

(31) 不連続面のせん断特性に関する実験的研究

埼玉大学 正員 吉中 龍之進 阪口 聡
(株)熊谷組 正員 清水 昭男 新井 元
正員○加藤 恵三

1. はじめに

岩盤不連続面を模擬したモデル実験の事例はかなり多く見られ、様々なせん断強度式が提案されている。不連続面モデルは、BartonやVandis¹⁾の研究のように実際の岩盤不連続面の形状を模擬したものと、PattonやLadanyi & Archambault²⁾の研究で知られているような単純な幾何形状のものに分けられる。両者のせん断強度提案式には、せん断面の粗さ、垂直応力および母材強度の影響が組み込まれているが、せん断面の粗さを表わすパラメータとしてダイレイタンス角だけを採り上げ、粗さの形状そのものは考慮されていない。

本研究では、不連続面の表面粗さを単純な幾何形状で表わし、垂直応力、母材強度、初期ダイレイタンス角および歯型形状をパラメータとするせん断試験を実施した。また、各パラメータがせん断強度に及ぼす影響を求め、諸せん断強度との比較、検討を行なった。また、不連続面のせん断破壊に至るまでの挙動を、せん断変位～せん断応力、ダイレイタンス角の関係から考察した。

2. 実験概要

2.1 直接せん断試験

実験に用いた供試体は、15cm×15cm×3～4cmのモルタル製で、不連続面は、図-1に示すような規則正しい形状とした。載荷は、せん断面上の垂直応力を一定として、せん断応力を増加させる方法で行なった。直接せん断試験におけるパラメータを表-1に示す。

2.2 三軸載荷せん断試験³⁾

図-2に、試験で用いた供試体の概形を示す。供試体は、一軸圧縮強度約200kg/cm²のモルタル製で、やはり規則正しい形状の不連続面を有している。載荷は、平面ひずみ状態を保ち、不連続面の垂直応力 σ_n が一定となるよう σ_1 、 σ_3 を調節して行なった。なお、載荷面にはテフロンシートを挟み、摩擦の影響を無くすよう努めた。三軸載荷試験におけるパラメータを表-2に示す。

3. 試験結果および考察

3.1 せん断強度

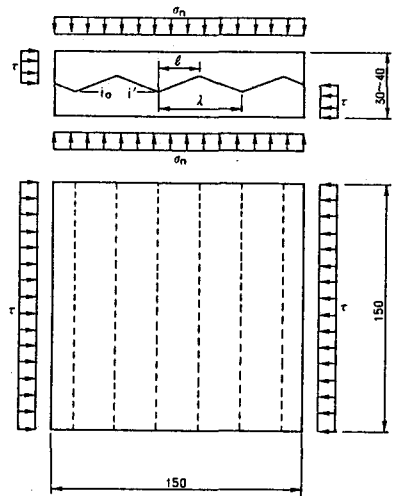


図-1 直接せん断試験用供試体 (mm)

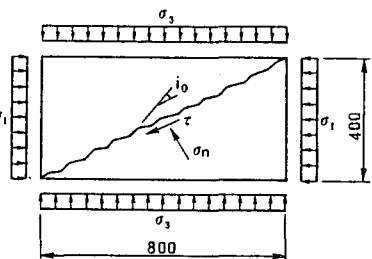


図-2 三軸載荷せん断試験モデル (mm)

表-1 直接せん断試験におけるパラメータ

一軸圧縮強度 σ_c	kgf/cm ² 150, 250
垂直応力 σ_n	kgf/cm ² 10, 20
初期ダイレイタンス角 i_0	0, 10, 20°
歯型形状係数 ℓ/λ (i')	0.5, 0.73, 1.0 (20°) (45°) (90°)

表-2 三軸載荷せん断試験におけるパラメータ

垂直応力 σ_n	kgf/cm ² 20, 40, 60
初期ダイレイタンス角 i_0	0, 10, 20°

図-3は、ピークせん断強度と初期ダイレイタンスー角の関係を表わしたグラフである。低拘束圧下では、初期ダイレイタンスーの増加に伴い、ピークせん断強度はほぼ直線的に増加している。一方、高拘束圧下では、10° から20° における強度の伸びが小さくなっている。これらの原因としては、低拘束圧下において、歯型斜面上に沿って滑り上がるため強度は初期ダイレイタンスー角に比例して大きくなるが、高拘束圧下では、歯型が削られるようになるため強度の増加が小さくなることが考えられる。

図-4に、垂直応力とピークせん断強度の関係を表わすグラフを示す。せん断面上の歯型がない供試体では、ピーク強度は垂直応力と比例関係にある。10° および20° についても、拘束圧の小さな範囲では、同様の傾向があり、このときのせん断強度は下式で近似される。

$$\tau_p / \sigma_c = \sigma_n / \sigma_c \cdot \tan(\phi + i_0) \quad (\text{Patton})$$

ただし、 ϕ : せん断面摩擦角、 σ_c : 母材強度、 σ_n : 垂直応力
拘束圧がある応力以上である場合、歯型が切断されるため、強度式の勾配 $\tan(\phi + i_0)$ は小さくなる。

母材強度とピークせん断強度時のせん断面摩擦角との関係を、図-5に示す。図中のデータは、ピーク強度時に歯型を破壊することなく斜面上を滑り上がっているものであるが、母材強度の増加に伴い、幾分せん断面摩擦角も増加する傾向が見られる。これは、せん断面上の微小なでこぼこの噛み合せが、せん断強度に影響を与えているためであると考えられる。

せん断面上の歯型の形状によってせん断強度がどのように変化するかを調べるため、歯型の斜辺投影長に対する歯型の底辺長の比 l/λ を歯型形状係数とし、数種の異なる係数を持つ不連続面モデルの直接せん断試験を行なった。なお、初期ダイレイタンスー角 i_0 は20° 一定とした。図-6は、ピークせん断強度と歯型形状係数の関係を表わしたものである。歯型形状係数の増加に対し、ピークせん断強度は減少する傾向が見られる。これは、せん断力を受ける上り斜面の長さに対し、底辺の長さが長いほどせん断強度が大きくなることを示している。

従来のせん断強度提案式には、上り斜面角度であるダイレイタンスー角によるせん断強度の違いは考慮されているが、歯型の形状に着目し強度式に採り入れているものは見られない。本実験のデータはまだ数も少なく、必ずしもこのグラフに示した傾向にあると断言はできないが、今後、歯型形状に注目した研究を進めていく必要があるように思われる。

図-7は、せん断強度と垂直応力をそれぞれ母材強度で無次元化し、それらの関係を、実験データ、Patton, BartonおよびLadanyi らの提案式について比較したものである。同図から、Bartonのせん断強度式は全般的に実験値よりもかなり下回っていることがわかる。それに対し、Ladanyi らの提案式とは、 σ_n / σ_c がかなり大きくなるまでの範囲内で比較的良好一致を示している。また、Pattonの提案式は σ_n / σ_c が

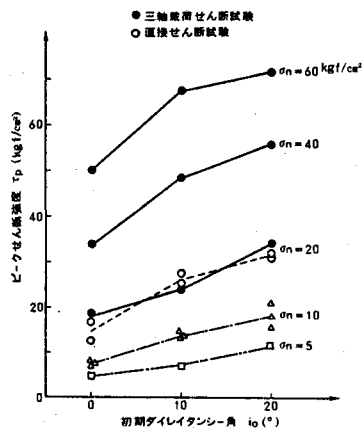


図-3 ピークせん断強度～初期ダイレイタンスー角関係

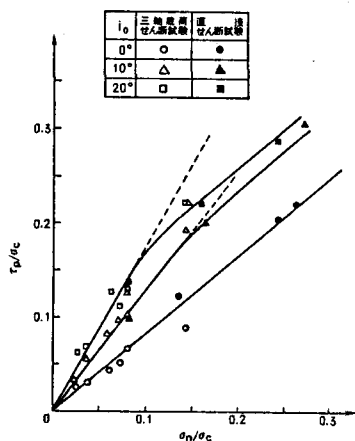


図-4 ピークせん断強度～垂直応力関係

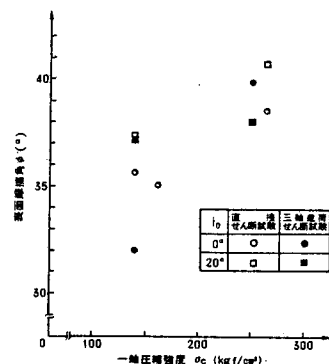


図-5 ピークせん断強度～一軸圧縮強度(母材強度)関係

小さい範囲で実験値とよく合うことが確かめられた。

Bartonのせん断強度式は、JRC値、基本摩擦角 ϕ および垂直応力の関係（図-8の式）から求めた。ここで、JRC値はTilt試験から以下の式により計算する。

$$JRC = (\tan^{-1}((T_1 + T_2)/N) - \phi_r) / \log(JRC \times A/N)$$

ただし、 T_1 , T_2 はすべり面方向の力、 N はブロック自重の垂直成分、 A はジョイント面積、 JRC は母材強度である。Tilt試験によって求めたJRC値とダイレイタンスー角との関係を、図-8に示す。Bartonの提案では、Tilt試験によって求めたJRC値と x 軸の $\log(qu/\sigma_n)$ とを掛け合わせ、ダイレイタンスー角 i とすることを示唆している。図中の黒印で表わされているのがTilt試験結果であり、白抜き印はせん断試験におけるピーク強度時のデータであるが、 $10^\circ, 20^\circ$ 共に理論直線とは一致していない。直接せん断試験でJRC値を求めたとすれば、その値はTilt試験結果から得られた値よりかなり大きく、この差が実測のせん断強度とBartonの提案式によるせん断強度との食い違いになっている。本研究のような規則正しい歯型を持つ不連続面のせん断試験では、Bartonの方法を適用することはできないと思われる。

Ladanyiらは、歯型のせん断された面積の割合 A_s やダイレイタンスー速度 $\dot{v}$ を指数型の関係で近似し、せん断強度式に取り入れている。図-9は、Ladanyiが提案している A_s 式と実測値との比較を示したものである。同図から、実測値は初期ダイレイタンスー角により A_s と σ_n/σ_c の関係が大きく変化している様子が見られるが、提案式では初期ダイレイタンスー角の影響は考慮されていない。せん断試験から考察すると、 $i_0 = 20^\circ$ のものでは、垂直応力 σ_n が比較的小さくてもピーク強度時に歯型が削られることが多いが、 $i_0 = 10^\circ$ では、かなり大きな垂直応力下でないと歯型が削られることはないと判断される。 A_s 式の k_1 を変化させることにより、実測値の近似曲線を求めると以下ようになる。

$$A_s = (1 - \sigma_n/\sigma_c)^{k_1} \quad (i_0 = 20^\circ)$$

$$A_s = (1 - \sigma_n/\sigma_c)^{k_2} \quad (i_0 = 10^\circ)$$

i_0 が 20° の式は上に凸の曲線になり、 i_0 が 10° の式は下に凸の曲線になる。また、ダイレイタンスー速度 $\dot{v}$ についても同様の傾向が見られる。図-10は、ピーク強度時の $\dot{v}$ と σ_n/σ_c との関係を表わしたグラフであるが、提案

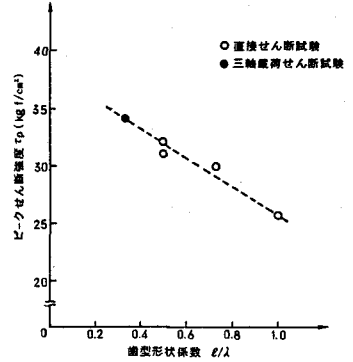


図-6 ピークせん断強度～
歯型形状係数関係

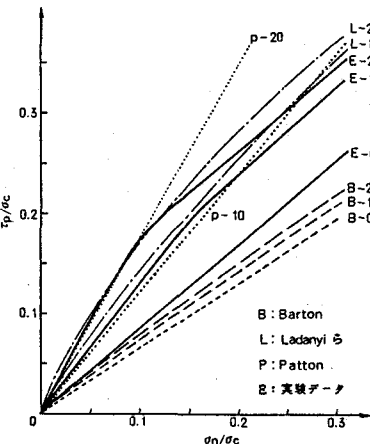


図-7 Barton, Ladanyi, Pattonらの
強度式との比較

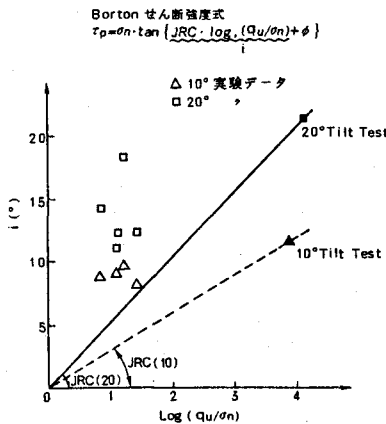


図-8 JRC値とダイレイタンスー角

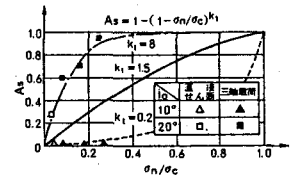


図-9 Ladanyi & Archambault
による A_s 提案式と実測値の
関係

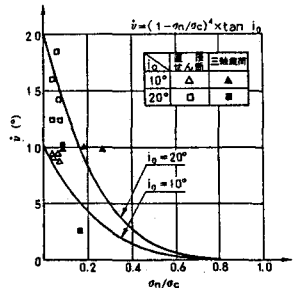


図-10 Ladanyi & Archambault
による $\dot{v}$ (割線ダイレイタンスー
速度)と実測値の関係

式では i_0 の影響が定数として考慮されているに過ぎないために実験値とはあまりよい一致を示していない。実験値から推測すると、 $i_0=20^\circ$ の場合、計算値よりさらに下に膨らんだ曲線に近似される傾向を示し、一方 $i_0=10^\circ$ の場合、むしろ上に凸の曲線に近似される傾向があるように判断される。

3.2 セン断剛性

せん断応力～変位曲線の形状から、せん断過程を図-11のように4つの領域に区分してみる。

I: 微視的な表面形状の噛み合わせがなされる領域

II: 巨視的な表面形状(歯型)の変形が生じる領域

III: 軟化領域(微視的表面形状および歯形のせん断破壊が生じている領域)

IV: 残留領域

応力～変位曲線とダイレイタンスー曲線との対応を考慮し、I、II領域のせん断機構を考えてみよう。まず、領域Iにおいて、微視的な表面のこぼこが潰されたり噛み合わさったりするため、負のダイレイタンスーが生じる。僅かにせん断変位が生じるが、これはせん断による滑りではなく、微視的な表面形状の変形とせん断弾性変形との和であると考えられる。領域IIでは、低拘束圧下の場合と、高拘束圧下の場合との2つに分けられる。低拘束圧下において、微視的な表面の噛み合わせが破壊し、歯型に沿って滑り始める。このときの①から②に至るせん断変位は、ほとんど微視的なこぼこの塑性変形で値も小さい。一方、高拘束圧下では、歯型表面を滑るよりも歯型を切断する方が小さな力で済むために、ある角度をもって歯型がせん断される。

領域I、IIにおけるせん断剛性と、初期ダイレイタンスー角および

垂直応力の関係を表わすグラフを、図-12に示す。個々にバラツキは見られるが、全般的に初期ダイレイタンスー角および垂直応力が増加すると、せん断剛性も増加する傾向が見られる。

4. まとめ

- (1) ピークせん断強度に影響を及ぼす要因として、初期ダイレイタンスー角、垂直応力、母材強度および歯型形状係数をパラメータにとり、せん断強度試験を行なった。その結果から、母材強度と歯型のない表面摩擦角との間に正の相関があること、また、歯型形状がせん断強度に影響を及ぼすことを示唆した。さらに、従来のせん断強度式と実験値との比較検討を行なった。
- (2) セン断応力～変位曲線からせん断のメカニズムについて考察を行なうとともに、せん断剛性と、初期ダイレイタンスー角および垂直応力に正の相関があることを示した。

参考文献

- 1) S.Babdis, B.Sc., M.Sc. (1980) "Experimental studies of scale effects on shear strength, and deformation of rock joints" Dep. Earth Sciences, The Univ. of Leeds.
- 2) Ladanyi, B. and Archambault, G. (1970) "Simulation of shear behavior of a jointed rock mass", Proc. 11th Symp. on Rock Mechanics, (AIME), P105
- 3) 吉中, 新井他(1985), "岩盤分離面に対するロックボルトの作用効果に関する基礎研究" 第17回岩盤シンポジウム, P281

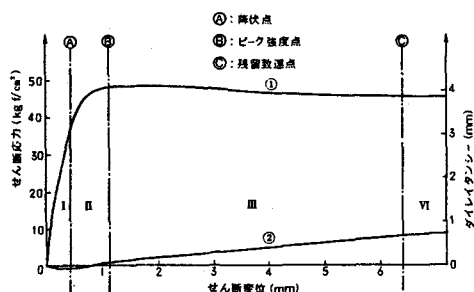


図-11 セン断応力変位曲線(①)およびダイレイタンスー曲線(②)

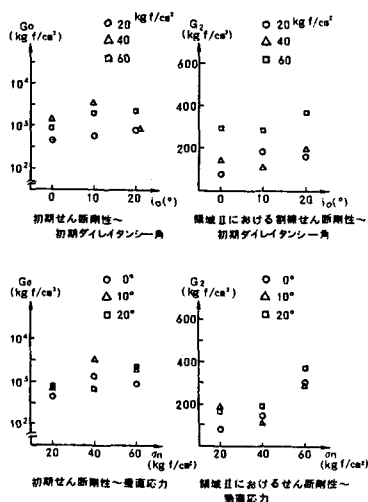


図-12 セン断剛性と初期ダイレイタンスー角および垂直応力の関係

(31) Experimental Study on Shear Property of Rock Joint

by

Ryunoshin YOSHINAKA, Satoshi SKAGUCHI,
(Saitama University)

Teruo SHIMIZU, Hajime Arai and Eizo KATO
(Kumagai Gumi Co., Ltd.)

ABSTRACT

Many studies of shearing experiment imitated a rock joint have been done, and some expressions of shear strength have been suggested in recent years. For instance, Barton and Bandis performed shearing test of discontinuity which has a natural joint surface, the other side, Patton and Ladanyi et al. did shearing test of which has regular teeth. Both sides only take normal stress, strength of material and dilatancy angle as roughness of joint surface into consideration; leave out shape of teeth. In this study, the author took normal stress, strength and shape of teeth into consideration of direct shearing test. And we search effects that these factor gives to shear strength, then compared experimental result with usual theory. Besides we considered a behavior about destruction of joint teeth with reference to relation of shear displacement and shear stress also dilatancy.

The result by this experiment may be summarized as follows;

- (1) The positive correlation was observed between strength of material and friction angle of joint surface has not teeth, and also between shape of teeth and shear strength of joint.
- (2) Mechanism of shearing destruction has close connection with the relation between stress and shear displacement.

Then we showed there was positive correlation between shear stiffness and initial dilatancy also normal stress.