

I—41

地震時における斜面のすべり変位に関する模型実験

苫小牧工業高等専門学校 正員 澤田 知之

日本大学生産工学部 正員 能町 純雄

1. まえがき

地震時斜面は水平方向の大きな慣性力を受け、その安定性は大きく低減され、その限界地震加速度を越える地動を受ける時、斜面はすべり崩壊を起こすこととなる。この際、1回の地震パルスで斜面は完全な崩壊を起こすのではなく、その1回ずつに生ずるいくらかのすべり変位の累積がある大きさに達して崩壊するということがニューマークにより論ぜられている¹⁾。ニューマークは地震時の斜面安定では、従来の最小安全率で評するよりも斜面の累積すべり変位量で評するべきであるとしたのである。

本報告は、この点に注目して斜面模型実験を行い、その結果と理論解析結果との比較検討を行うものである。

2. 実験概要

模型実験装置は図-1に示すようであり、アクリル箱の中に自然土(1.2mmふるい通過土)を表乾状態にしたもので斜面を形成し、予備実験により、単位体積重量(γ)、粘着力(C)および内部摩擦角(ϕ)を決定した。

モデル斜面を作製するにあたり、崩壊形式又はすべりによるずれを明瞭にするため、数cm間隔の石灰によるラインで数層に区切って構成した。使用する石灰は、この供試体の性質に影響を与えないようにアクリル板付近の最小限に抑えた。地動として起震機モーターの回転運動によるほぼ正弦波と考えられる水平加速度を与えた。これを斜面供試体内に埋め込んだものとアクリル箱に取り付けた両方の加速度変換器により、動ひずみ測定器を通して、ラビコーダーによる加速度記録から斜面の限界地震加速度と地動に相当する加速度を知り、同時にビデオカメラを設置して撮影を行い、これを再生したテレビ画面の中の移動量から実際の斜面高と画面の斜面高の相似比により実際の移動量を知った。また、再生画面のコマ送り時間とその間のすべり移動量からすべり速度を求めることとした。

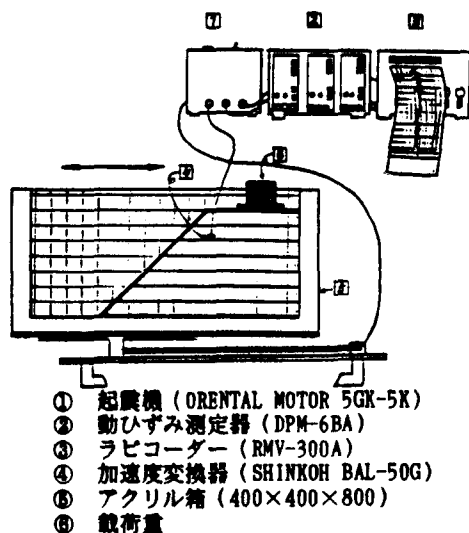


図-1 実験装置

3. 実験結果および考察

表-1には、載荷重の無い場合($P=0\text{Kg}$)の実験による斜面の限界地震加速度を示す。これから分かるようにモデル斜面は、斜面角(β)が急になる程、また斜面高(h)が高くなるに従って不安定となることを示し、妥当な実験供試体と言えよう。表-2には、同様のモデル斜面に載荷状態($P=6\text{Kg}$)で行った結果を示す。表中の添字1,2,3,4は各々地表からおよそ5cm毎の各層地点での位置を示しておりモデル斜面の4点でのすべり変位(D)とすべり速度(V)を示している。また、各々の状況を写真1~6に示す。これらから、

Model Experiment of Seismic Displacement of A Slope

by Tomoyuki SAWADA and Sumio NOMACHI

表-1 限界地震加速度

β \ h	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
35 度	0.452G	0.416G	0.405G	0.400G
45 度	0.275G	0.250G	0.235G	0.214G
50 度	0.240G	0.222G	0.213G	0.203G
60 度	0.178G	0.176G	0.172G	0.099G

載荷条件

$P = 0 \text{ kg}$

$b = 0 \text{ cm}$

本実験例においてはモデル斜面の限界地震加速度が0.204Gと求められており、入力加速度が最大の0.420Gのほぼ正弦波と見なすことができることや0.1秒後と0.5秒後（表2中*印）の2度の大きなすべり移動があり、1.3秒後での累積変位をもってすべり崩壊が終了していることがわかる。すべり変位の累積は各々の地点、時間で多少のばらつきがあるが13~14cm程度となっており大体均一な値を示した。但し、これが理論解析の仮定におけるすべり崩壊土塊が剛体回転すべり運動と見なし得るかどうかも言及するには実験数およびデータと工学的情報量が不足していると言わざるを得ない。ただ崩壊形式は非円、非平面となっており対数螺旋形を呈している。また崩壊の起点は載荷重直前から始まっており、前回著者等が発表した載荷重分担の $x = -a$ の場合²⁾を示している。尚、本例における供試体の物性値と構成寸法は $C = 0.055 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $\gamma = 0.00264 \text{ Kg/cm}^3$ 、 $\phi = 36.03^\circ$ 、 $h = 30 \text{ cm}$ 、 $\beta = 60^\circ$ 、 $P = 6 \text{ Kg}$ 、 $b = 16 \text{ cm}$ であり、上記考察と合わせて理論解析の数値計算における評価と計算諸元の基とした。

4. 理論解析概要

解析は次の順序に従って行う

- 1) すべり崩壊面は対数螺旋形とし、崩壊土塊は完全剛塑性体とし、図-2、図-3に示すように回転中心Oのまわりに回転すべりを行うものとする。
- 2) 斜面における限界地震加速度を越える地動が斜面に加わる時、ニューマーク法により移動変位を求める。その次第は以下に示すすべり角加速度($\ddot{\theta}$)、すべり角速度($\dot{\theta}$)およびすべり角度(θ)として求められる。詳細は著者等が既に発表した文献に述べてあるが³⁾、すべり土塊について図-2に示す地動の加速度が斜面の限界地震加速度と等しい臨界静止状態での力の釣り合い状態と、図-3に示す地動の加速度が大きくなり限界地震加速度を越えた場合の2段階の釣り合い式より $\dot{\theta}$ が次のように求め得る。

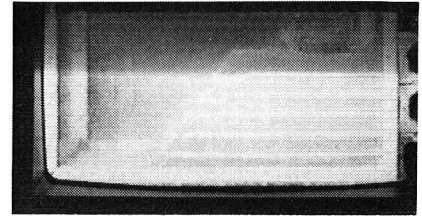


写真-1 すべり崩壊開始直後

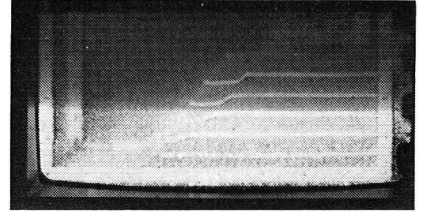


写真-2 3/30秒後

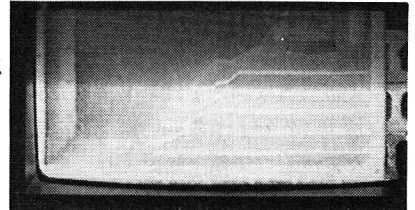


写真-3 10/30秒後

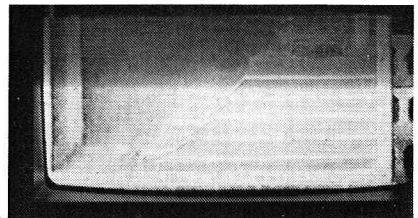


写真-4 15/30秒後

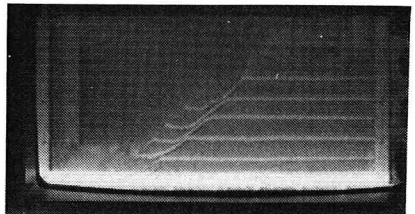


写真-5 21/30秒後

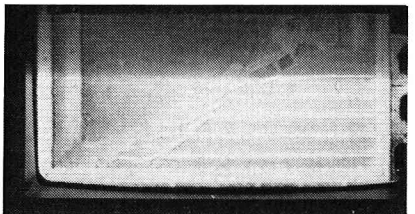


写真-6 すべり崩壊終了

表-2 実験結果

経過時間 (単位:SEC)	すべり変位 D 1 cm	すべり速度 V 1 cm/s	D 2	V 2	D 3	V 3	D 4	V 4
崩壊開始直後	1.57	0.00	1.96	0.00	1.18	0.00	0.04	0.00
3/30	3.53 *	19.61	3.92 *	19.61	3.92 *	27.45	5.10 *	50.98
10/30	5.10	6.72	9.02	21.85	5.88	8.40	7.45	10.08
15/30	10.59 *	32.94	10.59 *	9.41	9.80 *	23.53	9.80 *	14.12
21/30	11.76	5.88	14.12	17.65	12.55	13.73	11.76	9.80
30/30	12.16	1.31	14.51	1.31	12.94	1.31	12.16	1.31
39/30	12.94	2.61	14.51	0.00	13.33	0.00	12.16	0.00

$$\ddot{\theta} = \frac{(K_d(t) - K_c) \cdot g \cdot [\gamma r_0^2 (f_4 - f_5 - f_6) + x P r_0^2 \cdot f_9]}{W_3 \cdot l^2} \quad (1)$$

上式でのKは各々、地動の加速度や斜面の限界地震加速度を重力加速度(G)で除いたもので、各々、加速度係数、限界地震加速度係数と定義する。また、 f_4, f_5, f_6, f_9 は斜面を構成する幾何学的媒介変数としての角度 θ_0 、 θ_h を含むすべり土塊の仕事率を示す関数として示される³⁾。 W_3 はすべり土塊の重量であり、 l は回転中心(O)からすべり土塊の重心までの腕の長さを示し、次の式で表される。

$$l = \sqrt{[\gamma r_0^2 (f_1 - f_2 - f_3)]^2 + [\gamma r_0^2 (f_4 - f_5 - f_6)]^2} / W_3 \quad (2)$$

3) すべり始めてからの任意の時刻 t_r におけるすべり角速度は次の(3)式の如く示される。ここで斜面が上方にすべり上がろうとする時の抵抗は下方へすべる時の抵抗に比してきわめて大きくなると考えられるのですべり崩壊部分は下方へのみ移動するものとし、すべり角速度が負と計算される場合は $\dot{\theta} = 0$ とする。また、すべり角加速度とすべり角速度の正負の関係により、すべり部分はすべり出したり停止したりすることになる。

$$\dot{\theta}_r = \dot{\theta}_{r-1} + \frac{(\ddot{\theta}_{r-1} + \ddot{\theta}_r)(t_{r-2} - t_{r-1})}{2} \quad (3)$$

4) 従って、任意の時刻におけるすべり角度(θ)は t_r と t_{r+1} の時間間隔におけるすべり角加速度とすべり角速度を基本として次式のように示される。

$$\theta_{r+1} = \theta_r + \dot{\theta}_{r+1}(t_{r+1} - t_r) + \frac{(2\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_{r+1})(t_{r+1} - t_r)^2}{6} \quad (4)$$

5. 数値計算結果および考察

入力加速度を $2/3H_z$ で最大加速度を0.42Gに正規化した正弦波として本実験例を数値解析した結果を表-3および図-4に示す。各々、表、図から実験値と数値解析結果はよく一致していることを示し、斜面のすべり挙動を簡便に示し得ることができた。尚、その他の結果、考察は当日発表予定である。

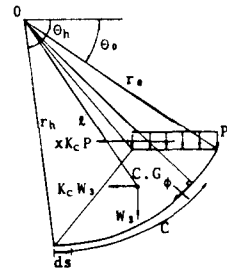


図-2

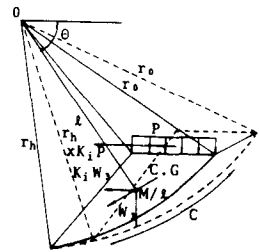


図-3

表-3 すべり変位の計算結果

経過時間(秒)	累積すべり変位(cm)
0.10	0.004
0.50	3.305
1.00	10.468
1.30	13.541

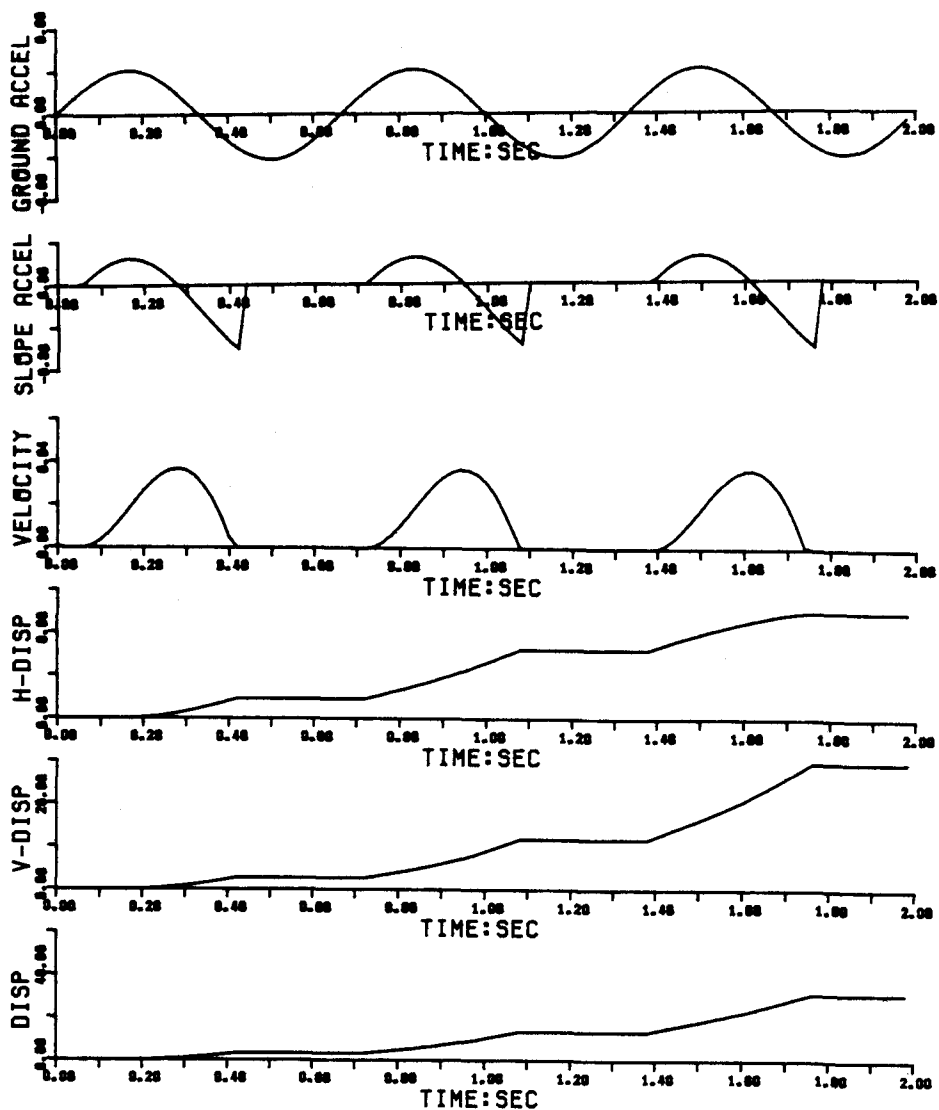


図-4 数値計算結果

参考文献

- 1) Newmark, N.M: Effect of Earthquakes on Dams and Embankment, Geotechn., Vol. 15, No. 2, pp. 137-160, 1965.
- 2) 澤田・能町: 地震などの慣性力を受ける斜面構造における載荷重分担について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第45号, pp. 95-98, 1989.
- 3) 澤田・能町・CHEN: 斜面の安定問題における地震時すべり変位について, 土木学会論文集, 第358号, III-3, pp. 113-118, 1985.