

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,解析を しない場合には,鉛直方向成分の移動量は測定不可能である。

_____ 論

文 =

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

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

- 小林 薫(こばやし かおる) 飛島建設㈱技術研究所 室長
- 松 元 和 伸(まつもと かずのぶ) 飛島建設㈱技術研究所 主任研究員
- 筒井雅行 (つつい まさゆき) 飛島建設㈱技術研究所 主任研究員
- 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次元的な地 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**-1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。

- 近 久 博 志 (ちかひさ ひろし) 飛島建設㈱技術研究所 所長
- 熊 谷 幸 樹 (くまがい こうき)飛島建設㈱技術研究所 主任研究員
- **阿保寿郎**(あぼ としろう) 飛島建設㈱技術研究所研究員

表1	単月 式に	トス地下す	と流向流速測	完古注の4年(4),5)
衣	早九式に	・よる地下ル	\´´´EI /ĨL 沐 倶	止力法の職業"。"

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	$\sim \frac{1 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-1} \text{ cm/s}}$
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 別から求める方法	$\sim \frac{5 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-0}} \text{ cm/s}$
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^{15} $\sim 1 \times 10^{11} \mathrm{cm/s}$
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	$\overset{3\times10^{-5}}{\sim}\times1\times10^{-2}\mathrm{cm/s}$
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	$\sim \frac{1 \times 10^{-3}}{4 \times 10^{-1} \text{ cm/s}}$

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—1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_i , 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。

$$\begin{aligned} x_{ij} &= -c_i \frac{a_{11i}(X_j - X_{0i}) + a_{12i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{13i}(Z_j - Z_{0i})}{a_{31i}(X_j - X_{0i}) + a_{32i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{33i}(Z_j - Z_{0i})} \cdots \cdots (1) \\ y_{ij} &= -c_i \frac{a_{21i}(X_j - X_{0i}) + a_{22i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{23i}(Z_j - Z_{0i})}{a_{31i}(X_j - X_{0i}) + a_{32i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{33i}(Z_j - Z_{0i})} \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

ただし,



土と基礎, 52—6 (557) NII-Electronic Library Service



図-2 光学式流向流速計の概要

図-3 空隙タイプの孔内流線9)

図-1 撮影対象物と撮影カメラ等の位置関係

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} , ω_i , ϕ_i , κ_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 分解し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ー2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-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 $\rho = 1.008 t/m^3$)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 次元的な流速と流向を 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.-16.5m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.-2.1mで腐植土層中に存在している 自由水(水温17℃)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.-11.0m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次元的な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1m、 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。

ロ絵写真―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。ロ絵写真―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

17

論 文

表-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	3 次元流の	流向	
	_X方向	Y方向	Z方向	平均流速(cm/s)	平均流速(cm/s)	(°)	備考
CASE1	-1.03	9.83	3.29	1.44×10^{-4}	1.51×10^{-4}	264	●:各粒子號向運送 N(0*)○:緊急途由建设
CASE2	0.13	9.79	3.00	3.76 $\times 10^{-3}$	3.94×10^{-3}	271	
CASE3	-16.65	14.20	10.00	7.15×10^{-4}	7.86 $\times 10^{-4}$	220	2.5
CASE4	-4.21	6.82	1.60	1.60×10^{-3}	1.64×10^{-3}	238	W(270) 0.0 E (90)
CASE5	-5.85	12.05	-1.63	4.19×10^{-3}	4.22×10^{-3}	244	03 2.5 ×10 (ca/s)
			平均流速=	2.08×10^{-3}	2. 15×10^{-3}	0.47	$1 \setminus T$
地盤内の実流速=			6.94×10^{-4}	7.16×10^{-4}	247	s (180')	

注1) 2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。

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-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-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 $=7 \times 10^{-4}$ cm/s)は、塩水を用いたポイント・ダイリ $_{-} - \psi_{3}$ 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-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-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-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



図-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)
CASE1	18. 4°		
CASE2	17.0°	1	ベクトル
CASE3	24. 6°	27. 5°	
CASE4	11. 3°		
CASE5	-6. 9°	1	

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 ただいた飛島建設㈱花室 稔氏,光学式流向流速計の開 発にご協力頂きました㈱レアックス 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.
- 2) 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.
- 4) 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.
- 5) 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試み,地下水技術, 第45巻,第11号,pp.3~10,2003.
- 6) 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 Enginnering 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-, pp. 334~337, 1995.
- 9) 小松田清吉:流速·流向の測り方,地質と調査, pp. 21 ~27, 1990.
- 10) 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.
- 11) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠:有限要素法による飽和
 一不飽和浸透流解析,土木学会論文集,Ⅲ-第264号,pp.
 87~96,1977.

(原稿受理 2004.1.8)