

地盤内の水分変動を考慮した 主成分分析による降雨時斜面の危険度評価

THE RISK EVALUATION OF SLOPE DURING RAINFALL USING PRINCIPAL
COMPONENT ANALYSIS CONSIDERING VARIATION OF SOIL MOISTURE

里見 知昭¹・酒匂 一成²・安川 郁夫³・深川 良一⁴

Tomoaki SATOMI, Kazunari SAKO, Ikuo YASUKAWA and Ryoichi FUKAGAWA

¹立命館大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻 博士課程後期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: rd005010@se.ritsumei.ac.jp

²立命館大学 総合理工学研究機構 ポストドクトラルフェロー (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: kaz-sako@fc.ritsumei.ac.jp

³立命館大学 防災システムリサーチセンター 客員研究員 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: 522ikuo@fc.ritsumei.ac.jp

⁴立命館大学 理工学部都市システム工学科 教授 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: fukagawa@se.ritsumei.ac.jp

Key Words: monitoring, slope failure, rainfall index, pore-water pressure, principal component analysis

1. はじめに

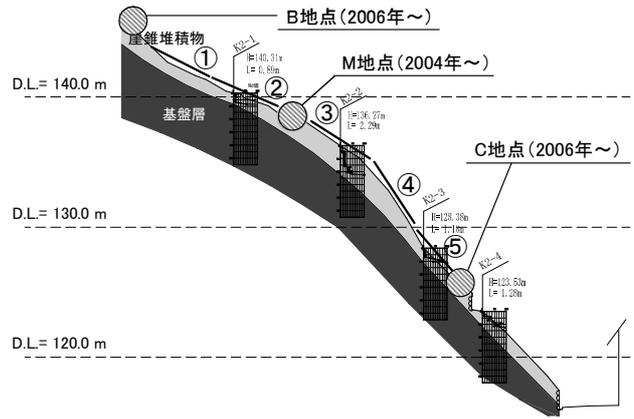
わが国では、梅雨期や台風襲来期の大雨による斜面災害が多発している。そこで、土砂災害から人命を守るために、2001年の土砂災害防止法の施行に伴って土砂災害警戒区域等の指定が実施され、指定箇所は年々増加する傾向にある。降雨に起因する斜面災害の防災対策として、従来、降雨量に基づいて斜面の危険度を評価することに重点が置かれてきた。この方法は、評価対象が広域である場合は有効であるが、地域ごとの「地形や地質」に対応したパラメータを設定することは困難なため、一般に「花崗岩」に対応したものを適用している¹⁾。結果として、降雨時斜面の危険度判断に空振りが生じるおそれがある。降雨時の表層すべり型崩壊は、(1)雨水の浸透による土塊自重の増加、(2)地盤内の飽和度の増加によるせん断強度の低下、(3)地下水位の上昇による間隙水圧や浸透力の増加によって発生すると言われていることから、「地形や地質」の影響を受ける地盤内の水分変動(間隙水圧や体積含水率など)を現地モニタリングによって直接把握することが望ましいと考えられる。筆者らの研究グループでは、現地モニタリングと数値シミュレーション

(2次元浸透解析, 斜面安定解析)を有機的に結びつけることで、降雨時の表層すべり型崩壊に対する防災システムの確立を目指している。現地モニタリングでは、2004年7月から京都市東山山麓の重要文化財後背斜面(以降、対象斜面)にテンシオメータと転倒ます型雨量計を設置し、間隙水圧と10分間雨量を計測している²⁾。2006年5月からは、広範囲における詳細な斜面状況を把握するため、計測地点の多点化を実施している。さらに、光ファイバセンサ(B-OTDR方式)を設置して地表面変位も計測している。

本論文では、2004年7月から計測し続けている地点の間隙水圧と10分間雨量の計測結果を使って、降雨時斜面の危険度を評価することを目的とする。間隙水圧と10分間雨量の計測結果を有効に活用するために、多変量解析手法の一つである主成分分析(Principal Component Analysis: PCA)³⁾を適用した評価方法を提案する。さらに、提案手法に基づいて算出した主成分得点を評価指標として採用することの有効性について、2004年台風23号時の計測結果を用いて考察する。

2. 対象斜面の地質断面および計測位置

図-1 に対象斜面の地質断面図と計測位置を示す。地質断面図は、対象斜面の4箇所で行った簡易貫入試験の結果(図-1 参照)をもとに基盤面を推定して作成されたものである。試験結果より、斜面全体の表土層(崖錐堆積物)の厚さは約100~200cmであった。図-1のB、M、C地点は計測位置を示し、M地点にはテンシオメータ(深さ20, 40, 60, 80, 100cmの計5本)と雨量計を、B、C地点にはテンシオメータ(深さ40, 80, 100cm:各地点3本の計6本)を設置している。また、図-1の①~⑤は、光ファイバセンサ(B-OTDR方式)の設置位置である。



3. 主成分分析による降雨時斜面の危険度評価

(1) 主成分分析の概要³⁾

2個の変量を想定した主成分分析の概念を図-2に示す。図-2より、主成分分析は多変量の元の情報の損失が最小となる評価軸(主成分, 合成変量)を新たに求める方法であると解釈される。この方法により、高次元のデータからの情報を限りなく失わずに低次元のデータとして処理することができ、主成分の算出方法を以下に述べる。

はじめに、式(1)を使って m 個の変量 x_1, x_2, \dots, x_m に対する n 個のデータ(個体)(x_{ji} ($j=1, 2, \dots, m$; $i=1, 2, \dots, n$))を標準化する作業を行う。それは、データの単位のとり方によって主成分が変化し、分析結果の解釈が困難になるためである。標準化によって、全データの平均は0, 分散は1になる。

$$x'_{ji} = \frac{x_{ji} - \bar{x}_j}{\sqrt{s_{jj}}} \quad (1)$$

ここで、 \bar{x}_j は変量 x_j の平均、 s_{jj} は変量 x_j の分散であり、データの主成分 z_j は式(2)のような一次式で表され、この主成分の分散 $V(z)$ は式(3)となる。

$$z_j = a_{1j}x'_1 + a_{2j}x'_2 + \dots + a_{mj}x'_m \quad (2)$$

$$V(z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m s_{jk} a_j a_k \quad (3)$$

ここで、 a_j は主成分の係数($a_j = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj})$, $j=1, 2, \dots, m$), s_{jk} は分散・共分散である。図-2より、主成分分析は、得られる新たな情報量が最大となるような式(2)の係数 a_j を決定するための分析方法で主成分分析は、得られる新たな情報量が最大となるような式(2)の係数 a_j を決定するための分析方法であるが、これは式(3)の分散 $V(z)$ が最大となる式(2)の係数 a_j を求めること

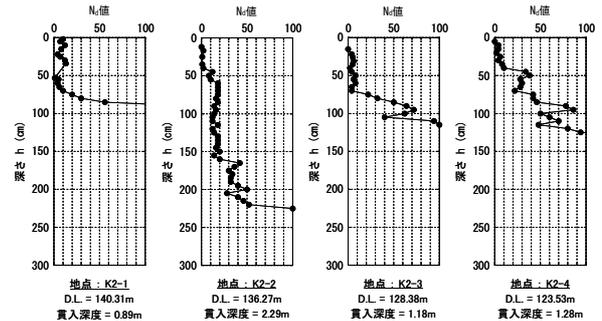


図-1 対象斜面の地質断面図および計測位置

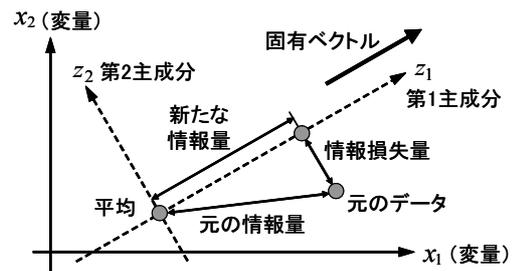


図-2 2個の変量を想定した主成分分析の概念

と等価である。このとき、分散 $V(z)$ が無限に大きくならないための制約条件として、式(4)を満たす必要がある。

$$a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_m^2 = 1 \quad (4)$$

式(4)と Lagrange の未定乗数法を使って、分散 $V(z)$ が最大となるときの係数 a_j を決定することが目的である。今回の問題は、式(5)の固有値問題を解くことに等しい。

$$Va = \lambda a; V = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1m} \\ s_{21} & s_{22} & & s_{2m} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \dots & s_{mm} \end{pmatrix}, a = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここで、 λ は分散共分散行列 V の固有値、係数 a は固有値 λ に対応する固有ベクトルである。得られた固有値 λ の中で最大の固有値に対応する固有ベクトルを使っ

た主成分が「第1主成分」であり、以降「第2主成分、…」と続く。そして、式(2)を使って各個体に対して主成分の値を計算したものを「主成分得点」とよぶ。なお、第*i*主成分が元の情報量をどの程度含んでいるかを表す指標として「寄与率」を使う。寄与率は、第*i*主成分の固有値が固有値の総和に占める比率であり、第1～*i*主成分までの寄与率の和が「累積寄与率」である。

一方、主成分分析は、元の情報量をできるだけ少ない情報量で表すことが目的のため、採用する主成分の数が重要となる。目安として、(1) 累積寄与率をある程度(例えば、80%以上)大きくすること、(2) 固有値が1以上であることなどが挙げられる³⁾。ここで、本研究で対象とするような自然斜面における地盤内の水分変動は、地質や地形状況などに影響されるため、固有値が1以上となる主成分のみでは、降雨強度と地盤内の水分変動の関係を有効に把握して評価することは容易ではないと考えられる。そこで、本論文では、採用する主成分にはある程度の情報量を持つことが望ましいと判断し、「累積寄与率が80%付近になるまでの主成分」を採用した。

(2) 主成分分析による降雨時斜面の危険度評価

図-3の降雨時斜面の危険度評価について説明する。はじめに、過去の計測データを使って主成分分析を行い、固有値や固有ベクトルの成分の係数(以降、主成分の係数)などを算出し、採用する主成分を決める。次に、主成分の係数と現在の計測データを使って主成分得点をリアルタイムに求め、この主成分得点が評価基準を上回ると避難勧告などを発令し、基準値を下回ると解除する。最後に、計測データを今後の分析データとして蓄積する。

(3) 分析に使用する計測データの設定

今回の分析には、計測を開始した2004年7月22日から2007年12月31日までに連続雨量5mm以上を記録したデータを使う。なお、連続雨量は、雨が降り始めてから無降雨状態が3時間続いた時間までの累積雨量とする。

a) 雨量指標

主成分分析の雨量指標(短期間、長期間:計2個)の変量に対して、次の4ケースを検討項目として分析する。

Case 1: 時間雨量・連続雨量(道路)

Case 2: 時間雨量・24h半減期実効雨量(矢野案(1990)⁴⁾)

Case 3: 1.5h半減期実効雨量・72h半減期実効雨量(提言案(1993)⁵⁾)

Case 4: 時間雨量・土壌雨量指数(連携案(2005)⁶⁾)

b) 間隙水圧

本論文では、図-1に示すM地点の計測データ(深さ20, 40, 60, 80, 100cm:計5個)を変量とする。今回、M地点のみを対象としたのは、B, C地点のテンシオメータ内の脱気水が抜けやすく計測できなかつた場合があり、主成分分析で用いるデータ数として十分ではないと判断したためである。

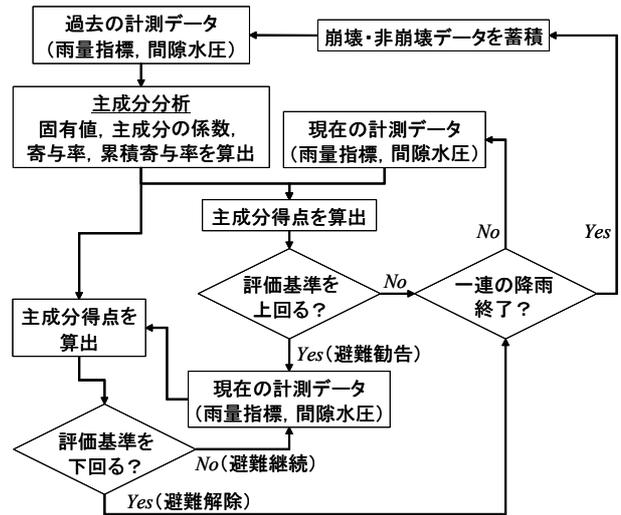


図-3 主成分分析による降雨時斜面の危険度評価

一方、間隙水圧の変化を時系列方向で評価するとき、雨が降り始めたときの間隙水圧の値(初期値)の違いによって単位時間あたりの変化量が異なる。実際、降雨開始時の地盤内が乾燥状態の場合、単位時間あたりの間隙水圧の変化量は大きくなるが、湿潤状態の場合は小さくなる。その結果、分析する毎に初期値が変化するため、分析結果を統一して処理することが困難となる可能性がある。したがって、計測結果を基準化することが必要であると考え、本論文では、式(6)を使って換算した「間隙水圧の無次元値」を主成分分析の変量とした。

$$u_t' = \frac{u_t - u_0}{|u_0|} \quad (6)$$

ここで、 u_0 は降雨開始時の間隙水圧(初期値)、 u_t は時刻*t*の間隙水圧を表し、降雨開始時の u_t' は0である。

4. 危険度評価指標としての有効性

降雨時斜面の危険度を評価する指標として、主成分得点を使った方法が降雨量のみを使った方法よりどの程度有効であるかを検討する必要がある。本章では、わが国全体で甚大な被害をもたらした2004年台風23号時の計測データを一例に、3.(3)節で示した「時間雨量・連続雨量」を使って主成分分析を実施した。今回の分析には、計測を開始した2004年7月22日から台風23号の一連の降雨直前までの約3ヶ月分のデータを使用している。

分析結果(固有値、主成分の係数、寄与率、累積寄与率)を表-1に示す。累積寄与率に注目すると、第3主成分までで全体の約80%の情報を捉えていることから、7個の変量を有効に処理できたと推測される。次に、各主成分の係数の解釈について検討する。表-1の太字斜体で表記した値より、第1主成分の係数は全て正值であるた

め、降雨量の増加に伴う間隙水圧の増加を、第2主成分と第3主成分は短期的な降雨（時間雨量）に対する深い部分（深さ 60, 80cm）の間隙水圧の変化傾向を表す。

図-4 に 2004 年台風 23 号時の間隙水圧、降雨量（時間雨量、連続雨量）、主成分得点（間隙水圧のみで表した第1主成分、間隙水圧と雨量指標による総和）を示す。間隙水圧の第1主成分得点に注目したのは、表-1 に示すように、第1主成分の固有値は最も大きく元の変量をより多く説明できるからであり、後述する避難勧告や解除等を発令するタイミング設定の際に使用する。計測結果より、降雨開始時の間隙水圧が比較的大きいのは、台風 23 号の一連の降雨の前に連続雨量 32.5mm を記録したためである。一方、主成分得点の総和は、過去に計測地点付近で崩壊したときの値（雨量データ（気象庁 京都地方気象台（京都）、1999 年 6 月 27 日 9 時、時間雨量：47mm/h、連続雨量：123.5mm）⁷⁾、崩壊時の間隙水圧を 0kPa と仮定したときの換算値：1（式(6)参照）から算定）に近づいていることから、崩壊に注意する必要があると推測される。ここで、崩壊時の間隙水圧を 0kPa と仮定したのは、降雨による間隙水圧の増加、特に正圧（0kPa）が続くと、一般に斜面は不安定になりやすいためである。

今回の結果をもとに、避難勧告や解除等を 4 段階（①避難準備（警戒基準）、②避難指示、③解除準備、④解除指示：図-4 の①～④に対応）に分けて、発令するタイミングの設定基準を検討する。このとき、4 つの基準値（(1)：全ての間隙水圧を 0kPa と仮定したときの間隙水圧の第1主成分得点（式(6)より）、(2)：(1)に対応する主成分得点の総和、(3)：1999 年崩壊時の主成分得点の総和、(4)：(2)と(3)の主成分得点の平均）を使う。なお、間隙水圧の 0kPa に注目したのは、先に述べたとおりである。

避難勧告のタイミングとして、「①避難準備」は、全ての間隙水圧を 0kPa と仮定したときの間隙水圧の第1主成分得点よりも上回った時点とし、斜面の安定化が著しく低下した時間帯と解釈する。「②避難指示」は、避難準備と崩壊発生の間として位置付けるため、「①避難準備」発令時と崩壊時の主成分得点の総和の平均値よりも大きくなった時点とする。一方、避難解除のタイミングとして、「③解除準備」は、全ての間隙水圧を 0kPa と仮定したときの間隙水圧の第1主成分得点（①避難準備と同値）よりも下回り、間隙水圧の計測値が 0kPa よりも小さくなった時間帯とする。「④解除指示」は、「①避難準備」発令時の主成分得点の総和より小さくなった時点で発令する。一般に、避難解除のタイミングは、避難指示よりも難しいといわれており、今回の方法を採用することで、解除を判断する目安になると考えられる。なお、今回のように単調増加の連続雨量を使うと、主成分得点の減少は小さく解除指示は遅れることから、減少を表現できる実効雨量や土壌雨量指数のほうが望ましいと推測される。このように、主成分得点は雨量強度と間隙水圧の変動を直接反映できるため、降雨量に基づく評価方法よりも

表-1 「時間雨量・連続雨量」を使った分析結果（2004 年台風 23 号直前までの計測データを使用）

	第1主成分	第2主成分	第3主成分	
固有値	3.206	1.441	0.897	
主成分の係数	深さ 20cm	0.4557	-0.1890	-0.2864
	深さ 40cm	0.4935	0.0107	-0.2208
	深さ 60cm	0.3312	0.5405	0.0530
	深さ 80cm	0.1799	0.5308	0.6268
	深さ 100cm	0.3983	-0.3300	0.2172
	時間雨量	0.1792	-0.5259	0.6242
	連続雨量	0.4648	0.0689	-0.1917
寄与率	45.8	20.6	12.8	
累積寄与率	45.8	66.4	79.2	

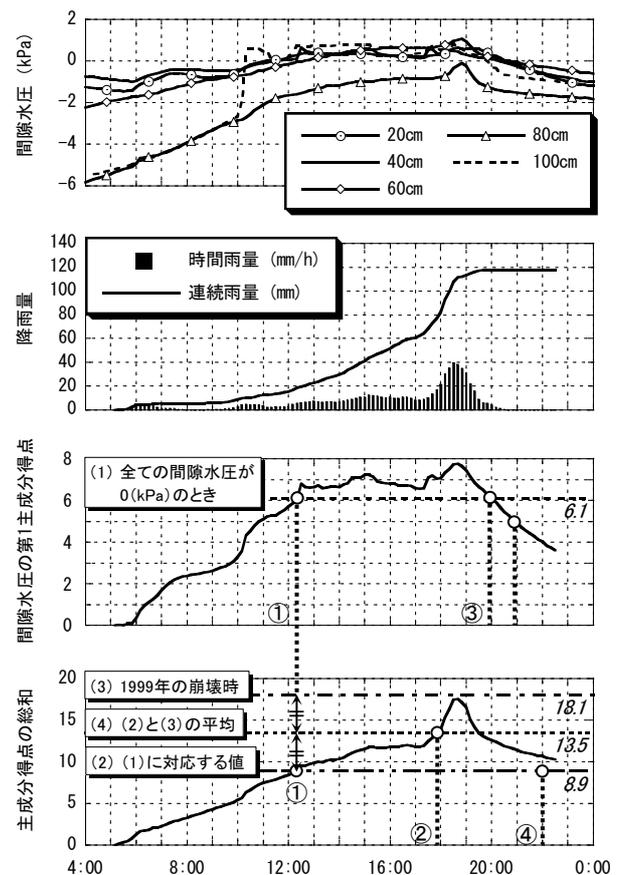


図-4 2004 年台風 23 号時の間隙水圧、降雨量、主成分得点の総和の時系列変化

崩壊の危険度に対する避難勧告や解除等を発令するタイミングをより具体的に設定できる可能性がある。

5. 雨量指標の組み合わせに関する検討

前章で述べた主成分得点の総和を降雨時斜面の危険度判断に使う場合、どの雨量指標が最も有効な組み合わせであるかを検討する必要がある。本論文では、3. (3) 節で示した 4 ケースの組み合わせにより主成分分析を行った。今回の分析には、計測を開始した 2004 年 7 月 22 日から 2007 年 12 月 31 日までの約 3.5 年間分の様々な降雨パタ

ーンに対する間隙水圧の変化傾向を示したデータを用いていることから、得られる分析結果はある一定の普遍性をもっていると判断し、分析結果に対して考察する。

はじめに、4 ケースの組み合わせに対する分析結果を示す前に、「時間雨量・連続雨量」による結果（固有値、主成分の係数、寄与率、累積寄与率）を表-2 に示す。累積寄与率に注目すると、第3 主成分までで全体の約 80% の情報を捉えていることから、7 個の変量を有効に処理できたと推測される。次に、各主成分の係数の解釈について検討する。表-2 の太字斜体で表記した値より、第1 主成分の係数は全て正值のため、降雨量の増加に伴う間隙水圧の増加を表し、第2 主成分の係数は時間雨量と深さ 60, 80cm の間隙水圧の値が他の係数よりも比較的大きいことから、短期的な降雨（時間雨量）に対する深い部分（深さ 60, 80cm）の間隙水圧の変化傾向を示している。第3 主成分の係数は、浅層から深層にかけて負値から正值へと転じているため、浅層から深層の地盤内水分にコントラストが生じることを表している。つまり、浅い部分が乾燥すると深い部分は湿潤になると解釈される。

次に、「時間雨量・連続雨量」の分析結果と同様、4 ケースの組み合わせに対する結果を表-3 に示す。ただし、「時間雨量・連続雨量」以外の雨量指標を使って求めた主成分の係数は表-2 と似ているため、本論文では省略する。表-3 より、「Case 3 : 1.5h 半減期実効雨量・72h 半減期実効雨量」の第3 主成分までの累積寄与率は 82.7% と最も大きく、第1~3 主成分までで元の変量 7 個の大部分を説明できることを意味するため、対象斜面ではこの組み合わせが最も有効であると推測される。

このような結果が得られたのは、変量である短期間雨量指標が影響したと考えられることから、2004 年台風 23 号時の計測結果を一例に、短期間雨量指標（時間雨量、1.5h 半減期実効雨量）と間隙水圧の変化傾向に関して考察する。雨量指標の特徴より、時間雨量は降雨終了 1 時間後に 0mm となるが、1.5h 半減期実効雨量は降雨終了 3 時間後も約 11.3mm を示している。一方、図-5 の降雨開始時 (○) と無降雨状態 3 時間経過後 (◆) の間隙水圧から判断すると、無降雨状態 3 時間経過した後も完全に回復していない。つまり、無降雨状態 3 時間経過した後も 0mm とならない 1.5h 半減期実効雨量のほうが地盤内の水分変動との関係を良好に表現できる可能性がある。

しかし、倉本ら⁸⁾は、降雨量に基づく評価として雨量指標を選定する際の検討項目として「災害補足度、空振り率」を採用した場合、「時間雨量・土壌雨量指数」が最も妥当な組み合わせであるという結果を得ている。本論文では、2004 年台風 23 号時の計測結果を一例に、一連の降雨に対する「主成分得点の総和」の最大値から無降雨状態 3 時間経過後の値までの減少率に注目し、それぞれの時刻に対する各深さの間隙水圧の減少率を考慮して、雨量指標の有効な組み合わせ (3. (3) 節の 4 ケースを対象) について検討する。

表-2 「時間雨量・連続雨量」を使った分析結果（2004 年の計測開始から 2007 年末日までの計測データを使用）

		第1主成分	第2主成分	第3主成分
固有値		3.953	0.958	0.696
主成分の係数	深さ 20cm	0.3950	0.1007	-0.6213
	深さ 40cm	0.4265	0.0063	-0.4832
	深さ 60cm	0.4121	-0.2817	0.1130
	深さ 80cm	0.4006	-0.2884	0.2564
	深さ 100cm	0.3805	0.1078	0.4680
	時間雨量	0.1872	0.9016	0.1486
連続雨量		0.3898	-0.0528	0.2470
寄与率		56.5	13.7	9.9
累積寄与率		56.5	70.2	80.1

表-3 雨量指標の組み合わせに対する分析結果（2004 年の計測開始から 2007 年末日までの計測データを使用）

Case 1	時間雨量・連続雨量		
	第1主成分	第2主成分	第3主成分
固有値	3.953	0.958	0.696
寄与率	56.5	13.7	9.9
累積寄与率	56.5	70.2	80.1
Case 2	時間雨量・24h半減期実効雨量		
	第1主成分	第2主成分	第3主成分
固有値	3.989	0.958	0.692
寄与率	57.0	13.7	9.9
累積寄与率	57.0	70.7	80.6
Case 3	1.5h半減期実効雨量・72h半減期実効雨量		
	第1主成分	第2主成分	第3主成分
固有値	4.256	0.836	0.699
寄与率	60.8	11.9	10.0
累積寄与率	60.8	72.7	82.7
Case 4	時間雨量・土壌雨量指数		
	第1主成分	第2主成分	第3主成分
固有値	4.008	0.957	0.686
寄与率	57.3	13.7	9.8
累積寄与率	57.3	70.9	80.7

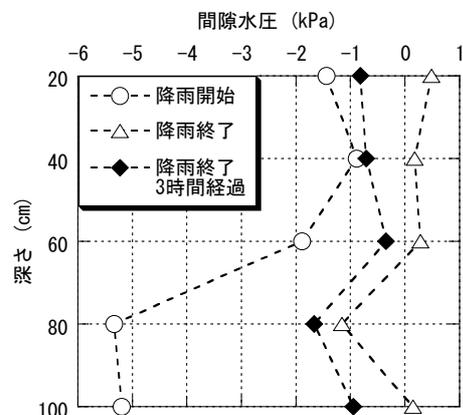


図-5 降雨開始時と無降雨状態 3 時間経過後の各深さに対する間隙水圧の変化（降雨終了時も含む）

雨量指標の組み合わせに対する主成分得点の総和と各深さの間隙水圧の基準化した値で整理した結果をそれぞれ表-4と表-5に示す。なお、表-5の「間隙水圧の基準化した値」とは、式(6)を使って表したものであり、減少率は計測深度が大きくなるほど小さくなった。表-4の減少率と表-5の平均を比べると、「1.5h半減期実効雨量・72h半減期実効雨量：Case3」が最も近い値を示した。このような結果が得られたのは、表-3に示す第3主成分までの累積寄与率に対してCase3が最大であることが影響していると考えられ、対象斜面において雨量指標と間隙水圧の変化傾向の関係を良好に把握しているCase3が4ケースの中で最も有効であると解釈される。参考に、「1.5h半減期実効雨量・24h半減期実効雨量」、「1.5h半減期実効雨量・土壌雨量指数」の組み合わせを用いて「主成分得点の総和に関する減少率」を求めると、それぞれ50.4%、55.1%であった。以上の6ケースの雨量指標の組み合わせに対する減少率と表-5の平均から判断すると、対象斜面では「時間雨量・土壌雨量指数」が最も離れた値(62.8%)となり、「1.5h半減期実効雨量・24h半減期実効雨量」が有効な組み合わせであると考えられる。このような結果が得られた理由背景として、(1)短期間雨量指標(時間雨量、1.5h半減期実効雨量)の変動傾向が異なること、(2)土壌雨量指数の計算に使用するパラメータは花崗岩が対象であること¹⁾が挙げられる。

今後は、2004年台風23号時以外の様々な降雨パターンによる計測結果を使って、対象斜面における雨量指標の有効な組み合わせについて検証する必要がある。一方、計測地点を変えた場合、各地点の地形や地質に対応した間隙水圧の変化傾向が分析結果に影響すると推測されるため、計測地点ごとに対して新たに分析することで最適な組み合わせが得られるのではないかと考えられる。

6. おわりに

本論文では、京都市東山山麓の重要文化財後背斜面で計測した間隙水圧と10分間降雨量を使って降雨時斜面の危険度を評価するため、主成分分析を使った評価方法を提案し、主成分得点を評価指標として採用することの有効性に関して、2004年台風23号の計測結果を使って検討した。本研究で得られた知見を、以下に述べる。

- 1) 主成分分析より、第3主成分までで全体の約80%の情報を捉えたことから、多変量(本論文は7個)を有効に処理できた。また、主成分の係数より、雨量強度と地盤内の水分変動との関係を表していることが解釈することができた。
- 2) 主成分の係数と計測データを使った主成分得点は、降雨時斜面の危険度をリアルタイムに評価できて、雨量強度と地盤内の水分変動を直接反映していることから、避難勧告や解除の発令等のタイミングをより具体的に設定できる可能性がある。

表-4 雨量指標の組み合わせに対する主成分得点の総和の最大値、無降雨状態3時間経過後の値、減少率

短期間雨量指標	長期間雨量指標	主成分得点の総和		減少率(%)
		最大値	無降雨状態3時間経過後	
時間雨量	連続雨量	15.37	6.53	57.5
時間雨量	24h半減期実効雨量	15.83	6.48	59.1
時間雨量	土壌雨量指数	15.48	5.76	62.8
1.5h半減期実効雨量	72h半減期実効雨量	14.74	7.42	49.6

表-5 各深さの間隙水圧の基準化した値に対する主成分得点の総和の最大時、無降雨状態3時間経過後の値、減少率

計測深度	間隙水圧の基準化した値		減少率(%)	平均(%)
	主成分得点の総和の最大時	無降雨状態3時間経過後		
20cm	1.437	0.434	69.8	51.6
40cm	1.514	0.203	86.6	
60cm	1.541	0.815	47.1	
80cm	0.961	0.688	28.5	
100cm	1.109	0.817	26.3	

- 3) 主成分分析の結果と間隙水圧の変化傾向から判断すると、降雨による対象斜面の危険度を評価する際の有効な雨量指標の組み合わせは、「1.5h半減期実効雨量・24h半減期実効雨量」であることが分かった。

参考文献

- 1) 岡田勝也：土壌雨量指数，測候時報，気象庁，第69巻，5号，pp.83-84，2002。
- 2) 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。
- 3) 田中豊，脇本和昌：多変量統計解析法，現代数学社，pp.53-84，1983。
- 4) 矢野勝太郎：前期降雨の改良による土石流の警戒・避難基準雨量設定手法の研究，砂防学会誌，Vol.43，No.4，pp.3-13，1990。
- 5) 建設省河川局砂防課：集中的に発生するがけ崩れに対する警戒避難基準雨量の設定手法(案)，1993。
- 6) 国土交通省河川局，気象庁予報部，国土交通省国土技術政策総合研究所：国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定方法(案)，2005。
- 7) 気象庁：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>，2008.05.16。
- 8) 倉本和正，野呂智之，小山内信智，小林幹男，岡田憲治：土砂災害警戒情報の作成・発表基準に用いる降雨指標の検討，砂防学会研究発表会概要集，pp.186-187，2005。

(2008.5.16 受付)