

ラフネス計測結果を用いた不連続面せん断挙動の推定

PREDICTION OF SHEAR BEHAVIOR OF A SINGLE JOINT USING PROFILING DATA

安原英明*, 岸田 潔**, 足立紀尚***

Hideaki YASUHARA, Kiyoshi KISHIDA and Toshihisa ADACHI

The geometrical and mechanical properties of discontinuities such as cracks, joints and fissures influence the stress-strain behavior of discontinuous rock mass. The response of a rough joint to shear loading depends on its surface properties as well as the boundary conditions that are applied by surrounding rock mass. In this paper, we propose the model simulating the shear behavior of a joint. The model focuses on each asperity in a joint and judges the contact of its asperity considering the theory of adhesion friction. In order to examine the propriety of the model, we predicted the direct shear experiments that were carried out under constant normal load and constant normal stiffness. Remarkably good agreement was not achieved. One of the reasons is thought because the model does not consider the effect of gouge material under shearing.

Key Words: profiling data, roughness, wear, gouge material & adhesion friction

1. はじめに

近年、地下発電所、石油・LP 備蓄施設、高レベル放射性廃棄物の地層処分など地下空間の開発利用プロジェクトが注目を集めている。また、建設される地下空洞は大深度、大断面化の傾向にあり、岩盤中に潜在的・顕在的に存在するクラックや節理等の不連続面の評価がより重要になってきている。岩盤不連続面の問題に対するアプローチ方法としては、対象岩盤全体における分布特性と単一不連続面の特性のどちらに着目するかによって2つに大別される。前者の分布特性とは、不連続面の方向、距離、密度、連結性であり、現場での調査結果に基づいた確率・統計的手法により研究が進められる一方で、全体の岩盤の挙動を疑似連続体または不連続体としてシミュレートするための数値解析手法が開発されている。後者の単一不連続面の特性とは、力学的には、せん断による変形・強度特性であり、水理学的には、開口幅と透水性の関係である。特に、岩盤不連続面のせん断変形・強度特性に関する研究は従来より数多く行われており^{1), 2)}、種々の強度式が提案されている^{3), 4)}。

しかしながら、これまで提案されている様々な岩盤不連続面のせん断強度式、せん断挙動をシミュレートする構成モデルは、実際のせん断挙動を十分に表現できていないのが現状である。この理由として、実際の岩盤不連続面は表面に様々な凹凸を有し、そのせん断機構は、せん断初期の凹凸の弾性変形に始まり、凹凸の乗り上げ、凹凸表面の摩耗さらには凹凸のせん断破壊へ進行する¹⁾と考えられ、このような凹凸の摩耗、せん断破壊による不連続面の表面損傷を定量的に評価できていないからであると考えられる。

本論文では、レーザー変位計により計測された不連続面の離散化ラフネスデータを用い、凹凸の乗り上げ・摩耗・せん断破壊に至る一連の機構を摩擦の凝着理論⁵⁾を考慮することにより表現することを試みる。そして、過去に行われた垂直拘束圧一定および垂直剛性一定のせん断試験をシミュレートすることにより、提案する解析モデルの妥当性を検討する。

2. 凝着摩擦

前章で示したように本論文で提案する解析モデルは、不連続面せん断過程における表面凹凸部の乗り上げ・摩耗・せん断破壊の一連の機構を摩擦の凝着理論を考慮し表現する。そこで本章では、凝着理論について以下に示す。

* 学生員	工修	京都大学博士1年	工学研究科土木工学専攻
** 正会員	工博	京都大学助手	工学研究科土木工学専攻
*** フェロー	Ph.D. 工博	京都大学教授	工学研究科土木工学専攻

図-1 に示すようにラフネスを有する 2 つの不連続面をかみ合わせるとき、実際に接触している面積（真実接触面積）は、見かけの接触面積に比べて極めて小さいことが普通である。この真実接触面の 1 つ 1 つはわずかな面積に荷重が集中するため、接触部においては降伏応力に達しており塑性変形が生じているものと考えられる。つまり岩石等の脆性材料では、一軸状態であることより接触部の応力は一軸圧縮強度であると仮定できる。また接触部表面は、塑性流動により破壊され内部で直接接合が生じ、凝着（または接着）が発生し、これが摩擦の原因となると考えられる。凝着説⁵⁾によれば、この微小な真実接触面の凝着部をせん断するのに要する力の総和が摩擦力であるとされている。

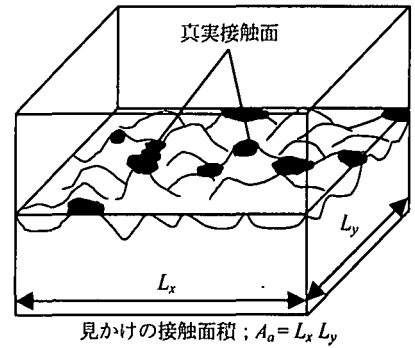


図-1 見かけの接触面積と真実接触面積

不連続面のせん断において、材料の凝着部のせん断強さを s とし、微小なせん断面の面積の総和が真実接触面積 A_r に近似的に等しいとすれば、摩擦力 F は、次式で表すことができる。

$$F = A_r \cdot s \quad (1)$$

ここで、荷重を W 、凝着部の降伏応力を材料の一軸圧縮強度 σ_c とすると、 $A_r = W / \sigma_c$ より、

$$F = \frac{W}{\sigma_c} s \quad (2)$$

となる。したがって、凝着説における摩擦係数 μ は、滑らかな不連続面の一面せん断試験より得られる材料の基礎摩擦角 ϕ_b を用いた $\tan \phi_b$ に等しく、次式で表すことができる。

$$\mu = \tan \phi_b = \frac{F}{W} = \frac{s}{\sigma_c} \quad (3)$$

次に、ラフネスを有する不連続面の真実接触面個々の凹凸部における接触・凝着・せん断破壊に至る一連のプロセスを考える。図-2 に示すようにまず、凹凸部微小領域での接触、凝着が起こる。そして凹凸部を乗り上げながら凝着部が増加していく。このとき、微小領域では、凝着部のせん断、再凝着が繰り返して発生し、摩耗粉が生じるものと推定できる。最後に、増大した凝着部がせん断（凹凸部のせん断破壊）されガウジが発生する。この一連の流れが不連続面せん断過程における表面凹凸部の乗り上げ・摩耗・せん断破壊の一連の機構を表していると考えられる。

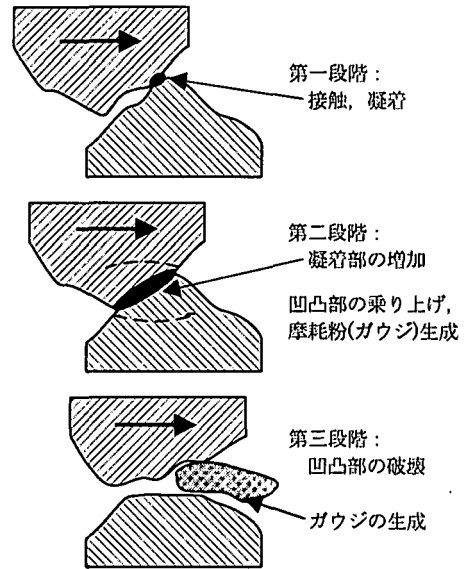


図-2 凹凸部の接触から破壊に至るプロセス

3. 凝着説を考慮した一面せん断挙動の解析モデル

本論文で提案する解析モデルは、不連続面の離散化ラフネスデータ・材料強度 σ_c ・基礎摩擦角 ϕ_b より種々の拘束条件（垂直拘束圧一定、垂直剛性一定条件）における一面せん断挙動を予測するものである。また、本解析モデルは、津野^{6),7)}が提案した垂直拘束圧一定条件における一面せん断挙動解析モデルの個々の凹凸部の破壊機構を、摩擦の凝着理論を適用し、種々の拘束条件の一面せん断挙動を推定できるように拡張したものである。本章では、この一面せん断挙動を表現する解析モデルについて述べる。

本解析モデルでは、まず初期条件として、上下の不連続面は完全にかみ合っている状態とする。解析上での最小せん断距離（1 ステップのせん断距離） Δu は、解析の入力値として離散化ラフネスデータを用いるため、計測される不連続面の計測間隔と同じ値を設定する。以下に垂直拘束圧一定条件における一面せん断挙動推定の解析フローを示す。

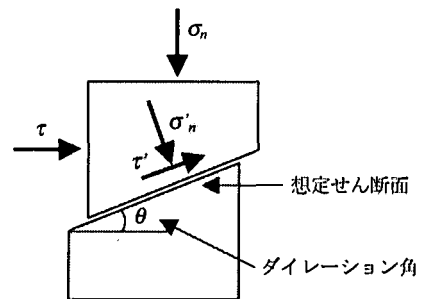


図-3 想定せん断面に作用する応力

<ステップ1 (せん断変位 $u = \Delta u$) >

初期垂直拘束圧 σ_n で上下の不連続面が完全にかみ合った状態よりダイレーション角 θ でせん断されると仮定する。このとき、図-3 に示すように想定せん断面に作用する応力 σ'_n 、 τ' は次式で表される。

$$\sigma'_n = (\sigma_n \cos \theta + \tau \sin \theta) \cdot \cos \theta \quad (4)$$

$$\tau' = (-\sigma_n \sin \theta + \tau \cos \theta) \cdot \cos \theta \quad (5)$$

また、前章で示したように真実接触面 (凝着部) における垂直応力は一軸圧縮強度 σ_c と考えられるので、見かけの接触面積 A_a 、真実接触面積 A_r を用いて σ'_n は、次式で表現できる。

$$\sigma'_n \cdot \frac{A_a}{\cos \theta} = \sigma_c \cdot A_r \quad (6)$$

さらに式(3)より、凝着部をせん断する応力 s は $\sigma_c \cdot \tan \phi_b$ で表されるため、想定せん断面に作用するせん断応力 τ' は次式で表現できる。

$$\tau' \cdot \frac{A_a}{\cos \theta} = \sigma_c \tan \phi_b \cdot A_r \quad (7)$$

つまり、実際の不連続面がせん断されるときダイレーション角 θ が決定できれば、式(4)~(7)よりせん断応力 τ を算定することが可能である。以下にダイレーション角 θ およびせん断応力 τ の決定手順を示す。

- [1] ダイレーション角を θ と仮定する。
- [2] 想定せん断面に作用する応力 (σ'_n 、 τ') を算定する。
- [3] (σ'_n 、 τ') を用いて真実接触面積 A_r を求める。
- [4] 離散化ラフネスデータより θ 以上の角度を持つ (接触する) アスペリティを検索し、接触面積 A_e を算定する。
- [5] $A_e = A_r$ となる θ を決定するために計算上では、初期の θ を十分小さな値 (例えば、 $\theta = -30^\circ$) に設定する。算定される A_e は A_r より大きくなるので、 $\theta = \theta + \Delta \theta$ として [1]~[4] を繰り返す。そして $A_e \leq A_r$ となるときの θ を、ダイレーション角と決定し、式(5)、(7)よりせん断応力 τ を算定する。

<ステップN (せん断変位 $u = \Delta u \times N$ の予測) >

ステップNでも、ステップ1と同様の手順でダイレーション角 θ を決定する。ただし、手順[4]での接触するアスペリティに関しては、各計測点間において津野⁶⁾が提案した *Weight* を計算し、*Weight* の総和を接触アスペリティ数とし、接触面積 A_e を算定する。*Weight* の算定方法を以下に示す。

- 1) 計測点(k-1,j)で上部供試体と下部供試体が接触する場合 ($Y_N(k-1,j) = X_N(k-1,j)$ のとき)、下部供試体の傾きがダイレーション角 θ 以上ならば、接触するとし *Weight* = 1 とする。また、 θ 以下ならば、*Weight* = 0 とする。
- 2) 計測点(k-1,j)で上部供試体と下部供試体が接触しない場合、図-4 のように上部供試体左側の計測点 $Y_N(k-1,j)$ から傾き θ の直線を引き、下部供試体との交点を TCP (Transit Contact Point) とする。TCP が計測点(k-1,j)と(k,j)の間にあるとき、TCP と計測点(k,j)の間の部分がせん断に寄与すると考え、*Weight* を次式で計算する。

$$Weight = L / \Delta u$$

ここで、 L : TCP と計測点(k,j)の間の距離

Δu : 1 ステップのせん断距離 (計測間隔に等しい)

<ステップ終了時のラフネスの座標>

ステップNで決定したダイレーション角 θ で、上部供試体をせん断方向に Δu 移動させる。このとき、上部供試体と下部供試体の凹凸部では重複が生じる場合があるが、せん断破壊が凹凸部のどの領域で発生するかを特定する

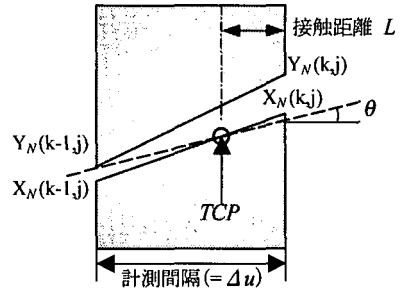


図-4 アスペリティの接触

<Input>

- ・初期垂直拘束圧: σ'_n ・一軸圧縮強度: σ_c
- ・垂直剛性: K ・基礎摩擦角: ϕ_b
- ・離散化ラフネスデータ

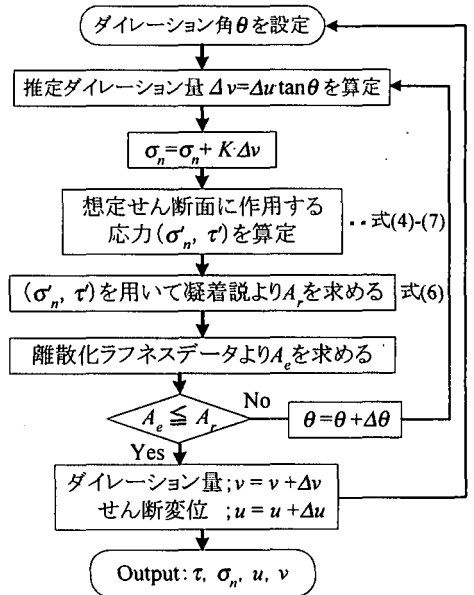


図-5 解析のフローチャート

(8)

ことは不可能であるため、重複部の midpoint で接触するとし上下供試体凹凸部の座標を補正する。実際には、この重複部のせん断破壊によりガウジが発生するものと考えられるが、本解析モデルでは発生するガウジの影響を考慮しない。

最後に、垂直拘束圧一定および垂直剛性一定条件における一面せん断挙動推定の解析フローを図-5 に示す。

4. 解析モデルを用いた一面せん断挙動の推定

本論文で提案する解析モデルを用いて、垂直拘束圧および垂直剛性一定条件における一面せん断挙動のシミュレーションを行い、実験結果との比較検討を行う。比較を行う実験結果は、垂直拘束圧一定試験については津野⁹⁾が行ったものを、垂直剛性一定試験については高木⁸⁾が行った結果を用いる。両者が実験に用いた不連続面は、自然の岩盤不連続面を型取り・複製したものであり、同一形状である。実験に用いた不連続面の鳥瞰図を図-6 に、解析入力データとなる供試体の

材料定数、実験条件を表-1 に示す。また、実験に用いられた不連続面はレーザー変位計を用いて 0.5mm ピッチで計測されているため、解析における 1 ステップのせん断距離 Δu は 0.5mm となる。

垂直拘束圧一定条件におけるせん断変位～せん断応力関係およびせん断変位～ダイレーション関係のシミュレーション結果を図-7 に示す。また、垂直剛性一定条件における解析・実験結果の応力経路図を図-8 に、せん断変位～ダイレーション関係を図-9 に示す。図-8 には、実験結果より得られる不連続面のせん断強度および残留強度(せん断変位 12mm のせん断応力)を用いた強度包絡線の近似直線を示す。

図-7(b),(d)および図-9 よりダイレーションは、解析結果のほうが明らかに小さな値を示している。これは、本解析モデルでは不連続面のせん断にともなうガウジ生成の影響を考慮していないためであると考えられる。また、図-7(a),(c)において、材料の一軸圧縮強度 $\sigma_c = 22.44[\text{MPa}]$ では、実験結果を精度よく表現できているのに対して、 $\sigma_c = 43.29[\text{MPa}]$ では、ピーク以降で上手く表現されていない。考えられる理由として、せん断にともない発生するガウジがベ어링の役目を果たし、せん断応力の低下を引き起こすことが推定できるが、どのような材料(一軸圧縮強度)でその効果が現れるのかを定量的に評価することは、現段階では不可能である。

図-8 において、実験結果の応力経路は破壊線に達した後、残留強度包絡近似線に近づいていっている。特に $K = 490.33, 686.47[\text{MPa/m}]$ の場合は、残留強度包絡近似線付近でこの直線に沿った挙動を示している。一方、解析結果の応力経路は、破壊線付近では実験結果に近い挙動を示しているが、それ以降は実際の挙動を再現できていない。これは図-9 より明らかのように、解析結果のダイレーションが実験結果より小さいため、垂直応力が実験とは異なり増加しなかったからである。

5. まとめ

本論文では、不連続面凹凸部における乗り上げ・摩耗・せん断破壊に至る一連の機構を、摩擦の凝着理論を用いて表現することにより不連続面の一面せん断挙動のモデル化を行った。そして、垂直拘束圧一定および垂直剛性一定条件の一面せん断試験のシミュレーションを行った。ダイレーションは、シミュレーション結果のほうが実際よりも小さくなる傾向を得た。これは、本解析モデルでは不連続面のせん断にともなうガウジの影響を考慮していないためと考えられ、そのため、せん断変位～応力関係、応力経路においては十分なシミュレーション結果を得ることができなかった。今後は、ガウジの影響を定量的に検討する必要がある。また、本解析モデルでは、不連続面凹凸部を 2 次元的にとらえた解析を行っているので、不連続面の 3 次元的な広がりやを考慮したモデルの構築が必要であると考えられる。

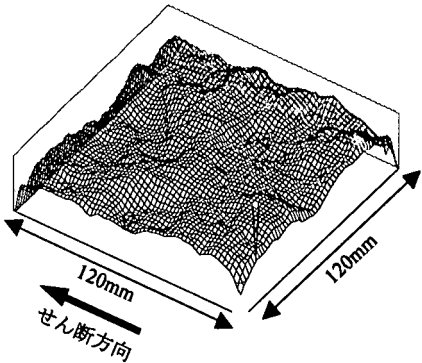


図-6 不連続面の鳥瞰図(計測間隔 0.5mm)

表-1 解析で用いる供試体の材料定数・実験条件

	垂直拘束圧一定試験	垂直剛性一定試験
一軸圧縮強度 σ_c [MPa]	43.29, 22.44	43.29
基礎摩擦角 ϕ_b [degree]	37.2, 34.0	37.2
初期垂直拘束圧 σ_v [MPa]	0.5, 1.0, 2.0	0.49
垂直剛性 K [MPa/m]	—	490.33, 686.47, 980.67

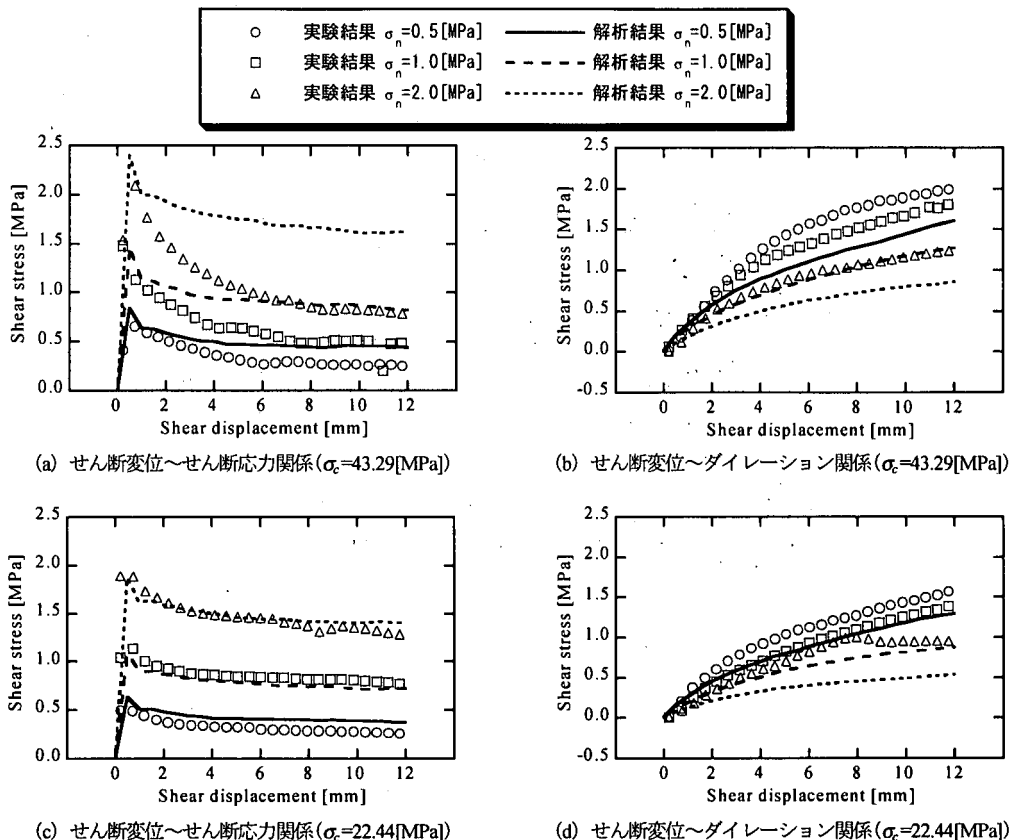


図-7 解析結果および実験結果の比較 (垂直応力一定条件)

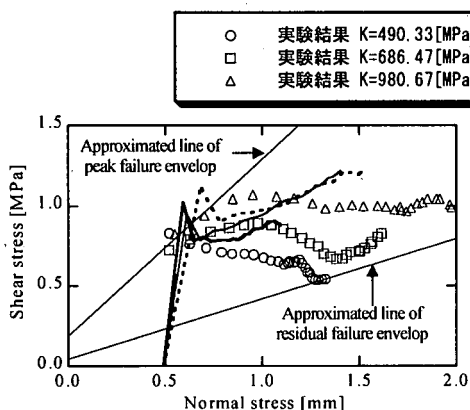


図-8 応力経路図 (垂直剛性一定条件)

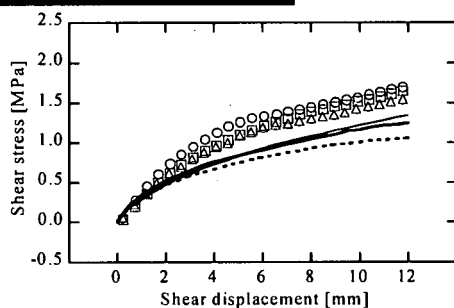


図-9 せん断変位～ダイレイション関係 (垂直剛性一定条件)

【参考文献】

- 1) Pereira, J.P. and de Freitas, M.H. : Mechanism of shear failure in artificial fractures of sandstone and their implication for models of hydromechanical coupling, *Rock Mechanics.*, Vol.26, pp.195-214, 1993
- 2) Jing, L., Stephansson, O. and Nordlund, E. : Study of rock joints under cyclic loading conditions, *Rock Mechanics.*, Vol.26, pp.215-232, 1993
- 3) Ladanyi, B. and Archambault, G. : Simulation of shear behavior of a jointed rock mass, *Proc. 11th Symp. Rock Mech.*, AIME, pp.105-125, 1970
- 4) Barton, N. and Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics.*, Vol.10, pp.1-54, 1977
- 5) 例えば, 兼田禎宏, 山本雄二 共著: トライボロジー, 理工学社, pp.32-43, 1998
- 6) 津野 究: 摩擦とラフネスを考慮した岩盤不連続面の一面せん断挙動のモデル化に関する研究, 京都大学大学院修士論文, 2000
- 7) 津野 究, 岸田 深, 足立紀尚: 摩擦とラフネスを考慮した岩盤不連続面の一面せん断挙動のモデル化, 第 35 回地盤工学研究発表講演集, pp.1479-1480, 2000
- 8) 高木克実: 垂直剛性一定せん断試験方法を用いた岩盤不連続面の強度推定に関する基礎的研究, 京都大学卒業論文, 2000