

(79) 熱慣性による岩盤斜面の力学的安定性の評価

西松建設 正会員 ○荒井紀之、平田篤夫
東興建設 正会員 安田永昌
建設省 正会員 三木博史

Evaluation of rock slope stability by the thermal inertia

Noriyuki ARAI, Atuo HIRATA, Nishimatu Co., Ltd.
Nagamasa YASUDA, Toukou Co., Ltd
Hiroshi MIKI, Public Works Research Institute, MOC

Abstract

Authors developed a system which simply evaluated the rock slope stability based on the thermal inertia of the rock mass. The advantages of this system is that the two dimensional distribution of the modulus of elasticity can be evaluated in non-contact way by measuring the surface temperature of the rock mass with the infrared thermo viewer. First of all, the phenomenon that the temperature on the surface of the rock mass changes as a response to the change in the air temperature was explained by the thermal inertia. Next, the rock mass was modeled as a porous media and the theory and the method to obtain modulus of elasticity from the thermal inertia was formulated. In the case study, this method was applied for the slope of the limestone opencast mining, the modulus of elasticity was presumed and the stability evaluation was done.

1. はじめに

ダムや高速道路の建設、露天掘り鉱山等において様々な規模の岩盤掘削斜面が出現し、工事中の安全管理や工事後の維持管理は重要な問題である。岩盤斜面の安定性を評価するための計測項目として、従来より各種の原位置計測（岩盤変位計、地表面傾斜計、地中歪計、孔内傾斜計等）が行われてきた。これらの計測では、得られる情報が計器の設置箇所に限定されるとともに、危険斜面であっても人間が近づく必要がある。最近ではGPSや光波測量による変位計測が実施されるようになり、斜面全体の変位分布が計測できるようになってきた。著者らは、熱慣性により岩盤斜面の弾性率や安定性を簡易に評価するシステム（熱慣性法）の開発を行った。この手法の利点は、サーモビューア等で岩盤斜面の表面温度を測定することにより、非接触に斜面全体の岩盤評価が行える点である。本論では、まず熱慣性法の概要を説明し、次に多孔体モデルに基づき熱慣性と弾性率の関係を理論的に定式化する。事例解析では、石灰岩露天掘り鉱山の残壁を対象として本手法を適用し、岩盤のヤング率や斜面の安定性評価を行った結果について論じる。

2. 熱慣性による岩盤の弾性率評価

岩盤の風化に伴い、間隙率が増大するとともに密度が低下する。これに伴い、岩盤のヤング率や剛性率は連続的に減少する。一方、地表のように気温が周期的に変化する条件下では、岩盤表面の温度変化の大きさは、その熱慣性 $\sqrt{\rho c \lambda}$ に支配される。ここに、 ρ は密度、 c は比熱、 λ は熱伝導率である。熱慣性

が大きな物質ほど表面温度は変化しにくい。この熱慣性も岩盤の風化が進行するとともに、連続的に減少すると考えられる。風化した岩盤は、インタクトな岩盤にくらべ熱慣性が小さいため、表面温度変化が相対的に大きくなる。もし、熱慣性と弾性率の関係が定量的に与えられるならば、岩盤の熱慣性を計測することによりその弾性率を知ることが可能となる。

Fig. 1 に熱慣性法のフローを示す。まず、解析対象斜面の表面温度、斜面付近の気象計測を行う。岩盤の表面温度変化は、サーモビューアを利用すれば2次元的な温度情報を取得できる。対象斜面が凹凸に富み、局部的に日陰が生じる場合には、夜間計測を行う。計測期間は、6時間から1日程度である。計測後、斜面表層の熱収支モデルに気温、風速、日射量データを入力し、岩盤の熱慣性値を変化させて岩盤表面の温度変化を計算する。そして、実測された表面温度に適合する熱慣性を逆算する。次に、多孔体モデルにより熱慣性から岩盤のヤング率を求める。そして、得られたヤング率を使用してFEM等により斜面の掘削解析を行い、局所破壊や全体破壊に対する検討を行う。

次に、岩盤を多孔体でモデル化し、その熱慣性と弾性率の関係について検討する。球形気孔からなる均質多孔体の熱伝導率や弾性率の理論近似式は、個別にいくつかのものが提案されている。まず、多孔体の熱伝導率 λ の理論式として、Eucken¹⁾の式が知られている。

$$\lambda = \lambda_s \frac{1 + 2\varepsilon \left(\frac{1-K}{2K+1} \right)}{1 - \varepsilon \left(\frac{1-K}{2K+1} \right)} \quad (1)$$

ここに、 ε : 間隙率 ($0 \leq \varepsilon \leq 1$)、 $K = \lambda_s / \lambda_s$ 、 λ_s : 基質部の熱伝導率、 λ_s : 間隙中の気相の熱伝導率である。多孔体の熱慣性 I は、空気の熱慣性を無視すると、

$$I = I_s \frac{(1-\varepsilon)}{\sqrt{1 + \frac{1}{2}\varepsilon}} \quad (2)$$

ここに、 I_s は固相の熱慣性である。また、球形気孔からなる希薄分散系多孔体の弾性率の理論式²⁾として以下の式がある。

$$K = K_s \left\{ 1 - \frac{3K_s + 4G_s}{4G_s} \varepsilon \right\} \quad (3)$$

$$G = G_s \left\{ 1 - \frac{5(3K_s + 4G_s)}{9K_s + 8G_s} \varepsilon \right\} \quad (4)$$

ここに、 ε は間隙率、 K_s 、 K はそれぞれ固相と多孔体の体積弾性係数、 G_s 、 G は固相と多孔体の剛性率である。間隙率が大きくなるにしたがい気孔間の相互干渉が生じる。この場合の弾性率の算出方法として山本³⁾により NSC (new self-consistent) スキームが提案されている。これは、微小間隙率増分

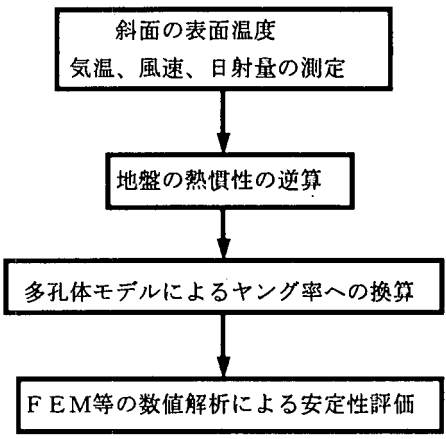


Fig. 1 熱慣性法による斜面安定性評価フロー

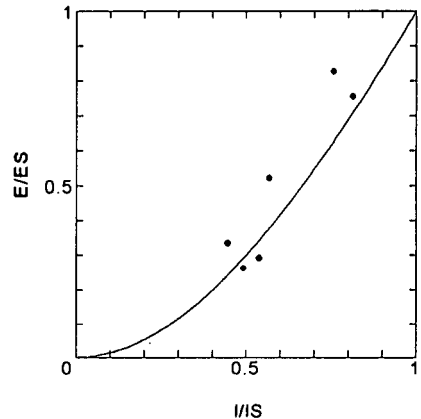


Fig. 2 多孔体の熱慣性とヤング率

I : 多孔体の熱慣性
 I_s : 固相の熱慣性
 E : 多孔体のヤング率
 E_s : 固相のヤング率

に対して希薄分散系多孔体の理論式より多孔体の K 、 G を求め、これらを再び (3) (4) 式中の K 、 G に代入し繰り返し計算して任意の間隙率に対する弾性率を計算する手法である。

多孔体の熱慣性とヤング率の関係は、間隙率を媒介変数として (2) 式と NSC スキームにより得られた弾性率を結びつけることにより、Fi

g. 2 のように与えられる。図中の丸印は、著者らが行った気泡モルタルを使用した室内実験結果⁴⁾をプロットしたもので、ほぼ理論曲線に沿い実験値が分布している。Fig. 2 により、岩盤の熱慣性からヤング率を知るためには、固相の熱慣性やヤング率が必要になる。これらの値は、現場で未風化に近い岩石試料が得られる場合には室内試験により求め、試料採取が困難な場合には既往の文献^{5),6)}中の値を使用する。

3. 石灰岩斜面に対する適用例

実験は、日鉄鉱業（株）羽鶴鉱山の露天掘り採掘場の残壁を利用して行った。採掘場はほぼ升状の凹地をなし、調査サイトはその内の北西向きの残壁である。Fig. 3 に調査対象斜面を示す。この残壁の斜面高は約 150 m、斜面幅は約 200 m、傾斜は約 45° である。高さ数メートルから 10 数メートル置きに小段が存在する。地質は、古生代のドロマイト、石灰岩等からなる。

現地調査は 1994 年 7 月 26 日夕刻～翌 27 日正午にかけて実施した。岩盤斜面の表面温度を調べるために赤外線画像を約 1 日かけて 1 時間おきに撮影した他、同時に気温、日射量、風速を測定した。また、岩石ブロック試料を採取し、1 軸圧縮試験や超音波速度試験を行った。

Fig. 3 中に太枠で囲った領域の岩盤を対象として解析を行った。Fig. 4 に赤外線画像から得られた斜面平均温度を示す。また、Fig. 5 に 30 分幅で移動平均した気温と風速の時間変化および Fig. 6 に 10 分毎に積算した日射量の時間変化を示す。撮影時の気象条件は晴れ一時曇りで、計測期間中の気温変動幅は約 9℃、風速は 3～6 m/s であった。対象斜面は北西向きのため日射が当たりにくく、斜面表面の温度は主として外気との熱伝達により支配されると考えられる。

熱画像や気象計測から得られたデータを使用し、羽鶴鉱山の残壁を構成しているドロマイトの熱慣性値の逆算を行った。Fig. 7 に数種類の熱慣性に対するのり面表面温度の計算値と、熱画像による測定値をあわせて示す。

斜面の表面温度測定値を最もよく満足する熱慣性値は、以下の式で表される誤差が最小になる値として求めた。この結果、 $36 \text{ kcal/m}^2 \text{ Ch}^{0.5}$ の値が得られた。

$$\sum_{i=1}^{24} (\theta_i^{cal} - \theta_i^{obs})^2$$

ここに、 θ_i^{cal} : 時刻 t における表面温度計算値、 θ_i^{obs} : 時刻 t における表面温度測定値

最適計算値と熱画像による測定値のグラフを比較すると、7 月 27 日の 5 時から 8 時にかけて最大 1.

Table 1 未風化ドロマイトの固相の物性値

密度	2.685 g/cm ³
比熱	0.2038 kcal/kg·°C
熱伝導率	4.29 (3.2～5.0) kcal/m·h·°C
熱慣性	48.45 (41.85～52.31) kcal/m ² h ^{0.5} ·°C
ヤング率	79.4 (57.6～104) GPa

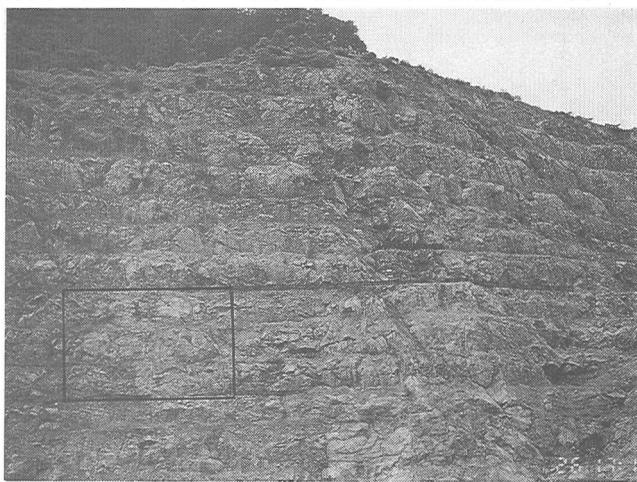


Fig. 3 実験サイトの石灰岩斜面

太枠は、解析対象域を示す。

2℃の誤差があるものの、温度変化パターンは概ね一致していることがわかる。

球形気孔からなる均質多孔体モデルにより得られた熱慣性値を用いて弾性率の換算を行なった。ただし含水の影響を無視した。解析対象域の岩盤表面には湧水が認められず、この仮定はほぼ妥当と考えられる。未風化ドロマイトの固相の熱慣性 I_s は、岩石の熱物性試験を行っていないため既往文献^{5),6)}中の値を使用した。また、固相の密度やヤング率は岩石試験から得られた値を使用した。これらの値をTable 1にまとめて示す。

石灰岩やドロマイトは、花崗岩等にくらべ岩石組織の不均質性が大きく、表中の物性値も括弧内に示すようにある幅をもって分布している。未風化ドロマイトの固相の熱慣性値およびヤング率のばらつきを考慮して、Fig. 1に示した関係により残壁を構成しているドロマイトのヤング率を換算したところ、48(31～80)GPaの値が得られた。

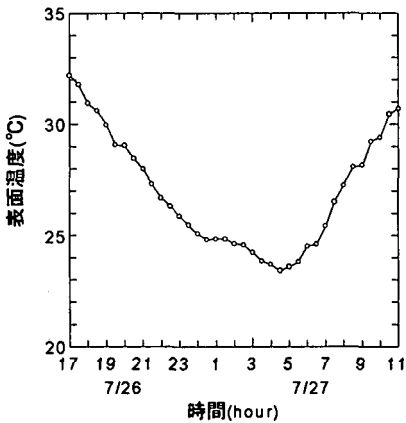


Fig. 4 斜面表面温度

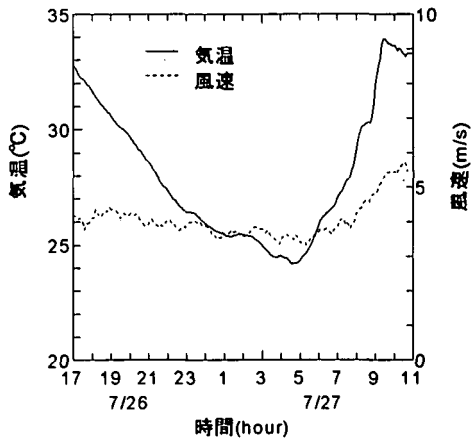


Fig. 5 気温と風速

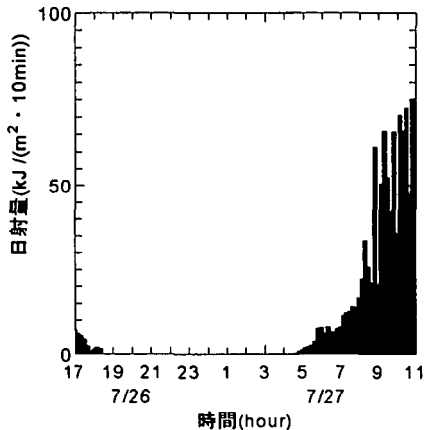


Fig. 6 日射量

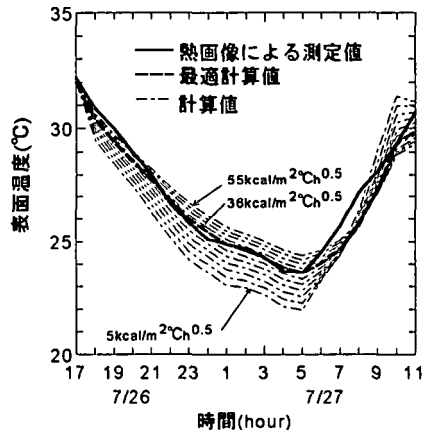


Fig. 7 熱慣性の逆算

次に、得られたヤング率の最小値を使用してFEMにより斜面の2次元掘削解析を行い安定性評価を行った。破壊基準として、モール・クーロンの基準を使用した。ただし、強度定数に対し以下の仮定を行った。岩盤の劣化にかかわらず内部摩擦角 ϕ は一定とし、粘着力 c は新鮮な岩石片の値からゼロまで、岩盤のヤング率の低減比 E/E_0 に比例して変化するとした。この仮定は、実際の風化現象を単純化しすぎてい

ることはいないが、第1近似として採用した。Fig. 8、Fig. 9に解析結果の一例を示す。Fig. 8は残壁の変位図であり、変位の最大値はのり先において12.5mmである。Fig. 9は、局所安全率のコンター図であり、最小安全率はのり先において1.51であり、斜面全体としては安定を保持していると判断される。

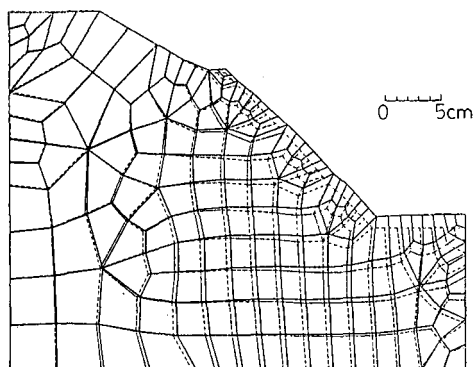


Fig. 8 変位図

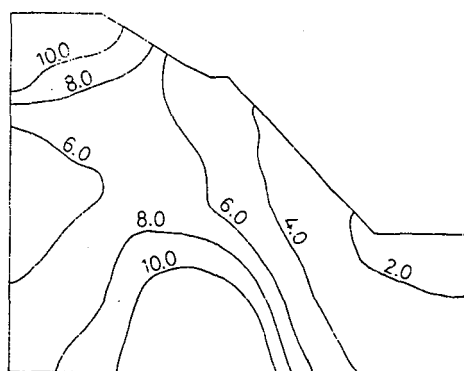


Fig. 9 局所安全率コンター図

5. おわりに

以上、熱慣性により岩盤斜面の弾性率や安定性を簡易に評価するシステム（熱慣性法）について述べた。この手法の利点は、サーモビューア等で岩盤斜面の表面温度を測定することにより、非接触に岩盤評価が行える点である。本論では、多孔体モデルに基づき熱慣性と弾性率の関係を理論的に定式化するとともに、熱慣性法を石灰岩斜面に適用し、岩盤のヤング率や斜面の安定性評価を行った。今後は、計測データを積み重ね、適用可能な岩石種、含水の影響、不連続性岩盤への適用性について検討していきたい。

最後に、原位置試験を行うにあたり、日鉄鉱業株式会社の関係各位には多大な御協力を賜った。記して感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1) Eucken, A.: Die Wärmeleitfähigkeit keramischer feuerfester Stoffe, Forsch. Gebiete Ingenieurw., Forschungsheft No. 353, 1932.
- 2) Sato, Y.: Velocity of Elastic Waves Propagated in Media with Small Obstacles, Bull. Earthquake Res. Inst., No. 30, Part 3, pp. 179-190, 1952.
- 3) Yamamoto, K. et al.: A Theoretical Method for Determination of Effective Elastic Constants of Isotropic Composites, Sci. Rep. Tohoku Univ., Tohoku Geophys. Journ., Vol. 28, No. 1, pp. 47-67, 1981.
- 4) 荒井紀之他: 多孔体の熱慣性と弾性率の関係に関する研究, 土木学会第49回年次学術講演会, III-A, pp. 686-687, 1994.
- 5) Handbook of Physical Constants - Revised Edition, The Geological Society of America Memoir 97, p. 486, 1966
- 6) Helgeson, H.C. et al.: Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals, Amer. Jour. Sci., Vol. 278-a, 1978.