

□豪雨時における土砂災害の危険性評価

－清水寺における現地モニタリングシステムと警戒体制－

立命館大学 理工学部 環境都市工学科 准教授 藤本将光

1. はじめに

近年、豪雨の多発化、激化によって土砂災害のリスクの増加が懸念されている。豪雨に起因する斜面崩壊や土石流は道路や住宅地域などにおいて多大な被害を発生させる。豪雨時における土砂災害の危険性評価には、タンクモデルをベースとした土壌雨量指数やスネークカーブなどが用いられる。スネークカーブを用いる場合、短時間の雨量の強さおよび長期的影響を考慮した降雨指標をグラフの縦軸・横軸にプロットし、降り始めからの降雨状況をもとに危険度を判断する。実際、気象庁から提供される土砂災害に関わる大雨警報（土砂災害）や土砂災害警報情報等は雨量や土壌雨量指数を判断基準としている。この大雨警報（土砂災害）の危険度分布（土砂災害警戒判定メッシュ情報）は1kmメッシュ単位の情報であり、例えば住宅の裏山斜面などのピンポイントな個所の災害の危険性評価とは乖離がある現状は否めない。また、斜面は多種多様な地形、地質、地盤構造を有しており、雨量情報のみでは斜面崩壊などの土砂災害を発生させる主要因となる地盤内の水分状態を把握し、斜面安定性・斜面崩壊危険度を評価・予測することが困難である。そのため、豪雨時における斜面崩壊危険度を評価するためには、対象地の計測雨量情報に加えて、地盤内の水分状態や変形挙動を計測する現地モニタリングによって斜面の状況を把握することが望ましい。

京都盆地東縁に位置する清水寺は、過去に土砂災害を経験している。また、清水寺の下流域は観光客が訪れる観光地としての側面だけではなく、多くの住宅が存在し、地域住民や観光客が土砂災害に被災することが懸念される。そこで、清水寺周辺において広域の地下水流動特性を把握し、斜面崩壊の潜在的な危険性の評価を行った。また、土砂災害が発生する可能性が高い斜面として判定された重要文化財後背斜面において、現地モニタリングによる斜面崩壊の危険性を評価し、警戒監視を行うシステムを構築した。本稿では、清水寺周辺における土砂災害の評価や避難警戒に関する取り組みを紹介する。

2. 清水寺における土砂災害と斜面崩壊の発生の危険性評価

2.1 清水寺周辺における土砂災害

京都は周囲を山地に囲まれた盆地であり、盆地周縁部に立地する寺社仏閣は土砂災害を受けるリスクが潜在的に高いと言える。世界遺産である清水寺は近年には境内斜面において土砂災害が発生している。1972年7月には釈迦堂の後背斜面の崩壊によって釈迦堂が全壊、1999年6月には音羽の滝横の茶店が斜面崩壊によって全壊、2013年8月には大小合わせて5か所で斜面崩壊が発生した¹⁾。図-1は2013年に発生した音羽の滝南側の斜面崩壊の現場の様子である。1999年に崩壊した斜面の横



図-1 2013年の8月における音羽の滝横の斜面崩壊の様子
(発生から1日後)

の斜面が崩れ、崩壊土砂は茶店の屋根に到達した。また、2021年8月の豪雨において、名勝成就院庭園内の湯屋谷の斜面や音羽川沿いの斜面において複数の斜面表層崩壊が発生した。

2.2 清水寺周辺の地下水流動と斜面崩壊の危険性評価

斜面崩壊発生の危険性の評価には、主として素因である地形や地質等に支配される発生場の特徴と崩壊発生の誘因となる地下水流動等の水文的要因を把握する必要がある。地形情報に関しては、近年の航空計測技術の進展により、微地形も含めた詳細な表面地形の把握が可能となった。また、崩壊の発生に関与する地下水の流動は湧水位置および湧水の電気伝導度の空間分布特性を用いて把握する方法²⁾が提示され、簡便な調査による実態把握の可能性が報告されている。そこで、高精度・高密度の地形データを用いた地形解析と湧水の空間分布特性調査に基づく水文情報を得ることで清水寺周辺の斜面崩壊の潜在的危険度を評価した。

地形解析では航空レーザ測量によって得られた1mの数値地形モデル (DEM) (中日本航空株式会社提供) を用いて微地形図を作成した。微地形図には視覚的に立体的な地形判読が可能である立体図法³⁾を用いて、CS (Curvature and Slope)

立体図を作成した。CS立体図は、標高データから傾斜と曲率を計算し、異なる色調で彩色し重ねて透過処理することにより作製される。CS立体図と地質図を用いて表層崩壊跡地、浸食箇所、湧水地等の地形判読を行った後、湧水調査を行った。湧水の電気伝導度の計測は電気伝導度計 (HORIBA 社、ES-51) を用いて現地において行った。

清水寺周辺におけるCS立体図に土砂災害の発生位置、湧水の位置と電気伝導度の調査結果を重ねたものを図-2に示す。図中の数値は湧水の電気伝導度を示し、単位は $\mu S/m$ である。清水寺本堂東側に位置するリニアメントを境に谷の開析状況が大きく異なることが明確になった。これはリニアメント東側が主として砂岩、頁岩、チャートからなる丹波層群であるのに対し、西側は新生代第三紀末から第四紀更新世の大阪層群から構成されていることに起因している。リニアメント東側では深部にまで地下水が浸透し、西側のシルト、砂礫から構成されるエリアまで流動し、湧出すると考えられる。リニアメント西側は湧水が多く、湧水による浸食崩壊が卓越している。また、近年の

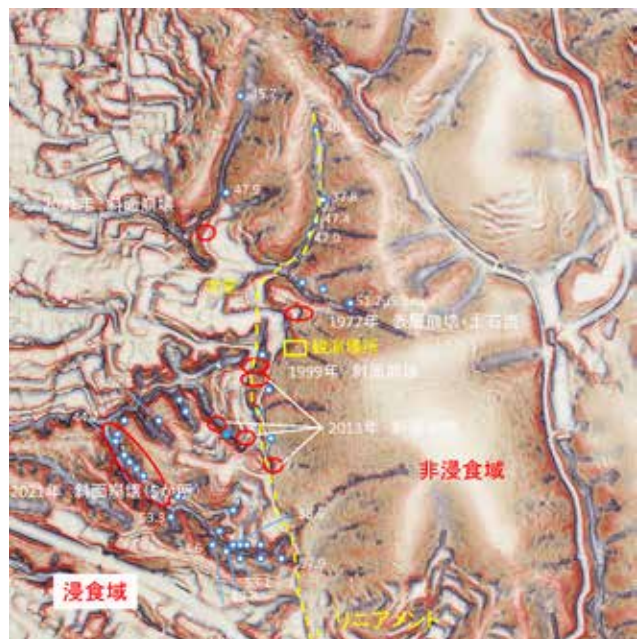


図-2 清水寺周辺のCS立体図，斜面崩壊の発生位置および湧水の位置 (参考文献⁴⁾に加筆)

崩壊がリニアメント周辺で発生していることは東側の非浸食域（浸食抵抗が強いエリア）で深部浸透した地下水が豪雨時に稀に地質境界であるリニアメント周辺で湧出することで引き起こされると考えられる。このように詳細な地形データと現地調査を組み合わせることで潜在的な土砂災害の危険度を評価できる可能性が示され、今後の土砂災害の予測への活用が期待される。

3. 現地モニタリングを用いた斜面監視システム・警戒体制

3.1 現地モニタリングシステムの概要

現地モニタリング対象斜面は重要文化財である奥ノ院の後背斜面を選定した。基岩は砂岩、頁岩、チャートからなる丹波層群で構成され、表土は崩積土で覆われている。図-2に示す観測場所（図中、黄色四角枠）において雨量、地盤内の間隙水圧、地温の計測を行った。間隙水圧を計測するテンシオメータの計測は2004年から開始し^{5), 6), 7)}、2012年に計測点を増設し、現在は調査対象斜面上に14観測場を設定した。テンシオメータはセラミック製のポーラスカップをつなげた塩ビパイプを土中に埋設し、パイプ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。セラミック製の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で、圧力センサによって間隙水圧を計測する仕組みである。地温は熱電対を用いて計測した。また、簡易動的コーン貫入試験の結果から土壌強度特性を把握するとともに基岩面までの土層深さを決定した。決定した土層深さを基準とし、鉛直方向に各点で2～6深度において計測点を設定し、テンシオメータを計51基設置し、計測地点1か所においてデータ集約を行った。データ収集には、ロガー（Campbell社、CR1000）を1台と計測チャンネルの増幅器であるマルチプレクサー（Campbell社、AM16/32B）を3台用いた。計測システムの概要を図-3に示す。

3.2 データ伝送と警戒システムの概要

本観測では収集した雨量、間隙水圧、地温のデータは無線通信を介してインターネット上でリアルタイムで確認できるシステムを構築した（図-4）。インターネットへの通信はモバイルカードを用いている。このシステムによって大学関係者と清水寺関係者の両者はリアルタイムでデータを確認することができる。また、計測された雨量データから雨量指標値を逐次解析し、設定した警戒基準を超えた場合に警戒メールが配信される仕組みとなっている。警戒基準に関して図-5に大規模降雨イベントにおける連続雨量と1時間雨量の関係を示す。図-5で示した雨量指標以外（土壌雨量指数、24時間半減期実行雨量、72時間半減期実行雨量）についても、計測結果をフィードバックさせて土砂災害の発生基準線（Critical Line）の設定を常時再検討している。このシステムを用いて、豪雨時に文化財や観光客に被害が及ばないように速やかに対応できる体制を整えている。また、この雨量基準に加え、後述する土中水分量の変動を確認し、参拝者や観光客の被災を避けるために通行できるルートに制限をかけるなどの対応を行っている。

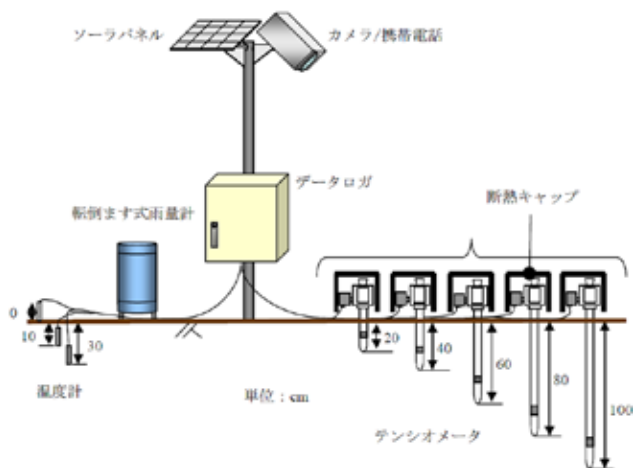


図-3 計測システムの概要⁵⁾

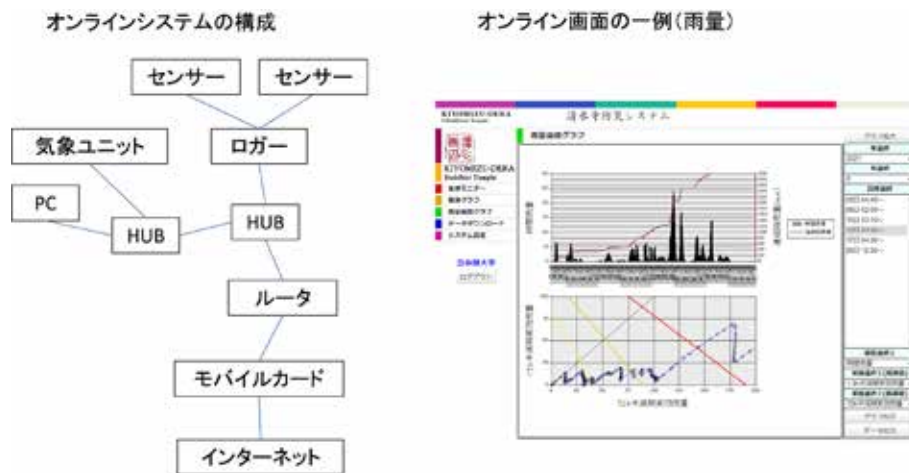


図-4 オンラインシステムの構成とシステム画面の一例

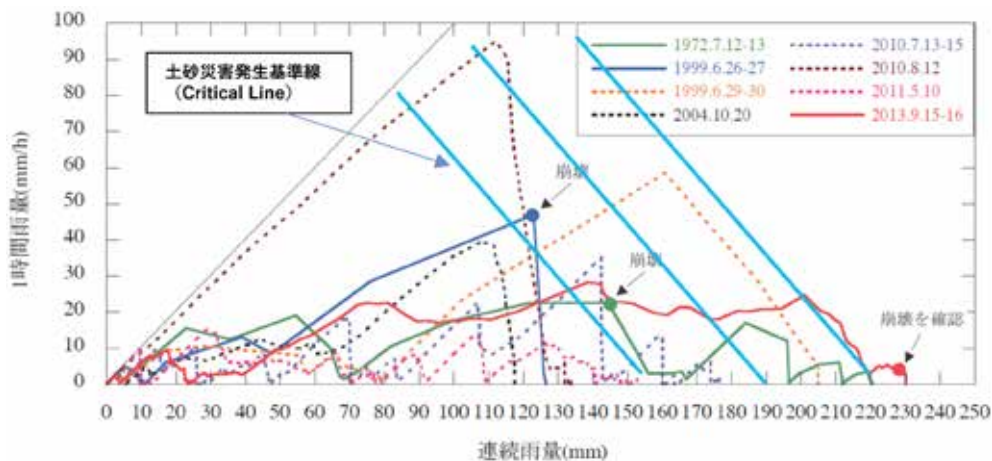


図-5 大規模降雨イベントにおける連続雨量と1時間雨量の関係（参考文献¹⁾を改変）

3.3 降雨浸透特性と斜面崩壊の発生危険性評価

間隙水圧の計測結果の一例を図-6に示す。本研究では、間隙水圧値が0 cmH₂Oを超えると計測点が飽和したと定義した。間隙水圧が正圧（正の値）の場合、計測点付近は飽和し、地下水位が発生し、その値は地下水位に相当すると解釈できる。また、負圧（負の値）の場合、計測点は不飽和であり、値が小さいほど乾燥状態であることを意味している。計測結果から、降雨時に間隙水圧は素早く応答し、正圧になり、地下水位が発生する傾向が認められた。また、降雨後には地下水位が消失し、乾燥状態に移行するが計測深度が深いほど、湿潤状態が維持されることが示された。

雨量、間隙水圧の計測結果から、奥ノ院後背斜面では土層内において非常に素早い水の移動によって地下水帯が形成されることが認められる。これは土層が主として砂岩やチャートが風化した礫で構成されており、礫間の空隙を水が素早く移動することに起因していることが考えられ、地盤の基質となる地質要因を把握することが重要であるといえる。

また、間隙水圧の変動傾向は計測地点ごとに異なり、飽和後も累加降雨量の増加とともに間隙水圧値（地下水位）が上昇する地点が認められた。地下水位は斜面崩壊の発生と密接に関係しており、既往の降雨で到達した地下水位のレベルを超える

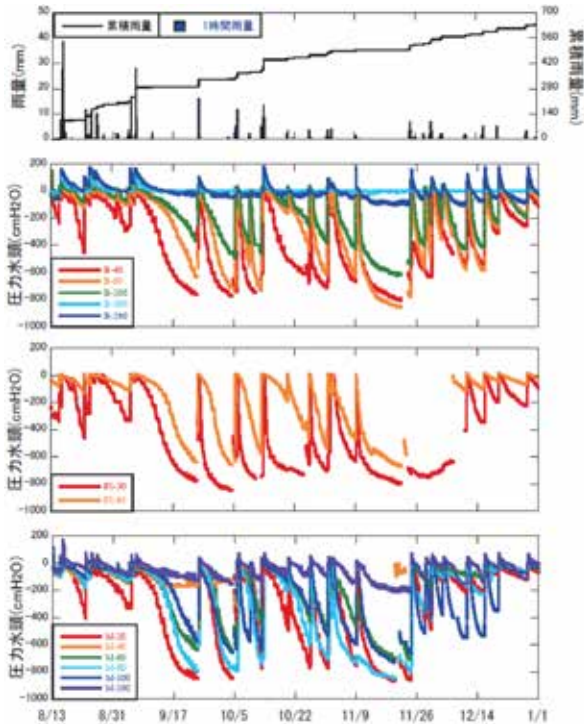


図-6 間隙水圧の計測結果の一例

降雨規模となった場合には、斜面崩壊が発生する可能性が高くなると考えられる。そのため、このように降雨に伴って地下水水位の上昇がみられる計測点で水分状態をモニタリングすることは斜面崩壊の予測につながると期待される。以上のように、雨量情報に加えて、斜面の水分状態をリアルタイム計測が対象となる個別の斜面の危険性を的確に判断する材料となり、避難警戒に繋がるといえる。

4. おわりに

豪雨による土砂災害が多発する中、斜面崩壊を的確に予測し対策を講じることは急務である。急傾斜地崩壊危険箇所等は日本全国で33万箇所を超えること（平成15年の国土交通省の調査結果）が報告された。しかしながら、対策にかかる経済的コ

ストや時間的コストの点で、こうした危険性の高い斜面において現実的に早急に対策を実施することは困難である。そのため、レッドゾーンのように危険性が高いと判断された斜面においては、対策に代わる手段として、まず斜面の状態をモニタリングし豪雨時に刻一刻と変化する危険性を評価することが望ましい。本稿で紹介した斜面監視システムが低コスト化され、多くの場所で運用されることで、土砂災害の被害の軽減や防止につながると期待される。また、個別の警戒レベルの設定や避難行動の判断に活用可能であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 檀上徹, 藤本将光, 木村亘, 平岡伸隆, 深川良一 (2014), 台風18号に伴う清水寺境内の被害と後背斜面の地盤水分変動及び挙動に関する一考察, 歴史都市防災論文集, 8, 115-122
- 2) 地頭菌隆, 下川悦郎, 寺本行芳 (2006), 深層崩壊発生場予測法の提案—鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして—, 砂防学会誌, 59, 2, 5-12
- 3) 戸田堅一郎 (2014), 曲率と傾斜による立体図法 (CS 立体図) を用いた地形判読, 森林立地, 56, 2, 75-79
- 4) 藤本将光, 戸田堅一郎, 有光悠紀, 里深好文, 深川良一 (2016), 京都市東山地域における斜面崩壊の潜在的危険度評価, 歴史都市防災論文集, 10, 55-58
- 5) 酒匂一成, 深川良一, 岩崎賢一, 里見知昭, 安川郁夫 (2006), 降雨時の斜面防災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, 1, 3, 57-69
- 6) 里見知昭, 酒匂一成, 安川郁夫, 深川良一 (2007), 京都市東山山麓周辺における現地計測データを用いた斜面安定度評価に関する研究, 歴史都市防災論文集, 1, 175-182
- 7) 深川良一, 酒匂一成, 里見知昭, 石田優子, 仲矢順子, 安川郁夫 (2008), 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, 歴史都市防災論文集, 2, 99-104