



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

田中, 勉
宇野, 健一
田内, 憲一郎

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 9:273-286

(Issue Date)

2005-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00422542>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00422542>



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

Inverse Analysis of Soil Permeability in Two-Dimensional Seepage Failure Tests

田中 勉¹⁾

Tsutomu Tanaka

宇野 健一²⁾

Kenichi Uno

田内憲一朗³⁾

Kenichiro Tauchi

概要: 浸透破壊現象は異方透水性に大きく影響を受ける。したがって, 浸透破壊実験においては地盤の異方透水性を正確に把握する必要がある。ここでは, 二次元実験地盤の透水係数テンソルを求める方法について考察し, 実際に目視法及び逆解析法を用いて異方性の値を求めた。そして, 実験地盤には異方透水性があること, 透水係数テンソルの誘導成分 k_{xz} は $k_{xz} \approx 0.0$ であること, 目視法及び全データを用いた逆解析法による透水係数に関する異方性の値は, 実験によっては大きな差異があることが明らかとなった。差異の原因である観測誤差の影響を取り除くため, 4つの残差処理法: 「絶対値基準による方法(δ_0 法)」, 「水頭差基準による方法(β 法)」, 「増山の方法(α 法)」, 「誤差の逆行列を重みとする方法(γ 法)」を考案し, 実際に解析を行った。そして, $\delta_0 = 1.5\text{mm}$, $\beta = 0.005$, $\alpha = 5\%$, $\gamma = 0.5$ が最適であることがわかった。

キーワード: 二次元浸透破壊実験, 実験地盤, 透水係数テンソル, 異方透水性, 目視法, 逆解析

1. 序論

土構造物や地盤の浸透流について考えたとき, 透水係数の異方性は流量, フィルダムの下流側斜面の安定性, 地盤の浸透破壊などに対して大きな影響を与えることが知られている¹⁾。著者らは, 地盤の浸透破壊特性を明らかにするために一連の浸透破壊実験を行っているが²⁾, このような理由から, 実験結果の整理においては実験地盤の異方透水性を正確に把握しておく必要がある。異方透水性を正確に把握して始めて, 実験地盤の浸透破壊特性を正確に把握することができる。ここでは, 浸透破壊実験における実験地盤について, 透水係数テンソルを求める方法を考案し実際に目視法及び逆解析法を適用して透水係数に関する異方性の値を求めた。

2. 二次元浸透破壊実験

二次元締切り矢板のある地盤の浸透破壊メカニズムを明らかにするために浸透破壊実験を行った²⁾。二次元浸透破壊実験装置の概略図を Fig.1 に示す。Fig.1 において, T は地盤の層厚, D は矢板の根入れ深さ, H は矢板の前後にかかる水頭差を表す。実験では豊浦砂 2, 琵琶湖砂 2 を用いた。物理的性質を Table 1 に示す。Table 1 から, これらの試料は均一な細砂であるといえる。ここでは, これまでに行った 47 ケースの実験 E0001~E0047 (Table 2) に関して, 実験地盤の透水係数テンソル成分の求め方について考察し, 実際に透水係数テンソルを求めた。Table 2

Fig.2にE0009の浸透領域分割図を示す。境界を除くすべての節点にピエゾメータ孔が設置されており、ビニールチューブを介してオープン・ピエゾメータで全水頭値が読みとれるようになっている。ちなみに、この場合の節点観測値の数は152個である。Fig.3(a)にE0009における等ポテンシャル線分布を示す。ここで、実験による等ポテンシャル線分布は地盤中の浸透流が比較的安定したとき(破壊時水頭差の50%~60%の水頭差の段階)のものをを用いた。Fig.3(a)には、さらにFEM解析より得られた等ポテンシャル線分布等ポテンシャル線分布はほぼ一致していることがわかる。間隙比と透水係数の関係を用いて、地盤の間隙比からまた、Fig.3(a)からわかるように、実験より得られた等製されているものと考えられる。しかし、Fig.3(a)を詳細に広がっていることがわかる。これは、実験地盤の水係数よりも大きいことに原因があるものと考えられる。この異方性は、地盤を作製するときに、試料を何層かに分けて水槽に入れ、締固め棒を用いて突き固めて作るために鉛直方向と水平方向に透水係数の差異が生じたためであると考える。

3. 目視法による透水係数の算定

目視法とは、実験による等ポテンシャル線分布と、理論による等ポテンシャル線分布を比較し、目視によって地盤の透水係数の異方性の値を求める方法である。まず、実験地盤は、作製方法から判断して、鉛直方向 z と水平方向 x が主方向であると考え、透水係数の誘導成分 k_{xz} を $k_{xz}=0$ と仮定した。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に、FEM 解析によって求めた等ポテンシャル線分布が、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} をその地盤の異方性の値とする。ここでは、3名の者がそれぞれ、実験と FEM 解析による等ポテンシャル線分布が最もよく合

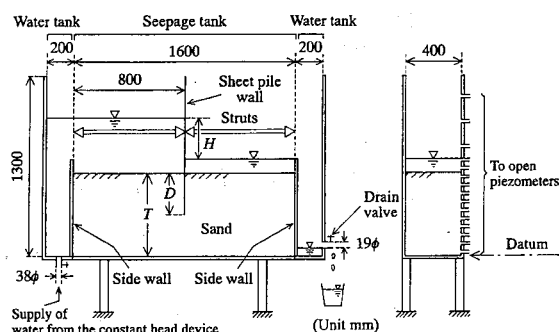


Fig.1 二次元浸透破壊実験装置の概略図

Table 1 試料の物理的性質

物理的性質	豐浦砂 2	琵琶湖砂 2
比重 G_s	2.647	2.677
均等係數 U_c	1.287	1.304
平均粒径 D_{50} (mm)	0.203	0.296
最大間隙比 $e_{\max}$	0.960	1.118
最小間隙比 $e_{\min}$	0.648	0.759
透水係數 k_{15}^* (cm/s)	0.0303	0.0845

* $D_r=50\%$ における 15°C 時の透水係数

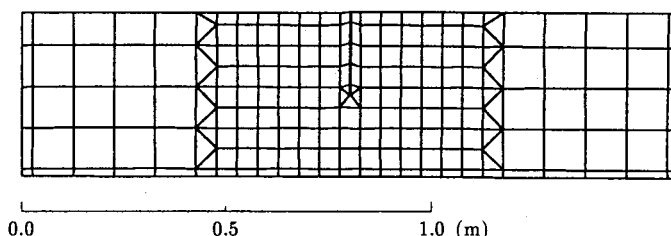
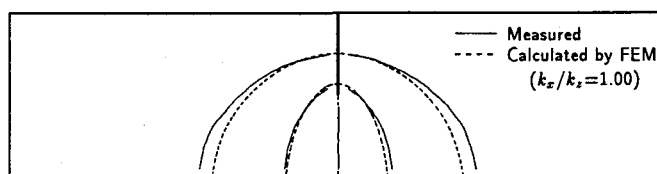
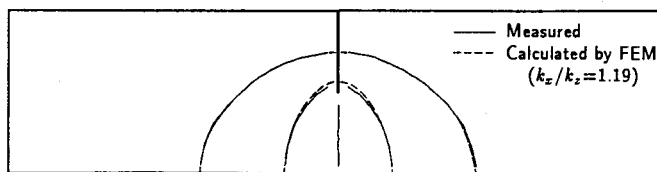


Fig.2 浸透領域分割図 (E0009)



(a) 実験と等方解析



(b) 実験と異方解析

Fig.3 等ポテンシャル線分布 (E0009)

Table 2 実験地盤の T , D , D/T , D_r 及び実験試料

実験番号	$T(\text{mm})$	$D(\text{mm})$	D/T	$D_r(\%)$	試料
E0001	453.99	139.69	0.3077	42.672	豊浦砂 2
E0002	443.35	129.08	0.2912	56.308	豊浦砂 2
E0003	443.60	129.18	0.2912	54.506	琵琶湖砂 2
E0004	514.88	200.35	0.3891	40.761	琵琶湖砂 2
E0005	408.85	109.05	0.2667	35.034	琵琶湖砂 2
E0006	450.55	150.75	0.3346	46.511	琵琶湖砂 2
E0007	303.13	102.53	0.3382	41.323	琵琶湖砂 2
E0008	351.09	150.49	0.4286	45.536	琵琶湖砂 2
E0009	399.08	198.48	0.4973	49.047	琵琶湖砂 2
E0010	448.80	248.20	0.5530	49.244	琵琶湖砂 2
E0011	499.79	299.19	0.5986	48.220	琵琶湖砂 2
E0012	404.70	204.10	0.5043	41.064	琵琶湖砂 2
E0013	414.80	214.20	0.5164	47.959	琵琶湖砂 2
E0014	397.88	197.28	0.4958	30.165	琵琶湖砂 2
E0015	402.39	201.79	0.5015	15.049	琵琶湖砂 2
E0016	402.83	202.23	0.5020	63.856	琵琶湖砂 2
E0017	415.75	215.15	0.5175	67.939	琵琶湖砂 2
E0018	400.63	200.03	0.4993	86.876	琵琶湖砂 2
E0019	398.88	198.28	0.4971	20.784	琵琶湖砂 2
E0020	206.51	105.51	0.5109	31.313	琵琶湖砂 2
E0021	301.36	200.36	0.6649	46.599	琵琶湖砂 2
E0022	352.13	252.13	0.7160	45.937	琵琶湖砂 2
E0023	402.51	301.51	0.7491	45.992	琵琶湖砂 2
E0024	249.64	148.64	0.5954	49.736	琵琶湖砂 2
E0025	151.49	50.49	0.3333	43.386	琵琶湖砂 2
E0026	202.43	101.43	0.5011	42.444	琵琶湖砂 2
E0027	200.88	99.88	0.4972	46.782	琵琶湖砂 2
E0028	200.48	149.43	0.7454	48.103	琵琶湖砂 2
E0029	200.75	149.70	0.7457	46.985	琵琶湖砂 2
E0030	250.63	199.58	0.7963	47.744	琵琶湖砂 2
E0031	151.04	99.99	0.6620	45.194	琵琶湖砂 2
E0032	300.81	249.76	0.8303	46.098	琵琶湖砂 2
E0033	200.75	149.58	0.7457	45.750	琵琶湖砂 2
E0034	499.94	199.94	0.3999	47.503	琵琶湖砂 2
E0035	400.33	100.33	0.2506	46.563	琵琶湖砂 2
E0036	459.89	249.89	0.4544	48.678	琵琶湖砂 2
E0037	400.91	100.71	0.2512	47.438	琵琶湖砂 2
E0038	450.48	150.28	0.3336	47.762	琵琶湖砂 2
E0039	550.15	249.95	0.4543	48.528	琵琶湖砂 2
E0040	400.50	100.30	0.2504	48.229	琵琶湖砂 2
E0041	200.60	150.41	0.7498	47.514	琵琶湖砂 2
E0042	350.88	150.39	0.4286	47.722	琵琶湖砂 2
E0043	450.51	249.00	0.5527	48.290	琵琶湖砂 2
E0044	300.70	99.18	0.3298	44.860	琵琶湖砂 2
E0045	409.48	207.96	0.5079	77.287	琵琶湖砂 2
E0046	399.81	198.30	0.4960	59.084	琵琶湖砂 2
E0047	398.98	198.40	0.4973	30.162	琵琶湖砂 2

致すると判断したときの k_{xx}/k_{zz} を求め、その平均値を「目視法による異方性の値」とした。この方法を目視法と呼ぶ。Table 3 に、解析を行ったすべての実験地盤に関して、目視法によって得られた異方性の値 k_{xx}/k_{zz} を示す。Table 3 において、水頭差は目視法及び次章の逆解析で用いた実験ステップの水頭差を表す。

E0009 について、目視法により異方性の値 k_{xx}/k_{zz} を求めたところ、 $k_{xx}/k_{zz} = 1.190$ となった (Table 3 参照)。Fig.3(b) に $k_{xx}/k_{zz} = 1.90$ のときの FEM 解析による等ポテンシャル線分布を実験によるものと同時に示している。Fig.3(b) からわかるように、実験と FEM 解析による等ポテンシャル線分布はよく一致していることがわかる。したがって、Fig.3(a) の等ポテンシャル線分布の差異は異方透水性によって生じたものと考えることができ、実験地盤には透水係数に異方性があると判断できる。また、ここで用いた $k_{xz} = 0.0$ の仮定は正しいといえる。

4. 逆解析法による透水係数の算定

目視法で得られた異方性の値は主観的になる可能性がある。客観的かつ合理的に地盤の異方性の値を求めることを目的として逆解析法を用いることを考えた。実験ではオープンピエゾメータを用いて地盤内の 62～214 点において全水頭値を観測している (Table 3 参照)。

(1) 異方透水性地盤中の浸透流に関する支配方程式と逆解析手法

異方性を有する実験地盤中の浸透流に関する運動方程式は、 x - z 座標系において、次のように拡張されたダルシー則で表される。

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_{xx} & k_{xz} \\ k_{xz} & k_{zz} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} i_x \\ i_z \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、

v_x, v_z : x, z 方向の流量流速

k_{xx}, k_{zz}, k_{xz} : 透水係数のテンソル成分 (テンソルの対称性から $k_{xz} = k_{zx}$)

$i_x \left(= -\frac{\partial h}{\partial x} \right), i_z \left(= -\frac{\partial h}{\partial z} \right)$: x, z 方向の動水勾配

h : 全水頭

である。拡張されたダルシー則((1)式)と流量の連続式

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

から、 x - z 座標系における異方透水性地盤における支配方程式は、

$$k_{xx} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + 2k_{xz} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial z} + k_{zz} \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

と表される。

ここで考えている問題は、(3)式によって観測値を最もよく説明できる3つのパラメータ k_{xx}, k_{zz}, k_{xz} の組み合わせを探索する問題、すなわち、最適問題に帰着する。最適化の考え方は、次式の最小二乗法を満足するようにパラメータを決定することである³⁾⁴⁾。

$$S(x) = \sum_{i=1}^{n+1} w_i (\bar{y}_i - y_i)^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

ここに、

$S(x)$: 重み付き残差平方和

$\bar{y}_i$: 観測値

y_i : 計算値

w_i : 重み

であり、 n は逆解析に用いる観測水頭値の数、 $n+1$ 番目の観測値は流量を表す。(4)式の非線形最適化手法にはいろいろな方法が提案されているが、まず何らかの方法でパラメータの初期値を与えそれを始点として線形近似で求めた解を(4)式のように重み付き残差平方和が小さくなるように反復改良して解を求めることになる。ここでは、非

Table 3 目視法と全データを用いた逆解析法による異方性の値 k_{xx}/k_{zz}

実験番号	水頭差(m)	観測点数	異方性の値 k_{xx}/k_{zz}		逆解析(全データ)と目視法による k_{xx}/k_{zz} の値の差
			目視法	逆解析法(全データ)	
E0001					
E0002					
E0003	0.20396	176	1.217	1.230	0.013
E0004	0.37296	190	1.227	1.195	-0.032
E0005					
E0006					
E0007	0.14988	114	1.250	1.261	0.011
E0008	0.30564	138	1.160	1.137	-0.023
E0009	0.31825	152	1.190	1.185	-0.005
E0010	0.40598	176	1.190	1.166	-0.024
E0011	0.47910	190	1.197	1.147	-0.050
E0012	0.32204	152	1.203	1.175	-0.028
E0012W	0.30904	152	1.207	1.168	-0.039
E0013	0.34195	152	1.207	1.164	-0.043
E0014	0.30844	152	1.183	1.259	0.076
E0015	0.27360	152	1.223	1.223	0.000
E0016	0.33889	152	1.180	1.126	-0.054
E0017	0.34494	152	1.143	1.095	-0.048
E0018	0.35188	141	1.160	1.088	-0.072
E0019	0.27238	152	1.240	1.225	-0.015
E0020	0.15146	76	1.227	1.344	0.117
E0021	0.34895	114	1.227	1.225	-0.002
E0022	0.44041	135	1.263	1.172	-0.091
E0023	0.51300	152	1.230	1.119	-0.111
E0024	0.22893	98	1.217	1.114	-0.103
E0025	0.07861	62	1.260	1.243	-0.017
E0026	0.16349	76	1.230	1.359	0.129
E0027	0.15119	76	1.197	1.156	-0.041
E0028	0.24192	76	1.273	1.148	-0.125
E0029	0.26891	76	1.223	1.063	-0.160
E0030	0.30426	100	1.227	1.058	-0.169
E0031	0.16743	62	1.210	1.123	-0.087
E0032	0.43505	114	1.203	1.030	-0.173
E0033	0.26291	76	1.217	0.987	-0.230
E0034	0.26922	190	1.223	1.147	-0.076
E0035	0.14114	152	1.233	1.167	-0.066
E0036	0.27876	214	1.213	1.162	-0.051
E0037	0.13744	152	1.223	1.132	-0.091
E0038	0.21066	176	1.227	1.162	-0.065
E0039	0.33346	214	1.217	1.161	-0.056
E0040	0.15382	152	1.260	1.198	-0.062
E0041	0.27615	76	1.183	1.156	-0.027
E0042	0.22802	138	1.207	1.140	-0.067
E0043	0.38633	176	1.200	1.132	-0.068
E0044	0.14221	114	1.200	1.116	-0.084
E0045	0.35057	152	1.097	1.018	-0.079
E0046	0.32893	152	1.180	1.116	-0.064
E0047	0.28760	152	1.287	1.341	0.054

Table 4 逆解析法(δ_0 法)によって得られた k_{xx}/k_{zz} の値

実験番号	水頭差 (m)	逆解析法 (全データ)	δ_0 の値(逆解析法(δ_0 法))						最終使用データ の割合(50%以下 のものを示す)
			10mm	5mm	3mm	2mm	1.5mm	1.0mm	
E0001									
E0002									
E0003	0.20396	1.230	-	1.231	1.231	1.229	1.229	1.227	
E0004	0.37296	1.195	1.195	1.195	1.198	1.200	1.200	1.199	
E0005									
E0006									
E0007	0.14988	1.261	-	-	1.266	-	1.267	1.273	
E0008	0.30564	1.137	1.139	1.142	1.153	1.162	1.168	1.170	
E0009	0.31825	1.185	1.187	1.189	1.194	1.194	1.194	1.197	
E0010	0.40598	1.166	1.167	1.174	1.178	1.179	1.173	1.168*	*46.0%
E0011	0.47910	1.147	1.150	1.152	1.158	1.159	1.149	1.147	
E0012	0.32204	1.175	-	1.177	1.180	1.180	1.182	1.184	
E0012W	0.30904	1.168		1.170	1.174	1.175	1.176	1.176	
E0013	0.34195	1.164	1.161	1.162	1.163	1.165	1.165	1.164*	*48.7%
E0014	0.30844	1.259	-	1.259	1.255	1.250	1.246	1.239	
E0015	0.27360	1.223	-	1.225	1.226	1.233	1.235	1.236	
E0016	0.33889	1.126	-	1.129	1.132	1.141	1.147	1.150	
E0017	0.34494	1.095	-	1.099	1.101	1.105	1.106	1.107	
E0018	0.35188	1.088	-	-	1.092	1.096	1.101	1.100	
E0019	0.27238	1.225	-	1.227	1.229	1.230	1.237	1.242	
E0020	0.15146	1.344	-	1.338	1.334	1.330	1.333	1.346	
E0021	0.34895	1.225	-	1.260	1.265	1.267	1.273	1.271	
E0022	0.44041	1.172	-	1.188	1.201	1.217	1.225	1.240*	*32.6%
E0023	0.51300	1.119	1.128	1.174	1.201	1.219	1.226**	1.225*	*33.6%, **41.4%
E0024	0.22893	1.114	-	1.130	1.161	1.174	1.202	1.237	
E0025	0.07861	1.243	-	-	-	-	-	1.261	
E0026	0.16349	1.359	-	1.359	1.351	1.360	1.352	1.353	
E0027	0.15119	1.156	-	-	1.174	1.206	1.250	1.269	
E0028	0.24192	1.148	-	1.181	1.225	1.260	1.278	1.305	
E0029	0.26891	1.063	1.073	1.081	1.127	1.140	1.164	1.198	
E0030	0.30426	1.058	1.066	1.108	1.120	1.139	1.143	1.151	
E0031	0.16743	1.123	-	1.138	1.168	1.209	1.213	1.215	
E0032	0.43505	1.030	1.049	1.076	1.118	1.148	1.152	1.160*	*43.9%
E0033	0.26291	0.987	1.009	1.021	1.084	1.113	1.137	1.168	
E0034	0.26922	1.147	-	1.149	1.156	1.157	1.166	1.165	
E0035	0.14114	1.167	-	1.169	1.173	1.176	1.183	1.188	
E0036	0.27876	1.162	-	1.157	1.161	1.166	1.179	1.193*	*45.3%
E0037	0.13744	1.132	-	-	1.136	1.142	1.146	1.169	
E0038	0.21066	1.162	-	1.167	1.170	1.182	1.189	1.203	
E0039	0.33346	1.161	-	1.165	1.175	1.185	1.194	1.207*	*47.2%
E0040	0.15382	1.198	-	1.199	1.200	1.204	1.203	1.209	
E0041	0.27615	1.156	-	1.171	1.201	1.216	1.225	1.225	
E0042	0.22802	1.140	-	1.145	1.163	1.185	1.188	1.203*	50.0%
E0043	0.38633	1.132	1.134	1.140	1.158	1.165	1.169	1.160*	*39.2%
E0044	0.14221	1.116	-	1.120	1.125	1.146	1.159	1.175	
E0045	0.35057	1.018	1.021	1.030	1.061	1.072	1.081**	1.086*	*36.8%, **44.7%
E0046	0.32893	1.116	-	1.122	1.135	1.136	1.141	1.131*	*44.7%
E0047	0.28760	1.341	-	1.341	1.340	1.339	1.333	1.334*	*43.4%

線形最適化手法としてガウス・ニュートン法³⁾を用いた。ここで、観測値としては、地盤内の各点で求めた全水頭値及び断面流量を用いた。また、重みとしては、全水頭値に対しては一定の値 $w_i = 1.0$ ($i = 1, 2, \dots, n$) をとり、流量に対しては $w_{n+1} = 1.0 \times 10^3$ をとった。重み付き残差平方の値が全水頭と流量でほぼ同じレベル(次数)になるように設定した(使用プログラムの詳細については引用文献5参照)。

(2) 全データを用いる方法

まず、すべての観測点のデータを用いて逆解析を行った。この方法によって得られた異方性の値を Table 3 に示している。Table 3 から、目視法による異方性の値と全データを用いて逆解析で求めた異方性の値は幾つかの実験においてはほぼ一致しているものの、実験によっては大きな差があることがわかる。次式で定義される相対誤差：

$$(\text{相対誤差}) = \frac{(\text{全データ}) - (\text{目視法})}{(\text{目視法})} \times 100 (\%) \quad (5)$$

は最大(絶対値)で 14.4% となる。実験における観測水頭値に誤差が存在するためにこの差異が生じたものと考えられる。次節では残差処理の方法について考察する。

(3) 残差処理の方法

実験結果に含まれる観測誤差を処理するために、ここでは、次の4つの残差処理法：「絶対値基準による方法(δ_0 法)」、「水頭差基準による方法(β 法)」、「増山の方法(α 法)」、「誤差の逆行列を重みとする方法(γ 法)」を考えた。以下、順に説明する。

a) 絶対値基準による方法(δ_0 法) 全水頭値の計測はオープンピエゾメータの読みとり(2人の読みとりを観測誤差 0.2mm 以下の精度で行いその平均を観測値とする)によって行っているが、観測点数が非常に多いため 1cm または 0.5cm の判読ミス、記入ミスが時として存在しうることがわかった。そして、観測水頭値と計算水頭値に 1.0cm または 0.5cm に近い残差がある場合にはこのような誤差の可能性が疑われた。ここでは、まず、このようなデータを除外する方法として絶対値基準の方法を考えた。絶対値基準の方法とは、観測水頭値と計算水頭値との差 $DYI (= \delta_0)$ の大きさによって除外節点を決める方法である。すなわち、まず、許容できる最大誤差(δ_0)を決める。次に、逆解析で得られた透水係数を用いて FEM 浸透流解析を行い、観測水頭値と計算水頭値の差(残差)の絶対値 $|\delta|$ が δ_0 以上のデータを取り除き、 δ_0 より小さい誤差を持つ節点データのみを用いて再度逆解析を行う。そして、残差の絶対値 $|\delta|$ が δ_0 以上のデータがあれば同じ操作を繰り返し、考慮する節点データの残差の絶対値 $|\delta|$ がすべて δ_0 より小さくなるまでデータの除去及び逆解析計算を行う。この方法を式であらわすと次のようになる。

$$\begin{cases} |\delta| < \delta_0 \text{ のとき } w = 1.0 \\ |\delta| \geq \delta_0 \text{ のとき } w = 0.0 \end{cases} \quad (6)$$

ここに、

δ : 残差

δ_0 : 絶対値基準の残差閾値

w : 重み

である。ここでは、 δ_0 として 10mm, 5mm, 3mm, 2mm, 1.5mm, 1mm を考えた。E0003, E0004, E0007~E0047 のすべての実験地盤について逆解析を行った。Table 4 に、すべての実験結果について、 δ_0 と異方性の値 k_{xx}/k_{zz} の関係を示す。算定された異方性の値 k_{xx}/k_{zz} が δ_0 の値によってどのように変化してゆくかを、一例として E0009 について示すと Fig.4 となる。Fig.4 からわかるように、不良データを取り除いてゆくにつれて k_{xx}/k_{zz} がある値に収束してゆき、目視法によるものに近づいてゆくことがわかる。しかし、Table 4 からわかるように、 $\delta_0 = 1.0\text{mm}$ とすると、実験によ

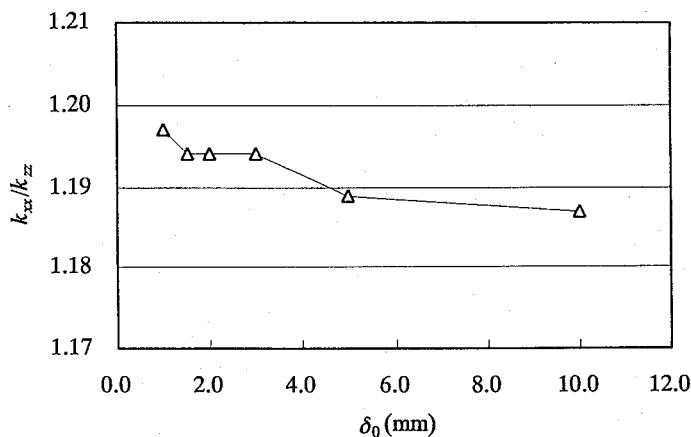


Fig.4 δ_0 と k_{xx}/k_{zz} の関係 (E0009)

Table 5 逆解析法(β 法)によって得られた k_{xx}/k_{zz} の値

実験番号	水頭差 (m)	逆解析法 (全データ)	β の値(逆解析法(β 法))							
			0.025	0.02	0.015	0.01	0.0075	0.005	0.0035	0.0025
E0001										
E0002										
E0003	0.20396	1.230	1.230	1.231	1.232	1.231	1.229	1.229	1.227	1.225
E0004	0.37296	1.195	1.195	1.195	1.193	1.194	1.196	1.198	1.200	1.199
E0005										
E0006										
E0007	0.14988	1.261	1.261	1.261	1.266	1.266	1.270	1.274	1.278	1.279
E0008	0.30564	1.137	1.137	1.139	1.140	1.143	1.153	1.160	1.168	1.173
E0009	0.31825	1.185	1.185	1.188	1.188	1.190	1.193	1.193	1.194	1.196
E0010	0.40598	1.166	1.166	1.167	1.170	1.172	1.175	1.178	1.179	1.164
E0011	0.47910	1.147	1.147	1.148	1.150	1.150	1.153	1.155	1.160	1.147
E0012	0.32204	1.175	1.175	1.175	1.177	1.177	1.180	1.179	1.182	1.184
E0012W	0.30904	1.168	1.168	1.169	1.170	1.170	1.174	1.176	1.176	1.179
E0013	0.34195	1.164	1.164	1.161	1.161	1.162	1.163	1.164	1.168	1.167
E0014	0.30844	1.259	1.259	1.260	1.259	1.259	1.255	1.249	1.314	1.239
E0015	0.27360	1.223	1.223	1.224	1.224	1.225	1.226	1.233	1.237	1.236
E0016	0.33889	1.126	1.126	1.127	1.128	1.129	1.131	1.136	1.145	1.152
E0017	0.34494	1.095	1.095	1.097	1.097	1.099	1.101	1.103	1.107	1.111
E0018	0.35188	1.088	-	1.088	1.088	1.088	1.092	1.093	1.098	1.104
E0019	0.27238	1.225	1.225	1.227	1.227	1.228	1.229	1.230	1.238	1.245
E0020	0.15146	1.344	1.344	1.338	1.334	1.329	1.333	1.336	1.337	1.334
E0021	0.34895	1.225	1.255	1.258	1.256	1.258	1.265	1.264	1.270	1.272
E0022	0.44041	1.172	-	1.172	1.172	1.174	1.191	1.200	1.217	1.229
E0023	0.51300	1.119	1.119	1.123	1.128	1.138	1.174	1.184	1.204	1.215
E0024	0.22893	1.114	1.114	1.126	1.130	1.154	1.168	1.185	1.226	1.246
E0025	0.07861	1.243	-	1.243	1.243	1.255	1.261	1.261	1.283	1.279
E0026	0.16349	1.359	1.359	1.355	1.351	1.349	1.356	1.371	1.356	1.340
E0027	0.15119	1.156	1.156	1.168	1.174	1.201	1.246	1.270	1.259	1.252
E0028	0.24192	1.148	1.148	1.166	1.183	1.227	1.258	1.269	1.293	1.316
E0029	0.26891	1.063	1.063	1.081	1.081	1.114	1.126	1.151	1.174	1.184
E0030	0.30426	1.058	1.058	1.072	1.083	1.108	1.120	1.131	1.143	1.146
E0031	0.16743	1.123	1.123	1.138	1.168	1.168	1.209	1.213	1.229	1.270
E0032	0.43505	1.030	1.030	1.040	1.049	1.076	1.076	1.122	1.138	1.136
E0033	0.26291	0.987	0.987	1.010	1.011	1.068	1.109	1.112	1.161	1.166
E0034	0.26922	1.147	1.147	1.148	1.149	1.150	1.157	1.157	1.166	1.156
E0035	0.14114	1.167	1.167	1.173	1.173	1.176	1.183	1.187	1.210	1.210
E0036	0.27876	1.162	1.162	1.157	1.157	1.156	1.162	1.165	1.186	1.192
E0037	0.13744	1.132	1.132	1.134	1.137	1.142	1.171	1.172	1.169	1.164
E0038	0.21066	1.162	1.162	1.167	1.168	1.170	1.180	1.187	1.206	1.209
E0039	0.33346	1.161	1.161	1.163	1.164	1.167	1.174	1.179	1.192	1.204
E0040	0.15382	1.198	1.198	1.199	1.200	1.205	1.202	1.203	1.207	1.215
E0041	0.27615	1.156	1.156	1.165	1.165	1.171	1.201	1.215	1.222	1.223
E0042	0.22802	1.140	1.140	1.144	1.145	1.161	1.178	1.188	1.222	1.232
E0043	0.38633	1.132	1.132	1.134	1.134	1.139	1.147	1.158	1.167	1.167
E0044	0.14221	1.116	1.116	1.122	1.125	1.144	1.159	1.173	1.190	1.194
E0045	0.35057	1.018	1.018	1.024	1.024	1.029	1.060	1.078	1.090	1.111
E0046	0.32893	1.116	1.116	1.117	1.119	1.122	1.135	1.135	1.139	1.140
E0047	0.28760	1.341	1.341	1.340	1.341	1.343	1.341	1.337	1.338	1.336

っては不良データの数が増大となる(除外データが観測データの半数を超える)ことがあったり、異方性の値が大きく変わることがある。 δ_0 は小さいほどよいと考えられるが、このような理由から本実験結果に関しては残差の絶対値 $|\delta|$ が $\delta_0=1.5\text{mm}$ より小さいデータを用いた逆解析値が適切であると判断した。Table 4 からわかるように、 $\delta_0=1.5\text{mm}$ とすると除外データはE0023, E0045を除いて半数を越えない。E0009に関して、残差閾値 $\delta_0=10, 5, 3, 2, 1.5, 1.0\text{mm}$ のときの除外節点分布を示すとFig.5となる。Fig.5では、

- : 残差が10mm以上の除外節点
- : 残差が5mm以上の除外節点
- ▲: 残差が3mm以上の除外節点
- △: 残差が2mm以上の除外節点
- : 残差が1.5mm以上の除外節点
- : 残差が1mm以上の除外節点

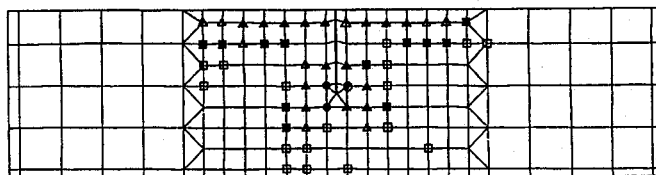


Fig.5 $\delta_0=10, 5, 3, 2, 1.5, 1.0\text{mm}$ のときの除外節点分布 (E0009)

で表される記号を用いている。Fig.5から除外節点は矢板の周辺及び中央部表層付近に多く集まっていることが読みとれる。

b) 水頭差基準による方法 (β 法) 地盤にかかる水頭差を基準にして大きな残差のあるデータを取り除いてゆく方法である。(1)の絶対値基準による方法を適用してゆく中で、地盤に大きな水頭差がかかっているときには、小さな水頭差段階のものよりも、観測値に大きな誤差が生じる可能性があるのではないかと考えた。本質的にはa)の方法と同様の考え方であるが、残差閾値を地盤にかかる水頭差の大きさを基準にしてとることになる。式で表すと次のようになる。

$$\begin{cases} |\delta| < \beta H & \text{のとき } w = 1.0 \\ |\delta| \geq \beta H & \text{のとき } w = 0.0 \end{cases} \quad (7)$$

ここに、

H : 水頭差

β : 水頭差基準の割合

βH : 水頭差基準の残差閾値

である。ここでは、 $\beta=0.025, 0.02, 0.015, 0.01, 0.0075, 0.005, 0.0035, 0.0025$ について解析を行った。解析を行ったすべての実験結果について、 β と異方性の値の関係を示すとTable 5となる。一例として、E0009について β と最終的に得られた異方性の値 k_{xx}/k_{zz} の関係を示すとFig.6となる。Fig.6からわかるように不良なデータを取り除いてゆくにつれて k_{xx}/k_{zz} がある値に収束してゆくことがわかる。ここでは、一連の浸透破壊実験地盤の解析結果から、最適な β の値は0.005であると判断した。

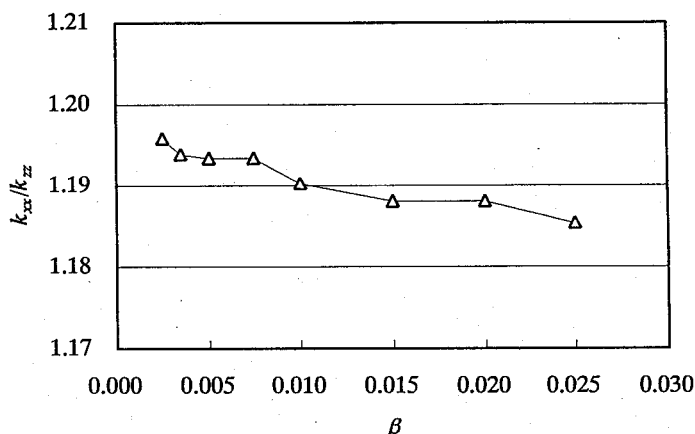


Fig.6 β と異方性の値 k_{xx}/k_{zz} の関係 (E0009)

c) 増山の棄却検定を用いる方法 (α 法) これは、観測値の中で最も大きなはずれ値が、他のデータ集団と同じ母集団に属しているかどうかを有意水準 α のもとに t 分布検定によって判断し、不良標本として棄却するかどうかを判定する方法である。増山⁹⁾によると、不良標本を X_0 とし他の n 個の標本を X としたとき、

$$t_0 = \frac{X_0 - \bar{X}}{\sqrt{s^2(n+1)/n}} \quad (8)$$

は、自由度 $n-1$ の t 分布に従う。ここに、

$\bar{X}$: 標本平均

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}: \text{不偏分散}$$

である。仮設を「 X_0 と他の標本 X に有意な差なし」としたとき、

Table 6 逆解析法(α 法)によって得られた k_{xx}/k_{zz} の値 ($\alpha=5\%$)

実験番号	水頭差(m)	逆解析法(全データ)	逆解析法(α 法)
E0001			
E0002			
E0003	0.20396	1.230	1.225
E0004	0.37296	1.195	1.199
E0005			
E0006			
E0007	0.14988	1.261	1.279
E0008	0.30564	1.137	1.167
E0009	0.31825	1.185	1.196
E0010	0.40598	1.166	1.183
E0011	0.47910	1.147	1.146
E0012	0.32204	1.175	1.180
E0012W	0.30904	1.168	-
E0013	0.34195	1.164	1.165
E0014	0.30844	1.259	1.246
E0015	0.27360	1.223	1.240
E0016	0.33889	1.126	1.153
E0017	0.34494	1.095	1.113
E0018	0.35188	1.088	1.096
E0019	0.27238	1.225	1.252
E0020	0.15146	1.344	1.376
E0021	0.34895	1.225	1.270
E0022	0.44041	1.172	1.213
E0023	0.51300	1.119	1.197
E0024	0.22893	1.114	1.269
E0025	0.07861	1.243	1.279
E0026	0.16349	1.359	1.349
E0027	0.15119	1.156	1.256
E0028	0.24192	1.148	1.349
E0029	0.26891	1.063	1.188
E0030	0.30426	1.058	1.190
E0031	0.16743	1.123	1.302
E0032	0.43505	1.030	1.141
E0033	0.26291	0.987	1.135
E0034	0.26922	1.147	1.158
E0035	0.14114	1.167	1.187
E0036	0.27876	1.162	1.165
E0037	0.13744	1.132	1.144
E0038	0.21066	1.162	1.209
E0039	0.33346	1.161	-
E0040	0.15382	1.198	1.209
E0041	0.27615	1.156	1.220
E0042	0.22802	1.140	1.188
E0043	0.38633	1.132	1.165
E0044	0.14221	1.116	1.194
E0045	0.35057	1.018	1.090
E0046	0.32893	1.116	1.139
E0047	0.28760	1.341	1.334

Table 7. 逆解析法(γ 法)によって得られた k_{xx}/k_{zz} の値

実験番号	水頭差 (m)	逆解析法 (全データ)	γ の値(逆解析法(γ 法))							
			3	2	1	0.5	0.3	0.2	0.1	0.05
E0001										
E0002										
E0003	0.20396	1.230	1.231	1.231	1.229	1.227	1.227	1.227	1.228	—
E0004	0.37296	1.195	1.194	1.194	1.197	1.198	1.198	1.198	1.198	1.199
E0005										
E0006										
E0007	0.14988	1.261	1.263	1.265	1.271	1.275	1.271	1.270	1.269	1.263
E0008	0.30564	1.137	1.138	1.141	1.152	1.163	1.153	1.147	1.137	1.135
E0009	0.31825	1.185	1.186	1.186	1.188	1.189	1.196	1.218	1.260	1.295
E0010	0.40598	1.166	1.168	1.171	1.176	1.172	1.168	1.171	1.170	1.171
E0011	0.47910	1.147	1.149	1.150	1.155	1.153	1.150	1.149	1.149	1.148
E0012	0.32204	1.175	1.176	1.177	1.179	1.182	1.182	1.182	1.185	1.187
E0012W	0.30904	1.168	1.174	1.175	1.178	1.180	1.181	1.183	1.176	1.176
E0013	0.34195	1.164	1.162	1.162	1.164	1.161	1.170	1.155	1.161	1.159
E0014	0.30844	1.259	1.259	1.259	1.255	1.248	1.246	1.246	1.252	1.250
E0015	0.27360	1.223	1.224	1.225	1.230	1.234	1.236	1.239	1.238	1.230
E0016	0.33889	1.126	1.127	1.128	1.134	1.142	1.145	1.136	1.129	1.128
E0017	0.34494	1.095	1.096	1.098	1.102	1.101	1.092	1.090	1.090	1.092
E0018	0.35188	1.088	1.088	1.090	1.095	1.098	1.097	1.098	1.093	1.093
E0019	0.27238	1.225	1.227	1.228	1.231	1.239	1.245	1.247	1.248	1.232
E0020	0.15146	1.344	1.343	1.339	1.331	1.351	1.369	1.373	1.377	1.378
E0021	0.34895	1.225	1.256	1.257	1.263	1.268	1.269	1.271	1.298	1.294
E0022	0.44041	1.172	1.172	1.174	1.192	1.209	1.203	1.196	1.166	1.165
E0023	0.51300	1.119	1.120	1.125	1.148	1.177	1.188	1.200	1.143	1.136
E0024	0.22893	1.114	1.119	1.126	1.151	1.179	1.202	1.204	1.184	1.191
E0025	0.07861	1.243	1.246	1.254	1.266	1.271	1.268	1.263	1.257	1.254
E0026	0.16349	1.359	1.358	1.355	1.356	1.364	1.354	1.349	1.353	1.354
E0027	0.15119	1.156	1.158	1.167	1.192	1.225	1.192	1.187	1.179	1.178
E0028	0.24192	1.148	1.153	1.167	1.210	1.241	1.259	1.277	1.313	—
E0029	0.26891	1.063	1.070	1.076	1.105	1.139	1.167	1.184	1.190	1.191
E0030	0.30426	1.058	1.065	1.076	1.108	1.127	1.163	1.141	1.131	1.124
E0031	0.16743	1.123	1.132	1.186	1.186	1.208	1.230	1.249	1.284	1.204
E0032	0.43505	1.030	1.034	1.042	1.067	1.108	1.123	1.126	1.128	1.116
E0033	0.26291	0.987	0.996	1.004	1.051	1.096	1.117	1.135	1.083	1.028
E0034	0.26922	1.147	1.147	1.149	1.155	1.158	1.157	1.155	1.149	1.150
E0035	0.14114	1.167	1.168	1.171	1.177	1.188	1.195	1.196	1.198	1.191
E0036	0.27876	1.162	1.159	1.158	1.162	1.170	1.166	1.164	1.167	1.158
E0037	0.13744	1.132	1.132	1.135	1.141	1.153	1.160	1.160	1.164	1.135
E0038	0.21066	1.162	1.165	1.166	1.175	1.188	1.199	1.201	1.198	1.186
E0039	0.33346	1.161	1.162	1.163	1.172	1.183	1.195	1.172	1.166	—
E0040	0.15382	1.198	1.199	1.201	1.203	1.208	1.210	1.210	1.205	1.203
E0041	0.27615	1.156	1.162	1.167	1.193	1.213	1.214	1.204	1.163	1.162
E0042	0.22802	1.140	1.141	1.143	1.161	1.174	1.189	1.195	1.200	1.168
E0043	0.38633	1.132	1.133	1.135	1.144	1.158	1.157	1.156	1.156	1.157
E0044	0.14221	1.116	1.119	1.122	1.143	1.164	1.176	1.182	1.185	1.140
E0045	0.35057	1.018	1.165	1.166	1.175	1.188	1.199	1.201	1.198	1.186
E0046	0.32893	1.116	1.116	1.119	1.130	1.135	1.130	1.128	1.130	1.119
E0047	0.28760	1.341	1.341	1.341	1.340	1.337	1.340	1.343	1.346	1.340

$$\begin{cases} t_a \leq t_0 \text{ のとき仮設棄却 } (X_0 \neq X) \\ t_a > t_0 \text{ のとき仮設採択} \end{cases} \quad (9)$$

となる。 t_a は有意水準 α 、自由度 $n-1$ に対応する t の値 ($\alpha = P(|t| \geq t_a)$) である。ここでは、 $\alpha = 1\%$ 、 5% について考察を行ったが、有意水準として 5% をとるのが妥当であると考えた。増山の棄却検定によって得られた異方性の値を $\alpha = 5\%$ の場合について全実験データについて示すと Table 6 となる。一例として、E0009 について、 $\alpha = 5\%$ の場合の、 n と k_{xx}/k_{zz} の関係を Fig.7 に示す。Fig.7 から、不良データを除いてゆくにつれて k_{xx}/k_{zz} がある値に収束してゆくことがわかる。

d) 誤差行列の逆行列を重みとする方法 (γ 法)
これは、すべての観測値に意味があると考え、誤差の小さなものほど重みが大きいと考える方法である。重み w が分散 σ^2 の逆数に比例すると考え、誤差行列の逆行列を重みとする方法である。この方法では、誤差の逆数を重みとするので、 $\sigma \approx 0$ のとき $w \rightarrow \infty$ となり、 $\sigma \approx 0$ に近いデータの重みが異常に大きくなる。この現象を回避するため、 $\sigma \approx 0$ 近傍で生じる大きな重みをカットして一定になるように次のように定式化した。

$$\begin{cases} |\sigma| < \gamma\sigma_0 \text{ のとき } w = (1/\gamma)^2 \\ |\sigma| \geq \gamma\sigma_0 \text{ のとき } w = (\sigma_0/\sigma)^2 \end{cases} \quad (10)$$

ここに、

σ_0 : 不偏標準偏差

σ : 各観測値の標準偏差または標準誤差 (ここでは $\sigma \approx \text{DYI}$ (残差)と仮定する)

である。 σ の値による重みの変化を、 $\gamma = 0.5$ の場合について示すと Fig.8 のようになる。解析を行った全実験データについて、 $\gamma = 3$ 、 $\gamma = 2$ 、 $\gamma = 1$ 、 $\gamma = 0.5$ 、 $\gamma = 0.3$ 、 $\gamma = 0.2$ 、 $\gamma = 0.1$ 、 $\gamma = 0.05$ と変化させたときの異方性の値 k_{xx}/k_{zz} を Table 7 に示す。一例として、E0009 について、 γ と k_{xx}/k_{zz} の関係を示すと Fig.9 となる。Fig.9 から、 k_{xx}/k_{zz} の値は、 $\gamma = 0.5$ 付近で目視法による値に近くなること、 γ が 0.5 より小さくなると異常に大きくなることからわかる。Table 7 から、 k_{xx}/k_{zz} の値は、 γ が 0.5 より小さくなるにつれて、幾つかの実験においてはある値に収束してゆくものの、その他の実験では異常に増加してゆくものや急激に減少してゆくものがあることがわかった。ここでは、最適な γ の値は 0.5 であると判断した。

5. 結論

締切り矢板のある地盤の浸透破壊メカニズムを明らかにするために、一連の浸透破

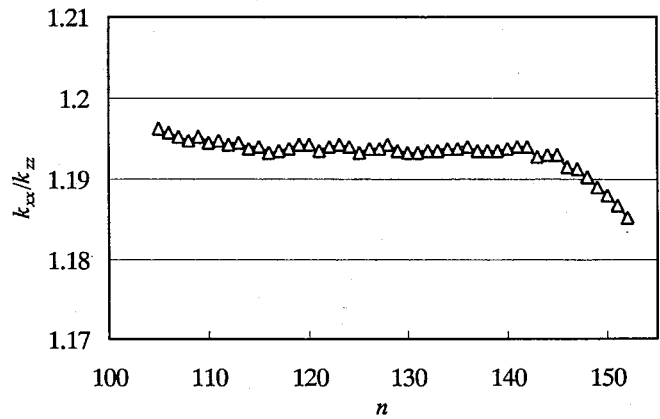


Fig.7 n と k_{xx}/k_{zz} の関係 ($\alpha = 5\%$ の場合) (E0009)

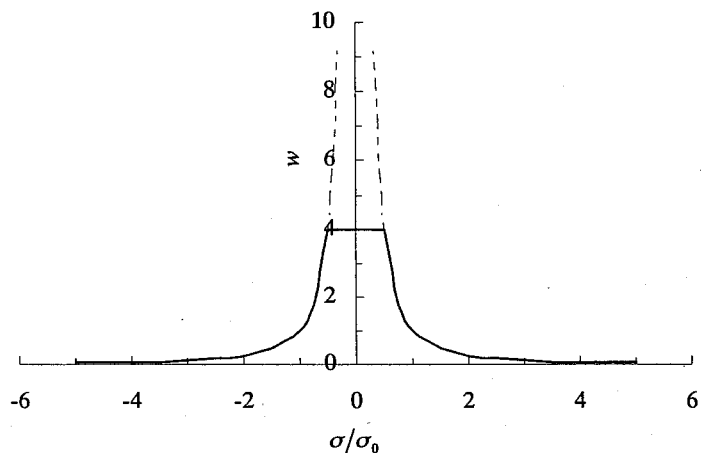


Fig.8 σ の値による重み w の変化 ($\gamma = 0.5$ の場合)

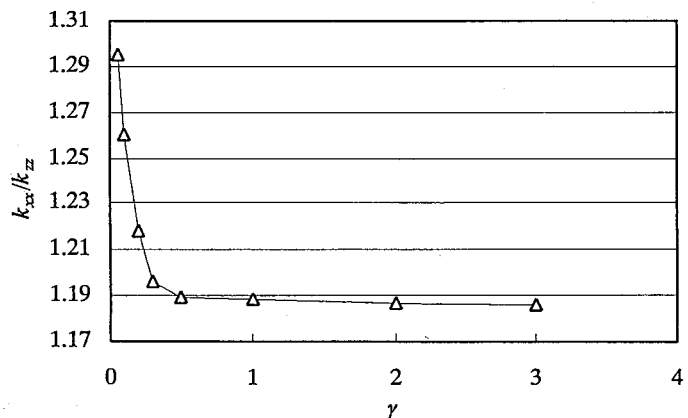


Fig.9 γ と k_{xx}/k_{zz} の関係 (E0009)

Table 8 各方法によって得られた異方性の値 k_{xx}/k_{zz}

実験番号	水頭差 (m)	目視法	逆解析法 (全データ)	逆解析法(残差処理法)			
				δ_0 法	β 法	α 法	γ 法
E0001							
E0002							
E0003	0.20396	1.217	1.230	1.229	1.229	1.225	1.227
E0004	0.37296	1.227	1.195	1.200	1.198	1.199	1.198
E0005							
E0006							
E0007	0.14988	1.250	1.261	1.267	1.274	1.279	1.275
E0008	0.30564	1.160	1.137	1.168	1.160	1.167	1.163
E0009	0.31825	1.190	1.185	1.194	1.193	1.196	1.189
E0010	0.40598	1.190	1.166	1.173	1.178	1.183	1.172
E0011	0.47910	1.197	1.147	1.149	1.155	1.146	1.153
E0012	0.32204	1.203	1.175	1.182	1.179	1.180	1.182
E0012W	0.30904	1.207	1.168	1.176	1.176	-	1.180
E0013	0.34195	1.207	1.164	1.165	1.164	1.165	1.161
E0014	0.30844	1.183	1.259	1.246	1.249	1.246	1.248
E0015	0.27360	1.223	1.223	1.235	1.233	1.240	1.234
E0016	0.33889	1.180	1.126	1.147	1.136	1.153	1.142
E0017	0.34494	1.143	1.095	1.106	1.103	1.113	1.101
E0018	0.35188	1.160	1.088	1.101	1.093	1.096	1.098
E0019	0.27238	1.240	1.225	1.237	1.230	1.252	1.239
E0020	0.15146	1.227	1.344	1.333	1.336	1.376	1.351
E0021	0.34895	1.227	1.225	1.273	1.264	1.270	1.268
E0022	0.44041	1.263	1.172	1.225	1.200	1.213	1.209
E0023	0.51300	1.230	1.119	1.226	1.184	1.197	1.177
E0024	0.22893	1.217	1.114	1.202	1.185	1.269	1.179
E0025	0.07861	1.260	1.243	-	1.261	1.279	1.271
E0026	0.16349	1.230	1.359	1.352	1.371	1.349	1.364
E0027	0.15119	1.197	1.156	1.250	1.270	1.256	1.225
E0028	0.24192	1.273	1.148	1.278	1.269	1.349	1.241
E0029	0.26891	1.223	1.063	1.164	1.151	1.188	1.139
E0030	0.30426	1.227	1.058	1.143	1.131	1.190	1.127
E0031	0.16743	1.210	1.123	1.213	1.213	1.302	1.208
E0032	0.43505	1.203	1.030	1.152	1.122	1.141	1.108
E0033	0.26291	1.217	0.987	1.137	1.112	1.135	1.096
E0034	0.26922	1.223	1.147	1.166	1.157	1.158	1.158
E0035	0.14114	1.233	1.167	1.183	1.187	1.187	1.188
E0036	0.27876	1.213	1.162	1.179	1.165	1.165	1.170
E0037	0.13744	1.223	1.132	1.146	1.172	1.144	1.153
E0038	0.21066	1.227	1.162	1.189	1.187	1.209	1.188
E0039	0.33346	1.217	1.161	1.194	1.179	-	1.183
E0040	0.15382	1.260	1.198	1.203	1.203	1.209	1.208
E0041	0.27615	1.183	1.156	1.225	1.215	1.220	1.213
E0042	0.22802	1.207	1.140	1.188	1.188	1.188	1.174
E0043	0.38633	1.200	1.132	1.169	1.158	1.165	1.158
E0044	0.14221	1.200	1.116	1.159	1.173	1.194	1.164
E0045	0.35057	1.097	1.018	1.081	1.078	1.090	1.188
E0046	0.32893	1.180	1.116	1.141	1.135	1.139	1.135
E0047	0.28760	1.287	1.341	1.333	1.337	1.334	1.337

壊実験を行っているが、実験地盤の異方透水性の値を把握する必要がある。ここでは、二次元実験地盤の透水係数テンソルを求める方法について考察した。まず、目視法を用いて異方透水係数を求め解析を行った。そして、

(1) 地盤には異方透水性($k_{xx} > k_{zz}$)がある。誘導成分 k_{xz} について、 $k_{xz} \approx 0.0$ の仮定は正しいといえる。ことがわかった。次に、合理的に透水係数テンソルを求めるべく逆解析法を適用した。逆解析法では、まず、全データを用いて解析を行った。そして、

(2) 目視法及び全データを用いた逆解析法による異方性の値は、幾つかの実験ではほぼ一致しているものの、実験によっては大きな差異がある。

ことが明らかとなった。差異の原因と考えられる観測値における誤差の影響を取り除くため、残差処理の方法について考察した。ここでは、4つの残差処理法：「絶対値基準による方法(δ_0 法)」、「水頭差基準による方法(β 法)」、「増山の方法(α 法)」、「誤差の逆行列を重みとする方法(γ 法)」を考えた。解析の結果をまとめると次のようになる。

(3) 逆解析法を有効にするためには残差処理法を考える必要がある。4つの残差処理法について、次のように妥当な値が提案できた。

- a) 絶対値基準による方法(δ_0 法)では $\delta_0 = 1.5\text{mm}$ とおくのがよい。
- b) 水頭差基準による方法(β 法)では $\beta = 0.005$ とおくのがよい。
- c) 増山の方法(α 法)では $\alpha = 5\%$ をとるのがよい。
- d) 誤差の逆行列を重みとする方法(γ 法)では最適な γ の値は0.5である。

このようにして、各方法を用いて得られた異方性の値 k_{xx}/k_{zz} を、解析を行ったすべての実験について示すと Table 8 となる。ここで提案した4種類の残差処理の方法は、現時点でどれが最も良いかは決められないが、目視法の結果も考慮に入れて、各実験地盤ごとに総合的に判断するのが望ましいと考えられる。今後、例えば赤池の情報量規準 AIC などを用いて最適な残差処理法を模索してゆく必要がある。

参考文献

- 1) 田中 勉, 野々村圭造, 鶴野千佳子: 土の異方性 —浸透流特性と浸透破壊特性—, 第36回地盤工学研究発表会平成13年度発表講演集, pp.1317~1318, 2001.7.
- 2) Tanaka, T., Verruijt, A. and Hyashi, K.: Seepage failure experiments on sand behind sheet piles, *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (IS-Tokyo '99)*, pp.717-722, July 19-21, 1999.
- 3) 中川 徹, 小柳義夫: UP応用数学選書7 最小二乗法による実験データ解析 —プログラ SALS, 東京大学出版会, 1982.
- 4) 中屋真司, 田中 豊: 地下水流の解析と逆問題, 数理科学, No.274, pp.72~79, 1986.
- 5) 田中 勉, 山浦清孝, 日高 厚: 二次元浸透破壊実験における作製地盤の異方透水係数の逆解析, 地盤工学における逆解析の適用と施工管理に関するシンポジウム発表論文集, pp.115~122, 1997.6.10.
- 6) 岸根卓郎: 理論応用 統計学, 第7版, 養賢堂, pp.397~399, 1975.

著者

- 1) 田中 勉, 神戸大学農学部, 教授
- 2) 農林水産省近畿農政局 紀伊平野農業水利事業建設所
- 3) 兵庫県但馬県民局地域振興部 豊岡土地改良事務所

Inverse Analysis of Soil Permeability in Two-Dimensional Seepage Failure Tests

Tsutomu Tanaka
Kenichi Uno
Kenichiro Tauchi

Abstract

Two-dimensional seepage failure tests were conducted to throw light on the seepage failure mechanism of soil in front of a sheet pile wall. The seepage failure phenomenon is largely influenced by anisotropy of soil permeability. Therefore, the anisotropic permeability or coefficients of permeability tensor should be examined for test soils. In this study, methods of obtaining permeability tensor for two-dimensional test soils are discussed. The visual-estimation method is first applied and it is concluded that:

(1) There is an anisotropy in permeability for test soils, i.e. permeability in the horizontal direction k_{xx} is larger than that in the vertical k_{zz} . The cross component of permeability tensor is expressed as $k_{xz} \approx 0.0$.

The inverse analysis method was next applied using all of the measurements of hydraulic heads in test soil. And we have

(2) Anisotropic permeabilities k_{xx}/k_{zz} obtained by visual-estimation and FEM-inverse-analysis are the same for some test soils, but are different for others.

The difference is thought to be due to observation error. Here we consider the following four methods for dealing with residual δ with respect to hydraulic heads H 's obtained by measurements and FEM analyses, where H is the hydraulic head difference between up- and downstream sides of sheet piles:

- i) The δ_0 method based on an absolute value, in which we consider only data for $|\delta| < \delta_0$.
- ii) The β method based on a fraction of hydraulic head difference H , in which we consider only data for $|\delta| < \beta H$.
- iii) The α method (Masuyama's method) in which defective samples are neglected based on t -test on the level of significance $\alpha\%$.
- iv) The γ method in which inverse matrix of standard errors σ is taken as weights w for measurements: $w = (1/\gamma)^2$ for $|\sigma| < \gamma\sigma_0$ and $w = (\sigma_0/\sigma)^2$ for $|\sigma| \geq \gamma\sigma_0$, where σ is the standard error for the weight $w=1$, residual δ is here taken as σ for each measurement.

Here we can conclude that $\delta_0=1.5\text{mm}$, $\beta=0.005$, $\alpha=5\%$ and $\gamma=0.5$ are recommended values for the above methods. Anisotropic permeabilities for test soils should be judged from visual-estimation and FEM-inverse-analysis.

