

沿岸部自由地下水の揚水に伴う塩水楔の挙動

徳島大学工学部 正員 尾島 勝
徳島大学大学院 学生員 ○重水 陽一

1. まえがき

昭和51年度の年次学術講演会において、上記研究課題に対する第一報を報告した¹⁾。今回は引き続き行った実験的研究に基づき、揚水に伴う淡・塩界面の挙動と塩分濃度変化の2面から考察を行う。なお、塩分濃度の測定器機の改善と測定精度の向上をほかったことが前年度と異なる。

2. 実験装置および実験方法

実験水槽本体は、長さ300cm、幅40cm、高さ60cmの前面アクリライト張りの鋼製水槽であり、両端より50cmの位置にあるフィルタータンシの内200cmに高さ50cmまで粒径2.5mm~0.6mmの川砂を敷いて滞水層とした。その砂層中上端より20cm間隔に集水孔を切った内径5cm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した。中詰め砂の有効径は0.5mm、均等係数1.92、透水係数は0.29cm/secである。実験モデルの諸元を図-1に示す。塩水(密度 $\rho_2=1.04$)および淡水を③、④のハルツより供給し、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30

表-1 実験タイプ

A-1; Nothing
A-2; Nothing, No.2, Over, Q1
A-3; Nothing, No.4, Over, Q1
B-1; No.2, Under, Q1
B-2; No.2, Over, Q1
B-3; No.2, Under, Q2
B-4; No.2, Over, Q2
C-1; No.4, Under, Q1
C-2; No.4, Over, Q1
C-3; No.4, Under, Q2
C-4; No.4, Over, Q2
B-1; No.6, Under, Q2
E-1; No.8, Under, Q2

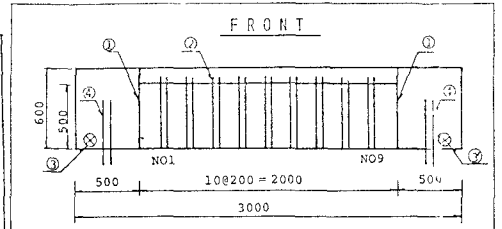


図-1 実験モデルとその諸元

cm, 31cmに保つ。表-1に実験タイプをまとめて示した。揚水の有無、揚水地点、ストレーナ位置、揚水量の違いによってタイプ分けをしている。

実験方法は前年度と同様であって

説明は割愛するが、測定量は、1)淡塩界面(楔形状)、2)観測井内塩分濃度(5cm間隔6測定点)、3)揚水の量と塩分濃度、の3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。塩分濃度の測定器機としては東亜電波製のCM-5B電導度計(感知部セル10mm、3個)と東邦電探製EST-3型電気水質計(感知部極間隔20cm)を用い、測定された電気伝導度から塩分濃度に換算する。

3. 淡・塩界面の挙動に関する考察

無揚水のA-1における塩水楔の侵入状況を図-2に示した。破線は透水係数0.19cm/sec、粒径2.5mm~0.25mm、均等係数2.46の中詰め砂を用いた昨年度の実験における定常界面である。

準一次元地下容度流の仮定を用いれば、定常理論による楔の侵入長は近似的に次式で表わされる。 $L = \frac{r_e}{21Q_1} \frac{1+E}{E} (Ah)^2$ (1)

ここで Q_1 :単位幅当りの淡水流量、 r_e :透水係数、 $E = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ 、 ah :淡・塩水槽の水位差である。

昨年度の実験で $Q_1 = 1/24$ cm/sec、 $r_e = 0.19$ cm/secを用いて L を求めれば約71cmとなり、実験で得られた界面とはほぼ一致している。一方、今回の実験で $Q_1 = 1/12$ cm/sec、 $r_e = 0.29$ cm/secを用いて L を求めれば54cmとなり、実験で視覚的に捉えた侵入長27cmとは一致していない。この原因について検討する。非定常理論による塩水楔の先端の位置と時間との関係は次式のように表わされる。

$$\frac{r_e ah}{4\lambda\sqrt{\eta}} t = -\frac{1}{3} \left(\frac{\sqrt{x_0}}{\eta} - 1 \right)^3 - 2 \left(\frac{\sqrt{x_0}}{\eta} - 1 \right) - 8 \log \left(2 - \frac{\sqrt{x_0}}{\eta} \right) + 0.212, \quad \eta = Ehs\sqrt{t}/2ah \quad (2)$$

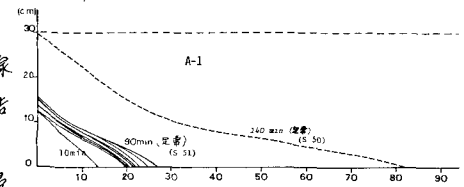


図-2 淡・塩界面の挙動

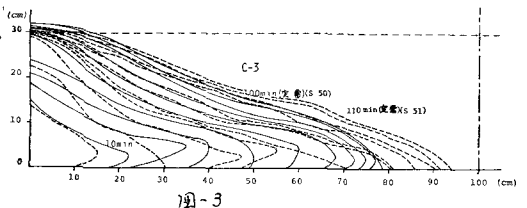


図-3

本実験における τ は、 $\Delta h=1\text{cm}$ 、 $L=27\text{cm}$ 、 $\eta=0.29\text{cm}^2/\text{sec}$ 、 $\eta_s=30\text{cm}$ 、 $\lambda=0.40$ であるから、 $\eta=2.6$ 、 $k\Delta h/4\lambda\sqrt{\eta}\eta^2=0.00198$ となる。

$\sqrt{t}/\eta$ 、 $k\Delta h/4\lambda\sqrt{\eta}\eta^2$ を計算して、式(2)の理論値と比較して示したものが図-4である。すなわち、無次元表示した塩水楔先端の時間的変化は理論値と極めてよく一致している。この結果より、塩水をKMnO₄で着色し視覚的に捉えた淡・塩界面が過少であったとしても、侵入現象そのものは正しく捉えているということができる。

逆に言えば、侵入長を視覚的に捉えて定量的考察を行うことは着色の程度の差異による実験誤差などの介入により危険であり、塩分濃度の精密な測定が必要であるといえる。ちなみに、今回の実験において視覚的に捉えた淡・塩界面は塩分濃度10000ppm程度に相当する。すなわち、淡・塩界面の挙動の解析には非定常理論の適用が望しいが、定量的に評価するためには、濃度差(塩分濃度)、水圧差、透水係数、間げき率等の精度の高い測定が必要となる。

図-3には、揚水を行った場合の淡・塩界面の挙動の一例を示した。実線が本年度、破線が昨年度の結果である。揚水に伴い界面は無揚水時の侵入位置よりさらに内部へと侵入するが、侵入速度、侵入長に影響を及ぼす要因は複雑であり、これを数値モデル化することは今後の課題である。しかし、定性的には、揚水量が多いほど、ストレーナの位置が深いほど、透水係数が大きいほど侵入速度、侵入長が大きいといえる。

4 塩分濃度変化に関する考察

観測井内の塩分濃度を測定し、その時間的変化、場所的変化から侵入特性について考察する。実験結果の一例を図-5に示した。揚水を伴うC-1の方へA-1より各測点における濃度変化速度が速く、定常時の限界濃度も高い。また、各井戸における濃度変化曲線は同一の様相を呈さず、濃度浸透(拡散)に場所的な相違がみられる。このことをさらに明確に調べるため、 $x=0, 12, 22\text{cm}$ の3断面における20000、15000、10000、5000ppmの等濃度線の時間的移動の様相を示したのが図-6である。図の縦軸は塩水楔境界からそれぞれの等濃度線までの距離を表す。各濃度線間の間隔が狭くあればそれだけ拡散効果は強い。したがって、下層部では間隔は小さく上層部では大きくなっていることから、上層部は拡散の効果は強く、下層部はいわゆる密度効果によって塩水の侵入が進行するといえる。無揚水のA-1について同様の検討を行った結果、3断面とも等濃度線間隔はほぼ同程度であり、したがって拡散効果はほとんど無密度効果のみによって塩水の侵入が生じている。

このことは揚水によって滞水層上部にまで拡散域が広がり、高濃度化の傾向を助長することを示すものであり、十分注意する必要がある。

つぎに、現象をマクロに捉えて一次元拡散として考察し、拡散定数 D_x の推定を試みた。図-7に結果の一例を示した。一般に、揚水した場合 D_x は初期には増加し、限界濃度に達したとみられる頃ピークになり以後減少していきようみえる。しかし、事例も少なく今後さらに検討する必要がある。

(1) 尾島・無水：沿岸部自由地下水における塩水楔の挙動に関する実験，第1回年報，Ⅱ-126，1976.10

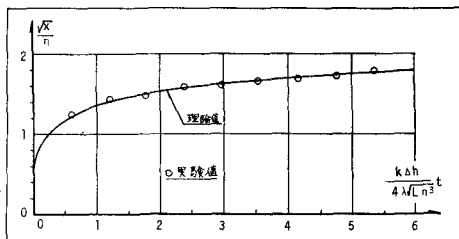


図-4 塩水楔先端の侵入状況

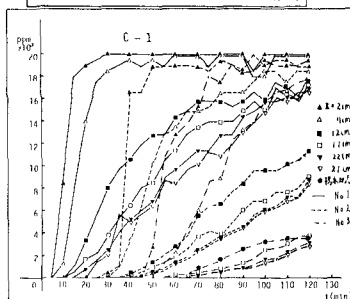
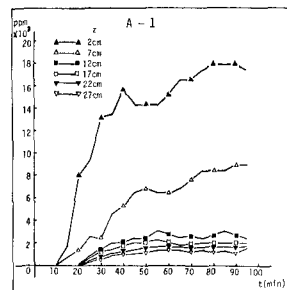


図-5 塩分濃度の変化

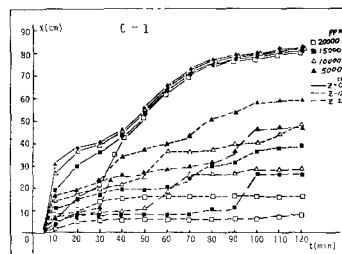


図-6 等濃度線の変化

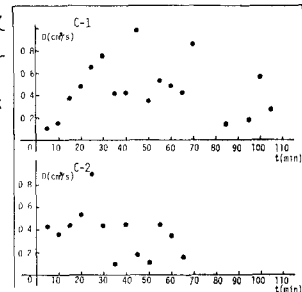


図-7 拡散定数 D_x