

岩盤不連続面の 2 次元・3 次元せん断強度モデルの提案

Proposal of Two and Three-Dimensional Shear Strength model for Rock Joint

尾澤知憲*・大塚悟**・土居正信***

Tomokazu Ozawa, Satoru Ohtsuka, Masanobu Doi

This paper presents shear strength models of rock joint for two and three-dimensional conditions. Both models were proposed based on the mechanical considerations for failure mechanism of rock joint with using limit analysis. Employing the Rengers method to assess the geometry of rock joint quantitatively, the proposed method gives the objective estimation on shear strength in contrast with conventional methods. Shear strengths by proposed methods were obtained almost coincident with both theoretical solutions for regular asperity joints and Barton's experiments for irregular asperity joints. This result clearly expresses the applicability of proposed method to shear strength estimation of rock joint.

Key Words: rock joints, three-dimensional, shear strength model, shear failure mechanism, roughness

1. はじめに

不連続面を有する岩盤の安定性は不連続面のせん断強度に左右されることが多い。不連続面のせん断強度は、岩石の強度、作用している垂直応力、不連続面の凹凸形状(アスペリティ)などの様々な要因に依存する。特に、不連続面の凹凸形状の影響は大きく、そのせん断強度は岩石の強度が同じ場合でも凹凸に依存して異なる強度特性を示すことが広く知られている。よって、不連続面の凹凸形状を定量的に評価し、不連続面の幾何形状とせん断強度との関係を明らかにすることは工学的に重要である。これまでに不連続面のせん断強度に関する研究は数多く行われている。Patton (1966)^[1] は規則的な鋸型形状を有する人工不連続面に対してせん断試験を実施するとバイ・リニアな強度特性が得られることを示し、低垂直応力でのせん断強度の勾配は、アスペリティの傾斜角とすべり摩擦角の和で表されることを明らかにした。Barton (1972)^[2] は不規則な不連続面の表面粗さを 0~20 の値で表現するラフネス係数 (JRC) を導入し、数多くの実験結果から不連続面のせん断強度モデルを提案した。Barton のせん断強度モデルは実用的で非常に優れているが、アスペリティのせん断破壊機構と実験式の関係が明確でない。また、不連続面の形状から JRC を推定する際に観察者の主観が影響する問題点がある。

Ohtsuka & Doi (2003)^[3] は規則的な鋸型形状を有する不連続面に対して極限定理の上・下界計算を実施し、不連続面の幾何形状とせん断強度との間に Patton (1966) が示唆した関係があることを解析的に示した。更に、不連続面のせん断破壊機構の考察に基づいて、不連続面のアスペリティを客観的に評価する Rengers (1970)^[4] の方法を導入したせん断強度モデルを提案した。しかし、問題の単純化のために岩石実質部分の強度には粘着力のみを仮定したことから、著者ら(2004)^[5] は岩石実質部分の強度に粘着力とせん断抵抗角を考慮した摩擦性材料に対して同様の検討を行い、提案モデルの妥当性を確認した。不連続面は本来、アスペリティの形

* 学生会員 長岡技術科学大学大学院 学生

** 正会員 工博 長岡技術科学大学 助教授 環境・建設系

*** 正会員 博士(工学) 高松工業高等専門学校 教授 建設環境工学科

状に起因してせん断方向による強度の異方性を示すと考えられる。しかし、Barton モデルをはじめ既存のせん断強度モデルは、一般に不連続面の強度異方性を表現することはできない。一方、著者らの提案モデルは不連続面の強度異方性を表現することが可能であり、事例解析により不連続面が規則形状の場合に強度異方性は著しいのに対して、不規則形状では強度異方性が大概喪失する特徴があることを明らかにしている。

岩盤不連続面のせん断強度モデルはこれまで 2 次元問題に限定されており、実際の不連続面の 3 次元的なアスペリティを考慮したせん断強度モデルに関する研究は少ない。本論文では Ohtsuka & Doi (2003) および著者ら(2004) の強度モデルに関する枠組みを発展させ、アスペリティの 3 次元的な分布を考慮したせん断強度モデルの提案を試みる。

2. 不連続面のせん断破壊機構と Rengers の形状評価手法

2.1. 上界計算による不連続面のせん断破壊機構

著者ら(2004)は極限定理の上界計算から不連続面のせん断破壊機構について検討を行った。上界計算は可容な破壊形態を仮定してせん断強度を求める手法であるが、有意な解を得るためには破壊形態を変化させて求められるせん断強度の最小化演算を行うことが重要である。図 1 に上界計算に用いた不連続面の形状と仮定した破壊形態の一例を示す。形状に関しては巨視的な視点からより大きな形状を選択して、1 次、2 次…とアスペリティを定義する。一般に高次のアスペリティほど微細な形状を有する。図では i_1 が 1 次アスペリティ、 i_2 が 2 次アスペリティの傾斜角を表す。ここで、不連続面の凹凸形状を観測区間により推測することは、観測区間の凹凸形状（代表形状）が周期的に繰り返されることを表す。図 1-(a)は不連続面の代表形状の例である。不連続面の破壊形態についても代表形状の周期性を考慮する必要がある。そこで、上界計算においては図 1-(a)を 2 個以上連結し、周期性を満足する破壊形態を選定した。図 1 では下側岩盤のアスペリティがせん断破壊する形態のみを示したが、アスペリティの部分的なせん断破壊や上部岩盤のせん断破壊も考慮して上界計算を行った。また、アスペリティのせん断に伴うダイレイタンスは、関連流れ則を仮定することにより岩石のせん断抵抗角 ϕ_R に等しく定めた（図 1-(c),(d)）。アスペリティに沿う不連続面のすべりに対してもすべり摩擦角 ϕ_μ と関連流れ則によるダイレイタンスを考慮した（図 1-(b)）。図 1-(a)の不連続面に対する上界計算によるせん断強度を図 2 の太線（UBC）に示す。また、上界計算の基本式は次のように表される。

$$\tau = \frac{c_R \cos \phi_R}{\cos(\alpha + \phi_R) \cos \alpha} \frac{\Delta L}{L} + \sigma \tan(\alpha + \phi_R) \quad (2.1)$$

ここで、 c_R は岩石の粘着力、 ΔL はせん断されたアスペリティの水平長さ（図 1-(c)）、 L は不連続面の全長である。 α は破壊形態におけるアスペリティ傾斜角であり、2 次アスペリティがせん断された図 1-(c)では $\alpha = i_1$ 、1 次アスペリティがせん断される図 1-(d) では $\alpha = 0^\circ$ となる。破壊形態とせん断強度の関係から、不連続面のせん断破壊機構に関する以下の知見を得る。

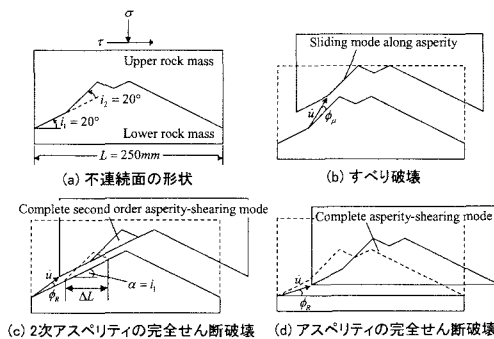


図 1. 不連続面の形状とその破壊形態の一例

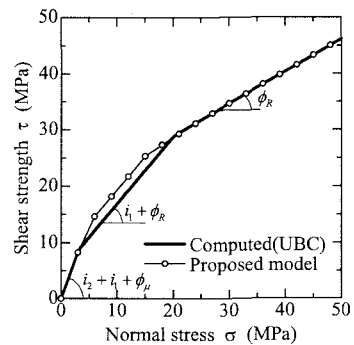


図 2. 図 1-(a)に対するせん断強度

- (1) 不連続面のせん断強度はトリ・リニアな強度特性を示す。
- (2) 各段階での強度線の勾配は破壊形態のアスペリティ傾斜角 α ，すなわち 1 次および 2 次アスペリティの傾斜角 i_1 および i_2 が反映される。
- (3) 式(2.1)の右辺第一項は見かけの粘着力を表す。見かけの粘着力は $\alpha, \Delta L, L$ および ϕ_R に関連する。
- (4) 不連続面のせん断強度は区分線形近似が可能である。式(2.1)によるとせん断強度の区分線形近似は α (アスペリティ傾斜角) と ΔL のパラメータによって表される。
- (5) 見かけの粘着力やせん断抵抗角が垂直応力の増加に伴い変化することで、不連続面のせん断強度の非線形性が現れる。規則形状の場合、その変化は不連続となり、Patton の実験結果と整合する。

以上のように、岩盤不連続面のせん断強度評価では不連続面の幾何情報が極めて重要である。また、以上の知見に基づくと、巨視的には平滑に見える面にてすべり摩擦が存在するのは微視的な凹凸形状の存在によるとの解釈も成り立つ。

2.2. Rengers の形状評価手法

図 3(a) に不連続面の凹凸形状を模式的に示す。検査面全長 L を最小単位長さ S で等間隔に n 分割して測点にて高さを計測する。図では L を 8 等分している。図 3(b) は $\Delta L_1 = S \times 1$ に対する凹凸形状の傾斜角を示しており、その中で最大の傾斜角を求める。傾斜角は反時計回りを正と定義する。測線 4-5 の区間で最大傾斜角 α_1 が得られるので、 $(\Delta L_1, \alpha_1)$ を図 4 に示すように整理する。同様に図 3(c) についても $\Delta L_2 = S \times 2$ に対して測点間の傾斜角を調べる。図の場合は測線 3-5 の区間で最大傾斜角 α_2 が得られる。検査長 $\Delta L_i (S \times i; i=1, 2, \dots, n)$ を変化させて得られる最大傾斜角 α_i の包絡線(図 4)を Rengers 曲線という。一般に、検査長が長くなると最大傾斜角は徐々に減少する。図 3(d) の場合は $\Delta L_8 = S \times 8$ が検査面全長 L に等しくなるために $\alpha_8 = 0^\circ$ となる。Rengers 曲線は不連続面の凹凸形状を最大傾斜角と検査長の 2 つのパラメータで表現する特長がある。

Rengers 曲線の物理的意味について考察する。アスペリティの一部が検査長 ΔL でせん断される場合を想定すると、Rengers 曲線による最大傾斜角 α は不連続面のせん断に伴う相対変位の方向角度を表す。岩石のせん断に伴うダイレイタンスを考慮すると、不連続面のせん断変位角度は $\alpha + \phi_R$ であり、不連続面のせん断抵抗角に関連付けられる。一方、検査長 ΔL はアスペリティのせん断長さを表し、 ΔL と L の比は不連続面のせん断抵抗力におけるアスペリティのせん断抵抗の分担率に関連する。以上のように Rengers 曲線から得られる幾何情報は上界計算式(2.1)におけるパラメータ $\alpha, \Delta L$ に関連付けることができる。

3. 不連続面のせん断破壊機構に基づく 2 次元せん断強度モデルの提案

不連続面のせん断強度は Coulomb の破壊基準 $\tau_m = c_m + \sigma \tan \phi_m$ により区分線形近似される。ここに ϕ_m, c_m は不連続面のせん断抵抗角および見かけの粘着力を表し、垂直応力によって変化する。本論文では ϕ_m, c_m を Rengers 曲線から得られる不連続面の幾何情報を用いてモデル化する。Ohtsuka & Doi (2003) は不連続面の破壊機構と幾何形状間の関係に着目して区分線形近似モデルを提案した。しかし、提案されたモデルは 2 次元条件でのみ成立するものであり、3 次元問題への拡張性が低い欠点がある。本論文は 3 次元せん断強度モデルの開発を目的に 2 次元モデルにつ

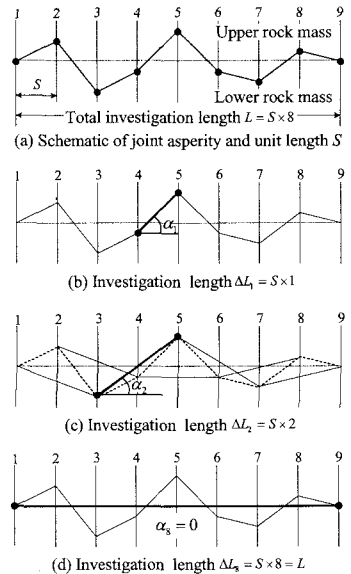


図 3. 傾斜角の測定方法

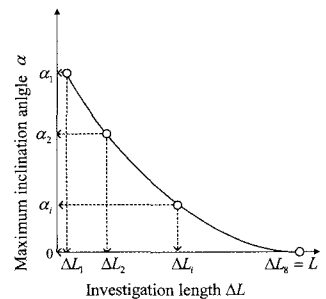


図 4. Rengers 曲線

いて再検討を行った。

3.1. 2次元せん断強度モデルの提案

不連続面の破壊機構は垂直応力の大きさによって変化する。垂直応力が小さい場合にアスペリティのせん断破壊は生じないことから、不連続面のせん断抵抗角はアスペリティの最大傾斜角度に関連付けられる。垂直応力が大きくなるとアスペリティのせん断破壊が生じる。一般に高次のアスペリティからせん断破壊が生じ始め、垂直応力が大きくなるにしたがって低次のアスペリティまでせん断破壊を起こすようになる。図2に示すように不連続面のせん断抵抗角はアスペリティの凹凸形状を表すアスペリティ傾斜角度に応じて不連続に変化する。この事例より、不連続面のアスペリティ傾斜角を計測することによってせん断抵抗角を予測できることが分かる。不連続面のせん断強度を上界計算によって求めると式(2.1)が得られるが、右辺第2項はせん断抵抗角がアスペリティ傾斜角度と岩石のせん断抵抗角との和で表されることを示す。以上から、本論文では Rengers 曲線から得られるアスペリティ傾斜角を用いて式(3.1)のように区分線形近似モデルのせん断抵抗角を与えることとする。

$$\phi_m = \alpha + \phi_r, \quad c_m = \frac{c_r \cos \phi_r}{\cos(\alpha + \phi_r) \cos \alpha} \frac{\Delta L}{L} \quad (3.1)$$

不連続面のせん断強度式(3.1)、右側の右辺第1項は見かけの粘着力項を示し、アスペリティのせん断長さ ΔL の関数で表される。しかし、 ΔL は独立な変数ではなく、破壊機構から幾何的に規定される関係が不連続面のせん断方向角度 α との間に成立している。本論文では不連続面のせん断方向角度 α がアスペリティ傾斜角度に関連付けられることに着目して、これらの指標に図4に示す Rengers 曲線による関係を仮定する。これにより、アスペリティのせん断水平長さ ΔL を規定すると Rengers 曲線からアスペリティ傾斜角、すなわちせん断方向角度 α が求められる。本論文では粘着力を式(3.1)のように定義することにより、区分線形近似モデルを構築する。式(3.1)のモデルは上界計算結果を直接区分線形近似モデルに適用していることから力学的に構造が明快であり、3次元問題への拡張性に優れている。

3.2. 事例解析

提案モデルの適用性を確認するために事例解析を示す。岩石の強度定数は $JCS=60\text{MPa}$, $\phi_r=30^\circ$ とし、これらの値より c_r を求めた。 ϕ_μ は平滑な不連続面の間に作用するすべり摩擦角であり、岩種や岩級によって様々な値が考えられるが、本論文では $\phi_\mu = \phi_r$ とした。図6に図5の Type1 に対する Rengers 曲線を、図7に上界計算および提案モデルのせん断強度を示す。図6の横軸は検査長を正規化して示している。図7のように提案モデルのせん断強度は上界計算結果と完全に一致している。次に、図5に示す3種類の不連続面に対するせん断強度について考察する。前述のように不連続面には周期性があると仮定していることから図5も不連続面を代表する形状を示している。図5の Type1 と Type2 の不連続面はアスペリティの傾斜角が等しいが、代表形状の検査長が異なっている。しかし、上界計算によりせん断強度を求めると Type1,2 は同一のせん断

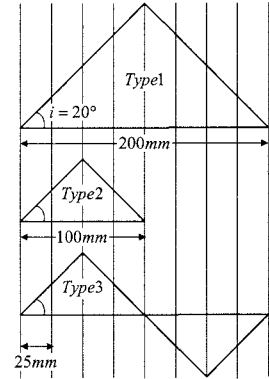


図5. 不連続面の形状

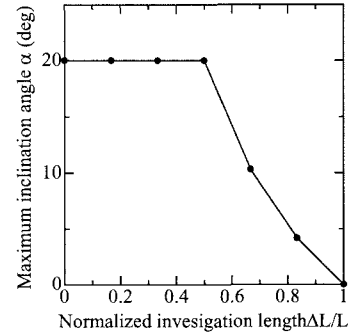


図6. Type1 に対する Rengers 曲線

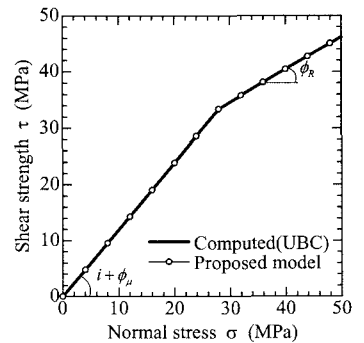


図7. 上界計算との比較

強度（図 7）を得る．これに対して Type2 の Rengers 曲線は図 6 に一致することから，提案モデルも図 7 に示すせん断強度となる．Type3 はアスペリティの傾斜角および代表形状の検査長さが Type1 と等しい波型のアスペリティである．個々のアスペリティの形状は小さいが，せん断抵抗力はアスペリティ全体で発揮されるために上界計算によるせん断強度はやはり Type1 と等しくなる．Type3 の不連続面の Rengers 曲線は図 6 に一致することから，提案モデルのせん断強度も Type1 と同一となる．

次に高次アスペリティを含む不連続面のせん断強度について検討するために図 2 に図 1-(a)に対する提案モデルのせん断強度を上界計算結果と合わせて示した．提案モデルのせん断強度は理論解より大きい箇所が見られるが概ね一致している．また，提案モデルは垂直応力の増加に伴い破壊形態が高次アスペリティから低次アスペリティのせん断破壊に移行する様子をうまく表現している．以上のように提案したモデルは理論解とよく一致することから，その適用性が確認された．

4. 3 次元的不連続面の形状評価手法と 3 次元せん断強度モデルの提案

4.1. 規則形状を用いた上界計算によるせん断破壊機構の考察

極限定理の上界計算を用いて，アスペリティが 3 次元的に分布する不連続面のせん断破壊機構について検討し，せん断強度を推定する際に必要な幾何情報を明らかにする．図 8 に示すような四角錐状のアスペリティを考える．これを 1 次アスペリティと呼ぶ．底面と側面との挟角は $i=20^\circ$ であり，底面は一辺の長さが 100mm の正方形である．アスペリティをせん断する方向は $\theta=0^\circ$ である．なお， θ は x 軸から反時計回りを正とする．上界計算で考慮する破壊形態は，①アスペリティの側面に沿うすべり破壊(Mode1)，②アスペリティの一部せん断破壊(Mode2)，③アスペリティの完全せん断破壊(Mode3)，である．1 次アスペリティがせん断を受け，その一部がせん断破壊したときの破壊形態(Mode2)を図 9 に示す． α は切断面(ハッチ部)の傾斜角であり，底面は一辺の長さが L の正方形である．解析に当たり，不連続面の巨視的なせん断力および垂直応力をそれぞれ τ, σ と規定し，不連続面の微視的なせん断抵抗力および垂直抗力をそれぞれ $\underline{\tau}, \underline{\sigma}$ と定義した． $\underline{\tau}, \underline{\sigma}$ には 2 つの場合がある．1 つは不連続面に沿うすべりであり， $\underline{\tau}, \underline{\sigma}$ はすべり摩擦角 ϕ_μ および粘着力 c_μ に規定される．本論文では $c_\mu = 0$ と仮定している．他方は不連続面に沿うアスペリティがせん断される場合であり， $\underline{\tau}, \underline{\sigma}$ は岩石強度によるモール・クーロン則， $\underline{\tau} = c_R + \underline{\sigma} \tan \phi_R$ に従うと仮定する．不連続面のせん断方向を表すせん断角度には不連続面でのすべりやせん断に伴うダイレイタンシー角を考慮した．なお，ダイレイタンシー角には関連流れ則を仮定している．内部エネルギーの消散に関連する切断面の面積 $A(\alpha)$ は，

$$A(\alpha) = \frac{s(\alpha)}{\cos \alpha}, \quad s(\alpha) = \left(\frac{L \cdot \tan i}{\tan i + \tan \alpha} \right)^2 \quad (4.1)$$

と表される．上式の $s(\alpha)$ は切断面の底面への射影面積である．切断面の面積 $A(\alpha)$ により内部エネルギー消散率は次式となる．

$$D = \frac{s(\alpha)}{\cos \alpha} \cdot \underline{\tau} \cdot \dot{u} \cos \phi_R - \frac{s(\alpha)}{\cos \alpha} \cdot \underline{\sigma} \cdot \dot{u} \sin \phi_R \quad (4.2)$$

上式に不連続面のせん断抵抗力 $\underline{\tau} = c_R + \underline{\sigma} \tan \phi_R$ を代入すると次式となる．

$$D = \frac{s(\alpha)}{\cos \alpha} \cdot c_R \cdot \dot{u} \cos \phi_R \quad (4.3)$$

また，外力仕事率は巨視的なダイレイタンシー角 $(\alpha + \phi_R)$ より，

$$W = L^2 \cdot \tau \cdot \dot{u} \cos(\alpha + \phi_R) - L^2 \cdot \sigma \cdot \dot{u} \sin(\alpha + \phi_R) \quad (4.4)$$

となる．式(4.3)と式(4.4)を等値して， τ について解くと図 9 に関する不連続面のせん断強度式を得る．

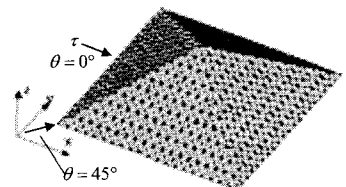


図 8. 1 次アスペリティ

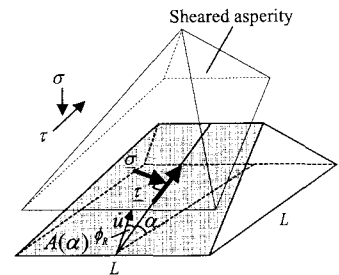


図 9. Mode2 の破壊形態

$$\tau = \frac{c_R \cdot \cos \phi_R}{\cos(\alpha + \phi_R) \cdot \cos \alpha} \cdot \frac{s(\alpha)}{L^2} + \sigma \cdot \tan(\alpha + \phi_R) \quad (4.5)$$

ここで、式(4.5)の第1項の見かけの粘着力は面積比 $s(\alpha)/L^2$ に関連する。切断面の形状や面積は不連続面の形状や傾斜角 α によって様々に変化する。図8の場合、傾斜角の減少に伴い、初期形状の三角形から台形を経て、最終的に正方形になる。 $\alpha = i$ のときは Model1 に対応し、式(4.1)から $s(\alpha)$ はアスペリティの側面の面積となる。このときはアスペリティのせん断破壊は生じないので強度定数 ϕ_R, c_R をそれぞれ ϕ_μ, c_μ に置き換える。 $\alpha = 0^\circ$ のときは Mode3 に対応し、 $s(\alpha)$ はアスペリティの底面積となる。 $0^\circ < \alpha < i$ のときは Mode2 に対応する。図10は図8に対する上界計算結果である。強度定数は前述と同様である。Model1,3 は垂直応力に対して線形であるが、Mode2 は非線形であることが分かる。上界定理に基づいてせん断強度の最小化を行うと不連続面のせん断強度を得るが、矢印で示す区間で Mode2 の非線形性が若干ながら現れ、せん断強度は連続的に変化する傾向にある。これは垂直応力に対してせん断強度が不連続に変化する2次元断面のせん断挙動とは異なる結果である。2次元断面の場合、奥行き方向に対するせん断長さは一定であるので切断面の面積も一定である。しかし、3次元的不連続面の場合、切断面の形状は傾斜角 α に依存して変化することから、3次元問題では切断面の面積もせん断強度に影響する。全般的には2次元問題と同様、せん断強度はアスペリティの傾斜角が反映されている。以上の考察から3次元的不連続面のせん断強度を予測する際に必要な幾何情報は、アスペリティの傾斜角 α およびそれに対する面積比 $s(\alpha)/L^2$ であることが明らかになった。

4.2. アスペリティが3次元的に分布する不連続面の形状評価法

3次元的不連続面のせん断強度を推定する際に必要な幾何情報は傾斜角 α と面積比 $s(\alpha)/L^2$ である。しかし、3次元的不アスペリティの場合、傾斜角 α に対する切断面の面積を求めることは容易ではなく、不連続面が不規則形状を有する場合は更に困難を極める。本論文ではアスペリティをせん断方向と平行に区切り、そこから抽出した2次元断面に対して Rengers の形状評価法を適用することで3次元的に分布する不連続面の形状評価を行う方法を提案する。

図11は図8の形状を上から見た平面図である。図に示すようにアスペリティをせん断方向に対して平行に、 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_{11}$ のように区切り、検査線上に存在する2次元断面を抽出する。図では11個の2次元断面が得られる。各断面に対して Rengers の形状評価法を適用し、重ね合わせると図12に示す Rengers 曲線が得られる。各 Rengers 曲線に対して最大化を図ると最大傾斜角の包絡線 L6 が得られるので、これを3次元的に分布する不連続面の代表 Rengers 曲線と定義する。

次にせん断長さ比 $\Delta L/L$ を面積比 $\Delta A/A$ に変換する。面積比に変換する際にはせん断方向に直行する方向のせん断長さ比 $\Delta L/L$ を考慮する。

$\Delta L/L$ と $\Delta L/L$ の関係は図13に示す始点 o と終点 p を結ぶ関数で表され、せん断方向やアスペリティの形状

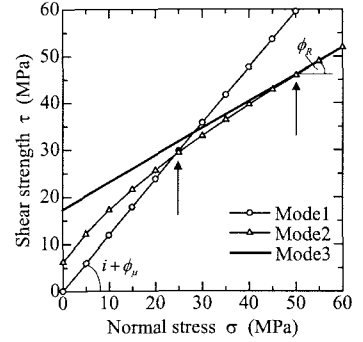


図 10. 1 次アスペリティの上界計算 ($\theta = 0^\circ$)

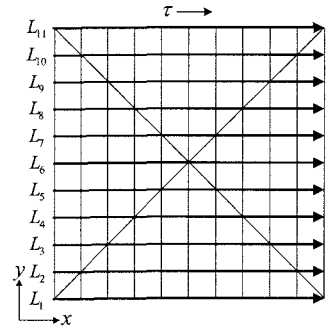


図 11. 2 次元断面の抽出方法

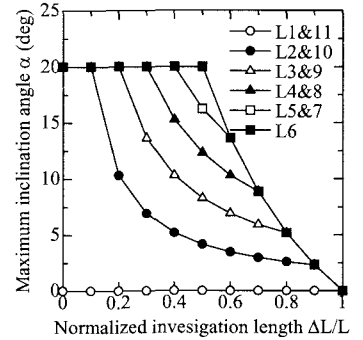


図 12. 各 2 次元断面の Rengers 曲線 ($\theta = 0^\circ$)

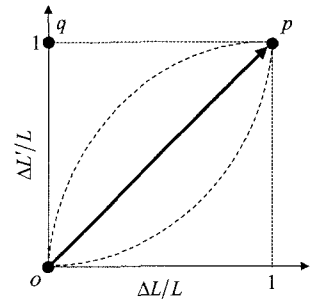


図 13. $\Delta L/L$ と $\Delta L/L$ の関係

等により様々な関数が考えられる．本論文ではせん断方向が決定されると，これに直行する方向の不連続面の性状は，せん断方向に平行な不連続面の性状と同質であると仮定(等方性の仮定)することから，せん断長さの関係に $\Delta L'/L = \Delta L/L$ を表す直線 op を採択する．図 14 ($\theta = 0^\circ$) に図 8 に対する 3 次元 Rengers 曲線を示した．図の Rengers 曲線の横軸には面積比を用いた．

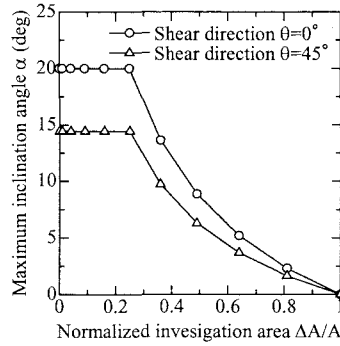


図 14. 図 8 に対する
3 次元 Rengers 曲線

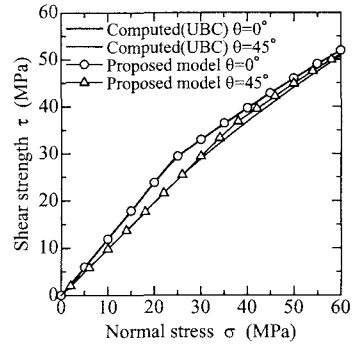


図 15. 図 8 に対するせん断強度

4.3. 3 次元せん断強度モデルの提案

本論文では式(4.5)の $s(\alpha)/L^2$ を $\Delta A/A = \Delta L \cdot \Delta L'/L^2$ に置き換えて，次の 3 次元強度モデルを提案する．

$$\phi_m = \alpha + \phi_R$$

$$c_m = \frac{c_R \cdot \cos \phi_R}{\cos(\alpha + \phi_R) \cdot \cos \alpha} \frac{\Delta A}{A}, \quad \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta L \cdot \Delta L'}{L^2} \quad (4.6)$$

上式に対して 3 次元 Rengers 曲線から得られる幾何情報 ($\alpha, \Delta A/A$) を適用し，Coulomb 破壊基準 $\tau_m = c_m + \sigma \tan \phi_m$ を用いて区分線形近似により不連続面のせん断強度を評価する．なお， $\Delta L'/L = 1$ の場合に面積比はせん断長さ比となり，式(4.6)は 2 次元モデルに帰着する．

4.4. 提案モデルの妥当性

図 8 の形状に関する提案モデルおよび上界計算によるせん断強度を図 15 に示す．強度定数は前述のものと同様である．せん断方向は $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ の 2 方向を考え，図 14 に示す 3 次元 Rengers 曲線によりせん断強度を推定した．3 次元的なアスペリティはせん断方向によって形状特性が変化する．図 8 の初期のアスペリティ傾斜角は， $\theta = 0^\circ$ のときは側面と底面の狭角 ($i = 20^\circ$) であるが， $\theta = 45^\circ$ のときは稜線と底面の狭角 ($i = 14.4^\circ$) となる．図 14 の差異はせん断方向によって異なる形状特性を示している．図 15 に上界計算および提案モデルによるせん断強度を示す． $\theta = 0^\circ$ の提案モデルによるせん断強度は上界計算結果と完全に一致している．一方， $\theta = 45^\circ$ では上界計算と整合しない箇所があるものの，提案モデルは理論解と概ね一致している． $\theta = 0^\circ$ および 45° のせん断強度の間に大きな差異が見られ，強度異方性が現れているが，このことは提案モデルによって 3 次元的な不連続面のせん断方向に起因する強度異方性の評価が可能であることを示唆している．

図 16 に高次アスペリティの事例を示す．1,2 次アスペリティの傾斜角をそれぞれ $i_1 = 20^\circ, i_2 = 20^\circ$ とした．せん断方向は $\theta = 90^\circ$ である．図 17 に図 16 に対する Rengers 曲線を示す．図 17 の初期の最大傾斜角は $i_1 + i_2$ であり，面積比の拡大に伴い α は減少する．面積比に対して α が一定である区間は 1 次アスペリティの傾斜角を表している．図 18 に理論解と提案モデルのせん断強度を示す．理論解は 2 次元問題と同様に，破壊形態が高次から低次アスペリティのせ

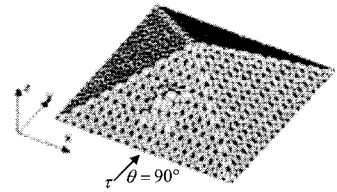


図 16. 高次アスペリティ

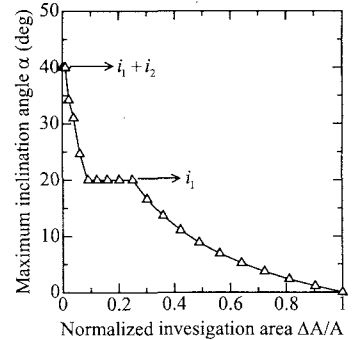


図 17. 図 16 に対する
3 次元 Rengers 曲線 ($\theta = 90^\circ$)

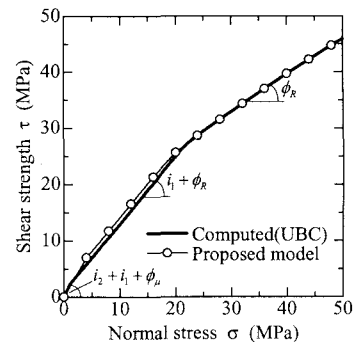


図 18. 図 16 に対するせん断強度
($\theta = 90^\circ$)

ん断破壊に移行することでせん断強度の非線形性が現れている。提案モデルのせん断強度は理論解とよく一致している。

次に不連続面が不規則な形状の場合について考察する。Barton(1972)は不規則形状を有する不連続面のせん断試験を実施していることから、試験結果とせん断強度を比較することにより提案法の妥当性を検証する。図19はBartonによって示された不規則形状の代表面である。JRC=20を用いると図21に示すように実験式は実験結果によく整合している。本研究では図19の形状特性をRengers曲線により評価して、三次元モデルによりせん断強度を推測する。岩石の強度定数はBartonによって示された、 $JCS=60\text{MPa}$ 、 $\phi_r=30^\circ$ を用いる。図19の代表形状が不連続面の直交2断面で成立すると仮定して作成したRengers曲線を図20に示す。図21に提案モデルと実験結果とのせん断強度の比較を示すが、全般的に試験結果と良く整合している。低垂直応力において提案モデルは試験結果に対してやや小さいせん断強度を与えているが、これは図20のRengers曲線が面積比の増加に伴って急速に減少することに起因する。Bartonの実験で用いられた試験供試体の不規則形状に関する情報が不足するために、図に示すRengers曲線の妥当性に関しては本論文にて議論できない。しかし、実務の面では不連続面の幾何特性を評価する場合に利用できる断面情報は高々不連続面の1断面情報であり、その点では図19の情報を活用することによりせん断強度の予測を行うことが求められる。解析結果は提案モデルのパフォーマンスに未だ課題があることを示している。

5. まとめ

本論文では岩盤不連続面のせん断強度の3次元モデルを提案し、その適用性を事例解析により検証した。以下に得られた結論を箇条書きにする。

- ① 不連続面の破壊機構を上界計算により考察して、せん断強度と不連続面のアスペリティ形状との関係に相関があることを示した。
- ② 上界計算による理論解に基づいて2次元および3次元せん断強度モデルを提案した。
- ③ 不連続面のせん断強度は幾何形状を反映してせん断方向による強度の異方性を示す。提案したせん断強度モデルは強度の異方性を適切に評価できることを、理論解との比較より検証した。
- ④ 不規則形状を有する不連続面のせん断試験結果と提案モデルとの比較を行い、提案モデルの妥当性を明らかにした。3次元的に分布する不連続面の性状に等方性を仮定したにも関わらず提案モデルは実験結果と比較的良好く一致した。しかし、未だ予測精度の低い一面もあり、不連続面の形状評価に課題が残された。

せん断強度の検討に際しては、不連続面のせん断強度による実験的な検討が不可欠であり、今後の課題としたい。

参考文献

- [1] Patton, F. D.: Multiple modes of shear failure in rock, Proc. of 1st Cong. ISRM, pp.509-513, 1966
- [2] Barton, N. R.: A model study of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.9, pp.579-602, 1972.
- [3] Ohtsuka, S. and Doi, M.: Considerations on shear strength and roughness of rock joint, Proc. of 12th Asian Reg. Conf. Soil Mech. and Geotech. Eng., Singapore, 2003.8.
- [4] Rengers, N.: Influence of surface roughness on the friction properties of rock plane, Proc. 2nd Cong. ISRM, Vol.1, pp.229-234, 1970.
- [5] 尾澤知憲・大塚悟・土居正信・廣崎大史: 岩盤亀裂のせん断機構とせん断強度モデルの検討, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, pp229-234, 2004.1.29-30

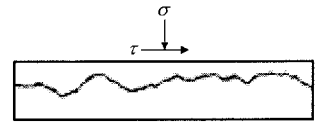


図 19. 不規則形状(JRC=20)

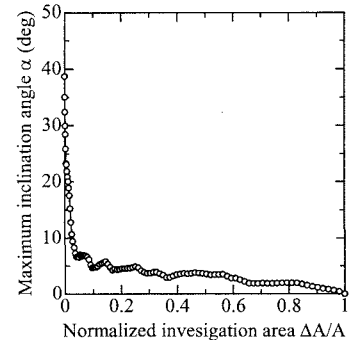


図 20. 図 19 に対する
準 3 次元 Rengers 曲線 ($\theta = 0^\circ$)

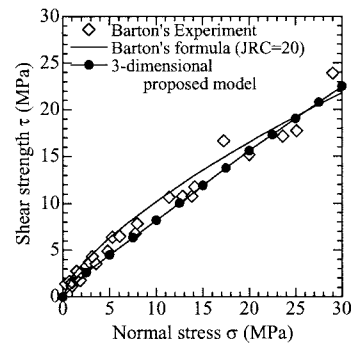


図 21. 図 19 に対するせん断強度
($\theta = 0^\circ$)