

熱の影響を受ける不飽和土中の浸透流の実験的研究

——上面よりの乾燥過程の場合——

西林 清 茂 須 藤 賢
村上 考 司

Experimental Study on Unsaturated Flow under Heat Transfer

——Drying Process at Soil Surface——

Kiyoshige Nishibayashi Ken Sudo
Kohji Murakami

Abstract

When considering underground hydraulics in geologic disposal of radioactive wastes, and designing and constructing facilities and structures for geothermal power generation, it is absolutely necessary to investigate saturated-unsaturated flow accompanied by heat transfer. This paper describes an experimental study of the fundamental characters of heat and capillary water with regard to unsaturated soil (Toyoura sand and Silty fine sand) produced during the drying process. The following results are obtained: (1) The change in volumetric water content is strongly affected by the heat applied to the surface and the humidity, and occurs more rapidly with higher temperature and lower humidity. (2) The depth of unsaturated soil, regardless of the temperature applied to the surface and the humidity, is more or less constant and is close to the height of capillary rise. (3) The vertical distribution of pore pressure in soil falls gradually from the initial hydraulic pressure. (4) The relation between unsaturated hydraulic conductivity and volumetric moisture content differs from the results of one-dimensional vertical flow tests.

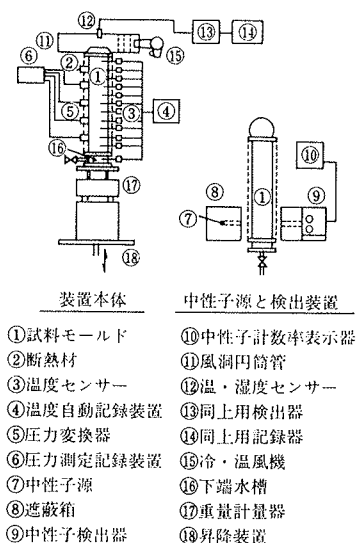
概 要

放射性廃棄物の地層処分や地熱発電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、熱を加えた飽和・不飽和浸透流の検討が不可欠である。この報告は、乾燥過程で生じる不飽和土中（標準砂、シルト質細砂）について室内実験を行ない、熱と浸透流の基本性状について次の事項を述べている。(1) 不飽和土の体積含水率の変化は土表面に与える熱と湿度に強い影響を受け、温度が高く、湿度が低いほど速い。(2) 不飽和土の深さは、土表面に与える熱と湿度の高さにかかわらず、ほぼ一定で、毛管上昇高に近い。(3) 乾燥過程における土中の圧力水頭の鉛直分布は、初期の静水圧からしだいに低下する。(4) 算定した不飽和透水係数と体積含水率の関係は、前報¹⁾の排水過程の場合とは異なる。

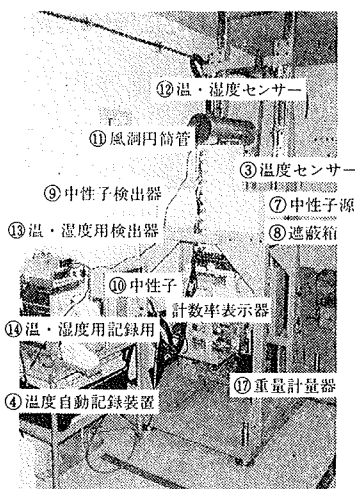
1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分や地熱発電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。

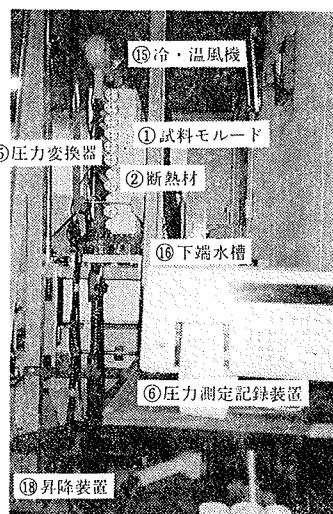
前報¹⁾では、排水過程で生じる不飽和土中の熱と浸透流の基本性状について述べた。この研究は、乾燥過程で生じる不飽和土中の熱と浸透流の基礎的性質を、標準砂とシルト質細砂を対象として、土表面から蒸発させる鉛直一次元の乾燥試験によって実験的に究明しようとしたものである。



図一 実験装置の概要



写真一 実験装置の正面

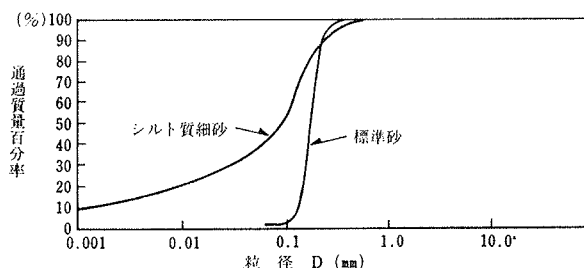


写真二 実験装置の裏面

2. 実験装置と実験方法

2.1. 実験装置

この実験に使用した装置は、図一、写真一、写真二に示す。図一に示すように、実験装置は、装置本体と中性子源と検出装置とから構成されている。その詳細について説明すると、図一中、装置の各部は番号で対応し、①試料モードは耐熱性透明板の柱状容器（縦0.1 m、横0.1 m、高さ0.6 m）で、断熱のために②の断熱材（発泡スチロール）で覆っている。試料モードの上端部には試料上面に熱風が送れるように⑪の風洞円筒管を設置しており、下端部には金網とステンレス多孔板を設置し、その下部に下端水槽がある。風洞円筒管には風を送る⑮の冷・温風機を設置し、その風洞内の温度・湿度を測定するために⑫の温・湿度センサーを取り付け、その経時変化を⑬、⑭の検出器、記録器により測定する。また、試料モードの両側面には、③の温度センサーと⑤の圧力変換器を取り付ける孔がそれぞれ0.05 m 間隔にあってあり、各々が任意の位置に設置できるようにしている。温度と圧力水頭の時間的な変化は、④と⑥の自動測定記録装置で測定する。試料内の体積含水率の測定は、低レベルの⑦の中性子源（ C_r-252 , 100 μCi 以下）を使用し、測定位置において正確に測定できるように⑧の減速材により中性子を絞り、⑨と⑩の検出装置で中性子計数率を測定することにより等価含水量に変換して求める。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、中性子測定装置の間を試料モードが上下移動可能のように⑱の昇降装置を設置している。また、試験中の蒸発量を知るために、⑰の重量計量器を設置し、試料重量が定時的に測定できるようにしている。



図二 実験試料の粒度分布

2.2. 実験試料

実験に使用した試料は、豊浦標準砂と埼玉県戸田産のシルト質細砂である。これらの試料の粒度分布を図二に示す。シルト質細砂については、試料モード内に均一に充填できるように、420 μ フレイ通過分を実験試料とした。

試料の作製方法は、試料モードに乾燥した試料を少しずつ入れ、密度が均等になるように突き棒で突き固めて作製した。

実験で使用した水は、すべて脱気した蒸留水である。

2.3. 実験方法および測定項目

土の種類	標準砂			シルト質細砂
実験 No.	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4
送風温度(°C)	26.0	55.0	75.0	57.5
土試料初期温度(°C)	23	23	23	23
送風速度(m/s)	2.09	2.09	2.09	2.20
送風湿度(%)	18.0	6.5	3.5	6.5
土試料長さ(m)	0.6	0.6	0.6	0.6
初期水位高(m)	0.6	0.6	0.6	0.6
乾燥密度(kg/m ³)	1,575	1,554	1,575	1,378
湿潤密度(kg/m ³)	1,972	1,955	1,979	1,826
飽和透水係数(m/s)	1.85×10^{-4}	1.92×10^{-4}	1.93×10^{-4}	5.85×10^{-7}

表一 実験条件および実験試料の物理的性質

この実験は、完全に飽和させた試料の上面に温風を送り続ける乾燥実験である。

実験方法は、気乾試料を試料モールドに均等に充填後、試料下部から水を給水し脱気により完全に試料を飽和させる。その後、定水位透水試験を行ない、試料の飽和透水係数を求める。その時の試料温度および水温は、室温と同じ23℃である。その結果は、表一に示しているように、標準砂は $k \approx 1.9 \times 10^{-4}$ m/s, シルト質細砂は $k = 5.85 \times 10^{-7}$ m/s である。定水位透水試験終了後、下端水槽のバルブを閉めて、試料モールド上端に風洞円筒管を設置し、冷・温風機により温風を試料上面に送風する。

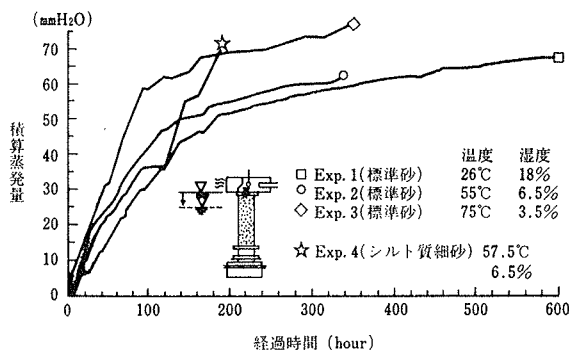
温風の温度条件は、表二に示すように、標準砂は、Exp. 1 で26℃, Exp. 2 で55℃, Exp. 3 で75℃の3種類で、シルト質細砂は Exp. 4 の57.5℃の1種類である。温風速度は、約2 m/sの同一条件とした。なお、実験は23℃の恒温室で行なった。

測定項目は、試料の深さ方向の温度と、圧力、試料の体積含水率（水分量）、試料全体の重量、乾燥前線、および風洞円筒管内の温度と湿度である。

3. 実験結果と考察

3.1. 蒸発量の経時変化

図一3は試料重量の変化量を断面積で割って求めた積算蒸発量と時間の関係を示したものである。標準砂について見ると、初期時点から蒸発量は大きくなり、蒸発速度（蒸発量/時間）は、土試料表面に与える温度の高い Exp. 3, Exp. 2, Exp. 1の順に大きくなっている。蒸発速度は、ある時間経過すると小さくなり、その変化点に至るまでの時間は、Exp. 1で130時間前後、Exp. 2で100時間前後、Exp. 3で90時間前後であり、温度が高く湿度の低い順から早い時間で変化が生じている。次に、シルト質細砂（Exp. 4）についてみると、蒸発速度は標準砂のように経過時間とともに小さくなることもなく、ほぼ一定のまま推移している。約150時間経過後では、標準砂の積算蒸発量より大きくなっている。シルト質細



図一3 積算蒸発量の経時変化

砂の場合、経過時間72時間から試料下部の下端水槽に気泡が混入し始めるという現象が生じた。原因は、試料上面が蒸発することによって、土の中に大きな毛管現象が働くためと考えられる。

3.2. 試料内の温度分布

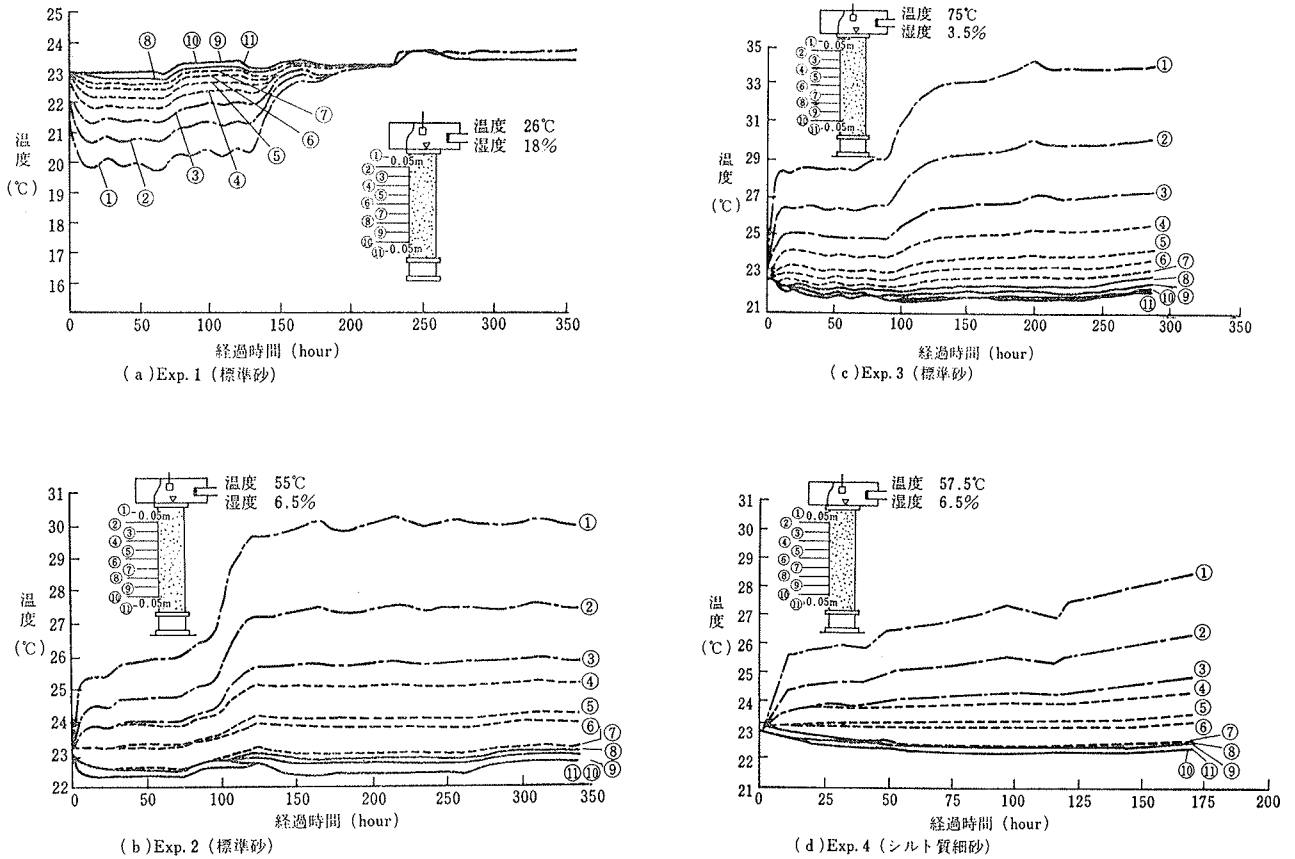
試料内部の間隙を通して蒸発する過程における試料内の温度は、気化熱と試料自体の熱伝導によって大きく影響を受ける。図一4は、各試料内の温度と経過時間の関係を示したものであるが、深さ方向の各測定点の温度は、経過時間とともに変化していることがわかる。標準砂についてみると、Exp. 1は送風温度が室温に近いので、試料上面からの熱伝導はなく、試料内温度は水の蒸発による気化熱によって低下している。Exp. 2とExp. 3の試料表面近くの温度は、上面に与えられる熱量により、初期時点で上昇し、その後、土中の水分の蒸発による気化熱の影響を受けることによってほぼ一定値に近づく。試料の乾燥が進み、蒸発が少なくなって熱収支のバランスがくずれるとともに、再び急激な温度上昇が生じている。一方、Exp. 4のシルト質細砂の場合、表面付近の温度は時間とともに上昇している。これは、主に、水面上の毛管上昇が高いことによって、蒸発がゆっくり生じているためと考えられる。

このように、乾燥過程によって生じる試料内の温度変化は、気化熱と熱伝導の両方によって影響していることがわかる。

3.3. 試料内の圧力分布

図一5は、標準砂（Exp. 2）とシルト質細砂（Exp. 4）の深度方向の圧力水頭の分布を示したものである。初期状態での圧力水頭の深さ方向の分布は静水圧である。そして、この静水圧分布は、蒸発によって時間とともに変化する。図一5より、標準砂の場合、初期においては、静水圧分布の勾配でほぼそのまま負の側へ移行している。経過時間とともに、試料上部においては、圧力水頭の深さ方向のこう配が多少緩くなり、水が上方に引っぱられる傾向が生じている。この現象は、不飽和領域での毛管作用が働いているためと考えられる。図一5(a)には、40時間経過後の試料内の水分分布模式図を併記している。地下水水面は、圧力水頭の値が0の位置で、それより上部には、毛管作用によって間隙が飽和している毛管飽和帯と間隙が不飽和の状態の毛管不飽和帯が存在する（図一6(b)参照）。蒸発が進行するとともに、それらの境界面は下方へと移行する。一方、シルト質細砂では、初期の時点は標準砂と同様であるが、その後は、標準砂の場合と比べて大きな負圧が試料下部にまで生じている。

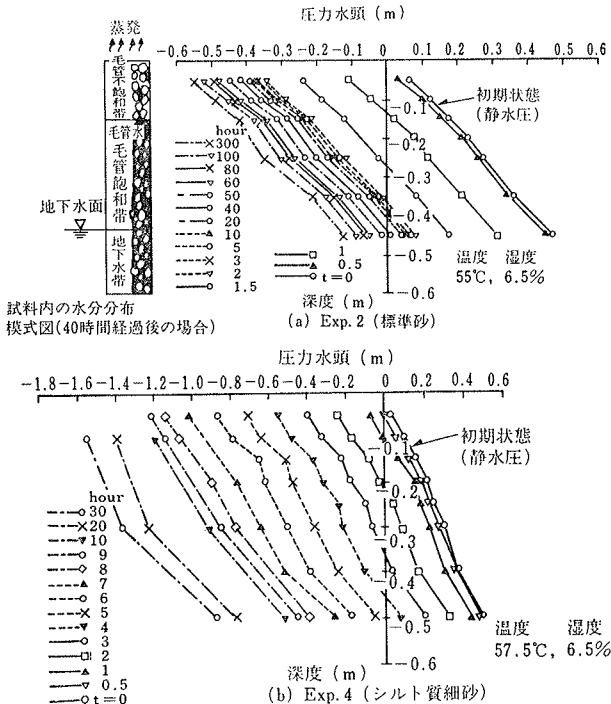
3.4. 試料内の体積含水率の分布



図一4 土試料内の温度と経過時間の関係

各実験条件における試料内の体積含水率の深度分布を
図一6に示す。体積含水率は、土表面において時間経過
とともに急激に減少する。その傾向から、蒸発は土表面

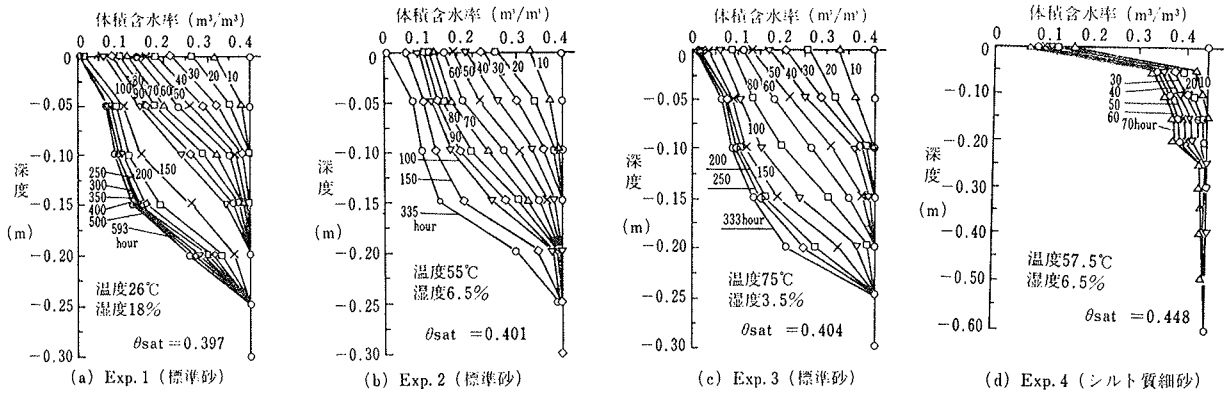
から発生し、深度方向へ進行することがわかる。図一6
の各図を比較すると、乾燥の進行は、温度と湿度、そして土の性状に関係していることがわかる。標準砂の体積
含水率の変化をみると、土表面に与える熱の温度が高く、
湿度が小さい Exp. 3 が早く減少している。体積含水率
が減少している深さは、約 0.2 m ~ 0.25 m であり、標準
砂の毛管上昇高(約 0.27 m)に近い。シルト質細砂につ
いては、時間的な変化を定常近くまで測定できなかった
が、変化する深さが土試料下部の 0.6 m 付近まで達して
おり、毛管力の影響が生じていると思われる。



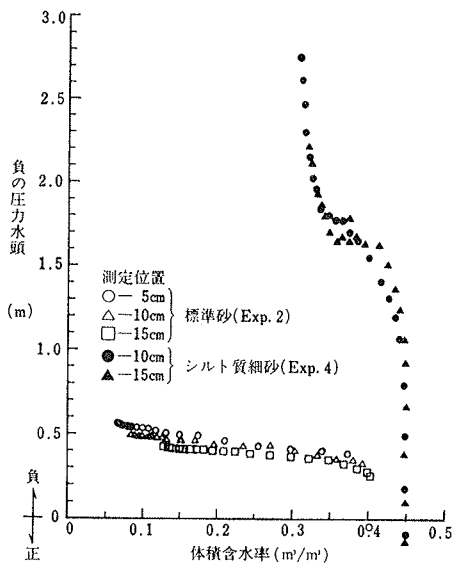
図一5 土試料内の経時的圧力水頭分布

3.5. 水分特性曲線と不飽和透水係数

水分特性曲線は、負の圧力水頭と体積含水率の関係で
示され、不飽和領域内の浸透特性を表すものの一つで
ある。図一7には、標準砂 Exp. 2 とシルト質細砂 Exp.
4 の場合について、圧力と体積含水率の測定結果から求
めた水分特性曲線を示す。標準砂は、負の圧力水頭が大
きい部分で体積含水率は小さく、逆に小さくなるにつれ
て大きくなっている。一方、シルト質細砂の場合、体積
含水率の大きい部分(飽和領域に近い)では、体積含水
率の減少程度がわずかで、負の圧力水頭の変化はきわめ
て大きい。これは、土の特性によるもので、標準砂の場
合、粒子からの吸着力によって保持される吸着水が少な



図—6 各実験条件における体積含水率の分布



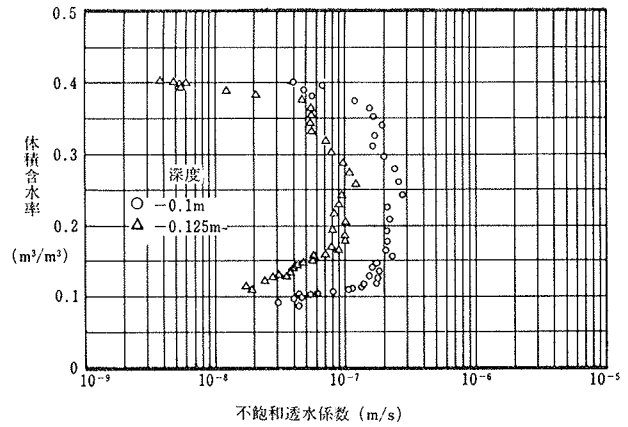
図—7 水分特性曲線

く、毛管作用によって保持される水分が多いので、負の圧力水頭が小さくなるにつれて後者の水分が著しく増加するためである。

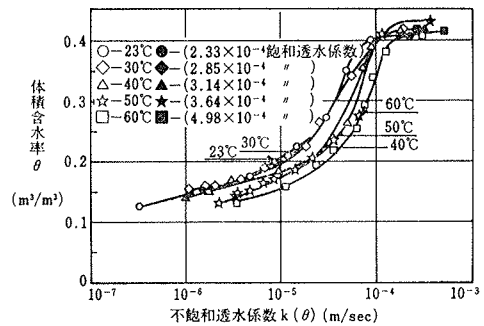
図—8は、水蒸気移動を無視し、等温状態の Richards の式¹⁾ から算定した体積含水率と不飽和透水係数の関係(標準砂 Exp. 2) について示したものである。不飽和透水係数の値は、全体的に見ると、体積含水率の大きい初期の時点では急激に大きくなって、その後、ほぼ一定値を保ち、体積含水率が小さくなり始めると、再び値は小さくなり、その変化は、 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 程度である。この現象は、圧力水頭の変化がほぼ一定のため、蒸発による水分移動量の変化に原因している。図—9に示す前報¹⁾ で求めた排水過程の体積含水率と不飽和透水係数の関係と比較すると、その形状は大きく異なり、値も小さい。

4. あとがき

土表面からの乾燥過程における熱と水分の移動現象に



図—8 体積含水率と不飽和透水係数の関係(標準砂 Exp. 2)



図—9 排水過程における体積含水率と不飽和透水係数の関係¹⁾

ついて、標準砂とシルト質細砂を対象に室内実験を行ない、その基礎的性状を検討した。今後、得られた結果を基に、理論的な解析および岩石への適応を進めていきたいと考えている。最後に、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頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西林, 須藤, 村上: 熱を伴う不飽和浸透流の基礎的研究, 大林組技術研究所報, No. 32, (1986), pp. 37~41