

投稿論文 (和文)
PAPERS

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

楠見晴重*・寺岡克己**・谷口敬一郎***

本論文は、規則的な歯型状不連続面に対して提案されている Ladanyi and Archambault のせん断強度式を、不規則形状の岩盤不連続面に対して適用させるために種々の実験的な検討を行ったものである。その結果、不連続面の粗さに関して、著者らの提案する方法により定量化を行い、さらに、Ladanyi らの強度式に含まれている各せん断パラメータを、著者らの提案する実験式を用いて表すことによって、不規則形状の不連続面に対しても適用が可能であることが確認された。

Key Words : shear strength, dilation, JRC, rock joint, irregular

1. まえがき

岩盤不連続面のせん断強度ならびにせん断変形特性に関する研究は従来より数多く行われており^{1)~10)}、種々の強度式が提案されている。それらの中で Ladanyi and Archambault²⁾あるいは Barton¹⁾のせん断強度式は特に良く知られている。

Ladanyiらは、人工的に作製した三角形の歯型状不連続面に対して、歯型の傾斜角を数種類変化させてせん断試験を実施し、歯型傾斜角の相違とせん断特性に関して検討を行い、ダイレタンシー特性および不連続面の破壊様式の変化を考慮に入れたせん断強度式を提案している。しかし、Ladanyi らのせん断強度式は、岩盤不連続面を規則的な歯型状不連続面に模式化することによって得られたものであり、ただちに実際の岩盤不連続面に対して適用させることはできない。Barton は実際の岩盤から切り出した不連続面を供試体として数多くのせん断試験を行い、経験的なせん断強度式を提案している。この中で Barton は、不連続面の粗さを JRC という指標を用いて定量化し、せん断剛性、垂直剛性、寸法効果に関して検討している^{3)~5)}。しかし、Barton の研究に関して、JRC の決定に際して観察者の主観性が大きく影響を与えるという問題点が指摘されている¹⁾。

せん断強度ならびにせん断変形特性に関する研究に関連して、岩盤不連続面形状の定量化についても従来より数多くの研究がなされており^{2), 4), 6), 11), 16)~19)}、種々の指標が提案されている。上述した Barton の JRC のほかに、断面形状を統計学的手法を用いて解析的に求める指標がいくつか提案されている^{6), 11), 16)}。これらは主に JRC の

問題点を補うことを目的としたものであり、JRC との相関性の良否によってその評価がなされている。さらに近年、フラクタル次元を用いて岩盤不連続面の粗さの評価を行う試みもなされている^{17)~19)}。著者らは、規則的な歯型状不連続面に対する一面せん断試験の結果から、歯型の傾斜角が不連続面のダイレタンシー特性ならびにせん断破壊様式に大きな影響を与えることを明らかにし、歯型の傾斜角とダイレタンシーの関係を示す実験式を提案した¹²⁾。

本論文は、規則的な歯型状不連続面に対して提案されている Ladanyi and Archambault のせん断強度式²⁾に関して、その適用範囲を不規則形状の不連続面にまで拡張するために、まず粗さの異なる数種類の不規則な不連続面の表面形状を測定し、不規則な不連続面形状を数値的に表す方法について検討を行い、さらに同様の供試体に対して一面せん断試験を実施し、実験結果を詳細に検討することによって Ladanyi and Archambault のせん断強度式に含まれる各せん断パラメータを表す実験式を提案した。

2. Ladanyi and Archambault 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。

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

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{v}_p : ピーク強度点におけるダイレション率

Ladanyi らは、 S_R にはインタクト部分の強度を適切

* 正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科
 (〒564 吹田市山手町 3-3-35)
 ** 正会員 工修 (株)サンヨー
 *** 正会員 工博 関西大学名誉教授

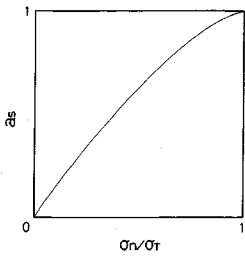


Fig.1 Variation of a_s obtained by eq. (4).

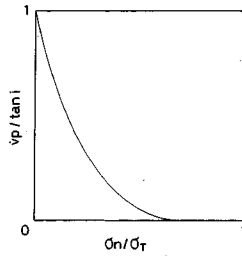


Fig.2 Variation of v_p obtained by eq. (5).

に表現できる式を用いることとしており、その例として式(2)に示すCoulomb式あるいは式(3)に示すFairhurstの放物線形の破壊基準を挙げている。

$$\tau = S_0 + \tan \phi_0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 S_0 ：岩石実質部分の粘着力
 ϕ_0 ：岩石実質部分の内部摩擦角

$$\tau = \sigma_c \frac{m-1}{n} \left(1 + n \frac{\sigma_n}{\sigma_c}\right)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

$$n = \sigma_c / (-\sigma_i)$$

$$m = (n+1)^{1/2}$$

σ_c ：岩石実質部分の一軸圧縮強度

σ_i ：岩石実質部分の引張強度

a_s , v_p は次に示す式(4), (5)によってそれぞれ表される。

$$a_s = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{k_1} \dots\dots\dots (4)$$

$$v_p = \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{k_2} \cdot \tan i \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 σ_T ：岩石実質部分の遷移応力^{14), 15)}であり、一軸圧縮応力で近似される

i ：歯型傾斜角

k_1, k_2 ：定数

Ladanyiらは、棒状のコンクリートを組み合わせて作った規則的な歯型状不連続面に対して数多くの実験を行い、 a_s , v_p の変化が歯型傾斜角*i*に影響されないことを確認し、 $k_1=1.5$, $k_2=4.0$ としている。Fig.1およびFig.2は式(4)により計算される a_s の変化および式(5)より計算される v_p の変化をそれぞれ示したものであり、 σ_n が0から σ_T まで増加するのに伴って、 a_s および v_p が比較的緩やかに変化する傾向を示している。

3. 実験方法

(1) 供試体

不連続面の粗さの相違がせん断特性に与える影響について明らかにするために、本研究ではあらかじめ用意した金属性の型枠を用いて人工的に作製した供試体を用いて実験を行った。供試体の材料としては石膏を用いた。

実験に用いた石膏供試体の不連続面部分の断面形状

Type	JRC
1	0~2
2	2~4
3	4~6
4	6~8
5	8~10
6	10~12
7	12~14
8	14~16
9	16~18
10	18~20

Fig.3 Typical range of JRC values associated with each profile.

は、Fig.3に示すBartonのJRC粗さ断面図¹⁾のうち、JRC値2~4：Type2, JRC値6~8：Type4, JRC値10~12：Type6, JRC値14~16：Type8の4種類とし、これらと同一形状の黄銅製型枠を放電加工によって作製した。供試体は不連続面で上下に分離しており、その寸法は上下重ね合わせた状態で1辺50mmの立方体である。供試体の作製は、石膏：細骨材：水を1：1：0.6の重量比で混ぜ合わせ、上下別々に型枠に流し込んだ後、湿度20%以下のデシケーター内で14日間気乾養生させて行った。Table1はこの配合の石膏供試体の諸特性を示したものである。

また本研究では、あらかじめ不連続面を作製した粗粒砂岩供試体を用いて、石膏供試体と同様の一連の実験を行った。供試体はまず直径50mm、高さ50mmの円柱形に整形した後、できる限り同質の粗さを有する不連続面を作製するために、せん断試験機で垂直応力 $\sigma_n=4$ MPa下においてせん断応力を加え破断させ、人工的に不連続面を作製し供試体として用いた。Table2は粗粒砂岩供試体の諸特性を示している。石膏供試体、粗粒砂岩供試体ともに、不連続面を持たないIntact供試体および平滑な不連続面を有する供試体も作製した。

(2) 実験装置および実験方法

本研究に用いた一面せん断試験機およびその計測システムは、前回報告¹²⁾したものと同様である。実験はすべて一定垂直応力下において行い、作用させた垂直応力の範囲は0.2~16.0MPaである。せん断荷重の載荷方法は変位制御とし、せん断変位速度は0.1mm/minとした。また本研究では、せん断試験に供する前に供試体の不連続面形状を測定し、不連続面の粗さを定量的に表現する方法についても検討を行った。不連続面形状の計測

Table 1 Some properties of plaster specimen.

Unit weight (γ) (kN/m^3)	Uniaxial compressive strength (σ_c) (MPa)	Tensile strength by Brazilian method (σ_t) (MPa)
15.8	18.0	2.94

Table 2 Some properties of coarse grain sand stone specimen.

Unit weight (γ) (kN/m^3)	Uniaxial compressive strength (σ_c) (MPa)	Tensile strength by Brazilian method (σ_t) (MPa)
24.89	104.2	6.96

Table 3 Estimation of JRC values using eq. (7), eq. (8) and Fig.3.

	plaster				coarse grain sand stone
	Type 2	Type 4	Type 6	Type 8	
Back-analysing using eq.(7)	16.4	21.5	25.1	28.0	20.2
Tilt tests using eq.(8)	4.3	4.3	4.2	5.1	5.6
Comparison with Fig.3	3.0	7.0	11.0	15.0	10.9

は、供試体を可動式ステージの上に載せ、ステージをせん断方向に移動させて行った。計測には非接触型のレーザ式変位計を用いた。センサーヘッドから対象物表面までの基準距離は 40 mm あり、 ± 10 mm の範囲において $2 \mu\text{m}$ の分解能を有している。本研究では不連続面の断面形状を 0.5 mm ピッチ、1/100 mm の単位まで読み取り、計測データは XY 型の座標データとしてパーソナルコンピュータに入力した。

4. 不連続面形状の定量化

不連続面形状の定量化の手法としては、Barton の JRC がよく知られている。これは、主に以下に述べる 3 つの方法によって不連続面の粗さ係数 JRC を決定し、さらに JRC を組み込んだ式 (6) によってせん断強度を評価しようとするものである。

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[\text{JRC} \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 ϕ_b : 基本摩擦角 (平滑で未風化の不連続面の残留摩擦角)

JRC : ジョイントの粗さ係数

JCS : ジョイント壁面の圧縮強度

1) せん断試験の結果から、JRC 以外のパラメータの平均値を求め、それらを次式に代入して求める。

$$\text{JRC} = \frac{\text{act}(\tau/\sigma_n) - \phi_b}{\text{Log}_{10}(\text{JCS}/\sigma_n)} \dots \dots \dots (7)$$

2) Tilt 試験結果を次式に代入して求める。

$$\text{JRC} = \frac{\alpha - \phi_b}{\text{Log}_{10}(\text{JCS}/\sigma_n)} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 α : Tilt 角

σ_n : Tilt 試験において不連続面に作用する有効垂直応力

3) 対象となる不連続面の横断面形状と、Fig.3 に示

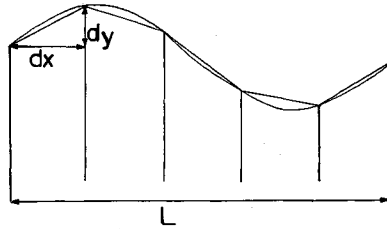


Fig.4 Definition of dx, dy and L.

した粗さ標準断面図とを比較することによって、適当な JRC 値を評価する。

Table 3 は、石膏供試体および粗粒砂岩供試体に対して、上述の 3 種類の方法でそれぞれの JRC を求めた結果を示している。表より、各供試体の JRC はその算出方法により非常に異なった値を示している。また Tilt 試験により求めた石膏供試体の JRC は、不連続面の粗さの相違を全く反映しない結果となっている。Tilt 試験結果については次のように考えられる。本研究で用いた供試体の形状は供試体の厚さが 25 mm であるのに対して不連続面の長さが 50 mm と十分でなく、そのため Tilt 試験に際して、供試体上半分の重量が不連続面の先端部分にしか加わらず、そのため正確な測定値が得られなかったものと考えられる。

このように、JRC は測定方法の相違によってその値が著しく異なり、そのため JRC を用いた式 (6) によって得られたせん断強度値についてもその信頼性は低いものと考えられる。そこで著者らは、不連続面の断面形状の計測結果から客観的にその不連続面の粗さを評価する方法について検討を行った。

著者らは、さきに規則的な歯型状不連続面を対象として行った研究において、歯型の初期傾斜角が不連続面のせん断強度、あるいは変形特性に大きな影響を与えることを明らかにした¹²⁾。本研究では、不規則形状の不連続面に関しても、その粗さを凹凸の初期傾斜角によって表すことを試みた。

Tse and Cruden¹³⁾は、式 (9) に示す Z_2 が不連続面の粗さの指標として有望であると述べている。

$$Z_2 = \left[\frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \right]^{1/2} \dots \dots \dots (9)$$

ここで、dx, dy, L は Fig.4 に示すとおりである。

また Z_2 は式 (10) によって不連続面の凹凸の初期傾斜角 i_{0T} に置き換えることができる。

$$i_{0T} = \arctan Z_2 \dots \dots \dots (10)$$

Dight and Chiu⁶⁾は、Fig.5(a) に示す規則的な三角形の歯型状断面の初期ダイレーション角 i_{0D} に関して、式 (11) に示す関係を導き出し、この関係を不規則形状の不連続面に対して適用させている。

$$i_{0D} = i_{ave} + k_i \cdot SD_i \dots \dots \dots (11)$$

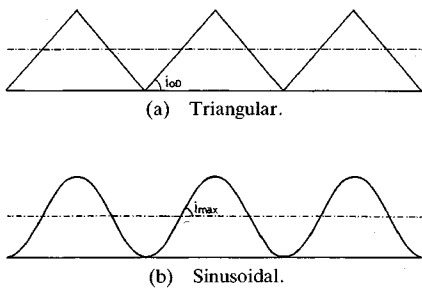


Fig. 5 Examples of regular profiles.

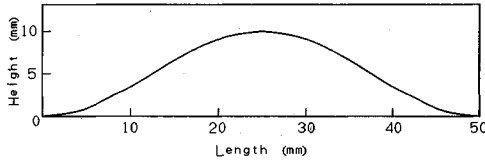


Fig. 6 A sinusoidal joint profile for analysis.

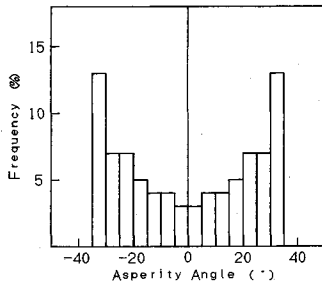


Fig. 7 Histogram of distribution of asperity angle for Fig. 6 profile.

- ここで、 i_{ave} ：隣接する横断面の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
- k_i ：係数（三角形の歯型状断面に関する解析結果では $k_i=1$ ）

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へた。これは表面の微小な粗さを表す二次の粗さは、不連続部表面の摩擦角としてすでに考慮されていると考へられるためである。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 Fig. 5(b) 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。Fig. 6 は解析に用いたサイン曲線の一例を示したものである。このサイン曲線について断面形状の解析を行ったところ、最大傾斜角 $i_{max}=32.62^\circ$ 、 $i_{ave}=0^\circ$ 、 $SD_i=23.47^\circ$ が得られ、 $i_{max}/SD_i=1.39$ となった。その角度分布のヒストグラムを Fig. 7 に示す。また、 i_{max} が 15° から 45° となるよ

Table 4 i_{0T} obtained from eq. (10), i_{0D} obtained from eq. (11), and i_{max} obtained from eq. (12).

	Type 2	Type 4	Type 6	Type 8
$i_{0T} (^\circ)$ ($\arctan \frac{1}{2}$)	6.6	9.6	13.5	15.3
$i_{0D} (^\circ)$ ($i_{ave} + SD_i$)	6.3	9.1	13.3	16.1
$i_{max} (^\circ)$ ($i_{ave} + \sqrt{2} \cdot SD_i$)	9.1	13.3	18.6	22.2

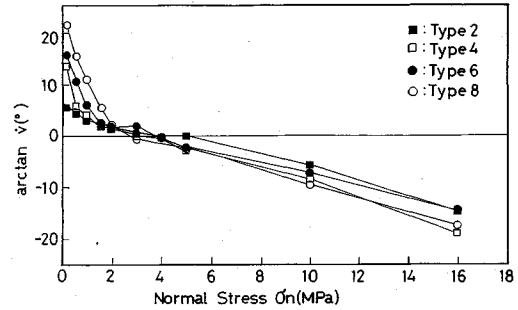


Fig. 8 Relationship between dilatancy and normal stress.

うに数種類のサイン曲線を設定し同様の解析を行ったところ、 $i_{max}/SD_i=1.42$ から 1.35 となり、ほぼ $\sqrt{2}$ 程度となった。したがって本研究では、サイン曲線の最大傾斜角 i_{max} を i_{ave} と SD_i を用いて式 (12) のように近似的に表すことを試みた。

$$i_{max} \doteq i_{ave} + \sqrt{2} \cdot SD_i \dots \dots \dots (12)$$

Table 4 は、本研究で用いた各供試体の i_{0T} 、 i_{0D} および i_{max} を式 (10)、(11)、(12) を用いて求めたものである。ただし i_{0D} については $k_i=1$ とした。

Fig. 8 は、Type 2 から Type 8 の各供試体について、一面せん断試験を行った結果得られたダイレーション率の変化を示したものである。なおダイレーション率 v_p は、ピーク強度点におけるせん断変位-垂直変位曲線の接線勾配である。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率は、不連続面上の凹凸間の滑り上がりによって生じたものであり、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。実験後の各供試体の不連続面を観察した結果、今回の実験で最も低い垂直応力である $\sigma_n=0.2$ MPa 下での試験結果は、いずれの供試体も不連続面の凹凸自体の破壊はみられず、せん断は凹凸間の滑り上がりによって進行したものと考へられる。そこで、Fig. 8 に示されている $\sigma_n=0.2$ MPa 下の各供試体の $\arctan v_p$ と、Table 4 に示した i_{0T} 、 i_{0D} 、 i_{max} の値を比較したところ、各供試体とも i_{max} と $\arctan v_p$ はほぼ一致した値を示している。このことから式 (12) を用いて計算される i_{max} によって、供試体の初期ダイレーション角を表現できることが明らかとなり、そこで式 (12) における i_{max} を式 (13) に示すように供試体の初期ダイレーション角 i_0 に置き換えることができる。

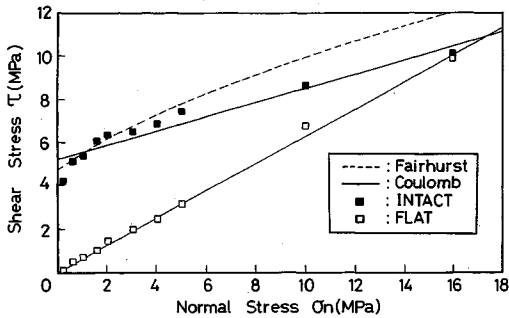


Fig.9 Shear strength of intact specimens and flat joints.

$$i_0 = i_{ave} + \sqrt{2} \cdot SD_i \dots\dots\dots (13)$$

以上のことから、以後本研究では、式 (13) を用いて求めた i_0 によって不連続面の粗さを表すこととする。

5. せん断パラメータの検討

(1) パラメータ S_R および ϕ_u の検討

Fig.9 は、Intact 供試体および平滑な不連続面を有する供試体に関するせん断試験結果を示したものである。図中の実線は、Intact 供試体と平滑な不連続面を有する供試体のせん断強度値をそれぞれ式 (2) の Coulomb 式に近似させて得られた値を示しており、破線は式 (3) に示した Fairhurst の破壊基準を用いて計算したせん断強度である。この図より、Intact 供試体の強度すなわち S_R に関して、Fairhurst 式により得られた値は実験値と比較して 5 MPa 以下の低い垂直応力域ではほぼ一致した値を示すものの、一軸圧縮強度に近い $\sigma_n = 16$ MPa では約 20% も過大なせん断強度を与えている。また実験値は最も低い垂直応力下で得られたせん断強度値を除いては、実験を行った垂直応力域では垂直応力に対してほぼ直線的に増加しており、かつ Coulomb 式とほぼ一致した傾向を示していることから、式 (2) の Coulomb 式が S_R を表現する式としてより適当であると考えられる。なお実験値を式 (2) に近似させた結果、 $S_0 = 5.2$ MPa、 $\phi_0 = 18.4^\circ$ が得られた。また、平滑な不連続面を有する供試体のせん断強度に関して、今回実験を行った垂直応力の範囲では実験値はほぼ直線的な増加傾向を示している。そこで実験値を Coulomb 式に近似させた結果、摩擦角 $\phi = 32.1^\circ$ が得られた。平滑な不連続面の摩擦角 ϕ は、Ladanyi らの強度式 (式 (1)) における ϕ_u に相当すると考えられ、そこで本研究では $\phi_u = 32.1^\circ$ とした。

(2) パラメータ $\dot{\nu}_p$ の検討

Fig.8 に示されているように各供試体のピーク強度点におけるダイレーション率は、垂直応力の増加に伴い減少しており、この傾向は i_0 が大きいもの、言い替えれば不連続面の粗さの大きいものほど顕著である。また各供試体ともある垂直応力以上では負のダイレーションを

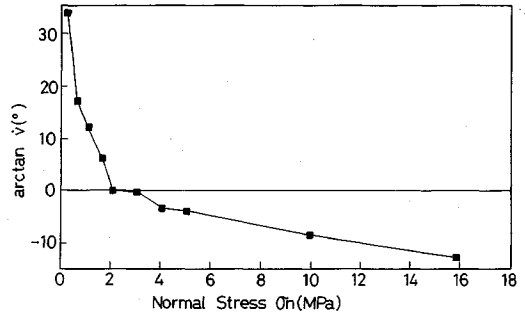


Fig.10 Variation of $\dot{\nu}_p$ for intact specimens.

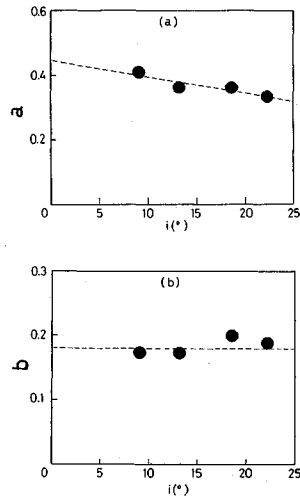
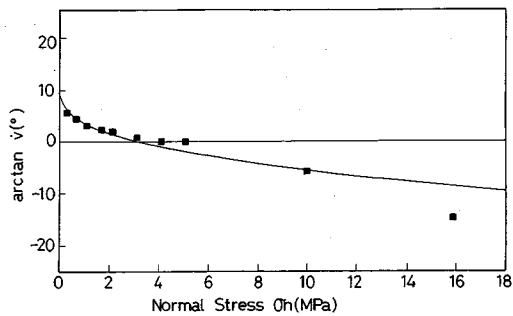


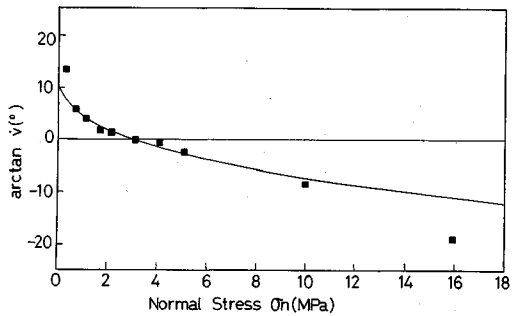
Fig.11 Relationship between i_0 and (a) a value and (b) b value.

示しているが、これは Fig.10 に示す Intact 供試体のダイレーション率の変化とほぼ同様の挙動である。このことからダイレーション特性に関して、不連続面を含む供試体であっても非常に高い垂直応力下では不連続面の影響は減少し、Intact 供試体と同様な挙動を示すものと推察される。

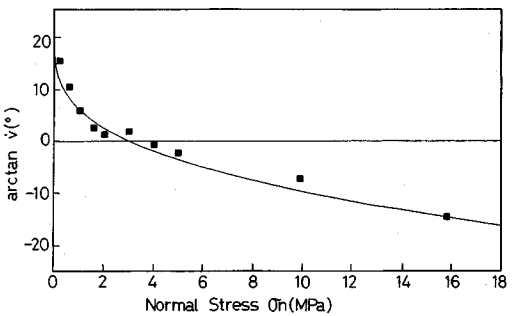
2. に述べたように、Ladanyi らはピーク強度点におけるダイレーション率を式 (5) を用いて定量化し、せん断強度式に組み入れている。しかし式 (5) では歯型傾斜角の影響を定数として考慮しているに過ぎないため、上述した i_0 の相違によるダイレーション特性の差異を表現することはできない。また負のダイレーションを表すことも不可能である。したがって供試体の破壊時の挙動をより正確に表現するためには、ピーク強度点におけるダイレーション率 $\dot{\nu}_p$ に関して式 (5) に代わる新たな式が必要となる。本研究では、上述したように i_0 の値によって $\dot{\nu}_p$ の変化傾向が異なり、ある垂直応力以上で $\dot{\nu}_p$ が負の値を示すという挙動を表現するため次の式 (14) を提案し、これを Ladanyi らの式 (1) に適用させた。



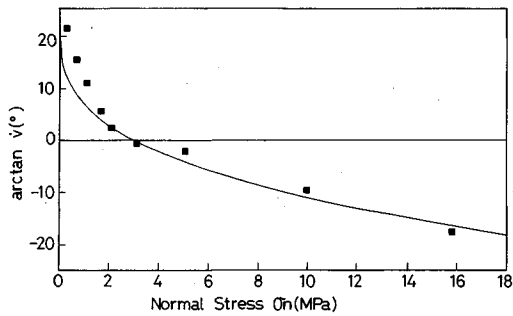
(a) Type 2



(b) Type 4



(c) Type 6



(d) Type 8

Fig.12 Comparison of \dot{v}_p between measured values and calculated values.

$$\dot{v}_p = \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma_n}{b \cdot \sigma_r} \right)^a \right\} \cdot \tan i_0 \quad \dots \dots \dots (14)$$

ここで、 a ：不連続面の粗さの相違によって変化する係数

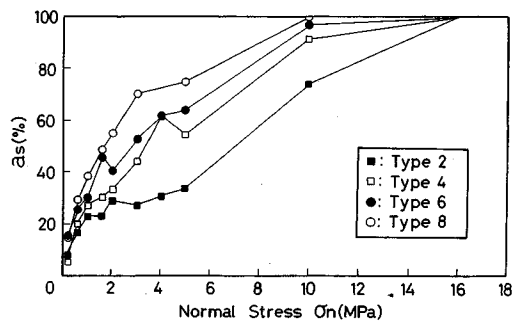


Fig.13 a_s values obtained by backward calculation.

b ： $(b \cdot \sigma_r)$ によって $\dot{v}_p=0$ となる垂直応力を定める係数

Fig.11(a), (b) は各供試体の \dot{v}_p を最小二乗法を用いて式 (14) に近似させた結果得られた係数 a , b と i_0 の関係を示したものである。Fig.11(a) より a 値は i_0 の増加に伴って徐々に減少しており、そこで a 値と i_0 の関係を一次式によって近似させ次式を得た。

$$a = 0.45 - 5.1 \cdot 10^{-3} \cdot i_0 \quad \dots \dots \dots (15)$$

また Fig.11(b) より、多少のばらつきはあるものの b 値は i_0 の値に関係なくほぼ一定値をとるものと思われ、この石膏供試体では、 $b=0.18$ となる。

Fig.12(a)~(d) は、式 (14), (15) および $b=0.18$ を用いて求めた各供試体の \dot{v}_p の計算値と実測値とを比較したものである。Fig.12(d) の Type 8 供試体に関して計算値が実測値をやや下回っているものの、他の供試体に関しては計算値と実測値はほぼ一致した値を示している。したがって不連続面の粗さの相違によって異なるピーク強度時のダイレーション特性 \dot{v}_p を、著者らが提案した式 (14), (15) を用いてほぼ正確に表現できることが確認された。

(3) パラメータ a_s の検討

2. で述べたように、Ladanyi らは a_s に関しても歯型傾斜角によらず一定の変化を示すとしている。しかし実験後の供試体不連続面の破壊状態を観察したところ、同じ垂直応力下であっても不連続面の粗さの相違によってその破壊状態は著しく異なっており、いずれの垂直応力下においても、 i_0 の大きな供試体ほど凹凸の破壊は著しい。このことは Fig.8 に示したダイレーション率の変化において、 i_0 の大きな供試体ほど垂直応力の増加に伴うダイレーション率の減少が著しいことから推察される。またこれらのことから不連続面に沿った滑り上がりから凹凸のせん断破壊への供試体の破壊様式の移行は、 i_0 の大きな供試体ほど低い垂直応力下で急激に生ずるものと考えられる。したがって a_s の変化を正確に表現するためには、 \dot{v}_p と同様、 i_0 の相違すなわち不連続面の粗さの違いを考慮に入れる必要がある。しかし、 a_s に

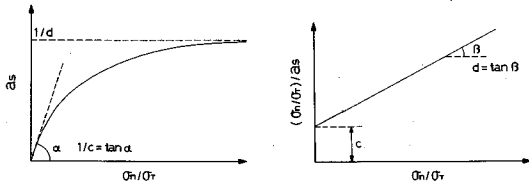


Fig.14 Hyperbolic model for relationship between a_s and σ_n/σ_T .

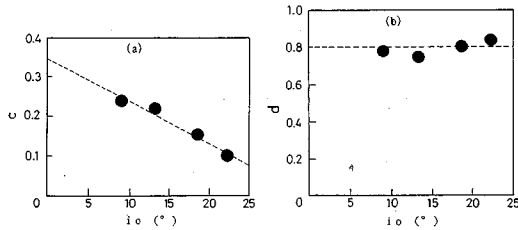


Fig.15 Relationship between i_0 and (a) c value and (b) d value.

関してその値を実験後の供試体から正確に測定することは現実的には不可能である。そこで著者らは、式(1)に含まれている a_s 以外のパラメータを式(1)に代入することによって、各供試体に対する a_s を求めた。なお、 τ , σ_n , \dot{v}_p については各供試体の実験値を直接代入し、 S_R は同一垂直応力における Intact 供試体のせん断強度値を代入した。 ϕ_u については 5. (1) で求めたとおり 32.1° とした。Fig.13 は、このようにして求めた各供試体の a_s を示したものである。図より、各供試体の a_s の変化傾向は Fig.1 に示されているような緩やかなものではなく、低い垂直応力下において急激な増加を示し、垂直応力の増加に伴ってその増加率を徐々に減じながら 100% に近づく傾向を示している。また i_0 の相違により a_s の値は大きく異なっており、いずれの垂直応力下においても i_0 の大きな供試体ほど大きな a_s 値を示している。したがって a_s についても \dot{v}_p と同様、不連続面の粗さの相違によってその変化傾向が異なることが間接的にはあるが確認された。

そこで本研究では、上述したような a_s の挙動をできる限り正確に表現するために、Fig.13 に示した各供試体の a_s - σ_n 曲線を、Fig.14 に示す双曲線と仮定し、式(16)に近似させた。ただし、式(16)による a_s の適用範囲は、 $0 \leq a_s \leq 1$ とする。

$$a_s = \frac{(\sigma_n/\sigma_T)}{c + d \cdot (\sigma_n/\sigma_T)} \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 $c:1/c$ によって a_s - σ_n 曲線の初期接線勾配を表わす係数

$d:1/d$ によって $\sigma_n \rightarrow \infty$ とした場合の a_s の最大値を定める係数

その結果得られた各供試体の係数 c , d の値を示したのが Fig.15(a), (b) である。Fig.15(a) より c 値の変化は i_0 の増加に伴って減少しており、 c 値と i_0 の関係を

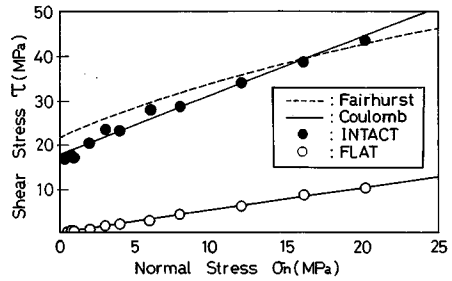


Fig.16 Shear strength of intact specimens and flat joints (coarse grain sandstone).

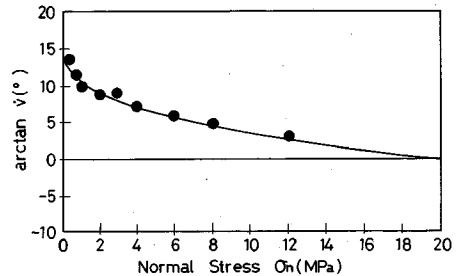


Fig.17 Relationship between dilatancy and normal stress (coarse grain sandstone).

一次式によって近似させ、その結果次式を得た。

$$c = 0.35 - 1.07 \cdot 10^{-2} \cdot i_0 \dots\dots\dots (17)$$

また Fig.15(b) より d 値は i_0 の値に関係なくほぼ一定値をとるものと思われ、 $d=0.8$ とする。

以上の考察より、不規則形状の不連続面の表面粗さは式(13)を用いて表すことが可能である。また、式(1)に含まれるせん断パラメータ (S_R , ϕ_u , a_s , \dot{v}_p) についても、5. で述べたように著者らの提案した方法によって表現できることが確認された。そこで本研究では、規則的な歯型状不連続面に対して提案されている Ladanyi and Archambault のせん断強度式に対して、4. および 5. で得られた結果を組み入れることによって、不規則形状の不連続面を有している岩石供試体に対しても適用させることを試みた。

6. 粗粒砂岩供試体に対する提案式の適用

(1) せん断パラメータの検討

Fig.16 は、Intact な粗粒砂岩供試体および平滑な不連続面を有する粗粒砂岩供試体に関するせん断試験結果を示したものである。図中の実線ならびに破線は、Fig.9 と同様 Coulomb 式および Fairhurst 式を用いて得られた値である。Fig.16 より、粗粒砂岩に関しても Intact 供試体の強度は、実験を行った垂直応力域では Coulomb 式とほぼ一致した傾向を示していることから、 S_R としては式(2)の Coulomb 式が適当であると考えられる。なお実験値を式(2)に近似させた結果 $S_0 =$

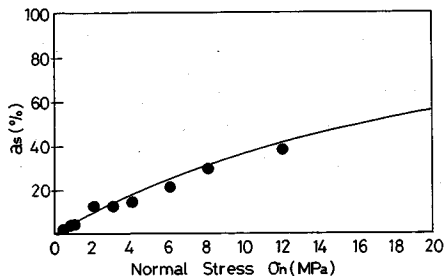


Fig.18 α_s values obtained by backward calculation (coarse grain sandstone).

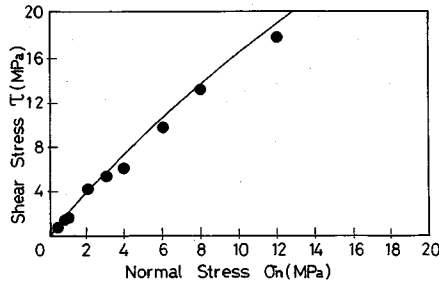


Fig.19 Comparison of peak shear strength between measured values and modified Ladanyi's theory (coarse grain sandstone).

17.9 MPa, $\phi_0 = 52.9^\circ$ が得られた。また平滑な不連続面を有する供試体に関しても石膏供試体と同様に式(2)に近似させ、 $\phi_a = 27.1^\circ$ となった。

Fig.17 は、粗粒砂岩供試体について一面せん断試験を行って得られたダイレーション率 \dot{v}_p の変化を示している。石膏供試体の場合と同様の方法で粗粒砂岩供試体の断面形状の計測を行い、式(13)を用いて i_0 を求めたところ $i_0 = 16.0^\circ$ が得られた。そこで式(14)、(15)および $b = 0.18$ を用いて粗粒砂岩供試体の \dot{v}_p の計算値を求めたのが Fig.17 の実線である。この図より、粗粒砂岩供試体に関しても \dot{v}_p の計算値と実測値はほぼ一致した値を示しており、著者らの提案した式(14)、(15)の有効性が確認された。

Fig.18 は石膏供試体と同様、式(1)に含まれている α_s 以外のパラメータを式(1)に代入することによって求めた粗粒砂岩供試体の α_s である。また図には、式(16)、(17)および $d = 0.8$ を用いて求めた α_s の計算値を実線で示している。図より、式(1)によって求めた α_s 値と双曲線関数を用いた計算値は、ほぼ一致した値を示していることが認められる。したがって式(16)、(17)によって粗粒砂岩供試体の α_s を表現することが十分可能であると考えられる。

(2) せん断強度特性

Fig.19 には、6. (1) で検討した各せん断パラメータを式(1)に代入し、Ladanyi らのせん断強度式を修正することによって求めた粗粒砂岩供試体のせん断強

度値を実線で示している。図より、高い垂直応力域において修正せん断強度値が実測値よりもやや大きな値を示すものの、大きな差異はなくほぼ同様な増加傾向を示している。以上のことから規則的な歯型状不連続面に対して提案されている Ladanyi らのせん断強度式に関して、式に含まれる各せん断パラメータを著者らが提案する実験式を用いて修正することによって、不規則形状の不連続面を有する岩石のせん断強度特性についてほぼ正確に表現できることが明らかとなった。またこのことより各せん断パラメータに関して著者らが提案した実験式の有効性が確認された。

7. 結 論

本研究は、規則的な歯型状不連続面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に対して適用させるために、不規則形状の不連続面を有する石膏供試体に対して一面せん断試験を実施し、そのせん断強度ならびに変形特性に関して詳細に検討を行ったものである。その結果以下のことが明らかとなった。

1) 不連続面形状の定量化に関して、著者らは不規則形状の不連続面をサインカーブ状の曲線によって模式化し、不連続面の初期傾斜角をその曲線の最大傾斜角によって表現しようと試みた。その結果、各供試体に対応して得られる最大傾斜角は、実験によって得られた各供試体のダイレーション角と良く一致しており、このことよりサインカーブ状の曲線の最大傾斜角によって不連続面の初期傾斜角を表すことが可能であることが確認された。

2) 岩石実質部分のせん断強度は、Ladanyi らが推奨する Fairhurst の放物線形の強度式よりも、Intact 供試体のせん断強度を Coulomb 式に近似させて求めたせん断強度のほうがより実験値との誤差が小さいことが判明した。

3) ダイレーション率 (\dot{v}_p) および岩石実質部分がせん断される割合 (α_s) に関して、これら2つのパラメータは、Ladanyi らが提案しているように不連続面の粗さに関わらず一定の変化を示すのではなく、不連続面の粗さの相違によってかなり異なった挙動を示すことが明らかとなった。また、これらはいずれも著者らの提案した実験式によってほぼ正確に表現できることが確認された。

4) 石膏供試体に関する実験より得られた上述の結果を不連続面を有する粗粒砂岩供試体に適用させたところ、著者らの提案した実験式が粗粒砂岩に関してもその実験値を十分に表現できることが判明した。

したがって、著者らが提案した実験式を用いて各せん断パラメータを表現することによって、規則的な歯型状

不連続面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に対しても適用できることが明らかとなり、著者らが提案する実験式の有効性が確認された。

以上述べたように、今回の実験によって不規則形状の不連続面に対して適用可能なせん断強度式を、Ladanyi and Archambault のせん断強度式を修正することによって得られることができた。しかし、岩盤不連続面のせん断強度を求めようとする場合、寸法効果の問題は避けて通ることのできない問題であり、また、過去の滑り履歴によるせん断強度の変化に関しても考慮する必要がある。本研究で得られたせん断強度式では、これらの事柄については考慮されていない。したがって、今後はこれらの点に関しても検討を行い、せん断強度式の中に組み入れる必要があると考えられる。

参考文献

- 1) Patton, F.D. : Multiple modes of shear failure in rock, Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, pp.509~513, 1966.
- 2) Ladanyi, B. and Archambault, G. : Simulation of shear behaviour 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. and Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol.10, No.1~2, pp.1~54, 1977.
- 5) Bandis, S.C., Lumsden, A.C. and Barton, N.R. : Fundamentals of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.20, pp.249~268, 1983.
- 6) Dight, P.M. and Chiu H.K. : Prediction of shear behaviour of joints using profiles, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.18, pp.369~386, 1981.
- 7) Bock, H. : A simple failure criterion for rough joints and compound shear surfaces, Engineering Geology, Vol.14, pp.241~254, 1979.
- 8) Hoek, E. : Strength of jointed rock masses, Geotechnique, Vol.33, pp.188~223, 1983.
- 9) Johnston, I.W. and Lan, T.S.K. : Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints-analysis, J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol.115, pp.711~727, 1989.
- 10) Johnston, I.W. and Lam, T.S.K. : Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints-evaluation, J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol.115, pp.728~740, 1989.
- 11) Tse, R. and Cruden, D.M. : Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol.16, pp.303~307, 1979.
- 12) 楠見晴重・寺岡克己・谷口敬一郎：規則的な不連続面のせん断時のダイレクシー特性，土木学会論文集，No. 430, pp.125~133, 1991.
- 13) Fairhurst, C. : On the validity of Brazilian test for brittle materials. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., Vol.1, pp.535~546, 1964.
- 14) 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.
- 15) Byerlee, J.D. : Brittle-ductile transition in rock, Journal of Geophysical Research, Vol.73, pp.4741~4750, 1968.
- 16) 吉中龍之進・清水昭男・新井 元・加藤恵三・蟻板俊英：岩盤不連続面の粗さの指標について，第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.386~390, 1987.
- 17) Mandelbrot, B.B. : The fractal geometry of nature, Freedman and Co., New York, 1977.
- 18) Carr, J.R. and Warriner, J.B. : Rock mass classification using fractal dimension, 28th U.S. Rock Mech. Symp., pp.73~80, 1987.
- 19) 大西有三・堀田正國・大谷司郎：画像処理システムを用いた岩盤割れ目のフラクタル幾何学的特性評価について，土木学会論文集，No. 412, pp.61~68, 1989.

(1992.12.25 受付)

STUDY ON FORMULATION OF SHEAR STRENGTH FOR IRREGULAR ROCK JOINTS

Harushige KUSUMI, Katsumi TERAOKA and Keiichiro TANIGUCHI

ON this paper, we have tried to apply Ladanyi's shear strength criteria to irregular joints, which is only applicable for regular joints. The measurement and analysis of joint profiles have conducted to estimate quantitative processing of irregular joint roughness, and direct shear tests on plaster-sand specimens which have JRC profiles given by Barton, and coarse grain sandstone have been done. As the results, we proposed experimental equations which exactly represent the shear strength parameters included in Ladanyi's shear strength criteria, and it becomes also applicable for irregular joints rearranging the shear strength parameters by substituting the experimental equations proposed by authors.