



不連続性岩に対する連続破壊一面せん断試験法の適用性に関する研究

| | |
|----------|--|
| 著者 | 谷口 敬一郎, 楠見 晴重, 寺岡 克己, 大橋 孝男 |
| 雑誌名 | 資源と素材 : 資源・素材学会誌 |
| 巻 | 108 |
| 号 | 8 |
| ページ | 585-592 |
| 発行年 | 1992-08 |
| その他のタイトル | Application of Continuous Failure State Direct Shear Test on Discontinuous Rocks |
| URL | http://hdl.handle.net/10112/2113 |

不連続性岩に対する連続破壊一面せん断試験法の適用性に関する研究*

谷口 敬一郎¹ 楠見 晴重²
寺岡 克己³ 大橋 孝男⁴

Application of Continuous Failure State Direct Shear Test on Discontinuous Rocks

by Keiichiro TANIGUCHI¹, Harushige KUSUMI¹, Katsumi TERAOKA² and Takao OHASHI³

1. Faculty of Engineering, Kansai University, Suita-shi, Osaka 564
2. Sanyo Co. Ltd.
3. West Japan Railway Company

In the determination of the shear strength of rocks, a lot of similar specimens are needed to obtain satisfactory results, but the preparation of the specimens of same characters involves great difficulties, especially in the case of discontinuous rocks. It is desirable if the strength envelopes could be obtained from only one specimen.

In this study, we carried out two types of CFS tests, and a series of constant stress shear tests for plaster specimens with regular triangular joint. In addition to these tests, we carried out multi-stage shear tests for rock specimens with artificially generated irregular joint. We made comparison of the results obtained by these tests, and examined the applicability of CFS tests.

KEY WORDS: Continuous Failure State Test, Discontinuous Rock, Failure Line, Shear Strength

1. 緒 言

岩石のせん断強度特性を評価する手法としては、多くの場合間接せん断試験法である三軸圧縮試験が用いられている。しかし層理、節理等の不連続面が発達している異方性岩石の場合には、せん断面が限定でき、せん断変位量が大きくとれるなどの有利な点が多いことを考慮すれば、直接一面せん断試験法が有効であると考えることができる^{1)~3)}。一面せん断試験は三軸試験に比べて装置や計測が簡単であるために、現場における原位試験としてよく用いられている。この場合、できるだけ同質のブロックを数個から数十個用意する必要があるが、節理等の不連続面を内包する岩盤では、非常に困難を伴う。このようなことは、試験室内で行われる場合にも同様のことがいえる。この問題を解決するために1個の岩石供試体で数種の異なった垂直応力下におけるピークせん断強度値ならびに残留せん断強度値を得ようとする多段階試験法が提案され⁴⁾、特に三軸試験に対応する方法として用いられている^{5)~7)}。しかしこの試験法には、各段階におけるピーク値の判断基準等に関して、若干の問題点が残されている。

Kováriら⁸⁾は、岩石供試体の破壊状態を維持しながら、軸応力-軸ひずみ関係のある定められた範囲内の傾きによって軸荷重と拘束圧を連続的にコントロールさせて、1個の供試体からピーク強度と残留強度の破壊包絡線を得ようとするCFS(Continuous Failure State)三軸試験を提案し、4種の岩石を用いて従来の三軸試験とCFS三軸試験との比較を行い、本試験の妥当性について検討を行っている。さらにこの試験法を直接一面せん断試験に対しても適用させ、概念的にその有効性について論じている⁹⁾。しかしCFS試験法の詳細な手法および適用範囲等についての基礎的資料が不足しているために、一般的な試験法となるには、まだ多くの問題が残されているように思われる。

本論文では、人工的に作製した種々の形状のラフネスを有する石膏供試体を用いて、不連続面形状に対するCFS直接一面せん断試験(以下ここではCFS試験とする。)の適用性、ならびに垂直応力の増加および減少の2方法のCFS試験法を用いて、それら試験結果の差異に関して、せん断変位量の面から主として実験的に検討を行った。さらに一度せん断を行って作製した不規則形状の不連続面を有する岩石供試体を用いて、直接一面せん断試験に対してCFS試験法および多段階試験法を適用させ、実際の不連続岩石、岩盤への適用性ならびにそれらの試験結果の比較検討をも行った。

2. 実験方法

2.1 直接一面せん断試験装置

* 1991年12月19日受付 1992年5月8日受理
1. 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科
2. 正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科
3. (株)サンヨー
4. 関西大学大学院生 (現 西日本旅客鉄道(株))

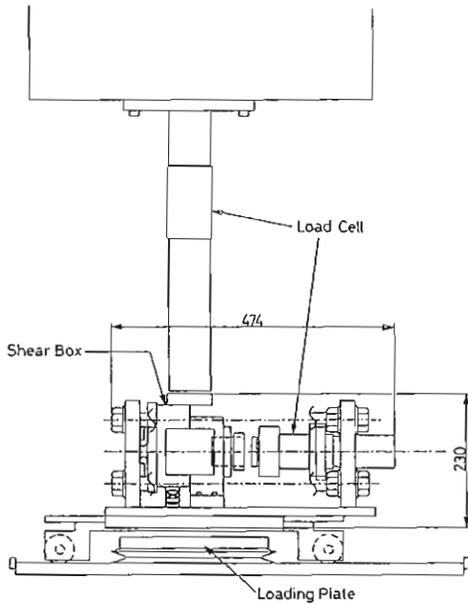


Fig. 1 Direct shear testing machine.

一面せん断試験には、せん断面が限定できること、せん断変位が比較的大きく取れること、試験機の操作が簡単であることなどの優れた点がある。これらのことは不連続面を扱う場合、三軸圧縮試験と比較して特に有利である。しかしその反面、試験中の主応力の回転、せん断刃付近の応力集中およびそれに伴う進行性破壊などの理論的問題点と、それに伴って生ずる試験中のせん断箱の回転などの試験上の問題点がある。そのため一面せん断試験を行う場合、これらの問題点を十分考慮した試験機を使って試験を行う必要がある。そこで本研究に用いる一面せん断試験機の製作に当たっては、試験機の剛性をできる限り高めること、せん断箱の変位がせん断荷重方向、垂直荷重方向のみに限定されることに留意した。

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、最大軸荷重100tfの高圧三軸圧縮試験機の三軸セル取り付け部分に一面せん断試験機を装着させたものである。せん断荷重は、三軸試験機の軸荷重載荷装置によって与えられるために、電気油圧サーボ方式によって制御される。垂直荷重は、油圧方式によって水平方向に載荷され、マニュアル制御によって0~5tf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、右側のせん断箱は試験機フレーム部分に完全に固定されている。左側のせん断箱は、せん断箱と試験機フレーム部分との間に装着したローラーによって、正確にせん断荷重方向に変位するようになっている。本試験機では、1辺50mmの立方体供試体あるいはφ50×50mmの円柱供試体について試験可能である。

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。荷重測定にはせん断荷重、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。これらはいずれもアンプユニット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記録され、また直視できる。

2・2 供試体

実在の不連続面を含む岩石を供試体として用いる場合、同質の供試体を数多く用意することは、非常に困難であり、得られる結果のばらつきは実験の信頼性を大いに低下させる。そこで本研究

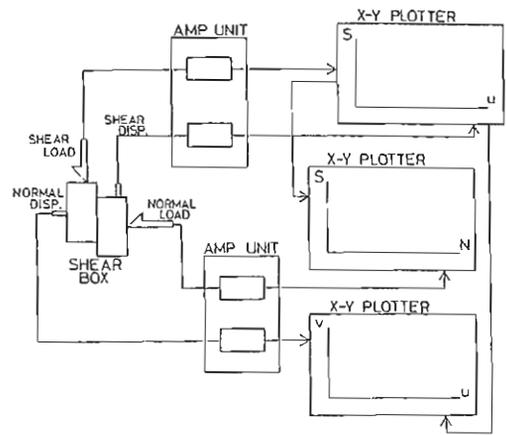


Fig. 2 Schematic diagram of monitoring system.

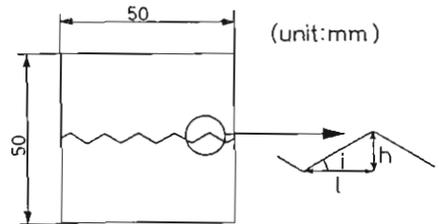


Fig. 3 Profile of plaster specimen with regular triangular joint of height h , and angle of inclination i .

では規則的な歯型状不連続面を有する石膏供試体、ならびにあらかじめ人為的に不連続面を作製した均質な粗粒砂岩供試体を用いて実験を行った。

Fig. 3は実験で用いた規則的な歯型形状の不連続面を有する石膏供試体を示している。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50mm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。ここで歯型斜面の傾斜角を i 、歯型の高さを h とし、すべての供試体で h は3mm一定とし、 i を 10° 、 20° 、 30° 、 45° の4種類からなるラフネス石膏供試体を作製した。以下、それぞれの角度 i を有する供試体をR10、R20、R30、R45とする。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%以下のデシケータ内で14日間気乾養生させたものである。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 1はこの配合の石膏供試体の諸特性を示している。

岩石試料として用いた粗粒砂岩は、飛騨山地の北部、中部地方の中生界ジュラ系に属する手取層群中のアルコース質砂岩で、福井県足羽郡美山町から採取したものである。供試体はまず直径50mm、高さ50mmの円柱形に整形した後、できる限り同質の表面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 $\sigma_n = 4 \text{ MPa}$ 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。この場合、せん断変位の進行によって不連続面に噛み合わせのずれが生ずることを極力避け

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) |
|--|--|---|
| 15.58 | 17.16 | 2.69 |

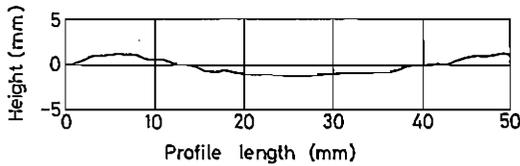


Fig. 4 A typical profile of artificially generated joint surface in coarse grain sand stone.

Table 2 Some properties of coarse grain sand stone specimen.

| Unit weight γ (kN/m^3) | Porosity (%) | Uniaxial compressive strength σ_c (Mpa) | Tensile strength by Brazilian method σ_t (Mpa) |
|--|-----------------|---|--|
| 24.89 | 4.76 | 108.26 | 6.96 |

るため、供試体が破断し、不連続面が形成された時点でただちにせん断応力を除荷した。このようにして作製した不連続面の断面形状は、すべて型どりゲージによって測定し、それをトレースすることによって記録されている¹⁰⁾。不連続面の断面図の一例をFig.4に示す。この測定結果をもとに断面形状の解析を行ったところ、勾配の自乗平均の平方根 (Z_2)¹¹⁾¹²⁾は0.195、正斜面の平均勾配 ($SI+$)¹¹⁾¹³⁾は 10.4° という平均値が得られた。またチルト試験によってBartonのJRC¹⁴⁾を求めた結果約5.0前後の値を示している。Table 2は粗粒砂岩供試体の諸特性を示したものである。

2.3 試験方法

実験は、ラフネス石膏供試体に対しては、垂直応力を増加させることによりピークせん断強度を求めようとするCFS試験法(以下CFS-U試験法とする)、垂直応力の除荷によりピークせん断強度を求めようとするCFS試験法(以下CFS-D試験法)の2種類のCFS試験法と通常の定圧一面せん断試験を行った。粗粒砂岩供試体に対しては、これらの試験法に加えて多段階試験法についても実施した。なお、実験はすべてひずみ制御で行い、せん断変位速度は0.025 mm/minである。以下にそれぞれの試験法の手順を説明する。

2.3.1 CFS-U試験法 Fig.5(a),(b)はCFS-U試験法によって得られるせん断応力-せん断変位図と応力経路図を模式的に示したものである。まず所定の垂直応力Pにおいてせん断を開始し、垂直応力Pにおけるピークせん断強度直前点Aから任意の傾きが α となるような直線aを描くように垂直応力を連続的に増加させる。垂直応力が所定の値Qに達した時点で垂直応力の増加を停止し、Qのまま保持する。供試体は破壊寸前の状態を維持しているため、垂直応力の増加が止まるとただちにピークせん断強度点Bに達して、その後ひずみ軟化の傾向を示す。こうしてFig.5(b)におけるピークせん断強度の破壊包絡線 \bar{a} が得られる。その後せん断変位の進行とともに残留せん断強度点Cに達する。この時点で垂直応力を連続的に減少させ、残留せん断強度の破壊包絡線 \bar{b} を得る。しかし初期垂直応力Pにおける破壊直前点の判断が早すぎたり(A'),垂直応力を必要以上に急速に増加させた場合(a'),応力経路は \bar{a}' を描き破壊包絡線は不確かなものとなる。また逆にA点の判断が遅れたり、垂直応力の増加速度が遅すぎた場合(a'')破壊包絡線は \bar{a}'' に示したような低い値となる。垂直応力の増加方法についてKováriらは、初期垂直応力Pにおけるせん断剛性 k_s と α との比をとり、 $\alpha/k_s = 1.0$ とすることを推奨している。

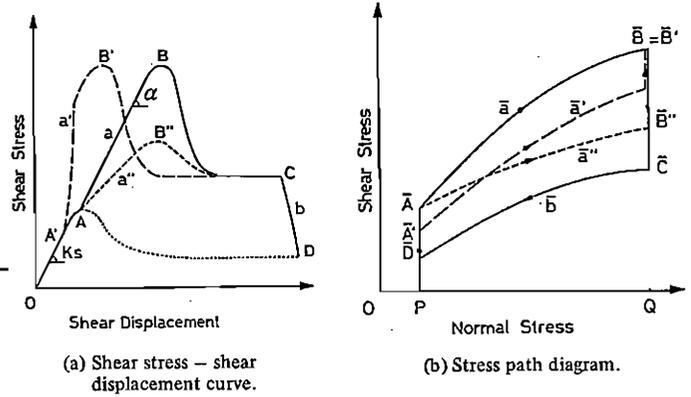


Fig. 5 Testing procedure of CFS-U test.

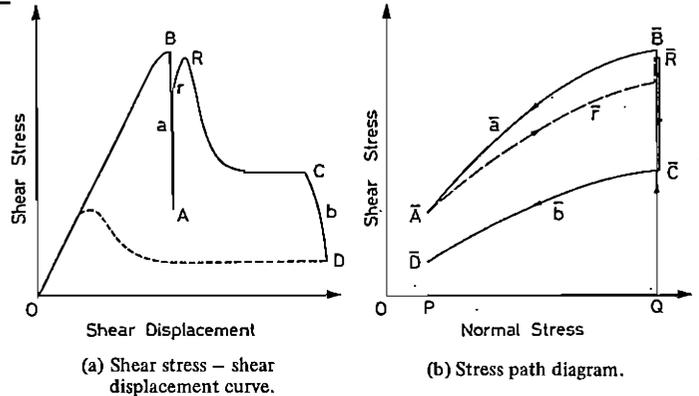


Fig. 6 Testing procedure of CFS-D test.

2.3.2 CFS-D試験法 Fig.6(a),(b)はCFS-D試験法に関してCFS-U試験法と同様に示したものである。まず求めたい垂直応力の範囲(P~Q)の上限の垂直応力Qのもとでせん断を開始し、ピークせん断強度直前点Bに達する。ここで垂直応力を連続的に減少させ、垂直応力Pにおけるピークせん断強度点Aを得る。この時点で応力状態はFig.6(b)の \bar{A} に達しており、ピークせん断強度の破壊包絡線 \bar{a} が描かれている。その後ただちに垂直応力をQまで増加させ、残留せん断強度点Cに達するまでせん断を続行する。この時点で垂直応力を連続的に減少させ残留せん断強度の破壊包絡線 \bar{b} を得る。

なお、この研究では供試体の不連続面とせん断面とはすべて平行としている。

3. ラフネス石膏供試体に対するCFS試験の適用

Fig.7は、定圧一面せん断試験によって得られた各供試体のピークせん断強度を垂直応力 σ_n をパラメータとして表したものである。図中の破線は、Ladanyi & Archambaultの理論式により得られたせん断強度値を示している。Fig.7より、多少のばらつきはみられるものの各垂直応力下の供試体のピークせん断強度は、 $i=10^\circ \sim 30^\circ$ までは i が大きくなるに従って増加し、 $i=45^\circ$ で急激に減少する傾向が認められる。これに対し、Ladanyiらの理論式により得られた強度値は、 i が大きくなるほど急激な増加を示しており、実験値の挙動とは明らかに異なっている。

Fig.8は各ラフネス石膏供試体に対してCFS-U試験を適用させたときのせん断応力-せん断変位ならびに垂直変位-せん断変位の関係を示したものである。ただし垂直変位 v の正は膨張、負は圧縮側である。このときの試験条件は、 $\sigma_n = 0.6 \text{ MPa}$ の定圧状態下においてせん断させ、破壊直前で、 $\alpha/k_s = 1.0$ の傾きでせ

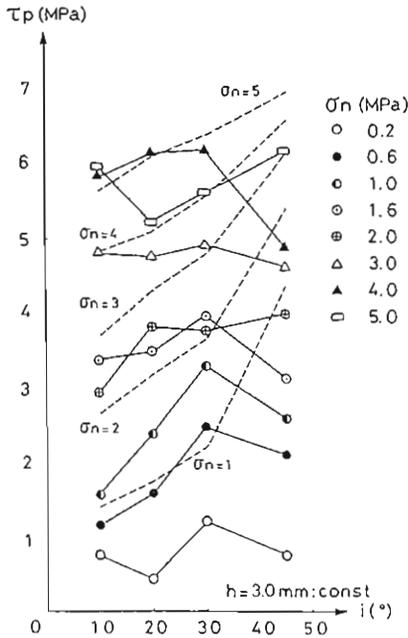
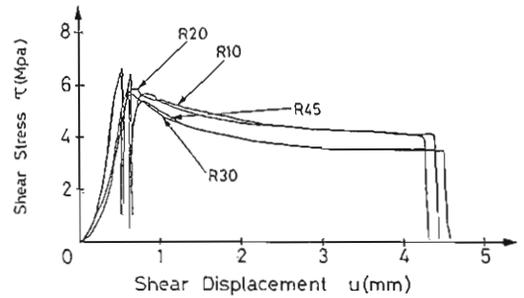
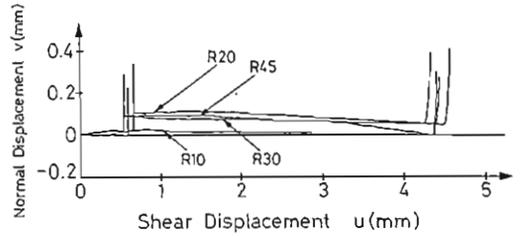


Fig. 7 Test results obtained from constant normal stress direct shear tests for plaster specimens.

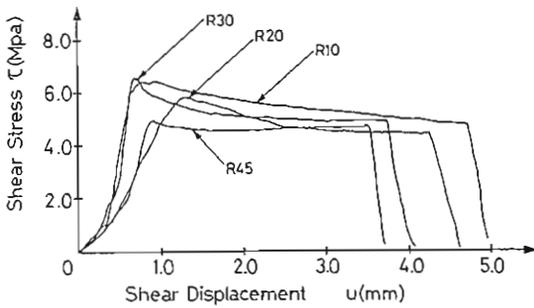


(a) Shear stress - shear displacement curves.

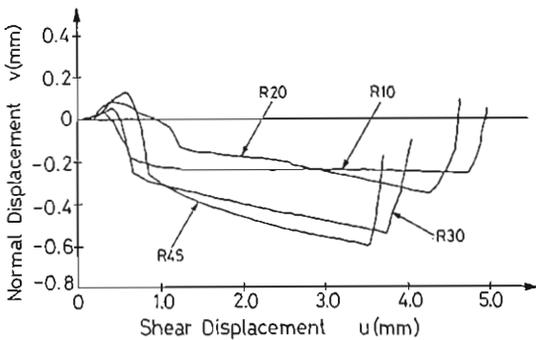


(b) Normal displacement - shear displacement curves.

Fig. 9 Results obtained from CFS-D tests for plaster specimens.



(a) Shear stress - shear displacement curves.



(b) Normal displacement - shear displacement curves.

Fig. 8 Results obtained from CFS-U tests for plaster specimens.

ん断応力を上昇させて行った。しかし、供試体によっては α/k_s ≈ 1.0 でコントロールできなかったものもあり、その場合にはできる限り α/k_s が 1.0 に近づくように制御しながら実施した。Fig. 9 は各供試体に対して CFS-D 試験を適用させたときのせん断応力-せん断変位ならびに垂直変位-せん断変位の関係を示したものである。試験条件は、最初の定圧試験過程では、すべての供試体は $\sigma_n = 8 \text{ MPa}$ で行い、破壊直前で、その状態を可能な限り保ちながらせん断変位を進め、垂直応力を約 0.6 MPa 前後にまで減少させ、ピーク強度の破壊包絡線を求めた。これらの図よ

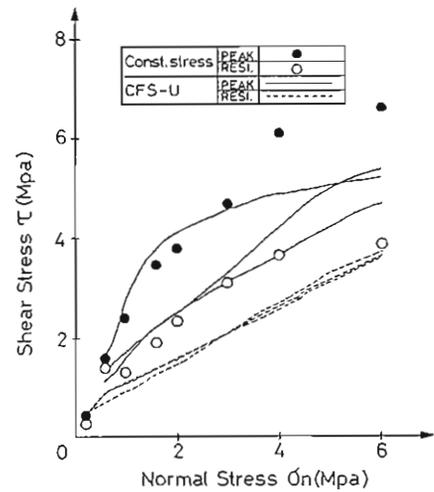


Fig. 10 Comparison of test results obtained from CFS-U tests and constant stress shear tests for R20 specimens.

り、各供試体とも CFS-U、CFS-D 試験のせん断応力-せん断変位関係は、Fig. 5、Fig. 6 の模式図と類似した挙動を示しており、試験は順調に進行したものと考えられる。しかし垂直変位とせん断変位の関係は、両試験法では異なっており、CFS-U 試験ではピークせん断強度の破壊包絡線が求められた後、供試体は圧縮側に大きく変位していることより、従来の定圧一面せん断試験におけるラフネス石膏供試体のダイランシー特性が常に膨張側に変位するのと異にしている。各供試体は両試験に対してそれぞれ 3 個ずつ実施した。

Fig. 10 は、R20 供試体に対して CFS-U 試験を適用させたときのピークせん断強度ならびに残留せん断強度の破壊包絡線を示したものである。図中の●および○印は、通常の定圧一面せん断試験を R20 供試体に対して行ったときの各垂直応力下におけるピークせん断強度ならびに残留せん断強度である。この図より CFS-U 試験で求めた 3 本のピークせん断強度の破壊包絡線は、同質の供試体であるにもかかわらず、かなりのばらつきがみられ

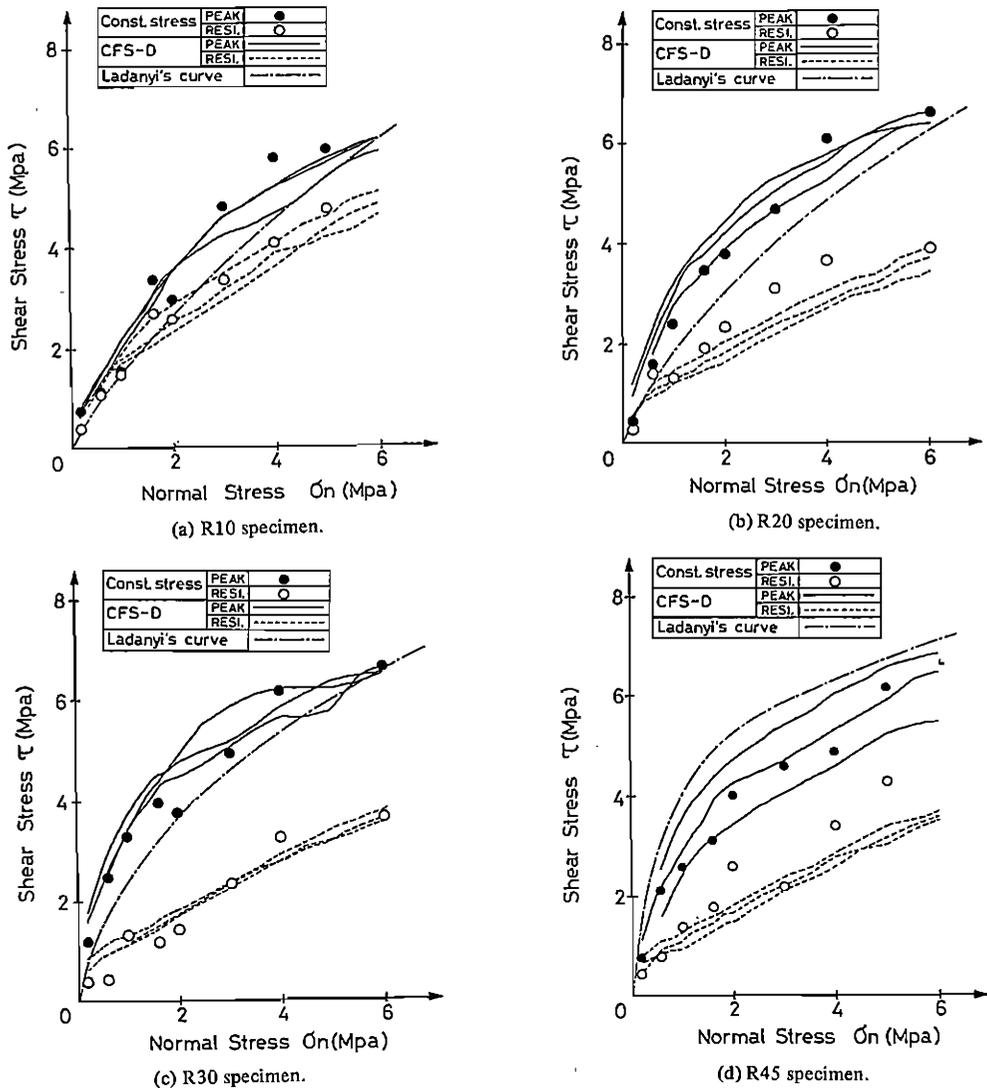


Fig. 11 Comparison of test results obtained from CFS-D tests and constant stress shear tests for plaster specimens.

る。またこのうち2本の破壊包絡線は、定圧一面せん断試験で得られたピークせん断強度値と比較しても大きな差異がみられ、ピークせん断強度値よりもむしろ定圧試験で得られた残留せん断強度の破壊包絡線とほぼ同様な変化を示している。これはCFS-U試験中には供試体を破壊直前の状態を保ちながら垂直応力、せん断変位を制御する必要があるが、CFS-U試験で求められたピークせん断強度の破壊包絡線が、3本のうち2本までが定圧試験で得られた残留せん断強度のそれに定性的には近いことから、CFS-U試験中、破壊の直前状態が維持できずに破壊が進行したためと考えられる。CFS-U試験で得られた残留せん断強度の破壊包絡線は、定圧試験で得られたそれに比べて全体的に低い値をとっている。これも上述したようにCFS-U試験時に破壊が進行したこと起因しているものと考えられる。以上の挙動は他の供試体に対してもほぼ同様な傾向を示している。

Fig. 11は各供試体に対してCFS-D試験を適用させたときのピークせん断強度ならびに残留せん断強度の破壊包絡線を示したものである。これらの図より、各供試体ともピークせん断強度ならびに残留せん断強度の各破壊包絡線は、定圧一面せん断試験で求めた各破壊包絡線とよい一致を示している。また各供試体とも同質の供試体3個についてCFS-D試験を実施したが、R45のピークせん断強度の破壊包絡線を除いて、CFS-U試験でみ

られたような大きなばらつきは存在せず、それらの差異は微小である。R45のピークせん断強度の破壊包絡線については、歯形の傾斜がかなり急峻であるために、ピークせん断強度付近の応力-ひずみ関係はひずみ軟化の特性を示すことより、ピークせん断強度の直前点の判断が困難であることに起因しているものと考えられる。しかしこれら3本の破壊包絡線は、いずれも定圧試験で得られた値から大きく遊離せず、またほぼ同様な変化傾向を示している。さらに図中の一点鎖線は、規則歯型形状の不連続面に対して適用可能なLadanyiらの理論式¹⁵⁾から求めたピークせん断強度の破壊包絡線であるが、それよりもむしろCFS-U試験で得られた3本の破壊包絡線の方が定圧試験の破壊包絡線と類似した変化を示している。これらのことより、R45供試体のCFS-D試験で求められたピークせん断強度の破壊包絡線は、他の供試体よりもばらつきは大きい、十分な信頼性があるものと考えられる。

CFS-U試験結果とCFS-D試験結果とを比較すると、明らかにCFS-D試験から得られたピークおよび残留せん断強度の破壊包絡線が、定圧試験のそれらとよく一致していることは、上述したとおりである。この原因に関しては、CFS-U試験では $\alpha/k_0 \approx 1.0$ として実験を行っているが、垂直応力を種々変化した定圧試験では、せん断剛性 k_0 は σ_n が変化すると異なることから^{16)~19)}、 $\alpha/k_0 \approx 1.0$ としてCFS試験を実施することには

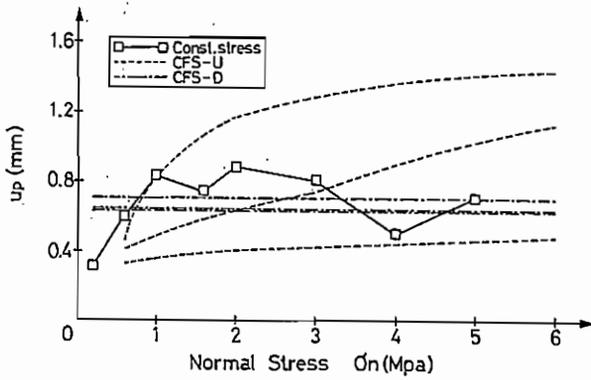
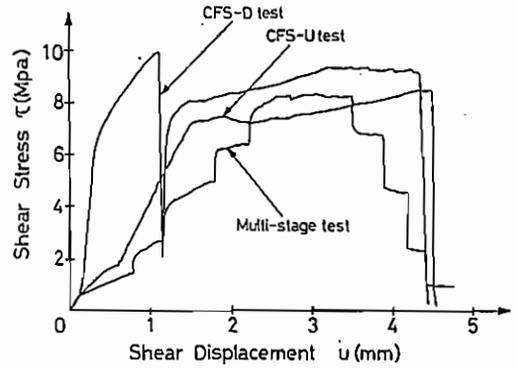
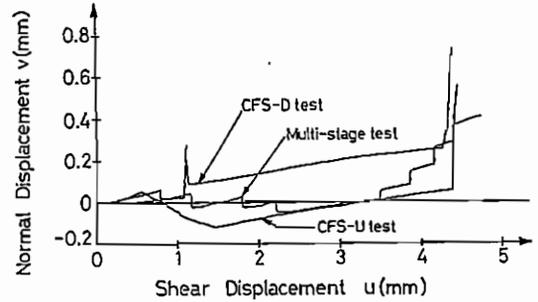


Fig. 12 Relationships between shear displacement at which peak shear strength was measured, u_p , and normal stress obtained from each testing method for R20 specimens.

若干の無理がある。さらにCFS-U試験では、ピークせん断強度を与えるせん断変位 u_p が大きくばらつくことが挙げられる。Fig. 12は、R20供試体に関して各試験法の u_p と垂直応力 σ_n との関係を示したものである。この図からCFS-D試験の u_p は、 σ_n が変化してもほぼ一定の値となり、また同質の3供試体の u_p のばらつきはほとんどみられず、さらに各垂直応力下で得られた定圧試験の u_p の値ともほぼ一致している。これに対してCFS-U試験の u_p は、同質の3供試体であるにもかかわらず大きくかけ離れ、また全体的に σ_n が大きくなると u_p が増加する傾向がみられ、定圧試験の u_p ともほとんど一致していない。このことより、破壊直前の状態を保ちながら垂直応力を増加させていくこの手法では、せん断変位が大きくなると供試体の破壊状態は残留領域に進んでしまうために、ピークせん断強度の破壊包絡線を精度よく求めることはできない。反対に、ピークせん断強度を与えるせん断変位 u_p は σ_n が変化してもほぼ一定であり、かつその値が比較的小さい必要がある。以上のことより、石膏供試体に対しては、



(a) Shear stress - shear displacement curves.



(b) Normal displacement - shear displacement curves.

Fig. 14 Typical results of a CFS-U test, a CFS-D test and a multi-stage shear test for coarse grain sand stone specimens.

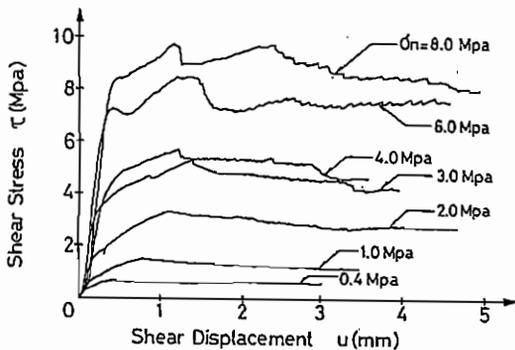
CFS-U試験よりもCFS-D試験の方が定圧一面せん断試験に近い結果をもたらし、有効の手法であるといえる。

4. 粗粒砂岩供試体を用いたCFS試験

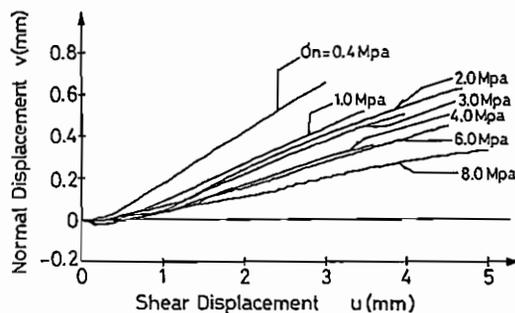
ここでは、不規則形状の不連続面を有する岩石に対する適用性について検討を行った。用いた粗粒砂岩供試体は、2.(2)で述べたように、人工的に不連続面を製作したものを供試体として用いた。また、ここではCFS試験とほぼ同一目的でよく実施されている多段階試験をもこの供試体に適用させた。

Fig. 13は、この不連続岩石供試体に関して、定圧試験によって得られたせん断応力-せん断変位ならびに垂直変位-せん断変位の関係を垂直応力 σ_n をパラメータとして表したものである。

Fig. 14は、CFS-U試験、CFS-D試験ならびに多段階試験を行ったときのせん断応力-せん断変位および垂直変位-せん断変位の関係を垂直応力 σ_n をパラメータとして表したものである。



(a) Shear stress - shear displacement curves.



(b) Normal displacement - shear displacement curves.

Fig. 13 Results obtained from constant stress shear tests for coarse grain sand stone specimens.

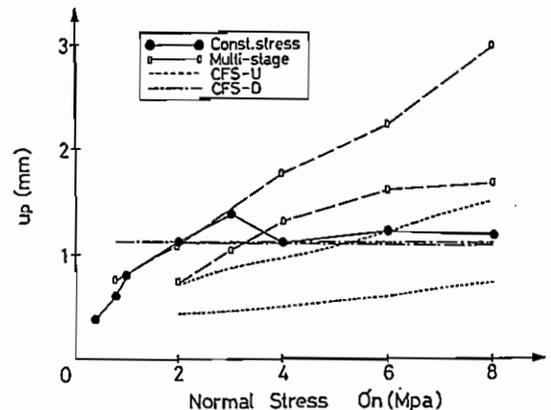


Fig. 15 Relationships between shear displacement at which peak shear strength was measured, u_p , and normal stress obtained from each testing method for coarse grain sand stone specimens.

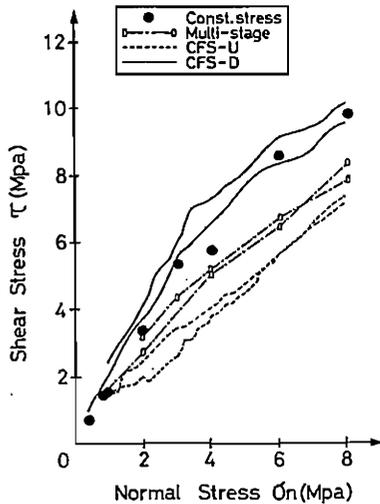


Fig. 16 Comparison of peak shear strength obtained from each testing method for coarse grain sand stone specimens.

断変位の関係を示したものである。この図より、CFS試験のせん断応力-せん断変位関係は、Fig.5, Fig.6の模式図と類似した挙動を示しており、試験が問題なく実施されていることがわかる。これらの試験に対しては、2つの供試体について行った。

Fig.15は、各試験においてピークせん断強度を与えるせん断変位 u_p と垂直応力 σ_n の関係を示したものである。この図より、Fig.12で示されたと同様な傾向がみられ、CFS-D試験では、 σ_n が変化しても u_p はほぼ一定の値を示し、また2つの供試体の差異はほとんど認められず、さらに定圧試験結果ともよく一致している。これらの傾向は、ラフネス石膏供試体のときよりも、より顕著に認められる。多段階試験においては、CFS-U試験と同様に、2つの供試体の差異は大きく、 σ_n が大きくなると u_p は増加する傾向がみられ、定圧試験結果とはかけ離れた変化を示している。このことから、不連続岩石供試体のピークせん断強度の破壊包絡線を高い精度で求める方法としては、CFS-D試験が適していると考えられる。

Fig.16は各試験法で得られたピークせん断強度の破壊包絡線である。またFig.17はそれらの残留せん断強度の破壊包絡線である。ピークせん断強度の破壊包絡線に関しては、不規則形状の不連続面を有する岩石供試体でも、ラフネス石膏供試体とほぼ同様な傾向が得られ、CFS-D試験の破壊包絡線と定圧試験のそれとはよく一致しているのが認められた。多段階試験で得られたピークせん断強度の破壊包絡線は、比較的低い垂直応力下では定圧試験結果のそれとよく一致しているが、垂直応力が高くなるに従ってその差異は大きくなり、包絡線全体としては、定圧試験結果とはかけ離れた状態となっている。残留せん断強度の破壊包絡線に関しては、各試験法による差異は、高い垂直応力下において若干認められるものの、定圧試験結果と各試験法による結果とは比較的よく一致しているものと考えられ、残留せん断強度の破壊包絡線に関しては、各試験法とも有効的であるものと思われる。

このような完全に分離し、かつ比較的JRCの値が小さい不規則な不連続面を有する岩石供試体に対して、1個の供試体でピークせん断強度および残留せん断強度の破壊包絡線を直接一面せん断試験で求めるためには、

① 個々のピークせん断強度の直前点を的確に判断すること、

② 破壊直前の状態を維持しながら試験を進めること、

という2つの事柄を満足する必要がある。しかし実際には、CFS-U試験や多段階試験においては、Fig.16, Fig.17に示され

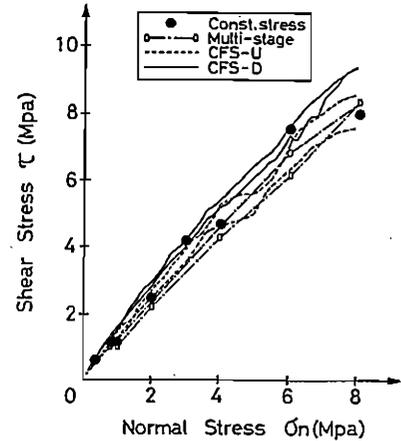


Fig. 17 Comparison of residual shear strength obtained from each testing method for coarse grain sand stone specimens.

ているように、ピークせん断強度の破壊包絡線は、定圧試験のそれと比べてかなり下に位置しており、残留せん断強度の破壊包絡線との差異があまり顕著にみられないことから、上述した②の事柄が満たされていないように思われる。すなわちピークせん断強度の破壊包絡線を求める試験中において、破壊が進行し、供試体はすでに残留領域に達しているものと考えられる。この解決法を見出さない限り、CFS-U試験あるいは多段階試験をこのような完全分離した不連続岩石に対して適用させるのは、困難であると考えられる。これに対して、CFS-D試験は上述した①、②の事柄が比較的容易に達成されることから、これらの岩石に対しては、非常に有効かつ経済的な試験法であると考えられ、十分実用に供せられることが認められた。

5. 結 言

本研究では、Kováriらが提案している垂直応力の増加および減少の2方法によって実施される連続破壊直接一面せん断試験法をラフネス石膏供試体ならびに完全分離した不規則形状の不連続面を有する岩石供試体に対して適用させ、通常定圧試験結果と比較検討することによって、これらの試験法の不連続岩石に対する適用性について検討し、またこれと目的が類似した多段階試験法とも比較検討を行ったものであり、以下のような結果が得られた。

(1) ラフネス石膏供試体に対してCFS試験を実施した結果、どの供試体に対してもCFS-D試験によって得られたピークせん断強度ならびに残留せん断強度の破壊包絡線は、定圧試験結果のそれらと高い精度で一致し、この試験法の有効性が認められた。これに対してCFS-U試験では、残留せん断強度の破壊包絡線は、定圧試験結果とよい一致を示したが、ピークせん断強度の破壊包絡線は、定圧試験結果のそれとは試験範囲の垂直応力下においては、常に下に位置しており、かなりかけ離れた結果となった。

(2) 上述した2方法によるCFS試験結果の相違に関して、CFS-U試験では、ピークせん断強度の破壊包絡線を求めて行く過程において、せん断変位がCFS-D試験に比べてかなりの変位量を必要とするために、ピークせん断強度の破壊状態を維持できずに、破壊が進行してしまうことに起因することが判明した。

(3) 人工的に不規則な不連続面を作製した岩石供試体に対して2方法のCFS試験を実施した結果、ラフネス石膏供試体とほぼ同様な結果が得られ、CFS-D試験は実際の不連続岩石に対して十分適用可能であり、かつ高い信頼性を有する試験法であることが認められた。これに対してCFS-U試験では、ピークせん断強度の破壊包絡線の精度はかなり低く、ここで用いた供試体の

ように、JRC \approx 5.0の凹凸があまり顕著でない不連続岩石に対しては、ピークせん断強度付近の破壊状態を維持することが困難となり、すでに残留領域に入ってしまう、ピークせん断強度と残留せん断強度の破壊包絡線には差異が認められなかった。

(4) 多段階試験で得られた破壊包絡線と2方法のCFS試験で得られた破壊包絡線とを比較した結果、ピークせん断強度の包絡線はCFS-D試験とCFS-U試験の中間部に位置しており、定圧試験結果のそれとも、比較的高い垂直応力領域で顕著な差異がみられ、これからもCFS-D試験の有効性が認められた。

以上、本研究で得られた成果について要約したが、今後さらにCFS-D試験法に関して定量的手法を確立させて行くことによって、岩石のせん断強度の評価手法が、1供試体に対して2本の包絡線が得られることより、より信頼性の高いせん断強度特性が得られるものと考えられる。また本研究においては、種々提案されているせん断強度式をラフネス石膏供試体ならびに岩石供試体に対して適用させたが、実験結果とよい一致を示したものは、ほとんど見当たらなかったことから、今後は、CFS-D試験で得られた破壊包絡線の定量的評価法についても検討して行く予定である。

引用文献

- 1) R. E. グッドマン (赤井浩一ほか訳) : 不連続性岩盤の地質工学, 134~135, (1978), 森北出版
- 2) 小林良二・杉本文男 : 弱面を含む岩石のせん断特性 (第一報), 応用地質, Vol. 24, No. 3, 89~96, (1983)
- 3) 江崎哲郎ほか : 変位制御型せん断試験機の試作と岩のせん断破壊特性, 日本鉱業会誌, 100 [1155], 9~14, (1984)
- 4) Kovári, K. and Tisa, A. : Multiple failure state and strain controlled triaxial tests, Rock Mechanics, Vol. 7, No. 1, 17~33, (1975)
- 5) 赤井浩一・大西有三・李 徳河 : 多段階三軸試験とその飽和軟岩への適用について, 土木学会論文報告集, No. 311, 93~102, (1981)
- 6) 西垣好彦・城戸 渉 : ジョイントを含む岩への多段階試験の適用, 土と基礎, Vol. 31, No. 7, 17~22, (1983)
- 7) 山下 秀ほか : 岩石の多段階三軸圧縮試験に関する技術的留意点について, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 205~210, (1987)
- 8) Kovári, K., Tisa, A. and Attinger, R. O. : The concept of "Continuous Failure State" triaxial tests, Rock Mechanics, Vol. 16, No. 2, 117~131, (1983)
- 9) Kovári, K. and Tisa, A. : Continuous failure state direct shear tests, Rock Mechanics, Vol. 17, No. 2, 83~95, (1984)
- 10) Stimpson, B. : A rapid field method for recording joint roughness profile, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 19, 345~346, (1982)
- 11) Tse, R. and Cruden, D. M. : Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, 303~307, (1979)
- 12) 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, 369~386, (1981)
- 13) 吉中龍之進ほか : 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, 386~390, (1987)
- 14) Barton, N. and Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol. 10, No. 1-2, 1~54, (1977)
- 15) Ladanyi, B. and Archambault, G. : Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass, Proc. 11th Symp. Rock Mech., AIME, 105~125, (1970)
- 16) Barton, N. R. : A model study of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 9, 579~602, (1972)
- 17) Rosso, R. S. : A comparison of joint stiffness measurements in direct shear, triaxial compression, and in situ, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 13, 167~172, (1976)
- 18) 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, 249~268, (1983)
- 19) 浜島良吉ほか : 不規則波形を有する岩盤不連続面のせん断強度, 応用地質, Vol. 28, No. 4, 167~182, (1987)