

海岸二層帯水層における塩水侵入について

東和大学 正会員 中田 欣也
宮崎大学 正会員 杉尾 哲

1. まえがき

筆者らはこれまでに、海岸帯水層における塩水侵入の解析手法を、不圧帯水層や被圧帯水層の単一地盤を対象として検討してきた^{1), 2)}。しかし、現実の帯水層は、特に海岸側の一部区間でそれらの互層地盤であることが多く、これまでの準一様流を仮定した解析手法の互層地盤への拡張が必要と考えられた。そこで、互層地盤を対象とした解析手法の提案をすでに行っているが³⁾、その解析手法の妥当性を確認するために、今回は互層地盤をモデル化した鉛直二次元の砂層モデル実験を行って解析結果との比較を行ったので、その結果を報告する。

2. 基礎方程式

図-1に示すように、底部の不透水層の中に基準面をとって、ダルシー式と連続方程式より基礎方程式を誘導すると次のようになる。

不圧帯水層について

$$\text{淡水領域: } n \frac{\partial h_r}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(h_r - z) \frac{\partial h_r}{\partial x} \right] \quad (1)$$

$$\text{淡塩水領域: } n \frac{\partial h_r}{\partial t} - n \frac{\partial h_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(h_r - h_s) \frac{\partial h_r}{\partial x} \right] \quad (2)$$

淡塩境界面:

$$n \frac{\partial h_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(h_s - z) \left\{ \frac{\rho_r}{\rho_s} \frac{\partial h_r}{\partial x} + \frac{\Delta \rho}{\rho_s} \frac{\partial h_s}{\partial x} \right\} \right] \quad (3)$$

被圧帯水層について

$$S_0(D-z') \frac{\partial h_r'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(D-z') \frac{\partial h_r'}{\partial x} \right] \quad (4)$$

$$S_0(D-h_s') \frac{\partial h_r'}{\partial t} - n \frac{\partial h_s'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(D-h_s') \frac{\partial h_r'}{\partial x} \right] \quad (5)$$

$$n \frac{\partial h_s'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(h_s' - z') \left\{ \frac{\rho_r}{\rho_s} \frac{\partial h_r'}{\partial x} + \frac{\Delta \rho}{\rho_s} \frac{\partial h_s'}{\partial x} \right\} \right] \quad (6)$$

ここに、 k は透水係数、 n は有効空隙率、 S_0 は比貯留量、 ρ_r, ρ_s はそれぞれ淡水、塩水の比重、 $\Delta \rho = \rho_s - \rho_r$ であり、その他の記号については図-1に示す通りである。

3. 実験方法

実験結果と数値計算結果を比較検討するために、図-2に示すように、透明塩化ビニル樹脂製の水槽の中に下面に突起を付けた厚さ1cmの板で、海側境界より70cmの長さの不透水層を設けて、長さが100cm、幅が10cm、高さがほぼ43cmの二層帯水層を0.5mmのほぼ均一な砂を詰めて構築した。実験は最初に帯水層上流端の淡水水位を37.46cm、下流端の淡水水位を35.09cmに設定して、3時間程度かけて定常状態の淡塩境界面を形成させてから開始した。非定常状態の実験は帯水層上流端の淡水水位を37.46cmから35.72cmに急降下させた場合の淡塩境界面が侵入していく過程を観測するもので、淡塩境界面の移動が明瞭に観察できるように、塩水を食用色素赤色2号で濃く着色している。このときの淡水と塩水の比重は、それぞれ1.0と1.026であった。また、透水係数は淡水のみが帯水層を流れるときに測定された流量とそのときの上、下流端の淡水水位を用いてデュブイの式より $k=0.27\text{cm/s}$ と求めた。有効空隙率はダルシー流速と染料を流して測定した実流速の関係から $n=0.38$ と求めた。

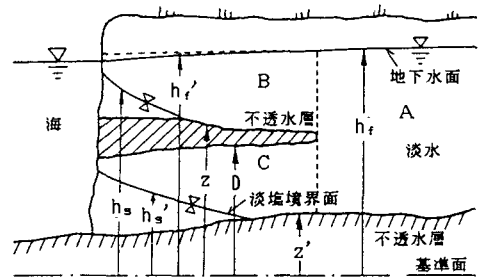


図-1 流れの場と記号

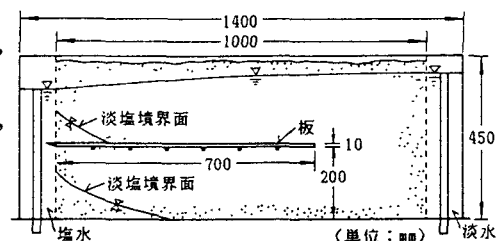


図-2 実験装置

4. 計算方法

不圧帯水層の数値モデルは図-1のA領域とB領域を計算するのに適用され、被圧帯水層の数値モデルはC領域を計算するのに適用される。図-1の点線で示された帯水層の接続位置での淡水水頭の計算は、接続位置を互層領域に属すると見なし、B領域とC領域のそれぞれの帯水層において、A領域内の淡水水頭を用いて別々に行う。次に、A領域の隣接する格子の淡水水頭の計算では、接続位置の淡水水頭にB領域とC領域の淡水水頭の平均値を用いる。なお本解析の特徴は、帯水層底部の不透水層内に仮定の淡塩境界面を仮定して、式(3)の $\partial h_s / \partial x$ および式(6)の $\partial h_s' / \partial x$ の計算精度を高めることにあり、仮定境界面の計算にも基礎方程式を適用する手法を用いているが、今回の解析でも同手法を適用している。数値計算においては、初期定常状態の淡塩境界面の位置を実験値と同じに設定して、非定常状態の淡塩境界面を追跡している。基礎方程式の離散化は、空間的には不圧帯水層および被圧帯水層とも中央差分をとり、時間的には不圧帯水層の場合には前方差分をとって陽形式差分法で計算し、被圧帯水層の場合には式(5)の左辺第1項目の係数に h_s' が含まれていて、非線形項であるので、後方差分をとって陰形式差分法で計算している。この場合、 i 回目の繰り返し計算値を $h_{r,i}$ で表すと、ピエゾ水頭が $|h_{r,i} - h_{r,i-1}| / |h_{r,i-1}| \leq \varepsilon (\varepsilon = 10^{-5})$ の収束条件を満足するまで繰り返し計算を行う手法を用いている。なお、空間の分割幅は5cm、時間間隔 Δt は陽形式差分法の安定条件を満足するように0.4secとしている。

5. 実験結果と計算結果

計算結果については図-3に、実験結果と対比させて測定時間ごとに示している。これらの結果より、実験結果と計算結果はよく一致していると言える。特に、被圧帯水層側の淡塩境界面の先端の形状は、例えば270分時では明瞭に上に凸になっていて、10分時～50分時の先端の下に凸の形状とは異なっているが、計算結果はこの傾向の変化も十分に表現している。

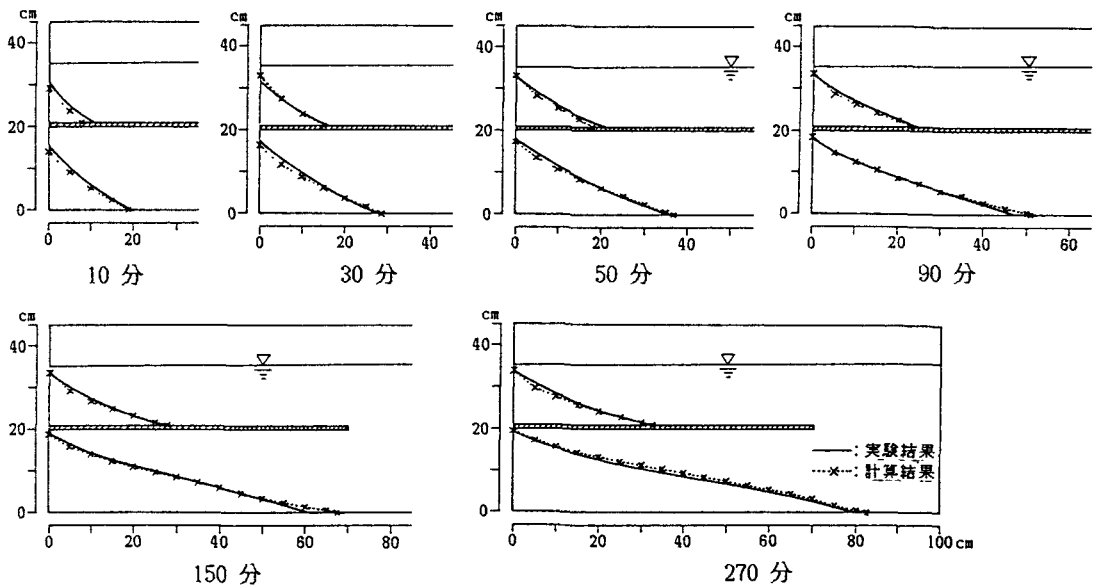


図-3 実験結果と計算結果の比較

- 《参考文献》1)土木学会第40回年講第2部, pp.191~192, 1985.
 2)土木学会第42回年講第2部, pp.230~231, 1987.
 3)平成元年度土木学会西部支部年講, pp.220~221, 1990.