

ダイレイタンスー拘束条件下の 岩盤不連続面せん断特性

谷本親伯¹・鈴木淳也²・川崎 了³・中原拓郎⁴

¹正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

²学生会員 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻(現大成建設株式会社)

³工学研究科地球総合工学専攻正会員 博(工) 大阪大学大学院学内講師 工学研究科地球総合工学専攻
(現北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻)

⁴学生会員 大阪大学大学院

本研究ではダイレイタンスー拘束条件下における、人工岩を用いた一面せん断試験を行うことによって、そのせん断特性の把握を試みた。また、異なるせん断方向におけるせん断特性の違いに関してもせん断試験を行うことによって検討を行った。それらのせん断試験の結果、せん断特性がせん断破壊の進行とともに破断するアスペリティーに大きく影響されることがわかった。そこで、破断するアスペリティーの体積を推定する手法を考案し、その破断されるアスペリティーの体積をパラメータとして用いたせん断強度式を新たに提案した。そして、自然岩に関する一面せん断試験を行い、提案したせん断強度式の適用性について考察した。

Key Words : dilatancy, rock joints, shear strength, volume of fractured asperities

1. はじめに

近年我が国では、ダムやトンネルなど土木構造物が大規模化されてきている。また、地下空間では気密性や恒温性、不燃性に優れているという点から、地下発電所や各種エネルギーの地下貯蔵、放射性廃棄物の地中処分等の利用が進められている。

地下発電所やトンネルなどの土木構造物の設計・施工で対象となる岩盤は、砂、粘土などの均質として扱うことのできる地盤材料と異なり、岩盤内には節理や層理などが存在することが多い。そのため、岩盤の工学的性質は構成する岩石の材料特性だけではなく、不連続面の性質にも大きく影響される。実際、き裂性岩盤の破壊は岩盤実質部の破壊によることは少なく、主に不連続面に沿ったせん断破壊によって生じることが多い。その結果、斜面において岩盤の崩落等の災害が発生し、また、トンネル切羽周辺の緩み領域においては、拘束圧が低いために岩盤ブロックが移動し、不連続面上でせん断破壊が生じる危険性がある。よって、不連続性岩盤内に空間の建設を考える場合には、事前に岩盤の工学的性質を理解し、その力学挙動を把握する必要があり、そのためには不連続面の力学特性を解明することが重要な課題である。

そのような不連続面の力学特性は、不連続面の拘束状態、岩石の材料強度、表面形状(ラフネス)、かみ合わせ

状態、不連続面上の充填物の状態、風化の程度、せん断履歴等の多くの要因に影響されるため、これら全てを含めた理論的検討や原位置試験は非常に困難であり、様々な条件が比較的自由に設定できる室内試験によって求めることが妥当であると思われる。この不連続面の力学特性を把握するために、Barton¹⁾やPatton²⁾、Ladanyi & Archambaults³⁾等の数多くの研究者によって様々な研究、解析が行われ、これらの研究は不連続面の力学特性の把握に大きく貢献してきたが、このために行われてきたせん断試験の多くは、せん断中の垂直拘束圧を一定に保った条件下で行われてきたものである。原位置岩盤において構造物を施工する際に特に問題となる緩み領域の力学挙動について考えると、掘削を開始した後、支保工を設置するまでの間は、掘削自由面周辺に非弾性域が広がり、岩盤ブロックの不連続面は凹凸の乗り上げを伴う比較的自由的な状態でせん断されると考えられる。つまり、垂直変位は拘束されず、垂直拘束圧一定に近い状態のせん断条件に対応すると考えられる。

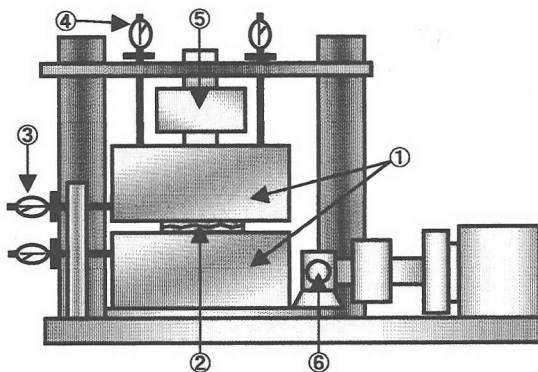
一方、剛な支保工やロックボルトなどを設置した後は、せん断に伴う岩盤ブロック同士の変位がこれらの支保部材により拘束されることになり、支保設置前とは違った条件でせん断を受けることになる。よってロックボルトや支保工を設置した後は、せん断に伴うダイレイタンスーを一定値に拘束して供試体をせん断させる「ダイレ

「ダイレイタンスー拘束条件下の一面せん断試験」から考察を行うことで、「緩み領域」における岩盤のせん断挙動を推測することができるかと期待した。

したがって、従来のような垂直拘束圧一定のせん断特性だけでは、不連続性岩盤の力学特性を把握するには不十分であり、ダイレイタンスーを一定に拘束した条件下でのせん断特性の把握が必要であると考えた。既報告において、谷本ら⁴⁾は定圧およびダイレイタンスー拘束条件下の一面せん断試験を石膏供試体を採用して行い、せん断中に破断するアスペリティーの体積からせん断応力の推定を行っている。しかし、供試体の材料、種類、ダイレイタンスーの拘束値等に関する試験条件が限定され、また、その破断体積の推定に関しても物理的根拠に欠けている部分があり、課題が残されていた。

本研究では上記の課題を考察し、ダイレイタンスーを一定に拘束した条件下における人工岩を用いた一面せん断試験を行うことによって、そのせん断特性の把握を試みた。また、異なるせん断方向におけるせん断特性の違いについてもせん断試験を行うことによって検討した。

一連のせん断試験の結果、せん断特性がせん断破壊の進行とともに破断するアスペリティー（岩盤不連続面の凹凸部分）に大きく影響されることがわかった。そこで、破断されるアスペリティーの体積を推定する手法を考案し、その体積をパラメータとして用いたせん断強度式を新たに提案した。そして、さらに、白浜砂岩に関する一面せん断試験を行い、提案したせん断強度式の適用性について検討を実施した。



- | | |
|---------|-------------|
| ① せん断箱 | ④ 垂直変位計 |
| ② 供試体 | ⑤ 垂直荷重ロードセル |
| ③ 水平変位計 | ⑥ 水平荷重ロードセル |

図-1 一面せん断試験装置（載荷部）

2. ダイレイタンスー拘束条件下の一面せん断試験

(1) 一面せん断試験装置

一面せん断試験装置（誠研舎製：図-1）は、せん断箱が上下2つに分割されて上箱が固定されており、下箱のみが水平方向に移動する仕組みになっている。水平荷重機構は電気・機械サーボ方式で、垂直荷重機構は一定荷重を与える空圧方式と一定変位を与える電気・機械サーボ方式の2種連動システムを備えている。最大荷重能力は水平30kN、垂直20kNであり、水平方向及び鉛直方向の荷重はロードセルによって測定する。垂直変位及び水平変位はそれぞれせん断箱に直接変位計を取り付けて測定した。測定された垂直変位、水平変位、垂直荷重、水平荷重のデータは逐次パソコンに取り込まれる。本試験機の分解能は、水平荷重及び垂直荷重において1.0N、水平変位及び垂直変位において0.01mmである。

(2) 供試体

本研究では、ボーリングコアから採取された自然状態の不連続面から同じ形状のレプリカを複製し、底面5.15cm×5.15cm、高さ8cmの不連続面を有する直方体供試体を作製して使用した。なお、不連続面同士は隙間なくかみ合っている。供試体に用いた材質には2種類（石膏、モルタル）を用意した。石膏はニューハイストーン（吉野石膏製）を用い、重量配合比は石膏：水=1:0.24である。一方、モルタルは早強セメント（大阪住友セメント製）を用い、重量配合比はセメント：標準砂：水=1:1:0.5である。なお、石膏とモルタルの物性値を表-1に示す。

(3) 表面形状の計測方法⁴⁾

表面形状の計測には、非接触式レーザープロファイラー（TOK-3PR）を用いて計測した。この装置は可動部、計測部、制御部によって構成され、計測されたデータはアンブを介してコンピューターに取り込まれる。可動部は鋳鉄製の防振台上にXYステージ（LTS-100XY：シグマ光機製）を固定し、ステージ上には供試体を堅固にかつ再現性をもって固定可能な可動アジャスタを設置している。計測にはレーザー変位計（LB-045：キーエンス製）を用いた。この変位計は焦点距離が40mm±5mm、分解能は4µm、垂直方向の測定可能範囲は±5mmである。また制御装置にはAS-NET（シグマ光機製）を用いている。この装置によりXYステージを0.001mmの精度で移動させることができる。計測されたラフネスのうち、後述するラフネスCの鳥瞰図を図-2に示す。

表-1 供試体の材料特性

	石膏	モルタル
一軸圧縮強度 q_u (MPa)	47.60	61.40
弾性係数 E_{50} (MPa)	1.04×10^4	1.30×10^4
P波弾性波伝播速度 V_p (km/s)	3.64	3.90
単位体積重量 γ_v (kN/m ³)	19.1	20.7

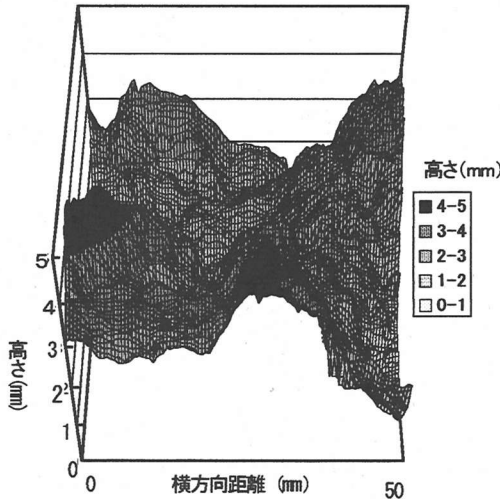


図-2 不連続面の鳥瞰図(ラフネスC)

(4) 不連続面の表面粗度

用いた供試体の不連続面表面の粗度(以下、表面粗度とする)に関して、その指標である $M_s^{5),6),7)}$ を用いて定量化を行った。結果を表-2に示す。ラフネス指標 M_s に関する一連の研究は、不連続面のラフネスを一つの波と考え、波動現象の解析に用いられるスペクトル解析を用いて定量化する手法を提案している。スペクトル解析は、時間-変位の座標系(時間領域)で定義された関数に対して、フーリエ変換により周波数(Hz [1/s]) - 振幅(mm)の座標系に変換し、それにより得られる周波数特性を利用して、その波の特徴を捉える手法である。 M_s の算出方法は、前述の表面形状計測装置で得られたデータに関して、せん断方向に平行な測線毎に M_s の算出を行い、その平均を求めた。

また、表-2で示した、本試験で用いた供試体不連続面の表面粗度が一般にどの程度の大きさであるのかを把握するために、自然の不連続面に関する M_s を算出した。すなわち、ボーリングコアから60個の自然の不連続面を無作為に選定した後、それらの表面形状を計測し、表面粗度の指標である M_s を計算し、それらの分布を求めた(図-3)。図中に今回試験で用いた供試体の M_s (ラフネスA, B, C, D)を示したが、この結果からは本試験で用いた供試体は一般に頻度が高く存在する表面粗度を有していることがわかる。

表-2 供試体の表面形状粗度^{5), 6), 7)}

ラフネス	A	B	C	D
$M_s (\times 10^{-3})$	1.78	1.54	3.26	2.59

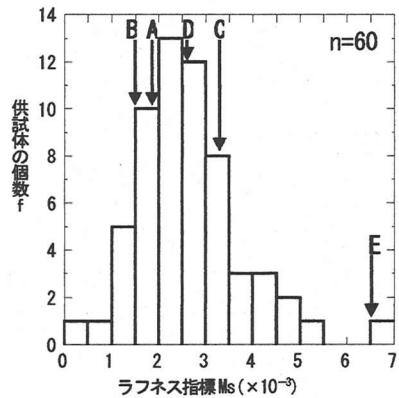


図-3 本論文で取扱った自然の不連続面に関する M_s の分布頻度

(5) 一面せん断試験

ダイレイタンスー拘束条件下における岩盤不連続面のせん断特性を調べるために、様々なダイレイタンスー拘束値を設定して一面せん断試験を行った。なお、供試体の製作方法及びその寸法等は、前述の2.(2)に示したとおりである。また、本試験は、初期垂直拘束圧(0.5MPa)一定の状態でせん断試験を開始し、事前に設定したダイレイタンスーが生じた後は、このダイレイタンスーを一定に拘束して、さらにせん断を進めた。試験ケースは表-3に示すとおりである。なお、垂直変位拘束精度は0.01mm、せん断速度0.1mm/minである。

本試験結果を図-4~図-7に示す。また、ラフネスCに関する、試験中のせん断応力-せん断変位関係を図-8に、垂直応力-せん断変位関係を図-9に、垂直変位-せん断変位関係を図-10にそれぞれ示す。なお、本試験では、せん断変位1/600mm毎にせん断抵抗値が示され、せん断変位の増加(1/600mmの増分毎)によるせん断面積の補正を行っている。すなわち、せん断試験中の上下供試体の重なり合う面積に対して、せん断応力および強度を定義している。

表-3 せん断試験ケース(供試体A~D)

	ダイレイタンスー拘束値(mm)
ラフネスA	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0
ラフネスB	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6
ラフネスC	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0
ラフネスD	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0

(ラフネス B は凹凸が小さいためダイレイタンスー拘束値を0.6mm以下で実施)

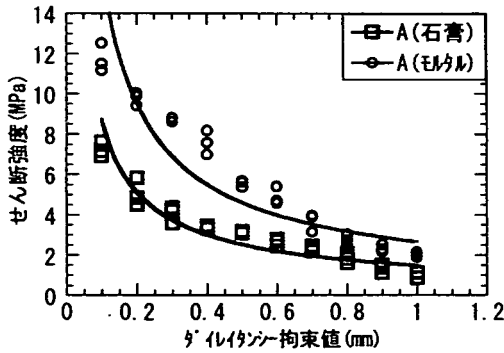


図4 せん断試験結果(ラフネス A)

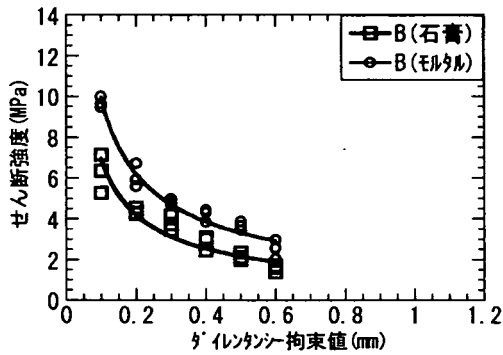


図5 せん断試験結果(ラフネス B)

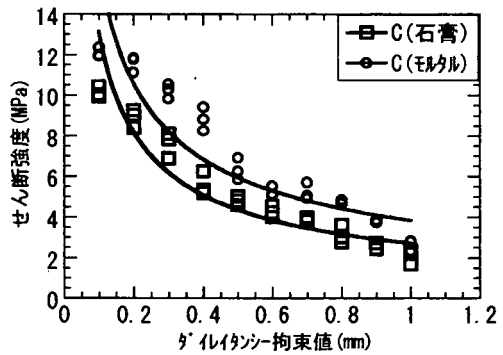


図6 せん断試験結果(ラフネス C)

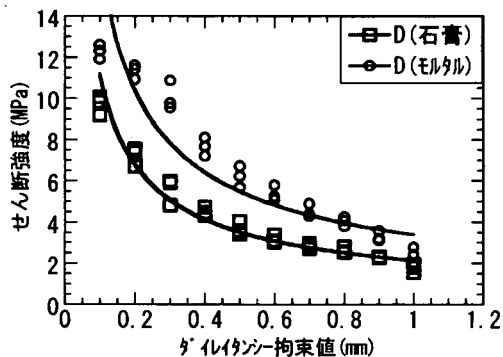


図7 せん断試験結果(ラフネス D)

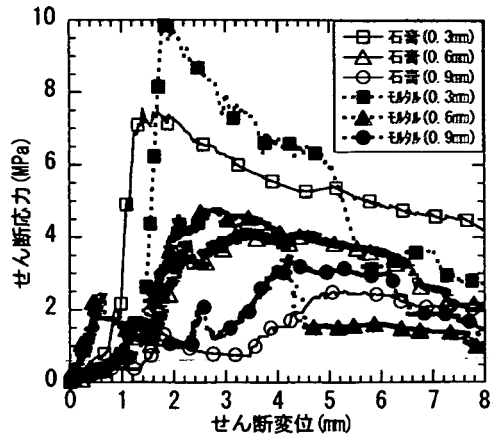


図8 せん断応力-せん断変位(ラフネス C)

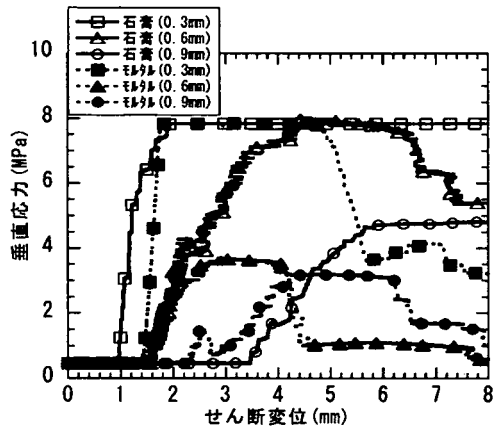


図9 垂直応力-せん断変位(ラフネス C)

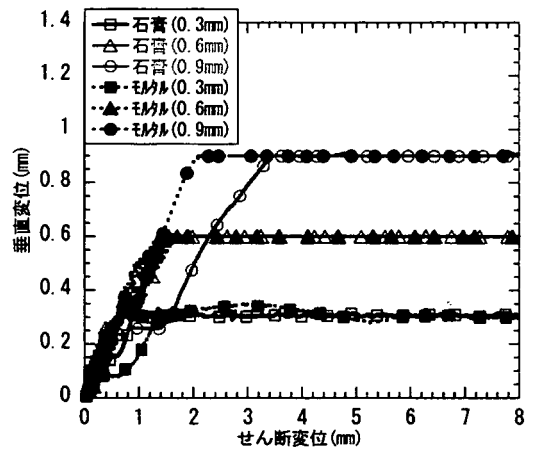


図10 垂直変位-せん断変位(ラフネス C)

これらのせん断試験結果(図4~図10)より, 得られた知見を以下に示す.

- ・ダイレイタンスーの拘束は, 不連続面のせん断強度を高める.
- ・不連続面の表面粗度が大きいほど, せん断強度が大きく現われる.
- ・材料の一軸圧縮強度が大きいモルタル供試体の方が, せん断強度が大きく現われる.

ダイレイタンスーを拘束すると, 設定したダイレイタンスーに達した後は, 不連続面のアスペリティーを破断しながらせん断が進行するので, 表面粗度の大きさや材料強度の影響が大きく現われたのではないかと考えられる. つまり, ダイレイタンスー拘束条件下のせん断特性は, アスペリティーの破断挙動による影響が大きいと考えられる.

(6) せん断方向によるせん断特性の差異

せん断方向によるせん断特性の違いを調べるために異なる計測方向において M_s を算出した(図-11). その結果, 先の試験に用いたラフネスA, B, C, D程度の粗度の大きさまでは計測方向による M_s の差異はなかったが, それより粗度が大きいラフネスE ($M_s > 4 \times 10^{-3}$) に関しては, 計測方向によって表面粗度が異なる不連続面が存在することがわかった. なお, ラフネスEは2. (2) で述べた方法により作製された60個のラフネス中の1つである.

計測方向による M_s 値の差異が大きいラフネスEを有する供試体に関して, 異なったせん断方向でせん断試験を行い, その特性の差異を調べた. その試験ケースを表-4に, また試験結果を図-12にそれぞれ示す. 表-4において, 西→東方向を基本方向として, その逆方向を東→西方向, 基本方向と垂直な方向を北→南方向と定めた.

同図より, 同じ不連続面であっても, せん断方向によってせん断強度が大きく異なる供試体が存在することがわかる. このことから, せん断方向による特性の差異の評価が必要であると考えられる. そこで次章では, 破断するアスペリティーに着目し, その面積や体積を推定することを試みた.

表-4 試験ケース(ラフネスE)

	ダイレイタンスー拘束量(mm)
ラフネスE(西→東)	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8
ラフネスE(東→西)	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8
ラフネスE(北→南)	0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4

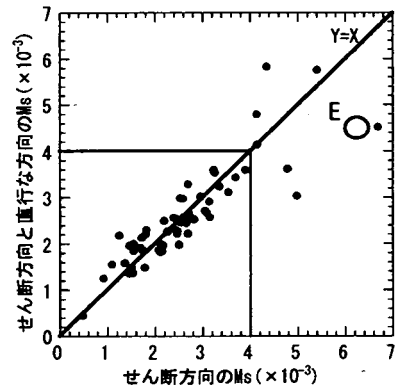


図-11 計測方向による M_s の変化

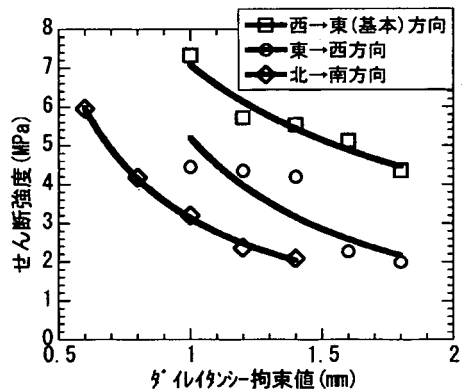


図-12 せん断方向の異なるせん断試験結果(mm)

3. アスペリティーの破断挙動の解明

(1) 画像による破断面積の判読

せん断試験後にモルタル供試体の不連続面表面を観察すると, せん断に寄与したと考えられるアスペリティー部分が, 摩擦や圧力の作用によって光沢を帯び, 暗灰色に変化する. そこで, せん断試験後の供試体表面をデジタルカメラで撮影し, 得られた供試体表面の画像に関して, 適当なしきい値を定めて白黒の二階値化処理を行い, 破断したと考えられるアスペリティー部分(黒色部分)を抽出した. そして, 黒色部分の面積を供試体表面全体の面積で除したものを破断面積率として求めた(図-13). その結果, ダイレイタンスー拘束値が小さいほど, 破断面積率が大きくなり, また, 破断面積率自体が30%以下と比較的小さいことから, ダイレイタンスー拘束値が0.3mmでは, 破断面積率は30%程度であることが判明した. よって, 不連続面全体がせん断されているのではないことを確認した.

(2) 破断面積率 RAF

せん断中の挙動をモデル化すると、図-14のように不連続面のアスペリティーが重なる状態になると仮定できる。このとき、この重なっているアスペリティーの破断が起きることになるが、本推定法では、上下供試体のアスペリティーの平均傾斜角（図中の α と β の平均）が大きい方のアスペリティーが破断され、そして図-14では下部供試体のアスペリティーが点線部分まで破断され、次のステップに移るとして推定を行い、破断面積率 RAF (Ratio of Area of Fractured asperity) を求めた。破断面積率 RAF は、図-14 に示すように上下のアスペリティーが重なり合う部分のせん断面への投影面積の和を補正したせん断面積で除した値で定義する。そこで、異なるダイレイタンスの拘束値に対し、数値解析により RAF との関係性を推定したものが図-15 である。3. (1) で述べた画像により求めた破断面積とダイレイタンス拘束値との関係性を示した図-13 と比較すると、両者のデータに共通するダイレイタンス拘束値が 0.3mm 以上の範囲では、同様の相関性が確認できる。そこで、破断面積率 RAF とせん断強度との関係を調べたところ、図-16 に示すような結果を得た。相関係数は、石膏が 0.76、モルタルが 0.88 であり、両者の相関性はそれほど高いとはみなされない。

この結果に対し、破断面積の問題点として、不連続面に垂直方向の高さを考慮していないことが挙げられる。つまり、アスペリティーが接触する場合、完全にアスペリティーが破断する部分と摩擦のみが起る部分とが考えられるが、それらを同様に扱うことになる。これらのせん断応力への影響は異なると考えられるので、そのために破断面積率 RAF とせん断強度との相関性が低くなると考えられる。そこで、破断するアスペリティーの不連続面に垂直方向の高さも考慮するために、その体積が必要となる。

以上の考察から、次に、実際せん断によって破断されるアスペリティーの体積について、破断体積率 RVF (Ratio of Volume of Fractured asperity) を提案した。

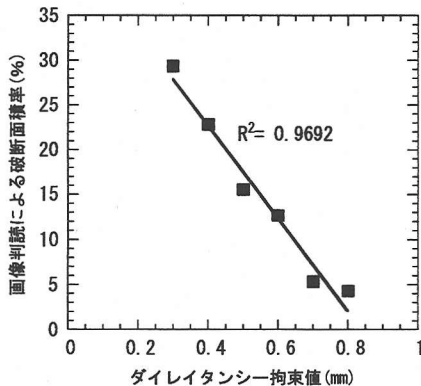


図-13 画像判読による破断面積率(ラフネスA)

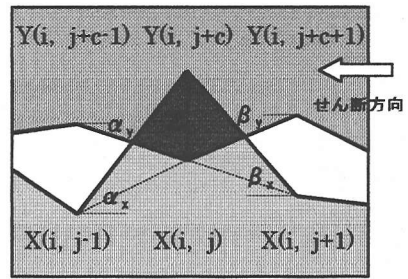


図-14 せん断挙動モデル

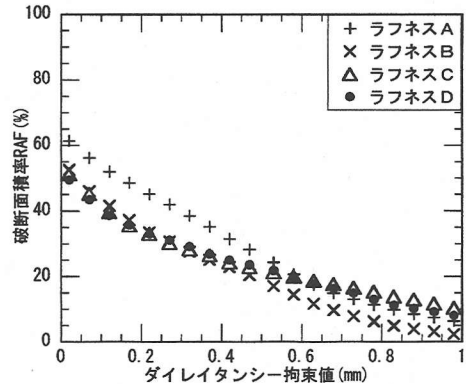


図-15 破断面積率RAF

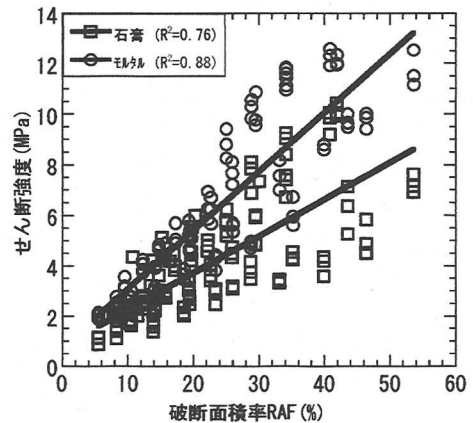


図-16 せん断強度—破断体積率RAF

(3) 破断体積率 RVF

破断面積率 RAF と同様のアスペリティーの破断に関する判定基準を用いて計算を行った。破断体積率 RVF は破断すると推定されたアスペリティーの高さにシミュレーションで設定した単位面積を乗ずることによりその体積を求め、せん断変位の増分ごとに算出したものの和を、補正したせん断面積で除した値で定義する。この破断体積率 RVF の算出方法は、本論の前段となる筆者らの既発表論文⁴⁾に説明している(文献⁴⁾では、Aに相当する)。この推定結果を図-17に示す。また、破断体積率 RVF とせ

せん断強度の関係を図-18 に示す (相関係数: 石膏 0.95, モルタル0.97)。この結果, 両者は高い相関関係を有することが確認された。

また, M_s が 4×10^{-3} 以下の場合, せん断方向の違いがせん断強度値に反映されないことを既に示しているが, M_s が 4×10^{-3} 以上の場合 (2. (6) 供試体 E について, せん断強度と破断体積率 RVF の関係を示すと図-19 となる。これから相関係数を算出すれば 0.94 なる値が得られた。したがって, せん断方向により, せん断強度が異なっても, 得られたせん断強度の値と破断体積率 RVF との間には, 高い相関性が認められると考える。ただし, さらなるデータが必要であろう。

以上のことから, 図-18, 図-19 からダイレイタンスー拘束条件下の一面せん断試験における不連続性岩盤のせん断強度は, ダイレイタンスー拘束値に関係なく, また, 任意の不連続面を有する供試体に関して, せん断中に破断を起こすアスペリティーの破断体積率 RVF から推定することが可能であることが明らかとなった。そこで, 次章において, 破断体積率 RVF を用いたせん断強度の推定を試みた。

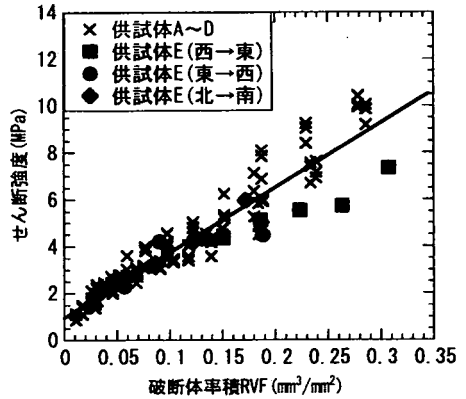


図-19 せん断強度—破断体積率RVF(供試体E)

4. アスペリティーの破断に着目したせん断強度推定法

(1) 供試体の圧縮性を考慮した破断体積率RVFの補正

不連続岩盤の力学的挙動, 特に, 今回対象とするせん断挙動については, 岩盤の実質部分の強度に比べ, 不連続面の状態変化に起因する岩盤としての強度変化(低下)の方がよりの著しい点が問題となる。すなわち, ダイレイタンスーがより小さくなるように拘束すれば, より大きな垂直応力が発生し, 岩石実質部において圧縮ひずみが増加する。

一方, 試験中の垂直変位の計測位置は, 図-20 のようにせん断箱の上端で計測しており, 不連続面でのダイレイタンスーを直接計測しているわけではない。つまり, 計測している垂直変位とRVFで用いているダイレイタンスーとは供試体実質部での圧縮量分の差が生じることになる。そこで, 石膏供試体, モルタル供試体に関する一軸圧縮試験から得た応力(σ)—ひずみ(ε)曲線上で, ピークせん断応力が発生した時点の垂直応力に相当するひずみを求め, 供試体の高さから供試体の圧縮量を算出し, RVFの補正を行った。

表-5にラフネスAに関する石膏供試体のダイレイタンスー拘束試験時のRVFを示す。補正前のRVFと補正後RVFの比較である。これによれば, 供試体実質部の圧縮性を考慮した場合のRVFは, 補正前と比較し, 最大16.8%小さくなる。また, 同様にモルタル供試体では最大23.8%なる値を得ている。これを図示したものが, 図-21である。拘束するダイレイタンスーが0.6mm以上であれば, 三者は一致している。0.5mm以下では一致していないが, 補正後のRVFは補正前と比較して, 計測による破断体積に近づくことが分かる。したがって, RVFは供試体の実質部の圧縮性を考慮した補正が必要である。

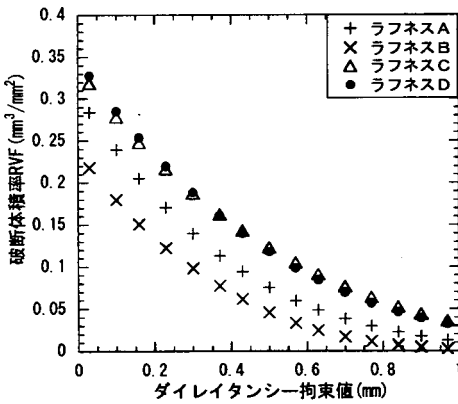


図-17 破断体積率RVF

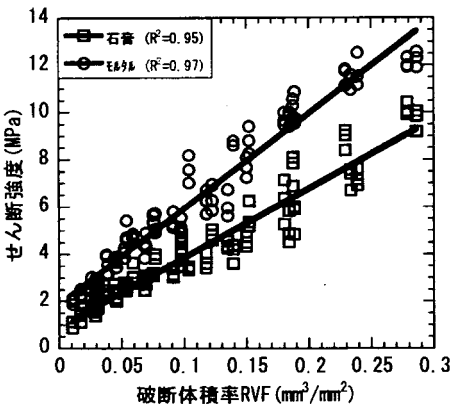


図-18 せん断強度—破断体積率RVF

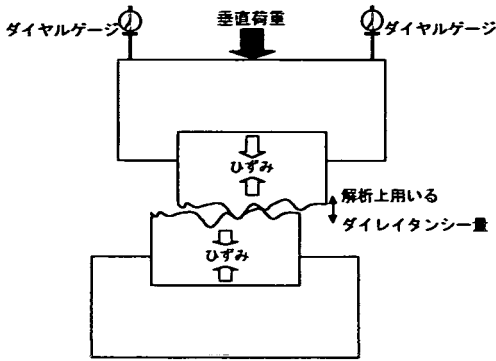


図-20 供試体基質部の圧縮性

表-5 ラフネス A に関するダイレイタンス拘束試験での破断体積率 RVF

拘束ダイレイタンス量 (mm)	補正前 RVF (mm ³ /mm ²)	補正後 RVF (mm ³ /mm ²)
0.3	0.140	0.121
0.4	0.103	0.087
0.5	0.075	0.063
0.6	0.054	0.048
0.7	0.038	0.034
0.8	0.027	0.025

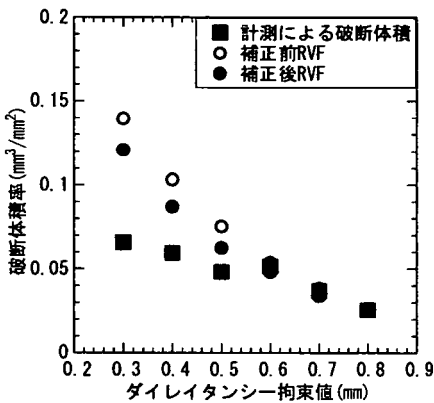


図-21 計測による破断体積率と RVF (補正前, 補正後)

(2) せん断強度の推定

ここで、本研究に対する筆者らの主目的は、かなり高いダイレイタンスを許すような、あるいは、拘束圧が非常に低い場合のせん断挙動を解明することにあることを述べておかねばならない。すなわち、山岳トンネルでの支保効果は、内圧に換算すれば、例外的に 2MPa に近い値が考えられるが高々 1MPa 程度であり、従来の岩石試験で取扱われる拘束圧に比べるときわめて低い領域である^{8), 9), 10)}。しかしながら、現実的な岩盤挙動はこの領域で大きく変化し、施工管理の面では、コンバージェンス(変位)の量で支保効果を判断しなければならない。本論文

で示したデータに限定すれば、直線近似が必ずしも最適とはみなされないが、本研究の結果を応用するには、せん断強度の推定を直線近似で行うことが実用上適切と判断している。補正後の RVF とせん断強度の関係を図-22 のようにモデル化する。このとき、同図中の直線(破断体積率 RVF とせん断強度との関係式)は、

$$\tau = a \cdot RVF \times 10^{-3} + b \quad (a, b: \text{定数}) \quad (1)$$

と表わすことができる。ここで、 a は供試体材料の一軸圧縮強度 qu に比例するとして以下のように仮定する。

$$a \times 10^{-3} = m \cdot qu \quad (2)$$

また、 b は主として、ラフネスの形状 c に比例するとして、

$$b = n \cdot c \quad (3)$$

と仮定する (m, n は定数)。以上より、せん断強度式を次のように定義する。

$$\tau = m \cdot qu \cdot RVF + n \cdot c \quad (4)$$

そして、RVF とせん断強度の関係からパラメータ同定を行った結果、 $m=0.72$ 、 $n=0.12$ となった。これらを式 (4) に代入すると、以下のようなせん断強度式が得られた。

$$\tau = 0.72qu \cdot RVF + 0.12c \quad (5)$$

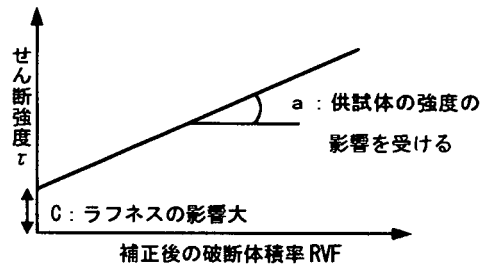


図-22 せん断強度式のモデル化

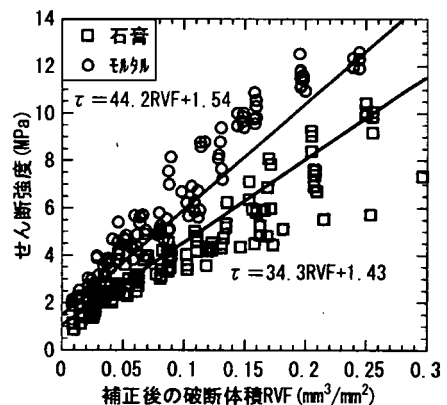


図-23 せん断強度式の適用

石膏、モルタルの各パラメータを代入することによって求めた各式を図-23中に示す。その結果、異なるせん断方向でせん断試験を行った供試体Eも含めて、提案したせん断強度式は石膏供試体とモルタル供試体のせん断強度を推定できると判断した。

5. せん断強度推定法の自然岩に関する適用性

(1) 自然岩に関する一面せん断試験

4. (2)で提案したせん断強度式(5)は、人工岩(石膏、モルタル)に関して求めたものであるが、ここでは同式の自然岩に対する適用性について検討する。

対象となる供試体材料には白浜砂岩を用いて、圧裂試験による不連続面を作成後、一面せん断試験を実施した。用いた供試体の材料特性を表-6に、また不連続面の表面形状粗度 M_s を表-7に、さらにその試験結果を図-24に示す。

(2) せん断強度式の適用

白浜砂岩供試体に関して得られたRVFとせん断強度との関係を図-25に示す。次に、白浜砂岩に関する各パラメータを求め、それらを提案したせん断強度式(5)に代入し、以下の白浜砂岩に関するせん断強度式(6)を導いた。

$$\tau = 39.7 \cdot RVF + 1.35 \quad (6)$$

図-25中に式(6)を示した。その結果、提案したせん断強度式により不連続面を含む白浜砂岩のせん断強度を推定することが可能であると考えが、この点についてはさらにデータを重ね、明瞭な知見を提言したいと考える。

表-6 白浜砂岩の材料特性

一軸圧縮強度 q_u (MPa)	55.2
弾性係数 E_{50} (MPa)	8.88×10^3
P波弾性波速度 V_p (km/s)	2.26
単位体積重量 γ_d (kN/m^3)	2.28×10

表-7 表面形状粗度 (M_s)

ラフネス	F	G	H	I	J	K
$M_s (\times 10^{-3})$	4.77	2.13	4.18	2.63	2.30	1.90

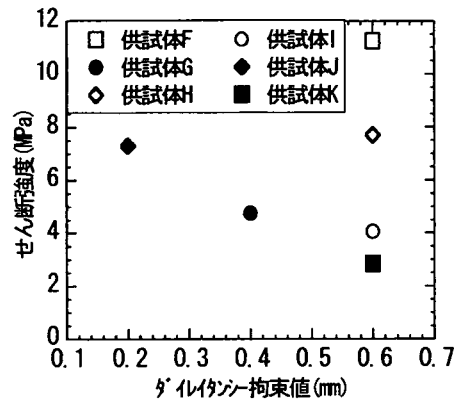


図-24 せん断試験結果(白浜砂岩)

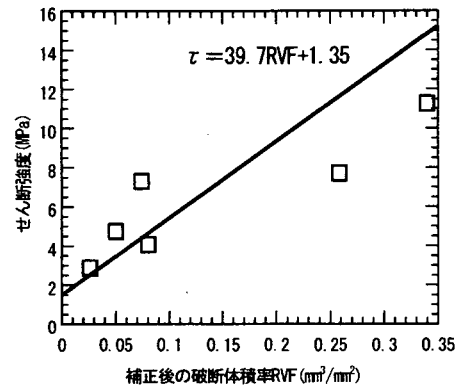


図-25 せん断強度式の適用(白浜砂岩)

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ①ダイレイタンスーの拘束は不連続面のせん断強度を高める効果があり、材料強度が大きいほど、また不連続面の表面粗度が大きいほど、その効果が大きい。
- ②せん断方向によって、そのせん断特性が異なる不連続面が存在する。
- ③せん断の進行とともに破断されるアスペリティーの体積とせん断強度には高い相関性がある。
- ④提案した破断体積率RVF、一軸圧縮強度、粘着力をパラメータとしたせん断強度式によって、せん断強度を推定することが可能である。
- ⑤提案したせん断強度式は自然岩にも適用可能である。

参考文献

- 1) Barton, N.: *A relationship between joint roughness and joint shear strength*, Proc. Int. Symp on Rock Mechanics, Nancy, ISRM, pp.1-8, 1971.
- 2) Patton, F. D.: *Multiple modes of shear failure in rock*, Proc. 1st Int. Cong. ISRM, Vol., pp. 509-513, 1966.
- 3) Ladanyi, B. and Archambault, G.: *Simulation of shear behavior of jointed rock mass*, Proc. 11th U.S. Symp on Rock Mechanics, pp.105-125, 1970.
- 4) 谷本親伯, 北村義宜, 川崎了, 宮田健治朗, 鈴木淳也: 定圧およびダイレイタンス拘束条件下の不連続性岩盤のせん断強度特性, 土木学会論文集, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp.83-94, 2002.
- 5) 谷本親伯, 岸田潔, 梅澤孝行: 岩盤不連続面のせん断特性とラフネスに関する基礎的研究, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.206-210, 1992.
- 6) 谷本親伯, 森岡宏之, 岸田潔: 低拘束下での不連続面のせん断特性とラフネスの関係, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.127-131, 1991.
- 7) 谷本親伯, 岸田潔: 3次元非接触式プロファイラーと最大エントロピー法を用いた岩盤不連続面ラフネスの定量化, 土木学会論文集, No.511/III-30, pp.57-67, 1995.
- 8) Tanimoto, C., Myers-Boehlke, B. and Iwasaki, Y.: *Allowable Limit of Convergence in Tunneling*, Proc. 24th U.S. Symp on Rock Mechanics, pp.251-263, 1983.
- 9) 谷本親伯, 道広一利, 藤原紀夫, 吉岡尚也, 畑浩二: トンネル切羽観察に基づく不連続岩盤強度の推定, 第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会岩盤力学委員会, pp.306-310, 1987.
- 10) Tanimoto, C., Hata, S., Fujiwara, T., Yoshioka, H. and Michihiro, K.: *Relationship between Deformation and Support Pressure in Tunneling through Overstressed Rock*, Proc of 6th Congress of International Society for Rock Mechanics, ISRM, vol.2, pp.1271-1274, 1987.

(2002. 3. 29 受付)

SHEAR CHARACTERISTICS OF ROCK JOINTS UNDER CONSTANT DILATANCY

Chikaosa TANIMOTO, Junya SUZUKI, Satoru KAWASAKI and Takuro NAKAHARA

In consideration of allowable limit of displacement and deformation associated with rock tunnelling, we should pay more attention to the meaning of the shear behavior of rock joints under constant dilatancy. By employing about 250 specimens which were made of three materials and reproduced from several natural joints with different roughnesses, the authors have carried out direct shear tests under constant dilatancies. The breakage of joint asperity was discussed from the point of view standing on the relationship between shear strength and the loss of asperity. The method to estimate the volume of fractured asperities was proposed and the correlation between shear strength and the volume was discussed. Finally, the authors proposed the new relational expression between the volume of fractured asperities and the shear strength.