

岩盤不連続面の噛み合わせの定量的評価とそのせん断強度式への適用性 Estimation Method of Matching with Rock Joint and its Application for Shear Equation

楠見 晴重*・酒井 崇**・西田 一彦***・中村 均史****

Harushige KUSUMI, Takashi SAKAI, Kazuhiko NISHIDA and Hitoshi NAKAMURA

The factors of discontinuity plane which affect the shear behavior of rock joint are the strength of intact rock, roughness, matching etc. In these factors, There is many researches in related with the roughness. However, although the matching of rock joint is important factor, the many researches with this factor have not been performed.

In this paper, the effects of which the shear behavior of rock joint is received by the magnitude of matching are discussed. Especially, the numerical index representing the degree of the matching with rock joints is proposed, and furthermore, it is tried that this index is applied on the shear strength equation proposed by authors.

Key words : rock joint, shear strength, matching, numerical index

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の強度、不連続面の粗さ、噛み合わせ等が挙げられる。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、Patton, Ladanyi and Archambault, Barton をはじめ数多くの研究者^{1)~5)}によって行われている。これらは、主に不連続面の粗さについて考察しているものが多く、とくに Barton の JRC は、有名であるが、不連続面間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。Zhao⁶⁾ 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、岩盤不連続面の噛み合わせが、せん断強度に及ぼす影響に関して検討するために、単一不連続面を有する岩石供試体を用いて、レーザー変位計によって不連続面の形状計測を行い、不連続面の噛み合わせ状況を数値化することを提案した。そして、その係数のあるせん断強度式に適用できる可能性について、主として実験的検討を行ったものである。

2. 修正した Ladanyi らのせん断強度式

Ladanyi and Archambault²⁾は、規則的な三角形の歯型状不連続面に対して、垂直応力の相違によるダイレイション率の変化、および岩石実質部分がせん断される割合の変化を考慮に入れた次のようなせん断強度式を提案している。

$$\tau = \frac{\sigma_n(1 - a_s)(\dot{\nu}_p + \tan \phi_u) + a_s \cdot S_R}{1 - (1 - a_s) \cdot \dot{\nu}_p \cdot \tan \phi_u} \quad (1)$$

ここで、 S_R : 岩石実質部分のせん断強度 ϕ_u : 不連続部の接触面における摩擦角

a_s : 岩石実質部分がせん断される割合 $\dot{\nu}_p$: ピーク強度点におけるダイレイション率

楠見ら⁷⁾は、このせん断強度式の適用範囲を不規則形状の不連続面にまで適用するために、不規則な不連続面形状を有する石膏供試体の表面形状を計測することによって、不連続面の一次の粗さの程度を数値化した不連続面の粗さ角 i_0 を提案している。さらに、 i_0 をLadanyiらのせん断強度式に組み込み、せん断パラメータ a_s 、 $\dot{\nu}_p$ を表す実験式を修正することによって、その適用範囲を不規則形状の不連続面まで拡張している。この i_0 、 $\dot{\nu}_p$ 、

* 正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科

** 学生員 関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*** 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

**** 正会員 (株)関西土木技術センター

a_s は、以下のような式で表される。

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

ここで、 i_0 : 不連続面の粗さ角

i_{ave} : 不連続面横断面において、隣接する座標データ間の角度の平均値

$$\dot{\nu}_p = \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma_n}{b \cdot \sigma_T} \right)^a \right\} \cdot \tan i_0 \quad (3)$$

ここで、 σ_T : 岩石実質部分の遷移応力^{8), 9)}であり、
一軸圧縮強度で近似される

$$a = 0.45 - 5.1 \times 10^{-3} \cdot i_0$$

$$b = 0.18$$

$$a_s = \frac{(\sigma_n / \sigma_T)}{c + d \cdot (\sigma_n / \sigma_T)} \quad (4)$$

ここで、 σ_T : 岩石実質部分の遷移応力^{8), 9)}であり、
一軸圧縮強度で近似される

$$c = 0.35 - 1.07 \times 10^{-2} \cdot i_0$$

$$d = 0.8$$

このように、Ladanyi and Archambault のせん断強度式を修正した式をこれ以降、「修正式」と呼ぶことにする。

3. 供試体および不連続面形状計測方法

本研究には、低垂直応力下（垂直応力 2.0MPa 以下）でアスベリティの破壊が生じにくい硬岩の部類に属する稲田花崗岩を用いた。この岩石の単位体積重量は、25.6MPa、一軸圧縮強度および引張強度は、それぞれ 187.8MPa、4.76MPa である。供試体は、直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱状に整形し、割裂によって人工的に単一不連続面を軸方向に作成したものをを用いた。使用した供試体の本数は、稲田花崗岩（G1～G4）4 本である。不連続面形状計測システムは、図-1 に示すような X-Y 可動式ステージ（移動量±60 mm、移動精度±0.015 mm）、レーザー変位計（基準距離 40 mm、計測範囲±10 mm）およびデータリレー機から構成される。計測は、供試体をステージ上にセットし、パソコンによる自動制御で X-Y 可動式ステージを移動させることによって、レーザー変位計からアナログ出力されたデータをパソコンに取り込んでいる。計測回数は、実験前、各実験後、すなわち 1 つの供試体につき 5 回で合計 20 回行った。計測間隔は 1.0 mm で、1 つの不連続面上の計測点数は 4851 点で、直径方向（j 方向）99 本、せん断方向（i 方向）49 本である。図-2 は、G2 の A 面を形状計測して得られた断面の鳥瞰図である。

4. 実験方法

本研究では、自然な岩石を使用しているため、完全に同一な不連続面形状の供試体を多数作成することは不可能である。このことから、供試体の不連続面形状をできるだけ変化させずに、1 つの供試体から破壊包絡線を求めるため、垂直応力の低い方から順に直接一面せん断試験を行った。直接一面せん断試験機⁷⁾は、垂直応力一定に保ち、せん断変位 5 mm までせん断特性を求めることができるものをを用いている。垂直応力は、0.4、1.0、1.4、2.0MPa の 4 段階とした。せん断試験は、垂直応力一定、ひずみ制御方式でせん断変位速度 0.1 mm/min. でせん

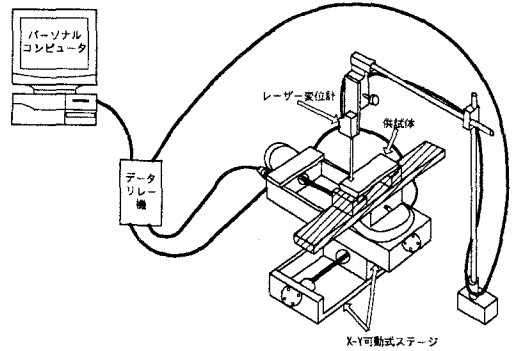


図-1 不連続面形状計測システム

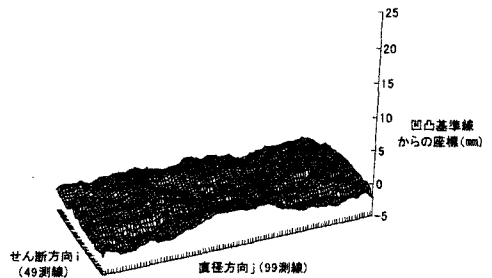


図-2 不連続面形状計測による断面（G2 供試体 A 面）

表-1 供試体不連続面の特徴

No.	JRC	i_o (°)	噛合わせ係数 k
G1	12.23	15.93	0.32
G2	10.12	14.57	0.61
G3	11.07	15.12	0.64
G4	10.30	14.96	0.72

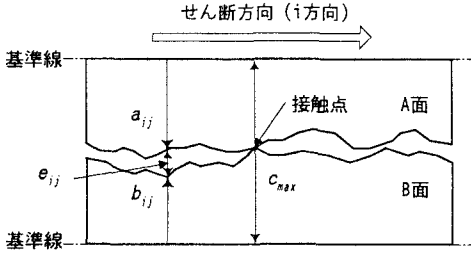


図-3 A面とB面の接触状況(横断面図)

断変位が 5.0 mmに達するまで行った。不連続面の形状計測は、せん断試験前および各せん断試験後に行った。せん断試験は、1つの供試体を低い垂直応力から順に実施して、各供試体異なった垂直応力下で4回、合計 16 回行った。

5. 不連続面の噛合わせの評価手法

1つの供試体不連続面は完全に分離しているために、それぞれについて不連続面形状計測システムを用い、形状計測を行った。このデータを基にして、各供試体の開口幅を求めて、この開口幅から噛み合わせ状況の評価を試みた。その手法を以下に示す。

図-3 のように、供試体不連続面の片面を 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} ($i=1\sim 99$, $j=1\sim 49$) とする。式(5)に示すように a_{ij} と b_{ij} 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、両不連続面が最初に接触する点とみなせる。

$$c_{ij} = a_{ij} + b_{ij} \quad (5)$$

これより、不連続面の各点における開口幅 e_{ij} は、式(6)のように表される。

$$e_{ij} = c_{max} - c_{ij} \quad (6)$$

いま、供試体のせん断方向に 1 mm間隔で長さ 99 mmの測線が 49 本存在する。この各測線における開口幅 e_{ij} の平均値を e_{sj} とし、これらのうち最も小さい平均開口幅を $e_{s,min}$ とする。Zhao⁽⁹⁾ は、粗い不連続面において、開口幅が小さくなるほど、噛み合わせ状態はよくなることを示している。したがって、この $e_{s,min}$ を与える測線上は、

両不連続面が最も噛み合わせ状態がよい測線であると考えられる。また、各測線の e_{sj} の平均値を e_{ave} とすると、 e_{ave} と $e_{s,min}$ が同じ値であれば、完全に噛み合っており、両者が大きくかけ離れた値であれば噛み合わせ状態は低いものと考えられる。したがって、式(7)に示すように、 $e_{s,min}$ と e_{ave} との比を求めることによってこの供試体不連続面の噛み合わせ状況を表すものと考え、噛み合わせ係数 k ($0 < k \leq 1.0$) と呼ぶことにする。

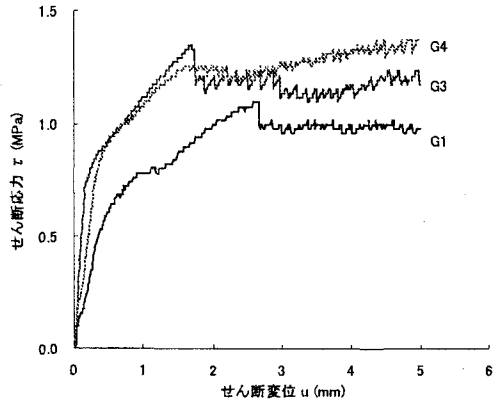


図-4 せん断応力-せん断変位曲線 (G1, G3, G4 供試体, $\sigma_n=1.0\text{MPa}$)

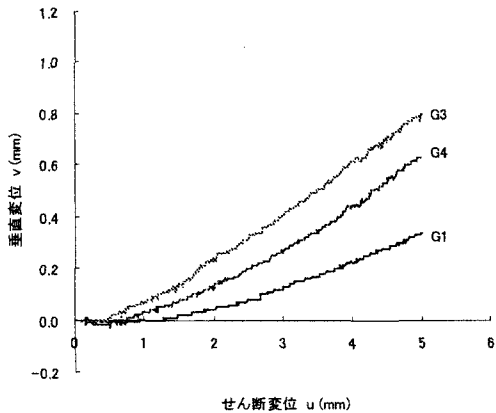


図-5 垂直変位-せん断変位曲線 (G1, G3, G4 供試体, $\sigma_n=1.0\text{MPa}$)

$$k = \frac{e_{s \min}}{e_{ave}} \quad (7)$$

ただし、この噛合わせ係数 k は供試体の端面が合っている状態（せん断方向の変位がない状態）で求めるものとする。

6. 噛合わせが異なった不連続面のせん断挙動

まず、表-1 に各供試体不連続面の JRC 値、不連続面の粗さ角 i_0 、噛合わせ係数 k を示す。これより、G1, G3, G4 供試体は、JRC, i_0 はほぼ同じ値となっているのに対し、 k は G1 供試体が他と比べ、かなり小さな値を示している。図-4 は、G1, G3, G4 供試体の垂直応力 1.0MPa におけるせん断応力-せん断変位曲線である。せん断試験を行う前と後での i_0 および JRC の変化はほとんどないことから、せん断試験による不連続面形状の変化、削れはほとんど見られない。各供試体の不連続面の粗さ角 i_0 および JRC はほぼ同じ値であることから最大せん断強度の違いは噛合わせの影響を受けていると考えられる。図-5 は、図-4 のときの各供試体における垂直変位-せん断変位曲線である。最大せん断強度付近のダイレーション角度は、G3 供試体、G4 供試体がそれぞれ 7.19° 、 6.86° と同程度であるのに対して、G1 供試体は 2.43° と大きく異なっている。この図においても噛合わせ係数 k の違いによりダイレーションに顕著な違いが認められる。図-4、図-5 の実験結果から、不連続面の粗さが同程度である岩石供試体のせん断挙動は、噛合わせ状態の違いにより異なり、噛合わせ状態が高い不連続面ほど最大せん断強度は大きくなることが認められた。

一般に、不連続面の凹凸自体のせん断が生じないような非常に低い垂直応力下のダイレーションは、不連続面上の凹凸間の滑り上がりによって生じるものであり、凹凸の粗さおよびその傾斜角度を直接反映する値であると考えられる。G1, G3 供試体を比較すると、G1 供試体の方が G3 供試体に比べ、各垂直応力においてダイレーション角度が小さい。表-1 より両供試体の不連続面の粗さ角 i_0 は、それぞれ 15.93° 、 15.12° と同程度であるが、噛合わせ係数 k は、それぞれ 0.32, 0.64 となっている。この噛合わせ係数 k の違いは、最大せん断強度付近のダイレーション特性に大きな影響を与えることが予測される。つまり、噛合わせの悪い供試体では、不連続面の粗さ角 i_0 に比べ、初期ダイレーション角度は小さくなると考えられる。

7. 破壊包絡線

前述した修正式は、石膏供試体を使用した実験によって、 ψ_p 、 α_s というせん断パラメータを修正したものであるが⁷⁾、完全に噛み合った石膏供試体を使用しているため、不連続面の噛合わせの要素を考慮していない。そこで、本研究では、修正式の不連続面の粗さ角 i_0 に噛合わせ係数 k を乗じることによって噛合わせの要素を

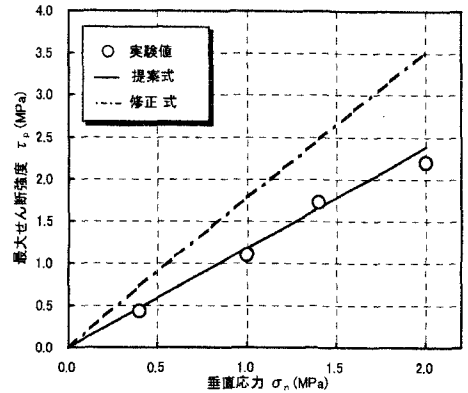


図-6 G1 供試体の計算曲線と実験値の比較

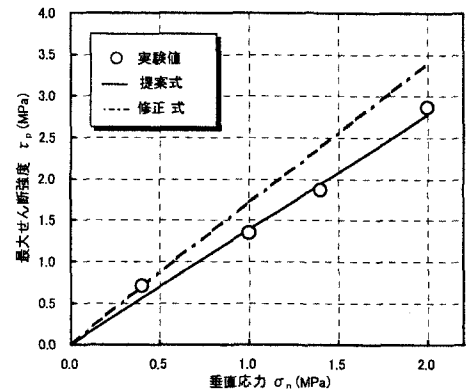


図-7 G3 供試体の計算曲線と実験値の比較

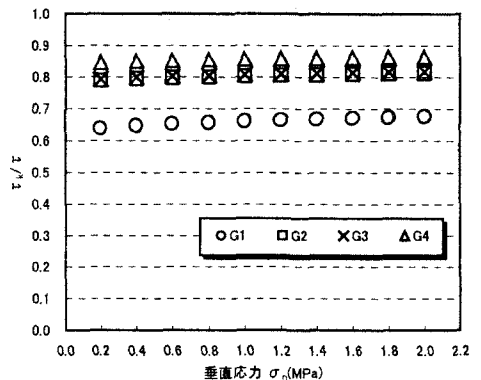


図-8 τ/τ_p と垂直応力の関係 (G1~G4 供試体)

考慮した式を提案した．この式を提案式とする．図-6、図-7 は、それぞれ G1、G3 供試体における修正式および、提案式の計算曲線と今回行った一面せん断試験によって得られた実験値を比較したものである．これらの図より、修正式については、垂直応力が 1.0MPa あたりまで、それによって求めた計算曲線と実験値は差異が小さいが、垂直応力がさらに大きくなると、実験値と修正式による破壊包絡線は大きく異なるのが認められる．また、噛み合わせ係数 k を考慮した提案式によって求めた計算曲線と実験値とは、本実験の垂直応力範囲内では、G1、G3 供試体ともよく一致しているのが認められた．したがって、不連続面のせん断特性は、不連続面の粗さに加えて、噛み合わせ状況が最大せん断強度に対して、かなりの影響を及ぼすことが明らかにされた．図-8 は、各供試体における、提案式によって求めた最大せん断強度 τ_k と修正式によって求めた最大せん断強度 τ との比 τ_k/τ と各垂直応力との関係を示したものである．この図より、噛み合わせ状態の悪い G1 供試体の τ_k/τ は、G2～G4 供試体を 15～20%程度下回っている．同じ岩種で不連続面の粗さも同程度の供試体であっても、噛み合わせの違いによって、破壊包絡線に大きな違いが現れることがわかる．以上のことから、修正式に噛み合わせ係数 k を組み込むことによって、完全に噛み合っていない岩盤不連続面の最大せん断強度を精度よく表すことができた．

8. まとめ

本研究は、不規則形状の不連続面を有する 100%噛み合った石膏供試体に対して、一面せん断試験を実施し、提案されている楠見らのせん断強度式に、不連続面のを噛み合わせ状態を考慮するために、岩石供試体の不連続面の表面形状計測から求めた開口幅の特性から、噛み合わせを定量的に表した．さらに、噛み合わせの要素を修正式に組み込むことによって噛み合わせを考慮したせん断強度式を提案した．得られた結果をまとめると次のようになる．

(1) 供試体不連続面の粗さ角 i_0 が同程度であっても、噛み合わせ係数 k の違いにより、不連続面のダイレタンシー特性は大きく変化する．つまり、噛み合わせの悪い供試体では、不連続面の粗さ角 i_0 に比べ、初期ダイレクション角度は小さくなる．

(2) 修正式におけるパラメータである不連続面の粗さ角 i_0 に噛み合わせ係数 k を乗じることによって、噛み合わせが 100%でない自然な岩石供試体不連続面の最大せん断強度を予測できる．

以上のような成果が得られたが、今後は、実岩盤への適用という方向で研究を行っていく予定である．

9. 参考文献

- 1) Patton, F.D. : Multiple modes of shear failure in rock, Proc.1st Cong. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon Vol.1, pp.509～513, 1966.
- 2) Ladanyi, B. and Archambault, G. : Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. Proc. 11th Symp. Rock Mech., AIME, pp.105～125, 1970.
- 3) Barton, N.R. : A model study of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.9, pp.579～602, 1972.
- 4) Barton, N.R. and Choubey V. : The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mech. 10, pp.1～54, 1977.
- 5) Barton, N. and Bandis S. : Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. Proc. Int. Conf. Rock Joints. Leon, Norway, pp.603～610, 1990.
- 6) Zhao, J. : Joint Surface Matching and Shear Strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.34. No.2, pp.173～185, 1997.
- 7) 楠見晴重, 寺岡克己, 谷口敬一郎 : 不規則な岩盤不連続面におけるせん断強度の定式化に関する研究, 土木学会論文集, No.499/III-28, pp.13～21, 1994.
- 8) Mogi, K. : Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow, Bulletin. Earthquake Research Institute, Tokyo University, Vol.44, pp.215～232, 1996.
- 9) Byerlee, J. D. : Brittle-ductile transition in rock, journal of Geophysical Research, Vol.73, pp.4741～4750, 1968.