

揚水による塩水化現象の変化に関する解析 (II)

尾 島 勝*

1. ま え が き

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高め、ひいては地下水の過剰揚水に伴う地盤沈下および地下水の塩水化等の社会問題をひき起こすことになった。

本研究は、上述のような社会的背景のもとに、塩水化の防止策を見出すことを目的として、とくに不圧滞水層における地下水揚水が自然条件下の平衡状態を乱す場合に、淡塩境界面の挙動と地下水中の塩分濃度分布にどのような影響を及ぼすかという、非定常現象を解明しようとしたものである。

昨年度¹⁾の海溝で報告した研究成果をふまえ、今回は主に砂層モデル実験結果の塩分濃度分布変化に着目し、地下水塩水化における分散現象の場所的・時間的变化について考察する。

本研究では、淡塩境界面の挙動と塩分濃度変化を支配するであろう要因として、自然的要因としては滞水層の透水性と淡・塩水の密度差のみを考え、それぞれ2種類を設定するが、水位条件、淡水流入量、滞水層厚は一定として直接的な要因としては考慮していない。さらに人為的要因としては、揚水量、揚水地点、揚水口高さを考慮した。

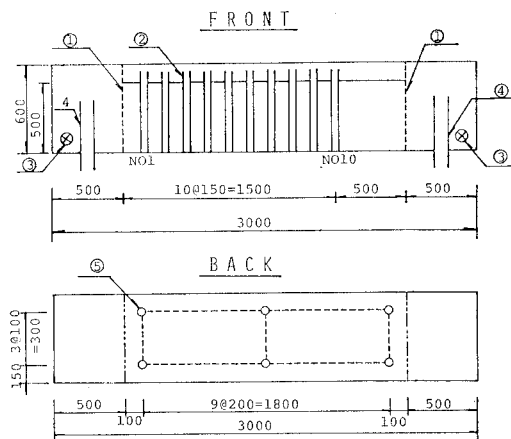
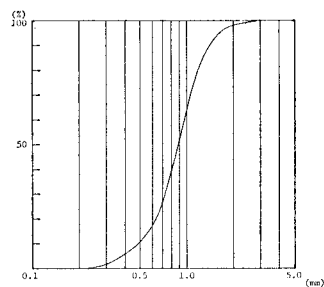


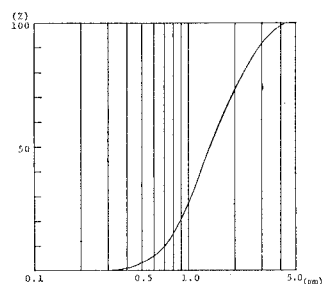
図-1 実験水槽

2. 実験装置および実験方法

実験水槽本体は、図-1 に示したように長さ 300 cm、幅 40 cm、高さ 60 cm の前面アクリライト張り水槽であり、両端より 50 cm の位置にあるフィルターメッシュ (①) の内幅 200 cm に高さ 50 cm まで 図-2 に示すような粒度分布をもつ川砂を敷いて滞水層とした。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 10 本を設置して揚水井および観測井 (②) とした。塩水 (密度 $\rho_2=1.04$, $\rho_3=1.37$) および淡水をそれぞれ ③, ③' のバルブより供給し、④ の水頭可変余水吐によって塩水槽水深 (h_2) および淡水槽水深 (h_1) をそれぞれ, 32 cm, 33 cm に保った。さらに、水面形測定のために水槽背面には ⑤ のピエゾ水頭測定用取り出し口がある。



(a) $k=0.28$ cm/sec, $D_{10}=0.5$ mm, $C_u=1.92$, $S_g=2.67$



(b) $k=0.56$ cm/sec, $D_{10}=0.7$ mm, $C_u=2.29$, $S_g=2.67$

図-2 実験砂粒度分布

表一に実験タイプを示した。揚水の有無, 揚水地点 (井戸番号), ストレーナ位置 (上部 $z=20\sim 25$ cm, 下部 $z=2\sim 7$ cm), 揚水量 ($Q_1=800$ cc/min, $Q_2=600$ cc/min, $Q_3=400$ cc/min, $Q_4=200$ cc/min), 塩水濃度 (ρ_2 , ρ_3), 透水係数 ($k_1=0.28$ cm/sec, $k_2=0.56$ cm/sec) によって表のようにタイプ分けをしている。

表一 実験タイプ

TYPE	WELL	STR.	Q	ρ	k
A-1				ρ_2	k_1
A-2	NO.2	over	Q_3	ρ_2	k_1
A-3	NO.4	over	Q_3	ρ_2	k_1
B-1	NO.2	under	Q_1	ρ_2	k_1
B-2	NO.2	over	Q_1	ρ_2	k_1
B-3	NO.2	under	Q_2	ρ_2	k_1
B-4	NO.2	over	Q_2	ρ_2	k_1
B-5	NO.2	under	Q_3	ρ_2	k_1
B-6	NO.2	over	Q_3	ρ_2	k_1
B-7	NO.2	under	Q_4	ρ_2	k_1
B-8	NO.2	over	Q_4	ρ_2	k_1
C-1	NO.4	under	Q_1	ρ_2	k_1
C-2	NO.4	over	Q_1	ρ_2	k_1
C-3	NO.4	under	Q_2	ρ_2	k_1
C-4	NO.4	over	Q_2	ρ_2	k_1
C-5	NO.4	under	Q_3	ρ_2	k_1
C-6	NO.4	over	Q_3	ρ_2	k_1
C-7	NO.4	under	Q_4	ρ_2	k_1
C-8	NO.4	over	Q_4	ρ_2	k_1
D-1	NO.6	under	Q_1	ρ_2	k_1
D-7	NO.6	under	Q_4	ρ_2	k_1
A-1				ρ_2	k_2
A-2	NO.4	over	Q_2	ρ_2	k_2
A-3	NO.6	over	Q_4	ρ_2	k_2
B-3	NO.2	under	Q_2	ρ_2	k_2
B-7	NO.2	under	Q_4	ρ_2	k_2
C-3	NO.4	under	Q_2	ρ_2	k_2
C-7	NO.4	under	Q_4	ρ_2	k_2
D-3	NO.6	under	Q_2	ρ_2	k_2
D-7	NO.6	under	Q_4	ρ_2	k_2
E-1				ρ_3	k_2

測定量は, 1) 水槽前面に現われる塩水楔形状, 2) 各観測井内地点塩分濃度 (5 cm 間隔 6 測点), 3) 揚水量とその塩分濃度, 4) 砂層内自由水面形状, の 4 項目である。計測時間間隔は 5 分とし, 各実験とも定常状態に達するまで続ける。

3. 淡塩境界面の挙動に関する考察

(1) 無揚水の場合

準一次元地下密度流の仮定を用いれば, 非定常理論による塩水楔の先端の位置と時間との関係²⁾は次式で表わされる。

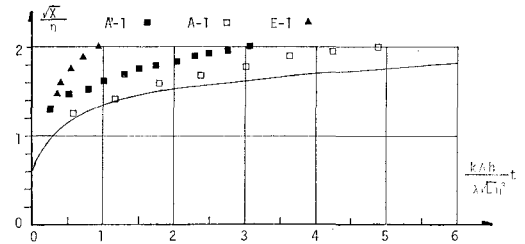
$$\frac{k\Delta h}{4\lambda\sqrt{L}\eta^3}t = -\frac{1}{3}\left(\frac{\sqrt{x_t}}{\eta}-1\right)^3 - 2\left(\frac{\sqrt{x_t}}{\eta}-1\right) - 8\log\left(2-\frac{\sqrt{x_t}}{\eta}\right) + 0.212 \dots\dots(1)$$

ここに, $\eta=\epsilon h_2\sqrt{L}/2\Delta h$, h_2 : 塩水槽水深, Δh : 淡塩水槽の水位差, $\epsilon=\Delta\rho/\rho_1$, k : 透水係数, λ : 間隙率, L : 定常時の楔侵入長, t : 時刻, x_t : 時刻 t における楔先端の位置である。

図一に無揚水の実験, すなわち, A-1, A'-1, E-1 の 3 タイプにおける目視による楔スケッチから求めた楔先端の移動の様子を式 (1) と比較して示している。

A-1 の実験結果は, $\Delta h=1$ cm, $L=88$ cm, $k=0.56$

cm/sec, $h_2=32$ cm, $\lambda=0.40$ であるから, $\eta=4.68$, $k\Delta h/4\lambda\sqrt{L}\eta^3=3.64\times 10^{-4}$ となる。A'-1 のそれは, $\Delta h=1$ cm, $L=58$ cm, $k=0.28$ cm/sec, $h_2=32$ cm, $\lambda=0.40$ で, $\eta=3.79$, $k\Delta h/4\lambda\sqrt{L}\eta^3=4.27\times 10^{-4}$, E-1 のそれは, $\Delta h=1$ cm, $L=139$ cm, $k=0.56$ cm/sec, $h_2=32$ cm, $\lambda=0.40$ で, $\eta=5.88$, $k\Delta h/4\lambda\sqrt{L}\eta^3=1.47\times 10^{-4}$ となる。図において, 横軸は無次元化された時刻を, 縦軸は無次元化された塩水槽境界からの距離を示したものであり, 実線が式 (1) に基づく理論曲線である。



図一 塩水楔先端の移動

昨年度の実験結果¹⁾は, $\Delta h=1$ cm, $L=27$ cm, $k=0.29$ cm/sec, $h_2=30$ cm, $\lambda=0.40$ で, $\eta=2.6$, $k\Delta h/4\lambda\sqrt{L}\eta^3=1.98\times 10^{-3}$ となり理論曲線と実験結果とは極めてよく一致した。今回の実験では, いずれのタイプも理論よりも楔の侵入速度が大きい。昨年度の実験と比較して大きく異なることは楔の定常侵入長がいずれもかなり大きいことであり, したがって無次元時刻の係数が小さくなり, 実験値が図の左上方にずれていると解釈できる。しかし, これらの実験結果を平行移動しても理論曲線と一致させることはむずかしく, とくに透水係数の大きい E-1 は明らかに異なる侵入の様相を呈しているといえよう。すなわち, 混合・分散効果を見捨てた密度効果のみから楔の挙動を推測するには限界があるといえよう。この実験値と理論曲線との差が分散効果による楔の侵入と仮定するならば, 分散効果の強さは, 透水係数, 淡塩水の初期密度差の違いによって異なると推察できる。

(2) 揚水をともしう場合

福尾³⁾によれば, 揚水時の淡塩境界面は次式のように表現される。

$$a^*\leq a_m^*;$$

$$0\leq x^*\leq a^* \quad \text{では} \quad (1-\eta^*)^2 = \frac{Q^*x^*}{Q^*l^*+P^*(l^*-a^*)} \dots\dots(2)$$

$$a^*\leq x^*\leq l^* \quad \text{では} \quad (1-\eta^*)^2 = \frac{Q^*x^*+P^*(x^*-a^*)}{Q^*l^*+P^*(l^*-a^*)} \dots\dots(3)$$

$$a^*\geq a_m^*;$$

$$(1-\eta^*)^2 = \frac{x^*}{l^*} \dots\dots(4)$$

ここに, $\eta^* = \eta/h_2$, $x^* = x/L$, $l^* = l/L$, $a^* = a/L$, $Q^* = LQ/kh_2^2$, $P^* = LP/kh_2^2$, η : 塩水深, L : 水槽の長さ, a : 揚水地点までの距離, a_m : 楔侵入長が最大となる揚水地点までの距離, P : 単位時間・単位幅あたりの揚水量, Q : 淡水流入量, h_2 : 塩水槽水深, k : 透水係数である。

実験タイプ B'-5, C'-7, C'-8, B-7, D-7 について上記理論式と実験値との比較を行ってみた。結果の一例を示したのが 図-4 である。理論値と実験値がよく一致しているとはいいいにくい。すなわち、無揚水、揚水有のいずれにしても目視による界面形状を上記のような理論値と比較し、定量的評価を行うことはかなり不明確なことになる。

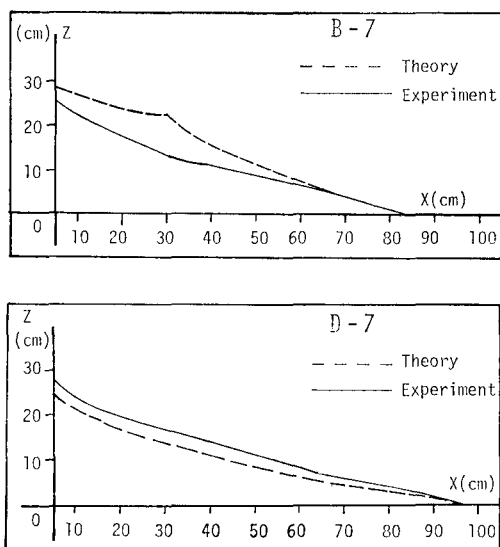


図-4 塩水楔形状の比較

(3) 淡塩界面の侵入に関する定性的考察

界面形状の比較考察により、種々の要因の影響を定性的に把握した。得られた結果を要約して示せば次のようである。

a) 無揚水時には、楔の侵入開始時に侵入速度は速く、時間とともにしだいに遅くなり定常界面に至る。その侵入速度は上層部よりも下層部の方が速い。

b) 揚水量が過剰揚水（定常淡水流量より大）になる場合は、揚水地点をいくら内陸部に移してもその地点まで楔は侵入してくる。しかし、過剰揚水でない場合には揚水地点・揚水量の相違による影響はほとんどなく、無揚水時における楔の侵入長とほぼ同じであり、界面形状にも大差はない。

c) 揚水口深さの相違による影響は、楔の下層部についてはその影響がほとんど認められないが、上層部になると上部揚水の方が強い影響が認められる。揚水量が多

いほどこの影響が明確に現われ、上部揚水をした場合、楔の内陸侵入を助長する結果となる。

d) 透水係数および密度差の相違については、いずれについても大きくなるほど侵入速度は速くなり、また侵入長も長くなる。

4. 塩分濃度変化に関する考察

観測井内の地点塩分濃度および揚水の塩分濃度を測定し、その時間的な変化ならびに場所的变化から、揚水と塩分侵入の関係について考察する。

無揚水の一例として A'-1 ($k=0.28$ cm/sec, $\varepsilon=0.04$) の地点塩分濃度の時間変化曲線を 図-5 に示した。図は縦軸に Cl^- 濃度 (ppm), 横軸に時刻 t (分) をとり、観測井位置 (No. 1, No. 2, ...) をパラメータとして、深さ方向 6 点 ($z=2, 7, 12, 17, 22, 27$ cm) における濃度変化の様相を示したものである。なお、実線は No. 1 ($x=15$ cm), 破線は No. 2 ($x=30$ cm), 一点鎖線は No. 3 ($x=45$ cm), 二点鎖線は No. 4 (60 cm)

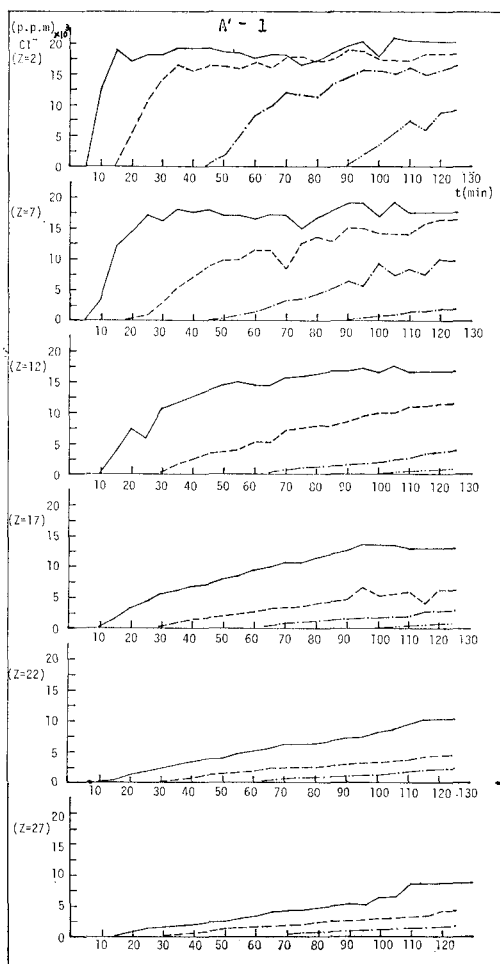


図-5 塩分濃度変化曲線（無揚水）

の観測井内の塩分濃度である。図に表わされていない各井戸では塩水の侵水が感受されていない。

図より各測点において塩分濃度変化に異なる様相がみ

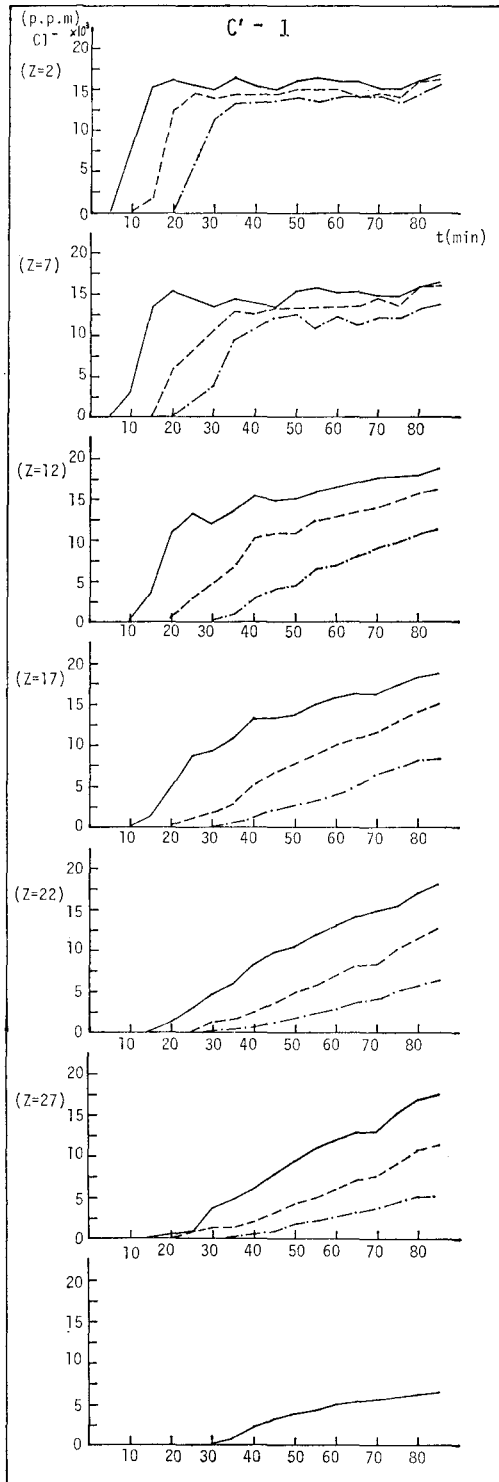


図-6 塩分濃度変化曲線 (揚水有)

られる。 x 方向にみれば、塩水槽に近い井戸ほど曲線の立ち上がりこう配が急であり、早く限界濃度に達している。また、 z 方向にみれば、楔下層部ほど曲線のこう配は急である。このような地点塩分濃度変化図から侵入現象が大略的に説明される。すなわち、もし塩分の侵入が密度効果のみで生じているとするならば、各曲線の時間変化は同じ様相を呈するはずである。曲線のこう配が急でありかつその変化率が大きいほど分散効果が大きいと考えられることから、塩水槽に近く、しかも楔下層部の点になるほど分散効果による塩分の侵入度が大きいといえる。しかし、そのような点は限界濃度に達する時刻も早いことから、分散現象が卓越する時間は短く、以後は密度効果が卓越して塩分侵入が進行すると解釈できる。一方、塩水槽から遠い点、あるいは楔上層部の点をみれば、ほぼ一定の割合で濃度が上昇し続けていることから、分散効果は相対的には小さいながらもそれによる塩分侵入が続いていると解釈できる。

揚水をともなう場合の一例として C'-1 (No. 4, 上部過剰揚水) の実験結果を図-6 に示した。一般に、揚水した場合でも濃度変化曲線は全体的な様相として、塩水槽に遠い地点ほど、楔上層部ほど濃度変化曲線のこう配が緩くなるという傾向は無揚水の場合と同じである。しかし、揚水条件の相違による様相の変化を要約して述べれば次のようである。

a) 揚水量が多くなるほど濃度変化曲線のこう配も急になり分散効果は増大する。

b) 上部揚水を行った場合、楔下層部においては下部揚水の場合と大差はないが、楔上層部においては明らかに分散効果は増大する。

c) 揚水地点が塩水槽に近いほど分散効果は増大する。しかし、過剰揚水にならない程度以下の揚水では無揚水時のそれと大差はない。

以上のような定性的把握のもとに、次いで分散方程式における主流方向分散係数 (D_x) と鉛直方向分散係数 (D_z) を求め、それらの時間的・場所的变化を揚水との関連において明らかにしようと試みた。de Josselin de Jong⁴⁾ の与えた関係にもとづき数値的検討を行ったが、浸透流速の算出方法にかなりあいまいさが残り、今回はそれらの結果の公表はさしひかえる。さらに検討を行い講演時に述べたい。

5. あとがき

本研究は、塩分侵入現象を濃度分布の時間変化から解析することの必要性を強調したものである。いまだ定量的評価 (密度効果と分散効果) までには至らず、今後さらに検討を続けていきたい。

最後に、実験および解析に協力願った大学院生垂水陽一君、学部学生大西、藤本の諸兄に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 尾島 勝: 揚水による塩水化現象の変化に関する解析, 第24回海講論文集, pp. 553~557, 1977.
 - 2) 玉井信行・嶋 祐之: Salt-Water Wedge in Unconfined Coastal Aquifers, Proc. JSCE, No. 139, 1967.
 - 3) 福尾義昭・北岡 豪: 内湾における海水と地下水の交流について, 沿岸海洋研究ノート, 第12巻, 第1号, pp. 23~35, 1974.
 - 4) de Josselin de Jang, G.: Longitudinal and Transverse Diffusion in Granular Deposit, Trans. AGU., Vol. 39, pp. 67~74, 1958.
-