

# 急勾配斜面の崩壊発生機構に関する実験的研究\*

## Experimental Study on a Mechanism of the Steep Slope Failure

笹原 克夫\*\* 海老原 和重\*\* 綱木 亮介\*\*  
Katsuo SASAHARA Kazushige EBIHARA Ryousuke TSUNAKI

### Abstract

In order to examine the mechanism of the collapse of steep unsaturated slope, 2 types of experiments were carried out. One is the series of the laboratory model experiments of sandy steep slope failure caused by artificial rainfall. Another is the series of triaxial compression tests of the sandy soil under different saturation ratios.

As the results of these experiments, deformation characteristics of unsaturated soil mentioned below have been made clear.

(1) The basic relationship between shear strain of the unsaturated soil and saturation ratio is hyperbolic. If the saturation ratio becomes larger, the shear strain becomes larger.

(2) If the normal stress becomes larger, the hyperbolic curve of the laboratory tests between the shear strain and the saturation ratio moves to the higher saturation ratio region. But, on the contrary, the relationship curve of the triaxial compression tests moves to the lower saturation ratio region if the confining stress becomes larger.

(3) In the laboratory tests, the relationship between shear strain and saturation ratio moves to lower saturation ratio region if the surface slope gradient becomes larger. This result of laboratory tests coincides with the fact that shear strain proceeds in the lower saturation ratio region if the stress ratio becomes larger.

キーワード: 斜面崩壊\*, 不飽和土, せん断ひずみ\*, 模型実験, 三軸圧縮試験

## 1. はじめに

平成5年7~9月の鹿児島災害では、40~60°程度の急勾配のり面・斜面に崩壊が多発した<sup>1)</sup>。崩壊した切土のり面の多くは勾配60°以上であり、また崩壊した自然斜面でも、特に高度差の大きな斜面は勾配が大きく、60°から90°近くあるものもあった。また過去に「がけ崩れ」として報告のあった斜面でも77.1%が40°以上の斜面で発生している<sup>2)</sup>。これらを見ると、り面・斜面崩壊対策を考える上で、勾配が40°程度以上ある急勾配のり面・斜面の対策や予知・予測が重要であることがわかる。

過去の人工降雨による崩壊実験の事例を見ると、すべり面が地下水位より浅い場所に形成されている<sup>3)4)</sup>か、または地下水位が発生しない状態で崩壊が発生しているもの<sup>5)</sup>がある。この現象は、崩壊が地下水位の上昇による有効応力の減少により発生するとする従来の理論では説明できず、含水量の増加による土の強度の低下<sup>6)</sup>またはひずみの進行というような不飽和状態での崩壊発生機構を

考える必要がある。

本論文では、以上の知見を踏まえ、急勾配斜面の不飽和状態での崩壊発生機構を解明するための第一歩として、砂質土斜面の人工降雨による崩壊実験を行い、地中変位量と地中水分量の関係について解析を行った。またその結果を、不飽和状態の試料土の三軸圧縮試験結果と比較し、急勾配斜面の不飽和状態における崩壊発生機構を、不飽和土の変形・破壊特性から説明することを試みた。

## 2. 急勾配斜面の崩壊実験

### 2.1 実験の種類と方法

不飽和状態の急勾配斜面内の、降雨時における地中変位量と地中水分量の関係を調べるために、砂質土の模型斜面を作成し、人工降雨による崩壊実験を行った。

実験は以下の2種類を行った。なお、模型斜面を作成した試料土の土粒子の密度は2.702 (g/cm<sup>3</sup>)であり、その粒径分布は図-1の通りである<sup>7)</sup>。

#### ①実験1 (図-2(a))<sup>7)</sup>

表面勾配を40°とし、降雨強度120 mm/hを崩壊発生まで継続した。

#### ②実験2 (図-2(b))<sup>7)</sup>

\* なお、本論文の一部は平成6年度砂防学会研究発表会及び第33回地すべり学会研究発表会で発表した。

\*\* 建設省土木研究所

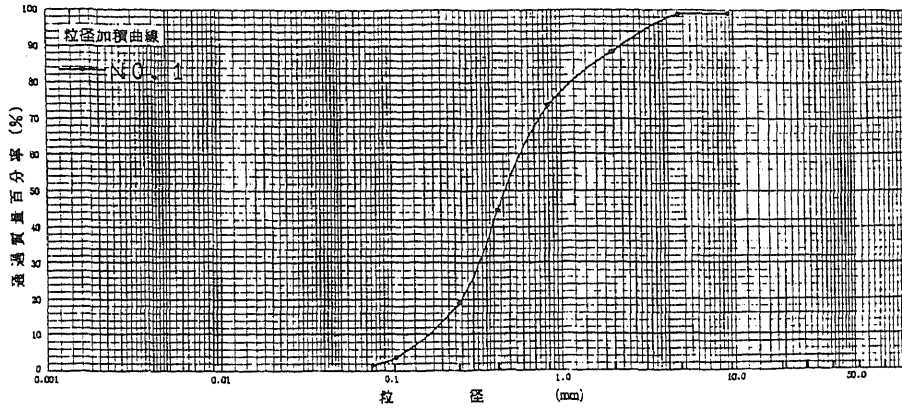


図-1 試料土の粒径加積曲線

Fig. 1 Particle size accumulation curve of the soil used in the experiment

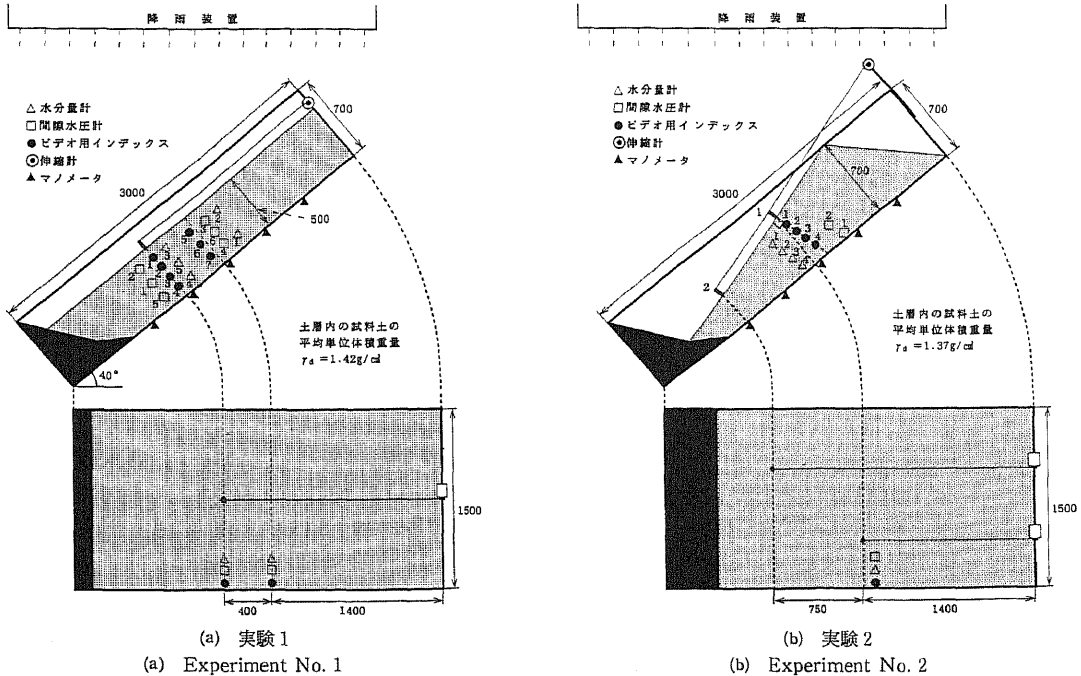


図-2 実験装置と斜面形状

Fig. 2 The experimental facility and the shape of slope

表面勾配を 55° とし、降雨強度を実験開始後 90 分まで 40 mm/h、90 分から 150 分まで 50 mm/h、その後崩壊発生まで 70 mm/h とした。

実験装置本体は鋼製であるが、側壁は強化ガラスであるので側面からの観察が可能である。また斜面下端は排水条件となるように、多数の排水孔が設けてある。図-2 中のビデオ用インデックスは直径 6 mm の白色の短棒であり、模型斜面側面に配置した。地中変位量とインデックス変位量は等しいと仮定して、ビデオで追跡したインデックスの変位をその位置における地中変位とした。水

分量計は坂田電気(株)製作の RX-2254 型であり、4 電極インピーダンス測定方式のものである。計測項目は地表変位 (伸縮計)、地中変位 (ビデオ用インデックス)、土中体積含水率 (水分量計)、地下水位 (間隙水圧計、マンメータ) である。

模型斜面の作成は実験装置を水平にして、層厚 10 cm 毎に人力踏み固めを行って作成した。作成中及び完成後に不攪乱サンプルを採取し、その単位体積重量を計測して、斜面が均一に踏み固められていることを確認した。また実験 2 の斜面形状については、実験装置の底面勾配

の上限が40°であるが、表面勾配をより大きくするために、底面勾配と表面勾配を変化させた。

2.2 崩壊実験結果

①実験 1<sup>7)</sup>

まず斜面上端から1800 mm付近の、地表面に垂直方向の体積含水率分布と累積地表・地中変位量の経時的变化を図-3に示す。この図より地下水位より浅い位置でも(つまり不飽和状態でも)、ある程度の体積含水率になると地中変位が発生することがわかる。

次に斜面内の土のせん断変位の状況をより詳しく見る

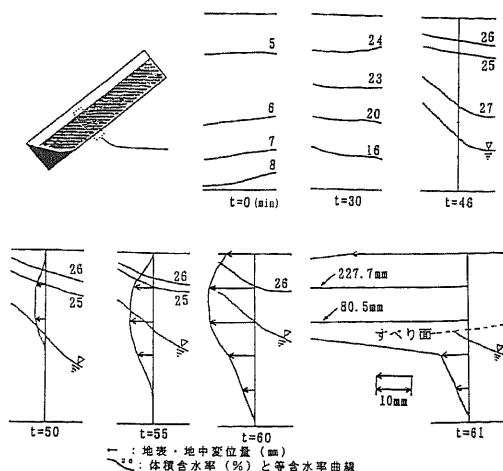


図-3 実験1におけるL=1800 mmでの土中体積含水率と地表・地中変位量

Fig. 3 The distribution of the water (volumetric) content and the shear displacement in the slope at L=1800 mm in the experiment No. 1

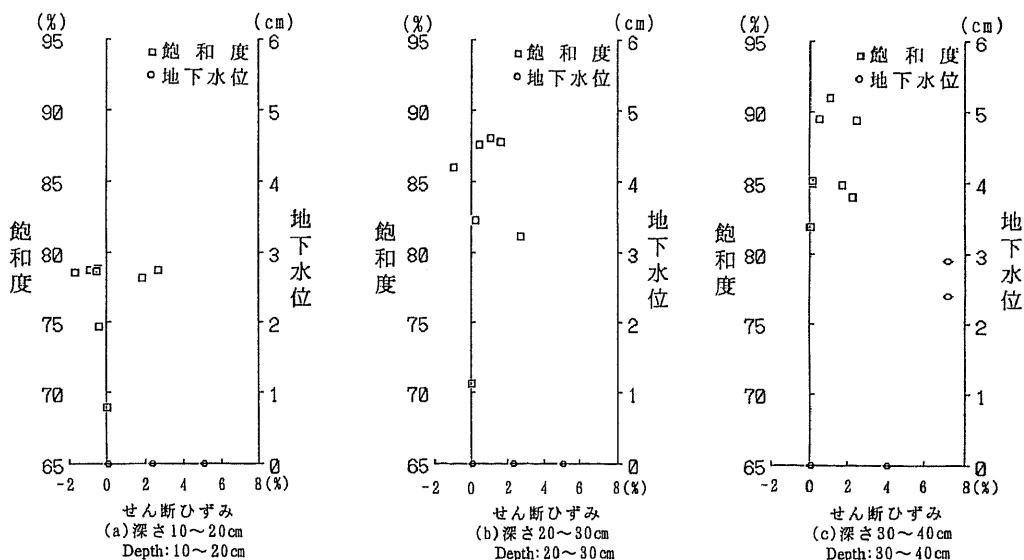
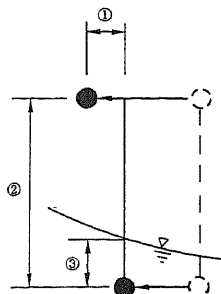


図-4 実験1におけるL=1800 mmでの地中のせん断ひずみ-飽和度、地下水の関係

Fig. 4 Relationships between shear strain and saturation ratio, water level at L=1800 mm in the experiment No. 1

ために、図-3と同じ測線上の、ビデオ用インデックス間のせん断ひずみと飽和度、地下水位の関係を図-4に示す。ここで飽和度は図-3よりインデックス間の平均値を求め、インデックス間のせん断ひずみは図-5に示すインデックス間の変位量をインデックス間の距離で除した値とし、インデックス間の地下水位も図-5の定義に従った。図-4を見ると最も深い30~40 cmの位置で変位量が多い場合を除いて、インデックス間に地下水位が発生することなく、不飽和状態でせん断変位が進行していることがわかる。この図では、必ずしもせん断変位が正の方向に増加し続けているわけではなく、飽和度の上昇と共にせん断変位が負の方向に生じている場合もあ



- ①インデックス間の変位量
- ②インデックス間の距離
- ③インデックス間の地下水位

①については、上のインデックスの方が累積変位が大きい場合を正とする

図-5 インデックス間のせん断ひずみと地下水位

Fig. 5 Definition of shear strain and water level between the video indexes

る。これはこの断面においてせん断がやや不連続かつ不均一に進行しているため、常に土層深が小さいほどせん断の進行が大きいわけではないためと考えられる。

②実験 2<sup>8)</sup>

実験 2 について、斜面上端から 1400 mm の位置での、地表面に垂直方向の体積含水率分布と累積地表・地中変位量の経時的变化を図-6 に、また斜面内のインデックス間のせん断ひずみと飽和度の関係を図-7 に示す。

図-6 を見ると実験 1 の場合と同様に、基本的に不飽和状態でせん断が進行している。また土層深が小さい程、地中変位の発生が早くなり、かつ累積地中変位が大きくなることもわかる。図-7 より実験 2 では実験 1 より小さい飽和度でせん断が進行していることがわかる。

2.3 考察

以上 2 種類の実験結果、特に斜面中のせん断ひずみと飽和度の関係を表す図-4, 7 より、以下の解析を行った。

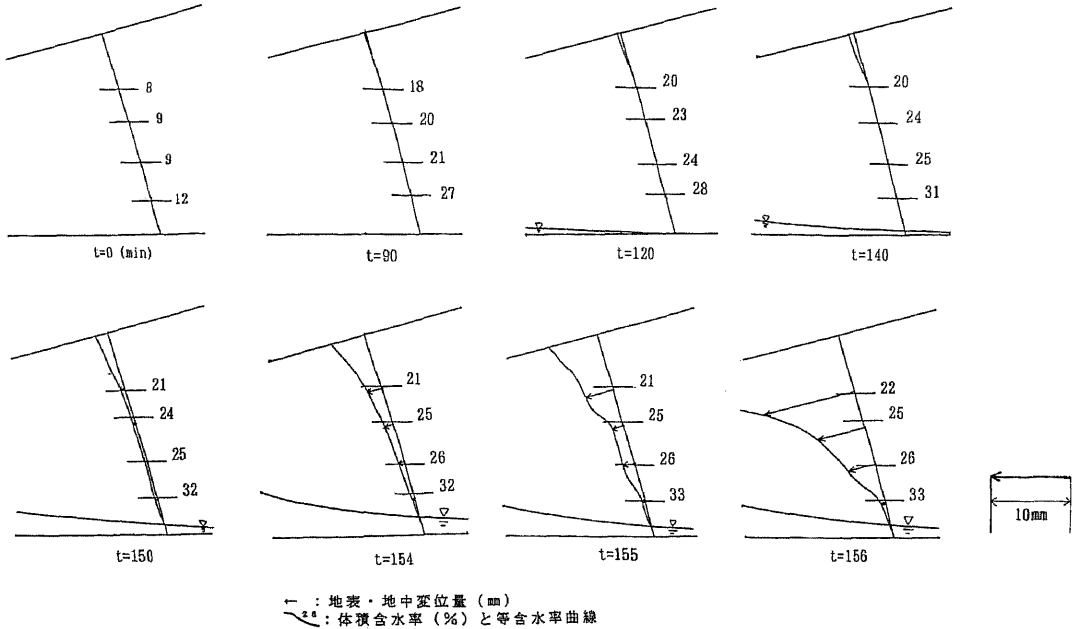


図-6 実験 2 における  $L = 1400$  mm での土中体積含水率と地中変位量

Fig. 6 The distribution of the water (volumetric) content and the shear displacement in the slope at  $L = 1400$  mm in the experiment No. 2

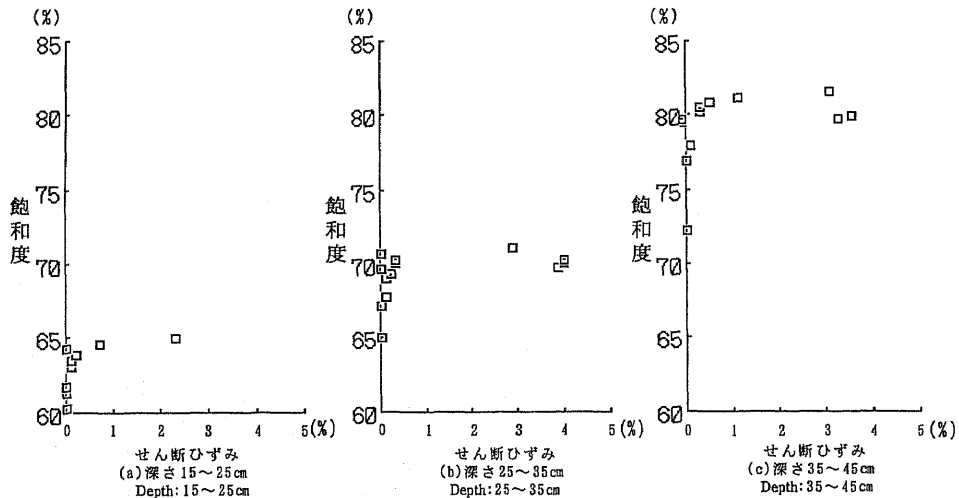


図-7 実験 2 における  $L = 1400$  mm での地中のせん断ひずみ-飽和度の関係

Fig. 7 Relationships between shear strain and saturation ratio at  $L = 1400$  mm in the experiment No. 2

①せん断ひずみ-飽和度

既に実験1については図-4に、また実験2については図-7に、各深さのせん断ひずみ-飽和度の関係を示している。図-4ではそれほど明瞭ではないが、図-7では飽和度の上昇と共に多少ではあるがせん断ひずみが大きくなり、ある飽和度に近づくにつれてせん断ひずみが無限大になるような、双曲線関係が両者の間に認められる。

②垂直応力が変化した時のせん断ひずみ-飽和度

図-8は実験2について、各深さのせん断ひずみ-飽和度を重ねて比較できるようにしている。これを見ると深い位置の方が、言い換えれば垂直応力が大きい位置での方が、飽和度が大きい状態でせん断が進行していることがわかる。

③傾斜が大きくなった時のせん断ひずみ-飽和度

地表面勾配の異なる実験1,2における、最も浅い位置のインデックスとその下のインデックスの間の、せん断ひずみ-飽和度の関係を図-9に重ねて示す。地表面勾配の小さな実験1(勾配40°)の方がやや浅い位置のせん断ひずみを表しているが、図-8より導かれる結論を考えると、これが実験2(勾配55°)と等しい深さにあればより大きな飽和度でせん断が進行することになる。このことより地表面勾配が大きい方が小さな飽和度の下でせん断が進行することがわかる。

3. 不飽和試料の三軸圧縮試験

3.1 試験条件

上記の崩壊実験で確認された、飽和度上昇による土のせん断変形の進行過程、特に崩壊実験では認識が困難な微小ひずみ段階の進行を明確な応力・ひずみ状態の実験で確認するために、飽和度の異なる試料のひずみ制御方式の三軸圧縮試験結果と比較・検討する。

三軸圧縮試験は側圧一定の圧密排水条件で行い、飽和度の異なる5種類の試料に対して行った。また一つの飽和度の試料につき、側圧を4種類変化させて行った。試験条件を表-1に示す。各試験はせん断ひずみが15%に達した時点で終了した<sup>9)</sup>。試料は崩壊実験で使用したものをを用い、供試体作成後の間隙比を一定とした。

3.2 解析

表-1の条件の試験結果より、図-10では各飽和度、各側圧の応力ひずみ曲線から応力比 $\alpha = 1.2$ 及び $1.5$ の時の $\varepsilon_1$ と $\varepsilon_3$ を読みとってせん断ひずみを求め、異なる側圧下でのせん断ひずみと飽和度の関係を求めた。同様に図-11では各飽和度の側圧 $\sigma_3 = 0.2, 0.4$  (kgf/cm<sup>2</sup>)の時の応力ひずみ曲線から応力比が $0.43, 0.75, 1.2, 1.5, 1.52$ の時の $\varepsilon_1$ と $\varepsilon_3$ を読みとってせん断ひずみを求め、異なる応力比でのせん断ひずみと飽和度の関係を

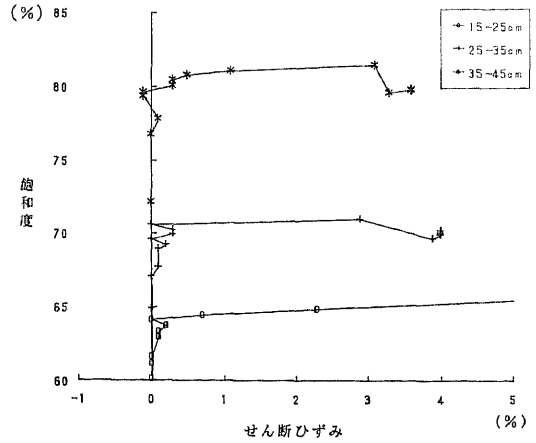


図-8 深さの異なる場合のせん断ひずみ-飽和度(実験2)

Fig. 8 Comparison of the relationships between shear strain and saturation ratio under different depth in the experiment No. 2

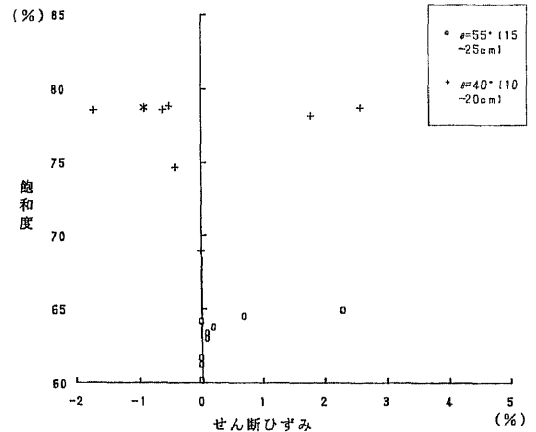


図-9 地表面勾配の異なる場合のせん断ひずみ-飽和度

Fig. 9 Comparison of the relationships between shear strain and saturation ratio under different slope gradient

表-1 三軸圧縮試験の試験条件

Table 1 Experimental conditions of the triaxial compression test

飽和度	Sr (%)	26.8, 55.2, 66.8, 82.8, 96.2
側圧	$\sigma_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
乾燥密度 (間隙比)	$\rho_d$ (gf/cm <sup>3</sup> ) (e)	1.350 (0.997)

求めた。なお応力及びひずみについては、一般的に軸対称応力状態に用いられる正八面体面上の表現<sup>10)</sup>とし、主応力差・偏差ひずみをそれぞれせん断応力・せん断ひずみに相当すると考えた。よって応力・ひずみは以下の式により求めた<sup>10)</sup>。

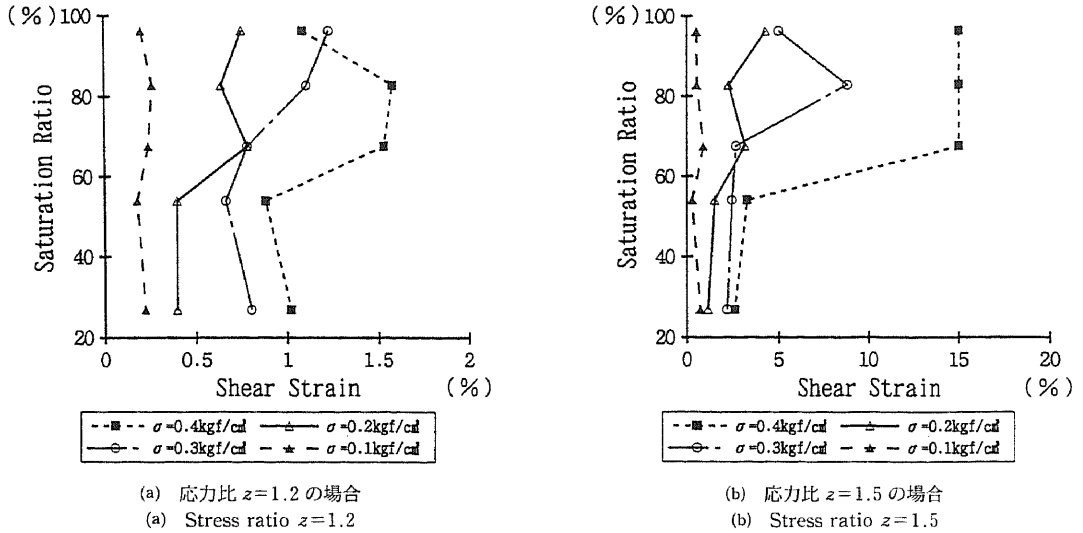


図-10 三軸圧縮試験における異なる側圧  $\sigma_3$  でのせん断ひずみ-飽和度の比較

Fig. 10 Comparison of the relationships between shear strain and saturation ratio under different  $\sigma_3$  in the triaxial compression test

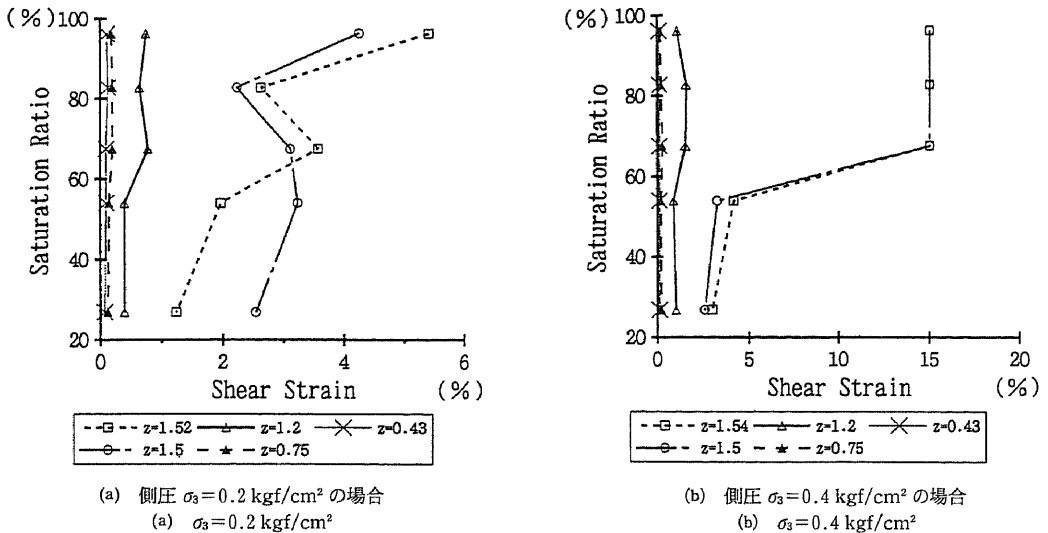


図-11 三軸圧縮試験における異なる応力比でのせん断ひずみ-飽和度の比較

Fig. 11 Comparison of the relationships between shear strain and saturation ratio under different stress ratio in the triaxial compression test

平均主応力:  $p = (1/3)(\sigma_1 + 2\sigma_3)$  .....(1)

主応力差:  $q = \sigma_1 - \sigma_3$  .....(2)

応力比:  $z = q/p$  .....(3)

せん断ひずみ:  $\epsilon_d = (2/3)(\epsilon_1 - \epsilon_3)$  .....(4)

応力については、全応力表示とし、ひずみについても弾性成分と塑性成分を分離せずに全ひずみで表した。

以下に解析結果について述べる。

①側圧を変化させた時のせん断ひずみ-飽和度

図-10の(a)が応力比  $z=1.2$  の場合、同(b)が  $z=1.5$  の場合である。また側圧と応力比が一定であれば、式(1)~(3)より平均主応力が一定であることになる。図(a)の応力比が小さい場合は実験誤差等の影響が大きくはつきりしないが、図(b)のように応力比が大きい場合は、基本的には側圧つまり平均主応力が大きいほど、同じ飽和度でもせん断ひずみは大きく、またその傾向は飽和度が大きくなる程顕著になるようである。側圧の小さい状態では、飽和度が変化してもせん断ひずみの変化は小さい。

つまり両者の関係は、応力比が大きいほど双曲線関係に近づき、かつこの曲線は側圧が大きいほど右方へシフトすると考えられる。ちなみに図(b)のせん断ひずみが15%の場合は、その条件下での応力はピーク強度以上であること、つまり破壊した状態であることを示す。

また図-10において、全体的な傾向とは逆に、飽和度の上昇につれてせん断ひずみが減少している場合が局所的にある。これは三軸圧縮試験は飽和度一定及び側圧一定の供試体の応力比を増加させて行ったが、図-10のせん断ひずみ-飽和度(側圧, 応力比一定)の関係は、異なる飽和度の供試体の試験結果を組み合わせ求めたため、各試験毎の実験誤差が図上に現れたものと考えられる。

#### ②応力比を変化させた時のせん断ひずみ-飽和度

側圧  $\sigma_3 = 0.2$  (kgf/cm<sup>2</sup>) の場合を図-11(a)に、 $\sigma_3 = 0.4$  (kgf/cm<sup>2</sup>) の場合を同(b)に示す。側圧の大きい図(b)の場合を見ると、応力比が大きいほど同じ飽和度でのせん断ひずみが大きく、かつその傾向は飽和度が高くなるほど顕著になる。応力比の小さい状態では、飽和度が変わってもせん断ひずみの変化は小さい。つまり側圧が大きいほどせん断ひずみと飽和度の関係は双曲線関係に近づき、応力比が大きくなるほど全体的にせん断ひずみの大きな右方の領域へ移行するようである。図(b)でせん断ひずみが15%の場合は、上記①と同様に、その条件下での応力はピーク強度以上であることを示す。

図-11でも局所的なせん断ひずみと飽和度の関係の逆転が図上に認められるが、これも図-10と同様に各応力比のせん断ひずみ-飽和度の関係が異なる試験結果を組み合わせ求められたために、実験誤差が現れたものと考えられる。

### 3.3 崩壊実験と三軸圧縮試験での土の変形挙動の比較

2.3で示した崩壊実験での模型斜面内の土の不飽和状態の変形挙動と、3.2で示した三軸圧縮試験での不飽和試料の変形挙動の比較を行う。

#### ①せん断ひずみ-飽和度の関係

せん断ひずみと飽和度の関係については、模型斜面内の土の挙動(例えば図-7)も、三軸圧縮試験でのそれ(例えば図-10(b))も、基本的には飽和度が大きくなるとせん断ひずみも大きくなる傾向がある。また崩壊実験では必ず破壊領域までせん断ひずみが達しているため、両者の関係はある飽和度に漸近するにつれてせん断ひずみが無限大となっていくという双曲線関係に近似されうる。三軸圧縮試験についても破壊領域に達したもののみ見ると、同様に双曲線関係を示すと考えて良いと思われる。

しかし崩壊実験の方が初めてせん断ひずみが確認される飽和度と、せん断ひずみが無限大状態になるときの飽和度が大きく、双曲線が飽和度の大きい領域に存在する。

前者については、崩壊実験での測定精度が悪いために飽和度の小さい状態での微小なせん断ひずみが計測できていないためと考えられる。またせん断ひずみも全体的に崩壊実験の方がやや小さい値をとっている。これについては、例えば崩壊実験では主応力軸が回転する単純せん断<sup>11)</sup>が斜面内で進行し、後者の三軸圧縮試験では主応力軸が固定されているなどの、せん断メカニズムの相違によることや、崩壊実験では非常に拘束圧の小さな状態でせん断が進行していることなどによるものと考えられる。

#### ②拘束圧を変化させた時のせん断ひずみ-飽和度

崩壊実験については図-8に垂直応力を変化させた時のせん断ひずみと飽和度の関係を、三軸圧縮試験については図-10に側圧(平均主応力)を変化させた時のせん断ひずみと飽和度の関係を示している。

崩壊実験では垂直応力が大きくなるにつれて同一のせん断ひずみに達する時の飽和度が大きくなるが、三軸圧縮試験では逆に側圧(平均主応力)が大きいほど同一のせん断ひずみに達する時の飽和度が小さくなる。つまり拘束圧が大きくなると、崩壊実験では双曲線が飽和度の大きな領域に移動するが、三軸圧縮試験では逆に飽和度の小さな領域に移動する。

#### ③応力比を変化させた時のせん断ひずみ-飽和度

崩壊実験において応力比は斜面傾斜に相当すると考えられる。図-9は崩壊実験で表面傾斜の異なる場合のせん断ひずみと飽和度の関係を比較したものである。また三軸圧縮試験については図-11に異なる応力比のせん断ひずみと飽和度の関係を比較している。

崩壊実験では表面勾配の大きな方が飽和度の小さい領域でせん断ひずみが進行している。また三軸圧縮試験でも応力比の大きい方が同一のせん断ひずみに達する飽和度が小さくなっている。つまり両実験での土の挙動は合致している。

## 4. 結論

急勾配斜面の不飽和状態での崩壊発生機構を解明するための第一歩として、崩壊実験を行い飽和度が増加する時の斜面内の土のせん断の進行について検討した。その結果以下のような結果が得られた。

- ①飽和度が大きくなるにつれてせん断ひずみが増加し、ある飽和度に近づくとせん断ひずみが無限大になるような双曲線関係をせん断ひずみと飽和度の間に確認した。
- ②垂直応力が大きいほど、上記の双曲線関係は飽和度の大きな領域で進行することが確認された。
- ③地表面傾斜が大きいほど、飽和度の小さい領域でせん断が進行することが確認された。

そして飽和度を変化させた試料を用いた三軸圧縮試

験を行い、飽和度とせん断ひずみの関係について検討し、崩壊実験結果と比較した。その結果以下の事項が判明した。

④三軸圧縮試験においても、飽和度が増加すると、せん断ひずみも増加するという基本的な関係が確認された。特に飽和度が大きい領域で破壊状態に達するような場合は、崩壊実験と同様にせん断ひずみと飽和度の間の双曲線関係が確認された。

⑤応力比が大きいほど、また拘束圧が大きいほど飽和度の小さい領域でせん断は進行する。崩壊実験について地表面傾斜を応力比に読み換えると、この三軸圧縮試験結果と合致するが、垂直応力を拘束圧に読み換えた時の崩壊実験の結果は三軸圧縮試験の結果と逆の傾向を示した。

以上の結果より、急勾配斜面内の土の不飽和状態でのせん断（単純せん断）の進行は、単純せん断と軸対称状態のせん断という異なるメカニズムの下での応力・ひずみを統一的に表現できれば、基本的には三軸圧縮試験で求められる飽和度とせん断ひずみの関係で説明しようと考えられる。しかし拘束圧の変化に関する飽和度とせん断ひずみの挙動が逆の傾向を示した。この点についてさらに検討を深める必要がある。

#### 参考文献

- 1) 矢澤昭夫他: 平成5年7~9月の鹿児島災害調査速報, 土木技術資料, Vol. 36, No. 2, 1994.2
- 2) 吉松弘行・三井宏人: かけ崩れ災害の実態, 土木研究所資料第2583号, p. 70, 昭和63年2月
- 3) 三森利昭他: 人工降雨による室内崩壊実験(I)―予備実験―, 平成3年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 272~275, 平成3年5月
- 4) 土屋智: まさ土と川砂の模型斜面を用いた降雨浸透時の崩壊発生機構について, 平成4年度砂防学会ワークショップ研究成果報告書「崩壊機構の実験的研究の現状と今後の課題」, pp. 9~18, 1993.3
- 5) 工藤賢二他: 斜面崩壊前兆現象計測のための基礎実験, 平成2年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 354~357, 平成2年5月
- 6) 風間秀彦・芥川真知・滝沢太郎: 降雨に伴う砂質土の強度低下と斜面の不安定化, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, pp. 267~274, 1987.12
- 7) 海老原和重・笹原克夫・綱木亮介: 急勾配斜面の不飽和条件下での変形に関する検討, 平成6年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 91~94, 平成6年5月
- 8) 海老原和重・笹原克夫・綱木亮介: 砂質斜面の不飽和条件下における変形特性の検討, 第33回地すべり学会研究発表講演集, p. 359~362, 平成6年8月
- 9) 土質工学会: 土質試験の方法と解説, p. 376, 平成2年3月
- 10) Schofield, A. N. and Wroth, C. P.: Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill, London, 1968
- 11) Cole, E. R. L.: The Behaviour of Soils in the Simple Shear Apparatus, Ph. D Thesis at Cambridge Univ., 1967