

Ⅲ-A289

亀裂を有する岩盤の熱伝導率に関する解析的考察

東北大学 正会員 朴 燦 燦

東北大学 正会員 柳澤 栄司

東北大学 正会員 風間 基樹

1. はじめに

亀裂を有する岩盤の熱伝導率に及ぼす要因として、一般に構成材料の熱伝導率以外に間隙と岩部の構成割合が挙げられる。しかし、同一の間隙率の岩盤でも亀裂の大きさ、形状、配列の状態などが全体岩盤の熱伝導率に影響すると考えられる。そこで、本研究は規則性亀裂を有する飽和した岩盤に対して、熱伝導率に及ぼす上記の影響要因を考え解析し、その傾向を考察する。

2. 計算の手法

岩盤中の熱移動は岩部と間隙で、それぞれ熱伝導によって熱移動すると考え、式(1)の(a)、(b)のように岩部と間隙の熱伝導方程式を別々に用いて、有限要素法による数値解析を行う。有限要素法の定式化の方法としては重み付き残差法を基にした近似解法で、重み関数に区分多項式を用いるガラーキン法を用いて定式化した。ただし、亀裂と岩部の境界は温度が同一であると考えられる。

$$\rho_s \cdot C_s \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (a) \quad \rho_f \cdot C_f \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_f \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (b) \quad (1)$$

ここで、 ρ は密度、 C は比熱、 T は温度、 t は時間、 λ は熱伝導率、添字 s と f は岩盤と間隙水を表わしている。また、岩盤全体の熱伝導率を求めるために式(1)より計算された温度分布を式(2)に代入し熱流方向の熱伝導率を求め、その結果を用いて同一の間隙率の岩盤で、異なる亀裂の形状、配列の状態、その大きさが岩盤全体としての熱伝導率に及ぼす影響について考察を行った。

$$\lambda_y = \rho \cdot C \frac{\partial T}{\partial t} / \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

ここで、 y は熱流方向の距離、岩盤全体の密度 ρ は $n \cdot \rho_s + (1-n) \cdot \rho_f$ 、比熱 C は $C_s \cdot m_s + C_f \cdot m_f$ で求めたものである。ただし、 n は間隙率、 m_s と m_f は単位体積当りの岩盤と間隙水の質量比である。

3. 解析のモデル

亀裂の大きさ、形状、配列の状態が亀裂を有する岩盤の熱伝導率に及ぼす要因と考え、その各要因の影響を考察するために図-1のようなモデルを設け計算を行った。計算領域は $30 \times 30 \text{ cm}$ で、961節点、1800要素に分割し、面 a は連続境界面、面 b は温度勾配を与えるために熱源とし 50°C を保つようにした。領域の初期温度は 20°C 、岩部の熱伝導率は $4.32 \text{ Kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ \text{C}$ 、亀裂中は水で充填しているとし、熱伝導率を $0.5 \text{ Kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ \text{C}$ とした。各要因別の計算モデルは次のようである。

①亀裂の数／ 計算領域中に、縦の長さが 5 cm 一定で横が $1, 2, 3, 4, 5 \text{ cm}$ の亀裂か 0.3 の間隙率で分布するモデルに対して計算を行う。一定の領域なら亀裂が大きいほどその数は少なくなる。熱流と直角面の亀裂と岩部の占める割合は同じである。

②亀裂の形状／ 計算領域中に横縦比($c=b/1-a$)が $2.67 (3 \times 8 \text{ cm})$ 、 $1.5 (4 \times 6 \text{ cm})$

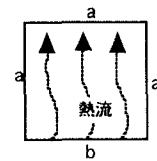


図-1 計算モデル

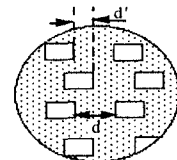


図-2 亀裂の配列モデル

Heat, Rock Mass, Thermal Property, Finite Element Method

〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 TEL 022-217-7438 FAX 022-217-7435

、0.67 (6×4) , 0.375 (8×3) , 0.2 (10×2cm) の亀裂が0.17の間隙率で分布する各場合について計算を行い、形状が及ぼす熱伝導率への影響を考察する。
③亀裂の配列／ 図-2のような熱流に対して前後列の亀裂の配列が重なる場合、その重複程度と熱伝導率の関係を検討するために、 d'/d を0～0.8に変えながら計算を行う。亀裂の大きさは3×5cm、 d は6cm、間隙率は0.3で一定である。

4. 解析結果

同一の間隙率の条件で亀裂の数が異なる場合、亀裂の数が多いほど熱伝導率は小さい傾向を表わしている。等温線図をみると亀裂の数が多い場合は、熱源から同じ距離に離れた面での温度の高低は小さく、亀裂が大きく数が少ない場合はその高低が大きい状態で温度の伝導が進む。領域中で、各場合の直列と並列伝導の割合は同じであるが亀裂の数が多いとy方向の亀裂の表面積が大きくなるので岩部から亀裂への熱伝導が大きくなり、熱流方向の熱伝導率は小さくなると考えられる。

図-5の亀裂の形状と熱伝導率関係は、縦横比が大きいほど図-3のaの部分が大きくなり、領域全体での岩部のみによる伝導が大きくなり、熱伝導率は大きくなる。図-5の黒丸は直列-並列伝導式で計算したものであるが縦横比が小さいほど解析結果より小さい熱伝導率となる。これは亀裂の存在により領域中でy方向以外にx方向でも温度勾配ができ熱伝導するが、直列-並列式によってはそれが表現できないためである。

亀裂の配列と熱伝導率の関係は、前後列の亀裂配列が重なる部分の大きいと、全体領域中で、図-3のbの部分は小さくなるが1-aの部分は大きくなる。そのゆえに領域全体で、直列伝導の部分が増え、熱伝導率は小さくなると考えられる。しかし d'/d が大きくなるにつれ直列-並列式による熱伝導率との差は広がる。その原因として亀裂の形状と熱伝導率関係と同じようにx方向の熱伝導による影響と考えられる。

4. おわりに

亀裂を有する岩盤の熱伝導率は間隙率の他に、亀裂の形状、表面積、配列、方向性、亀裂と岩盤の熱伝導率の差などにも大きく影響される。また、均質な材料と違って熱流方向以外の熱伝導が熱流方向の熱伝導に影響を及ぼすと考えられる。今後、実験と解析を併用し、詳細な検討を行う予定である。

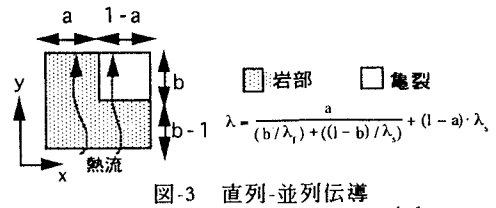


図-3 直列-並列伝導

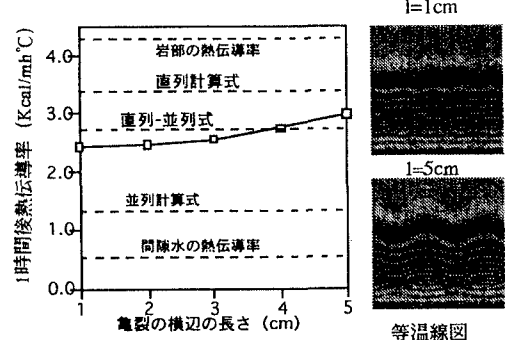


図-4 亀裂の数と熱伝導率

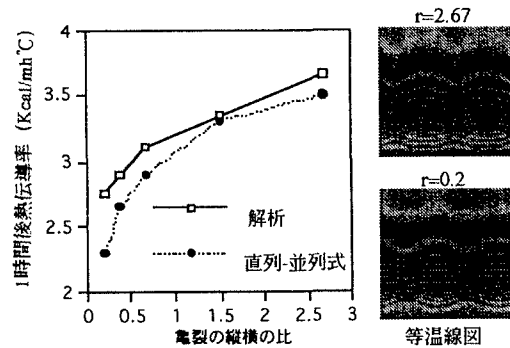


図-5 亀裂の形状と熱伝導率

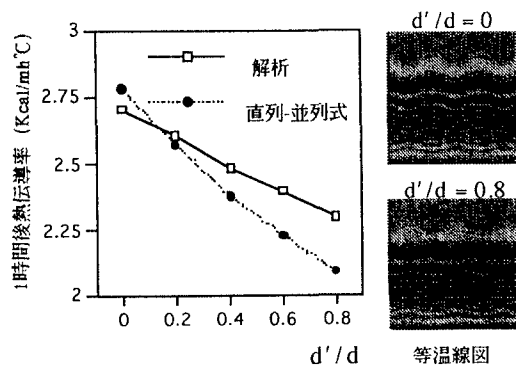


図-6 亀裂のの配列と熱伝導率