

## (9) 赤外放射温度計による落石源の予測手法について

北海道開発コンサルタント(株) 高橋 輝明

### 1. まえがき

近年国道39号北海道土川町層雲峡峡谷で発生した岩石崩壊、また記憶に新しい国道 305号福井県越前海岸で発生した岩石崩壊のように、岩盤斜面崩壊による人的被害は跡を絶たない。このような岩石崩壊および巨大落石などを発生する岩盤斜面は急峻であることが多く、地すべり地のように直接調査を行うことは非常に困難な場合が多い。このため、従来、このような斜面の危険箇所予測は熟練技術者の目視判断に頼ってきたのが実情である。しかしかたに熟練技術者といえどもその判断にはかなりの主観が入るのは避けられない。当報文では、このような斜面調査の実情に対して、熱赤外線リモートセンシング手法による、より定量的な斜面の評価手法を提案しようとするものであり、主にその原理的考え方について述べた。

### 2. 新たな斜面評価手法の考察

落石・岩石崩壊を発生する岩盤斜面では前兆現象として“亀裂の開口化”が最も現れ易い現象と考えられる。このような開口化の現象をどのようにして捕らえることができるのであろうか。亀裂性岩盤をモデル化するに際して、検討を容易にするため四角柱からなる“柱状節理性”岩盤をモデルと考える(図-1)。

亀裂性岩盤斜面は亀裂面の組み合わせによる微視的な凹凸から構成される。即ち凹状隅角と凸状隅角の組み合わせからなる。このような凹凸面上において形状を支配要因とする状態変量、例えば表面温度にどのような分布特性が認められるであろうか。

このような観点からいくつかの平面の組み合わせからなる凹凸のある物体表面の温度を計ってみたところある特性が認められた。即ち、気温の変化に伴い凸状隅角は熱し易く冷め易いのに対し、凹状隅角は気温変化と共に変化するもの、温度変化は凸状隅角程顕著ではなく、また、周囲に比し温度の集中現象がみとめられた。亀裂性岩盤表面の開口化は図-1に示すような凹状隅角dから開口性隅角aへの変化とすることができる。この隅角aは外見上、凹状隅角であるが、微視的にみれば凸状隅角であり、このような開口化に伴う境界面条件の変化に伴い、表面温度分布特性にも差が生ずることが予想される。

以上の観点から図-1に示すような亀裂性岩盤モデルについて、数値解析、モデル実験等を行い、岩盤表面温度分布から亀裂の開口化を判定し得る可能性について検討を行った。

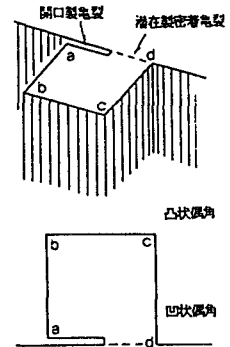


図-1 岩盤モデル図

### 3. 数値解析

計算モデルとして図-1に示す密着性亀裂を有する凹隅角と開口性亀裂を有する凸隅角を合わせもつ四角柱からなる柱状節理性岩盤モデルを用いる。計算は当社開発の有限要素法による熱伝導解析プログラム“HEAT”を用いた。

当プログラムは2次元問題の定常・非定常解析が可能で、内部発熱・潜熱を考慮できる。なお、有限要素法の定式化はGalerkin法を用い、時間積分はCrank-Nicolson法を併用している。

今回行った数値解析の条件は以下のとおりである。

- 1) 境界条件：地表面および開口性亀裂面は熱伝達境界、側面は断熱境界とする。底面は地中深度10mを温度一定境界とし年平均気温 $5.5^{\circ}\text{C}$ とした。
- 2) 地表面温度：試行計算では凍結融解期の温度条件を設定し、 $+5^{\circ}\text{C}$ ～ $-10^{\circ}\text{C}$ 間を正弦関数近似とした。本計算ではある地区の気象観測データを用いて計算を行った。
- 3) 熱定数：熱伝導率  $k = 4 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$  ( $=14.4 \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$ )  
熱容量  $\rho c = 0.5 \text{ g/cm}^3$   
熱伝達係数  $h = 2.78 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}^2\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$  ( $=1 \text{ cal/cm}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$ )  
含水比 15%

試行計算では計算間隔は1時間毎に行い、計算結果は約10日後で収斂している。本計算の結果として日変化(3時間毎)と月変化の一部を表-1に示す。

この結果、凍結融解期～冬期には開口性亀裂を有する偶角 a の温度は密着性亀裂を有する偶角 d よりも常に温度が低く、その差は有意であることが示唆される。但し、これには条件があり、当例のように2月から3月にかけて温度が大幅に急変した場合、この関係は逆転する。

表-1 数値解析結果

	単位 ℃											
	11/15						12/15					
	0:00	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	21:00	0:00	3:00	6:00	9:00
偶角 a	-0.2	-4.4	-4.3	-4.1	-4.1	-4.2	-5.2	-4.9	-4.6	-9.1	-13.1	-0.1
偶角 b	-1.7	-3.6	-4.5	-4.5	-4.5	-4.5	-4.7	-4.5	-4.4	-9.0	-12.7	+0.5
偶角 c	-1.5	-1.7	-1.8	-1.9	-1.9	-2.1	-2.4	-2.6	-4.3	-9.0	-12.6	+0.1
偶角 d	+1.0	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.6	-0.8	-0.8	-3.4	-8.4	-10.0	-2.5

#### 4. モデル実験

計算モデルと同一形状のコンクリート製供試体を作成した。試料は25×25×50 (cm) の角柱と75×75×10 (cm) の角板からなる。また、角柱の一面には開口性亀裂を模擬した切欠(5×12.5 (cm)) を設け、角柱、角板の各端面から25cmの断面内に各々16点・7点、計23点の温度センサー(BTS-100AT) を埋設した。測定は、冬期～凍結融解期にあたる2月中旬から3月下旬にかけてこれらの供試体を太陽の直射日光・風の影響等を避けるため木製覆いを被せ、野外に設置して行った。

測定結果の内、角柱の各偶角 a・b・c・d および気中温度の各測定結果を図-2 に示す。この結果から突出部の偶角 b・c は気温変化に速やかに追従し、凹状偶角 a

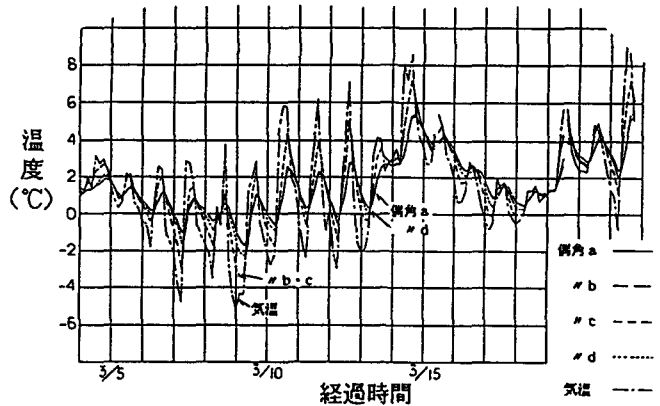


図-2 モデル実験測定結果

d は応答速度・変化が共に小さいことが明らかとなった。また、開口性偶角 a と非開口性偶角 d の温度差については、特に気温低下時に前者が後者に比し、常に低く有意な差が認められた。

#### 5. 考察

数値計算とモデル実験結果には相違点と共通点が認められた。相違点として、突出部の偶角 d・c の差が数値計算上、極めて明瞭であるのに対し実験結果ではほとんど変わらない結果が得られた。これは開口性亀裂部(偶角 a 相当部)の空隙の温度特性を計算上、一般大気と同一条件にしたためと考えられる。この空隙は開口化に伴い、その開口度に応じて通気性が異なり、一般大気と同一条件で扱い得ないのが実情であろう。この点で今後、計算上の改善の余地が残される。共通点としては開口亀裂性偶角 a が密着亀裂性偶角 d に比して、特に日気温の低下時に明らかに温度が低いという有意差が認められた。この結果は凹状偶角部の表面温度測定から、亀裂の開口化を推定し得る手掛かりを示唆するものである。

#### 6. 測定法

亀裂の開口性判定を目的として亀裂性岩盤斜面表層の温度測定を行う場合、対象斜面が落石・岩石崩壊を発生し易い急峻な斜面であることが多いところから、実測による方法は物理的に採用が難しい。このために考えられる方法が、赤外線リモートセンシング手法の応用である。この手法のために用いられる熱赤外線測定装置(赤外放射温度計)として種々の機種が市販されているが、筆者が行った検討結果から測定条件は冬期間が好条件となり、このために低温域で測定可能な機種が選定される。また、野外実験結果から、測定時間帯として、日気温変化の中でも低温時にあたり、且つ直射日光を回避し得る日の出前の時間帯が最も好条件と考えられる。

#### 7. あとがき

現在まで数例試みた野外測定では本稿で検討した測定原理の実証は可能なようである。但し、調査手法としての実用化にむけては今後多くの課題が残るようであり、検討を重ねて行きたい。なお、本稿中、数値解析については当社地質部福内康光氏の御協力を得た。記して御礼を申し述べる次第である。