

挟在物を有する岩盤不連続面模型を用いた 室内せん断試験

矢島 良紀^{1*}・多田 一晴¹・品川 俊介¹

¹国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
*E-mail: y-yajima@pwri.go.jp

Key Words : rock joint, filled joint, shear strength, direct shear test, dilation angle

1. はじめに

岩盤には断層や節理のような力学的な不連続面が存在することがあり、総称して弱層と呼ばれる。このような弱層がダムの基礎岩盤に分布すると、その位置や性状によっては堤体の滑動など、ダム安定上の懸念材料となることがあるため、弱層に対し適切に強度評価を行う技術の確立が求められている。

弱層に期待できるせん断強さの要素はそのタイプにより変化し、挟在物のない単一亀裂の場合は、堅岩部のせん断破壊と摩擦がその要素となり、挟在物が堅岩部のアンジュレーションに対し十分に厚い場合は、挟在物のせん断強さが弱層全体の強さとみなすことができる。一方、弱層がアンジュレーションを有する堅岩部と薄い挟在物から構成される場合、挟在物の厚さや堅岩部の形状によりせん断経路が変化するため、せん断過程は複雑なものとなる。ダム事業ではこのような弱層に対し、原位置せん断試験を行うことがあるが、ロックせん断試験となることやアンジュレーションを取り込むために大型の試験体を用いる必要があることに加え、試験体の挙動を安定させるために姿勢制御方式のような特殊な試験となることもあり、実施には多大な手間と費用を要することから、その数量は限られたものとなり、代表性が課題であった。

このような挟在物を有する岩盤不連続面の強度評価には、Goodman¹⁾による規則形状の供試体を用いた実験など、振幅と挟在物の厚さの関係について分析した結果は多いが、複雑な凹凸を有する自然岩盤の亀裂面をもとに実験を行った例は必ずしも多くなく、簡便な強度予測手法の確立までには至っていない。

そこで筆者らは、自然岩盤の亀裂面の形状をもとに製作した模擬岩盤と多様な挟在物を用いて、数多くの一面せん断試験を実施したので、その結果を報告する。

2. 供試体と試験方法

(1) 試験の種類

せん断強さに与える堅岩部の表面形状と挟在物の種類、厚さの影響を評価するため、表面粗さの異なる2種類（粗・滑）の堅岩部と厚さや性状の異なる7種類の挟在物（挟在物なしを含む）を組み合わせた14シリーズの試験を実施した（表-1）。せん断時の垂直応力は後述する4段階で設定し、各試験パターンで2回の試験を実施した。試験数は再試験を含め、合計113試験である。

(2) 供試体

a) 堅岩部

供試体の堅岩部は、粗さの異なる稲田花崗岩の割裂亀裂面をレーザースキャナと3Dプリンタを用いて高精度に複製し、これをモールドとして石膏（吉野石膏・ハイストーンB）により作成した。供試体の平面寸法は約200mm×100mmである。作成条件を均一にするため、石膏や供試体の保管は恒温恒湿室にて行い、攪拌は真空攪拌機を用いて攪拌ムラや気泡の混入が生じないようにした。また、供試体間の凹凸のかみ合わせは良好であり、挟在物を含まない場合、上下盤は密着した状態である。

作成した堅岩部供試体A・Bの形状イメージを図-1に示す。堅岩部供試体A・Bの表面粗さは、長辺沿いに測

表-1 堅岩部と挟在物の組合せ

堅岩部形状 (2種類)	挟在物 (7種類)		
形状 A (粗い)	①	なし	
	②	岩片状	2mm
	③	礫混じり粘土 I (礫 10%)	2mm
形状 B (滑らか)	④	〃	4mm
	⑤	礫混じり粘土 II (礫 30%)	2mm
	⑥	〃	4mm
	⑦	粘土	1mm

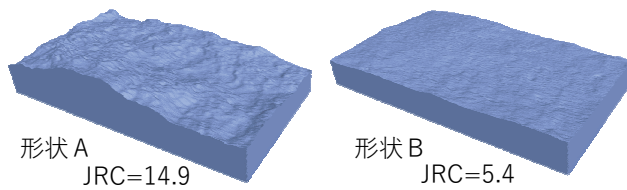


図-1 作成した供試体の表面形状

線を0.5mm間隔で設定し、測線ごとに粗さを算出した上で測線数で割ることにより平均的な粗さを求めた。測線ごとの最大－最小値（最大比高）の平均でそれぞれ12.8mm, 6.0mm, JRC（Joint Roughness Coefficient）²⁾はTse and Cruden³⁾の手法によって換算した値でそれぞれ14.9, 5.4であった。

b) 挟在物

作成した挟在物のうち、粘土は陶芸用の笠間土を使用し、礫は堅岩部と同じ石膏を用いて、直径2mm程度に調整したうえで、密度が一定となるように所定の割合で粘土と混合し礫混じり粘土とした。混合した粘土および礫混じり粘土は所定の厚さに整形したのち、試験直前に堅岩部供試体間に挟んだ。また、岩片状の挟在物に関しては、堅岩部で使った石膏よりもやや強さを低下させる目的で、石膏（吉野石膏・ハイストーンN）に標準量の1.5倍の水を混和させ、石膏シートを作成し、粘土等と同様に試験直前に堅岩部の供試体に挟んだ。挟み込む際に石膏シートに亀裂が入るため、試験時には石膏シートが岩片状となって供試体の凹凸に密着するような状態となった。なお、挟在物は垂直載荷で圧密された段階で設定した厚さ（1mm, 2mm, 4mm）程度になるようにし、せん断載荷前に挟在物の厚さを測定した。

(3) 試験装置

土木研究所が所有する一面せん断試験機（写真-1）を使用した。本試験機はアムスラー型の一軸圧縮試験機に、直交する方向の垂直力拘束装置を組み合わせたもので、供試体を設置したときのせん断面は水平面から90°回転した鉛直方向となる（図-2）。試験機の最大載荷能力は、垂直力200kN、せん断力2,000kNであり、測定した値（垂直力、せん断力、垂直変位、せん断変位）は、AD変換器を介して、コンピュータへリアルタイムに保存される。

(4) 試験条件

試験時の垂直応力は、0.5, 1.0, 2.0, 4.0MPaの4段階とし、本試験の前に図-3の載荷パターンにて予備載荷を実施している。せん断力の載荷速度は変位制御で行い、毎分0.2mmとした。また、試験はせん断変位が5mm（一部試験は10mm）に達するまで行い、その間は垂直力が一定となるように制御した。



写真-1 使用したせん断試験機

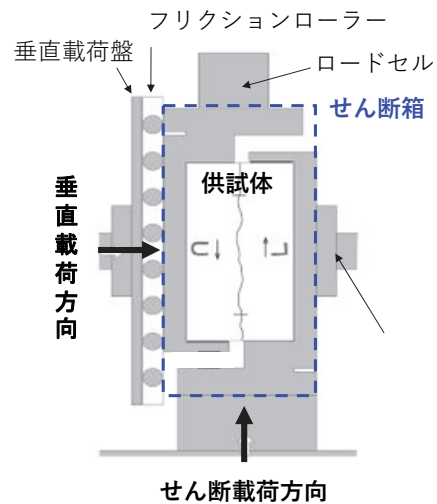


図-2 供試体の設置イメージ

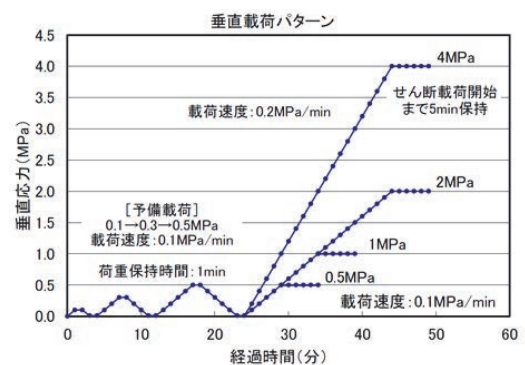


図-3 予備載荷パターン

3. 試験結果と考察

(1) せん断強さ

各試験における垂直応力とピークせん断応力の関係を図-4に、試験結果の回帰式より求めたせん断強さ（粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ ）を表-2に示す。回帰式の決定係数 R^2 は全てのシリーズで0.99以上と非常に高く、安定した試験結果が得られていることを確認した。

表面の粗さが試験結果に与える影響をみると、挟在物の有無や性状にかかわらず、滑らかな形状Bの方が粗い

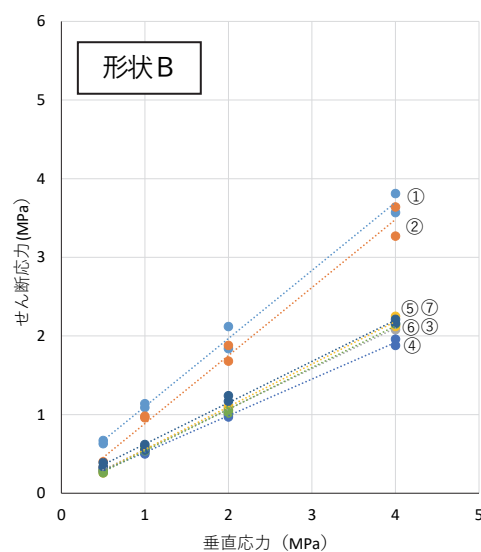
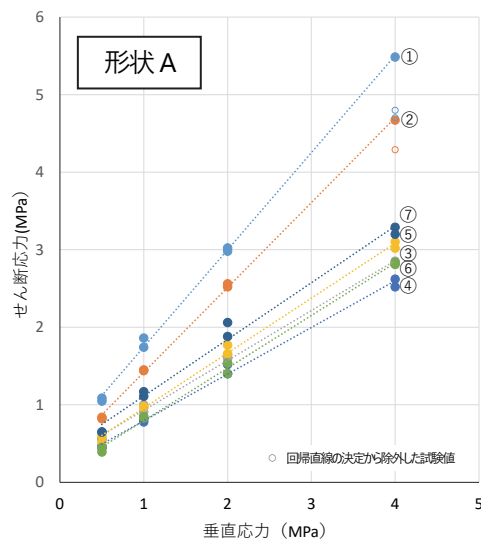


図-4 垂直応力とピークせん断応力の関係

形状Aより粘着力、内部摩擦角とも低い値を示した。形状Bにおける粘着力の低下量は0.11～0.30MPaであり、内部摩擦角 ($\tan \phi$) も20～30%ほど低下した。

挟在物によるせん断強さの比較では、形状Aでは、挟在物なし>岩片状>粘土(1mm)>礫混じり粘土II(礫30%)>礫混じり粘土I(礫10%)の順となった。本試験では礫-粘土比の異なる2種類の礫混じり粘土を用いたが、礫分の割合が30%と多く粘土分の割合が少ない礫混じり粘土IIでは、礫分の割合が10%と少ない礫混じり粘土Iを用いたシリーズに比べ、内部摩擦角が大きくなる一方、粘着力は小さくなった。形状Bでもせん断強さは同様の傾向を示したが、岩片状以外の挟在物を有するシリーズ間の差異は小さかった。

挟在物の厚さと形状の関係がせん断強さに与える影響を確認するため、図-5に示すとおり粘着力と内部摩擦角に分けて整理した。一般化のため、せん断載荷前に測定した挟在物の厚さを各形状の最大比高の平均値で除すと

表-2 回帰式より算出した各シリーズのせん断強さ

挟在物種類	形状A			形状B		
	c	ϕ	R^2	c	ϕ	R^2
① 挟在物なし	0.49	51.4	1.00	0.24	40.9	0.99
② 岩片状(2mm)	0.32	47.6	1.00	0.02	40.8	0.99
③ 礫混じり粘土 I (礫10%・2mm)	0.29	32.8	1.00	0.04	27.2	1.00
④ 礫混じり粘土 I (礫10%・4mm)	0.19	31.0	1.00	0.06	25.0	1.00
⑤ 礫混じり粘土 II (礫30%・2mm)	0.25	35.3	1.00	0.01	28.5	1.00
⑥ 礫混じり粘土 II (礫30%・4mm)	0.12	34.1	1.00	0.01	27.9	1.00
⑦ 粘土 (1mm)	0.38	36.1	0.99	0.10	27.7	1.00

c: 粘着力(Mpa), ϕ : 内部摩擦角($^{\circ}$), R^2 : 決定係数

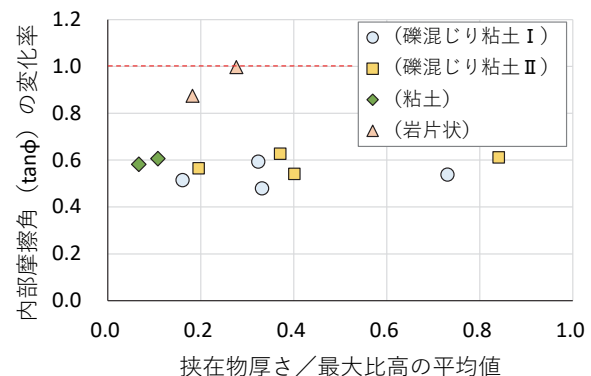
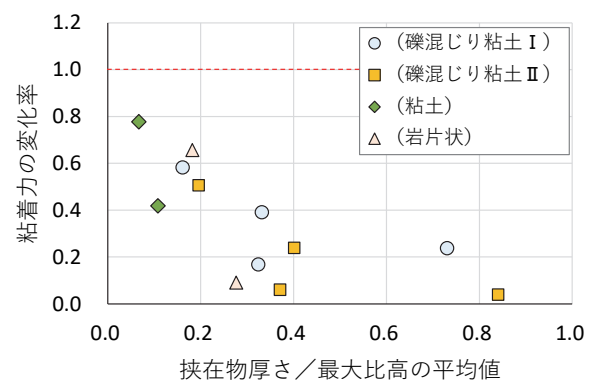


図-5 挟在物の厚さとせん断強さの関係

ともに、粘着力、内部摩擦角はそれぞれ挟在物なしを1としたときの変化率で表現した。図より、粘着力は挟在物の厚さが増加するにしたがい減少するが、厚さが最大比高の平均値の1/2程度に達すると粘着力の減少は頭打ちになるような傾向が見られた。これは挟在物の厚さが増加することで堅岩部のかみ合いが減少し、さらに挟在物が堅岩部の凹凸に対し一定以上の割合になることでかみ合いが生じなくなり、挟在物のせん断強さに等しくなるためと考えられる。一方で内部摩擦角は、たとえ薄い挟在物であってもそれが存在するだけで、挟在物の性状

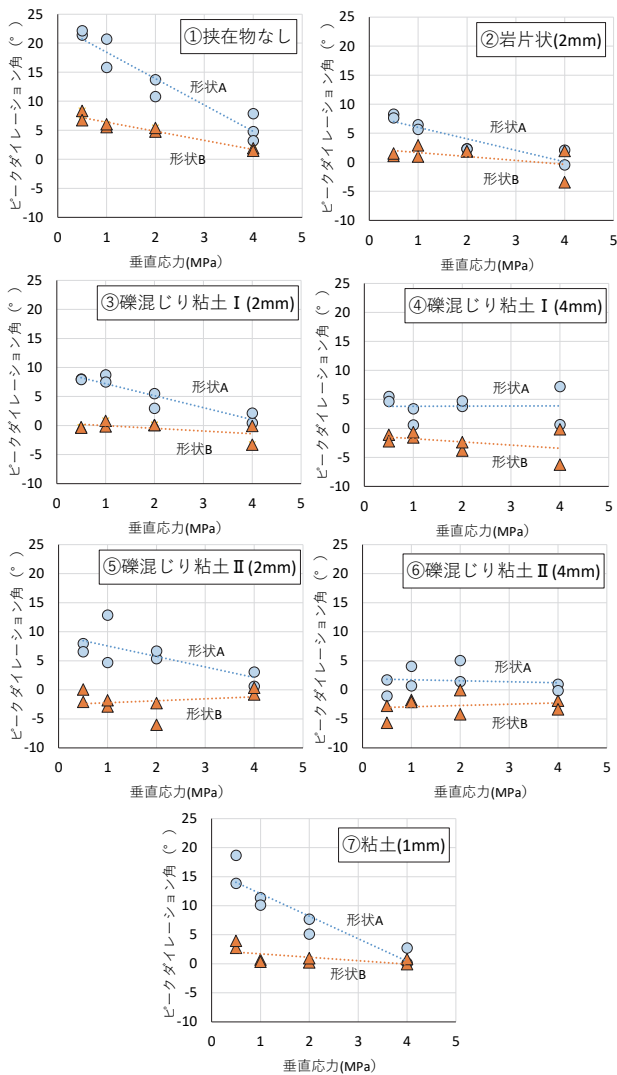


図-6 挟在物の種類とピークダイレーション角の関係

に応じた割合で減少し、挟在物の厚さには依存していないことがわかった。このことは挟在物が堅岩部のかみ合いに対し潤滑油のような働きをしていることを示唆している。

(2) ダイランシー特性

せん断試験時における供試体の挙動は、せん断過程に直結するため強度予測を行う上で重要な要素である。挟在物を有しない岩盤不連続面の場合には、一般にはせん断初期には供試体の沈み込みが生じ、その後浮き上がりに転じた後にピークせん断応力を示すことが多い。一方、挟在物が存在する場合は、堅岩部の形状と挟在物の厚さ、垂直応力との相互関係によりその挙動が変化すると考えられる。そのため、要素ごとにこれらの関係について整理を行った。

図-6に供試体の形状とピークダイレーション角（ピークせん断応力を示したときの供試体の浮き上がりまたは沈み込み角度）の関係を挟在物の種類ごとに示す。図より、粗い形状Aは、滑らかな形状Bよりも全般的に大き

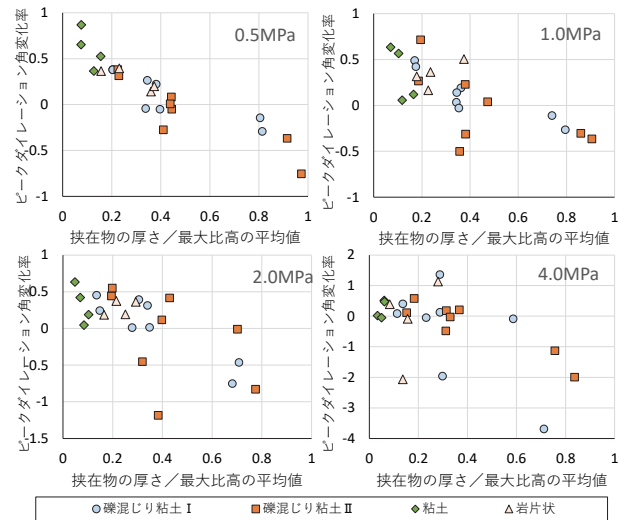


図-7 挟在物の厚さ、形状とピークダイレーション角の関係

なピークダイレーション角を示すことや、垂直応力の増加にともないピークダイレーション角は低下する傾向が見られた。また、挟在物がある場合は挟在物がない場合と比較して小さなピークダイレーション角を示すことがわかる。これは、挟在物があることでその内部でせん断が生じるため、凹凸の乗り上げが生じにくくなっているためと考えられる。加えて、ピークダイレーション角の低下には挟在物の種類による差は少なく、挟在物の厚さと堅岩部の形状に大きく関係していた。

そこで、挟在物の厚さと堅岩部の形状の相互関係とピークダイレーション角の関係を整理するために、図-5と同様に挟在物の厚さを各形状の最大比高の平均値で除して一般化し、ピークダイレーション角を挟在物なしを1とした場合の変化率で表した。結果を図-7に示す。垂直応力が小さい場合、全てのプロットが直線上に並んでおり、少なくとも今回使用した挟在物については、その種類とは関係なく厚さと形状（表面粗さ）のバランスによってピークダイレーション角の変化率が決定されることがわかった。一方で、垂直応力が大きくなると、供試体の乗り上げが生じにくくなるため、挟在物なしの供試体でもピークダイレーション角の絶対値が小さくなり、相対的に変化率が大きくなりやすいため、関係は不明瞭になる傾向にある。

4. まとめ

堅岩部の強度、表面形状および挟在物の構成材料と厚さからせん断強度を推定することを目的として、表面粗さや挟在物を変化させた模擬弱層供試体を用いた室内せん断試験を実施した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- ・挟在物の有無や性状にかかわらず、粗い形状を有する方が、粘着力、内部摩擦角とも高い値を示す。
- ・供試体のせん断強さは挟在物なしがもっとも大きく、挟在物がある場合の強さは、まず挟在物の種類、次いでその厚さに影響される。
- ・挟在物の厚さが増加すると粘着力は減少するが、内部摩擦角は挟在物の有無や種類に大きく影響し、厚さの増加による変化は小さい。
- ・ピークダイレーション角の低下には挟在物の種類による差は小さく、挟在物の厚さと堅岩部の形状に大きく関係する。

引き続き試験結果の分析を進め、せん断過程の把握と強度評価に向けたモデル化を行う予定である。

参考文献

- 1) Goodman, R.E.: The Deformability of Joints, Determination of the In Situ Modulus of Deformation of Rock, *ASTM STP 477, American Society for Testing and Materials*, pp174-196, 1970.
- 2) Barton, N. : Review of a new shear-Strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*. 7, pp. 287-332, 1973.
- 3) Tse, R., and Cruden, D.M. : Estimating joint roughness coefficients. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 16, pp. 303-307, 1979.