II-281　潮汐による地下水位及び塩水楔の挙動について

○正　員　八代高専　藤野 和徳
正　員　飛島建設　高木 友久

1. はじめに

近年、水資源の不足により、海岸近くで地下水を取水したり、また構造物の設置に伴い湧水を取水する場合が生じてきている。このため地下水位の低下により、塩水楔が内陸部へ進行し、地下水の塩水化が問題となっている。本報は地下水位、塩水楔の挙動特性を把握するため、潮汐に伴うそれぞれの挙動を非定常解は数値計算を行い、定常解は解析解をもとめ計算値と実験値の比較を行ったものである。また実験により、潮汐と地下水位、塩分濃度の関係を明らかにしようとしたものである。

2. 基礎式と解の誘導

(1)定常解　ダルシー則より　$Q=-\{k(\alpha\phi+\beta)\cdot\partial\phi/\partial x\}/\partial x$　(1)

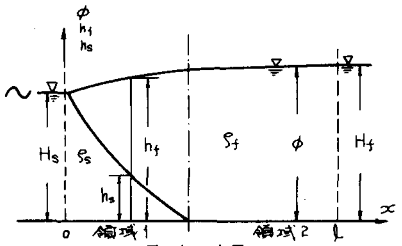
ここでα, βは定数である。　$\Phi=\frac{1}{2}k\alpha(\phi+\beta/\alpha)^2+C$　(2)

と定義すると、連続の式は　$\partial^2\Phi/\partial x^2=0$　(3)　となる。

領域1では $\Phi_1=\frac{1}{2}k\rho_s/(\rho_s-\rho_f)\cdot(\phi-H_s)^2+C_1$　領域2では

$\Phi_2=\frac{1}{2}k\phi^2+C_2$　と表わせる。塩水楔先端位置で $\Phi_1=\Phi_2$

より $C_1=0$ とすると $C_2=-\frac{1}{2}kH_s^2\rho_s/\rho_f$ となる。



図－1 砂層モデル

よって領域1では　$\Phi_1=\frac{1}{2}k\rho_s/(\rho_s-\rho_f)(\phi-H_s)^2$　(4)　領域2では　$\Phi_2=\frac{1}{2}k\phi^2-\frac{1}{2}kH_s^2\rho_s/\rho_f$　(5)

なお塩水楔先端位置でのΦは　$\Phi=\frac{1}{2}kH_s^2\rho_s/\rho_f\cdot(\rho_s-\rho_f)/\rho_f$　(6)　となる。式(3)を境界条件 $x=0$ で $\Phi=0$、$x=l$ で $\Phi=\frac{1}{2}k(H_f^2-H_s^2\rho_s/\rho_f)$ を用いて解くと　$\Phi=\frac{1}{2}k(H_f^2-H_s^2\rho_s/\rho_f)\,x$　(7)

式(7)と塩水楔先端の条件式(6)を用いて、各々の領域のφを求めることができる。

(2)非定常解　連続の式は淡水層について　$(n/k)\cdot\partial(h_f-h_s)/\partial t=\partial h_f/\partial x\cdot(\partial h_f/\partial x-\partial h_s/\partial x)+\partial^2 h_f/\partial x^2(h_f-h_s)$　(8)

塩水層について　$(n/k)\cdot\partial h_s/\partial t=(\rho_f/\rho_s)\{(\partial h_f/\partial x)\cdot(\partial h_s/\partial x)+h_s\partial^2 h_f/\partial x^2\}+\Delta\rho/\rho_s\cdot\{(\partial h_s/\partial x)^2+h_s\cdot\partial^2 h_s/\partial x^2\}$　(9)

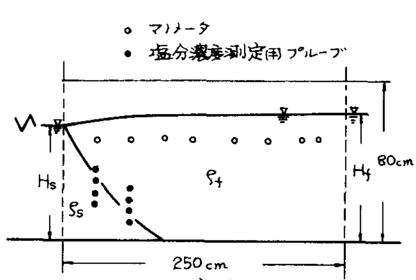
となる。式(8)、(9)を連立させて解を求めるにあたり、差分法としてExplicit法を用いた。なお塩水楔先端位置の算定方法は h_s の値が負または0となる格子点の一つ手前の格子点で、塩水流速が等しいという条件を用いると、

$\Delta\rho/\rho_s\cdot k(-h_{s\,i})/(Y-x_i)=\Delta\rho/\rho_s\cdot k\cdot(h_{s\,i}-h_{s\,i-1})/\Delta x$　(10)　となり、Yが塩水楔先端位置である。

ここで、k：透水係数、n：空げき率、H_s：塩水ヘッドタンクの水位、H_f：淡水ヘッドタンクの水位、h_f：淡水位、h_s：塩水位、ρ_s：塩水密度、ρ_f：淡水密度、$\Delta\rho=\rho_s-\rho_f$、i：格子点番号、Δx：差分間隔である。

3. 実験装置

実験装置は図－2に示すように、左右にヘッドタンクを設けた長さ250cm、幅40cm、高さ80cmの長方形水槽で塩水側に潮汐発生装置をつけたものである。水頭測定のためのマノメータは塩水ヘッドタンクより30、60、90、115、150、180、210、225cmの点に設けてあり、以後図－2の左のマノメータよりM_1～M_8と呼ぶ。塩分濃度測定のためのプローブは塩水ヘッドタンクより30、60cmの点に各々5cm置きに4個ずつ設けてあり30cmの点のプローブを上からC_1～C_4、60cmの点のプローブを上からC_5～C_8とする。実験は水槽内に、平均粒径 d=0.5mm 程度の砂をつめて行い、この場合測定により透水係数 k=0.305cm/sec



図－2 実験装置

空げき率 $n=0.4$ であった。また淡水、塩水密度は各々の $\rho_f=1.0g/cm^3$、$\rho_s=1.025g/cm^3$ を用いた。実験としてはまず塩水位 $H_s=51.0cm$、淡水位 $H_f=53.0cm$ で定常状態を形成させ、淡水位、塩水楔形状を測定し、次に淡水位 $H_f=53.0cm$ と一定に保ち、潮汐発生装置により塩水位をのこぎり刃形で振動させ淡水位、塩分濃度を測定した。

4. 実験結果及び実験値と計算値の比較

図-3に周期 $T=474sec$、振幅 $a=4.76cm$ の非定常時の塩水楔形状を示す。実線は実験値であり、塩水はウラニンを用いて着色してあり、着色水の上端を示したものであるが、塩水ヘッドタンクより50cm以上離れた点では、塩水楔形状の変動は本実験においてはほとんど確認できないものであった。一点、二点鎖線は $H_s=56.0$、$46.7cm$ となった時点での楔形状の数値計算値であり、波線は $H_s=51.46cm$（平均水位）として求めた解析値である。図-4に非定常時の淡水位変動を示す。ここで時間は $H_s=51.6cm$ の時点を0分として示したものである。この図において淡水位の挙動を数値計算値は傾向は表わしていると思われるが、かなりの誤差を含んでいる。この原因としては、本計算では空げき率 $n=0.4$ を用いているためと思われ、実際現象を表わすには有効空げき率を用いる必要があると思われる。図-5に淡水位、塩水楔の各点の振幅を示す。両者ともに指数関数的に減少しており、淡水位の振幅については実験値、計算値はほぼよい一致を得ているものと思われる。図-6に無次元量で表わした、$\tau=t/\sqrt{(na^2)/(2k\bar{H}_s^3\omega)}$ と $x/\bar{H}_s$ の関係を示す。この図より、位相の遅れは図-1に示す領域1、2の区別なく、ほぼ塩水ヘッドタンクからの距離に比例していると思われる。なお白丸は福岡市西戸崎での実測値であり、実験値とのずれは矢板の影響、海岸線すなわち原点の定め方によるものと思われる。この図の勾配は位相速度を表わすが両者とも勾配はほぼ一致しており位相速度を求めると、$C=(1/2.35)\cdot\sqrt{(2k\bar{H}_s^3\omega)/(na^2)}$ となる。潮汐と塩分濃度の関係を求めると、塩分濃度に関しても、位相の遅れは塩水ヘッドタンクからの距離に比例する結果を得ている。

5. 考察

定常解についてはほぼ現象を表わし得ると思われるが、非定常解においては、多少の誤差を含んでいる。これは空げき率の値をどのように定めるかによるものであり、今後検討してゆきたいと考えている。また位相の遅れは距離 x に比例しており、等距離にある2つの変動量（淡水位と塩分濃度）の相関はある一定値をもつものと思われる。

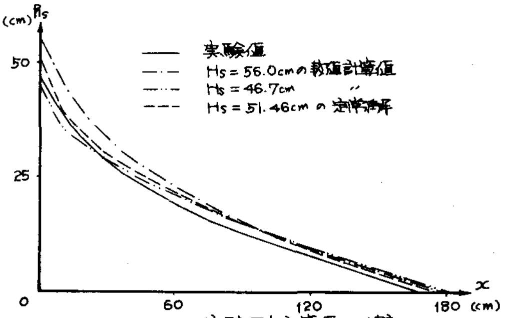


図-3 実験値と計算値の比較

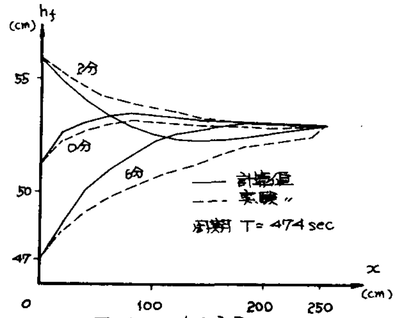


図-4 地下水位変動の実験値と計算値の比較

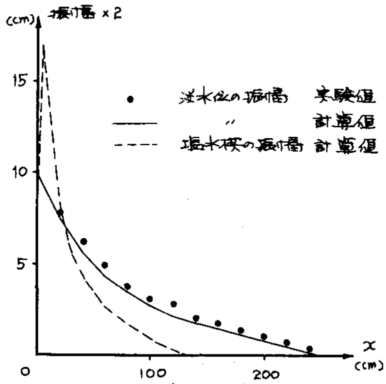


図-5 淡水位・塩水楔の振幅

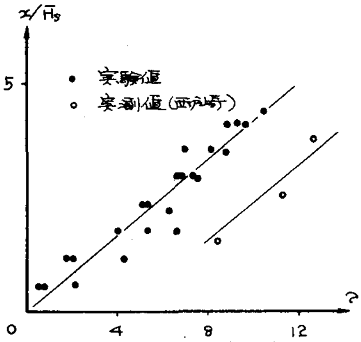


図-6 τ と $x/\bar{H}_s$ の関係

参考文献

1). Strack, O. D. L : A Single-Potential Solution for Regional Interface Problem in Coastal Aquifers, Water. R.R 12(6) 1976.

2). 尾崎彬：外水位変動による自由地下水の非定常応答に関する研究 第33回年講