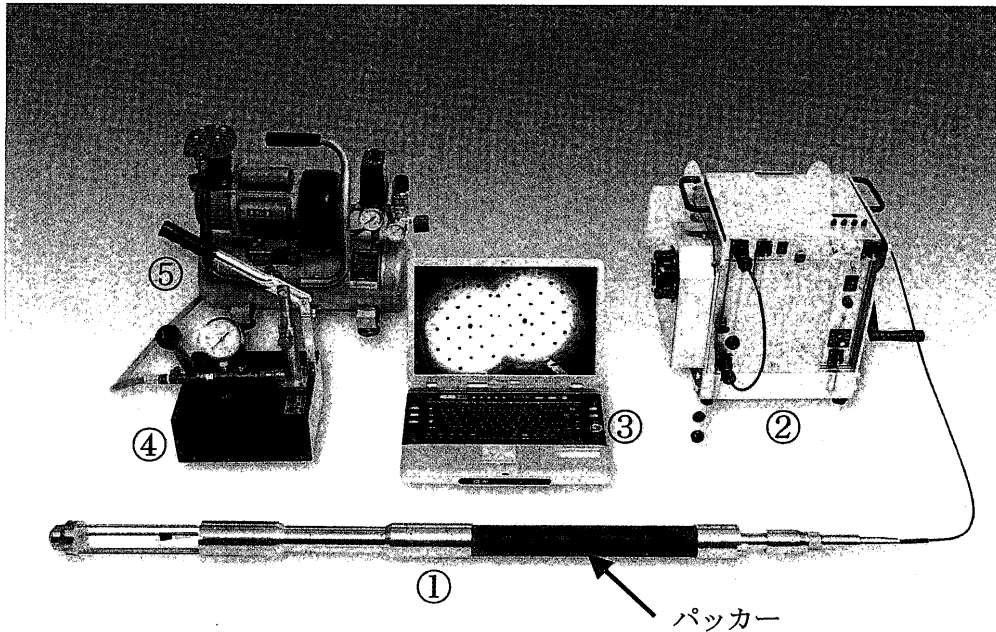
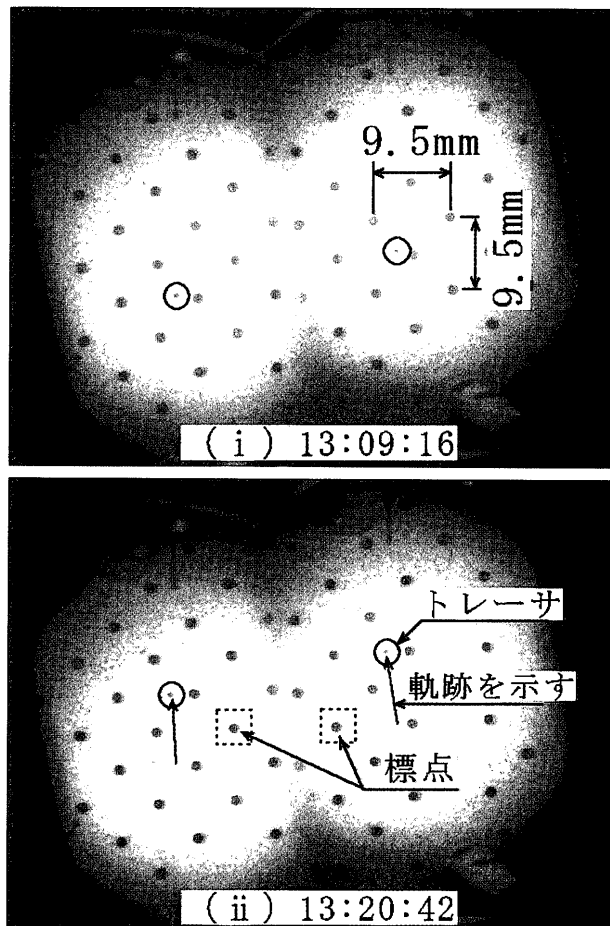


画像計測によるボーリング孔を過ぎる地下水流動の3次元流向流速測定
(本文16～18ページ参照)



口絵写真-11 単孔式による3次元流向流速測定システム

- ① CCDカメラとプリズムを組み合わせた方位計内蔵の光学式流向流速計本体部
- ② 本体部の上げ下げを機械的に行うケーブル巻き取り装置 (深度表示あり)
- ③ 取得画像表示および画像保存用パソコン (画像計測用ソフト内蔵)
- ④ 微量押し出し整備機能を有している清水用のトレーサ投入装置
- ⑤ 本体部を所定深度に固定するパッカー用のコンプレッサー



口絵写真-12 プリズムを通して取得したステレオ(グレー変換)画像例

左右の画像で微妙にトレーサ位置が異なるように見えるのは、視差の違いによるものである。画像上に示す軌跡は、トレーサが11分26秒間で移動した距離を示す。なお、解析できない場合には、鉛直方向成分の移動量は測定不可能である。

画像計測によるボーリング孔を過ぎる地下水流動の3次元流向流速測定

Measurement of 3D-Groundwater Flow in Single Borehole by Image Processing Technique

小林 薫 (こばやし かおる)

飛鳥建設機技術研究所 室長

松 元 和 伸 (まつもと かずのぶ)

飛鳥建設機技術研究所 主任研究員

筒 井 雅 行 (つつい まさゆき)

飛鳥建設機技術研究所 主任研究員

近 久 博 志 (ちかひさ ひろし)

飛鳥建設機技術研究所 所長

熊 谷 幸 樹 (くまがい こうき)

飛鳥建設機技術研究所 主任研究員

阿 保 寿 郎 (あほ としろう)

飛鳥建設機技術研究所 研究員

1. はじめに

地盤環境問題に関心が集まる中、これまでの井戸枯れや地盤沈下だけではなく、流況阻害や土壌・地下水汚染など、地下水に係わる問題が注目されている。地下水汚染問題においては、汚染物質の地下水流動による移行範囲を予測・評価することが重要であり、地下水流向流速測定は環境保全・環境修復の分野においては透水試験より重要視されている¹⁾。特に、地下水に溶出している状態の水溶性流体は、遅延効果が小さく汚染物質が地下水流動とともに移動するため、帯水層中の地下水流動を正確に把握することが重要である²⁾。また、地下水流向流速は、地下水汚染問題における維持管理上の長期モニタリング計画において重要な要因の一つとされている³⁾。

一方、原位置における地下水流動の流向流速測定は、経済的で測定時間が比較的短く、測定精度も向上している単孔式による測定方法が多用されている。しかし、現状の単孔式測定方法^{4),5)}は、技術的に水平流の流向流速測定しかできないため¹⁾、原位置における複雑な3次元挙動を示すような地下水流動の測定は困難である。こうした背景に対し、流動阻害や処分施設から漏出する汚染物質の地下水流動に伴う移行範囲の予測など、維持管理における予測精度の向上を図るためには、原位置で地下水流向流速を正確に把握する測定方法の確立が望まれる。

本論文では、原位置において単孔式で3次元な地下水流向流速を的確に測定するための、Self Calibration法を用いた重複画像標定問題の解析方法とともに、CCDカメラとプリズムを組み合わせて試作した光学式流向流速計の現場適用性について検討した結果について述べる。

2. 単孔式による地下水流向流速測定の概要

現状の単孔式による地下水流向流速測定方法の概要を表一に示す。最近では、ボーリング孔内で固体トレーサの3次元挙動を測定する技術が開発中であるが^{5),6)}、ここでは現場実験まで実施している小林ら⁵⁾の画像計測による単孔式3次元流向流速測定方法について述べる。

表一 単孔式による地下水流向流速測定方法の概要^{4),5)}

測定方法	概要	備考(測定範囲)
テレビ(CCDカメラ)法	テレビ(CCDカメラ)を用いて浮遊粒子の軌跡を追跡する最も直接的な方法で、浮遊物追跡法とも呼ばれる	1×10^{-3} $\sim 2 \times 10^{-1}$ cm/s
レーザー法	レーザー光によって、干渉縞を発生させ、この干渉縞を回転させて、粒子の干渉縞を横切る周期から求める方法	5×10^{-6} $\sim 2 \times 10^{-9}$ cm/s
中性子検出法	ホウ素をトレーサとし、指向性(8方向)を持たせた中性子検出器で各方向のホウ素濃度の希釈状況の変化より求める方法	3×10^{-5} $\sim 1 \times 10^{-1}$ cm/s
電位差法	地下水と比抵抗の異なる溶液をトレーサとし、電極間の電気抵抗(周囲12本)を測定し、トレーサの希釈状況の変化より求める方法	3×10^{-5} $\sim 1 \times 10^{-2}$ cm/s
熱量法	ヒーターによって加熱された地下水をトレーサとし、温度センサー(8個)を用いてその移動を検出して求める方法	1×10^{-3} $\sim 4 \times 10^{-1}$ cm/s

3. Self Calibration法を用いた重複画像標定問題の解析方法

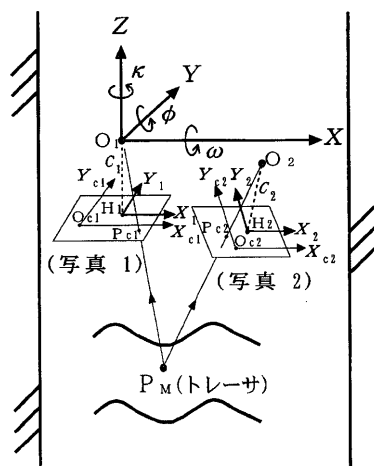
Self Calibration法⁷⁾(以下、SC法と記す)の概要を以下に示す。図一は、ステレオペアな写真画像を撮影した場合の被写体(P_M)とカメラ投影中心(O_i)と取得画像(P_{ci})の位置関係を示したものである。また、H_i、X_i、Y_iは主点、主点を原点とする写真座標系のX軸とY軸、O_{ci}、X_{ci}、Y_{ci}は測定座標系の原点とそのX軸およびY軸を示す。ここで、座標が(X_j, Y_j, Z_j)であるような点jの写真i(i=1,2)における写真座標(x_{ij}, y_{ij})は共線条件式(1)、式(2)で表される。

$$x_{ij} = -c_i \frac{a_{11i}(X_j - X_{0i}) + a_{12i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{13i}(Z_j - Z_{0i})}{a_{31i}(X_j - X_{0i}) + a_{32i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{33i}(Z_j - Z_{0i})} \dots (1)$$

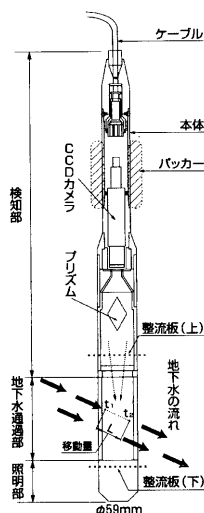
$$y_{ij} = -c_i \frac{a_{21i}(X_j - X_{0i}) + a_{22i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{23i}(Z_j - Z_{0i})}{a_{31i}(X_j - X_{0i}) + a_{32i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{33i}(Z_j - Z_{0i})} \dots (2)$$

ただし、

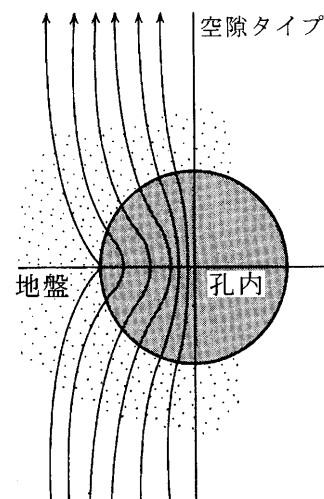
$$\begin{bmatrix} a_{11i} & a_{12i} & a_{13i} \\ a_{21i} & a_{22i} & a_{23i} \\ a_{31i} & a_{32i} & a_{33i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa_i & \sin \kappa_i & 0 \\ -\sin \kappa_i & \cos \kappa_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_i & \sin \omega_i \\ 0 & -\sin \omega_i & \cos \omega_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \phi_i & 0 & -\sin \phi_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi_i & 0 & \cos \phi_i \end{bmatrix} \dots (3)$$



図一 撮影対象物と撮影カメラ等の位置関係



図二 光学式流向流速計の概要



図三 空隙タイプの孔内流線⁹⁾

なお、写真 i は外部標定要素 (X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i} : カメラ投影中心の座標, $\omega_i, \phi_i, \kappa_i$: 各軸に対するカメラの傾き) を有するものであり、また、正しい写真座標 (x_{ij}, y_{ij}) は、画像処理などによって測定された写真座標を (x_{cij}, y_{cij}) とすると、式(4)~(8)のように表される。

$$x_{ij} = x_{cij} - x_{hi} - \Delta x_{ij} \dots\dots\dots (4)$$

$$y_{ij} = y_{cij} - y_{hi} - \Delta y_{ij} \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta x_{ij} = x_{ij}(k_{1i}r_{ij}^2 + k_{2i}r_{ij}^4 + k_{3i}r_{ij}^6) + p_{1i}(r_{ij}^2 + 2x_{ij}^2) + 2p_{2i}x_{ij}y_{ij} \dots\dots\dots (6)$$

$$\Delta y_{ij} = y_{ij}(k_{1i}r_{ij}^2 + k_{2i}r_{ij}^4 + k_{3i}r_{ij}^6) + 2p_{1i}x_{ij}y_{ij} + p_{2i}(r_{ij}^2 + 2y_{ij}^2) \dots\dots\dots (7)$$

$$r_{ij}^2 = x_{ij}^2 + y_{ij}^2 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 c_i は写真 i の焦点距離、 x_{hi}, y_{hi} は主点の位置のずれ、 $k_{1i}, k_{2i}, k_{3i}, p_{1i}, p_{2i}$ はカメラレンズの歪曲収差の係数である。

SC法では、1台の CCD カメラのみを用いて焦点距離を変えずに撮影を行うため、それぞれの写真がすべての写真に共通した内部標定要素をもつものとみなすことができるので、複数の写真について同時に単写真標定を行っている。この方法では、外部標定要素 ($X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, \omega_i, \phi_i, \kappa_i$) は写真ごとに異なるが、他の8個の内部標定要素 ($c_i, x_{hi}, y_{hi}, k_{1i}, k_{2i}, k_{3i}, p_{1i}, p_{2i}$) はすべての写真で同一であるとして解析を行う。また、式(1)~(8)で表される共線条件式は、未知数について非線形である。したがって、本解析では、未知数を近似値と微小補正量とに分けて考えて非線形方程式を線形化し、繰返し計算によって解を求めている。

4. 光学式流向流速計の概要と現場適用

4.1 光学式流向流速計の概要と測定手順

開発した光学式流向流速計の概要を図二に示す。本体部(検知部、地下水通過部および照明部)、電力・画像伝送用ケーブル、孔内の上下流を抑制するために設けた整流板および固定用パッカー等から構成され、取得画像は地上部に連結しているパソコンに順次保存する。測定システムの全体構成は口絵写真一11に示す。

測定手順は、ボーリング孔に定方位ロッドと連結した本体部を挿入し、固定用パッカーで所定深度に固定する。そして、必要に応じて密度調整した固体トレーサ(平均乾燥密度 $\rho \approx 1.008 \text{ t/m}^3$)を投入し、地下水流動が定常状態になった後、初期画像を取得する。静置状態のまま任意時間後に順次画像を取得する。取得した各ステレオ画像を SC法で画像処理することにより、初期 t_1 と任意時間後 t_2 (移動後)の固体トレーサの各3次元座標を算出し、その座標差から任意時間における移動量とその移動方向を求め、地下水流動の3次元の流速と流向を同時に算出する。なお、必要に応じて本体部を順次上下方向に移動させ、前記手順で測定を行うことになる。

4.2 光学式流向流速計の現場適用

(1) 地質および地下水概要

本地点の地質構成は、埋土の直下より第四紀完新世の沖積層(上位より腐植土、砂層、礫混じり粗砂、砂礫および礫混じり粗砂)と G.L. -16.5 m 以深の更新世の洪積層(砂層・中砂および砂礫)が分布している。また、地下水位は、G.L. -2.1 m で腐植土層中に存在している自由水(水温 17°C)である。

(2) 測定概要

測定は、地下水流動の比較的大きいと予想される G.L. -11.0 m 付近の砂礫層を対象に、光学式流向流速計による流向・流速とダルシー則と良く一致するとされている塩水を用いたポイント・ダイリューション法による流速測定を実施した。検証のための地下水流動は、揚水により3次元の地下水流動場をつくった。観測井に用いたスクリーンは、測定対象の砂礫層に長さ 1 m、開口率 30% 以上⁸⁾の水平連続 V スロット型を設置した。

4.3 流向流速測定結果と考察

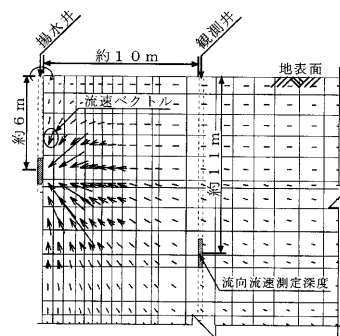
光学式流向流速計およびポイント・ダイリューション法による現場測定結果について以下に示す。

口絵写真一12は光学式流向流速計を用いて(プリズムを通して)、視差の異なる左右2方向から撮影した画像例を示す。口絵写真一12には、時間経過とともに地下水中を移動する固体トレーサ(○印内)と照明部上面に配

表一 2 原位置における流向流速測定結果

測定ケース	トレーサの移動量(mm)			水平流とした 平均流速(cm/s)	3次元流の 平均流速(cm/s)	流向 (°)	備考
	X方向	Y方向	Z方向				
CASE 1	-1.03	9.83	3.29	1.44×10^{-4}	1.51×10^{-4}	264	
CASE 2	0.13	9.79	3.00	3.76×10^{-3}	3.94×10^{-3}	271	
CASE 3	-16.65	14.20	10.00	7.15×10^{-4}	7.86×10^{-4}	220	
CASE 4	-4.21	6.82	1.60	1.60×10^{-3}	1.64×10^{-3}	238	
CASE 5	-5.85	12.05	-1.63	4.19×10^{-3}	4.22×10^{-3}	244	
平均流速=				2.08×10^{-3}	2.15×10^{-3}	247	
地盤内の実流速=				6.94×10^{-4}	7.16×10^{-4}		

注1) Z方向は、一が沈降方向を示す。また、流向については、270°が西方向を示す。
注2) 地盤内の実流速(=V)は、秋林らの研究より 1/3×平均流速とした。



図一 4 浸透流解析¹¹⁾によるシミュレーション

表一 3 鉛直方向成分の地下水流向の比較

測定ケース	流向流速計による 鉛直方向成分の流向	浸透流解析による 鉛直方向成分の流向	備考(角度)
CASE 1	18.4°	27.5°	
CASE 2	17.0°		
CASE 3	24.6°		
CASE 4	11.3°		
CASE 5	-6.9°		

置した解析時に必要となる標点群 (□印内:各標点間の相対距離は既知)を示す。また、ボーリング孔を過ぎる地下水流は図一 3 に示すような複雑な挙動を示す⁹⁾。したがって、画像解析時には、できる限りボーリング孔の中心付近を通過する固体トレーサのみを用いて処理を実施した。

表一 2 には、光学式流向流速計で取得した画像を用いて前述した SC 法により解析を行い、固体トレーサの 3次元座標を求め、任意時間における固体トレーサの移動量とその方向から流速と流向を算出した結果を示す。

地下水流速の測定結果は、従来の水平流として評価した地下水流速と 3次元流速を示す。現場の作業工程から測定ケースは少ないが、地下水流速の測定結果は多少ばらつきはあるものの鉛直方向成分の流れが生じており、3次元評価を行うことにより、今回の流速測定結果では水平流としての評価結果に比較して、10%程度大きく評価されることがわかる (CASE 3)。なお、秋林ら¹⁰⁾の研究を基に換算した地盤内の地下水流速の平均値 ($V \approx 7 \times 10^{-4}$ cm/s) は、塩水を用いたポイント・ダイリユーション法による地下水流速測定結果 ($V_p = 6.0 \times 10^{-4}$ cm/s) と良く一致しており、光学式流向流速計により孔内の 3次元地下水流速を十分測定可能と考える。

地下水流向については、水平面に関しては表一 2 に示すように、全体的には西南西方向 (平均流向 = 247°) への流れをとらえており、揚水井と観測井の平面的な位置関係にほぼ一致していた。また、鉛直方向成分の地下水流向は、図一 4 に示す軸対象浸透流解析によるシミュレーション結果を基に、測定位置付近の 3次元流速ベクトルと現場計測結果 (流向) を比較した (表一 3)。その結果、CASE 5 の測定結果を除き地下水流向は、ストレーナの影響などにより解析結果に比較して小さくなったものと考えられるが、軸対象浸透流解析による上向き方向の流速ベクトルと比較的良く一致した。

以上の今回試作した光学式流向流速計による現場測定結果および室内基礎実験の測定結果⁵⁾から、光学式流向流速計を用いることで、従来方法では測定困難であった単孔式による地下水流動の 3次元的な流向・流速を実用的な精度で十分測定可能であることを確認した。

5. おわりに

今後は、光学式流向流速計の完成度を高めた上で、処分施設から漏出する汚染物質の地下水流動に伴う移行範

囲の予測・評価などの土壌・地下水汚染問題や土構造物・基礎等の各種構造物の地下水調査など、安全性・供用性の維持管理のために早期活用を図って行きたい。

謝辞: 本論文をまとめるに際して、現場実験にご協力いただいた飛鳥建設株式会社 稔氏、光学式流向流速計の開発にご協力頂きました株式会社レックス 金内昌直氏に謝意を表します。

参考文献

- 張 銘・遠藤秀典・高橋 学: 原位置浸透流測定法について (その 2), 応用地質, Vol. 42, No. 1, pp. 52~59, 2001.
- 菱谷智幸: 予測技術, 土木技術, Vol. 58, No. 10, pp. 69~76, 2003.
- 平山光信: 調査・予測・モニタリング技術総論, 土木技術, Vol. 58, No. 10, pp. 59~68, 2003.
- 地盤工学会: 土壌・地下水汚染の調査・予測・対策, 報光社, pp. 39~41, 2002.
- 小林 薫・松元和伸・熊谷幸樹: CCD カメラを用いた単孔式による 3次元流向流速測定の実験, 地下水技術, 第45巻, 第11号, pp. 3~10, 2003.
- 戸井田克ほか: 流向流速計測装置の設計に資するための数値解析について, 日本地下水学会2002年秋季講演会講演要旨, pp. 236~239, 2002.
- A. Okamoto: The Model Construction Problem Using the Collinearity Condition, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 50, No. 6, pp. 705~711, 1984.
- 地盤工学会: 地盤調査法一地下水流速流向測定一, pp. 334~337, 1995.
- 小松田清吉: 流速・流向の測り方, 地質と調査, pp. 21~27, 1990.
- 秋林 智・金森禎文・魏 青: ボーリング孔を過ぎる地下水の流れに関する数値解析, 地下水学会誌, Vol. 36, No. 4, pp. 439~450, 1994.
- 赤井浩一・大西有三・西垣 誠: 有限要素法による飽和不飽和浸透流解析, 土木学会論文集, III-第264号, pp. 87~96, 1977.

(原稿受理 2004.1.8)