

Ⅱ. 京都清水寺における斜面防災への取り組み

1. 概要

778年に延鎮上人が「音羽の瀧」上に観音を祀ったことが起源とされる清水寺は、1994年に世界遺産「古都京都の文化財」のひとつに登録され、年間500万人もの観光客が訪れる京都有数の観光地である。境内には国宝である本堂のほか重要文化財に指定された14の伽藍が建立され、春の桜、秋の紅葉をはじめ、美しい境内や眼下に広がる古都京都の景観が親しまれている。



写真-1 桜に彩られた本堂の眺め



写真-2 紅葉に生える舞台

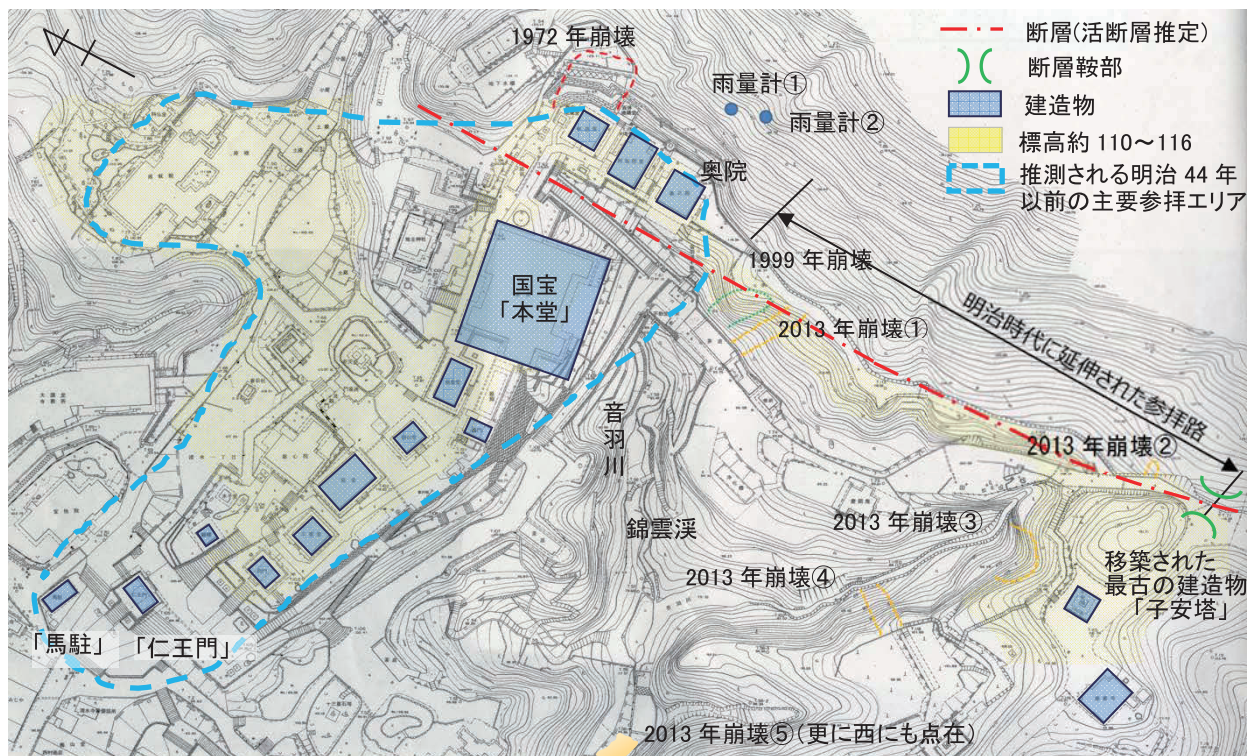


図-1 境内平面図

■境内の伽藍配置と歴史的景観

「境内空間は、単に建設物の敷地ということではなく、意識的に、注意深く、美意識を持って形成され、寺院全体を壮麗にしている文化遺産である」(文化遺産防災学「ことはじめ」篇、p.72)

例えば…

舞台に立って正面を望むと、正面の小さな谷から少しそれて右寄りに子安塔が緑の中に見えてくる。日本の絵画では、絵の主役というべきものを絵の中心に描くのではなく、中央から少し離れた位置に描いてきたという伝統的な好みがある。本堂から見ると、子安塔は右にそれているが、子安塔自身の向きは本堂舞台のほぼ中心に向かう位置に配置されている。舞台の正面にはそういう絵のような風景がある。(同、p.71)

■過去に発生した斜面災害

近年、清水寺では、境内において以下のような斜面崩壊が発生している（位置は図-1に記入）。

【1972年】

「昭和四十七年七月豪雨」を誘因とし、7月12日午後7時頃発生。高さ約15m、幅約20m。厚さは1m程度以上の表層崩壊であったと推測される。重要文化財「釈迦堂」と隣接する「西向き地藏堂」が、直径20cmの松の倒木10本を伴う崩壊土砂を受けて全壊した。



写真-3 1999年の崩壊

【1999年】

梅雨前線の活発化に伴う豪雨を誘因とし、6月27日午前8時45分頃発生。高さ約15m、幅約10m、厚さ約1m。「音羽の瀧」の南隣にある茶店「瀧の家」が押し潰された（写真-3）。

【2013年】

「台風18号」に伴う降雨を誘因とし、9月16日に5箇所が発生した。

- ① 1999年崩壊斜面の南に隣接する斜面。高さ約9m、幅約6m、厚さ約1.2m。土砂が茶店に流入（写真-4）。
- ② 子安塔付近の参拝路脇斜面。高さ約3m、幅約4m。
- ③ 子安塔が移築された尾根の北斜面。高さ約21m、幅約30mの馬蹄形崩壊。
- ④ 崩壊③に連続する尾根の東斜面。高さ約12m、幅約8.5m。
- ⑤ 音羽川の境内下流谷斜面。ごく薄い表層。



写真-4 2013年の崩壊(崩壊①)

■地盤の特徴

本堂東側には、南北方向に活断層と推定されるリニアメントが延びている。直交するように境内北側および南側に尾根筋が通り、その間には「錦雲溪」と呼ばれる音羽川の谷が分布する。

基岩は砂岩、頁岩、チャートなどからなる丹波層群の地層から構成されている。活断層を境として、東側の後背急傾斜地はチャートや泥岩が卓越し、表層は厚さ0.9～4.0m程度の崩積土に覆われている。断層西側は新生代第三紀末～第四紀更新世の大阪層群分布域であり、「音羽の瀧」の南側斜面は、シルト質砂礫を主体とする大阪層群上に、厚さ2.0～4.0m程度の表土および崩積土が堆積している。

■崩壊発生場所と崩壊要因

崩壊は、1972年に発生した崩壊を除き、全て明治時代（1911年）の境内整備以降に拡張された南側エリアで発生している。また、ほとんどが、断層西側、大阪層群分布域に位置する。大半のケースにおいて、表層のルーズな崖錐堆積物、含水比の高い谷型斜面の粘土質崩積土、風化により軟質化した表層部が、地下水上昇により崩壊したものと推定される。

以上のように、崩壊履歴と地形、地盤の特徴から、断層西側、特に「音羽の瀧」以南の明治時代の拡張エリアである大阪層群分布域の急傾斜地において、表層の緩い表土～崩積土の崩壊の危険性が高いと考えられる。

2. 危険斜面の抽出と地盤調査

すべての斜面に対策を行うことは困難であるので、対策が必要な危険斜面を抽出する必要がある。土砂災害の起こりやすさは、斜面の勾配、高さ、地形や地質などにより異なることから、それらをもとに優先度を決めて対策を実施することが望まれる。

■点数法による斜面評価

土砂災害が発生する可能性の高い斜面の抽出を客観的に行うため、斜面の地形・形状、地質や地質構造、地下水の状況に応じて配点した表点法が提案されている。本事例では、計測モニタリングを行う地点を選定する目的で、「道路土工のり面工・斜面安定工指針」の「安定度調査（落石・崩壊）」を参考にして、境内の斜面の安定性を評価した（表-1）。点数が高いほど安定度は低いと評価される。

境内で行った評価例を図-1に示す。図中の斜線部分は、過去に斜面崩壊が発生した部分である。評点から、調査地点①～④の重要文化財後背斜面の危険度が相対的に高いことがわかる。このため、詳細調査や計測モニタリングシステムの設置はこの地点を優先した。

表-1 安定度調査の調査項目と配点

項目		のり面 配点	自然斜面 配点
地形	崩壊性要因を持つ地形	0～6	0～6
土質	崩壊性の土質	0～8	0～2
地質	崩壊性の岩質	0～12	0～8
構造	崩壊性の構造	0～14	0～6
表層の状況	表土及び浮石・転石の状況	0～12	0～24
	湧水状況	0～8	0～4
	表面の被覆状況	0～5	0～16
形状	勾配	0～18	0～10
	高さ		0～10
変状	当該のり面・斜面等の変状	0～12	0～10
	隣接するのり面・斜面等の変状	0～5	0～4
合計		0～100	0～100
対策工		-0, -20～0	-0, -20～0
総合展		0～100	0～100

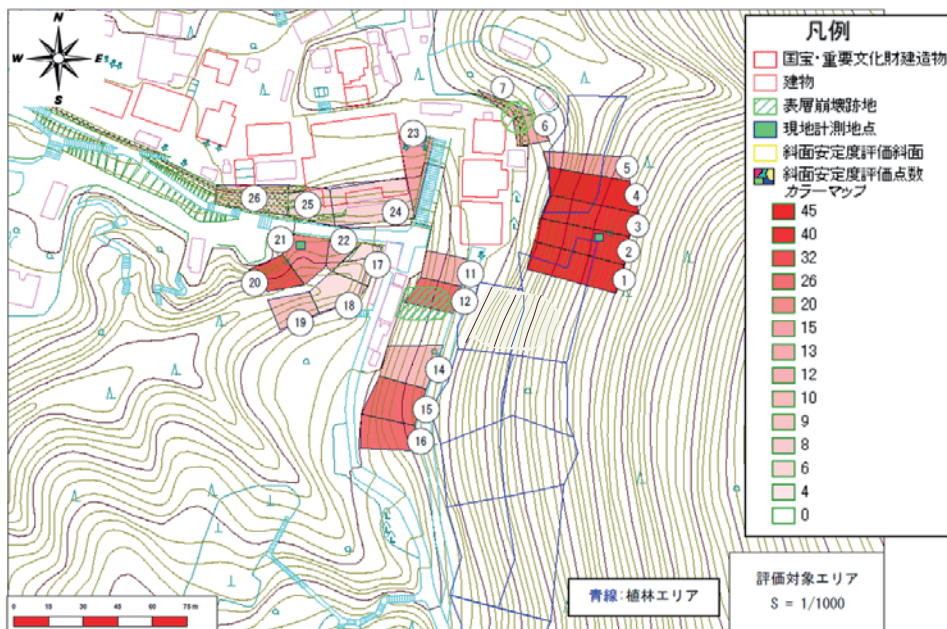


図-1 境内斜面の安定度評価結果

■地盤構造の把握

計測モニタリングシステムを設置する地点で、表土～表層の風化層の厚さを確認する目的で地盤調査を実施した。一般に、地盤調査では調査ボーリングが実施される場合が多いが、費用がかかることと、当地では貴重な湧水に悪影響を与える可能性があったため、比較的簡易な設備で実施可能な簡易貫入試験を行った。地表面から想定基盤面までの深さは、約120cm程度であることが確認された(図-2)。

さらに、原位置で深度ごとに土質試料のサンプリングを行い、土質試験により土の特徴を把握している。また、すべり面の土質強度を把握するために、表層に近い条件である低拘束圧領域において試験を行えるように改良した試験装置(写真-1)で、土の飽和度を変えて一面せん断試験を実施している。

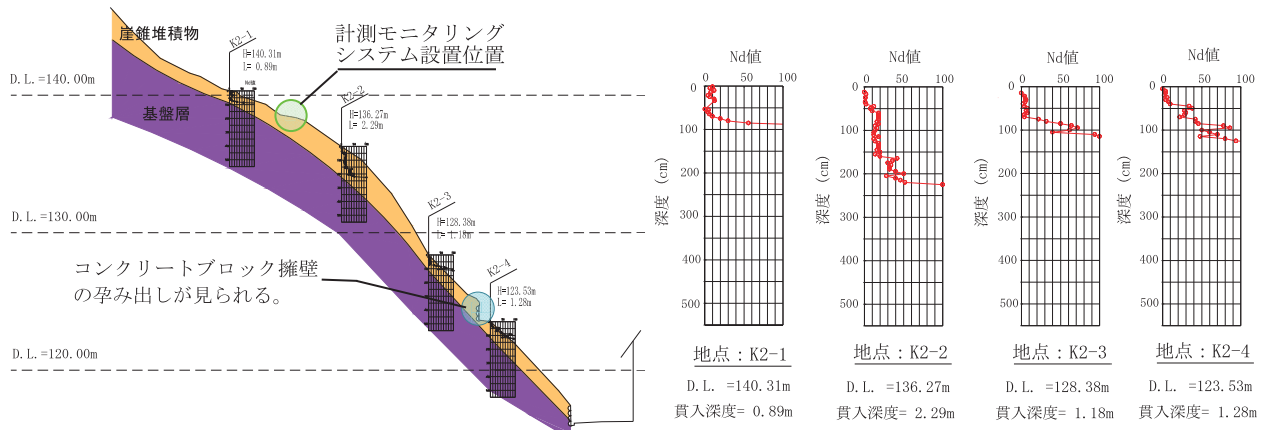


図-2 簡易貫入試験位置と得られた土層断面

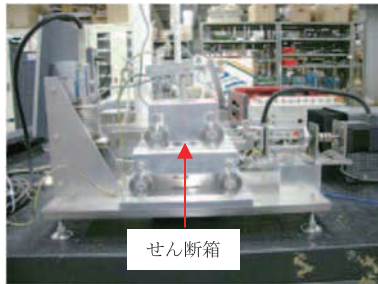


写真-1 超低拘束圧型一面せん断試験

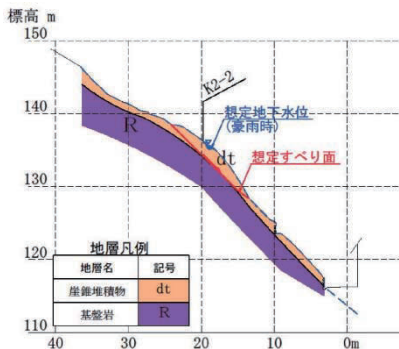


図-3 安定性評価の対象斜面と想定すべり面

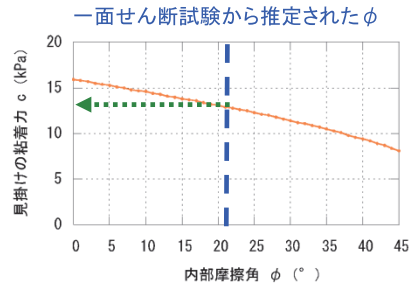


図-4 逆解析で得た安全率が1の状態を保つのに必要な内部摩擦角と見かけの粘着力の関係

■安定性の評価

試験で得られた結果をもとに、安定解析を行っている。まず、与えられた断面で逆解析を行い、安定を確保するのに必要なすべり面の土質定数を求めた。一面せん断試験により推定した内部摩擦角 21° を用いると、安定に必要な見かけの粘着力は 13kPa となる(図-3、4)。

飽和度を変えた一面せん断試験結果(図-5)を見ると、飽和度 60% 未満の場合はこの見かけの粘着力 13kPa は確保されているが、それ以上になると確保できなくなることが分かる。すなわち、当該斜面は、平常時は安定を保っているが、降雨が続いて飽和状態になると危険になると言える。

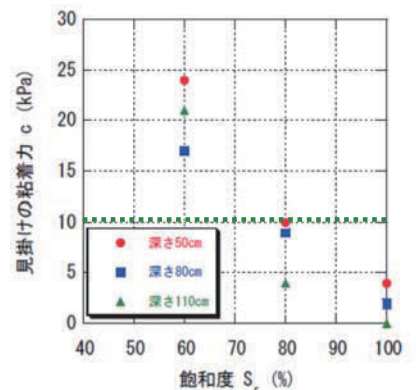


図-5 飽和度と見かけの粘着力

3. 計測モニタリングによる安定監視

観光客・参拝客の安全確保とともに貴重な文化財を守るため、境内斜面に気象ユニットと間隙水圧計から構成されるモニタリングシステムを設置し、継続して降雨時の斜面崩壊を監視している。現地計測雨量にもとづき算出された雨量指標が予め設定した警戒基準を超えると、関係者に警報がメールで送られる仕組みになっている。

■現地モニタリングシステムの概要

モニタリングシステムは転倒ます型雨量計、温度計、テンシオメータ、データロガー、カメラ、無線通信機器から構成される（図-1）。テンシオメータは表層から地下水帯が発生しやすい土壌基岩境界面まで多深度で設置している。これにより、10分間雨量、間隙水圧、地中温度のデータを無線通信を介してインターネット上で確認することができる。

設置位置は前出（p.10）のような安定性評価を行い、危険度が相対的に高く、近接斜面で過去に崩壊が発生している奥院背後の斜面を選定した。上記システムを2004年から設置し、2012年からは図-2に示す14地点で間隙水圧を計測している。計測深度は表-1に示すとおりである。モニタリングによって得られた2014年のデータを図-3に示す。

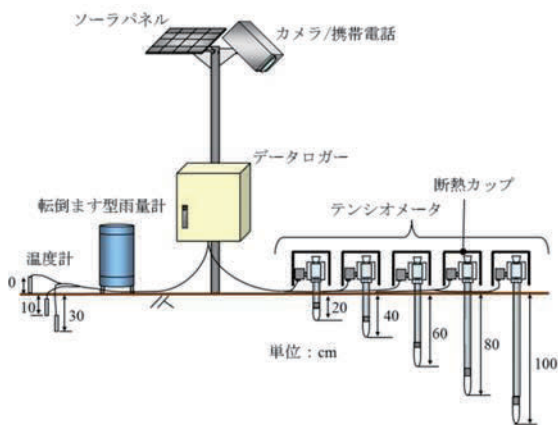


図-1 システムの概要

表-1 テンシオメータの計測深度

地点名	計測深度 (cm)	地点名	計測深度 (cm)
A	40, 80, 100	P3	30, 80
B	40, 80, 100, 200, 260	P4	30, 60, 100
C	40, 80, 100, 230	P5	30, 60, 100, 200
D	40, 80, 100	P6	30, 60, 100, 200, 280
M	20, 40, 60, 80, 100, 190	P7	30, 60, 100
P1	30, 65	P8	30, 60, 100, 200
P2	30, 60, 100, 200	P9	30, 60, 110

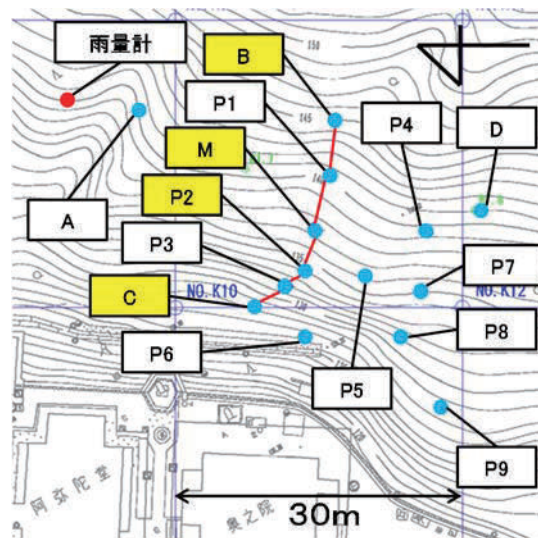


図-2 設置位置

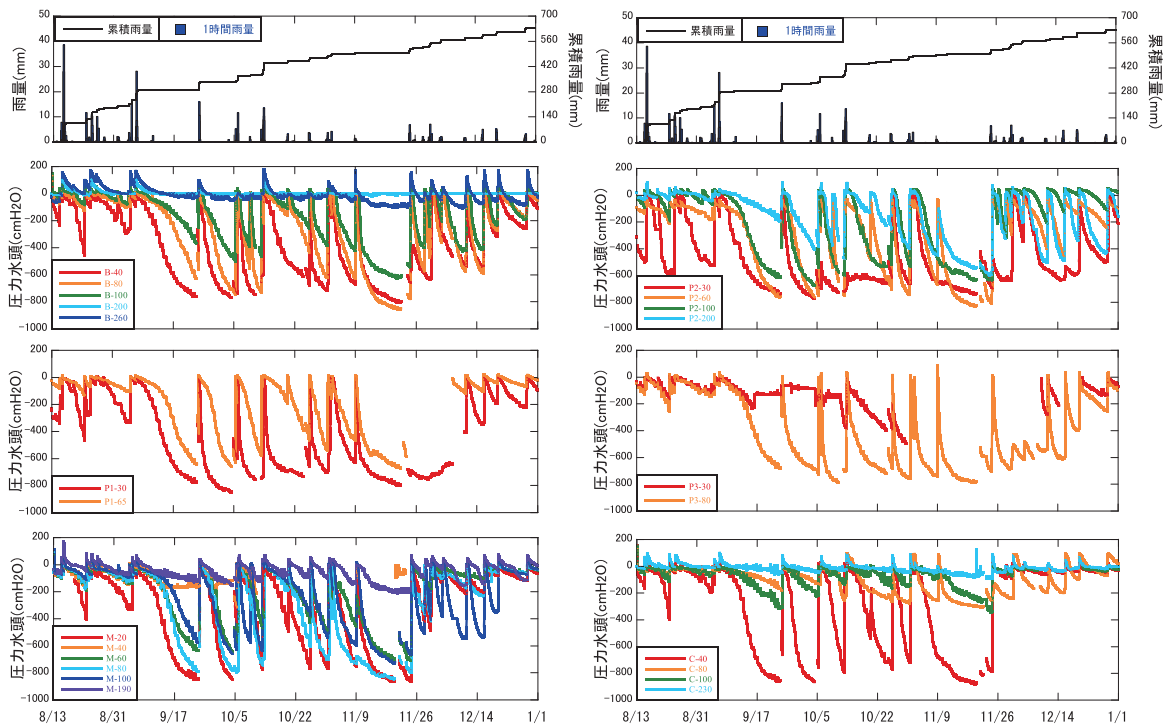


図-3 間隙水圧値の時系列変化

■データの解析

システムは計測結果から斜面の安定性を評価し、危険度が高くなった場合に避難を勧告するルーチンと、避難勧告が発令されたのちその解除を検討するルーチンから構成されている（図-4）。

安定性の評価は、「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増加する」という特徴に着目して行っている。解除の検討は「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（減少する）」という特徴に着目している。それぞれのルーチンで、データ分析による評価に加え、数値シミュレーションによる評価を2段階で行うこととしている。

■データ分析と安定性評価

各機関で提案されている崩壊危険度評価を踏まえてデータの分析を行った結果、当地では「土壌雨量指数」と「時間雨量」の相関図による評価が最も有効であることが確認された（次頁図-5）。なお、評価の指標については、計測結果を常時フィードバックさせて、レベルアップを図っている。

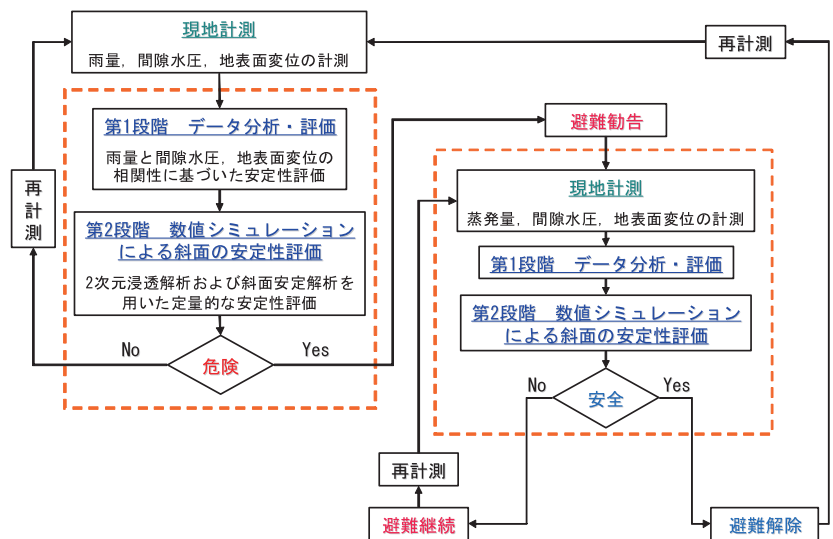


図-4 降雨時斜面災害防止システム

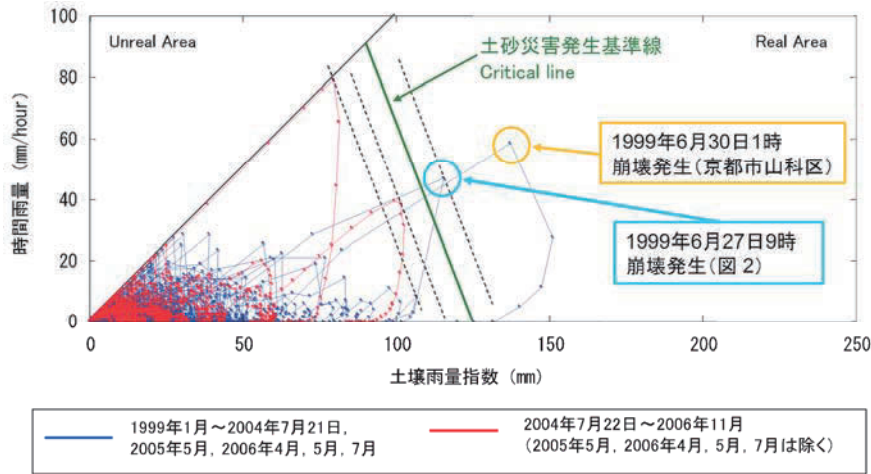


図-5 時間雨量-土壌雨量指数の関係

2015年に発生した台風11号に伴う間隙水圧値の計測結果を分析し、従来の土砂災害警戒基準に用いられる土壌雨量指数と間隙水圧値の変動を比較することにより、斜面崩壊発生の危険度評価に対する、間隙水圧値の現地モニタリングの有用性について検討した。間隙水圧最大値計測後の減衰が土壌雨量指数に比べ早いため、間隙水圧値のみを用いての斜面崩壊発生の危険度評価は現状では困難であるが、雨量指標と組み合わせて扱うことで、崩壊危険度の判定に役立つと考えられる。

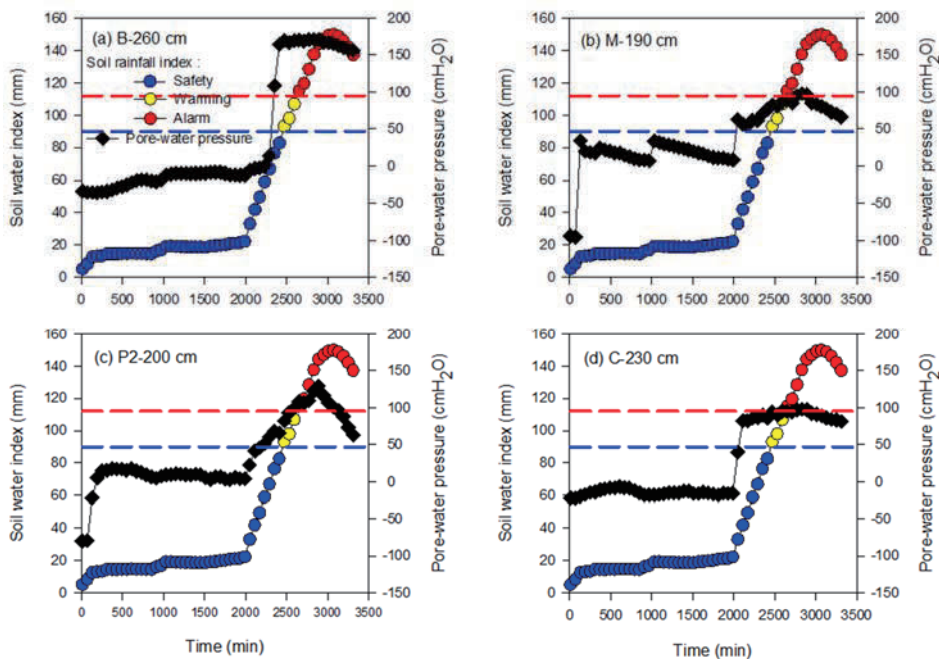


図-6 2015年台風11号における土壌雨量指数、間隙水圧値の変動(青色破線:注意報発令基準, 赤色破線:警報発令基準)

■計測システムの簡素化の試み

本計測システムでは、テンシオメータの定期的なメンテナンスが必要となる。このため、当初は雨量計とテンシオメータで測定を行い、ある程度データが集積できたところで雨量計だけの測定システムへの切りかえをめざしている。そのために必要となる「降雨による間隙水圧の変動傾向」の把握を、主成分分析を用いて行っている。試行の結果、当地では、2年間の計測データで、降雨時の間隙水圧の変動をある程度把握できることがわかった。また、第一主成分得点から崩壊確率を算出し危険度を評価できる可能性が示されている。

■ 超音波を使った新しい測定器の開発

計測システムをさらに広域に展開させて予測精度を向上させるためには、既存の計測機器に比べ、安価で設置が容易なセンサが必要となる。そこで超音波による土中水分・水位測定手法を開発し、清水寺境内内で試験的に運用している。

地盤に設置する超音波検出器は中空パイプと超音波の送受信を行うセンサで構成される(図-7)。超音波センサは自動車のバックソナーを適用することで低コスト化を実現している。超音波センサから発信された超音波はパイプ内部の空気を伝って、下端の土表面で反射する。土が乾燥状態の場合、土粒子の凹凸による散乱で反射強度が低くなり、湿潤状態となると水膜により散乱が軽減され反射強度が高くなる。また、地下水位が上昇した場合には、パイプ内を上昇した水位により反射波の伝搬時間が短くなるため、水位を算出することが可能である(図-8)。現地計測によって、本手法での豪雨時の水分変化を捉えることに成功している(図-9、10)。

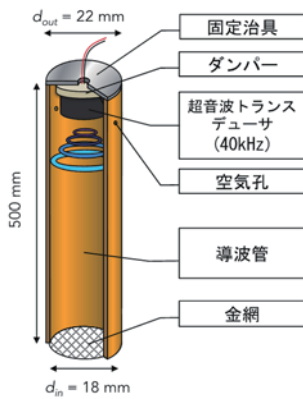


図-7 超音波検出器

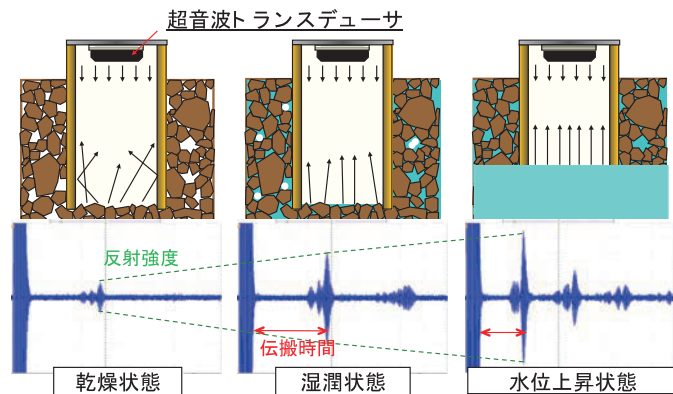


図-8 各状態における反射波の変化

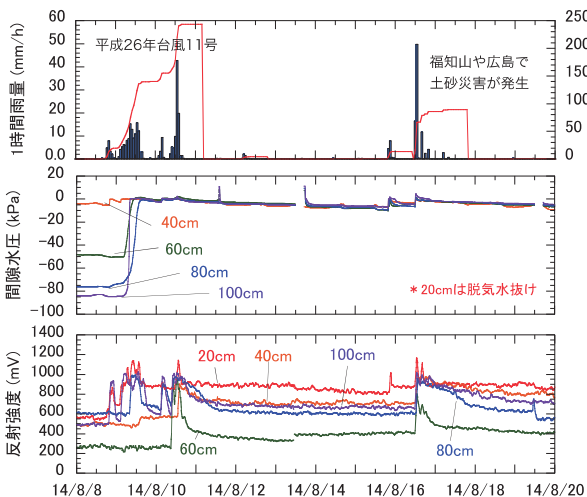


図-9 2014年8月豪雨による間隙水圧と反射強度の変化

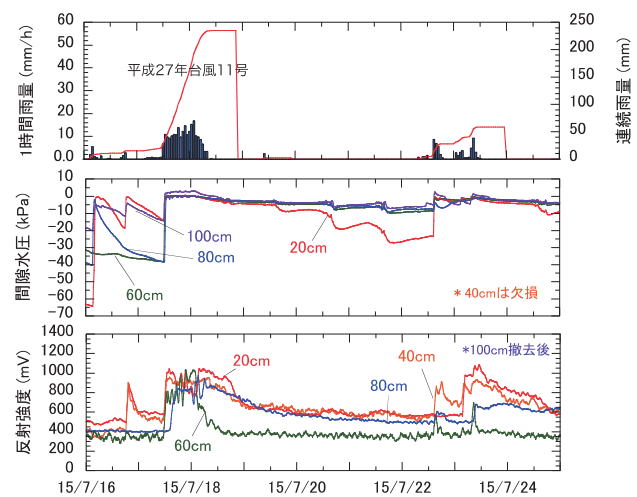


図-10 2015年台風11号による間隙水圧と反射強度の変化

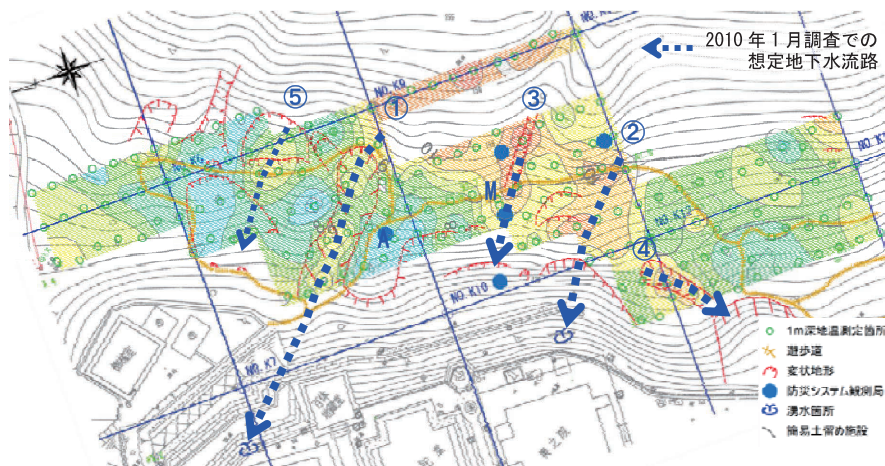
4. 地下水調査による水みちの探索

斜面の安定は地下水に大きく影響を受けるため、斜面の安定対策として、地盤内への雨水の浸透防止や、排水による地下水位の低下対策などが検討されることが多い。しかし、地下水は、地盤中の特定の流路（水みち）を流れていることが多く、有効に対策を行うためには水みちの位置を特定する必要がある。また、地下水は、周辺の環境や景観を支える資源でもあり、むやみに排水すると地上の景観や環境、湧水の水質や量に悪影響を及ぼす可能性がある。環境や景観を保全しつつ、適切な地下水対策の検討を行うため、境内の斜面において水みちの探索が行われている。

■ 1m 深地温調査

地盤表層の温度は、気温や日射等の影響により日変動や季節変動が生じる。しかし、地表下 1m 程度になると、季節変動は残るが日変動がほとんどなくなる。一方、地下水は年間を通じてあまり温度が変化しないため、夏は周囲の地盤の温度を低下させ、冬は低下を抑制する。このような現象を利用し、地表面下 1m の温度を図ることにより、水みちの推定が行われている。

測定は、奥院背面の斜面において実施されている。推定された地盤内の水みちの位置を図-1 に示す。この結果をもとに、水みちと想定される位置とそれ以外の位置での間隙水圧測定結果をチェックしたところ、降雨時の水圧変動状況が異なっており、地盤の透水性が異なることが示唆された。



2011年2月15日計測

図-1 1m 深地温測定により推定された水みち

■ 地中音測定

水が地中を流れる際、亀裂や土粒子間隙に存在する空気が気泡となり、その気泡が割れることで爆気音が発生する。地中音測定は、この爆気音を測定することにより地下水の存在を判別し、水みちの位置を推定する方法である。測定は、10~20cm のステンレス棒を地中に打ち込み、これにセンサを取り付け、ヘッドホンなどで実際に音を確認しながら行う。

測定結果を図-2 に示す。測定は 4 日行い、各ポイントの最大値をプロットし水みちを推定した。概ね、1m 深地温測定結果と類似した位置に水みちの存在が推定される。南側の斜面では、1m 深地温測定で水みちと推定された箇所は、地中音測定では広い地下水層であると推定されている。また、間隙水圧測定との比較から、地中音測定で得られた水みちは、比較的深部（2~5m 深）のものであることが推定されている。

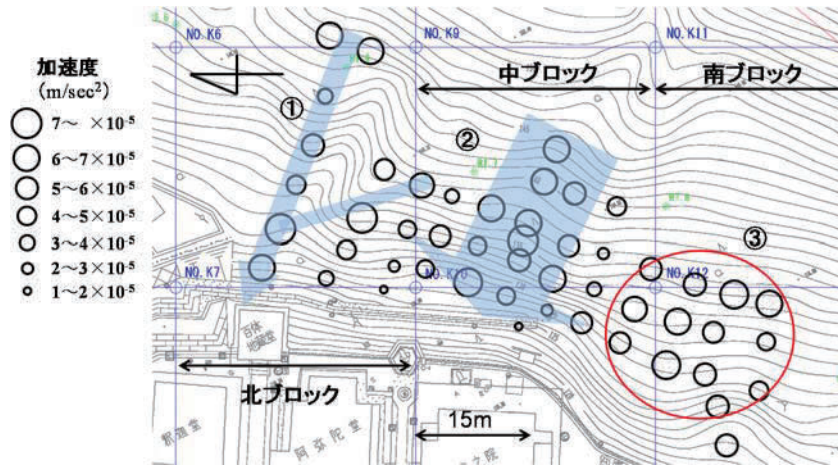


図-2 地中音測定により推定された水みち

■電気探査

電気探査は、地盤に電流を流して比抵抗分布をもとに、地質・土質、地下水の状況などを調べる方法である。探査の結果、前出の2つの調査方法から推定された水みち箇所、恒常的な2つの低比抵抗帯（水みち）が岩盤中に確認された（図-3、4。表層の土砂部には恒常的な水みちは確認されなかった）。

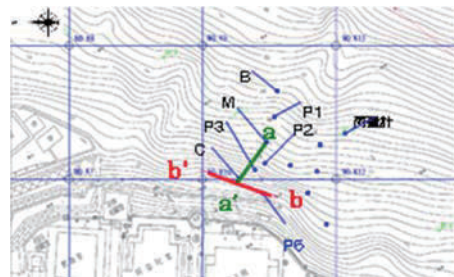
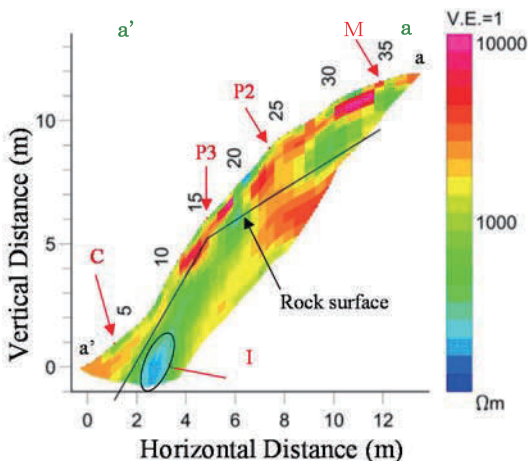
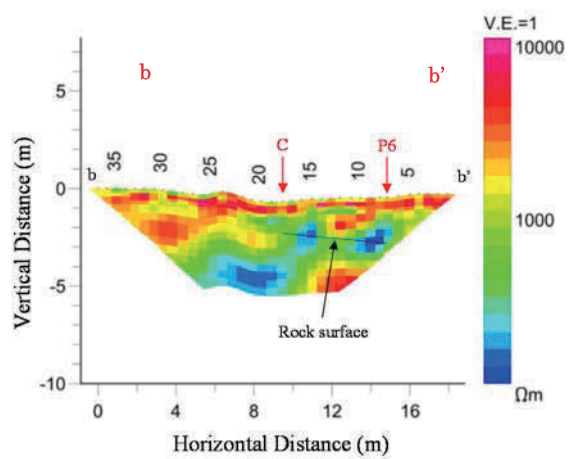


図-3 電気探査実施断面



* 青～水色の部分が水みちと推定される箇所

図-4 縦断方向(a-a')の測定結果



* 青～水色の部分が水みちと推定される箇所

図-5 横断方向(b-b')の測定結果

■水みちの調査と留意点

以上のように比較的簡便な方法で、地盤内の水みちを大よそ推定することができる。ただし、「1m 深地温調査」は外気温・日照や植物の影響を受けること、「地中音測定」は観光客がもたらす振動などが影響することなどから、十分な水みち推定精度が確保できない場合がある点に留意が必要である。「電気探査」は両手法に比べると精度は高いが、専門性が高く、費用が高いため頻繁に適用できる方法ではないのが難点である。

5. 土砂災害危険度・対策優先度の評価

調査・モニタリング結果から、安定性を検討するためのデータが多く収集されつつある。この成果をもとに、より精度の高い土砂災害危険度判定や、対策優先度を検討するための評価方法が検討されている。

■数量化Ⅱ類による崩壊危険度評価

斜面の崩壊危険度評価は、斜面の地形や地質などの素因情報をもとに行われることが多い（例えば p.10 の方法）。しかし、崩壊危険度は降雨にも大きく影響を受けるため、降雨情報も含めて検討する必要がある。そこで、多変量解析の数量化Ⅱ類を適用し、斜面の素因情報に 24 時間雨量を加えた分析による斜面の評価が試みられている。

数量化Ⅱ類とは、質的な形で与えられた外的基準を質的な要因に基づいて予測・判別する方法であり、地質や土地利用など数量で表せないデータを扱うことができる（詳細はここでは省略する）

表-1 が分析に用いるアイテム・カテゴリである。評価には、2004 年台風 23 号による京都府北部の災害データ（崩壊 96 箇所、非崩壊 100 箇所）を用いた。数量化Ⅱ類による評価フローを図-1 に示す。分析結果が最適となるまで、分析・検討を繰り返す。

分析結果を表-2 に示す。「崩壊・非崩壊」の判別への影響は、24 時間雨量、斜面傾斜角の順であると解釈できる。

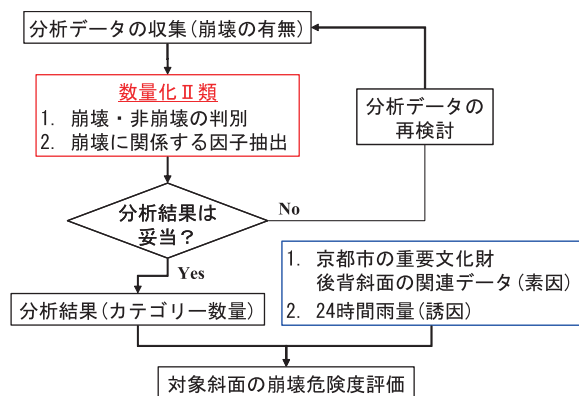


図-1 数量化Ⅱ類による斜面の崩壊危険度評価フロー

表-1 分析に用いるカテゴリ

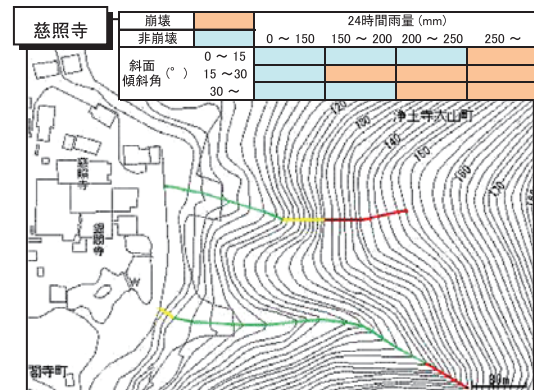
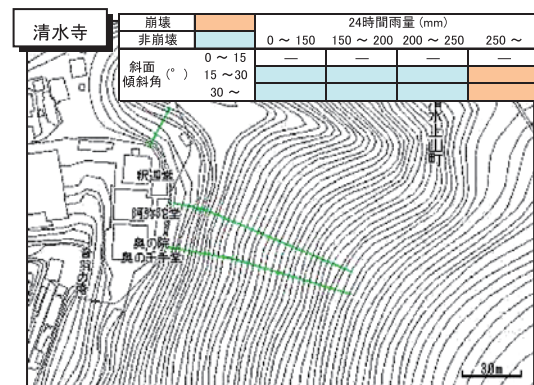
	アイテム	カテゴリ
素因	斜面傾斜角(°)	0~15, 15~30, 30~
	表層地質	固結堆積物, 未・半固結堆積物, 深成岩, その他
	土地利用	針葉樹林, 広葉樹林, 農地, その他
	風化帯の深度	浅い, 中程度, 深い
	起伏量(m)	0~150, 150~300, 300~400, 400~
誘因	24時間雨量(mm)	0~150, 150~200, 200~250, 250~

表-2 分析結果

アイテム	崩壊に最も影響		非崩壊に最も影響		レンジ(順位)
	カテゴリ	数量	カテゴリ	数量	
斜面傾斜角(°)	15~30	0.113	0~15	-0.196	0.310 (2位)
表層地質	その他	0.216	深成岩	-0.089	0.305 (3位)
土地利用	その他	0.227	広葉樹林	-0.054	0.282 (4位)
風化帯の深度	深い	0.138	中程度	-0.105	0.244 (5位)
起伏量	400~	0.117	0~150	-0.095	0.212 (6位)
24時間雨量(mm)	250~	0.250	0~150	-0.418	0.668 (1位)

図-2 は清水寺と慈照寺の分析結果である。少ない雨量で崩壊が発生する斜面が、危険度が高い斜面であると判定できる。

まだ試行段階であるので、今後、分析情報の検討などを行い、評価精度の向上を図る予定である。



崩壊と判別した際の24時間雨量(mm)	0~150	150~200	200~250	250~	崩壊の危険度
危険度クラス	黒	赤	黄	緑	青

図-2 崩壊危険度評価(清水寺、慈照寺)

■文化財を対象としたリスクアセスメント

土砂災害の発生危険度に加え、保全対象の重要性や、発生した場合の損失の評価も加味した手法として、リスクアセスメント手法の適用を検討している。

★文化財に対するリスクアセスメントの定義

「文化財における自然災害による危険性を特定し、特定された危険性によって生ずるおそれのある文化財自体の損失の程度と、災害が発生した場合の被災の可能性およびその災害が発生する可能性の度合いを合わせて災害リスクを見積もり、その災害リスクの大きさに基づいて対策の優先度を決め、リスクの除去又は低減の措置を検討し、結果を記録する一連の方法」

災害リスク評点は、以下の式に基づき、表-3のように評点を定めて算出した。評点が高いほど、対策の優先度は高くなる。

$$(\text{災害リスク評点}) = \text{①被害の重大性} + \text{②災害時の被害発生の可能性} + \text{③災害発生の可能性} \quad (\text{災害リスク評点算出式})$$

表-3 災害リスク評点の数値化

①被害の重大性		②災害時の被害発生の可能性		③災害発生の可能性	
修復不能（消失）	10	確実	6	確率が高い	4
重大な損傷（修復可能）	6	可能性が高い	4	可能性がある	2
部分損傷（修復可能）	3	可能性がある	2	可能性が低い	1
軽微な損傷（メンテナンス程度の修復要）	1	可能性がほとんどない	1		

表-4 災害リスクレベルの評価基準

リスクレベル	リスク評点	災害リスクの内容	災害リスク低減措置の進め方
IV	12~20	災害に対して重大な問題がある	直ちに専門家への相談を検討
III	8~11	災害に対して問題がある	早期に専門家への相談を検討
II	5~7	災害に対して多少の問題がある	計画的に低減措置を検討する
I	3~4	災害に対しての問題はほとんどない	費用対効果を考慮して検討する

清水寺境内にある地主神社を対象に、様々な自然災害による被害リスクを評価した（表-5）。台風、土砂災害、地震に対する対策の優先度が高いという評価となった。

■今後の方向性

文化財は、建造物だけでなく、景観や他の施設を含めた複合施設としての性格をもち、また美術工芸品や参拝客など保護対象も多岐にわたる。多様な保全対象の抽出、対象物ごとのリスク評価、それらを組み合わせた優先度の決定、低減措置の検討を行うことができれば、さらに有効性の高い手法になると考えられる。

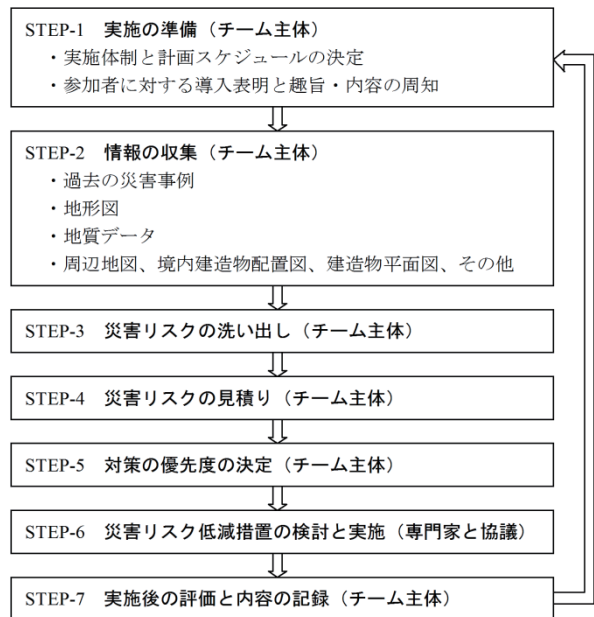


図-3 自然災害リスクアセスメントの実施手順

表-5 各自然災害のリスク評点

災害	①被害の重大性	②災害時の被害発生の可能性	③災害発生の可能性	評価点 (計)
台風（強風）	6	4	4	14
風倒木	6	1	1	8
火災（林野・雷）	10	1	1	12
霰	1	2	2	5
雹	1	2	2	5
豪雪	3	2	2	7
凍害	1	2	2	5
豪雨	3	4	4	11
土砂災害	6	4	4	14
地震	6	4	4	14
鳥獣害	1	1	1	3

6. 崩壊斜面の復旧 (1) 1999年に発生した斜面災害の復旧

1999年6月に境内で土砂崩れが発生し、茶店が押しつぶされる災害が発生した。この斜面は、「音羽の瀧」のすぐ南側の斜面であるため多くの観光客が直下を訪れ、また「清水の舞台」より展望できる位置にあり、桜や紅葉など四季折々の豊饒な景観を構成する斜面でもある。このため、防災的な観点だけではなく、文化的な景観の再生についても考慮した復旧対策が求められた。

■ 斜面安定対策

斜面表層において風化による土砂化が進んでいるため、斜面安定工として鉄筋挿入工を選定した。補強鉄筋には、長期耐久性を考慮してステンレス鋼棒を用いた。しかし、鉄筋挿入工は、のり面表面に受圧板などの人工物の設置を必要とするため、景観上問題が残ることとなった。

■ 景観への配慮

そこで連続繊維補強土（ジオファイバー）工を併用した（☞p.24 参照）。これにより、斜面表面の人工物を遮蔽し厚い植生生育基盤が確保できるため、豊かな景観・環境の再生が可能となった。景観の再生にあたっては、清水の舞台からの眺望に配慮しつつ、学識経験者の意見を取り入れて、自然林に近い状況を目指す高レベルな再生を試みた（☞p.21 参照）。さらに、将来的に創出される景観（特に春の桜と秋の紅葉）に留意し、樹冠予想図などを作成しながら、植栽の配置を計画した。



写真-1 崩壊直後

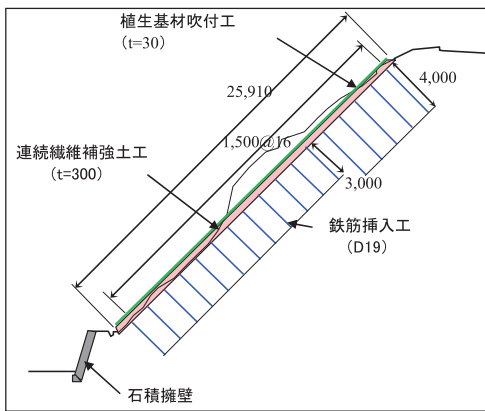


図-1 対策工の概要(断面)

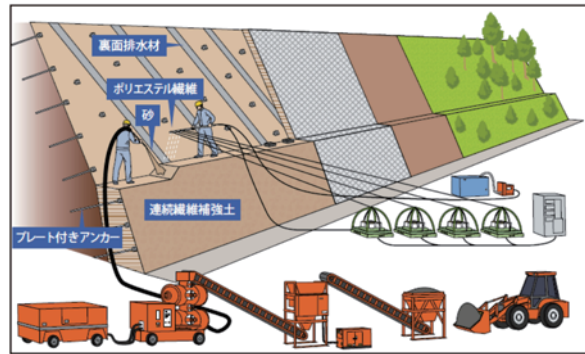


図-2 連続繊維補強土工施工方法(概要)

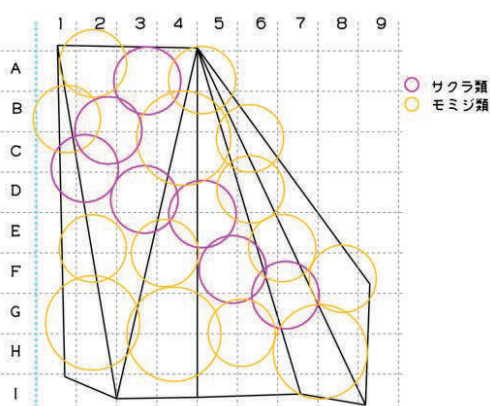


図-3 40年後の樹冠予想図

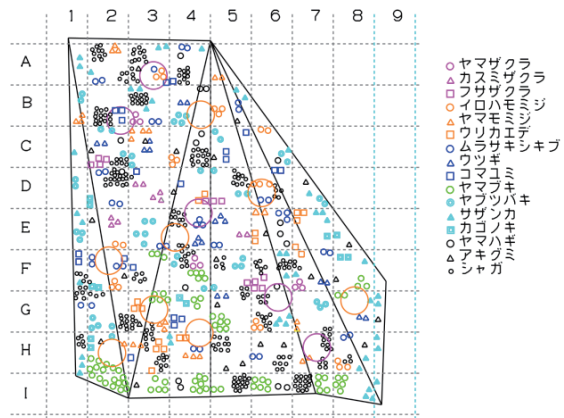


図-4 植栽配置計画



写真-2 連続繊維補強土工・植生基材吹付工完了直後



写真-3 植栽から7年経過した復旧斜面

■効果の確認

1999年に復旧対策を実施した斜面に隣接する斜面で、2013年に土砂崩れが発生した。しかし1999年に復旧した斜面には異常は認められず、斜面安定対策としての有効性が実証された。

景観の再生は、樹木の成長に時間がかかるため形成途中ではあるが、一般的に当初意図したランダム配置や立体的（複層的）な景観が創出されつつあり、周辺と整合・連続性がとれた良質な景観が復元されつつあるものと評価できる（写真-4）。



写真-4 2014年の斜面状況

黄色矢印区間は1999年の復旧対策斜面。白色矢印区間は2013年に崩壊した斜面で、鉄筋挿入工、連続繊維補強土工、植生工により復旧工事を実施中である。

●対策技術：自然配植緑化

一般に、切土のり面などでは、侵食防止を目的に草本類による全面緑化が行われる。また、景観・環境を考慮する必要がある場合には、植物の種類や導入方法が検討される。しかし、これらは工事として行われるため、施工効率が優先され、その結果、単調な一斉林が形成される場合が多い。

樹林化による自然な景観創造を目指す場合には、使用植物の種類や導入量、種子や苗木など導入方法、これらの将来的な生育予想までも含め、人工的な様相にならないように配慮した計画が望まれる。特に苗木植栽では、単調な一斉林にならないように、自然な配植で階層を有する群落形成をめざすことで、自然との調和を図りやすい。自然配植緑化は、この自然林の配置を模して行う植栽配置の考え方である。以下のような特徴がある。

- ①自然林の景観と調和した群落が形成される。
- ②樹高の高低差がランダムに生じ、複層林が形成される。
- ③複層林の形成によって、豊かな自然が形成される。

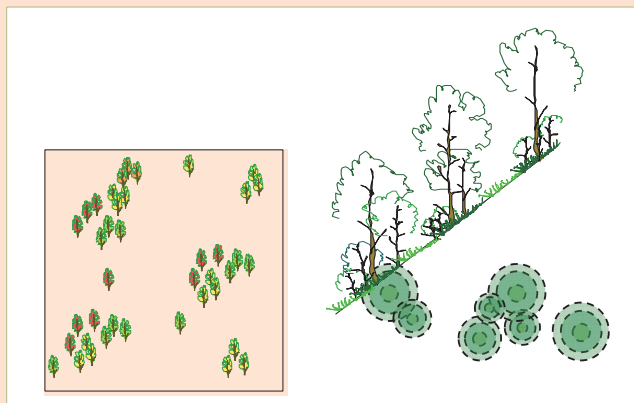


図-5 自然林の特徴(イメージ)

6. 崩壊斜面の復旧 (2)2013年に発生した斜面災害の復旧

■ やや深い崩壊に対する対策

2013年に、境内の複数の箇所です砂崩れが発生した(図-1)。1999年に被災・復旧した斜面のすぐ脇でも表層崩壊が生じたため、1999年の復旧対策に準じた対策を実施した(災害箇所1、写真-1~3)。一方で、子安塔下ののり面では、軟質となった風化層が厚く分布し、のり肩にはクラックも生じていたため、のり面安定工としてグラウンドアンカー工を適用した(災害箇所3・4、写真-4、5)。災害箇所1と同様、連続繊維補強土工を併用し、景観の再生を図っている。災害箇所3・4の復旧工法の概要(断面)を図-3に示す。



写真-1 鉄筋挿入工完了直後(受圧板がのり面に並ぶ)



写真-2 受圧板を連続繊維補強土工で被覆



写真-3 植生工実施後



図-1 2013年の斜面崩壊災害発生箇所



写真-4 グラウンドアンカー打設後(受圧板により被覆される)



写真-5 復旧対策実施後

のり面上部に子安塔が隣接していたこと、風化により土砂化した層が厚かったこと、のり肩にひび割れが生じたことなどを考慮して、グラウンドアンカー工によりのり面の安定を図った。アンカー力を土塊に伝達させるため地表に設ける支承構造物には、新素材の受圧板（1400×1400×240mm）を適用した。これらは地表面を広範囲に覆って清水の舞台からの眺望を台無しにしてしまうため、連続繊維補強土工により被覆したのち、植生工を実施した（写真-4、5）。

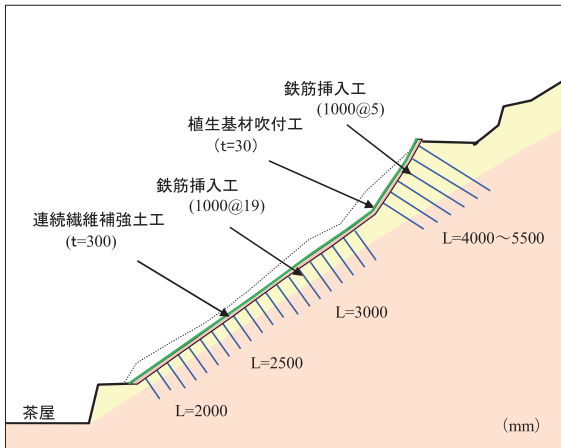


図-2 災害箇所1の復旧対策概要(断面)

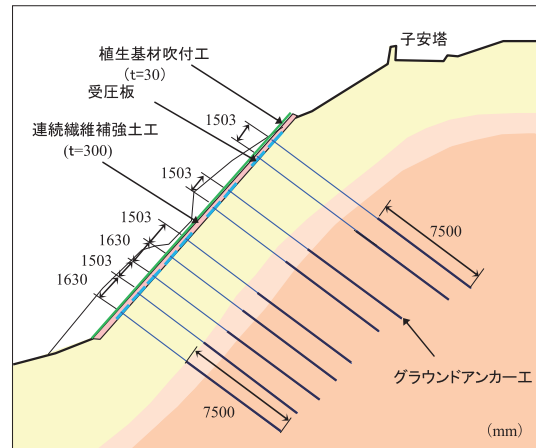


図-3 災害箇所3、4の復旧対策概要(断面)

■観光客・参拝客への配慮

文化財周辺での斜面工事では、観光客・参拝客に配慮しながらの作業が求められる。危険要素がある場合は取り除くことはもちろんであるが、観光客の多くは、文化財とそれを取り巻く景観を観覧することを大きな目的としていることから、できるだけ工事現場を観光客の目から遮る、目立たなくすることも大切である。実際に配慮をしている例を写真-6、7に示す。このほか、工事の騒音や臭い・粉塵などにも十分注意して観光客に不快な思いをさせないことが大切である。



写真-6 シートの色に配慮

一般的にはブルーを使用するが目立たない色のシートを使用。



写真-7 眺望を遮らない透明な防護板

●対策技術：連続繊維補強土工（ジオファイバー工）

連続繊維補強土工は、ポリエステル繊維と砂質土だけで、のり面保護と植物生育基盤としての性能をあわせ持った補強土を構築する工法である。のり面安定に必要な強度は、繊維を定向配列するように斜面上に吹付けることにより、砂質土に疑似粘着力を発生させて確保している。セメントを使わないため、良質な生育基盤の提供が可能である。擁壁形状に構築することも可能である。「鉄筋挿入工」、「植生工」と組み合わせて、地盤表層の安定確保と良質な景観・環境の創造・復元を行うことができる。

施工は、連続繊維（ポリエステル製）と砂質土を別々の専用装置から供給し、のり尻からのり肩に向かって均質に吹付けて築造する（写真-3）。連続繊維は糸巻き状の繊維専用の供給装置から引き出され、高圧水によって直線状に噴射される。砂質土は吹付機により圧送・吹付けされる。砂質土内の繊維を一定方向に配列させることにより、砂質土と連続繊維で疑似粘着力を有する補強土が形成される。

人工の構造物を地表面に出すことなく斜面の安定を確保できる工法であることから、一般の切土のり面をはじめ、景勝地や国立・国定公園など景観・環境への配慮が必要な地区で多くの採用実績がある。

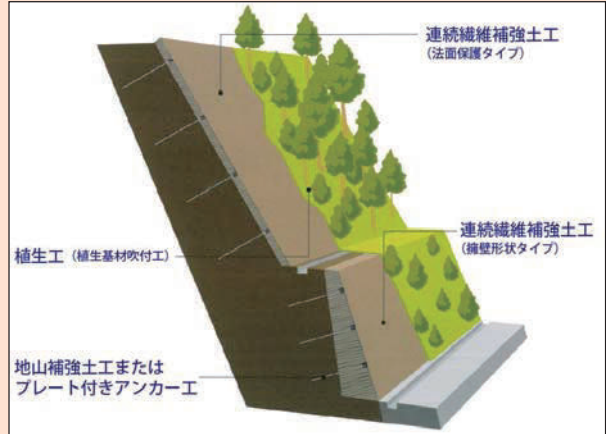


図-1 連続繊維補強土工の概要



写真-1 連続繊維



写真-2 連続繊維と砂質土による補強土



写真-3 連続繊維補強土築造状況



写真-4 背面地山の処理



写真-5 裏面排水材と末端排水処理



写真-6 プレート付きアンカー



写真-7 補強土内への根の伸長状況