

III-A 266

純粋な砂の透水係数の予測に関する研究

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
 長岡工業高等専門学校 正会員 小川正二

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、透水係数は粒子寸法や間隙比を主な指標として推定されており、その推定式の物理的意味は明確ではない。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、この結果と物理的性質の関係から、統計的手法を用いて透水係数の予測の可能性を探る。ただし、本研究で検討した因子は間隙比 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 FU である。

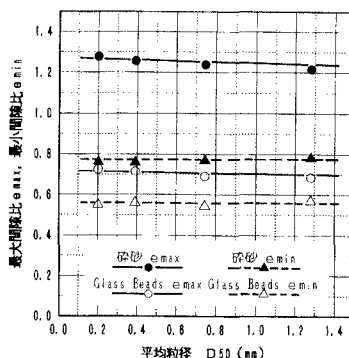
2. 試料および実験結果 実験に用いた供試体は、0.074~2.0mmの粒子形状の異なるGlass Beads、豊浦標準砂、木曾川砂、砕砂の4種類を平均粒径 $D_{50}=0.202\sim 1.28\text{mm}$ 、均等係数 $U_c=1.32\sim 10$ に人工的に粒度調整した種々の試料を、異方性のないよう棒で突き固めて作成したものである。

図-1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 、凹凸係数 FU ²⁾）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。

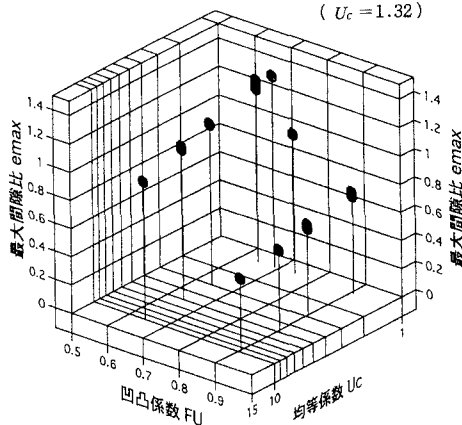
図-2は、透水係数 k と間隙比 e および一次性質（ D_{50} 、 U_c 、 FU ）の関係の一例を示したものである。なお、各図の比較を容易にするために縦軸（透水係数 k ）、x軸（間隙比 e ）スケールを統一してある。透水係数 k は、 D_{50} の増加、 U_c の減少に伴い増加しており、 FU にはほとんど影響を受けないことがわかる。また、 k はいずれの関係とも、間隙比 e の増加に伴い増加している。

3. 統計分析および考察 2.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、図-1よ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。

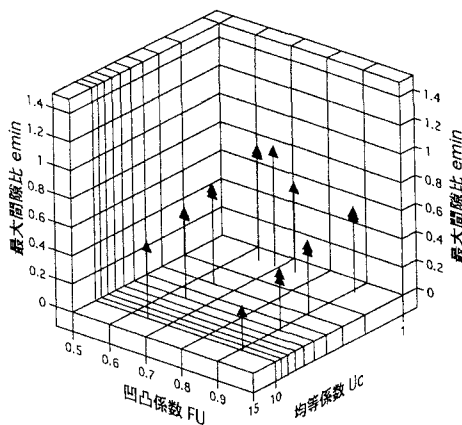
一般に間隙比 e は、最大間隙比 e_{max} ~最小間隙比 e_{min} の



(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-1 最大・最小間隙比と各因子との関係

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-1の実験結果に基づけば、 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。

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

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

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。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-2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。

$$k = 0.359D_{50} - 0.201\log Uc + 0.0857e^2 + 0.120FU - 0.159 \quad (\bar{R} = 0.941) \quad \dots\dots\dots (1)$$

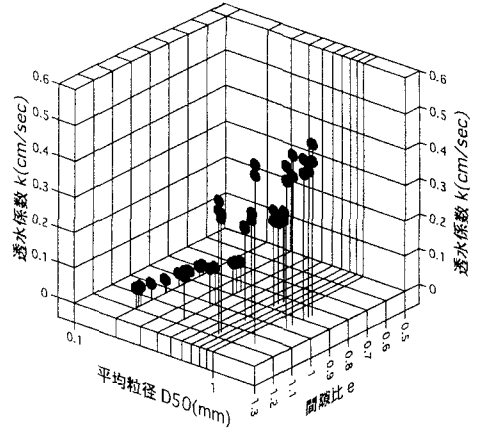
$$k = 0.360D_{50} - 0.210\log Uc + 0.0508e^2 - 0.0454 \quad (\bar{R} = 0.935) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$k = 0.356D_{50} - 0.226\log Uc - 0.0418FU + 0.0250 \quad (\bar{R} = 0.919) \quad \dots\dots\dots (3)$$

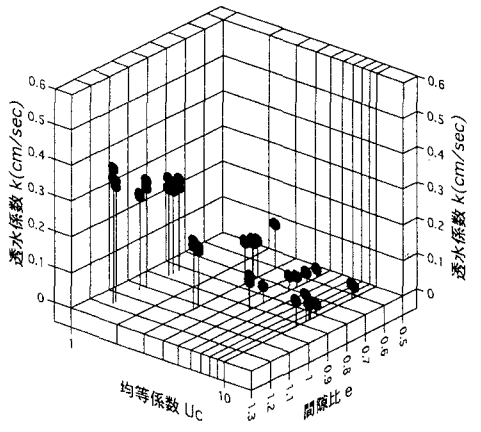
\bar{R} の値が最も大きくなるのは、式(1)の全ての説明変数を含んだ帰式である。ただし、先に述べたように、 e と FU には強い内部相関があるので、この式(1)から FU の項を除いた式(2)は推定精度はほとんど変化しておらず、また、 e の項を除いた式(3)も \bar{R} は若干小さくなるにすぎない。しかし、同じく e と相関のある U_c を除くと $\bar{R} = 0.775$ と精度が落ち、 U_c は e だけではなく透水性にも直接影響を与えることを示している。また、 D_{50} を除いた場合は $\bar{R} = 0.122$ と推定精度は急激に減少する。偏相関係数の比較により、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(1)～(3)を使うことにより、予測が可能であることが確認できた。

4. 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細粒分含有率、飽和状態、異方性、攪乱の程度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今後進めていく必要があると考えられる。

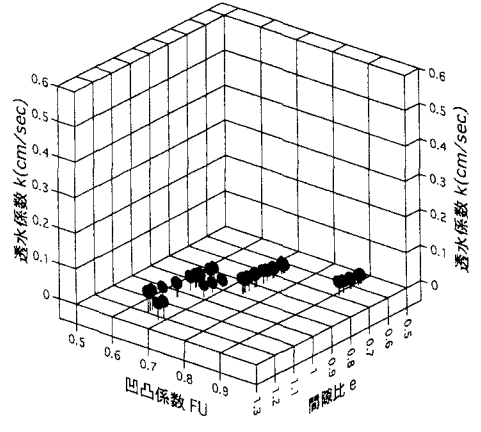
参考文献：1) 土質工学会：土質工学ハンドブック，pp.65～70，1990.1. 2) 吉村優治・小川正二：砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法，土木学会論文集，No.463/Ⅲ-22，pp.95～103，1993.3.



(a) 透水係数と間隙比、平均粒径の関係 (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-2 透水係数と各因子との関係