

岩盤不連続面の開口状況の定量的評価と そのせん断強度式への適用性

楠見 晴重¹・酒井 崇²・西田 一彦³・中村 均史⁴

¹正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

²正会員 サンコーコンサルタント株式会社 地質第一部 (〒136-8522 東京都江東区亀戸 1-8-9)

³正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

⁴正会員 株式会社関西土木技術センター 技術部 (〒612-8437 京都市伏見区深草小久保町 310 番地)

本研究は、岩盤不連続面の開口状況が、せん断強度に及ぼす影響について、人工的に不連続面を作成した岩石供試体を用い、その供試体の不連続面の表面形状を計測することによって、不連続面のせん断方向における開口状況を定量的に表した。それを修正 Ladanyi 式に組み込むことによって、開口状況を考慮したせん断強度式を提案した。さらに、形状計測を行った供試体の一面せん断試験を実施した。その結果、実験値と提案式による計算曲線はよく一致し、提案式の有効性が認められた。

Key Words: rock joint, aperture condition, shear strength criterion, 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、開口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、Patton, Ladanyi and Archambault, Barton をはじめ数多くの研究者^{1)~3)}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、不連続面間の開口状況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。Zhao⁴⁾ 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ク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、岩盤不連続面の開口状況が、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、不連続面の開口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ーション率 (dv/du dv, du :垂直, 水平変位成分) 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。

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

ここで、 σ_n : 垂直応力

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{v}_p : ピーク強度点におけるダイレーション率

楠見ら⁵⁾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{v}_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{v}_p 、 a_s は、以下のような式で表される。なお、 i_0 の詳細については参考文献 7) を参照されたい。

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

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

SD_i : 隣接する横断面の座標データ間の角度の標準偏差

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

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

$$d = 0.8$$

このとき用いた供試体は、100%密着した、もしくはそれに近い状態の石膏供試体、砂岩供試体である。試験条件としては、通常の直接一面せん断試験を実施して、規則歯形状を有する供試体に対して提案されている Ladanyi and Archambault のせん断強度式を不規則形状の不連続面供試体にまで拡張しようとしたものである。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。

図-1は、ボーリングコアから採取した自然な岩石供試体の不連続面の粗さ角 i_0 とJRC値との関係を示したものである。本実験で用いた岩石供試体G1~G4も同時にプロットしている。これより、不連続面の粗さ角 i_0 とJRC値は一次的な相関性を有していることから、 i_0 は不連続面の粗さ程度を表す指標になり得るものと考えられる。なお、JRC値は、Xianbinら¹⁰⁾が提案している式(5)によって求めた。

$$\left. \begin{aligned} JRC &= 64.22 \times Z_2 - 2.31 \quad (dx = 1.0\text{mm}) \\ Z_2 &= \sqrt{\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx} \end{aligned} \right\} (5)$$

ここで、 dx : 計測間隔

dy : x 方向に dx 移動したときの高低差

L : 不連続面の長さ

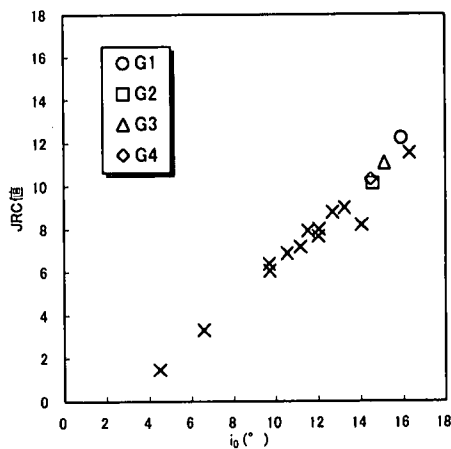


図-1 不連続面の粗さ角 i_0 とJRC値との関係

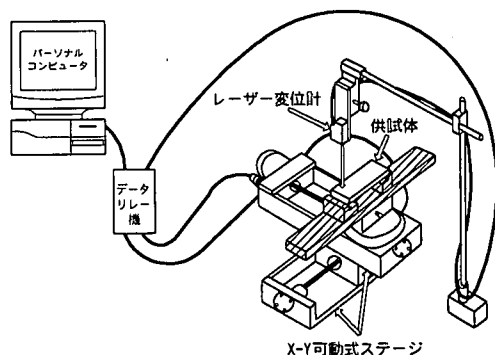


図-2 不連続面形状計測システム

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)でアスペリティの破壊が生じ難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、25.6 kN/m³、一軸圧縮強度および引張強度は、それぞれ187.8 MPa、4.76 MPaである。供試体は、直径50mm、高さ100mm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-2に示すようなX-Y可動式ステージ(移動量±60mm、移動精度±0.015mm)、レーザー変位計(基準距離40mm、計測範囲±10mm)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1.0mmで、1つの不連続面上の計測点数は4851点で、

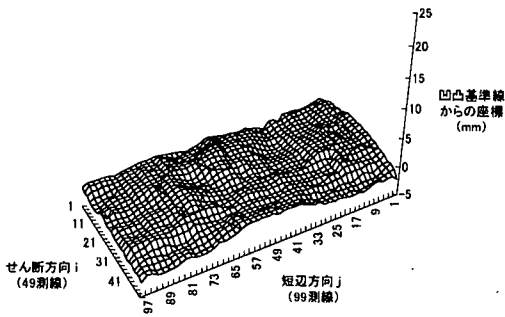


図-3 不連続面形状計測断面の一例

せん断方向 (i 方向) 49 測線, 短辺方向 (j 方向) 99 測線である。図-3 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, 同一供試体を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。したがって, 2 回目以降のせん断試験においては削りかすがあれば除去し, 初期状態は 1 回目と同様, 上下端面を合わせて行った。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 5mm までせん断特性を求めることができるものを用いている。本試験機の載荷方法は, 油圧サーボ方式であり, せん断箱は, 130mm×130mm×62mm, 厚さ 8mm のものを用いた。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 0.1mm/min. でせん断変位が 5.0mm 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, 各供試体異なる垂直応力下で 4 回, 合計 16 回行った。

5. 不連続面の開口状況の評価手法

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, この開口幅から開口状況の評価を試みた。その手法を以下に示す。

図-4 のように, 供試体不連続面の片面を A 面, も

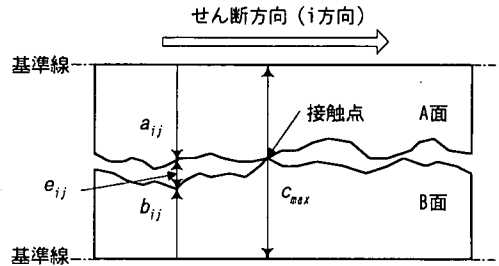


図-4 A 面と B 面の接触状況 (横断面図)

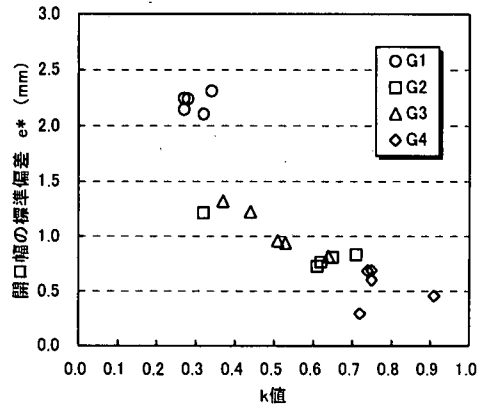


図-5 開口幅の標準偏差と開口係数 k との関係

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} ($i=1,2,\dots,49, j=1,2,\dots,99$) とする。式 (6) 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。

$$c_{ij} = a_{ij} + b_{ij} \quad (6)$$

これより, 不連続面の各点における開口幅 e_{ij} は, 式 (7) のように表される。

$$e_{ij} = c_{max} - c_{ij} \quad (7)$$

いま, 供試体のせん断方向に 1mm 間隔で長さ 99mm 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_{ij} 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。Zhao⁹⁾ 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_{ij} 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、せん断方向の平均開口幅のバラツキが全くない状態を示し、両者が大きくかけ離れた値であればバラツキが大きいものと考えられる。したがって、式 (8) 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開口状況を表すものと考え、開口係数 k ($0 < k \leq 1.0$) と呼ぶことにする。なお、開口係数 k は、不連続面上の計測を行った 4851 点全てを統計処理した値であることから、不連続面全体の開口状況を表しているものと考えられる。また、 $e_{s,min}$ は、せん断方向の 49 計測線の中で最も開口していない測線であることから、これが不連続面のせん断挙動に影響を及ぼすと考えられるため、 $e_{s,min}$ に注目した。また、2 つの不連続面がずれていれば、開口係数 k は異なった値となることから、常に一義的に定める必要があるため、この開口係数 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。

$$k = \frac{e_{s,min}}{e_{ave}} \quad (8)$$

図-5 は、各岩石供試体の異なった垂直応力下で行ったせん断試験後に不連続面の形状計測を行い、開口幅分布を求めて、それらの標準偏差 e^* と開口係数 k との関係を示したものである。この標準偏差 e^* は次式によって求めた。

$$e^* = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{49} \sum_{j=1}^{99} (e_{ij} - e_{ave})^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

ここで、 N : 全測点数 (4851 点)

図-5 より、開口係数 k が小さいほど開口幅分布の標準偏差 e^* は大きくなっていることから、 k は、不連続面間の開口状況を表す指標であるといえる。

6. 開口状況が異なった不連続面のせん断挙動

表-1 は、せん断試験前の各供試体における不連続面の JRC 値、不連続面の粗さ角 i_0 、開口係数 k 、平均開口幅 e_{ave} を示している。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-6 は、G1, G3, G4 供試体の垂直応

表-1 各供試体不連続面の特性

No.	JRC	i_0 (°)	開口係数 k	平均開口幅 e_{ave} (mm)
G1	12.23	15.93	0.32	2.68
G2	10.12	14.57	0.61	1.70
G3	11.07	15.12	0.64	1.30
G4	10.30	14.96	0.72	1.21

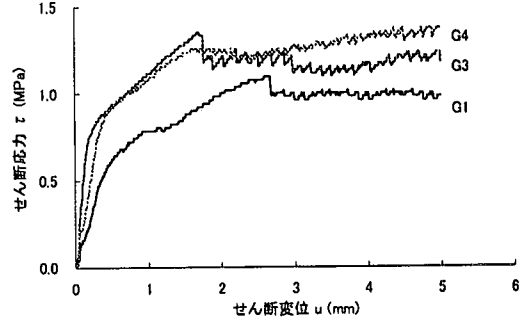


図-6 せん断応力-せん断変位曲線 ($\sigma_1=1.0\text{MPa}$)

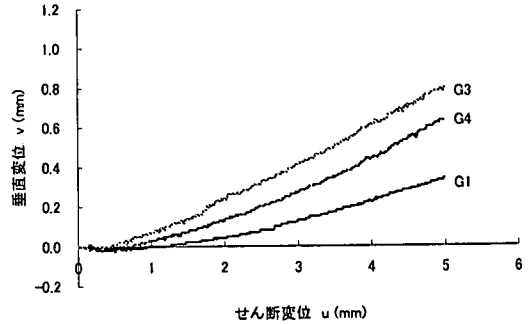


図-7 垂直変位-せん断変位曲線 ($\sigma_1=1.0\text{MPa}$)

力 1.0MPa におけるせん断応力-せん断変位曲線である。この垂直応力下において、せん断試験を実施する前の各供試体の不連続面の粗さは表-1 の値とほぼ同じであったことから最大せん断強度の違いは開口状況の影響を受けていると考えられる。図-7 は、図-6 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。この図においても開口係数 k の違いによりダイランシーに顕著な違いが認められる。図-6、図-7 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、開口状況の違いにより異なり、せん断方向の平均開口幅のバラツキが小さい不連続面ほど、すなわち、不連続面が接触している面積が多いほど、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タンスーは、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ク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、開口係数 k は、それぞれ 0.32, 0.64 となっている。この開口係数 k の違いは、最大せん断強度付近のダイレタンスー特性に大きな影響を与えることが予測される。つまり、開口幅にバラツキが大きい供試体では、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、 $\dot{\nu}_p$ 、 a_s というせん断パラメータを修正したものであるが⁷⁾、完全に密着した不連続面を有する石膏供試体を使用しているため、不連続面の開口状況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 に開口係数 k を乗じることによって開口状況の要素を考慮することを試みた。すなわち、 i_0 は不連続面の粗さ程度を示しており、不連続面の開口状況を表している開口係数 k を乗じることによって、見かけ上不連続面の粗さを変化させ、それがせん断強度特性に反映されることから、式(10)のように i_{0k} を定義した。

$$i_{0k} = i_0 \times k \quad (10)$$

この i_{0k} を式(3),(4)における i_0 の代わりに適用した式を提案式とする。図-8, 図-9 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。ここで用いた i_0 、 k は表-1 に示したものである。ここで、図-5 に示した G2 の 1 点 ($k=0.32$), G3 の 2 点 ($k=0.37, 0.44$) は、垂直応力が 1.4 もしくは 2.0MPa の条件下で得られたもので、他の値とかけ離れた値になっているが、これはせん断によって端面の一部が若干欠けたことに起因している。したがって、 k にその影響が及び、 k を求める不連続面上の計測範囲について、検討する必要があると考えられる。しかし、不連続面形状は大きく変わっていないことから、図-8, 9 のせん断強度に対しては、それほど大きな影響を受けていな

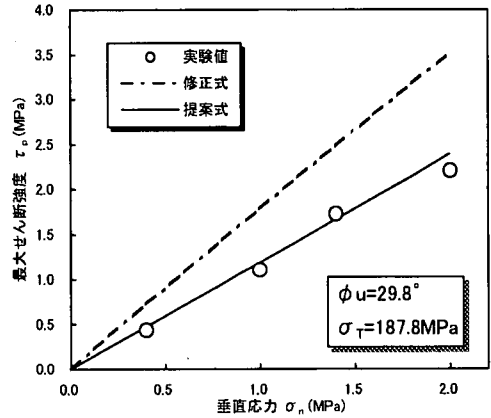


図-8 G1 供試体の計算曲線と実験値の比較

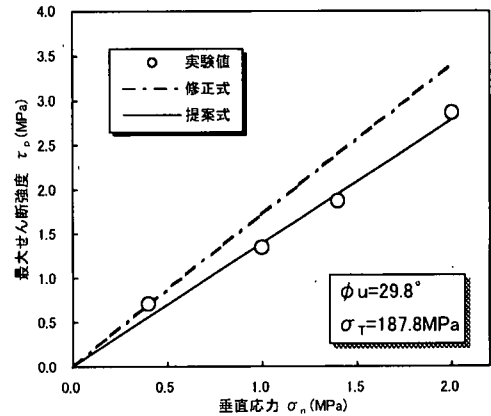


図-9 G3 供試体の計算曲線と実験値の比較

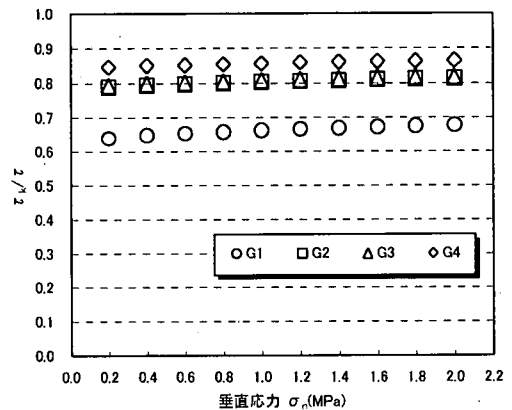


図-10 τ_s/τ と各垂直応力との関係

と考えられる。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っている。また、開口係数 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、開口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-10 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、開口係数 k の小さい 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、不連続面の開口状況の違いによって、破壊包絡線に大きな違いが現れることが認められた。以上のことから、修正式に開口係数 k を組み込むことによって、完全に密着し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%密着した石筈供試体に対して、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、不連続面の開口状況を考慮するために、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、開口状況を定量的に表した。さらに、開口係数 k を修正式に組み込むことによって開口状況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、開口係数 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、せん断方向の平均開口幅にバラツキが大きい供試体では、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ことが認められた。

(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 に開口係数 k を乗じることによって、完全に密着していない自然な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。

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, 1966.
- 9) Byerlee, J. D. : Brittle-ductile transition in rock, *Journal of Geophysical Research*, Vol.73, pp.4741-4750, 1968.
- 10) 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.

(1999. 2. 3 受付)

ESTIMATION METHOD OF APERTURE CONDITION WITH ROCK JOINT AND ITS APPLICATION FOR SHEAR EQUATION

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, aperture etc. In these factors, there is many researches in related with the roughness. However, although the aperture condition 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 depended on the magnitude of aperture condition are discussed. Especially, the numerical index representing the degree of the aperture condition with rock joints is proposed, and furthermore, we applied this index on the shear strength equation proposed by authors.