

不規則な表面形状を有する岩盤不連続面のせん断強度に関する研究

STUDY ON SHEAR STRENGTH FOR ROCK JOINTS WITH IRREGULAR SURFACE PROFILE

楠見晴重*・寺岡克己**・鈴木哲也***・西田一彦****

Harushige KUSUMI, Katsumi TERAOKA, Tetsuya SUZUKI and Kazuhiko NISHIDA

We carried out the experimental study in order to investigate the influence of the surface roughness of rock joints on the shear strength of those. We made some artificial plaster specimens which have three different types of surface profiles, i.e. regular triangular profile, irregular triangular profile and JRC profiles. All of these specimens are applied on the direct shear test. On the other hand, before direct shear test, in order to investigate the method of quantitative estimation of irregular joint profile, the measurement and the analysis of joint profile for each specimen using laser profilometer have conducted.

As the results, we proposed the shear strength criteria which is expressed by the power function, and it is recognized that this criteria is applied to various rock joints..

Key Words : rock joint, shear strength, JRC, surface roughness, failure criteria, direct shear test

1. はじめに

岩盤の工学的性質は、岩盤を構成する岩石基質部の材料特性と不連続面の性質とに大別することができる。実際の岩盤の破壊は、岩石基質部の破壊によることはまれであり、主に不連続面に沿ったすべり破壊によって生じている。したがって、岩盤の力学挙動を把握するためには不連続面の力学特性、特にせん断強度、変形特性を解明することが重要な課題であると考えられる。また不連続面の力学特性は、開口幅、かみ合わせ状態、充填物の性状、表面粗さ、風化の程度などに支配される¹⁾。

本研究は、不連続面の表面粗さがせん断強度に与える影響に着目し、これらの関係を明らかにするために、数種類の不連続面形状を有する石膏供試体を用いて実験的な検討を行ったものである。まず規則的な歯型状不連続面に関する一面せん断試験結果から、表面形状を考慮した比較的簡便なせん断強度式を提案し、次にこの提案式の不規則な歯型状不連続面への適用性について検討した。さらに Barton²⁾の JRC 標準断面図のうち3種類の断面形状を有する供試体に対して一面せん断試験を実施し、不規則形状の不連続面に対する提案式の有効性について検討した。

2. 実験に用いた供試体

本研究では、作製方法が簡単で均質な材料を多く作り出せるという利点から、石膏を用いて供試体を作製した。供試体材料の配合は、石膏、標準砂、水を重量比 1:1:0.6 で練り混ぜ、型枠に流し込んだ後 2 週間気乾

* 正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 博(工)(株)サンヨー 地質調査室

*** 正会員 工修 内外エンジニアリング(株)

**** 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

表-1 石膏供試体の諸特性

単位体積重量	γ (gf/cm ³)	1.59
一軸圧縮強度	σ_c (kgf/cm ²)	213.9
圧裂引張強度	σ_t (kgf/cm ²)	25.0

表-2 各供試体の長さ L

供試体名	L(mm)
RP15	100.0
RP20	73.62
RP25	57.46
IP15-20-15	91.22
IP15-20-20	82.42
IP15-25-15	85.83
IP15-25-25	71.65
IP20-25-20	68.23
IP20-25-25	62.85
IP15-25-20	77.63

養生したものを用いた。表-1 は、実験に用いた石膏供試体の諸特性を示したものである。図-1 は、三角形の歯型状不連続面を有する供試体の断面図を示したものである。図より、供試体は左から順に傾斜角 i_a 、 i_b 、 i_c のアスペリティーを有しており、アスペリティー角度は 15° 、 20° 、 25° の3種類、アスペリティー個数は3個である。以下ここではこれらの供試体を不規則歯型供試体とし、供試体名を $IPi_a-i_b-i_c$ と表す。また不規則歯型供試体の中で $i_a=i_b=i_c=i$ の供試体を規則歯型供試体とし、 RPi で表す。各供試体のアスペリティー高さ h は 4.47mm で一定である。供試体は不連続面によって2つに分離しており、重ね合わせた状態で寸法は、幅 50mm 、高さ 50mm の直方体であり、長さ L は供試体によって異なる。表-2 は、各供試体の長さ L を示したものである。図-2、は Barton によって提案された JRC 標準断面図を示している。この図に示す10種類の断面形状のうち、JRC 値 $2\sim4$ 、 $10\sim12$ 、 $18\sim20$ の3種類の粗さをせん断方向に有し、かつせん断方向と直交方向には凹凸のない供試体を歯型供試体と同様の材料を用いて作製した。以下ここではこれらを JRC 断面供試体と呼ぶこととし、供試体名はそれぞれ $J2-4$ 、 $J10-12$ 、 $J18-20$ とする。供試体寸法は、2つに分離したものを重ね合わせた状態で幅 50mm 、高さ 50mm 、長さ 100mm の直方体である。また、これら以外に不連続面を有しない Intact 供試体、平滑な不連続面を有する Saw-Cut 供試体についても上記の供試体と同様の材料を用いて作製し実験を行った。

3. 実験装置および方法

図-3 は、本研究で用いた直接一面せん断試験機を示したものである。この試験機は、高圧三軸圧縮試験装置のセル取り付け部分に直接一面せん断試験機ユニットを装着したものであり、垂直荷重およびせん断荷重の載荷方向はそれぞれ水平方向、鉛直方向である。せん断荷重は高圧三軸圧縮試験装置の加圧盤の上昇により作用させ、せん断箱が上下にずれることによりせん断箱内部の供試体を直接せん断する。垂直荷重は、油圧により水平力付加ジャッキを介して作用させる。せん断荷重、せん断変位、垂直荷重、垂直変位の各デー

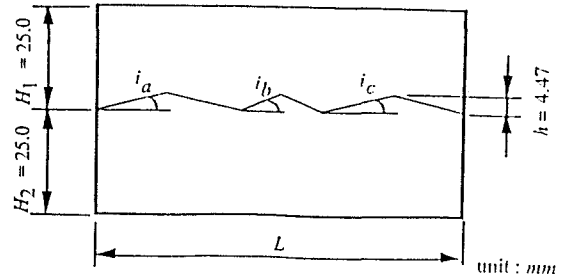


図-1 実験に用いた歯型供試体

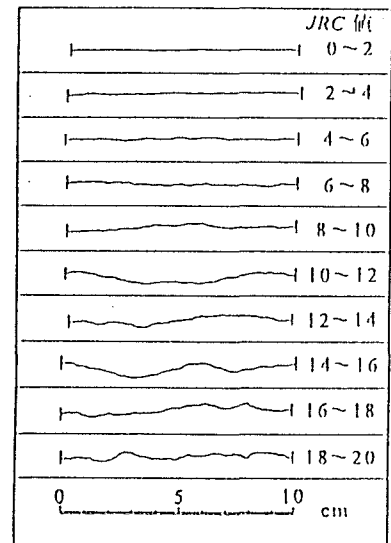


図-2 JRC 標準断面図

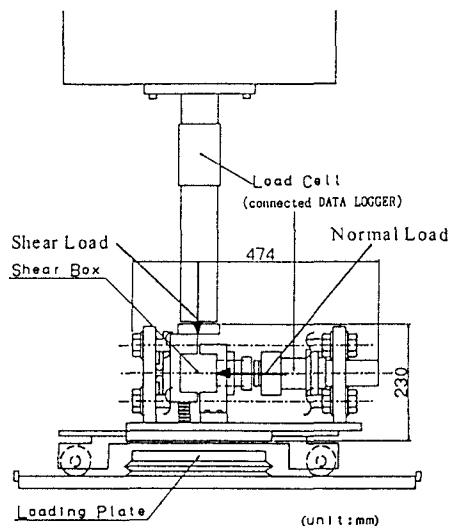


図-3 直接一面せん断試験機

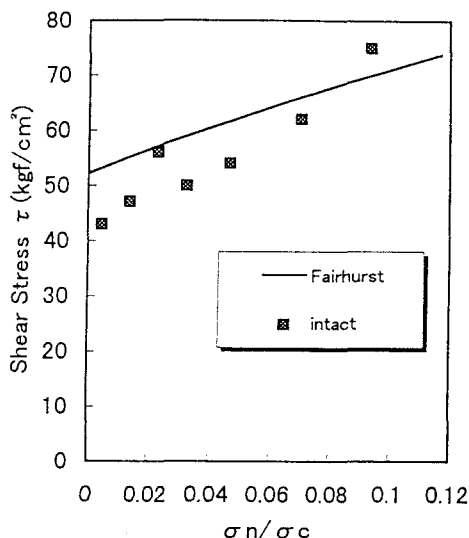


図-4 Intact 供試体の最大せん断強度

タは、データロガーを介してせん断変位 0.01mm ごとに計測され、GP-IB インターフェイスボード(Mac Adios 488S)によってパーソナルコンピュータ(Macintosh Powerbook 180c)に取り込まれる。試験は定圧一面せん断試験とし、作用させた垂直応力は、歯型供試体では 1.0、3.0、5.0、7.0、10.0、15.0、20.0 kgf/cm² の 7 種類、また JRC 断面供試体では、1.0、5.0、10.0、15.0、20.0 kgf/cm² の 5 種類とした。せん断荷重の載荷方式は変位制御方式を採用し、変位速度は 0.10mm/min とした。また本研究では、JRC 断面供試体の不連続面形状を定量的に評価するため、せん断試験に供する前に JRC 断面供試体の不連続面形状の計測を行った。計測には非接触型のレーザー変位計を用い、供試体のせん断方向に 1 本の測線を設け、1mm 間隔で高さデータの測定を行った。

4. 不連続面を有する供試体のせん断強度の定式化

4・1 規則歯型供試体のせん断強度式の評価

岩盤不連続面のせん断特性に関して、これまで様々な研究が行われており、その中でせん断強度の定式化を試みているものも数多い(例えば³⁾)。しかし、従来提案されているせん断強度式については、実際の不連続面への適用に際して問題点も多い。そこで本研究では、不連続面の表面粗さを考慮に入れ、簡単にパラメータを決定できる新たなせん断強度式を提案することを試みた。図-4 は、Intact 供試体の最大せん断強度と垂直応力の関係を示したものである。図中の実線は、式(1)に示す Fairhurst⁴⁾の式によって求められた岩石基質部の最大せん断強度の強度曲線である。なお、以下の式中では圧縮応力を(+)、引張応力を(-)として表すものとする。

$$\tau_p = \sigma_c \frac{m-1}{n} \left(1 + n \frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$n = \sigma_c / (-\sigma_t) \quad m = (n+1)^{1/2}$$

ここで、 σ_c ：一軸圧縮強度 (kgf/cm²)

σ_t ：引張強度 (kgf/cm²)

τ_p ：最大せん断強度 (kgf/cm²)

σ_n ：垂直応力 (kgf/cm²)

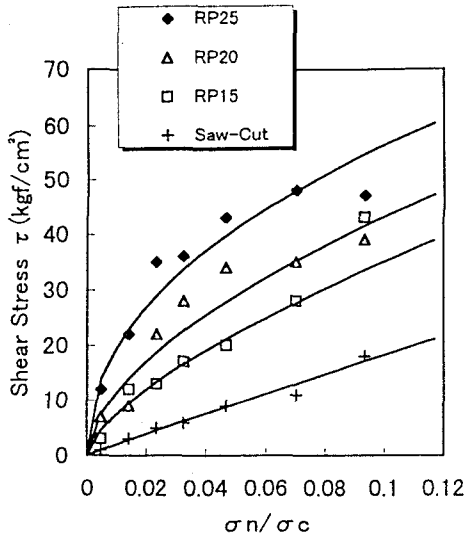


図-5 規則歯型供試体の最大せん断強度

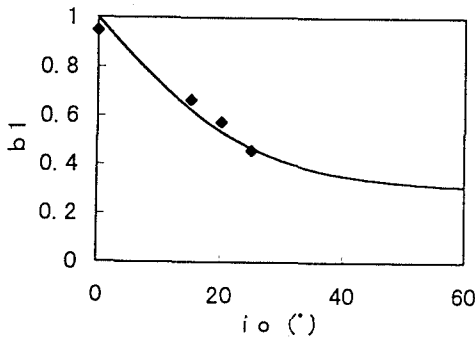


図-6 規則歯型供試体の係数 b_1

図-5 は、規則歯型供試体および Saw-Cut 供試体に関して図-4 と同様に示したものである。不連続面を有する供試体の場合、最大せん断強度と垂直応力の関係は直線的な増加傾向はみられず、非線形的となる。このような関係を表すために、式(2)に示すべき乗関数が提案されている^{5),6)}。

$$\tau_p = a \cdot \sigma_n^b \quad (2)$$

ここで、 a, b : 係数

しかし式(2)に関しては、係数 a, b の物理的な意味が不明確であり、また不連続面を構成する岩石の物性値も考慮されていない。そこで本研究では式(2)を拡張した式(3)によってこれらの関係を表現しようと試みた。

$$\tau_p = a_1 \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right)^{b_1} \quad (3)$$

ここで、 a_1, b_1 : 係数

式(3)に含まれる係数 a_1, b_1 について以下のような検討を行った。係数 a_1 は、 $\sigma_n = \sigma_c$ における τ_p を表している。したがって $\sigma_n = \sigma_c$ において不連続面の影響がなくなり、不連続面と岩石基質部のせん断強度が一致すると考えると、 a_1 は $\sigma_n = \sigma_c$ における岩石基質部のせん断強度によって表すことができる。図-4 より、Fairhurst のせん断強度曲線(式(1))と Intact 供試体のせん断強度がほぼ一致した傾向を示していることから、ここでは a_1 を式(1)において $\sigma_n = \sigma_c$ として得られる式(4)によって表す。

$$a_1 = \sigma_c \left\{ \left(\frac{\sigma_c}{-\sigma_t} + 1 \right)^{1/2} - 1 \right\} + \sigma_c \quad (4)$$

図-6 は、式(4)を用いて求めた a_1 を式(3)に代入して得られた各供試体の b_1 の値を示したものである。図中の破線は、Intact 供試体に関して求めた b_1 の値を示している。本来 Intact 供試体に関しては粘着力の要素が存在するため式(3)では表現できないが、ここでは規則歯型供試体との比較のため、便宜的に b_1 値を求めた。この図より、 b_1 の値はアスペリティー角度 i の増加に伴って減少する傾向を示している。また不連続面を有する供試体のせん断強度は、Intact 供試体のせん断強度を越えることはないと考えられるため、規則歯型供試体の b_1 は Intact 供試体の b_1 の値に漸近するものと考えられる。そこで b_1 は式(5)によって表される。

$$b_1 = 1 - 0.7 \cdot \tanh(0.04 \cdot i) \quad (5)$$

図-5 の実線は、式(3)、(4)、(5)を用いて計算された各供試体のせん断強度曲線である。図より、供試体によって多少のばらつきは見られるものの、本研究で提案したせん断強度式によって各供試体のせん断強度特性

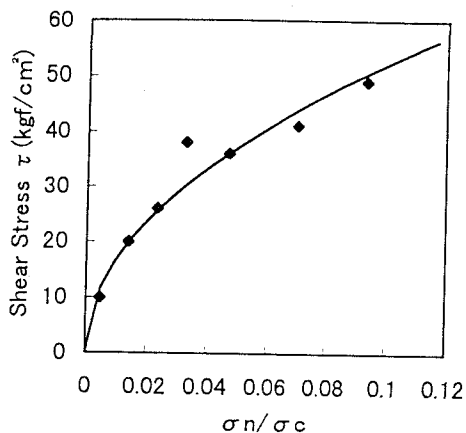


図-7 IP20-25-25 供試体の最大せん断強度

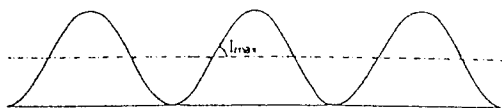


図-8 サインカーブ状断面

ている。したがって不規則歯型供試体の最大せん断強度に関して、初期ダイレクション角度を用いて表面形状を考慮したべき乗型せん断強度式を用いて精度よく表現できることが認められた。

4・3 JRC断面供試体のせん断強度式の評価

不規則歯型供試体と同様 JRC 断面供試体に関しても、最大せん断強度を評価するためには不連続面形状の定量化が必要である。著者らは、不規則形状の不連続面の定量化について、以下に述べる手法を提案している⁸⁾。

著者らは不連続面のせん断特性に支配的な影響を与えているのは、不連続面のうねりに相当する一次の粗さであると考えた。これは表面の微少な粗さを表す二次の粗さは、不連続面表面の摩擦角としてすでに考慮されていると考えられるためである。そこで実際の岩盤不連続部のようにある程度の勾配の変化を有し、規則性のある断面形状として図-8に示すサインカーブ状の断面を提案し、このサイン曲線の最大傾斜部分の傾斜角度によって一次の粗さを表すことを試みた。その結果 $i_{\max}/SD_i$ がほぼ $\sqrt{2}$ 程度となることを確認し、Dight and Chiu が提案する式(6)から、サイン曲線の最大傾斜角 $i_{\max}$ を表す式(7)を導いた。

$$i_{\max} = i_{\text{ave}} + \sqrt{2} \cdot SD_i \quad (7)$$

さらに数種類の JRC 粗さ断面を有する石膏供試体を用いて、不連続面のアスペリティー自体のせん断破壊が生じないような非常に低い垂直応力下で一面せん断試験を行った結果、式(7)を用いて計算される $i_{\max}$ によってせん断初期のダイレクション角度が表現できることを確認した。そこで式(7)における $i_{\max}$ を初期ダイレクション角度 i_0 に置き換え、式(8)を提案した。

はほぼ正確に表現できているものと思われる。

4・2 不規則歯型供試体のせん断強度の評価

不規則歯型供試体の最大せん断強度を評価するためには、まず規則歯型供試体におけるアスペリティー角度に変わり得る不連続面形状の定量化が必要になる。本研究では Dight and Chiu⁷⁾ によって提案された式(6)を用いて、不連続面の粗さを初期ダイレクション角度 i_0 として評価することとする。

$$i_0 = i_{\text{ave}} + k_i \cdot SD_i \quad (6)$$

なお式(6)において、不連続面形状の計測結果から得られる隣接する計測値間の傾斜角度を i とし、断面ごとに計算される i の平均値を i_{ave} 、標準偏差を SD_i と表している。また、 k_i は係数であり、三角形の歯型状断面では 1 となる。不規則歯型供試体では $i_{\text{ave}} = 0^\circ$ であり、 $k_i = 1$ となるため $i_0 = SD_i$ となる。図-7は、IP20-25-25 供試体の最大せん断強度と垂直応力の関係を示したものである。図中の実線は、式(6)を用いて求めた IP20-25-25 供試体の初期ダイレクション角度 $i_0 = 23.2^\circ$ 、および式(3)、(4)、(5)を用いて得られた最大せん断強度の計算曲線を示している。この図より、実験値と計算曲線は非常によく一致し

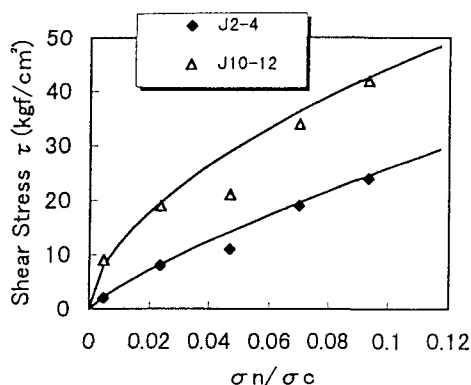


図-9 JRC 断面供試体の最大せん断強度

本研究で提案した不連続面の表面形状を考慮したべき乗型せん断強度式の有効性が確認された。

5. まとめ

本研究では、規則的な三角形歯型不連続面を有する供試体に対する一面せん断試験結果より、表面形状を考慮したべき乗型せん断強度式の提案を行った。さらに、異なるアスペリティー角度を有する不規則歯型供試体、ならびに実際の岩盤不連続面のような不規則形状を有する JRC 断面供試体に対する提案式の適用性についても検討を行った。以下にその結果を述べる。

- 1) 不規則歯型供試体の最大せん断強度に関して、今回提案した表面形状を考慮したべき乗型のせん断強度式を用いて精度よく表現できることが明らかとなった。
- 2) JRC 断面供試体の最大せん断強度についても、表面形状を初期ダイレーション角度で評価することにより、べき乗型せん断強度式によってほぼ正確に表現できることが判明した。したがって実際の岩盤不連続面のように不規則な形状を有する不連続面に対しても、本研究において提案したべき型せん断強度式が有効であることが確認された。

今後は、自然な岩盤不連続面から採取した不連続面に対して、今回と同様の検討を行い、提案式の有効性を確認する必要があると考えられる。

6. 参考文献

- 1) 川本 暁万：岩盤力学、朝倉書店、1975.
- 2) Barton, N.R. and Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol. 10, pp. 154, 1977.
- 3) Ladanyi, B. and Archambault, G. : Simulation of shear behavior of a jointed rock mass, Proc. 11th Symp. Rock Mech., AIME, pp. 105-125, 1970.
- 4) Fairhurst, C. : On the validity of Brazilian test for brittle materials, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., Vol. 1, pp. 535-546, 1964.
- 5) Hobbs, D.W. : The behavior of broken rock under triaxial compression, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., Vol. 7, pp. 125-148, 1970.
- 6) Murrell, S.A.F. : The effect of triaxial stress systems on the strength of rocks at atmospheric temperatures, Geophys. J.,

$$i_0 = i_{ave} + \sqrt{2} \cdot SD_i \quad (8)$$

そこで本研究では、式(8)を用いて JRC 断面供試体の表面形状の定量化を行うものとする。図-9 は、J2-4 供試体および J10-12 供試体の最大せん断強度と垂直応力の関係を示したものである。図中の実線は、式(3)、(4)、(5)、(8)を用いて求めた各供試体の最大せん断強度の計算曲線を示している。なお式(8)を用いて求めた J2-4 供試体および J10-12 供試体の初期ダイレーション角度 i_0 は、各々 8.3° 、 17.7° である。図より、実験値と計算曲線は非常によく一致しており、計算曲線が各供試体のせん断強度特性をほぼ正確に表現していることが認められた。したがって不規則形状の不連続面を有する JRC 断面供試体に関して、式(8)を用いた不連続面形状の定量化手法、ならびに

Vol.10, pp.231-281, 1965.

- 7) Dight, P.M. and Chiu, H.K.: Prediction of shear behaviour of joints using profiles, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol.18, pp.369-386, 1981.
- 8) 楠見晴重, 寺岡克己, 谷口敬一郎, 西田一彦: 不連続面の粗さの評価法とせん断強度特性との関係について, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.491-496, 1994.