

降雨時斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における 現地多点モニタリング

Multipoint monitoring method for a slope behind an important cultural asset
to prevent slope disasters during rainfall

深川良一¹, 酒匂一成², 里見知昭³, 石田優子⁴, 仲矢順子⁵, 安川郁夫⁶

Ryoichi Fukagawa, Kazunari Sako, Tomoaki Satomi, Yuko Ishida, Junko Nakaya, Ikuro Yasukawa

¹ 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

² 立命館大学ポスドク研究員 総合理工学研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Postdoctoral fellow, Ritsumeikan University, Research Organization of Science and Engineering

³ 立命館大学大学院 D2 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Graduate student, Ritsumeikan University, Graduate School of Science and Engineering

⁴ CF シビル代表 (〒544-0003 大阪市生野区小路東 1-5-2)

Head, CF Civil

⁵ ともえ地盤情報室代表 (大津市北比良 1275-20)

Head, Tomoe Geo Info

⁶ 立命館大学特別研究員 総合理工学研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Fellow, Ritsumeikan University, Research Organization of Science and Engineering

The purpose of our research is to construct a prevention system in order to defend a lot of lives, infrastructures and heritages from slope disasters due to rainfall. So we have set up a filed monitoring system to measure the pore-water pressure, temperature and rainfall intensity on a slope behind a structure, which is an important cultural asset in Japan, since July 2004. In this paper, the above filed monitoring system is introduced, and in-situ seepage behavior is considered based on the multipoint monitoring data. Results show that the relationship between seepage behavior in unsaturated soil and rainfall intensity can be obtained, and the effectiveness of the filed monitoring system for natural disasters due to slope failures caused by heavy rainfall is examined.

Key words: filed monitoring system, slope failure, rainfall, pore-water pressure

1. はじめに

京都盆地周辺の山腹・山麓には、世界文化遺産をはじめ数多くの重要な文化財が集積しており、これまでに火災、地震、降雨、風などによって幾度も被害を受けてきている。これらの重要文化財は代替性がなく、現在の社会・経済状況を考慮すると被災後の重要文化財の修復を行うことは、容易でないことが予想される。また、近年、日本各地で異常気象が頻発しており、とりわけ 2004 年は、日本本土に観測史上最多の 10 個もの台風が上陸した。これらの台風などに起因する局地的な集中豪雨により各地で斜面崩壊が生じ、多くの人命や社会資本が失われた。そこで、本研究では降雨による斜面崩壊から代替性のない重要文化財および人命（観光客、周辺住民など）を守るための防災システムを確立することを目的としている。

降雨時の斜面崩壊は、すべり厚さが数十 cm～数 m 程度の表層すべり型崩壊が多く、主な要因は、1) 雨水の浸透に伴う土塊自重の増加、2) 飽和度の増加に伴う見掛けの粘着力の減少および 3) 地下水位の上昇

であると定性的に言われている。このことより、降雨時の斜面崩壊を予知・予測するためには斜面内の浸透挙動を把握することが重要であると言える。

本研究では、2004 年 7 月から京都市東山山麓の重要文化財周辺斜面において現地計測を実施してきた¹⁾。また、2006 年 7 月から同対象斜面において多点計測を開始した。本論文では、多点計測システムの概要を述べる。また、多点計測結果の考察を行い、浸透特性に対する降雨強度の違いの影響について述べる。

2. 降雨時斜面災害防止システム

本研究では、降雨時の表層すべり型崩壊を対象とした防災システムの構築を目的としている。予知は、「場所」、「時間」、「規模」を事前を知ることを意味しているが、本システムで目指している予知はその中の時間と規模のみであり、崩壊が予想される危険斜面（場所）を予め特定し、降雨により時々刻々と変化する斜面の安定性を定量的に評価することを目指している。

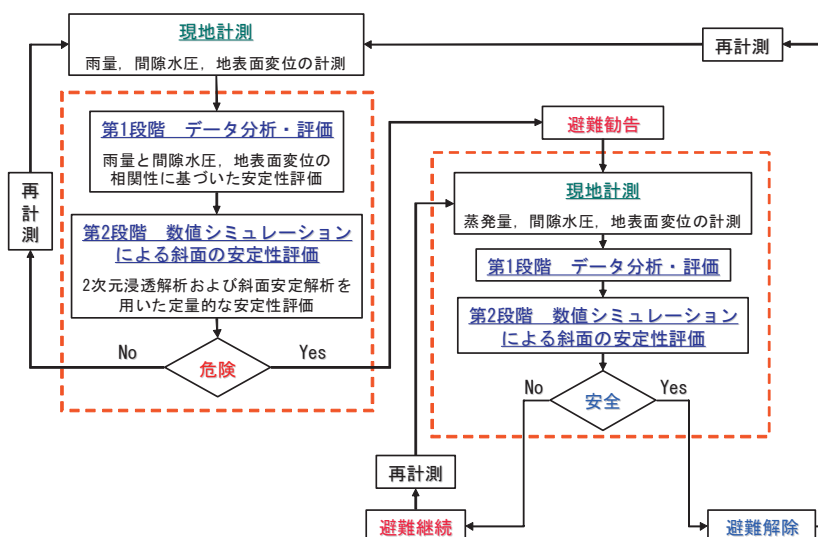
これまでに北村ら¹⁾、松尾ら²⁾は、降雨時の斜面崩壊を予知して災害を未然に防ぐことに重点を置き、現地斜面モニタリングシステムと数値シミュレーションを有機的に結びつけることにより構築される防災システムを提案している。本研究では、北村らの提案するシステムをベースに降雨時の通行規制・避難および降雨後の規制解除を行うことのできる斜面崩壊予知システム（以降、

防災システム）の構築を行っている。本システムでは“不飽和地盤内の間隙水圧は、負の圧力を示し、飽和度が高まるに従い間隙水圧が増加する”という特徴に着目した斜面の安定性の評価を行っている。また、規制解除を行う際の判断が非常に難しいことから、“降雨終了後、蒸発および浸透により、土中の間隙水圧が回復する（飽和度が低くなるに従い間隙水圧が減少する）”という特徴に着目している。

図 1 に斜面災害防止システムのフローを示す。本システムでは、まず、現地計測により雨量、間隙水圧および地表面変位の計測を行う。次に、これらの計測結果を用いたデータ分析による斜面の安定性評価および数値シミュレーションによる安定性評価という 2 段階評価が実施される。斜面の危険度が高い場合、避難勧告が発令される。また、避難勧告後も現地計測が継続され、避難解除の判断を行うための安定性評価が実施される。

3. 現地計測システムの概要

本研究では、2004 年度から重要文化財後背斜面において現地斜面モニタリングを行ってきており、



2006 年度から計測地点の多点化を実施し、より広範囲で詳細な斜面の観測を行うためにデータ通信・収集機能を強化したシステムを構築した。図 2 に多点計測システムの設置位置を示す。図 2 には、過去の崩壊箇所も示している。また、計測機器設置に先立って測量および簡易貫入試験を行った。図 3 は地質断面図および計測機器の設置位置を示している。今回、対象斜面において 4 箇所での簡易貫入試験を行っており、その結果をもとに基盤面を推定した。計測位置における地表面から想定基盤面までの深さは、約 120cm であった。

地点 M は、2004 年度に計測を開始した地点である。写真 1 に地点 M の計測システム設置状況を示す。テンシオメータ（20、40、60、80、100cm の深さに計 5 本）、温度計（10、20、30cm の深さに 3 本）、転倒ます式雨量計が設置されており、間隙水圧、地中温度、10 分間雨量の計測を行っている。増設した計測地点 A～D には、テンシオメータ（40、80、100cm の深さに計 3 本）、温度計（0、20、40cm の深さに 3 本）が設置されている。テンシオメータは、セラミック製のポーラスカップを土中に埋設し、パイプやチューブを介して圧力計をつなぎ、内部を脱気水で満たしたものである^{4)、5)}。セラミック製ポーラスカップ部分で、土中の間隙水圧とテンシオメータ内の脱気水の圧力が平衡することにより、圧力センサによって土中の間隙水圧を計測することができる。また、テンシオメータ上部の水タンク部は、テンシオメータの圧力センサが防水加工されていないことと水タンク部に直射日光が当たることによる日周期の変動を抑えることから断熱キャップで覆っている（写真 1）。また、地点 B、M、C に沿って光ファイバセンサが 5 本（1 本 1m）設置されており、地盤表面の変位を計測している。

システムの電源は、斜面に建設されている機械室より供給されている。データは、10 分間隔で取得しており、一旦、機械室内の PC に保存され、その後、寺務所へ無線通信によりデータが転送される。最終的にデータは web サイト上に表示されており、遠隔地より斜面の状況を監視することが可能である。

図 4 は、2006 年 11 月の M 地点における間隙水圧および 10 分間雨量の時系列変化を示している。地中温度については、計測器拡張工事期に伴いデータは得られていない。図より、11 月上旬は、ほとんど雨が降っておらず斜面の地盤は乾燥しており、間隙水圧の値も小さい値を示している。

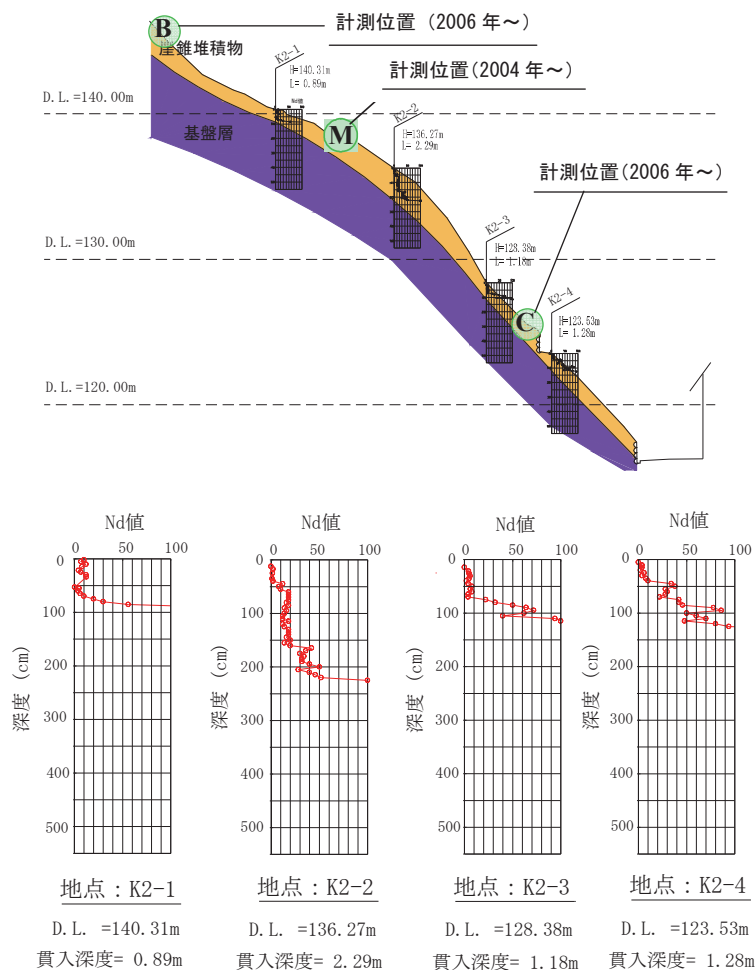


図 3 地質断面図および計測位置

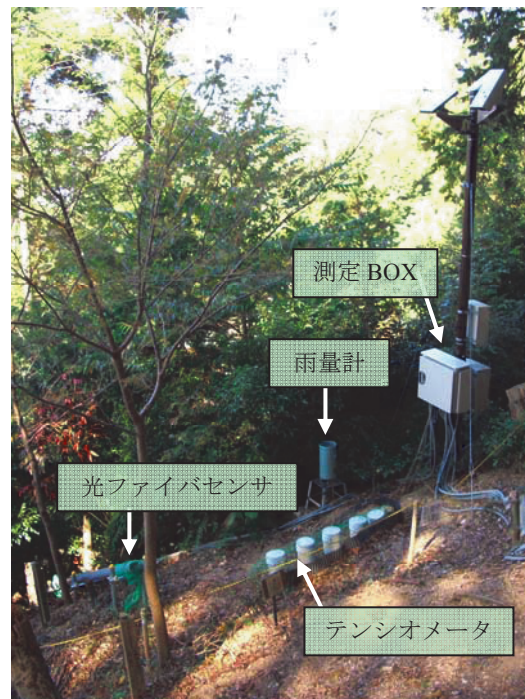


写真 1 計測機器設置状況 (M 地点)

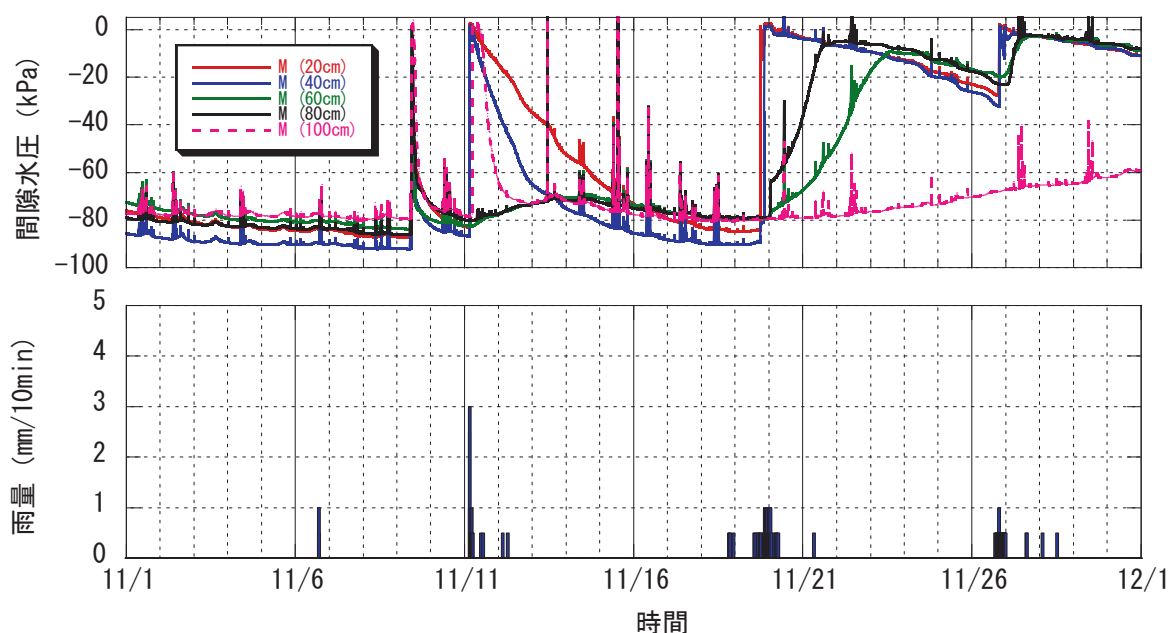


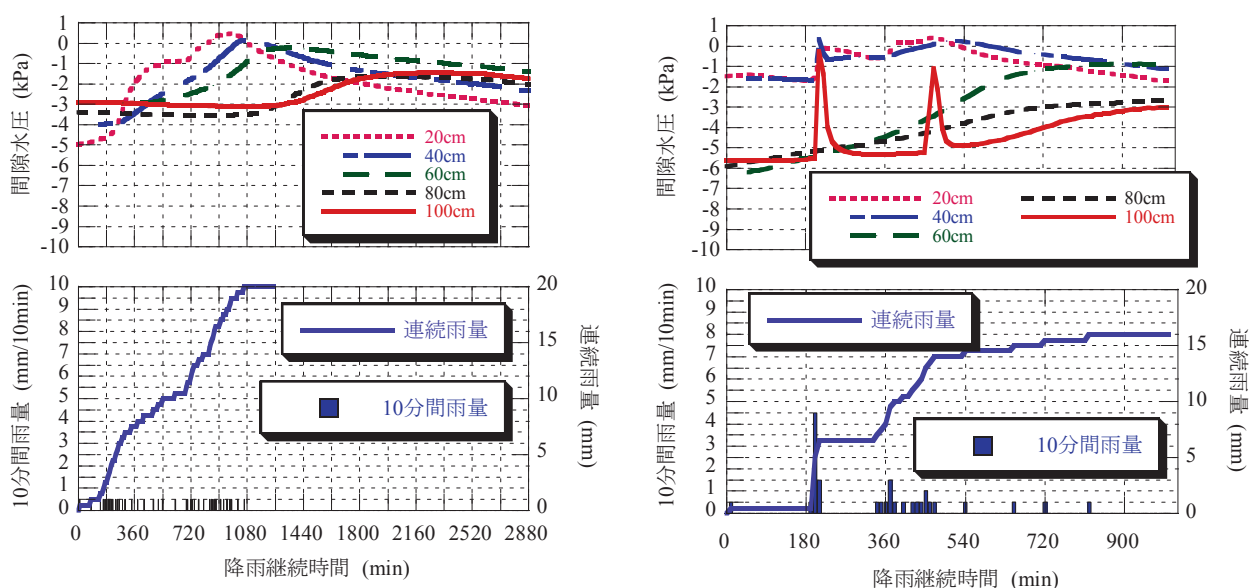
図4 間隙水圧および10分間雨量の時系列変化 (M地点：2006年11月)

11月9日には、テンシオメータ内の脱気水が抜けていたため、脱気水の補給を行った。そのため、0kPa程度まで間隙水圧が上昇している。メンテナンス終了後には、間隙水圧が急激に低下し、メンテナンス以前の値に戻ろうとしていることがわかる。データには、1ヶ月間を通してノイズが見られる。この現象は、2006年8月22日の落雷に伴う機器の故障に伴い、機器の修繕を行ってから2007年1月まで生じた。

計測地点において、11月11日、19日、26日に雨が降っており、雨水の浸透に伴う間隙水圧の増加が見られる。降雨終了後は、雨水の浸透および蒸発に伴い間隙水圧の回復（減少）が見られる。本システムでは、このような間隙水圧の変化に着目し、斜面の安定性の評価を行う。

4. 降雨強度の浸透特性に対する影響

上述のように、2004年7月からM地点において間隙水圧の計測を行ってきている。この計測結果から、図5に示すように連続雨量が同程度であっても時間雨量3.5mm/hour以上の雨が降った場合に深さ100cmの



(a) 降雨強度が小さい場合 (2004年11月18日)

(b) 降雨強度が大きい場合 (2004年11月12日)

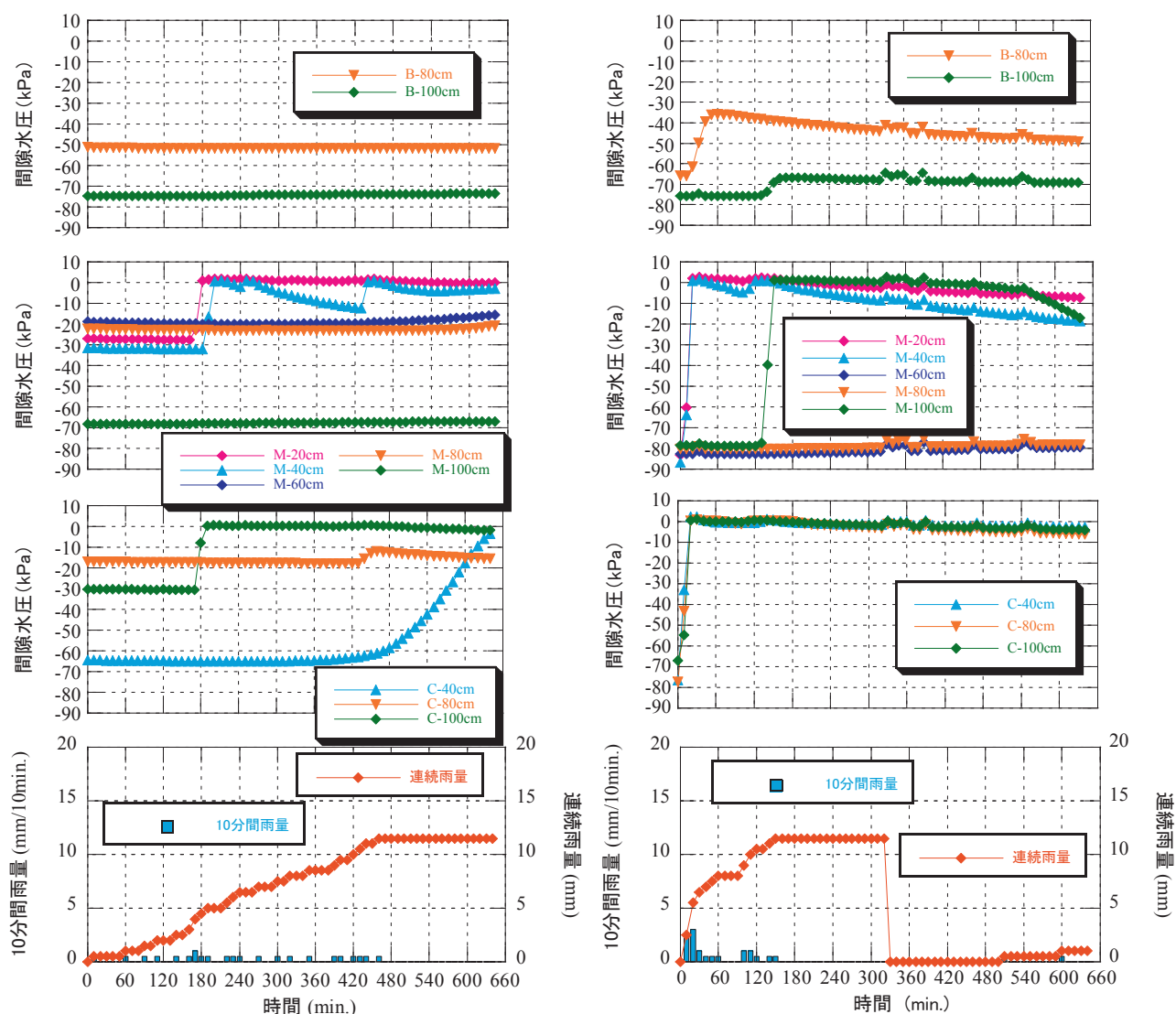
図5 降雨パターンの違いによる間隙水圧の変化の傾向 (M地点)

間隙水圧が他の浅い地点の間隙水圧よりも先に増加する傾向が得られた³⁾。この要因として、図3の地層断面図において崖堆積物の厚さが90~200cm程度であることから、M地点上部から浸透した雨水が基盤層に沿って流れてくる影響が推測されたため、2006年7月から対象斜面の縦断方向に対して現地計測システムの多点化を行った。本論文では、多点化した計測結果に基づき、降雨パターンの違いによる間隙水圧の変化傾向について検討および考察する。

図6(a)、(b)に2006年11月26日と11日の多点計測結果を示している。これらの図は、総雨量は同じであるが、雨量強度（時間雨量）が異なっている結果である。ここで、B地点の深さ40cmのデータは、テンシオメータの脱気水が完全に抜けており、計測ができなかったため、図から削除した。また、無降雨状態が3時間以上続いた場合に、連続雨量を0mmと設定している。

図6(a)は、降雨強度が小さい場合の間隙水圧の変化傾向を示している。このときの最大時間雨量は2.5mm/hourであった。図より、B地点では、間隙水圧の反応は見られず、M地点は深さ20、40cmで大きな変化が見られている。また、降雨後約540分以降に深さ60、80cmの間隙水圧が増加し始めていることがわかる。C地点においては、深い100cmから間隙水圧が反応している。上部に降った雨の表面流が集まったこと、C地点周辺には岩石が露頭している部分があり、水みちがある可能性があることなどが原因として考えられる。

一方で、図6(b)に示すような雨量強度が大きい場合においては、M地点の深さ100cmの間隙水圧が、深さ



(a) 雨量強度が小さい場合（2006年11月26日）

(b) 雨量強度が大きい場合（2006年11月11日）

図6 降雨パターンの違いによる間隙水圧の変化傾向

60cm、80cm の間隙水圧よりも先に変化していることがわかる。ここで、M 地点よりも上部にある B 地点の間隙水圧の変化に着目すると、M 地点に比べ深さ 80cm および 100cm の間隙水圧が早く変化している。これにより、C 地点の深さ 100cm も早い段階で変化している。これより、雨量強度が大きいと地表面から順に浸透するだけではなく、斜面上部からの浸透による影響があるのではないかと推測される。

ここで、B および C 地点の深さ 100cm の変化傾向に関して連続雨量と最大時間雨量を用いて検討した結果、B 地点では平均すると連続雨量 9.5mm、最大時間雨量 4.5mm/hour、C 地点では連続雨量 8.5mm、最大時間雨量 3.5mm/hour 以上のときに深さ 100cm の間隙水圧が増加する傾向を示した。これは、M 地点の深さ 100cm が連続雨量 7mm、最大時間雨量 3.5mm/hour 以上となったときに間隙水圧の増加が生じる傾向³⁾と似た結果であった。このことから、本対象斜面において、降雨量と間隙水圧データから斜面の含水状態をより正確に把握することができる。また、従来の雨量指標のみによる斜面管理基準に土中の間隙水圧の変化傾向を加えることで、より精度の高い降雨時の斜面管理を行うことができると考えられる。

5. おわりに

本論文では、降雨時の斜面崩壊に対する防災システムの概要について述べ、京都市東山山麓の重要文化財周辺斜面で実施している多点モニタリング結果について考察を行った。

多点化した計測結果に基づいた降雨パターンの違いによる間隙水圧の変化傾向に関する考察により、M 地点における深さ 100cm の間隙水圧の挙動が斜面上部からの浸透による影響によるものではないかということが明らかになった。また、深さ 100cm の間隙水圧の変化傾向と雨量指標（連続雨量および最大時間雨量）の関係が、対象斜面の異なる計測地点において、ほぼ類似した傾向を示していることがわかった。このことから、本対象斜面において、降雨量と間隙水圧データから斜面の含水状態をより正確に把握することができ、従来の雨量指標のみによる斜面管理基準に土中の間隙水圧の変化傾向を加えることで、より精度の高い降雨時の斜面管理を行うことができると考えられる。ただし、本論文における間隙水圧の変化傾向は、本対象斜面における特異な減少である可能性が高い。より一般性のある間隙水圧を用いた斜面管理手法を提案するためには、データの分析および異なる地形・地質を持つ斜面における計測を実施していく必要がある。

今後、斜面モニタリングと数値シミュレーションを有機的に結びつけることで減災・防災に貢献することができるのではないかと考えられる。

参考文献

- 1) R. Kitamura, K. Sako and K. Matsuo: A research strategy for prediction of slope failures due to heavy rain, Proc. of 12th Asian Regional Conference, pp.1535-1538, 2003.
- 2) 松尾和昌・酒匂一成・北村良介：斜面崩壊予知戦略-南九州シラス地帯を例として-，自然災害科学（日本自然災害学会誌），第 21 巻 1 号，pp.25-33, 2002.
- 3) 酒匂一成・深川良一・岩崎賢一・里見知昭・安川郁夫：降雨時の斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング，地盤工学ジャーナル，Vol.1, No.3, pp.57-69, 2006.
- 4) 地盤工学会 不飽和地盤の挙動と評価編集委員会編：不飽和地盤の挙動と評価，p.14-17, 2004.
- 5) 北村良介・川井田実・阿部廣史・城本一義・寺地卓也：砂質土地盤でのサクシヨンの現地計測システムの開発，土木学会論文集，No.652/III-51, pp.287-292, 2000.