動や固有振動のような定常的な振動が発生しないため、転倒限界が低下する原因を振動モードなどから明らかにすることができなかった。

(2) 共振の発生について

ロッキングの影響を無視すれば、上質量とバネで決まる固有振動数は(1)式から求められる。この固有振動数の計算値は1.86Hzである。しかし、これは水平運動すると仮定した場合の値で、ロッキングを伴う運動の場合は若干その影響を受けるのではないかと考えられる。そこで正確な共振が発生している箇所を調べようとしたが1.86Hz付近で強制振動や固有振動のような定常的な振動が発生しないため、正確な共振が発生している箇所は明らかにすることができなかった。

(3) 免震構造に似た運動について

固有振動が発生する高振動数域で図1-3と図1-4を比較すると、振動数が高くなるにつれて転倒が発生する限界振幅が大きくなるような変化はみられない。従って、免震構造にも似た上質量の振幅が減少する結果、安定性が増すという運動は起っていないと言える。

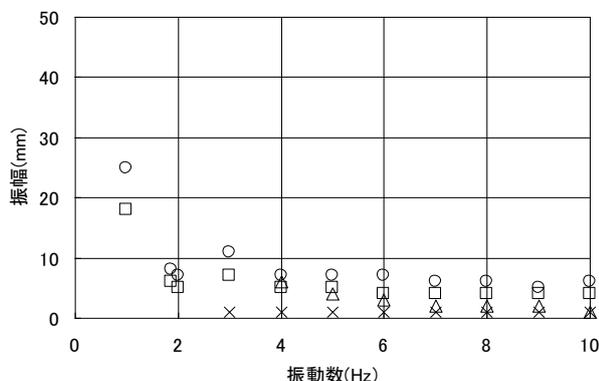


図1-3 弾性を考慮した転倒が発生する限界振幅

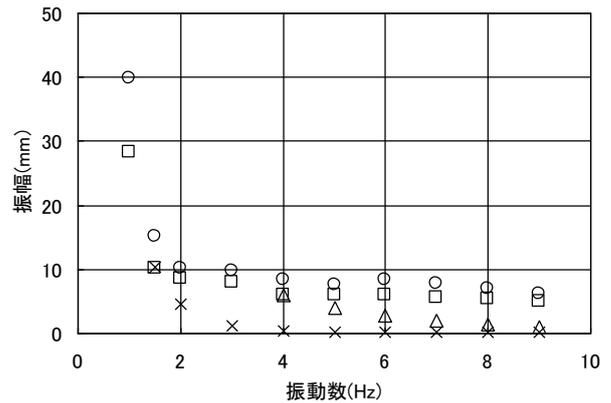
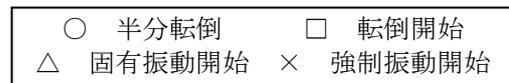


図1-4 剛体の転倒が発生する限界振幅



4.3 ロッキングの特性と安定性

伊藤、徳久が報告している2種類のロッキングが今回の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。

強制振動と固有振動のような定常的な振動が発生している3Hzと9Hzで、地震動による家具のロッキングの特性と安定性について検討した。

(1) 強制振動で見られたロッキング1

強制振動には2種類の振動があることが分かった。その1つをロッキング1とする。図1-5に強制振動時のロッキング1の波形の例を示す。なお微小振幅のロッキング解析となるので θ と η の値は z に合わせて拡大した。

図から z と η は常に同じ位相で水平運動していることが分かる。また θ と z 、 η には 90° の位相差があり、 θ が0から右に回転を始める時、上質量の変位は最大、すなわち最も右側に変位している。つまり θ が時計回りに回転して設置した瞬間に重力による時計回りモーメントが最大となっていると言える。

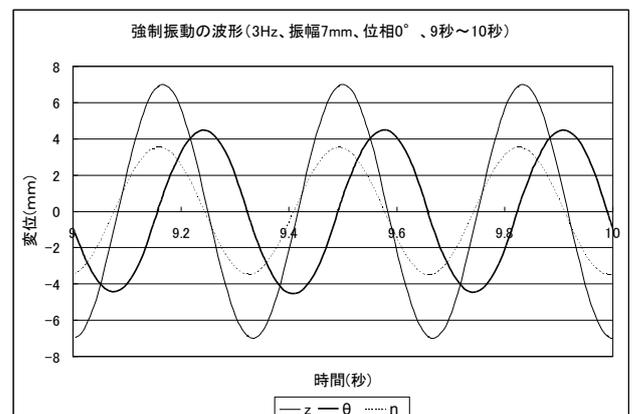


図1-5 強制振動波形の例

(2) 強制振動で見られたロッキング 2

強制振動時に見られる 2 つめのロッキングをロッキング 2 とする。図 1-6 にロッキング 2 の波形の例を示す。図から z 、 θ と η は全て同じ位相で振動していることが分かる。すなわち、ロッキングの時計回り角変位が最大となった時に、上質量は最も右側に変位していることになる。振動理論によれば、このような応答は一般には固有振動数より低い振動数で加振した場合に生じると考えられるが、固有振動数より高い 3 Hz でこのような応答が発生した理由は明らかでない。

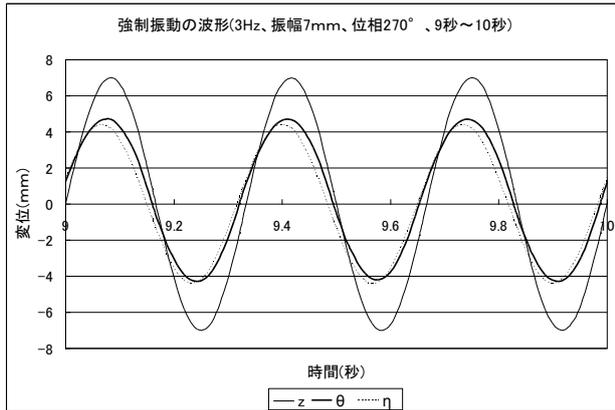


図 1-6 強制振動波形の例

(3) 固有振動で見られたロッキング 3

図 1-7 に固有振動時のロッキング波形の例を示す。図から、 z と η は 9 Hz で振動し、 θ は 3 Hz で振動していることが分かる。ロッキング周期が加振周期の奇数倍となる現象は、剛体として解析した場合にも発生しており、重心の移動があっても、ロッキング特性は本質的には変わらないことを示すものであろう。上質量の振動数はロッキングに関わらず、加振振動数と同一になっている。これが今回用いた 2 質量モデル特有の現象であるのか、実際の家具と同様に剪断変形する場合でも発生するのかは、今回の解析では明らかでない。

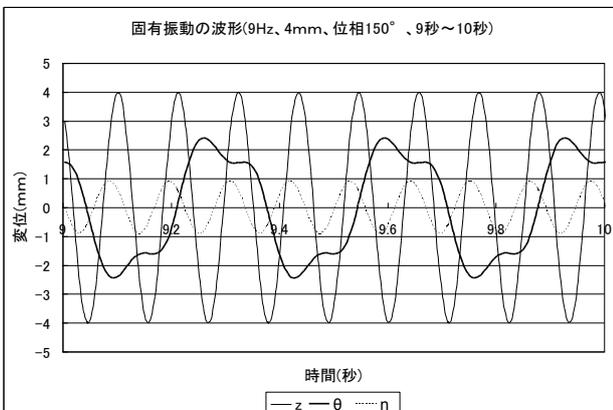


図 1-7 固有振動波形の例

(4) ロッキングモードと安定限界

解析の結果、同じ振動数でも初期位相の違いで異なった運動をすること、3 種類の異なったモードがあることが分かった。強制振動時のロッキングモードの安定性を調べるため、徐々に振幅を増加させて転倒に至るまでの解析を行なった結果、ロッキング 1 が最初に転倒を起こした。右に回転した時に上質量が右に変位するロッキング 2 よりロッキング 1 の方が不安定な理由は、 θ が 0 の時、つまり模型が完全に床に平行に接した状態の時に、上質量の変位によって、転倒モーメントが大きくなることであろうと考えられる。

5. 結論

剛体の実験的研究、解析的研究と同様に、加振時のロッキングには固有振動と強制振動の 2 種類がある。

転倒限界を解析した結果からは、1.86Hz 付近で共振が発生しているであろうということ、剛体の場合と比較して固有振動数以下で転倒が発生する限界振幅は小さくなること、高振動数域で免震構造のような運動は示さないことが分かった。

ロッキングの特性と安定性を解析した結果からは、ロッキング 1 が最も転倒しやすい運動であること、重心の移動があってもロッキング特性は本質的には変わらないことが分かった。

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
- 2) 徳久環奈、「地震時の家具の転倒特性の検討」、日本建築学会四国支部研究報告集、第 9 号、2009 年 5 月