

臨海部の塩水侵入現象における地盤の不均一性の影響

神戸大学大学院 学生会員 高山裕介
神戸大学 正会員 齋藤雅彦

1. はじめに

臨海部の帯水層においては、海水と淡水の密度差によって海水が地盤内に侵入する現象（塩水くさび）が広く知られている。このような現象を解析する際には数値シミュレーションがよく用いられるが、通常は地盤の諸物性値は一定と仮定される。しかし地質学的に同一と判断される地層内においても、透水係数は空間的に大きく変動することが多くの調査・研究で明らかにされている。

本研究では、透水係数の空間分布モデルを用いた数値シミュレーションにより、地盤の不均一性が塩水侵入に及ぼす影響について調べる。

2. 数値シミュレーションの概要

密度変化を考慮した飽和・不飽和浸透流の基礎式は、以下のように表される。

$$\frac{\rho}{\rho_0} \left(\alpha S_s + n \frac{dS_w}{dh} \right) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\mathbf{K} \cdot \left(\nabla h + \frac{\rho}{\rho_0} \nabla z \right) \right] \quad (1)$$

ここに、 ρ は濃度 C における溶液の密度、 ρ_0 は淡水の密度、 h は圧力水頭、 z は位置水頭、 n は間隙率、 S_w は飽和度、 $\mathbf{K}$ は透水係数テンソル、 S_s は比貯留量、 t は時間である。塩水侵入現象の支配方程式として移流分散方程式を導入し、以下のように表される。

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (\theta \mathbf{D} \cdot \nabla C) - \mathbf{q} \cdot \nabla C \quad (2)$$

ここに、 C は濃度、 θ は体積含水率 ($=nS_w$)、 $\mathbf{D}$ は分散係数テンソル、 $\mathbf{q}$ はダルシー流速ベクトルである。

透水係数の空間分布は齋藤・川谷^{1),2)}によって提案されている確率的フラクタルモデルを応用した空間分布モデルを用いて発生させた。これは、透水係数の対数変換値 $Y = \log(k_s)$ のパワースペクトル密度関数が次式のように $f^{-\zeta}$ 型となるものであり、実地盤における透水係数の空間分布特性を容易に模擬し得ることが確認されている。

$$S(|f|) \propto |f|^{-\zeta} \quad (3)$$

ここに、 f は空間周波数ベクトル、 $S(|f|)$ はパワースペクトル密度、 ζ は空間的な相関性を表すパラメータであり、2次元モデルの場合、 $\zeta=2$ である。このとき、自己相関関数を指数関数で近似した場合の相関長（積分特性距離）は、解析対象スケールの0.1倍程度となる。

3. 均一地盤への塩水侵入

まず地盤が均一、つまり透水係数の値を一様としたときの地盤への塩水侵入について解析を行った。数値解析で設定したモデルを図1に示す。解析領域は二次元とし、図1に示すように上流側に淡水が存在し、下流側に塩水が存在する場を設定した。水の密度を $\rho_0 = 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 、海水の比重を 1.025 とし、透水係数の値は $K = 1 \times 10^{-4} \text{ (m/sec)}$ とした。侵入を開始してから 360 日後の濃度分布の解析結果を図2に示す。ここで C は海水の濃度を 1 としたときの濃度比である。また、 $z=0$ において $C=0.5$ となる点の x 座標を最大塩水侵入距離 L_s と定義し、特に均一地盤の場合は L_{s0} とする。図2より $L_{s0} = 45.8 \text{ m}$ となった。

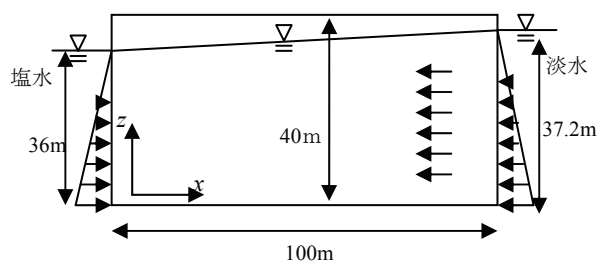


図1 解析モデル

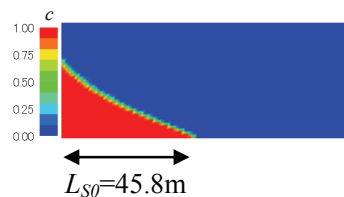


図2 均一地盤解析時の濃度分布

キーワード 塩水侵入, 不均一場, 数値シミュレーション

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学工学部内 TEL 078-803-6435

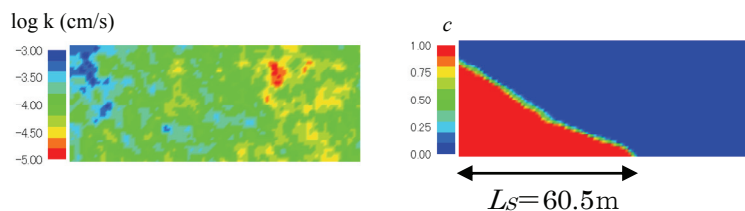


図3 透水係数の空間分布（等方性） 図4 等方性地盤解析時の濃度分布

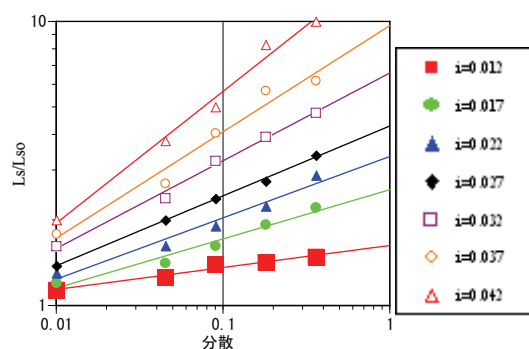
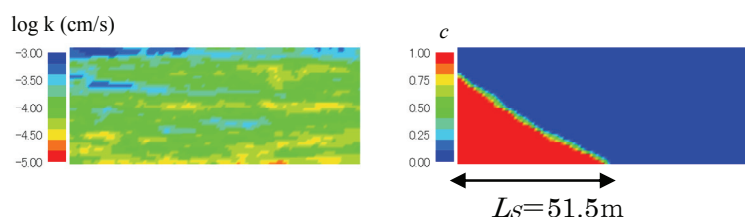
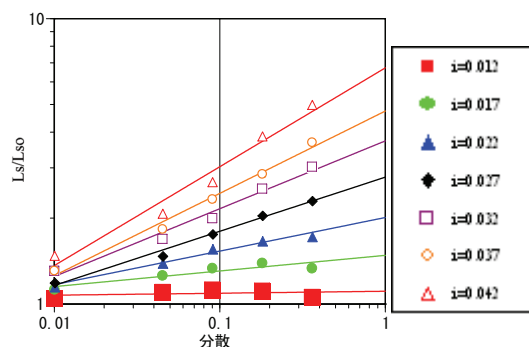
図5 分散 σ^2 と比 L_s/L_{s0} の関係（等方性）

図6 透水係数の空間分布（異方性） 図7 異方性地盤解析時の濃度分布

図8 分散 σ^2 と比 L_s/L_{s0} の関係（異方性）

4. 不均一地盤（等方性）への塩水侵入

先に記した空間分布モデルを用い、透水係数が不均一な場を20ケース作成し、先ほどの均一地盤解析時と同じ条件で解析を行った。この場合の最大塩水侵入距離 L_s については、平均値は44.3m、標準偏差は8.55mとなった。ここで、20ケースの中で最も L_s の大きかったケースに着目すると、透水係数分布は図3、濃度分布は図4のようになった。図3より、上流付近に透水性の小さい地盤、下流付近に透水性の大きい地盤がそれぞれ局所的に分布しているのがわかる。このような透水係数分布では、上流部において水頭低下量が大きくなるため塩水侵入域は広がりやすいと考えられる。

次に図3と同じ地盤を用い、下流側の水位を変化させることによって平均動水勾配を変えた場合、および透水係数のばらつきの大きさを表す分散 σ^2 を変化させた場合について同様の解析を行った。図5は、平均動水勾配 i 、分散 σ^2 、および均一場に対する侵入距離の比 L_s/L_{s0} の関係を両対数軸上で示したものである。これより σ^2 に対して L_s/L_{s0} は概ね直線的に変化することがわかった。

5. 不均一地盤（異方性）への塩水侵入

臨海地における帯水層は、その形成過程から層構造を持った形をしていると考えられる。そこで透水係数

の分布に異方性を与え、水平方向の相関距離が鉛直方向に対して10倍となるように設定し、20ケースの空間分布を作成し解析を行った。この場合の最大塩水侵入距離 L_s は、平均値43.53m、標準偏差5.18mとなった。また、同様に20ケースの中で最も L_s の長かったケースの透水係数分布を図6に、濃度分布を図7に示す。さらに図6と同様の検討を行った結果を図8に示す。これらの結果から透水係数が層状に分布している場合、等方性の分布より地盤の不均一性の影響が小さくなり、塩水侵入距離のばらつきは小さくなることがわかる。

6. おわりに

数値シミュレーションにより、不均一地盤への塩水侵入について検討し、平均動水勾配および透水係数のばらつきと、塩水侵入距離の関係について整理した。

参考文献

- 1) 齋藤雅彦, 川谷健: 透水係数の空間分布に関する理論的考察, 土木学会論文集, No. 645/III-50, pp. 103-114, 2000.
- 2) 齋藤雅彦, 川谷健: 透水係数の空間分布モデルの適用性に関する一考察, 土木学会論文集, No. 694/III-57, pp. 245-258, 2001.