

比抵抗・弾性波速度の変換解析による トンネル建設時の岩盤評価法

楠見 晴重¹・高橋 康隆²・中村 真³

¹フェロー会員 関西大学教授 工学部 都市環境工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目3-35)
E-mail: kusumi@ipcku.kansai-u.ac.jp

²正会員 (株) 大日コンサルタント (前 関西大学大学院生) (〒501-0412 岐阜県本巣市長屋95-4)

³正会員 (株) ニュージェック (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東2-3-20)

トンネル建設における地質調査では弾性波探査と電気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。設計、施工段階においては、断層、破碎帯等の地質構造を事前に把握することは重要である。筆者らは、トンネルを計画・設計する際に事前調査として、よく利用される弾性波探査と電気探査に着目し、弾性波速度と比抵抗値を間隙率と体積含水率に変換する解析手法の構築を試みた。ここでは、本解析手法を変換解析と称する。そして、トンネル施工における各種の施工記録や原位置の岩盤状態と、変換解析結果である間隙率、体積含水率を比較することで、変換解析の有用性を検証し、さらには、トンネルの支保設計への適用性について検討を行った。

Key Words : tunnel construction ,conversion analysis, seismic velocity, electric resistivity

1. はじめに

トンネルや地下発電所の建設においては、岩盤が構造物の一部であるという考えから岩盤構造物のより合理的かつ効率的な施工が要求されている¹⁾。このため、岩盤の工学的特性を事前に把握しておくことは重要な課題である。事前調査には調査横坑内における地質調査、不連続面調査、初期地圧測定、原位置透水試験、各種原位置試験などがあるが、これらすべての調査は、点や線の情報しか得ることができない。これらの調査に対して、非破壊的かつ連続的に地盤内部の状況を把握する手法に物理探査がある。弾性波探査や電気探査で代表される物理探査は、採鉱部門で発達してきた手法であり、コンピュータの発達とともに、飛躍的に精度が向上したことから、現在、土木工学分野ではトンネルや斜面などの事前調査において盛んに利用されている。近年では、複数の物理探査を組み合わせた応用的な活用がなされている。複数の物理探査を組み合わせて利用することの利点としては、単独の探査では解明できなかった地質構造や事象を明らかにすることができる等がある²⁾。数ある土木構造物の中でもトンネル建設においては、安全性やコストの面から岩盤の工学的性質などを事前に把握しておくことが重要である。このことから、弾性波速度と比抵抗を求める物理探査手法が、併用して行われる事例がみられる³⁾。

筆者らは、トンネルを計画・設計するにあたって、事前調査として行われている弾性波探査と電気探査に着目

し、原位置で得られた弾性波速度分布・比抵抗分布を間隙率分布・体積含水率分布に変換する変換解析⁴⁾のシステム化を試みた。

変換解析の一連の流れは、まず弾性波速度と間隙率・飽和度、比抵抗と間隙率・飽和度、それぞれの関係を定量的に把握するための室内試験を行い、その結果からそれぞれの関係式を求める。そして、得られた関係式を用いて原位置での弾性波速度・比抵抗の測定結果を、間隙率・飽和度に変換することが可能となる。

とくに、ここでは、実際のトンネル建設において行われた弾性波・比抵抗複合探査結果を用いて変換解析を行い、トンネル施工記録と比較することで、変換解析の有用性を検証した。さらには、トンネル建設における支保設計への適用性についても検討した。

2. 変換解析概要

弾性波速度と比抵抗は、地盤を評価する上で異なる物理量として扱われているが、これら二つの物理量はそれぞれ飽和度と有効間隙率との関係を有することから、飽和度と有効間隙率をパラメータとして弾性波速度と比抵抗を関係付けることができる。この関係を利用して、原位置で行われた弾性波速度と比抵抗の探査結果を用いて、間隙率と体積含水率に変換する変換解析のシステム化を図った。

変換解析に用いる弾性波速度と間隙率・飽和度の関係式には、Wyllie⁵⁾の式である次式を用いた。

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

ここで、 V_p ：岩盤の弾性波速度、 V_m ：供試体の弾性波速度、 V_f ：間隙水の弾性波速度、 V_a ：間隙空气の弾性波速度、 ϕ ：間隙率、 Sr ：飽和度である。

また、比抵抗と間隙率・飽和度の関係には、室内試験より求めた、我々の提案する実験式を用いた⁶⁾。なお、この詳細は、3. (2)に述べる。

$$\rho = m \cdot Sr^{-B} \cdot \phi^{-n} \quad (2)$$

ここで、 ρ ：比抵抗値、 m 、 n 、 B ：地質の違いによる係数である。

このように式(1)および式(2)は、岩盤のボーリングコアについて、間隙率と飽和度をパラメータとして、以下に示す式(3)および式(4)で示すことができる。

$$V_p = f(\phi, Sr) \quad (3)$$

$$\rho = g(\phi, Sr) \quad (4)$$

したがって、弾性波速度および比抵抗が既知であれば、間隙率と飽和度を含む2変数の連立方程式が導かれ、これを解析的に解くことで間隙率と飽和度を求めることができる。

変換解析で用いる弾性波速度分布は、高密度弾性波探査やジオトモグラフィーといった手法により求められる。比抵抗分布は、EM探査もしくは高密度電気探査によって求められる。このように二種類の探査を行うことで、各計測点で一对の比抵抗と弾性波速度を求めることができる。

一对の比抵抗と弾性波速度を用いて変換解析を行う前には、式(1)における供試体の弾性波速度(V_m)、間隙水の弾性波速度(V_f)、間隙空气の弾性波速度(V_a)と、式(2)における地質の違いによる係数(m 、 n 、 B)を設定する必要がある。ここではこれらの数値を変換パラメータと称する。これらの変換パラメータは、原位置で得られた供試体を用いて、室内実験を行うことで設定することができる。

設定された変換パラメータを用いて、各計測点で変換解析を行うことで対象岩盤全体の間隙率分布、飽和度分布、体積含水率分布を求めることができる。求められた間隙率分布からは、既存の間隙率と岩盤区分の関係⁷⁾を用いることで、間隙率から岩級区分等への変換を行い、掘削地点の地山区分を行うことができるものと考えられる。また、体積含水率からは、体積含水率の急変箇所より湧水の推定等が可能と考えられる。

変換解析は、それぞれ単独で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間隙率と体積含水率に変換することで、設計・施工時に必要な地山特性として、より定量的に評価することができる手法である。

3. 変換パラメータの設定

(1) 室内実験概要

変換パラメータは、対象地点におけるボーリングコア供試体を用いた室内実験により、弾性波と比抵抗を測定することで設定する。室内実験には、我々が開発した比抵抗および弾性波同時測定システム⁸⁾を使用した。

図-1は、今回使用した同時測定システムの弾性波計測システムの構成を示したものである。測定システムの構成に関しては、(a)信号発生器、(b)高速電力増幅器、(c)圧電素子、(d)比抵抗および弾性波の同時測定器、(e)プリアンプリファイア、(f)ディスクリミネータ、(g)オシロスコープである。信号源である信号発生器ではパルス波を発生し、その信号は増幅器である高速電力増幅器により増幅され、供試体の一側面に取り付けた圧電素子に送られる。その信号により、圧電素子を振動させ、他方の側面に取り付けた圧電素子で信号を受信する。その受信された波形は、プリアンプリファイアおよびディスクリミネータなどで増幅し、オシロスコープに表示される。また表示された波形は、オシロスコープによりファイルに書き込み、初動を読み取ることで到達時間を求めて弾性波速度を計算する。

図-2は、今回使用した比抵抗および弾性波の同時測定器を示している。これは、従来の比抵抗測定器に使用していたGS社(Geoscience社)式サンプルホルダー⁹⁾に、側面から電圧素子を接触させ、供試体の弾性波速度および比抵抗の同時測定を可能にするために開発した測定器である。比抵抗測定には、小型デジタルスタッキング式比抵抗計を用いた。電極配置は、 C_1 、 C_2 を電流電極、 P_1 、

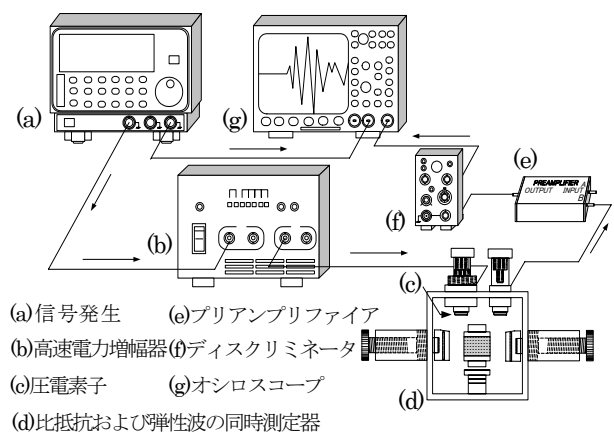


図-1 弾性波計測システム

P_2 を電位電極として岩石供試体の左右に銅メッシュシートおよび、電極と岩石供試体の間に生じる接地抵抗を低減させるために、硫酸銅溶液 (0.1N) を含んだ濾紙を交互に挟んでいる。

(2) 変換パラメータの設定手法

変換解析に用いる比抵抗の関係式である式(2)は、室内実験の測定結果から比抵抗と飽和度、比抵抗と有効間隙率、それぞれの関係を求めて導いた式である。比抵抗には、飽和度が減少するにしたがい指数関数的に増加する関係があることから、次のような関係式が得られる。

$$\rho = A \cdot S_r^{-B} \quad (5)$$

ここで、 ρ : 岩石の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)、 A : 飽和状態の比抵抗 ρ_s ($\Omega \cdot m$)、 B : 指数である。

飽和状態での比抵抗と有効間隙率の関係からは、次式に示すような関係式が得られる。

$$A = \rho_s = m \cdot \phi^{-n} \quad (6)$$

ここで、 m : 係数、 n : 指数

よって、これらの関係を求めることにより、式(2)の変換パラメータである B , m , n を設定することができる。弾性波速度の関係式である式(1)の変換パラメータは、後述する図-5 に示すように、室内実験により得られた弾性波速度をプロットした点と、Wyllie の式より求めた理論曲線に良い相関性があることから設定することができる。

4. トンネルにおける施工実績との比較

(1) トンネル概要

対象とした地点は、TBM 導坑先進切掘り工法が採用されたトンネルである。トンネル周辺の岩盤は、花崗岩が主体であり、一軸圧縮強度は、新鮮なもので約 100MPa、

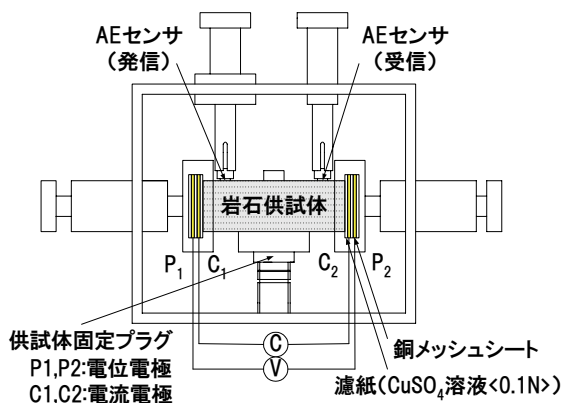


図-2 比抵抗および弾性波の同時測定器

風化したもので約 10MPa である。弾性波・比抵抗複合探査の対象地点は、路線選定のために比抵抗探査による事前調査が行われた西坑口から 200m 付近である。表-1 には、TBM 導坑の支保パターンの詳細を示す¹⁰⁾。同地点では、調査結果による TBM 支保の設計パターンと実施パターンが整合せず、むしろ支保工の軽重が逆転している状況が認められ、これらの差についての検討を行うための TBM 坑側壁からの高密度弾性波探査および EM 探査¹¹⁾ が 200m 区間にわたって実施された。今回は、これら複合探査結果を用いた変換解析を行い、施工記録との比較を行うことで、変換解析の有用性、さらには支保・設計への適用性について検討を行った。なお、EM 探査においては、鋼製支保工の影響をあまり受けない測定周波数の高い 364~45.5kHz のデータを適用した。

(2) 変換パラメータの設定

今回対象とした地点では、得られたボーリングコアの本数が少なかったことから、当地点におけるパラメータを設定するのに、我々が過去の研究で集積したデータベースを用いた¹²⁾。図-3 は、データベースを用いて花崗岩における飽和時の比抵抗と有効間隙率の関係を近似曲線として表したものに、ボーリングコアの測定結果を併記したものである。同図より、ボーリングコアの測定結果とデータベースから得られた近似曲線は、採取地点が違ってもほぼ一致しているのが認められた。よってこの近似曲線から、変換パラメータである m , n を設定した。

図-4 は、二つのボーリングコアを用いた室内試験から得られた比抵抗と飽和度の関係を示したものである。図

表-1 TBM 導坑の支保パターン

支保パターン	支保間隔 (mm)	吹付モルタル(pf入り)	鋼製リング支保工
C I	1500	上部120° 厚さ=20mm	なし
C II	1500	上部180° 厚さ=20mm	H-100mm
D I	1500	上部180° 厚さ=30mm	H-100mm

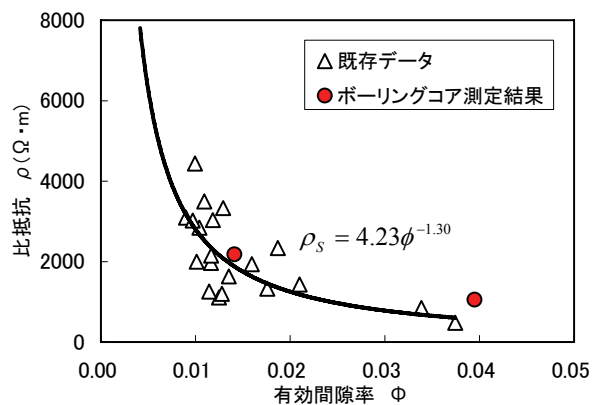


図-3 飽和時の比抵抗と有効間隙率の関係

からは、飽和度が減少するにしたがって、比抵抗が指数関数的に増加していることが確認できた。このことから、二つのボーリングコアの近似曲線を求め、この二つの近似式の B の値を平均することで、変換パラメータ B を設定した。ただし、上述したように同一供試体から m , n , B を求めているので、式(2)に各変換パラメータを適用した場合、図-4の曲線とは若干異なる。これに関しては、供試体数に限りがあることが、この誤差が生じる原因である。しかし、 $\phi=0.0141$ の供試体においては良く一致していることから、大きな問題とはならないと考えられる。

図-5 は、弾性波速度と飽和度の関係を示したものである。図は、 $\phi=0.0141$ のボーリングコアの測定結果に、Wyllie の式より求めた理論曲線を併記したものである。まず、水と空気の一般的な弾性波速度から V_f , V_a を設定し、測定値と理論曲線の相関性が良いように V_m を設定した。なお、 $\phi=0.039$ のボーリングコアに関しては、弾性波速度を測定することができなかった。

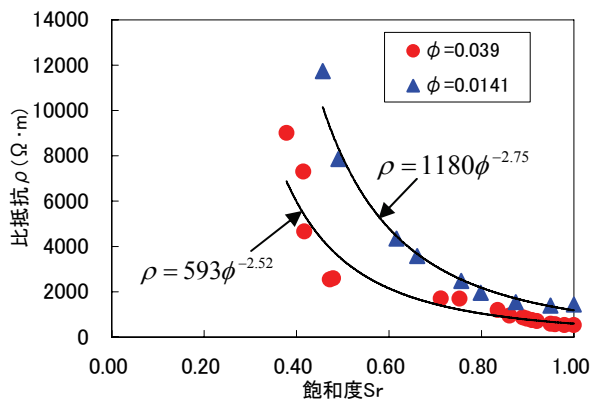


図-4 比抵抗と飽和度の関係

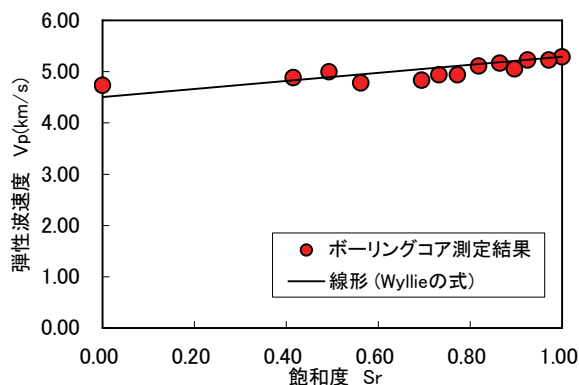


図-5 弾性波速度と飽和度の関係

表-2 変換パラメータ

変換パラメータ	m	4.23
	n	1.30
	B	2.63
岩石実質部の弾性波速度	V_m	5500m/s
間隙水の弾性波速度	V_f	1500m/s
空気の弾性波速度	V_a	330m/s

(3) 変換結果と穿孔エネルギーの比較

図-6 は、変換結果である間隙率分布と穿孔エネルギーを比較したものである。表-2 に、上記の室内試験から求めた変換解析に用いる変換パラメータを示す。穿孔エネルギーとは、単位体積あたりの岩盤を穿孔するのに要したエネルギーを示しており、硬質な岩盤ほど穿孔エネルギー値は大きな値を示す特徴を有する¹³⁾。穿孔エネルギーは、直接坑壁を穿孔したものである。穿孔エネルギーを算出するには、次の算出式が用いられているが、ここでの E_d の値は、建設現場から提供されたものを使用した。

$$E_d = \frac{E_p \times C_p}{V_d \times S} \quad (7)$$

ここで、 E_d : 穿孔エネルギー (J/cm^3)、 E_p : 打撃エネルギー (J)、 C_p : 打撃数 (bpm)、 V_d : 穿孔速度 (cm/min)、 S : 孔断面積 (cm^2) である。

穿孔エネルギーと間隙率分布を比較すると、図に示されるように穿孔エネルギーが大きくなる3箇所の区間と間隙率の低い区間が一致することが確認できた。このことから、穿孔エネルギーと変換結果に良い整合性があることが示され、変換結果である間隙率分布が地質状況の推定に有用な情報となることが示されたといえる。

(4) 変換結果と坑壁地質展開図の比較

図-7 は、変換結果から得られた体積含水率分布と坑壁地質展開図¹⁴⁾の比較を示したものである。同図より、変換結果から得られた体積含水率分布が高い部分、つまり体積含水率が約8.00%である4箇所のうち3箇所においては、坑壁地質展開図における湧水箇所との一致が認められた。

しかしながら、当該地点においては全体的に体積含水

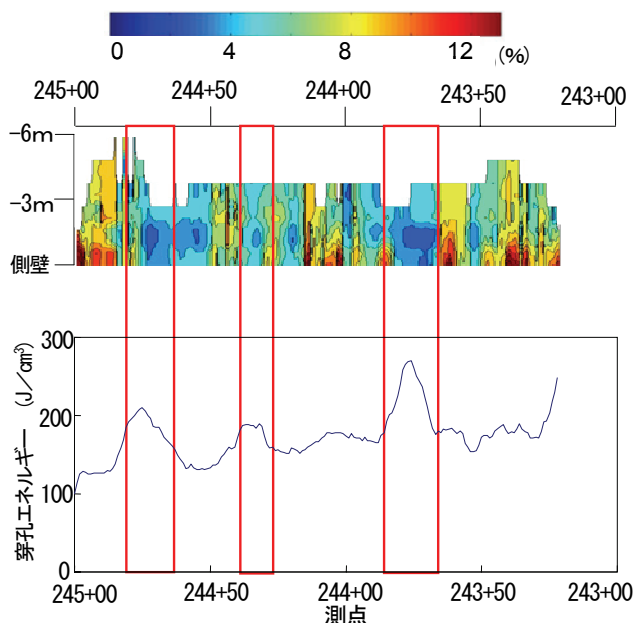


図-6 間隙率分布と穿孔エネルギーの比較

率が低く、体積含水率分布における急変箇所が認められなかった。すなわち、透水層と不透水層の境界が見られず、湧水箇所は少なかったと考えられる。この区間においての坑壁地質展開図を見ると、にじみ出る程度の湧水地点が数箇所見られる程度であり、施工時に問題となりうる毎分数リットルに及ぶ、目立った湧水箇所は認められなかった。今後、湧水量が顕著な地点での変換結果を用いた評価を行い検討する必要があるが、これらの結果より、変換結果である体積含水率分布が湧水箇所の推定に有効である可能性が示された。

(5) 変換結果とトンネル支保実施パターンの比較

図-8 は、施工記録における支保実施パターンと変換結果から得られた間隙率分布を比較したものである。支保パターンは、C I、C II、D I の順により強固なものとなっている。支保実施パターンは、TBM の機械データや実際の岩盤状況などから総合的に判断して決められているので、岩盤が不安定な状況であればあるほど、より強固な支保パターンが採用される。

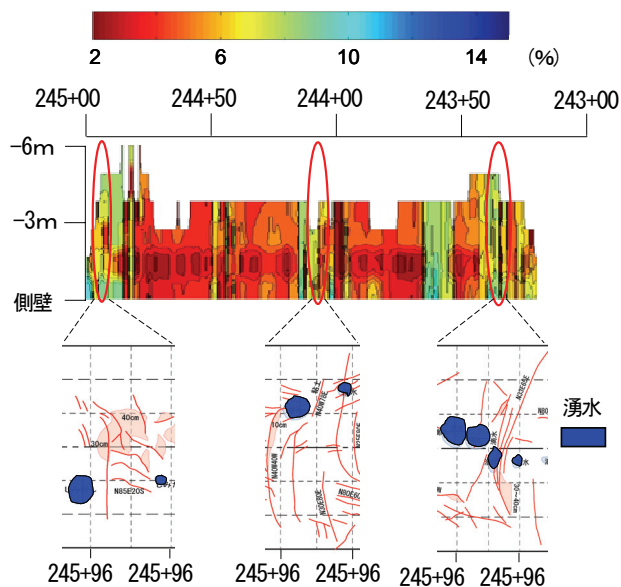


図-7 体積含水率と坑壁地質展開図の比較

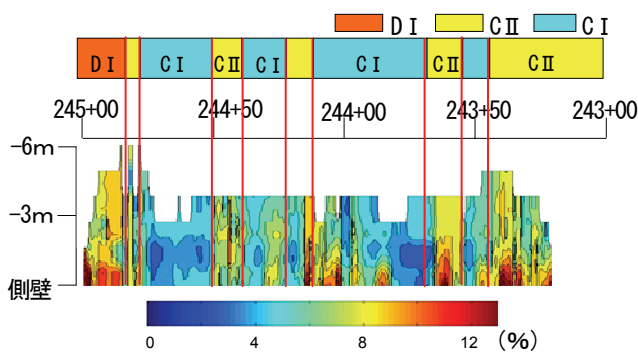


図-8 間隙率分布と支保実施パターンの比較

支保実施パターンと変換解析より求めた間隙率分布を比較すると、D I パターンの区間は他の部分よりも間隙率が大きくなっていることから、施工記録との良い一致が示されたといえる。また、C I パターン、C II パターンにおいては、一部異なる箇所も若干みられるが、全体的には良く一致していることが認められた。

図-9 は、各支保パターン(C I・C II・D I)の区間内に含まれる間隙率の割合をヒストグラムで示した図である。表-3 は、各支保パターンの区間に分布する間隙率の平均値、間隙率の割合分布についての標準偏差を示したものである。図-9 より、各支保パターンにおける間隙率の割合分布は、ほぼ正規分布となることが確認された。そして、それぞれの支保パターンに最も多く含まれる間隙率が、D I、C II、C I の順に、9.00%~9.99%、8.00%~8.99%、5.00%~5.99%と小さくなっていることが確認できた。間隙率分布の平均値についても同様に、D I、C II、C I の順に 9.41%、7.41%、6.08%と小さくなっていることが確認できた。これらのことから、間隙率が約 10.00%の時に D I、約 8.00%の時に C II、約 5.00%の時に C I となることが示され、間隙率が大きいほどより強固な支保パターンを用いていることが確認された。また、弾性波探査および EM 探査それぞれの結果は、坑壁に近くなるほど速度は低くなるが、比抵抗の分布は必ずしもそのような結果とはなっていない。そして、両方の探査結果と支保パターンとは、一致していないことが認められた。

以上のことから、支保設計には間隙率以外に土被りや岩種等の考慮すべき項目があるものの、変換結果と TBM 支保実施パターンがよく整合していることから、研究で提案した変換解析手法が TBM 採用時のトンネル支保設計に対し有用な情報を提供できることが実証された。

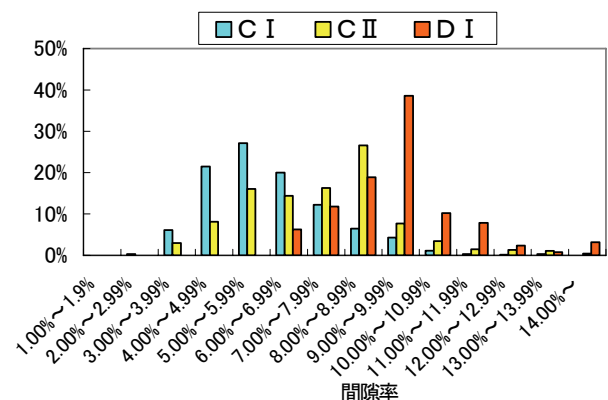


図-9 各支保パターンに含まれる間隙率の割合

表-3 各支保パターンに含まれる平均値・標準偏差・変動係数

	平均値	標準偏差
C I	6.08%	2.50
C II	7.41%	2.64
D I	9.41%	1.73

5. まとめ

本稿では、事前探査として行われる弾性波および比抵抗の測定結果を用い、設計・施工時の有効な指標になると考えられる間隙率と体積含水率に変換する変換解析の原位置へ適用性を検証した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 変換解析より得られた間隙率分布は、施工記録における穿孔エネルギーと概ね類似した傾向が認められた。
- 2) 変換解析より得られた体積含水率分布に対して、対象とした区間において湧水が顕著でないため定量的評価にまで及ばなかったが、変換結果である体積含水率分布が湧水箇所の推定に有効である可能性が示された。
- 3) 変換解析から得られた間隙率分布に対して、施工実績におけるTBM支保実施パターンが比較的一致していることが認められ、本システムがトンネル支保設計に対し有効なツールであることが示された。

以上のことから、本稿で提案した変換解析が、岩盤の物性値で判断できることから、単独の探査に比べて、トンネルの施工では、有用であることが示された。今後は、他の原位置岩盤への適用性を検証し、本手法の精度向上を図るとともに、実用化を目指す予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、多くの資料等をご提供頂いた、日本道路公団大津事務所と(財)災害科学研究所トンネル調査研究会に対しまして、ここに、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 川本桃万:岩盤工学を巡る諸問題, 資源・素材学会誌, Vol.106, No.14, pp.835-841, 1990.
- 2) 長谷川信介, 木村正樹, 杉田理, 村岡直: 電気探査とボーリ

- ング孔を利用した弾性波探査の併用による地山評価精度の向上, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.257-262, 2003.
- 3) 伊藤芳郎, 楠見晴重, 竹内篤雄: 斜面調査のための物理探査, pp.213-241, 1998.
- 4) 中村真, 近藤悦吉, 楠見晴重: 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, 土木学会論文集, No.735/VI-59, pp.209-214, 2003.
- 5) Wyllie, M.R., Gregory, A.R. and Gardner, L.W.: Elastic wave velocity in heterogeneous and porous media, Geophysics, 21(1), pp.41-70, 1956.
- 6) Kusumi, H., Hatakenaka, Y., Nishigata, U., Nakamura, M. and Nishida, K.: Characterization of electrical resistivity for intact and jointed specimen and its application in suit rock mass assessment, GeoEng2000, CD-ROM, 2000.
- 7) 土質工学会: 風化花崗岩とまき土の工学的性質とその応用, pp.132-133, 1979.
- 8) 中村真, 楠見晴重, 奥田善之: 岩石供試体の P, S 波速度および比抵抗同時測定装置の開発とその適用性, 土木学会論文集, No.722/III-61, pp.381-386, 2002.
- 9) 千葉昭彦, 熊田政弘: 花崗岩及び凝灰岩資料の比抵抗測定, 物理探査, Vol.47 No.3, pp.161-172, 1994.
- 10) 土木学会関西支部: 地盤の可視化とその評価法, 講習会テキスト, pp.1-23, 2005.
- 11) 桜木大介, 片山辰雄, 小林翼, 加藤裕将: マルチ周波数型 E M 探査の取組みと現状について, 第 37 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.79-80, 2002.
- 12) 畠中与一, 楠見晴重, 中村真, 西方卯佐男, 西田一彦: 種々な岩石の比抵抗値に及ぼす飽和度の影響, 土木学会第 53 回年次学術講演会, pp.718-719, 1998.
- 13) 引間亮一, 石川宏二, 塚田純一, 石井洋司: 堆積軟岩地山における油圧式削岩機を用いた切羽前方探査とボーリングコアとの比較, 第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.238-242, 2000.
- 14) 土木学会関西支部: 地盤の可視化とその評価法, 講習会テキスト, pp.1-34, 2005.

(2005. 8. 1 受付)

ESTIMATION METHOD OF ROCK MASSES IN TUNNEL CONSTRUCTION BY CONVERSION ANALYSIS USING SEISMIC VELOCITY AND ELECTRIC RESISTIVITY

Harushige KUSUMI, Yasutaka TAKAHASHI and Makoto NAKAMURA

Geophysical exploration for tunnel construction is usually used on seismic method and electric method. However, seismic velocity and electric resistivity directly are not connected with a design for tunnel construction. Grasping the nature of rock masses, for example effective porosity and saturation, is very important for the design of tunnel. In this paper, new estimation method of tunnel construction by conversion analysis seismic velocity and electric resistivity are proposed. As the result, it is recognized that the distributions of porosity and saturation of rock mass around tunnel by this analysis system correspond with that of the real rock mass conditions.