

(40)トンネル掘進に伴う比抵抗分布の変化

資源環境技術総合研究所 瀬戸政宏、和田有司

勝山邦久

奥村組筑波研究所

篠原 茂

三井金属資源開発

斉藤 章

The Change of Electrical Resistivity of Rock Mass During the Excavation Using TBM

Masahiro SETO, National Institute for Resource and Environment

Yuji WADA, National Institute for Resource and Environment

Kunihisa KATSUYAMA, National Institute for Resource and Environment

Shigeru SHINOHARA, Okumura Corporation

Akira SAITOU, Mitsui Mineral Development Engineering Co., Ltd

The change of electrical resistivity during the excavation of tunnel was investigated. The change of electrical resistivity was closely related to the position of face, fault and ground water. From the distribution of electrical resistivity in rock mass, it was possible to know the behavior of ground water during the excavation. And, it was found from the change of electrical resistivity in the vicinity of F1 fault that the drastic change of ground water movement occurred about 15 m beyond the face. As a conclusion, the measurement of electrical resistivity is very useful for the investigation of ground water movement during the excavation.

1. はじめに

地下に空洞を掘削すれば、その影響によって地下水の流動状態が影響を受けることはよく知られていることであるが、トンネル掘削の場合においては、それによって工事の進行阻害、安全上の面から問題となる岩盤からの大量湧水の発生の危険性も考えられる。また、生活圏に近接した箇所での工事では、地下水脈への影響を抑えた工事計画が必要になる。これら岩盤中の地下水に起因する問題に対して適切な対策を立てるためには、岩盤中の地下水分布の状態を広範囲で的確に把握するとともに、掘削によって地下水の状態がどのように変化するのかを明らかにしていく必要がある。

実際の岩盤中の地質状態と併せて地下水の状況およびその変化を把握するためには、反射法地震探査や比抵抗法に代表される電気探査等物理探査技術の応用が有効と考えられる。その中で、大地に電流を流し、それにより形成される電位から岩盤中の比抵抗分布を解析する比抵抗法は、他の物理探査技術に比較して岩盤中の水の存在に対して敏感といわれている。

そこで、本研究では比抵抗法に着目し、トンネル掘削時の周辺岩盤中の地下水への影響を調べる目的で、トンネル掘削前と掘削進行中において複数回の計測を実施した。鉱床探査、岩盤調査等においては比抵抗電気探査技術は広く利用されてきているが、本研究で実施したようなトンネル掘削の進行に合わせた計測例は現在まであまり行われていない。本研究で実施した比抵抗法による計測によって、トンネル掘削の進行に伴って岩盤中の比抵抗分布に顕著な変化が認められ、岩盤中の地下水の流動状態がトンネル掘削によって影響

されていることが推察された。

本論文では、計測によって得られたトンネル掘削に伴う岩盤の比抵抗分布の変化について、トンネル切羽位置、地下水、断層等と関連付けながら論じ、トンネル掘削時の岩盤監視技術としての比抵抗法の有効性について示す。

2. 試験の概要

試験を実施したトンネル現場は、神戸市垂水区で工事が行われている舞子トンネル導坑工事現場である。本工事においては、直径5mの導坑が4本掘削され、その後拡幅が行われる。4本の導坑の配置は図1に示すが、本計測で対象としたトンネル掘削は図中に示したNo.4坑の掘削である。計測に際して電極、計測装置等を設置した場所は、No.4坑から4.2m離れて平行に既に掘削が終了していたNo.3坑である。なお、岩盤を構成する主要な岩石は花崗岩（六甲花崗岩）であり、トンネル掘削箇所の地表から深さは約20mから50mである。

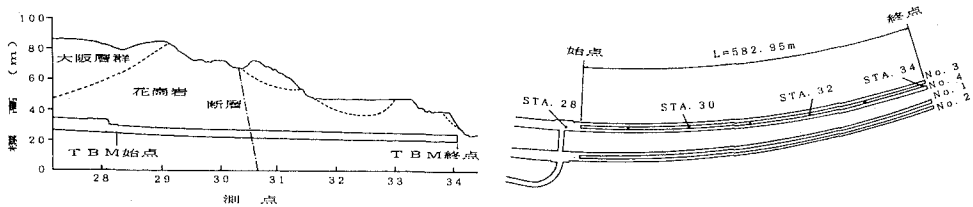


図1 計測現場の概要図

本試験においては、2種類の計測を実施した。ひとつは、No.3坑の坑道壁面に10m間隔で電極を500mの距離にわたって設置して行った計測である。この計測は、導坑掘削予定領域のほぼ全域の比抵抗変化を变化を検討するためのものである。他のひとつは、図1に示すように、導坑掘削の出発点から約240m進んだところに断層（以下、F1断層と呼称）が存在するが、この断層周辺で実施した計測である。この計測では、電極は1m間隔で20mの距離にわたってNo.3坑の坑道壁面にに取り付けた。この計測は、断層周辺の脆弱な岩盤部分でのトンネル掘削による比抵抗変化を検討するためのものである。

本計測では、ホールインアンカを坑道壁面の岩盤に打ち込んで電極とした。遠電極の取付も同様の方法である。また、計測に用いた装置は応用地質製のMcOHM-21で、電極配置は二極法（ポール・ポール法）によって計測を行った。

解析は次の手順で実施した。まず、計測された見掛け比抵抗値に対して感度補正を施し、次いでそのデータに対して比抵抗構造の初期モデルを決定する。ここでは、一次元解析を繰り返し行い二次元断面を作成する。次いで、この解析結果を初期値にして、リニアフィルタ法によって繰り返し計算を行って比抵抗構造を求めた。この計算においても、一次元解析を繰り返し行って二次元断面を作成した。

3. 試験結果と考察

(1) 広域比抵抗分布とトンネル掘削

観測用として利用したNo.3導坑の500mにわたって電極を設置して行った、広域にわたる比抵抗分布の解析結果を図2に示す。同図において、矢印で示した箇所が5m離れて掘削されているNo.4導坑の切羽位置である。また、同図(a)では、TBMによる掘削が開始した直後であるために、解析断面上に切羽がまだ完全には到達していない。なお、同図の横軸は1番電極（TBM出発点に最も近い電極）からの距離を示している。また、同図の縦軸は、トンネル壁面からの深度を示しており同図に示した解析断面では深さ100mまでを示している。

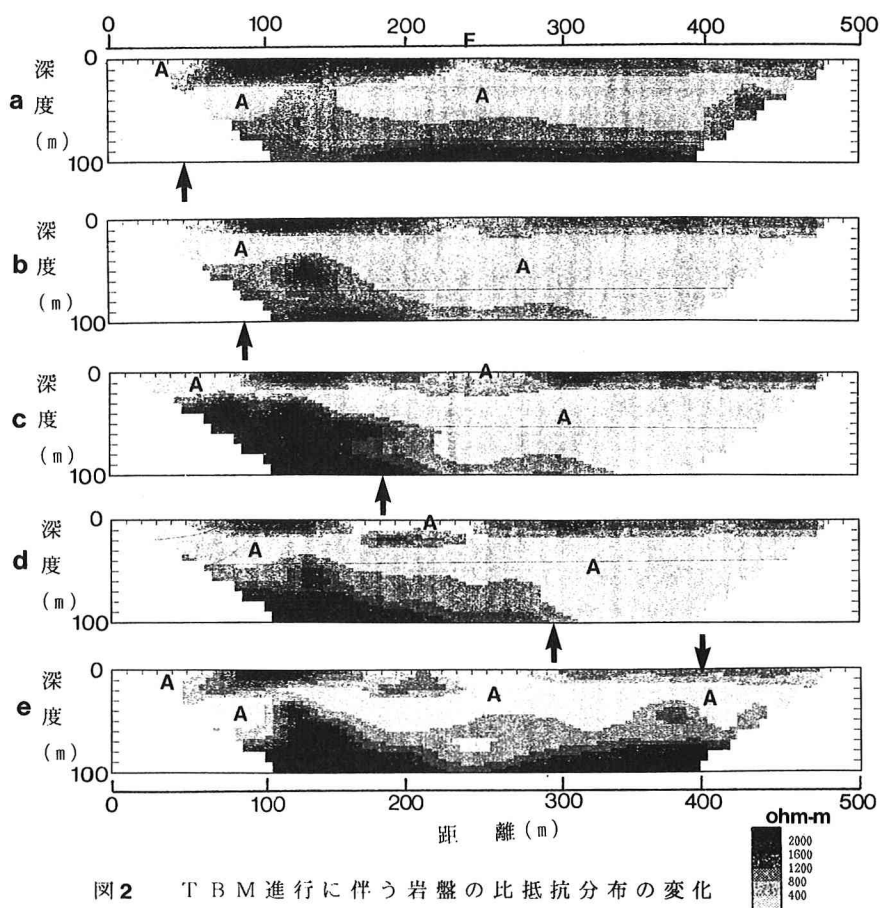


図2 TBM進行に伴う岩盤の比抵抗分布の変化
(矢印は切羽位置を、Fは断層を示す)
A: $200\ \Omega \cdot \text{m}$ 以下

No.3導坑のトンネル壁面の展開画像の一部を図3に示す。同図に示した観察結果において、同図(a)はTBM出発点から約40m離れたところに認められた破碎帯(岩盤分類:D)を示している。同図(b)は、TBM出発点から約250m離れた箇所に出現していたF1断層(岩盤分類:D)を示している。また、同図(c)はトンネル壁面からの多量の滴水がみられたTBM出発点から約420m~450mの箇所の壁面を示しているが、同図に示すように多数のき裂が互いに交差している様子が分かる。

まず、図2(a)に示したトンネル掘削初期の段階の比抵抗分布と図3に示したトンネル壁面の観察結果との関係について述べる。比抵抗分布において $800\ \Omega \cdot \text{m}$ 以下の低比抵抗帯に着目すると、No.3導坑の壁面近くに見られる低比抵抗の位置は図3で示した多量の滴水が認められた破碎帯、F1断層等の位置とよく一致している。また、F1断層(図中F地点)近傍の岩盤の比抵抗が特に低い値($400\ \Omega \cdot \text{m}$ 以下:図中Aと付記)を示しているが、その分布はF1断層がNo.3導坑に出現している箇所を起点とした分布になっていることが特徴的である。このことから、低比抵抗帯の分布は岩盤中の地下水の分布と極めて密接な関係があるものと思われる。

次に、TBMによるトンネル掘削の進行と比抵抗分布の変化との関係について述べる。比抵抗が $400\ \Omega \cdot \text{m}$ 以下の低比抵抗帯の変化をみると、掘削の進行に伴ってその領域がF1断層周辺を起点として拡大していることが分かる。また、切羽到達点の近傍では比抵抗が $400\ \Omega \cdot \text{m}$ 以下の領域が形成されていることから、このト

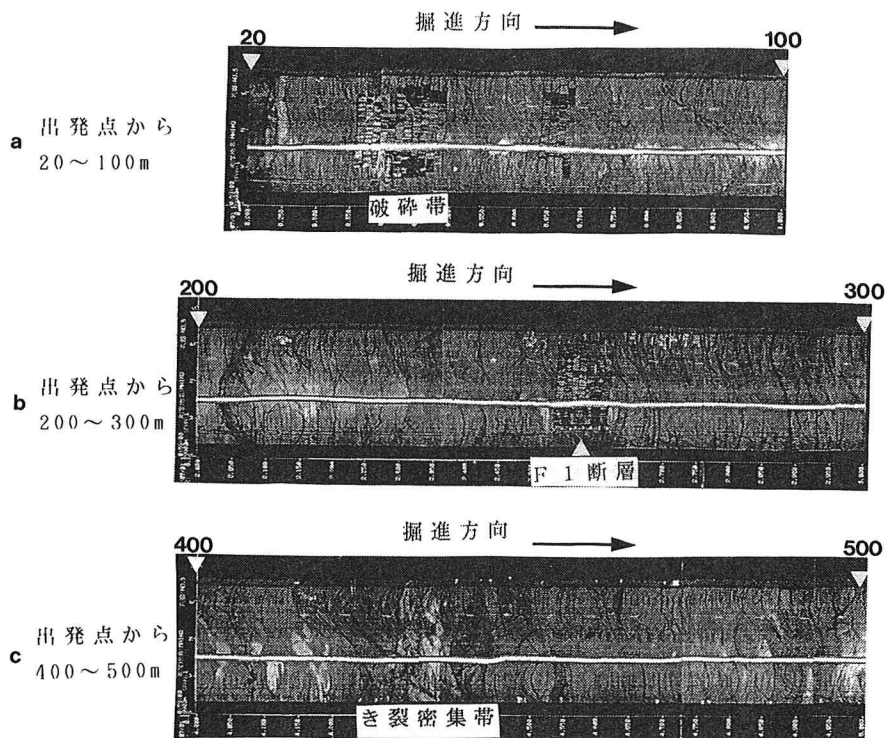


図3 No.3導坑のトンネル壁面の展開画像

ンネル掘削によって岩盤中の地下水の分布が変動しているものと推察される。なお、掘削の進行によって壁面から奥部において高比抵抗の領域が出現しているが、これがNo.4導坑の影響に依るものかどうかは明らかではない。

(2) 断層通過前後の比抵抗分布の変化

図1に示したF1断層を挟むかたちで電極を1m間隔に配置し、20mの区間で比抵抗分布の計測を実施した。図2に示したように、比抵抗分布は岩盤中の地下水の分布を反映している可能性が高いが、ここでは断層をTBMが通過する際の比抵抗分布の変化について検討した。

図4に比抵抗分布の解析結果をTBMの切羽位置(矢印)と併せて示した。同図において、横軸は1番電極(TBM出発点側)からの距離を示している。また、縦軸はNo.3導坑の壁面からの深度を示しており、本解析結果では深度10mまでを示している。

同図(a)の比抵抗分布図はトンネル切羽が計測領域に到達する前の段階の分布図であるが、F1断層を構成するD級の岩盤がNo.3導坑に露出している箇所から400Ω・m以下の低比抵抗帯が分布している。しかし、No.3導坑壁面近くで、かつ岩盤が花崗岩である箇所では比抵抗が高くなっている。同図(b)、(c)は、切羽が計測領域のほぼ中央まで到達したときの比抵抗分布図である。切羽到達前の分布図との違いは、No.3導坑から約5m奥部に比抵抗600Ω・m以上の領域が認められることである。No.4導坑の掘削はNo.3導坑から約5m離れてほぼ平行に掘削されていることと、比抵抗600Ω・m以上の領域が出現している箇所がよく一致している。このことから、この600Ω・m以上(図中Bと付記)の領域はTBM掘削による影響が出現しているものと推察される。同図(a)においても認められた200Ω・m以下(図中Aと付記)の低比抵抗の領域がNo.3導坑壁面にほぼ平行に分布しているが、同図(b)、(c)の結果においてもその分布形態はほとんど変化していない。つ

まり、切羽位置が本計測領域のほぼ中央まで達した段階では、トンネル掘削の影響は岩盤中の地下水にまだ影響を与えていないと思われる。同図(d)は、切羽が計測対象域を5 m先まで通過したときの比抵抗分布図である。同図(b)、(c)と比較すると、No.3導坑の約5 m奥部に認められた高比抵抗(600 $\Omega \cdot m$ 以上)帯が認められなくなるとともに、200 $\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯が壁面から奥部側に拡大している様子が認められる。したがって、TBM切羽が完全に通過した後においては、岩盤の緩み等起因して地下水が流動し、岩盤中の地下水の再配置が発生するものと推察される。地下水変化が生じている箇所(同図(b)、(c)の高比抵抗帯が認められなくなった箇所)と切羽との距離は約15 mである。

4. おわりに

舞子トンネル導坑工事現場において、導坑(トンネル)掘削の進行に伴う岩盤の比抵抗分布の変化について検討を加えた。その結果、

①導坑のほぼ全域にわたる比抵抗分布は、計測域中に存在した破碎帯、断層等に関連した水理状況をよく反映したものであった。また、トンネルの掘削に伴う比抵抗分布の変化から岩盤中の地下水分布の変化を推定することが可能であることが明らかになった。

②断層周辺での比抵抗分布の計測から、トンネル切羽周辺の局所的な変化も比抵抗分布によく反映されることが明らかになった。また、低比抵抗帯の変化を地下水分布の変化と対応させて推察すると、トンネル掘削による切羽周辺地下水の変化は切羽が完全に通過した後に出現することが分かった。

謝辞 本研究の遂行にあたって多大のご協力をいただいた本州・四国連絡橋公団の関係者の皆様、奥村・鴻池・鉄建建設共同企業体の関係者の皆様に謝意を表します。また、実験の遂行においてご協力をいただいた奥村組技術研究所の関係者の皆様に謝意を表します。

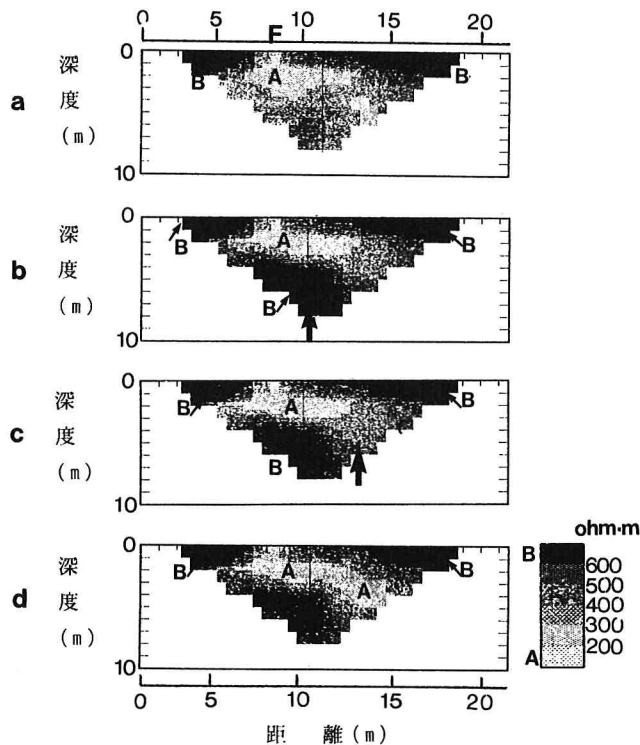


図4 断層通過前後の比抵抗分布の変化
(矢印は切羽位置を示す)

A: 200 $\Omega \cdot m$ 以下、B: 600 $\Omega \cdot m$ 以上