

自然な岩盤不連続面の 空隙状況およびラフネスを考慮したせん断強度式

The shear strength formula including joint aperture and roughness for natural rock joint

杉野友通* 山田亮介** 楠見晴重***

Tomomichi SUGINO*, Ryousuke YAMADA** and Harushige KUSUMI***

In this paper, the effects of which the shear behavior of rock joint is depended on aperture condition are discussed. So, we propose new index γ which quantitatively showed aperture condition. Index γ which shows aperture condition is compared with result of the single shear test. And we propose new strength formula for natural rock joint. It is composed of index γ which shows aperture condition and index JRC which shows the roughness of surface of discontinuity and cohesion C as the material strength.

Key Words: natural rock joint, aperture condition, JRC, failure envelope, shear strength

1. はじめに

岩盤不連続面のせん断強度に影響を及ぼす因子としては、不連続面を構成する岩石自体の強度、不連続面の粗さ、不連続面間の空隙状況等が挙げられる。一方、岩盤不連続面のせん断強度、変形特性に関する研究は、Barton¹⁾らをはじめ数多くの研究者によって行われている。しかし、多くは主に不連続面の粗さについてのみに考察しているものであり、不連続面の噛み合わせがせん断強度に及ぼす影響について検討しているものは少ない。Zhao²⁾は、不連続面の噛み合わせを表す指標として JMC というものを提案しているが、これは主観的な要素が強く観察者によって数値が変わってくるという問題がある。

本研究は、開口した自然な岩盤不連続面のせん断強度特性を解明することを目的として、その特性に影響を及ぼす因子である開口部の空隙状況に注目したものである。実際には、開口した自然な不連続面を有する岩石供試体からジェットセメントを用いて供試体を複製し、非接触型レーザー変位計によって不連続面の形状計測を行う。このデータを用いて、不連続面の開口幅を算出し、開口部の空隙状況を定量的に表す指標³⁾について検討した。そして、せん断試験結果をもとに提案した指標の有用性について考慮するとともに、開口部の空隙状況および不連続面形状を考慮したせん断強度式を提案した。

2. 実験概要

2.1 供試体

同一形状の開口した自然な岩盤不連続面を数多く得ることは困難であるため、本研究では軟岩～中硬岩程度の強度を有するジェットセメント及びスーパージェットセメント

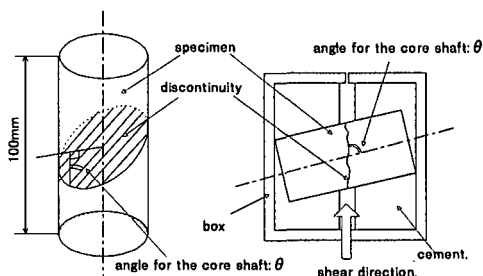


Fig. 1 Specimen and shear box

* 学生会員 関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻

** 正会員 修士(工学)京都市交通局 高速鉄道部 施設課

*** 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

を用いて不連続面を複製している。供試体は開口した自然な不連続面をウレタン樹脂で型取りし、セメントを流し込むことにより複製した。使用した供試体の本数は、ジェットセメント供試体 (J1~J27) 27 本、スーパージェットセメント供試体 8 本 ($JRC \approx 8$, 4 本, $\gamma \approx 0.3$, 4 本) $\times 2$ 種類 ($W/C=30,50$) の 16 本, 合計 43 本である。いずれの供試体についても養生期間は 7 日とした。ジェットセメント供試体では, W/C (水セメント比) $=40$, スーパージェットセメント供試体では, $W/C=30,50$ の供試体を作成し, 3 種類の軸圧縮強さをもつ材料を用意している。Table1 に供試体の諸特性及び, 作成した種類を示す。○印および■印を示した, 8 種類のコアについて水セメント比の異なる供試体を作成している。Table2 には, それぞれの供試体の諸物性値を示す。Fig. 1 に示すように, 供試体は, 不連続面が中央に来るように高さ 100mm の円柱に整形した。自然な不連続面はさまざまな方向を呈しているため, コア軸に対する傾き $\theta(^{\circ})$ を考慮して, 不連続面がせん断方向と水平になるようにせん断箱に収めた。

2.2 表面形状計測

表面形状計測システムは, X-Y 可動式ステージ (X 方向移動量 100mm, Y 方向移動量 100mm), 非接触型レーザー変位計 (計測範囲 ± 15 mm, 分解能 $2\mu m$) およびデータリレー機から構成される。本研究では不連続面の表面形状を 0.5mm ピッチで行い, 1/100mm の単位まで読みとっている。

2.3 一面せん断試験

一面せん断試験機は, せん断荷重, 垂直荷重の測定はともにロードセルを用い, せん断変位, 垂直変位の測定はともに差動トランス型変位計を用いた。せん断試験は, 垂直応力が 0.2, 0.5, 1.0, 2.0MPa の 4 段階とし, 垂直応力一定, ひずみ制御方式でせん断変位速度 0.1mm/min, せん断変位 5.0mm に達するまで行った。

Table1 JRC and γ using specimens

specimen	JRC	γ
J1	5.87	0.30
J2	5.99	0.27
J3	6.77	0.45
J4	6.90	0.43
J5	7.06	0.34
J6	7.18	0.45
J7	7.74	0.24
J8	7.75	0.38
J9	7.87	0.29
J10	8.02	0.26
J11	8.06	0.24
J12	8.12	0.53
J13	8.16	0.18
J14	8.52	0.18
J15	8.97	0.41
J16	9.06	0.36
J17	9.42	0.28
J18	9.48	0.23
J19	10.11	0.19
J20	10.35	0.20
J21	10.73	0.26
J22	11.34	0.20
J23	13.20	0.30
J24	13.20	0.53
J25	13.57	0.47
J26	15.98	0.40
J27	16.23	0.34

○JRC ≈ 8 ■ $\gamma \approx 0.3$

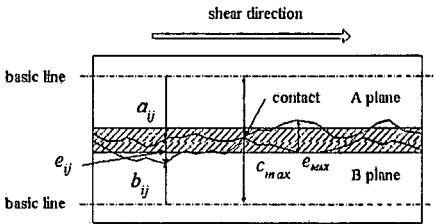


Fig. 2 Contact condition between A and B plane

Table2 Material properties of the specimens

Water cement ratio W/C	Uniaxial compressive strength σ_c [MPa]	Cohesion C [MPa]	Internal friction angle	Basic friction angle
30	49.94	7.06	58.8	29.8
40	40.20	6.34	56.2	32.3
50	26.36	5.61	55.3	34.8

3. 自然な不連続面の評価

3.1 粗さを表す指標 JRC

不連続面の粗さを定量的に評価する代表的な指標として、Barton の JRC¹⁾ がよく利用されている。そこで、本研究においても粗さを表す指標として JRC を採用した。なお、JRC の算出には 1mm ピッチのデータを用い、各せん断方向に対する Z_2 を求めることにより、Xianbin の式⁴⁾ から計算した。

3.2 空隙状況を表す指標 γ

Fig. 2 は、開口幅を算出するために、不連続面の空隙状況を二次元的に表したものである。不連続面の片面を A 面、もう一方の面を B 面とし、凹凸の基準線からの座標をそれぞれ a_{ij} , b_{ij} ($i=1,2,\dots,100$, $j=1,2,\dots,130$) とする。基準線は任意に設定が可能であり、開口幅には影響を与えない。 a_{ij} と b_{ij} とを加えたものを c_{ij} とし、 c_{ij} の最大値を c_{max} とする。 c_{max} は両面を合わせるときに、両不連続面が接触する点とみなせる。次に、不連続面の開口幅 e_{ij} における最も大きいものを e_{max} とし、不連続面の空隙部分が全て含まれる斜線部の体積を算出する。この値と不連続面の空隙部分の体積との比をとることによって、三次元的な不連続面間の空隙状況を表す指標 γ を算出した。ただし、 γ はせん断変位および拘束圧のない状態で求めるものとする。

$$\gamma = \frac{\sum (e_{ij} \times a)}{e_{max} \times A} \quad (1)$$

ここで a は計測点の単位面積、 e_{max} は開口幅(e_{ij})の最大値、 A は不連続面の断面積とする。Fig. 3 に不連続面の断面積 A と、計測点の単位面積 a についての図を示す。式(1)における $\sum e_{ij}$ は、開口幅の平均値 e_{ave} と不連続面の断面積 A により式(2)のように表すことができる。

$$\sum (e_{ij} \times a) = e_{ave} \times A \quad (2)$$

ここで e_{ave} は開口幅の平均値である。これより、 γ は式(3)のように、開口幅の平均値 e_{ave} と開口幅の最大値 e_{max} の比によって定義することが可能となった。

$$\gamma = \frac{e_{ave}}{e_{max}} \quad (3)$$

γ の特性を以下に示す。 γ が小さくなると不連続面の空隙部分が減少するため、一般的に、不連続面の接触部分が多くなるものと考えられる。ここで、 $\gamma=0$ は不連続面に空隙部分が全く存在しない状態、 $\gamma=1$ は不連続面が完全に分離していることを表している。通常、不連続面が完全に分離している状態にはなり得ないため、 γ の範囲は $0 \leq \gamma < 1$ である。

Table1 に、各供試体における不連続面の粗さを表す指標 JRC、開口部の空隙状況を表す指標 γ を示した。供試体番号が大きくなるに伴って JRC 値が大きくなるようにした。 γ は JRC が大きくなっても

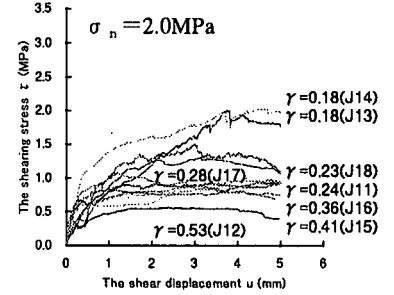
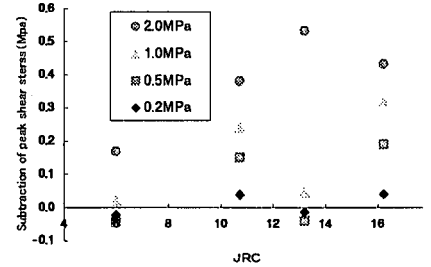
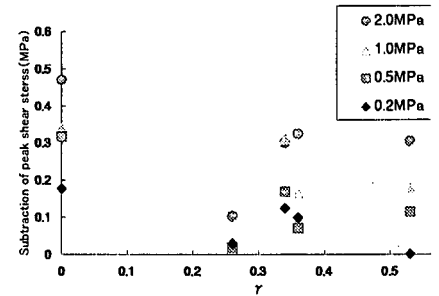


Fig. 3 Shear stress and displacement curves of specimens (JRC=9)



(a) Relationship on JRC ($\gamma \cong 0.3$)



(b) Relationship on γ (JRC $\cong 8$)

Fig. 4 Subtraction of peak shear stress
($\tau_p(N/C=30) - \tau_p(N/C=50)$)

増加せず、JRC と γ の間に相関関係はみられなかった。したがって、JRC と γ は独立したパラメータであり、 γ は不連続面に関する新たなパラメータになると考えられる。

4. 開口した不連続面のせん断挙動

4.1 せん断応力-せん断変位曲線

Fig. 3 は、 γ がせん断特性に及ぼす影響を検討するため、不連続面の粗さが同程度(JRC≒9)の、せん断応力-せん断変位曲線を示したものである。せん断応力は γ が小さくなるに伴って増加している。これは、不連続面間の空隙部分が小さくなるに伴って、噛み合わせ状況がよくなり、せん断応力が大きくなったと考えられる。このため、自然な不連続面を有する供試体において、せん断応力は γ に依存することを確認でき、不連続面の粗さが同程度であっても、空隙状況が異なることによりせん断応力も異なると分かった。

4.2 せん断応力に及ぼす材料強度の影響

Fig. 4 は、材料強度の違いによるせん断強度への影響を検討するため、W/C=30 供試体と W/C=50 供試体における最大せん断強度の差を取ったグラフである。つまり、このグラフにおける差が大きいほど、材料強度の高い W/C=30 供試体のせん断強度が大きかった事を意味する。これらのグラフより、拘束圧が大きいほど最大せん断強度に大きな差が現れることがわかる。また、低拘束圧領域では必ずしも材料強度の大きい供試体が高いせん断強度を発現するとは限らなかった。この結果は岸田・津野の報告⁹⁾と同様な結果であった。次に、Fig. 4(a) は γ の値を一定とすることにより γ の影響を排除し JRC 値の影響について比較したものである。JRC 値が大きくなるほどピーク強度の差が明確になることが確認できる。また、Fig. 4(b) では γ について比較したグラフである。JRC 値ほど明確ではないものの、 γ が小さくなる（噛み合わせが良い）ほど、材料強度の影響が現れるものと推測できる。これら、強度差が明確に発現するすべての場合において、アスペリティーの破壊がより頻繁に行われる状況を示したものであると考えられる。

5. 破壊包絡線

5.1 破壊包絡線の双曲線表示

本研究で行ったすべての実験結果より、破壊包絡線はモール・クーロン式に合致せず、非線形的な挙動を呈していることが確認できた。また、すべての試験結果において増加関数であることが認められたため、本研究では式(4)に示す双曲線に近似させることを試みた。

$$\tau_p = \frac{\sigma_n}{a + b \cdot \sigma_n} \tag{4}$$

ここで、 a と b は破壊包絡線の特性を決めるパラメータである。

パラメータ a および b の物性値としては次のように考えられる。式(4)を垂直応力 σ_n で微分し $\sigma_n = 0$ を代入すると式(5)のように $1/a$ が算出され、式(4)の垂直応力 σ_n を無限大にすると式(6)のように $1/b$ が算出される。このため、 a と b は Fig.7 に示すような特性を有し、 $1/a$ は破壊包絡線の初期接線係数、 $1/b$ は破壊包絡線の漸近線を示すパラメータである。

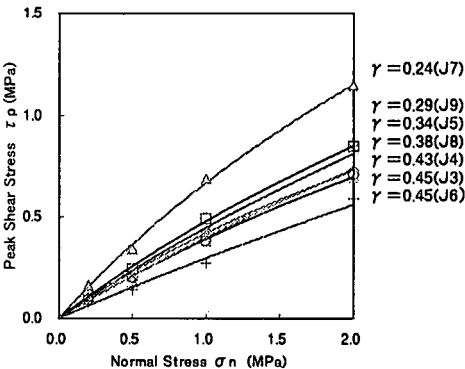


Fig.5 The failure envelopes of each specimen.

$$\left(\frac{d\tau_p}{d\sigma_n} \right)_{(\sigma_n=0)} = \frac{1}{a} \quad (5)$$

$$\lim_{\sigma_n \rightarrow \infty} \tau_p = \frac{1}{b} \quad (6)$$

5.2 破壊包絡線に及ぼす空隙状況の影響

Fig. 5 は、開口部の空隙状況 γ をパラメータとして、 $JRC \approx 9$ の破壊包絡線を示したものである。すなわち、不連続面の粗さ JRC が破壊包絡線に及ぼす影響を排除した。破壊包絡線は γ が小さくなるに伴って大きくなる傾向がみられ、 γ の差異が大きいほど破壊包絡線にも大きな差異が確認できた。これは、不連続面間の空隙部分が小さくなるに伴って、不連続面間の噛み合わせ状況がよくなり、せん断応力が大きくなったと考えられる。したがって、不連続面間の空隙状況が破壊包絡線に大きな影響を及ぼしており、不連続面の粗さが同程度であっても、空隙状況が異なることによりこれらの特性も異なることが分かった。

6. せん断強度式

6.1 パラメータ a の検討

パラメータ a は、式(5)より破壊包絡線の初期接線係数に関するものであった。初期接線係数とは、初期状態における垂直応力と最大せん断応力の増分の比で定義され、不連続面の初期強度を表す指標であり、 JRC 、 γ に関係するものと考えられる。

Fig. 6 は、 $W/C=40$ の供試体について JRC をパラメータとして γ と $1/a$ の関係を示したものである。図より、 $1/a$ は γ が増加するに伴って減少する傾向が見られる。これは、不連続面間の空隙部分が小さくなると初期強度は大きくなるからである。 γ と $1/a$ の間には一次的な関係を確認することができ、その傾きと、 $1/a$ 及び γ の関係を式(7)のように導いた。

$$\frac{1}{a} = -1.68\gamma + \left(\frac{1}{a} \right)_{\gamma=0} \quad (7)$$

ここで、切片 $(1/a)_{\gamma=0}$ は完全に密着した不連続面の初期接線係数であり、実験値または Barton¹⁾のせん断強度式を用いて算出することが可能である。

次に、材料強度の異なる供試体における (7) 式の適用について検討する。Fig. 7 は、 $JRC \approx 9$ における γ と a 値の関係である。中央に示す点線が、 $W/C=40$ についての結果であり、初期接線勾配の小さいほうから $W/C=50, 40, 30$ の順に結果が出ている。材料強度の小さいものほど、初期接線勾配が小さくなることは容易に推測できる。ここで、切片 $(1/a)_{\gamma=0}$ を実験及び Barton の提案式より材料強度の影響を考慮した結果として算出できる。つまり、切片 $(1/a)_{\gamma=0}$ を算出することにより、傾きとの関係から一次的に a 値を算出することが可能である。

以上のことから、パラメータ a を不連続面間の空隙状況を表す指標 γ の関数として表すことができた。

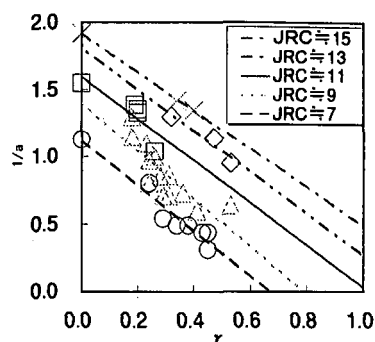


Fig. 6 The relationship between γ and ' a '. ($W/C=40$)

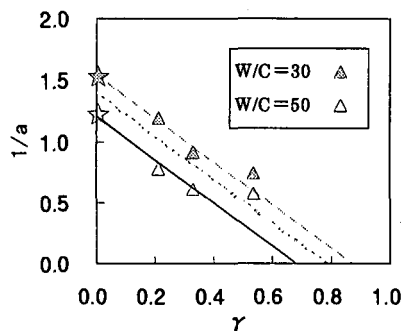


Fig. 7 The relationship between γ and ' a '. ($JRC \approx 9$)

6.2 パラメータ b の検討

Fig. 8 は JRC に $\sqrt{1-\gamma}$ を乗じた値と b 値の関係を示したグラフである。ここで、供試体がもつ粗さ(JRC)をその空隙状況(γ)の影響により減少させることを考えた。その結果、 $JRC\sqrt{1-\gamma}$ が b 値と最も良い相関関係を示す事が確認された。また、水セメント比の違いによる傾きの相違が、材料強度を示す指標であることが推測できる。ここで、せん断過程におけるアスペリティーの破壊は、微少なインタクト部分のせん断破壊であると考えられる。そこで、この傾きを粘着力 c により表現することを考え、傾きを $0.064 \times c$ と表す事とした。以上より、 b 値と、JRC 及び γ による表面形状特性、材料強度の関係が(8)式のように定義できる。

$$\frac{1}{b} = 0.064 \times c \times JRC \sqrt{1-\gamma} \quad (8)$$

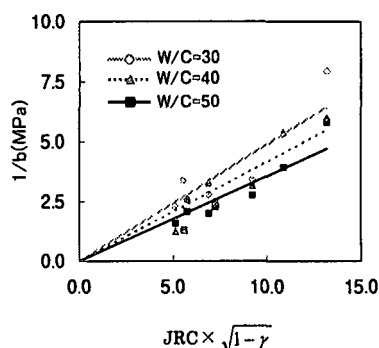


Fig. 8 The relationship between γ and ' b '.
($JRC \approx 9$)

6.3 本研究で提案するせん断強度式

我々が提案するせん断強度式はすべての供試体において相関係数 0.8 以上の非常に良い相関を示した。このことから、空隙状況を考慮することにより自然な岩盤不連続面に対して、精度良く強度を推定可能な式が提案できたと考える。

7. まとめ

本研究は、開口した自然な不連続面をセメントにより複製し、一面せん断試験を実施した。さらに、開口部の空隙状況を考慮するために、不連続面の表面形状計測を行い、そのデータを用いて空隙状況を定量的に表す指標 γ を提案した。自然な不連続面のせん断強度式は、空隙状況を表す指標 γ と粗さを表す指標 JRC 及び材料強度である粘着力 C の関数として表現することが可能となった。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 開口した自然な不連続面間の空隙状況を定量的に表す指標 γ を提案し、この指標 γ がせん断強度特性に影響するパラメータであることを確認した。
- (2) 不連続面のせん断強度特性は、不連続面の粗さ JRC が同程度であっても、空隙状況を表す指標 γ の違いにより、大きく変化することが確認された。
- (3) せん断強度に及ぼす材料強さの影響は、拘束圧と JRC が大きいほど、また、 γ が小さく噛み合わせが良いほど顕著に表れることがわかった。
- (4) 開口した自然な岩盤不連続面のせん断強度式は、空隙状況を表す指標 γ と粗さを表す指標 JRC の関数として表現することが可能となった。

参考文献

- 1) Barton, N. R. : A model study of rock joint deformation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.9, pp.579-602, 1972.
- 2) Zhao, J. : Joint Surface Matching and Shear Strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.34, No.2, pp.173-185, 1997.
- 3) H. Kusumi, T. Sugino, Y.H. LI, Shear Behavior of Rock Joint Considering both of Joint Aperture and Roughness, 3rd Korea-Japan Joint symposium on Rock Engineering, pp.169-176, 2002
- 4) Xianbin, Y. and Vayssade, B. : Joint profiles and their roughness parameters, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.28, pp.333-336, 1991.
- 5) 岸田潔, 津野究 : 摩擦とラフネスを考慮した岩盤不連続面の一面せん断挙動のモデル化, 土木学会論文集, No.680/III-55, pp.245-246, 2001.