

# 複雑な構造を有する弱層の強度評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～令 3

担当チーム：地質チーム

研究担当者：阿南修司、品川俊介、矢島良紀、松尾達也

## 【要旨】

土木構造物の安定上の課題となる基礎岩盤中の弱層に対し、簡便な強度評価手法をとりまとめるために、弱層が課題となったダム事業における事例分析や、それに基づく挟在物の概略的な強度を検討した。また、挟在物を有し、岩盤同士のかみ合わせも期待できるような複雑な弱層を模擬した供試体を用いた室内せん断試験を実施した。その結果、事前調査の有効性を確認するとともに、現状の調査・評価方法に関する課題を抽出した。合わせて、挟在物の強度の目安を既往試験から示した。また、模擬弱層を用いた室内せん断試験により、弱層の粘着力は挟在物の厚さに伴って減少し、粗さに対し一定以上となると挟在物の粘着力に近づくのに対し、内部摩擦角は厚さにかかわらず、挟在物の有無によって大きく低下することがわかった。

キーワード：ダム基礎、弱層、せん断強度、せん断試験

## 1. はじめに

岩盤中には断層や節理、シーティングジョイント、軟質挟在層など、周囲の岩盤と比べ強度が劣る箇所が層状に連続することがある（写真-1）。これらは力学的な不連続面となり弱層と総称される。このような弱層がダムや橋梁等の構造物基礎の周辺や切土法面に分布すると、土木構造物の建設や斜面安定上の課題となることがある。

ダム事業においては、その基礎となる岩盤に連続性を有する弱層が存在した場合、規模や分布、強度によっては堤体の滑動など構造物の安定上重大な影響が生じる恐れもある（図-1）。過去には1959年に発生したマルパッセダム（フランス）の事故のように、初期湛水時の貯水池水位上昇により、基礎岩盤内の弱層が滑動し、ダムの堤体に破壊が生じたことにより、下流に甚大な被害が生じた事例もある。

そのため、ダム事業者は確認された弱層に対し十分な調査を行った上で、慎重に対応をしている。特にその強度については、体系的な強度評価手法が確立していないため、試行錯誤的に様々な検討を行った上で、その最低値を採用するなど極めて安全側となる対応を行っている。一方、弱層の強度評価によってはダムの構造や基礎岩盤の掘削量等が大きく変化し、ときに数億円～数十億円規模の事業費の増大が発生することがある。掘削量の増大は、事業コストの増加のみならず、長大法面の出現や膨大な残土処

理など自然環境への負荷も想定されるため、弱層の強度をよりの確に評価できる手法の確立が求められている。

そこで、本研究では、弱層の評価手法の体系化に向け、既往資料をもとにダム基礎における弱層の調査方法や強度評価に関する事例を分析した上で、礫混じり粘土等の挟在物を有する複雑な構造の弱層を模擬した供試体を用いて室内せん断試験を実施し、その強度評価手法についてとりまとめた。



写真-1 ダム基礎で確認された弱層の例

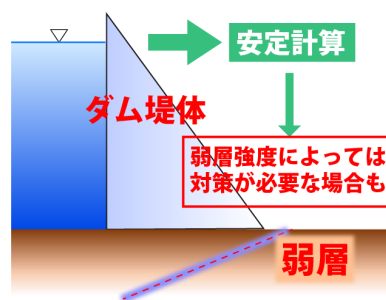


図-1 ダム基礎で課題となる弱層の分布例

## 2. 弱層の強度評価に関する事例分析<sup>1)</sup>

### 2.1 調査対象ダム

既往のダム事業における弱層の調査・試験方法や強度評価手法を整理し課題を抽出するために、基礎岩盤中に弱層が確認された 70 ダムを対象に事例分析を実施した。ダムによってはダムサイトに複数の弱層が存在することがあり、また同じ弱層でも区間により粘土状、岩片状、密着亀裂など複数の性状を有する場合など、それぞれに対して強度の検討がなされていることも多いため、各ダムで区分された弱層の強度評価単位の合計は 211 となった。対象となったダム形式の内訳を図-2 に示す。重力式コンクリートダムが全体の約 8 割を占めており、弱層の強度評価単位数においても比率はほぼ同じであった。また、弱層の分布形態としては重力式コンクリートダムで課題となりやすい低角度弱層がその約半数を占めていた。

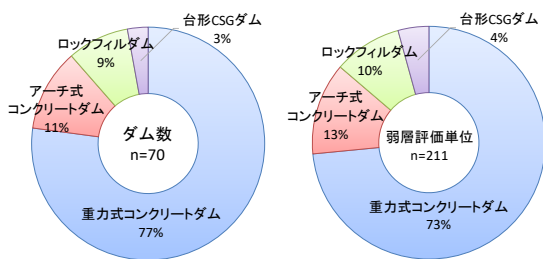


図-2 調査対象ダムの構成

### 2.2 弱層の確認時期と地質調査量

調査対象ダムのうち、弱層が確認された時期が明らかな 58 ダムについて、事業段階との関係について整理した。結果を図-3 に示す。58 ダムの約 8 割にあたる 47 ダムが調査設計段階であらかじめ弱層の存在を把握していた。このうち、整理時点で掘削完了前であった 11 ダムを除くと、36 ダムのうち 21 ダムにおいて、施工段階で新たな弱層や分布・性状の相違が確認されていた。調査設計段階で弱層の存在が把握されていなかったダムと合わせると、少なくとも 58 ダムのうち 32 ダムで施工段階において想定と異なる弱層が確認されたことなどにより、新たに弱層の強度に関する検討が行われており、そのうち 7 割ではコンクリート置換や掘削線変更などの対応をとる必要が生じていた。

また、各ダムにおける弱層の確認時期と地質調査量（ダムサイトにおける調査坑本数・延長、ボーリング本数・延長）との関係について分析した。ダムの形式・規模によって調査量が異なるため、ダム形

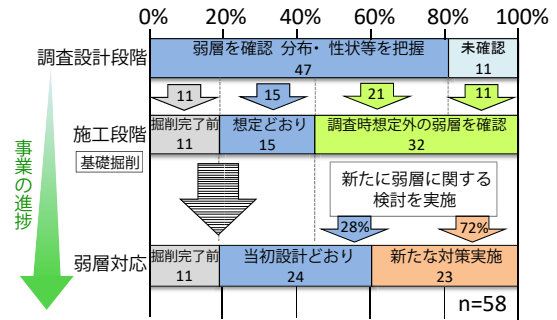


図-3 ダム事業における弱層の確認段階

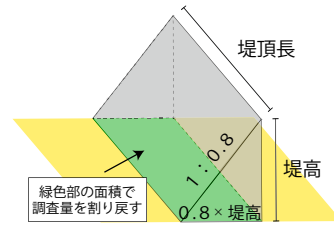


図-4 調査密度の算出方法

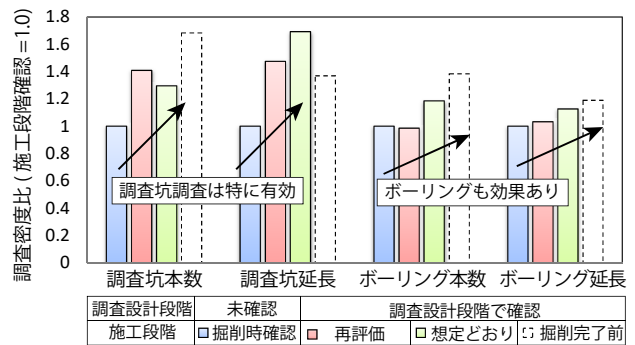


図-5 弱層確認時期と地質調査密度比の関係

式は重力式コンクリートダムのみ限定し、図-4 に示すように規模の指標を簡略的に「 $0.8 \times \text{堤高} \times \text{堤頂長}$ 」と設定し、各ダムの調査量を割り戻して調査密度を算出した。さらに、弱層の確認時期や施工時における見直しの有無で区分し、それぞれ平均値を算出した上で、「調査設計段階で未確認であったが施工段階で初めて弱層が確認された事例」の調査密度を 1 として無次元化を行った。結果は図-5 に示すとおり、調査坑・ボーリングとも調査密度が小さいほど施工段階で想定外の弱層に遭遇する割合が高く、調査密度が高くなるに従い調査設計段階で弱層を的確に把握できていることが明らかになった。特に調査坑密度による違いは大きく、弱層の分布や性状確認に対する調査坑調査の有効性を示唆している。また、ボーリング密度による違いは調査坑ほど顕著ではないが、河床部に分布する低角度弱層などは調査坑（特に横坑）調査によっても把握が困難な場合があり、分布や性状を把握する上で、ボーリング調査、特に

高品質ボーリングやボアホールカメラを活用した調査が効果的であることを示している。

### 2.3 弱層に対する試験等の実施状況

現場における弱層の強度評価方法について把握するため、重力式コンクリートダムで確認された155の弱層単位における強度試験等の実施状況について整理した。図-6に示すとおり、原位置せん断試験や室内せん断試験（三軸圧縮試験、一面せん断試験）により、直接的にせん断強度を求めた事例は全体の30%程度であり、それ以外は技術者による地質性状観察や針貫入試験、土壌硬度試験などの簡易力学試験結果をもとに、特徴が類似していると判断された別の弱層（他のダムを含む）の強度試験結果を参考に強度を設定していた。

実際に弱層の強度評価が行われたタイミングを調査設計段階と施工段階で区分し、それぞれにおける強度評価手法を調べると、調査設計段階では24%で原位置せん断試験を用いた強度評価を行っており、室内せん断試験を合わせると約半数が直接的にせん断強度を求めていた。一方、施工段階では基礎岩盤の掘削により横坑が改変されていることが多く、原位置せん断試験は困難であることから、直接的なせん断強度の把握は室内せん断試験が一部で行われている程度であり、ほとんどが性状の類似する別の弱層（他のダムを含む）で設定されたせん断強度を採用していた。また、性状の類似する別の弱層との比較方法として、約3割が地質性状確認と掘削面等における簡易力学試験を併用し、そのほかは地質性状確認のみを実施していた。図-7に実施された試験の

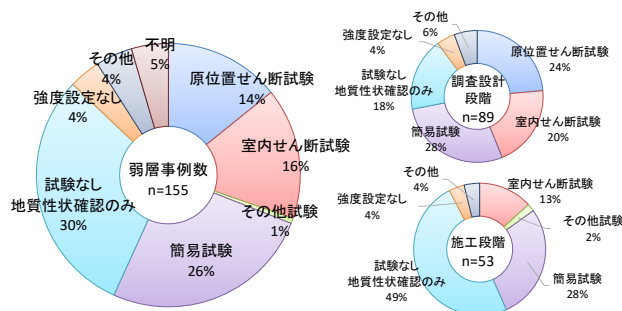


図-6 弱層を対象とした試験の実施状況

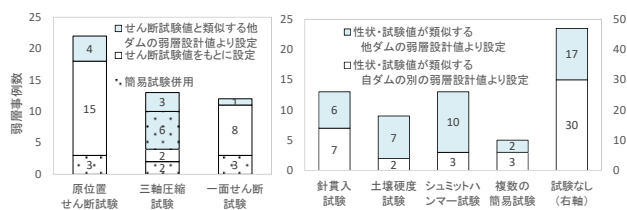


図-7 試験の詳細と設計値の設定方法

内訳と設計値として用いた「類似する別の弱層」の設定根拠を整理した結果を示す。原位置せん断試験では20%程度が類似する他のダムの事例を用いているが、これは一つの弱層に対する試験数が少ないために、他のダムで設定された内部摩擦角を用いて粘着力を求めることや、より安全側の評価をするために、他ダムと比較し、より低い強度を設計強度として採用した事例があったためである。また、三軸圧縮試験、一面せん断試験でも同様に他ダムの事例や複数の試験結果の最低値を採用するなどして、安全側の評価がなされていた。

技術者による地質性状確認のみを行った弱層では、同じダムで確認された別の弱層の強度や岩級区分への当てはめを行った例が多く確認された。一方で、針貫入試験、土壌硬度試験、シュミットハンマー試験等の簡易力学試験を実施した弱層では、その多くが類似する他ダム弱層の強度を準用していた。これは、同じダムとは異なり、他のダムでは地質性状その他が完全に一致することは稀なため、簡易力学試験値によって当該弱層が他ダム弱層と比べ「同等以上の強度が見込める」ことを担保して、安全側の評価を行っているためとみられる。

### 2.4 挟在物の強度に関する事例分析<sup>2)</sup>

弱層の多くは単純な亀裂ではなく、岩片や粘土などの相対的に軟質な挟在物が存在している。また、せん断は弱層中の低強度の領域を優先的に経路とするため、厚みのある挟在物層はもとより堅岩部のかみ合わせが期待できるような薄い弱層であっても、挟在物を有している場合はその強度が大きく影響することが想定される。そのため挟在物の強度設定は極めて重要であるが、挟在物の強度は性状によりばらつきが大きく、規模や分布によっては原位置せん断試験や不攪乱のサンプリングが困難なことも多い。そこで、挟在物のせん断強度の目安を設定することを目的に、調査対象ダムで実施された試験結果をもとに、挟在物の粒度構成や物理試験結果、簡易力学試験結果と室内強度試験との関係を分析した。

#### 2.4.1 挟在物に関する試験の実施状況

調査対象ダムで確認された挟在物を有する弱層のうち、強度試験に加え、物理・粒度試験や簡易力学試験を実施した事例を分析とした。図-8にその内訳を示す。分析したダム数は17であり、調査対象ダム全体と比べ、強度試験を実施したダムは少なかった。対象を厚みのある挟在物を含むものに限定していることもあり、弱層の成因は断層が7割と多くを占め、

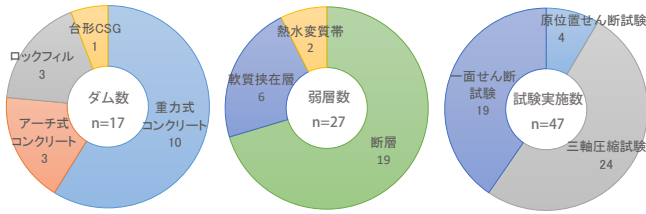


図-8 挟在物の試験を実施した弱層とその諸元

未固結堆積物や火砕流堆積物に起因する軟質挟在層が2割強、熱水変質帯1割弱であった。実施された室内強度試験の内訳は三軸圧縮試験が約5割と最も多く、一面せん断試験が4割であった。また、実施された三軸圧縮試験のうち、約8割がCUB試験であった。原位置せん断試験（簡易せん断試験含む）の事例が少ないが、挟在物の粒度や物理特性、簡易力学試験などは主に室内強度試験と合わせて実施されることが多いと推定される。

2.4.2 弱層挟在物の粒度構成と乾燥密度

挟在物を有する弱層のうち、室内強度試験を実施した43例について、粒度や物理試験結果を整理した。そのうち挟在物の粒度試験を実施した41例から、整理した土質分類を図-9に、乾燥密度および間隙比との関係を図-10に示す。断層は礫を多量に含むものからほぼ細粒分となるものなど多様な粒度構成を示し、乾燥密度も幅を持つが中央値で1.72となった。一方、軟質挟在層は今回の事例に関しては、礫分の少ないものが多く乾燥密度の中央値も1.23と低い傾向がみられた。

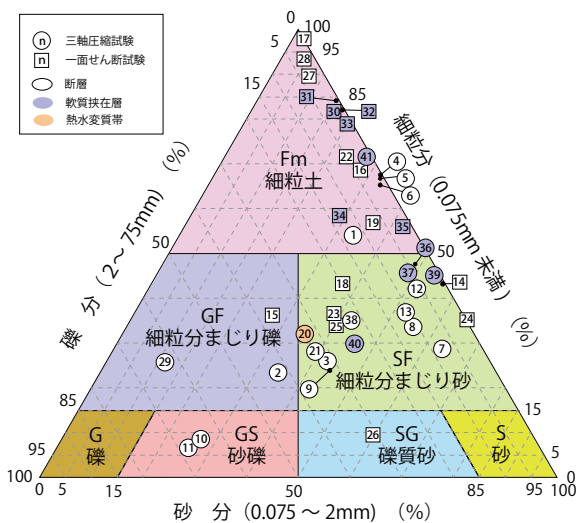


図-9 弱層挟在物の土質分類

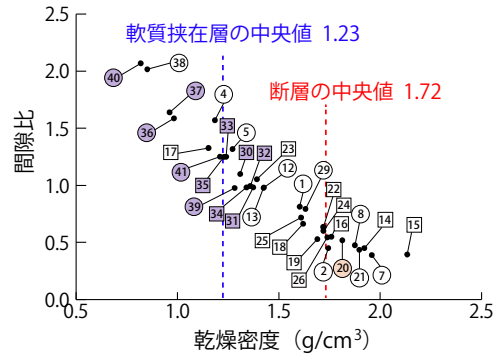


図-10 弱層挟在物の成因と乾燥密度

2.4.3 挟在物の性状と内部摩擦角

ダムのような大型構造物の基礎では高い垂直応力条件下となり、特に粘着力の小さい挟在物では、内部摩擦角の値によりせん断強度が大きく変化するため、内部摩擦角の推定は極めて重要となる。一方で、内部摩擦角の推定は簡易力学試験では困難であり、原位置せん断試験や室内せん断試験により求めることが一般的であった。そのため、内部摩擦角の目安を既往試験から求められれば、特に不攪乱サンプリングが困難な弱層にも適用できるため、その利用価値は大きい。そこで、室内強度試験結果と挟在物の粒度分析や物理試験の結果を比較した。

図-11に室内強度試験による内部摩擦角（有効応力）と粒度分析結果に基づく粗粒分（礫分+砂分）割合との比較結果を示す。結果からばらつきはあるものの、粗粒分の割合と内部摩擦角に一定の関係がみられ、粗粒分が60%程度以上になると内部摩擦角が急激に増加する傾向があった。これは粗粒分の増加に伴い、礫等を迂回することにより、せん断長が増加することに加え、基質よりも内部摩擦角の大きい礫の破碎が生じやすくなるためとみられる。また、断層と軟質挟在層で分布傾向に大きな違いはみられないが、三軸圧縮試験よりも一面せん断試験による結果の方が同じ粒度構成でも内部摩擦角がやや大きくなる傾向があった。これは一面せん断試験ではせん断面が固定されているため、礫などの分布によっては、その迂回や破碎が生じやすくなり、三軸圧縮試験よりもやや高い値を示すことと傾向があるとみられる。図-11に示す赤点線は分析対象とした挟在物における内部摩擦角の最低値を結んだものである。このことから、攪乱試料を用いた粒度試験からでも、粗粒分の割合を計算することにより、これまで強度試験の実施なしには困難だった内部摩擦角の評価が、安全側ではあるが推定が可能である。

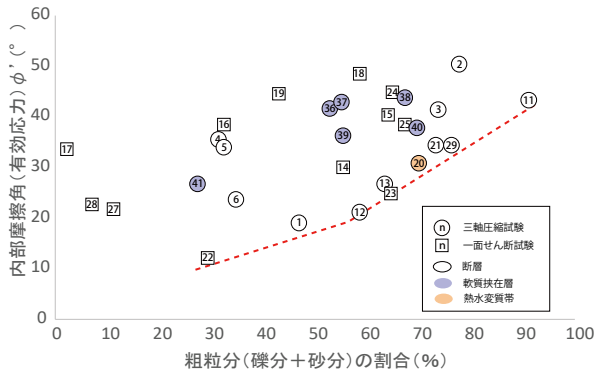


図-11 挟在物の内部摩擦角と粗粒分の関係

#### 2.4.4 挟在物の性状と粘着力

粘着力（有効応力）と粗粒分、乾燥密度との関係を図-12 に示す。内部摩擦角と関係がみられた粗粒分割合や、固結程度の指標と想定した乾燥密度は、粘着力とは相関がみられず指標とならないことがわかった。また、他の物理試験結果も相関が確認できなかったため、粘着力の指標として簡易力学試験である針貫入試験結果との比較を試みた。針貫入試験結果は一軸圧縮強度とは比較的相関が高いことが知られており、せん断強度への換算も行われているが、一軸圧縮強度を介した2回の換算となるため、精度の点からは課題もある。そのため、針貫入試験と室内せん断試験から求めた粘着力の直接的な比較を行ったものである。結果は図-13 に示すとおり、ややばらつきはあるものの、針貫入勾配の増加に伴い粘着力も大きくなる傾向が確認できた。また、内部摩擦角と同様に一面せん断試験結果の方が同じ針貫入勾配でも高い傾向があった。回帰式よりも低い粘着力となった3点の粒度を確認するといずれも礫の割合が比較的高いものであった。通常、針貫入試験時には礫を避けて試験をするが、礫の割合が高くなると内部の礫の影響を受けやすくなるため、見かけ上針貫入勾配が大きくなったことが考えられる。そのため、礫に影響を受けた値を除外するなど、試験結果を適切に取り扱うことにより、針貫入勾配を粘着力の指標とできる可能性があることを確認した。一方で、このような簡易力学試験は試験条件の統一が必要であり、中村ほか(1989)<sup>3)</sup>によれば、乾燥条件における堆積性軟岩の針貫入試験値は平均で湿潤条件の1.4~1.9倍程度となることが指摘されている。特に掘削面での試験では、調査坑と異なり含水状態が日々変化するため、測定条件の統一には特に注意が必要である。

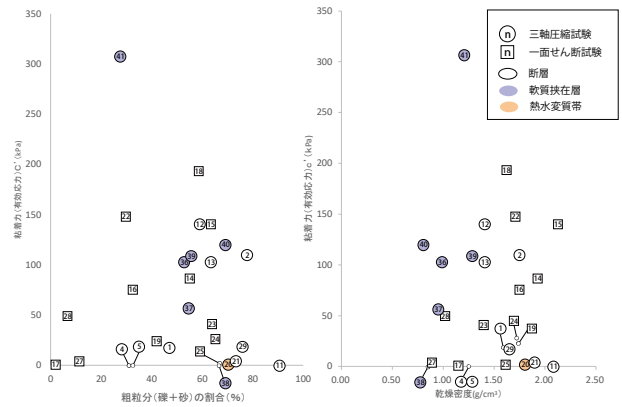


図-12 挟在物の粘着力と粗粒分、乾燥密度の関係

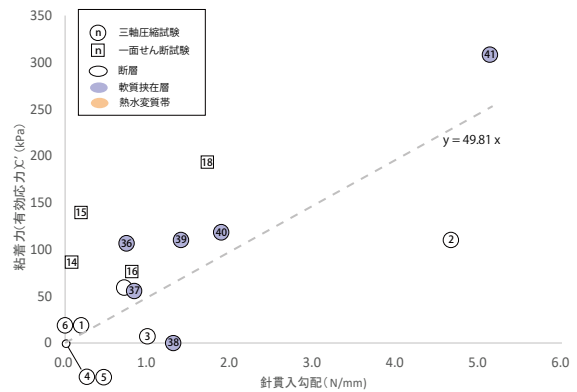


図-13 挟在物の粘着力と針貫入試験結果

### 3. 複雑な構造を有する弱層の強度評価

#### 3.1 弱層の強度評価の課題

弱層の形態別分類と想定されるせん断強度の考え方について、佐々木ら(2008)<sup>4)</sup>は弱層の連続性、アンジュレーション（不陸）と挟在物幅の関係から表-1のように整理している。

表-1 弱層の分類と想定されるせん断強度<sup>4)</sup>を一部改変

弱層の形態		模式図	想定されるせん断強度
不連続部の有無	不連続		不連続面と岩盤(不連続部)の合成強度
	連続		不連続面の強度
壁面の粗さと挟在物幅の関係	幅 ≤ 振幅		壁面のかみ合いによるせん断抵抗を主とする強度
	幅 > 振幅		挟在物の強度
挟在物の構成	均質または層状		単一種類の挟在物の強度
	不均質		複数種類の挟在物の合成強度

弱層に期待できるせん断強度の要素はその分類により変化し、挟在物のない単純な亀裂の場合は、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、挟在物のせん断強度を弱層全体の強度とみなすことが一般的に行われている。

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が必要になることもある。また、アンジュレーションの影響を取り込むためには大型の試験体を用いることが必要になる。そのため、実施にあたっては多大な手間と費用が必要であり、必然的に数量は限られたものとなることから、弱層の不均質性ともあいまって代表性が課題であり、これらを補完し適切なせん断強度を設定するための目安や実用的な評価手法の構築が必要であることが必要であった。

### 3.2 挟在物を有する複雑な弱層の強度評価<sup>5)</sup>

挟在物を有し、また岩盤同士のかみ合わせも期待できるような弱層の強度評価については、これまで、振幅と挟在物の厚さの関係について実験に基づいて分析した結果はあるものの、複雑な凹凸を有する自然岩盤の亀裂面での検討は少なく、特に礫混じり粘土のような複合的な挟在物を有する弱層については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、自然岩盤の亀裂面の形状をもとに製作した模擬岩盤と礫混じり粘土を含む多様な挟在物を用いた室内せん断試験により、岩盤部のアンジュレーションと、挟在物の種類および厚さが弱層のせん断強度に与える影響を評価し、強度の補正方法について検討した。

#### 3.2.1 試験方法

##### (1) 試験の種類

堅岩部の表面形状と挟在物の種類、厚さがせん断強度に与える影響を評価するため、表-2に示すとおり表面粗さの異なる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）を組み合わせた計14シリーズの試験を実施した。せん断時の垂直応力は後述する4段階で設定し、各組合せで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（約200mm×100mm）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。作成条件を揃えるため、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た。また、供試体間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った。堅岩部供試体A・Bの形状イメージを図-14に示す。それぞれの表面粗さは、長辺沿いに測線を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平均化した。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、Tse and Cruden<sup>6)</sup>の手法により換算したJRC（Joint Roughness Coefficient）<sup>7)</sup>はそれぞれ14.9、5.4であった。なお、換算式は以下に示すとおりである。

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log z_2 \quad z_2 = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left( \frac{dz}{dx} \right)^2$$

表-2 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
形状B (滑らか)	③ 礫混じり粘土 I (礫 10%) 2mm
	④ " 4mm
	⑤ 礫混じり粘土 II (礫 30%) 2mm
	⑥ " 4mm
	⑦ 粘 土 1mm

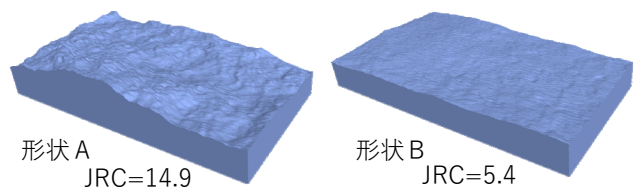


図-14 作成した供試体の表面形状

### b) 挟在物

挟在物の作成にあたり、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、堅岩部で使用した石膏よりもやや強度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-2)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荷重載荷装置を組み合わせたもので、試験時におけるせん断面は図-15のように水平面から90°回転した鉛直方向となる。試験機の最大載荷能力は、垂直荷重200kN、せん断荷重2000kNである。



写真-2 せん断試験機

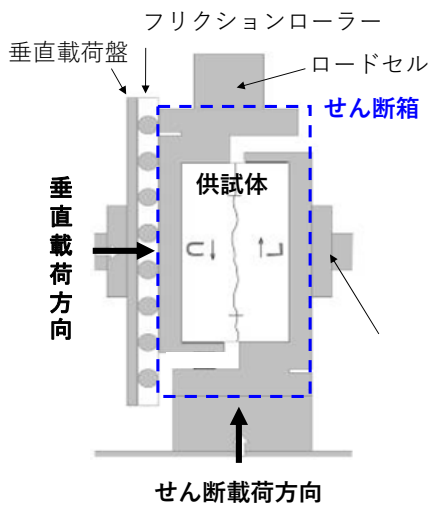


図-15 供試体の設置イメージ

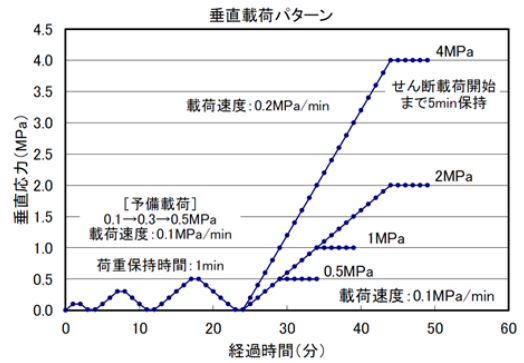


図-16 予備載荷パターン

### (4) 試験条件

試験時の垂直応力は、0.5、1.0、2.0、4.0 MPaの4段階とし、本試験の前に図-16の載荷パターンにて予備載荷を実施している。せん断荷重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）に達するまでに行い、その間は垂直応力が一定となるように制御した。

#### 3.2.2 試験結果と考察

##### (1) せん断強度

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-17に、試験結果の回帰式より求めたせん断強度（粘着力、内部摩擦角）を表-3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。また、別途三軸圧縮試験で求めた堅岩部の強度と、一面せん断試験で求めた挟在物の強度（全応力）を表-4に示す。

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は形状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0.11~0.30 MPa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度の比較では、形状Aでは、挟在物なしが最も大きく、次いで岩片状、以下、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でもせん断強度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。

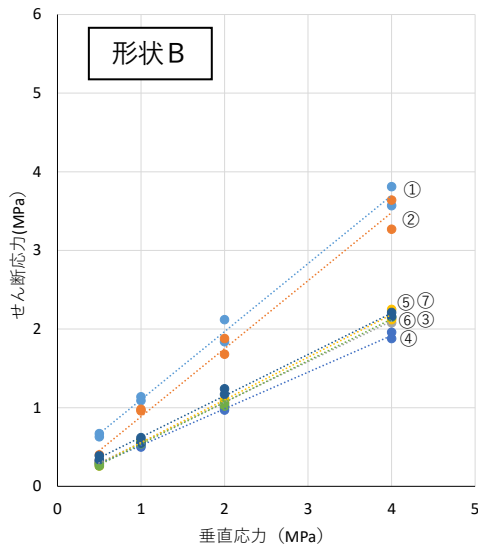
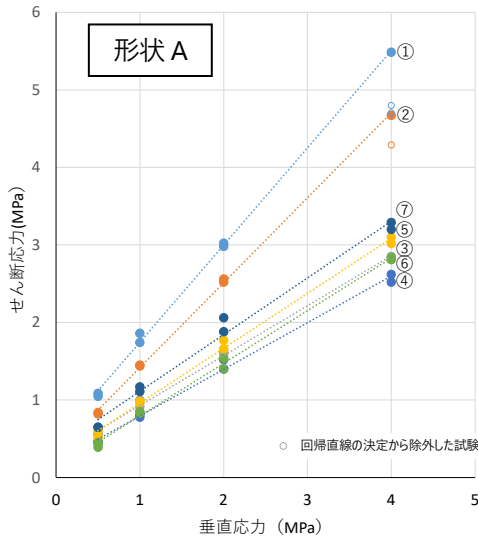


図-17 垂直応力とピークせん断応力

表-3 試験結果より求めたせん断強度

挟在物種類	形状A			形状B		
	c	$\phi$	R <sup>2</sup>	c	$\phi$	R <sup>2</sup>
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),  $\phi$ : 内部摩擦角(°), R<sup>2</sup>: 決定係数

表-4 挟在物および堅岩部のせん断強度

挟在物種類	粘着力(MPa)	内部摩擦角( $\phi$ )
礫混じり粘土Ⅰ	0.037	20.5
礫混じり粘土Ⅱ	0.106	30.8
粘土	0.006	21.5
堅岩部	2.2289	54.5

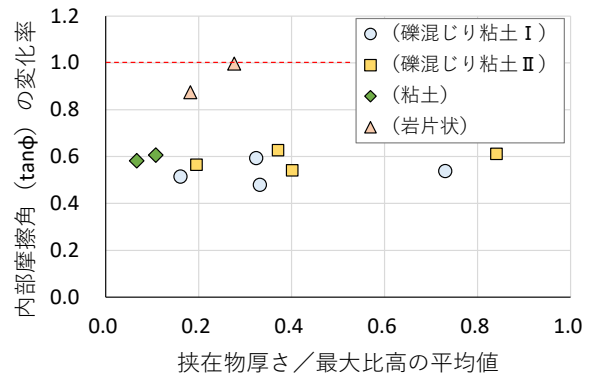
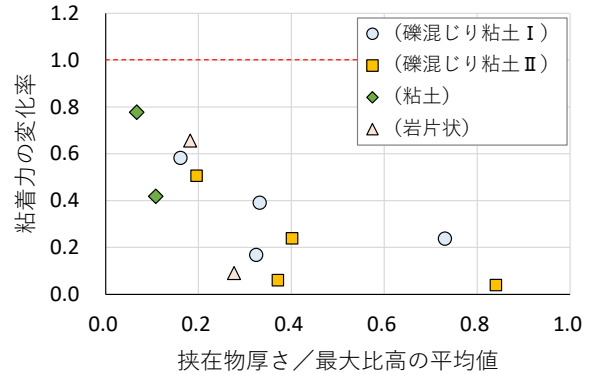


図-18 挟在物の厚さとせん断強度

挟在物の厚さが弱層全体のせん断強度に与える影響を確認するため、得られた強度を粘着力と内部摩擦角に分けて整理した。堅岩部の粗さと挟在物厚さの関係を、せん断載荷前の挟在物の厚さを各形状の最大比高の平均値で除すことによって関係を一般化した上で、粘着力、内部摩擦角ともにそれぞれ挟在物なしの値を1としたときの変化率で表現した(図-18)。粘着力は挟在物の厚さが増加すると減少するが、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が下げ止まる傾向が見られた。これは挟在物によって堅岩部のかみ合いが減少し、最終的に挟在物のせん断強度に近づくためと考えられる。一方で内部摩擦角は厚さによる変化はほとんど無く、たとえ薄い挟在物であってもそれが存在するだけで、挟在物の性状に応じた割合で減少することがわかった。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。



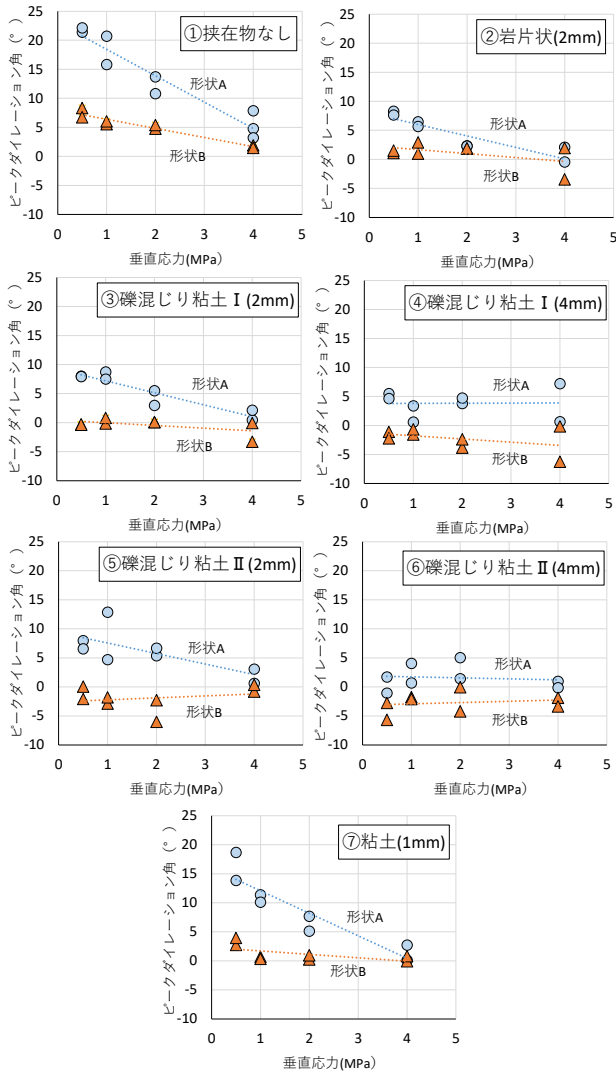


図-19 挟在物の種類とピークダイレーション角

## (2) 供試体の挙動

せん断試験時における供試体の挙動は、せん断過程を確認する上で重要な要素である。挟在物を有しない弱層では、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、堅岩部の粗さと挟在物の厚さ、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を整理した。

図-19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。粗い形状Aは、滑らかな形状Bよりも全般的に大き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しており、挟在物があることでその内部でせん断が生じ、堅岩部の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。また、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することがわかった。

## 3.3 強度評価手法について

弱層の強度評価式として、土木研究所ではSaeb(1977)<sup>8)</sup>によるモデルを改良した式<sup>9)</sup>を開発したが、挟在物の厚さが強度に与える影響については未解明な点が多かった。今回の試験結果をふまえ、弱層全体のせん断強度のうち、粘着力は挟在物の厚さと形状の最大比高の平均値から推定でき、厚さが最大比高の平均値の概ね 1/2 程度以上となると、粘着力は挟在物の値と同程度にまで減少することがわかった。一方、内部摩擦角は挟在物の有無と挟在物の内部摩擦角により大きく変化し、挟在物の厚さには影響を受けないことがわかった。そのため、アンジュレーションを有する弱層の強度評価にあたり原位せん断試験が困難な場合には、表面形状および挟在物の厚さを計測した上で、挟在物のサンプリングを行い、強度定数を求めて換算を行うことが望ましいと考える。また、不攪乱のサンプリングが困難な場合には、簡易力学試験や攪乱試料の粒度試験等から、安全側となるような粘着力と内部摩擦角を求める手法も考慮する必要がある。

## 4. まとめ

研究の成果をまとめると以下のとおりである。

- ・既往事例の分析により、多くのダムで施工時に調査設計時の想定と異なる弱層が出現していたが、事前の調査密度が高いほどその割合は減少していた。
- ・施工時では直接的なせん断試験が行われることは少なく、ほとんどで簡易力学試験や地質性状観察により類似する別の弱層の強度試験値を利用していた。
- ・挟在物の簡易的な強度推定として、針貫入勾配と粘着力、粒度分析による粗粒分と内部摩擦角には一定の関係があり、安全側の概略値として利用できる。
- ・不陸を有する堅岩部と挟在物からなる弱層に関して、試験の結果、粘着力は挟在物の厚さに伴って減少し、粗さに対し一定以上となると挟在物の粘着力に近づくのに対し、内部摩擦角は厚さにかかわらず、挟在物の有無によって大きく低下することがわかった。

## 参考文献

- 1) 矢島良紀, 西塚大, 松尾達也, 阿南修司: ダム基礎の弱層強度評価に関する事例分析, 日本応用地質学会平成 30 年度研究発表会講演論文集, pp.259-260, 2018.
- 2) 矢島良紀, 西塚大, 松尾達也, 阿南修司: ダムにおける弱層の性状と強度試験結果に関する分析, 日本応用地質学会令和 2 年度研究発表会講演論文集, pp.199-200, 2020.
- 3) 中村康夫, 平野勇, 佐々木靖人: 岩盤分類のための調査 その 4 新第三系中新統の堆積性軟岩における例, 土木研究所資料, 第 2727 号, 76p, 1989.
- 4) 佐々木靖人, 寶谷周, 矢島良紀: ダム基礎の弱層分類と強度評価手法—ダムの調査事例から—, ダム技術, No.256, pp.35-48, 2008.
- 5) 矢島良紀, 多田一晴, 品川俊介: 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, 第 48 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 2022.
- 6) Tse, R., and Cruden, D.M.: Estimating joint roughness coefficients. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 16, pp. 303-307, 1979.
- 7) Barton, N.: Review of a new shear-Strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*. 7, pp. 287-332, 1973.
- 8) Saeb, S.: A variance on the Ladanyi and Archambault's shear strength criterion, Rock Joints, Barton & Stephansson(eds), Balkema, pp.701-705, 1990
- 9) 佐々木靖人, 倉橋稔幸, 吉田直人: ダム基礎等における弱層の強度評価手法の開発, 平成 21 年度重点プロジェクト研究報告書, 国立研究開発法人土木研究所, <https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2009/pdf/2009-14-3.pdf>

# A STUDY ON EVALUATION METHOD OF SHEAR STRENGTH FOR ROCK MASS WITH COMPLICATED WEAK LAYER

Research Period : FY2017-2021

Research Team : Geology and Geotechnical

Research Group(Geology)

Author : ANAN Shuji, SHINAGAWA Shunsuke,

YAJIMA Yoshinori and MATSUO Tatsuya

## Abstract :

In order to develop a strength evaluation method for the weak layer in the foundation rock mass, case analysis were examined in the dam project where the weak layer became an issue and the approximate strength of the filling material in weak layer. In addition, a direct shear test was conducted using a specimen that simulated a complicated weak layer. As a result, the effectiveness of the preliminary survey was confirmed, and issues related to the current survey / evaluation method were extracted. And the approximate strength of filling is shown from the previous test. In addition, the cohesion decreases as the thickness of the filling materials increases. But, the internal friction angle was affects from mainly presence or absence of filling not the variation of thickness.

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