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５）
－堆積岩の圧縮強度と弾性波速度の関係のモデル化－

高橋　亨[1]・田中荘一[1]

[1]深田地質研究所

Study on rock physical interpretation of geophysical data for geotechnical applications (Part V)
- Rock physics modeling of the compressive strength-seismic velocity relation of sedimentary rocks -

TAKAHASHI Toru[1] and TANAKA Soichi[1]

[1]Fukada Geological Institute

要旨：土木工学分野では，岩石の強度，特に圧縮強度を推定することが必要な場合が多い．そこで，本研究では，堆積岩について，その圧縮強度を弾性波速度から推定することを目的に，ロックフィジックスモデルについて検討を行った．国内の堆積岩を対象に，コアの室内試験で得られた超音波速度および検層による S 波速度と室内三軸試験で得られた圧縮強度のデータを用いて有効媒質モデルの適用性を検討した．圧縮強度と間隙率および弾性波速度と間隙率に関する２つの有効媒質モデルを組み合わせることにより，圧縮強度と弾性波速度との関係をモデル化した．そのモデルを 2 種類の堆積岩データに適用した結果，計算結果と実測データがよく一致した．このことから，ロックフィジックスモデルを利用することにより，弾性波速度から合理的に岩石の圧縮強度を推定することが可能であることがわかった．
キーワード：ロックフィジックス，物理探査，弾性波速度，圧縮強度，堆積岩

Abstract: Estimating strength, especially compressive strength of rocks is one of major problems in many civil engineering applications. We have thus studied a rock physics model for estimating the compressive strength of sedimentary rocks from seismic velocity. Effective medium models are applied to the ultrasonic P-wave velocity in the laboratory and S-wave logging velocity with confined compressive strength measured in the tri-axial compression test, which are obtained for sedimentary rocks in Japan. The confined compressive strength – seismic velocity relation is modeled by combining two effective medium models for the confined compressive strength vs. porosity and seismic velocity vs. porosity. Applications of the model to two sets of actual measured data show good agreements between predicted and measured data, indicating that the compressive strength can be rationally predicted from seismic velocity using a rock physics model.
Keywords: rock physics, geophysics, seismic velocity, compressive strength, sedimentary rock

1.　はじめに

トンネルや地下構造物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，強度特性を把握する必要がある．従来から，原位置での岩盤試験やボーリングコアを用いた室内試験により変形係数や強度が測定されている．しかしながら，これらの測定データは，調査対象岩盤の

限られた地点のデータであるため，地質調査に基づいた岩盤区分等と組み合わせて調査地全体の広域的な岩盤の力学モデルが構築されるのが一般的である．一方，物理探査は広域の地下構造や物性を把握することができるため，物理探査で得られる弾性波速度等から，変形係数や強度を推定することができれば，より効率的かつ精度の高い岩盤の力学モデルの構築が可能になると考えられる．

そこで，前報(高橋・田中，2010)では，より合理的に，弾性波特性から岩盤の変形係数（静的ヤング率)と一軸圧縮強度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岩石モデルとパーコレーション理論の適用を試みた．その結果，既存の粒状媒質モデルに粒子間のすべりの概念を導入することにより，歪領域の大きい静的ヤング率をモデル化できる可能性を示した．また，一軸圧縮強度と間隙率の関係にパーコレーション理論を適用することにより，一軸圧縮強度の最大値と弾性波速度との関係をモデル化できることを示した．

本報では，一軸圧縮強度に加えて，実際の設計・施工において重要な物性である三軸圧縮強度について，ロックフィジックス分野で利用されている岩石モデルを適用することにより弾性波速度からの推定が可能かどうかについて検討を行う．検討に使用するデータは，ロックフィジックスデジタルライブラリー（金子・高橋，2008）に収録された堆積性軟岩と堆積岩での室内試験データと検層データである．

２．　圧縮強度と弾性波速度の関係のモデル化

前報では，圧縮強度と同様に工学的に重要な静的ヤング率（歪の大きな領域でのヤング率）のモデル化に岩石モデルが適用可能であることを示した．岩石の堆積変形に関係するヤング率と違い，圧縮強度，特に一軸圧縮強度は，岩石の局所的な状態に支配されて決まることが知られている．しかし，Oda et al.(2002)は，拘束状態にある岩石の場合には，破壊は局所的な状態よりも岩石全体の状態によって決まり，岩石中のクラック密度が臨界値に達した時に起こると主張した．この考えに従うと，岩石の圧縮強度もヤング率同様，有効媒質モデルで表せる可能性がある．そこで，本研究では，三軸圧縮強度を有効媒質モデルで表すことを試みた．

岩石の最大強度は，岩石固有の物性である c(粘着力）と φ （内部摩擦角）を用いて，(1)式で表される(Goodman，1989）：

$$\sigma_{\max} = q_u + \sigma_3 \cdot \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2}) \qquad (1)$$
$$q_u = 2c \cdot \tan(45 + \frac{\varphi}{2})$$

ここに，$\sigma_{\max}$ は，岩石の最大強度，σ_3 は，拘束圧である．

有効媒質モデルでは，(2)式に示すように，任意の間隙率における岩石の最大強度を，間隙率ゼロの場合の岩石に間隙率が臨界値（臨界間隙率）の場合の岩石が，$f(0<f<1)$の割合で混ざる場合の岩石の強度として表す．ここでは，有効媒質の平均式としてReussの平均式を使う．

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{1-f}{\sigma_{\max(1)}} + \frac{f}{\sigma_{\max(2)}} \qquad (2)$$
$$\phi = \phi_c \cdot f$$

ここに，σ は，間隙率 ϕ の時の岩石の最大強度，$\sigma_{\max(1)}$ と $\sigma_{\max(2)}$ は，それぞれ間隙率がゼロの場合の岩石の最大強度と臨界間隙率（ϕ_c）の場合の最大強度である．(1)式と(2)式を使うことにより，拘束圧下にある任意の間隙率の岩石の最大強度を

計算することができる.

一方、同じく有効媒質モデルを用いて弾性波速度と間隙率の関係をモデル化できる（詳しくは，高橋・田中、2009, Mavko et al.，2009 等を参照)。次章で示す実データへの適用では，粒状媒質モデルとして広く利用されている砂質頁岩モデル(Avseth et al.，2005)を用いている.

圧縮強度と間隙率のモデルおよび弾性波速度と間隙率の両モデルを組合せることにより，圧縮強度と弾性波速度のモデルを得ることが出来る.

３． 実データへの適用と評価

3.1 堆積性軟岩への適用

最初の適用例は，国内の更新世の堆積性軟岩で実施されたサスペンションPS検層によるS波速度と同じボーリング孔で採取されたコア試料を用いた室内岩石試験による圧縮強度を用いた例である.図１と２にそれぞれ，圧縮強度と間隙率，S 波速度と間隙率の関係の実測データを示す．堆積性軟岩は，砂岩，砂質泥岩，泥岩の３種類である．検層を実施したボーリング孔長は約 300m である.圧縮強度は，室内三軸圧縮試験により，試料の採取深度相当の拘束圧をかけた状態で測定された.

図１および２には，有効媒質モデルを用いた計算結果も合わせて示した．圧縮強度は，表１に示すパラメータを用いて，(1)式と(2)式から計算した．Goodman (1989) に示された数値を参考に，間隙率ゼロの場合の岩石として石英岩，臨界間隙率(0.8)の場合の岩石として頁岩の代表的な c, φ の値を用いている．弾性波速度は，表２に示すパラメータを用いて,砂質頁岩モデルにより計算した.この計算では，間隙率ゼロの場合の岩石には石英の物性（体積弾性係数とせん断弾性係数）を，臨界間隙率の場合の岩石には頁岩の物性をもとに表

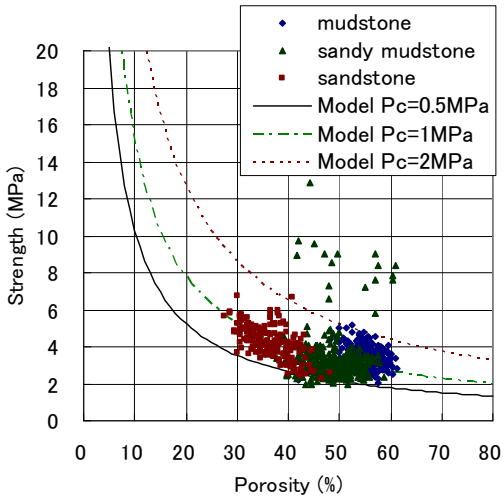

図１ 圧縮強度と間隙率の関係
実測データ（点）に，モデルによる計算値（曲線）を重ねた結果．計算値は，３ 種類の拘束圧(0.5, 1.0, 2.0Mpa)に対応する.

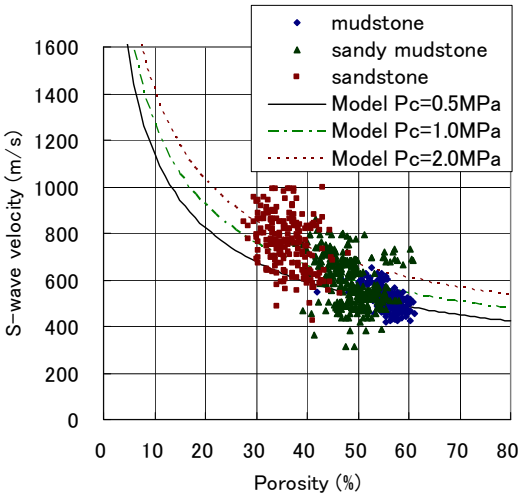

図２ S 波速度と間隙率の関係
実測データ（点）に，モデルによる計算値（曲線）を重ねた結果．計算値は，３ 種類の拘束圧(0.5, 1.0, 2.0MPa)に対応する.

表１ 圧縮強度の計算に使用したパラメータ

Parameter	Value
c for Quartzite	70.6 MPa
φ for Quartzite	30 degrees
c for Shale	0.3 MPa
φ for Shale	7.5 degrees
Critical porosity	0.8

表２　弾性波速度の計算に使用したパラメータ

Parameter	Value
Bulk Modulus of Quartz at zero porosity	36.6 MPa
Shear Modulus of Quartz at zero porosity	45.0 GPa
Bulk Modulus of Clay at critical porosity	21 GPa
Shear Modulus of Clay at critical porosity	7 GPa
Critical Porosity	0.8
Coordination Number	21

に示すパラメータを用いて Hertz-Mindlin の式（Mindlin, 1949）により計算した物性を用いた．

両データの計算とも，コア試料の採取深度相当の拘束圧として，0.5，1.0，2.0MPa の３種類の拘束圧に対して計算を行っているが，いづれも実測データとよく一致していることがわかる．

この２つの有効媒質モデルを組合せることにより，圧縮強度とＳ波速度の関係を求めることができる．同じく３種類の拘束圧について計算した結果と実測データを図３に示す．砂岩（茶色）のデータの弾性波速度モデルの適合度がやや悪いため，圧縮強度との関係でもやや適合度が悪いが，全体としては，計算値と実測データはほぼ一致していることがわかる．つまり，有効媒質モデルを用いることにより，原位置で，弾性波速度（ここではＳ波速度）から岩石の圧縮強度を推定できる可能性があることが示された．

3.2　堆積岩への適用

次の適用例は，国内各地の堆積岩のボーリングコア試料や露頭からの採取試料を用いて室内試験で測定された超音波速度と圧縮強度のデータ（星野他，2001）を用いた例である．超音波速度は，基礎物性として測定された自然状態での測定値を使用した．圧縮強度は，拘束圧を変えた三軸圧縮試験で得られた値を使用した．図４に，拘束圧が 25, 50, 100, 150MPa の場合の圧縮強度と間隙率の実測データを示す．

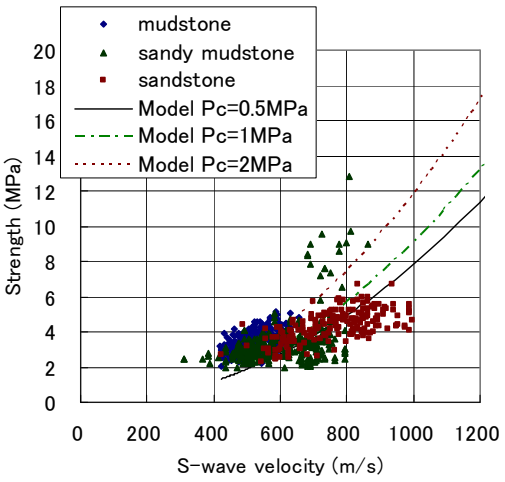

図３　圧縮強度とＳ波速度の関係
実測データ（点）に，モデルによる計算値（曲線）を重ねた結果．計算値は，３種類の拘束圧(0.5，1.0，2.0MPa)に対応する．

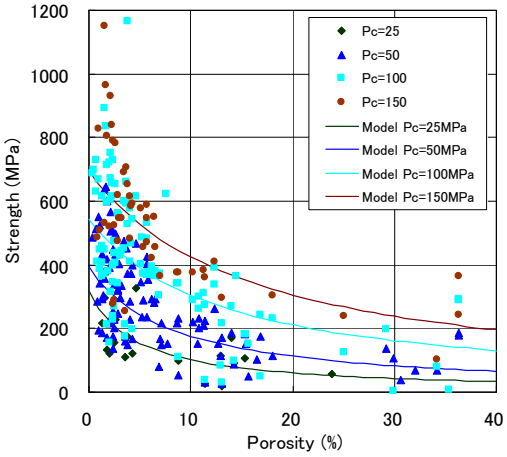

図４　圧縮強度と間隙率の関係
実測データ（点）に，モデルによる計算値（曲線）を重ねた結果．計算値は，４種類の拘束圧(25, 50, 100, 150MPa)に対応する．

図４には，有効媒質モデルを用いて４種類の拘束圧について計算した結果も合わせて示した．この計算では，堆積性軟岩の場合と同様，砂質頁岩モデルを用いた．圧縮強度のモデル計算では，表１に示す堆積性軟岩のモデル計算と同じ岩石物性を用いた．ただし，図４からわかるように，堆積岩の間隙率は，図１に示す堆積性軟岩に比べ小さ

いため，ここでの計算では臨界間隙率を0.4としている．計算結果は，それぞれの拘束圧における実測データとよく一致していることがわかる．

弾性波速度のモデル化でも，同じく砂質頁岩モデルを用いて計算を行った．ただし，ここでの臨界間隙率に対する岩石物性の計算では，間隙率を0.4，それに応じた配位数として6を，超音波速度は自然状態で測定されているので，拘束圧を0.1MPaとして，石英の基礎物性を用いてHertz-Mindlinの式により計算を行った．

以上の２つの有効媒質モデルを組合せて圧縮強度と超音波速度（P波速度）との関係を求めた結果を，その他の関係図と一緒に拘束圧ごとに表示したものを図5に示す．実測データのばらつきは大きいものの，有効媒質モデルによる計算結果は実測データの平均的特徴をよく表していることがわかる．この結果は，有効媒質モデルを用いることにより，合理的に弾性波速度から岩石の圧縮強度を推定できることを示している．

４．まとめと今後の課題

弾性波探査で得られる動的な弾性係数から工学的に重要な変形係数や強度を合理的に推定することができれば，設計・施工に必要な広域での岩盤の力学モデルを効率的且つ精度よく構築することができる．そこで，本研究では，弾性波探査で得られる弾性波速度と圧縮強度との関係を合理的に説明することを目的に，検層と室内試験で得られた弾性波速度データと圧縮強度データを用いてモデル化の検討を行った．

ロックフィジックス分野で利用されている粒状媒質モデルの１つである砂質頁岩モデルを利用して圧縮強度と間隙率の関係および弾性波速度（P波，S波）と間隙率の関係をモデル化し，両モデルを組合せることにより，弾性波速度と圧縮強度の関係を表すモデルを求めた．国内の3箇所の堆積性軟岩で実施された検層によるS波速度と岩石コアの室内試験による圧縮強度データならびに国内の堆積岩から広く収集された岩石コア試料・露頭試料を用いた室内試験による超音波速度と圧縮強度データに適用した結果，有効媒質モデルにより実測データをよく表現できることが示された．つまり，岩石物理モデルを用いることにより，弾性波探査で得られる弾性波速度から工学的に重要な岩石，岩盤の圧縮強度を合理的に推定できる可能性があることが示された．

前報で報告したヤング率，一軸圧縮強度と合わせて，ロックフィジックスの考え方や岩石モデルを適用することにより，いわゆる歪レベルの小さい領域での弾性波特性から工学的に重要な歪レベルの大きい領域での力学特性を推定できる可能性を示した．今後は，さらに多くの実データへの適用を通じて，モデルの適用限界を把握するとともに，精度や信頼性についても検討を行っていきたい．

参考文献

Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G. (2005): Quantitative seismic interpretation, Cambridge University Press.

Goodman, R.E. (1989) : Introduction to Rock mechanics, 2nd Edition, John Wiley & Sons.

星野一男，加藤碩一，深部物性データ編集委員会(2001)：本邦産岩石の深部物性データ集，産業技術総合研究所，地質調査総合センター．

金子誠，高橋亨(2008)：ロックフィジックスデジタルライブラリー，深田地質研究所年報，No.9.

Mavko, G.., Mukerji, T. and Dvorkin, J. (2009): The rock physics handbook, second edition,

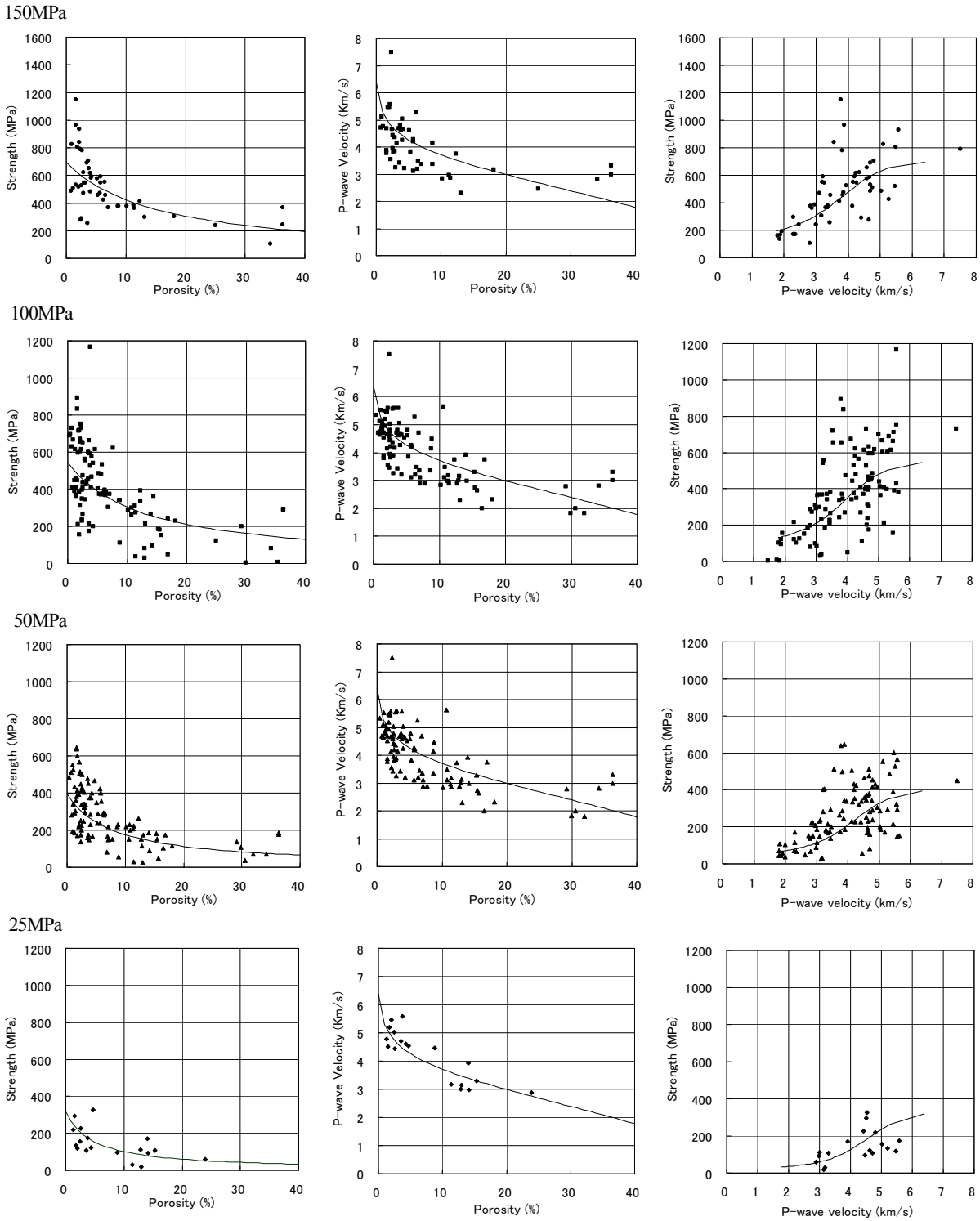

図5　圧縮強度と間隙率（左），P 波速度と間隙率（中），圧縮強度と P 波速度（右）の関係
実測データ（点）に，モデルによる計算値（曲線）を重ねた結果．上から順に拘束圧 150，100，50，25MPa の場合の関係図

Cambridge University Press.

Mindlin, R. D. (1949): Compliance of elastic bodies in contact, J. Appl. Mech., **16**, 259-268.

Oda, M., Katsube, T. and Takemura, T. (2002): Microcrack evolution and brittle failure of Inada granite in triaxial compression tests at 140MPa, J. Geophys. Res., 107(B1), ECV9-1-9-17.

高橋亨, 田中荘一(2009)：ロックフィジックスをベースにした浅層物理探査データの解釈技術に関する研究－堆積性軟岩の岩石モデル解析－, 物理探査, 第62巻, 第4号, 437-446.

高橋亨, 田中荘一(2010)：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４）－堆積岩の静的ヤング率と一軸圧縮強度のモデル化－, 深田地質研究所年報, No.11, 129-137.