

岩盤亀裂のせん断機構とせん断強度モデルの検討

Consideration on Failure Mechanism of Rock Joint and Its Application to Shear Strength Model

尾澤知憲*・大塚悟**・土居正信***・廣崎大史****

Tomokazu Ozawa, Satoru Ohtsuka, Masanobu Doi & Daishi Hirotsuki

Roughness of rock joint affects the shear strength of joint greatly. Ohtsuka & Doi(2003) proposed the shear strength model by applying the Rengers method to estimate the roughness of joint. The applicability of proposed model was examined for the assumption of adherent material on rock. The comparison among the proposed method and upper and lower bound calculations in limit analysis showed a good coincidence. In this study, the shear strength of rock joint was widely investigated for the assumption of frictional material on rock in comparison with upper bound calculations. The applicability was clearly shown for the frictional material. When the roughness of joint is irregular, the shear strength of joint shows the anisotropy depending on the shear direction. Through the case study the proposed method was examined to estimate the anisotropic shear strength properly.

Key Words: rock joints, strength anisotropy, shear failure mechanism, roughness

1. はじめに

亀裂を有する岩盤のせん断強度は不連続面の幾何形状が大きく影響する。岩盤不連続面のせん断強度はこれまでに多くの研究が行われている。Patton(1966)^[1]は不連続面の凹凸形状に着目し、石膏に砂や粘土を混入した人工材料を用いて規則的な歯型形状を有する供試体を作成し、垂直応力を変化させた一面せん断試験を実施した。この結果よりせん断強度は垂直応力に対してバイ・リニアな曲線になり、この曲線によるせん断抵抗角は垂直応力が大きい場合には人工材料のすべり摩擦角 ϕ_μ に等しく、小さい場合は不連続面のアスペリティ角 i と ϕ_μ を合わせた $(i+\phi_\mu)$ に等しくなることを示した。Barton(1972)^[2]は実岩盤の不連続面を用いた数多くの実験結果より、不連続面の粗さを表現するラフネス係数 JRC を導入したせん断強度モデルを提案した。

$$\tau = \sigma \cdot \tan \left[\text{JRC} \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma} \right) + \phi_\mu \right] \quad (1.1)$$

ここで JCS は一軸圧縮強度である。上式は不連続面のせん断抵抗角が垂直応力に応じて変化することを表現している。一方、JRC の決定に際しては観察者の主観が大きく影響するため客観性に乏しいことが問題であ

* 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

**** 非会員 長岡技術科学大学大学院 学生

る。大塚・土居(2003)^[3]は不連続面のアスペリティ（凹凸形状）を Rengers(1970)^[4]の形状評価手法を導入したせん断強度モデルを提案し、岩石が粘着性材料の場合に提案モデルが極限解析の上・下界計算に一致することを示した。また、不規則な凹凸形状を有する岩盤不連続面についても提案モデルを適用し、垂直応力が小さい場合には精度の高い予測が可能であることを示した。

本研究では岩石が摩擦性材料の場合のせん断破壊機構について上界計算により検討した後、Rengers の形状評価手法による提案モデルの妥当性を明らかにする。一般に岩盤不連続面はせん断方向に依存してせん断強度の異方性が発揮されると考えられる。本研究では規則的な凹凸形状および不規則な凹凸形状を有する不連続面のせん断強度異方性について示す。

2. 岩石が摩擦性材料の場合のせん断破壊機構

2.1. 上界計算によるせん断破壊機構の検討

岩石が摩擦性材料である場合のせん断破壊機構を上界計算により検討する。上界計算は可容な破壊形態を仮定することで不連続面のせん断強度を求めるが、有意な解を得る為には破壊形態を変化させて最小化を図ることが重要である。岩盤不連続面の幾何形状として図1に示すような1次アスペリティを有する規則的な歯型を考える。太線はすべり線であり、これに沿ってせん断抵抗力 $\bar{\tau}$ が発揮される。太点線は右方向せん断に対して剥離する不連続面であり、この線上では抵抗力は働かないものと仮定する。上界計算において考慮する破壊形態は、①アスペリティ i に沿って滑動する形態(mode1)、②アスペリティの一部が角度 α でせん断され、それに沿って滑動する形態(mode2)、③アスペリティが完全にせん断される形態(mode3)、である。また、不連続面上では粘着力は働かず、アスペリティの一部または全てがせん断されることで見かけの粘着力が生じるものとする。

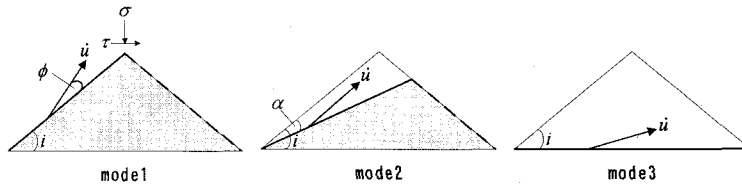


図-1. 1次アスペリティを有する規則歯型と可容な破壊形態

ここで mode2 に対する上界計算式を導出する。内部消散エネルギー率 D は、

$$D = \bar{\tau} \cdot \frac{L'}{\cos(i-\alpha)} \cdot \dot{u} \cos \phi - \sigma \cdot \frac{L'}{\cos(i-\alpha)} \cdot \dot{u} \sin \phi \quad \left(L' = \frac{\tan i}{\tan i + \tan(i-\alpha)} L \right) \quad (2.1)$$

であり、不連続面のせん断抵抗力 $\bar{\tau} = c + \sigma \tan \phi$ を代入すると次式を得る。

$$D = c \cdot \frac{L'}{\cos(i-\alpha)} \cdot \dot{u} \cos \phi \quad (2.2)$$

ここで c, ϕ はそれぞれ岩石の粘着力およびせん断抵抗角であり、 σ は垂直応力である。 L はアスペリティの全長、 L' は消散に影響する斜辺の長さである。 c を一軸圧縮強度 JCS および ϕ で関係付ける場合は、モールの応力円とクーロンの破壊基準から、

$$c = \frac{JCS}{2} \cdot \frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi} \quad (2.3)$$

となる。式(2.2)より内部消散エネルギー率は垂直応力に無関係である。一方、外力仕事率 W は、

$$W = \tau \cdot L \cdot \dot{u} \cos(\phi + i - \alpha) - \sigma \cdot L \cdot \dot{u} \sin(\phi + i - \alpha) \quad (2.4)$$

と表される。ここで τ はせん断強度である。外力仕事率と内部消散エネルギー率を等値した後、 τ について解けば mode2 の上界計算式を得る。

$$\tau = \frac{c \cdot \cos \phi}{\cos(\phi + i - \alpha)} \cdot \frac{L'}{\cos(i - \alpha)} \cdot \frac{1}{L} + \sigma \tan(\phi + i - \alpha) \quad (2.5)$$

上式の $\frac{L'}{\cos(i - \alpha)}$ は消散に影響する斜辺の射影長さであり、これを L で除したものは相対長さを表している。右辺第1項は不連続面の粘着力を表す項であり、アスペリティが角度 α せん断されると、その相対長さは粘着力に影響する。式(2.5)において有意な解を得るには σ を与えて、 τ に関する最小化演算を行う必要がある。式(2.5)は $\alpha=0$ のとき $c=0$ としたものが mode1、 $\alpha=i$ としたものが mode3 の上界計算式となる。図2に各モードに対する不連続面のせん断強度を示す。岩石の強度定数は $JCS=60\text{MPa}$ 、 $\phi=30^\circ$ であり、アスペリティ角 $i=20^\circ$ とした。粘着力 c は式(2.3)により求めた。mode1,3によるせん断強度は垂直応力に対して線形であるが、mode2では非線形である。しかし、上界定理に基づいて可容な破壊形態の中からせん断強度の最小化を行うと mode2 の非線形挙動は実際現象には現れず、せん断強度は mode1 から mode3 へと不連続に移行する。よって、垂直応力に対するせん断強度はバイ・リニアな曲線となる。せん断抵抗角には不連続面の凹凸形状 i と ϕ が直接反映されており、高い垂直応力域でのせん断挙動は ϕ に支配され、その強度は岩石の強度に等しい。以上の結果は Patton(1966)の実験を裏付けるものである。

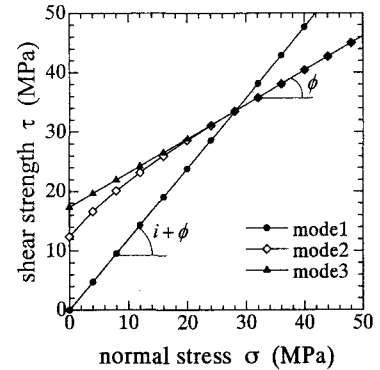


図-2. 上界計算によるせん断強度(1次)

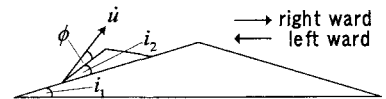


図-3. 2次アスペリティを有する規則歯型

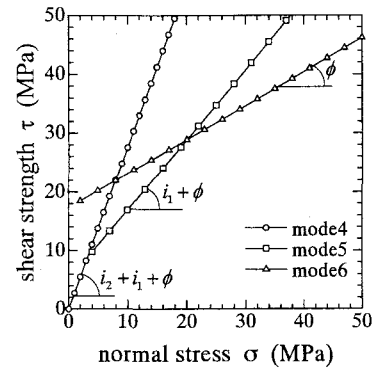


図-4. 上界計算によるせん断強度(2次)

2.2. アスペリティ形状による強度特性の検討

次にアスペリティ形状によるせん断強度特性を検討するため、図3に示すような2次アスペリティを有する規則的な歯型に対して上界計算を行った。岩石の強度定数は前述と同様であり、1,2次アスペリティ角をそれぞれ $i_1 = 20^\circ$ 、 $i_2 = 20^\circ$ とした。考慮した破壊形態は、①2次アスペリティ i_2 に沿って滑動する形態(mode4)、②2次アスペリティがせん断破壊し、1次アスペリティ i_1 に沿って滑動する形態(mode5)、③アスペリティが完全にせん断される形態(mode6)、である。図4に上界計算によるせん断強度を示す。形状が2次アスペリティの場合、前述と同じ強度定数を用いているにも係らず、そのせん断強度は垂直応力が約20MPa以内において1次よりも大きくなっている。一方、高垂直応力域では両者とも ϕ に支配されており、せん断強度はアスペリティの完全破壊により岩石の強度に等しい。つまり、高垂直応力域でのせん断強度はアスペリティ形状に依存しない。せん断強度は上界定理に基づく最小化によりトリ・リニアな曲線となり、せん断抵抗角は垂直応力に対して $(i_2 + i_1 + \phi)$ から $(i_1 + \phi)$ と不連続に変化し、最終的に岩石のせん断抵抗角 ϕ になる。なお、上界計算においてはアスペリティが部分的にせん断される破壊形態についても検討したが、mode2と同様の理由により実際現象には現れなかった。

3. Rengers の形状評価法と提案モデルの妥当性

3.1. Rengers の形状評価法

図 5(a)に測線 1~9 に至る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 分割する。図では L を 8 等分している。図 5(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。図の場合、 ΔL_1 に対して測線 4-5 の区間で最大傾斜角 $\alpha_{\Delta L_1}$ が得られるので、 $(\Delta L_1, \alpha_{\Delta L_1})$ を図 6 に示すように整理する。同様に図 5(c)についても $\Delta L_2 = s \times 2$ に対して測線 3-5 の区間で最大傾斜角 $\alpha_{\Delta L_2}$ が得られる。このように凹凸形状の角度を計測するためのステップ長 $\Delta L_i (s \times 1, s \times 2, \dots, s \times n)$ に対する最大傾斜角 $\alpha_{\Delta L_i}$ を決定し、図 6 のように整理したものを Rengers 曲線という。一般にステップ長が長くなると最大傾斜角は徐々に減少する。この場合、図 5(d)のように $\Delta L_8 = s \times 8$ では検査面全長 L に等しくなるため $\alpha_{\Delta L_8} = 0^\circ$ となる。Rengers 曲線は不連続面の凹凸形状を最大傾斜角と長さの 2 つのパラメータで表現でき、岩盤不連続面の客観的な評価が可能である。一般に Rengers 曲線はせん断方向に依存して異なった曲線が得られる。このことは強度異方性の表現が可能であることを示唆するものである。

3.2. 提案モデルとその妥当性

大塚・土居の提案モデルによる不連続面のせん断強度は、Rengers 曲線から得られる $\Delta L_i, \alpha_{\Delta L_i}$ から強度定数 c_m, ϕ_m を算出し、クーロンの破壊基準を用いた強度包絡線により与えられる。提案モデルのせん断抵抗角 ϕ_m は岩石のすべり摩擦係数 ϕ_μ を考慮すると、

$$\phi_m = \phi_m(\Delta L_i) = \tan^{-1}(\tan(\alpha_{\Delta L_i} + \phi_\mu)) \quad (3.1)$$

となる。また、アスペリティがせん断されることで発揮される見かけの粘着力 c_m は次式を仮定する。

$$c_m = c_m(\Delta L_i) = c \cdot \left[1 - \frac{\tan \alpha_{\Delta L_i}}{\tan \alpha} \right] \cdot \frac{\Delta L_i}{L} \quad (3.2)$$

ここで、 α は Rengers 曲線において $\alpha_{\Delta L_i}$ の最大値である。 $\Delta L_i/L$ は相対長さであり、2.1 節で示したものに相当する。次に提案モデル(PM)の妥当性を検討するため、図 3 に示す凹凸形状を用いて前述の上界計算との比較を行う。岩石の強度定数は $JCS=60\text{MPa}$ 、 $\phi=30^\circ$ であり、式(2.3)より c を求めた。すべり摩擦係数は $\phi_\mu = \phi=30^\circ$ 、アスペリティの全長は $L=250\text{mm}$ とした。

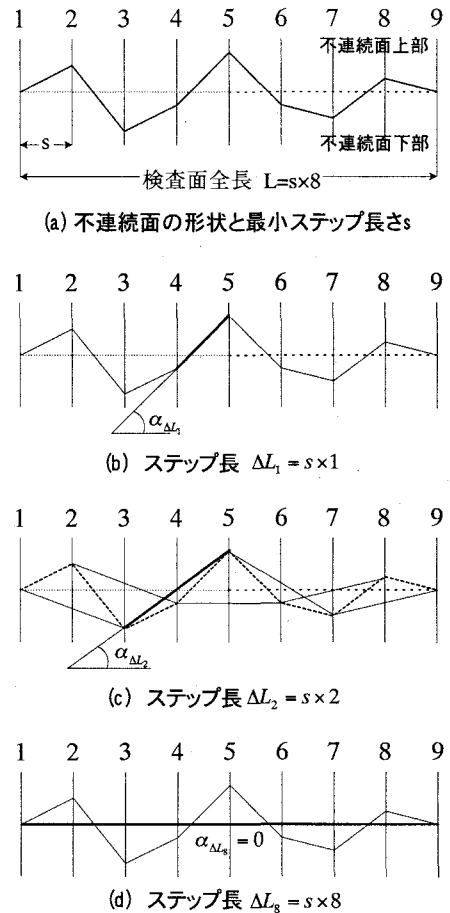


図-5. Rengers の形状評価法の概念図

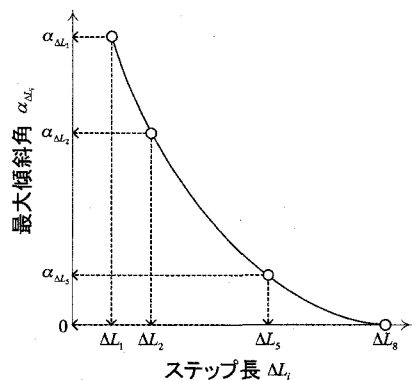


図-6. Rengers 曲線

図7に図3に対する Rengers 曲線を示す。曲線は凹凸形状の最大値である 40° から 0° まで徐々に減少しており、アスペリティの部分的なせん断破壊を意味している。ステップ長に対して最大傾斜角が一定値になる区間があるが、このときは1および2次アスペリティ角に等しい。Rengers 曲線を用いて提案モデルより推定したせん断強度曲線を図8の太線で示す。提案モデルのせん断強度は連続的に変化しており、不連続に変化する上界計算と合わない点があるが、せん断抵抗角の非線形挙動は表現できている。以上より提案モデルの妥当性が確認された。

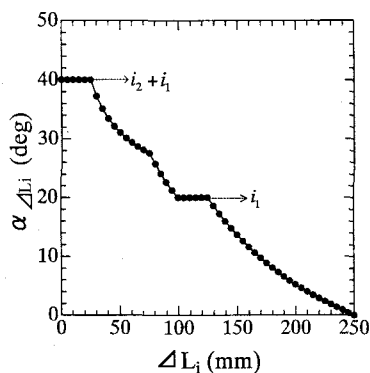


図-7. 図3に対する Rengers 曲線

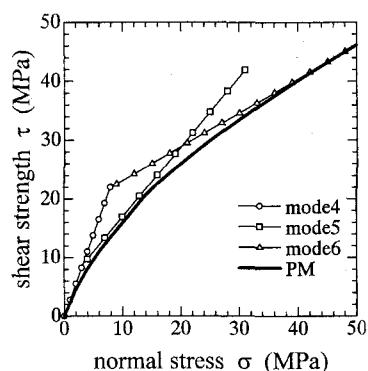


図-8. 上界計算と提案モデルの比較($\phi_\mu = 30^\circ$)

4. 規則的な不連続面のせん断方向による強度異方性

岩盤不連続面はたとえ同じ形状であっても、せん断方向に依存して強度異方性を示すものと推察される。図3に示す規則的な形状に対して右・左方向にせん断したときの Rengers 曲線を図9に示す。図3は対称形状ではない。このような形状の場合は、せん断する方向に依存して異なった Rengers 曲線が得られる。図10に提案モデルのせん断強度曲線を示す。強度定数は3.2節と同様である。せん断強度が岩石の強度に等しくなる高垂直応力域では両者の差はほとんどなく、その勾配はすべり摩擦係数に等しくなる。一方、低垂直応力域では両者の間に差がみられ、同じ定数・形状でもせん断する方向に依存してせん断強度は異なる。以上から提案モデルを用いて規則的な形状のせん断方向による強度異方性が示された。

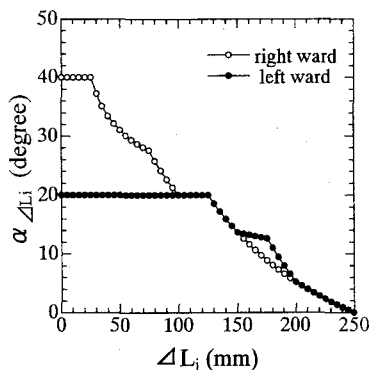


図-9. 図3の形状に対する Rengers 曲線

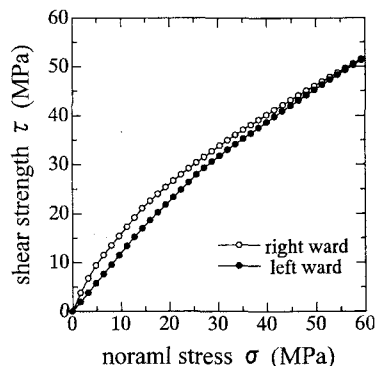


図-10. 提案モデルによるせん断強度曲線($\phi_\mu = 30^\circ$)

5. 不規則な不連続面のせん断方向による強度異方性

図 11 に不規則な不連続面の形状を、図 12 に図 11 に対する右・左せん断方向の Rengers 曲線を示す。図 13 には提案モデルと Barton によるせん断強度曲線を実験値とともに示す。強度定数は 3.2 節と同様である。Barton のモデルは不連続面の凹凸形状をラフネス係数(JRC)に変換するため、せん断方向による強度の差を表現することはできない。一方、提案モデルは右・左方向で異なった Rengers 曲線が得られることから、不規則な不連続面の強度異方性を表現することが可能である。しかし、図 7 より低垂直応力域(15MPa 以下)では、両者に明確な強度異方性は見られず、規則的な場合とは異なる結果を得た。

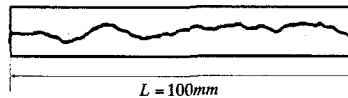


図-11. 不規則な不連続面の凹凸形状 (JRC=20)

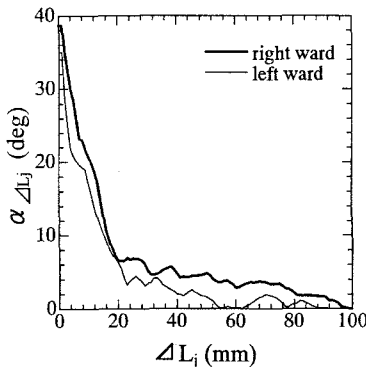


図-12. 図 11 の形状に対する Rengers 曲線

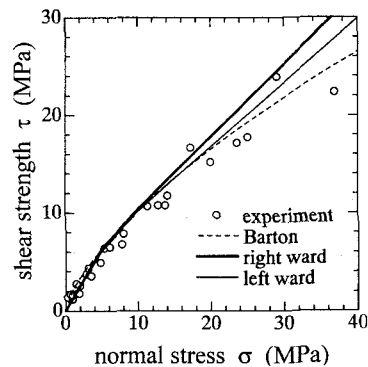


図-13. 提案モデルによるせん断強度曲線($\phi_\mu = 30^\circ$)

6. まとめ

岩石が摩擦性材料である場合の不連続面のせん断破壊機構を上界計算により明らかにし、不連続面せん断強度評価式が摩擦性材料に対しても適用できることを明らかにした。せん断特性には形状と岩石のせん断抵抗角が直接反映され、高垂直応力下でのせん断挙動は ϕ に支配された。岩盤の不連続面はせん断方向によってせん断強度は異なる。規則形状を有する不連続面に対して上界計算を行い、異方強度のメカニズムを明らかにすると共にせん断強度評価式にて強度異方性を評価できることを示した。事例解析では特に低垂直応力域での異方性が明確であった。一方、不規則形状を有する不連続面は低垂直応力域において明確な異方性が見られない結果を得た。

参考文献

- [1] Patton, F. D.: Multiple modes of shear failure in rock, Proc. 1st Cong. ISRM., Lisbon, pp.509-513, 1966.
- [2] Barton, N.R.: A model study of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Mini. Sci., Vol.9, pp.579-602, 1972.
- [3] Ohtsuka, S., Doi, M.: Considerations on Shear Strength and Roughness of Rock Joint, Proc. of The 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Singapore, 2003.8
- [4] Rengers, N.: The influence of surface roughness on friction properties of rock plane, Proc. 2nd Cong. ISRM., Vol.1, pp.1-31, 1970.