

岩盤不連続面の表面形状を考慮したせん断強度式

矢野隆夫¹・青木一男²・大西有三³・大津宏康⁴・西山 哲⁵・水田潤一⁶

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 関西電力 舞鶴火力建設所土木設計課 (〒625-0135 舞鶴市字千歳500)

岩盤の力学的挙動は、断層・破碎帯・亀裂等の不連続面のすべり破壊に支配されることが知られている。そして、その不連続面の強度特性を推定する方法として、Barton, Pattonの研究に代表されるように、不連続面自体の凹凸という幾何学的特性の影響に着目した岩盤不連続面の強度推定式が提案されてきた。しかし、これらの提案式の多くは、定量的に幾何学的特性を反映したものではないという問題点を内蔵している。このような観点から、本研究では様々な凹凸を有する供試体を対象とした垂直応力一定一面せん断試験結果での強度特性を、その面の粗さを表すために導入した統計的なパラメータと関連付けることにより、表面形状を考慮したせん断強度式を提案するものである。

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

1. はじめに

1950年代以降、ダム、トンネルおよび長大橋基礎などの大規模土木構造物の建設が増加し、岩盤構造物の設計・施工について、安全性および合理性が要求されるようになってきている。また、近年、地下発電所、原子力発電所の基礎、原油を始めとするエネルギーの地下貯蔵施設および高レベル放射性廃棄物の廃棄処理場等の岩盤を対象とした大型プロジェクトが計画・建設されるに至り、岩盤力学は飛躍的な発展を遂げてきた。

また、コンピュータの目覚ましい発達に伴って、岩盤挙動を把握するためにキープロック解析¹⁾や不連続変形法 (Discontinuous Deformation Analysis; DDA)²⁾、個別要素法 (Distinct Element Method; DEM)³⁾、マニフォールド法 (Manifold Method; MM)⁴⁾など数値解析が盛んに行われるようになってきている。例えば、キープロック解析は、岩盤の亀裂の走向・傾斜を測定することによって、幾何学的条件から確定的にあるいは確率的に岩盤の崩落位置が推定できる。しかし、これらの解析手法では、不連続面におけるせん断特性を、強度定数 c, ϕ が一定の凹凸

がない平滑な不連続面のものと仮定して扱っている。この理由として、現場では不連続面形状のデータが得難く、その面の強度・変形特性が十分に把握できないことなどが挙げられる。

当初、岩盤力学の研究は、土質力学の延長線上として連続体力学を基本としていた。しかし、福井県越前町や北海道豊浜トンネル坑口で発生した岩盤崩落事故^{5),6)}でも報告されているように、岩盤の挙動は岩盤不連続面上でのすべり破壊が卓越していることから、不連続性地盤や地下空間での不連続面の挙動を把握することが極めて重要であることが改めて認識されてきた。すなわち、大小様々な不連続面を有する岩盤において土木構造物の設計を行う場合、その不連続面の強度・変形特性を把握することは重要な問題となるわけである。

垂直応力一定一面せん断試験において、充填物を含まない新鮮な岩盤不連続面の強度・変形特性を決定する主要因は、その面の凹凸の大きさの程度 (ラフネス)、母岩強度、基本摩擦角およびその面に作用する垂直応力である。その中でも不連続面凹凸の幾何学的特性把握が最も重要な問題である⁷⁾。非常に滑らかな不連続面と粗い凹凸を有する不連続

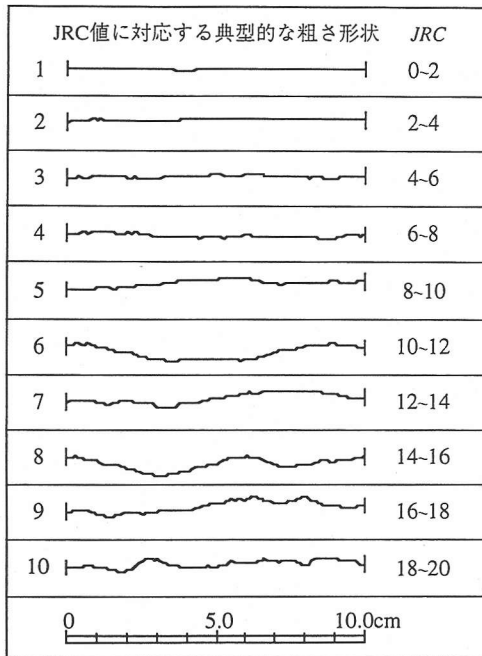


図-1 標準的な不連続面の粗さに対応する JRC

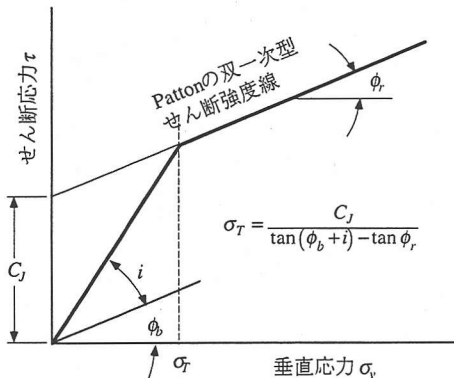


図-2 Patton の双一次型せん断強度式

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、その面の凹凸の大きさを求めることは強度・変形特性を考える場合に必要不可欠である。Barton and Choubey⁹⁾は不連続面の断面形状を図-1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として表し、この値を不連続面の粗さを表す指標とした。そして、そのJRCを用いて、垂直応力によるダイレイタンス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実

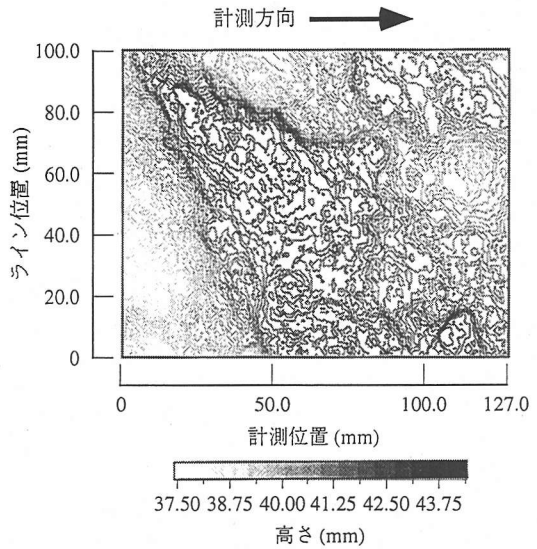


図-3 JRC の信頼性を検証するために用いた供試体の等高線図

験的なせん断強度式⁹⁾を提案している。また、Patton¹⁰⁾は図-2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、すべ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 として双一次型のせん断強度式を提案している。それに対し、Ladanyi and Archambault¹¹⁾は不連続面がせん断を受ける場合、実際にはすべ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、せん断強度に関してせん断強度式を提案している。この他にも、Jaeger¹²⁾やGoodman¹³⁾によって種々のせん断強度式が提案されている。

以上、従来のせん断強度式について述べてきたが、実際の岩盤不連続面の挙動がPatton式で双一次関係にあるとは保証されていないことや、Ladanyi and Archambaultの式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と、Barton式では、実際の不連続面のJRC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ことなど多くの問題点が存在している。そこで、著者らは不連続面の凹凸を計測し、岩盤不連続面の基本的な挙動をとらえるために垂直応力一定一面せん断試験を行うと共に、その面の粗さを表す統計的なパラメータを直接導入することによって、不連続面のせん断強度 τ_p を推定するせん断強度式を提案する。また、上述のせん断強度式には不連続面の凹凸の幾何学的な異方性を定量的

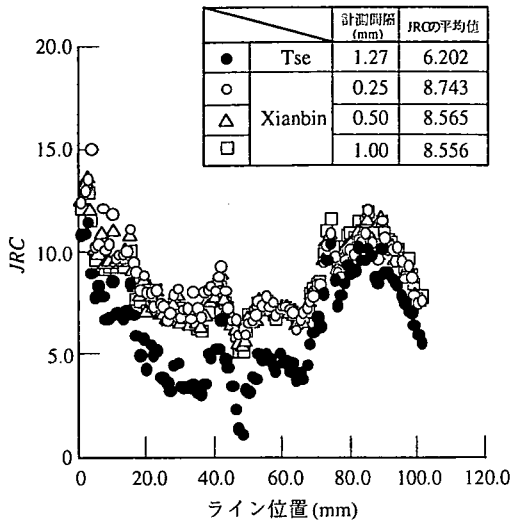


図-4 Tseらが提案した式で算出したJRCとXianbinらのJRCの比較

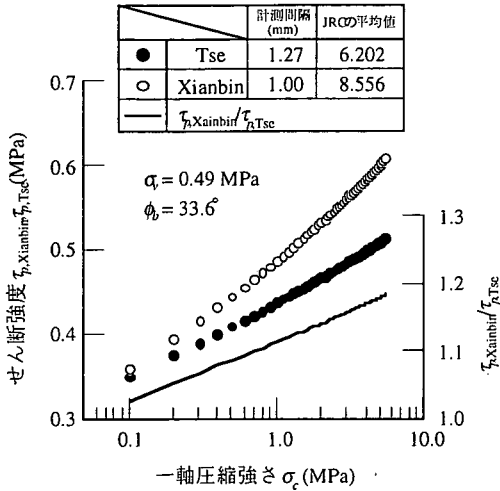


図-5 一軸圧縮強度とせん断強度の関係

に評価しているものはない。そこで、著者らが新たに提案したその不連続面の幾何学的な異方性を表すパラメータ $Z2_p$ ¹⁴⁾を導入することによって τ_p を推定するせん断強度式も合わせて提案する。

2. Bartonのせん断強度式とその問題点

不連続面の凹凸の幾何学的特性は、その面のせん断特性に影響を及ぼす要因である。従来から、多くの研究者によって不連続面の凹凸の大きさ、すなわちラフネス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

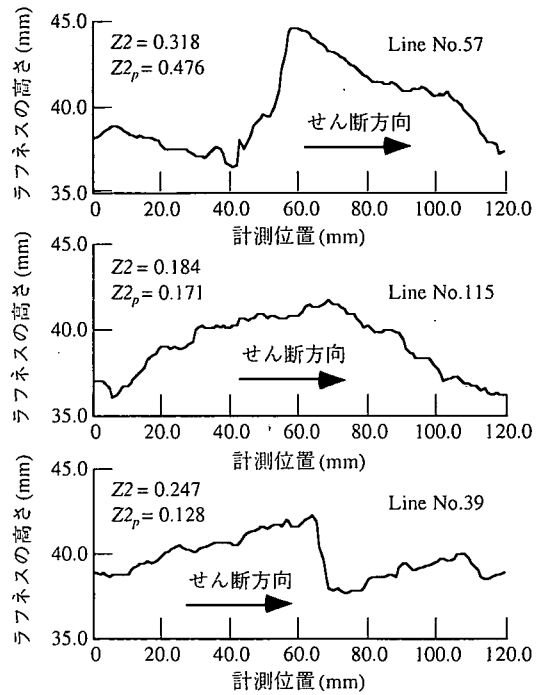


図-6 不連続面の異なる凹凸がラフネスパラメータに及ぼす影響

指標が提案されている。

前述したように、Bartonは岩盤不連続面の粗さをJRCで表し、充填物がない不連続面に対する実験的なせん断強度式を次式のように提案している。

$$\tau_p = \sigma_v \tan \left\{ JRC \log \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_v} \right) + \phi_b \right\} \quad (\sigma_v < \sigma_s) \quad (1)$$

ここに、 τ_p はせん断強度であり、 σ_v は垂直応力、 σ_s は不連続面の圧縮強度、 ϕ_b は基本摩擦角である。

一般的に τ_p を式(1)で計算する場合、不連続面の圧縮強度 σ_s は一軸圧縮強さ σ_c が代用される場合が多い。よって、本研究においても不連続面の圧縮強度は一軸圧縮強さをを用いるものとする。

式(1)を用いて不連続面のせん断強度を求める場合、目的の不連続面と図-1を比較してJRCを見定めることになるが、それは主観的にならざるを得ない。そこで、Tse and Cruden¹⁵⁾はBartonらのJRC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。

$$Z2 = \left[\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 M は計測点の数であり、 Δx_i は計測間隔 ($\Delta x_i=1.27\text{mm}$)、 Δy_i は不連続面の凹凸の高さである。

また、TseらはJRCとZ2には強い相関関係があるとして、主観的に決定したJRCの有効な確認方法として、次式を提案している。

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log Z2 \quad (3)$$

それに対し、Xianbin and Vayssad¹⁶⁾は各計測間隔におけるZ2とJRCの関係を以下のように与えている。

$$JRC = 60.32(Z2) - 4.51, \quad \Delta x = 0.25\text{mm} \quad (4)$$

$$JRC = 61.79(Z2) - 3.47, \quad \Delta x = 0.50\text{mm} \quad (5)$$

$$JRC = 64.22(Z2) - 2.31, \quad \Delta x = 1.00\text{mm} \quad (6)$$

ここに、 Δx は計測間隔である。

次に、Tseらの提案した式(3)から算出したJRCと、XianbinらのJRCを比較し、JRCの信頼性を検証する。図-3は検証に用いた供試体の表面形状の等高線図である。

図-4はTseらのJRCとXianbinらのJRCを比較したものである。図から明らかなように両者のJRC間には明らかな差があることが読み取れ、JRCにして平均で約2.4の差が認められる。この結果をふまえて、両研究者のJRCの差がせん断強度に如何に影響するかを述べる。一軸圧縮強さ σ_c と、式(1)にTseらのJRCの平均値(=6.202)とXianbinらのJRCの平均値(=8.556)を代入して求めたせん断強度 $\tau_{p,Tse}$ 、 $\tau_{p,Xianbin}$ の関係を図-5に示す。なお、計算に用いた σ_r は0.490 MPa、 ϕ_r は33.6°である。この図から、一軸圧縮強さ σ_c が小さい領域においては両者のせん断強度に大きな差は見られないが、一軸圧縮強さ σ_c が大きくなるにしたがってJRCの差がせん断強度に大きく影響することがわかる。

以上のことから、JRCは不確定な要素を含む値であると考えられ、JRCを用いてせん断強度を推定する場合、その値に大きな誤差を含む可能性があると考えられる。そこで、Z2などの統計的なパラメータを用いたせん断強度式を構築する必要があるが、式(2)では不連続面の凹凸の幾何学的な異方性を表現できない。

一般に、自然の岩盤不連続面の凹凸は幾何学的な異方性を有するものであり、この異方性とその面

のせん断挙動に大きく影響を及ぼすと考えられる。そこで本研究では、不連続面のせん断強度に支配的な凹凸を考慮するために、式(2)のZ2を応用して次のようなパラメータを考える。つまり、せん断に寄与すると思われるせん断方向の凹凸のみを考慮したもので、次式で表される。

$$Z2_p = \left[\frac{1}{M_p} \sum_{i=1}^{M_p} \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

ここで、 $\left(\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right)_p$ はせん断方向の正のアスペリティー角度の正接、 M_p はせん断方向の正のアスペリティー角度の個数である。なお、正のアスペリティー角とはせん断方向に対して傾斜角が反時計回りの方向を意味する。

図-6はその概念を示したものである。この図から、せん断方向に対して正のアスペリティー角が卓越する場合、 $Z2_p$ はZ2に比べて大きい値を示し、平均的な凹凸の場合にはZ2と $Z2_p$ はほぼ同じ値をとり、せん断方向に対し突出した凹凸が存在せず逆に窪んだ凹凸(負のアスペリティー角)が存在するとZ2に比べて $Z2_p$ は小さい値を示すことがわかる。そこで不連続面内の異方性を示すラフネスを表現したパラメータを次式のように表わす。

$$A_p = \frac{Z2_p}{Z2} \quad (8)$$

以上、Bartonのせん断強度式について述べてきたが、本研究では不確定な要素を含むJRCのかわりにZ2および $Z2_p$ を用いたせん断強度式を提案する。

3. 供試体の諸定数および実験条件

本研究に用いた供試体は一辺の長さが120.0mmの正方形供試体である。図-7に供試体の表面形状と、表-1に、供試体の材料定数と実験条件を示す。

表-1に示すように本研究では、表面形状の違う6種類の供試体(A~E供試体)を用意し、各供試体に対して4方向(EW,NS,SN,WE方向)、垂直応力5種類の垂直応力一定一面せん断試験を行った。また、母岩の一軸圧縮強さが岩盤不連続面の強度・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の重量含有比を0, 50.0, 100.0, 200.0, 300.0%とすることによって一軸圧縮強さを変化させ

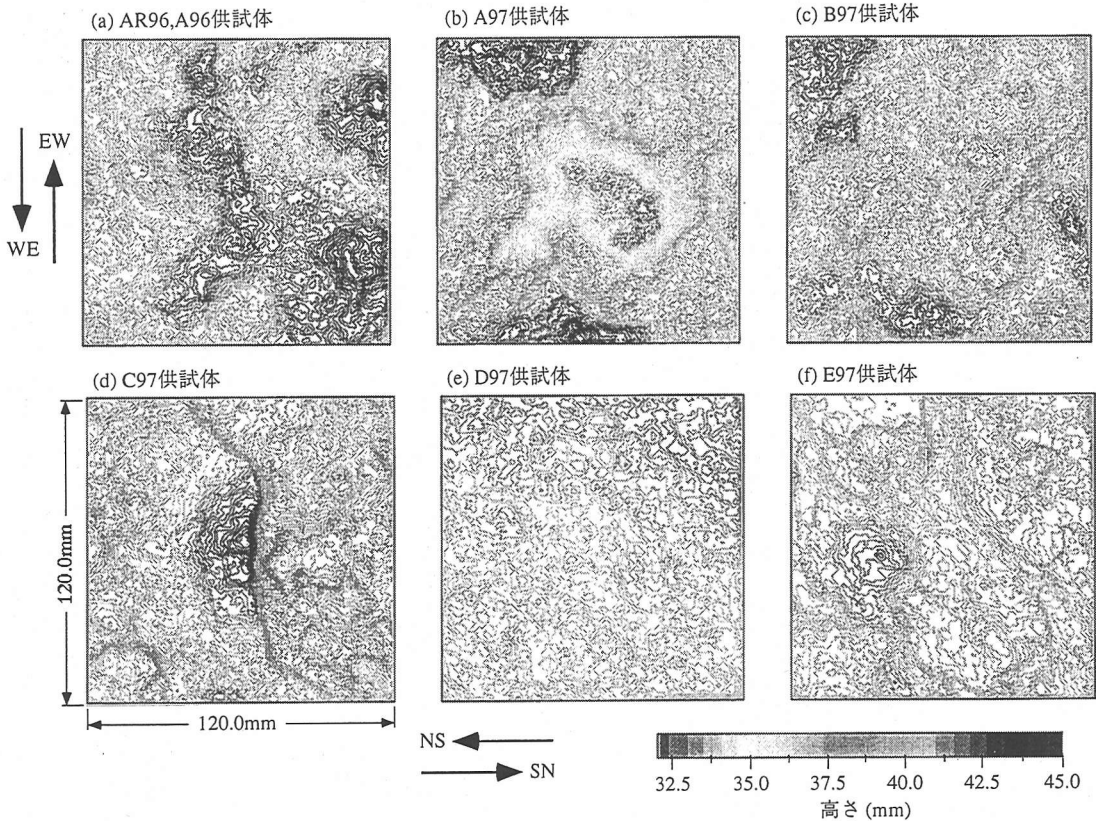


図-7 供試体の表面形状とせん断方向

た供試体を製作した。なお、表中の“供試体の種類”の/Hは1997年に実施した試験結果を、/Mは1999年に実施した試験結果を表す。

それと共に各供試体の基本摩擦角を求めるため、不連続面に凹凸のない平滑面を有する供試体（以下、平滑面供試体と呼ぶ）を材料強度ごとに準備した。

変位速度は、A96供試体/Hについては1.0mm/min、その他の供試体については0.1mm/minとした。なお、岩石一面せん断試験時のせん断速度依存性については参考文献14)に詳述してある。

不連続面の凹凸の幾何学的特性は、その面のせん断特性に影響を及ぼす要因であることはすでに述べた。そこで、不連続面の幾何学的特性を把握するために、供試体表面上をせん断方向、せん断方向に直交する方向の2方向についてそれぞれ格子状に1.0mm間隔で、最小スポット径0.1mmのレーザー変位計を搭載した装置を用いて不連続面の凹凸の計測を行った。よって、計測ライン数は120本、計測点数は1計測ライン当たり120点となっている。計測値はコンピュータで処理できる離散化されたラフ

ネスデータとしてフロッピーディスクに記録される。なお、供試体の作成方法、ならびに岩石一面せん断試験および不連続面の凹凸の計測方法については参考文献17)に詳述している。

表中のZ2およびZ2_pは計測間隔が1.0mmの計測値を用いて計算したものであり、JRCはXianbinらの式の内、計測間隔1.0mmに対応する式(6)を用いて計算したものである。なお、JRC、Z2およびZ2_pは全計測ラインの平均値を代表値としている。また、表中のZ2は本来ならばEW方向とWE方向や、NS方向とSN方向は一致していなければならないが、本研究では実験条件によって供試体数が異なっており、それらの供試体の平均値を用いているために一致していない。

図-8は各供試体の不連続面の異方性を表すパラメータA_pを示したものである。図から明らかなように、本研究で用いた供試体の内、C97供試体のNS,SN方向の値が突出しており、ラフネスの異方性が顕著である供試体であることを示している。その他の供試体については多少の異方性を示すが、顕著

表-1 供試体の材料定数と実験条件

供試体の種類	カオリン含有率 K/C (%)	垂直応力 σ_v (MPa)	一軸圧縮強さ σ_c (MPa)	基本摩擦角 ϕ_b (度)	Z2	Z2p	A _p	JRC	実験本数
A96EW/M	0.0	0.098	37.498	37.5	0.196	0.192	0.976	10.293	14
	50.0	0.490	36.015	36.4					12
	100.0	0.980	20.718	34.8					13
	200.0	1.960	10.793	37.4					6
	300.0	3.980	7.585	38.4					3
A96EW/H	0.0	0.490	52.626	33.6	0.196	0.192	0.976	10.293	4
A96NS/H		0.980			0.183	0.196	1.071	9.465	5
A96SN/H		1.470			0.186	0.195	1.048	9.616	5
A96WE/H		1.960			0.184	0.193	1.049	9.508	5
		3.920							
A96WE/M	0.0	0.098	37.498	37.5	0.184	0.193	1.049	9.508	7
	50.0	0.490	36.015	36.4					7
	100.0	0.980	20.718	34.8					7
	200.0	1.960	10.793	37.4					4
	300.0	3.980	7.585	38.4					5
A96WE/H	0.0	0.980	52.626	33.6	0.184	0.193	1.049	9.508	5
	50.0	0.294	14.504	31.6					5
	100.0	0.490	7.546	32.9					5
	200.0	0.686	3.136	35.0					3
	300.0	0.980	1.823	35.0					5
A97EW/M	0.0	0.098	37.498	37.5	0.267	0.258	0.966	14.833	4
	50.0	0.490	36.015	36.4					5
	100.0	0.980	20.718	34.8					5
	200.0	1.960	10.793	37.4					5
	300.0	3.980	7.585	38.4					5
A97EW/H	0.0	0.490	52.626	33.6	0.267	0.258	0.966	14.833	5
A97NS/H		0.980			0.282	0.265	0.940	15.832	5
A97SN/H		1.470			0.270	0.274	1.015	15.001	5
A97WE/H		1.960			0.261	0.268	1.027	14.479	5
		3.920							
A97WE/M	0.0	0.098	37.498	37.5	0.261	0.268	1.027	14.479	13
	50.0	0.490	36.015	36.4					12
	100.0	0.980	20.718	34.8					13
	200.0	1.960	10.793	37.4					4
	300.0	3.980	7.585	38.4					5
B97EW/H	0.0	0.490	52.626	33.6	0.201	0.207	1.030	10.616	5
B97NS/H		0.980			0.209	0.214	1.024	11.088	5
B97SN/H		1.470			0.224	0.227	1.013	12.102	5
B97WE/H		1.960			0.197	0.197	1.000	10.318	5
		3.920							
C97EW/H	0.0	0.490	52.626	33.6	0.223	0.220	0.987	12.001	5
C97NS/H		0.980			0.234	0.296	1.265	12.711	5
C97SN/H		1.470			0.237	0.180	0.759	12.897	5
C97WE/H		1.960			0.205	0.207	1.010	10.850	5
		3.920							
D97EW/H	0.0	0.490	52.626	33.6	0.126	0.136	1.079	5.761	5
D97NS/H		0.980			0.105	0.108	1.029	4.404	5
D97SN/H		1.470			0.103	0.103	1.000	4.325	5
D97WE/H		1.960			0.117	0.104	0.889	5.223	5
		3.920							
E97NS/M	0.0	0.098	37.498	37.5	0.147	0.141	0.959	7.119	5
	50.0	0.490	36.015	36.4					7
	100.0	0.980	20.718	34.8					4
	200.0	1.960	10.793	37.4					5
	300.0	3.980	7.585	38.4					5
E97SN/M	0.0	0.098	37.498	37.5	0.154	0.165	1.071	7.557	12
	50.0	0.490	36.015	36.4					14
	100.0	0.980	20.718	34.8					13
	200.0	1.960	10.793	37.4					6
	300.0	3.980	7.585	38.4					5
E97EW/H	0.0	0.490	52.626	33.6	0.141	0.124	0.879	6.729	4
E97NS/H		0.980			0.147	0.141	0.959	7.119	5
E97SN/H		1.470			0.154	0.165	1.071	7.557	5
E97WE/H		1.960			0.141	0.148	1.050	6.771	5
		3.920							

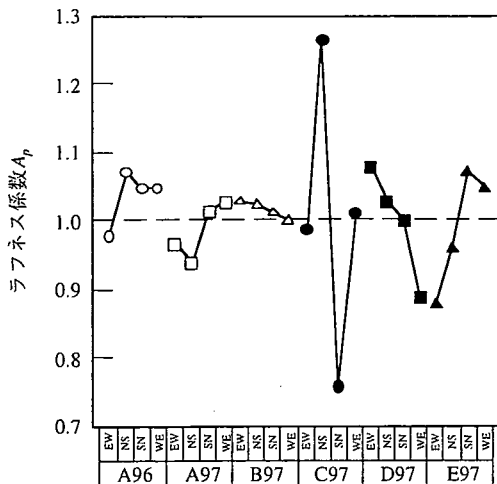


図-8 各供試体のラフネス係数 A_p

な異方性がない供試体であることがわかる。

4. せん断強度式の定量化

(1) Z2を用いたせん断強度式

不連続面に凹凸のない供試体のせん断特性は、実際に平滑面供試体を作製し、一面せん断試験を実施することによって容易に求められる。しかし、不連続面の凹凸に起因するせん断特性については、その凹凸の幾何学的特性とその面のせん断中における削れ特性を考慮しなくてはならず容易には求められない。

Bartonのせん断強度式(式(1))や、図-9に示すように、不連続面のせん断強度 τ_p は平滑面供試体のせん断強度 $\tau_{p,s}$ と、不連続面の凹凸に起因するせん断強度 $\tau_{p,r}$ に分離することができる。

$$\tau_p = \tau_{p,r} + \tau_{p,s} \quad (9)$$

よって、不連続面の凹凸のみに起因する $\tau_{p,r}$ は次のように与えられる。

$$\tau_{p,r} = \tau_p - \tau_{p,s} \quad (10)$$

$$\tau_{p,s} = \sigma_v \tan \phi_b \quad (11)$$

なお、本研究では不連続面の凹凸がその面のせん断強度に及ぼす影響について議論することを目的としているため、 $\tau_p < \tau_{p,s}$ の領域については議論の対象としない。

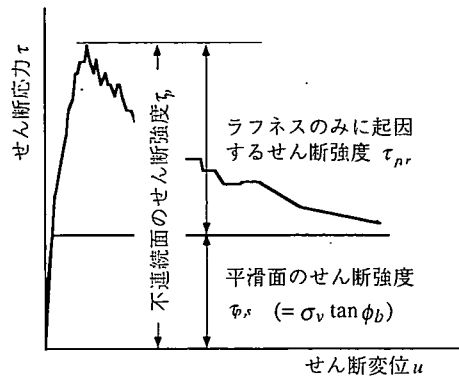


図-9 本研究に用いるせん断強度

前述したように、岩盤不連続面の強度・変形特性を決定する主な要因は、①その面のラフネス、②母岩強度、③基本摩擦角および④その面に作用する垂直応力であり、せん断強度は式(10)で定義できるので、③は除外できる。せん断過程において、残る①、②、④の要因は個々に発揮されるものではなく、複雑に関連して作用するものである。よって、 $\tau_{p,r}$ に寄与する値を λ とし、①、②、④の要因を用いて以下のように定義する。ただし、①のラフネス係数は式(2)で示したZ2を用いるものとする。

$$\lambda = Z2 \log \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_v} \right) \quad (12)$$

ここに、 σ_c は一軸圧縮強さである。

パラメータ λ の物理的な意味づけとしては次のように考えられる。不連続面に作用する垂直応力が大きい場合や、同一垂直応力下でも不連続面を含む母岩の強度が弱い場合、その面の凹凸が削られる量は大きくなることは明らかである。すなわち、せん断過程において、せん断応力の発現の仕方は、垂直応力が小さい程、母岩の強度が強い程、不連続面の凹凸の影響を大きく受けることが明らかであり、式(12)はそれらを加味したパラメータである。

以下、この $\tau_{p,r}$ および λ を用いてせん断強度式を誘導する。

図-10にA96供試体における σ_v と $\tau_{p,r}$ の関係を示す。図-10(a)は同一不連続面形状においてせん断方向が $\tau_{p,r}$ に如何に影響するかを示しており、図-10(b),(c)は同一供試体、同一せん断方向において母岩強度が如何に影響するかを表している。これらの図より、 σ_v と $\tau_{p,r}$ には両対数グラフにおいて直線関係があることがわかる。また、図-10(a)から明らかかなように、 $\tau_{p,r}$ の大きさはNS,SN方向には大き

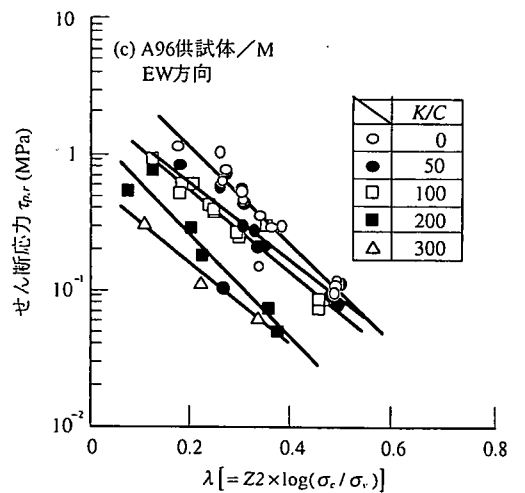
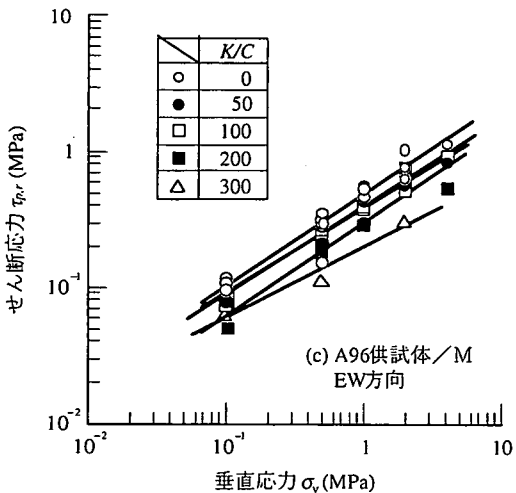
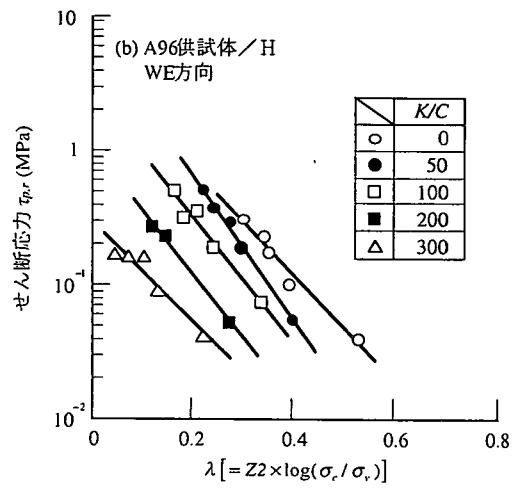
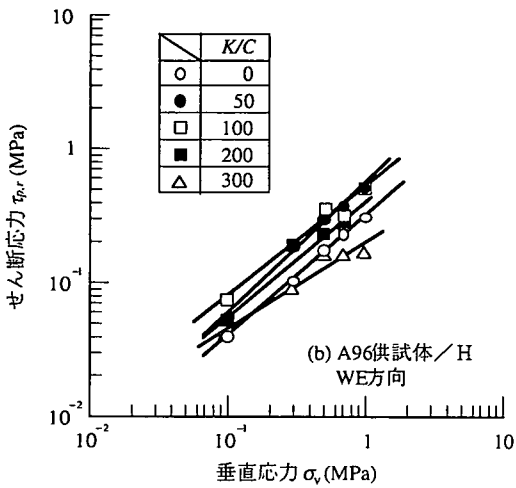
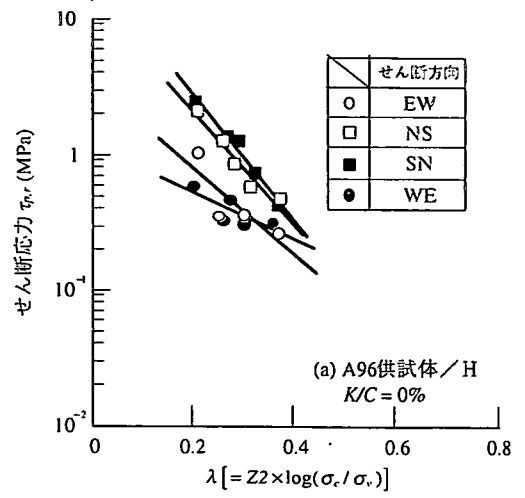
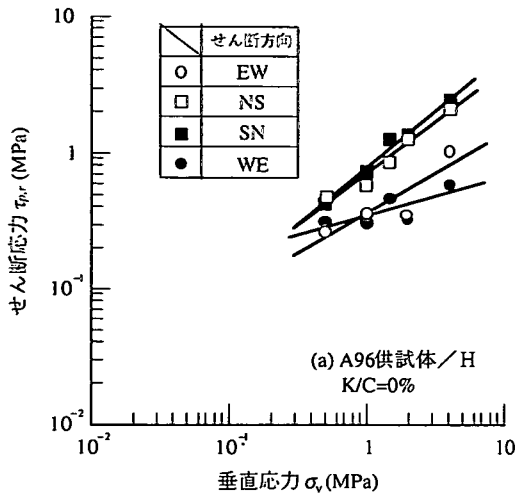


図-10 $\sigma_v \sim \tau_r$ 関係 (A96 供試体)

図-11 $\lambda \sim \tau_r$ 関係 (A96 供試体)

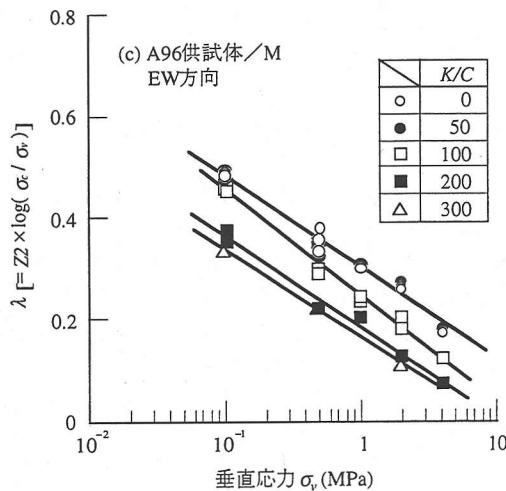
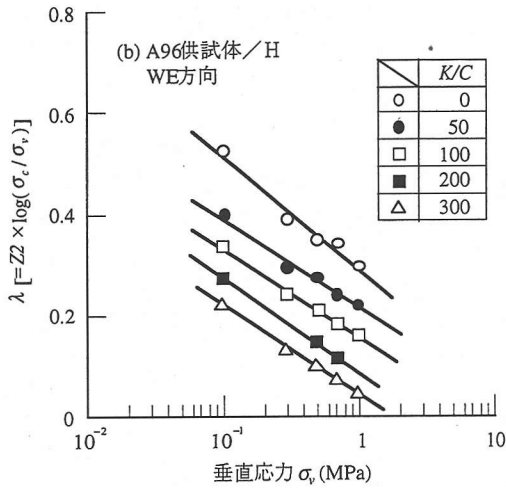
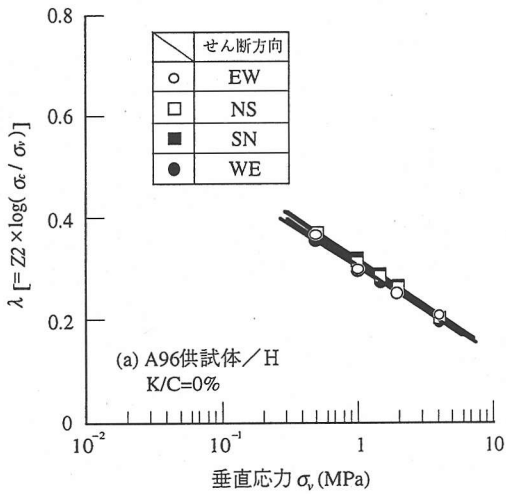


図-12 垂直応力 $\sigma_v \sim \lambda$ 関係 (A96 供試体)

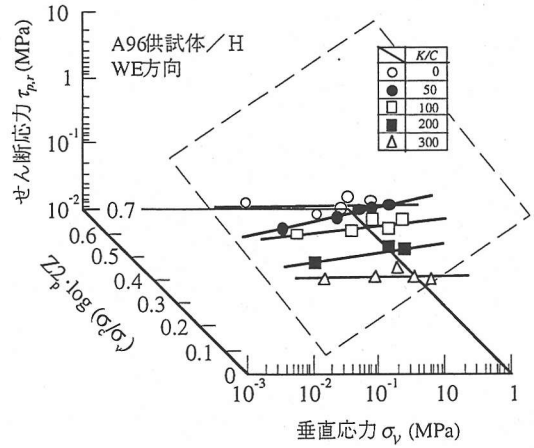


図-13 $\sigma_v \sim \tau_{p,r} \sim \lambda$ 関係 (A96 供試体)

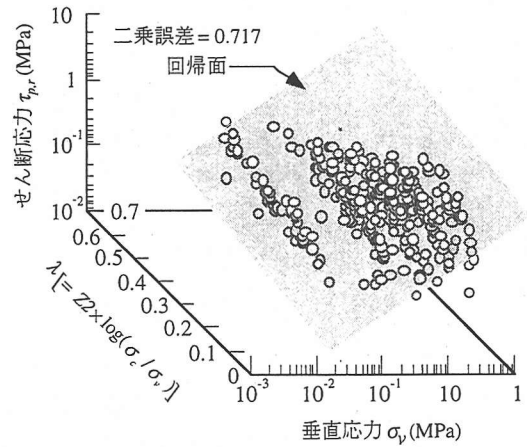


図-14 全供試体の $\sigma_v \sim \tau_{p,r} \sim \lambda$ 関係

な差が認められないが、EW、WE方向においては大きく異なっている。このことは、不連続面の凹凸の幾何学的な異方性がせん断挙動に大きく影響していることを表しており、その異方性を表現できないJRCを用いて τ_p を正確に表現することはできないことを示唆している。図-10(b),(c)からは、母岩強度が小さくなるほど $\tau_{p,r}$ は小さくなっており、母岩強度が小さいほど不連続面の凹凸を削るのに必要な力が小さいという傾向を示している。

図-11に λ と $\tau_{p,r}$ の関係を示す。これらの図より、 λ と $\tau_{p,r}$ には片対数グラフにおいて直線関係があることがわかる。また、 σ_v と $\tau_{p,r}$ の関係と同じように、不連続面の凹凸の幾何学的な異方性や母岩強度が岩盤不連続面のせん断特性に大きく影響することがわかる。

図-12に σ_v と λ の関係を示す。これらの結果は、

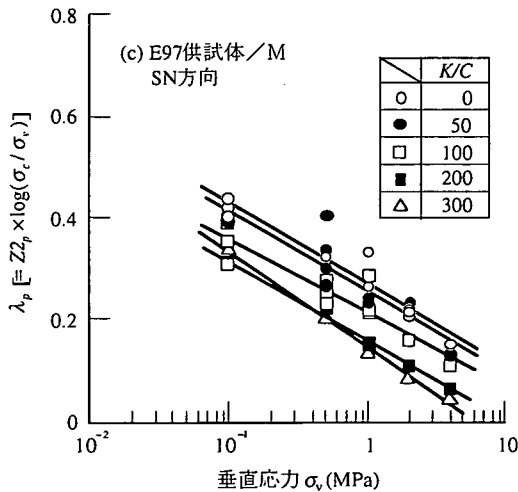
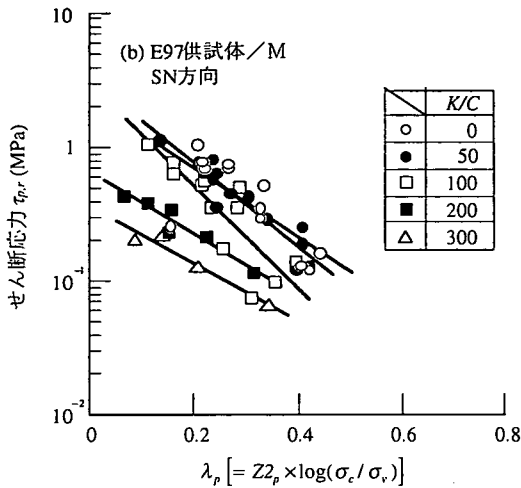
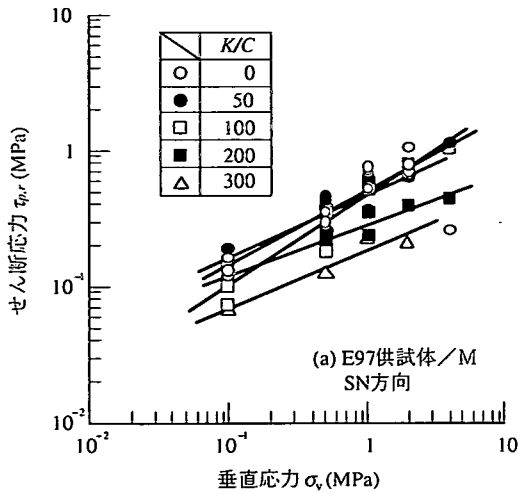


図-15 計測結果 (E97 供試体/M)

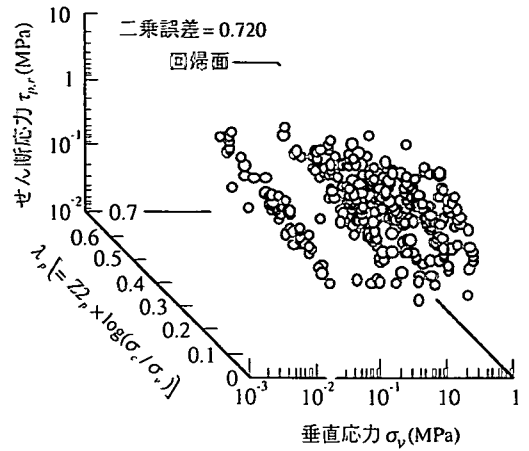


図-16 全供試体の \$\sigma_v \sim \tau_{pr} \sim \lambda_p\$ 関係

式(12)からも推測できるが、 σ_v と λ には片対数グラフにおいて直線関係があることがわかる。

以上の事柄は、 σ_v と τ_{pr} と λ は三次元空間上で直線関係があり、それらの関係はある平面を形成していることを示唆している。図-13はA96供試体/HのWE方向の σ_v と τ_{pr} および λ をプロットしたものであり、図から明らかなようにそれらの関係は三次元空間においてもほぼ直線関係があることがわかる。

以上の結果から、全供試体(366個)の σ_v と τ_{pr} および λ を三次元空間上で回帰を行ったところ、図-14のような結果が得られた。この回帰面の関係は次式のように表される。

$$\log \tau_{pr} = \alpha \log \sigma_v + \beta \lambda - \chi \quad (13)$$

ここに、 α, β, χ は実験結果から求められる定数であり、本研究では $\alpha=0.663, \beta=0.822, \chi=0.667$ となっている。よって、不連続面のせん断強度 τ_p を求める場合、対象とする不連続面のラフネス係数 $Z2$ を計測し、その面に作用する垂直応力 σ_v と一軸圧縮強さ σ_c を求めることによって、 τ_{pr} が計算できる。 τ_{pr} が計算できれば式(9)より、不連続面のせん断強度 τ_p を計算することができる。

式(13)の問題点は、式の構造上から明かなように、平滑面供試体($Z2_p=0, \lambda=0$)においてもいくらかの τ_{pr} が算出されることである。ただし、ここでの議論は、不連続面の凹凸がその面のせん断強度に及ぼす影響について注目することであるため、本提案式では τ_{pr} の下限値については除外する。

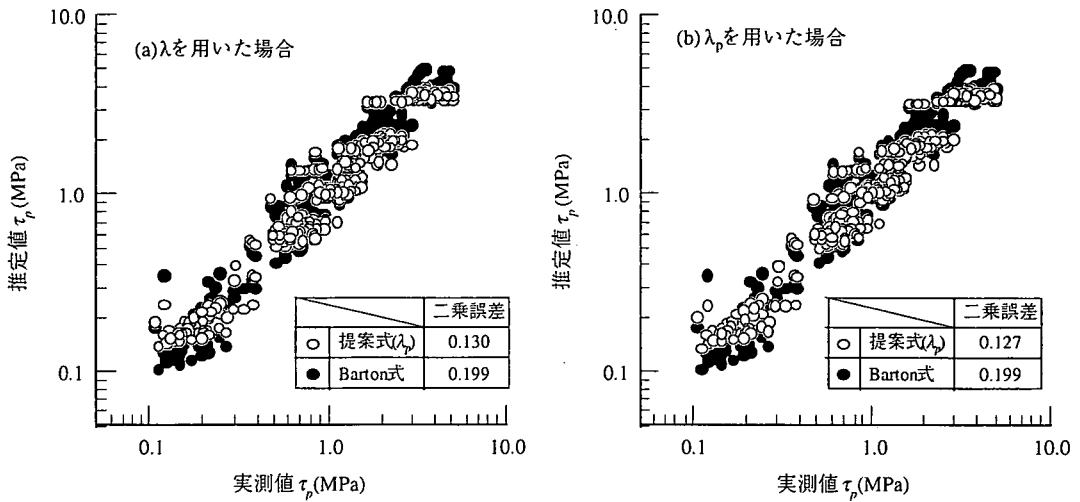


図-17 推定結果の比較（全供試体）

(2) Z_2 を用いたせん断強度式

次に、著者らが新たに提案した不連続面の凹凸の幾何学的な異方性を表すパラメータ Z_2 を用いたせん断強度を誘導する。

式(12)と同様に、 $\tau_{p,r}$ に寄与する値を λ_p とし、上述した①、②、④の要因を用いて以下のように定義する。

$$\lambda_p = Z_2 \log \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_v} \right) \quad (14)$$

図-15にE97供試体/MのSN方向における実験結果を示す。これらの図からは、図-15(a)の $\sigma_v \sim \tau_{p,r}$ 関係には両対数グラフにおいて直線関係が、図-15(b)の $\lambda_p \sim \tau_{p,r}$ 関係と図-15(c)の $\sigma_v \sim \lambda_p$ 関係には片対数グラフにおいて直線関係があることがわかる。よって、このことは図-14と同様に、 σ_v と $\tau_{p,r}$ と λ_p は三次元空間上で直線関係があり、それらの関係はある平面を形成していることを示唆している。以上の結果から、全供試体の σ_v と $\tau_{p,r}$ および λ_p を三次元空間上で回帰を行ったところ、図-16のような結果が得られた。この回帰面の関係は次式のように表される。

$$\log \tau_{p,r} = \alpha_p \log \sigma_v + \beta_p \lambda_p - \chi_p \quad (15)$$

ここに、 $\alpha_p, \beta_p, \chi_p$ は実験結果から求められる定数であり、 $\alpha_p=0.678, \beta_p=0.904, \chi_p=0.691$ となっている。

5. 推定結果

せん断強度式は、あらゆる条件の供試体に対して適用できなければならない。そこで、本提案式の有効性を検証するために、全供試体の実測値と本提案式で求めた結果およびBarton式で求めた結果を比較する。

図-17は全供試体に対して、実測値と式(13)と式(15)を用いて推定した値を比較したものである。この図からは、両推定結果に優位な差が見られないが、二乗誤差を比較すると、 Z_2 を用いた提案式では約0.130、 Z_2 を用いた式では約0.127、Barton式では約0.199となっている。

次に、4.で示した岩盤不連続面の強度・変形特性を決定する主な要因の内、①、②について、本提案式がどのように適用しうるかを述べる。

(1) 不連続面の凹凸の幾何学的な異方性が顕著でない場合の適用性

不連続面の凹凸の幾何学的な異方性が顕著でない供試体に対して、本提案式がどのように適用しうるかを検証するため、同一母岩強度をもつ供試体について τ_p の推定を行った。

図-18はA96供試体/Hにおけるせん断強度の実測値と推定値を比較したものである。図から明らかのように、図-18(a)のEW方向および図-18(d)のWE方向は本提案式が、その他の方向はBarton式の方がより良く一致しているものの、全体的には本提案式とBarton式には大きな差がなく、応力経路を

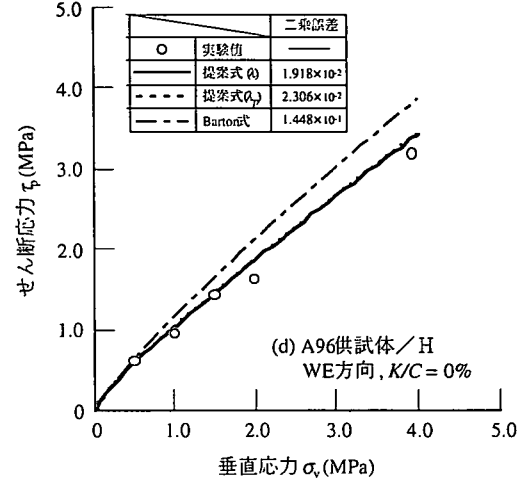
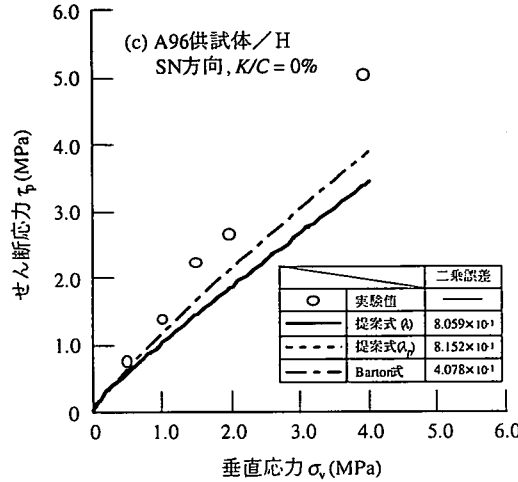
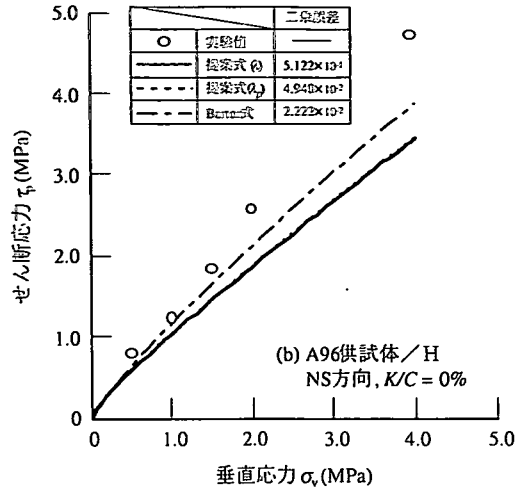
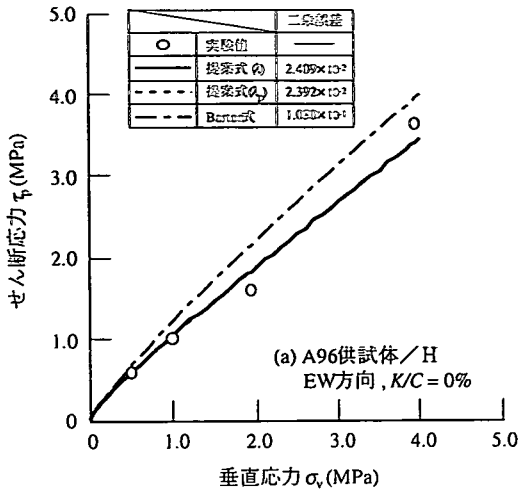


図-18 推定結果 (A96 供試体)

良く表現していることがわかる。また、本提案式における両推定結果を比較すると、その結果にはほとんど差が見られない。このことから、A96 供試体/Hは表-1 および図-8 からわかるように、不連続面の凹凸の幾何学的な異方性が顕著でない供試体であり、このような場合はどちらの推定式を用いても応力経路をより良く表現できることがわかった。

(2) 不連続面の凹凸の幾何学的な異方性が顕著な場合の適用性

不連続面の凹凸の幾何学的な異方性が顕著な供試体に対して、本提案式がどのように適用しうるかを検証するため、ここでも同一強度をもつ供試体について τ_p の推定を行った。

図-19 は C97 供試体/Hにおける実測値と推定値を比較したものである。この図からは、図

-19(c)のNS方向ではBarton式が良く一致しているが、他の三方向については本提案式の方がより良く一致していることがわかる。本提案式における両推定結果を比較すると、 Z_2 を用いた提案式の方が良く表現していることがわかる。このことから、C97 供試体/Hは表-1 および図-8 から明らかなように、不連続面の凹凸の幾何学的な異方性が顕著な供試体であり、このような場合は異方性を考慮した式を用いて推定する方が、より良い推定結果を得られることがわかった。

(3) 母岩強度が異なる場合の適用性

ここでは、母岩強度が異なる供試体に対して、本提案式がどのように適用しうるかを検証するため、同一ラフネスを有する供試体について τ_p の推定を行った。

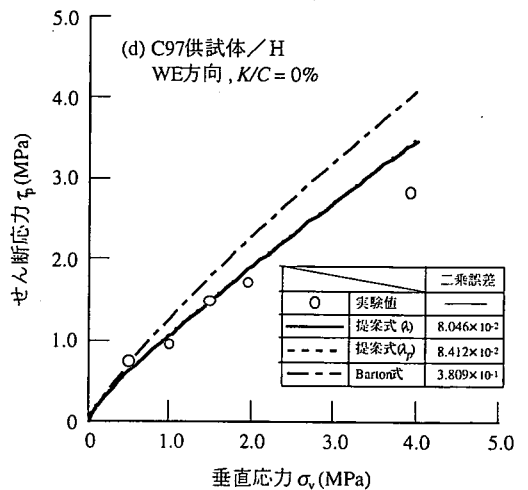
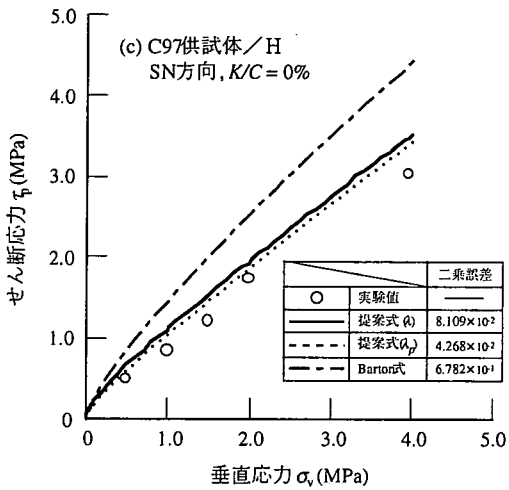
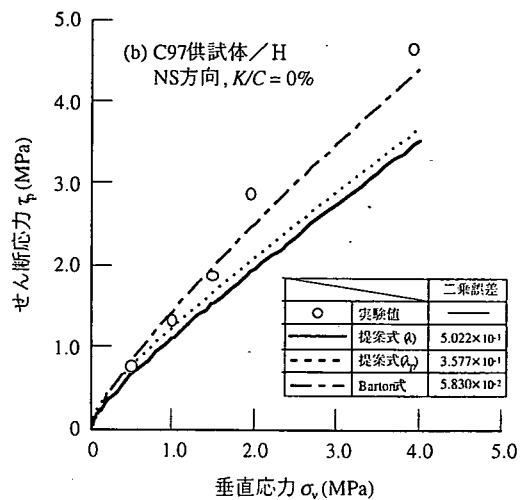
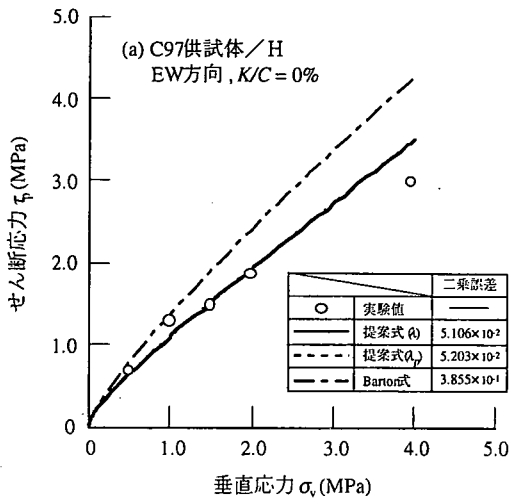


図-19 推定結果 (C97 供試体)

図-20はE97供試体/Mにおける実測値と推定値を比較したものである。図から明らかなように、母岩強度が異なる供試体に対しても本提案式は良く表現できることがわかる。次に、本提案式における両推定結果を比較すると、その結果にはほとんど差が見られないことから、せん断方向が同じ場合はどちらの推定式を用いても応力経路をより良く表現できることがわかる。

6. 結論

著者らは従来の研究者と同様に、不連続面のせん断挙動をその面に凹凸を含まない材料自身の特性と、凹凸に起因する特性について分離し、その面のせん断強度 τ_p を総合的に論じてきた。しかし、

従来の研究では不連続面の凹凸の幾何学的な異方性について定量的に論じているものは皆無である。そこで、それらの問題を解決する方法として、著者らが新たに提案した不連続面の凹凸の幾何学的な異方性を表すパラメータ $Z\phi_p$ を導入することによって、不連続面のせん断強度 τ_p を推定するせん断強度式を述べてきた。以下に本研究で得られた知見を述べる。

- ① Bartonのせん断強度式を用いる場合の JRC は、図-1を用い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。また、 JRC の有効な確認方法として提案されているTseらの式とXianbinらの式では、図-4に示すようにその値の評価が大きく異なっている。よって、 JRC を用いてせん断強度を推定することは、その値に大きな誤差を含む可能性があることがわかった。

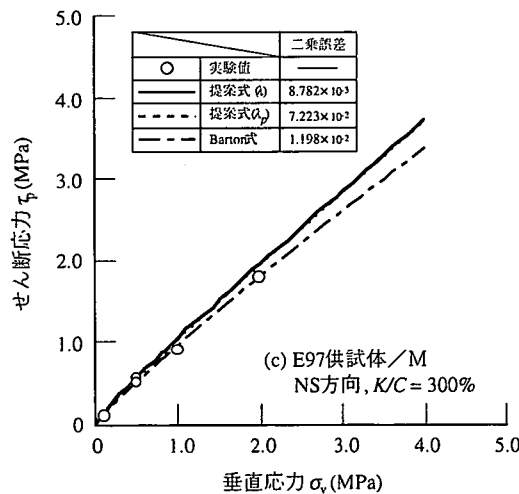
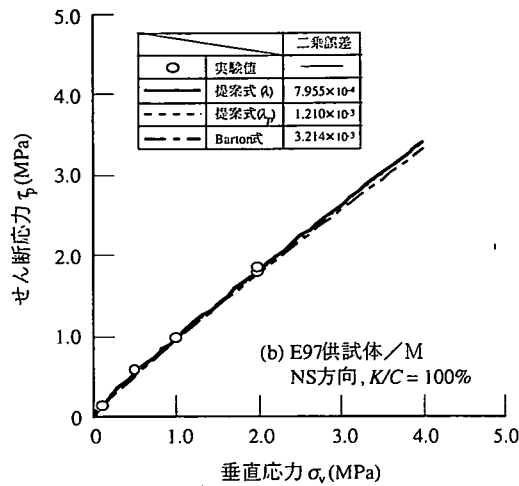
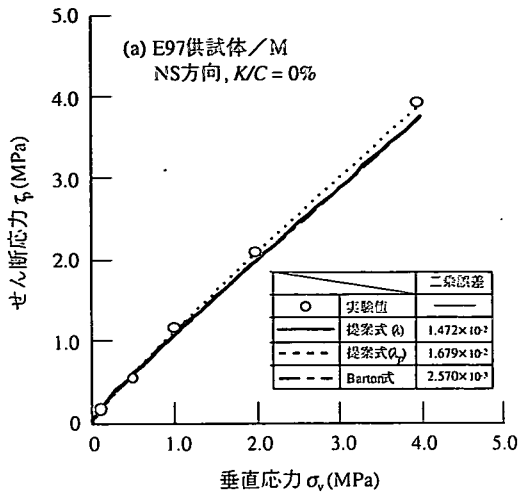


図-20 推定結果 (E97 供試体)

② Bartonのせん断強度式において、TseらとXianbinらによって評価の異なるJRCを用いてせん断強度を推定する場合、その推定結果に対するJRCの感度は、一軸圧縮強さ σ_c が大きくなるにしたがってせん断強度に大きく影響することがわかった。

③ 不連続面の凹凸の幾何学的な異方性が顕著でない供試体に対して、 σ_v と $\tau_{p,r}$ および λ は三次元空間はある平面を形成していることがわかった。よって、それらの値を三次元空間上で回帰を行ったところ、式(13)に示すような有用なせん断強度式を誘導することができた。また、不連続面凹凸に幾何学的な異方性が顕著な供試体に対しては、 σ_v と $\tau_{p,r}$ および λ_p は三次元空間上で直線関係があり、なおかつ、それらの関係はある平面を形成していることがわかった。よって、それらの値を三次元空間上で回帰を行ったところ、式(15)に示すような有用なせん断強度式を誘導することができた。

④ 垂直応力一定下において、本提案式を適用することにより、本研究で行った条件下では不連続面のせん断強度を表現することができた。以上、不連続面の凹凸の幾何学的な特性や異方性を考慮したせん断強度式を述べてきたが、以下に本提案式の問題点を述べる。

① 本研究で提案した式は、供試体の一辺の長さが120.0mmの正方形供試体を用いた実験結果から誘導したものである。よって、他の大きさの供試体に適用できるかどうかは検討の余地がある。

② 3. で述べたように、本提案式を誘導する際に用いたラフネス係数は、ラフネス計測時の計測間隔が1.0mmであるため、それ以外の間隔で計測された場合は本提案式を適用する場合に不都合が生じる可能性がある。

今後の課題として、①については、種々の大きさの供試体で実験を行い、本提案式の妥当性を究明する必要がある。また、②については、ラフネス係数の幾何学的な特性を把握し、ラフネス計測時の計測間隔の基準化の提案や、既存のラフネス係数を用いたラフネス係数の簡易推定法¹⁸⁾などを適用して、本提案式への適用を考えなければならない。

参考文献

1) 大西有三, 朝川 誠, 林 真由: 地下空洞掘削におけるキープロックの発生予測, 土木学会論文集,

- 第617号/III-46, pp.115-12 脂娟眺4, 1999.
- 2) 佐々木 猛, 大西有三, 吉中龍之進: 不連続変形法 (DDA) とその岩盤工学への適用に関する研究, 土木学会論文集, 第493号/III-27, pp.21-30, 1994.
 - 3) Cundall, P. A. : A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock system, *Proc. Int. Symp. for ISRM*, Nancy, Paper No.II-8, 1971.
 - 4) 佐々木 猛, 大西有三, 森川誠司, 石井大介: Manifold法による摂理製岩盤の弾塑性解析, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.151-156, 1998.
 - 5) 足立紀尚, 大西有三, 荒井克彦: 福井県越前岬の崩壊と災害の教訓, 月刊地球/Vol.18, No.9, pp.589-595, 1996.
 - 6) 豊浜トンネル崩落事故調査委員会: 豊浜トンネル崩落事故調査報告書, 1996.
 - 7) 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*, pp.36-106, 1997.
 - 8) Barton, N. and Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*, Vol.10, pp.1-65, 1971.
 - 9) Barton, N. R. : Review of a new strength criterion for rock joint, *Eng., Geol.*, Vol.4, No.4, pp.287-332, 1973.
 - 10) Patton, F. D. : Multiple Models of Shear Failure in Rock, *Proc. 1st Cong. ISRM (Lisbon)*, Vol.1, pp.509-513, 1966.
 - 11) 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.
 - 12) Jaeger, J. C. : Friction of Rocks and The Stability of Rock Slopes-Rankine Lecture, *Geotechnique*, Vol.21, pp.97-134, 1971.
 - 13) R.E.グッドマン著, 赤井浩一, 川本朧万, 大西有三共訳: 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, 1978.
 - 14) 大西有三, 大津宏康, 矢野隆夫, 橋村義人: 割れを考慮した岩盤不連続面のせん断挙動解析, 土木学会論文集, 第666号/III-53, pp.145-158, 2000.
 - 15) Tse, R. and Cruden, D. M. : Estimating joint roughness coefficients, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.16, pp.303-307, 1979.
 - 16) Xianbin Yu and Vayssade, B. : Joint Profiles and their Roughness Parameters, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.28, No.4, pp.333-336, 1991.
 - 17) 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.
 - 18) 大西有三, 大津宏康, 矢野隆夫, 高木克実: 岩盤不連続面のラフネス係数の簡易推定法, 第36回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.579-580, 2001.

(2001. 10. 15 受付)

SHEAR STRENGTH FORMULA FOR ROCK JOINTS USING PROFILES OF JOINT SURFACE ROUGHNESS

Takao YANO, Kazuo AOKI, Yuzo OHNISHI, Hiroyasu OHTSU,
Satoshi NISHIYAMA and Junichi MIZUTA

It has been known that the mechanical behavior of rock mass strongly depends on these of discontinuities such as faults, fractures and joints. In the rock mechanics literature, several constitutive models to predict joint shear strength have been proposed focusing on effect of geometrical properties of the joint surface roughness. It is shown, however, that some of existing models have problems that these do not quantitatively reflect on geometrical properties. In our study, the statistical parameter related to the strength properties obtained from the results of the direct shear experiments is introduced and a new constitutive model to predict shear strength of rock joint is proposed.