降雨による粘性土斜面の崩壊実験

著者	福囿 輝旗, 寺島 治男
雑誌名	国立防災科学技術センター 研究報告
巻	29
ページ	103-122
発行年	1982-01
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00000878

国立防災科学技術センター研究報告　第29号　1982年10月

551. 311. 235.: 624. 131. 37

降雨による粘性土斜面の崩壊実験

福 囿 輝 旗*・寺 島 治 男*

国立防災科学技術センター

Experimental Study of the Process of Failure in Cohesive Soil Slope Caused by Rainfall

By

Teruki Fukuzono and Haruo Terashima

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

Experiments of slope failure caused by rainfall are described and results of these experiments are discussed.

Experimental models were made of loamy soil and had surfaces parallel to the impervious bottom, and their right and left sides were bounded by vertical steel walls. Two slope angles, 40° and 30°, were used in the experiments.

The slope models were 5 m in height, 4 m in width and 1 m in depth and their lengths were 7.2 m in 40° slope and 10 m in 30° slope. The rainfall intensity was maintained at 15 mm/h for 40° slope and 20 mm/h for 30° slope. Failure occurred 640 minutes after the beginning of rainfall in 40° slope, and 550 minutes in 30° slope.

The results are as follows:

1. Several failure planes were observed at the lower part of the slopes, one of them being a true sliding surface.
2. Outflow intensity from the bottom of the slopes decreased shortly before the failure.
3. The upper part of the slope subsided, while its lower part heaved before the failure.
4. The velocity of the surface displacement before the failures increased in four patterns: very little increase, uniform acceleration, uniform velocity and very rapid increase like an exponential function, and these occurred in succession.
5. The increment of the logarithmic velocity of the surface displacement is proportional to the logarithmic acceleration of the surface displacement in the period from 40 minutes to 2 minutes before the failure. These phenomena are analyzed for use in predicting the failure time of the slope.

* 第3研究部　降雨実験室

1. はじめに

降雨により発生する斜面崩壊は，毎年，多数の人命を奪い，鉄道・道路等の交通網をマヒさせ，あるいは家屋・公共施設等に甚大な被害を与えている．しかも，土地利用の高度化に伴い，斜面崩壊の発生と被災の危険性は増加しつつある．貴重な財産や人命を守るためには，崩壊の発生位置・規模・時間等の予測手法，崩壊の発生と被災の防止対策を急ぎ確立する必要がある．

このために，現在２つの立場からの研究がなされている．過去の災害事例を統計的に処理し，例えば，多変量解析による崩壊危険斜面のランク付け，あるいは，危険雨量を設定する等の確率論的な研究はその一つである．これらは現時点で行政的に広域な防災対策を計画する場合等には必要な研究である．

しかし，個々の斜面ごとに崩壊の危険性あるいは崩壊の時期等を知り，それぞれの斜面に合った個別の対策を立てるためには，崩壊を発生させる力学的なメカニズムを明らかにしていくことが必要である．筆者らの研究はこの決定論的立場に立つものである．

このためには，現場での種々の観測・観察がなされるべきである，しかしながら，降雨による崩壊は突発的に発生するために，発生位置・時期等の予測手法が確立されていない現在では，現実の斜面から崩壊している最中の詳細なデータを得ることは不可能であり，崩壊前後の限られたデータしか入手出来ない．また，現実の斜面は地盤構造・土質等が複雑で直接的に現実の斜面崩壊の力学的なメカニズムを考察することは困難である．

そのために，筆者らは，現実の斜面の地盤構造・土質等を単純化した模型斜面で崩壊実験を行ない，現場で指摘されている現象を詳細に解析するとともに，逆に実験で得られた新しい知見を現場データにより検証することによって斜面崩壊のメカニズムを明らかにして行く手法を取っている．

その際に問題となるのは実験結果と現場との整合性である．土を使用した実験，特に破壊現象を扱う際には重力を制御しない限り相似実験は不可能である．このために，なるべく実物大に近い大規模な模型を用いて実験を行なうことが有力な手法である．この考えのもとに，筆者らは実物大に近い大規模な模型を用いて，砂質土による一連の崩壊実験を行なってきた（寺島ら，1976，森脇，1978，福囿，1978等）．

しかし，砂質土斜面の崩壊実験だけで，現実の斜面崩壊を説明することは困難で，特に実際の斜面で崩壊の前に観察されるクリープ的な微小変形の機構を検討することは不可能であった．したがって，筆者らは砂質土による実験で得られた現象をふまえ，斜面崩壊機構をより広く解明していくことを目的として，粘性土による斜面崩壊実験を行なった．

本報文では，まず降雨による粘性土斜面の崩壊現象を順を追って解析し，つぎに，特に粘

性土の特徴であるクリープ変形に着目して崩壊直前の表面移動量による崩壊時期の直前予知の可能性について検討した結果を報告する.

2. 実験方法

斜面表面の傾斜角が40°の模型（40°斜面）と30°の模型（30°斜面）で計2回の実験を行なった.

砂質土による実験結果(福囿1978, 森脇1978) と対比させて崩壊機構を解析して行くために砂質土模型と同じ角度にした.

2.1 実験用土

茨城県筑波町産の関東ロームを使用した. 液性限界80.6％, 塑性指数18.2であり, 工学的土質分類では火山灰質粘性土（II型）VH_2である. 図1に粒径加積曲線を示す. 均等係数15.6, 曲率係数1.42, 60％粒径0.053㎜である. 含水比100％での三軸圧縮試験機による排水試験の結果は, 見掛けの粘着力が70 g/㎠, 内部摩擦角が20度であった. なお, この値は, 試験中軸応力が明瞭なピークを示さなかったので10％歪時の側圧と軸応力を用いて算出した. 表1に実験の初期条件と主要な結果等を示す.

2.2 模型の形状

図2に40°斜面模型, 図3に30°斜面模型の形状を示す. 砂質土の実験結果と比較するために同じ実験装置を使い, 模型形状を同じにした. 斜面表面と底面のコンクリー

表 1 実験初期条件と主な結果

Table 1 Initial experimental conditions and results.

模型	40°斜面	30°斜面
乾燥重量 γ (g/㎤)	0.47	0.58
初期含水比 wo (%)	127.1	91.4
降雨強度 (㎜/h)	15	20
地下水発生時刻 (分)	610 ～	380 ～
崩壊発生時刻 (分)	640	550
崩壊の形状	全層滑落	全層滑落

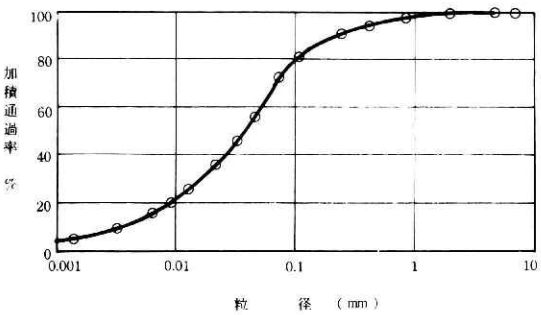


図 1 実験用土の粒径加積曲線

Fig. 1 Grain size accumulation curve of the cohesive soil used in the experiments.

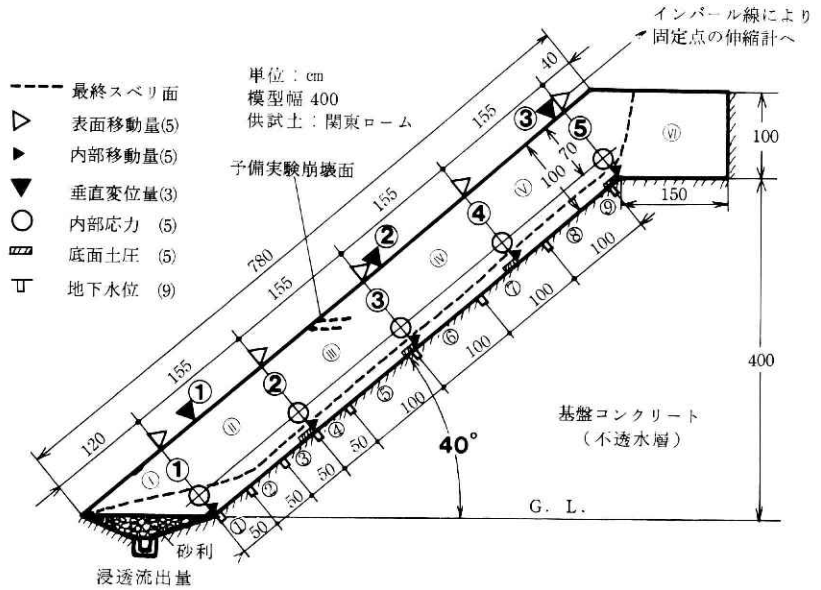


図　2　模型形状と測定位置（40°）

Fig. 2　Profile of the slope model and locations of measurement (40° slope)

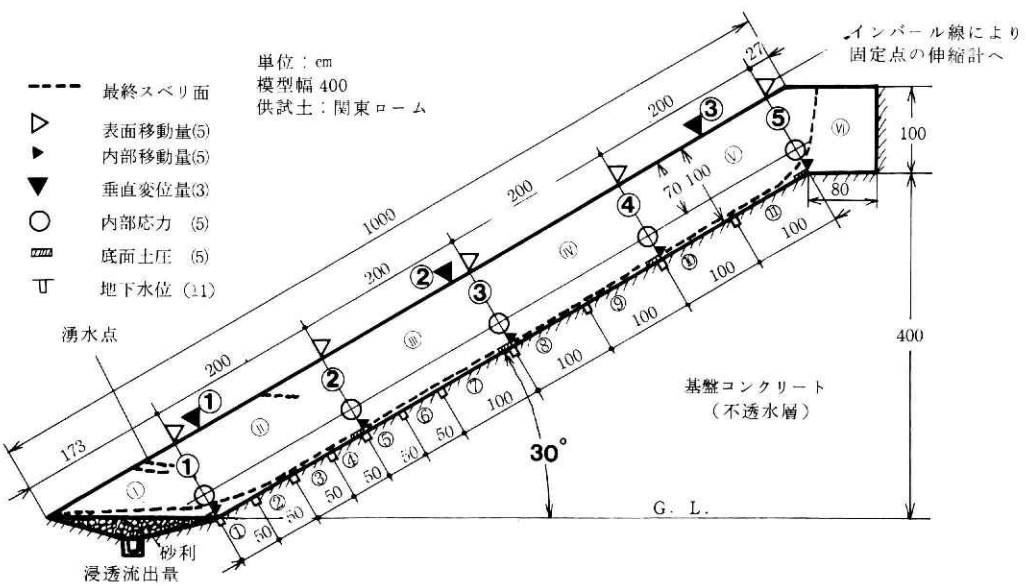


図　3　模型形状と測定位置（30°）

Fig. 3　Profile of the slope model and locations of measurement (30° slope).

ト基盤面が平行で，両側面は鉄板により仕切られている．崩壊が発生する実際の斜面は三次元的に複雑な構造を有しており，崩壊も三次元的に起きるのであるが，力学的に検討していくためには，まず二次元で基本的な機構を解析した上で，三次元に拡張して行くことが有効な手法である．そのために，力学的・水理学的に単純で，二次元的な崩壊が起こる構造とした．底面のコンクリートには凹凸をつけ，コンクリート面と土層の境界面で滑らない構造とした．斜面末端部は湧水による崩壊が発生しないように砂利による水抜きを行なった．模型斜面は水平方向の層厚約30cm毎に足踏で転圧しながら築造した．これは，これまでの実験からスベリ面の大部分が底面と平行になると予想されたために，その方向に弱線を作らないためである．

2.3 計測項目と方法

斜面全体の挙動を把えるために，全体を斜面長方向に6ブロックに分割して，5測点を設けた．各測点の配置は図2，図3に示す．移動量と内部応力を主に測定した．計測システムは図4に示す．表面移動量・内部移動量の固定点は斜面上部に設けてある．計器自体の分解能は0.1㎜程度であるが，可動部の抵抗等のため階段状に動き，第4章で述べるような崩壊の直前予知を行なうのに必要な測定データとしては不十分である．今後，精密なデータを必要とする場合には測器を含めて測定手法の改良が必要である．内部応力は，60°ずつ角度を違えて埋設した三方向の土圧計で測定した．底面土圧はコンクリート基盤面上に受圧面を表にして土圧計を固定し，基盤面に垂直に作用する圧力を測定したものである．

2.4 降雨入力

降雨の入力は当センターの大型降雨実験装置を使用した．本装置は15㎜/h～200㎜/h 間の任意の降雨強度で長時間安定した降雨を供給することが出来る．

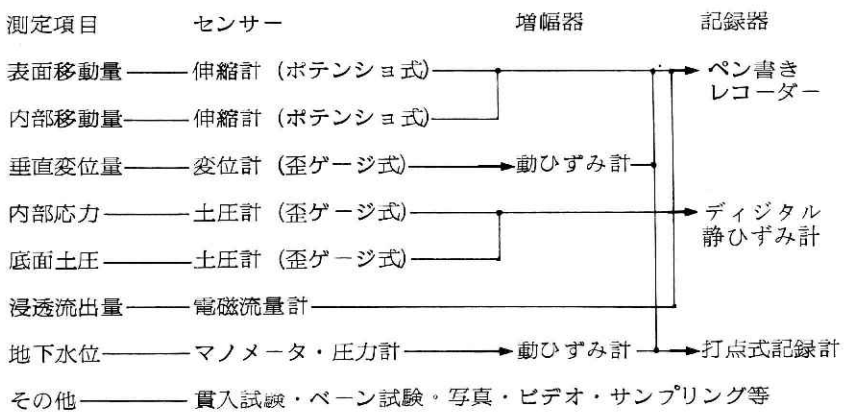


図 4 計測システム
Fig. 4 Measuring system.

降雨により斜面が崩壊する形態には様々なものがあり，表面流による侵食に起因するものもその一つであるが，一般的な崩壊の主たる要因ではない．そのために，ここでは取り扱わないことにし，表面流が発生しない程度の降雨強度に設定し，40°斜面は 15㎜/h，30°斜面は20 ㎜/h で散水した．

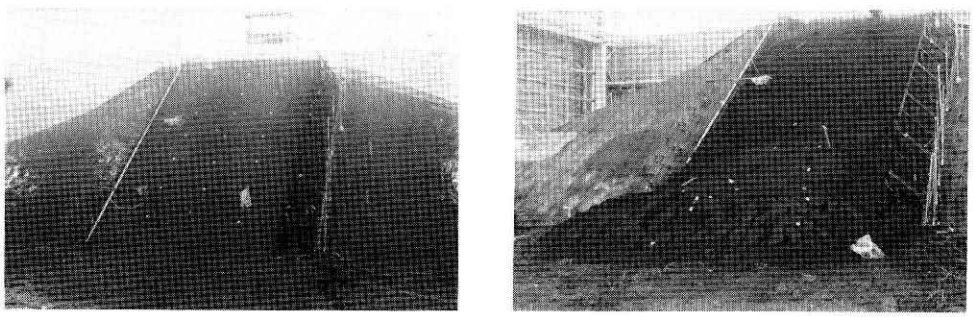
3. 実験結果及び考察

本章では 40° 斜面および 30° 斜面での崩壊実験により得たデータから考えられる粘性土斜面の崩壊機構について順を追って説明する．

3.1 40°斜面実験結果および考察

40°斜面は散水開始後640分で全層崩壊した．最終すべり面の形状は図２に破線で示す．砂質土の場合は基盤直上面がスベリ面となったが，今回の粘性土では基盤面上約20㎝の所がスベリ面になった．これは，土の破壊強度，剛性，粘性等の違いによるものであろうが，解析は困難で今後の検討課題である．

各測点の位置と番号およびブロックの番号を図２に示す．写真1に散水開始直後と崩壊後の状況を示す．



散水開始直後　　崩　壊　後

写真　1　散水開始直後と崩壊後の状況（40°斜面）

Photo. 1 40° slope under a constant rainfall of 15 mm/h and its view shortly after the failure.

1）表面と内部の変形について

現実の斜面崩壊で最も観測しやすく，かつ有益なデータを与えてくれるものは表面の変動である．例えば，クラックの発生，斜面下部のせり出し等が崩壊の前兆として観察される．したがって，表面の変動と関連ずけて斜面内部の破壊機構を解析することは，実験結果と現場とを対比するために非常に有効である．その意味で，ここでは主として斜面表面の移動量に着目し，それに関連ずけて他のデータを解析することにした．

図５－a に表面移動量の経時変化を示す．なお，斜面が崩壊した時刻は目視により明らか

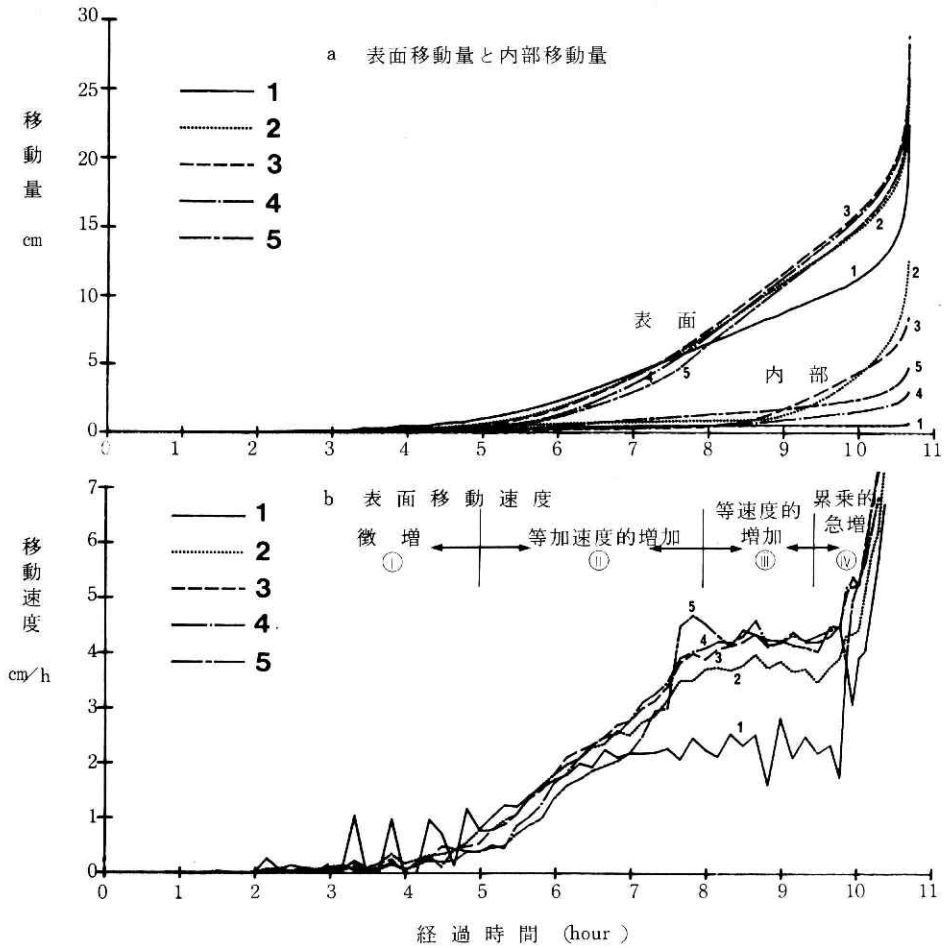


図 5 表面移動量，内部移動量及び表面の移動速度の経時変化（40°斜面）

Fig. 5 Dynamical characteristics of the surface displacement, the internal displacement at bottom and the velocity of the surface displacement (40° slope).

に急激な移動が確認された時刻を取っている．図5－bに表面の移動速度（図5－aで示される表面移動量の時間微分）を示す．この図から，表面の移動は①微増，②等加速度的増加，③等速度的増加，④累乗的急増の4段階に分けられる．③④段階は土のクリープ破壊のいわゆる2次，3次クリープに類似している．この段階は崩壊の直前予知の際の有効なデータとなり得るものであり，特に④段階について第4章で説明する．

③段階にはいる頃は浸潤前線がほぼ基盤面上に到達した時刻（本報告では述べないが，土中の比抵抗の変化状況から確認されている）である．したがって，①②段階は浸潤前線の降下に伴って土の含水量が増し，剛性・粘性等の土の力学的性質が変化したために生じた動きであると考えられる．

Ⅲ段階にはいる頃から図5－a に示すように，底面から10cm上にある内部移動量の測点②③④が顕著な動きを示す．なお，これらの測点は最終スベリ面より下方，すなわち滑落しなかった部分に位置している．表面移動量の測点⑤ではこの頃に一時的に移動速度が急増して，急減している．これは斜面上部にクラックが確認された時刻とほぼ同じである．

図6にブロックⅡ～Ⅴの圧縮状況を示す．斜面上部ⅣⅤはむしろ初期状態よりも伸びて崩壊する．圧縮されるのは斜面下部のⅡⅢであることにより，斜面中央部付近から上部と下部では力の釣合状態が異なっており，下端の支持力による影響が大きく作用するのはⅢまでであると推察される．

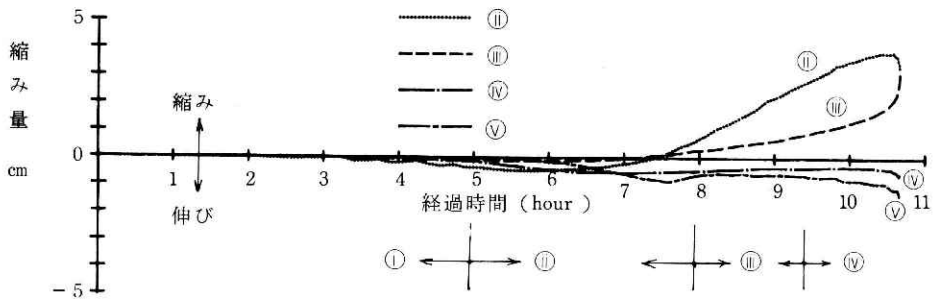


図　6　表面の縮み量の経時変化（40°斜面）

Fig. 6　Compression of the slope surface (40° slope).

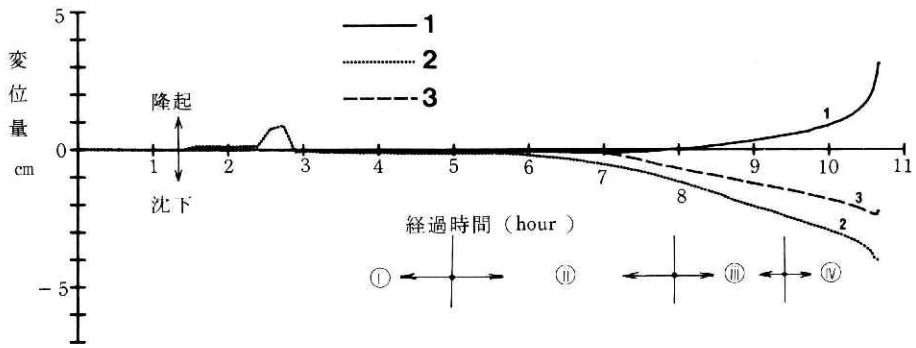


図　7　表面垂直変位量の経時変化（40°斜面）

Fig. 7　Vertical displacement of the slope surface (40° slope).

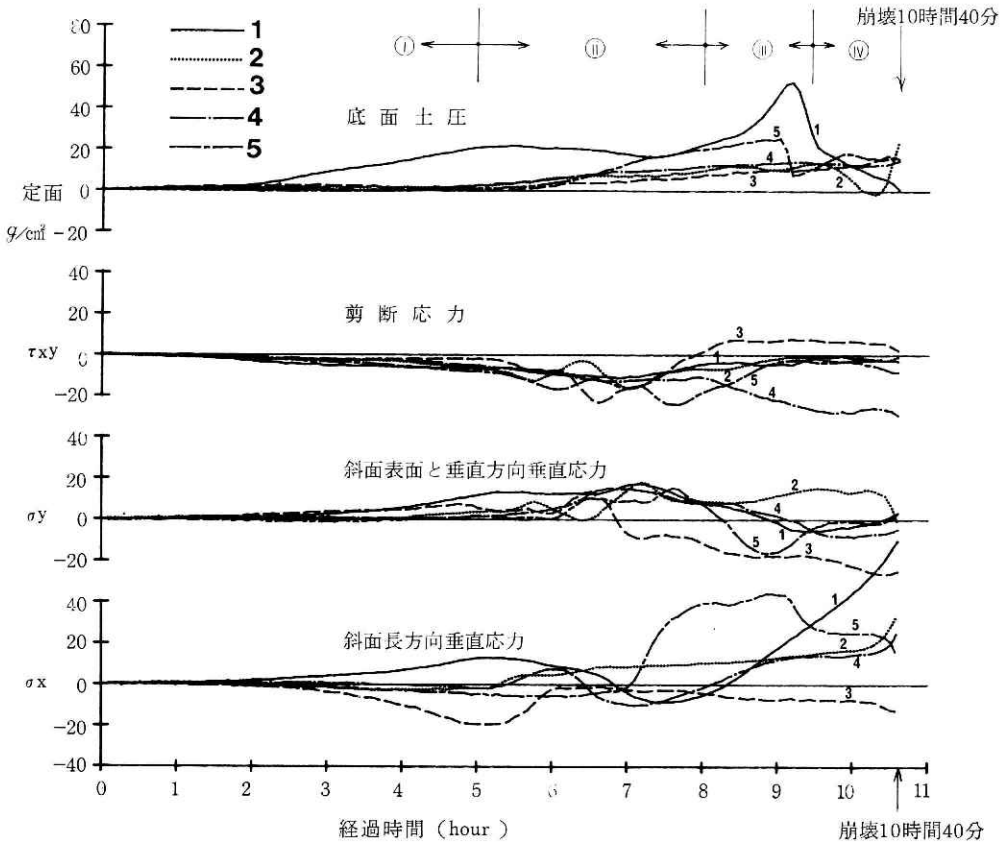


図　8　内部応力と底面土圧の経時変化（40°斜面）

Fig. 8　Internal stress and earth pressure measured at bottom (40° slope).

Ⅳ段階にはいるとⅡは圧縮速度が減少し，最終的には伸びとなる．Ⅱの斜面上部にあるⅢはこの時逆に圧縮速度が急増する．これは崩壊直前に最終スベリ面とは異なる破壊面がⅢに観察されたことから，破壊面の形成に伴ってⅢの圧縮速度が増し，Ⅱはこの破壊面により上部ブロックからの力の伝達割合が減少したために圧縮速度が減少したものと推察される．なお，予備実験では図2に示すようにこの破壊面とほぼ同じ位置が最終スベリ面になった．

図7に表面の垂直変位量の経時変化を示す．斜面上部付近の沈下，斜面下部付近の隆起現象がⅡ段階の終り頃から顕著である．

2）内部応力状態について

図8に各測点における斜面長方向の垂直応力（σ_x），斜面表面と垂直方向の垂直応力（σ_y），剪断応力（τ_{xy}）および底面土圧の経時変化を示す．なお，降雨開始時の値からの変化

量である．①～Ⅳは表面の移動量の４段階である．

①段階は浸潤前線がまだ各測点まで到達していない時期であり，増加あるいは減少が一様な傾向を示している．垂直応力は各測点で異なった変化をしているが，剪断応力はどの測点ともほぼ同じような減少を示している．なお，剪断応力が減少するということは土層が斜面表面と平行な方向に滑り落ちようとする力が増すことを意味する．長大斜面の考え方（福囿，1978）から，供給された雨水の分だけの重量増による剪断応力の減少（$\Delta\tau_{xy}$）は次式で計算される．

$$\Delta\tau_{xy}=\gamma_w \cdot rt\cos\theta \cdot \sin\theta \quad (g/cm^2)$$

ただし，γ_w：水の単位体積重量（g/cm³），r：雨量強度（cm/h），t：散水した時間（hour），θ：斜面傾斜角（度）

$\gamma_w=1$ g/cm³，$r=1.5$ cm/h，$t=5$hour，$\theta=40°$ を代入すると，$\Delta\tau_{xy}=3.7$ g/cm² となる．測定値は12～17g/cm² であり４～５倍である．このことは浸透水による土の力学的性質の変化に伴う応力変化の方が単なる重量増よりもはるかに大きいことを意味する．

Ⅱ段階は変動の激しい時期である．この段階は浸潤前線が各測点付近を通過するときであり，この際に応力状態は大きく変動するものと思われる．また，計器のなじみ等の初期埋設状態の影響を受けたことも考えられる．これらの意味づけは浸潤前線の移動に伴う斜面の応力状態の変化を解析することにより可能であるが，斜面の応力状態を解析的に求めることは困難であり今後の課題である．なお，測点⑤で，７時間から8.時間にかけて，斜面長方向の垂直応力が急上昇している時期は表面のクラックの発生時期および表面移動量の測点⑤が急増している時期に相当する．

Ⅲ段階はⅡ段階に比較して変化が少ない時期である．ただし，この時期から斜面下部の測

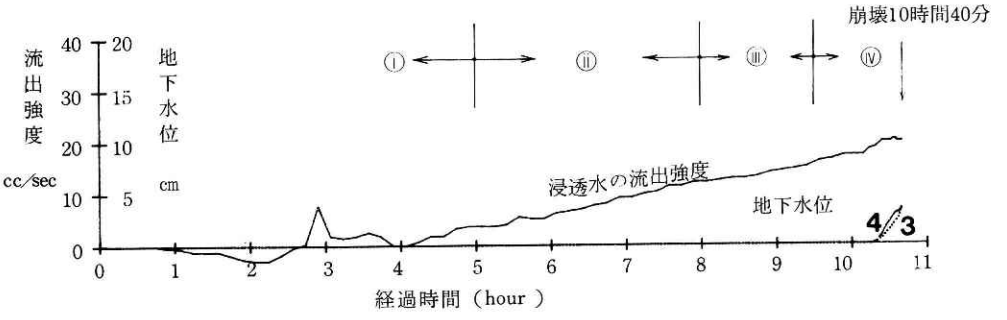


図　9　浸透水の流出強度と地下水位の経時変化（40°斜面）

Fig. 9　Outflow intensity and groundwater level (40° slope).

点①の斜面長方向の垂直応力が急増しはじめる．また，この段階の終り頃，9時間から9時間半にかけて，斜面最下部の測点①と最上部の測点⑤において応力が急変している．特に測点①の底面応力が急減する現象は砂質土斜面の場合にもよく観察され，崩壊の前段階として破壊面の形成に発展していく重要な現象である（福囿，1978，寺島他1980）．

Ⅳ段階では斜面最下部の測点①の斜面長方向の垂直応力の増加が著しく，最終的には測点②でも増加が見られる．しかし，測点③では減少しており，前述のⅢブロックに破壊面が形成されたことに対応している．

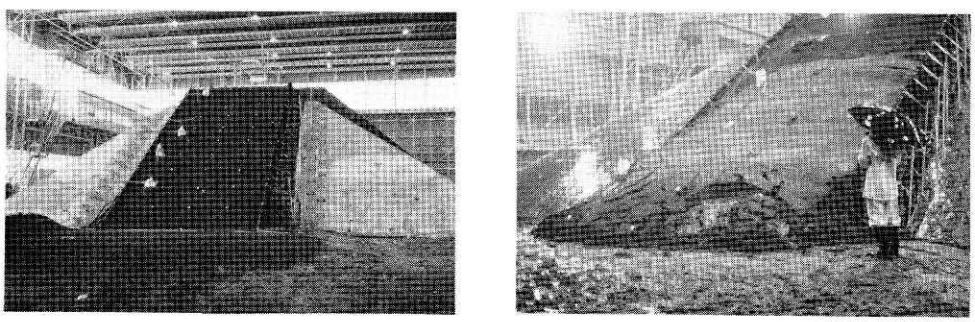
3） 浸透流出量と地下水位について

図9に浸透水の流出強度と地下水位の経時変化を示す．地下水位は3番と4番以外では観測されず，しかも崩壊の20～25分前からである．また，浸透水の流出強度はほぼ直線的な変化を示し，基盤面上に現われた地下水が流出して来ている様子はない．このことと，最終スベリ面が基盤上20cm位の所に出来たことから，崩壊をもたらす土の破壊強度の低下が地下水によるものではなく，不飽和状態での含水量増加に起因するものであると推察される．なお，図9で1時間から4時間にかけて，浸透水の流出強度が負になったり，極端に増加したりしているのは流量計より下流の排水方法の不備によるものである．

3.2 30°斜面実験結果および考察

30°斜面は散水開始後550分で全層崩壊した．最終スベリ面の形状は図3に破線で示す．基盤面の直上がスベリ面になっており，40° 斜面の場合と異なる．

各測点の位置と番号およびブロックの番号を図3に示す．写真2に散水開始前と崩壊後の状況を示す．



散水開始前　　崩　壊　後

写真　2　散水開始直前と崩壊後の状況（30°斜面）

Photo. 2　30° slope under a constant rainfall of 20 mm/h and its view shortly after the failure.

1）表面と内部の変形について

図10－ａに表面と内部の移動量，同図ｂに表面の移動速度の経時変化を示す．40°斜面の場合と同様に①，⑪，⑩，⑫段階に分けられる．ただし，⑪段階が完全な等加速度的ではないが，全体的な傾向は40°斜面と同様である．図11に各ブロックの縮み量を示す．⑫ブロックおよび⑬ブロックは崩壊直前の急激な伸びを除くとほとんど変化がなく，表面の測点③，④，⑤はほぼ同じ動きをしている．これは40°斜面の場合と同様である．

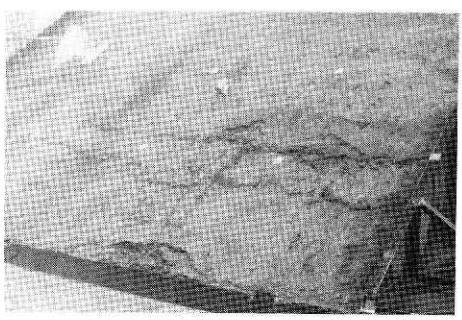
⑩段階の等速度の値は40°斜面の場合よりも小さい．移動方向への垂直力が小さく，底面の剪断支持力が大きいからであると考えられる．⑫段階への移行過程として崩壊の直前予知の観点から重要な現象であり，今後検討すべき課題の一つである．

内部移動量の測点②は表面移動量の測点②と⑩段階の終り頃から移動速度がほぼ等しい．したがって，この付近の土層はこの時点で底面にスベリ面が形成されたのではないかと推察される．

散水開始後約５時間（⑪段階の終り頃）に最終スベリ面とは異なる斜面末端から１ｍの付近（図３）の位置にほぼ水平な破壊面の乗り上げが上下２つ（写真３）観察された．その後，徐々に大きくなり，８時間30分後（崩壊前40分）に上側の破壊面から湧水（写真３）が始まった．湧水による破壊が上部へ約１ｍ進行した時点で図２に示す最終スベリ面を持つ崩壊が発生した．このことは斜面下部付近では，至る所破壊の極限状態に近かったことを示している．また，破壊面からの湧水は基盤面上の地下水が流出する位置ではないこととその後の破壊の進行が遅いことから基盤面上の地下水が流出したのではなく破壊面が浸透水の流れに対する不連続面となったために起こったものと思われる．湧水は一般的に崩壊を促進させる作用があると言われているが，今回の場合は別の面が最終スベリ面になったことから全体崩壊にほとんど影響を与えなかったと思われる．



破　壊　面



湧 水 開 始

写真　3　300分後に観察された斜面下部付近の破壊面と510分後の湧水状況（30°斜面）

Photo. 3　Outside view of the sliding surface at the lower parts of 30° slope about 300 minutes after the beginning of rainfall and the failure that occurred about 510 minutes.

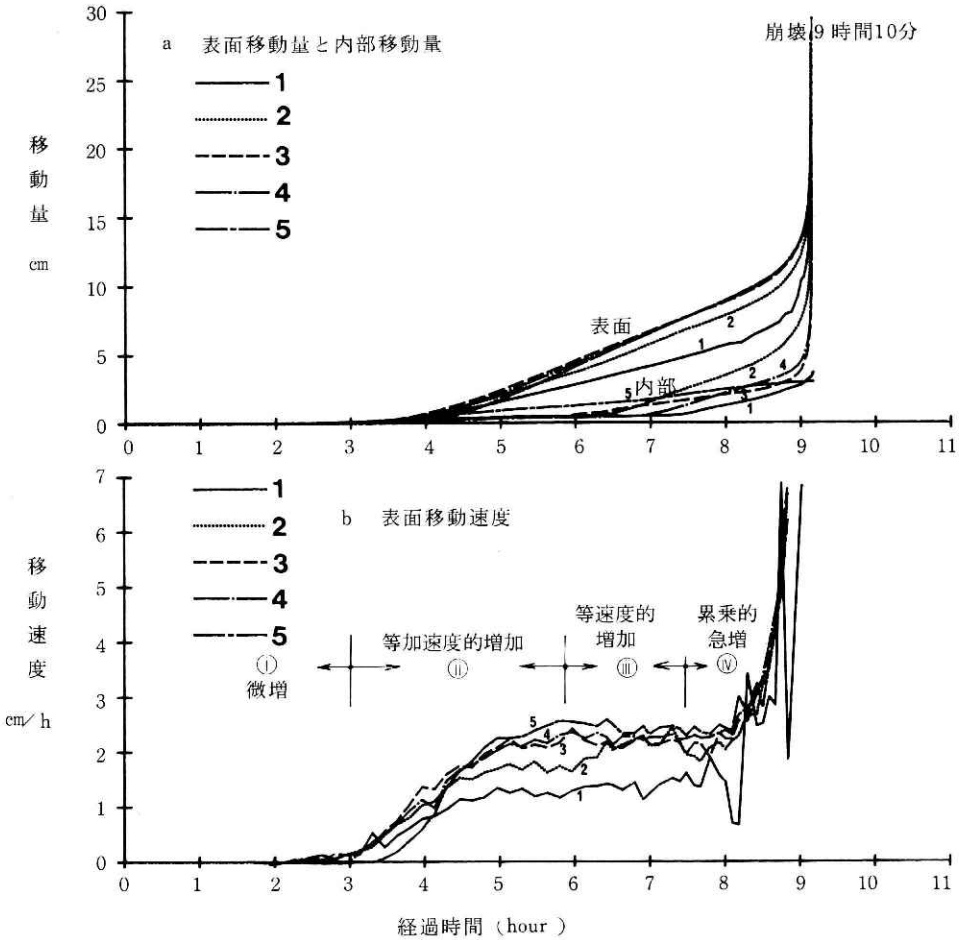


図 10 表面移動量，内部移動量及び表面移動速度の経時変化（30°斜面）

Fig. 10 Dynamical characteristics of the surface displacement, the internal displacement at bottom and the velocity of the surface displacement (30° slope).

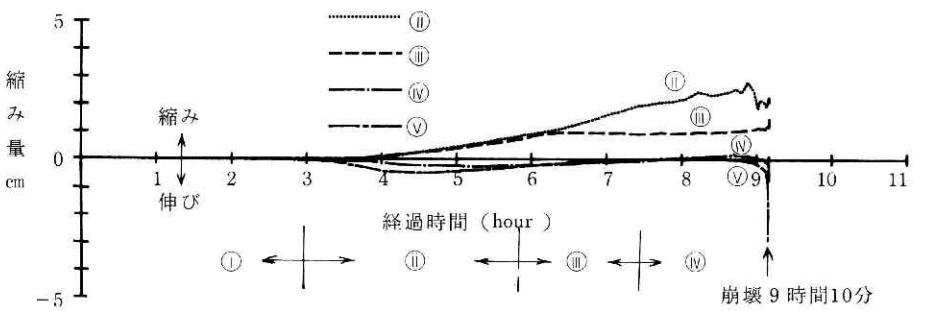


図 11 表面の縮み量の経時変化（30°斜面）

Fig. 11 Compression of the slope surface (30° slope).

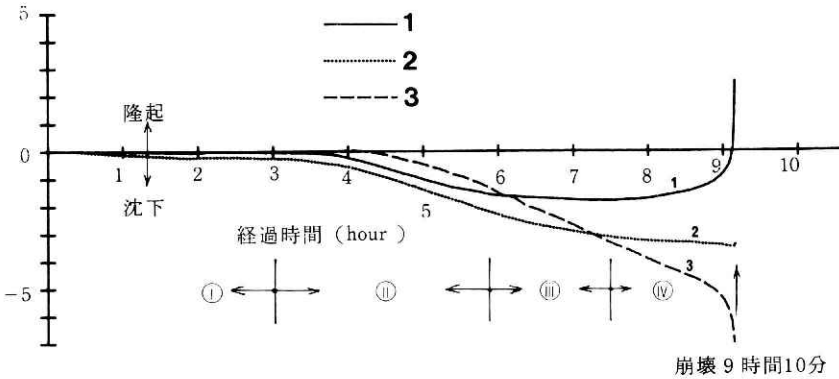


図　12　表面の垂直変位量の経時変化（30°斜面）

Fig. 12　Vertical displacement of the slope surface (30° slope).

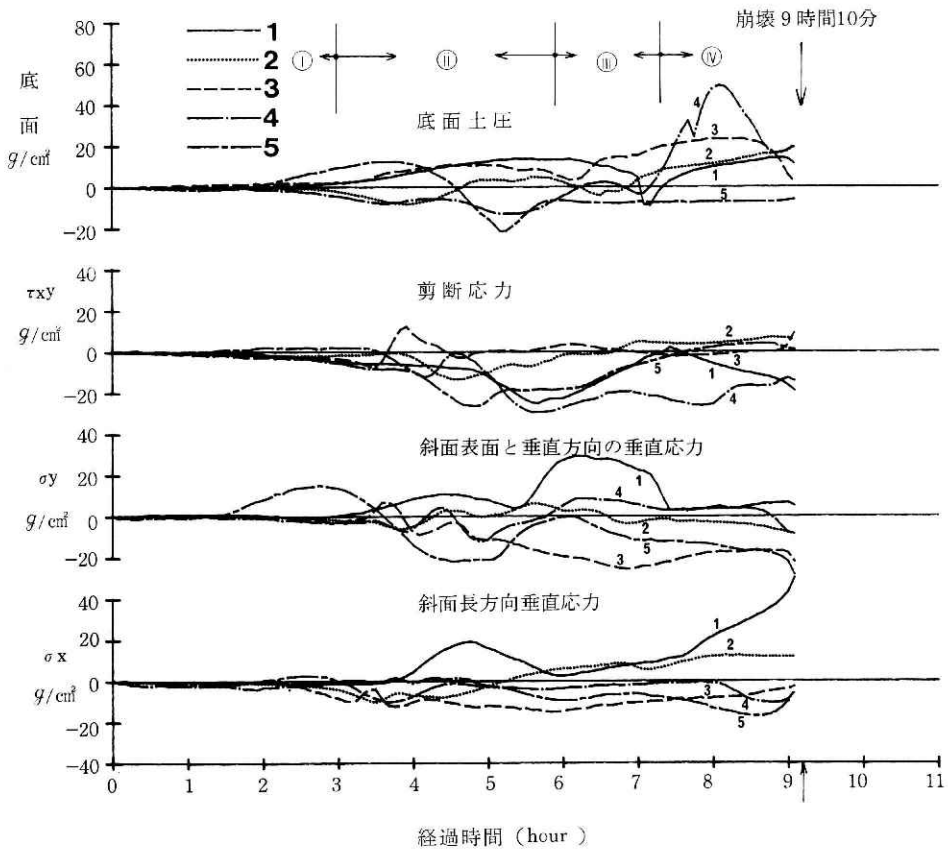


図　13　内部応力と底面土圧の経時変化（30°斜面）

Fig. 13　Internal stress and earth pressure measured at bottom (30° slope).

崩壊数分前には図３に示すように，Ⅲブロックの中程にほぼ水平方行に破壊面らしき乗り上げが観察された．これは40°斜面で見られた現象と同様である．この破壊面は30㎝位の深さまでほぼ水平にはいっており，それより内部は不明瞭であった．

図12に斜面表面の垂直変位量の経時変化を示す．散水開始後土層は浸透水の降下に伴って全体的に沈下しているが，Ⅳ段階にはいる頃から下部隆起，上部沈下の現象が区別出来る．なお，目視により確認出来る程の隆起は崩壊直前の数分間である．

2） 内部応力状態について

図13に内部応力と低面土圧の実験開始時の初期値からの変化量を示す．40°斜面の場合と同様に①Ⅱ Ⅲ Ⅳ段階に対応した変化をしているが，もっと複雑である．最終Ⅳ段階において斜面長方向の垂直応力が増加するのは測点①に限られる．また，測点①のⅢ段階の終り頃の応力状態の急変は40°斜面の場合に３－１節２）で説明した破壊面の形成に発展して行く現象と同じである．

3） 浸透流出量と地下水位について

図14に浸透水の流出強度と地下水位の経時変化を示す．４時間30分～５時間の流出量が

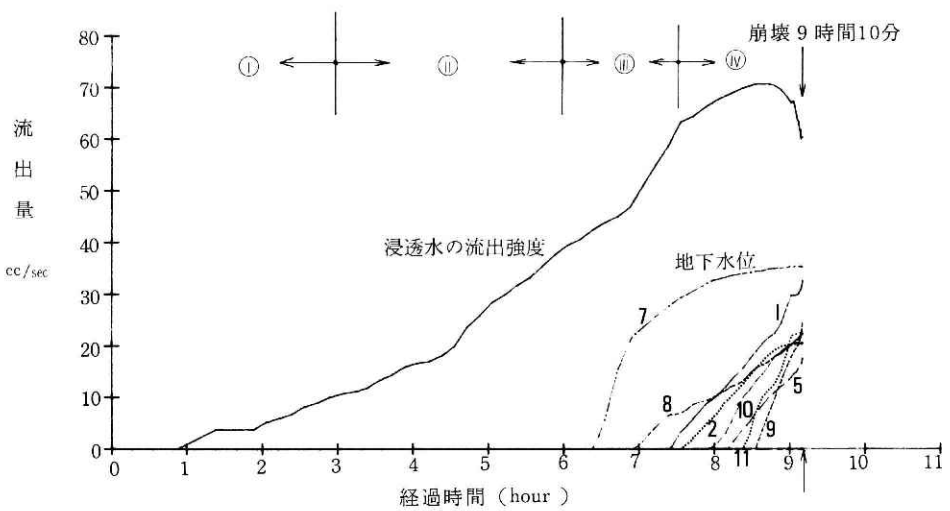


図 14 浸透水の流出強度と地下水位の経時変化（30°斜面）

Fig. 14 Outflow intensity and groundwater level (30° slope).

急に変化する時刻は浸潤前線が基盤面に到達した時刻とほぼ同じである．７時間頃の流出強度の増加は地下水が発生し始めた時刻である．40°斜面の場合にはこれらの現象は見られなかった．Ⅳ段階にはいる７時間30分頃から流出強度の増加の割合が減少し，８時間40分頃から流出強度が減少しているのは，表面の垂直変位が測点①において上昇に転じ，斜面長方向垂直応力が最下部の測点①において急激に増加し始める下部の圧縮によるものであると思わ

れる．３－２節２）で述べたように破壊面等に水が蓄えられることも一因であろう．これらの現象は砂質土による実験でも見られ，現実の崩壊事例で崩壊直前に湧水が減少したり，水が濁ったりする現象に相当するものと考えられる．

4. 表面移動量による崩壊の直前予知

この章では⑩段階の表面移動量から崩壊時期の直前予知が可能であることについて述べる．

斜面は崩壊するかなり前から，目視では確認出来ない非常にゆっくりした速度で変動していることはよく知られている．降雨による崩壊の際も実験等によりこの現象は確認されている（寺島ら，1976）．しかし，変動を始めたら必ず崩壊するというわけではなく，時には動きが止まることもある．斜面がゆっくりしたある一定の速度で動いており，そのままの状態を持続している場合には，はたして今後この斜面が止まるのかそれとも崩壊するのかは判定がつかない．ここで，速度に変動が起こるつまり加速度が生じたならばどちらかに推定することが出来る．この観点から表面移動量の実験データを速度と加速度とについて考察した．図15，図16はそれぞれ40°斜面，30°斜面の崩壊40分前から２分前までの測点③における速

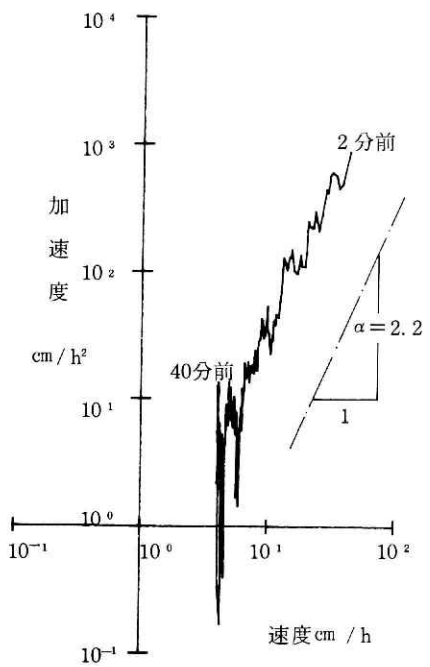


図　15　崩壊の40分前から２分前までの表面移動速度と加速度の関係（40°斜面）

Fig. 15　The velocity and the acceleration of the surface displacement on the period from fourty to two minutes before the failure of slope (40° slope).

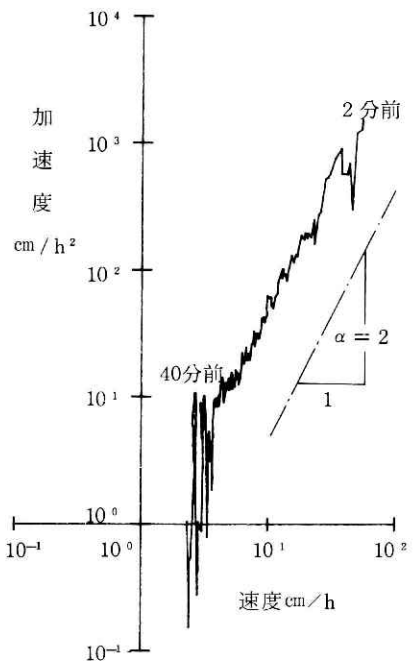


図　16　崩壊の40分前から２分前までの表面移動速度と加速度の関係（30°斜面）

Fig. 16　The velocity and the acceleration of the surface displacement on the period from fourty to two minutes before the failure of slope (30° slope).

度と加速度を両対数グラフで示したものである．測定値の差をとって割り算をしなければならないために，表面移動量の測定誤差が増幅されてかなりのバラツキがあるが，ほぼ直線と見なせる．両対数グラフで直線であるから，数式で表わすと次式となる．

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a\left(\frac{dx}{dt}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

ただし，x：斜面長下方向への表面移動量，t：時間，$a \cdot \alpha$：定数である．

なお，前報（福囿，1981）では，㈢段階を考慮して，$\frac{d^2x}{dt^2} = a\left(\frac{dx}{dt}+b\right)^{\alpha}$ としたが，その後の検討で $b=0$ の方が適合性が良いことがわかったので，(1)式とした．

$a<0$ の場合は加速度が負となり移動が止まりつつあることを，$a=0$ の場合は本実験の㈢段階のような等速運動を表わし，$a>0$ の場合が本実験の㈣段階に相当する．(1)式を解くことにより崩壊前数十分間の表面移動量を表わす関数形が決まる．一回積分して速度の形で表わすと，α の値によって異なり，次式となる．

$\alpha<1$ の時　$$\frac{dx}{dt} = \{a(1-\alpha)\}^{\frac{1}{1-\alpha}}(t_1+t)^{\frac{1}{1-\alpha}} \tag{2}$$

$\alpha=1$ の時　$$\frac{dx}{dt} = C^{a(t_2+t)} \tag{3}$$

$\alpha>1$ の時　$$\frac{dx}{dt} = \{a(\alpha-1)\}^{\frac{1}{1-\alpha}} \cdot \frac{1}{(t_3-t)^{\frac{1}{\alpha-1}}} \tag{4}$$

ただし，t_1, t_2, t_3 は積分定数である．

(2)式は駒村（1976）が地すべり土塊の動きを説明するために提案している粘土の第3次クリープ領域を表わす式 $a_0 t^{\alpha_0}$（a_0, α_0：定数）と同形である．また，$\alpha=2$ とおくと

$$\frac{dx}{dt}(t_3-t) = \frac{1}{a} \tag{5}$$

となり，斉藤（1968）が2次クリープ領域で得られた結果を3次クリープ領域に拡張し，崩壊時期の直前予知に使用している式と同形である．両氏がそれぞれ異なる仮定から導出した式が同じ形の微分方程式で表わされるのは興味深いことである．なお，(1)式は単に実験結果を表わす式であり，今後理論的な検討を加える必要がある．

今回の実験では，図15，図16に示すように40°斜面では $\alpha=2.2$，30°斜面では $\alpha=2$ であり，(4)式に相当する．また，(4)式は $t \to t_3$ の場合，速度が無限大になり，この t_3 を崩壊時刻と見なすことにより崩壊予想時刻を容易に決定することが出来る．他の式ではある有限の速度の時点を崩壊時刻と決めなければならず，いつの時点を崩壊と見るかによって差が生じてくる．なお，実際は速度が無限大になることはなく，ある有限の速度であるが，目視不可能で精能の良い計器でしか観測出来ないような微少な速度（本実験では 10^{-4} cm/sec 程度）

に対して，明らかに動いていることが目視でも観察される数cm/sec の速度では数万倍の違いがあり，ほぼ無限大と考えても大差がない．

今，(4)式で $\alpha=2$，すなわち(5)式を用いて，表面移動量のデータから崩壊時期の予測を行なった結果を図17に示す．パーソナル・コンピューターを用いて，ある時点までのデータから最小2乗近似で最終崩壊時刻を予想したものである．アルゴリズムの詳細は別途報告する予定であるのでここでは省略する．横軸の右端原点が実際に崩壊した時刻で左の方向に崩壊前の何分かを目盛ってある．縦軸は，ある時点でのそれまでに得られたデータを用いて予想

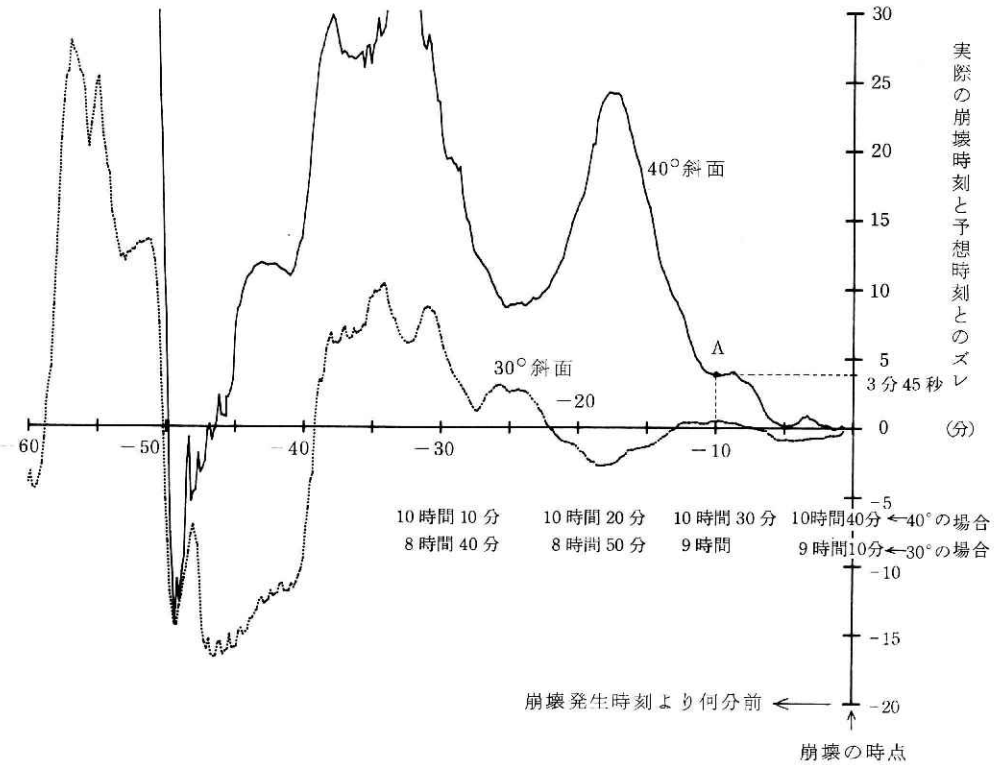


図　17　$\frac{dx}{dt}(t_3-t)=1/(\alpha-1)$ で予想した崩壊時刻と実際の崩壊時刻との差

Fig. 17　Rupture time estimated by the relation $\frac{dx}{dt}(t_3-t)=1/(\alpha-1)$ and the failure time of the slope.

した崩壊時刻から実際の崩壊時刻を引いた値である．0の場合が予想と実際がピッタリ一致したことを，また，正の側にずれれば予想した時間よりも早く崩壊が発生したことを意味する．例えば図中 40°斜面のA点は，散水開始後10時間30分（崩壊前10分）にそれまでの表面移動量の時系列データから計算した結果10時間43分45秒に崩壊するという予想となったが，実際の崩壊は10時間40分に発生したためその誤差が3分45秒であることを表わしている．従って，横軸からの曲線の離れ具合により，予知手法の有効性が示されることになる．30° 斜

面の場合は崩壊の30分位前から2～3分の精度で予知が可能である．また，40°斜面の場合も崩壊前5～6分から1分以内の精度で予知されており，有効な予知方法であることがわかる．

ところで，40°斜面の場合，崩壊40分前～10分前では実際の崩壊時刻よりもかなり遅い時刻を予想している．これは，$\alpha=2.2$ であるところを $\alpha=2$ と仮定して計算したためである．予想した時刻よりも早く崩壊が発生したら防災上はむしろ危険側になる．このために，$\alpha>2$ の場合も予測出来るようにするために(4)式を使って予測の方法を考えてみた．両辺の対数を取って微分して整理すると

$$\frac{\frac{d^2x}{dt^2}}{\frac{dx}{dt}} \cdot (t_3-t)=\frac{1}{1-\alpha} \tag{8}$$

となる．

この式は $\alpha=2$ のみに限らず，$\alpha>1$ の範囲で予測可能である．ただし，速度あるいは加速度の非常に小さい値を直接測定することは困難であり，測定方法を検討する必要がある．(8)式を使った40°斜面の予測結果を図18に示す．移動速度が比較的大きい崩壊前7～8分間

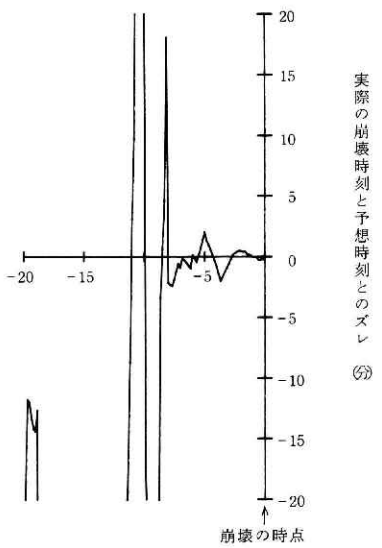


図 18 $(\frac{d^2\hat{x}}{dt^2})/(\frac{dx}{dt})(t_3-t)=1/(\alpha-1)$ で予想した崩壊時刻と実際の崩壊時刻との差

Fig. 18 Rupture time estimated by the relation $(\frac{d^2x}{dt^2})/(\frac{dx}{dt})\cdot(t_3-t)=1/(\alpha-1)$ and the failure time of the slope.

では1～2分の精度で予知出来ている．特に崩壊前7～8分頃の予想が安全側であることは評価される．しかし，移動速度の小さい崩壊10分以前では予測不可能であった．これは速度・加速度を求める際に表面移動量測定データの差を取って割り算を行なうため測定誤差等が増

幅され，バラツキが大きくなるからである．この点については，今後，測定手法，データ処理法等に詳細な検討を加え，改良して行く予定である．

5. おわりに

本報文では，降雨による粘性土（関東ローム）斜面の大規模な崩壊実験を行ない，得られた測定結果から粘性土斜面の崩壊現象を斜面表面の変動をもとにして説明することを主に報告した．

砂質土斜面と比較して，粘性土斜面はクリープ的な微小変形が顕著であり，崩壊までに表面の移動が①微増，②等加速度的増加，③等速度的増加，④累乗的急増の4段階を経ることがわかった．①～③段階については，今後，浸透水の動きと対比させて，土質力学的に詳細な解析を行なう予定である．④段階における崩壊直前の数十分間の表面の変動は，崩壊を直前で予知し，避難のための警報を発する際の有効なデータとなり得ると考え，詳細に検討した結果，速度と加速度が両対数グラフ上でほぼ直線であることがわかり，これを解析することにより降雨時に多発する比較的規模の小さい斜面崩壊でも崩壊の直前予知が可能であることがわかった．この点は，今後事例を集積し，適用限界を検討するとともに，理論的な考察を加えて行く予定である．

最後に，本実験を遂行するにあたり，当降雨実験室の研究員諸氏，特に，富永雅樹氏には浸透水の挙動把握，井口隆氏には実験の記録と崩壊後のトレンチ調査の点で有益な御指導・御援助を得た．また，施設課の青木秀夫・中野照明両氏には長時間にわたる実験にもかかわらず降雨装置の運転操作の面で御支援を得た．末尾ながら，ここに記して謝意を表する．

参　考　文　献

1）福囿輝旗（1978）：降雨による斜面崩壊と内部応力状態について．国立防災科学技術センター研究報告，No.**20**，101～122.
2）福囿輝旗（1981）：斜面崩壊時の表面変位速度と加速度について．土木学会第36回年次学術講演会講演概要集第3部，302～303.
3）**駒村富士弥**（1976）：地すべり土の挙動に関するレオロジー的研究（Ⅱ）．新砂防，No.**101**，17～19.
4）森脇寛（1978）：斜面崩壊の発生過程について（Ⅰ）—降雨による表層崩壊実験—．　国立防災科学技術センター研究報告，No.**19**，51～64.
5）斉藤迪孝（1968）：第3次クリープによる斜面崩壊時期の予知．地すべり，4巻3号，1～8.
6）寺島治男ら（1976）：斜面崩壊機構に関する実験的研究（Ⅰ）．国立防災科学技術センター研究報告．No.**15**，75～88.

（1982年6月28日　原稿受理）