

(50) ボーリング孔を横切る地下水流れの
トレーサー追跡に関する実験的検討
—単孔式地下水流速流向計への応用—

(財)電力中央研究所 正会員 ○河西 基
東京農工大学一般教育部 佐野 理
大成基礎設計(株) 平田洋一
" 松岡永憲

Experimental Study on Tracer Tracking for Groundwater Flow across a Borehole
;Application to Measurement by Groundwater Flow Meter in Single Well

Motoi Kawanishi Central Research Institute of Electric Power Industry
Osamu Sano Tokyo University of Agriculture and Technology
Yoichi Hirata Taisei Kiso Sekkei Co.Ltd
Eiken Matuoka "

ABSTRACT

In surveying the groundwater flow by tracking the tracer movement, it is important to clarify the influences of a borehole to the groundwater flow field inside and outside the hole bored in porous media. In this study, the laboratory tests for the tracer transport with the groundwater flow across a cylindrical hole in the homogeneous porous media and the analyses for the groundwater flow and tracer dispersion were performed. From the comparison between the observe and analyzed results, the adequacy of the analytical method applied to this problem was identified so that the remarkable differences between inside and outside the well could be quantitatively represented.

1. はじめに

近年地下空間の有効利用や環境汚染がクローズアップされつつあり、このために地下水の流れをより合理的に把握する必要性が増大している。地下水の流速を測定する方法の一つとして、従来からのポイントダイレーション法¹⁾に代表されるトレーサー手法が良く知られており、最近では単一のボーリング孔を利用した地下水流速流向計²⁾も開発されてきているが、原理的にはボーリング孔内のトレーサーの動きを追跡する手法がほとんどである。しかしこのような空洞内における流れは、実際に測ろうとする周辺地盤の元の流れと差異があることが知られており⁽²⁾ 佐野はこれらのことを念頭に置いて多孔媒体中の流れに対する円柱状空洞の影響を理論的に論じている³⁾。また筆者らはさらにトレーサーの拡散について実験と解析による概略的検討を行っている⁴⁾。本報告は、実験的検討を更に加えることにより、円筒空洞によって影響を受ける地下水の流れを測る指標としてのトレーサーの挙動をより定量的に検討したものである。

2. 解析モデル

(a) 地下水流れ

佐野³¹は、空洞内ではストークスの方程式、地盤内では一般化されたダルシーの方程式に基づく以下の解析解を用いて理論検討を行っているが、本報告でもこれを用いることとした。

$$\cdot \text{空洞内} \quad ; v_r^* \equiv v_r / U\infty = (U_0^* + a \zeta^2 / 8) \cos \phi \quad (1)$$

$$v_\phi^* \equiv v_\phi / U\infty = - (U_0^* + 3a \zeta^2 / 8) \sin \phi \quad (2)$$

$$\cdot \text{地盤内} ; V_r^* \equiv V_r / U\infty = [1 + B \zeta^{-2} + \sigma \zeta^{-1} K_1(\zeta)] \cos \phi \quad (3)$$

$$V_\phi^* \equiv V_\phi / U\infty = \{-1 + B \zeta^{-2} + \sigma [K_0(\zeta) + \zeta^{-1} K_1(\zeta)]\} \sin \phi \quad (4)$$

$$\text{ここに, } B = \zeta_0^4 (\alpha + 3\beta) / \Delta, \quad \sigma = -8 \zeta_0^2 / \Delta \quad (5) \quad (6)$$

$$U_0^* \equiv U_0 / U\infty = \zeta_0^2 (3\alpha + 5\beta) / \Delta, \quad a = -8 (\alpha - \beta) / \Delta \quad (7) \quad (8)$$

$$\Delta = 8 (\alpha - \beta) + \zeta_0^2 (\alpha + 3\beta) \quad (9)$$

$$\alpha = K_0(\zeta_0) + (\zeta_0 + 2 \zeta_0^{-1}) K_1(\zeta_0) \quad (10)$$

$$\beta = K_0(\zeta_0) + 2 \zeta_0^{-1} K_1(\zeta_0) \quad (11)$$

$$\zeta = r / \sqrt{K}, \quad \zeta_0 = R_0 / \sqrt{K} \quad (12) \quad (13)$$

ここに R_0 は空洞半径、 $U\infty$ は無限遠方における一様平均流速、 v は空洞内部の流速、 V は地盤内での平均の流速であり、流速に付けた添え字は2次元極座標系 (r, ϕ) におけるそれぞれの成分を表わす。また K は地盤の透水係数、 $K_0(\zeta)$ 、 $K_1(\zeta)$ は変形されたベッセル関数である。

流れの解析結果の一例としてベクトル図、及びX軸上の流速分布図を図-1、2に示す。

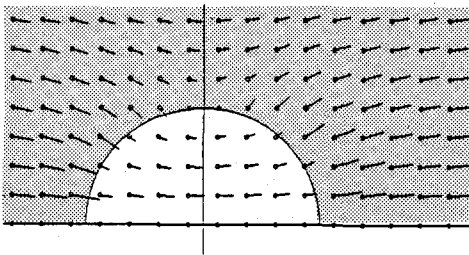


図-1 流れのベクトル図

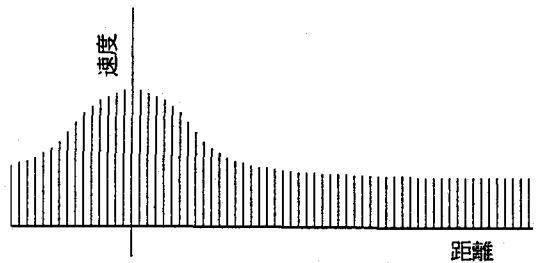


図-2 X軸上の流速分布図

これらの結果は後述の物質輸送解析の流れ場条件として入力される。

(b) 物質輸送

トレーサの輸送の基礎方程式を以下に示す。

$$\partial C / \partial t = D \Delta C - (V_e \cdot \nabla) C \quad (14)$$

式(12)の左辺を後退差分、右辺を中央差分で展開すると式(13)を得る。

$$\frac{C(t) - C(t-1)}{\Delta t} = D \frac{C(m+1, n) - 2C(m, n) + C(m-1, n)}{\Delta x^2} + D \frac{C(m, n+1) - 2C(m, n) + C(m, n-1)}{\Delta y^2} - V_{ex} \frac{C(m+1, n) - C(m-1, n)}{2 \Delta x} - V_{ey} \frac{C(m, n+1) - C(m, n-1)}{2 \Delta y} \quad (15)$$

ここに C はトレーサ濃度であり、 D は分散係数である。 V_e は地盤中の地下水の実流速であり、前記の平均流速との関係は次に示す通りである。ここに n_e は有効間隙率を示す。

$$V = n_e \cdot V_e \quad (16)$$

数値解析を行うに際しては K 、 n_e および D の3つをパラメータとして設定する必要がある。モデル地盤のガラスビーズの透水係数 K は室内透水試験で求めた値、 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ を採用した。有効間隙率 n_e についても土質試験で得られた間隙率 $n = 0.4$ を採用した。分散係数 D は数値解析と実験値との比較により同定した。

3. 実験装置とトレーサー濃度分布測定法

トレーサー実験を行うに際し、当初ではバックグラウンドと電気抵抗の異なるトレーサー材を投入して、モデル地盤の電気抵抗の変化を測定する方法を用いたが、有限個の電極における出力変化から面的な濃度分布を推定するところに難点があった⁴⁾。そこで本報告では色素をトレーサーとした場合、濃度が増加すると色調もそれにつれて変化することに着目し、画像計測により濃度変化を測定する方法を用いた。これにより面的濃度分布を明瞭に測定することが可能となった。次にその実験の装置と方法について述べる。

(a) 実験装置

実験装置は図-3に示すようにモデル地盤を入れる水槽、流れを発生させる定量ポンプ、データ計測部としての鏡〜カメラ〜コンピューター〜照明装置、及びトレーサー注入装置で構成される。

モデル地盤の材料は $\phi 0.1\text{mm}$ のガラスビーズとし、また疑似ボーリング孔として $\phi 16\text{mm}$ のトレーサー投入孔をステンレスメッシュで作製し設置した。水槽底盤は透明アクリル盤を使用し、底面からの観察を可能にしてある。モデル地盤内に流れを発生させる方法は一般的には上下流の水位を制御するが、本実験のように拡散を問題とするような低流速場においては mm オーダーの制御が必要となり、このような手法では正確な流速の発生は困難である。そこでオーバル機器工業(株)製の微

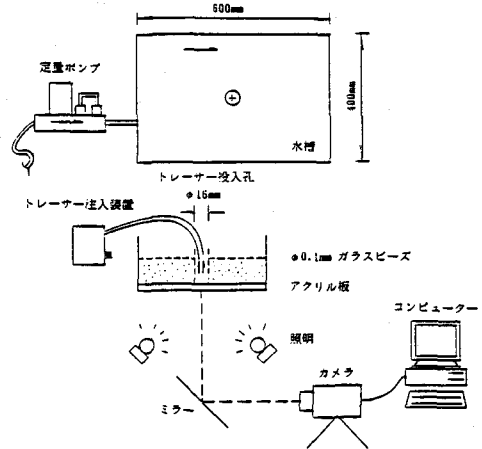


図-3 実験装置

小定流量ポンプ(マスフローオーバルF-9000シリーズ)を使用した。今回用いたポンプでは最小流量 0.25g/h が制御できる。画像データを取り込むカメラはオートホワイトバランス、オートゲインコントローラー等の自動調節機能によりデータに大きな誤差が生じるので、これらをキャンセルできる機種とした。また照明はカメラのシャッタースピードと干渉しないように工夫した。一方、トレーサーをそのまま投入すると、水との密度差及び投入孔内の水位上昇による初期擾乱が大きく、その影響が無視できなくなる。そこで、トレーサー材として比重 1.001 のエオシン(赤色染料)を用い、またトレーサーの投入分だけ投入孔内の水を排水する等体積置換法を用いてこの問題を解決した。

(b) トレーサー濃度分布測定方法

カラーテレビ等の発色の原理は赤(R) 緑(G) 青(B)を3原色とする加色混合であり、基本8色は図-4に示すようにRGBの組み合わせで発色する。本実験装置ではRGB各々について256の分解能があるので、理論上認識可能な色の数は1670万色となる。今回の測定ではトレーサーの色調、つまり濃度をRGBの出力値に変換することによりデータを数値化した。トレーサー濃度とRGB出力の関係は実験により求めた。その結果は図-5に示す。キャリブレーションは比重 1.001 のトレーサー濃度を100%としてその $1/100$ までを7段階に変化させた。この時のRGB出力値を見ると、Rは145から85へ減少するが(出力幅60)、GおよびBは逆に約50から120程度に増加し(出力幅約70)、エオシンは赤色系のトレーサーであるが出力の変動幅はむしろ他の色の方が大きかった。そこで最終的に画像データからトレーサー濃度を決定する検定曲線は、図-6に示すようにGおよびBの値の平均値を用い、R出力は除外した。

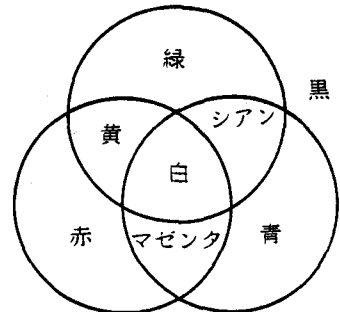


図-4 3原色混合図

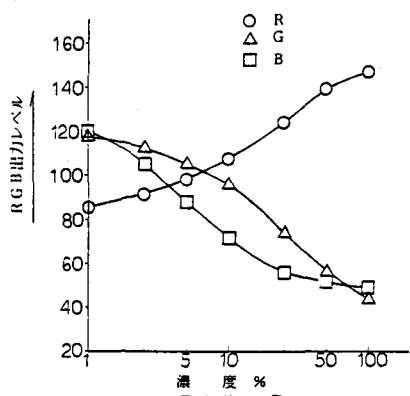


図-5 濃度出力検定結果

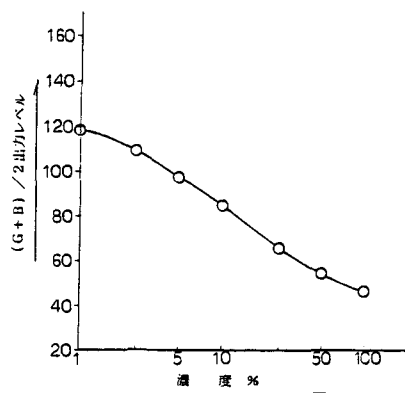


図-6 検定曲線

4. 実験結果

(a) 実験結果

実験は表-1に示すような2つのケースについて行った。トレーサー濃度の平面分布を示す測定結果例を図-7、8に示す。

表-1 実験ケース

ケース	平均流速 (cm/sec)	画像取り込み時間 (hour)	最終測定時間 (hour)
1	1×10^{-4}	1	13
2	1×10^{-5}	6	96

トレーサー塊の中心の移動はほぼ実流速に比例しており、移流・分散の傾向を良く表していると言える。

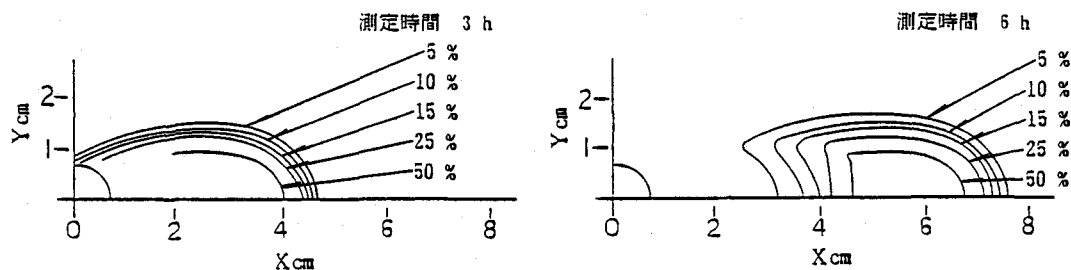


図-7 濃度分布測定例 (ケース1)

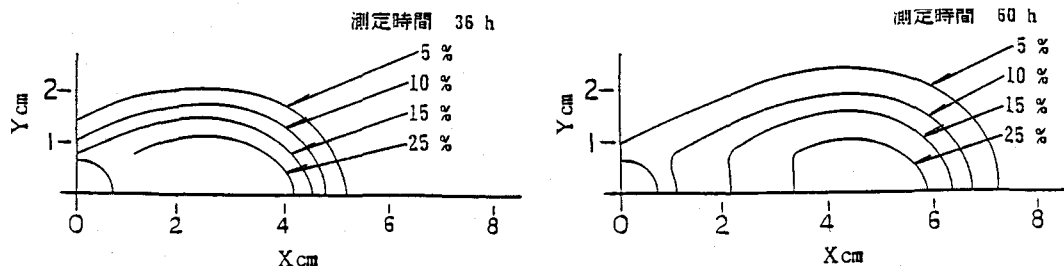


図-8 濃度分布測定例 (ケース2)

(b) 数値計算と実験結果の比較と考察

空洞内と地盤中では条件が異なるので見かけの分散係数が違っていると考えられるので、地盤中の分散係数を固定して、空洞内のそれを变化させた条件で数値解析を行った例を図-9に示す。この例からも分かるようにトレーサの前面部分では空洞内の分散係数の影響をほとんど受けないが、尾部では空洞内の分散が大きくなると濃度勾配が緩くなる傾向がある。従って地盤中の分散係数は前面部分のマッチングで同定し、次に空洞中のそれを尾部のマッチングで決定した。その例は図-10、11に示すように地盤の分散係数は 1×10^{-6} cm²/sec、空洞内ではその20倍とすることでかなり良い一致を見ることができた。

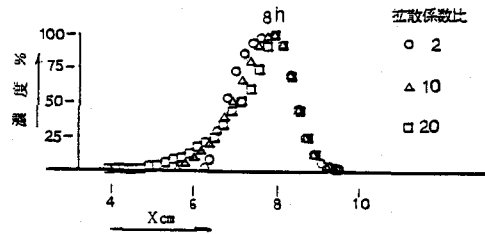


図-9 空洞内の分散係数の影響

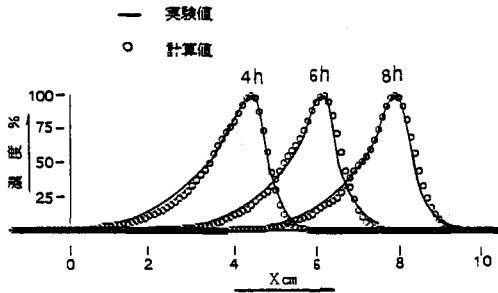


図-10 平面濃度分布の比較例

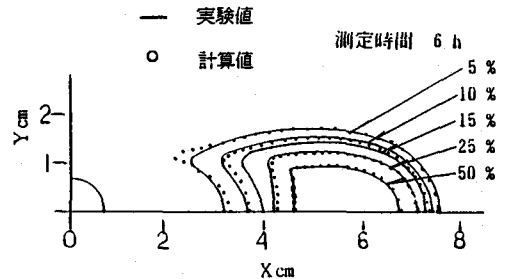


図-11 X軸上の濃度分布の比較例

5. まとめ

前節までの検討から、ここで用いた解析モデルによりボーリング孔を横切る地下水の流れ場とトレーサの拡散場を良好に再現できることが実験により確かめられた。また、これらの解析結果から空洞内ではその周辺に比べて地下水の流速が大きい場合には3倍、さらに拡散係数が20倍程度は大きくなる(本報告の対象ケースの場合)ことが明らかとなった。したがって、単一のボーリング孔内でトレーサ追跡により流速・流向を測定する場合にはこれらの特性を十分に吟味する必要があることが明確にされた。

今後は実験と解析をさらに加えて、より汎用的な現象の解明を試みる予定である。

参考文献

- (1) 福岡正己他(1979): 地下水ハンドブック、建設産業調査会
- (2) 河西基(1986): 単一孔による新型地下水流速流向計の開発、電中研研究報告385031
- (3) 佐野理(1983): 多孔性媒質中に穿った円柱状の空洞を過ぎる粘性流、『ながれ』第2巻第3号
- (4) 佐野理、平田洋一、吉村淳、河西基(1990): ボーリング周辺における地下水トレーサ挙動の検討 第25回土質工学研究発表会講演論文集
- (5) 土屋裕、深田陽司(1990): 画像処理、コロナ社
- (6) W. キンツェルバッハ、上田年比古監訳(1990): パソコンによる地下水解析、森北出版