

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11）
－岩石の圧縮強度と弾性波速度の関係についての再考－

高橋 亨

深田地質研究所

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

- Revisit of the relationship between seismic velocity and compressive strength of a rock-

TAKAHASHI Toru

Fukada Geological Institute

要旨：土木構造物等の設計・施工に不可欠な岩盤の圧縮強度を弾性波速度から推定することができれば、広域的な岩盤の強度モデルを効率的・経済的に構築することができ大変有効である。本研究では、一軸圧縮強度については、従来から提案されている P 波速度との経験式を再整理し、実データとの比較を通じて、適用上の課題を指摘した。一方、三軸圧縮強度については、Sharma et al. (2011) が、砂や粘土にセメントを混ぜた人工土試料を用いた室内三軸圧縮試験での測定結果から三軸圧縮強度と動的せん断弾性係数の間で示した簡単な関係を、実際の堆積性軟岩の室内試験および検層で得られた圧縮強度と弾性波速度から求められた動的せん断弾性係数のデータを用いて検証を行った。その結果、実際の岩石や岩盤においても、圧縮強度と弾性波速度から得られる動的せん断弾性係数との間に簡単な関係があることがわかった。また、岩石物理モデルでもこの関係をモデル化できることを示した。

キーワード：岩石の圧縮強度、弾性波速度、動的せん断弾性係数、岩石物理モデル、堆積性軟岩

Abstract: A compressive strength model of a large rock mass can be effectively and economically built if compressive strength of a rock or rock mass can be estimated from seismic velocity. In this study, we first summarize empirical equations between uniaxial compressive strength of a rock and P-wave velocity which have been so far proposed, and point out the problems in application of the empirical equations by comparing with real data. For the triaxial compressive strength, a simple linear relationship between triaxial compressive strength and dynamic shear modulus obtained S-wave velocity measurements in a triaxial compression test in the laboratory by Sharma et al. (2011) is verified by the data measured in the laboratory and well logging for real soft sedimentary rocks. The data for real rocks show that there is also a simple linear relationship between triaxial compressive strength and seismic velocity derived dynamic shear modulus for a real rock and rock mass. Rock physics model can also represent the linear relationship of these two properties of a rock.

Keywords: compressive strength of a rock, seismic velocity, dynamic shear modulus, rock physics model, soft sedimentary rock

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、対象とする岩盤の強度特性のモデル化が必要である。通常は、調査サイトに掘削された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た岩石強度をベースに、地質・岩盤分類に基づいてサイトあるいはルート全体の強度モデルとして拡張、利用されるのが一般的である。しかしながら、数少ないボーリング地点での測定データに基づいたモデル化では、特に複雑な地質構造を有するサイトなどでは、その精度や信頼性に問題が生じる場合がある(高橋, 2017)。

物理探査は広域の地下構造や物性を非破壊的かつ経済的に調査できる特長を有する。そのため、物理探査で得られる弾性波速度等の物性から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強度モデルの構築が可能になると考えられる。そこで古くから、弾性波探査で得られる弾性波速度と原位置試験や岩石コアの室内試験で測定される強度との相関関係や経験式を利用して弾性波速度から強度を推定する手法が用いられている(例えば、地盤工学会, 2001 や Zhang, 2009)。しかしながら、一般に数量の少ないデータに基づく相関式や適用地質に制約の多い経験式では、推定精度や汎用性の面で課題がある。

そこで、筆者たちは、より合理的に弾性波特性から岩盤の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提案されている岩石物理モデルを利用して岩石の強度と弾性波速度との関係をモデル化する検討を行ってきた。岩石物理モデルでは、岩石の力学的特性を左右する亀裂や間隙と物性との関係をモデル化の基本とする。そこで、筆者たちも圧縮強度と間隙率の関係を有効媒質モ

デルで表し、同じく有効媒質モデルで表される弾性波速度と間隙率の関係と組み合わせることによって圧縮強度と弾性速度の関係をモデル化し、実データにより検証し、その実用性を明らかにしてきた(高橋・田中, 2013 ; 高橋, 2016)

岩石の強度を表す物性値として一軸圧縮強度が広く利用されている(例えば、山口・西松, 1991)。そのため、上述の通り、一軸圧縮強度と弾性波速度、特にP波速度の関係については多くの経験式が提案され、弾性波速度から岩石の一軸圧縮強度を推定するために利用されている。そこで、本稿では、筆者達が、これまでに提案されている多くの経験式をまとめた結果を示し(Takahashi and Tanaka, 2017)、これらの経験式を利用する場合の留意点について述べる。

一方、三軸圧縮強度と弾性波速度の関係については、Sharma et al. (2011) は、室内三軸圧縮試験において、载荷時に超音波速度(S波速度)の計測を行い、得られる動的せん断弾性係数と破壊(降伏)時の応力、つまり圧縮強度との関係を求め、両者の関係が簡単な直線的な関係で表せることを示した。この結果は、簡単な式によって弾性波速度から岩石の(三軸)圧縮強度を推定できることを示しており、大変興味深い。しかしながら、彼らの研究は、砂や粘土にセメントを混ぜた人工材料を試験試料として用いており、動的せん断弾性係数も1GPa以下の土質材料を想定した試験での結果である。そこで、本稿では、実際の岩石・岩盤を対象に室内試験および検層で得られた弾性波速度と三軸圧縮強度との関係を調べ、上記の結論を検証した結果を示す。さらに、筆者達がこれまでに提案してきた岩石物理モデル(高橋・田中, 2013 ; Takahashi and Tanaka, 2017)の適用結果を示す(高橋, 2017)。

2. 一軸圧縮強度と P 波速度に関する経験式

一軸圧縮強度と弾性波速度 (P 波速度) の経験式はこれまでに数多く提案, 利用されている. 土木分野はもちろん, 鉱山や石油・ガス開発分野においても数多くの経験式が提案されている. それらの経験式は, Schön(2011), Zhang(2005), Zoback(2007)に多くが記載されているので, 筆者達はそれらの経験式に, 最近提案されたもの (Sharma and Singh, 2008; Karakul and Ulsay, 2015)を加えて, 表 1 としてまとめた (Takahashi and Tanaka, 2017). これらの経験式で使用されているデータの多くは, 室内超音波速度測定で得られた P 波速度と一軸圧縮試験で得られた一軸圧縮強度であるが, 石油・ガス開発分野で提案されている経験式には, 速度検層 (音波検層) で得られた P 波速度も多い. 表 1 には, 経験式の記載された文献ならびに対象岩石の種類も記載しているので, 経験式の使用にあたっては, それらを参照することが重要である.

図 1 には, 高橋・稲崎(2010)に記載されているダムのロック材の室内試験で得られた P 波速度と一軸圧縮強度のデータに, 表 1 に示された経験式を, 岩種ごとに重ねてプロットした結果を示した. 経験式の数が少なく, またデータのばらつきも大きい, 火山岩類と花崗岩類の場合, 提案されている経験式は, 実データの平均的な特徴をよく表していることがわかる. 一方, 堆積岩の場合には, 経験式は多いものの, 実データへの適合度はあまり高くなく, 特に高速度部分のデータの適合度が低いことがわかる. 高橋・田中(2015)が指摘しているとおり, 一軸圧縮強度の場合, 測定値のばらつきが大きい, 平均値よりも最大値が実際の岩石固有の強度を表す等の特徴があるため, 経験式の使用にあたっては, できるだけ原論文に戻り, データを確認の上, 利用することが肝要である.

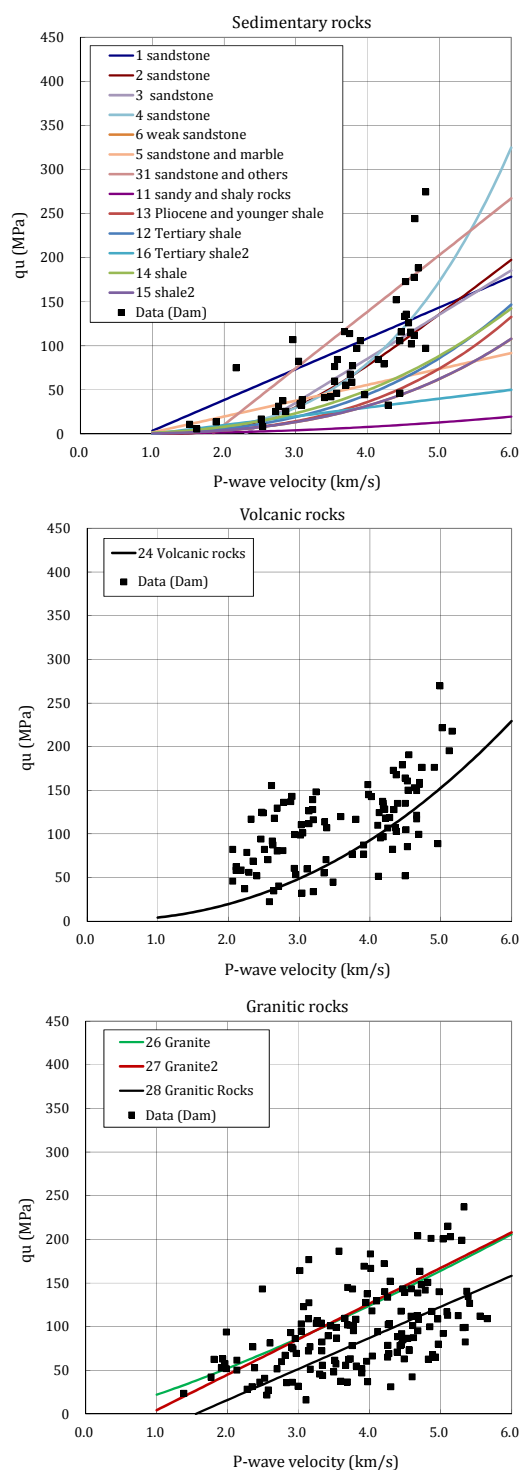


図 1 一軸圧縮強度 (縦軸) と P 波速度 (横軸) の関係 (点: 実測データ (上: 堆積岩類, 中: 火山岩類, 下: 花崗岩類), 実線: 表 1 に示す経験式 (番号は, 表 1 に示す経験式の番号)).

表1 一軸圧縮強度と弾性波速度（P波速度）の関係についての経験式（Takahashi and Tanaka, 2017）

No.	Equation	Rock type	Reference
1	$q_u = 35.0V_p - 31.5$	Sandstone	Freyburg (1972)
2	$q_u = 1277e^{(-11.2/V_p)}$	Sandstone	McNally(1987)
3	$q_u = 50.0V_p - 114.5$	Sandstone	Schön (2011)
4	$q_u = 3 \times 10^{-0.65} V_p^{3.45}$	Sandstone	Schön (2011)
5	$q_u = 18V_p - 16.26$	Sandstone and marble	Howarth et al. (1989)
6	$q_u = 0.499V_p^3$	Weak and unconsolidated sandstones	Zoback (2007)
7	$q_u = 3.3 \times 10^{-20} \rho^2 V_p^2 \{(1+v)/(1-v)\}^2 (1-2v)(1+0.78V_{clay})$	Sandstone with $q_u > 30\text{MPa}$	Fjaer et al. (1992)
8	$q_u = 1.745 \times 10^{-9} \rho V_p^2 - 21$	Coarse grained sands and conglomerates	Moos et al. (1999)
9	$q_u = 42.1 \exp(1.9 \times 10^{-11} \rho V_p^2)$	Consolidated sandstones with $0.05 < \phi < 0.12$ and $q_u > 80\text{MPa}$	Zoback (2007)
10	$q_u = 3.87 \exp(1.14 \times 10^{-10} \rho V_p^2)$	Sandstone	Zoback (2007)
11	$q_u = -0.98V_p + 0.68V_p^2 + 0.98$	Sandy and shaly rocks	Gorjainov and Ljachovickij (1979)
12	$q_u = 0.77V_p^{2.93}$	Mostly high porosity Tertiary shale	Horsrud (2001)
13	$q_u = 0.43V_p^{3.2}$	Pliocene or younger shale	Zoback (2007)
14	$q_u = 1.35V_p^{2.6}$	Shale	Zoback (2007)
15	$q_u = 0.5V_p^3$	Shale	Zoback (2007)
16	$q_u = 10(V_p - 1)$	Mostly high porosity Tertiary shale	Lal (1999)
17	$q_u = \{(V_p - 1.4)/0.2\}^{1.43}$	Tertiary tuffaceous mudstone with $q_u < 10\text{MPa}$	Aydan et al. (1992)
18	$\log q_u = 0.444V_p + 0.003$	Schist	Golubev and Rabinovich (1976)
19	$q_u = 36.0V_p - 31.2$	Coal measure rocks	Göktan (1988)
20	$q_u = 2.45V_p^{1.82}$	Limestone	Militzer and Stoll (1973)
21	$\log q_u = 0.358V_p + 0.283$	Limestone	Golubev and Rabinovich (1976)

22	$q_u = 10^{(2.44+0.358V_p)} / 145$	Limestone and dolomite	Golubev and Rabinovich (1976)
23	$q_u = 31.5V_p - 63.7$ ($r^2=0.80$)	Dolomite, marble, limestone	Yasar and Erdogan (2004)
24	$q_u = 43V_p^{2.23}$	Mainly volcanic rocks	Inoue and Ohmi (1981)
25	$q_u = 10.79\{V_p^2 + 4(\rho-1)\}^{1.447}$	Mainly volcanic rocks	Inoue and Ohmi (1981)
26	$q_u = 22.03V_p^{1.247}$ ($r^2=0.72$)	Granites	Sousa et al. (2005)
27	$q_u = 40.7V_p - 36.31$	Granites	Vasconcelos et al. (2008)
28	$q_u = 35.54V_p - 55$ ($r^2=0.64$)	Granitic rocks	Tugul and Zarif (1999)
29	$q_u = 1.02V_p^3$	Granites, andesite, sandstone	Ohkubo and Terasaki (1971)
30	$q_u = 9.95V_p^{1.21}$ ($r^2=0.69$)	Dolomite, sandstone, limestone, marl, diabase, serpentine, hematite	Kahraman (2001)
31	$q_u = 64.2V_p - 117.99$	Sandstone, weathered basalt, phyllite, schist, coal, shaly rocks	Sharma and Singh (2008)
32	$\log q_u = 1.368 + 0.794 \log(1 + 0.001V_p) - 0.201S_r - 5.6\phi V_{clay}$	Marl, sandstone, andesite, limestone, tuff, ignimbrite, claystone	Karakul and Ulusay (2015)

q_u : unconfined compressive strength in MPa, V_p : P-wave velocity in km/s, ρ : density in g/cm³, V_{clay} : clay content in fraction, ϕ : porosity in fraction, S_r : degree of saturation in fraction. r^2 is the determination coefficient.

3. 三軸圧縮強度と弾性波速度の関係

Sharma et al. (2011) が、人工土質試料を用いた室内三軸圧縮試験で得た圧縮強度（降伏時の差応力）と計測した S 波速度と密度から計算したいわゆる動的せん断弾性係数の関係を図 2 に示す。ここに、横軸の動的せん断弾性係数は、载荷時に計測された S 波速度の最大値に対応する値である。この結果は、三軸圧縮強度は、S 波速度から求められるせん断弾性係数から簡単な関係式により推定できることを示している。この関係が実際の岩石や岩盤で成立するかどうかを、室内試験および検層による S 波速度データを用いて検証を行った。

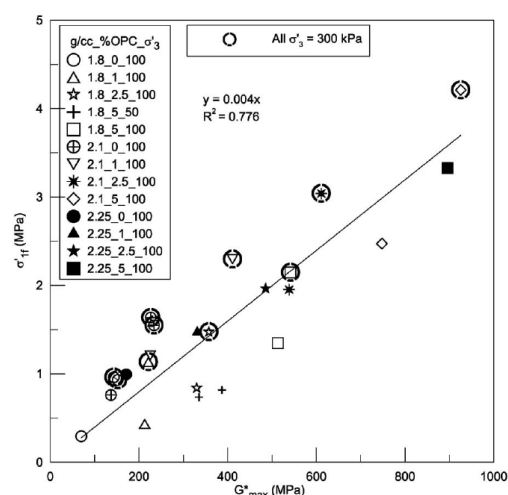


図 2 三軸圧縮強度と動的せん断弾性係数の関係 (Sharma et al., 2011). シンボルは、密度、拘束圧、配合比の異なる試料を表す。実線はデータの回帰直線を表す。

3.1 室内試験データ

検証に使用した岩石試料は、鮮新世の堆積性軟岩に属する泥質砂岩と砂質泥岩に掘削された深度 300m のボーリング孔で採取された岩石試料である。砂質泥岩は深度 10-150m で採取された 57 個、泥質砂岩は深度 140-260m で採取された 64 個の試料を用いた。室内三軸圧縮試験では、岩石試料採取深度に応じた拘束圧をかけた状態で P 波および S 波の超音波速度測定が行われるとともに、破壊（降伏）時の差圧 ($\sigma_1 - \sigma_3$)、つまり圧縮強度が求められている。

図 3 に、試験で得られた圧縮強度と間隙率の関係を、図 4 に、超音波 S 波速度と密度から計算した動的せん断弾性係数と間隙率の関係を示す。泥質砂岩と砂質泥岩は間隙率も強度特性も大きく異なることがわかる。

図 5 は、圧縮強度と動的せん断弾性係数の関係を示す。異なる特性を有するにもかかわらず、両物性の関係は直線的な関係を示しており、Sharma et al. (2011) が土質材料で得た結論を支持しているようにみえる。

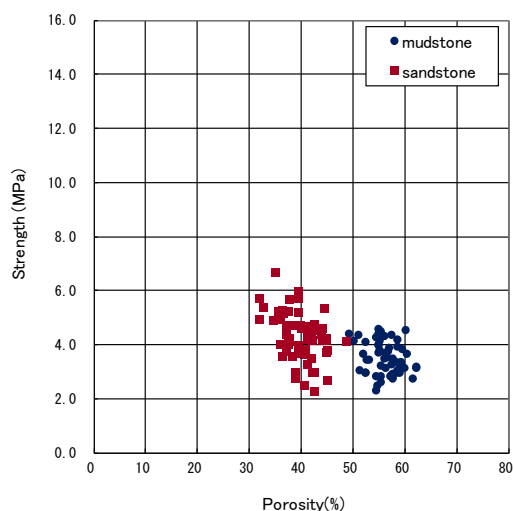


図 3 三軸圧縮強度（縦軸）と間隙率（横軸）の関係。青：砂質泥岩，茶：泥質砂岩。

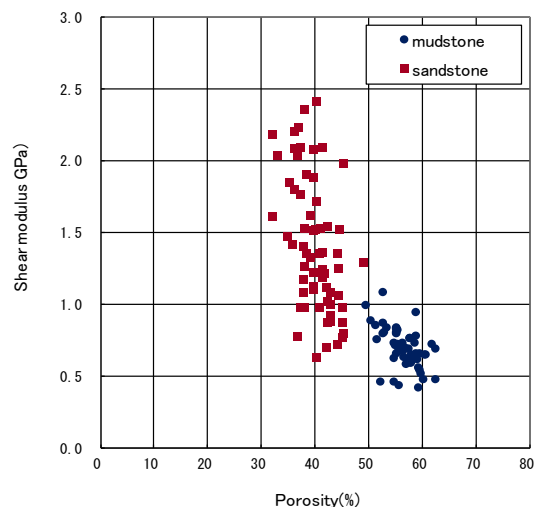


図 4 動的せん断弾性係数（縦軸）と間隙率（横軸）の関係。青：砂質泥岩，茶：泥質砂岩。

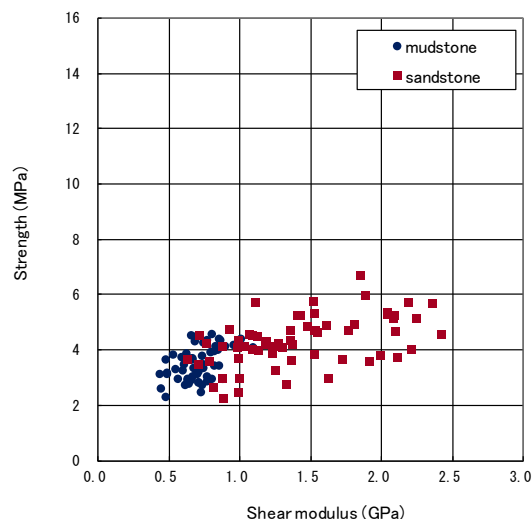


図 5 三軸圧縮強度（縦軸）と動的せん断弾性係数（横軸）の関係。青：砂質泥岩，茶：泥質砂岩。

3.2 検層データ

検証に使用したデータは、上記岩石試料が得られた地点と同じ堆積性軟岩に属する泥質砂岩と砂質泥岩に掘削されたボーリング孔内で実施されたサスペンション PS 検層による S 波速度と検層が実施されたボーリング孔で採取された岩石試料の室内三軸圧縮試験で得られた圧縮強度のデータである。三軸圧縮試験では、試料が採取された深度

に対応する拘束圧がかけられている。

図6に、室内試験で得られた三軸圧縮強度と間隙率の関係ならびに検層で得られたS波速度と室内試験で得られた密度から計算した動的せん断弾性係数と間隙率の関係を示した。検層データについても、両岩の特性が大きく異なっていることがわかる。

図7に、検層で得られたS波速度より求められた動的せん断弾性係数と圧縮強度と関係を示す。この結果も、室内試験データによる結果同様、三軸圧縮強度と動的せん断弾性係数の直線的な関係を示しており、Sharma et al.(2011)の結論を支持している。

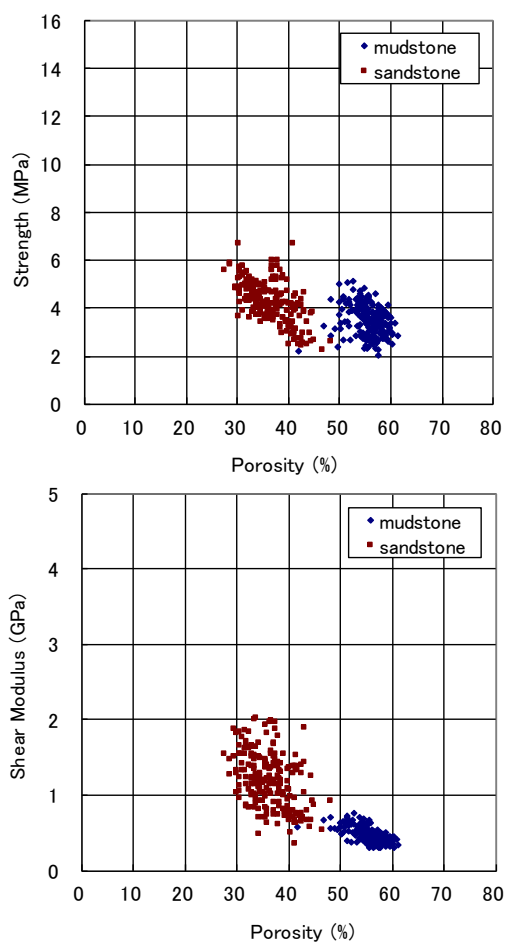


図6 三軸圧縮強度と間隙率の関係(上)と動的せん断弾性係数と間隙率の関係(下)。青：砂質泥岩、茶：泥質砂岩。

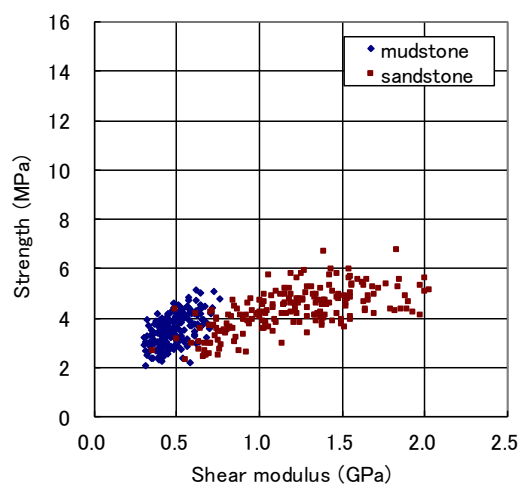


図7 三軸圧縮強度(縦軸)と動的せん断弾性係数(横軸)の関係。青：砂質泥岩、茶：泥質砂岩。

4. 圧縮強度のモデル化

高橋・田中(2013)に従い、三軸圧縮強度と間隙率の関係を有効媒質モデルで表し、同じく有効媒質モデルで表せる動的せん断弾性係数と間隙率の関係を組み合わせることにより、三軸圧縮強度と動的せん断弾性係数の関係をモデル化した。図8に、三軸圧縮強度と間隙率の関係のモデル計算値を実測データに重ねて示す。モデル計算に使用したパラメータを表2に示す。

図9に、動的せん断弾性係数と間隙率の関係のモデル計算値を実測データに重ねて示す。モデル計算に使用したパラメータを表3に示す。

この両モデルを組み合わせることによって得られる三軸圧縮強度と動的せん断弾性係数の関係のモデル計算値を、実測データとともに図10に示す。モデル計算値は、この物性値の範囲では直線的な関係を示しており、実測データとの一致もよい。この結果は、岩石物理モデルによっても、三軸圧縮強度と動的せん断弾性係数の直線的な関係をモデル化できること、すなわち、Sharma et al.(2011)の結論を説明できることを示している。

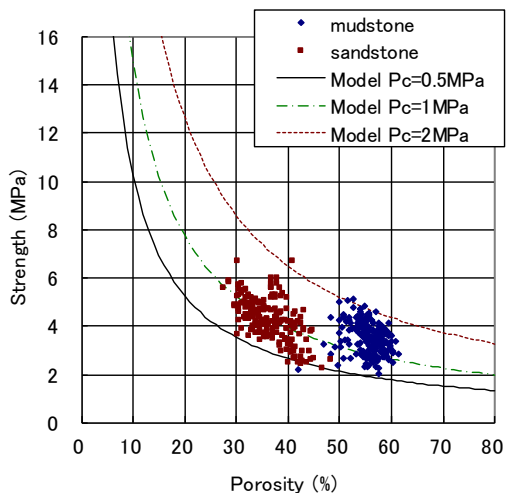


図8 圧縮強度（縦軸）と間隙率（横軸）の関係。実線、一点鎖線、点線はそれぞれ、拘束圧 0.5, 1.0, 2.0MPa に対するモデル計算値。

表2 計算に使用したパラメータ

Physical property	Value
Critical porosity	0.8
Cohesion of Quartzite	70.6 MPa
Friction angle of Quartzite	30 deg.
Cohesion of Shale	0.3 MPa
Friction angle of Shale	7.5 deg.

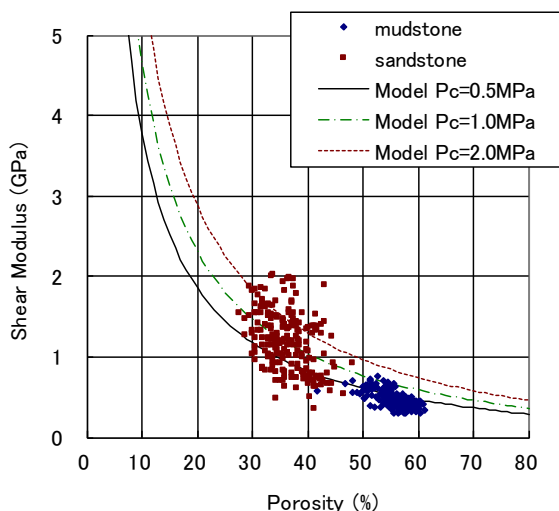


図9 動的せん断弾性係数（縦軸）と間隙率（横軸）の関係。実線、一点鎖線、点線はそれぞれ、拘束圧 0.5, 1.0, 2.0MPa に対するモデル計算値。

表3 計算に使用したパラメータ

Physical property	Value
Coordination number	21
Critical porosity	0.8
Bulk modulus of quartz	36.6 GPa
Shear modulus of quartz	45.0 GPa
Bulk modulus of clay	21.0 GPa
Shear modulus of clay	10 GPa

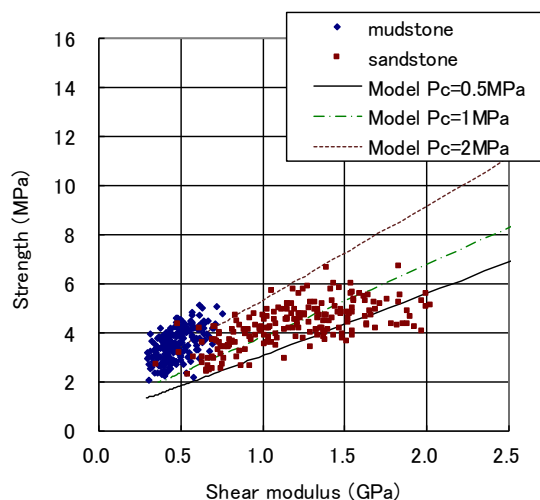


図10 圧縮強度（縦軸）と動的せん断弾性係数（横軸）の関係。実線、一点鎖線、点線はそれぞれ、拘束圧 0.5, 1.0, 2.0MPa に対するモデル計算値。

5. おわりに

弾性波探査で得られる弾性波特性から工学的に重要な岩盤の強度特性を推定することができれば、土木構造物の設計・施工に必要な広域での岩盤の強度モデルを効率的且つ精度よく構築することができる。そのため、従来から原位置でのデータ間の相関や経験式を利用して弾性波速度から岩盤の強度特性が推定されてきた。

そこで、本稿では、まず、一軸圧縮強度については、これまでに提案されている一軸圧縮強度と弾性波速度（P 波速度）の経験式をまとめ、実測データとの対比を通じて、留意点を述べた。一方、

三軸圧縮強度については, Sharma et al. (2011)が人工土質材料の室内試験で得た強度と弾性波速度 (S 波速度) から求められる動的せん断弾性係数との直線的な関係を, 実際の岩石の室内試験および岩盤での速度検層での S 波速度を用いて, 検証を試みた。その結果, 岩石, 岩盤に対しても両物性間に直線的な関係があることが確かめられた。また, 岩石物理モデルによってもこの関係をモデル化できることを確かめた。

これらの結果は, 従来, 弾性波速度から岩石・岩盤の圧縮強度を推定するために用いられてきた圧縮強度と弾性波速度の関係についての経験式が妥当なこと, また, 岩石物理モデルを利用することによって両物性間の関係をモデル化でき, より精度の高い推定が可能であることを示している。

文献

アイダン オメール・赤木知之・伊東孝・川本 眺万 (1992) : スクィーズィング地山におけるトンネルの変形挙動とその予測方法について, 土木学会論文集, No. 448/III-19, 73-82.

Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, A.M. and Risnes, R. (1992): Petroleum Related Rock Mechanics, Elsevier, Amsteram.

Freyburg, D. (1972): Der Untere und mittlere Buntsandstein SW-Thurringen in seinen gesteintechnischen Eigenschaften, Ber.Dte.Ges.Geol.Wiss.A; Berlin, 17 (6), 911-919.

Göktan, R.M. (1988): Theoretical and practical analysis of rock rippability, Ph.D. thesis, Istanbul Technical Univeristy.

Golubev, A.A. and Rabinovich, G.Y. (1976): Resultay primeneia apparturny akusticeskogo karotasa dija predeleina procontykh svoistv gornych porod na

mestorosdeniaach tverdych isjopaemych, Priklad-naja GeofizikaMoskva, 73, 109-116.

Gorjainov, N.N. and Ljachovickij, F.M. (1979) : Seismiceskie Metody v Insenernoi Geologii, Izdat. Nedra, Moskva.

Horsrud, P. (2001): Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations, SPE Drilling and Completion, 16 (2), 68-73.

Howarth, D.F., Adamson, W.R., Berndt, J.R. (1989): Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties, Int. Rock Mech. Sci. Geomech., 23, 171-175.

Inoue, M. and Ohmi, M. (1981): Relation between uniaxial compressive strength and elastic wave velocity of soft rock, Int. Symp. on Weak rock, Tokyo, 9-13.

地盤工学会(2001) : 地盤工学への物理探査技術の適用と事例, 地盤工学会, 東京.

Kahraman, S. (2001): Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, Int. Rock Mech. Min. Sci., 38, 981-994.

Karakul, H. and Ulsay, R. (2015): Multivariate predictions of geomechanical properties of rocks by ultrasonic velocities, physical and mineralogical properties under different degrees of saturation, ISRM Congress 2015 Proceedings.

Lal, M. (1999): Shale stability: drilling fluid interaction and shale strength, SPE 54356, SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Caracas, Venezuela, Society of Petroleum Engineering.

McNally, G.H.N. (1987): Estimation of coal measures rock strength using sonic and neutron logs, Geoporation, 24, 381-395.

Militzer, H. and Stoll, R. (1973): Einige Beiträge der

- geophysik zur primärdatenerfassung im Bergbau, Neue Bergautechnik, Leipzig, 3, 21-25.
- Moos, N., Zoback, M.D. and Bailey, L. (1999): Feasibility Study of the Stability of Open-hole Multilaterals, Cook Inlet, Alaska, 1999 SPE Mid-continent Operations Symposium, Oklahoma City, OK, Society of Petroleum Engineers.
- 大久保 彪・寺崎 晃 (1971) : 岩石の物理的性質と弾性波速度, 土と基礎, 19(7), 31-37.
- Schön, J.H. (2011): Physical properties of rocks, Elsevier, Amsterdam.
- Sharma, P. K. and Singh, T. N. (2008): A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength, Bull. Eng Geol Environ, 67, 17-22.
- Sharma, R., Baxter, C. and Jander, M. (2011): Relationship between shear wave velocity and stresses at failure for weakly cemented sands during drained triaxial compression, Soils and Foundations, 51, 4, 761-771.
- Sousa, L.M.O., del Rio, L.M.S., Calleja, I., de Argandona, V.G. and Rey, A.R. (2005): Influence of micro-fractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites, Engng. Geol., 77, 153-168.
- 高橋 亨・稲崎富士 (2010) : 地盤物性データベース「KuniJiban」整備を目的とした岩石物性データの収集と分析, 物理探査学会第 123 回学術講演会講演集, 9-12, 2010
- 高橋 亨・田中莊一 (2013) : ロックフィジックスを利用した岩石の圧縮強度と弾性波速度の関係のモデル化, 第 13 回岩の力学国内シンポジウム.
- 高橋 亨・田中莊一 (2015) : 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 9) —一軸圧縮強度と弾性波速度の関係のモデル化—, 深田地質研究所年報, 16, 159-168.
- 高橋 亨 (2016) : 岩石の一軸圧縮強度と弾性波速度の関係のモデル化, 物理探査学会第 134 回学術講演会論文集, 9-12.
- 高橋 亨 (2017) : 岩石の圧縮強度と弾性波速度の関係についての再考, 物理探査学会第 137 回学術講演会講演論文集 (投稿中).
- Takahashi, T. and Tanaka, S. (2017): Compressive strength-seismic velocity relationship for sedimentary rocks, Chapter 10 in Rock Mechanics and Engineering, CRC Press, London.
- Tugul, A. and Zarif, I.H. (1999): Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey, Engng. Geol. 51, 303-317.
- Vasconcelos, G., Lourenc, P.B., Alves, C.A.S. and Pamplona, J. (2008): Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites, Ultrasonics 48, 453-466.
- 山口梅太郎・西松裕一(1991) : 岩石力学入門, 第 3 版, 東京大学出版会, 東京.
- Yasar, E. and Erdogan, Y. (2004): Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey), Engng. Geol., 66, 211-219.
- Zhang, L. (2009): Engineering properties of rocks, Elsevier, Amsterdam.
- Zoback, M. (2007): Reservoir geomechanics, Cambridge University Press, Cambridge.