

名古屋工業大学 正会員 ○松岡 元  
 兵庫県 大丸 誠司  
 兵庫県 正会員 當舎 良章

粒子表面摩擦の異なるアルミ丸棒積層体とテフロン丸棒積層体を2次元粒状体モデルとして二軸圧縮試験を行うとともに、粒子表面摩擦が構成式<sup>1)</sup>中のパラメーター、ひいては粒状体の変形・強度特性に及ぼす影響を検討した。

1. アルミ丸棒積層体とテフロン丸棒積層体の二軸圧縮試験

同じ粒径、混合比、間隙比のアルミ丸棒積層体およびテフロン丸棒積層体(ともに径5mm, 9mm、長さ50mm、混合比3:2)を試料とし、0.5kgf/cm<sup>2</sup>まで等方圧密した後、平均主応力 $\sigma_m = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ (一定)と側圧 $\sigma_s = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ (一定)の2つの条件で二軸圧縮試験を行った。この2種の試料は、粒子間摩擦角 $\phi\mu$ (アルミ丸棒の $\phi\mu \approx 19^\circ$ 、テフロン丸棒の $\phi\mu \approx 10^\circ$ )以外の特性はできるだけ合わせてある(ただし、アルミの弾性係数 $E = 0.72 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、テフロンの弾性係数 $E = 0.4 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ )。図-1、2は、2種の試料の主応力比( $\sigma_1/\sigma_3$ )~主ひずみ( $\epsilon_1, \epsilon_3$ )関係で表した試験結果の比較を示している。両者の差は主として粒子間摩擦角 $\phi\mu$ の違いによるものと考えられる。なお、図中の実線と点線については後述する。

2. 構成式<sup>1)</sup>中のパラメーターの相関関係

図-3に示すように、粒子間の滑動を摩擦のある斜面上の粒子の滑動とみれば、内部摩擦角 $\phi$ は発揮されている粒子摩擦角 $\phi\mu_0$ と破壊時の粒子の噛み合わせの角度の平均値 $\bar{\theta}_{max}$ の和として式(1)で表される<sup>2)</sup>。

$$\tau_f/\sigma = \tan\phi = \tan(\phi\mu_0 + \bar{\theta}_{max})$$

$$\phi = \phi\mu_0 + \bar{\theta}_{max} \quad (1)$$

また、滑動面上の応力比~ひずみ増分比関係<sup>3)</sup>

$$\tau/\sigma_N = \lambda(-d\epsilon_N/d\gamma) + \mu \quad (2)$$

の整理より、アルミ丸棒積層体の $\mu = 0.19$ と得られているので、 $\phi\mu_0 = \tan^{-1}\mu = 11^\circ$ となる。同様に、テフロン丸棒積層体の $\mu = 0.12$ より $\phi\mu_0 = 7^\circ$ となる。これらの値は実際に発揮される粒子間摩擦角の平均値と考えられ、 $\phi\mu$ の値とは異なっている。しかし、 $\phi\mu_0$ は両試料とも $\phi\mu$ の6割程度の値をとっており、 $\phi\mu_0$ と $\phi\mu$ の間に相関関係が認められる。また、破壊時の主応力比より、アルミ丸棒積層体の $\phi = 24^\circ \sim 25^\circ$ 、テ

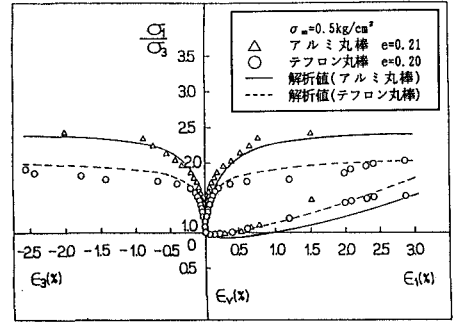


図-1 アルミとテフロン丸棒積層体の試験結果と解析値( $\sigma_m = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ )

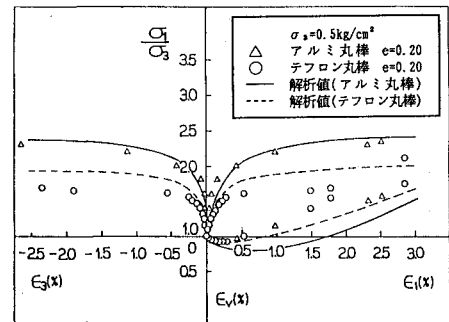


図-2 アルミとテフロン丸棒積層体の試験結果と解析値( $\sigma_s = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ )

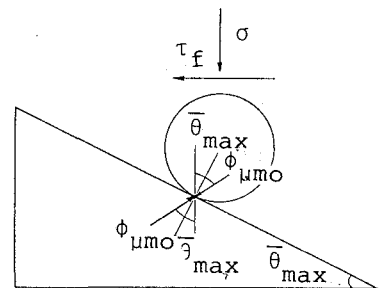


図-3 摩擦のある斜面上の粒子の滑動

$$\phi = \phi\mu_0 + \bar{\theta}_{max}$$

アルミ丸棒積層体	$24^\circ \sim 25^\circ = 11^\circ + 13^\circ$
テフロン丸棒積層体	$19^\circ \sim 20^\circ = 7^\circ + 13^\circ$

表-1 解析に用いたパラメーター

	テフロン丸棒	アルミ丸棒
$\phi$	19°	25°
$\mu$	0.12	0.19
$\lambda$	0.9	0.9
$k_s$	0.4%	0.4%
$C_c/(1+e_0)$	0.6%	0.6%

フロン丸棒積層体の $\phi=19^\circ\sim 20^\circ$ と求められる。さて、ここで用いた2種の粒状体モデルは、粒径、混合比、間隙比を合わせる努力をしているので、破壊時の粒子の噛み合わせ角度 $\bar{\theta}_{max}$ はともに等しいと考えられる。実際、図-3の下に示すように式(1)にしたがって計算すると両試料に対して同じ $\bar{\theta}_{max}=13^\circ$ が得られ興味深い( $\bar{\theta}_{max}$ はスベリ面上の粒子接点角の測定から直接求めることができる)。なお、アルミ丸棒積層体とテフロン丸棒積層体の等方圧縮試験を行ったところ、 $C_c/(1+e_0)$ は両試料とも同じ0.6%となった。

3. 二軸試験結果と構成式<sup>1)</sup>による解析結果の比較

決定した両試料のパラメーター(表-1)を用いて、提案構成式によって $\sigma_m=0.5\text{kgf/cm}^2$ と $\sigma_s=0.5\text{kgf/cm}^2$ の二軸圧縮試験の解析値を求めた。表-1で注目したいのは、前述の $\phi$ と $\mu$ の値以外は全て等しくとっていることである。図-4、5は、アルミ丸棒積層体とテフロン丸棒積層体の2種の側圧条件での試験結果と解析値の比較を示したものである。両図より、試験結果と解析値がほぼ一致し、せん断初期の体積圧縮の差( $\sigma_s$ 一定の場合、 $\sigma_m$ が増加するので体積圧縮が大きくなる)も説明できるのが見られる。なお、図-1、2中の実線と点線はそれぞれの解析値を示したものである。両図とも、試験結果と解析値はほぼ一致しており、 $\phi$ 、 $\mu$ の影響を評価できている。

4. まとめ

表-1に示すパラメーターのうち、 $\phi$ と $\mu=\tan\phi\mu_m$ については式(1)のような関係があり、 $\phi\mu_m$ については斜面上

に貼り付けた丸棒の上を別の丸棒を滑らせるような簡単な実験で求められる $\phi\mu$ の値の6割程度の値と予測できるようである。もし粒子の噛み合わせ角度 $\bar{\theta}_{max}$ がスベリ面上の粒子接点角の測定より推定できれば、 $\phi$ の値も予測できることになる。他のパラメーター $\lambda$ 、 $k_s$ 、 $C_c/(1+e_0)$ については粒子間摩擦の差異の影響をあまり受けにくいようであるので、アルミ丸棒積層体か、テフロン丸棒積層体のどちらかの値を用いて決定すれば、他方はその同じ値を用いることができる。以上より、2種の粒子表面摩擦の異なる、同じ初期粒子構造の粒状体の応力~ひずみ関係が、表-1のように3つの同じ値のパラメーターと2つの粒子表面摩擦の影響を反映したパラメーターによって説明できたことは興味深い。

参考文献

1)Matsuoka and Sakakibara(1987):S & F, Vol.27, No.4, pp.73-88.  
 2)松岡(1985):粉体工学会誌, Vol.22, No.9, pp.(53)-(59).  
 3)Matsuoka(1974):S & F, Vol.14, No.2, pp.47-61.

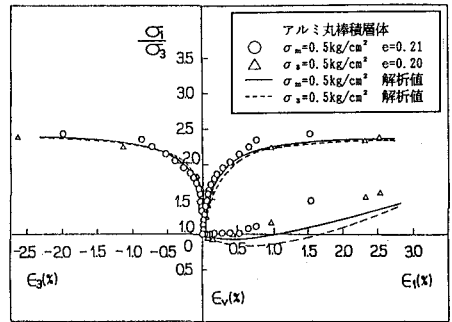


図-4 アルミ丸棒積層体の試験結果と解析値

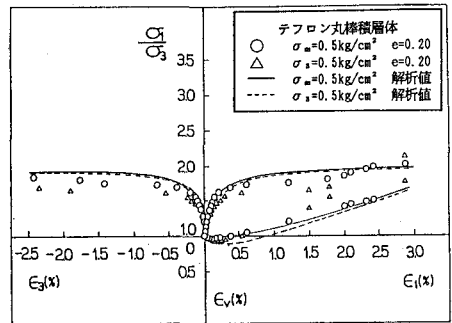


図-5 テフロン丸棒積層体の試験結果と解析値