

砂質土の透水係数の予測に関する研究

株式会社 アイ・エス・シイ 正会員 乾 英隆
岐阜工業高等専門学校 正会員 吉村優治

1. はじめに

土の透水性，すなわち土中における自由水の移動のしやすさは土の重要な性質の一つであり土質工学や地盤工学の多くの問題に関わっている．透水性は，その地盤を構成している土の基本的性質（粒子寸法，粒度分布，粒子形状など）および，その状態（間隙比，あるいは密度，含水比など）によって影響され，同様の基本的性質をもつ土であっても状態により透水性は異なり，逆に同様の状態にあるものであっても基本的性質によって透水性は変化する．しかし，これまでに提案されている多くの透水係数の推定式¹⁾は，間隙比，粒子形状等を主な指標として推定されてはいるものの，それらの推定式の物理的意味は明確ではなく，推定精度もあまり良好ではない．

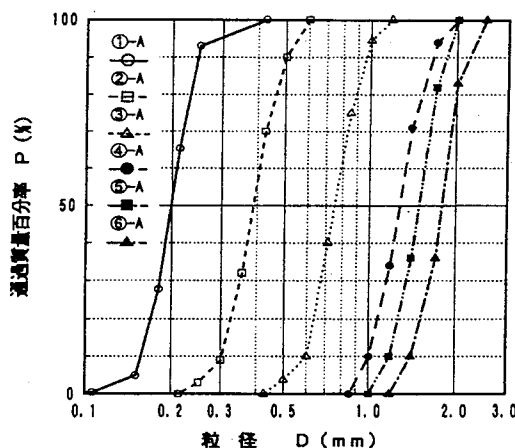
そこで，本研究では異方性のない完全に飽和した攪乱状態の砂の室内定水位透水試験を行い，極めて限られた条件下ではあるがこの結果を用いて間隙比および一次性質である粒子寸法，粒度分布，粒子形状等の物理的性質と透水係数との関係を明らかにする．また，統計的手法を用いてこれらの物理的性質による透水係数の予測を試みる．

さらに，細粒分，粗粒分が透水係数に及ぼす影響についても若干の考察を行う．

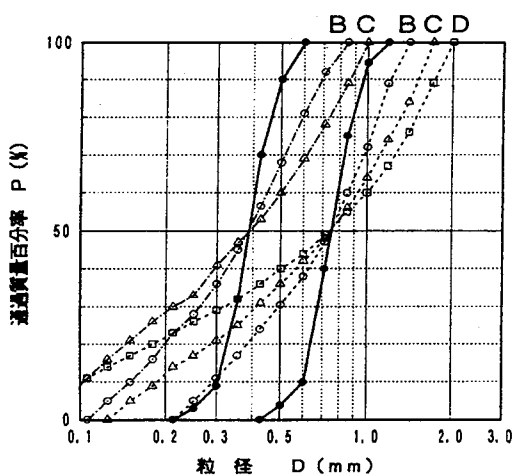
2. 実験に用いる試料

2.1 純粋な砂試料

実験および統計解析に用いる試料は図-1(a) (①~④試料)，(b)に示す粒径加積曲線のように人工的に粒度調整した粒子形状の異なる Glass Beads，豊浦標準砂，木曾川砂，砕砂の4種類の粒状体である．本研究ではこれらの試料を異方性のないよう棒で突き固めて供試体を作成する．



(a) 平均粒径の異なる試料



(b) 均等係数の異なる試料

図-1 試料の粒径加積曲線

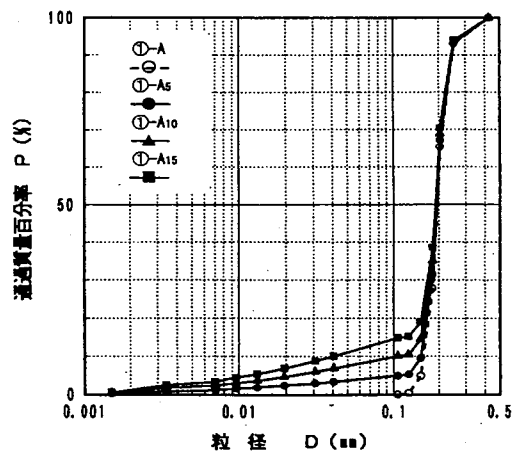


図-2 細粒分含有試料の粒径加積曲線

なお、粒子寸法を代表させる指標として平均粒径 D_{50} 、粒度分布を代表させる指標として U_c 、粒子形状を示す指標は吉村ら²⁾の提案した凹凸係数 FU を用いる。この FU は粒子が完全球（投影断面が円）の場合に 1.0 で、凹凸の度合いが激しくなるほど小さくなる。また、土中の間隙の大小を表す指標として間隙比 e を用いる。

2.2 細粒分・粗粒分を含む試料

細粒分の影響は、図-2 に示すように砕砂の①-A の試料 ($D_{50} = 0.202\text{mm}$, $U_c = 1.32$, $FU = 0.644$) に細粒分（砕砂の粒径が 0.075mm 以下の試料）を 5% 含有させた試料 (①-A₅)、10% 含有させた試料 (①-A₁₀)、15% 含有させた試料 (①-A₁₅) により検討を行う。

粗粒分の影響は、図-1 (a) に併せて示した砕砂の⑤-A ($D_{50} = 1.491\text{mm}$, $U_c = 1.32$, $FU = 0.644$)、⑥-A ($D_{50} = 1.789\text{mm}$, $U_c = 1.32$, $FU = 0.644$) の試料により検討する。

なお、供試体の作成方法は 2.1 と同様である。

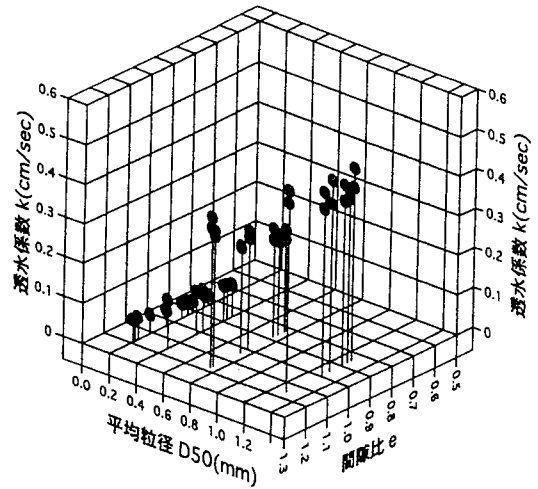
3. 純粋な砂の透水試験結果および統計解析

3.1 透水試験結果

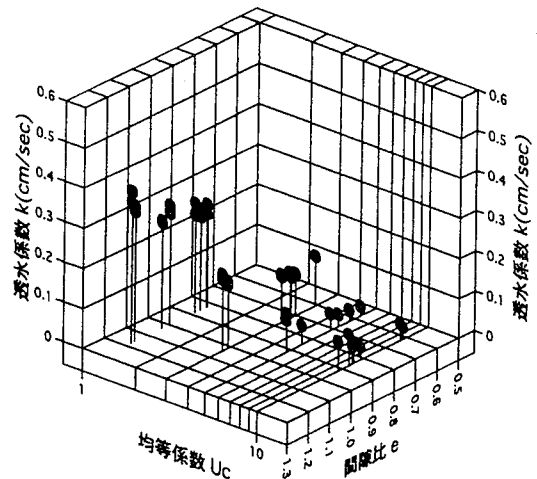
図-3 は、①~④の試料 ($D_{50} = 0.202 \sim 1.280\text{mm}$) について透水係数 k と間隙比 e および一次性質 (D_{50} , U_c , FU) の関係の一例を示したものである。なお、各図の比較を容易にするために z 軸（透水係数 k ）、 x 軸（間隙比 e ）スケールを統一してある。透水係数 k は、 D_{50} の増加、 U_c の減少に伴い増加しており、 FU にはほとんど影響を受けないことがわかる。また、 k はいずれの関係とも、間隙比 e の増加に伴い増加している。

3.2 統計解析

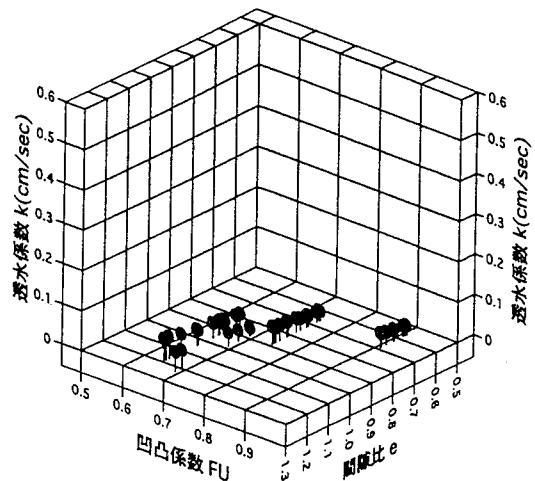
3.1 の実験結果に基づき、透水係数 k を目的変数、平均粒径 D_{50} 、均等係数 U_c 、凹凸係数 FU 、間隙比 e を説明変数として統計解析を行うにあたり、状態を表す変数である e と一次性質である D_{50} 、 U_c 、 FU の間に互いに干渉し合う因子が存在する可能性がある。すなわち、間隙比 e は、一次性質 (D_{50} , U_c , FU など) によって決まる二次的な性質であり、強い相関がある一次性質の因



(a) 透水係数と間隙比、平均粒径の関係 (砕砂, $U_c = 1.32$)



(b) 透水係数と間隙比、均等係数の関係 (砕砂, $D_{50} = 0.745\text{mm}$)



(c) 透水係数と間隙比、凹凸係数の関係 ($D_{50} = 0.202\text{mm}$, $U_c = 1.32$)

図-3 透水係数と各因子の関係

子に大きく左右される。一般に間隙比 e は、最大間隙比 e_{max} ~ 最小間隙比 e_{min} の値をとるので、 e_{max} 、 e_{min} と一次性質間の相関を調べることによって、 e と一次性質の因子との相関の強さが判明することになる。

図-4は、各試料の最大間隙比 e_{max} 、最小間隙比 e_{min} と一次性質 (D_{50} 、 U_c 、 FU) の関係を示している。なお、各図は間隙比の比較を容易にするために縦軸スケールを統一してある。 e_{max} 、 e_{min} は、 D_{50} にはほとんど影響を受けず、 U_c 、 FU の増加に伴い減少することがわかる。この結果に基づけば、 e_{max} 、 e_{min} は一次性質 D_{50} 、 U_c 、 FU を説明変数として、以下のような相関の高い重回帰式を得る。

$$e_{max} = -1.99FU - 0.29\log U_c + 2.56 \quad (\bar{R} = 0.965) \cdots (1)$$

$$e_{min} = -0.80FU - 0.29\log U_c + 1.32 \quad (\bar{R} = 0.949) \cdots (2)$$

なお、 \bar{R} は自由度調整済み重相関係数である。これらの重回帰式は、 e_{max} 、 e_{min} は D_{50} には影響を受けず、 FU と U_c から推定できることを示している。したがって、 k を目的変数とする場合、説明変数である e と FU および U_c の間には多重共線性 (内部相関) があることが明らかになった。また、各変数の目的変数に対する相関係数の比較により、 FU は U_c よりも相関が大きいことがわかった。

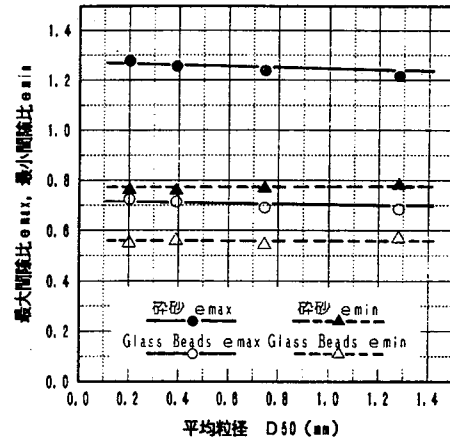
以上の結果を考慮し、図-3の実験結果に基づけば、透水係数 k (cm/sec) は以下のような重回帰式により予測できる。

$$k = 0.359D_{50} - 0.201\log U_c + 0.0857e^2 + 0.120FU - 0.159 \quad (\bar{R}=0.941) \cdots (3)$$

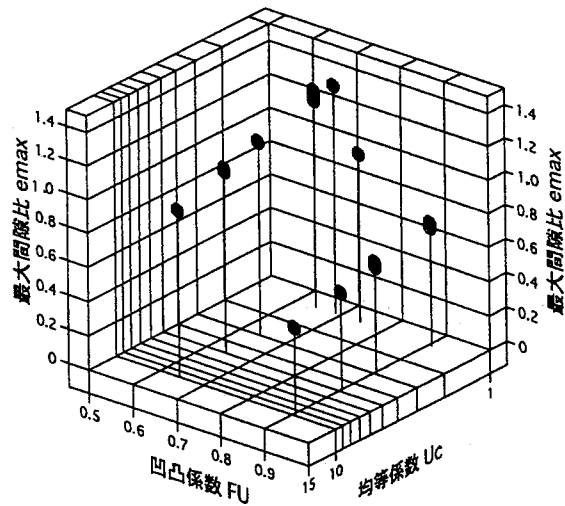
$$k = 0.360D_{50} - 0.210\log U_c + 0.0508e^2 - 0.0454 \quad (\bar{R}=0.935) \cdots (4)$$

$$k = 0.356D_{50} - 0.226\log U_c - 0.0418FU + 0.0250 \quad (\bar{R}=0.919) \cdots (5)$$

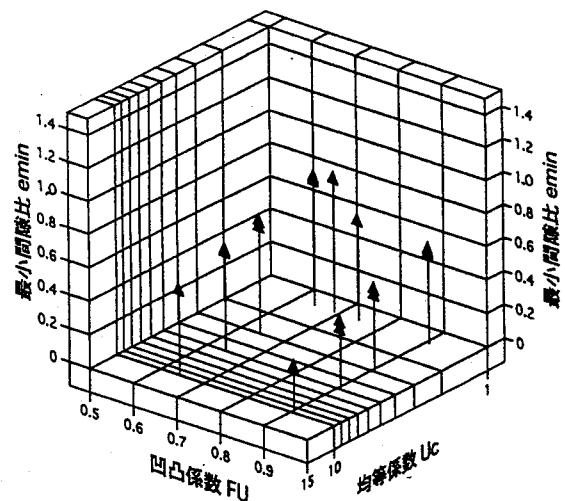
なお、 D_{50} の単位はミリメートルである。 \bar{R} の値が最も大きくなるのは、式(3)の全ての説明



(a) 最大・最小間隙比と平均粒径の関係 ($U_c = 1.32$)



(b) 最大間隙比と凹凸係数, 均等係数の関係



(c) 最小間隙比と凹凸係数, 均等係数の関係

図-4 最大・最小間隙比と各因子の関係

変数を含んだ回帰式である。ただし、先に述べたように、 e と FU には多重共線性があるので、この式(3)から FU の項を除いた式(4)は推定精度はほとんど変化しておらず、また、 e の項を除いた式(5)も \bar{R} は若干小さくなるにすぎない。しかし、同じく e と相関のある Uc を除くと $\bar{R} = 0.775$ と精度が落ち、 Uc は e だけではなく透水性にも直接影響を与えることを示している。また、 D_{50} を除いた場合は $\bar{R} = 0.122$ と推定精度は急激に減少する。各変数の目的変数に対する相関係数の比較により、 k に最も大きく影響をおよぼす因子は D_{50} であり、 Uc 、 e 、 FU の順にその影響は小さくなることもわかった。したがって、透水係数 k は既知の物理量(D_{50} 、 Uc 、 FU 、 e)に応じて、式(3)～(5)を使うことにより、予測が可能である。

4. 細粒分・粗粒分が透水係数に及ぼす影響

図-5は、間隙比が同程度の砕砂①-A、A5、A10、A15の試料について、透水係数 k と細粒分含有率 FC の関係を示したものである。透水係数 k は FC の増加によって指数関数的に減少する。

図-6は、間隙比が同程度の砕砂①～⑥-A ($Uc = 1.32$ 、 $FU = 0.644$)の試料について、透水係数 k と平均粒径 D_{50} との関係を示したものである。透水係数 k は D_{50} の増加に伴い指数的に増加している。3.では D_{50} は一次関数的に透水係数に影響することを示したが、この試験結果を考慮すると、粗粒分を含む場合には k を D_{50} の一次関数として回帰することは不相当であり、 k は粒径の増加に伴って著しく増加することが明らかになった。

今後、細粒分含有率を種々変化させた試料について透水試験を実施しその影響について考察を行うとともに、平均粒径の透水係数への影響についても検討を進めていく必要がある。

5. おわりに

本研究では、砂質土の透水性という非常に多くの要素が影響をおよぼすであろう現象について、粒子寸法、粒度分布、粒子形状、細粒分含有量、

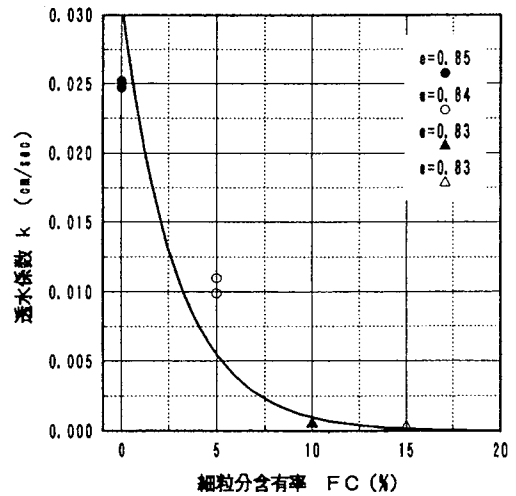


図-5 透水係数と細粒分含有率の関係

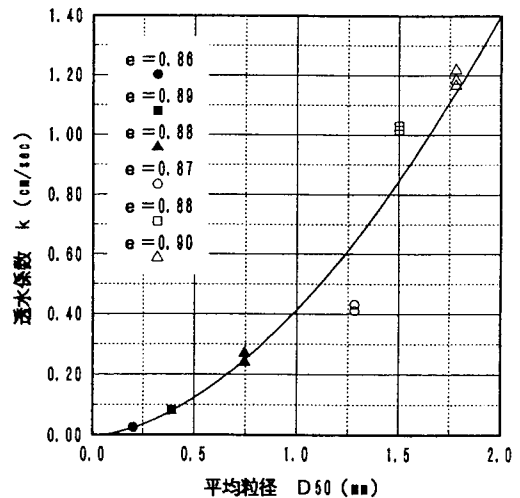


図-6 透水係数と平均粒径の関係

粗粒分含有量、間隙比等それぞれの因子に対してどのような影響を受けるのかを検討した。そして、純粋な砂に関しては極めて限られた条件下ではあるが、精度の良い透水係数の予測式を提案した。しかし、この推定式を実際の地盤で適用できるよう拡張するためには、飽和状態、異方性、攪乱の程度などまだまだ多くの因子を考慮する必要がある。

参考文献：1) 土質工学会：土質工学ハンドブック、pp.65～70、1990.1. 2) 吉村優治・小川正二：砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法、土木学会論文集、No.463/Ⅲ-22、pp.95～103、1993.3.