

ITを用いた豪雨時の地盤災害の予知システムの技術開発



所属名：岡山大学大学院環境学研究所
発表者：西垣 誠

1. はじめに

中国地区の人口密集地である南部地域一帯では、花崗岩が多く、その風化残積土であるまさ土が厚く分布しており、豪雨時における斜面崩壊や、落石、土石流災害が多く起こっている。本研究で取り組んだ技術開発は、上記のような特徴を持つ地盤災害を事前に予知するシステムの開発である。そして、その技術を中国地区で整備されている通信ネットワークに組み込むことで、社会整備基盤の保全を図ろうとするものである。

雨が降って斜面が崩壊するという過程は「降雨 雨水の斜面内への浸透 浸透水圧の作用・斜面土の重量の増大・強度の低下 崩壊」であると考えられるが、各過程を適切にモデル化し、時間によって変化する降雨量に応じた斜面安定性の変化を把握できるシステムは非常に有用であると考えられる。したがって、本技術開発では IT 技術により降雨量、体積含水率、圧力水頭、地中温度などを計測し、リアルタイムにデータを通信するシステム

を開発するとともに、その一方でボーリング調査や物理探査などの地盤調査を実施して地盤モデルを作成した。そして、浸透流解析および安定解析を行い、浸潤前線の基底地下水位への到達予測を指標とした豪雨時の斜面の安定性評価システムを確立することを目的とし、実際の斜面現場で実証試験を行った。

2. 実証実験概要

本実証実験は、岡山県赤磐市内の道路建設予定現場斜面において、斜面内における水分量の経時変化を中心に現場計測を実施したものである。さらに、斜面の安定性を評価する上で必要な地表踏査、物理探査、地下水観測および土質試験を実施した。その項目を表-1にまとめる。また、現場の地形概要として、対象斜面は山の末端部に位置する小尾根の一部である(写真-1参照)。そして、対象斜面付近には3水系が認められ、概ね平均斜面勾配 30°程度のやや急峻な地形を呈している。なお、この斜面の下部終点側は平均斜面勾配 15°程度の緩斜面に変化している。また、斜面末端部は圃場整備された緩斜面の段丘地形がみられた。

表 - 1 実施項目

項目	内容・数量
1 機械ボーリング(66mm)	3 地点, 総掘削長 24.5m 1 地点, 総掘削長 15m
2 標準貫入試験	2 地点, 12 回
3 二重管式標準貫入試験	1 地点, 21 回
4 現場透水試験	1 地点
5 地下水検層	2 地点
6 不攪乱試料採取 (気泡ボーリング, 86mm)	2 地点, 総掘削長 14m
7 弾性波探査	3 測線, 総測線長 490m
8 電気探査	3 測線, 総測線長 490m
9 高精度表面波探査	2 測線, 総測線長 120m
10 浅部電気探査	1 測線, 総測線長 5m
11 室内土質試験	土の密度, 含水比, 粒度, 湿潤密度試験
12 水質試験	酸素, 水素安定同位体比, トリチウム
13 降雨量計測	1 地点
14 地下水位計測	3 地点 2 地点
15 土中水分量計測	6 地点, 16 箇所
16 間隙水圧計測	2 地点, 7 箇所
17 土中温度計測	1 地点, 6 箇所
18 浸透流解析	1 式
19 安定解析	1 式



写真 - 1 対象斜面の全景

3. 実験方法

3-1 現場計測方法 :本実験で用いたデータ収集・発信装置(写真-2参照)は、電子メールでのデータ送信が可能であり、あらかじめ警戒雨量を設定しておけば警戒値を超えたときに自動的に警告メールを送信することができる。また、図-1にセンサー設置概要図を示す。斜面の直角方向にADR水分センサーとテンシオメータを設置した。さらに、対象地盤の表層部に温度計を設置し、浸潤前線の降下挙動を温度変化によって把握する可能性についても検討した。

3-2 機械ボーリング方法 :ボーリング調査は、4地点において油圧式ロータリーマシンを使用して実施した。掘削孔径は66mmでオールコアとした。

3-3 標準貫入試験方法 :打ち込みは、掘削による乱れを防ぐための15cmの予備打ち後、原則として深さ1mごとに実施した。

3-4 二重管式標準貫入試験方法 :二重管式標準貫入試験器は、標準貫入試験器の中に密度測定用の真鍮製の中空管(長さ10cm、内径35mm、外径38mm)を先端から5個、最後に長さだけが11cmの中空管を並べて装填できるように工夫されたものである。貫入時に土が中空管内に採取され、 N 値測定と共に簡単に密度が測定可能である。なお、試験は深さ50cmごとに行った。

3-5 現場透水試験方法 :ピエゾメーター法で実施し、地下水位が低いため非常注水法を選択した。

3-6 地下水検層方法 :ボーリング孔に食塩を投入した後、地下水流動層で置換希釈する状況を測定した。測定間隔は、25cmピッチで比抵抗値を測定した。

3-7 不攪乱試料採取(気泡ボーリング)方法 :圧縮空気の中に界面活性剤を注入発泡させ、その泡によりビット先端部の冷却とスライムの排出を行う方法を用いた。従来方法との違いは、地下水位以下・被圧地下水位以下でコアリングが行える点にある。

3-8 弾性波探査方法 :調査測線上に5m間隔で測点を設け、最初の24測点に受振器を配列した。測線上の適当な地点、数ヶ所に起振点を設け、火薬(ガンサイザー)を装填した後、爆発させ、人工地震波(P波)を観測した。そして、起振点から振動が伝播するために要した時間(走時)を解析した。

3-9 電気探査方法 :測線上5.0m間隔で電極を設置し、測線外の地点に遠電極を設置した。

3-10 高精度表面波探査方法 :地山のS波速度分布を把握し、地盤状況を二次元的に把握した。従来の方法では2,3個の受振器を用いていたが、今回は多数の受振器を用いた。

3-11 室内土質試験方法 :気泡ボーリングの不攪乱試料および標準貫入試験時の攪乱試料を用いて、土粒子の密度試験、土の含水比、粒度、湿潤密度試験を実施した。

3-12 水質試験方法 :当該調査斜面への地下水流動特性を把握する目的で放射性同位体であるトリチウムの半減期を利用して水の平均滞留時間を推定する年代測定を実施した。

4. 実験結果

4-1 ボーリング調査結果 :図-2に示す3地点で実施した。図-3に得られた推定地層断面図を示す。

4-2 二重管式標準貫入試験結果 : N 値と土の密度の測定結果を図-4に示す。

4-3 現場透水試験結果 :対象地の強風化花崗岩(ww-Gr)の透水係数は概ね $10 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ であった。

4-4 地下水検層結果 :B-1とB-2のボーリング孔内を利用して実施し、GL-8~9m, GL-11m付近の亀



写真-2 雨量計およびデータ収集・発信装置

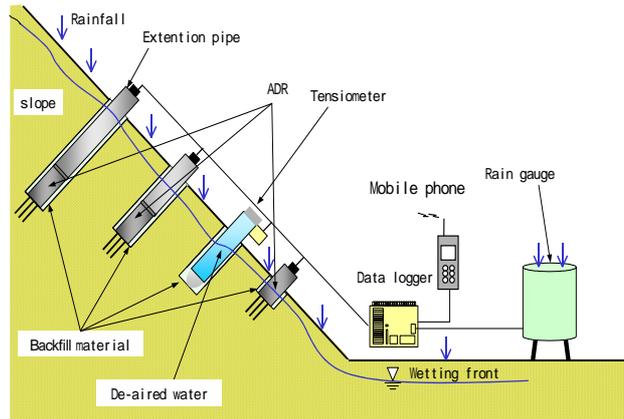


図-1 センサー設置概要図

裂と推察される通水層を確認した。

4-5 弾性波探査結果 : 図-2 に示す A, B, C 測線において実施した。測線長はそれぞれ 150, 180, 160m である。B 測線の結果を図-5 に示す。

4-6 電気探査結果 : 電気探査は弾性波探査と同様に 3 測線において実施した。図 6 に B 測線における結果を示す。

4-7 高精度表面波探査結果 : 深度 20m 付近までの S 波速度層分布を把握することが可能であり、結果として換算 N 値断面を作成した(図-7 参照)。

4-8 室内土質試験結果 : 各地層(崖錐堆積層, 段丘堆積層, 花崗岩(土砂状風化部)) の粒径加積曲線(図-8 参照) 等の物理特性を測定した。風化の進行状況に伴う粒度の変化が認められた。

4-9 水質試験結果 : B 地点のボーリング孔内水は雨水の可能性が高いことが分かった。

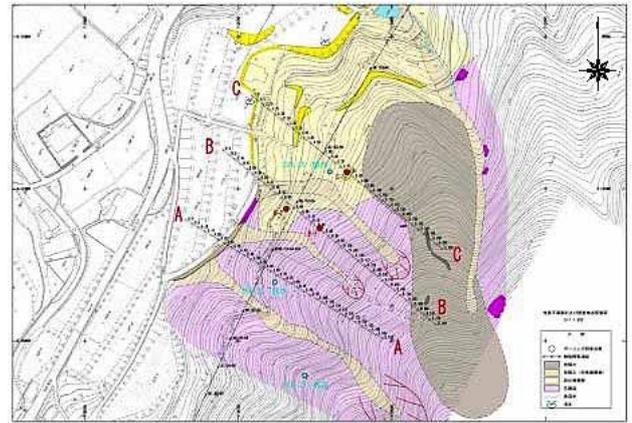


図 - 2 調査地点配置図

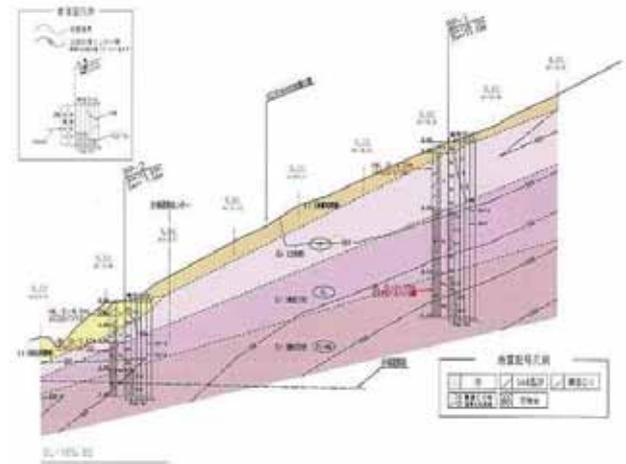


図 - 3 推定地層断面図 (B 測線)

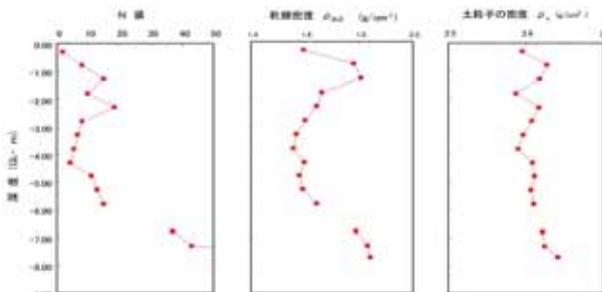


図 - 4 二重管式標準貫入試験結果

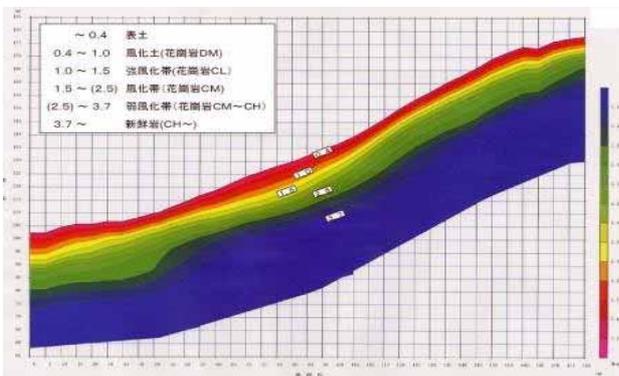


図 - 5 弾性波探査結果 (B 測線)

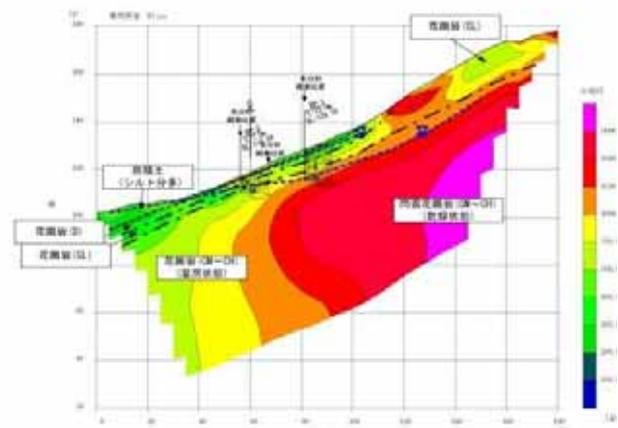


図 - 6 電気探査解釈結果 (B 測線)

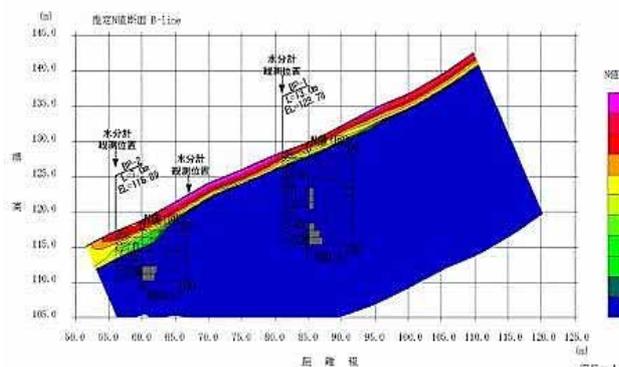


図 - 7 高精度表面波探査による換算 N 値断面 (B 測線)

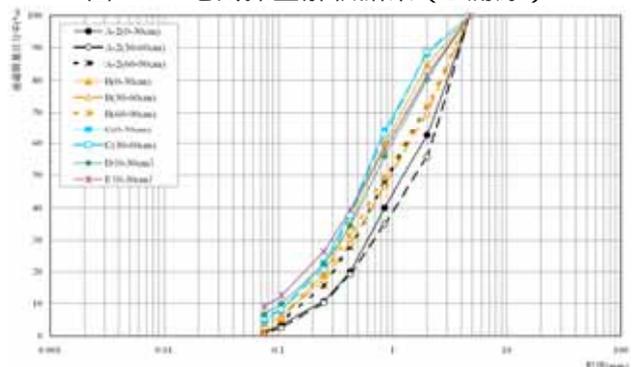


図 - 8 粒径加積曲線

4-10 現場計測結果 : 地下水位計測は図-9 に示す B-1, B-2 地点において自記水位計を用いて計測した。降雨量を図-10 に、地下水位の変化を図-11 に示す。降雨に伴い大きく変動しているのがわかる。次に、土中水分量は表層付近(最大深度 90cm)において計測した。図-12 に A2 地点の飽和度分布を示す。全体的な挙動を見ると、深度が増すほど降雨に対する反応が鈍くなっている。これは、比較的水分量の高い状態を保持しているためであり、浅層における水分量の変化と高い飽和度を持続する期間に着目する必要があると考えられる。一方、テンシオメータによる圧力水頭の計測結果を図-13 に示す。降雨時に含水率が上昇し、それに伴って敏感にサクションが低下することが確認された。また、土中温度の計測結果は、温度計測による浸潤前線降下挙動を特定するには至らなかった。

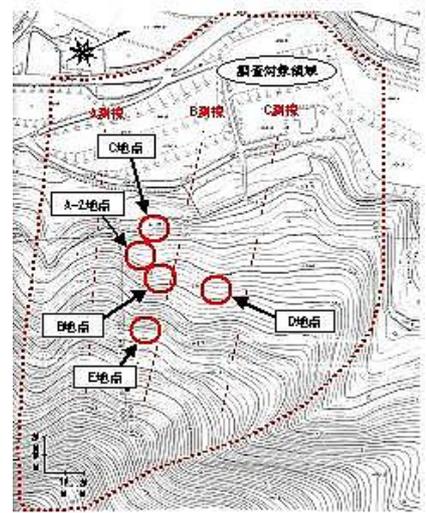


図 - 9 計測地点配置図

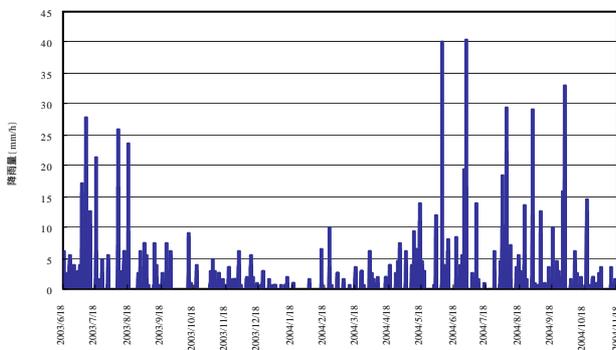


図 - 10 降雨量計測結果

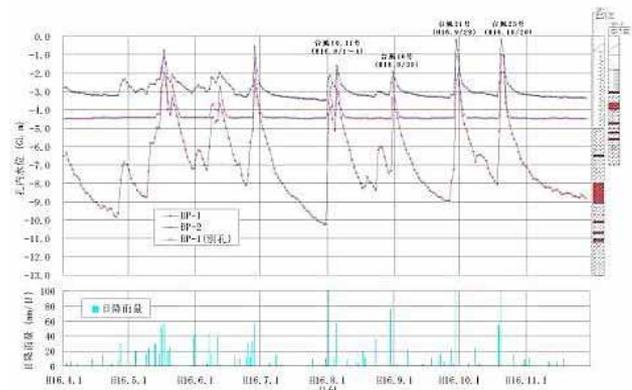


図 - 11 地下水位の変化

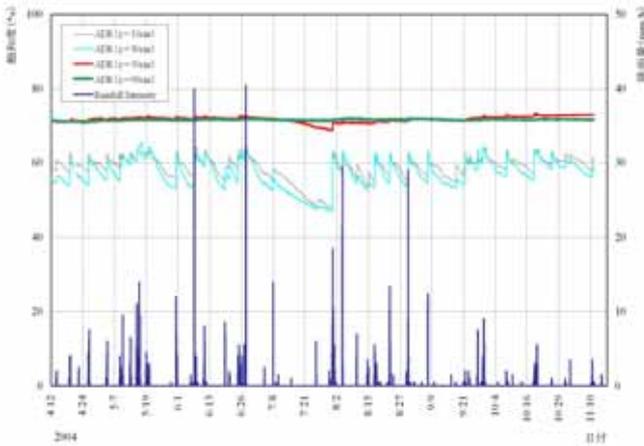


図 - 12 A-2 地点の飽和度の経時変化

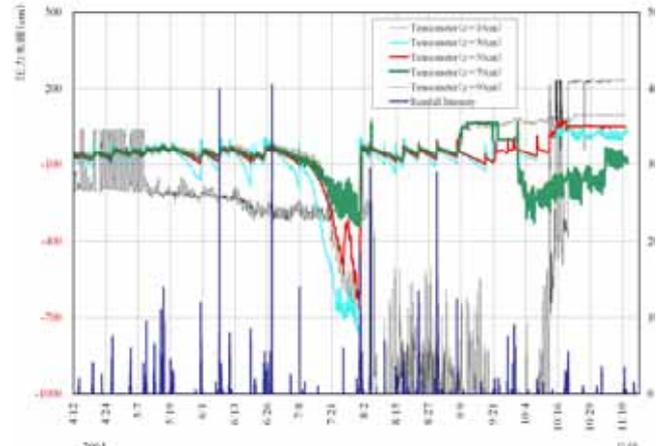


図 - 13 圧力水頭の経時変化

5. 斜面の安定性評価

5-1 斜面の安定性評価手法 : 本研究開発の最終的な目標は図-14 に示す安定性評価システムの構築である。この中でシミュレーションによって様々な降雨パターン下の地盤状況を推定し、個々の安定性を評価できれば、水分量の計測のみによって警報の発令・解除をすることができる。

5-2 解析用地盤モデルの作成 : 解析用地盤モデルはボーリング調査結果や各種物理探査結果を基

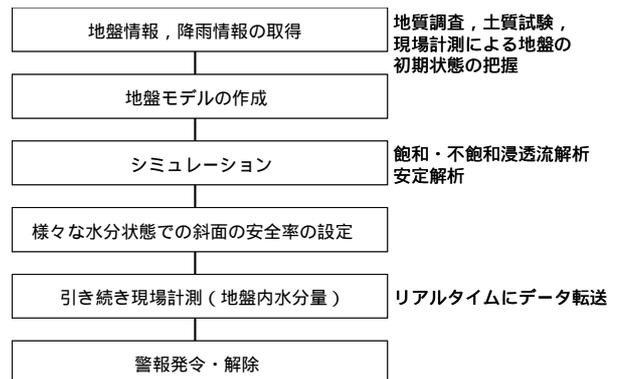


図 - 14 豪雨時斜面の安定性評価システム

に図-15の破線で示す範囲で設定した。

5-3 浸透流解析：前述の解析用地盤モデルを用いて三次元の飽和・不飽和浸透流解析を実施し、計測結果との整合性の検討および豪雨時の地盤内の地下水状況の推定を行った。結果を図-16に示す。地下水位との整合性に若干の誤差が認められるが、概ね現象を再現できているとみなせる。

5-4 安定解析：安定解析は、円弧すべり面を仮定した分割法を用い、降雨状況による斜面の安定性の変動を検討した。解析結果を図-17に示す。これより、降雨状況により斜面の安全率が変動し、豪雨前よりも豪雨中および豪雨後には安全率にして最大で0.13程度の低下が確認された。また、斜面下部の安全率が低く、実際の斜面では斜面下部で崩壊が起こるとその上方の斜面の安全率も下がることが明らかになった。

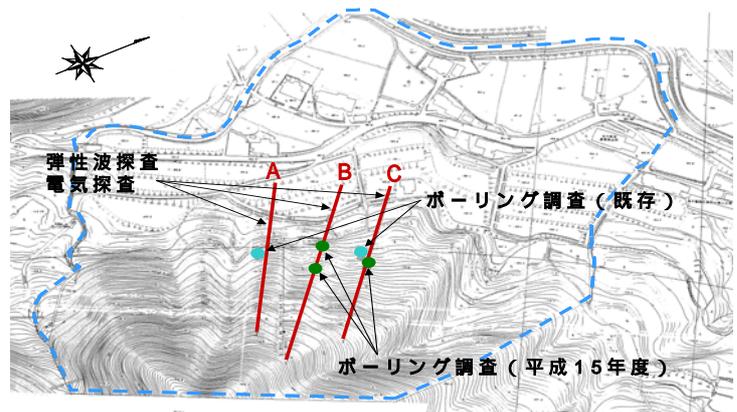


図 - 15 対象範囲

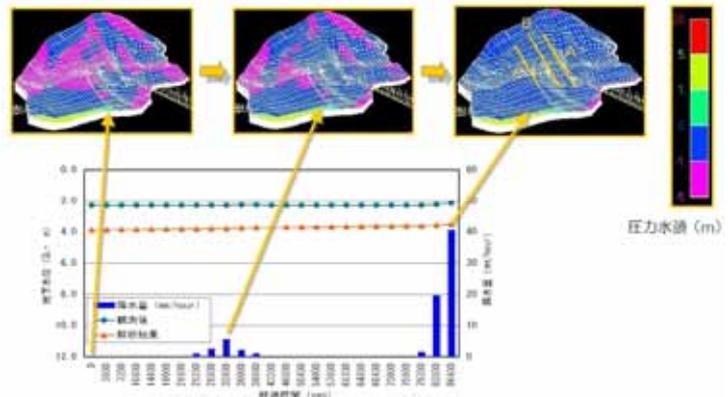


図 - 16 浸透流解析結果

6. おわりに

本技術開発では、豪雨時の斜面の安定性評価システムを確立することを目標に、地盤調査を、次に降雨時の地盤状況を把握するために各種の現場計測、最後に斜面の安定性を評価するために数値解析を実施した。以下に得られた結果を総括して結論とする。

- 1) 地下水挙動は降雨に強く依存している。
- 2) B 測線の上部斜面は浅層地下水面と深層地下水面が存在することが判明した。
- 3) まさ土部の地下水面は概ね連続降雨が40~70mm程度あれば形成されている。
- 4) 地下水位は低下時の方がより長い時間を必要とする。警報解除基準作成のための基礎資料となる。
- 5) 飽和度の経時変化の全体的な挙動を見ると、深度が増すほど降雨に対する反応が鈍くなっている。
- 6) 降雨時に含水率が上昇し、それに伴ってサクションが低下する。また正圧の発生も確認された。
- 7) 浸透流解析においては不飽和浸透特性による影響が非常に大きいことがわかった。
- 8) 斜面法尻の安全率が小さく、実際の斜面では法尻が崩壊するとその上方斜面の安全率も低下する。
- 9) 浸透流の浸透水圧を考慮すると安全率 < 1 の状況が多く見られる。

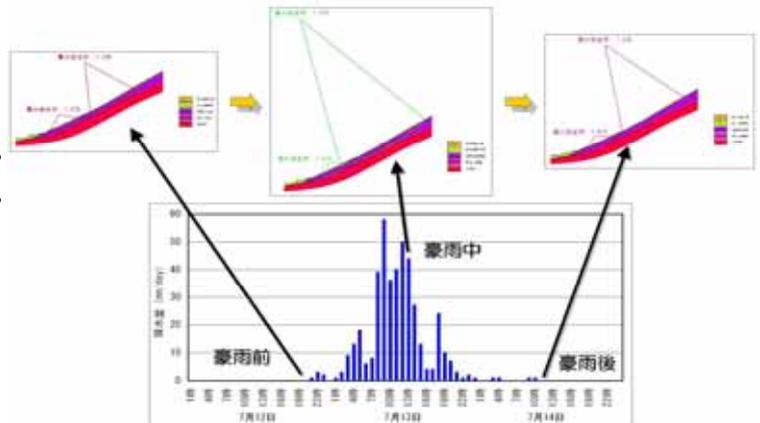


図 - 17 豪雨時斜面の安定性評価システム

また、今後の課題としては、各層の不飽和浸透特性を求め、初期条件を変化させて計測値と解析値を比較することと、様々な豪雨パターンに対する斜面内の安定性を評価することが挙げられる。さらに、対象現場は切土予定であるため、今回実施した様々な現場調査の精度を検証する必要がある。

謝辞：本報告書は(社)中国建設弘済会の平成15年度~16年度(2年間)にわたる助成を頂いて実施したものであり、地盤工学会中国支部岡山地域セミナーの共同グループとして行ってきた成果を取りまとめたものである。さらに対象現場は岡山県東備地方振興局建設部美作岡山間道路建設班のご好意により提供して頂いた。ここに関係各位に心より感謝の意を表す次第である。