

一面せん断試験に基づいた異方性を有する泥岩の強度特性評価

長崎大学工学部 学生会員 ○門田 英義

長崎大学大学院 フェロー会員 蔣 宇静

長崎大学大学院 正会員

李 博

鉄道建設・運輸施設整備支援機構 正会員 井浦 智実

長崎大学大学院

学生会員 早川 輝

1. はじめに

現在、九州では九州新幹線西九州ルート等の工事が行われているが、このルートは泥岩で構成される地山を通過する区間が多く、トンネル掘削面の地層が水平から傾斜するケースが見られ、掘削時に地層がすべり面となり、断面欠損を引き起こす可能性がある。通常、水平な地層では緩み圧が鉛直下向きに天端に作用するが、層が傾いている構造では偏圧が作用し、特異的な変形挙動を示すことが報告されている。そこで、本研究では層理面が傾斜状の泥岩に着目し、層の垂直と水平方向に対して一面せん断試験¹⁾を行い、泥岩の粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ を求め、力学特性に関する異方性を評価する。また、繰り返し荷重載荷試験により、層の方向の違いによる垂直剛性の応力依存性についても検証する。

2. 一面せん断試験の概要

泥岩の力学的特性の異方性を評価するため、これらの供試体に、層に平行な方向（以下、 S_{par} に省略）と垂直な方向（以下、 S_{ver} に省略）に一面せん断試験²⁾を行う。

2.1 供試体の作製

JR 西九州ルート俵坂トンネル³⁾周辺の泥岩をカッターで約 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ のサイズに整形したものを、せん断箱（高さ 50mm 、幅 200mm 、奥行き 100mm ）の中心部に入れ、隙間を水と石膏を混ぜた材料（石膏 200：水 40：遅延剤 1）で満たす。数時間後石膏が固まり次第、次に上半部も同様の作業を行うことにより図-1 に示すような供試体を作成する。

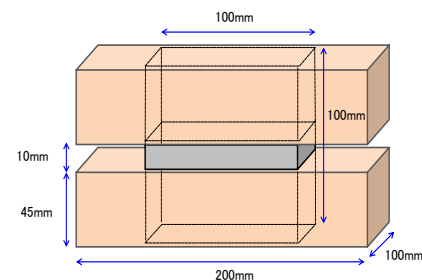


図-1 せん断試験用供試体

2.2 一面せん断試験⁴⁾の手順

作成した供試体をせん断箱に入れ、ボルト等でせん断箱を固定する。次に、供試体に油圧式ジャッキで垂直応力が 1.0MPa となるように加圧する。そして、破壊後の残留強度を確認するためにせん断変位が 10mm になるまで速度 0.5mm/min でせん断し続ける。せん断を終えた後、供試体を取り外し、せん断面の観察を行う。

3. 繰り返し載荷試験の概要

岩盤亀裂の垂直応力と垂直変位の関係式は式(1)で表わされる⁵⁾。供試体の破壊前後に垂直応力 5MPa までの繰り返し載荷を行うことで、それぞれの垂直応力-垂直変位の曲線を求めた。そして、破壊前後の曲線の差分からその近似式である式(1)のパラメータ k_{n0} と $u_{n\text{max}}$ を定めた。

$$\sigma_n = k_{n0} \left(\frac{u_n}{1 - u_n / u_{n\text{max}}} \right) \quad (1)$$

ここで、 k_{n0} ：一定の応力状態での初期剛性 (MPa/mm)

u_n ：垂直変位 (mm)

$u_{n\text{max}}$ ：最大垂直変位 (mm)

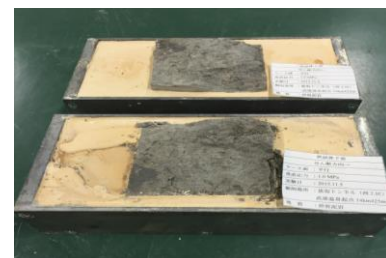


図-2 せん断後の供試体

4. 試験結果と考察

図-2 にせん断後の供試体を、図-3 にせん断応力とせん断変位の関係図を示す。各ケースの結果をまとめてみると、平行にせん断したピーク値は、ケース $S_{\text{par-1}}$ では 0.74MPa 、ケース $S_{\text{par-2}}$ では 1.32MPa であり、垂直にせん断したピーク値は、ケース $S_{\text{ver-1}}$ では 1.83MPa 、ケース $S_{\text{ver-2}}$ では 1.05MPa であった。ピークせん断応力 τ_{peak} はせん断変位 1mm 以内で発生し、その点から 1mm ほど変位したところでせん断応力はピークの半分くらいまで小さくなり、その後なだらかに減少している。せん断荷重をかけた際の最大せん断応力は、層

に垂直にせん断する方が層に平行にせん断するより高い値を示すが、ケース S_{ver-2} は用いた供試体の寸法が短く、せん断面の面積が小さかったため、一般性に沿うような数値が得られなかった。

図-3 のピーク時および残留状態における内部摩擦角は同じであると仮定し、ピークせん断応力 τ_{peak} 、破壊後の残留せん断応力 τ_{res} をモール・クーロンの破壊規準である式(2)と式(3)に代入して、粘着力 c と内部摩擦角 φ をそれぞれ算出した。なお、式中の i はせん断破断面の傾斜角であるが、ここでは傾斜角を 0° とする。

$$\tau_{peak} = c + \sigma_n \tan \varphi \tag{2}$$

$$\tau_{res} = \sigma_n \tan (\varphi - i) \tag{3}$$

求められた粘着力 c 、内部摩擦角 φ 及びピークせん断応力 τ_{peak} 、破壊後の残留せん断応力 τ_{res} を表-2に示す。粘着力 c 、内部摩擦角 φ は S_{ver} の方が大きくなるが、内部摩擦角 φ では明確な差が見られなかった。

図-4 にせん断試験前後に繰り返し荷重を加えた際の変形特性を、図-5 に図-4 で示した破壊前後の曲線の差分を示す。また、表-1 に図-5 の曲線を近似することで求めた式(1)に含むパラメータの計算結果を示す。図-4 より、ケース S_{ver} は傾きが大きく、ケース S_{par} に比べて垂直剛性が高い数値を示した。ケース S_{ver} の方がせん断後の表面の起伏が大きく、高い垂直剛性を示す傾向があることが検証された。

5. おわりに

本研究では、一面せん断試験装置を用いて異方性を有する泥岩の力学特性の検証を試みた。その結果、層に垂直な方向にせん断する方が水平方向にせん断するよりもピークせん断応力と垂直剛性は大きいことが示された。今後は試験時における供試体の形状や寸法を整え、様々な载荷条件における泥岩の力学異方性をさらに明らかにしていく。

参考文献

1) 新城俊也：一面せん断試験(軟岩に関する調査・試験法：目的・問題点・今後の課題(＜小特集＞軟岩))，土と基礎，Vol.3，No.11，pp.30-31，1993

2) 早川輝：一面せん断試験装置を用いた軟岩の強度特性評価，長崎大学大学院工学部工学科社会環境デザイン工学コース卒業論文，pp.20-35，2014

3) 後藤知治，内田雅洋，高山藤博：TSP など切羽前方予測を試みつつ膨張性地山に挑む-九州新幹線西九州ルート俵坂トンネル(西)-，トンネルと地下，Vol.42，No.3，pp.7-14，2011

4) 千年俊介，棚橋由彦，蔣宇静，李博：岩盤不連続面のせん断挙動のせん断速度依存性の実験的解明，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.409-410，2009

5) Li B, Zhao Z, Jiang Y, Jing L. Contact mechanism of a rock fracture subjected to normal loading and its impact on fast closure behavior during initial stage of fluid flow experiment. International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics, 2015, 39 : 1431-1449

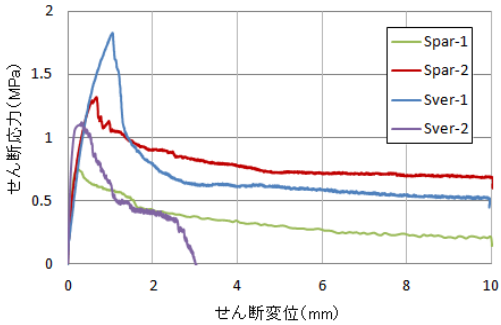


図-3 せん断応力－せん断変位の関係

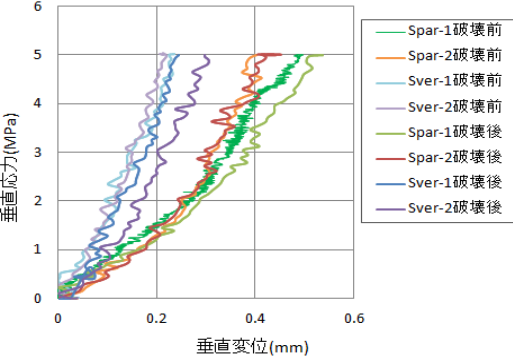


図-4 垂直変位－垂直応力の関係

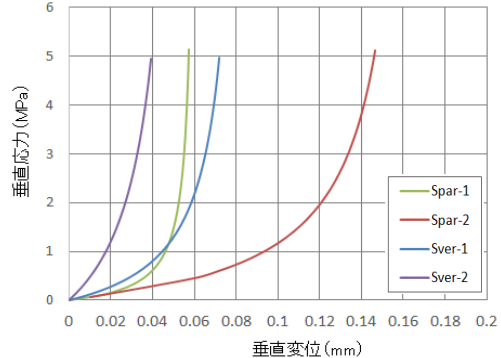


図-5 亀裂の垂直剛性の変化

表-1 亀裂剛性の比較

	k_{n0}	u_{nmax}
	(MPa)	(mm)
S_{par-1}	5.270	0.061
S_{par-2}	5.650	0.16
S_{ver-1}	10.62	0.085
S_{ver-2}	260.5	0.016

表-2 粘着力と内部摩擦角

	c	φ	τ_{peak}	τ_{res}
	(MPa)	(deg)	(MPa)	(MPa)
S_{par-1}	0.48	14.68	0.74	0.26
S_{par-2}	0.61	35.60	1.3	0.72
S_{ver-1}	1.3	29.77	1.8	0.57
S_{ver-2}	0.67	20.81	1.1	0.38