

III-199 砂の三軸試験結果から単純せん断試験結果を予測する試み

名古屋工業大学 学生員 ○福元 信一，正 員 松岡 元

実際の地盤は単純せん断的な挙動を示すことが多いので、単純せん断試験を行うことは意義深いことと思われる。しかし、実際には単純せん断試験よりも三軸圧縮試験が行われることが多いようである。そこで今回は、三軸圧縮試験結果から簡単な仮定に基づいて単純せん断試験結果を予測することを試みた。

1. 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)の3つとしており、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: $d\tau_{xy}^{s0}$ の和として表される。

$$d\tau_{xy} = d\tau_{xy}^s + d\tau_{xy}^r + d\tau_{xy}^{s0} \quad (1)$$

なお、②の $d\tau_{xy}^r$ においては、 σ_1 と $d\epsilon_1$ の方向に角度 δ ($\approx 30^\circ$)のズレ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: $d\epsilon_x^{i0} = d\epsilon_y^{i0}$ を加える。以上述べた構成式は2次元のものであるため、主ひずみ増分の重ね合わせを仮定して3次元に拡張する。図-1に示すような単純せん断状態では、 $d\phi_{m0}$, $d\alpha$, $d\sigma_m$ はいずれも一般応力増分($d\sigma_x$, $d\sigma_y$, $d\sigma_z (=d\sigma_x)$, $d\tau_{xy}$)で表現されるので、次式のような一般応力増分と一般ひずみ増分を直接結び付けた土の構成式の定式化が可能となる。

$$\begin{aligned} (d\epsilon_x, d\epsilon_y, d\epsilon_z, d\tau_{xy})^T &= [K]^{-1} \{d\sigma_x, d\sigma_y, d\sigma_z, d\tau_{xy}\}^T \quad (2) \\ (d\epsilon_z = d\epsilon_x, d\sigma_z = d\sigma_x) \end{aligned}$$

2. 排水条件下の単純せん断の境界条件³⁾

図-1は排水条件下の単純せん断の概念図を示している。単純せん断とは鉛直応力を一定に保ち($d\sigma_x=0$)、側方変位を拘束しながら($d\epsilon_y=d\epsilon_z=0$)、せん断応力を加えるものである。従って、せん断・垂直応力比の増加、平均主応力の増加とともに、 xy 面内では主応力軸の回転が生じる。I、II、III軸はそれぞれ主応力軸を表しており、 α_{xy} はI軸と x 軸(σ_x 方向)のなす角度を表している。なお、 x , y , z 軸は固定されており、 z 軸とII軸とは一致している。上記の境界条件より単純せん断の解析を行うことができる。³⁾

3. 単純せん断の解析結果と主応力軸の回転によるひずみの影響

図-2～5は鉛直応力 $\sigma_x=1.0\text{kgf/cm}^2$ 、せん断初期の水平・鉛直応力比 $\sigma_y/\sigma_x=0.5$ とした場合の、豊浦砂の単純せん断の解析結果を示す。図-2は単純せん断面上のせん断・垂直応力比～せん断ひずみ～体積ひずみの関係を示したものである(図中の○印プロットは

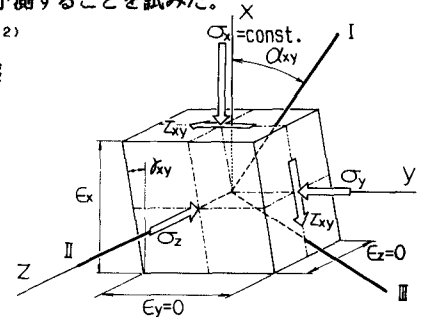


図-1 排水条件下の単純せん断の概念図

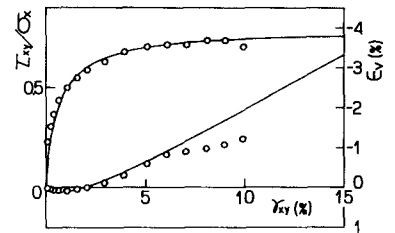


図-2 単純せん断面上のせん断・垂直応力比～せん断ひずみ～体積ひずみ関係の解析値と実測値の比較

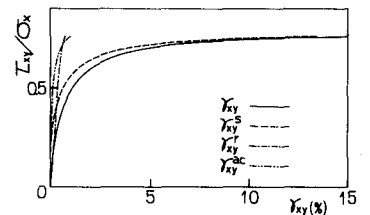


図-3 $\tau_{xy}/\sigma_x \sim \gamma_{xy}, \tau_{xy}^s, \tau_{xy}^r, \tau_{xy}^{s0}$ 関係の解析結果

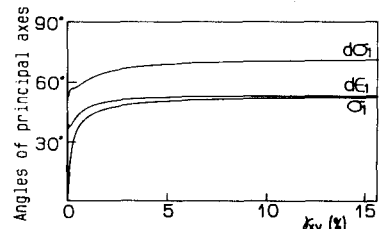


図-4 $d\sigma_1, d\epsilon_1, \sigma_1$ の各主軸方向～せん断ひずみ関係の解析結果

初期間隙比が解析上のものと近い中空ねじり単純せん断試験機による実測値⁴⁾を示す)。図-3は単純せん断面上のせん断・垂直応力比 τ_{xy}/σ_x ～せん断ひずみ γ_{xy} 、せん断ひずみの各成分(γ_{xy}^r , γ_{xy}^v , γ_{xy}^{s0})の関係の解析結果を示したものである。同図より主応力軸の回転によるせん断ひずみ γ_{xy}^r は全体として小さな値であることがわかる($\gamma_{xy}=15\%$ のときで $\gamma_{xy}^r=0.7\%$)。これは、提案構成モデル^{1), 2)}の形より γ_{xy}^r が主応力軸の回転角 α と、そのときの応力比に関係するためと考えられる。すなわち、単純せん断の初期には($0 \leq \gamma_{xy} \leq 0.8\%$)、主応力軸は大きく回転するが($\alpha=0 \sim 40^\circ$, 図-4参照)、主応力比が小さいため($\sigma_1/\sigma_3=2 \sim 2.9$)、 γ_{xy}^r の値としてはさほど大きくならない。また、せん断が進むと($\gamma_{xy} \geq 3.0\%$)、主応力比は大きくなるが($\sigma_1/\sigma_3 \geq 4.1$)、主応力軸の回転が小さいため($\alpha=48 \sim 52^\circ$)、 γ_{xy}^r の値はこれまたあまり大きくならないと理解される。

4. 三軸圧縮試験結果から単純せん断試験結果を予測する試み

前節で考察したように、単純せん断試験では主応力軸の回転によるせん断ひずみは小さいと考えられるため、主応力軸の回転が起こらない三軸圧縮試験結果に、単純せん断試験の特徴を考慮して単純せん断試験結果を予測することを試みる。考慮すべき特徴は、① σ_m の値はせん断中はほぼ一定(図-5参照)、②平面ひずみ条件、③せん断初期を除き主応力方向はほぼ一定($\alpha=48 \sim 52^\circ$, 図-4参照)、④ ϕ_{plain} (平面ひずみ試験の内部摩擦角) $> \phi_{comp}$ (三軸圧縮試験の内部摩擦角)の4つである。ただし、ここでは①～③のみを考慮し、下記のように三軸圧縮試験結果を整理した。特徴①より側圧一定の三軸圧縮試験結果を用いる。特徴②より複合滑動面の概念^{1), 2)}に基づいて、ひずみを2次元に分割する。特徴③より $\alpha=50^\circ$ 面にひずみを変換する。以上より、単純せん断試験結果を図-2のように整理したときの座標 τ_{xy}/σ_x , γ_{xy} , $\epsilon_v (= \epsilon_x)$ に対応する座標として、次式で表される $(\tau/\sigma)_{s0}$, γ_{s0} , ϵ_v が考えられる。

$$\left. \begin{aligned} (\tau/\sigma)_{s0} &= \frac{(\sigma_a - \sigma_r) \cdot \sin(2 \times 50^\circ)}{(\sigma_a + \sigma_r) + (\sigma_a - \sigma_r) \cdot \cos(2 \times 50^\circ)} \\ \gamma_{s0} &= (\epsilon_a/2 - \epsilon_r) \cdot \sin(2 \times 50^\circ) \\ \epsilon_v &= \epsilon_a/2 + \epsilon_r \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

図-6中の破線は、側圧一定の三軸圧縮試験の解析値を上記の方法で変換したものであるが、単純せん断の解析値(同図中の実線)をよく近似していると思われる。図-7は、図-6の解析結果の比較に基づいて、側圧一定の三軸圧縮試験の実測値を変換したもの(●印)と、単純せん断試験の実測値(○印)の比較を示したものである。同図中の●印プロットは○印プロットをよく近似していると思われる。以上より、比較的簡単に行える側圧一定の三軸圧縮試験結果から、単純せん断試験結果を近似的に予測できるといえよう。なお、解析に用いたパラメータは豊浦砂を対象とした、 $\phi=42^\circ$, $C_c/(1+e_0)=0.9\%$, $C_s/(1+e_0)=0.5\%$, $\lambda=1.1$, $\mu=0.2$, $k_s=0.33\%$ である。

謝辞 図-2, 7中の実測値の引用を許可頂いた大阪土質試験所(元・東大生研)アラダン氏に謝意を表します。

文献 1)松岡他(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.

3)松岡・福元(1989):第24回土質工学研究発表会講演集(投稿中).

4)アラダン他(1988):S & F, Vol. 28, No. 3, pp.131-148.

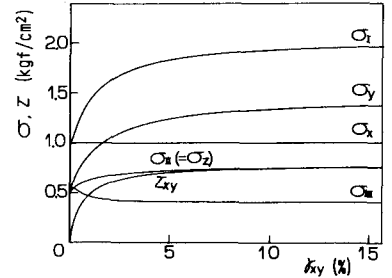


図-5 各種応力値～せん断ひずみ関係の解析結果

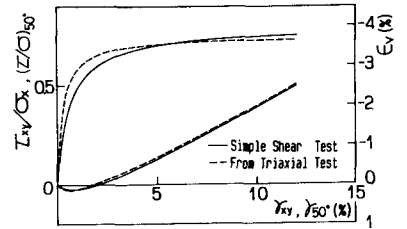


図-6 単純せん断試験の解析値と、三軸試験の変換された解析値の比較

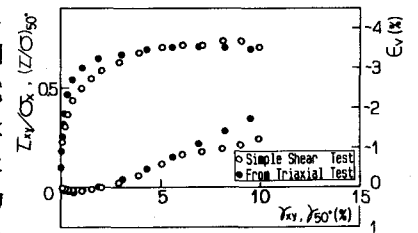


図-7 単純せん断試験の実測値と、三軸試験の変換された実測値の比較