

同じ主応力変化を受ける粒状体の「一般応力」試験の比較

名古屋工業大学 正 員 松岡 元, 学生員 ○村田 卓則

アルミ丸棒積層体(径1.6, 3mm, 長さ50mm)を試料として、任意の一般応力($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$)を独立に制御可能な2次元一般応力試験機を開発し(図-1参照)、主応力方向の回転を含む種々の一般応力経路試験を行なってきた。ここでは、主応力の変化は同じで一般応力経路の異なる2種の「一般応力」試験を行ない、提案構成式^{1), 2)}と試験機について、現象に対する座標軸の設定の仕方によらず同一の結果をもたらすという「客観性の原理」を検討する。

1. 2次元一般応力試験機と2種の「一般応力」試験

実験は、図-1に示すアルミ丸棒積層体を試料とした、2次元一般応力試験機を用いて行なった。この試験機は、2次元での一般応力($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$)をそれぞれ独立に制御可能であるため、2次元でのあらゆる応力経路を再現可能である。また、図-2はモールの応力円表示による2種の一般応力経路を示している。行なった実験経路は、TEST①(点A₁→点B₁):一般面上の垂直応力($\sigma_x=0.45, \sigma_y=0.35$ (kgf/cm²))を一定に保ったまま、せん断応力 τ_{xy} のみを制御する試験、TEST②(点A₂→点B₂):一般面上のせん断応力 $\tau_{xy}=0.05$ (kgf/cm²)を一定に保ったまま、垂直応力 σ_x を減少、 σ_y を増加させる試験の2つである。ここで注意すべきは、この2種の応力経路は始点と終点が異なる経路であるが、点A₁, A₂の主応力値($\sigma_1=0.45, \sigma_3=0.35$ (kgf/cm²))と、点B₁, B₂の主応力値($\sigma_1=0.5, \sigma_3=0.3$ (kgf/cm²))が同じであることである(図-2参照)。したがって、通常の主応力空間やp~q空間では、応力経路の差異は表現できないことになる。

2. 主応力軸回転の影響を評価できる一般座標表示の土の構成式^{1), 2)}

提案モデルは、降伏条件を応力比(ϕ_{m0} :動員されている内部摩擦角)、主応力軸の回転角(α)、平均主応力(σ_m)とするトリプル・ハードニング・モデルと呼ぶべき形をしており、せん断ひずみ増分が①せん断($d\phi_{m0}$)によるせん断ひずみ増分: $d\tau_{xy}^s$ 、②主応力軸の回転($d\alpha$)によるせん断ひずみ増分: $d\tau_{xy}^r$ 、③異方圧密($d\sigma_m$)によるせん断ひずみ増分: $d\tau_{xy}^{ac}$ の和として表される。

$$d\gamma_{xy} = d\gamma_{xy}^s + d\gamma_{xy}^r + d\gamma_{xy}^{ac} \quad (1)$$

なお、②の $d\gamma_{xy}^r$ においては、 σ_1 と $d\epsilon_1$ の方向に角度 δ のズレ($\delta \approx 30^\circ$)が生じることを考慮している。式(1)と応力比~ひずみ増分比関係を組み合わせることにより、それぞれの垂直ひずみ増分 $d\epsilon_x, d\epsilon_y$ を求め、最後に④等方圧密($d\sigma_m$)による垂直ひずみ増分: $d\epsilon_x^{ic} = d\epsilon_y^{ic}$ を加える。一方 $d\phi_{m0}, d\alpha, d\sigma_m$ はいずれも一般応力増分($d\sigma_x, d\sigma_y, d\tau_{xy}$)で式示されるので、以上より式(2)のような一般応力増分と一般ひずみ増分を直接結びつけた土の構成式の定式化が可能となる。

$$\{d\epsilon_x, d\epsilon_y, d\gamma_{xy}\}^T = [D]^{-1} \cdot \{d\sigma_x, d\sigma_y, d\tau_{xy}\}^T \quad (2)$$

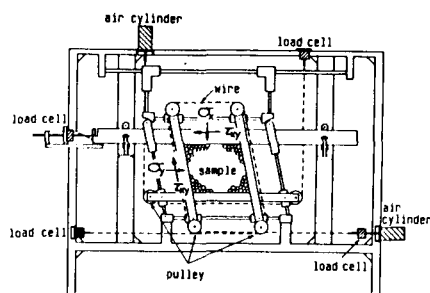


図-1 2次元一般応力試験機

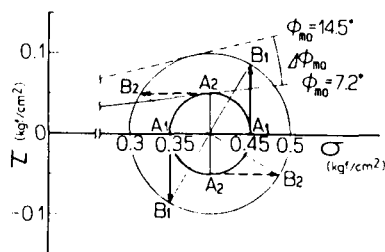


図-2 モールの応力円表示による2種の「一般応力」経路

3. 2種の「一般応力」経路下の実測値と解析値の比較

図-3(a), (b) は、前述の TEST①, ② の異なった一般応力経路下の実験結果と提案モデルによる解析値の比較を、主応力比(σ_1/σ_3) とひずみ($\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}, \epsilon_1, \epsilon_3, \epsilon_1-\epsilon_3, \epsilon_v=\epsilon_1+\epsilon_3$) の関係で示したものである。TEST①(図-3(a)) では、 ϵ_x は圧縮、 ϵ_y は膨張しているのに対し、TEST②(図-3(b)) では σ_x は減少、 σ_y は増加するので(図-2参照)、 ϵ_x は膨張、 ϵ_y は圧縮するという経路の違いによるひずみの出方の差異が生じる。一方、解析値はどちらの場合においても実測値の傾向を妥当に評価しているのがみられる。図-4(a), (b) はそれぞれ、TEST①, ② の応力経路に対する原点から放射状に示した粒子接点角のヒストグラムの概念図である。図-2の一般応力経路図を参照すれば、図-4(a) は主面の点A₁からせん断応力 τ_{xy} の载荷により、応力比の増大と主応力軸の回転を起こし点B₁へ動く間の粒子接点角の分布の変化を、図-4(b) は主面より45°傾いた面の点A₂より、応力比の増大と主応力軸の回転を起こして点B₂へ動く間の粒子接点角の分布の変化を示している。この図より、この2つの一般応力経路は、その载荷方法や一般面上のひずみ($\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$)の出方は違っても粒子構造の変化は同じであり、見ている面が違うだけなのが理解される。したがって、発生しているひずみも、主ひずみ($\epsilon_1, \epsilon_3, \epsilon_1-\epsilon_3, \epsilon_v=\epsilon_1+\epsilon_3$)で比較すれば一致しなければならない。これは客観性の原理(連続体力学の基本式や力学現象が座標のとり方に関係なく成立する)の必要条件である。図-5は2種の試験の実測値と解析値の主ひずみに着目した比較である。解析値は両経路に対して全て同じになり、提案モデルは客観性の原理を満足していることがわかる。また、実測値についても多少のズレはあるもののほぼ一致しており、試験機としても客観性の原理を満たしていると考えられる。図-6はTEST②の実測値と解析値を45°回転して変換した各種ひずみを示している。変換した解析値はTEST①の解析値(図-3(a)参照)と全て一致し、実測値も良く対応しているので、ここでも提案モデル、試験機ともに客観性の原理を満足していることが確認できる。なお、以上の解析に用いたアルミ丸棒積層体のパラメーターは $\phi=24^\circ$, $k_s=0.31\%$, $\lambda=0.8$, $\mu=0.19$, $\delta=30^\circ$ である。

以上、ここでは提案モデル及び2次元一般応力試験機について、客観性の原理の1つの検証を試みた。

- 文献 1) 松岡・岩田・榊原(1986): Proc. of 2nd Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics Ghent, pp. 67-78.
2) 松岡・榊原(1987): S & F, Vol. 27, No. 4, pp. 73-88.

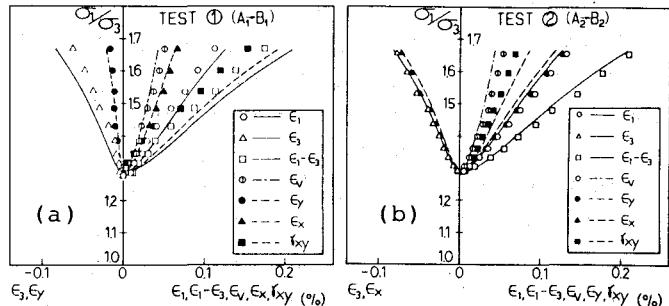


図-3 2種の「一般応力」経路試験の実測値と解析値の比較

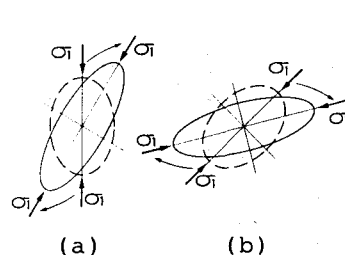


図-4 2種の「一般応力」経路下の粒子接点角分布のヒストグラムの変化特性図

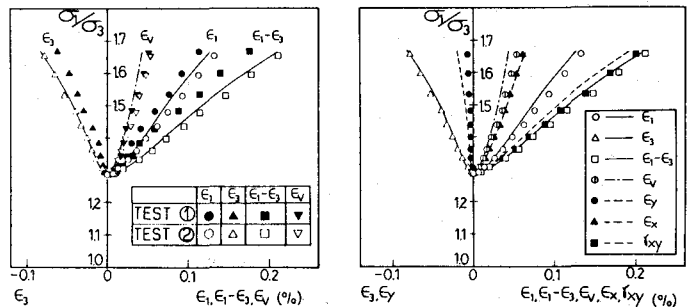


図-5 2種の「一般応力」経路試験の主ひずみに着目した比較

図-6 TEST②の実測値と解析値を45°回転変換した各種ひずみ