

自由地下水帯への塩分侵入阻止に関する実験的研究

尾 島 勝*

1. 結 言

水資源としての地下水は、表流水への依存度が高いわが国においてもその利用価値は高く、利用量は年々増大している現状にある。しかし、その反面、従来あまり問題にされなかった地下水環境の劣化に関連する社会問題が各地でかなり深刻化してきている。特に生産活動の活発な海岸部低平地においては、慢性化しつつある地下水の過剰揚水が海水塩分の内陸部侵入を助長し、生活環境の劣化速度をはやめつつあるといえる。したがって、まず第一に塩分侵入現象と地下水流動現象との関係を理論的・実証的に把握し、次いでその成果に基づいた積極的な塩分侵入阻止の方策を見出すことが必要となる。

そこで、著者らは塩分の非定常侵入過程の解明をめざしてすでに実験的研究を進めてきたが^{1),2)}、今回はとくに過剰揚水条件下における自由地下水帯の海側護岸矢板の開口条件の相違による塩分侵入阻止効果について、基本的砂層模型実験結果に基づき考察する。

2. 実験方法

実験水槽は従来の研究で使したものと同じであり、図-1 に示したように長さ 300 cm、幅 41 cm、高さ 60 cm の前面アクリライト張りの密度流実験水槽である。その中央部 180 cm 区間に粒径 2.5 mm 以下のふるい砂(有効径 0.36 mm、均等係数 2.47)を層厚 45 cm までできるだけ均一に敷きつめ、砂層模型を形成した。なお、

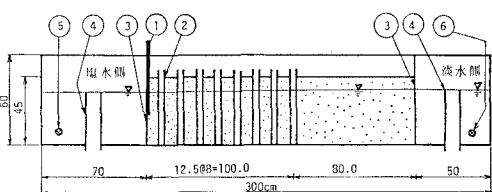
今回は下流端(塩水貯留槽側)から 12.5 cm 間隔で開口率約 30% の内径 5 cm の塩化ビニールパイプが観測用井戸として水路中心線上に 8 本設置されている。

実験方法は、淡水槽の水深(上流端水位条件)を 36.7 cm、一定濃度(CI=18 500 ppm)の塩水槽の水深(下流端水位条件)を 35.2 cm に保ち、遮水矢板(①)を所定の開口幅に設定し、下流側メッシュ(③)の外側の仕切板を取り除くと同時に実験を開始し、各観測井戸(②)において底から 3.75、11.25、18.75、26.25 cm の位置に固定された電気伝導度計測プローブを用いて 5 分毎に塩分侵入現象が終了したと判定できる時刻まで電気伝導度を計測する。

今回の実験タイプは、表-1 に示した合計 16 タイプであり、それぞれ揚水条件および矢板開度条件が異なる。なお、実験タイプの記号表示は従来の研究と同様である。

表-1 実験タイプおよび実験条件

TYPE	揚水井戸	揚水高さ (cm)	定常流量 (cc/min)	揚水量 (cc/min)	透水係数 (cm/sec)
A-0	—	—	161	—	0.218
B-1	No. 3	lower	157	236	0.209
B-3	No. 3	upper	154	240	0.207
C-1	No. 8	lower	146	220	0.201
C-3	No. 8	upper	148	223	0.197
SC-1	No. 8	lower	147	222	0.197
A'-0	—	—	115	—	0.181
B'-1	No. 3	lower	118	175	0.178
C'-1	No. 8	lower	118	176	0.178
SB'-1	No. 3	lower	115	173	0.181
SC'-1	No. 8	lower	117	173	0.178
A''-0	—	—	93	—	0.151
B''-1	No. 3	lower	106	159	0.175
C''-1	No. 8	lower	90	154	0.149
SB''-1	No. 3	lower	95	155	0.151
SC''-1	No. 8	lower	100	155	0.167



- ① 矢板, ② 観測井戸, ③ 砂止め用フィルターメッシュ,
- ④ 水頭可変余水吐, ⑤ 塩水流入バルブ, ⑥ 淡水流入バルブ

図-1 実験水槽とその諸元

したがって、実験タイプ表示におけるダッシュの有無は矢板条件を表わし、(′), (′′) はそれぞれ開口幅 20 cm (開口比 0.57)、10 cm (開口比 0.28) の実験を意味する。また、ストレーナの位置が底より 3~8 cm の場合を下部揚水(lower)、20~25 cm の場合を上部揚水(upper)と呼び、それぞれ数字 1、3 で表わしている。揚水量は淡水流量の約 1.5 倍の過剰揚水条件である。SB、SC タイプは A タイプの実験条件で一旦塩分侵入が平衡状態に達した後、引き続いて所定の揚水条件を付加するものである。

* 正会員 工博 徳島大学助教授 工学部土木工学科

3. 実験結果の考察手法

各測点において5分毎に測定された電気伝導度を塩素イオン濃度値に換算し、まず第一はこれら各測点における塩分濃度値を基本データとして、塩分濃度感知開始時刻表、等濃度線時間変化図、塩分侵入速度図および塩分濃度フラックス表を各実験毎に作成し、砂層内への塩分侵入現象を比較考察する。次いで、砂層内塩分挙動を一次元移流分散現象として解析し、各実験条件の相違による塩分挙動を分散係数値の変化として評価することを試みる。

塩分濃度感知開始時刻とは、各測点において200 ppmの濃度を初めて感知するまでに要する時間とした。等濃度線時間変化図とは、一定に保たれた塩水槽濃度 ($C_0 = 18\,500$ ppm) に対する砂層内塩分の相対濃度値 C/C_0 が0.1, 0.25, 0.5 および 0.75 となる座標値を各測点間の濃度変化を直線近似として求め、塩分侵入現象が終了したとみなされる時刻まで20分毎にその変化を図化したものである。

塩分侵入速度図とは、観測井戸の定点 (ここでは $z = 3.75$ cm, 11.25 cm) 間を $C/C_0 = 0.1, 0.25, 0.5, 0.75$ の塩分濃度が通過するに要する時間を求め、その変化の様相を示したものである。また、塩分濃度フラックスとは、最終平衡状態における等濃度線間の面積にそれぞれの塩分濃度を乗じたものであり、砂層内に侵入した塩分総量を定量的に評価しうる指標である。

4. 塩分侵入阻止効果に関する考察

4.1 塩分濃度感知開始時刻および等濃度線時間変化図による評価

まず、無揚水条件の実験系列 (A-0, A'-0, A''-0) について考察する。表-2 に示したとおり最も早く侵入塩分を感知する測点 (1, 1) における濃度感知開始時刻は、それぞれ9分, 77分, 342分であり、さらに12.5 cm 内部にある測点 (2, 1) におけるそれは50分, 251分, ∞ であり、開口比が小さくなるほど塩分侵入現象は大幅に遅延することがわかる。また、この実験系列の等濃度線時間変化図 ($C/C_0 = 0.1$) (図-2) から、塩分侵入

終了時間と塩水化域を比較すれば、A'-0 ($n = 0.57$) では A-0 ($n = 1.0$) に比べて平衡状態到達時間は約2/3に短縮され、塩水化域は約2/5に縮小している。また、さらに開口比が小さい A''-0 ($n = 0.28$) では平衡状態到達時

表-2 塩分濃度感知開始時刻

TYPE	Z(cm)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
A-0	26.25	50	448						
	18.75	35	365						
	11.25	23	85	405					
	3.75	9	50	160	360				
B-1	26.25	38	27						
	18.75	27	108						
	11.25	20	55						
	3.75	15	36	46	164				
B-3	26.25	36	142						
	18.75	26	80						
	11.25	18	55	55	125	454			
	3.75	12	35	43	101	196			
C-1	26.25	48	298						
	18.75	35	129	209	474				
	11.25	25	77	127	205	285	424		
	3.75	16	50	81	126	180	234	296	320
C-3	26.25	51	308						
	18.75	36	152	239	503				
	11.25	26	89	147	236	314	437	457	
	3.75	21	56	91	141	202	263	327	363
CS-1	26.25			104					
	18.75			13					
	11.25				106				
	3.75				3	52	204	363	132
A'-0	26.25								
	18.75								
	11.25	145	251	481					
	3.75	77							
B'-1	26.25								
	18.75								
	11.25	85	107						
	3.75	31	65	70	221				
C'-1	26.25								
	18.75	92	427	640					
	11.25	50	159	237	316	411	595		
	3.75	35	82	120	169	223	275	311	350
SB'-1	26.25								
	18.75								
	11.25	42							
	3.75		30		138				
SC'-1	26.25		480						
	18.75		90	387					
	11.25	54		65	148	263	450		
	3.75				32	103	170	227	241
A''-0	26.25								
	18.75								
	11.25								
	3.75	342							
B''-1	26.25								
	18.75								
	11.25	59							
	3.75	26	77	67	178				
C''-1	26.25								
	18.75								
	11.25	63	515	288	373	842			
	3.75	31	82	132	190	251	311	369	386
SB''-1	26.25								
	18.75								
	11.25	52							
	3.75	15	55	22	132	311			
SC''-1	26.25								
	18.75								
	11.25	111	247	374	235	312	451		
	3.75	33	37	83	130	179	225	276	294

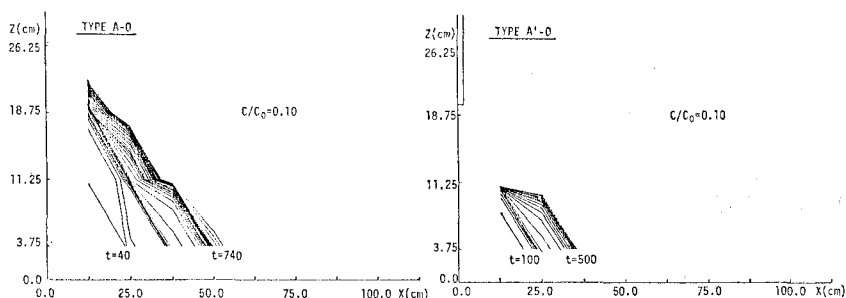


図-2 等濃度線時間変化図 (A-0, A'-0)

間も塩水化域もさらに減少していることは明らかである。すなわち、換言すれば、無揚水条件の下では矢板の打設によって塩分侵入を十分阻止し得ると結論できる。

しかしながら現実には海岸部低平地地下水の揚水利用は多く、その揚水条件と護岸矢板の開口条件の複合条件によって塩分侵入現象は異なるから、その塩分侵入阻止効果を明らかにすることが重要である。

そこで、次ぎは No. 3 井戸からの下部揚水条件である実験系列 (B-1, B'-1, B''-1) について考察する。

表-2 から読み取れるように測点 (1, 1) における濃度感知開始時刻は (15 分, 31 分, 16 分) であり、測点 (2, 1) では (36 分, 65 分, 46 分), 測点 (3, 1) では (46 分, 70 分, 67 分) である。すなわち、開口比が小さくなれば濃度感知開始時刻は遅くするといえるが、各井戸間の時間差には揚水による吸引の影響も明らかに現われていることもわかる。また、開口比の小さい B'-1 の方が B'-1 よりも早く濃度を感知していることは、無揚水条件下の塩分侵入状況とはまったく異なるといえる。

さらに、図-3 に示した等濃度線時間変化図より塩分侵入状況を比較すれば次のようなことがわかる。

すなわち、塩分侵入現象が最終平衡状態に至るまでの所要時間は、開口比の減少とともに短くなっているが、その減少の割合は A 系列に比べれば小さく、B'/B で約 86%, B''/B で約 76% になるにすぎない。また、塩水化域も減少しているとは判断しにくい。

したがって、塩水槽に比較的近い所 ($x \approx h_s$) で過剰揚水がなされた場合は、塩分侵入の矢板による拘束条件が強くなるにもかかわらず、塩水化域の大きさはほとんど変わらず、塩分侵入現象も速くなるといえる。すなわち、このような揚水条件の下では矢板の打設による塩分侵入阻止効果はほとんど期待できず、むしろ塩分侵入現象を助長することにもなりかねないといえよう。

また、No. 8 井戸からの下部揚水条件である実験系列 (C-1, C'-1, C''-1) についてみれば、濃度感知開始時刻は表-2 に示すとおりであり、開口比が小さくなれば塩分侵入現象は遅くなるといえるが、矢板開口比の相違

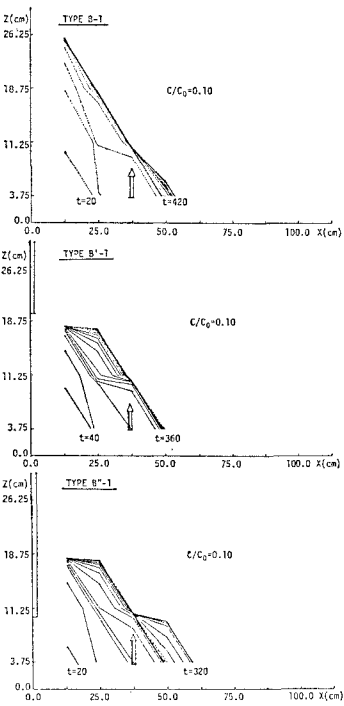


図-3 等濃度時間変化図 (B-1, B'-1, B''-1)

による侵入現象の相違をさらに詳しく言及し得ない。

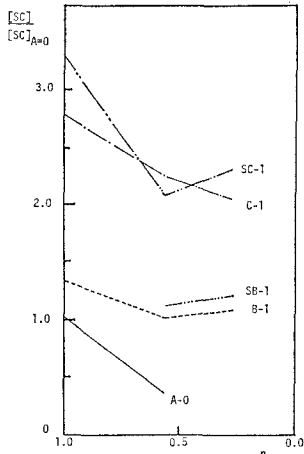
4.2 塩分濃度フラックスによる評価

表-3 は各実験結果より求めた塩分濃度フラックス表であり、図-4 は塩分侵入阻止効果の評価図である。

表-3 に示した ΔS は塩水化域の大きさを示すものであり、無矢板無揚水条件の A-0 の塩水化域に対する各タイプの面積比が S/S_{A-0} で示され、総塩分侵入量を表わす濃度フラックスの比は $[SC]/[SC]_{A-0}$ で示されている。揚水が付加された場合は、面積比の値よりも濃度フラックス比の値の方が必ず大きく、C-3 では 1.26 倍である。この事は、揚水によって高濃度塩分領域の占める割合が増すことを示しているといえる。また、揚水付加の各実験において総塩分侵入量が異なるにもかかわらず、 C/C_0 区分による濃度フラックスの割合はほとんど変

表-3 塩 分 濃 度 フ ラ ッ ク ス

TYPE	C/C_0 の区分による面積 S (cm ²)					平均濃度 フラックス [SC]	C/C_0 の区分による濃度フラックスとその割合										S		[SC]		矢板あり [SC]		揚水あり [SC]	
	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	%	S_{A-0}	[SC] _{A-0}	[SC]	[SC] _{A-0}	[SC]	[SC] _{A-0}	[SC]	[SC] _{A-0}	[SC]	[SC] _{A-0}
A-0	413.1	116.5	123.3	201.3	854.2	419.0	309.8	74	58.2	14	30.8	7	20.1	5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
B-1	612.5	107.0	116.3	102.1	937.8	552.2	459.4	83	53.5	10	29.1	5	10.2	2	1.10	1.32	1.00	1.00	1.00	1.32	1.00	1.32	1.00	1.32
B-3	963.8	225.2	260.5	168.7	1618.2	917.4	722.8	79	112.6	12	65.1	7	16.9	2	1.89	2.19	—	—	—	2.19	—	2.19	—	2.19
C-1	1 237.7	280.7	258.2	194.8	1 971.3	1 152.6	928.2	81	140.3	12	64.5	6	19.5	2	2.31	2.75	1.00	1.00	1.00	2.75	1.00	2.75	1.00	2.75
C-3	1 570.5	173.8	240.7	185.0	2 170.0	1 343.5	1 177.9	88	86.9	6	60.2	4	18.5	1	2.54	3.21	—	—	—	3.21	—	3.21	—	3.21
SC-1	1 457.4	254.8	266.1	291.0	2 269.4	1 316.1	1 093.1	83	127.4	10	66.5	5	29.1	2	2.66	3.25	1.00	1.00	1.00	3.25	1.00	3.25	1.00	3.25
A'-0	100.5	83.9	93.2	66.5	344.1	147.3	75.4	51	42.0	29	23.3	16	6.6	4	0.40	0.35	—	—	—	0.35	—	0.35	—	0.35
B'-1	440.5	101.6	108.1	69.5	719.8	415.2	330.4	80	50.8	12	27.0	7	7.0	2	0.84	0.99	—	—	—	0.99	—	0.99	—	0.99
C'-1	980.8	220.0	233.5	202.1	1 636.0	924.2	735.6	80	110.0	12	58.4	6	20.2	2	1.92	2.21	—	—	—	2.21	—	2.21	—	2.21
SB'-1	464.4	114.8	132.3	208.4	920.0	459.7	348.3	76	57.4	12	33.1	7	20.8	5	1.08	1.10	—	—	—	1.10	—	1.10	—	1.10
SC'-1	888.5	231.0	240.4	173.4	1 533.3	859.3	666.4	78	115.5	13	60.1	7	17.3	2	1.80	2.05	0.63	0.63	0.63	2.05	0.63	2.05	0.63	2.05
A''-0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B''-1	463.4	110.1	143.8	105.2	822.5	449.0	347.5	77	55.0	12	35.9	8	10.5	2	0.96	1.07	—	—	—	1.07	—	1.07	—	1.07
C''-1	887.2	211.1	219.9	179.2	1 497.4	843.9	665.4	79	105.6	13	55.0	7	17.9	2	1.75	2.01	—	—	—	2.01	—	2.01	—	2.01
SB''-1	510.8	130.6	140.9	158.9	941.1	499.5	383.1	77	65.3	13	35.2	7	15.9	3	1.10	1.19	—	—	—	1.19	—	1.19	—	1.19
SC''-1	1 024.7	224.5	224.6	193.9	1 667.7	956.3	768.5	80	112.3	12	56.1	6	19.4	2	1.95	2.28	0.70	0.70	0.70	2.28	0.70	2.28	0.70	2.28



図—4 塩分侵入阻止効果の評価図

らないことも注目される。

図—4 は、各実験系列毎に矢板による塩分侵入阻止効果を示したものであり、 $[SC]/[SC]_{A=0}$ の値を縦軸に、開口比を横軸にとってあるから、これらの直線の傾きが大きいほど塩分侵入阻止効果の大きいことを意味している。

したがって、開口比が 1.0 から 0.57 になる場合は、いずれの実験系列でも阻止効果は認められるが、A 系列よりもその効果が大きいといえるのは SC 系列のみであるといえる。しかし、さらに打ち込み深さが増して開口比が 0.28 になった場合は、矢板による塩分侵入阻止効果が認められるのは C-1 系列のみであり、その他の揚水を伴う系列ではむしろ塩分侵入を助長していることに注意しなければならない。

4.3 侵入速度図による評価

侵入速度の適切な算定は、次に述べる分散係数の決定に大きく影響するため、その変化特性を詳しく把握する必要がある。図—5 に示した侵入速度図は縦軸に移動距離、横軸に時間をとっているから、このグラフの傾きが大きいほどその区間の塩分侵入速度が大きいことになる。

全体的にみれば低塩分濃度値ほどグラフの傾きは大きく、早く内部侵入することを示しているが、また、 $z =$

11.25 cm における侵入速度は、 $z = 3.75$ cm の位置における値よりもかなり小さいこともわかる。したがって、同じ高さにおける C/C_0 値の相違による侵入速度の違いよりも高さの違いによる侵入速度の違いの方が大きいといえる。

次に、矢板開口比の相違による侵入流速の変化について考察すれば以下のようなことがわかる。

まず、A-0 系列では矢板開口比の減少とともに侵入速度の減少も極めて顕著である。B-1 系列では侵入流速の変化に揚水による吸引の影響が明確に現われており、No. 2～No. 3 井戸間の侵入流速が開口比が小さくなるほど大きくなっている。C-1 系列では No. 2 井戸までは開口比の減少とともに侵入流速も減少しているが、No. 3 井戸よりも内陸側では開口比の減少に伴う侵入速度の明確な減少は認められず、開口比の減少による影響よりも過剰揚水による吸引の影響が強く及んでいると判断できる。

5. 分散係数による塩分侵入現象の把握

塩水の流れの連続式

$$\partial A / \partial t + \partial (AU) / \partial x = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

を考慮して、分散物質（塩分）の保存則を変形すれば次のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (UC)}{\partial x} = -\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (A \langle \hat{u} \hat{c} \rangle) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 A : 任意断面における塩水化域面積、 U : 塩水侵入速度の断面平均値、 C : 断面平均塩分濃度、 $\langle \hat{u} \hat{c} \rangle$ は

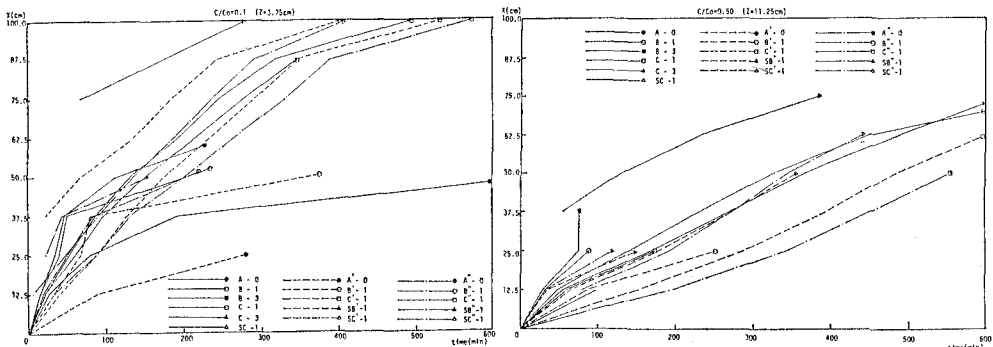
$$\langle \hat{u} \hat{c} \rangle = D_L \cdot \partial C / \partial x \quad \dots\dots\dots (3)$$

と書ける移流分散項である。

式 (2) は次のように書きかえることができる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + C \frac{\partial U}{\partial x} = -D_L \left\{ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{h_2} \frac{\partial C}{\partial x} \cdot \frac{\partial h_2}{\partial x} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

これが分散係数を求める基本式である。 h_2 は $C/C_0 = 0.1$ の等濃度線図より求めた塩水水深であり、この塩水



図—5 塩分侵入速度図

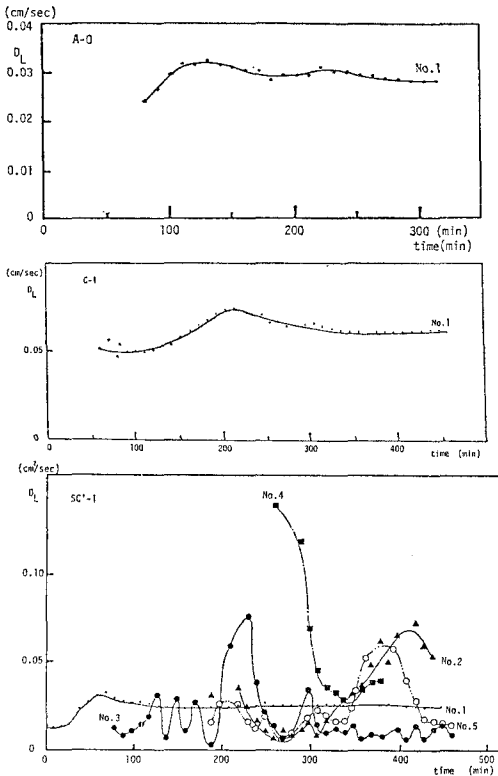


図-6 分散係数の時間変化特性

域の断面平均濃度 C を計算する。また、断面平均流速 U は $C/C_0=0.5$ の塩分濃度が $Z=3.75\text{cm}$ の測点を移動する侵入速度を採用することとし、相隣の井戸間の侵入流速の平均値とした。

実際の計算に当っては、 $\Delta t=10$ 分、 $\Delta x=12.5\text{cm}$ とし、式 (4) を差分化して D_L を算出した。

図-6 には得られた分散係数値の時間変化特性をみるためいくつかの例を示している。

これらの変化特性図より得られた考察結果を列挙すれば以下のである。

i) 図に示した A-0 の No. 1 井戸における D_L の値は 90~130 分の塩分侵入の初期には増加し、それ以後は漸減してほぼ $2.6 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ の値に収束している。また、ここには示していないが No. 2 井戸の収束値は $8.6 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ と No. 1 に比べてかなり大きい。

ii) 開口比 0.57 の A'-0 の No. 1 井戸における D_L の値は $0.28 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ と算出されており、A-0 の値に比べて約 1/10 に減少している。

iii) 塩水槽の近くの上部揚水である B-3 では、 D_L の値は塩分侵入初期から A-0 の約 3 倍以上であり、時間とともに漸増し、収束値は $10 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ を越える。また下部揚水である B-1 では、 D_L の変化は A-0 とほぼ同様であるが収束値は $8.5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ であり A-0 の約 3.3 倍である。したがって、揚水条件の付加

は分散係数値の増大として表わされるといえる。

iv) 開口比が 0.57 である B'-1 の No. 1 井戸の D_L 値は $3.1 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、開口比 0.28 の B''-1 それは $4.0 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ と算出されている。これは、開口比減少による分散係数値の減少よりも揚水の影響による分散係数の増大効果の方が相対的に強いためであると解釈できる。

v) 塩水槽より遠方での下部揚水である C-1 では、図に示したように No. 1 井戸における D_L の収束値は $5.5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ であり、A-0 の約 2 倍である。また、C-3 の値も $5.3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ と算出されており、揚水高さの相違による塩分侵入現象の相違はほとんど現われない。

vi) 揚水付加時間の異なる SC-1 系列の D_L の時間変化特性は図に示したように極めて複雑である。このことは砂層内での塩分侵入現象が予想以上に複雑であることを示唆しているともいえる。

6. 結 論

本研究で得られた成果を以下に要約するとともに今後に残された問題点を記して結論とする。

(1) 矢板開口比の相違による塩分侵入阻止効果

i) 無揚水の場合には、矢板開口比が小さくなるほど塩分侵入阻止効果は急激に増大することを明らかにした。

ii) 過剰揚水条件が付加された場合には、塩分侵入阻止効果が最大となる開口比が存在すること、換言すれば開口比が小さくても揚水条件との複合条件としてむしろ塩分侵入が助長されることが起こり得ることを明らかにした。

(2) 揚水付加履歴の相違による塩水化の程度

一旦平衡状態が形成された後に揚水条件が付加された場合には、初めから揚水条件が付加される場合よりも塩水化域も総塩分侵入量も大きく、塩水化の程度は高くなることを明らかにした。

(3) 分散係数による塩分侵入現象の把握

i) 無矢板無揚水の場合は塩分侵入現象は比較的安定しており、分散係数値は $2.6 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ である。

ii) 揚水が付加された場合は、その吸引の影響が侵入流速、分散係数値の増大として表わされる。

iii) 矢板開口比の減少は分散係数値の減少として表わされるが、揚水条件が付加されればそれらの相乗効果により、分散係数値の時間変化は複雑になる。

参 考 文 献

- 1) 尾島 勝・鎌田義人・板東敏雄：不圧滞水層への塩分侵入に対する揚水および護岸矢板の効果に関する実験的研究，第 27 回海岸工学講演会論文集，pp. 537~541, 1980.
- 2) 尾島 勝・西内剛三：不圧地下水帯への塩分侵入阻止効果に及ぼす揚水履歴の影響に関する考察，第 27 回水講演会論文集，pp. 627~632, 1983.