

I-57

ランダム波入力による模型斜面の破壊実験について

苫小牧高専 正 員 澤田知之
 日本大学 正 員 能町純雄

1. まえがき

地震時における斜面のすべり破壊は、斜面内安定の著しい低減が大きな水平方向の慣性力により引き起こされて生ずると考えられる。地震が作用している間中、この慣性力はその方向と大きさが何度も変化し、しばしば安全率を1以下にする。よって斜面の安定性が損なわれ、これが地震によるすべり変位の原因となる。地震荷重による斜面構造のこのような動的変位やすべり速度はニューマークの方法¹⁾によって計算されるが、このような地震荷重による斜面の累積変位量等は地震波の1回のパルス毎に非線形的に変化するという観点から、本稿においては不規則波動の入力による斜面すべり破壊の模型実験を行い、そのビデオ撮影の再生画像より(写真-2)すべり破壊に至るまでの累積変位と、すべり1回毎の斜面の限界地震加速度係数を知りそれによる理論すべり値との比較検討について報告するものである。

2. 模型実験

2-1 実験供試体

試験に用いられた試料は、本学内に於いて採取したシルト混じりの自然土で2.5mmふるいを通過するものを使用し、この試料の性質を知るために予備実験として一面せん断試験と比重試験を行った。これらの実験結果、内部摩擦角 $\phi = 37.8^\circ$ 、粘着力 $C = 0.22 \text{ kg/cm}^2$ 、密度 $\rho_s = 2.69 \text{ g/cm}^3$ 、単位体積重量 $\gamma = 1.26 \text{ kg/cm}^3$ という値を得た。試料は表乾状態で室内保管し、保管中の性状の変化はないものとする。試験中に層分けの目安として供試体に加える石灰は土の性質に影響のない程度に最小限の量を使用し試験後にその都度取り除くようにし、なるべく実際の斜面に近い状態の供試体を作製した。

2-2 入力波形

今回の実験に使用した入力波形は、実際の地震波形に近づけるために、ランダム波を作成し、その波形をデータレコーダーに取り入れて繰り返し使える入力波形とした。波形の作製においては、加速度変換器を初めは小さく振りだんだんと大きく振ることにより実際の地震波動における初期微動部分と主要動部分を再現し、できる限り地震波形に近づけるように工夫した。

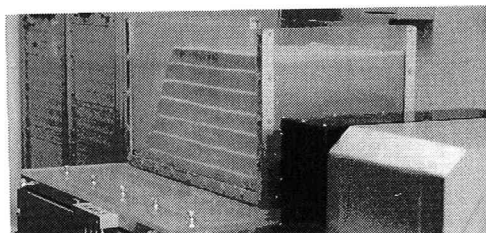
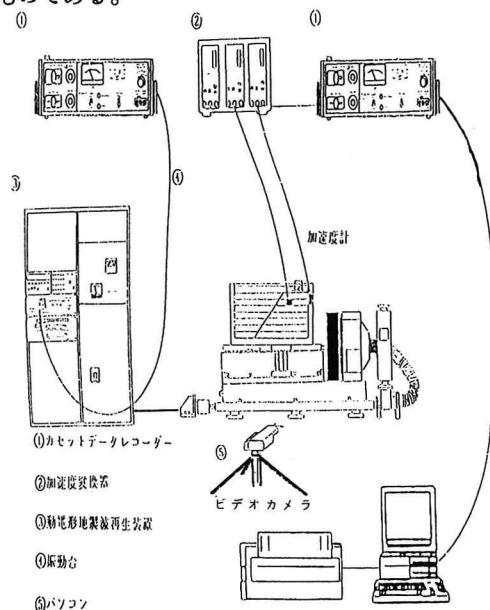


写真-1・図-1 実験概要

Model Test of Seismic Slip Failure of a Slope by Random Waves; Tomoyuki SAWADA(Tomakomai National College of Technology) and Sumio G.NOMACHI(Nihon University)

2-3 実験概要

前述の供試体試料を、 $400 \times 800 \times 400$ mmのアクリル箱に入れ斜面を形成し、崩壊時の斜面のずれを明瞭にするために、アクリル板付近にのみ5 cm間隔で水平に石灰のラインを引き斜面を構成する。

次に、加速度変換器を入力波の加速度測定用と斜面内の加速度測定用として2つ用意し、それぞれアクリル箱の外側と斜面内に取り付ける。(写真-1・図-1)

あらかじめデータレコーダーからの入力波により振動台を作動させ、それぞれの加速度変換器から取り入れられた波形を、動ひずみ測定器を通してデータレコーダーでカセットテープに記録する。同時にビデオカメラを約1.5m程度供試体から離れた地点に設置し斜面の崩壊状態を撮影した。

カセットテープに記録された波形はパソコン（PC9801RX）に取り込まれカノープスのソフトを用いて波形として表示し、入力波形と応答波形の相違から限界加速度係数（ K_c ）を1G（980cm/sec）を基準として求めるとともに高速フーリエ変換解析（FFT）を行い振動数特性も得ることができる。

撮影したビデオからは、崩壊していく時の土の変位量やすべり速度を静止画像処理機器（写真－２）を用いて求める。また、この静止画像を写真撮影し崩壊形式をまとめた。

この様にして、余裕幅 (B) を 10 cm、斜面高 (h) を 25 cm から 35 cm まで 2.5 cm 刻みで 5 種類と斜面角 (β) を 45°, 50°, 60° と変化させて模型実験を行った。

3. 理論式

理論としては、すべり土塊の仕事率とすべり線に沿って生ずる内部逸散エネルギーが等しいと置くことによって得られるつりあい式から、非線形最適化手法によって限界地震加速度係数 (K_c) を求め、それを越える加速度によって生ずるすべり角度はニューマークの力積変位理論により、任意の時刻におけるすべり角加速度 $\ddot{\theta}$ (1) 式とすべり角速度 $\dot{\theta}_i, \dot{\theta}_{i+1}$ (2) 式とからすべり角 θ_i として (3) 式のように求められる。これに (4) 式に示すすべり中心 O からのアーム l を乗じることによりすべり変位を計算する。

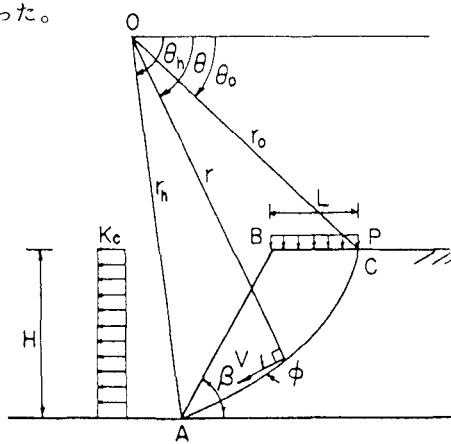


図-2 解析モデル

$$\ddot{\theta} = \frac{(\mathbf{K}_i - \mathbf{K}_c) \mathbf{g} \{ \gamma \mathbf{r}_0^3 (f_4 - f_5 - f_6) + \mathbf{P} \mathbf{r}_0^2 f_9 \}}{\mathbf{W}_3 \ell^2} \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_{i+1} = \dot{\theta}_i + \frac{(\ddot{\theta}_i + \ddot{\theta}_{i+1})(t_{i+1} - t_i)}{2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{3(1+\tan^2\phi)} \{ (3 \tan \phi \cdot \cos \theta_h + \sin \theta_h) \cdot \exp [3(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] - 3 \tan \phi \cos \theta_0 - \sin \theta_0 \} \\ f_2 &= \frac{1}{6} \frac{L}{\gamma_0} \left(2 \cos \theta_0 - \frac{L}{\gamma_0} \right) \sin \theta_0 \\ f_3 &= \frac{1}{6} \left\{ \sin (\theta_h - \theta_0) - \frac{L}{\gamma_0} \sin \theta_h \right\} \exp [(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] \cdot \left\{ \cos \theta_0 - \frac{L}{\gamma_0} + \cos \theta_h \cdot \exp [(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] \right\} \\ f_4 &= \frac{1}{3(1+\tan^2\phi)} \{ (3 \tan \phi \cdot \sin \theta_h + \cos \theta_h) \cdot \exp [3(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] - 3 \tan \phi \sin \theta_0 - \cos \theta_0 \} \\ f_5 &= \frac{1}{6} \frac{L}{\gamma_0} 2 \sin \theta_0 \cos \theta_0 \\ f_6 &= \frac{1}{6} \left\{ \sin (\theta_h - \theta_0) - \frac{L}{\gamma_0} \sin \theta_h \right\} \exp [(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] \cdot \left\{ \sin \theta_0 + \sin \theta_h \cdot \exp [(\theta_h - \theta_0) \tan \phi] \right\} \\ f_7 &= \frac{L}{\gamma_0} \sin \theta_0 \end{aligned}$$

4. 結果及び考察

今、図-3に示す入力波に対し、 $H = 25\text{ cm}$ 、 $B = 10\text{ cm}$ 、 $\beta = 45^\circ$ で載荷重 $P = 12\text{ kg}$ の場合の結果を図-3及び、表-1に示す。入力波と応答波及びそのビデオ画面から見て、限界加速度を越えた状態ですべり土塊はそれ自体の慣性力により大きな加速度を生じることが測定された。よって限界加速度係数 (K_c) としては入力加速度に比して小さい値 $K_{c1} = 0.92G$ を最初の限界加速度係数として決定した。実験結果 (波形記録及びビデオ画面) より K_{c1} 、 K_{c2} 、 K_{c3} の3パルスによりこの斜面構造はすべり破壊に至ったと考えられる。実験結果の表-1より破壊は、開始より4.72秒後に終了と考えられ、累積変位は6.0cmを得た。一方、実験諸元を用いた理論値からは表-2より、累積変位は約5.2cmが得られ、実験値の方がやや大きめであるが妥当な一致を見た。また、斜面高 $H = 35\text{ cm}$ で斜面角 (β) を 45° 、 50° 、 60° と変化させた結果を図-4に示す。(写真-3)より斜面が緩やかであるほど、変位が大きくすべり速度はゆっくりとなる。つまり斜面破壊は急斜面な程、すべり変位は小さく、すべり速度は速く、一気に破壊する傾向を示している。

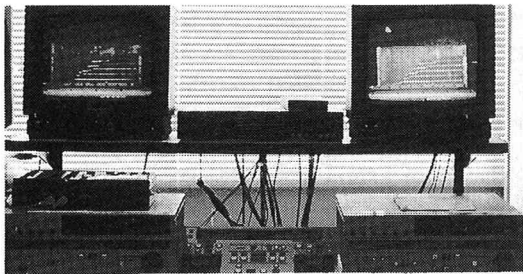
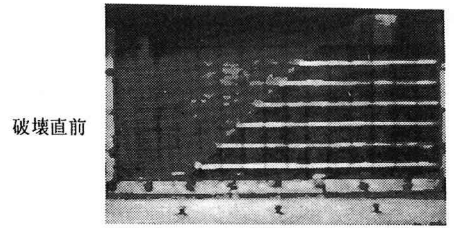
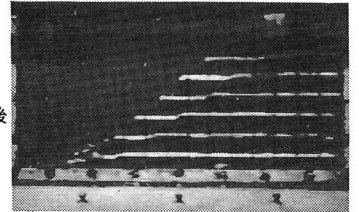


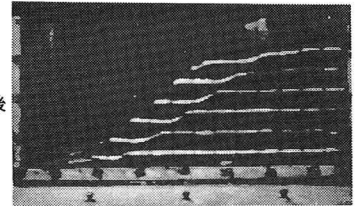
写真-2 静止画像処理装置



34/30sec. 後



100/30sec. 後



142/30sec. 後

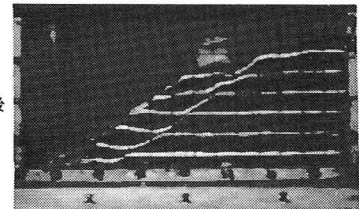


写真-3 斜面破壊例 ($H = 35\text{ cm}$)

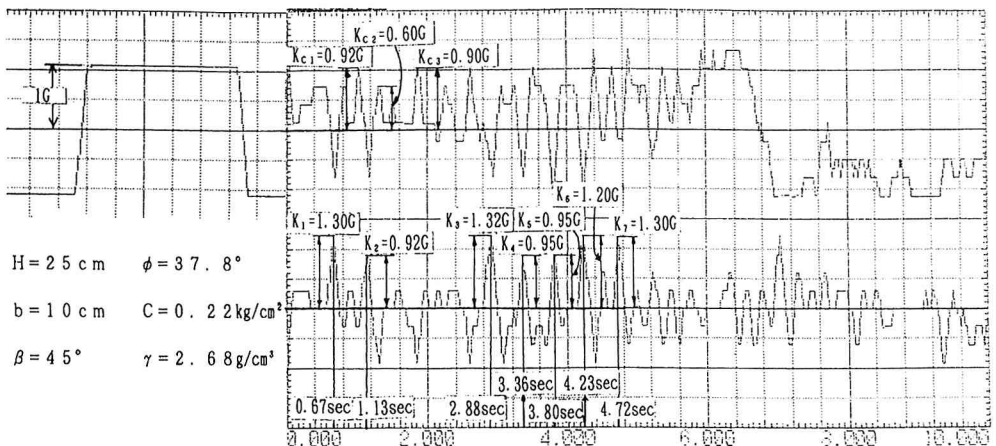


図-3 実験記録波形

表-1 実験結果

平均累積変位 60.0mm

H=25.0cm B=10.0cm $\beta=45^\circ$ $\phi=37^\circ 49' 42''$ C=0.22kg/cm² P=12kg

時間経過と K_{ci} の変化			変 位 (mm)				すべり速度 (mm/s)			
番号	時間経過	K_{ci}	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4
1	崩壊直前	—	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	20/30sec. 後	0.92G	26.3	11.3	15.0	17.5	65.6	21.8	37.5	43.7
3	34/30sec. 後	0.60G	30.0	16.9	18.8	21.9	9.4	3.8	9.4	7.5
4	75/30sec. 後	—	45.0	22.5	22.5	30.0	64.3	11.3	16.1	30.6
5	87/30sec. 後	0.90G	45.0	26.3	22.5	31.3	0.0	22.5	0.0	7.5
6	100/30sec. 後	0.90G	52.6	31.9	37.5	40.7	22.8	16.9	45.0	28.2
7	114/30sec. 後	0.90G	60.6	33.8	37.5	43.8	44.4	11.3	0.0	18.6
8	127/30sec. 後	0.90G	63.8	43.1	45.0	50.6	5.9	14.5	11.8	10.7
9	142/30sec. 後	0.90G	71.3	60.0	48.8	60.0	3.8	8.9	1.9	4.9

表-2 理論値 累積変位 5.202cm

番号	時間経過	K_{ci}	入力波	変位(cm)
1	崩壊直前	—	—	—
2	0.67sec. 後	0.92G	1.30G	0.045
3	1.13sec. 後	0.60G	0.92G	0.108
4	75/30sec. 後	—	—	—
5	2.88sec. 後	0.90G	1.32G	0.923
6	3.36sec. 後	0.90G	0.95G	0.150
7	3.80sec. 後	0.90G	0.95G	0.191
8	4.23sec. 後	0.90G	1.20G	1.423
9	4.72sec. 後	0.90G	1.30G	2.362

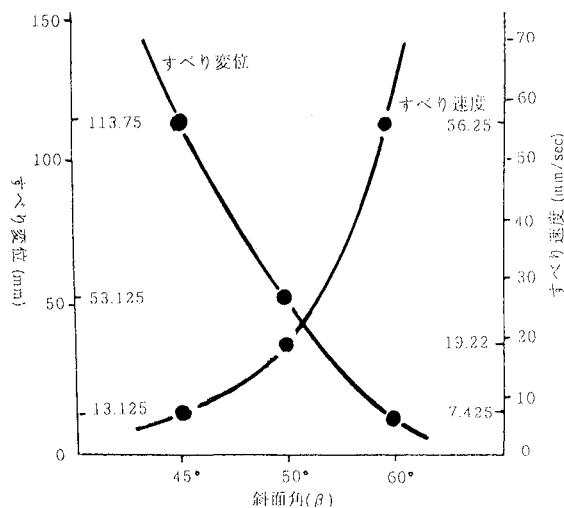


図-4 すべり変位・速度と斜面の関係

付記: 本研究の一部は平成5年度北海道科学研究補助金の交付を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 澤田・松岡・能町, “慣性力を受ける斜面構造の安定性状についての模型実験”, 土質工学会北海道支部技術報告集, 第32号, 1992, PP. 69-72.
- 2) Newmark, N. W., “Effect of Earthquakes on Dams and Embankments”, The Fifth Rankine Lecture of the British Geotechnical Society, Geotechnique, England, Vol. XV, No. 2, 1965, PP. 137-160.
- 3) Sawada, T., Chen, W. F. and Nomachi, G., “Model Test and Analysis for Seismic Displacement of a Mounded Foundation Near a Down-Hill Slope”, International Symposium on Soil Improvement and Pile Foundation, China, Vol. I, 1992, PP. 316-321.
- 4) 最上武雄編, 土質力学, 技報堂, 1982, PP. 795-831, PP. 850-870.