

III-A 9 主応力方向の回転を受けた緩詰め砂の非排水変形挙動

山口大学工学部 正会員 ○中田幸男・兵動正幸・村田秀一  
 山口大学大学院 学生員 板倉志保美  
 清水建設（株） 正会員 吉村正芳

1. まえがき 著者らは、主応力方向回転下における砂の非排水挙動を明らかにするために、空中落下法によって作成した豊浦砂供試体に対して一連の実験<sup>(1-3)</sup>を行ってきた。その一連の実験から、主応力方向の回転を与えることで、密度や回転中の応力レベルに依存して流動変形を示すことや、その流動変形は有効応力がせん断試験から得られる限界有効応力比に達したとほぼ同時に生じること等が明らかとなった。この知見は、Ishihara<sup>4)</sup>らの研究のように地震時に発生する流動破壊を議論する場合には主応力方向の変化が無視できないものであることを示唆しており、意義のあるものといえる。しかし、この結果は豊浦砂に対して行った実験から得られたものであり、今後さらなる結果の蓄積が必要であるといえる。そこで、本報告では、秋穂砂の供試体に対して、主応力方向のみが回転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。

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<sup>5)</sup>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た。用いた試料は秋穂砂であり、豊浦砂と比較すると、角張った粒子や扁平な粒子が多く、粒度分布のよい試料である。供試体は相対密度  $Dr=35\%$  を目標に、空中落下法を用いて作成した。空中落下によって作成した時の秋穂砂粒子の長軸方向は、豊浦砂のそれと比べて、顕著に水平方向へ卓越すること<sup>6)</sup>が明らかになっている。図-1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  $\sigma_1$  方向と最小主応力  $\sigma_3$  方向を回転させる試験を行っているが、鉛直軸と  $\sigma_1$  方向となす角  $\alpha_\sigma$ （主応力方向角）を用いて結果の整理を行っている。試験は、全てで4種類行った。図-2はその4つの試験の圧密径路と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  $p' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3 = 30\text{kPa}$  と主応力方向角  $\alpha_\sigma = 0^\circ$  を保ちつつ所定の応力比に達するまで軸差応力を増加させた後、所定の応力比を保ったまま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  $q = 1/\sqrt{2} \{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2\}^{0.5}$  であり、それぞれ86.6kPa、52.0kPa、34.6kPa、17.3kPaとなっている。なお、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に保っている。

3. 試験結果 図-3(a), (b)は、4つの回転試験結果の有効応力径路を示したもので、図(a)は  $p'-q$  関係を、図(b)は  $\eta-\alpha_\sigma$  関係をそれぞれ示したものである。図中には、主応力方向固定試験

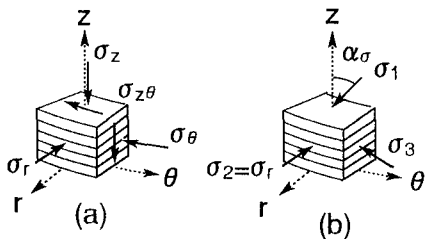


図-1 供試体内の要素

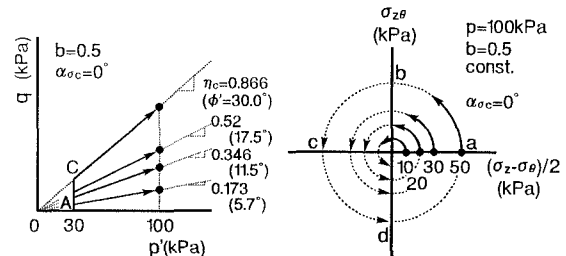


図-2 試験径路

から得られた限界有効応力比、変相応力比やピーク応力比の取りうる範囲をそれぞれ示している。また、図中の数字は主応力方向の回転数を示すものである。これらの図から、以下のようなことが認められる。(1) 86.6kPa、52.0kPa、34.6kPaの回転試験では、有効応力がピーク時の応力状態近傍まで変化する。ただし、そのピーク応力状態に達するまでに要する主応力方向の回転は、 $q$ の増加とともに減少する。(2) 52.0kPa、34.6kPaの回転試験の有効応力径路は限界有効応力比と交差する。その交差する主応力方向角は、52.0kPaで65°付近、34.6kPaで回転2周目の80°付近である。(3) 17.3kPaの結果では、最終的に主応力方向の回転を20周与えても、有効応力は75kPaまでの減少しか示さない。図-3(c)は、4つの回転試験結果の軸差ひずみ  $\gamma = \sqrt{2/3} \{ (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \}^{0.5}$  と主応力方向角  $\alpha_\sigma$  の関係を示したものである。この図から、有効応力がピーク応力比まで変化した86.6kPa、52.0kPa、34.6kPaの結果は、それぞれ  $\alpha_\sigma = 15^\circ$ 、 $\alpha_\sigma = 80^\circ$ 、 $\alpha_\sigma = 110^\circ$  付近から顕著に軸差ひずみを生じていることがわかる。図-3(b)中の矢印は、この軸差ひずみの急増する応力状態を示している。52.0kPaや34.6kPaの矢印は、限界有効応力比と交差する応力状態とは若干異なっていることがわかる。豊浦砂の場合、有効応力が限界有効応力比に達するとほぼ同時に、数10kPaの間隙水圧が瞬時に発生し、それに伴い数%の軸差ひずみが生じることが明らかになっている。図-3(c)中の黒丸のプロットがその豊浦砂(Dr=60%)の応力ひずみ関係を示している。また、このような挙動は、Ham river砂やガラスビーズを用いて行った Shibuya and Hight<sup>5)</sup>の研究においても示されている。しかし、秋穂砂は豊浦砂と比較して急激なひずみの発達を示していないことがわかる。これは、せん断応力が変化しない本試験条件では、秋穂砂のような比較的角張りのある扁平な粒子間ではすべりが生じにくくなるためと考えられる。しかし、軸差ひずみの急増する応力状態が86.6kPaの結果と異なり変相応力比に達する以前に生じていることから、52.0kPaや34.6kPaの挙動も主応力方向回転中の流動変形の一つであると考えられる。

**4. まとめ** 本報では、秋穂砂の供試体 (Dr=35%) に対して、非排水状態で主応力方向回転試験を実施した。その結果、比較的角張った粒子を持つ秋穂砂供試体も、主応力方向回転下において流動変形と見なせる挙動を示すことを明らかにした。

<参考文献> 1) Yasufuku, N. et al, I0ARC, pp.115-118, 1995. 2) 吉村他: 主応力方向の回転を受ける緩詰め砂の流動変形, 第31回地盤工学研究発表会投稿中, 1996. 3) 中田他: 主応力方向回転下における密詰め砂の非排水変形挙動, 第31回地盤工学研究発表会投稿中, 1996. 4) Shibuya, S. and Hight, D.W.: A bounding surface for granular materials, "S&F, Vol.27, No.1, pp.59-81, 1987. 5) 中田他, 土木学会論文集, No.505/III-29, pp.329-332, 1994. 6) Ishihara, K.: Liquefaction and flow failure during earthquakes, "Geotechnique, Vol.33, No.3, 349-415, 1993. 7) 板倉他: 微視的観察における砂の初期構造異方性, 土木学会中国支部研究発表会投稿中, 1996.

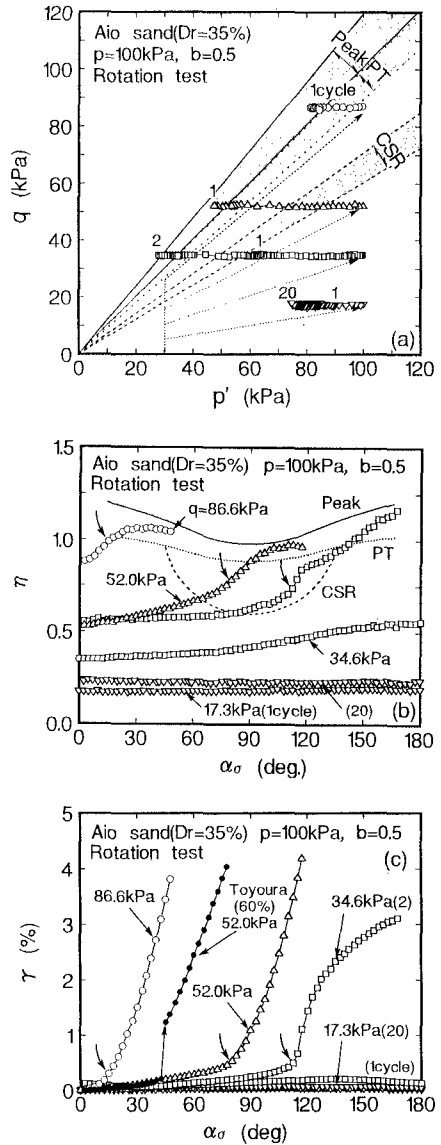


図-3 秋穂砂の主応力方向回転下の非排水変形挙動; (a)  $p'-q$ 関係, (b)  $\eta - \alpha_\sigma$ 関係, (c)  $\gamma - \alpha_\sigma$ 関係