

斜面崩壊に関する実験的研究 (序報)

奥 西 一 夫

AN EXPERIMENTAL STUDY ON SLOPE FAILURE

Preliminary Report

By Kazuo OKUNISHI

Synopsis

An experimental equipment was constructed in order to investigate the conditions of slope failure (including landslide) to take place. The inclination of the soil tank (5m long, 0.5m wide, and 0.5m deep) is variable from 0° up to 35° . Simulated rainfall and groundwater flow can be applied in variable quantity. Preliminary experiments were carried out to check the capability of the equipment, using weathered granite as soil sample. Hydrological measurements were successful, but the earth pressure was not measured satisfactorily.

1. は し が き

斜面崩壊に関する力学的な研究は比較的古くから始まり^{1,2)}, 引き続き活発に研究がおこなわれているが^{3,4)}, その方法はいずれも Rankine の土圧論を唯一のよりどころとしている。しかしながら, 斜面は不静的構造であるから, その土圧は一義的に決まらないので, 何かもう一つの関係式を加えなければ理論は完成されない。そのような関係式は, 本来は実際の斜面崩壊の観察からでてくるべきである。しかし, それらの現象は突発的に発生するものであるから, 多くの場合, 観察がおこなわれるのは現象が終ってからである。そのため, 山崩れ, 崖崩れ, その他斜面崩壊の実地調査の集積は着々と進んでいるにもかかわらず, universal な関係式はまだでていないようである。理論家は, それぞれ違った仮定にもとづいていろいろな理論式を提出するが, 仮定が事実合っているかどうかはわからないので, どの理論が正しいのかわからないのが現状である。

このような不確定さを除去するためには, 人工的に崩壊を起してみても, そこで種々の測定をおこなって見ることが有力な手段であると思われる。例えば Rheological な土より成る斜面の場合は変位量測定により^{5,6)} また他の場合には土圧測定を行なうことによって, 応力状態を unique に決定できよう。従来の実験的研究としては, 田中の風化花崗岩地帯の山崩れに関する一連の研究⁷⁾ などがあるが, 本研究は, 以上のような理由から, 特定の対象を決めないで, できるだけ種々な条件のもとで実験をし, 一般的な関係を見いだそうという試みである。

最終的には non-dimensional な関係にまとめたいので, そのためにはいろいろな dimension で実験することが望ましいわけであるが, さし当っては地すべり部門において製作した, 斜面崩壊実験装置を用いて実験することにした (近く野外に比較的大規模な斜面災害実験設備も作られる予定である)。今回は実験装置の性能をチェックするとともに, 今後の実験の見通しを得るために, 一連の予備的な実験をおこなった。

2. 実験方法

Figs. 1, 2 と **Photos. 1, 2** に装置の概略図と写真を掲げる。この装置は特に山崩れに対する、陸水学的なファクターの影響を調べることを目的として設計したものである。丈夫な I 形鋼に乗せられた、長さ 5 m、巾 50 cm、深さ 50 cm の鋼製土槽の一端は、hinge で固定され、他の一端は斜立ネジ柱によるエレベーターに乗っていて、その傾斜を 0° から 35° まで変えることができる。土槽の両端には取りはずし可能な整流タンク（土に接する面には多数の穴があいている）があり、それぞれヘッドタンクとつながれて、任意の水頭をもった地下水を供給することができる。土槽の側壁は摩擦を最少限にするため、滑らかな面より成っているが、底は試料土自体の摩擦力が効くように、1 m ごとに高さ 3 cm の刃型を入れた。装置の上には散水器を備えて、任意の特性の降雨を与えることができる。

予備実験の試料としては、いろいろな実験を短時間ですませるために、透水係数が大きく、またその崩壊機構の概略がわかっているものが望ましい。そういった理由から神戸市裏山の風化花崗岩（真砂土）を使用した。京都大学工業教員養成所土木研究室で測定していただいた土質試験の結果は **Table 1** の通りである。

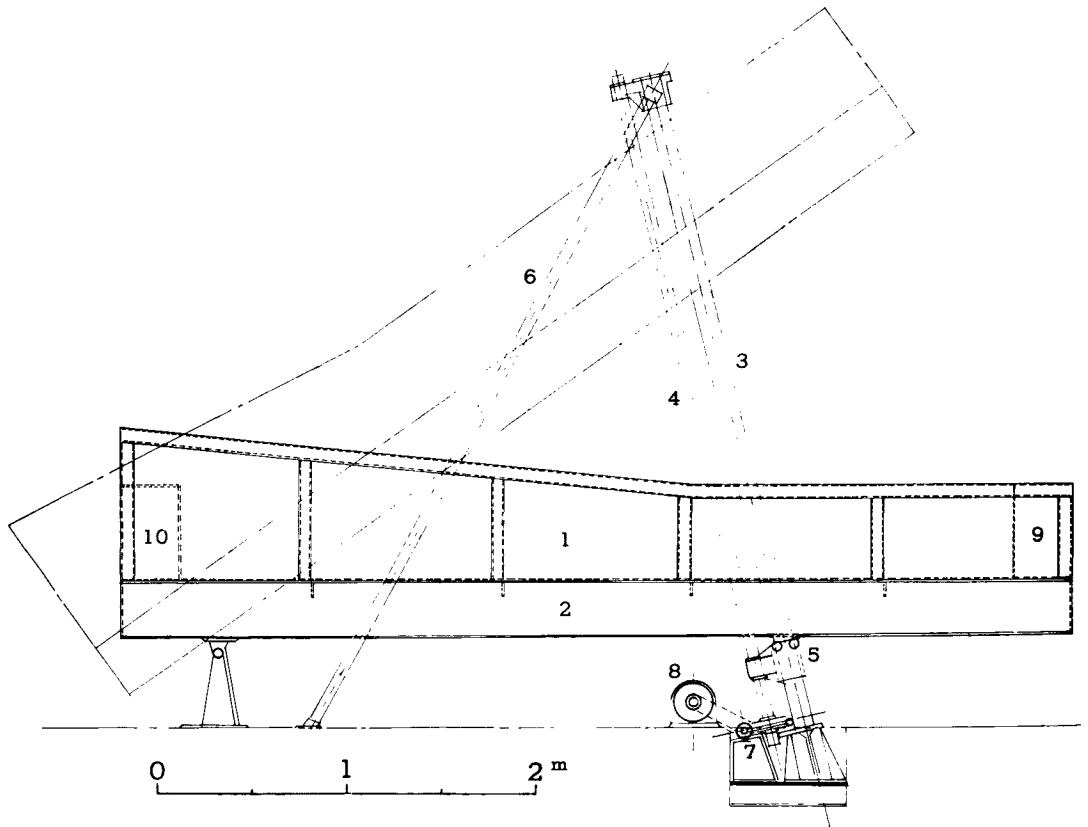


Fig. 1. A side view of the equipment. 1—soil tank, 2—I-beam, 3—main pole, 4—spiraled pole, 5—elevator, 6—supporter pole, 7—gear wheel assembly, 8—motor, (3 HP) 9—upper water tank, 10—lower water tank.

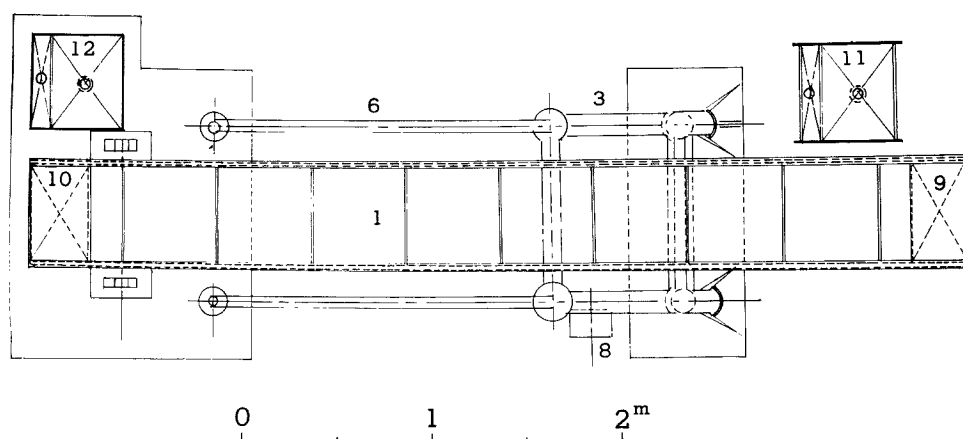


Fig. 2. Plan of the equipment. 11—upper head tank to be connected with tank 9, 12—lower head tank to be connected with tank 10.

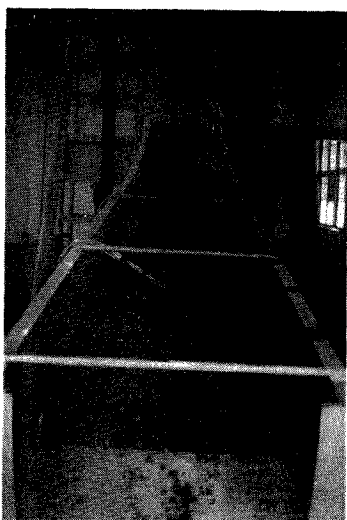


Photo. 1. A view of the soil tank from downstream side at experiment 4.



Photo. 2. A vicinity of control valves of rain simulator.

Table 1. Soil-mechanical property of the sample.

specific weight	2.641
porosity (β_0)	0.317
specific yield (β)	0.202
particle size (d_{50})	3.4 mm

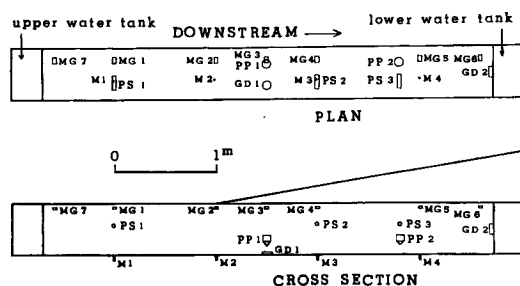


Fig. 3. arrangement of measuring heads. MG—gypsum block moisture meters, PS—piezometer tips (porous pipe), PP—pore pressure meters (strain gauge type), GD—earth pressure meters (strain gauge type), M—plugs leading to manometers.

測定ヘッドの配置を Fig. 3 に示す。これらのすべてをこの実験専用を用意したわけではないので、大きすぎたり、測定範囲が広すぎたりして、必ずしも最適のものではないが、とにかくどの程度まで働くかをチェックする意味で、できるだけ多数を使用してみた。

実験期間は昭和39年1月から4月までである。

3. 実験結果

各々の実験について、与えた条件と結果は次の通りである。

実験番号	目的	土槽傾斜	平均降雨 (mm/H)	上流端 水深 (cm)	下流端 水深 (cm)	その他の条件	結果
1	透水係数, 毛管力	0	0	50	固定せず	最初は乾燥状態	front の進行状況を追跡できた
2	透水係数, 測定器のチェック	19°33'	0	30	20		土圧計の動作不良, マノメーターは良好
3	模擬降雨のチェック, 水収支の解明	6°46'	79	0	20		降雨による地下水充足の状況を調べた
4	上流端パイピング	13°19'	0	100 (水頭)	20	上流端に過大な地下水頭を与えた。 (地表より 50 cm)	はげしい表面浸食
5	下流端パイピング	19°33'	0	25	—	下流端を閉じて付近の地下水位を上げる	漏水のため, 地下水位が十分上がらなかった
6	降雨による崩壊	13°19'	78	27	20		崩壊は起らず
7	傾斜の増大による崩壊	13°19' ~ 30°	80	27	20	40分の間に傾斜を増加	"

実験3および6について、下流端からの流出量 Q_0 、地下水位（厳密には土槽の底における水頭）、土圧、および間隙水圧の測定結果を Fig. 4 に示す。他の計測器にはほとんど変化が現われなかった。実験3における地下水面の形の変化を Fig. 5 に示す。

4. 水収支に関する考察

実験装置に即して Fig. 6 のように座標系と物理量を選ぶと、流れが x 方向だけであると仮定した場合の連続の条件は次のようになる。

$$\beta \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = P \dots \dots \dots (1)$$

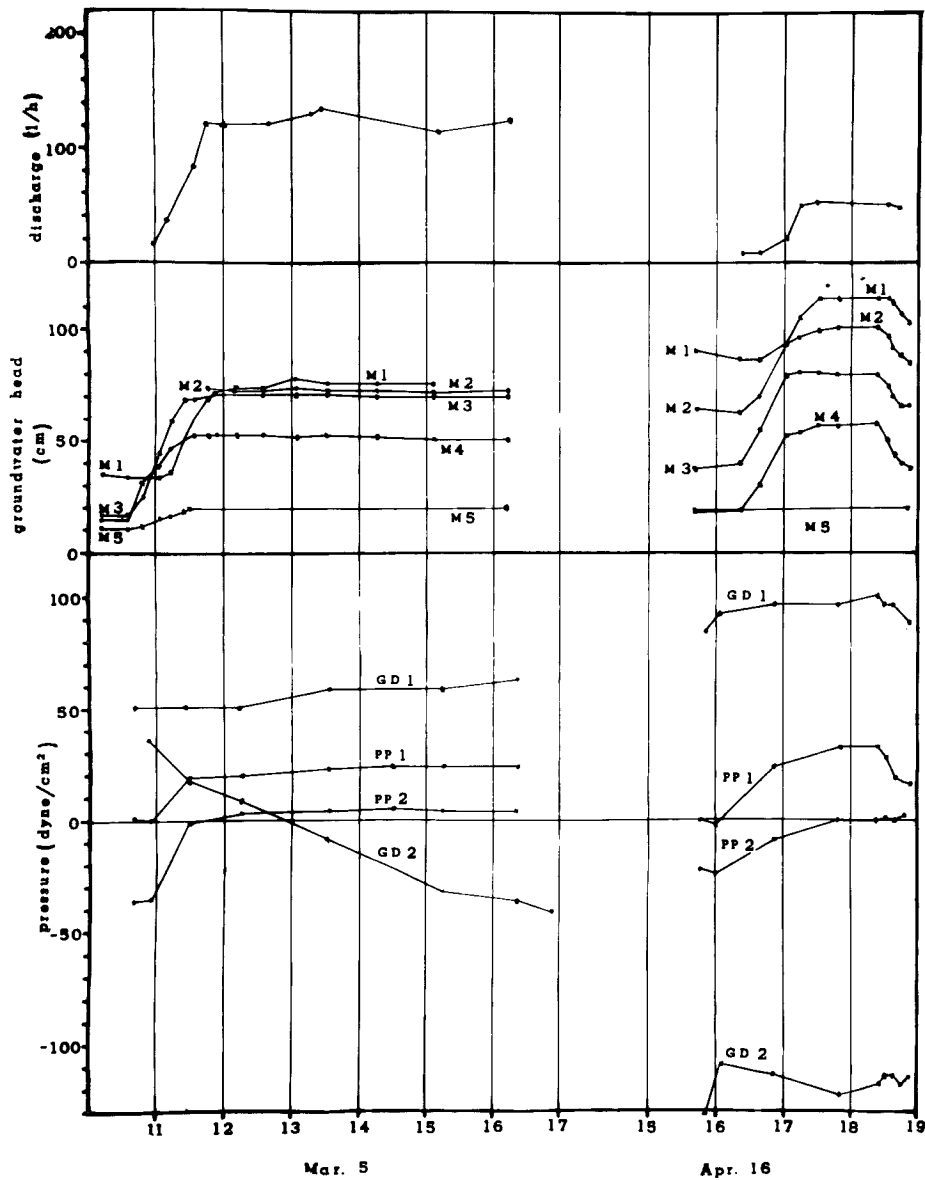


Fig. 4. Time changes of discharge from lower tank, ground water head at each manometer plugs, pore pressure, and earth pressure through experiment 3 (Mar. 5) and 6 (Apr. 16).

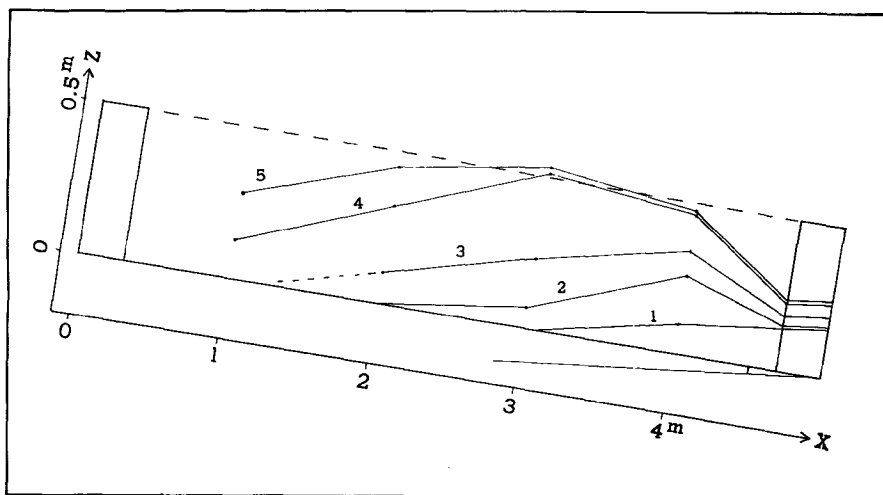


Fig. 5. Change of the profile of water table through experiment 3. 1—10h37m, 2—10h50m, 3—11h05m, 4—11h27m, 5—11h35m.

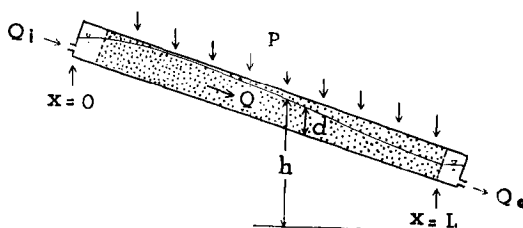


Fig. 6. Mathematical model. Q_i —inflow rate from the upper head tank, Q_o —outflow rate to the lower head tank, Q —groundwater flow in the soil, P —rate of groundwater replenishment from rainfall, h —groundwater head, d —depth of groundwater flow.

Darcy の法則は,

$$Q = -kd \frac{\partial h}{\partial x} \dots \dots \dots (2)$$

ここで β は有効空隙率 (ヒステリシスを含んでいるので const. ではない。実際には 0, および Table 1 の β と β_0 の値を適当に使いわけた), P は地下水面に補給される降雨, k は透水係数。
(1), (2)の両式から

$$\beta \frac{\partial h}{\partial t} - k \frac{\partial}{\partial x} \left(d \frac{\partial h}{\partial x} \right) = P \dots \dots \dots (3)$$

これを x について積分すると,

$$\int_{x_1}^{x_2} \beta \frac{\partial h}{\partial t} dx - \left(kd \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{x_2} + \left(kd \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{x_1} = \int_{x_1}^{x_2} P dx \dots \dots \dots (4)$$

Table 2. Permeability at each section calculated from equation (4). (cm/sec)

date	$x=200$	$x=300$	$x=400$	$x=470$	mean
Feb. 24					
11:40	0.01163	0.01395	0.01461	0.01557	
12:05	0.01202	0.01181	0.01299	0.01381	
12:35	0.01050	0.01218	0.01215	0.01206	
12:59	0.01141	0.01172	0.01157	0.01139	
13:30	0.01100	0.01294	0.01156	0.01066	
Feb. 25					
10:23	0.01382	0.01405	0.01365	0.01380	
11:02	0.00743	0.01221	0.01290	0.01280	
11:31	0.00688	0.01374	0.01396	0.01253	
12:17	0.00832	0.01625	0.01336	0.01117	
12:36	0.00319	0.01726	0.01115	0.00881	
mean	0.00962	0.01361	0.01279	0.01226	0.01207

$$\int_x^L \beta \frac{\partial h}{\partial t} + k d \frac{\partial h}{\partial x} + Q_0 = \int_x^L P dx \dots \dots \dots (4)'$$

この実験の場合、未知量は k と P であるが、 $P=0$ の場合は k が求まる。(4)' 式から求めた k の値を Table 2 に示す。

また、実験 1 のように土槽が水平で降雨がない時には、 h の基準面を土槽の底にとれば、(3) 式は

$$\beta \frac{\partial h}{\partial t} - k \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \dots \dots \dots (3)'$$

境界条件は実験 1 の場合、 $x=0$ で $h=h_0$, $t=0$, $x>0$ で $h=0$ である。以下 Kochina に従ってこれを解く⁸⁾。

$$\xi = \sqrt{\frac{\beta}{2kh_0}} x, \quad u = \frac{h}{h_0} \dots \dots \dots (5)$$

とおけば (3)' 式は、

$$\frac{d^2 u^2}{d\xi^2} + 2\xi \frac{du}{d\xi} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

または、

$$uu'' + u'^2 + \xi u' = 0 \dots \dots \dots (6)'$$

となる。 ξ が大きい時 (t が小さいか、 x が大きい時) には $u=0$ であるはずだから、 $\xi=c$ で $u=0$ と仮定する。その所で $u' \neq 0$, $u'' \neq \infty$ とすると (6)' 式より、

$$u' = -c \dots \dots \dots (7)$$

同様に (6)' 式を逐次微分すると $\xi=c$ における $d^n u / d\xi^n$ ($n=1, 2, \dots$) が逐次求まる。かくして u の Taylor 展開は、

$$u = -c(\xi - c) - \frac{1}{4}(\xi - c)^2 - \frac{1}{72c}(\xi - c)^3 + \frac{(\xi - c)^4}{576c^2} + \dots \dots \dots (8)$$

$\xi=0$ の時 $u=1$ であるから、

$$c = 1.14277 \dots \dots$$

(8) 式の曲線と実験 1 の結果を比較したのが Fig. 7 である。ここで四角のプロットは Table 2 にしたがって $k=0.012$ とした場合、丸印は $\xi=c$ の付近で理論解と一致するように $k=0.016$ とした場合の実験結果である。

Table 3. Evaluation of each term of equation (4). (cm²/min)

section		experiment 3			experiment 6			
		10h50m	11h15m	11h55m	16h22m	17h02m	17h47m	18h34m
$x_1=100$	1st term	4.82	18.24	3.28	0.14	13.56	0.11	0.00
	2nd term	0.01	-1.52	0.18	1.17	2.00	5.35	5.76
	3rd term	0.00	0.00	-0.14	-1.18	0.00	-3.36	-4.21
$x_2=200$	4th term	4.83	16.72	3.33	0.14	15.56	2.10	1.55
$x_1=200$	1st term	14.55	21.20	1.52	3.57	15.96	0.00	0.00
	2nd term	-0.06	0.18	3.64	1.00	6.99	7.46	6.89
	3rd term	-0.01	1.52	-0.18	-1.17	-2.00	15.35	-5.76
$x_2=300$	4th term	14.48	22.90	4.97	3.40	20.95	2.08	1.13
$x_1=300$	1st term	18.64	16.48	0.32	4.82	14.69	0.15	0.00
	2nd term	1.36	7.34	10.17	0.71	10.71	11.91	9.48
	3rd term	0.06	-0.18	-3.64	-1.00	-6.99	-7.46	-6.89
$x_2=400$	4th term	20.06	23.64	6.85	4.82	18.40	4.61	2.58
$x_1=400$	1st term	7.25	4.92	0.00	1.49	4.77	0.20	0.00
	2nd term	10.02	13.08	40.50	2.60	7.07	17.93	16.90
	3rd term	-1.36	-7.34	-10.17	-0.71	-10.71	-11.91	-9.48
$x_2=470$	4th term	17.91	10.65	30.33	3.38	1.13	6.22	8.42

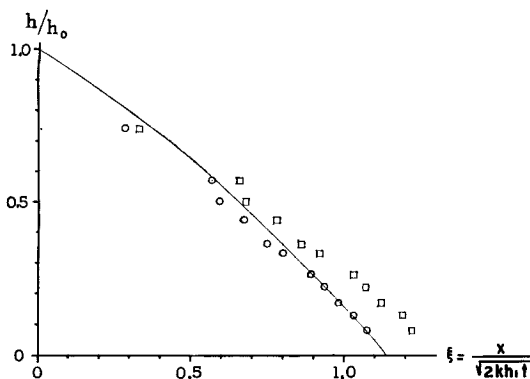


Fig. 7. Examination of permeability by equation (8) after Kochina.
 circle— $k=0.016$
 square— $k=0.012$

(4) 式にもどって、降雨がある場合について、地下水面に供給される雨量 P を計算する。 k の値としては、Fig. 7 からは 0.016 の方がよいように思われるが、同じような条件で得た値の方がよいと思われるので、0.012を用いた。実験3および6の場合について、(4) 式の各項の値を Table 3 に、地下水面での雨量 P と地表面における雨量 P' の比較を Fig. 8 に示す。降雨の初期には、雨水がまだ地下水面に到達しないので P は0である。次の段階では P の方が P' よりも大きくなるが、Table 3 を見ると、この時 $\partial h / \partial t$ が大きくなっている、これは鉛直方向の流れの他に地下水面の上昇によって、地下水面直上の飽和に近い土中水分が地下水に併合されるためであることがわかる。別の見方をすれば、地下水面の直上で有効空隙率が Table 1 の値よりも小さくなっているためである。その次の段階では地下水面が地表に達

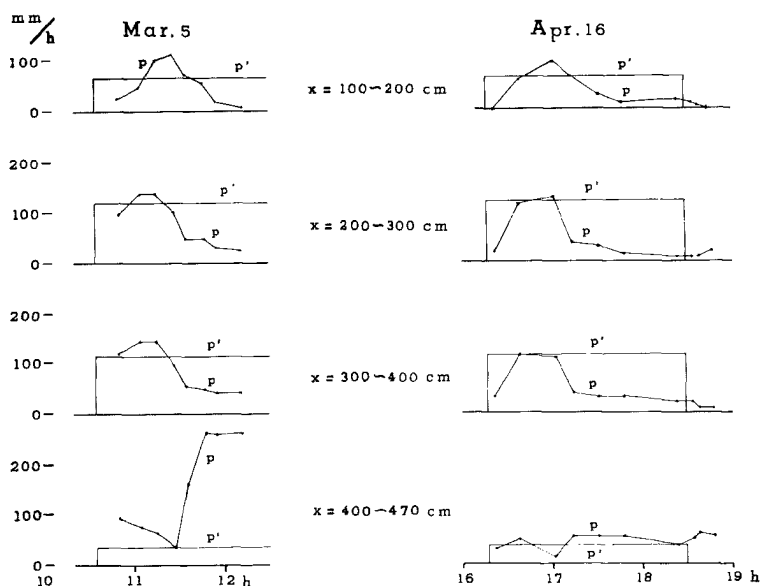


Fig. 8. Time change of P calculated from equation (4) and P' calculated from the flow rate to the rain simulator at each section.

して表面流出が生じ、 P' の一部が地表を流れるために、 P は P' よりも小さくなる。ただし、最下流部の区間では表面流の流量も Q_0 に加わるので、その P が大きく見積られ、全体としては収支がバランスするはずである。実験3の場合は平均12%の誤差で収支がバランスしているが、実験6の場合は後半でひどくアンバランスになっている。これは Q_0 の測定の不備によるものと思われる。

5. 崩壊実験

真砂土の崩壊機構については、まさつ角が大きいので自重によって崩壊することではなく、豪雨の際に、地下水が地表に噴き出す時に起るパイピングが、崩壊の原因であることが明らかになっている⁷⁾。そこで実験4~7のように、上・下流端に大きな水頭を与えたり、大きな勾配で強い降雨を与え、下流端付近に地下水の湧き出しを起させようとしたが、実験4の場合の他は全然崩壊らしいものが起らなかった。実験4については、Photos. 1, 3にその状況を示すが、地下水を流し始めるとともに上流端でパイピングが起り、噴き出した水はただちに表面流となって流れ下った。そのため、上流部ではげしい浸食が起り、深さ25cmぐらいのガレができた。その後は上流端水位を下げたので、浸食は減少した。中流部および下流部では、堆積と浸食がほぼバランスして、見かけの変化はほとんどなかった。表面流は上流部ではガレの中を通るが、中・下流部では蛇行し、河川の蛇行に似た周期的な変遷が見られた。



Photo. 3. Surface flow and erosion at experiment 4.

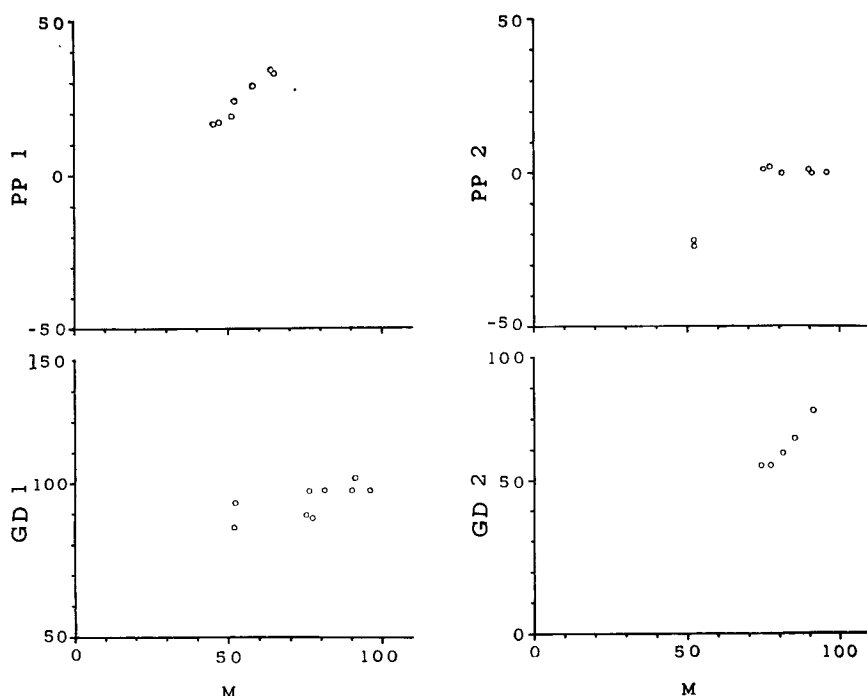


Fig. 9. Correlation diagram of the readings of pore pressure meters and earth pressure meters versus corresponding readings of manometers, i.e. $PP1 = (M_2 + M_3)/2$, $PP2 = (M_3 + M_4)/2$, $GD1 = (M_2 + M_3)/2$, $GD2 = (M_1 + M_2 + M_3 + M_4)/4$. (unit: dyne/cm²)

6. 測定器の動作について

いろいろな測定器の使用可能性をチェックするために、Fig. 3 のようにできるだけ多くの測定器を使用して見たが、十分な性能を発揮したのはマンメーターと間隙水圧計ぐらいであった。Fig. 9 は間隙水圧計と土圧計について、マンメーターの読みとの相関をプロットしたもので、7 回の実験の中から最も相関のよさそうなものを選んだものである。間隙水圧計の動作状態については、多少誤差は大きいがほぼ良好といえよう。土圧計は間隙水圧と有効土圧の和を測定するわけであるが、間隙水圧の変化に対しては図に見られるように一応動作するようである。しかし土槽の傾斜の変化などのように、有効土圧が当然変化しなければならない場合には、土圧計の読み取り値の変化はほとんど認められない。

毛管張力の測定のためには、石膏ブロックとピエゾメーターチップ（途中で tensiometer を追加）を使用した。いずれもほとんど変化を示さなかった。これはおそらく試料土の粒径が粗すぎて、土と測定器の間に毛管がつかずなかったためで、シルト以下の粒径の土に対しては十分動作すると思われる。地下水がない場合には、マンメーターで読み取った水位が土槽の底よりも低くなることがあったが、この時連結チューブの中には気泡が認められなかったので、土槽の底部で圧力が負になっていることを示しており、これによって毛管張力の程度を推定することができた（最大で水柱 -20 cm ぐらい）。

7. 見 通 し

この予備実験の結果だけから今後の実験を見通すことは困難であるが、水関係の測定については、基本的

にはこのような体制で十分であろう。

土中の応力状態を把握することはできなかった。土圧計が動作しなかった理由としては、土のアーチ作用と側壁の摩擦が考えられる。もし側壁の効果が大きいとすれば、今後の実験に重大な支障を来たすであろうが、クリープしやすい試料土を使うことによって、アーチ作用を排除して実験してみるならば、側壁の摩擦効果がどのくらい効いているかを調べることができるであろう。

土圧の測定については従来からおこなわれているが、よく測定できたという例は少なく、土圧計を土中に孤立させた場合は特に困難だといわれている。しかしながら、これを測定しないことには、土中の応力状態をユニークに決定することができないから、土圧を十分な精度で測定することが、今後の実験の最も重要な課題になると思われる。

謝 辞

実験装置の製作に際しては、理学部の海洋学研究室の皆様には有益な助言をいただいた。実験の遂行に際しては、地すべり部門ならびに地形土壌部門の皆様の御支援に負うところが大きい。また、試料土は神戸市埋立事業局より提供されたものである。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 野満隆治：山崩れについて，地球物理，第6巻，第2号，昭17，pp. 135—152.
- 2) 川口武雄：山崩れの力学的要素および数式解法について，新砂防，No. 9，昭27，pp. 8—14.
- 3) 武居有恒：円弧すべり面の仮定にもとづく山崩れの平衡条件に対する一計算法，新砂防，No. 7，昭27，pp. 11—13, 24.
- 4) 郷原有恒：山崩れの力学的研究，Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，新砂防，No. 13，昭29，pp. 19—，同 No. 29，昭33，pp. 1—10.
- 5) 吉田順五：一様な斜面上の積雪の応力，低温科学，物理篇 A，No. 21，昭38，pp. 1—12.
- 6) Nye, J.F.: The flow of glaciers and ice-sheets as a problem in plasticity, Proc. Royal Soc. London, A 207, 1951, pp. 554—572.
- 7) 田中茂：豪雨による砂質斜面の崩壊機構，新砂防，No. 22，昭31，3—9，など
- 8) Polubarinova-Kochina, P. Ya.: Theory of ground water movement (translated), 1962, pp. 497—512.