

III-217

凍結融解試験における実岩盤の熱伝導特性

西松建設技術研究所 正員 石山宏二, 正員 野本 寿
 埼玉大学工学部 正員 渡辺邦夫, 正員 山辺 正

1. はじめに

本研究では、多数のき裂が複雑な形状で交錯する実岩盤を対象とし、原位置における凍結融解試験を繰返し実施しながら岩盤の伝熱および変形特性を調べている。その内、本報告では凍結過程における熱伝導特性に着目し、試験サイトの岩盤特性を均質・連続体モデルと仮定して、有限要素法による三次元非定常熱伝導解析を行った。そして計測された温度分布の変化と比較し、岩盤の伝熱特性の把握、および数値解析の適用性について検討した。

2. 原位置試験サイトとそのモデル化

原位置試験サイトの地質は花崗閃緑岩であり、主なき裂は図1中に実線で示すCa1~Ca3の方解石で充填されたものと、破線で示す緑泥石で充填されたものに大別できる。詳細は別報¹⁾を参照されたい。岩盤中の伝熱特性を調べるにあたって、本研究ではCa1とCa2のき裂による影響に着目し、温度測線L1,L3を設けた。観測孔内には1m間隔でT型熱電対が設置され、岩盤中の非定常温度分布を計測する。また、き裂の影響を比較的受けにくい測線L2を設定し、伝熱特性の違いを検討した。凍結過程の低温熱源は図中○で示された9本の凍結管で、管内に-20℃のブライン液を循環させた。融解過程では液の循環を停止させ、8℃前後に保たれているサイト周囲の岩盤および大気のを熱源とした。

数値解析を行う上で、試験サイトおよびその熱物性値をモデル化した。試験サイトの解析対象領域を図2に示す。太線で表す5本の凍結管を含む凍結管列軸面、およびそれと直交する凍結管を含む面をそれぞれ断熱境界とした。また、図中の下面を含む隠れた3つの境界面をサイトの平均岩盤温度8℃で温度一定とし、上面を熱伝達境界とした。凍結管上の各節点はブライン温度の-20℃一定に設定した。次に、岩の熱物性値(熱拡散率)のモデル化を試みた。まず、図3に示すように試験サイトの岩盤が飽和し、間隙率が3%であると仮定した²⁾。そして、水(氷)の熱拡散率と実験から得られた乾燥供試体の熱拡散率を基に、間隙率により体積平均して湿潤状態の岩盤の熱拡散率を近似した³⁾。

また、氷点近傍における水の

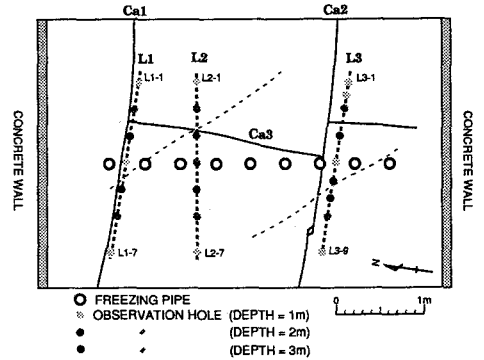


図1 原位置試験サイト平面図

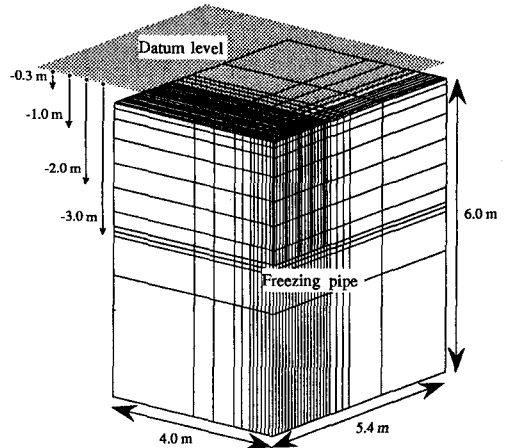


図2 解析対象領域モデル

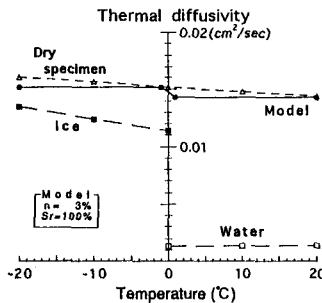


図3 熱物性値の評価モデル

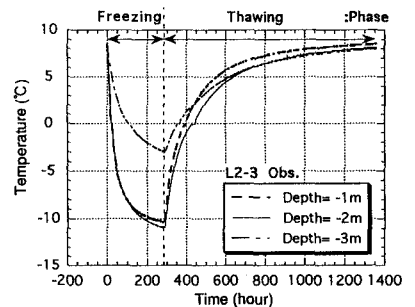


図4 凍結融解に伴う岩盤内温度の経時変化

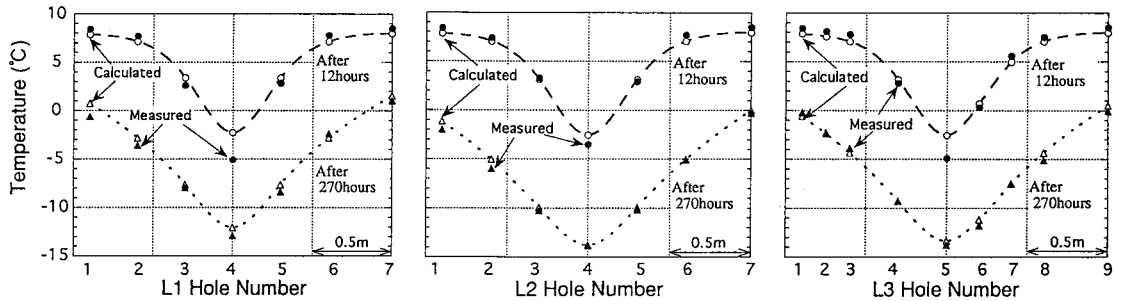


図5 岩盤中の深度1mにおける温度の非定常空間分布

物性値の不連続、本試験の温度範囲では氷点の前後それぞれにおいて熱物性値の温度依存性が極めて小さいことから図中実線で示すような熱拡散率のモデルを数値解析に適用した。

3. 熱伝導解析結果

凍結融解試験時に計測された代表的な岩盤内温度の経時変化を図4に示す。図から0℃近傍において水の相変化に伴う潜熱の影響が見られる。そこで、本解析ではこのようなエネルギーに不連続が生じる内部境界値問題を数値解析的に解くことができるエンタルピー法を採用し、岩盤中に含まれる全水分の凍結潜熱を考慮した⁴⁾。また図から深度2mの温度は深度1mに比べて低いことがわかる。これは岩盤表面からの熱伝達の影響と考えた。そこで、その熱伝達率を評価するために大気中の温度境界層厚さ δ を表1のようにそれぞれ仮定して解析を行い、凍結開始から270時間後における測線2の計測結果と比較検討した。その結果、深度方向における温度の高低順序を満足し、かつ計測値に近い値を示した $\delta=1\text{cm}$ とした時の熱伝達率 $0.21\text{cal}/\text{cm}^2\text{h}^\circ\text{C}$ を本解析では使用することにした。

凍結過程を開始してから12時間および270時間経過した時の各測線の深度1m測点にて計測された岩盤温度とその解析結果の比較を図5に表す。図から解析結果は岩盤中の温度の非定常な空間分布変化を良く再現しており、本解析の妥当性が示されたと考える。特に測線2と測線1,3の結果を比較した場合、その再現性にき裂の影響と考えられる明らかな差は見られなかった。図6は本解析に

より凍結開始後の凍結前線の進展状況を推定し、そのコンターを解析領域上に三次元表示したものである。凍結管を図のように配置した場合における熱伝導特性として、凍結初期における各凍結管周りの前線の接合、岩盤表面からの熱流入、および解析領域面上での楕円形状な凍結域の広がりが読み取れる。

4. おわりに

本報告では実岩盤の凍結過程における温度の非定常な空間分布変化の把握、そしてそれに対する数値解析の適用性を検討し、その妥当性を示した。今後、融解過程における熱伝導解析の適用性の検証も進めていく。

参考文献 1)石山 他：釜石鉱山における岩盤凍結・融解試験（その1），第24回岩盤力学に関するシンポジウム論文集，pp.96-100，1992。2)武田 他：原位置凍結・融解試験における温度分布特性とその解析，第25回岩盤力学に関するシンポジウム論文集，pp.226-230，1993。3)山辺 他：原位置凍結融解試験に伴う地下き裂の熱応力学動解析，第9回岩の力学国内シンポジウム論文集，pp.211-216，1994。4)W.D.Rolph III and K.J.Bathe：An efficient algorithm for analysis of nonlinear heat transfer with phase change，Int.J.Num.Meth.Engng.，Vol.18，pp.119-134，1982。

表1 熱伝達率の評価

Observation Hole No. and Depth	Measured Temp. ($^\circ\text{C}$)	Calculated Temp. ($^\circ\text{C}$) using of thermal boundary layer δ		
		$\delta = 3.0\text{ cm}$	$\delta = 1.0\text{ cm}$	$\delta = 0.5\text{ cm}$
L2-1-1	-2.0	-1.99	-1.15	-0.37
L2-2-1	-6.0	-6.00	-5.05	-4.18
L2-2-2	-6.9	-5.51	-5.37	-5.27
L2-3-1	-10.3	-10.75	-9.95	-9.24
L2-3-2	-10.8	-10.34	-10.24	-10.14
L2-3-3	-2.9	-2.40	-2.38	-2.35
L2-4-1	-13.9	-14.33	-13.80	-13.32
L2-4-2	-14.8	-14.07	-14.00	-13.93

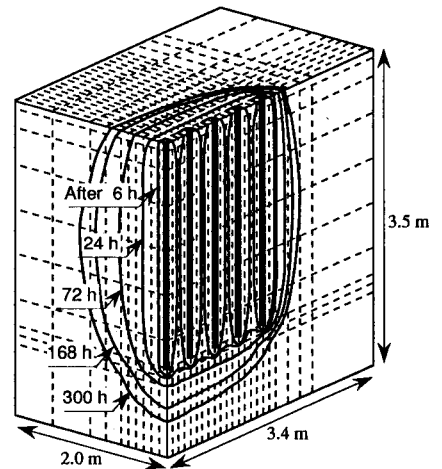


図6 凍結前線の進展過程