

熱を伴う不飽和浸透流の基礎的研究

Fundamental Study of Unsaturated Flow Accompanied with Heat Transfer

埼玉大学 工学部

正員 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

はじめに

従来、不飽和浸透流については等温状態でしかも水の移動に注目した研究が進められてきたが、地盤の乾燥過程や伝熱を考える際には必ず熱を伴う不飽和浸透流の現象を解明することが不可欠である。そこで、本研究は、標準砂について熱を与えた場合の不飽和浸透流の基礎的性質を、温度自動記録装置、圧力変換器、ガンマー線密度計を用いて実験的に究明しようとしたものである。

1. 実験装置と実験方法

(1) 実験装置

本研究に用いた実験装置は図-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ー線源と検出装置などから構成される。

図-1において、実験装置について説明すると、②は、透明アクリル製モールド(縦10cm、横5cm、高さ60cm)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)で周囲を覆う。砂モールドの上下端部には、ステンレス多孔板と金網が設置されており、その両端に①の上端水槽、④の下端水槽がある。砂モールドの両側面には、⑤の温度センサー、⑦の圧力センサー用の孔がそれぞれ10cm、5cm間隔にあけてある。温度センサー(写真-3参照)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0.9cm、厚さ0.5cm)を取り付け(写真-3参照)、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を行なう。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り制御する。温度調節水槽への給水は⑫のマリオットびんにより行ない、温度調節水槽内の水温を一様にするために⑪の攪拌装置を設置した。試料内への給水量の測定は、マリオット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 , 70μCi)を使用し、測定位置において正確に測定できるように透過ガンマー線束を絞り、⑯の検出装置でガンマー線計数率を測定することより、みかけの密度に変換して求める。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可能な⑰の昇降装置を設置した。

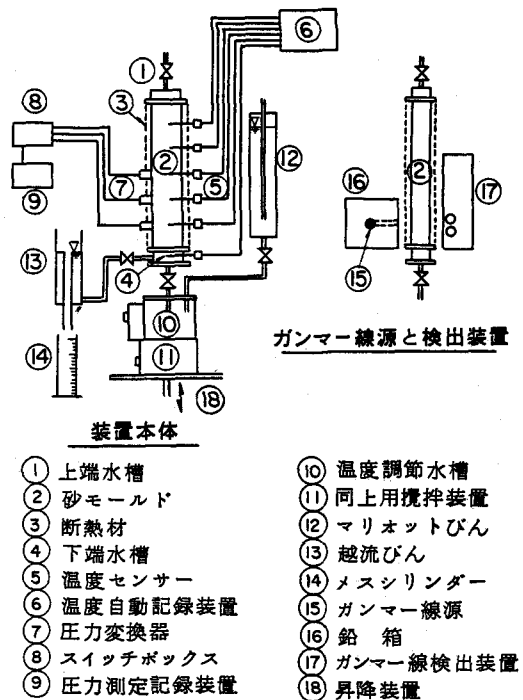


図-1 実験装置の概略図

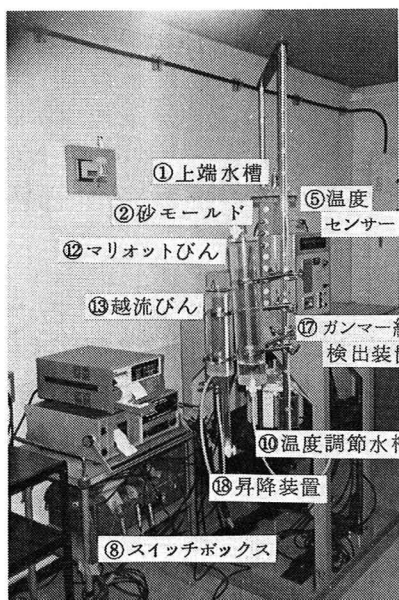


写真-1 実験装置の全景

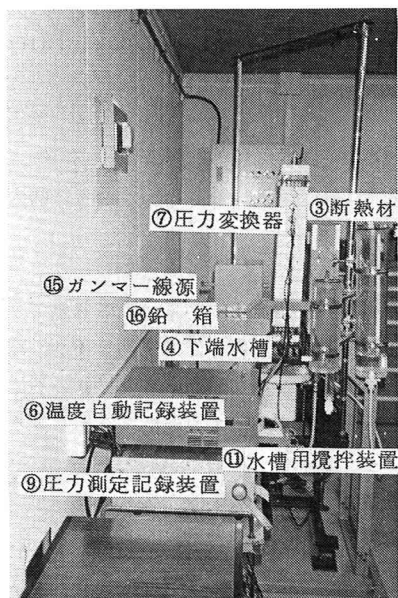


写真-2 実験装置の正面

(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、 $C = 0.1768 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ である。使用した標準砂の粒径過積曲線を図-2に示した。この試料の10%粒径は、 $D_{10} = 0.11 \text{ mm}$ 、均等係数は、 $U_c = 1.25$ であった。

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、密度が均質になるように突き棒で約1 cm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 1.58 g/cm^3 である。また、間隙率は、 $n \div 40\%$ である。

(3) 実験の種類と実験方法

本実験は、大別して浸透水が室温状態(約 23°C)における不飽和浸透実験と熱を伴う場合の温水(約 40°C , 60°C)の不飽和浸透実験の二つの実験を行なった。各々について不飽和浸透実験としては、乾燥状態における試料の下部から給水させる湿潤試験と、水で飽和させた試料の下部から排水させる排水試験の2ケースとした。また、試料の透水性を把握するため、各々について飽和状態における定水位透水試験も行なった。

それらの実験の種類と実験方法については、表-1に示した。

表-1に示すように、常温状態の試験は、砂試料温度と



写真-3 温度センサーと圧力変換器およびその取付部

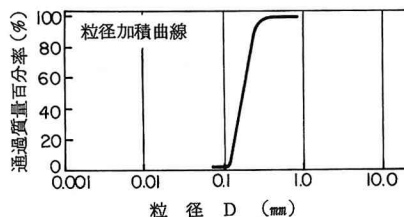


図-2 標準砂の粒径過積曲線

水温ともに室温の約23℃である。

湿潤試験方法は、砂モールドの底部から一定水位（15 cm）でマリOTTびんより給水し、土柱内の圧力水頭（3点）、体積含水率、浸潤前線の上昇状況を測定した。定水位透水試験は、砂試料を飽和させた後、マリOTTびんと上端水槽を、下端水槽と越流びんをそれぞれ接続し、水頭差60 cmで試験を行なった。定水位透水試験終了後、上部からの給水を停止し、鉛直一次元の排水試験を行ない、湿潤試験と同様の測定項目を測定した。

温水の試験については、表-1に示すように、湿潤試験は、砂試料温度が室温（約23℃）、温水の温度がそれぞれ40℃、60℃である。湿潤試験方法は、(1)の実験装置で述べたように、下端水槽は温度調節水槽に接続し、底部から一定水位（20 cm）で温水を給水し、圧力水頭、体積含水率、浸潤前線

の上昇状況を測定した。また、温水40℃のときに、砂カラムの熱伝導を調べるため、砂試料には水を浸透させない場合（下部のステンレス多孔板と金網の代わりに、水が浸透しないように銅板を設置）の温度上昇変化の測定を行なった。定水位透水試験は、試料を水で飽和させた後、温水を通水させ、それぞれの温度（40℃、60℃）になった時に試験を行なった。定水位透水試験終了後、通水を停止し、試料温度が変化しないうちに、鉛直一次元の排水試験を行なった。

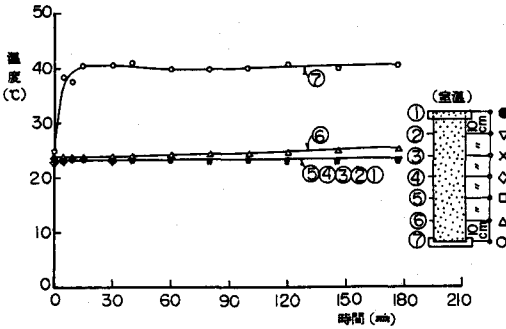
実験に使用した水は、蒸留水を脱気したものである。

2. 実験結果

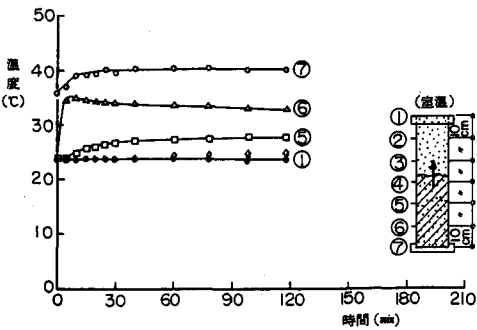
図-3、図-4は、温水40℃、60℃の各試験における試料内の温度と経過時間の関係を示したものである。図-3(a)より、温度40℃の砂カラムの熱伝導をみると、熱源から10 cmの位置で180分経過後に約1～2℃程度温度上昇するが、それ以上の距離になると180分経過程度では、温度の上昇は見られない。次に、図-3(b)より、40℃の湿潤試験の結果を見ると、底部から与えた一定水位20 cmまでの10 cm、20 cmの測定位置の温度は試験開始直後から上昇するが、不飽和浸透となる30 cmの位置の温度上昇は、やはり砂カラムの試験結果と同様に1～2℃程度しか上昇していない。ここで注意したいのは、センサー番号⑥の温度経時変化は初期に上昇するが、やがて砂粒子に熱伝導が起これ、安定するまで一時温度が低下する。温水は底部から20 cmの位置まで上昇するのに砂試料の温度により約12～13℃程度低下しており、不飽和浸透をする位置ではほとんど試料温度の常温に近くなっている。図-3(c)より、排水試験については、初期状態は全試料等温であり、試験開始とともに温度が徐々に低下していく傾向にある。排水試験の場合は、湿潤試験に比べ、試験開始直後の水温は、まだ温水の状態として保たれている。したがって、今回の場合、温水による影響を見るには、排

表-1 実験の種類と実験方法の一覧

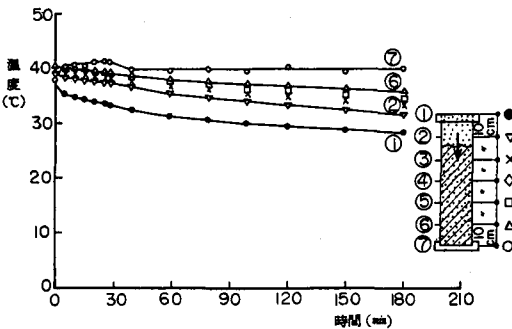
試験名	常温状態 (約23℃)		温水 約40℃		温水 約60℃	
	装置模式図	実験方法	装置模式図	実験方法	装置模式図	実験方法
湿潤試験		乾燥砂 $\rho_d = 1.574 \text{ g/cm}^3$ 砂温度 $\pm 23^\circ\text{C}$ 水温 $\pm 23^\circ\text{C}$ 底部より一定水位 (15 cm) で給水。		乾燥砂 $\rho_d = 1.588 \text{ g/cm}^3$ 砂温度 $\pm 23^\circ\text{C}$ 水温 $\pm 40^\circ\text{C}$ 底部より一定水位 (20 cm) で温水を給水。砂カラムの熱伝導も実施。		乾燥砂 $\rho_d = 1.588 \text{ g/cm}^3$ 砂温度 $\pm 23^\circ\text{C}$ 水温 $\pm 60^\circ\text{C}$ 底部より一定水位 (20 cm) で温水を給水。
定水位透水試験		飽和砂 $\rho_s = 1.99 \text{ g/cm}^3$ 砂温度 $\pm 23^\circ\text{C}$ 水温 $\pm 23^\circ\text{C}$ 砂試料を飽和させ、透水試験を行なう。 H = 60 cm		飽和砂 $\rho_s = 1.982 \text{ g/cm}^3$ 砂温度 $\pm 40^\circ\text{C}$ 水温 $\pm 40^\circ\text{C}$ 飽和させた試料に40℃の温水を通水させ、試料が40℃のときに試験。		飽和砂 $\rho_s = 1.987 \text{ g/cm}^3$ 砂温度 $\pm 60^\circ\text{C}$ 水温 $\pm 60^\circ\text{C}$ 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 $\rho_s = 1.99 \text{ g/cm}^3$ 砂温度 $\pm 23^\circ\text{C}$ 水温 $\pm 23^\circ\text{C}$ 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 $\rho_s = 1.982 \text{ g/cm}^3$ 砂温度 $\pm 40^\circ\text{C}$ 水温 $\pm 40^\circ\text{C}$ 透水試験終了後、上部を大気圧、室温に開放し、下部は40℃で試験。		飽和砂 $\rho_s = 1.987 \text{ g/cm}^3$ 砂温度 $\pm 60^\circ\text{C}$ 水温 $\pm 60^\circ\text{C}$ 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。



(a) 砂カラムの熱伝導 (40°C)



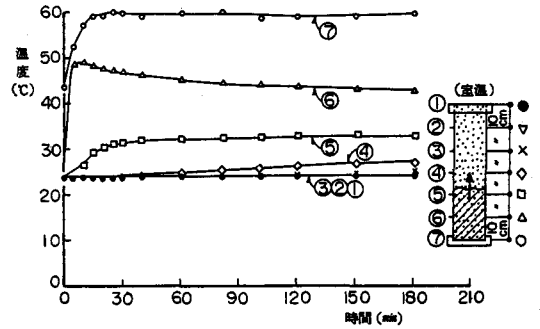
(b) 湿潤試験の場合 (40°C)



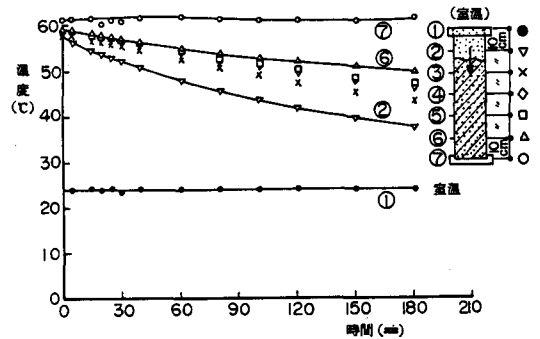
(c) 排水試験の場合 (40°C)

図-3 砂の熱伝導および温水40°Cの湿潤、排水試験の温度と時間の関係

一定水位の条件（常温状態は15cm，温水状態は20cm）は若干異なるが，不飽和領域における浸潤線の移動には，温水による影響はそれほど見られない。例えば，それぞれの一定水位の位置から10分後の浸潤線の移動距離は，常温状態で約11cm，温水40°Cで約9.3cm，温水60°Cで約11cm程度とあまり変化がない。それは，前述したように，浸透させた温水は砂試料の温度が低いために，不飽和浸透する位置においては定温に近い状態となったためと考えられる。また，毛管上昇高さは，常温状態の45時間経過後で約27cm，温水40°Cの約2時間後で約17cm，温水60°Cの約2時間30分後で約18cmである。図-5(b)は，排水試験における浸潤線の移動に



(a) 湿潤試験の場合 (60°C)



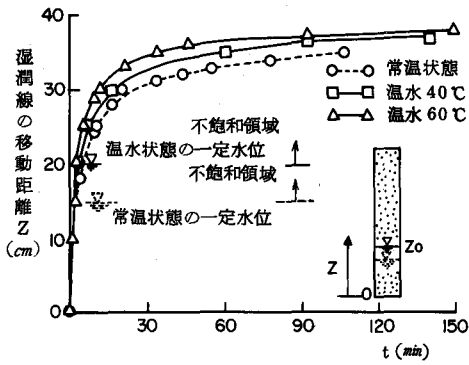
(b) 排水試験の場合 (60°C)

図-4 温水60°Cの湿潤，排水試験の温度と時間の関係

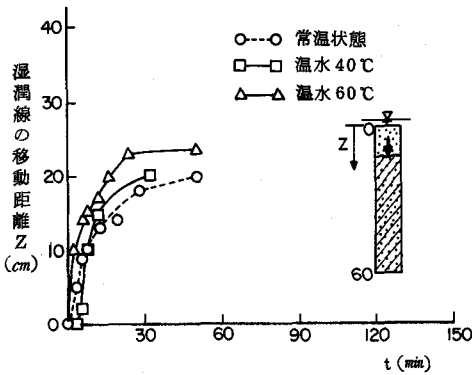
水試験のほうが好ましいと思われる。

図-4は，温水60°Cの場合であるが，(a)図の湿潤試験については，温水40°Cの場合と同様の傾向にあり，試料上端では，ほぼ常温に近い値である。(b)図の排水試験については，温水40°Cで述べた傾向が一層顕著に表われている。

次に，浸湿前線の移動を各実験について示したものを図-5に示す。浸潤線は，砂モールドの各側面で多少違いが見られたため，測定側面を決めて観測した。図-5(a)は，湿潤試験における浸潤線の移動を示したものであるが，常温状態と温水状態とで，下部からの



(a) 湿潤試験の浸潤線の移動



(b) 排水試験の浸潤線の移動

図-5 各々の不飽和浸透試験の浸潤線の移動距離と経過時間の関係

ついて示したものである。排水試験については、湿潤試験に比べて温水の影響がある程度見られ、図-5(b)より、浸潤線の位置 $Z=0$ の時刻から10分後の浸潤線の移動を見ると、常温状態で約 12.5cm に対して、 40°C の温水では約 15.5cm 、 60°C の温水では約 16.5cm であり、排水のスピードが温度の高いものほど早い傾向にある。これは、前述した温度と経過時間に見られるように、温水条件がほぼ保たれていたため、水の粘性が影響を及ぼしているものと考えられる。当然のことであるが、各温度条件で行なった定水位透水試験の結果(表-2)を見てもわかるように、飽和透水係数は温度の高いものほど大きい。表-2中、 k_{15} は、温度 15°C に対する透水係数で、温度 T $^\circ\text{C}$ 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試料の k_{15} は、ほぼ同じ値である。

表-2 定水位透水試験結果

試験条件	透水係数 cm/sec
常温状態	$k_{23}=2.14 \times 10^{-2}$, $k_{15}=1.75 \times 10^{-2}$
温水 40°C	$k_{40}=2.8 \times 10^{-2}$, $k_{15}=1.6 \times 10^{-2}$
温水 60°C	$k_{60}=3.84 \times 10^{-2}$, $k_{15}=1.57 \times 10^{-2}$

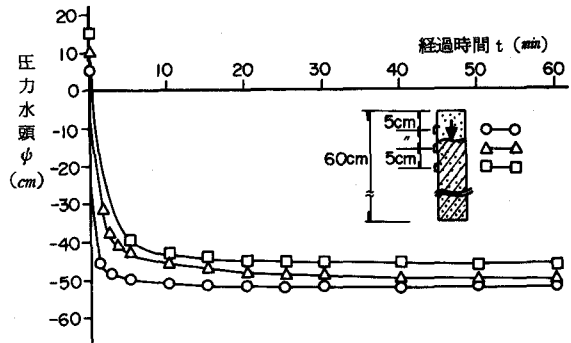


図-6 温水 60°C 排水試験時の圧力水頭と時間の関係

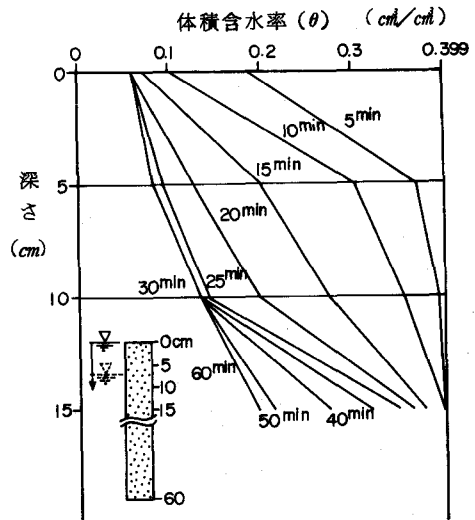


図-7 温水 60°C 排水試験時の体積含水率の分布

図-6は、温水60℃の排水試験から得られた圧力水頭の時間的変化である。圧力変換器は、試料上端から5cm, 10cm, 15cmに設置したものである。圧力水頭は、試験開始とともに急激に低下し、短時間で平衡状態に近くなっている。

図-7は、温水60℃の排水試験時の体積含水率を経過時間をパラメーターとして示した分布図である。排水試験4時間後の最小含水量(θ_r)は0.065 cm/cmである。また、有効体積含水率(θ_e)は0.399 cm/cmで、試験試料は脱気により作製したので、ほぼ完全飽和に近い状態である。図-7の体積含水率の時間的変化と圧力水頭の時間変化とを対比してみると、体積含水率の時間的変化に比べて、圧力水頭の平衡状態に近づく時間的変化のほうが若干早いようにみられる。これは、圧力変換器を設置している砂モールド側面の浸潤線が早く移動した影響が現われたことも考えられる。

次に、不飽和透水係数について述べると、任意の点の任意時間の不飽和透水係数は、一次元鉛直浸透のRichardsの基礎式

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

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

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

で求めることができる。ここに、t; 時間, v; 浸透速度, θ ; 体積含水率, ϕ ; 圧力水頭, z; ある基準面からの高さ, k(θ); 不飽和透水係数である。(2)式のうち、分母は図-6、分子は図-7の実測値により求めた。そのようにして求めた温水60℃の排水試験での不飽和透水係数と体積含水率との関係を図-8に示した。また、図-8中には、²⁾河野・西垣が求めた不飽和透水係数を参考に実線で示した。体積含水率が違うために単純には比較できないが、 $\theta - k$ (θ)の分布形状はほぼ同様な傾向にあることがわかる。また単純に、体積含水率を0.1程度づらして、 $\theta - k$ (θ)曲線を見ると、60℃の排水試験で求めたk(θ)のほうが大きい傾向にある。

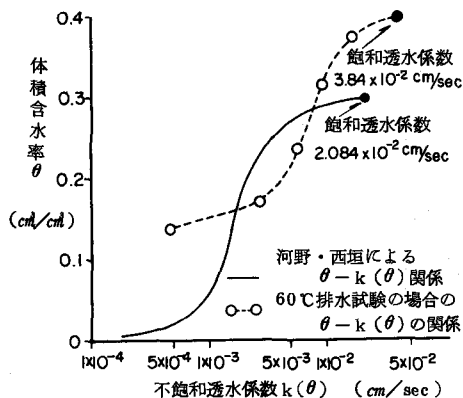


図-8 体積含水率と不飽和透水係数の関係 (60℃の排水の場合)

あとがき

今回の実験は今後の研究の足掛りとして、標準砂を用いて、温水の不飽和浸透の実験を行なったが、この実験装置を使用することによって、その浸透特性を調べ得ることがわかった。今後、このような実験結果を踏まえて、砂や岩などの多くの試料について実験を継続し、実験手法の確立と実際への適応を目指していきたいと考えている。最後に、本研究を進めるに当って、協力していただいた榎大林組技術研究所の阪谷幸吉研究員、埼玉大学工学部建設基礎工学科北村剛史君にお礼申し上げる次第である。

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，第320号，1982.4，pp.57～65
- 2) 河野伊一郎・西垣誠：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