

(10) 変位制御による岩のせん断試験およびせん断中のダイレタンシーについて

九州大学生産科学研究所

○ 江崎哲郎

青木一男

S.ンダムコン

西田 正

1. 緒言

岩の力学的特性を調べる目的から、種々の強度試験が現場または現場から採取した岩石試料によって行われている。この方法には、大別して三軸圧縮試験とせん断試験がある。そして、目的や条件に応じて適宜選択されているが、一般に現場においてせん断試験が、室内試験としては三軸試験が多く採用されており、標準的な試験方法が提唱されている¹⁾。一方、室内試験としてのせん断試験は、斜面などの分野で、比較的垂直応力の小さい範囲で実施されることが多く、載荷方法によって、一面せん断試験、二面せん断試験、IBG 規格せん断試験²⁾、ねじり試験などがあるが、三軸試験に比べて、実際にあまり用いられていないのが現状である。

この理由は、せん断箱の摩擦、応力分布、進行性破壊などのせん断試験の問題点に明確な説明や解決策が与えられていないからであろう。しかしながら、室内せん断試験は、三軸試験と比較して、簡易な装置で剛性試験が可能で、操作、計測も容易な特徴を有している。とくに、不連続面を対象とする試験では、応力や変位が直接求まることや垂直荷重とせん断荷重の組合せが自由、変位量を大きくとれることなど、三軸試験よりも優れている点が多い。最近では、いくつかの試験機が試作³⁾されて数々の検討がなされてきているものの前述の試験に比べて、まだ不明のことがはなはだ多い。

以上の観点から、本研究では次のような条件下でのせん断試験を行い、試験装置、試験方法、評価方法を検討すると同時に、これらの条件下でのせん断特性を明らかにすることを目的とする。

- (1) 高圧三軸試験に代わる簡便な試験としての垂直応力が大きい領域でのせん断試験。
- (2) 地下深部などでのダイレタンシーが拘束される条件に対応する垂直変位拘束下でのせん断試験。
- (3) 不連続面のせん断試験。

まず本報は、これらの試験を行うために試作した変位制御方式の一面せん断試験機、および、その性能試験を兼ねて行ったインタクトな岩の(1)および(2)の試験結果について述べることにする。

2. せん断試験機概説

前述の(1)～(3)までの試験が可能な試験機は、試験体の寸法効果を考慮すると、かなり容量、能力を必用とし、当然大型となる。しかし、室内試験としての簡便な装置という特色を生かすこと、現場試験と比べれば、寸法効果という点からは当然不利であるのは止むを得ないこと、さらに、せん断面

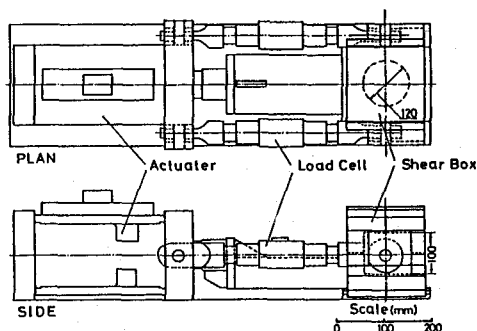


Fig.1 Direct Shear Testing Machine

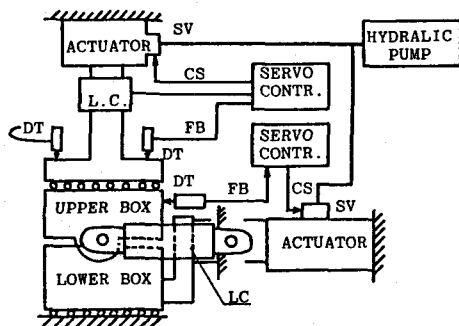


Fig.2 Schematic of System

積が 40 cm^3 程度あれば不連続面の試験として有効と考えている試験方法⁴⁾もあり、せん断箱は内径 12 cm 、高さ 10 cm とかなり小型にした。

円柱供試体 ($\phi 5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$) の場合は間にリング状の金具で固定し、不定形の供試体は箱の中に石こうなどの埋込み材料で固定する。

Fig. 1、および 2 に試験機およびシステムの概略を示す。载荷はせん断、垂直とも油圧サーボ方式を採用し、せん断方向の能力は、圧縮 40 t 、引張 35 t の復動型である。垂直方向は 200 t の圧縮試験機を用いて载荷する。

せん断試験の大きな問題点の 1 つは、せん断箱の回転や摩擦である。従来の試験機は、土質用の試験機を踏襲したタイプが多いが、このタイプでは、垂直方向の応力の伝達や変位の計測に疑問が多い。従って、下箱移動方式を採用し、上箱は、せん断面の中心を通る軸

にリンクで連結して、上下方向に自由に変位できるようにし、垂直方向ピストンで回転を防止する。また、せん断面に加力位置を合せてモーメントを除去する。

3. 岩石供試体および試験方法

岩石供試体は、長崎県相浦産砂岩 (乾燥密度 2.36 g/cm^3 、圧縮強度 82.3 MPa 、同標準偏差 1.0 MPa) および山口県秋吉産大理石 (2.67 g/cm^3 、 73.7 MPa 、 2.4 MPa) の 2 種類である。

$5\text{ cm} \phi \times 5\text{ cm}$ の円柱形に入念に仕上げ、乾燥炉で一定重量になるまで乾燥させた。

試験は (1) 垂直応力一定試験と (2) 垂直変位拘束試験の 2 種類である。(1) の場合は、まず所定の垂直応力 (2、5、10、20、50、100、および 200 MPa の 7 段階) を与え、これを一定

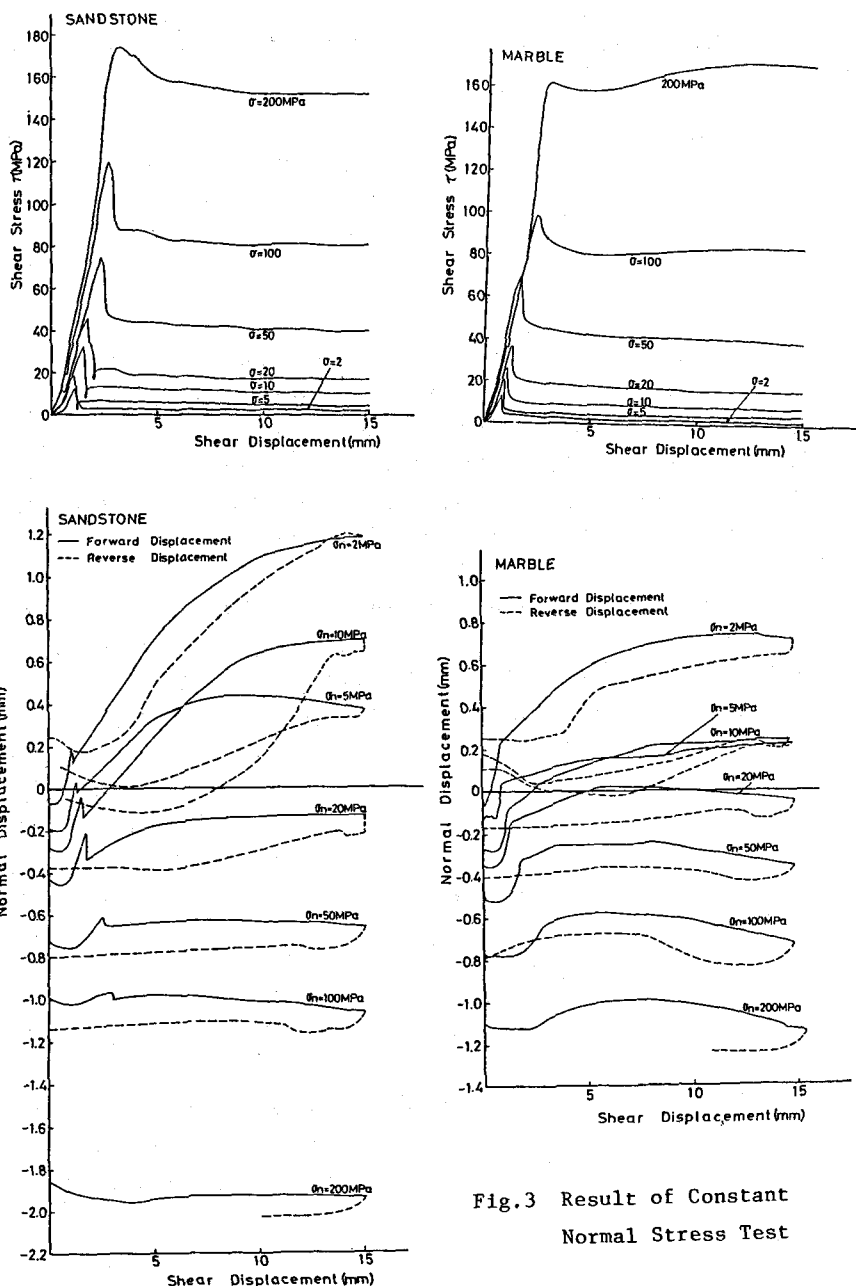


Fig.3 Result of Constant Normal Stress Test

に保持しながら毎分
0.3 mm の速度でせん断する。そして変位
15 mm に達したら、
逆方向にせん断する。
(2) の場合は、所定の垂直応力を与えた時の垂直変位が一定となるように、垂直方向変位計でフィードバックをとって (1) と同様のせん断を行う。なお上下のリング間のすき間は試験開始時に 1 mm とした。測定は、垂直方向がロードセルおよび上箱上面の 2 個の変位計で、せん断方向はリンクに取付けた 2 個のロードセルおよび上下箱間を変位計で、各々荷重および変位を計測した。

4. 結果および考察

(1) および (2)

の試験結果を Fig. 3

および 4 に示す。両者とも垂直応力が小さい時の破壊直後にやや不安定な制御となる場合もあったが、一般に制御は完全に行なわれた。(1) の場合、三軸試験の応力-変位 曲線と極めて類似した形状を示し、垂直応力が増加するとひずみ軟化の傾向がなくなり延性破壊の様相を呈してくる。垂直変位 (ダイレタンス) の増加は、垂直応力が小さいほど著しい。またピーク強度付近で最も増加が大きく、砂岩の場合にはこの位置に垂直変位の変化にピーク値が認められる。しかし一軸強度以上の垂直応力になると変化がないか、またはコントラクションの傾向となる。また垂直応力 5 ~ 10 MPa 付近を境界として垂直変位の変化状況に遷移する傾向が見られるが、この原因には、粉末の生成機構の変化する遷移領域、破壊時の最小主応力が引張から圧縮に変化する遷移領域などが考えられるが明らかでない。

変位拘束試験では砂岩と大理石で様相が異なる。破壊以前は両者共にせん断にともない垂直応力が増加する。そして最初の垂直応力が小さいほど増加する割合が大きい。破壊直後には砂岩の垂直応力は急激に低下するが、大理石の場合のそれは増加速度が減少するものの増加を継続する。その結果、垂直応力一定の場合のぜい性的挙動と比べて、破壊後の挙動が塑性的になり、最大強度以降も急激にせん断強度を失なわないで、最終的には減少していくものの、付加的せん断強度をもつ。砂岩の場合も、初期の垂直応力が小さい場合では同様の傾向がある。また、これらの挙動はせん断面の摩耗とも関連深い (Fig. 5)

Fig. 6 はせん断応力-垂直応力図においてピークせん断強度と残留せん断強度をプロットしたものである。拘束試験の残留強度は、垂直変位の変化が平坦になった位置で決定した。また、比較のため、三軸試験結果のモールの応力円 (実線はピーク強度、破線は残留強度) を示した。強度のばらつきは少な

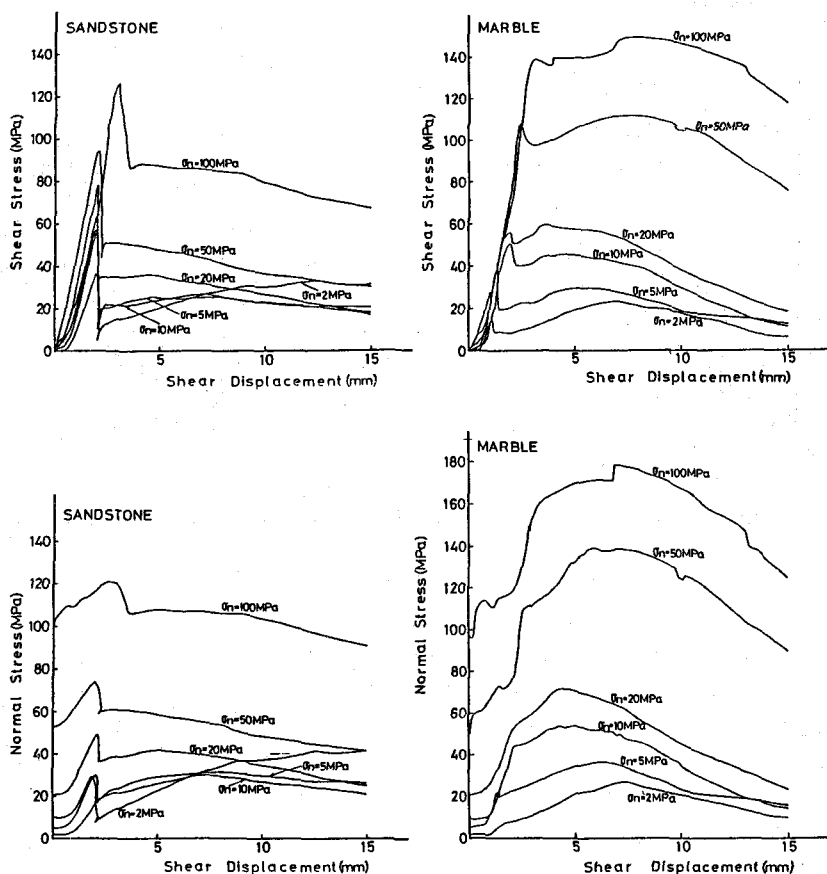


Fig.4 Result of Test with Controlled Vertical Deformation.

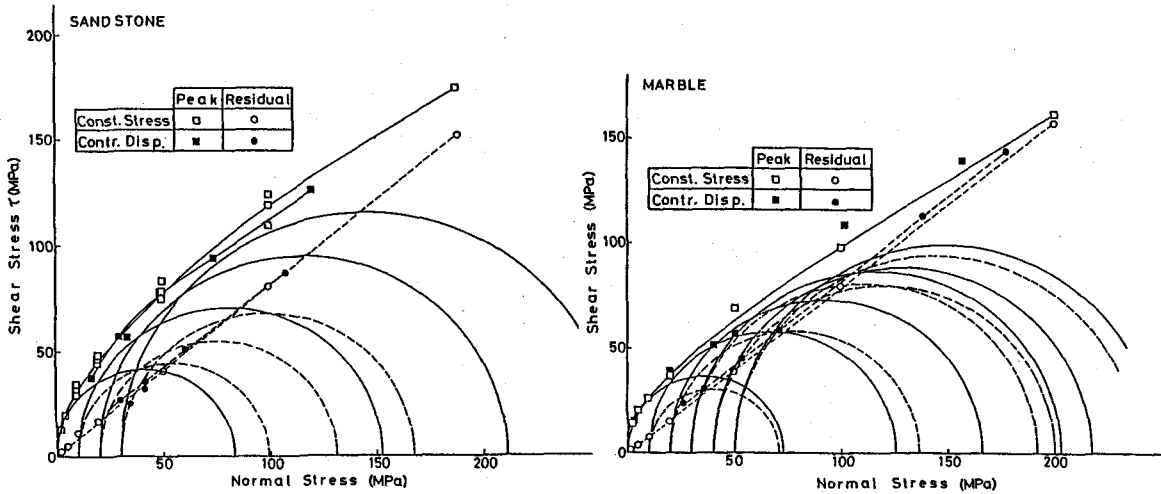


Fig.6 Failure Criterion in Shear Test and Mohr's Circles in Triaxial Test

く、特に残留強度の破壊線は完全に直線となった。そして、一軸強度の約3倍程度の垂直応力の地点が、ぜい性破壊から延性破壊への変換点になると推定される。三軸試験と比べると類似した破壊曲線であるが、ピーク強度は、せん断試験の方が少し大きく、残留強度は逆に少し小さくなる。これには、せん断試験の表示方法の問題もあると考える。

5. 結言

以上の結果、簡便な装置にもかかわらず、本せん断試験はダイレンシーの計測、拘束試験などに特色を持つ試験方法として期待しうると考える。

なお、現在(3)の不連続面の試験を進行中であるが、同時に、せん断試験の最大の問題点である主応力の回転などの応力分布や進行性破壊の問題を明確にして、せん断試験の正しい表示方法を検討していく予定である。

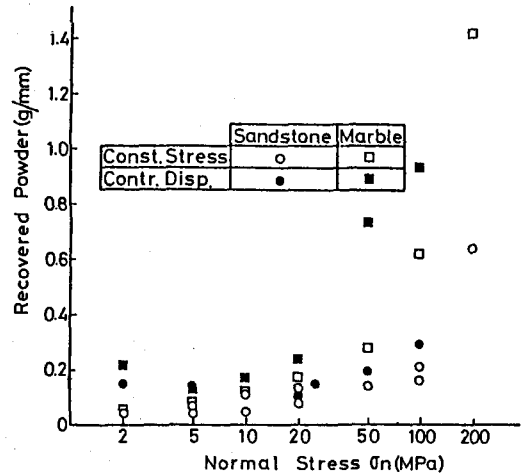


Fig.5 Recovered Powder per Unit Displacement during Shear Test

参考文献

- 1) ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Test, CFT 1974, CLT 1977
- 2) Everling, G., Bergbau Archiv, 25, 85-91 (1964)
- 3) Bernaix, J., Int. J. RMMS vol. 6, 43-90 (1969), Goodman, R.E. and Y. Ohnishi, Rock Mechanics 5, 129-149 (1973), Rosso, R.S., Int. J. RMMS vol. 13, 167-172 (1976), Natau, O. et al, 4th ISRM, vol. 3, 241-243 (1979), 小林良二他, 日本鉱業会春季大会, 289-290 (1979) など
- 4) CANMET, Pit Slope Manual, Supplement 3-2, Ottawa (1977)

(10) Rock Shear Test under Constant Deformation Rate
and Dilatancy of Rocks during Shear.

by Tetsuro ESAKI, Kazuo AOKI,
Samuel A. NDAMUKONG and Tadashi NISHIDA
Research Institute of Industrial Science,
Kyushu University.

With the aim of carrying out the following tests:-

- (1) Rock shear test under high normal stress,
- (2) Rock shear test with controlled vertical deformation and
- (3) Shear test of rocks containing discontinuous planes,

we designed a new shear testing machine which was used in the present investigation.

Two rock types, Ainoura sandstone and Akiyoshi marble, were used in our tests involving the first two objectives mentioned above. The data from our tests give very plausible shear stress versus shear displacement curves (Fig.3) which are comparable with those of triaxial stiff tests. Particular attention is drawn to the interesting fact that rock dilatancy characteristics can be observed during shear.

With regard to the controlled deformation tests, our machine handled the situation very successfully, hence characteristic curves of sundry normal stresses were obtained as shown in Fig. 4.

From Fig. 6, it is observed that the data on the failure criterion are very reproducible but have slightly higher peak and slightly lower residual values than those of triaxial tests.