

比抵抗法によるトンネル切羽前方地下水探査の新手法について THE NEW METHOD OF RESISTIVITY PROSPECTING FOR GROUND WATER AHEAD OF TUNNEL FACE

山本和義*・近藤和男*・竹内伸光*

Kazuyoshi YAMAMOTO, Kazuo KONDO, Nobumitsu TAKEUCHI

SUMMARY

The tunnel to go through alternation of sandstone and shale in the Chichibu band, encountered to the fault fracture zone with much high-pressure water.

Therefore, at this tunnel, as the prospecting method for ground water, it implemented "resistivity two dimension prospecting" and "resistivity tomography".

But there was a limit in each result, because it is required that it grasps the distribution of ground water and the rock property quite precisely while constructing.

Therefore, we combined two ways. As a result, we could get the result, which agreed with the distribution of the actual rock and underground water well.

1. はじめに

施工中のトンネル坑内から切羽前方の地質状況を把握する手法として、弾性波探査反射法(TSP Tunnel Seismic Prediction またはHSP Horizontal Seismic Profiling)を用いた方法がさかんに用いられるようになってきた。この手法では、断層や地質境界など力学的不連続面の位置を検出することが可能であるが、地下水の有無や岩盤強度など他の要素について評価することが原理的に困難である。そのため、施工上有用な切羽前方の地質の情報特に地下水の情報が得られないという欠点を有している。

そこで近年、上記のような要素を評価できる物理探査法として比抵抗法電気探査が注目されるようになっている。電気比抵抗が岩盤の組成・キレツの多少・含水の程度・地下水の水質などと相関性があり、岩盤の状態を総合的に表す指標となるためである。

そこで本研究では、地表面からの探査である「比抵抗2次元探査」と、地表部とおよび掘削中のトンネル坑道内にも電極系を展開して探査する「比抵抗トモグラフィ」の2つの方法を実施し、その有用性と問題点とを把握し、それらを基にして、より高い精度の結果を得るための新しい手法を考案、実施しその結果を報告するものである。

2. 探査概要

探査は、トンネル内に出現した高被圧多量湧水を伴う断層を対象とし、後背の帯水区間がどこまで続くのか、また、多量湧水の供給源がどこにあるのかを探査する目的で行った。

* 正会員 清水建設(株)土木本部技術第2部

2. 1 地形地質概要

探査地域の地形地質概要は以下の通りである。

探査地域は高知市の北部に位置する。この付近は微起伏地が標高 300～400mの高さに広がっているが、大きく見ると北に傾斜しており、分水界は大きく南に偏っている。また、直線的な東西および南北方向の谷地形が発達しており、基盤岩の構造を反映しているものと思われる。

また探査地域は、地質構造区分としては秩父帯中帯（黒瀬川構造帯）に属し、ペルム系上部の休場層が分布している。休場層は、黒色粘板岩・千枚岩質粘板岩と暗灰色砂岩との互層から構成され、しばしば輝緑凝灰岩や石灰岩がみられる。大局的には地層の走向は東北東～西南西、傾斜は北に $60\sim 80^\circ$ であり、この地域の大構造に調和的であるが、部分的には地層の撓乱が激しく非常に複雑な構造であり、特に大構造と走向方向がほぼ一致する褶曲構造や断層構造などが多く見られる。問題となった断層もこれらのうちの一つである。

施工時には、断層以外の部分でも、岩石そのものの強度は数十～100 MPa と比較的大きいものの亀裂が発達しており施工時の湧水はかなり多い状況であった。

2. 2 比抵抗 2 次元探査

比抵抗 2 次元探査は、既にトンネルの調査法として業務レベルで適用されている方法である。

本研究では、地表面のトンネル方向に沿って $L=600\text{m}$ の測線を設定し、探査を行った。表-1 に探査の仕様を、図-1 に測線配置平面図を、図-2 に測線配置断面図を示す

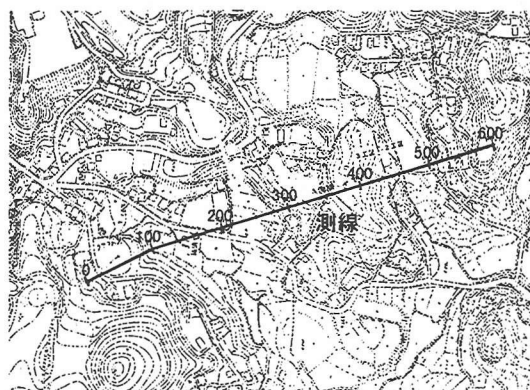


図-1 比抵抗二次元探査測線配置平面図

表-1 比抵抗 2 次元探査仕様

電極間隔	10m ($L=600\text{m}$ に 61 極)
電極配置法	2 極法
測定深度	$a = 300\text{m}$ (30 通り) とする
解 析	2 次元解析により 真の比抵抗を求める

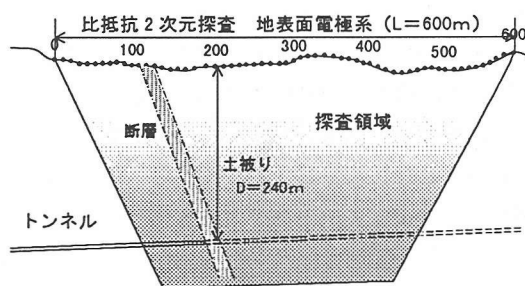


図-2 比抵抗 2 次元探査測線断面図

2. 3 比抵抗トモグラフィ

比抵抗トモグラフィは、今回の研究において試験的に実施し、基礎的データを得ることに務めたものである。測定仕様を表-2 に、測線配置断面図を図-3 に示す。なお、平面的配置は比抵抗 2 次元探査と同様である。

表-2 比抵抗トモグラフィ仕様

坑内電極	10 極 (10m 間隔)100m 間
地表電極	32 極 (10m 間隔)310m 間
解 析	比抵抗トモグラフィの 解析プログラムに従って 比抵抗分布を求める

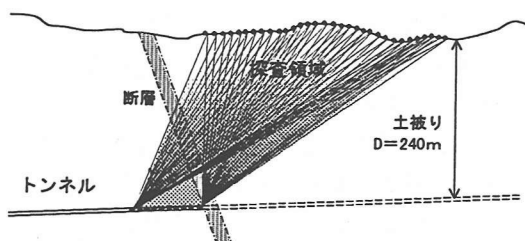


図-3 比抵抗トモグラフィ測線断面図

3. 探査結果と問題点

3. 1 比抵抗 2 次元探査

比抵抗 2 次元探査による比抵抗断面図を図-4 に示す。

- ① 大局的な比抵抗分布の状況を明らかにすることができた。即ち、中央部（切羽前方）に巾 150m に及ぶ低比抵抗ゾーンが明瞭に検出され、破碎帯を含むキレツの多い、しかも含水した岩盤の存在が想定された。
- ② 中央部の低比抵抗部の比抵抗は $200 \sim 300 \Omega \cdot m$ であり、切羽まで及び 2 工区サイドの比抵抗は $350 \sim 800 \Omega \cdot m$ を示し高い値である。比抵抗値は地層や岩盤の種類によって異なるので、単純には岩盤の良否と結びつけられないが、対象地では中生代の砂岩・頁岩の互層であることがわかっているため、岩質状態について次のように評価できる。

- ・ $[200 \sim 350 \Omega \cdot m]$ $\Rightarrow$ キレツの多い砂岩・頁岩の互層（含水していて透水性も良い）
- ・ $[400 \sim 800 \Omega \cdot m]$ $\Rightarrow$ キレツの少ない砂岩・頁岩の互層（透水性は低い）

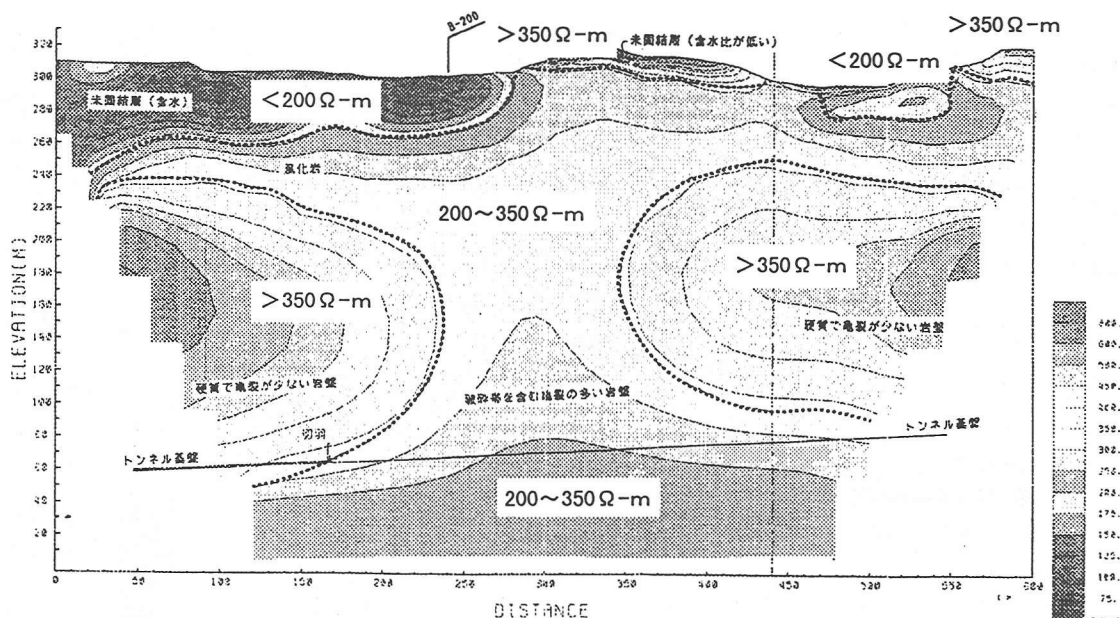


図-4 比抵抗 2 次元探査による比抵抗断面図

- ③ 浅層部の比抵抗の分布状況が比較的詳細に求まっており、地質状況をも良く反映してとらえていると言える。トンネルフォーメーションまでの土被りが薄い場合は比抵抗二次元探査で相当良い精度の結果が得られる。

今回の場合、表層の未固結堆積物（帯水している）の分布状況が明確になり、トンネル湧水の供給源について検討する上で有用なデータとなった。

しかしながら、以下にあげる問題点も明らかになった。

- ① 深層部の探査精度が低くなる。これは2つの面から限界が生じている。
- ・地表部からの探査であり、原理的に言って深度の2乗のレベルで測定と解析の精度は落ちている。
 - ・測定の最深部(今回は最大電極間隔=300mが最大深度)の解析においては、その下位のデータがないため演算において仮定値が入り、そのため解析結果の比抵抗値の精度が悪い。

今回の結果においてもトンネルフォーメーション(深度 250m)付近の比抵抗コンターは、これ以深の解析精度が低いため、必ずしも実際を正確に反映しているとは言えない。特にコンターがトンネルに平行に近くなっているのは、現実を反映しているものとは考え難い。

- ② トンネル工事施工前の調査段階としては有効な方法ではある。施工中の調査としては、トンネル内からの情報が利用されていないという点で不十分さの残る手法である。

3. 2 比抵抗トモグラフィ

比抵抗トモグラフィでは、Aトンネル坑内に電極を設置し、地表面で電位を測定した方が、B地表面に電極を設置し、トンネル坑内で電位を測定した結果より誤差の少ないものが得られたのでその結果を図-5に示す。

切羽上方から前方斜め上方の比抵抗分布が得られている。切羽前方のトンネルレベル付近の測定結果は原理的に見て得られないので、現実的にはトンネルレベルの予測は、上層部の比抵抗を下へ延長して推定することになる。切羽付近から約 200mぐらいの区間が $75 \sim 200 \Omega \cdot m$ と相当低い比抵抗を示している。これは

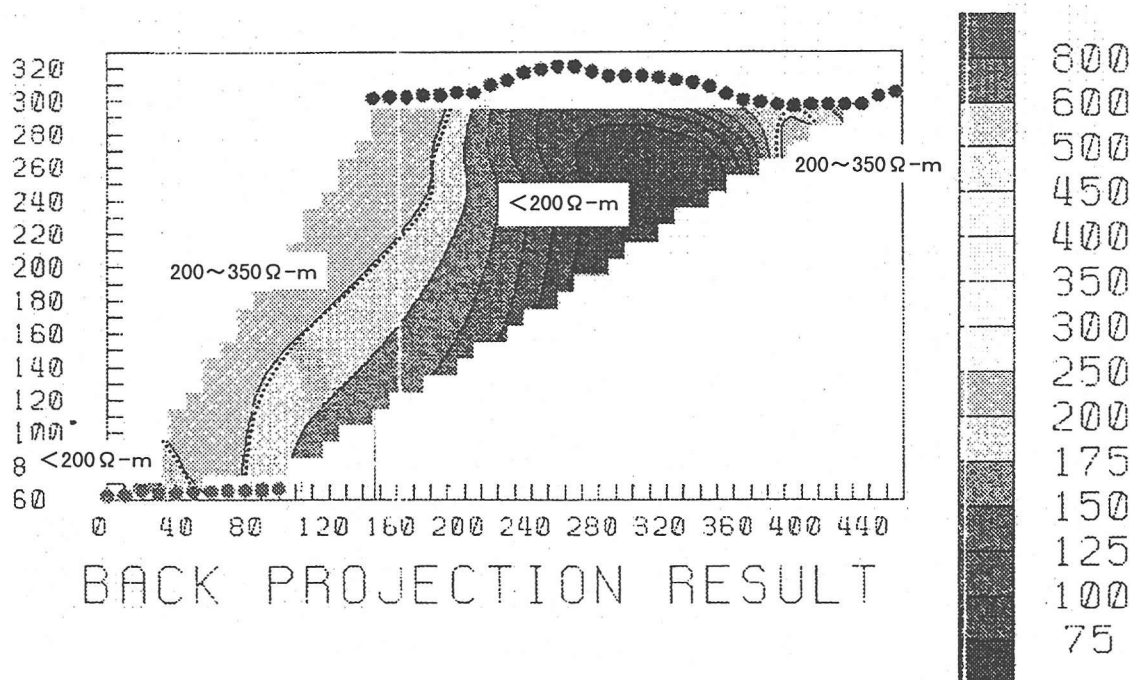


図-5 比抵抗トモグラフィによる比抵抗断面図

[$\Omega \cdot m$]

地表面からの比抵抗二次元探査の結果よりも巾が広く現われており、しかも比抵抗値自体も二次元探査で得られた 250～350Ω・m という値よりも 50% 近く低いものとなっている。

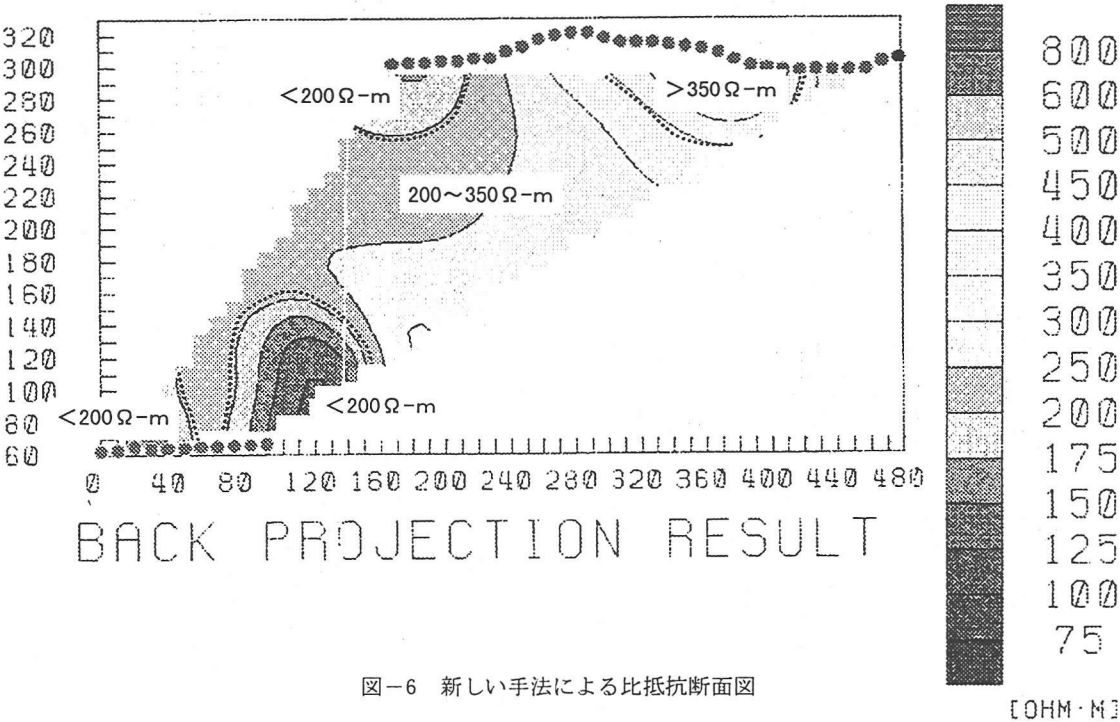
このように低比抵抗帯が強調されて現われている理由としては以下のことが考えられる。この付近の地層及び破砕帯の傾斜が地表面から地下へと垂直に近いため、坑内から地表への電流が流れやすくなる、即ち垂直方向に低比抵抗の異方性があり、その影響が強く現われていると思われる。従つて、このケースの比抵抗分布の結果図は現実よりも比抵抗ゾーンが巾広く、かつ低比抵抗側にシフトしていると言える。

3. 3 比抵抗 2 次元探査と比抵抗トモグラフィの組み合わせ

比抵抗 2 次元探査および比抵抗トモグラフィでは、各々単独では、得られた情報に限界があることが判明した。最も知りたい情報は大規模な断層帯がどの程度の長さに出て出現し、断層部を越えた地盤の地下水の状況がどのような挙動を示すかと言うことである。

そこで、坑内電極及び地表電極系に通電し、地表電極系で電位測定した、比抵抗 2 次元探査と比抵抗トモグラフィの組み合わせたような測定を実施した。その結果を図-6 に示す。

切羽付近を中心に 80m ぐらいの比抵抗 (125～250Ω・m) ゾーンが存在する。その先は 250～350Ω・m の比較的低い比抵抗を示す。この値は比抵抗二次元探査で解析された低比抵抗ゾーンの値と一致している。従つてトモグラフィの結果によって、切羽付近から 40～50m 間は 125～250Ω・m を示し、相当破砕されて含水した岩盤であるが、その先は 250～350Ω・m を示し、亀裂は多いものの相対的には、含水が少ない岩盤となっていることが予想される。



4. 比抵抗探査結果と問題点のまとめ

比抵抗二次元探査と比抵抗トモグラフィの両方法について、先進探査の適用性について試験した結果、両方法ともに大局的な地質構造の把握や地下水賦存の評価する上で有効であることが確かめられた。しかし、一方では測定面及び精度面での限界があることも明らかとなった。

これらのうち地表の電極系のみを使う比抵抗二次元探査については原理上、深層部になるほど二次関数的に精度が低くなるため、測定・解析上の改善をしても、切羽前方の探査を詳細に知る上では限界がある。

そこで新しく試みた方法として電極を坑内と地表の双方に設置し、地表で電位を測定する方法を試みたが、本方法ではより明確に比抵抗の分布の相違が得られた。現実の施工においても測定した切羽面から、40～50 m間に渡って大規模な断層破砕帯が出現し、坑内から地盤改良および止水注入を実施し、この断層を突破した。50m以降は断層破砕帯ではなく、当初想定した亀裂は多いものの相対的には、含水が少ない岩盤が出現し、本測定方法および解析方法の妥当性が検証された。

しかしながら、本システムの今後の課題として以下のことが上げられる。

- ① 坑内と地表の測定では、トンネル高さレベルの比抵抗値を得ることに限界がある。
- ② 測定が有線で行う必要があるため、坑内から地表部への配線を考慮する必要がある。ちなみに本トンネルでは取水目的の大口径ボーリングがあり、ここを有効に利用して配線を行った。

表-3 比抵抗探査の結果と問題点のまとめ

	比抵抗二次元探査	坑内～地表間 比抵抗トモグラフィ
方法の概要	地表面に電極系を展開（10m間隔）し、最大電極間隔を 300mまで拡張して地下の抵抗値（Q）を測定しリアフィルタ法及びアルファセンタ法などを組合せて二次元解析を行い、比抵抗断面図を作成	坑内切羽手前 100m間と地表部の 310m間に電極系を展開（10m間隔）し、順次通電して坑内～地表間の抵抗値（Q）を測定 測定データから逆投影法（BPT）によってセル毎の比抵抗を算出して比抵抗断面図を作成
探査結果	切羽付近から約 200mの区間にわたって 200～300Ω・mと比較的低い比抵抗を示す。複数の破砕帯を含むキレツの多い岩盤であり含水している。但し個別の破砕帯を識別できる程の精度は有していない。	切羽付近から約 80mの区間が 100～250Ω・mとかなり低い比抵抗を示す。含水した破砕帯を含むキレツの多い岩盤で一部変質している箇所もあると判断される。 その先は 200～350Ω・mの比抵抗を示し、キレツは多いが岩盤は強固であると予想される。
問題点と対策	・トンネルフォーメーション付近の精度が低い ・事前調査としては有効であり工事中の先進探査として比抵抗トモグラフィを採用する場合、このデータをも組込んだ解析をすることで有効に活用できる。	・トンネル切羽から前方上側のデータは得られるがフォーメーションレベルのデータが欠落する。これを解決するためには切羽前方でそれほど離れない位置に地表から垂直ボーリングを掘削しそれも利用したトモグラフィを立案することである。 ・トンネル内での測定において、ノイズに対する対策処理を行う。