

(III-64) 節理の力学的挙動のモデル化とメカニズムの解明に関する研究

○ 千葉工業大学 学生員 手塚 裕之
東京大学 正 員 堀井 秀之, 吉田 秀典

1. はじめに

わが国における岩盤は多くの負荷履歴を受け、節理・断層といった不連続面を数多く含んでいる。こうした不連続面は、地下空洞などが掘削される前には地圧を受けて閉塞しているが、空洞掘削に伴う応力解放によって変形を生じる。その変形成分は基岩のそれに比べてはるかに大きい。したがって、地下空洞が掘削される前には、種々の原位置試験・岩石試験を行い、こうした不連続面、主として節理の変形・強度特性を把握することが重要となる。しかしながら、こうした特性を評価するにあたって、経験的な指標・判断¹⁾による面が少いとは言い難く、節理の挙動を必ずしも捉えたものとはなっていない。そこで本研究では、節理の力学的挙動のモデル化を行い、そのメカニズムを明らかにすることを目的とした。

2. 垂直方向の変形

一般に節理面は多くの凹凸を有し、これがその力学的挙動に大きな影響を及ぼすことが知られている¹⁾。こうした凹凸を有する節理に対して垂直方向から負荷を与えると、初期段階では接触面積が小さいために応力が集中し、接触部近傍では塑性変形を生じ大きな変形を生む。さらに負荷を続けると接触面積は増加し、見かけ上、変形しにくくなる。図1はBartonらによる節理の圧縮試験の結果であるが、彼らの実験においても負荷初期の段階では大きな変形が生じ、やがて変形が小さくなって応力が増大している。そこで本研究では、節理の凹凸部が正規分布をしているものと仮定し、図2のような有限要素メッシュを用いて節理の垂直方向载荷の解析を行った。図の高さに相当する部分が節理のapertureであり、分散(正規分布の)が節理の凹凸一つの幅と規定している。解析は垂直方向に対して変位制御で荷重を与え、材料をDrucker-Pragerの構成則にしたがう弾塑性体と仮定した。その材料特性(変形及び強度特性)を表1に示す。本稿では紙面の都合上、節理の分散(正規分布の)を3通り(0.2, 0.25, 0.3)、また粘着力を2通り(0.5MPa, 2.0MPa)に変化させた結果のみを示す。尚、解析は左右対称問題であることから右半分のみの領域(左側面にある節点のX方向の変位を固定)について、2次元平面ひずみの条件下で解析を行った。

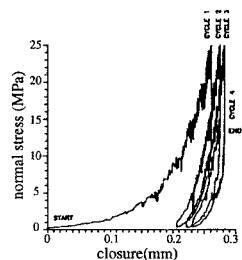


図1 closure vs normal stress

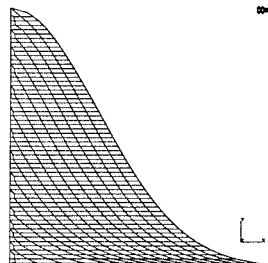


図2 二次元有限要素メッシュ

図3及び図4は、粘着力を2.0MPaに固定して分散を変化させた場合、及び分散を2.0に固定して粘着力を変化させた場合の垂直変位-応力関係をそれぞれ示している。図3より分散のばらつきが小さいために、それぞれのグラフ形状にほとんど差がないことがわかる。現在、分散を変化させる解析を進行中であることを付け加えておく。

表1 材料特性(変形及び強度特性)

分散	ヤング率 E:(MPa)	ポアソン比 ν	内部摩擦角 ϕ :(deg)	粘着力 C:(MPa)	aperture (mm)
0.20 0.25 0.30	300	0.3	40	0.5 or 2.0	0.5

同様に図4においても粘着力による差もほとんどない。これも2つの粘着力による差が小さいことに起因していると考えられるので、比較のために弾性解析も併せてプロットした。弾性解析の場合、変位を0.3mmまで与えるとかなり大きな応力が生じ、明らかに図1のような挙動を再現出来ないことがわかる。本解析結果により、分散(幅)及び粘着力の小さな差には、応力-変位関係は敏感でないことがわかった。また適当なパラメータを選ぶことで図1のような挙動を再現出来ることが判明した。

キーワード：節理、垂直方向の変形、せん断方向の変形

〒113 東京都文京区本郷3-7-1 TEL:03-3812-2111 FAX:03-3812-4977

3. せん断方向の変形

節理のせん断挙動を表現するために以下のようなモデル化を行った。
(1) 節理は一定のせん断剛性 K_{si} を有するが、これは垂直応力 σ_n の影響を受け、拘束圧の傾向がある。そこで図2のような形状を有するジョイントに荷重 P を加えた時、ジョイントに作用する応力 τ^J は以下ようになる。

$$P = A^P \tau^P = A^J \tau^J \dots\dots\dots (1)$$

ここで A^P は試験器 (せん断箱など) の面積、 τ^P はそれに作用する応力 (実際に計測される応力)、そして A^J は節理と試験器が接触している部分の面積である。また、節理に作用しているせん断応力 τ^J とせん断変位 u^J の関係は

$$\tau^J = K_{si} u^J \dots\dots\dots (2)$$

と定義される。これに式 (1) を代入すると

$$\tau^P = \frac{A^J}{A^P} K_{si} u^J = K_s u^J \dots\dots\dots (3)$$

と求まる。式中の K_s が垂直応力に依存した節理のみかけのせん断剛性である。さらに、節理は以下の条件を満足するとせん断すべりを生ずるものと仮定する。

$$\tau^J = \mu \sigma_n \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 μ は静止摩擦係数である。式 (4) を満足した後は、以下のような条件を満たし、残留状態になるものと仮定する。

$$\tau^{J(R)} = \mu' \sigma_n \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 μ' は動摩擦係数である。本稿では、紙面の都合上、静止・動摩擦係数を一定 (それぞれ 1.2 と 0.8) として垂直応力を 4 通り (0.23, 0.46, 0.92, 1.84 MPa) に、そして垂直応力を一定 (0.23 MPa) として静止・動摩擦係数を 4 通り (1.2&0.7, 1.3&0.8, 1.4&0.9, 1.5&1.0) に変化させた結果を示す。尚、いずれの解析も K_{si} を 45 MPa/mm としている。図5及び図6は、静止・動摩擦係数を固定して垂直応力を、垂直応力を固定して静止・動摩擦係数を変化させた場合のせん断変位-せん断応力関係をそれぞれ示している。図5においては、垂直応力が増加することによりみかけのせん断剛性が変化し、それぞれグラフの傾きが異なる。また垂直応力が増大する方が、せん断強度が大きくなっている。図6においては、静止・動摩擦係数によりせん断強度が異なり、静止・動摩擦係数が増大する方がせん断強度が大きくなる。これらの解析結果は、文献¹⁾で報告されている結果と類似している。

4. まとめ

本研究では、節理の正規分布形状になっているものとし、垂直およびせん断試験の解析を行った。垂直試験の解析では、見かけ上の応力が増大していくという挙動が表現でき、除荷側も含めて実際の挙動をほぼ再現できている。せん断方向の変形についても、せん断強度の拘束圧依存性や、簡単な破壊条件を導入することでピーク後の挙動もうまく表現できることが判明した。今後は、こうしたモデルの種々のパラメータ (分布の幅を規定する分散, aperture を規定する関数の高さおよび節理の強度など) と、Barton らの規定する JRC や JCS との相関を確認する必要があると思われる。

参考文献

- 1) N.R.BARTON, S.C.BANDIS, A.C.LUMSDEN, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.20, No.6. pp.249-268. 1983

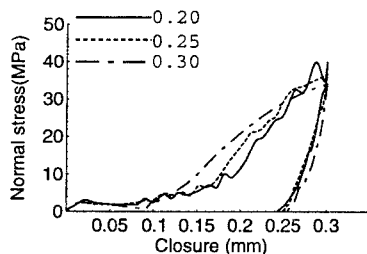


図3 分散変えた結果

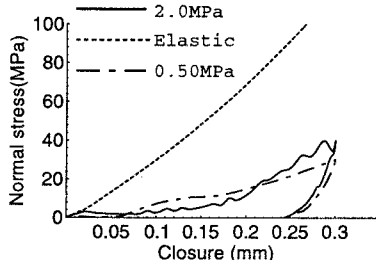


図4 粘着力 C を変えた結果

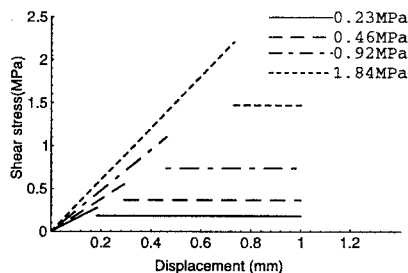


図5 垂直応力を変えた結果

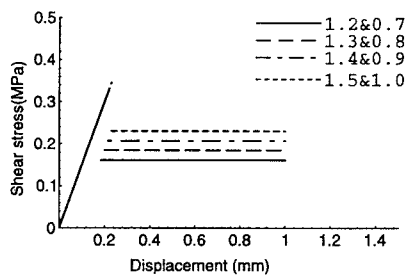


図6 静止・動摩擦係数を変えた結果