

透水異方性評価のためのダイポール・フロー透水試験の開発

Development of Dipole Flow Test for Estimate of Anisotropy of Hydraulic Conductivity

菱田 省一^{*}, 岩本 健^{**}, 井上 和明^{*}, 吉岡 正^{*}

ABSTRACT

We developed a new single borehole permeability test for in situ hydraulic anisotropy measurement. Recently the cross hole permeability tests have been used to estimate hydraulic anisotropy, but we developed the dipole flow test in a single borehole based on the theory of dipole flow (Zlotnik and Ledder(1996)). We verified the dipole flow testing tool and the propriety of this method at soft sedimentary rock. As a result of experiment, the tendency of drawdown measured in upper chamber and drawup measured in lower chamber were similar to theoretical curves. Anisotropy values evaluated from the dipole flow test were consistent with the results from hydro pulse tomography which is the cross hole method.

Key Words: dipole flow test, anisotropy of hydraulic conductivity, single-hole method, hydro pulse tomography

1 まえがき

地盤には地質構造に起因する透水異方性が存在することが知られており、一般的には地盤の透水性は透水テンソルとして表現される。透水テンソルを求める方法として、異なる方向のパスがとれる孔間式の透水試験(Hsieh and Neuman,1985等)が提案され、実施されている。しかし、この方法では複数のボーリング孔を必要とし、作業が煩雑となることから、簡便な単孔式による測定が望まれている。

単孔を用いて透水異方性を把握するにあたって、Zlotnik and Ledder(1996)等はダイポール・フロー理論(theory of dipole flow)を提唱している。この理論によれば、図-1に示すような、鉛直方向と水平方向の透水係数が異なる帯水層中で、孔内に2つの透水区間を設置して両区間間で地下水を移動させることにより、透水異方性(K_r および K_z)を把握できるとしている(図-1)。今回、この理論に基づく透水試験装置を開発し、その適用性の検討を行った。

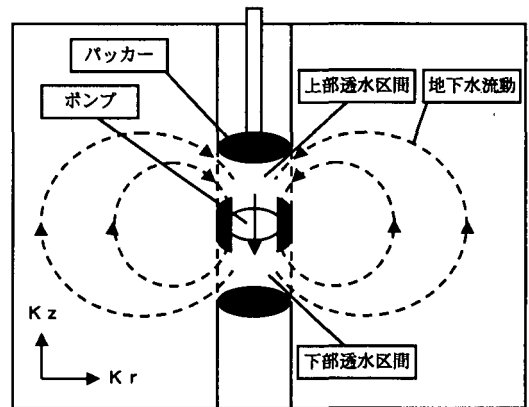


図-1 ダイポール・フロー透水試験概念図

2 ダイポール・フロー透水試験装置の概要

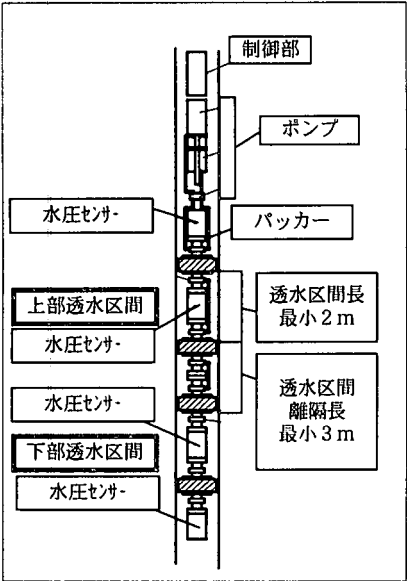
ダイポール・フロー透水試験装置は、孔内装置と地上制御装置から構成される。地下水を循環させるポンプを孔内装置に組み込んだことにより、孔内装置と地上制御装置間はケーブル1本のみで接続するため、注水および揚水のホースが不要となり、孔内装置の出し入れが簡便に行えるようにした。

また、ポンプは回転式のものではなく、シリンダーによるピストン方式を採用し、流量制御を正確に行えるよう工夫してある。

^{*} 正会員 応用地質株式会社 エネルギー事業部 地質技術部

^{**} 正会員 応用地質株式会社 エネルギー事業部 地盤物性部

図－２に孔内装置の構成図を、表－１に試験装置の仕様を示す。孔内装置には４つの遮水パッカーがあり、上部の２つのパッカーにより上部透水区間を形成し、下部の２つのパッカーにより下部透水区間を形成している。また、パッカーによる遮水を確認するために、最上部のパッカーの上方と最下部のパッカーの下方にも水圧センサーを配置している。



図－２ 孔内装置の構成図

表－１ 試験装置の主な仕様

項 目	仕 様
適用範囲	水平方向の透水係数 $K_r=1\times10^{-8}\sim1\times10^{-6}\text{m/s}$ の地盤
透水区間	パッカーにより設定。各区間を1m単位で設定可能。 最小透水区間長：2m 上部透水区間と下部透水区間の最小離隔長：3m
ポンプ	ピストン方式。流量を正確に制御。 流量範囲： $4\times10^{-3}\sim1\text{cm}^3/\text{sec}$ 切替バルブにより送水を一定方向に制御
水圧センサー	水晶発振式 測定範囲：0～13.7MPa (0～140kgf/cm ²) 分解能：水頭表示で0.014mm

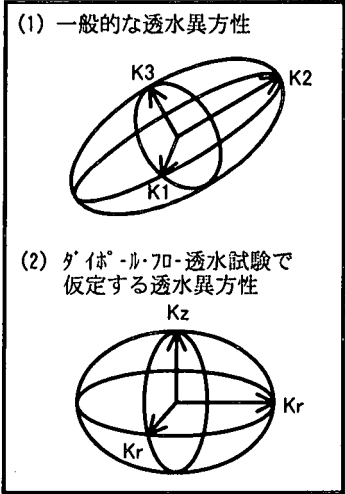
3 試験の原理と解析方法

a. ダイポール・フロー透水試験での透水異方性

透水性は一般的には透水テンソルとして表現され、6つの成分を有する。これは、互いに直交する3つの主方向と各方向の透水係数の大きさである（図－３の(1)）。これに対し、ダイポール・フロー透水試験では、以下のような透水性をもつ帯水層を仮定する（図－３の(2)参照）。

- ・ 水平方向の透水係数 K_r で、水平面内ではどの方向も同じである。
- ・ 鉛直方向の透水係数 K_z である。
- ・ 帯水層の透水性は一様である。

このような帯水層の透水異方性は、異方性比 a によって特徴づけられ、 $a^2 = K_r / K_z$ と定義される（本報告での透水異方性は、 a そのものではなく、 K_r / K_z や $\log_{10}(K_r / K_z)$ と表現した）。



図－３ 透水異方性の概念

b. 試験の原理

孔内に同じ長さの透水区間を2区間設置し、定流量で下部透水区間で注水し、上部透水区間で揚水を行うと、帯水層中に2つの極をもつポテンシャル場が形成される。この流動がダイポール・フローと呼ばれる(図-1)。

ダイポール・フローの理論は、Kabala(1993)や Zlotnik and Ledder(1996)により展開され、数値解析による検討が行われている。これらの研究によれば、透水区間の水圧は注水している下部透水区間では経時的に上昇し、揚水している上部透水区間では経時的に低下する。両透水区間のそれぞれの水圧は、最終的には一定値に収束する。この最終的な水圧と平衡水圧との差の絶対値は、どちらの区間でも同じ大きさとなる。仮に、水平方向の透水係数が同じであれば、鉛直方向の透水係数が小さいほど(異方性比が大きいほど)この水圧の差は大きくなる(図-4)。試験では、この水圧変化量を測定して、水平方向の透水係数 K_r および鉛直方向の透水係数 K_z を求める。また、併せて比貯留係数 S_s を求めることができる。

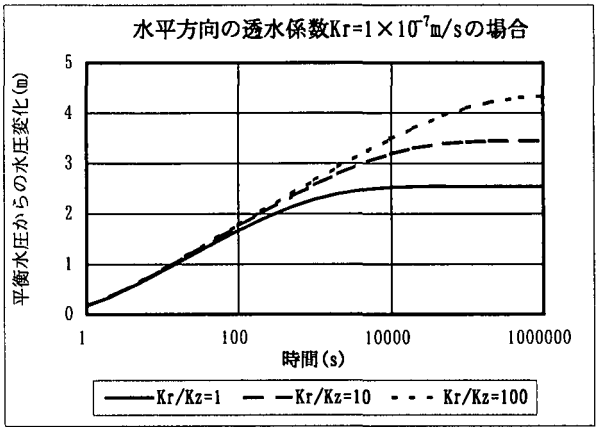


図-4 ダイポール・フロー透水試験時の水圧変化のタイプカーブ

c. 解析方法

解析は、Zlotnik and Ledder(1996)の理論に基づいた非定常解析法により行った。透水区間内の水圧変化 $S(t)$ は、以下のように導かれている。

$$S(t) = \frac{q\rho_w}{8\Delta} \left[2M_1\left(\frac{\rho_w^2}{\tau}, \frac{2\Delta}{\rho_w}\right) - M_1\left(\frac{\rho_w^2}{\tau}, \frac{2L-2\Delta}{\rho_w}\right) + 2M_1\left(\frac{\rho_w^2}{\tau}, \frac{2L}{\rho_w}\right) - M_1\left(\frac{\rho_w^2}{\tau}, \frac{2L+2\Delta}{\rho_w}\right) \right] \dots \textcircled{1}$$

$$\text{ここに、} \rho_w = \frac{r_w}{a}, \quad q = \frac{Q}{4\pi Kr \Delta}, \quad \tau = \frac{4K_z t}{S_s}$$

$S(t)$: 水頭表示の水圧変化量(m)

t : 時間(s)

K_r : 水平方向の透水係数(m/s)

K_z : 鉛直方向の透水係数(m/s)

S_s : 比貯留係数(m^{-1})

a : 異方性比 $a^2 = K_r / K_z$

$2L$: 2つの透水区間の中心間距離(m)

2Δ : 透水区間長(m)

r_w : ボーリング孔半径(m)

Q : 注水および揚水の流量(m^3/s)

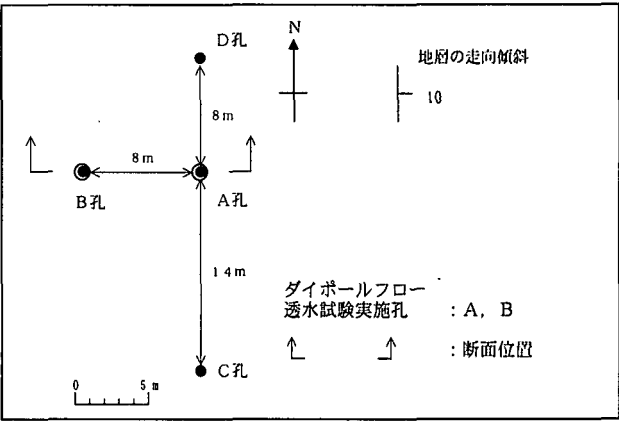
であり、 $M_1(u, x)$ は井戸関数の一種である。

①式は、試験条件に関するパラメータ(L, Δ, r_w, Q)を含んでいるが、これらは既知である。したがって、水理パラメータ(K_r, K_z, S_s)のみが未知量となる。透水区間の水圧変化の測定値から、適当な3つの(t, S)の組を選んで①式に代入すると、 K_r, K_z, S_s を未知数とする連立方程式となる。これを解くことにより、水理パラメータ(K_r, K_z, S_s)を得ることができる。

4 適用性の検討

a. ダイポール・フロー透水試験

図－5のA、B孔のそれぞれ3深度でダイポール・フロー透水試験を行った（透水区間長2m、透水区間離隔長3m、孔径76mm）。ボーリング調査結果によれば、試験位置には新第三系中新統の斜交葉理が卓越する粗粒砂岩が分布し、ほぼ南北の走向で東側に約10°で緩く傾斜する構造が認められる。また、下部ほど葉理が顕著である。ポアホールカメラ観察結果によれば、この粗粒砂岩には、開口した透水性割れ目は認められない。粗粒砂岩の透水性については、既往の透水試験により全域において $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ m/s}$ 程度の透水係数が得られている。



図－5 調査地点位置図

b. 透水異方性の確認方法

A、B孔間で、孔間試験としてパルス試験も実施した。孔間試験による値と比較することによりダイポール・フロー透水試験の妥当性の確認を行った。表－2にそれぞれの試験方法の特徴を示す。

表－2 透水異方性試験手法の比較

項目	ダイポール・フロー透水試験	パルス試験
測定	ボーリング孔	単孔式
	測定区間	孔間式
	測定値	注水側透水区間(I)、揚水側透水区間(I)
	現場作業	注水区間(I)、受圧区間(多連) (注水を複数孔、複数深度で行う)
解析	測定値	発信および受信区間の 流量および水圧の時系列データ
	現場作業	簡便
	送水方式	煩雑
	透水異方性	任意
長所	解析法	水平方向 K_r 、鉛直方向 K_z
	不均質性 得られる 物性値	主方向を固定した異方性
	不均質性 得られる 物性値	逆解析
長所	不均質性 得られる 物性値	考慮できない
	不均質性 得られる 物性値	考慮できる
	不均質性 得られる 物性値	全てのグリッドの K_x, K_y, K_z
長所	不均質性 得られる 物性値	・大深度での異方性の評価が簡単
	不均質性 得られる 物性値	・地下水を揚水し、これを再び注水 するため環境への影響が小さい
	不均質性 得られる 物性値	不均質な地盤に適用できる

・ K_r : 水平方向の透水係数
・ K_z : 鉛直方向の透水係数
・ S_s : 比貯留係数
・ K_x, K_y, K_z : 直交する3方向の透水係数

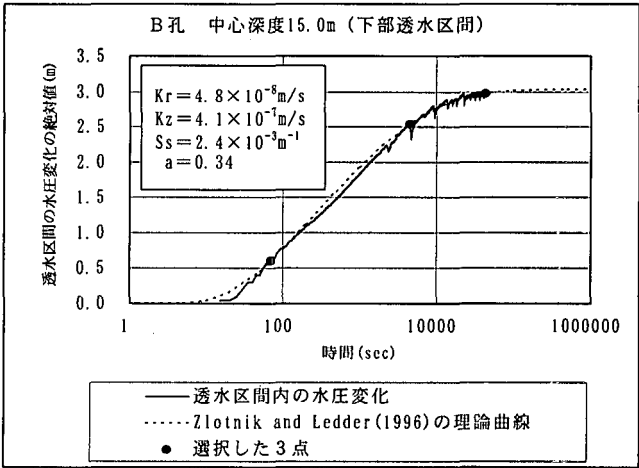
c. 試験結果

(1)測定結果

図－6の例に示したように、Zlotnik and Ledder(1996)の理論曲線（図中の3点を用いて計算により求めたもの）と実測値とは、ほぼ同じ形状となることが確認された。

(2)水平方向の透水係数

B孔の中心深度15.0mで実施したダイポール・フロー透水試験より水平方向の透水係数を評価したところ、既往の透水試験による透水係数とほぼ同様な値が得られた。他の5点においても、ダイポール・フロー透水試験による水平方向の透水係数は、既往の透水試験とほぼ一致した。



図－6 透水区間の水圧経時変化の例

(3) 透水異方性

図-7 に、ダイポール・フロー透水試験結果とパルス試験結果を示す。両試験の結果を比較するために、同深度の異方性比を平均して、その深度の代表値とした。ダイポール・フロー透水試験結果の平均値からは、深度の増加とともに異方性比が大きくなる傾向が認められ、パルス試験結果からも同様の傾向が認められた。これは、深部ほど薬理が顕著になるという地質状況に起因するものと考えられる。

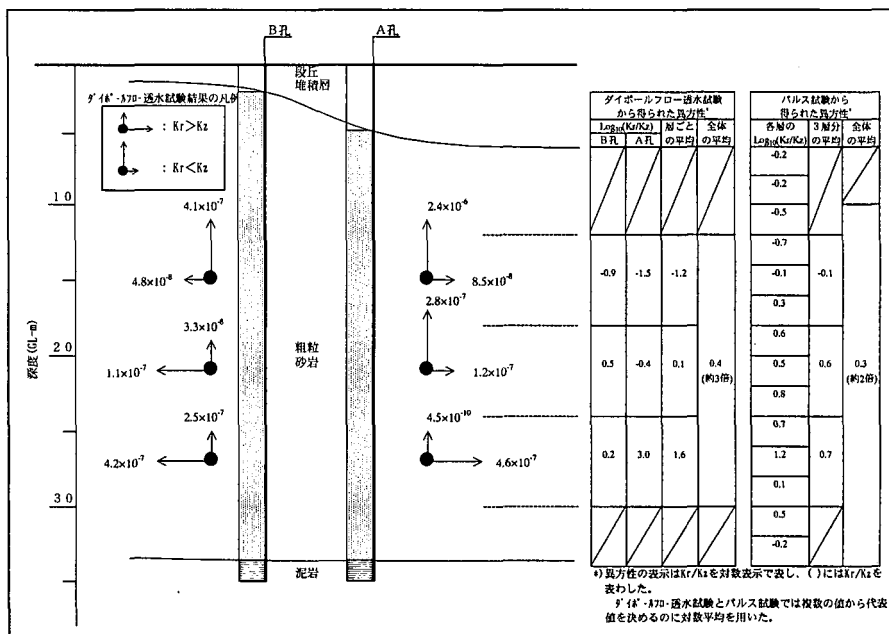


図-7 透水異方性試験総合結果図

さらに、ダイポール・フロー透水試験によって評価した粗粒砂岩全体の透水異方性を、パルス試験結果から評価したものと比較すると概ね等しい値となり、水平方向の透水係数は鉛直方向の透水係数の約2～3倍である。

5 まとめ

適用性の検討から、透水区間での水圧変化がダイポール・フロー理論から導かれる理論曲線と同様な形状となることを確認した。さらに、孔間試験（パルス試験）との比較から、透水異方性についてもほぼ同様な結果が得られており、開発した装置で簡便に透水異方性を把握できることが確認された。

今後は、さらに改良を加えつつ、この試験を適用できる条件を明らかにし、大深度への適用に取り組んでいきたいと考えている。

参考文献

- ① Hsieh,P.A. and Neuman,S.P.(1985); Field Determination of the Three-Dimensional Hydraulic Conductivity Tensor of Anisotropic Media: 1.Thory, Water Resources Research, Vol.21,No.11,p1655-1665
- ② Hsieh,P.A., Neuman,S.P., Stiles,G.K. and Simpson,E.S.(1985); Field Determination of the Three-Dimensional Hydraulic Conductivity Tensor of Anisotropic Media: 2.Methodology and Application to Fractured Rocks, Water Resources Research, Vol.21, No.11,p1667-1676
- ③ Kabala,Z.J.(1993); The Dipole Flow Test : A New Single-Borehole Test for Aquifer Characterization, Water Resources Research,Vol.29,No.1,p99-107
- ④ Zlotnik,V. and Ledder,G.(1996); Theory of dipole flow in uniform anisotropic aquifers, Water Resources Research, Vol.32,No.4,p1119-1128