

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

尾 島 勝*・鎌 田 義 人**・板 東 敏 雄**

1. 緒 言

わが国の急速な産業の発展と生活水準の向上は、大量の水の利用のもとに成り立っていることは、衆目の一致するところである。特に沿岸部低平地における水需要の増大は、表流水のみならず地下水にその供給源を求める傾向を一層強めており、建設省の推計では用水量の20%近くを地下水に依存し、とりわけ工業用水においては50%近くに達するとされている。したがって、沿岸部低平地における地下水の過剰揚水が原因となる地下水位の低下や地盤沈下、あるいは沿岸部地下水の塩水化の進行などの社会問題が各地でかなり深刻化してきている。

そこで、本研究は、特に不圧滞水層中における塩分の非定常侵入過程の解明をめざし、影響要因と考えられる揚水条件の相違、護岸矢板根入れ条件の相違との関連において実験的に論ずる。すなわち、実験滞水砂層中における塩分の侵入速度、濃度分布特性、濃度拡散および淡塩界面形状に関して、ここで考慮した外的影響要因の影響度を定量的に分析評価する。

2. 実験および実験方法

実験水槽本体は 図-1 に示すように、長さ 300 cm、幅 40 cm、深さ 60 cm の前面アクリライト張りの鋼製水槽であり、過マンガン酸カリウムで赤着色された塩水楔の侵入状況が目視できるようになっている。

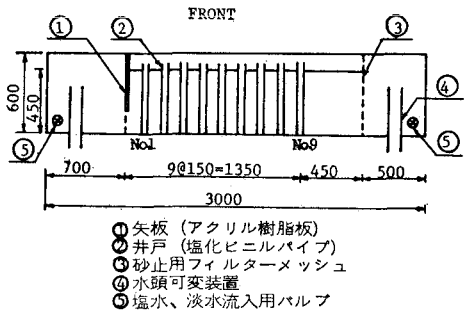


図-1 実験モデルとその諸元

滞水層は、鋼製水槽のフィルターメッシュの内幅 180 cm に高さ 50 cm まで粒径 2.5 mm 以下のふるい砂 (有効径 0.35 mm, 均等係数 1.84, 透水係数 0.71 cm/sec) を敷きつめたものとし、等方均質であり、流れは準一次元であると仮定する。その砂層中心線上 15 cm 間隔に集水孔を切った内径 5 cm の塩化ビニールパイプ 9 本を打設して揚水井および観測井とする。この砂層模型において、上流淡水槽水深は 36.8 cm, 下流塩水槽水深は 35 cm に保たれ、また供給塩水の塩分濃度 (Cl-) はほぼ 20 000 ppm に保たれており、淡塩水密度差 $\epsilon=(\rho_s-\rho_f)/\rho_f=0.034$ である。

上記の砂層模型によりまず無矢板の状態での基本的な揚水実験を行ない、さらに塩水槽と砂層との境にアクリル樹脂製の護岸矢板を設け、水槽底面よりの開口幅を 20 cm, 15 cm, 10 cm と変える場合の効果をはっきりさせるために同様の実験を行なう。今回の実験をその目的別に分類すれば次の 4 通りである。

- i) 無矢板 (矢板を挿入しない) の場合
- ① 無揚水時の塩水楔の挙動と砂層内塩分濃度の変

表-1 実験タイプ

TYPE	WELL	STR.	Q	TYPE	WELL	STR.	Q
A-0	—	—	—	A'-0	—	—	—
B-1	No. 2	upper	Q ₁	B'-1	No. 2	upper	Q ₁
B-2	No. 2	upper	Q ₂				
B-3	No. 2	lower	Q ₁	B'-3	No. 2	lower	Q ₁
B-4	No. 2	lower	Q ₂	B'-4	No. 2	lower	Q ₂
C-1	No. 5	upper	Q ₁	C'-1	No. 5	upper	Q ₁
C-3	No. 5	lower	Q ₁	C'-3	No. 5	lower	Q ₁
C-4	No. 5	lower	Q ₂	C'-4	No. 5	lower	Q ₂
A''-0	—	—	—	A'''-0	—	—	—
B''-1	No. 2	upper	Q ₁	B'''-1	No. 2	upper	Q ₁
B''-3	No. 2	lower	Q ₁	B'''-3	No. 2	lower	Q ₁
B''-4	No. 2	lower	Q ₂	B'''-4	No. 2	lower	Q ₂
C''-1	No. 5	upper	Q ₁	C'''-1	No. 5	upper	Q ₁
C''-3	No. 5	lower	Q ₁	C'''-3	No. 5	lower	Q ₁
C''-4	No. 5	lower	Q ₂	C'''-4	No. 5	lower	Q ₂

WELL: 揚水井戸
STR.: ストレーナ高さ
upper — 3~5 cm
lower — 20~25 cm
' : 開口幅 20 cm
'' : 開口幅 15 cm
''' : 開口幅 10 cm

Q: 揚水量
Q₁=150 (cc/min)
Q₂= 50 (cc/min)

* 正会員 工博 徳島大学助教授 工学部土木工学科
** 正会員 徳島県庁
*** 正会員 建設技研

化

② 揚水時の塩水楔の挙動と砂層内塩分濃度の変化

ii) 矢板を挿入した場合

① 無揚水時の塩水楔の挙動と砂層内塩分濃度の変化

② 揚水時の塩水楔の挙動と砂層内塩分濃度の変化

なお、揚水を行なう場合には、揚水条件すなわち揚水地点、揚水高さ、揚水量を変えることによりそれらの影響度の解明をめざした。さらに矢板条件との組合わせにより実験ケース(表-1)は無矢板 8, 矢板開口幅 20 cm で 7, 15 cm で 7, 10 cm で 7 の合計 29 である。

3. 実験結果とその考察

3.1 淡塩界面の挙動に関する考察

(1) スケッチによる淡塩界面の挙動

図-2 には、水槽前面に現われた過マンガン酸カリウムで赤着色された塩水楔の侵入状況を 30 分ごとに描いたものである。地下水の塩水化は、図-2 に示すように進行し、やがて定常状態に達するものと思われるが、楔先端あるいは界面上層部の時間的な動きに着目すれば、楔先端部は一定の速度で侵入するのではなく、侵入速度は初期に速く、次第に指数的に減少し、上層部ほど侵入速度は遅く、楔先端部に比べその動きは等速的であるとされる。

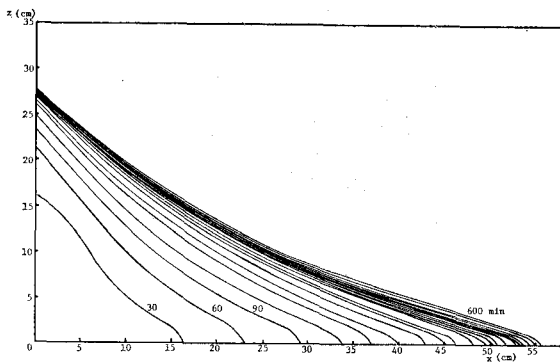


図-2 淡塩界面の時間的変化

(2) 定常理論との比較考察

海岸線における鉛直流速の効果を考慮した Nomitsu et al.¹⁾の手法によると、図-3 のように座標系をとり、それぞれの水理量を図中のように表わせば、 $x=0$ すなわち海岸線における淡水層の厚さ h_{10} と境界面形状は次式で表わされる。

$$h_{10} = |Q_L| \sqrt{(1+\varepsilon)/2} / k\varepsilon \approx |Q_L| / \sqrt{2} k\varepsilon$$

$$x = \varepsilon k (h_1^2 - h_{10}^2) / 2 |Q_L|$$

ここに、 Q_L : 単位幅当りの淡水流量、 k : 透水係数、 ε : 密度差 ($\Delta\rho/\rho_1$)、 h_1 : 淡水深である。

A-0 の実験結果と理論解の比較したものが 図-4 で

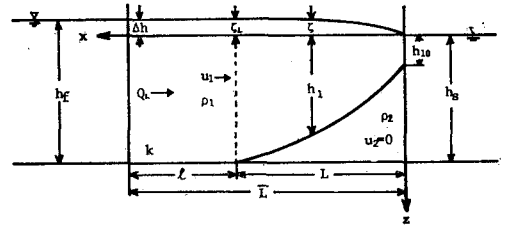


図-3 定常塩水楔理論の座標系

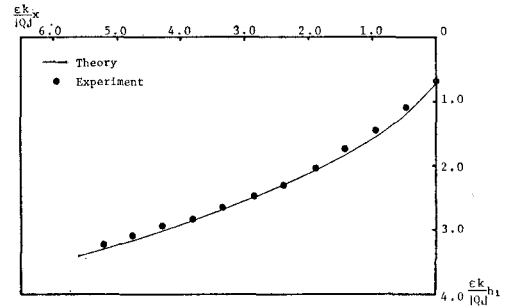


図-4 塩水楔形状の実験結果と理論解の比較

ある。なお、実験条件は、 $k=0.167$ cm/sec、 $h_s=35$ cm、 $h_f=36.8$ cm、 $|Q_L|=5.967 \times 10^{-2}$ cm²/sec、 $\varepsilon=0.034$ である。図-4 からわかるように、定常状態において塩水楔理論は実験結果とかなりの精度で適合性があるといえる。

(3) 非定常理論解との比較考察

Shima²⁾による解法における非定常理論の基礎式をここに示す。

$$\bar{X} = \sqrt{2} \beta \xi = \frac{(1-\alpha)\beta}{(1-\eta)(\alpha-\beta)} \left\{ \frac{1}{\mu} \log \frac{1-\mu\alpha}{1-\mu\xi} - \xi + \alpha \right\}$$

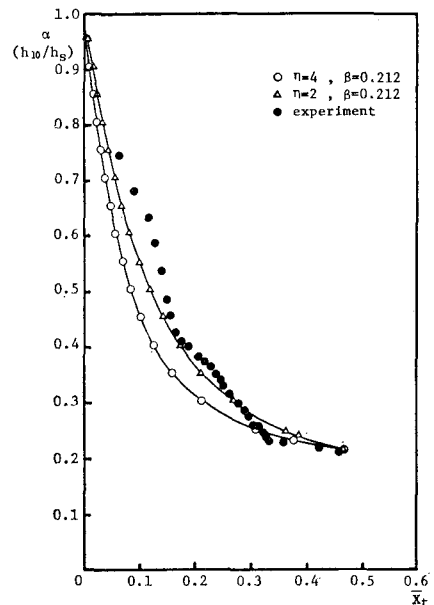


図-5 $\alpha-X_t$ に関する理論と実験の比較

$$\bar{X}_t = \frac{(1-\alpha)\beta}{(1-\eta)(\alpha-\beta)} \left\{ \frac{1}{\mu} \log \frac{1-\mu\alpha}{1-\mu} - 1 + \alpha \right\}$$

ここに, $\mu = \frac{(1-\eta)(\alpha-\beta)}{\alpha(1+\beta(\eta-1)-\eta\alpha)}$, $\alpha = \frac{h_{10}}{h_s}$, η ; 定数,
 $\beta = \lim_{t \rightarrow \infty} \alpha = \frac{|Q_L|}{\sqrt{2ksh_s}}$, $\bar{X}_t = \frac{|Q_L|X_t}{ksh_s^2}$, X_t ; 楔先端の位置,
 h_{10} ; $X=0$ における淡水深である。

図-5 に海岸線から楔先端までの距離の無次元化したもの $\bar{X}_t$ と淡水深と開口幅の比 ($\alpha = h_{10}/h_s$) の関係を示す。図は実験値と定数 η を変化させた理論解と比較をしたものである。 α が 0.25 以上の時には、楔先端の位置は理論値よりもかなり大きい値を示していることがわかる。換言すると、侵入初期においては、塩水楔は理論よりも早く侵入するといえる。非定常理論においても、定常状態に近くなれば実験値との適合性は良いと認められたが、非定常非線形性が強いと考えられる初期においては、適合性は十分であるとはいえず検討を要することがわかる。また、実験定数 η についても再考が必要である。

(4) 揚水条件の相違による塩水楔の挙動 (無矢板)

塩水槽より遠くで過剰揚水を行なえば、楔先端は必ずその位置まで侵入し、さらに上部で揚水する場合には淡塩界面を上部に引き上げる結果となる。

また、塩水槽の近くで過剰揚水を行なえば、上部揚水では揚水地点まで淡塩界面は上昇し、上に凸の状態となり楔長もそれだけ長くなるが、下部揚水では揚水地点以上には侵入せず定常に達するという顕著な違いが見られる。

過少揚水では、その揚水位置、揚水高さにかかわらず楔先端の侵入を少し助長する傾向が見られるだけである。

(5) 矢板の開口幅の相違による塩水楔の挙動

矢板の開口幅を 20 cm, 15 cm, 10 cm としたときの各タイプの定常時の淡塩界面を比較考察すると、無揚水時においては塩水楔の侵入長は矢板の開口幅が小さいほど短いことがわかる。すなわち、滞水層に人為的要因が加味されない場合に矢板による塩水侵入阻止効果が現われている。一方、過剰揚水を行なえば、矢板の開口幅を変えても塩水楔の侵入を阻止することはできず、その侵入長は揚水条件に支配され、ほぼ一様な値となるように思われる。すなわち、矢板を挿入することによって塩水楔の侵入速度を遅くすることは可能であっても、過剰揚水が行なわれた場合には、矢板による塩水侵入阻止効果

は望めないことがわかる。換言すると、同一揚水条件のもとで矢板の開口幅による塩水侵入阻止効果を見れば、過剰揚水以外の場合において開口幅が小さいほど塩水楔の侵入長も短くなる。

3.2 塩分濃度変化に関する考察

前述のように、無揚水時の塩水楔理論は侵入初期において適合性は十分であると言えないが、定常時に近づけばその適合性は良いと認められる。しかし、揚水等の人為的条件下の理論的展開は未だ確立されていないし、ま

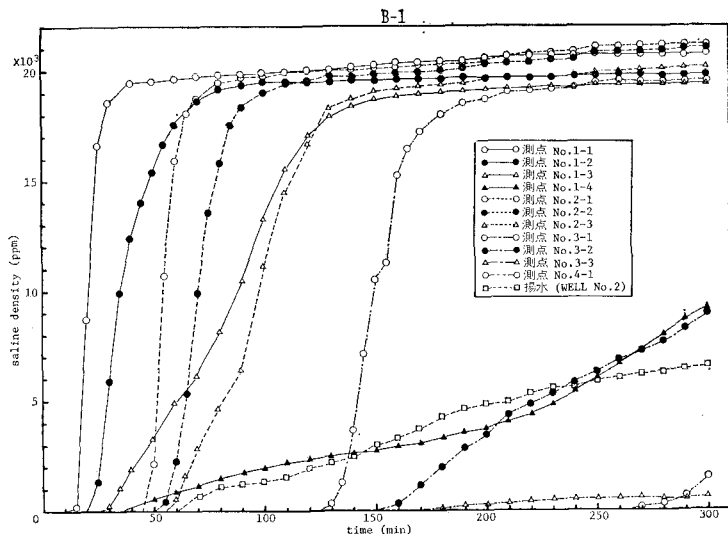


図-6 塩分濃度変化図

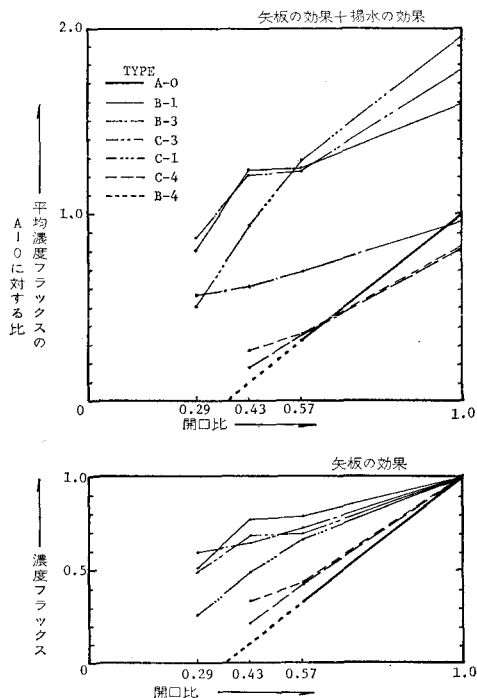


図-7 塩分侵入阻止効果の評価図

た、目視による塩水楔のスケッチからはその機構の詳細はわからない。したがって、揚水条件および矢板の根入れ深さの違いによる不圧滞水層内への塩分侵入現象を明らかにするために、実験結果に基づきその塩分濃度変化に着目した考察をする必要があると考える。

ここでは、地点濃度変化、侵入速度、および塩分侵入阻止効果の評価基準として砂層中の平均濃度フラックスから考察する。地点濃度変化図(図-6)とは縦軸に塩素イオン濃度(ppm)を、横軸に時間(min)をとり、各測点における塩分濃度の変化を示したものである。侵入速度とは感知最大濃度 C_0 と各測点の濃度比 (C/C_0) が 0.5 である等濃度線の各井戸への侵入速度をいう。平均濃度フラックス(図-7)とは、 C/C_0 が 0.25, 0.5, 0.75 の 3 本の等濃度線で塩水楔を 3 層に分割し、それらの面積とそれぞれの C/C_0 との積を加え合わせたもので、砂層中に侵入した総塩分量を意味する。

(1) 矢板を挿入しない場合の揚水条件の違いによる塩分濃度変化に関する考察

考察結果を要約して示せば次のようになる。

i) 何ら人為的操作を加えない自然条件下(無揚水無矢板)における塩分侵入現象に化して、塩分侵入現象の変化に及ぼす影響度が大きいのは揚水量の違いであり、次いで揚水位置の違い、揚水高さの違いの順である。

ii) 塩水化を助長する効果が大きいのは過剰揚水であり、揚水位置、揚水高さのいかんにかかわらず塩分はその揚水位置まで侵入し、平均濃度フラックスも増大する。しかし、自然条件下における塩水化域にはいる塩水槽近く的位置において上部過剰揚水を行なう場合には、自然条件下の場合に比して塩分の侵入速度は速くなり、平均濃度フラックスも増大し、塩水槽から揚水位置までの砂層上層部は高濃度化するが、揚水位置より内部砂層への高濃度塩分の侵入は阻止されている。したがって、内陸部の水質保全にはプラスの効果となる。

iii) 過少揚水の場合には、揚水位置、揚水高さのいかんにかかわらず平均濃度フラックスは自然条件下の 8 ~ 9 割程度の値となり多少小さくなるが、侵入速度は相対的には当然速くなるから塩水化の阻止効果を認めるとしてもそれほど大きくないと判断できる。

(2) 矢板を挿入した場合の揚水条件の違いによる塩分濃度変化に関する考察

考察結果をまとめると次のようになる。

i) 図-7 に示されたように、矢板による塩分侵入阻止効果を平均濃度フラックスを指標として揚水条件と合わせて評価し、その効果を大きい順に示せば、塩水槽遠くでの上部過少揚水 (C' , C'' , C''' -4), 塩水槽近くでの下部過少揚水 (B' , B'' , B''' -4), 塩水槽遠くでの上部過剰揚水 (C' , C'' , C''' -1), 塩水槽近くでの下部過剰揚水

(C' , C'' , C''' -3), 塩水槽近くでの下部過剰揚水 (B' , B'' , B''' -3), 塩水槽近くでの上部過剰揚水 (B' , B'' , B''' -1) となるが、最も阻止効果の小さいとされる開口比 0.57 の B' -1 の場合でも矢板を挿入しない場合の平均濃度フラックスの 0.78 倍となり、かなりの塩水侵入阻止効果を発揮していると判断できる。

ii) 塩水化助長効果が大きかった塩水槽遠くでの上部過剰揚水の場合には開口比が 0.43 以下、下部過剰揚水ならびに塩水槽近くでの上部過剰揚水の場合には開口比が 0.29 になれば、自然条件下よりも濃度的に低くなり、矢板の挿入による塩分侵入阻止効果が顕著に発揮されることがわかる。

iii) 矢板を挿入した場合でも過剰揚水であれば、最終的にその揚水位置まで塩分は侵入してくることに注意する必要がある。しかし、その到達時間は矢板の開口幅が小さくなるほど長くなり、いわゆる遅滞効果は期待できる。

iv) 砂層中の塩分濃度分布より明らかとなるが、塩分は砂層下部を侵入し、上部の濃度上昇は見られない。したがって、砂層上部の淡水域の維持をはかることができるので、その意味では阻止効果が発揮されたと評価できる。

3.3 一次元拡散方程式に基づく考察

砂層内の塩分濃度変化を一次元拡散方程式

$$\partial C / \partial t + V \cdot \partial C / \partial x = D_L \cdot \partial^2 C / \partial x^2$$

より得られる拡散係数 D_L で評価する。鉛直流速を無視し水平流速のみを考慮した非定常縦拡散として考えたため、拡散係数は実験タイプごとに値がばらつき顕著な特性を見出すことはできなかった。図-8 に各タイプの平均拡散係数と平均流速を示す。これより、矢板の有無にかかわらず塩水槽遠くでの過剰揚水の場合は、平均拡散係数はほぼ一様であるが平均流速はばらついているこ

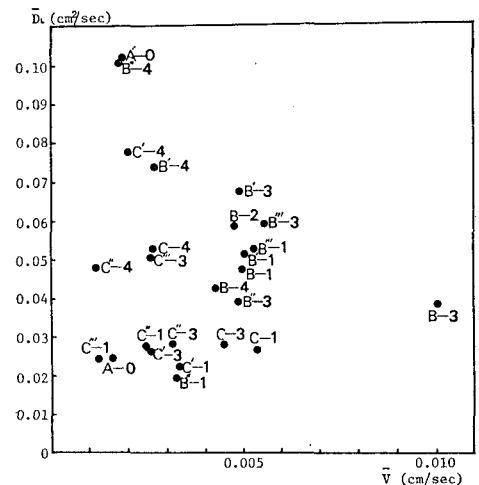


図-8 平均拡散係数と平均流速

と、塩水槽近くでの過剰揚水の場合は、逆に平均流速はほぼ一様であるが、平均拡散係数はばらついていることがわかる。しかし、図に示された拡散係数から揚水や矢板の影響の明確な評価はできない。また、自然条件下(無揚水無矢板)の場合の平均拡散係数と平均流速を用いて計算した塩分濃度変化と実験から得られたそれを図-9に示す。計算値は測点 No. 1-1 のような急激な立ち上がりや No. 1-2, No. 1-3 のような変化となっている。このことは、拡散係数は滞水層固有のものではなく、

時間的あるいは場所的な変化をも考慮したうえで濃度変化を捉えるべきであることを示唆している。

4. 結 言

揚水および矢板による塩分浸透に及ぼす影響について定性的に把握することができた。理論的には、塩水楔定常理論の適合性は良いと認められたが、揚水や矢板等の人為的条件下の理論的展開が待たれる。また、とくに過剰揚水について詳細な研究が必要であると思われる。拡散係数の評価については各測定における塩分濃度値より得られる平均流速をより精密にし、実現象に適應できるように今後研究を進めていきたい。

参 考 文 献

- 1) Nomitsu, T., Toyohara, R., and Kamimoto, R.: On the Contact Surface of Fresh and Salt-water under the Ground near a Sandy Sea Shore, Memoirs of Coll., Kyoto Imperial Univ., A-7, Vol. 89, 1927.
- 2) Shima, S.: Hydrodynamics of Flow in Porous Media; Transient Characteristics of Salt-water Wedge, 13th Cong., IAHR, D-46, pp. 433~440, 1969.

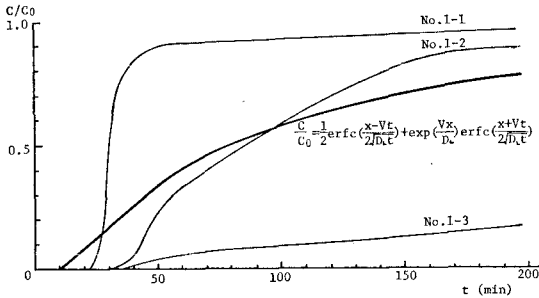


図-9 塩分濃度変化の理論値と実験値の比較