

III-406 クロスホール試験による岩盤透水係数の三次元異方性評価に関する検討

清水建設(株) 大崎研究室 正会員 ○ 奥野 哲夫

1. はじめに 最近、ジオトモグラフィに代表されるように、各種の試験をボーリング孔間で実施し、その間の地盤物性を推定する試みが行われている。一般に、これらの手法は地盤物性の不均質性を評価することを目的としているが、本研究では岩盤透水係数の異方性を評価することを目的としてHsiehら^{1),2)}が提案したクロスホール試験について検討を行ったので、その結果を報告する。

2. クロスホール試験 Hsiehらが提案したクロスホール試験は、試験領域の地盤を三次元均質異方性媒体(多孔質体)に近似することを目的とする試験で、近似可能な場合は透水テンソルと比貯留量が算定できる。その実施方法は、複数のボーリング孔に注入区間と水頭観測区間を配置し、一定流量を注入しながら観測区間の水頭増加量の経時変化を観測するもので、6方向以上の観測結果を理論曲線とフィッティングして水理定数を求める。

Hsiehらは理論曲線のフィッティングに、その漸近特性から注入・観測区間とも点と仮定した解を用いることを提案している。図-1は理論解の誘導に用いた注入・観測区間を示しており、CASE I は共に点と仮定したもの、CASE II は共に有限長さの線と仮定したものである。図-2にはこれらの理論曲線を示しており、横軸は無次元化した時間 t_D を、縦軸は無次元化した水頭増加量 Δh_D を示している。なお、これらの無次元量は次式で与えられるものである。

$$t_D = K_d(e) t / (R^2 S_s) \quad \Delta h_D = (4\pi R \Delta h / Q) \cdot [D / K_d(e)]^{1/2}$$

ここに、 t :経過時間(T), Δh :水頭増加量(L), $K_d(e)$:注入区間と観測区間を結ぶ方向の透水係数(L/T), S_s :比貯留量(1/L), R :注入区間から観測区間までの距離(L), Q :注入量(L³/T)である。また、理論式には以下のパラメータ α_1, β_1 が含まれている。

$$\alpha_1 = (2R/L) \cdot [K_d(e_l) / K_d(e)]^{1/2} \quad \beta_1 = (2R/B) \cdot [K_d(e_b) / K_d(e)]^{1/2}$$

ここに、 L :注入区間長(L), B :観測区間長(L), $K_d(e_l)$:注入区間の長さ方向の透水係数(L/T), $K_d(e_b)$:観測区間の長さ方向の透水係数(L/T)である。図-2より、 $\alpha_1, \beta_1 \rightarrow \infty$ のときCASE II はCASE I の理論解に漸近し、約5.0以上でCASE I の理論解に一致している。

図-3にはCASE I の理論解を用いた算定方法を示している。まず、CASE I の理論曲線を作成し、 α_1, β_1 が5.0以上になるように試験計画で R, L, B を設定する。しかし、これには $K_d(e_l)/K_d(e)$, $K_d(e_b)/K_d(e)$ が必要となるが、これらは試験前には未知数である。そのため事前情報からこれを仮定し R, L, B を設定する。次に試験を実施しCASE I の理論解を用いたフィッティングから最小二乗近似により水理定数を算定する。その結果から再度 α_1, β_1 を算定し、これらが5.0以上になっていれば、先の仮定ならびに求めた水理定数は妥当なものと判断される。

3. 算定方法の改良 以上の算定方法では、再度求めた α_1, β_1 が5.0以下になった場合、その観測結果を水理定数の算定に用いることができない。また、このデータを用いた場合は算定精度が低下し、観測結果を有効に利用できない。本研究ではこの点を解決するため水理定数の算定方法を改良し、その確認を行った。その方法は図-3のように、まずHsiehらの方法で水理定数を求め、 α_1, β_1 が5.0以下になった観測結果については、

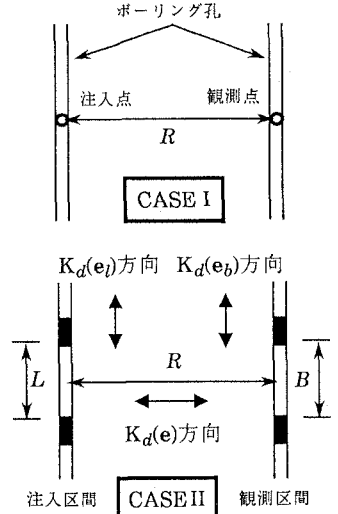
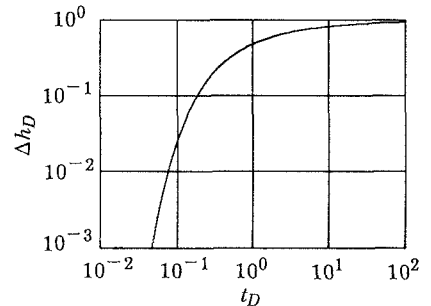
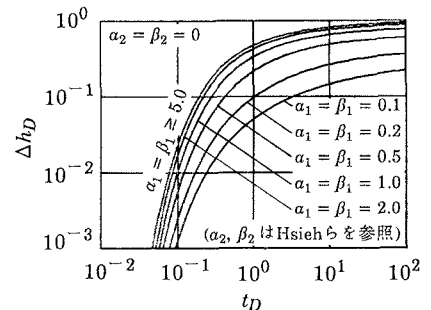


図-1 理論解の誘導条件



(a) CASE I の理論曲線



(b) CASE II の理論曲線

図-2 理論曲線

その α_1, β_1 を用いてCASE IIの理論曲線を作成し再度フィッティングを行う。その結果と他の結果を合わせて最小二乗近似を行い水理定数を算定する。そして全観測区間について再度 α_1, β_1 を計算し、前回との差 $\Delta\alpha_1, \Delta\beta_1$ を求める。この差が十分小さくなる ($\Delta\alpha_1, \Delta\beta_1 < \varepsilon$) まで、以上の過程を繰り返す。この計算により、フィッティングに用いた α_1, β_1 と算定されたそれとが一致し、妥当な水理定数が得られる。本研究では $\varepsilon = 0.01$ とし、以上の手順を自動プログラム化して人為的誤差の除去と計算の効率化を図った。

4. 検討方法 本手法の精度を確認するため、CASE IIの理論解から水頭増加量 Δh を求め模擬観測データとした。その条件は三次元均質異方性媒体として表-1に示す3ケースの透水係数を設定し、このような媒体中に図-4に示す1つの注入区間と9つの観測区間を配置した。ここで透水係数の主軸は図-4の x, y, z 軸に一致するものとし、また $L=B$ として表-2に示す3ケースの区間長を設定した。以上の透水係数と区間長の組合せから合計9ケースの模擬観測データを作成した。以下ではCaseAの透水係数とCase1の区間長の組合せで作成した模擬観測データは、CaseA1のように表記する。以上の条件で作成した模擬観測データから、両手法を用いて水理定数を算定しその精度を確認した。なお、Hsiehらの方法では α_1, β_1 が5.0以下になる観測データも用いて算定した。

5. 検討結果 両手法から求めた透水テンソルの算定誤差 E_k を次式で評価した。

$$E_k = [|D_E| / D]^{1/3} \quad D_E = \det(K - K_C) \quad D = \det K$$

ここに、 K ; 真の透水テンソル, K_C ; 算定した透水テンソルである。図-5には各ケースで9つの観測区間から求めた $\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1$ の平均値 $\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1$ と E_k の関係を示している。Hsiehらの方法を用いると $\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1$ が約5.0以上では E_k が約0.1以下であるが、5.0以下では徐々に E_k が増加する。これに対して本手法では $\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1$ が5.0以下でも十分な精度で透水テンソルの算定が行える。また、図-6には $\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1$ が5.0以下となるCaseC3について、両手法から算定した透水楕円形を示している。この図からも本手法により透水楕円形が精度よく求められることがわかる。

6. おわりに 本研究で改良した算定方法により、観測結果を有効に利用して透水テンソルを精度よく算定できることが確認できた。なお、比貯留量も十分な精度で算定できる。

- 参考文献 1) Hsieh P. A., Neuman S. P., Water Resour. Res., Vol.21, No.11, pp.1655-1665, 1985.
2) Hsieh P. A., Neuman S. P., Water Resour. Res., Vol.21, No.11, pp.1667-1676, 1985.

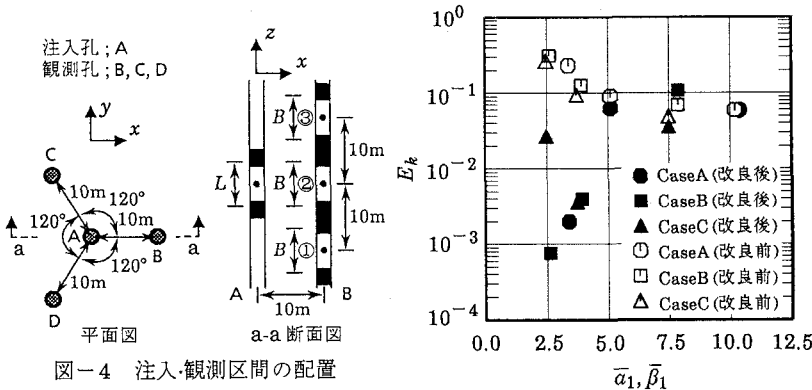
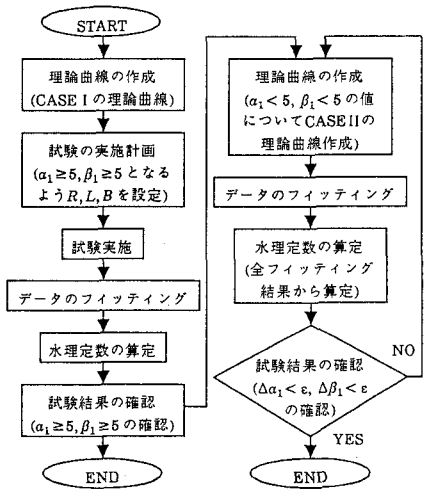


図-4 注入・観測区間の配置
(B,C,D孔とも同じ深度に観測区間を配置)

図-5 $\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1$ と E_k の関係



Hsiehらの方法

改良した方法

図-3 水理定数の算定方法

表-1 透水係数 (cm/s)

検討ケース	$K_1 (=K_x)$	$K_2 (=K_y)$	$K_3 (=K_z)$
CaseA	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
CaseB	2.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	0.5×10^{-6}
CaseC	5.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	0.5×10^{-6}

比貯留量は全ケースとも 1.0×10^{-8} (cm⁻¹)

表-2 区間長 (m)

検討ケース	区間長
Case1	2.5
Case2	5.0
Case3	7.5

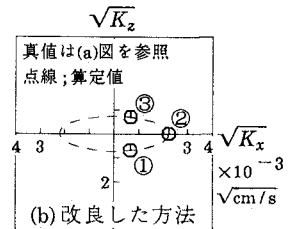
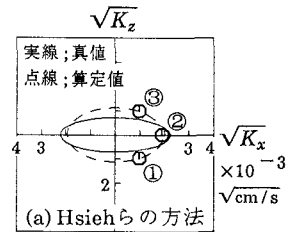


図-6 a-a断面の透水楕円形 (Case C3)