

奥村組

名古屋大学 工学部

名古屋大学 工学部

名古屋大学 工学部

○塚本 耕治

新田 宏基

市川 康明

川本 眺万

1. まえがき. 各種土木構造物の対象となる岩盤は断層, 節理, 層理といった不連続性を有しており, その挙動にさまざまな影響を与えている. このような岩盤の力学的挙動を数値シミュレートする有効な手段として, 川井により開発された剛性バネモデル¹⁾があるが, これは弾性域における変位が他の解析解に合わないという欠点を有している. 本研究では, 充填物を含まず密着した状態にある不連続のせん断挙動に着目し, 人為的に不連続性を作ったモルタル供試体を用いて一面せん断試験を行なうと共に, 従来の剛性バネモデルのひずみを再定義し, エネルギー評価に修正を加えることにより弾性問題にも適用できる剛性バネモデルを開発し, これに弾塑性関係を導入して, 上記試験の数値シミュレートを実施してその妥当性を検討した.

2. 不連続面に対する一面せん断試験. (i)実験方法 水, 普通ポルトランドセメント, 標準砂を重量比 0.65:1:2 の割合で配合し, 次に示すような人為的に不連続性を作った大きさ $14.9 \times 14.9 \times 10.3$ cm の供試体を用意することにより, 垂直応力一定下で一面せん断試験を行なった.

供試体-1 予め垂直応力一定 ($\sigma_n = 10 \text{ kg/cm}^2$) でせん断し, せん断面を再び組み合わせた不連続面

供試体-2 せん断面を電動式カッターにより切断した不連続面

供試体-3 せん断方向に対し, 上向きに角度 i ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) だけ傾いたのこぎり歯状の不連続面

供試体-1 と供試体-3 には繰り返し載荷を, 供試体-2 には連続的な載荷を行なった. なお, 載荷速度は毎分 0.08 mm 程度である. (ii)実験結果と考察 実験結果をせん断応力~せん断変位, 垂直変位~せん断変位の関係について整理し, 垂直応力および不連続面の凹凸性が与える影響について比較, 検討する.

供試体-1 に対する実験結果を Fig.1 に示すが, 予めせん断を受けているため, せん断応力のピークが現れず, また垂直応力の増加に伴うダイレイタシーの抑制は見られない. 供試体-2 に対する実験結果の Fig.2 は, 垂直応力の比較的大きいところでは, 一様なせん断を起こすのではなく段階的なすべりを伴う stick-slip 現象を生じることを示している. この現象は初期降伏点の前後で激しく起こり, 垂直応力の増加に伴い著しくなる傾向にある. 供試体-3 に対する実験結果を Fig.3~Fig.5 に示すが, これらは不連続面の傾きが 15° と比較的小さい場合, 小さい垂直応力下ではすべりを伴いながらせん断破壊を生ずるため, せん断応力~せん断変位の関係は比較的ゆるやかな曲線を示すのに対し, 大きい垂直応力下では歯状部を破壊しながらせん断が進むため, 最大せん断応力に到達後, 急激な応力低下をしており, この傾向は角度 i が $30^\circ, 45^\circ$ と大きくなるにつれて著しくなる. 最大せん断応力と垂直応力との関係を Fig.6 に示す. すべり面上の摩擦角 ϕ_u は 32° であり, 一様な角度 i の規則的な凹凸がしだけ摩擦角を増加するとした Patton のせん断強度式 $\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_u + i)$ をほぼ満足している.

3. 修正剛性モデル. 従来の剛性モデルのひずみは, 要素境界面上

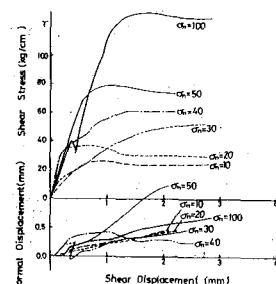


Fig. 1 Shearing of irregular repetition
Shear and dilatancy curves

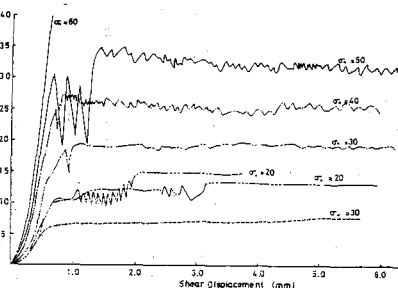


Fig. 2 Shearing of flat discontinuity
Shear curves

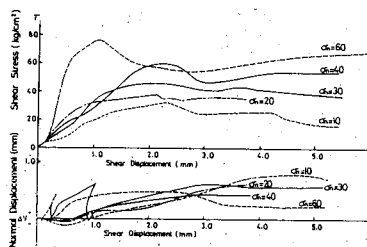


Fig. 3. Shearing of Regular hexapierite at a uniform angle. Shear and Dilatancy curves ($\alpha=15\text{deg.}$)

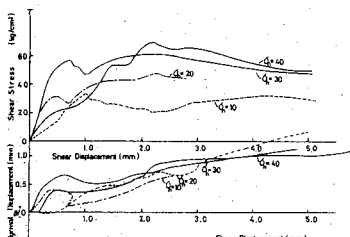


Fig. 4. Shearing of Regular hexapierite at a uniform angle. Shear and Dilatancy curves ($\alpha=15\text{deg.}$)

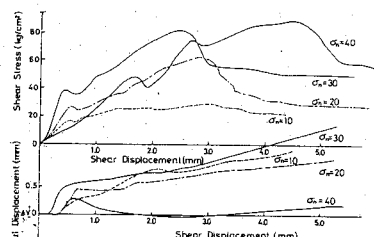


Fig. 5. Shearing of Regular hexapierite at a uniform angle. Shear and Dilatancy curves ($\alpha=15\text{deg.}$)

の接線方向と垂直方向の相対変位を一律に要素重に間距離 h で割ることにより定義している。そのため、要素境界面方向の直ひずみ ϵ_t が考慮されていず、この分だけの剛性が低くなり、過剰な変位を与えている。そこでひずみを再定義し、弾性域における変位を他の解析解に合わせるとともに、不連続面においては川本、後藤²⁾のモデルを導入し、一面せん断試験を数値シミュレートする。

(i) ひずみの再定義 要素境界面上での相対変位は、

$$\delta = B d e \quad (1)$$

ここに $\delta = (\delta_n, \delta_s)$

$$d e = (u_1, u_2, \theta_1, u_3, u_4, \theta_2)$$

微小変形理論よりひずみを

$$\epsilon_n = \frac{\Delta U}{\Delta n} = \frac{\delta_n}{h}, \quad \epsilon_s = \frac{\Delta V}{\Delta s} = \frac{\delta_s}{l}, \quad \gamma_{ns} = \frac{\Delta V}{\Delta n} + \frac{\Delta U}{\Delta s} = \frac{\delta_s}{h} + \frac{\delta_n}{l} \quad (2)$$

ここに、 h ：重の間距離、 l ：要素境界面上の長さで近似する。これをマトリックス表示すると、

$$\bar{\epsilon} = S B d e \quad \text{ここに } S = \begin{bmatrix} 1/h & 0 \\ 0 & 1/l \\ 1/l & 1/h \end{bmatrix} \quad (3)$$

となる。(ii) 要素剛性マトリックス 応力がHooke則に従うものとする、仮想仕事の原理により要素剛性マトリックスは、

$$K_e = t \int_A B^T S^T D S B dA \quad t: \text{単位長さ}$$

となる。ここで積分範囲 A を要素 l の長方形で考える (Fig. 7)。(iii) 弾塑性解析 上に述べた修正剛性モデルにRetruszczak & Mroz³⁾の提案した弾塑性構成式を導入し、傾き $\lambda=15^\circ$ について数値シミュレートを行なった。

なお、材料定数はTable.1を用いた。(iv) 実験結果と解析結果との比較 解析によるせん断応力 $\sim$ 変位関係は実験結果より幾分小さい値を示すが、ほぼ同様な傾向を示す。ダイレイタンシーは実験値より大きくなった (Fig. 8, Fig. 9)。

4. おわりに、不連続面のせん断挙動は凹凸の形状および垂直応力の状態により著しく異なる。また、このような挙動を解析する上で今回の剛性モデルは有用である。

参考文献

- 1) 川井忠彦 (1980), 物理モデルによる連続体力学諸問題の解析 (第3回) 東大生研セミナーテキスト。
- 2) 後藤有志, 剛性モデルを用いた不連続性岩盤界面の変形、破壊挙動解析, 第18回土質工学研究発表会 (1983.6)
- 3) Retruszczak, S. & Mroz, Z. (1981), "Finite Element Analysis of Deformation of Strain Softening Material," Int. J. for Numerical Methods in Eng., vol. 17, pp. 327-334.