

間隙水で飽和した岩盤中の弾性波速度分散現象を用いた透水場構築手法

(財) 原子力環境整備促進・資金管理センター 正会員 ○吉村 公孝, 非会員 坂下 晋

(株) 大林組 正会員 安藤 賢一, 非会員 パトリック ブライネス

電源開発(株) 正会員 奥村裕史

京都大学大学院 正会員 西山 哲, 大西有三

1. はじめに

地下空間は地下発電所, 石油備蓄, 地下ダム, 放射性廃棄物処分事業など様々な用途で利用されるようになった。地下空間の安全性や利用目的に対する適用性の評価のうち, 地下水流動に関する評価は重要な項目である。地下水流動の把握には母岩の透水性と構造, さらに断層や破碎帯の位置形状, 規模および透水性を知ることが重要である。地表またはトンネル内からの調査において, 岩盤の透水性評価には, 従来からボーリング孔を利用した透水試験等により, 孔井近傍の水理場評価が行われてきた。しかし従来の水理試験情報は点あるいは線の情報であり, 広域の透水場評価には不確実性が大きい。ここでは, 地質構造探査に適用されている物理探査情報を用いて, 空間的な透水場を求めるために, 間隙水で飽和した岩盤中を伝播する弾性波の速度分散特性を利用した手法を適用し, 花崗岩中に存在する破碎帯を含む空間の透水構造把握に適用した結果を報告する。

2. 弾性波速度の分散特性と透水場の構築手法

(1) Biot 理論および BISQ 理論

間隙水で飽和した岩盤中を伝播する弾性波速度は, 岩盤を構成する骨格と間隙水の相互作用によって波長の周波数の違いによって分散する。Biot(1956)によると, 周波数が低い場合には間隙水は骨格の運動に従って動くことができるため, 流体部と固体部は同じ動きをする。一方で, 周波数が高い場合には, 間隙水に働く慣性力が粘性力に比べ相対的に大きくなり, また弾性波の周期が短いために, 流体は固体の運動に従うことができないことから, 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, 弾性波速度が上昇するとされている。このときの分散現象における速度変化の境界周波数を式(1)で定義している。Biot 理論では, 間隙内の流体は弾性波の伝播方向にのみ動くのに対し, BISQ 理論(Dvorkin & Nur1993)では弾性波の伝播方向に加え, 伝播方向に垂直な流体の動き(Squirt flow)を考慮している。その流体の動きの概念図を図-1に示す。この Squirt flow と呼ばれる流体の動きを考慮した上で, Biot 理論の場合と同様に, 間隙流体の動きの様子が弾性波の周波数により変化すると考え弾性波分散現象を導いている。このときの分散現象における速度変化の境界周波数を式(2)で定義している。

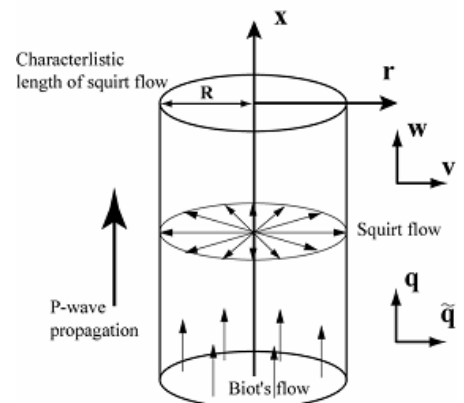


図-1 Biot理論およびBISQ理論の流体概念

$$f_c = \mu\phi/2\pi k\rho_f \quad (\text{式1})$$

$$f_{bisq} = K_f k / 2\pi\mu\phi L^2 \quad (\text{式2})$$

μ : 粘性係数, ϕ : 間隙率,
 k : 固有透過度, ρ_f : 流体の密度
 K_f : 流体の体積弾性率
 L : 流体平均移動距離

(2) 透水場の構築手法

本研究では, 上記で示した弾性波速度の分散現象の周波数依存性を利用し, 透水性が異なる岩盤において弾性波速度が変化する周波数領域や変化の度合いが異なることに着目して, 原位置計測で得られる弾性波速度トモグラフィと透水試験を組み合わせる手法を示す。本手法では, 初めに異なる複数の周波数を用いてボーリング孔間の弾性波トモグラフィ測定を実施し, それぞれの周波数における弾性波速度分布を作成する。併せてボー

キーワード 物理探査, 透水試験, 高レベル放射性廃棄物地層処分, 弾性波トモグラフィ

連絡先 〒105-0001 東京都港区虎ノ門 2-8-10 第15森ビル (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター TEL03-3504-1487

ーリング孔内で透水試験を実施し、トモグラフィ計測区間の透水係数を計測する。次に、異なる周波数の速度分布差を取る。透水性が異なる岩盤では、その違いにより速度分散を起こす周波数帯が異なるため、速度分散が生じる周波数領域で計測した場合は、透水性の違いが差分として現れてくる。そこで透水試験位置における透水係数と弾性波速度分布を組み合わせ、関数近似で対象岩盤の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、弾性波速度差を基に空間的に再配分し、ボーリング孔間の透水場を構築する。

3. 原位置試験による透水場の構築

原位置試験は、図-2 に示す NAGRA（スイス放射性廃棄物管理共同組合）が保有するグリムゼル岩盤試験所にて実施した。ここでは、ボーリング孔間距離 1.5m 区間において理論の適用性の確認と本手法で得られた透水係数分布の検証を行った。試験区域には、地下水で飽和した花崗岩が分布しており一部に岩盤がせん断された際に生じたシェアゾーンと呼ばれる高透水部（透水係数 $1\text{E}-8 \sim 1\text{E}-9\text{m/sec}$ ）が存在する。トモグラフィ測定では、

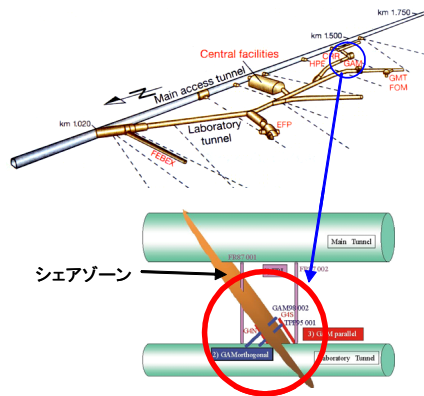


図-2 計測位置とシェアゾーン

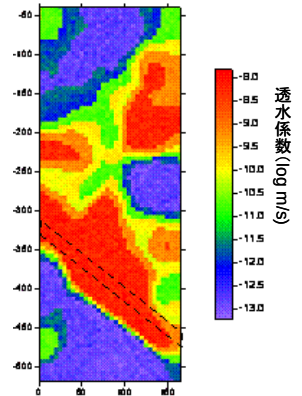


図-3 トモグラフィによる透水場

2本のボーリング孔内の 4.6m 区間においてピエゾ式の震源を用い、10kHz、20kHz、40kHz の弾性波を発信した。受信器には 12 連のハイドロフォンを使用し、発受振間隔は 0.2m とした。受信波形から波動の伝達時間を読み取り、逆解析によって速度分布を求めた。なお、ボーリング孔内の透水係数は NAGRA の計測データを用いた。図-3 に 20kHz および 40kHz 弾性波の速度差とボーリング孔における透水試験の相関性から推定した透水場を示す。本図には高透水性を示すシェアゾーンを破線で示している。この結果から、異なる周波数による弾性波速度差から推定した透水場と高透水性を示すシェアゾーンに相関性が見出せる。

4. 透水係数分布の検証

本手法によって構築した透水係数分布を検証するために、透水場を推定した領域のほぼ中心に位置するボーリング孔による新規透水試験を実施した。透水試験結果とトモグラフィから得られた透水係数の比較を図-4 に示す。横軸はボーリング孔口からの距離、縦軸に透水係数を示す。本手法による解析メッシュサイズを 0.05m とした場合(●)と 0.025m とした場合(○)の 2 ケースを示している。この図から、本手法で得られた透水係数と原位置での新規透水試験結果は良く一致していることが解る。なお、透水試験により計測された透水係数は、 $1.5\text{E}-11\text{ m/s}$ から $1.6\text{E}-9\text{ m/s}$ の範囲で分布している。

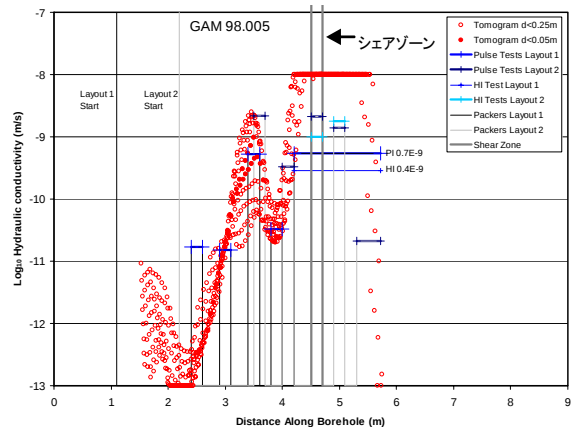


図-4 透水トモグラフィと新規透水試験結果の比較

5. まとめ

ボーリング孔間の透水性を把握する目的で、弾性波トモグラフィと透水試験を組み合わせた手法を示した。そして、原位置スケールにおいて弾性波の分散現象が生じることを確認するとともに、原位置透水試験により、推定した水理場と透水試験の結果が良く整合することが示された。なお、本報告は、経済産業省からの委託による「地層処分技術調査等」の成果の一部である。

6. 参考文献

- 1) M. Biot (1956) : 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
- 2) J. Dvorkin & A. Nur (1993) : Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms, Geophysics 58, NO. 4; 524-533