

粒度分布と間隙率を考慮した土の透水係数の推定方法

A new Method to Estimate the Permeability of Soil with Considering
Particle Size Distribution and Compaction Rate

森 田 悠紀雄 (もりた ゆきお)

元 基礎地盤コンサルタンツ㈱

坪 田 邦 治 (つばた くにはる)

中部土質協同組合

西 垣 誠 (にしがき まこと)

岡山大学 環境理工学部

小 松 満 (こまつ みつる)

岡山大学大学院 自然科学研究科

1. はじめに

土砂地盤の透水係数は、(a)粒度分布、(b)飽和度、(c)締め度合、(d)水の温度、(e)地下水の流れの方向、等々によって変化する。ところが、現場の地下水位変動解析にインプットする重要な定数である「透水係数 k 」の決定方法は、数値解析の高度化に比べると、お粗末といわざるを得ない。地盤の透水係数を測定するには、多孔式の揚水試験、乱さない土質試料を採取した室内透水試験、測定方法に課題の多い単孔式の原位置透水試験、の順で測定精度は低下するが、経済的な理由もあって、さらに精度の悪い、後述する D_{10} や D_{20} から地盤の透水係数を推定することが多用されている。

本小文では、約200個の室内透水試験結果とその土の粒度分析試験結果を用いて、 D_{10} あるいは D_{20} から透水係数を推定する多用法の問題点を指摘し、新たに粒度特性値と間隙率を加味した透水係数推定式を提案している。

2. 従来の提案式

山村¹⁾によれば、 D_{10} から透水係数 k を推定するヘーゼン (Hazen) の式²⁾は100年以上前 (1893) の提案式である。久保田ら³⁾によれば、この Hazen の提案式は洗浄砂について実施された試験結果であり、定数 C について、均等な粒子で150、緩い細砂で116、よく締まった細砂で70、大小粒子が混じっている砂で60、非常に汚れた粒子で46、であると解説している。

このほかにテルツァーギ (Terzaghi)、ツンカー (Zunker)、コゼニー・ドゥナー (Kozeny, Donat) らの提案式などがあるが、これらはいずれも確定の難しい定数を含んだ提案式であることもあって、我が国の現場ではほとんど普及せず、簡単な提案値で示された D_{20} だけから推定するクレーガー (Creager) の提案値⁴⁾が現場では多用されて現在に至っている。

その理由の一つは、この提案値が特殊土の一つである均等係数の小さい「レス土」を含むアメリカ合衆国中部にある四つのダムサイトにて実施された数百例の浸透試験結果から得られた平均的な値であって、『現場における極めて大まかな概算値を表す。密度、温度あるいは間隙率の違いが透水係数には大きな違いとなる。』との断

りがあるにもかかわらず、我が国では、そのことがあまり紹介されず、適用条件が示されなかったためであると筆者らは推測している。この提案値の分布が指数関数式 (例えば $k \approx 0.0036 D_{20}^{0.4}$ m/s, D_{20} は mm 単位入力) として近似できたことも広く現場で普及した要因であろう。

最近の関連研究報告には、福田・宇野の研究⁵⁾や、田中・堀・福本の研究⁶⁾などがあるが、いずれの提案も数多くの物性値が必要となる。このほか、例えば藤原・国生⁷⁾は砂礫材料を対象に D_{10} と透水係数の関係を整理している例を始めとして、限られた土質材料を対象にした研究報告は数多くあるが、広範囲の土質材料を対象にした研究報告は少ない。

3. 室内透水試験データを用いた透水係数と粒径特性・間隙率との相関

3.1 使用したデータ

入手できた幅広い種類の土の JIS 規格室内透水試験データ (現場にて乱さない試料が採取されたサンプル、ならびに室内で締めめられたサンプル、いずれも試験条件は飽和条件) から、約200個のデータ (火山灰質土と、明らかに異常値と思える数個は分析データから除外) を用いて、粒径特性値などと透水係数との相関性を分析することを試みた⁸⁾。

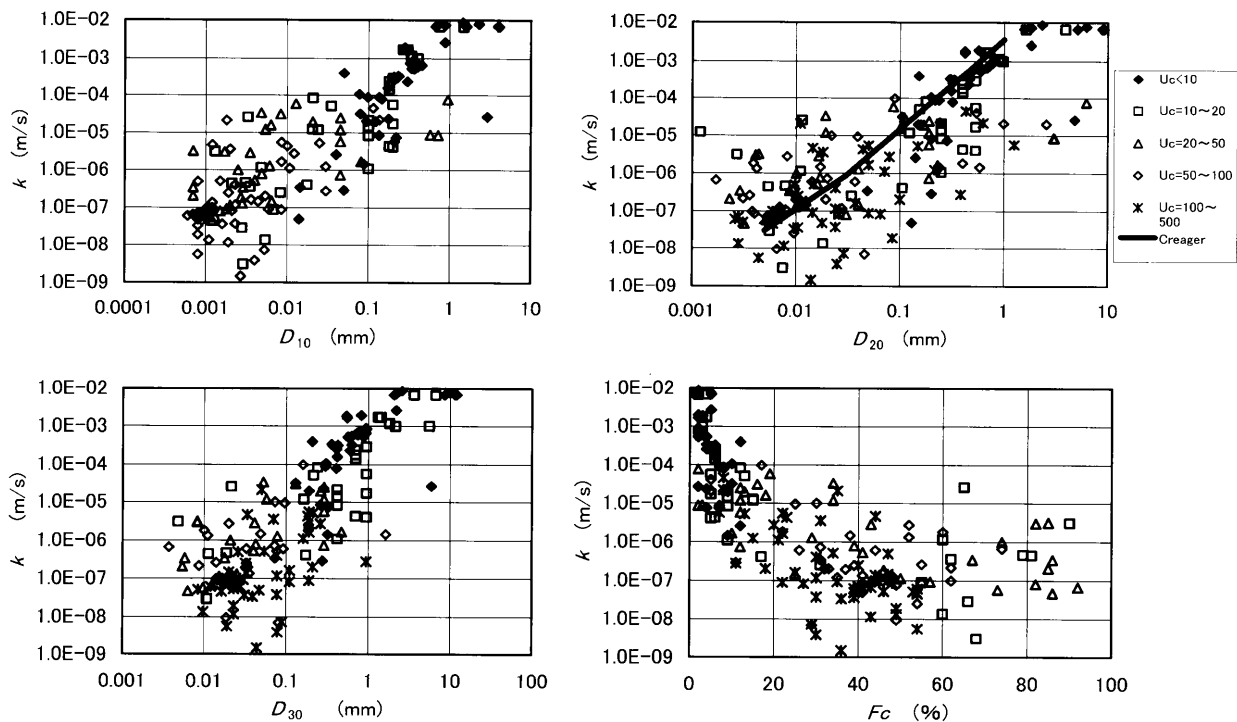
分析に使用した物性値は、一般的な粒径分布特性値である (D_{10} , D_{20} , D_{30} , F_c)、締め度合を評価するための間隙率 n 、ならびに間隙率 n が測定されていない多くの現場調査事例にも対応できるよう、締め度合を測定 N 値から大まかに5ランクに区分した値である。ここで5ランク区分とは Terzaghi & Peck らの提案を準用した5ランク値 (1.0 : 極めて緩い, 2.0 : 緩い, 3.0 : 中位, 4.0 : 密, 5.0 : 極めて密) を用いている。

3.2 均等係数 U_c の影響

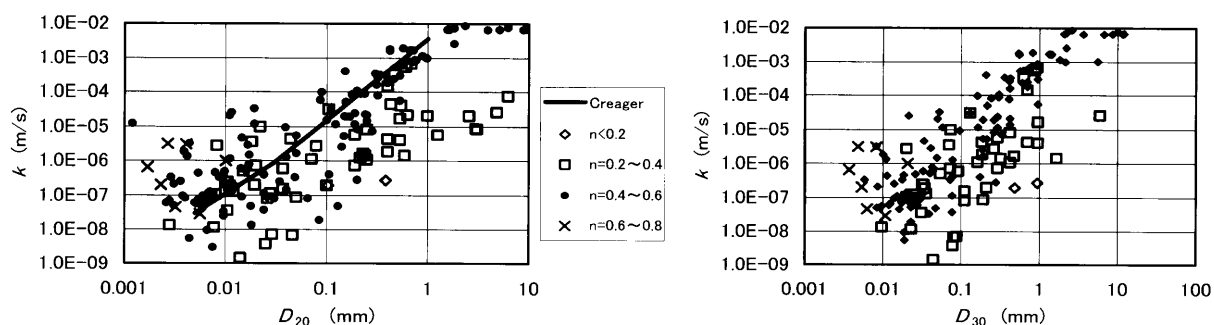
(1) 細粒径特性値 (D_{10} , D_{20} , D_{30} , F_c) と室内透水試験結果の相関は図—1であり、相関性はあまり良くない。殊に、多用している D_{20} を用いるクレーガーの提案値から透水係数を推定する方法は、他の特性値 (D_{10} , D_{30} , F_c) よりも、透水係数との相関性が悪い。

(2) D_{10} , D_{20} , D_{30} あるいは F_c が同じ土であっても、均等係数 U_c が大きくなるほど、透水係数は小さくなる

論文



図—1 粒度特性値と透水係数

図—2 $k \sim D_{20}, D_{30}$ (間隙率 n の影響)

傾向がある。

(3) このことは、一つの粒度特性値のみから透水係数を推定することには無理があり、均等係数などの係数も考慮する必要があることを示している。

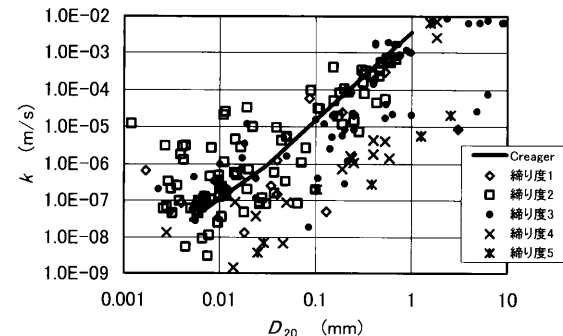
3.3 間隙率 n の影響

(1) 図—2 は図—1 の一部を、間隙率 n を識別して整理している。透水係数は同じ粒度配合の土であっても、その間隙率 n によって大きく異なることが分かる。当然のことながら、間隙率が小さいほど、透水係数は小さくなることを示している。

(2) 測定 N 値から評価した締り度ランクの影響を、 $k \sim D_{20}$ 相関図にて見ると図—3 となる。同図からも透水係数は締り度合の影響を強く受けることが明らかとなる。

4. 粒径・均等係数・締り度を考慮した透水係数の推定式 (多重回帰分析結果)

(1) 上述の検討結果から、粒度分析試験結果を利用して透水係数を推定するには、その土の細かい粒径に関する特性値 ($D_{10}, D_{20}, D_{30}, F_c$) 以外に、均等係数 U_c ならびに締り度合 (間隙率 n , あるいは締り度ランク) を加

図—3 $k \sim D_{20}$ (N 値評価締り度の影響)

味する必要性が指摘でき、それらを加味した多重回帰分析を実施した。

(2) 分析結果から得られた相関係数は表—1 である。指摘できることは、粒径に関する特性値としては、 D_{30} を採用した場合の相関係数が全般的に大きく、つぎに F_c, D_{10} の順であり、 D_{20} は最も相関係数が小さく算出される。

(3) 最も相関係数が大きい値となるのは、 D_{30}, U_c, n の組み合わせであり、重相関係数は 0.899 を得る。

表—1 $\ln k$ の重相関係数計算結果

使用関数	$\ln D_{10}$	$\ln D_{20}$	$\ln D_{30}$	$\ln F_c$
$\ln k$ 単独	0.838	0.782	0.798	-0.837
$\ln k, \ln U_c$	0.848	0.840	0.877	0.865
$\ln k, \ln n$	0.869	0.843	0.878	0.877
$\ln k, \ln(\text{締め度ランク})$	0.847	0.794	0.830	0.845
$\ln k, \ln U_c, \ln n$	0.870	0.856	①0.899	0.881
$\ln k, \ln U_c, \ln(\text{締め度ランク})$	0.853	0.844	②0.893	0.867

使用単位など: k (透水係数 m/s), D_{10}, D_{20}, D_{30} (%粒径 mm),

n (間隙率 $=e/(1+e)$), F_c (細粒分含有率 %単位 の 1/100),

U_c (均等係数 $=D_{60}/D_{10}$)

5. 概略透水係数推定式の提案

表—1 の重回帰分析結果から、最も相関性の高い透水係数推定式として、30%粒径 D_{30} 、均等係数 U_c 、間隙率 n を係数として用いた式(1)の採用を提案する。

$$k = 0.052 \times (D_{30})^{1.5} \times (U_c)^{-0.8} \times n^{1.4} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 k : m/s, D_{30} : mm 単位, n : %値の 1/100
現場にて乱さない試料を採取して、間隙率 n を測定することが実施されていない場合には、標準貫入試験 N 値から締め度合を評価して、式(2)を代用する。

$$k = 0.014 \times (D_{30})^{1.2} \times (U_c)^{-1.0} \times (\text{締め度ランク値})^{-2.0} \dots \dots \dots (2)$$

上記の式を用いて推定した透水係数と、室内透水試験結果との相関は図—4、図—5 となる。計算値は試験値に比べておよそ ± 1 オーダーのばらつきはあるが、図—1 に比べると、ばらつき範囲は減少していることが分かる。

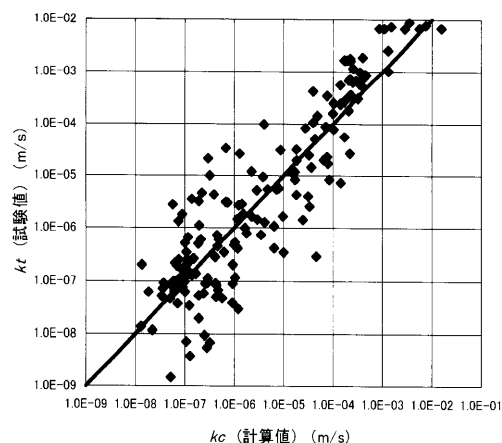
6. あとがき

ここに提案した透水係数の推定式は、従前の提案値に比べるとばらつきは小さくなってはいるが、なお広いばらつきの範囲にある提案式であることには変わらない。土の種類ごとに、より信頼性の高い推定式が提案できるとよい。

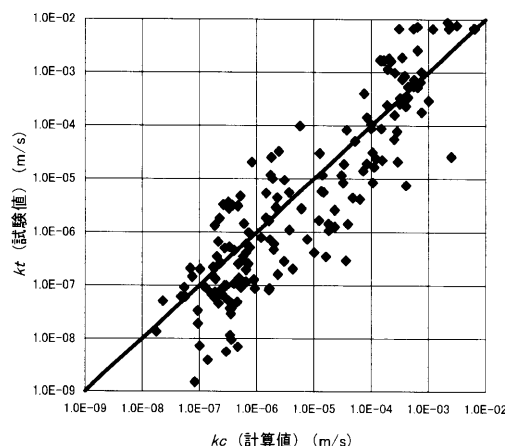
土の締め度合に関して、相対密度の測定値を使用することが好ましいと考えるが、一般的な地盤調査ではそれを測定することはまれである。そこで、比較的測定されることが多い間隙比から算出できる間隙率を使用している。

間隙比に関する測定値も得られない場合の代案として、測定 N 値から締め度を 5 ランクに分けて評価する方法も提示しているが、測定 N 値は土質型によってその評価は異なるため、ここでは工学的な評価が必要である。

併せて、土の透水係数は飽和度に大きく影響されること、自然地盤にて不飽和状態にある土は、細粒分が粗粒状に団粒固化していることが多く、それが飽和しても、ここに提案した値よりも、はるかに高い透水性を有して



図—4 式(1)を用いた計算値と試験値



図—5 式(2)を用いた計算値と試験値

いることがあることも忘れてはならないと考える。

参考文献

- 1) 山村和也: 土質基礎工学ライブラリー 7, 実用数式・図表の解説, 第3章 土の中の水の動き, 土質工学会, 1971.
- 2) Hazen, A.: Some Physical properties of sand and gravel with special reference to their use in filtration, 24th Ann. Rep., Mass. State Board of Health, Boston, 1893.
- 3) 久保田敬一・河野伊一郎・宇野尚雄: 透水—設計へのアプローチ, 鹿島出版会, 1976.
- 4) Creager, W.P., J. D. Justin and J. Hind: Chap. 16 Soil tests and their utilization, Engineering for dams, Vol. III: Earth, Rock-fill, Steel and Timber Dams, John Wiley and Sons, pp. 645~654, 1944.
- 5) 福田光治・宇野尚雄: 透水係数に関する粒度分布と間隙指標, 土木学会論文集, Vol. 561, III-38, pp. 193~204, 1997.
- 6) 田中佑二郎・堀 佑平・福本武明: まさ土の風化指標とその活用, 土木学会第58回年次学術講演会, III-388, pp. 775~776, 2003.
- 7) 藤原裕介・国生剛治: 砂礫の浸透破壊と透水係数に及ぼす粒度の影響, 土木学会論文集, Vol. 687, III-56, pp. 27~36, 2001.
- 8) 森田・坪田・西垣・小松: 粒度分布と締め度合を考慮した概略透水係数推定式の提案, 第39回地盤工学研究発表会, pp. 1159~1160, 2004.

(原稿受理 2004.10.19)