

I - 22

単軸引張時の非共軸特性における微視すべりと巨視すべりととの関係

東北大学工学部

○学生員 赤崎 圭輔

東北大学大学院工学研究科

正員 岩熊 哲夫

1. まえがき

材料が破壊するとき、鋼片の引張試験のように絞りなどの大変形を伴い壊れる場合があり、このときすべり線のような局所化した変形が数多く観察される。この変形の局所化の発生を、せん断帯の発生というある種の分岐現象として捉えた研究が古くから行われている。このせん断帯の発生は、特に、塑性ひずみ増分の主軸と応力の主軸が一致しない「非共軸性」がせん断帯の発生を促す役割を果たし、せん断帯の発生する応力が現実的な値になることがわかっていて、本研究では、文献¹⁾によって提案された構成モデルを活用し、3次元での非共軸の特性についての考察を行う。

2. 構成モデル

本研究では文献¹⁾による構成モデルを使用しており、ここに概説する。弾性域は一般化した Hook の法則に従うとし、塑性域は J_2 流れ則を拡張し、拘束圧依存性や体積変化の塑性成分を考慮した非関連流れ則を前提としている。さらに変形局所化の大きな要因となる非共軸項を付加することで、塑性ひずみ増分を以下に与える。

$$d_{ij}^p = \frac{1}{H} \left(\frac{\sigma'_{ij}}{2\bar{\sigma}} + \frac{\beta}{3} \delta_{ij} \right) \left(\frac{\sigma'_{kl}}{2\bar{\sigma}} + \frac{\alpha}{3} \delta_{kl} \right) \bar{\sigma}_{kl} + A \left\{ \bar{\sigma}'_{ij} - \frac{1}{2\bar{\sigma}^2} \sigma'_{kl} \bar{\sigma}_{kl} \sigma'_{ij} \right\} \quad (1)$$

ここに、上付きの ∇ は Cauchy 応力の Jaumann 速度で、nominal 応力速度と以下の関係にある。

$$\dot{n}_{ij} = \bar{\sigma}'_{ij} + d_{kk} \sigma_{ij} - d_{ik} \sigma_{kj} + w_{jk} \sigma_{ki} \quad (2)$$

また、A は次の式で表される。

$$\frac{1}{\bar{\mu}} = \frac{1}{\mu} + 2A \quad (3)$$

ここに、 $\bar{\mu}$ は見かけ上の接線せん断係数である。材料試験・要素試験で観察される集中化したすべり変形を、Hill のモデルによる不連続面として捉えると、このせん断帯の発生条件は次の式で与えられる。

$$\det |\nu_i F_{ijkl} \nu_j| = 0; \quad \nu_k \nu_k = 1 \quad (4)$$

ただし、 ν は不連続面の法線方向単位ベクトルである。詳細は文献¹⁾に記載してある。

3. 計算に際しての条件および比較対象

単軸載荷状態において、応力増分として $\dot{n}_{ij}$ を与え、そのときの偏差応力と塑性ひずみ増分との関係を考察する。また、式 (4) を満たす時の応力と、そのときの微視すべりの方向について、 $\bar{\mu}$ および文献¹⁾との比較を行う。

4. 計算結果

(1) 非共軸の影響による共軸からのズレ

図-1 から図-4 はそれぞれ、 $\sigma_{11}/\mu = 0.002$ を載荷し、応力増分として $\dot{n}_{ij}/\mu = 0.00001$ を与えたときの $\bar{\mu}$ と塑性ひずみ増分との関係を示し、図-5 は応力増分の各成分を与えたときの内積を示したものである。式 (1) におけるパラメータは、それぞれ $H = 0.001$, $\beta = 0$ とし、また、 x_2, x_3 方向については対称なので、 $\dot{n}_{23}/\mu = \dot{n}_{32}/\mu = 0.00001$ として与えた。図中に示されていない塑性ひずみ増分の成分は零あるいは極めて零に近い値をとっているために省略した。図-1 のときは、他の場合と比べて塑性ひずみ増分が大きくなるのがわかる。また、 α の影響も大きく出ることがわかる。しかしながら、塑性ひずみ増分の方法は偏差応力の方向と一致し、非共軸項の影響が出てこない。これは、単軸載荷の時には d_{11}^p には非共軸項が含まれず、また d_{22}^p, d_{33}^p の非共軸項は $\dot{n}_{11}$ の影響を受けないためである。図-2、図-3 のようにせん断方向に応力増分を与えたときは、 $\bar{\mu}/\mu = 1$, つまり共軸性に近づくにつれて塑性ひずみ増分は零に漸近する。また、図-5 より、応力増分としてせん断を与えたときは内積の値は常に零である。これは、せん断成分の塑性ひずみ増分が降伏曲面に接する方向に塑性ひずみ増

分をもつため、塑性仕事をしないということである。また、 $\dot{n}_{22}$ に応力増分を与えたときは塑性ひずみ増分の方が降伏曲面の内側を向いていることになり、除荷を意味する。

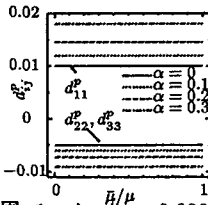


図-1 $\dot{n}_{11}/\mu = 0.00001$

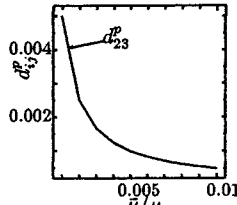


図-2 $\frac{\dot{n}_{23}}{\mu} = \frac{\dot{n}_{32}}{\mu} = 0.00001$

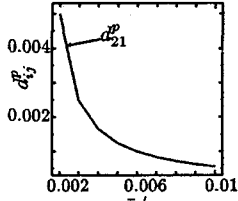


図-3 $\dot{n}_{21}/\mu = 0.00001$

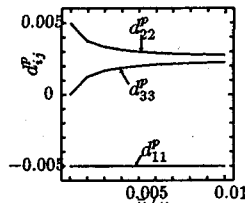


図-4 $\dot{n}_{22}/\mu = 0.00001$

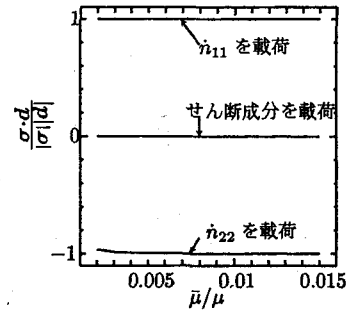


図-5 偏差応力と塑性ひずみ増分との内積

(2) 不連続面の方向と不連続面の発生する応力

単軸荷重のとき、式(4)において x_2, x_3 方向に関する対称性を利用すると、 $\nu_2/\nu_1 = \nu_3/\nu_1 = \tan \theta$ とすることができ、このとき式(4)は $\tan \theta$ に関する6次関数となる。この関数が実数解をもつときの σ_{11} と、そのときの $\tan \theta$ を、図-6、図-7の実線で示した。また、破線は文献¹⁾の平面ひずみでの解析結果である。図-6から分かるように、3次元の単軸荷重においては微視すべりの発生するときの応力と、 $\bar{\mu}$ との関係がほぼ線形であることが分かる。また、図-7からは3次元か平面ひずみかで収束する値に違いがあるものの、 $\bar{\mu}/\mu < 0.01$ の区間でともに微視すべりの発生の方向に大きな変化が現れることが確認できる。3次元の荷重では $\sigma_{11} = 2\bar{\mu}$ のときに式(4)は6次関数から4次関数に変化し、 $\sigma_{11} = 2\bar{\mu}$ に近づくにしたがってせん断帯の方向が零度に近づくことが確認できた。

文献²⁾の圧縮に対する解析結果では、ひずみの集中帯の方向は約 38° である。ところが、このときの微視すべりの方向は 21.5° であった。つまり、解析で得られたひずみの集中帯の方向が実験での巨視すべりと、解析で得られた微視すべり線が実験で観測される微視すべり線に関係すると考えられる。

5. 終わりに

図-5から分かるように非共軸の影響による塑性ひずみ増分の共軸方向からのズレは非常に小さい。しかしながら図-6、図-7によると、非共軸性は微視すべりの発生にかかわる応力や、せん断帯の方向に非常に影響を与えている。つまり、2次元の問題だけでなく3次元的なせん断帯の発生に対しても非共軸性は非常に有用なパラメータであることが確認できた。

参考文献

- 1) 白戸真大, 岩熊哲夫: 微視すべりを組み込んだ構成モデルとその大変形問題への適用, 土木学会論文集, No.598/I-44, pp.257-268, 1998.
- 2) 千葉尚, 白戸真大, 岩熊哲夫, 後藤文彦: 圧縮試験における局所変形の発達, 応用力学論文集 Vol3, pp323-334, 2000.

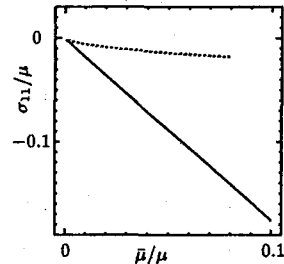


図-6 微視すべり発生時の応力

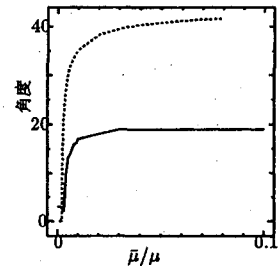


図-7 微視すべりの方向