

揚水を伴う自由地下水帯における塩分分散に関する実験的研究

徳島大学工学部 正員 尾島 勝
徳島市役所 正員 ○石川 総彦
(樹久保田建設 高橋 敏行

1 まえがき 本研究は 海岸部自由地下水帯への塩分侵入過程ならびに塩分侵入阻止効果を定量的に評価することを目的として 揚水条件 矢板開口条件の異なる種々の砂層モデル実験を行い、侵入塩分フラックス量および分散係数値の相違ならびにそれらの変化特性について検討したものである。

2 実験モデルおよび実験方法 図-1に示した寸法の砂層模型 ($D_0 = 0.35\text{ mm}$, $U_c = 1.94$, 高さ 45 cm , 幅 43 cm) を型成し、塩水槽の塩分濃度を一定 ($C_0 = 18300\text{ ppm}$) に保ち、上下流水頭差を 140 cm の一定として、表-1に示した22ケースの実験を行った。

各観測井戸(径 5 cm)は砂層モデルの中心線上に等間隔に設置されており、各井戸には底から 3.75 cm の位置を第1測点として 7.5 cm の等間隔に塩分濃度計測用プルーフが固定されており、合計23測点の地点塩分濃度をほぼ同時刻に計測できる。

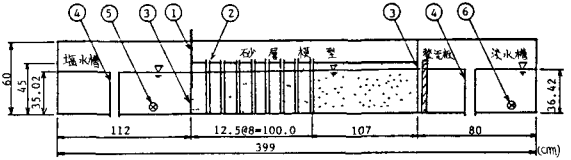


図-1 主要実験装置の寸法

表-1 実験タイプ・実験条件

TYPE	揚水位置	揚水高さ	定常流量 (cc/min)	揚水量 (cc/min)	透水係数 (cm/sec)
A-0	—	—	118	—	0.185
C-1	NO.3	lower	125	63	0.197
C-2	NO.3	lower	119	119	0.188
C-3	NO.3	lower	124	186	0.198
D-1	NO.7	lower	128	64	0.206
D-2	NO.7	lower	122	122	0.193
D-3	NO.7	lower	123	185	0.198
A'-0	—	—	120	—	0.190
B'-1	NO.3	upper	110	55	0.174
B'-3	NO.3	upper	124	186	0.196
C'-1	NO.3	lower	118	59	0.186
C'-3	NO.3	lower	126	189	0.198
D'-1	NO.7	lower	112	56	0.178
D'-2	NO.7	lower	118	118	0.186
D'-3	NO.7	lower	121	182	0.191
A''-0	—	—	111	—	0.175
B''-1	NO.3	upper	109	55	0.175
B''-3	NO.3	upper	116	174	0.183
C''-1	NO.3	lower	112	56	0.175
C''-3	NO.3	lower	121	182	0.192
D''-2	NO.7	lower	113	113	0.178
D''-3	NO.7	lower	117	176	0.186

実験タイプの英数字は、揚水条件の相違を区別するものであり、英字は揚水井位置と揚水高さを、数字は揚水量の大きさを表わしている。また、英字右肩のダッシュの有無は、矢板条件を区別するものであり、(、')、(、'') はそれぞれ矢板開口幅 20 cm (開口比 0.57)、 10 cm (開口比 0.28) を表わしている。計測諸量は、各測点における電気伝導度(塩素イオン濃度値に換算)、揚水量とその電気伝導度、および淡水流入流量であり、計測は5分毎とし、各測点での電導度値の時間変化が無くなり侵入現象が平衡状態に達したとみなされる時刻まで続けられる。

3 塩分侵入阻止効果 表-2

表-2 塩分化域および平均濃度フラックス

は、各実験タイプの塩分化域と侵入塩分量を示したものである。ここに、平均濃度フラックスとは、最終平衡状態における相対塩分濃度値 $C/C_0 = 0.1, 0.25, 0.5, 0.75$ の等塩分濃度線間の面積にそれぞれの代表塩分濃度値 $0.1, 0.25, 0.5, 0.75$ を乗じて面積塩分量とし、それを累加したものであり、揚水により排出される塩分量はわずがであるが、近似的には砂層内に侵入した単位幅当りの総塩分量とみなせる。ここに示された平均濃度フラックス値により、塩分侵入阻止効果を比較評価したものが図-2～図-4である。図-2は無矢板無揚水の A-0 タイプに対する濃度フラックス比 $[SC]/[SC]_{A0}$ を縦軸に、それぞれの実験条件の開口比を横軸にとり、表わしたものであり、揚水と矢板との複合効果を考察できる。図-3は、同一の揚水条件の各実験系列間における矢板による阻止効果の相違を示したものであり、図-4は、

TYPE	C/C ₀ の区分による面積 S (cm ²)					C/C ₀ の区分による濃度フラックスとその割合					[S] [S] _{A0}		[SC] [SC] _{A0}		[SC] [SC] _{A0}	
	1.00-0.75	0.75-0.50	0.50-0.25	0.25-0.10	ΣS	1.00-0.75	0.75-0.50	0.50-0.25	0.25-0.10	Σ	1.00-0.75	0.75-0.50	0.50-0.25	0.25-0.10	Σ	Σ
A-0	466.4	146.4	175.8	242.4	1,031.0	492.2	349.8	21	24.2	863.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
C-1	447.4	128.9	171.6	145.9	893.8	457.5	335.5	73	64.5	927.5	0.87	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
C-2	520.3	168.2	127.1	82.5	900.1	522.1	397.9	76	84.2	1084.2	0.88	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
C-3	566.0	136.2	122.5	79.0	903.7	531.1	424.5	80	68.1	1063.7	0.87	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
D-1	749.3	253.9	227.5	179.0	1,409.7	763.7	562.0	74	126.9	1422.6	1.36	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
D-2	1,009.2	213.4	254.5	179.8	1,652.9	940.8	752.5	104	104.7	1898.0	1.60	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91
D-3	1,246.8	243.2	254.9	270.4	2,015.4	1,147.5	935.1	82	121.6	2256.2	1.93	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33
A'-0	153.6	72.9	83.5	35.2	345.2	178.0	115.1	45	36.5	330.1	0.35	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
B'-1	220.2	108.0	118.2	146.3	592.7	263.4	165.2	63	54.0	541.6	0.37	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
B'-3	908.6	178.3	173.0	156.2	1,416.1	829.4	681.4	82	89.1	1600.1	1.37	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69
C'-1	183.9	93.6	110.9	108.4	506.8	231.3	137.9	60	46.8	476.0	0.56	0.47	0.51	0.51	0.51	0.51
C'-3	432.3	101.0	109.1	65.3	707.7	424.1	339.3	80	50.9	814.3	0.71	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
D'-1	236.4	109.4	117.6	146.8	610.2	276.3	173.3	64	54.7	554.7	0.59	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
D'-2	523.3	176.9	212.3	211.4	1,123.9	562.6	400.0	71	88.4	1051.1	1.10	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
D'-3	711.2	192.1	199.3	159.2	1,259.8	694.5	533.4	77	96.1	1424.7	1.22	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
A''-0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B''-1	0.0	0.0	0.0	195.6	195.6	19.6	0.0	0.0	0.0	19.6	0.00	0.19	0.00	0.19	0.00	0.19
B''-3	599.4	169.3	156.9	102.3	1,027.9	583.6	449.5	77	84.7	1118.2	1.02	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
C''-1	453.6	99.3	107.5	68.4	730.2	425.0	264.7	80	49.7	749.4	0.69	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
C''-3	102.3	70.7	100.3	71.9	345.2	144.3	76.7	53	35.5	249.5	0.33	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
D''-3	240.0	120.5	192.6	160.4	863.4	416.8	292.4	70	60.3	869.5	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83

同一矢板条件下の揚水量の相違による阻止効果を比較したものである。これらの図表に示された塩分侵入阻止効果を簡潔に示せば次のとおりである。

i) 無矢板条件下で揚水が付加された場合には、塩水化域面積比 $(SC)/(SC)_{A-0}$ の値の方が必ず大きい。このことは、揚水によって塩水化域内の高塩分濃度域の占める割合が増大したことを示すものであり、その傾向は揚水量が多くなるほど顕著である。

ii) しかし、矢板開口比が 0.57 の場合には過剰揚水の B-3、C-3、D-3 を除けば面積比と濃度フラスコ比の値はほぼ等しく、さらに開口比 0.28 の場合には過剰揚水条件であってもこれらの値はほぼ等しい。このことは、矢板による効果はそれぞれの塩水化域内における塩分濃度分布の相似性を保持することとして現われる。その傾向は矢板開口比が小さいほど顕著である。

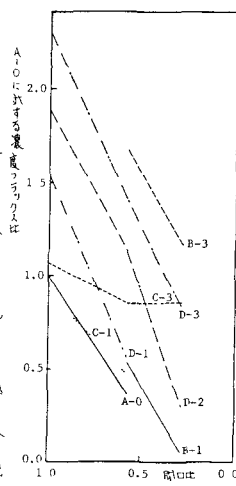


図-2 塩分侵入阻止効果の評価図

iii) 矢板開口比を 1.0 から 0.57 とした場合に塩分侵入阻止効果が A-0

系列よりも大きいのは図-2 に示した折線の傾きの大きさにより D-1、D-3、D-2 の順である。ところが図-3 に示されるとおり、揚水による吸引効果による影響を差引いた矢板による塩分侵入阻止効果は遠方下部過少揚水条件の D-1 がほぼ A-0 のそれに等しい他はいずれも小さく、C-1、D-2、D-3、C-3 の順となる。

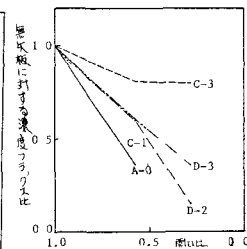


図-3 塩分侵入阻止効果の評価図

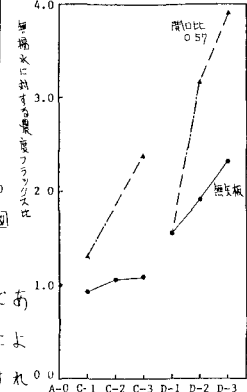


図-4 塩分侵入阻止効果の評価図

4 分散係数による考察 まず一次元拡散分散現象として解析した結果の一例を図-5 に示した。

分散係数を求める基礎式は次式である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = -D_L \left\{ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \frac{\partial R}{\partial x} \right\}$$

この式を差分化して測定された地点塩分濃度値から各井戸における断面平均濃度 (C^i) と塩水化水深 (R^i) を計算し、断面平均流速 (U^i) を新たな考え方のもとに与えて D_L^i を算出する。すなわち、各観測井戸の各測点濃度値 C_i/C_0 が 0.01~0.1、0.1~0.25、0.25~0.5、0.5~0.75、0.75~1.0 のいずれかの範囲に

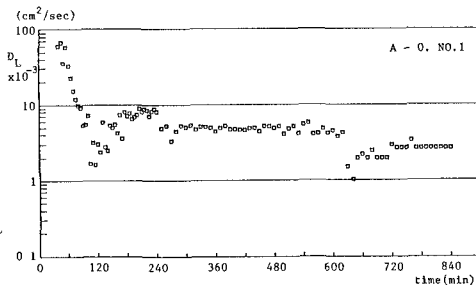


図-5 D_L の経時変化

あれば、それぞれ相対濃度値 $C/C_0 = 0.01, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75$ の侵入速度をその測点の侵入速度とし、断面平均流速を計算した。塩分侵入速度図の一例を図-6 に示す。分散係数値は、塩分侵入流速に従属的であるから、塩分侵入初期には大きな値となり、平衡状態に近づくば一定値に収束するはずである。例えば無矢板、無揚水の A-0 では $2.80 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、矢板開口比 0.57 の A-0 では $2.80 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、塩水槽近傍の上部過少揚水で開口比 0.57 の B-1 では $6.10 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ である。このことから矢板開口比の減少は塩分侵入流速の減少すなわち分散係数値の減少として

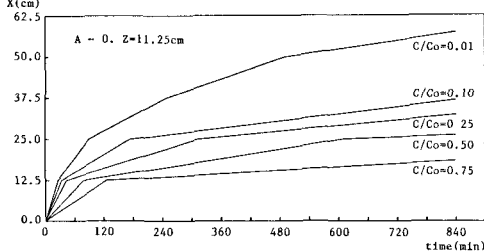


図-6 塩分侵入速度図

表わされ、揚水付加による吸引の効果は逆に塩分侵入流速の増大すなわち分散係数値の増大として表わされることがわかる。しかしながら、各実験タイプ毎の分散係数値の時間変化特性ならびに収束値から、塩分侵入過程と阻止効果を適確に定量的評価するには到っていない。

5 あとがき 鉛直方向の速度成分を考慮した二次元分散現象として解析した結果については講演時に述べる。二次元的取り扱いにより密度効果による侵入と分散効果によるものとのかなり明確に判別できる。