

亀裂性岩盤斜面の調査・解析とその解釈

Survey, Analysis and Perception for Possible Failure Modes of a Rock Slope with Fissures

谷口洋二 Yoji TANIGUCHI (株) エイトコンサルタント
 増田宏己 Hiroki MASUDA (株) エイトコンサルタント
 西村 強 Tsuyoshi NISHIMURA (鳥取大学工学部)
 藤村 尚 Hisashi FUJIMURA (鳥取大学工学部)

亀裂の発達した岩盤斜面の安定検討を目的とした調査手法は、一般的な方法が確立されていない。そこで、本論文では、現地計測と数値解析を有機的に組み合わせることにより、岩盤斜面の崩壊形態の予測を試みた。対象斜面は、地震と豪雨に起因して発生したと見られる落石崩壊を生じた岩盤斜面である。近年技術発展の著しいボアホールカメラを利用して不連続面を検出し、岩盤ブロックのモデル化を行った。そのモデルを用いて個別要素法(DEM)による地震時の崩壊挙動をシミュレートした。さらに、岩盤斜面にリモートセンシングの一手法である熱赤外線映像法の適用を試み、その汎用性や今後の展望を探った。

キーワード：岩盤調査，岩盤崩壊，ボアホールカメラ，個別要素法，熱赤外線映像法
 (IGC:C-4,G-6,G-13)

1. はじめに

調査地は、JR鳥取駅の西方数kmに位置し、交通量の多い国道に面した小山地である。この小山地は南西から北東に延びた半島状の地形をなしており、当該地はこの北東端部に位置している。この細長く延びる山体は、所々極端な痩せ尾根部が見受けられる。調査地の近辺には、昭和18年に起きた鳥取地震(マグニチュード7.4、死者1,025名)によって出現した吉岡断層、鹿野断層が走っている¹⁾。

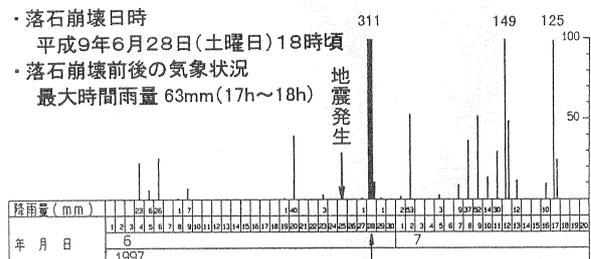
調査地の地質は、鳥取市街から西方にかけて帯状に分布する中生代白亜紀～新生代古第三紀の鳥取花崗岩を主体としている。この鳥取花崗岩は黒雲母花崗岩に分類されており、全体に細粒構造であるが、所々粗粒の構造も見られる¹⁾。調査地には、この花崗岩中に細脈のひん岩が貫入している。

対象斜面は交通量の非常に多い国道に面した採石場の跡地であり、斜面上部には重要な公共施設が建設されている。この岩盤斜面は、古くから小規模な落石が生じており、昨年には、震度3の地震と台風が原因とみられる小規模な崩壊が発生した。筆者らは、こういった特徴をもつ本現場で、岩盤の将来的な安定性を検討するために、岩盤亀裂の調査、数値解析による崩壊シミュレーションを行い、さらに新しい調査手法としての熱赤外線映像法の適用を試みた。

2. 落石崩壊の経緯

落石崩壊の経緯は、図-1に示すように震度3の地震の発生から3日後の台風8号による豪雨時に発生している。この豪雨は、調査地の降雨記録はないが隣の鹿野町では日雨量311mm、最大時間雨量63mmを記録している。この最大時間雨量時に落石崩壊が発生している。

また、この時の暴風雨は、岩盤斜面を叩き付ける方向に作用していた。落石崩壊の状況を図-2、図-3に示す。崩壊した岩塊(約5m³)は、10m程度の高さから落下し、斜面末端から約15mまで飛び跳ね、砕け散っていた。



- ・落石崩壊日時
平成9年6月28日(土曜日)18時頃
- ・落石崩壊前後の気象状況
最大時間雨量 63mm(17h~18h)
- ・地震記録
地震発生月日 平成9年6月25日(水曜日)
震源地 鳥根県西部(北緯34° 27'、東経131° 40')
- 震源深さ 12km
マグニチュード 6.1
鳥取市の震度 震度3(浦富3、智頭2、倉吉2)

図-1 落石崩壊の経緯

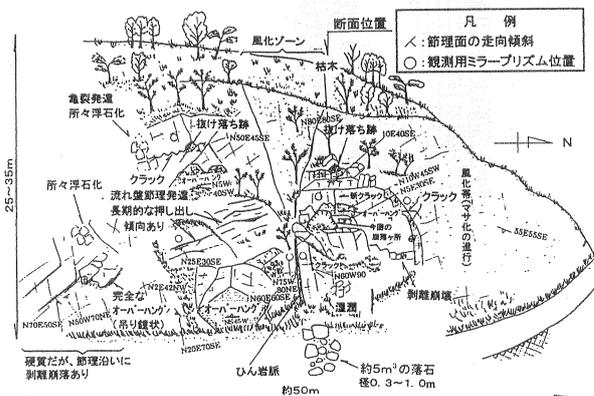


図-2 岩盤斜面スケッチ図

かを検討した。垂直剛性 1000tf/m, 接線剛性 250tf/m, 内部摩擦角 40°, 粘着力 なし。

個別要素法の解析結果を図-8に示す。

図-8によると、水平震度が増すにつれて不連続面が開口していき、ついにはブロックが分離し岩盤崩壊が発生する過程がよくわかる。水平震度 0.2 までは不連続面が開口し、変位が増大するが、大きな崩壊は発生していない。水平震度 0.3 では、このすべり落ちる過程において、各ブロックがトップリング的な回転運動を示していることが伺える。このため、崩壊頭部は引張り領域となり、不連続面が開口している。

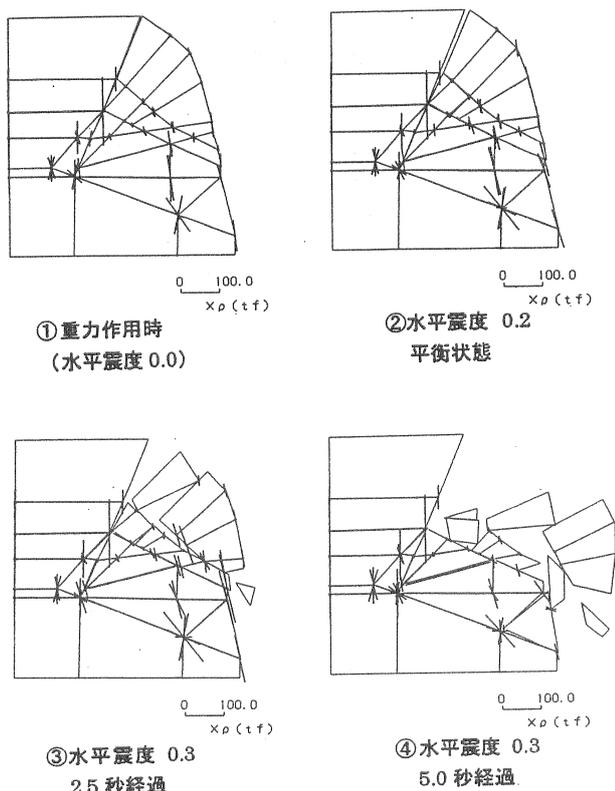


図-8 DEM解析結果

以上のことから、岩盤崩壊は①～④のような過程で発生するものと想定される。

①開口亀裂発生過程 ②落石崩壊発生過程 ③トップリングの発生と、それに伴う小規模崩壊 ④岩盤の平面すべりによる大崩壊、但し、③と④はほぼ同時に発生する可能性がある。

以上のようにDEM解析では、不連続面の性状のうち、強度特性、方向、ブロック形状等をモデル化し、崩壊の過程とその形態を、数値実験的に表現した。この結果を岩盤斜面の耐震設計に利用することが可能と考える。

5. 熱赤外線映像法の岩盤斜面調査への適用

リモートセンシングの一手法である熱赤外線映像法を適用した岩盤斜面の調査結果について述べる。

熱赤外線映像法は、熱赤外線の放射エネルギーを測定することで、材料表面の温度を遠隔から非接触で計測し、

その物体の状態を把握する技術である。この方法は、測定が簡便で、遠隔から非接触で物体の状態を把握できることから、建物外壁や吹付法面の老朽化診断調査に利用されている⁴⁾。しかしながら、岩盤斜面に対しては、その不均質性によって明確な解析手法は確立されていない。そこで、今回は、この方法を用いて岩盤の風化・緩み・浮石化・地下水状況・植生等の性状を面的に把握しようと試みたものである。

5.1 調査方法

測定は、対象斜面を一望できるように、斜面向い側マンション上階から実施した。測定は水平約 26m, 垂直約 25m の範囲を対象とし、夏季の好天時 10:15 から 17:00 まで、約 30 分間隔で実施した。熱赤外線映像法の測定から解析までの流れを図-9に示す。

測定機器は、太陽光の反射による影響を受けにくい長波長域 ($\lambda=8\sim 13\mu\text{m}$) の赤外放射温度計を用いた。センサー仕様としては、最小検知温度差が 0.025℃、瞬時視野角は 1.5mrad であり、今回の測定範囲においては約 10cm の分解能となる。

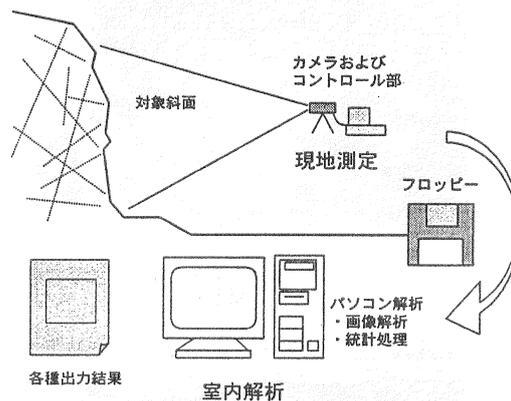


図-9 熱赤外線映像法モデル図

5.2 熱赤外線映像解析手法

熱赤外線映像法は、物体表面の温度によって映像が作成されることから、その映像のみでは解析する位置の特定が困難である。今回の測定ではセンサーの最小検知範囲(画素)を約 10cm 四方に設定しており、図-10に示すように縦横 20 画素(約 2m)毎に区画を設け、それぞれに「A..M 列/1..12 行」というインデックスを設定して解析位置を表現した。

解析においては、現地測定によって取得された熱赤外映像の温度範囲を調整し、画像処理により解析インデックスをオーバーレイ表示することから始めた。オーバーレイ表示した熱赤外映像の例を図-11に示す。ここで、熱赤外線映像とは寒色系の低温部から暖色系の高温部まで虹色のグラデーションで温度を表現したものであるが、本文中の図においてはモノクロ画像として表現した。また、時間経過による温度変化を把握するため、2つの時間における温度差を求め、熱差画像を作成し、画像による解析を行なった。

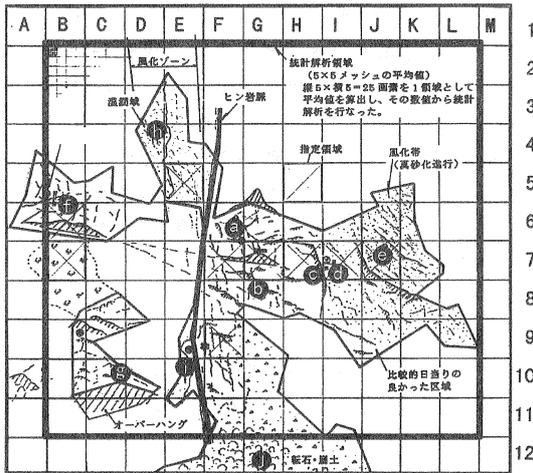
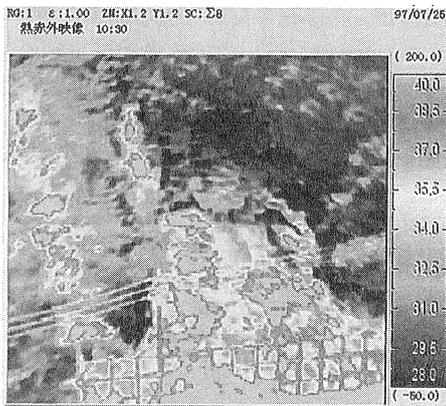


図-10 解析領域インデックス図



↓ 熱赤外映像に
解析インデックスを重ねる

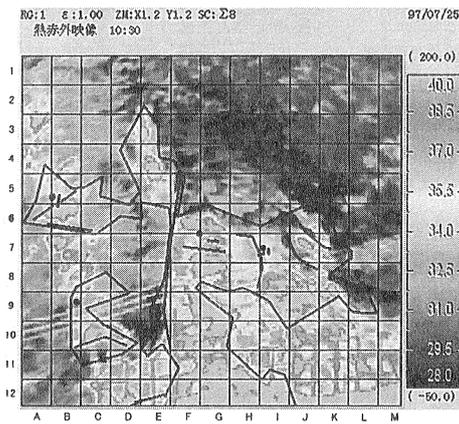


図-11 熱赤外映像のオーバーレイ表示

次に、熱赤外線映像測定結果をもとに多変量解析を含む統計処理（2次解析）を行なった。2次解析の統計処理は、「5×5メッシュの平均値」を基本数値として実施した。これは、約10cm四方の最小検知範囲（画素）を縦横それぞれ5個分の領域（5×5=25画素：約50cm四方）にまとめ、それぞれの領域（解析メッシュ）毎に平均値を算出したものである。統計処理を行なう時間帯については、10:30から16:30までの1時間毎の7系列

のデータを用いた。ここで、対象斜面が東向きで計測開始が10:15であるため、日の出以降の日照の影響により表面温度が上昇した後の計測データとなっている。

5.3 熱赤外線映像測定結果

岩盤性状と温度の関係を検討するため、岩盤性状に関わる標点を設定し、その標点の経時的温度変化を調べることにした。表-1に岩盤性状に関わる10種類の標点を示す。また、標点の経時的な温度変化を図-12に示す。

図-12において注目すべき事項を以下に列挙する。

表-1 岩盤性状に関わる標点

標点	岩盤性状ほか
● a	オーバーハング状硬質岩盤
■ b	硬質岩盤
▲ c	風化帯との境界付近
◆ d	風化帯との境界付近
○ e	風化帯（真砂化進行）
□ f	オーバーハング状硬質岩盤
△ g	オーバーハング状硬質岩盤
+ h	湿潤域（風化ゾーン）
× i	湿潤域（表流水あり）
◇ j	斜面下方の転石・崩土

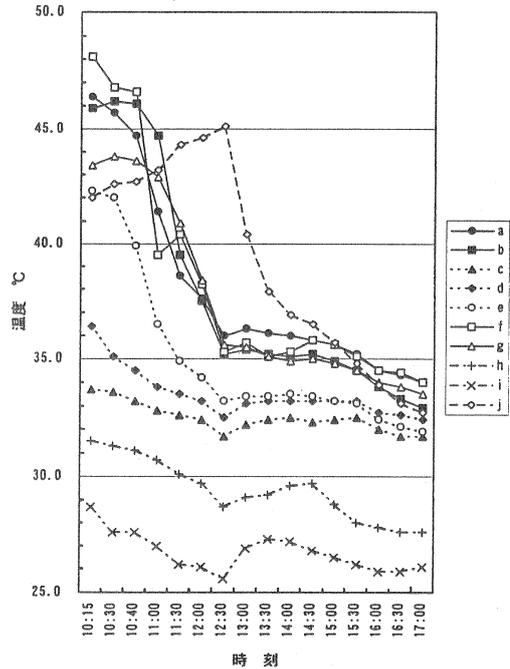


図-12 標点の経時的温度変化

硬質岩盤において、[a,f,g]オーバーハング状部と[b]平坦な部分では、日照条件の差による影響はあるものの、明瞭な差異は認められない。

[j]斜面下方の転石・崩土は、12:30くらいまで直射日光にさらされており、その影響で昼すぎまで温度上昇を示し、その後急激に温度が低下している。これらの転石・崩土の温度変化は、硬質岩盤[a,b,f,g]と夕方の時間帯で交差し、急激な低下を示しており、岩盤に比較して熱を放出しやすい性質が現われている。

[e]真砂化風化帯についても、風化帯との境界付近の [c,d]に比較して、夕方の温度低下傾向が強く、風化の進行に伴って岩盤が細片化し、熱放出が容易となった影響であろう。

[c,d]風化帯との境界付近の温度が全般に低いのは、午前中の日当たりが悪い位置にあったもので、岩質による差異を認めるまでには至らなかった。

[h,i]湿潤域は特に温度が低く、温度変化も小さいことから、他の部分とは明瞭に区別できる。

5.4 解析および考察

2次解析として多変量解析を含む統計処理を行ない、岩盤斜面に対する考察を行なう。2次解析の統計処理は、「5×5メッシュの平均値」を基本数値として実施する。

i)全時間帯の温度平均値 (図-13)

日当りの良かった領域で高温度を示すが、真砂化風化帯では、温度低下が急速なためさほど高い値を示さない。湿潤域が常に低温を保っていた状況も明瞭に現われている。

ii)全時間帯の温度の標準偏差 (図-14)

時間経過による各領域の温度変化の度合いが示されており、日当りの良かった領域が温度変化の度合いが強いことがわかる。したがって、凹凸の激しい岩盤斜面へ適用する場合には様々な角度からの検討が必要となる。

iii)最大温度上昇量 (図-15)

岩盤域と植生域の両者を明瞭に区分することができる。これは、岩盤域の温度上昇が直接的な日射の影響を強く受けるのに対して、植生域では昼過ぎからの気温上昇の影響が強いことを示している。

iv)最大温度低下量 (図-16)

日当りの良かった領域で高い値を示しており、温度が高くなった領域ほど大きな温度低下をしている。ただし、さほど高温でなかった風化帯域でもやや高い温度低下量を示している。この理由としては、硬質な岩盤域に比較して熱容量が小さく、素早く熱を放出した結果と考えられる。

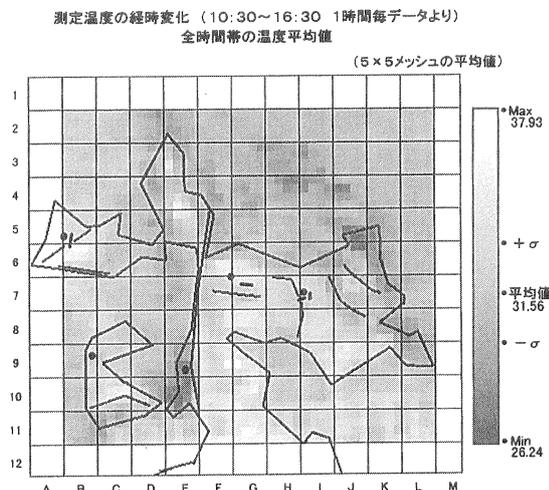


図-13 全時間帯の温度平均値画像

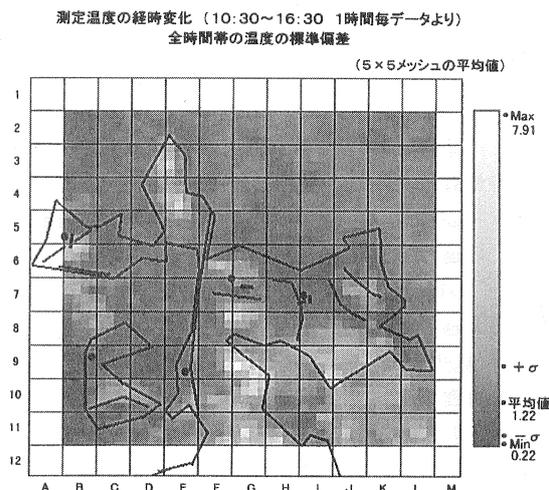


図-14 全時間帯の温度の標準偏差画像

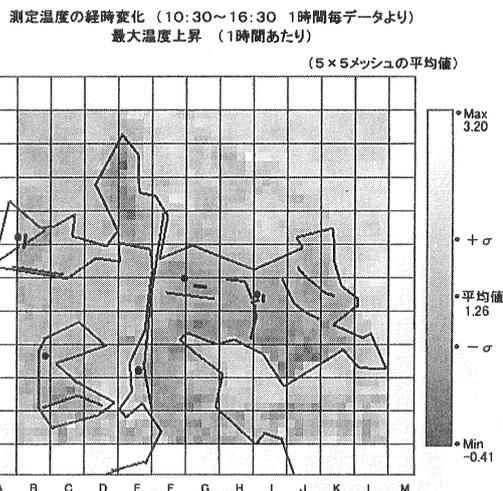


図-15 最大温度上昇量画像

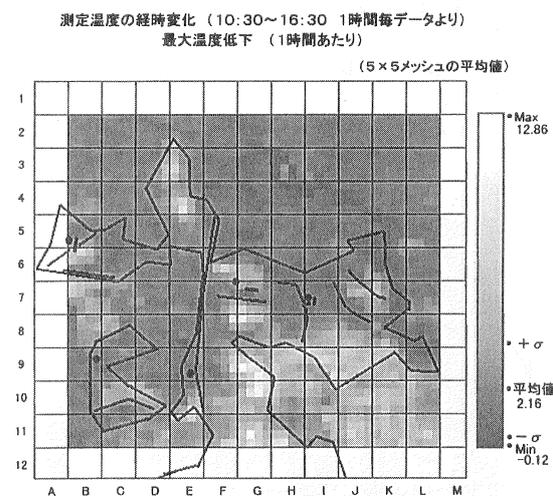


図-16 最大温度低下量画像

次に、5×5メッシュ平均値の時間別温度データによる主成分分析を実施する。これは、複雑な経時的温度変

化のパターンを主成分分析によって単純化し、岩盤斜面の性状を客観的に認識する可能性を検討するものである。第1,第2主成分スコアをそれぞれ図-17 および図-18 に示す。

図-17 の第1主成分のスコア画像では、高スコアの領域は常に周囲に比べて高い温度の領域であり、硬質岩盤および転石・崩土の領域を示している。スコアの低い領域は周囲に比べて低い温度の領域であり、湿潤域および風化の進行した領域を示している。

図-18 の第2主成分のスコア画像では、高スコアの領域は時間経過とともに低温域から高温域へ変化する領域であり、植生が繁茂している領域にほぼ一致している。また、針葉樹の低木域と広葉樹が主体の区域ではスコアが異なっており、多変量解析によって領域区分を行なえる可能性を示している。第2主成分は時間経過とともに高温域へ変化する性質を示すことから、そのスコアが低い領域には、常に低温である領域に加えて、温度低下の著しい領域も含まれている。つまり、初期には日照が良く高温域となったが、熱放出が早いために低温領域に変化した転石・崩土域や風化の進行した領域がこれに相当する。

5×5メッシュの平均値による
主成分分析結果 【第1主成分】

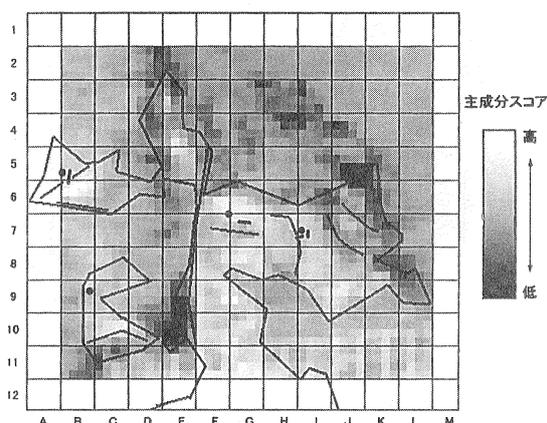


図-17 第1主成分スコア画像

5×5メッシュの平均値による
主成分分析結果 【第2主成分】

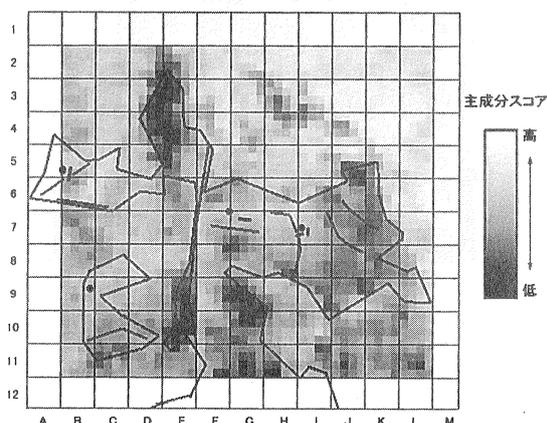


図-18 第2主成分スコア画像

熱赤外線映像法は対象物の表面温度を測定するものであるが、表面温度は熱伝導率や熱容量に左右されるものである。したがって、岩盤や土砂の性状によって温度変化の特性が異なり、熱赤外線映像でその性状を推測することが可能である。しかし、表面温度は日照などの周囲からの熱供給の影響が大きく、斜面形状や日射状況も検討データに含めておく必要がある。

硬質岩盤部と風化帯に関しては、この手法で区分することが可能であり、植生域と露岩域については明瞭な区分が可能であった。また領域区分における主成分分析の適用性についても、確認することができた。ただし、開口亀裂周辺の岩盤の不安定化に関しては、ブロックが50cm~1m以上と大きいため、今回の測定では判別できなかった。これは、数時間程度の測定期間中の岩盤斜面の温度変化は、表面からせいぜい10数cmの範囲の岩盤性状に起因するものであり、より大きなスケールの不連続面が存在しても、表面温度の日変化には差が生じないことが原因として考えられる。

6. まとめ

岩盤崩壊は前兆現象が少なく、突発的に発生するため、その予測は難しく、調査手法も確立していない。

今回の事例ではボアホールカメラ等による岩盤のモデル化と個別要素法による崩壊挙動の解析を行い、加えてリモートセンシング的手法である熱赤外線映像法の適用を検討した。

ボアホールカメラ等による不連続面の検出と岩盤ブロックのモデル化は非常に有効な調査手法といえ、今後も数値解析と併せて利用していくことが望ましいと考える。

熱赤外線映像法については、岩盤調査への初めての適用であり、計測方法に多少の問題があったと考えている。しかしながら、今回の結果を参考にし、計測時間や時期の設定方法を工夫し、斜面方向や日照条件、気温等のデータを総合的に検討すれば、新しい岩盤調査手法が確率できるのではないかと考える。今後は、さらに各種調査手法に改善を加え、総合的で精度の高い岩盤斜面の調査検討方法の確立を目指したい。

参考文献

- 1) 地質調査所：鳥取南部5万分の1地質図，1963.
- 2) 鳥取地方気象台：気象月表，1997.
- 3) Cundall,P.A. : A computer model for simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems, Symposium ISRM Nancy France Proceedings, Vol.2, pp.129~136, 1971.
- 4) (財)土木研究センター：熱赤外線映像法による吹付のり面老朽化診断マニュアル，1996.