

併用探査によるトンネル施工ルート の岩盤および湧水予測評価法

中村 真¹・近藤 悦吉²・楠見 晴重³

¹正会員 工修 ㈱ニュージェック 西日本事業本部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内)

²正会員 関西電力㈱ 総合技術研究所 (〒661-0974 尼崎市若王寺)

³フェロー会員 工博 関西大学教授 工学部都市環境工学科 (〒564-8680 吹田市山手町)

山岳部においてトンネルを建設するに際し、事前調査として弾性波探査や比抵抗探査による地質調査が実施されている例が多いが、これらの調査結果に基づく設計は経験的で、度々実際と異なることがある。一方、設計・施工において、断層、破碎帯、帯水層等の地質構造を正確に把握することは安全性や経済性の点からも重要である。本研究では、弾性波速度と比抵抗の測定結果を設計・施工時の有効な指標になると考えられる間隙率と飽和度に変換する地質構造評価手法のシステム化を図るとともに、本システムに用いる弾性波速度および比抵抗の物理定数評価式の妥当性を、岩盤ブロックを用いた室内試験で検証した。さらに、既往のトンネル経過地点の地質構造評価に適用し、掘削実績と比較することによって適用性の検証を行った。

Key Words : elastic wave, resistivity, conversion analysis, saturation, porosity

1. はじめに

トンネル等の岩盤を対象とした地下構造物の建設における地質調査として、弾性波探査や比抵抗探査が実施されている例が多いが、これらの調査結果に基づく設計は経験的で、度々実際と異なることがある。蓮井ら¹⁾は、近年地盤内部の可視化技術としてトモグラフィーに関する研究が盛んに行われているが、掘削実績による検証にまで至らず、一方的な推定に留まるものが多いと述べている。このような背景の中、菅原ら²⁾はジオトモグラフィー手法を実用的なものとするためには、条件の異なる多くのサイトに適用し、結果の評価と手法の改良を繰り返していく必要があると指摘する中で、弾性波トモグラフィーと比抵抗トモグラフィーの2種類の手法について、その適用性を検討するとともに両者を併用することの有効性について指摘している。また、横井ら³⁾は地下坑道における地質観察結果とレーダトモグラフィー、比抵抗トモグラフィー、弾性波トモグラフィー等の物理探査結果の比較検討を行って、いずれの手法とも地質構造評価に有効であることが確認され、さらに今後より体系的にさまざまな手法を併用することによって、より高精度な解析が可能となることが期待されると述べている。

併用探査による評価として最近の研究では、比抵抗と弾性波速度を組み合わせて解釈しようとする手法が提

案されている。松井ら⁴⁾は、岩盤の比抵抗と弾性波速度がそれぞれ間隙率と一義的な関係であることを用いて、比抵抗検層データから岩盤の弾性波速度を換算し、これを速度検層データと比較している。さらに、これらの関係式に基づいて、比抵抗高密度探査結果から得られる換算弾性波速度による地山区分手法を示している。また内浦ら⁵⁾は、比抵抗高密度探査、弾性波探査、岩石試験により得られる物性値を用いて、理論的に上記の各パラメータの定量値を算出し、これらの値を用いて比抵抗を岩盤の弾性波速度と間隙率に換算している。

著者らは、岩盤の含水状況に大きく左右される比抵抗に関して、その関係を定量的に明らかにするために、種々の岩石における比抵抗と間隙率、飽和度の関係を室内試験で把握し、その評価手法を確立するとともに、現地で得られた弾性波速度と比抵抗の測定結果を間隙率と飽和度に変換する地質構造評価手法のシステム化を図った⁶⁾。

本論文では、著者らが提案する地質構造評価手法の概要を述べるとともに、本システムで用いる比抵抗および弾性波速度の物理定数評価式(以下、変換式と称する)の妥当性を、岩盤モデルを用いた室内試験により検証した結果について述べる。さらに、本システムを既往のトンネル経過地点の地質構造評価に適用し、掘削実績と比較することによって適用性の検証を行った結果を報告する。

2. 地質構造評価システムの概要

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{F \cdot \rho_w} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_0} \quad (3)$$

原位置岩盤における弾性波速度と比抵抗とは異なる物理量ではあるが、岩盤の間隙率や水の飽和度をパラメータとして関係付けることができる。弾性波速度については式(1)に示す Wyllie(1956)の式が、比抵抗については式(2)に示す Archie(1941)らの式が一般に知られている。

$$\frac{1}{V_p} = \frac{(1-\phi)}{V_m} + \frac{\phi \cdot Sr}{V_f} + \frac{\phi \cdot (1-Sr)}{V_a} \quad (1)$$

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot \phi^m \cdot Sr^n \quad (2)$$

ただし、

V_p : 岩盤の弾性波速度 (km/sec)

V_m : 岩石実質部の弾性波速度 (km/sec)

V_f : 間隙水の弾性波速度 (km/sec)

V_a : 空気間隙の弾性波速度 (km/sec)

ρ : 岩盤の比抵抗 ($\Omega \cdot m$) で比抵抗探査で求めたもの

ρ_w : 間隙水の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

a, m, n : 地質の違いによる係数

ϕ : 間隙率, Sr : 飽和度

Archie らの式については、最近の研究^{7),8)}によれば、この式は砂層ではよく適合するが、岩盤ではあまりよく適合しないとされているので、本システムでは式(3)の並列回路モデルを採用するものとした⁹⁾。

ただし、

F : 地層比抵抗係数 ($a \cdot \rho \cdot \phi^m \cdot Sr^n$)

ρ_c : 粘土等による間隙中の導電性粒子の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

ρ_0 : 岩石実質部の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

式(1)および式(3)は、間隙率 ϕ と飽和度 Sr を変換して、ひとつの岩盤要素 (小要素に分割したセル) についてそれぞれ次の連立した方程式として表される。

$$V_p = f(\phi, Sr) \quad (4)$$

$$\rho = g(\phi, Sr) \quad (5)$$

したがって、地山の比抵抗と弾性波とが既知であれば、式(4)と式(5)から逆解析 (最適化手法) により、未知の間隙率と飽和度を求めることができる。

図-1 に変換手法による地質構造評価システムのフローを示す。各セルごとに1対の比抵抗と弾性波速度が求められると、変換式の選択と別途室内試験により変換パラメータの設定を行い⁶⁾、変換解析と称する逆解析 (最適化手法) により間隙率と飽和度が得られる。変換式は、一般的な岩盤については式(1)と式(3)を用いるが、亀裂の連続性が顕著で岩盤基質部が分断された岩盤には後述する岩盤モデルによる室内試験の結果、式(1)は適応しないことが認められたため、別途考慮する必要がある。

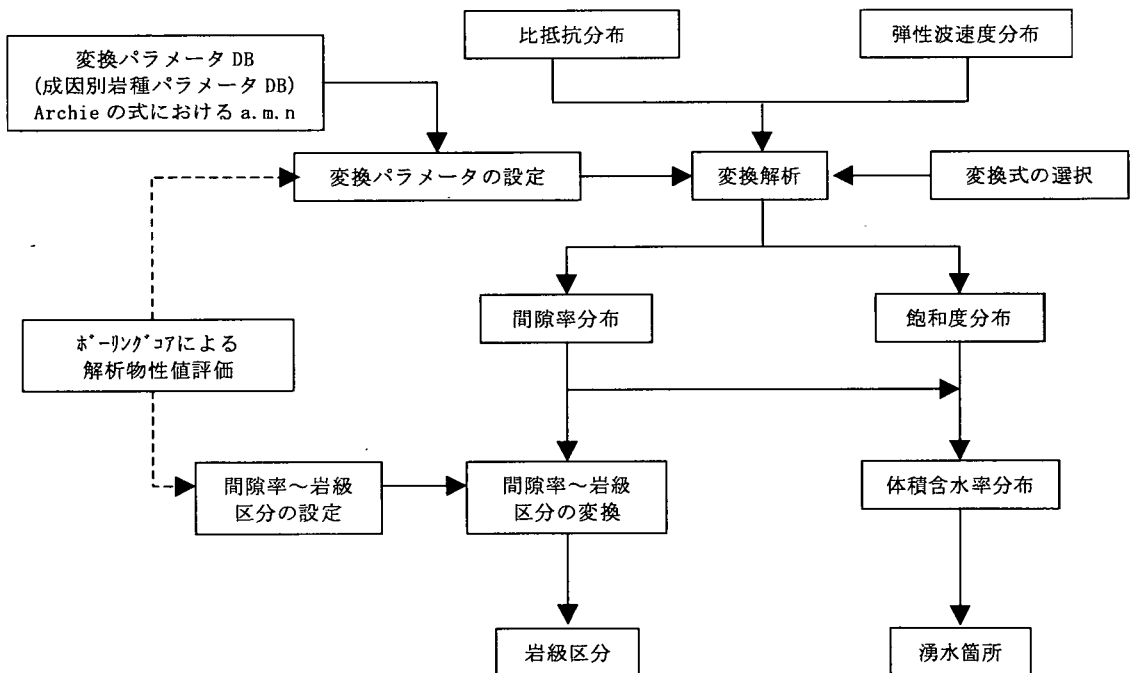


図-1 地質構造評価システムのフロー

変換パラメータの設定は、検討地点の岩石コアから求めるのが望ましいが入手不可能の場合には、変換パラメータデータベースと呼ぶ既存の試験結果に基づくデータベースにより対応する岩種のパラメータを用いることができる。

変換解析によって求められた間隙率分布と飽和度分布のうち、間隙率分布においては、ボーリング等で岩級分布が既知の位置で間隙率から岩級区分への変換のしきい値を決定して、掘削地点の岩級区分を求める。

一方、間隙率と飽和度の積から体積含水率を求め、体積含水率の急変箇所から湧水箇所を推定する。

以上の手順により、それぞれ単独かつ定性的に評価されていた弾性波探査や比抵抗探査結果を、連立することによって設計、施工時に必要な地山特性として定量的に把握することが可能となる。

3. 岩盤モデルによる変換式の妥当性検証

本システムで用いる変換式は弾性波速度については式(1)を、比抵抗については式(3)を採用している。ところがこれらの式は、砂層といった粒状体地盤において提案された評価式であるため、本研究で対象とする亀裂性岩盤への適用性については明らかにされていない。そこで、間隙率や飽和度が異なる岩盤モデルの比抵抗および弾性波速度を測定するため、模擬岩盤として間隙率が調整可能な花崗岩ブロックや碎石を用いた実験装置を作製した。実験用岩盤モデルは、実規模岩盤の平均的な比抵抗と弾性波速度を検討するため、できるだけ大きい方が望ましい。しかし、効率的に岩盤モデル製作を行う必要があったので、鈴木らの検討¹⁰⁾等を参考にし、岩盤モデルの領域を1m四方の立方体とした。比抵抗測定を行う場合の電極配置は、本研究では岩盤モデル内を一樣電界とするため、図-2に示すように電流電極を1m×1mの銅板による面電極とした。電位電極は、ブロックに埋め込んだ銅板による点電極である。

岩盤のモデル化に際しては、硬岩モデルとして花崗岩を整形して作製したブロックを積み上げ、ブロック間の隙間を0mm（亀裂はあるが岩盤基質部は接触、間隙率3%）と2mm（岩盤基質部は分断、間隙率6.5%）に設定し、隙間の大小をモデル化した模擬亀裂として扱った。間隙率が大きい（40.2%）軟岩モデルとして最大粒径25mmの碎石（粘板岩）を用いて十分締め固めた。

不飽和状態の岩盤モデルは、兼間の実験装置¹¹⁾を参考に、図-3(a)に示すような上面から散水する方法と、硬岩モデルについては図-3(b)に示すような飽和間隙中に気泡を注送して再現する方法を試みた。気泡発生装置は、エアコンプレッサー、自在ホース、空気量調整バルブ、補助エアータンク、気泡発生器具により構成した。気泡発生器具には、数種類の市販品（観賞魚の水槽用）

を使用した結果、気泡発生状況が均等で良好なセラミックストーン（φ20mm、長さ20cm）を採用した。これを10列に分岐し、1列につき4本ずつ実験装置の底部に配置した。散水装置は、市販の家庭用散水ノズルを25個等間隔に設置し、ホース長さを均一にするなど極力均等に散水できるように配慮した。

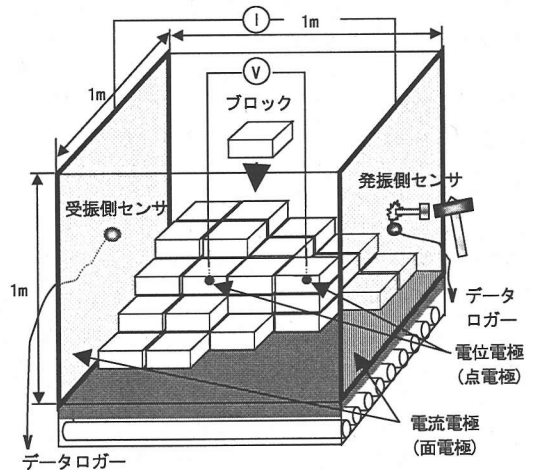
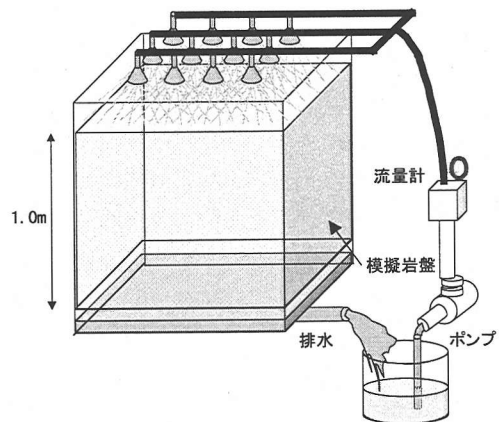
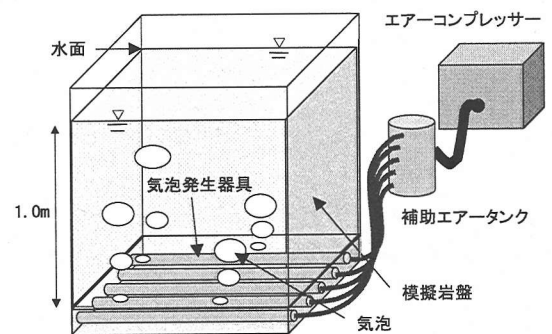


図-2 岩盤モデル試験の測定配置



(a) 散水による方法



(b) 気泡による方法

図-3 不飽和状態の岩盤モデル

弾性波速度は図-2 に示す岩盤モデルの両端に圧電型加速度センサー（感度 100mV/G, 共振周波数約 30kHz）を設置し、一端をハンマーで打撃して初動の到達時間から求めた。

比抵抗および弾性波速度測定時の岩盤モデルは、インタクト部（ブロック等）を飽和状態とし、気泡発生装置または散水装置にて模擬亀裂の飽和度を種々変えた。各飽和度では 10 回ずつ測定してその平均値を記録した。

岩盤モデル実験結果を図-4 に示す。各ケースの間隙率は 100%飽和から 0%にした時の排水量から算定し、表面水は無視した。図中の理論曲線は、花崗岩および碎石の基岩である粘板岩のパラメータを、先に確立した室内試験手法⁹⁾により評価して変換式により求めたものである。各物性値を表-1 に示す。なお、ここでは式(3)中の粘土等による間隙中の導電性粒子は考慮していない。花崗岩ブロックのケースでは、全体的に間隙が小さいため、気泡実験と散水実験で重複した飽和度域での測定ができた。2つの手法による不飽和状態のモデル化では、散水実験の方が ρ / ρ_w 値が大き目に出る結果が得られた。岩盤亀裂内の浸透水のモデル化としては、亀裂内の一部分を流れると考えた場合、散水実験の方が現実に近いと考えられる。散水実験結果より、ブロック間隔 2mm の場合では、飽和度の低い領域での ρ / ρ_w 値の増加傾向が認められ、式(3)と整合する。碎石においても若干ながら飽和度が低くなるに伴い、 ρ / ρ_w 値の増加傾向が認められる。

弾性波速度測定では、飽和状態での測定値は概ね安定しているが、不飽和状態での測定では、気泡発生時や散水時のノイズが大きいのに加えて、弾性波振幅の減衰が激しいため、伝播時間の読み取りには困難を極めた。

したがって、各ケースの各飽和度において 10 回ずつ測定して、弾性波速度のバラツキについて検討し、極端に異なる値がないことを確認した上で平均値で評価することにした。

花崗岩ブロックの場合では、ブロック間隔が 2mm のケース（図-4(1)(b)）では、飽和状態から不飽和状態になって弾性波速度は大きく低下し、以後飽和度の減少と共に若干ながら微減する傾向が見受けられる。間隔 0mm のケース（図-4(1)(a)）では、気泡実験および散水実験ともに急激な減少はなく、飽和度の減少に伴い弾性波速度の微減傾向が認められた。

実験結果と理論曲線の比較より弾性波速度についてはブロック間隔が 2mm のケース、すなわち岩盤基質部が亀裂で完全に分断されている場合を除き概ね式(1)が、比抵抗については全ケースとも概ね式(3)が適用可能であることが分かった。

表-1 理論曲線の物性値

岩種	花崗岩	粘板岩
	変換パラメータ	
a	4.9	2.0
m	0.28	0.50
n	0.53	1.15
岩石実質部の比抵抗 ρ_0	5000 $\Omega \cdot m$	500 $\Omega \cdot m$
岩石供試体の弾性波速度 V_m	5000m/s	3200m/s
間隙水の弾性波速度 V_f	1500m/s	
間隙空気の弾性波速度 V_a	340m/s	

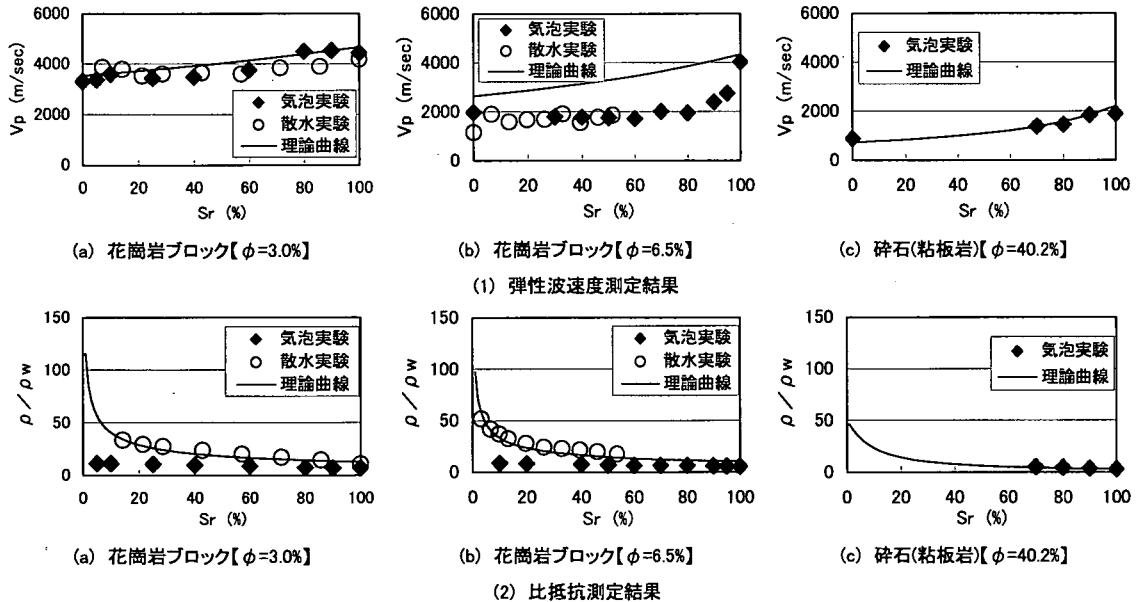


図-4 岩盤モデル実験結果

4. 既往トンネルにおける掘削実績との比較

本研究で提案する地質構造評価システムの妥当性を検証するために、既往のトンネルの掘削に際して地表面から実施された弾性波探査と比抵抗探査結果を用いて変換手法を用いて岩級評価を行い、掘削実績との比較を行った。

検討対象としたのは、S地点における水力発電所導水路トンネルとM地点における火力発電所放水路トンネルである。S地点のトンネル標準断面は内径2.4mの円形、M地点は幅7m、高さ7mの馬蹄形で、掘削工法は両地点ともにNATMである。S地点の岩種は古第三紀の流紋岩、M地点の岩種は白亜紀末期の花崗岩および古生代末期から中生代初期の斑レイ岩である。現地では、地表からの屈折法弾性波探査とS地点では電磁探査の一種であるCSA・MT (Controlled Source Audio-frequency Magneto-Telluric) 探査が¹²⁾、M地点では高密度電気探査が実施された。検証は、S地点では全長約3kmのうちCSA・MT探査を実施した500m区間について、M地点ではトンネル全区間の2450mで実施した。

検討に際して、図-1のフローにしたがったトンネル断面近傍で実施されたボーリングコアを用いた室内試験により変換パラメータを算出した。各地点のパラメータを表-2に示す。

S地点で実施した変換解析によって得られた体積含水率分布と湧水量実績を図-5に示す。湧水量実績には、トンネル掘進時の切羽での湧水量と、坑口で測定した各

表-2 各地点の変換パラメータ

地点	S地点	M地点
変換パラメータ		
a	0.01	0.1
m	2.5	1.1
n	2.2	2.2

切羽位置でのトンネル全長の総湧水量を示す。この図より、体積含水率の急変箇所、すなわち透水層と不透水層の境界と湧水箇所が比較的一致し、体積含水率の変化が湧水箇所の推定に有効であることが確認された。

次に、M地点で実施した変換解析によって得られた岩級分布と実績岩級区分を図-6に示す。変換解析によって得られた間隙率から岩級区分への変換においては、トンネル経過地点で実施された、ボーリングによる岩級分布と変換解析による間隙率分布より、凡例に示す基準値で岩級区分を評価した。変換解析との比較では、岩級分布は地質観察結果とは概ね一致している。しかし、

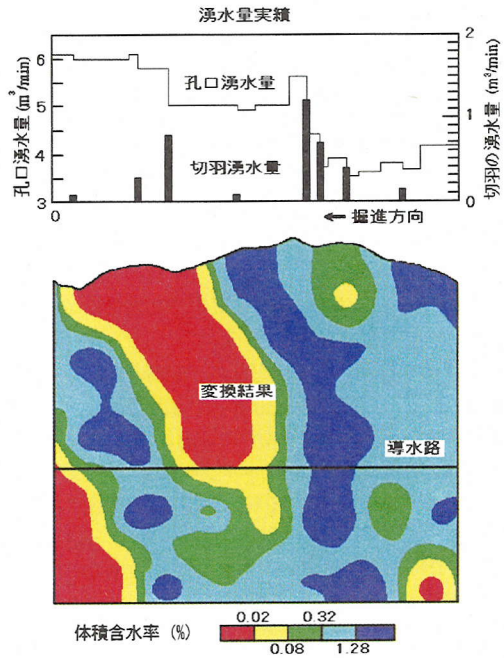


図-5 変換手法による湧水箇所予測(S地点)

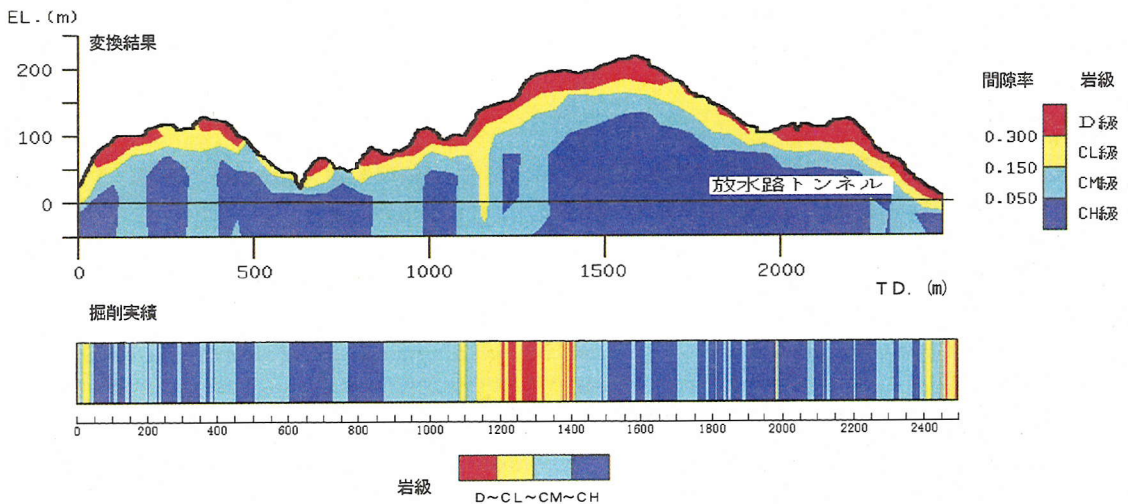


図-6 変換手法による岩級分布と掘削実績との比較(M地点)

TD.1100~1400m 付近では実績岩級区分の方が少し悪いように区分された。

地質観察による岩級判定では、湧水が顕著であると岩級を1ランク下げて評価することが多い。ところが、変換解析による岩級区分判定基準では、湧水の影響が考慮されていないため、岩級を過大評価することになったものと考えられる。したがって今後湧水の影響を加味した判定基準についても検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では、トンネル等の地下構造物の建設に際して問題となる地質不良帯や湧水箇所を、弾性波探査結果と比抵抗探査結果を用いてより精度よく推定する手法を構築し、そのシステム化を計った。

本システムで用いる変換式の妥当性を評価するために実施した岩盤モデルの室内試験では、弾性波速度については岩盤基質部が亀裂で完全に分断されている場合を除き概ね式(1)が、比抵抗については、間隙率の大小に関わらず、概ね式(3)が適用可能であることがわかった。

本システムを用いて、既トンネル経過地点の地質構造評価を実施し、実績岩級区分および湧水箇所と比較したところ概ね一致し、本システムの適用性が検証できた。これらの指標を用いてトンネル支保設計を行うには、固結度や応力状態を考慮する等、検討する課題は多いが、本システムは設計・施工段階において断層、破碎帯、帯水層等の地質構造を事前に把握するのに有効なツールとなれば幸いである。

謝辞：本研究を実施するにあたり、電力中央研究所、楠建一郎 上席研究員には貴重な御意見と御指導を賜りました。謹んで感謝いたします。

参考文献

- 1) 蓮井昭則, 世一英俊, 北村晴夫, 中川浩二: 弾性波・電磁波・比抵抗トモグラフィによる地盤状況の推定, 土木学会論文集, No.462/VI-18, pp.141~150, 1993.
- 2) 菅原捷, 神尾重雄, 斎藤秀樹, 島裕雅: 岩盤調査におけるジオトモグラフィの適用性の検討, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.146~150, 1989.
- 3) 横井浩一, 野口義文, 長久, 浜辺修二: 釜石鉱山における地下空間利用と物理探査, 物理探査, 第44巻, 第6号, pp.350~361, 1991.
- 4) 松井保, 朴三奎: 比抵抗高密度探査データによる地山区分手法の研究, 第29回土質工学研究発表会, pp.153~154, 1994.
- 5) 内浦慎一, 谷口親平, 松井保, 朴三奎: 比抵抗高密度探査結果の定量的評価によるトンネル地山区分手法について, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.1~6, 1994.
- 6) 近藤悦吉, 大友譲, 中村真: 地質構造調査・評価法のシステム化, 電力土木, No.293, pp.79~83, 2001.
- 7) 千葉昭彦, 熊田政弘: 花崗岩及び凝灰岩試料の比抵抗測定, 物理探査, 第47巻, 第3号, pp.161~172, 1994.
- 8) 岩本宏, 熊田政弘, 飯博行: 花崗岩の比抵抗および間隙水との関係, 土木学会第50回年次学術講演会, pp.64~65, 1995.
- 9) 西方卯佐男, 大友譲, 小里隆孝, 澤井清人: 比抵抗及び弾性波探査結果を用いた岩級区分の算定について, 土木学会第51回年次学術講演会, pp.13~14, 1996.
- 10) 鈴木浩一, 東貞成, 志田原巧: 比抵抗トモグラフィ法の地下水流動のモニタリングへの適用, 電力中央研究所報告, No.U97065, 1998.
- 11) 兼間強: 不完全飽和状態の含水砂試料を伝搬する弾性波速度と減衰に及ぼす空気飽和度の影響, 物理探査, Vol.50, No.3, pp.229~245, 1997.
- 12) 西方卯佐男, 打田靖夫, 大友譲: 複数の物理探査結果を用いた地質構造の定量的評価法の試み, 電力土木, No.275, pp.75~80, 1998.

(2002.7.8 受付)

THE PREDICTIVE ESTIMATION TECHNIQUE OF ROCK MASS AND SPRING WATER ON THE TUNNELING ROUTE BY COMBINATION SURVEY

Makoto NAKAMURA, Ethukichi KONDO and Harushige KUSUMI

In case of constructing the mountain tunnel, geological survey such as seismic prospecting and electrical prospecting is often carried out. However, the support design based on these prospecting results is not quantitative, so it is often differ from actual geological condition. The other side, it is important from safety and economical efficiency to grasp accurately the geological condition beforehand in design and construction. In this paper, the systematization of geological evaluation technique that converted from seismic velocity and electric resistivity to porosity and saturation was discussed. As the results, the evaluation system of rock mass using the both of seismic velocity and electric resistivity are proposed, and it is recognized that this system can be applied on the in-site rock mass site.