

14.5 ダム基礎等における弱層の強度評価手法の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：材料地盤研究グループ（地質）

研究担当者：佐々木靖人、倉橋稔幸、吉田直人

【要旨】

ダム基礎となる岩盤には、断層や節理のような弱層が存在することがあり、効率的な建設を行う上で問題となることがある。これは弱層のせん断強度には体系的な評価手法が確立されておらず、設計強度の決定が難しいためである。

弱層の形態において、せん断強度との関係で着目すべき要素は、弱面の不連続性、壁面のかみ合いおよび充填物の存在である。平成 20 年度は、せん断強度推定に用いるモデル作成のための基礎試験として、充填物がある場合の弱層模型を用いた一面せん断試験を実施し、せん断強度と表面形状、材料強度の関係を充填物のない場合のせん断強度と比較検討を行った。

キーワード：弱層、岩盤不連続面、一面せん断試験、せん断強度、ダム基礎

1. はじめに

岩盤には、断層や節理のように力学的な不連続面が存在することがある。不連続面は周囲の岩盤と比較し、強度が著しく低いことから総称として弱層と呼ばれる。弱層がコンクリートダム等の大型土木構造物の基礎となる岩盤に存在する場合、この強度を適切に評価して設計を行う必要があるが、弱層の強度評価が難しいため、設計強度を安全側の評価として低く設定することが一般的である。しかし、そのために、基礎掘削量や堤体積の増加など、効率的な建設事業を行う上で問題となることもある。

そのため、本研究は弱層の強度評価手法を開発し、上記課題に対応することを目的としている。平成 20 年度はせん断強度推定に用いるモデル作成のための基礎試験として、粘土や砂などの充填物がある場合における弱層模型を用いた一面せん断試験を実施し、充填物あり、なしの場合におけるせん断強度について比較検討した。

2. 研究の概要

物性値に基づく弱層の強度推定手法には、弱層の表面粗さと壁面の一軸圧縮強度等を用いて求める Barton(1973)の経験的な強度式¹⁾が知られているが、実際のダムで見られるような開口節理や粘土等の充填物を挟む弱層への拡張性に乏しく、適用が難しい。

このため、昨年度は表面の凹凸のせん断破壊と凹凸に沿った乗り上げを考慮したモデルとして知られる Ladanyi & Archambault (1970)の修正式である Saeb (1990)のせん断強度式²⁾ (1)に着目し、充填物を含む弱層の強度

評価への適用性を検討した。

$$\tau_p = \alpha_n \tan(\phi_n + i)(1 - A_s) + A_s \cdot S_r \quad (1)$$

ここで、 τ_p はピークせん断強度、 α_n は垂直応力、 ϕ_n は平滑面の摩擦角、 i はピークダイレーション角、 A_s はせん断面積比、 S_r は堅岩部のせん断強度である。

平成 19 年度の実験結果より、このせん断強度式は、充填物のなく、弱層断面がかみ合わせの良い場合において、十分適用できることがわかった。そこで、平成 20 年度では、粘土や砂などが充填されている弱層模型の一面せん断試験を実施し、せん断強度式の拡張性を検討した。

3. 試験概要

3.1 供試体

岩盤を想定した供試体は、モルタルを用いて、粗さの異なる 3 種類（形状 A・B・C（平滑面））を作製した。モルタルは、水：普通ポルトランドセメント：石粉：大井砂＝4.9：4.9：2.1：21.0 (kg) で配合し、作製した。作製後は、28 日間水中養生を行い、その後実験室内で常温保管した。表-1 にモルタルの物性を示す。モルタルは、かみ合わせが良いものを作製するため、片面打設後、その翌日にもう一方を片面打設して作製した。

表-1 モルタルの物性

	JRC	平均振幅 (mm)	強度 (MPa)	
			一軸圧縮	引張
形状A	14.2	5.30	15.6	2.51
形状B	11.8	4.24		
形状C (平滑面)	—	—		

弱層に流入した粘土や介在する砂を想定した充填物には、K:カオリンクレー、S:砂混じり粘土(細粒砂)、SII:砂混じり粘土(粗粒砂)、F:油性粘土を用いた。充填物の厚さは、平均振幅1/4、平均振幅の1/8を設定した。充填物は、モルタル表面に均等になるようにヘラを用いて塗り、変位計を用いて充填物の厚さが所定の厚さになるように作製した。充填物の物性は、表-2に示す。供試体の形状および寸法を図-1に、供試体作製状況を図-2に示す。

表-2 充填物の厚さと種類

充填物の種類	粒径および配合	含水比 (%)	一軸圧縮強度 (kN/m ²)
K:カオリンクレー	75 μm以下	60.0	7.80
S:砂混じり粘土(細粒砂)	カオリンクレー: 75 μm以上425 μm以下の砂 =5:3	38.0	6.46
SII:砂混じり粘土(粗粒砂)	カオリンクレー+ 425 μm以上850 μm以下の砂 =5:3	38.0	
F:油性粘土	-	-	82.4

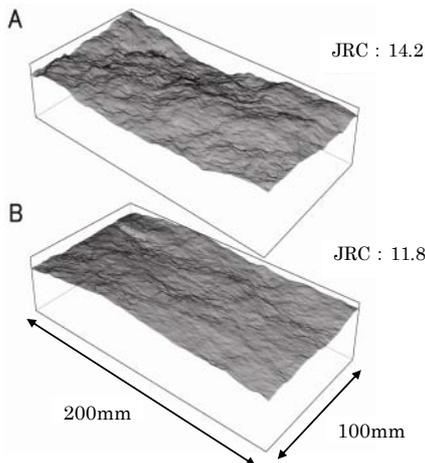


図-1 供試体の形状 (形状 A, B)



図-2 供試体作製状況

3.2 試験機器

使用したせん断試験機は、土木研究所所有の垂直荷重200kN、せん断荷重2000kNの载荷能力を有する装置であり、せん断時に垂直荷重を一定に保持する機構を内蔵している(図-3左)。測定値(垂直荷重、せん断荷重、垂直変位、せん断変位)は、コンピュータリアルタイムに保存される。また、せん断による供試体の形状変化を

調査するため、供試体表面を試験の前後にXY方向とも0.5mmピッチで形状測定を実施した。測定にはレーザー変位計(赤色半導体レーザー:精度±2μm)とステップモーター駆動方式によるXY軸自動ステージを用いた(図-3右)。



図-3 試験機器

3.3 試験条件

前述した3種類の供試体に対し、試験条件として、垂直応力を段階的に変えた4種類の荷重を設定した。これに充填物の種類を組合せた計94種類のせん断試験を実施した。

試験は予備荷重をし、充填物を所定の厚さに設定した後、所定の垂直荷重を載荷し、これを一定に保持しながら、変位制御によってせん断を行った。載荷速度は0.2mm/minとした。試験終了は、せん断変位が10mmまで達した時点とした。

4. 試験結果

4.1 せん断強度

4.1.1 充填物がない場合におけるせん断強度

充填物がない場合におけるせん断試験結果を図-4に示す。表面の粗さの違いが強度に与える影響についてみると、同じ垂直応力下では形状A>形状B>形状Cの傾向があり、形状が粗いものほどせん断強度が大きくなった。形状C(平滑面)のせん断強度の結果から、摩擦角φuは、35.7°となった。

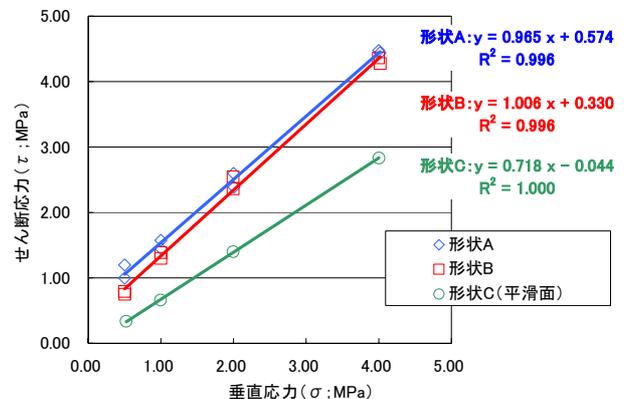


図-4 せん断試験結果 (充填物なし)

4.1.2 充填物の厚さ、種類の違いによるせん断強度の比較

(1) 充填物の厚さの違いによるせん断強度の比較

形状 A における充填物がない場合と充填物がある場合におけるせん断試験結果を図-5に示す。

節理面の平均振幅の 1/4~1/8 程度の充填物の厚さ違いによるせん断強度は、明確な差が見られなかった。また、充填物がある場合のせん断強度は、充填物がない場合のせん断強度と比較して、半分以下程度を示した。

節理面の振幅と充填物の厚さとせん断強度との関係については、今後詳細に分析する必要がある。

なお、形状 B においても同様な結果を示した。

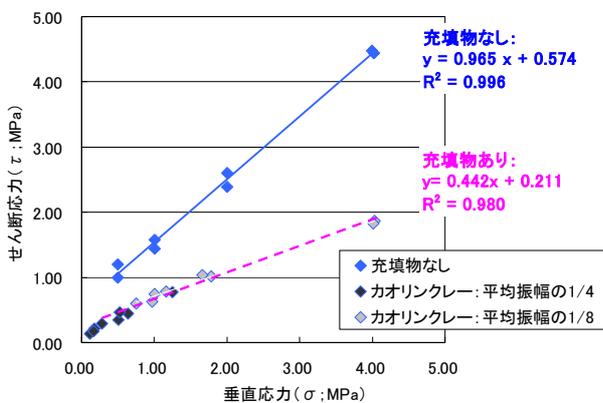


図 - 5 せん断試験結果 (形状 A)

(2) 充填物の種類の違いによるせん断強度の比較

形状 B における充填物がない場合と充填物がある場合におけるせん断試験結果を図-6に示す。

充填物の種類の違いによるせん断強度においても、充填物の厚さと同様に明確な差が得られなかった。充填物の種類 (強度) とせん断強度との関係については、今後詳細に分析する必要がある。

なお、形状 A においても同様な結果を示した。

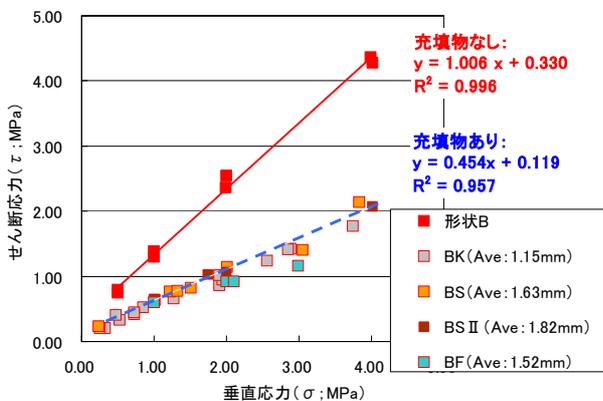


図 - 6 せん断試験結果 (形状 B)

4.2 せん断破壊箇所の面積

せん断試験前後の供試体の形状を計測し、せん断破壊箇所の面積を求めた。算出は試験前後の形状計測測定データの差分値をベースとし、さらに目視による供試体の観察結果を参考にして供試体ごとの判定閾値を設定し、GISを用いて破壊箇所およびせん断破壊面積を求めた。

図-7に形状 A、Bにおける供試体の表面のせん断面積の割合を示すせん断面積比を示す。同じ垂直応力では、充填物がない場合のせん断強度を充填物がある場合のせん断強度が越えることはなかったが、せん断面積比は、バラツキはあるものの、充填物がある場合のせん断面積比が、充填物がない場合のせん断面積比を超えるケースがあった。その原因として、充填物がある場合のせん断応力がピーク時のせん断変位は、充填物がない場合と比較して、高い値を示していることから、せん断変位量の増加に伴い、せん断面積比も増加したことが考えられる。

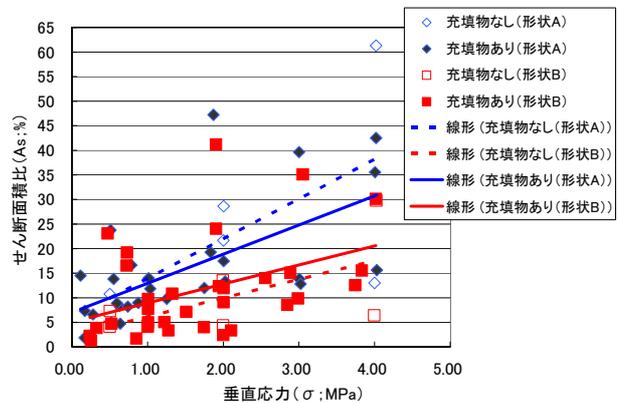


図 - 7 せん断面積比

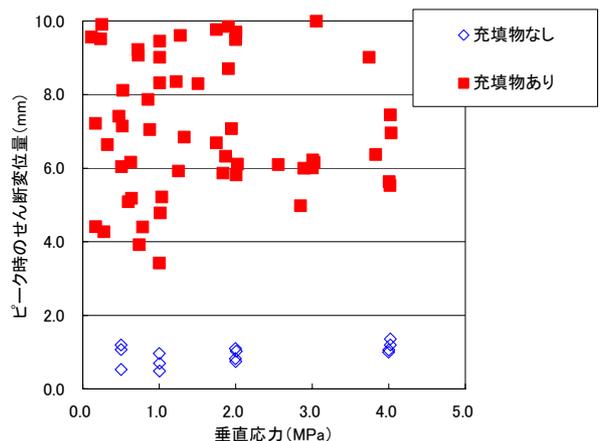


図-8 ピーク時のせん断変位

4.3 ダイレクシー特性

図-9に形状 A、Bにおけるピークダイレーション角を示す。ピークダイレーション角とは、せん断試験時の供試体のせん断変位-垂直変位曲線のピークの傾斜を示したものである。

垂直応力の増加に応じて、ピークダイレーション角が

減少する傾向が、バラツキがあるものの、充填物のある、なしに関わらず見られた。また、同じ垂直応力では、概ね充填物のある場合のピークダイレーション角は、充填物のないピーク断れーション角と比較して、低い値を示した。

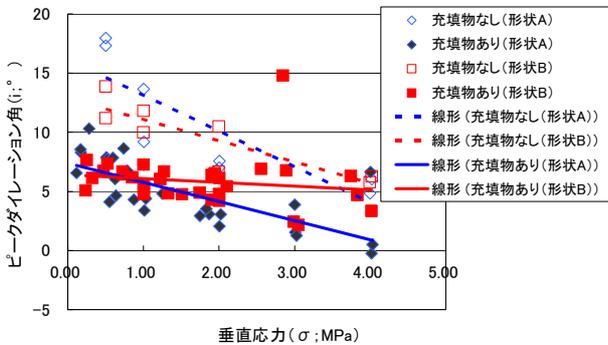


図-9 ピークダイレーション角

5. 考察

5.1 せん断試験結果

粘土や砂混じり粘土のような強度の低い材料である充填物を含んだ場合の弱層の一面せん断試験を行った結果、せん断強度について、以下のことが考えられる。

充填物のある場合のせん断強度が、充填物のない場合のせん断強度に比べ、低い値を示している理由として、充填物がモルタル表面の粗い部分を埋めることで滑らかにするため、せん断強度が低下するものだと見える。

また、垂直応力の増加に伴い、せん断面積比の増加とダイレーションの減少が見られ、Seabのせん断予測式の適用性の可能性を示している。

5.2 せん断強度予測式の拡張性の検討

本試験によって得られたパラメータをSeabのせん断強度予測式(1)へ代入し、拡張性を検討した。実測値とSeabの予測式によるせん断強度の関係を図-10に示す。

充填物がない場合のせん断強度においては、昨年度の結果同様に、実測値と予測式によって求めた値が概ね一致し、seabのせん断強度予測式の検証が確認できた。

充填物がある場合の弱層のせん断強度は、seabのせん断強度予測式に代入すると、seabのせん断強度予測式のほうが実測値よりも大きな強度を示し、充填物のある場合の弱層のせん断強度予測には、このままでは適用できないことがわかった。

そこで、垂直応力と実測のせん断強度/seabの予測式によるせん断強度の相関関係を整理した(図-11)。垂直応力の増加に伴い、実測のせん断強度/seabの予測式によるせん断強度の値が減少する傾向が見られる。Seabのせん断強度予測式を用いて、充填物がある場合のせん断強度を推定する場合は、垂直応力に応じた項を付加する

必要があることがわかった。

今後、充填物の強度や表面の粗さとの関係について詳細に分析し、せん断強度の予測式の拡張性の検証を引き続き行う。

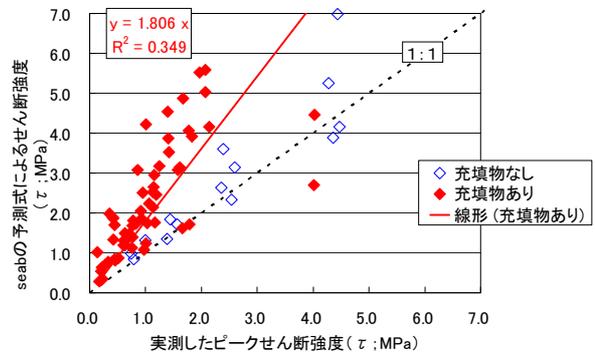


図-10 実測値とSeabの予測式によるせん断強度の関係

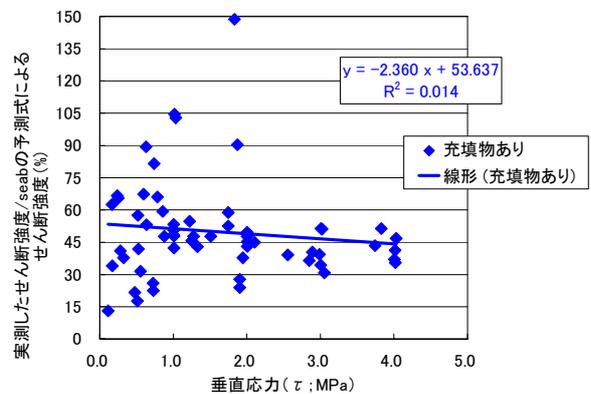


図-11 垂直応力と実測したせん断強度/seabの予測式によるせん断強度の関係

6. まとめ

弱層のせん断強度推定に用いるモデル作成のための基礎実験として、充填物を含む弱層模型の一面せん断試験を行い、そのせん断強度を、充填物を含まない弱層のせん断強度と比較検討した。結果を以下に示す。

- 充填物を含む弱層のせん断強度は、充填物を含まない弱層のせん断強度と比較して、半分以下となる。
- seabのせん断強度予測式を用いて、充填物がある場合の弱層の評価をする場合、垂直応力に応じた項を付加する必要があることがわかった。

参考文献

- 1) Barton, N. : Review of a new shear-Strength criterion for rock joints, Engineering Geology, Vol.7, pp.287-332,1973
- 2) Seab, S. : A variance on the Ladanyi and Archambault's shear strength criterion, Rock Joints, Barton & Stephansson(eds), Balkema, pp.701-705,1990

DEVELOPMENT OF STRENGTH EVALUATION METHOD FOR A WEAK LAYER OF DAM FOUNDATIONS

This research showed the geotechnical evaluation of a weak layer for dam foundations. A weak layer has been avoided or removed as dam foundation because of its low shear strength. We purpose to develop of strength evaluation method in order to utilize rock masses with weak layers from the either view of cost reduction or natural preservation in this study.

We carried out direct shear test using rock joint replicas, and we showed the relation between shearing strength of filled rock joint and shearing strength of not filled rock joint.

Key words: weak layer, rock joint, direct shear test, shear strength, dam foundation