

PIV手法を用いた浸透による斜面崩壊現象の観察

Observation for slope failure due to injected water using PIV method

村上裕幸	Hiroyuki MURAKAMI	(山口大学大学院)
中田幸男	Yukio NAKATA	(山口大学大学院)
村田秀一	Hidekazu MURATA	(山口大学大学院)
宮北志野	Shino MIYAKITA	(山口大学大学院)

本論文では、画像解析 (PIV) を本試験に導入し、浸透水流入による斜面崩壊試験を行った。その結果、浸透水の流入場所が円弧すべり面に近く、流入量が大きい場合、円弧すべり面を短時間で示す斜面全体を含むような崩壊パターンと、斜面先から崩壊を順に起こす崩壊パターンの2パターンを観察した。この2つの崩壊は浸透水流入後、共に斜面先から崩壊が始まり、その後崩壊パターンが分かれる。斜面崩壊の様子はPIVを用いることで内・外部的に詳細に観察することができ、斜面先の変形が斜面全体の安定性に大きく寄与していることを示した。

キーワード：斜面崩壊，浸透，画像解析，PIV

(IGC : E06)

1. はじめに

豪雨による地盤災害は、地域住民の生活や人命に関わるものが多く、豪雨時における斜面崩壊挙動の予測や検討は、古くからの地盤工学における重要な課題であった。これまで多くの研究者により取り組まれ、室内の斜面崩壊試験^{1), 2), 3)} や、崩壊実例の調査の実施⁴⁾ により斜面崩壊の予測や検討を行っている。例えば、八木ら^{5), 6), 7)} は雨水浸透による斜面崩壊試験を行い、崩壊形態には2つあることを把握し、降雨による斜面崩壊予知手法として、限界降雨量の考え方を提案している。これらの研究により崩壊予測の精度は上がっているがまだまだ未解明な部分も多く残されているのが現状である。

近年、記録的な豪雨に見舞われるケースが増加し始めている。通常、土構造物の排水設備などの設計には100年周期の豪雨に対して検討が行なわれる。しかし、この2-3年に発生した豪雨ではそれを超えるものもあり、斜面内に水が浸入することで大きな被害を受けたものもあった⁸⁾。自然斜面においては長雨により緩んだ斜面に、谷地形であったため周りの山から地下水が集水し、局所的に流入したことによって大規模な斜面崩壊を起こした実例もある⁹⁾。これまでの常識をはるかに超える豪雨による被害を有効かつ最小限に抑えることが、今後求められようとしている。このような要請に対応するための一つの方策として、斜面表層のモニタリングがある。この技術については、モニタリングすべき箇所が極めて重要で、技術者の判断に大きく委ねられる。そのため、室内における模型実験などを系統立てて行い、その成果を蓄積することも必要である。

一方、近年のデジタル技術の発達は、高精度で速度分

布を調べることができる画像解析技術の発展をもたらしている。中でもPIV¹⁰⁾ は流れの速度分布を調べる方法として最も進化した計測法の一つであり、主に流体力学の分野で用いられていた技術で、地盤工学においても斜面崩壊現象を詳細に捉えることが出来るツールとして威力を発揮する。本研究では、このPIVを導入した。室内で一連の浸透による小型の模型斜面に対する崩壊試験を行い、PIVは斜面のモニタリングのために使用した。ここでは、特に局所的に圧入する浸透水が斜面崩壊挙動に与える影響を考察した。

2. 斜面崩壊実験の概要

試料はシリカ砂 (表-1 参照) を用い、寸法幅530mm、高さ400mm、奥行き100mmの小型模型土槽で試験を行った。斜面は、試料を含水比8%に調整し試験機に投入後、タンパーで相対密度60%となるように均一に突き固めて作製した。今回は盛土斜面を想定しているため、基岩を設置しなかった。同一の条件で作製した試料、つまり水平方向に堆積面を有する供試体に対し鉛直方向の定水位透水試験を実施すると、透水係数 $k=0.015(\text{cm/s})$ を得た。斜面内への水の流入を模擬するために、斜面内に浸透水を圧入することが可能な浸透水圧入用のノズルを浸透水流入場所に配置したうえで斜面を作製した。斜面形状と浸透水流入場所を図-1に示す。地盤内にある定常地下水状態を再現するため、上・下流側水位で定水位となる浸透条件を与えた。図-1に示す斜面形状の場合には上流側水位 H_1 を200mmまで上げたとき、斜面先部分において浸透破壊が観

表-1 シリカ砂の物性

Sample	d_{50}	Fc(%)	e_{max}
	U_c	G_s	e_{min}
Silica	0.333	0.020	1.022
	1.972	2.660	0.630

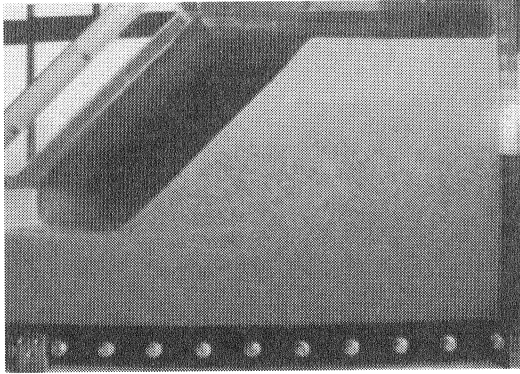


写真-1 地下水面の様子

られるため、上流側水位 $H_1=150\text{mm}$ まで水位を上げ地下水状態を再現した。その様子を写真-1に示す。写真-1では定常地下水を食紅水としているため、ある程度浸潤面の様子を目視することができる。

3. 模型地盤の浸透

作製された模型地盤に定常浸透場の状態を把握するために、下流側の排水量を測定した。模型地盤は図-2に示すように、図-1に示すものに対して斜面の角度はそのまま、天端の長さを330mm, 230mm, 180mm（それぞれ、Model-1, 2, 3）としたものである。所定の水位まで上流側水位 H_1 を200mmまで、50mmおきに段階的に上昇させ、その都度、排水量を確認している。このとき上流側水位 H_1 を所定の位置で保持した状態で、下流側流出量を20秒毎に計測し、5分以上流出量の変化が起きなくなった時点で定常状態になったと判断した。自由水面または浸潤面があるときLaplaceの式を直接求めることは難しい。そこで、Dupuitは、本実験のような模型地盤に対して有効な近似解を提案している¹¹⁾。このDupuitの仮定を用いて導かれる時間当たりの流量と上・下流の水位との関係は、以下のようなる。

$$Q = \frac{k}{2B} (H_1^2 - H_2^2) \quad (1)$$

ここで、上流側水位 H_1 、下流側水位 H_2 、土槽の幅 B であり、 k は地盤の透水係数である。図-3に下流側流出量 Q と水頭差 $(H_1^2 - H_2^2)$ の関係を示しているが、この図の傾きが透水係数を示している。この結果から、透水係数は平均値で

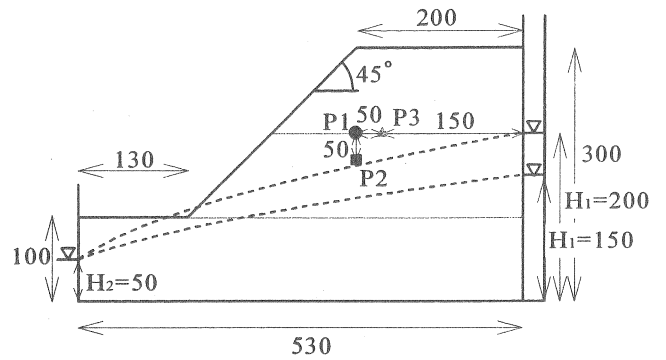


図-1 斜面形状と浸透水流入位置

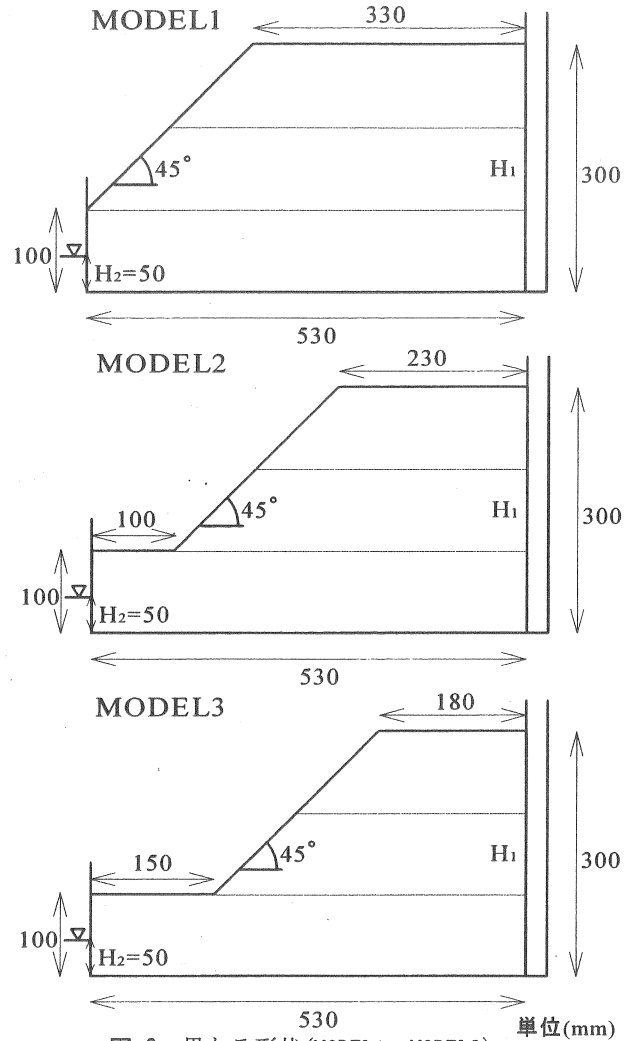


図-2 異なる形状 (MODEL1~MODEL3) における浸潤面の検討

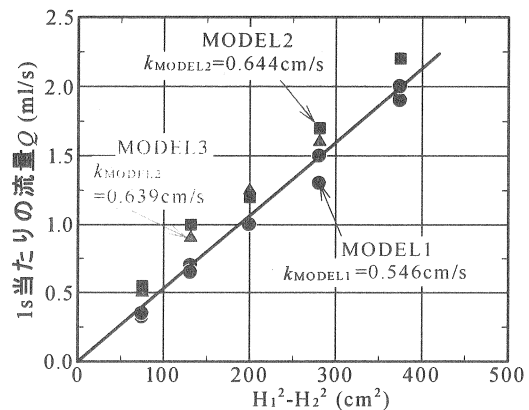


図-3 流量 Q と水頭差 $(H_1^2 - H_2^2)$ との関係

0.579(cm/s)となり、3つの地盤形状には影響を受けないことがわかった。しかし、この定常透水試験により求めた透水係数と定水位透水試験で求めた透水係数には1オーダーの差ができた。その原因は、定水位透水試験は水平方向に堆積面を有する供試体に対して鉛直方向の透水係数を求めているが、定常透水試験では水平方向の透水係数を求めている点、模型試験では土槽と試料の間で水みちができてやすくその面積が大きい点であると考えられる。このDupuitの仮定から、上流側水位が既知な点から水平距離xの点における浸潤面の高さzを与える式も導くことができる。

$$z = \sqrt{H_1^2 - \frac{(H_1^2 - H_2^2)x}{B}} \quad (2)$$

この(2)式を適用して描かれた浸潤線について、図-1に破線で描いている。この図から、 $H_1=150\text{mm}$ では浸潤線が地盤内を通過するのに対して、 $H_1=200\text{mm}$ では浸潤線が斜面を越えていることが認められる。

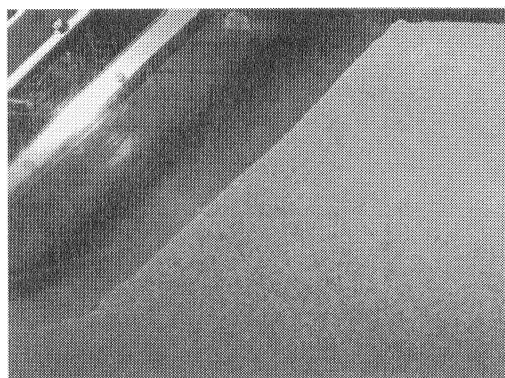
4. 浸透水流入による斜面崩壊挙動の把握

斜面崩壊試験は圧力載荷装置を用いて斜面内部へ浸透水を流入することで行った。先述したように上流側水位 H_1 を 150mm に上げ地盤中の流れが定常状態になったことを確認し、模型地盤作製中に配置したノズルから浸透水を流入させた。その時の斜面の変化をデジタル撮影し、撮影した画像を用いて画像解析を行なった。図-1 に示すようにノズルの位置を P1, P2, P3 のいずれかにし、また地盤への流入量を 15ml/s, 30ml/s と変えて計 5 パターンで試験を行なった。この 2 つの流入量を選択した理由は次のようである。試験は 8ml/s, 15ml/s, 30ml/s, 45ml/s の 4 パターンを行ったが、8ml/s のときには斜面先が小崩壊を起こした後安定し、45ml/s のときには斜面が水压破壊を起こした。このため今回は 15ml/s と 30ml/s の 2 パターンについて試験を行うことにした。表-2 は浸透水流入試験の試験条件をまとめたものである。

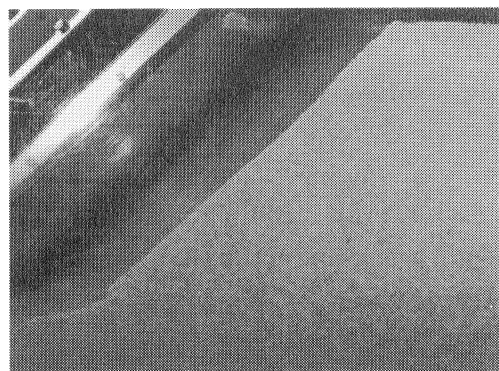
P1 点に 30ml/s の流入を与えたときの斜面崩壊の様子を写真-2 に示す。PIVによる画像解析には、写真-2 に示したデジタル画像を用いた。その解析結果を図-4, 図-5 に示す。図-4 は、P1 点に 30ml/s の流入を与えたときの斜面変形について、地盤の各点の試験中の軌跡を示すもので、図-5 はそのときの最大せん断ひずみ γ_{\max} 分布を示したものである。図-4 より P1 点に 30ml/s の流入を与えた場合は、流入から約 17s で斜面先の崩壊が起こり、22.5s は斜面内部に移動が見え始める。26s には円弧状のすべり面を形成

表-2 浸透水流入の試験条件

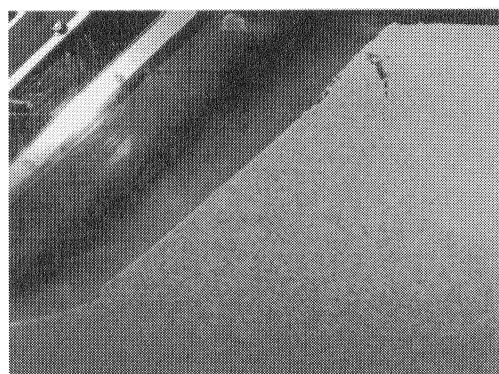
実験CASE名	P1-15	P1-30	P2-15	P2-30	P3-15
ノズルの位置	P1	P1	P2	P2	P3
流入量(ml/s)	15	30	15	30	15



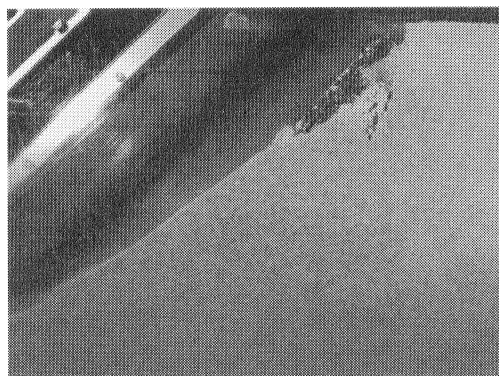
(a) t=17s



(b) t=22.5s



(c) t=26s



(d) t=28s

写真-2 P1 点に 30ml/s 流入した時の斜面崩壊の様子

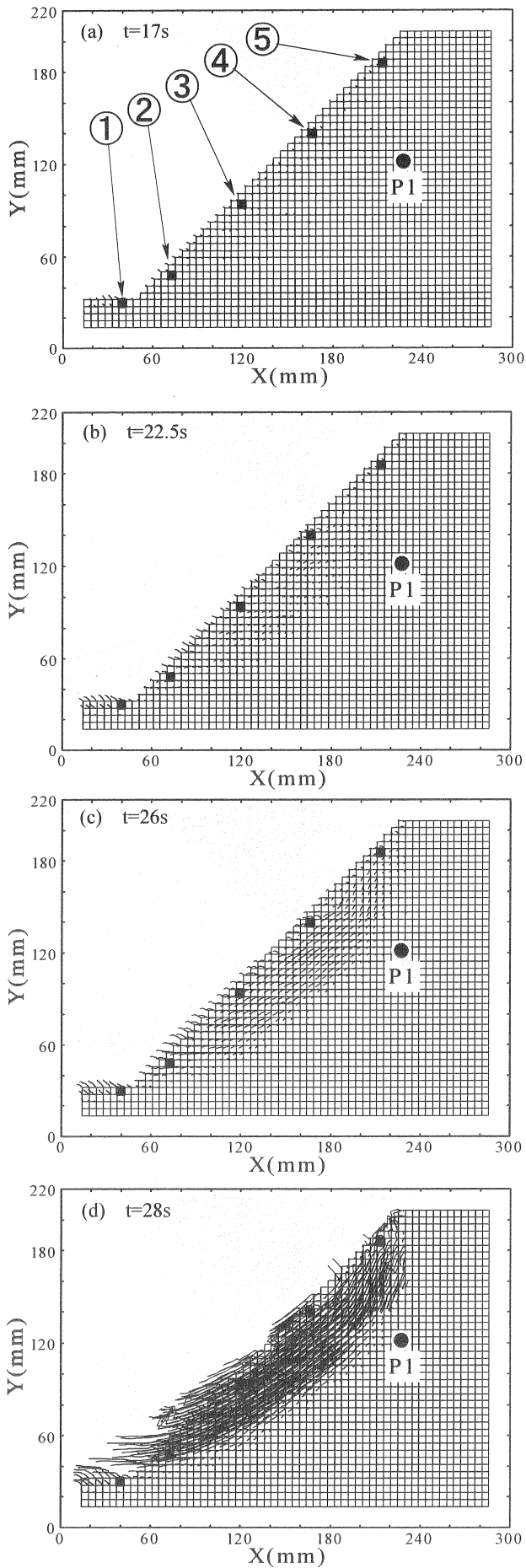


図-4 P1 点に 30ml/s 流入した時の斜面変形の軌跡

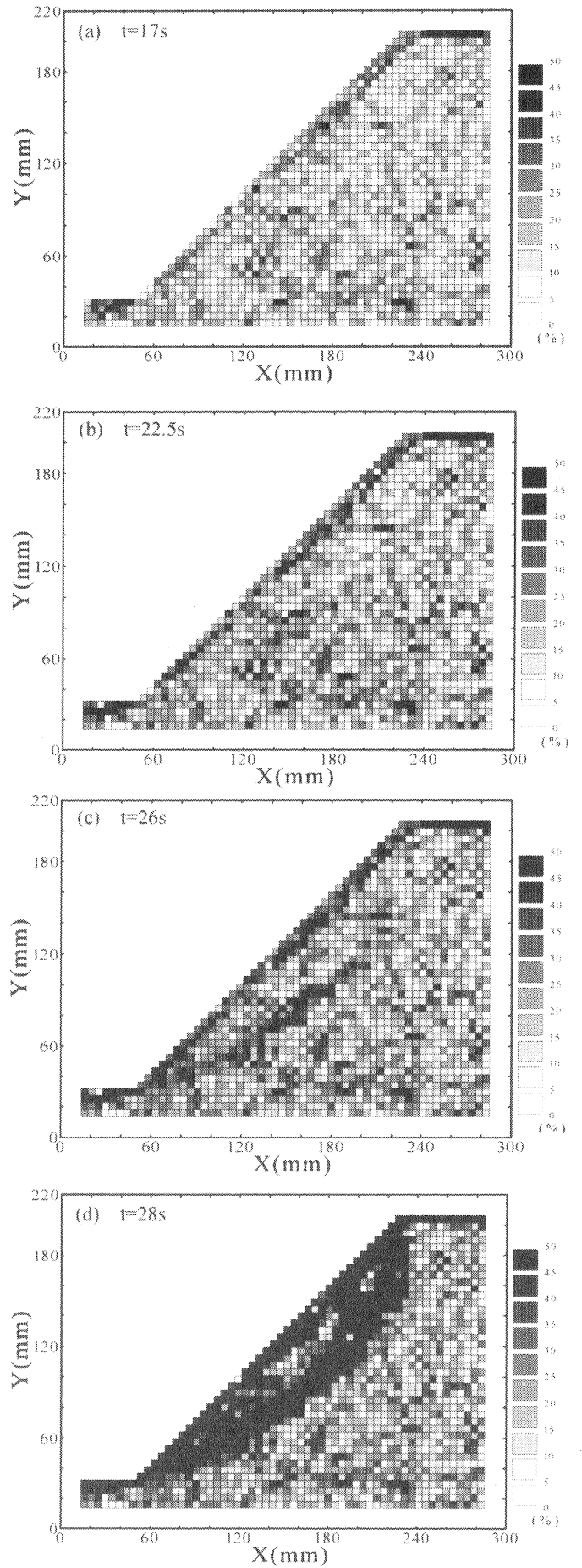


図-5 P1 点に 30ml/s 流入した時の γ_{max} 分布

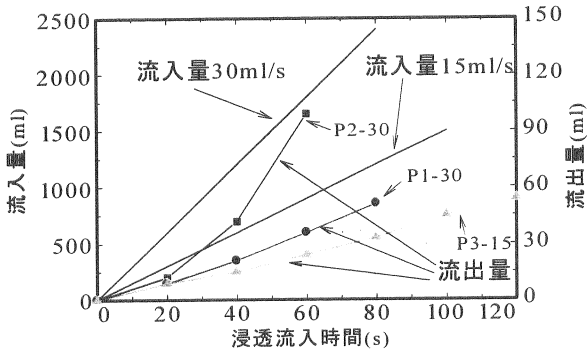


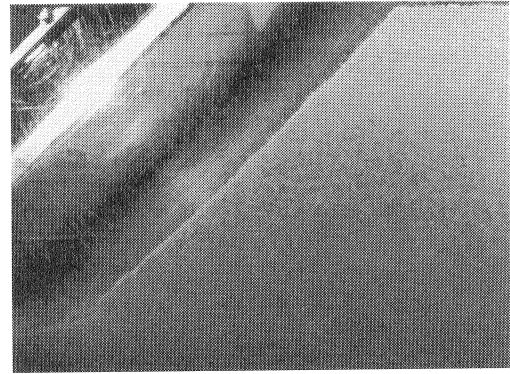
図-6 流量と浸透流入時間との関係

し崩壊し始め、約 27s で斜面全体を含むような円弧状のすべり面を短時間(2~3 秒)で示す崩壊を起すことがわかる。

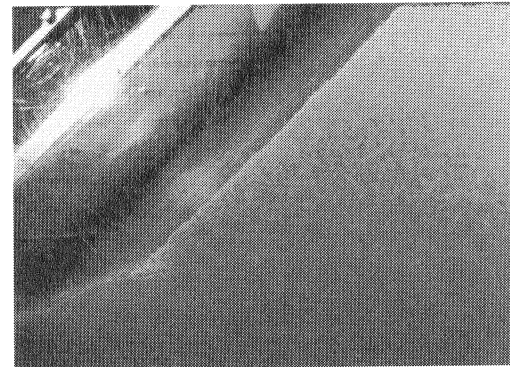
図-5 に示す最大せん断ひずみ分布を見ると、約 17s のとき斜面先が小崩壊を起し、それと同時に斜面表層にせん断ひずみが観られる。さらに浸透水を流入すると 26s のときに斜面表層だけでなく、斜面先から斜面内部へせん断ひずみが円弧状に進展していることがわかる。そして 28s のときには斜面全体を含むような円弧状にせん断ひずみが分布し崩壊に至っている。この斜面全体を含むような円弧状のすべり面を短時間で示す崩壊の場合、斜面先から斜面内部へせん断帯が円弧状に形成されることにより短時間での崩壊を誘発していると考えられる。従って、本試験のような条件下での斜面崩壊の場合には斜面先の変形が斜面の安定性に大きく寄与し、斜面先のモニタリングが有効であることが示唆される。

図-6 は P1 点に 30ml/s, P2 点に 30ml/s, P3 点に 15ml/s を地盤内へ与えた時の流入量と下流側流出量との関係を示している。ここでの流出量は定常浸透による流出量を差し引いて求めている。P2-30 流出量は 20s まで、その他の結果と大きな差はないものの、その後増加していることがわかる。一方、P1 点に流入させた場合の結果の流出割合は、実験の初期段階から大きく変化がないことがわかる。これらは、浸透流入位置から浸潤面までの距離が関係していると考えられる。最終的な流量はいずれも流入量の 6% 程度である。流入した大半の水は、地盤内に貯留したことがわかる。

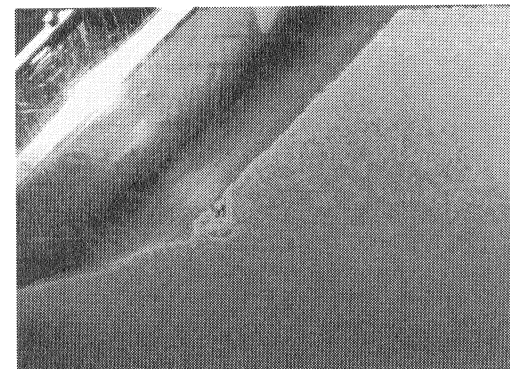
P2 点に 30ml/s の流入を与えた場合の斜面崩壊の様子を写真-3 に示す。またその解析結果を図-7, 図-8 に示す。図-7 は、P2 点に 30ml/s の流入を与えたときの斜面変形について、地盤の各点の試験中の軌跡を示すもので、図-8 はそのときの最大せん断ひずみ γ_{max} 分布を示したものである。この図-7 を見ると、6.8s, 13.6s, 20.5s と斜面先の崩壊が順に起きている。そして、27.2s のときに飽和度上昇による自重増加により斜面上部が崩落したと考えられる。この試験条件の場合、斜面全体を含む円弧状の崩壊ではなく、斜面先から崩壊を順に起こす崩壊パターンとなることがわかる。



(a) t=6.8s



(b) t=13.6s



(c) t=20.5s



(d) t=27.2s

写真-3 P2 点に 30ml/s 流入した時の斜面崩壊の様子

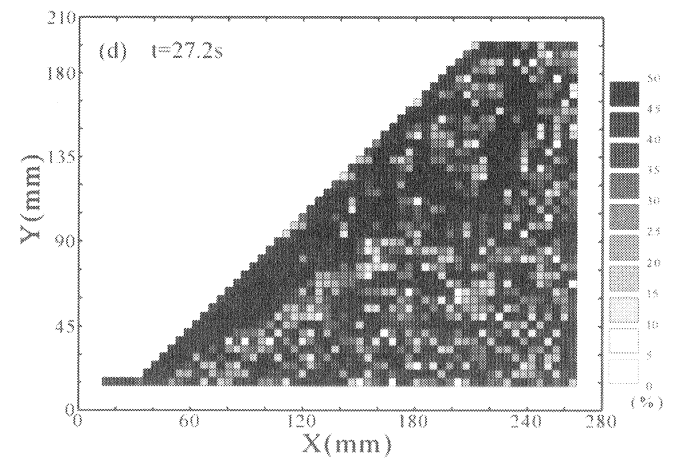
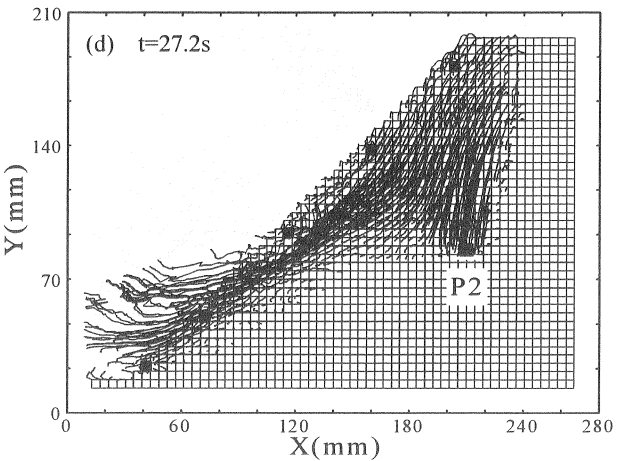
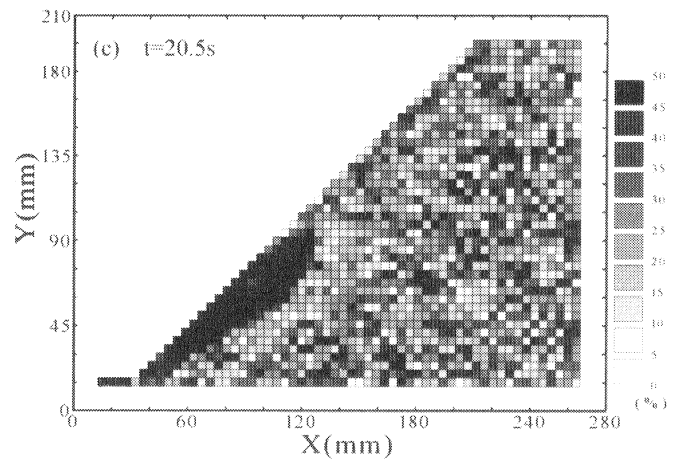
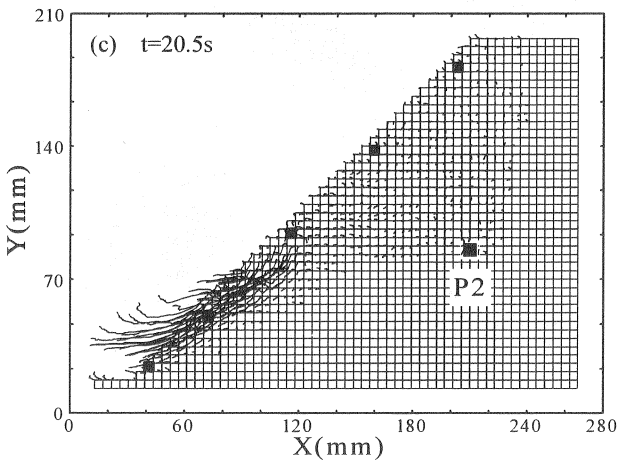
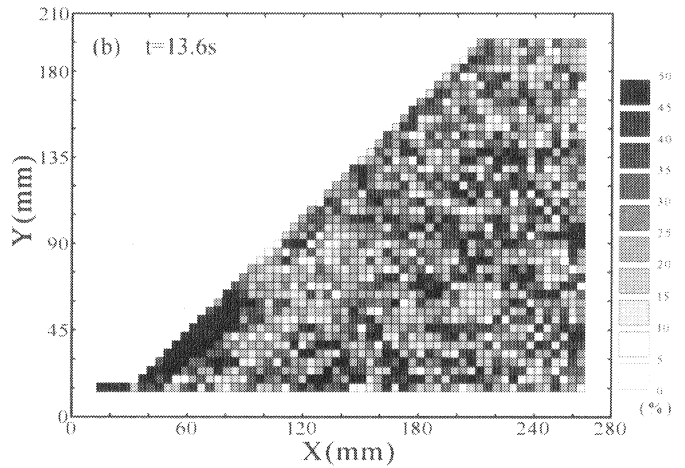
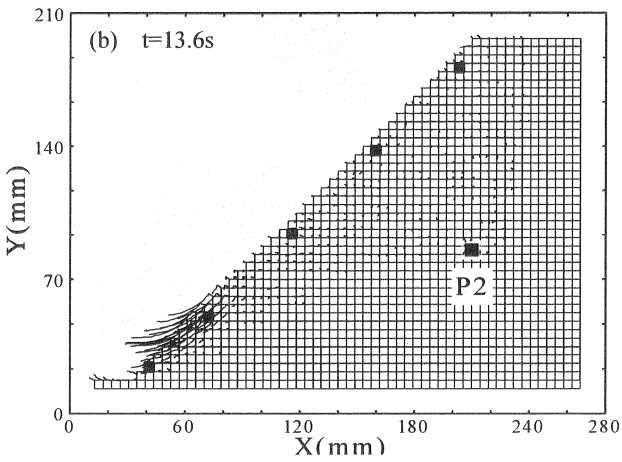
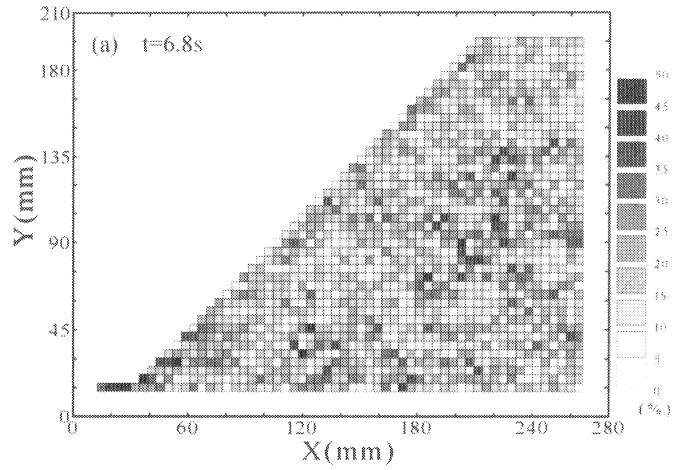
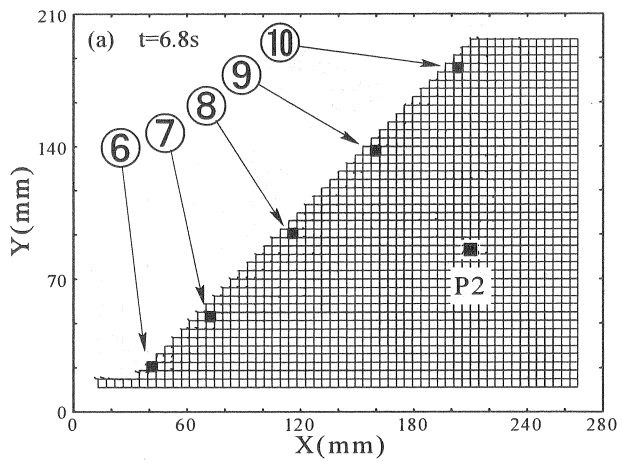


図-7 P2 点に 30ml/s 流入し時の斜面変形の軌跡

図-8 P2 点に 30ml/s 流入した時の γ_{\max} 分布

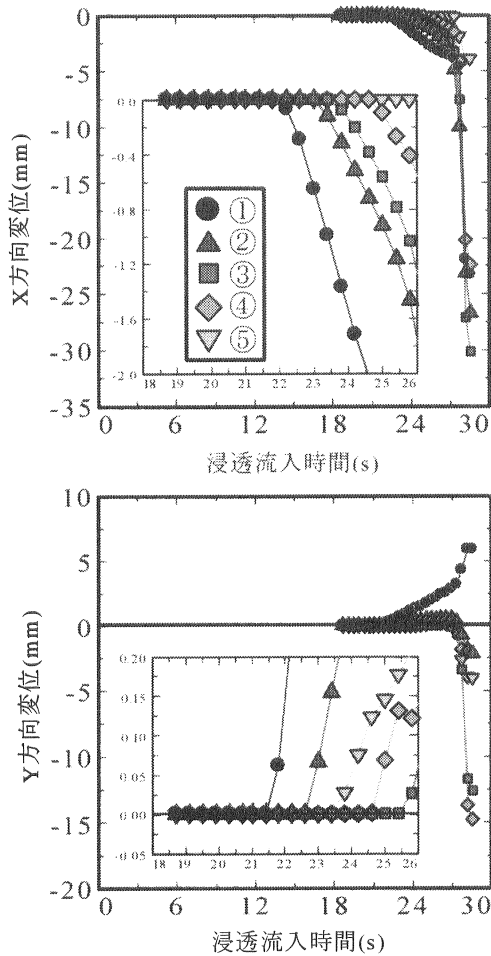


図-9 測点①～⑤の変位と浸透流入時間との関係

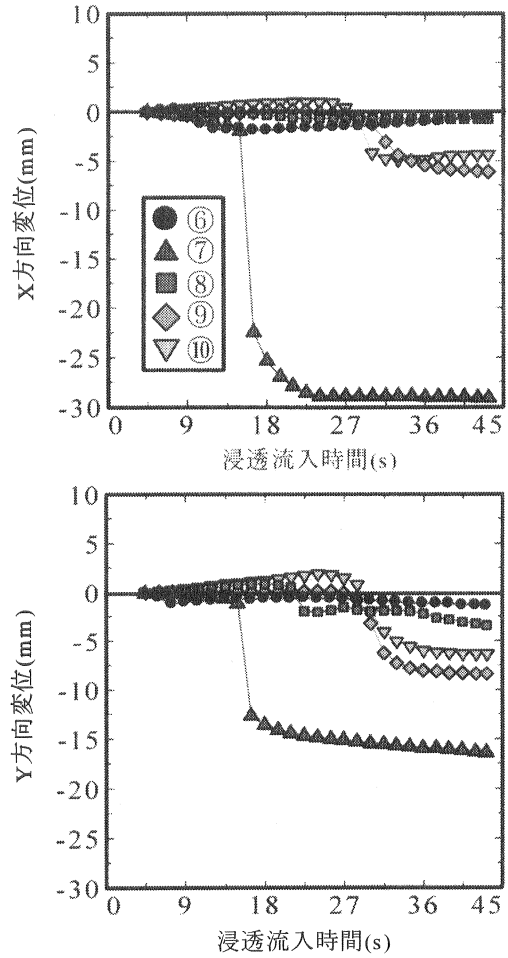


図-10 測点⑥～⑩の変位と浸透流入時間との関係

図-8 からせん断ひずみ分布が斜面先から斜面上方に向かい順に起きていることがわかる。この崩壊パターンは、P1 点に 30ml/s の流入以外の 4 つの実験条件でも観察された。本試験では、斜面モニタリングに PIV を導入して崩壊パターンを観測した。そして、斜面変形の軌跡を見てわかるように崩壊の様子を詳細に観測できたと言える。しかし、PIV には画像解析に特有の光による誤差や、カメラレンズ収差による誤差等が含まれる。例えば、図-8 の 6.8s のときの γ_{max} 分布を見ると斜面右下部分は全く移動していないにもかかわらず、せん断ひずみが生じている。このような誤差を小さくすることもこれからの研究課題ではあるが、現時点でその誤差を許容範囲内に収める事は十分可能である。

P1 および P2 点に 30ml/s の流入を与えた場合について、図-4 に示す斜面上の①～⑤および図-7 に示す斜面上の⑥～⑩の測点を選び、浸透流入時間と各測点の変位を図-9 と図-10 に示す。図-9 に示す P1 点に 30ml/s の流入を与えた場合の斜面の水平方向には、22s を越えたあたりから始まっていること、22s から 27s までは斜面先のほうがより大きく動いていること、27s 以降いずれの測定点でも急激

に左方へ変化していることがわかる。鉛直方向には、22s から 27s までの間わずかではあるが上方に動くこと、27s 以降は下方に移動していることがわかる。一方、図-10 に示す P2 点に 30ml/s の流入を与えた場合の斜面の水平方向には、まず斜面先の測点に 9s あたりから変位が認められること、9s から 16s の間、斜面上方ではわずかに右側に動いていること、16s に達したところで、斜面先は大きく左側に動いていること、27s 付近で斜面上方も左側に大きく動くこと、がわかる。また鉛直方向には、9s あたりから変化がみられ、斜面先では下方向に、斜面上部では上方向に動いていること、16s あたりで斜面先の測点が大きく下方向に動くが、そこでも斜面上部の測点は上方に動き続けること、27s あたりから一転して斜面上部の測点も下方に大きく動くことが見て取れる。この条件の斜面崩壊では、浸透水が斜面上から流出した直後から、斜面先から順々に崩壊を起していることも目視により確認された。これらのことから、本試験のような斜面崩壊の場合には斜面先の変形が斜面の安定性に大きく寄与し、斜面先の変形のモニタリングが有効であることが改めて示唆された。

5. まとめ

PIVを用いた画像解析により浸透による斜面崩壊挙動を把握することを目的として、小型模型土槽を用いた斜面崩壊試験を行った。この結果、浸透水の流入場所が円弧すべり面に近く、その流入量が大きい場合、円弧状のすべり面を短時間で示す斜面全体を含むような崩壊となることが明らかとなった。また今回のような均質な斜面の場合には崩壊が先から順に起きることがわかった。

6. 今後の課題

小型模型土槽では全般破壊しやすいため、模型土槽サイズを大きくして同様の試験を行い、実地盤との比較・検討を行う必要がある。また実地盤では基岩が存在することが一般的であるため、基岩を考慮した同様の試験を実施していきたい。

参考文献

- 1) 丸山正, 木村孟, 廣岡明彦, 森有一郎: 地下水位上昇による斜面崩壊に関する基礎的研究, 第27回土質工学研究発表会講演集No.696, pp.1869~1872, 1992.
- 2) 吉迫和生, 廣岡明彦, 竹村次郎, 木村孟, 村石尚: 盛土斜面崩壊に関する実物大模型実験と遠心模型実験の比較, 第28回土質工学研究発表会講演集No.807, pp.2163~2164, 1993.
- 3) 前田賢悟, 下間英, 本多剛, Orense Rolando, 東畑郁夫: 降雨による斜面崩壊の予測に関する浸透模型試験, 第37回地盤工学研究発表会発表講演集No.1084, pp.2159~2160, 2002.
- 4) 南部光広, 安藤増実, 福田雅: 文献調査による地すべり・斜面崩壊の傾向, 豪雨時の斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測に関するシンポジウム発表論文集No.5, pp.29~38, 2002.
- 5) 西田義親, 八木則男, 二木幹夫: 雨水浸透による地盤内発生間隙圧と斜面安定, 土木学会論文集第262号, pp.91~100, 1977.
- 6) 八木則男, 矢田部龍一, 山本浩司: 雨水浸透による斜面崩壊, 土木学会論文報告集第330号, pp.107~114, 1983.
- 7) 八木則男, 矢田部龍一, 榎明潔: 降雨時の斜面崩壊に対する限界降雨量, 土木学会論文集第418号/Ⅲ-13, pp.65-73, 1990.
- 8) 山陽自動車道災害調査検討委員会: 山陽自動車道災害調査検討報告書, 2006.
- 9) Fawu Wang, Kyoji Sassa: Mechanism of the May 2004 landslide-debris flow at Bettou-dani side of Jinnosuke-dani landslide, Haku-san Mountain, Japan, 第41回地盤工学研究発表会発表講演集No.1082, pp.2163~2164, 2006.
- 10) 可視化情報学会編: PIVハンドブック, 2002.
- 11) 山口柏樹: 土質力学, 技報堂出版, 1969.

(2006年6月30日 受付)