

(60) 高密度電気探査による 変状トンネルの診断について

パシフィックコンサルタンツ(株)	正会員	谷口 親平
"	〇正会員	安田 亨
応用地質(株)	正会員	田中 達吉
大阪大学工学部	正会員	松井 保

Evaluation of Aged Tunnel by Resistivity Image Profiling

Shinpei TANIGUCHI Pacific consultants Co., Ltd.

Toru YASUDA "

Tatsukichi TANAKA OYO Corporation

Tamotsu MATSUI Osaka University

Abstract

Methods for investigating general alteration of tunnels are eye observation, non-destructive methods, and borings, which are used mainly around the vicinity of tunnels. For serious alteration of tunnels which need drastic repairs, however, the above-mentioned investigation methods are not sufficient. In this case, it is important to investigate it from the wide point of view, including the conditions of deterioration of the entire rock-masses and underground water around tunnels. Resistivity image profiling might be effective for evaluating their conditions.

In this paper, an effective use of the resistivity image profiling for tunnel investigation is discussed, and a practical example is given for a tunnel evaluated by the overall investigation method combined with other methods. As a result, it is concluded that the resistivity image profiling together with other methods can evaluate the zoning of opening cracks, the distributions of faulted zones, fractured zones, and deteriorating rock-masses, and the conditions of underground water around the tunnel. Consequently, the proposed method can be effectively used for evaluating alteration of tunnels and also for planning countermeasures for their repairs.

1. はじめに

完成後20～50年程度経過したトンネルでは、トンネル周辺地山の劣化、経年による老朽等の理由から安全性に問題があるトンネルが指摘されるようになっている。これらのトンネルは当時充分に調査されていないのが普通で、調査記録や施工記録が残っていないケースが多いため、現時点では白紙の状態から調査することになる。そこで筆者らは、予備調査という位置付けの下に、トンネルの壁面に発生しているクラックに着目し、この変状傾向を調べることによって概略の変状原因を推定する方法を提案した¹⁾。さらに、変状原因の究明をした後、対策工の選定を行うには、トンネル周辺地山の評価が次段階として必要になる。特に変状が著しく抜本的な対策を必要とするトンネルでは、トンネル周辺のための調査では不十分で、岩盤全体の劣化状況や地下水状況を調査することが重要である。

そこで本報告においては、岩盤全体の調査法として高密度電気探査法を適用し、これを変状トンネルの調査に効果的に利用する方法を述べ、他の調査（レーダー調査、ボーリング調査）とあわせて総合的に変状トンネルを診断した事例を報告する。

2. 周辺の地質

地表踏査によって確認した地質状況の平面図を図-1に示す。地質は地質構造区分で言えば、東北東から西南西方向に延びる舞鶴帯に位置し、周辺には古生代二畳紀の舞鶴層群と称される堆積岩類が分布している。舞鶴層群は頁岩で構成されており、新鮮部は黒色～暗灰色を呈し、岩塊は中硬岩相当の硬さを有している。亀裂は、数cm～数10cm程度と比較的に発生している。地表部に分布する頁岩は、粘土状に風化しており、しばしば表層崩壊や地すべりを発生させる原因となっている。

図示のように、特徴的な地すべりが次の3箇所で開催している。

- 1) 始点側坑口右側 50m上方の斜面に、地すべりブロックが認められる（図中のLS①）。立木の曲がり具合から見ておそらく10数年前に運動し始め、現在までに約3mの累積変位が認められる。
- 2) 始点側坑口左斜面の切土法面上に2度に渡る地すべりが発生している（図中のLS②）。おそらく表層すべりであると思われる、トンネルへの直接的な影響はないと推察される。
- 3) 終点側坑口部は風化した頁岩が分布しており、地表から10数mの範囲は地すべり運動をしている（図中のLS③）と考えられ、これによる地すべりブロックおよび坑門工の変状が確認されている。

断層についてはNE～SW系のものが確認されているが、断層そのものは幅数10cmの破碎帯を持つ程度である。

3. トンネル坑内の変状状況

図-2に、特徴的なクラックの展開図（トンネル底面中央から展開し、トンネル背面から見た図）を示す。変状は両坑口部に多く発生している。始点側 0-35mには、補修用の吹付コンクリートの表面に、クラック幅は小さいが数多くの縦断方向クラックが発生している。35-70mには、終点に向かって左アーチ肩部に明瞭な縦断方向クラックが発生している。またこの区間は漏水が多い。終点側については、250-290mには終点に向

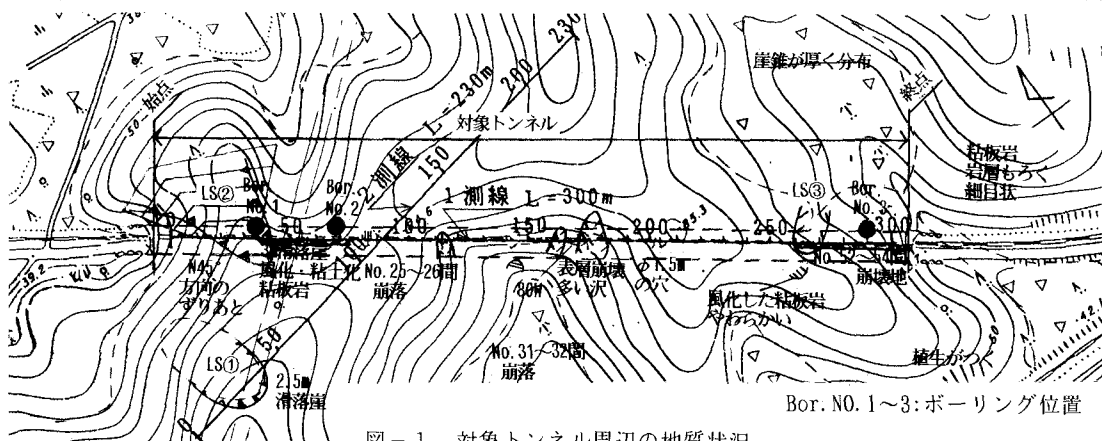


図-1 対象トンネル周辺の地質状況

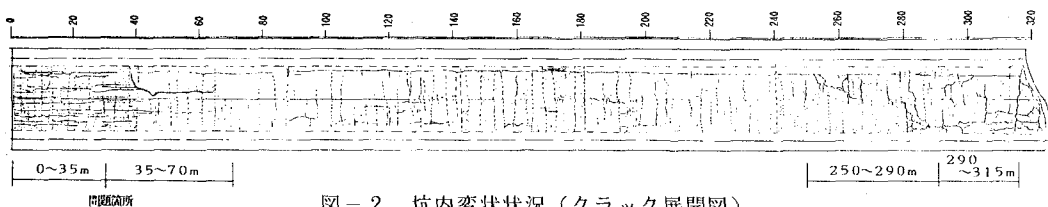


図-2 坑内変状状況（クラック展開図）

かって左から右方向に連続性が非常に顕著なクラックが発生している。また290-315mの坑口部には、アーチ両肩部に縦断方向クラックが発生している。以上、始点側2箇所、終点側2箇所の計4箇所を問題箇所として抽出した。

4. 調査方法

4-1. 調査の目的と調査計画

上述した問題箇所について、その変状の原因が構造物自体の老朽によるものか、外的な作用を受けて生じたものを明らかにし、今後の対策を検討する資料に供することを目的とする。以下に示す調査を実施した。

- 1)高密度電気探査法－地山全体の地質および地下水状況の把握
- 2)レーダー調査－覆工巻厚、覆工背面の地山状況の推定
- 3)ボーリング調査－トンネル周辺の地山状況（岩の破碎状況）の把握

ボーリング箇所は高密度電気探査法とレーダー調査の結果を考慮して決定した。

4-2. 高密度電気探査法（比抵抗映像法）調査

従来の電気探査は1次元探査で、地下構造が垂直あるいは水平に一次的に変化すると仮定できる場合に適用され、垂直探査・水平探査として利用されている。これに対しコンピューターの進歩により多量の点数のデータを処理することができるようになり、二次元探査を可能とする高密度電気探査法が発達した。ここで用いた高密度電気探査法は、地下の比抵抗分布を逆解析によって求める測定・解析法である比抵抗映像法を採用している。比抵抗映像法は測線直下における地盤の比抵抗分布を断面2次的に求めるもので、解析はアルファセクター法を用いた自動解析法によって行った²⁾。電極配置は2極法による。

土質地盤の場合は、比抵抗はその粒度や化学組成と密接な関係があり、砂・砂礫では大きい値になるのに対し、粘土などでは極めて小さい値を示す。土質パラメーターとの関係は表-1のとおりである。

表-1 各種土質パラメーターと比抵抗の関係

小	比抵抗	大
(粘土)	(シルト)	(砂)
小	粒 度	大
大	飽和度	小
大	体積含水率(孔隙率×飽和度)	小
小	地層水比抵抗	大

一方岩盤においては、岩自体の比抵抗は極めて高く、比抵抗値は孔隙内の地層水の比抵抗に左右されるため、断層や破碎帯のような高含水率帯は比抵抗の低下が大きい。また風化・変質作用を受けて粘土化した場合その比抵抗はさらに低下することが知られている。したがって、高密度電気探査法をトンネル調査へ適用する有用性は十分に考えられ、特に変状トンネルの異常箇所の検出に利用することは特に有効であると思われる。

5. 調査結果

5-1. 全体的傾向

図-3は高密度電気探査によるトンネル軸断面の比抵抗分布図である。図から分かるように、始点から150m付近までは比抵抗は高-低-高の順となっており、そこから終点までは高-低となり300ohm-m以下の低比抵抗となっている。100m付近の尾根部に1000ohm-m以上の新鮮な岩盤が検出されており、これを境に地下水が左右に流下している。異常箇所は順に40, 75, 220, 250, 290mの位置で検出されており、断層であることが想定される。また非常に特徴的な結果として、両坑口のトンネル直上に高比抵抗が検出されており、おそらくトンネル掘削による緩みのためクラックが開口しているものと考えられる。図-4のレーダー調査の結果からもこの付近に空洞が推定され、クラックの開口が大きい範囲を良好に捉えたものと思われる。

5-2. 始点側坑口部について（問題箇所 35-70m）

図-1の平面図に示したように、本区間の切土部で地すべりが発生している。図-5(a)および図-6(a)

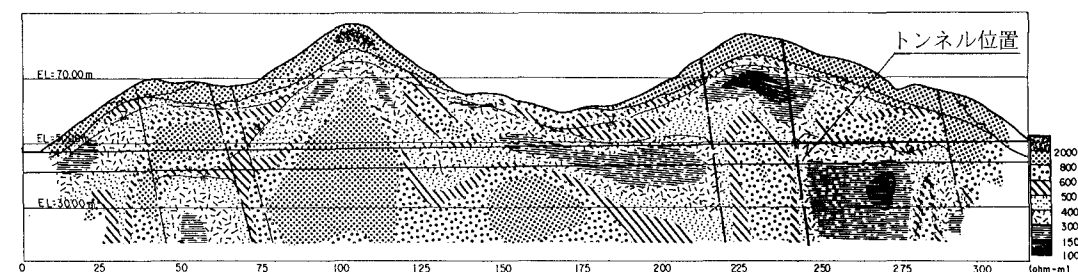


図-3 地山全体の比抵抗分布図

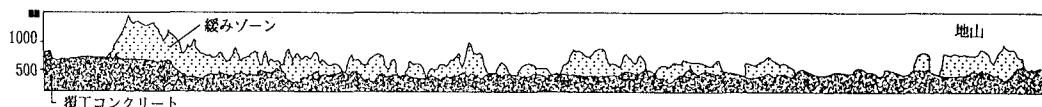


図-4 レーダー調査結果

はそれぞれ始点側坑口部の比抵抗分布図およびのボーリング等の調査結果を踏まえて作成した地質断面図を示す。この断面図に基づけば、トンネル付近の岩盤は亀裂は多いが岩塊そのものは硬質であり、地すべりは表層の土砂状風化岩を主体とした極浅い（5m程度）すべり土壌であるため、トンネルに対する影響は少ないと判断できる。また比抵抗調査により断層を推定しているが、ボーリング調査では明確な断層は捉えておらず、断層沿いに多少の破碎がある程度で、トンネルへの影響はないと判断した。したがって、アーチ左肩部の縦断方向クラックについては、天端付近が高比抵抗になっていることに基づいて、ゆるみ荷重が作用したことによる引張性クラックであると判断した。また70m付近に漏水が多いのは、新鮮岩上を通る流水経路から流れ落ちた地下水が断層で堰上げされ、この付近の目地やクラックから漏水しているものと思われる。

5-3. 終点側坑口部について（問題箇所 250～315m）

図-5(b)および図-6(b)はそれぞれ終点側坑口部の比抵抗分布図および地質断面図を示す。断面図から分かるように坑口部に土砂状風化岩が厚く堆積している。各調査を総合してこの区間の変状は以下のように推定できる。

1)250～290mの斜交クラック

レーダーで空洞・緩みゾーンを捉えておらず、トンネル天端まで風化岩が密着していることから、地すべりによる偏地圧が作用していると考えられる。

2)290～315mの肩部の縦断クラック

トンネル天端付近は、開口割れ目および緩みゾーンとなっており、土砂状風化岩が厚く堆積していることから、地山の緩み土圧が塑性土圧による変状であると考えられる。

5-4. 診断結果

以上の調査結果に基づき、問題箇所の診断を行った結果を表-2に示す。35-70mおよび250-315mの区間については、構造的な外力が作用して発生した変状であると考えられるため、ロックボルトや注入等の応急対策ではなく、内巻コンクリートおよびインバートコンクリートの打設等の抜本的な対策が望ましい。

表-2 問題箇所の診断結果一覧表

区間	変 状	原 因
0 ～ 35m	吹き付けコンクリート施工しているために十分な分析はできないが、比抵抗・レーダー等から特に問題となる原因はなく乾燥収縮による変状である可能性がある	
35 ～ 70m	断層・地すべりの影響とは考えにくいので、天端付近の破碎（開口性亀裂の緩み）による構造的な外力が作用していると考えられる	
250 ～ 290m	風化ゾーンが深部まで及んでいること、及び地表部に地すべりが発生していること等から、偏圧・地すべり・緩み等が原因として考えられる	
290 ～ 315m	トンネル断面が風化ゾーンに入っていることから、塑性土圧・緩み荷重等による原因であると考えられる	

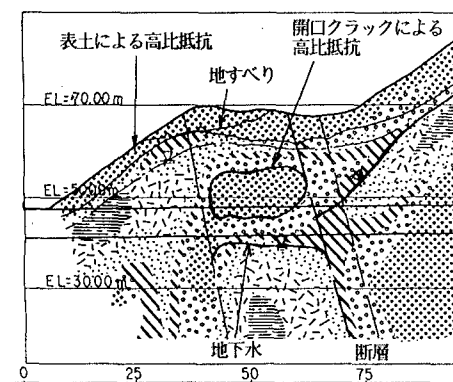


図-5(a) 始点側坑口部比抵抗分布図

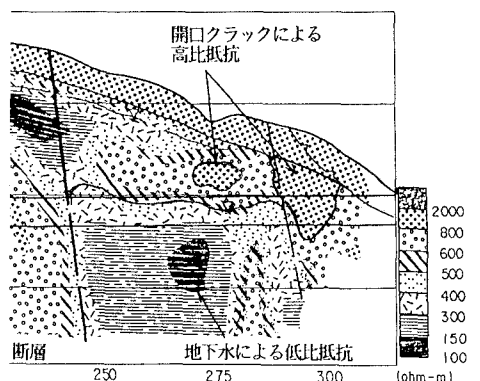


図-5(b) 終点側坑口部比抵抗分布図

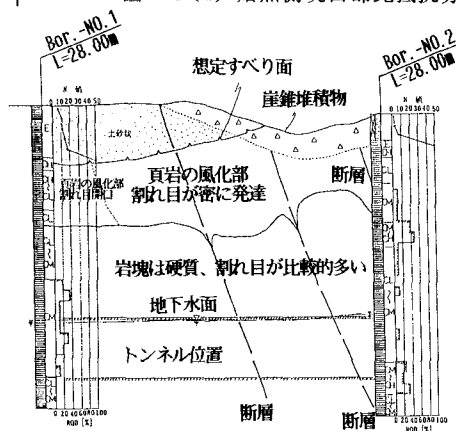


図-6(a) 始点側坑口部地質断面図

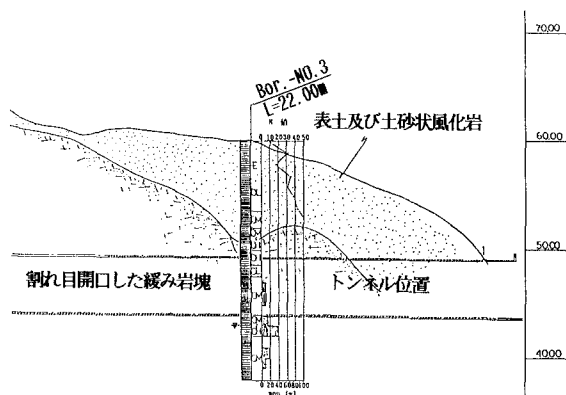


図-6(b) 終点側坑口部地質断面図

6. おわりに

トンネルの変状調査に高密度電気探査を適用した結果、以下の結論が得られた。

- 1) 高密度電気探査は、開口クラックのゾーニング、断層・破砕帯・岩盤劣化ゾーンの分布状況（範囲、方向）を把握することができる。
- 2) 高密度電気探査は、地下水位、地下水の流下経路等を把握することができる。

以上の高密度電気探査の有用性に基づいて地山全体の状況把握を行った後、レーダーやボーリング調査等を効果的に融合することによって、変状トンネルを適切に診断し、的を絞った補修・補強対策が計画できる。

今後は、さらに他の調査事例を踏まえて、変状トンネルの診断手法を確立していきたいと考えている。

7. 参考文献

- 1) 安田・谷口・亀和田：「老朽トンネルにおけるクラック診断システムの開発」、土木学会論文集 No435/VI-15, pp139-144, 1991.9
- 2) 鳥・坂山：「電気探査におけるアルファセンター法を用いた二次元自動解析の試み」、昭和60年度物理探査学会秋期講演会、1985
- 3) 松井 他：「新しい電気探査法のトンネル調査への適用性（その1）～（その4）」、土質工学研究発表会（第25～27回）