

# シラス模型斜面の崩壊試験

下川悦郎・春山元寿  
渡辺保輝\*・大迫恵\*\*

(昭和50年8月21日 受理)

## On the Failure-Tests of SHIRASU Model-Slope

Etsuro SHIMOKAWA, Motohisa HARUYAMA,  
Yasuteru WATANABE\* and Megumi OSAKO\*\*

(Laboratory of Erosion Control)

### まえがき

シラス地帯における斜面崩壊を自然斜面(地山切土斜面を含む)の崩壊と人工盛土斜面の崩壊に大別する。このうち、自然斜面の崩壊については、崩壊の発生条件、機構および形態上から、いくらかの研究が行なわれている<sup>1)</sup>。しかし、人工盛土斜面の崩壊は、その発生実態については報告され<sup>2)</sup>ながらも、崩壊の発生条件および機構についてはほとんど研究されていないのが現状である。既往に行なわれた、多くの砂質土の人工盛土斜面崩壊に関する研究からシラス人工盛土斜面の崩壊について基本的認識は得られるが、粒形、粒子表面の状態、比重などシラスの特殊な砂質土としての性質を考慮すると、シラスそのものの人工盛土斜面崩壊に関する研究が必要である。また、最近の斜面崩壊研究の一つの考え方として、局所性破壊、進行性破壊、土性の変化などを考慮した斜面安定解析の重要性が指摘されており<sup>3)</sup>、このような考え方にもとづき、シラス人工盛土斜面の崩壊を見ることも興味ある問題である。

社会との関連で見ると、人工盛土斜面は宅地、道路、堤防など多くの箇所に存在し、自然斜面に比べ、社会とのかかわり合いも深い。特に、シラス地帯においては宅地開発が進み、多くの人工盛土斜面が存在し、これまでも何回もの降雨による崩壊が発生している。このような意味でも、自然斜面とは違ったシラス人工盛土斜面の崩壊発生条件および機構について解明しておく必要がある。

そこで、筆者らは降雨によるシラス人工盛土斜面の崩壊を想定して、室内で浸透水による崩壊試験を行な

い、とくに、崩壊におよぼす斜面の間ゲキ比および傾斜の影響について検討した。本文はその結果の報告である。

### 試料および試験方法

シラスの物理的性質は Table 1 に示す通りである。試料は採取後空気乾燥させ、9.5 mm フルイを通過したものである。

実験装置は前面アクリル板張りの鋼製水槽である。

試料は平均 7.4% の初期含水比でよく混ぜ合わせた。模型斜面はその試料を斜面の高さに応じて水槽に 4~5 層に分けて入れ、所定の間ゲキ比を得るように締め固め試験用のランマーで動的に締め固めて作成し、水分の蒸発をできるだけ防ぐようにして一昼夜養生した後、試験開始前に所定の傾斜に切った。

この後、一定の水量を水位調節装置を通して斜面内に浸透させ、崩壊にいたるまでの諸要因を経時的に観察した。水位調節装置における水位の調節は、試験シリーズ A では 10 cm 毎の段階的増加、シリーズ B では 30 cm から開始し、その後、5 cm 毎の段階的増加方法を取り、それぞれ最高 40 cm まで上昇させた。また、次の段階への水位の増加は各位置の水位測定用パイプの水位の読みが一定になった後、行なった。斜面内の浸透水位は水位測定用パイプによって、変位は垂直方向の変位をダイヤルゲージ No. 1, No. 2 によって、水平方向の変位を No. 3, No. 4, No. 5 に

Table 1 Physical properties of Shirasu.

Specific gravity of grains		2.38
Grain size distribution (%)	Gravel	11.0
	Sand	69.0
	Silt	14.0
	Clay	6.0

\* 株式会社富士工

\*\* 鹿児島県庁林務部

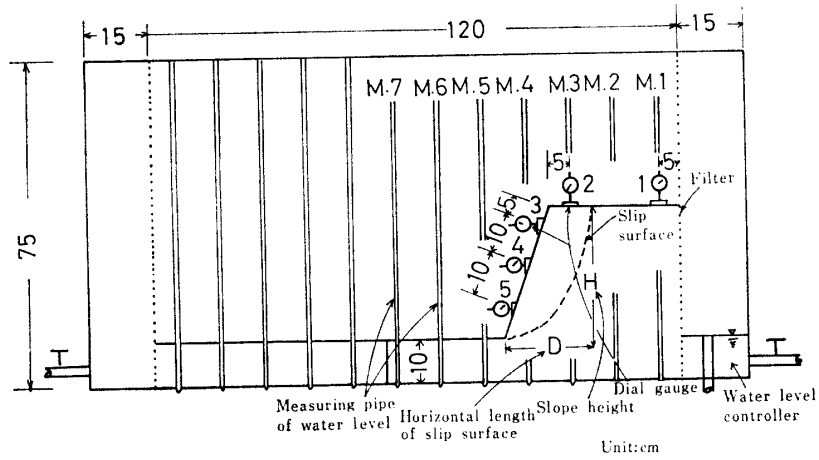


Fig. 1 Experimental equipment and method.

Table 2 State of slopes and test conditions.

Test No	Initial state		Test conditions	State after failure		
	Water content (%)	Void ratio	Inclination angle (Degree)	Void ratio		
Series-A	1	9.4	2.06	72	—	
	2	10.6	1.40	72	—	
	3	8.7	1.73	72	—	
	4	7.8	2.08	72	—	
	5	5.1	1.18	72	—	
	7	8.1	1.45	80.5	—	
	9	7.0	1.01	64	—	
	10	5.5	1.25	56.5	—	
	11	7.8	1.33	90	—	
	Series-B	2	6.7	1.21	72	1.32
		3	8.8	1.07	72	1.28
4		5.8	1.16	72	1.28	
5		7.7	1.35	56	1.25	
6		8.5	1.19	56	1.32	
7		6.1	1.18	56	1.25	
8		6.5	1.19	56	1.28	
9		6.4	1.14	63	1.26	

よって測定した。Fig. 1 は実験装置の名称、寸法、斜面の形状、変位測定的位置を、Table 2 は斜面の状態および試験条件（傾斜）を示したものである。

試験結果と考察

1) 崩壊にいたるまでの斜面変化の様相

水の浸透によって、斜面内では、まず毛管水帯が形成され、やがて水位調節装置に近い方から順に水位が発生した。間ゲキ比の大きな斜面では、この毛管水帯の形成、水位の発生とともに斜面の沈下および局所性破壊が見られた。水位がさらに上昇して、浸潤線がノリ尻部にあらわれるとパイピングによる小さな崩壊が断続的に発生する。この種の崩壊は、間ゲキ比が小さく、傾斜が緩なほどその発生回数は多く、間ゲキ比の大きな試験シリーズA-3, 4の斜面では見られな

かった。パイピングによる崩壊の大きさをその高さで表わして、それと間ゲキ比、傾斜との関係を検討したのが Fig. 2 (a), (b) である。間ゲキ比が小さく傾斜が緩なほど、その高さは大きくなる。このことは、浸潤線がある程度上昇するまで、崩壊は発生しないことを意味している。パイピングによる崩壊の発生によって斜面の支持力は減少し、斜面のノリ尻部分に引張りきれつが生じ、その後、10~30分後に引張りきれつに沿って崩壊が発生した。間ゲキ比が大きく、傾斜が急なものはパイピングによる崩壊を生じないうちにこの崩壊が発生した。崩壊形態は円弧すべりである。パイピングによる崩壊の発生から引張りきれつ発生までの時間は間ゲキ比、傾斜にかかわらず一定な傾向が見られた。Photo. 1~5 は毛管水帯の形成、パイピングによる崩壊、引張りきれつの発生および最終的なすべ

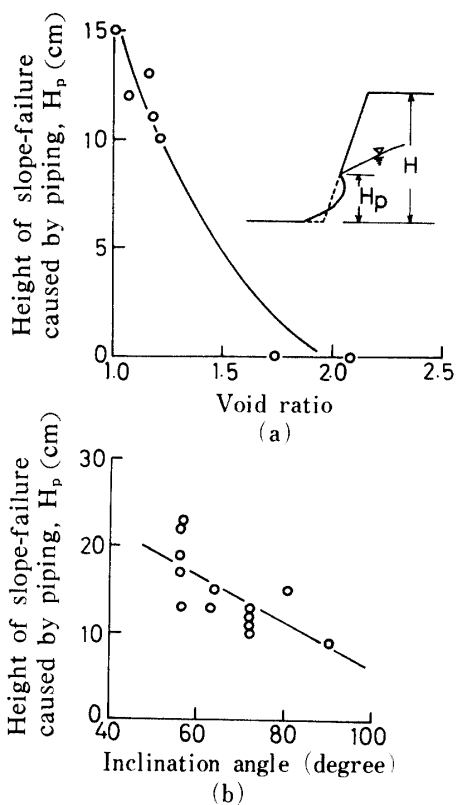


Fig. 2 (a) (b) Influence of void ratio and inclination angle on height of slope-failure caused by piping,  $H_p$ .



Photo. 1 Development of capillarity zone (Series B-9).



Photo. 2 Occurrence of slope-failure caused by piping (Series B-9).

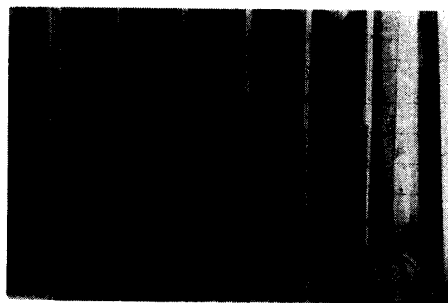


Photo. 3 Occurrence of tension-crack (Series B-9).



Photo. 4 Occurrence of slide-failure of slope (Series B-9).

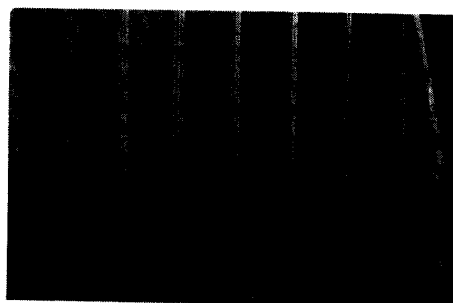


Photo. 5 Slope after slide-failure (Series B-9).

り崩壊の発生を経時的に追って見たものである。崩壊にいたるまでの経過がよくあらわれている。このような現象はシラスがけや切土斜面の豪雨時の崩壊においても確認されている。

## 2) 斜面の変形性状

斜面の変形性状を斜面のヒズミによって表示する。ヒズミの求め方は次の通りである。垂直方向のヒズミ  $\epsilon_v$  は変形量  $\Delta H$  を斜面の高さ  $H$  に対する百分率  $\Delta H/H \times 100(\%)$  として、水平方向のヒズミ  $\epsilon_h$  は変形量  $\Delta D$  をすべり面の水平方向の長さ  $D$  に対する百分率  $\Delta D/D \times 100(\%)$  として表わした。  $H$ 、 $D$  の意味は Fig. 1 に示されている。ヒズミの符号は、垂直方向のヒズミでは下方への変化を正、上方への変化を負とし、水平方向のヒズミでは斜面外方向への変化を正、斜面内方向への変化を負とした。

Fig. 3 はダイヤルゲージ No. 3, No. 4, No. 5 における水平方向のヒズミと時間の関係である。斜面は同じ時期に一様な変形を示さず、ダイヤルゲージ No. 5 (斜面最下部) の変形が最も早くあられ、No. 4 (中央部), No. 3 (最上部) の順につづく。Fig. 6 の流動特性にもこの傾向があらわれている。

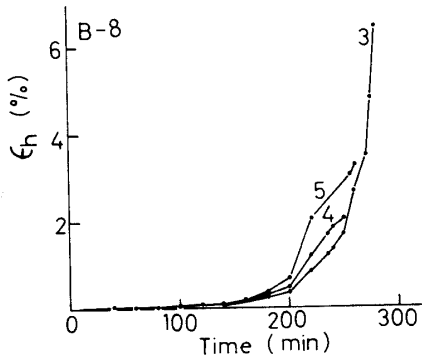


Fig. 3 Comparison of horizontal strain-time relation in the three positions of slope. Curves 3, 4 and 5 represent the upper, middle and lower part of slope, respectively.

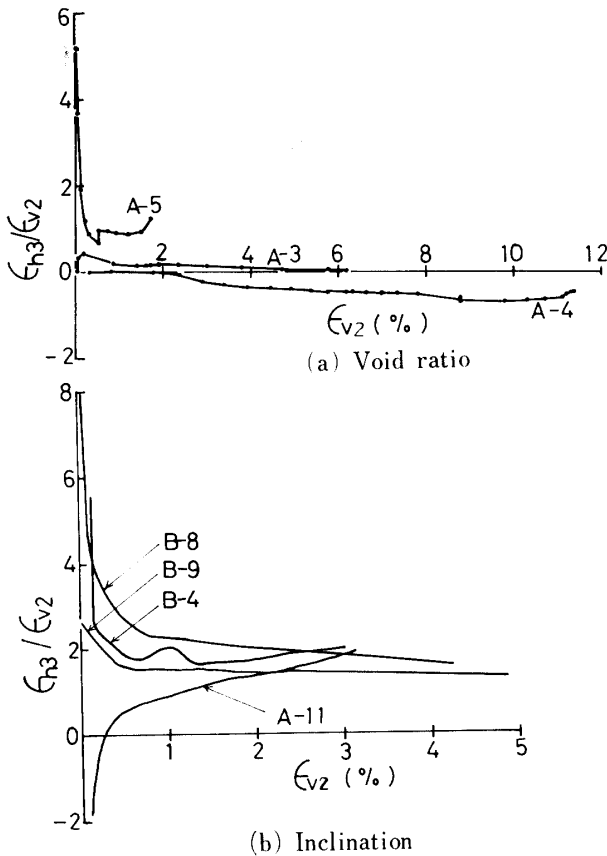


Fig. 4 (a)(b) Influence of void ratio and inclination angle on strain ratio,  $\epsilon_{h3}/\epsilon_{v2}$ .

この現象は進行性破壊の発生を示唆するものであり、斜面安定解析上重要な意味をもつものである。

Fig. 4 (a), (b) はそれぞれ斜面の間ゲキ比、傾斜の変形性状に対する影響を検討するために、ダイヤルゲージ No. 2 における垂直方向のヒズミ  $\epsilon_{v2}$  に対するダイヤルゲージ No. 3 における水平方向のヒズミ  $\epsilon_{h3}$  の比  $\epsilon_{h3}/\epsilon_{v2}$  を垂直方向のヒズミ  $\epsilon_{v2}$  に対してプロットしたものである。曲線の経路は斜面の間ゲキ比および傾斜によって異なるが、ヒズミ比  $\epsilon_{h3}/\epsilon_{v2}$  の崩壊時の値は間ゲキ比によって変化するだけで、傾斜の影響を受けない。この特徴をまとめたのが Fig. 5 (a), (b) における、それぞれ  $(\epsilon_{h3}/\epsilon_{v2})_f$  と間ゲキ比の関係、 $(\epsilon_{h3}/\epsilon_{v2})_f$  と傾斜の関係である。 $(\epsilon_{h3}/\epsilon_{v2})_f$  は間ゲキ比が大きくなるほど小さくなり、傾斜の影響は受けない。平均間ゲキ比 1.12 の斜面では、 $(\epsilon_{h3}/\epsilon_{v2})_f$  の値は約 1.5 である。

Fig. 6 はヒズミ速度と水位の関係であり、水位を水圧とみなせば、流動特性に相当するものである。水位は変位測定点に近い水位測定用パイプ M, 4 の水位の読みで示している。ヒズミ速度が急増する点をもって斜面崩壊の一つの限界値と考えると、この限界値  $(d\epsilon_h/dt)_f$  と間ゲキ比、傾斜との関係は Fig. 7 (a), (b) の通りである。 $(d\epsilon_h/dt)_f$  は間ゲキ比によって影

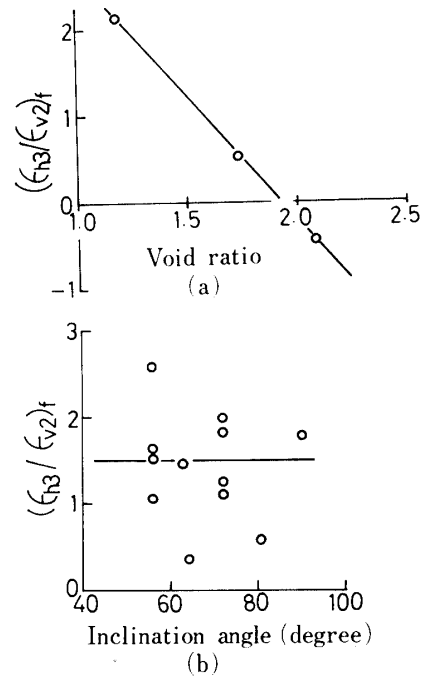


Fig. 5 (a)(b) Influence of void ratio and inclination angle on strain ratio,  $(\epsilon_{h3}/\epsilon_{v2})_f$ , at slide-failure of slope.

響を受け、間ゲキ比が大きくなれば指数的に減少する。傾斜には影響されず、平均間ゲキ比 1.12 の斜面では、 $(d\epsilon_h/dt)_f$  は約 0.027 (%/min) である。ヒズミ速度がこのような値に達した時の斜面の状態はパイピングによる崩壊と引張りきれつの発生の間にある。すなわち、パイピングによる崩壊の発生、引張りきれつの発生はすべり崩壊発生の一つの条件であり、過程でもある。

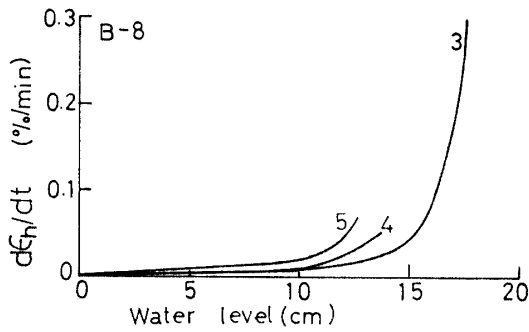


Fig. 6 Comparison of flow characteristics in the three positions of slope. Curves 3, 4 and 5 represent the upper, middle and lower part of slope, respectively.

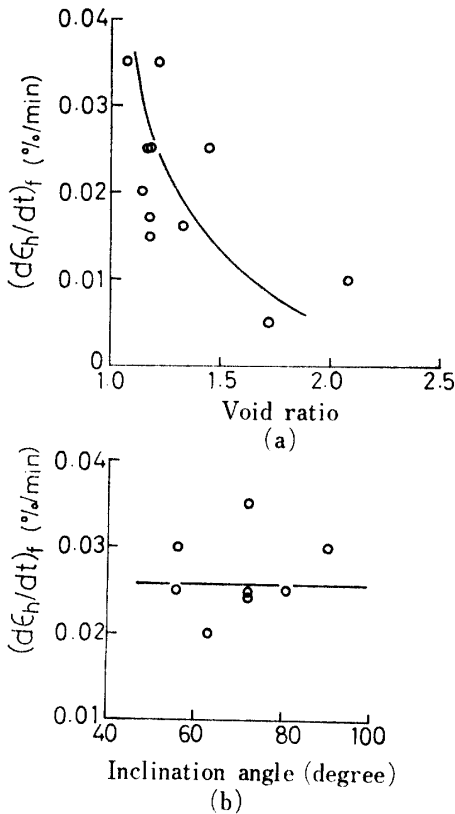


Fig. 7 (a)(b) Influence of void ratio and inclination angle on strain rate,  $(d\epsilon_h/dt)_f$ , at flow of slope.

そこで、さらに崩壊条件をヒズミによって規定するために、パイピングによる崩壊発生時と引張りきれつ発生時におけるヒズミを間ゲキ比と傾斜によって整理

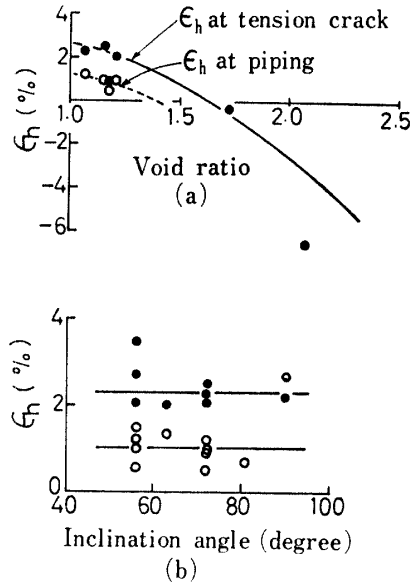


Fig. 8 (a)(b) Influence of void ratio and inclination angle on strain,  $\epsilon_h$ , at piping and development of tension-crack.

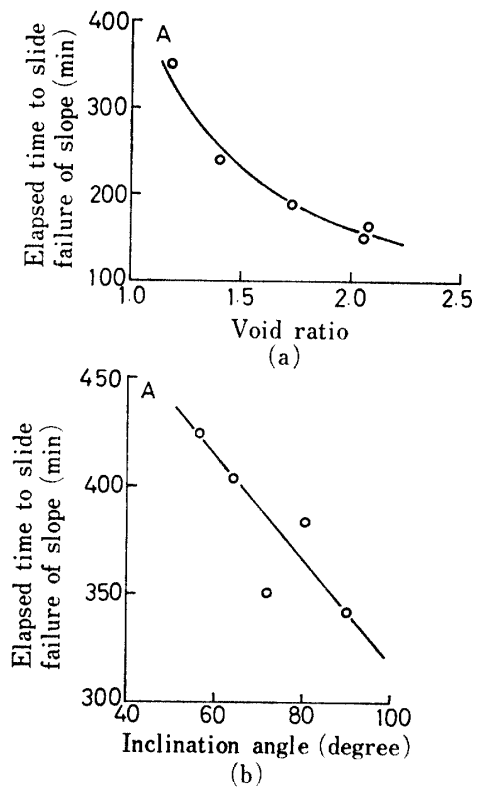


Fig. 9 (a)(b) Influence of void ratio and inclination angle on elapsed time to slide failure of slope (Series A).

したのがそれぞれ Fig. 8 (a), (b) である。ヒズミはダイヤルゲージ No. 3 における水平方向のヒズミで示している。パイピングによる崩壊発生時および引張りきれつ発生時のヒズミは間ゲキ比によって影響を受けるだけで、傾斜の影響は受けず、平均間ゲキ比 1.12 の斜面では前者は約 1 (%)、後者は約 2.2 (%) の値をとる。

3) 崩壊時間、崩壊時の水位および斜面の状態

Fig. 9 (a), (b) は試験シリーズ A について実験開始から崩壊までの経過時間におよぼす間ゲキ比、傾斜の影響を検討したものである。崩壊までの経過時間は間ゲキ比、傾斜が大きくなるにしたがって小さくなる傾向を示す。

Fig. 10 (a), (b) は崩壊時の水位を水位測定用パイプごとにそれぞれ間ゲキ比、傾斜に対してプロットしたものである。間ゲキ比、傾斜が大きいくほど、崩壊時の水位は小さくなる傾向を示している。すなわち、間ゲキ比、傾斜が大きくなるほど少ない水位で崩壊は発生する。このことから、水位の発生が崩壊に大きな影響をおよぼしていることが理解できる。

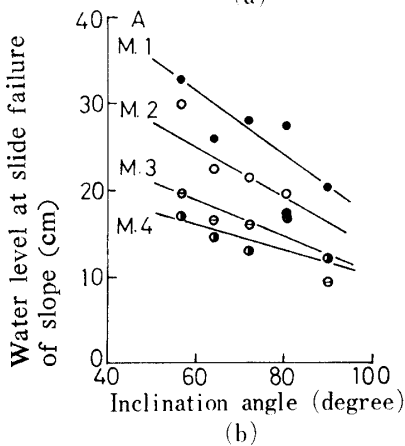
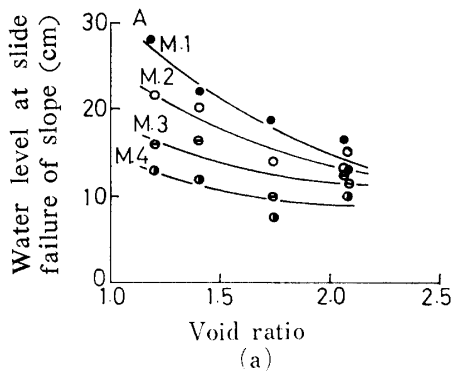


Fig. 10 (a)(b) Influence of void ratio and inclination angle on water level at slide-failure of slope (Series A).

Fig. 11 (a), (b) は崩壊時の斜面の状態を引張りきれつの長さを例にあげて、それぞれ間ゲキ比、傾斜との関係について見たものである。斜面の高さに対する引張りきれつの長さは間ゲキ比には影響されず、傾斜によって影響を受け、傾斜が大きくなるほど大きくなる。引張りきれつ発生部分では崩壊に対する抵抗はなくなると考えると、この点から急傾斜面の危険性が

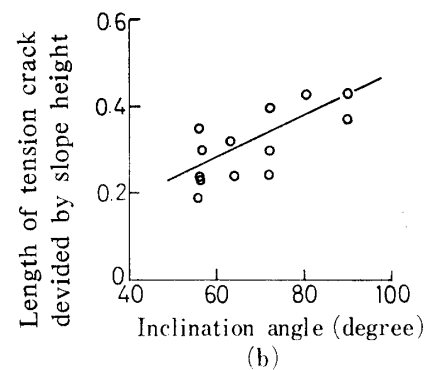
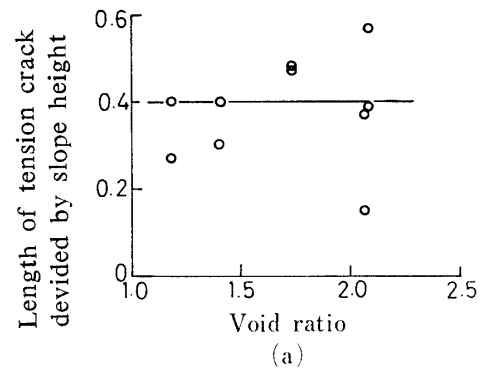


Fig. 11 (a)(b) Influence of void ratio and inclination angle on length of tension-crack.

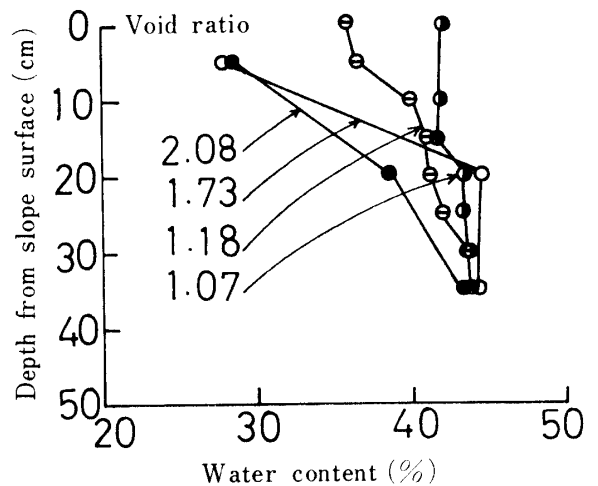


Fig. 12 Influence of void ratio on change of water content in the slope.

指摘される。

崩壊による土性の変化の1例として崩壊時の斜面内における含水比の分布について見たのが Fig. 12 である。斜面内における含水比の分布は間ゲキ比が大きいほど変化が顕著で、小さくなるにしたがって少なくなる。傾斜による分布の違いはあまり見られなかった。崩壊後における間ゲキ比は初期の値より大きくなる傾向を示した (Table 2)。

#### 4) 斜面安定解析の問題点

斜面安定解析の基本的仮定はすべり面内のすべてにわたって応力と変形が同時にしかも一様に生じるという認識にもとづいている。しかし、本試験で得られた結果を変形について見ると、Fig. 3 の水平方向のヒズミと時間の関係、Fig. 6 の流動特性に示されるようにその基本的仮定とは矛盾している。また、斜面安定解析上、考慮しなければならない問題としてパイピングによる崩壊、引張りきれつの発生がある。これらの発生部分は崩壊に対してほとんど抵抗力をもっていないと考えられる。この外、考慮しなければならない要因として毛管水帯の形成および水位の発生による斜面内の土の物理的、力学的性質の変化<sup>4)</sup>がある。

### 要 約

浸透水によるシラス模型斜面の崩壊におよぼす斜面の間ゲキ比、傾斜の2つの条件の影響を検討した。その結果は以下の通りである。

1) すべり崩壊の発生は何の前兆もなく起こるのではなく、その前にパイピングによる崩壊および引張りきれつの発生をともなう。この外、間ゲキ比の大きな斜面では局所性破壊が発生する。パイピングによる崩壊の発生回数は間ゲキ比が小さく、傾斜が緩なほど多

く、その高さも大きくなる。パイピングによる崩壊の発生時から引張りきれつ発生時までの時間は傾斜の影響を受け、引張りきれつ発生からすべり崩壊発生時までの時間は一定 (10~30分) である。

2) 斜面の変形は一様には発生しない。変形過程は間ゲキ比、傾斜によって変化する。斜面はパイピングによる崩壊の発生と引張りきれつの発生の間ですでに崩壊限界に達している。この時の水平方向と垂直方向のヒズミ比 ( $\epsilon_{h3}/\epsilon_{v2}$ )<sub>f</sub>、ヒズミ速度 ( $d\epsilon_h/dt$ )<sub>f</sub> およびヒズミ  $\epsilon_h$  は間ゲキ比によって変化するだけで、傾斜による影響を受けない。

3) すべり崩壊までの経過時間および崩壊時の水位は間ゲキ比、傾斜が大きくなると小さくなる傾向を示す。引張りきれつの長さは傾斜によって影響を受け、間ゲキ比には無関係である。斜面内の含水比の変化は間ゲキ比が大きいほど大きく、傾斜にはあまり影響されない。

4) 斜面安定解析は局所性破壊、進行性破壊、パイピングによる崩壊、引張りきれつの発生および土性の変化を考慮する必要がある。

### 文 献

- 1) 例えば, Motohisa, H.: *Mem. Fac. Agr. Kagoshima Univ.*, **10**, 151-163 (1974)
- 2) 木村大造: シラス地帯集中豪雨による崩壊の実態と防災上の問題点, 鹿児島県林務部治山課, 17-20 (1970)
- 3) 伊勢田哲也・落合英俊・柵橋由彦・伊東修平・井上 守: 土木学会西部支部研究発表会論文集, 245-246 (1972)
- 4) 下川悦郎・寺崎 明・春山元寿: 新砂防, 98, (1976)

### Summary

The failure-tests of Shirasu model-slope caused by seepage water were carried out, with the influence of void ratio and inclination of slope discussed. The results are summarized as follows:

1) The slide failure of slope does not occur without any premonition, but it is foreboded by the slope failure caused by piping at the toe of slope and by tension crack at the top of slope. In addition to these, the local failure occurs in the loose slopes. The smaller are void ratio and inclination angle, the more frequently the slope failure caused by piping occurs, and the higher its height is. The elapsed time from piping to the development of tension crack is influenced by void ratio and inclination angle. But, the elapsed time from the development of tension crack to slide failure of slope is not influenced by them.

2) The slope deformation occurs ununiformly. The process of deformation is influenced by void ratio and inclination angle. The slope is in an unstable state during the period from piping to development of tension crack. Strain ratio,  $(\epsilon_{h3}/\epsilon_{v2})_f$ , strain rate,  $(d\epsilon_h/dt)_f$ , and strain,  $\epsilon_h$ , at the time are influenced by void ratio. They are not influenced by inclination angle.

3) The larger are void ratio and inclination angle, the smaller are the elapsed time to slide failure of slope and water level at that time. The length of tension crack is influenced by inclination angle, but not by void ratio. The larger is void ratio, the larger is the change of water content in the slope.

4) The analysis of slope stability must be carried out with the consideration of the local failure, progressive failure, slope failure caused by piping, development of tension crack and change of soil properties.