

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（治水勘定）

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、矢島良紀

【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。

平成 19 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、充填物を含まない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、材料強度の関係について検討するとともに、今後の課題の整理をした。

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

岩盤中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り、このような不連続面は周囲の岩盤と比べ強度が著しく低いことから、総称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は、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、時に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 19 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、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および材料強度の関係について検討するとともに、今後の課題について整理した。

2. 試験の目的

弱層強度評価手法の一つである原位置せん断試験は、弱層強度を直接測定することができるため、多くのダムにおいて行われているが、試験が大がかりで多くの手間と費用を要するため、数多くの試験を行うことは難しく、試験箇所の代表性が問題になることもある。そこで、原位置せん断試験を補完し、強度評価の信頼性を向上させるために、弱層の表面形状や壁面（岩盤）強度のように取得が比較的容易なパラメータを用いて間接的にせん断強度を推定する方法の開発が望まれている。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、本研究では理論に基づく強度式を検討することとし、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)のせん断強度式に着目した。

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_r + i)(1 - A_s) + A_s \cdot S_r \quad (1)$$

ここで、 τ_p はピークせん断強度、 σ_n は垂直応力、 ϕ_r 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。

このせん断強度式の適用性を検討するため、モルタル製の弱層模型を用いた一面せん断試験を実施した。

3. 試験概要

3.1 供試体

表面形状（粗さ）および材料強度の違いがせん断強度に与える影響を調べるため、粗さの異なる 3 種類（A・B・C）の稲田花崗岩の節理面をもとに、それぞれ硬軟 2 種類のモルタルを用いて合計 6 種類の供試体を作成した（図-1）。このとき、上下盤で別々に供試体を作成し、試験時に組み合わせたため、供試体間のかみ合わせは完全ではなく、若干の間隙が生じた。試験面の大きさは 100mm×200mm であり、表面粗さを示す指標の一つである JRC は A:14.9、B:8.0、C:5.4 であった。

使用したモルタルは表-1 に示す配合とし、打設後は 28 日間の水中養生を行い、その後は実験室内で常温保管した。試験実施時における平均一軸圧縮強度は、硬質供試体で 71.8MPa、軟質供試体では 20.9MPa である。

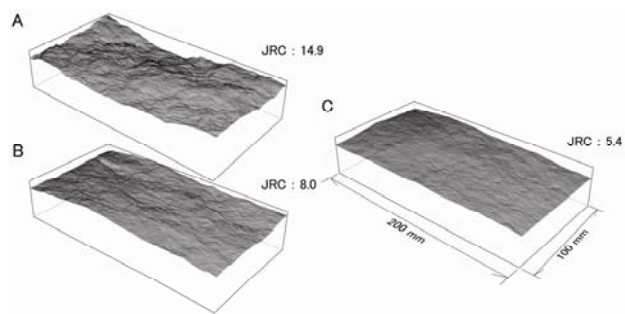


図-1 供試体の形状

表-1 供試体材料の配合および強度

種類	使用セメント	配 合				強度 (MPa)	
		水	セメント	CaCO ₃	大井砂	一軸圧縮	引張
軟	普通ポルトランド	1	1	0.43	4.3	20.9	2.4
硬	無収縮グラウト剤	1	ブレミックスグラウト			71.8	5.4

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 の載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-2 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（キーエンス製 LB-300）とステッピングモータ駆動方式による XY 軸自動ステージを用いた（図-2 右）。



図-2 試験機器

3.3 試験条件

前述した 6 種類の供試体に対し、試験条件として、垂直応力を 0.5、1、2、4MPa の 4 種類、またせん断载荷の終了条件として、せん断変位 10mm まで達した時点まで行う試験とピークせん断強度発現時点で終了する試験の 2 種類を設定し、これらを組み合わせた計 48 種類を実施した。またこれ以外に凹凸のない平滑面についてもそれぞれ試験を実施した。試験は予備载荷後に、所定の垂直荷重を载荷し、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。载荷速度はピーク強度発現までは 0.1mm/min、それ以降は 0.2mm/min とした。

4. 試験結果

4.1 せん断強度

試験結果より求めた垂直応力とピークせん断応力との関係を図-3 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 の傾向が明瞭であり、形状が粗いものほどせん断強度が大きくなる。一方、材料強度に着目すると、形状 A では硬質の方がわずかに大きな強度を示すが、形状 B、C では反対に軟質供試体の方がやや大きな強度を示す。また硬質供試体による試験では一部に低い強度を示すものがあり、平滑面の強度を下回るものもあった。

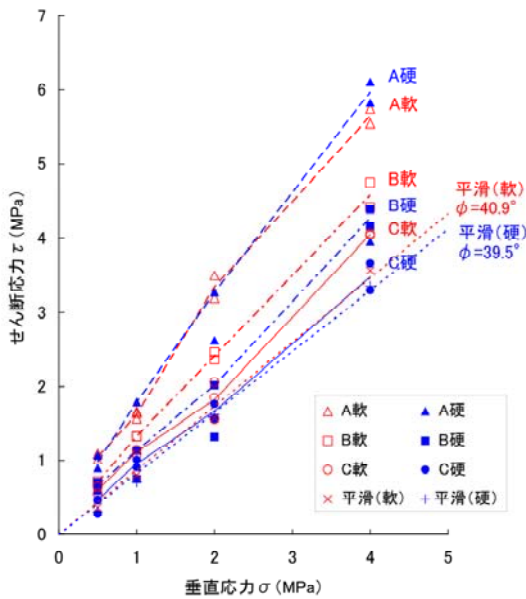


図-3 せん断試験結果

4.2 せん断破壊箇所の分布と面積

ピークせん断応力直後で終了した各試験について、せん断破壊箇所の分布とその面積を求めた。算出は試験前後の形状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 ソフト (ESRI ArcGIS9.2) を用いて破壊箇所およびせん断破壊面積を求めた。

図-4 に形状 A (硬) におけるせん断破壊箇所の分布例を、図-5 に各供試体のせん断破壊面積比を示す。

算出は上下盤ごとにそれぞれ行い、その後合算した。また、一部では、上下盤の破壊箇所が重複することがあったが、今回は下盤側の破壊箇所とみなした。なお、重複率はいずれの供試体においても破壊面積全体の 3% 未満に過ぎない。また、端部に見られた明瞭な引張破壊域も特定し、せん断破壊箇所からは除外してある。

図より、せん断によって破壊される箇所は、全体のごく一部であることがわかる。また破壊される箇所には共通性があり、垂直荷重の増加にともない、破壊面積が広

がっていく様子が伺える。

せん断破壊面積比は、材料強度で比較すると硬質供試体よりも軟質供試体の方が大きい。また材料強度が同じであれば、形状が粗く、また垂直応力が高くなるにしたがってせん断面積比が大きくなる傾向がある。

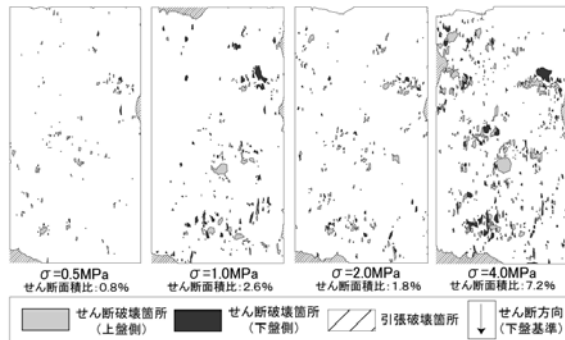


図4 形状A（硬）におけるせん断破壊域の分布

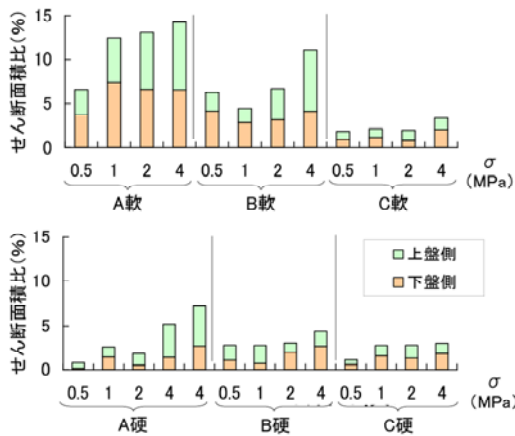


図5 ピークせん断応力直後の破壊面積

4.3 ダイラタンシー特性

一般的にせん断時における供試体の挙動は、せん断初期に沈下（圧縮）し、その後浮き上り（膨張）に転じ、せん断変位とともに浮き上り続ける。このときに記録される供試体のせん断変位－垂直変位曲線の傾斜をダイレーション角と呼び、ピークせん断応力時に最大値を示すことが多い（ピークダイレーション角）。

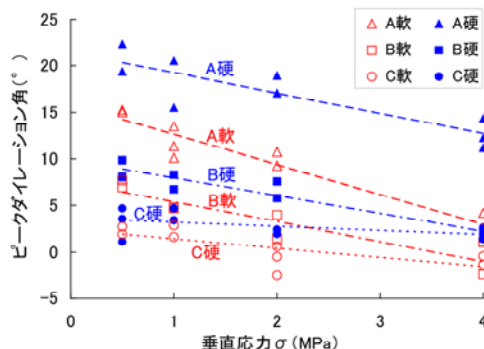


図6 各試験のピークダイレーション角

各試験においてピークダイレーション角を特定し比較すると、いずれも表面形状が粗い方が滑らかなものより大きな角度を示した。また材料強度は大きい方が、垂直応力は低い方が大きなピークダイレーション角を示す傾向がある（図-6）。

4.4 供試体表面の傾斜変化

GISソフトを用いて、せん断破壊箇所として抽出された領域内外の試験前後における傾斜変化を算出した。形状A（硬質） $\sigma = 4\text{MPa}$ についての算出結果を図-7に示す。なお傾斜角は形状測定のピッチである0.5mmグリッドにおける最大傾斜角から算出した、せん断方向起点側からの見かけ傾斜角で示してある。

傾斜角の頻度分布を比較すると、非破壊域では見かけ傾斜角 0° （水平）をピークとした正規分布を示し、せん断後にも大きな変化が見られないのに対し、せん断破壊域では 20° 付近にピークがあり、試験後にはこのピークが低角度側にシフトしている。また図-8は同供試体においての、せん断破壊域における試験前後の傾斜角の増減を示したものであり、この供試体においては 20° を越える傾斜角が減少し、 12° 程度をピークとして $3^\circ \sim 18^\circ$ の傾斜角が増加している。

試験後の傾斜角のピークとなった 12° 付近は、本試験のピークダイレーション角（ 12.2° ）とよく一致している。また図-9に示すとおり他の試験結果においても同様に試験後に増加した傾斜角の最頻値がピークダイレーション角とほぼ一致する傾向が見られている。このことから、せん断は供試体表面において急傾斜の箇所を破壊し、破壊後の傾斜角はピークダイレーション角に近づくことが明らかになった。

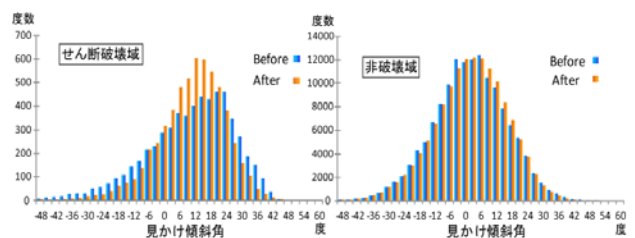


図7 せん断による供試体表面の傾斜変化

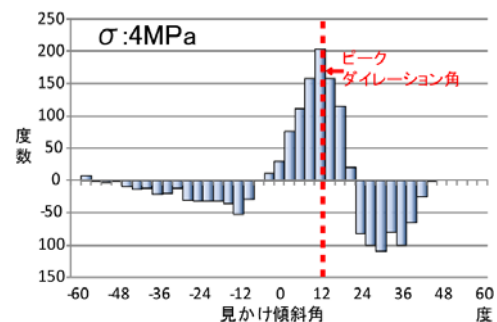


図8 形状A（硬）供試体における傾斜角の増減

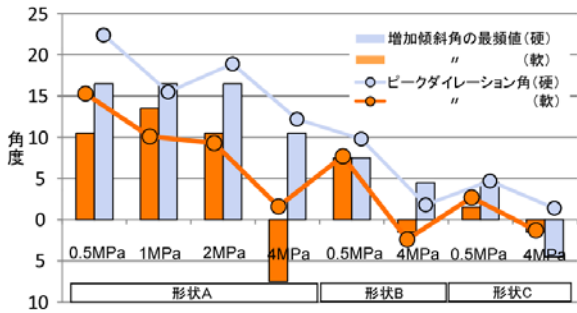


図-9 増加傾斜角の最頻値とピークダイレーション角

5. 考察

5.1 セン断強度

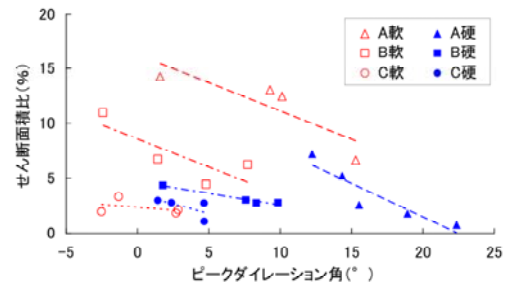
垂直応力および材料強度が同一であれば、表面形状が粗いほどせん断強度が大きくなるという結果は、Bartonの強度式をはじめとする既往の研究と一致する。しかし、今回の試験では以下のように既往の知見と異なる結果も得られた。

- (1) 軟質供試体の方が硬質供試体と比較して、高いせん断強度を示すことがある。
- (2) 硬質供試体について、一部で平滑面の強度を下回るせん断強度を示すことがある。

これらの原因として、供試体間のかみ合わせの良否が影響していると仮定し、以下に考察した。

供試体が剛体の場合、理論的には、表面形状が同一であれば、ピークダイレーション角とせん断面積の関係は、供試体の硬軟に関わらず一定である。図-10はピークダイレーション角とせん断破壊面積比の関係を表したものであり、上記の関係が成り立つとすれば、測定値は表面形状ごとに、一本の線上に分布することが予想される。しかし、特に形状 A・B については、明らかに材料強度の違いによっても異なった直線関係を示しており、同一のピークダイレーション角であっても硬質供試体は軟質供試体と比べせん断破壊面積がやや小さくなっている。このことは、軟質供試体が硬質供試体に比べ、かみ合わせが良好であったことを示唆している。

各供試体のかみ合わせの良否は、多少の差はあれども、硬質・軟質供試体とも基本的には同程度とみられるため、軟質供試体は垂直応力の載荷時にその軟らかさのため変形し、結果、かみ合わせが良好となり、大きなせん断強度を示したものと推測した。一方、硬質供試体は、その強度のため、供試体があまり変形せずにかみ合わせの悪いまません断が生じ、少数のアスペリティに応力が集中した結果、せん断強度は小さくなり、あるものは平滑面をも下回る強度になったと推測する。

図-10 ピークダイレーション角とせん断面積比の関係
5.2 セン断強度予測式の検証

本試験によって得られたパラメータを(1)式に代入し Saeb のせん断強度予測式の検証を試みた。結果を図-11 に示す。計算値と実測値は概ねよく一致するが、全般的に硬質供試体は計算値よりもやや低いせん断強度を示す一方、軟質供試体はやや高いせん断強度を示している。これは、かみ合わせの悪い供試体を用いた本試験において、軟質供試体はせん断時の変形によりかみ合わせが改善し、高い強度となったのに対し、硬質供試体は変形が小さく、かみ合わせがあまり改善されずに低い強度となったためと考えられるが、かみ合わせの定量的な評価や供試体の変形程度などまだ不明の点も多い。今後は補足試験として実施したかみ合わせの良否を考慮した供試体による試験結果を詳細に分析し、引き続き検証を行う。

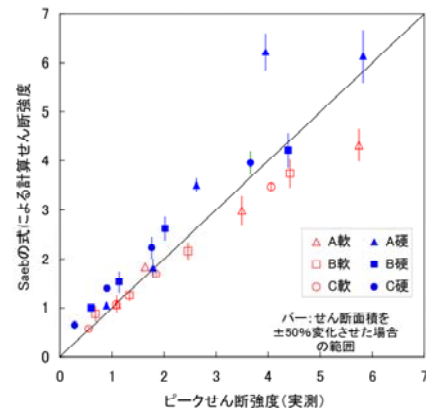


図-11 実測値と計算値の関係

6. まとめ

充填物を含まない弱層の強度評価に用いる、せん断モデル式の有効性の検討のため、垂直応力、表面形状および材料強度の条件を変えた弱層模型の一面せん断試験を行なった。結果を以下に示す。

- ・垂直応力および材料強度が同一であれば、表面形状が粗いほど高いせん断強度を示す。
- ・せん断によって供試体表面の急傾斜箇所が破壊され、破壊後の傾斜角はピークダイレーション角に近づく。
- ・供試体のかみ合わせが悪い場合には、材料の変形性が

せん断強度に大きく影響すると考えられる。

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 development 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 relations between shear strength and joint roughness, material strength.

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