

## 19. 地震動による物体のすべりについて

筑波大学 構造工学系 藤野 陽 三  
九州電力株式会社 佐々木 有 三  
地震研究所 伯野 元 彦

(昭和 53 年 4 月 28 日受理)

### 1. はじめに

地震力による構造物あるいはその一部材の破壊モードとしてはいろいろなものが考えられる。曲げ破壊、せん断破壊、軸力による圧縮破壊、座屈などの不安定現象による破壊などが一般的であり、それらについては構造工学、耐震工学の立場からいろいろな研究が行なわれている。あまり一般的ではないがすべり破壊というもある。すべりによって実在の構造物が破壊、使用不能に至る例としては、レンガ・ブロックを積み重ねた建物、オイルタンク(曾我部・重田・柴田, 1977), 斜面を形成する土構造物(NEWMARK, 1965), 構造物ではないが墓石のすべりによる墓台からの転落などがあるだろう。また、ビル・家屋内のピアノ、机など設備・家具が地震時にすべったために破損したり、あるいは人的被害が生じたりすることもある。このように“すべり”という現象はある種の構造物の耐震安全性にとってかなり重要な問題と考えられる。しかしこれまで、地震動により物体(構造物)がどれほどすべるのかという研究はあまり行なわれていなかったようである。

本論文は地震動による物体のすべりに関する研究の第一歩として、Fig. 1 に示すような剛体地盤の上に物体が載っている簡単なモデルを採用し、この物体が地盤を通じて、地震動による加振を受けたときのすべり量の特性を調べるのが目的である。水平加振だけでなく、上下加振を受けたときの物体のすべり特性がどのように変化するかについても調べる。最後に斜面上にある物体のすべりについても考察を加える。

佐々木・藤野・伯野(1978)は1976年北イタリア地震でレンガ・ブロックを積み重ねて出来ている建物が斜面あるいは斜面に接する比較的軟弱な地盤上で数多く破壊しているのに注目して、それらの地形をモデル化し地震応答解析を行い、被害の大きかった場所では上下動が他の場所に比して大きくでるという結果を得た。レンガ・ブロックを積み重ねたような建物が摩擦でもっているような構造体と考えるならば、上下動を多く含む地震動によって物体のすべり量が上下動が少ない場合に比して大きくなり、これらの建物が破壊したのではないかという著者らの推測を確かめようとしたのが本研究を行なったそもそもの動機であることを付記しておく。

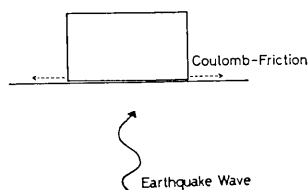


Fig. 1. Friction-controlled mass model.

## 2. 水平面上にある物体のすべり

地震動による物体のすべりに関する研究の第一歩として Fig. 1 に示すような簡単なモデルを考える。これは地盤、あるいは基礎の上に構造物が載っている場合を想定したものである。ここで構造物は剛体とし、下の地盤あるいは基礎はロッキング運動をしないものとする。そして両者の間に働らく力はクローン摩擦のみとして粘着力等はここでは考えないことにする。

### 2.1 摩擦係数について

よく知られているように物体が下の台との間に働く摩擦には静止摩擦と動摩擦がある。最大静止摩擦をこえる力が物体に働いたとき、物体はすべり出して動摩擦を受けることになる。

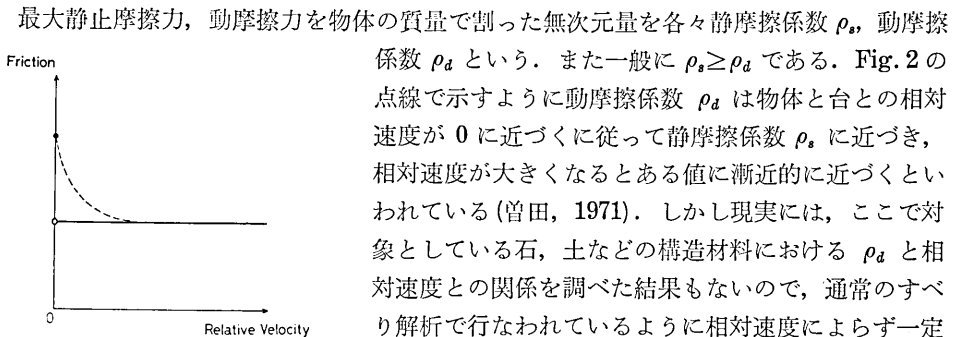


Fig. 2. Coefficient of Coulomb-friction.

最大静止摩擦、動摩擦を物体の質量で割った無次元量を各々静摩擦係数  $\rho_s$ 、動摩擦係数  $\rho_d$  という。また一般に  $\rho_s \geq \rho_d$  である。Fig. 2 の点線で示すように動摩擦係数  $\rho_d$  は物体と台との相対速度が 0 に近づくに従って静摩擦係数  $\rho_s$  に近づき、相対速度が大きくなるとある値に漸近的に近づくといわれている(曾田, 1971)。しかし現実には、ここで対象としている石、土などの構造材料における  $\rho_d$  と相対速度との関係を調べた結果もないので、通常のスベリ解析で行なわれているように相対速度によらず一定の動摩擦係数  $\rho_d$  (Fig. 2 の実線) を考える。

静摩擦係数  $\rho_s$  と動摩擦係数  $\rho_d$  の関係は、例えば石、レンガなどでは  $\rho_d$  は  $\rho_s$  の約半分、土と土では一旦すべりだすと  $\rho_d$  が  $\rho_s$  の半分以下になることもある(増田, 1976)。そこでここでは主として  $\rho_d = 0.5 \rho_s$ ,  $0.333 \rho_s$  の 2通りの組合せを採用した。

### 2.2 解析モデルと運動方程式

物体のすべりを計算するにあたって必要な座標系を Fig. 3 に示す。ここで  $z$  は地動の絶対変位、 $x$  は物体の絶対変位、 $m$  を物体の質量、そして  $g$  を重力加速度とする。運動方程式は次のようになる。

#### 2.2.1 上下動がない場合

○すべりはじめるための条件

$$g\rho_s \leq |\ddot{z}_{t_0}| \quad (1)$$

ここで  $\dot{\cdot}$  は時間微分の意味である。 $t_0$  はすべりはじめの時刻である。

○すべりはじめたあとの運動方程式

$$\ddot{x} = \pm g\rho_d \quad (\pm \text{の符号は } \ddot{z}_{t_0} \geq 0 \text{ に従う}) \quad (2)$$

$$\dot{x} = \dot{z}_{t_0} \pm g\rho_d (t - t_0) \quad (3)$$

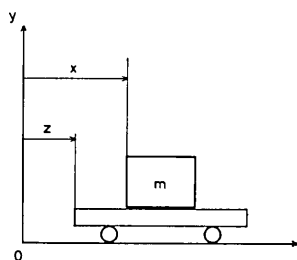


Fig. 3. Co-ordinates of the model.

$$x = z_{t_0}(t - t_0) \pm \frac{1}{2} g \rho_d (t - t_0)^2 + x_{t_0} \quad (4)$$

そしてすべりは相対速度の符号が変わるまで、すなわち  $\dot{x} - \dot{z} = 0$  となるまで続く。

### 2.2.2 上下動がない場合の計算例

- ・ 定常正弦波を地動として入力したとき

入力加速度:  $\ddot{z} = 60 \sin 2t$

静摩擦係数  $\rho_s = 0.2$

動摩擦係数  $\rho_d = 0.175$

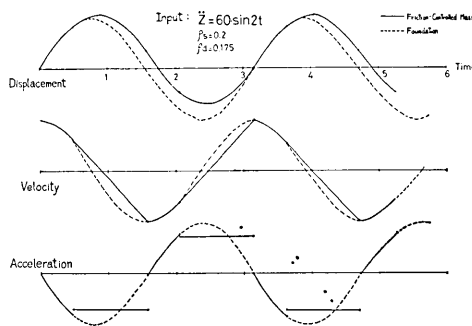


Fig. 4. Slip caused by a sinusoidal foundation motion.

以上を仮定し、運動方程式を解き、地動及び物体の変位、速度、加速度を求めたのが Fig. 4 である。点線は地動を、実線は物体の動きを示す。

この図からも、また運動方程式からもわかるように、すべっているときは時間に対して物体の加速度は一定の値をとり、速度は直線的に変化し、また変位は放物線を描く。定常正弦波入力に対する弾塑性振動のように応答変位の中立軸が時間とともに一方的にずれていくという現象は見られない。応答変位の中立軸が一定の値ずれるだけである。

- ・ 実地震波を地動として入力したとき

我々の関心のあるのは実際の地震動で物体がどの位すべるか、そのすべりの量的な特性は地震動のどのような性質に大きく依存しているのかを究明することである。そこでまず、ここでは八戸(1968)、エルセントロ(1940)、タフト(1952)の三地点で得られた地震波を選び、それぞれについて物体のすべり応答解析を行う。各地震波は比較できるように、最大加速度がほぼ等しくなるように変換してある。各地震波の加速度波形を Figs. 5, 6 に、変換された波形の諸量を Table 1 に示す。

すべり応答解析では各地震動による最大すべり量(最大相対変位量)を静摩擦係数  $\rho_s$  と  $\kappa (= \rho_d / \rho_s)$  の2つのパラメーターを変化させて求めた。その結果を Fig. 7 に示す。一般的には同じ地震波、同じ  $\rho_s$  値に対し、 $\kappa$  が小さい程、すなわち  $\rho_d$  が小さい程最大すべり量は大きいことが分る。しかし地震波が変わると同じ  $\rho_s$ 、 $\kappa$  値でも最大すべり量の値そのものも大きく変わる。言い換えれば、ここでは各地震波を最大加速度によって規準化したわけであるが、この規準は最大すべり量とはあまり密接な関連はないということを意味

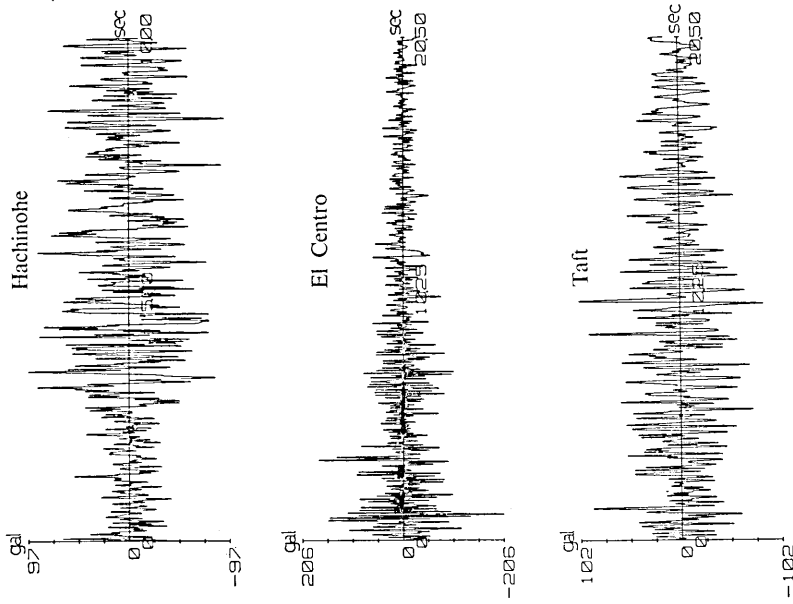


Fig. 6. Vertical accelerations of earthquake motions.

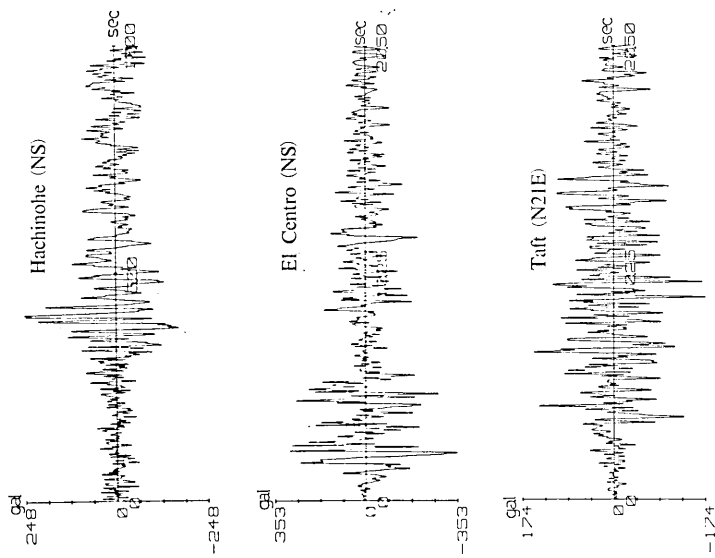


Fig. 5. Horizontal accelerations of earthquake motions.

Table 1. Earthquake motions.  
Horizontal motion

	Max. Acc. (gal)	Max. Velocity (kine)	Max. Dis. (cm)
Hachinohe, 1968, NS	248.63	-36.31	10.02
El Centro, 1940, NS	-245.27 (Factored)	-24.75 (Factored)	7.13 (Factored)
Taft, 1952, N21°E	-245.27 (Factored)	21.80 (Factored)	-8.61 (Factored)

Vertical motion

	Max. Acc. (gal)	Max. Velocity (kine)	Max. Dis. (cm)
Hachinohe	97.68	-11.16	7.08
El Centro	-97.68 (Factored)	-5.47 (Factored)	-2.28 (Factored)
Taft	97.68 (Factored)	-6.28 (Factored)	-3.58 (Factored)

している。直観的に考えると同じ $\kappa$ 値ならば、 $\rho_s$ 値が小さい程すべり量は増えると推測される。確かに八戸の記録を入力としたときは、 $\rho_s$ が小さくなるに従って最大すべり量は増加している。しかしエルセントロ、あるいはタフトの記録を入力とした場合、 $\kappa$ 値が1.0に近いときは、 $\rho_s$ 値が小さくなるに従い最大すべり量はほぼ一様に増加するが、一方 $\kappa$ 値が小さくなると最大すべり量は、 $\rho_s$ 値に対しピークを有するようになる。最大すべり量のピークを与える $\rho_s$ 値はエルセントロの例では0.15程度、タフトの例では0.08程度というようにこれまた地震波によって大きく変わってくる。このように、すべりという現象は構造物の弾塑性非線形応答のように入力が小さいときは線形現象として扱えるというようなものではなく、非線形現象の中でもかなり扱いにくい、いわば無線形現象ともいえるものであることがFig. 7の結果だけからも理解されることと思う。

Fig. 8に示すのは各地震波によるすべり応答（相対変位）の一例である。

### 2.2.3 上下動のある場合

2.2.1, 2.2.2では上下動のない場合を扱ったが、実際の地震動には上下動が含まれている。上下動のある場合の解析法は上下動のない場合のそれと基本的には同じである。

○すべりはじめるための条件

$$\rho_s(g+\dot{y}) < |\dot{z}_{i_0}| \quad (5)$$

○すべりはじめたあとの運動方程式

$$\ddot{x} = \pm \rho_d(g+\dot{y}) \quad (\pmは \dot{z}_{i_0} \geq 0 の符号に従う) \quad (6)$$

$$\dot{x} = \dot{z}_{i_0} \pm g\rho_d(t-t_0) \pm \rho_d(\dot{y}-\dot{y}_{i_0}) \quad (7)$$

$$x = \dot{z}_{i_0}(t-t_0) + x_{i_0} \pm \frac{1}{2}g\rho_d(t-t_0)^2 \pm \rho_d(y-y_{i_0}) + \dot{y}\rho_d(t-t_0) \quad (8)$$

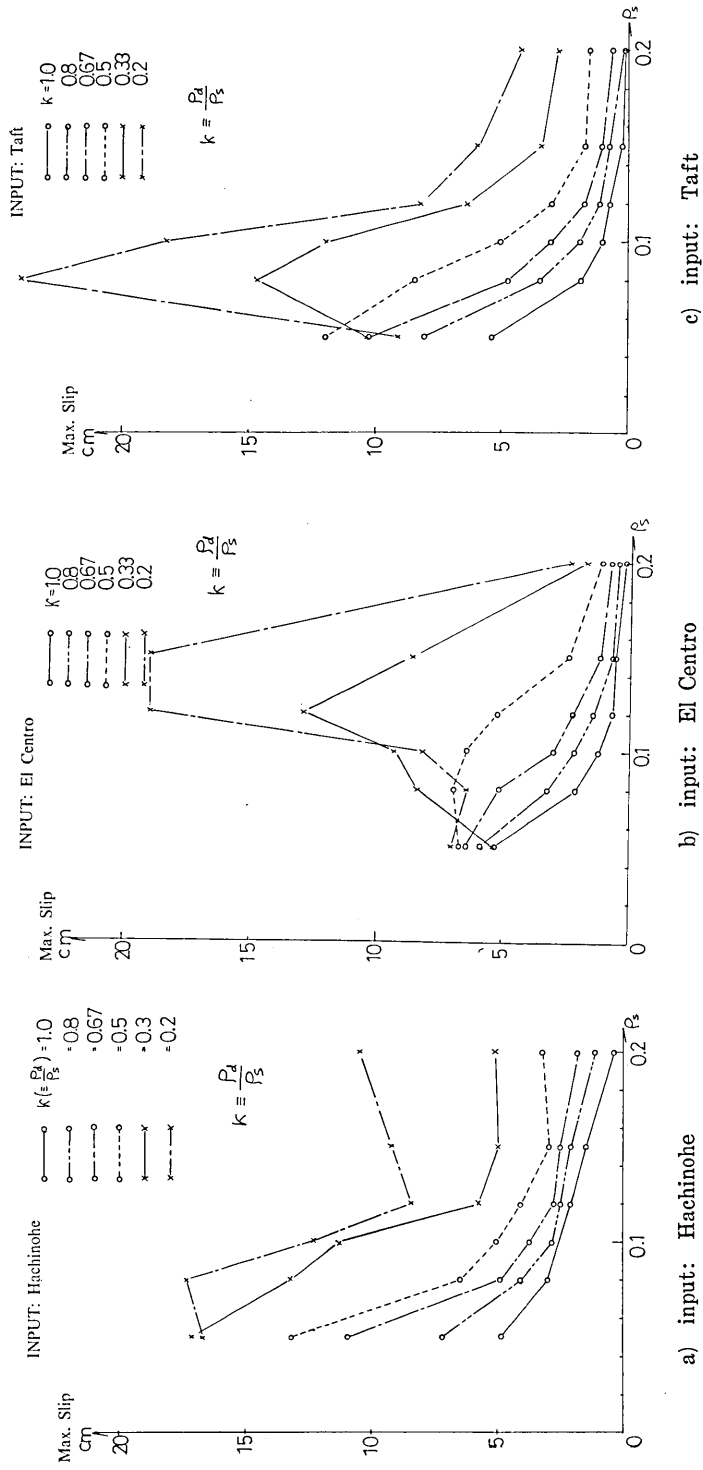


Fig. 7. Maximum slip due to horizontal earthquake motion.

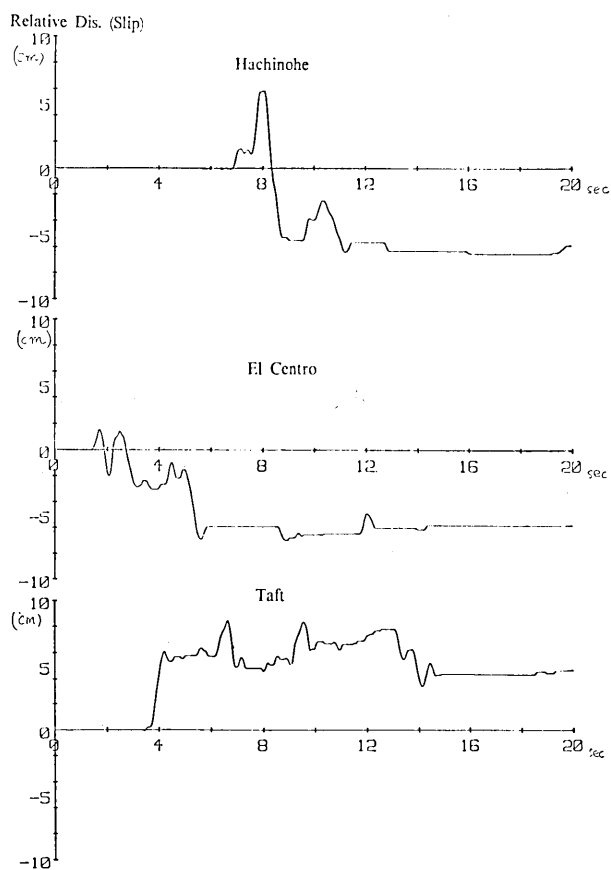


Fig. 8. Examples of slip response due to horizontal earthquake motions.  
 $(\rho_s=0.08, \rho_d=0.04)$

そしてすべりは相対速度  $(\dot{x}-\dot{z})$  の符号が変わるまで続く。

#### 2.2.4 上下動がある場合の計算例

ここでは水平動のみならず上下動が加わったとき、すべり量がどの程度変化するかを見るのが主眼である。入力地震波は 2.2.2 で用いたものと同じである。上下動も 3 つの地震波の最大加速度を等しくしてある。上下動の影響を見る尺度として同じく最大すべり量を採用する。変化させるパラメーターとして次のものを考える。

静摩擦係数  $\rho_s$ :  $\rho_s$  は 0.05~0.20 まで間隔を適宜とって変化させる。

動摩擦係数  $\rho_d$ :  $\rho_d$  の値は  $\rho_s$  の半分 ( $\kappa=0.5$ ), 3分の1 ( $\kappa=0.333$ ) の2つを  
 考える。

上下動の倍率  $\gamma$ : 上下動がない場合, 1倍, 3倍の3通りを考える。

数値計算の結果を示したのが Fig. 9 である。たて軸は上下動が入ったときの最大すべり量を水平動のみのときの最大すべり量で割った無次元量  $\beta$  をとってある。したがって、も

しこの無次元量が1.0より大きければ上下動が加わったことにより余計すべるという意味である。逆に1.0より小さいときは上下動が加わってかえって最大すべり量が減ったという事になる。Fig. 9の印●, ×, ○, △, は各々以下の意味である。

- : 上下動倍率  $r=1$  倍 }  $\kappa(\equiv \rho_d/\rho_s)=0.5$
- ×: " =3 " }  $\kappa=0.5$
- : " =1 " }  $\kappa=0.333$
- △: " =3 " }  $\kappa=0.333$

Fig. 9を見れば, いずれの入力地震波に対しても上下動があわせて入力されることにより全体的に最大すべり量が増大することが多いことがわかる。ただしタフトの記録を入力

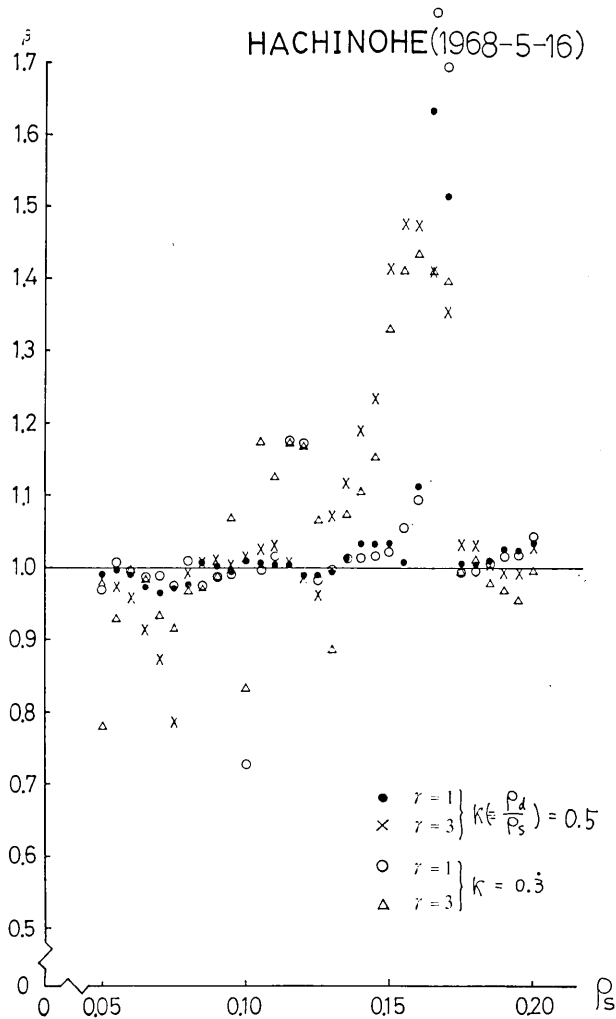


Fig. 9. (a) Ratios  $\beta$ .  
 ( $\equiv$ maximum slip with vertical motion/maximum slip with only horizontal motion)



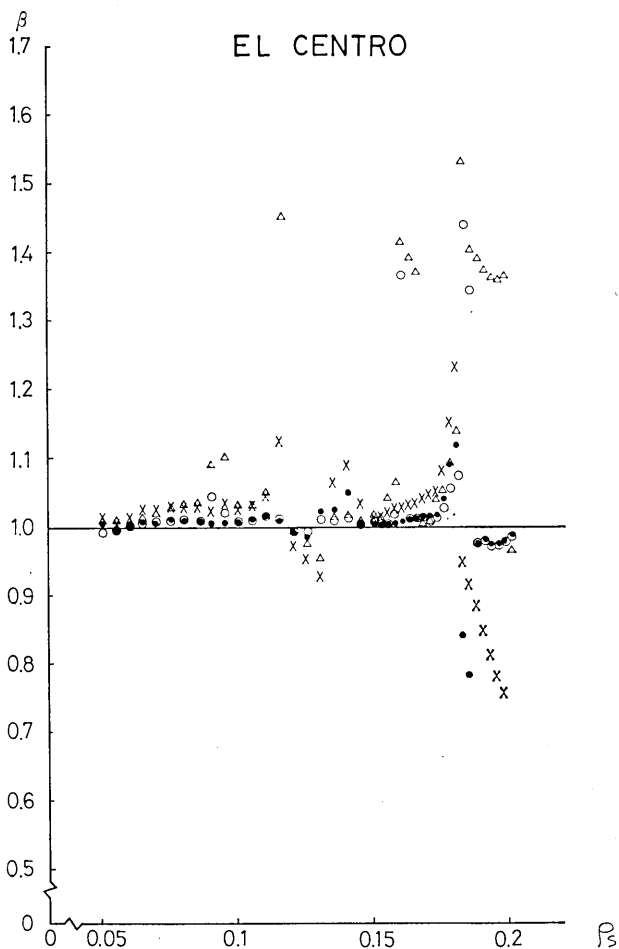


Fig. 9 (b)

したときは上下動による最大すべり量の増加の割合は他の2つの地震波の場合より小さいといえよう。タフトの例では特に  $\rho_s$  の大きい付近では最大すべり量が半分になることもある。

次に上下動の倍率を変えることによるすべり量への影響を考えてみる。いずれの入力地震波に対しても上下動を大きくすることで最大すべり量もおおむね増加するようである。しかし、Fig. 9 (a) の八戸の記録を入力とした場合、 $\rho_s=0.17$  付近では上下動を3倍としたときのすべり量よりも1倍とした方がすべり量が増えるという例もいくつかある。上下動の倍率をもっと細かく上げていくとどうなるかを示したのが Fig. 10 である。各地震波について比較的上下動の影響が大きくなる  $\rho_s, \kappa$  の組合せをここでは選んである。たて軸は Fig. 9 のたて軸の定義と同一であり、横軸は上下動の倍率をとってある。最大すべり量の増加の傾向は違うものの、八戸とエルセントロ地震波では上下動がすべり量を増やす

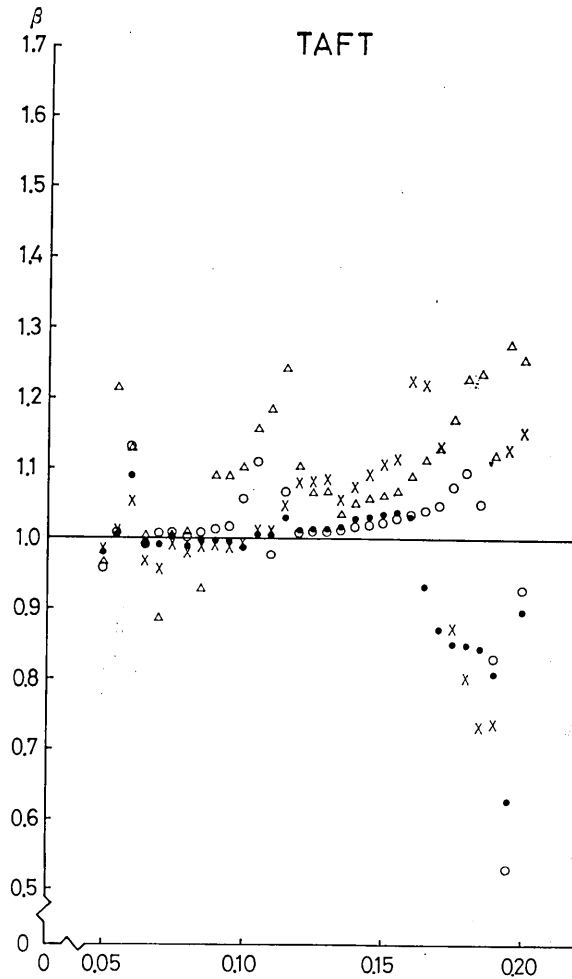


Fig. 9 (c)

方向に働いている。一方、タフト地震波では上下動が2.5倍程度までは上下動がすべり量を減らし、3倍以上になると増やす方向に働いており、前者の2つの場合と全く異った様相を呈している。

摩擦係数比  $\kappa (\equiv \rho_a / \rho_s)$  の違いが及ぼす影響という見地から Fig. 9 を見ると、 $\kappa = 0.333$  としたときの上下動によるすべり量の増加は  $\kappa = 0.5$  のときよりも概して大きいようである。しかし Fig. 9 (b) の  $\rho_s = 0.19$  付近では上下動の倍率が同じ3倍であっても、 $\kappa = 0.333$  ではすべり量が増加し、 $\kappa = 0.5$  では減少するというような例はある。また  $\kappa$  が小さいときの方がすべり量の増加、減少のばらつきが大きいようである。摩擦係数  $\kappa$  を少しずつ変化させた時、すべり量 (相対変位) が時間とともにどのように変化するのかを示した例を Fig. 11 に示す。この図より  $\kappa$  の値の少しの変化に対してもすべりの様相がかなりかわっ

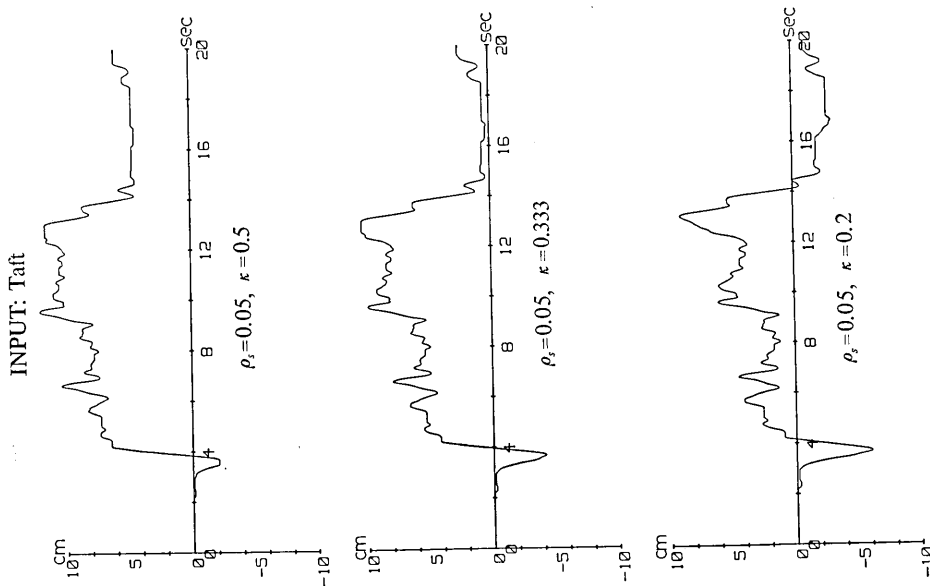


Fig. 11. Examples of slip response to earthquake motion in Taft (1952).

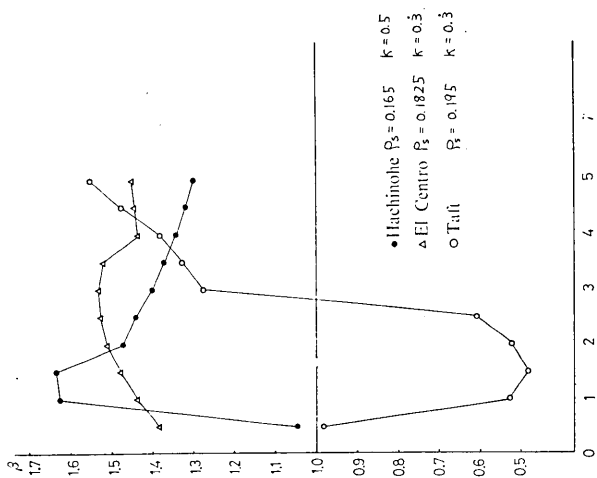


Fig. 10. Effect of magnitude of vertical motion to ratios  $\beta$ .

てくることがわかる。その変わり方は全体的なすべり応答の形状がまるで変わるというのではなく、 $\kappa$  値が少し変わると所々の一部分で急激にすべり量が増えたり、減ったりし、あとはほぼ同じ形状というような応答となっている。

Fig. 9 を見ると、同じ上下動の倍率、 $\kappa$  値なのに  $\rho_s$  の値が少し変わっただけで急激にすべり量比の値が変化する所がある。その例として、Fig. 9 (b) において上下動倍率  $\gamma=3$ 、 $\kappa=0.333$  で  $\rho_s=0.115$  と  $0.11$  の場合があげられる。この原因を見るために物体、地動の動きを書いたのが Fig. 12 である。これらの図より  $\rho_s$  の変化によるすべり量の急激な変化をもたらすのは 1 秒付近の地動の加速度の波形であることがわかる。つまり  $\rho_s=0.11$  の場合は矢印の所で地動の水平加速度が  $\rho_s(g+y)$  の値を越える (Fig. 12 (a)) のに対し、 $\rho_s=0.115$  の場合は越えない (Fig. 12 (b))。このため、Fig. 12 (a) の速度記録を示す図において  $\rho_s=0.11$  のときは  $\rho_s=0.115$  のときに比べて斜線部だけ多くなる (Fig. 12 (a)) において実線で書かれた直線は  $\rho_s=0.11$  のときの物体のすべり時の速度、点線は  $\rho_s=0.115$  のときの速度を示す。なお、点線は Fig. 12 (b) の実線を Fig. 12 (a) に書き写したものにすぎない。つまり  $\rho_s=0.11$  のときは 1 秒付近で一回余計にすべり、そのためすべり量が相殺され最大すべり量が小さくなるのである。このような微妙な波形の違いがすべり量をかえてしまう。

### 3. 斜面上にある物体のすべり

ここでは斜面上にある物体のすべりと地震動の関係について考える。具体的には地震動による斜面のすべり崩壊が対象として考えられる。

#### 3.1 解析モデルと運動方程式

Fig. 13 に示すような座標系を考える。物体のつりあい条件から以下のように斜面のすべりが求められる。

◦上にすべるための条件

$$(g \cos \theta + \ddot{y}_{t_0}) \rho_s + g \sin \theta \leq z_{t_0} \quad (9)$$

◦下にすべるための条件

$$-(g \cos \theta + \ddot{y}_{t_0}) \rho_s + g \sin \theta \geq z_{t_0} \quad (10)$$

◦すべりはじめたあとの運動方程式

$$\ddot{x} = g \sin \theta \pm (g \cos \theta + \ddot{y}_{t_0}) \rho_s \quad (z \times 0) \quad (11)$$

$$\dot{x} = g \sin \theta (t - t_0) \pm \{g \cos \theta (t - t_0) + (\dot{y} - \dot{y}_{t_0})\} \rho_s \quad (12)$$

$$x = \frac{1}{2} g \sin \theta (t - t_0)^2 \pm \frac{1}{2} g \cos \theta \rho_s (t - t_0)^2 + \dot{z} t_0 (t - t_0) \mp \dot{y}_{t_0} \rho_s (t - t_0)$$

$$\pm \rho_s (y - y_{t_0}) + x_{t_0} \quad (13)$$

そしてすべり終わるのは相対速度  $\dot{x} - \dot{z}$  の符号が変わるときである。

##### 3.1.1 計算例—水平動のみを入力としたとき

水平面上にある物体のすべりについては入力地震波の違いがすべり量にどのような影響を及ぼすかに重点をおいて計算を行なったが、ここでは斜面の角度がすべり量に及ぼす影響に重点をおいて調べる。

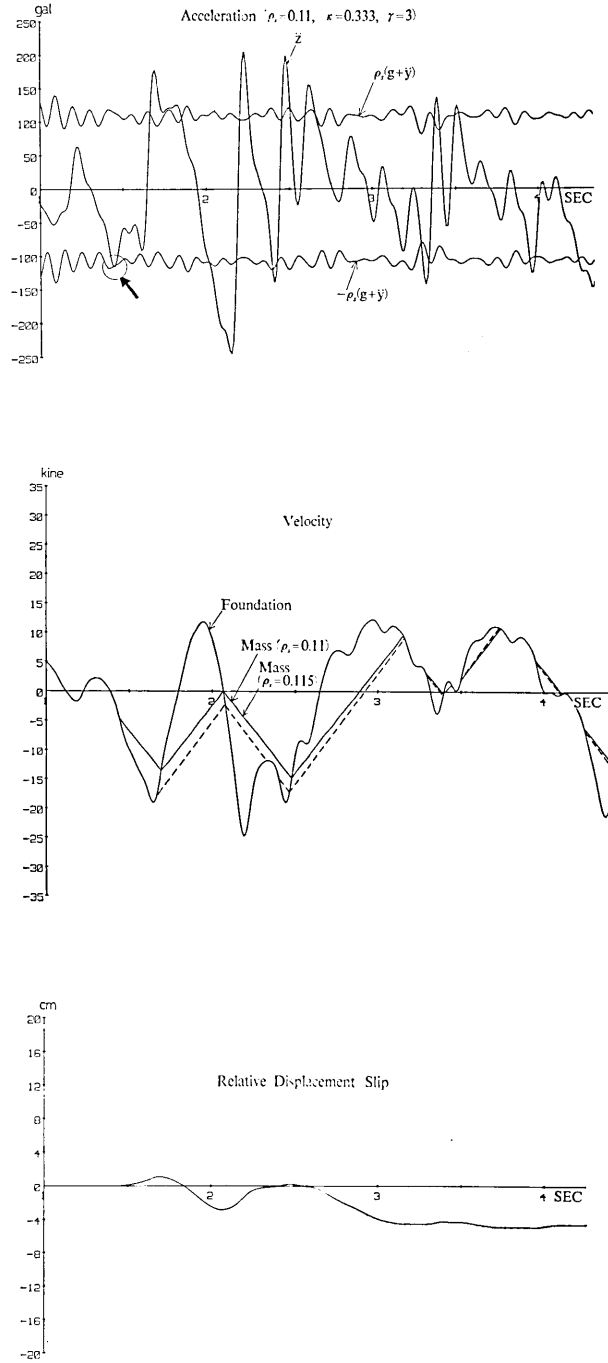


Fig. 12. Examples of slip response to earthquake motion in El Centro (1940).  
 (a)  $\rho_s = 0.11, \kappa = 0.333$ , Amplification factor of vertical acc. motion = 3.

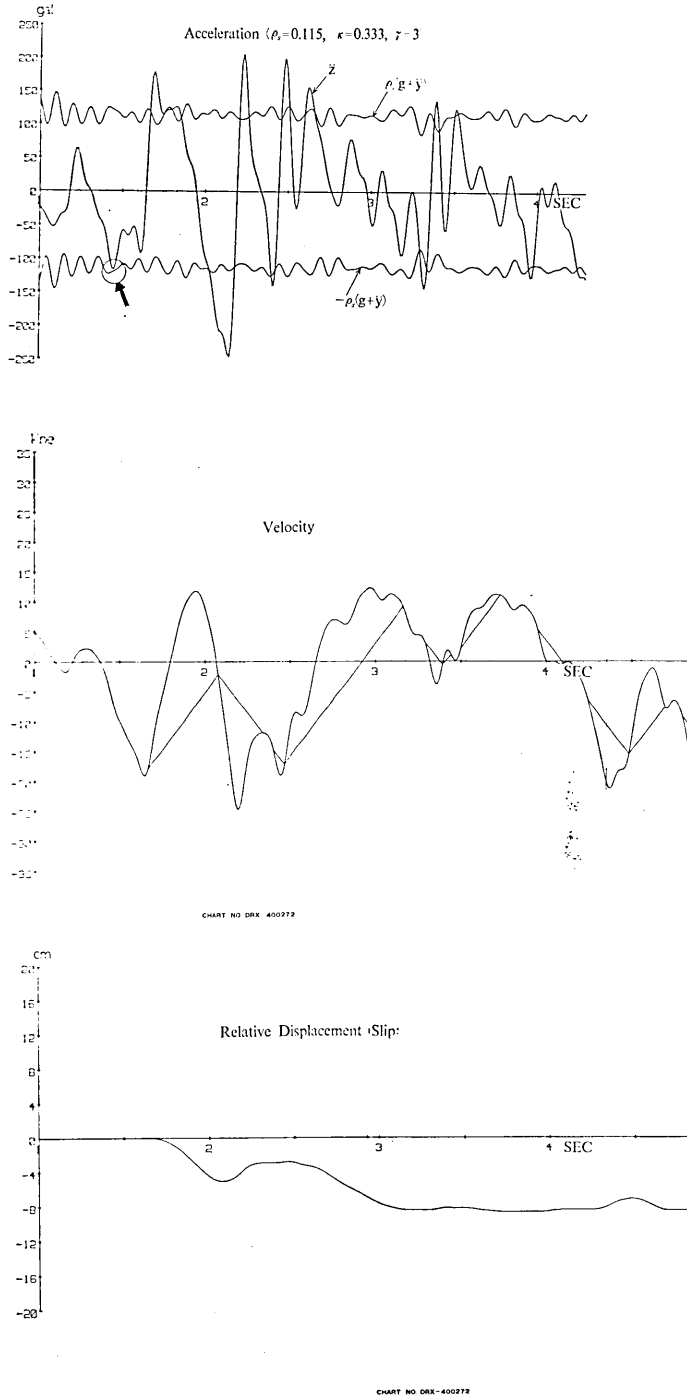


Fig. 12. Examples of slip response to earthquake motion in El Centro (1940).  
 (b)  $\rho_s=0.115, \kappa=0.333$ , Amplification factor of vertical acc. motion=3.

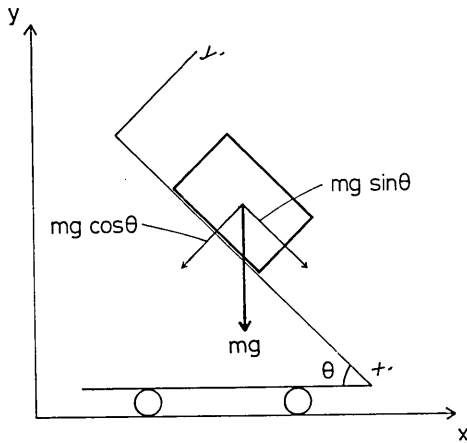


Fig. 13. Friction-controlled mass on inclined foundation.

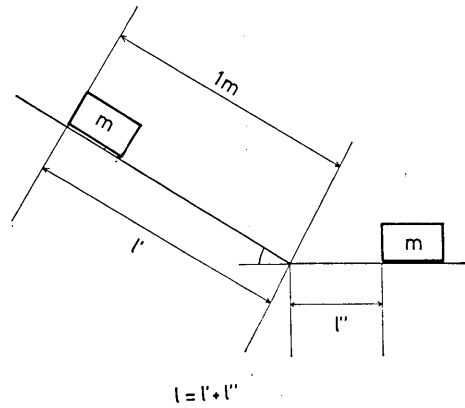


Fig. 14. Amount of slip in case of inclined foundation.

物体のすべり量と斜面の角度との関係を探るにあたり、物体が一度すべりだすと動摩擦力による抵抗力が物体に働く重力の斜面方向の分力を下まわり、ほぼ持続的にすべり続けてしまうという状態が考えられる。また実際の斜面はある程度おりと勾配もゆるくなり平地となると考えられるのでここでは Fig. 14 に示すように斜面の長さが  $1\text{ m}$  であとは平地というモデルを採用し、すべり量と角度の関係をみることにする。また物体は斜面の下まできたら、エネルギーを失わず水平方向へすべりだすと考えた。このようにしてすべり量  $l$  と斜面の勾配  $\theta$  の関係を示したのが Fig. 15 である。ただし、摩擦係数比  $\kappa$  は  $0.5$ 、入力地震波としてはタフトを用いた。Fig. 15 よりすべり量が  $1\text{ m}$  を越える場合、すなわち物体が水平面上まですべり落ちてしまう場合には、すべり量は斜面勾配  $\theta$  にほぼ比例して増大することがわかる。勿論、すべり量の増加率は静摩擦係数  $\rho_s$  に依存し、 $\rho_s$  が小さい程すべり量の絶対値、増加率とも大きい。同一の  $\rho_s$  値に対してすべり量が  $1\text{ m}$  を越えない場合物体が斜面上に留まるから越える場合（水平面上へすべり落ちる）へ移るに要する角度の増加は極めて小さく、その限界角に達するまでは物体は斜面上ですべったとしても大した量ではないことが Fig. 15 よりわかる。これを地震時によく発生する斜面での地すべりに対応させて考えてみると、地震時の斜面すべりは高々、キレツが入る程度、あるいは全面的にすべるかの二者択一で、斜面の一部がすべって斜面の途中で止まるなどということはないことを意味している。斜面に少々キレツが入るとしても安定、あるいは斜面がすべって崩壊するかのどちらかになるかは斜面の勾配、あるいは摩擦係数などの微妙な違いによって決まるということである。これは実際の斜面のすべり崩壊例から見ても納得のいくことであろう。

### 3.1.2 計算例—上下動の影響

斜面上に載っている物体が地震動を受けてすべりはじめるか否の判定は (9), (10) 式によって求められる。次に物体が斜面の下に向ってすべりはじめたあと、そのあとそのまま

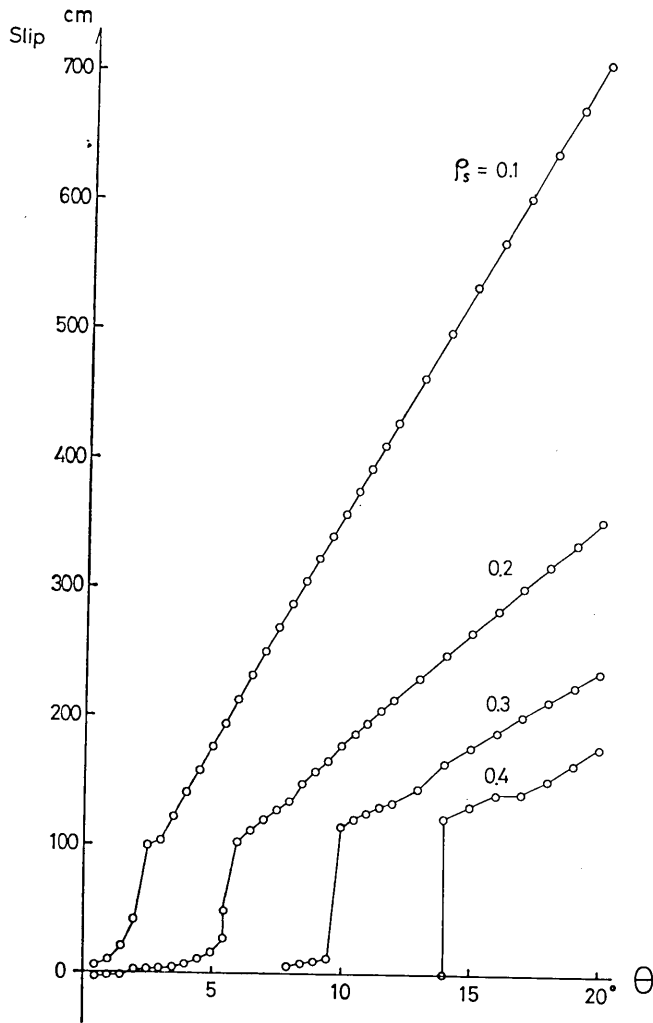


Fig. 15. Amount of slip for various angle of slope.

べり続けるか、あるいは、すべりおわるかの判定は次のように簡単に考えてよいだろう。つまり、それは物体に動く重力の斜面方向の成分が、これとは反対の向きに働く動摩擦力より大きい場合は一度すべりだしたら留まるところを知らずにすべり続けると考えるのである。これを数式で示すと

$$\rho_s \leq \frac{\tan \theta}{\kappa} \quad (14)$$

となる。物体が地震動によってすべりだすための条件は (10) 式より

$$\rho_s \leq \frac{\sin \theta + \alpha(\mu \sin \theta - \cos \theta)}{\cos \theta + \alpha(\mu \cos \theta + \sin \theta)} \quad (15)$$



であることがわかる。ここで  $\alpha$  は水平加速度 (Fig. 13 の  $x'$  方向) を重力加速度で割ったもの、 $\mu$  は上下動加速度 (同じく  $y'$  方向) を水平加速度で割った値である。ただし地震動は時々刻々変化するから、一つの地震波において (15) 式の左辺を最も小さくするような  $\alpha, \mu$  を選ぶことになる。ここで八戸地震波について (14), (15) 式をプロットしたのが Fig. 16 である。ここで  $\kappa=0.5$  とした。また  $\alpha=(\ddot{x}')_{\max}$  は  $-169.75$  gal (斜面なので左右の方向性が効いてくるので絶対最大加速度  $245$  gal とはならない) を、 $(\ddot{y}')_{\max}$  のときの  $(\ddot{y}')$  は  $-60.98$  gal であり、 $\mu=60.98/169.75$  を用いた。Fig. 16 において一点鎖線は上下動がない時、すなわち  $\mu=0$  として (15) 式をかいたものである。したがって、一度すべるとすべり続けるであろう領域は、水平動のみのときは点線と一点鎖線、上下動のあるときは点線と、実線の 2 本の曲線で囲まれた右下の領域となる。すべらない領域は実線、もしくは一点鎖線の左上である。

Fig. 16 において  $\text{---}\circ\text{---}$  (上下動あり),  $\text{---}\text{---}\text{---}$  (上下動なし) で示したのは数値計算結果である。ここでは斜面を下に向かって  $2$  m 以上すべるときは物体はすべり続けるという判定を用いた。数値計算結果は上下動のない場合も、ある場合もどちらも 2 つの曲線に漸近的に近づくものとなっている。これにより (14), (15) 式の妥当性が確かめられたことになろう。上下動の影響という点から Fig. 16 を見ると、斜面勾配  $\theta$  もゆるく、また静

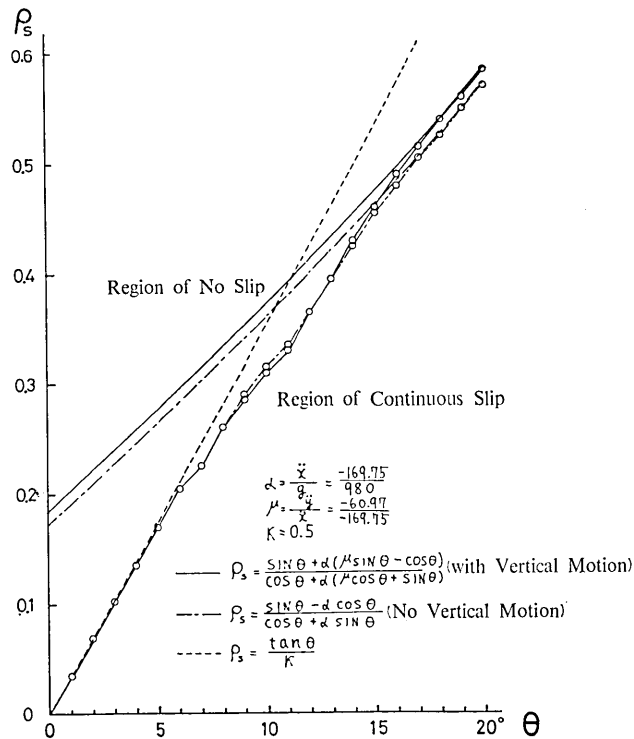


Fig. 16. Criteria of slip occurrence on inclined foundation.

摩擦係数  $\rho_s$  が小さいときには斜面のすべり崩壊の要因として上下動の影響はほとんどないといえる。しかし斜面が急な場合、地震動によってこの斜面上の物体がすべり落ちるかどうかの限界静摩擦係数  $\rho_{s,cr}$  の値は上下動が存在することにより若干大きくなっている。つまり上下動のないときは例えば  $\rho_s=0.60$  ですべり落ちないが、上下動があることにより  $\rho_s=0.60$  ではすべり落ちてしまうことが有り得るということである。

上下動の斜面上のすべりに及ぼす影響を見る意味で (15) 式をいろいろな  $\alpha$ ,  $\mu$  について図示したのが Fig. 17 である。まず水平動のみあるとき、すなわち  $\mu=0$  のときを見ると当然のことながら斜面の勾配が大きくなればほぼ直線的に限界静摩擦係数  $\rho_{s,cr}$  も増大する。また地震加速度 ( $\alpha$  に相当) が大きくなればやはり限界静摩擦係数  $\rho_{s,cr}$  も増大する。

次に、上下動が加わったときのことを考えてみる。地震水平加速度が小さいときは  $\mu=\pm 1$  による  $\rho_{s,cr}$  の幅は小さいが、 $\alpha$  が大きくなると  $\mu=\pm 1$  の幅は急増する。鉛直加速度  $j'$  が  $0.2g$  のとき、 $\alpha$  ( $\equiv$  水平加速度/重力加速度)  $=0.2$  では  $\mu=\pm 1$ ,  $\alpha=0.4$  では  $\mu=\pm 0.5$  に対応し、各々図示してある。同じ  $j'=0.2g$  でも  $\alpha$  が大きいほど  $\rho_{s,cr}$  の幅に及ぼす影響も大きい。また斜面の勾配  $\theta$  が大きくなると  $\rho_{s,cr}$  の幅も増大する。

実際の地震動によって急斜面の一部あるいは全部がすべり崩壊することが多いのはつい

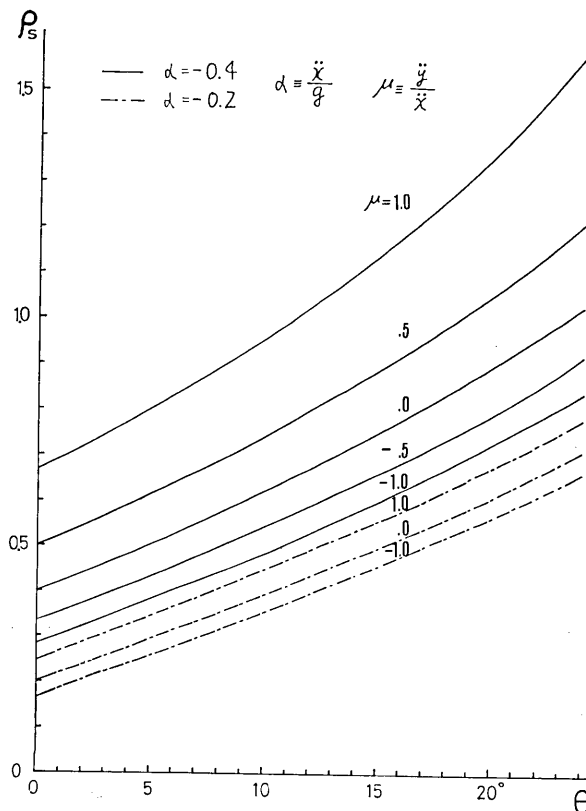


Fig. 17. Effect of vertical motion to slip occurrence on inclined foundation.

最近の伊豆大島近海地震 (1978年1月14日) による被害を見ても明らかである。この地震でもそうであったが、斜面の崩壊は全く同じような地形、勾配、地質でもある所では生じているのに他の所では全く何でもなかったりする。この原因をここで行なった斜面上の物体のすべりという点から考えてみると、まず Fig. 15 に示したように斜面の少しの違いがすべり量、言い換えれば斜面崩壊の程度に大きな影響を及ぼすことがあることが原因の1つとして挙げられよう。次に上下動の影響という点から考えてみる。急斜面において通常の状態では安定なのだから静摩擦係数  $\rho_s$  はかなり大きいと考えてよいだろう。このような斜面の下の基盤に強い地震動が入射したとき、その地形の影響により、斜面では水平動のみならず、かなり強い上下動が誘起される (佐々木・藤野・伯野, 1978)。水平動、上下動の誘起のされ方は斜面の震源からの位置、方向、形状により位相も含めて大きく異なるであろう。もし水平動の大きさが同じ、斜面の勾配  $\theta$ 、摩擦係数  $\rho_s$  が同じとしても、斜面によってすべったり、すべらなかったりするのには Fig. 17 に示すように限界摩擦係数  $\rho_{s,cr}$  が  $\mu$  の正負、絶対値、すなわち上下動の大きさ、位相の影響をかなり受けるというのも1つの原因として考えられるであろう。

#### 4. ま と め

水平面あるいは斜面におかれた物体が地震動によりどれ程すべるのかを知るために、単純化されたモデルを用いてすべり応答計算を行った。本研究によって得られた結論をまとめると次のようになる。

まず水平面上に載っている物体の水平地震動による最大すべり量をいくつかの地震動を入力として求めると、たとえそれらの最大加速度が同一であってもすべり量は地震波の波形によりかなりばらついた値になる。静摩擦係数  $\rho_s$ 、摩擦係数比  $\kappa$  の変化に対する最大すべり量の変化もまた入力地震波によってまちまちである (Fig. 17)。

次に上下動もあわせて入力とした場合の最大すべり量は上下動のない場合に比して、概して増える (Fig. 9)。最大すべり量を破壊の尺度の1つとみるならば、上下動があることにより物体は破壊しやすくなるといえる。しかしその増え方は入力地震波によってかなり異なる。また上下動の大きさが増えたからといって最大すべり量が必ず増えるわけではない (Fig. 10)。最大すべり量が若干の静摩擦係数  $\rho_s$ 、上下動の倍率  $\gamma$  の値の違いによって大きく異なることがある。

斜面の下に水平面が続く地面 (Fig. 14) の上にある物体の地震動によるすべり量を求めると、すべり量は斜面の勾配がある値まではすべらないか、すべってもごくわずかであるが、その値を少しでも越えようとすべり量が急増し、それ以上の勾配に対してはすべり量は近似的に勾配に比例する (Fig. 15)。これは土でできている斜面のすべり崩壊において、すべりが起こらないか、斜面にキレツが入る程度すべる、あるいは全面的にすべり落ちるかのいずれかで、それは地震動特性、摩擦係数、斜面の角度の若干の違いによってどちらかになるかが決定される。

急斜面上にある物体がすべるか、すべらないかの判定における上下動の影響はかなりある。

ここで扱ったモデルは地面の上に乗っている単体のすべりを見たもので力学的に極めて単純化されたモデルである。レンガ・ブロック作りの建物にしろ、あるいは土の斜面すべり崩壊においてもいくつかの単体の集まった構造であり、このようなことを考慮したすべり解析を今後行うべきであろう。

また、単純化されたモデルではあるが物体のすべり量が地震波の波形特性によって大きく変わることが示された。その変化の仕方は極めて複雑であり、現段階では地震動のどのような特性がすべり量と密接な関係にあるかは不明である。これは興味深い問題であり、今後の課題としておきたい。

最後に、地震記録ならびに地震波の積分に関して色々と便宜、指導をいただいた東京大学地震研究所の田中貞二講師に心より感謝したい。

### 文 献

- 増田芳夫, 1976, 斜面の安定解析と滑動機構, 東京大学工学部土木工学科修士論文.  
 NEWMARK, N. M., 1965, Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, *Géotechnique*,  
 15, 139.  
 佐々木有三・藤野陽三・伯野元彦, 1978, 地形が地震被害に及ぼす影響について, 地震研究所彙報  
 53, 447-459.  
 曾田範宗, 1971, 摩擦の話, 岩波新書 791, 岩波書店.  
 曾我部潔・重田達也・柴田 碧, 1977, 液体貯槽の耐震設計に関する研究, 東京大学生産技術研究所  
 報告, 27, 1-21.

### 19. *Skip of a Friction-Controlled Mass excited by Earthquake Motions.*

By Yozo FUJINO,

Institute of Structural Engineering, University of Tsukuba,

Yuzo SASAKI,

Kyushu Electric Power Corporation

and

Motohiko HAKUNO,

Earthquake Research Institute.

For certain structures, such as a soil embankment or piled blocks, slip caused by an earthquake motion is of concern from the viewpoint of the aseismicity of the structures. A rigid mass driven by Coulomb friction from a randomly moving horizontal or inclined foundation is used as a simple model in the analysis, and the dynamic responses of the mass subjected to earthquake motions are calculated. In a mass on a horizontal foundation subjected to horizontal earthquake motions, its maximum slips are found to be sensitive to the type of the input earthquake motions. Next, the effects of vertical motion to the maximum slip are considered. It is found that the maximum slip is generally increased in the presense of vertical components of an earthquake motion. However, the ratios of increase due to the vertical motion are sensitive to the type of the earthquake motions and to the coefficients of static and dynamic friction. It is shown as well that the vertical motion is not negligible to the slip of a friction-controlled mass on an inclined foundation.