

削れを考慮した岩盤不連続面のせん断挙動解析

大西有三¹・大津宏康²・矢野隆夫³・橋村義人⁴

¹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)

²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)

³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)

⁴正会員 工修 熊谷・三井共同企業体横池田工事作業所 (〒239-0804 神奈川県横須賀市横井 296)

岩盤構造物の建設に伴う力学的挙動の評価は、一般に断層・破碎帯等を含む複雑な地質条件からなる日本の国土において、諸外国と比較して特に重要な課題である。岩盤不連続面のせん断強度式は Mohr-Coulomb の破壊基準を始め、多くの研究者によって提案されているが、不連続面の凹凸の削れやラフネスの異方性を考慮したものは皆無である。そこで、著者らは充填物を含まない不連続面を対象として、その面の離散化ラフネスデータを用いて、幾何学的な削れ方を考案し、減耗率 k という新たなパラメータを導入してせん断挙動を推定する方法を開発し、その解析手法の有効性を示した。本論文は種々の供試体にその手法を適応し、その解析手法の有効性を確たるものにした。

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

1. はじめに

近年、我が国では、ダム・トンネル・地下空洞など岩盤構造物が大型化し、揚水発電所の建設・地下備蓄・地熱発電・廃棄物の地下処分等の構想が進められている。これらの岩盤構造物の建設に伴う岩盤の力学的挙動の評価は、複雑な地質条件からなる日本の国土において、諸外国と比べて特に重要な課題である。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滑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。

不連続面のせん断挙動を推定する場合、その面の凹凸の幾何学的な特性を求めなければならない。Barton and Choubey¹⁾ は不連続面の断面形状を 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。そして、その JRC 値を用いて、垂直応力の違いによるダイレイタンスの変化や不連続面の凹凸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提案した²⁾。また、Patton³⁾ は規則的な歯形を持つ模型

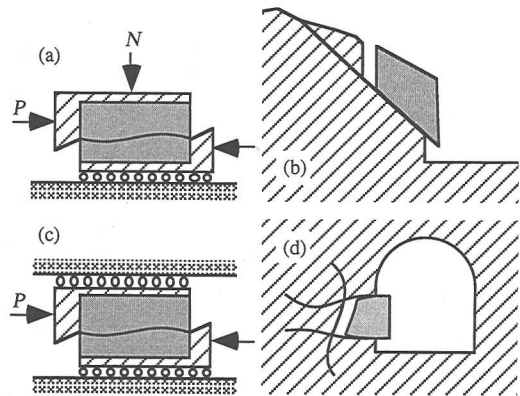


図-1 岩盤のせん断様式の種類 ((a),(b): 垂直応力一定試験, (c),(d): 定体積試験)

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 Archambault⁴⁾ は不連続面がせん断を受ける場合、実際には滑りとその面の凹凸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せん断強度式を提案している。この他にも、Jaeger⁵⁾ や Goodman⁶⁾ によって種々のせん断強度

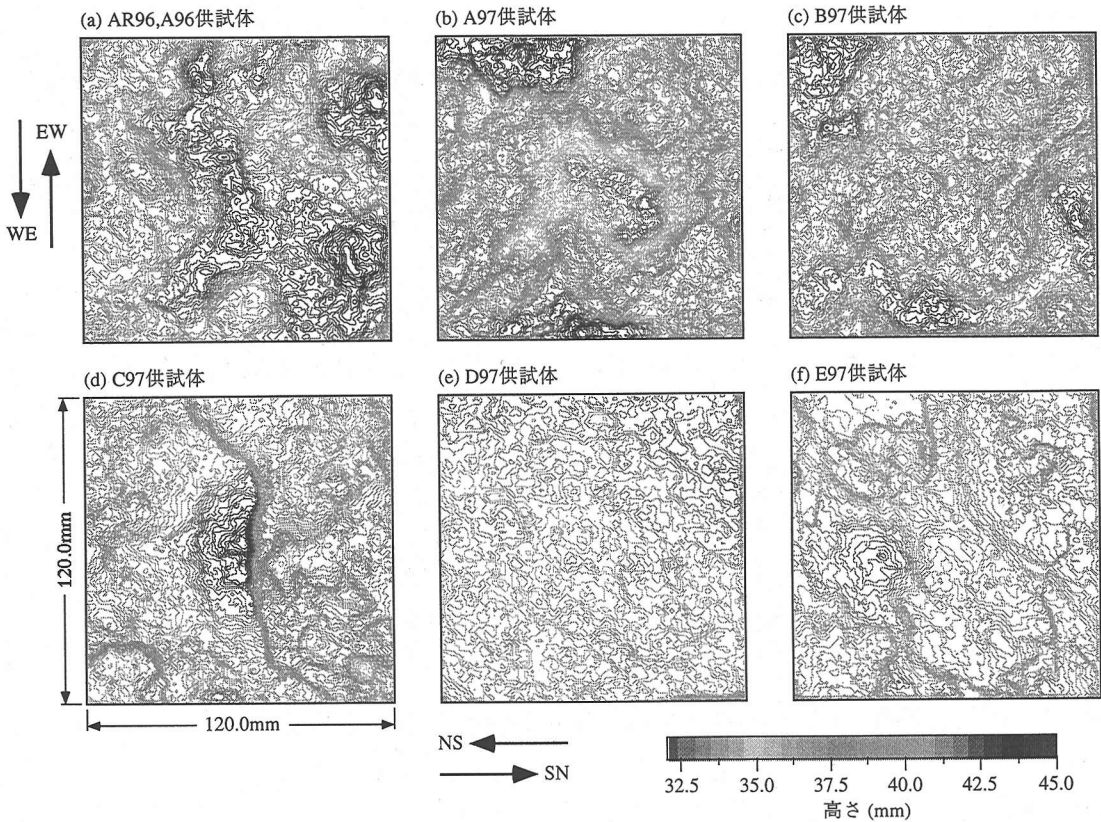


図-2 供試体の表面形状とせん断方向

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、これらの式にはせん断によって発生する不連続面の割れやラフネスの異方性を定量的に評価しているものはない。そこで、著者は不連続面の凹凸を計測し、岩盤の基本的な挙動をとらえるために一面せん断試験を行うと共に、新たに提案したせん断モデルを導入することによって、不連続面のせん断挙動の推定法⁷⁻¹⁰⁾を提案した。その方法とは、充填物を含まない不連続面を対象として、その面の離散化ラフネスデータを用いて幾何学的な割れ方を考案し、減耗率 k （せん断時に不連続面の凹凸が割れる割合）という新たなパラメータを導入してせん断挙動を推定するという方法である。その中で提案した推定法の有効性を証明したが、その一方、不連続面の凹凸の形状やラフネスの異方性およびラフネスの計測条件などの違いが解析結果に大きく影響するなど未解明な部分も多く存在することを指摘した。よって本研究の目的は、種々な表面形状を有する供試体の実験結果に本解析手法を適用することにより、そのせん断モデルを用いた推定法

の有効性を確たるものにするることである。

2. 一面せん断試験

従来、岩の強度・変形特性を調べる室内試験として、一軸試験、三軸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は一面せん断試験の様式を示したものである。通常多用される垂直応力一定試験は図-1(a)に示すようにせん断中、垂直応力を一定に保つ試験方法であり、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。よって、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。それに対し、図-1(c)に示す定体積試験は、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

表-1 供試体の材料定数と実験条件

供試体	垂直応力 (MPa)	カオリン含有率 (%)	一軸圧縮強さ (MPa)	方向	JRC値の平均値			
AR96	0.098	0	52.626	WE	7.650			
	0.294	50	14.504					
	0.490	100	7.546					
	0.686	200	3.136					
	0.980	300	1.823					
A96	0.490 0.980 1.470 1.960 3.920	0	52.626	NS,SN	8.081			
A97				EW,WE	7.650			
				NS,SN	13.796			
B97				EW,WE	14.609			
				NS,SN	10.520			
C97				EW,WE	9.876			
				NS,SN	11.819			
D97				EW,WE	10.577			
				NS,SN	1.029			
E97				EW,WE	3.487			
				NS,SN	6.246			
							EW,WE	5.339

断を受けている場合に相当しているため、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。本研究では、不連続面の形状がいかにせん断挙動に影響を及ぼすかを解明することを目的としているので図-1(a)のような垂直応力一定試験を行った。

(1) 供試体の諸定数および実験条件

図-2 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。また、表中にはラフネスの大きさがどの程度違うかを判断しやすいように後述する式(20),(21)を用いて算出したJRC値も示してある。

表-1 に示すように本研究では、表面形状の違う6種類の供試体を用意し、各供試体に対して4方向、垂直応力5種類の一面せん断試験を行った。また、一軸圧縮強さが本解析手法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た供試体を製作した。ただし、供試体は不連続面形状をA96供試体と同じとし、せん断方向もWE方向に限定してせん断試験を行った。この供試体名をAR96とする。それと同時に各供試体の基本摩擦角を求めめるため、カオリンの重量含有比が同じ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)も同時に準備した。変位速度は、A96, AR96供試体については1.0mm/min, その他の供試体については0.1mm/minとした。

せん断変位速度が不連続面のせん断挙動に与える

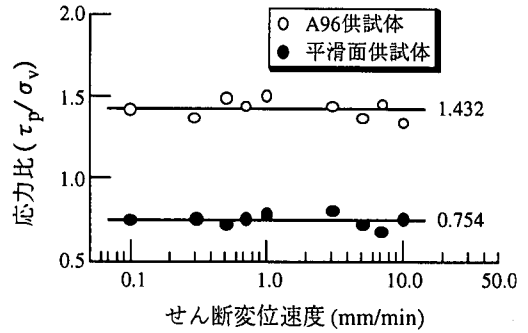


図-3 せん断変位速度と応力比 $\eta(=\tau_p/\sigma_v)$ の関係

影響を調べるため、種々のせん断変位速度下で一面せん断試験を行った。その結果を図-3 に示す。なお、実験に用いた垂直応力は0.49MPaであり、図中の値は各供試体の応力比の平均値を示す。この図から明らかのように本研究で用いた供試体の寸法ではほぼ速度依存性がないと考えられる。よって、本研究では供試体によってせん断変位速度が異なっているが、速度依存性がないとして比較検討が可能であると考える。

(2) ラフネスの計測

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。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と0.5mm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。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、岩石一面せん断試験およびラフネスの計測方法については参考文献11)に詳述してある。

3. せん断挙動の推定法

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。そこで、不連続面を計測することによって得た離散化ラフネスデータと不連続面の凹凸の削れ特性を表すパラメータとして減耗率kなるものを導入

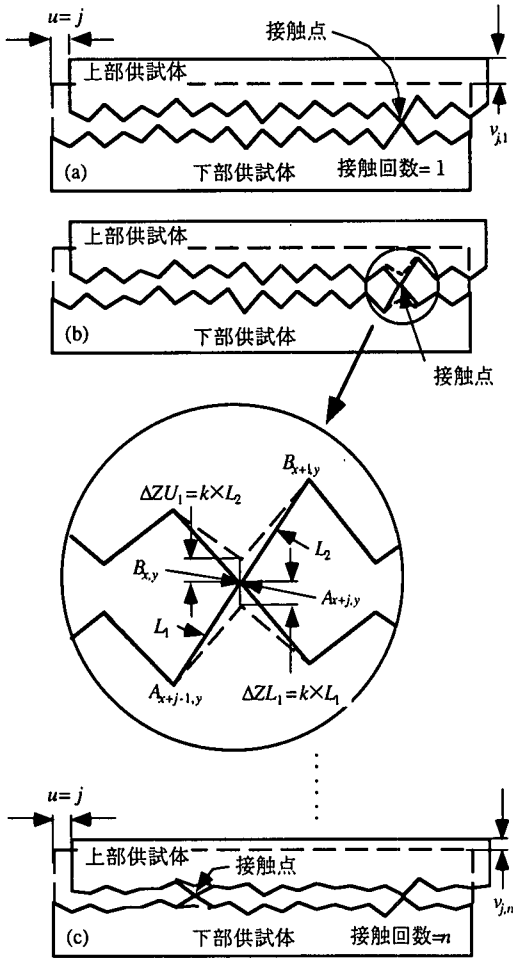


図-4 せん断挙動のモデル化

し、岩盤のせん断挙動を表現する解析モデルを用いてその凹凸に起因するせん断挙動の把握を試みる。

(1) せん断挙動の解析モデル

離散化されたラフネスデータを用いた垂直応力一定下の一面せん断試験におけるダイレイタンス挙動の推定法を簡単に説明するが、詳細は参考文献10)を参照されたい。

不連続面の凹凸を計測する場合、離散的なデータしか得られないことから、せん断過程をその計測間隔でステップに分けてシミュレートを行う。ここで、せん断方向をx軸方向、せん断方向に垂直な方向をy軸方向、上部供試体が滑り上がる方向をz軸方向とし、x軸方向の計測点の個数をN、y軸方向の計測点の個数をMとする。

上部供試体と下部供試体は完全にかみ合っているものとして、図-4(a)に示すように、せん断変位が

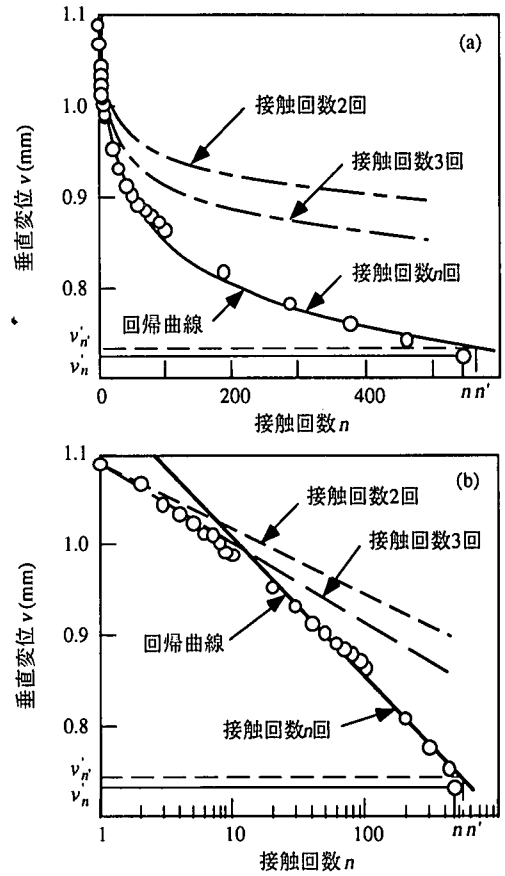


図-5 接触回数 n と垂直変位 v の関係および収束条件

$u=j$ 進んだ時を考える。せん断変位 $u=j$ の時、全点において下部、上部供試体の接触点の鉛直座標をそれぞれ $Z(A_{x+j,y})_{u=j}$ 、 $Z(B_{x,y})_{u=j}$ とすると、せん断前には上下部は完全にかみ合っていることから、 $Z(A_{x+j,y})_{u=j} = Z(B_{x,y})_{u=j} (u=j=0)$ である。せん断変位 $u=j$ におけるせん断挙動は、最も高い部分、つまり次式において最大値を与える接触点 (x,y) に依存する。

$$v_{j,1} = Z(A_{x+j,y})_{u=j} - Z(B_{x,y})_{u=j} \quad (0 \leq x \leq N, 0 \leq y \leq M) \quad (1)$$

図-4(b)で示している著者が提案した削れモデルに準じてこの接触点を削る。接触点が決まると減耗率 k を導入することによって、次式により接触回数が1回目の下部、上部供試体の減耗量 ΔZL_1 、 ΔZU_1 が決定される。

$$\Delta ZL_1 = k \sqrt{\Delta x^2 + (Z(A_{x+j,y})_{u=j} - Z(A_{x+j-1,y})_{u=j})^2} \quad (2)$$

$$\Delta ZU_1 = k \sqrt{\Delta x^2 + (Z(B_{x+1,y})_{u=j} - Z(B_{x,y})_{u=j})^2} \quad (3)$$

幾何学的削れを導入した後、接触点の新たな鉛直座標は次式で与えられる。

$$Z(A_{x+j,y})_{u=j} = Z(A_{x+j,y})_{u=j} - \Delta ZL_1 \quad (4)$$

$$Z(B_{x,y})_{u=j} = Z(B_{x,y})_{u=j} + \Delta ZU_1 \quad (5)$$

これらの操作を垂直変位がある収束条件を満たすまで繰り返し、最終的に図-4(c)に示すように接触回数 n 回目で収束するものとする。このとき接触回数 n 回目の接触点の座標を $(x_n, y_n) = (x_n, y_n)$ 、せん断変位 $u=j$ での最終的な垂直変位を $v_{j,n}$ とすると供試体のラフネスデータは次式によって書き換えられる。

$$v_{j,n} = Z(A_{x_n+j,y_n})_{u=j} - Z(B_{x_n,y_n})_{u=j} \quad (6)$$

$$Z(A_{x_n+j,y_n})_{u=j} = Z(A_{x_n+j,y_n})_{u=j} - \Delta ZL_n \quad (7)$$

$$Z(B_{x_n,y_n})_{u=j} = Z(B_{x_n,y_n})_{u=j} + \Delta ZU_n \quad (8)$$

(2) 収束条件

あるせん断ステップにおいて、垂直変位 v_n と接触回数 n の関係は、図-5(a) のようになった。これを対数関数で近似し、接触回数 n の軸を対数で表すと図-5(b) のようになる。この対数近似関数を用いて収束条件を次のように考える。

接触回数 n のとき、 n 個の解析において得られる垂直変位 v_n と接触回数 n に関して対数近似関数を算出する。近似曲線によって得られる垂直変位を v_n^* とする。この対数関数を用いて接触回数 n 、 $n+1$ の垂直変位の差 Δv_c が 0.0001mm 以下になる接触回数を n' とし、この時の垂直変位を $v_{n'}$ とする。

接触回数 n の時、垂直変位 v_n^* が $v_{n'}$ より小さくなると計算を終了し、垂直変位 v_n^* が $v_{n'}$ より大きい場合は接触回数を増やして再び計算を行う。

(3) 収束値 Δv_c の影響

参考文献 10) および 3.(1),(2) において本解析手法を詳述してきた。ここでは収束値 Δv_c の設定が本解析結果に及ぼす影響を述べる。

図-6 は収束値 Δv_c をパラメータとして、減耗率 k とせん断変位 u が 10.0mm における垂直変位 v をプロ

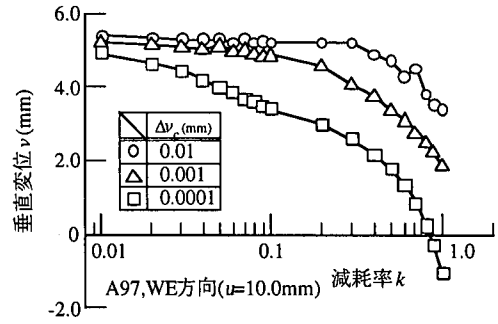


図-6 減耗率 k と垂直変位 v の関係 ($u=10.0\text{mm}$)

ットしたものである。図から明らかなように減耗率 $k=1.0$ において、収束値 Δv_c が 0.01 の場合は垂直変位が約 3.5mm、収束値 Δv_c が 0.001mm の場合は約 1.9mm になるという結果が得られており、これ以下のダイレイタンス量を表現できないことがわかった。よって、収束値 Δv_c の値は 0.001mm より小さい値に設定しなければならない。これに対して、収束値 Δv_c が 0.0001 の場合には、本検討で対象とする減耗率 k が 0 から 1 の間で、垂直変位 v が正の値である範囲が表現可能となっている。また、本解析手法では収束条件に対数回帰曲線を用いている関係上、収束値 Δv_c を 1桁小さくすると接触回数は1桁大きくなる。すなわち収束値 Δv_c の設定値を小さくすればするほど解析に要する時間が長くなることを意味している。そこで、減耗率 k を精度良く計算し、なおかつ短期間に解析を終了させるためには最適な収束値 Δv_c を設定しなければならない。本研究では収束値 Δv_c の最適値を 0.0001mm と考え、以下この値を用いて解析を行うものとする。

4. 岩盤不連続面におけるせん断挙動の評価

不連続面のせん断特性は不連続面に凹凸を含まない材質自体のせん断特性と、凹凸に起因するせん断特性に分類することができる。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

$$\tau = \sigma_v \tan(\phi_b + i) \quad (9)$$

となる。垂直応力 σ_v がある応力値を越えると、不連続面の粗さ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。

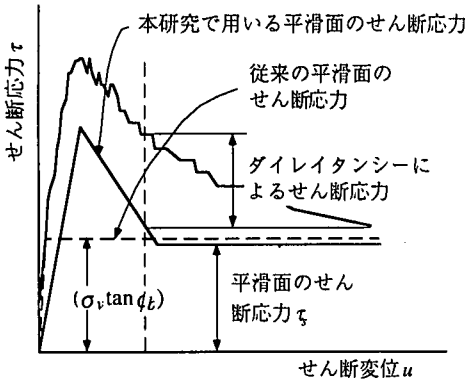


図-7 不連続面のせん断変位 u -せん断応力 τ 関係の概念

$$\tau = c + \sigma_v \tan \phi \quad (10)$$

ここに、 c は見掛けの粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。

Patton³⁾ は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双一次型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

$$\tau = \sigma_v \tan(\phi_b + i) \quad (11)$$

σ_v が σ_T 以上の場合

$$\tau = C_j + \sigma_v \tan \phi_r \quad (12)$$

$$\sigma_T = \frac{C_j}{\tan(\phi_b + i) - \tan \phi_r} \quad (13)$$

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。

Barton²⁾ は、せん断時の接触面積は全体の面積に比べて極端に小さく、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スの変化や不連続面の凹凸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以下のように提案した。

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left\{ JRC \log \left(\frac{q_u}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right\} \quad (\sigma_n < q_u) \quad (14)$$

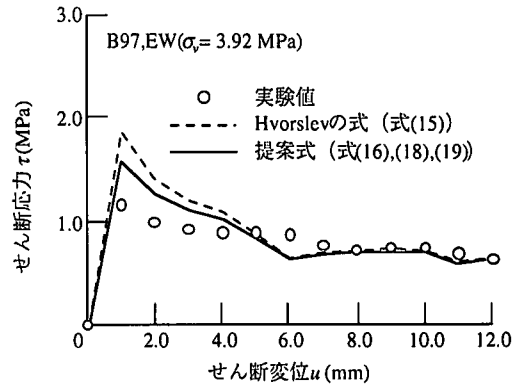


図-8 せん断強度式の比較

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。

著者らが提案したせん断モデルを用いてせん断挙動の推定が本研究で用いた全供試体に適用可能であるかを検討し、本数値解析手法に導入した不連続面の凹凸の削れを表すパラメータ減耗率 k の評価を行う。

(1) 不連続面のせん断特性

図-7に示すように、凹凸を有する不連続面のせん断特性は、凹凸を含まない平滑面供試体のせん断特性に加え、不連続面のせん断時におけるダイレイタンス特性がせん断特性に及ぼす影響を考慮しなければならない。そこで本数値解析では、不連続面の凹凸の削れ特性と幾何学的特性を考慮し、ダイレイタンス曲線を求めることで、凹凸を有する不連続面のせん断特性（強度・変形特性）を概念的に求める。なお、図中に示す“本研究で用いる平滑面のせん断応力”は後述する図-9の実験結果をもとにモデル化したものである。

(2) 本数値解析で用いるせん断強度式

Hvorslev¹²⁾ は、せん断中における内部エネルギーと外部エネルギーが等しいと仮定し、理論的に次のような式を提案した。

$$\tau = \sigma_v \tan \phi_b + \sigma_v \frac{\Delta v}{\Delta u} \quad (15)$$

ここに、 τ はせん断応力、 σ_v は垂直応力、 ϕ_b は基本摩擦角、 $\frac{\Delta v}{\Delta u}$ はダイレイション率である。

図-8は式(15)に本解析手法によって得られたダイレイタンス曲線を代入して求めたせん断変位 u

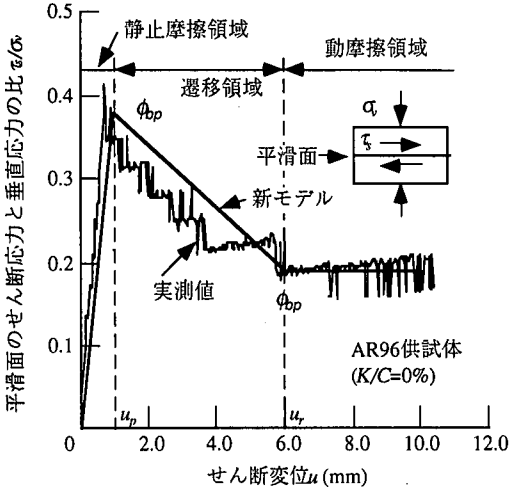


図-9 平滑面供試体のせん断変位 u ~ せん断応力 τ 関係の概念

せん断応力 τ 関係と実験値を比較したものである。ただし、基本摩擦角 ϕ_b は 34.2° を用いている。

図から明らかのように、せん断初期において、せん断応力は実験値に比べて解析値の方が大きく発現しており、本解析手法によってせん断応力を推定する場合、それを過大推定する可能性がある。この原因は基本摩擦角の導入方法に問題があると考えられる。よって、基本摩擦角を再検討する必要がある。そこで本数値解析では、せん断応力を求める場合、式(15)を応用して以下のように考える。

平滑面供試体のせん断特性は、一面せん断試験により容易に求めることができる。図-9は平滑面供試体のせん断変位 u と、せん断応力 τ と垂直応力 σ_v の比 τ/σ_v との関係を示したもので、基本摩擦角はせん断中常に一定でないことがわかった。よって、図に示すようにこの関係を静止摩擦領域、遷移摩擦領域、動摩擦領域の3要素に分割してモデル化を行い、本数値解析に導入するものとする。

1. 静止摩擦領域

$$\tau = \sigma_v \tan \phi_{bp} + \sigma_v \frac{\Delta v}{\Delta u} \quad (16)$$

2. 遷移摩擦領域

$$\phi'_b = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi_{br} - \tan \phi_{bp} (u - u_p) + \tan \phi_{bp}}{u_r - u_p} \right) \quad (17)$$

$$\tau = \sigma_v \tan \phi'_b + \sigma_v \frac{\Delta v}{\Delta u} \quad (18)$$

表-2 各供試体の基本摩擦角 ϕ_{pv}, ϕ_{br}

カオリン含有率 (%)	基本摩擦角 $\phi_{pv} (u=u_p)$	基本摩擦角 $\phi_{br} (u=u_r)$
0	20.7°	10.7°
50	33.2	30.2
100	34.7	30.2
200	37.6	32.4
300	31.9	28.9

3. 動摩擦領域

$$\tau = \sigma_v \tan \phi_{br} + \sigma_v \frac{\Delta v}{\Delta u} \quad (19)$$

ここに、 $\phi_{bp}, \phi'_b, \phi_{br}$ は各領域の基本摩擦角であり、これらの値は平滑面供試体を用いた実験結果から定められるものである。表-2に各平滑面供試体のせん断過程における各領域の基本摩擦角を示す。

式(16),(18),(19)の第1項は図-7に示すように、平滑面供試体のせん断特性を表し、第2項は、せん断中におけるダイレイタンスの発生がせん断挙動に及ぼす影響を表している。図-8には式(16),(18),(19)によって計算した結果も示してある。この図より、せん断初期には式(15)で計算したものと同様に、せん断応力は大きく発現しているものの、明らかな改善が見られる。よって、以下せん断強度式は式(16),(18),(19)でもって議論する。

(3) 不連続面のせん断挙動の評価

一面せん断試験結果から得られるダイレイタンス曲線を本数値解析手法に同定することによって得られる推定ダイレイタンス曲線から、式(16),(18),(19)を用いることにより、せん断変位 u とせん断応力 τ の関係を推定する。更に、これらと試験結果から得られるダイレイタンス曲線やせん断応力・変位関係を比較することによって、本数値解析手法が不連続面のせん断挙動を表現可能であるかを検討した。なお、実験値への解析方法の適用方法については参考文献10)に詳述してある。

a) 不連続面形状が本解析手法に及ぼす影響

不連続面の形状の違いがせん断挙動にどのような影響を及ぼすかについて検討するために、供試体の一軸圧縮強さを一定にし、不連続面の形状を変えてせん断挙動の推定を行った。

図-10は実験結果から得られるダイレイタンス

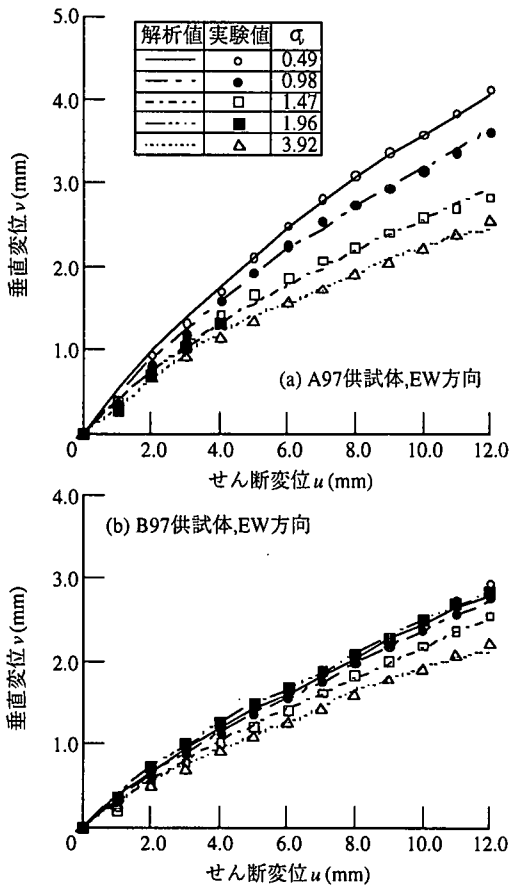


図-10 解析結果と実験結果の比較 (ダイレイタンスー曲線, (a) A97 供試体, EW 方向, (a) B97 供試体, EW 方向)

曲線を、本解析手法に同定させることによって得られる推定ダイレイタンスー曲線と実験値を比較したものである。ただし、図には A97 供試体の EW 方向と、B97 供試体の EW 方向の結果を示してある。この図より、本解析手法は種々の表面形状を持つ不連続面においても、ダイレイタンスー特性をかなり正確に表現できることが確認された。

図-11 は、式(16),(18),(19)に本解析手法で得られたダイレイタンスー曲線を代入することによって推定したせん断変位 u ~ せん断応力 τ 関係と実験値を比較したものである。これらの図より本解析手法はあらゆる不連続面のせん断変位 u ~ せん断応力 τ 関係をかなり正確に表現できることがわかる。

b) せん断方向が本解析手法の及ぼす影響

せん断の方向が違うことによって、不連続面のせん断挙動がどのような影響を受けるかについて検討

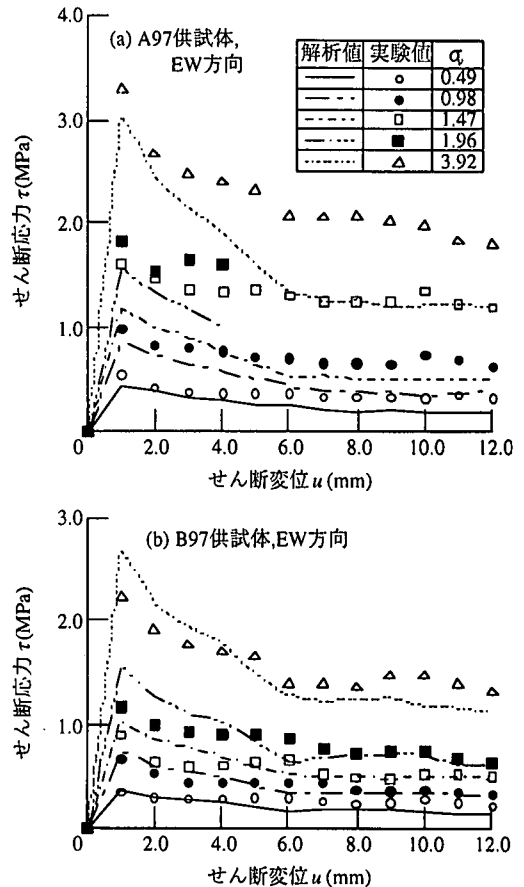


図-11 解析結果と実験結果の比較 (せん断変位 u ~ せん断応力 τ 関係, (a) A97 供試体, EW 方向, (b) B97 供試体, EW 方向)

するため、同一強度かつ同一ラフネスを持つ供試体についてせん断挙動の推定を行った。

図-12 は上述の条件のもとで実験値と解析値を比較したものであり、せん断変位 u ~ せん断応力 τ 関係において、NS 方向の解析結果と実験結果には大きな差が見られるものの、本解析手法はせん断方向がせん断挙動へ及ぼす影響をある程度正確に表現していることがわかる。なお、図には C97 供試体の結果を示してあるが、他の供試体についても同様の結果が得られている。

c) 一軸圧縮強さが本解析手法に及ぼす影響

一軸圧縮強さがせん断挙動に及ぼす影響を検討するために、同一不連続面、同一方向かつ同一垂直応力下のもとでせん断挙動の推定を行った。

図-13 はカオリンを混入した一軸圧縮強さの異なる供試体について上記の条件下で比較検討したもの

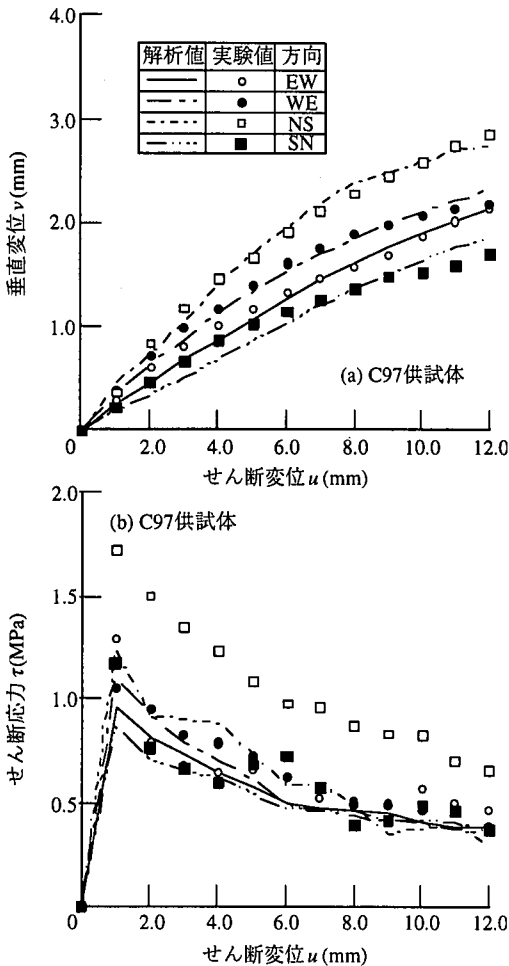


図-12 解析結果と実験結果の比較（せん断方向の影響，C97 供試体）

である。この図より、本解析手法は一軸圧縮強さがせん断挙動へ及ぼす影響をかなり正確に表現できることがわかる。

以上のように、いずれの条件下でも本数値解析手法は、せん断初期に不連続面が完全にかみ合っている条件下では、不連続面のせん断挙動がある程度表現可能であると考えられる。

(4) 減耗率 k の物理的意味と問題点

減耗率 k とは不連続面においてせん断が起きる際に、その面の削られる割合のことである。減耗率 k 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岩石の強度が弱い場合、削られる量は多くなるのは明らかである。

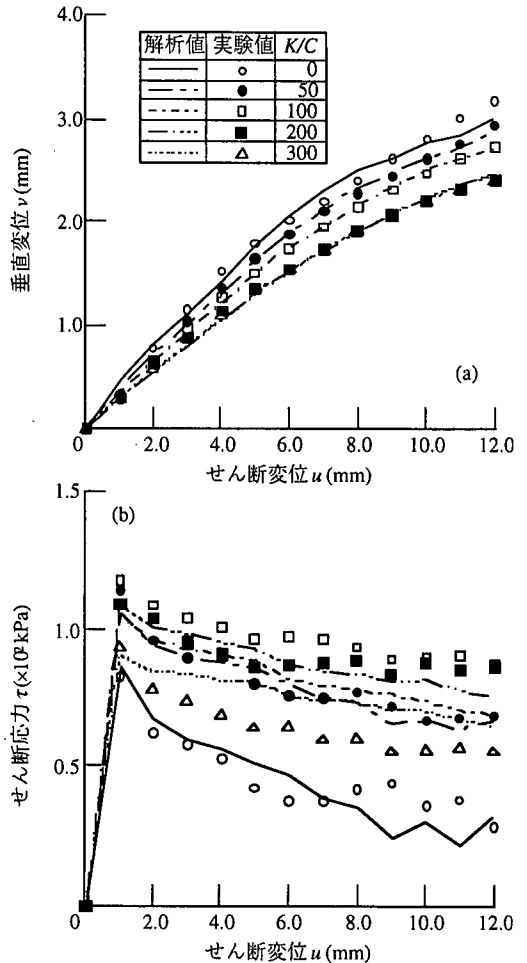


図-13 解析結果と実験結果の比較（一軸圧縮強さの影響，AR97 供試体， $\sigma_c=0.098$ MPa）

著者らは減耗率 k と不連続面にかかる垂直応力 σ_v / 母岩の強度 σ_c （以下、正規化応力比と呼ぶ）の間に累乗の関係があるを解明した⁷⁾⁻¹⁰⁾。ここでは、複数の供試体の実験結果を用いて、減耗率 k が実際どのような物理的意味を持っているかを考察してみる。

図-14は、表-1にある全ての供試体について、正規化応力比 σ_v/σ_c と減耗率 k の関係を示したものである。この図から明らかなように、減耗率 k と正規化応力比 σ_v/σ_c は両対数グラフにおいてある程度直線関係を保っているものの、かなりのバラツキがあることがわかる。この点について詳細に検討するために、供試体かつせん断方向別に減耗率 k と正規化応力比 σ_v/σ_c の関係について考察を行う。

図-15に示すように、C97 供試体以外のものについてはせん断方向に関係なく、ある程度両対数グラフにおいて減耗率 k と正規化応力比 σ_v/σ_c は直線関

係が認められる。しかし、C97 供試体に関してはかなりせん断方向によってばらつきがあり、NS 方向に関しては他の供試体より減耗率 k が小さい値を示した。この原因は以下のように考えられる。各供試体に対しアスペリティ角の相対度数分布を調べた結果を図-16 に示す。ここで、アスペリティ角とは凹

凸の単位長さあたりの傾斜角を意味する。なお、縦軸の相対度数は図を理解しやすいように対数表示してある。図-16(a) に示すように、A97 供試体にはせん断方向によって相対度数分布にあまり差が生じていないが、図-16(b) に示すように C97 供試体の NS 方向については他の 3 方向に比べて大きいアスペリティ角が存在していることがわかる。そのため削れよりも滑りが卓越し、減耗率 k が小さくなったと考えられる。次にこのような特異な凹凸が供試体に含まれる場合、その要因が減耗率 k に与える影響について考察する。

(5) 不連続面の特異な凹凸を表すパラメータ

Barton and Choubey の JRC を用いて実際の不連続面の指標を求める場合、その面と Barton らの粗さ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 Cruden¹³⁾ は Barton らの JRC 値と以下に示す統計的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。

$$Z2 = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (20)$$

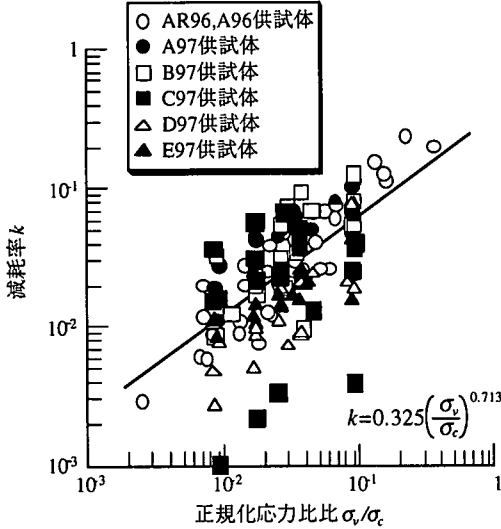


図-14 正規化応力比 σ_v/σ_c と減耗率 k の関係

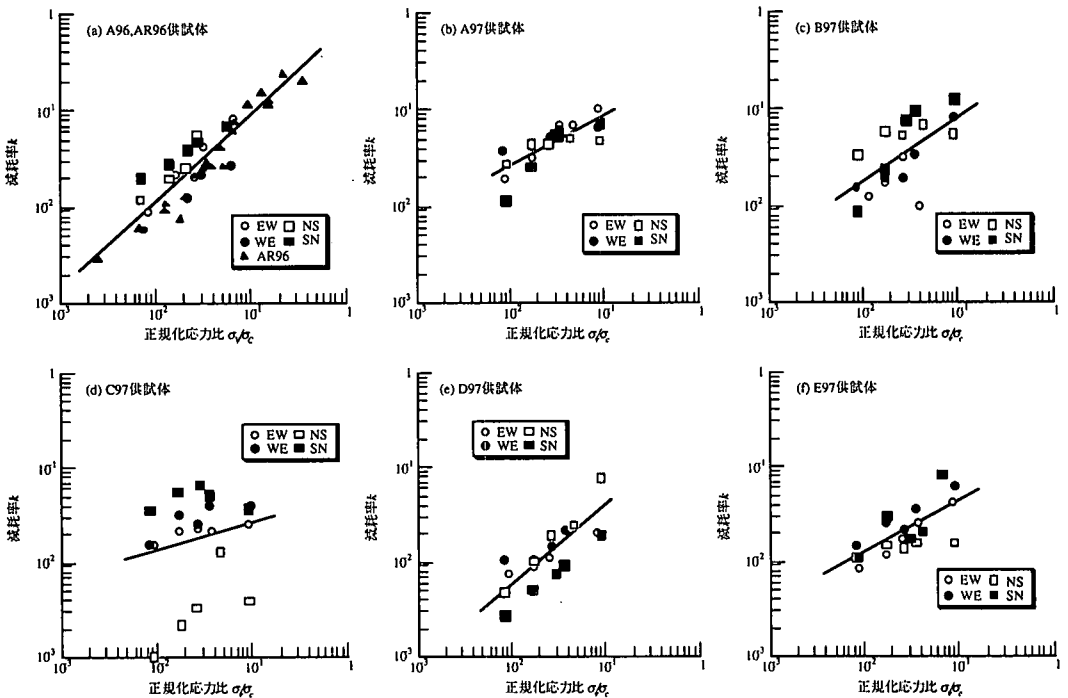


図-15 せん断方向別の正規化応力比 σ_v/σ_c と減耗率 k の関係

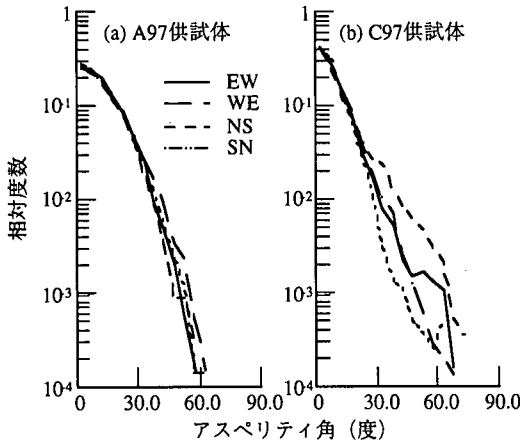


図-16 せん断方向の正のアスペリティ角の相対度数
(a) A97 供試体, (b) C97 供試体

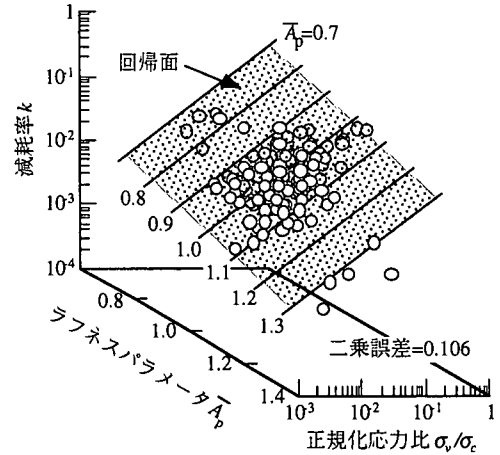


図-18 正規化応力比 σ_n/σ_c とラフネスパラメータ A_p と減耗率 k の関係 ($\Delta x=1.0\text{mm}$)

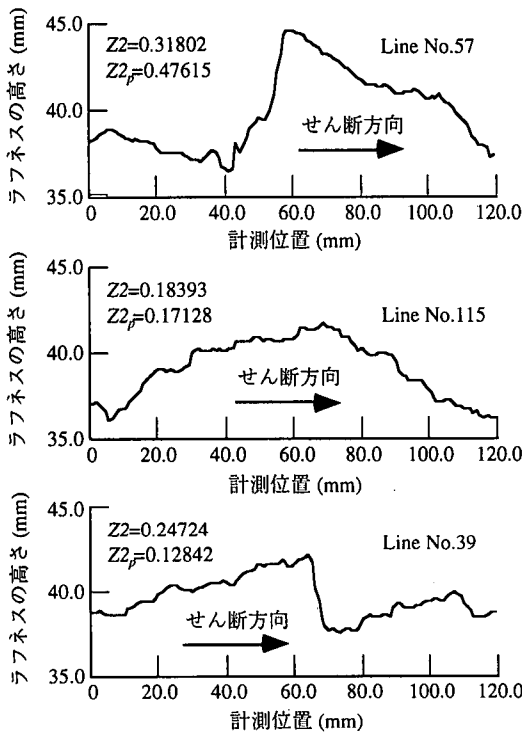


図-17 不連続面の特異な凹凸がラフネスパラメータに及ぼす影響

ここに、 Δx は計測間隔であり、 Δy は凹凸の高低差である。そして、 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。

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log Z2 \quad (21)$$

式(20)の指標は不連続面の凹凸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、この異方性は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、不連続面の特異な凹凸を考慮するために、式(20)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。

$$Z2_p = \left[\frac{1}{M_p} \sum_{i=1}^{M_p} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_p^2 \right]^{1/2} \quad (22)$$

ここで、 $\left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_p$ はせん断方向の正のアスペリティ角度の \tan 、 M_p はせん断方向の正のアスペリティ角度の個数である。なお、正のアスペリティ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-17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角が卓越する場合は、 $Z2_p$ 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 $Z2_p$ はほぼ同じ値を取り、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。

$$A_p = \frac{Z2_p}{Z2} \quad (23)$$

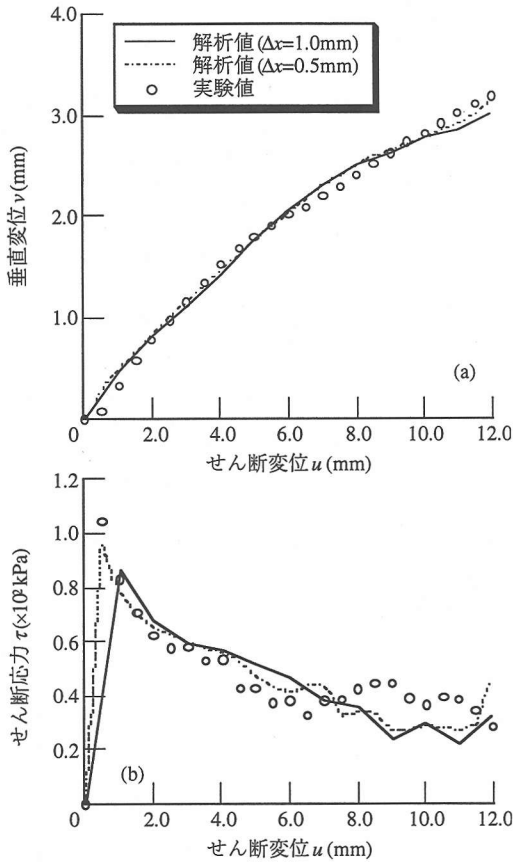


図-19 計測間隔が解析結果に及ぼす影響
(AR97 供試体, $\sigma_c = 0.098$ MPa)

減耗率 k と正規化応力比 σ_v/σ_c の関係に特異な凹凸を表現したラフネスパラメータ A_p の平均値 \bar{A}_p を導入し、回帰を行ったところ図-18のような結果を得た。この回帰面の関係は次式のように表される。

$$\log_{10} k = 1.04 + 0.74 \log_{10} \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_c} \right) - 1.47 \bar{A}_p \quad (24)$$

ここで、式(24)がどのような意味を持ちうるのかは以下のように考えられる。

特異な凹凸を表現するパラメータ A_p が一定であれば、正規化応力比 σ_v/σ_c が増加すると減耗率 k が増加するので、式(24)は、従来の減耗率 k の概念を表現している。また、正規化応力比 σ_v/σ_c が一定である場合、異方性パラメータ A_p が増加すると減耗率 k が減少するので、式(24)は4.(4)で述べた問題点を解決することができる。よって、減耗率 k の物理的意味が明確になったと考えられる。

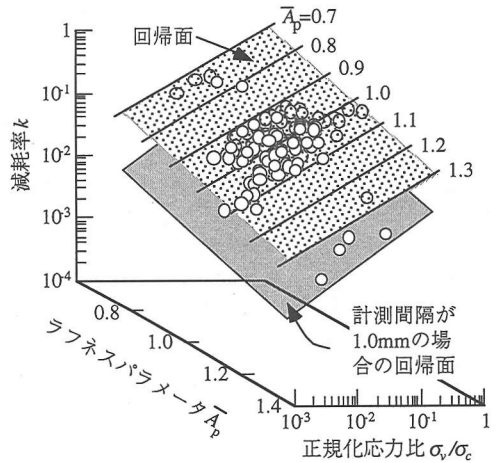


図-20 正規化応力比 σ_v/σ_c とラフネスパラメータ A_p と減耗率 k の関係 (計測間隔の比較)

(6) 計測間隔が本解析手法に及ぼす影響

上記までは、計測間隔が 1.0 mm のラフネスデータを本解析手法に導入しており、本数値解析によって得られる最大せん断強度はせん断変位が 1.0 mm の時に生じている。しかし実際のせん断挙動ではせん断変位が 1.0 mm 以内で最大せん断強度が生じている場合が多く、計測間隔が 1.0 mm ではこの挙動を考慮できない。以上のことから、計測間隔を細かくすることによって、本解析手法に及ぼす影響について考察した。

図-19 は、計測間隔 1.0 mm と 0.5 mm のラフネスデータを本解析手法に適用した場合の計測間隔が本数値解析によって求められるせん断挙動に及ぼす影響を示した一例である。この図よりせん断変位 u ~ せん断応力 τ 関係に関しては、残留状態において、ラフネスの計測間隔による影響は認められないが、せん断ピーク時には、せん断強度が計測間隔を細かくすると大きくなり、同時に、せん断応力のピークが生じるせん断変位は小さくなる傾向が認められた。これは計測間隔を細かくすることは、不連続面の凹凸が粗く計測されることを意味し、せん断初期のダイレーション率 $\frac{\Delta v}{\Delta u}$ が大きめに算出されていると考えられる。

図-20 は図-18 と同様に、減耗率 k と正規化応力比 σ_v/σ_c の関係に特異な凹凸を表現したラフネスパラメータ A_p の平均値 \bar{A}_p を導入し、回帰を行ったものである。この図から、ラフネスの計測間隔を細かくすると減耗率 k は大きくなることが認められる。これはラフネスの計測間隔を細かくすると不連続面

の凹凸が粗く計測され、解析上多くの凹凸を削る必要があるためと考えられる。この回帰面の関係は次式のように表される。

$$\log_{10} k = 1.50 + 0.59 \log_{10} \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_c} \right) - 1.43 \bar{A}_p \quad (25)$$

以上のことから本解析方法を適用するには、解析結果にラフネス計測時の計測間隔が多分に影響することを考慮しなければならない。今後、本解析手法を用いる場合は計測条件の基準化などを行う必要があると考えられる。

5. 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、その挙動を総合的に論じてきた。しかし、従来の研究ではせん断中に発現する不連続面の削れや、ラフネスの異方性について定量的に論じているものは皆無である。よって、それらの問題を解決する方法として、離散化ラフネスデータを用いてその面の幾何学的な削れ方を導入し、せん断中に発生するダイレイタンス特性を把握することによりせん断特性を推定する数値解析手法を述べてきた。以下に本研究で得られた知見を述べる。

- ① 垂直応力一定下において、本解析手法を適用することにより、様々な条件下での不連続面のせん断挙動を表現することができた。
- ② 不連続面の凹凸の削れ特性を表す減耗率 k は、正規化応力比 σ_v/σ_c との関係では図-14 に示すようにかなりのバラツキが見られるが、特異な凹凸を表現するパラメータ A_p なる変数を用いることにより、図-18,20 に示すように詳細に表現できるようになった。
- ③ ラフネス計測時の計測間隔が減耗率 k に及ぼす影響が大きいことがわかった。
- ④ 本解析手法を現場の問題に適用する場合、減耗率 k はラフネスの計測間隔が 1.0mm の場合は、式(24)から、0.5mm 間隔の場合は式(25)に示す関係から求めることができるので、自然岩盤においても不連続面に作用する垂直応力、母岩の強度、不連続面の形状が得られればせん断挙動をある程度推定できると考えられる。

今後の課題としては、本解析手法を導入するにあ

たり、寸法効果の影響、上下供試体の接触条件、ラフネスの計測時の計測条件の基準化などをさらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) Barton, N. and Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*, Vol.10, pp.1-65, 1971.
- 2) Barton, N. R. : Review of a new strength criterion for rock joint, *Eng., Geol.*, Vol.4, No.4, pp.287-332, 1973.
- 3) Patton, F. D. : Multiple Models of Shear Failure in Rock, *Proc. 1st Cong. ISRM (Lisbon)*, Vol.1, pp.509-513, 1966.
- 4) 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.
- 5) Jaeger, J. C. : Friction of Rocks and The Stability of Rock Slopes-Rankine Lecture, *Geotechnique*, Vol.21, pp.97-134, 1971.
- 6) R.E.グッドマン著,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.
- 7) 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.
- 8) 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予測に関する研究, 第31回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1377-1378, 1996.
- 9) 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.
- 10) 大西有三, 大津宏康, 矢野隆夫, 加藤雅広, 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関する研究, 土木学会論文集, 第645号/III-50, pp.255-266, 2000.
- 11) 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.
- 12) 土木学会:土木技術者のための岩盤力学, 土木学会, pp.235-237, 1976
- 13) Tse, R. and Cruden, D. M. : Estimating joint roughness coefficients, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.16, pp.303-307, 1979.

(1999. 11. 8 受付)

THE APPLICATION OF THE ANALYSIS METHOD CONSIDERING THE
CHANGE OF GEOMETRICAL CONDITION OF JOINT SURFACE DURING
SHEAR PROCEDURE FOR THE PREDICTION OF THE SHEAR STRENGTH

Yuzo OHNISHI, Hiroyasu OHTSU, Takao YANO,
Masahiro KATO and Yoshito HASHIMURA

The shear strength of rock joints are dependent on the their geometrical condition. Up to now, many researchers have proposed formulations which associate the shear strength with roughness profile of rock joints. However, most of them are established under the idealized assumption that no change of the configuration of joint surface occurs. The shear strength of rock joints essentially should be affected by the geometrical change of joint surface during shear procedure. From these viewpoints, this study proposes the analysis method to consider the effect of the change of roughness profile during shear procedure on the shear behavior, and presents the applicability of the proposed method for the prediction of shear strength.