

(9) 不連続面のせん断強度の異方性について

東海大学	正会員	○ アイダン・オメル
名城大学	正会員	清水泰弘
愛知工業大学	正会員	川本眺万

The Anisotropy of Shear Strength of Rock Discontinuities

Ömer AYDAN	Tokai University
Yasuhiro SHIMIZU	Meijo University
Toshikazu KAWAMOTO	Aichi Institute of Technology

Abstract

The surface topography of discontinuities in rock masses is generally consisted of a set of ridges and throughs in view of their genesis. The axis of these ridges and throughs is generally perpendicular to the direction of crack propagation or flow of magma or sediments. As a result, their surface morphology parameters become anisotropic. The authors showed that it was possible to evaluate the anisotropy of the parameters if measurements along their eigen directions are available.

Since surface morphology characteristics are generally anisotropic, it is expected that their shear strength parameters are also to be anisotropic. The authors have been investigating the anisotropy of shear strength of discontinuities for some time. In this paper, the authors propose some theoretical models to evaluate the anisotropy of the shear strength of rock discontinuities and check their validity on some actual discontinuities and some published experimental data by Huang et al. (1990a,b). Furthermore, if the anisotropy of shear strength is considered, it is possible to drastically reduce the scatterness of experimental data.

1. はじめに

不連続面が岩盤の変形・強度特性と岩盤中に掘削される構造物に与える影響は、今までの数多くの研究で明らかにされている。したがって、岩盤のモデル化の際に、必要となる不連続面の水理力学特性を求めるために室内あるいは現場試験を行うことが一般的になっている。今までに行われてきた数多くの実験的研究では、不連続面の水理力学特性の異方性に関する報告がわずかである。不連続面の成因を考えると、不連続面の水理力学特性が異方であることが当然であろう。また、計測されている水理力学特性の値のバラツキの主な原因も不連続面の表面特性の異方性と直接的な関係によるものであろう。

本研究では、不連続面のせん断強度特性に着目し、その表面特性の異方性とせん断強度の異方性の関連性を実験的に明らかにする。また、不連続面のせん断強度の異方性を評価できる新たな降伏関数を提案し、その妥当性を検証する。

2. 理論的検討

著者らは、不連続面の表面特性についての研究成果から、不連続面の発生要因によってその表面特性が異方性を示すことを明らかにしている。Fig. 1 は不連続面のせん断強度と密接な関係がある表面特性パラメータ WAI (重み付きアスペリティ傾き) と CLAH (重み付きアスペリティ高さ) の測定結果である。Fig. 1 にも見られるように、今までの研究成果より不連続面の表面に関して固有な異方性軸が存在していることは明かである。

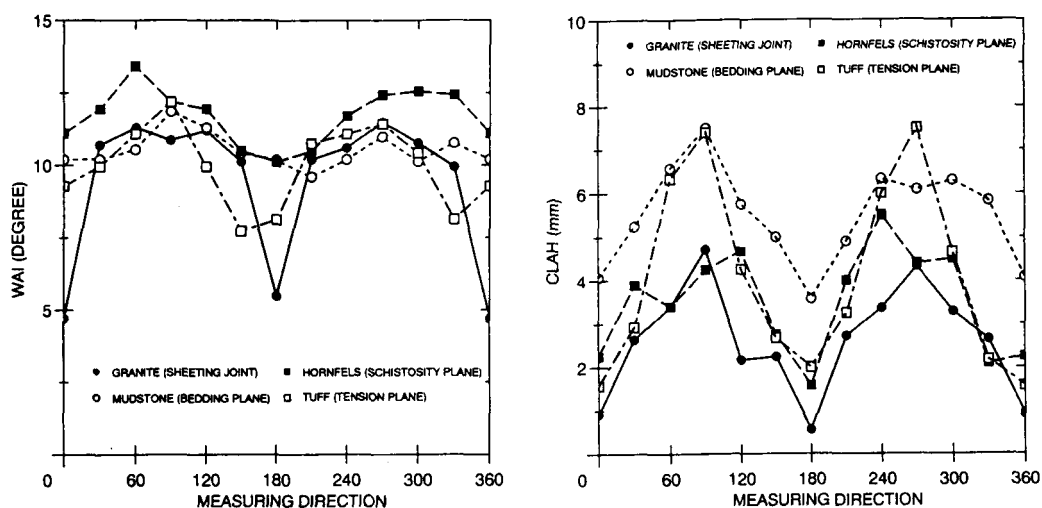


Fig. 1 The anisotropy of surface morphology parameters WAI and CLAH of several discontinuities

Fig. 2 は不連続面のせん断方向を考慮せずに供試体の長さの関数として実験結果を図示したものである。この実験結果に見られるように、せん断する方向を考慮せずにせん断強度の実験結果を評価すると、測定結果にはかなりのバラツキがある。このバラツキの主な要因は、不連続面のせん断試験を行う際にせん断する方向について注意をはらっていないためであると思われる。

不連続面のせん断強度の異方性について、一番最初に注目したのは、LaFountain・Dunn(1974) である。その後、Brown ら (1979)、Huang ら (1990a,1990b) および Aydan・Kawamoto(1990) の実験的な研究成果を報告している。しかし、その強度特性の評価に関して、まだ、理論的なモデルが提案されていないのは現状である。以下では、規則的な表面形状を有する不連続面に対して理論的なモデルを紹介した後に、最も一般的な場合の不連続面の異方的なせん断強度を評価するモデルについて説明する。

2.1 規則的な表面形状を有する不連続面の異方的せん断強度

Fig. 3 に示すような規則的な表面形状を有する不連続面のすべりに対して、せん断強度を以下のように与えることができる。

一つのアスペリティ上でのすべりの場合

$$(T \sin \theta \cos \alpha_i - N \sin \alpha_i)^2 - (\tan \phi_\alpha (T \sin \theta \sin \alpha_i + N \cos \alpha_i))^2 + T^2 \cos^2 \theta = 0 \quad (1)$$

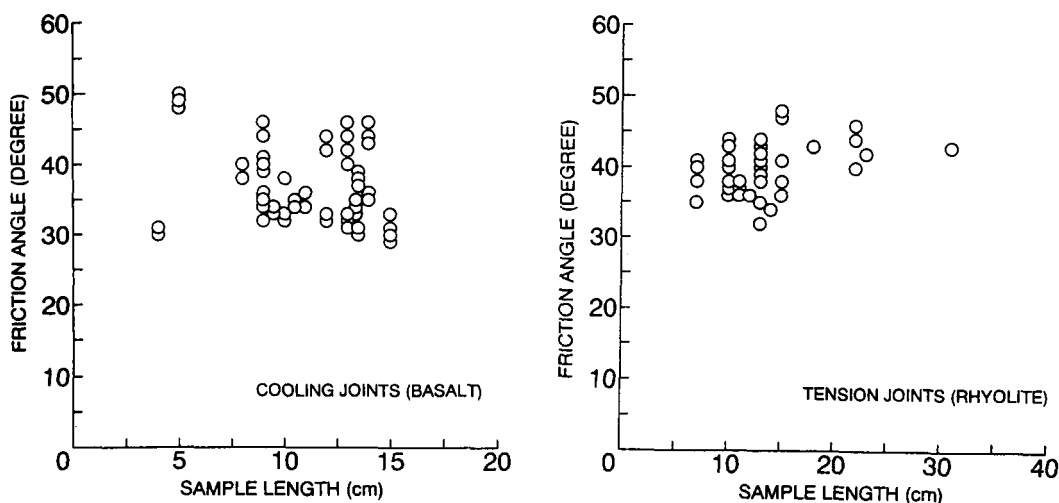


Fig. 2 Friction angles of some discontinuities as a function of sample length

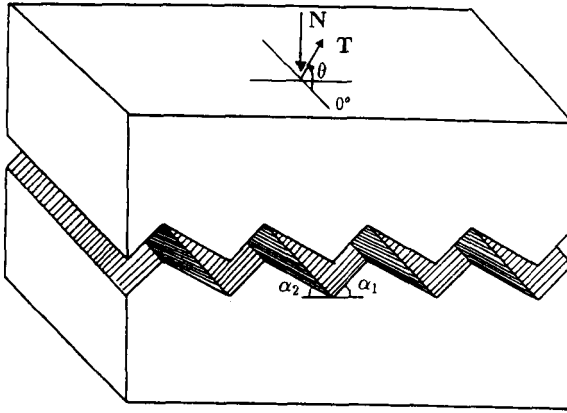


Fig. 3 Discontinuity with a periodic surface topography

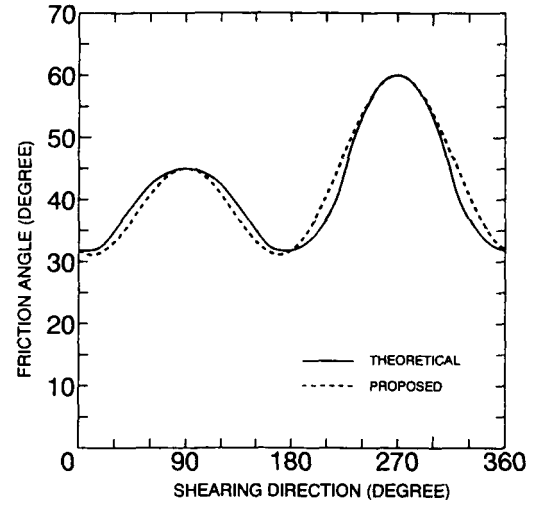


Fig. 4 Comparison of the theoretical yield function with the proposed yield function

アスベリティの長軸方向でのすべりの場合

$$\frac{T}{N} = \frac{(\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) \tan \phi_\alpha}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos \theta - \tan \phi_\alpha \sin \theta (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)} \quad (2)$$

ここに T はせん断力、 N は垂直力、 θ はせん断方向角、 α_i は i 番目のアスベリティの傾き、 ϕ_α は i 番目のアスベリティの摩擦角である。

式 (2) は $N_1 > 0$ および $N_2 > 0$ の場合に利用される。その条件は次のように与えられる。

$$\frac{\sin \alpha_1}{\tan \phi_\alpha} > \tan \theta > -\frac{\sin \alpha_2}{\tan \phi_\alpha} \quad (3)$$

せん断方向 θ が 0° , 180° の場合に、式 (2) は以下ようになる。

$$T = N \frac{(\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \tan \phi_\alpha \quad (4)$$

同様にせん断方向 θ が 90° , 270° の場合に、式 (1) は以下ようになる。

$$T = N \tan(\alpha_i + \phi_\alpha) \quad (5)$$

たとえば、 $\alpha_1 = 15^\circ$, $\alpha_2 = 30^\circ$, $\phi_\alpha = 30^\circ$ の場合に対してのせん断強度を求めると Fig. 4 のように図示される。

上記で与えられる強度関数を一本化するために次のような関数で表されるとする。

$$\phi(\theta) = \sum_{i=1}^n a_i \cos^i \theta + \sum_{i=1}^n b_i \sin^i \theta + \sum_{i=1}^n c_i \cos^i 2\theta + \sum_{i=1}^n d_i \sin^i 2\theta + \cdots + \sum_{i=1}^n y_i \cos^i K\theta + \sum_{i=1}^n z_i \sin^i K\theta \quad (6)$$

また、上式の特定的場合として次式を選定しよう。

$$\phi(\theta) = a_1 \cos \theta + a_2 \cos^2 \theta + b_1 \sin \theta + b_2 \sin^2 \theta \quad (7)$$

せん断強度が直行異方であるとして、そのスペクトラが次のように与えられるとする。

$$\phi(\theta = 0^\circ) = \phi_0, \quad \phi(\theta = 90^\circ) = \phi_{90}, \quad \phi(\theta = 180^\circ) = \phi_{180}, \quad \phi(\theta = 270^\circ) = \phi_{270}, \quad (8)$$

上記の条件より関数の定数 a_1, a_2, b_1, b_2 は、次のように得られる。

$$a_1 = \frac{\phi_0 - \phi_{180}}{2}, \quad a_2 = \frac{\phi_0 + \phi_{180}}{2}, \quad b_1 = \frac{\phi_{90} - \phi_{270}}{2}, \quad b_2 = \frac{\phi_{90} + \phi_{270}}{2}. \quad (9)$$

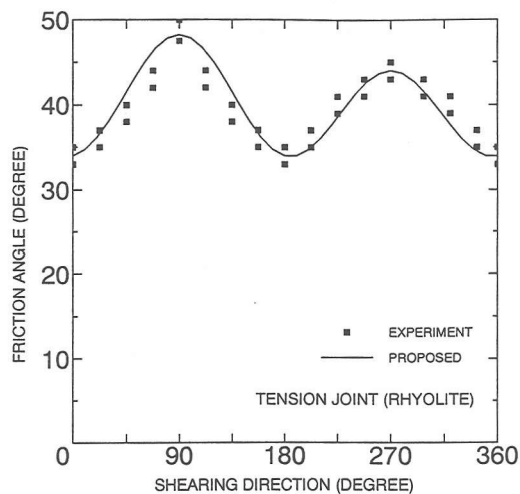
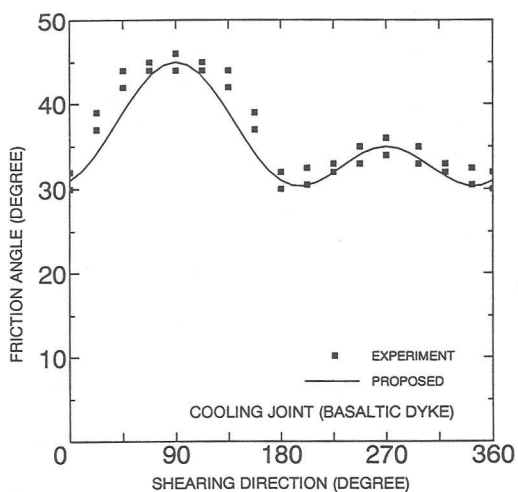


Fig. 5 Comparison of experimental results with the proposed yield function



Photo 1 A view of the tiltmeter

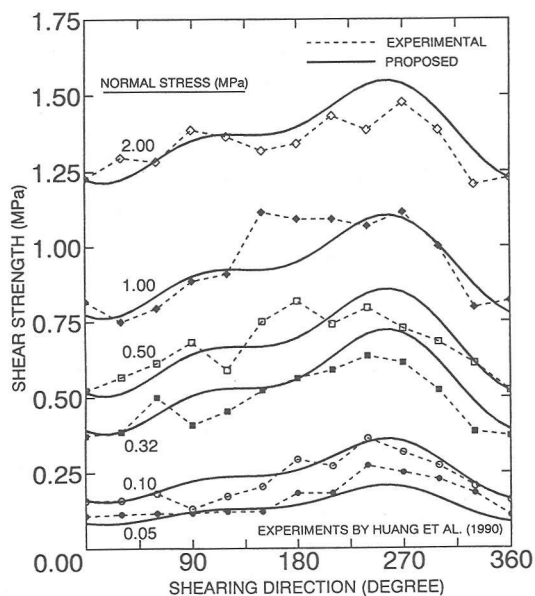


Fig. 6 Comparison of experimental results with the proposed yield function

Fig. 4 で求めた理論曲線に関して、上記の方法を適用して得られた近似曲線を Fig. 4 に破線で示す。図より明かなように、提案した方法で得られる曲線が理論曲線をかなりよい精度で近似していると言える。

2.2 一般的な表面形状を有する不連続面の異方的せん断強度

不連続面のせん断強度が垂直荷重と表面特性の影響を受け、そのせん断強度を一本の線形的な関数で表すことはできない。そのため、表面特性を考慮した幾つかの降伏関数が提案されている (Patton 1966, Barton 1971, Jaeger 1972, Aydan et al. 1994)。ここで、Aydan らの降伏関数を基に、強度異方性を考慮した形を提案する。Aydan らの提案した降伏関数は以下のように与えられている。

$$\tau = A_1(1 - e^{-B_1\sigma_n}) + \sigma_n[\tan \phi_i + A_2e^{-B_2\sigma_n}] \quad (10)$$

τ はせん断応力、 σ_n は垂直応力、 A_1, A_2, B_1, B_2 は定数、 ϕ_i は母岩の摩擦角である。定数 A_1, A_2, B_1, B_2 は $\phi_\alpha \geq \phi_i$ の場合に以下のように与えられている。

$$A_1 = c, \quad A_2 = \tan \phi_\alpha - \tan \phi_i, \quad B_1 = \frac{\tan(\alpha + \phi_\alpha) - \tan \phi_i}{c}, \quad B_2 = \frac{\tan \phi_\alpha - \tan \phi_i}{\sigma_t} \quad (11)$$

ここに c, σ_t は母岩の粘着強度と引っ張り強度、 α はアスペリティの傾斜角である。上式において母岩の物性値と不連続面の摩擦特性が等方的であれば、パラメータ A_1 と α の異方性のみを求めればよい。パラメータ A_1 と α の求め方に関して前節で提案した近似法を適用できる。本論文においてはパラメータ A_1 と α について式 (7) から式 (9) までの手順を利用する。

3. 実験結果への適用と考察

不連続性岩盤における岩盤構造物の安定性を評価するために不連続面の表面特性とそのせん断挙動を現場で簡易に求めることが望まれる。そのため、現場で簡易に測定でき、かつ、持ち運びしやすい表面形状記録装置とティルティング試験機を開発した。ティルティング試験前に、不連続面の表面形状を測定し、その後ティルティング試験を行い、せん断強度を求めた。写真-1 は現場で行ったティルティング試験の様子を示す。Fig. 1 に示した実験結果はティルティング試験機によるものである。

Fig. 1 に示した不連続面を含め、せん断の方向を 22.5° ずつ変えながら様々な不連続面に対してティルティング試験を行った。Fig. 5 はその実験結果の一部を示す。Fig. 5 には、2 節で提案した方法より求めた曲線をも図示している。計測値と理論値の比較より明らかなように、不連続面のせん断強度が異方的であり、かつ、そのバラツキ範囲はかなり狭くなっている。

次に、Huang らの報告している実験結果に提案した方法を適用した解析結果を Fig. 6 に示す。解析において、パラメータ A_1 と α 次のように選定した

$$A_1 = -0.085 \cos \theta + 0.465 \cos^2 \theta - 0.095 \sin \theta + 0.555 \sin^2 \theta$$

$$\alpha = -0.95 \cos \theta + 57.55 \cos^2 \theta - 0.965 \sin \theta + 58.615 \sin^2 \theta$$

提案した方法から得られる曲線と実験結果は定性的および定量的にはほぼ一致していると言える。しかし、実験結果に合わないところも見受けられる。この違いは実験結果のバラツキと選定した関数の項数の不足によるものであろう。

4. おわりに

本研究において、不連続面のせん断強度が異方的であることを示し、その異方性を評価する手法を提案した。また、不連続面のせん断強度の異方性を考慮することによって、せん断強度のバラツキ幅が減少することを明らかにした。

なお、本研究に関して、中部電力技術研究所より研究助成金を受けたことに對し深謝するものである。

参考文献

- Aydan, Ö. & T. Kawamoto 1990. Effect of discontinuities on rock masses. Int. Symp. on Rock Joints,
- Aydan, Ö., T. Akagi, H. Okuda & T. Kawamoto 1994. The cyclic shear behaviour of interfaces in rock anchor systems and their effect on the long-term performance of rock anchors. Int. Symp. on New Development in Rock Mechanics and Engineering. Shenyang, 15-22.
- Barton, N. 1971. A model study of the behaviour of steep excavated rock slopes. PhD Thesis, Univ. London.
- Brown, E.T., L.R. Richards & M.V. Barr 1979. Shear strength characteristics of the delabole slates. Int. Symp. on Rock Engng., Newcastle upon Tyne, 33-51.
- Huang, T.H. & Y.S. Doong 1990a. Anisotropic shear strength of rock joints. Int. Symp. on Rock Joints, 211-218.
- Huang, T.H., Y.S. Doong & J. Sheng 1990b. Measurement of rock joint roughness and its directional shear strength. Int. Conf. on Jointed and Faulted Rock, 337-343.
- Jaeger, J.C. 1971. Friction of rocks and stability of rock slopes. Geotechnique, 21(2), 97-134.
- LaFountain, L.J. & D.E. Dunn 1974. Effect of anisotropy on the coefficient of sliding friction in schistose rocks. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 11, 459-464.
- Patton, F.D. 1966. Multiple modes of shear failure in rock. Proc. 1st Int. Congress on Rock Mechanics, ISRM, 1, 509-513.