

主成分分析を用いた降雨時斜面のリアルタイム危険度評価

—京都市東山区重要文化財後背斜面を対象として—

Real-time risk evaluation for a slope during rainfall based on principal component analysis
- In case of a slope behind an important cultural asset in Higashiyama-ward, Kyoto city -

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)

Doctoral Program, Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

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)

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

³立命館大学 防災システム研究センター 特別研究員 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Fellow, Research Center for Disaster Mitigation System, Ritsumeikan University

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)

Professor, Dept. of Civil Engineering, College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

In Japan, slope disaster often occurs during typhoon and rainy season. Thus, rainfall data was often used to evaluate the danger of a slope during rainfall. This method is difficult to set rainfall-index parameter for a specific slope. Therefore, in order to more quantitatively evaluate stability of a slope, estimation of water behavior in soil is important. We have been measuring rainfall, pore-water pressure...etc., of a slope behind an important cultural asset in Higashiyama-ward, Kyoto city. In this paper, in order to make effective use of these data, an evaluation method using principal component analysis (PCA) is proposed. As a consequence, the danger level of the above slope failure can be evaluated using PCA.

Key Words : *principal component analysis, rainfall, pore-water pressure, ground displacement*

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。特に、京都市内の山麓周辺は代替性のない重要文化財が数多く存在しており、一旦降雨による斜面災害で重要文化財が被災した場合、修復することは容易ではなく、観光客や周辺住民の生命にも影響を及ぼす。降雨に起因する斜面災害への防災対策としては、従来、降雨量に基づいて斜面の危険度を評価し判断することに重点が置かれてきた。この方法は、広域の斜面を評価対象とする場合は有効であるものの、雨量指標に使う際のパラメータ設定に関して、斜面ごとの「地形や地質」を考慮することは困難なため、一般に「花崗岩」に対応したパラメータを適用している¹⁾。その結果、崩壊の危険性を具体的に判定したい斜面では、空振りが生じる可能性が大きい。特に、地形的に危険と判断される斜面下に重要な文化財がある場合、従来の降雨量に基づいた評価方法では、一般的な危険度判断にとどまり、当該斜面に対する崩壊の危険性を直接評価していない。一般に、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から直接把握すること

が望ましいと考えられる。筆者らのグループでは、現地モニタリング結果を使って統計的手法（データ分析）と数値力学的手法（数値シミュレーション）を有機的に結びつけた、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（以下、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、広範囲の詳細な斜面状況を把握するために計測地点の多点化を実施し、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、「10分間雨量、間隙水圧、地表面変位」計測結果をもとに統計的手法を使って降雨時斜面の危険度をリアルタイムに評価することを目的とし、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。そして、2007年台風4号時（2007年7月13日～15日）の計測結果を危険度評価の対象として、提案手法に基づいて算出した主成分得点を評価指標に採用することの有効性、避難勧告や解除のタイミングの設定基準について検討する。

2. 対象斜面の地質状況、計測地点・機器

図1に対象斜面の地質断面図と計測地点を示す。地質断面図は、対象斜面の4ヶ所で行った簡易貫入試験の結果をもとに基盤面を推定して作成されたものであり、斜面全体の表土層（崖錐堆積物）厚さは約100～200cmであった。M地点の土は、日本統一土質分類法によると、地表面～深さ40cm：細粒分質砂質礫、深さ50cm付近：礫まじり砂質細粒土、深さ80～110cm：砂礫質細粒土となり、深さ50, 80, 110cmの土は、集中豪雨などによって法面崩壊や侵食が生じやすい傾向にあることが分かっている²⁾。計測機器に関して、M地点では写真1のように、間隙水圧を計測するためのテンシオメータ（深さ20, 40, 60, 80, 100cmの計5本）と地中温度を計測するための熱電対（深さ20, 40, 60cm）、気象観測（10分間雨量、気温、湿度、風速）のために気象観測計（2007年）を設置している。2006年より新たに増設したB, C地点では、テンシオメータ（深さ40, 80, 100cm：各地点3本の計6本）を使用しており、図1に示す番号①～⑤は、光ファイバセンサ（B-OTDR方式）の設置位置である。

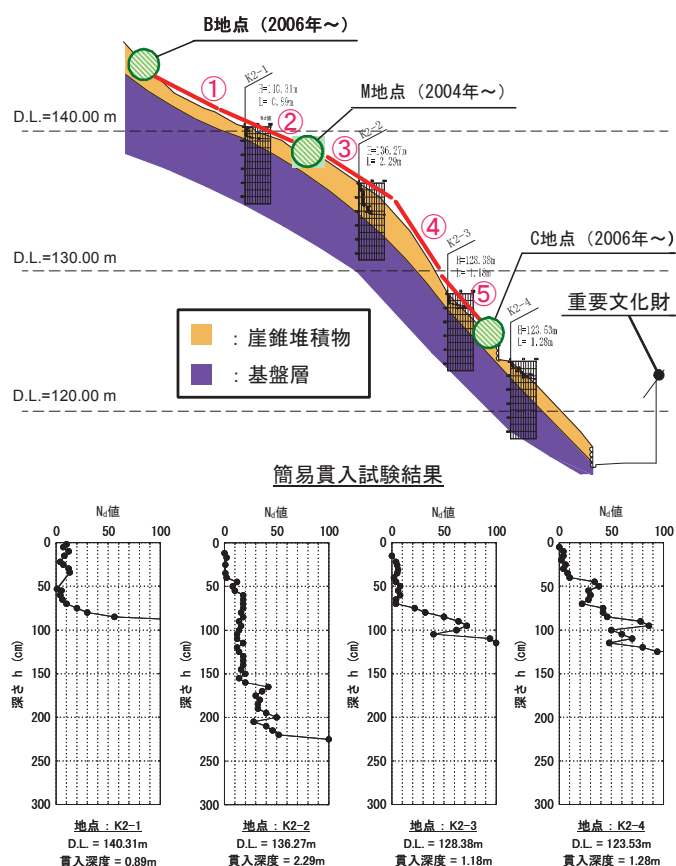


図1 対象斜面の地質断面図および計測位置

3. 主成分分析を用いた斜面の危険度評価

(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に示し、主成分分析とは多変量の元の情報量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） $(x_{ji} [j=1, 2, \dots,$



写真1 M地点の設置状況

$m ; i=1, 2, \dots, n]$) を標準化する作業を行う。この作業は、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ことを抑制するために行う。標準化によって、全データの平均は0、分散は1になる。

$$X_{ji} = \frac{x_{ji} - \bar{x}_j}{\sqrt{s_{jj}}}$$

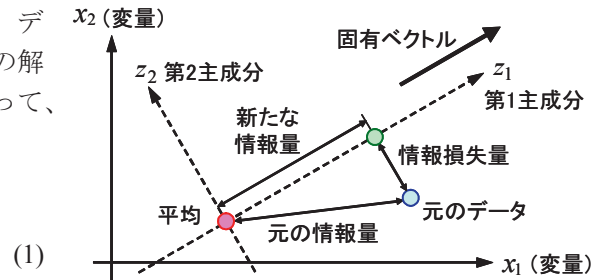


図2 2個の変量を想定した主成分分析の概念

ここで、 \bar{x}_j は変数 x_j の平均、 s_{jj} は変数 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 $V(z_j)$ は式(3)となる。

$$z_j = a_{1j}X_1 + a_{2j}X_2 + \dots + a_{mj}X_m \quad (2)$$

$$V(z_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{ji} - \bar{z}_j)^2 = s_{11}a_1^2 + s_{12}a_1a_2 + \dots + s_{mm}a_m^2 = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m s_{jk}a_ja_k \quad (3)$$

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あるが、これは式(3)の分散 $V(z_j)$ が最大となる式(2)の係数 a_j を求めることと等価である。このとき、分散 $V(z_j)$ 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 $V(z_j)$ 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が「寄与率」であり、第 i 主成分の固有値が固有値の総和に占める比率を意味し、第1~ i 主成分までの寄与率の和が「累積寄与率」である。

また、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、主成分の採用数が重要となる。目安として、(1) 固有値が1以上であること、(2) 累積寄与率をある程度（例えば、80%以上）大きくすることなどが挙げられ³⁾、主成分の数の決定は危険度評価で詳しく述べる。

(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フローについて説明する。はじめに、過去の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（以下、主成分の係数）などを算出して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、得られた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、基準を下回ると解除を実施する。最後に、計測データを今後の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

本論文では、2007年台風4号時の斜面の危険度をリアルタイムに評価することが目的であるため、今回の分析には、計測を始めてから（間隙水圧と10分間雨量は2004年7月から、地表面変位は2006年5月から）2007年台風4号直前までに連続雨量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

主成分分析に使用する雨量指標（短期間，長期間：計2個）の変量は、以下の3ケースである。

- Case 1：時間雨量・連続雨量（道路の通行規制を対象）
- Case 2：1.5hr半減期実効雨量・72hr半減期実効雨量（提言案）⁴⁾
- Case 3：時間雨量・土壌雨量指数（連携案）⁵⁾

実効雨量⁶⁾とは、式(7)の半減係数を使って降雨の浸透・貯留過程を概略的に表現した指標で、 α_n はn時間前の半減係数、Tは半減期(1.5hr, 72hr)を表す。

$$\alpha_n = (0.5)^{n/T} \tag{7}$$

一方、土壌雨量指数⁵⁾とは、図4のような直列3段タンクモデルの流出・浸透孔の位置などを考慮したタンク貯留高の合計値で表す。なお、図4の係数に関して、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ は各流出孔の流出係数(1/hr)、 L_1, L_2, L_3, L_4 は各流出孔の高さ(mm)、 S_1, S_2, S_3 は各タンクの貯留高、 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ は各浸透流出孔の浸透係数(1/hr)を意味している。

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）を変数とする。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った場合があり、分析用データの数として十分でない判断したためである。

一方、間隙水圧の変化を時系列方向で評価する際、図5のように、降雨開始時の間隙水圧の値（初期値）の違いによって、単位時間あたりの変化量は異なる。実際、地盤内が乾燥状態の場合は単位時間あたりの間隙水圧の変化量は大きく湿潤状態の場合は小さくなり、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は困難となる可能性がある。本論文では、計測結果を基準化することが必要であると考え、式(8)を使って換算した「間隙水圧の無次元値」を変数とした。

$$U_t = \frac{u_t - u_0}{|u_0|} \tag{8}$$

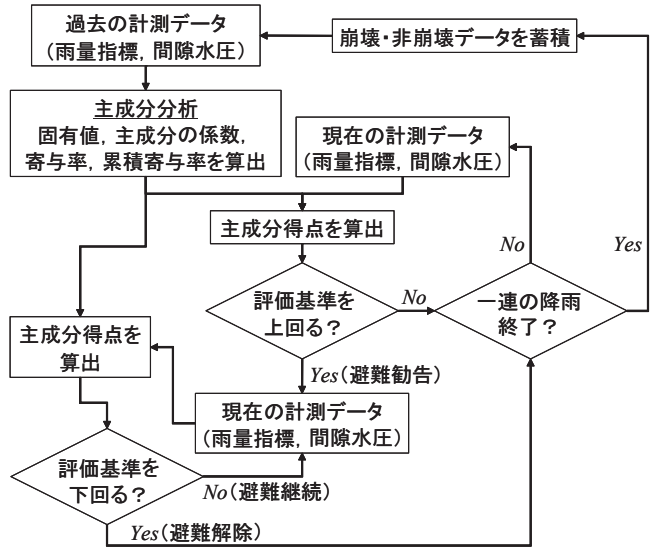


図3 主成分分析による降雨時斜面の危険度評価

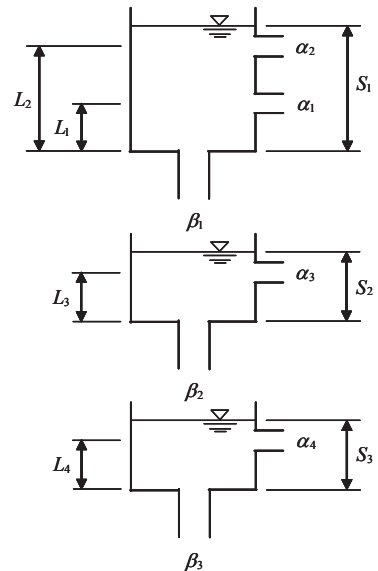


図4 直列3段タンクモデル

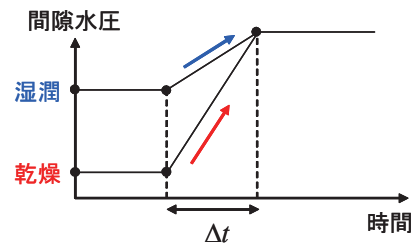


図5 間隙水圧の時系列変化

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、降雨開始の U_t は 0 である。

4. 2007 年台風 4 号時の危険度評価

(1) 計測結果

図 6 に 2007 年台風 4 号時（7 月 13 日～15 日）の計測結果（間隙水圧、累積ひずみ、ひずみ速度、降雨量（時間雨量・連続雨量））を示す。降雨開始時の間隙水圧が比較的大きいのは、7 月 9 日から 12 日にかけて記録した累積雨量 69mm が影響したためである。また、時間雨量の強度によって間隙水圧の変化が明確に表れた結果より、降雨量のみではなく地盤内の水分変動を直接把握することは有効であると解釈できる。一方、図 6 の地表面変位（累積ひずみ・ひずみ速度）については、2007 年 5 月 26 日 15 時を基準（0mm）としており、累積ひずみは地表面変位をセンサ長（5m）で除して百分率で表した値で、ひずみ速度は 1 時間ごとの累積ひずみ量に換算した値であり、双方のパラメータも正值は引張、負値は圧縮を意味する。図 6 より、累積ひずみやひずみ速度はほとんど変化せず、特にひずみ速度は $\pm 0.01\%/hr$ の範囲内である。なお、光ファイバセンサの精度は 0.1mm/m （ 0.01% ）である。以上より、今回のような雨量強度（最大時間雨量： 10.2mm/hr ）では、斜面はほとんど変位しないことが分かった。

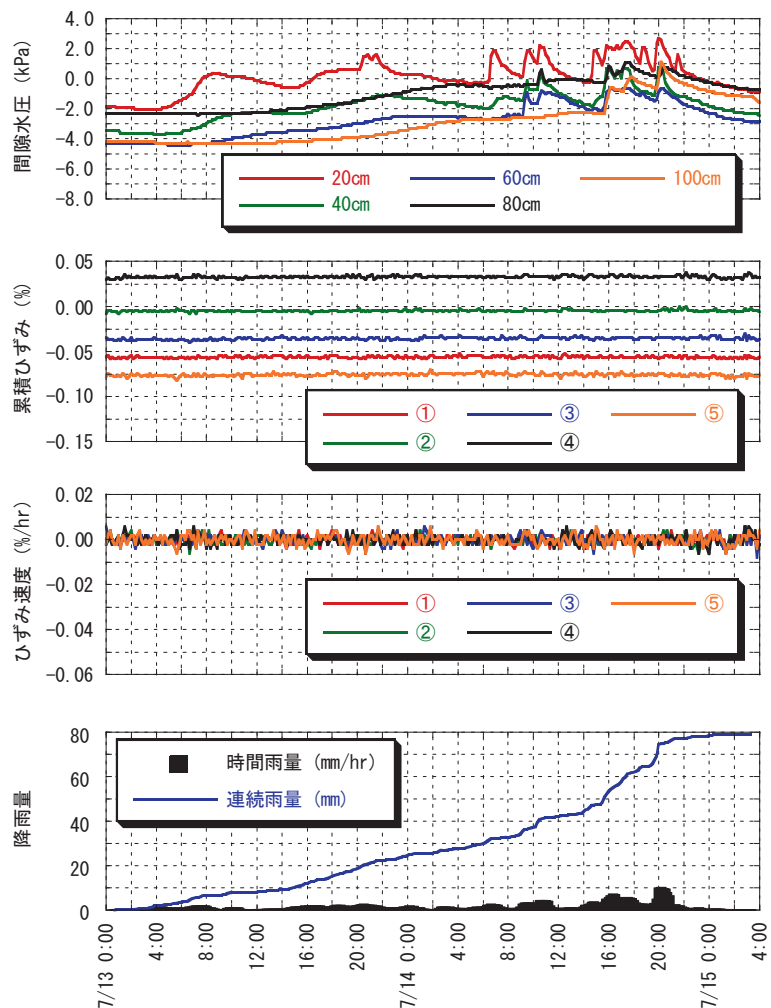


図 6 2007 年台風 4 号時の計測結果

(2) 分析結果

本節では、降雨に対する地盤内の水分変動と地表面の変動に注目するために、変量である降雨量（雨量指標）と間隙水圧とひずみ速度の関係について検討する。分析に使用する検討項目は、次の 3 ケースとする。ここで、地表面の変動を評価する指標に「ひずみ速度」を採用したのは、降雨時に異常を確認した場合、崩壊域や場所を推定し限定するときに有効であるといわれているからである⁷⁾。

- a) 「雨量指標～間隙水圧」の関係（変量：7 個）
- b) 「雨量指標～ひずみ速度」の関係（変量：7 個）
- c) 「雨量指標～間隙水圧～ひずみ速度」の関係（変量：12 個）

a) 「雨量指標～間隙水圧」の関係

今回の分析には、計測を開始した 2004 年 7 月から 2007 年台風 4 号直前までのデータを使用し、「Case1：時間雨量・連続雨量」を用いた場合の分析結果を表 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。なお、分析用データは、約 3 年間の様々な降雨パターンに対する間隙水圧の変化傾向を含んだデータを使用しており、得られる結果はある一定の普遍性があるものとして解釈する。

次に、各主成分の係数の解釈に関して検討する。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表し、第 2 主成分は時間雨量と深さ 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。そして、第 3 主成分は、浅層から深層にかけて負値から正值へと転じた結果より、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。

一方、主成分分析の結果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 3 ケースの組み合わせにより主成分分析を行い、寄与率および累積寄与率から雨量指標の最も有効な組み合わせを判断する。3. (1) 節で述べたように、寄与率とは、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であり、累積寄与率とは、第 $1\sim i$ 主成分までの寄与率の和である。つまり、各主成分における寄与率と累積寄与率が大きいほど、「降雨量と間隙水圧の変化」の関係を明確に説明できることを意味している。表 2 に Case1 以外の分析結果を示す。ただし、主成分の係数については Case1 (表 1 参照) と似ていたため、本論文では省略する。分析結果より、「Case2 : 1.5h 半減期実効雨量・72h 半減期実効雨量」の第 1~3 主成分の寄与率は全てのケースで常に大きく、第 3 主成分までの累積寄与率も 83.3% と最大である。つまり、Case2 の雨量指標を採用することで、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し、対象斜面では Case2 の雨量指標が最も有効であると推測される。

b) 「雨量指標～ひずみ速度」の関係

今回の分析には、計測を開始した 2006 年 5 月から 2007 年台風 4 号直前までのデータを使用し、「Case1 : 時間雨量・連続雨量」を用いた場合の分析結果 (固有値, 主成分の係数, 寄与率, 累積寄与率) を表 3 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 67% の情報を捉えたことから、7 個の変量はある程度処理できたと考えられる。

次に、各主成分の係数の解釈に関して検討する。表 3 の太字斜体で表記した値より、第 1 主成分のひずみ速度に関する係数は正值かつ雨量指標に関する係数よりも大きい結果より、第 1 主成分はひずみ速度の変化を表し、第 2 主成分は雨量指標に関する係数が大きい結果より、雨量強度を表現している。そして、第 3 主成分は、計測地点③~⑤のひずみ速度と長期間雨量指標 (連続雨量) の関係を示していると解釈される。なお、第 4 主成分以降の係数の関連性は明確でなかったため、表 3 には示していない。一方、「降雨量とひずみ速度」関係を効果的に説明するための最も有効な雨量指標の組み合わせに関して、4. (2). a) 項と同様に分析し検討した結果、「Case2 : 1.5h 半減期実効雨量・72h 半減期実効雨量」が最も有効であると推測された。

c) 「雨量指標～間隙水圧～ひずみ速度」の関係

今回の分析には、計測を開始した 2006 年 5 月から 2007 年台風 4 号直前までのデータを使用し、3. (3) 節で示した 3 ケースの組み合わせに基づいて主成分分析を行った結果、4. (2). a), b) 項と同様、「Case2 : 1.5h 半減期実効雨量・72h 半減期実効雨量」の寄与率と累積寄与率が最も大きかったため、本論文では Case2 の分析結果のみを示す (表 5 参照)。表 5 の太字斜体で表記した値より、第 1 主成分は、間隙水圧と雨量指

表 1 時間雨量・連続雨量を使った分析結果

		第1主成分	第2主成分	第3主成分
固有値		3.955	0.960	0.734
主成分の係数	深さ20cm	0.3875	0.2064	-0.6286
	深さ40cm	0.4275	0.0483	-0.4735
	深さ60cm	0.3972	-0.3832	0.1737
	深さ80cm	0.3917	-0.3310	0.3099
	深さ100cm	0.3800	0.1087	0.3239
	時間雨量	0.2099	0.8248	0.3611
	連続雨量	0.4092	-0.0812	0.1385
寄与率 (%)		56.5	13.7	10.5
累積寄与率 (%)		56.5	70.2	80.7

表 2 雨量指標の組み合わせに対する分析結果

Case 2	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	3.989	0.958	0.692
寄与率 (%)	61.2	11.7	10.4
累積寄与率 (%)	61.2	72.9	83.3

Case 3	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	4.256	0.836	0.699
寄与率 (%)	57.3	13.7	10.4
累積寄与率 (%)	57.3	71.0	81.5

表 3 時間雨量・連続雨量を使った分析結果

		第1主成分	第2主成分	第3主成分
固有値		2.518	1.161	1.017
主成分の係数	地点①	0.4955	0.0177	-0.0832
	地点②	0.4762	0.0596	-0.2312
	地点③	0.3742	-0.0420	0.4210
	地点④	0.4131	0.1439	-0.4549
	地点⑤	0.4639	-0.0840	0.3891
	時間雨量	-0.0397	0.7514	-0.2989
	連続雨量	-0.0191	0.6340	0.5611
寄与率 (%)		36.0	16.6	14.5
累積寄与率 (%)		36.0	52.6	67.1

表 4 雨量指標の組み合わせに対する分析結果

Case 2	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	3.989	0.958	0.692
寄与率 (%)	36.0	21.7	13.5
累積寄与率 (%)	36.0	57.6	71.1

Case 3	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	4.256	0.836	0.699
寄与率 (%)	36.0	16.9	14.4
累積寄与率 (%)	36.0	52.9	67.3

標に関する係数がひずみ速度に関する係数よりも大きいことから、降雨量の増加に伴う間隙水圧の増加を表している。第2主成分は、ひずみ速度に関する係数が大きい結果より、ひずみ速度の変化を表現している。なお、第3主成分以降の係数の関連性については、第1, 2主成分の係数よりも明確ではなかったため、分析結果のみを示す。以上より、「雨量指標～間隙水圧～ひずみ速度」の関係は、元の変量である12個から2個に減らすことができ、より少ない変量でこれらの関係を表現できるものと推測される。

表5 1.5hr半減期実効雨量・72hr半減期実効雨量を使った分析結果

	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分	第5主成分	
固有値	4.586	2.512	1.016	0.865	0.636	
主成分の係数	深さ20cm	0.3588	0.0000	0.4065	0.4035	-0.0757
	深さ40cm	0.3626	0.0196	0.3439	0.3995	-0.1699
	深さ60cm	0.3871	0.0196	-0.1961	-0.1506	-0.0168
	深さ80cm	0.4064	0.0177	-0.1792	-0.2118	0.1327
	深さ100cm	0.3667	0.0299	-0.2760	-0.3022	-0.0249
	地点①	-0.0251	0.4948	0.0964	-0.0739	-0.4060
	地点②	-0.0195	0.4762	0.2148	-0.2775	-0.1269
	地点③	-0.0180	0.3741	-0.4158	0.5051	0.5381
	地点④	-0.0197	0.4133	0.3993	-0.3144	0.5174
	地点⑤	-0.0129	0.4638	-0.3145	0.2596	-0.3205
1.5hr半減期	0.3615	0.0005	0.1896	0.0316	0.2964	
72hr半減期	0.3971	0.0240	-0.2172	-0.1179	-0.1349	
寄与率(%)	38.2	20.9	8.5	7.2	5.3	
累積寄与率(%)	38.2	59.2	67.6	74.8	80.1	

(3) 2007年台風4号時の危険度評価

本節では、前節で示した3ケースの関係を考慮して、2007年台風4号時の計測結果と主成分の係数を使って算出した主成分得点をもとに対象斜面の危険度をリアルタイムに評価する。なお、雨量指標の組み合わせに対する分析結果より、雨量指標は「Case2: 1.5h半減期実効雨量・72h半減期実効雨量」を採用した。

a) 「雨量指標～間隙水圧」の関係を用いた場合

図7に主成分得点(間隙水圧のみの第1主成分, 間隙水圧と雨量指標による総和)を示す。今回採用する主成分の数については、対象斜面のような自然斜面における地盤内の水分変動は、地質や地形などに影響するため、固有値が1以上の主成分のみでは雨量強度と地盤内の水分変動の関係を有効に把握し評価することは容易ではないと推測される。本論文では、採用する主成分にはある一定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%付近となった第3主成分までを用いた(表2参照)。また、間隙水圧のみの第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大であり、第1主成分で元の変量をより多く説明することができるからであり、避難勧告や解除等を発令するタイミング設定のときに使用する。

今回の計算結果をもとに、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(警戒解除), ④解除指示: 図7の①～④に対応)に分けて、発令するタイミングの設定基準について検討する。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(式(8)より1に換算)ときの間隙水圧のみの第1主成分得点, (2): (1)に対応する主成分得点の総和, (3): 計測地点付近で過去に崩壊したときの主成分得点の総和(雨量データ(気象庁 京都地方気象台(京都)⁸⁾, 1999年6月27日9時, 時間雨量: 47mm/hr, 連続雨量: 123.5mm), 間隙水圧を0kPaと仮定), (4): (2)と(3)の平均値)を使う。なお、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からである。

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

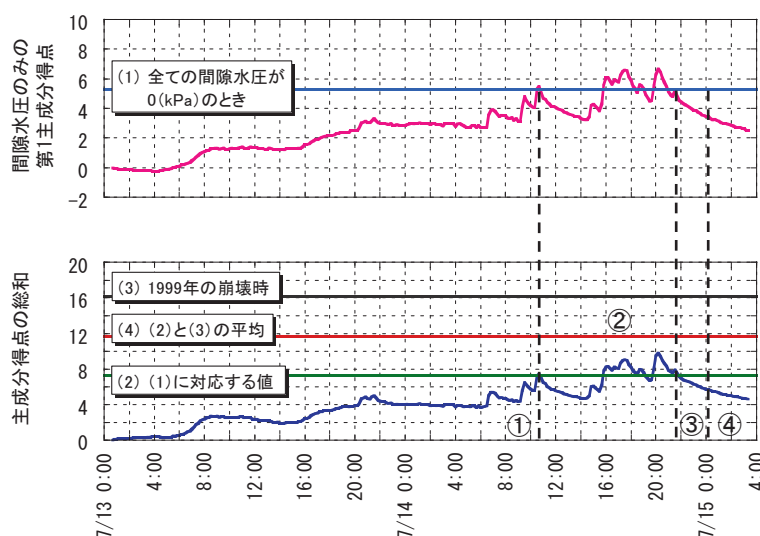


図7 2007年台風4号時の主成分得点の時系列変化

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、今回の設定によって解除の目安になると考えられる。

b) 「雨量指標～ひずみ速度」の関係を用いた場合

図8に第1主成分得点(表3より、ひずみ速度の変化)と第2主成分得点(表3より、雨量強度)の関係を示す(b)近似直線)。ここで、第1主成分と第2主成分を採用した理由は、これら2つの主成分で降雨に対するひずみ速度の変化を表現できるからである(表3参照)。近似直線は2007年台風4号直前までのデータを用いて分析した結果を使って算出した主成分得点であり、プロット(○)は2007年台風4号時のリアルタイムに算出した主成分得点である。このように、地表面変位がほとんどない場合は近似直線で表現できるため、地表面が大きく変動した際はこの直線から外れると推測され、斜面崩壊に対する監視や管理の判断基準になると考えられる。

c) 「雨量指標～間隙水圧～ひずみ速度」の関係を用いた場合

図8に第1主成分得点(表5より、降雨量の増加に伴う間隙水圧の増加)と第2主成分得点(表5より、ひずみ速度の変化)の関係を示す(c)近似直線)。第1主成分と第2主成分を用いたのは、これら2つの主成分で降雨による間隙水圧とひずみ速度の変動を表すことができるからである。b)「雨量指標～ひずみ速度」と同様、双方の関係は直線近似となり、崩壊するときはこの近似直線から外れると解釈できる。

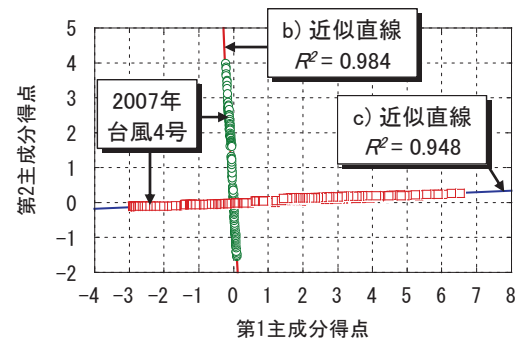


図8 2007年台風4号時の主成分得点

5. 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, 10分間降雨量, 地表面変位」を使って降雨時斜面の危険度をリアルタイムに評価するために、主成分分析を使った評価方法を提案した。そして、2007年台風4号の計測結果を使って、主成分得点を評価指標として採用することの有効性、避難勧告や解除のタイミングの設定基準について検討した。本研究で得られた知見を以下に述べる。

- 1) 主成分分析を使うことで多変量のデータを有効に処理することができ、主成分の係数より「雨量強度, 地盤内の水分変動, 地表面の変動」の関係を効果的に表現できることが分かった。
- 2) 主成分分析結果の寄与率と累積寄与率から判断すると、降雨時の対象斜面の危険度を評価する際の雨量指標の組み合わせとして、「1.5hr半減期実効雨量・72hr半減期実効雨量」が有効である。
- 3) 重要文化財の後背に位置する特定斜面に対して危険度評価を行う場合、主成分得点を使うことで避難勧告や解除の発令等のタイミングを具体的に設定することができる。
- 4) 2007年台風4号時の主成分得点の算定結果より、斜面崩壊の危険性が低かったことを確認できた。

参考文献

- 1) 岡田憲治：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) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 加藤俊二, 小橋秀俊, 古谷充史：斜面表層崩壊の監視・管理および崩壊予測手法の提案, 降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関するシンポジウム論文, pp.45-50, 2006.
- 8) 気象庁：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2008.08.04 現在)