

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

大西有三¹・大津宏康²・矢野隆夫³・加藤雅広⁴・高田裕輔⁵

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 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 関西電力 土木建築室土木保修課 (〒530-8270 大阪市北区中之島3-3-22)

⁵正会員 奈良県土木部奈良土木事務所 (〒630-8303 奈良県南紀寺町2-251)

岩盤中の不連続面の強度・変形特性を把握することは、その岩盤全体のせん断挙動を推定するのに重要な問題となる。非常に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。従来より多くの研究者によって岩盤不連続面のせん断強度式が提案されているが、せん断の進行と共に生ずる岩盤表面の削れを考慮したものは皆無である。そこで本研究では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、その解析手法の有用性を示した。

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

1. はじめに

岩盤内に地下構造物を建設する場合、岩盤を対象とした新しい課題が注目を浴びようになってきている。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・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。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¹⁾。

非常に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 Choubey²⁾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、垂直応力によるダイレイタンス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提案している³⁾。また、Patton⁴⁾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 Archambault⁵⁾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せん断強度式を提案している。この他にも、Jaeger⁶⁾やGoodman⁷⁾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、これらの式にはせん断によって発生する岩盤表面の削れを定量的に評価しているものは少ない。そこで本研究ではレーザ変位計で計測して得られた不連続面の離散化ラフ

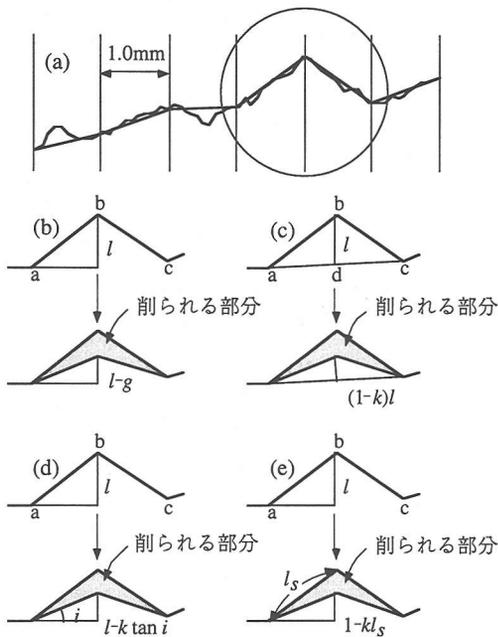


図-1 離散化されたラフネスデータと幾何学的な削れ方
 (a) 表面形状と離散ラフネスデータ, (b) パターン1,
 (c) パターン2, (d) パターン3, (e) パターン4)

ネスデータを用いて、その面の幾何学的な削れ方を考案し、減耗率 k (せん断時にラフネスの削れ易さを表す係数) という新たなパラメータを導入してせん断時のダイレイタンス挙動を推定し、その挙動からせん断応力を推定する方法を提案する。

2. 解析方法

(1) 減耗率 k

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盤の強度が弱い場合、削られる量は多くなるのは明らかである。従って、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) の間には何らかの相関関係があると考えられる。

(2) 幾何学的な削れ方のモデル化

幾何学的な削れ方のモデルとして図-1(b)~(e) のような4つのパターンについて検討する。なお、図-1(b)~(e) は図-1(a) の不連続面の一部を拡大したものである。

図-1(b) はラフネスの形状に関わらず図に示すように接地した点 b において一定量 g 削られると仮定する方法である (パターン1)。しかし、この削れ方はラフネスの形状を全く無視した考え方なので、現実的に正しいかどうかは疑問である。よって、新しい幾何学的な削れ方を考えることにする。

まずはじめに、図-1(c) に示すような方法について検討する (パターン2)。これは、接地した点 b の前後の点 a, c を結んだ線分の midpoint を d とし、点 b の鉛直座標から点 d の鉛直座標を引いた長さ $bd=l$ に減耗量は比例するという考えである。しかしこの方法では、接地している点 a, b, c の鉛直座標が等しい場合は削れが生じないという矛盾が生じる。次に減耗量はラフネスの傾斜角 i に比例すると仮定し、図-1(d) に示すような方法を考える (パターン3)。しかし、この方法でも $i=0$ の場合、図-1(c) の場合と同様な矛盾が生じる。そこで上述した事柄を考慮に入れ、図-1(e) に示すような方法について検討する (パターン4)。この方法は、減耗量は滑りが生じる辺の長さ $ab=l_s$ に比例するという仮定のもとで考案したものであり、水平な不連続面でも削れが生じるので、現実的な現象として矛盾が生じないと考えられる。よって、この方法を用いて解析を行う。

(3) せん断挙動のモデル化

本研究は、岩盤不連続面の变形特性および強度特性を離散化されたラフネスデータを用いて予測するものであり、減耗率 k を導入してその面のせん断挙動をモデル化することを目的としている。

まずはじめに、供試体の表面形状を計測して数値化し、そのデータから以下に述べるような方法を用いて不連続面のせん断過程をシミュレートし、垂直応力一定一面せん断試験におけるダイレイタンス挙動の推定を行う。ただし、リアルタイムで進行するせん断過程をコンピューターで表現することは不可能であるので、接触回数 n というパラメータを用いてせん断過程を数ステップに分けてシミュレーションを行った。この接触回数 n とは、不連続面におけるせん断挙動を図-2 に示すように供試体の一番高い点が接触して削られ、その次に高い点が接触して削られるという現象の繰り返しと考え、垂直変位 v がある値に収束するまでこの現象が繰り返し起こる回数のことである。この収束条件については後で詳述する。

本解析方法においてせん断挙動とは、上部供試体の変位するに伴い上部供試体の乗り上げがなくなり、鉛直方向 (z 軸方向) に元の位置より v だけ変位すると仮定している。なお、 v の値はせん断変位 u に

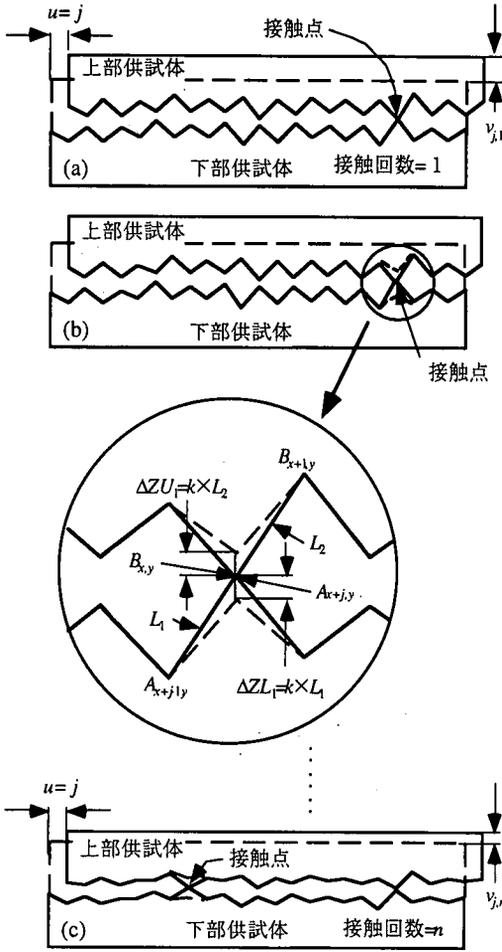


図-2 せん断挙動のモデル化 ((a) 接触回数が一回目の状態図, (b) 幾何学的な削れ方の概念, (c) 接触回数が n 回目の状態図)

よって随時変化を伴う。この挙動をシミュレートするためには、まずこのラフネスを計測し、得られた離散化ラフネスデータを計算機上にせん断方向 (x 軸方向) およびせん断方向に直交する方向 (y 軸方向) に単位長さ $\Delta x, \Delta y$ ごとに鉛直座標として数値化する必要がある。本研究では、 $\Delta x, \Delta y = 1.0\text{mm}$ としている。また、x 軸方向に計測された点の数を N 、y 軸方向に計測された点の数を M とする。

上部供試体と下部供試体が完全に噛み合っていると仮定して、図のようにせん断変位が j 進んだ時を考える。せん断方向に最大傾斜角をもつ下部供試体の $A_{x+j-1,y} \sim A_{x+j,y}$ 部分に沿って上部供試体の $B_{x,y} \sim B_{x+1,y}$ 部分が接しながら乗り上がり、 $A_{x+j,y}$ と $B_{x,y}$ が一点で接触する。この $A_{x+j,y}$ と $B_{x,y}$ の削れを生じた後の鉛直座標を決定するには次のように簡略化して考えることにする。

図-2 に示すようにせん断変位 $u=j$ が生じたとき、接触点を求め、2.(1) で説明した“削れ方”の考え方に従って上下供試体に削れを生じさせる。そして、2.(4) で後述する“収束条件”の考え方に従って、次々に生じる接触点で削れを生じさせ、この操作を垂直変位 v がある値に収束するまで繰り返す。解析値が収束すると各ステップのせん断変位量を j として、任意のせん断ステップに達するまで同様のステップ計算を繰り返す。

せん断変位 $u=j$ のとき全点において下部、上部供試体の接触点の鉛直座標を $Z(A_{x+j,y})_{u=j}$ 、 $Z(B_{x,y})_{u=j}$ とする。せん断試験前には下部、上部供試体は完全に噛み合っているので $Z(A_{x+j,y})_{u=0} = Z(B_{x,y})_{u=0}$ である。せん断変位 $u=j$ におけるせん断挙動は一番急斜な凹凸部分、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。

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

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 n 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、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 $(x,y) = (x_n, y_n)$ 、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。

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

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

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

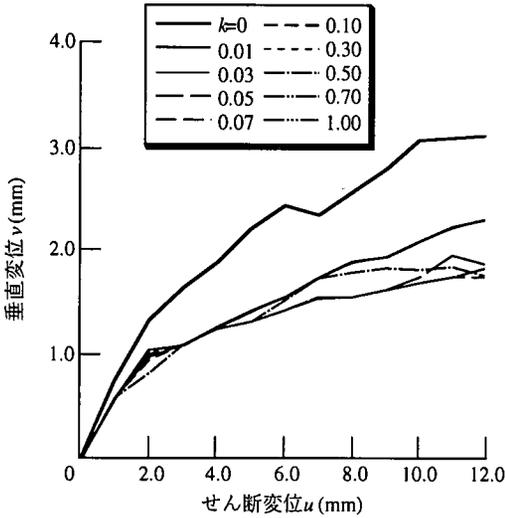


図-3 収束条件1で解析したダイレイタンスー曲線

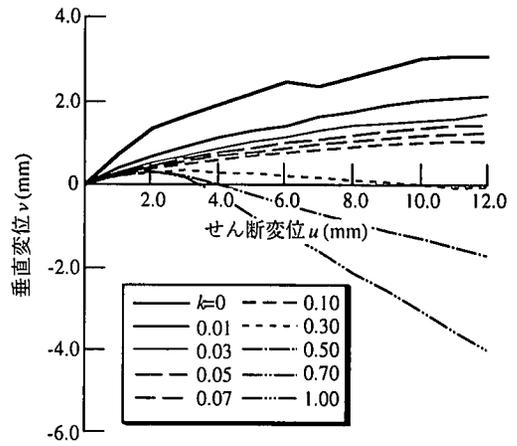


図-5 収束条件2で解析したダイレイタンスー曲線

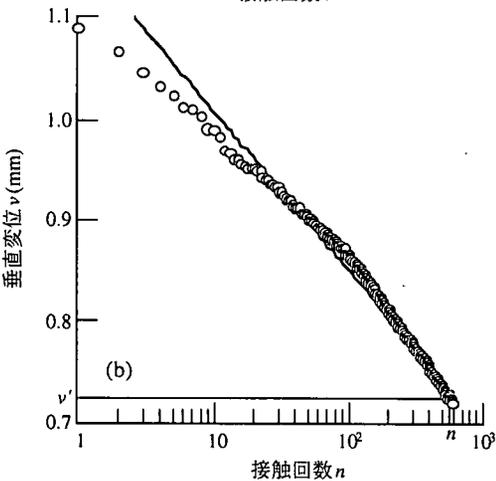
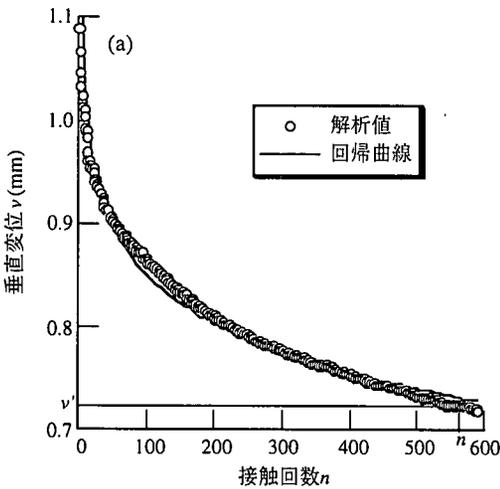


図-4 接触回数 n と垂直変位 v の関係
((a) $n \sim v$ 関係, (b) $\log n \sim v$ 関係)

(4) 接触回数 n の収束条件

本研究の初期段階では接触回数 n を任意の値に設定して解析を行っていた⁸⁾。しかし、接触回数 n は工学的な意味を持たない。よって、せん断挙動を減耗率 k のみで表現するためには接触回数 n に関係なく垂直変位が収束する条件を考えなければならない。

上記の事項を検討するため、後述する円形供試体(図-9(a)参照)を用いて、2種類の収束条件の妥当性について検討した結果を以下に示す。

a) 収束条件1

はじめに、接触回数 $n-1, n$ における垂直変位の差が 0.0001 mm 以下の場合、計算を終了するという条件で解析を行った。その結果、減耗率 k の値を大きく変化させても垂直変位は図-3に示すように約 1.7 mm に収束するという現象が生じた。これは計測値と同じ高さのデータが存在しているため、接触回数 $n-1, n$ において垂直変位の差が 0 となったことにより発生した現象と考えられる。よって、この条件ではダイレイタンスー曲線を表現できないことがわかった。

b) 収束条件2

次に、“収束条件1”の結果を考慮して新しい収束条件を考えることにする。接触回数を制限せずに解析した結果、接触回数 n と垂直変位 v の関係は、図-4(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-4(b)のようになる。この対数関数を用いて接触回数 n の収束条件を次のように考える。

- ① 接触回数 $n=i$ のとき、 i 個の計算値から垂直変位の差の二乗誤差が最小になるような対数関数を求める。
- ② その対数関数を用いて、接触回数 $n-1, n$ にお

る垂直変位の差が0.0001 mm 以下になる接触回数 n に対応する垂直変位 v の値を v' とする。

- ③ 接触回数 $n=i$ における垂直変位 v の値が v' より小さくなるとそこで計算を終了し、垂直変位の値 v が v' より大きい場合は接触回数 n を増やして、再び計算を行う。

この収束条件で解析した結果を図-5に示す。図から明らかなようにダイレイタンスー曲線の変化は減耗率 k に依存するという結果が得られた。よって、この収束条件で解析を行う。

3. ダイレイタンスー曲線を用いたせん断強度式

本研究は目的は前述したように、不連続面の離散化ラフネスデータを用いてせん断時のダイレイタンスー曲線を推定し、そのダイレイタンスー曲線からせん断応力を推定する方法を提案することにある。ダイレイタンスー曲線を用いたせん断強度式は多くの研究者によって提案されている。ただし、以下に述べる提案式はいずれもせん断過程でのラフネスの削れを明確に考慮したものではない。

Hvorslev⁹⁾ 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。

$$\tau = \sigma_v \tan \phi_b + \sigma_v \frac{\Delta v}{\Delta u} \quad (9)$$

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

Seidel and Harberfield¹⁰⁾ は供試体を剛体とし、エネルギー保存の法則を適用してせん断強度式を次のように提案した。

$$\tau_{u=j} = \frac{\sigma_n (\tan i_{\max,j} + \tan \phi_b)}{1 - (dv/du)_{u=j} \tan \phi_b} \quad (10)$$

$$i_{\max,j} = \tan^{-1} (dv/du)_{u=j}^{k=0} \quad (11)$$

さらに彼らは、式(10)にダイレイタンスー曲線を適用できるように以下のようにせん断強度式を表している。

$$\tau_{u=j} = \frac{\sigma_n (\tan i + \tan \phi_b)}{1 - (dv/du)_{u=j} \tan \phi_b} \quad (12)$$

ここに、 i は表面の初期傾斜角である。

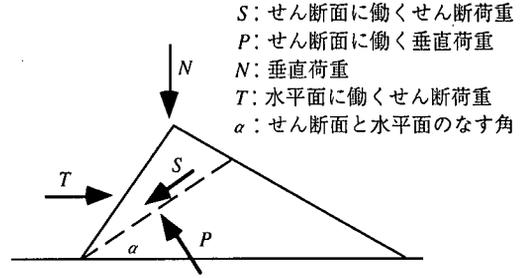


図-6 せん断面における力の釣り合い

Bro¹¹⁾ はせん断が起こる際にその部分にかかる荷重を図-6に示すように考え、つり合い式を次のように示した。

$$S = T \cos \alpha - N \sin \alpha \quad (13)$$

$$p = N \cos \alpha + T \sin \alpha \quad (14)$$

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

$$\delta E_t = T \delta t = \delta E_n + \delta E_s = N \delta n + S \delta s \quad (15)$$

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 は新しいせん断面をつく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。

$$\delta n = \delta t \tan \alpha \quad (16)$$

$$\delta s = \frac{\delta t}{\cos \alpha} \quad (17)$$

以上により、エネルギー消費率は次式で表せる。

$$\dot{E}_t = T = N \tan \alpha + \frac{S}{\cos \alpha} \quad (18)$$

ここで、このエネルギー消費率が最小となるときの α が最適の破壊角となる。

$$T = N \tan (\phi_{int} + \alpha) \quad (19)$$

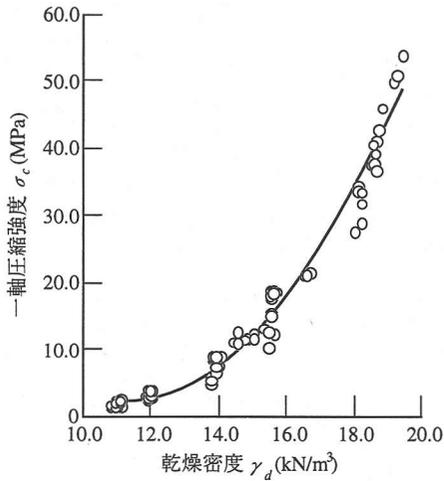


図-7 一軸圧縮試験結果

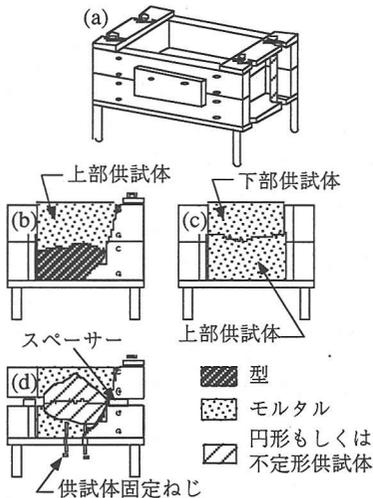


図-8 供試体作成用モールドと作成方法 (a) 供試体作成用モールド, (b) 上部供試体作成方法, (c) 下部供試体作成方法, (d) 円形もしくは不定形供試体作成方法

ここに、 T は水平面に働く新しいせん断荷重、 ϕ_{int} は新しいせん断面の摩擦角、 α はせん断面と水平面のなす角である。ただし、 α は割れが生じてできた新しいせん断面と水平面のなす角であると考えられるので、次のように表すことができる。

$$\alpha = (dv/du)_{u=j} \quad (20)$$

$$T = N \tan(\phi_{int} + (dv/du)_{u=j}) \quad (21)$$

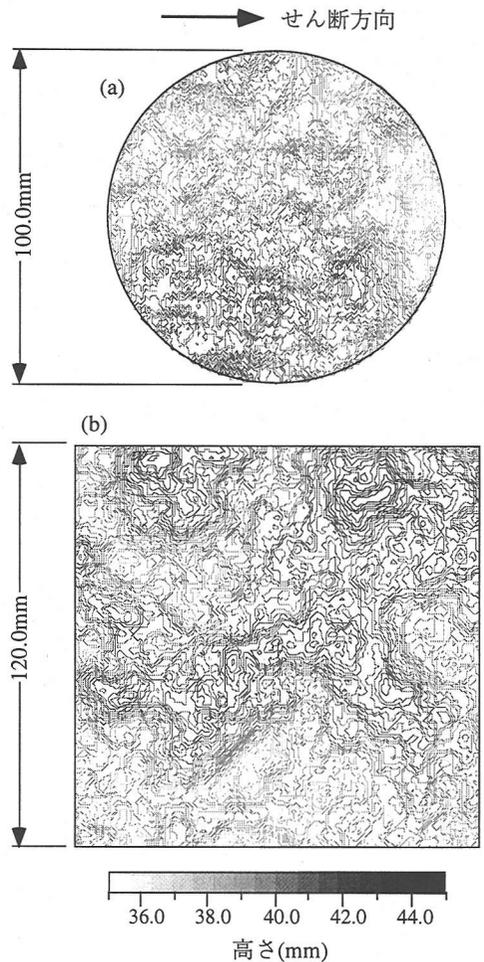


図-9 ラフネスの計測結果 (a) 円形供試体, (b) 方形供試体

以上、ダイレイタンシー曲線を用いたせん断強度式について述べてきたが、以下これらの式の本解析手法への適応性を検討する。

4. 供試体および実験条件

本研究に用いた供試体は円形供試体(直=100.0 mm)と正方形供試体(一辺の長さ=120.0 mm)の2種類である。円形供試体はモルタルのみで作成し、正方形供試体はモルタルに液性限界で練り混ぜたカオリンを混合して図-7に示すように強度の異なる供試体を用意した。セメントに対するカオリンの重量混合比 K/C は0%,50%,100%,200%,300%である。

供試体の作成は図-8(a)に示す供試体作成用モールドを用いて行う。方形供試体の作成方法は、岩石表面を型取った鉄製あるいはシリコンゴム製の型を

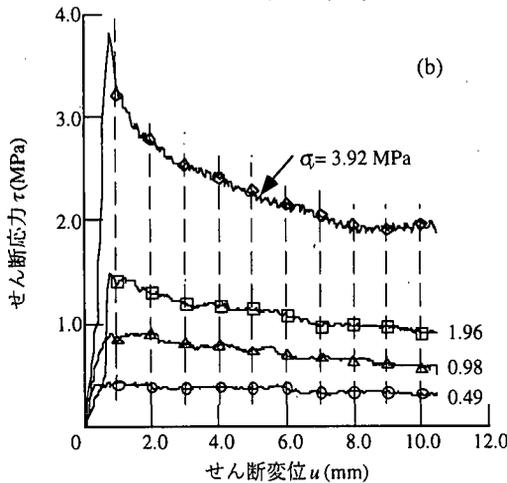
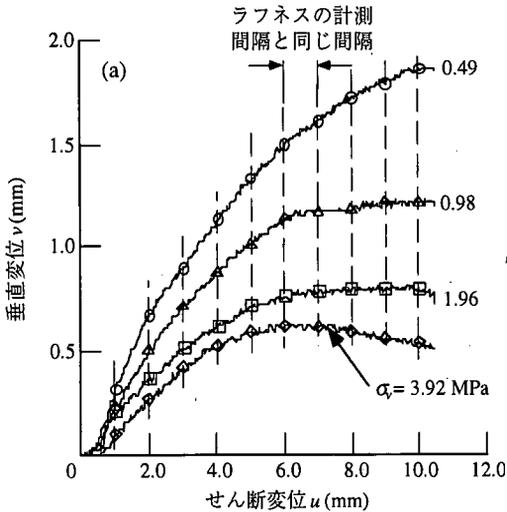


図-10 実験結果 (円形供試体, (a) $u \sim v$ 関係, (b) $u \sim \tau$ 関係)

図-8 (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, 供試体の強度のパラッ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を作成できる (図-8 (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ジェリスを用いている. 円形供試体は図-8 (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

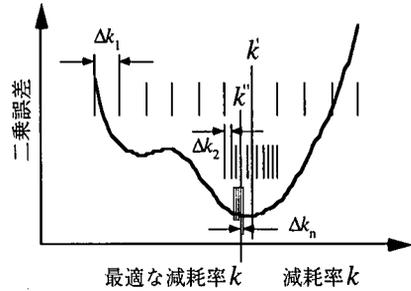


図-11 最適な減耗率 k の計算方法

により固定することで作成できる.

実験条件および実験方法は, 円形供試体については垂直応力 0.490, 0.980, 1.960, 3.920 MPa, 正方形供試体については強度の異なる試料についてそれぞれ垂直応力 0.098, 0.294, 0.490, 0.686, 0.980 MPa のもとで垂直応力一定一面せん断試験を行った. なお, せん断変位速度は 1.0 mm/min とする.

ラフネスの計測は最小スポット径 0.1 mm のレーザ変位計を搭載した装置を用いて, 供試体表面上をせん断方向で格子状に 1.0 mm 間隔で行った. 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. 図-9 にラフネスの計測結果を示す.

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 1) に詳述してある.

5. 解析結果と実験結果の比較

(1) 実験結果への解析方法の適用

次に解析方法を具体的に説明する. 図-10 に一面せん断試験結果を示す. なお, 垂直応力 σ_v ~ せん断応力 τ 関係は解析結果と共に図-17 に示してある.

- ① 図-10(a) のせん断変位 u ~ 垂直変位 v 関係からラフネスの計測間隔と同じ間隔でデータを抜粋する.
- ② 図-11 に示すように, 減耗率 k を 0 から任意の値 (本研究では 1.0 である) までを任意の間隔 Δk_1 ($\Delta k_1 = 0.1$) でダイレイタンスー曲線を計算し, それらの解析値と実験値の二乗誤差が最小となる減耗率 k を求める. この値を k' とする.
- ③ $k' - \Delta k_1$ から $k' + \Delta k_1$ の間を任意の間隔 Δk_2 ($\Delta k_2 = \Delta k_1 / 20$) でダイレイタンスー曲線を計算し, 実験値との二乗誤差が最小となる減耗率 k を求める. この値を k'' とする.

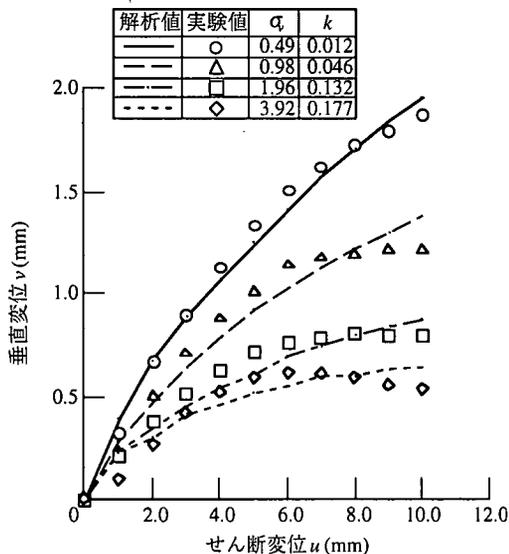


図-12 解析結果と実験結果の比較（せん断変位 u ~ 垂直変位 v 関係，円形供試体）

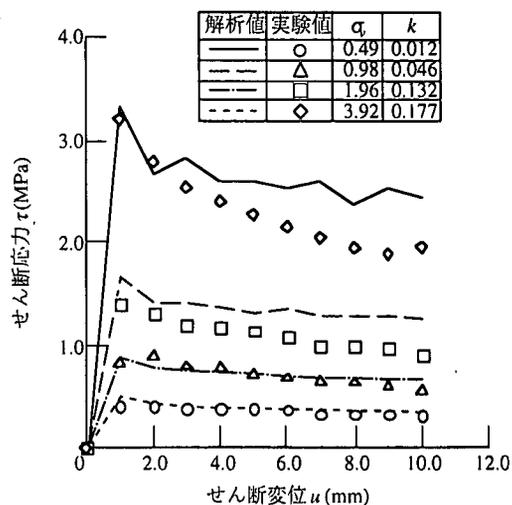


図-14 解析結果と実験結果の比較（せん断変位 u ~ せん断応力 τ 関係，円形供試体）

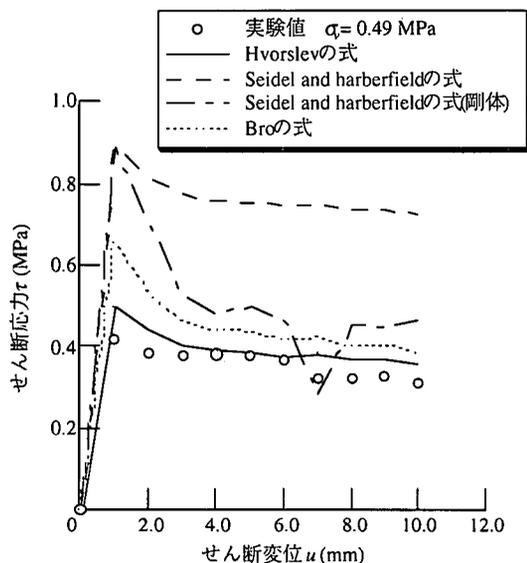


図-13 各せん断強度式による解析結果と実験結果の比較（円形供試体）

④ ③の作業を任意の桁数まで繰り返し，最適な減耗率 k を計算する。

図-12 に円形供試体に本解析手法を適用した解析結果を示す。この図から明かなように，垂直応力 σ_v が大きくなると共に減耗率 k も大きくなる傾向が認められる。せん断変位 u が 1.0 mm のところではすべての垂直応力 σ_v において解析値のほうがやや大きくなっているが，かなり正確に推定できたと考

えられる。

次に図-13 は，前述した 4 種類のせん断強度式に対して，図-12 に示す解析結果の内，垂直応力 σ_v が 0.49MPa の場合のダイレイタンスー曲線を適応し，それぞれの変位に対応するせん断応力 τ を求めた結果である。なお，実験値は垂直変位 v と同様にラフネスの計測間隔と同じ間隔で抜粋してある（図-10(b)）。図に示すように実験値を良く表現しているのは Hvorslev の式である。よって，以下せん断強度式は Hvorslev の式でもって議論する。

さらに図-14 は，図-12 に示す各垂直応力に対する解析結果に，Hvorslev のせん断強度式を適用させて求めたせん断変位 u とせん断応力 τ 関係である。これらの結果よりダイレイタンスー曲線が本解析方法によって推定できればせん断応力 τ の推定が可能であることがわかる。

図-15 はモルタルにカオリンを混合した一軸圧縮強度の異なる方形供試体を用いて行った実験結果に本解析方法を適用したものである。この図から，正方形供試体についてもかなり正確に推定できたと考えられる。また，減耗率 k は母岩の強度が低くなると共に増加する傾向があることがわかる。

これらのことから，垂直応力 σ_v が大きいのか，もしくは供試体の強度が弱いほどダイレイタンスーは小さくなり，実験値に相当する減耗率 k の値は大きくなるのがわかる。減耗率 k と正規化応力比 σ_v/σ_c の関係を図-16 に示す。図を詳細に見ると，円形，方形供試体は同一線上には乗っていないことがわかるが，個々の供試体のデータには累乗関係にあるこ

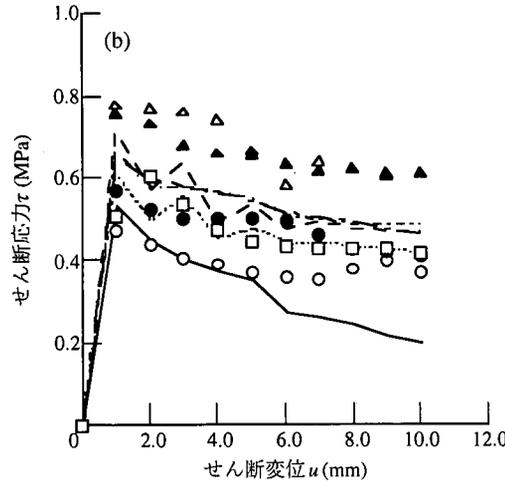
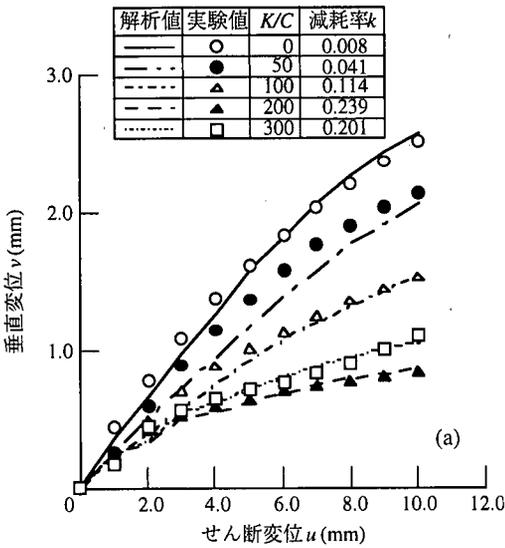


図-15 解析結果と実験結果の比較 (方形供試体, 垂直応力 $\sigma_v = 0.98 \text{ MPa}$, (a) $u \sim v$ 関係, (b) $u \sim \tau$ 関係)

とが読み取れる。このように同一線上に乗らない原因として、ラフネスの形状、ラフネスの異方性などが考えられるが、今後多くの供試体について本解析方法を適用し、その原因を究明していく必要があると考えられる。

(2) 垂直応力 σ_v と最大せん断応力 τ_f の関係について

垂直応力 σ_v と最大せん断応力 τ_f の関係について実験値と解析値を比較した結果を図-17に示す。垂直応力 σ_v と最大せん断応力 τ_f の関係は図に示すように原点を通る直線で表すことができる。実験値と解析値を比較すると、最大せん断応力 τ_f は実験値のほ

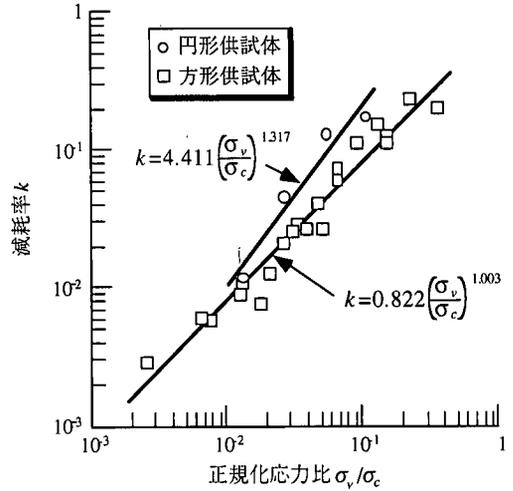


図-16 減耗率 k と正規化応力比 σ_v/σ_c の関係

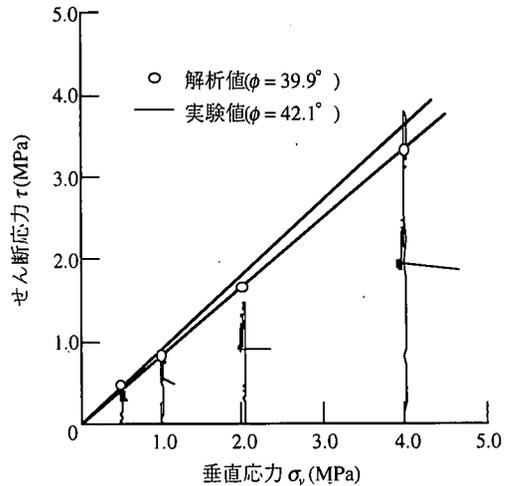


図-17 解析結果と実験結果の比較 (垂直応力 $\sigma_v \sim$ 最大せん断応力 τ_f 関係, 円形供試体)

うが解析値より大きくなっており、内部摩擦角についても実験値のほうがやや大きくなっているが、ほぼ正確に推定することができたと考えられる。

(3) ラフネスの計測間隔が本解析結果に及ぼす影響
ラフネス計測時の計測間隔がその面の粗さを表す係数に大きく影響することは明らかである¹²⁾。よって、ラフネスの計測条件が本解析方法にどのように影響するかを以下に述べる。

a) ライン間隔が解析結果に及ぼす影響

図-18(a)は、供試体を剛体 ($k=0$) として、せん断方向のライン間隔のみを変化させて解析したダイレイタンスー曲線である。この図から明らかなよう

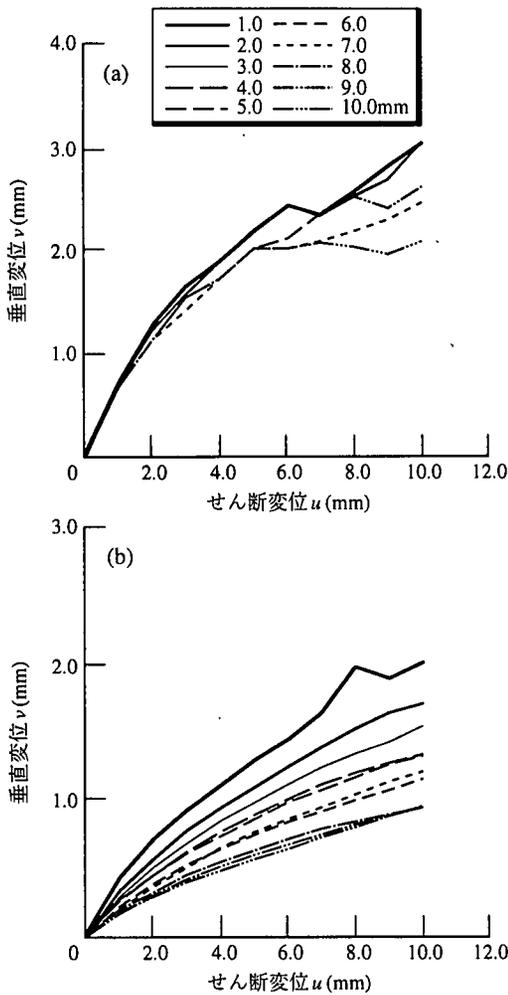


図-18 ライン間隔が解析手法に及ぼす影響
(a) 剛体, (b) 減耗率 $k=0.01$

に剛体として解析した結果には計測間隔の違いによる影響はほとんど見られない。それに対して図-18(b)は、供試体を剛体でない ($k=0.01$) として、せん断方向のライン間隔のみを変化させて解析したダイレイタンスー曲線である。この結果、供試体に削れが生じる場合には計測間隔の違いがダイレイタンスー曲線に大きく影響することがわかる。これらの原因として、供試体を剛体と考えた場合には図-19(a)に示すようにダイレイタンスーに影響する部分は移動せず、しかもその部分は広範囲に散らばっているため、ライン間隔を変えてもダイレイタンスー曲線にほとんど影響しなかったと考えられる。また、供試体を剛体でない ($k=0.01$) と考えた場合は、図-19(b)に示すように削れが生じるため、

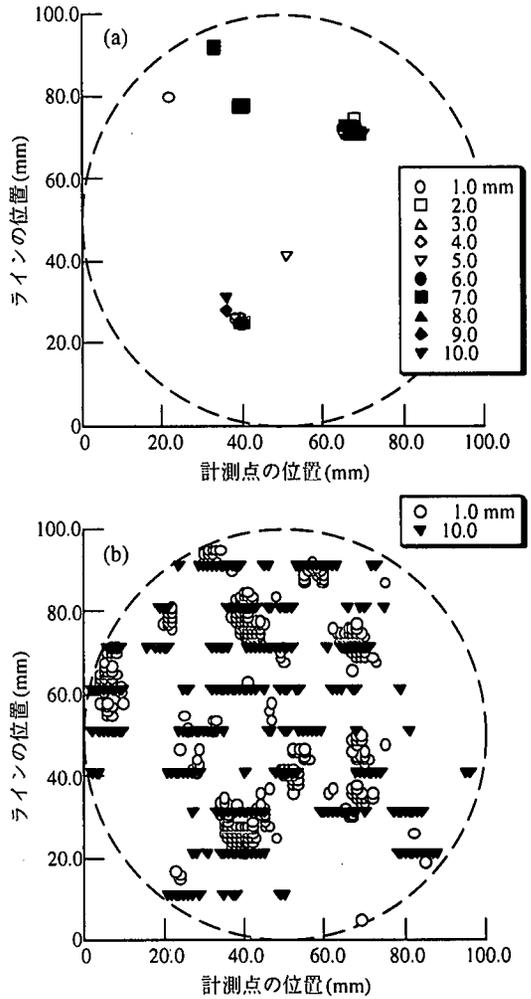


図-19 ライン間隔が解析手法に及ぼす影響の要因 (a) 剛体, (b) 減耗率 $k=0.01$

ダイレイタンスーに影響する部分がランダムに移動し、ダイレイタンスー曲線に変化を与えたと考えられる。

b) 1ラインあたりの計測点の数が解析方法に及ぼす影響

図-20(a)は、供試体を剛体 ($k=0$) と考えて1ラインあたりの計測点数を変化させて解析を行って得られたダイレイタンスー曲線である。図-20(b)は図-20(a)と同様に供試体を剛体でない ($k=0.01$) として解析を行って得られたダイレイタンスー曲線である。この結果、剛体とした場合にも、剛体でないとした場合にもダイレイタンスー曲線にかなりの変化が見られる。これらの原因としては、供試体を剛体 ($k=0$) と考えた場合、図-21に示すように計測間隔が広くなればラフネスは平坦になるので、同じ

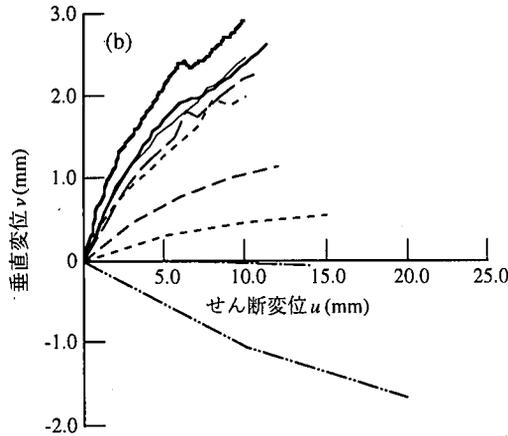
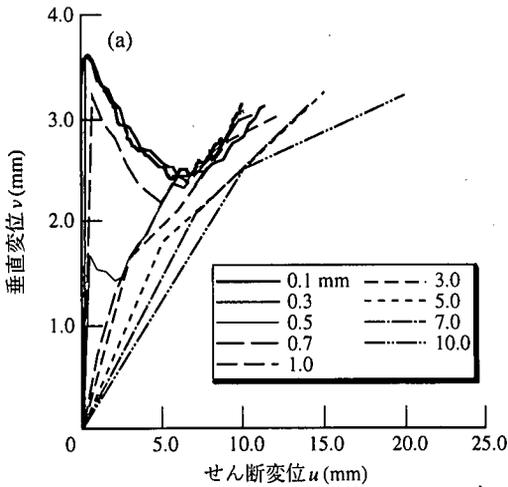


図-20 1 ラインの計測点の数が解析手法に及ぼす影響 ((a) 剛体, (b) 減耗率 $k=0.01$)

水平変位 10.0 mm に対しても垂直変位は小さくなり、ダイレイタンスー曲線の傾きも図-20(a)に示すようにライン間隔の変化と共に緩やかになったと考えられる。また、供試体を剛体でない ($k=0.01$) と考えた場合は、図-1(e)に示すように本解析方法において、削られる量は滑りが生じる辺の長さに比例すると仮定しているの、計測間隔が広くなればなるほど削られる量が多くなりダイレイタンスーの発現がかなり小さくなったと考えられる。

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。今後この問題についても、多くの供試体について本解析方法を適用し、ラフネスの計測間隔を基準化するなど、その要因を究明していく必要があると考えられる。

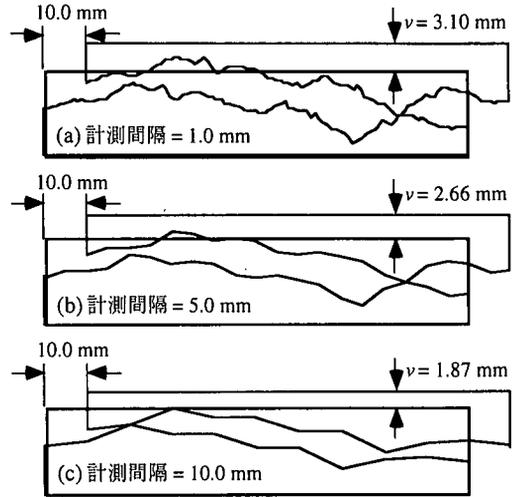


図-21 1 ラインの計測点の数が解析手法に及ぼす影響の要因

6. おわりに

以下に本研究で得られた知見を示す。

- ① ラフネスデータと母岩の強度が得られれば、幾何学的な削れ方と減耗率 k を導入することによりダイレイタンスー曲線を表すことができる。したがって、岩盤不連続面の変形特性をモデル化して推定することができた考えられる。
- ② ダイレイタンスー曲線が正確に推定できれば、せん断応力もほぼ正確に推定できることが判明した。また、本研究で行った実験結果より減耗率 k と正規化応力比 σ/σ_c の関係は累乗の関係にあることがわかった。
- ③ 5.(3)で述べたように、本解析方法は計測間隔などの寸法効果に影響されることがわかった。よって、本解析方法を適用するには寸法効果を考慮に入れ、ラフネスの計測間隔を基準化する必要があると考えられる。

また、減耗率 k は図-16 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、岩盤の強度、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。ただし、本解析方法に影響する要因について未解明な部分も数多くあるので、今後さらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Barton, N. and Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*, Vol.10, pp.1~65, 1971.
 - 3) Barton, N. R. : Review of a new strength criterion for rock joint, *Eng., Geol.*, Vol.4, No.4, pp.287~332, 1973.
 - 4) Patton, F. D. : Multiple Models of Shear Failure in Rock, *Proc. 1st Cong. ISRM(Lisbon)*, Vol.1, pp.509-513, 1966.
 - 5) 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.
 - 6) Jaeger, J. C. : Friction of Rocks and The Stability of Rock Slopes-Rankine Lecture, *Geotechnique*, Vol.21, pp.97~134, 1971.
 - 7) 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.
 - 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) 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
 - 10) Seidel, J. P. and Harberfield, C. M. : The Application of Energy Principles to the Determination of the Sliding Resistance of Rock Joints, 1994.
 - 11) Bro, A. : Failure of Stepped Joints: an Analysis and Comparison with a Measured Failure Geometry, *Int. J. Rock Mech.Min.Sci.&Geomech.Abst.*, Vol.29, No.2, pp.179-186, 1992
 - 12) 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土木学会年次学術講演会概要集, pp.582-583, 1997.
- 7) R. E.グッドマン著, 赤井浩一, 川本眺万, 大西有三 (1999. 6. 21 受付)

THE EVALUATION OF SHEAR STRENGTH OF ROCK JOINTS BASED ON THE DIGITIZED ROUGHNESS PROFILE

Yuzo OHNISHI, Hiroyasu OHTSU, Takao YANO,
Masahiro KATO and Yusuke TAKADA

It is well-known that the mechanical behaviors of rock joints due to shearing generally are heavily dependent on the their geometrical condition, which is so-called roughness profile. Therefore, it is inevitable factor to evaluate the effect of roughness profile on the shear behavior. Up to now, many researchers have proposed the formulations, which associate the shear strength with roughness profile of rock joints, under the idealized assumption that no change of the configuration of joint surface due to shearing occurs. From these viewpoints, focusing on the geometrical change of joint surface due to shearing, this study proposes the formulation of shear strength based on digital data of roughness profile.