

規則的な不連続面のせん断時の ダイレタンシー特性

楠見晴重*・寺岡克己**・谷口敬一郎***

本論文は、規則的な歯型状の不連続面を有する岩石供試体を用いて一面せん断試験を行い、不連続面の粗さの相違がそのせん断破壊様式に与える影響について、主にダイレタンシー特性の面から明らかにしようとした。その結果、垂直応力の増加に対するダイレタンシーの変化は、不連続面の粗さが増大するほど急激なものとなり、また、その変化は著者らの提案する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。

Keywords : shear strength, dilation, rock joint

1. まえがき

一般に、岩盤内には断層、節理、層理などの不連続面が存在し、これら不連続面の強度あるいは変形特性は、特に硬岩から成る岩盤においては岩盤全体の力学特性を支配するほどの大きな影響を与える。したがって、地下空間、ダムなどの岩盤を対象とした工事の設計を行う場合、岩盤の力学特性を評価するに際して、不連続面の強度あるいは変形特性を十分に把握する必要がある。

岩盤不連続面のせん断強度特性に関する研究は従来から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。しかしこれらの強度式は、いずれも実測値と比較して満足し得る結果を与えていないように思われる。これは従来の研究では不連続面のせん断強度を表現することのみに力点が置かれており、その変形特性あるいは破壊様式に関して十分に考慮されていなかったためではないかと思われる。そこで本研究では、数種類の粗さが異なる規則的な歯型状の不連続面を有する供試体を用いて一面せん断試験を行い、それらの変形特性、特にダイレタンシー特性について検討を行い、さらに粗さの相違がその破壊様式に与える影響について検討した。また、規則的な歯型状の不連続面に対して適用可能な Patton¹⁾あるいは Ladanyi and Archambault²⁾による既存の強度式と本研究の実験結果との比較を行うことによって、そのせん断強度特性について明らかにしようとした。

2. 実験方法

(1) 試験装置

Fig.1 は、本研究に用いた一面せん断試験機を示した

ものである。この試験機は、高圧三軸試験機の三軸セルの取り付け部分に一面せん断試験機を取り付けたものである。せん断荷重は、三軸試験機の軸荷重装置によって与えられるために、荷重方向は鉛直であり、電気油圧サーボによって制御される。またせん断荷重の最大許容荷重は 20 tf である。垂直荷重は油圧によって水平方向に荷重され、マニュアル制御によって 0~5 tf の間で荷重を自由に变化させることができる。せん断箱は左右に分離しており、一辺 50 mm の立方体供試体および直径 50 mm、高さ 50 mm の円柱供試体に対して試験が可能である。Fig.2 は、本研究における計測システムを示したものである。荷重の測定はせん断荷重、垂直荷重ともにロードセルを用い、変位の測定はせん断変位、垂直変位ともに差動トランス型変位計を用いた。これらはいずれも増幅器を介して自記記録装置に接続されており、せん断荷重-せん断変位、せん断荷重-垂直荷重、垂直変位-せん断変位の 3 つの関係が試験の進行と同時に自記記録装置に描かれるようになっている。

(2) 供試体および実験方法

本研究では、不規則形状の岩盤不連続面を単純にモデル化したものとして、三角形の規則的な歯型状の不連続面を有する供試体を用いて実験を行った。また実際の岩盤不連続面は風化により強度が低下している場合が多いことから、供試体の材料としてはほぼ軟岩程度の強度を有するものとして石膏を用いた。

Fig.3 は実験に用いた石膏供試体を示したものである。この供試体は歯型形状の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 50 mm の立方体である。実験に際しては、不連続面の中心がせん断面と一致するようにせん断箱内に収められるように整形した。また Fig.3 に従い歯型斜面の傾斜角を i 、歯型の高さを h 、歯型底面の長さを l とし、Table 1 に示すような 7 種類の異なる歯型形状を有する供試体を作製

* 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)

** 工修 (株) サンヨー

*** 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

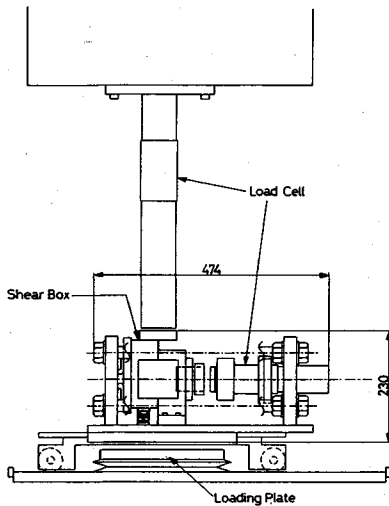


Fig.1 Direct shear testing machine.

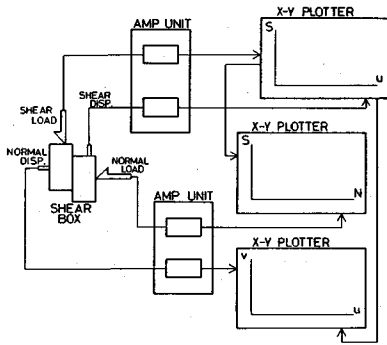


Fig.2 Schematic diagram of measuring system.

した。これらの供試体は、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日間気乾養生させた。なおこの供試体に用いた細骨材は、粒径0.42~0.84mmの川砂である。Table 2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、これらの供試体と同一寸法、同一配合の不連続面を有さない 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。Fig.4に Intact 供試体と平滑な不連続面を有する供試体に対する一面せん断試験結果を示した。図中の実線は、Fairhurst⁽¹⁾の強度式より計算される Intact 供試体の最大せん断強度であり、破線は平滑な不連続面の強度値を Coulomb 式に近似させたものである。この図より、これら2つの強度式により Intact 供試体および平滑な不連続面の強度を表現することが可能であり、また実験の再現性が十分に高いことが確認された。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は0.2~8.0MPaの範囲である。また、せん断荷重の載荷方法はひずみ制御とし、せん断変位速度は0.1

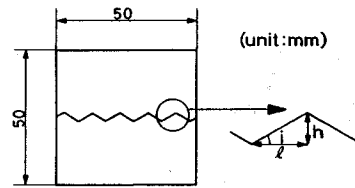


Fig.3 Plaster specimen which has the regular joint of triangle shape.

Table 1 Geometry of each specimen.

Specimen Type	i (°)	h (mm)	q (mm)
R1015	10	1.5	8.3
R1030	10	3.0	18.7
R2030	20	3.0	8.3
R2050	20	5.0	14.0
R3030	30	3.0	5.0
R4530	45	3.0	3.0
R4550	45	5.0	5.0

Table 2 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)
15.58	17.16	2.69

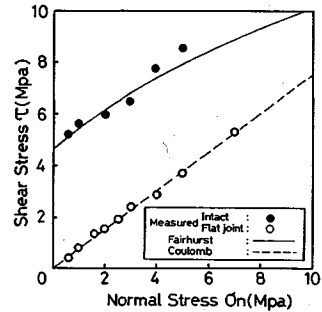


Fig.4 Shear strength of flat joints and Intact specimens.

mm/minとした。

3. 実験結果および考察

(1) ダイラタンシー特性

Fig.5は、R2030供試体に関して一面せん断試験を行った結果得られた、せん断応力-せん断変位曲線と垂直変位-せん断変位曲線の一例を示したものである。この図から、それぞれの曲線における変曲点は、両者ほぼ一致したせん断変位点に生じていることがわかる。本研究では、これらの変曲点が供試体のせん断破壊過程における重要な変化点であると考え、せん断応力-せん断変位曲線の変曲点によって供試体のせん断破壊過程を4つの領域に分け、各領域ごとのダイラタンシーに着目した。各領域の区分について以下に説明する。

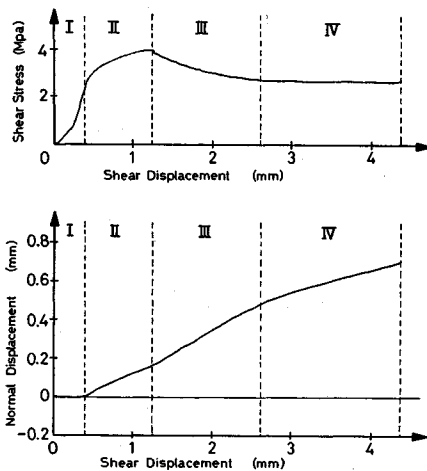


Fig.5 An example of shear stress-shear displacement curve and normal displacement-shear displacement curve for R2030 specimen.

領域Ⅰ：せん断の初期段階において、せん断応力-せん断変位曲線が下に凸な曲線状を示す領域とそれに続く弾性的変形を示す領域。

領域Ⅱ：せん断応力-せん断変位曲線が直線の変化を示さなくなり、ひずみ軟化を示す領域。

領域Ⅲ：ピーク強度に達した後、残留強度に至るまでのひずみ軟化領域。

領域Ⅳ：残留強度領域。

Fig.6 (a), (b), (c), (d) は歯型高さ 3 mm の供試体に関して、各領域のダイレクション率の変化を示したものであり、歯型傾斜角 i をパラメーターとして表している。なお、これらの図においてダイレクション率をダイレクション率 ψ で表し、 ψ は各領域における垂直変位-せん断変位曲線の割線勾配である。ただし領域Ⅲ、領域Ⅳの区分が明確でない供試体の ψ について、領域Ⅲに関してはピーク強度点直後の接線勾配、領域Ⅳに関しては試験終了時の接線勾配とした。

Fig.6 (a) は領域Ⅰにおけるダイレクション率 ψ の変化を示したものである。この図において、R1030 供試体の $\arctan \psi$ は、実験を行ったすべての垂直応力下においてほぼ 0° であり、圧縮も膨張もみられない。これに対して、R1030 供試体以外の供試体では、垂直応力 σ_n が 3 MPa 以下の低い垂直応力域において、歯型傾斜角 i が大きくなるに従って、 $\arctan \psi$ の値も大きくなっている。領域Ⅰは、微視的な歯型表面の凹凸の噛み合わせと、それに続く歯型自体の弾性変形によって変位が進行する領域であると考えられるが、低い垂直応力下において $\arctan \psi$ の値は i が大きくなるに従って増加していることから、 i が 20° 以上の供試体に関しては、歯型自体の弾性変形が進行するのと同時に、歯型に沿った滑り上がりが生じているものと考えられる。また

R1030 供試体に関しては、領域Ⅰに相当する変位はごく微小であり、载荷の初期段階においてただちに領域Ⅱへ移行しているため、このような結果になったのである。

Fig.6 (b) に示した領域Ⅱにおいて、R1030 供試体を除いて $\arctan \psi$ の値は低い垂直応力下では大きな値を示すが、垂直応力が増大するに伴い急激に小さくなっている。これに対して、R1030 供試体は低い垂直応力域ではほぼ一定の $\arctan \psi$ の値を示し、 $\sigma_n = 4$ MPa から 5 MPa の間で急激な減少を示している。また $\arctan \psi$ は、急激な減少を示した後、ある垂直応力以上ではほとんどマイナスの値を示しており、このことから高い垂直応力域では供試体には負のダイレクションが生じていると考えられる。領域Ⅱは、供試体が弾性的変形を示さなくなりひずみ硬化を示す領域であることから、歯型がその斜面に沿って滑り始める領域、あるいは歯型の部分的な破壊が生じ、歯型自体のせん断が始まる領域であると考えられる。しかし Fig.6 (b) より、歯型傾斜角 i とほぼ等しい $\arctan \psi$ を示すことから歯型に沿った滑り上がりのみによって変位が進行していると考えられるのは、 $\sigma_n = 0.2$ MPa の R2030 供試体と R3030 供試体のみである。また、R1030 供試体では、低い垂直応力下においても歯型傾斜角 i よりも小さな $\arctan \psi$ の値を示していることから、歯型の部分的な破壊は非常に低い垂直応力下においても生じていると考えられる。

Fig.6 (c) に示した領域Ⅲにおいて、R1030 供試体および R2030 供試体の $\arctan \psi$ の変化は、低い垂直応力域において上に凸の曲線を示している。R2030 供試体に関して、領域Ⅱの低垂直応力域において急激な $\arctan \psi$ の減少を示しているにもかかわらず、領域Ⅲでこのような変化を示しているのは、領域Ⅱで生じた歯型の部分的な破壊が、歯型全体の破壊には至らなかったためであると考えられる。また R1030 供試体に関して、領域Ⅱでは $\sigma_n = 4$ MPa 以下の垂直応力域においても、歯型傾斜角 i よりも小さな 5° 程度の $\arctan \psi$ の値を示しているが、領域Ⅲでは i にほぼ等しい 10° 前後の値を示しており、これも R2030 供試体と同様な理由によると推測される。これに対して R3030 供試体および R4530 供試体では $\arctan \psi$ の変化は領域Ⅱと大きく変わらず、領域Ⅱで生じた歯型の部分的な破壊が進行し、歯型全体の破壊に至るものと考えられる。

Fig.6 (d) は、領域Ⅳにおける $\arctan \psi$ と σ_n の関係を示したものである。前述したように、領域Ⅳは残留強度領域であり供試体の変位がかなり進んだ状態であることから、領域Ⅳにおける $\arctan \psi$ の値は歯型の破壊状態を反映していると考えられる。Fig.6 (d) より R1030 供試体および R2030 供試体は、低い垂直応力域で i とほぼ等しい $\arctan \psi$ の値を示しており、これらの供試

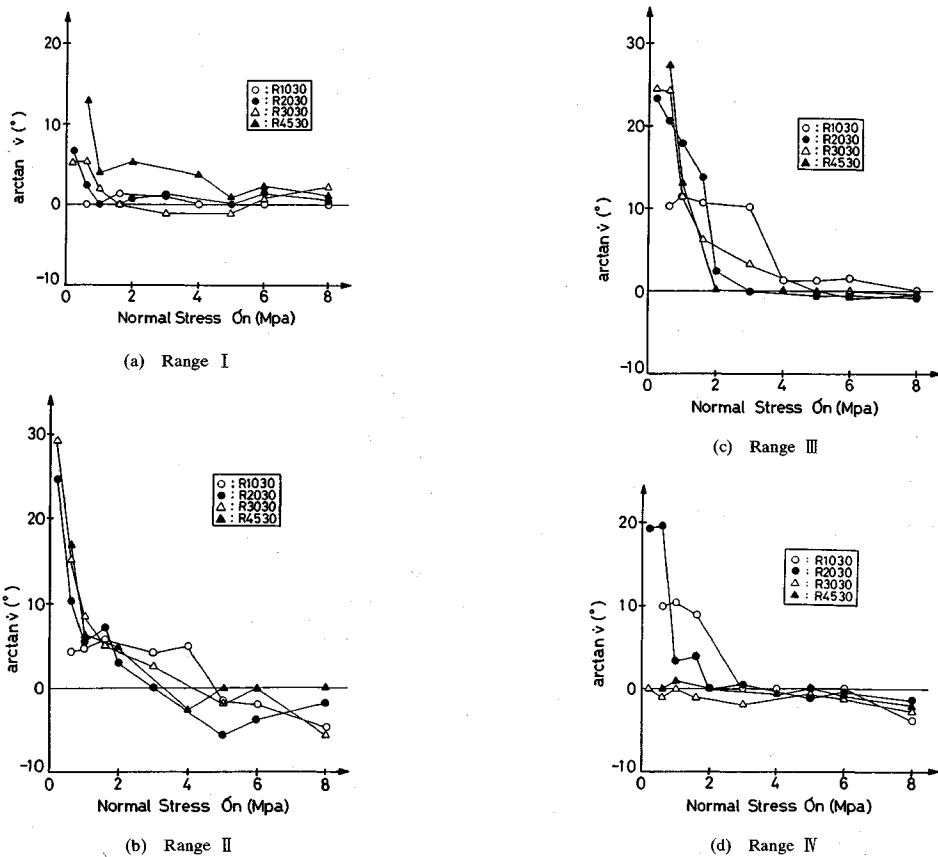


Fig.6 Relationship between dilatancy and normal stress.

体では歯型自体の破壊は生じておらず、歯型に沿った滑り上がりによって破壊が進行したものと考えられる。これに対して R3030 供試体および R4530 供試体では、試験を行ったすべての垂直応力下で $\arctan v$ はほぼ 0° となっており、非常に低い垂直応力下においても歯型自体の破壊が生じていることを示している。

上述したように、歯型傾斜角 i の相違によってダイレタンスー率 v の変化傾向はかなり異なったものとなっている。特に、ピーク強度に関連が深いと考えられる領域 II から領域 III における $\arctan v$ の変化は、R1030 供試体では上に凸の緩やかな減少傾向を示しているのに対して、歯型傾斜角 i が大きくなるに従って $\arctan v$ の減少傾向は急激なものとなっている。また、残留強度域である領域 IV においても、R1030 供試体および R2030 供試体では、低い垂直応力下において歯型傾斜角 i とほぼ等しい $\arctan v$ の値を示しているのに対して、R3030 供試体および R4530 供試体では、低い垂直応力下においてもほぼ 0° である。またどの領域においても、4 MPa 以上の高い垂直応力域では $\arctan v$ はほぼ 0° 以下の値を示しており、したがってこの垂直応力域ではダイレタンスーはほとんど生じていない。こ

れらのことから、供試体の破壊様式の変化に関して、次のように推測することができる。R1030 供試体あるいは R2030 供試体のように歯型傾斜角 i が比較的小さな供試体では、低い垂直応力下においては歯型斜面に沿った滑り上がりによって破壊が進行し、垂直応力の増加に伴って歯型自体のせん断現象が顕著となる。これに対して R3030 供試体、R4530 供試体のように比較的大きな歯型傾斜角を有する供試体では、非常に低い垂直応力下においても、その破壊は歯型斜面に沿った滑り上がりだけではなく、歯型自体の破壊を伴っている。また、低い垂直応力下における歯型斜面の滑り上がりによる破壊から、高い垂直応力下における歯型自体の破壊への破壊様式の変化は、歯型角度が大きくなるに従って急激になるものと推測される。

(2) ダイレタンスー特性の定量化

ダイレタンスー特性をせん断強度式の中に組み入れたものとしては、Ladanyi and Archambault によって提案されている強度式²⁾がある。Ladanyi and Archambault は、垂直応力の変化によるダイレタンスー率の変化、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強度式を提案している。

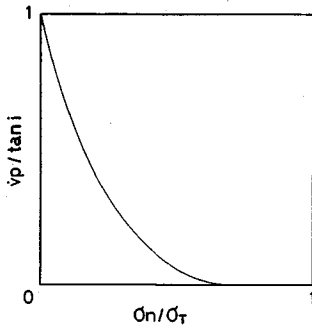


Fig.7 Variation of v_p obtained from eq. (4).

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

ここで、 S_R : 岩石実質部分のせん断強度
 a_s : 岩石実質部分がせん断される場合
 v_p : ピーク強度点におけるダイレーション率
 S_R に関して、Ladanyi らは式 (2) に示す Fairhurst の放物線形の破壊基準¹¹⁾を用いることを推奨している。

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

ここで、 $n = \sigma_c / (-\sigma_t)$
 $m = (n+1)^{1/2}$
 σ_c : 岩石実質部分の一軸圧縮強度
 σ_t : 岩石実質部分の引張強度

また、彼らは多くの実験の結果から 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、式 (3), (4) に示す実験式で与えた。

$$a_s = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{1.5} \dots\dots\dots (3)$$

$$v_p = \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{4.0} \cdot \tan i \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 σ_T : 岩石実質部分の遷移応力^{12), 13)}であり、一軸圧縮強度で近似される。

i : 歯型傾斜角

式 (4) は、Fig.7 に示すように、 σ_n/σ_T が 0 から 1 まで増加するのに伴って、 v_p が $\tan i$ から 0 まで緩やかに減少する傾向を与えている。また式 (4) の v_p は、Fig.6 (c) に示した領域 III における \dot{v} にほぼ相当していると考えられるが、これらの変化傾向はかなり異なったものとなっている。これは式 (4) では、歯型傾斜角 i の影響を定数として考慮しているに過ぎず、3. (1) で述べたダイレーション特性の相違を考慮していないためであると推測される。

以上のことから、本研究ではピーク強度点におけるダイレーション率 v_p に対して、3. (1) に述べたように、歯型傾斜角 i によって \dot{v} の変化傾向が異なり、またある垂直応力以上で \dot{v} がほぼ 0 となる傾向を表現するた

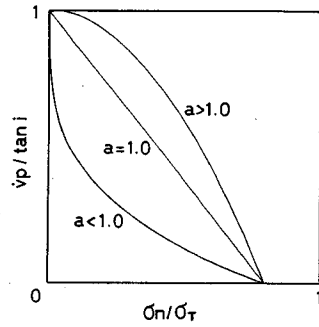


Fig.8 Variation of v_p obtained from eq. (5) and eq. (6).

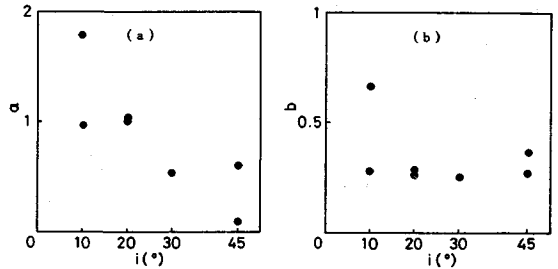


Fig.9 Relationship between the inclination of the teeth i and (a) a value and (b) b value.

めに次に示す式 (5), (6) を用いた。

$$0 \leq \frac{\sigma_n}{\sigma_T} < b$$

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

$$b \leq \frac{\sigma_n}{\sigma_T}$$

$$v_p = 0 \dots\dots\dots (6)$$

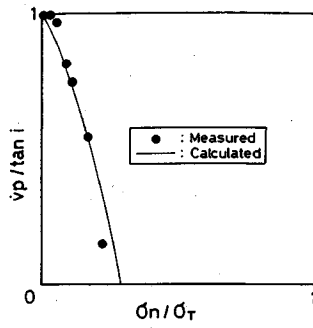
ここで、 a : 歯型形状の相違によって変化する係数
 b : $(b \cdot \sigma_T)$ によって $v_p = 0$ となる垂直応力を定める係数

Fig.8 は、式 (5), (6) を用いて計算される v_p と σ_n の関係を示したものであり、 a, b の値を変化させた場合の v_p の変化を表している。この図より、 a の値によって上に凸な曲線から下に凸な曲線までを表現することができ、 b の値によって v_p が 0 となる垂直応力を定めることができる。

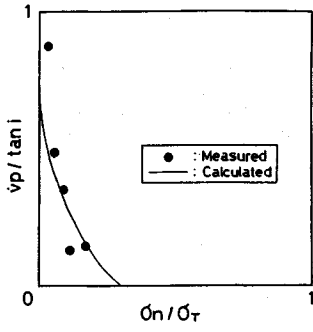
Fig.9 (a), (b) は、各供試体の v_p を最小二乗法を用いて式 (5) に近似させた結果得られた係数 a, b の値を示したものである。Fig.9 (a) より、 a 値の変化は i の増加に伴って減少する傾向を有しており、そこで a 値と i の関係を一次式によって近似させた結果、次式が得られた。

$$a = 1.63 - 0.03 \cdot i \dots\dots\dots (7)$$

また Fig.9 (b) より、 b 値は $i = 10^\circ$ における 1 点を除



(a) R1015 specimen



(b) R4550 specimen

Fig.10 Comparison of measured v_p and calculated v_p using eq. (5), (6), (7) and $b=0.3$.

いて、ほぼ0.3前後の値を示しており、このことから b は、 i 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、 $b \approx 0.3$ となる。

Fig.10 (a), (b) は、最も小さな歯型を有する R1015 供試体と最も大きな歯型を有する R4550 供試体に対して、式 (5), (6), (7) および $b=0.3$ を用いて求めた v_p の計算値と実測値とを比較したものである。これらの図より、いずれの供試体に対しても計算値と実測値とはよい一致を示していることが認められた。また、歯型高さおよび歯型角度の異なる他の供試体に対しても、Fig.10 に示したのと同様に計算値と実測値はほぼ一致している。これらのことから、歯型角度の相違によって著しく異なるピーク強度時のダイレタンシー特性を、 a 値を用い歯型角度の影響を考慮することによって表現できることが明らかとなり、著者らが提案した式 (5), (6), (7) の有効性が確認された。しかし、 a 値および b 値に関しては、不連続面を形成する材料の力学特性の影響を受けると考えられ、そのため今後も異なった強度あるいは変形特性を有する材料に対して実験を行い、検討を進める必要があると考えられる。

(3) せん断強度特性

ここでは、今回の実験結果と既存の強度式との比較を行い、また 3. で述べたダイレタンシー特性を考慮し、

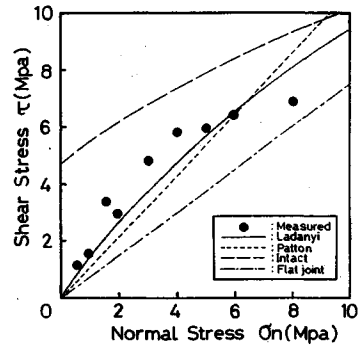


Fig.11 Comparison of peak shear strength for R1030 specimens between measured values and theoretical values.

規則的な不連続面のせん断強度特性について検討を行った。

Fig.11 は、R1030 供試体に関して一面せん断試験を行ったときのせん断応力と垂直応力との関係を示したものである。なお図中に描かれている実線は、式 (1) に示した Ladanyi and Archambault の理論式から求めた関係を、破線は Patton の理論式から求めた関係を示している。Patton の理論式は低い垂直応力域では、歯型に沿った滑り上がりのみによって破壊が進行し、垂直応力がある値以上になると歯型自体のせん断のみによって破壊が進行するとしたものであり、式 (8), (9) の 2本の直線によって表される。

$$\sigma_n < \frac{C}{\tan(i+\phi) - \tan\phi}$$

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(i+\phi) \dots\dots\dots (8)$$

$$\sigma_n > \frac{C}{\tan(i+\phi) - \tan\phi}$$

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan\phi \dots\dots\dots (9)$$

- ここで、 C : 見掛けの粘着力
- ϕ : 基本摩擦角
- i : 歯型傾斜角

また、式 (2) によって計算される Intact 供試体のせん断強度、および Coulomb 式に近似させた平滑な不連続面の強度も図中に示されている。Fig.11 に関して、4 MPa 程度までの低い垂直応力下において、実験値は Patton の理論曲線および Ladanyi and Archambault の理論曲線と比較してやや高い値を示している。しかし垂直応力が 4 MPa より大きい領域では、実験値の垂直応力に対するせん断強度の増加は少なくなり、 $\sigma_n = 6$ MPa 以上では、2つの理論値が実験値よりも高い値を示し、その増加傾向もかなり異なったものとなっている。低垂直応力域における実験値と理論値の差異に関しては次のように考えることができる。実験値では 3. (1) で考察したダイレタンシー特性より、歯型傾斜角 i が 10° の供試体に関して非常に低い垂直応力下において、歯型自

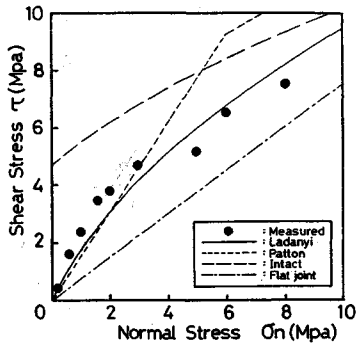


Fig.12 Comparison of peak shear strength for R2030 specimens between measured values and theoretical values.

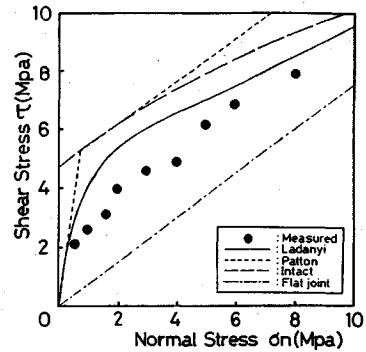


Fig.14 Comparison of peak shear strength for R4530 specimens between measured values and theoretical values.

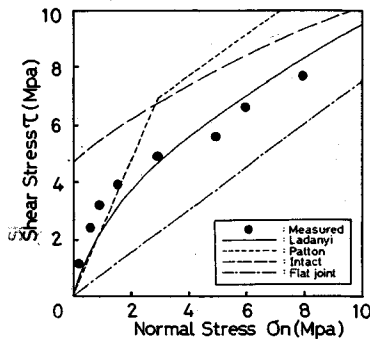


Fig.13 Comparison of peak shear strength for R3030 specimens between measured values and theoretical values.

体の部分的な破壊が生じていると考えられる。これに対して Patton の理論では、低い垂直応力域では歯型斜面に沿った滑り上がりのみによる破壊を考えており、Ladanyi and Archambault の理論においても、 α_s によって歯型自体の破壊の影響を考慮しているものの、式(3)に示したように歯型傾斜角の影響に関して全く考慮していないことから、破壊様式の変化を十分に表し得ていないように思われる。また実験値に関して、せん断強度の増加割合が変化する垂直応力 $\sigma_n = 4$ MPa は、Fig.6 (b), (c) においてダイレーション率が急激に変化する垂直応力とほぼ一致している。Fig.6 (b), (c) より、これ以上の垂直応力下ではダイレーション率がほぼ 0° を示すことから、R1030 供試体は、4 MPa 以上の垂直応力域では、歯型の滑り上がりではなく歯型自体のせん断によって破壊は進行するものと考えられる。しかし Fig.11 に示した実験値は、 $\sigma_n = 4$ MPa を境に Intact 供試体の強度よりもむしろ平滑な不連続面の強度に近づく傾向を示しており、垂直応力の増加に伴って不連続面のせん断強度が材料自身のせん断強度と一致する、とした 2 つの理論式とは異なった傾向を示している。

Fig.12, Fig.13 は、R2030 供試体および R3030 供試体に関する実験結果を Fig.11 と同様に示したものであ

る。これらの図においても Fig.11 に示した R1030 供試体と同様に、低い垂直応力下においては実験値が理論値よりも高い値を示し、垂直応力の増加に伴い理論値が実験値よりも高い値を示す傾向がみられる。また、実験値のせん断強度の増加割合が変化する垂直応力は、歯型傾斜角が大きくなるほど小さくなっており、R1030 供試体と同様、Fig.6 に示したダイレーション率の変化傾向との対応がみられる。

Fig.14 は、R4530 供試体に関する実験結果を Fig.11 と同様に示したものである。この図より、R4530 供試体では、Fig.11 から Fig.13 に示した歯型傾斜角 i が 30° 以下の供試体とは異なり、すべての垂直応力域で実験値は理論値よりも低い値を示している。特に低い垂直応力下において理論値が急激な増加を示し、Intact 供試体の強度に近づくのに対して、実験値は比較的緩やかで一次的な増加傾向を示している。R4530 供試体では歯形傾斜角が大きいため 3. (1) で述べたように低い垂直応力下においてもほとんど歯型に沿った滑り上がりが生じず、このことが、低い垂直応力下では歯型に沿った滑り上がり現象が生ずる、と仮定している理論値との差異の原因であると考えられる。また、実験終了後の破壊面の観察から、高い垂直応力下ならびに低い垂直応力下においても、R4530 供試体の歯型は底部から完全に破壊された状態となっている。このことから、R4530 供試体では歯型底部に引張応力が作用し、この引張応力によって歯型の破壊が生じ、そのため供試体の強度が低下するのではないかと推測される。ダイレクタンシー特性から、歯型が完全にせん断されると考えられる高い垂直応力下において、R4530 供試体は他の供試体と同様、Patton および Ladanyi and Archambault の理論値よりもや低い強度を示している。

Fig.11 から Fig.14 において、歯型を有する供試体の強度は、平滑な不連続面の強度と Intact 供試体の強度の間に存在しており、また、高い垂直応力下において 2 本の理論曲線とは異なり、平滑な不連続面の強度に近

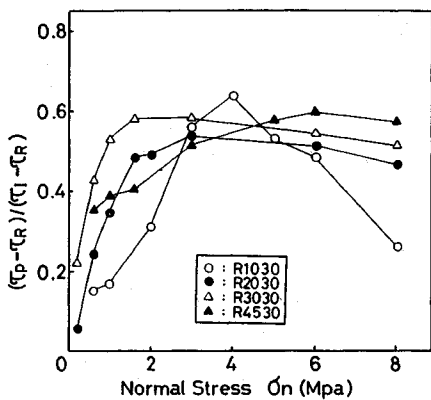


Fig.15 Relationship between stress ratio $(\tau_p - \tau_R) / (\tau_I - \tau_R)$ and normal stress σ_n .

く傾向を示している。そこで、供試体の強度を平滑な不連続面の強度からの強度増分として表し、垂直応力に対する強度増分の変化を示したのが Fig.15 である。この図において τ_p は供試体の強度、 τ_R は平滑な不連続面の強度を Coulomb 式に近似させた値、 τ_I は式 (2) によって計算された材料自身のせん断強度値をそれぞれ表している。図より、低い垂直応力下における $(\tau_p - \tau_R) / (\tau_I - \tau_R)$ の値は、R4530 供試体を除いて歯型角度に準じて大きくなっており、この垂直応力域では歯型傾斜角がせん断強度に大きな影響を与えていることがわかる。また、各供試体ともある垂直応力以上では $(\tau_p - \tau_R) / (\tau_I - \tau_R)$ は減少する傾向を示しており、この垂直応力域における $(\tau_p - \tau_R) / (\tau_I - \tau_R)$ は、歯型傾斜角が大きいほど大きな値を示している。このことから、歯型を有する供試体のせん断強度は、垂直応力の増加に伴って Intact 供試体の強度よりもむしろ平滑な不連続面の強度に近づく傾向を示しており、またその傾向は、歯型傾斜角が小さい供試体ほど顕著であることが認められた。

4. 結 論

規則的な歯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、そのダイレクシー特性ならびにせん断強度特性に関して検討を行った。その結果を要約すると次のようになる。

(1) ダイレーション率の変化は、Ladanyi and Archambault の計算曲線のようなスムーズな移行は認められず、ある垂直応力下において急激な変化を示すことが判明した。また、それらは歯型傾斜角によってそれぞれ異なった挙動を示すが、ピーク強度点におけるダイレーション率に関して、著者らの提案した実験式によってほぼ正確にその挙動を表現することができた。

(2) せん断強度特性に関して、歯型を有する供試体の強度は、非常に低い垂直応力下においても歯型に沿っ

た滑り上がりだけでなく歯型の部分的な破壊を伴っており、そのため歯型の滑り上がりのみによる破壊を考えている Patton の理論式と比較して大きなせん断強度を示す。しかし、歯型傾斜角が 45° の供試体に関する実験値は、理論値よりも低いせん断強度を示しており、これは破壊面の観察から歯型底部に作用する引張応力の影響ではないかと推測される。高い垂直応力下においては、歯型傾斜角が大きい供試体ほど大きなせん断強度を示している。また、歯型傾斜角にかかわらず、供試体の強度は垂直応力の増加に伴い Intact 供試体の強度よりもむしろ平滑な不連続面の強度に近づく傾向がみられる。

以上述べたように、本研究により得られた結論の多くははまだ定性的な記述にとどまっており、供試体の材料特性が異なれば、歯型の破壊が生ずる応力レベルや強度も当然異なるものと思われる。しかし歯型に沿った滑り上がりから歯型の破壊へと移行する破壊様式の変化に関しては、定性的ながら非常に有益な知見が得られており、今後は変形、強度特性に関してさらに検討を行い、それらを定量的に表す必要があると思われる。また、規則的な不連続面に関して得られた結果の実際の不規則形状の岩盤不連続面に対する適用性についても検討する必要があると思われる。

参 考 文 献

- 1) Patton, F.D. : Multiple modes of shear failure in rock, Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, 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. 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 Lam, T.S.K. : Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints-analysis, J.Geotech. Engrg., ASCE, Vol.115, pp.711~727, 1989.
- 10) Lam, T.S.K. and Johnston, I.W. : Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints-evaluation, J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol.115, pp.728~740, 1989.

-
- 11) Fairhurst, C. : On the validity of Brazilian test for brittle materials, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.1, pp.535~546, 1964.
- 12) 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.
- 13) Byerlee, J.D. : Brittle-ductile transition in rock, *Journal of Geophysical Research*, Vol.73, pp.4741~4750, 1968. (1990. 8. 10 受付)
-

DILATION PROPERTIES OF REGULAR DISCONTINUITIES DURING SHEAR

Harushige KUSUMI, Katsumi TERAOKA and Keiichiro TANIGUCHI

This paper deals with the influence of joint roughness on the dilation behaviour and the shear strength properties. Direct shear tests on seven types of plaster-sand specimens which have the rough discontinuities of regular triangle shapes have been conducted, and the comparison those results with Ladanyi and Archambault's criteria and Patton's criteria was carried out.

The results obtained are summarized as follows :

- (1) The dilation behaviour is remarkably affected by the angle of the teeth.
 - (2) The shear strength of regular triangular joints gradually approaches the shear strength of flat joints rather than intact specimens.
-