

細粒分含有率と締固め度に着目した盛土材料の透水性評価手法の提案

Proposal of a Method for Evaluating Permeability of Embankment Materials with Attention Paid to Fine Fraction Content and Degree of Compaction

山 本 眞 暉 片 岡 沙 都 紀 澁 谷 啓
Masaki Yamamoto Satsuki Kataoka Satoru Shibuya

1. はじめに

宙水とは、「局所的に存在する難透水層の上にレンズ状にたまった地下水¹⁾」または「不圧地下水の一種。地表からの浸透水が比較的浅い地層中の、泥質のはさみ層などの上に捕捉されたもの。(中略)不圧地下水本体(本水)との間に不飽和体が存在することが特徴。(以下略)²⁾」と定義されている。図-1に示すように、宙水は、地下水本体(本水)と分離して存在する。そのため、従来の地下水位低下工法による排水が難しく、盛土法面に表層崩壊を引き起こすなど、盛土の維持管理における諸問題の要因の一つとなっている³⁾⁻⁵⁾。

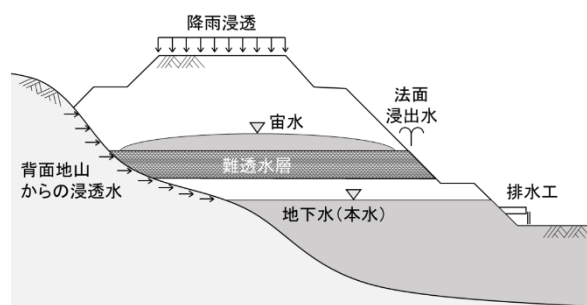


図-1 盛土内「宙水」の概念図

数値解析によって宙水が盛土の安定性に及ぼす影響について検討した研究⁶⁾では、宙水が存在する盛土において、宙水による間隙水圧の影響を無視した安定計算を行うと、宙水の領域の広がりや位置によっては安全率を過大評価することがわかった。これは、盛土内に形成された宙水が、盛土の性能と安定性を低下させる可能性を示唆している。原位試験によって盛土内「宙水」を観測した事例²⁾では、宙水領域の直下に極端に締固め度の大きい層が位置することが明らかとなり、この層が難透水層となって盛土内に浸透した水を滞留させ、宙水が形成されたと結論づけた。また、不均質な透水係数分布を有する地盤モデルを用いた不飽和浸透流解析で宙水の形成メカニズムを検討した研究^{7),8)}では、透水係数が大きく異なる層が重なって存在する場合、上層と下層の透水係数の平均値が 1.0×10^{-7} (m/s) オーダー以下であり、かつ下層の透水係数が上層の1000分の1から100分の1程度の値である場合に、相対的に透水係数の小さい層が難透水層となり、宙水が発生し得ることを述べている。こうした先行研究から、盛土内「宙水」が盛土の安定性に影響を及ぼすことや、盛土内に宙水が形成されるメカニズムは明らかになりつつある。しかし、宙水の形成要因となる難透水層の定量的な工学的特性については明らかでなく、施工管理や維持管理において有用な指標は確立されていない。

本研究では、細粒分含有率と締固め度が土の透水係数に支配的である点に着目し、これらのパラメータを変えて透水試験を実施した。一連の試験結果に基づき、細粒分含有率と締固め度に着目した盛土材料の透水性評価手法を確立し、盛土内の宙水形成を促す難透水層の工学的特性について考察した。

2. 室内透水試験

2.1. 供試体の作製方法

室内試験には大阪層群土と六甲山まさ土を用いた。前者は宙水の発生が確認された実盛土ののり面から採取した材料である。また後者は、六甲山の複数の斜面崩壊地より採取した崩土を混合攪拌したものである。これらの試料の9.5 mm

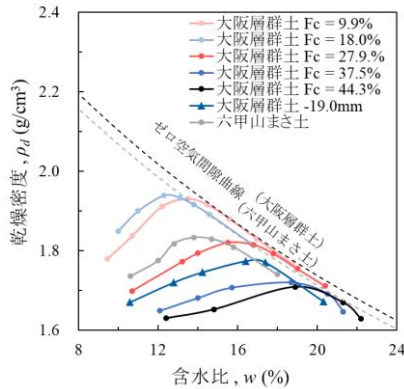
ふるい通過分を各種試験に使用した。

用いた試料の物性値を表－1に、締固め曲線と粒径加積曲線を図－2および図－3にそれぞれ示す。大阪層群土は実盛土から複数回にわたって採取しており、異なる3地点から採取した試料群を9.5 mmふるいにかけたところ、細粒分含有率はそれぞれ $F_c = 27.9, 37.5, 44.3\%$ であった。本研究では、細粒分が盛土材料の透水係数に及ぼす影響を検討するため、別途 $F_c = 9.9\%$ と 18.0% の試料を準備した。

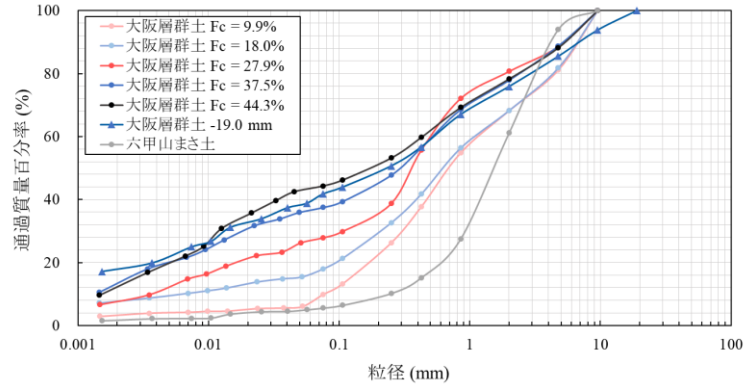
透水試験に用いた供試体は、油圧ジャッキを用いた3層静的締固めにより作製した。なお透水試験前の供試体の乾燥密度 ρ_d は、締固め曲線より得られた最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ に対して、 $\rho_d = 0.75\rho_{d\max} \sim 1.05\rho_{d\max}$ の範囲内となるように設定した。ただし、 $\rho_d = 1.05\rho_{d\max}$ の供試体は上記手法での作製が困難であったため、突固めによる土の締固め試験⁹⁾(JIS A 1210) A法のランマーで75回突固めることで動的に締固めた後、油圧ジャッキで40 kPaの応力を加え、供試体の上端面を平滑化した。また、締固め前の土試料の水分状態は、最適含水比となるように調整した。

表－1 物性値

物性	大阪層群土						六甲山まさ土
	$F_c = 9.9\%$	$F_c = 18.0\%$	$F_c = 27.9\%$	$F_c = 37.5\%$	$F_c = 44.3\%$	-19.0 mm	
最大乾燥密度 (Mg/m^3)	1.930	1.939	1.822	1.723	1.709	1.774	1.833
土粒子の比重	2.662	2.662	2.662	2.662	2.662	2.662	2.606
最適含水比 (%)	13.5	12.3	15.8	18.4	18.9	16.4	13.8
最大粒径 (mm)	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	19.0	9.5
細粒分含有率 (%)	9.9	18.0	27.9	37.5	44.3	41.8	5.6
50%粒径, D_{50} (mm)	0.680	0.610	0.350	0.300	0.170	0.250	1.500
30%粒径, D_{30} (mm)	0.014	0.019	0.106	0.200	0.300	0.014	0.900
均等係数, U_c	16	157	143	333	250	—	7.6



図－2 締固め曲線



図－3 粒径加積曲線

2. 2. 試験方法と試験条件

JIS A 1218⁹⁾に準ずる定水位および変水位透水試験を実施した。一連の透水試験では、今回の粒度分布と近い試料で実施した既往の検討事例⁵⁾を参考に、締固め度90%以上の供試体には変水位透水試験を、90%未満の場合は定水位透水試験を実施した。また、透水試験前の供試体の飽和度を高めるため、前者には吸水脱気法、後者には水浸脱気法を適用した。なお試験終了時の供試体の飽和度が計算上ほぼ100%に近い値となっていることを確認した。

3. 結果および考察

3. 1. 透水係数の密度依存性

透水係数の密度依存性を評価するため、大阪層群土($F_c = 27.9\%$)と六甲山まさ土($F_c = 5.6\%$)を用いて $\rho_d = 0.75\rho_{d\max}$

～ $1.05\rho_d \max$ の供試体を作製し、透水試験を実施した。先行研究では、透水係数の密度依存性を間隙比 e と常用対数表記した透水係数 $\log k$ との関係で整理することが多い^{2), 7), 10)}。そのため本論文では対象試料の透水特性を $e - \log k$ 関係で整理した。一連の試験結果のプロットを図－4に示す。

両試料ともに、間隙比の減少に伴い透水係数が減少するという一般通念に整合する結果が得られた。従来、 $e - \log k$ 関係は線形になると考えられてきたが^{2), 7), 10)}、本研究の試験結果では非線形性が確認できる。特に、六甲山まさ土で $0.394 \leq e \leq 0.460$ 、大阪層群土で $0.386 \leq e \leq 0.571$ と、間隙比の比較的小さい領域で透水係数が大きく低下し、線形挙動から逸脱していることがわかる。

一般に、土の透水係数はその間隙径分布に依存する。宇野ら¹¹⁾は、砂の間隙径分布を計測し、間隙比が小さい場合、小さい径の間隙が多く分布し大きい径の間隙が少なく分布すること、間隙比が大きい場合は、小さい径の間隙が少なく分布し大きい径の間隙が多く分布することを指摘した。間隙比の小さい領域（例えば $e = 0.4 \sim 0.6$ ）では、間隙比の減少に伴い小径の間隙が増えるため、透水係数の低下の度合いが大きくなり、 $e - \log k$ 関係の接線の傾きが大きくなる。一方、比較的間隙比の大きい範囲（例えば $e = 0.6 \sim 1.0$ ）では、間隙比が減少しても依然として大きい径の間隙がある程度分布するため、透水係数が著しく低下することはない、 $e - \log k$ 関係の接線の傾きがゆるやかになると考えられる。その結果、 $e - \log k$ 関係には図－4に示すような非線形性が発現すると考えられる。図－4に示す試験結果は、式(1)で精度よく回帰することができる¹¹⁾。

$$\log k = \frac{a}{e} + b \quad (1)$$

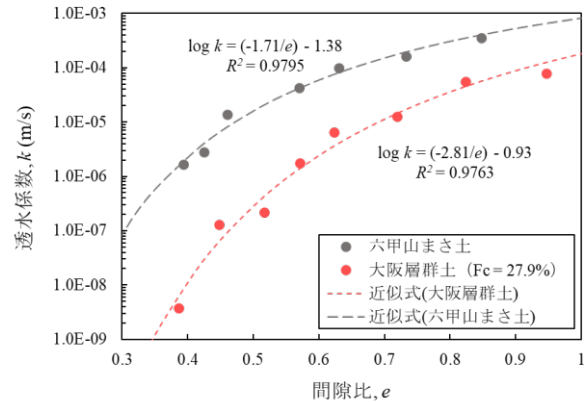
k は透水係数(m/s)、 e は間隙比、 a, b はフィッティングパラメータである。六甲山まさ土と大阪層群土($F_c = 27.9\%$)の試験結果について、式(1)による回帰曲線、回帰式と決定係数を図－4に併記する。式(1)中のフィッティングパラメータ a は負の値を示すが、これは間隙比 e と透水係数 k の間に正の相関があり、間隙比の増加に伴い透水係数が上昇することを意味する。また a の値は、間隙比の減少に伴う透水係数の低下度合いを表し、この値が小さいほど、よく締固めた際の透水係数の低下が顕著であることを意味する。一方 b の値は、 $e - \log k$ 関係の曲線の上下の位置関係を支配し、この値が小さいほどその試料の透水性が小さいことを意味する。

3. 2. 透水係数の細粒分依存性

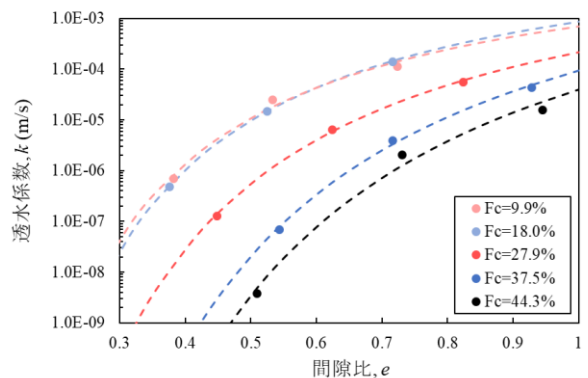
透水係数の細粒分依存性を評価するため、細粒分含有率が $F_c = 9.9, 18.0, 27.9, 37.5, 44.3\%$ の大阪層群土を用い、それぞれの試料について締固め度が $D_c = 80, 90, 100\%$ の供試体を作製して透水試験を行った。一連の試験結果と式(1)による回帰曲線を $e - \log k$ 関係で整理し、図－5に示す。また、各試料に対応する回帰式と決定係数を表－2に示す。

間隙比が同程度の場合、細粒分含有率が大きいほど透水係数が小さくなるという傾向が得られ、また細粒分含有率が大きいほど、間隙比の減少に伴う透水係数の低下が顕著であることがわかる。これは、粒子径が小さいほど間隙径が小さくなり、水の流れる間隙の経路が小さく、かつ屈曲度が増し、水が流れにくくなるためと解釈できる^{12), 13)}。

一方、細粒分含有率が $F_c = 9.9, 18.0\%$ の場合では、細粒分含有率は概ね2倍ほど異なるものの、その回帰曲線は $e = 0.4 \sim 0.7$ の範囲で概ね重なっている。ここで、図－2に示した大阪層群土($F_c = 9.9\%, 18.0\%$)の締固め曲線に着目す



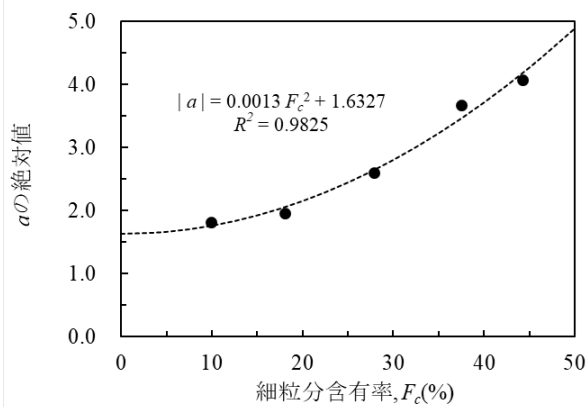
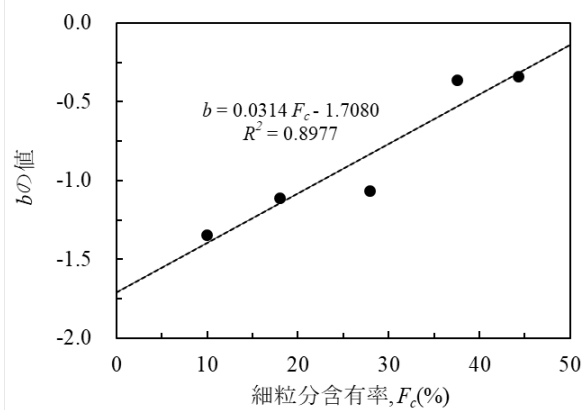
図－4 $e - \log k$ 関係と回帰曲線



図－5 実測値と回帰曲線のグラフ

表－２ 細粒分含有率に対応する回帰式と決定係数

細粒分含有率 (%)	回帰式	決定係数
9.9	$\log k = \frac{-1.81}{e} - 1.34$	0.9865
18.0	$\log k = \frac{-1.96}{e} - 1.11$	0.9999
27.9	$\log k = \frac{-2.60}{e} - 1.07$	0.9989
37.5	$\log k = \frac{-3.67}{e} - 0.36$	0.9977
44.3	$\log k = \frac{-4.07}{e} - 0.34$	0.9888

図－６ 細粒分含有率と a の絶対値の関係図－７ 細粒分含有率と b の関係

ると、最大乾燥密度はそれぞれ 1.930, 1.939 (Mg/m³)、最適含水比はそれぞれ 13.5%, 12.3%と大差ない。このことから、細粒分含有率が $F_c = 20\%$ を下回る場合の $e - \log k$ 関係は、細粒分よりも密度が支配的であるといえる。

表－２に示す回帰式の a の値は、細粒分含有率が大きいほど小さくなる。 a の絶対値を F_c の 2 次多項式で表現した式(2)は、 F_c と a の関係を精度よく回帰する (図－６)。

$$|a| = 0.0013F_c^2 + 1.6327 \quad (2)$$

F_c と b の関係を整理すると、両者の間には線形性が確認でき (図－７)、 b は F_c の 1 次式で回帰できる。(式(3))

$$b = 0.0314F_c - 1.7080 \quad (3)$$

式(2)と式(3)から、式(1)中の a と b の値を F_c で表現する式が得られ、式(1)は式(4)のように拡張できる。以降、式(4)を $F_c - e - \log k$ 関係式と呼称する。

$$\log k = \frac{-(0.0013F_c^2 + 1.6327)}{e} + (0.0314F_c - 1.7080) \quad (4)$$

式(4)は、間隙比が小さいほど透水係数が小さくなり、細粒分含有率が大きいほど低い透水性を示すという二つの特性を同時に表現できる。そのため、上載圧や外力によって地盤の間隙比が刻々と変化する状況や、細粒分流出によって細粒分含有率が変化する状況を考慮した浸透流解析を行う際、透水係数を決定する経験式として有用であると考えられる。

3.3. 締固め度が透水係数に及ぼす影響

異なる細粒分含有率を示す試料の結果について、締固め度で分類すると、図－８に示すように $D_c = 80, 90, 100\%$ の $e - \log k$ 関係はそれぞれ線形性を有し、表－３に示す式で回帰できる。(ただし、 $D_c = 100\%$ 時の回帰式は、 $F_c = 9.9$,

18.0, 27.9, 37.5%の4点の結果から求めた。) 細粒分含有率が異なっても締固め度が同程度であれば $e - \log k$ 関係が線形になるという性質は, 盛土材料の粒度分布によらず締固め度のみから透水係数を評価できることを示唆している. 図-8に示す本研究の室内試験結果は $D_c = 80, 90, 100\%$ の3ケースのみと, この性質を一般化するには十分なデータの量ではないが, 締固め度のみから透水係数を評価する手法の確立に先駆けて, 本研究のデータに当てはまる単純な式で, 締固め度~間隙比~透水係数の関係を表す回帰式を提案する. 表-3の回帰式の傾きを c として締固め度 D_c との関係を整理すると図-9のように線形関係がみられ, 簡単のため式(5)のように c を D_c の1次式で回帰した. 同様に, 表-3の回帰式の切片を d として締固め度 D_c との関係を整理すると図-10のようになり, 同じく簡単のため式(6)のように d を2本の D_c の1次式で回帰した.

$$c = -0.18D_c + 11.479148$$

(5)

$$d = \begin{cases} -0.054D_c + 2.56 & (80 \leq D_c \leq 90) \\ -0.14D_c + 10.3 & (90 \leq D_c \leq 100) \end{cases}$$

(6)

ここで示した式(5)と式(6)から, $D_c - e - \log k$ 関係を式(7)のように表せる.

$$\begin{aligned} \log k &= (-0.18D_c + 11.479)e + (-0.054D_c + 2.56) \\ &\quad (80 \leq D_c \leq 90) \\ \log k &= (-0.18D_c + 11.479)e + (-0.14D_c + 10.3) \\ &\quad (90 \leq D_c \leq 100) \end{aligned}$$

(7)

表-3 締固め度に着目した $e - \log k$ 関係		
締固め度 (%)	回帰式	決定係数
80	$\log k = -2.90e - 1.76$	0.8965
90	$\log k = -4.71e - 2.30$	0.9182
100	$\log k = -6.50e - 3.70$	0.8934

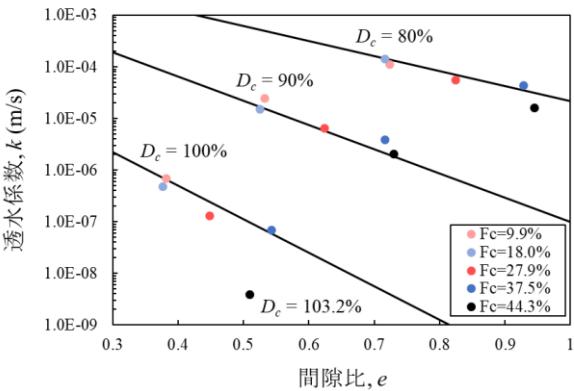


図-8 締固め度ごとの $e - \log k$ 関係

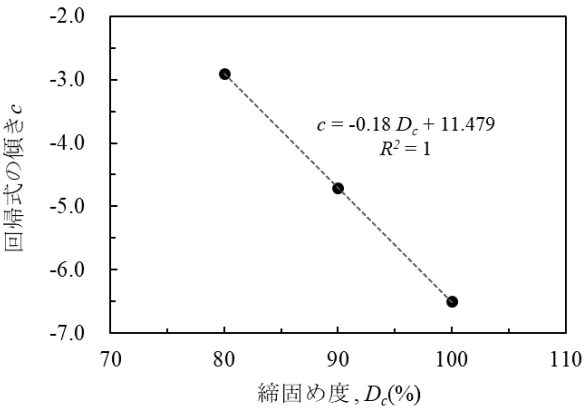


図-9 締固め度と回帰式の傾き c の関係

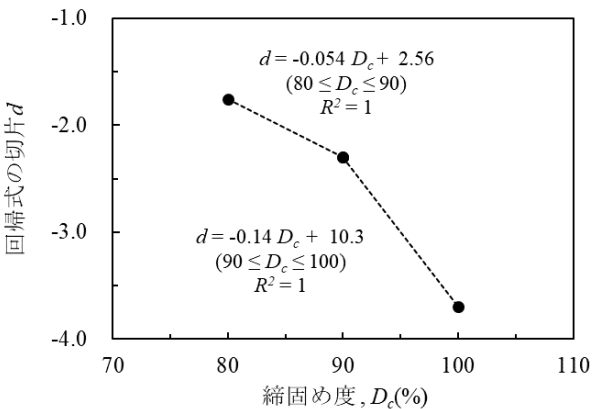


図-10 締固め度と回帰式の切片 d の関係

4. 透水係数の推定手法の提案

4. 1. 細粒分含有率と締固め度を用いた透水係数の推定

細粒分含有率が $F_c = 10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0\%$ に対応する $F_c - e - \log k$ 関係式（式(4)）と締固め度が $D_c = 80, 90, 100, 105\%$ に対応する $D_c - e - \log k$ 関係式（式(7)）を重ね合わせたグラフを図－11に、図－11中の各細粒分含有率に対応する $e - \log k$ 関係の回帰式を表－4に示す。

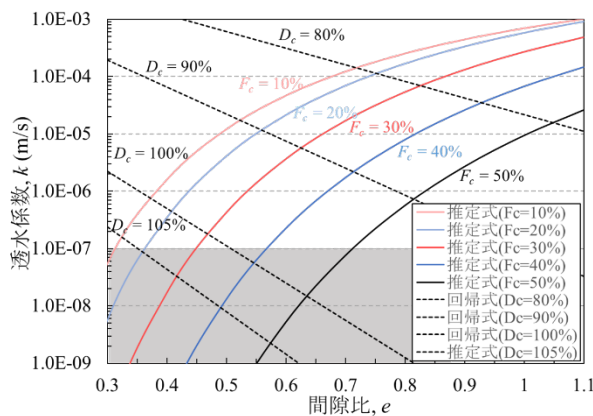
ここで、式(4)と式(7)のグラフの交点は、任意の細粒分含有率と締固め度に対応する透水係数を意味する。本研究で対象とした盛土材料の透水特性を表す参考値として、グラフの交点から求められる透水係数を表－5に示す。

先行研究^{7),8)}の知見を援用すると、宙水を形成する要因となる難透水層とは、 $1.0 \times 10^{-8}(\text{m/s})$ オーダー以下の透水係数を有する層であると仮定できる。次に、この透水係数を満たす細粒分含有率と締固め度の範囲を式(4)と式(7)に基づいて検討した。

式(4)で求めた $F_c = 10, 20, 30, 40, 50\%$ に対応する $e - \log k$ 関係式と、式(7)で求めた $D_c = 80, 90, 100, 105\%$ に対応する $e - \log k$ 関係式のグラフを重ね合わせたものを図－11に示す。また、図中には難透水層となる透水係数の条件、すなわち $k \leq 1.0 \times 10^{-7}(\text{m/s})$ の領域を網掛け部で示した。

図－11から、一般的な盛土の下限管理基準値である $D_c = 90\%$ においては、 $F_c = 50\%$ の場合さえも透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-7}(\text{m/s})$ より大きいことがわかる。一方、 $D_c = 100\%$ を表す直線は $k \leq 1.0 \times 10^{-7}(\text{m/s})$ の領域と $(e, k) = (0.506, 1.0 \times 10^{-7})$ の点で交わり、 $F_c - e - \log k$ 関係のグラフがその点を通るときの細粒分含有率は、計算上 $F_c = 35.1\%$ となる。このことから、細粒分含有率が概ね $F_c = 35\%$ 以上を示す盛土材料が $D_c = 100\%$ 以上で締固められると、宙水を形成させ得る難透水層になる可能性があるといえる。同様に、 $D_c = 105\%$ の直線は、 $F_c = 20\%$ 程度で透水係数が難透水層の領域に重なる。これより、 $F_c = 20\%$ 以上の盛土材料が $D_c = 105\%$ 以上で締固められた土層も、宙水を形成させ得る難透水層になる可能性があるといえる。このように、本研究で提案した式(4)、式(7)を用いることで、盛土内に宙水を形成させ得る難透水層の工学的特性について、細粒分含有率と締固め度の側面から定量的な解釈を与えることができた。

細粒分含有率と締固め度が既知であるとき、式(4)と式(7)を連立するとそれに対応する透水係数が求められる。つまり、ボーリング調査によるコア試料を用いた粒度分析から細粒分含有率を求め、RI法により締固め度が求められれば、原位置の透水係数を推定することが可能となる。従来の現場透水試験では、観測位置周辺の地盤の透水係数を巨視的にしか評価できないが、原位置試験で求めた細粒分含有率と締固め度から透水係数を推定する場合、現場透水試験よりも高解像度で任意の箇所の透水係数を求めることが可能となる。実地盤の透水係数を高解像度で求めることができれば、地盤中に生じる不均質な流れ場を浸透流解析で再現できるようになり、実地盤における宙水や水みちが発生しやすいポイントを特定する技術の確立に資することが期待できる。



図－11 式(4)と式(7)のグラフ

表－4 細粒分含有率ごとの $e - \log k$ 関係式

細粒分含有率 (%)	回帰式
10.0	$\log k = \frac{-1.76}{e} - 1.39$
20.0	$\log k = \frac{-2.15}{e} - 1.08$
30.0	$\log k = \frac{-2.80}{e} - 0.77$
40.0	$\log k = \frac{-3.71}{e} - 0.45$
50.0	$\log k = \frac{-4.88}{e} - 0.14$

表－５ 式(4)と式(7)のグラフの交点から求められる透水係数

透水係数 (m/s)		細粒分含有率 (%)				
		10	20	30	40	50
締固め度 (%)	80	1.44×10^{-4}	1.15×10^{-4}	6.96×10^{-5}	3.55×10^{-5}	1.59×10^{-5}
	90	1.74×10^{-5}	1.17×10^{-5}	5.67×10^{-6}	2.21×10^{-6}	7.34×10^{-7}
	100	7.60×10^{-7}	4.45×10^{-7}	1.80×10^{-7}	5.65×10^{-8}	1.49×10^{-8}
	105	1.55×10^{-7}	8.60×10^{-8}	3.23×10^{-8}	9.31×10^{-9}	2.22×10^{-9}

4. 2. $F_c - e - \log k$ 関係式と既往の推定式の比較

実務においては、透水係数の推定には Creager 法¹⁴⁾が用いられることが多いが、当該手法では 20%粒径のみが透水係数を支配しており、間隙率などの密度指標は考慮されていない。また、これまで粒度指標と密度指標の両者の影響を考慮した推定手法がいくつか提案されている^{例えば 15), 16)}。それらの例を式(8)～式(10)に示す。

$$h = \frac{0.3 \cdot D_{50}}{\exp(0.5 \cdot \ln^2 \sigma_w)} \times \frac{e}{G_s} \quad (8)$$

$$\log k = 2.87(1 + \log h) \quad (9)$$

$$k = 0.052 \times (D_{30})^{1.5} \times (U_c)^{-0.8} \times \phi_U^{4.4} \quad (10)$$

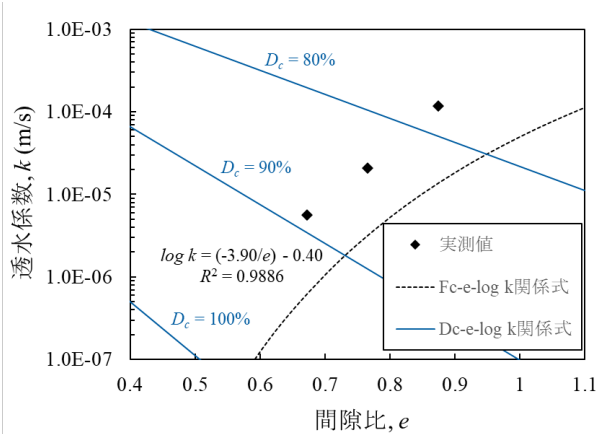
h : 平均間隙径深(mm), D_{50} : 50%粒径(mm), σ_w : 通過質量百分率に基づく粒度分布の標準偏差, e : 間隙比, G_s : 土粒子の比重, D_{30} : 30%粒径, U_c : 均等係数, ϕ_U : 間隙率(%)である。

両式ともに、広く様々な土質材料を対象に透水係数を推定することができるという大きな利点を有する。これらの式を本研究で対象とした試料に適用したところ、間隙比が $e = 0.3 \sim 1.0$ の範囲で推定された透水係数は、式(9)の場合で $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6}$ (m/s)オーダー、式(10)の場合で $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-8}$ (m/s)オーダーであった。本研究の試験では、細粒分含有率と間隙比の条件次第で $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-9}$ (m/s)オーダーの透水係数を測定したが、式(9)や式(10)では幅広い透水係数の変化を考慮した推定は難しいことが示唆された。一方、本研究で示した式(4)と式(7)は、細粒分含有率と締固め度という実務上よく用いられる指標によって、 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-9}$ (m/s)オーダーという幅広い透水係数を推定できる点に利点があるといえる。

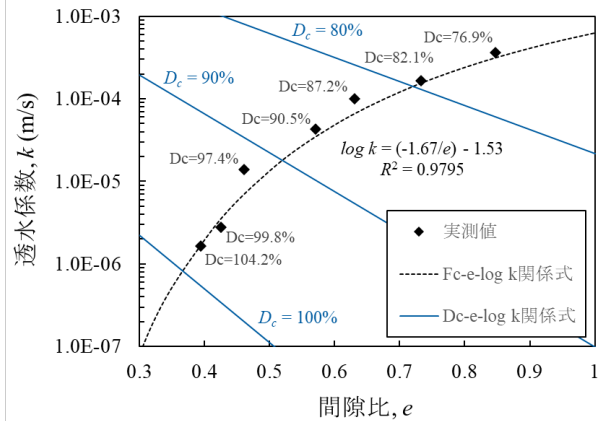
4. 3. $F_c - e - \log k$ 関係式の適用限界

本研究で示した回帰式の適用限界について、試料の最大粒径の条件を検討した。式(4)と式(7)は最大粒径が 9.5 mm の試料で行った透水試験の結果に基づいている。ここでは、最大粒径が 19.0 mm の大阪層群土(細粒分含有率は $F_c = 41.8\%$)の $e - \log k$ 関係を式(4)で求め、締固め度が $D_c = 80, 85, 90\%$ のときの透水係数の実測値と比較した。図－1 2 から、透水係数の推定値は実測値の 1/10 程度と過小評価していることがわかる。このことから、式(4)が適用できるのは最大粒径が概ね 9.5 mm の土質材料に限るといえよう。

次に、六甲山まさ土(最大粒径 9.5mm)の細粒分含有率($F_c = 5.6\%$)の値を式(4)に代入して得られる $e - \log k$ 関係と、大阪層群土の試験結果から得た $D_c - e - \log k$ 関係を、透水試験から得た透水係数の実測値と比較した。なお、六甲山まさ土の透水係数の実測値は図－4 に示したものと同一のデータである。図－1 3 からわかる通り、 $D_c - e - \log k$ 関係式を用いた推定精度はさほど良くはないが、 $F_c - e - \log k$ 関係式は決定係数が $R^2 = 0.9795$ と、よくあてはまるといえる。これは、式(4)が異なる種類の土質材料にも適用できることを示唆している。



図－1 2 最大粒径 19.0 mm の試料の
 $F_c - e - \log k$ 関係式への適用



図－1 3 六甲山まさ土の
 $F_c - e - \log k$ 関係式への適用

5. まとめ

本研究では，細粒分含有率と締固め度を変えて透水試験を実施し，対象とした盛土材料における，透水係数の密度依存性と細粒分依存性を評価した．また一連の試験結果に基づいて，細粒分含有率，締固め度，透水係数の関係を表す回帰式を提案し，盛土内「宙水」の形成要因となる難透水層の工学的特性について，細粒分含有率と締固め度の観点から考察した．以下，得られた知見を示す．

- 1) 従来，間隙比 e と透水係数 k の関係（ $e - \log k$ 関係）は線形性を有するとされてきたが，幅広く締固め度を変えて透水試験を実施したことで， $e - \log k$ 関係は非線形性を有することがわかった．また式(1)によって，非線形性を考慮して試験結果の回帰曲線を求めることができる．
- 2) 締固め度に加えて細粒分含有率を幅広く変えて実施した透水試験の結果から， $e - \log k$ 関係式を透水係数の細粒分依存性を考慮した， $F_c - e - \log k$ 関係式（式(4)）に拡張することができた．
- 3) 種々の細粒分含有率を示す試料の $e - \log k$ 関係において，各試料の締固め度が $D_c = 80\%$ ， 90% ， 100% 時の透水係数は線形に分布する傾向が確認された．
- 4) 3)で述べた性質は，粒度分布によらず締固め度のみから透水係数を評価可能であることを示唆している．本研究では実験データに整合するよう単純な式で $D_c - e - \log k$ 関係の回帰式を提案したが，締固め度と透水係数の関係を一般化していくためには，さらなるデータの蓄積と検討が必要である．
- 5) $F_c - e - \log k$ 関係式（式(4)）と $D_c - e - \log k$ 関係式（式(7)）のグラフの交点は，任意の細粒分含有率 F_c と締固め度 D_c の条件下の透水係数を意味し， F_c と D_c が既知のとき，式(4)と式(7)を連立することで透水係数を推測できる．
- 6) 細粒分含有率が $F_c = 30\%$ 以上で締固め度が $D_c = 100\%$ 以上の層，または，細粒分含有率が $F_c = 20\%$ 以上で締固め度が $D_c = 105\%$ 以上の層は，透水係数が $1.0 \times 10^{-8}(\text{m/s})$ オーダー以下となり，先行研究^{7),8)}の知見を援用すると，盛土内「宙水」の形成要因である難透水層となる可能性が示唆される．

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，各種室内試験においては，神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻卒業生の瀬古一樹氏，友近温人氏に協力を得た．また，神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻の齋藤雅彦准教授から本研究成果についてご意見をいただいた．また一名の匿名査読者の方より建設的なご意見をいただき，本論文における議論の展開がより有意義なものとなった．関係者各位に謝意を表す．

参 考 文 献

- 1) 地盤工学会地盤工学用語辞典改訂編集委員会：地盤工学用語辞典，地盤工学会，2006.
- 2) 公益社団法人日本地下水学会：地下水用語集，理工図書，p. 69，2011.
- 3) 塚本将康，赤平博文，一井利光，阿部利枝，太田史朗：大規模河川堤防における湿潤化調査の一例，全国地質調査業協会連合会「技術フォーラム 2013」長野，No. 28，2013.
- 4) 肥後陽介，南野佑貴，加藤亮輔，片岡沙都紀，甲斐誠士：道路盛土内の宙水の原位置調査および再現解析，Kansai Geo-Symposium 2016 - 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム - 論文集，pp. 183-188，2016.
- 5) 原崇彰，岡本健太，片岡沙都紀，戎剛史，野並賢，澁谷啓：変状が生じたある既設道路盛土における原位置・室内試験結果について，第 50 回地盤工学研究発表会，pp. 913-914，2015.
- 6) Tang, D., Jiang, Z., Yuan, T., Li, Y.: Stability Analysis of Soil Slope Subjected to Perched Water Condition, KSCE Journal of Civil Engineering 24(9), pp. 2581-2590, 2020.
- 7) 深田竜司，肥後陽介，片岡沙都紀，大竹雄，南野佑貴，加藤亮輔：不均質性を考慮した降雨による盛土内宙水の発生条件に関する研究，第 52 回地盤工学発表会，pp. 1057-1058，2017.
- 8) 深田竜司・肥後陽介・大竹雄・南野佑貴・加藤亮輔：盛土内の不均質透水性空間分布の生成と不飽和降雨浸透解析への適用，土木学会論文集 A2, Vol. 73, No. 2, I-791-799, 2017.
- 9) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説〔第一回改訂版〕-二分冊の 1-，丸善出版，pp. 393-404，2020.
- 10) 日下部治：土質力学，コロナ社，pp. 92-93，2004.
- 11) 山本眞暉，瀬古一樹，友近温人，片岡沙都紀，澁谷啓：宙水発生メカニズムの解明に向けた盛土材料の透水特性に関する基礎的研究，Kansai Geo-Symposium 2021 論文集，Vol. 9, pp. 53-57，2021.
- 12) 宇野尚雄，神谷浩二，田中宏路：「空気圧入法」と「水分法」による砂の間隙径分布，土木学会論文集，No. 603, III-44, pp. 35-44，1998.
- 13) 篠原邦夫，村井剛：球形粒子充填層の断面における空孔径分布に基づく透過特性，化学工学論文集，Vol. 20, No. 2, pp. 198-204，1994.
- 14) Creager, WP., Justin, J.D., Hinds, J.: 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.
- 15) 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.
- 16) 森田悠紀雄，坪田邦治，西垣誠，小松満：粒度分布と間隙率を考慮した土の透水係数の推定方法，土と基礎，Vol. 53, No. 7, pp. 5-7，2005.

著 者

山本 眞暉	京都大学大学院工学研究科博士後期課程，修士（工学），地盤工学
片岡 沙都紀	研究員，博士（工学），地盤工学
澁谷 啓	所員，博士（工学），Ph. D.，地盤工学

