家具の地震時滑り量の簡易評価

EVALUATION OF SLIDING
DISPLACEMENT OF FURNITURE
DURING EARTHQUAKE金子美香 — * 1 林 康裕 — * 1
田村和夫 — * 1Mika KANEKO — * 1 Yasuhiro HAYASHI — * 1
Kazuo TAMURA — * 1キーワード：
家具, 滑り, 摩擦係数, 床応答, 地盤種別, 建物固有周期Keywords:
Furniture, Slide, Friction coefficient, Floor response, Soil condition, Natural period

A new formula to estimate sliding displacements of furniture during earthquakes is proposed. This formula indicates that sliding displacements are proportional to the square of input velocity and inversely proportional to friction coefficients. It is ascertained by analyses using a simple model and various input waves that the formula indicates almost maximum sliding displacement of furniture for an input velocity. By using this formula, we evaluated sliding displacements of furniture under various conditions. As the results, it becomes clear that sliding displacements are largely influenced by friction coefficients, soil conditions and floors where furniture is installed.

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震をはじめとする大地震の被害報告では、室内の家具等の転倒・散乱による人的被害が数多く報告されている^{例えは1)}。このように室内の安全性の観点からも、家具類の地震時挙動を把握しておくことは重要と考えられる。家具(矩形の二次元剛体に置換されることが多い)の地震時の転倒限界については、現在までにさまざまな研究が行われ^{例えは2)3)}、転倒限界式が提案されている。但し、これらは家具が滑らない、或いは滑りにくいという条件下で検討されたものが多い。一方、実際の地震では、家具が滑って大きく移動した事例⁴⁾も多く見られる。家具の移動量が大きい場合には、他の家具と衝突したり、移動中に脚部が何かにひっかかり転倒することも考えられ、危険な状態に成り得る。このことから、家具の滑り量に関する検討も重要と考えられる。

本報では、家具の設置床が水平方向に振動した場合に転倒またはロッキング振動よりも滑りが生じやすい(1)式の条件下で、地震時の家具の滑り量について検討する。

$$\mu < b/h \quad (1)$$

ここで、 μ は家具と床との静摩擦係数、 b/h は家具の幅高さ比である。筆者らは、過去に(1)式を満たす条件下で、剛体モデルにさまざまな観測地震波を入力して解析を行い、剛体の滑り量と入力速度の間に強い相関があること、滑り量は剛体の形状に影響されないことを示した³⁾。

本報では、まず、家具を一自由度系でモデル化し、模擬地震波、観測地震波、床応答波を入力した解析により、家具の最大滑り量を求める。次に、その結果を基に滑り量の算定式を提案する。また、提案した算定式を用いて建物内の家具の地震時滑り量を簡易的に評価し、家具の滑り量に影響を及ぼす要因について考察する。

2. 家具の滑り解析と最大滑り量の算定式

2.1 解析モデルと摩擦係数

解析モデルは図1に示す一自由度系とした。水平方向ばねの履歴特性は、静摩擦係数と動摩擦係数が等しいと仮定して、完全弾塑性型のバイリニアモデルとした。線形時のばね剛性は剛と仮定し、解析上は固有振動数が50Hzとなるような値を与えた。なお、固有振動数の値を数Hz程度にしても、最大滑り量があまり変わらないことを、別途確認している。入力方向は水平方向とし、解析方法にはNewmarkの β 法を用いた。

摩擦係数 μ は、家具が滑るかどうかの判定、あるいは滑り量に影響する重要なパラメータである。筆者らが家具と床面との静摩擦係数および動摩擦係数の計測を行った結果を、参考値として図2に示す。これらは、床に置かれた家具を水平にばねばかりで引っ張り、静摩擦力と動摩擦力を計測し、家具の重量で割った値である。計測には、テーブル、椅子、本棚、ドレッサーなど9種類の家具を用いた。これらは全て木製(床との設置面も木製)で、重量は30kg以下である。床面の材質としては、木質材、絨毯、畳、塩ビシートの4種類を用いた。同じ床面でも、家具による摩擦係数のばらつきは大きい。絨毯で静摩擦係数0.93と0.53のケースは、家具が長期間同じ場所に設置されていたケースであり、絨毯の沈み込みが大きかったものと考えられる。従って、同様の影響があると考えられる畳や塩ビシートでも、重量が重く長期間設置された家具では、より大きな摩擦係数になる可能性がある。解析では、キャスターなどの滑りやすい条件も含めて、摩擦係数 μ を0.1、0.3、0.5の3種類とした。

2.2 入力波

2.1に示した解析モデルへの入力波としては、模擬地震波、観測地

*1 清水建設㈱和泉研究室 工博
(〒100-0011 千代田区内幸町2-2-2)

*1 Izumi Research Institute, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

震波、床応答波を用いた。以下に、各波の作成方法を示す。

模擬地震波

模擬地震波は、建築物荷重指針⁴⁾(以下、荷重指針と呼ぶ)に示されている地震動の加速度応答スペクトル S_A にフィッティングするように作成した。荷重指針では、 S_A を(2)、(3)式のように設定している。

$$S_A(T_s, h_s) = \begin{cases} \left(1 + \frac{f_A - 1}{d} \frac{T_s}{T_c}\right) G_A R_A A_0 \cdot F_{hs}, & 0 \leq T_s \leq dT_c \\ \frac{f_A G_A R_A A_0 \cdot F_{hs}}{2\pi f_V G_V R_V V_0} \cdot F_{hs}, & dT_c \leq T_s \leq T_c \\ \frac{2\pi f_V G_V R_V V_0}{T_s} \cdot F_{hs}, & T_c \leq T_s \end{cases} \quad (2)$$

$$T_c = \frac{2\pi f_V G_V R_V V_0}{f_A G_A R_A A_0} \quad (3)$$

ここで、 F_{hs} は $h_s=0.05$ 以外の減衰に対する補正係数、 A_0 、 V_0 は標準地盤の地震動の基本最大加速度および最大速度、 R_A 、 R_V は加速度および速度の再現期間換算係数、 G_A 、 G_V は地盤種別補正係数である。今、地震動の最大加速度 A_g と速度 V_g が与えられている時、 $A_g = G_A R_A A_0$ 、 $V_g = G_V R_V V_0$ として(2)、(3)式を書き換えると、(4)、(5)式となる。ここでは $f_A = 2.5$ 、 $f_V = 2.0$ 、 $d = 0.5$ という荷重指針の推奨値を用いた。

$$S_A(T_s, h_s) = \begin{cases} (1 + 3T_s/T_c) A_g \cdot F_{hs}, & 0 \leq T_s \leq T_c/2 \\ 2.5 A_g \cdot F_{hs}, & T_c/2 \leq T_s \leq T_c \\ 4\pi V_g / T_s \cdot F_{hs}, & T_c \leq T_s \end{cases} \quad (4)$$

$$T_c = 1.6\pi V_g / A_g \quad (5)$$

荷重指針では、第I種、第II種、第III種の各地盤種別に対して、 $G_A = 1.0, 1.2, 1.2$ 、 $G_V = 1.0, 2.0, 3.0$ の値が推奨されている。また、第I種地盤の $A_0 = 15V_0$ の関係式が示されている。これらの関係より、ここでは、 $V_g = 10\text{cm/s}$ とした場合の各地盤種別の A_g を 150Gal、90Gal、60Gal とした。 T_c は荷重指針より、0.33秒、0.56秒、0.84秒と与えた。 $V_g = 10\text{cm/s}$ とした場合の各地盤種別の $S_A(h_s = 0.05)$ の値を図3に示す。本検討では、図3の $S_A(h_s = 0.05)$ にフィッティングするように波を作成した。

模擬地震波の時刻歴包絡形は Jennings 型⁵⁾とし、各地盤種別において継続時間(振幅が最大値の1/10となるまでの時間)5秒、20秒、40秒の3種類の波を作成した。位相はランダムとし、無作為に初期値を与えて各地盤種別、各継続時間について10波ずつ作成した。図4に作成した模擬地震波の波形例を示す。

観測地震波

観測地震波としては、表1に示す日本および米国の強震記録24波を用いた。これらの波を $V_g = 10\text{cm/s}$ となるように基準化した時の速度応答スペクトル($h=0.05$)を、図5(a)に点線で重ね描いた。比較のため、荷重指針の第II種地盤の加速度応答スペクトルを、 $T_s/2\pi$ を乗じることで速度応答スペクトルに換算した値も実線で示した。図より、用いた観測記録は、短周期側(約1.0秒以下)で波によるばらつきが大きい。荷重指針のスペクトルはその中間的な値であることがわかる。また、長周期側(約2.0秒以上)では、観測地震波のスペクトルの方が荷重指針よりも小さくなっている。

床応答波

床応答波としては、表1の観測地震波を線形一自由度系に入力した時の応答波を用いた。一自由度系の固有周期は0.5秒、1.0秒、2.0秒の3種類、減衰定数はいずれも $h=0.03$ とした。床応答波の速度応答スペクトル($h=0.05$)を最大速度 10cm/s に基準化して図5(b)~(d)に示す。

図1 解析モデル

図2 実測による木製家具(重量30kg以下)と床との摩擦係数

図3 模擬地震波作成用の加速度応答スペクトル ((4)式)

図4 模擬地震波の波形例

表1 解析に用いた観測地震波

No.	発生日	地震名	観測場所	成	No.	発生日	地震名	観測場所	成分
1	1966.05.28	松代	松代	SN	13	1994.10.04	北海道東方沖	根室	EW
2	1966.05.28	松代	落合	S35E	14	1994.12.28	三陸はるか沖	八戸	NS
3	1968.05.16	十勝沖	八戸	SN	15	1994.12.28	三陸はるか沖	青森	EW
4	1978.06.12	宮城県沖	東北大	NS	16	1995.01.17	兵庫県南部	JMA 神戸	NS
5	1987.12.17	千葉県東方沖	勝浦	NS	17	1995.01.17	兵庫県南部	葦合	N37W
6	1987.12.17	千葉県東方沖	木更津	NS	18	1940.05.18	Imperial Valley	El Centro	NS
7	1987.12.17	千葉県東方沖	木更津	EW	19	1949.04.13	Olympia	Olympia	EW
8	1989.07.09	伊豆半島東方沖	伊東	10E	20	1952.07.21	Kern County	Taft	EW
9	1993.01.15	釧路沖	釧路	EW	21	1971.02.09	San Fernando	Pacoima Dam	S16W
10	1993.01.15	釧路沖	根室	EW	22	1994.01.17	Northridge	Newhall	360D
11	1993.07.12	北海道南西沖	寿都	NS	23	1994.01.17	Northridge	Sylmar	360D
12	1994.10.04	北海道東方沖	根室	EW	24	1994.01.17	Northridge	Tarzana	90D

波によるばらつきは観測地震波より小さく、どの波も固有周期付近の成分が卓越している。

2.3 剛体の最大滑り量

2.1に示した解析モデルに2.2で作成した波を入力し、剛体の最大滑り量を求めた。模擬地震波の場合には(4)式の V_g が、観測地震波と床応答波の場合には各波の最大速度が10cm/sから150cm/sまで10cm/s刻みとなるように基準化して用いた。結果の例を図6に示す。●は解析による最大滑り量の値である。実線は滑り量の算定式であるが、これについては2.4で説明する。(a)～(c)は模擬地震波入力の場合である。(a)は地盤種別による違い、(b)は入力地震波の継続時間による違い、(c)は摩擦係数による違いを比較したものである。これらの図より、地盤種別や波の継続時間による滑り量の違いはほとんど見られず、滑り量には摩擦係数が大きく影響していることがわかる。

(d)は観測地震波を入力した場合の摩擦係数による違いを比較をしたものである。摩擦係数0.1の場合には、約50cm/s以上の入力で、(c)の模擬地震波入力の場合より滑り量が小さくなっている。これは、図5(a)に示したように、用いた観測地震波の長周期成分が模擬地震波よりも少ないためと考えられる。摩擦係数0.3と0.5の場合には、模擬地震波の滑り量よりもばらつきが大きくなっている。これは、模擬地震波の場合にはどの波もほぼ一定の速度で滑り始めるのに対し、観測地震波の場合には、波により滑り出す速度に違いがあるためと考えられる。

(e)は、床応答波入力の場合に、建物の固有周期による違いを比較したものである。固有周期の長い建物の方が、入力レベルの大きいところで滑り量がやや大きくなっている。

2.4 滑り量の算定式

バイリニア形の変力特性をもつ弾塑性系の地震応答では、系が比較的短周期の場合には、一般にエネルギー一定則が成り立つことが知られている⁹⁾。最大滑り量においても同様の関係が成り立つとすると、図7に示すパラメータを用いて(6)式が成り立つ。

$$\frac{1}{2}k\delta_L^2 = \mu mg(\delta_S - \delta_y/2) \quad (6)$$

ここで、 $\delta_y \ll \delta_S$ とすると、 δ_S は(7)式で表される。

図5 観測地震波および床応答波の速度応答スペクトル
(最大速度10cm/sに基準化、 $h=0.05$)

$$\delta_S = \frac{k}{2mg} \frac{\delta_L^2}{\mu} \quad (7)$$

(7)式から、最大滑り量は入力レベルの2乗に比例し、摩擦係数に反比例するという関係が得られる。最大滑り量と入力速度との相関が高いことは既に確認されているため⁹⁾、ここでは、入力速度の2乗に比例し、摩擦係数に反比例するという関係で表すものとした。また算定式は、最大滑り量のほぼ上限を抑えるように設定するものとした。以上の考え方で設定された最大滑り量の算定式が(8)式である。

$$\delta_S = \begin{cases} \frac{0.0015}{\mu} V^2, & V \geq \frac{\mu g}{2\pi F_e} \\ 0, & V < \frac{\mu g}{2\pi F_e} \end{cases} \quad (8)$$

(8)式では、家具に加わる水平力が摩擦力を超えるかどうかで、滑りの有無を判断している。ここで、 δ_S は最大滑り量[cm]、 μ は摩擦係数、 V は入力最大速度[cm/s]、 g は重力加速度[Gal]、 F_e は入力波の最大加速度 A と最大速度 V の比から(9)式で求められる振動数[Hz] (等価振動数と呼ぶ) である。

図6 解析による家具の最大滑り量と滑り量の算定式の値

$$F_e = A/2\pi V \quad (9)$$

(8)式による算定値を図6に実線で示した。観測地震波入力と床応答波入力の場合には、等価振動数の値が波により異なるため、最大と最小の等価振動数を用いて求めた2種類の線を示した。摩擦係数0.1の場合には、観測地震波や建物周期0.5秒の床応答波の速度の大きい入力で、算定式が過大評価になっている。これは、入力波に長周期成分が少ないためと考えられよう。逆に、摩擦係数0.3、0.5の場合には、滑り始める入力速度付近で算定式が過大評価になっている。このように、一部の入力条件に対しては過大評価になるものの、本算定式は、ほぼ解析結果の上限を与える式になっている。このため、簡易的に家具の地震時滑り量を算定する際には、本式が役立つものとする。

3. 家具の地震時滑り量の簡易評価

3.1 簡易評価方法

2.4の滑り量の算定式を用いて、建物内に設置された家具の地震時滑り量を簡易的に評価する。家具の滑り量の評価位置は、建物1階と1次モードの等価高さ（以下、等価高さと呼ぶ）とする。等価高さは、一般に建物高さの0.7倍程度である。

建物1階に設置された家具の滑り量は、1階の床応答が地表面地震動と同一であると仮定すれば、地表面地震動の最大加速度 A_g と最大速度 V_g から、(8)式、(9)式を用いて算定することができる。一方、建物等価高さに設置された家具の滑り量を算定するには、等価高さでの床応答加速度 A_f および速度 V_f を求める必要がある。 A_f および V_f は、以下のように算定するものとした。

- ① 建物を1自由度系とし、地表面地震動の最大加速度 A_g と最大速度 V_g から、(4)式の関係を用いて、等価高さでの最大加速度 A_f を求める。
- ② 等価高さでの最大速度 V_f は、(10)式、(11)式から求める。

$$V_f = \begin{cases} A_f/2\pi F_s & , F_s \leq F_{e,g} \\ \sqrt{V_g^2 + (A_f/2\pi F_s)^2} & , F_s > F_{e,g} \end{cases} \quad (10)$$

$$A_r = \sqrt{A_f^2 - A_g^2} \quad (11)$$

F_s は建物の固有振動数、 $F_{e,g}$ は地表面地震動の等価振動数である。建物の線形（または等価線形）モデルが設定できれば、①②により建物応答を簡易評価できることは、文献7)で確認されている。 A_g および V_g は、(12)式⁹⁾と(13)式⁹⁾の距離減衰式から求めるものとする。

$$\log A_g = 0.42M_w - \log(R + 0.025 \cdot 10^{0.42M_w}) - 0.0033R + 1.22 \quad (12)$$

$$\log V_g = -0.22M_w^2 + 3.94M_w - \log(R + 0.01 \cdot 10^{0.43M_w}) - 0.002R - 11.9 - 0.71 \cdot \log V_s, \quad V_s = 400(m/s) \quad (13)$$

ここで、 M_w は地震のモーメントマグニチュード、 R は断層距離[km]である。 M_w の気象庁マグニチュード M_J への換算は、 M_w の定義式¹⁰⁾と地震モーメント M_0 と M_J の関係の半経験式¹¹⁾を用いることにより可能である。(13)式のマグニチュードの適用範囲から、 $6.8 \leq M_J \leq 7.6$ ($6.5 \leq M_w \leq 7.8$)とした。得られた A_g および V_g の値は第II種地盤上での値と仮定し、第I種地盤では A_g を1/1.2倍、 V_g を0.5倍、第III種地盤では A_g を1倍、 V_g を1.5倍した。

本検討で用いた家具の滑り量の簡易評価フローを図8に示す。建物としては、固有周期0.5秒、1.0秒、2.0秒のものを考え、減衰定数はいずれも $h_s=0.03$ とした。減衰の補正係数 F_{hs} には、(14)式⁹⁾を用いた。

$$F_{hs} = 1.5/(1 + 10h_s) \quad (14)$$

図7 エネルギー一定則と最大滑り量 δ_s

図8 本検討で用いた家具の滑り量の簡易評価フロー

3.2 簡易評価結果

3.1の方法で評価した家具の滑り量を図9～図12に示す。いずれも、横軸にマグニチュード M_J 、縦軸に断層距離 R をとり、滑り量をコンターで表している。図9は建物1階での評価結果（摩擦係数0.1）、図10は等価高さでの評価結果（第II種地盤、摩擦係数0.1）、図11は建物1階での評価結果（第II種地盤、摩擦係数0.3）、図12は等価高さでの評価結果（第II種地盤、摩擦係数0.3）である。

図9の(a)(b)(c)を比較すると、地盤種別により、家具の滑り量に大きな違いがあることがわかる。これは、地表面地震動の最大速度を、第I種地盤：第II種地盤：第III種地盤=1：2：3と設定しており、家具の滑り量には、その2乗の値が影響しているためである。

図9(b)と図10を比較すると、周期1.0秒、2.0秒の建物の M_J が小さく R の大きい領域で滑らないと判定されている以外は、等価高さでの滑り量は、1階での滑り量よりかなり大きくなっている。また、摩擦係数0.3の場合（図11と図12の比較）にも同様の傾向が見られる。図10において建物による違いを見ると、周期の長い建物ほど滑り出す M_J と R の領域は限定されるが、一旦滑り出すと滑り量は大きくなっている。また、滑っている領域での(b)と(c)の滑り量は同じ値である。これは、どちらの建物の固有周期も地盤の卓越周期に比べて長く、地震動の速度応答スペクトルが一定となる周期領域に入っているためである。

摩擦係数による違いを建物1階で比較（図9(b)と図11）すると、摩擦係数0.3の場合に家具が滑る領域は、摩擦係数0.1の場合に比べて断層距離がかなり短い範囲に限定されていることがわかる。建物等価高さで比較（図10と図12）しても、摩擦係数0.3の方が家具の滑り出す M_J と R の領域は限定され、滑り量も小さくなっている。

4. まとめ

摩擦係数が家具の幅高さよりも小さい条件 ((1)式) 下で、家具の

図9 建物1階での滑り量評価結果： δ_s （摩擦係数0.1） 図10 建物等価高さでの滑り量評価結果： δ_s （第II種地盤、摩擦係数0.1） 図11 建物1階での滑り量評価結果： δ_s
（第II種地盤、摩擦係数0.3）図12 建物等価高さでの滑り量評価結果： δ_s （第II種地盤、摩擦係数0.3）

最大滑り量の算定式を提案した。この算定式は、種々の入力波を用いた解析結果から、一部の入力条件で過大評価になることを除けば、ほぼ最大滑り量の上限值を与える式であると言える。また、この算定式を用いて家具の滑り量の簡易評価を行い、家具の滑り量には、摩擦係数、地盤種別、設置階が大きく影響することを示した。今後は、地震時の家具の転倒評価と滑り量評価とを組み合わせ、家具の地震時安定性の評価に役立てていきたい。

謝辞

表1の地震波は、以下の機関により観測又は提供されたものです。関係された方々に謝意を表します。/日本建築センター、東北大学、防災科学技術研究所、東大地震研究所、日本気象協会、関西地震観測研究協議会、C.D.M.G、大阪瓦斯/

参考文献

- 1) 日本建築学会建築計画委員会：建築内部空間における被害WG:阪神淡路大震災 住宅内部被害調査報告書、1996年

- 2) Ishiyama, Y.: Criteria for Overturning of Bodies by Earthquake Excitations, Transactions of A.I.J., No.317, July 1982.
- 3) 金子美香、林康裕：地震時の剛体の転倒限界と移動量に関する検討、構造工学論文集、Vol.43B、1997年3月。
- 4) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、1993年6月。
- 5) Jennings, P.C., G.W.Housner and N.C.Tsai: Simulated earthquake motions, Earthq. Eng. Res. Lab., California Institute of Technology, 1968.
- 6) 柴田明徳：最新耐震構造解析、森北出版、1981年6月。
- 7) 金子美香、林康裕、田村和夫、神原浩：地震時の家具の転倒可能性評価（その1）（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1998年9月。
- 8) Fukushima, Y. and T.Tanaka: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, BSSA 80, pp.757-783, 1990.
- 9) Midorikawa, S.: Preliminary analysis for attenuation of peak ground velocity on stiff site, Proc. of the Intern. Workshop on Strong Motion Data, 2, pp.39-48, 1993.
- 10) Kanamori, H.: The energy release in great earthquakes, J. Geophys. Res. 82, pp.2981-2987, 1977.
- 11) 福島美光、田中貞二：気象庁マグニチュードによる震源スペクトルのスケールリング則、日本建築学会論文報告集、425, pp.19-25, 1991.

[1998年10月20日原稿受理 1999年2月8日採用決定]