堆積岩の間隙構造の定量化に関する検討

清水建設(株)　正会員　○多田　浩幸，熊坂　博夫，齋藤　亮
埼玉大学　正会員　長田　昌彦
(独)日本原子力研究開発機構　非会員　前川　恵輔

１．はじめに　地下施設の建設・供用時における坑道内の空気の循環等に伴い，坑道近傍における岩盤の物理特性は掘削前とは異なることが知られている．とくに堆積岩では，乾燥によるクラックの発生や体積収縮等が顕著で，それらに伴って岩盤の強度や透水性の変化領域が拡大すると考えられるが，その程度や範囲を定量的に評価する手法は確立されていない．著者らは，堆積岩中に地下施設を設置する際の坑道近傍の岩盤への乾燥の影響に関する調査評価手法の開発を目的として，岩盤の乾燥に伴う変形挙動のメカニズムの解明とそのモデル化の研究を進めている[1),2)]．本報ではその一環として堆積岩の間隙構造の把握とその定量化手法についての検討を実施したので報告する．

２．堆積岩の間隙構造の把握について　多くの堆積岩はその堆積構造に由来した構造的な異方性を有しており，その変形挙動も異方性に依存することとなる．このような堆積岩の有する内部構造に起因する異方性を調べるために堆積岩試料による室内試験を実施した．

表-1 試験項目一覧表

試験項目	供試体条件
水銀圧入試験	直径 10mm×高さ 5mm 程度のコア，2 方向
コアの軸方向の弾性波速度測定（P 波と S 波）	直径 50mm×高さ 100mm のコア，3 方向
コアの径方向の弾性波速度測定（P 波）	直径 50mm×高さ 100mm のコア，3 方向
透気試験	150mm 角程度の立方体

２．１　試験内容　試験には新第三紀中新世の泥岩試料を用いた．試験項目・供試体条件を表-1 に示す．コアは岩石ブロック（約 50cm×30cm×30cm）から目視によって確認された堆積面に平行（短軸 X，長軸 Y）および直交（Z）する 3 方向からコア抜きした（図-1）．透気試験の供試体も同様に方向性を保持した状態で採取した．各供試体は室内での気乾状態とした．

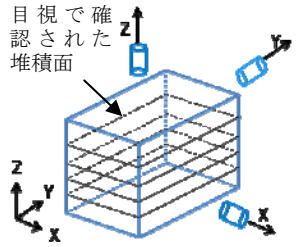


図-1 岩石ブロックの模式図

水銀圧入試験は X，Y の 2 方向から採取したコアを用いて行った．測定結果より式(1)に基づき等価な間隙半径を算出した．

$$r = -(1/P)\cdot 2\gamma\cos\varphi \qquad (1)$$

ここに，r:間隙半径，P:圧力，γ:表面張力（485dynes/cm），ϕ:接触角（130°）である．

コアの軸方向の弾性波速度測定では X，Y，Z の 3 方向のコアの軸方向の P 波と S 波速度をパルス透過法を用いて測定した．径方向の弾性波速度測定では 3 方向のコアの半径方向の P 波速度をコアの高さ方向の 3 つの面内（上，中，下）で 30° 毎に測定した．測定状況を図-2 に示す．

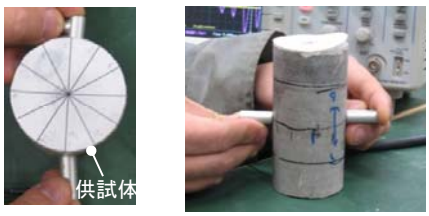
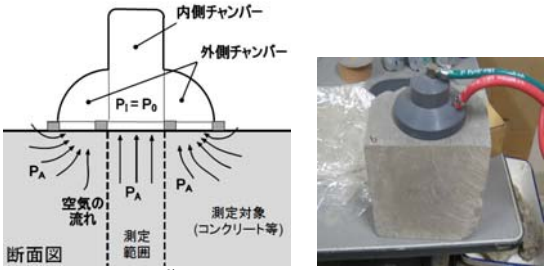


図-2　コアの径方向の弾性波速度測定
（左：供試体上面より撮影）

透気試験では供試体の 3 方向のそれぞれの面で透気係数を測定した．測定はコンクリート表層部の緻密性を非破壊で測定する方法として開発されたトレント法[3)]によって行った．透気試験の概要を図-3 に示す．トレント法は，コンクリートの表面に密閉空間（チャンバー）を作り，チャンバーの中に真空圧力を作ることによりコンクリート表層中の空気を吸い込み，チャンバー中の圧力変化を測定することでコンクリートの透気係数を算定する方法である．



(a) トレント法[3)]の概要　(b) 測定状況
図-3 透気試験の概要

キーワード　堆積岩，乾燥変形，間隙構造，弾性波速度，透気係数，異方性
連絡先　〒135-8530　東京都江東区越中島 3-4-17　TEL 03-3820-8467　FAX 03-3820-5959

２．２　試験結果　水銀圧入試験結果の例を図-4 に示す．横軸は間隙半径，縦軸は間隙全体に占める各区間の間隙体積の割合と累積を示す．間隙半径分布は 0.05 μ m 付近にピークがあり，X，Y の各方向から採取したコアとも類似した結果となった．

コアの軸方向の弾性波速度測定と透気試験の結果を表-2 に示す．いずれの値も Y 方向で最大, X 方向で中間, Z 方向で最小となった．P 波，S 波速度と透気係数は同様な方向依存性を示し，堆積面が Y 方向に卓越していると推定されることから，透気係数と弾性波速度は堆積面に平行な方向で高く，堆積面に直交する方向で低くなる異方性構造を示すことがわかった．

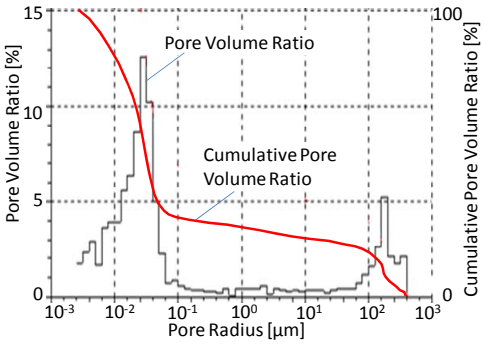
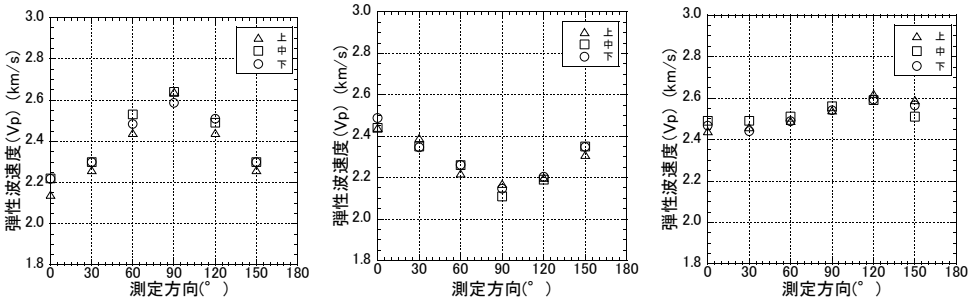


図-4 間隙半径分布（X 方向）

表-2 試験結果

測定方向	P 波速度 (km/s)	S 波速度 (km/s)	透気係数 (m^2)
X 方向	2.50	1.56	0.10
Y 方向	2.66	1.67	0.16
Z 方向	2.30	1.47	0.08

3 方向のコアの Y-Z，X-Z，X-Y 面内における径方向の P 波速度の分布を図-5 に示す．堆積面に平行な方向にコア抜きした X，Y 方向のコアでは Y 軸に一致する方向でP波速度が卓越する傾向を示した．一方，堆積面に直交する方向にコア抜きした Z 方向のコアでは測定方向によらずほぼ同様なP波速度となり卓越する傾向は見られない．このような径方向のP波速度分布は異方性を有する花崗岩での測定例[4]と類似した傾向を示している．



(a)X 方向コア（Y-Z 面内）　(b)Y 方向コア（X-Z 面内）　(c)Z 方向コア（X-Y 面内）

図-5 コアの径方向の P 波速度の測定結果

３．堆積岩の間隙構造の定量化手法について　堆積岩の間隙構造の定量化にあたり，小田ら[5]の提案した速度構造テンソルに着目して堆積岩の異方性構造を表現することを検討した．単位ベクトル $\boldsymbol{m}$ の方向に張られた測線に沿う P 波速度比の二乗 $(v/v_0)^2$ は速度構造テンソル V_{ij} を用いて式(2)で近似される．ここで，v はクラックを含んだ P 波速度，v_0 はクラックを含まない P 波速度である．実測データから V_{ij} を決定する方法として式(3)に示す誤差の二乗和 L を最小にする最小二乗法が用いられている[6]．ここで，$v(k)$は k 番目の測線（総測線数 N）の方向で実測された P 波速度である．径方向の P 波速度測定で得られたデータと式(3)による最小二乗法から，当該試料の速度構造テンソルを算出した．ここで，v_0 は測定データの最大値とした．算出した速度構造テンソルを式(4)に，その主値ベクトルを図化した結果を図-6 に示す．この主値の最大，中間，最小の方向は，室内試験で得られた異方性構造と整合している．このことから速度構造テンソルを利用することにより堆積岩の間隙構造を定量化できる可能性があると考えられる．

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = V_{ij} m_i m_j \qquad (2)$$

$$L = \sum_{k=1}^{N} \left\{ \left(\frac{v^{(k)}}{v_0}\right)^2 - V_{ij} m_i m_j \right\}^2 \qquad (3)$$

$$V_{ij} = \begin{pmatrix} 0.855 & 0.021 & 0.013 \\ & 0.974 & -0.008 \\ \text{Sym.} & & 0.672 \end{pmatrix} \qquad (4)$$

４．まとめ　堆積岩試料による室内試験を実施した結果，透気係数と弾性波速度は堆積面に平行な方向で高く堆積面に直交する方向で低くなる異方性構造を示すことを把握した．また，速度構造テンソルを利用する方法により堆積岩の間隙構造を定量化できる可能性を示した. 今後は速度構造テンソルと堆積岩の間隙系の作る幾何的配列（間隙の体積，方向性など）との関係について検討を進めていきたい．

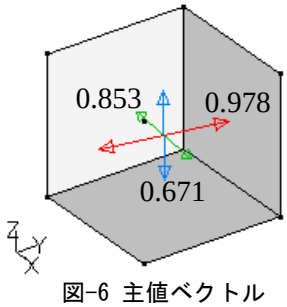


図-6 主値ベクトル

参考文献：1) 長田昌彦：第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,講演番号 70, pp.397-400, 2011. 2) 前川恵輔，他：第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，講演番号 10, pp.53-58, 2012. 3) Torrent, R.: *Materials & Structures*, v.25,n.150, pp.358-365, 1992. 4) 工藤洋三，他：土木学会論文集，第 382 号/Ⅲ-7, pp.45-53, 1987. 5) 小田匡寛，他：第 18 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，Vol.18, pp.467-470, 1986. 6) Takemura, T., and M. Oda : *J. Geophys. Res.*, 110, B05401, 2005.