

熱を伴う不飽和浸透流の基礎的研究

西林 清茂 須藤 賢
村上 考司

Fundamental Study on Unsaturated Flow Accompanied by Heat Transfer

Kiyoshige Nishibayashi Ken Sudo
Kohji Murakami

Abstract

This paper describes an experimental study of fundamental characters of unsaturated flow accompanied by heat transfer using a one-dimensional vertical flow test. The soil parameters of osmotic characteristics in the unsaturated range (soil moisture characteristics curve, the relation between unsaturated hydraulic conductivity and volumetric moisture contents) were determined by the one-dimensional vertical test with Toyoura sand exposed to fixed temperatures (23, 30, 40, 50, 60°C). The results are that the relation between unsaturated hydraulic conductivity and volumetric moisture contents, and the phreatic line are changing accompanying change in dynamic coefficient of viscosity of water influenced chiefly by temperature. Further, unsaturated flow is assumed by numerical analysis on investigation of the soil moisture characteristics curve and unsaturated hydraulic conductivity.

概要

この研究は、熱が加わった場合の不飽和浸透流の基礎的性質を鉛直一次元の浸透試験によって実験的に究明したものである。その第一段階として、標準砂を対象として、熱（室温、30°C、40°C、50°C、60°C）を与えた場合の鉛直一次元排水実験を実施し、不飽和領域の水分特性曲線、不飽和透水係数と体積含水率の関係を求めた。

その結果、主に水の動粘性係数が変化することが原因で、不飽和透水係数と体積含水率の関係、浸潤線の移動などが変化することが判明した。また、今回の温度範囲における不飽和浸透流については、水分特性曲線と不飽和浸透水係数を求めれば、数値計算によって推定できることを確認した。

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分や地熱発電などの構造物の設計・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・不飽和のみの研究では不十分である。ところで、熱を伴う飽和浸透流に関してはすでに研究¹⁾は着手されているが、熱を伴う不飽和浸透流の現象に関してはほとんど未解決の問題である。

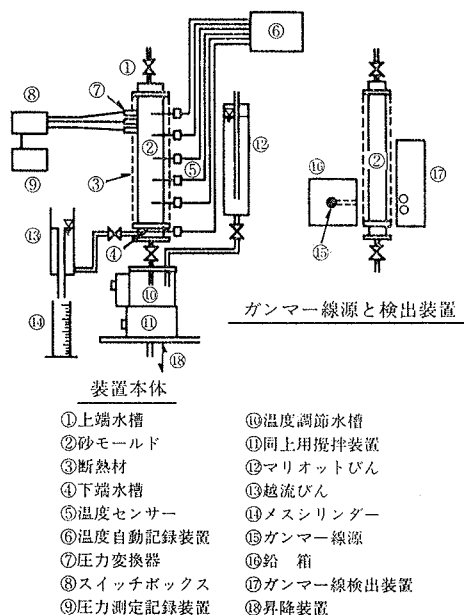
そこで、この研究は、第一段階として、標準砂を対象として、熱を与えた場合の不飽和浸透流の基礎的性質を、鉛直一次元の浸透試験によって実験的に究明しようとしたものである。

2. 実験装置と実験方法

2.1. 実験装置

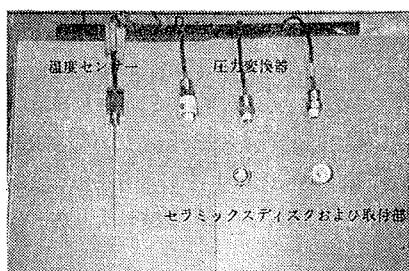
本実験に使用した実験装置は、図-1、写真-1、2、3に示したように、透水試料モールド装置本体とガンマ線源と検出装置などから構成される。

図-1によって、実験装置を説明すると、②は、透明アクリル製モールド（縦10 cm、横5 cm、高さ60 cm）で、温水浸透の場合は、断熱のために③の断熱材（発泡スチロール）で周囲を覆っている。砂モールドの上下端部には、ステンレス多孔板と金網を設置しており、その両端に①の上端水槽、④の下端水槽がある。砂モールドの両



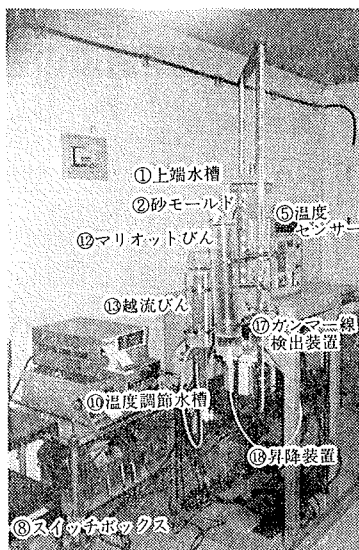
図一 実験装置の概略

側面には、⑤の温度センサー、⑦の圧力変換器用の孔がそれぞれ10 cm, 5 cm 間隔にあけてあり、各々が任意の位置に設置できるようにしている。温度セ

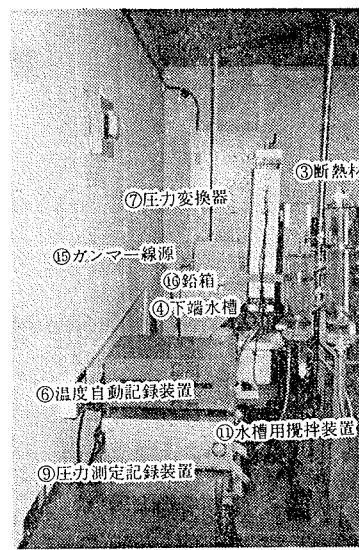


写真一三 温度センサーと圧力変換器およびその取付部

ンサー(写真一三参照)は、⑥の温度自動測定記録装置に接続され、圧力変換器は⑧のスイッチボックスから⑨の圧力測定記録装置に接続され、それぞれ経時的な温度、圧力水頭を測定する。圧力変換器の取り付け部の先端には、セラミックディスク(直径0.9 cm, 厚さ0.5 cm)を取り付け(写真一三参照)、圧力測定時には水で飽和させた状態で砂モールドに設置する。下端水槽④は、⑩の温度調節水槽(室温から90℃まで調節可)と接続しており、その圧力水頭は、⑬の越流びんの高さによって制御する。温度調節水槽への給水は⑫のマリ奥特びんにより行ない、温度調節水槽内の水温を一様にするために⑭の攪拌装置を設置している。試料内への給水量は、マリ奥特びんの給水量と越流びんからの排水量を⑭のメスシリンダーで測定した値の差から求める。試料内の体積含水率は、今回は低レベルの⑮のガンマー線源(^{60}Co , $70\mu\text{Ci}$)を使用し、⑰の検出装置でガンマー線計数率を測定することによって、みかけの密度に変換して求めた。なお、各測定位置において経時的な体積含水率の変化を測定するために、ガンマー線測定装置の間を砂モールドが上下移動



写真一四 実験装置の側面



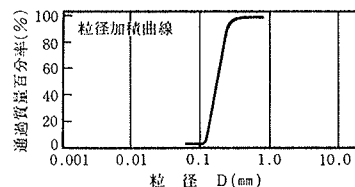
写真一五 実験装置の正面

可能な⑱の昇降装置を設置している。

2. 実験試料

実験に使用した試料は、豊浦標準砂である。

この砂の比重は、 $G_s=2.642$ で、比熱は、 $C=0.1768$ cal/g℃ である。使用した標準砂の粒径加積曲線を図二に示す。この試料の10%粒径は、 $D_{10}=0.11\text{mm}$ 、均等係数は、 $U_c=1.25$ である。



図二 標準砂の粒径加積曲線

試料の作製方法は、砂モールドに乾燥した標準砂を少しずつ入れ、密度が均等になるように突き棒で約1cmごとに突き固めて作製した。作製した試料の乾燥密度は、約 1.57g/cm^3 、間隙率は、 $n=40\%$ であった。

実験に使用した水は、蒸留水を脱気したものである。

2.3. 実験の種類と実験方法

実験は、温度が室温状態(23℃)と30℃、40℃、50℃、60℃の5ケースで、試験は砂試料を完全に飽和させた定水位透水試験と、透水試験終了後、上部を大気圧に開放した鉛直一次元排水の浸透試験である。表一には、室温状態の実験方法と温水状態の例として60℃の試験方法について示した。

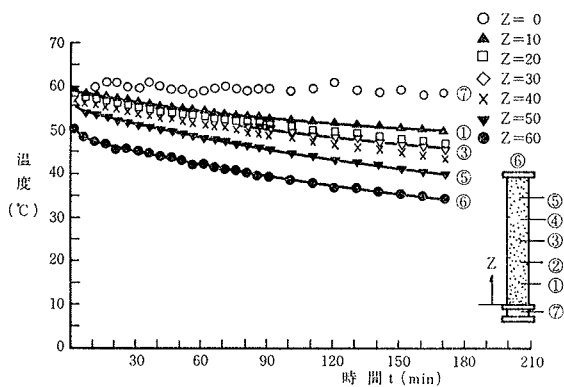
3. 実験結果

3.1. 砂試料中の温度変化

図一三は、温水60℃の排水試験時の温度と時間の関係を示したものである。初期状態は、全試料等温であり、試験開始とともに、上部を大気圧、室温に開放するため、試料上部から温度が徐々に低下していく傾向にある。したがって、排水試験中の試料温度は、約55℃前後である。

試験名	室温状態 (23℃)		温水状態 (60℃の場合)	
	装置模式図	実験方法	装置模式図	実験方法
定水位透水土験		飽和砂 $\rho_t = 1.987 \text{ g/cm}^3$ 砂温度 $\approx 23^\circ\text{C}$ 水温 $\approx 23^\circ\text{C}$ 砂試料を飽和させ、透水試験を行なう。 $H = 60 \text{ cm}$		飽和砂 $\rho_t = 1.982 \text{ g/cm}^3$ 砂温度 $\approx 60^\circ\text{C}$ 水温 $\approx 60^\circ\text{C}$ 飽和させた試料に60℃の温水を通水させ、試料が60℃のときに試験。
排水試験		飽和砂 $\rho_t = 1.987 \text{ g/cm}^3$ 砂温度 $\approx 23^\circ\text{C}$ 水温 $\approx 23^\circ\text{C}$ 透水試験終了後、上部を大気圧に開放し、排水試験を行なう。		飽和砂 $\rho_t = 1.982 \text{ g/cm}^3$ 砂温度 $\approx 60^\circ\text{C}$ 水温 $\approx 60^\circ\text{C}$ 透水試験終了後、上部を大気圧、室温に開放し、下部は60℃で試験。

表一 実験の種類と実験方法

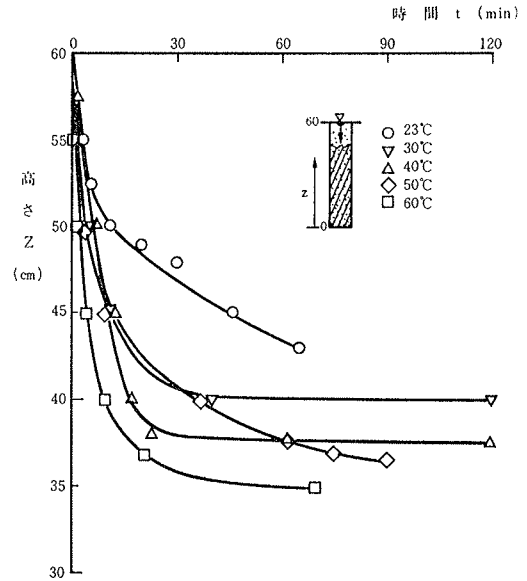


図一三 温水60℃ 排水試験時の温度と時間の関係

また、各温度条件においても、試料中の温度低下はその程度であり、ほぼ一定に保たれている。

3.2. 排水時の浸潤線の移動

排水時の浸潤線の移動を各実験について示したものを図一四に示す。浸潤線は、砂モールドの一定の側面で計測した。図一四から、浸潤線の位置 $Z = 60 \text{ cm}$ における初期時点から10分経過した間の浸潤線の低下は、各温度条件によって異なり、排水のスピードは温度が高いものほど早い傾向にあることがわかる。これは温度の違いによる水の粘性が影響を及ぼしているものと考えられる。また、浸潤線の移動は、試験開始後60分程度で平衡状態に近づく傾向にあり、排水現象は短時間で生じる。浸潤線の高さは、試験終了時の経過時間約4時間後において、室温状態で39cm、温水30℃で39cm、40℃で36.8cm、50℃で36.5cm、60℃で34cmである。試験終了時の浸潤線の高さも温度の高いほど低下する傾向にある。



図一四 排水時の浸潤線の移動

3.3. 水分特性曲線

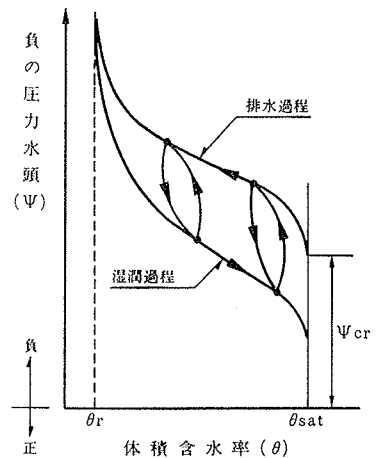
水分特性曲線は、不飽和領域内の浸透特性を表わすものの一つであり、体積含水率 (θ) と負の圧力水頭 (ψ) の関係で表わされる。一般に、その測定方法は、土質試験法の“P F 試験”として吸引法 (土柱法と吸引法)、遠心法、加圧法、蒸気圧法などの試験方法が規定されており、よく使用されている。

この水分特性曲線は、一般に、体積含水率が増加するにつれて、負の圧力水頭は減少していき、飽和状態になると $\psi \leq \psi_{cr}$ となる。また、この曲線は、浸潤過程であるか排水過程であるか、またその出発点の位置によって、図一五に示すようなヒステリシスを生じることが知られている²⁾。また、排水過程での ψ_{cr} は、土中水に加わる負圧が ψ_{cr} 以下になると、間隙の中に空気が浸入し排水を生じる値で、限界毛管水頭と呼ばれている。

浸透の対象となる

体積含水率の変化領域は、最小容水量 (θ_r) と飽和体積含水率 (θ_{sat}) の間の範囲である。

各実験で得られた排水時の水分特性曲線を、図一六に示す。この曲線は、吸引法のうち土柱法に準じて、排水試験終了後、各深度における含水比を測定し



図一五 水分特性曲線のヒステリシス

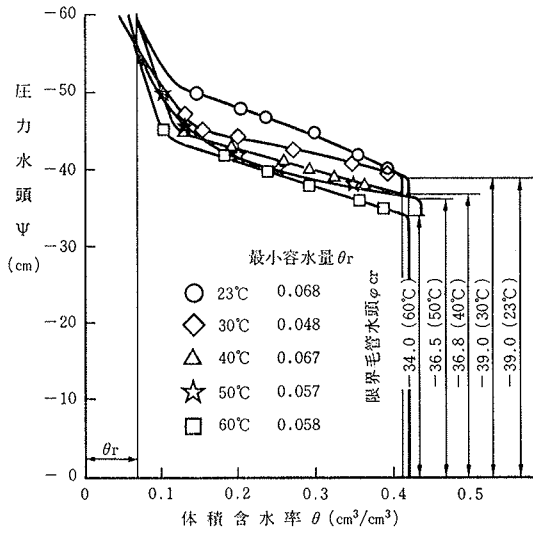


図-6 排水試験の水分特性曲線

て求めたものである。水分特性曲線は温度が高いものほど下部にあり、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（約4時間経過後）の浸潤線、および試料の体積含水率が、温度の高いものほど低下していることが原因である。

表-2は、排水試験前に実施した定水位透水試験結果を示したものである。表中、 k_{15} は温度15°Cに対する透水係数で、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り、各温度条件における砂試料の k_{15} はほぼ同じ値である。また、図-7は、温度を変化させて一つの試料について別に定水位透水試験を実施した結果（●印）と表-2の k_T の値（○印）を示したものである。当然のことであるが、飽和透水係数は、温度が高くなるほど水の粘性が小さくなるため、温度が高いものほど大きい。

3.4. 不飽和透水係数と体積含水率の関係

不飽和透水係数は、一次元鉛直浸透のRichardsの基礎式

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

をz積分し、境界条件（地表面 $z=0$ で、 $v=0$ ）を代入し、 $k(\theta)$ で整理した式

$$k(\theta) = \frac{\left(\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \right)_{z,t}}{\left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right)_{z,t}} \quad \dots\dots(2)$$

温度T(°C)	湿润密度 (g/cm³)	乾燥密度 (g/cm³)	体積含水率 (cm³/cm³)	飽和透水係数 k_T (cm/sec)	
				$k_T (\times 10^{-2})$	$k_{15} (\times 10^{-2})$
23	1.987	1.578	0.409	2.33	1.932
30	1.995	1.577	0.418	2.85	1.995
40	1.970	1.553	0.417	3.14	1.802
50	1.997	1.565	0.432	3.64	1.753
60	1.982	1.565	0.417	4.98	2.044

表-2 各実験の飽和透水係数

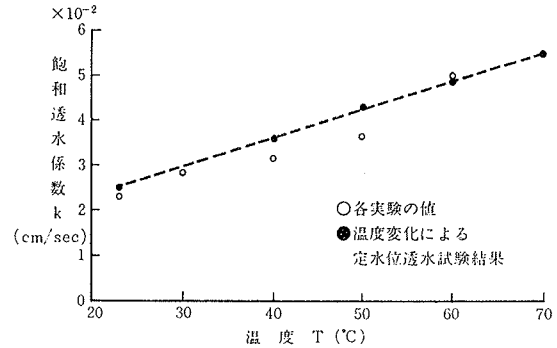


図-7 飽和透水係数と温度の関係

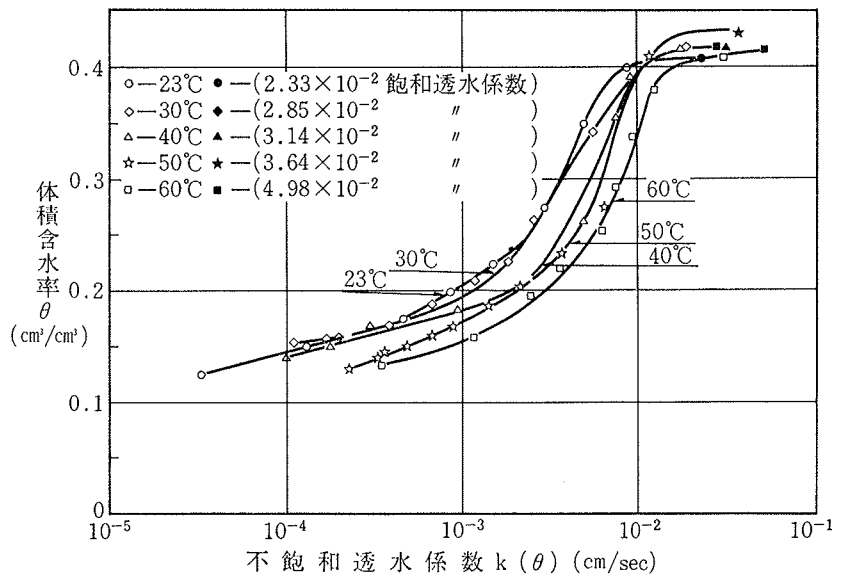


図-8 体積含水率と不飽和透水係数の関係

で求めることができる³⁾。ここに、t: 時間、v: 浸透速度、 θ : 体積含水率、 ψ : 圧力水頭、z: ある基準面の高さ、 $k(\theta)$: 不飽和透水係数である。(2)式のうち、分母は動水勾配を表わし、実験で得られた圧力水頭と時間の関係から求め、分子は流速を表わし、ガンマー線測定装置で測定した深さ方向における体積含水率の分布図によって求めることができる⁴⁾。

このようにして求めた各温度条件における体積含水率 θ と不飽和透水係数 $k(\theta)$ の関係を図-8に示す。図中、黒印で示したものは飽和透水係数である。

体積含水率 (θ) と不飽和透水係数 $k(\theta)$ の曲線は、飽和透水係数を最大値として、図-8 に示すように曲線を描きながら減少する。一般に、不飽和透水係数は、土中水の粘性、間隙の形・大きさ・曲折・拡張・分岐・連結、土粒子の表面活性などに依存する⁵⁾。したがって、温度が高いものほど不飽和透水係数が同一の体積含水率で大きくなるのは、水の動粘性係数が温度の上昇とともに小さくなるため、砂試料の間隙中を水が流れ易くなること主な原因と考えられる。

4. 数値解析および結果

土中の浸透を支配する基礎方程式は(2)式において、体積含水率 θ と圧力水頭 ψ のあいだに一価関係が維持されるとした次式である。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $C(\psi)$ は比水分容量で、

$$C(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \quad \dots\dots\dots(4)$$

として表わされる。

排水試験の初期条件と境界条件は、鉛直上方に z 軸の正の方向をとれば、次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} t=0, z>0, \theta=\theta_{sat} \\ t>0, z=0, \psi=0 \\ t>0, z=L, \frac{\partial \psi}{\partial z}=-1 \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 θ_{sat} : 飽和体積含水率、 L : 試料上端面までの高さである。

(3)式を差分法して、実験で得られた図-6の水分特性曲線(圧力水頭 ψ と体積含水量 θ の関係)と図-8の体積含水率 θ と不飽和透水係数 $k(\theta)$ の関係から60°Cの値を用いて数値解析した結果と、実験で得られた同一温度の体積含水率 θ と高さ z の分布を図-9に示した。図-9によると、実験値と比較して、計算値は若干体積含水率 θ の進行が早い、全体的に両者は近似している。このように、今回の温度範囲における鉛直一次元の不飽和浸透については、水分特性曲線と不飽和透水係数を調べることによって、数値計算によって推定できると考えられる。

5. あとがき

今回の実験は、標準砂を用いて、温水の鉛直一次元排水の実験を行ない、不飽和浸透特性を調べ検討するとともに、数値解の検証も実施した。現在、砂や岩などの多

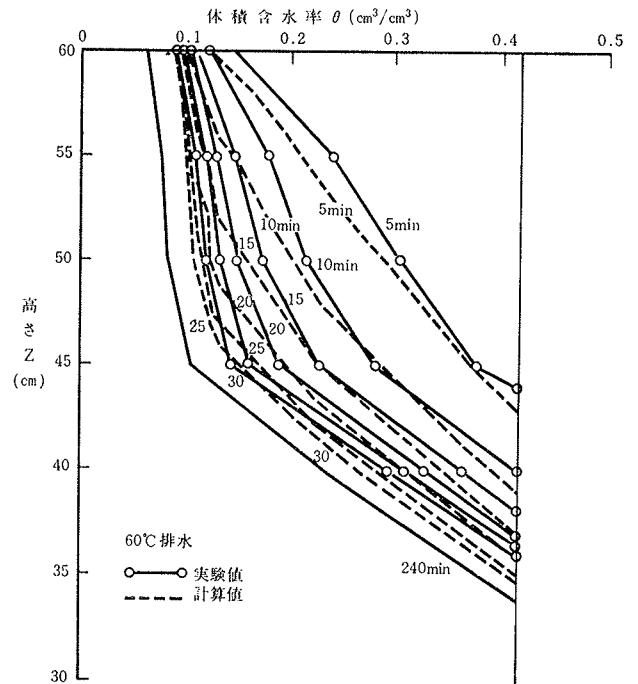


図-9 排水過程における体積含水率の分布

くの試料についても同様の実験を継続するとともに、不飽和浸透流による熱伝導の実験も実施しており、それらの結果についても次の機会に報告したいと考えている。

謝 辞

この研究の遂行に際して、埼玉大学 工学部 地盤水理実験施設の佐藤邦明助教授に御指導を戴いた。また、数値解析にあたって、当技術研究所の高橋真一研究員に協力して戴いた。ここに記して深く感謝致します。

参考文献

- 1) 佐藤邦明: 飽和多孔体および温水浸透流における温度伝導率の実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 320, (1982. 4), pp. 57~65
- 2) 土壌物理研究会編: 土の物理学, 森北出版, pp. 220~225
- 3) 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, No. 307, (1981. 3), pp. 59~69
- 4) 佐藤, 西林, 須藤: 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, (1985. 2), pp. 863~868
- 5) 2)と同じ pp. 241~245