

熱慣性法による風化花崗岩切取斜面の弾性率評価

建設省土木研究所	正会員	三木博史
東興建設	正会員	安田永昌
西松建設	正会員	○荒井紀之、稲葉 力

1. はじめに

著者らは、熱慣性により岩盤斜面の弾性率や安定性を安全に効率よく評価するシステム(熱慣性法: TIM)の開発を進めている。熱慣性とは、 $\sqrt{\rho c \lambda}$ で定義される物理量である。ここに、 ρ は密度、 c は比熱、 λ は熱伝導率である。Fig. 1に熱慣性法のフローを示す。このシステムでは、まず対象斜面の表面温度変化を熱赤外線映像装置等で計測する。これと同時に対象斜面付近で気温、風速等の測定を行う。計測期間は、6時間から1日程度である。次に、これらの計測データより斜面の熱慣性を逆算し、多孔体モデルに基づき弾性率(ヤング率やポアソン比等)に変換する。対象斜面のヤング率が得られた後は、FEM等の数値解析を行い安定性評価を行うことができる。この手法の利点は、非接触に斜面全体の岩盤評価が行える点である。これまでの研究により、多孔体モデルに基づき熱慣性と弾性率との関係を理論定式化し、気泡モルタルを使用した室内実験によりその妥当性を確認した¹⁾。また、実岩盤を対象とした現場実験として、石灰岩露天掘り鉦山の残壁の安定性評価を行ない、具体的な適用例を示した²⁾。本論文では、熱慣性法を風化花崗岩からなる切取斜面に適用しその弾性率評価を行うとともに、同時に実施した弾性波探査より動的な弾性率を求め、両者を比較した結果について論じる。

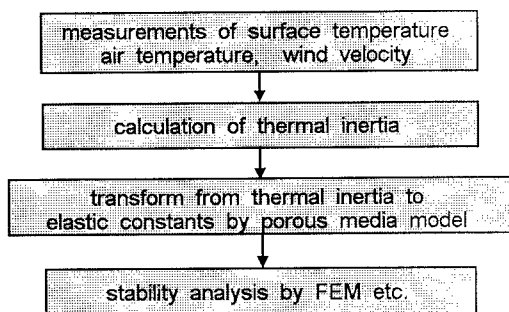


Fig. 1 Flow of thermal inertia method

2. 実験斜面と計測方法

Fig. 2に実験対象斜面の平面図を示す。地質は、強風化花崗岩であり、いわゆるまさ土に相当する。のり面の勾配は45°、のり直高約7mであり、中位に小段が存在する。北東向きであるために、日中は日の出後の数時間を除き日陰部に相当する。のり面の表面温度計測は、熱赤外線映像装置を使用し、午後1時から翌日の正午にかけて実施した。気温は、白金抵抗温度計を通気性のよいステンレス容器中に収め計測した。また、風速は熱線風速計により計測した。地盤の熱慣性値は含水量の影響を受けるため、計測期間中に原位置密度試験(砂置換法)を行うとともに含水比測定用の試料を採取した。また、対象斜面の動的なヤング率を得るために、Fig. 2中に示す位置において弾性波探査を行った。感振器の間隔は1m、測線長は23mである。

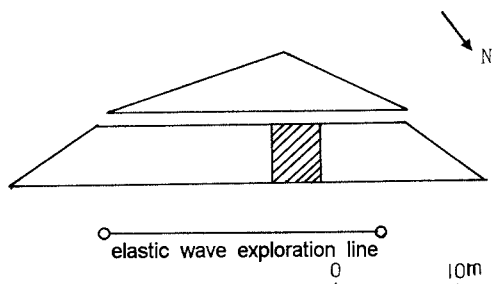


Fig. 2 Test site (weathered granite cut slope)

3 計測と解析結果

Fig. 3に熱慣性の逆算結果を示す。対象斜面の表面温度の測定値は、Fig. 3中において実線で描かれている。また、図中の計算値(破線)は地盤の熱慣性値を $5 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \text{h}^{0.5} \text{ } ^\circ\text{C})$, $[349 \text{ J}/(\text{m}^2 \text{s}^{0.5} \text{ K})]$ 刻みで変化させ、各々の熱慣性値に対してのり面の表面温度を1次元熱伝導解析により求めたものである。Fig. 3中の表面温

度の測定値と最適な計算値のグラフを比較すると、10/27の午前7時以後の一致度がよくない。この時間帯は、対象斜面に直達日射が当たる時間帯に相当し、現状のモデルにおいて日射の影響がうまく表現されていないためと推定される。そこで、最適な熱慣性値は、夜間について表面温度の計測値と計算値の比較を行い、その誤差の自乗和が最小になる値として求めた。この結果、最適な熱慣性として $13 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \text{ h}^{0.5} \text{ } ^\circ\text{C})$, $[910 \text{ J}/(\text{m}^2 \text{ s}^{0.5} \text{ } ^\circ\text{K})]$ を得た。熱慣性法の適用時間帯として、日中にくらべ夜間のほうが、日射の影響（斜面の凹凸による日射強度の違いや蒸発）を軽減できるため計測に有利と考えられる。

次に、多孔体モデルにより熱慣性からヤング率を換算した結果をFig. 4に示す。このグラフよりヤング率 E の絶対値を得るためには、固相の熱慣性 I_s とヤング率 E_s が必要である。これらの値は、既往文献²⁾中の値を参考として、 $I_s=33.6 \sim 41.7 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \text{ h}^{0.5} \text{ } ^\circ\text{C})$ $[2.35 \times 10^3 \sim 2.91 \times 10^3 \text{ J}/(\text{m}^2 \text{ s}^{0.5} \text{ } ^\circ\text{K})]$ 、 $E_s=3.4 \times 10 \sim 5.7 \times 10 \text{ GPa}$ とした。まず飽和度 $S_r=0\%$ として当該のり面を構成している風化花崗岩のヤング率を換算する。 $I/I_s=0.31 \sim 0.39$ より、これに対応するヤング率比 E/E_s は、Fig. 4中の $S_r=0\%$ の理論近似曲線より $0.13 \sim 0.19$ となる。したがって風化花崗岩のヤング率 E は、 E/E_s に E_s を乗じ、 $4.4 \sim 11 \text{ GPa}$ となった。一方、弾性波探査の結果、斜面表層（ $0 \sim 50 \text{ cm}$ ）の V_p は約 400 m/s であり、これより動ヤング率を計算した結果 $2.0 \times 10^2 \text{ MPa}$ を得た。ただし、動ポアソン比 ν_d を 0.4 とした。熱慣性法により得られたヤング率と動ヤング率を比較すると、前者は後者の $22 \sim 55$ 倍となった。一方、原位置密度試験結果より、計測対象斜面近傍のまさ土表層の飽和度は約 $30 \sim 40\%$ であった。Fig. 4中に示すように飽和度 $S_r=40\%$ に対応する理論近似曲線よりヤング率を換算した結果 $4.8 \times 10^2 \sim 2.5 \times 10^3 \text{ MPa}$ となり、より動ヤング率に近い値となった。

4. まとめ

熱慣性法を風化花崗岩からなる切取斜面に適用し、以下の結果が得られた。

1. 熱慣性法によるヤング率 E と弾性波速度から推定した動ヤング率 E_d を比較した結果、乾燥多孔体モデルによる E は E_d の約 $22 \sim 55$ 倍の値となり、飽和度を考慮した多孔体モデルでは E は E_d の約 $2.4 \sim 13$ 倍となった。したがって、湿潤岩盤に対しては飽和度を考慮することによりヤング率の換算精度が向上する。
2. 熱慣性法の適用時間帯は、夜間が適している。

なお、この研究は建設省土木研究所との官民共同研究の一環として行ったものである。

1) 荒井, 平田, 安田, 三木: 多孔体の熱慣性と弾性率に関する研究, 土木学会第49回年次学術講演会, III-A, pp686-687, 1994.

2) 荒井, 平田, 安田, 三木: 熱慣性による岩盤斜面の力学的安定性の評価, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp381-385, 1995.

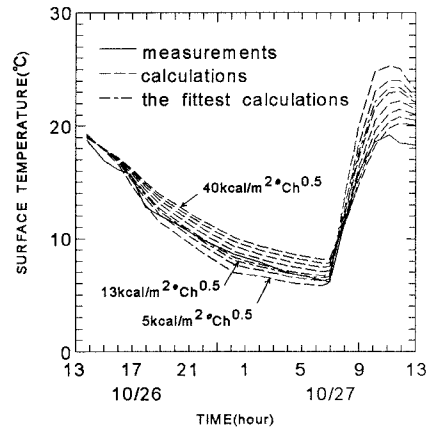


Fig. 3 Calculation of thermal inertia

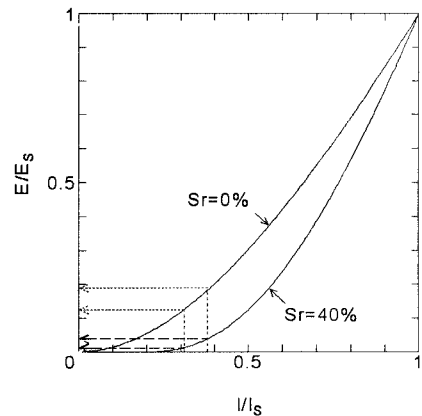


Fig. 4 Transform from thermal inertia to Young's modulus

I : Thermal inertia of porous media
 I_s : Thermal inertia of solid face
 E : Young's modulus of porous media
 E_s : Young's modulus of solid face
 S_r : Degree of saturation