三次元電気探査によるトンネル掘削に伴う地下水流動モニタリングの適用性

土田　隆史[1]・兼松　亮[2]・小塩　崇之[3]・熊谷　幸樹[4]

[1]正会員　飛島建設　土木事業本部　土木技術部（〒108-0075 東京都港区港南 1-8-15　W ビル 4F）
E-mail: Takashi_Tsuchida@tobishima.co.jp

[2]正会員　飛島建設　九州支店　赤嶺トンネル北作業所（〒901-0225 沖縄県豊見城市豊橋 1-1）
E-mail: Kiyoshi_Kanematsu@tobishima.co.jp

[3]正会員　飛島建設　東北支店　新幹線ニセコトンネル作業所（〒048-1502 北海道虻田郡ニセコ町本通 258－1）
E-mail:Takayuki_Koshio@tobishima.co.jp

[4]正会員　飛島建設　土木事業本部　土木技術部（〒108-0075 東京都港区港南 1-8-15　W ビル 4F）
E-mail: Koki_Kumagai@tobishima.co.jp

山岳トンネルを施工する際には，トンネル周辺地山の地下水流動は何らかの影響を受ける．その影響を把握するため，通常は地下水観測孔を設置して地下水位を測定し，地下水分布状況を把握する．しかしながら，この方法は広域地盤に対して点情報であるため，地下水分布状態を把握するためには複数の観測孔が必要となり，詳細な地下水流動を把握するための制約となっている．そこで，筆者らは，地盤状況を比較的広域に調査することが可能な三次元電気探査に着目し，トンネル施工に応じて複数回の調査を行い，トンネル施工後の地下水分布を把握することが可能であるかを検討した．本報告では，その試行方法および試行結果について報告する．

Key Words: *electric exploration, groundwater monitoring, tunnel, NATM*

1. はじめに

電気探査は，地中に電気を流すことで地盤の比抵抗分布を調べ，地下水の有無や地質分布を推定する地盤調査技術である．トンネルの事前調査では，二次元電気探査が用いられることが多く，地質境界や破砕帯，帯水層を推定する目的で活用されている．さらに，対象地盤の比抵抗分布を三次元的に把握することが求められる場合は，三次元電気探査が用いられるが，探査，解析に多大な時間や費用を要することから，適用事例は極めて少ない．しかしながら近年，探査精度を確保したうえで三次元電気探査の左記の問題点を解決する「省力型三次元電気探査」が開発され，数例の適用事例が報告されている．本報告では，小土被りが連続するトンネル工事で省力型三次元電気探査を利用し，事前のボーリング調査では把握しきれない三次元的な地質分布や帯水分布の調査，および地下水流動モニタリングへ用することとしたので，その結果について詳述する．

2. 省力型三次元電気探査の特徴

従来の二次元電気探査と省力型三次元電気探査の特徴を今回の調査を例にとり**表-1**に示す．省力型三次元電気探査は，二次元電気探査とほぼ同等の簡易な探査手法でありながら，対象地盤の比抵抗分布を三次元で把握でき

表-1　各種電気探査の比較

探査手法	二次元電気探査	省力型三次元電気探査	（参考）三次元電気探査
測定方法	・直線状の測線を設置 ・総測線長：1,025m	・直線状の測線を複数設置 ・総測線長：2,760m	・格子状に測点を設置 ・総測線長：1,025m
解析手法	・AGI社製EarthImager2D	・自社製3D解析プログラム	・自社製3D解析プログラム
探査結果	・測線上（断面：二次元）の比抵抗分布を把握	・対象地盤（空間：三次元）の比抵抗分布を把握	・対象地盤（空間：三次元）の比抵抗分布を把握

表-2　測定器の仕様

出力電圧	800Vp-p
出力電流	1mA～2A
入力インピーダンス	20MΩ
測定電位(電圧、範囲)	±10V
分解能	最大30nV
入力チャンネル数	8
出力パワー	200W

ることが特徴である．従来の二次元電気探査では，測線両側で比抵抗値が大きく異なる地盤が存在した場合は，解析上の制約から信頼性の高い結果を得ることが困難である．しかしながら，省力型三次元電気探査では，このような地盤条件でも信頼性の高い結果を得ることが可能である．

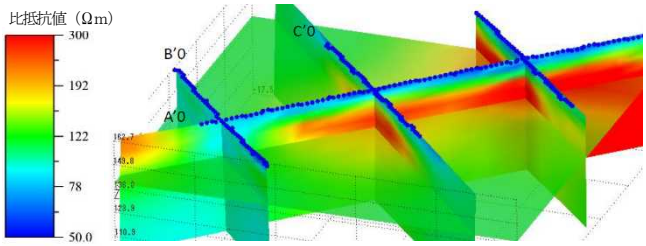

図-1　省力型三次元電気探査結果例

3.　試行現場の概要と探査方法

省力型三次元探査のトンネル地質調査への適用を目的に，現在施工中のトンネル現場で本探査を試行した．試行現場は土被りが 15～20m 程度で，未固結～半固結の火山灰層と軟岩レベルの自破砕安山岩が分布し，地下水位は地表から 2～3m 下に位置する地山（地形，地質）条件であった．

探査は 3 回に分けて掘削前後で実施した．それぞれの測線配置図を**図-2** に示す．測線はトンネルに沿った主測線とそれに交差する副測線 2～3 本を設定した．電極間隔は 2.5m とし，探査深度を 45m とした．探査に使用した測定器の仕様を**表-2** に示す．

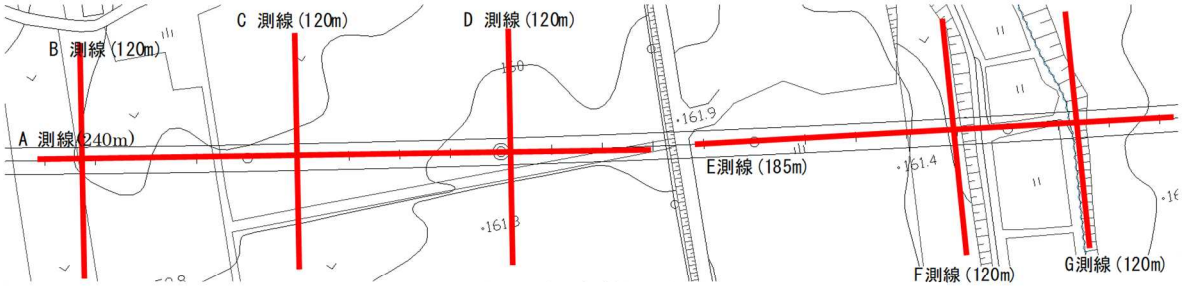

図-2　測定範囲平面図

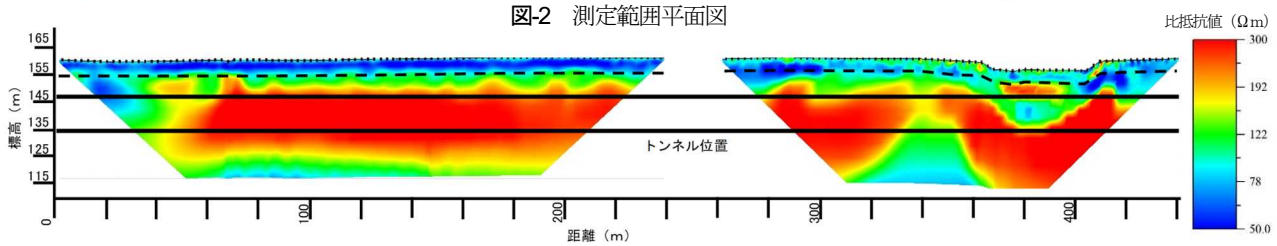

図-3　二次元電気探査比抵抗分布図

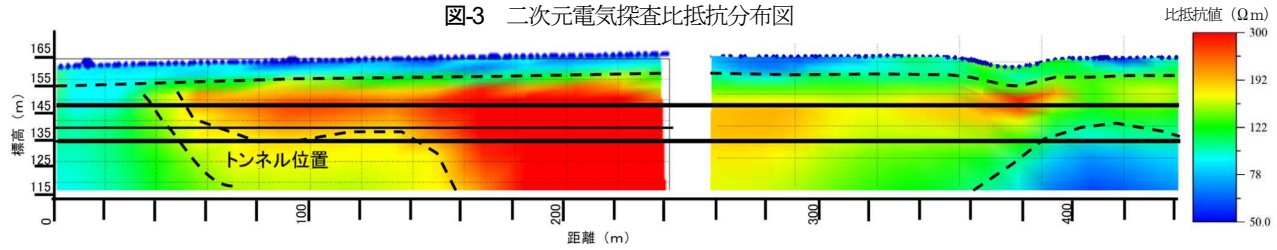

図-4　省力型三次元電気探査比抵抗分布図

表-3　二次元電気探査と省力型三次元電気探査の解析結果比較

共通点	差異
・ 地表下 5～10m 80Ωm 以下の低比抵抗値が分布 ・ 距離 160～220m 300Ωm 程度の高比抵抗値が分布 ・ 距離 380m 標高 150m付近 300Ωm 程度の高比抵抗値が分布	・ 距離 60～160m 標高 140m以下 二次元は 300Ωm 程度、三次元は 160Ωm 程度が分布 ・ 距離 320～360m 二次元は標高 120m 以深に 80Ωm 以下の低比抵抗が分布するが、三次元は 200Ωm 程度 ・ 距離 360～440m 二次元は標高 150m 以深に 300Ωm 以上が分布するが、三次元は 80Ωm 以下の低比抵抗が分布

4. 解析結果の比較

(1) 二次元電気探査と省力型三次元電気探査

測定データを基に二次元電気探査と省力型三次元電気探査それぞれの手法で解析を実施した．**図-3**，**図-4** に解析結果を示す．両社の比抵抗分布について，共通点と差異を**表-3** に示す．共通部も確認できるが異なる部分が多い結果となった．実施工では，省力型三次元電気探査の解析結果と近い地質の変化が確認された．省力型三次元電気探査の地山予測が実際と同等の傾向であることから，本探査の信頼性は高いと評価している．

(2) 掘削後における省力型三次元電気探査の結果比較

次に省力型三次元電気探査による掘削前後の探査結果を**図-5** に示す．トンネル上部の比抵抗分布が高くなっていることが確認できる．この原因として考えられるのは

①掘削による地下水位の低下

②AGF による注入材の影響

があると考えられる．そこで，AGF 注入材のサンプルを作成し，比抵抗値の測定を実施したところ，注入材は非常にポーラスな状態であるため，浸透する地下水の値に左右されることが確認できた．計測結果を**表-4** に示す．

以上より，掘削前後の比抵抗値の変化は地下水位低下に起因するものと考えられ，省力型三次元電気探査により，掘削前後の地下水位状況を把握することが出来たと考えている．

(3) まとめ

今回の検証によりに，省力型三次元電気探査により，二次元電気探査ではとらえることのできなかった地質の変化点をとらえることが可能であることを確認した．また，掘削の前後で探査を実施することにより，地下水位の変化を確認することが出来ることも確認できた．

5. おわりに

本検証では，省力型三次元電気探査を掘削前後で実施し，その解析結果から地質の変化点や地下水流動のモニタリングへの適用を検証した．現時点では，地質の変化点の確認，および地下水流動のモニタリングへの適用に関しては可能であると考えている．しかしながら，今回の現場条件では，

- 地表部が耕作地であり，埋設管等の電気探査実施時にノイズを生じるものがなかった．
- 土被りが浅い

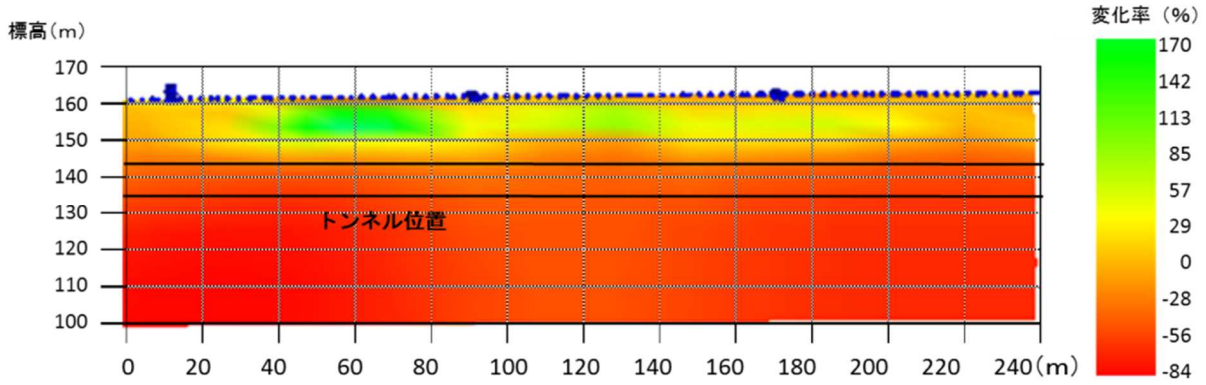

図-5 変化率縦断図

表-4 AGF 注入材抵抗値測定結果

測定	状態	コア数	電流 [μA]	電位差 [mV]	抵抗 [Ω]	比抵抗 [Ω・m]
1回目	飽和	1	100	146	1460	50.6
		2	100	176	1760	30.5
2回目	不飽和	1	ERROR	ERROR	ERROR	ERROR
3回目	飽和	1	100	159	1590	55.1
		2	100	272	2720	47.1

地下水	水温 [℃]	19.7
	電気伝導度 [mS/m]	25.10
	比抵抗 [Ω・m]	39.84

コア	直径 [mm]	30.0
	長さ [mm]	20.4
	断面積 [m]	7.07E-04
	乾燥質量 [g]	6.14
	湿潤質量(平均) [g]	14.39

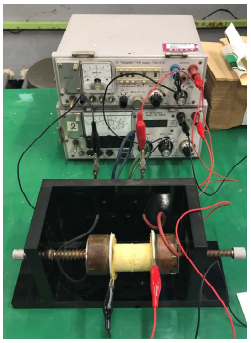

図-6 AGF 注入材抵抗値測定状況

など，探査をするうえで条件が非常に整った環境であった．今後は，都市部などのノイズの発生源が多い環境下で適用し，解析方法を確立する必要がある．また，トンネル掘削後に実施した解析は過去の実施事例がほとんどなく，解析方法などを確立するためにはより多くのトンネル現場で省力型三次元電気探査を採用し適用していく必要がある．

今後，省力型三次元電気探査のトンネル摘要事例を増やし，地質の変化点の把握や地下水流動モニタリング方法を確立することで，トンネル施工時，および事前調査時に活用していきたいと考えている．

参考文献

1) 物理探査学会　統合物理探査調査研究委員会：統合物理調査研究委員会報告書　統合物理探査による地盤物性評価と土木建設分野へ適用，2017.
2) 高倉伸一：粘土鉱物を含有する岩石の比抵抗-間隙水の塩分濃度と温度が及ぼす影響，物理探査，Vol.62，No.4，pp.385-396，2009.
3) 朴三奎・藤原寛・朴美京・松井保：土の比抵抗に関する基礎的研究，物理探査，Vol.52，No.4，pp.299-306，1999.

(2020. 8. 7 受付)

APPLICABILITY OF 3D ELECTRICAL SURVEYS TO GROUNDWATER FLOW MONITORING DURING MOUNTAIN TUNNELING

Takashi TSUCHIDA,Kiyoshi KANEMATSU,Takayuki KOSHIO and Koki KUMAGAI

Electrical surveying is a ground survey technology used to estimate geological and groundwater distributions by examining electrical resistivity while allowing electricity to flow through the ground. When no change is assumed in the geological distribution in a survey area, if electrical surveying is conducted several times in different periods for the same survey area, change in the electrical resistivity distribution can be used as an indicator to monitor change in groundwater distribution.

In this context, 3D electrical surveying was done a total of three times before and after tunneling for the same (240 m long, 120 m wide) survey area of mountain tunneling (Projected Hokkaido Shinkansen Line) through unconsolidated aquifer ground with a small overburden. This was done as part of a 3D survey of geological and groundwater distributions that were difficult to grasp only from measurement results at multiple groundwater observation holes.

This paper details the closely examined results of the effectiveness and practical applicability of this survey method for surveying 3D groundwater distribution changes by identifying the outline and features of the applied 3D electrical surveying and the results obtained from this application to the groundwater flow monitoring in the course of mountain tunneling.