

透水係数の現場測定に関する実験的考察

藤村 尚*・勝見 雅*・久保田 敬 一**

(1976年5月31日受理)

An Experimental Study on a Method of Field-Measurement of Permeability

Hisashi FUJIMURA,* Tadashi KATSUMI* and Keiichi KUBOTA**

(Received May 31, 1976)

The measurement of permeability by infiltration tests is discussed and the revised formula, developed originally by W.E. Schmid, for infiltration well terminating above the ground water is shown. The validity of the revised formula and assumption used are checked by model experiment. Moreover the values found by the proposed formula is compared with those found by the standard permeability tests.

Based on the authors' experimental results, the conclusions are obtained.

- 1) Formulas for infiltration well terminating above the ground water can be expressed by Eq. (2).
- 2) Above the ground water table wetting front is usually a spherical shape within some initial time interval.
- 3) The values found by infiltration test are smaller than those found by the standard permeability test on dense sand.
- 4) The values found by infiltration test are about one order magnitude larger than those found by the standard permeability test on loose sand.

1. 緒 言

近年、用水需要の急増にともなって合理的な地下水開発の必要性が各方面から強く望まれている。従来、地下水の利用に関して、帯水層に無計画な揚水が行なわれた結果、地下水位の低下、水資源の枯渇、さらには地盤の沈下といったへい害をもたらしている。こうした現状に対処するため地下水動態に関する研究とともに、同時に広い意味での土中水を有する地盤に関する研究が行なわれる必要がある。前者についてはコンピューター・シミュレーションにより求めたものと現場測定の結果とがよく一致することが報告¹⁾されている。後者については現位置の揚水試験や単孔式透水試験を行なって、透水係数、有効間げき率や貯留係数を求め解析を行なってい

る²⁾。さて実際に土中水を有する地盤を対象として地下水調査のための原位置試験を行ない、その試験結果の解析には揚水試験では最も広く用いられている **Thiems³⁾**、**Theiss³⁾**、**Jacob³⁾**、単孔式透水試験では **Kirkham** と **van Bavl⁴⁾**、**Lutin** と **Kirkham⁵⁾**、**Kirkham⁶⁾**、**Hvorslev⁷⁾** らの数多くの方法がみられる。しかし、これらの研究はすべて地下水面下にある井戸を対象としたもので地下水面上に末端のある井戸については数少^{8),9)}ない。

そこで本研究は地下水面上にある砂地盤を対象に **Infiltration test** を行なって透水係数を求めることである。透水係数は **W. E. Schmid⁹⁾** によって初めて提唱された式に浸透初期の湿潤部が球状とする仮定と初期

* 土木工学科

** 福山大学

条件を考慮した修正式を用いて算出する。さらに、ここで用いた仮定と修正した式の証明は模型実験を用いて検定するとともに、この試験における問題点を拾いあげて論じる。最後に、修正した式から求めた透水係数と一般に用いられている定水位・変水位透水試験による透水係数との比較を間げき比を変えた地盤について行なった。

2. 試料および実験方法

2.1 試料およびグリセリン

実験に用いた試料は Fig.-1 に示す粒度分布特性をもつ鳥取市賀露産の細砂である。この試料を十分水洗いしたのち、空気乾燥させ実験に供した。この試料の比重は 2.66 である。

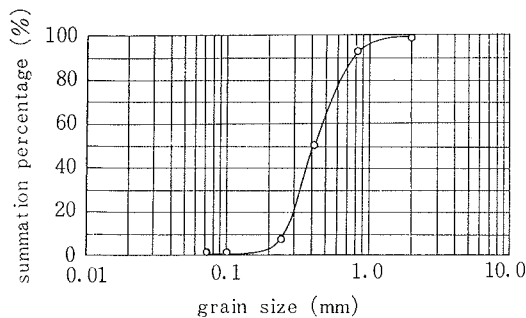


Fig. 1 Grain size distribution curve

通常、土の透水係数は 15°C における水の透水係数を標準としている。本実験では液体として水のかわりにグリセリンを使用した。グリセリンの粘性係数は所定の濃度に調合したグリセリンの比重を測定したのち、オスワルド粘度計を用いて求めた。

2.2 実験装置

実験装置の概要は Fig.-2 に示すようである。模型地盤を造るための槽は、28×28×28cm³ の大きさからなる鉄製である。この槽の中央に内径約 1cm、長さ 120cm と内径約 2cm、長さ 70cm (D=1, D=2 と称す) の 2 種類のガラス製給水管を垂直に固定した。この給水管の底部には網目約 1mm のポリエチレン製網のフィルターを半球状にとり付けた。

2.3 実験方法

はじめに給水管を土槽中央で地盤表面から約 15cm に埋まるよう垂直に固定する。つぎに Fig.-1 に示す試料を土槽内に突き固める。突固めは均一地盤になるよう

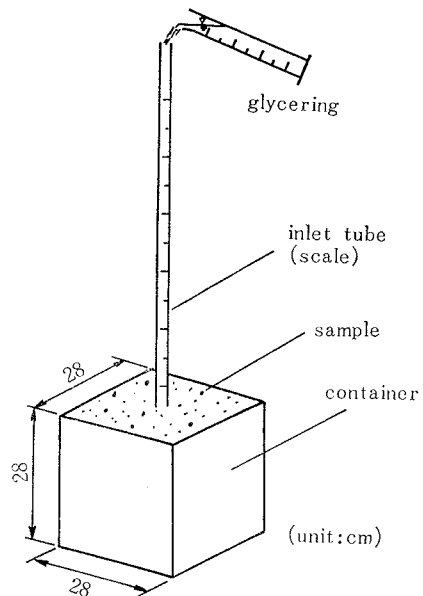


Fig. 2 Experimental setup

に十分な注意をはらって行ない、各種の間げき比の地盤を造るために、試料を 5 層に分けて土槽に自然落下させるとともに直径 1.5cm のつき棒を用いて行なった。

地盤の完成後、土中の温度に等しく、所定の濃度に調整したグリセリンを Fig.-2 に示すように給水管の頂部から流入し、給水管底部から地盤に浸透させた。流入後、ただちに適当な時間間隔で給水管の底部からの水頭を測定した。

浸透試験後、すみやかに土槽中から湿潤球をとり出し、その球の直径を測定した。つぎに湿潤球を 2 分し、半球内部の土を上・中・下の各部分から約 100g 採取して、土に含まれるグリセリンの量を測定した。これらの測定値を用いて湿潤球の飽和度を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 定水位・変水位透水試験¹⁰⁾による透水係数

一般に土の透水性を実験室内で求めるには定水位および変水位透水試験が行なわれる。試料の透水係数は JIS A 1218 の透水試験法に準じて両試験を行なった。

Fig.-3 は定水位透水試験による透水係数 k (cm/sec) と間げき比 e との関係を示したものである。なお、ここで用いた地盤の間げき比は 0.84, 0.78, 0.71, 0.67,

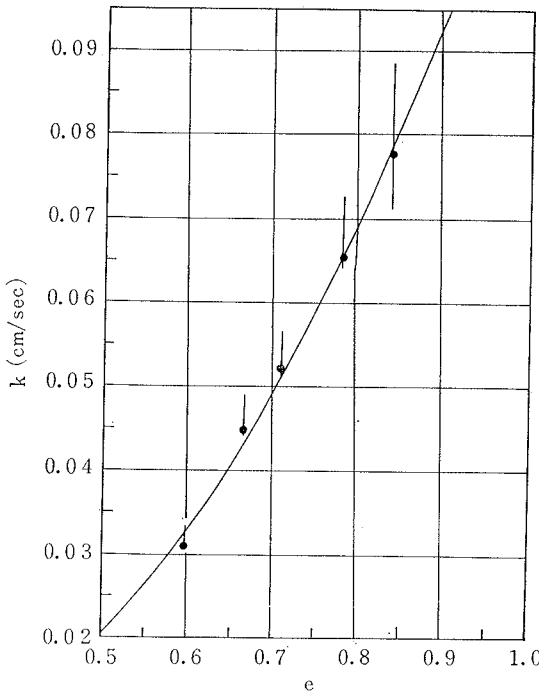


Fig. 3 Relationship between coefficient of permeability k and void ratio e on constant head permeability test

0.60 に調整したものである。同図によると周知のように透水係数は間げき比によって大きな影響を受けている傾向がわかる。ただし、個々の間げき比における透水係数の変化は間げきが大きくなるにつれて大きく変化している。例えば間げき比 $e=0.84$ の試料では透水開始 5 分後と 70 分後に求めた透水係数 k (cm/sec) はそれぞれ 0.089 と 0.071 であった。このことは透水試験後、試料底面に細かい土粒子が運ばれ詰まった跡が観察されたことから土の構造的変化や土粒子のマイグレーションに起因することなどが考えられる。したがって、間げき比の大きい試料における透水係数の値には問題が残るが、本実験では JIS に定められているように、透水係数がほぼ一定になるのを待ち、その一定値になった値をその試料の透水係数とした。同図では透水係数を●印で示す透水開始後 30~70 分の間の平均値を描いた。なお、透水係数と間げき比との関係を表わす式は数多く提唱されているが、ここでは一般によく知られている Taylor¹¹⁾ による式を用いて、これらの関係は次式のように求めた。

$$k = 0.245 \frac{e^3}{1 + e^3} \quad \dots(1)$$

Fig. 4 は変水位透水試験による動水勾配 i と流速 v (cm/sec) との関係を示したものである。ここで用いた試料の間げき比は 0.60、試料長さは 21.05cm である。同図によると動水勾配が減少するに伴って流速は減少する。それらの関係は $i = 0.4$ 以上では直線の関係が現われていないが、 $i = 0.4$ 以下では比例関係を示している。一般に土の中の流れの層流限界は明りょうに現われず、層流から乱流への移行は徐々に行なわれているといわれている¹²⁾ ことから判断して、当実験で用いた試料の層流と乱流との境界値、いわゆるダルシーの法則が適用される限界値はほぼ $i = 0.4$ 、 $v = 0.012$ cm/sec に存在するものと思われる。

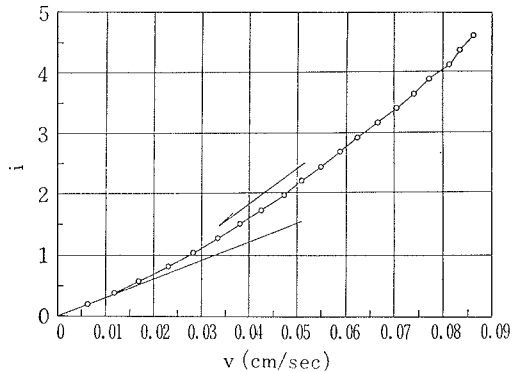


Fig. 4 Relation between hydraulic gradient i and velocity v on falling head permeability test

3.2 浸透試験

周知のように地下水面上にある土の透水係数を測定するとき Infiltration test がよく用いられている。本研究ではシュミットの方法に準じて地下水面上にある不飽和土の透水係数を測定する目的で、Fig. 2 の実験装置を用いて浸透試験を行なった。解析にあたり、透水係数 k は本実験とシュミットの実験とでは初期条件が異なることと著者らは浸透初期の湿潤部が球状であるという仮定を設けたのでシュミットの式⁹⁾を修正した次式によって求めた。

$$k = \frac{r_0^2}{4} \frac{I_n(h_1/h_2)}{\left[\frac{3(Q - \pi r_0^2 h_2)}{4 \pi \cdot n \cdot S} \right]^{1/3} \cdot t_2} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 r_0 ：給水管の半径 (cm), h_1 および h_2 ：それぞれ時間 t_1, t_2 のときの水頭高さ (cm), Q ：流入量 (c. c.), n ：間げき率 (%), S ：湿潤球の飽和度 (%) を表わす。なお、 h および t は 図-5 のようにとる。(2)式ではエネルギーは位置エネルギーのみ考慮した。

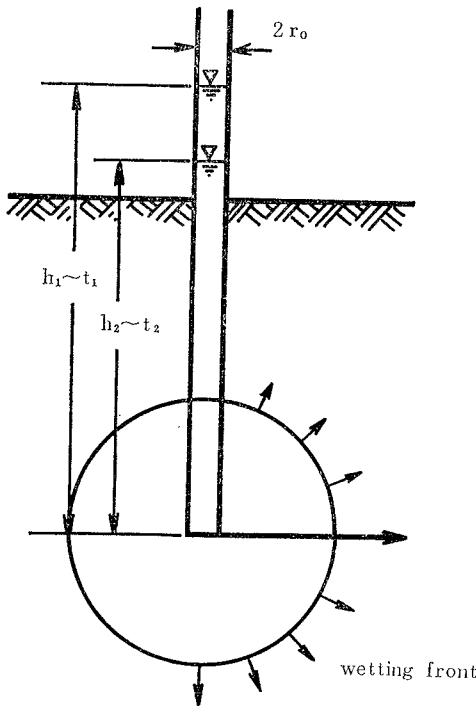


Fig. 5 Diagram of wetting front above ground water table infiltration test

浸透試験に供した地盤は間げき比によって、 $e = 0.64$ 以下を **Dense**, $e = 0.64 \sim 0.71$ を **Middle**, $e = 0.80$ 以上を **Loose** と称し 3 段階に分類した。地盤の性質は **Loose** では非常に不安定で、試験実施中にもわずかな震動によって間げき比の変化が認められることから、以後地盤が最も安定している **Dense** を中心に考察を進める。

(2)式では **Wetting front** が球状であり、最終的に地盤からとり出した土の湿潤部が球になるという仮定を設けた。このことについて、実験的に確かめるため **Dense** および **Middle** における縦方向の径/横方向の径の平均の比と粘性係数との関係の一例を掲げたもの

が Fig.-6 である。同図によると $D = 1$ と $D = 2$ とでは湿潤球の形状がわずかに異なる、すなわち $D = 1$ では縦方向に長く、 $D = 2$ では横方向に長い円状を呈している。また、その形状は流入量によっても異なっていくことがわかれる。しかし、これらの測定結果は球であることを示す縦軸の比が 1.0 に近い値を示していることから球とみなしてさしつかえないものと判断される。なお、この湿潤球の形状については流入量や管径の大きさとともに、特に給水管底部の空げきが形状に大きく影響を及ぼしているものと思われるので、今後、二次元的な浸透試験を行なって検討する予定である。

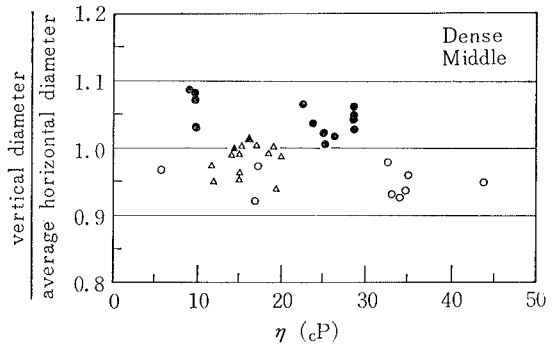


Fig. 6 Relationships between the ratio of vertical diameter to average horizontal diameter and coefficient of viscosity η

- D = 1, 200cc
- ▲ D = 1, 400, 600, 800cc
- D = 2, 200cc
- △ D = 2, 400, 600, 800cc

つぎに、当実験で行なった浸透試験において地盤内でのどのような流速分布を示すものかを検討する。Fig.-7 は水頭が 45~35cm に変化する際(2)式によって算出した土中内の浸透速度 v と球の中心からの距離 r との関係を示したものである。なお、同図は管径 2 cm, 間げき比 0.620, 間げき率 0.386%, 初期飽和度 0%, 最終飽和度 90%, 透水係数 0.025cm/sec とし、200, 400, 600, 800cc の流量をパラメーターとする水に換算した浸透速度である。算出方法はグリセリンの粘性係数と流量から水頭が h_1 から h_2 に降下する水量 Q' と降下に要した時間 t' を求め、さらに湿潤球の中心から 1, 2, …… 7 cm における球の表面積を求める。すなわち、球の中心から r 離れた表面積 A は $4\pi r^2$ であり、 t' 秒間にこの断面を流量 Q' が通過することに

なる。したがって、球の中心から r における浸透速度 v は次式によって求められる。

$$v = \frac{Q'}{t \cdot A} \quad \dots(3)$$

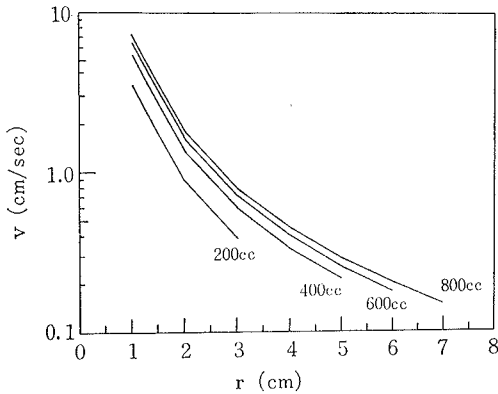


Fig. 7 Relationships between velocity v and distance r from the bottom of the well to wetting front

Fig. 7 によると r が大きくなるほど v は減少していることがわかる。ここで、3.1 の変水位透水試験で求めた層流と乱流の境界の流速 $v = 0.0012\text{cm/sec}$ と同実験から得られた値とを比較すると、乱流状態で実験を行なっていることになり好ましくない。本実験では水の約 7~60 倍の粘度をもつグリセリンを使用している。一般に流速は液体の粘度に反比例することから、本実験で得られた流速は図-7 に示した水の浸透速度の 7~60 分の 1 であり、すなわち本実験は層流状態であったことがわかった。

3.2.1 透水係数に影響を及ぼす諸要素について

飽和度：Fig-8 と 9 は Dense および Middle における飽和度 S と粘性係数 η との関係を示したものである。なお、Fig-8 の飽和度はグリセリンの含有量を水に換算した試料の含水比を用いて算出した。一方 Fig-9 の飽和度は湿潤球の縦方向の径と 2 つの横方向の径を平均し、その径を有する球の体積におきかえて算出したものである。両図によると粘性の増加とともに飽和度もやや高くなる傾向を示しているが、飽和度の値にはかなりの変動があって、両者の明りよな関係は得られなかった。そこで湿潤球の飽和度は粘性係数が飽和度に影響を及ぼさないものとして、全ての測定飽和度の平

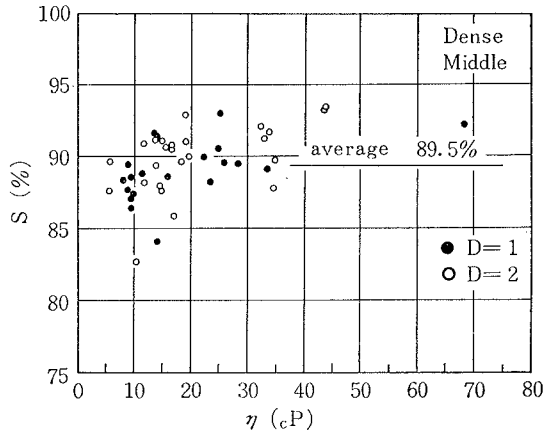


Fig. 8 Relationships between saturation S by water content measurement and coefficient of viscosity η

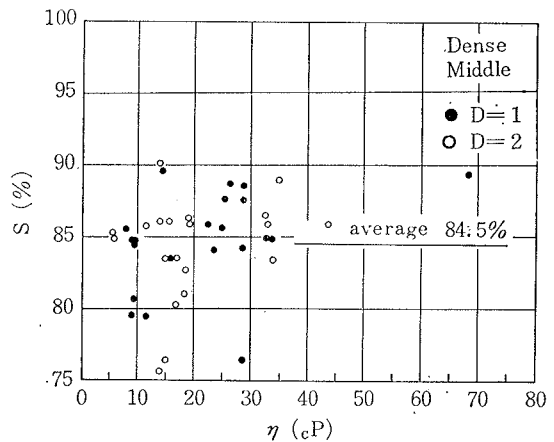


Fig. 9 Relationships between saturation S by shape measurement and coefficient of viscosity η

均値を求めると、含水比測定から得られた飽和度の方が形状測定から得られた飽和度より約 5% 高い値を示した。今、どちらの値を採用するかは現段階では若干早計と思われるが算出される誤差の大きさから判断して、本実験では含水比測定から得られた平均飽和度を以後用いることにする。したがって、Dense ならびに Middle では $S \approx 90\%$ 、Loose では前述のように問題は残るが $S \approx 100\%$ と推定した。

グリセリンの使用：本実験では給水管の径が 1 cm および 2 cm、水頭差が 90 cm であるので水を用いて浸透試験を行なうと水頭降下が早く約 2~3 秒で終了するた

め水頭高さを測定することがむづかしかった。そのうえ動水勾配が3以上になって、3.1で述べたように乱流状態で透水係数を求めることになり、真の透水係数とはいえない。これらのことを考慮すれば水に代わる他の液体を選ぶか給水管の径を大きくする必要がある、しかし後者は本実験に用いた土槽の大きさでは無理であるため、本実験では粘性の大きいグリセリンを用いることにした。グリセリンは比較的簡単に入手できるうえに水に可溶で粘性係数の幅に富んでいることなどから土の透水係数を検討する上で有利な液体と考えられる。なお、当実験に供したグリセリンの粘性係数は8~70センチポアズにあった。これらは水の15°Cにおける粘性係数が1.145センチポアズであることから、水に較べて約7~60倍の粘度である。Fig.-10は透水係数 k と粘性係数 η との関係を示したものである。なお、透水係数はグリセリンを用いて求めた地盤の透水係数を粘度、比重と温度とを補正し、15°Cの水の透水係数に換算し、一例としてDense試料、飽和度90%の結果を描いたものである。同図によると透水係数はグリセリンの粘度に影響しないことがわかった。

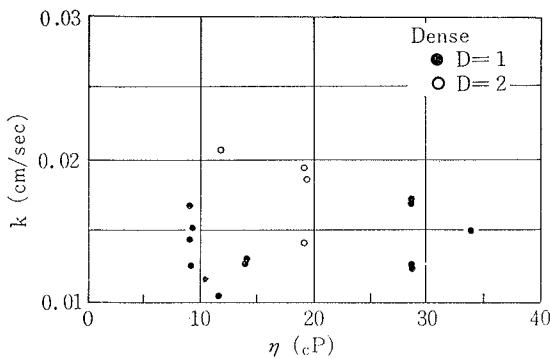


Fig. 10 Relationships between coefficient of permeability k and coefficient of viscosity η on infiltration test

Fig.-11はグリセリンの流入量 Q をD=1の場合には100~600cc、D=2の場合には200~800ccにとって、 k と Q との関係を示したものである。同図によるとD=1およびD=2の両方とも流入量がある流量以上になると透水係数は一定値を示していることがわかる。なお、D=1、 $Q=100\text{cc}$ とD=2、 $Q=200\text{cc}$ の時にはわずかに高い透水係数が描かれている。おそらくこれは給水管底部の空げきの大きさ、形状による影響が

現われたものと思われる。以上のことから、液体の粘度および流量は透水係数に影響を及ぼさないことがわかる。

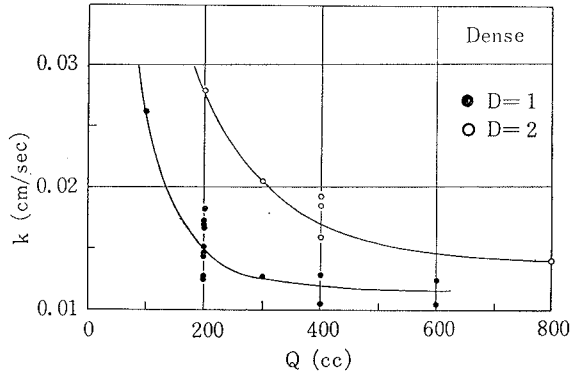


Fig. 11 Relationships between coefficient of permeability k and discharge Q on infiltration test

3.2.2 透水係数と間げき比

Fig.-12はDenseおよびMiddle試料について浸透試験による透水係数と間げき比との関係を示したものである。なお、図中の実線は3.1の定水位試験で求めた(1)式を描いたものである。同図によると透水係数の値には変動があるが浸透試験による透水係数は間げき比が大きくなるにつれて、定水位試験による透水係数の値に漸近していく傾向がわかる。すなわち、両試験結果からDenseでは約0.01cm/sec、Middleでは約0.005cm/sec浸透試験による透水係数の方が低い値を示している。

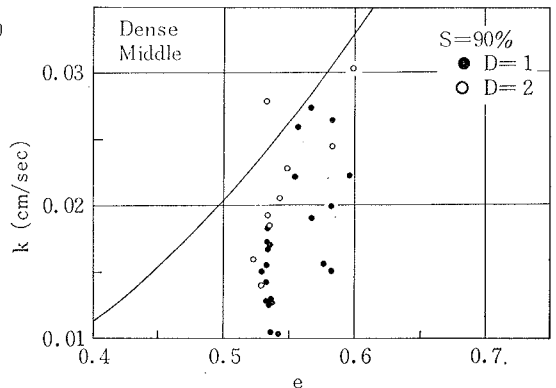


Fig. 12 Relationships between coefficient of permeability k and void ratio e on infiltration test

ここで、不動境界層の概念を導入^{13),14)}して土の透水性をさらに検討する。この不動境界層については **Schmid** および著者の論文に詳しく述べられているので、ここでは省略する。この概念は土中を浸透する液体の一部が透水に関係しないものとして、液体の一部を土粒子の実質部とする考え方である。したがって、地盤について考えると実質部が変化すれば間げき比および飽和度も変化することになる。今、飽和度を 100%, 95%, 85%, 80% とした時の有効間げき比を算出し、この値と透水係数との関係をそれぞれ **Fig.-13** の (a), (b), (c), (d) に示す。これらの図によると飽和度が **Dense** では 80%, **Middle** では 85% において浸透試験による

透水係数と定水位試験による透水係数とが一致していることがわかる。したがって浸透試験で得られた透水係数は不動境界層の概念を導入すれば定水位試験による透水係数にさらに近づくものと期待されるので今後も詳しく研究を押し進めていく予定である。

一方、**Loose** 試料ではよい結果がえられず、飽和度 100% として算出した透水係数は等しい間げき比における定水位試験による透水係数より約 1 オーダー大きく現われた。このことについては前述したように給水管底部の空げき、地盤の間げき変化、測定精度の問題などが影響を及ぼしたものと考えられる。

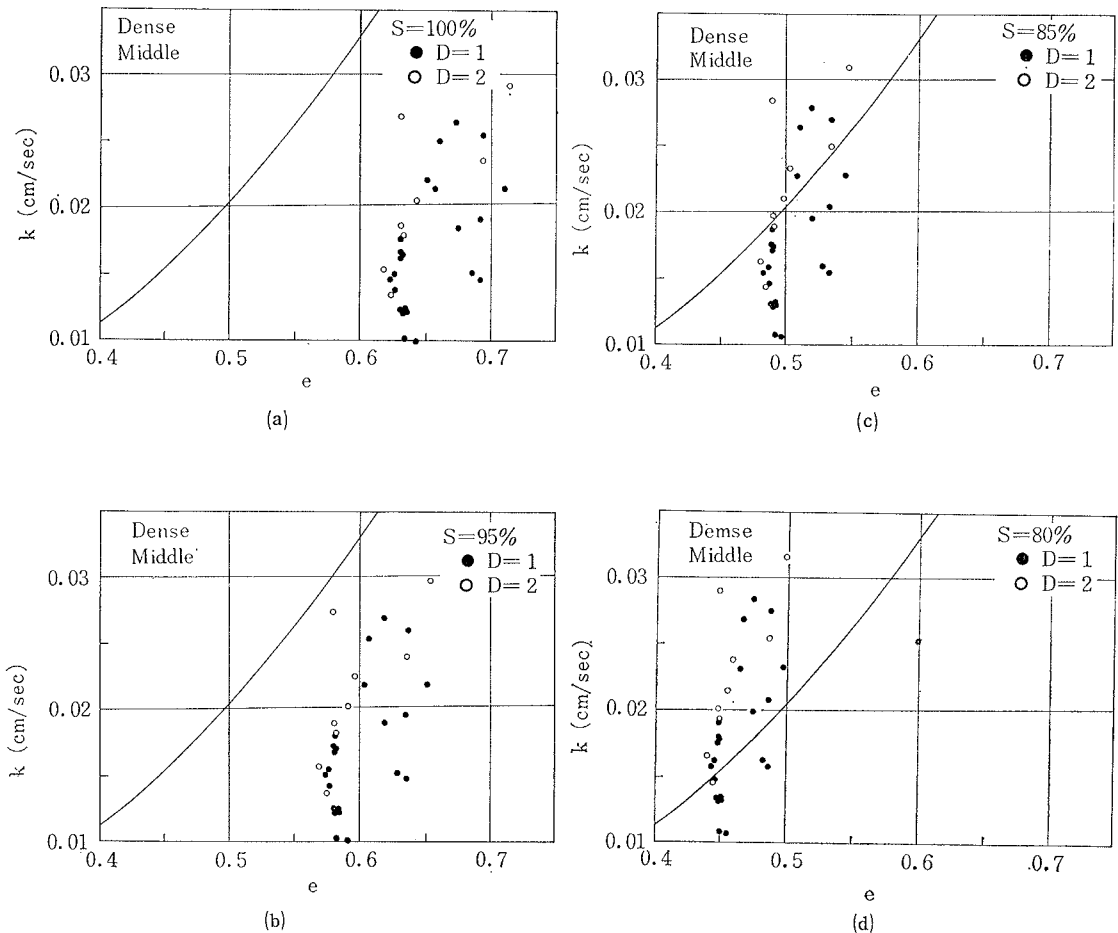


Fig. 13 Relationships between coefficient of permeability k and void ratio e on infiltration test

4. 結 言

地下水面上にある砂地盤を対象として **Infiltration test** を実施し、その結果から透水係数 k を求めた。この k は **W. E. Schmid** によって提唱された式に浸透初期の湿潤部が球状とする仮定と初期条件を考慮した修正式を用いて算出した。ここで用いた仮定と修正式については模型実験で証明するとともに、この試験における問題点を拾いあげて論じた。最後に修正式による k と一般に用いられている 定水位透水試験による k を間げき比を変えた地盤について比較した。得られた結果をまとめるとつぎのようである。

- 1) 地下水面上の不飽和土の透水係数は簡単な装置を用いた **Infiltration test** で求めることができる。
- 2) 浸透試験の解析に当っては(2)式が適用できることがわかった。
- 3) 浸透初期においては **Wetting front** は球状に進行し、試験後とり出した湿潤部は球であった。
- 4) この種の試験では概して乱流状態で試験が行なわれていることが多いので、試験を実施するに当っては層流状態で行なっているかどうかを調べておく必要がある。
- 5) 均一な砂地盤における浸透試験では液体として水に代わるグリセリンの使用が有効であることがわかった。
- 6) 浸透試験では給水管底部の空げきの大きさ、形状が透水係数に大いに影響を及ぼす。したがって、現場透水試験や揚水試験を実施する時にはスクリーンや **cavity** の問題を十分検討する必要がある。
- 6) **Dense** 試料では浸透試験によって得られた透水係数は定水位試験による透水係数より幾分低い値を示したが、不動境界層の概念を導入して間げき比を修正すれば、その差はほとんどなくなる。
- 7) **Loose** 試料では一般によい結果はえられず、定水位試験によって求めた透水係数より約1オーダー大きい透水係数を示した。

以上のような成果を一応収めることができたが、**Infiltration test** については始めたばかりであり、本文中に指摘した問題など今後究明されねばならない点も少なからず残されている。なお、初期含水比を有する試料の透水係数、空気の閉塞、圧縮および水との置換の機構などについては今後研究を行なう予定である。

おわりに本研究を実施するに際して、当時の学生寺田

丈男君(現・奥村組KK)をはじめ本学土木工学科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。

参 考 文 献

1. 岩佐敏博・野田英明：被圧地下水のシミュレーションに関する研究，鳥取大学工学部研究報告，第6巻，第1号，昭和51.5，pp. 93~102.
2. 藤村尚・岩佐敏博・久保田敬一・野田英明：鳥取市内地下水の土質学的ならびに水理学的研究，鳥取大学工学部研究報告，第4巻，第1号，昭和48.9，pp. 74~91.
3. 山本荘毅：揚水試験と井戸管理，昭晃堂，1962，pp. 73~80.
4. D. Kirkham and C.H.M. van Bavel: Theory of Seepage into Auger Holes, *Proceedings, Soil Science Society Am.*, Vol 13, 1949, pp. 75~82.
5. J.N. Lutin and D. Kirkham: A Piezometer Method for Measuring Permeability of Soil in Situ below a Water Table, *Soil Science*, Vol 68, 1949, pp. 349~358.
6. D. Kirkham: Proposed Method for Field Measurement of Permeability of Soil below the Ground Water Table, *Proceedings, Soil Science Society Am.*, Vol 11, 1946, pp. 58~68.
7. 京大土木会訳：土質便覧，山海堂，1963，pp. 210~215.
8. V.S. Aronovici: Model Study of Ring Infiltrometer Performance under Low Initial Soil Moisture, *Proceedings, Soil Science Society Am.*, Vol 19, 1955, pp. 1~6.
9. W.E. Schmid: Field Determination of Permeability by the Infiltration Test, Permeability and Capillarity of Soils, ASTM STP 417, Am. Soc. Testing Mats., 1967, pp. 142~158.
10. 土質工学会編：土質試験法，土質工学会，昭和48.6，pp. 250~273.
11. D. W. Taylor: Fundamentals of Soil Mechanics, pp. 110~111.
12. 久保田敬一：浸透水と土の安定，山海堂，昭和41.4，pp. 40~42.
13. W. E. Schmid: The Permeability of Soils and the Concept of Stationary Boundary Layer,

Proceedings, Am. Soc. Testing Mats., 1957, pp. 1195
~1218.

14. 藤村尚・久保田敬一：締固め土の透水性，鳥取大
学工学部研究報告，第3巻，第2号，昭和48.3，pp.
63~70.