

# 純粋な砂の透水係数の推定に関する研究

岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科 正会員 吉村優治  
 岐阜工業高等専門学校 建設工学専攻科 学生 乾 英隆

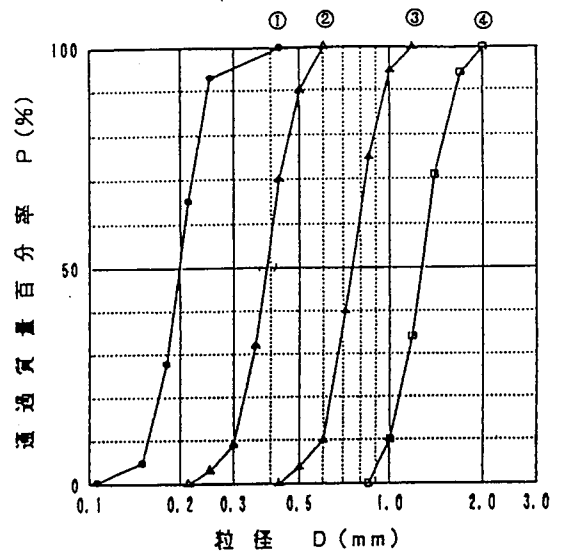
## 1. はじめに

土質問題を取り扱うに当たって、土中の浸透水、地盤の沈下など土の透水性が問題になることが少なくない。特にアースダムや河川堤防の堤体、および基礎地盤中の浸透水などの問題においては土の透水性が大きく影響しており、透水性を表す指標である透水係数を求めることは非常に重要である。

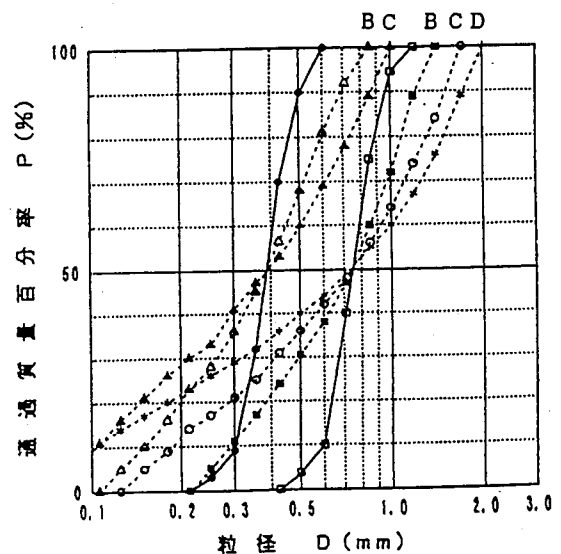
透水係数を求める試験には、現場で井戸を掘って行う現場試験と、現場でサンプリングした試料を用いる室内透水試験とがある。自然のままの地盤の透水係数の必要性が生じたときには、現場透水試験が用いられるが、現場で井戸をほるため多大な費用が必要となる。これに比べ室内透水試験は極めて簡単な原理に基づいて行われるものであり、アースダムや堤防などのように人工的な盛土の透水係数を調べるには適しているが、自然の地盤から、透水性に大きな影響をもつ密度や、土の構造などを変化させることなく試料を採取するのは困難であり、実際の地盤と同一の条件下で透水試験を行うことは難しい<sup>1)</sup>。また、サンプリングで採取できる試料が少ないため攪乱した試料についてもあまり行われていない。この他に透水係数を推定する方法として経験式を用いる方法、現地の地下水位や漏水量などの観測値を用いる方法とがあるが、これら2つの方法は経済的である代わりに推定値の精度をそれほど期待できないという問題を含んでいる。

そこで、本研究では物理的性質から透水係数を精度良く求めることを目的として、室内透水試験によって間隙比（あるいは密度）、平均粒径、均等係数、粒子形状と透水係数の関係を明らかにし、この実験結果を基に統計解析により透水係数の予

測を試みたものである。しかしながら、本研究は純粋な砂を完全に飽和させた攪乱試料を用いるという極めて限定された条件下で行ったものである。



(a) 平均粒径が異なる試料



(b) 均等係数が異なる試料

図-1 試料の粒径加積曲線

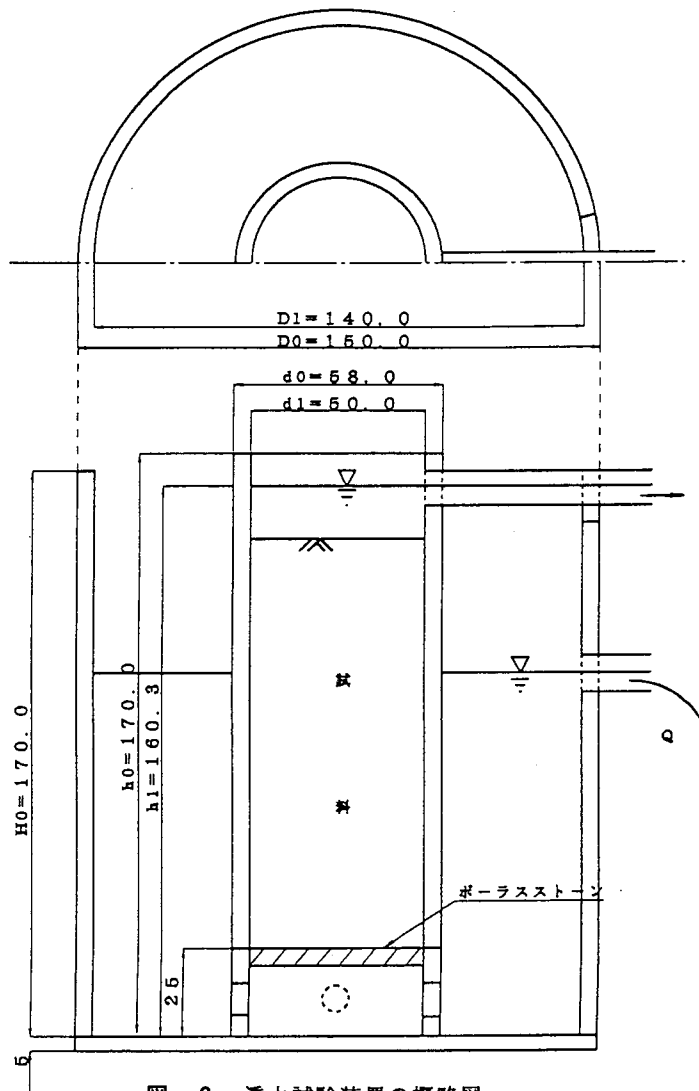


図-2 透水試験装置の概略図

## 2. 実験概要

### (1) 試料

間隙比, 平均粒径, 均等係数, 粒子形状と透水係数の関係を明らかにするために, 試料は粒子形状の異なる, Glass Beads, 豊浦標準砂, 木曾川砂, 砕砂の4種類を準備し, 網ふるいを用いたふるい分けにより図-1の粒度分布になるように粒度調整をした。しかし, JSF基準<sup>2)</sup>に定められている方法では, 網ふるいのメッシュ幅が粗く完全に粒度組成を等しく調整するには不十分であるので, JISの全標準網ふるいを用いて細かいメッシュ幅でふるい分けを行った。

これらの試料を真空ポンプで脱気することにより完全に飽和させ, 棒を用いた突固めにより供試体を作成し, 突き数を変化させることにより間隙比を調整した。

### (2) 試験装置

本研究で用いる定水位透水試験機は, 試料として人工的に調整したGlass Beadsなどの特殊な材料を用いることを考慮し, 土質工学会基準(JSF T 311-1990)<sup>3)</sup>の標準的な定水位透水試験装置に準ずるアクリル製の小型の試験装置を用いる。

この試験装置に必要な供試体の寸法は $\phi = 5\text{cm}$ ,  $h = 10\text{cm}$ 程度であり, 試料を約 $200\text{cm}^3$ しか必要せず, JSF標準型<sup>3)</sup>の試験装置の約1/4の試料で試験を行うことが出来る。フィルターには完全に飽和させたポラスストーン使用し, 容器がアクリル製であるので目視で粒子の詰まり具合, 飽和の状況を確認できる。この試験器の概略図を図-2に示す。

なお, 試験の方法についてはJSF基準<sup>3)</sup>に準ずるものとする。

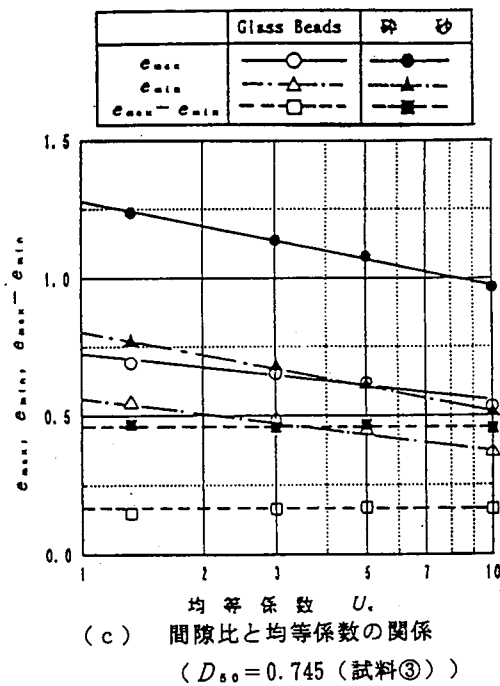
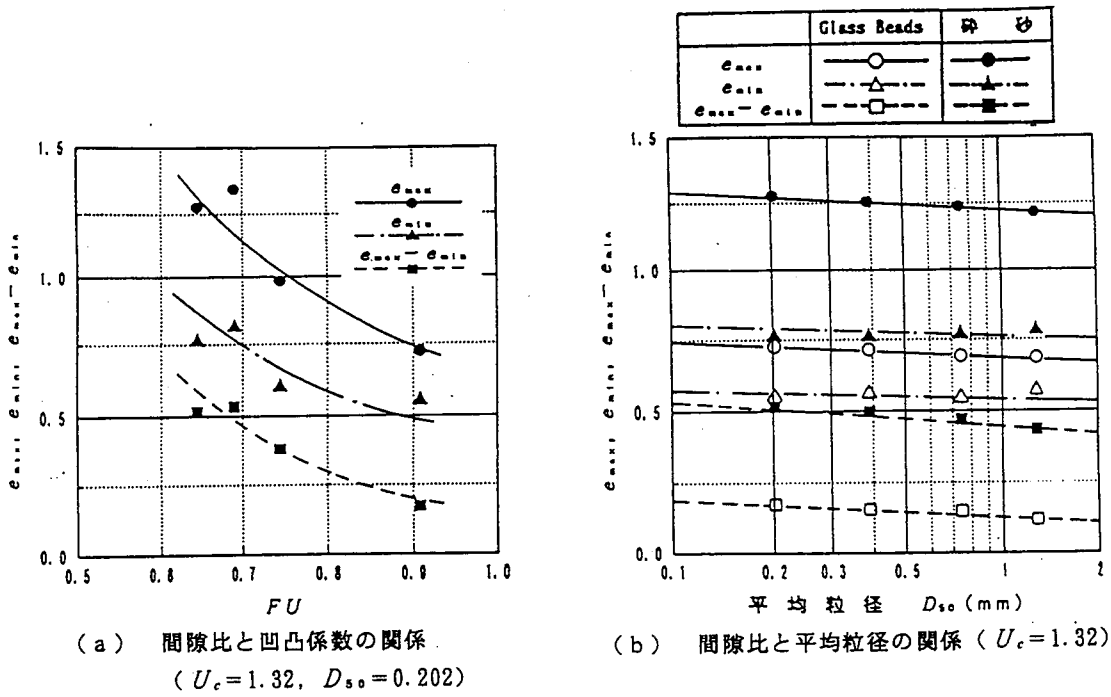


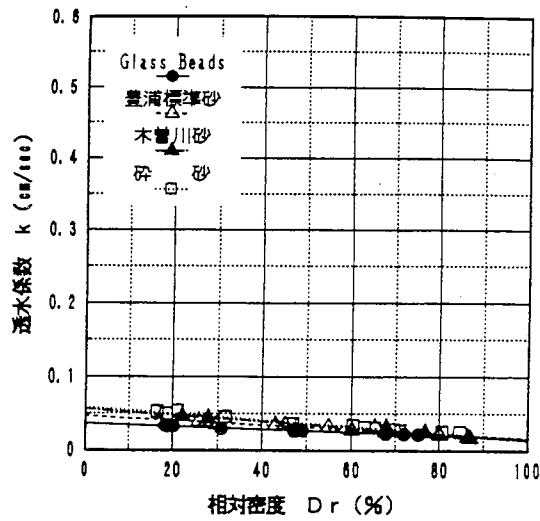
図-3 間隙比と各因子の関係

### 3. 間隙比特性

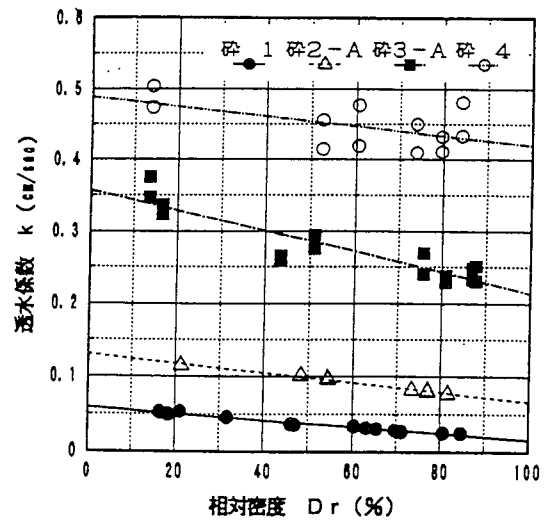
本研究で透水係数と物理的性質である間隙比（あるいは密度）、平均粒径、均等係数、粒子形状との関係を調べるにあたり、間隙比と他の物理的性質の間に相関があることが考えられる。そこで、各試料の最大間隙比  $e_{max}$ 、最小間隙比

$e_{min}$  および間隙比幅 ( $e_{max} - e_{min}$ ) と粒子形状、平均粒径、均等係数との関係を表したグラフの一例が図-3<sup>4)</sup>であり、各図の間隙比の比較を容易にするため縦軸のスケールは統一してある。

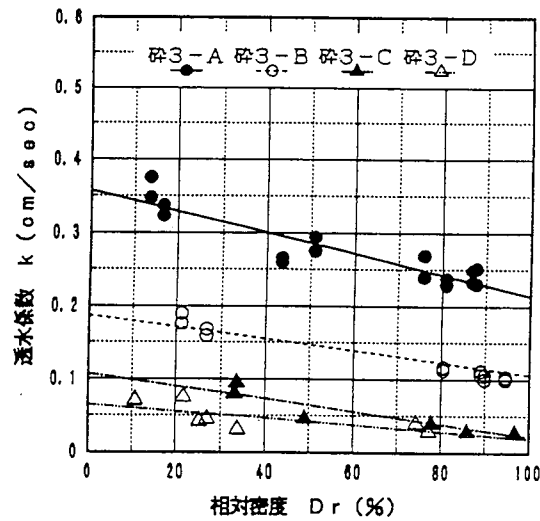
これらの図から、間隙比に及ぼす粒子形状の影響は非常に大きく、平均粒径はほとんど影響を与えないことがわかる。



(a) 透水係数に及ぼす粒子形状の影響



(b) 透水係数に及ぼす平均粒径の影響



(c) 透水係数に及ぼす均等係数の影響

図-4 透水係数に及ぼす各因子の影響

#### 4. 透水試験の結果と考察

透水係数と相対密度  $D_r$  の関係で整理した実験結果の一例を図-4<sup>5)</sup>に示す。なお、比較を容易にするためこれらの図の縦軸スケールは統一してある。

粒子形状は透水係数にはほとんど影響せず (a 図), 平均粒径が小さいほど (b 図), 粒度分布が良いほど (c 図) 透水係数が小さくなることが明らかであり, いずれも密度が大きくなるほど透

水係数は小さくなっている。

一般的に透水係数は間隙比の大小に左右されると考えられがちであるが, 図-3 (a) のように粒径が変化しても間隙比はそれほど変わらないのに粒径が大きくなると透水係数は著しく大きくなっている。このことから, 地盤の透水性は粒径が大きいほど良くなるが, これは粒径が大きくなるほど間隙比が大きくなるからではなく, むしろ間隙比は小さいが一つ一つの間隙が大きく, 水道が容易いためであると推測できる。

## 5. 統計分析による透水係数の推定

### (1) 推定方法

本研究では透水係数を予測する統計分析の手法として重回帰分析を用いる。

ある変数  $y$  (目的変数あるいは従属変数) と、それに影響されると考えられる変数  $x$  (説明変数あるいは独立変数) の間の関係式を求め、それにもとずいて  $x_1, \dots, x_p$  の値から  $y$  の値を予測したり、その際の各  $x$  の影響の大きさを評価したりする分析を回帰分析と呼び、特に説明変数が1つのものを単回帰分析、2つ以上のものを重回帰分析と呼ぶ。本研究では、目的変数を透水係数  $k$ 、説明変数を平均粒径  $D_{50}$ 、均等係数  $U_c$ 、凹凸係数  $FU$  とした重回帰分析<sup>6)</sup>を行う。

プログラム<sup>5)</sup>は、目的変数と説明変数の全てのデータを入力することによって、各変数の平均、分散などの基本統計量を計算した後、変数増加法、変数減少法、変数増減法などを用い最良な回帰モデルを探索するために、説明変数の選択を自動的に行う。また、プログラムの使用者が任意の説明変数を選択することも可能である。その後、指定された目的変数の他の変数に対する回帰係数の推定値とその標準誤差、偏相関係数、重相関係数、出力された回帰モデルの当てはまりの良さの基準となる自由調整済み重相関係数、赤池の情報基準量 AIC、マロウズの  $C_p$  を算出する。これらの値を総合的に判断して最も良い回帰モデルを選択する。

この重回帰分析プログラムを利用し透水試験の結果も十分考慮して最適な透水係数の推定式を求める。

### (2) 予測結果

入力した透水試験の基礎データは256個であり、このデータをもとに重回帰分析によって求めた幾つかの重回帰式のうち、式の当てはまりの良さを表す指標の一つである自由度調整済み重相関係数が、0.9以上となるものは式(1)のような関数となり、間隙比が大きくなるほど、平均粒径が大きくなるほど、均等係数が小さくなるほど透水係数は大きくなるという基本的な条件は実験結果と一致している。

$$k = +\alpha e^x + \beta D_{50} - \gamma \log(U_c) - C \quad \dots(1)$$

ここに、 $k$ : 透水係数  $e$ : 間隙比  $D_{50}$ : 平均粒径  $U_c$ : 平均粒径であり、 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $x$ ,  $C$  はそれぞれ重回帰分析プログラムによって出力された正の係数である。

粒子形状を表す指標である凹凸係数  $FU$  は透水係数に与える影響が少なく、また図-4(a)のように間隙比  $e$  と非常に関係が深いため互いに内部相関があることが考えられるので説明変数からは省かれた結果となっている。

なお、この重回帰式が他の試料についても当てはまるか否かを確かめるために、真鍮製の球と六角ナット、沖縄産の星砂などの特殊な粒状体を含んだ幾つかの試料について比較試験を行い、式(1)による推定値の妥当性を検討した結果、基礎データと同程度の精度で透水係数を推定できることも確認している。

## 6. おわりに

1. でも述べたように今回の実験で用いた試料は、極めて限られた範囲のものであり、実際の地盤で適用するには細粒分含有率、飽和状態、不攪乱、攪乱状態が透水性におよぼす影響など考慮すべきパラメーターが数多く残っている。また、粗粒材を含むような広範囲の粒度についても透水係数の推定が可能であるか否かの検討も必要である。今後の研究では、上述のように条件の種々異なる試料を用いてデータの蓄積および統計解析を行い、適用範囲の幅を広げていきたいと考えている。

謝 辞: 本研究を実施するにあたり真鍮試料を提供して頂いた名古屋工業大学教授・松岡 元先生に厚く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 河上房義: 土の透水試験(その1), 土と基礎, Vol. 4, No. 1, 土質工学会, pp. 33~40, 1956.
- 2) 土質工学会: 土質試験の方法と解説, pp. 54~67, 1990.
- 3) 前掲 2), pp. 271~287, 1990.
- 4) 吉村優治: 砂のような粒状体の粒子形状と

- 一次性質，二次性質に関する研究，長岡技術科学大学博士（工学）学位論文，1994.3.
- 5) 乾 英隆：砂のような粒状体の透水性に関する研究，岐阜工業高等専門学校平成6年度卒業論文，1995.3.
- 6) 田中 豊・垂水共之・脇本和昌 編：パソコン統計解析ハンドブックⅡ多変量解析編，共立出版株式会社，pp.1～24，1984.
-