

岩盤の体積含水率を用いた地下水の賦存状況把握手法の検証

Verification of a Method for Assessing Groundwater Occurrence using the Volumetric Water Content of Bedrock

木村 圭佑^{*1}
Keisuke Kimura

兼松 亮^{*2}
Kiyoshi Kanematsu

松元 和伸^{*3}
Kazunobu Matsumoto

木村 洋太郎^{*4}
Youtarou Kimura

王 功輝^{*5}
Wang Gonghui

【要旨】

地下構造物の建設において、地下水の存在は施工の難易度を左右する重要な要素である。地下水の存在や分布を正確に把握することは、適切な施工計画の策定や安全確保に重要であり、事前調査での評価が求められている。

地下水の存在を評価する方法として、地盤の電気比抵抗値の高低を利用する手法がある。しかし、地盤の比抵抗値は地盤をなす地層の地質や風化、温度により変化するため、比抵抗値を利用した地下水の把握には限界がある。

本研究では、トンネル建設工事現場において、比抵抗値に代わり体積含水率を用いて地下水賦存状況を把握する手法の試行を行った。その結果、体積含水率が高いと示したエリアで湧水を確認し、この手法の有効性を確認した。

【キーワード】 比抵抗 体積含水率 地下水賦存状況

1. はじめに

地下構造物の建設において、地下水の賦存状況は施工の難易度を大きく左右する重要な要素である。地下水賦存状況を正確に把握することは、適切な施工計画の策定や安全確保に重要である。

地下水の賦存状況を評価する方法として、電気探査で得られた地盤の比抵抗値の高低を利用する手法¹⁾がある。しかし、比抵抗値は岩石の種類、間隙率、飽和度、間隙水の比抵抗、粘土鉱物の含有量、温度により変化し、必ずしも地下水の存在を正確に反映するとは限らないため、評価には限界がある¹⁾。

そこで本研究では、地下水の賦存状況を評価するため、体積含水率に着目した。体積含水率は比抵抗値に比べ、水の存在をより直接的に評価するパラメータであり、地下水賦存状況をより正確に評価できる可能性がある。本研究は、体積含水率を利用した地下水賦存状況把握手法の有効性検証を目的に実際の現場データを用いて試行した結果を示す。

案されている²⁾。

$$\frac{1}{V_p} = \frac{1 - \phi}{V_m} + \frac{\phi \cdot S_r}{V_f} + \frac{\phi(1 - S_r)}{V_a} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{m \cdot \rho_w \cdot S_r^{-B} \cdot \phi^{-n}} \quad (2)$$

式(1)、および式(2)から、間隙率および飽和度を導き、その積である体積含水率を求める。以上のように、弾性波速度や比抵抗値といった間接的な測定値から地盤の含水状態を示す体積含水率を導出できる。

なお、式中の V_f は間隙水の弾性波速度 (1,500m/s)²⁾、 V_a は間隙空気弾性波速度 (340m/s)²⁾、 V_m は岩石の亀裂、空隙等を除いた実質部の弾性波速度である。 ρ_w は間隙水の比抵抗で、 $50 \Omega \cdot m$ を採用した²⁾。 m 、 n 、 B は地質の違いによる係数であり、実験的に求められるパラメータである²⁾。先行研究を参考に、工事現場から採取した試料を用いて室内試料試験より導出する。

2. 解析方法の検討

2.1 体積含水率の計算手法

トンネル建設工事では、地山の地質を調査する目的で弾性波探査や電気探査が行われる場合が多く、それぞれ弾性波速度と比抵抗値が得られる。

既往の研究において、弾性波速度(V_p)と間隙率(ϕ)・飽和度(S_r)の関係式である Wyllie の式(1)、および比抵抗値(ρ)と間隙率・飽和度との関係式である Archie の式(2)が提

2.2 地質の違いによる係数の導出方法

地質の違いによる係数 m 、 n 、 B は、先行研究²⁾により導かれた式(3)(4)で求める。

$$\rho = \rho_s \cdot S_r^{-B} \quad (3)$$

$$\rho_s = m \phi^{-n} \quad (4)$$

1.技術研究所 研究開発 G 第一研究室 2.土木本部 土木 FSC トンネル/シールド G 3.技術研究所 研究開発 G
4.土木本部 土木技術部 5.京都大学 防災研究所

ここで、 ρ ：岩石の比抵抗、 ρ_s ：飽和状態の岩石の比抵抗、 S_r ：飽和度、 ϕ ：間隙率、 m 、 n 、 B ：地質の違いによる係数である。

式(3)より、係数 B は飽和状態の岩石の比抵抗値を測定した上で、飽和度を変化させながらその際の比抵抗値を測定し、近似線を作成することで求めることができる。

また式(4)より、係数 m 、 n は、間隙率の異なる供試体を用いて比抵抗値を測定することで求めることができる。

2.3 比抵抗測定方法

比抵抗測定には、土木分野で一般的に使用される直流比抵抗4極法を用いた。測定方法は図-1に示す回路を作成して行った。供試体の両端面に銅電極を密着させ、これを介して供試体に通電する。その際、供試体の側面に設置された2箇所の電位電極間に発生する電位差を測定することで、比抵抗値を求める。

なお、今回の実験条件は

- ・電源装置より200Vの電圧を供試体にかける。
- ・供試体の両端部には導電性液体を塗布する。
- ・電位差測定には、供試体の側面に銅テープを巻き付け、その上に金属バンドを締めて、端子を接続する。

とし、実験状況を図-2に示す。

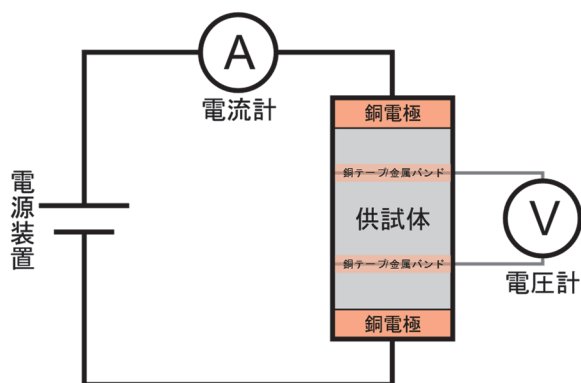


図-1 直流比抵抗4極法回路図

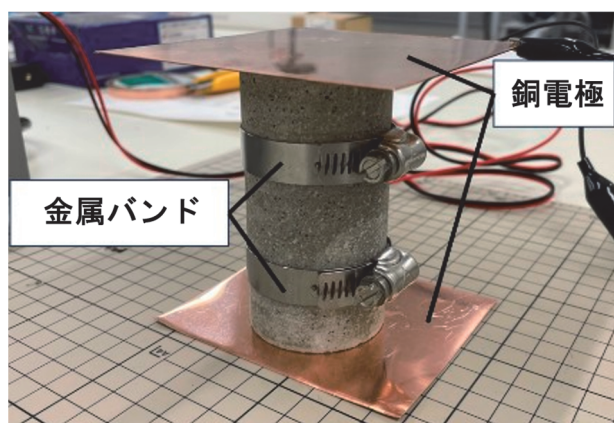


図-2 比抵抗値測定状況

2.4 地下水賦存状況の評価手順

以上の手法を用いて本研究の解析を実施する。その解析フローを図-3で示す。

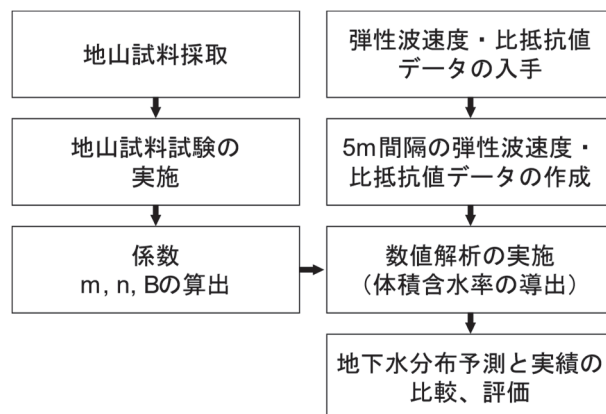


図-3 解析フロー

①弾性波速度・比抵抗値データの入手・作成

検証領域における、弾性波速度および比抵抗値のデータを補間することで5m間隔のデータを作成する。

②地山試料採取・試料試験

検証領域から地山試料を採取し、この試料を用いて室内試験を実施し、異なる飽和度で比抵抗値の測定を行う。

この試験により、地質の違いによる係数 m 、 n 、 B を導出する。

③数値解析の実施(体積含水率の導出)

導出したパラメータと取得したデータを用いて数値解析を実施し、体積含水率の分布を推定する。

④地下水分布予測と実績の比較・評価

推定した体積含水率分布と実際の湧水状況を比較することで、予測可否の評価をし、手法の有効性を検証する。

以上の手順により、地下水賦存状況の評価有効性を検証し、実際のトンネル施工における湧水発生箇所の事前把握に寄与することを目指す。

3. 比抵抗測定による各係数の導出

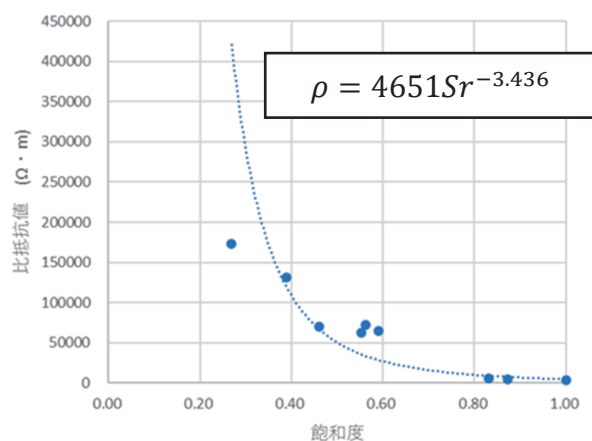
3.1 係数 B の導出

係数 B の導出のために、現場で採取した岩石コア(直径50mm長さ100mm)を7本用いて、それぞれ飽和度が異なる10ケースで比抵抗値測定を実施した。

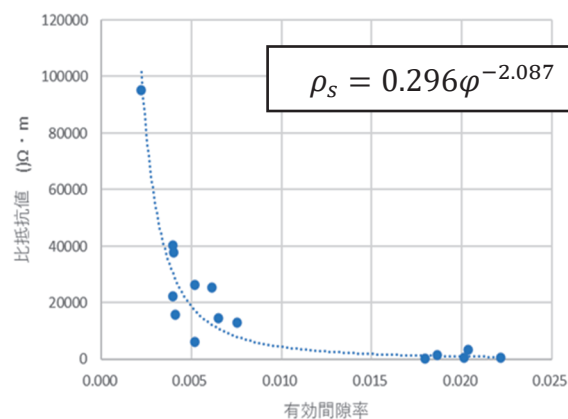
その結果を表-1に示す。飽和度と比抵抗値の関係の図-4は表-1のケース3について示している。この場合、飽和時の比抵抗値が $4651 \Omega \cdot m$ である。この値が式(3)の ρ_s となる近似曲線を作成すると、その式は、

$$\rho = 4651 S_r^{-3.436}$$

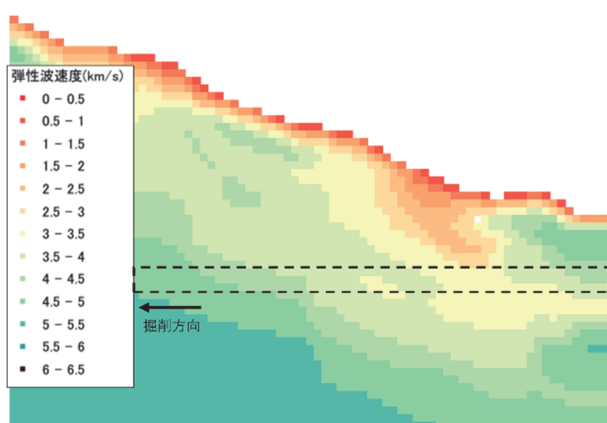
と求められ、 B は3.436となる。7ケースについて B を求めたところ、1.347から3.436の範囲を示した。今回の解析ではその平均値である2.475を B として採用した。



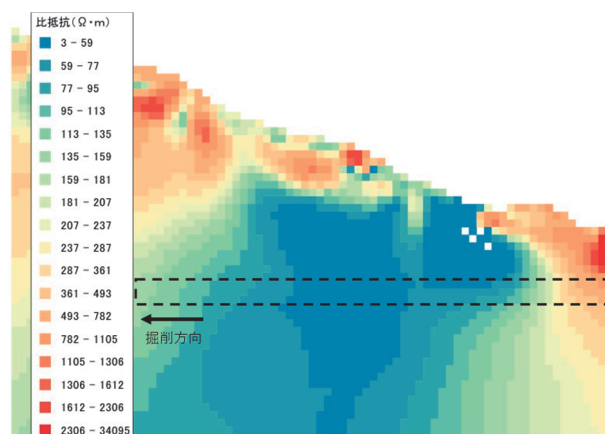
図－４ 飽和度と比抵抗値の関係



図－５ 有効間隙率と比抵抗値の関係



図－６ 弾性波速度分布



図－７ 比抵抗値分布

表－１ 係数 B の導出結果

ケース	ρ_s	B
1	12479	3.025
2	18497	1.605
3	4651	3.436
4	12006	2.195
5	8339	3.079
6	6315	2.637
7	1300	1.347

3.2 係数 m, n の導出

現場で採取した15本の岩石コア(直径50mm長さ100mm)を用いて、係数m, nの導出した。それぞれの岩石コアの乾燥重量と水中重量を測定することで、有効間隙率の導出を行った。また、飽和した岩石コアで比抵抗値の測定を行った。有効間隙率と比抵抗値の関係を図－５に示す。プロットに対する近似曲線は、 $\rho = 0.296\phi^{-2.087}$ と求められ、式(4)よりm, nは0.296, 2.087となる。

4. 湧水箇所予測への適用

図－６および図－７は、今回の検証対象とした箇所の

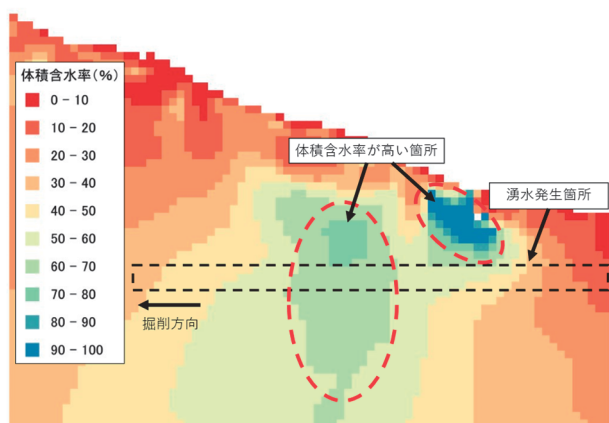
弾性波速度と比抵抗値の分布図である。これらは、お互いのデータ間隔が異なっており、測定箇所の座標が異なっていたため、解析を実施するために、5m 間隔となるようにスプライン補間を行ったものである。

また、分布図を示した範囲は、トンネル掘削時に湧水が発生した箇所が含まれており、湧水が発生した箇所の近傍が、高い体積含水率を示しているかどうかの検証も加えて実施する。

なお、この箇所の岩種はマイロナイトであり、岩石実質部の弾性波速度である V_m は参考文献³⁾より 5,500m/s とし、前章で決定した係数 m, n, B と式(1)(2)を用いて解析を実施する。

解析によって得られた体積含水率の分布を、施工時に湧水が確認された箇所と併せて図－８に示す。体積含水率の分布は、弾性波速度や比抵抗値と異なった分布を示しており、特に右側地表面付近に、体積含水率が 80%以上と評価がされたエリアが存在する。また、図中の点線で囲んだ部分はトンネル掘削箇所、こちらには体積含水率 60%以上と評価された領域が確認できる。

施工結果と比較すると、体積含水率が高いエリアの手前で湧水が確認されている。このことから、今回の手法で、地下水の賦存状況を把握できる可能性が示唆される。



図－8 体積含水率分布

5. おわりに

本報では、地下水賦存状況を直接的に把握できる技術の開発を目指し、比抵抗値と弾性波速度から、飽和度と間隙率のそれぞれの関係式を連立方程式として解くことで求め、その積である体積含水率を導出し、実際の湧水状況と比較・検証を行った。

解析の結果、実際の湧水箇所に近い地点で、高い体積含水率が示されたことから、地下水賦存状況を把握できることが示唆される。

今回の試行では、同一の岩種であるエリアを抽出し、そのエリアから採取した岩石を用いて地山試料試験を行い、それにより得られた解析パラメータを用いて解析を実施した。

今後は、岩種の異なる他の領域についても検証を行うために、その区間で採取した岩石のボーリングコア等を用いた地山試料試験を実施し、その後に解析を行う必要がある。

岩種ごとの係数 m , n , B を測定し、データベース化することで、他の場所における地下水賦存状況の把握に寄与できると考えられる。

また、解析式は他にも提案されており、その数値解析結果を比較することにより、信頼性の高い解析を行っていく予定である。

【参考文献】

- 1) 安藤誠：弾性波速度と比抵抗を組合わせた物理探査結果解釈の概要, 地質ニュース, No.655, pp.12-18, 2009.
- 2) 楠見晴重, 高橋康隆, 中村真：比抵抗・弾性波速度の変換解析によるトンネル建設時の岩盤評価法, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.4, pp.603-608, 2006.
- 3) 松澤進一：マイロナイト化に伴う岩石の P 波速度異方性の変化—畑川破碎帯マイロナイトについて—, 地質調査所月報, Vol.46, No.10, pp. 497-516, 1995.

Summary The presence of groundwater is a key factor in underground construction that determines the difficulty of the construction work. Thus, an accurate understanding of the presence and distribution of groundwater is essential for formulating construction plans and ensuring safety, which requires assessments of groundwater during preliminary surveys.

One method for evaluating the presence of groundwater is to draw on existing data on the correlation between specific electrical resistance and water content of bedrocks. However, since specific resistance is dependent on the geology, the state of weathering, and temperature of the geological layers in the bedrock, the resistivity-based method of groundwater assessment has its limits.

Our study investigated a method for evaluating the groundwater availability based on the volumetric water content of bedrock, in place of specific resistance, at a tunnel construction site. The results identified flowing groundwater in the areas determined to have high volumetric water content, indicating that the method is capable of accurately determining groundwater availability.

Key Words : Specific resistance, volumetric water content, groundwater availability