

# 透水係数に関する粒度分布と間隙指標

福田光治<sup>1</sup>・宇野尚雄<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 大阪土質試験所 技術1部 (〒550 大阪市西区立売堀4-3-2)

<sup>2</sup>フェロー 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

土の力学的性質は重量割合だけでなく、個数割合による粒度分布に影響されるという認識のもとに、粒度分布の対数正規分布性を仮定して、両者の関係式を導いた。これに基づいて、「個数による粒度分布」視点から新しい間隙指標として、間隙径深と間隙水膜厚さを提案し、それらの物理的意味や Hazenの有効径との関係を調べた。それらの指標を用いた飽和透水係数の表現を試み、Hazen式や Creager式との精度的比較、不飽和透水係数への拡張を調べた。粘性土の透水係数の推定にもこの方法を適用し、傾向的には良い精度で推定できることを示した。これらの基礎的研究を介して地層の透水性を表現する管理図を示した。

**Key Words :** grain size, permeability, void ratio, coarse-grained soil, clay soil

## 1. はじめに

粒度分布は土の構造を考える場合の重要な因子の一つで、様々な代表値が土質工学の特性把握の基礎指標として取り入れられてきた。透水係数の推定式における Hazenの $d_{10}$ 、Creagerの $d_{20}$ や液化化予測における $d_{50}$ 等である。

一方、粗粒から細粒まで幅広く含まれている土を土質試験する場合、最大粒径が限られてくるため尖頭粒度や相似粒度に粒度を調整して試験したり、フィルダム関係では Walker-Hortzの方法<sup>1)</sup>や細粒分含有率等が用いられて補正<sup>2)</sup>されることがある。Pascal分布やTalbotの式も風化過程や締固め度における粒度変化を表わす研究に利用されている<sup>3), 4)</sup>。また、地盤改良工法等の選択においても粒度分布が用いられている。しかし、各々の指標の統一的な認識に関する研究はみられない。

日本統一分類法の分類方法は粒径区分による粒度組成と粒径加積曲線の形状を裏付ける均等係数や曲率係数を基本的指標としている。これらの指標は定性的には非常に有効な情報を与える半面、実務的には試料間の土質特性の変化あるいは細粒分を含んだレキ質土や砂質土等の透水性の変化に追従できない

特徴を有している。つまり細粒分の影響を十分に反映した指標が使用されていないように考えられる。その原因の一つは容積による粒度分布と重量による粒度分布の違いが考慮されていないことにある。力学的特性の多くは固相や液相、気相の状態や割合等の関係で決まることは明白である。そしてこれらの相互関係は幾何学的条件で決まり、これは重量ではなく容積に関係していることも明らかである。従って、土の粒度は重量よりも容積で表現する必要があるのに対し、重量表示の粒度分布が使用されていたことが、細粒分を含有した土に対して粒度を基礎とする分類法の適用が充分でなかった一つの理由と考えられる。

本研究は粒度の役割を再検討する一環として、重量による粒度分布から個数による粒度分布の誘導方法と土の間隙指標を提案し、粗粒土と透水係数との関係を再検討したものである。

さらに本研究では粗粒土で得られた知見を粘性土まで拡張する試みを行った。確かに通常業務で実施されている粘性土の粒度分布は光透過法や顕微鏡法あるいは電子顕微鏡を用いた結果とはやや異なった分布形状をしており信頼性に乏しいとされているが<sup>5)</sup>、液性限界と粒度間にはある種の関係<sup>6) ~ 8)</sup>が

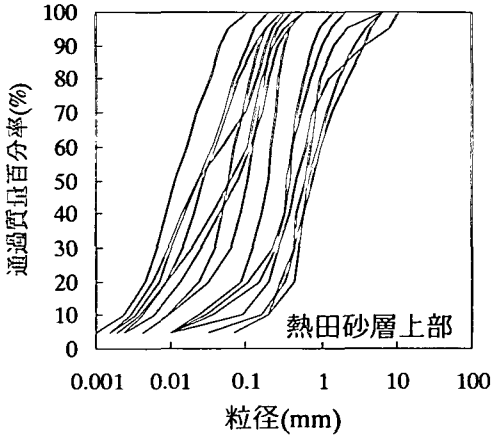


図-1 熱田砂層の粒度分布

見出されているように、必ずしも粒度の役割を完全に否定することはできない。本研究ではこれらの現状を考慮して、粗粒土に対して提案した透水モデルを粘性土の粒度分布にも拡張し、このモデルの適用条件を検討した。

## 2. 粒度分布からみた土の間隙モデルに関する基礎的研究

土質分野でも土の粒度は対数正規分布で近似的に示されることが箭内ら<sup>9)</sup>により指摘されている。また堆積学の分野でも $\phi$ -Scaleによる対数正規分布をもとに堆積条件などの研究が進められている<sup>10)</sup>。しかし土質分野における均等係数と曲率係数及び10, 20, 50%粒径等の統計的背景は十分には明らかにされていない。岩井ら<sup>11)</sup>は土の粒径加積曲線の表示方法の研究の中で、Hazenが初めて対数確率紙を粒径加積曲線の表示に用いたこと、Grassbergerが粒径加積曲線に統計的考察を加えた最初の人としてあげ、散布度、歪度等を統計的に考察している。陶野<sup>12)</sup>は均等係数 $U_c$ 、曲率係数 $U_c'$ を分散度や分級度、偏平度などの堆積学分野で用いられている統計的諸概念と関連づける研究を行い、堆積環境と土質特性の関係を示している。本研究では重量による粒度分布から個数による粒度分布を誘導するにあたって陶野と同じ手法を用いて基本になる分散特性の確認を行い、これらの結果をベースにして両者の関係を求めている。

### (1) 分散と均等係数の関係

図-1は建築基礎の支持地盤として名古屋ではよく利用されているPleistoneの熱田砂の粒径加積曲線

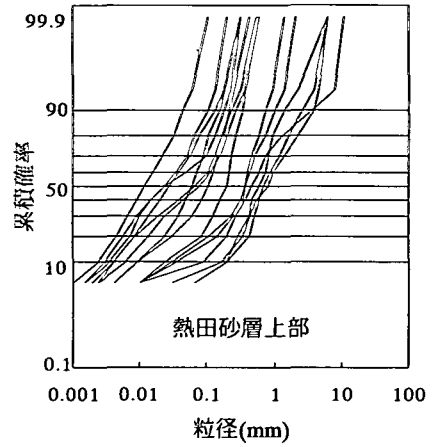


図-2 熱田砂層の対数正規分布性

を示し、それを対数確率紙上に例示したのが図-2である<sup>13)</sup>。

箭内らの指摘と同様、両端部を除けば対数正規分布で表現できることを示している。一方、堆積学では対数の底を2とする $\phi$ -Scaleをもとに、式(1)、(2)の確率密度関数をベースにして分散状態を示す種々の因子が式(3)のように提案されている。

$$\phi = \log_2 d \quad (1)$$

$$f(\phi) = \frac{1}{\sigma_\phi \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\phi - \phi_{50}}{\sigma_\phi} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

ここに $d$ : 粒径(mm),  $\sigma_\phi$ : 標準偏差,  $\phi_{50}$ : 確率50%粒径に対する $\phi$ を示す。

式(3)はInmannが提案した定義式で、分級度 $\sigma_1$ は式(2)の標準偏差の近似値として示されている<sup>14)</sup>。このため本論文では $\sigma_1$ を標準偏差 $\sigma_\phi$ とみなして展開している。

$$\begin{aligned} \text{分級度 } \sigma_1 &= \frac{1}{2}(\phi_{84} - \phi_{16}), \quad \text{対称度 } \alpha_\phi = \frac{\phi_{50} - \sigma_\phi}{\sigma_\phi} \\ \text{偏平度 } \beta_\phi &= \frac{\frac{1}{2}(\phi_{95} - \phi_5) - \sigma_\phi}{\sigma_\phi} \end{aligned} \quad (3)$$

陶野らは土の続成作用や堆積環境による強度などの違いを研究する中で、式(3)の諸概念を検討し、均等係数 $U_c$ と標準偏差 $\sigma_\phi$ の関係が強いこと、曲率係数 $U_c'$ と対称度 $\alpha_\phi$ 、 $\beta_\phi$ 等との関係は見当たらないこと等を指摘している。

図-3, 4は広い範囲の粒度を対象とするため文献<sup>15)</sup>等からデータを収集し、均等係数 $U_c$ と標準偏差 $\sigma_\phi$ 、対称度 $\alpha_\phi$ の関係を求めたものである。これらの図によっても均等係数 $U_c$ との関係が強いという陶

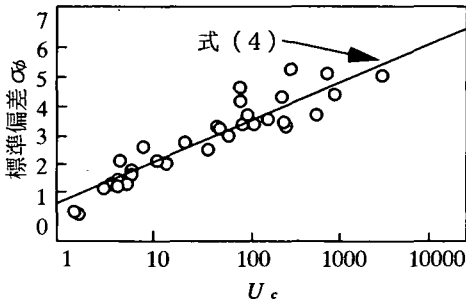


図-3 均等係数と標準偏差

野らと同じ結論を得ることができる。最小二乗法でこれらの関係を求めたのが式(4), (5)で、各々相関係数は $r=0.92, 0.65$ である。

$$\sigma_\phi = 0.699 + 1.395 \log U_c \quad (4)$$

$$\alpha_\phi = -0.216 + 0.212 \log U_c \quad (5)$$

式より均等係数 $U_c$ は単に分散を示すだけではなく、対称度にも関係した概念であることが分かった。しかし、反面、曲率係数 $U_c'$ は片寄り度を表わす概念とされ、対称度に関係することが期待されたが、ほとんど相関がなく統計的な裏付けの乏しい概念といえる。

以下に粒径加積曲線の対数正規分布性を仮定し、重量による粒度分布特性と個数による粒度分布特性との関係を誘導するが、この過程では式(4)を標準偏差を示す基本式として用いている。

(2) 重量による粒度分布と個数による粒度分布  
重量による粒度分布と個数による粒度分布を式(6), (7)のように仮定する。  
重量による確率密度関数

$$f(\ln d) = \frac{1}{\ln \sigma_w \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln d - \ln d_w}{\ln \sigma_w} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

個数による確率密度関数

$$g(\ln d) = \frac{1}{\ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

ここに、 $d$ : 粒径、 $d_w$ : 重量による粒度分布の平均粒径、 $d_g$ : 個数による粒度分布の平均粒径、 $\sigma_w$ : 重量による粒度分布の標準偏差、 $\sigma_g$ : 個数による粒度分布の標準偏差である。

また、個々の粒子の重さは $d^m$ に比例すると仮定し、その比例定数を $\alpha$ とする。一般に土は様々な鉱物からなり、また異なった粒径、形状で構成されているので、比例定数は必ずしも一定値ではない。しかし、近似的に $\alpha$ は土粒子の密度のように平均的な値が仮定できるとすれば、式(6), (7)から式(8)を得る。

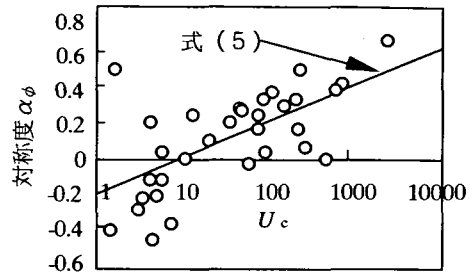


図-4 均等係数と対称度の関係

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\ln \sigma_w \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln d - \ln d_w}{\ln \sigma_w} \right)^2 \right\} \\ & \alpha d^m \frac{1}{\ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g} \right)^2 \right\} \\ & = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \alpha d^m \frac{1}{\ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g} \right)^2 \right\} d(\ln d)}{\int_{-\infty}^{\infty} \alpha d^m \frac{1}{\ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g} \right)^2 \right\} d(\ln d)} \quad (8) \end{aligned}$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\sigma_g$ は一定と仮定しているので、式(9)になる。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\ln \sigma_w \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln d - \ln d_w}{\ln \sigma_w} \right)^2 \right\} \\ & d^m \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g} \right)^2 \right\} \\ & = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d^m \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g} \right)^2 \right\} d(\ln d)}{\int_{-\infty}^{\infty} d^m \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g} \right)^2 \right\} d(\ln d)} \quad (9) \end{aligned}$$

式(9)の右辺分母を、 $\frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g} = t$ として展開すると、式(10)になる。

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} d^m \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g} \right)^2 \right\} d(\ln d) \\ & = d_g^m \ln \sigma_g \exp \left\{ \frac{(m \cdot \ln \sigma_g)^2}{2} \right\} \sqrt{2\pi} \quad (10) \end{aligned}$$

式(10)を式(9)にいれて展開し整理すると、式(11)が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\ln^2 \sigma_w} - \frac{1}{\ln^2 \sigma_g} \right) \cdot \ln^2 d + \left( \frac{\ln d_g}{\ln^2 \sigma_g} + m \cdot \frac{\ln d_w}{\ln^2 \sigma_w} \right) \ln d + \frac{\ln^2 d_w}{2 \cdot \ln^2 \sigma_w} \\ & - \frac{\ln^2 d_g}{2 \cdot \ln^2 \sigma_g} + \ln(\ln \sigma_w) - m \cdot \ln d_g - \frac{1}{2} m^2 \cdot \ln^2 \sigma_g - \ln(\ln \sigma_g) = 0 \quad (11) \end{aligned}$$

式(11)において、下に示す式(12)~(14)の3式が同時に成立すれば、式(11)は粒径 $d$ の如何にかかわらず常に成立することを意味する。

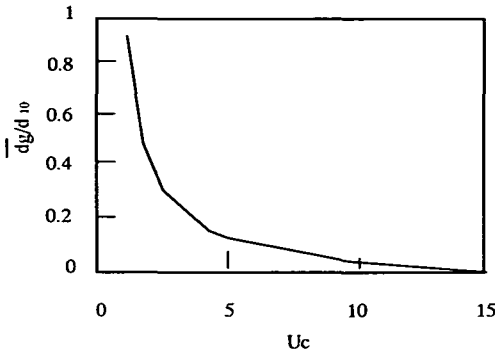


図-5 均等係数とHazenの有効径

$$\frac{1}{\ln^2 \sigma_w} - \frac{1}{\ln^2 \sigma_g} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\ln d_g}{\ln^2 \sigma_g} + m - \frac{\ln d_w}{\ln^2 \sigma_w} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\ln^2 d_w}{2 \cdot \ln^2 \sigma_w} - \frac{\ln^2 d_g}{2 \cdot \ln^2 \sigma_g} + \ln(\ln \sigma_w) - m \cdot \ln d_g - \frac{1}{2} m^2 \cdot \ln^2 \sigma_g - \ln(\ln \sigma_g) = 0 \quad (14)$$

式(12)より式(15)が得られるので、これを式(13)に代入すると式(16)を得る。

$$\sigma_g = \sigma_w \quad (15)$$

$$\ln d_g = \ln d_w - m \cdot \ln^2 \sigma_w \quad (16)$$

そして、式(15)、(16)を式(14)の左辺に代入すると満足されるため、結果としては重量による粒度分布と個数による粒度分布を結ぶ式(9)が成立するためには式(15)、(16)の2式が成立すればよい。

式(16)の $m$ は形状依存の因子であるが、本研究では球状モデルを想定して、 $m=3$ とした。この場合、式(17)を得る。

$$\ln d_g = \ln d_w - 3 \cdot \ln^2 \sigma_w \quad (17)$$

式(17)を常用対数で書き直し、式(15)を代入すると、式(18)になる。

$$\log d_w = \log d_g + 6.908 \cdot \log^2 \sigma_g \quad (18)$$

式(18)は粉体工学でHatch<sup>16)</sup>が見いだした式と同一で、対数正規分布性を仮定した場合の統計的關係である。

### (3) Hazenの有効径と個数による平均径

Hazenの有効径 $d_e$ は平均間隙径に対応した大きさとして、透水係数の推定等に使用されてきたが、粒径加積曲線上では、この有効径は10%粒径に対応するとされている。本節では式(6)に示す重量による粒度の確率密度関数の関係から求められる10%粒径と、個数による粒度分布から得られる平均径の関係を統計的に検討してみる。10%粒径 $d_{10}$ は重量分布から求

表-1  $d_{10}$ と $d_e$ の比較

$U_c$	1	2	3	4	5	10
$d_g/d_{10}$	0.92	0.45	0.23	0.13	0.08	0.01

められる値であるため、ここでは、

$$F(\ln d) = \int_{-\infty}^{\ln d} f(\ln d) d(\ln d) = 0.1 \quad (19)$$

式(19)を満足する粒径として10%粒径 $d_{10}$ と定義する。 $f(\ln d)$ は式(6)で示されている。式(19)を満たす粒径 $d$ は正規確率表を利用すると式(20)になる。

$$\frac{\ln d_{10} - \ln d_w}{\ln \sigma_w} = -1.28 \quad (20)$$

式(16)、(20)より、

$$\ln d_g - \ln d_{10} = (1.28 - m \cdot \ln \sigma_w) \cdot \ln \sigma_w \quad (21)$$

これを常用対数で整理すると、式(22)になる。

$$\log d_g - \log d_{10} = (1.28 - 2.303 \cdot m \cdot \log \sigma_w) \cdot \log \sigma_w \quad (22)$$

式(22)は個数による粒度分布の平均径と、重量による粒度分布の10%粒径 $d_{10}$ との関係である。仮定より $m=3$ である。また、式(4)の標準偏差 $\sigma_g$ は2を底とする対数座標上の標準偏差であるため自然対数スケールの $\sigma_w$ に変換する必要がある。そこで、式(4)を用いて

$$\sigma_g = \frac{\log \sigma_w}{\log 2} = 0.699 + 1.395 \log U_c \quad (23)$$

とすると式(24)を得る。

$$1 \log \sigma_w = 0.484 + 0.4201 \log U_c \quad (24)$$

式(22)、(24)により $d_g$ 、 $d_{10}$ の関係を求めたのが図-5と表-1である。図-5より個数による平均粒径 $d_g$ は均等係数 $U_c$ が1~2で、粒径が揃っている場合は、10%粒径と類似した大きさであるが、均等係数が大きくなれば、両方の比は小さくなり対応しなくなる。つまり、均等係数 $U_c$ が大きくなると10%粒径は平均径との差が大きくなるため、幾何学的な意味が曖昧になることがわかる。

### (4) 土の間隙指標の提案

本節では重量による粒度分布から幾何学的な個数による粒度分布の関係をj用いて、間隙の大きさ、あるいは水膜の厚さ等に対応する概念を検討する。

平均粒径の表面積を $S$ 、個数を $N$ 、全体積を $V$ 、土粒子の実質部分の体積を $V_s$ 、間隙の体積を $V_v$ として単位面積当りの間隙の平均径深 $h$ を形状係数 $\phi_v$ 、 $\phi_s$ を介して式(25)で定義する。

$$h = \frac{V_v}{N \cdot S} = e \cdot \frac{\sum n_i \phi_{v_i} d_i^3}{\sum n_i \phi_{s_i} d_i^2} \quad (25)$$

式(25)の平均間隙径深 $h$ は土粒子実質部分の体積を表面積で除した項と間隙比の積になっている。ここ

表-2 平均間隙径深の計算

(A)  $d_{50}=0.342\text{mm}$   $U_c=1.45$

w	b (mm)	e	h (mm)
0.1	$9.58 \times 10^{-3}$	0.6	$1.67 \times 10^{-2}$
0.2	$1.92 \times 10^{-2}$	0.8	$2.22 \times 10^{-2}$
0.3	$2.87 \times 10^{-2}$	1.0	$2.79 \times 10^{-2}$

(B)  $d_{50}=1.27\text{mm}$   $U_c=11.7$

w	b (mm)	e	h (mm)
0.1	$1.85 \times 10^{-3}$	0.6	$2.41 \times 10^{-2}$
0.2	$3.70 \times 10^{-3}$	0.8	$3.21 \times 10^{-2}$
0.3	$5.55 \times 10^{-3}$	1.0	$4.02 \times 10^{-2}$
0.4	$7.40 \times 10^{-3}$	1.2	$4.82 \times 10^{-2}$

で形状係数  $\phi_w, \phi_s$  は一定と仮定して  $\phi_w, \phi_s$  とすると、右辺の最後の項は式(26)になる。

$$\frac{\sum n_i \phi_w d_i^3}{\sum n_i \phi_s d_i^2} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \times \frac{\phi_w}{\phi_s} = \frac{\int_0^\infty d^3 g(\ln d) d(\ln d)}{\int_0^\infty d^2 g(\ln d) d(\ln d)} \times \frac{\phi_w}{\phi_s} \quad (26)$$

式(10)を用いると式(27)を得る。

$$\frac{\sum n_i \phi_w d_i^3}{\sum n_i \phi_s d_i^2} = \frac{d_g^3 \exp(4.5 \cdot \ln^2 \sigma_w)}{d_g^2 \exp(2.0 \cdot \ln^2 \sigma_g)} \times \frac{\phi_w}{\phi_s} = d_g \exp(2.5 \cdot \ln^2 \sigma_g) \times \frac{\phi_w}{\phi_s} \quad (27)$$

式(15), (16)を式(27)に代入し、式(25)を整理すると式(28)を得る。

$$h = \frac{\phi_w}{\phi_s} \times e \times \exp(\ln d_w - 0.5 \cdot \ln^2 \sigma_w) \quad (28)$$

粉体工学では式(28)の中の  $\phi_w / \phi_s$  の値として  $6 \sim 11^{16)}$  を与えている。

また、同様に見掛け上の水膜の平均厚さを  $b$ , 水の体積を  $V_w$  として保水条件を無視するならば、

$$b = \frac{W}{N \cdot S} = \frac{1}{\gamma_w} \times \frac{W}{W_w} \times \frac{V_w}{N \cdot S} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \times w \times \frac{V}{N \cdot S} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} (1+e) \frac{V}{N \cdot S} = \frac{G_s}{\gamma_w} \times w \times \frac{\sum n_i \phi_w d_i^3}{\sum n_i \phi_s d_i^2} = \frac{G_s}{\gamma_w} \times \frac{\phi_w}{\phi_s} \times w \times \exp(\ln d_w - 0.5 \cdot \ln^2 \sigma_w) \quad (29)$$

を得る。また式(28), (29)より式(30)が導かれ、飽和度の概念と一致することを示している。

$$\frac{b}{h} = \frac{\frac{\phi_w}{\phi_s} \times \frac{G_s}{\gamma_w} \times w \times \exp(\ln d_w - 0.5 \cdot \ln^2 \sigma_w)}{\frac{\phi_w}{\phi_s} \times e \times \exp(\ln d_w - 0.5 \cdot \ln^2 \sigma_w)} = \frac{w \cdot G_s}{\gamma_w \cdot e} = S_r \quad (30)$$

表-3  $\frac{2h}{d_{10}}$  の変化

$U_c$	1	2	3	4	5	10	15	20
0.6	0.20	0.24	0.26	0.27	0.27	0.27	0.26	0.24
0.8	0.26	0.32	0.34	0.35	0.36	0.36	0.34	0.33
1.0	0.33	0.40	0.43	0.44	0.45	0.45	0.43	0.41
1.5	0.50	0.60	0.64	0.67	0.68	0.67	0.64	0.61
2.0	0.66	0.80	0.86	0.89	0.90	0.89	0.86	0.82

式(28), (29)が一般にどの程度の値を示すのかを試算したのが表-2である。なお、ここでは係数の値として  $\phi_w / \phi_s \approx 0.1$ ,  $G_s \times \phi_w / \phi_s \approx 0.3$  として計算した。

また  $d_w$  の値として近似的に  $d_w \approx d_{50}$  を用いると、式(31), (32)が得られ、今後この2つの式を中心に種々の検討を行っている。

$$h = \frac{0.3 \cdot d_{50}}{\exp(0.5 \cdot \ln^2 \sigma_w)} \times \frac{e}{G_s} \quad (31)$$

$$b = \frac{0.3 \cdot d_{50}}{\exp(0.5 \cdot \ln^2 \sigma_w)} \times w \quad (32)$$

妹尾<sup>17)</sup>によると、水膜の厚さからpFを理論的に求める際、

pF8に相当する水膜厚さ  $3 \times 10^7 \text{mm}$

pF5.5に相当する水膜厚さ  $1.0 \times 10^3 \text{mm}$

を仮定している。また Schofield<sup>18)</sup> によると  $(2 \times 10^2 \sim 2.2 \times 10^1) \text{mm}$  が計算されており、表-2に示す水膜厚さと同程度の値になっている。

次に平均間隙径深の2倍が概略的に平均間隙径に対応するものと考えて、 $2h$ とHazenの有効径 $d_e$ を10%粒径 $d_{10}$ とみなして比較してみる。式(20), (28)を整理すると、式(33)が得られる。

$$\frac{2h}{d_{10}} = \frac{e}{5} \times \exp\{(1.28 - 0.5 \cdot \ln \sigma_w)\} \quad (33)$$

砂の一般的な範囲を想定して間隙比 $e$ を0.6~2.0、均等係数 $U_c$ を1~20として試算した結果が表-3である。表より、10%粒径 $d_{10}$ に比べ、 $2h$ は小さな値を示しているが、オーダーとしてはほぼ同程度である。しかも均等係数 $U_c$ の影響に比べ間隙比の影響が大きくなる。間隙比 $e$ が大きいきとき $2h$ と10%粒径 $d_{10}$ の値は同じ程度になることがわかる。(3)節では10%粒径 $d_{10}$ と個数による粒度分布の平均粒径を比較したが、均等係数が大きくなれば両者の値は大きく異なってくることを示した。これに対し、表-3に示すように  $2h/d_{10}$ は  $0.9 \geq 2h/d_{10} \geq 0.2$  の範囲になり、Hazenの有効径 $d_e$ は平均粒径よりも間隙の大きさに関係していることがわかる。つまり、平均間隙径深 $h$ は間隙の大きさを示す指標になりうることを示している。

この関係をさらに明確にするため、図-6に示す

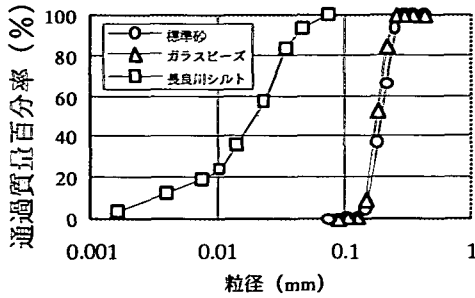


図-6 空気透過法による比表面積測定に用いた土試料の粒度

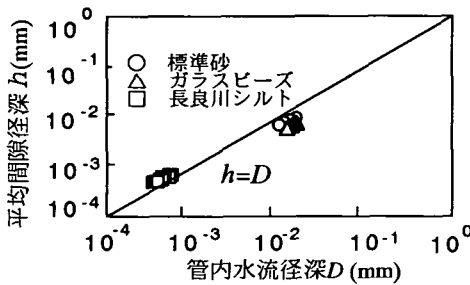


図-7 平均間隙径深 $h$ と管内水流径深 $D$ の比較

粒度分布をもつ標準砂，ガラスビーズ，長良川シルトを用いて空気透過法による比表面積測定から求めた平均間隙径と平均間隙径深 $h$ と比較した。用いたデータは宇野ら<sup>19)</sup>の試験結果である。宇野らは毛管モデルを用いて間隙径 $R$ と粒度の関係を求めているが，ここでは平均間隙径深 $h$ と直接対比できるように式(34)に示される管内水流の径深 $D$ を用いた。

$$D = \frac{\pi R^2/4}{2\pi R/2} = \frac{R}{4} \quad (34)$$

図-7は実験した全データを対比したもので，その中から各々4個の結果を示したのが表-4~6である。式(31)による推定値は実験で得た管内水流径深 $D$ に対し， $10^{-4} \sim 10^{-2}$ mmの範囲において $h/D=0.6 \sim 1.2$ の関係がみられ，平均間隙径深 $h$ は式(34)に示す管内水流径深 $D$ に対応していることが明らかである。

また表に示されるように3種の実験結果では，両者の比は均等係数が1.25（ガラスビーズ）のとき約0.6で最小値になり，標準砂，長良川シルトと均等係数が大きくなれば， $h/D$ も大きくなっていく傾向がみられる。

この傾向については今後の研究課題にすることとして，本研究では概略的には $h \approx D$ を仮定する。この前提にたてば粒度分布から式(31)を使って毛管モデルの管内水流径深が容易に推定できることになる。

表-4 標準砂の間隙径

50%粒径  $d_{50}=0.195\text{mm}$  均等係数  $U_c=1.33$   
土粒子の密度  $\rho_s=2.645(\text{g/cm}^3)$

間隙比 $e$	平均間隙径深 $h$ (mm)	毛管径深 $D$ (mm)	$h/D$
0.849	0.01562	0.02262	0.69
0.763	0.01404	0.01950	0.72
0.685	0.01260	0.01681	0.75
0.604	0.01110	0.01420	0.78

表-5 ガラスビーズの間隙径

50%粒径  $d_{50}=0.178\text{mm}$  均等係数  $U_c=1.25$   
土粒子の密度  $\rho_s=2.498(\text{g/cm}^3)$

間隙比 $e$	平均間隙径深 $h$ (mm)	毛管径深 $D$ (mm)	$h/D$
0.699	0.01267	0.02274	0.56
0.665	0.01205	0.02060	0.58
0.614	0.01109	0.01877	0.59
0.572	0.01035	0.01727	0.62

表-6 長良川シルトの間隙径

50%粒径  $d_{50}=0.0205\text{mm}$  均等係数  $U_c=7.80$   
土粒子の密度  $\rho_s=2.653(\text{g/cm}^3)$

間隙比 $e$	平均間隙径深 $h$ (mm)	毛管径深 $D$ (mm)	$h/D$
0.968	0.0009060	0.0008136	1.11
0.865	0.0008094	0.0006647	1.22
0.814	0.0007619	0.0006148	1.23
0.760	0.0007114	0.0005942	1.20

### 3. 平均間隙径深モデルと透水係数

透水係数と粒度分布の関係はHazen, Creager等多くの研究者により提案されているが，その適用は均一な砂や粘土に限られている<sup>20)</sup>。いわゆる砂や粘土の間にある砂質土や粘性土も，10%粒径や20%粒径等の粒度を因子として拡張することも可能であるが，代表的な粒径だけでは，粒度分布と透水係数の関係を表現することは困難である。

#### (1) 透水係数と間隙

土の透水係数をマクロな土の構造をベースにして考察する時，よくHagen-Poiseuilleの水管のモデルが用いられる。このモデルでは透水係数は式(35)で表わされる管内水流径深 $D$ の2乗に比例している。

$$k \propto \frac{n}{2} D^2 \quad (35)$$

なお，土粒子を囲む水膜は物理的に自由水と吸着水に分けられ，後者は水の流れにほとんど寄与しな

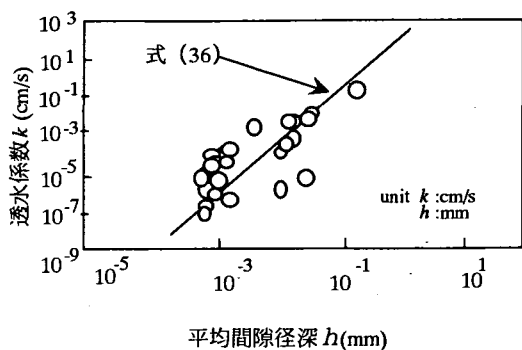


図-8 透水係数と見掛けの間隙厚さ

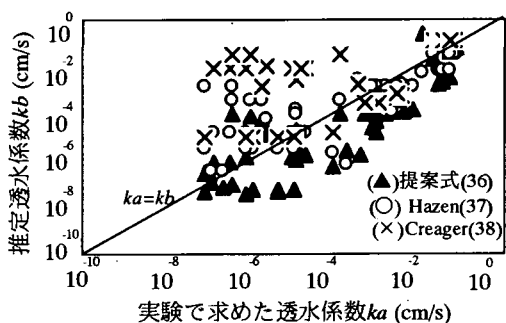


図-9 透水係数の推定式の比較

いが、概略的な検討段階として平均間隙径深 $h$ を見掛けの全水膜厚さと考えた。

中間土の透水係数を研究した文献<sup>21)</sup>のデータを用いて平均間隙径深 $h$ と透水係数を、両対数座標で整理したのが図-8である。

図によると用いた試料の粒度は広範囲に及んでいるが、透水係数と平均間隙径深 $h$ はほぼ直線な関係にある。これらの図から式(36)が近似的に得られる。

$$\log k = 2.87(1 + \log h) \quad (k: \text{cm/s}, h: \text{mm}) \quad (36)$$

データは $10^{-7} \sim 10^0 \text{ cm/s}$ と幅広く分布しているが、 $h = 10^{-4} \text{ mm} \sim 10^1 \text{ mm}$ の範囲では、式(36)による推定値は実験値に対してほぼ1オーダー程度の誤差範囲にある。従来の提案式は粒度分布の中から10%粒径とか、20%粒径等のただ1個の特性値と透水係数の組み合わせで推定するのに対し、式(36)は均等係数 $U_0$ と土の締まり具合を示す間隙比 $e$ を取り入れた形になっており、幾分幅広い条件に対応できる推定式と考えることができる。また式(35)では透水係数 $k$ は平均間隙径 $h$ の2乗に比例することを予想させるが、実験結果を整理するとやや大きな値2.87が得られた。

## (2) 透水係数の推定式の精度

粒度から透水係数を推定する公式<sup>22)</sup>として実務的

表-7 推定式の精度

推定式	$X$	$\sigma_{n-1}$	$X - \sigma_{n-1}/2$	$X + \sigma_{n-1}/2$
Hazen式(37)	-0.92	1.149	-1.495	-0.345
Creager式(38)	-1.369	2.007	-2.373	-0.365
提案式(36)	0.112	1.297	-0.537	0.761

によく用いられているのは式(37)、(38)である。

$$\text{Hazen式: } k = 100 d_e^2 \quad (d_e: \text{mm}) \quad (37)$$

$$\text{Creager式: } k = 0.359 d_{20}^{2.327} \quad (d_{20}: \text{mm}) \quad (38)$$

ここでHazen式の係数を100としたのは、種々の土質を対象としているため、中央値になる値を選択した。またCreager式は一般に20%粒径 $d_{20}$ と透水係数の関係を表で示しているが、横沢の文献<sup>23)</sup>から式(38)を選択した。

図-9は透水係数の実験値<sup>24) ~ 33)</sup>と上式による推定値の精度を示したものである。図より相当のばらつきがみられるが、それぞれの式について比較してみる。その場合、変数 $X$ を式(39)で定義し、 $X$ の平均及び分散によって検討したのが表-7である。

$$X = \log(k_a/k_b) \quad (39)$$

ここに $k_a$ : 実験で求めた透水係数、 $k_b$ : 推定透水係数である。平均値を基準に推定精度を示すと、式(37)は実験値に対して1/10倍程度、式(38)は1/20倍程度、式(36)は1.1倍程度の精度になる。

これらの図表から以下のような精度特性が考えられる。

**Hazen式:** 平均的には実験値に対し、1/100~1/2程度で1~2オーダー小さくなる傾向にある。細かく点検すると $10^4 \text{ cm/s}$ を境に推定精度が異なり $10^4 \text{ cm/s}$ 以上では1/2~1倍程度で良好な精度である。しかし、 $10^4 \text{ cm/s}$ 以下の領域では1/100~1/10となり、実験値は1~2オーダー小さな値になる。

**Creager式:** 平均的には実験値に対して推定値は、1/300~1/2程度の精度で、1~2オーダー小さくなる傾向にあるが、 $10^4 \text{ cm/s}$ 以上の領域では1/2~1倍程度であり推定精度はよい。しかし、 $10^4 \text{ cm/s}$ 以下の領域では1/2000~1/300倍程度になり、実験値は2~4オーダー小さい値となる。

**提案式:** 平均的には実験値に対して推定値は1/2~6倍程度である。 $10^4 \text{ cm/s}$ 以上の領域では1~6倍程度、 $10^4 \text{ cm/s}$ 以下の領域では1/5~5倍程度でほぼ1オーダーの変動で推定できる。

以上の結果よりHazen式、Creager式は $10^4 \text{ cm/s}$ 以下の領域での適用範囲が限られることがわかる。これに対し、提案式は $10^{-7} \sim 10^0 \text{ cm/s}$ の広範囲にわたって1オーダー程度の精度で実験値を推定できる。

この違いを式の構造から検討してみる。Hazen式、

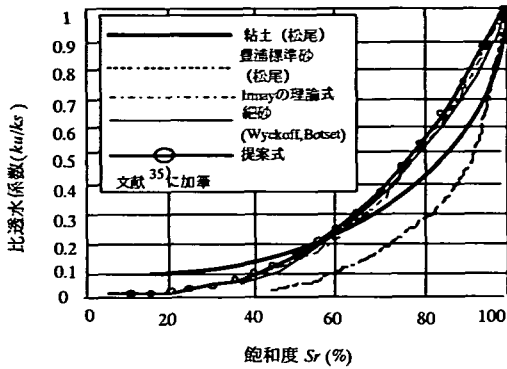


図-10 不飽和透水係数

Creager式は式(40)で示される。

$$\log k = \alpha + \beta \log d \quad (40)$$

ここに、 $\alpha$ 、 $\beta$ は係数、 $d$ は粒径を示しており、Hazen式では10%粒径 $d_{10}$ 、Creager式では20%粒径 $d_{20}$ になる。一方、式(36)は粒径 $d$ ではなく、平均間隙径 $h$ が対応する。

毛管モデルをベースとした考え方では、透水係数は粒径の2乗に比例し $\beta=2$ が基準になるが、Hazen式では $\beta=2$ 、Creager式では $\beta=2.327$ 、提案式では $\beta=2.87$ で提案式が最も大きな値になる。

一方、粘土等の細粒分の透水係数に関しては透水係数の対数と間隙比は直線になることが、また毛管モデルでは $e^3/(1+e)$ 等と透水係数の直線関係が示されている<sup>34)</sup>。Hazen式、Creager式では間隙比を含むことはできないが、提案式は式(31)より透水係数は間隙比 $e$ の2.87乗に比例することになる。間隙比が0.2~2.5の範囲では $e^{2.87}/\{e^3/(1+e)\}=1.4\sim 3.0$ の範囲になり提案式と毛管モデルは類似した大きさである。

### (3) 不飽和土の透水係数

飽和土の場合、式(30)、(36)より平均間隙径 $h$ は平均水膜の厚さ $b$ に等しいと考えることができる。この概念を拡張し、不飽和土の透水係数も平均水膜厚さ $b$ に関係すると考えるならば式(41)が得られる。

$$\log k_u = 2.87 (1 + \log b) \quad (41)$$

式(41)は式(30)を考慮すると、飽和度 $S_r$ を含む式(42)の関係式を誘導することができる。

$$k_u = k_s \cdot S_r^{2.87} \quad (42)$$

ここに飽和土と不飽和土の透水係数を区別するため、各々 $k_s$ 、 $k_u$ とする。図-10は不飽和透水試験結果の一例<sup>35)</sup>である。この図から分かるように式(42)は細砂あるいはIrmayの理論式に類似した結果を与えている。

一般にIrmay<sup>36)</sup>、Corey<sup>37)</sup>、Auerjanov<sup>38)</sup>によると不飽和透水係数 $k_u$ は飽和度 $S_r$ と式(43)の関係にあると

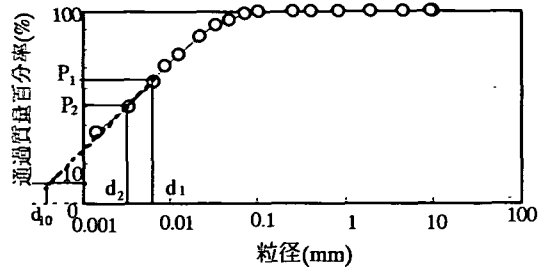


図-11 10%、20%粒径の推定方法

言われており、

$$k_u \propto S_r^{3-4} \quad (43)$$

式(42)はこれらの式と類似した関係にある。つまり飽和土、不飽和土の透水モデルにおける水膜厚さの拡張性と、式(40)の勾配 $\beta$ の統一性によって、間隙指標モデルの有効性が示される。

## 4. 粘性土の粒度分布と圧密透水係数に関する一考察

粘性土の粒度試験には多くの未解決の問題があり信頼性が常につきまとっている<sup>39)</sup>が、土質分野では粘性土の粒度試験として、比重浮ひようを用いた粒度測定が一般的に用いられている<sup>40)</sup>。

一方、粘性土の透水係数は一般に圧密試験結果で示されているが、直接的に透水試験から求める研究もある<sup>41)</sup>。これまでの研究成果では圧密試験から求められる透水係数はその整理方法によって異なり、また過圧密領域ではばらつくことが指摘されている<sup>42)</sup>。

このように粘性土の粒度分布や圧密透水係数は信頼性が問題になっているが、本研究では粒度との関係を検討することによって、両者の信頼性の評価を行った。

### (1) 10%、20%粒径の推定

粘性土の粒度分布から10%、20%粒径を求めることは困難であるが、本研究では図-11に示すような通常使用されている沈降分析結果による粒度分布から外捜する方法を用いた。

比重浮ひようを用いた粒度試験の最小値は一般に0.003mm程度である。本研究では比重浮ひようを用いた粒度試験の信頼性を考慮し、最小値を除外してそれより径が大きい2つの粒径と通過質量百分率を用い、式(44)、(45)で推定することにした。

$$\log d_{20} = \log d_2 - \frac{P_2 - 20}{P_1 - P_2} \cdot \log \frac{d_1}{d_2} \quad (44)$$



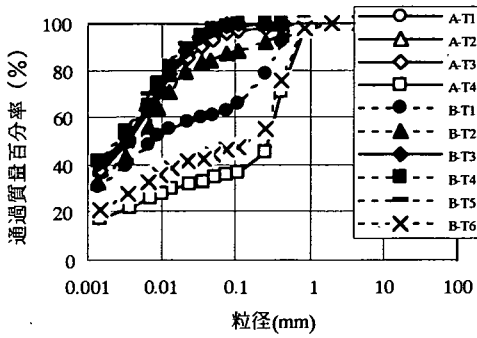


図-12 粘土の粒度分布

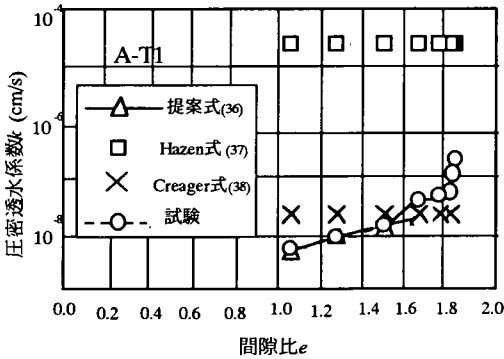


図-13 粘土の圧密透水係数 (1)

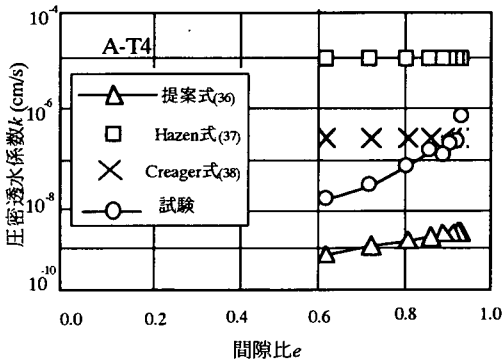


図-14 粘土の圧密透水係数 (2)

$$\log d_{10} = \log d_2 \cdot \frac{P_2 - 10}{P_1 - P_2} \cdot \log \frac{d_1}{d_2} \quad (45)$$

## (2) 圧密透水係数

本研究で用いたデータは大阪湾岸の粘性土に関する土質試験結果で、一次圧密比で補正した圧密透水係数である。

図-12は実験に使用した粒度分布を、図-13、14は圧密試験から求めた圧密透水係数と間隙比の関係を各種の推定値と併記したものである。

HazenやCreagerの推定式には間隙比が含まれてい

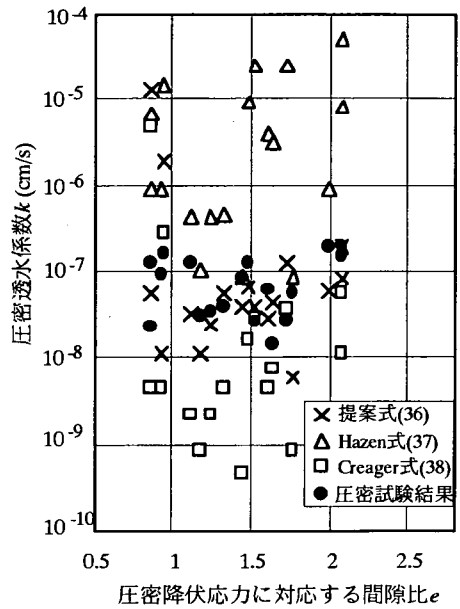


図-15 間隙比と圧密透水係数

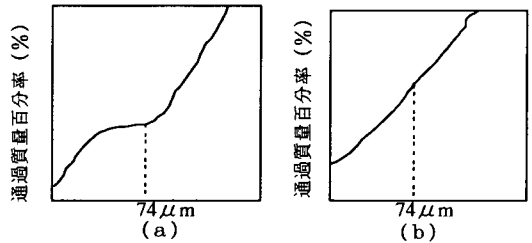


図-16 粒度曲線の形状

ないので間隙比に対し一定値になる。これに対し、提案式(36)は間隙比によっても透水係数は変化する。

推定精度を点検した結果を整理したのが図-15である。なお、圧密透水係数は圧密降伏応力に対応する値である。また式(36)の間隙比は圧密降伏応力の間隙比を用いている。図からHazen式は圧密試験で得られた透水係数に比べ約1~2オーダー大きく、過圧密領域の間隙比に対応した値に近い大きめの圧密透水係数を与える。

一方、Creagerの式は全体に圧密降伏応力時の間隙比付近の圧密透水係数に比べ約1オーダー小さい値を与える傾向を示し、3つの推定式の中では最小の値を与える。これに対し、式(36)による推定結果は正規圧密領域の間隙比と、圧密透水係数の対数紙上での直線傾向は類似しており、しかも近似度も高い。両者の差が大きい粒度曲線は図-16(a)のように74μm粒径付近にみられる曲線が階段状のとき生じている。一方、図-16(b)のように滑らかな粒度曲線

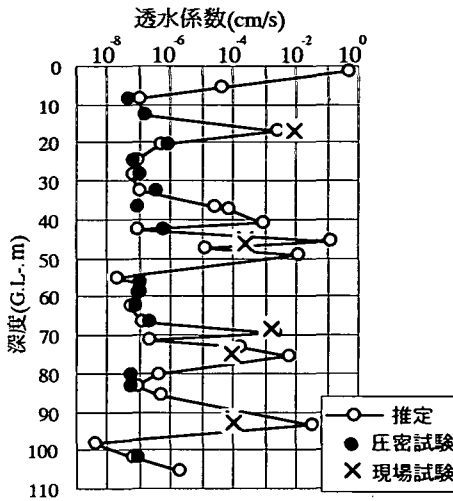


図-17 透水係数の深度方向分布

であれば近似度は高い。

本研究の対象とした粘性土の圧密透水係数は $10^5 \sim 10^8 \text{ cm/s}$ のオーダーで、砂の透水係数に比べかなり小さい。本研究では10%, 20%粒径が求められない粘性土の粒度試験曲線を単純に外推して $d_{10}$ ,  $d_{20}$ を求め圧密透水係数を推定した。従って、これらの推定結果は試験結果に対して大きくばらつきても奇異と思われぬが、予想に比べかなりばらつきが小さい結果が得られた。

### (3) 現場透水試験の管理図

一般に現場の透水性を知る上では現場揚水試験から得られる値が最も精度が高いとされている。しかし現場の地層は複雑であり、揚水試験で求められた値がどの層の透水係数か、あるいは本当に平均的な透水係数かは分からないことが多い。粘性土にも圧密透水係数の推定式が適用できることを利用して図-17のような管理図を作成することができる。これは粘土、砂を問わず粒度と間隙比から求めた推定透水係数～深度分布図に圧密試験及び現場透水試験から求めた結果を併記したものである。この図では透水係数が深度方向に複雑に変化しているが、現場や室内試験結果はほぼこの変化に対応していることがわかる。

## 5. 結論

本論文は土の挙動は粒子の重量ではなく、個数による粒度分布が基本的な影響因子であるという認識のもとに、重量による粒度分布と個数による粒度分

布との関係式を誘導した。そして、粒径の概念にもとづいて水理関係の基本概念として用いられている有効径の意味を検討した。さらに、これらの概念を拡張することによって、飽和土や不飽和土の透水係数を推定する式を提案した。この結果得られた結論を列記する。

- 1) 重量による粒度分布と個数による粒度分布の対数正規分布特性を仮定し、実験結果からInmannの分散と均等係数の関係式を求めることによって重量による粒度分布特性と個数による粒度分布特性との関係式を導いた。
- 2) 水理現象の基礎概念として扱われているHazenの有効径は均等係数が小さい場合は10%粒径に対応するが、均等係数が大きくなれば対応しにくい。
- 3) 新しく定義した平均間隙径 $h$ を提案し、これは毛管モデルの径深にほぼ等しいことを示した。
- 4) 透水係数は近似的には粒子のまわりの水膜の厚さ $b$ に関係すると考えられ、飽和土は式(36)、不飽和土は式(40)で表現される。
- 5) 透水係数を推定するHazenの式やCreagerの式に比べ、提案式は幅広い粒度分布に対して透水性が推定できることを示した。
- 6) 不飽和土の透水係数を推定する提案式はImayの式に近似していることを明らかにした。
- 7) 粘性土の粒度分布から推定した透水係数は圧密試験で得られる透水係数を良い精度で近似し得ることを示した。しかし、粒度分布が階段状になるとこの推定精度は悪くなることも明らかにした。
- 8) 個数による粒度分布に基づいて透水係数を推定する本方法を利用して、地盤の各地層(砂層でも粘性土層でも)の透水性をかなりの精度で評価して管理図を作成できることを示した。

## 付録

本文式(9), (10), (11)の誘導過程を以下に示す。

$$\frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g} = t \quad \text{より}$$

$$d(\ln d) = \ln \sigma_g \cdot d t \quad (\text{A-1})$$

$$d = \exp(t \cdot \ln \sigma_g + \ln d_g) \quad (\text{A-2})$$

$$d^m = \exp(m \cdot t \cdot \ln \sigma_g + m \cdot \ln d_g) \quad (\text{A-3})$$

式(A-1), (A-3)を式(9)の右辺分母に代入する。

$$\int_{-\infty}^{\infty} d^m \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g} \right)^2 \right\} d(\ln d)$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{-\infty}^{\infty} \exp(m \cdot t \cdot \ln \sigma_g + m \cdot \ln d_g) \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cdot (\ln \sigma_g) dt \\
&= d_g^m \cdot \ln \sigma_g \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2} + m \cdot t \cdot \ln \sigma_g\right) dt \\
&= d_g^m \cdot \ln \sigma_g \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{1}{2}(t - m \cdot \ln \sigma_g)^2 + \frac{1}{2}m^2(\ln \sigma_g)^2\right\} dt \\
&= d_g^m \cdot \ln \sigma_g \cdot \exp\left\{\frac{1}{2}m^2(\ln \sigma_g)^2\right\} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{1}{2}(t - m \cdot \ln \sigma_g)^2\right\} dt \\
&= d_g^m \cdot \ln \sigma_g \cdot \exp\left\{\frac{(m \cdot \ln \sigma_g)^2}{2}\right\} \sqrt{2\pi} \quad (A-4)
\end{aligned}$$

ここに式(A-4)が式(10)である。

式(10)を式(9)に代入する。

$$\begin{aligned}
&\frac{1}{\ln \sigma_w \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln d - d_w}{\ln \sigma_w}\right)^2\right\} \\
&\frac{d^m \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g}\right)^2\right\}}{d_g^m \cdot \ln \sigma_g \cdot \exp\left\{\frac{1}{2}(m \cdot \ln \sigma_g)^2\right\} \sqrt{2\pi}} \quad (A-5)
\end{aligned}$$

両辺の対数をとる。

$$\begin{aligned}
&-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln d - \ln d_w}{\ln \sigma_w}\right)^2 - \ln(\ln \sigma_w) \\
&= m \cdot \ln d - \frac{1}{2}\left(\frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g}\right)^2 - m \cdot \ln d_g - \ln(\ln \sigma_g) - \frac{1}{2}(m \cdot \ln \sigma_g)^2 \quad (A-6)
\end{aligned}$$

式(A-6)を $\ln d$ について整理すると、式(11)が得られる。

謝辞：本研究は取り扱う対象範囲を広くするため、既存の発表文献を積極的に活用した。心から謝意を表したい。

#### 参考文献

- 1) 森満雄, 阿部道雄: レキ混じり土の締固め密度に関する基礎的検討, 第23回土質工学研究発表会, pp.1997-1998, 1987.
- 2) 末岡徹, 後藤聡, 茗ヶ原義彦, 小川輝繁: 粗粒材-細粒材の混合割合が締固め特性に与える影響について, 土質工学会「粗粒材料の現場締固めの評価に関するシンポジウム」, pp.33-36, 1990.
- 3) 福本武明: まさ土の粒径分布に関する一考察, 第22回土質工学研究会, pp.165-166, 1986.
- 4) 宇梶文雄: フィルダム技術ノート, 材料の基本と実際一, 日刊工業新聞社, p.51, 1980.
- 5) 牟田明德, 渡辺薫樹: 関東ロームと粘土の正しい粒度分布(液中沈降粒度分布測定法の問題点について), 第20回コロイド化学討論会講演予

稿集, pp.81-82, 1976.

- 6) 土質工学会編: 土質試験法-第2回改訂版, 土質工学会, pp.82-91, 1979.
- 7) A. W. Skempton: The Colloidal "Activity of Clays", *Proc. 3rd ICSM*, Vol. 1, pp.57-61, 1953.
- 8) 井上隆夫, 中島伸一, 濱田晃之, 諏訪靖二, 福田光治: 埋立地における土質工学的特性の整理方法例, 土質工学会, 第29回土質工学研究発表会, pp.253-254, 1994.
- 9) 節内寛治: 土の粒度分布に関する考察, 第10回土質工学研究発表会, pp.51-54, 1975.
- 10) 上杉陽: 粒径頻度分布からみた風成砂・海成砂の諸特徴, 第四紀研究, 第11巻, 第2号, pp.49-60, 1972.
- 11) 岩井重久, 松尾新一郎: 土の粒度加積曲線に関する統計学的研究, 土木学会, 土木学会誌, 36-12, pp.32-35, 1950.
- 12) 陶野郁雄: 砂質堆積物の粒度試験, 第14回土質工学研究発表会, pp.129-132, 1970.
- 13) 福田光治: 熱田砂層の工学的特性, 第23回土質工学研究発表会, pp.187-188, 1987.
- 14) 庄司力偉: 堆積学, 朝倉書店, pp.178-191, 1971.
- 15) 同上4)
- 16) 川北公夫, 小林真純, 種谷真一: 粉体工学(基礎編), 槇書店, p.61, 1974.
- 17) 妹尾学: 土壌水エネルギー指数pFによる土壌構造の考察, 農土論集14, pp.11-15, 1965. (土壌物理研究会編; 土の物理学-土質工学の基礎一, 森北出版, pp.216-226, 1979.)
- 18) Schofield, R. K: Ionic forces in thick films of liquid between charged surfaces, *Trans. Faraday Soc.* 44 B, pp.219-228, 1946. (土壌物理研究会編: 土の物理学-土質工学の基礎-, 森北出版, pp.216-226, 1979.)
- 19) 宇野尚雄, 杉井俊夫, 神谷浩二: 比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察, 土木学会論文集, No.469/III-23, pp.25-34, 1993.
- 20) 久保田敬一, 河野伊一郎, 宇野尚雄: 土質工学叢書2透水-設計へのアプローチ, 鹿島出版会, pp.75-79, 1975.
- 21) 松尾新一郎, 木暮敬二: 土の透水性に関する一考察, 土と基礎, No.560, Vol.125, pp.23-29, 1969.
- 22) 宇野尚雄: 透水係数を推定する実験公式について, 土木学会中部支部, 昭和49年研究発表会,

- pp.115-116, 1973.
- 23)横沢昭人：土質調査の実際，理工図書，p17, 1973.
- 24)三木五三郎，佐藤剛司，下田一雄：瞬結性薬液の地盤噴射注入機構に関するモールド実験，第15回土質工学研究発表会，pp.1657-1661, 1980.
- 25)黒田輝光，木村洋行：砂地盤におけるトンネルの施工計測解析，第15回土質工学研究発表会，pp.1557-1560, 1980.
- 26)松尾新一郎，島重章：マサ土表層の浸透破壊に関する基礎的研究，第15回土質工学研究発表会，pp.1149-1152, 1980.
- 27)山上拓男：クイックサンド現象に関する実験考察，第15回土質工学研究発表会，pp.1133-1136, 1980.
- 28)林七郎：地盤の透潤特性に関する考察（その2），第15回土質工学研究発表会，pp.197-202, 1980.
- 29)河野伊一郎，西垣誠：不飽和砂質土の浸透特性に関する実験研究，土木学会論文報告集，第307，pp.59-69, 1981.
- 30)西尾仁応，小島孝之：深谷ダム高含水コアーの強制乾燥工法について，日本ダム協会，ダム施工実例集（II），1972.
- 31)吉田正：奥清津発電所の計画と施工，日本ダム協会，ダム施工実例集（II），p.95, 1972.
- 32)土質工学会編：切工ノリ面，土質工学会，p.224, 1975.
- 33)酒井賢一：新冠ダムの設計と施工，日本ダム協会「フィルダムタイプダムの施工技術」，pp.70-71, 1973.
- 34)同上19)
- 35)松尾新一郎，河野伊一郎：地下水位低下工法，鹿島出版会，p.12, 1969.
- 36)Jacob Bear：“*dynamics of fluids in porous media*”，american elsevier publishing company，inc.，p.492, 1972.
- 37)同上36)
- 38)同上20)
- 39)土質工学会編：土質試験法－第2回改訂版－，土質工学会，pp.95-96, 1980.
- 40)同上5)
- 41)今井五郎，村本勝巳：圧密係数に関する2，3の検討，土質工学会，第24回土質工学研究発表会，pp.433-436, 1989.
- 42)高根弘志，柏木淳男，有泉浩蔵，山内一秀，早川敦：飽和土の透水特性について（その1 圧密実験），第21回土質工学研究発表会，pp.179-181, 1985.

(1996.5.27 受付)

## ROLES OF MEAN PORE SIZE INDEX AND GRAIN SIZE DISTRIBUTION IN PERMEABILITY PHENOMENON

Mitsuharu FUKUDA and Takao UNO

It is presented how to derive the grain size distribution from the particle weight distribution based on the assumption of logarithm normal distribution and experiments. From extending these converts, mean particle size and mean radius of pores around solid particles are derived and related to coefficient of permeability. Finally, the mean pore size index concepts are summarized as a series of equations for predicting coefficient of permeability and drawing the permeability profile including clay soil.