

◆ 斜面の挙動特集 ◆

特定のり面・斜面の危険雨量の設定手法の検討

三木博史* 藤井厚企** 古田光弘***

1. 研究目的

降雨に起因するのり面・斜面の崩壊はいつ、どの程度の降雨量で発生するのかを予測することが非常に困難であり、道路の通行規制等を発動する基準雨量設定の際には、近隣区域における過去の降雨履歴と被災履歴との関係などを参考に経験的、大局的に基準雨量を設定しているのが現状である。

筆者らは、個々の斜面に着目した場合、崩壊を引き起こす降雨量(以下、危険雨量と呼ぶ)の評価が、降雨浸透とそれによる不安定化メカニズムに基づいてどこまで定量的に行えるかを、一連のモニタリング結果をふまえて検討してきている^{1)~3)}。

本報告は、従来困難であった特定斜面の危険雨量の定量的な評価を可能とする調査・解析システムの提案とその適用例の紹介を行うものである。

2. のり面・斜面の危険雨量の予測手法の検討

2.1 全体の流れ

今回提案するのり面・斜面の危険雨量の予測の流れを図-1に示す。

全体の評価の基本的な流れは以下の3段階から構成される。

(1) 斜面の調査

現地斜面の現況を調査し、安定度評価を実施するために必要な解析モデルと基本的なパラメータを得るために実施する。

調査項目は斜面形状、浸透特性、力学特性であり、原位置試験及び現地で採取したサンプリング試料を用いた室内試験などを実施する。

(2) 斜面のモニタリング

現地斜面への降雨の浸透特性を把握し、(1)で仮構築した解析モデルとパラメータをより現地の状態に近づけるための情報を得るために実施する。

モニタリングにより得られたデータは、浸透モデルのパラメータ設定に直接関わる情報となることから、解析精度向上を図るためにも適切な方法

でモニタリングを実施することが肝要となる。

設置するモニタリング計器は、土壤水分計、間隙水圧計、変位計などで、経時的な含水状態の変化、変位などについて計測を行う。

(3) 斜面の解析と危険雨量の予測

危険雨量の予測は、浸透流解析及び安定解析を併用して行う。

浸透流解析では、降雨浸透に関する現地斜面の応答と同様な挙動を示す斜面浸透モデルを構築し、様々な強度の降雨によって斜面内部の飽和度がどのように変化するかを予測可能にする。

安定解析では、室内土質試験により得られた現場斜面の飽和度と強度の関係を用いて斜面安定力学モデルを構築し、様々な浸透状態の斜面の安定度を予測可能にする。

上記の二種の解析を併用した、崩壊シミュレーションを実施することで、降雨状況を斜面の安定度へと結びつけ、対象斜面に崩壊をもたらす危険雨量を設定する。

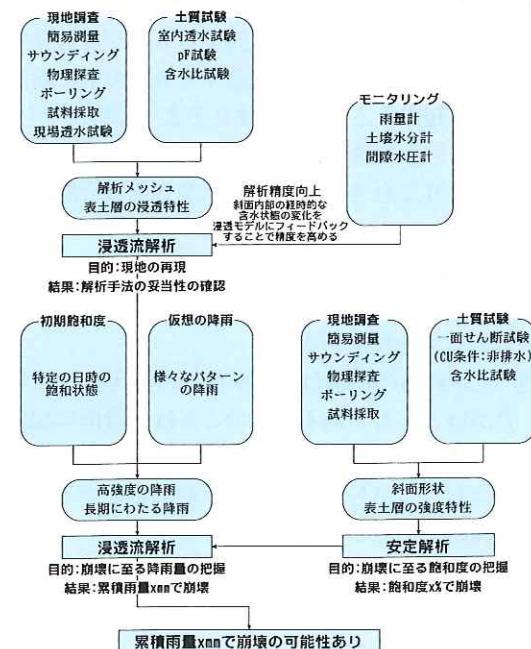


図-1 のり面・斜面の危険雨量設定の流れ

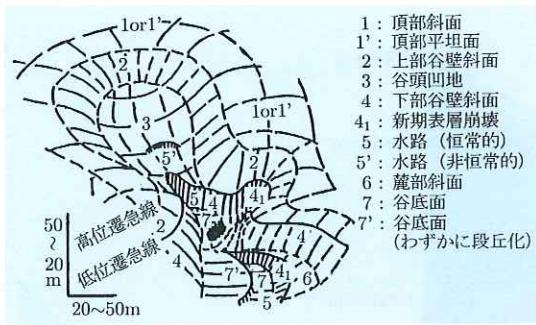


図-2 微地形の区分例

2.2 実用的な斜面の調査技術の提案

のり面・斜面の地質構造は非常に不均質性が高く、その内部の地質構造を正しく把握することは非常に困難である。そこで本研究では、簡易で、しかもできるだけ実用的な精度の情報を得られる調査方法の確立を目指し、各種の調査技術の適用性を検討した。

斜面の調査は、以下の3段階で行う。

(1) 事前調査

現地に立入る前に行う地形図及び写真判読は、主に地形分類⁴⁾や植生を中心に行う。最初に谷頭凹地、遷急線、崩壊地などの微地形に区分し(図-2)、崩壊形態を推定するとともに、地質図や過去の災害履歴を参考にしながら、崩壊の危険性が高いと推定されるのり面・斜面をある程度絞込み現地調査に備える。

現地では絞込んだのり面・斜面を中心に、より詳しく目視観察して潜在危険性や崩壊形態を推測する。地質・地形状況、植生状況、災害発生状況、湧水状況などに着目し、近隣ののり面・斜面の状況を参考に、最も危険性が高いと推測されるのり面・斜面に測線を設定する。

(2) 斜面内部探査

測線を決定した後、斜面内部の地質構造の調査においては、以下の探査手法を用いる。

1) 検土杖(図-3)

人力で貫入することのできる直径5mm程度の鋼棒で、風化厚が1m未満の場合は数秒で試験結果を得ることができるので利点がある。また、先端に小さなスリットがあり、引抜後に貫入深度の土質を目視確認することができる。本手法は、風化層厚が1m以上か否かの概略を知るために簡易調査に用いる。

2) 土研式簡易貫入試験機(図-4)

先端にコーンを装備した直径16mmのロッドに、

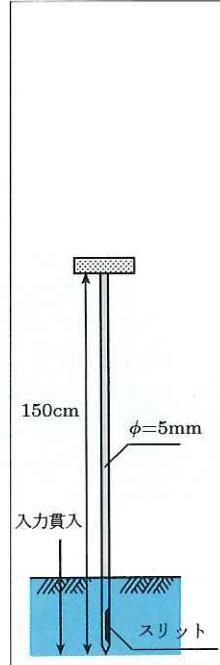


図-3 検土杖

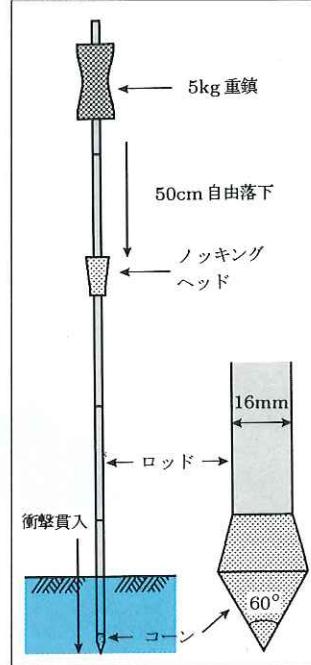


図-4 簡易貫入試験器

5kgの重錘により高さ50cmからの落下衝撃力を加え、地盤内への貫入抵抗を調べる試験である。可能探査深度は3m程度であるが、連続的かつ具体的な強度情報を比較的短時間のうちに得られるため、のり面・斜面探査においては非常に有用な調査方法の一つである。

3) 物理探査

その他の探査技術として地中レーダ法、電磁波反射法、比抵抗探査法など、短時間に面的なデータを得られる新しい探査技術が開発されている。しかし、各手法から得たデータを実際の強度定数に換算することは難しいため、土研式簡易貫入試験などの直接的な試験と併用する必要がある。

実際の調査では、まず簡便な検土杖調査から始め、結果を見ながら必要に応じて詳細な調査法を実施する。なお、得られたデータは同じ図面上に併記し斜面の内部状況をまとめる(図-5)。

(3) 各種土質試験

上記の各探査技術により分類された各地層の性状を把握するため土質試験を実施する。

土質試験は、斜面内部調査時に実施する原位置試験と、サンプリングされた土試料を試験室に持ち帰って実施する室内土質試験がある。

1) 土試料の基本的性状の把握のための土質試験

土の基本的分類を行うために実施する。試験項

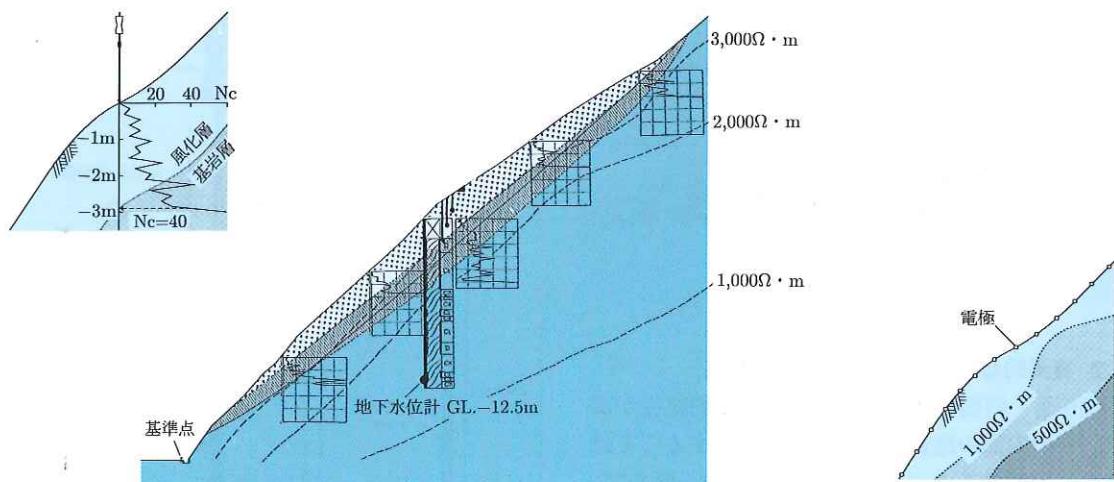


図-5 斜面内部状況まとめの例

目は温潤密度試験、乾燥密度試験、土粒子の密度試験、含水比試験、粒度試験などである。これらの項目は乱した試料でも試験可能である。

2) 浸透に関する土質試験

土の浸透特性に関する性状を把握するために実施する。試験項目は透水試験、pF試験などである。これらの試験は試料の乱れに大きく結果が左右されるため、ブロックサンプリングなど乱さない試料の採取方法により得られた試料を用いて試験を実施する。

3) 強度に関する土質試験

土の強度特性に関する性状を把握するために実施する。試験項目は一面せん断試験、三軸圧縮試験などである。自然斜面の崩壊現象を考える場合、土被りによる内部摩擦角成分がほとんど期待できないこと、土の温潤による強度低下が崩壊の大きな要因となることに留意する必要がある。そのため拘束圧 1.0kg/cm^2 以下、可能であれば 0.2kg/cm^2 程度という低拘束圧下で試験を実施することが必要となり、それが容易に行える一面せん断試験を行うことを推奨する。また、これらの試験も乱さない試料を用いて試験を実施することが望ましい。

2.3 実用的な斜面のモニタリング手法の提案

斜面内部の飽和度の経時的変化や、斜面の変状を的確に捕え、長期的に安定したデータを得るために留意点を以下に示す。

1) 土壤水分計(テンシオメータ)(図-6)

土壤水分計は、先端に脱気水で充填されたポーラスカップ(素焼きの陶器でわずかに水を通す)を

装備し、カップが土に密着した部分から水分が吸着される力をセンサで感知し、サクション力(水を引き寄せる力)を計測するものである。得られるデータの単位は $\text{g}/\text{cmH}_2\text{O}$ (pF 値 $=\log_{10}(\text{サクション値})$)である。

土壤水分計の機種選定の際には、正圧も計測可能なものを選定すると間隙水圧計の代用になる。しかし、間隙水圧計に比較して計器の反応が鈍いため、リアルタイムな水圧変化データが必要な場合は間隙水圧計を別途設置したほうがよい。

設置は、ハンドオーガ等により縦孔を掘削して計器を挿入し、カップと土とが密着するように泥水を流し込んで行う。その際、先端のカップの破損に注意する必要がある。設置位置は雨水の集中しやすい斜面の末端部や風化層厚の厚くなった部分に設置すると的確な評価が可能である(図-7)。

測定はデータロガーにて、15分~1時間に1回程度の間隔でデータを記録する。乾燥の激しい斜面に設置した場合、1ヶ月~1週間程度で計器内の脱気水がなくなり、計測不可能になるケースがある。そのため、必要に応じて脱気水の補給などのメンテナンスを行う。また、今回は実施しなかったが、データを電話回線を通して事務所で得られるようにしておくと、リアルタイムに斜面の浸透現象を追跡することが可能となり有用である。

2) 間隙水圧計(図-8)

間隙水圧計は、土中に水位が発生した際に、その水圧をデータとして計測するものである。基本的に水位が発生していない状態では反応がない

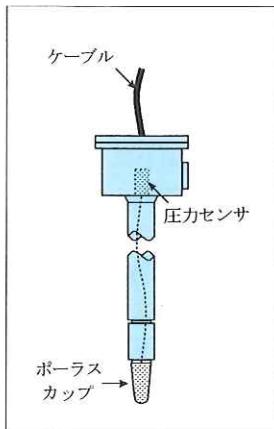


図-6 土壤水分計

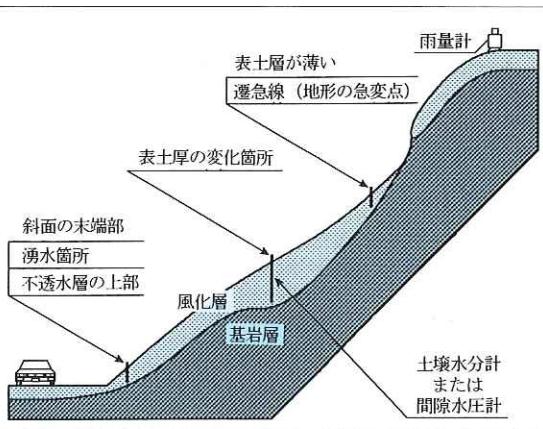


図-7 計器の設置位置例

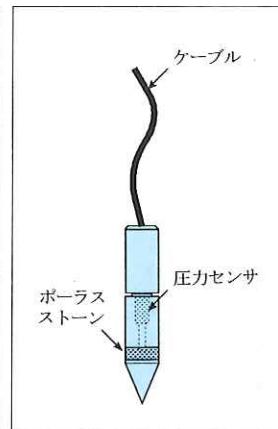


図-8 間隙水圧計

ため、水位が発生すると思われる箇所に設置する必要がある。

間隙水圧計の機種選定の際には、対象が浅層崩壊であることから、計測精度の高いもの選定する。設置に際しては、ボーリング孔などをを利用して設置を行うこととし、設置位置は土壤水分計と同様に雨水の集中しやすい箇所に設置する。

計測についての注意は、土壤水分計と同じく、比較的短い時間間隔で計測を行い、浸透の過程をきめ細かく追跡することである。土壤水分計に比べそれほどメンテナンスを必要としないという利点がある。

対象とする斜面によっては、水位が発生しない場合もあるため、できるだけ水位の存在を確認したうえで、計器の設置を行うことが重要である。

3) その他の計器

土壤水分計及び間隙水圧計のデータは、降雨量と密接に関連するため、測定箇所周辺に雨量計を設置して⁵⁾降雨量を計測する。また、斜面の変状

を計測するため、傾斜計、伸縮計などの計器も有用である。ただし、斜面の浸透特性の把握を主目的とする場合には、必ずしも設置する必要はない。

以上の各モニタリング手法によって得られたデータは同じ時間軸上にプロットしてまとめる(図-9)。

2.4 解析・予測方法

以上の現場調査及びモニタリング結果を解析モデルに反映し、浸透流解析と安定解析によって危険雨量の予測を行う。

以下に現場調査、モニタリングで得られた各種データを解析モデルに反映する方法を示す。

1) 浸透流解析

浸透流解析は、降雨により斜面内に浸透した水分が、どのような挙動を示すかを調べるために実施する。現地から得られた斜面形状、風化層厚、水分特性曲線、比透水係数、透水係数、降雨状況等を解析プログラムに入力し、地盤内の各ポイントでの水分量(飽和度)の変化を求める。

2.1 で述べたように、解析精度を高めるために

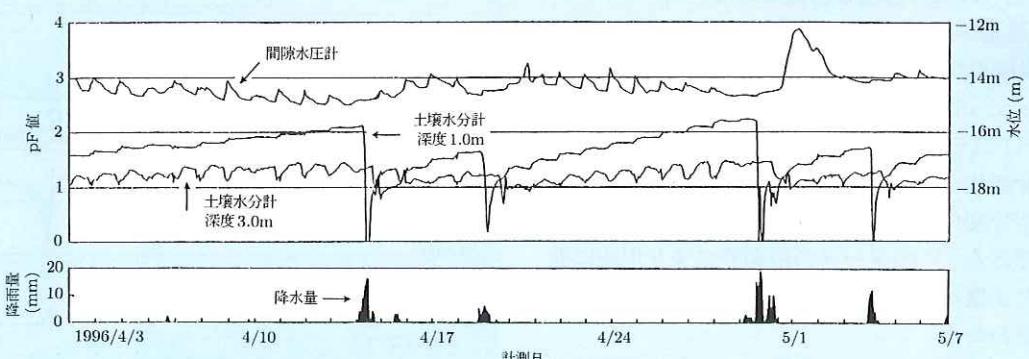


図-9 モニタリング結果のまとめの例

は、雨量計により得られた降雨データを解析モデルに与え、解析モデルが output した土壤水分量が、埋設された土壤水分計のデータとできるだけ合致するよう、入力パラメータを微修正しながら繰り返し解析を行い、解析モデルを実際の斜面に近似することが重要である。

2) 安定解析

安定解析は、降雨浸透による斜面の湿润化の進行と安定度の関係を調べるために実施する。

基本的に解析モデルとする斜面形状は基岩と風化層からなる層状モデルとする。

解析モデルによる計算は風化層と基岩層の無限斜面として計算する。その際、斜面の傾斜と風化層厚は、対象斜面の最大傾斜と最大厚を入力すればよい。また、粘着力、内部摩擦角、湿润密度については、土質試験結果から求めた飽和度との関係を用い、飽和度を 10% 刻みに変化させ入力する。

3) 総合評価

安定解析により斜面の安全率が 1.0 を下回る斜面の湿润状態(飽和度)が判明するので、再び浸透流解析モデルを用いてどのような降雨条件を与えるか該当する飽和度に達するか否かを調査する。単純な連続雨量のほうが崩壊条件を明確にしやすいため、降雨強度 5~30mm/hour などを連続して与えればよい。

3. 実際への適用例

今回は、山梨県の国道に面する自然斜面に対して、上記の一連の危険雨量設定システムを適用した事例について紹介する。

図-10 に現場の状況を示す。調査より上部ほど崩壊土砂が厚く堆積し、下部には基岩が露出する、平均傾斜 40 度の急峻な斜面である。

1) 浸透流解析

現場調査から得られた情報をもとにモデル化したメッシュ図を図-10 に合わせて示す。

図-11 はモニタリングにより得られた斜面の土壤水分変化と、解析から得られた斜面モデル内の土壤水分変化を、同じ軸上に重ね合わせて同定した例である。パラメータの微調整により現地に近似した土壤水分変化を示すモデルが得られていることがわかる。

近似の方法としては、初期に入力した実験値から大きく外れることのない程度に、透水係数、pF

曲線、比透水係数などを増減する。なお、同定する際には、特に pF 値の低下及び復帰の動き、降雨から飽和度上昇までの遅れなどに着目する。

2) 安定解析

図-12 は図中の右上のように現地をモデル化したものに対し、実験から得られた斜面の飽和度と c, ϕ, r_t の関係を与え、飽和度を変化させて安全率を計算した結果を示したものである。飽和度の上昇に伴い、崩壊に対する安全率が次第に低下し、飽和度 80% に至って安全率が 1.0 を切る結果となっている。このグラフより、本斜面は飽和度 80% を上回ると崩壊が発生すると推測できる。

3) 総合評価

次に、仮想の降雨を与えて当該斜面の危険雨量の設定を行った。

図-13 は累積雨量と安全率(飽和度から換算)の関係をまとめたものである。

これをみると、降雨強度によって崩壊する累積雨量が異なっている。全体の傾向として、降雨強度が大きくなるにつれ、飽和度が速やかに上昇す

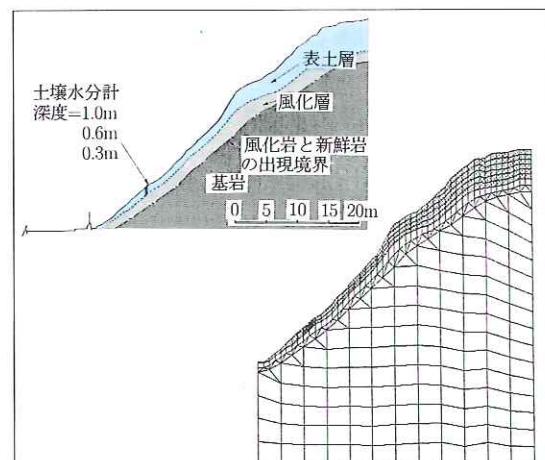


図-10 現地の状況と浸透流解析モデル

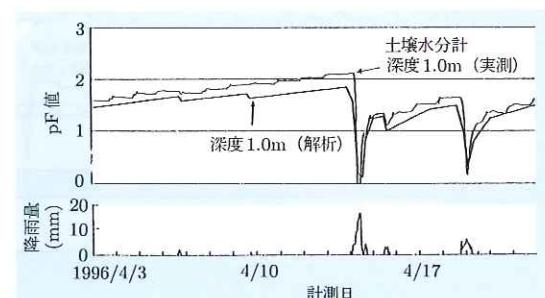


図-11 モニタリング結果と解析結果の近似

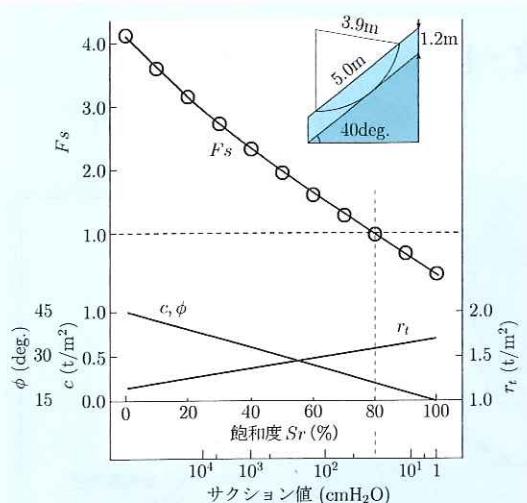


図-12 斜面の飽和度と安全率の低下²⁾
(山梨県甲府市国道脇自然斜面の例)

るため、少ない累積雨量で安全率が1.0を下回るという結果となっている。また、降雨強度5mmでは安全率1.3で安全率の低下がとまっているが、これは、降雨浸透と斜面下部からの水分の排出とがバランスし、飽和度が一定の状態に保たれたためと考えられる。

今回の例では、降雨強度20mm/hourが連続した場合に最も少ない累積降雨量340mmで崩壊する可能性があると予測できた。

なお、他にも数箇所の斜面について上記検討を行った結果、妥当と思われる結果を得ている^{1)~3)}。

4. まとめと今後の課題

今回提案したような、降雨浸透に関するモニタリング結果を、解析にフィードバックする、のり面・斜面の危険雨量の予測システムを用いることにより、従来困難であった特定斜面の危険雨量の定量的な予測が行える目処が得られた。

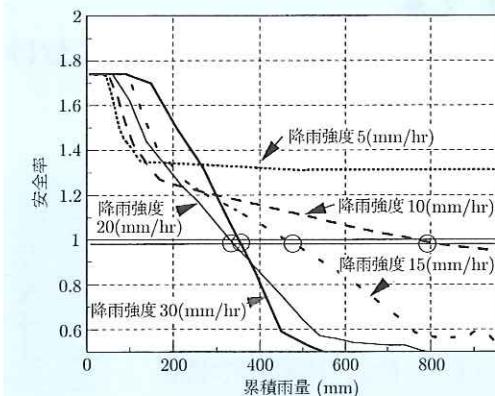


図-13 累積雨量と安全率の関係²⁾
(山梨県甲府市国道脇自然斜面の例)

今後は土の強度特性をより的確に得るための簡易土質調査手法の開発や、モニタリング計器を用いた崩壊前兆予知技術の検討を継続して実施し、道路管理等の実際への適用を目指して研究を進めよう予定である。

参考文献

- 三木博史ほか：斜面モニタリングによる降雨の影響評価の試み, 第30回土質工学研究発表会講演集, pp.1811-1812, (社) 土質工学会, 1995.7
- 三木博史ほか：道路のり面の降雨による崩壊予測の試み, 第21回日本道路会議一般論文集, pp.36-37, (社) 日本道路協会, 1995.1
- 三木博史ほか：浸透流-安定解析による自然斜面の安定度評価の試み, 第51回年次学術講演概要集, 第3部 (A), pp.422-423, (社) 土木学会, 1996.9
- 道路土工：のり面工・斜面安定工指針, pp.26-27, (社) 日本道路協会, 1986.11
- 建設省河川局監修：(社) 日本河川協会編, 改訂新版建設省河川砂防技術基準(案) 同解説調査編, pp.7-16, 山海堂, 1997.10

三木博史*



建設省土木研究所
材料施工部
上質研究室長、工博
Dr. Hiroshi MIKI

藤井厚企**



同 土質研究室研究員
Atsuki FUJI

古田光弘***



同 土質研究室研究員
Mitsuhiro FURUTA