

III-30

液状化におよぼす初期せん断応力の影響

九州大学工学部 正員 山内 豊嗣  
 “ 正員 坂井 晃  
 “ 学生員 杉本 洋一  
 “ 学生員 白石 哲

1. まえがき

異方圧密状態から行なう砂の非排水繰返しせん断試験は、原地盤の応力状態を考慮した液状化試験であり、従来から種々の装置を用いて研究されてきた。この中で、一般的に用いられたのが簡単な振動三軸試験装置を用いたものとしてVoidらの研究が挙げられる。本研究においても、振動三軸試験装置を使用し、液状化におよぼす初期せん断応力の影響について調べた。過剰間隙水圧の評価に際しては、繰返し载荷による生ずる塑性せん断ひずみの累積量を用いて等方圧密状態から得られた過剰間隙水圧の評価方法と比較し、かつ残留ひずみも含めた、せん断ひずみの累積量と過剰間隙水圧との関係について新たな実験式を提案する。

2. 実験方法

実験には、振動三軸試験装置を用い、軸圧変動・側圧一定で0.5Hzの正弦波を载荷した。試料は豊浦標準砂を使用し、供試体は煮沸した試料を水中落下法で作成した。拘束圧は、 $\sigma'_v = 196 \text{ kN/m}^2$  で等方圧密した後、所定の $K_c$ 値( $K_c = \sigma'_v/\sigma'_3$ )が得られるまで軸圧を増加した。その後、飽和を期すために196  $\text{kN/m}^2$ の背圧を加えた。相対密度は50%の同一条件下で $K_c = 1.3, 1.5$ の2種類について実験を実施した。

3. 実験結果と考察

3-1 有効応力経路と液状化強度

図-1は、繰返し载荷試験において、初期せん断応力 $\tau_s = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ が作用している場合の有効応力経路を示したものである。この応力面の $\tau_s$ 軸上の有効応力経路の致達点は平均有効主応力 $P=0$ に達することなく、動的破壊包絡線と初期せん断応力 $\tau_s$ との交点Aとなる。また、この包絡線は、等方圧密圧からの液状化試験によって求まる動的破壊包絡線とほぼ同一であることが認められたことから、図中の点Aにおける過剰間隙水圧 $u_{max}$ は次式で与えられる。

$$u_{max} = \frac{(1 + K_c) \sin \phi' + 1 - K_c}{2 \sin \phi'} \sigma'_3 \quad (1)$$

式(1)は、 $K_c$ 値が増加するのに伴って $u_{max}$ が減少することを意味している。このことは、繰返し回数と過剰間隙水圧との関係を示した図-2によっても表わされ、ここでは、 $K_c=1.3$ のとき $u_{max}=180 \text{ kN/m}^2$ 、 $K_c=1.5$ のとき $u_{max}=165 \text{ kN/m}^2$ となった。図-3は、 $K_c$ 値の違いによる液状化強度の比較を行なうため、液状化回数 $N_l$ と応力比 $\tau_{cy}/\sigma'_m$  ( $\tau_{cy}$ : 繰返しせん断応力)の関係を示したものである。この図から、 $K_c$ 値が増加するのに伴って強度増加が見られるが、 $K_c=1.3, 1.5$ の間にはさほどの大きな相違は認められない。

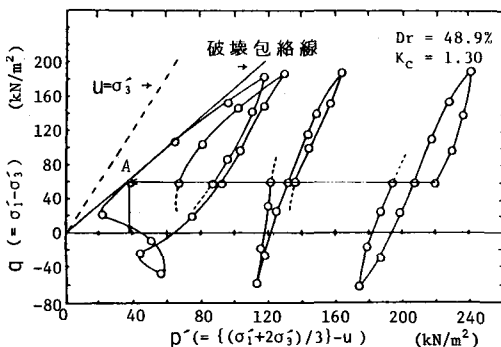


図-1 有効応力経路

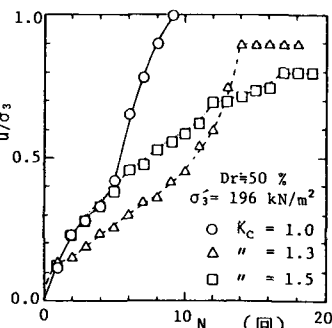


図-2 Nと $u/\sigma'_3$ の関係

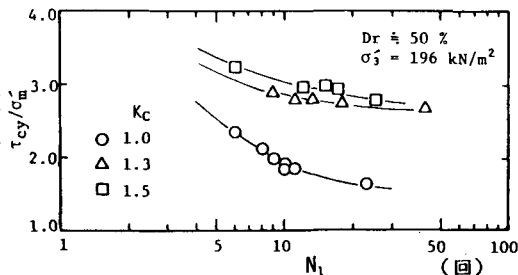


図-3  $N_l$ と $\tau_{cy}/\sigma'_m$ の関係

### 3-2 過剰間隙水圧の評価

図-4の応力-ひずみ曲線は、初期せん断応力 $\tau_0$ が作用している状態からの繰返し試験による模式図である。ここに、図に示される1サイクルの塑性せん断ひずみ $\gamma_p$ を $N$ サイクルまで加え合わせた値( $\gamma_p^N = \sum_{i=1}^N \gamma_{i1}^p$ )であり、 $\tau_{re}$ はそれまでに残留したせん断ひずみを表す。これらの累積量 $\gamma_p^N$ を用いて、過剰間隙水圧との関係を示したのが図-5である。同一の過剰間隙水圧を生ずるに必要な $\gamma_p^N$ の値は、実線で示される等方圧密圧( $\tau_0=0, K_c=1.0$ )と比較してもわかるように $K_c$ の値が大きくなるほど増加する。この傾向は、図-6に示されるように、繰返し回数の増加とともに残留ひずみが増えていることによるものであり、残留ひずみが大きくなるほど過剰間隙水圧の上昇量は減少する。ところで、 $\tau_0=0$ における $\gamma_p^N$ と $u$ の関係式は次式で与えられる。

$$\gamma_p^N = A \left[ \exp(B \cdot u / \sigma'_3) - 1 \right] \quad (A, B \text{ は定数}) \quad (2)$$

ここでは、 $K_c$ の違いによる $\gamma_p^N$ と $u$ の関係を残留ひずみの影響を考慮して次式で表わされる新しい内部状態変数 $\xi$ を定義する。

$$\xi = \gamma_p^N - \alpha |\tau_{re}| = A' \left[ \exp(B' \cdot u / \sigma'_3) - 1 \right] \quad (3)$$

このとき、残留ひずみに比例(比例定数 $\alpha$ )し、また、残留ひずみのない状態における $\gamma_p^N$ の値に相当する。式(3)の定数 $\alpha$ は、実験値から求められ圧縮側の残留ひずみが生ずるすべてのデータについてほぼ一定の値( $\alpha=1.8$ )を示した。また $K_c=1.0$ (等方圧密)の場合も、側圧一定の試験であるため、過剰間隙水圧が大きくなると伸張側に残留ひずみが生ずるが、このときの $\alpha$ の値もまたほぼ一定値( $\alpha=0.5$ )を示すことがわかった。すなわち定数 $\alpha$ は、内部状態変数 $\xi$ に対し、圧縮側または伸張側に生ずる残留ひずみの比例定数として一定値をとることが考えられる。このことから、一定の $\alpha$ 値を用いて、同一の過剰間隙水圧に対する $\xi$ の値をプロットしたものが図-7である。図中の実線で示された曲線は、式(3)の計算式によるものであり、残留ひずみが生じないときのみ $\xi = \gamma_p^N$ になることを意味している。このときの値は、式(3)の曲線から幾分ばらつきがみられるものの図-8に示されるように、この $\alpha$ の値を用いて繰返し回数 $N$ に対する過剰間隙水圧を求めると、実測値の傾向とよく一致した結果が得られた。また、他の多くの実験データに関してもよく一致した傾向が得られ、式(3)による残留ひずみ評価の妥当性が認められる。

### 4. あとがき

振動三軸試験装置を用いて異方圧密状態から液状化試験を行なった場合、残留ひずみが生じて過剰間隙水圧上昇に大きな影響を与えることになるが、残留ひずみを考慮した新たな内部状態変数 $\xi$ を用いることにより、初期せん断応力を受けた場合の過剰間隙水圧を評価することができる。

参考文献: 1) Void, Y.P. and Chern, J.C.: Effect of Static Shear on Resistance to Liquefaction, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 1, 1983.

2) 山内, 坂井, 杉本: 砂の液状化におけるEndochronic理論の適用, 九大工業報, Vol. 56, No. 5, 1983.

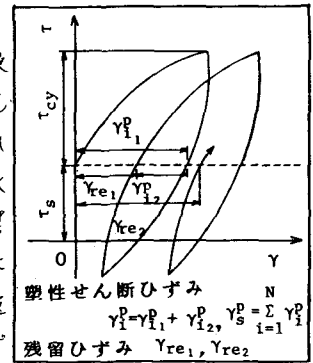


図-4 応力-ひずみ関係

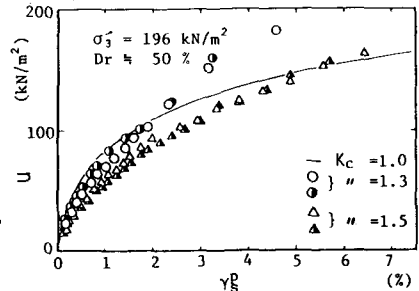


図-5  $\gamma_p^N$  と  $u$  の関係

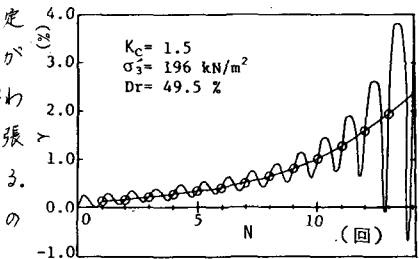


図-6  $N$  と  $\tau$  の関係

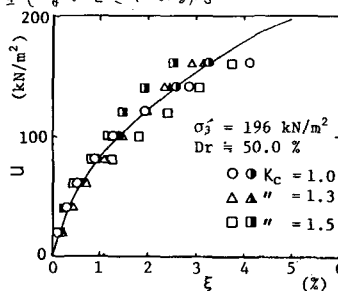


図-7  $\xi$  と  $u$  の関係

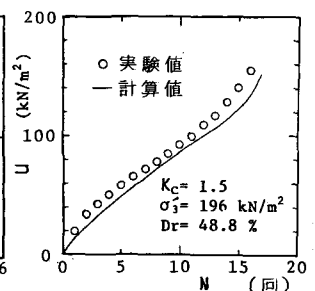


図-8  $N$  と  $u$  の関係