

海岸被圧帯水層における定常塩水くさび混合域の特性に関する検討

九州産業大学工学部 正会員 ○ 細川 土佐男
九州大学工学部 正会員 神野 健二
九州大学工学部 正会員 初井 和朗

1.はじめに 海岸付近の地下ダムの計画や建設後の運転・維持管理を行う上で、塩水くさびの侵入は十分に検討しなければならない問題である。本研究では、塩水くさびの定常侵入について淡水と塩水の分散混合を考慮した室内実験と数値解析を行い、淡塩水混合域の混合のメカニズム特性と数値解析法の精度について検討を加えている。

2.室内実験 図-1に室内実験および数値解析で対象とした鉛直断面被圧帯水層を示している。実験では、図の左側の塩水深を $H_s=53.0\text{cm}$ 、右側の淡水深を $H_r=54.9\text{cm}$ に設定し、境界ABより目視観測が可能のように食用色素赤色2号で赤紫色に着色した塩水を被圧帯水層に侵入させ、塩水領域が変化しなくなった状態を定常状態とした。実験は、相馬砂を用いた場合(Expt.1)およびガラス球を用いた場合(Expt.2)の2ケースについて行った。表-1には、それぞれの実験の条件を示している。鉛直方向の塩分濃度は、 $x=4\text{cm}$ 、 20cm 、 34cm の位置に設けた直径 1cm の観測孔を使って、直径 0.4cm のセンサーを徐々に降下させて測定している。

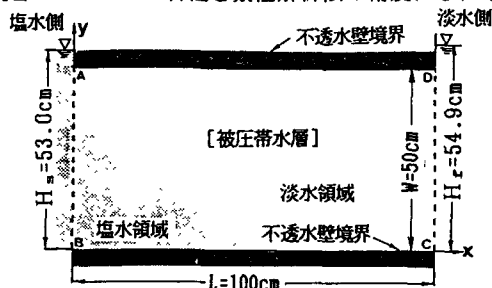


図-1 鉛直断面被圧帯水層

表-1 実験および計算条件

		Expt.1 [ガラス球]	Expt.2 [相馬砂]
淡水密度	ρ_f (g/cm ³)	1.000	1.000
塩水密度	ρ_s (g/cm ³)	1.025	1.025
平均粒径	d_m (cm)	0.235	0.054
空隙率	n	0.406	0.370
透水係数	k (cm/s)	3.50	0.46
淡水流量	q (cm ² /s)	2.200	0.275
水温	°C	27	25
Reynolds数 Re	$= [q/(nW)]/\nu$	2.968	0.089

3.数値解析 地下水流れの基礎式および2次元移流分散方程式は、次式で与えられる。

$$S \partial h / \partial t = -\partial u / \partial x - \partial v / \partial y \quad \dots (1)$$

$$u = -k \partial h / \partial x \quad \dots (2) \quad v = -k (\partial h / \partial y + \rho / \rho_f) \quad \dots (3)$$

$$\partial C / \partial t + \partial (u' C) / \partial x + \partial (v' C) / \partial y = \partial (D_{xx} \partial C / \partial x + D_{xy} \partial C / \partial y) / \partial x + \partial (D_{yx} \partial C / \partial x + D_{yy} \partial C / \partial y) / \partial y \quad \dots (4)$$

ここに、 S ：比貯留係数(10^{-6}cm^{-1})、 h ：圧力水頭、 t ：時間、 u, v ： x, y 方向のDarcy流速、 k ：透水係数、 ρ ：流体密度、 ρ_f ：淡水密度、 C ：塩分濃度、 u', v' ： x, y 方向の実質流速、 $D_{xx}, D_{xy}, D_{yx}, D_{yy}$ ：分散係数は、帯水層の分散に関する等方性を仮定すると、分散係数は流速依存型で与えられる。

$$D_{xx} = \alpha_L u'^2 / V + \alpha_T v'^2 / V + D_m, \quad D_{yy} = \alpha_T u'^2 / V + \alpha_L v'^2 / V + D_m, \quad D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) u' v' / V \quad \dots (5)$$

ここに、 $V = (u'^2 + v'^2)^{1/2}$ 、 α_L ：縦分散長、 α_T ：横分散長、 D_m ：分子拡散係数($10^{-5}\text{cm}^2/\text{s}$)である。

式(4)の塩分濃度 C と式(3)の流体密度 ρ との間には $C = 100(\rho - \rho_f) / (\rho_s - \rho_f) \quad \dots (6)$ の関係がある。

ここに、 ρ_s ：塩水密度、塩分濃度 C は%表示である。境界条件は、具体的に次のように与えている。

AB境界： $h = (H_s - y) \rho_s / \rho_f$ 、 $u \geq 0$ ： $C = 100\%$ ； $u < 0$ ： $\partial C / \partial x = 0$ 、CD境界： $h = H_r - y$ 、 $C = 0\%$

BC境界： $-k(\partial h / \partial y + \rho / \rho_f) = 0$ 、 $\partial C / \partial y = 0$ 、AD境界： $-k(\partial h / \partial y + \rho / \rho_f) = 0$ 、 $\partial C / \partial y = 0$

縦と横の分散長 α_L, α_T には、Harleman-Rumerの分散係数に関する実

表-2 縦と横の分散長

験公式¹⁾に淡水流入量の実測値を代入して求めた表-2に示す値を与えて

いる。上述の条件で、圧力水頭 h に関する式(1)は陰形式の差分法を

用いて数値計算を行い、式(4)の移流分散方程式の数値解は、移流項の

離散化誤差がない粒子移動法によって²⁾。なお、 x, y 方向の差分格子間隔はともに 0.5cm としている。

4.結果および考察 図-2には、室内実験で目視観測により得た淡塩水境界面形状を○印で、流出口で鉛直流速を考慮した準一様流の仮定の非混合淡塩水境界面を×印¹⁾で、さらに20%間隔の等濃度線の数値解を実線で示している。Expt.1の実験による淡塩水境界面は、数値解の90%等濃度線と一致し、Expt.2のそれは90%

	Expt.1 [ガラス球]	Expt.2 [相馬砂]
縦分散長 α_L (cm)	0.2196	0.0221
横分散長 α_T (cm)	0.0050	0.0040

等濃度線にほぼ一致している。

また、Expt.1 および Expt.2 に対する数値解の等濃度線は、非混合淡塩水境界面にほぼ平行になっている。Expt.1の数値解の淡塩水混合域は、Expt.2のそれと比べて広がっている。これは、Expt.1で用いたガラス球の粒子径がExpt.2のそれと比べて大きいため、分散長と流速が大きくなり、その結果分散係数が大きくなっているためである。

図-3には、流速ベクトル分布の数値解を示している。

淡水は、陸側から淡塩水混合域に沿って海側に流れている。塩水は、非常に遅い速度で陸側に流れているが、淡塩水混合域に近づくとき流れの方向を変え海側に戻る。このように塩水領域では、全領域に循環流が形成されている。従って、定常状態ではこのような塩水の循環流によって塩分の補給と流出に平衡が保たれていると考えられる。なお、単位奥行き当りの淡水流入量は、表-3に示しているように、Expt.1及びExpt.2とも実測値と数値解はよく一致している。

図-4には、鉛直濃度分布の実測値と数値解の比較を示している。Expt.1及びExpt.2とも実測値と数値解の鉛直濃度分布の傾向は、よく一致しているといえよう。また、内陸部に比べて海側の鉛直濃度分布の拡がり幅が大きくなっている。これは、図-3に示した流速ベクトル分布の数値解からもわかるように、内陸部に比べて海側へ向かう淡水の流速が大きくなり、その結果、式(5)に示した分散係数が大きくなっているためである。

5. おわりに 本報では、被圧帯水層における定常塩水くさびについて室内実験と数値計算を行い、淡塩水混合域のメカニズム特性が明らかになった。また、計算精度については、室内実験で妥当性を確かめた。今後、本報で得られた知見と本数値解析法を海岸帯水層に築造される地下ダムの効果評価や運転・維持管理に役立てたい。

謝辞 本研究を行うに当たり、九州大学工学部 上田年比古教授、九州産業大学工学部 奥蘭英明助教授、加納正道助教授に有益な御助言、御協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献 1) 土木学会水理委員会編：水理公式集，pp.384-390，土木学会，1985。

2) 神野健二・上田年比古：粒子の移動による移流分散方程式の数値解法の検討，土木学会論文集，第271号，pp.45-53，1978。

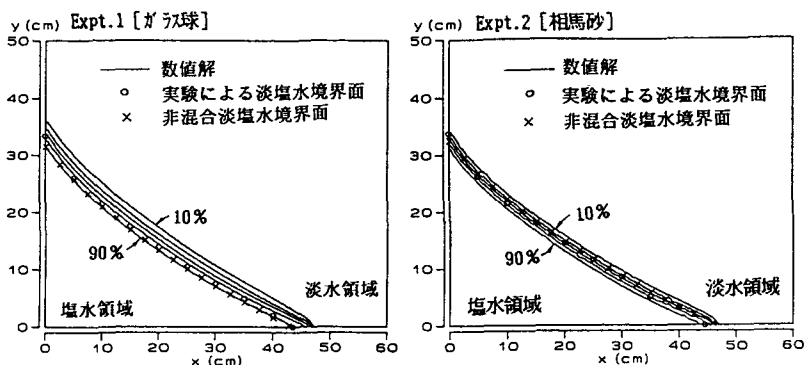


図-2 濃度分布(数値解の等濃度線は20%間隔)

表-3 淡水流量

	Expt.1 [ガラス球]	Expt.2 [相馬砂]
実測 q (cm ² /s)	2.20	0.27
数値 q (cm ² /s)	2.31	0.28

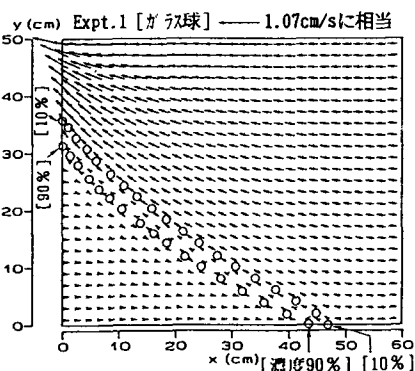


図-3 流速ベクトル分布

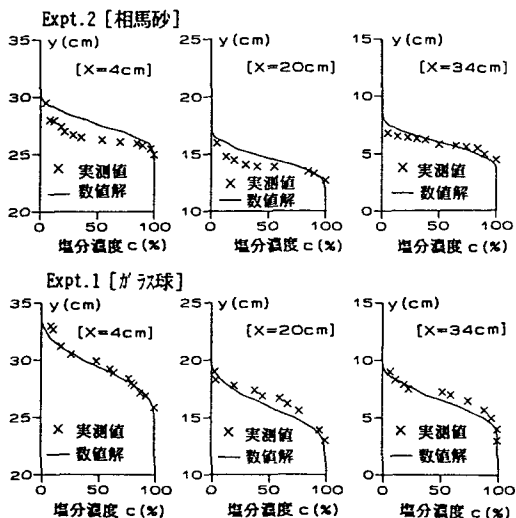


図-4 鉛直濃度分布の実測値と数値解の比較