

京都大学 学生員 ○ 松岡 勇樹  
 横浜国立大学 正会員 菊本 統  
 大阪大学 正会員 緒方 奨  
 京都大学 正会員 岸田 潔

### 1. はじめに

岩石不連続面の開口幅は表面粗さやかみ合わせ状態が反映されており、せん断挙動を支配する状態変数であるとの考えに基づいて、Zhang<sup>1)</sup>は不連続面の開口幅を考慮した岩石不連続面のせん断モデルを提案している。本研究では、岩石不連続面の一面せん断試験と解析結果の比較により同モデルの検証を行うとともに、状態変数の発展則パラメータ $\omega$ の感度分析を行った。

### 2. 一面せん断試験の概要

対象の一面せん断試験は、4つの花崗岩供試体(G1, G2, G3, G4)の結果である<sup>1)~3)</sup>。各供試体は、圧裂試験により供試体中央に単一割れ目が作成されている。各供試体のサイズは、長さ80 mm、幅120 mm、高さ120 mmである。

せん断試験を行う前に垂直剛性試験が行われている。この試験は岩石不連続面に対し所定の垂直応力まで載荷・除荷を3回繰り返す試験である。その後、一定拘束圧の一面せん断試験がせん断速度0.1 mm/minで行われた。

### 3. 岩石不連続面のせん断モデルの概要

垂直剛性試験で得た開口幅と垂直応力の自然対数の関係の一例を図1に示す。最初の載荷過程では、開口幅は顕著に減少し、不可逆的に変化する。その後の除荷・再載荷過程での開口幅の変化は概ね可逆的であった。開口幅の変化は片対数平面で直線として近似でき、最初の載荷過程の傾きを $\lambda$ 、除荷・再載荷過程での傾きを $\kappa$ とする。

Zhang<sup>1)</sup>は、岩石不連続面は最初の圧縮過程では硬化を

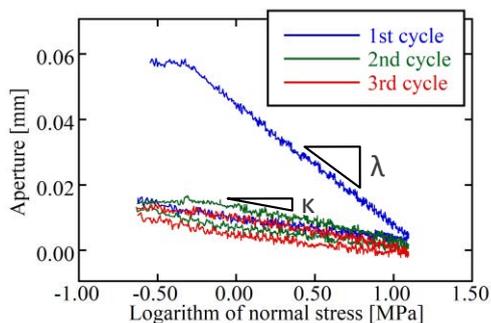


図1 垂直剛性試験での開口幅変化(試料G2)<sup>1)</sup>

伴う弾塑性挙動を呈し、その後の除荷・再載荷過程は弾性応答を示すと仮定して、岩石不連続面のせん断モデルを提案した。本研究では上付き文字の  $e, p$  はそれぞれ弾性成分、塑性成分を表す。開口幅は岩石不連続面の接触面間の平均距離とする。

垂直剛性試験における、除荷・再載荷過程での開口幅の弾性的な開口幅の変化は次式で表す。ここで $\kappa$ は垂直剛性試験での除荷・再載荷過程の傾きである。

$$d\bar{b}^e = -\kappa \frac{d\sigma_n}{\sigma_n} \quad (1)$$

垂直剛性試験における初回の圧縮過程での開口幅変化を開口幅の上限値とみなして正規圧縮線(NCL)とし、NCL上の開口幅を $b_n$ とすると平均開口幅は次式を満たす。

$$\bar{b} \leq b_n - \lambda \ln \frac{\sigma_n}{p_a} \quad (2)$$

$p_a$ は大気圧、 $b_n$ は大気圧下でのNCL上の開口幅、 $\lambda$ は垂直剛性試験での1回目の載荷過程の圧縮線の傾きである。

また、この不連続面をせん断して、せん断応力比や開口幅が変化しない限界状態に達した時、不連続面の開口幅は垂直応力に対してユニークな値をとるとして限界状態線(CSL)を定義する。CSL上の開口幅は次式で表す。

$$\bar{b} = b_s - \lambda \ln \frac{\sigma_n}{p_a} \quad (3)$$

ここで、 $b_s$ は大気圧下でのCSL上の開口幅である。

NCLとCSLを含む面を、任意のせん断応力比 $\eta$ のもとで開口幅の上限を表す状態境界面(SBS)とする。 $\zeta(0) = 0$ 、 $\zeta(M) = 1$  ( $M$ は限界応力比)を満たす単調増加関数 $\zeta(\eta)$ を用いれば、状態境界面上の開口幅 $b_{sbs}$ はNCLとCSL上の開口幅を補間することで式示できる。

$$\bar{b}_{sbs} = b_n - (b_n - b_s) \zeta(\eta) - \lambda \ln \frac{\sigma_n}{p_a} \quad (4)$$

また、Zhang<sup>1)</sup>は開口幅による塑性変形の程度の違いを考慮するため下負荷面の概念を導入している。状態境界面

表 1 実験より得られるパラメータ

		初期開口幅 $b_0$	垂直剛性 $k_n$	せん断剛性 $k_s$	最大閉塞量 $V_{mc}$
		[mm]	[MPa/mm]	[MPa/mm]	[mm]
G1	Case-1	0.0389	1428.57	25.98	0.1794
	Case-2	0.0430	138.89	36.88	0.4856
G2	Case-1	0.0050	434.78	74.88	0.0674
	Case-2	0.1238	34.56	29.14	0.5550
G3	Case-1	0.0392	33.11	200.69	0.2295
	Case-2	0.0445	14.47	9.66	0.1128
G4	Case-1	0.0469	28.17	10.50	0.1320
	Case-2	0.5794	11.17	6.75	0.6969

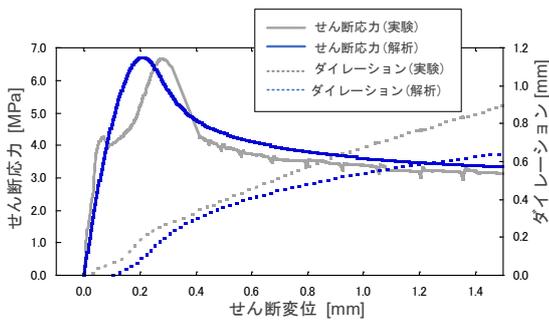


図 2 実験と解析<sup>1)</sup>の比較 (試料 G2 Case-1)

上の開口幅と現在の開口幅の差を状態変数 $\Omega$ として、塑性変形時の $\Omega$ の発展則を式(6)で与える。

$$\Omega \equiv \overline{b_{sbs}} - \bar{b} \quad (5)$$

$$d\Omega = -\omega\Omega^2 |d\delta^p| \quad (6)$$

ここで $\omega$ は定数である。以上より、降伏関数は次式となる。

$$f = \bar{b} - \overline{b_{sbs}} + \Omega \equiv 0 \quad (7)$$

#### 4. 材料パラメータの決定

平均開口幅の変化量と岩石不連続面の垂直変位は等しいことから、弾性剛性 $k_n$ は式(1)を変形して次式で求まる。

$$k_n = \frac{\sigma_n}{\kappa} \quad (8)$$

せん断剛性 $k_s$ は、初期剛性が捉えられるように設定した。

次に初期開口幅 $b_0$ の決定方法を示す。Bandis, et al<sup>4)</sup>は岩石不連続面の垂直応力-変位関係を次式に近似した。

$$v = \frac{\sigma_n V_{mc}}{k_{ni} V_{mc} + \sigma_n} \quad (9)$$

$v$ は開口幅の閉塞量、 $V_{mc}$ は開口幅の最大閉塞量、 $k_{ni}$ は初期垂直剛性である。初期開口幅 $b_0$ は、垂直剛性試験の3回目の除荷過程における開口幅変化を式(9)に近似し、各実験での拘束圧 $\sigma_n$ をその近似式に代入して得られる開口幅の閉塞量 $v$ を、最大閉塞量 $V_{mc}$ から差し引くことで求める。各供試体に対して設定したパラメータを表 1 に示す。

#### 5. 結果と考察

ピーク強度と所定のせん断変位におけるせん断応力・ダイレーションの値が実験結果と最も適合するよう $\omega$ を

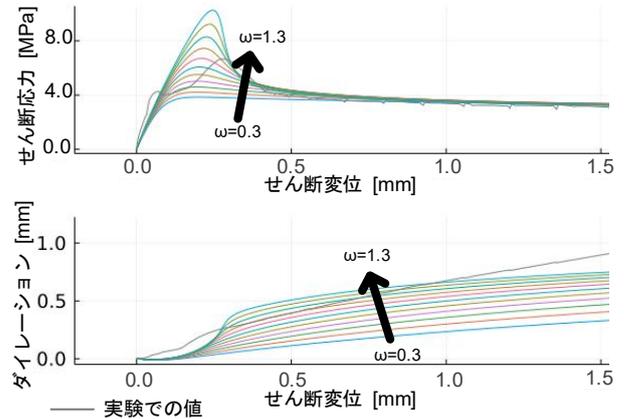


図 3  $\omega$ の値による解析結果への影響(試料 G2 Case-1)

0.9と決定し、岩石不連続面のせん断試験の解析を行った。図 2 に結果の一例を示す。図のように解析は実験で観察されたようなピーク強度や軟化挙動、ダイレイタンス特性を概ね再現した。

次に、図 3 に示すように $\omega$ をパラメトリックに変化させて解析を行った。 $\omega$ が大きいほど状態変数 $\Omega$ は顕著に減少するため、開口幅がより速く状態境界面上の値に近づき、同時にピークせん断強度が大きくなる。

#### 6. まとめ

本研究では、せん断試験より求めたパラメータを用いて、Zhang<sup>1)</sup>の提案した岩石不連続面のせん断モデルのシミュレーションを行い、実験結果の挙動の傾向をある程度とらえた。また、パラメータ $\omega$ がせん断挙動に及ぼす影響について感度分析を行い、パラメータ $\omega$ の値によって、シミュレーションでのダイレーションが発生する速さが変化し、ピークせん断強度も変化することが分かった。

#### 参考文献

- 1) Zhang, J.: Study on Slide-Hold-Slide Process of Rock Discontinuity Considering Joint Surface Roughness and Aperture Change, *Ph.D Thesis, Kyoto University*, 2022 (in press).
- 2) 松本ら：岩石不連続面の SHS 型一面せん断試験と速度・状態を考慮した応力回復現象の評価, 第 45 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 202-205, 2018.
- 3) 岸田ら：加温条件下での岩石不連続面のせん断応力回復に関する実験的研究, *地盤工学ジャーナル*, 11(1), 11-20, 2016.
- 4) Bandis, et al.: Fundamental of Rock Joint Deformation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts*, 20(6), 249-268, 1983.