

地震時斜面破壊の理論解析と模型実験

澤 田 知 之*

Analysis of Seismic Slope Failures compared with Model Tests

Tomoyuki SAWADA

要旨

斜面がその耐震限界を越える地震波により、すべり変位を生じる時、その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、移動変位量は、限界値を越えた入力加速度分を積分することにより求め得る。又、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。よって正弦波の地震動が斜面が耐震限界加速度を越えて入力された時の地動1波分のすべり変位を計算し、その重ね合わせ（累積量）として求めることとした。本稿は、この理論値と模型実験の結果の比較検討を報告するものである。

Abstract

The slope displacement of the failure section depends on the effect an seismic-wave acting on the slope. In this paper, an upperbound technique of the limit analysis is used to find the critical acceleration of a slope. The slope structure is discussed upon the assumptions that a logarithmic spiral rupture starts at an edge of the loaded area, a sliding part of soil behaves as a rigid body and inertia force acts its center of gravity.

Obtained numerical results are compared with those by model experimental tests.

1. ま え が き

地震多発国である、我が国では地震による土塊の滑動や斜面のすべり破壊による震害がしばしば発生している。その為に斜面構造の地震時安定問題は耐震工学上の重要な課題となっている。

本論文では、破壊すべり面を対数螺旋線であると仮定することにより安全率を最小とするようなすべり量を求めようとするもの¹⁾⁵⁾で、従来の微小要素の釣り合い方程式や土の構成方程式を用いること⁶⁾⁷⁾なく、解析対称の斜面構造のすべり破壊部分における土塊すべり仕事率と粘着抵抗である内部逸散エネルギーが等しいとおく釣り合い式を最適化を行なう目的関数として定める¹⁾⁸⁾。この式の斜面が耐え得る限界地震加速度係数 (K_c) を非線形最適化手法により上界値の最小化することにより解として求める。尚、この際すべり土固まりは完全剛塑性体でモール・クーロンの破壊規準に従い、塑性のひずみ増分は主軸方向に一致するものとし、塑性媒体の幾可学的変形は無視するものとする。次にこの K_c を越える加速度分を積分し、すべり変位角を求め、土塊の重心までの距離を計算し、乗じることによって、そのすべり移動量を知る。一方、一度、土塊はすべる毎にその限界加速度は小さくなり、すべり抵抗は減じられて行くと考えられるが、その K_c の変化を知ることにより、地動1波分のすべり量の累積としてすべり量は算定される。今回は、以上の理論値をその模型実験のいくつかの結果との比較検討を行ったものを報告する。

* 教授 環境都市工学科

3. 模型実験概要

図-2及び写真-1に示すようなモデル斜面と実験装置により模型実験を行なった。供試体(2.5mmふるいを通すシルト混じりの赤土)の物性を知る為に予備実験として、一面剪断試験と比重試験を行い、粘着力 $c=0.22\text{kg}/\text{cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi=37.5^\circ$ 、単位体積重量 $\gamma=1.26\text{g}/\text{cm}^3$ を得た。入力波形はランダム波とし、その応答波形を記録すると同時にビデオ撮影し、その再生画面を静止画像処理機(写真2)を用いて $\frac{1}{30}$ 秒刻みのコマ送り状態にし、斜面破壊の部分をピックアップし、破壊過程の追跡と破壊形式の明示を行なった(写真-2)。又、応答記録と画面から、すべり開始時刻と限界地震加速度係数(K_c)の特定を行ない、すべり経過時間と、画面と模型の縮尺を考慮して、累積すべり変位とすべり速度を求めている。写真-2は模型斜面の破壊過程をビデオ再生画より、静止画像処理装置を用いて示した連続写真による破壊例を示す。

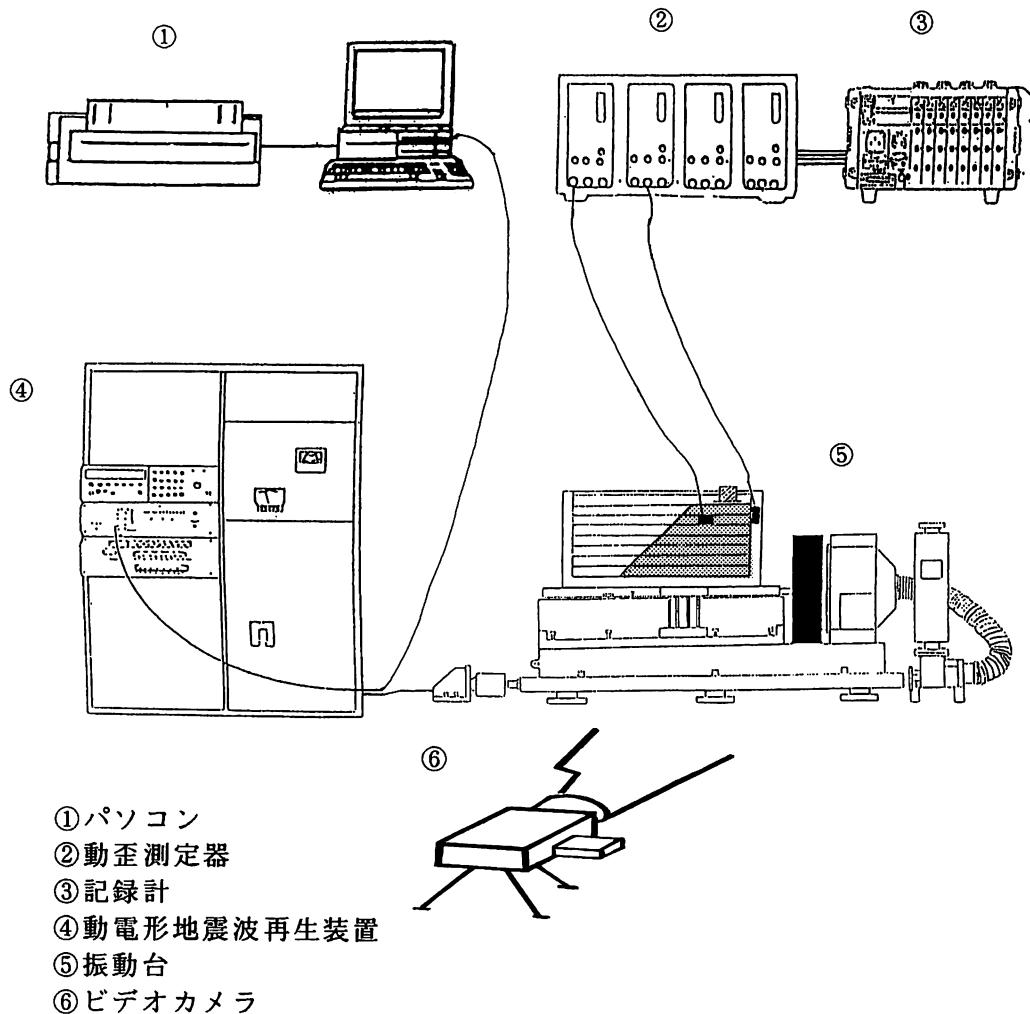
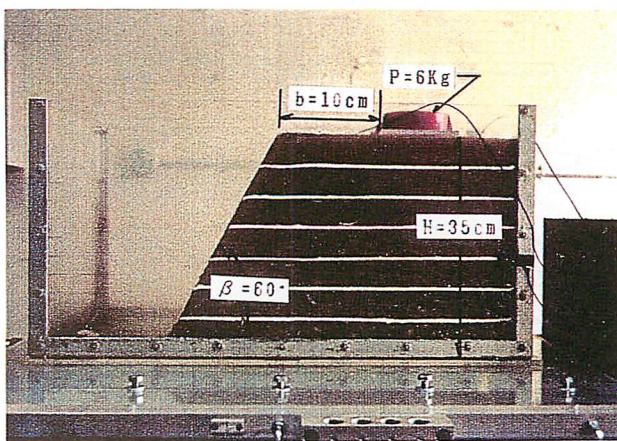
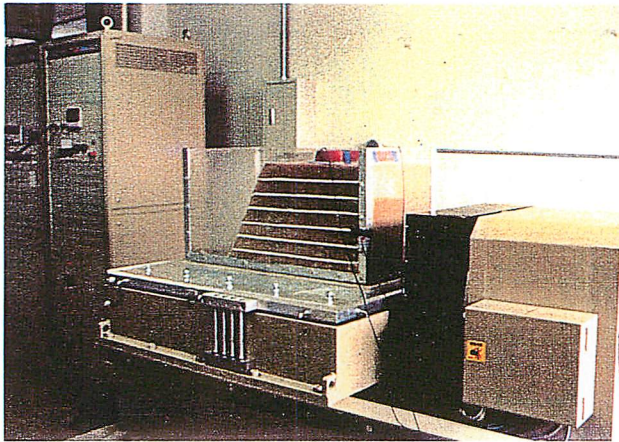


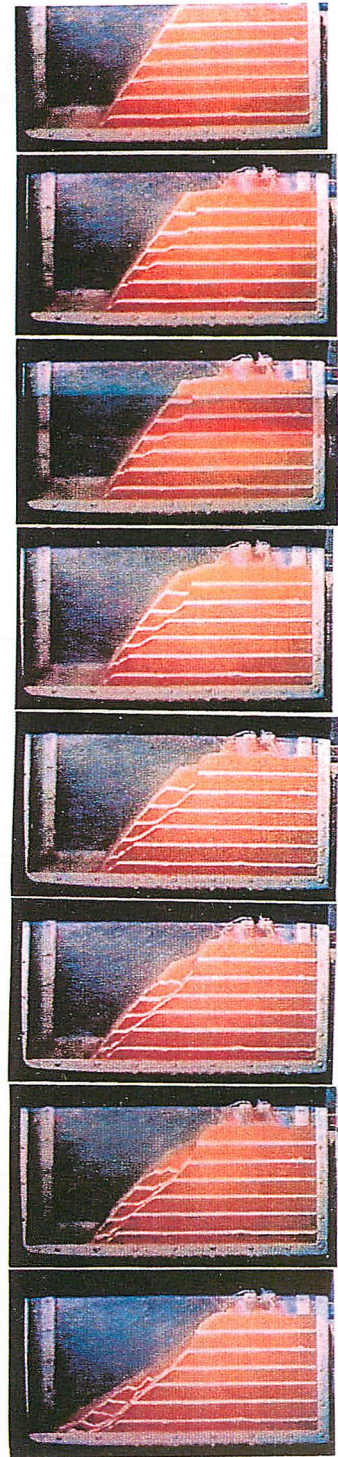
図-2 実験概要

4. 理論と実験の比較及び考察

実験結果とその諸元を用いて行った理論値を図と表に対比して以下に示す。又、実験装置と斜面モデルおよび実験結果の一例を写真－1と写真－2に示す。



写真－1 実験装置および斜面モデル



写真－2 ビデオ再生画面の静止画像
処理機による斜面破壊過程例

表－１ 実験結果

H=35.0cm B=10.0cm $\beta=60^\circ$
 $\phi=37^\circ49'42''$ C=0.22kg/cm² P=12kg

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 _c i	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	2.20sec. 後	0.419G	0.0	13.1	15.0	9.4	0.0	65.6	75.0	46.9
3	2.56sec. 後	0.419G	0.0	22.5	22.5	15.0	0.0	281.3	225.0	168.8
4	3.08sec. 後	0.419G	11.3	0.0	0.0	3.8	67.5	0.0	0.0	22.5
5	3.76sec. 後	0.419G	20.6	0.0	0.0	6.9	23.4	0.0	0.0	7.8
6	4.40sec. 後	0.419G	15.0	18.8	0.0	11.3	37.5	46.9	0.0	28.1
7	4.60sec. 後	0.419G	18.8	20.6	—	13.1	112.5	56.3	0.0	56.3

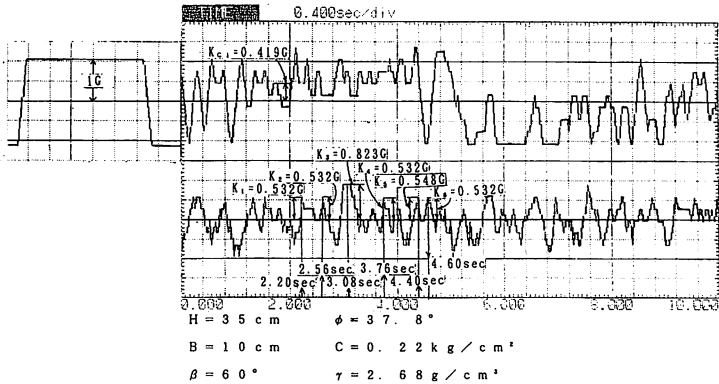
平均累積変位 19.7mm

表－２ 論理値

H=35.0cm B=10.0cm β=60°
φ=37°49'42" C=0.22kg/cm² P=12kg

番号	時間経過	K _c i	入力波	変位 (cm)
1	破壊直前	—	—	—
2	2.20sec. 後	0.419G	0.532G	0.0899
3	2.56sec. 後	0.419G	0.532G	0.1217
4	3.08sec. 後	0.419G	0.823G	0.6299
5	3.76sec. 後	0.419G	0.532G	0.2626
6	4.40sec. 後	0.419G	0.548G	0.4104
7	4.60sec. 後	0.419G	0.532G	0.3930

累積変位 1.9075cm



図－３ 入力波形と応答波形

表－３ 実験結果

H = 35.0cm B = 10.0cm $\beta = 60^\circ$
 $\phi = 37^\circ 49' 42''$ C = 0.22kg/cm² P = 12kg

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 _c i	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

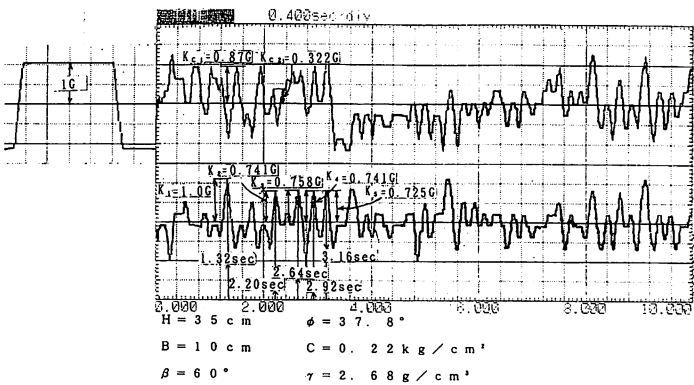
平均累積変位 37.5mm

表－４ 論理値

H=35.0cm B=10.0cm β=60°
φ=37°49'42" C=0.22kg/cm² P=12kg

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



図－４ 入力波形と応答波形

表－5 実験結果

H=35.0cm B=10.0cm β=45°
φ=37°49'42" C=0.22kg/cm² P=12kg

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 _c i	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	4.48sec. 後	0.29G	86.3	43.1	43.1	57.5	30.3	6.5	6.5	14.4		
3	4.88sec. 後	0.00G	86.3	71.3	67.5	75.0	0.0	44.4	38.5	27.6		
4	5.32sec. 後	0.00G	93.8	73.1	69.4	78.8	13.2	3.3	3.3	6.6		
5	5.52sec. 後	0.00G	108.8	78.8	75.0	87.5	23.7	8.9	8.9	13.8		
6	5.68sec. 後	0.00G	138.8	82.5	76.9	99.4	47.4	5.9	3.0	18.8		
7	5.92sec. 後	0.00G	161.3	97.5	82.5	113.8	11.6	7.8	2.9	7.4		

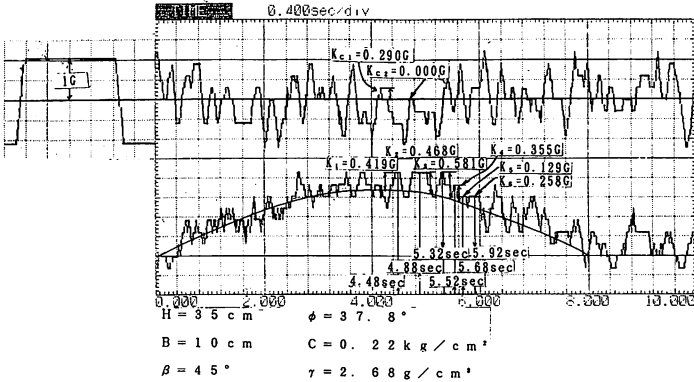
平均累積変位 113.8mm

表－6 論理値

H=35.0cm B=10.0cm β=45°
φ=37°49'42" C=0.22kg/cm² P=12kg

番号	時間経過	K _c i	入力波	変位(cm)
1	破壊直前	—	—	—
2	4.48sec. 後	0.290G	0.419G	0.4896
3	4.88sec. 後	0.000G	0.468G	2.1070
4	5.32sec. 後	0.000G	0.581G	3.1090
5	5.52sec. 後	0.000G	0.355G	2.0450
6	5.68sec. 後	0.000G	0.129G	0.7869
7	5.92sec. 後	0.000G	0.258G	1.7100

累積変位 10.2475cm



図－5 入力波形と応答波形

表－7 実験結果

H=32.5cm B=10.0cm β=60°
φ=37°49'42" C=0.22kg/cm² P=12kg

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 _c i	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	1.88sec. 後	0.343G	0.0	26.3	26.3	17.5	0.0	20.2	20.2	13.5		
3	2.08sec. 後	0.343G	15.0	52.6	41.3	36.3	225.0	395.3	225.0	281.8		
4	2.16sec. 後	0.343G	41.3	0.0	0.0	13.8	13.8	41.4	0.0	13.8		
5	2.24sec. 後	0.343G	22.5	—	—	22.5	45.0	0.0	0.0	15.0		

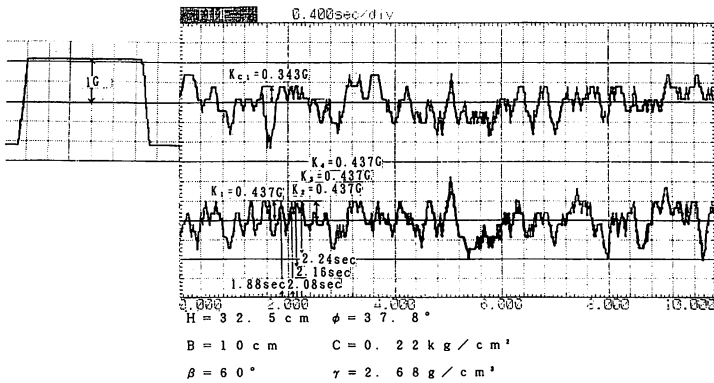
平均累積変位 22.5mm

表－8 論理値

H=32.5cm B=10.0cm β=60°
φ=37°49'42" C=0.22kg/cm² P=12kg

番号	時間経過	K _c i	入力波	変位(cm)
1	破壊直前	—	—	—
2	1.88sec. 後	0.343G	0.437G	0.0546
3	2.08sec. 後	0.343G	0.437G	0.6685
4	2.16sec. 後	0.343G	0.437G	0.7209
5	2.24sec. 後	0.343G	0.437G	0.7753

累積変位 2.2193cm



図－6 入力波形と応答波形

表－9 実験結果

H=30.0cm B=10.0cm β=45°
φ=37°49'42" C=0.22kg/cm² P=12kg

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 _c i	Line 1	Line 2	Line 3	平均値	Line 1	Line 2	Line 3
1	破壊直前	—	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.64sec.後	0.839G	26.3	30.0	45.0	33.8	3.5	12.5	25.0
3	1.12sec.後	0.839G	37.5	45.0	60.0	47.5	18.8	25.0	22.9
4	2.16sec.後	0.274G	48.8	60.0	78.8	62.5	16.1	26.8	21.4
5	2.64sec.後	0.274G	67.5	97.5	131.3	98.8	23.4	65.6	45.3
6	3.64sec.後	0.274G	108.8	114.4	142.5	121.9	68.8	18.8	38.6
7	4.44sec.後	0.274G	112.5	142.5	168.8	141.3	5.4	37.5	27.7

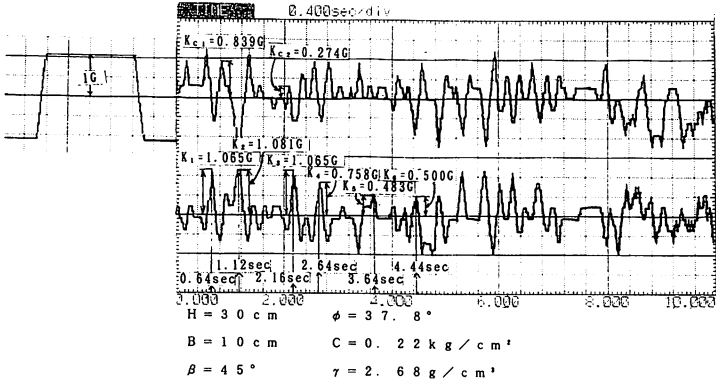
平均累積変位 141.25mm

表－10 論理値

H=30.0cm B=10.0cm β=45°
φ=37°49'42" C=0.22kg/cm² P=12kg

番号	時間経過	K _c i	入力波	変位(cm)
1	破壊直前	—	—	—
2	0.64sec.後	0.839G	1.065G	0.0175
3	1.12sec.後	0.839G	1.081G	0.0574
4	2.16sec.後	0.274G	1.065G	0.6982
5	2.64sec.後	0.274G	0.758G	0.6382
6	3.64sec.後	0.274G	0.483G	0.5239
7	4.44sec.後	0.274G	0.500G	0.8428

累積変位 2.7780cm



図－7 入力波形と応答波形

表－11 実験結果

H=27.5cm B=10.0cm β=45°
φ=37°49'42" C=0.22kg/cm² P=12kg

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 _c i	Line 1	Line 2	Line 3	平均値	Line 1	Line 2	Line 3
1	破壊直前	—	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.72sec.後	0.661G	33.8	30.0	31.9	31.9	9.4	18.8	16.7
3	1.79sec.後	0.355G	63.8	37.5	41.3	47.5	29.0	7.3	15.1
4	1.96sec.後	0.355G	67.5	45.0	48.8	53.8	4.7	9.4	7.8
5	2.40sec.後	0.339G	75.0	56.3	61.9	64.4	10.2	15.3	14.5
6	2.48sec.後	0.339G	78.8	61.9	61.9	67.5	4.3	6.5	3.6
7	3.68sec.後	0.339G	86.3	75.0	67.5	76.3	8.3	14.6	9.7
8	4.20sec.後	0.339G	93.8	120.0	93.8	102.5	3.3	19.6	11.4

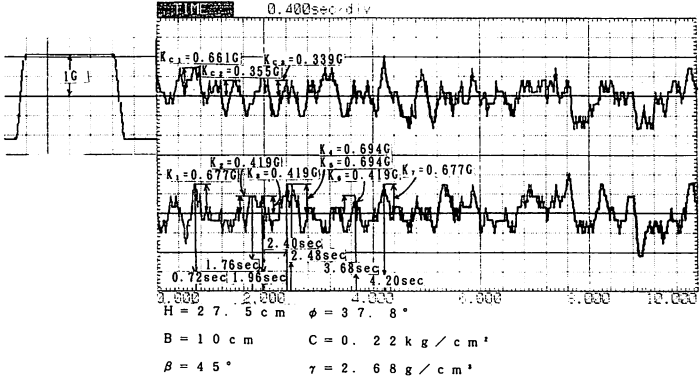
平均累積変位 102.5mm

表－12 論理値

H=27.5cm B=10.0cm β=45°
φ=37°49'42" C=0.22kg/cm² P=12kg

番号	時間経過	K _c i	入力波	変位(cm)
1	破壊直前	—	—	—
2	0.72sec.後	0.661G	0.677G	0.0016
3	1.76sec.後	0.335G	0.419G	0.0375
4	1.96sec.後	0.335G	0.419G	0.0465
5	2.40sec.後	0.339G	0.694G	0.3870
6	2.48sec.後	0.339G	0.694G	0.4132
7	3.68sec.後	0.339G	0.419G	0.2050
8	4.20sec.後	0.339G	0.677G	1.1280

累積変位 2.2188cm



図－8 入力波形と応答波形

表-13 実験結果

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

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 _c i		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	0.67sec.後	—		26.3	11.3	15.0	17.5	65.6	21.8	37.5	43.7
3	1.13sec.後	0.92G		30.0	16.9	18.8	21.9	9.4	3.8	9.4	7.5
4	2.50sec.後	0.60G		45.0	22.5	22.5	30.0	64.3	11.3	16.1	30.6
5	2.88sec.後	—		45.0	26.3	22.5	31.3	0.0	22.5	0.0	7.5
6	3.36sec.後	0.90G		52.6	31.9	37.5	40.7	22.8	16.9	45.0	28.2
7	3.80sec.後	0.90G		60.6	33.8	37.5	43.8	44.4	11.3	0.0	18.6
8	4.23sec.後	0.90G		63.8	43.1	45.0	50.6	5.9	14.5	11.8	10.7
9	4.72sec.後	0.90G		71.3	60.0	48.8	60.0	3.8	8.9	1.9	4.9

平均累積変位 60.0mm

表-14 論理値

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

番号	時間経過	K _c i	入力波	変位(cm)
1	破壊直前	—	—	—
2	0.67sec.後	0.92G	1.30G	0.045
3	1.13sec.後	0.60G	0.92G	0.108
4	2.50sec.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

累積変位 5.202cm

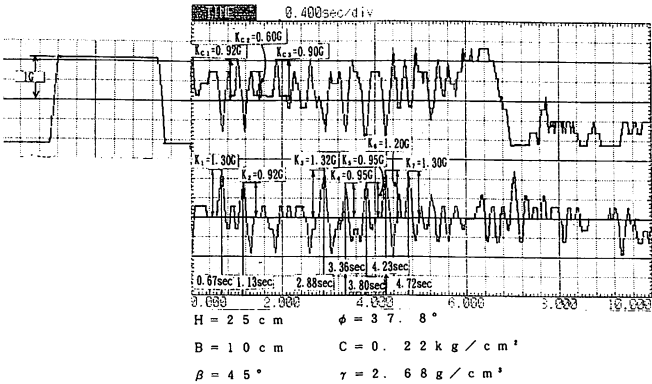


図-9 入力波形と応答波形

表-15 実験結果

H=25.0cm B=10.0cm $\beta=60^\circ$
 $\phi=37'49'42''$ C=0.22kg/cm² P=12kg

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 _c i		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	1.96sec.後	0.613G		11.3	11.3	0.0	7.5	2.6	2.6	0.0	1.7
3	2.32sec.後	0.613G		30.0	22.5	0.0	17.5	562.5	337.5	0.0	300.0
4	2.56sec.後	0.613G		13.1	18.8	0.0	10.6	19.7	28.1	0.0	15.9
5	3.76sec.後	0.097G		41.3	0.0	0.0	13.7	281.3	0.0	0.0	93.8
6	3.94sec.後	0.355G		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	4.04sec.後	0.355G		13.1	0.0	0.0	4.4	6.1	0.0	0.0	2.0
8	4.16sec.後	0.355G		18.8	0.0	0.0	6.3	7.7	0.0	0.0	2.6
9	4.56sec.後	0.355G		37.5	16.9	0.0	18.1	62.5	56.3	0.0	39.6
10	4.76sec.後	0.355G		50.6	18.8	0.0	23.1	131.3	18.8	0.0	50.0
11	4.88sec.後	0.355G		71.3	37.5	0.0	36.3	103.1	93.8	0.0	65.6

平均累積変位 36.3mm

表-16 論理値

H=25.0cm B=10.0cm $\beta=60^\circ$
 $\phi=37'49'42''$ C=0.22kg/cm² P=12kg

番号	時間経過	K _c i	入力波	変位(cm)
1	破壊直前	—	—	—
2	1.96sec.後	0.613G	0.677G	0.0405
3	2.32sec.後	0.613G	0.694G	0.0717
4	2.56sec.後	0.613G	0.694G	0.0873
5	3.76sec.後	0.097G	0.419G	0.7497
6	3.94sec.後	0.355G	0.419G	0.1635
7	4.04sec.後	0.355G	0.419G	0.1719
8	4.16sec.後	0.355G	0.419G	0.1822
9	4.56sec.後	0.355G	0.710G	1.2150
10	4.76sec.後	0.355G	0.419G	0.2386
11	4.88sec.後	0.355G	0.468G	0.4428

累積変位 3.632cm

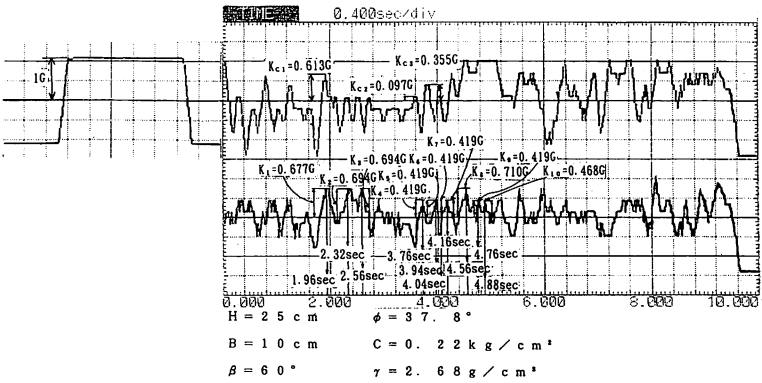


図-10 入力波形と応答波形

模型実験においては、斜面高さ (H) を35cmから2.5cmづつ低くして行き25cmまで5種類と斜面角 (β) を60°, 50°及び45°と変化させた15種のデータを得た (余裕幅 (b) は10cm)。各々の実験結果は図-3～13と表-1～15 (奇数番) に示す。

又、この模型実験の諸元を用いて数値解析を行った結果も表-2～16 (偶数番) に示している。多くは、妥当な一致を見ているが、 $H=35\text{cm}$, $\beta=45^\circ$ (図-5, 表-5と表-6) の場合と $H=27.5\text{cm}$, $\beta=45^\circ$ (図-8, 表-11と表-12) の場合は理論と大きくずれた実験結果となっている。特に $H=35\text{cm}$, $\beta=45^\circ$ の実験値の応答波は波形が大きくゆがみ、入力波とビデオ再生画面より図のように修正して加速度係数 $K_1 \sim K_6$ を決定した。理論と実験が大きく異なった理由としては、ビデオ再生画面から斜面破壊時を特定し、記録紙から (図-11, 12) その時刻における次見解地震加速度係数は求めているが、図-13に示すような周期関係波 (正弦波) 入力の際の応答波のように明瞭に限界加速度が特定できず、その設定時刻にかなりずれが生じた為に、数値計算結果との大きな誤差が生じたものと考えられる。また、同条件で実験を行なった場合でも図-3 (表-1と表-2) と図-4 (表-3と表-4) の場合のように差異はみられたが大むね妥当な結果を得た。

一方、理論と実験が妥当な一致を見た例においては、表-13と表-14 (図-9) の場合、限界地震加速度係数 K_{c1} は0.92Gとなり、同様に $K_{c2}=0.60\text{G}$, $K_{c3}=0.90\text{G}$ と3段階の値をビデオ再生画面と波形記録により得た。これらの K_c により7個の波が、斜面破壊に寄与すると考えられ、すべり変位を式(2)(3)より1波づつ求め、理論の累積変位を求める。一方、再生画面からは、各時間におけるすべり移動量を知ることか出来、破壊終了時のすべりをもってすべり変位としている。この結果により、理論値の累積変位を約5.2cmと得た。ビデオ再生画面から求めたすべり時間と移動によるすべり変位とすべり速度を求めたが、すべり変位は6.0cmを得た。理論値と実験値はほぼ一致していると言える。又、表-15と表-16 (図-10) の場合は、 $K_{c4}=0.613\text{G}$, $K_{c2}=0.097\text{G}$, $K_{c3}=0.355\text{G}$ と K_{c2} が大きく差異のあることになったが、ビデオ再生画面より10波の応答波についてすべり量の理論値を計算することとなったが理論値3.363cm, 実験値3.63cm

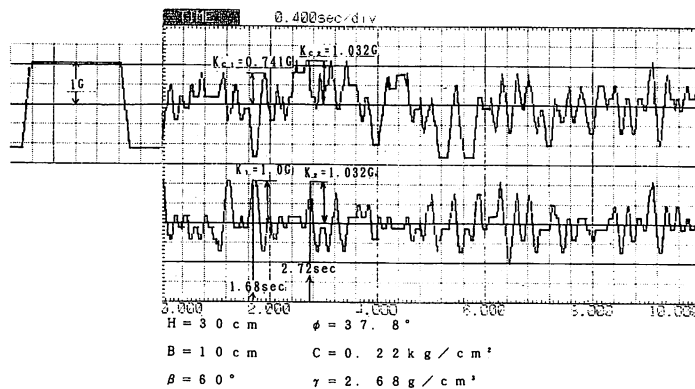


図-11 限界地震加速度係数 K_c の特定例

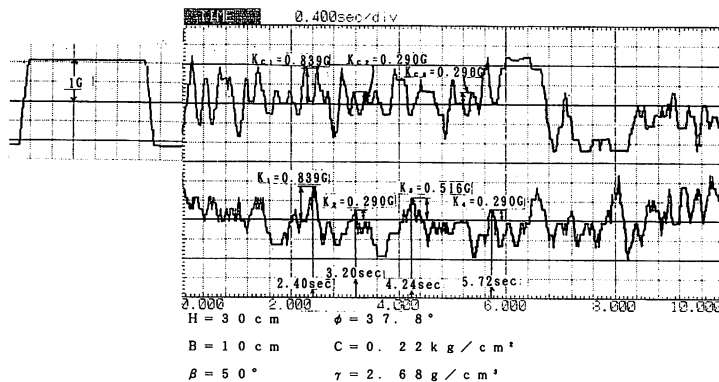


図-12 限界地震加速度係数 K_c の特定例

とこれもよい一致を見ており、解析理論の妥当性が示されたと考え得る。斜面角 β が 45° に比して累積すべり量は小さくなっており、ゆるやかな斜面の方がすべり変位は大きいことを示している。

さらに、この点について、 β が 45° 、 50° および 60° と3種類のデータ(斜面高差 $H=35\text{cm}$)を表-17に示す。この結果からも斜面が緩やかである程、すべり変位が大きく、すべり速度は小さくなる。地震時斜面破壊は急斜面である程、すべり変位は小さくて済むが、すべり速度は速く一気に破壊して行くことを示していると考えられる。しかし、前述の図-3と図-4の場合のように、同じ斜面の同条件下での破壊実験例のように結果にかなり差異が生じることもある。入力波がランダム波である点、すべり破壊の開始の同定と定義の点、第2次、第3次のすべり破壊の判定が、かなり微妙で難しく、今後のさらなる多くの実験と考察が必要と考えられる。

表-17 斜面角(β)の変化によるすべり変位とすべり速度

斜面角	変位 (cm)	すべり速度 (cm/sec)
$\beta=45^\circ$	113.750	7.425
$\beta=50^\circ$	53.125	19.220
$\beta=60^\circ$	13.125	56.250

謝 辞

本論文作成にあたっては、丹波郁恵氏(北見工業大学)、山崎郁子氏(北海道開発局)、桂幸生氏(エイエスシビルコンサルタント)、林保慎也氏(フロンティア技研)および藤田智寛氏(泰進建設)の多くの協力をいただいた。ここに記して深く謝意を表するものである。

本研究は、平成7年度、文部省科学研究費(一般-c)課題番号07650582の交付を受けて行ったものであることを附記する。

参 考 文 献

1) 澤田・能町, “いくつかの不規則波入力による斜面破壊の模型実験について”, 土質工学会北海道支部技術報告集第35号, 1995, PP.180-187

2) 能町・澤田・松岡, “擬静的解析による斜面上基礎の地震時支持力”, 構造工学論文集, Vol.31A, 1985, PP.503-508。

3) 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, 1995, PP.137-160。

4) 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。

5) 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。

6) Seed, H.B., Lee, K.L. and Idriss, I.M., “Analysis of the Sheffield Dam Failure”, Journal of SMFD, ASCE, Vol.95, No. SM6, November 1969, PP.1453-1490。

7) 最上武雄編, 土質力学, 技報堂, 1982, PP.497-503, PP.659-720, PP.795-831, PP.850-870。

8) 澤田・能町・W.F.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, 1985, PP.113-118。

(平成7年11月30日受理)