

### III-104 再載荷時に主応力方向が変化した場合の粒状体のせん断特性

名古屋工業大学大学院 学生員○鈴木康之 名古屋工業大学 正員 松岡 元  
日本道路公団 正員 榊原和成 大阪府 正員 野添淳一

一般に繰返しせん断試験としては、主応力方向が固定されていて最大主応力 $\sigma_1$ と最小主応力 $\sigma_3$ が入れ替わる両振り試験( $\sigma_1$ の方向が物理面で $90^\circ$ 変化する)や、 $\sigma_1$ と $\sigma_3$ が入れ替わらない片振り試験( $\sigma_1$ の方向が変化しない)がよく行なわれている。ところが、実際の地盤では、これらの中間的な、 $\sigma_1$ の方向が任意に変化する応力状態が起こり得る。そこで今回は、任意の一般応力( $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ )を載荷可能な2次元一般応力試験機を用い、2次元粒状体モデル(アルミ丸棒積層体 $\phi 1.6\text{mm}$ ,  $3\text{mm}$ , 長さ $50\text{mm}$ )を試料として、平均主応力が一定で、再載荷時に主応力方向を $90^\circ, 45^\circ, 0^\circ$ 変化させた場合の繰返しせん断試験を行ない、粒子構造の変化という観点から解析を試みた。

#### 1. 両振り繰返しせん断試験時の応力比～ひずみ関係モデル

図-1は、 $45^\circ$ 面上の応力比 $(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3) \sim$ せん断ひずみ $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$ 間の双曲線関係を示しているが、その破線(除荷)部分を、実線(載荷)部分を逆方向に延長したものと表現している。また、図-2は、せん断ひずみ増分より垂直ひずみ増分を求めるための滑動面上の応力比 $\tau/\sigma_N (= \tan \phi_{mo}) \sim$ ひずみ増分比 $d\varepsilon_N/d\gamma$ 関係を示しており、図中の破線(除荷部分)は図-1と同様、実線(載荷部分)を逆方向に延長したものと表している。逆方向せん断時には摩擦係数 $\mu$ の符号が変わるだけであるので、図-2の直線式は $\tau/\sigma_N = \lambda(-d\varepsilon_N/d\gamma) \pm \mu$ と表される<sup>1)</sup>。

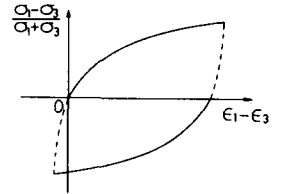


図-1  $45^\circ$ 面上の応力比～せん断ひずみ関係

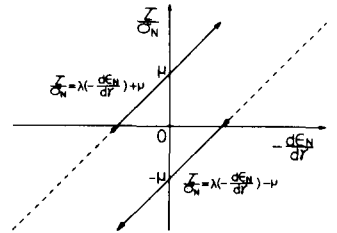


図-2 滑動面上の応力比～ひずみ増分比関係

#### 2. 再載荷時に主応力方向が変化した場合の繰返しせん断試験結果

図-3(a)～(c)は、モールの応力円上で最大主応力方向との角度 $2\alpha = 45^\circ$ (再載荷時に $2\alpha = 225^\circ$ )、 $2\alpha = 45^\circ$ (再載荷時に $2\alpha = 315^\circ$ )、 $2\alpha = 45^\circ$ (再載荷時に $2\alpha = 45^\circ$ )と変化する場合の平均主応力一定の繰返しせん断試験結果を示している。それぞれの試験で再載荷時のモールの応力円の変化は同一であるが(図-3の下図参照)、実測値は主応力方向が変化することによってひずみの発生の方が大きく異なることを示している。

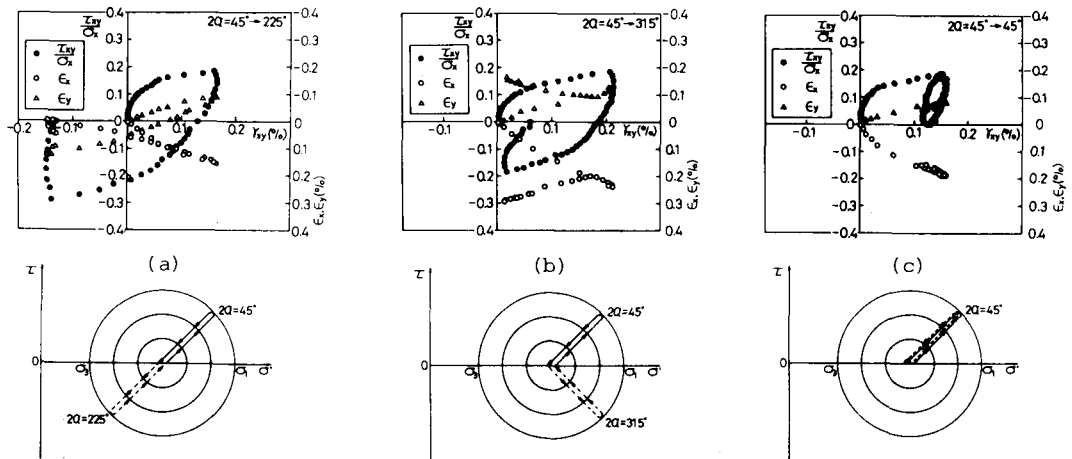


図-3 再載荷時(破線)に主応力方向が種々の角度変化した場合の繰返しせん断試験結果とその応力経路

### 3. 再載荷時に主応力方向が変化した場合に発生する粒状体のひずみの評価

図-4 (a)~(c)は、図-3 (a)~(c)の応力経路に対応する、原点から放射状に表示した粒子接点角のヒストグラムの概念図である<sup>2)</sup>。載荷時(図中②の状態)と再載荷時(図中③の状態)との楕円の重なっている領域は、過去に形成された粒子構造と同じ粒子構造となることを示し、その領域内ではひずみの発生量は少なく、それを越えると粒子構造の変化が激しくなり、ひずみの発生量は多くなると考えられる。そこで、ここでは1.で示した両振り繰返しせん断時に応力比 $\sim$ せん断ひずみ関係がループになると仮定した簡単なモデルに基づいて、再載荷時に主応力方向の角度が種々に変化する場合の応力比 $\sim$ せん断ひずみ関係を考えた。まず、(a) ( $2\alpha=45^\circ \rightarrow 225^\circ$ )の応力経路では、粒子構造で示すと図-4 (a)のように再載荷時は、楕円の重なりは少なく初期載荷時と同じく構造が激しく変化すると考えられるので、図-5に示す曲線OD部分を用いた。(c) ( $2\alpha=45^\circ \rightarrow 45^\circ$ )の応力経路では、図-4 (c)のように過去に経験した応力状態を再び経験し、粒子構造変化は起こりにくいと考えられるので、その構造変化は除荷時と同程度と考え、曲線AO (DE)部分を用いた。また(b) ( $2\alpha=45^\circ \rightarrow 315^\circ$ )の応力経路では、図-4 (b)のように(a)と(c)の中間的な変化を起こすと考えられるので、図-5の点Oの接線勾配(曲線OD部分に対応)と点Aの接線勾配(曲線AO部分に対応)の中間値の接線勾配をとる点Bからの曲線BC部分を用いた。

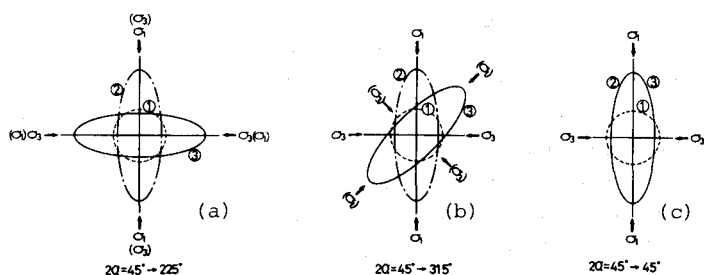


図-4 放射状に表示した粒子接点角のヒストグラムの変化特性

図-6 (a)~(c)は、3種類の実験を同一面上で比較するために、実測値を $45^\circ$ 面上に変換したものと、以上の考え方に基いた解析値を示している。解析値は、新たにパラメーターを増していないが、再載荷時にひずみの発生量が異なる実測値の傾向をほぼ説明している。

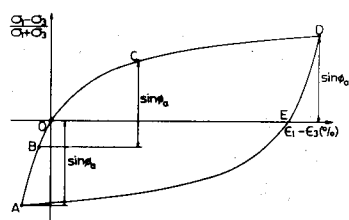


図-5 繰返しせん断時の $45^\circ$ 面上の応力比 $\sim$ せん断ひずみ関係

**謝辞** 日頃御援助頂いている本学山内利彦教授、有益な議論を頂いた中井照夫助教授、清水建設(株)福武毅芳氏に感謝致します。

**参考文献** 1) 松岡・榊原他(1987): 第22回土質工学研究発表講演集。  
2) 松岡・竹田・藤井(1983): 第38回土木学会年次講演概要集、III-14, PP. 27-28。

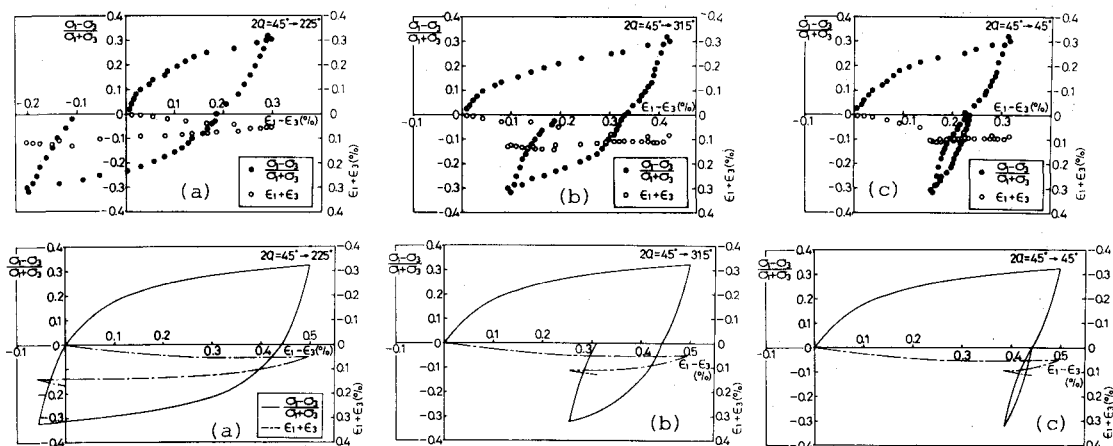


図-6  $45^\circ$ 面上に変換した繰返しせん断試験結果と解析値