CCD カメラを利用した単孔法による 3次元流向流速測定に関する基礎的研究*

小林 薫**・近久博志**・松元和伸**・熊谷幸樹**

Fundamental study on the measurement of direction and velocity of three-dimensional groundwater flow using a CCD camera in single borehole

Kaoru KOBAYASHI **, Hiroshi CHIKAHISA **,
Kazunobu MATSUMOTO ** and Kouki KUMAGAI **

Abstract

Methods for measuring the direction and velocity of groundwater flow are classified into single or multi boring methods. In recent years, single boring methods have been used more frequently because they are more economical, facilitate measurement and provide more accurate data. Where actual groundwater flow in a complex way, however, existing single boring methods have difficulty in measuring the three-dimensional flow of groundwater although they can take measurement for horizontal flow.

This paper discusses the method for measuring the direction and velocity of groundwater flow using a CCD camera and prism to economically and accurately identify the three-dimensional groundwater flow in single borehole. In this study, the accuracy of measurement was also verified based on the results of laboratory tests. As a result, it was found that the proposed method enabled the measurement of the direction and velocity of three-dimensional groundwater flow using a CCD camera in single borehole with great accuracy.

Key Words: measurement of groundwater flow, single boring method, CCD camera, prism, precise photogrammetry

* 本論文の一部は、土木学会第55回年次学術講演会（平成12年9月）において口頭発表

** 飛鳥建設株式会社 技術研究所

Research Institute of Technology, Tobishima Corporation

要 旨

ボーリング孔を用いて地下水の流向流速を測定する手法には、多孔法と単孔法がある。近年では、経済性ととも測定が容易で測定精度も向上している単孔法が多孔法に比較して多用されている。しかし、複雑な挙動を示す実際の地下水流動に対して、現状の単孔法では水平流の測定は可能であるが3次元的な地下水流動の測定は困難である。

本論文は、単孔法により3次元的な地下水流動を経済的かつ的確に測定するための、CCDカメラとプリズムを利用した孔内流向流速の測定方法について論ずるとともに、複数の室内実験結果を基に測定精度について検証した。その結果、本測定方法は単孔法により3次元的な地下水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。

キーワード：地下水流動測定、単孔法、CCDカメラ、プリズム、精密写真測量

1. はじめに

近年、地下水流動調査に関しては、建設工事に伴う流動障害や井戸枯れ問題の他、産業廃棄物などによる地下水・土壤汚染が深刻な社会問題となっている(今村、1996)。地盤環境の保全・修復という観点から、精度の高い影響予測や効果的な対策工の実施には、限られた調査期間と経済性を考慮した上で、地盤の透水係数の把握だけではなく、地下水の流向流速の測定が今まで以上に重要視されている(西垣、1991)。

原位置において地下水の流向流速を測定する手法としては、大きく分けて多孔法と単孔法がある。近年では、経済的であるとともに、原理が単純で測定時間が比較的短く、測定精度も向上している単孔法が多用されている。単孔法による代表的な測定手法としては、トレーサーの希釈濃度を計測するポイントダイリューション法を応用したホウ素をトレーサーとして用いる中性子検出法(山本ほか、1985)、蒸留水の希釈程度を計測して流向流速を求める電位差法(河西ほか、1986)、熱を用いて流向流速を求める熱量法(梅田・西垣、1988)、溶存酸素の減少量の計測から流速を求める方法(柳原ほか、1999)などが挙げられる。こうした従来の単孔法による地下水流向流速の測定手法は、複雑な機器類が必要で、データ収集と整理・分析に時間を要するなどの課題がある。また、CCDカメラを用いて液体中の浮遊粒子を直

接追跡する浮遊物追跡法(安藤ほか、1987; 山田・荒川、1999)は、孔内水の濁りに関する課題も残されているが、測定時間が短い、中間処理・解析を必要としない(山田、2001)他、地下水流動の可視化という視覚的な観点から、今後有望な手法の1つであるとされている(亀井・中村、1992)。

しかしながら、単孔法による地下水流向流速の測定は、技術的な問題から水平流の測定しかできないため(張ほか、2001)、原位置における実際の3次元的な地下水流向流速を正確に測定することが困難である。このことから、原位置において高い再現性で精度良く、複雑な機器類を必要とせずに3次元的な地下水流向流速を簡易に測定できる孔内流向流速計の開発が望まれている。

こうした背景に対して、本論文は1台のCCDカメラ(Charge Coupled Device Camera)とプリズムを利用した浮遊物追跡法で3次元的な孔内流向流速を経済的かつ的確に測定するための手法について論ずるとともに、複数の室内実験結果を基に測定精度について検証した。その結果、本測定手法は単孔法により3次元的な地下水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。

2. ステレオビジョンを応用した測定手法

本研究の地下水流向流速測定は、ステレオビジョンを応用したものであり、CCDカメラとプ

リズムを組み合わせ、同時に撮影したステレオ画像を処理することにより、対象とする液体中を任意時間に移動した浮遊物質の3次元座標を求め、流向と流速を同時に算定するものである。

以下に測定理論 (Self Calibration 法) (A. Okamoto, 1984; 近久ほか, 1996) の概要を示す。

座標が (X_j, Y_j, Z_j) であるような点 j の写真 i 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。モデル空間上の点と2つの画像上の点の共線条件を示したものを図1に示す。

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

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

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

ここで、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、 $\omega_i, \phi_i, \kappa_i$: 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、画像処理等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。

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

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

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

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

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

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。

Self Calibration 法では、1 台の CCD カメラの

図1 重複写真の共線条件

Fig. 1 The collinearity equations for the point in the model space for the left and right pictures

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う。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。ここで、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、解析では、未知数を近似値と微小補正量とに分けて非線形方程式を線形化し、繰り返し計算によって解を求める。

CCD カメラとプリズムを用いて取得した2方向からの画像を用いて Self Calibration 法を用いて解析を行ったが、解析時における標点の写真座標の読み取り誤差は、測定精度に大きな影響を与える。このことから、標点の写真座標を精度良く読み取るために、標点の輝度 (黒: 0 ~ 白: 255 の256階調) による重み付き重心の値を写真座標として取得した (小林ほか, 2000)。また、標点の輝度は、撮影場所や撮影条件によって異なるため、必

要に応じて標点ごとにしきい値を順次修正しながら重み付き重心の値を求めた。

3. 測定精度検証のための室内実験概要

地盤内の地下水流向流速の測定精度（特に、鉛直方向成分）を検証する目的で実施した複数の室内実験の概要は、以下に示すとおりである。

3.1 標点間（2点間）の実距離と測定距離との比較実験

図2に示すように、ある一定時間に浮遊粒子が液体中を3次元的に移動する状況を想定し、平板上に配置した3次元的に相対座標が既知である標点群（図3）を液体中（液温21℃）に傾斜させて設置する。静置した後、CCDカメラ（ $c=12\text{mm}$ 、 640×480 ピクセル、31万画素）とプリズム（材質；BK-7）を組み合わせ、液体中にある標点群を視点の異なる2方向からの画像（写真1）として同時に撮影する。次に、CCDカメラに接続しているパソコンに画像を取り込む（小林ほか、2000）。取り込んだ画像を用いて前述した解析を行い、各標点の3次元座標を算出する。この3次元座標を基に各標点間の距離を算定し、実距離と比較することで測定精度の検証を行った（以後、本実験を実験Aと記す）。解析時の標点数は、左右の両画像に撮影されている20点（図3の丸印

内）を用いて、基準点は3点（1、2、3）、長さ情報は2個（1-2間と2-3間）与えて解析を行った。なお、写真1に示した数字は、基準点、長さ情報および測定精度検証時に用いた標点番号（1~8）を示す。

3.2 液体中の球体粒子の沈降速度測定実験

液体中の球体粒子の沈降速度測定は、室温一定（20℃）の部屋で図4に示すように底面に標点群を配置した容器を準備する。次に、容器内にシリ

図3 室内実験に用いた標点

Fig. 3 The point targets using laboratory test

図2 標点間距離測定の室内実験概略図

Fig. 2 Schematic diagram of laboratory test on measurement of distance between two points

写真1 取得画像

Photo 1 Digital image obtained

コーンオイルを入れ、その上部に前述と同様に CCD カメラとプリズムを設置する。その後、球体粒子をシリコンオイル上部より静かに投入し沈降させる。この球体粒子 (写真 2 の↑印) の沈降状況は、経過時間とともに視点の異なる 2 方向からの画像として同時に撮影し、CCD カメラに接続したパソコンに順次取り込む (写真 2)。取り込んだ画像を用いて後述する条件の基で解析を行い、球体粒子の沈降量と経過時間の関係から沈降速度 (= 沈降量 / 経過時間) を算出する。解析により得られた沈降速度は、ストークス (Stokes) が理論的に導いた式 (9)~(11) (土木学会水理公式集、1985) より求まる沈降速度 (終末沈降速度) と比較検討し、測定精度の検証を行った (以後、本実験を実験 B と記す)。

$$v_t = \left(\frac{4gd(\rho' - \rho)}{3\rho C_D} \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$Re = \frac{v_t d \rho}{\mu} \quad (10)$$

$$C_D = 24 / Re \quad (Re < 1) \quad (11)$$

ここで、 v_t : 粒子の沈降速度、 ρ' : 粒子の密度、 ρ : 液体の密度、 g : 重力の加速度、 μ : 流体の粘性係数、 C_D : 粒子の抵抗係数、 d : 粒子の直径、 Re : Reynolds 数である。

実験 B の解析時の標点数は、左右の両画像に撮

影されている 21 点 (球体粒子 1 点含む) を用いて、実験 A と同様に基準点は 3 点、長さ情報は 2 個与えて解析を行った。実験 B に用いた球体粒子は、

(a) 実験開始から 16 秒後

(b) 実験開始から 34 秒後

(c) 実験開始から 100 秒後

図 4 沈降速度測定の実験概略図

Fig. 4 Schematic diagram of laboratory test on measurement of sedimentation velocity

写真 2 解析を用いた画像 (画像例)

Photo 2 Digital image used for analysis (sample image obtained)

直径と密度の異なるガラスビーズ (直径 $d = 1.02\text{mm}$ 、密度 $\rho' = 2.4\text{t/m}^3$) とポリエチレン粒子 (直径 $d = 0.88\text{mm}$ 、密度 $\rho' = 1.03\text{t/m}^3$) の2種類である。また、液体は画像取得時間を考慮し、沈降速度の調整が図りやすいシリコンオイル (粘性係数 $\mu = 1.1\text{Pa} \cdot \text{s}$ (20℃)、密度 $\rho = 0.974\text{t/m}^3$ (20℃)) を用いた。

4. 測定結果とその評価

4.1 実験Aの測定結果とその評価

算出した各標点の3次元座標から任意標点間の相対水平距離および相対鉛直距離の算出結果を表1に示すとともに、実距離との誤差(%)を示す。なお、誤差は式(12)で算出している。

$$\text{誤差}(\%) = \frac{|\text{測定距離} - \text{実距離}|}{\text{実距離}} \times 100 \quad (12)$$

また、液体中にある標点を上部より見た (撮影した) 場合、見かけの深さは屈折率の関係から実際の深さの3/4倍に見えるため (三宅, 1991)、算出された相対鉛直距離については4/3倍している。

表1に示す結果より、液体中に傾斜させて配置した標点群の任意標点間の実距離と測定距離との誤差は、相対水平距離で最大3%程度、相対鉛直距離で最大9%程度であり、鉛直方向の誤差が水平方向の誤差に比較していくぶん大きいものの、実務的には十分な精度で3次元的な流向流速を測定可能であると考えられる。

4.2 実験Bの測定結果とその評価

本測定手法を用いて得られたシリコンオイル中を沈降する球体粒子の経過時間と沈降量の関係

表1 2点間の実距離と測定距離の比較

Table 1 Comparison between true distance and measured distance

標点区間	初期設定値 (mm)		測定値 (mm)		誤差 (%)	
	水平距離	鉛直距離	水平距離	鉛直距離	水平距離	鉛直距離
4-5	10.30	2.60	10.637	2.851	3.3	9.6
4-6	15.45	3.90	15.756	4.143	1.9	6.2
4-7	20.60	5.20	20.900	5.411	1.5	4.1
4-8	16.37	2.60	16.585	2.628	1.3	1.1

を図5に示す。ガラスビーズを用いた沈降量は、ストークスの理論式から求まる沈降量に比較していくぶん小さい傾向にあるものの、ポリエチレン粒子については比較的良く一致していることがわかる。また、図6には図5の実験結果を基に、区間ごとに算出した各球体粒子の沈降速度 (以後、区間沈降速度と記す) とストークスの理論式から求まる理論沈降速度 (以後、理論値と記す) を示す。区間沈降速度は、各球体粒子ともバラツキながらも理論値と比較的良く一致している。また、表2は区間沈降速度の単純平均値と理論値の比較を示す。今回実施した2種類の球体粒子を用いた液体中の沈降速度測定は、使用したプリズムや球体粒子の歪みおよびシリコンオイルの粘性係数の温度依存性を考慮した場合、本測定手法による

(a) ガラスビーズ

(b) ポリエチレン粒子

図5 経過時間と沈降量の関係

Fig.5 Relationship of time elapsed and sedimentation depth

沈降速度の測定値は良く一致しているものと考えられる。

以上、複数の室内実験結果より、これまで困難であった単孔法による鉛直方向成分の流向流速についても実用的な精度で測定可能であることが確認できた。

(a) ガラスビーズ

(b) ポリエチレン粒子

図6 区間沈降速度と理論沈降速度の比較

Fig. 6 Comparison between measured sedimentation velocity in the section and theoretical sedimentation velocity

表2 平均沈降速度と理論沈降速度の比較

Table 2 Comparison between average measured sedimentation velocity and theoretical sedimentation velocity

球体粒子	沈 降 速 度 (cm/sec)		比率①/② (%)
	①測定値(平均)	②理 論 値	
ガラスビーズ	5.9×10^{-2}	7.0×10^{-2}	84.3
ポリエチレン粒子	2.4×10^{-3}	2.2×10^{-3}	109.8

5. まとめ

単孔法により地盤内の3次元的な地下水流向流速を評価するためのCCDカメラとプリズムを使用した孔内流向流速を測定する手法について述べるとともに、室内実験結果を基に測定精度の検証を行った。その結果、次のことが明らかになった。

- 1) 本測定手法により得られた室内実験結果は、標点間(任意の2点間)の実距離や球体粒子の理論沈降速度と比較的良好一致した。
- 2) 本測定手法は、単孔法では困難であった地下水流動の鉛直方向成分の流向流速についても実用的な精度で測定可能である。
- 3) 一般的なボーリング孔($\phi 66 \sim \phi 86 \text{mm}$)を用いて3次元的な孔内流向流速を測定可能なCCDカメラとプリズムを組み合わせた孔内流向流速計(光学式孔内流向流速計)の開発が十分可能である。

今後は、プリズムや孔内撮影方法などの改良・改善を行い、測定精度の向上を図って行く予定である。また、トレーサーとしての浮遊粒子について詳細な検討を加えるとともに、現場実験等による測定精度検証を行った上で、光学式孔内流向流速計の早期実用化を図り、止水壁の漏水個所や地下水汚染調査などの地下水問題への活用を図って行きたいと考えている。

参考文献

- 安藤義久・斎藤秀晴・長塚正樹(1987): テレビカメラを応用した地下水流向流速計の開発とその適用性、土木学会第42回年次学術講演会、200~201。
- 今村 聡(1996): 揮発性有機塩素化合物による汚染の浄化対策と予測、平成8年秋季講習会テキスト、(社)地下水技術協会、101~122。
- 梅田美彦・西垣 誠(1988): 地下水流向・流速計の試作、第23回土質工学研究発表会講演集、135~136。
- 河西 基・小松田精吉・平田洋一(1986): 電位差方式連続型地下水流向流速計の開発、土木学会第30回水理講演会論文集、337~342。
- 亀井健史・中村嘉博(1992): テレビカメラを用いた地

- 下水流動調査と実地盤への適用性、土と基礎、40-4、17~22.
- 小林 薫・近久博志・松元和伸・中原博隆・筒井雅行・熊谷幸樹 (2000): 単一孔による3次元地下水流向流速測定に関する室内基礎実験、土木学会第55回年次学術講演会概要集、Ⅲ-A315、630~631.
- 竹内篤雄 (1996): 温度測定による流動地下水調査法、古今書院、349~366.
- 近久博志・中原博隆・筒井雅行・大西有三・岡本 厚 (1996): 岩盤空洞の不連続面分布調査に対する精密写真測量の適用性、第1回岩盤工学シンポジウム講演論文集、45~46.
- 張 銘・遠藤秀典・高橋 学 (2001): 原位置浸透流測定法について (その2)、応用地質、42-1、52~59.
- 土木学会 (1985): 水理公式集—昭和60年版—、76~77、416~417.
- 西垣 誠 (1991): 技術手帳 地下水の流向・流速、土と基礎、39-8、56~58.
- 三宅和夫 (1991): 幾何光学、共立出版、16~17.
- 柳原幸希・網木亮介・吉田克美 (1999): 溶存酸素をトレーサーとした地下水流動調査、土木技術資料、41-6、48~53.
- 山本毅史・石谷伊利・土弘道夫 (1985): ほう素トレーサー法を利用した単一井による地下水流動調査、土質工学会論文報告集、25-3、187~196.
- 山田啓一・荒川 創 (1999): CCDカメラによる孔内流向流速測定と流速の垂直分布について、地下水学会誌、41-3、193~201.
- 山田啓一 (2001): CCDカメラを用いた孔内流向流速測定の検討、基礎工、29-11、31~33.
- A. Okamoto (1984): The Model Construction Problem Using the Collinearity Condition, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 50-6, 705~711.
- (受付: 2002年5月27日、受理: 2002年12月28日)