飽和帯水層中の環境汚染物質の移流拡散解析

法政大学　　正　秋元　護
法政大学　　正　草深守人
法政大学　　学　板倉大祐

1. はじめに

地下水汚染の進行状況を知るためには、現場での実測が望ましいが、現実ではその方法は地域に与える影響が大きく困難である．本文では現実に近いモデルを設定し、浸透流および移流拡散解析プログラムを用い帯水層の汚染の進行と浄化について数値解析を行ったものである．また使用した解析手法と解析プログラムの妥当性を検討するため、飽和地盤中における汚染物質の移流拡散現象とその浄化に関する模型実験を実施した．

2．数値解析手法

本文に示す計算例は、浸透流の支配方程式と帯水層中の物質輸送方程式として知られている式(1)と式(2)をガラーキン法により有限要素離散化したものに従っている．

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(k_{ij}\frac{\partial \phi}{\partial x_j}\right)+b=S\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t}+\frac{\underset{\sim}{u}}{R}\cdot\underset{\sim}{\nabla} c-\underset{\sim}{\nabla}\cdot\left(\frac{\overline{D}}{R}\underset{\sim}{\nabla} c\right)-\frac{q_w}{n_e HR}(c_S-n_e c)+\lambda c-\frac{S_s}{n_e HR}+\frac{cS}{m}\frac{\partial h}{\partial t}=0 \qquad (2)$$

3. 数値解析結果とその考察

著者らは、既に帯水層内の上流部に揚水井を設置することにより下流での汚染物質の拡散を軽減できることを示した．ここでは揚水井の配置が下流部の汚染物質の濃度にどのような影響を及ぼすか様々なパターンで検討した．**図** 1 はその一例であり、扇状地上流部(x=0m 点)に定常的に 100g/m³ の汚染物質を投入した場合、a 点で 0.5m³/s、b 点で 1m³/s 揚水した 2 ケースを想定した解析を行った．

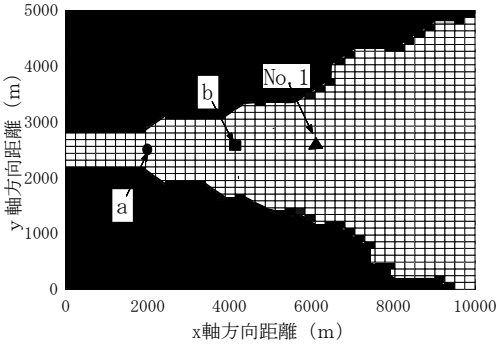

図 1　扇状地における井戸配置図

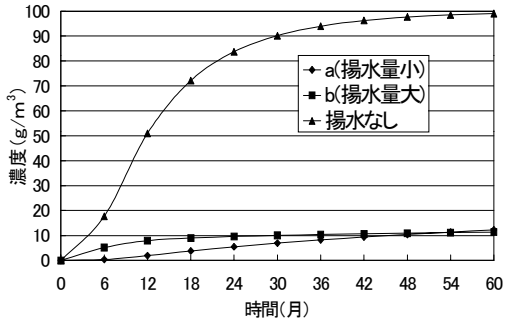

図 2　経時濃度変化図

図 2 は、**図** 1 の No.1 測点での濃度の時間変動の時間変動に関する計算結果を示したものである．揚水量が異なるにも関わらず a 点から揚水した場合も b 点から揚水した場合も濃度がほとんど変わらない．このことは現実問題として一般的な扇状地での汚染対策を考える場合は、可能な限り汚染源に近い上流部に揚水井を設置することが望ましいと考えられる．

次に、汚染された帯水層の一部の周囲をコンクリート等の遮水壁で囲い、この状態を基準に４隅に注水井を設け清水を注入し、モデル中央部から注水量と同量の水を揚水することによって汚染場を浄化する問題を想定した．この例では土粒子への汚染物質の吸着に着目して数値解析を行った．

キーワード：移流拡散、帯水層浄化、有限要素法、数値解析、模型実験
連　絡　先：〒184-0002　東京都小金井市梶野町 3-7-2　法政大学工学部

図 3 は遅れ係数を 1.5 と考えた時の 30 日後の濃度分布を示したものであり**図** 4 は揚水井から汲み出される洗浄水中の汚染物質の濃度変化に与える吸着の影響を示したものである．解析結果によると吸着による遅れ係数は浄化の進行速度に大きく影響することが分かり、数値計算において重要なパラメータの１つであることを示している．

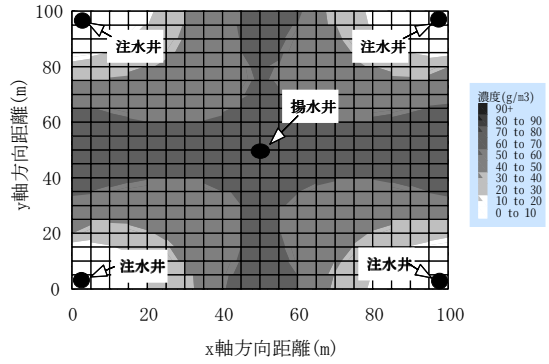

図 3　遅れ係数 1.5 の濃度分布(30 日後)

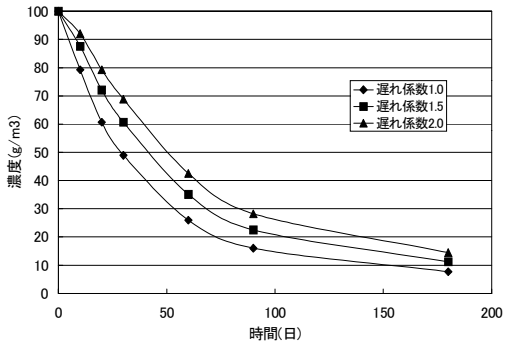

図 4　遅れ係数による経時濃度変化(揚水井節点)

4．飽和帯水層での模型実験

これまでは、仮想のモデルを用いた数値計算について検討してきたが、ここでは飽和帯水層の模型実験について述べる．**図** 5 に示す実験装置を用い、定常状態になるまで水を流し、その後汚染物質と仮定したフローエッセン(着色料)を連続注入し汚染状況を観察した．逆に浄化状況を観察するために土槽全体が着色した後、清水を注入する実験も行った．

汚染過程では注水口から同心円状に汚染が拡大した後、しばらくして地表面上部の自由水を伝わって水槽の下流からも汚染が拡大していった．この拡大は下流側の汚染が排水口に達した時点で止まり、続いて注水口側の汚染が徐々に下方に拡大し、およそ 20 時間で砂層全体がほぼ完全に汚染された．洗浄過程でも同様な現象が見られおよそ 30 時間で洗浄が完了した．

図 5、6 は実験結果と解析結果を比較したものである．発色した地点での汚染物質濃度の測定を行わなかったため、単純な比較はできないが、汚染や浄化の広がり具合からさほど大きな差はないと思われる．

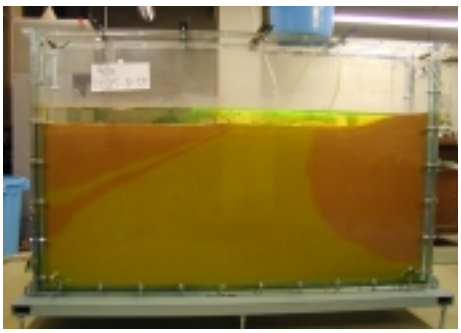

図 5　実験結果　(浄化開始６時間後)

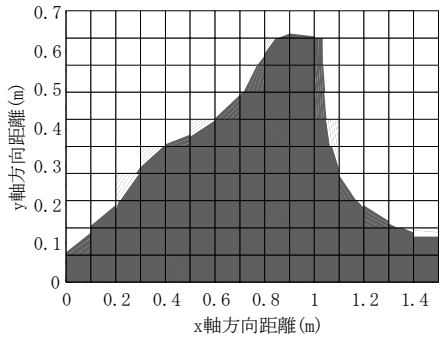

図 6　解析結果(浄化開始 6 時間後)

５．結論

揚水井戸を用いた汚染の拡大防止策や洗浄水の注水と揚水による汚染土壌の浄化対策は、解析値での評価のみではあるが、地下水環境の保全に有効な技術の一手段となりうる可能性を示すことができた．また、数値解析と模型実験との比較では、定量的な評価はできなかったものの、現象観察の範囲では、解析によって実現象をほぼ表現できることを示した．今後の課題としては、今回実施した模型実験を定量的に考察するため、少なくとも拡散した汚染物質の濃度の測定を検討すべきと考える．

参考文献

1)地下水問題研究会・編：地下水汚染論、共立出版　1994.

2)R.H.Gallaghe,G.Carey,J.T.Oden,O.C.Zienkiewich ：Finite Elements in Fluid –Volume 6,WILEY　1985