

垂直剛性一定一面せん断時の 岩盤不連続面のせん断挙動

矢野隆夫¹・青木一男²・大西有三³・大津宏康⁴・西山 哲⁵・高木克実⁶

¹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)

²正会員 工博 大阪工業大学教授 工学部土木工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5丁目16番1号)

³正会員 工博 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)

⁴正会員 工博 京都大学助教授 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)

⁵正会員 工修 京都大学助手 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)

⁶正会員 工修 三菱重工業(株) 高砂製作所 (〒676-8686 高砂市荒井町新浜2-1-1)

岩盤構造物の設計では、不連続面の力学挙動を把握することが極めて重要な問題となる。本論文では岩盤不連続面の強度・変形特性を把握するために垂直剛性一定一面せん断試験を行い、その結果を垂直応力一定一面せん断試験の結果と比較し、不連続面の凹凸の大きさ、初期垂直応力 σ_0 、垂直剛性 K_n 、および、母岩強度 σ_c などのパラメータがその面のせん断挙動に与える影響を検討した。さらに、単一の垂直剛性一定試験の結果より、不連続面の強度特性がMohr-Coulombの破壊規準に従うと仮定した場合の強度定数 c, ϕ を推定する、より効率的な方法を提案した。

Key Words : rock joint, shear strength, direct shear test, normal stiffness

1. はじめに

岩盤の挙動は弱面である不連続面に大きく影響を受けていることから、岩盤構造物の設計、施工、さらにはメンテナンスの各段階において、岩盤不連続面の強度・変形特性を把握することは、基礎的かつ最も重要な問題となる。岩盤不連続面の力学挙動を支配するパラメータは、①その面の凹凸の大きさの程度(ラフネス)、②母岩強度 σ_c 、③基本摩擦角 ϕ_0 、および、④その面に作用する垂直応力 σ_n などであり、それらが複雑に絡み合っている。

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、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。

図-1は岩盤不連続面のせん断形式の分類である。図-1(a)は通常よく用いられる垂直応力一定試験(Constant Normal Load: 以下CNL試験と称す)で

あり、図-1(b)に示すように斜面上で拘束されていないブロックが不連続面上を滑る場合に相当している。この場合、そのせん断特性は母岩の強度よりもラフネスに大きく依存されると考えられる。図-1(c)に示す定体積試験(Constant Volume: CV試験)は、図-1(d)のように岩盤内の亀裂が変位を拘束された状態でせん断を受けている場合に相当しており、その特性はラフネスよりも母岩の強度により多く影響されると考えられる。それに対し、図-1(e)は垂直剛性一定試験(Constant Normal Stiffness: CNS試験)と呼ばれるもので、近年、その試験方法が注目されている^{1),2)}。ここで、CNS試験の原理について簡単に説明する。

岩盤不連続面のせん断挙動がMohr-Coulombの破壊規準にしたがうと仮定すると、その関係式は次式のように表される。

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

ここに、 τ はせん断強度、 σ_n は垂直応力であり、 c は見かけの粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。

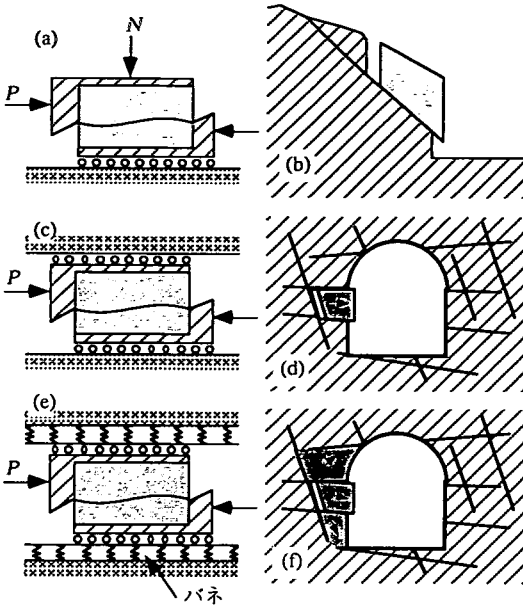


図-1 岩盤のせん断様式の種類 ((a),(b): 垂直応力一定試験, (c),(d): 定体積試験, (e),(f): 垂直剛性一定試験)

通常、不連続面の強度定数 c, ϕ を求める場合、種々の垂直応力下でCNL試験を行う。しかし、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、 c, ϕ 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、自然に存在する岩石では不可能である。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-2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点で始まる時、垂直応力を σ_0 から σ_1 まで増加させる。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のような応力径路をたどることになり、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、実際にすべりが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CNS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は同じであるが、ピーク時を見極めるのに人

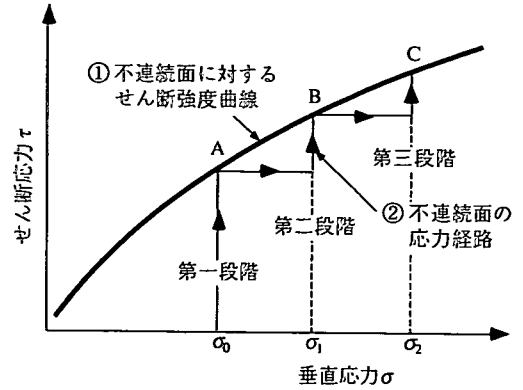


図-2 多段階せん断試験の応力経路

間の勘に頼らず、図-1(e)に示すように垂直荷重載荷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、 $K \times \Delta v$ 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CNL試験などで c, ϕ 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く、1つの供試体で c, ϕ 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-1(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岩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。なお、従来より行われてきたCNL試験は、垂直変位 v の増減によらず σ_c の値が一定であるので、 K_c がゼロであるCNS試験であるとして考えることができる。

以上、岩盤不連続面の強度・変形特性を求める試験方法について述べてきた。本研究の目的は、CNS試験を用いて岩盤不連続面の強度・変形特性を求めることである。よって本研究では不連続面の表面形状として、規則的な歯形形状と、2種類のランダムラフネスを有する供試体を用いて、初期垂直応力 σ_0 、垂直剛性 K_v 、および、母岩強度 σ_c といったパラメータがせん断挙動にどのような影響を及ぼすのかを解明する。さらに、不連続面の強度特性がMohr-Coulombの破壊規準に従うと仮定した場合の c, ϕ を推定しようとするものである。

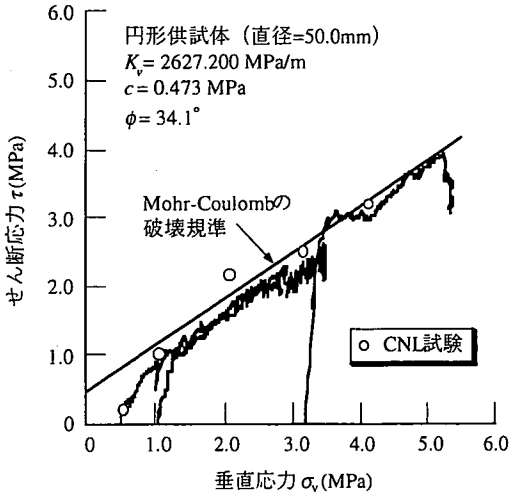


図-3 CNS 試験結果 (1990年)

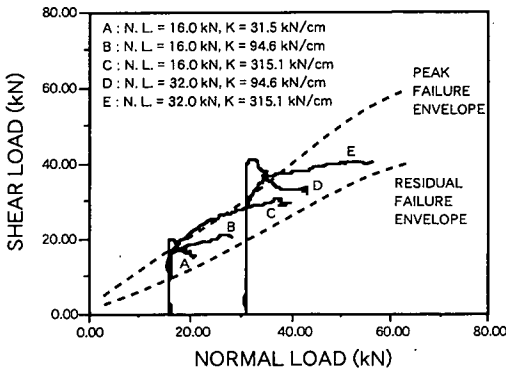


図-4 Amadei³⁾らの実験結果 (N.L.: 初期垂直荷重, K: 垂直剛性)

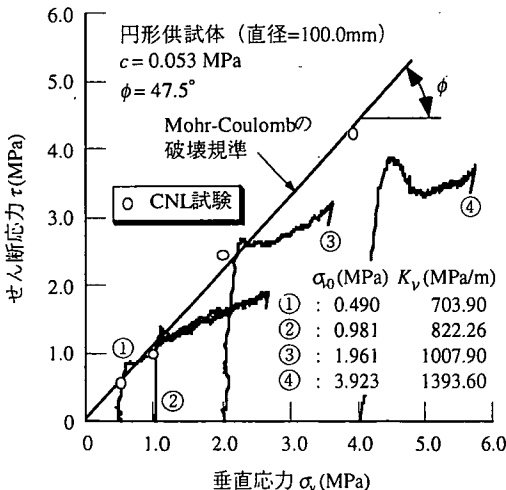


図-5 CNS 試験結果 (1991年)

2. CNS 試験の問題点

図-3は供試体の直径が50.0mmの円形供試体を用いて行った実験結果^{3),4)}である。この図から、CNS試験から求められる応力経路はCNL試験から求めたMohr-Coulombの破壊規準にそって移動しており、CNS試験を用いることで c, ϕ を正確に推定できることを証明した。それに対してAmadei and Wibowo⁵⁾は、図-4に示すようにCNL試験を行い、垂直剛性 K_v の値によって応力経路の挙動が大きく異なること、すなわち、 K_v の値によってはCNS試験でMohr-Coulombの破壊規準を表現できないことを指摘している。そこで著者らは直径が100.0mmの円形供試体の試験結果⁶⁾を用いて、CNS試験におけるせん断挙動を再考した。その試験結果を図-5に示す。この図から、応力経路①は初期垂直応力 σ_{v0} が小さく、 K_v の値が小さいにもかかわらず、その経路はMohr-Coulombの破壊規準をよく表しているが、 σ_v が大きくなる、もしくは、 K_v の値が大きくなるに従って破壊線から離れ(経路②)、さらには、せん断応力 τ にピークが現れる現象(経路③④)が認められる。

このように、図-3~図-5に示す3種類の試験結果に大きな違いが見られ、この最も大きな原因は K_v の大きさや σ_{v0} の大きさが大きく影響していると考えられる。そこで本研究では種々の供試体を用いて、種々の K_v 、 σ_{v0} 、および、母岩強度 σ_c 下においてCNS試験を行い、この原因を解明する。

3. 供試体および実験方法

(1) 供試体の作製方法

本研究で用いる供試体は、図-6に示すような規則的な歯形形状の供試体(以下、規則性歯型供試体と呼ぶ)と、図-7に示すような実在の不連続面と同じように、せん断方向の凹凸だけでなくそれと直交する方向にも凹凸が存在し、3次元的な広がりを持つもの、すなわち、ランダムラフネスを有する供試体(以下、不規則性供試体と呼ぶ)を2種類準備した。供試体はモルタル製(セメント:標準砂:水 = 1:2:0.65(重量比))であり、サイズは一辺が120.0mmの立方体である。また、母岩の一軸圧縮強さ σ_c が不連続面の強度・変形特性に及ぼす影響を調べるため、セメントに対するカオリン(液性限界 $w_L = 38.2\%$)の重量含有比を0, 50.0, 100.0%とすることによって σ_c を変化させた供試体を製作し

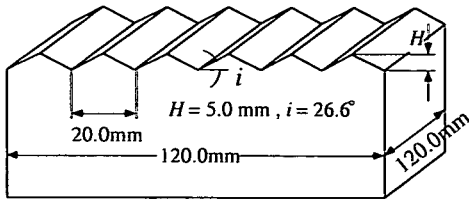


図-6 規則性歯型供試体

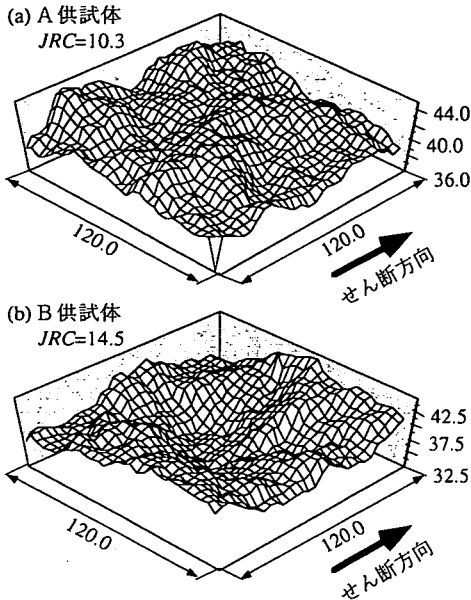


図-7 不規則性供試体の表面形状とせん断方向

た、それと共に各供試体の基本摩擦角 ϕ_b を求めるため、不連続面に凹凸のない平滑面を有する供試体を材料強度ごとに準備した。変位速度は 0.1mm/min である。表-1 に供試体の材料定数と実験条件を示す。

(2) せん断試験

本研究に用いた装置は、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、パーソナル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、せん断試験中の不連続面の面積減少を自動的に計算し、垂直応力 σ_v 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 CNL 制御が可能である。

図-3 と 図-5 に示す実験において、CNS 試験のコントロールは、垂直荷重載荷装置にバネを挿入することにより実施していた。その時、実験に用いるバ

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、またバネ自体の剛性を変えることにより実験が可能となっていた。そのため、この構造では任意の垂直剛性を設定することが不可能であった。しかし、1999 年に計測・制御システムを簡単に構築できる計測制御用グラフィカルプログラミングソフトウェア LABVIEW を導入したので、現在では任意の垂直剛性下での実験が可能となっている。なお、制御とともに計測データは自動的にハードディスクに記録されるので、試験後のデータ整理もパーソナルコンピュータを用いて行うことができる。試験装置についての詳細は参考文献 7) に譲る。

4. 実験結果

図-8 に本研究で行った CNS 試験結果の垂直応力 σ_v ~ せん断応力 τ 関係の一例を、CNL 試験より得られた Mohr-Coulomb の破壊規準と共に示す。この図から明らかなように、不連続面の強度特性は、垂直剛性 K_v の値によって異なった特性を持つことがわかる。すなわち、応力経路の発現の違いは、 K_v に大きく影響を受けており、前述した CNS 試験における 2 つの事例のうち、図-3 に示す応力経路が破壊線上を長い区間に渡り移動しているものは本研究において K_v を大きくしたものと類似しており、図-4 に示すような破壊線に到達した後、 τ が低下してピークを持つものは K_v が極端に小さいものと類似している。これより、 K_v の設定値が CNS 試験時の強度・変形特性に大きく影響を与えていると考えられる。

(1) 規則性歯型供試体のせん断挙動

ここでは、 K_v の値が岩盤不連続面の強度・変形特性にいかに関与するかを論じる。

図-9 は規則性歯形供試体に対し、 $\sigma_{v0} = 0.490 \text{ MPa}$ の下で、 K_v の値を 1716.164, 3432.328, 6864.655 MPa/m と 3 種類変化させたときの CNS 試験結果である。図-9(a) に $u \sim \tau$ 関係を示す。この図より、 K_v が大きくなる程、より大きい τ が発現していることがわかる。これは、 K_v には v に応じて σ_v を増加させる働きがあり、 K_v が大きい程、 σ_v はより増大し、その σ_v の増加が τ の増加につながっているためであると考えられる。また、 τ のピークが発現する変位 u_p に着目すると、 u_p は K_v の値にかかわらずほぼ $u_p = 1.800 \text{ mm}$ となっていることが読み取れる。

図-9(b) に $u \sim v$ 関係を示す。この図からは K_v が大きくなる程、 v の発現が抑制されていることがわかる。この現象をエネルギー保存の法則を用いて考

表-1 規則性歯型供試体および不規則性歯型供試体の材料定数と実験条件

形状	カリウム含有率 K/C (%)	一軸圧縮強さ σ_c (MPa)	見かけの粘着力 c (MPa)	内部摩擦角 ϕ (°)	基本摩擦角 ϕ_b (°)	限界せん断変位 u_c (mm)	初期垂直応力 σ_0 (MPa)	垂直剛性 K_v (MPa/m)
規則性歯型供試体	0	52.626	0.000	61.7	33.6	1.300	0.490	1716.164 3432.328 6864.655
A型供試体	0	37.498	0.152	46.8	37.5	0.348	0.490 0.981 1.961 3.923 7.845	490.333 980.665 2941.995 4903.326 6864.655 9806.650 19613.300 29419.950
	50.0	36.015	0.147	42.9	36.4	0.554	0.490 0.981	490.333 4903.326 9806.655
	100.0	20.718	0.136	42.6	34.8	0.646	1.961	29419.950
B型供試体	0	37.498	0.179	48.2	37.5	0.443	0.490 0.981 1.961	490.333 980.665 2941.995 4903.326 6864.655 9806.650 19613.300 29419.950
	50.0	36.015	0.201	47.9	36.4	0.558		490.333 4903.326 9806.655
	100.0	20.718	0.155	49.9	34.8	0.710		29419.950

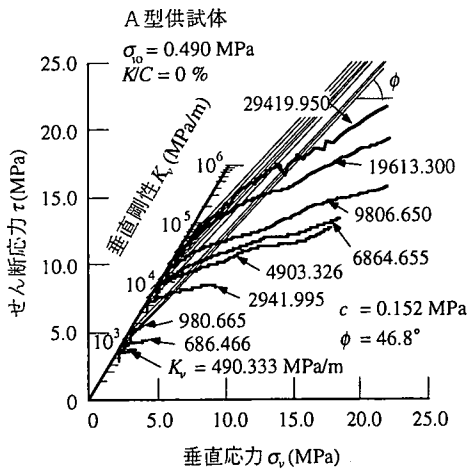


図-8 CNS 試験結果の応力経路の一例 (A型供試体)

察する。

Bro⁸⁾ はせん断が起こる際に、その部分にかかる荷重を図-10に示すように考え、つり合い式を次のように示した。

$$S = T \cos \alpha - N \sin \alpha \quad (2)$$

$$p = N \cos \alpha + T \sin \alpha \quad (3)$$

ここに、 S はせん断面に働くせん断荷重、 T は水平面に働くせん断荷重、 N は垂直荷重であり、 P はせん断面に対する垂直荷重、 α はせん断面と水平面のなす角である。

エネルギーに関しては

$$\delta E_t = T \delta t = \delta E_n + \delta E_s = N \delta n + S \delta s \quad (4)$$

となる。ここに、 δE_t はせん断時に消費される全エネルギー、 δE_n はすべり上がるエネルギー、 δE_s は不連続面を削るエネルギーであり、 δt は水平面に平行なせん断変位、 δn は鉛直方向のせん断変位、 δs はせん断面に平行方向のせん断変位の増加量である。 δn 、 δs は次式によって与えられる。

$$\delta n = \delta t \tan \alpha \quad (5)$$

$$\delta s = \frac{\delta t}{\cos \alpha} \quad (6)$$

よって、 δE_t は、 δE_n と δE_s とに大別され、上述したように、 K_v が大きい程、 α は大きく増加し、そのために δE_n の割合が小さくなり、 δE_s の割合が増加し、より多く削れが生じるようになったためであると考えられる。また、図-9(b)に示すようにその経路は、 τ のピークが発現するせん断変位まで、供

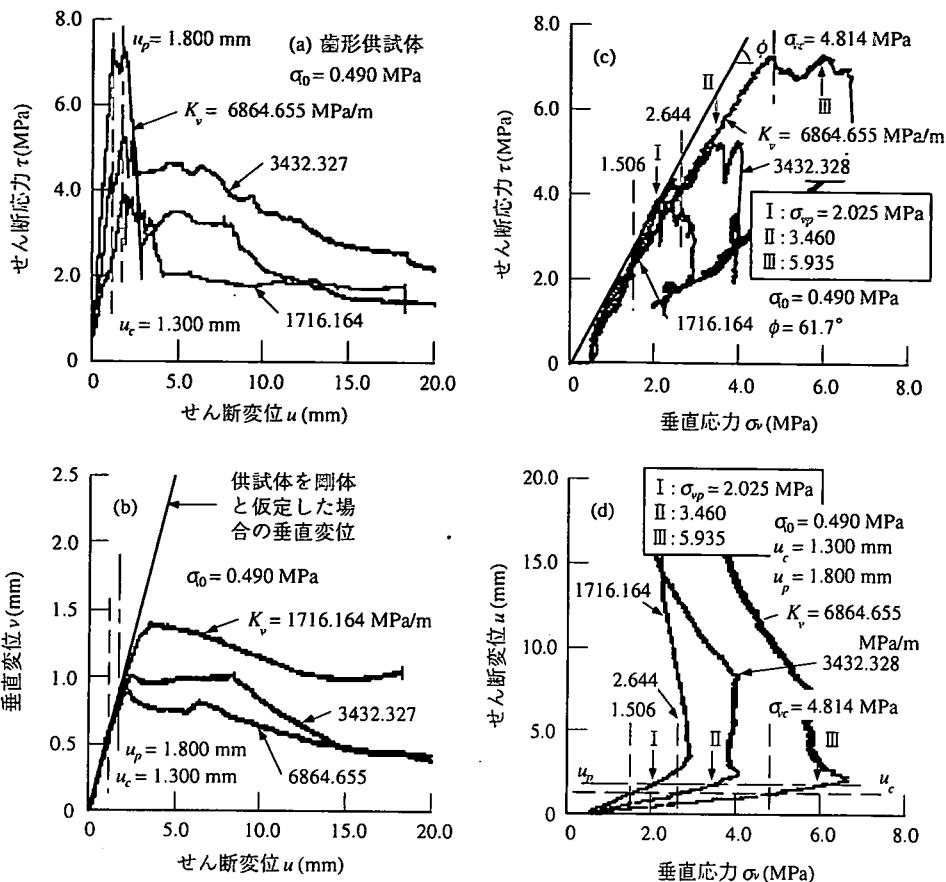


図-9 歯形供試体の CNS 試験結果 ($\sigma_0=0.490\text{MPa}$)

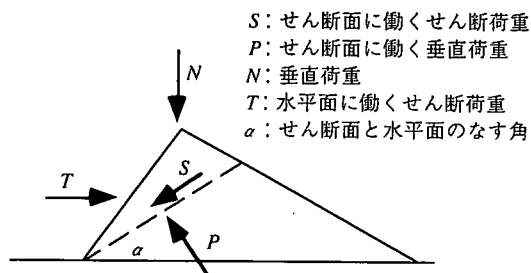


図-10 せん断面における力の釣り合い

試体を剛体と仮定した場合の v とほぼ同じ経路を辿っており、規則性歯形供試体のせん断過程は、 K_v の大きにかかわらず、滑りが卓越する領域と削れが卓越する領域に分類できることを示唆している。

図-9(c) に $\sigma_v \sim \tau$ 関係を示す。この図から明らかなように、 K_v が大きい程、応力経路が破壊線上を長い区間にわたって移動する様子が見られる。ここで、応力経路が破壊線上を移動する区間を特定するため、

図-9(a) に示すのピーク値 τ_p と、 τ のピークが発現する u_p を用いて $\sigma_v \sim \tau$ 関係を考察する。 u_p を図-9(d) に示す $\sigma_v \sim u$ 関係に適用し、その変位に対応する σ_v の値を求めたところ、 K_v の値が小さいものからそれぞれ、 $\sigma_{vp} = 2.025, 3.460, 5.935\text{MPa}$ となった。これらの値を図-9(c) の応力経路に当てはめると、その経路は低垂直応力下では破壊線上を移動しているが、求められた σ_{vp} の値まで応力経路は破壊線上を移動せず、残留状態に移行することがわかる。よって、CNS 試験の τ のピーク値 τ_p で応力経路を議論することは不可能である。そこで、CNL 試験結果を用いて $\sigma_v \sim \tau$ 関係を議論する。

図-11 は、規則性歯形供試体を用い、 σ_0 を $0.490, 0.981, 1.961\text{MPa}$ として行った CNL 試験における $u \sim \tau$ 関係を示したものである。この図において、 τ にピークが現れる u_c は約 1.300mm であった。なお、 u_c は各試験結果の平均値を持って代表値としている。この結果を図-9(d) に示す CNS 試験における $\sigma_v \sim u$ 関係に適用し、その u に対応する σ_v の値を求めたと

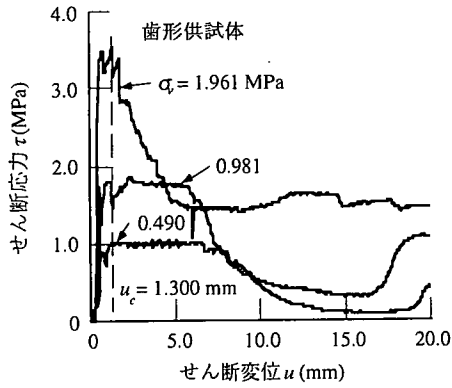


図-11 CNL 試験におけるせん断変位 u ~ せん断応力 τ 関係 (歯形供試体)

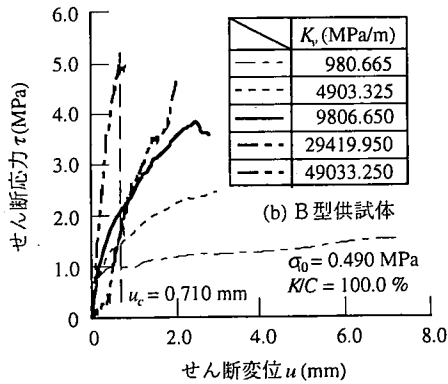
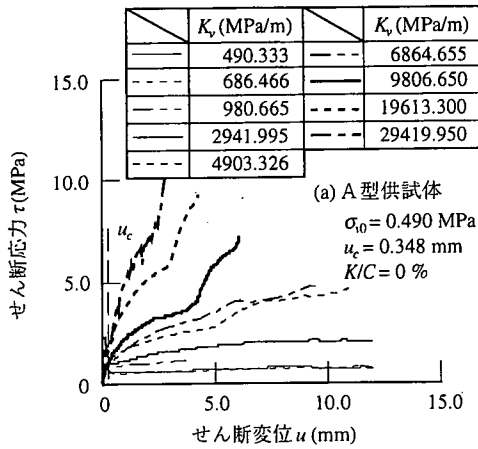


図-12 せん断変位 u ~ せん断応力 τ 関係 ($\sigma_0=0.490\text{MPa}$)

ころ、 K_v の値が小さいものからそれぞれ、 $\sigma_c = 1.506, 2.664, 4.814$ MPa となった。再びこれらの値を図-9(c) の応力経路に当てはめると、求められた σ_c の値までは破壊線上を移動していることが認められる。以下、このせん断変位を限界せん断変位 u_c 、垂直応力を限界垂直応力 σ_v 、せん断応力を限界せん

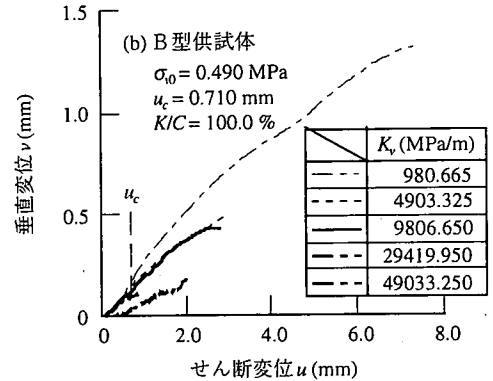
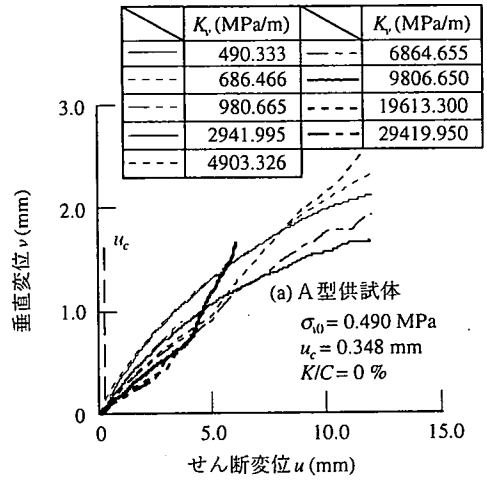


図-13 せん断変位 u ~ 垂直変位 v 関係 ($\sigma_0=0.490\text{MPa}$)

断応力 τ_{pc} と呼ぶ。次に、それらの値を用いて不規則性供試体の CNS 試験結果を論じる。

(2) 不規則性供試体のせん断挙動

a) 垂直剛性 K_v の影響

図-12~図-15にA型、B型供試体のCNS試験結果を示す。なお、 σ_0 は0.490MPaである。図-12の u ~ τ 関係から、規則性歯型供試体のせん断挙動と同様に、 K_v が大きくなる程、より大きい τ が発現していることがわかる。しかし、図-9(a)に示した歯形供試体では明確なピークが現れたが、不規則性供試体では明確なピークが現れず、 τ は単調に増加する傾向を示している。この理由は以下のように考えられる。歯形供試体において、せん断過程には滑りが卓越する領域と削れが卓越する領域に明確に分類できることは前述した。規則性歯型供試体と不規則性供試体の表面形状の幾何学的な相違はアスペリティ角である。すなわち、歯形供試体ではアスペリティ角が1個に対し、複雑な表面形状を持つ供試体では様々な大きさのアスペリティ角が無数に存在する。

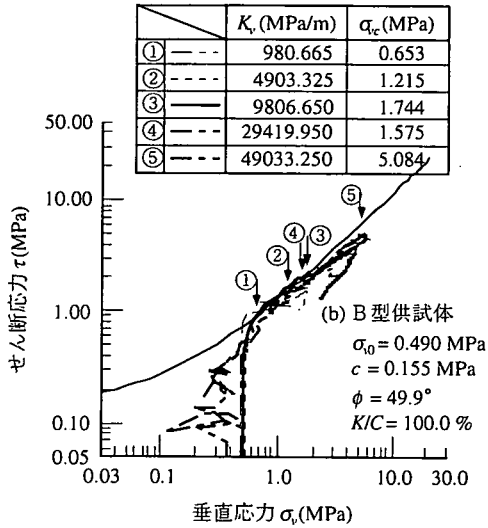
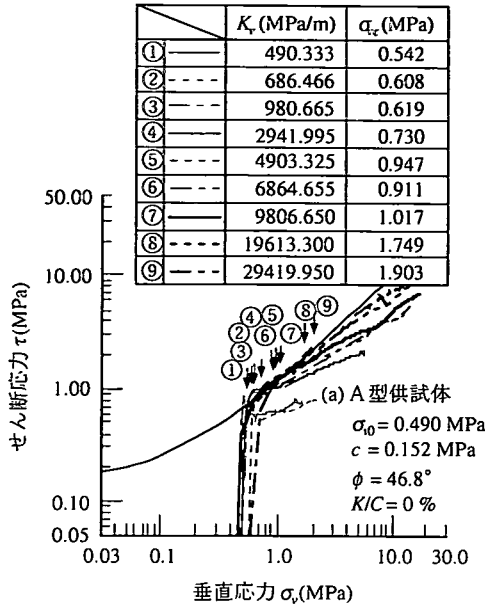


図-14 垂直応力 σ_v ~ セン断応力 τ 関係 ($\sigma_0 = 0.490$ MPa)

このことは、せん断過程において τ に寄与するアスペリティ角が無数に存在するを意味しており、刻々と進行するせん断に対して τ に寄与するアスペリティの位置が変化するため、その領域を明確に分離できず、なおかつ、滑りと削れが複雑に絡み合っ τ を発現するために起こる現象であると考えられる。なお、アスペリティ角とは凹凸の単位長さ当たりの傾斜角を意味している。

図-13はA、B型供試体の $u \sim v$ 関係であり、歯形供試体と同様に K_v が大きくなる程、 v の発現が抑制されていることがわかる。

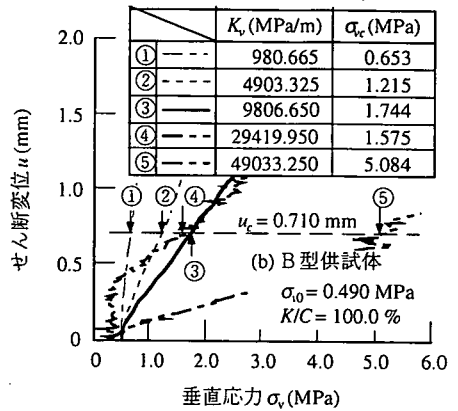
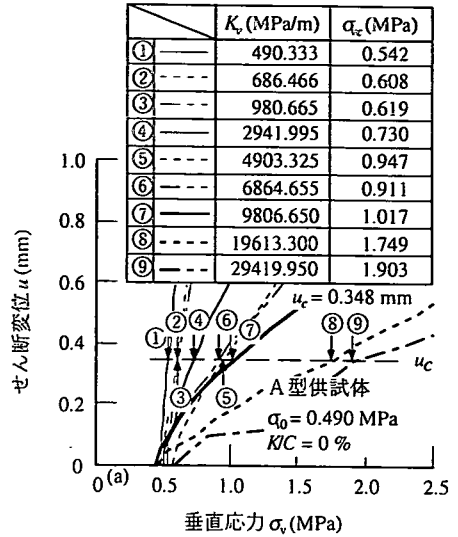


図-15 垂直応力 σ_v ~ セン断変位 u 関係 ($\sigma_0 = 0.490$ MPa)

図-14に $\sigma_v \sim \tau$ 関係を示し、図-15に $\sigma_v \sim u$ 関係を示す。なお、図-14の $\sigma_v \sim \tau$ 関係は図を理解しやすいように対数表示してあり、普通軸でプロットしたものは図-8に示してある。また、図-15は実験結果の一部を拡大したものである。

次に、規則性歯型供試体のせん断挙動で説明した u_c の適用性について述べる。図-16は、A型供試体の $K/C = 0\%$ のCNL試験における $u \sim \tau$ 関係を示したものである。この図において、 τ がピークを示す u の平均値を求めると約 0.348 mm となり、この値を u_c であると仮定する。なお、その他の供試体の u_c は表-1に示してある。こうして求めた u_c を図-15に示す $\sigma_v \sim u$ 関係に適用し、 σ_{vc} を求め、図-14に示す応力経路に当てはめると、その経路は歯形供試体と同様に σ_{vc} まで破壊線上を移動している様子が見られる。また、図-17は σ_{vc} に対する破壊線上の τ_p と τ_{pc} の関係示したものであり、両者の関係はほぼ1

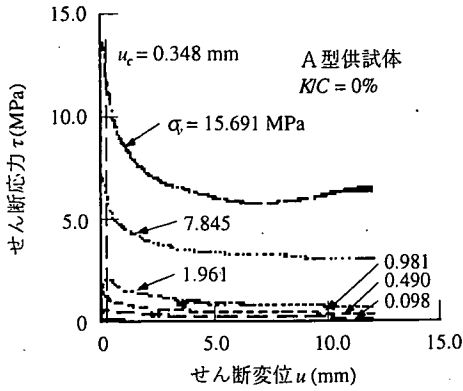


図-16 CNL 試験におけるせん断変位 u ～せん断応力 τ 関係 (A 型供試体)

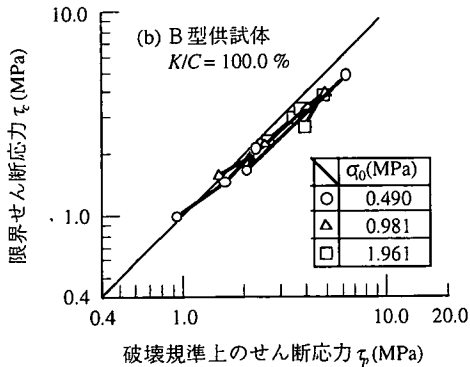
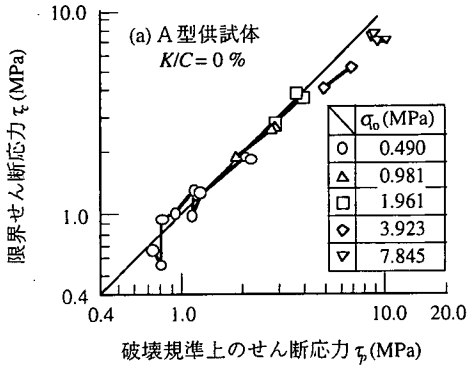


図-17 破壊線上のせん断応力 τ_p ～限界せん断応力 τ_{pc} 関係

対1になっており、 τ_{pc} は破壊線上にあることを示している。よって、CNS 試験は不規則性供試体においても Mohr-Coulomb の破壊規準をよく表現でき、そのせん断挙動は u_c などを用いて説明することが可能である。

次に、図-15に示す $\sigma_v \sim u$ 関係に着目すると、 K_v が小さくなるに従って、 σ_{vc} と σ_{v0} の差が小さくな

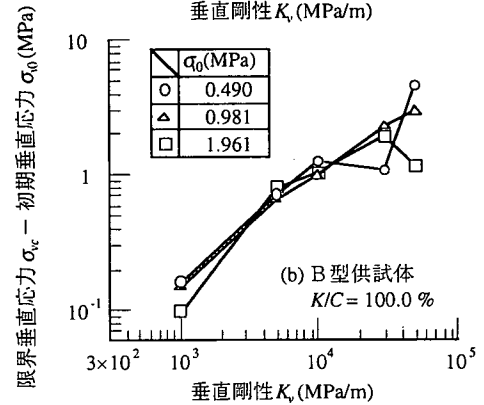
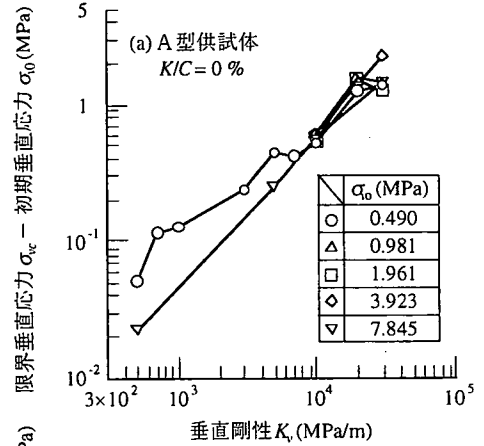


図-18 垂直剛性 K_v と初期垂直応力 σ_0 - 限界垂直応力 σ_{vc} の関係

ており、 σ_v がほとんど増加しないことがわかる。図-18はその現象を具体的に示した図であり、横軸に K_v を、縦軸に σ_{vc} と σ_{v0} の差をプロットしたものである。この図や図-14からも明らかなように、破壊線上を移行する σ_v の区間は K_v が小さくなるに従って短くなっている。よって、図-3と図-4、図-5に示した CNS 試験における2つの事例の内、応力経路が破壊線上を移行せずにピークを示した事例は、実験に用いた K_v の値が小さすぎたために起こった現象であると考えられる。

b) 初期垂直応力 σ_0 の影響

図-19は $u \sim v$ 関係について、 σ_0 の影響を検討した結果である。これらの図から、 u_c までは σ_0 によらず同一経路を移行しており、明確な差があるとは言えない。このことは、 u_c までは不連続面の削れ量は σ_0 の影響をほとんど受けないと考えられ、 v は σ_0 よりも、 K_v に支配されていると考えられる。それに対し、図-20に示す $u \sim \tau$ 関係においては σ_0 が大きい程、 τ がより大きな値を示す傾向が見られる。

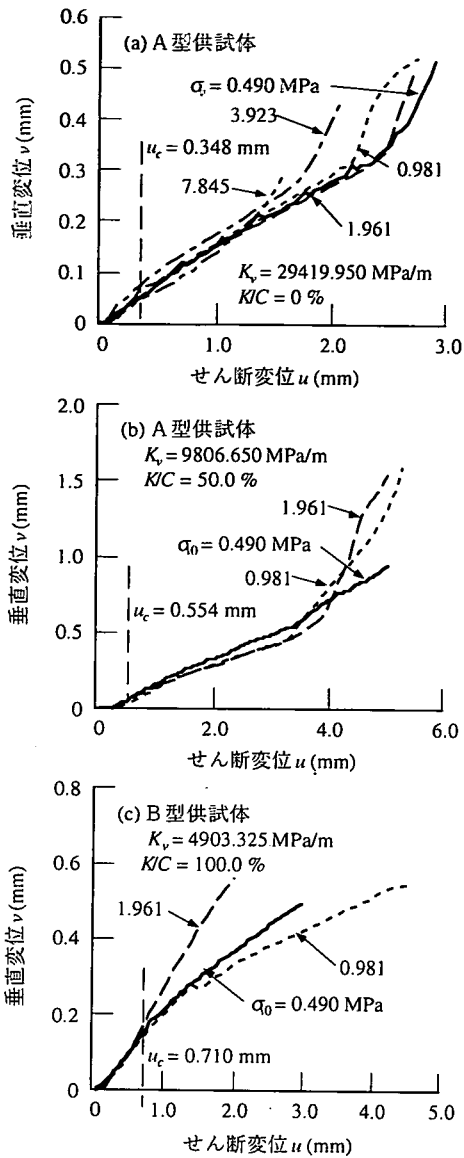


図-19 せん断変位 u ~ 垂直変位 v 関係

このことは同一 K_v において、 v の発生量が同じであれば、垂直応力の増分量が同じであるので、 u_c における σ_c は σ_0 が大きい程、大きくなることから、 τ が大きくなったと考えられる。

図-21 に $\sigma_v \sim \tau$ 関係を示し、図-22 に $\sigma_v \sim u$ 関係を示す。次に、 u_c 、 σ_{vc} および τ_{pc} の適用性を述べる。

図-22 に示す $\sigma_v \sim u$ 関係に表-1 に示す u_c を適用し、 σ_{vc} を求めた結果、図中に示すような値が得られた。この結果を図-21 に示す応力経路に当てはめると、 σ_0 が 1.961MPa までのものは σ_{vc} まで破壊線

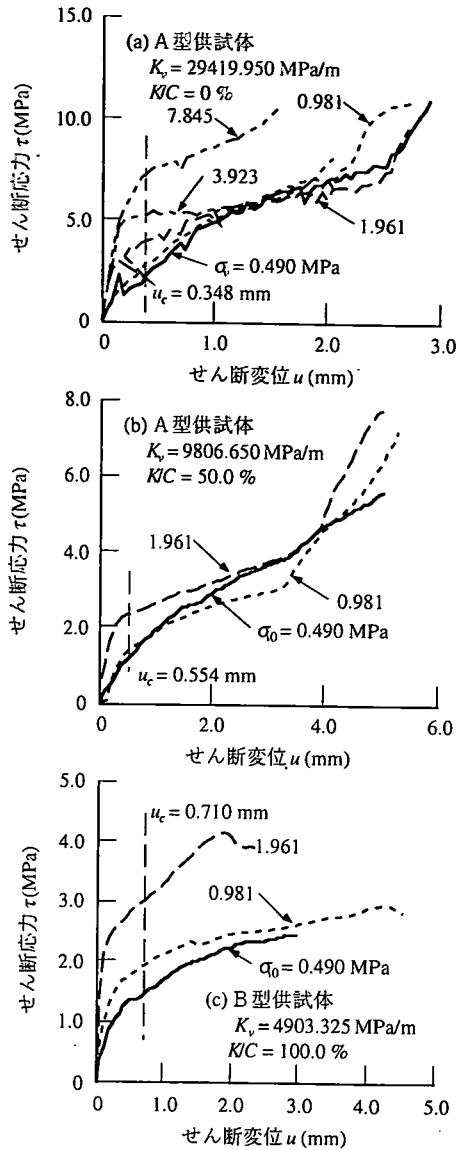


図-20 せん断変位 u ~ せん断応力 τ 関係

上を移動している様子が見られる。しかし、図-21(a) に示すように、 σ_0 が 3.923MPa 以上の高拘束圧下では破壊線上に到達しないものや、到達するもののすぐにピークに達し、その後 τ が低下する現象が見られる。また、すべての供試体において、 σ_0 が大きくなればなる程、その応力経路は破壊線上を移動する区間が短くなり、 σ_c がほとんど増加しないうちに残留応力状態に移行する現象が読み取れる。図-23 はその現象を具体的に示した図であり、 σ_{vc} に対する破壊線上の τ_p と τ_{pc} の関係を示したものである。この図から、 σ_0 が 1.961MPa 以下では両者の関係はほぼ 1 対 1 になっており、 τ_{pc} は破壊線上に

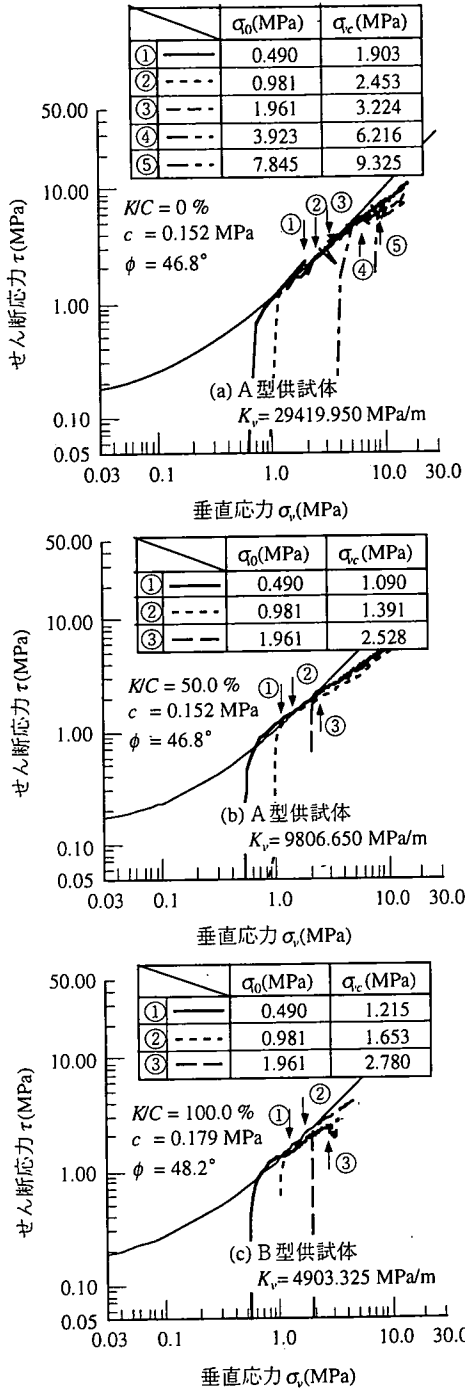


図-21 垂直応力 σ_v ~せん断応力 τ 関係

あるが、破壊線上の τ_p が約 4.0MPa 以上、換言すると σ_0 が 1.961MPa 以上になると、 τ_{pc} は破壊線を大きく離脱していることが確認できる。よって、図-5 の応力経路③、④に示すように、 σ_0 が大きく、応力経路が破壊線上を移行せずにピークを示した事例

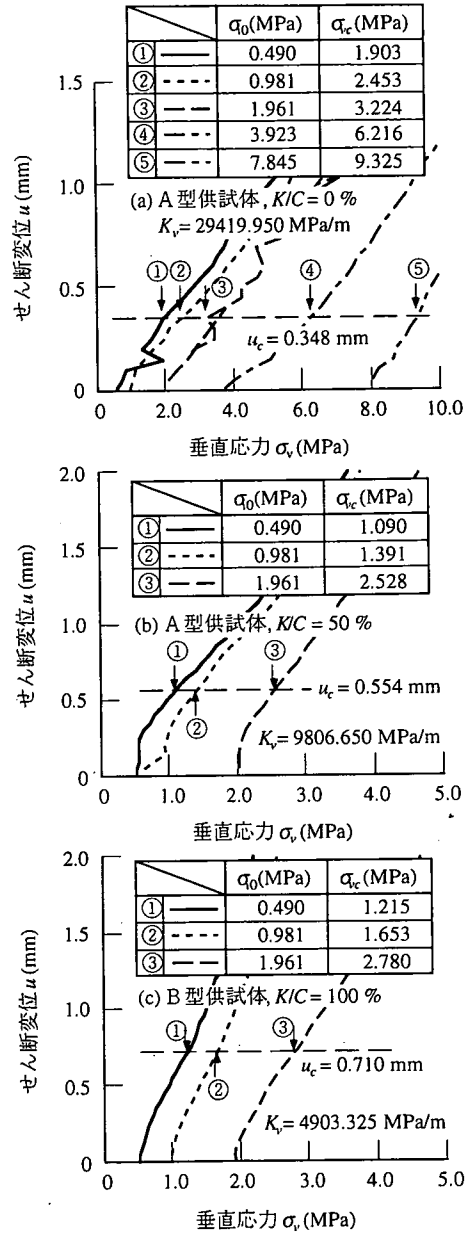


図-22 垂直応力 σ_v ~せん断変位 u 関係

は、実験に用いた σ_0 の値が大きすぎた可能性がある。よって、CNS 試験を実施するに当たり、 σ_0 には、その適用範囲に上限が存在している可能性があることを示唆している。

c) 母岩強度 σ_c の影響

図-24~図-27は、 K_v を 9806.650MPa/m として、 σ_0 を 0.490, 1.981, 1.961MPa、 σ_c を 37.498, 36.015, 20.718MPa と 3 種類変化させたときの CNS 試験結

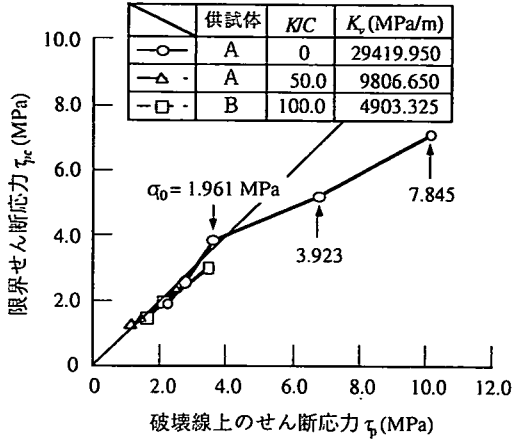


図-23 破壊線上のせん断応力 τ_p ~ 限界せん断応力 τ_{pc} 関係

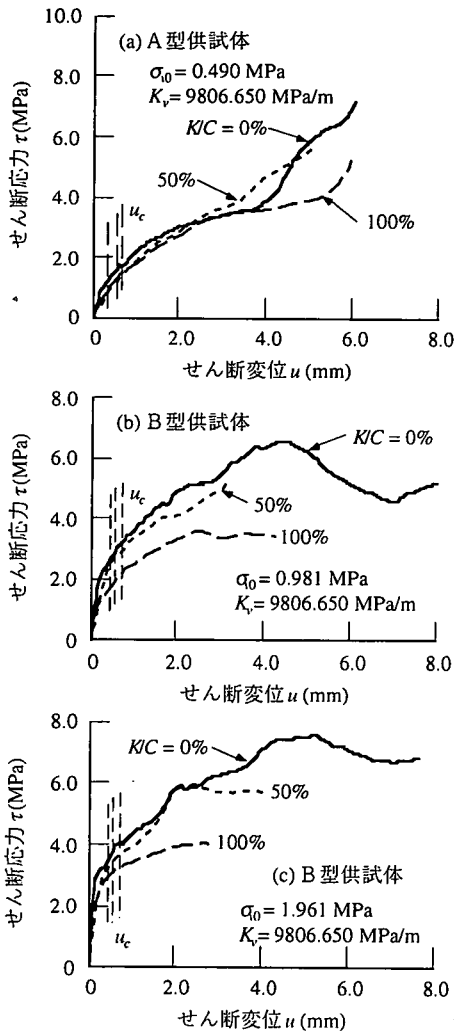


図-24 せん断変位 u ~ せん断応力 τ 関係

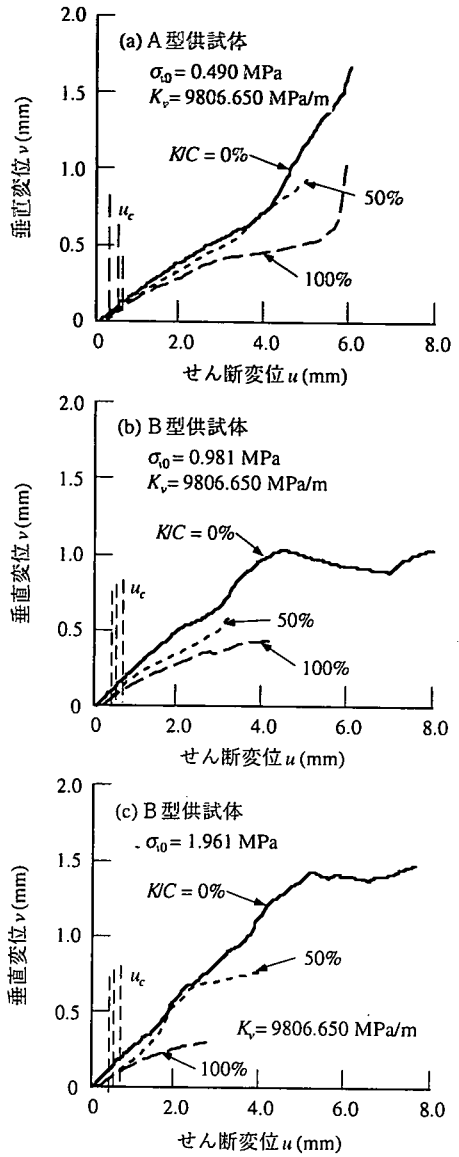


図-25 せん断変位 u ~ 垂直変位 v 関係

果である。

図-24に示す u ~ τ 関係に着目すると、 σ_{i0} が 0.490 MPa において、せん断変位が 4.0 mm まではその関係に顕著な違いが認められない。しかし、 σ_{i0} の大きさにかかわらず、 u_c まではその関係に顕著な違いが認められないものの、それ以上の変位においては σ_c が異なると明らかにその関係に違いが認められる。すなわち、 K/C が小さい程、換言すると、 σ_c が大きい程、 τ は大きく発現しており、 σ_c が小さくなる程、その値は低下する傾向があることがわかる。この原因については u ~ v 関係と共に論じる。

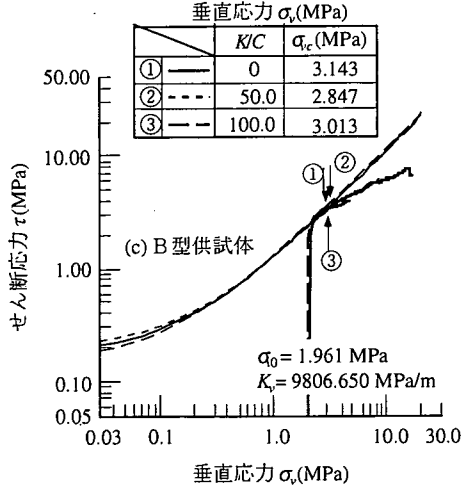
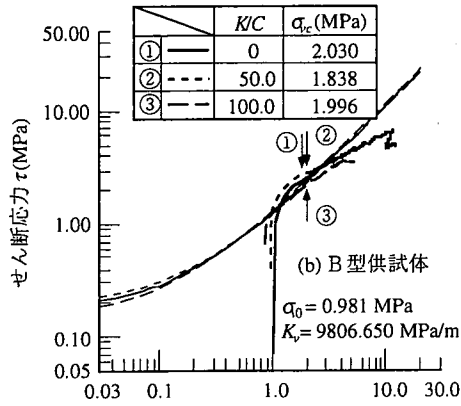
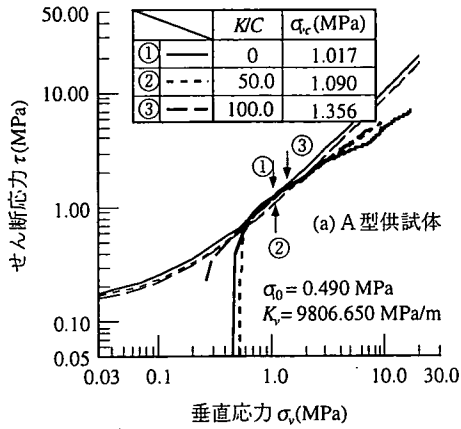


図-26 垂直応力 σ_v ~せん断応力 τ 関係

図-25に $u \sim v$ 関係を示す。この図からは $u \sim \tau$ 関係と同様に σ_c にかかわらず、 u_c まではその関係に顕著な違いが認められないが u_c 以上の変位においては K/C が大きい程、すなわち、 σ_c が小さくなる程、 v の発現が抑えられていることがわかる。これらの原因は次のように考えられる。前述したように、せん断によって与えられるエネルギー δE は、不連続面の凹凸を乗り越えてせん断するためのエネルギー δE_n と、不連続面を削るエネルギー δE_s とに大別される。よって、 $u \sim \tau$ 関係および $u \sim v$ 関係から、 u_c までのせん断挙動は、 σ_c の大きさにかかわらず、 δE_s や δE_n が等しく、その挙動に明確な差が現れないが、 u_c を越える領域から σ_c が大きくなればなる程、 δE_s が δE_n より大きくなるため、それらの関係に顕著な差が発現したと考えられる。

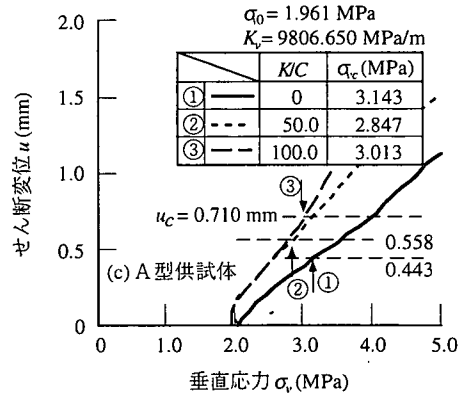
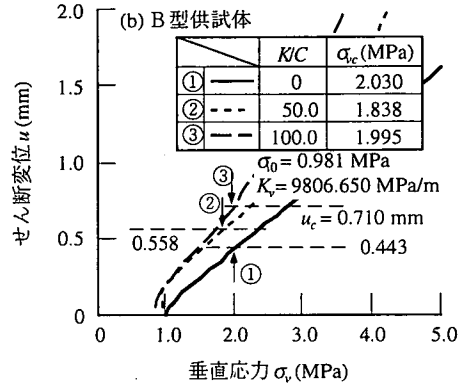
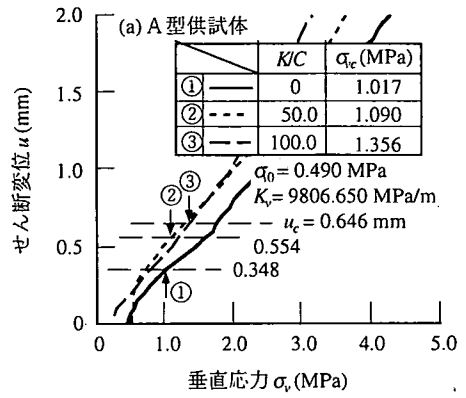


図-27 垂直応力 σ_v ~せん断変位 u 関係

図-26に示す $\sigma_v \sim \tau$ 関係に着目すると、 σ_{c0} の大き

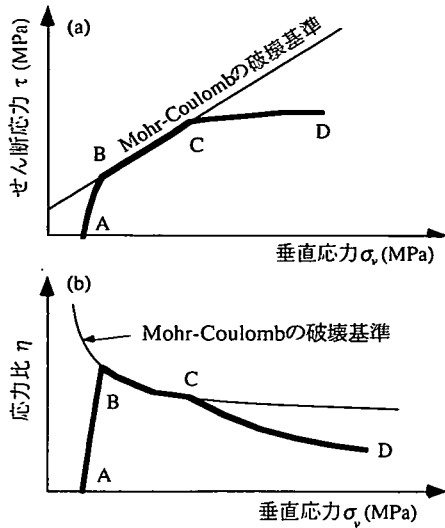


図-28 Mohr-Coulomb の破壊規準と応力経路の模式図

さに関係なく、同一経路を辿っていることがわかる。これについても、CNL 試験の結果を用いて考察する。

図-27 に示す $\sigma_v \sim u$ の関係に u_c を適用して、 σ_{vc} を求めると、その垂直応力までは σ_c にかかわらず、ほぼ同じ経路を辿っていることがわかる。また、 τ_{pc} はほぼ同じ値を示しており、 $\sigma_v \sim \tau$ 関係において、 σ_{vc} までは σ_c の影響はほとんど受けないことがわかる。

以上、CNS 試験における σ_{v0} 、 K_v および σ_c の影響について述べてきたが、これらのことから得られる知見は、本試験法を実施するに当たり、 σ_c に関係なく、 σ_{v0} を小さく設定し、 K_v をできる限り大きくする方が Mohr-Coulomb の破壊規準をより良く表現できることがわかった。

5. 強度定数 c, ϕ の推定法

一般に強度定数 c, ϕ は、種々の垂直応力下で複数個の実験を行った結果から、最小二乗法を用いて客観的に求めることができる。しかし、図-8 に示すような単一の CNS 試験結果において、式(1)を直接適用して c, ϕ を求める場合、主観的な要素を含み、その値に誤差を生じる可能性がある。よって、単一の CNS 試験結果から客観的に c, ϕ を求める方法を提案する必要がある。以下に、その方法について述べる。

岩盤不連続面のせん断挙動が Mohr-Coulomb の破

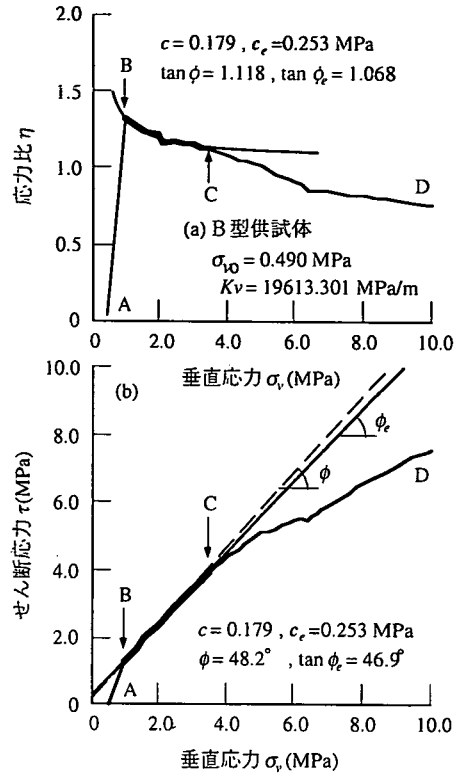


図-29 強度定数 c, ϕ の推定方法の一例

壊規準にしたがうと仮定すると、その関係式は式(1)のように表される。図-28 は Mohr-Coulomb の破壊規準と CNS 試験の垂直応力 σ_v ~ せん断応力 τ 関係を模式的に示したものである。図-28(a) に示す破壊規準を、応力比 $\eta (= \tau/\sigma_v)$ を用いて変換すると、図-28(b) に示すようにその関係は次式のように双曲線となる。

$$\eta = \frac{c}{\sigma_v} + \tan \phi \quad (7)$$

よって、図-28(b) に示すように計測値を $\sigma_v \sim \eta$ の関係で表し、そこから双曲線となっている BC 区間を取り出す事ができれば双曲線の曲率と漸近線から c, ϕ の値を推定できると考えられる。この変換により、応力経路が破壊線に達したところ、すなわち、 η の最大値が図中 B 点で表され、C 点は限界垂直応力 σ_{vc} と限界せん断応力 τ_{pc} で規定できるので、BC 区間は客観的に見定めることが可能である。

図-29 に $\sigma_v \sim \eta$ 関係の一例を示す。図-29(a) から図-29(b) に示す BC 区間を取り出して双曲線で近似したところ、見かけの粘着力 c_c は 0.253 MPa、内

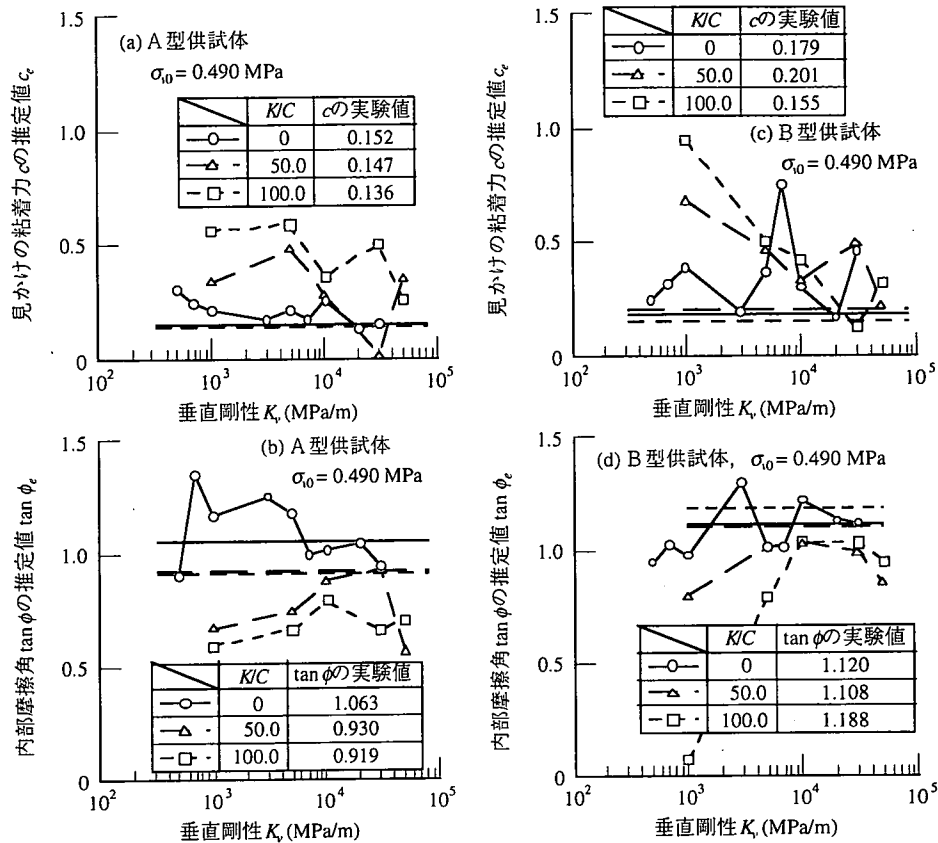


図-30 強度定数 c, ϕ の推定結果

部摩擦力 $\tan \phi_c$ は 1.068 となっており、CNL 試験から求められた値と比較すると、それらの値はよく推定されていると考えられる。

この方法を用いる場合、CNS 試験ではこれまでに述べたように、初期垂直応力 σ_0 を小さくし、垂直剛性 K_v を大きくすれば応力経路が破壊線上を移動する区間が長くなり、双曲線となる区間も長くなるので、双曲線を容易に取り出す事ができると考えられる。また、双曲線の区間が長い程、計測値のノイズ成分の影響が小さくなると考えられ、推定される c, ϕ の値の精度も向上すると考えられる。

図-30 に各供試体の σ_0 が 0.490 MPa であるものについて、上述した方法で推定した結果を示す。これらの図より、両推定値とも K_v を大きくしたものが CNL 試験から求めた値とよく合っており、上述の予測のように、 σ_0 が小さく K_v が大きい程、精度よく推定されていると考えられる。

以上のことから、適切な実験条件を与えると、この方法は単一の CNS 試験結果から c, ϕ を求める方法として有効であると考えられる。

6. 結論

本研究では CNS 試験において、初期垂直応力 σ_0 、垂直剛性 K_v および母岩強度 σ_c がせん断挙動に与える影響について考察を行い、不連続面の強度定数 c, ϕ を効率的に推定する方法を提案した。以下に本研究で得られた知見を述べる。

- ① CNS 試験において、せん断挙動に影響を与えるパラメータは σ_0, K_v および σ_c であり、その中でも K_v の設定値がより大きく影響することがわかった。
- ② 4. (2). a), b) で述べたように、CNS 試験結果において、 K_v の設定値が大きい程、もしくは、 σ_0 が小さい程、応力経路が Mohr-Coulomb の破壊線上を移動する区間が長くなることがわかった。また、 σ_0 が大きくなると、その応力経路は u_c に達するよりも早く残留状態に移行し、CNS 試験に適用できる σ_0 に上限が存在している可能性があることがわかった。

- ③ すべての実験結果の垂直応力 σ_c ~ せん断応力 τ 関係において、その応力経路が Mohr-Coulomb の破壊規準から残留状態に移行する点のせん断変位 u である限界せん断変位 u_c を用いることで、CNS 試験におけるせん断挙動を説明することができた。また、 u_c は CNL 試験におけるピークせん断応力に対する変位に相当すると仮定できることがわかった。
- ④ CNS 試験において u_c までのせん断挙動に着目すると、 σ_c はそのせん断挙動にほとんど影響を与えないことがわかった。
- ⑤ 単一の CNS 試験結果から客観的に c, ϕ を推定する方法として、応力比 η を用いた双曲線で近似する方法を提案した。その結果、その方法は c, ϕ を推定するのに適した方法であることがわかった。
- 以上、CNS 試験における各パラメータの影響や c, ϕ の推定方法について述べ、その試験方法の有効性を示した。今後の課題として、CNS 制御下における不連続面のせん断挙動はその面に作用する応力状態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。
- 2) 蔭 宇静, 棚橋由彦: 垂直剛性自動制御試験による不連続面のせん断強度評価, 資源素材学会 2002 年秋季大会講演集, pp.13~16, 2002.
 - 3) Ohnishi, Y. and Dharmaratne, P. G. R. : Shear behavior of physical models of rock joints under constant normal stiffness conditions, *Balkema, Rotterdam. ISBN. 1990.*
 - 4) 大西有三, Dharmaratne, P. G. R., 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.
 - 5) Amadei, B. and Wibowo, J. : Applicability of existing models to predict the behavior of rock joints under different boundary conditions, *Proceedings of the second international conference on analysis of discontinuous deformation*, 1997.
 - 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, 岩本宏, 西川直人: 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, 土木学会論文集, No.645 / III-50, pp. 307~320, 2000.
 - 8) Bro, A. : Failure of Stepped Joints : an Analysis and Comparison with a Measured Failure Geometry, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* , Vol.29, No.2, pp.179~186 , 1992.

参考文献

- 1) Kishida, K., Taniya, H., Nakashima, S. and Adachi, T. : Shear behavior of rock joints under constant normal stiffness conditions, *NARMS-TAC 2002, Mining and Tunneling Innovation and Opportunity*, Hammah et al. (eds), University of Toronto, pp. 53~61, 2002. 7.

(2002. 6. 6 受付)

METHODOLOGY FOR ESTIMATION OF THE STRENGTH OF ROCK DISCONTINUITIES BY USING SHEARING TESTS UNDER CONSTANT NORMAL STIFFNESS CONDITION

Takao YANO, Kazuo AOKI, Yuzo OHNISHI, Hiroyasu OHTSU,
Satoshi NISHIYAMA and Katsumi TAKAGI

In this paper, a shearing test was carried out under constant normal stiffness condition to understand the mechanical characteristics of discontinuities. By using the result of this test, we propose an efficient methodology to estimate the strength parameters c and ϕ , in case we assume the strength characteristics of discontinuities follow the Mohr-Coulomb's failure criterion. In addition, we discuss the effect of parameters such as roughness, initial normal stress and normal stiffness on the shearing behavior of discontinuities by comparing the results between the shearing test under constant normal stiffness condition and constant normal stress condition.