

土のねじり単純せん断試験 (IV) 砂の平面ひずみねじり単純せん断試験 (その1)

Stress-Strain Behavior of Soil by Torsional Simple Shear Test (IV)
-Plane Strain Torsional Simple Shear Test on Sand-

福島 伸二*・龍岡 文夫*

Shinji FUKUSHIMA and Fumio TATSUOKA

1. ま え が き

斜面や盛土内の土の要素が受けている一般的な応力-ひずみ状態の1つとして平面ひずみ状態を保ったままの単純せん断変形がある。土が非線型でかつ異方的な物性をもつ材料であることを考えると、斜面や盛土などの安定を考えるときに必要な土の応力-変形特性はこのような条件の下で調べる必要がある。これまで、このような条件下での土のせん断特性は箱型あるいはディスク状の供試体を用いる単純せん断試験により調べられてきた。しかしこの試験は次のような問題点がある。

- (1) 実験操作が複雑で、供試体に加わる応力の測定が非常にむずかしい。(Cambridge Type)
- (2) 供試体全体が真の単純せん断変形をしておらず、一般には供試体の水平面上に作用している応力しかわからない。(NGI Type)

これに対してねじり単純せん断試験機では供試体の応力状態は明確で、実験操作も簡単である。そこで、ここでは、この試験機を用いて平面ひずみ試験を実施し、Cole (1967)¹⁾が行った Cambridge Type の単純せん断試験の結果と比較を行った。そして、あえて Cambridge Type のような複雑な試験を行わなくとも、操作が簡単なねじり単純せん断試験を行えば平面ひずみでの単純せん断変形をシミュレートできることがわかった。

2. 平面ひずみねじり単純せん断試験

用いた供試体は外径10cm、内径6cm、高さ20cmの中空円筒形で、その応力状態を図1に示す。試料は豊浦砂を用い、供試体の作製は空中落下法により行った。平面ひずみ試験は次のように行った。まず K_0 三軸試験により得られた $K_0 - e_i$ 曲線 (大河内ら: 1981²⁾) から試験を行おうとする供試体の初期密度 e_i に相当する K_0 値 ($=\sigma_r/\sigma_a$) で異方圧密を行う。排水試験ではその後、軸応力 σ_a を一定にして供試体の断面積を一定に保ったまません断応力を加える。これを行うための具体的な方法を図2に示してある (前報告 (1) で述べた方法

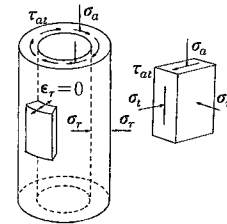


図1 供試体の応力状態

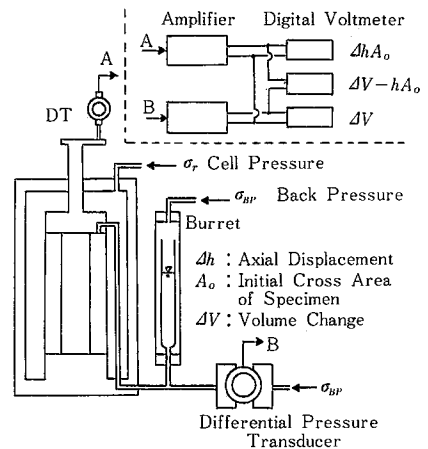


図2 排水平面ひずみねじり単純せん断試験

とは若干異なっている)。すなわち供試体の体積変化 (ΔV) を差圧計 (電圧表示) で測定し、高さ変化 (Δh) を変位計 (電圧表示) でそれぞれ測定する。このとき変位計の電圧表示に供試体のせん断開始時の初期断面積 (A_0) と高さ変化の積 ($\Delta h \cdot A_0$) が出力されるようにしておき、これと差圧計の電圧表示との差 ($\Delta V - \Delta h \cdot A_0$) が常に0になるように、つまり断面積一定となるように側圧 (σ_r) を増減させながら、ひずみ制御 (ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{ax} = 0.24\%$ /min) でせん断応力を加える。この試験では断面積一定を平面ひずみ条件としているが、これは次の理由による。この供試体で平面ひずみ条件とは (ϵ_r 半径ひずみ) = 0 であるが、この試験では (ϵ_v 体積ひずみ) = (ϵ_a 軸ひずみ) + (ϵ_A 面積ひずみ) において断面積

* 東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

一定, つまり $\epsilon_A = 0$ としてせん断している. しかし $\epsilon_A = \epsilon_r + (\epsilon_l \text{ 接線ひずみ}) = 0$ でも $\epsilon_r = -\epsilon_l \neq 0$ である可能性があるが, ここでは $\epsilon_r = \epsilon_l$ として $\epsilon_A = \epsilon_r = 0$ とした. 非排水試験では供試体高さが一定 ($\epsilon_a = 0$) になるようにせん断を行った. これは非排水条件 ($\epsilon_v = 0$) と高さ一定条件 ($\epsilon_a = 0$) より $\epsilon_A = \epsilon_r = 0$ を達成して平面ひずみとしたものである. なお, この試験では中空供試体の内側と外側の垂直応力 (σ_r) は等しいので, $\sigma_r = \sigma_l$ であり, この σ_r は中間主応力 σ_2 に等しい.

3. 実験結果

(3つの主応力の変化)排水試験のせん断中における主応力の変化を図3 (a), (b)にそれぞれ示してある. これらの図から, ゆるい砂, 密な砂ともに最大主応力 (σ_1) と中間主応力 (σ_2) は共にせん断中増加しつづけているが, 最小主応力 (σ_3) はせん断初期にやや減少するもののその後はほぼ一定であることがわかる. つづいて図4には非排水試験におけるせん断中の主応力の変化を示してある. 非排水試験ではせん断中間隙水圧 u が変

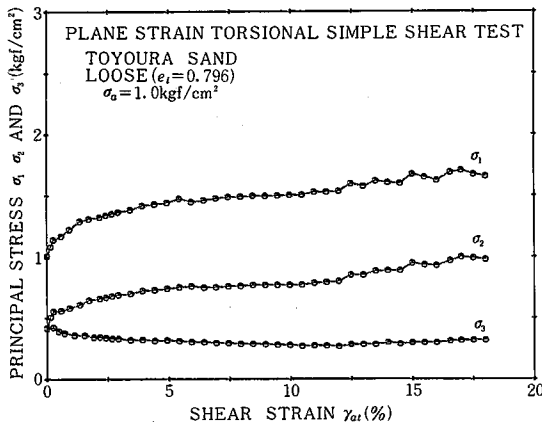


図3 (a) せん断中の主応力の変化 (排水試験, ゆるい砂)

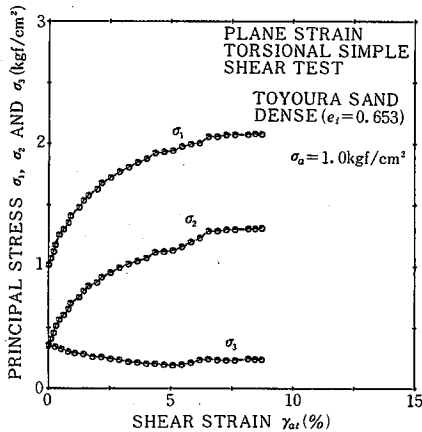


図3 (b) せん断中の主応力の変化 (排水試験, 密な砂)

化するため有効軸応力 $\sigma'_a (= \sigma_a - u)$ はせん断中一定でないことに注意すべきである. 図から非排水状態では密度に関係なく3つの主応力はせん断初期に減少するが, やがて増加してゆくこと, 密な砂ではこの増加する傾向がより大きいことがわかる.

(最大主応力方向の回転と応力比の関係)図5 (a) に示す最大主応力方向の回転角 (ψ) と供試体水平面上の応力比 (τ_{at}/σ'_a) の関係を示したのが図6 (a) (排水), (b) (非排水) である. これらの図は, 密度, 排水条件によらず ψ と τ_{at}/σ'_a の間には何らかの一定の関係, つまり主応力方向の回転角は水平面上の応力比の関数で表されることがわかる. これは Cole (1967)¹⁾ の結果と同じである.

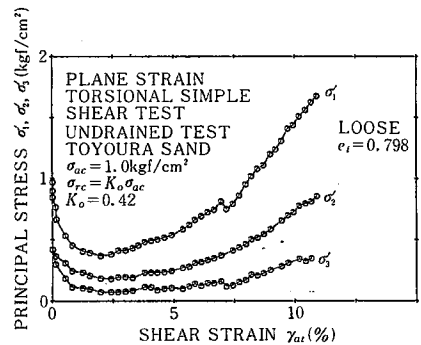


図4 (a) せん断中の有効主応力の変化 (非排水試験, ゆるい砂)

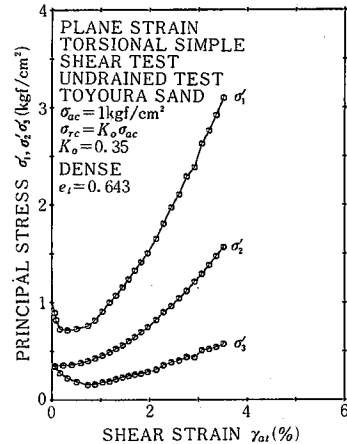
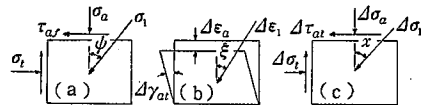


図4 (b) せん断中の有効主応力の変化 (非排水試験, 密な砂)



(a) 最大主応力方向 (b) 最大主ひずみ増分方向 (c) 最大主応力増分方向

図5 ψ, ξ, χ について

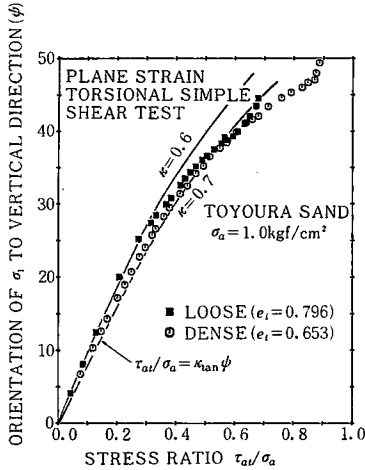


図6 (a) ψ と τ_{ai} / σ_a の関係 (排水試験)

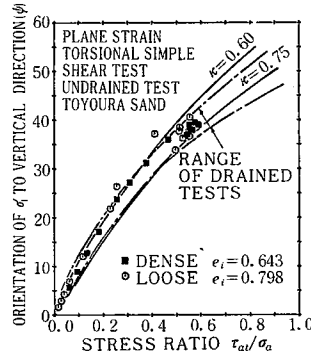


図6 (b) ψ と τ_{ai} / σ_a の関係 (非排水試験)

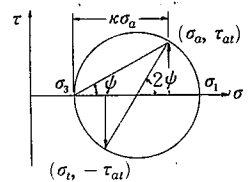


図7 応力の Mohr 円

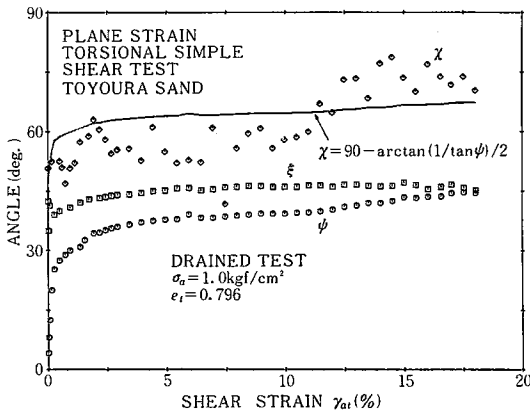


図8 (a) せん断中の ψ, ξ, χ の変化 (排水試験, ゆるい砂)

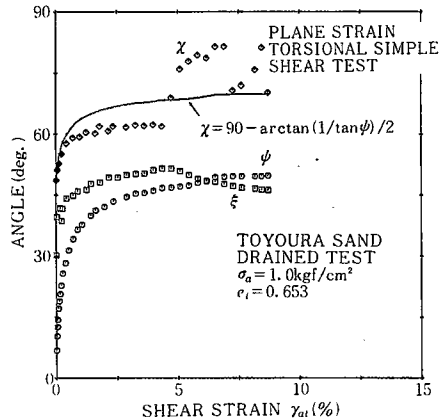


図8 (b) せん断中の ψ, ξ, χ の変化 (排水試験, 密な砂)

Oda et al (1974)⁹⁾ はこの関係を $\tau_{ai} / \sigma_a = \kappa \tan \psi$ で与えている (ここで κ は材料の粒子間摩擦角のみに依存する材料定数であるとしている)。なお、本実験では κ はおおむね 0.6 ~ 0.7 の範囲にある。また落合 (1975)¹⁰⁾ は ψ と τ_{ai} / σ_a の関係が Oda の式で与えられるならば、Mohr の応力円 (図7) から最大、最小の主応力はそれぞれ

$$\sigma'_1 = \sigma'_a + \tau_{ai}^2 / \kappa \sigma'_a, \quad \sigma'_3 = \sigma'_a (1 - \kappa) \quad (1) \text{式}, (2) \text{式}$$

で表せることを示している。また本試験では $\sigma'_1 = \sigma'_i = \sigma'_2$ の関係があるので、中間主応力は同様に Mohr 円から

$$\sigma'_2 = \sigma'_a (1 - \kappa) + \tau_{ai}^2 / \kappa \sigma'_a \quad (3) \text{式}$$

で表すことができる。排水試験では σ_a はせん断中一定としているから、これらの式は σ_a は一定で、また σ_1, σ_2 は増加しつづけることを示しているが、このことは実験結果 (図3) と合致している。ここで κ について考え

てみる。 $\tau_{ai} = 0$ のとき $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_a (1 - \kappa)$ は $K_0 \sigma_a$ に等しくなるから $K_0 = 1 - \kappa$ となる。ここで K_0 値は大河内ら (1981)¹¹⁾ の研究によると、砂の密度により変化するから、 κ も密度により変化するようになる。しかし図6 (a) によるとせん断中の κ は砂の初期密度によらない。このことは、砂の K_0 圧密中では厳密に言えば成り立たないと言えるであろう。

(主応力, 主ひずみ増分, 主応力増分方向) 図8 (a), (b) に排水試験におけるせん断中の最大主応力方向 (ψ), 最大主ひずみ増分方向 (ξ), 最大主応力増分方向 (χ) の変化を示してある (ψ, ξ, χ については図5参照)。これらの図はゆるい砂, 密な砂ともに主応力方向と主ひずみ増分の方向はせん断の進行と共に一致するようになるが、せん断初期を除けば主応力増分方向と主ひずみ増分方向はせん断中一致しないことを示している。次に図9には

研究速報

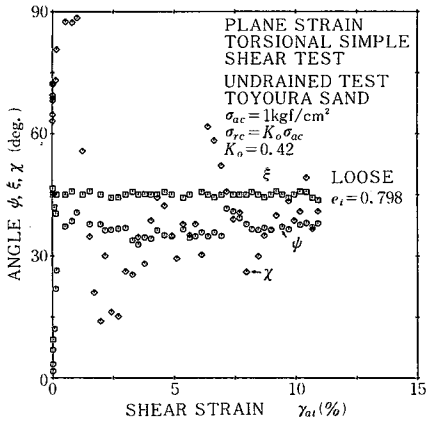


図9 (a) せん断中の ψ, ξ, χ の変化 (非排水試験, ゆるい砂)

非排水試験の場合のせん断中の ψ, ξ, χ の変化について示している。これらの図よりゆるい砂では χ のバラツキが大きい, ψ と χ はせん断変形が進むと一致してくること, またゆるい砂, 密な砂共に ψ と ξ ($\approx 45^\circ$) はせん断初期を除き, その差は小さいことがわかる。このことは砂は非排水平面ひずみ単純せん断においてある程度以上のせん断変形になると $\sigma'_1, d\epsilon_1, d\sigma'_1$ がほとんど同じ方向を向いたまま変形が進むことを示している。この結果も Cole (1967)¹⁾ とよく一致している。

(主応力増分方向 χ の推定) 排水試験におけるせん断中の主応力増分方向 (χ) の推定式を求めてみる。(3) 式より

$$\sigma_2 = \sigma_a (1 - \kappa) + \tau_{at}^2 / \kappa \sigma_a (= \sigma_r = \sigma_t)$$

ここで σ_a = 一定であるから増分をとり Oda の式を適用すると

$$d\sigma_t = 2 \tau_{at} \cdot d\tau_{at} / \kappa \sigma_a = 2 \tan \psi \cdot d\tau_{at}$$

この式を用いて応力増分の Mohr 円より χ を求めると, 次式が得られる。

$$\chi = 90 - \tan^{-1} (1 / \tan \psi) / 2 \quad (4)$$

図8にこの式を実線で示してあるが, 多少のズレがみられるが傾向をうまく表しているといえよう。

次に非排水試験の場合について求める。Oda の式を適用しながら (3) 式から σ'_1 の増分をとると,

$$d\sigma'_1 = d\sigma'_a (1 - \kappa) - \kappa \tan^2 \psi \cdot d\sigma'_a + 2 \tan \psi \cdot d\tau_{at} \quad (5)$$

Oda の式より τ_{at} の増分をとると

$$d\tau_{at} = \kappa \tan \psi \cdot d\sigma'_a + \kappa \sigma'_a \cdot \sec^2 \psi \cdot d\psi \quad (6)$$

(5), (6) 式と応力増分の Mohr 円より χ を求めると,

$$\tan 2\chi = \frac{2(\kappa \tan \psi \cdot d\sigma'_a + \kappa \sigma'_a \sec^2 \psi \cdot d\psi)}{(1 - \tan^2 \psi) \kappa d\sigma'_a - 2 \kappa \tan \psi \cdot \sec^2 \psi \cdot \sigma'_a d\psi} \quad (7)$$

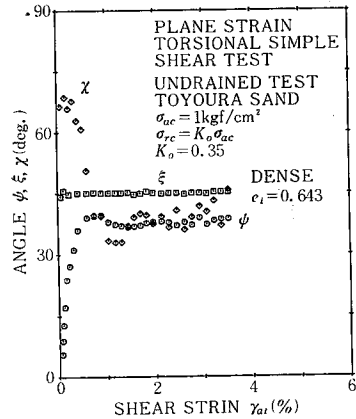


図9 (b) せん断中の ψ, ξ, χ の変化 (非排水試験, 密な砂)

せん断変形がある程度進んだ $d\psi \rightarrow 0$ の領域を考えると上式は $\tan 2\chi = \tan 2\psi$ となり次式を得る。

$$\chi = \psi \quad (8)$$

この関係は Cole (1967)¹⁾ が得たものと同一である。そしてこれは実験結果と一致している。

4. 結 論

- (1) ねじり単純せん断試験においても主応力方向の回転角は密度, 排水条件に関係なく, 供試体水平面上の応力比の関数で表せ, Oda の提案式 ($\tau_{at} / \sigma_a = \kappa \tan \psi$) は比較的良好。
- (2) 排水状態ではせん断変形と進行と共に主応力方向と主ひずみ増分方向は一致してくる。
- (3) 非排水状態では, せん断変形の進行と共に主応力方向, 主ひずみ増分方向, 主応力増分方向は一致してくる。
- (4) 以上のことは Cole (1967)¹⁾ の単純せん断試験の結果と同じ傾向である。(以下続く)

5. 謝 辞

本実験に用いた試験機の改良および部品製作は生研試作工場で行った。末筆ながら試作工場のスタッフ諸氏に感謝します。

(1981年7月27日受理)

参 考 文 献

- 1) Cole, E.R.L. (1967): The Behavior of Soils in Simple Shear Apparatus, Ph. D. Thesis, Cambridge Univ.
- 2) 大河内, 山口, 龍岡 (1967): 供試体作製法が砂の Ko 圧密特性に与える影響, 第16回土質工学研究発表会
- 3) Oda, M. and Konishi, J. (1974): Rotation of Principal Stresses in Granular Material during Simple Shear, Soils and Foundations, Vol. 14, No. 4, pp. 39 ~ 53
- 4) 落合 (1975): 直接せん断試験における砂の挙動: Soils and Foundations, Vol. 15, No. 4, pp. 93 ~ 100