

土のねじり単純せん断試験 (VII) —砂の平面ひずみねじり単純せん断試験 (その 4) —

Stress-Strain Behaviour of Soil by Torsional Simple Shear Test (VII)
—Plane Strain Torsional Simple Shear Test on Sand—

福 島 伸 二*・龍 岡 文 夫*
Sinji FUKUSHIMA and Fumio TATSUOKA

1. ま え が き

原位置の応力状態を可能な限り忠実に再現して実際の地盤の土の変形・強度特性を求める必要のあるとき、今のところねじり単純せん断試験あるいは単純せん断試験 (NGI 型, SGI 型) が最も有利であるように考えられる。そして、これらの試験は供試体に直接せん断応力を加える型式であるので、せん断に伴い主応力軸は回転する。しかし、NGI 型あるいは SGI 型単純せん断試験では供試体水平面上の応力 (σ_v, τ_h) しかわからず、主応力の大きさおよび方向などの供試体の応力状態は不明確である。したがって、単純せん断試験を用いて実際地盤の安定問題を考えるとき、供試体水平面上の最大せん断応力 (τ_{hf}) さえわかれば良い場合を除いて、たとえば試験結果を統一的に解釈したり三軸試験・平面ひずみ試験など他の試験結果と比較する場合には主応力の大きさおよび主応力方向など基礎的な供試体の応力の情報が必要になってくる。この点、応力状態が明確なねじり単純せん断試験を用いればよいが、この試験がない場合には通常の単純せん断試験を適用することになる (図 23)。このとき、供試体水平面上の応力 (σ_v, τ_h) だけでなく、さらに主応力の大きさ、方向なども知る必要があるときは、なんらかの方法により供試体の応力状態を推定する必要がある。ここでは、供試体の応力状態が明確なねじり単純せん断試験結果を用いて通常の単純せん断試験の供試体の応力状態の推定方法について検討する。

2. 単純せん断試験の応力状態の推定

Cambridge 型単純せん断試験のように供試体の応力状態を供試体の一部分 (中央 1/3 部分) のみで代表させるようなことをせずに、NGI 型あるいは SGI 型単純せん断試験のようにディスク状の供試体全体の応力状態を

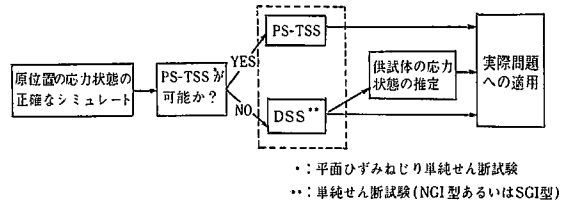


図 23 単純せん断試験の実際問題への適用

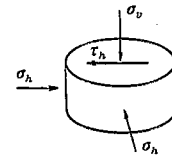


図 24 単純せん断試験における供試体全体の水平応力の条件

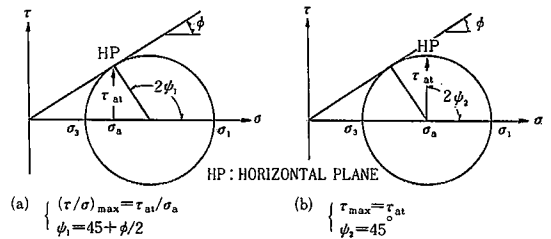


図 25 Arthur, J.R.F. et al. (1964) の仮定

考えると、水平 2 方向の垂直応力は等しくねじり単純試験と同様な応力条件にあると考えられる (図 24)。したがってここでは単純せん断試験の供試体の応力状態の推定する方法を平面ひずみねじり単純せん断試験結果から検討する。NGI 型, SGI 型の単純せん断試験では供試体水平面上の応力 (σ_v, τ_h) しかわからないため、Mohr の応力円を求めるためには他になんらかの仮定が必要である。Arthur, J.R.F., James, R.G. and Roscoe, K.H. (1964)¹⁾ は単純せん断試験の水平面上の応力状態について次の 2 つの仮定を上げている。

1) 供試体水平面は最大応力比面 ($(\tau/\sigma)_{\max}$ 面) であ

* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

研究速報

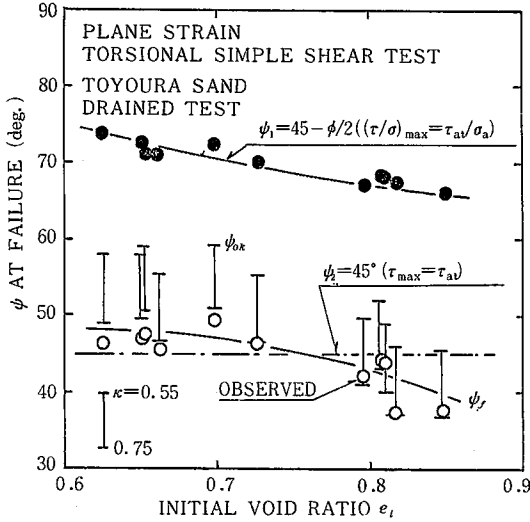


図26 破壊時における主応力の回転角 ψ_f (排水試験)

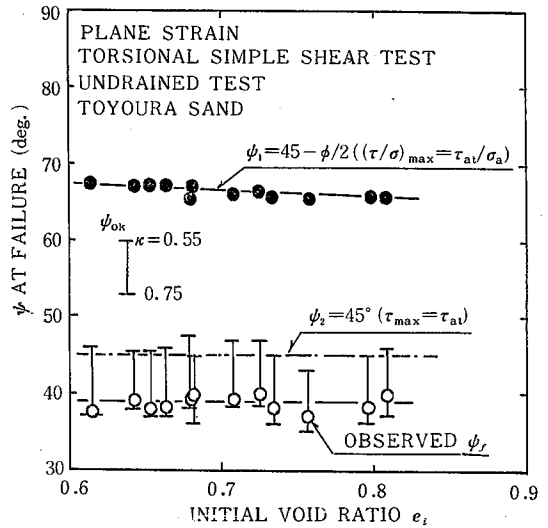


図27 破壊時における主応力の回転角 ψ_f (非排水試験)

る。(図 25(a))

2) 供試体水平面は最大せん断応力面 (τ_{max} 面) である。(図 25(b))

前報告(V)²⁾で平面ひずみねじり単純せん断試験の供試体の破壊型式を調べ、供試体水平面は破壊面でも最大応力比面でもないことを示したが、ここでは主に主応力方向から供試体水平面上の応力 (σ_a, τ_{at}) に関する上記 2つの仮定について考える。図 26 に排水試験のいろいろな密度における破壊時の最大主応力方向 (ψ) の実測値を示してある。なお、図中には最大主応力面と最大応力比面とのなす角 ψ_1 を示してある。この角 ψ_1 はもし最大応力比面と水平面が一致しているときは最大主応力軸の回転角 ψ_f でなければならない。したがって ($\psi_1 - \psi_f$) は供試体水平面と最大応力比面とのなす角である。図からわかるように両者はかなりの差 ($25^\circ \sim 30^\circ$) があることがわかる。また、図中の $\psi_2 = 45^\circ$ は供試体水平面上のせん断応力 (τ_{at}) が最大せん断応力 (τ_{max}) であるときの最大主応力軸の回転角を表しているが、この値は実測した ψ_f に近いが、供試体の密度により異なり、

ゆるい供試体: $\psi_f < \psi_2$ ($\sigma_N < \sigma_a, \tau_{max} > \tau_{at}$)

密な供試体: $\psi_f > \psi_2$ ($\sigma_N > \sigma_a, \tau_{max} > \tau_{at}$)

である。図中の縦実線の範囲は最大応力比 (τ_{at}/σ_a)_{max} と小田・小西の式 ($\tau_{at}/\sigma_a = \kappa \tan \psi$) より求めた主応力方向 (ψ_{0k}) の範囲を示している ($\kappa = 0.55 \sim 0.75$)。小田・小西の式から求めた ψ_{0k} は係数 (κ) の値により変化するが、前報告(VI)³⁾で述べたように破壊時を問題にする場合には大きい κ 値を用いるべきで、ここでは $\kappa = 0.75$ の方が実測値との一致は良いことがわかる。非排水試験に関しては図 27 に示してあるが、この場合にも供試体水平

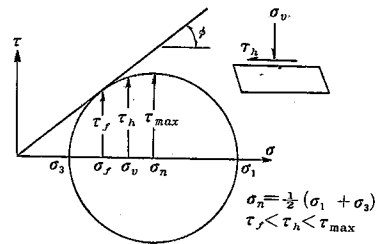


図28 Ladd, C.C. et al. (1972) の結果 (NGI 型単純せん断試験)

面は最大応力比面でもなく ($\psi_1 - \psi_f \approx 25^\circ$)、最大せん断応力面でもない ($\psi_2 - \psi_f \approx 6^\circ, \sigma_N < \sigma_a, \tau_{max} > \tau_{at}$) が、より最大せん断応力面に近い。また、この場合にも小田・小西の式から推定した ψ_{0k} の範囲を示してあるが、大きい κ の値の方が実測値との一致は良い。Ladd, C.C. and Edgers, L. (1972)⁴⁾は Boston Blue 粘土の正規圧密非排水単純せん断試験 (NGI 型) を実施し、最終的に供試体水平面は (τ/σ)_{max} 面と τ_{max} 面の間にくることを明らかにしている (図 28)。砂のねじり単純せん断試験では排水条件で密な供試体の場合にこれと一致している。Cole, E.R.L. (1967)⁵⁾は“破壊時には最大主応力方向と主ひずみ増分方向が一致する”という仮定を用いると実際とよく合うことを実験結果で示している。つまり図 29 より、

$$\tan(2\xi) = \frac{d\gamma_{yx}}{d\epsilon_{yx}} = \frac{\dot{x}}{\dot{y}}$$

$$\begin{cases} s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \sigma_{yy} - \tau_{yx} \cot(2\psi) \\ t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_{yx} \operatorname{cosec}(2\psi) \end{cases}$$

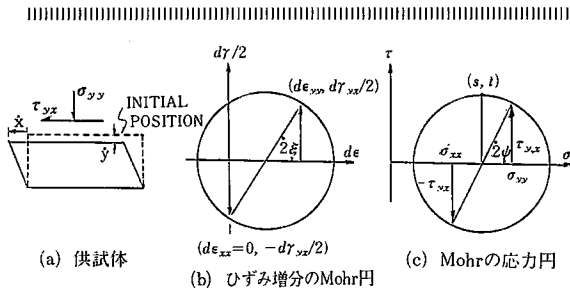


図29 Cole, E.R.L. (1969) の仮定 ($\psi = \xi$)

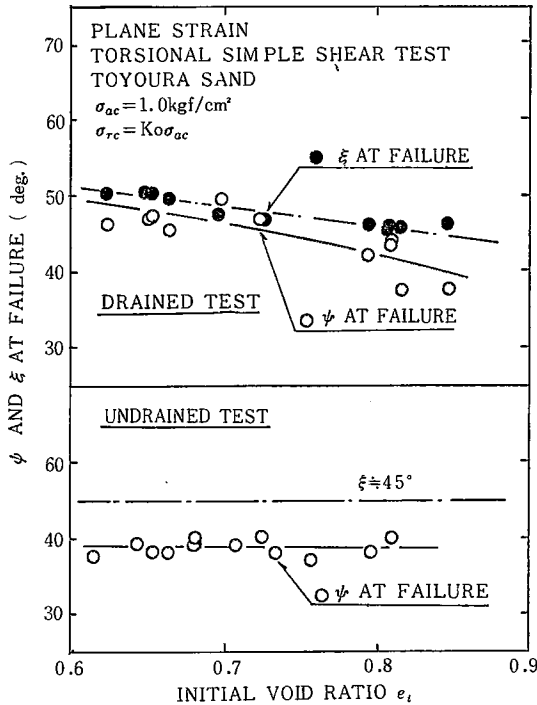


図30 破壊時の ψ と ξ

仮定 $\psi = \xi$ より,

$$\begin{cases} s = \sigma_{yy} - \tau_{yx} \cot(2\xi) = \sigma_{yy} - \tau_{yx} \left(\frac{y}{x}\right) \\ t = \tau_{yx} \operatorname{cosec}(2\xi) = \tau_{yx} \left[1 + \left(\frac{y}{x}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (14)$$

となり供試体水平面の応力と供試体変形量 (x, y) が知れば供試体の Mohr の応力円は求められる。ねじり単純せん断試験に対するこの仮定の妥当性を検討するために、いろいろな密度における破壊時の最大主応力軸の回転角 (ψ) と最大主ひずみ増分軸 (ξ) をプロットしたのが図 30 である。この図から排水試験では ψ と ξ は多少のバラツキがあるが広い範囲の密度にわたってその差は小さいと言える。つまり、排水試験では Cole, E.R.L. の仮定は問題が少ないようにである。これに対して非排水試験

研究速報では ξ は非排水条件 ($d\epsilon_v = 0$) と断面積一定条件 ($d\epsilon_A = 0$) より 45° でありせん断中一定であるが、図から主応力方向はこれと完全に一致していないことがわかる。しかし、この場合には $\psi = \xi$ という事と $\tau_{at} = \tau_{max}$ は同じ意味であるので、非排水試験では Cole, E.R.L. の仮定と $\tau_{at} = \tau_{max}$ は同じであるが、問題があることがわかる。以上をまとめると単純せん断試験の応力状態を推定するとき用いられるいろいろな仮定のうち、Arthur; J.R.F. et al. (1964) の (1) の仮定は問題があるが、それ以外は排水条件では比較的試験結果と近いようである。しかし、必ずしも合理的といえないのは非排水試験ではどの仮定も問題があるということである。したがって、供試体の応力状態を推定するとき排水条件に関係なく使用できる関係は小田・小西の式であろう。しかし、この関係は前報告 (VI) で述べたように κ の値の決定に問題があることに注意すべきである。

3. 結 論

供試体水平面上の応力 (σ_v, τ_h) しかわからない単純せん断試験の水平面上の応力に関する仮定について平面ひずみねじり単純せん断試験結果を用いて検討した結果、次のことがわかった。

(1) 排水試験では「供試体水平面は最大せん断応力面である (Arthur, E.R.F. et al. の仮定)」と「主応力軸と主ひずみ増分軸は一致する (Cole, E.R.L. の仮定)」は比較的実測値との一致は良い。

(2) 排水条件に関係なく使用できる関係は小田・小西の式である。

ただし、係数 κ の決定には注意する必要がある。

(1982年6月14日受理)

参 考 文 献

- 1) Arthur, J.R.F., James, R.G. and Roscoe, K.H. (1964); The Determination of Stress Fields during Plane Strain of a Sand Mass, Geotechnique, Vol.14, No.4, pp.283~308
- 2) 福島, 龍岡 (1982): 土のねじり単純せん断試験 (V), -砂の平面ひずみねじり単純せん断試験(その2)-, 生産研究, Vol. 34, No. 8
- 3) 福島, 龍岡 (1982): 土のねじり単純せん断試験 (VI), -砂の平面ひずみねじり単純せん断試験(その3)-, 生産研究, Vol. 34, No. 9
- 4) Ladd, C.C. and Edgers, L. (1972): Consolidated-Undrained Direct-Simple Shear Tests on Saturated Clays, Research Report R 72-82 Soils Publication 284, Massachusetts Institute of Technology
- 5) Cole, E.R.L. (1967): The Behaviour of Soils in Simple Shear Apparatus, Ph.D. Thesis, Cambridge Univ.