

堤防基礎地盤における透水係数と 粒度特性の関係

RELATIONSHIP BETWEEN PERMEABILITY AND GRAIN SIZE CHARACTERISTICS OF SUBSTRATA OF LEVEE SYSTEMS

稲崎富士¹・小西千里²

INAZAKI Tomio and KONISHI Chisato

¹土木研究所 つくば中央研究所 技術推進本部 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²応用地質 エンジニアリング本部 技術研究所 (〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘43)

Permeability of substrata is the essential property which controls the seepage safety of levee systems. Permeability of unconsolidated porous sediment is obtained generally by laboratory test, pumping test and in-situ permeability test in single borehole. In contrast, estimation from the grain size characteristics has been widely adopted as an alternative way, due to the difficulty and cost expensiveness of permeability tests. Creager's equation, whereas old-fashioned, is one the most usual methods for estimating permeability from grain size parameters. The equation input D20 diameter value and output the permeability range in the order of power. Kozeny-Carman equation and Timur equation are also well known equations to estimate permeability from them. Appropriateness of each equation is practically important issue because they are used in safety assessment of levee systems without any constraints. We then collected in-situ permeability test data and grain size analysis data, and analyzed them statistically with special reference to the bimodal grain mixture model.

Key Words : Levee systems, seepage analysis, permeability, grain size, Creager's equation,

1. はじめに

河川堤防の浸透破壊に対する安全性照査として、基礎地盤のパイピング破壊に対する安全性を非定常浸透流解析と円弧すべり計算によって求める手順が設定されており、入力パラメータとして必要な透水係数は現場透水試験によって求めることとされている。その現場透水試験には、単孔式による注水法および回復法試験が一般的に採用されている。しかし注水法によって求めた透水係数と回復法によって求めた透水係数が、同一孔同一深度での試験に関わらず異なる値を示す場合があることが知られている^{1,2)}。室内と現場での透水試験結果にも有意の差異が認められるという指摘もなされている。透水試験の測定データが信頼できるものであるか否か、計測手法による差異が何に起因しているのか、それらの中からどの値を採用するか、あるいは試験法自体に問題がないか、という評価を下すには内在的な情報だけでは本質的に不十分であり、外在的な情報の利用が不可欠である。この外的指標として一般的に用いられている物性情報に、粒度組成と間隙率が挙げられる。未固結土質地盤のような多孔質媒質における飽和浸透流を想定する場合、間隙の

構成率とその存在状態、すなわち間隙の連通性と間隙径分布が浸透性を支配する主要な要因となることが知られている³⁾。さらに多孔質媒質においては間隙と構成粒子とは相補的な関係にあり、粒度組成によって間隙の連通性も間隙径分布を説明することができる。したがってこの関係を利用することで、粒度組成情報から透水係数を推定することが可能で、実際多数の経験式が提案されてきている。そのなかで最もよく用いられているのが、粒度試験によって求められるD20を代表粒径として使用するCreagerの式⁴⁾であろう。提案から60年以上経た今日においてもその簡便性から同式は広く透水係数の推定に用いられている。

Creagerの式から推定される透水係数は、均質な砂地盤であれば比較的実測値と整合的であるといわれているが、粘性土のような細粒分を多く含む地盤の場合の適用性は高くはないことが想定される。そこで今回、Creagerの式により粒度試験から推定した透水係数と現場透水試験結果とを比較検討し、細粒分含有率との関係について統計的な検討を加えた。さらに細粒分と粗粒分からなる2粒子モデルを仮定し、その構成比から透水係数を推定する方法についても検討した⁵⁾。

2. データ収集および統計的解析

(1) 収集データセットの概要

土木研究所は国土交通省の委託を受けて、同省が保有する地盤調査資料のWEB公開を担当してきた⁶⁾。これまでに土質調査ボーリング柱状図約8万本および付帯土質試験結果を国土地盤情報検索サイト“KuniJiban”から公開している⁷⁾。この公開作業の中には、信頼性の高い地盤情報を公開するための記載情報の点検検討も含まれており、その一環として、ボーリング柱状図および土質試験結果の収集点検だけでなく、現資料の収集・電子化作業も系統的に進めてきている。この間、電子納品された資料も含め、約5000冊分の地盤調査報告書類を収集し、電子ファイル化してきた⁸⁾。これらの収集報告書類の中から現場透水試験および土質試験を実施している資料を選択し、さらにそれらから現場透水試験結果と粒度試験結果を抽出した。収集データは約1000組に達した。現場透水試験はピエゾメーター法によるもので、大きく注水法と回復法に区分される。まず両試験結果の出現頻度を大まかな土質区分毎に比較してみた(図-1)。同図では試験によって求められる透水係数の指数部で区分して出現頻度を算出している。この図からは、細粒になるにつれて透水係数の値が小さくなるという一般的な傾向に加え、測定法間に有意な差異が見いだされる。すなわち、注水法に比べ回復法によって得られる透水係数の値のほうが明らかに大きい。ここでは土質すなわち粒度特性によってデータセットを区分しており、母集団が一樣ではないものの、注水法に比べ回復法によって求めた透水係数が有意に大きな値を示す一般的な傾向が捉えられている。図-2は、収集したデータセットの中から同一孔・同一深度で実施された回復法と注水法による試験結果を抽出して比較したものである。同図ではデータの90%以上が1:1のラインの下方に分布しており、注水法による試験結果が、回復法による試験結果よりも1桁ないし2桁程度小さな値を呈することが明瞭に示されている。なお測定法間に生じる差異の原因については、細粒分による目詰まりの影響と考えられる。図に示されるように、両測定データを一律に扱うことが危険であることから、以下回復法による試験結果のみを取り扱うこととする。なお、現場透水試験の実施深度は、大部分が沖積層・洪積層の自然地盤に相当しており、地下水位以深であった。したがって、今回対象としたデータは飽和状態を仮定しているが、土質試験において飽和度の試験結果が記載されていない場合は、それを95%と仮定して他の土質物性パラメータを計算している。

(2) 透水試験および土質試験結果に対する統計的解析

回復法による単孔式現場透水試験結果と土質試験結果とを対比し、両者の相関性について検討を加えた。なお

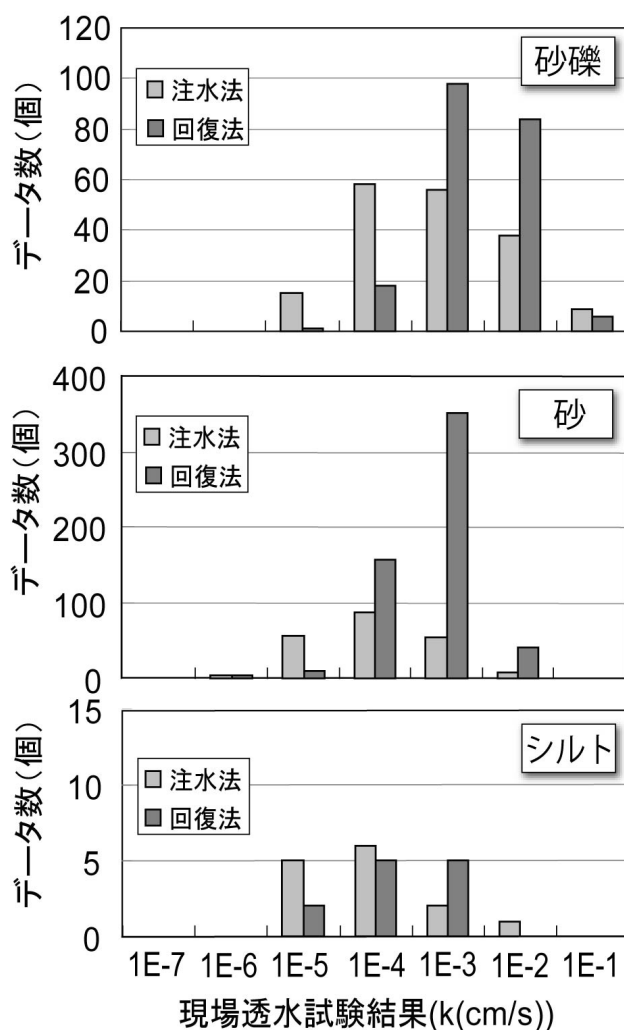


図-1 土質別現場透水試験結果の出現頻度

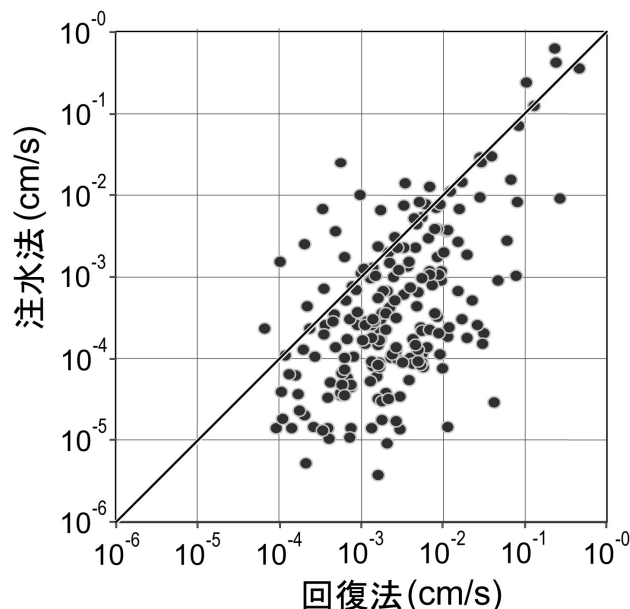


図-2 回復法と注水法による同一深度での試験実施結果の比較

土質試験結果の抽出にあたっては、原則として現場透水試験実施区間で採取された試料に対する試験データを対象としたが、一部には透水試験実施層準とおなじ層準と見なすことが可能な異なった深度で採取された試料に対する試験結果も使用した。対比に使用した土質物性パラメータは、土粒子の密度、粒度特性（4相分率、細粒分含有率、均等係数、曲率係数、D50、D20、D10）、湿潤密度、間隙率、である。

図-3に回復法による現場透水試験結果と間隙率との関係を示す。間隙率が大きいほど透水係数が小さく、逆に間隙率が小さいほど透水係数が大きくなる傾向が認められ、直線的な式で両者の関係を近似することができそうである。ただし透水係数は砂礫でも 10^{-4} から 10^{+0} 乗の範囲に広く分散しており、他の相データも同様に分散が大きい。つぎに粒度特性と透水係数との関係を検討した。そのうち、D20（20%粒径）、および細粒分含有率（ $F_c: < 75\mu\text{m}$ ）との関係をそれぞれ図-4、図-5に示す。図-4には、20%粒径が大きいほど透水係数が大きくなるほぼ直線で近似できる相関を見いだすことができる。ただし両対数表示であるため、線形尺度では分散が無視できない規模となる。なお直線近似式ではD20の範囲が4桁であるのに対し、透水係数ではほぼ2桁に収まっている。このことは透水係数のD20に対する感度が小さいことを示唆している。細粒分含有率との関係においても、両対数表示上で同様な直線近似を仮定することが可能である。すなわち細粒分含有率が大きくなるほど透水係数は小さくなる。近似式の傾きはほぼ-2であり、D20と同様に細粒分含有率にたいする透水係数の感度が高くないことが示唆される。なお回復法による透水係数の分布範囲は、以上に示した図に共通して示されているように、概ね 10^{-4} から 10^{-1} 乗の範囲に集中している。現場透水試験が基本的に粗粒層を対象としている結果と解釈することが可能である。

3. 土質試験データからの透水係数の推定法検討

(1) 既往推定式に対する検討

Creager⁴⁾は、アースダムの遮水特性についての検討を進める中で、使用する土質材料の粒度特性から透水係数を推定可能であるとし、D20を用いた経験式を提案した。その関係は、元来は一覧表にまとめられているが、ここではその表を近似した次式をCreagerの式とする。

$$D_{20} > 0.03 \text{ のとき } k = 0.36 D_{20}^{2.368} \quad (1)$$

$$D_{20} < 0.03 \text{ のとき } k = 0.0647 D_{20}^{1.885}$$

上記のCreagerの式から求められた透水係数をKcと表し、回復法により得られた透水係数(Kr)と対比した。結果を次頁の図-6に示す。この図に示されるように、Creagerによる推定透水係数(Kc)は現場透水試験結果と比

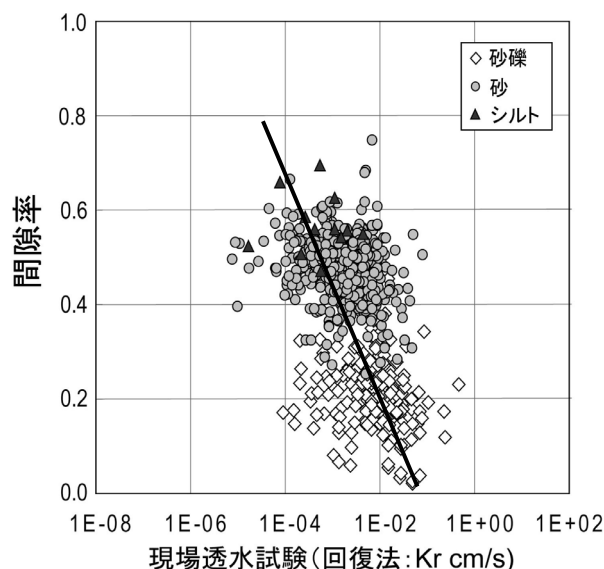


図-3 間隙率と透水係数（回復法）の関係

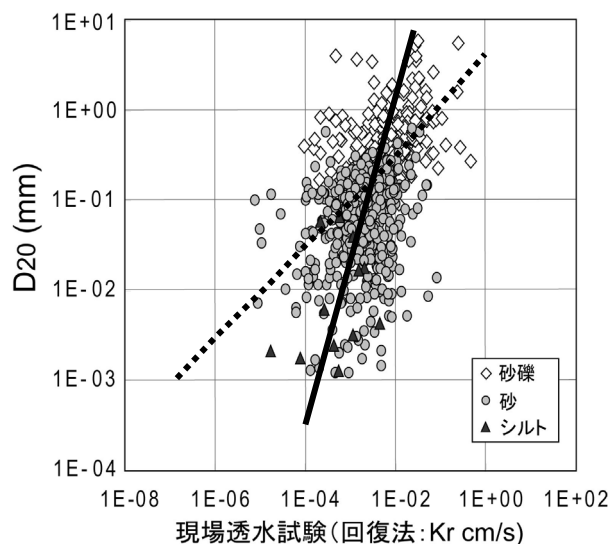


図-4 D20と透水係数（回復法）の関係

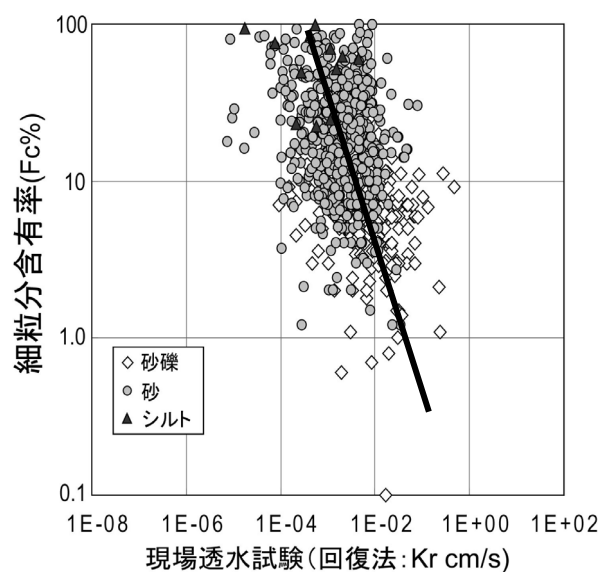


図-5 細粒分含有率と透水係数（回復法）の関係

べると粗粒の砂礫では高い値を示し、逆に細粒のシルトで低い値を示す。回復法による現場透水試験結果は、砂礫のような高透水部については測定上の問題から、やや低く測定されている可能性はあるが、砂・シルトでCreagerによる推定透水係数よりも高い値を示す理由は他にありと考える。

福田・宇野⁹⁾は、粒度分布が対数正規分布していると仮定し、粒子個数を指標として間隙の特性を説明する式を提案し、さらにHazen¹⁰⁾の有効径の概念との関係を調べ、土粒子の密度、50%粒径と均等係数および間隙比を用いて透水特性を推定する式を提案した。均等係数は10%粒径と60%粒径の比で定義されるので、細粒分についてもCreagerの式と同様に考慮されている。

$$\ln(\sigma_w) = 0.484 + 0.420 \ln(U_c)$$

$$h = \frac{0.3D_{50}}{\exp\{0.5 \times \ln^2(\sigma_w)\}} \times \frac{e}{G_s}$$

$$\log(k) = 2.87(1 + \log(h)) \quad \dots (2)$$

(k : cm/s, h : mm), σ_w : 粒度の標準偏差,
 U_c : 均等係数, h : 平均間隙径深, G_s : 土粒子密度

上記の式から求められた透水係数をKfと表し、回復法により得られた透水係数(Kr)と対比した。図-7にその結果を示す。この図でも図-6に示したCreagerによる推定透水係数と同様に、推定透水係数Kfは現場透水試験結果と比べると分散が大きく、その多くが1:1の線以下に分布していることが示されている。すなわち、福田・宇野による推定式では、実測値より2桁程度小さな値を与えることが示唆された。

(2) 細粒分の寄与に対する検討

上述した既往の2つの透水係数推定法は、いずれも細粒分の影響を考慮しているが、その寄与の程度を過大に見積もっているために実測値との乖離が生じていると考えられた。たとえば図-4に書き入れられた破線は、Creagerの推定式に対応しているが、D20の値が小さくなるほど実測値との乖離が大きくなっている。実際図-4と図-5を対比すると、シルトなど細粒分含有率が大きい試料でCreagerの式による推定値と実測値とのずれが大きいことがわかる。そこで現場透水試験結果(Kr)とCreagerの式による推定透水係数(Kc)との比をとって細粒分含有率(Fc)との関係を検討してみた。結果を図-8に示す。対数で表示した細粒分含有率と透水係数比には2次曲線で表すことが可能な正の相関が認められる。したがってこの2次相関式を用いることにより、細粒分含有率を指標としてCreagerの式による推定透水係数の乖離を補正することが可能となる。

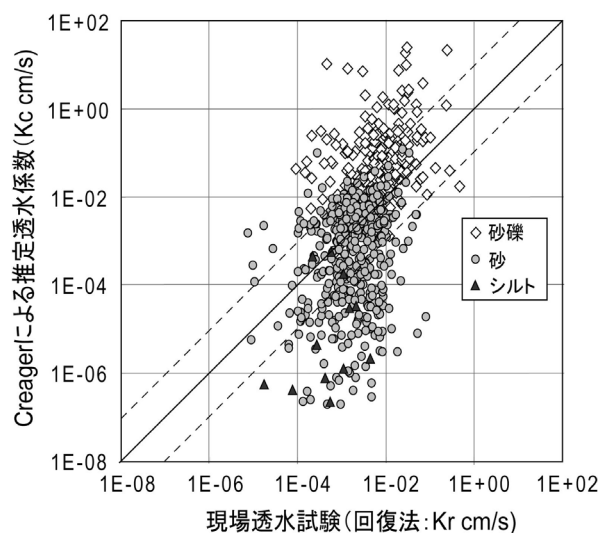


図-6 Creagerの式による推定値(Kc)と実測値 (回復法: Kr) との関係

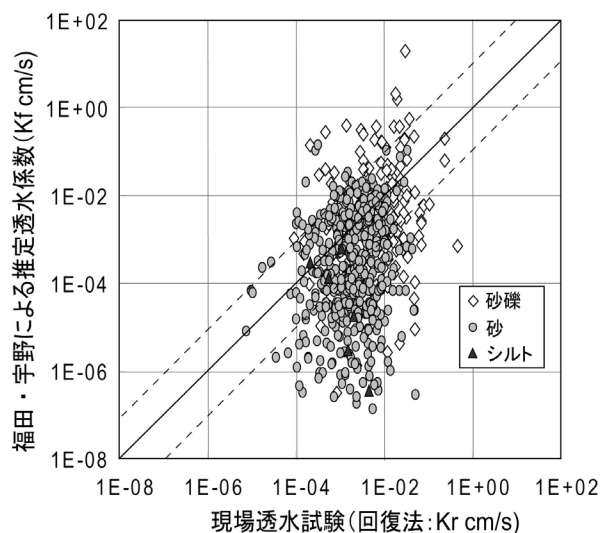


図-7 福田・宇野の式による推定値(Kf)と実測値 (回復法: Kr) との関係

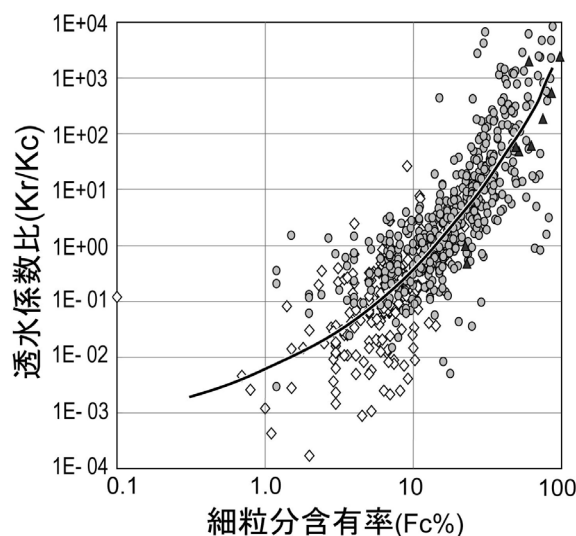


図-8 実測値(Kr)と推定値(Kc)との比と細粒分含有率との関係

両者間の2次相関式を以下に示す。

$$\log(Kr/Kc) = 1.05 \cdot (\log(Fc))^2 + 0.48 \log(Fc) + 1.91 \quad \dots(3)$$

この右辺を補正項とすることで、より実測値に近い値を推定することが可能となる。細粒分含有率補正透水係数を Kc' とすると、

$$\log(Kc') = Kc + 1.05 \cdot (\log(Fc))^2 + 0.48 \log(Fc) + 1.91 \quad \dots(4)$$

(4)式を用いて算出したCreagerによる推定透水係数補正値と現場透水試験結果を比較した(図-9)。まだばらつきは大きいものの、両者の差がおおむね1桁以内に収まっていることがわかる。実用的な面から言えば、このような単純な補正であっても透水係数の推定には有効といえるであろう。

Creagerの式では、D20を代表粒径として、同じ粒径の球で均質な地盤が構成されていると仮定している。この仮定により平均的な間隙径が定まることで透水係数が推定できることになる。しかし、実際の地盤は均質な1粒子モデルでは説明できない。浸透特性を規制する間隙の状態をより的確にモデル化するには、細粒分によって間隙の容量とその連通性がどのように変わるかについての検討が必要とされる。

そこで、土質試験結果による間隙率と細粒分含有率の関係を検討してみると、図-10のように、細粒分が多いほど間隙率は大きくなる傾向が認められる。これは、細粒分の増加に伴って、粒子表面や粒子間に吸着する間隙水の量が増えることにより、間隙率が大きくなっているためと考えられる。しかしこの間隙水は浸透には関与していない不動態水と考えられることから、この分を差し引き、透水係数に関係する間隙として有効間隙率を想定し、それへの細粒分含有率の寄与を、Timur¹¹⁾の式を用いて推定した。Timurの式は、不動水飽和度と間隙率を用いて透水係数を求める経験式である。元のTimurの式は岩石試料を用いて求められており、(5)式のように表される。

$$K = 0.136 \frac{\phi^{4.4}}{S_{wi}^2} \quad \dots(5)$$

ただし、 ϕ : 間隙率 (%) S_{wi} : 不動水飽和度 (%)
 K : 浸透率(mD : 1mD $\div 10^{-6}$ cm/s)

なお有効間隙率と不動水飽和度は以下の(6)、(7)式のように表される。ただし、ここでは全体の体積を1として、有効間隙率、不動水飽和度ともに割合で表している。

$$\text{有効間隙率} : \phi_e = \phi \cdot (1 - S_{wi}) \quad \dots(6)$$

$$\text{不動水飽和度} : S_{wi} = 1 - \frac{\phi_e}{\phi} \quad \dots(7)$$

すなわち、間隙率と有効間隙率の関係がわかれば、不動水飽和度が求められることになる。そこで、間隙率と有

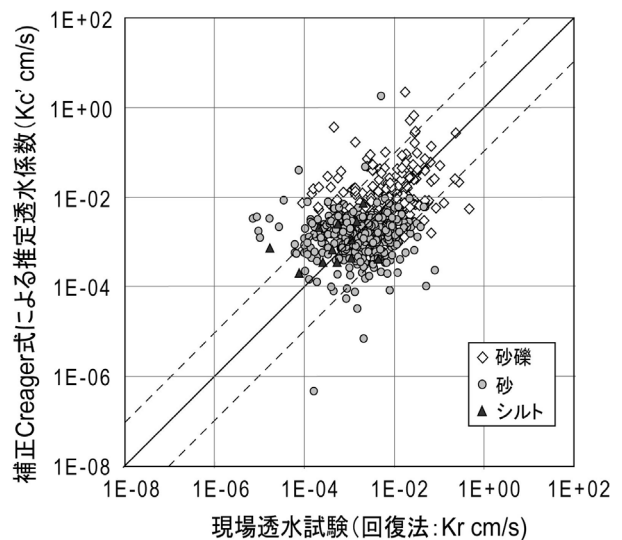


図-9 Creagerの式に細粒分補正した推定値(Kc')と実測値(回復法: Kr)との関係

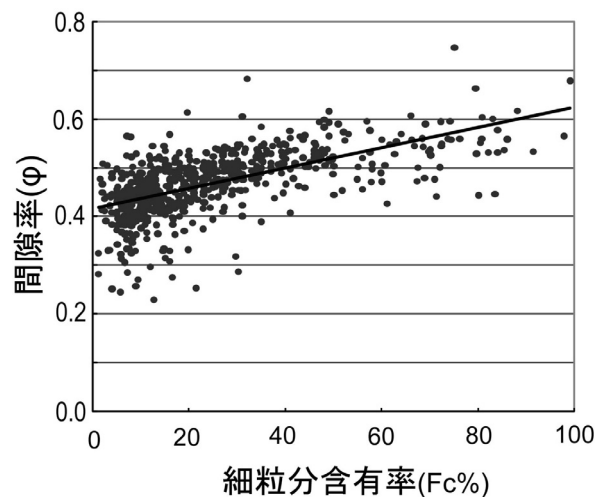


図-10 細粒分含有率と間隙率との関係

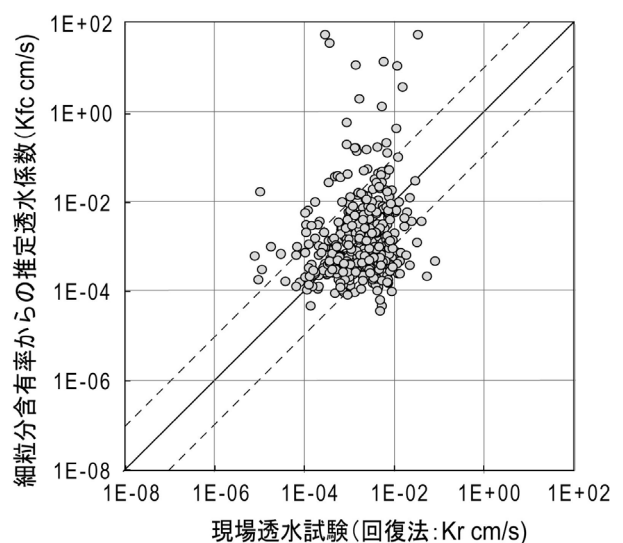


図-11 細粒分含有率からの推定透水係数(Kfc)と実測値(回復法: Kr)との関係

効間隙率の関係式を次のように仮定し、以下の検討を加えた。

$$\phi_e = a(\phi - \phi_s)(b \cdot \phi - \phi_c) + \phi_s \quad \cdots(8)$$

a, b : 定数

ϕ_s : 純粹砂の間隙率 ϕ_c : 純粹粘土の間隙率

このような関係式により、間隙率が増加しても細粒分の影響によって有効間隙率は低下するという関係を表すことができる。なお、今回は $a = -0.25$, $b = 2.5$, $\phi_s = 0.3$, $\phi_c = 0.8$ とした。

さらに、間隙率と有効間隙率の関係から不動水飽和度を求めることで、Timurの式を用いて透水係数 (K_{fc}) を推定することを試みた。

Timurの式は一般式としては、次のような定数A, B,

$$C \text{ を用いて表される。 } K = A \times \frac{\phi^B}{S_{wi}^C}$$

今回は試行錯誤的に定数を求め、 $A=3$, $B=2$, $C=8$ とした。なお、単位をダルシーから cm/s へと換算するために 10^{-6} の係数が乗じられている。

求めた透水係数 (K_{fc} : cm/s) の推定式は以下の通りである。

$$K_{fc} = 3 \times \frac{\phi^2}{S_{wi}^8} \times 10^{-6} \quad \cdots(9)$$

$$S_{wi} = 1 - \frac{\phi_e}{\phi}, \quad \phi_e = \phi_e(\phi)$$

$$\phi = 0.0021Fc + 0.4169 \quad \cdots(10)$$

なお (10)式は、図-10中に示した近似式である。

この推定式を用いて細粒分含有率から推定した透水係数と回復法による現場透水試験結果を比較した結果を図-11に示す。図-11、図-9ともばらつきは大きい、細粒分含有率をパラメータとして使用して透水係数を推定したほうが、D20を代表粒径として使用するCreagerの式に比べ、より現場透水試験結果に近い値を示すようになることがわかる。

4. まとめ

河川堤防詳細点検等で実施された地質調査報告書を収集し、その中から現場透水試験結果と粒度試験結果を抽出して両者の関連性について統計的検討を加えた。さらにこれまで提唱されてきたいくつかの透水係数推定法について検討した。その結果、注水法によって求められた透水係数は、回復法による値と比べて有意に小さいことが確認された。注水法の結果には細粒分による目詰まりの影響が疑われたため、回復法の結果のみを対象とし、Creagerの式で推定透水係数を計算して両者を比較した。

推定透水係数は粗粒土で大きく、細粒土では実測値のほうが大きいという、明瞭な乖離傾向が認められた。土質試験データの検討によって、両者の差は細粒分含有率と相関が高いことがわかった。そこで細粒分含有率を補正項として含む補正式を算出した。この補正Creager式を用いることで、推定誤差を概ね1桁以内に収束させることができた。つぎにこの関係を説明するモデルとして、細粒分含有率が大きくなるほど浸透に関与する有効間隙率が小さくなるという透水モデルを想定し、細粒分含有率から有効間隙率を推定する過程を経て、Timurの式を用いて透水係数を推定した。これにより、上記補正式と同様に1桁以内で透水係数を推定できることがわかった。本研究結果は、適切なモデルの構築が、透水性の評価に不可欠であることを示している。今後はこの推定式が利用可能な細粒分含有率の範囲などを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 関東地質調査業協会：現場技術者のための地質調査技術マニュアル, 153p, 2005.
- 2) 平田洋一：単孔式現場透水試験, 地下水学会誌, Vol.35, No.3, pp247-254, 1993
- 3) 石原研而, 第2版土質力学, 丸善, pp.67-70, 2001.
- 4) Creager, W. P., Justin, J. D. and Hinds, J.: Chap.16 soil tests and their utilization, in *Engineering for dams*, Vol.III: Earth, Rock-fill, Steel and Timber Dams, John Wiley and Sons, pp.645-654, 1944..
- 5) 小西千里, 稲崎富士：土質地盤における細粒分含有率と透水係数の関係についての考察, 物理探査学会第121回学術講演会講演論文集, pp.306-309, 2009.
- 6) 倉橋稔幸, 佐々木靖人, 稲崎富士：国土交通省における地盤情報提供の取り組みについて, 第3回シンポジウム「統合化地下構造データベースの構築」研究成果の中間報告 予稿集, pp.33-37, 2009.
- 7) 倉橋稔幸, 佐々木靖人, 稲崎富士：国土地盤情報検索サイト (KuniJiban)による地盤情報の提供とその利用, 地質と調査, 第121号, pp.34-36, 2009.
- 8) 稲崎富士, 倉橋稔幸, 佐々木靖人：地盤物性データベース構築とその利活用に向けた土木研究所の取り組み, 第4回シンポジウム「統合化地下構造データベースの構築」予稿集, pp.15-20, 2010.
- 9) 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, No.561/III-38, pp.193-204, 1997.
- 10) Haren, A. :Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration, 24th Annual Report, Massachusetts State Board of Health, pp539-556, 1892.
- 11) Timur, A. : An investigation of permeability, porosity, & residual water saturation relationships for sandstone reservoirs, The Log Analyst, July-August, pp.8-17, 1968.

(2010.4.8受付)