

(40) 原位置における多段階せん断試験について

応用地質株式会社 正会員 ○ 船戸 明雄
同 上 正会員 横山 幸也
同 上 和 田 弘

In-situ Multistage Direct Shear Test

Akio FUNATO OYO Corporation
Tatsuya YOKOYAMA OYO Corporation
Hiroshi WADA OYO Corporation

Abstract

In-situ direct shear test is practically the only method for determining the shear strength of discontinuous rock. In Japan, it is used to investigate foundation rock mainly for nuclear power plants and dams. However, this test, which is rarely used in projects for other types of structure, is expensive and the relationship between the normal stress and the shear stress often show considerable scattering. In order to improve these problems, the authors have studied in-situ multistage testing, a method whose reliability is well-established in laboratory.

In the in-situ direct shear test, the following phenomena appear prior to failure:

- 1) increase of AE count rate
- 2) changes in resistivity
- 3) upward brock movement
- 4) shifting of load displacement curve

By using these phenomena, the in-situ multistage direct shear test may be able to conducted successfully. We will attempt this test on many types of rock, and will find its usefulness for evaluating the shear strength of rock.

1. まえがき

岩盤の直接せん断試験は、原位置でのせん断強度を求めるためのほとんど唯一の方法であり、我国においては主にダムや原発等の重要構造物の基礎岩盤を対象に適用されている。しかしこの試験は、多くの人手と日数と費用を要するうえに、得られた結果も岩盤の不連続性や不均質性を反映してばらつくことが多く、これら以外の構造物に対して適用されることは稀である。

筆者らは、室内では以前から実施例の多い多段階試験を、原位置へ適用することを検討してきた。多段階試験は、ひとつの供試体で強度定数を得ることができるため、通常の単段階の試験に比べ、費用の面でもばらつきの少ないデータが得られるという点でもメリットがある。室内における多段階試験では、単段階試験とほぼ等しい強度が得られると報告されている¹⁾。国際岩の力学会 (ISRM) の指針としても多段階の三軸圧縮試験法が提案されており²⁾、多段階試験はひとつの試験方法として認知されつつある。しかし原位置のせん断試験を多段階で実施した例ほとんど報告されていない。以下では原位置せん断試験において、供試体を完全に破壊させる手前で除荷、再載荷をくり返す多段階試験の方法と適用結果の一例について述べる。

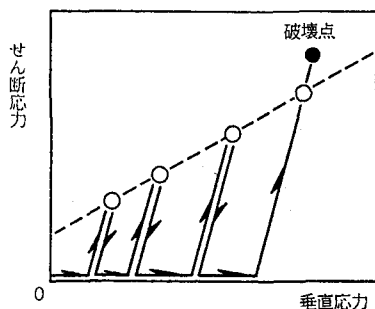


図-1 多段階試験における応力経路の模式図

2. 原位置せん断試験において破壊に至るまでの様々な現象

I S R Mの多段階三軸圧縮試験の指針では、応力～変位曲線のピークを確認して次の段階に移るとしている。しかし、変位制御の三軸圧縮試験と違って荷重制御の原位置せん断試験では、ピークに達した時点で供試体は一気に破壊してしまうため、多段階試験時にはピークの直前でひとつの段階の試験を終える必要がある。したがって、図-1に示すような応力経路で試験を行うためには、破壊を予知することが重要なポイントになってくる。

岩石の圧縮試験における応力～変位曲線は、直線関係を示す弾性的挙動の後に、ピークに先立つ塑性的な挙動が明瞭にあらわれることが多い。また図-2に示すように、破壊に先立って種々の物性値が変化することが知られている³⁾。同様に原位置のせん断試験においても、破壊に先立つこのような現象を利用することにより、多段階試験の荷重制御が容易になる可能性がある。そこで通常の原位置せん断試験において、AE、比抵抗およびブロックの変位が、破壊に至るまでどのように変化するかを把握するため、予備実験および検討を行った。

2-1. AE発生状況の変化

図-3は花崗閃緑岩におけるせん断試験時のAEの測定結果である。AEセンサーは、せん断ブロックの背後約20cmの岩盤表面上に設置した。AEの毎秒当りの発生率は、せん断応力の増加時には増え、応力保持時には少なくなる脈うちを示しながら、破壊の直前に急激に増加している。AEの累積数と時間の曲線で見ると、初期の直線関係から下に凸の曲線への変曲点が図中↓印の位置に認められる。このような変曲点(AEの増加点)は他のブロックについても破壊時のせん断応力の $\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3}$ の時点であらわれている。周知のようにAEは岩盤内の微小破壊に伴って発生するものであり、AEの増加はマイクロクラックの進展や急増によるダイラタンシーの開始と密接な関係がある。この測定結果では、AEの増加点(↓印)はブロックの浮上り点(垂直変位が沈下から浮上りに変化する点)に一致する場合が多かったが、一致しない場合もあった。この点についてはさらに検討を要する。

破壊時のAEについては、石田ら⁴⁾も指摘しているように、変位の急増にわずかに先行してAEの爆発的な増加がみられる。位置標定、周波数やエネルギーの測定等を行なえば、破壊を予知するためのさらに有用な情報が得られるものと期待される。

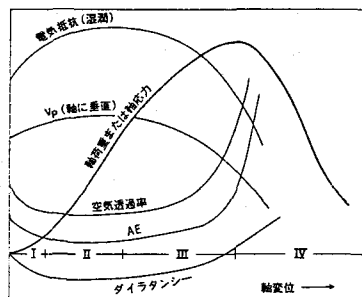


図-2 圧縮試験で認められる岩石の完全な荷重～変位曲線の四つの段階と、これに対応する各種の物理的性質の変化。

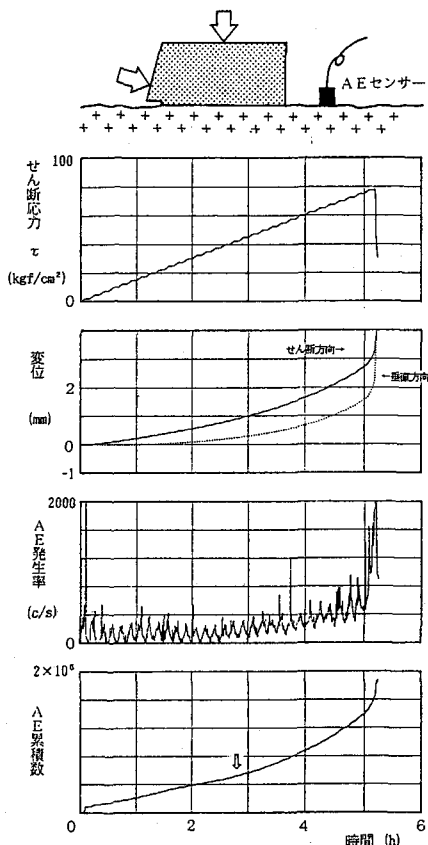


図-3 せん断試験時のAEの測定結果

2-2. 比抵抗の変化

図-4はの砂岩・頁岩互層箇所においてせん断試験時に比抵抗を測定した結果である。電極は、あらかじめ試験面の中央に掘削した $\phi 18\text{mm}$ 、深さ 20cm の孔中に、孔口のNo.1から孔底のNo.16まで $1\sim 2\text{cm}$ 間隔で16点設置した。同図によるとNo.2, No.4, No.8の各点では、せん断応力 τ が 50kgf/cm^2 を越えたあたりから徐々に比抵抗の低下が見られる。これに対しNo.6では、 $\tau=60\text{kgf/cm}^2$ 付近から比抵抗がやや大きくなり、 τ が 70kgf/cm^2 を越えると急激に低下している。またNo.10, No.12では破壊に至るまで比抵抗はほとんど変化していない。このような比抵抗の変化は、せん断に伴うクラックの開口（比抵抗増加）や水の侵入（比抵抗低下）など、破壊のメカニズムと深いつながりがあるものと考えられる。

2-3. 浮上り点

せん断に伴うブロックの浮上りは、その工学的・力学的意味は必ずしも明確ではないが、破壊に先立って多くの場合に認められる現象である。既存のデータをもとに、浮上り点の応力比 α_{up} （浮上り時のせん断応力 τ_{up} ／破壊時のせん断応力 τ_{max} ）と初期垂直応力 σ_0 の関係プロットすると図-5のようになる。岩盤状況によって差はあるが、初期垂直応力 σ_0 が大きくなると α_{up} が大きくなる傾向がうかがえる。なかには σ_0 が小さい場合、せん断開始とともに浮上りを示すものもある（ $\alpha_{up}=0$ ）。逆に著しい破壊部や軟質な岩では、浮上りを生じないまま破壊に至る例もある（ $\alpha_{up}=1$ ）。通常のせん断試験においては、せん断用ジャッキの荷重の作用線は想定せん断面とある角度をなしているため、せん断応力の増加はその分力としての垂直応力の増加を伴う。したがって試験時に計測される垂直変位は、せん断に伴うダイラタンシーに、垂直応力の増分による圧縮変形が加わったものとなる。 α_{up} が同一の岩盤でもかなりばらつくのは、このようなことによるものであろう。

2-4. せん断応力～せん断変位曲線の特徴

この関係は通常指数関数的であり、破壊に先立つ変曲点が明瞭に認められることは少ない。そこで、既存のデータを分析して変曲点の抽出を試みた。図-6a)では、応力比 α （ $=\tau/\tau_{max}$ ）が小さい範囲ではほぼ直線関係を示し、 $\alpha \approx 0.6$ 付近で折れ曲がるものが多い。同図b)では、ばらつきが大きいものの $\alpha \approx 0.7 \sim 0.9$ 付近に

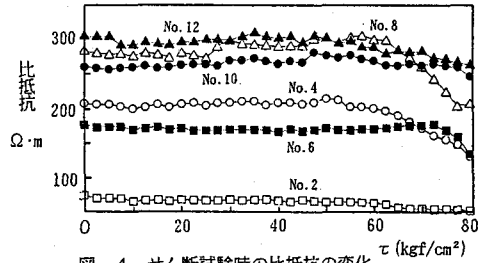


図-4 せん断試験時の比抵抗の変化

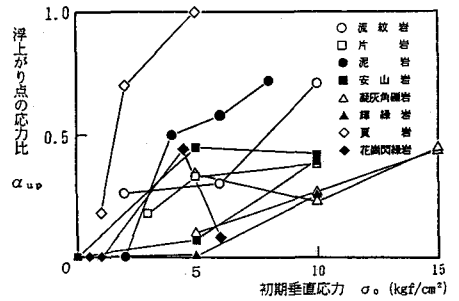


図-5 浮上り点の応力比と初期垂直応力の関係

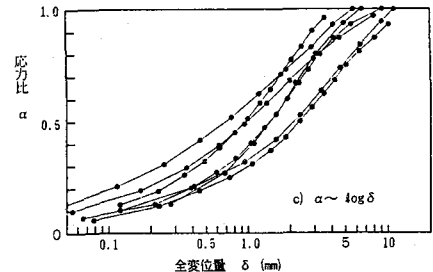
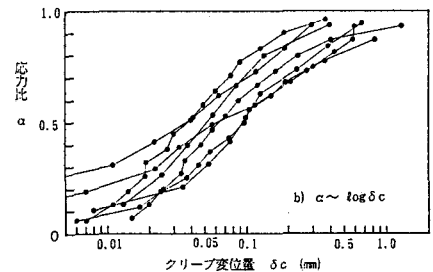
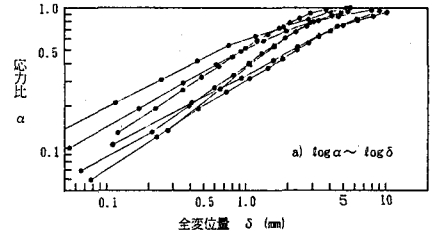


図-6 せん断応力～せん断変位曲線

折れ点が現われている。また同図c)では、 α が大きくなるにつれ下に凸から直線状、さらに $\alpha \approx 0.8$ 付近で下に折れ曲がる形状を示している。このような傾向は地質・岩盤状況によって差はあるものの、検討した限りのデータにおいては、ほとんど例外なく認められた。これらの変曲点が、岩盤のせん断破壊とどのような関係があるかについては不明であるが、破壊の前駆現象として利用できると考えられる。

2-5. 破壊時の変位置

異なる拘束圧下における応力～変位の関係を単純化したモデルで表わすと、図-7のような2つの形に大別できる。同図a)は定剛性モデルであり、インタクトな硬岩の三軸圧縮試験時の応力～変位曲線はこのような形状を示すことが多い。一方同図b)は定変位モデルであり、すりへった面の一面せん断試験時の応力～変位曲線がこの形に近いといわれている⁵⁾。ただし両者の中間的な挙動を示す場合が多いことはいうまでもない。

既存の原位置せん断試験データについて、せん断応力がピークに達した時のせん断変位 δ_p と、初期垂直応力 σ との関係をプロットすると図-8のようになる。この図から岩盤状況によって δ_p の絶対値は異なるものの σ の違いによる差はあまりないことがうかがえる。即ち、原位置せん断試験時のせん断応力～せん断変位の関係は、図-7の定変位モデルに近いといえる。

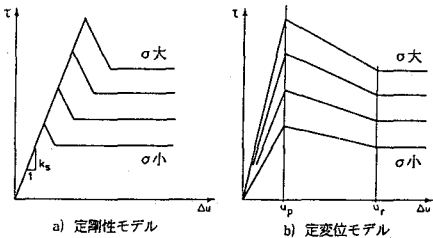


図-7 応力～変位関係のモデル

3. 多段階試験の試み

3-1. 荷重制御方法

以上のような検討の結果から、原位置で多段階のせん断試験を行う際には、次のような点に着目して荷重を制御する方法が考えられる。

- ①せん断応力～せん断変位曲線の変曲点
- ②あらかじめ設定されたせん断変位置
- ③A E、比抵抗等の変化点

ただしいずれにしても、同一の岩盤において、同一の試験方法・試験装置によりあらかじめ単段階の試験を行い、破壊に先立つこれらの現象の出現状況を確認しておくことが必要である。

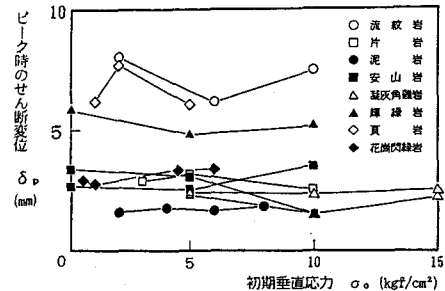


図-8 ピーク時のせん断変位と初期垂直応力の関係

3-2. 試験結果

図-9は泥岩を対象に実施した原位置での多段階せん断試験の結果である。この時は既存の試験によるせん断応力～せん断変位曲線の特徴をもとに、前述②のせん断変位の上限值を設定して荷重の制御を行った。 σ^* と τ^* (せん断変位が設定値に達した時の垂直およびせん断応力)の関係はばらつきが少なく、クーロンの直線式に回帰すると、

$$\tau^* = 1.55 + \sigma^* \cdot \tan 27^\circ$$

となった。

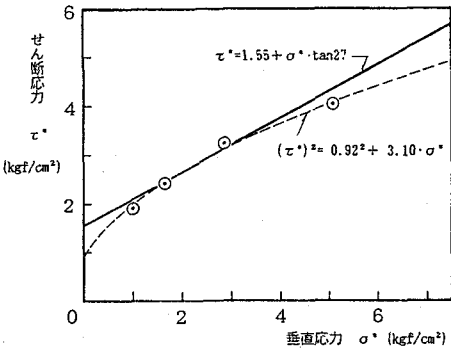


図-9 多段階せん断試験による $\sigma \sim \tau$ 関係図

なお得られた σ^* と τ^* の関係は、よく知られているようにやや上に凸であり、次式の放物線により良くフィッティングできる。

$$\tau^{*2} = 0.92^2 + 3.10 \cdot \sigma^*$$

4. 多段階試験による強度定数の評価

破壊時の σ 、 τ を直線回帰して得られる強度定数を τ_0 、 ϕ 、多段階試験による破壊前の σ^* 、 τ^* から得られる強度定数を τ_0^* 、 ϕ^* とする。また τ^*/τ の値を α (< 1) とすると以下の関係式が導かれる。

$$\tan \phi^* = \frac{1}{1 + (1 - \alpha) \tan \theta \cdot \tan \phi} \cdot \alpha \tan \phi$$

$$\tau_0^* = \frac{1 - \tan \theta \cdot \tan \phi^*}{1 - \tan \theta \cdot \tan \phi} \cdot \alpha \tau_0$$

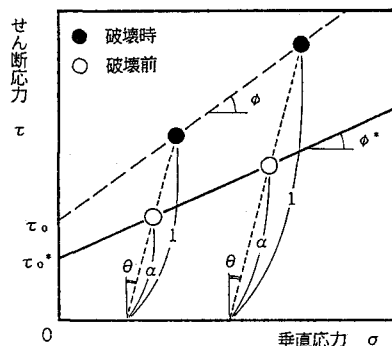


図-10 破壊時と破壊前の強度定数の関係

図-10からも明らかなように、 $\tau_0 > \tau_0^*$ 、 $\phi > \phi^*$ であるから、多段階試験によって求められる強度定数は常に安全側（小さめ）の評価となる。どの程度安全側であるかということは、多段階試験の最後の段階で α を確認し、上式から推定することができる。

構造物の設計にあたっては、岩盤が最大せん断強度を発揮するまで変位することは、構造物の許容変位量からほとんど許されないことと思われる。したがって強度を評価する際にも、単に試験で得られた破壊強度を用いるのではなく、設計上の許容変位量から設定される一定のせん断変位時の強度を用いるのが妥当ではなかろうか。その意味でこのような多段階試験は今後大いに利用価値があるものと考えられる。

5. まとめ

原位置の多段階せん断試験は、従来の単段階せん断試験に比べいくつかのメリットを持っている。しかし同時に以下のような課題を有している。

- ① τ^* の工学的意味が不明確である
- ② 繰り返し载荷の影響
- ③ 荷重制御方法

今後は数多くのデータを得ていくなかで、このような課題について検討していきたいと考えている。

<参考文献>

- 1) 例えば、赤井浩一・大西有三・李徳河：多段階三軸圧縮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、第 311号、pp.93-102、1981年
- 2) INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS : Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression : Revised Version ,Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.,Vol.20, No.6, pp.283-290, 1983
- 3) M.S. パターソン著、荻野正二・水田義明・佐野修 共訳：実験岩石力学、古今書院、1986年
- 4) 石田毅・金川忠・佐々木俊二・浦沢義彦：AEによる岩盤空洞安定性監視に関する基礎実験、土木学会論文集、第 376号／Ⅲ-6、pp.141-149、1986年
- 5) R.E.Goodman : Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, WEST PUBLISHING COMPANY, pp.175-177, 1976