

海岸部自由地下水帯への塩分侵入阻止効果と塩分散に関する解析

Experimental Study on Defence of Salt Intrusion in Unconfined Groundwater of Coastal Region

徳島大学工学部 正員 尾 島 勝
徳島市役所土木部 正員 石 川 稔 彦

1. まえがき

地下水の塩水化は、工業用水としての使用量が多い被圧地下水のみならず、農業用水、養殖漁業用水としての取水量の増大や河道改修工事の進捗に伴う河道からの漏水量の減少の影響として、自由地下水においてもかなり深刻な社会問題になりつつある。すなわち、自由地下水帯では対象域内の河川や人工水路における流況の変化あるいは揚水井戸位置、揚水量や塩分侵入遮へい工等の人為的条件の変化が、地下水流況変化や塩分挙動に対してとくに敏感に影響する。したがって、自由地下水帯においても揚水の総量規制はもとより、さらに効果的な塩水化阻止工法の確立が急務とされている。

著者は、砂層模型実験に基づき、塩分侵入機構と塩分侵入阻止効果を解明する目的で若干の成果を得ているが、^{1),2),3)}今回は生起現象を1次元あるいは断面2次元の移流分散現象として解析しようとする場合の浸透流速の考え方ならびに実際の算出方法に改良を加え、塩分侵入阻止効果と砂層内の塩分散を定量的に評価することを試みた。このような砂層模型による実験例は比較的少なく、本研究では理論展開上重要な塩分侵入速度値や分散係数値を実測結果から求め、さらには、理論的解析において最も重要となる塩分侵入入口である下流端境界条件、すなわち矢板開口条件の相連による影響を定量的に比較検討している。

2. 実験装置・実験方法

今回用いた実験水槽は、図-1に示したとおり、中央部に 207 cm の砂層形成区間をもち、幅 43 cm、高さ 60 cm である。砂層模型は、粒径 0.3 mm ~ 2.5 mm 間のフレイ砂 ($d_{10} = 0.35\text{ mm}$, $U_c = 1.94$, $k_s = 0.13\text{ cm/sec}$) で、厚さ 45 cm に形成されている。さらに、図に示すように砂層下流端（塩水槽側）から 12.5 cm 間隔で開孔率約 30 %、内径 5 cm の観測用井戸を砂層中心線上に 8 本設置し、それらの井戸には底から 3.75, 11.25, 18.75, 26.25 cm の位置に合計 22 個の電気伝導度測定用ブルーブ ($\phi = 10\text{ mm}$, $r = 10\text{ mm}$) が固定されている。

実験方法は、淡水槽水深（砂層上流端境界水位）を 36.4 cm、一定濃度 ($Cl^- = 18,300\text{ ppm}$) である塩水槽水深（砂層下流端境界水位）を 35.0 cm に保ち、仕切板をはずした実験開始時刻から塩分侵入現象が平衡状態に達したと判定できる時刻まで、各測点における電気伝導度（塩分濃度）を所定の時間間隔で計測した。なお、今回はとくに実験開始時刻からおよそ 30 分間の淡水流入流量を上流側余水吐に連結した集水マスの圧力変化として連続的に計測した。

実験タイプは、表-1に示したように揚水条件および下流端矢板開口条件の異なる 9 系列、22 ケースである。実験タイプ記号のダッシュの有無は、矢板開口条件を表わし、ダッシュ無しは無矢板、(')、(") はそれぞれ矢板開口幅 20 cm（開口比 0.57）、10 cm（開口比 0.28）の実験である。また、実験タイプの数字 1, 2, 3 は、それぞれ淡水のみを流した初期定常流入流量に対して 0.5 倍（過少）、1.0 倍（平衡）、1.5 倍（過剰）となる揚水条件

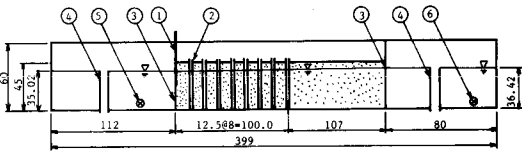


図-1 実験水槽

表-1 実験タイプおよび実験条件

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	66	0.206
D-2	NO.7	lower	122	122	0.191
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

を付加した実験を意味し、数字0は無揚水実験である。

3. 塩分侵入機構と塩分侵入阻止効果に関する考察

3-1 塩分侵入初期における淡水流入流量の変化

図-2(a), (b)は、縦軸に実験開始後1分毎の淡水流入流量(Q_{it})の初期定常流入流量(Q_{if})に対する比の値をとり、横軸に時間をとってその経時変化の様相を示した例である。

図-2(a)は、無揚水条件のA-0系列であるから、矢板開口幅の相違のみによる影響を考察しうる。流入流量は流入開始後20分頃まではかなり大きく変動しているが、その後変動振幅は徐々に小さくなり、新しい定常状態に移行していく様子がわかる。その定常到達時刻は、A-0で21~22分、A'-0で24~25分、A''-0では30分以後と読み取れる。また、その時の Q_{it}/Q_{if} の値は明らかに1.0より小さく、A-0で0.75、A'-0で0.70、A''-0で0.60と読み取れる。このような生起現象の相違は、矢板開口幅の縮小に伴う初期定常流入流量の減少を考慮した無次元比に現われているのであるから、砂層下流端における侵入塩分が淡水流出口の幅をさらにせばめる閉塞効果がそれぞれ異なることを意味しているといえよう。

図-2(b)は、塩水槽に近いNa.3井戸($x = 37.5\text{ cm}$)の下部ストレーナから過少揚水を行ったC-1系列について比較したものである。図から明らかなとおり、揚水が付加されれば、過少揚水であっても定常到達時刻はA-0系列のそれよりもかなり早くなり、C-1で13分、C''-1で20分である。また、その時の定常流量比の値も0.80~0.75と若干大きくなっていることがわかる。さらに、ここには示していないが、塩水槽から遠いNa.7井戸($x = 87.5\text{ cm}$)における下部過剰揚水のD-3系列では、定常到達時刻は2~5分とさらに早くなっており、その時の定常流量比の値は1.30~1.20と1.0よりもかなり大きくなっている。すなわち、このような過剰揚水条件の付加によって初期定常流入流量よりも大きい淡水流入流量となっていることがわかる。

3-2 平均濃度フラックスによる評価

表-2は、各実験タイプの塩水化域面積(S)と侵入塩分量を示す平均濃度フラックス値(SC)の算出結果を示したものである。図-3は、 $(SC)/(SC)_{A-0}$ の値を縦軸に、矢板開口比を横軸にとり示したものであり、各実験系列毎の揚水と矢板との複合作用による塩分侵入阻止効果を

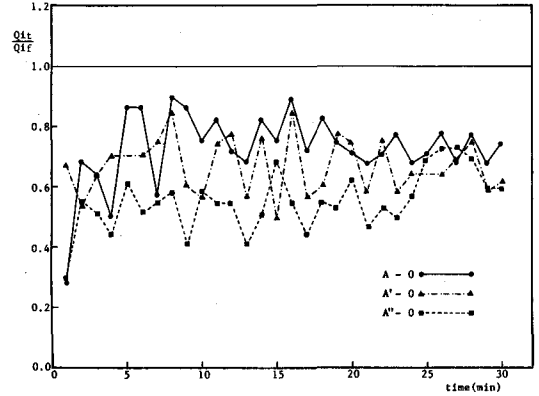


図-2(a) 淡水流入流量の経時変化

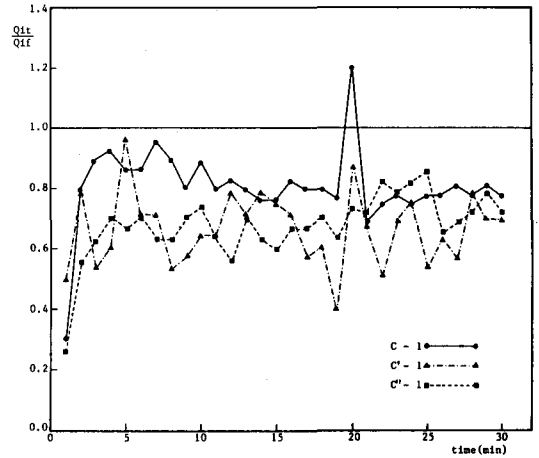


図-2(b) 淡水流入流量の経時変化

表-2 平均濃度フラックス

TYPE	C/C ₀ の区分による面積				S (cm ²)	平均濃度 フラックス	C/C ₀ の区分による濃度フラックスとその割合				(S)	(SC)	S (SC)	S (SC)	S (SC)	S (SC)
	1.00 -	0.75 -	0.50 -	0.25 -			1.00 -	0.75 -	0.50 -	0.25 -						
A-0	466.4	148.4	175.8	242.4	1,033.0	492.2	349.8	71	74.2	15	43.9	9	26.2	5	1.00	1.00
C-1	447.4	128.9	171.6	145.9	893.8	457.5	335.5	73	64.5	14	42.9	9	14.6	3	0.87	0.93
C-2	330.5	168.3	127.1	82.5	908.4	522.1	397.9	76	84.2	18	31.8	6	8.2	2	0.88	1.06
C-3	366.0	136.2	122.5	79.0	903.7	531.1	424.5	80	68.1	13	30.6	6	7.9	1	0.87	1.08
D-1	749.3	253.9	227.5	179.0	1,409.7	763.7	562.0	74	126.9	17	56.9	7	17.9	2	1.36	1.35
D-2	1,003.2	213.4	254.5	179.8	1,651.0	940.8	732.5	80	108.7	11	63.6	7	18.0	2	1.60	1.91
D-3	1,246.8	243.2	254.5	270.4	2,015.4	1,147.5	935.1	82	121.6	11	63.7	6	27.0	2	1.95	2.33
A'-0	153.4	72.9	83.3	55.2	365.1	178.0	115.1	65	36.5	21	20.9	12	5.5	3	0.35	0.36
B'-1	220.2	108.0	118.2	146.3	592.7	263.4	165.2	63	54.0	21	29.5	11	14.6	6	0.57	0.34
B'-3	908.6	178.3	175.0	156.2	1,418.1	829.4	681.4	82	89.1	11	43.2	5	13.6	2	1.37	1.69
C'-1	181.9	93.6	110.8	188.4	576.8	231.3	137.9	60	46.8	20	27.7	12	18.8	8	0.56	0.47
C'-3	452.5	101.0	109.1	69.3	731.9	424.1	339.3	80	50.5	12	27.3	6	6.9	2	0.71	0.86
D'-1	236.4	109.4	117.6	148.8	612.1	276.3	177.3	64	54.7	20	29.4	11	14.9	5	0.59	0.56
D'-2	533.3	176.9	212.3	211.4	1,135.9	562.6	400.0	71	88.4	16	53.1	9	21.1	4	1.10	1.14
D'-3	711.2	192.1	198.3	155.2	1,256.8	694.5	533.4	77	96.1	14	49.6	7	15.5	2	1.22	1.41
A''-0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B''-1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B''-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C''-1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C''-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D''-1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D''-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D''-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

考察することができる。図-4は同一揚水条件下における各実験系列での矢板による阻止効果を比較したものである。

これらの図表から明らかにされる塩分侵入阻止効果を簡潔に示せば次のようである。

i) 無矢板条件下で揚水が付加された各実験では、平均濃度フラックス比 $(SC)/(SC)_{A-0}$ の値は塩水化域面積比 $(S)/(S)_{A-0}$ の値よりも大きく、しかもその傾向は揚水量が大きくなるほど顕著である。このことは、揚水付加に伴う吸引作用によって塩水化域内の濃度分布が変化して高濃度域の割合が増大することを示している。

ii) 矢板開口幅 20cm の場合は、過剰揚水条件を除けば濃度フラックス比と面積比の値はほぼ等しく、さらに開口幅を 10cm とした場合には、過剰揚水であってもこれらの比の値はほぼ等しいことがわかる。このことは、塩水化域内における塩分濃度分布の相似性が保たれていることを意味しており、揚水条件の相違による影響よりも矢板開口幅の縮小による影響の方が強く効いていると判断できる。しかもその傾向は矢板開口比が小さくなるほど顕著である。

iii) 図-3に示したように、矢板開口比を 1.0 から 0.57 とした場合、塩分侵入阻止効果が無揚水条件の A-0 系列よりも大きくなるのは、いずれも塩水槽より遠方の Na 7 井戸で揚水する実験系列である。グラフの傾きから阻止効果の大きい順に示せば、D-1 系列 (1.54 倍)、D-3 系列 (1.44 倍)、D-2 系列 (1.20 倍) となる。一方、塩水槽近傍の Na 3 井戸で揚水する場合は、阻止効果は A-0 よりも小さく、過剰揚水の C-3 で 0.35 倍、過少揚水の C-1 で 0.7 倍である。

iv) 揚水付加に伴う吸引の影響はいずれのタイプにおいても等しいとして差引き、矢板による実質的な阻止効果についてみれば、図-4に示すように、D-1 系列が A-0 系列にほぼ等しいほかは、いずれの実験系列も A-0 系列より小さいことがわかる。

3-3 塩分侵入速度による評価

各実験毎に、相対塩分濃度値 $C/C_0 = 0.01, 0.10, 0.25, 0.50, 0.75$ の侵入状況を侵入速度図 (図-5、図-6) として表わした。また、そのグラフの傾きから侵入速度値を算出すれば、例えば $Z = 3.75\text{cm}$ 、 $C/C_0 = 0.50$ に対して表-3 のようになる。

ここでは、種々の条件が付加された場合の塩分侵入現象の相違を A-0 タイプの速度値と比較して考察する。

i) 塩水槽近傍 (Na 3 井戸) の下部において揚水を行った C 系列に着目すれば、侵入速度値は揚水量が多いほど大きくなっており、特に鉛直

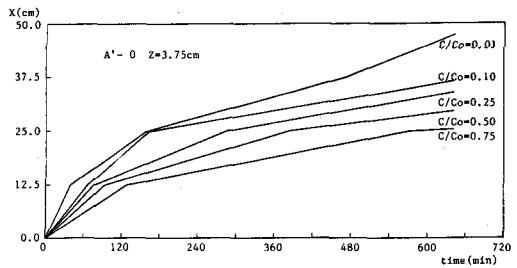


図-5 塩分侵入速度図 (主流方向)

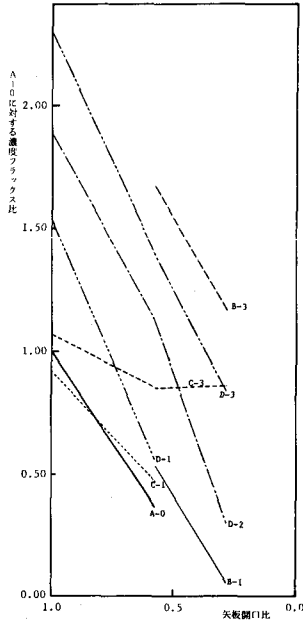


図-3 塩分侵入阻止効果評価図 (揚水・矢板)

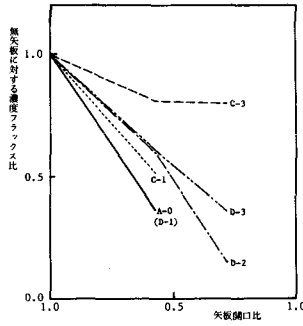


図-4 塩分侵入阻止効果評価図 (矢板)

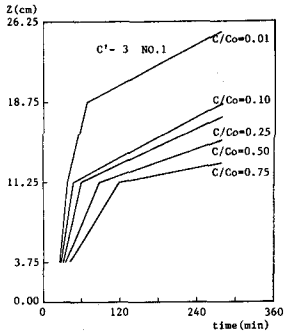


図-6 塩分侵入速度図 (鉛直方向)

方向の速度値の増加率がきわめて大きい。すなわち、このような揚水条件の場合、揚水の吸引効果は主流方向に対するよりも鉛直方向の侵入塩分に大きく作用すると言えよう。

ii) 塩水槽遠方(№7井戸)の下部において揚水を行ったD系列についてみれば、次のことがわかる。過少揚水の場合、塩分侵入初期では速度値がA-0のそれよりも小さいことから、揚水による吸引の効果は現われておらず、塩水の先端部が№3～№4井戸よりも内陸側に侵入した後にその影響が現われることがわかる。しかしながら、過剰揚水の場合には、揚水による吸引の影響が侵入速度増として塩分侵入開始直後から現われている。

iii) 最も危険であると思われる過剰揚水条件のC-3系列とD-3系列に着目し、矢板開口比の減少に伴う侵入速度の変化を考察する。C-3系列の場合、矢板開口比の減少に伴う主流方向の侵入速度のてい減率はA-0系列に比べて小さい。D-3系列の場合、矢板開口比が小さくなるほど主流方向ならびに鉛直方向の侵入速度値が小さくなり、とくに矢板の拘束力は塩分侵入初期において強く作用する。

4. 分散係数に基づく塩分侵入現象の把握

4-1 分散係数の算定法

分散係数を求める基礎式は、塩分の保存則と塩水流れの連続式から導かれ、淡塩界面における連行量や揚水による消失量を見れば、次のようになる。

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

ここに、 h ：任意点(x)における塩水化域の高さ、 U ：塩水侵入流速の断面平均値、 C ：断面平均濃度である。実際の計算手順を次に示す。

i) 観測井戸において、各測点の塩分濃度値 C の供給塩水濃度値 C_0 に対する相対濃度 C/C_0 が0.01以上となる測点が4点の場合には、塩水化域高さ(h)は30cmとし、それが3点、2点、1点の場合にはそれぞれ22.5cm、15.0cm、7.5cmとする。これは、観測井戸における塩水の支配領域を考慮し、その高さを決定したものである。

ii) 断面平均濃度値(C)は、観測井戸内の C/C_0 の値が0.01以上となるすべての測点の値を単純平均したものである。

iii) 観測井戸において、各測点の C/C_0 値が0.01～0.10、0.10～0.25、0.25～0.50、0.50～0.75、0.75～1.00の範囲にあれば、それぞれ代表相対濃度値0.01、0.10、0.25、0.50、0.75の侵入速度を侵入速度図から計算してその測点位置における侵入流速とする。断面平均侵入流速は、それらの値を単純平均して求める。

以上のような仮定の下に算出された h 、 C 、 U を用い、 $\Delta t = 5$ 分、 $\Delta x = 12.5$ cmとし、(1)式を差分化して D_L を算出する。

ところで、第3節で考察したように、揚水条件および矢板条件が付加されると、砂層内の塩分挙動は自然状態(無矢板・無揚水)の場合に比べて大きく異なる。すなわち、種々の条件が付加された場合の塩分侵入現象を詳しく把握するためには、鉛直方向の侵入流速および分散を考慮した二次元解析が必要であろう。そこで、今回は主流方向ならびに鉛直方向の分散係数 D_x 、 D_z がそれぞれの方向の侵入流速 u 、 w に

表-3 塩分侵入速度値(主流方向)

	$Z=3.75\text{cm}$ ($\times 10^{-5}$ cm/sec)							
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
A-0	917	407	155	40	(18)			
C-1	837	451	246	(30)				
C-2	878	639	294	(30)				
C-3	919	761	308	(92)				
D-1	843	578	258	141	104	(49)		
D-2	887	586	217	483	250	138	112	(130)
D-3	968	694	479	356	329	228	84	(51)
A'-0	224	72	(31)					
B'-1	306	172	206	(73)				
B'-3	608	542	1238	155	(38)			
C'-1	350	206	(37)					
C'-3	607	554	273	(73)				
D'-1	290	173	71	(29)				
D'-2	420	290	187	114	130	(57)		
D'-3	495	358	272	186	249	120	(35)	
A''-0								
B''-1								
B''-3	150	276	123	32				
C''-1								
C''-3	545	496	156	(102)				
D''-2	51	53	(19)					
D''-3	284	244	192	141	148	(68)		

表-3 塩分侵入速度値(鉛直方向)

	$(\times 10^{-5}$ cm/sec)					
	NO.1			NO.3		
	1-2	2-3	3-4	1-2	2-3	3-4
A-0	230	(10)		(10)		
C-1	308	(21)		(17)		
C-2	451	68	(13)	(18)		
C-3	528	101	(18)	(15)		
D-1	204	20	(17)	26	(22)	
D-2	332	74	(15)	38	(26)	
D-3	454	117	(14)	103	(20)	
A'-0	(12)					
B'-1	(22)			(51)		
B'-3	279	105	(16)	386	169	(15)
C'-1	(16)					
C'-3	231	(34)		(44)		
D'-1	(10)			(16)		
D'-2	39	(13)		(12)		
D'-3	85	(9)		23	(30)	
A''-0						
B''-1						
B''-3	90	(20)		182	74	(23)
C''-1						
C''-3	291	(31)		(61)		
D''-2	(10)					
D''-3	(10)			(13)		

比例するという仮定を設けて、分散係数を算出し、その経時変化を検討した。すなわち、

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + w \frac{\partial S}{\partial z} = - \left(D_x \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + D_z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (2) \quad D_x = \alpha u, \quad D_z = \alpha w \dots\dots\dots (3)$$

の基本式を差分化して、 $\Delta t = 5$ 分、 $\Delta x = 12.5$ cm、 $\Delta z = 7.5$ cmとして計算する。

4-2 分散係数の考察

図-7～図-9は、一次元移流分散係数 D_L の経時変化の数例を示したものである。これらの図より得られた考察結果を列挙すれば、以下のようである。

i) 無矢板、無揚水条件のA-0タイプ場合、図-7に示したように D_L の値は120分頃までに速やかに減少し、その後緩やかな減少傾向を示しながら660分以降 2.8×10^{-3} cm²/secに収束している。矢板開口比を0.57としたA'-0の場合、実験開始から300分頃までの D_L 値のて

い減率はA-0のそれよりも明らかに小さく、またそれ以後 D_L の値は 0.9×10^{-3} cm²/secに収束している。すなわち、矢板条件付加による塩分侵入現象の相違は D_L の値が約1/3に減少することと塩分侵入全過程が6割程度に短縮することとして現われる。

ii) 図-8に示したC-1タイプの D_L 収束値は、 3.0×10^{-3} cm²/secと読み取れ、A-0のそれよりもわずかに大きい程度である。しかし、最終平衡状態到達時間は明らかにA-0のそれよりも早く、揚水による吸引の影響が D_L 値の経時変化の様相の違いとして現われているといえる。ところで、矢板開口比を0.57としたC'-1の D_L の収束値は 1.2×10^{-3} cm²/secであり、C-1の約4割の値に減少している。これはi)で述べた無揚水実験系列での矢板そう入による減少率よりも小さく、揚水付加による吸引の影響であると判断できる。

iii) 矢板開口比0.57の塩水槽直傍上部過剰揚水であるB'-3タイプの場合、 D_L の値がかなり大きくばらつき、明確な経時変化特性を見出せない。これは、鉛直方向の侵入流速が上部過剰揚水の付加により大きく影響しているものと考えられ、塩分挙動の二次元解析が必要であることを示している。

iv) 塩水槽遠下方部平衡揚水であるD-2タイプの D_L の収束値は 11×10^{-3} cm²/secと、A-0のはば4倍の値を示しており、揚水付加による吸引の効果が分散係数値の増大として現われる。

2次元揚として解析した結果の数例を図-10から図-12に示した。これらの図より得られた考察結果を列挙すれば、以下のようである。

i) A-0タイプの測点No.1-2 ($x = 12.5$ cm、 $z = 11.25$ cm)における D_x 、 D_z の経時変化の様相は、一次元移流分散係数 D_L のそれと類似しているが、それぞれの収束値は 0.35×10^{-3} cm²/sec、 0.12×10^{-3} cm²/secと読みとれ、 D_L の収束値に比べて1オーダー小さい。低濃度塩分が到達する侵入初期には分散係数値が大きく、密度効果

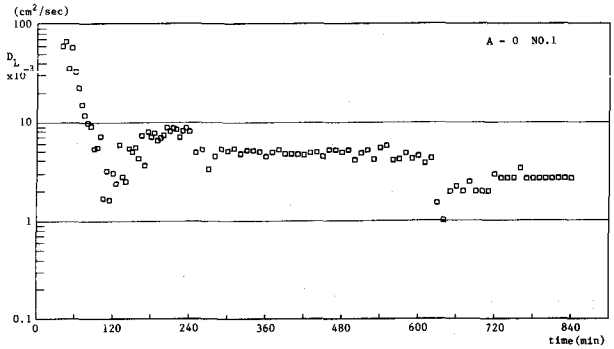


図-7 移流分散係数の経時変化 (A-0)

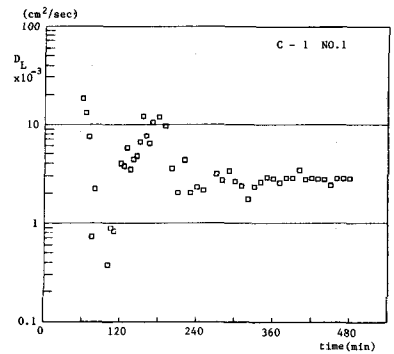


図-8 移流分散係数の経時変化 (C-1)

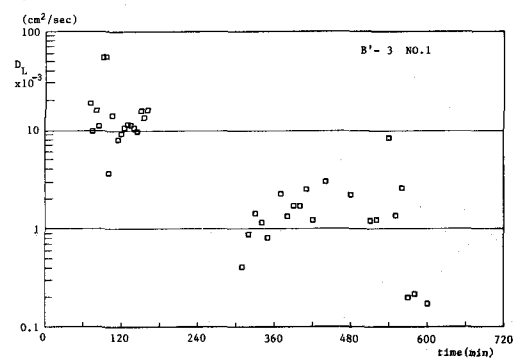


図-9 移流分散係数の経時変化 (B'-3)

によって高濃度塩分が侵入して一定濃度になれば小さい値となる。鉛直方向の分散現象は場所的には大差なく、主流方向のそれは砂層上部ほど、内部ほど大きい。

ii) 図-11に示したB'-3タイプのNo.1-2, No.2-2, No.3-2の各測点における D_x , D_z の収束値は, (0.8, 0.5), (0.4, 0.5), (0.6, 0.3) $\times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ であり, 場所的な相違はほとんどない。また, 図-9では不明確であった経時変化特性がより明確になり, このような場合には2次元解析の必要性があるといえよう。

iii) D-2タイプの測点No.1-2における D_x , D_z の経時変化の様相には, 揚水による吸引効果の影響が明確に現われている。D-2タイプの D_x , D_z の経時変化特性は180分までA-0の場合と類似しているが, 380分以降大きく異なっており, それらの値は, $6.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$, $0.9 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ に収束している。このことから, 揚水の吸引力が380分以降塩水槽近傍の深部における塩分挙動に影響し, 侵入流速の偏差が大きくなり, 新たに移流分散現象が卓越してきたと解釈できる。

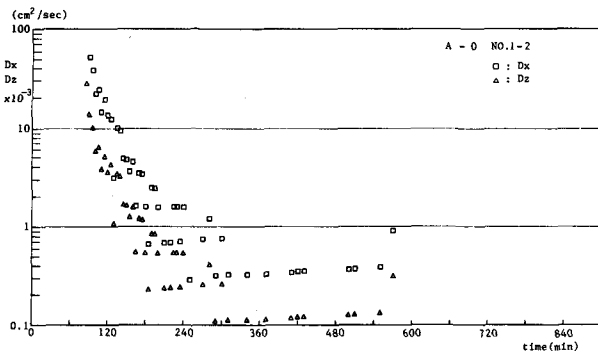


図-10 2次元移流分散係数の経時変化 (A-0)

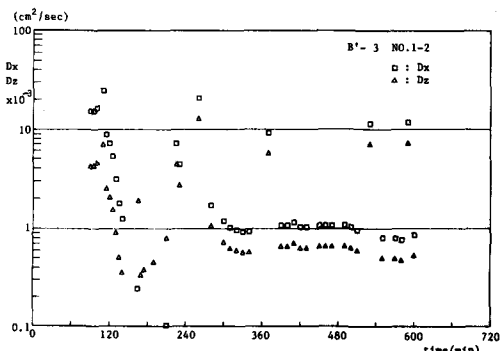


図-11 2次元移流分散係数の経時変化 (B'-3)

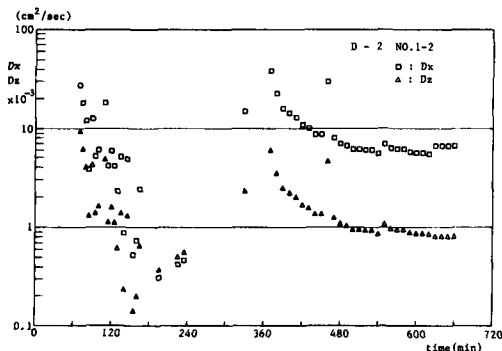


図-12(a) 2次元移流分散係数の経時変化 (D-2)

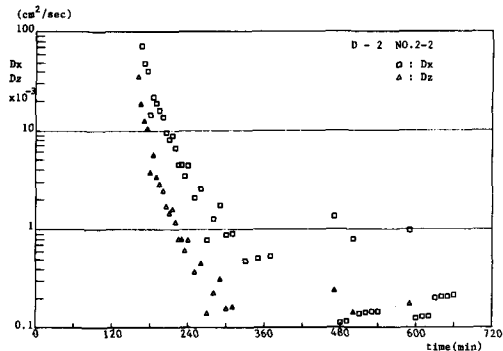


図-12(b) 2次元移流分散係数の経時変化 (D-2)

5. あとがき

本研究では, 塩分侵入現象を分散現象として捉え, 砂層模型実験から揚水による吸引効果と矢板挿入による塩分侵入阻止効果を定量的に比較評価することができた。しかし, なお相似性に関する問題の解決が残されており, 現場への適用についてはさらに理論的表現の改良を必要とする。

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, 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回水理講演会, pp.627~632, 1983.
- 3) 尾島 勝: 自由地下水帯への塩分侵入阻止に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会, pp.670~674, 1984.