

降雨時斜面の崩壊危険度評価における現地計測システムの効率化 —京都市東山区の重要文化財後背斜面を対象として—

The efficiency of field monitoring system in the risk evaluation for a slope during rainfall
- 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・石田優子³・安川郁夫³・深川良一⁴

Tomoaki Satomi, Kazunari Sako, Yuko Ishida, 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立命館大学准教授 グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Associate professor, Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

³立命館大学客員研究員 グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Visiting fellow, Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

⁴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, Dept. of Civil Engineering, College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

In order to quantitatively evaluate slope stability during rainfall, estimation of water behavior in soil is important. However, the field monitoring system using rain gauge and soil-moisture meter are very expensive; applying the system to all slopes behind important cultural assets in Kyoto city is economically-difficult, so the system efficiency is required. In this paper, in case of a slope behind an important cultural asset in Kyoto city, an evaluation method using principal component analysis is proposed to grasp between the rainfall intensity and the water behavior in soil. Consequently, it was found that the rain gauge-only system could be converted two and a half years after the start of monitoring.

Key Words : *efficiency of field monitoring system, rainfall, slope failure, 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、多くの生命や財産が失われている。京都市内の山麓周辺にも代替性のない重要文化財が数多く存在し、観光客は強雨時でも拝観することがあるため、強雨時における進入禁止への基準を設定することが必要である。また、観光客の安全に関わって周辺住民にも避難勧告の発令や解除等の基準を明確にすることが望まれる。その基準設定としての防災対策として、従来、降雨量に基づいて斜面の崩壊危険度を評価することに重点が置かれてきた。この評価方法は、評価対象が広域である場合は有効であるものの、斜面ごとの地形や地質に対応できていない¹⁾。つまり、従来の方法では一般的な危険度判断にとどまり、特定斜面（例えば、重要な文化財の後背斜面）に対する斜面崩壊の危険性を直接評価していないため、崩壊の危険度判断に空振りが生じる可能性があり、解除の発令にも時間を要する結果となる。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ため、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

モニタリング結果を使って統計的手法（データ分析）と数値力学的手法（2次元浸透解析、斜面安定解析）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を確立することを目指している。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）に雨量計とテンシオメータを設置し、10分間雨量と間隙水圧を計測している²⁾。しかし、雨量計とテンシオメータを用いた計測システムでは、テンシオメータの設置に伴うコストの増大や定期的な脱気水の補給・メンテナンスなどが課題であり、例えば京都市内の全ての重要文化財後背斜面に適用することは財政的に困難なため、計測システムの効率化が求められる。そこで、雨量計とテンシオメータで降雨量と間隙水圧を一定期間計測し、降雨に伴う地盤内の水分変動関係を構築することで、将来はテンシオメータを撤去した雨量計のみの計測システムに転換できる可能性がある。

本論文では、京都市東山区にある重要文化財の後背斜面の計測システムを検証対象として、主成分分析（Principal Component Analysis：PCA、統計的手法）を用いて雨量強度と間隙水圧の関係（降雨による間隙水圧の変動傾向）を把握する。そして、計測システムの効率化を目指すため、テンシオメータ撤去のタイミングを設定し、京都市の重要文化財後背斜面における現地計測システムの将来展開について考察する。さらに、雨量計のみの計測システムに転換したと仮定して、雨量強度に関する分析結果のみを用いて2007年台風4号時の崩壊危険度をリアルタイムに評価した結果を検討する。

2. 対象斜面の地質断面、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⁾。計測機器は、M地点では写真1に示すように、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）、気象観測計（10分間雨量、気温、湿度、風速など）を設置している。また、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の番号①～⑤は光ファイバセンサ（B-OTDR方式）の設置位置である。

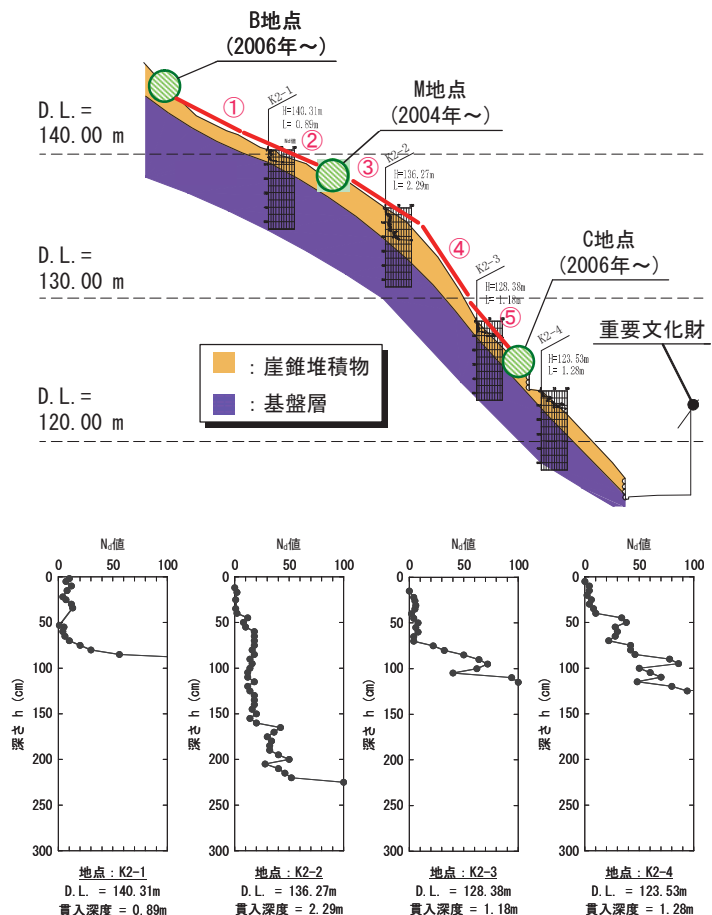


図1 対象斜面の地質断面図および計測位置



写真1 M地点の設置状況

3. 主成分分析による降雨時斜面の崩壊危険度評価

本章では、はじめに主成分分析の概要を説明し、崩壊危険度評価のフローチャートを示す。そして、分析に使用する計測データについて述べる。

(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）を新たに求める方法であり、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る。以下に主成分の算出方法を述べる。

はじめに、式(1)を用いて m 個の変量 x_1, x_2, \dots, x_m に対する n 個のデータ $(x_{ji} [j=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n])$ を、全データの平均が 0、分散が 1 となるように標準化する（式(1)の X_{ji} は標準化された変量）。この作業は、データの単位設定によって主成分が変化し、分析結果の解釈に影響を与えないようにするために行う。

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

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 $V(z_j)$ 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と判断できるが、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。ただし、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。

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

ここで、 λ は分散共分散行列 V の固有値、 \mathbf{a} は固有値 λ に対する固有ベクトルである。得られた固有値の中で最大の固有値に対する固有ベクトルを用いた主成分が「第 1 主成分」であり、以降「第 2 主成分、…」と続く。そして、式(2)を用い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に「寄与率」を用いる。寄与率とは、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。

(2) 降雨時斜面の崩壊危険度評価

図3に崩壊危険度評価フローを示す。はじめに、過去の一連の降雨に対する計測データを用いて主成分分析を行い、固有値や固有ベクトル（以下、主成分の係数）などを求める。この分析結果をもとに採用する主成分を決定する。このとき、元の情報量をできるだけ少ない情報量で表すことが望ましいため、目安として、(1) 固有値が 1 以上（データを標準化した相関係数行列の場合）、(2) 累積寄与率をある程度（例えば、80%

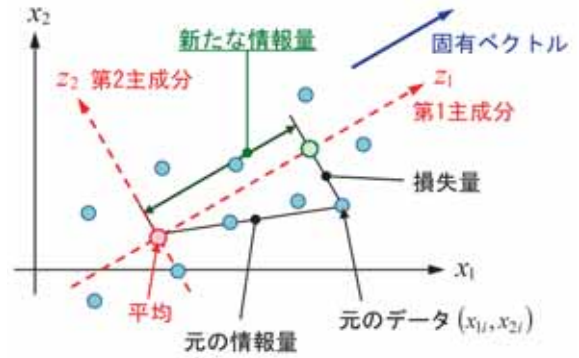


図2 2個の変量を想定した主成分分析の概念

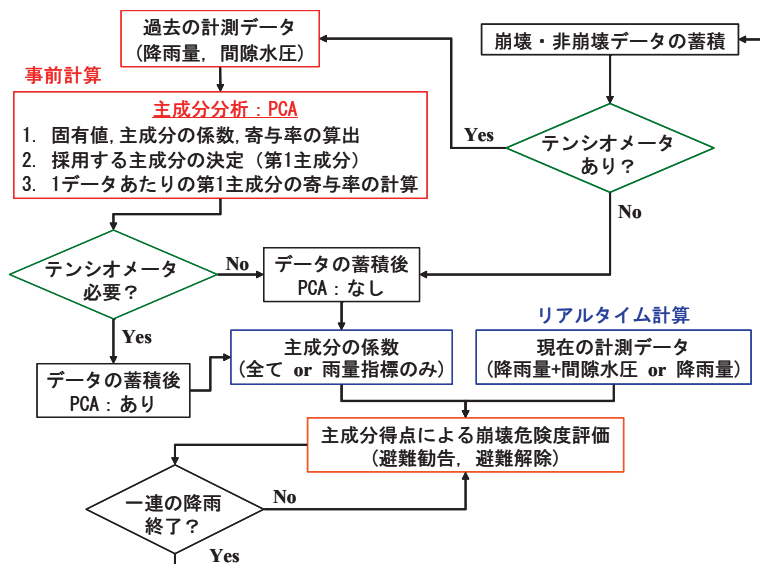


図3 主成分分析による降雨時斜面の崩壊危険度評価

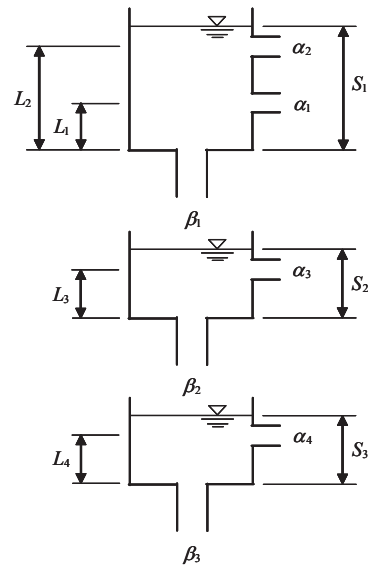


図4 直列3段タンクモデル

以上) 大きくすることなどが挙げられる³⁾。本論文では、雨量強度と間隙水圧の変動関係に着目するため、分析結果より全体の変動傾向を表すと解釈された「第1主成分」を採用し、有効な雨量指標の組み合わせを検討する(詳細は次項で説明)。次に、1データあたりの第1主成分の寄与率(第1主成分の寄与率をデータ数で除した値)を求め、テンシオメータ撤去のタイミングを設定する。以上の事前計算をもとに、式(1)に主成分の係数と現在の計測データを代入して第1主成分得点をリアルタイムに求め、崩壊確率(第1主成分得点の過去最大値と現在値の比率による百分率表示)で崩壊危険度を判断し避難勧告や解除を発令する。なお、主成分得点の最大値には、計測地点付近で過去に崩壊したときの降雨量(気象庁京都地方気象台(京都)、1999年6月27日午前8時45分頃)⁴⁾を採用した。また、欠測が生じた場合も気象台データを用いる。

(3) 分析に使用する計測データの概要

本論文では、10分間雨量(雨量指標)と間隙水圧を使用して降雨時斜面の崩壊危険度を経時的に評価することが目的のため、主成分分析(図3の事前計算)には2004年7月の計測開始からリアルタイム計算直前までの一連の降雨に対する計測データを使用する。なお、一連の降雨は降雨開始から無降雨期間が24時間続いた時間までの累積雨量とする⁵⁾。以下、計測データ(雨量指標、間隙水圧)に関して説明する。

a) 雨量指標

分析結果を降雨に対する斜面崩壊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、次の3ケース(短期間・長期間雨量指標:2個)が検討対象である。

case-1: 時間雨量・連続雨量(旧日本道路公団⁶⁾)

case-2: 1.5hr半減期実効雨量・72hr半減期実効雨量(提言案⁷⁾)

case-3: 時間雨量・土壌雨量指数(連携案⁵⁾)

ここで、時間雨量は直近の60分間に降った雨量とする。実効雨量^{8),9)}は式(6)の半減係数を用いて降雨の浸透・貯留過程を概略的に表した指標で、 α_n はn時間前の半減係数、 T は半減期(1.5hr, 72hrなど)である。また、土壌雨量指数^{1),5)}は図4の直列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ある。なお、図4に示す係数の $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 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]を意味する。

$$\alpha_n = (0.5)^{n/T} \quad (6)$$

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:5個)を変数とする。なお、M地点の計測データのみを対象としたのは、B, C地点に設置したテンシオメータの脱気水が抜けやすく計測できなかった場合があり、主成分分析用のデータ数として十分ではないと判断したためである。

表1 データ数とケース毎の第1主成分の寄与率

年数	データ数 (個)	第1主成分の寄与率 (%)		
		case-1	case-2	case-3
0.5	6,843	42.5	44.1	43.8
1.5	9,866	49.3	51.0	50.9
2.0	16,746	50.2	51.3	51.7
2.5	20,351	51.2	51.1	51.6
3.0	24,851	52.3	52.7	53.1
3.5	30,775	54.9	55.7	56.2
4.0	42,328	55.4	56.1	56.3

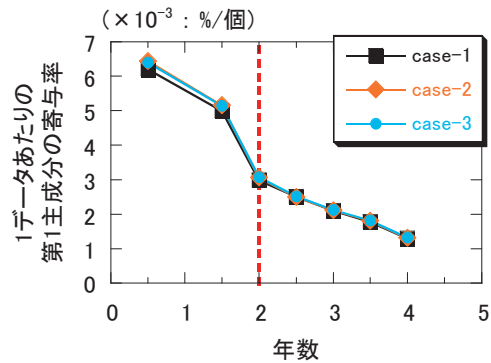


図5 1データあたりの第1主成分の寄与率の経年変化

4. 降雨時斜面の崩壊危険度評価

本章では、はじめに雨量指標の組み合わせとテンシオメータ撤去のタイミング設定について検討し、京都市の重要文化財後背斜面に対する計測システムの将来展開を述べる。そして、雨量計のみの計測システムに転換したと仮定して、2007年台風4号時の崩壊危険度をリアルタイムに評価した結果を示す。

(1) 雨量指標の組み合わせ、テンシオメータ撤去のタイミング設定に関する検討

表1に半年毎のデータ数と雨量指標の組み合わせによる第1主成分の寄与率、図5に半年毎の1データあたりの第1主成分の寄与率の経年変化を示す。なお、1年後の結果はテンシオメータの長期メンテナンスで計測できなかったため、省略する。表1より、データ数の増加に伴い第1主成分(変量全体の傾向を表現)の寄与率が増加し、case-3(時間雨量・土壌雨量指数)の寄与率は他のケースと比べて差は小さいものの最も大きな値となった。したがって、case-3が対象斜面の降雨に対する間隙水圧の変化傾向を最も良好に表現できると解釈され、降雨量(雨量指標)に基づいて対象斜面の崩壊危険度を評価する場合は、case-3(時間雨量・土壌雨量指数)の組み合わせが最も望ましいと考えられる。さらに、本論文で用いる評価指標の第1主成分得点(式(7)の z_1)より、分析で得られた主成分の係数 a_{11} 、 a_{21} は対象斜面の地形や地質の影響を考慮した雨量指標(式(7)の X_1 は時間雨量、 X_2 は土壌雨量指数)の重みであると解釈できる。すなわち、土壌雨量指数の算定に用いる係数を地形や地質の影響にかかわらず一定としている点⁹⁾を改善できる可能性がある。

$$z_1 = a_{11}X_1 + a_{21}X_2 \quad (7)$$

次に、テンシオメータ撤去のタイミング設定について検討する。図5より機器の設置開始から2年経過すると変化量は小さくなっている。つまり、対象斜面の場合は2年間の計測データで降雨時の間隙水圧の変動はある程度把握できると推測される。ここで、テンシオメータ撤去の準備期間を考慮すると、設置開始から2.5年後には雨量計のみの計測システムに転換できる可能性がある。このように雨量計のみのシステムに転換できることが望ましいが、斜面の経年劣化や将来の気候変動を考慮すると、地盤内水分の変化傾向が変わる可能性がある。今後の展開は、今回の撤去タイミングの結果を考慮しつつ定期的に地盤調査を行い、テンシオメータの設置が重要と判断された深さのみに限定するなど、段階的な削減も視野に入れる必要がある。

この検討をもとに、京都市の重要文化財後背斜面に対する計測システムの将来展開を示す。前述したように、全ての斜面に計測システムを構築することは財政上困難である。そこで、京都府の過去の崩壊・非崩壊事例を文献等により収集し、事前に崩壊要因や崩壊危険度の順位を明確にする必要がある¹⁰⁾。そして、順位の高い順に雨量計とテンシオメータを設置して計測データを蓄積し、図3に示す崩壊危険度評価を実施する。ここで、テンシオメータが撤去または削減できると判断されると、現在設置しているテンシオメータを新たな斜面に移せるため、広域かつ効率の良い計測システムに展開できるものと期待される。

(2) 崩壊危険度評価事例(2007年台風4号時)

2007年台風4号時では計測機器の設置開始から約3年経過しているため、2.5年後から雨量計のみの計測

システムに転換したと仮定し、2.5年後の分析結果（雨量指標のみに関する主成分の係数）を用いて2007年台風4号時の第1主成分得点（式(7)の z_1 ）を求める。図6に2007年台風4号時の計測結果（間隙水圧（参考値）、10分間雨量）と崩壊確率の時系列変化、図7に降雨履歴図（スネーク曲線）を示す。図6より、崩壊確率は間隙水圧の変動とほぼ似た傾向を示し、主成分分析によって対象斜面の特性を考慮しているため、崩壊確率によって崩壊危険レベルを段階的に設定できることは有効な方法であると考えられる。また、図7の降雨履歴図に示すように、降雨量のみによる従来法ではCL（Critical Line）の基準線設定⁹⁾に客観性を欠きやすくなるものの、提案法は降雨時の間隙水圧の変化傾向を考慮した客観的な設定ができるため、提案法は従来法よりも有用であると推察される。

5. おわりに

本論文では、降雨時斜面の崩壊危険度評価における計測システムの効率化を目指すため、京都市東山区の重要文化財後背斜面の計測システムを検証対象とし、主成分分析を用いた評価手法を提案した。その結果、対象斜面では計測開始から2.5年後には雨量計のみの計測システムに転換できる可能性があり、提案法は降雨量のみに基づく従来法よりも崩壊危険レベルをより客観的かつ具体的に設定できることが分かった。今後は、統計学的手法と数値力学的手法を併用し、主成分得点と斜面の安定性の関係について検討していきたい。

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.82-84，2002.
- 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) 気象庁，過去の気象データ検索：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>（2009.04.13現在）
- 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) 後藤順治：降雨時における道路通行規制基準の見直し，EXTEC，58号，Vol.16，No.2，pp.15-17，2001.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 寺田秀樹，中谷洋明：土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法，国土技術政策総合研究所資料，5号，p.30，pp.35-42，2001.
- 10) 里見知昭，堀部将，酒匂一成，深川良一：24時間雨量を考慮した数量化Ⅱ類による京都市重要文化財後背斜面の崩壊危険度評価，土木学会全国大会第64回年次学術講演会概要，2009.（掲載決定）

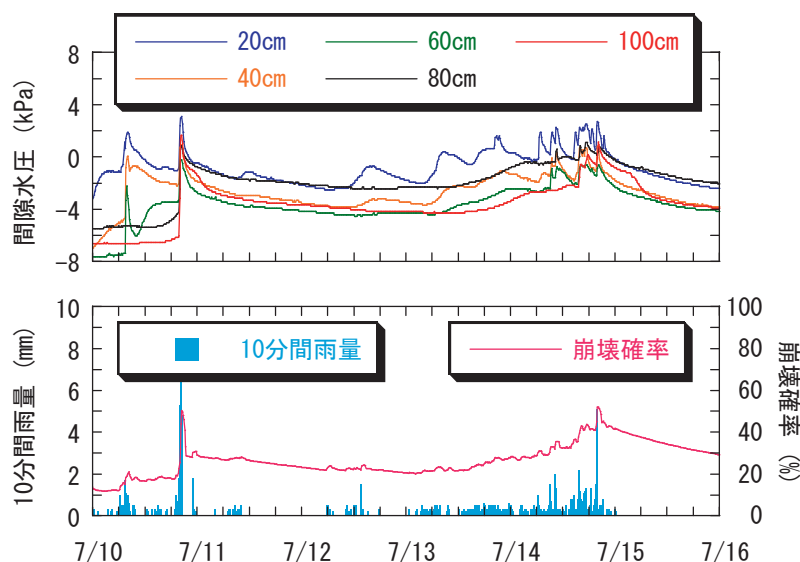


図6 計測結果および崩壊確率の時系列変化

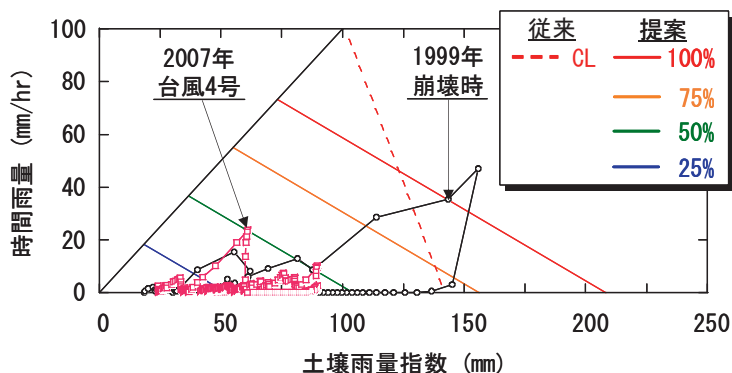


図7 降雨履歴図（スネーク曲線）