

地盤工学における物理探査データのロックフィジックスをベースにした  
解釈技術に関する研究（その10）  
—物理探査データを用いた岩石物理モデルに基づく岩盤分類の試み—

高橋 亨<sup>1</sup>・田中莊一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>深田地質研究所

Study on rock physical interpretation of geophysical data for geotechnical applications  
(Part X)

- An attempt at model-based rock mass classification using geophysical data -

TAKAHASHI Toru<sup>1</sup> and TANAKA Soichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fukada Geological Institute

要旨：岩盤分類は、トンネルやダム等の土木構造物の設計・施工時に対象岩盤をモデル化する際に広く利用されている。岩盤分類法としては、RMR や Q 値法、あるいは国内では関連各機関独自の分類法が長年利用されている。しかしながら、それらの分類法には定性的な評価項目が含まれているため、評価を行う技術者によってその結果が大きく異なる場合があることが指摘されている。そこで、筆者たちは、より定量的かつ客観的に岩盤分類を可能にすることを目的に、物理探査データに岩石物理モデルを適用してモデル化し、岩盤分類を行う手法について検討を行っている。本稿では、トンネル調査での事例として、計画ルート上での探査で得られた P 波速度と比抵抗データを用いて、岩盤をモデル化するとともに、掘削後のゆるみによる P 波速度の低下を予測し、掘削前後の P 波速度に基づき地山分類を求めた。その結果、実測地山分類とも整合する結果が得られた。

キーワード：岩盤分類，地山分類，弾性波速度，比抵抗，岩石物理モデル，トンネル

Abstract: Rock mass classification has been widely used for designing and constructing engineering structures such as tunnels and dams. There are several classification methods such as RMR and Q-value, and the methods proposed by related organizations in Japan. As these methods, however, include some qualitative evaluation criteria, it has been long recognized that the rock mass classification strongly depends on those who make classification. We have, therefore, studied a classification method which can more quantitatively and objectively classify the rock grade with multiple geophysical data based on rock physics. This paper demonstrates an application of the proposed model to P-wave velocity and resistivity data acquired with seismic refraction and electric surveys on a planned tunnel route to estimate rock grades before and after excavation. The rock grade after excavation is determined based on P-wave velocity reduced due to loosening of the tunnel wall which is predicted by the model. Comparison with rock grades determined with the conventional way proves that the model-based method can be used for more quantitative rock mass classification.

Keywords: rock mass classification, tunnel rock classification, seismic velocity, resistivity, rock physics model, tunnel

### 1. はじめに

トンネル、ダム、地下空洞等の土木構造物の設計や施工に当たっては、対象とする岩盤の変形や強度特性等に関するモデル化が必要である。これらの物性は、調査サイトに掘削された試掘坑やボーリング孔を利用した原位置試験や岩石コアの室内試験によって測定され、岩盤分類に基づいてサイトあるいはルート全体の物性モデルとして拡張、利用されるのが一般的である (Takahashi, 2016)。

モデル化にとって不可欠な岩盤分類は、地表踏査やボーリングコア試料の観察による亀裂の性状や含水状態、あるいは岩石の圧縮強度や弾性波速度等の物性値を点数化するなどして分類が行われるのが一般的である。分類項目や区分の仕方によって各種の方法が提案、利用されている。RMR (Rock Mass Rating) 法 (Bieniawski, 1989) や Q 値法 (Barton et al., 1974) はよく知られているが、国内では、旧道路公団、国鉄、建設省等の機関により、それぞれが建設・管理する土木構造物に応じた分類法が独自に提案され、現在に至るまで長く利用されている (日本材料学会, 1993)。しかしながら、これらの岩盤分類法では、評価基準がやや定性的なため、分類項目ごとに評価等級が大きく異なる、あるいは、分類を行った人によって評価が異なる場合が少なくないということが指摘されている (亀村, 2014)。

岩盤分類の1つとして、トンネルの地山分類では、弾性波速度が重要な評価項目の1つとして利用されている。弾性波速度は、岩盤の強度はもちろん、亀裂の状態や風化度に応じて変化するので、岩盤評価に適しているためと思われる。しかしながら、トンネルの掘削前後で計測される弾性波速度が大きく異なる場合があり、その結果岩盤分類にも大きな違いが生じ、施工時に支保パターンの

修正を迫られる場合が少なくないことが指摘されている。図1は、木村・大橋(2002)が示した弾性波速度 (P 波速度) と地山分類の関係を表した一例であるが、掘削前後の分類に大きな違いがあることがわかる。筆者たちは、亀裂を含む岩石の弾性波速度と間隙率の関係に岩石物理モデルを適用することにより、岩盤の掘削によって発生するEDZ (掘削影響領域) による弾性波速度の低下を予測することができ、掘削前後の弾性波速度の違いを説明できることを示した (Takahashi and Tanaka, 2013)。その際、亀裂の形状をパラメータとして岩石をモデル化することによって、図1に示すような地山分類との関係を求めることができることを示した。

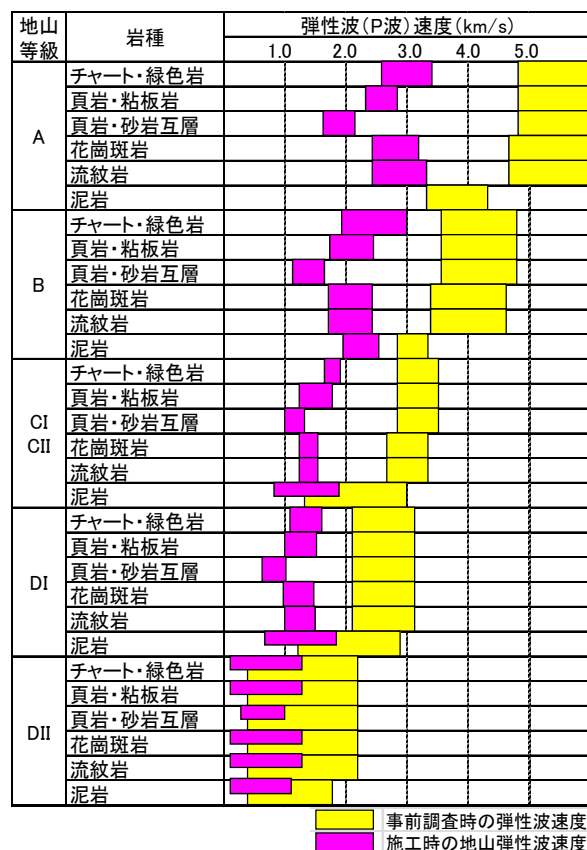


図1 トンネル掘削前後の弾性波速度と地山分類の関係 (木村・大橋, 2002 の表-3 を修正)。

本研究では、さらにそのアイデアを拡張し、現位置では広範囲に求めにくい間隙率を電気探査による比抵抗値から推定し、弾性波速度と比抵抗の関係から岩盤（地山）等級を推定することを試みた。掘削前後の地山分類が得られている実データへの適用を通じて、トンネル掘削前のデータから、施工時に必要な掘削後の岩盤（地山）等級を予測することができることを示す。

## 2. 亀裂性岩盤のモデル化

本研究では、トンネルやダム等の建設の対象となる岩盤として亀裂性の岩盤を想定する。筆者たちはこれまで亀裂性の岩石のモデル化に岩石物理モデルの1つである Kuster-Toksoz モデル (Kuster and Toksoz, 1974) を用いたが (例えば, Takahashi and Tanaka, 2013), ここでは、より大きな間隙率までモデル化できる Differential Effective Medium (DEM) モデル (Mavko et al., 2009) を用いる。このモデルは、均質な基質を有した岩石に異物（ここでは流体を含む亀裂とする）が含まれるインクルージョンモデルで、基質と亀裂の体積弾性率と剛性率および間隙率を用いて、以下の式で表される (Berryman, 1995)。

$$(1-\phi) \frac{d}{d\phi} K^*(\phi) = (K_2 - K^*) P^*(\phi) \quad (1)$$

$$(1-\phi) \frac{d}{d\phi} G^*(\phi) = (G_2 - G^*) Q^*(\phi) \quad (2)$$

ここに、 $K^*$ 、 $G^*$  がそれぞれ、亀裂を含む岩石の体積弾性率と剛性率である。初期値は  $K^*(0) = K_1$ 、 $G^*(0) = G_1$  であり、 $K_1$ 、 $K_2$  と  $G_1$ 、 $G_2$  はそれぞれ、基質と亀裂の体積弾性率と剛性である。 $\phi$  は間隙率である。ここで、岩石に含まれる亀裂の形

状を薄い楕円型（ペニーシェープ型）と仮定すると、 $P^*$  と  $Q^*$  は以下の式で表される (Berryman, 1995)。

$$P^* = \frac{K_2 + \frac{4}{3}G_2}{K_2 + \frac{4}{3}G_2 + \pi\alpha\beta_1} \quad (3)$$

$$Q^* = \frac{1}{5} \left[ 1 + \frac{8G_1}{4G_2 + \pi\alpha(G_1 + 2\beta_1)} + 2 \frac{K_2 + \frac{2}{3}(G_2 + G_1)}{K_2 + \frac{4}{3}G_2 + \pi\alpha\beta_1} \right] \quad (4)$$

$$\beta_1 = G_1 \frac{3K_1 + G_1}{3K_1 + 4G_1} \quad (5)$$

ここに、 $\alpha$  は亀裂のアスペクト比である。岩石の密度を  $\rho$  とすると、P 波、S 波速度は以下の式で得られる。

$$V_p = \sqrt{\frac{K^* + \frac{4}{3}G^*}{\rho}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}} \quad (6)$$

ここで、図1の中の花崗斑岩のP波速度をモデル化することを想定し、対象とする岩石を水で飽和した亀裂を含む花崗岩と仮定し、表1に示す物性を用いてP波速度と間隙率の関係を計算した。その結果を図2に示す。ここでは、亀裂のアスペクト比を0.002, 0.004, 0.006 および0.008 の4種類とした。この計算結果と図1を対比して、地山等級をA, B, C およびDとして図中に矩形で示した。それぞれの等級は、A：アスペクト比0.002, 間隙率0.005, P波速度5-5.5km/s, B：アスペクト比0.004, 間隙率0.02, P波速度3.5-4.5km/s, CI/CII：アスペクト比0.006, 間隙率0.04, P波速度2.8-3.5km/s, DI/DII：アスペクト比0.008, 間隙率0.1, P波速度1.5-2.8km/s で表すことができることがわかる。

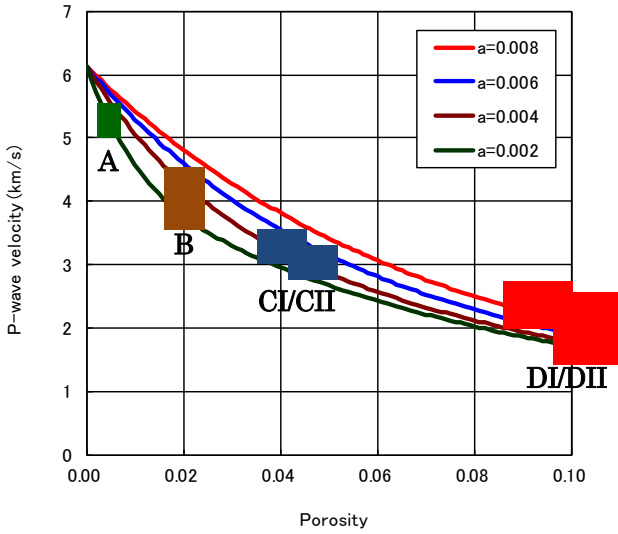


図2 P波速度と間隙率の関係の計算結果  
(実線：計算結果，矩形：地山等級区分，a：アスペクト比)

表1 計算に使用した物性値

$K_1$	50.0 GPa	Bulk modulus of rock matrix
$G_1$	37.9 GPa	Shear modulus of rock matrix
$K_2$	2.2 GPa	Bulk modulus of crack (water)
$G_2$	0.0 GPa	Shear modulus of crack (water)
$\rho$	2,670 kg/m <sup>3</sup>	Density of the rock with crack

### 3. トンネル掘削による弾性波速度低下の予測

上記モデルを用いると、トンネル掘削後の EDZ での弾性波速度の低下を予測することができる。掘削による影響を、拘束圧（土被り圧）の解放および地下水の散逸と仮定すると、モデル計算では、拘束圧の低下による間隙率の増大ならびに間隙流体の水から空気への変化として表すことができる。

拘束圧の低下による間隙率の増加は以下の式で表すことができる (Toksoz et al., 1976)。

$$\frac{d\phi}{\phi} = -\frac{P}{K^*} [E_1 - E_2 E_3 / (E_3 + E_4)] \quad (7)$$

$$E_1 = \frac{6GI}{2\pi(3K + 4G)} \quad (8)$$

$$E_2 = \frac{6G}{4\pi(3K + 4G)} (3I - 4\pi) \quad (9)$$

$$E_3 = \frac{\alpha^2 (3 - 9I / 4\pi)(6K + 2G)}{2(1 - \alpha^2)(3K + 4G)} + \frac{6GI}{8\pi(3K + 4G)} \quad (10)$$

$$E_4 = \frac{1}{2} \left[ \frac{(3 - 9I / 4\pi)(6K + 2G)}{2(1 - \alpha^2)(3K + 4G)} - \frac{3G(1 - I / \pi)}{3K + 4G} \right] \quad (11)$$

$$I = \frac{2\pi\alpha}{(1 - \alpha^2)^{3/2}} [\cos^{-1} \alpha - \alpha(1 - \alpha^2)^{1/2}] \quad (12)$$

ここに、 $P$  は拘束圧、 $K^*$  は亀裂を含む岩石の体積弾性率、 $K$  と  $G$  はそれぞれ、アスペクト比が  $\alpha$  の亀裂を除く岩石の体積弾性率と剛性率である。拘束圧の変化によっても亀裂の大きさは変わらないと仮定すると、アスペクト比の変化は、間隙率の変化と一致し、次式で表される (Toksoz et al., 1976)。

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{d\phi}{\phi} \quad (13)$$

一例として、前項で述べた DEM モデルと上式を用いて、水で飽和した花崗岩中の土被り 100m のトンネルにおける掘削前後の P 波速度の計算を行った。計算に使用した物性は、表 1 に示す値に加え、空気の体積弾性率を 0.00015GPa とした。拘束圧は、土被りに応じて  $\rho gh$  ( $\rho$  は密度、 $g$  は重力加速度、 $h$  は深度) にて求めた。亀裂のアスペクト比を、0.002、0.004、0.006 および 0.008 と変化させた場合のトンネル掘削前後の P 波速度と間隙率の関係を図 3 に示す。図 2 に示した掘削前の P 波速度による地山区分に対応する間隙率とアスペクト比の計算値から、掘削後の P 波速度に対応する地山区分を推定した結果を中抜き矩形にて示した。計算で得られた各等級に対応する掘削後の速度低下量は、図 1 に示す事例の花崗斑岩に対する掘削後の速度低下量ともよく一致していることがわか

る。この結果は、岩石物理モデルを用いてP波速度と間隙率の関係をモデル化することによって、トンネル掘削前のP波速度から、施工にとって最も重要な掘削後のP波速度、つまり地山等級を予測することができることを示している。

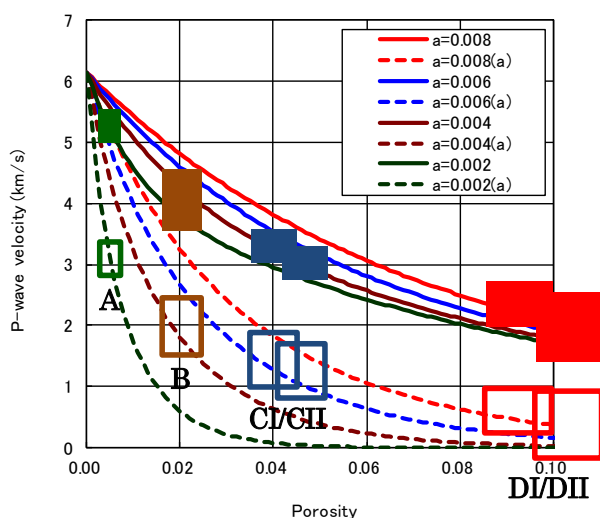


図3 P波速度と間隙率の関係の計算結果  
(実線：掘削前計算結果，破線：掘削後計算結果，  
矩形：地山等級区分，a:アスペクト比)

#### 4. トンネル掘削後の地山等級の予測

トンネル掘削前後の地山分類が得られている実データを用いて、本手法の適用性を評価した。ここでは、災害科学研究所トンネル調査研究会(2001)に掲載されている大阪府と奈良県の県境に位置する水越トンネルで、実際にトンネル掘削前に実施された弾性波探査によるP波速度と電気探査による比抵抗データを用いて、掘削後の地山等級を推定し、トンネル掘削後に得られた実測地山等級との比較を行った。

図4に、電気探査で得られたトンネルルート上の比抵抗断面を示す。このサイトでは、これに加えて同一位置で実施された弾性波探査によるP波速度断面が得られている。このトンネル付近の地

質は大部分が新鮮な石英閃緑岩で、比抵抗は500Ωm以上、P波速度は4.0km/s以上を示すが、それ以下の値を示す変質岩が存在している。

ここでは、比抵抗データはモデル化のための間隙率を推定するために使用した。推定に当たっては、アーチの式を拡張し、間隙水だけでなく岩石(表面)も導体と考え、間隙を含む岩石全体の比抵抗あるいは電気伝導度(σ)を表す以下のGloverの式(Glover et al. 2000)を用いた。

$$\sigma = \sigma_m (1 - \phi)^{\frac{\log(1 - \phi^m)}{\log(1 - \phi)}} + \sigma_w \phi^m \quad (14)$$

ここに、σ<sub>m</sub>とσ<sub>w</sub>はそれぞれ、岩石の基質と間隙水の電気伝導度である。φは間隙率である。mはセメンテーションファクターと呼ばれる定数で、通常1.3~2.5程度の値をとるが(高倉, 2003)、以下の計算では、1.7と仮定した。

探査で得られたP波速度と比抵抗断面から、トンネル施工基面沿いに50m間隔で抜き出したP波速度と比抵抗データの関係図を図5に示す。このデータを用いて、岩石基質と間隙水の比抵抗をそれぞれ1500Ωmと5Ωmと仮定し、Gloverの式を用いて比抵抗から間隙率を計算し、P波速度との関係としてプロットした結果を図6に示す。次に、このP波速度と間隙率の関係をもとに、表1に示す花崗岩に対する物性値を用いて、これらのデータを説明できる間隙(亀裂)のアスペクト比を求めた。その結果を、図7に示す。ここでは、アスペクト比が、0.005~0.1の範囲でほぼデータが説明できることがわかる。さらに、この図から、各データのP波速度、間隙率、アスペクト比が得られるので、3項で述べた式を用いて、土被りを100mと仮定して、掘削後のP波速度と間隙率の関係を求めた。

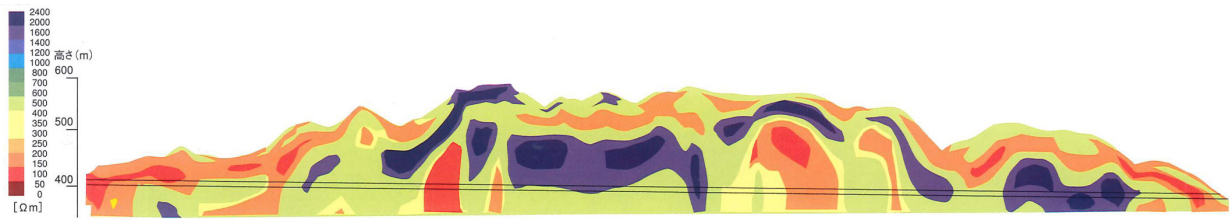


図4 本研究の対象としたトンネルルート上で実施された電気探査による比抵抗断面図（二重線：トンネル施工基面）  
（災害科学研究所トンネル調査研究会，2001）

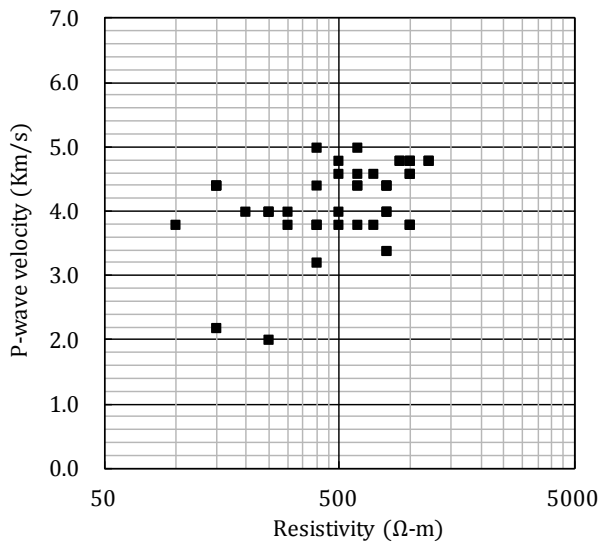


図5 実測P波速度と比抵抗の関係

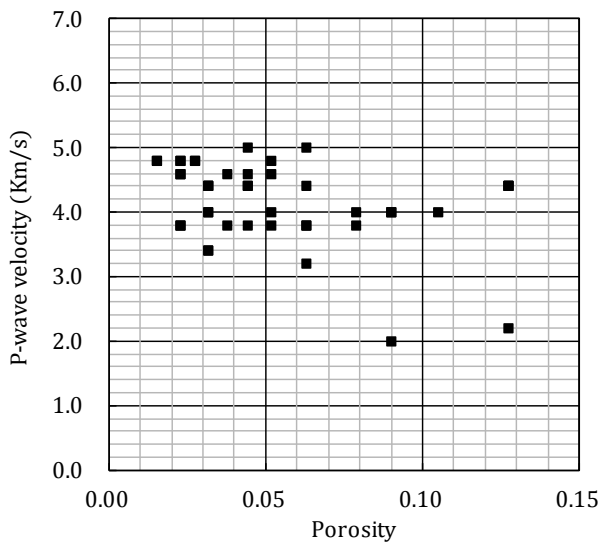


図6 実測P波速度と計算間隙率の関係

その予測結果を，掘削前の関係と比較する形で図8に示す．これらの図では，各データを実測で得られた地山等級（B，CI/CII，DI/DII/DIII）別にカラーで示した．掘削前には，BやCI という等級で評価された岩が，掘削後にはCII 以下に評価されていることがわかる．また，掘削前には少なかったD評価の岩盤が，掘削後には大幅に増加していることがわかる．つまり，物理探査データを用いたモデル解析によって得られた掘削後の予測結果は，掘削後の実際の岩盤評価とよく一致していることがわかる．

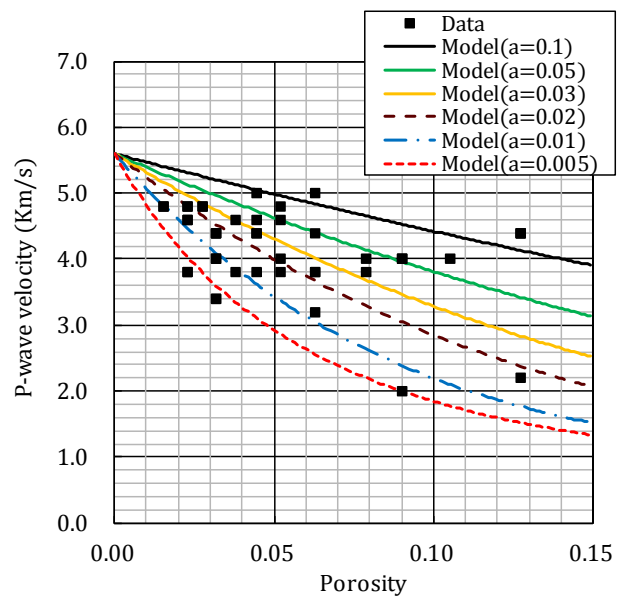


図7 実測P波速度と計算間隙率の関係をもとに，DEMモデルで計算したアスペクト比

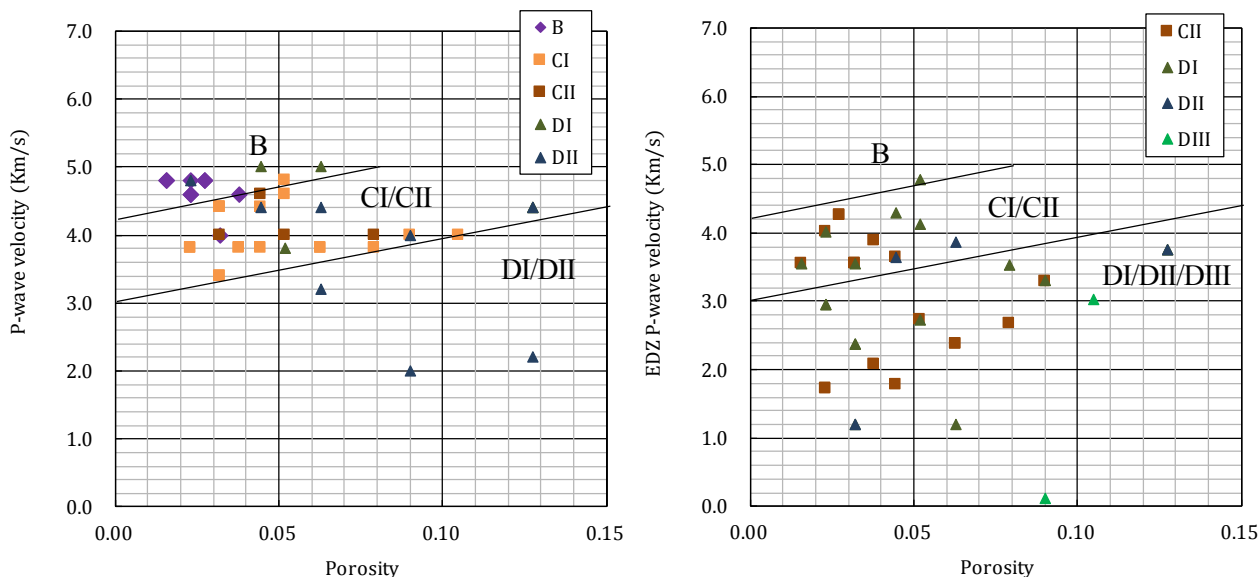


図8 掘削前(左)と掘削後(右)のP波速度と間隙率の関係(カラーシンボルは実測された地山等級)

この結果は、トンネルの事前調査でP波速度と比抵抗データが得られると、岩石物理モデルを用いることにより、掘削によるゆるみ等の影響を考慮した掘削後、つまり施工時の地山等級を予測することができることを示している。

### 5. おわりに

岩石物理モデルを利用することにより、P波速度と間隙率の関係をベースとした岩盤分類(地山分類)が可能であることを示した。その応用例の1つとして、トンネル掘削後のゆるみによると推定される弾性波速度の低下を予測し、トンネル掘削前後の岩盤等級(地山評価)の不一致の問題を解決できる可能性を、実例を通して示した。従来の方法による岩盤分類(地山分類)は、上述のとおり不確かな場合があり適用性の検証が難しいが、今後、適用事例を増やし、本手法の実用性を評価したい。

### 文献

- Barton, N., Line, R. and Lunde, J. (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mechanics*, 6 (4), 189-236.
- Berryman, J.G. (1995): Mixture theories for rock properties, in *Rock Physics and Phase Relations: a Handbook of Physical Constants*, ed. T.J. Ahrens., Washington, DC: American Geophysical Union, 205-228.
- Bieniawski, Z.T. (1989): *Engineering rock mass classification*, John Wiley and Sons.
- Glover, P.W.J., Hole, M.J. and Pous, J. (2000): A modified Archie's law for two conducting phases, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 180., 369-383.
- 亀村勝美 (2014): 岩盤構造物の性能評価における課題—先進ボーリング調査結果に基づく地山分類—, *深田地質研究所年報*, 15, 107-115.

木村正樹・大橋弘紀 (2002) : 弾性波速度の低減を考慮した合理的なトンネル支保の選定について, 応用地質技術年報, 117-125.

Kuster, G.T. and Toksoz, M.N. (1974): Velocity and attenuation of seismic waves in two phase media, *Geophysics*, 39, 587-618.

Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J. (2009): *Rock Physics Handbook 2nd Ed.*, Cambridge University Press, New York.

日本材料学会(1993) : 岩の力学, 丸善, 東京.

災害科学研究所トンネル調査研究会 (2001): 地盤の可視化と探査技術—比抵抗高密度探査法の実例, 鹿島出版会, 東京.

Takahashi, T. and Tanaka, S. (2013): Rock physical interpretation of seismic properties of the excavation disturbed zone, *Proc. of EUROCK 2013*.

Takahashi, T. (2016): Model-based quantitative rock mass classification with geophysical data, *Proc. of 9<sup>th</sup> Asian Rock Mechanics Symposium* (accepted).

高倉伸一 (2003) : アーチの式と並列回路モデル, 2003年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 127-132.

Toksoz, M.N., Cheng, C.H. and Timur, A. (1976): Velocities of seismic waves in porous rocks, *Geophysics*, 41, 621-645.