

ロックフィジックスをベースにした物理探査データの解釈技術の研究（その3） — 亀裂性岩盤の岩石モデル解析 —

高橋 亨^{1*}・藤田勝代¹・横山俊治²・田中莊一¹

¹財団法人 深田地質研究所（〒113-0021 東京都文京区本駒込2-13-12）

²高知大学（〒780-8520 高知市曙町2-5-1）

*E-mail: takahashi@fgi.or.jp

亀裂性岩盤の岩石モデルの研究を目的に、検層と室内試験で得られた弾性波速度を用いて、均質な岩石中に亀裂等の不均質（インクルージョン）を含む岩石のモデル化に広く利用されているKuster-Toksozモデル（K-Tモデル）の適用性を評価した。本研究では、このモデルを花崗岩中で実施された音波検層と密度検層データに適用し、花崗岩中の亀裂形状の推定を試み、ボアホールテレビビューアーやコア観察から得られた亀裂の分布や形状とよく一致する結果を得た。また、このモデルを用いることによって、従来からよく知られているトンネル掘削時のゆるみによると推定される弾性波速度の低下を定量的に説明できることを示した。

Key Words : geophysics, rock physics, cracked rock, Kuster-Toksoz model

1. はじめに

筆者らは、地盤・岩盤工学分野での物理探査データの解釈技術を高度化することを目的に、近年石油・ガス探査開発分野で積極的に研究、適用が進められているロックフィジックスを利用した解釈技術の研究を行っている¹⁾。前報²⁾では、研究の中で収集した岩石物性データの中から国内に広く分布する堆積性軟岩のデータを用いて、ロックフィジックス分野で提案されている二粒子岩石モデルの適用性を検討した。本報では、同じく国内に広く分布する花崗岩等の亀裂性岩盤のモデル化について検討を行った。

亀裂性岩盤の岩石モデルについては、これまでに多くの研究がなされているが³⁾、物理探査で得られる物性に着目した研究例はあまり多くない。本研究では、物理探査で得られる物性を用いた岩石モデルの研究の一環として、ロックフィジックス分野でインクルージョンモデルの1つとして広く利用されている Kuster-Toksoz モデル⁴⁾（以後、K-T モデルと呼ぶ）を用いて、弾性波特性から亀裂の密度や形状等を推定する方法について検討を行った。

本稿では、まず、K-T モデルによって岩石の弾性係数を求める計算式について説明した後、亀裂を含む花崗

岩で実施された検層データにモデルを適用し、亀裂の形状（アスペクト比）を推定し、ボアホールテレビビューアーの画像やコア観察の結果と比較した。さらに、K-T モデルのような岩石モデルを用いることにより、トンネル掘削後の緩みによる弾性波速度の低下を定量的に説明できることを示す。

2. 亀裂性岩盤の岩石モデル

ロックフィジックス分野でインクルージョンモデルの1つとして知られるK-Tモデルは、弾性波の散乱に着目して、均質な岩石基質の中に、亀裂などの不均質（インクルージョン）がランダムに分布する場合に、岩石基質とインクルージョンの弾性係数と形状を与えることによって、岩石全体の弾性係数を計算するモデルである。

K-Tモデルでは、亀裂を含む岩石の体積弾性係数(K)とせん断弾性係数(G)は、以下の式により計算される⁴⁾。

$$K = \frac{4PG_s + K_s(3K_s + 4G_s)}{3K_s + 4G_s - 3P} \quad (1)$$

$$G = \frac{5G_s^2(3K_s + 4G_s) + QG_s(9K_s + 8G_s)}{5G_s(3K_s + 4G_s) - 6Q(K_s + 2G_s)} \quad (2)$$

ここに、 K_s と G_s は、それぞれ岩石基質の体積弾性係数とせん断弾性係数である。PとQは岩石基質と基質中に含まれるインクルージョンの物性と形状によって決まるパラメータであり、以下の式で表される。なお、ここでの計算では、亀裂は水で飽和されているとしている。

$$P = \frac{\phi}{3}(K_i - K_s)T_{ijj} \quad (3)$$

$$Q = \frac{\phi}{5}(G_i - G_s)(T_{ijj} - \frac{1}{3}T_{ijj}) \quad (4)$$

$$T_{ijj} = \frac{3F_1}{F_2} \quad (5)$$

$$T_{ijj} - \frac{1}{3}T_{ijj} = \frac{2}{F_3} + \frac{1}{F_4} + \frac{F_4F_5 + F_6F_7 - F_8F_9}{F_2F_4} \quad (6)$$

$$F_1 = 1 + A \left\{ \frac{3}{2}(E + D) - C \left(\frac{3}{2}E + \frac{5}{2}D - \frac{4}{3} \right) \right\} \quad (7)$$

$$F_2 = 1 + A \left\{ 1 + \frac{3}{2}(E + D) - \frac{C}{2}(3E + 5D) \right\} + B(3 - 4C) + \frac{A}{2}(A + 3B)(3 - 4C) \{ E - D - C(E - D + 2D^2) \} \quad (8)$$

$$F_3 = 1 + \frac{A}{2} \left\{ C(2 - D) + \frac{1 + \alpha^2}{\alpha^2} E(C - 1) \right\} \quad (9)$$

$$F_4 = 1 + \frac{A}{4} \{ 3D + E - C(E - D) \} \quad (10)$$

$$F_5 = A \left\{ C \left(E + D - \frac{4}{3} \right) - E \right\} + BD(3 - 4C) \quad (11)$$

$$F_6 = 1 + A \{ 1 + E - C(E + D) \} + B(1 - D)(3 - 4C) \quad (12)$$

$$F_7 = 2 + \frac{A}{4} \{ 9D + 3E - C(5D + 3E) \} + BD(3 - 4C) \quad (13)$$

$$F_8 = A \left\{ 1 - 2C + \frac{E}{2}(C - 1) \right\} + \frac{D}{2}(5C - 3) + B(1 - D)(3 - 4C) \quad (14)$$

$$F_9 = A \{ E(C - 1) - CD \} + BD(3 - 4C) \quad (15)$$

$$A = \frac{G_i}{G_s} - 1 \quad (16)$$

$$B = \frac{1}{3} \left(\frac{K_i}{K_s} - \frac{G_i}{G_s} \right) \quad (17)$$

$$C = \frac{3G_s}{3K_s - 4G_s} \quad (18)$$

$$D = \frac{\alpha}{(1 - \alpha^2)^{3/2}} \{ \cos^{-1} \alpha - \alpha(1 - \alpha^2)^{1/2} \} \quad (19)$$

$$E = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} (3D - 2) \quad (20)$$

ここに、

K_i : 亀裂の体積弾性係数 (水の場合: 2.25GPa)

G_i : 亀裂のせん断弾性係数(水の場合: 0GPa)

ϕ : 亀裂の体積分率 (=間隙率)

α : 亀裂のアスペクト比 (回転楕円体として近似した場合の長軸と短軸の比)

弾性係数 K と G が得られると、飽和状態の岩石の弾性波特性は以下の式から求められる。

$$M(\phi) = K + 4G/3 \quad \text{P波弾性係数}$$

$$G(\phi) = G \quad \text{せん断弾性係数}$$

$$V_p(\phi) = \text{SQRT}(M/\rho) \quad \text{P波速度}$$

$$V_s(\phi) = \text{SQRT}(G/\rho) \quad \text{S波速度}$$

$$\rho = \phi \rho_f + (1 - \phi) \rho_s \quad \text{密度}$$

$$\rho_s: \text{岩石基質の密度}$$

$$\rho_f: \text{水の密度}$$

3. 花崗岩データへの適用

亀裂性岩盤の代表例として、ここでは、花崗岩を取り上げる。この花崗岩は、細粒の花崗岩脈を含むが、全体としては粗粒の黒雲母花崗岩である⁹。使用した物性データは、この花崗岩中に掘削されたボーリング孔で実施された検層によるP波速度と密度である。孔長は750mであるが、ここでは、一般の土木調査を想定した深度を念頭に、地下水位以下の極浅層部10~100mで得られたデータだけを用いた。

図-1に、検層で得られたP波速度、密度、密度値から岩石の密度を2.58と仮定して計算した間隙率(亀裂の体積分率を以後間隙率とする)の深度10~100mまでのプロファイルを示す。詳しくは後述するが、P波速度や密度が急減し、間隙率が急増している深度は、亀裂が卓越する深度である。

P波速度と密度から推定した間隙率のプロファイルから作成した両物性の相関図を図-2に示す。図中には、K-Tモデルで、4つの異なるアスペクト比(0.02, 0.05, 0.1, 0.8)について計算したモデル曲線もあわせて示す。計算に使用したモデルパラメータを表-1に示す。花崗岩基質の弾性係数は、構成鉱物の弾性係数を参考にした値⁶および測定されたP波速度の最大値を考慮して決めた。

この相関図は、P波速度と間隙率が得られた場合、岩石内に分布する亀裂のアスペクト比を推定できることを示している。そこで、4本のモデル曲線に挟まれた3つの領域をアスペクト比(AR)が大、中、小の領域と考え、それぞれAR=1, 2, 3として同図に示した。この図をもとに、図-1に示すP波速度と間隙率のプロファイルから各深度の岩石中の亀裂のアスペクト比を推定した結果を図-3(e)に示す。この図には、ボアホールテレビューアー(以後、BHIV)の解析で推定された亀裂をその角度

が水平に近いもの(図-3(d))と鉛直に近いもの(図-3(f))に分けて個数を計測した結果を示した⁷⁾。また、ボーリングコアの観察によって確認したミリメートルオーダーの間隔をもつ低角割れ目であるラミネーションシーティング[®]の個数(図-3(c))も合わせて示した。

P波速度と間隙率から推定されたアスペクト比とBHTVで推定された亀裂の数を比較すると、アスペクト比の大きな亀裂(AR=1)は、BHTVで検出された鉛直に近い亀裂分布に、アスペクト比の小さい亀裂(AR=3)はBHTVで検出された水平に近い亀裂とラミネーションシーティングの分布と対応がよいように見える。BHTVの画像からは、鉛直に近い亀裂は開口幅が大きく、水平に近いものは小さいことがわかっている。このことは、P波速度と密度(間隙率)から推定されたアスペクト比の大小が、実際に観測される亀裂の形状や開口幅の特徴とよく対応していることを示している。つまり、検層で得られる物性から、岩盤内部の亀裂の概略の形状を把握できる可能性を示しているといえる。

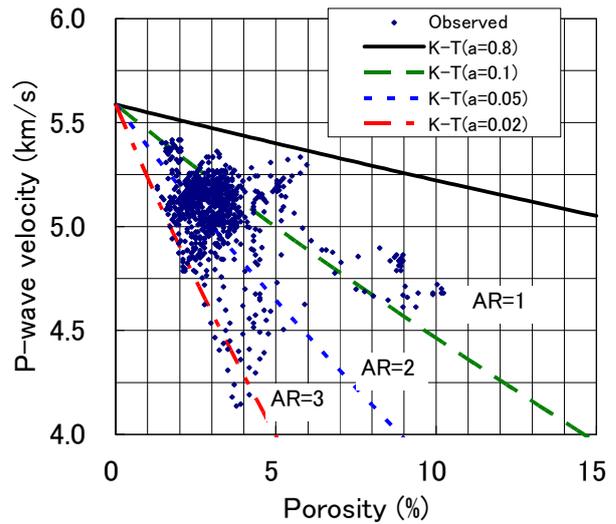


図-2 P波速度と間隙率の関係
図中の曲線は、4つの異なるアスペクト比(上から順に、0.8, 0.1, 0.05, 0.02)に対するK-Tモデルによる計算値

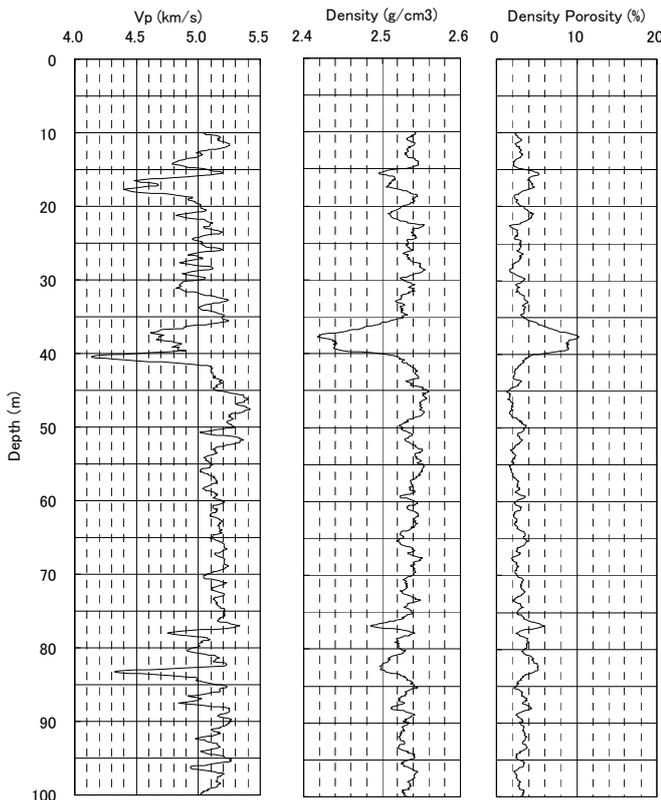


図-1 モデル化に使用した検層データ
左:P波速度, 中:密度, 右:密度から推定した間隙率

表-1 計算に使用した物性値

Ks	46.2 GPa	岩石基質の体積弾性係数
Gs	28.1 GPa	岩石基質のせん断弾性係数
Ki	2.25 GPa	亀裂の体積弾性係数
Gi	0.0 GPa	亀裂のせん断弾性係数

4. トンネル掘削による速度低下の定量的解釈

トンネルの事前調査では、支保等の設計に必要な岩盤の力学的特性を把握するために、計画ルート上で屈折法弾性波探査が実施されるのが一般的である。しかしながら、事前調査で得られた弾性波速度に基づいて設計された支保パターンと施工実績が大きく乖離する例も少なくない⁹⁾。その原因は、事前調査時の弾性波探査結果は、掘削によるトンネル周辺地山の緩みが無い状態での探査結果であるため、掘削後の地山の緩みが大きい場合には、その乖離が大きくなると考えられている。木村・大橋(2002)⁹⁾は、緩みによる弾性波速度の低減を考慮した合理的なトンネル支保設計について検討するために、様々な地質条件で施工された多くのトンネル坑内で弾性波速度測定を実施し、事前調査時の速度値と比較を行った。その結果を図-4に示す。地山等級の大きい岩盤ほど、掘削前後の弾性波速度の乖離が大きいことがわかる。

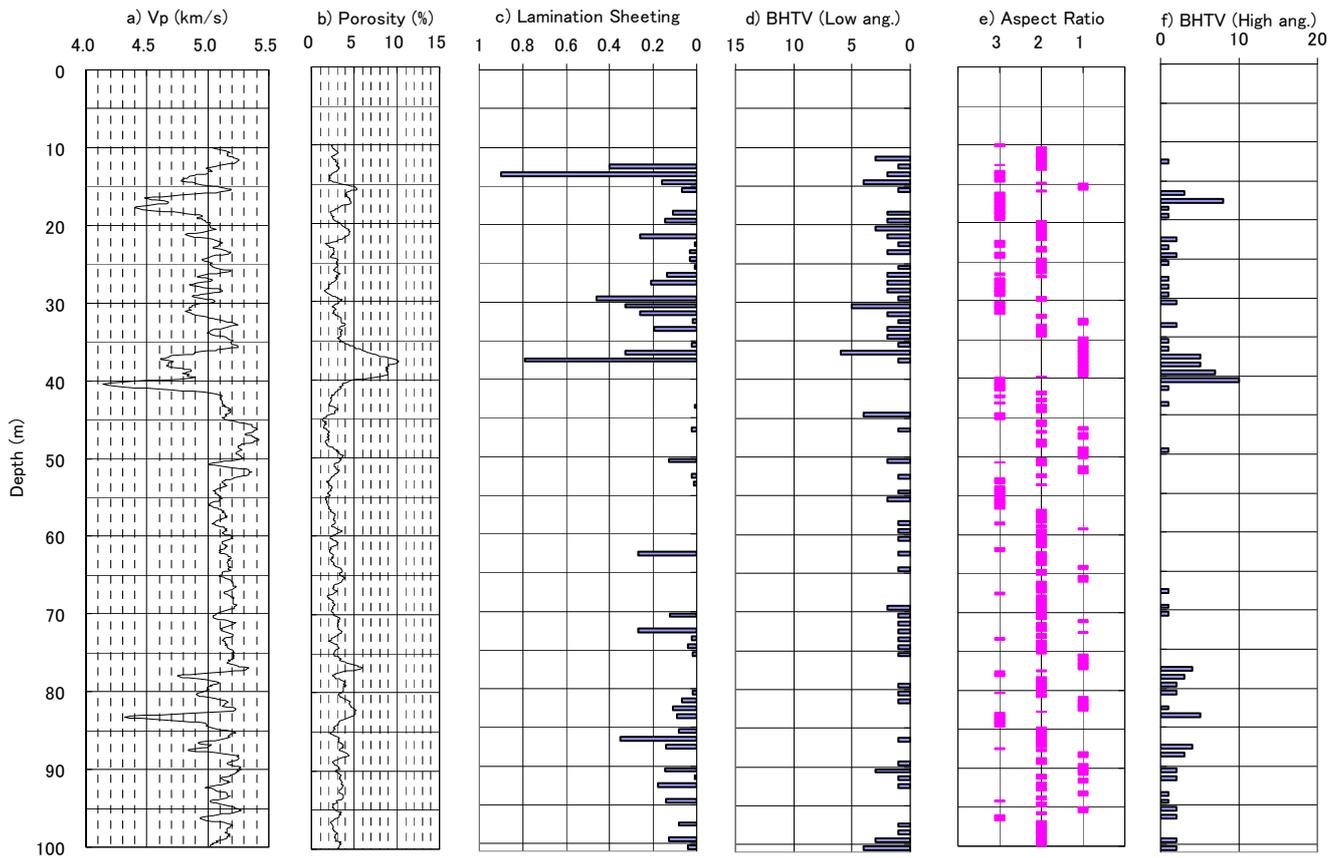


図-3 P波速度と間隙率の関係をもとに推定した亀裂のアスペクト比のプロファイルと関連データの比較図
 a) P波速度, b)密度値から推定した間隙率, c)ラミネーションシーティング, d)BHTV 解析による水平系の亀裂数,
 e)推定した亀裂のアスペクト比 (横軸の数字は, アスペクト比範囲を示す AR-1, 2, 3 に対応), f)BHTV 解析による鉛直系の亀裂数

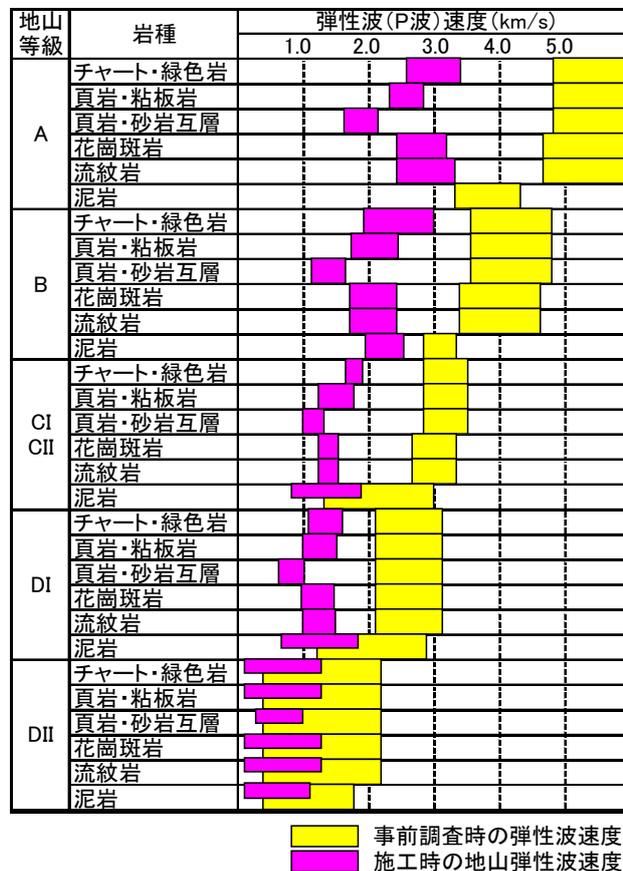


図-4 トンネル調査における事前, 事後の弾性波速度 (木村・大橋(2002)⁹⁾ の表-3 を修正)

この原因が掘削による地山の緩みと考え、掘削による拘束圧の低下と地下水位の低下による岩盤の不飽和化が発生すると考える。これを岩石モデルで考えると、拘束圧の低下により間隙率が增大すること、不飽和化により亀裂内が水から空気が変わることで表現することができる。拘束圧の変化による間隙率(ϕ)の変化は、以下の式で表すことができる¹⁰⁾。

$$\frac{d\phi}{\phi} = -\frac{P}{K^*} [E_1 - E_2 E_3 / (E_3 + E_4)] \quad (21)$$

$$E_1 = \frac{6GI}{2\pi(3K + 4G)} \quad (22)$$

$$E_2 = \frac{6G}{4\pi(3K + 4G)} (3I - 4\pi) \quad (23)$$

$$E_3 = \frac{\alpha^2 (3 - 9I/4\pi)(6K + 2G)}{2(1 - \alpha^2)(3K + 4G)} + \frac{6GI}{8\pi(3K + 4G)} \quad (24)$$

$$E_4 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(3 - 9I/4\pi)(6K + 2G)}{2(1 - \alpha^2)(3K + 4G)} - \frac{3G(1 - I/\pi)}{3K + 4G} \right\} \quad (25)$$

$$I = \frac{2\pi\alpha}{(1 - \alpha^2)^{3/2}} \left\{ \cos^{-1} \alpha - \alpha(1 - \alpha^2)^{1/2} \right\} \quad (26)$$

ここに、 P は拘束圧、 K^* は、亀裂を含む岩石の体積弾性係数、 K 、 G はそれぞれ、アスペクト比が α 以外の亀裂を含む岩石の体積弾性係数とせん断弾性係数である

拘束圧の変化によるアスペクト比(α)の変化は、亀裂の大きさが変化しないとすると、以下の式で表される¹⁰⁾。

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{d\phi}{\phi} \quad (27)$$

K-Tモデルとこれらの式を使って、上記例と同じような亀裂性の花崗岩を想定し、拘束圧として土被り100mを仮定し、掘削後拘束圧が解放され、飽和から完全不飽和に変わるとして、亀裂のアスペクト比の異なる3つの場合(0.005, 0.01, 0.05)について、P波速度と間隙率の関係を計算した結果を図-5に示す。ここで、3本の実線は、それぞれのアスペクト比についての緩みの無い場合に対する、また、破線は緩みを考慮した場合の計算結果である。この計算結果からわかる重要な点は、亀裂のアスペクト比が異なると速度の低下率が大きく変わることである。つまり、アスペクト比が大きい場合には低下率は小さいが、アスペクト比が小さい場合には低下率大きい。ここで、アスペクト比が最も小さい0.005の場合の計算値と図-4に示す花崗斑岩の実測値を対比させ、間隙率1%の場合が地山等級A、間隙率2%の場合が地山等級B、間隙率4%の場合が地山等級CI・CIIに対応すると考えると、それぞれの計算値と実測値の速度の低下率がほぼ一致することがわかる。この結果は、亀裂性岩盤をK-Tモデル等を用いてモデル化する

ことにより、事前調査で得られた弾性波速度から掘削後の緩みの影響を受けた速度値を予測することが可能であることを示している。

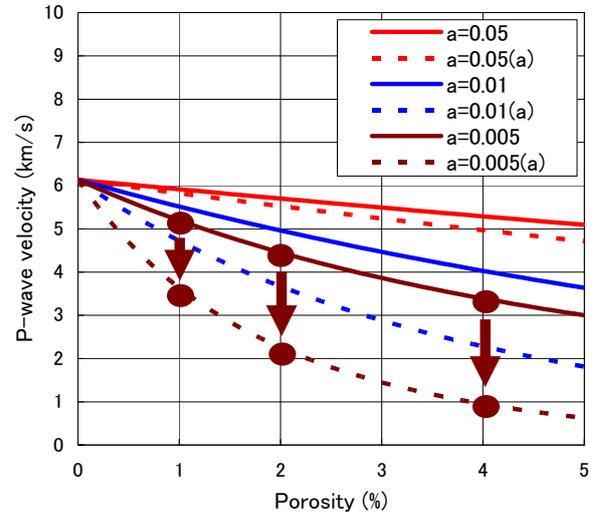


図-5 モデルによるP波速度と間隙率の関係
図中の6本の曲線は、3種類のアスペクト比(0.005, 0.01, 0.05)に対して、緩みの無い場合(実線)と緩みを考慮した場合(破線)の計算値。丸印と矢印は、地山等級A(間隙率1%)、B(間隙率2%)、CI/CII(間隙率4%)に対比される速度低下。

5. まとめと今後の課題

弾性波特性を用いて亀裂性岩盤の亀裂の形状を推定することを目的に、ロックフィジックス分野で利用されているK-Tモデルを花崗岩中で実施された検層データに適用した。推定された亀裂のアスペクト比を、BHTVの画像解析やコア解析によって得られた亀裂の分布や形状と比較し、推定結果の妥当性を検証し、モデルの適用性を確認した。また、トンネル掘削後の緩みによる考えられている弾性波速度の低下を、同じモデルを用いることによって、事前調査で得られる弾性波速度から定量的に予測することが可能であることを示した。

K-Tモデルでは、岩盤中の亀裂は、密度が小さく、ランダムに分布するといった仮定がおかれている。適用に当たっては、その限界に注意する必要があるが、今回の事例に見られるように、その適用性はかなり広いと思われる。今後、他の類似モデルも含めて、実データへの適用を通してモデルの適用限界を明確にするるとともに、拡張モデルの提案などを行っていきたい。

参考文献

- 1) 高橋亨・田中莊一：ロックフィジックスをベースにした物理探査データの解釈技術の研究－岩石物性データの収集と予備的な岩石モデル解析－，第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，2008.
- 2) 高橋亨・田中莊一：ロックフィジックスをベースにした物理探査データの解釈技術の研究（その2）－堆積性軟岩の岩石モデル解析－，第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，2010.
- 3) 岩の力学，材料学会，1993.
- 4) Kuster, G.T. and Toksoz, M.N. : Velocity and attenuation of seismic waves in two phase media, *Geophysics*, 39, 587-618., 1976.
- 5) 石田直人・長秋雄：産総研岡山応力測定コアにおける花崗岩割れ目の特性，日本応用地質学会研究発表会 講演論文集，509-512，2006.
- 6) 斎藤徳美・阿部司・佐藤七郎：複合体の弾性理論を結晶質岩石に適用するに際してのMatrixの弾性定数の見積について，*物理探査*，36, 1-15, 1983.
- 7) 藤田勝代・堀川滋雄・横山俊治：深度600m試錘による岡山県万成花崗岩の割れ目の分布様式，日本応用地質学会平成15年度研究発表会 講演論文集，331-334，2003.
- 8) 藤田勝代・横山俊治：深度750m調査ボーリング孔の花崗岩の割れ目の分布様式（2）－ラミネーションシーティングの深度分布－，日本応用地質学会平成18年度研究発表会 講演論文集，421-424，2006.
- 9) 木村正樹・大橋弘紀：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*，117-125，2002.
- 10) Toksoz, M.N., Cheng, C.H. and Timur, A.: Velocities of seismic waves in porous rocks, *Geophysics*, 41, 621-645, 1976.

STUDY ON ROCK PHYSICAL INTERPRETATION OF GEOPHYSICAL DATA (PART III) - ROCK PHYSICS MODELING OF CRACKED ROCKS -

Toru TAKAHASHI, Masayo FUJITA, Shunji YOKOYAMA and Soichi TANAKA

The Kuster-Toksoz model as a rock physics model is applied to the seismic velocity data obtained in well loggings and laboratory tests to model cracked rocks. In this study, this model is applied to well logging velocity and density data to estimate crack features such as the crack size and shape. The estimated crack features are verified by comparing them with the borehole Televiewer images and drill core observations. It is also demonstrated that this model can be used for quantitative interpretation of seismic velocity reduction due probably to excavation damage of a tunnel, which has been recognized in many surveys in the past.