

岩石一面せん断試験装置およびラフネス計測 装置の開発・研究とその変遷

大西有三¹・矢野隆夫²・岩本 宏³・西川直人⁴

¹正会員 工博 PhD. 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 京都大学技官 工学研究科土木システム工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 竹中工務店技術研究所(〒270-1395 印西市大塚1-5-1)

⁴元京都大学大学院工学研究科修士1回生(〒640-0403 和歌山県那賀郡貴志川町尼寺714-3)

岩盤内には必ずと言ってよいほど不連続面が存在し、その面のせん断特性は岩盤全体に大きな影響を与える。よって、岩盤を対象とした土木構造物の設計を行う場合には、その特性を十分に理解しなければならない。一般に、岩のせん断特性を調べる室内試験として、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験などが行われるが、その試験結果だけでは岩盤不連続面のせん断特性を総合的に判断することは不十分である。滑らかな不連続面と粗い凹凸を有する不連続面では、すべりを生じさせるために必要な力の大きさが異なることは明かであり、その面の凹凸を計測することはせん断特性を考える場合に必要不可欠である。よって、それらの問題を解明するため、岩石一面せん断試験装置とラフネス計測装置を開発し、それらの装置の有用性を示した。

Key Words : direct shear apparatus, direct shear test, rock joint, shear behavior, shear strength, roughness profiler, joint roughness

1. はじめに

環太平洋造山帯に位置し、地殻変動の盛んな我が国では、岩盤内に断層、破碎帯、亀裂などが多く存在する。また、国際情勢の急激な変化をうけ、エネルギー問題に関連して石油の地下備蓄が実施され、クリーンなエネルギーである電力の安定供給のための原子力の利用が行われている。そのような場合、それらの施設が岩盤内に施工される場合が増加しており、劣悪な建設条件下的施工を余儀なくされている場合も少なくない。岩盤は自然に存在する材料であるため、岩盤を対象とする設計は非常に特殊なものになる。すなわち、露頭や掘削中の岩盤を観察すれば容易にわかるように岩盤内には必ずと言ってよいほど不連続面が存在する。不連続面の強度および変形特性は岩盤全体に大きな影響を与えるので、岩盤を対象とした土木構造物の設計を行う場合には、その特性を十分に理解しなければならない。

不連続面を有する岩盤を調査する場合、現場計測と室内試験が実施される。従来、岩の強度・変形特性を調べる室内試験として、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験などが行われているが、その試験結果だけで

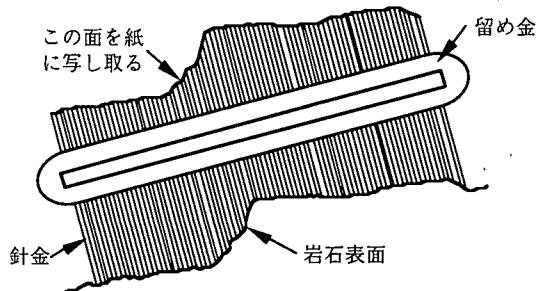


図-1 型取り器

は不連続面を含んだ岩盤の特性を総合的に判断することは不十分である。よって、不連続面を直接せん断する岩石一面せん断試験機が多用されるようになってきている。著者らは1987年(昭和62年)から岩石一面せん断試験装置を開発・改良してきており、それらの成果を当学会や地盤工学会などに発表している^{1)~14)}。

非常に滑らかな不連続面と粗い凹凸(ラフネス)を有する不連続面では、すべりを生じさせるために必要な力の大きさが異なることは明かであり、その面のラフネスの大きさを計測することは、その面の

装置	年代	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
岩石一面せん断試験装置														
計測・制御システム														
A/D,D/A変換、12Bit、C言語														
A/D,D/A変換 16Bit LABVIEW														
せん断箱														
φ50.0, φ100.0mm専用(図-7(a))														
円形供試体 方形供試体														
フリーサイズ(図-7(b))														
ラ計 フ測 ネ装 ス置														
型取り機(図-1)														
1号機 (図-15(a))														
2号機 (図-15(b))														
3号機 (図-15(c))														

図-2 試験装置の開発年表

強度・変形特性を把握する場合に必要不可欠である。

ラフネスの大きさを表す指標としては、Barton and Choube¹⁵⁾が提案しているJRCやTres and Cruden¹⁶⁾が提案しているZ2が有名である。それらの指標を求める場合、その面のラフネスの大きさを計測しなければならない。研究開始当初、岩石表面のラフネスを計測する方法として著者らは図-1に示すような簡単な型取り器を使い、これを計測面に押し当ててその波形を紙面上に書き写し、画像解析処理によって読み取る方法を用いてきた(使用期間:1987年~88年)。しかし、この方法では読み取り値の精度に問題がある。よって、型取り器の代わりにレーザビームを使用した変位計を用いることで精度の高い計測が可能な装置を開発したのでその装置についても報告する。

図-2に岩石一面せん断試験装置およびラフネス計測装置の開発年表を示す。

2. 岩石一面せん断試験

(1) 岩石一面せん断試験の試験条件

一般に岩石一面せん断試験で実施される試験条件は、(1)垂直応力一定試験、(2)定体積試験である。図-3は一面せん断試験の様式を示したものであり、(1)の試験方法は一般によく用いられる方法で、図-3(a),(b)に示すように斜面上の自由なブロックがすべり落ちる場合に相当している。(2)は垂直方向の変位が生じないよう不連続面をせん断する方法であり、図-3(c),(d)に示すような地下空洞壁面の平行なダイレイターンシーを起こす亀裂面で拘束されたブロックが抜け落ちる場合に相当する。

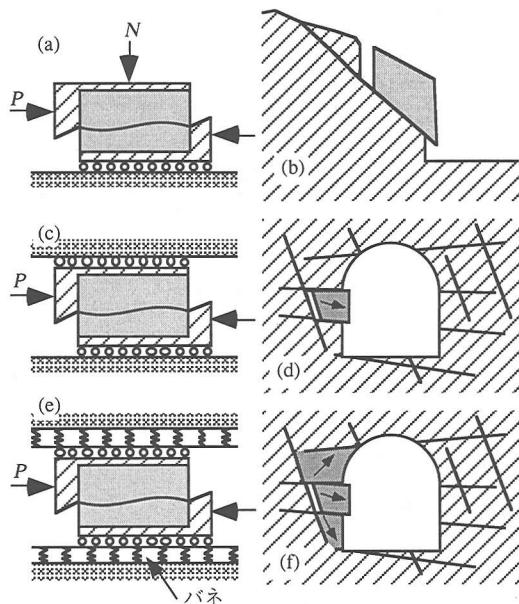


図-3 せん断様式の分類 (a),(b) : 垂直応力一定試験、(c),(d) : 定体積試験、(e),(f) : 垂直剛性一定試験)

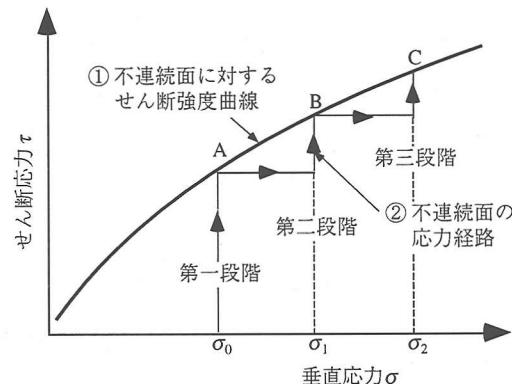


図-4 多段階試験の応力経路

図-3(e),(f)は垂直剛性一定試験と呼ばれるもので、本試験装置で実施できる特殊な試験条件である。まずははじめに、この方法の原理を理解し易いよう、多段階試験について簡単に説明する。

通常、不連続面の強度定数を求める場合、(1)の試験方法で、種々の垂直応力下で実験を行う。しかし、前述したように不連続面の強度は岩石表面のラフネスの大きさ、形状に影響される。よって、強度定数を正確に求めるには同一ラフネス、同一強度を持った供試体を多数用意する必要がある。しかし、それはモルタルなどによって人工的に作製する供試体では可能であるが、自然に存在するような岩石で

是不可能である。そこで考え出されたのが多段階試験である。この方法は図-4に示すように低い垂直応力 σ_0 からこの垂直応力を一定に保ちながらせん断し、すべりがA点で始まるとき、垂直応力を σ_0 から σ_1 まで急速に増加させる。垂直応力が増加するとせん断応力も必然的に増加されるので、すべりが発生する応力はB点まで移動することになる。また次にすべりが起こる直前に垂直応力を σ_1 から σ_2 まで増加するとすべりが発生する応力はC点まで移動する。以下同様の作業を繰り返してゆくと、図中②のような応力経路が得られることになり、この変化点A, B, Cを結ぶと①のせん断強度曲線が求められる。しかしこの試験方法では、実際にすべりの起こる直前の応力点を試験中に察知するのは非常に困難である。そこで、多段階試験の考え方を基本とした新しい試験手法をとり入れたのが垂直剛性一定試験である。この場合も、試験中にせん断応力がピークに達すると同時に、垂直応力を増やすという基本的な考え方と同じであるが、ピーク時を見極めるのに人間の勘に頼らず、図-3(e)に示すように垂直荷重装置にバネを挿入し、その作業を肩代りさせる方法である。つまり、不連続面のせん断変位 u が Δu 変化したとき垂直変位 v が Δv 変化すると、その変形分 Δv だけ剛性 k のバネが縮まり、 $kx\Delta v$ だけ垂直応力が増加する。垂直応力が増加すれば、多段階試験と同様な現象が生ずることは説明するまでもない。よって、この試験方法を用いれば垂直剛性一定試験などで強度定数を求めるときのように、同一ラフネス、同一強度を持つ供試体を数多く用意する必要はない、1つの供試体で強度定数を求めることができる。また実際の岩盤不連続面はある程度の剛性を有する。図-3(f)に示すような岩盤内での応力状態を考える場合、ある岩塊(ブロック)が移動するとそれに隣接するブロックも移動することは容易に想像できる。よって、ブロックが動くことにより、そのブロックに作用する応力状態も変化することが考えられ、実験に用いるバネ剛性を周辺地盤の剛性に等しくすることで、他の試験方法よりも現実の状態に近い現象を再現できると考えられる。

以上、垂直剛性一定条件下での岩石一面せん断試験の原理について論じてきた。ここで、岩石一面せん断試験で拘束圧を多段階に変化させてその強度特性を評価するためには、せん断過程での不連続面のラフネス特性が一定であることが必要条件となる。しかし、実際の試験では、せん断過程で不連続面の局部的な削れが生じるために、上述のラフネス特性一定という条件が満足されない。このため、厳密な意味で不連続面のせん断強度特性を議論するために

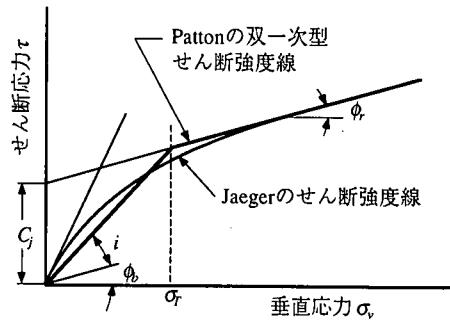


図-5 Patton の双一次型せん断強度式と Jaeger の経験的なせん断強度式

は、このせん断に伴うラフネス特性の変化を定量的に評価することが必要である。ただし、この不連続面の局部的な削れに伴うラフネス特性の変化は、垂直剛性一定あるいは垂直応力一定という支持機構および、拘束圧の大きさ等の試験条件に大きく依存するため、現状では未解明な課題と言わざるを得ない。このような観点から、筆者らはこの課題に対処するために、多種の条件下での岩石一面せん断試験を実施しており、その成果を報告する予定である。

(2) せん断強度式

平滑面を有する不連続面の摩擦抵抗が基本摩擦角 ϕ_b で表され、傾斜角 i を持つブロックが母岩の実質部分の破壊を伴わないので滑ると仮定すると、そのせん断強度式は

$$\tau = \sigma_v \tan(\phi_b + i) \quad (1)$$

となる。垂直応力 σ_v がある応力値を越えると、岩石表面のラフネスが削られるようになり、せん断強度関係を表す条件式は、Mohr-Coulombの破壊基準に従うと仮定すると次式のように表される。

$$\tau = c + \sigma_v \tan \phi \quad (2)$$

ここに、 c は見掛けの粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。

Patton¹⁷⁾は図-5に示すように、規則的な歯形を持つ模型ジョイントのせん断過程を滑りが卓越する領域と削れが卓越する領域に分け、その遷移応力を σ_T として以下のようないくつかのせん断強度式を提案している。

垂直応力 σ_v が σ_T 以下の場合

$$\tau = \sigma_v \tan(\phi_b + i) \quad (3)$$

σ_v が σ_T 以上の場合

$$\tau = C_j + \sigma_v \tan \phi_r \quad (4)$$

$$\sigma_T = \frac{C_j}{\tan(\phi_b + i) - \tan \phi_r} \quad (5)$$

ここに, ϕ_b は基本摩擦角, C_j はラフネスによって生ずるせん断強度の切片であり, ϕ_r は不連続面の残留摩擦角である。

それに対し, Jaeger¹⁸⁾ はせん断挙動が Patton が提案するモデルのような簡単なものではないと考え, 図-5 に示すように連続的に変化する経験的なせん断強度式を以下のように提案している。

$$\tau = C_j(1 - e^{-b\sigma_v}) + \sigma_v \tan \phi_r \quad (6)$$

Ladanyi and Archambault¹⁹⁾ は不連続面がせん断を受ける場合, 実際には滑りと岩石表面の削れが混在しているとして, エネルギー収支の考察から経験的かつ理論的研究に基づき, ピークせん断強度に関して次式を提案している。

$$\tau = \frac{\sigma_n(1-a_s)(\dot{v} + \tan \phi_r) + a_s S_R}{1 - (1-a_s)\dot{v} \tan \phi_r} \quad (7)$$

ここに, a_s はラフネスを通してせん断されたジョイント面積の割合, \dot{v} はピークせん断強度におけるダイレイタンシー速度, σ_n は垂直応力であり, ϕ_r は残留内部摩擦角, S_R は岩石のインタクト部分のせん断強度である。岩石のインタクト部分のせん断強度 S_R については Ladanyi and Archambault によって以下のように表されている。

$$S_R = \sigma_c \frac{\sqrt{1+n}-1}{n} \left(1 + \frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right)^{1/2} \quad (8)$$

$$n = \sigma_c / (-\sigma_i) \quad (9)$$

ここに, σ_c は岩石のインタクト部分の一軸圧縮強度, σ_i は岩石のインタクト部分の引張強度である。式(7)中の a_s , \dot{v} については以下のように表している。

$$a_s = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T} \right)^{1.5} \quad (10)$$

$$\dot{v} = \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T} \right)^{4.0} \tan i \quad (11)$$

ここに, σ_T は岩石のインタクト部分の遷移応力, i は歯形の傾斜角である。なお, σ_T は岩石の一軸圧縮強度 σ_c に近似できるとしている。

この Ladanyi and Archambault の方法は概念的に優れているが, 実用面においては求めなければならないパラメータが複雑である。これに対し, Barton²⁰⁾ は, せん断時の接触面積は全体の面積に比べて極端に狭く, 見かけの応力を用いてせん断強度を求めるには物理モデルでは不適切と考え, 垂直応力によるダイレイタンシーの変化やラフネスのせん断強度を考慮した, 充填物がない不連続面に対する経験的なせん断強度式を次式のように提案した。

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left\{ JRC \log_{10} \left(\frac{q_u}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right\} \quad (\sigma_n < q_u) \quad (12)$$

ここに, JRC は面の粗さを表す係数であり, q_u は不連続面の圧縮強度である。また, Goodman²¹⁾ は不連続面の破壊基準を次式のように提案している。

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_b + i)(1 - a_s) + a_s S_R \quad (13)$$

ここに, a_s , S_R は Ladanyi and Archambault によって与えられており, 式(10), 式(8)に示すとおりである。

(3) 供試体の作成方法

図-6(a)に供試体作成用モールドを示す。方形供試体の作成方法は, 岩石表面を型どった鉄製あるいはシリコンゴム製の型を図-6(b)に示すようにモールドにセットし, その上にモルタル(配合比はセメント1, 標準砂2に対し水を0.65の重量比である)を流し込むことにより上部供試体を作成する。その際, 供試体の強度のバラツキを少なくするため, モルタル中に混在している空気を十分に排除する必要がある。次に, モルタルが固結したことを確認したのち型を取り外し, 固結したモルタル上にモルタルを流し込むことにより下部供試体が作成できる(図-6(c))。上下供試体が十分に固結したことを確認した後, 両供試体を剥離させることにより作成作業は終了する。供試体は24時間水中養生を行った後, 乾燥炉にて十分乾燥させて使用している。なお, 上下供試体の剥離剤として粘性の小さいスプレーグリスを用いている。

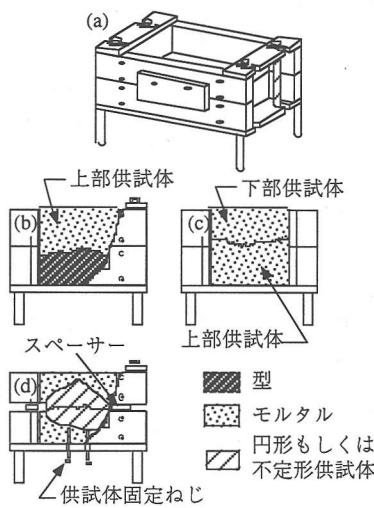


図-6 供試体作成用モールドと作成方法

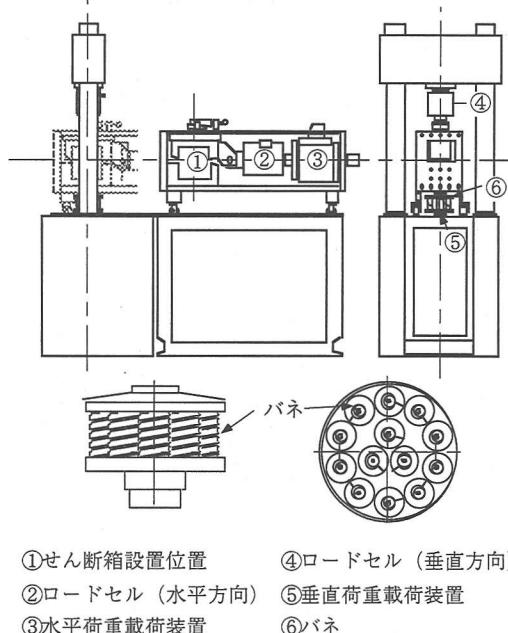


図-7 岩石一面せん断試験装置の概略図

円形供試体および不定形供試体は図-6(d)に示すように、供試体固定ねじで適切な位置に供試体をセットし、その周囲をモルタルにより固定することで作成できる構造となっている。

(4) 岩石一面せん断試験の概略

図-7に一面せん断試験装置の概略を示す。この装

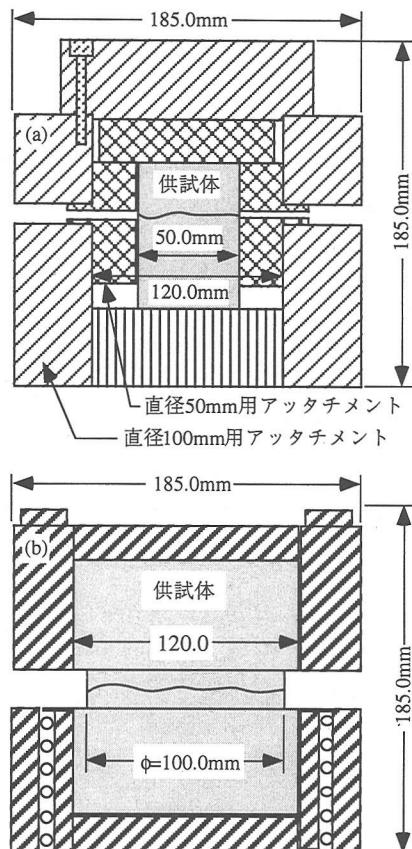
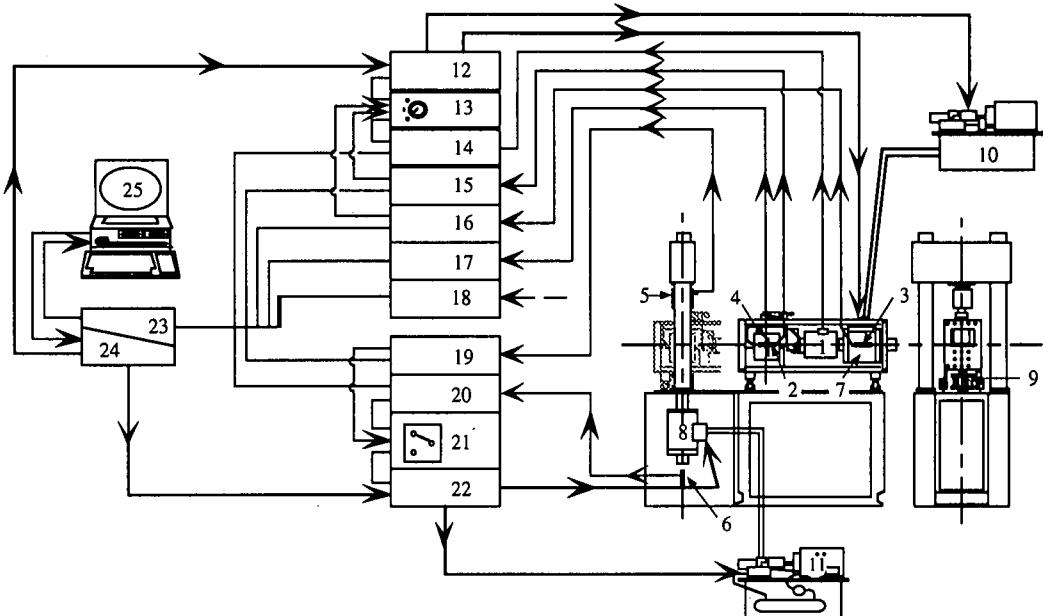


図-8 せん断箱の一例 ((a) : $\phi 50.0\text{mm}$ および $\phi 100.0\text{mm}$ 専用, (b) : フリーサイズ)

置は岩石をはじめ、モルタルなどによって人工的に作製した各種の供試体に適用できる構造となっている。せん断負荷制御は電気・油圧サーボ方式を用いているため、荷重制御、もしくは変位制御のいずれかを選択することができる。さらに、せん断箱は目的に応じて取り替えて使用できるようにカセット式となっており、あらかじめ供試体を別の場所でセットし、試験の直前にこれを負荷装置に装着できるようになっている。垂直剛性一定試験は図に示すように垂直荷重載荷装置にバネを挿入することにより実施できる。バネは4本から13本まで任意の本数を装着できる構造となっており、またバネ自身の剛性を変えることにより種々の垂直剛性下での実験が可能である。

図-8にせん断箱の一例を示す。図-8(a)は円形供試体専用のせん断箱であり、直径100.0 mmと50.0 mmの供試体に適応できるようになっている。それに対し、図-8(b)は種々の形状の供試体に適用でき、最大で直径100.0 mmの円柱形、または一辺120.0 mmの



- | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 : ロードセル (水平荷重, 245kN, 0.1%RO) | 11 : 油圧発生装置 (鉛直荷重, 196kN) | 19 : 直流アンプ (鉛直荷重) |
| 2 : 水平変位計 (No.1, 25mm, 0.1%RO) | 12 : サーボコントローラ
(水平方向) | 20 : 直流アンプ (鉛直変位計, No.2) |
| 3 : 水平変位計 (No.2, ±25.0mm, 0.1%以下) | 13 : フィードバックコントローラ
(水平方向) | 21 : フィードバックコントローラ
(鉛直方向) |
| 4 : 鉛直変位計 (No.1, 25mm, 0.1%RO) | 14 : 直流アンプ (水平荷重) | 22 : サーボコントローラ
(鉛直方向) |
| 5 : ロードセル (鉛直荷重, 196kN, 0.1%RO) | 15 : 直流アンプ (水平変位計, No.1) | 23 : A/D変換器 |
| 6 : 鉛直変位計 (No.2, 100mm, 0.1%以下) | 16 : 直流アンプ (水平変位計, No.2) | 24 : D/A変換器 |
| 7 : 油圧シリンダ (水平荷重, 100mm) | 17 : 直流アンプ (鉛直変位計, No.1) | 25 : マイクロコンピュータ |
| 8 : 油圧シリンダ (鉛直荷重, 100mm) | 18 : 直流アンプ (間隙水圧) | |
| 9 : バネ | | |
| 10 : 油圧発生装置 (水平荷重, 245kN) | | |

図-9 岩石一面せん断試験装置の計測・制御システム

正方形もしくは不定型の供試体まで適応できるように設計されている。

1987~91年では、主に図-8(a)に示す円形供試体専用のせん断箱を用いて研究を行っていた。供試体のラフネスの幾何学的な特性を求める場合、方形供試体に比べて円形供試体では、計測するラインの位置で計測点の数が異なるなどラフネスの正確な評価が困難である。したがって、せん断特性をラフネスの幾何学的な特性と対比して考える場合、円形供試体では不適切である。よって、91年以降は正方形供試体を用いて研究を行っている。

図-9に本装置の計測・制御システム図を示す。この装置は、垂直荷重およびせん断荷重ともフィードバック機構を有する完全閉ループ制御方式の電気・油圧サーボシステムで、マイクロコンピュータによりコントロールされている。したがって、せん断試験中の供試体の面積減少に伴い、垂直応力を一

定に保つように垂直荷重を減じるような文字どおりの垂直応力一定試験が可能である。

計測・制御を迅速かつ正確に行うためには、その計測・制御時間間隔をできる限り微小に設定する方がよい。よって、時間割り込みルーティンの高速化を実現するため、1987年から98年まではその計測・制御プログラムにC言語を用いていた。しかし、約10年間、同一計測・制御システムを用いてきたため、長年の使用により老朽化が目立ってきた。そのため、システムを再構築する必要が生じ、計測・制御システムを簡単に構築できるLABVIEWを導入した。またそれと同時に、A/D,D/A変換器の分解能も12Bitから16Bitに更新している。その結果、図-10(a)に示すように計測結果も精度が良くなっている。ただし、この結果は同一ラフネス、同一強度を持つ供試体を用いて実験を行ったものである。なお、制御とともに計測データは自動的にプロ

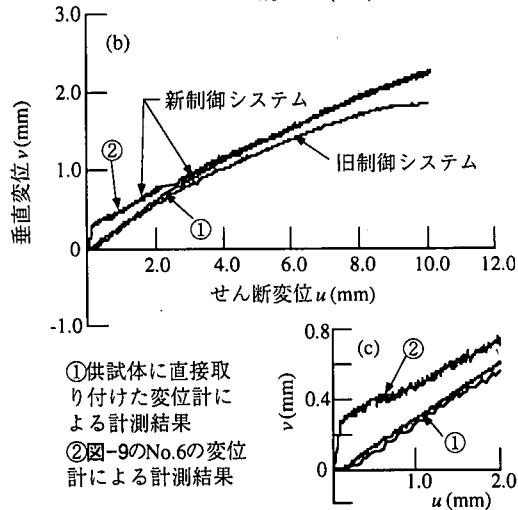
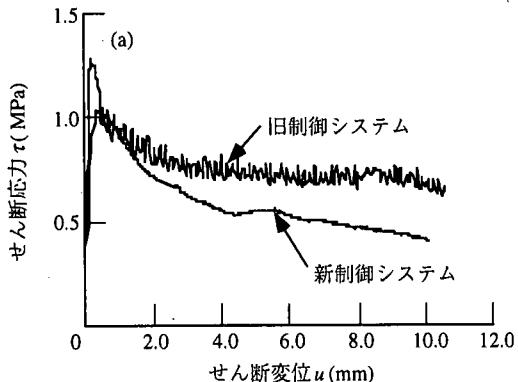


図-10 新旧システムによる計測結果の比較

ツピーディスクに記録されるので、試験後のデータ整理もマイクロコンピュータを用いて行うことができる。

本試験装置による現在の計測要素はせん断荷重、せん断変位、垂直変位および垂直荷重の4要素となっている。荷重検出は、ひずみゲージ式の圧縮・引張両用ロードセル（せん断荷重は容量±196kN、垂直荷重は容量±245kN）で行う。また、変位の検出は差動トランジスタ型の変位計および、ひずみゲージ式変位計を使用して行い、計測および制御兼用となっている。なお、図-9の4に示すように垂直方向の変位はせん断箱の左右（中央部）で測定し、その平均値をとるものとする。変位計は供試体の寸法に応じて変更できるようになっている。

水平・垂直変位計の取付け金具は1995年までせん断箱に取付けていた。その結果、図-12～図-14の(b)図に示すようにせん断変位 u ～垂直変位 v 関係において、せん断初期に負のダイレイタンシーが発生するという現象が見られた。また、本装置では

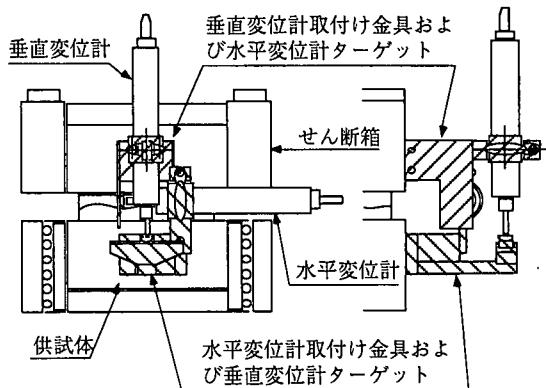


図-11 鉛直変位計の取り付け方法

鉛直変位を図-9に示すようにNo.4とNo.6の2ヶ所において計測しており、せん断変位 u ～垂直変位 v 関係には図-10(b),(c)に示してあるようにせん断初期の鉛直変位に大きな差が見られることが多々発生している。これらの原因として、供試体自体のかみ合わせの善し悪しが大きく影響していると考えられるが、供試体とせん断箱のすり合わせの問題も無視することはできないと考えられる。よって、95年以降は図-11に示すように変位計を固定するための取付け金具をコンクリート用ノープラグビスによって直接供試体に取付けるようにした。その結果、図-10(b),(c)に示すようにせん断初期に負のダイレイタンシーが発生するという現象が見られなくなり、改善されたと考えられる。

以上のセンサーの信号は各々、専用のプリアンプを介し電圧を増幅した後、A/D変換器によりコンピュータに取り込まれる。各検出量のモニタリングはCRT画面上に試験中常時表示されるので、試験の進行状態の把握が容易に行える。制御方法、変位速度・載荷速度および計測時間等の計測・制御条件はキーボード上から簡単に指定することができ、制御信号はD/A変換器を介してサーボ機構にフィードバックされる。

(5) 実験結果

図-12に垂直応力一定試験の実験結果を、図-13に垂直剛性一定試験の実験結果、図-14に定体積試験の結果を示す。本研究では3種類の試験方法とも、0.490, 0.980, 1.960, 3.920 MPaの4種類の初期垂直応力下で、3回の繰り返し載荷実験を行っているが、紙面の都合上、1回目の結果を示す。また、各実験結果の垂直応力 σ_v ～せん断応力 τ 関係にはMohr-Coulombの破壊基準（式(2))を用いて求めた破壊線も付記してある。

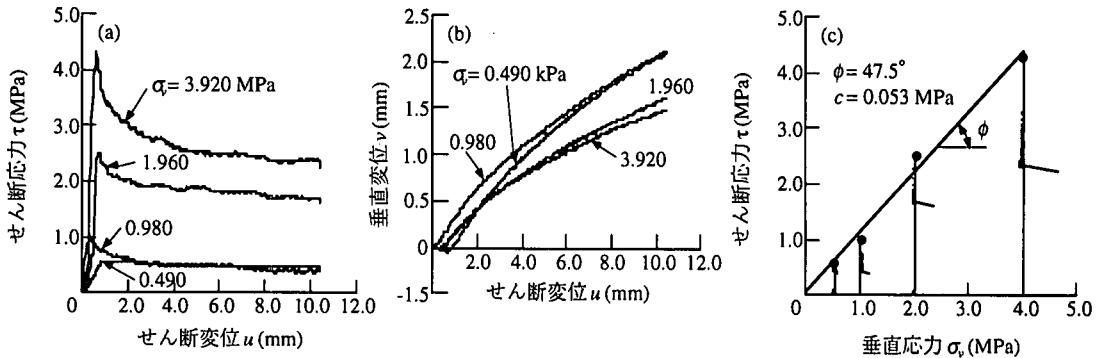


図-12 垂直応力一定試験の結果 ((a)せん断変位 u ～せん断応力 τ 関係、
(b)せん断変位 u ～垂直変位 v 関係、(c)垂直応力 σ_v ～せん断応力 τ 関係)

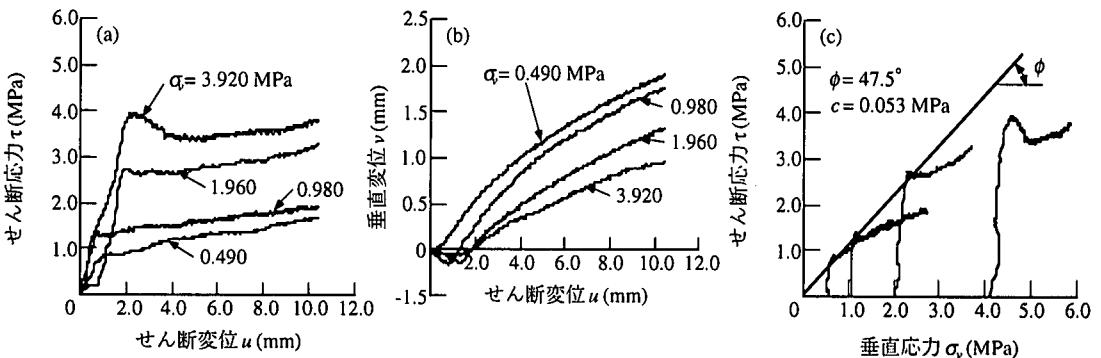


図-13 垂直剛性一定試験の結果 ((a)せん断変位 u ～せん断応力 τ 関係、
(b)せん断変位 u ～垂直変位 v 関係、(c)垂直応力 σ_v ～せん断応力 τ 関係)

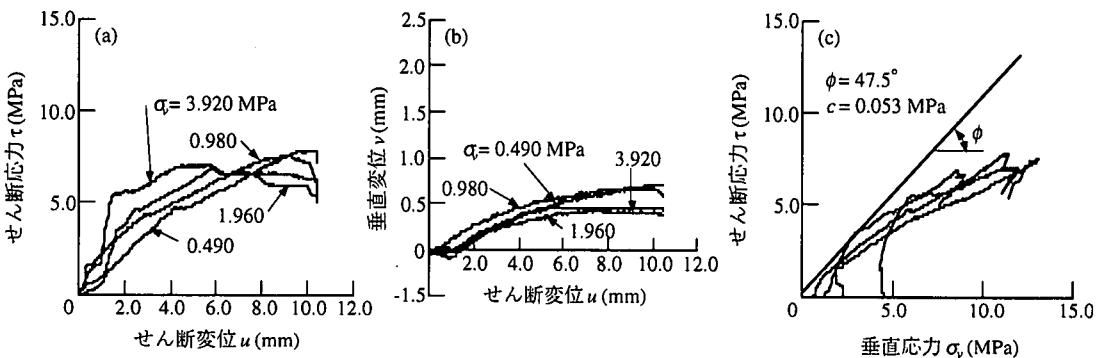


図-14 定体積試験の結果 ((a)せん断変位 u ～せん断応力 τ 関係、
(b)せん断変位 u ～垂直変位 v 関係、(c)垂直応力 σ_v ～せん断応力 τ 関係)

本実験に用いた供試体は直径 100.0 mm のモルタル製であり、その表面形状は図-19 に示してある。また、供試体のせん断箱へのセット状況は図-8(b)に示してある。

前述したように本装置はフィードバック機構を有する完全閉ループ制御方式の電気・油圧サーボシステムでマイクロコンピュータにより制御しており、

図-12(c)に示す垂直応力 σ_v とせん断応力 τ 関係から本装置の制御はほぼ正確に行われていることがわかる。図-12～図-14 の垂直応力 σ_v とせん断応力 τ の関係に着目すると、実験方法によって明らかな違いが認められる。すなわち、図-12(c)に示す垂直応力一定試験においてはその関係にはほぼ直線関係が認められるが、その他の方法 (図-13(c), 図-14(c))

では低応力下においては直線的な関係が認められるものの、応力が増加するに伴いその関係は曲線的になる傾向を示している。このことは、Patton の双一次型のせん断強度式や Jaeger の経験的なせん断強度式の適応の可能性を示唆していると考えられる。このように、試験方法によって違ったせん断特性が発現する原因として、リアルタイムに進行するせん断中に発生するラフネスのダメージの度合いが違うことが考えられる。よって、岩盤を対象とした土木構造物を設計する場合、その条件に合った試験方法を選択してせん断特性を把握する必要がある。

以上、垂直応力 σ_v とせん断応力 τ の関係を中心に実験結果を述べた。本試験装置の問題点としては、定体積試験は垂直変位 v が発生しないように制御しなければならない。それにもかかわらず、今回の実験では図-14(b)に示すように垂直変位 v の発現が認められる。これは供試体の亀裂面が傾斜していることや、試験機自体の垂直方向の剛性不足、垂直応力 σ_v の急激な増加のために制御が追い付かないことなどが考えられ、この方法の制御には困難さがともなうなど改良すべき点が存在している。

3. ラフネス計測装置

(1) ラフネス

ラフネスの幾何学的特性は、不連続面のせん断特性に影響を及ぼす要因である。多くの研究者によってラフネスの大きさとせん断強度との関係について研究が行われており、ラフネスの大きさを表現する様々な指標が提案されている。

Barton and Choubey は不連続面の断面形状を図-15 に示すように 1 から 10 までの基準化された断面に分類し、対象とする不連続面を平滑な不連続面から粗い不連続面へと 0~20 までの JRC 値として表し；この値を不連続面の粗度を表す指標とした。このため、実際の不連続面の指標を求める場合、その面と Barton らのラフネス断面図を比較して経験的に求めることになり、主観的な値となる欠点がある。そこで、Tse and Cruden は Barton らの JRC 値と以下に示す統計的なパラメータとの関係を示し、ラフネスの大きさを定量的に評価した。

a) CLA (Center Line Average)

$$CLA = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |y_i - \bar{y}| \quad (14)$$

ここに、 M は 1 ラインあたりの計測点数、 y_i は i 番目のラフネスデータであり、 \bar{y} は ラフネスデータ

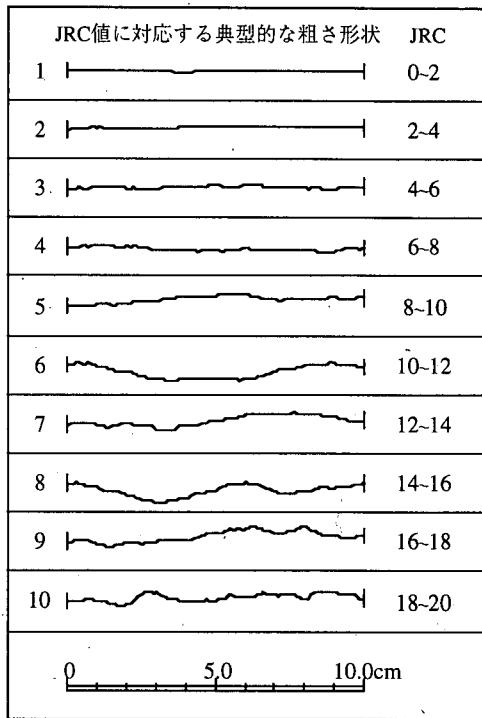


図-15 標準的な不連続面の粗さと対応する JRC の値

の中央値である。

b) RMS (Root Mean Square)

$$RMS = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

c) Z2

$$Z2 = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_i^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

ここに、 Δx は計測間隔、 Δy はラフネスの高さである。また、Tse らは JRC 値と Z2 には強い相関関係があるとして、次式を主観的に決定した JRC 値の有効な確認方法として提案している。

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log Z2 \quad (17)$$

この他にも多数の統計的な指標が提案されている。上述の統計的な指標は、計測間隔によって値が変化することが Tse らによって実証され、また著者ら¹⁰⁾は計測間隔と指標の関係を調べ、有効的な利用方法を提案している。さらに、Mandelbrot²²⁾によつて提案されたフラクタル幾何学を応用し、岩盤不連続面はフラクタルな性質を持つと仮定し、ユークリ

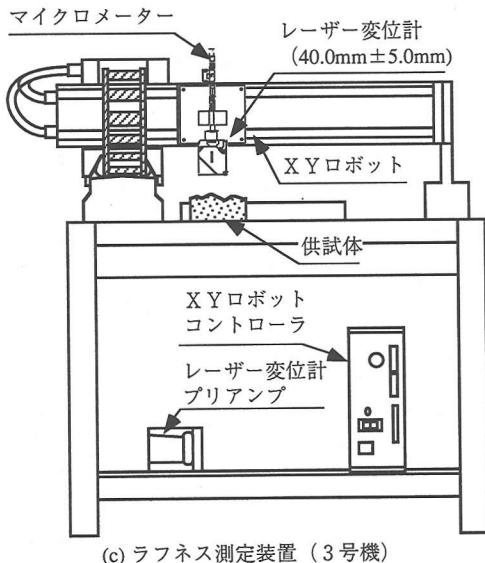
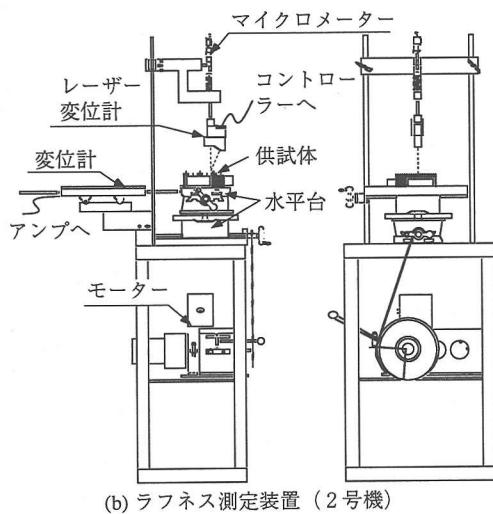
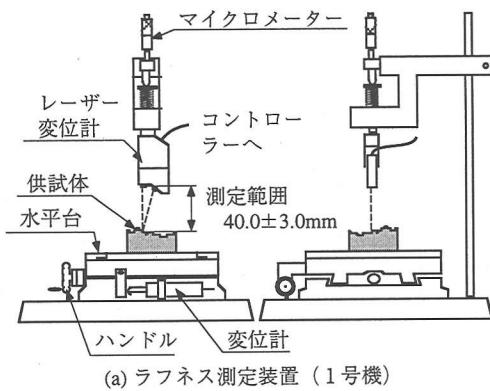


図-16 ラフネス計測装置

表-1 歴代のラフネス計測装置の仕様

	レーザー変位計		計測・制御方法	
	スポット径 (mm)	測定範囲 (mm)	計測装置	駆動方法
1号機 89年～92年	φ0.05	40.0±3.0	X Yプロッタ	手動
2号機 92年～96年	1.0×2.0	40.0±5.0	データロガー	モータ
3号機 86年～	φ0.1	40.0±5.0	マイコン (A/D変換)	X Yロボット (マイコン制御)

ド形状よりも複雑な不規則形状を定量化する試みも行われている^{23),24)}。

以上のように不連続面の幾何学的な性質であるラフネスを、JRC、統計的な指標およびフラクタル理論を用いて定量化する研究が行われているが、これらの指標はラフネスの平均的な粗さを表し、ラフネスの異方性を表現できない。一般に、自然の岩盤不連続面のラフネスは異方性を有するものであり、この異方性がその面のせん断挙動に大きく影響を及ぼすと考えられる。よって、これを評価できるラフネスの指標を考案する必要があると考えられる。

また、上述のラフネスの指数は二次元的なものである。しかし、岩石表面のせん断特性は面的（三次元）に発現する。よって、せん断特性とラフネスの幾何学的な性質を比較検討する場合、三次元的なラフネスの指標を考案する必要がある。三次元的な指標はHerda²⁵⁾によって提案されているが、この指標も異方性が表現できない。よって、このことについても新たな指標を考案する必要があると考えられる。

(2) ラフネス計測装置の概略

研究開始当初は図-1に示すような簡単な型どり器を使ってラフネスの計測を行っていた。しかし、この方法では読み取り値の精度に問題があることは前述したとおりである。また、畠ら²⁶⁾は針を岩石表面に押し当て、その針の上下の移動量を計測する装置を開発した。しかし、その方法は針よってせん断面を削る恐れがあるので、正確なラフネスの計測には不適当であると考えられる。よって現在では、このような問題を解決する方法として、非接触型のレーザ変位計を用いた計測装置^{24),27)}が開発されている。著者らもレーザ変位計が発売された当初から、この変位計の長所に着目し、それを用いたラフネス計測装置を開発・改良している。

図-16に歴代のレーザ変位計を用いた岩石表面形状の計測装置の概略図を示し、表-1にその仕様を

示す。これらの装置は、図に示すように水平に移動させることができるものである。測定台やXYロボットに、レーザ変位計を設置することにより、供試体のラフネスが計測できるようになっている。また、変位計取り付け部には25.0 mmまで可変可能なマイクロメータを備えた変位計の位置を微調整することができる器具についており、変位計を鉛直方向±12.5 mmの範囲で自由に上下させることができるので、最適な位置での計測が可能である。

本装置で使用したレーザ変位計は赤外半導体レーザを使用しているものである。測定範囲は表に示す通りであり、反射率の変化、測定面の汚れ、色の変化、色ムラの影響を受けない等の特徴がある。

計測・制御方法として、1号機は手動で水平台を動かし、水平方向の変位およびレーザ変位計の出力はXYレコーダで記録し、計測値の読み取りは画像解析によって行っている。2号機は水平台をモータで駆動し、それらの出力はデータロガーによって記録される。3号機はXYロボットをマイクロコンピュータで制御し、変位計の出力もマイクロコンピュータを用いて計測している。なお、データの合成、解析などの処理はマイクロコンピュータを用いて行っている。

ラフネス計測装置3号機について詳述すると、この装置で計測できる供試体の最大寸法は縦横とともに350.0 mmで、ラフネスの最大高低差が35.0 mmまでの供試体に適応できる。計測精度は、本装置に搭載してあるロボットには位置検出機能が付いており、指定した座標より±0.01 mmの移動誤差の範囲で計測を開始し、1計測点につき150回計測し、その内51回から150回の平均値をもって計測値としている。そのため、計測速度は1秒間に約2測点となっており、例えば一辺が120.0 mmの正方形供試体を1.0 mm間隔の格子状で計測した場合（計測点の数=14,641個）、約2時間程度必要である。

図-17は同じ供試体を用いて2回計測し、その計測データから同じ計測点の計測値の差をヒストグラムで表したものであり、計測値の差はほぼ正規分布していると考えられる。その結果、本計測結果から計測値の差の平均は 1.000×10^{-3} mm、分散は 2.282×10^{-4} mmとなっている。

前述したように、レーザ変位計には許容される測定範囲があり、供試体のラフネスの最大高低差がその許容範囲以上ある場合は一度でそのラフネスを測定することが不可能である。そのような場合は図-18に示すようにレーザ変位計の位置を変化させて計測し、そのデータを合成することによって計測が可能となる。

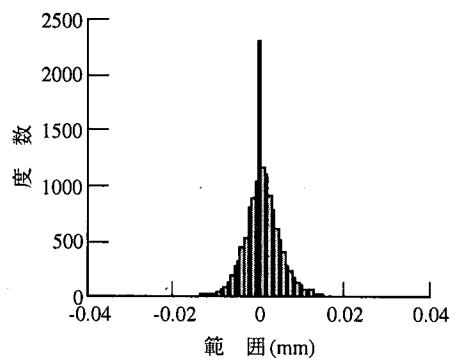


図-17 計測値の差のヒストグラム

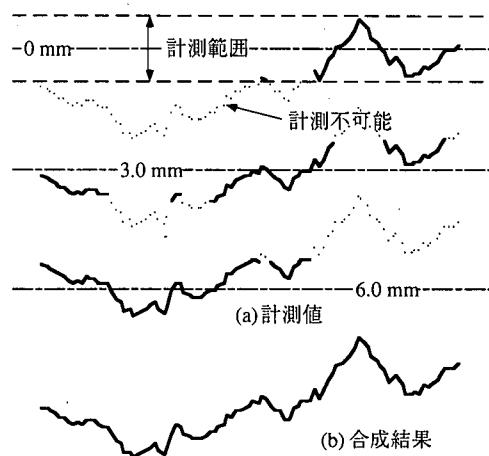


図-18 岩石表面形状の高低差がレーザ変位計の計測許容範囲を越えた場合の計測方法

(3) 計測結果

ラフネス計測装置の3号機によって計測した離散化されたラフネスデータを用いて作成した等高線を円形供試体について図-19に示し、方形供試体は図-20に示す。なお、円形供試体はせん断条件の違いがせん断挙動に及ぼす影響を調べるために用いたものであり、方形供試体は垂直応力が岩盤不連続面形状の変化に如何に影響を及ぼすかを調べるために用いたものである。

図-21は各垂直応力下における計測ラインのせん断前のラフネス係数Z2およびせん断後のZ2を示したものである。なお、この試験結果は前述したように円形供試体を用いてZ2を論じることは不適切であるので方形供試体を用いて行ったものである。また、せん断試験は垂直応力 σ_v が0.490~3.920 MPaの8種類で行っているが図には0.490, 1.470, 3.920 MPaの実験結果を示してある。この図から垂直応力 σ_v が大きくなるに伴い、岩石表面の削れ量が多くなつ

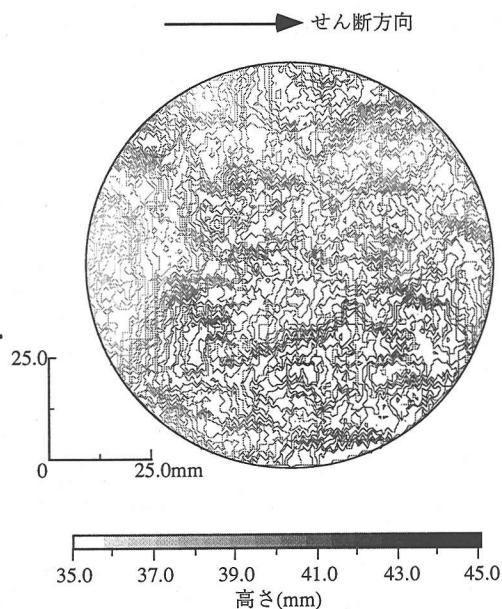


図-19 計測結果（等高線、円形供試体）

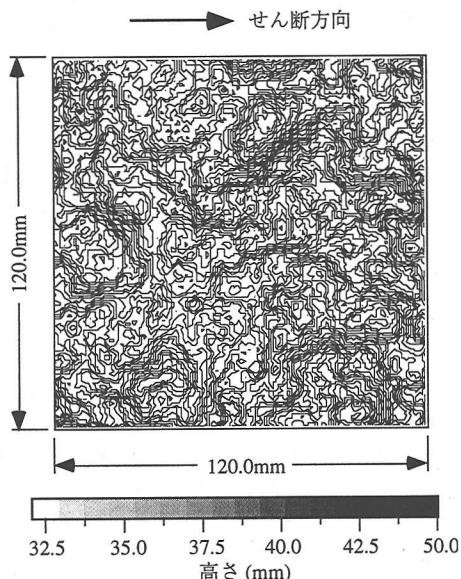


図-20 計測結果（等高線、方形供試体）

ていく様子がわかる。このことを具体化して示したのが図-22である。ただし、垂直応力 σ_v が0.098, 0.294, 0.686 MPaの実験結果については実験後にラフネスの計測を行っていないので、せん断による岩石表面の削れを評価することは不可能である。よって、この結果は垂直応力 σ_v ～せん断応力 τ 関係のみに示してある。

図-22(a)は横軸に垂直応力 σ_v を、縦軸にせん断前後のラフネス係数 Z_2 の比の平均値をプロットしたものである。この図から明らかなように、遷移応力 σ_T 以下ではその値にほとんど変化が見られないが、 σ_T 以上になると大きく変化することがわかる。すなわち、垂直応力 σ_v ～せん断応力 τ 関係において、せん断挙動は滑りが卓越する領域と削れが卓越する領域に分かれる、いわゆる patton の双一次型の破壊基準の適応性を示唆していると考えられる。なお、本試験結果では遷移応力 σ_T が1.470～1.960 MPaの範囲にあることが(a)図から読み取れる。遷移応力 σ_T を正確に求める場合、この領域を詳細に検討する必要があるが、本論文では1.470 MPaと仮定して議論する。

図-22(b)は遷移応力 σ_T を1.470 MPaとして、patton の双一次型の破壊基準を適応したものである。図には Mohr-Coulomb の破壊基準も示してある。この図から、両破壊基準に優位な差は認められないが、破壊基準と実験値の二乗誤差から patton の双一次型の破壊基準の方がより適切にせん断挙動を表現していることがわかる。

4. 結論

以下に本研究で得られた知見を示す。

- ① 本研究で開発・改良してきた装置は不連続面の強度・変形特性を調べるために適したものであると考えられる。すなわち、定体積せん断試験には不向きな試験装置であるが、不連続面に作用する応力状態を考慮し、それに合った試験方法を選択することでそれらの特性を解明することが可能である。
- ② 計測・制御技術の進歩に伴って開発された計測器を導入することにより、高精度に実験を実施できるように改良できた。
- ③ 垂直応力 σ_v ～せん断応力 τ 関係において、そのせん断挙動は Mohr-Coulomb の破壊基準よりも、patton の双一次型の破壊基準や Jaeger の経験的なせん断強度式などがより良く表現することがわかった。
- ④ ③の事柄は、せん断前後のラフネス係数を比較することにより説明できることがわかった。

以上、岩石一面せん断試験装置、ラフネス計測装置について述べたが、これらを用いた実験的研究には供試体の寸法効果や、ラフネス計測時の計測条件の違いによる影響など未解明な要素も存在する。よって、今後は多くの供試体について実験を行い、その要因を究明していく必要があると考えられる。

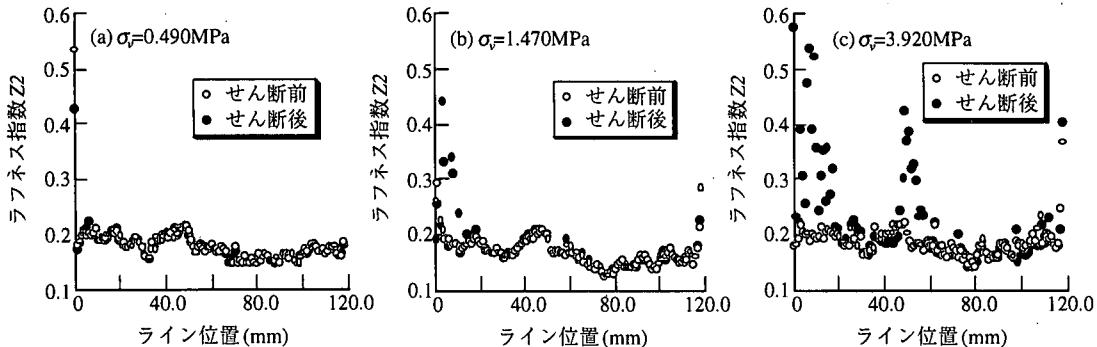


図-21 せん断前とせん断後のラフネス係数Z2の比較

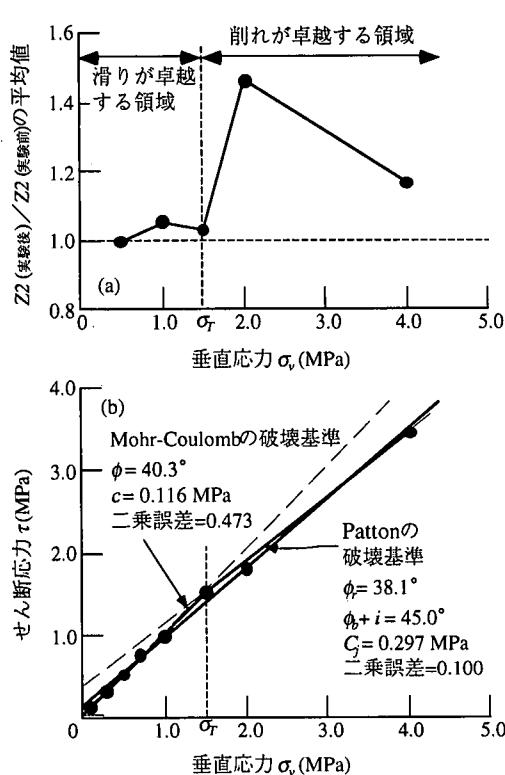


図-22 ラフネス計測結果と遷移応力 σ_v の関係

また、不連続面の強度・変形特性はその面に作用する応力状態やその面のラフネスだけに依存されるものではない。すなわち、亀裂面の充填物の影響や圧力水を供給して透水状態での試験を考えるといった、いろいろな手段を構じてさらに研究を進める必要があるだろう。

謝辞：本研究に用いた装置は1987年から開発・改良を行ってきたものである。その間、多くの学生諸

氏（現・パシフィックコンサルタンツ・龍原毅氏、飛島建設・阿保寿郎氏、鴻池組・藤原祐一郎氏、関西電力・加藤雅弘氏、奈良県・高田裕輔氏、熊谷組・橋村義人氏、京都大学修士2回生・水田潤一君）が卒業論文、修士論文作成のため本装置の開発・改良作業に加わって頂いた。ここに、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 大西有三, 堀田正國, 矢野隆夫, 岩本 宏: 浸透流を考慮した亀裂性岩石一面せん断試験機の試作, 第23回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1101-1104, 1988.
- 2) 大西有三, 堀田正國, 矢野隆夫, 岩本 宏: 岩盤の单一不連続面の変形と強度特性, 第24回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1101-1104, 1989.
- 3) 大西有三, 矢野隆夫, 龍原毅: 連続載荷式の新しい岩石一面せん断試験方法について, 第45回土木学会年次学術講演会概要集, pp.506-507, 1990.
- 4) 大西有三, 矢野隆夫, 龍原毅, 阿保寿郎: 岩石の一面せん断試験に関する割れ目凹凸形状の表現法について, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, III-5, 1990.
- 5) 大西有三, P.G.R.Dharmaratne, 矢野隆夫, 龍原毅: 岩石ジョイントモデルの連続載荷式の新しいせん断試験方法について, 第25回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1089-1092, 1990.
- 6) 大西有三, 矢野隆夫, 龍原毅, 西川直人: 一面せん断時の岩石不連続面の力学挙動について, 第26回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1151-1154, 1991.
- 7) 大西有三, 矢野隆夫, 藤原祐一郎: 一面せん断試験における寸法効果に関する実験的研究, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, III-8, 1992.
- 8) 大西有三, 矢野隆夫, 加藤雅広: 岩盤不連続面の表面形状を考慮した一面せん断挙動の推定について,

- 第30回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1191-1194, 1995.
- 9) 大西有三, 矢野隆夫, 高田裕輔: 離散化ラフネスデータを用いた岩盤不連続面のせん断挙動の推定法について, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, III-33, 1996.
 - 10) 大西有三, 矢野隆夫, 橋村義人: ラフネス計測時の計測間隔がラフネス係数におよぼす影響, 第52回土木学会年次学術講演会概要集, pp.582-583, 1997.
 - 11) 大西有三, 矢野隆夫, 橋村義人: フラクタルの概念を適用したラフネスの補間方法について, 第32回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1217-1218, 1997.
 - 12) 大西有三, 大津宏康, 矢野隆夫, 橋村義人: 岩盤不連続面におけるラフネスの異方性を考慮したせん断強度式に関する一考察, 第53回土木学会年次学術講演会概要集, pp.714-715, 1998.
 - 13) 大西有三, 大津宏康, 矢野隆夫, 橋村義人: ランダムラフネスを考慮した岩盤不連続面のせん断挙動推定法に関する研究, 第33回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1239-1240, 1998.
 - 14) 大西有三, 矢野隆夫, 水田潤一: カオスによる岩盤不連続面形状の評価方法について, 第33回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1237-1238, 1998.
 - 15) Barton, N. and Choubey, V.: The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*, Vol.10, pp.1-65, 1971.
 - 16) Tes, R. and Cruden, D. M.: Estimating joint roughness coefficients, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.16, pp.303-307, 1979.
 - 17) Patton, F. D.: Multiple Models of Shear Failure in Rock, *Proc. 1st Cong. ISRM(Lisbon)*, Vol.1, pp.509-513, 1966.
 - 18) Jaeger, J. C.: Friction of Rocks and The Stability of Rock Slopes-Rankine Lecture, *Geotechnique*, Vol.21, pp.97-134, 1971.
 - 19) Ladanyi, B. and Archambault, G.: Simulation of the shear behavior of a jointed rock mass, *Proc. 11th symposium on Rock Mechanics*, AIME, pp.105-125, 1970.
 - 20) Barton, N. R.: Review of a new strength criterion for rock joint, *Eng., Geol.*, Vol.4, No.4, pp.287-332, 1973.
 - 21) R. E. ゲッドマン著, 赤井浩一, 川本眺万, 大西有三共訳: 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, 1978.
 - 22) Mandelbrot, B. B.: *The fractal geometry of nature*, W. H. Free man and Company, pp.30-33, 1983.
 - 23) 大西有三, 堀田正國, 大谷司郎: 画像処理システムを用いた岩盤割れ目のフラクタル幾何学的特性評価について, 土木学会論文集, 第412号/III-12, pp.61-68, 1989.
 - 24) 杜守繼, 江崎哲郎, 蒋宇静, 小林和昭: 岩盤不連続表面のフラクタル特性とせん断強度との関係に関する研究, 土木学会岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.166-172, 1997.
 - 25) Herda, H. and Ohnishi, Y.: Joint roughness in three dimensions, 京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻年次レポート No.1, 1994.
 - 26) 畠昭治郎, 谷本親伯, 森岡宏之: 岩盤不連続面の定量的評価と力学的特性に関する基礎的研究, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, III-25, 1989.
 - 27) 谷本親伯, 岸田潔: 3次元非接触式プロファイラーと最大エントロピー法を用いた岩盤不連続面ラフネスの定量化, 土木学会論文集, 第511号/III-30, pp.57-67, 1995.

(1999.6.21 受付)

THE HISTORY OF THE RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE APPARATUSES MEASURING BOTH THE SHEAR STRENGTH AND THE ROUGHNESS PROFILE OF ROCK JOINTS

Yuzo OHNISHI, Takao YANO, Hiroshi IWAMOTO and Naoto NISHIKAWA

When one evaluates the shear strength of rock joints in detail, the investigation based on both mechanical and geometrical condition should be considered. As for mechanical conditions, shear behaviors of rock joints is affected by loading condition. As for geometrical conditions, shear behaviors of rock joints should be heavily dependent on the configuration of rock joints, which is so-called roughness profile. From these viewpoints, the authors have developed both the apparatuses measuring both the shear strength and the roughens profile of rock joints. This paper describes the history of the developed apparatus and their applicability.