

(102) $\rho_a - \rho_u$ 探査法の探査例

－ トンネル調査への応用 －

住鉦コンサルタント株式会社 正会員 ○千葉 昭彦
日本道路公団 羽田 勝
青木建設株式会社 坂井 弘
財団法人物理探鉦研究会 吉住永三郎

A Field Survey Using $\rho_a - \rho_u$ Prospecting Method

- In the case of the Geological Survey for the Mountain Tunnel -

A.CHIBA, Sumiko Consultants Co., Ltd. M.HATA, Japan Highway Public Corporation
H.SAKAI, Aoki Corporation Co. E.YOSHIZUMI, Institute for Geophysical Exploration

ABSTRACT

The $\rho_a - \rho_u$ prospecting method was supplied to the site of the Nikkure-Yama Tunnel in order to try to predict the geological and hydrogeological conditions that would be encountered during tunnel construction. The result lead following interpretations,

(1) The geological structure is divided into discrete blocks by a series of faults which effectively isolates the ground water system in the vicinity of the tunnel from aquifers used for domestic water supply in a nearby residential area.

(2) The tunnel was expected to be constructed at the boundary between a swelling mudstone layer and an overlying highly fractured autobrecciated andesite lava containing significant quantities of ground water.

1.はじめに

近年、物理探査法の一つである電気探査の測定及び解析技術が進歩し、電気的物性分布を利用して地下断面の構造を画像化する $\rho_a - \rho_u$ 探査法や比抵抗映像法等の高密度電気探査法が土木地質調査の分野で普及してきた。トンネルを対象とした調査に関するいくつかの適用事例(例えば 横矢他, 1990)が報告され、関西土木学会ではトンネル調査における高密度電気探査技術の適用性に関する検討も行われている(松井, 1993)。高密度電気探査法の中で最も早く探査手法として確立した $\rho_a - \rho_u$ 探査法(Yoshizumi, 1981)は、これまでにいろいろな探査対象に関する事例報告が行われてきた(例えば 吉住他, 1992)が、土被り100m以上の山岳トンネルへの適用例は報告されていない。

今回、日本でもまれに見る超膨脹性泥岩のために難工事となった上信越自動車道日暮山トンネルの、超膨脹性泥岩部周辺の詳細な地質、水文調査において $\rho_a - \rho_u$ 探査法が採用され、泥岩対策の施工検討に資することができた(中村他, 1993)のでこれを報告する。

2.調査の概要

日暮山トンネルは上信越自動車道上の延長2,233mのトンネルで、群馬県・長野県の県境付近、軽井沢の南方約6kmに位置する。本トンネルのほとんどの区間の地質は堅固で施工し易い安山岩であったが、トンネル中央部付近は脆弱な泥岩(約380m)であった。この泥岩の区間では支保構造の破損が出た箇所もあったほど激しい天端沈下、支保工の脚部沈下と水平変位が生じ、泥岩の透水係数が 10^{-7} 程度と低いために透水係数設計前の路線調査からは予想

できなかった大量の湧水があったため、この区間だけで2年10ヶ月を費やす難工事となった。当該地域は群馬県でも有名な巣鴨地すべり地付近にあり(図-1)、北側にある軽井沢地区の取水井戸が近接していたことから、トンネル掘削に伴うトンネル周辺の岩盤や水理の変化が地すべり地や取水井戸に影響を与えるとともに、地すべりがトンネル掘削に与える影響が懸念されたため、再度詳細な地質・水文に関する調査が実施された。この詳細な地質調査は地質、水文、地すべりに関する資料を得る目的で実施され、詳細な地表地質踏査、比抵抗法電気探査($\rho a-\rho u$ 探査)、地表からの垂直ボーリング、坑内からの水平ボーリング、原位置及び室内での地山物性試験が行われた。調査結果を受けて、施工検討委員会等で支保構造を中心とする以降の施工法が決定された。

3. $\rho a-\rho u$ 探査

当該地域のトンネルの土被りが約100mであったことから、地下水に適した比抵抗法電気探査の中から、100m以上の深部探査によく用いられるシュランベルジャー法垂直探査が再調査における物理探査として計画された。本調査では詳細な地質構造を把握することを目的としていたので、数10m以浅の探査に用いられることが多いが垂直探査法よりも断層の位置等を正確に捉えることのできる $\rho a-\rho u$ 探査を採用した。

本調査の電気探査の第1の目的は湧水対策としてのトンネル切羽での水抜き工事の北北西約1.2kmにある軽井沢地区の取水井戸に対する影響を調査することであり、トンネルと取水井戸との間の水理地質構造を把握するために、最初の湧水発生日から取水井戸へ向かうA測線(図-1)の探査を実施した。

第2の目的は切羽前方の地質状況把握であり、トンネル路線上のB測線及び路線から約50m離れたC測線(図-1)の探査を実施した。

各探査測線の仕様は探査対象深度や解析精度を考慮して表-1に示したように設定した。 $\rho a-\rho u$ 探査の測定には、測線から十分離れた位置の電流遠電極と測線上の1点に電流を流し、測線及び電流遠電極と十分離れた位置の電位遠電極に対する測線上の各測点の電位を測定する2極法電極配置を用いた。3測線とも、電流遠電極はA測線の南端から南方約1km、電位遠電極はA測線の北端から北方約1kmに設置した電極を使用した。

$\rho a-\rho u$ 探査には、パーソナルコンピュータでスキャナーやシグナルコンディショナーを制御して測線上の1電流点に対して、測線上の他の49受信点の電位を同時測定する $\rho a-\rho u$ 探査専用システムを用いた。本調査で用いた電極間隔は通常の $\rho a-\rho u$ 探査の5～15倍である上、測点に設置した電極の接地抵抗が高くて電流が流れ難く、測点間隔が広がった時の電位が小さくなる測定に不適な地下構造であった。専用システム付属の出力1.6kwの定電流型送信機では出力が小さく解析に十分なデータが取得できなかったため、本調査に限り出力12kwの定電圧型送信機を用いた。

パーソナルコンピュータに収録した1測線当たり2,450個の測定データは、地形データと共に $\rho a-\rho u$ 解析ソフトに入力し、12種類の4極法電極配置での測定値を合成された後、各4極法測定値を満足する比抵抗構造の再構成画像として作成された(吉住他,1989)。

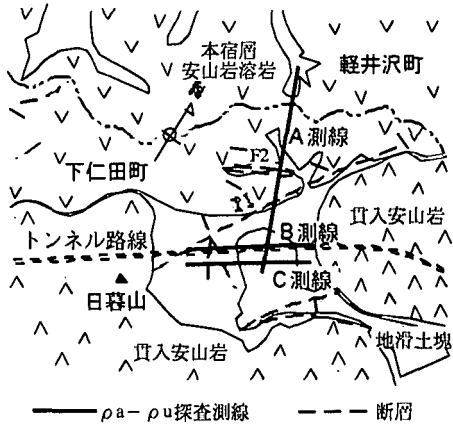


図-1 $\rho a-\rho u$ 探査測線位置と地質平面図

表-1 $\rho a-\rho u$ 探査測線仕様

測線名	方向	測点間隔	測点数	測線長	解析深度	備 考
A	N25E	15m	50点	735m	150m	湧水位置～取水井戸
B	N103E	10m	50点	490m	100m	トンネル路線上
C	N103E	10m	50点	490m	100m	B測線と平行(測線間隔50m)

4. 調査結果

(1) A 測線

A 測線の解析結果を地質図のように画像化した ρu -地質図を図-2(a)に示す。この図では、断層と推定された右落ちの切立った線状構造で地質構造が数個のブロックに分割されていることが捉えられた。この画像は地質踏査の結果と合わせて、図-2(b)のように解釈された。 $\rho a-\rho u$ 探査から推定された F1~F4 の断層の内、F1とF2は地表踏査や航空写真判読で確認された断層と一致した。

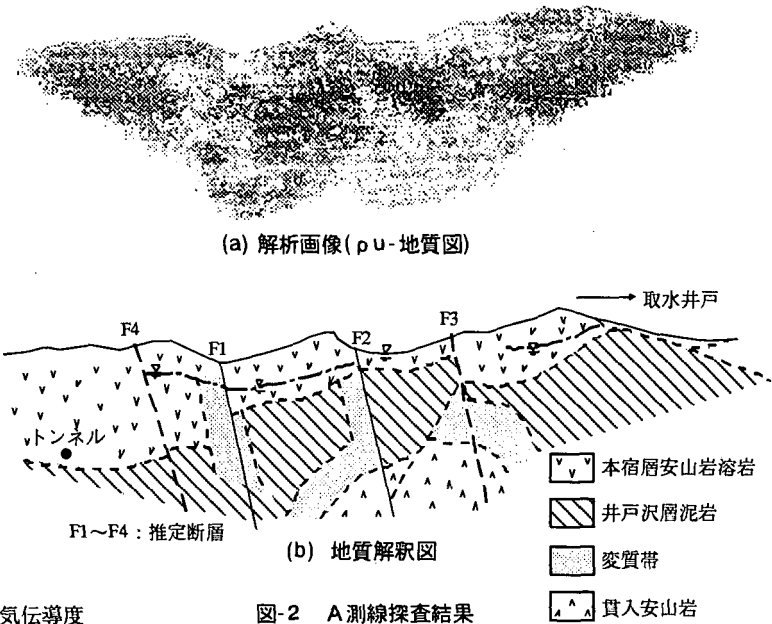


表-2 現地水電気伝導度

測定場所	測定場所	電気伝導度 ($\mu S/m$)	温度 ($^{\circ}C$)	換算比抵抗 (Ωm)
1	下仁田① 沢	149.0	16.1	67.1
2	" ② 沢	122.5	14.5	81.6
3	" ③ 沢	128.3	14.2	77.9
4	軽井沢① 沢	40.0	12.9	250.0
5	" ② 池	60.5	18.5	165.3
6	トンネル切羽①	274	13.1	36.5
7	" ②	269	13.1	37.1
8	" ③	263	13.1	38.0

図-2 A 測線探査結果

表-2に示したようにトンネルのある下仁田側に比べて取水井戸のある軽井沢側の現地水の電気伝導度は低く異なる正常を示していることから、A 測線下の水理地質構造も図-2(b)のように断層によってブロック化され、各ブロック毎に地下水圏が形成されていると考えられた。このことから、トンネル内にて地下水を集中排水しても、取水井戸のある地域への地下水障害は発生しないと判断し、積極的に水抜きを中心とした補助工法を実施した。水抜きを開始して数年間にわたり取水井戸に関する問題は生じなかったので、 $\rho a-\rho u$ 探査から推定した地下水圏の分断が実証されたと考えられる。

(b) B 測線

B 測線の探査結果を解析及び画像化した結果を ρu -地質図を図-3(a)に示す。この画像には、トンネル切羽と反対の測線右端は浅部から深部まで高比抵抗層が広く分布し、測線中央部から切羽のある左側では高比抵抗の表層下には低比抵抗層が厚くトンネル付近まで広がり、高比抵抗層と低比抵抗層の間には切り立った断層状の構造があることが捉えられている。地表踏査、ボーリング調査及びトンネル内の地質から測線右端の高比抵抗は堅硬で間隙率

表-3 岩石試料採取深度

試料 番号	採取孔	採取深度 (m)	岩石名	直径 (mm)	長さ (mm)	比抵抗 (Ωm)	
						自然状態	湿潤状態
1	B-1	40.82	安山岩	51.8	93.05	82.6	90.1
2	B-1	52.55	風化安山岩	51.3	60.75	18.7	19.9
3	B-1	110.62	泥岩	51.3	89.35	9.7	11.9

の低い安山岩に相当し、表層の高比抵抗は間隙水の飽和度が低い崖錐堆積物に対比されると考えられた。中央部から左側下部の低比抵抗層は数10Ωm程度で、表-3に示した試料の比抵抗から泥岩より上位の自破砕安山岩溶岩に対比されると考えられた。以上をまとめると解析画像はと図-3(b)のように解釈され、泥岩の上面深度は路線調査時の推定(図-4(a))よりかなり深く、トンネルは泥岩と上位の自破砕安山岩溶岩の境界付近を通り、堅硬な貫入安山岩部に達する前に大規模な破砕帯を伴うF1断層に遭遇することが想定された。岩盤等級に対応する図-4(c)の支保パターンから判断すると、 $\rho a-\rho u$ 探査から地山の状況は(a)の地質縦断面図から設計されたD~Bよりも悪く、長い区間に渡って続くことが予想されたので、前方を確認する水平ボーリングの結果を確かめながら、悪い岩盤に対応した剛な支保構造を用いて施工が行うとともに、反対の坑口から迎え掘りを行った。

図-4(b)の工事終了後に判明した地質縦断面図と図-4(c)の実際に実施した支保パターンは $\rho a-\rho u$ 探査結果の解釈時から変更点が少なく、 $\rho a-\rho u$ 探査による切羽前方の地山状況予測が有効であったことが実証されたと考えることができる。自破砕安山岩溶岩と泥岩の境界部から大量の湧水があったことから、両岩体の境界の位置を捉えたことは特に有効な結果であったと考えられる。

5. 今後の課題

$\rho a-\rho u$ 探査結果を定性的に解釈することで土被り100m付近までの地質構造を捉えて施工方法の検討に資することができ、山岳トンネルに関する調査へも $\rho a-\rho u$ 探査を適用することが可能なが示されたと考えられる。

$\rho a-\rho u$ 探査法は単に比抵抗構造が画像化されているだけでなく、解析断面を分割した小さなユニット(単位体積)毎に比抵抗 ρu が求められている。探査地域において、比抵抗と透水係数や岩盤強度を求めることができれば、 ρu を利用して有限要素法等を用いた浸透流解析や応力解析を行うことが可能である。今回報告した例では、トンネル

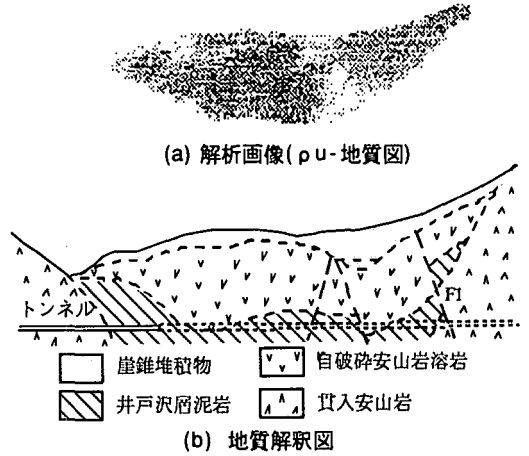
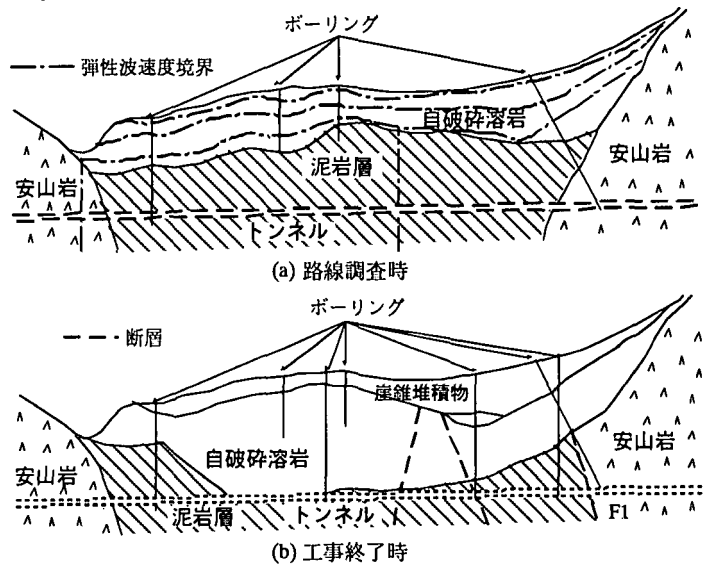


図-3 B測線探査結果



設計	B	C	D1				C2	B				
実施	B	C	D1	D2	E1・2・3			E4	E5	C	B	A

(c) 支保パターン

図-4 工事開始前と工事終了後の地質縦断面図と支保パターン

部分の比抵抗及び地山の物性分布の変化が乏しく、両者の関係を捉えることができなかった。今後は、単に探査結果を地質的に解釈するだけでなく、比抵抗分布を利用した地山物性の定量解析を行えるような方向に研究を進めたいと考えている。

6.おわりに

調査を実施した1990年頃は、 $\rho a-\rho u$ 探査以外の高密度電気探査の適用事例も少なく、数10m以浅の探査に用いられることが多かったため、垂直探査法のかわって $\rho a-\rho u$ 探査を採用することには決断が必要であった。 $\rho a-\rho u$ 探査を含めた詳細な地質調査の結果、次の2点が明らかになった。

- (1)トンネルと隣接地域の取水井戸との間は複数の断層で地質及び水理地質構造が分断され、トンネル内での地下水の集中排水が取水井戸へ影響を与えることは少ないと判断することができるので、積極的水抜き工事を実施することが可能である。
- (2)トンネル切羽前方の地山状況は、自破碎溶岩と泥岩との地質境界及び断層破碎帯のために設計時の想定よりも悪い岩盤であると予想され、水平ボーリングで前方を確認しながら施工を実施すると共に、より剛な支保パターンを採用する必要がある。

工事の完了後上記の2点は妥当性が実証されたと考えられ、 $\rho a-\rho u$ 探査は超膨脹性泥岩を克服した難工事に微力ながら貢献することができたと思われる。

最後に、本報告をまとめるにあたりご指導・ご助言を賜った日本道路公団、青木建設株式会社、住鉱コンサルタント株式会社の関係各位に対し感謝の意を表すとともに、超膨脹性泥岩による難工事を克服された工事関係者の方々に敬意を表します。

参考文献

- 1) 横矢直道、島裕雅、樋渡純也：山岳トンネルにおける電気探査の適用例，物理探査学会第80回学術講演会論文集，p.260～262，1989.
- 2) 松井保：高密度電気探査技術トンネル地盤調査への適用性，地下空間利用シンポジウム1993発表論文集，p.37～48，1993.
- 3) Yoshizumu,E.： $\rho a-\rho u$ prospecting method, 51st. Annual International Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, 1981.
- 4) 吉住永三郎・千葉昭彦・松田陽一： $\rho a-\rho u$ 探査法の探査例ー地盤調査への応用ー，日本応用地質学会平成4年度研究発表会講演論文集，p.157～160，1992.
- 5) 中村良明・羽田勝・木曾伸一：超膨脹性泥岩を克服 上信越自動車道日暮山トンネル，トンネルと地下，Vol.24, No.1, p.7～16，1993.
- 6) 吉住永三郎・柏井善夫・中井卓巳： $\rho a-\rho u$ 探査法における測定及び表示方式，物理探査学会第81回学術講演会論文集，p.191～194，1989.