# 簡易な原位置透水試験機の開発に向けた基礎的研究

九州大学工学部　正○梶木雅文　九州大学大学院　F　落合英俊
九州大学大学院　正　安福規之　正　大嶺　聖　　正 小林泰三

## 1.はじめに

近年、地盤環境への関心の高まりから、地盤内での汚染物質などの移流や拡散を予想するためには、原位置における精度の良い透水係数の把握が重要となってくる。原位置における透水試験法は、井戸・観測井を用いた揚水試験やボーリング孔を用いた単孔式透水試験などがその代表的手法として挙げられる。しかし、これらの方法は、コストや手間が掛かることや、試験・装置が大掛かりであることなどから、測定地点数が限られる。そこで、本研究では、簡便性で有為なコーン貫入試験（CPT）に着目し、新たな着想に基づく機能を付与することで地盤の透水係数を精度よく推定することのできる原位置透水試験機の開発を行っている。従来から、粘性土地盤においては、ピエゾコーンによる過剰水圧の消散試験を行い、圧密特性の一つとして透水係数が求められることがある。しかし、砂質土地盤では瞬時に過剰水圧が消散してしまうため、同様の試験は不可能である。そこで本研究では、砂質土地盤での透水係数の推定が可能なシステムの開発を目指す。本論文は、本研究における透水係数推定のアイデア・着想を述べるとともに、その妥当性を検討するための解析・模型実験を行ったので紹介する。

## 2. 透水係数推定のアイデア

前述したとおり、本研究では CPT を用いた透水係数の推定法を提案するものである。ただし、基礎的研究として、地下水面以下の飽和した地盤を想定する。ここで提案する透水係数推定の原理は次の通りである。

コーン先端から地下水の揚水を可能とし、同時に揚水時の水圧と流量を計測することができる CPT システムを作製する（**図-1**）。透水性のよい地盤では、揚水力（水圧 $u$）が小さくても大きい水量 $Q$ を揚水することが可能となり、逆に透水性の悪い地盤では、揚水力を大きくしなければ揚水量の確保は難しくなると考えられる。すなわち、この揚水量 $Q$ と揚水力（水圧 $u$）の組み合わせは、地盤の透水係数を反映するものであり、これらの関係を理論的に解くことによって、計測値($Q$ と $u$)からの透水係数の推定が可能となると考えた。

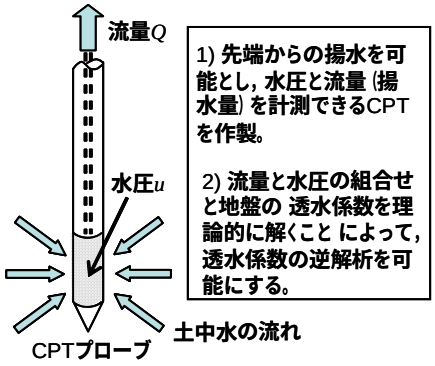



**図-1**　透水係数推定のアイデア

## 3. 推定法の妥当性の検討

本論文では、揚水機能を付与した CPT 装置の設計・作製に先立ち、上述したアイデアの妥当性を検証するために、コーン周辺の水の流れを単純化して、**図-2** に示すような模型装置を用いた二次元の平面流れ場による揚水実験を行った。本実験は、異なる透水係数を有する砂を土槽（高さ：1000 mm、横幅：600 mm、奥行き（土槽幅）：80 mm）に詰め、コーン先端部に見立てた揚水口（高：60 mm、幅 80 mm）からフィルターを通して水をポンプアップするものである。揚水中の水圧は揚水口近傍に取り付けた水圧計によって測定し、流量は揚水口からつながるタンクに水が一定量溜まる時間を測定して求める。また、地盤内の流線を把握するため、壁面の任意点からインクを流してその流れを観察した。実験では、透水係数の異なる地盤を作製するために、粒径の異なる三種の砂試料を用いた。なお、ここで作製した模擬地盤の透水係数は、別途、JIS 法に準拠した低

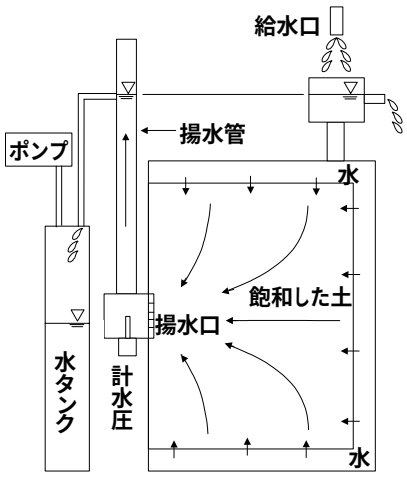



**図-2**　模型実験装置の概略図

水位透水試験によって求めた。

## 4. 揚水試験の理論的解析とその結果

ここでは、揚水試験で得られる計測データ($Q$ と $u$)と透水係数 $k$ の関係を理論的に導出する。本論文では、上述の実験条件を再現した境界条件のもと、有限要素法による解析を行った。解析には、オイラリアン・ラグランジアン法による浸透流・移流分散解析コード：Dtransu2D-EL[1)]を用いた。図-3(a)は、$k = 2.1\times10^{-2}$ cm/s の地盤に対して揚水試験を行い、インクの流れから読み取った流線をもとに描いたフローネットである。このとき、揚水口では $Q = 1.12$ $l$/min、$u = 15.4$ kPa なる実測値が得られた、同図(b)は、同一の $k$ のもと、揚水口と側壁との間にヘッド差 154 cm を与えて得られた地盤内の水頭分布の理論解析結果である。これらの図を比較して、図(a)、(b)ともに等ポテンシャル線が揚水口を中心に半円状で分布しており、理論解析によって計算される地盤内流れが、実験のそれを表現しうるものであることが分かる。

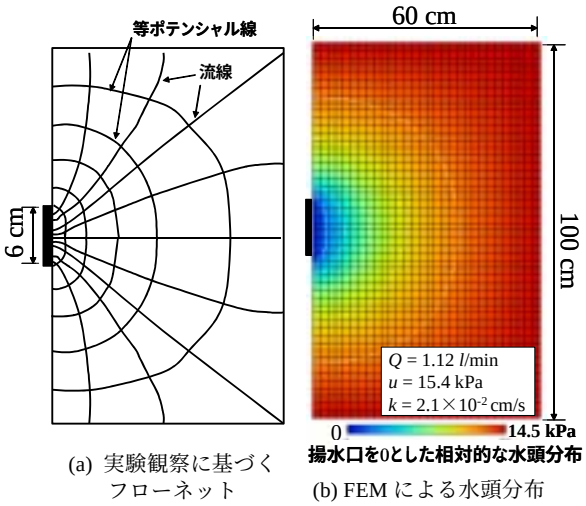
**図-4** は、理論解析の結果、種々の $Q$ と $u$ の組み合わせを実現するような $k$ の関係を図示したものである。この図から、揚水口における流量と水圧を計測することにより、直ちに地盤の透水係数の推定が可能になると考えられる。

## 5. 推定法の妥当性の検証

模型実験において種々の揚水力（水圧 $u$）を与えた結果、計測された $Q$ のプロットを**図-5** に示す。$Q$ と $u$ の組み合わせは、それぞれの砂試料で線形関係を示すことが明らかとなった。また、同図には、計測結果の条件を与えて得られた理論的関係も示している。**表-1** に示すように、本論文で提案する手法で推定された透水係数は、砂 A、B、C でそれぞれ、$4.5\times10^{-1}$、$4.0\times10^{-2}$、$1.3\times10^{-2}$ cm/s となり、別途、低水位透水試験で求められたそれと比較的良く一致することが分かる。すなわち、本実験で用いた二次元の模型実験では、揚水口の水圧と流量を計測することから、**図-4** に示すダイヤグラムを用いると直ちに透水係数が精度よく推定でき、本論文で提案する推定手法には、十分妥当性や適用可能性のあることが示された。今後、CPT の先端プローブからの揚水を想定し、軸対象あるいは球対象の流れ場を想定した計算手法の確立を経て、意**図-4** に相当する CPT に対する推定ダイヤグラムを提示していきたいと考えている。

## 6. おわりに

今後、実験データを蓄積し、本手法の妥当性をさらに検討するとともに、揚水機能を付与した CPT デバイスの製作を進めていきたいと考えている。




(a) 実験観察に基づくフローネット　(b) FEM による水頭分布

図-3　地盤内の水頭分布

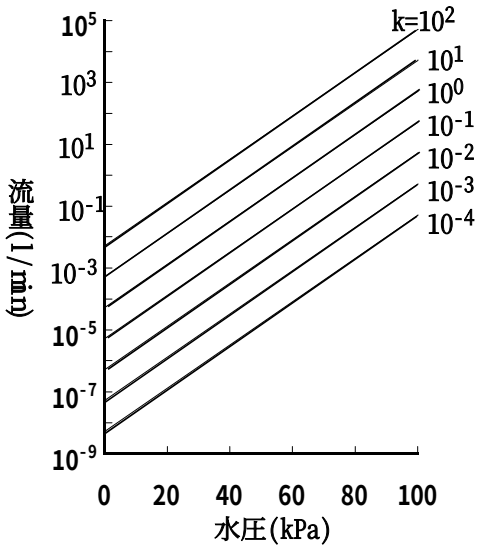



**図-4**　透水係数推定用ダイヤグラム

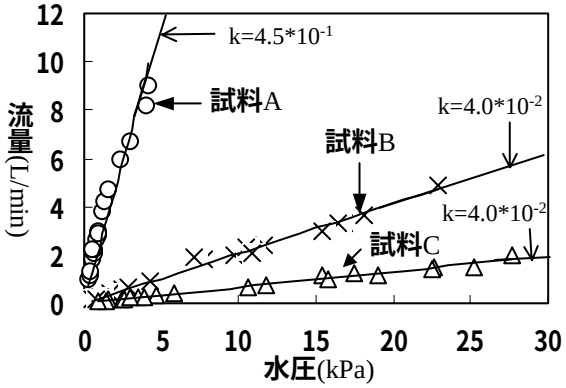



**図-5**　実験結果と透水係数のフィッティング

**表-1**　透水係数の比較

| | 定水位透水試験(cm/s) | 提案法による推定値(cm/s) |
|---|---|---|
| 試料A | $7.6\times10^{-1}$ | $4.5\times10^{-1}$ |
| 試料B | $3.1\times10^{-2}$ | $4.0\times10^{-2}$ |
| 試料C | $2.1\times10^{-2}$ | $1.3\times10^{-2}$ |

【参考資料】1) http://gw.civil.okayama-u.ac.jp:16080/gel_home/index.html