

主応力方向回転下における砂の非排水変形挙動

山口大学工学部 正会員 ○中田幸男・村田秀一・兵動正幸
九州大学工学部 正会員 安福規之
(株)大林組 正会員 永島剛圭
山口大学大学院 学生員 吉村正芳・板倉志保美

1. はじめに

筆者ら¹⁾は、これまでに初期構造異方性を有する砂供試体の主応力方向を固定した条件下における非排水せん断挙動を明らかにしている。その結果、空中落下法によって作成された豊浦砂 ($Dr=60\%$) の有効応力径路は、図-1に示すように主応力方向によって異なることが明らかとなった。特に、主応力方向によっては、変相状態に達する以前に軸差応力が減少するひずみ軟化挙動を示すという知見が得られた。本報は、この豊浦砂の供試体に対して、主応力方向のみが変化する非排水試験を行い、主応力方向回転下における変形特性を実験的に検討するものである。ここでは、ひずみ軟化挙動を生じ始める応力比 (限界有効応力比、 $CSR^{2)}$ に着目して検討する。

2. 試験方法

用いた試験機は自動制御・計測可能な中空ねじりせん断試験機³⁾であり、供試体は、概ね、高さ20cm、外径10cm、内径6cmの中空円筒形のものをを用いている。用いた試料は豊浦砂であり、供試体は相対密度 $Dr=60\%$ を目標に、空中落下法を用いて作成される。図-2は、供試体内の要素、および要素に作用する応力を模式的に示したものである。ここでは、 $z-\theta$ 面内で最大主応力 σ_1 方向と最小主応力 σ_3 方向を回転させる試験を行っているが、鉛直軸と σ_1 方向のなす角 α_σ (主応力方向角) を用いて結果の整理を行っている。供試体は30kPaの負圧で自立させ、供試体寸法を測定した後、負圧を側圧に置換し、炭酸ガスの通気、脱気水の通水、背圧の負荷によって飽和状態にする。図-3は4つの試験の圧密径路および回転径路を示すものである。いずれの試験においても、圧密径路は、平均有効主応力 $p' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3 = 30\text{kPa}$ や主応力方向角 $\alpha_\sigma = 0^\circ$ を保ちつつ所定の応力比 η_c に達するまで軸差応力を増加させた後、 η_c を保ったまま100kPaまで p' を増加させるものである。続く回転径路は、圧密終了時の軸差応力を保ちつつ、非排水状態で主応力方向のみを連続的に変化させるもの (図-3(b)中の $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow a$ の径路) である。4種類の実験の違いは回転中の軸差応力 $q = 1/\sqrt{2} \{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2\}^{0.5}$ の違いであり、

RT1 試験が86.6kPa、RT2 試験が52.0kPa、RT3 試験が34.6kPa、RT4 試験が17.3kPaとなっている。なお、軸力、トルク力、外圧、内圧を独立に制御することによって、試験中の中間主応力係数 $b = (\sigma'_2 - \sigma'_3)/(\sigma'_1 - \sigma'_3)$ は0.5に、回転中の平均主応力 p (全応力) は100kPaに保たれている。試験は全て応力制御方式で行われ、1Stepの主応力方向の回転角は 2.5° としている。

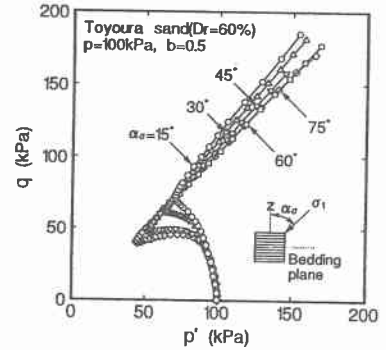


図-1 豊浦砂の有効応力径路

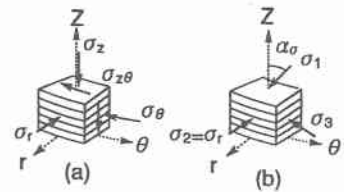


図-2 供試体内の要素

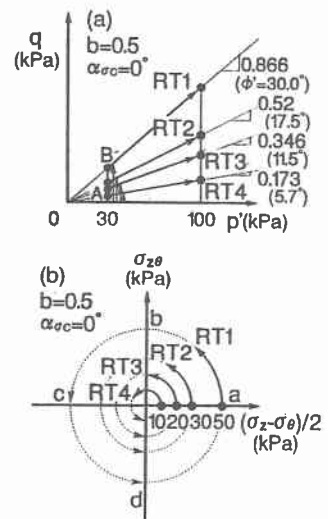


図-3 試験径路

3. 試験結果

図-4は、4つの主応力方向回転試験の結果を示したもので、図(a)が $p'-q$ 空間、図(b)が $\eta-\alpha_\sigma$ 関係における有効応力径路を示したものである。図中には主応力方向固定試験から得られた限界有効応力比 CSR や変相応力比、ピーク応力比の取りうる範囲を示している。また、図中に示した数字はそれぞれの試験の繰返し回数を示している。これらの図から、軸差応力の大きさによらず、主応力方向が回転することによって過剰間隙水圧が発生し、有効応力が減少することがわかる。しかしながら、その有効応力の減少は、主応力方向回転中の軸差応力の大きさによって異なることがわかる。具体的にみていくと、以下のようなことがいえる。

1) RT4 の有効応力は、21 周の主応力方向の回転を与えた後でも CSR に達することなく、 p' にして 100kPa から 80kPa まで変化するだけである。2) RT3 の有効応力は、2 周目の $\alpha_\sigma = 50^\circ$ 付近で CSR に達している。また、RT2 の有効応力は 1 周目の $\alpha_\sigma = 40^\circ$ 付近で CSR に達している。RT2 及び RT3 試験の両結果についても、CSR に達した後に過剰間隙水圧が一挙に生じ、応力比が変相応力比近傍まで瞬時に変化していることがわかる。この挙動は、結果として応力比が CSR に達することによって発生していることから、主応力方向の回転中の流動変形と捉えられる。3) RT1 の有効応力は、CSR に達することなく $\alpha_\sigma = 10^\circ$ 付近で変相応力比に達する。しかし、有効応力が変相応力比に達する近傍での過剰間隙水圧の増加やそれに伴う応力比の変化は大きく、最終的にはピーク応力比に近づく傾向にある。図(c)は軸差ひずみ $\gamma = \sqrt{2/3} \left\{ (\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 \right\}^{0.5}$ の生じ方を示すもので、 $\gamma-\alpha_\sigma$ 関係を描いたものである。この図から、RT4 では、21 周後であっても γ が 0.1% 程度しか生じていないこと、RT3 や RT2 では、応力比が CSR に達した α_σ において 0.2% から 1.1% まで、流動変形に伴って不連続に γ が生じていること、さらに、RT1 では、不連続なせん断変形はみられないものの、変相応力比に達する $\alpha_\sigma = 10^\circ$ 付近から軸差ひずみが連続的に急増していることがわかる。

4. まとめ

本報では、豊浦砂の主応力方向回転下における非排水変形挙動を実験的に検討した。その結果、有効応力は、軸差応力の大きさによらず、主応力方向が回転によって減少し、せん断変形を示すことが明らかとなった。ただし、有効応力の減少の仕方に着目すると、回転中の軸差応力の大きさによって、1) 有効応力が限界有効応力比に達しない場合、2) 有効応力が限界有効応力比に達し瞬時に減少した後、ピーク線近傍までに達する場合、3) 有効応力が瞬時の減少することなくピーク線近傍まで減少する場合の 3 つ挙動が認められた。

<参考文献> 1) 中田, 安福, 村田, 兵動, 永島: 主応力方向固定条件下における異方性砂の非排水・排水せん断挙動, 土木学会論文集 3 月号掲載。2) Vaid, V.P. and Chern, J.C. (1985): "Cyclic and monotonic undrained response of saturated sands," Advances in The Arts of Testing Soils under Cyclic Conditions, ASCE, Convention, Detroit, p.120-147. 3) 中田, 山本, 安福, 村田, 兵動: 自動制御・計測可能な中空ねじりせん断試験機の試作とひずみ制御試験への適用, 土木学会論文集, No.505/III-29, pp.329-332, 1994.

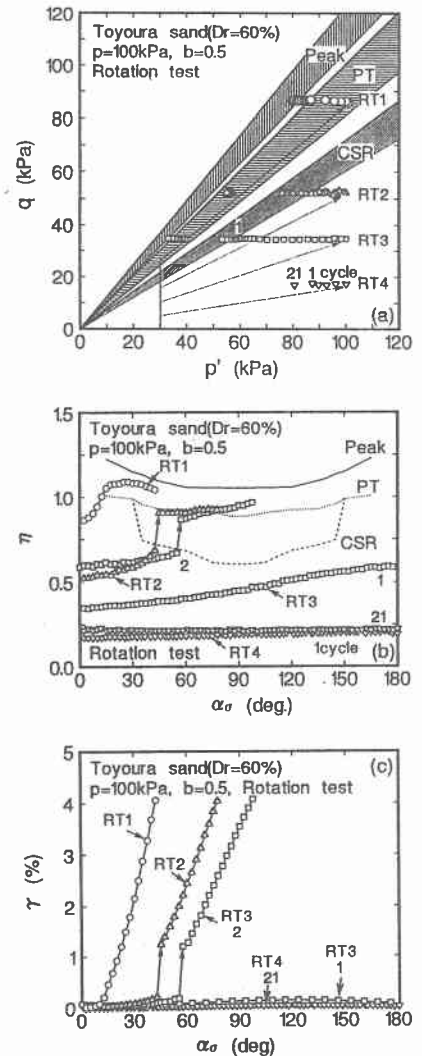


図-4 豊浦砂の主応力方向回転下の非排水変形挙動；(a)平均有効主応力と軸差応力の関係、(b)応力比と主応力方向角の関係、(c)軸差ひずみと主応力方向角の関係