

学会賞受賞研究

## 琉球石灰岩帯水層を対象とした地下水流速と間隙率の評価

倉澤 智樹\*

Tomoki KURASAWA:

Evaluation of the Darcy Velocity and Porosity in a Ryukyu Limestone Aquifer

### Abstract

Subsurface dams are a promising means of developing water resources in coastal areas, examples of which include the ones in India, China, and the Ryukyu Islands of Japan. However, subsurface dams interfere with groundwater flow, which results in a higher water level upstream and a reduced hydraulic gradient and groundwater discharge. These induce the retention of terrestrial pollutants in the upstream aquifer. Since contaminants are transported by groundwater flow, it is important to obtain accurate physical data such as flow velocity for proper planning and management of subsurface dams. In this study, we aimed to quantify groundwater flow velocity in an aquifer of subsurface dam formed by Ryukyu limestone using single-borehole dilution tests (SBDTs), which is low-cost and highly mobile, and thus suitable for large areas such as subsurface dam sites. The results showed that the flow velocities at the subject site tended to decrease with elevation, and also revealed the validity of the flow velocities obtained by SBDTs. In addition to the determination of flow velocity, the porosity was estimated using 93 Ryukyu limestone cores, with an average of 29.3%, which was larger than the published literature value. This is due to the fact that the aquifer is composed of the lower Ryukyu limestone. For these achievements, we received the Research Encouragement Award from Japanese Association of Groundwater Hydrology.

**Key words:** subsurface dam, groundwater velocity, porosity, single-borehole dilution tests, Ryukyu limestone

### 1. 受賞の経緯

令和5年11月16日(水)から18日(土)にかけて富山県民会館で開催された日本地下水学会2023年秋季講演会において、日本地下水学会研究奨励賞を受賞した。

日本地下水学会は、地下水にかかわる理学・工学・農学などの幅広い分野の研究者・技術者が所属する学術団体であり、地下水に関する総合的な学問の発展ならびに地下水の開発・保全に関する研究、技術の広範な普及を目的としている。当学会では、地下水学会誌

(Journal of Groundwater Hydrology) を刊行しており、2年以内に掲載された論文のうち、筆頭著者が35歳以下の優れた論文に対し、研究奨励賞が授与される。次章以降では、受賞論文の内容を述べる。

### 2. はじめに

我が国の南西諸島には、サンゴを含む石灰化生物の遺骸で形成された、多孔質で水を通しやすい(高透水性の)琉球石灰岩が広く分布している。この高い透水性のため、当該石灰岩が分布する地域では、速やかに雨水が地下に浸透し、海に流れ出てしまうため、古くから水資源確保が重要な課題であった。これを解決するため、地下水流をせき止めつつ、海岸からの塩水侵入を阻止することで水資源を貯留する地下ダムの開発が進められており、現在、国内では十数基が供用されている。地下ダム建設は島しょ地域の水資源確保に貢

2024年11月12日受領

2024年11月12日受理

\*愛媛大学農学部地域防災学教育分野

献する一方、地下水流をせき止めていることから、農地などから流入した汚染物質が、地下ダム貯留域に滞留することが懸念される (Fang ら, 2022).

汚染物質は地下水流によって輸送されることを考慮すると、地下ダムの計画・運用においてダム貯留域として利用される石灰岩層中の地下水流速などの物理データを正確に取得することが第一の課題である。地下水流速を観測する上で最もオーソドックスな方法に、センサの中心部にヒーターを設け、周辺の温度分布から流速を計測する熱量法がある (Nakaya ら, 2018). また、主に放射性廃棄物の地層処分場における長期安全性の評価を目的として、固体粒子トレーサを長音波センサで追跡し、流速を測定する手法も開発されてきた (戸井田ら, 2007). しかしながら、これらの計測手法は、高価な機器類を利用するとともに、電源を必要とするため、フィールド調査での機動性は低い。地下ダム貯留域のような広範囲に及ぶフィールドを対象とする場合、多地点で観測することが要求されるため、低コスト、かつ、機動性に優れた方法が好まれる。

このような中、本研究では単孔式希釈試験に焦点を当てた。この手法では、観測井戸に塩化ナトリウムなどのトレーサを投入し、濃度の経時変化を捕捉する。このとき、地下水流速が大きいほど速やかに希釈されるため、経時的な濃度の希釈情報から流速が決定できる。簡便かつ単純なプロセスのため、カルスト地域の帯水層や、南極大陸などの氷床におけるフィルン層の流速計測に利用された実績がある (Yang ら, 2019; Montgomery ら, 2020). また、フィルダムの漏水部調査や土水路側部からの浸透による用水損失の推定にも活用されている (Dong ら, 2016; Andrade ら, 2017). このように国外で利活用は進みつつある一方、我が国ではほとんど実績が存在しない。また、国外での幅広い適用実績に比して、推定結果の妥当性について議論した研究事例は希少である。

このような背景のもと、受賞の対象論文では、新規地下ダムが建設される予定地付近の琉球石灰岩層において、単孔式希釈試験を実施し、地下水流速を評価するとともに、推定結果の妥当性を検討した。また、併せて、対象地域の琉球石灰岩コアを利用して、地下ダムの貯留能力を評価する上で重要な間隙率も推定した。つまり、当該研究の主要な目的は、地下ダムサイトの地下水流速や間隙率などの物理条件を評価することと、単孔式希釈試験の妥当性を検証すること、の2つである。

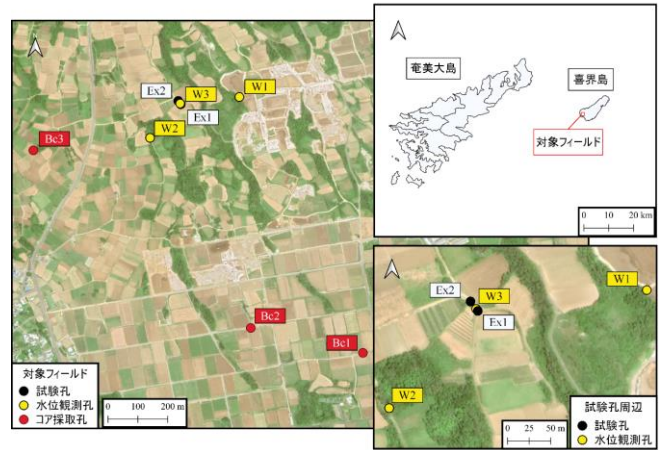


図1 研究対象フィールドの平面図. Ex1, Ex2は単孔式希釈試験の試験孔, W1, W2, W3は水位観測孔, Bc1, Bc2, Bc3は琉球石灰岩のコア採取孔である。

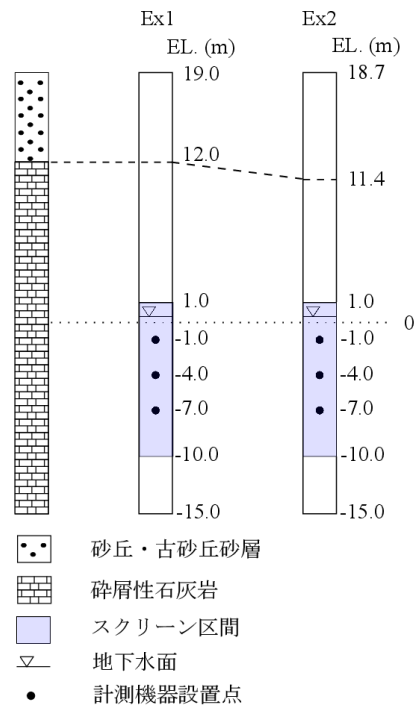


図2 地質構成と試験孔のデザイン

### 3. 研究の概要

#### 3.1. 単孔式希釈試験

図1に示す鹿児島県喜界島の新規地下ダムの建設予定地付近を研究フィールドとした。図中のEx1とEx2は単孔式希釈試験の試験孔である。また、W1, W2, W3は水位観測孔であり、局所的な動水勾配(地下水位の勾配)の推定に供した。さらに、Bc1, Bc2, Bc3の3孔からは、琉球石灰岩のボーリングコアを取得しており、これらの間隙率の測定に利用した。希釈試験の対象であるEx1とEx2の地質構成とデザインを図2

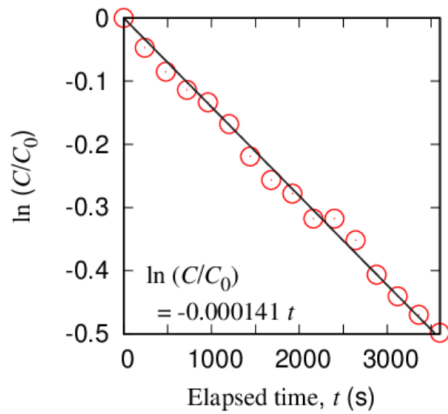


図3 濃度の経時変化とフィッティングの一例

に示す。どちらの試験孔も EL. 1.0～-10 m の範囲にスクリーンが設けられ、地下水が通過しているため、希釈試験の対象区間に設定した。試験実施に当たっては、まず NaCl を入れた滲透性の繊維パックを 1 m おきに取り付けたロープを試験孔内に投入し、上下方向に振り動かすことで、孔内の地下水を所定の NaCl 濃度にした。その後、EL. -1 m と -4 m, -7 m の 3 地点に濃度計測ロガーを設置し、時間経過ごとに濃度が低下する状況を捕捉した。このとき取得した濃度の経時変化を次式の解析解にフィッティングすることで、孔内の平均断面流速の大きさ  $|v_a|$  を求めた (Pitrak ら, 2007)。

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\left(\frac{2|v_a|}{\pi R}\right)t \quad (1)$$

ここに、 $C$  は濃度、 $C_0$  は初期濃度、 $t$  は経過時間、 $R$  は孔の半径である。図 3 に濃度の経時変化とフィッティング結果の一例を示す。

一方、孔の存在は、周辺地下水の流線を歪曲させるため、孔内を通過する平均断面流速  $|v_a|$  は、周辺地下水の流速に比べて高い。この点を補正するため、補正係数  $\alpha$  を導入し、地下水流速の大きさ  $|v|$  を決定した (Pitrak ら, 2007)。

$$|v| = \frac{|v_a|}{\alpha} \quad (2)$$

本研究では、補正係数として最も一般的に適用される  $\alpha = 2$  を採用した。

### 3.2. 間隙率の測定

本研究では図 1 に示す Bc1, Bc2, Bc3 の 3 地点で取得された計 93 本の琉球石灰岩のボーリングコアを利用して間隙率を推定した。具体的には、コアの水中質量  $M_1$ 、湿潤質量  $M_2$ 、乾燥質量  $M_3$  を計測し、次式で間隙率  $\theta$  を計測した (独立行政法人緑資源機構, 2006)。

$$\theta = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \cdot 100 \quad (3)$$

## 4. 得られた成果

単孔式希釈試験の結果の妥当性検証に必要な比較データを得るため、W1, W2, W3 の 3 孔の水位から推定した動水勾配ベクトル  $\mathbf{i} = (i_x, i_y)$  と現場の透水係数  $K$  から次式より間接的に対象フィールドの流速を求めた。

$$|v| = \sqrt{K i_x + K i_y} \quad (4)$$

なお、 $i_x$  と  $i_y$  はそれぞれ動水勾配ベクトルの東方向、北方向の成分である。式(4)を用いた計算により、対象フィールドの流速が  $2.65 \times 10^{-6}$  m/s と推定された。また、単孔式希釈試験により Ex1 と Ex2 で取得した地下水流速の平均値はそれぞれ  $1.67 \times 10^{-5}$  m/s,  $4.42 \times 10^{-6}$  m/s であり、式(4)から得られた結果と同一オーダーであった。このことから希釈試験による地下水流速の推定値は一定の妥当性を有しているといえる。また、Ex1 と Ex2 の希釈試験の結果から、標高とともに流速が低下する傾向にあることを確認した。一方で、標高に応じた差異は最大でも 2 倍程度と小さかった。図 2 で確認できるとおり、どちらの試験孔も対象としたスクリーン区間は砕屑性の琉球石灰岩で構成されている。つまり、対象領域は地質の大きな変化点を有しておらず、流速の差異は小さかったと示唆される。

また、間隙率の平均値は 29.6%、標準偏差は 6.88% であり、最小値と最大値はそれぞれ 10.6% と 46.7% であった。平均値である 29.6% は既往研究と比較して相対的に大きな値である。野間 (1977) によると、水理地質的観点から琉球石灰岩は高位・中位・低位の 3 つに大別することができ、対象フィールドである喜界島の荒木集落北部は低位琉球石灰岩が分布している。低位琉球石灰岩は固結度がゆるいことが知られており、このことが相対的に高い間隙率の要因と考えられる。

## 5. おわりに

本研究を通して、単孔式希釈試験による流速推定が一定の妥当性を有していることが確認できた。また、局所的ではあるものの、地下ダムサイトの地下水流速や間隙率を含む物理条件などを明らかにした。今後は当該手法を利用して、ダムサイト全体の特性調査を実施し、地下ダム計画・運用の合理化に向けて検討を進めていきたい。

## 引用文献

倉澤智樹・高橋仁太郎・前野一稀・鈴木麻里子・井上一哉。(2022) 琉球石灰岩帯水層を対象とした地下

- 水流速と間隙率の評価. 地下水学会誌. 64 : 189–200.
- 戸井田克・田中真弓・杉本映湖・菱谷智幸・西垣誠・大江俊昭・佐藤光吉・小舞正文. (2007) 孔内3次元流向・流速測定における計測区間内の地下水流動状況評価について. 地下水学会誌. 49:309–326.
- 独立行政法人緑資源機構. (2006) 地下ダムによる水資源開発の手引き. 3-1-3-50.
- 野間泰二. (1977) 喜界島の地下水—奄美諸島の水理地質(1)—. 地質調査所月報. 29 : 145–157.
- Andrade R, Bhowmick S, Pund A. (2017) Tracer an effective tool in detecting canal seepage: case studies from Northern India. Sustainable Water Resources Management. 3: 25–31.
- Dong H, Chen J, Li X. (2016) Delineation of leakage pathways in an earth and rockfill dam using multi-tracer tests. Engineering Geology. 212: 136–145.
- Fang Y, Zheng T, Wang H, Zheng X, Walther M. (2022) Nitrate transport behavior behind subsurface dams under varying hydrological conditions. Science of the Total Environment. 838: 155903.
- Montgomery L, Miège C, Miller J, Scambos TA, Wallin B, Miller O, Solomon DK, Forster R, Koenig L. (2020) Hydrologic properties of a highly permeable firn aquifer in the Wilkins Ice Shelf, Antarctica. Geophysical Research Letters 47: e2020GL089552.
- Nakaya S, Yasumoto J, Ha PM, Aoki H, Kohara F, Masuda H. (2018) Hydrochemical behaviour of an underground dammed limestone aquifer in the subtropics. Hydrological Processes. 32: 3529–3546.
- Pittrak M, Mares S, Kobr M. (2007) A simple borehole dilution technique in measuring horizontal ground water flow. Groundwater. 45: 89–92.
- Yang M, Yaquian JA, Annable MD, Jawitz JW. (2019) Karst conduit contribution to spring discharge and aquifer cross-sectional area. Journal of Hydrology. 578: 124037.