

海岸部自由地下水帯への塩分侵入阻止と塩分分散 に関する実験的考察 (第五報)

Experimental Study on Salt Intrusion in Unconfined Groundwater of Coastal Region

福山大学工学部 尾島 勝 Masaru OJIMA
徳島大学大学院 李 圭太 Keita LI

The quality of groundwater in unconfined aquifers is going to become from bad to worse with the increase of the amounts of pumping for agriculture or fish farming. It is especially one the urgent problems to prevent from the saltwater intrusion into the aquifers in many coastal lowland.

In this study, it is tried experimentally to analyze the mechanisms of saline intrusion and to estimate the effects of its check.

The main subjects of consideration are as follows : 1) the calculation of the time-dependent flux of salinity and of the flow velocity of saltwater, 2) the estimation of the defensible effects due to the artificial structures, and 3) the valuation of coefficients on the basis of the one-dimensional dispersion analysis.

Key words : unconfined groundwater, saltwater intrusion, sand-model experiment, dispersion

1. まえがき

地下水の塩水現象は、工業用水の過剰揚水に起因する被圧地下水帯のみならず、農業用・養殖漁業としての揚水量の増大や河道改修工事の進歩に伴う漏水量の減少に起因するものとして、海岸部低平地の自由地下水帯においてもかなり深刻な社会問題になりつつある。侵入塩分挙動は、揚水条件の変化や護岸矢板などの開口条件（根入れ深さ）の相違によって異なる。したがって、このような複合的な人為条件の変化に伴う塩分侵入・分散機構ならびに侵入阻止効果の解明が急務である。すでに、護岸矢板の設置、ウォーターカーテン法、最適揚水量の決定など基礎的研究が成されているが、^{1), 2), 3), 4)} 海岸部低平地における複雑な地盤構造を考慮した密度流現象の実態把握やその変化予測に関してはいまだ十分であるとはいえず、多くの応用的研究が進められつつある。著者らも塩水化防止策を見いだすために、現地観測や室内砂層模型実験などによってすでにいくつかの成果を得ている。⁵⁾ 本研究は、砂層模型実験を基本とする一連の研究の第五報となるものであり、塩分侵入機構を移流分散過程としてとらえるときとくに塩分侵入速度ならびに分散係数値の算出精度を高めることを主要課題としている。

2. 実験方法

本研究では、従来とほぼ同様の砂層模型を用いているが、砂層下流端($X=0$)における塩分濃度計測と砂層内水面形計測に改良を加えている。砂層模型は、図-1にその諸元を示したように、長さ 207cm、

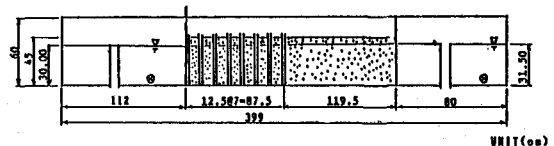


図-1 実験水槽

幅 43cm、高さ 45cm の単一砂層であり、使用砂の物理諸元は、 $d_{10}=0.29\text{mm}$ 、 $U_c=2.28$ 、 $k_s=0.044\text{cm/sec}$ 、 $\lambda=0.48$ である。砂層下流端から 12.5cm 間隔で中心線上に設置された 8 本の濃度観測用センサーが設置されている。塩水槽水深 h_s は 30cm、淡水槽水深 h_f は 31.5cm である。

実験方法は次のとおりである。1) まず、所定的水位条件 ($\Delta h=1.50\text{cm}$)・矢板開口条件の下に淡水定常流れをつくり、上流側淡水槽への供給流量と余水吐からの越流流量、下流側余水吐からの流出流量を測定して、

初期定常浸透流量と砂層平均透水係数を決定する。2)次に、下流側塩水槽に止水板をはめ、槽内の淡水を塩水($\rho_2=1.024\text{g/cm}^3$, $\text{Cl}^-=18300\text{ppm}$)に置き換えヘッドタンクからそれぞれ淡・塩水を供給して上下流貯水槽水深を所定の水深に保つ。3)止水板をはずすと同時に実験開始となり、必要計測量の測定が行われる。測定時間間隔は実験開始から3時間までは5分、5時間までは10分、7時間までは15分、9時間までは20分、そ

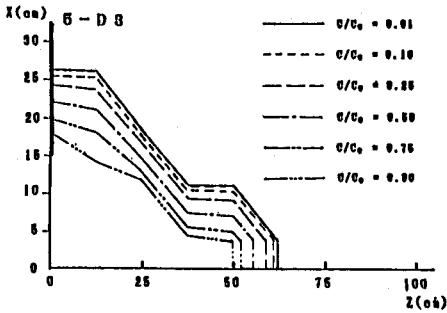


図-2 等塩分濃度線図

の後は実験終了まで30分とした。実験ケースは、表-1に示すように表記される。揚水量は、初期定常浸透流量のほぼ1.5倍のいわゆる過剰揚水とし、その揚水位置と揚水高さを変えている。各計測時における各プロブの測定濃度値に基づき、塩水化域(相対濃度 $C/C_0 \geq 0.01$)の決定と相対塩分濃度($C/C_0=0.01, 0.1, 0.25,$

$0.5, 0.75, 0.9$)に対する侵入流速の算出と等濃度線図(図-2)の作成を行う。

3. 塩分濃度フラックスの経時変化に基づく考察

塩分侵入過程を定量的に比較考察する物理量として、各井戸断面を通過する塩分量(平均濃度フラックス)を用いた。その算出方法は次のとおりである。1)まず、各計測時に対して作成された等塩分濃度線図から、対象井戸断面よりも内部へ侵入している総塩分量を計算する。すなわち、等濃度線間の閉領域の面積にその等濃度線図の平均濃度を乗じて塩分量とし、これを加算して総侵入塩分量が求まる。2)次に、この総侵入塩分量の差を計測時間で除し、さらに塩水水深で除して、単位時間単位面積当りの侵入塩分の増加量が求まる。これが各断面(井戸)、各時刻における塩分濃度フラックスである。このようにして求めた塩分濃度フラックスの経時変化図の一つのシリーズとして塩水槽近傍上部揚水条件の解析結果を図-3に示した。これらの経時変化図より次のような考察結果を得る。

1)フラックスの経時変化の様相は、実験開始200分程度までの初期では変動幅が大きくまた、井戸毎にかなり異なっているといえる。しかし、それ以後の経時変化は、各井戸とも類似の変動の様相を示していることがわかる。とくに揚水の影響が強い実験ケースほどその傾向が明確である。すなわち、塩分侵入過程の初期では、塩分挙動の非線形性、非定常性が強いことが推測される。

2)無揚水条件下では矢板開口比の減少とともに濃度フラックス値は急速に小さくなり、開口比6/10以下では、フラックス値は微小である。以後は各井戸とほぼ同じ低濃度フラックスを保持した定常な侵入過程である。したがって、矢板による塩分侵入阻止効果が大いといえる。

3)塩水槽近傍上部揚水条件のU-3系列についてみれば、いずれのケースでも200分までの初期段階において大きなフラックス値を示しており、速やかに多量の塩分が侵入しているといえる。また、矢板開口比5/10の実験ケースを除く他の5ケースでは、No.0~No.3の井戸において300~400分に明確なピークが認められ、その後もかなり大きなフラックス値を示しながら塩分侵入過程が継続しているのに対しケース5-U3では200

表-1 実験ケース

CASE	揚水井戸	揚水高さ	浸透流量 (cc/min)	揚水量 (cc/min)	上流水深 (cm)	下流水深 (cm)	造水係数	計測時間 (min)
10	—	—	80	—	31.51	30.00	0.104	1470
8	—	—	58	—	31.50	30.00	0.104	1380
6	—	—	93	—	31.52	30.01	0.170	1320
5	—	—	103	—	31.53	30.02	0.189	420
4	—	—	117	—	31.56	29.99	0.211	660
2	—	—	100	—	31.80	30.06	0.189	190
10-U3	No.3	下部	46	68	31.51	30.01	0.078	1050
8-U3	No.3	下部	74	111	31.51	30.00	0.132	900
6-U3	No.3	下部	72	108	31.51	30.00	0.132	900
5-U3	No.3	下部	99	150	31.51	30.00	0.182	600
4-U3	No.3	下部	118	177	31.50	30.00	0.223	480
2-U3	No.3	下部	93	160	31.52	30.10	0.190	630
10-U3	No.3	上部	68	102	31.52	30.01	0.117	1320
8-U3	No.3	上部	53	80	31.50	30.00	0.096	900
6-U3	No.3	上部	79	119	31.50	30.00	0.145	930
5-U3	No.3	上部	97	146	31.51	30.01	0.179	660
4-U3	No.3	上部	101	152	31.51	30.00	0.190	690
2-U3	No.3	上部	98	147	31.61	30.03	0.180	990
10-U6	No.6	下部	89	104	31.50	30.00	0.120	1280
8-U6	No.6	下部	61	92	31.50	30.00	0.109	1200
6-U6	No.6	下部	72	108	31.51	30.00	0.132	1710
5-U6	No.6	下部	95	147	31.52	30.01	0.175	1050
4-U6	No.6	下部	100	150	31.51	30.00	0.188	750
2-U6	No.6	下部	90	135	31.49	30.11	0.190	870
10-U6	No.6	上部	79	120	31.51	30.00	0.138	1440
8-U6	No.6	上部	48	72	31.50	30.01	0.086	1740
6-U6	No.6	上部	61	92	31.52	30.01	0.111	1650
5-U6	No.6	上部	93	140	31.51	30.02	0.175	2040
4-U6	No.6	上部	95	148	31.53	30.00	0.178	1020
2-U6	No.6	上部	116	164	31.91	30.07	0.182	1320

分以後はフラックス値は急速に小さくなり、塩分侵入域もNo.2井戸までにとどまっている。したがって、U-3系列の場合は矢板開口比5/10で阻止効果が最も大きくなるといえる。

4) 塩水槽近傍下部揚水のD-3系列についてみれば、300~400分においてU-3系列ほど明確なピークは認められず、また、フラックス値もU-3系列に比べてやや小さい。このことは、同じ矢板開口比であれば揚水高さが下部の方が塩分侵入阻止効果が大きいといえる。

5) 塩水槽遠方上部揚水条件のU-6系列についてみれば、矢板開口比が10/10, 8/10, 6/10 5/10の場合には400~500分、および700~800分においてフラックス

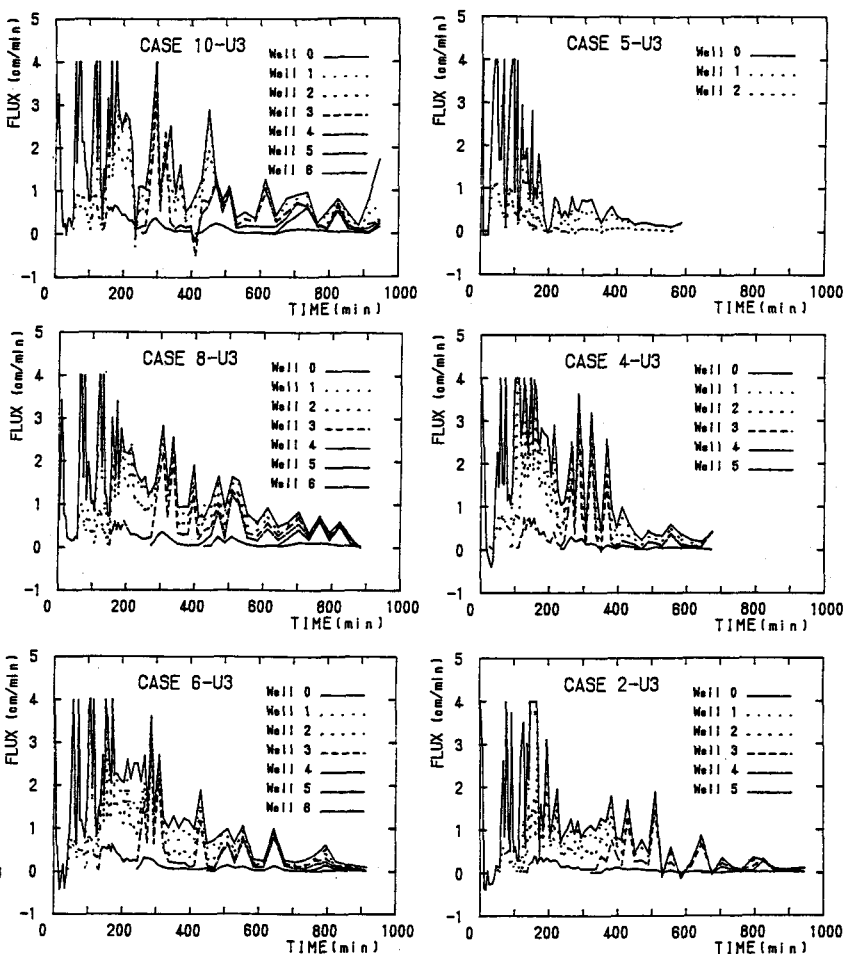


図-3 FLUXの経時変化図

値にかなり明確なピークが認められる。したがって、この条件下では開口比が4/10が最も有効な阻止効果を発揮しているといえる。

6) 塩水槽遠方下部揚水条件のD-6系列についてみれば、開口比5/10でフラックス値は極めて小さくなり明確な阻止効果が認められる。開口比をさらに4/10, 2/10と小さくしてもフラックス値は逆に増大し塩分侵入を助長することになり上部揚水条件の4-U6, 2-U6に比べて塩分侵入阻止効果は劣る。

4. 塩分侵入速度に基づく考察

塩分侵入機構を解明しようとするとき、塩分侵入速度の計測あるいは算定が一番問題となる。現状ではフィールドにおいても実験室においても浸透流速を直接的に計測することは非常に難しく、流量・水位あるいは塩分濃度値の経時変化を介して間接的に算出するしかない。ここでは流速算定法として、著者らがすでに提示している地点塩分濃度値の経時変化に基づく方法の妥当性を検証する目的で、総侵入塩分量の経時変化(平均濃度フラックス値)に基づく方法との比較考察を行った。本解析における地点塩分濃度値の経時変化に基づく侵入流速の算出手順は次のようである。

①濃度測定用プローブの設置高さは、塩水槽水深30cmを4分割したそれぞれの中央点である。侵入塩分の移動は主流方向(X方向)に卓越しているものとし、各分割層での塩分移動はそれぞれ独立であるとする。

②測点(X_i, Z_i)において、相対塩分濃度 C_k ($k=1, \sim 6$)を感知した時刻 t_k を求め、測点間距離12.5cmをそれ

その所要時間で割れば移動速度 $u_{k,j}^k$ が求まる。

③測点 (X_i, Z_j) において、 k 番目の濃度値を感知し、次の $(k+1)$ 番目の濃度値を感知するまでの時間 $(t_{k+1}-t_k)$ において k 番目までのすべての濃度値が次の測点 (X_{i+1}, Z_j) にはまだ到達していない場合には、移動速度として $\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k u_{k,j}^k$ を採る。 $(k-1)$ 番目までの濃度値がすでに (X_{i+1}, Z_j) に到達している場合には、移動速度として $\frac{1}{k} (\sum_{i=1}^{k-1} u_{k,j}^k + u_{k,j}^k)$ を採る。 k 番目の濃度値もすでに (X_{i+1}, Z_j) に到達している場合には、移動速度として $\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k u_{k,j}^k$ をとる。

④上記のようにして求めた各時刻における移動速度を濃度感知層 j について平均して、 i 断面における塩水化域断面の平均移動速度とする。

⑤時間が経過して、到達 (X_i, Z_j) で最大の相対塩分濃度 C_0 を感知した時刻 t_0 以降については、測点 (X_{i+1}, Z_j) における移動速度を用いて連続条件を満足するように定める。

一方、平均濃度フラックス値に基づく侵入流速の算出方法は次のようである。

前節3.で説明した手順で、各井戸断面を通過する平均濃度フラックスが求まる。塩分 C が流れの速度 u に乗りきって移動するものとすればフラックスは、 $\langle \text{FLUX} \rangle = \langle cu \rangle = \langle D_n \partial c / \partial x \rangle$ と表される。ここで、右辺第2項の大きさを逆同定してやるために、この項を無視して $\langle u \rangle = \text{FLUX} / \langle c \rangle$ から流速値を求めてみた。算出結果の一例として図-4に塩分濃度値からの計算値をDS、濃度フラックスからの値をFSとして、その経時変化を示した。

図中の△印は地点塩分濃度変化から算出した侵入流速DS(cm/sec)であり、○印は濃度フラックス値からもとめた侵入流速FS(cm/sec)である。

これらの図から明らかになった事項を簡潔に示せば次のようになる。

①無揚水条件の実験シリーズについてみれば、矢板開度が大きいケース10,8,6ではFS値の変動幅が若干大きいものの、その速度減衰の様相はDSのそれとよい一致を示している。また、それらの速度値の最終定常値は矢板開口比が小さくなるほど小さくなる傾向が現れており、FS値とDS値の差は小さくなっているといえる。しかしながら、開口比が5/10,4/10とさらに小さくなり、矢板による侵入阻止効果が大きくなる場合には、DS値はむしろ大きくなり、時間的にみてもほぼ一定($7 \sim 8 \times 10^{-4}$ cm/sec)であるのに対し、FS値は時間経過とともに急速に減衰して他のケースとほぼ同じ定常値 $7 \sim 8 \times 10^{-5}$ cm/secとなっている。

②塩水槽近傍上部揚水のU3シリーズでは、DSの最終定常値は矢板開口比の減少とともにケース4-U3まで漸減して、 3×10^{-4} cm/secまで低下するが、開口比が2/10の2-U3では 1×10^{-3} cm/secに再び大きくなっている。一方、FS値の最終値のちがいはほとんどないがD3シリーズの方がDSとFSの速度減衰の様相がよく一致している。

③塩水槽遠方上部揚水条件であるU6シリーズについてみれば8-U6, 6-U6, 5-U6では侵入過程の後半ではDSとFSの値はほぼ一致していることがわかる。D6シリーズでは8-D6と6-D6で上記と同様の傾向を示している。

以上のように各シリーズ毎の変化特性を明らかにしたが、揚水による吸引の影響が強くなれば、侵入流速値も大きくなるが、そ

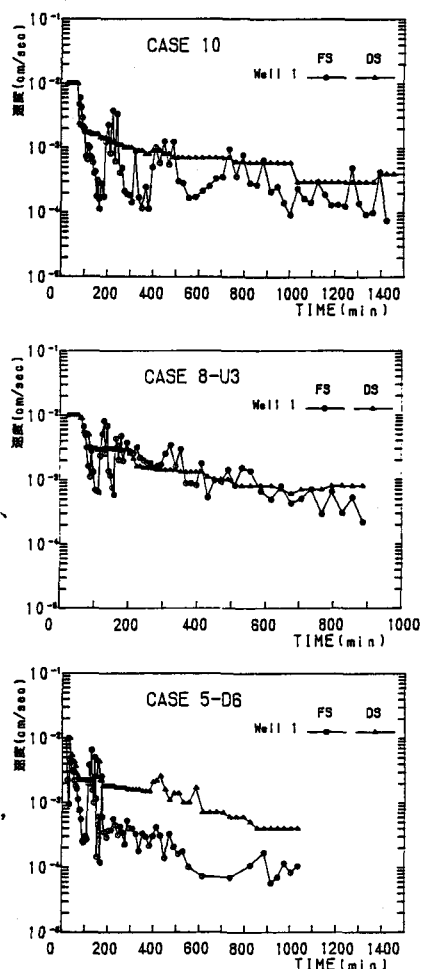


図-4 主流方向の速度図

の定量的評価ができたことになる。また、FS値の最終定常値が揚水条件および矢板開口比条件の相違にかかわらずほぼ一定値となることから分子拡散係数項の影響は小さいといえよう。

5. 一次元移流分散係数に基づく考察

実際地下水塩分の挙動を広域的に解析するに当たっては、限られた観測井戸において得られた水位ならびに塩分濃度値に基づいて、透水係数(k)や分散係数(D_L)を推定せざるを得ない。最も単純な一次元移流分散現象としての理論的取扱においても、流速(U)、塩水化域水位深(h)、それにD_Lが未知量である。分散係数は場の定数であるから、本研究のような基礎的モデル実験から得られた値も、矢板開口条件や揚水条件の相似性が保たれる現場には適用が可能であろう。したがって、このような基礎的モデル実験の結果として、複合条件下における分散係数値の変化特性とその収束値が求められるならば、未知量は、流速と塩水化水深の2つに経るから、水位境界条件の設定と限られた測点における水位および塩分濃度の観測値に基づいて、対象域全体の塩分挙動の再現計算や将来変化予測が可能となる。

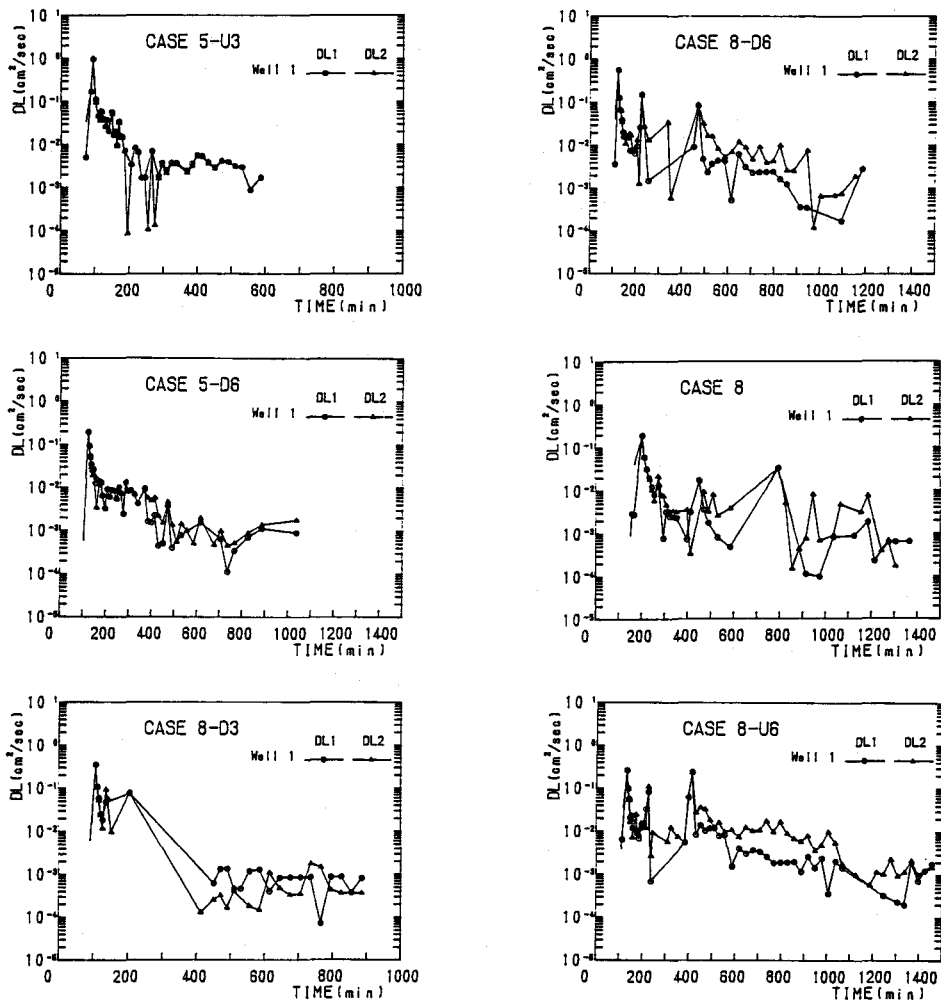


図-5 DLの経時変化図

一次元移流分散は、

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

であり、これを次のように差分化して、分散係数DLを求める。

$$\frac{c_i^t - c_{i-1}^{t-1}}{\Delta t} + u_i^t \frac{c_i^t - c_{i-1}^t}{\Delta t} = -D_L \left\{ \frac{c_{i+1}^t - 2c_i^t + c_{i-1}^t}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{h_i^t} \frac{(c_i^t - c_{i-1}^t)(h_i^t - h_{i-1}^t)}{(\Delta x)^2} \right\}$$

各実験ケースにおいて次のように必要諸量を算出する。

- ①各断面における塩水化域水深 h_i^t は、測定値から相対濃度0.01となる位置を線形内挿により求める。
- ②断面平均濃度値は、相対濃度0.01以上の塩水化域の面積平均とする。
- ③断面平均流速は前節で求めた2種の値を用いる。
- ④ ΔX は井戸間距離12.5cmであり、 Δt は測定時間間隔とする。

以上のような値を用いて各時刻における分散係数値を計算した。

今回、前節で求めた流速PS、およびDSより移流分散係数を算定したものをDL1, DL2 とした。図-5は数ケースについてDL1, DL2 はほぼ一致していることが明らかである。とくに、3・4節で考察したように揚水を考慮しDL1, DL2 は明確に一致する。

揚水条件を付加した実験ケースに着目すると、ケース8-D3と8-U3を比較対象すれば明らかなように吸引効果の増大によってDL値は増大する傾向にある。8-D3では $10^{-3}(\text{cm}^2/\text{sec})$ 程度に収束し、さらに減少していることなどからも明確である。

揚水高さに着目すると、収束する時間に差はあるもののDL値はほぼ同じである。また矢板開口比の減少とともに値は多少ではあるが、小さくなる。揚水の吸引効果の増大による影響がさらに強くなれば、見掛け上DL値に負値も現れる。

6. あとがき

今回の報告では、塩分侵入過程を侵入塩分の濃度フラックスの経時変化図と濃度フラックスから算定した侵入流速の考察に力点を置いた。しかし、フラックスから算出した流速値の理論的論拠があいまいであり、今後この点を明確にする必要がある。さらに、ここで得た分散係数値を用いた現地における現象解析を進め、その適用性の評価を行いたい。

- 参考文献
- 1) 尾島 勝・鎌田義人・坂東敏雄：不圧帯水槽への塩分侵入に対する揚水および護岸矢板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) 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回海岸工学講演会論文集、pp.670~674、1984。
 - 3) 岩崎敏夫・江塚利幸：移流分散現象と考えた海岸地下水における塩分侵入過程の解析、第28回海岸工学講演会論文集、pp.510~514、1981。
 - 4) 嶋山正常・細川土佐男・阿部孝行：地下水汲み上げによる淡塩水境界面の低下、土木学会論文報告集、No.236、pp.83~90、1979。
 - 5) 尾島 勝・天羽誠二：感潮河川内浚渫による地下水塩水化の変化予測、第29回海岸工学講演会論文集、pp.530~534、1982。