

締 固 め 土 の 透 水 性*

藤 村 尚**・久保田 敬 一**

(1972年10月31日 受理)

Permeability of Compacted Soil

by

Hisashi FUJIMURA and Keiichi KUBOTA

(Received October 31, 1972)

Department of Civil Engineering

Synopsis

This paper describes the results of research carried out on the Decomposed Granite Soils which are widely distributed over Japan. The permeability tests were conducted to investigate the engineering properties of the decomposed soils principally. A series of experimental observations has been performed in order to clarify the influence of molding water-content and consolidation condition on the permeability of specimens of the compacted soils.

With the author's experimental results, the following subjects were discussed mainly, and a summary of writer's views led to the conclusion that, (1) Soil structure is greatly influenced by molding water-content. (2) The break-down of soil-grain clusters is large at a moisture content a little wet of optimum. (3) The coefficient of permeability is small at a moisture content a little wet of optimum. (4) The threshold gradient have been detectable in the permeability tests. (5) The theoretical equations on the permeability inferred from the concept of a Stationary Boundary Layer (suggested by Werner E. Schmid) could be applied to this soil. The decomposed granite soil could have a medium property between clay and sandy soil in dealing with water permeability.

1 はじめに

土の透水性については、古くから研究^{1,2)}が行なわれており、締固めた粘性土および砂について透水実験を行ない、その工学的特性を明らかにしようと試みられてきた。著者らは、わが国に多くみられる花こう岩質風化土である真砂土を対象として、その工学的性質を、とくに透水性から研究しようと試みた。

本研究は、突き固めた半花こう岩真砂土を対象とし、締固め含水比ならびに圧力変化が締固め土の特性（土の構造および土粒子の破碎性）、締固め土の透水性ならび

に始動動水勾配等におよぼす影響について実験的研究を行なったものである。さらに、不動境界層を導入した理論式を用いて、その透水性を実験的に検討した。

2 試料および実験方法

試料は鳥取県東浜産の真砂土（鳥取花こう岩の半花こう岩の風化土）で、傾面を削り切取り面から深さ50cmから採取したものである。この試料の物理定数は表-Iに、粒度分布は図-1に示した。一般に真砂土の鉱物組成は一次鉱物の長石、石英と雲母などの有色鉱物とそれ

*原稿受理1972年10月31日

**土木工学科

Table-I Physical properties of MASA sand

Specific gravity (G)	Liquid limit (LL)	Plastic limit (PL)	Uniformity coefficient (U)	Mineral composition		
				feldspar	quartz	coloured mineral
2.61	29.7(%)	—	115	61.35(%)	38.65(%)	0 (%)

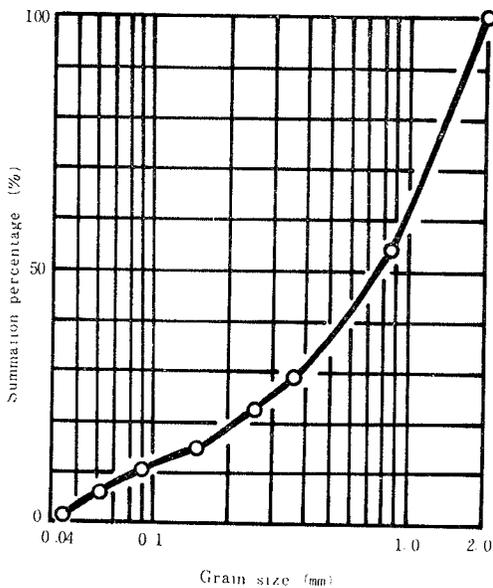


Fig. 1 Grain size distribution curve

から変質生成した各種の二次鉱物からなっており、一般の土ではそれほど注目されない粒子鉱物の種類、その変化程度が工学的性質に大きな影響をおよぼす。当試料の鉱物組成（磁気分離機と分液ロートを用いて鉱物を分離する）は、主に長石と石英とからなり、雲母はほとんど含まれていない。

透水試験装置は図一2に示した。この装置はバックプレッシャーの測定と流れを測定するためU字管をもつ Mitchell (1962)²⁾ によって開発されたものと同種である。バックプレッシャーはプラスチック製のセル中の試料へ一定圧力セルによって作用され、プレッシャー管は、透水セルの流入側と流出側に連絡している。流出側には体積変化測定管を備え付け、それは上部部のパラフィンオイル（赤色に染める）と水の間に明確な中間面を得る。

供試体は透水におよぼす締固め含水比の影響を測定するため、気乾状態（1.5%）から約20%の含水比まで1

％ずつ増加させたものを準備した。図一3は、透水試験および突き固め効果の諸結果を考察するために使用したプラスチック製モールドである。調整された各含水比の試料はこのモールド中に高さ7cmにするため、3層に突き固めた、各々の層は手製ランマーを高さ29cmのところから自由落下させ、25回の打撃回数で作成した。このようにして、作製された供試体は、間げき比 (e) が0.571~0.841、初期飽和度が4%~81%の範囲にあった。この供試体を装置に据えつけ、飽和試料を得るために透水セル下部から水を送り、さらに、一定のバックプレッシャー、3.5kg/cm²を加えた。透水試験の圧力状態は、試料の上、下部に等しい圧力、1.5、2.5、3.5、4.5、5.5、6.5kg/cm²を作用させた。流入・流出間に保たれた各圧力状態において、水頭差は0から1kg/cm²に段階的に増加させて透水試験を行なった。

3 実験結果と考察

3.1 締固め土の透水性

土の構造および透水性への突き固め状態の影響は、Seed と Chan (1959)⁴⁾ によって詳細に研究されている。彼らの研究によれば透水係数は構造によって影響され、粘土では低含水比の綿毛構造から高含水比での団粒構造に変化し、それらは最適含水比を境に区別され、強度が異なることを示した。さらに、Lambe (1958)⁵⁾ は最適含水比の乾燥側と湿潤側では透水係数が異なることを示している。しかしながら、真砂土は Seed と Chan の研究した構造と異なるものと考えられる。それゆえ、同種の研究を真砂土に対して実験を行なった。

真砂土を用いた JIS・A・1210 による突固めと透水路モールドの突固め試験結果の締固め含水比 (W) と乾燥密度 (γ_d) との関係は、図一4に示した。JIS規格の締固めエネルギーは 5.63cm²kg/cm²、粒径は 4760 μ フルイ通過のもの、透水路モールドの締固めエネルギーは 13.69cm²kg/cm²、粒径は 2000 μ フルイ通過のものを使用した。突き固め曲線から前者の最大乾燥密度は 1.64g/cm³、最適含水比は19.5%であり、後者はそれぞれ1.66g

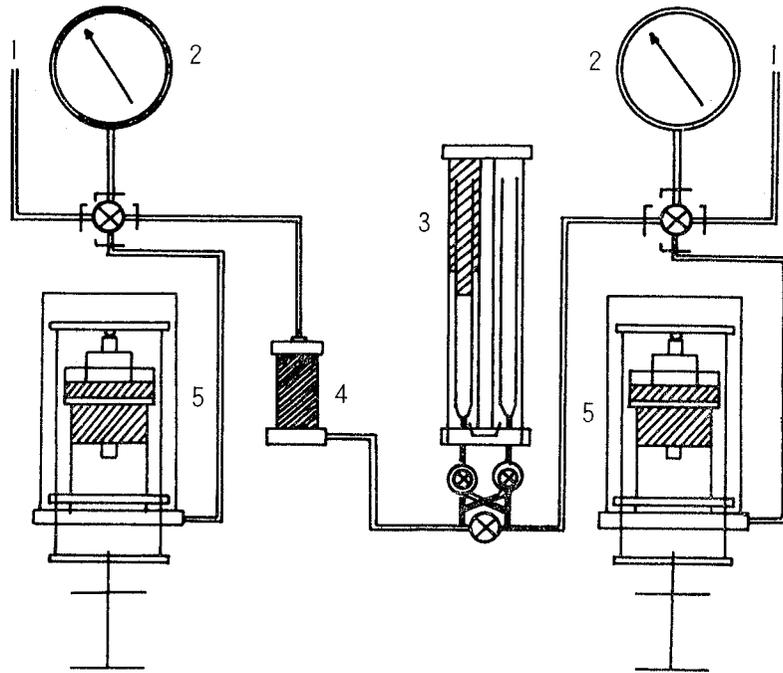


Fig. 2 Experimental device

1. water supply
2. bourdon gage
3. volume change
4. sample
5. constant pressure cell

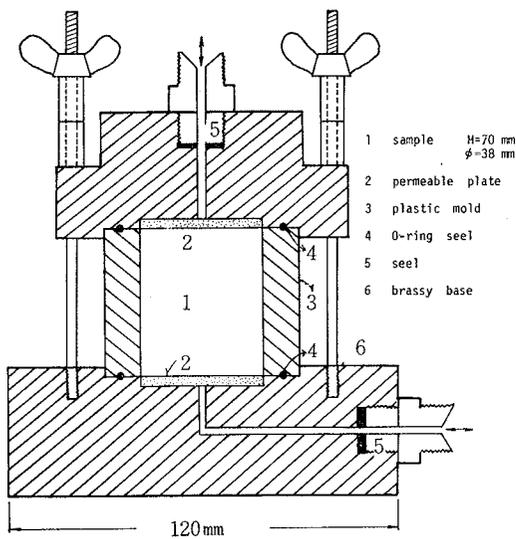


Fig. 3 Pressure permeable cell

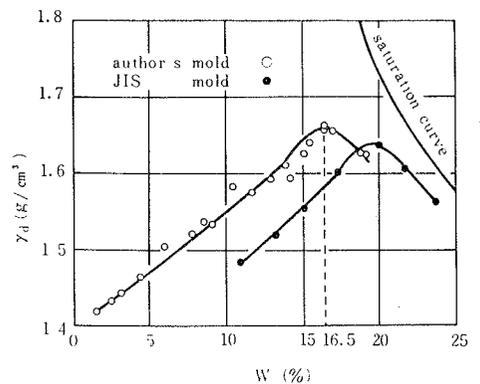


Fig. 4 Water content-dry density relationship

/cm³, 16.5%であった。これらは粒度ならびに締固めエネルギーの異なりによる結果が現われたものと思われる。2つの突き固め曲線において、締固め土の乾燥密度が増減する理由は含水比の低い土は塊状に結合してお

り、この結合を破壊することがむづかしいために十分締固められないが、これに少しずつ水分を加えてゆくと、塊状の土は軟らかくなり、塊が破碎され、かつ土粒子の表面に付着した水分は土粒子が相互に位置を変える際に潤滑作用をするため、高い密度が得られる。さらに水分を加え含水比がある限度をこえると、土粒子の間げきに存在する水分のために、土粒子相互の距離が遠ざけられ、乾燥密度が低下する。これらの境界の指標、すなわち最適含水比は土の間げきを満すだけの最も少ない水分を含有する場合と考えられる。図一五は締固め含水比と

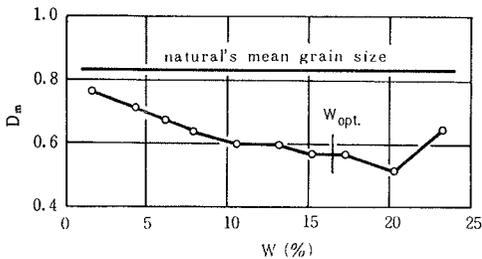


Fig. 5 Relationship between molding water content and mean grain size

その試料の平均粒径を示した、すなわち、締固め含水比の異なりによる土粒子の破碎の影響を調べた。なお、土粒子の破碎性を比較するため締固め前の自然粒径をあわせて記した。ここに、平均粒径・ D_m (算術平均) は

$$D_m = \frac{\sum f d}{\sum f} \quad (1)$$

より求める。 f はフルイ残留パーセント、 d はフルイ目径である。図によると最適含水比付近で突き固められた供試体では土粒子の破碎は一般に大きい、そして含水比の減少と共に減少する。土粒子の最大の破碎がみられるのは最適含水比より少し湿った(4%高い含水比)にあり、高含水比ではわずかに破碎は減少する。これらの破碎性は風化花こう岩の真砂土の特性である。締固め含水比と破碎の原因⁶⁾については次のように考えられる。締固め含水比が最適含水比をこえると、吸水性の粒子がその構造間に十分な水分を吸着し、粒子自身の強度が小さくなることと、密度が減少すること、ならびに、粒子相互の接触点の数が減少することとあまって、接触点における接触応力が増加するために破碎が大きく現われる。最適含水比より低い含水比では十分な水分の吸着が行なわれないため、土粒子自身の強度が大きいため、接触点における接触応力が大きいにもかかわらず、土粒子の破碎が少ない。

図一六に示したのは、透水係数と締固め含水比の関係

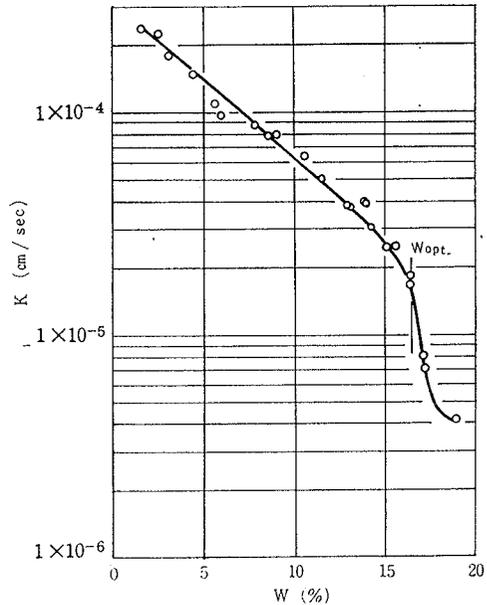


Fig. 6 Influence of molding water content on permeability

である。図によると低含水比から最適含水比付近までは直線関係を示すが、さらに含水比が増すと直線関係はくずれ、透水係数は急激に小さくなる。また、最適含水比の乾燥側と湿潤側では透水係数のオーダーは粘性土で2~3²⁾減少するという報告がみられるが、真砂土におけるその変化はオーダーにして1の減少であった。このことは最適含水比の乾燥側と湿潤側では土の構造に変化がおきていることを示している。すなわち、最適含水比の湿潤側では締固めによって分散構造をつくり、水は通りやすく、透水係数は小さくなる。一方、乾燥側では綿毛構造をつくり透水係数は大きくなる。このことは図一七の粒子の配向度と締固め含水比の関係からも説明できる。この粒子の配向度はKozeny-Carman⁷⁾による式を用いて検討する。

$$k_0 s^2 = \frac{1}{k} \frac{e^3}{1+e} \quad (2)$$

ここに、 $k_0 s^2$ は粒子配向の度合い、 s は土粒子の比表面積、 k_0 は間げきの形状と流れの曲折などにより決まる定数、 k は透水係数、 e は間げき比である。ミクロ的に考察すると、この粒子配向の変化は流れの曲折の変

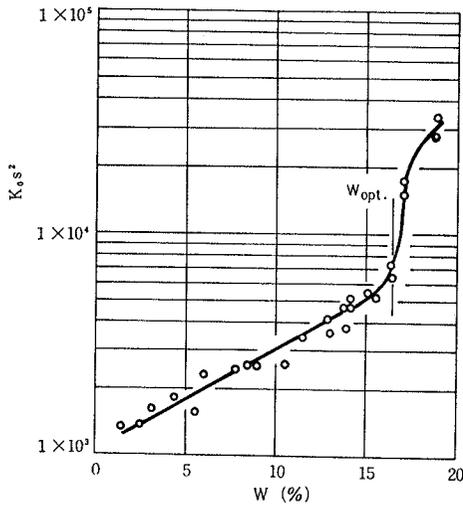


Fig. 7 Relationship between molding water content and particle orientation

化と露出表面積の変化をもたらす。図にみられるように最適含水比前後で粒子配向度が急激に変化し、最適含水比より高い含水比で粒子配向がよくおこなわれ、いわゆる分散構造を示す。すなわち、粒子配向がよい構造では透水係数が小さくなる。真砂土の場合には、さらに、粒子の破碎をも考慮しなければならない。破碎が進むにつれて、供試体の平均粒径が小さくなり、間げき寸法が小さくなるため、透水性は減少するものと考えられる。最適含水比付近で透水係数が急激に減少するのは、前図一5でみられたように最適含水比付近で最も大きい破碎がみられることも大きな要因である。

一般に、土の透水性は土の種類、土粒子の大きさと形、間げき比、飽和度、水温等によって変化する。ここでは各圧力状態下における透水性について検討する

図は省略するが透水係数と間げき比の関係 (e , e^2 , $e^3 / (1+e)$) は直線関係は認められず、最適含水比に相当する間げき比で明らかな変曲点が生じた。

図一8は間げき比の変化にともなう見掛けの流速 (v) と動水勾配 (i) の関係を示す。図によると、間げき比が大きくなれば透水係数も大きい。また、 $v \sim i$ の関係はほぼ直線であり、Darcyの法則にのっているが、しかし、動水勾配がゼロで流速がゼロにならず、有限の動水勾配で流速がゼロになっている。この現象は次のように説明されている。一般に30Åあるいは、それ以上というきわめて狭い土粒子間げきには粘性の異なる吸着水とエントラップドエアが存在し、このような間げきを

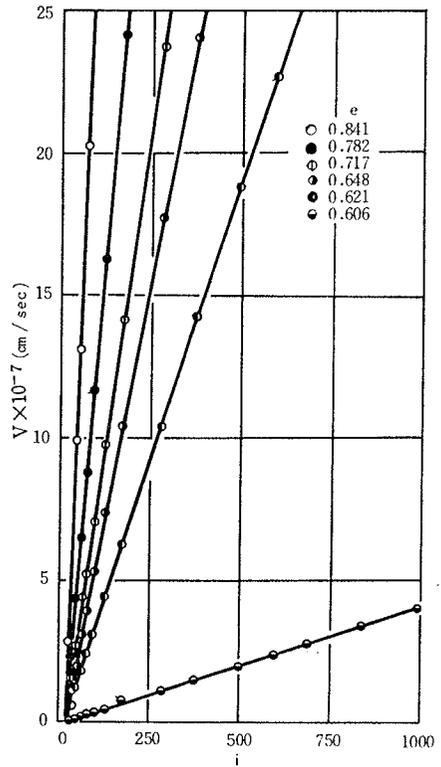


Fig. 8 Relationship between hydraulic gradient and discharge velocity

自由水が移動するにはある値以上の圧力勾配が必要である。間げきが水で飽和されている場合でも、水が移動するためにはある値の圧力勾配が必要であって、細粒土の場合には、これが相当の値になる、この圧力勾配を始動動水勾配 (Threshold hydraulic gradient) という。この始動動水勾配についての研究は King (1898)⁸⁾, Hansbo (1960)⁹⁾, Kutilek (1967)¹⁰⁾ らによって行なわれてきた。真砂土を用いた透水実験結果では King の真ちゅう線網、細砂、砂岩の実測結果とほぼ同様な変化を示している。すなわち、 i がある一定値、始動動水勾配 $\cdot i_0$ (図一8において、動水勾配の原点から $v \sim i$ 直線が横軸と交わる点の値として表示する) に達しなければ、浸透流は起らず、動水勾配が i_0 より大きい場合にのみ $v \sim i$ 関係は線型の変化を示した。図一9は種々の圧力状態における始動動水勾配と締りめ含水比の関係を示す。図によると低含水比から最適含水比の乾燥側の範囲では i_0 がほぼ一定値であるが、最適含水比付近から含水比の増加と共に増加し、最適含水比より少し湿ったところで最大値を示す、それ以後、含水比の増加と共に

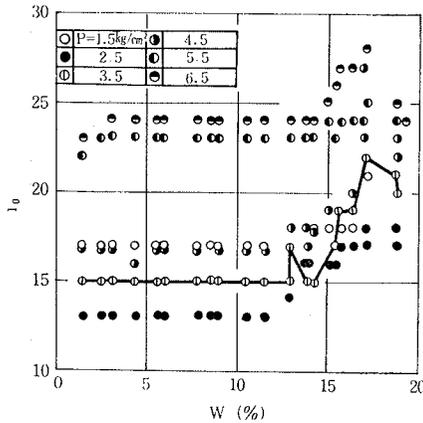


Fig. 9 Relationship between molding water content and threshold hydraulic gradient

に徐々に減少する。また、圧力条件が大きくなるにつれて i_0 は増加する傾向がみられる。このことは、真砂土の破碎性および構造の変化が始動動水勾配に影響をおよぼしているものと思われる。この問題については、今後、始動動水勾配の測定方法の改良ならびに不動境界層、マイグレーション、微生物の発生および水の特性等と始動動水勾配との関連性についての実験的検討および始動動水勾配の理論的研究を試みたいと考えている。

3.2 不動境界層¹¹⁾

ダルシー (1856)¹²⁾ は飽和した珪酸質砂の実験結果から次式を求めた。

$$Q = v \cdot A = k \cdot i \cdot A \quad (3)$$

ここに、 Q は流量 (cm³/sec), v は流速 (cm/sec) A は土の総断面積 (cm²), k は透水係数 (cm/sec), i は動水勾配である。つぎに、土粒子実質部を除く間げきを単位断面中に m 個の等径の管と想定し、図-10のように管1本の層流の平均流速について、ハーゲンとポアズイ

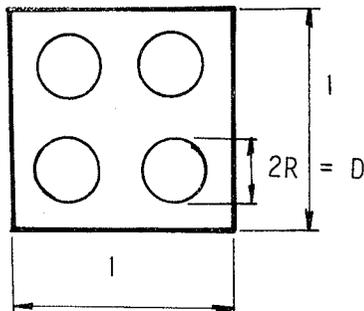


Fig. 10 Idealized model

ユ¹²⁾ らはつぎのように示している。

$$U_m = \frac{\gamma}{8\mu} R^2 i \quad (4)$$

ここに、 U_m は平均流速 (cm/sec), γ は流体の単位体積重量 (g・重/cm³), μ は流体の絶対粘性 (g/cm/sec), R は管の半径 (cm), i は動水勾配である。単位断面につき、管が m 個存在するので、単位断面積当りの流量・ Q' は次のようになる。

$$Q' = m \frac{\pi\gamma}{8\mu} \cdot R^4 \cdot i \quad (5)$$

モデルのポロシティ・ n は $n = m\pi R^2$ となる。(5)式に n を代入する。

$$Q' = \frac{\gamma}{8\mu} R^2 \cdot n \cdot i = \frac{\gamma}{32\mu} D^2 \cdot n \cdot i \quad (6)$$

ここに、 $D = 2R$, (3)式と(6)式が等しいとすれば

$$Q' = \frac{Q}{A} = k \cdot i = \frac{\gamma}{32\mu} D^2 \cdot n \cdot i \quad (7)$$

となる。上式から透水係数を求める。

$$k = \frac{\gamma}{32\mu} D^2 \cdot n \quad (8)$$

式(8)は流体の流れ方を粘性流と仮定した理論式であるが、ここで流体と固体の境界にまさつが考慮されねばならない、その領域は層厚をもち、境界層と呼ぶ。この境界層は図-11(a)のように平面でなく穴や起伏のある表面として、流体と固体の中間面にあると考える。凹部での流体分子はほとんど静止するから大いに浸透に影響をおよぼす。しかし、土粒子の表面の起伏のみによって水分子を吸着するのではなく、水分子の双極性による水分子間の結合は土粒子表面の突起にそつて水分子の不動層を形成する。なお、この水分子間の結合は土粒子表面から遠ざかるほど弱まる。この不動境界層を透水問題に適用すると、連続した間げきにより形成された水路が図-11(b)に示されるようにいくつかの長だ円形の断面をも

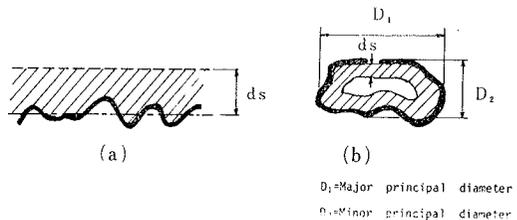


Fig. 11 Pore surface and pore section

(a) Typical surface profile

(b) Cross-section through typical pore channel

D_1 : Major principal diameter
 D_2 : Minor principal diameter

っている。最小径・ D_2 が水路にそう不動境界層 ds に等しいかあるいはそれ以下であれば、水路を浸透する流れはおこらない。これは水路が閉じたバルブをもつ管にたとえることができる。このことから全ポロシティーの一部が浸透に関係し、残りの大部分は閉じた管、不動境界層を形成する。実験で測定するポロシティー・ n は全ポロシティーであるから、有効ポロシティーを測定するには間接測定によって求める。というのは、間けき内で浸透に関係する部分と閉じたバルブをもつ管内にとじこめられる部分および実際に不動境界層に形成される部分のそれぞれの水分量に分離して測定することは不可能である。そこで、各々のポロシティーはつぎのようなポロシティーの分配を理想化したモデルで求める。図-12のようにモデルの管の側面にそう外周円の半径 R と内周

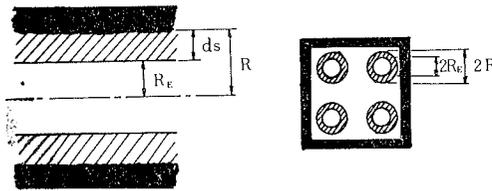


Fig. 12 Modified idealized models

円の半径 R_E の中空のシリンダーとして、全ポロシティー・ n を有効ポロシティー・ n_E と見掛けのポロシティー・ n_0 に分ける。

$$n = m \pi R^2 \tag{9}$$

$$n_E = m \pi R_E^2 \tag{10}$$

$$n_0 = n - n_E = m \pi (R^2 - R_E^2) \tag{11}$$

ここで、修正したモデルにハーゲン・ポアズイユの式を適用して、次の式を得る。

$$k = \frac{\gamma}{32\mu} DE^2 \cdot n_E = \frac{\gamma}{32\mu} DE^2 (n - n_0) \tag{12}$$

ここに、 $DE (= 2RE)$ は有効径、 $n > n_0$ である。以上が不動境界層を導入した透水理論式であるが、実際には図-13のように透水係数を縦軸に全ポロシティーを横軸にとって各々の値をプロットして、直線式を求め有効径と見掛けのポロシティーを算定する。すなわち、この直線の勾配は式(12)から $\tan A = \gamma/32\mu \cdot DE^2$ であり、その勾配から有効径・ DE が求められる、見掛けのポロシティー・ n_0 は最小二乗法で求めた直線の延長が横軸と交わる点として求める。図-14は真砂土の実験で求め

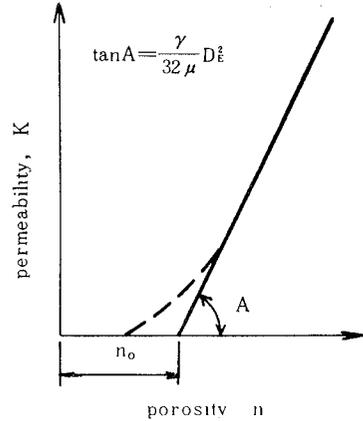


Fig. 13 Porosity versus permeability

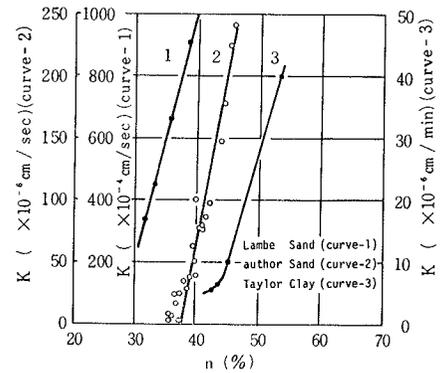


Fig. 14 Relationship between porosity and permeability

た透水係数と全ポロシティーの関係である。ポロシティーが小さい領域を除くと直線関係にある。同図には Taylor (砂), Lambe (粘土) のデータ¹¹⁾ を真砂土との比較でプロットした。データが少なく断言できないが、真砂土の DE , n_0 の値は両者が行なった砂、粘土の中間値をもち、また、小さいポロシティーにおいて直線から逸脱する粘土の $k \sim n$ 関係の傾向を示し、見掛けのポロシティーは小さく、有効径も小さい傾向を示す。見掛けのポロシティーが小さくなる原因として考えられるのは固有の土粒子表面の形状、固体のエネルギー、粒子配向、水の分散性および双極性等の変化によるものと思われる。また、それらは真砂土の破碎性と構造の変化とも密接な関係があると考えられる。つぎに、圧力変化 ($1.5 \sim 6.5 \text{ kg/cm}^2$) と有効径ならびに見掛けのポロシティーの関係は圧力が大きくなると共に有効径も大きくなるが、しかし、圧力変化と見掛けのポロシティーは何

ら変化はみられなかった。

以上のことから、不動境界層の概念を導入した式(12)は透水問題に対して流体と固体の相互関係を一義的、かつ、その特性をは握するのに有効であると思われる。今後、不動境界層と土の粒度、粒径、ポロシティの幅の問題等を検討し、さらに、不動境界層の微視的な測定をも加える必要があると考える。

4 ま と め

一連の実験によって得られた結果を要約するとつぎのようになる。

- 1) 真砂土の構造は締固め含水比に大いに関係する。最適含水比の乾燥側では綿毛構造、湿潤側では分散構造を示す。
- 2) 真砂土の破碎性と締固め含水比の関係について、破碎性は低含水比から最適含水比近付まで含水比の増加と共に漸進的に増加し、最適含水比よりわずかに湿ったところ(約4%増)で最も大きい破碎がみられる、以後、含水比の増加と共に減少する。
- 3) 真砂土の透水性におよぼす締固め含水比の影響は大きく、締固め含水比が最適含水比より高くなると透水性は急激に減少する。しかし、透水係数と間げき比の線型的関係はみられなかった。
- 4) 始動動水勾配が存在し、それは締固め含水比および圧力状態と共に変化する。
- 5) 不動境界層の概念を導入した式(12)は真砂土についても適応でき、その結果、真砂土は砂と粘土の中間的性質を示すことが明らかになった。

以上、花こう岩質真砂土を用い、締固め含水比および圧力状態を変化させた透水実験を行ない、それらの透水性についてのべた。さらに、不動境界層を導入し、モデル化した理論式でその透水性を検討した。今後は本文中に指摘した問題点を究明するとともに不飽和土の透水性の問題にまで発展させたいと考えている。

本研究を実施するに際して、吉垣優氏(現・清水建設KK)をはじめ土質研究室関係者の協力を得たことを付記して感謝の意を表する。

- 1) Miller R. J., Low P. F.

Threshold Gradient for Water Flow in Clay Systems,

Soil Sci. of America vol. 127, (1963)

- 2) Mitchell J. K., Hooper D. R.
Permeability of Compacted Clay,
Jour. of S. M. F. Div., Pro ASCE SM4 (1965)
- 3) Lowe J., Johnson T. C.
Use of Back Pressure to Increase Degree of Saturation of Triaxial Test Specimens,
Jour. of S. M. F. Div., Pro. ASCE (1960)
- 4) Seed H. B., Chan C. K.
Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays,
Jour. of S. M. F. Div., Pro ASCE SM5 (1959)
- 5) Lambe T. W.
The Engineering Behavior of Compacted Clay,
Jour. of S. M. F. Div., Pro. ASCE SM2 (1958)
- 6) 久保田・他
突き固めによる土粒子の破碎について,
土木学会関西支部年次学術講演会概要, (1966)
- 7) Lambe T. W.
The Structure of Compacted Clay,
Jour. of S.M. F. Div., Pro. ASCE SM2 (1960)
- 8) King F. H.
Principles and Conditions of The Movement of Grond Water,
U. S. Geol. Survey, the 19th Ann. Rept. Part2, (1898)
- 9) Hansbo S.
Consolidation of Clay, with Special Reference to Influence of Vertical Sand Drains,
Swed. Geotech. Inst., Proc. No. 18, Stockholm (1960)
- 10) Kutilek M.
Temperature and Non-Darcian Flow of Water,
Internal. Soil Water Symp., Praha, (1967)
- 11) Werner E. Schmid
The Permeability of Soils and The Concept of a Stationary Boundary-Layer,
Presented at the Sixtieth Annual Meeting of the Society, (1967)
- 12) 土質工学ハンドブック,
土質工学会編, 技報堂, (1966)