

Ⅲ-85

細砂地盤におけるトレーサ試験による移流分散パラメータの推定

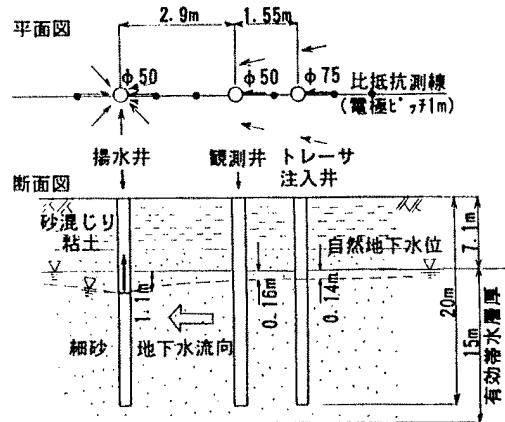
鹿島技術研究所 正会員 川端淳一 土弘道夫 瀬尾昭治
" " 安本敬作 末吉隆信

1. はじめに

実地盤における地下水の移流分散現象は、不均質性に依存する確率的問題といわれており一般化が困難であることから、移流分散パラメータの実測例は室内試験に比して非常に少ない。しかし環境問題への関心の高まりと共にこの問題を実際に定量的に扱う必要性が増しており、信頼できるパラメータを原位置で推定する手法を検討することは今後重要であるものと考えられる。本報文は、細砂の不圧帯水層地盤で、揚水により地下水流を発生させ（以下収束流と呼ぶ）、そこでトレーサ試験を実施し移流分散パラメータを推定したものである。推定パラメータは平面2次元の移流分散数値解析（EL法）により検証した。また比抵抗測定も併せて実施し、トレーサの存在を非破壊で捉えることも試みた。

2. トレーサ試験概要

図-1にトレーサ試験の概要及びトレーサを投入した不圧帯水層の地盤特性を示す。トレーサはNaClの水、エタノール溶液（濃度6.9%）であり、比重が地下水と同一となるように調整してある。トレーサの投入は、揚水井より24liter/min.で揚水を開始し、地下水位分布が定常状態となった後、投入管を用いた置換投入により行った。トレーサ投入後、観測井での電気伝導度を経時的に測定した。電気伝導度とトレーサの地下水による希釈濃度の関係は別途室内実験によって求めた。またトレーサ投入前後の地盤の比抵抗分布を把握するため図-1中に示すような測線で（2極法、長さ60m、GL-20mまでの比抵抗分布を測定）比抵抗探査を行った。なおトレーサ投入前の地盤の比抵抗測定結果は100[Ω・m]程度であり、細砂地盤の値としては妥当な値を示した。



透水係数: $k=4.7 \times 10^{-3}$ m/min, $d_{50}=0.15$ mm, 均等係数: 3~20
細砂分含有率: 80~90%, 間隙率: $n=0.43$

図-1 トレーサ試験概要図

3. 試験結果

図-2は、トレーサ投入後15,000分経過時の比抵抗低下率の分布を比抵抗映像法を用いて解析したものである。トレーサによる地盤の比抵抗の低下が捉えられていることがわかる。

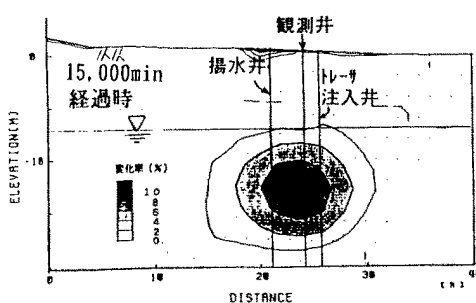


図-2 比抵抗低下率分布測定結果

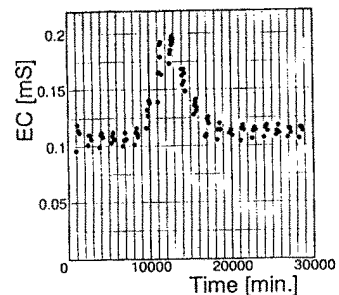


図-3 観測での電気伝導度経時変化

今回のような比較的低い比抵抗値を示す細砂地盤においても、7%程度のNaClトレーサ投入による地盤比抵抗の低下を比抵抗法を用いて捉えることが可能であることがわかった¹⁾。

各井戸で観測した地下水位低下量より、発生した地下水流速は井戸理論に基づき次式のように表現できる。

$$V_d = \frac{Q}{2\alpha\pi} \frac{1}{r(H^2 - \frac{Q \cdot \ln r}{\alpha k \pi})^{0.5}}, \quad V_r = \frac{V_d}{n} \quad \dots \dots \dots (1)$$

α : 不完全入補正係数 V_d : ダルシー流速 r : 揚水井からの距離

H:有効帯水層厚(サマシの張りH=15m), Q:揚水量(24liter/min.), k:透水係数, V_r:実流速, n:間隙率
また図-3は観測井での電気伝導度経時変化であり、トレーサが分散しつつ輸送されていくことが確認された。

4. 分散パラメータの推定結果

トレーサ試験を想定した移流分散パラメータの推定のために導かれた解析解がいくつか存在するが、今回の試験のような収束流の場では(1)式が非線形となっていることからわかるように解析解は存在しない。そこで次のような方法で縦方向分散度 α_1 を推定することとした。

- ①観測井での測定結果に2次元一様流の近似解を適用し α_1 を算定する。この際ピーク濃度が観測された時点での濃度 $c'_{\max}(t_0)$ とある時点での濃度 $c'(t_1)$ との比より分散度を推定する(2)式を用いる²⁾。

$$\alpha_1 = \frac{V_r(t_0 - t_1)^2}{4[t_1 \cdot \ln(R_1) - (t_0 - t_1)]}, \quad R_1 = \frac{c'_{\max} t_{\max}}{c_1 t_1} \quad V_r: \text{平均実流速} \quad \dots\dots(2)$$

- ②算定した分散度の妥当性を、ペクレ数 $Pe(x/\alpha) > 3$ 以上の場合に収束流の数値解を近似できることが確かめられている1次元の解析解(3)式³⁾に代入し、その値を実測値と比較検証する。

$$c' = \frac{k}{t'^{1.5}} \exp\left[-\frac{Pe}{4t'}(1-t')^2\right], \quad k = t'_0{}^{1.5} \exp\left[-\frac{Pe}{4t'_0}(1-t'_0)^2\right], \quad t' = \frac{V_r t}{x} \quad \dots\dots(3)$$

今回の試験においては図-4の観測結果に基づき $t_0=12500\text{min}$, $t_1=10000\text{min}$, $c'_{\max}(t_0)=1.0$, $c'_1(t_1)=0.444$ の諸値を用いた。その結果 $\alpha_1=0.025\text{m}$ ($Pe=52$)となった。この値を(3)式で比較検証したところ今回の結果を表現しうる値であることが確かめられた(図-4参照)。さらに推定した α_1 及び α_1 ($\alpha_1=0.2\alpha_1$ と仮定)を用いて、EL法により平面2次元の移流分散数値解析を行い実測値と比較したところ図-4に示すように妥当な結果が得られた。

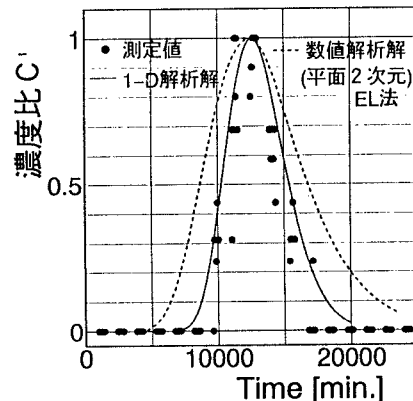


図-4 観測井における濃度経時変化 (実測値と解析値の比較)

5. 考察

過去に提案されている室内実験公式⁴⁾は適用範囲がRe数やPe数等に応じて限られており、実地盤の分散度を定量的に説明することが困難なのはよく知られている。今回推定した分散度についても過去の知見と同様に室内試験結果に比して2~3オーダー程度大きな値となっている。一方この値は、細川・神野⁴⁾の細砂地盤の原位置試験での採用値やGenuchtenら同程度の流速場での採用値⁵⁾にほぼ近く、またBeimsが整理した観測規模に応じた分散度の値⁶⁾とも一致している。以上より $\alpha_1=0.025\text{m}$ は妥当な値であると考えられる。トレーサを置換投入する原位置試験で分散度を推定する場合には、投入トレーサのすべてが質量保存されながら理想的に流れ場に投入されるとは限らない(井戸損失等の影響等)。したがって無次元濃度の経時変化のみから解析解を用いて分散度を推定する今回用いた手法は有効であるものと考えられる。

図-4に示した移流分散解析においては、遅延係数 $R=1.5$ 程度の遅延効果を導入しないとトレーサの到達時間を説明することが困難であった。これはEc測定によるトレーサ試験を実施する場合、NaClについてもある程度の吸着効果を見込む必要のあることを示唆している。NaClの吸着効果については、今回試験を実施した地盤でのメカニズムについて不明な点があり今後の検討課題である。

参考文献

- 1)川端・土弘・広野,「比抵抗率を用いたトレーサ試験による地下水移流分散特性の把握手法について」,第49回土木学会年次講演会,Ⅲ-860,1708-1709,1994
- 2)Zou & Parr, Two-Dimensional Dispersion Estimation Using Tracer Experimental Data, Ground Water, 32-3, 367-373, 1994
- 3)Sauty, An Analysis of Hydrodispersive Transfer in Aquifer, Wat. Res. Res., 16-1, 145-158, 1985
- 4)例えば, 細川・神野・杉井,「現地ポットリング」孔内の塩分濃度実測値に基づく縦方向分散係数の推定と数値シミュレーション, 水工学論文集, 36, 423-428, 1992
- 5)西垣,「地下水数値計算法, 2-4物質輸送のその他の解析法」, 地下水学会誌, 33, 265-276, 1991
- 6)神野,「地下水汚染の解析とモニタリング」の法」, 水工学に関する夏期研修会講義集, A-6-1~A-6-23, 1990