

(21) 岩盤の凍結融解に伴う熱・変形特性に関する基礎的研究

埼玉大学工学部 山辺 正・渡辺邦夫
西松建設技術研究所 野本 寿・石山宏二

Thermal and Mechanical Properties of Rocks under Freezing Atmosphere

Saitama University Tadashi YAMABE, Kunio WATANABE
Nishimatu Construction Co., Ltd. Toshi NOMOTO, Koji ISHIYAMA

ABSTRACT

Mechanical properties of rocks are greatly influenced by the external thermal conditions. Uniaxial and triaxial compression tests are conducted for controlled temperatures. In order to maintain the iso-thermal conditions of test specimens, confining pressure is controlled by constant thermal devices. The results obtained by these element tests show that the strength increases with decreasing the temperature. Freezing experiments in laboratory was conducted for the rectangular specimens with the center hole. The rectangular specimens which have a discontinuities are also used in this experiments. Two kind of discontinuities are induced. One is made by diamond saw and the other is by static rock breaker using shape memory alloy. It is clarified that the temperature contour map for the specimens with discontinuities made by diamond saw has an anisotropic characteristics. Numerical procedures are also presented to express a thermal behaviour of these experiments.

1. はじめに

近年、地盤内の熱移動現象を解明した上で安定解析を実施する必要性が高まりつつある。熱環境として、高温側では熱水の地下貯蔵、地熱開発、放射性廃棄物の地層処分などの分野、低温側では低温液化ガスの岩盤内貯蔵、超伝導電力設備、寒冷地における凍結融解などを対象とした研究が進められている。これら岩の熱的性質を求めるための試験は、岩盤内の温度分布を求め岩盤の安定解析を行う際に必要となる。このように、地下での熱移動現象に対する興味が増すにつれ特に硬質岩盤を対象として、熱源が岩に与える影響を実験的・解析的に解明しようとする研究¹⁾や、長時間にわたる連成現象に関する予測の必要性から、熱・応力・浸透の連成現象を取り扱った解析的研究²⁾が進められている。

本研究では比較的均質な地盤を構成する堆積軟岩と花崗岩を対象として低温側の熱環境を与えたときの基本的な物性の変化や亀裂の存在による温度変化に着目した実験的研究を実施した。特に、内部で凍結前線が移動するいわゆる内部境界値問題は、ステファン問題³⁾として知られており、いくつかの数値解析的研究⁴⁾も進められている。また、本研究では熱環境に置かれた軟岩および硬岩に対する一軸および三軸圧縮試験から実験的に力学物性を調べると共に、供試体レベルの熱物性の温度依存性にも言及した。また、将来、地盤を対象として低温側の熱と応力・浸透が連成する場の数値解析を実施するための基礎的な物性の変化を実験的に確認する事を1つの目標とした。この観点から、岩盤に凍結・融解が繰り返し作用する時の熱・変形特性に着目して実施した室内試験および数値解析について報告する。

2. 供試体の熱的性質と強度・変形特性

2.1 実験試料と物理的性質

実験に用いた試料には代表的な軟岩と硬岩として砂質凝灰岩と花崗閃緑岩を選んだ。いずれの試料も均質の材料が多量に採取できることが実験を進める上で有利な条件であり、過去の研究から基本的な物性値がある程度把握している事もこれらの試料を選定した理由である。なお、これ以後の本研究では紙面の都合もあり、砂質凝灰岩に限定して議論をすすめる。熱環境下の一軸圧縮試験・三軸圧縮試験・応力緩和試験などの実験において、供試体は直径：長さの比が2の円柱形（ $\phi 50 \times 100\text{mm}$ ）で、上下端面の表面は十分に滑らかで、互いに平行になるよう整形した。飽和試料を作成する場合には、整形後の供試体を水浸させて真空ポンプで脱気することによって、強制飽和させた。実験に用いる供試体の主な物性値の平均値を表1に示す。同表には、自然乾燥状態での弾性波速度試験結果および圧裂引張試験・一軸圧縮試験結果についても、その平均値を示す。

表1 砂質凝灰岩の乾燥・常温下における物理的性質

比重	2.33
乾燥密度 (gf/cm ³)	1.87
P波速度 (km/sec)	1.62
S波速度 (km/sec)	1.02
圧縮強度 (kgf/cm ²)	136.0
引張強度 (kgf/cm ²)	13.8

表2 砂質凝灰岩の一軸・三軸圧縮強度と変形係数の温度依存性（湿潤状態）

温度 (°C)	-5	+5	+20
一軸強度 (kgf/cm ²)	147.7	98.7	84.3
変形係数 ($\times 10^3$ kgf/cm ²)	11.2	13.7	10.1
三軸強度 ($\sigma_3=10$ kgf/cm ²)	152.5	127.3	116.2
変形係数 ($\times 10^3$ kgf/cm ²)	11.0	18.0	16.6

2.2 強度・変形特性

実験に用いた供試体の強度・変形特性を把握するために、三軸試験用のセルを改造し、拘束圧力に用いる流体の温度を-20.0℃から+80.0℃の範囲において0.1℃の精度で制御できる恒温循環装置を用いて要素試験を実施した。内部ロードセルと内部変位計（ギャップセンサー）を使用する場合には、耐熱環境の制約から拘束流体は-5℃から+40℃の範囲とした。この恒温循環装置は後に述べる直方供試体の凍結実験における冷媒の循環装置としても利用している。

三軸圧縮試験装置は供試体長軸方向に加え得る最大荷重が5tfで、最大拘束圧力が50kgf/cm²である。拘束圧力と拘束流体の温度を制御できるので、凍結融解条件下での変形係数の変化を確認でき数値解析を実施する上で必要となる物性値を検討する事ができる。これら基本物性の確認においては、凍結融解を受けた供試体の強度・変形特性がどの程度低減あるいは増幅されるかを調べるために、直径5cmのテストピースを用いて一軸・三軸試験を実施した。実験は変位制御で行い、軸歪速度は $\dot{\epsilon}_1 = 0.025\%/min$ を標準とした。ここでは、湿潤状態で拘束流体の温度を-5℃から+20℃まで変化させた時の一軸・三軸圧縮強度および変形係数の変化を表2にまとめる。同表において三軸試験は拘束圧力 $\sigma_3=10\text{kgf/cm}^2$ で実施したときの結果である。この結果から、湿潤供試体においては環境温度が低下するにつれて強度が上昇する事が読み取れ、これは既往の研究成果^{5),6)}とも整合的である。ただし、変形係数については0℃を挟んで複雑な挙動を示しており、内部に存在する水の影響を大きく受けている事が判り、より低温下での実験を実施する必要がある。

2.3 供試体の熱的性質と二次元非定常解析による検討

2次元非定常熱伝導解析を実施して、供試体内部が一定温度になるまでに必要な待機時間などについて考察した。非定常な熱伝導問題については古くから多くの形状に対する厳密解⁷⁾が知られているが、ここでは2次元平板状の閉領域を対象とした。構成則として熱フラックスは温度勾配に比例するとしたフーリエ則を採用し、無次元化した熱伝導方程式を差分法して解析を実施した。解くべき方程式は、

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} = \nabla^2 \bar{T} = \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} \tag{1}$$

$$\bar{q} = -\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{n}} = \frac{q \cdot L}{\lambda} \tag{2}$$

ここで、 $\bar{T}$ は温度、 $\bar{t}$ は無次元時間、 $\bar{x}, \bar{y}$ は無次元座標である。実時間 t および実座標 x, y と、無次元量との間

には $t = \rho C_p L^2 \bar{t} / \lambda$, $x = L \cdot \bar{x}$, $y = L \cdot \bar{y}$ の関係がある。なお、 ρ ; 密度 (g/cm^3), C_p ; 定圧比熱 ($\text{cal}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C}$), L ; 代表寸法 (cm), λ ; 熱伝導率 ($\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$) である。代表寸法 L は任意に選ぶことができるがここでは矩形領域の横幅が無次元距離 1 となるように設定した。一般には温度 T についても代表温度差などで無次元化する場合もあるが、ここでは温度に関しては無次元化を行っていない。また、式 (1) において熱流量の存在は考慮していない。境界面を通過する無次元熱流束 $\bar{q}$ は、実熱流束 q と式 (2) の関係にあり、 $\bar{q}$ も、温度の次元をもつ。式 (1) に関連して解析に必要な熱物性値は、本来、応力状態や温度条件に対して非線形性を有するものであり、軟岩のように間隙率が大きな試料において湿潤状態の供試体では 0°C 付近で、大きな変化を示す。実験に用いた砂質凝灰岩についての計測結果から湿潤・乾燥状態における定圧比熱 C_p , 熱伝導率 λ の温度依存性を表 3 に示す。同表には温度伝達率 κ も同時に示している。この温度伝達率は $\kappa = \lambda / \rho C_p$ で表され、表 3 で対象とした温度範囲内では、乾湿の別なく $3.97 \sim 9.75 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度である。なお、理科年表⁸⁾に与えられている数値から計算される 0°C の水での温度伝達率は $1.33 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。ただし、 0°C の水の温度伝達率は $11.4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ と著しく変化する。なお、式 (1) を伝導現象の支配方程式としての放物型の偏微分方程式と捕らえれば、温度伝達率と圧密係数の比⁹⁾ は当然の事ながら無次元数となり、連成効果を考慮していく上で重要である。

これらの物性値を用いて三軸室内に供試体が置かれた状況を対象として、供試体が熱平衡状態に達するまでの時間を数値解析によって求めた。解析の結果、供試体下部の中心の一部が拘束流体との温度差が 10°C までにしか上昇しない事を想定した厳しい条件下でも、供試体内部とその周りの境界温度が定常状態になる時間を 2 時間と推定することができた。実験においては恒温循環装置を用いて $-10^\circ\text{C}/\text{hour}$ の温度降下率で所定の温度にまで拘束流体の温度を低下させた後、1 時間以上の待機時間を経て実験を開始した。

表 3 砂質凝灰岩の熱物性値の温度依存性

	温度	T	($^\circ\text{C}$)	-40	-5	20
湿潤 状態	比熱	C_p	$\text{cal}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C}$	0.229	0.627	0.320
	熱伝導率	λ	$\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{hour} \cdot ^\circ\text{C}$	1.72	1.92	1.38
	温度伝達率	κ	$\times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$	9.75	3.97	5.60
乾燥 状態	比熱	C_p	$\text{cal}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C}$	0.171	0.189	0.199
	熱伝導率	λ	$\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{hour} \cdot ^\circ\text{C}$	0.95	0.92	0.90
	温度伝達率	κ	$\times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$	8.48	7.43	6.90

3. 直方供試体による室内凍結・融解試験

要素試験に用いた試料を用いて、奥行き $12\text{cm} \times$ 幅 $30\text{cm} \times$ 高さ 45cm の直方供試体を作製し、供試体の中央に直径 46mm のボアホールを設け銅パイプを挿入し内部に冷媒を循環させて室内凍結・融解実験を実施した。実験では直方供試体内部に亀裂を含まない供試体と、内部に亀裂を含む供試体を作製した。特に、後者については単一の亀裂を模擬するためにダイヤモンドカッターを用いて整形した平坦な面を供試体中央部分の水平方向に含む場合と、不連続面の形状が凹凸になっている亀裂を再現するために形状記憶合金を利用した静的破碎装置¹⁰⁾を用いて作成した亀裂を含む場合の 2 種類の供試体を準備した。なお、供試体の材質としては硬岩としての花崗閃緑岩と、軟岩として砂質凝灰岩を用いたが、ここでの結果については要素試験の場合と同様、後者の場合のみを論ずる。

上記の直方供試体を用いる場合には、熱環境を如何に制御するかが実験上の課題であるが、供試体の全周囲に発砲スチロールの断熱材を密着させるとともに実験室内の環境温度の変化をモニターしながら実験を実施した。また、供試体の表面に多数の熱電対を貼り付けるとともに、供試体奥行き方向の温度分布を確認するために供試体中心にもシース管付きの熱電対を配置した。シース管自身は直径 3mm であるが計測孔 (直径約 1cm) との間隙を埋めるために供試体に用いた試料を $200 \mu\text{m}$ 以下に粉碎した粉末を流し込んで熱電対を固定し伝導特性を改善させた。また、熱電対には、 0°C 付近での応答特性に優れた T 型 (銅-コンスタン熱電対) を

使用している。以上のように作製した直方供試体を、冷媒を用いて冷却し非定常な熱応力の発生と、冷却域の推移を観察した。

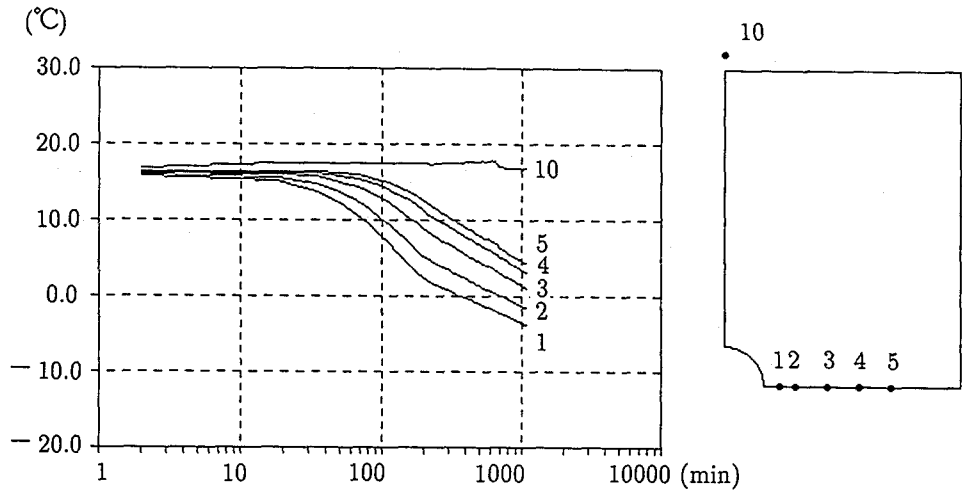


図1 水平方向に亀裂を含む乾燥供試体における
温度-時間関係 (水平方向・降温過程)

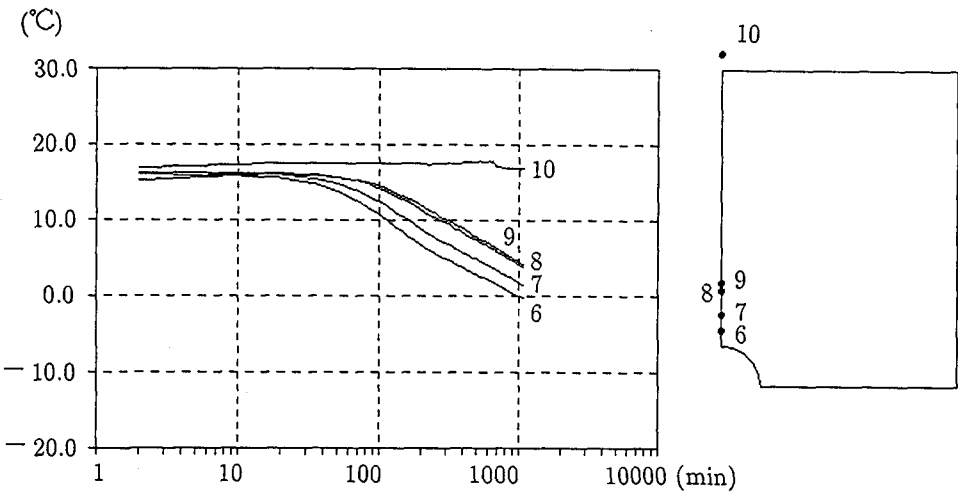


図2 水平方向に亀裂を含む乾燥供試体における
温度-時間関係 (鉛直方向・降温過程)

図1,2 には、直方供試体の中心部分水平方向にダイヤモンドカッターで作製した亀裂を含む乾燥供試体において観察された温度-時間関係を示す。図中の各曲線に付けた番号は、各図の右側に示した供試体4分の1断面（参考図）中の熱電対と対応している。供試体直上にある測点10は外気温を示している。図1,2を比較する事により、スリットのある方向（水平方向）に早く伝達している様子が観察される。なお、形状記憶合金を利用した静的破碎装置で作製した亀裂の場合にはここで見られたほど温度伝達の異方性は著しくなく、亀裂の性質に依存している事が判明した。原位置での計測においては、十分に注意すべき点である。また、図2の測点8は前述のように供試体内部に埋め込んだシース管熱電対であり、測点9は測点8と中心から等距離にある供試

体表面の熱電対である。両者にはほとんど違いがなく、供試体奥行き方向の温度勾配は問題にならないと考えられる。さらに、測点10の示す外気温は実験期間中(約1200分間)に1℃程度変化しているが、この変化が断熱材に保護されている熱電対に与える影響は極く小さい事も読み取れる。次に、供試体表面に貼り付けたロゼットゲージから求めた主歪の時間変化を図3に示す。図中の番号はゲージの位置を示し、maxは最大主歪、minは最小主歪を表している。この場合にも中心から等距離にある①と③のゲージは異なる変化を示しており温度伝達の異方性が著しい。

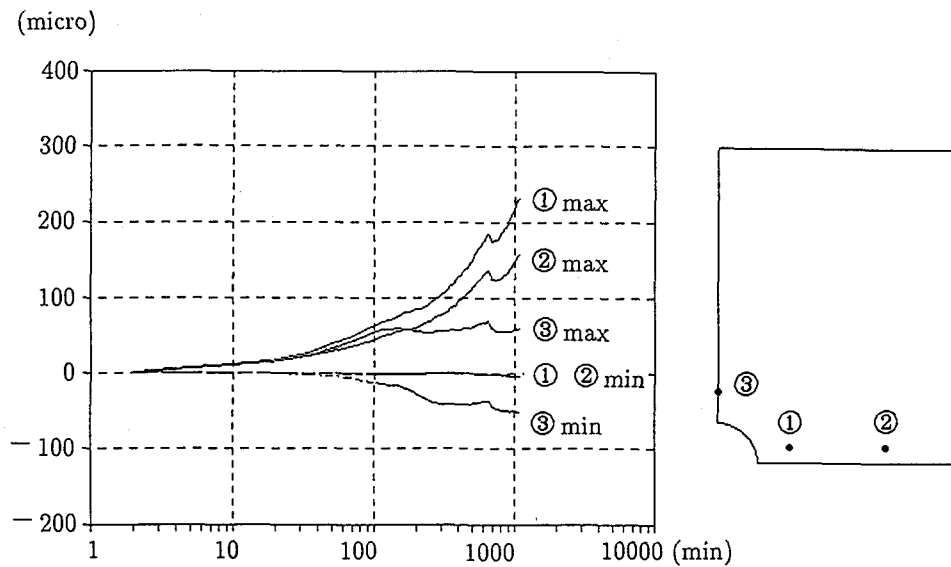


図3 亀裂を含む乾燥供試体における主歪-時間関係(降温過程)

4. まとめ

本研究で対象とする現象は本質的に高度な非線形連成現象であり、しかも相変化を伴いながら内部の境界が変動する複雑極まりない問題である。また、地盤内あるいは地表面に存在する熱源による温度変化は、地盤に対して外力として作用すると共に、地盤材料の構成関係そのものにも影響を及ぼす点が問題を複雑にしている。本研究では、これらの現象を解明するための第一歩として一軸・三軸圧縮強度や変形係数などの力学的性質が環境温度の影響を強く受けていることを明らかにした。また、数値解析による安定性評価を実施するためには、まず熱と変形の現象を連成させないで個々に解析することが必要であり、第一段階として2次元非定常熱伝導解析による予備的な検討をすすめた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、釜石鉦山・山本忠善課長にはご助力頂いた。また、室内凍結実験については埼玉大学卒研究生・岩井隆章、千葉聴の両君にまたデータの整理にあたっては埼玉大学大学院・渡辺孝浩君に協力して頂いた。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) 石塚 与志雄：岩石の破壊脆性特性と岩石・岩盤の亀裂進展問題への破壊力学の適用に関する研究，名古屋大学学位請求論文，1988.
- 2) Hart, R. D. & C. M. ST. John: Formulation of a fully-coupled thermal-mechanical-fluid flow model for non-linear geologic systems, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.23, No.3, pp.213-224, 1986.
- 3) 山口昌哉，野木達夫："ステファーン問題"，数理解析とその周辺 17 産業図書，1988.
- 4) 市川康明：地盤中の熱伝導と熱輸送の数値解析，土と基礎，第37巻11号，pp.81-91, 1989.
- 5) 稲田善紀，八木則男：低温下における岩石の熱物性値，材料，第29巻327号，pp.1228-1233, 1980.
- 6) 稲田善紀，北村聖一，岡田明浩：LNGの地下岩盤内空洞貯蔵における空洞の安定性の検討，土木学会論文報告集，第343号，pp.35-44, 1984.
- 7) Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C.: Conduction of Heat in Solids (2nd.ed.), pp.162-254, 1959, reprinted 1980, Clarendon Press, Oxford.
- 8) 理科年表，平成2年机上版，国立天文台編
- 9) Booker, J.R. & Savvidou, C.: Consolidation around a Point Heat Source, Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., Vol.9, pp.173-184, 1985.
- 10) Inaba, T., Nishida, N., Kaneko K. & Yamauchi K.: Static rock breaker using shape memory alloy, 7th Int. Cong. on Rock Mech., pp.1005-1008, 1991.