

岩盤不連続面のせん断強度発現機構に関する一考察 A Numerical Study on Failure Mechanism of Rock Joint

土居正信*・大塚 悟**・茂木竜史***
Masanobu Doi, Satoru Ohtsuka and Ryushi Motegi

This paper employed the numerical procedure to clarify the mechanical property of joint strength. The complicated real geometry of rock joint was simplified to the triangle shape asperity. Then, the effect of that on joint strength was investigated. The applicability of employed method was examined in comparison with both the Patton's experiments and the upper bound solutions. The failure mechanism of rock joint was shown to change with the increasing normal stress from the sliding failure along the asperity to the mixed failure of sliding along the asperity and shearing of asperity. It was found that the non-linearity in joint shear strength for normal stress was caused by the change in failure mechanism of rock joint.

Key words : rock joint, non-linearity, upper and lower bound theorem, finite element analysis

1. はじめに

層理・節理などに代表される岩盤不連続面はそれを含む岩盤構造物全体の安定性に大きな影響を与えることが、これまでの多くの被災事例より知られている。岩盤不連続面のせん断強度に関する実験的研究は数多くの研究者によって実施されている。Patton¹⁾、Barton²⁾らの研究は特に著名である。Patton は不連続面形状を規則的に配置した歯形モデルに単純化し、垂直応力の増加に対してパイ・リニアなせん断強度モデルを提案した。実岩盤の複雑な不連続面に対して Barton はジョイントの粗さ(ラフネス: JRC)を導入した経験的な垂直応力依存性の非線形せん断強度モデルを提案した。他の研究者らのモデルも、基本的にはせん断強度の非線形性を表現しようとするものである。このような不連続面せん断強度の垂直応力に対する非線形性は、垂直応力の変化に伴う不連続面の破壊形態の遷移過程として捉えられている。

本論文は、岩盤不連続面の垂直応力とせん断強度の関係が不連続面の破壊モードの変化を反映していることを数値解析的に示し、アスペリティ形状によるせん断強度発現メカニズムを明らかにすることを目的とする。解析には既開発手法³⁾による不連続面を含む岩盤の下界定理に基づいた安定解析を適用するほか、可容な破壊モードを想定する上界計算も行う。既往の実験的研究では通常、アスペリティをある規則的な傾斜角をもつ単純な形状と接触面でのすべり摩擦角にモデル化している。しかしながら、実際の岩盤不連続面を形成するアスペリティは巨視的な視点による1次的形状のほかに2次、3次あるいはそれ以上の高次の形状によって構成されている。したがって、既往のせん断強度モデルのように、2次以上の高次の形状によるせん断強度への影響を単純にすべり摩擦角に置き換えるのではアスペリティの力学的効果を十分考慮しているとは言えない。本論文では、まず既開発解析手法の概要を述べ、それを単純化したアスペリティを含む岩盤の平面ひずみ圧縮試験に適用する。また、同様な解析モデルに対して上界計算を実施し、既開発手法による解との比較・検討を行う。最後に、アスペリティに対して1次的形状に2次的形状を重ねることによって、アスペリティ形状とせん断強度発現メカニズムの関係を上・下界計算に基づいて明らかにする。

* 正会員 工修 長岡技術科学大学講師 工学部環境・建設系
** 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系
*** 学生員 長岡技術科学大学 大学院

2. 不連続面の接触条件を考慮した下界計算と線形計画法

岩盤不連続面には、不連続面に作用する垂直応力に依存して (i) アスぺリティに沿うすべり・剥離破壊、(ii) アスぺリティ基部の完全な破壊、(iii) アスぺリティの一部の破壊とすべり・剥離破壊が同時に生じる混合破壊、といった破壊モードがあることが実験的に確認されている。したがって、これらの破壊モードを統一的に1つの解析手法で取扱えることが望ましい。本解析手法は塑性定理の1つである下界定理に基づいている。

不連続面における接触応力 q を不連続面上の垂直応力 q_n およびせん断応力 q_s の2成分によって表す。垂直応力に引張応力が作用する場合には粘着力 c_n を考慮する。せん断応力に関する接触条件は Coulomb モデルによって定義する。Coulomb モデルのパラメータには粘着力 c_s およびすべり摩擦角 ϕ_μ を用いる。これらの接触条件をマトリックス表示すると、

$$\begin{bmatrix} 1 & \tan\phi_\mu \\ -1 & \tan\phi_\mu \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_s \\ q_n \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} c_s \\ c_s \\ c_n \end{Bmatrix} \leq \mathbf{0} \quad (1)$$

となる。不連続面での接触応力 q は、Goodman ら⁴⁾ によって提案されたジョイント要素を導入すると、不連続面での接触応力 q を変数とする力の釣り合い式が求められる。ジョイント要素は垂直方向の剛性が k_n とせん断方向の剛性が k_s の2本のバネで構成されている。本研究では、不連続面での接触応力 q を変数とする力の釣り合いを得るためにジョイント要素を導入しており、不連続面の変形を評価する意味でのバネ剛性の値は重要でない。本研究ではバネ剛性を大きく設定し、不連続面のせん断特性を剛完全塑性体にモデル化している。不連続面における接触条件はジョイント要素の降伏条件を表し、不連続面のすべりや剥離はジョイント要素の塑性変形として捉えられている。また、岩盤自体は弾完全塑性材料に単純化・理想化し、区分線形近似した降伏条件に従うものとする。本解析手法はジョイント要素の接触条件式 (1) および岩盤自体の降伏条件を満足する可容な解の中で最大値を求める線形計画問題に帰着する。さらに、岩盤の塑性変形に対応して発生する残留応力を変数に取り入れることによって、岩盤自体の連続体としてのせん断挙動と不連続面に沿うすべり・剥離による応力の再配分を考慮して安定性を評価できる特徴を有している。

3. 不連続面を含む岩盤の平面ひずみ圧縮試験の数値シミュレーション

図-1 は不連続面を含む岩盤の平面ひずみ圧縮試験状態を模式的に示している。アスぺリティの個数は $N = 1$ の場合を示している。まず、等方拘束応力 σ_c を作用させ供試体内に初期応力を与え、軸差応力 σ_d を作用させる。本解析手法により σ_d の最大値を算定する。 θ はアスぺリティを含む不連続面の水平面からの平均傾斜角、 i は θ 面とアスぺリティがなす角であり、これをアスぺリティ傾斜角と定義する。側圧 σ_c と軸応力 $(\sigma_c + \sigma_d)$ から θ 面に作用する垂直応力 σ_n と最大せん断強度 τ_p を求める。以後、不連続面を含むせん断強度特性について σ_n と τ_p の関係より検討する。岩盤自体は粘着力が c 、せん断抵抗角が ϕ である Coulomb の破壊基準に従い、解析では Drucker-Prager 材料として扱う。不連続面の巨視的な方向である θ は岩盤自体の材料定数を勘案して、 $\theta = \pi/4 + \phi/2$ となるように設定し、岩盤自体の破壊面の方向と θ 面を一致させるようにした。本解析で用いた解析定数を表-1 に示す。なお、解析モデルのサイズは

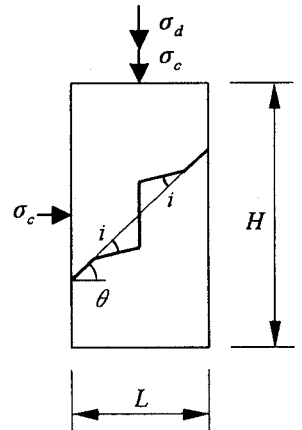


図-1 不連続面を含む岩盤の平面ひずみ圧縮試験模式図

表-1 解析定数

岩盤	E	5000.0 MPa
	ν	0.2
	c	5.0 MPa
	ϕ	0°
不連続面	k_n and k_s	10^{14} kPa/m
	c_n and c_s	1.0 kPa
	ϕ_μ	0°

横 (L) 12cm, 縦 (H) 24cm とした。

図-2は $\theta = 45^\circ$, $i = 20^\circ$, $N = 1$ の解析モデルに対する解析結果を示している。破壊包絡線の初期こう配はそれぞれのアスペリティ傾斜角 i の $\tan i$ と一致していることから、アスペリティ面に沿うすべり破壊が生じていることを表している。高い σ_n における破壊包絡線のこう配はほぼ 0° であり、せん断強度は σ_n に依存しない。岩盤自体のせん断抵抗角は $\phi = 0^\circ$ であることから、高い σ_n では不連続面のアスペリティに沿うすべり破壊からアスペリティなどの岩盤自体の破壊へと移行する。しかしながら、アスペリティ面に沿うすべり破壊とアスペリティの一部のせん断破壊を伴う混合破壊を示す領域はほとんど見られない。Pattonの実験供試体を模擬し、アスペリティ傾斜角 i やアスペリティの個数 N を種々変化させた解析を既に試みている⁵⁾。その解析結果はPattonの実験結果と同様の傾向を与えた。すなわち、いずれの場合もせん断強度と垂直応力の関係はBartonらのせん断強度モデルのような滑らかな破壊包絡線とはならず、ほぼバイ・リニアな関係を示した。

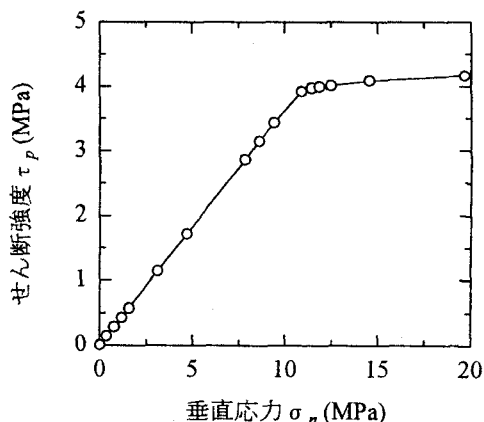


図-2 本解析手法による解析結果

4. 上界計算による平面ひずみ圧縮試験の検討と考察

図-1に示す解析モデルに対して可容な破壊モードについて検討する。図-3(a) mode Aのように、供試体が岩盤自体のせん断破壊をとまわずにアスペリティ面に沿ってすべり破壊を生じる場合には供試体の上部が角度 $(\theta - i)$ で斜め下方へ変位する。極限解析の上界定理では可容速度場を設定することから、供試体上部は鉛直下方、水平方向に \dot{v} , \dot{u} の速度を有する。各速度間には不連続面の幾何形状から $\dot{v} = \dot{u} \tan(\theta - i)$ の関係が成立する。アスペリティ接触面ではすべり抵抗 $\hat{\tau}$ が働き、すべりをとまわずに剥離する場合には抵抗力は働かないとする。この場合に上界計算では外力仕事率と内部エネルギー消散率を等置することによって、次式が得られる。ただし、岩盤自体は剛体と仮定した。

$$L(\sigma_c + \sigma_d)\dot{v} - L \tan \theta \cdot \sigma_c \dot{u} = \frac{L_a}{\cos^2(\theta - i)} \hat{\tau} \dot{u} \quad (2)$$

ここに、 L は供試体の幅、 L_a は水平方向で測ったアスペリティの実質長さである。不連続面でのすべり抵抗力を $\hat{\tau} = 0$ と仮定すると、 θ だけ傾斜した巨視的な不連続面上のせん断応力 τ_p と垂直応力 σ_n との比は $\tau_p / \sigma_n = \tan i$ となり、せん断強度は見かけ上アスペリティ傾斜角 i による摩擦則に従う。

次に、図-3(b) mode Bに示すようにアスペリティを構成する岩盤の一部がせん断破壊して、供試体の上部が角度 $(\theta - \alpha)$ で斜め下方へ変位するとする。この場合にアスペリティ傾斜角は本来 i であるが、アスペリティの上部がせん断されて傾斜角が α になったと仮定している。この時の鉛直、水平速度は $\dot{v} = \dot{u} \tan(\theta - \alpha)$ の関係が成立する。岩盤自体のせん断強度を $\hat{\tau}$ とすると、上界計算式は、式(2)中の i を α に置き換えたものとなる。 σ_c を与えて上界計算式を σ_d の最小化問題として解くと $\partial \sigma_d / \partial \alpha = 0$ から σ_d を求めることができる。図-3(c) mode Cに示す破壊モードも生じ得るが、上界計算式

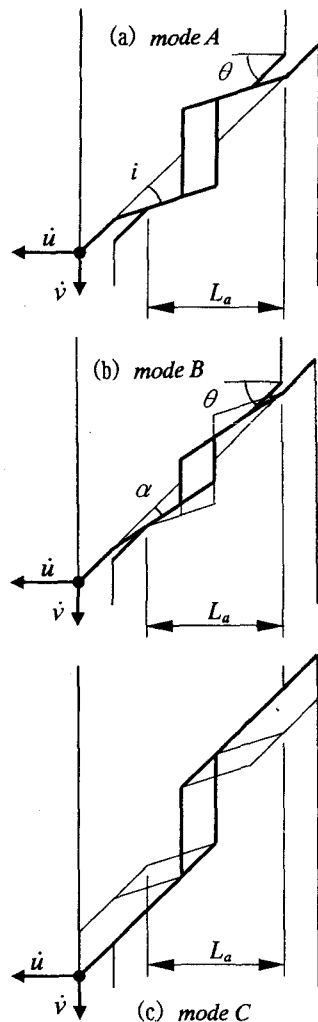


図-3 可容速度場の設定 (上界計算)

は式(2)とほぼ同様の式となる。上界計算は可能な破壊モードの中から軸差応力 σ_d の最小化を図ることが重要である。

前述の下界計算を行った同様の解析モデル ($\theta = 45^\circ$, $i = 20^\circ$, $N = 1$) に対して, 式(2)に示したような上界計算を行った結果を図-4に示す。岩盤自体のせん断抵抗角は $\phi = 0^\circ$ とした。図-3(a), (b), (c)のように仮定した各破壊モードに応じた垂直応力による不連続面のせん断強度の変化を図示している。図では mode A によるせん断強度は垂直応力に線形に増加するのに対して, mode B, C は非線形である。これは mode B の破壊形態の場合に, せん断にともなうダイレイションの度合いはアスペリティの破壊形態を表す傾斜角 α に依存している。ダイレイションが大きいと同一垂直応力に対して一般に大きいせん断強度を与えることから傾斜角は垂直応力の増加に対してより小さい角度が破壊形態として選択される。傾斜角 α の変化によって, せん断強度は垂直応力に対して非線形となる。しかし, 上界定理に基づいて可容な破壊モードの中からせん断強度の最小化を行なうと, mode A の影響を受けて mode B, C の非線形挙動は実際現象に現れず, 結果として不連続面のせん断強度は垂直応力に対してパイ・リニアになる。この挙動は図-2に示す下界定理に基づく有限要素解析の結果に一致しており, Patton の実験にて非線形挙動が見られない理由が明らかとなった。

5. 不連続面のせん断強度発現に関する数値解析的検討

Patton モデルでは前節で検討したように, アスペリティのせん断破壊によるアスペリティ傾斜角の変化を取り入れてもせん断強度の非線形性を表現することができない。本研究では Patton が用いた楔型形状のアスペリティを実際の不連続面のアスペリティ形状に関する1次の形状と定義して, 実際にはアスペリティ形状に2次, 3次の高次の形状が存在することに着目してアスペリティの幾何的性質と不連続面のせん断強度との間の関係について検討する。

図-5 は実際には複雑な不連続面を単純化したモデルである。本解析手法を適用した有限要素解析メッシュを図-6に示す。アスペリティの1次の形状の他に, 2次の形状を取り込んでいる。ここでは1次及び2次の形状におけるアスペリティ傾斜角を各々 $i_1 = 20^\circ$, $i_2 = 20^\circ$ と設定した。簡単のために岩盤自体の強度定数は $\phi = 0^\circ$ として, 不連続面は傾斜角 $\theta = 45^\circ$ に設定した。また岩盤同士の接触によるすべり摩擦係数は $\phi_\mu = 0^\circ$ として, アスペリティの噛み合わせによるせん断強度への影響を調べる。本解析手法による結果を図-7に示す。同図中には1次のアスペリティのみの場合についての結果も図示している。初期こう配は $\tan 40^\circ = \tan(i_1 + i_2)$ であり, Patton モデルに一致する。 σ_n が増加するとうこう配が $\tan 20^\circ = \tan i_1$ へと変化し, 2次のアスペリティの効果がなくなる。さらに, σ_n が増加するとうこう配はほぼ0となり, 1次のアスペリティのせん断破壊が生じる。2次のアスペリティがない場合 (Patton モデル) の解析結果はパイ・リニアな破壊包絡線となるが, 2次のアスペリティを有する場合にはトリ・リニアな破壊包絡線へと変化する。高い σ_n では両者ともほぼ一致し, ともにアスペリティの影響は消失する。ここで用いたアスペリティの幾何形状は非常に簡単なものであるが, アスペリティ形状に高次の性質を取り込むこと

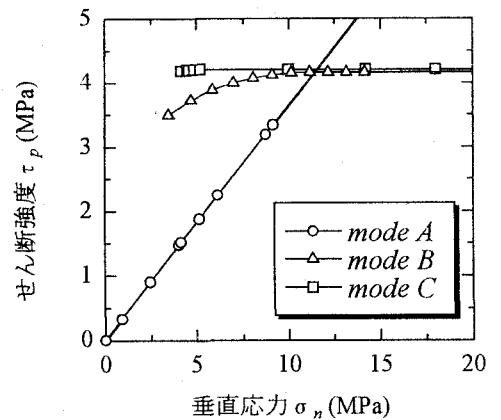


図-4 上界計算による解析結果

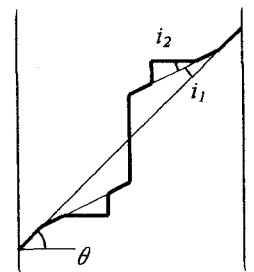


図-5 2次のアスペリティを含む不連続面の模式図

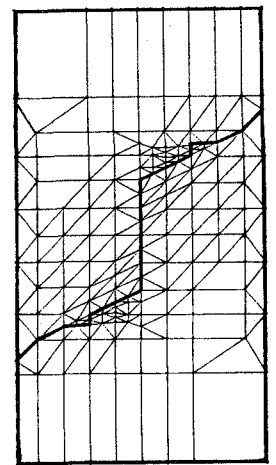


図-6 2次のアスペリティを含む不連続面の有限要素メッシュ

によって不連続面のせん断強度の垂直応力に対する非線形性が表現できた。

図-5に示すモデルに対する上界計算を行って、下界計算の精度を確かめると同時に破壊モードの変化を検討する。図-8に示す破壊モードを仮定して上界計算を実施した。図-9にその結果を示す。図ではせん断強度の最小化から得られる破壊包絡線は下界計算で得られた図-7にほぼ一致しており、両手法の解析結果が妥当であることがわかる。破壊モードの変化から、a) 垂直応力の小さい初期においては2次のアスペリティ形状に起因するすべり破壊 (mode A), 垂直応力の増加によって、b) 2次のアスペリティのせん断をともなった1次のアスペリティに沿うすべり破壊 (mode B), c) 1次のアスペリティのせん断破壊 (mode C), のように垂直応力によって不連続面の破壊形態が変化している。mode Bの破壊形態にて図中のプロットが見掛けの粘着力を有する直線で表されるのは2次のアスペリティのせん断破壊が生じることによる。

図中のプロットが見掛けの粘着力を有する直線で表されるのは2次のアスペリティのせん断破壊が生じることによる。

6. まとめ

岩盤不連続面における凹凸の幾何的性質がせん断強度に及ぼす影響につ

いて、極限解析の上・下界定理に基づく数値解析を用いて考察した。本研究では実際の岩盤不連続面はアスペリティ形状に2次、3次あるいはそれ以上の高次の形状より構成されていることに着目した。1次だけでなく2次の形状を取入れると、不連続面のせん断強度は垂直応力に対してパイ・リニアからトリ・リニアな関係へと変化することを示した。これにより、垂直応力に対して発揮されるせん断強度はアスペリティの破壊形態の変化に起因する見かけの粘着力・せん断抵抗角の変化を伴った非線形性を示すことを明らかにした。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、長岡技術科学大学大学院1年松岡真也・三船尚樹・吉田宏一の諸君に助力いただいた。ここに記して謝意を表する。

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. Min. Sci., Vol.9, pp579-602, 1972. 3)大塚悟・山田英司・松尾稔:基礎と地盤間の静的相互作用を考慮した直接基礎の極限支持力, 土木学会論文集, No.525/III-41, pp.151-162, 1997. 4)Goodman, R.E., Taylor ,R.L. and Brekke, T. : A model for the mechanics of jointed rocks, Proc. of ASCE, 94, SM3, pp.637-659, 1968. 5) Doi, M. and Ohtsuka, S. : Some Considerations of Patton Model on Rock Joint Shear Strength, Proc. of Int. Symp. on Slope Stability Engineering, Vol.2, pp.799-804, 1999.

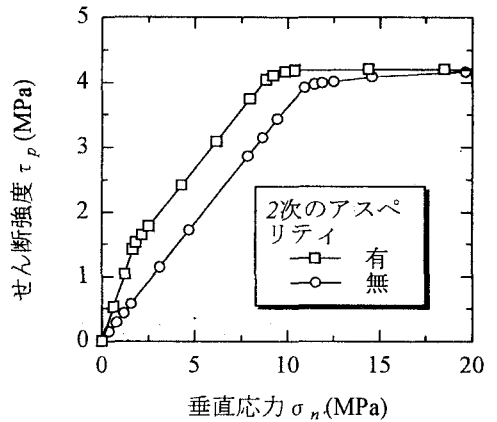


図-7 不連続面のせん断強度への2次のアスペリティ有無の影響 (下界)

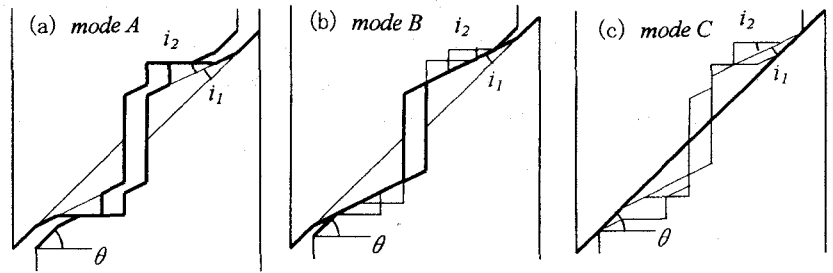


図-8 2次のアスペリティを含む不連続面の破壊モード

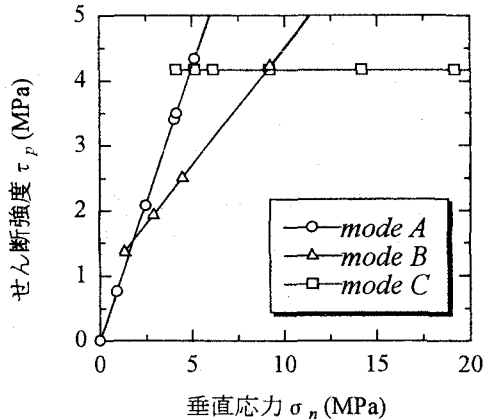


図-9 不連続面のせん断強度への2次のアスペリティ有無の影響 (上界)