

(40) 岩石の透水性の温度依存性に関する実験的研究

埼玉大学 工学部
(株)大林組 技術研究所
(株)大林組 技術研究所(埼玉大学研究生)

正会員 佐藤 邦明
" 西林 清茂
" ○ 須藤 賢

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分や地熱発電などの施設構造物の設計・施工において地下水理を取り扱う場合には、従来の等温状態における飽和・不飽和浸透流に熱を加えた性状を知ることが重要である。とくに、不飽和領域における浸透特性においては未解明の問題が多い。そこで、本研究は、岩石の飽和・不飽和浸透流に対して温度が与える影響について室内実験を試み、岩石の透水性の温度依存性についていくつか興味ある成果が得られたので、ここに報告する。

2. 実験装置と実験方法

(1) 実験装置

本研究で使用した実験装置は、図-1に示す。装置各部は、図-1に示すように番号で対応している。図中、②の岩石試料には、圧力変換器、温度センサーを取り付け、透水時の圧力、温度の経時変化を測定できるようにしている。また、試料の体積含水率は、両側面から中性子源と中性子検出装置により、中性子計数率を測定し、等価含水率として求めることができる。

(2) 実験試料

実験に使用した試料は、千葉県君津産の房州石(砂質凝灰岩)である。その物理的性質は、表-1に示す。試験に使用した供試体は、写真-1に示すが、縦10cm、横10cm、高さ55cmであり、型枠の中に供試体を挿入し、隙間を樹脂でコーティングして型枠に固定させた。

実験に使用した水は、脱気した蒸留水である。

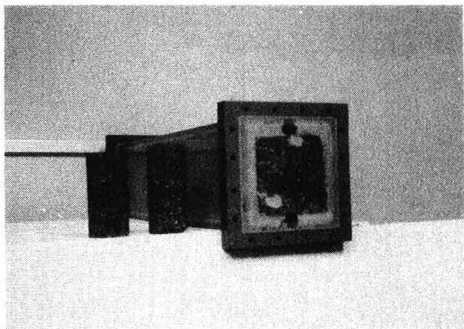
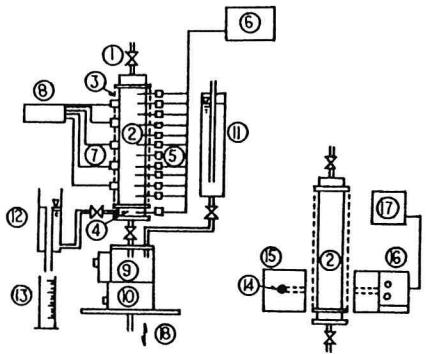


写真-1 試験供試体



装置本体	中性子源と検出装置
① 上端水槽	⑩ 温度調節水槽用暖房装置
② 岩石試料	⑪ マリオットびん
③ 断熱材	⑫ overflow水槽
④ 下端水槽(ヒーター付き)	⑬ メスシリンダー
⑤ 温度センサー	⑭ 中性子源
⑥ 温度自動測定記録装置	⑮ 遮蔽箱
⑦ 圧力変換器	⑯ 中性子検出器
⑧ 圧力自動測定記録装置	⑰ 中性子計数率表示器
⑨ 温度調節水槽	⑱ 昇降装置

図-1 実験装置の概略

表-1 物理的性質

項目	房州石(砂質凝灰岩)
湿潤密度(飽和)	1.956
乾燥密度	1.597
有効空隙率	35.9%
吸水率	18.9%

(3) 実験方法

実験は、温度と飽和透水係数の関係調べる定水位透水試験および温度と不飽和透水係数の関係調べる排水試験を実施した。

定水位透水試験は、23°C、40°C、60°C、80°C、90°Cの5ケースの温度条件について実施した。透水係数の測定は、各温度の温水を試料に通水させ、試料内温度が所定の温度に達した時に行う。試験は、ケースごとに温度を段階的に上昇させていく場合と、ケースごと段階的に低下させる場合の上昇・下降過程について行った。排水試験の温度条件は、23°C、60°C、80°Cの3ケースである。排水試験の方法は、試料内温度が所定の温度になった時、通水を停止し、上端水槽のコックを開き、上部を大気圧に開放し、鉛直一次元排水させる。なお、下端水槽内に設置した電気ヒーターにより、試料下部の温度を保つようにした。

3. 実験結果と考察

(1) 定水位透水試験結果

図-2は、温度と飽和透水係数の関係を示したものである。飽和透水係数は、当然のことながら、温度の高いものほど大きい。しかし、図-2に示すように、温度の上昇過程と下降過程では透水係数の値は異なり、前者の方が小さい傾向で、温度履歴が生じている。一般に、温度の変化による浸透流への影響は、水の粘性変化、水や岩の膨張、岩石の充填物の溶解や亀裂内壁、孔壁への沈着など種々の要因が考えられる。今回の場合、温度上昇過程で透水性が悪くなることから、水の中に含まれる気泡が影響していることも考えられる。

次に、温度15°Cにおける透水係数 K_{15} と温度の関係にして、図-3に示した。 K_{15} は、温度 T °Cに対する水の粘性による補正係数によって求めたものである。図-3より、各温度における K_{15} の値は、高温部において、いく分、温度履歴が残っているものの、ほぼ同一に近い値を示している。

(2) 排水試験結果

排水試験で測定した排水量の経時変化を図-4に示す。図-4に示すように、各温度条件における排水量は、温度の高いものほど多い。また、初期の立ち上がりも大きく、排水速度が早いことがわかる。排水量がほぼ一定に近づく経過時間は、80°Cで約1時間、60°Cで約2時間、23°Cで約3時間程度で、排水は温度の高いものほど早く終了している。

次に、試料内の温度変化を見るために、温度80°Cの排水試験時の試料内温度と経過時間の関係を図-5に示したものである。初期状態では、試料の深さ方向は等温状態であるが、試験開始とともに、上部を大気

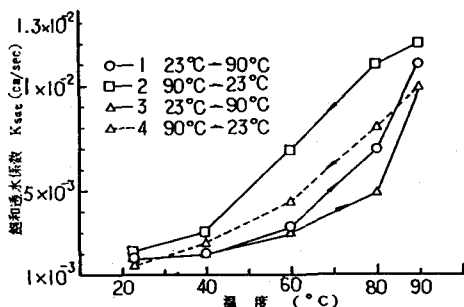


図-2 飽和透水係数と温度の関係

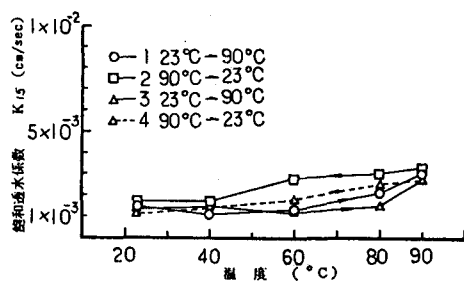


図-3 K_{15} と温度の関係

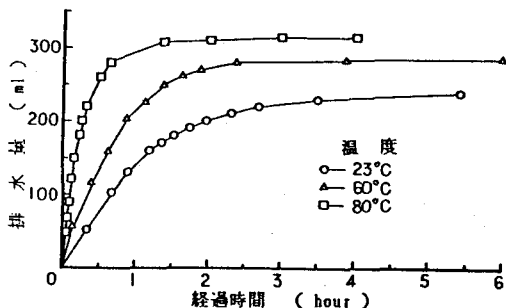


図-4 排水量と経過時間の関係

圧、室温に開放するため、試料上部から温度が徐々に低下する傾向にある。しかし、排水の現象が約1時間程度であるため、排水試験中の試料内温度は、平均約75℃程度である。また、60℃の場合の試料内温度は、約55℃程度であった。

試料内の圧力変化および体積含水率の測定例として、温度23℃の排水試験の場合について、圧力水頭と経過時間の関係を図-6に、体積含水率と経過時間の関係を図-7に示す。図-6より、各深度で測定した圧力水頭は、試験開始とともに急激に低下し、その後、徐々に平衡状態に近づくように低下している。図-7より、体積含水率の減少は、試料表面（深度0cm）から生じ、その減少量は深度の浅いものほど多いことがわかる。

次に、各排水試験で得られた水分特性曲線を図-8に示す。水分特性曲線は、不飽和浸透特性を表わすものの一つであり、体積含水率と圧力水頭の関係で表わされる。この水分特性曲線は、土質試験法による吸引法のうち土柱方法に準じて、試験終了後の体積含水率の測定値から求めたものである。水分特性曲線は、温度の高いものほど下部にあり、最小水分容量 θ_r の値は小さく、限界毛管水頭 ψ_{cr} の値も若干小さい傾向にある。これは、試験後の体積含水率が温度の高いものほど低下しているためである。また、図-9には、各温度条件における排水試験中の体積含水率の深度分布を経過時間ごとに示している。図-9中、□印、△印で示した経過時間0.2、1時間の各温度条件における体積含水率の深度分布を比較してみると、試料内の体積含水率は、温度の高いものほど早く減少していることがわかる。

各温度条件における不飽和透水係数と体積含水率の関係を図-10に示す。不飽和透水係数は、一次元鉛直浸透のRichardsの基礎式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial (\psi + z)}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

を z で積分し、 $k(\theta)$ で整理した式で求めることができる¹⁾。ここに、 t ：時間、 θ ：体積含水率、 ψ ：圧力水頭、 $k(\theta)$ ：不飽和透水係数、 z ：ある基準面からの高さ、である。

次に、基礎式(1)の適用性を再現してみるために、基礎式(1)において、体積含水率 θ と圧力水頭 ψ のあいだに一個関係が維持されたとした次式を差分化して、計算を行った。²⁾

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $C(\psi)$ は、比水分容量である。図-8の水分特性曲線と

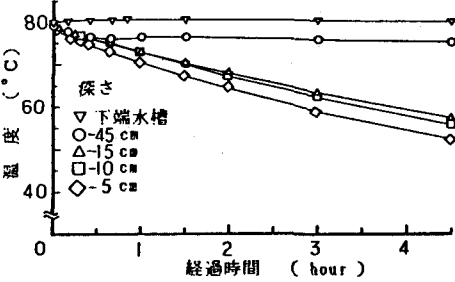


図-5 試料内温度と経過時間の関係

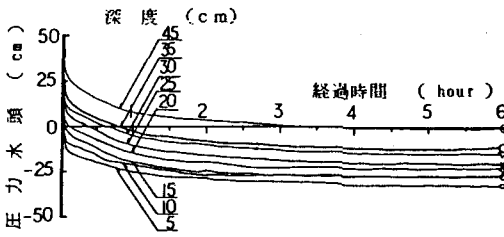


図-6 圧力水頭と経過時間の関係 (23℃)

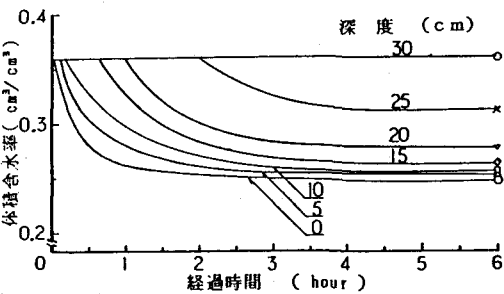


図-7 体積含水率と経過時間の関係 (23℃)

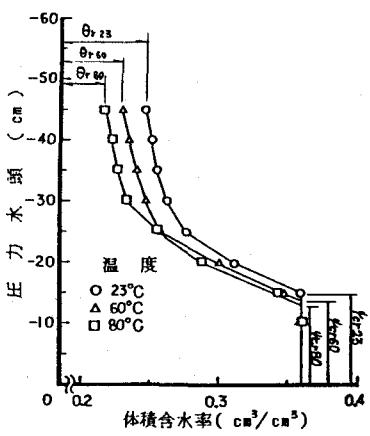


図-8 水分特性曲線

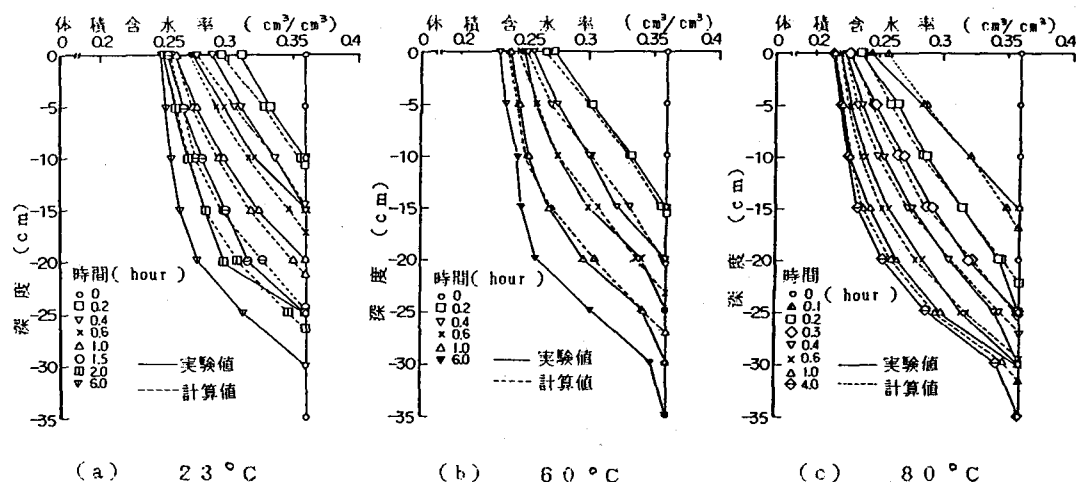


図-9 体積含水率の深度分布

図-10の不飽和透水係数と体積含水率の関係から計算した計算値を図-9に点線で併記した。図-9より、計算値と実験値は、この程度一致していることがわかる。これより、図-10に示す不飽和透水係数と体積含水率の関係についてみると、温度の高いものほど、同一の体積含水率における不飽和透水係数は大きい。次に、不飽和透水係数を飽和透水係数で割った比透水係数と体積含水率の関係について示した図-11についてみると、比透水係数は、体積含水率が大きい部分では、ほぼ同一に近い値を示すが、小さくなるに従って温度の高いものほど大きくなることわかる。

4. むすび

砂質凝灰岩の飽和・不飽和領域における透水性の温度依存性について実験的に調べ、次のような結果を得た。

砂質凝灰岩の飽和透水係数は、温度の上昇過程と下降過程とでは値に差があり、前者の方が小さく、温度履歴が生じる。水の粘性で温度補正した透水係数は、高温部において温度履歴がいく分残るものの、ほぼ同一の値に近い。不飽和透水係数と体積含水率の関係は、温度の高いものほど、同一の体積含水率における不飽和透水係数は大きく、温度変化を伴う不飽和浸透流を取り扱う場合、使用する透水係数は粘性補正をするのみならず、本質的温度依存性があることが判った。

最後に、本研究を進めるに当たって、協力してくれた埼玉大学工学部建設基礎工学科の宗像雅広君にお礼申し上げる次第である。

参考文献：1) 河野、西垣：不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第307号、1981.3、pp.59～69

2) 佐藤、西林、須藤：砂質土の熱を伴う不飽和浸透流の基礎的研究、土木学会第40回年講、1985.9

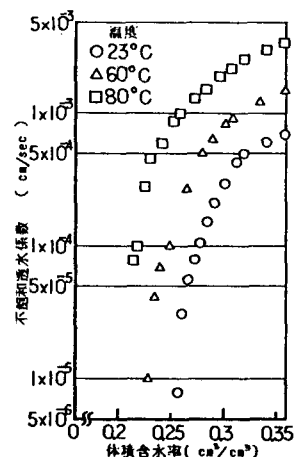


図-10 不飽和透水係数と体積含水率の関係

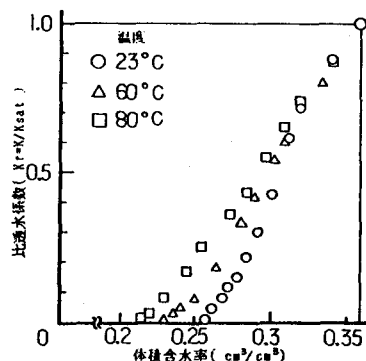


図-11 比透水係数と体積含水率の関係

(40) Experimental Study on Rock Permeability
affected by Temperature

by Kuniaki Sato *

Kiyoshige Nishibayashi **

Ken Sudo **

Abstract

This paper presents some experimental results of rock seepage affected by thermal effect. In the experiments, the temperature, the negative pressure, the seepage rate and the water content in rock sample are measured in the process of drainage at the temperatures of 23°C, 60°C and 80°C. In order to investigate the characteristics of unsaturated seepage flow in rock, the sand stone is used for rock sample.

The results obtained from the present study are concluded as follows : (1) the permeability of sand stone under thermal gradient increases with increasing the temperature, (2) the characteristic curves in the drainage process are much dependent on the temperature, (3) the seepage velocity curve shows the hysteresis loop by acting pressure.

* Hydroscience and Geotechnology Laboratory, Faculty of engineering,
Saitama University. Urawa, Saitama.

** Soil & Foundation Laboratory. Ohbayashi Corporation Technical
Research Institute, Kiyose, Tokyo.