

Ⅲ - A326 岩盤亀裂のせん断強度と亀裂面の粗さの関係についての数値解析的考察

長岡技術科学大学（正） 土居正信・大塚 悟
J R 西日本 （正） ○竹内 潤

1. はじめに： 岩盤に内在する大小様々な亀裂は岩盤全体の安定性に大きく影響を与えることが知られている。岩盤亀裂のせん断強度特性に関して、これまでに多くの研究が行われ、様々な破壊基準が提案されている^{1)~3)}。なかでも Barton²⁾ は多数の実験結果に基づいて、亀裂のせん断強度と亀裂の粗さ（ラフネス：JRC）を関係付けた破壊基準を提案している。本研究は、亀裂のせん断強度におよぼす亀裂面の粗さの影響を数値解析的に評価することを目的としている。本報告では、規則的な歯型（アスペリティー）を用いてその個数の変化を粗さの変化として捉え、数値解析した結果について述べる。

2. 解析手法の概要および特徴： 岩盤自体を連続体と見なすと亀裂は不連続面となり、解析的に取り扱うには複雑になる。本解析手法⁴⁾ では、亀裂面にはジョイント要素を用い、連続体力学の枠組みの中での解析を可能にしている。岩盤自体は弾完全塑性体にモデル化し、区分線形近似した降伏関数を制約条件とみなし、亀裂面ではジョイント要素を通して伝達される接触応力に制約を設ける。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おり、ジョイント要素および岩盤自体に対する2組の制約条件を満たす可容な解の内の最大値を簡単な線形計画法によって求める問題に帰着する。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アスペリティーに沿う面の剥離・すべり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. 解析条件： 本解析では平面ひずみ圧縮試験を想定し、図-1(a)~(d)に示す解析モデルに対し、初期等方拘束応力 σ_c ($\sigma_3 = \sigma_c$) を与えた後、軸差応力 σ_d を作用させた。解析により求まるのは σ_d である。岩盤自体はDrucker-Prager 材料とし、強度定数が c および ϕ であるCoulomb の破壊基準にしたがうものと仮定する。図-1(a)はアスペリティーがない平坦な亀裂面を有するモデルを示す(case1)。この面は最大主応力

表-1. 解析定数.

intact rock	E	5000.0 MPa,	ν	0.2
	c	5.0 MPa,	ϕ	30°
joint	k_n and c_n and case1	k_s and c_s and case2,3,4	10^{14} kPa/m	0.1 kPa
	ϕ_μ	ϕ_μ	15, 30, 45°	0°
	i	i	30°	

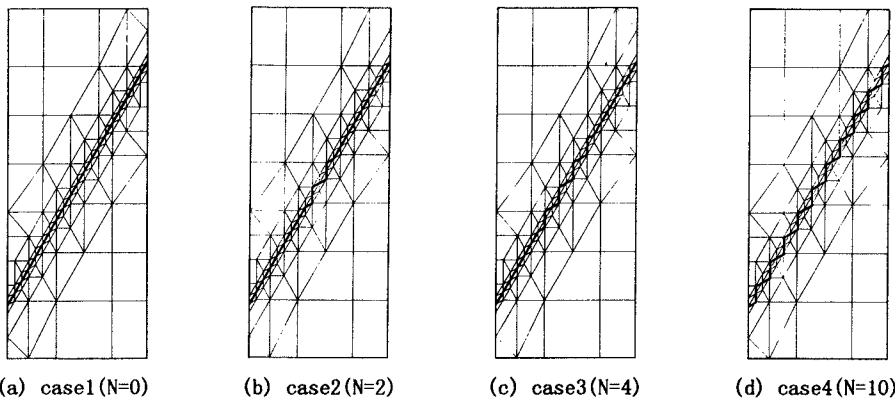


図-1 解析モデルと有限要素メッシュ

key words：岩盤亀裂，せん断強度，数値解析

連絡先： 〒940-2188 長岡市上富岡町 1653-1 長岡技術科学大学 環境・建設系 Tel. 0258-47-9627, Fax. 0258-47-9600

($\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_d$) 面から $\theta = 45^\circ + (\phi/2) = 60^\circ$ となるように設定した。図-1(b)~(d)はアスペリティーを有する解析モデルを示している。アスペリティーの個数 N は、それぞれ $N=2$ (case2), 4 (case3) および 10 (case4) である。アスペリティー傾斜角 i は θ 面となす角で表す。また、本解析で用いた岩盤要素とジョイント要素についての解析材料定数を表-1 に示す。

4. 解析結果および考察： 本解析では前述のように、ある σ_c に対する σ_d が計算結果として求まる。これらの値を θ 面上のせん断強度 τ_f および垂直応力 σ_n に変換し、 τ_f と σ_n の関係に着目する。

case1 について、亀裂面におけるすべり摩擦抵抗角を $\phi_\mu = 15, 30$ および 45° と変化させた場合の τ_f と σ_n の関係を図-2 に示す。図中の破線は岩盤自体のせん断破壊基準 (Coulomb の破壊基準) を示している。いずれの ϕ_μ の場合においても、 τ_f は σ_n に比例して増加し、その勾配は $\tan(\phi_\mu)$ となっており、 θ 面に沿うすべり破壊を表している。ただし、 $\phi_\mu = 45^\circ$ ($\phi_\mu > \phi$) の場合は、 $\phi_\mu = 15$ および 30° ($\phi_\mu \leq \phi$) の場合とは異なり、 σ_n がある大きさ以上になると岩盤自体の破壊基準線に至る。このときの破壊形態は θ 面に沿うすべり破壊から岩盤自体のせん断破壊に変化することを示し、 ϕ_μ の物理的な意味は喪失する。

一方、亀裂面にアスペリティーがある場合 (case2, 3 および 4) には、図-3 に示すような τ_f と σ_n の関係がそれぞれ得られた。ただし、アスペリティーの個数がせん断強度におよぼす影響を検討するために、アスペリティーに沿う接触面における ϕ_μ は 0° とした。いずれの場合も、 σ_n が低い領域ではその勾配が $\tan(i)$ となり、アスペリティーに沿うすべり破壊が生じていることを示している。case2, および 3 の場合については非線形性が見られ、これは σ_n の増加にともないアスペリティーに沿うすべり破壊からアスペリティーのせん断破壊へと破壊形態が変化していることを表している。case4 のようにアスペリティーの個数が増加すると、 τ_f と σ_n は線形関係となり、図-2 で示した $\phi_\mu = 30^\circ$ の場合とまったく同様のせん断強度特性を示していることがわかる。このことは、巨視的にみた亀裂面のすべり摩擦抵抗は、亀裂面の粗さによって発揮されることを示唆しているものと考えられる。

5. まとめ： 本研究では、亀裂面の粗さとせん断強度特性の関係を解析的に評価・検討する目的で、塑性論における下界定理に基づく解析手法を用いて数種類の解析を行った。その結果、亀裂面における粗さが岩盤亀裂の破壊形態を変化させ、すべり摩擦抵抗発揮の要因であることを示した。

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. Min. Sci., Vol.9, pp.579-602. 1972. 3) Ladanyi, B. and Archambault, G.: Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass, Proc. of 11th Symp. Rock Mech., AIME, pp.105-125. 1970. 4) Ohtsuka, S.: Bearing capacity analysis of rock structures including cracks, Proc. of 9th Int. Conf. of Int. Assoc. for Comp. Mech. Adv. on Geomech., Vol.1, pp.739-744. 1997.

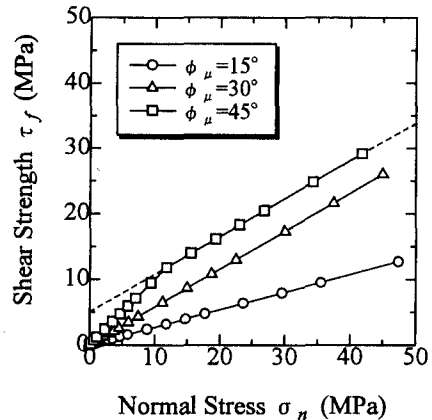


図-2 平坦亀裂のせん断強度 (ϕ_μ 変化)

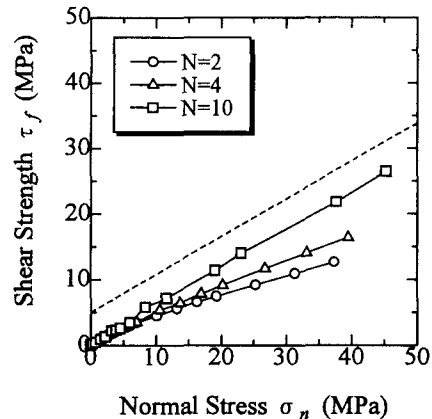


図-3 アスペリティーの影響 ($\phi_\mu = 0^\circ$)