

破碎帯のせん断強度および変形特性の評価方法に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON SHEAR STRENGTH AND DEFORMABILITY

PROPERTIES OF FRACTURE ZONES

赤木知之*・河村精一**・清水泰弘***・アイダンオメル****

Tomoyuki AKAGI, Seiichi KOUMURA, Yasuhiro SHIMIZU, Ömer AYDAN

Fracture zones are commonly found in the uppermost of Earth's crust. Therefore, it is almost impossible not to encounter these zones in large rock excavations. Fracture zones or shear zones are always problematic and engineers face different problems such as heavy water in flow, heavy squeezing, instability. In this paper, the authors describe laboratory direct shear and uniaxial tests on model fracture zones. During tests, the thickness and particle size distribution of these zones are varied. The cohesion, friction angle, uniaxial strength and deformability characteristics of these zones are evaluated in terms of those of constituents and geometry of fracture zones. The outcomes of both experimental and theoretical studies will be given and discussed.

1. まえがき

基礎岩盤調査において、断層破碎帯が分布していることが確認された場合、この特性を構造物の基礎設計に如何に評価するかが大きな問題となる（例えば写真-1）。

写真-1に示された破碎帯の状態は、広く分布している破碎帯の一部分であり、他のほとんどの見えない部分がどのような状態かは推定するしかないといった場合が多い。したがって、写真-1の破碎帯を評価して、それをそのまま設計値とすることには無理がある。実際には、破碎帯全てが粘土化しているものと想定して設計がなされる場合がある。安全側の設計であることは確かであるが、現実問題として実際の強度変形特性を定量的に

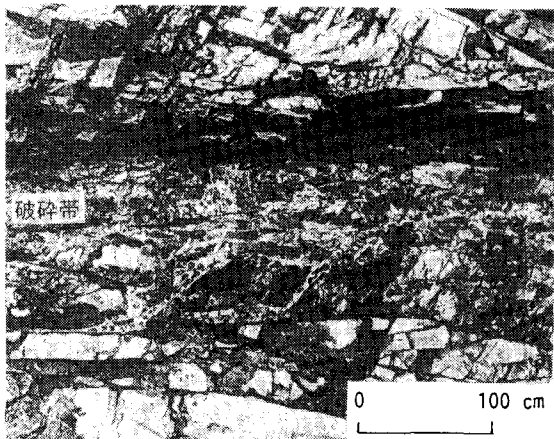


写真-1：破碎帯の例

* 正会員 工博 豊田高専教授

** 正会員

中部電力（株）

*** 正会員 工博 名城大学助教授

正会員 工博

東海大学助教授

評価することは非常に困難である。そこで、破砕帯が全て粘土化されているとした場合のせん断特性をベースにして、そこに周辺岩盤の破砕片が混入すると、その特性がどのように変化するかを実験的に探ってみようとして本研究は始められた。

このような破砕帯の実験モデルのせん断特性に与える影響因子には、破砕帯の幅、混入させる破砕材の量、粒径そしてその形状などが考えられるが、本論文では混入率を一定としてその粒径を変化させた場合および破砕帯の幅を変化させた場合の結果についてまとめている。

いままでに行われてきた破砕帯の力学特性を評価するための実験的研究例として、Byerlee¹⁾等のグループは、San-Andreas断層の地震予知に関する研究の一環として、直径76mm、高さ190mmの円柱供試体を2つに切断して破砕帯を作り、三軸試験によってその応力-ひずみ特性を求めている。ある角度で切断した面の間に詰められた断層粘土としては、Ottawaの砂・砕いた石英および花崗岩・モンモリロナイトなどが使われている。Kutter(1974)等²⁾はジョイントモデルの直接せん断試験を行い、充填物として砂および粘土を用い、種々その混合割合を変えて強度特性を求めている。Lama(1978)³⁾やHencher⁴⁾等も同様の実験を行っている。

2. 破砕帯の実験モデル

(1) 材料とその特性

実際に観察された破砕帯において、それを構成する周辺岩盤の破砕片（母岩材）と弱部の強度比が約10：1であったので、本研究における実験モデルでは、母岩を表-1に示す配合のモルタルとし、断層粘土を想定した弱部は表-2に示す配合の人工軟岩を用いた。混入させる母岩の破砕片は母岩材のモルタルをハンマーで砕き、それぞれのフルイ通過分を混入させて混入破砕材の違いによる破砕帯材料の違い（B～E）と

表-1：母岩材の配合

	重量比
セメント	1.00
混和剤	0.065
水	0.36

表-2：破砕帯材料の配合

	重量比
セメント	1.0
生石膏	1.8
三星粘土	1.5
標準砂	1.5
混和剤	0.1
水	3.1
破砕材	3.0

表-3：実験ケース一覧

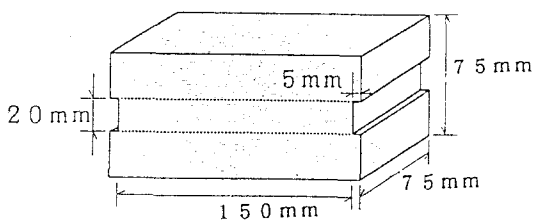
破砕帯材料の種類 (混入材の粒径)	拘束圧 (kgf/cm ²)	実験モデル（破砕帯の厚さ） (mm)					
		2.5	5.0	10.0	15.0	20.0	75.0
A (混入無し)	1.0	3個	3	3	3	3	3
	1.5	3	3	3	3	3	3
	2.0	3	3	3	3	3	3
B (2.38 - 4.76)	1.0		3	3	3	3	3
	1.5		3	3	3	3	3
	2.0		3	3	3	3	3
C (4.76 - 9.52)	1.0			3	3	3	3
	1.5			3	3	3	3
	2.0			3	3	3	3
D (9.52 - 15.9)	1.0				3	3	3
	1.5				3	3	3
	2.0				3	3	3
E (15.9 - 19.1)	1.0					3	3
	1.5					3	3
	2.0					3	3

した。それぞれの混入破碎材の粒径を表－3に示す。破碎帯材料Aは破碎材を混入させないものである。なお、混入破碎材の重量は全て同一とした。

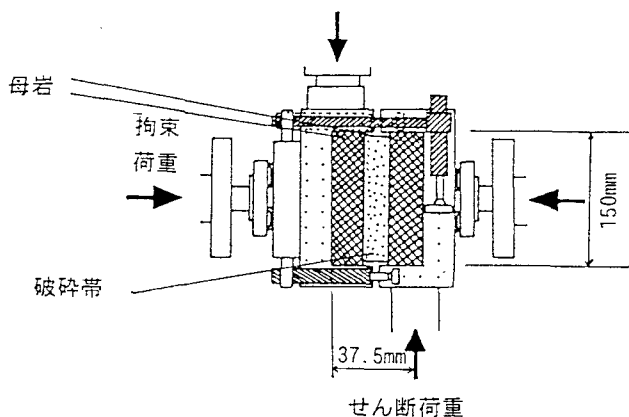
（2）実験モデルの寸法と種類

実験は特製の直接せん断試験装置で行うため、供試体の寸法はせん断箱の大きさに合わせて75mm×75mm×150mmとした。破碎帯を母岩で挟んだサンドイッチ構造とし、その厚さを20mm～2.5mmの5種類に変えた。また、供試体全てが破碎帯材料からなるモデルも作成した。これを便宜的に破碎帯厚75mmの実験モデルと呼ぶこととする。実験モデルの一例を図－1に示す。また、せん断試験時に、母岩と破碎帯の境界面が滑動するのを防ぐために、供試体の作成に当たっては特性の鋼製型枠を使用し、境界面が深さ5mm、幅1.5mmの凸凹でかみ合うようにした。

6種類の実験モデルに対し破碎帯材料の粒径の種類を5種類（A～E）に変化させた。それぞれ実施した実験のケースと個数を表－3に示す。一種類につき9個の供試体を作成し、合計60種類のモデルについて拘束圧を3種類とし180回の実験を行った。



図－1：破碎帯の実験モデル



図－2：せん断箱近傍の拡大図

3. 直接せん断試験

（1）試験装置

試験装置は、縦型の鋼製枠を持ち1650×1950×750mmの大きさで、水平方向より拘束荷重を、垂直方向にせん断荷重を載荷する。アクチュエーターはクローズドループ方式で最大出力は25t、最大ストロークは水平方向の2つが100mm、鉛直方向が200mmである。負荷の制御方法は、荷重制御であり載荷による供試体の体積変化に伴う荷重の変化を防ぐためにサーボ機能が備えられている。せん断箱の内径寸法は75×75×150mmでせん断長さは150mmである。図－2にせん断箱近傍の図を示す。両側の母岩は剛性の高い鋼製枠に一体となるように設置されるので、せん断荷重はほぼ等変位載荷の状態となる。したがって、せん断荷重による偶力モーメントはきわめて小さくなるものと考えられる。計測変位は、せん断荷重と左右の水平方向変位（2カ所の変位の平均）、せん断変位の3つの変位量である。左右の水平方向変位量は、それぞれ変位計で計測され、せん断変位量は、変位計で計測し制御盤に表示される。ただし、左右の水平方向変位量は平均され、それを水平方向の変位量として記録される。

せん断荷重と拘束荷重は、ロードセルで検出し、制御盤に表示される。せん断荷重、せん断変位量、左右の水平方向変位量のアナログデータは、ローパスフィルターに通された後A/D変換され、コンピューターでデジタルデータとしてフロッピーディスクに記録される。以上のシステムによって、記録されたデータをもとに、せん断応力－せん断変位曲線、せん断応力－垂直変位曲線等を入力する。

(2) 試験結果

全ての試験結果はせん断応力-せん断変位関係曲線として出力される。図-3に破碎帯厚が20mmで破碎帯材料がAの場合とDの場合とについてその関係曲線を示した。せん断荷重に対して垂直方向に加えた拘束応力は10, 15, 20 kgf/cm^2 の3種類である。

母岩の変形を無視できるものとすれば、これらの関係曲線の初期勾配から破碎帯材料のせん断弾性係数、ピーク強度の拘束圧依存性より強度定数 (c, ϕ) を求めることができる。

拘束荷重を小さくすると実験時に供試体が安定せず、大きくなると破碎帯材料が圧縮破壊してしまうため、

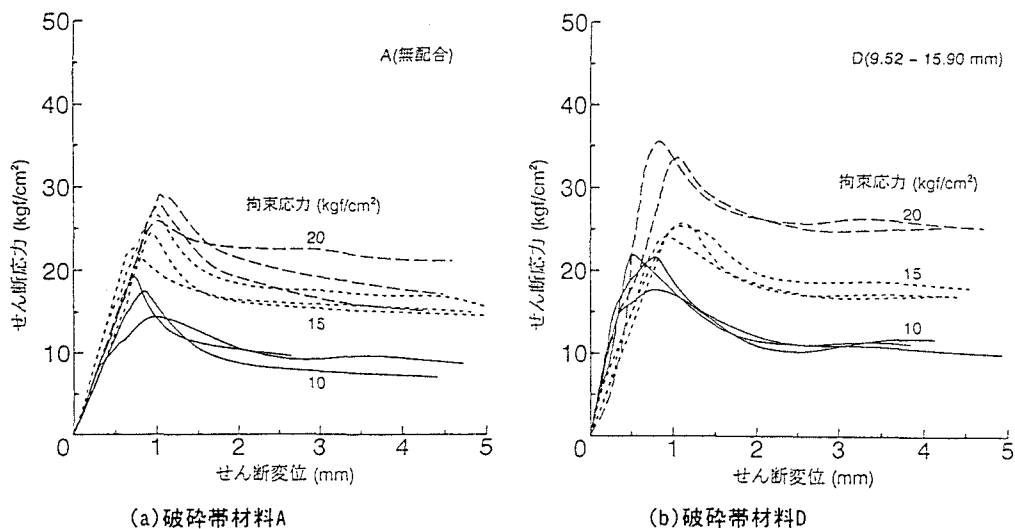


図-3：せん断応力-せん断変位関係（破碎帯厚20mm）

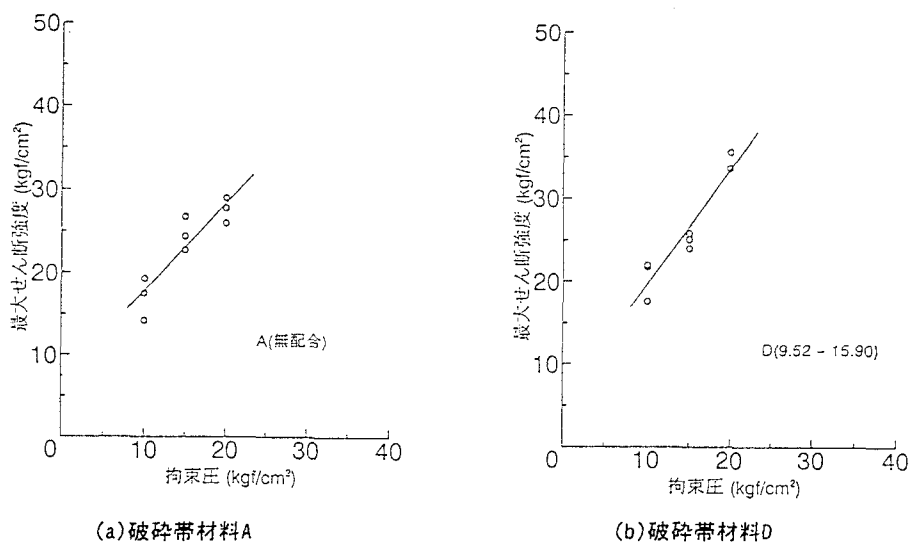


図-4：クーロンの破壊線（破碎帯厚20mm）

拘束応力を大きく変えることができず、3種類の拘束応力下のみ結果であるが、クーロンの破壊線として整理した結果の例を図-4に示す。

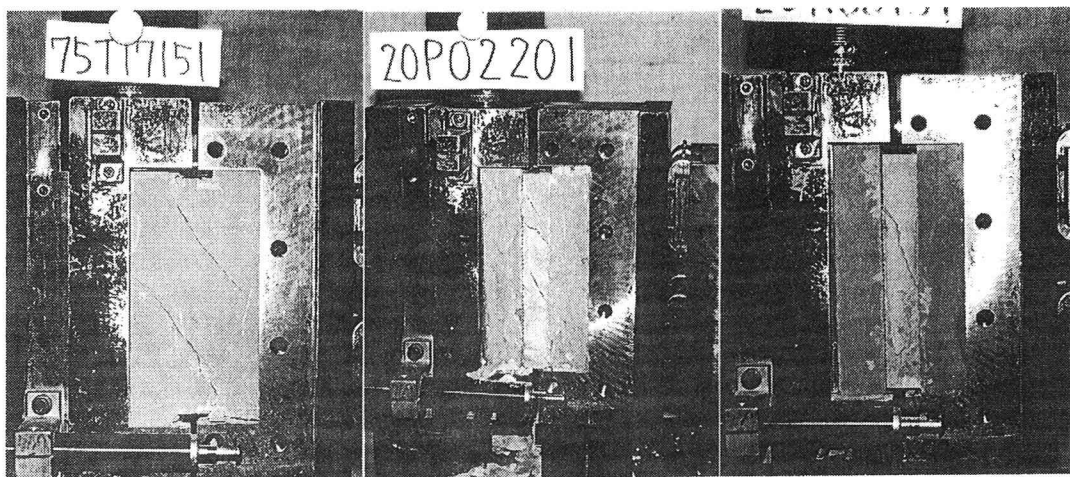


写真-2：試料の破壊状況
(破碎帯材料D、破碎帯材料厚
75mmのモデル)

写真-3：試料の破壊状況
(破碎帯材料A、破碎帯厚20mm)

写真-4：試料の破壊状況
(破碎帯材料B、破碎帯厚20mm)

写真-2～写真-4は試料の破壊状況を示したものである。いずれの試料もピーク強度で破碎帯にクラックが発生した。その方向はせん断荷重方向に対し反時計回りに $30\sim 45^\circ$ である。クラック発生後、応力-変位曲線は軟化し残留状態に到るが、その時点では試料は破碎帯と母岩の境界面で滑動している。しかし、クラックの発生以前にその境界面で滑るような状況は観察されなかった。

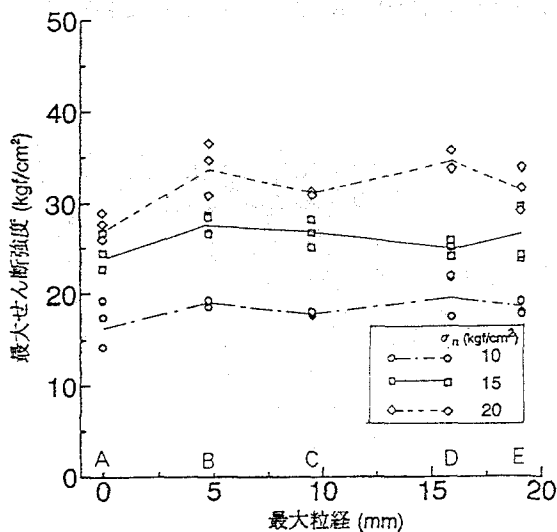
写真-2は破碎帯材料のみで母岩のない試料であるため、クラックは試料全体に及んでいる。写真-3は破碎帯材料A（母岩の破片を含有していない）で、クラックは同時に3カ所で発生した。写真-4は破碎材を含んだ試料で、クラックは1カ所のみであった。他の試料でも同様の傾向がみられた。

また、それぞれの破碎帯材料（A～E）について、円柱供試体（ $\phi 50\text{mm}\times 100\text{mm}$ ）を作成し、その一軸圧縮強度、圧裂強度および弾性波速度を測定した。一軸圧縮強度は、母岩材で 350 kgf/cm^2 、破碎帯材料で $35\sim 50\text{ kgf/cm}^2$ であり、圧縮強度は混入破碎材の粒径が大きくなるほど大きくなる傾向にある。また、弾性波速度より求められた弾性係数は混入破碎材の粒径が大きくなるほど大きくなる傾向にあった。

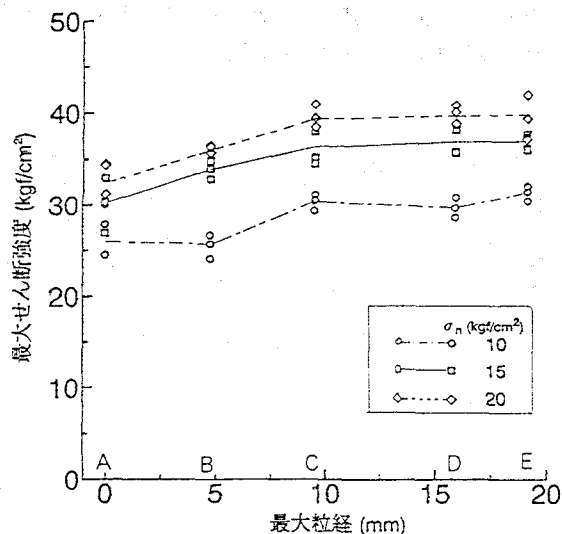
4. 結果の整理と考察

得られた結果を破碎帯材料の種類（A～E）、すなわち混入破碎材の粒径に対してまとめて図-5～図-7に示す。図-5は最大せん断強度の変化を3種類の拘束圧別に表しており、(a)は破碎帯厚20mmの場合、(b)は破碎帯材のみで母岩のない実験モデル（破碎帯厚75mmのモデル）である。したがって、これらは異種の実験モデルであり、(a)と(b)は比較できないが、混入破碎材の粒径の影響については考察できよう。

(a)の結果では、破碎材を含む場合（B～E）と含まない場合（A）の違いは明瞭に見られるが、混入破碎材の粒径の影響があるとは言えない。(b)の結果は比較的安定した結果で混入破碎材の粒径の影響が表れている。これは、両者の実験モデルの違いによるものと思われる。



(a) 破砕帯厚20mmのモデル



(b) 破砕帯厚75mmのモデル

図-5：混入破砕材の粒径と最大せん断強度

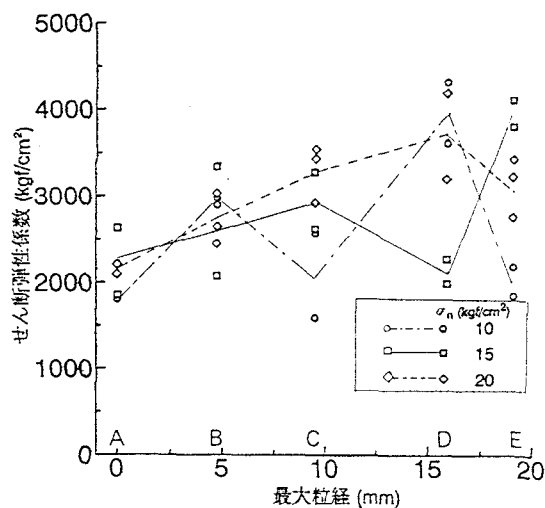


図-6：混入破砕材の粒径とせん断弾性係数
(破砕帯厚20mm)

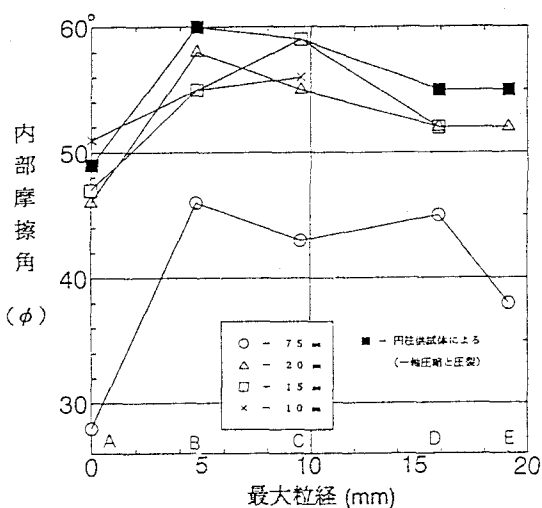


図-7：混入破砕材の粒径と内部摩擦角

図-6はせん断弾性係数と混入破砕材の粒径との関係を破砕帯厚20mmの場合について拘束圧別に比較したものである。きわめてばらつきが激しく明快な比較は困難であるが、一応混入破砕材の粒径が大きいほど、弾性係数も大きくなっているものと考えられる。せん断弾性係数は試料が単純せん断の状態にあるものと考えて求められているが、実際は、その都度応力状態が異なり大きくばらつき結果になったものと思われる。

図-7は内部摩擦角についてまとめたものである。破砕材を混入しない場合 (A) と混入した場合 (B~E) の違いは当然の結果として明確に表れているが、粒径による違いはほとんど見られない。一方、内部摩擦角

の値に実験モデルの違いが明確に表れている。
すなわち、破碎帯材料厚75mmのモデルは $\phi=28\sim46^\circ$ で、人工軟岩とモルタル破砕片の混入材としては比較的納得できる値であるが、破碎帯厚20mm以下の母岩でサンドイッチ構造をなすモデルでは $\phi=47\sim56^\circ$ と極めて大きな値を示している。これはこのようなモデルに対する実験結果にクーロンの摩擦則を適用することに問題があるか明確ではないが、このような結果が得られたということを紹介するに留める。

図-8は最大せん断強度を破碎帯厚に対してまとめたものである。拘束圧15 kgf/cm²の結果の内破碎帯厚10mmの結果が異常なものとして除外すれば、せん断強度は破碎帯厚が大きいくほど小さくなる傾向にあるといえよう。

5. まとめ

元々複雑な構造を呈する破碎帯の力学特性の評価に際し、その影響因子を如何に考えるかは、その因子の数があまりにも多すぎて、絞り込むことは極めて困難である。今回の研究では、破碎帯内部のジョイントが顕著に発達している場合を想定し、破碎帯の構成物は断層粘土と母岩の破砕片のみであるとして実験モデルを作成した。

破碎帯が断層粘土のみからなる場合と、それにわずかも母岩の破砕片が混入している場合では、明らかにその強度および弾性係数に違いが表れることが確認された。その度合いは特に強度特性に顕著に表れるようである。また、混入破砕材の粒径が大きくなると弾性係数および強度も大きくなる傾向を示している。

したがって、この種の基礎実験を行うことで、実際の破碎帯の観察結果から断層粘土の含有量および破砕された母岩の粒径などを求め、構成物質の力学特性を知ることにより破碎帯全体の力学特性を評価する手法を開発するための基礎データとなることが期待される。

参考文献

- 1) Byerlee, J., Summers, R.: A note on the effect of fault gouge thickness on fault stability, Int. J. Rock mechs. & Min. Sci., Vol.13, 1976, pp.35-36
- 2) Kutter, H.K., Rautenberg, A.: The residual shear strength of field joints in rock. The 4th Int. Congress on Rock mechanics, ISRM, Vol.1, 1979, pp.221-227
- 3) Lama, R.D.: Influence of thickness of fill on shear strength of rough rock joints at low normal stress, fclssmechanik kolloquium, 1978, pp.55-56
- 4) Papaliangas, T., Lumsden, A.C., Hencher, S.R., Manalopoulou, S.: The effect of frictional fill thickness on the shear strength of rock discontinuities, Int. J. Rock Mechs. & Min. Sci., Vol.30, No.2, 1990, pp.82-91

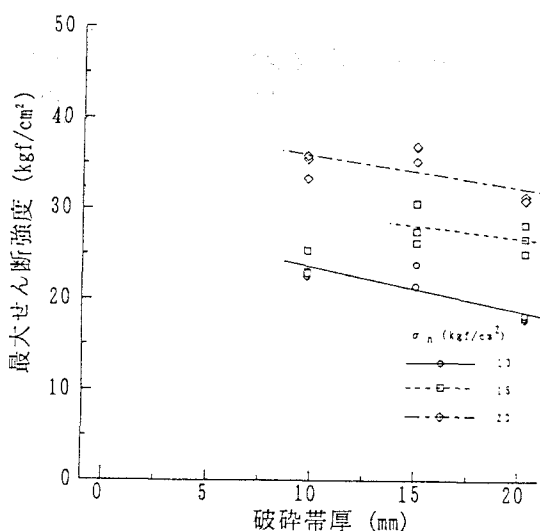


図-8：破碎帯厚と最大せん断強度
(破碎帯材料Cの場合)