

二次元集中流実験地盤における透水係数の逆解析

Inverse analyses of permeability of test soil in two dimensional concentrated flow condition

田中 勉・○岩谷あゆみ・岩石早季子・石渡雅子・鹿島靖朗・井上一哉

Tanaka Tsutomu, Iwatani Ayumi, Iwaishi Sakiko, Ishiwatari Masako, Kashima Yasuro and Inoue Kazuya

1. 序論

異方透水性は地盤の浸透破壊に対する安定性に大きく影響する。ここでは、二次元集中流実験地盤について、目視法及び逆解析法を用いて、異方透水係数を算定した。また、実験における測定誤差の影響を取り除くために、5種類の残差処理法を用いて逆解析を行った。

2. 二次元集中流浸透破壊実験

二次元集中流浸透破壊実験装置を Fig.1 に示す。ここに、 H は水頭差、 T, D は下流側地盤層厚及び矢板の根入れ深さ、 d は掘削深さである。装置の背面には、間隙水圧測定用のピエゾメータ孔が 440 点設置されている。均一な細砂を用いて作製した地盤に、定水頭装置を用いて段階的に上下流に水頭差をかけてゆき、浸透流が定常になるのを確認して、地盤形状、間隙水圧、流量、水温を測定する。これまでに、条件を変えた 25 種類の実験 E0201~E0225 を行った。

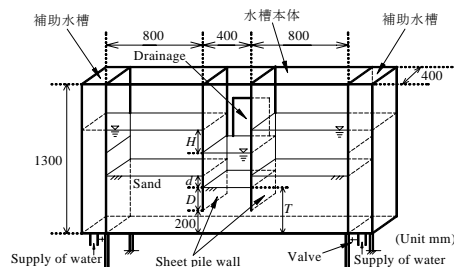


Fig.1 二次元集中流浸透破壊実験装置

3. 地盤の異方透水係数の算定方法

ここでは、地盤中の浸透流が安定した水頭差(限界水頭差の約 50%)における計測データを用いて、目視法及び逆解析法によって、地盤の異方透水係数を算定した。

3.1 目視法

目視法¹⁾では、 $k_{xz}=0$ と仮定し、鉛直方向の透水係数 k_{zz} を固定して、水平方向の透水係数 k_{xx} を順次変化させていったときの FEM 解析による等ポテンシャル線分布を求め、実験による等ポテンシャル線分布と最も良く一致するときの

k_{xx}/k_{zz} の値を、その地盤の異方透水性の値とする。Fig.2 に、E0224 について、実験と解析(目視法)による等ポテンシャル線分布を示す。両者は良く一致していることがわかる。

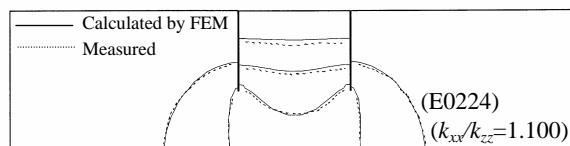


Fig.2 実験と解析(目視法)による等ポテンシャル線分布

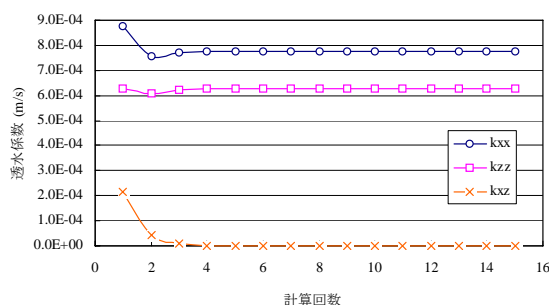


Fig.3 パラメータの収束の様子(E0223)

3.2 逆解析法

客観的に実験地盤の異方透水係数を求めるために、FEM 浸透流逆解析を行った。 x, z 座標における支配方程式(1)、及び、最小二乗条件式(2)に基づいて透水係数成分 k_{xx}, k_{zz}, k_{xz} を算定する。

$$k_{xx} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) + 2k_{xz} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x \partial z} \right) + k_{zz} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\sum_i^n w_i (h_i - \bar{h}_i)^2 + w_{n+1} (Q - \bar{Q})^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

ここに、 $i=1 \sim n$ は考慮節点、 h_i, w_i, Q は観測水頭値、重み、流量、上付きのバーは推定値を表す。

(1) **パラメータの収束** 初期値の逆解析結果への影響について考える。実験 E0223 の全データを用いた逆解析において、初期値として異方透水性($k_{mm}=1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, $k_{ss}=5.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, $\beta=30^\circ$)を与えた場合について、パラメータの収束の様子を Fig.3 に示す。ここに、 k_{mm}, k_{ss} は主透水係数、 β は主方向 n の x 軸となす角度である。Fig.3 から、

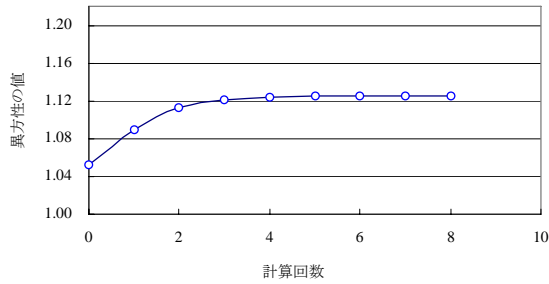


Fig.4 w法の異方性の値の収束の様子(E0223)

パラメータは効率よく収束し、 $k_{xz}=0.0$ である(透水係数主方向は x, z 軸と一致する)ことがわかる。

(2) 全データを用いた逆解析 Table 1に、E0201～E0225について、目視法及び全データを用いた逆解析結果を示す。実験により少しばらつきがあるものの目視法と比べて大きな差異はない。

3.3 残差処理法

実験における測定誤差の影響を取り除くため、残差 δ 、観測値の標準偏差 σ 、重み w としたとき、次の5つの残差処理法を用いて逆解析を行った。

(1) 絶対値基準による方法(δ 法)

$$|\delta| < \delta_0 \text{ のとき } w=1.0$$

$$|\delta| \geq \delta_0 \text{ のとき } w=0.0$$

(2) 水頭差基準による方法(β 法)

$$|\delta| < \beta H \text{ のとき } w=1.0$$

$$|\delta| \geq \beta H \text{ のとき } w=0.0$$

(3) 増山の棄却検定を用いる方法(α 法) 不良標本を X_0 とし他の n 個の標本を X としたとき、

$$t_0 = \frac{|X_0 - \bar{X}|}{\sqrt{s^2(n+1)/n}}$$

は、自由度 $n-1$ の t 分布に従う。ここに、 \bar{X} は標本平均、 s^2 は不偏分散である。仮説を「 X_0 と標本 X に有意差なし」としたとき、

$$t_0 < t_\alpha \text{ のとき 仮説採択}$$

$$t_0 \geq t_\alpha \text{ のとき 仮説棄却 } (X_0 \neq X)$$

とする。 t_α は有意水準 α 、自由度 $n-1$ に対応する t の値($\alpha = P(|t| \geq t_\alpha)$)である。

(4) 誤差行列の逆行列を重みとする方法(γ 法)

$$|\sigma| < \gamma \sigma_0 \text{ のとき } w = (1/\gamma)^2$$

$$|\sigma| \geq \gamma \sigma_0 \text{ のとき } w = (\sigma_0/\sigma)^2$$

(5) 重み関数を用いる方法(w 法) 例えば、 $\gamma=0.5$ に対応した重み関数は $w = 4e^{-u^2}$ と与えられる。

ここに、 δ_0 は絶対値基準の閾値、 β は水頭差基準の閾値係数、 α は有意水準、 γ は逆行列の重みのカット位置¹⁾、 w は重み関数である。 δ 法、 β 法、 α 法では不良データ節点を逆解析考慮節点から

Table 1 目視法、全データ及び w 法による k_{xx}/k_{zz} の値

実験番号	目視法	全データ	w法	平均値
E0201	1.190	1.180	1.208	1.193
E0202	1.190	0.990	1.065	1.082
E0203	1.170	1.100	1.144	1.138
E0204	1.150	1.120	1.126	1.132
E0205	1.160	1.100	1.130	1.130
E0206	1.160	1.150	1.166	1.159
E0207	1.160	1.120	1.157	1.146
E0208	1.160	1.110	1.117	1.129
E0209	1.100	1.030	1.110	1.080
E0210	1.220	1.190	1.208	1.206
E0211	1.200	1.190	1.199	1.196
E0212	1.190	1.120	1.138	1.149
E0213	1.213	1.235	1.216	1.221
E0214	1.203	1.194	1.198	1.198
E0215	1.193	1.132	1.159	1.161
E0216	1.177	1.153	1.143	1.158
E0217	1.210	1.180	1.185	1.192
E0218	1.177	1.183	1.174	1.178
E0219	1.357	1.332	1.025	1.238
E0220	1.133	1.061	1.080	1.091
E0221	1.082	1.010	1.064	1.052
E0222	1.409	1.387	1.374	1.390
E0223	1.210	1.237	1.147	1.198
E0224	1.100	1.052	1.125	1.092
E0225	1.217	1.210	1.180	1.202
平均値	1.189	1.151	1.154	1.164

除外し、 γ 法、 w 法では不良データ節点の重みを小さくする。Fig.4に、 w 法の異方性の値の収束の様子(E0223)を示す。残差処理法について、 δ 法では $\delta_0=1.5\text{mm}$ 、 β 法では $\beta=0.01$ 、 α 法では $\alpha=5\%$ 、 γ 法では $\gamma=0.5$ 、 w 法では $\gamma=0.5$ に対応する重み関数が最適であることがわかった。また、AIC情報量基準によると、5つの残差処理法では、 γ 法、 w 法が最適であることがわかった。Table 1に、 w 法による異方透水性の値 k_{xx}/k_{zz} を示す。Table 1から、実験地盤の k_{xx}/k_{zz} は、1.164(平均値)である。

2. 結論

二次元集中流実験地盤における透水係数の逆解析について考察を行い、次の結論を得た。(1) 目視法、逆解析によって得られた異方透水性の値は実験により少しばらつきはあるものの、いずれも大きな差異はない。(2) 逆解析において、パラメータ k_{xx} 、 k_{zz} 、 k_{xz} は初期値にかかわらず効率よく収束し、 $k_{xz}=0.0$ である。(3) 残差処理により測定誤差の影響を除外することができる。(4) 残差処理法では γ 法、 w 法が最適である。(5) 実験地盤の異方透水性の値 k_{xx}/k_{zz} は1.164である。

参考文献

- 1) 田中勉, 宇野健一, 田内憲一郎: 二次元浸透破壊実験における実験地盤の透水係数逆解析, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 第9号, pp.273-287, 2005.