

(33) 実地的な岩盤不連続面粗さを持つ

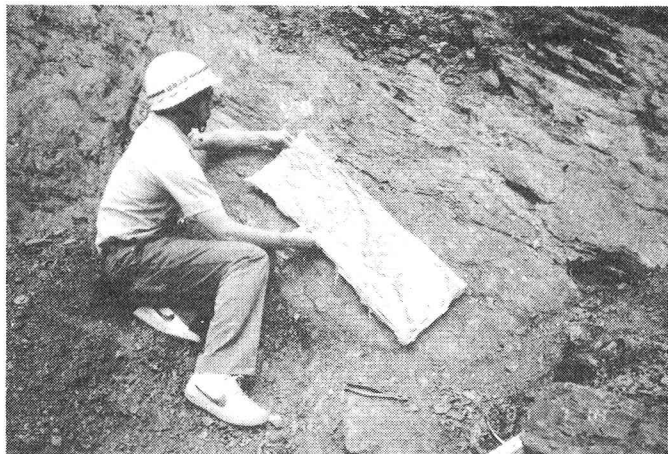
節理モデルのせん断試験

埼玉大学工学部 正員 吉中 龍之進

榑 熊 谷 組 正員 清水昭男 新井 元 加藤恵三 ○熾坂俊英

1. まえがき

岩盤不連続面の強度・変形特性は岩盤斜面や岩盤地下空洞等の安定解析を行う上で重要である。筆者らは、これまで規則的なこぎり歯状の不連続面やBartonの JRC縦断面図の形状を持つ二次元不連続面のせん断特性について研究して来たが、今回その延長線上に立って、実地的な不連続面を用いたせん断試験を行ったので、その概要を報告する。



2. 実験概要

2.1 不連続面の採取

自然の岩盤不連続面の採取は東京近郊の採石場で行った。岩質は砂岩および凝灰岩で、不連続面そのものが露出している場所を選定した。採取方法は、まず3辺にスポンジゴム(厚さ3cm×幅3cm)を張り付けたアクリル板(30cm×90cm)を壁面に圧着させ、次に壁面とアクリル板との間にできた空間にシリコンを注入し、固化するまで放置した。固化後シリコンをアクリル板ごと壁面からはがし、出来上がった不連続面の逆刷り(雄型、写真1)を実験室に持ち帰り、雄型を用いて同様な方法で雌型を作成した。雄型・雌型とも20cm×82.5cmの大きさに加工して、モルタル打設用の型板とした。採取した不連続面は3断面で、その縦断面形状を一例ずつ図1に示した。

写真1 採取した不連続面

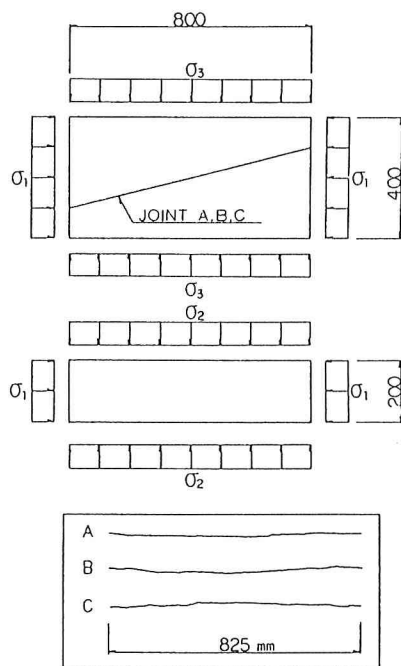


図1 実験供試体

2.2 実験方法

実験供試体は、図1に示すような80cm×40cm×20cmのモルタル製で、不連続面部の型枠として上記のシリコン板を用いた。供試体の作成方法は、二つの鋼製型枠に不連続面に対応した形状の雄型と雌型のシリコン板を別々に設置しモルタルを打設した。

載荷試験は、平面ひずみ状態を保ちつつ、不連続面の垂直応力 σ_n が一定のまま、せん断応力 τ が増加していくように、 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 を調整しながら行った。供試体の変位は長短辺に2個ずつ計8個のダイヤルゲージで測定し、各載荷板にはテフロンシートを2～3枚重ねて摩擦の低減に努めた。実験パラメーターは表1に示す通りである。実験に用いた垂直応力は不連続面の影響の大きい岩盤斜面や岩盤空洞壁面近傍で、危険な不連続面の方向を対象と考え、低応力とした。

3. 実験結果および考察

3.1 実際の不連続面モデル

図2に実際の不連続面モデルのせん断応力～せん断変位曲線を示す。いずれの曲線も弱い軟化の傾向を示すが、顕著に強度低下する位置(せん断変位)は、不連続面の種類(粗さ)によってまちまちである。面の粗さの特徴を言葉で表現するならば、Aは相対的に平坦な面、Bは大きくゆるやかな凹凸の多い面、CはBより小規模の凹

凸が多い面といえよう。図2によれば垂直応力 $\sigma_n=5\text{kgf/cm}^2$ のとき軟化の順序がB, C, Aであったものが、 $\sigma_n=20\text{kgf/cm}^2$ のときにはA, C, B(Bは $U>30\text{mm}$ で軟化している)と全く逆転している。軟化の要因には、凹凸の切断とダイレイタンスー曲線の傾きの減少があるが、後者は図2からもわかるように、せん断の初期以外は急激な変化がないので凹凸の切断の方が重要な要因であると考えられる。Aでは両者ともかみ合せがよかったので、垂直応力の大きい方が凹凸が早く切断されたと考えられる。Bでは、低垂直応力時に、大きな凹凸上の小さな凹凸の切断の寄与によるピークが、高垂直応力時には消えて(小さな凹凸がつぶれた可能性もある)大きな変位の後に凹凸の切断がおこったものと考えられる。Cでは高垂直応力時の方がかみ合せがよく、比較的大きな凹凸が、比較的大きな変位の後に切断されたものと考えられる。ダイレ

イタンスーは、かみ合せの影響も受けるが、面の影響が最も大きく、B, A, Cの順になっている。

図3に不連続面の違いによるせん断強度の変化を示す。ここでの残留強度は、変位が30mmをこえたときの強度とする。面の違いによるピーク強度の大小関係は垂直応力が変わると変化する。(面Cが垂直応力の増加に対し面A, Bより高い増加率を示した。)かみ合せの影響もあると思われるが、この事実は粗さの評価を難しくすることになる。次に残留強度についてみると、軟化しなかった面Aで、 $\sigma_c=300\text{kgf/cm}^2$ の場合を除けば、不連続面の違いによる差は小さい。ピーク強度から残留強度への低下量は、前述の例外を除けば、11~18%で、この分が、面の粗さの寄与と考えられる。

表1 実験パラメーター

一軸圧縮強度 σ_c		300, 500 kgf/cm ²
垂直応力 σ_n		5, 20 kgf/cm ²
不連続面 (粗度)	三次元	A, B, C
	二次元	B-1, B-2, B-3

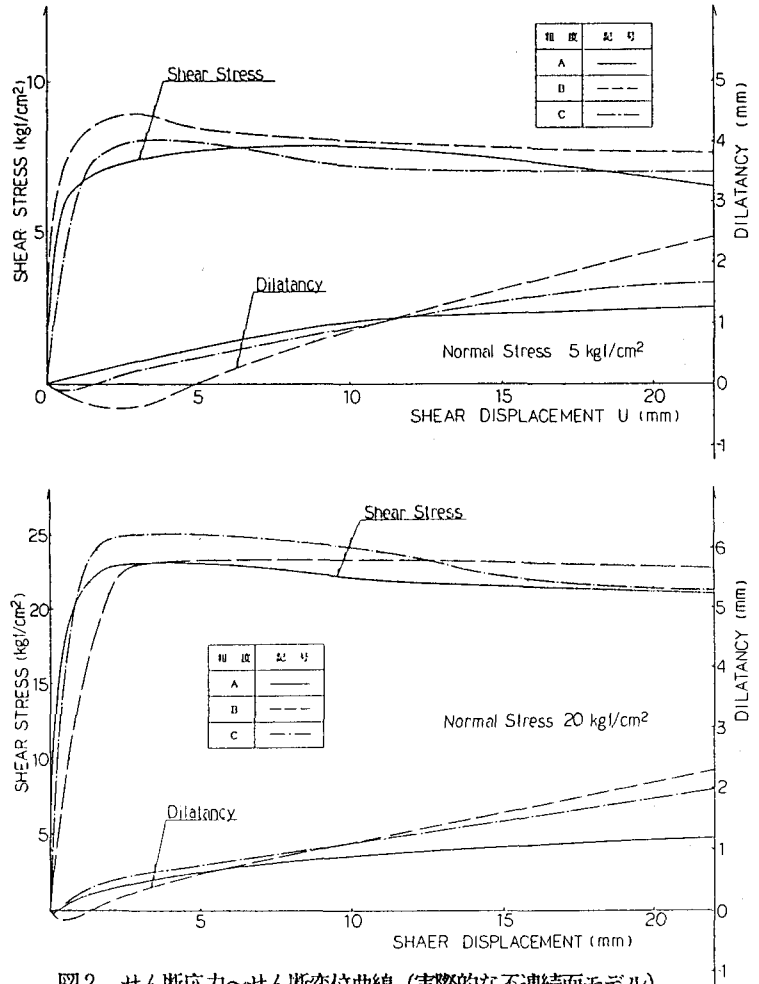


図2 せん断応力～せん断変位曲線(実際の不連続面モデル)

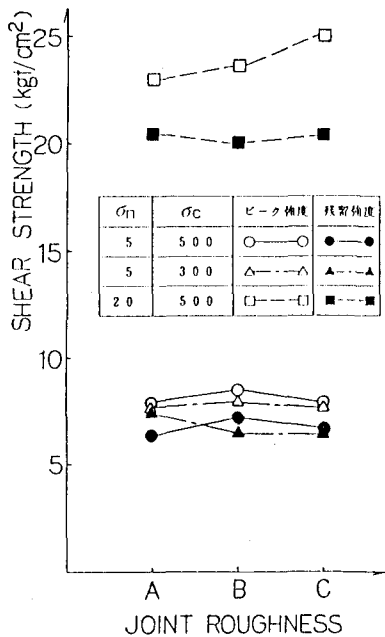


図3 実際的な不連続面モデルの強度

3.2 二次元不連続面モデル

図4に二次元不連続面モデルのせん断応力～せん断変位曲線を示す。二次元不連続面とは、どの位置で切っても同じ縦断面形状をしているもので、これらの面は不連続面Bの縦断面形状から作成したものである。図4によれば、三つの面のうちB-1だけが大きな強度を示し激しく軟化した。他の二つの面の強度はともに比較的小さく、B-3は早期に弱い軟化を示し、B-2はせん断変位が25mmを超えてから軟化している。オリジナルの(三次元)不連続面Bの強度と軟化の程度は、三者の平均に近い。B-1が大きな強度を示すのは、1箇所角度の急な段差があり、これがかみ合ったためであろう。この段差は面が三次元的になると、強くかみ合わない場合があり、また仮に強くかみ合っても、奥行き方向の広がりか二次元面に比べて小さいので、その影響も小さくなるものと考えられる。したがって、実際的な不連続面では、角度の急な凹凸は応力の集中により切断されやすく、その影響としての強度増加は比較的小さいと考えられる。

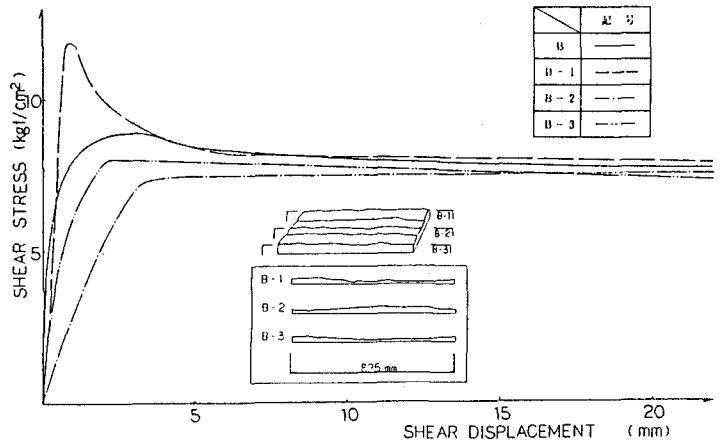


図4 せん断応力～せん断変位曲線(二次元不連続面モデル)

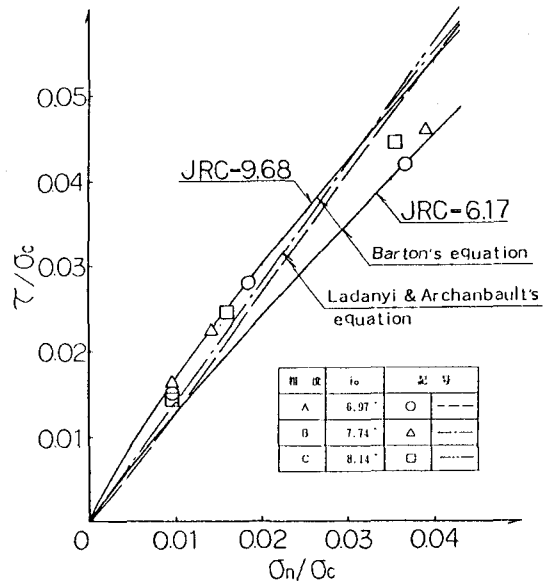


図5 ピークせん断強度～垂直応力関係

3.3 既往の強度式との比較

ピークせん断強度 τ_p ～垂直応力 σ_n 関係を一軸圧縮強度 σ_c で無次元化したグラフ上での実験結果と既往の強度式との比較を図5に示す。Bartonの式は、 σ_c で無次元化すると、不連続面粗さ係数 JRCを用いて、

$$\tau_p / \sigma_c = (\sigma_n / \sigma_c) \cdot \tan \{ JRC \cdot \log_{10} (\sigma_c / \sigma_n) + \phi \} \dots \dots \dots (1)$$

ここに ϕ は基底摩擦角とよばれ、母材の平らな面の摩擦角をあらわし、 $0 \leq JRC \leq 20$ である。

図5には実験値を包含するような上限と下限のJRCを持つ曲線を示したが、この曲線間ではJRCの変化に対し曲線はほぼ一様に変化すると考えてよい。そうして見ると、Bartonの式は仮にJRC値を正しく選んでも実験結果とあまりよく合わない。不連続面毎にみればC面はJRC=8とすれば中央の点がややはずれるものの比較的よく合うが、A、B面はBartonの式ではフィットすることができない。

Ladanyi & Archambault の式は、 σ_c で無次元化すると、

$$\frac{\tau_p}{\sigma_c} = \frac{(\sigma_n/\sigma_c)(1-A_s)(\dot{v} + \tan \phi) + A_s \cdot \tau_r/\sigma_c}{1 - (1-A_s) \cdot \dot{v} \cdot \tan \phi} \quad \dots(2)$$

ここに、 A_s は凹凸の切断面積の割合、 $\dot{v}$ はピーク時のダイレイタンスー曲線の傾き、 τ_r は母岩のせん断強度で、それぞれ、

$$A_s = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{k_1}, \quad \dot{v} = \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{k_2} \cdot \tan i_0 \quad \dots(3)$$

$$\tau_r/\sigma_c = \left\{ \left(\sqrt{1+n}-1 \right) / n \right\} \cdot \sqrt{1+n} \cdot \sigma_n/\sigma_c \quad \dots(4)$$

i_0 は初期ダイレイション角で、遷移応力 $\sigma_T \approx \sigma_c$ とされ、

$k_1=1.5$ 、 $k_2=4$ が推奨されている。

図5には、 i_0 は凹凸の正斜面の平均勾配に対応する角とし、 $n=9$ とした場合の曲線を示した。テフロン摩擦を考慮すれば低応力部は比較的よく合うが高応力部では、かなりはずれている。

図6に、 A_s 、 $\tan^{-1} \dot{v}$ と σ_n/σ_c の関係を示す。実験の A_s は、変位の増加に伴い累積したものであるが、推奨式よりはるかに大きい。 $\dot{v}$ は、推奨式とオーダー的には合っているが、変化の傾向が異なる。また、 A_s は面によって変化の傾向が類似しているが、 $\dot{v}$ はかなり異なっている。

4. あとがき

自然の粗さを持つ不連続面モデルのせん断試験を行った結果をま

とめると、①せん断応力～せん断変位曲線は軟化の傾向を示し、せん断変位が30mm以内ではダイレイタンスーは単調な増加傾向を示す。②ピーク強度から残留強度への低下量は、一例を除けば、11～18%と小さい。③自然の粗さを持つ不連続面のせん断強度と軟化の程度は、代表的な3つの縦断面形状から作成した二次元不連続面のその平均に近い。④実際の不連続面では、角度の急な凹凸は応力の集中により切断されやすく、その影響としての強度増加は比較的小さいと考えられる。⑤既往の強度式では、今回の実験結果を统一的に説明することが出来ない。

岩盤不連続面の強度・変形特性については、今後さらに実験を重ね研究を進めてゆきたい。

最後に本研究を遂行するに当たり多大な労力を惜しまれなかった丹沢昭義、中村俊智の両氏（埼玉大学）ならびに、岩盤不連続面の採取に御協力頂いた菱鋸建材㈱、㈱昭和石材工業所の皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉中、腰塚、清水、新井、蟻坂、岩盤不連続面の強度特性について
土木学会第42回年次学術講演会講演概要集(Ⅲ)、pp.334～335、1987
- 2) R.E.Goodman 原著、赤井、川本、大西共訳；不連続性岩盤の地質工学；森北出版、pp.151～153、1978

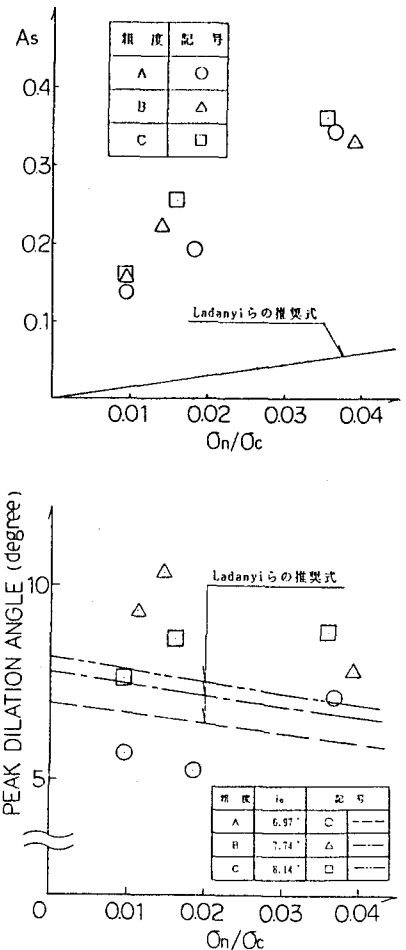


図6 A_s 、 $\tan^{-1} \dot{v}$ と σ_n/σ_c の関係

(33) Shear Tests of Rock Joint Model using Roughness of Natural Rock Joint

by

Ryunoshin YOSHINAKA (Saitama Univ.), Teruo SHIMIZU (Kumagai-Gumi Co.,Ltd.)

Hajime ARAI, Eizo KATO, Shunei ARISAKA (Kumagai-Gumi Co.,Ltd.)

ABSTRACT

It is important to know the characteristics of strength and deformation of rock joint when we analyse the stability of rock slopes or underground openings in rock. The authors have studied shear property of two-dimensional joints which have regular saw teethed asperities or Barton's JRC profiles.

On the extended line we executed shear tests of rock joint model using mortar specimens whose roughness are copies of natural rock joint.

From the test results we get following observations.

- 1) Shear stress-Shear displacement curves of the test result show tendency of softening and dilatancy increase gradually within 30mm of shear displacement.
- 2) Differences of peak shear strength and residual shear strength of the same specimens are relatively small. Rate of the differences against peak shear strength are 11~18% except one case which did not show softening.
- 3) Peak shear strength and softening of joint model which has roughness of natural joint are nearly equal to the average of those of two-dimensional joint models that were made from profiles of the natural joint surface.
- 4) Steep asperities of natural joint are easy to shear off by concentrated local shear stress and do not have so much effect to the peak shear strength.
- 5) It is impossible to explain the test results uniformly by familiar strength equation.