

(65) 岩石・細砂の飽和・不飽和領域の熱・水分移行現象に関する実験的研究

埼玉大学 工学部

正会員 佐藤 邦明

協 大林組 技術研究所

" 西林 清茂

協 大林組 技術研究所(埼玉大学研究生)

" ○須藤 賢

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分や地熱発電の設計・施工に係る地下水理を取り扱う場合、従来からの等温状態における飽和・不飽和浸透流の検討のみでは不十分であり、非等温の浸透流の検討が不可欠である。この種の現象は、熱を伴うために水の移動が液状水の形で生じるのみではなく、気体状態でも生じる。それによって伝熱も影響を受け、水分移行が熱輸送と表裏一体となるという特色がある。そこで、本研究は、熱・水分の同時移行現象に注目し、凝灰岩と標準砂試料を用いて、水位が試料表面にある飽和状態と表面下にある不飽和状態の場合において、表面からの蒸発過程における試料中の温度分布、圧力分布、体積含水率の分布を実験的に検討し、いくつか興味ある成果が得られたので、ここに報告するものである。

2. 実験装置と実験方法

(1) 実験装置

実験に使用した装置は図-1に示す。図-1中、装置各部は番号で対応している。①試験試料には、③温度センサー、⑤圧力変換器を取り付け、試料内の温度、圧力を測定できるようにしている。試料内の体積含水率の測定は、試料の両側面から⑦中性子源と⑨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。試料内の水位は、⑩下端水槽に接続している⑪マリ奥特管で所定水位に保ち、蒸発量はマリ奥特管内の水位変化量から求めることができる。また、試料表面から乾燥させるために、⑫風洞円筒管を試料上端に設置し、温風機により試料表面に温風を送ることができるようにしている。風洞内の温度および湿度は、⑬温・湿度センサーにより測定できる。

(2) 実験試料

実験に使用した試料は、福島県西白河産、新第三紀の集塊質両輝石安山岩(通称白河凝灰岩)と標準砂である。白河凝灰岩の試験供試体は、縦10cm、横10cm、高さ60cmで、型枠の中に供試体を挿入し、空間を樹脂でコーティングして型枠に固定させた。また、標準砂の試験供試体は、縦10cm、横10cm、高さ60cmの試料モールドに乾燥した標準砂を少しづつ入れ、密度が均等になるように突き棒で突き固めて作製した。作製した試料の乾燥密度は、 1.577 g/cm^3 であり、間隙率は約40%である。標準砂の毛管上昇高さは約27cmである。¹⁾

(3) 実験の種類と試験方法

表-1に実験ケースとその条件を示す。実験は、表-1に示すように、5ケースの実験を行なった。標準砂試料の実験は、水位条件が0cm(試料表面)、-25cm、-50cmの3ケースで、白河凝灰岩の水位条件

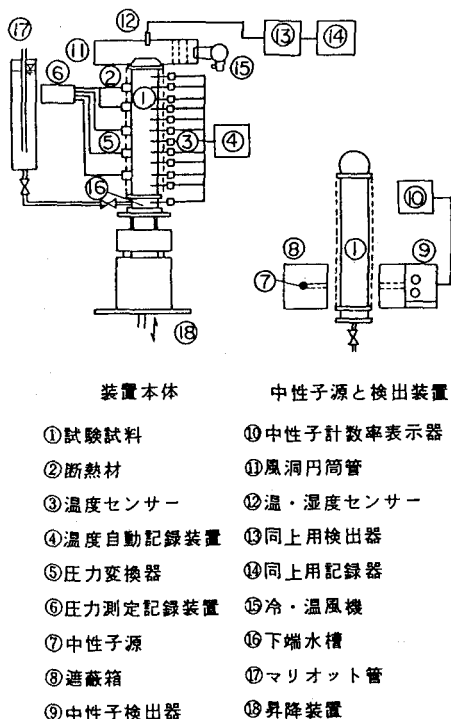


図-1 実験装置の概略

は 0 cm (試料表面), -

50 cm の 2 ケースである。

温風の温度および速度は、
各ケースともに約 60℃、
2.3 m/s と一定にした。

水位条件 0 cm の試験方
法は、真空ポンプを使用
して試料を蒸留水で飽和
させた後、下端水槽に接
続しているマリOTT管

の水位を試料表面に合わせて、試料表面からの乾燥試験を行なう。表面からの蒸発とともに、試料下部から水が供給できるようにしている。水位条件 -25 cm の試験方法は、飽和している試料について、水位 -25 cm の重力排水による排水試験を行ない、試料内の水分分布が定常状態になった後、表面からの乾燥試験を行なった。水位条件 -50 cm の場合も同様の方法で行なった。なお、試験は、すべて 23℃ の恒温室内で実施した。

3. 実験結果とその性質

図 - 2 は、試料からの蒸発量と時間の関係を示したものである。標準砂の場合は、水位条件が試料表面に近いほど蒸発量が多くほぼ直線的に変化している。この傾向は、試料下部から水の供給がない場合と異なる。蒸発速度は、Exp. 1 で 1.5 ml/hour, Exp. 2 で 4.4 ml/hour, Exp. 3 で 3.5 ml/hour と減少している。これは、地下水面上の毛管水帯が影響しているものと考えられる。次に、白河凝灰岩についてみると、標準砂と同様に水位条件の高いほうが蒸発量が多いが、時間的な変化は、経過時間とともに緩やかになる。

図 - 3 は標準砂の圧力水頭と経過時間の関係を示したものである。図 - 3(a) には、水位条件 0 cm の場合の圧力経時変化を示すが、初期状態は静水

表 - 1 実験ケースとその条件

ケース	試料種類	水位条件	風 速	風温度 風湿度	乾燥密度	湿潤密度	空隙率	室 温	供給水		
Exp. 1	標 準 砂	0cm	2.3 m/s	60 ℃ 5.5 %	1.577 g/cm ³	2.003 g/cm ³	0.426	23 ℃	脱気蒸 留水		
Exp. 2		- 25 cm				2.003 g/cm ³					
Exp. 3		- 50 cm				1.943 g/cm ³					
Exp. 4	白河凝灰岩	0cm			1.992 g/cm ³	2.247 g/cm ³	0.255				
Exp. 5		- 50 cm				2.247 g/cm ³					

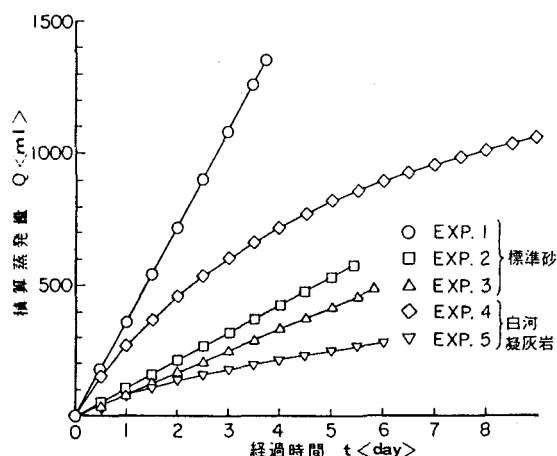
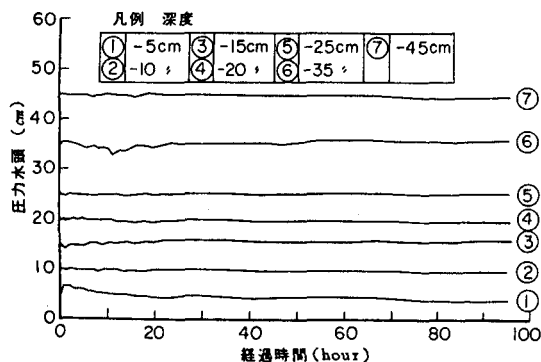
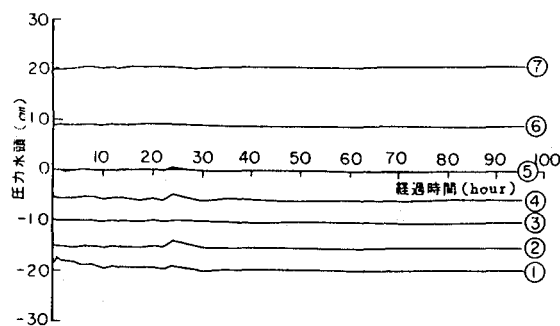


図 - 2 蒸発量の経時変化



(a) Exp. 1 (水位条件 0 cm)



(b) Exp. 2 (水位条件 -25 cm)

図 - 3 標準砂の圧力経時変化

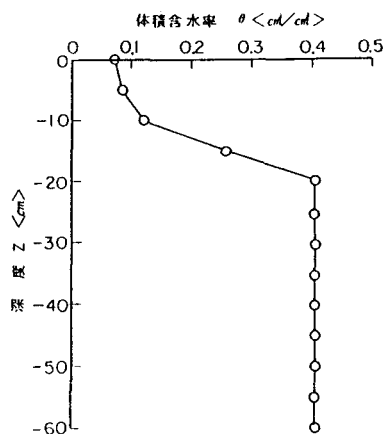
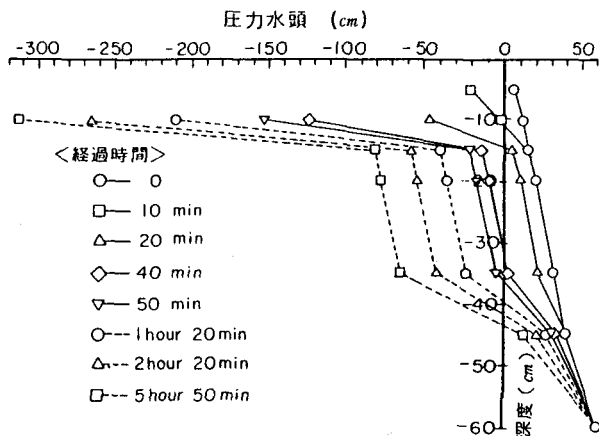


図-4 体積含水率の定常分布
(排水試験-50 cmの場合)

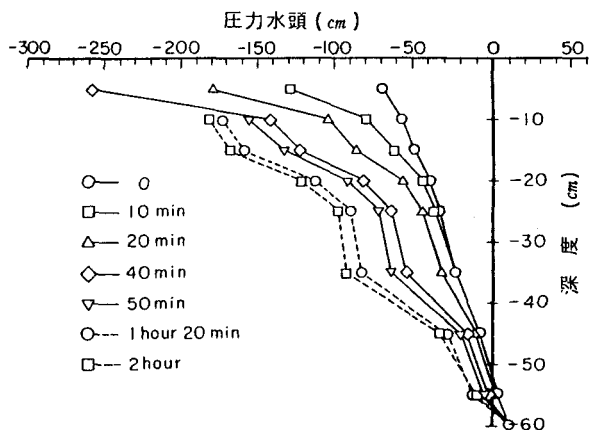
圧分布を示しており、乾燥試験中も圧力水頭は大きな変化が見られず、ほぼ一定の状態推移している。図-3(b)は、水位条件-25cmの乾燥試験の結果であるが、その初期状態は、-25cmの排水試験で得られた最終の圧力水頭分布であり、各深度の圧力水頭は各々-25cmずつ低下している。排水試験での体積含水率の測定結果では、飽和状態から体積含水率の減少は認められず、標準砂の毛管上昇高さ(27cm)が影響しているものと考えられる。図-3(b)に示すように、乾燥試験で得られた圧力水頭は、水位条件0cmと同様に大きな低下は認められない。また、体積含水率の測定結果においても、大きな減少は認められなかった。水位条件-50cmの場合は、排水試験で得

られた図-4の体積含水率の分布に示すように、深度20cmまでは体積含水率が減少している。しかし、圧力水頭の経時変化、体積含水率の経時変化は、Exp.1, Exp.2の結果と同様の傾向であった。したがって、今回の実験の場合、試料下部から水を供給することにより、試料内の体積含水率は初期の分布に比べて変化が少なく、蒸発する水分は地下水面から常に供給されていると考えられる。

次に、白河凝灰岩の圧力水頭の深度分布を図-5に示す。図-5(a)は、水位条件0cmの場合であるが、圧力水頭の深度分布は、初期では静水圧分布を示し、試験開始とともに、試料表面に近い位置から急激に圧力水頭は低下する。時間経過とともに、圧力水頭の深度分布は、負の方向へ移行している。また、図-5(b)に示す水位条件-50cmの場合は、初期の圧力水頭分布は排水試験終了後のものであり、各深度の圧力水頭は各々約50cm程度低下している。試料内の体積含水率については、大きな減少はほとんど認められず、白河凝灰岩の毛管上昇高さは少なくとも50cm以上であると考えられる。



(a) Exp.4 (水位条件 0 cm)



(b) Exp.5 (水位条件 -50 cm)

図-5 白河凝灰岩の圧力水頭の深度分布

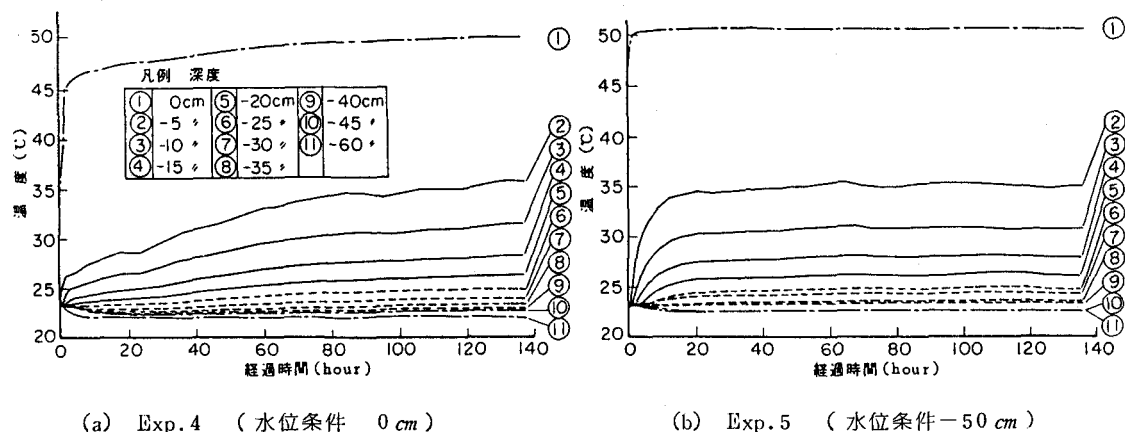


図-6 白河凝灰岩の温度経時変化

図-6には、白河凝灰岩の温度経時変化を示している。図-6(a)は飽和状態の場合であり、図-6(b)は水位条件-50cmの場合であるが、これらの図を比較すると、深度5~20cmの初期の温度上昇は、飽和状態のほうが緩やかに上昇している。これは、試料表面に水位を与えているため、不飽和状態に比べて蒸発量が多いことに原因している。図-7には、Exp.4の温度深度分布を示したものであるが、温度は約35cmを境に上部は上昇し、下部は低下している。これは、蒸発熱の影響が表われているものと考えられる。

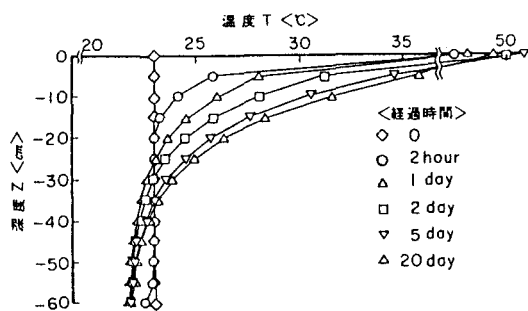


図-7 白河凝灰岩の温度深度分布 (Exp.4)

4. むすび

白河凝灰岩・標準砂の飽和・不飽和領域の熱・水分移行現象について実験的に調べ、次のような結果を得た。

(1) 蒸発量の経時変化は、標準砂と白河凝灰岩とは異なり、標準砂の場合はほぼ直線関係であり、白河凝灰岩では経過時間とともに緩やかな曲率を示す。

(2) 試料内の圧力水頭深度分布は、標準砂の場合はほぼ静水圧分布に近い形状を示すが、白河凝灰岩の場合は、経過時間とともに負圧へ移行していく。

(3) 試料内の体積含水率は、水面からの水の供給により、蒸発進行中においても、初期の分布と比べて変化が小さい。

(4) 温度の経時変化は、飽和状態のほうが不飽和状態に比べて初期時点の温度上昇が緩やかである。

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天野裕史君にお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 佐藤邦明, 西林清茂, 須藤 賢: 熱を伴う不飽和浸透流の基礎的研究, 第29回水理講演会論文集, pp863 ~ 868, 1985. 2
- 2) 佐藤邦明, 西林清茂, 須藤 賢: 不飽和多孔媒体の乾燥過程における毛管流動と伝熱に関する実験的研究, 第30回水理講演会論文集, pp277 ~ 282, 1986. 2

(65) Experimental Study on Heat and Moisture
Transfer in Saturated-Unsaturated Porous
Media by Evaporation

by Kuniaki Sato *

Kiyoshige Nishibayashi **

Ken Sudo **

Abstract

This paper presents some experimental results of heat and moisture transfer in saturated-unsaturated porous media by evaporation.

In the experiments, the used apparatus is composed of sample columns, wind tube, mariotte water-supply system and measurement systems.

The temperature, negative pressure, evaporation rate and water content in samples are measured in the process of evaporation by heated wind above the column. The fine sand and Shirakawa tuff are used for porous media.

The results obtained from the present study are concluded as follows :

(1) Evaporation rate with time is linear for fine sand and nonlinear for Shirakawa tuff, (2) Void pressure with depth is hydrostatic for fine sand in evaporation process and it changes to negative pressure, (3) Water content in samples doesn't change from initial profile, because the evaporation water is transmitted from water table, (4) Temperature along sample column changes gradually in saturated case as compared with unsaturated one.

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

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