

降雨による砂質土斜面の崩壊発生時期の予知法に対する検討

CONSIDERATION ON PREDICTION METHOD FOR OCCURRING TIME OF SLOPE FAILURE DURING SEEPAGE OF RAINFALL

矢田部龍一*・八木則男**・榎 明潔***

By Ryuichi YATABE, Norio YAGI and Meiketsu ENOKI

In order to develop a prediction method for the occurring time of a slope failure due to rainfall, the experiments and analyses were carried out. The pore pressures increased sharply from about ten minutes before the failure, while almost no displacement of the slope surface and no strain in the slope was measured. Then the prediction method based on the measurement of pore pressure in a slope during a seepage of rainfall seems to be probable. The seepage characteristic and the thickness of permeable layer have a great influence on the total rainfall till the slope failure. The quantity of successive rainfall for the slope failure can be accurately estimated by numerical analysis if the pore pressure distribution in the slope is known.

Keywords : prediction of slope failure, field experiment, pore pressure, seepage analysis, stability analysis

1. まえがき

近年、集中豪雨による土砂災害が多発し、多大な被害がでている。経済的な制約があって防災対策を完全には行えない現状では、斜面崩壊発生時期の予知法を確立することが急務である。斜面崩壊発生時期の予知法としては斎藤¹⁾のひずみ速度の変化による方法が有名であり、実際多大な成果をあげている。また、崩壊発生前の斜面の変動に着目したものとしてはひずみ速度の変化以外にも、地表面の傾斜の変動²⁾、微小音³⁾を測定することにより予知する方法なども提案されている。さらには、崩壊の誘因である降雨に着目して過去のデータに基づき危険降雨量を設定し、崩壊発生時期の予知を行う試み⁴⁾もなされている。このように崩壊発生時期の予知に対して各種の試みがなされているが、まだ多くの問題も残されている。特に、降雨による砂質土斜面の小規模な表層崩壊の発生時期の予知に対しては、確固たる方法が確立されていないのが現状である。砂質土斜面の崩壊発生時期の予知に斎藤の方法を適用した例⁵⁾が見受けられるが、

降雨時の砂質土斜面の場合、降雨浸透に伴い有効応力が変化するし、また、もともと飽和粘土のクリープ挙動に基づいた方法であるので同法を適用することには無理があると思われる。また、危険降雨量の設定は実用的ではあるが、より精度を高めるためには経験的な関係を理論的に裏付ける必要があると考えられる。

斜面崩壊の発生時期に関する確固たる予知法が確立されていない理由の1つとして、崩壊機構が多様であり、その支配要因が十分解明されていないことが挙げられる。著者らが行ってきた斜面崩壊の機構に関する研究^{6,7)}から、崩壊の主要因は降雨浸透に伴う間隙圧の増加であることが明らかになっている。崩壊の主要因が斜面内間隙圧の増加である以上、間隙圧の変化に基づく予知法も検討する必要があると思われる。間隙圧に着目した現地観測や模型実験などはこれまでにも行われてきているが、間隙圧の定量的取り扱いの困難さと地層構成や土質の不均一さなどがあつて予知法と結びつくまでに至っていないのが現状である。

本研究では対象を降雨時の砂質土斜面の表層崩壊発生時期の予知に限定して、次の研究を行った。まず、室内および現地で人工降雨による斜面崩壊実験を行い、間隙圧、地表変位、地中ひずみの挙動を調べ、また、降雨時の斜面変位を非線形弾性解析により求め、崩壊直前の斜

* 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部海洋工学科
(〒790 松山市文京町3)

** 正会員 工博 愛媛大学教授 (同上)

*** 正会員 工博 愛媛大学助教授 (同上)

面の変状に基づく崩壊発生時期の予知の可能性を検討した。次に、崩壊発生時期の予知法として下記のような方法が考えられるが、その方法に対しても検討を行った。降雨時に斜面が崩壊するか否かは、その斜面の間隙圧、強度定数、地形などにより決まる。それらのうち、地形、飽和時の強度定数などは降雨時に変化せず、あらかじめ求めておくことが可能である。間隙圧は降雨時に変化するが、ある任意時刻での間隙圧が明らかであれば、それ以降の降雨に伴う間隙圧は浸透解析により求めることができ、安定解析が可能である。したがって、対象斜面の諸物性をもとに数値解析をしておけば任意時刻の間隙圧を測定することにより、今後いくらの降雨量で崩壊が発生するかを推定することが可能となる。この間隙圧測定と数値解析に基づく危険降雨量による予知法の可能性を検討するため、領家型の花崗閃緑岩の風化した粗粒のいわゆる松山型まさ土の諸物性をもとに数値解析を行い、実際の崩壊資料と比較検討した。

2. 室内実験および現地実験による降雨時の斜面崩壊予知の検討

(1) 室内および現地実験の概要

まず、室内実験について述べる。実験土槽ならびに降雨装置を Fig. 1 に示す。土槽の奥行きは 50 cm で底面と側面は不透水面になっている。実験に使用した土は海砂で、比重 $G_s = 2.70$ 、最大粒径 $D_{max} = 0.84$ 、 $D_{50} = 0.18$ 、均等係数 $U_c = 1.54$ で、間隙比 $e = 0.80$ での飽和透水係数 $K_s = 1.65 \times 10^{-2}$ (cm/s) である。模型斜面は厚さ 5~6 cm 程度ずつ試料を入れ、各層均一に突き固めて、初期間隙比 $e_0 = 0.8$ 程度に作成した。斜面の層厚は 30 cm で、斜面角度 30° と 40° の場合に対して実験を行った。30° 斜面の試料は初期に気乾状態で、40° 斜面は湿潤状態である。降雨はスプリンクラーで、降雨強度 100 mm/h で与えた。計測は間隙圧、地表変位、地中ひずみについて行った。間隙圧計はひずみゲージ式の容量 100 gf/cm² (9.8 kPa) のものを用い、地表変位は精度 1 mm のポテンショメーターにより、また、地中ひずみは 0.5 mm 厚さの鋼板に取り付けたひずみゲージにより測定した。ひずみゲージは地表から 15 cm 深さの 1 か所だけに取り付けてある。間隙圧計、ひずみ計の設置位置は Fig. 1 に、変位計の設置位置は Fig. 3 (b), 4 (b) に示してある。なお、実験で測定している圧力は間隙空気圧ならびに間隙水圧であるので間隙圧とよぶ。ただし、地下水位が形成されて飽和してくれれば、測定された圧力は間隙水圧と考えて差し支えないと思われる。

現地実験は愛媛大学農学部付属米野々演習林内の山腹斜面で行った。斜面の傾斜は平均 42°、地質は基岩が領家型花崗岩で、表層土はそれが風化したまさ土（腐植土

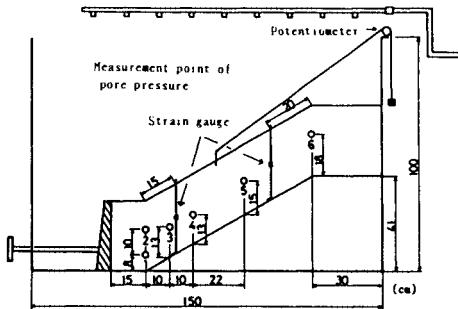


Fig. 1 Test apparatus.

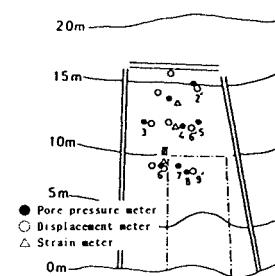


Fig. 2 Arrangement of buried transducers.

を多く含む）であり、層厚は平均 1 m 程度である。実験対象地は横幅 10 m、縦 25 m である。降雨装置としては消防ポンプと塩ビパイプを使用し、降雨強度は 20~30 mm/h である。計測は地表変位、地中ひずみ、間隙圧について行った。計測器の設置位置を Fig. 2 に示す。崩壊は Fig. 2 の破線で示す面積約 15 m² の部分に発生した。実験は 2 日にわたって行っている。1 日目に約 90 mm の降雨を与えた後、10 時間の中斷を挟んで、2 日目の降雨量が約 80 mm に達したとき崩壊が発生している。崩壊の様相は目視観察によると、引張り亀裂が観察されて瞬時に土塊がすべり落ちた。なお、実験方法などの詳細は参考文献^{8), 9)}に示してある。

(2) 実験結果と考察

a) 地表変位、地中ひずみの経時変化とそれに基づく予知の可能性

室内実験による斜面角度 30° と 40° の場合の地表変位、地中ひずみの経時変化をそれぞれ Fig. 3 (a), 4 (a) に、崩壊形態および崩壊発生時刻を Fig. 3 (b), 4 (b) に、現地実験による地表変位、地中ひずみの経時変化を Fig. 5 に示す。なお、Fig. 3 (a), 4 (a), 5 には間隙圧の経時変化も示してある。

まず、室内実験による地表変位の経時変化をみると、いずれのケースでも崩壊に先立って目立った変化はほとんどない。そして、土塊の崩壊とともに一気に変化している。次に、地中ひずみの経時変化をみると、崩壊に先立って 10 μ 足らずの変化がみられる。ひずみの測定は

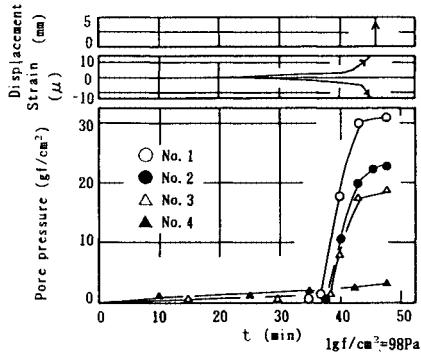


Fig. 3 (a) Changes of displacement of ground surface, strain in ground and pore pressure with time (slope angle 30°).

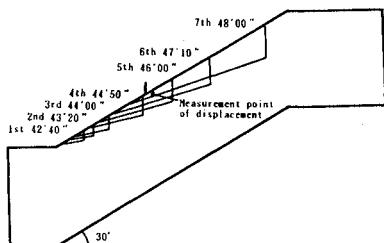


Fig. 3 (b) Failure pattern and elapsed time.

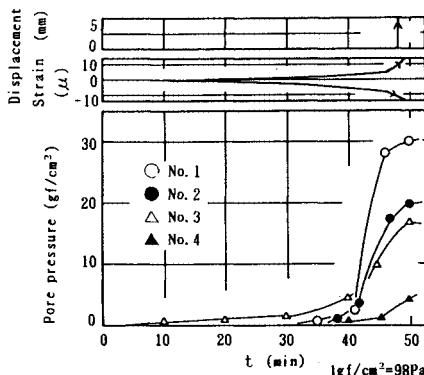


Fig. 4 (a) Changes of displacement of ground surface, strain in ground and pore pressure with time (slope angle 40°).

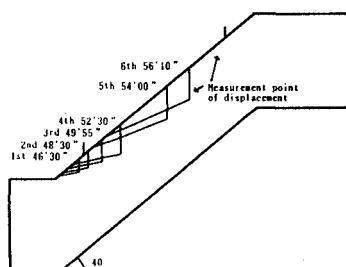


Fig. 4 (b) Failure pattern and elapsed time.

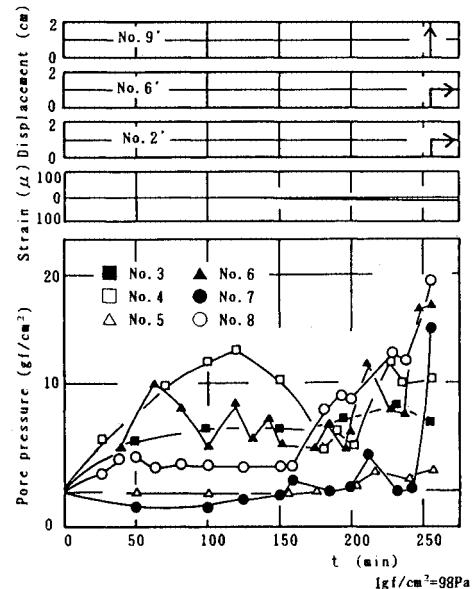


Fig. 5 Changes of displacement of ground surface, strain in ground and pore pressure with time (field test).

深さ方向に1点だけであるので変位を求めるることは困難であるが、30 cm厚さの土が単純せん断されていると仮定すれば、 10μ のひずみは 0.003 mm の変位となる。

次に、現地実験による地中ひずみと地表変位について考える。地中ひずみであるが、Fig. 5に示したように感度をあげているせいもあって若干の変動はみられるが、予知に使えそうな目立った変化はしていない。また、地表変位は崩壊土塊に設置されたNo. 9'にみられるよう崩壊の発生とともに一気に大変位が測定されているが、地表変位計の分解能は1 mm程度あるにもかかわらず崩壊の前兆現象としての地盤の微小変位は測定されていない。崩壊土塊よりも上方に設置された地表変位計（No. 2', 6'）でも崩壊時に約1 cmの急激な変位を測定しているのみで、やはり前兆現象としての微小変位は測定されていない。これから、今回のような崩壊では地表変位も予知に適していないことがわかる。

ここで、室内実験を対象に行った有限要素法による非線形弾性解析結果を以下に示す¹⁰⁾。解析にあたり初期の応力状態は弾性解析により、間隙水圧は飽和・不飽和非定常浸透解析によりそれぞれ求めた。接線変形係数は三軸試験結果をもとに次式により求めた。

$$\frac{E_t}{E_0} = a \cdot \frac{d_{\min}}{R_f} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$d_{\min} = c_d \cdot \cos \phi_a + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \cdot \sin \phi_a - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$R_f = c_d \cdot \cot \phi_a + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

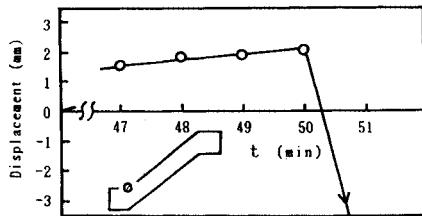


Fig. 6 Changes of displacement of ground surface with time (numerical analysis).

ここに、 E_t ：各応力状態に応じた接線変形係数、 E_0 ：初期接線変形係数、 c_d ：粘着力、 ϕ_d ：内部摩擦角、 σ'_1, σ'_3 ：最大、最小有効主応力、 a ：実験定数であり、 $E_0 = 100 \text{ kgf/cm}^2$ (9.8 MPa)、 $c_d = 0 \text{ g/cm}^2$ (0 Pa)、 $\phi_d = 40^\circ$ 、 $a = 1.56$ 、ポアソン比 $\nu = 0.4$ とした。

Fig. 6 に斜面角度 40° の場合の斜面先の点における地表変位の経時変化を示す。図から地表変位の変化は降雨開始後 50 分まではわずかであり、50~51 分の間に一気に入り大変位が発生していることがわかる。この解析結果からも地表変位により崩壊発生時期の予知を行うことは困難であると思われる。

ところで、これまで斜面崩壊の発生時期の予知は、主に地表変位の測定に基づいて行われている。実際、発生時刻の予知に成功したケースは地表変位の測定に基づくものだけである。しかし、今回、室内および現地実験と変位解析を行った結果から考える限り、砂質土斜面の表層崩壊の発生時期の予知を地表変位により行うのは困難なケースが多いのではないかということが明らかになつた。これは次のような理由によると思われる。Fig. 7 に不くら乱さき土の破壊ひずみと拘束圧の関係を示す。これから拘束圧が小さくなるにつれて、破壊ひずみも非常に小さくなっていることがわかる。今回行った実験と数値解析の場合、拘束圧は 0.1 kgf/cm^2 (9.8 kPa) 以下という非常に低圧であるので、破壊ひずみが小さく、その結果、崩壊前に前兆現象としての地表変位がほとんど観測されなかつたものと考えられる。また、すべり帯が一般的には非常に薄いということも理由の一つであると考えられる。実際の降雨時の砂質土斜面の崩壊は、建設省土木研究所砂防部急傾斜地崩壊研究室の調査資料¹¹⁾によると大半が $1.0 \sim 2.0 \text{ m}$ 以下の非常に浅いすべりであるので、地表変位測定に基づく予知は困難なケースが多いと思われる。前述したように、地中ひずみは崩壊の数分前から比較的顕著な変動を示すので、地中ひずみを測定することにより崩壊時期を予知できる可能性はある。しかし、変動量が小さいことと明確な変動が起こっているのが崩壊の数分前からということから考えると、実用的にはかなり困難が予想される。

b) 間隙圧の経時変化とそれに基づく予知の可能性

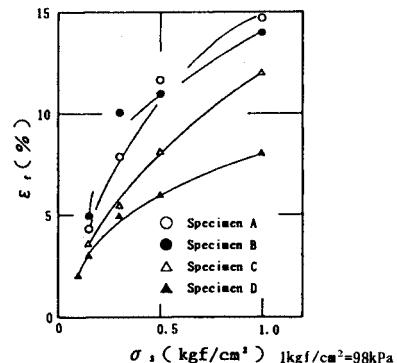


Fig. 7 Relationship between confining pressure and strain at failure.

室内実験による間隙圧の経時変化は Fig. 3 (a), 4 (a) に、また、現地実験による間隙圧の経時変化は Fig. 5 に示してある。

まず、室内実験による間隙圧の経時変化をみると地表変位、地中ひずみと比較して、間隙圧は崩壊に先立って比較的顕著な変化を示している。実験により違いはあるが、崩壊の 5~20 分前から間隙圧が増加しあげていている。これから、降雨浸透に伴う間隙圧の変化を測定することにより、表層崩壊の発生時期を予知できる可能性が高いと思われる。

次に、現地実験による間隙圧の挙動について考える。最も興味深い現象を示しているのが、崩壊土塊内およびその側方に設置された間隙圧計 (No. 6, 7, 8) の測定データである。これらは、いずれも崩壊発生時刻の 10~20 分前から急激な間隙圧の上昇を示している。特に No. 7 ではそれまで間隙圧の発生がほとんどみられなかつたものが、急激に上昇している。これから、今回のように突然的に起る斜面崩壊の発生時刻の予知には地表変位計や地中ひずみ計よりも間隙圧計の方が有効な場合が多いと思われる。なお、この程度の間隙圧の発生で崩壊が起こることは、すでに示した安定解析結果により確かめられている⁸⁾。

今回行った室内実験、現地実験より、降雨による砂質土斜面の小崩壊の発生時期を予知する場合には地表変位、地中ひずみの変化によるよりも間隙圧の変化に基づく方が有効であることが確認された。しかし、上記のような手法を崩壊の予知に適用するにはまだ多くの問題が残されている。

1つは設置位置の問題である。危険な斜面を予測し、かつ、有効な位置に計測器を設置することはかなり困難なことである。これまで、地表変位などの計測に基づき崩壊時刻の予知に成功した例はかなり多くあるが、いずれの場合も変状が事前に発見されてから計測器が設置さ

れている。発生時刻の予知とともに、発生場所の予測に関する研究を進める必要がある。もう1つは間隙圧計自体の問題である。斜面崩壊の大半を占める表層崩壊を対象にする場合、測定圧が高々 $0.1 \sim 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ ($9.8 \sim 19.6 \text{ kPa}$) 以下であるので非常に精度が要求される。また、長期にわたる計測となるので長期の安定性や耐久性も問題である。今回、現地実験のため精度のよい間隙圧計を試作し、一応の成果を得たが、長期にわたる安定性などは今後改良していく必要がある。

また、間隙圧がどの程度まで上昇すれば崩壊の危険性があるかをあらかじめ求めておく必要がある。災害から人命を守るうえで前兆現象による予知は重要であり、まだ確固たる予知法が確立されていない現状では、今回有効性が確認された間隙圧も含めてもっと多くの斜面で実際に種々の前兆現象を測定することにより予知の精度を高める必要があると思われる。

3. 数値解析と初期間隙圧の測定に基づく危険降雨量による予測

室内および現地実験より、正の間隙圧の急激な増加に着目すれば崩壊発生時期の予知の可能性があることが確認された。しかし、間隙圧の上昇が確認されてから崩壊が発生するまでの時間は比較的短く、時間的には崩壊のせいぜい数十分前であろう。数時間あるいは数日前からの予知法としては、まえがきで述べたような方法も考えられる。その方法は従来経験的に提案されている危険降雨量（あるいは限界雨量）による予知と同様な考え方に基づくものであるが、間隙圧の測定と数値解析に基づく危険降雨量による予知法の方が、理論的裏付けがしっかりしており、また、より信頼度が高い方法であると思われる。このような予知法の可能性を検討するため、まず、斜面内間隙圧の経時変化の現地観測を行った。そして、現地観測より得た間隙圧と室内実験より得た領家型の花崗閃緑岩からなる松山型まさ土の諸物性をもとに数値解析を行い、実際の崩壊資料と比較した。

（1）斜面内間隙圧の現地観測結果

実際の現象の理解や数値解析を行う際の初期条件を求めるうえで、斜面内の間隙圧の経時変化を把握しておくことが重要である。そこで、現地斜面内の間隙圧の経時変化を把握するため、比抵抗式水分計とテンシオメーターを用いて現地観測を行った。観測した斜面は愛媛大学農学部付属演習林で、現地斜面崩壊実験を行った場所から約 20 m 上方である。観測地の地表面および基岩の地形は緩やかな谷地形になっている。比抵抗式水分計とテンシオメーターの設置状況を Fig. 8 に示す。深さ 20, 40, 60 cm には比抵抗式水分計 (No. 1, 2, 3) を、深さ 80, 120 cm にはテンシオメーター (No. 4, 5) を

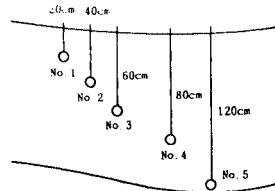


Fig. 8 Arrangement of buried transducers.

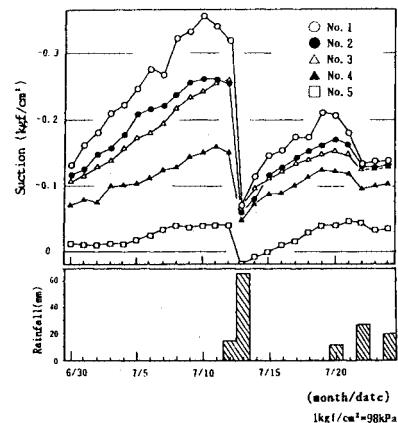


Fig. 9 Changes of pressure head and rainfall with time.

設置した。深さ 120 cm に埋設したテンシオメーターはほぼ基岩に達している。テンシオメーターは圧力変換器を介して測定した。圧力変換器は容量 500 g/cm^2 (49 kPa) で、測定精度は 1.0 g/cm^2 (98 Pa) である。計測の時間間隔は 30 分で、自動計測した。なお、比抵抗式水分計は試作し、含水比と抵抗の関係ならびに安定性は室内実験により確かめてある。観測は 1984 年 6 月 30 日から 7 月 24 日にかけて行った。

Fig. 9 に降雨量ならびに間隙圧の経時変化を示す。間隙圧は 1 日の平均値で示したが、13 日は降雨により時間的な変動が大きかったので最小値で示してある。観測期間中の降雨としては、7 月 12 日に 15 mm, 7 月 13 日に 67.5 mm, 20 日から 22 日にかけて 42.5 mm の降雨が観測されている。間隙圧の変化の全体的傾向をみると、無降雨時には表層部分のサクションが大きく、深くなるにつれてサクションは小さくなっている。6 月 30 日から 7 月 11 日、7 月 14 日から 7 月 19 日の無降雨期間をみると、深さ 20 cm でのサクションの変動が最も大きく、深くなるにつれ変動は小さくなる。6 月 29 日から 7 月 11 日の約 2 週間で深さ 20 cm の部分では約 230 g/cm^2 (22.5 kPa) 変動しているのに対し、最深部では 30 g/cm^2 (2.94 kPa) 程度しか変化していない。無降雨期間における間隙圧の変動を明らかにするには、蒸発などの水蒸気移動を解明する必要がある。7 月 13 日、20 日から 22 日の降雨時には、いずれの測点でもサ

クションの減少がみられる。特に、7月13日には最深部の測点で正の間隙圧の発生がみられる。この結果から、降雨浸透に伴い斜面内に飽和浸透流が発生することが明らかである。なお、15 mmの降雨があった7月12日には、深さ20 cmの部分に若干サクションの変化が認められるが、他の測点では変動はほとんどみられない。これは、前日までの無降雨期間に表層部分が乾燥していたせいである。降雨後の7月14日からの間隙圧の経時変化をみると、2~3日目あたりまでの変化の方が、それ以降の変化の速度に比べて若干大きい。なお、最深部では降雨が終わって、正の間隙圧がゼロになるまで約2日間を要している。これは、観測地が山の中腹に位置し谷地形をなしているため、上部からの流出が続いているためであると思われる。

Fig. 10 に7月12日から13日にかけての降雨量ならびに間隙圧の経時変化を示す。降雨開始に伴って表層部から順にサクションが低下していくが、3時間足らずで深さ80 cm、120 cmの部分のサクションが低下しはじめている。これは、深さ60 cmの部分のサクションがほとんど変化していないことから考えて、間隙空気の閉塞によるものであろう。なお、深さ60 cmの部分は比抵抗式水分計により計測したので、間隙空気の閉塞に伴う圧力は測定できない。降雨開始後、7時間足らずで深さ120 cmの部分に20 g/cm² (1.96 kPa)程度の正の間隙圧が発生している。これは、浸潤前線が基岩まで到達して飽和帯が発生したことを意味している。

(2) 数値解析と初期間隙圧の測定に基づく危険降雨量による予知法の検討

a) 解析方法

降雨浸透に伴う斜面の安全率の経時変化は、間隙圧、自重、強度定数の変化などが明らかであれば、安定解析により求めることができる。このうち、降雨浸透に伴う間隙圧と自重の変化は飽和・不飽和非定常浸透解析結果より求めることができる。また、強度定数の変化はせん断試験により求めることができる。したがって、ある間隙圧(飽和度)を有する斜面が今後どの程度の降雨によ

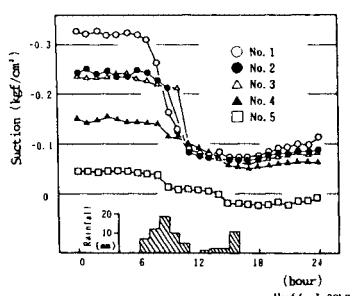


Fig. 10 Changes of pressure head and rainfall with time.

り崩壊するかは飽和・不飽和非定常浸透解析および安定解析を行えば求めることができる。

対象としたモデル斜面は**Fig. 11**に示してある。斜面の形状は、斜面角度 $\beta=35^\circ$ 、斜面先および斜面肩の長さ5 mでそれぞれ一定とし、層厚 H は3ケース変えた。なお、斜面前面(図中、 h で示した部分)は排水条件とした。降雨浸透に伴う斜面内間隙圧の変化は、有限要素法による飽和・不飽和浸透解析により求めた。安定解析は修正 Fellenius 法により行った。安定解析にあたっては、間隙圧の変化、自重の増加を考慮した。浸透解析法と安定解析法の詳細ならびに間隙圧や安全率の経時変化などに関しては参考文献¹²⁾に示してある。

地盤の初期飽和度(初期の間隙圧)は、次のように仮定した。**Fig. 12**は、まさ土斜面におけるサクションと無降雨日数の関係を示したものである。同図には著者の測定結果と小川ら¹³⁾の測定結果を併せて示してある。これから、ばらつきはあるが、無降雨日数の増加とともにサクションは大きくなっていることがわかる。

ところで、**Fig. 9**に示したように、地盤内の間隙圧は一様ではなく、表層部で大きなサクションをもち、深くなるにつれ徐々にサクションが小さくなるような分布をしている。解析にあたって、このような分布をそのまま用いるべきであろうが、そうするとさまざまな場合が想定され、一般的な結論を求めるのが大変である。斜面内の圧力ボテンシャルが一様であると仮定できれば、取り扱いは非常に簡単になる。そこで、**Fig. 13**に示したように、

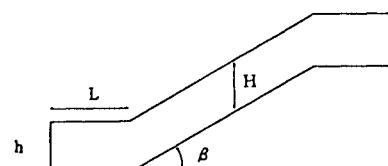


Fig. 11 Model slope.

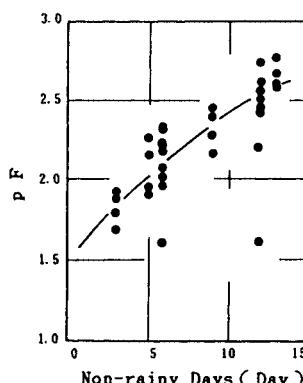


Fig. 12 Relationship between suction and non-rainy days.

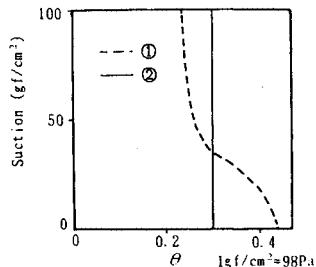


Fig. 13 Relationship between suction and moisture content ratio.

- ① 斜面内の間隙圧が深さ方向へ異なる場合
- ② ①の場合と全含水量は等しいが間隙圧が深さ方向
へ一様に分布している場合

の降雨浸透の比較を行った。その結果、層厚 1.0 m の斜面で、崩壊発生までの総降雨量は、②の一様分布を仮定した場合に 125 mm であるのに対し、①の深さ方向に異なる分布を仮定した場合に 120 mm とわずかの違いであった。したがって、便宜的ではあるが、解析に際して初期の間隙圧分布が地盤内で一様であると仮定し、Fig. 12 を参照して、 -30 gf/cm^2 (2.94 kPa) (無降雨日数 0 日に相当)、 -100 gf/cm^2 (9.8 kPa) (無降雨日数 5 日)、 -400 gf/cm^2 (39.2 kPa) (無降雨日数 14 日) の 3 ケースに対して解析した。

浸透特性は Fig. 14 に示すものを用いた。水分特性曲線は乱したまさ土試料を用いて、実測したものであり、不飽和透水係数は Irmay 法¹⁴⁾により求めた。なお、図中、 θ は体積含水率で土の 1 cm^3 当たりの水の含有量であり、 pF はサクションを水頭で表わしたものと常用対数で示したものである。また、相対透水係数 $K_r (= K/K_s)$ は不飽和透水係数 (K) と飽和透水係数 (K_s) の比で飽和時に 1 である。飽和透水係数は実測で 3.35×10^{-3} (cm/s) である。降雨強度は $20 \text{ mm}/\text{h}$ 、強度定数は $c_a = 0 \text{ gf/cm}^2$ (0 Pa)、 $\phi_a = 35^\circ$ とし、乾燥密度 γ_d は 1.5 gf/cm^3 とした。これらの土性に関する定数は妥当なものであると思われるが、詳細に関しては今後検討する必要がある。なお、表層崩壊を対象にした安定解析では粘着力 c の影響が非常に大きい。急傾斜の自然斜面が安定しているのは、この c のためであると思われる。砂質土がもつ c はサクションと植物の根系の影響であろう。安定解析を行う場合、 c に対する詳細な検討が必要であると思われるが、今回の解析では上述したような値を用いている。

b) 解析結果と考察

Fig. 15 に無降雨日数と崩壊が発生するまでの総降雨量の関係を示す。図中には層厚 0.5, 1.0, 2.0 m の場合を併記してある。これから、当然のことではあるが、

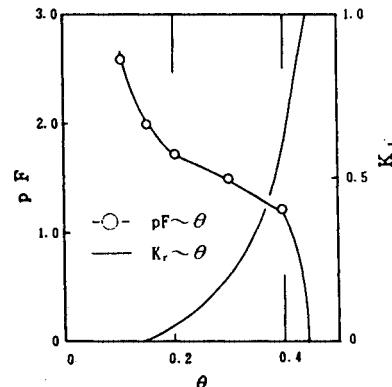


Fig. 14 Seepage characteristic curve.

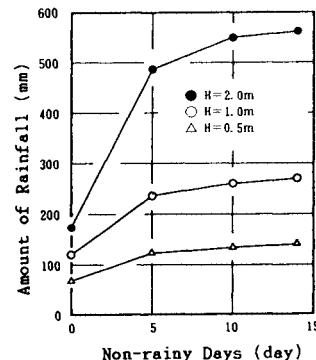


Fig. 15 Influence of thickness of permeable layer on amount of critical rainfall.

無降雨日数が多くなるにつれて崩壊発生までの総降雨量は多くなり、また、層厚が厚くなるほど崩壊が発生するまでの総降雨量は多くなることがわかる。Fig. 16 は愛媛県東中予のまさ土地帯における実際の崩壊資料に基づく崩壊発生までの 1 週間雨量と当日雨量の関係を示したものである。なお、崩壊資料は愛媛県土木部砂防課の昭和 55, 57 年の急傾斜地崩壊調査資料^{15), 16)}による。また、崩壊が数日にわたって発生する場合があるが、第 1 回の崩壊が発生した日ですべて整理してある。愛媛県のまさ土地域の崩壊層厚がほとんど 1 m 以下であることを考慮すると、数値解析により求めた崩壊発生までの総降雨量と実際に崩壊した資料に基づいて求めたものは比較的よく一致しているといえる。

ところで、崩壊発生前の事前降雨量として何日間をとるかによって、Fig. 16 の関係は当然異なってくる。事前降雨量は地盤の間隙圧に関係したパラメーターであり、Fig. 15 に示した数値解析結果から、崩壊が発生するまでの総降雨量に与える初期の間隙圧（無降雨日数）の影響は非常に大きいことがわかる。したがって、事前降雨量は危険降雨量を求める場合に重要なパラメーター

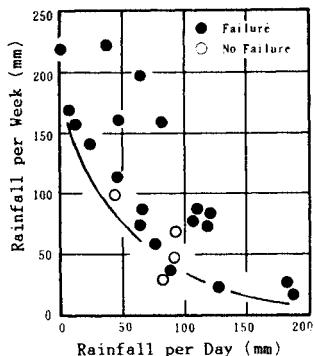


Fig. 16 Relationship between rainfall per a week and rainfall per a day of the failed and non failed slopes.

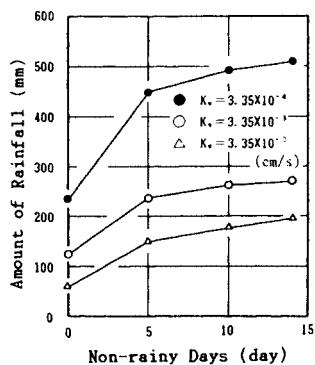


Fig. 17 Influence of coefficient of permeability on amount of critical rainfall.

であるが、今のところ何日間を取るべきかを理論的に求めることは困難である。今回、事前降雨の期間として1週間を考えたのは、次の理由による。Fig. 15をみて明らかなように、無降雨日数が長ければ当然、崩壊発生までの総降雨量は多くなる。しかし、無降雨日数が短いうちは総降雨量の増加の割合が大きいが、長くなると増加の割合は小さくなる。そのことから考えて1週間で整理してみた。このように、事前降雨の期間として何日を考えるべきかを理論的に厳密に決定することは困難であるが、土の浸透特性の実測データと飽和度の変化に関する現地での長期観測結果などをもとに数値解析を行えば、ある程度その期間を限定できると考えられる。

また、Fig. 17に透水層厚1.0mで、飽和透水係数を 3.35×10^{-2} (cm/s), 3.35×10^{-3} (cm/s), 3.35×10^{-4} (cm/s)の3ケース変えて数値解析より求めた無降雨日数と崩壊発生までの総降雨量の関係を示す。これから、透水係数は崩壊発生までの総降雨量に大きく影響することが明らかである。危険降雨量を求める場合、Fig. 15, 17に示した数値解析の結果から明らかなように浸透に関するパラメーターの影響が非常に大きいので、それら

が比較的揃った地域で考える必要がある。

上述したことから、初期の間隙圧、水分特性曲線、地層、強度定数などが明らかであれば、崩壊が発生するまでの連続総降雨量をかなりの精度で数値解析により求められる可能性があることがわかった。ここで、変化するものは初期の間隙圧だけである。したがって、Fig. 15に示したように種々の初期の間隙圧 (Fig. 15では無降雨日数で示してある)に対応する連続総降雨量をあらかじめ求めておけば、間隙圧を測定することにより、現時点でいくらの降雨によって崩壊が発生するかを推定することが可能であると思われる。

4. あとがき

降雨による斜面崩壊発生時期の予知法の確立を目的として、間隙圧、地表変位、地中ひずみを測定した室内および現地における人工降雨による斜面崩壊実験、間隙圧の変化の現地観測、さらに数値解析などを行った。得られた結果は次のようにある。

(1) 間隙圧、地表変位、地中ひずみを測定した砂質土斜面の人工降雨による室内および現地崩壊実験を行った結果、間隙圧は崩壊の5~20分前から急激に増加はじめるが、地表変位は崩壊発生前にほとんど計測されず、地中ひずみも崩壊予知に使えるような目立った変動はみられなかった。また、降雨時の斜面変位を非線形弾性解析により求めた結果でも、崩壊前に地表変位はほとんど発生しなかった。これから、降雨による砂質土斜面の表層崩壊発生時期の予知を地表変位、地中ひずみにより行うのは無理であるが、正の間隙圧の急激な増加に着目すれば予知を行える可能性があることがわかった。

(2) 斜面内の間隙圧の経時変化を現地観測した結果、当然のことではあるが、無降雨日数が増えるとともにサクションは大きくなり、降雨時には低下することが明らかになった。また、表層部でより大きなサクションをもち、深くなるにつれてサクションは小さくなるような分布をしている。

(3) 実測した浸透特性曲線、初期の間隙圧、強度定数などの諸物性値を用いて崩壊発生までの総降雨量を数値解析により求めた結果と愛媛県東中予のまさ土地域の実際の崩壊資料に基づく結果とが比較的よく一致した。したがって、種々の初期の間隙圧に対応する崩壊発生までの連続総降雨量を求めておけば、間隙圧を測定することにより、現時点で幾らの連続総降雨量によって崩壊が発生するかを推定することが可能であると思われる。

本研究を行うにあたり、演習林事務所のスタッフ諸氏には現地実験に際して便宜を計っていただいた。愛媛県の崩壊調査資料は愛媛県庁土木部砂防課のご好意による。水圧計、変位計、ひずみ計の設計、製作に際しては

愛媛大学工学部海洋工学科教授 二神 治氏の協力を得た。また、室内および現地実験を行うにあたっては海洋資源工学講座の学生諸氏の多大な協力を得た。記して関係各位に感謝の意を表わします。

本研究の一部は昭和59年度科研費（自然災害特別研究、代表：網干教授）を使用した。また、数値計算は愛媛大学情報処理センターの Facom M-180 II AD を使用した。

参考文献

- 1) 斎藤祐孝：斜面崩壊発生時期の予知に関する研究、鉄道技術研究所報告、No. 706, 1970.
- 2) 森野亮宏、ほか 6 名：斜面崩壊検知に関する実験、鉄道技術研究所速報、No. 75-104, 1975.
- 3) 渡 正亮・板垣 治：微小音による岩盤地すべりの予知手法の予備実験、土木技術資料、No. 17-2, 1975.
- 4) 高速道路調査会：異常気象時の土構築物の灾害予知と災害復旧に関する調査研究報告書、1981.
- 5) 竹本雅俊・三島豊彦・白石省三・浜田成久：碎屑堆積物よりなる切土のり面の崩壊例、第19回土質工学研究発表会発表講演集、pp. 1267~1270, 1984.
- 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) Yagi, N., Yatabe, R. and Yamamoto, K. : Slope Failure Mechanism due to Seepage of Rain Water, Proc. 7th ARCSMFE, Vol. 1, pp. 382~386, 1983.
- 8) 八木則男・矢田部龍一・榎 明潔：降雨時の斜面崩壊予知に関する室内および現地実験、地すべり、22巻、2号、pp. 1~7, 1985.
- 9) Yagi, N., Enoki, M. and Yatabe, R. : Slope Failure Mechanism and Prediction Method due to Rainfall, Proc. IVth ICFL, pp. 209~214, 1985.
- 10) 八木則男・榎 明潔・矢田部龍一・田坂嘉章：変位を用いた降雨時斜面崩壊の予知の可能性、第38回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集、pp. 245~246, 1986.
- 11) 建設省土木研究所砂防部急傾斜地崩壊研究室：がけ崩れ災害実態について、土木研究所資料、第 2161 号、1985.
- 12) 矢田部龍一・榎 明潔・八木則男：降雨浸透を考慮した斜面安定解析法の検討、地すべり、22巻、3号、pp. 1~7, 1985.
- 13) 小川 滋・水谷完治：山林地斜面における降雨の動態と流出機構に関する研究、愛媛大学農学部演習林報告、第 20 号、pp. 93~110, 1983.
- 14) Brutsaert, W. : Some Methods of Calculating Unsaturated Permeability, Trans. ASCE 10, pp. 400 ~ 404, 1967.
- 15), 16) 愛媛県土木部砂防課：昭和 55, 57 年度急傾斜地崩壊調査資料、1981, 1983.

(1986.7.16・受付)