

I-42 再生地震波等による斜面破壊の模型実験

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

斜面がその耐震限界を越える地震波により、すべり破壊が生じる時、そのすべり破壊過程における移動変位の計算はまず、極限解析の上界法を用いて斜面の限界地震加速度を求める。次にその限界値を越えた入力加速度分を積分するニューマーク法によりすべり変位を求め得るが、その値は累積変位として評価されるべきであり、すべりが生じる度に斜面の耐震限界は低減し、変化すると考えられる。よって、これらの限界加速度を模型実験により決定し、1波分のすべり変位の累積としてすべり移動量を求める。また、地震時の動的土圧分布(慣性力分布)は震度法に根拠をおいて深さ方向に一定として計算されている。本稿は、これら理論の検証の模型実験結果例を報告するものである。

2. 実験概要

実験の試料は2.5mmふるいを通するシルト混じりの赤土を300kg程度採取し、表面乾燥状態で室内保存したものをモデル斜面の試料として使用した。まず、試料の物性を知るために予備実験として一面せん断試験結果より、内部摩擦角 $\phi = 37.8^\circ$ 、粘着力 $C = 0.22 \text{ kg/cm}^2$ 、比重試験で密度 $\rho = 2.69 \text{ g/cm}^3$ を得た。さらに実験時と同様の条件下でモデル斜面を作製し、その質量を計り、体積との兼ね合いから単位体積重量 $\gamma = 1.26 \text{ g/cm}^3$ を求めている。実験装置としては写真-1および図-2に示すように、振動台(IMV.CMW-1000-5)上にモデル斜面を設置し、加速度ピックアップおよび土圧計を取り付け、限界加速度の決定と深さ方向の動的土圧を4カ所で測定した。斜面モデルの破壊の様子は、約1.5m離れた位置からビデオ撮影を行った。この撮影したビデオの再生画を静止画像処理機を用いて1/30秒刻みのコマ送り状態にし破壊形式を特定する。また、画面と実際寸法の縮尺を考慮して石灰ラインのすべり移動量とすべり速度を求めている。

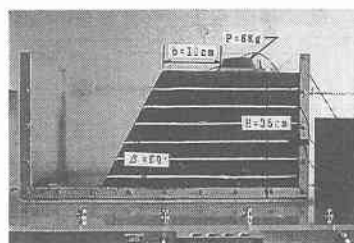
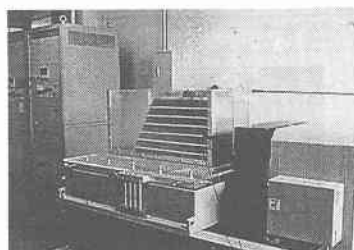


写真-1 実験装置と実験モデル

3. 理論式

理論としては、図-1の解析モデルにより、すべり土塊のすべり仕事率とすべり線に沿って得られる内部消散エネルギーが等しいと置くことによって求められる釣り合い式(θ_0, θ_h の2媒介変数)を目的関数として、その最小値である限界地震加速度係数(K_e)を非線形最適手法によって求める。まとめると(1)、(2)式のように示される。

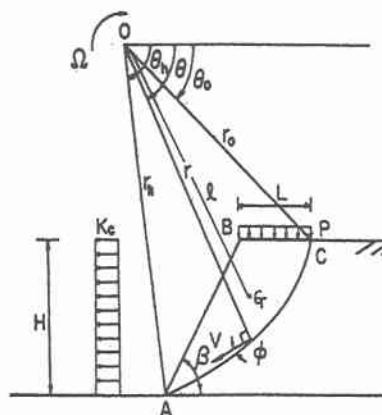


図-1 解析モデル

Model test of slope-collapse induced pseudo-seismic waves
 by Tomoyuki SAWADA and Sumio G. NOMACHI

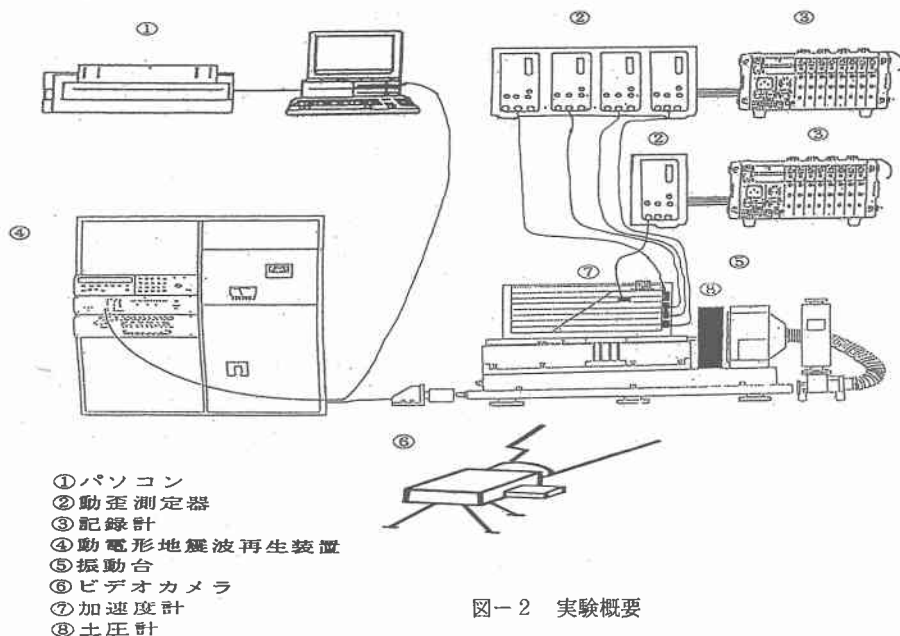


図-2 実験概要

$$F(\theta_0, \theta_h) = \frac{cF_c - \gamma r_0 (F_1 - F_2 - F_3) - PF_p}{\gamma r_0 (F_4 - F_5 - F_6) - xPF_p} \quad (1)$$

$$K_c = \text{Min.} F(\theta_0, \theta_h) \quad (2)$$

表-1 理論計算値

番号	時間経過	$K_c i$	入力波	変位(cm)
1	破壊直前	-	-	-
2	1.32sec. 後	0.870G	1.00G	0.0372
3	2.20sec. 後	0.322G	0.741G	0.3333
4	2.64sec. 後	0.322G	0.758G	0.4994
5	2.92sec. 後	0.322G	0.741G	0.5871
6	3.16sec. 後	0.322G	0.725G	0.6614

累積変位 2.1184cm

この K_c を越える入力波によって生じるすべり角 (θ) はニューマーク法により(3)式のように求め得る。これに(4)式で示すすべり中心(o)からのアームを乗じることにより、すべり変位を計算する。尚、(1)式中の $F_1 \sim F_6$ および f_p, f_q は θ_0, θ_h の関数で表される。^{1) 2)}

また、 W_3 は対数螺旋で示されるすべり線によるすべり土塊の重量であり、 F_c はすべり線に沿った粘着抵抗である内部消散エネルギーを示し、やはり θ_0, θ_h で示される。^{2) 3)}

$$\theta_{r+1} = \theta_r + \dot{\theta}(t_{r+1} - t_r) + \frac{(\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_{r-1})(t_{r+1} - t_r)}{6} \quad (3)$$

$$\ell = \frac{\sqrt{[\gamma r_0^3 (F_1 - F_2 - F_3)]^2 + [\gamma r_0^3 (F_4 - F_5 - F_6)]^2}}{W_3} \quad (4)$$

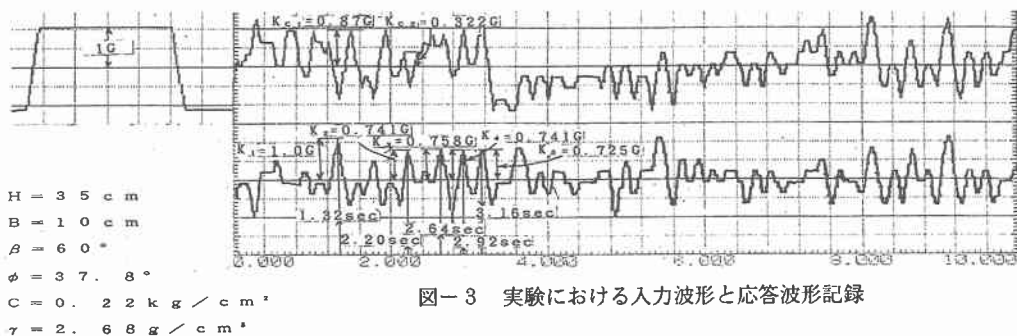


図-3 実験における入力波形と応答波形記録

4. 実験結果と考察

今、理論の検証のために図-3と表-1、2に斜面高さ(H)35cm, 斜面角(β) 60° の場合のランダム波入力をして破壊させた実験値結果と理論計算値を示す。すべり変位は実験と理論は3.75cmと2.12cm程でビデオ再生画面からの斜面破壊形式も理論仮定とほぼ一致していると考えられるが、記録紙からその時間における限界地震加速度係数を求める時、その設定時間にずれが生じ、数値計算結果との誤差が生じたものと考えられる。破壊に至る累積変位が比較的小さいことから、工学的精度からはほぼ妥当な傾向と考えられる。実験概要と破壊過程例を写真-2に示す。

表-2 実験結果

$H = 35.0 \text{ cm}$ $B = 10.0 \text{ cm}$ $\beta = 60^\circ$
 $\phi = 37^\circ 49' 42''$ $C = 0.22 \text{ kg/cm}^2$ $P = 12 \text{ kg}$

時間経過と K_c 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	平均値	Line 1	Line 2	Line 3	平均値
1	破壊直前	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1.32sec. 後	0.87G	0.0	0.0	41.3	13.8	0.0	0.0	281.3	93.8
3	2.20sec. 後	0.32G	26.3	18.8	0.0	15.0	196.9	140.6	0.0	112.5
4	2.64sec. 後	0.32G	60.0	56.3	0.0	38.8	506.3	562.5	0.0	356.3
5	2.29sec. 後	0.32G	15.0	18.8	0.0	11.3	50.0	62.5	0.0	37.5
6	3.16sec. 後	0.32G	37.5	-	-	37.5	225.0	0.0	0.0	75.0

平均累積変位 37.5mm

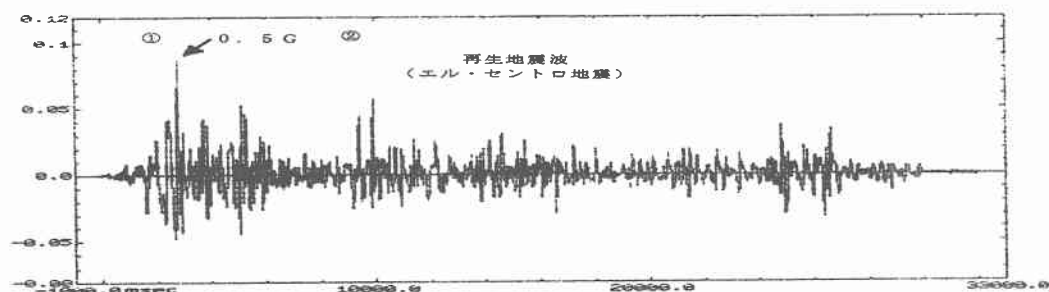


図-4 入力再生地震波 (El-Centro地震)



図-5 動的土圧の実験記録

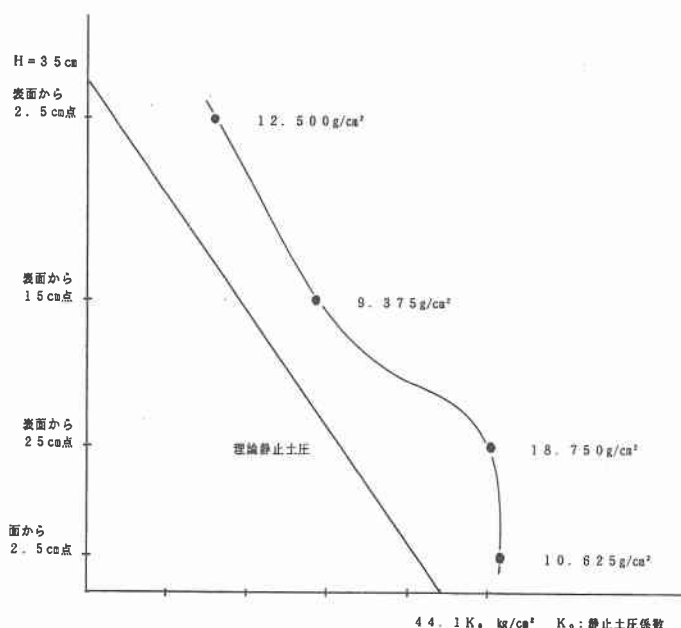


図-6 破壊時の深さ方向の土圧分布

次に、再生地震波としてエル・セントロ波（図-4）を入力した場合の深さ方向の動的土圧分布を示す。図-5は表面から各々2.5cm,15cm,25cmおよび32.5cm点の記録であり、図-4の主要動①②（図-5の①②点）で破壊に至っていると考えられる。深さ方向の最大土圧分布を図-6に示す。これからほぼ一定の加速度分布と考えられ、震度法等における慣性力一様分布とする根拠を示していると考えられる。その他の結果は当日発表予定である。

付記：本研究は平成7年度文部省科学研究費一般研究（C）課題番号07650582の補助金を受けて行ったものである

破壊直前

1.05秒後

1.32秒後

2.20秒後

2.29秒後

2.64秒後

2.85秒後

3.16秒後

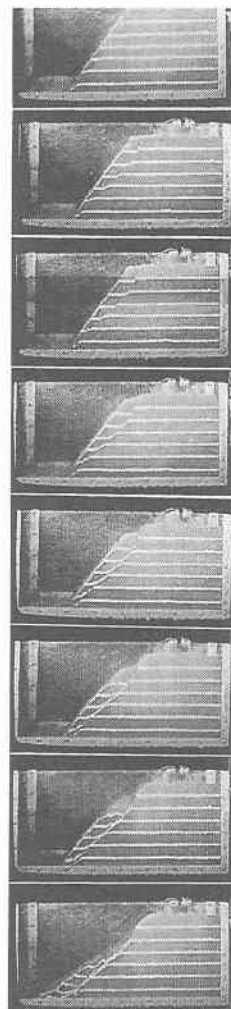


写真-2 破壊過程

謝辞：本稿作成にあたっては苫小牧工業高等専門学校環境都市工学科 柳谷豊技官に多大なご協力を頂いている。ここに記して深く謝意を表するものである。

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) Sawada,T., Chen,W.F. and Nomachi,S.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.1, 1992, pp.316-321
- 3) Newmark,N.W., Effects 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
- 4) Sawada,T., Nomachi,S.G. and Chen,W.F.: On Slope Displacement by a Logarithmic Spiral Failure Slide during Earthquake, Proceedings of the Sixth International Symposium on Landslides, New Zealand, 1992, pp.1193-1198