

土の粒径分布特性と透水性の関係に関する一考察

茨城大学大学院理工学研究科(東京電力㈱) 学生会員 ○岸裕和

茨城大学 学生会員 阿部聡 佐藤恭兵 橋本大地

早稲田大学 正会員 小峯秀雄

茨城大学 正会員 村上哲

1. はじめに

軟弱性地盤に対する補強対策に適用する地盤改良技術の高度化には、土の水理モデルの構築が欠かせない。土は、しばしば球形粒状体の集合体に近似して取り扱われる。この粒状体は様々な大きさ(粒径)から成り、自然な土ではその分布は確率分布の一つである対数正規分布に近い¹⁾ことが判明している。筆者は、グラウチングに関する理論モデルの構築を検討している。その検討の中でグラウチングの対象を土とする場合、その粒径分布は間隙の分布と密接な関係があると推察されるため、粒径分布と透水性の関係についての評価が重要である。したがって、土の透水係数に関するモデルとその粒径分布との関係を理論的に把握するとともに、そこからの土の透水係数の理論値と実測値の整合性に関する特性およびその要因について考察を行った。

2. 土の透水係数モデルに関する粒径分布との理論的な関係

土の透水性係数は、土粒子間の間隙の大きさに支配されるものと想定し、これと密接な関係にある代表粒径により表す試みは従来から行われている²⁾。筆者も、土の間隙における通水経路を、図-1に示す通りある水理的等価管径を有する屈曲した管路の集合と仮定した場合の透水係数モデルを想定した。この等価管径の1/2は土の間隙率と土粒子の粒径から式(1)で表される³⁾。この関係を用いて、土の透水係数は式(2)で示される³⁾。

$$a = \frac{n_e d}{3(1-n_e)} \quad \cdots (1) \quad k = \frac{n_e^3 g d^2}{72 \xi^2 (1-n_e)^2 v_w} \quad \cdots (2)$$

ここで、 a は土の間隙に関する水理的等価管径の1/2、 n_e は土の有効間隙率、 d は土の代表粒径、 k は土の透水係数、 ξ は土の屈曲度(以降の計算では $\xi = n_e^{-0.82}$ とした⁴⁾)、 v_w は水の動粘性係数、 g は重力加速度である。本式において、土の代表粒径(d)は土の粒径分布に関連すると考えた。土の様々な粒径に対応し、間隙も様々な大きさのものが存在する。この間隙がどのよう

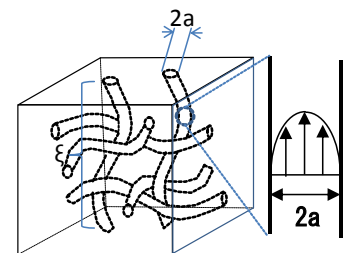


図-1 土の透水モデル概念

に連続していくかを想定することにより、代表粒径の表し方が変化する。ここでは、個々の管径が直列的または並列的に連続するとしたケースを考えた。透水係数理論値には、式(2)から代表粒径の2乗に係るため、本値を土の粒径分布の確率分布に基づき式(3)および(4)で表される期待値として得た。

$$d_{\text{syn-s}} = \sqrt{\left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{x^2} g(x) dx \right)^{-1}} = \sqrt{\left(\exp \frac{1}{2} (16\sigma^2 - 4\mu) \right)^{-1}} \quad \cdots (3) \quad d_{\text{syn-p}} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} x^2 g(x) dx} = \sqrt{\exp \frac{1}{2} (-8\sigma^2 + 4\mu)} \quad \cdots (4)$$

ここで、 $d_{\text{syn-s}}$ 、 $d_{\text{syn-p}}$ は、それぞれ直列型、並列型としての代表粒径である。 $g(x)$ は土の粒径と粒子個数割合に関する確率密度関数であり、 x は粒径(確率変数)である。この関数は、上述の通り粒径と累積重量割合の関係を対数正規分布とした場合の平均値 μ と標準偏差 σ を用いて式(5)に表される。また、上記の二種の代表粒径に関し両者の比は式(6)となり、平均粒径によらず標準偏差のみが関係する。直列型、並列型の代表粒径に対応する透水係数の理論値を $k_{\text{syn-s}}$ 、 $k_{\text{syn-p}}$ として、これらの比は図-2に示す通りとなる。標準偏差が0.4程度までは並列型が直列型に対する比は2倍程度以下であるが、それ以上では指数関数的に並列型の方が大きくなる。

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - (\mu - 3\sigma^2)}{\sigma} \right)^2 \right) \quad \cdots (5) \quad \frac{d_{\text{syn-p}}}{d_{\text{syn-s}}} = \sqrt{\exp(4\sigma^2)} \quad \cdots (6)$$

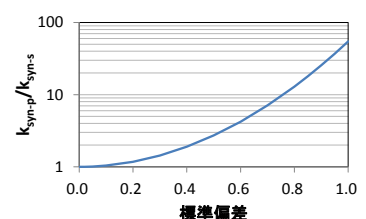


図-2 並列型と直列型の比

キーワード 透水係数, 粒径分布, 対数正規分布, 代表粒径, 直列・並列モデル

連絡先 〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3 東京電力株式会社建設部 TEL.03-6373-1111

3. 透水係数理論値の実測値との整合性に関する評価

土試料の透水係数実測値への理論値の整合性について調査した。使用した試料の粒径分布は図-3に示す通りであり、S-1, S-2は粗粒分(>75 μm)が多く、S-5, S-6は細粒分(<75 μm)が多い。S-3はそれらの中間的で均質的な粒径分布である。S-4は細粒分から粗粒分にかけて粒径分布の幅が大きい。同図中の破線は、最小二乗法によりフィッティングした対数正規分布確率密度関数の累積確率値である。また、試料の透水性とその粒径分布の特性値(D_{50} , D_{20})との関係を、図-4に示す。これらの関係には両対数軸において弱い線形性が見られる。

上述の式(2), (3)により求められる粒径および累積重量割合、累積粒子数割合に関する分布の中央値に相当する粒径を代表粒径とした時の透水係数の理論値の実測値に対する比について、標準偏差との関係を図-5に示す。本図では、標準偏差が1程度までの範囲では、並列型の代表粒径による透水係数の理論値が、実測値との整合性が高い。一方、それ以上の標準偏差においては、理論値の実測値との乖離が大きくなる。また、本図には、標準偏差が0.05~0.55にあるガラスビーズを用いた供試体の透水係数測定値⁵⁾に対する理論値の傾向線(上:並列型, 下:直列型)を併せて示した。これは、標準偏差が0.4程度の土試料の両型の値と整合的である。

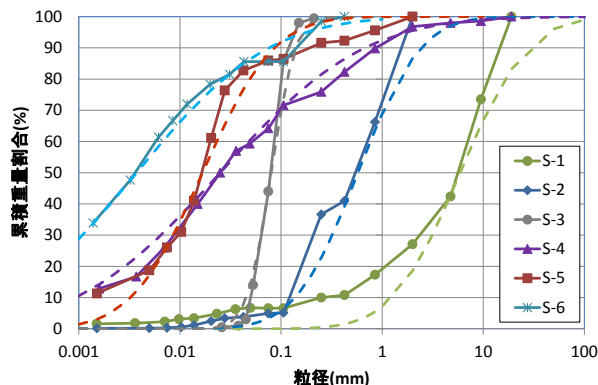


図-3 土試料の粒径分布 (累積重量割合)

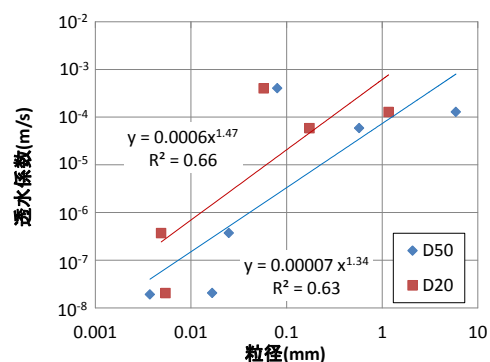


図-4 粒径の特性値と透水係数の関係

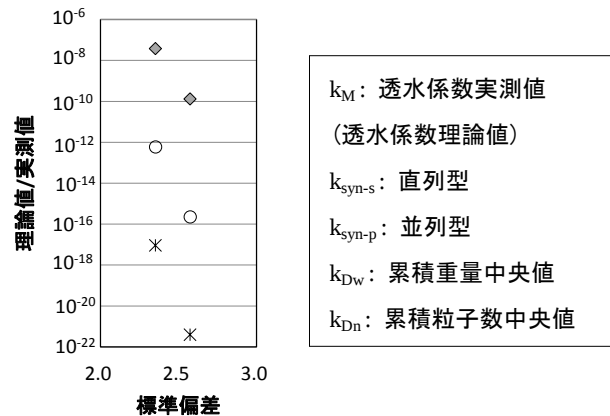
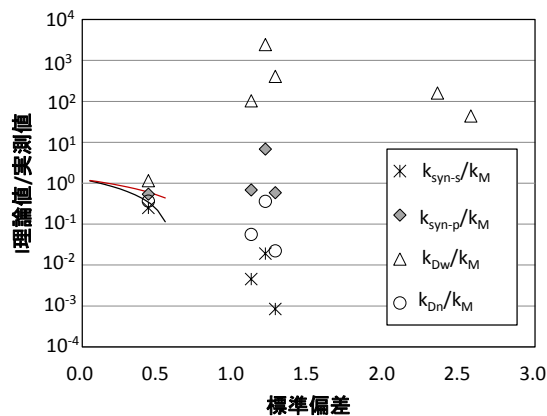


図-5 土試料の透水係数に関する理論値と実測値の比の標準偏差との関係

4. 考察と今後の課題

粒径分布の主範囲が広くその標準偏差が大きい土では、透水係数の理論値と実測値との整合性が低い。これは、土に想定した透水形態が実際は異なるためと推定される。理論値の方が小さい傾向にあるため、実際の土では、想定したように大小の間隙が万遍なく透水経路として機能するのではなく、比較的大きい間隙が選択的に透水経路になると推定される。また、細粒土粒子の団粒化による見かけ上の土の粗粒化も要因の一つと想定される。今後は、土中の具体的な浸透経路を把握する調査およびその結果を踏まえた理論の構築が必要である。

参考文献 1) 例えば、陶野:砂質堆積物の粒度試験,第14回土質工学研究発表会講演概要集,1979,pp.129-132.

2) 例えば、工藤他:粗粒材の飽和透水特性に関する実験的検討,土木学会論文集 No.715/III-60,pp.187-199,2002.

3) 岸他:非ニュートン流体の粘性特性を有するグラウト注入に関する一考察,土木学会第68回年次学術講演会 III-226,pp.451-452,2013.

4) 廣野他:間隙水の物性変化による移流・拡散現象の遅延効果,応用地質,第45巻,第3号,pp.118-124,2004.

5) 武内:確率モデルによる多孔体内の流れのシミュレーション,土木学会論文報告集,第187号,pp.79-93,1971.