

砂質土の透水係数の推定に関する研究

岐阜工業高等専門学校専攻科 学生員 ○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 砂のような粒状体の透水性は、材料である砂の一次性質（平均粒径、均等係数、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）によって影響されることはよく知られている。しかし、Creagerの方法やTaylorの式¹⁾に代表されるように、透水係数を推定するための経験式は多く提案されているものの、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純粋な攪乱状態の砂の室内定水位透水試験を行い、極めて限定された条件下での試験結果ではあるが、この結果と間隙比 e および一次性質である平均粒径 D_{50} 、均等係数 U_c 、粒子形状の4つの因子との関係から、統計的手法を用いて透水係数の予測の可能性を探る。

2. 試料の性質 実験に用いる供試体は図-1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、木曽川砂、砕砂の4種類の粒状体を異方性のないよう棒で突き固めて作成したものである。なお、今回粒子形状を示す指標には吉村ら²⁾の提案した凹凸係数 FU を用いる。ここで、図-2の投影断面模式図を用いて FU の定義を説明する。

投影断面の外周長が l 、断面積が a の形状係数 f は、

$$f = \frac{a}{l^2} \quad (1)$$

で示される。この形状係数は円の場合に最大となり、例えば円の半径を R とすれば、

$$f_c = \frac{\pi R^2}{(2\pi R)^2} = \frac{1}{4\pi} \quad (2)$$

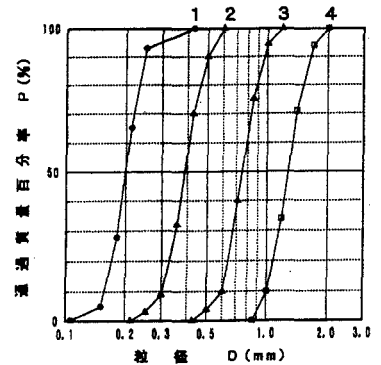
となる。ここで、 FU は式(1)に対する式(2)の比をとって

$$FU = \frac{f}{f_c} = \frac{4\pi a}{l^2} \quad (3)$$

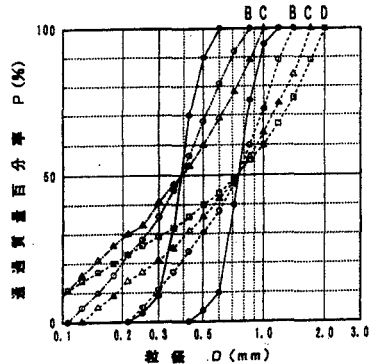
で定義されたものである。この FU は粒子が完全球（投影断面が円）の場合に1.0で、凹凸の度合いが激しくなるほど小さくなる。

3. 実験結果 図-3は、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縦軸（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。

4. 統計分析および考察 3.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 の中に互いに干渉し合う因子の存在が示唆される。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子に大きく左



(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 粒子の投影断面模式図

右されるものと考えられる。

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。 $e_{\max}$ 、 $e_{\min}$ を目的変数、一次性質 D_{50} 、 U_c 、 FU を説明変数として、統計解析を行えば以下のような相関の高い重回帰式を得る。

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

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

なお、 $\bar{R}$ は自由度調整済み重回帰係数である。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。このことより、説明変数である e と FU および U_c の間には内部相関があることが明らかになった。また、偏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 は以下のような重回帰式により予測できる。

$$k = 0.359D_{50} - 0.201\log U_c + 0.0857e^2 + 0.120FU - 0.159 \quad (\bar{R}=0.941) \quad \text{..... (4)}$$

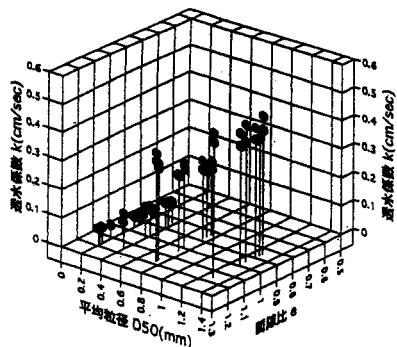
$$k = 0.360D_{50} - 0.210\log U_c + 0.0508e^2 - 0.0454 \quad (\bar{R}=0.935) \quad \text{..... (5)}$$

$$k = 0.356D_{50} - 0.226\log U_c - 0.0418FU + 0.0250 \quad (\bar{R}=0.919) \quad \text{..... (6)}$$

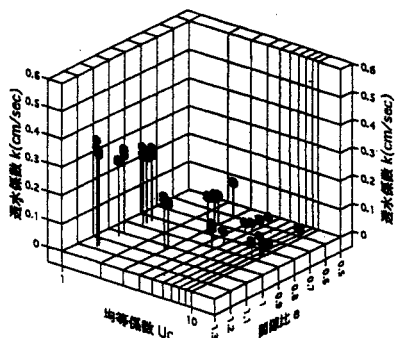
$\bar{R}$ の値が最も大きくなるのは、式 (4) の全ての説明変数を含んだ重回帰式である。ただし、先に述べたように、 e と FU には強い内部相関があるので、この式 (4) から FU の項を除いた式 (5) でも推定精度はほとんど変化しておらず、また、 e の項を除いた式 (6) も $\bar{R}$ は若干小さくなるにすぎない。しかし、同じく e と相関のある U_c を除くと $\bar{R} = 0.775$ と精度が落ち、 U_c は e だけではなく透水性にも直接影響を与えることを示している。また、 D_{50} を除いた場合は $\bar{R} = 0.122$ と推定精度は急激に減少する。偏相関係数の比較により、透水係数 k に最も大きく影響をおよぼす因子は D_{50} であり、 U_c 、 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} 、 U_c 、 FU 、 e) に応じて、式 (4) ~ (6) を用いることにより、予測が可能であることが確認できた。

5. おわりに 本研究で提案した透水係数 k の推定式は、極めて限られた条件下のものではあるが、 k の予測に用いた因子の物理的意味、その因子間の内部相関などを明確にすることができた。ただし、この推定式を実際の地盤で適用するにはさらに多くのパラメータ (たとえば細粒分含有率 F_c など) について検討する必要がある。

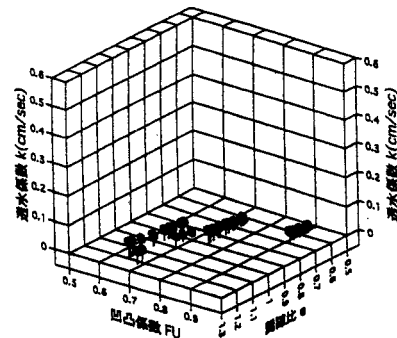
参考文献：1) 土質工学会：土質工学ハンドブック、pp.65 ~ 70、1990.1. 2) 吉村優治・小川正二：砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法、土木学会論文集、No.463/III-22、pp.95 ~ 103、1993.3.



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



(b) 透水係数と間隙比、均等係数の関係
(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 透水係数と各因子との関係