

長大山岳トンネル施工に伴う大深度高密度電気探査 の適用 —九州新幹線 筑紫トンネル—

APPLICATION OF LARGE-SCALE 2D-RESISTIVITY SURVEY TO AN LONG MOUNTANEOUS TUNNEL – CHIKUSHI TUNNEL OF KYUSHU SHINKANSEN –

千葉昭彦*, 中村和仁**, 倉川哲志**, 薦田靖志***

Akihiko CHIBA, Kazuhito NAKAMURA, Tetsuji KURAKAWA and Yasushi KOMODA

The Chikushi tunnel running from Nakagawa town in Fukuoka prefecture to Tosu city in Saga prefecture is designed as the longest one of the Kyushu Shinkansen at the 11.865 km. It is concerned that decrease of ground water related to the construction of this tunnel caused short problem of water in and around urban areas.

Large-scale 2D-resistivity surveys were applied to characterization of hydro-geological structures around the tunnel and predict of geology on the route. In these surveys, it was difficult to keep signal-to-noise ratio better because of small signals on long electrode intervals and strong artificial noises induced in the urban area around the survey area. A stronger transmitter, addition of electrodes on each measurement point and measurement in the night improve the signal-to-noise-ratio to help good quality data acquired.

The electrical conductive zones corresponding to known faults supposed from previous seismic surveys were recognized on the resistivity distribution resulted from the 2D-resistivity surveys. It is suggested that the variations of resistivity in the survey area reflect those of porosity of rock mass. Furthermore, the classification of rock mass on the tunnel route using resistivity corresponded to seismic velocity was tried.

Key Words: 2D-resistivity survey, resistivity, rock mass classification

1. はじめに

筑紫トンネルは福岡県那珂川町と佐賀県鳥栖市を結ぶ延長 11.935 km の九州新幹線最長のトンネルである。本トンネルは福岡県と佐賀県の県境をなす背振山地を概ね南北方向に横断し、土被りは最大 500m を越える。背振山地は豊富な地下水を貯留し、福岡市周辺地域の水瓶として、また福岡・佐賀両県の農業用水として重要な存在となっている。したがって、トンネル施工によって広範囲の湧水が生じた場合は重大な社会問題となりかねない。このため、1974 年から断続的に本地域を対象に各種調査が実施されてきており、特に 2001 年度以降、トンネル施工に先立ち、長尺斜めボーリングや電気探査等の地質・水文調査を実施した。

従来、トンネル調査における物理探査は動弾性係数等の工学的物性を反映する弾性波探査が中心であった。電子技術の急速な発達により 1980 年代後半から普及し始めた高密度電気探査によって、岩石の体積含水率と密接な関係を有する比抵抗分布を捉えられることで、施工上注意が必要な地下水および地質劣化部の把握が可能となった。特に花崗岩地帯での高密度電気探査の実績が増えてきている¹⁾。

* 正会員 住鉱コンサルタント(株) 技術開発部

** 正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 九州新幹線建設局 鳥栖鉄道建設所

*** 非会員 住鉱コンサルタント(株) 試験部

花崗岩が地質を構成する筑紫トンネルにおいても、まず、広範囲の水文地質構造評価に資するため、トンネルを横断する 7 測線で高密度電気探査を実施した。さらに、トンネル縦断方向の水文地質構造を把握する目的で高密度電気探査を実施した。本調査では、要求される探査深度が 500m を越し、総測線長は 35km に達した。本報では、実施した電気探査の成果概要と大深度における電気探査の留意点について報告する。

2. 調査地概要

調査地は、トンネル路線にあたる福岡県筑紫郡那珂川町と佐賀県鳥栖市の他、福岡県大野城市、筑紫野市、佐賀県三養基郡基山町にまたがる東西約 5km×南北約 10km の範囲である(図-1 参照)。背振山地東部の標高 300～600m の山地に相当し、九千部山(標高 847m)を中心に北東から南西方向に連なる山稜の北西および南東の両斜面が調査対象である。福岡県側の北西斜面は調査地の西側を南から北へ流れる那珂川水系に属し、北西-南東方向の支流や谷地形が発達する。佐賀県側の南東側斜面は筑後川水系安良川流域に属し、北西斜面同様、北西-南東方向の支流や谷地形が樹枝状に分布する。調査地周辺には南畑ダム、山神ダム、河内ダム、牛頸ダムおよび四郎五郎池等の水源지가作られている。

調査地域の地質は、古生代の三郡変成岩類へ中生代白亜紀に貫入した北九州花崗岩類およびこれらを被覆する第四紀の段丘堆積物、柱石堆積物および崖錐堆積物で構成される。調査地域の基盤岩である花崗岩類は古期の糸島型花崗閃緑岩、新期の深江型花崗岩、早良型花崗岩の 3 種に区分される。北から南へ早良型花崗岩、糸島型花崗閃緑岩、深江型花崗岩の順に分布し、互いに北東-南西方向の境界で接している。これらの花崗岩類にペグマタイト質～アブライト質の酸性岩が脈状に貫入している。花崗岩類は全体に風化が進行し、マサ化が顕著である。本調査では、断層破砕部を除く花崗岩の風化度合いを、Ⅰ(新鮮)、Ⅱ(弱風化)、Ⅲ(強風化)に区分した。

地質構造は北部九州の基盤構造を規制する北西-南東系の構造が明瞭である。主要河川や沢沿いに連続性のよいリニアメントや断層が発達する。地表に現れる谷地形はこれらの地質構造に規制されている。節理、リニアメントともに北西-南東系と直交する北東-南西系が卓越する。調査地に活断層は存在しないが、既存の弾性波探査結果から、北から順に梶原断層、埋金断層、平等寺断層、大谷断層、貝方断層の 5 本の大きな断層が推定された。これらの断層の走向はいずれも北西-南東方向で、伴う破砕帯は擾乱帯も含めて幅 100m 以上、透水係数 10^{-3} cm/s 程度と想定されていた。

3. 高密度電気探査

二次元高密度電気探査は、測線上に密に配置した多数の測点到電極を接地し、各電極を組み合わせで取得した多数のデータから、コンピュータによるインバージョンで測線下の比抵抗分布断面を求める物理探査法である。

電気探査では、電極間隔が狭いほど分解能が高く、広いほど探査深度は大きくなる。電極間隔を狭くすると測点数や取得データ数が増大し、測定や解析に要する手間や時間が大幅に増加する。最大で 500m を越す土被りのトンネルの深度までを探査対象としたので、測点間隔をやや広めの 20m、測点毎に測点間隔の 1～75 倍(20～1,500m)の電極間隔で測定を行った。電極配置には、探査深度が大きな二極法を採用した。

トンネル縦断方向の調査では、最大電極間隔 1,500m、最大測線長 9.5km(測点数 426 点)という大規模な高密度電気探査となったため、次のような点に留意した。

(1) 遠電極

本電気探査で採用した二極法では、測線の両端から無限遠と見なせる位置(最大電極間隔の 5 倍以上)に遠電極を設けなければならない。西側を除く本調査範囲の隣接地域は人家が密集しており、安全管理上、理想的な位置に遠電極を設けることはできなかった。測線から南西に 5km ほど離れた人家のない背振山地内と東へ 4km ほど離れた河川沿いに遠電極を設けた。遠電極用までの電線は管理し易い曲がりくねった道路沿いに敷設したため、

総延長では 30km を越えた。遠電極の位置を考慮した遠電極補正を行い、無限遠と見なせない影響を除去した。

(2) SN 比

高密度電気探査の解析では測定データの品質が結果に大きな影響を与える。測定データの品質はノイズに対する信号の強さの比すなわち SN 比で保証される。SN 比を向上させるには、信号を強くする方法とノイズを抑制する方法がある。電気探査で測定する電位は、送信電流の大きさに比例し、電流電極からの距離に反比例する。大深度を対象とする場合には、電極間隔が非常に広がるので、次の二つの方法を併用して大きな電流を流さなければならない。一つは高電圧、大出力の送信機を用いて低周波数の電流を流すことである。本調査では、最大印可電圧 800V、最大出力 4kW の横浜電子製送信機 L-5204 を使い、1Hz の交替直流を送信した。もう一つは電極の接地抵抗を下げることである。本調査では 60cm の電極を 1 測点当たり 5 本以上設置して接地面積を増やし、接地抵抗を 1k Ω 以下に抑えた。接地抵抗を低減させた電極は、送信用としてだけでなく、受信時に高周波ノイズの影響を受けにくくなる副次的な効果がある。

調査範囲の北側に隣接する福岡市は九州第一の都市で、大きな人工ノイズ源になっている。午前 0 時 30 分から 4 時 30 分までの 4 時間以外は、パルス状の大ノイズが頻発し高品質のデータを取得できなかった。福岡市内を走る JR、新幹線から発生するノイズと考えられ、パルスノイズが静穏となる時間帯に限り測定を行った。

(3) 測定装置

測定には主に住鋳コンサルタント製 GS-3000 システムを用いた。このシステムは最大 100 測点の電極を接続し、送信電極を自動的に切り替えた後、受信電極で測定を行う。本測定器の機能を十分に利用し、準備完了時には各測点の接地抵抗の確認測定、測定時にはモニター上での目視によるノイズ混入状況の監視、データ取得終了後には電位減衰曲線の形状や相反性の確認を行い、現場で測定データの品質を確認した。効率的な 25 測点同時測定により、ノイズの平穏な時間内に測定を終了させることができた。

全測線のデータを一度に取得できないので、2km ずつに分割してデータを取得した。しかも、分割データ取得範囲の端周辺は所定の探査深度を評価できるまで電極間隔を広げられないので、分割範囲を 500m ずつ重ね合わせた。測線長 9.5km の縦断の測定では 13 回の分割測定を行った。2km の測定するための資材は膨大でしかも山地であったため、分割測定 1 回あたりの準備・撤収に 5 日程度を要した。

(4) データ処理・解析

送信電流、受信電位および遠電極補正した電極配置係数から見掛比抵抗を算出した。見掛比抵抗断面図を作成し、品質の劣るデータを除去した後、逆解析を行った。逆解析には、有限要素法を使って求めた数値モデルの見掛比抵抗と実測見掛比抵抗を比較し、その差異が十分小さくなるまで平滑化拘束付き最小二乗法でモデルを繰り返し修正する反復修正法を適用した。大深度を対象とする場合には、深度方向の要素数および見掛比抵抗の数が増大になる。ソフトおよび計算機の能力上、同時解析可能な測点数は 200 測点に制限され、全測線の解析を一度に行えないため、4km ずつの断面を分割して解析を行った。しかも、分割範囲の端付近では、測定と同じように、所定の探査深度を評価できないので、分割範囲を 2km ずつずらしながら解析を実施し、それぞれの結果を重ね合わせることで測線全体の解析結果とした。測線長 9.5km の縦断の測定では 4 回の分割解析を行った。

4. 探査結果

調査範囲全体の比抵抗分布を見るため、各解析比抵抗断面の標高 100m（トンネルレベル相当）の比抵抗を平面図上にプロットして、コンタリングした解析比抵抗平面図を図-2 に示す。また、8 本の測線の内、トンネル路線に沿った縦断測線（測線長 9.5km）と、東部の山神ダムと西部の南畑ダムを結ぶ横断測線 D（測線長 6km）の解析比抵抗断面をそれぞれ図-3、図-4 に示す。以下に本地域の比抵抗分布と解釈について概説する。

本調査で解析された比抵抗は 100～5,000 $\Omega \cdot m$ の範囲にあり、国内の一般的な花崗岩地帯の比抵抗範囲内にある。比抵抗平面図（図-2）から明らかなように、概ね埋金断層を境に調査範囲の北部から北東部にかけては 1,000 $\Omega \cdot m$

m 以上の高比抵抗が広く分布し、中央部から南側は $500\Omega\cdot\text{m}$ 以下の比較的低比抵抗が広く分布する。北部の高比抵抗域には主として早良型花崗岩が分類するが、糸島型花崗閃緑岩との境界が比抵抗分布の境界と直交するなど、地質の違いが比抵抗分布に反映されているわけではない。岩種の違いはほとんどなく、風化の度合いや断層破碎帯の影響が比抵抗分布に現れていると考えられる。

北部の高比抵抗分布域では、図-3の北部や図-4の東部のように、浅部から深部まで高比抵抗が広がり、浅部の沢や谷地形部に小規模な低比抵抗が分布する。この地域では高比抵抗を示す比較的新鮮な岩盤が広がり、浅部に低比抵抗化した風化部が点在することを示すと考えられる。

一方、比抵抗平面図における中央部から南側の低比抵抗分布域では、北部とは全く異なり、 $1,000\Omega\cdot\text{m}$ 以上の高比抵抗は尾根部や山稜部の浅層にのみ分布し、ほとんどの比抵抗は $200\sim 500\Omega\cdot\text{m}$ の範囲にある。尾根の浅層に分布する高比抵抗は風化から残存した中～硬質の岩盤（巨大岩塊等）を表しているものと考えられる。河川や谷地形の下部では、深部に $150\Omega\cdot\text{m}$ 以下の低比抵抗異常が分布し、浅部に向かって異常が伸びてきている。これらの低比抵抗異常の上端部は、弾性波探査の低速度部やリニアメントから推定された埋金、平等寺、大谷および貝方の各断層位置とよく一致する。したがって、これらの低比抵抗異常は擾乱帯、破碎帯もしくは深層風化を表していると考えられる。低比抵抗分布から判断すると、断層破碎帯や深層風化帯の幅はかなり広いと推定される。特に埋金断層の南側では平等寺、大谷および貝方等の大きな断層活動によって岩盤全体が影響を受けて低比抵抗化している可能性がある。

最南部にある G 測線の比抵抗は全般に低比抵抗を示している。この測線は沖積平野である佐賀平野に近く、広い段丘が形成されていることから、未固結のために低比抵抗を示す段丘堆積物が厚いことを示すと考えられる。

比抵抗の平面分布では、梶原、埋金、平等寺、大谷および貝方のいずれの断層も相対的な低比抵抗異常を通っており、低比抵抗の原因を断層破碎帯に求めることを支持している。比抵抗分布からは、埋金断層は D 測線まで伸びて、梶原断層と一緒にいる可能性を指摘できる。

5. 比抵抗分布の評価

(1) 間隙率との関係

岩石の比抵抗 ρ は、地下水の比抵抗 ρ_w 、間隙率 ϕ 、飽和度 S_w 、粘土含有率および温度に左右されることが知られている。Archie(1942)²⁾は、地層比抵抗係数 F という指標を導入し、アーチーの式と呼ばれる(1)式が成立することを実験的に示した。ただし、 a 、 m 、 n は実験的に求められる定数である。千葉ら(1994)³⁾は花崗岩においても粘土を含有する岩石と同じように、(2)式で示す並列回路の式を満足することを実験で示した。しかし、その場合でも定性的には岩石の比抵抗と間隙率や飽和度との関係は維持される。

$$F = \frac{\rho}{\rho_w} = a\phi^{-m}S_w^{-n} \quad \text{----- (1)}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{F\rho_w} + \frac{1}{\rho_c} \quad \text{----- (2)}$$

本調査地域の河川水や湧水等の地表水は弱アルカリ性（約 pH7.5）で $100\Omega\cdot\text{m}$ 前後（温度 20°C 弱）の高比抵抗（低電気伝導度）を示す。地下水はほぼ同質と推定される。また、河川源流部の標高の高い箇所でも湧水が認められる上、既往ボーリングでは自噴井も含め平均的な地下水位は 10m 前後で推定されることから飽和度は 100% と見なしてもよい。さらに、岩種によって比抵抗が左右されないことは上述した。したがって、本調査地域の比抵抗を左右する物性は間隙率であると考えられる。Matsui ら(1999)⁴⁾の成果を参考にすると、大半を示す $200\sim 500\Omega\cdot\text{m}$ の花崗岩の間隙率は 4～7%、断層破碎帯に相当する $100\Omega\cdot\text{m}$ 以下は 10%以上、新鮮で緻密な岩体と考えられる $1,000\Omega\cdot\text{m}$ 以上は 3%以下と考えられる。ただし、この場合の間隙率は亀裂まで含めた岩体としての間隙率であり、花崗岩片の一般的な間隙率 0.1～3%よりも大きな値である。

既存ボーリングにおける透水試験と速度検層、電気検層を比較したところ、弾性波速度も比抵抗も透水係数と

負の相関の傾向があるものの、比抵抗より弾性波速度の方が透水係数との相関はよい結果が得られた。これは粘土化が生じると比抵抗は低下し、透水係数も小さくなることが多い、すなわち正の相関を持つ傾向が生じることがあるためと考えられる。

(2) 地山分類との関係

鉄道トンネルにおける地山分類は弾性波速度と岩相から決定される。通常の弾性波探査では土被り 200m 程度までの解析が限度である。今回の調査を基に、トンネル路線の断面の比抵抗分布を利用して地山分類を試みた。弾性波速度基盤上面の位置における弾性波速度と比抵抗の対比を行い、表－1 のような対比表を作成した。地山分類には、空中写真から推定したリニアメント、河川や谷の分布、地表地質踏査結果および既存ボーリングのデータも考慮した。また、縦断測線の比抵抗分布から表－2 のように要素毎の区分基準表を作成した。

表－1 比抵抗を利用した地山分類

弾性波速度 V_p (km/s)	<2.5	2.5～3.2	3.2～3.8	2.8～4.6
比抵抗($\Omega \cdot m$)	≤ 300	300～400	400～600	600～800
地山等級(A 岩種)	I_s, I_L , 特 S, 特 L	I_n	II_n	III_n

表－2 比抵抗による要素毎の区分基準

区 分	基 準	区 分	基 準
地下水位	浅部層状低比抵抗中心線	新鮮部(I)	深部高比抵抗
強風化部(III)	浅部層状低比抵抗中心線上位	破碎帯	高角度の比抵抗急変部・低比抵抗
弱風化部(II)	III と I の中間	熱水変質帯	深部低比抵抗(<150 $\Omega \cdot m$)

電気探査終了後に、破碎帯を伴う断層それぞれに実施された長尺斜めボーリングの結果、電気探査のほぼ想定地点で破碎帯が確認された。しかしながら、断層破碎帯と推定した箇所は、地質の良好部と劣悪部が混在し、幅 100～200m にわたる連続した大規模破碎帯ではないことも判明した。ボーリングの結果からは、断層の中では平等寺断層に粘土変質部の割合が多く、筑紫トンネルでは最も地質が悪い可能性が高い。

6. おわりに

高密度電気探査による比抵抗分布は、リニアメント判読、地質踏査、弾性波探査等と同様、NW-SE の方向性をもつ低比抵抗帯が梶原、埋金、平等寺、大谷および貝方の各断層の破碎帯と対比されることが判明した。これらの断層破碎帯は止水壁あるいは貯水帯となる可能性があるため、水源地との最短地点よりも、水源地を通る低比抵抗帯と交差部での施工時には注意が必要である。今回は、長大山岳トンネルを対象に、従来にはない規模の大深度高密度電気探査が実施して地下水および地質劣化部の把握を行い、施工上の注意喚起に資することができた。

本調査で判明した長大山岳トンネルにおける高密度電気探査の課題に、特に土被りの大きな地点の分解能の向上、比抵抗および比抵抗変化を左右する要因（間隙率、地下水の比抵抗と量、岩種や岩相等）の特定があげられる。これらの課題解決に資するため、今後の施工実績をフォローしていきたい。

引用・参考文献

- 1) 松井保, 比抵抗高密度探査技術とトンネル地盤調査への適用性, 比抵抗高密度探査に関する研究, ワークショップ発表論文集, 土木学会関西支部, pp.3～22, 1995.
- 2) Archie, G. E., The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, T. A.I.T.E, 1942.
- 3) 千葉昭彦・熊田政弘, 花崗岩および凝灰岩試料比抵抗測定一間隙水の比抵抗が岩石の比抵抗に及ぼす影響について, 物理探査, 第 47 巻, pp.161～172, 1994.
- 4) Matsui, T., Park, S. G., Park, M. K. and Matsuura, S., Applicability of resistivity-based high-density prospecting to rock mass survey, Proceeding of the '99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, pp.141～146, 1999.



図-1 調査位置図

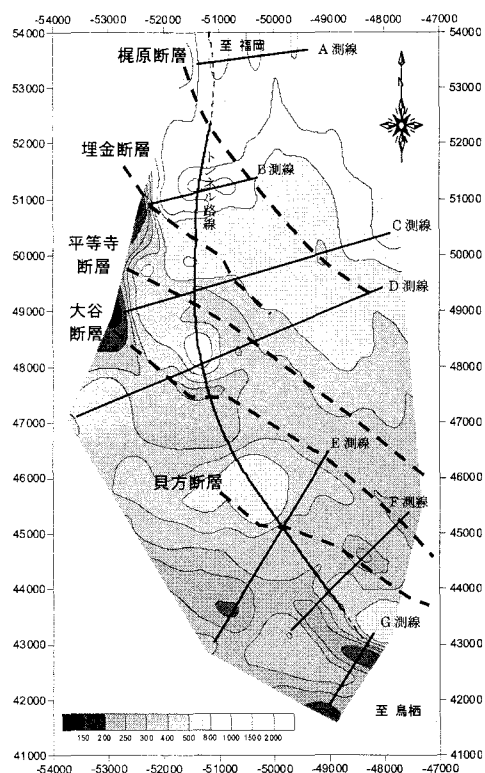


図-2 解析比抵抗平面図
(標高 100m : トンネルレベル)

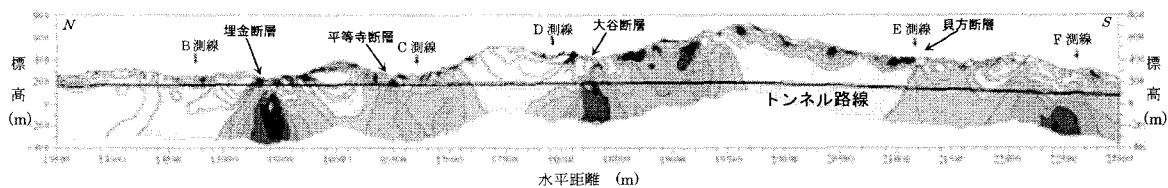


図-3 解析比抵抗断面図 (トンネル縦断)



図-4 解析比抵抗断面図 (D 測線)