

弾性波速度の分散特性を用いた岩盤の 透水係数イメージング手法に関する実験的研究

吉村公孝*・安藤賢一**・坂下 晋*3・パトリック・ブライネス**・奥村裕史*4・西山 哲*5・大西有三*5

要 旨

弾性波の分散を利用した岩盤の透水性評価手法の開発を目指し、室内試験および原位置試験による基礎的な検討を実施した。流体で満たされた岩盤中を弾性波が伝播する際には、周波数に応じた固体と流体との相互作用により速度と減衰率が変化する分散現象が生じ、その周波数特性と透水性との相関性を示す理論が提案されている。本稿では、弾性波の分散と透水性との関係について数値実験を実施し、次いで室内試験を実施した。その結果、透水性の異なる花崗岩試料に対して、異なる分散特性が認められ、理論式と整合することを確認した。さらに、周波数に依存した弾性波速度の分散が原位置で測定可能かどうかを検討した。その結果、1.5m から 70m の孔間で、0.8kHz から 80kHz の周波数帯において分散現象の可能性が高い試験結果が得られた。孔間距離 1.5m で、発振周波数が 20kHz および 40kHz の弾性波トモグラフィ測定を実施し、地球統計学的手法を利用した試解析により透水係数断面を得た。得られた透水係数断面中央付近のボーリングを用いて透水試験を実施し、推定透水係数と比較したところ、両者の良好な一致が認められた。

キーワード：透水係数・高レベル放射性廃棄物・弾性波トモグラフィ・多孔質弾性体論・速度分散

1. はじめに

近年、地下空間は地下発電所、石油備蓄、地下ダム、高レベル放射性廃棄物の地層処分および低レベル放射性廃棄物の処理・処分など重要かつ大規模な構造物への利用あるいは利用計画の検討が実施されつつある。地下空間利用に際して、その安全性または目的に対する適用性などの評価にあたり、岩盤中の地下水流動に係わる情報を把握することは重要である。岩盤の透水性評価を行う地表からの調査としては、ボーリング孔による透水試験や水頭計測、物理探査などが行われる。しかし、ボーリング孔での透水試験情報は点あるいは線の情報であり、広域の透水場を精度良く評価することは難しい。

そこで、物理探査技術の広域かつ深部情報把握能力に着目し、物理探査技術から透水性評価を行う試みが行われつつある。田中ほか(2002)、Sudo et al.(2004)では、電気検層による比抵抗値と原位置透水試験による透水係数から相関関係を導き、その関係式を電気探査結果に適用することで二次元の透水係数分布を推定している。羽竜・西川(2003)は、弾性波探査や電気探査の二次元逆解析で得られた弾性波速度と比抵抗を岩石物理モデルにあてはめ、間隙率・飽和度・体積弾性率などの岩盤特性と共に透水係数分布を推定している。ここではモデルに必要なパラメータは、別途検層、岩石試験および透水試験より得ている。Kemna et al.(2004)は、クロスホールの IP 探査結果から、複素導電率の離相成分が比表面積に比例することを利用し

2007年5月31日原稿受付; 2009年4月21日受理

* 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター
〒104-0052 東京都中央区月島1丁目15番7号

**株式会社大林組 原子力本部 原子力環境技術部
〒108-8502 東京都港区港南2-15-2

*3 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター
現：応用地質株式会社 エネルギー事業部
〒336-0015 埼玉県さいたま市南区太田窪2-2-19

*4 電源開発株式会社 水力送変電部

西日本支店 土木グループ
〒530-6691 大阪市北区中之島6-2-27

*5 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻
〒615-8540 京都市西京区京都大学桂

第110回(平成16年度春季)学術講演会、第113回(平成17年度秋季)学術講演会、第115回(平成18年度秋季)学術講演会および第116回(平成19年度春季)学術講演会にて一部を発表

て、間隙内部の表面積に関する量と地層比抵抗係数から透水係数の算出を行っている。

弾性波を用いた透水係数の把握は、Yamamoto et al.(1995) や Yamamoto(2003)による一連の研究がある。これは、多孔質媒質における弾性波速度と透水性の関係を示した Biot 理論(Biot,1956a, 1956b)や BISQ 理論(Dvorkin and Nur, 1993)に基づき、多数の周波数による弾性波速度および振幅のトモグラフィ測定から透水係数断面の把握を試みている。

筆者らは、上記理論に基づき、弾性波速度の分散特性を用いて、岩盤の透水係数を把握する手法を構築するために、室内試験や原位置試験を実施してきている(安藤ほか, 2004; 吉村ほか, 2005, 2006)。

本稿では、まず、BISQ 理論に基づく弾性波速度と Q^{-1} 値を導き、速度が変化し Q^{-1} 値が最大になるときの周波数が、透水係数に関係していることを示す。次いで、室内試験により BISQ 理論の確認を行った結果について示す。原位置試験では、原位置における分散現象の確認を行うとともに、計測可能な周波数帯域と発振-受振間距離との関係について検討を行った。さらに、弾性波トモグラフィデータから岩盤の透水係数イメージを得るための試みとして、地球統計学的手法を適用した。地球統計学は自然界における様々な現象の空間的、時間的な関連性をモデル化して推定を行う統計学の一分野であるため、得られた透水係数断面の妥当性を確認するためにボーリング孔を用いた透水試験と対比した結果についても報告する。

2. BISQ 理論に基づく弾性波の分散特性と透水性

流体で満たされた岩盤中を伝播する弾性波は、周波数に応じた固体と流体との相互作用により速度と減衰率が変化する分散現象が起きる。この現象は、多孔質弾性体論により導くことができる。多孔質弾性体論には土粒子や砂粒子のような粒状構造の骨格を仮定する Biot 理論および、それを岩盤に対して適用可能なように拡張した BISQ 理論がある。

流体で飽和された多孔質媒体中を弾性波が伝播する際に、間隙流体は弾性波の伝播方向に生じる圧力勾配に従って動く。Biot(1956a, 1956b)によると、この間隙流体の動きは弾性波の周波数により変化する。周波数が低い場合は、流体に働く粘性力が慣性力に比べ相対的に大きくなる。また弾性波の周期が長いことにより、流体は固体の運動に従って動くことができる。ゆえに、流体部と固体部は同じ動きをする。一方、周波数が高い場合には、流体に働く慣性力が粘性力に比べ相対的に大きくなる。また弾性波の周期が短いことにより、流体は固体の運動に従うことができず、実質的

に流体は間隙内に閉じ込められることになる。その結果、間隙内に閉じ込められた流体により全体の弾性率が増加し、弾性波速度が上昇し、分散現象が発生する(Fig.1 (a))。

BISQ 理論では Fig.1(b) に示すように Biot 理論が弾性波の伝播方向に対して、平行な流体の流れのみを考慮していたのに対し、波の伝播方向に直行する方向の流れ (squirt flow) を考慮している。

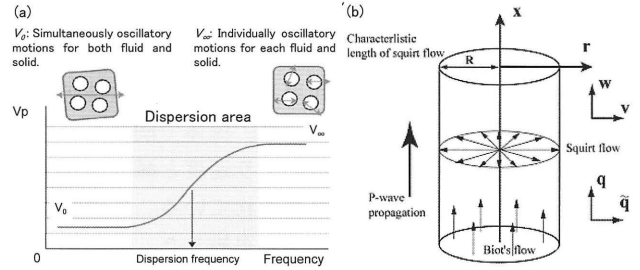


Fig. 1. (a) Image of P-wave velocity dispersion. (b) The BISQ model. Biot's flow and Squirt flow in a cylindrical representative volume of a rock due to seismic excitation (Dvorkin and Nur, 1993).

Dvorkin and Nur (1993)の BISQ 理論による P 波速度 V_p と減衰に関する Q^{-1} 値は下記のように示される。

$$V_p = \frac{1}{\text{Re}(\sqrt{Y})}, \quad Q^{-1} = -\frac{2aV_p}{\omega}, \quad a = \omega \text{Im}(\sqrt{Y}),$$

$$Y = -\frac{B}{2A} - \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 - \frac{C}{A}}, \quad A = \frac{\phi F_{sq} M}{\rho_2^2},$$

$$B = \frac{F_{sq} \left(2\alpha - \phi - \phi \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) - \left(M + F_{sq} \frac{\alpha^2}{\phi} \right) \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho_2} + i \frac{\omega_c}{\omega} \right)}{\rho_2},$$

$$C = \frac{\rho_1}{\rho_2} + \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \left(\frac{\rho_a}{\rho_2} + i \frac{\omega_c}{\omega} \right), \quad F_{sq} = F \left[1 - \frac{2J_1(\lambda L)}{\lambda L J_0(\lambda L)} \right],$$

$$\lambda L = \sqrt{L^2 \frac{\rho_f \omega^2}{F} \left(\frac{\phi + \rho_a / \rho_f}{\phi} + i \frac{\omega_c}{\omega} \right)}, \quad F = \left(\frac{1}{\rho_f c_0^2} + \frac{1}{\phi H} \right)^{-1},$$

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{K_s} \left(1 - \phi - \frac{K_b}{K_s} \right), \quad M = 2G \frac{1-\nu}{1-2\nu}, \quad \alpha = 1 - \frac{K_b}{K_s},$$

$$\rho_1 = (1-\phi)\rho_s, \quad \rho_2 = \phi\rho_s, \quad \omega_c = \frac{\mu\phi}{k\rho_f} \quad (1)$$

ここで ϕ : 間隙率, k : 固有透過度, ρ_f : 流体の密度, ρ_s : 固体の密度, μ : 粘性係数, G : 剛性率, ν : ポアッソン比, K_b : フレーム(骨格)部分体積弾性率, K_s : 固体部分体積弾性率, ω : 角周波数, L : squirt flow length(以下、文章中では SFL と表記), c_0 : 流体の音速, J_0 および J_1 は、各々 0 次および 1 次の Bessel 関数を示す。 ρ_a は Biot の連成密度と呼ばれる。Yamamoto(2003)では $\rho_a = C_a(1-\phi)\rho_f$ と表記され、

定数 C_a は石灰岩で 0.20, 砂岩で 0.35 を与えている。

また, Pride et al.,(2003)によると, 地震探査に関わる数十 cm から数十 m の波長スケールにおいて, Q^{-1} 値が最大となる分散周波数 f_c は, 間隙圧の拡散率 D と L より以下のように表される。

$$f_c = \frac{D}{L^2} \quad (2)$$

ここで D は, 流体の体積弾性率 K_f , 間隙率および間隙流体の透水性と粘度から定義される流体の移動性 $M(M=k/\mu)$ より以下のように示される(Batzle et al., 2006)。

$$D = \frac{K_f M}{\phi} \quad (3)$$

Table 1 に示すパラメータ(Dvorkin and Nur, 1993)を用いた速度および Q^{-1} 値と周波数との関係を Fig.2 に示す。図中矢印で分散周波数の位置も示す。透水係数および SFL の変化に対して, 速度と Q^{-1} 値が変化している。分散周波数は速度の変曲点付近で, Q^{-1} 値の最大値を示す。

Table 1. Description of parameters used in calculations.

Model parameters	Symbols	Values	Units
Porosity	ϕ	15	%
Density of solid	ρ_s	2650	kg/m ³
Density of pore fluid	ρ_f	1000	kg/m ³
Pore fluid viscosity	μ	0.001	Pa·s
Shear modulus	G	1.43e10	Pa
Poisson's ratio	ν	0.15	
Bulk modulus of frame	K_b	1.6e10	Pa
Bulk modulus of solid	K_s	3.8e10	Pa
Squirt Flow Length	L	0.001	m
Acoustic velocity of fluid	c_0	1500	m/sec
Biot's additional coupling density	ρ_s	420	kg/m ³
Hydraulic conductivity	k	1.25e-8	m/sec
		2.5e-8	
		5e-8	

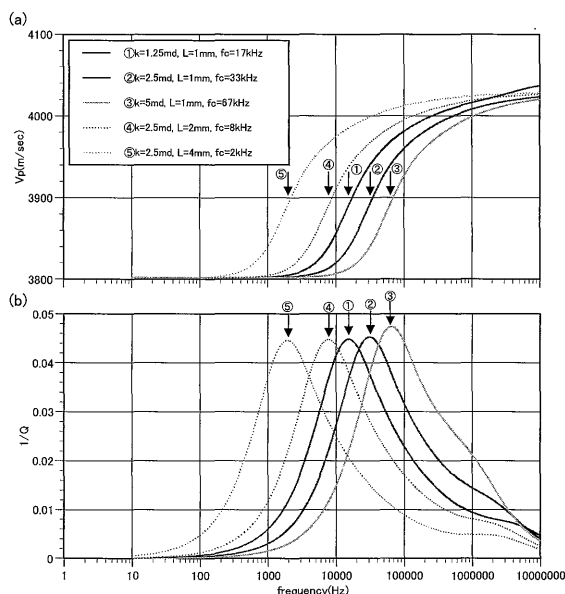


Fig. 2. (a) P-Wave velocity and (b) Q inverse value versus frequency for various permeability and squirt flow length. Arrows indicate dispersion frequency.

3. 室内試験

室内試験は, 周波数に依存した弾性波速度分散の実測の有無と得られた分散現象が前節で示した理論と整合するかどうかを確認するために実施した。

西山ほか(2004)は, 砂岩, 泥岩, 凝灰岩および花崗岩コア試料を用いた室内試験を実施し, 速度分散を実測した。本稿では, 西山ほか(2004)と同様の試験装置・試験方法により, 透水性の異なる破碎部を含んだ花崗岩試料を用いた試験を実施した。

室内試験に使用した供試体は, NAGRA(スイス放射性廃棄物管理協同組合)が保有するグリムゼル試験場で採取した花崗岩を用いた。Fig.3(a) に示すような Shear zone と呼ばれる高透水, 低速度部を含む岩石サンプルに対して, 異なる計測方向で弾性波速度の周波数変化を把握することにより, 分散現象の発生の有無と, 透水性の異なる媒質に対する分散特性の変化を検討した。

弾性波速度の測定は湿潤状態の供試体に対して 3 通りの方向 (①Shear zone に垂直, ②基岩部, ③Shear zone に平行) において以下の手順で実施した。

- 1) 真空ポンプを用いて供試体を水 (蒸留水) に長時間 (72 時間以上) 浸した。
- 2) 測定の前に振動子同士を接着し, 水中でキャリブレーションを行った。これにより振動子内に存在する金属の厚みによる弾性波到達時間の誤差を測定し, 測定結果を補正した。この補正值と初動走時から供試体の弾性波速度を算出した。
- 3) 各周波数の振動子を用いて, 前述の 3 方向で弾性波計測を行った。
- 4) 測定は, パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法に基づいて実施した。

試験の結果得られた 3 方向の弾性波速度を Fig.3(b) に示す。図より基岩部, Shear zone 垂直方向に関しては, 周波数が増加するにつれて弾性波速度が増加する傾向が認められる。各方向の弾性波速度の大きさを比較すると, 基岩部方向と Shear zone 垂直方向との速度の大小関係は妥当であるが, 平行方向に計測した弾性波速度に関しては, 基岩部と同程度の速度を示したり, 垂直方向の速度よりも小さい速度を示したりと不安定な結果となっている。これは弾性波が Shear zone 部を透過する場合と, 速度の速い基岩部を透過する場合が不規則に発生しているためと考えられる。そこで, Fig.3(c) に示すように基岩部速度を V_1 , 基岩部と Shear zone を含む垂直方向の速度を V として, 式(4)に示すように V_2 (Shear zone の速度) を算出した。なお, 供試体長さ(S_l)は 8cm であり, Shear zone 幅(S_w)は 2cm とした。

$$\frac{S_l}{V} = \frac{S_l - S_w}{V_1} + \frac{S_w}{V_2} \tag{4}$$

Fig.4 に、基岩部、Shear zone 垂直方向および Shear zone 速度の計測値を丸印で示し、別途実施した室内試験結果等から求めたパラメータ (Table 2) を用いて、式(1)より算出した BISQ 理論曲線を併せて示す。基岩部と Shear zone 部分における速度差を比較すると、基岩部の方が大きく、速度差が透水性により異なる傾向が認められる。

以上のことから、室内実験における 10⁵Hz~10⁶Hz の周波数帯、10cm 程度のスケールにおいて、速度分散が実測でき、単純なモデルであれば BISQ 理論を適用可能であることが確認された。

4. 原位置試験

室内試験における知見を基に、同一岩種が分布する試験場内の孔間距離が異なる 3 地点において、速度分散現象が現有の測定システムで実測可能かどうかを検討した。さらに、狭い孔間距離の試験地で透水係数断面の構築を試みた。推定した透水係数断面の妥当性を検討するため、断面中央付近のボーリング孔内で透水試験を実施した。

4.1 試験場概要

原位置試験はグリムゼル試験場において実施した。同試験場は、放射性廃棄物処分プロジェクトを支援するための研究開発施設として様々な試験・研究が実施されている。試験場は、Fig.5 に示すようにスイス中南部に位置し、地下 450m に掘削された南北方向の水力発電所へのアクセス用メイントンネルと、そこから枝分かれしたラボラトリトンネルおよび、それらから掘削された多数のボーリング孔より構成される。地質は花崗岩を主体とし、所々に lamprophyre の貫入が認められる。全体に緻密な花崗岩が分布するが、一部に

は Shear zone と呼ばれる北東-南西方向の低速度、高透水ゾーンが分布する。母岩の速度は概ね 5km/sec、透水係数は 10⁻¹²~10⁻¹⁴m/sec である。Shear zone では、速度が 4km/sec 程度、透水係数が 10⁻⁸~10⁻⁹m/sec を示す。原位置試験は、グリムゼル試験場北側に位置し、ラボラトリトンネルから西方に掘削された 2 本のボーリング孔による BOUS 地点(ボーリング孔間距離約 70m)、試験場南側に位置し、アクセストンネルとラボラトリトンネルを結ぶボーリング孔による FRI 地点(孔間距離約 10m)および、FRI 地点近傍でラボラトリトンネルから南東方向に掘削されたボーリング孔による GAM 地点(孔間距離約 1.5m)の 3 地点において実施した。

4.2 周波数に依存する弾性波速度分散の確認

原位置データを用いて周波数に依存する弾性波速度分散の確認を行うとともに、BISQ 理論との整合を検討した。本節ではまず、計測方法・装置について記し、次いで周波数の異なる波を発振する場合の振源特性についての検討結果を示す。この特性を踏まえた上で、原位置における分散現象の有無および実測データと BISQ 理論との整合に関する検討結果を示す。

4.2.1 計測方法の概要

信号発生装置から所定の周波数の信号(バーストサイン波、波数は孔間距離に応じて 1 波から 5 波に調整)を発振させ、増幅器を経由してピエゾ型の振源を駆動させた。適用する孔間距離に応じ、発振周波数の異なる 2 種類の振源を使い分けた。受振器も利用周波数と受振器間隔に応じて 4 種類のハイドロフォンを使用した。

測定データは、最大 26ch、4μsec のサンプリングが可能な収録器に記録した。なお、受振データに加えて、トリガー信号として信号発生装置から振源に送った入力信号も同時に記録した。

測定に使用した装置の一覧を Table 3 に示す。

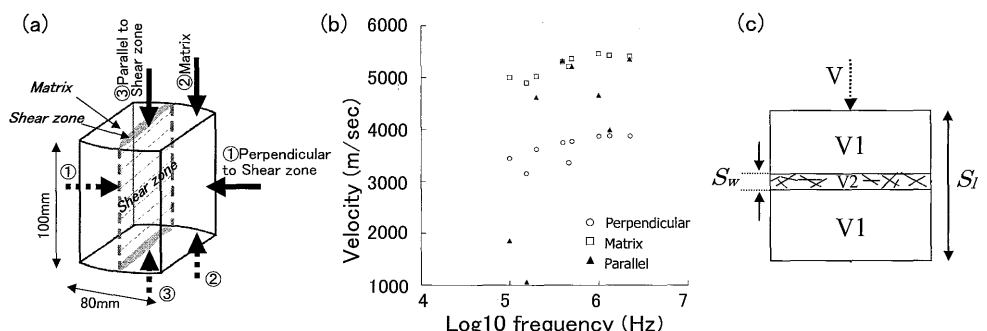


Fig. 3. (a) Schematic diagram of rock sample with measurement direction. Sample consists of rock matrix and a shear zone. (b) Comparisons between matrix, parallel and perpendicular direction to shear zone for P-wave velocity versus frequency. (c) Schematic diagram to calculate shear zone velocity (V₂) using measured matrix velocity (V₁) and perpendicular velocity (V) in equation (4).

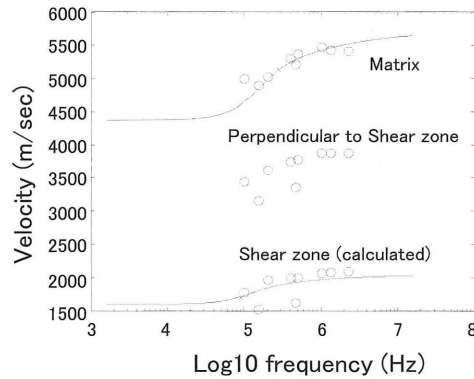


Fig. 4. Results of laboratory test (circle) and parameter fitting from BISQ theory (curve).

Table 2. Calculated parameters for BISQ theory in Fig. 4.

Model parameters	Symbols	Units	Parameters	
			Matrix	Fracture
Porosity	ϕ	%	0.5	8.4
Density of solid	ρ_s	kg/m ³	2600	2600
Shear modulus	G	Pa	1.7e10	2.0e9
Poisson's ratio	ν	—	0.25	0.30
Bulk modulus of frame	K_b	Pa	0.87e10	2.0e9
Bulk modulus of solid	K_s	Pa	5.0e10	7.8e9
Squirt Flow Length	L	m	7.0e-5	1.0e-3
Biot's additional coupling density	ρ_a	kg/m ³	199	199
Hydraulic conductivity	k	m/sec	2.1e-8	2.0e-5

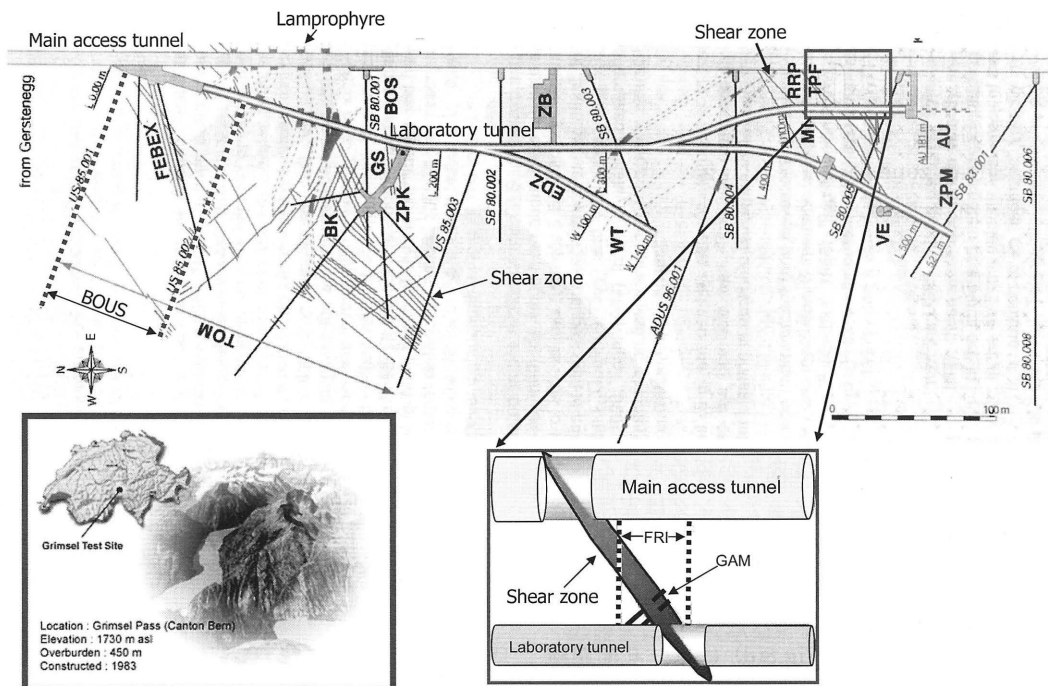


Fig. 5. Plane view of the Grimsel Rock Laboratory in Switzerland. The distances between boreholes at the BOUS site is about 70 meter, at FRI site is about 10 meter and at GAM site is about 1.5meter.

4.2.2 振源の特性

信号発生装置からの入力信号と実際に駆動する振源の波形とは厳密には一致しない。速度分散の有無を確認するためには、微小な速度差を把握する必要があり、振源波形の周波数ごとの特性を把握する必要がある。そこで、速度一定で均質媒質と考えられる水槽内で周波数ごとの波形記録を取得し、振源から実際に出力される波形を評価した。

試験は、水槽内に Table 3 の Source2 と Receiver3 を 1.7m 離して設置し、0.5~32kHz まで 17 通りに周波数を変化させた場合の波形を記録した。入力信号は、5 波のバースト正弦波を使用した。結果を Fig.6 に示

す。図によると、振源が起動時に高周波に振動し、概ね半周期程度の時間アンダーシュートした後に、所定の周波数の振動を行っている。これは、トリガー信号として記録された入力信号の波形の立ち上がりから遅れて実際の振動が始まることを示している。この時間遅れは周波数に依存するため分散の有無を議論するためには補正が必要となる。Fig.7 には水槽試験における実測走時と送受振間距離および水温から求められる理論走時との差から求めた較正データ(図中■の記号)を示す。ただし、波長を考慮すると、例えば周波数 0.5kHz の場合水中での波長は約 3m であるから、振源—受振器間隔 1.7m に対して長すぎる。このため、原

位置試験の際、低周波側については今回の水槽試験による較正データでは不十分で、補正が必要となる。ここでは、時間遅れが周期のほぼ半分であることを考慮した補正時間を定めた(図中○の記号)。次節の原位置での速度測定結果はここで求めた補正時間による較正を実施している。

4. 2. 3 速度分散計測結果

1.5m, 10m および 70m という 1 オーダー程度の差がある孔間距離の異なる 3 地点で、周波数変化に伴う P 波速度の変化を把握することにより、分散現象を既存装置で測定可能かどうかを確認した。さらに、速度変化が認められる場合には BISQ 理論曲線のパラメータフィッティングを行い、実測値と理論値との整合を確認するとともに、計算に用いたパラメータが異常値を取るかどうかを確認し、妥当性を評価した。

孔間距離が約 1.5m の GAM 地点における測定結果を Fig.8(a) および Fig.8(b) に示す。Fig.8(a) には、GAM 地点の起振点と受振点を直線で結んだ測定ジオメトリおよび測定データのうち、起振点と受振点を結ぶ直線が、Shear zone を通る場合(起振点 T-8 と受振点 R-10 の組み合わせ)と通らない場合(起振点 T-3 と受振点 R-5 の組み合わせ)について、17kHz から 82kHz まで 8 通りの周波数における波形記録を示す。この波形記録から初動を読み取り速度を計算した結果を Fig.8(b) に示す。さらに、Table 4 に示すパラメータを用いて、式(1)により計算した BISQ 理論曲線を併せて示す。

図より周波数変化に伴う速度変化が認められる。また、BISQ 理論曲線によるフィッティングは実測値と概ね整合しており、計算に用いたパラメータは Table 2 に示す室内試験結果とのフィッティングに用いたパラメータと比較して妥当な値となっている。

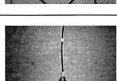
同様に、Fig.8(c) および Fig.8(d) には、孔間距離 10m の FRI 地点における測定結果を示す。Fig.8(c) に、FRI 地点の測定ジオメトリおよび測定データのうち、起振点と受振点を結ぶ直線が、Shear zone を通る場合(起振点 T-15 と受振点 R-15 の組み合わせ)と通らない場合(起振点 T-30 と受振点 R-30 の組み合わせ)について、3kHz から 41kHz まで 9 通りの周波数における波形記録を示す。Fig.8(d) には、速度一周波数の関係を示す。図より、周波数変化に伴う速度変化が GAM 地点より顕著である一方、Shear zone の有無による明瞭な差は認められない。BISQ 理論曲線によるフィッティングは実測値と概ね整合しており、Table 4 に示す計算パラメータは Table 2 と比較して妥当な値となっている。

さらに、Fig.8(e) および Fig.8(f) には、孔間距離 70m の BOUS 地点における測定結果を示す。Fig.8(e) に、BOUS 地点の測定ジオメトリおよび測定データの

うち、孔口から深度 134m の起振点 T-45 と孔口から深度 132m の受振点 R-43 について、0.8kHz~4kHz まで 8 通りの周波数における波形記録を示す。Fig.8(f) には、速度一周波数の関係を示す。図より、他 2 地点と比べると、周波数変化に伴う速度変化が小さいという特徴が認められる。BISQ 理論曲線とのフィッティングは概ね良好で、Table 4 に示すパラメータは、他 2 地点と比較して速度が大きいことを反映して間隙率、透水係数、SFL 等が小さくなっており、妥当な変化と考えられる。

以上のことから受発振距離が数十 cm で周波数が数百 kHz~数 GHz の室内試験だけでなく、受発振距離 1m 程度で周波数が数十 kHz, 受発振距離 10m 程度で周波数が数 kHz~数十 kHz および受発振距離が 70m 程度で周波数が数 kHz の原位置試験においても分散現象が確認できた。ただし、孔間距離が 10m 程度の場合、今回の結果からは透水性の異なる箇所でのデータの相違がわずかであったことから、適用孔間が 10m 以上の場合には、より慎重な検討が必要である。速度の分散は、既存データから設定したパラメータを用いて計算した BISQ 理論曲線に概ね整合しており、原位置においても、BISQ 理論の適用が可能であることが示されたと考えている。

Table 3. Specifications for data acquisition system.

Equipment	Maker and Type	Specifications	Photo
Source1 (piezo transducer) For GAM(1.5m) and FRI(10m)	Maker : ITC Type : ITC6130	Dimension : φ44mm L 200mm Max Power(1V) : 155dB Max Voltage : 300V Frequency : 2 ~ 40kHz	
Source2 (piezo transducer) For BOUS(75m)	Maker : System Giken	Dimension : φ55mm L 790mm Frequency : ~ 22kHz	
Receiver1 (12 hydrophones) For GAM tomography	Maker : System Giken	Frequency : ~ 50kHz Spacing : 20cm	
Receiver2 (24 hydrophones) For FRI tomography	Maker : JFE civil	Frequency : ~ 20kHz Spacing : 50cm (originally 100cm)	
Receiver3 (24 hydrophones) For BOUS both tomography and various frequencies	Maker : System Giken	Freq. : ~ 100kHz Sensitivity : -215dBuP Spacing : 2.0m	
Receiver4 (single hydrophones) For GAM and FRI various frequencies	Maker : System Giken Type : SSLM-100	Freq. : ~ 100kHz Sensitivity : -185dB (0dB1V/μPa) Pre-Amp : 20dB Gain : 40dB ~ 80dB	
Data Logger	Maker : NI et., al.	Sample Rate: 250k/sec Ch. : 26ch	
Pulse Generator	Maker : Agilent Type : 33220A	Amplitude : 10mVpp ~ 10Vpp Frequency : 1μ ~ 20MHz Electrical power : 50VA	

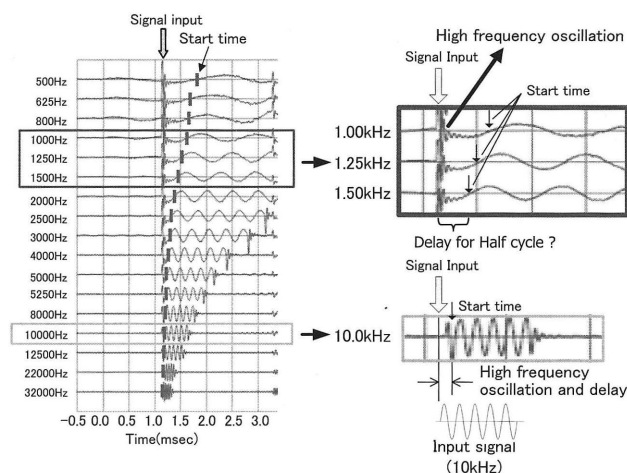


Fig. 6. Received waveforms with various frequencies in water.

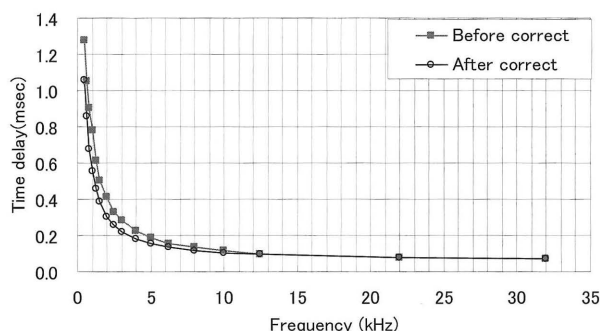


Fig. 7. Corrected curve derived from experiment in water.

4.3 透水係数イメージングのための試解析

実用的なイメージング手法を確立する上での基礎検討として、統計的手法により透水係数断面を把握した。

4.3.1 方法

実施手順は、Fig.9 に示すように、まず分散領域内の複数周波数で弾性波トモグラフィ測定を実施し、複数の弾性波速度断面を求める。また、透水試験によりボーリング孔沿いの透水係数を把握する。次いで、複数周波数による弾性波速度の差を求め、透水試験位置における弾性波速度差と透水係数の相関性を評価する。評価した相関性を、相関係数とその誤差を指標として、地球統計学的に弾性波速度差をもとに空間的に再配分し、透水係数の空間分布を推定する。

4.3.2 結果

孔間距離 1.5m の GAM 地点におけるトモグラフィ測定データを用いて、同地点の透水係数の空間分布の推定を試みた。GAM 地点はグリムゼル地下実験場の南に位置(Fig.5)し、Shear zone を対象とした様々な試験がなされ、グリムゼルの中でも良く地質が理解されている地点のひとつである。トモグラフィ測定の受発

振点は、0.20m 間隔で、各々 24 点ずつ設定した。測定周波数は、10, 20, 40, 56 および 80kHz の 5 種類とした。このうち 10~40kHz の測定波形のスペクトル解析図を Fig.10 に示す。いずれも起振周波数に近い周波数が卓越している。一方、56kHz 以上の発振周波数を用いても受振周波数の卓越周波数は 40kHz 以下であった。そこで、40kHz 以下の 3 種類のデータの初動を読み取り SIRT 法による走時トモグラフィ解析を実施した。解析結果を Fig.11(a) に示す。10kHz と 20kHz の結果に変化は認められないが、40kHz の結果にはやや変化が認められることから、20kHz と 40kHz との速度差 (20kHz-40kHz) を計算した (Fig.11(b))。

透水係数断面を把握するためには、GAM 地点における 2 本のボーリング孔 (TPF95-1 孔および GAM98-2 孔) を利用して実施した透水試験結果と速度差との相関を調べる必要がある。Fig.11(c) に、弾性波トモグラフィ解析グリッドと透水試験区間位置を示す。トモグラフィ解析のグリッドは 5cm×5cm である一方、透水試験区間は数十 cm であることから、スケールの違いを考慮する目的で、透水係数測定区間の全てのグリッドの弾性波速度差を抽出した。Fig.12(a) に各透水試験区間内の弾性波速度差を、Fig.12(b) に透水係数との相関図を示す。なお、合計 10 ヶ所の透水試験区間のうち GAM2 は、トモグラフィ解析領域の外側であるため図から除外した。Fig.12(a) の四角いボックスの上下線は、それぞれ抽出した速度差の 25% と 75% 区間値を、上下の外側の線の末点は 5% と 95% 区間を、四角ボックス中の横線は平均値を、点は中央値を表す。Fig.12(b) には、平均値と中央値のうち透水係数との相関が良い平均値を採用した。同図における近似直線の設定には、GAM5 と TPF3 を除外した。これは、GAM5 では速度変化量と透水試験結果とが大きくずれているため異常値と判断したこと、TPF3 では Fig.11(c) に示すように TPF1 および TPF5 の測定区間を含み、速度測定区間に比較して、透水係数測定区間が大きいことため平均化されているのが原因と考えられる。

BISQ 理論曲線から推定すると、低周波における速度から高周波における速度を引くと、全てマイナス値になると考えられるが、本試験結果ではそうっていない。これは、原位置で測定可能な周波数が限られているうえ、実際の地盤構造が複雑なため、分散に伴う速度変化と、岩盤性状による速度の違いが表われ、場合によっては見かけ上高周波の波の方が遅く到達したように見えたのではないかと考えている。

透水係数分布を把握するための地球統計学的解析には、スタンフォード大学で開発された GSLIB (Deutsch

and Journal,1998)を用いた。速度差と透水係数との間に相関関係がなければ本手法は適用できないが、Fig.12(b)を見ると、弱いながらも両者の相関があると考えられる。Fig.11(b)の速度差断面をFig.12(b)における相関を利用して透水係数分布を得る解析には、GSLIBに装備されているSA (Simulated annealing)法を用いた。

求めた透水場は、Fig.12(c)に示すようにShear Zone付近で高透水ゾーンが認められ、調査地点の水利構造を良好に把握できている可能性を示している。

4.4 原位置透水試験による解析結果の妥当性評価

解析断面中央部付近のボーリング孔において原位置透水試験を実施し、その結果と解析結果との対比を行った。

Fig.13(a)に示すように解析断面中央付近のボーリング孔(GAM98-5)に、5箇所の同時測定が可能な水利試験装置であるマルチパッカーシステム(MMPS)を、2回(レイアウト1およびレイアウト2)に分けて設置し、測定を行った。装置の設置位置は、透水係数断面とポアホールテレビ測定結果に基づいた。結果の対比をFig.13(b)に示す。図中、横軸にボーリング孔GAM98-5沿いの距離(図下面)と解析断面のY軸上の距離(図上面)を、縦軸に透水係数を示す。弾性波トモグラフィより推定した透水係数断面とボーリング孔とは、同一面内に存在しないことから、孔中心より半径0.05mおよび0.25m以内に存在するセルの透水係数値を抽出し、2種類の丸印としてプロットしている。地球統計学的解析時の上下限の透水係数値は 10^{-13} m/secから 10^{-8} m/secと設定しているため、Y軸上の0.5m~0.8mおよび2.6m~4mの値は各々下限および上限を示している。計測された透水係数は、横棒で示し、 $1.5\text{E-}11$ m/secから $1.6\text{E-}9$ m/secまでの範囲に分布している。原位置試験による計測結果は下記の4区分に分類できる。

- 1)比較的低い透水係数領域(グループ1):レイアウト1の2.4m~3.1mの区間で、透水係数は、およそ $1.5\text{E-}11$ m/secから $1.7\text{E-}11$ m/secで母岩と推定される。
- 2)比較的高い透水係数領域(グループ2):レイアウト2の4.5m~5.1mの区間で、透水係数は、 $1.5\text{E-}09$ m/secから $1.6\text{E-}09$ m/secで、Shear zoneに分類される。
- 3)グループ1の遷移ゾーン: Shear zoneに近い透水

係数を示す。4.0m~4.2mの区間で、透水係数は、 $3\text{E-}10$ m/secから $5\text{E-}10$ m/secである。

- 4)グループ2の遷移ゾーン: 母岩の透水係数に近い領域で、3.8m~4.0mの区間と5.3m~5.5mの区間で、透水係数は、およそ $3.3\text{E-}11$ m/secから $5\text{E-}11$ m/secである。

推定透水係数値と実測値とを比較すると、 10^{-11} m/secから 10^{-9} m/secの範囲では良好な一致を示している。低透水性の区間については、①MMPSの低透水性評価の精度がやや劣る、②透水係数と弾性波速度差に線形の関係を仮定しているが、低透水での線形が低いという原因が推定される。高透水性の区間に関しては、地球統計学的手法の解析時に設定している高透水のしきい値の設定が高すぎる可能性が考えられる。

5. まとめ

BISQ理論に基づく透水場推定方法を検討するために室内試験および原位置試験を実施した。室内試験では、透水性の異なる破砕部を含む試料に対して弾性波速度の分散を把握するとともに、BISQ理論との整合性を確認した。また、原位置試験では、周波数の変化に伴う速度変化を最大孔間距離70mで確認し、原位置での適用可能性を示した。さらに、孔間距離1.5mにおける透水係数断面の試解析を行い、Shear zoneという高透水ゾーンに対応する位置に高透水部を把握した。その結果は、透水試験との比較を通じて、妥当な結果であることを確認した。

以上の実験的研究により、弾性波速度の分散特性を用いて岩盤の透水係数イメージを得るための可能性が示された。今後は、孔間距離に関係するスケールと速度分散を生じる周波数との関係についての理論的考察を行うことにより、実用的なイメージング手法の開発も可能であると考ええる。

謝 辞

京都大学の学生諸氏には、理論検討および室内試験計測に多大な御協力を頂いた。また、匿名査読者には本文の誤りや不備を丁寧にご指摘していただき、推敲のための有益な助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

本報告は平成13年度から18年度までの経済産業省からの委託による「地層処分技術調査等」の成果の一部をとりまとめたものである。

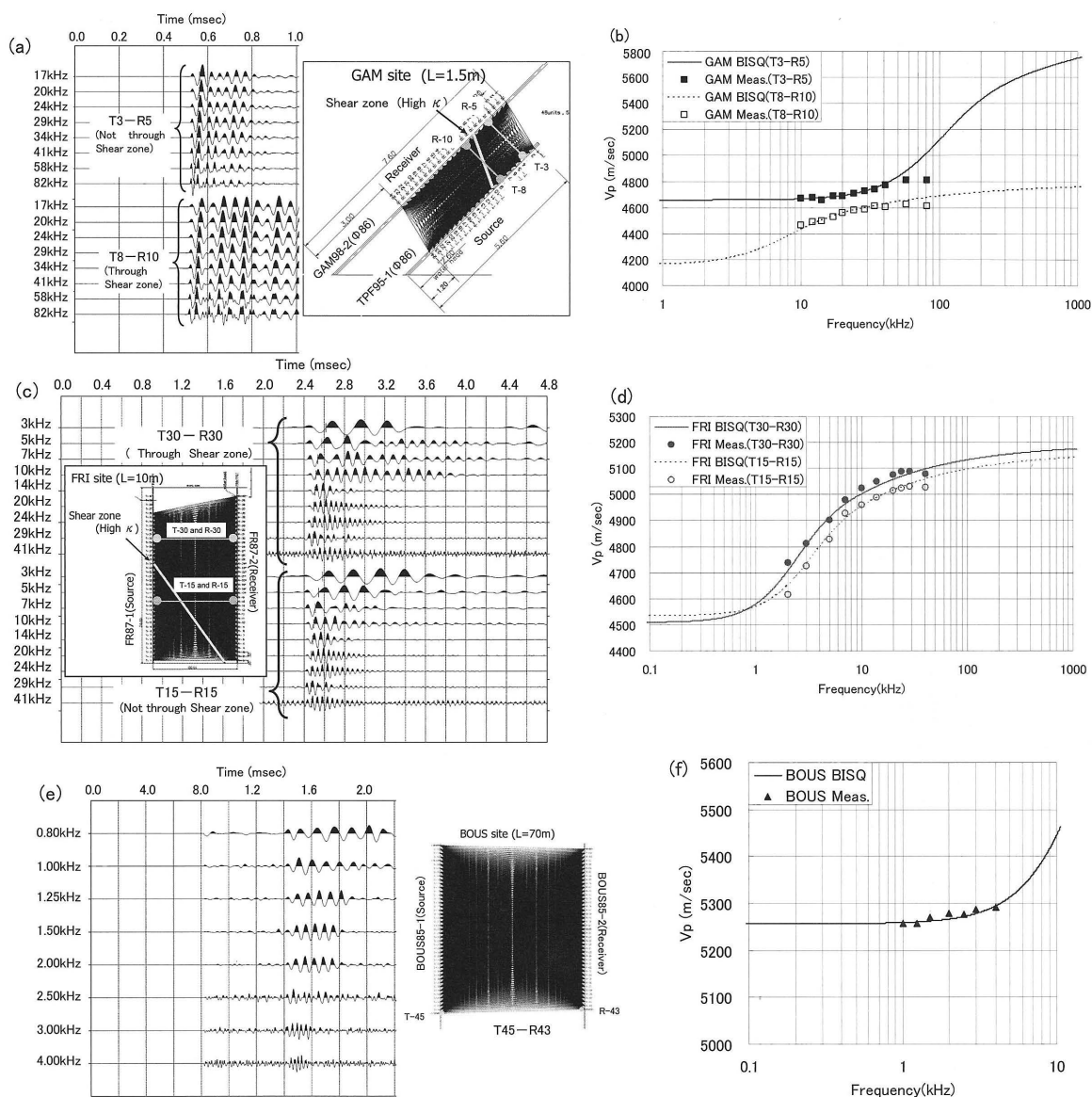


Fig. 8. Results of in-situ velocity measurements at the GAM, FRI and BOUS sites. (a) Source-receiver configurations at the GAM site and comparison with waveforms of various frequencies in different source-receiver configurations. (b) Comparison with measured and synthetic (BISQ theory) velocity versus various frequencies. (c) Source-receiver configurations at the FRI site and comparison with waveforms of various frequencies in different source-receiver configurations. (d) Comparison with measured and synthetic (BISQ theory) velocity versus various frequencies. (e) Source-receiver configurations at the BOUS site and comparison with waveforms of various frequencies in different source-receiver configurations. (f) Comparison with measured and synthetic (BISQ theory) velocity versus various frequencies.

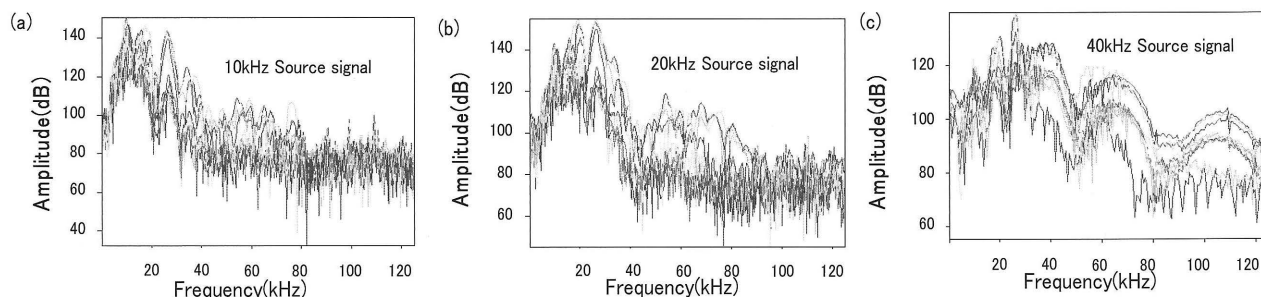


Fig. 9. Frequency spectrum of (a) 10 kHz, (b) 20 kHz and (c) 40 kHz source frequencies.

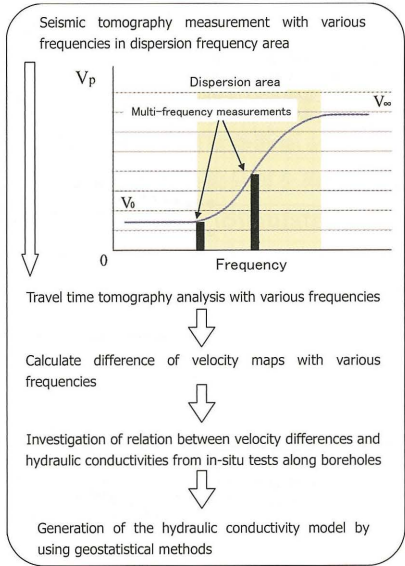


Fig.10. Flow chart for constructing hydraulic conductivity model from seismic tomography.

Table 4. Calculated parameters for BISQ theory at GAM, FRI and BOUS sites.

parameters	GAM		FRI		BOUS
	T8-R10	T3-R5	T15-R15	T30-R30	
ϕ	8	0.5	7	5	0.25
κ	4.00E-11	2.10E-12	1.50E-11	1.00E-11	1.00E-13
ν	0.23	0.25	0.24	0.24	0.29
K_b	8.70E+09	8.70E+09	8.70E+09	8.70E+09	4.85E+10
K_s	5.00E+10	5.00E+10	5.00E+10	5.00E+10	9.00E+10
G	1.45E+10	1.88E+10	1.70E+10	1.70E+10	2.15E+10
ρ_s	2600	2600	2600	2600	2600
ρ_a	199	199	196	196	199
L	9.00E-05	9.00E-05	9.00E-05	9.00E-05	8.35E-06

ϕ : Porosity(%)
 κ : Hydraulic conductivity(m/sec)
 ν : Poisson's ratio(—)
 K_b : Bulk modulus of frame(Pa)
 K_s : Bulk modulus of solid(Pa)
G: Shear modulus(Pa)
 ρ_s : Density of solid(kg/m³)
 ρ_a : Biot's additional coupling density(kg/m³)
L: Squirt Flow Length(m)

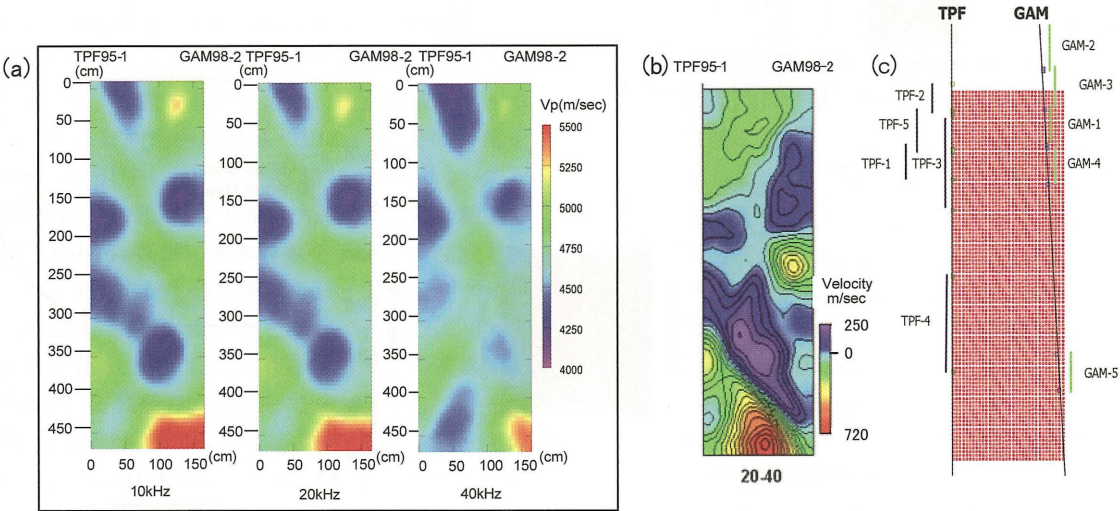


Fig. 11. (a) Analyzed velocity map with three kinds of source frequencies. (b) Velocity difference map of the 40 kHz and 20 kHz tomograms. (c) Grid for tomography analysis (grid number 34 x 97 = 3298) with in-situ hydraulic test locations.

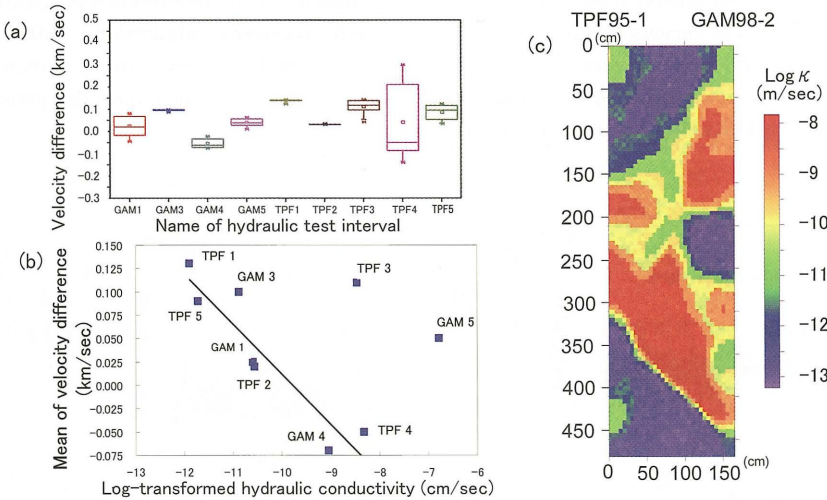


Fig. 12. (a) Distribution of velocity difference for each hydraulic test location. (b) Relationship of log-transformed hydraulic conductivity against velocity difference. (c) Derived hydraulic conductivity map from seismic tomography.

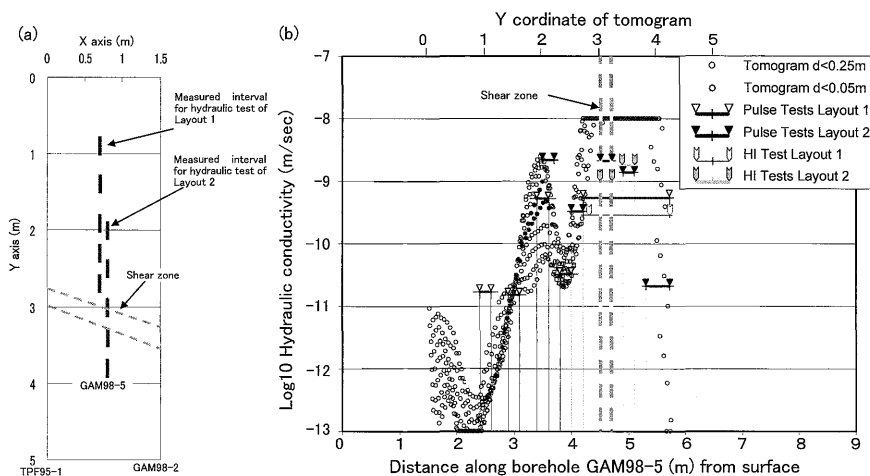


Fig. 13. (a) Location of the in-situ hydraulic test for GAM98-5 borehole. GAM98-5 was instrumented with a 5 packer Multi Modular Packer System (MMPS). (b) Results of the hydraulic test campaign in GAM98-5, hydraulic conductivity ranges versus borehole depth. Solid and hollow circles show the derived hydraulic conductivity from seismic tomography analysis. Horizontal bars show the interval hydraulic conductivity from in-situ hydraulic tests.

参考文献

- 安藤賢一・金 亨穆・西山 哲・大谷俊輔・菊地 崇・大久保秀一・吉村公孝 (2004) : 弾性波速度の周波数依存特性を利用した岩盤透水場の試構築と花崗岩を対象とした適用性検討, 物理探査学会第 110 回学術講演会論文集, 149-152.
- Batzle, M.L., Han, De-Hua and Hofmann, R. (2006) : Fluid mobility and frequency-dependent seismic velocity — Direct measurements, *Geophysics*, **71**, N1-N9.
- Biot, M. A. (1956a) : Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range, *Reprinted from Journal of Acoustical Society of America*, **28**, 168-178.
- Biot, M. A. (1956b) : Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range, *Reprinted from Journal of Acoustical Society of America*, **28**, 179-191.
- Deutsch, C.V. and Journel, A.G. (1998) : *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*, 2nd edition, Oxford University Press, New York, USA.
- Dvorkin, J. and Nur, A. (1993) : Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms, *Geophysics*, **58**, 4524-533.
- 羽竜忠男・西川 貢 (2003) : 電気比抵抗-弾性波速度モデルによる変形係数及び透水係数の地下空間分布の推定, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 81-88.
- Kemna, A., Binley, A., and Slater, L. (2004) : Crosshole IP Imaging for engineering and environmental applications, *Geophysics*, **69**, 1, 97-107.
- 西山 哲・大西有三・矢野隆夫・吉村公孝・大久保秀一・安藤賢一・土家輝光 (2004) : 弾性波伝播速度の分散特性を利用した岩石試料の透水特性計測法の研究, 物理探査学会第 110 回学術講演会論文集, 153-154.
- Pride, S.R., Harris, J.m., Johnson, D.L., Mateeva, A., Nihei, K.T., Nowack, R.L., Rector, J.W., Spetzler, H., Wu, R., Yamamoto, T., Berryman, J.G. and Fehler, M. (2003) : Permeability dependence of seismic amplitudes, *Leading Edge*, **22**, 6, 518-525.
- Sudo, H., Tanaka, T., Kobayashi, T., Kondo, T., Takahashi, T., Miyamoto, M., and Amagai, M. (2004) : Permeability imaging in granitic rocks based on surface resistivity profiling, *Butsuri-Tansa*, **57**, 1, 56-61.
- 田中利和・須藤 宏・小林 剛・近藤達敏・宮本正浩・雨谷満 (2002) : 比抵抗分布から透水係数分布への変換—花崗岩地域における山岳トンネル地質調査での例—, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 251-254.
- Yamamoto, T., Nye, T., and Kuru, M. (1995) : Imaging permeability structure of a limestone aquifer by crosswell acoustic tomography, *Geophysics*, **60**, 6, 1634-1645.
- Yamamoto, T. (2003) : Imaging permeability structure within the highly permeable carbonate earth: Inverse theory and experiment., *Geophysics*, **68**, 4, 1189-1201.
- 吉村公孝・坂下 晋・菊地 崇・西山 哲・大西有三・金 亨穆・安藤賢一 (2005) : 弾性波速度の分散特性を用いた岩盤の透水トモグラムの評価手法に関する研究, 物理探査学会第 113 回学術講演会論文集, 346-349.
- 吉村公孝・坂下 晋・安藤賢一・橋本秀爾・パトリック ブライネス・奥村裕史・西山 哲・大西有三 (2006) : 弾性波速度の分散特性を用いた岩盤中の透水係数分布把握に関する検討, 物理探査学会第 115 回学術講演会論文集, 201-204.

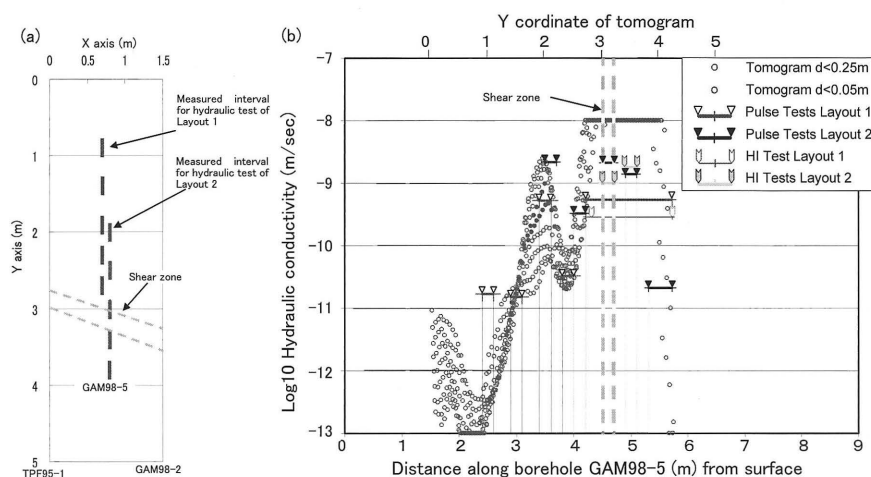


Fig. 13. (a) Location of the in-situ hydraulic test for GAM98-5 borehole. GAM98-5 was instrumented with a 5 packer Multi Modular Packer System (MMPS). (b) Results of the hydraulic test campaign in GAM98-5, hydraulic conductivity ranges versus borehole depth. Solid and hollow circles show the derived hydraulic conductivity from seismic tomography analysis. Horizontal bars show the interval hydraulic conductivity from in-situ hydraulic tests.

参考文献

- 安藤賢一・金 亨穆・西山 哲・大谷俊輔・菊地 崇・大久保秀一・吉村公孝 (2004) : 弾性波速度の周波数依存特性を利用した岩盤透水場の試構築と花崗岩を対象とした適用性検討, 物理探査学会第 110 回学術講演会論文集, 149-152.
- Batzle, M.L., Han, De-Hua and Hofmann, R. (2006) : Fluid mobility and frequency-dependent seismic velocity — Direct measurements, *Geophysics*, **71**, N1-N9.
- Biot, M. A. (1956a) : Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range, *Reprinted from Journal of Acoustical Society of America*, **28**, 168-178.
- Biot, M. A. (1956b) : Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range, *Reprinted from Journal of Acoustical Society of America*, **28**, 179-191.
- Deutsch, C.V. and Journel, A.G. (1998) : *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*, 2nd edition, Oxford University Press, New York, USA.
- Dvorkin, J. and Nur, A. (1993) : Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms, *Geophysics*, **58**, 4,524-533.
- 羽竜忠男・西川 貢 (2003) : 電気比抵抗—弾性波速度モデルによる変形係数及び透水係数の地下空間分布の推定, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 81-88.
- Kemna, A., Binley, A., and Slater, L. (2004) : Crosshole IP Imaging for engineering and environmental applications, *Geophysics*, **69**, 1, 97-107.
- 西山 哲・大西有三・矢野隆夫・吉村公孝・大久保秀一・安藤賢一・土家輝光 (2004) : 弾性波伝播速度の分散特性を利用した岩石試料の透水特性計測法の研究, 物理探査学会第 110 回学術講演会論文集, 153-154.
- Pride, S.R., Harris, J.m., Johnson, D.L., Mateeva, A., Nihei, K.T., Nowack, R.L., Rector, J.W., Spetzler, H., Wu, R., Yamamoto, T., Berryman, J.G. and Fehler, M. (2003) : Permeability dependence of seismic amplitudes, *Leading Edge*, **22**, 6, 518-525.
- Sudo, H., Tanaka, T., Kobayashi, T., Kondo, T., Takahashi, T., Miyamoto, M., and Amagai, M. (2004) : Permeability imaging in granitic rocks based on surface resistivity profiling, *Butsuri-Tansa*, **57**, 1, 56-61.
- 田中利和・須藤 宏・小林 剛・近藤達敏・宮本正浩・雨谷 満 (2002) : 比抵抗分布から透水係数分布への変換—花崗岩地域における山岳トンネル地質調査での例—, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 251-254.
- Yamamoto, T., Nye, T., and Kuru, M. (1995) : Imaging permeability structure of a limestone aquifer by crosswell acoustic tomography, *Geophysics*, **60**, 6, 1634-1645.
- Yamamoto, T. (2003) : Imaging permeability structure within the highly permeable carbonate earth: Inverse theory and experiment., *Geophysics*, **68**, 4, 1189-1201.
- 吉村公孝・坂下 晋・菊地 崇・西山 哲・大西有三・金 亨穆・安藤賢一 (2005) : 弾性波速度の分散特性を用いた岩盤の透水トモグラムの評価手法に関する研究, 物理探査学会第 113 回学術講演会論文集, 346-349.
- 吉村公孝・坂下 晋・安藤賢一・橋本秀爾・パトリック ブライネス・奥村裕史・西山 哲・大西有三 (2006) : 弾性波速度の分散特性を用いた岩盤中の透水係数分布把握に関する検討, 物理探査学会第 115 回学術講演会論文集, 201-204.

Experimental study on imaging hydraulic conductivity of rock masses based on elastic wave velocity dispersion

Kimitaka Yoshimura*, Ken-ichi Ando**, Susumu Sakashita*³,
Patrick Bruines**, Hirohumi Okumura*⁴, Satoshi Nishiyama*⁵ and Yuzo Ohnishi*⁵

ABSTRACT

The objective of this study is to establish a technique to obtain hydraulic conductivity distribution in granite rock masses. This technique is based on the characteristic that elastic wave velocity disperses in fully saturated porous media on frequency. Velocity dispersion is governed by fluid/solid interaction which corresponds to the hydraulic conductivity such as described by Biot and BISQ theory.

In order to verify the validity of these theories in granite rock, laboratory tests were performed. The results of experiments show that the elastic wave velocity dispersion for granite rock can be well described by BISQ theory. To test the applicability of this approach in real rock masses, we performed in-situ experiments at the Grimsel test site in Switzerland. Dispersion phenomena were detected in the frequency range from 0.8 kHz to 80 kHz, in the borehole distance range from 1.5m to 70m. Cross-hole tomography measurements, with frequency at 20 kHz and 40 kHz in a distance between boreholes of 1.5 meter, were carried out.

To obtain the hydraulic conductivity image, geostatistical technique was tried. A limited number of hydraulic test data were used to find the correlation between the velocity difference and hydraulic conductivity. With this correlation, a hydraulic conductivity image was constructed. The location of the high hydraulic conductivity zone from the result agrees with that estimated using geological information. Additional hydraulic tests were conducted in a borehole located in the middle of the tomography plane. These hydraulic tests show a good agreement between the measured hydraulic conductivity and the hydraulic conductivities predicted from the cross-hole tomography.

These result of experimental studies show that the possibility as a practical method to determine the hydraulic conductivity image in granite rock.

Keywords: velocity dispersion, seismic tomography, hydraulic conductivity, Radioactive Waste disposal in underground, poro-elastic theory

Manuscript received May 31, 2007; Accepted April 21, 2009.

* Radioactive Waste Management funding and research Center
1-15-7, Tsukishima, Chuo-ku, Tokyo 104-0052, Japan

** Obayashi corporation

2-15-2, Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8502, Japan

*³ Radioactive Waste Management funding and research Center,
Present : OYO corporation

2-2-19, Daitakubo, Minami-ku, Saitama 336-0015, Japan

*⁴ Electric Power Development Co., Ltd.

6-2-27, Nakanoshima Kita-ku, Osaka 530-6691, Japan

*⁵ Kyoto University School of Civil Engineering, Division of
Urban and Environment engineering

Kyoto University, Katsura Campus, Nishikyo-ku, Kyoto,
615-8540, Japan

A part of this paper was presented at the 110th SEGJ spring conference, 2004, the 113rd SEGJ fall conference, 2005, the 115th SEGJ fall conference, 2006 and the 116th SEGJ spring conference, 2007.