

原位置透水試験機能を有する CPT の開発

九州大学工学部 学○大場 慎治

九州大学大学院 F 落合 英俊 正 安福 規之

九州大学大学院 正 大嶺 聖 正 小林 泰三

1. はじめに

原位置における地盤の透水係数の評価手法としては、従来からボーリング孔や井戸を利用した単孔式透水試験、および揚水試験などが行われてきた。これらの方法は広い領域の平均的な値を求めることに適した試験法といえるが、一般に装置や試験方法が大掛かりになることが多い。近年、地盤環境問題への関心の高まりから、地盤内の汚染物質の検出やそれらの移流・拡散を支配する透水性の把握が求められるようになり、簡便かつピンポイントに調査できる原位置試験法の開発が望まれるようになった。

そこで著者ら^{1),2)}は、透水試験と土壌・地下水サンプリングを同時に行える試験装置の研究・開発を進めている。本研究では、簡便性の高いコーン貫入試験(CPT)に地下水を揚水する機能を付与することによって、ピンポイントでの多点計測を可能とする試験法の開発を目指している。従来の CPT 機能との融合も可能となり、汚染物質とそれが存在する地盤の透水性、土質判別、変形・強度特性などを同時に評価できる試験法になると期待している。本報告では、そのうちの透水試験機能に注目し、透水係数推定の原理を説明するとともに、模型実験を行ったので紹介する。

2. 透水係数の推定法

Darcy の法則に示されるように、流速(又は流量)は水頭差と透水係数によって定まる。つまり、透水係数を求めるためには流速と水頭差を把握すればよい。本研究では図 1 に示すように、コーンの先端付近に設置したフィルターを介して地下水を定常的に揚水し、そのときの負の過剰水圧 Δu と流入量 Q を計測する機能を付与したシステムを提案する。 Δu を水頭表示で $\Delta u/\gamma_w = \Delta h$ (水頭差)とした場合、 Δh と Q は地盤の透水係数 k を反映したものととなり、 $(\Delta h, Q)$ と k を関連付ける理論モデルを導くことによって、計測データから透水係数を逆推定することが理論的に可能となる。

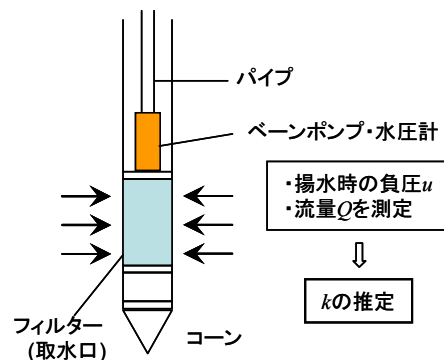


図 1 CPT を用いた透水係数推定法

3. 有限要素法による透水係数推定のための理論モデル

ここでは $(\Delta h, Q)$ と k を関連付けるために行った有限要素解析について述べる。CPT のロッドに設置した円筒形フィルターにより揚水した場合、流れ場は軸対称に形成されると考えられる。本研究では (r, z) 基礎方程式として、Darcy の法則と連続の式から得られる Richards の式を軸対称で表した次式を用いた。

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \left(k \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial h}{\partial z} + k \right) = 0 \quad (1)$$

ここに、 k : 透水係数、 h : 圧力水頭である。本報告では(1)式を後述する模型実験装置の境界条件のもと、有限要素法を用いて、フィルター部における $(\Delta h, Q)$ と k との関係を理論的に求めた。計算で得られた水頭差 Δh と流量 Q の関係を図 2 に示す。この図から、水頭差 Δh と流量 Q の関係は原点を通る直線関係となり、その傾き $Q/\Delta h$ はフィルターの大きさを固定すると、 k のみに依存することが分かる。種々の透水係数、境界条件で数値計算を行った結果、 k と $Q/\Delta h$ は線形関係にあり、次式のように表せることが分かった。

$$k = \alpha \cdot \frac{Q}{\Delta h} \quad (2)$$

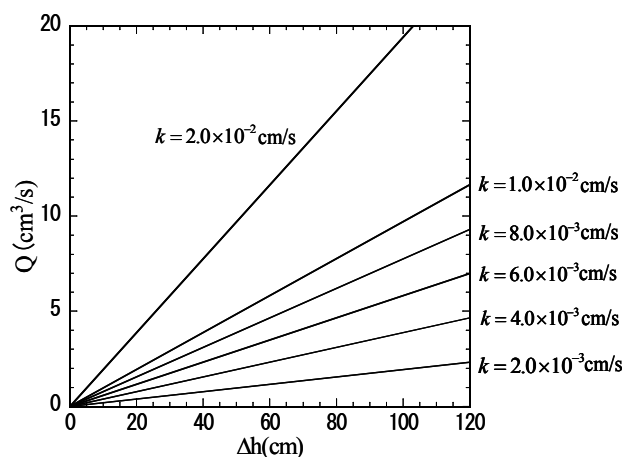


図 2 Q と Δh の関係(理論解析結果)

ここに k : 透水係数(cm/s)、 α : 比例定数(1/cm)、 Q : 流量(cm³/s)、 Δh : 水頭差(cm)である。なお、比例定数 α は、フィルターの大きさ(外径、高さ)によって決まる値である。後述する模型実験で用いたフィルター(外径:30mm、高さ:40mm)の場合では $\alpha=0.103$ (1/cm)である。この式から分かるように、フィルター部で計測されたデータの比 $Q/\Delta h$ に理論解析で得られた α を掛けることで、直ちに k を求められることになる。今回は模型実験装置に応じた境界条件での計算結果のみを示したが、半無限地盤を想定する場合には、揚水口に対して解析領域を十分広く取り、その解析境界面には静水圧のみが作用するとして計算を行えばよい。

4. 模型實驗

提案する($\Delta h, Q$)と k を用いた推定法の妥当性を検証するために図3のような模型装置を用いて実験を行った。模型地盤には、高さ:1000mm、内径:1000mmの円筒チャンバーを使用した。チャンバーの周面および底面には十分な透水性を確保しているため、水は地盤内に自由に流入できるようにになっている。揚水コーンは外径:30mm、フィルター高さ:40mmのものを使用し、地盤中央にフィルターが位置するまで貫入して実験を行った。揚水コーンには水圧計と小型ベーンポンプが内蔵されており、水圧測定と揚水が可能となっている。本実験では流量計を設置していないため、チューブ先端から流出する水量を一定時間計測して流量を求めた。ただし、チューブの先端は水槽内の水位と一致させてあり、水圧計には過剰水圧のみが検出されるようになっている。実験では珪砂($D_{50}=0.41\text{mm}$ 、 $D_{10}=0.18\text{mm}$)を使用し、空中落下法によって模型地盤を製作した。

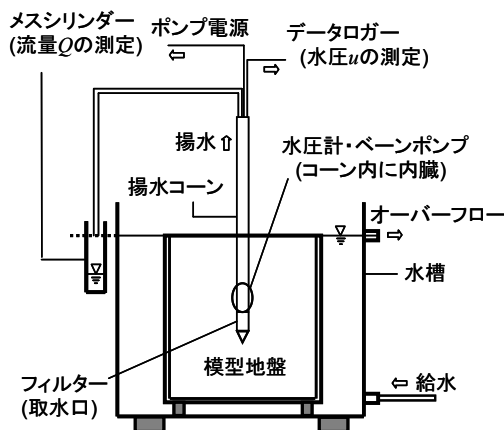


図3 模型実験装置の略図

5. 推定法の妥当性の検証

図4はベーンポンプの出力を変化させ、様々な水頭差 Δh のもとで測定された流量 Q の実験結果である。この図から、模型実験においても理論解析と同様に Δh と Q の間に線形の関係があることが確認できる。今回の実験では、線形関係を近似した直線勾配が $Q/\Delta h = 0.111(\text{cm}^2/\text{s})$ となった。これは、任意のベーンポンプ出力に対する揚水量の比が常に一定になることを意味し、 $0.111(\text{cm}^2/\text{s})$ はその最確値を表している。この値を(2)式(ただし $\alpha = 0.013(1/\text{cm})$)に代入すると、推定値 $k = 1.14 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ を得た。推定値の妥当性を検証するため、模型地盤の密度を再現した試料を用いて定水位透水試験(JIS法)を行った結果、 $k = 1.18 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ を得た。このように推定値と良い一致が見られ、今回提案する手法は精度よく透水係数を推定できる可能性があることが分かった。

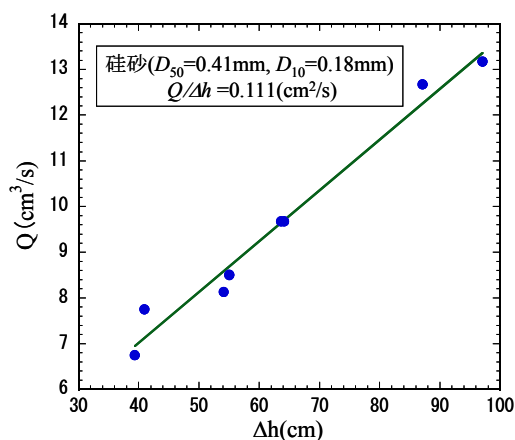


図 4 O と Δh の関係(実験結果)

6. まとめ

本報告では、CPT に揚水機能を付与した原位置透水試験法を提案した。解析の基礎方程式として Richards の式を利用し、図 3 の模型装置の境界条件で有限要素法により計算した結果、理論上 k と $Q/\Delta h$ を関連付けることができ、計測データの比 $Q/\Delta h$ に比例定数 α を掛けることで、直ちに k を推定することができる(2)式を得た。この理論式は実験結果と良い一致を示し、提案した手法によって精度よく k を推定できる可能性があることが分かった。今後は他の試料での模型実験データを蓄積するとともに、将来的には原位置での試験、従来の CPT 機能との融合についても研究開発を行っていく。

〔参考文献〕

- 1) T.Kobayashi, H.Ochiai, N.Yasufuku, K.Omine, M.Kajiki and T.Katumi : Development of an In-Situ Testing Device for Hydraulic Conductivity Measurement in Sands, Proc. of 5th International Congress on Environmental Geotechnics, Cardiff, UK, (submitting).
- 2) 小林泰三、落合英俊、安福規之、大嶺聖、梶木雅文、石森洋行:原位置透水試験機能を有するCPTの開発に向けた基礎的研究、第40回地盤工学研究発表会、地盤工学会、函館、C-03、pp.51-52、2005.