

(62) 不連続面を有する岩石に対する 連続破壊試験法の適用性について

関西大学工学部 正会員 楠見 晴重
関西大学大学院 学生員○寺岡 克己
関西大学工学部 正会員 谷口敬一郎

Application of Continuous Failure State Direct Shear Tests on Jointed Rock Specimen

Harushige Kusumi, Kansai University
Katsumi Teraoka, Kansai University
Keiichiro Taniguchi, Kansai University

Abstract

Continuous failure state direct shear tests (CFS-tests) which aimed at determining the failure envelopes of jointed rocks with a single test specimen was proposed by Kovári. We have applied CFS-tests to plaster specimens with regular joint, and showed that CFS-test was applicable to those specimens.

In this paper, two types of CFS-tests, multi-stage shear tests and constant stress shear tests were carried out for rock specimens with irregular joints. We made comparison of the results obtained by these tests, and examined the applicability of CFS-tests to irregular rock joints.

1. まえがき

岩石のせん断強度特性を評価する手法として一般には三軸圧縮試験が用いられているが、異方性岩あるいは不連続面を有する岩石に対しては、せん断面を限定することのできる直接一面せん断試験が有効であると考えられる。また岩石のせん断強度特性を求める場合には、一定垂直応力下での試験、いわゆる定圧状態で実施し、これを異なった垂直応力下で繰り返し行うため、同質の岩石試料を数個用意することが必要とされる。しかし、不連続面を有する岩石の場合、同質の試料の採取は非常に困難であり、そのため試験結果のばらつきも大きくならざるを得ない。このためKováriらは1本の岩石供試体でピーク強度と残留強度の破壊包絡線が得られる連続破壊一面せん断試験法 (Continuous Failure State Direct Shear Test 以下ここではCFS試験法とする)¹⁾を提案しているが、CFS試験法の詳細な手法および適用範囲についての基礎的な資料が不足しているため、一般的な試験法となるにはまだ多くの問題点が残されている。

本論文では、人為的に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、2方法のCFS試験および多段階一面せん断試験を実施し、それらの試験結果の差異およびCFS試験法の適用性に関して実験的に検討を行った。

2. 実験方法

2.1 直接一面せん断試験装置

図-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、载荷方向は鉛直であり、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载荷され、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可能である。せん断箱は左右に分離しており、一辺50 mmの立方体供試体あるいは $\phi 50 \times 50$ mmの円柱供試体について試験可能である。

図-2は、本実験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、変位の計測は、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直視でき、また記録される。

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ほとんど不可能であり、また得られる結果のばらつきは大きくその信頼性も低いものにならざるを得ない。そこで本研究ではあらかじめ人為的に不連続面を作製した砂岩供試体を用いて実験を行った。

試料として用いた砂岩は、飛騨山地の北部、中部地方の中生界ジュラ系に属する堆積岩岩盤の手取層群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50 mm、高さ50 mm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 $\sigma_n = 4$ Mpaにおいてせん断応力を加え破断させたものを用いた。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。なお、これらの供試体に対してTilt試験を行い、JRC値²⁾を求めたところ4.3~6.6の範囲で、平均は5.5となった。表-1は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、垂直応力を増加させることにより最大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最大せん断強度を求めようとするCFS試験法（以下、CFS-D試験法とする）の2種類のCFS試験法に加えて、比較のため多段階一面せん断試験法³⁾（以下、多段階試験とする）および通常の定圧一面せん断試験（以下、定圧試験とする）も合わせて実施した。試験は全て変位制御方式で行い、せん断変位速度は0.025 mm/minである。以下に各試験法の手順を説明する。

a) CFS-U試験法

図-3(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

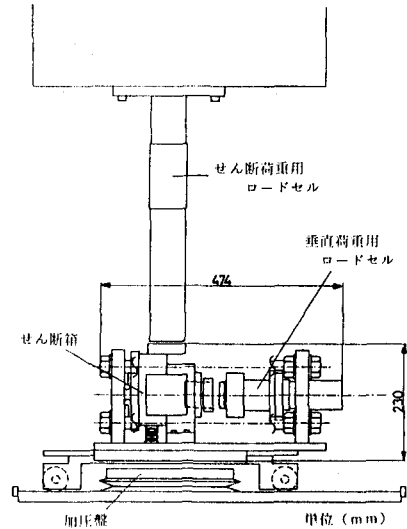


図-1 一面せん断試験機図

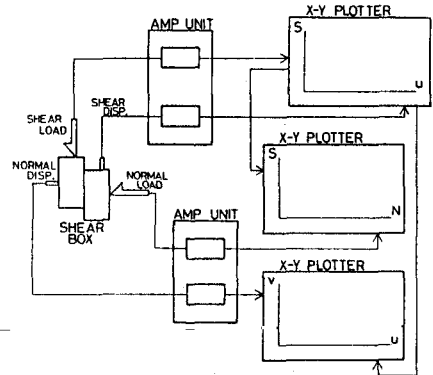


図-2 計測システム図

表-1 砂岩供試体の諸特性

単位体積重量 (kN/m^3)	吸水率 (%)	有効空隙率 (%)	一軸圧縮強度 (Mpa)	圧裂引張強度 (Mpa)
24.89	1.88	4.76	108.26	6.96

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 における最大せん断強度直前点 A に達する。 A 点から任意の傾き α の直線 a を描くように垂直応力を連続的に増加させる。垂直応力が所定の最大値 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最大せん断強度点 B に達する。こうして図-3(b)における最大せん断強度の破壊包絡線 $\bar{a}$ が得られる。その後、垂直応力 Q を維持したまません断を続行し、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。垂直応力の増加速度に関して、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、 $\alpha/k_s = 1.0$ となるように垂直応力を制御することを推奨しており¹⁾³⁾、今回の実験においてもこれに従った。

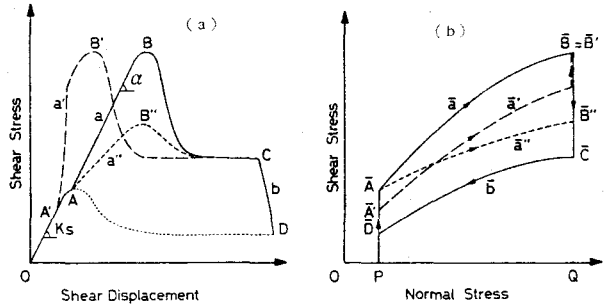


図-3 CFS-U試験模式図

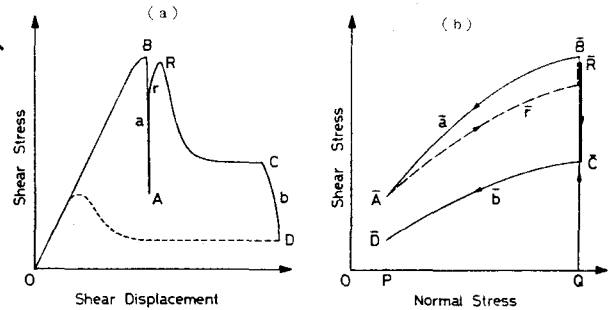


図-4 CFS-D試験模式図

b) CFS-D試験法

図-4(a),(b)は、CFS-D試験法に関してCFS-U試験法と同様に表したものである。まず求めたい垂直応力の範囲 ($P \sim Q$) における最大値 Q のもとでせん断試験を開始し、最大せん断強度直前点 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 における最大せん断強度点 A を得る。この時点で応力状態は図-4(b)の $\bar{A}$ に達しており、最大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。

3. 実験結果および考察

図-5(a),(b)は、定圧試験から得られたせん断応力 τ - せん断変位 u 曲線と垂直変位 v - せん断変位 u 曲線を示したものである。なお図-5(b)の垂直変位 v の符号に関しては+を膨張、-を圧縮として表している。図-5(a)の $\tau - u$ 曲線より、供試体の変形特性は、低垂直応力下において完全弾塑性的であり、高垂直応力下においては asperity のせん断によると思われるひずみ軟化現象がみられる。また図-5(b)に示した $v - u$ 曲線において、垂直応力の増加に伴ってダイレーション率 (dv/du) が低下しており、このことから供試体の破壊様式は、低垂直応力下における asperity に沿ったすべり上がりから高垂直応力下における asperity 自体のせん断へと移行しているものと考えられる。

図-6(a),(b)は、CFS-D試験、CFS-U試験、多段階試験の各試験法によって得られた $\tau - u$ 曲線、および $v - u$ 曲線の一例を示したものである。 $v - u$ 曲線に関して、CFS-D試験では初期垂直応力下のピーク強度点に達するまで供試体の膨張はほとんど見られず、この部分では asperity に沿ったすべり上がりは生じていないものと考えられる。これに対してCFS-U試験、多段階試験においては、初

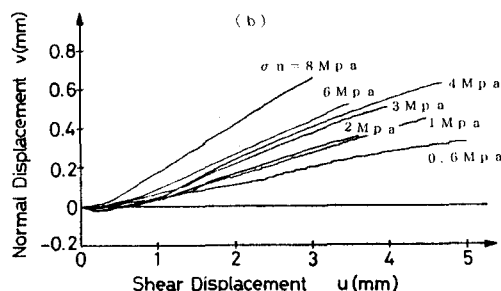
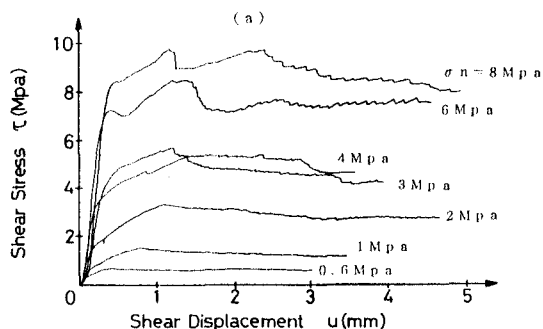


図-5 定圧一面せん断試験結果

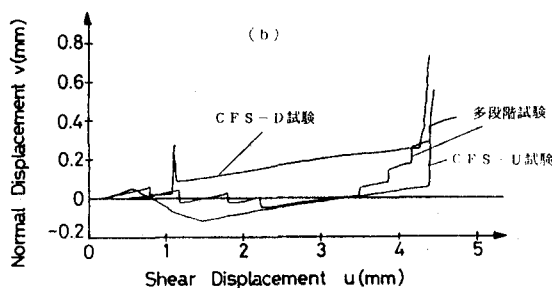
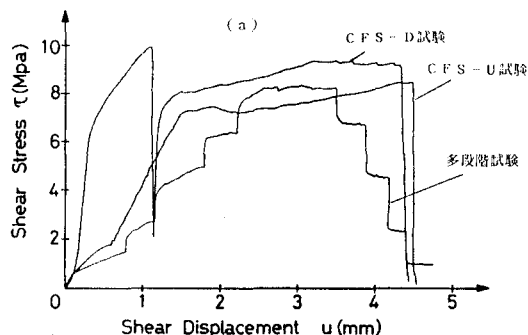


図-6 各試験結果の比較

期垂直応力下におけるせん断の初期段階から供試体は膨張傾向を示しており、この時点ですでにasperityに沿った滑り上がりが生じているものと考えられる。また多段階試験では垂直応力の各段階において顕著な膨張傾向を示している。

図-7は、最大せん断強度に関して各試験法によって得られた結果をせん断応力 τ -垂直応力 σ_n 図に表したものである。この図より、CFS-D試験によって得られた破壊包絡線は定圧試験の結果とよく一致しているものの、CFS-U試験あるいは多段階試験から得られた破壊包絡線は、定圧試験よりもかなり低い値を示している。次にこのような試験法の相違による試験結果の差異に関して考察する。

図-8は、定圧試験の τ - u 曲線より求めた各供試体のせん断剛性 k_s と垂直応力 σ_n の関係を示したものである。この図より、多少のばらつきは見られるものの σ_n の増加に伴って k_s は顕著な増加傾向を示している。このような k_s の増加傾向に関してはいくつかの報告例があり、岩石不連続面のせん断変形特性の一つであると考えられる。CFS-U試験における垂直応力の増加方法に関してKováriらは、図-9に示すような垂直応力によってせん断剛性が変化しない等剛性モデルを仮定し^{1), 3)} その仮定に基づいて τ - u 関係におけるピーク強度点の軌跡をなぞるために $V/k_s = 1.0$ を推奨している。しかし、図-8に示したように k_s は σ_n によって変化し一定ではないため、Kováriらの方法に従ってCFS-U試験を行った場合、初期垂直応力の相違によって τ - u 曲線はかなり異なった傾きを示すことになる。図-10は、各試験法においてピーク強度を測定した時点のせん断変位 u_p と σ_n の関係を示したものである。この図より、定圧試験に関して2 Mpa以下の垂直応力域において u_p は顕著な増加傾向を示しているが、それ以上の垂直応力域ではほぼ一定値を示し、この点に関しても不連続面の変形特性はKováriらの仮定した等剛性モデルの変形特性とは一致しない。そのためCFS-U

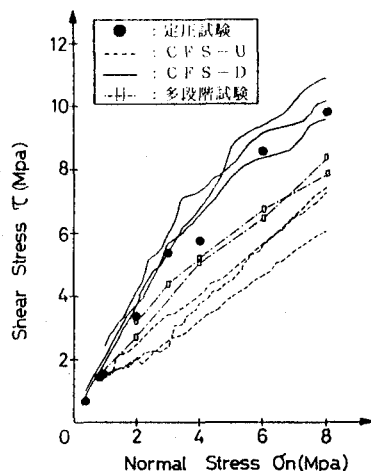


図-7 最大せん断強度に関する試験結果

試験における u_p は、定圧試験の傾向とは異なったものとなっており、また多段階試験に関しても、図-6に示したように、ピーク強度を得るため垂直応力の各段階においてある程度せん断変位を進めることが必要とされるために、 u_p の変化傾向は定圧試験とはかなり異なっている。これに対してCFS-D試験に関しては、2Mpa以下の低い垂直応力域を除いて、ほぼ定圧試験と一致している。さらに図-6に明かなように、CFS-U試験、多段階試験に関しては初期垂直応力におけるピーク強度点においてすでに歯形に沿った滑り上がりが生じており、その後の垂直応力の増加過程において、せん断変位の進行によって供試体はほぼ残留強度状態に達しているものと考えられる。以上のことから、岩石不連続面の最大せん断強度の破壊包絡線を求める場合、CFS-D試験が有効であると考えられる。図-11は、

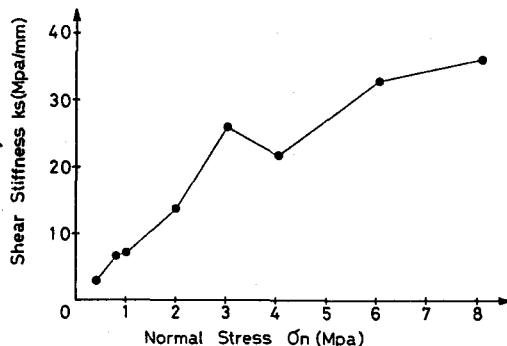


図-8 せん断剛性 k_s と垂直応力 σ_n の関係

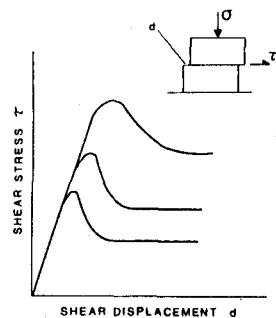


図-9 せん断応力-せん断変位図 (Kováriら¹⁾による)

残留せん断強度に関して各試験法によって得られた結果をせん断応力 τ -垂直応力 σ_n 図に表したものである。この図より各試験法ともほぼ定圧試験の結果と一致した値を示しており、残留せん断強度に関しては試験法の相違は試験結果にほとんど影響を与えないものと考えられる。

4. まとめ

以上述べたように、人工的に作成した不連続面を有する岩石供試体に対して、2方法のCFS試験を行った結果、CFS-D試験法を用いることによって最大せん断強度および残留せん断強度の破壊包絡線をわずか1本の供試体によってほぼ正確に求めることが可能であり、CFS-D試験法が非常に有効な試験法であることが確認された。しかし、CFS-U試験法に関しては、残留せん断強度の破壊包絡線を求めることは十分可能であるが、最大せん断強度については岩石不連続面の变形特性の点からも垂直応力の制御が非常に困難であり、そのため得られる破壊包絡線も不正確で信頼性の低いものとなることが明かとなった。

《参考文献》

- 1) Kovári, K., Tisa, A. : Continuous Failure State Direct Shear Tests, Rock Mechanics, Vol.17, No.2, pp.83-95, 1984.
- 2) Barton, N., Choubey, V. : The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, Rock Mechanics, Vol.10, No.1-2, pp.1-54, 1977.
- 3) Kovári, K., Tisa, A., Attinger, R.O. : The Concept of "Continuous Failure State" Triaxial Tests, Rock Mechanics, Vol.16, No.2, pp.117-131, 1983.

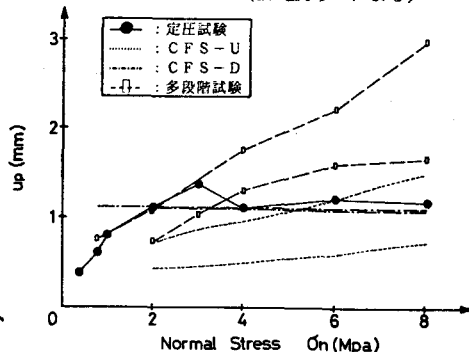


図-10 最大せん断強度測定点におけるせん断変位 u_p と垂直応力 σ_n の関係

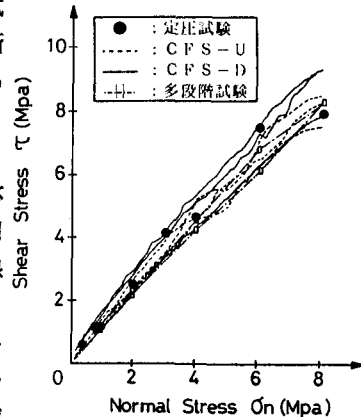


図-11 残留せん断強度に関する試験結果