

DOI: 10.11779/CJGE201603014

初始剪应力对饱和粉土液化特性影响试验研究

周正龙, 陈国兴*, 吴琪

(南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要: 为探寻饱和粉土的液化特性, 利用GDS空心圆柱仪进行了一系列循环扭剪试验。在初始剪应力 τ_s 和循环剪应力 τ_{cy} 共同作用下, 试样的最小剪应力 $\tau_{min}=\tau_s-\tau_{cy}$ 存在3种类型: $\tau_{min}<0$, $\tau_{min}=0$ 和 $\tau_{min}>0$ 。试验结果表明: 当 $\tau_{min}\leqslant 0$ 时, 试样的孔压可以达到有效围压, 其破坏模式为循环液化; 当 $\tau_{min}>0$ 时, 试样的孔压始终达不到有效围压, 其破坏模式为过大的累计应变。饱和粉土的循环强度随着初始剪应力 τ_s 与初始有效平均主应力 p'_0 之比值SSR(初始剪应力比)的增加呈现出先减小后增大变化趋势, 且SSR=0.1~0.15时的循环强度最低。当SSR≤0.1时, 孔压比的发展模式随着循环剪应力比的增加由“快—平稳—急剧”的增长模式向“快—平稳”的增长模式转变; 当SSR>0.1时, 孔压比的发展呈现“快—平稳”的增长模式。

关键词: 粉土液化; 初始剪应力; 循环剪应力; 循环强度; 孔压比

中图分类号: TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)03-0504-06

作者简介: 周正龙(1988-), 男, 江苏海安人, 博士研究生, 主要从事土动力学研究。E-mail: zhouchen.glong@163.com。

Effect of initial static shear stress on liquefaction behavior of saturated silt

ZHOU Zheng-long, CHEN Guo-xing, WU Qi

(Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: In order to investigate the role which the initial static shear stress plays in the liquefaction of saturated silt, a series of cyclic torsional shear tests are conducted. Three types of cyclic loading patterns, stress reversal, intermediate and stress no-reversal, are employed by varying the initial static shear level τ_s and the cyclic shear stress amplitude τ_{cy} . The observed failure state types of the samples can be distinguished into the cyclic liquefaction and the excessive accumulated permanent deformation according to whether the pore pressure of the samples reaches the effective confining one. The test results show that under the low initial static shear level, an increase in the ratio SSR of the initial static shear stress τ_s to the initial effective mean confining stress p'_0 leads to a decrease in the cyclic shear strength. However, under the higher initial static shear level, an increase in SSR increases the cyclic shear strength. It is found that the growth mode of the pore pressure ratio depends on the combination of the initial and cyclic shear stresses. When $SSR\leqslant 0.1$, with the increase of τ_{cy} , the growth mode of the pore pressure ratio changes from a state of “fast-steady-sharp” to a state of “fast-steady”. On the other hand, the growth mode of the pore pressure ratio is in a state of “fast-steady” when $SSR>0.1$.

Key words: silt liquefaction; initial static shear stress; cyclic shear stress; cyclic shear strength; pore pressure ratio

0 引言

众所周知, 边坡、储灰场、路堤、土石坝、码头、围堰、江(河)堤、海堤等工程一定区域的土单元存在顺坡向或朝水方的初始剪应力作用。许多学者开展了初始剪应力对饱和砂土液化特性影响的研究, 但由于试验方法、仪器以及应力参数定义的不同, 目前尚未形成一致的结论。Yoshimi等^[1]注意到初始剪应力的作用使砂土更易液化, 但Seed^[2]注意到初始剪应力的存在减缓了孔隙水压力的发展速率, 从而使砂土不易液化。Vaid等^[3]、Seed等^[4]发现初始剪应力的作用是使饱和砂土的抗液化强度增大、减小或几乎无影响,

这取决于饱和砂土的密度。Yang等^[5]的研究表明: 初始剪应力对饱和砂土液化性能的影响程度与相对密度和有效围压有关, 并提出了门槛初始剪应力比的概念, 解释初始剪应力比对砂土抗液化强度的影响。Sivathayalan等^[6]则利用单剪仪和循环三轴仪研究了初始剪应力对砂土液化特性的影响, 发现初始剪应力比对抗液化强度的影响与加载模式有关。Chiari等^[7]通

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91215301);
国家自然科学基金项目(41172258, 51438004)

收稿日期: 2015-01-12

*通讯作者

过一系列循环扭剪试验发现初始剪应力比对饱和松砂循环液化强度的影响依赖于土体的应力状态和破坏模式。

粉土在世界各地分布广泛, 已有研究表明粉土在地震作用下易发生液化^[8-11]。但目前针对初始剪应力作用下饱和粉土循环强度的研究尚属少见。Hyde 等^[12]通过循环三轴试验研究了偏应力比对粉土循环强度的影响, 发现循环强度随着偏应力比的增大呈现出先减小后增大的现象, 且当偏应力比为 0.5 时循环强度最低。沈扬等^[13]试验研究了主应力轴循环旋转条件下初始固结比对密实粉土循环强度的影响, 结果表明: 偏压条件下粉土的循环强度与初始固结比不存在单调变化的关系。Sağlam 等^[14]观察到饱和粉土的循环强度随着偏应力比的增加而增加, 但当初始剪应力比超过 0.6~0.7 时, 循环强度则随着初始剪应力比的增大而减小。

由此可见, 初始剪应力比对饱和粉土循环强度的影响, 目前仍存在分歧。鉴于前人的研究主要以循环三轴仪偏压固结来模拟初始剪应力的作用, 本文利用空心圆柱仪对试样直接施加初始剪应力后进行循环扭剪试验, 探讨了初始剪应力比和循环剪应力比对饱和粉土循环强度和孔隙水压力发展规律的影响。

1 试验内容与方法

试验采用南京工业大学岩土研究所购置的英国 GDS 公司的空心圆柱仪进行, 该仪器可以实现轴向、扭剪、外压和内压的四向耦合振动加载, 如图 1 所示。



图 1 GDS 空心圆柱仪

Fig. 1 GDS hollow cylinder apparatus

试验所用的南京粉土, 塑性指数为 6.5, 土粒比重为 2.72, 最大孔隙比为 1.14, 最小孔隙比为 0.62。颗粒分析试验曲线如图 2 所示。

试样为空心圆柱样, 外径为 100 mm, 内径为 60 mm, 高度为 200 mm。控制试样的相对密度为 60%, 采用振捣法进行制备。土样制备完成后先采用抽真空

下吸无气水的方法进行饱和, 再施加 400 kPa 的反压饱和, 确保试样固结前饱和度达到 0.97 以上。首先对试样进行初始有效平均主应力 $p'_0=100$ kPa 的等压固结, 主固结完成后以 0.5 kPa/min 的速率施加静剪应力, 直至其达到目标值来实现不同初始剪应力 τ_s 的作用, 待固结稳定后在不排水条件下给试样施加一定的循环扭剪应力 τ_{cy} 。采用正弦波加载, 振动频率为 0.1 Hz。试验方案见表 1。

表 1 不排水循环扭剪试验方案和结果

Table 1 Schemes and results of undrained cyclic torsional tests

试验 编号	初始剪应力 τ_s /kPa	循环剪应力 τ_{cy} /kPa	破坏振次 N_f
C1	0	10	138.6
C2	0	15	22.6
C3	0	20	6.6
C4	5	10	108.6
C5	5	15	9.7
C6	5	20	4.8
C7	10	10	66.2
C8	10	15	6.6
C9	10	20	2.8
C10	15	10	68.1
C11	15	15	9.2
C12	15	20	1.2
C13	20	10	122.9
C14	20	15	9.4
C15	20	20	1.8

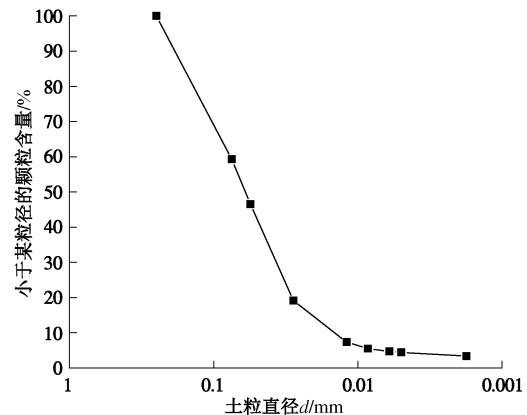


图 2 粉土级配曲线

Fig. 2 Particle-size distribution of Nanjing silty soil

2 试验结果与分析

Hyodo 等^[15]指出: 具有初始剪应力作用的土体在循环荷载作用下处于 3 种应力状态, 可通过最小剪应力 ($\tau_{min}=\tau_s - \tau_{cy}$) 来分类, 即: $\tau_{min}<0$, $\tau_{min}=0$ 和 $\tau_{min}>0$ 。图 3~5 给出了这 3 种典型应力状态的剪应力 - 剪应变关系和有效应力路径。当 $\tau_{min}<0$ 时 (如图 3), 剪应力 τ 随着循环扭剪应力 τ_{cy} 的变化会产生应力反向, 随着循环次数的增加, 循环剪应变不断增长, 土样中的孔压持续发展, 直至土样达到初始液化状态, 即有效应力为 0。当 $\tau_{min}=0$ 时 (如图 4), 土样产生的循环剪应

变不断增大；同时，累积塑性应变亦不断增大，当循环应变增大到一定程度，土样达到初始液化状态。而当 $\tau_{\min} > 0$ 时（如图 5），土样产生的塑性应变不断增大，而循环应变基本保持不变，即使累积应变达到 10%，循环应变亦没有明显变化，而此时土样仍未能达到初始液化状态。

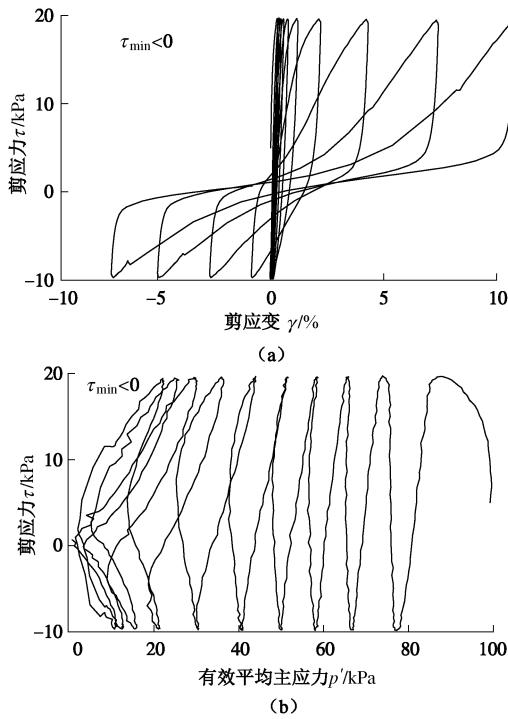


图 3 土样 C5 的不排水循环扭剪试验结果

Fig. 3 Results of undrained cyclic torsional shear tests on sample C5

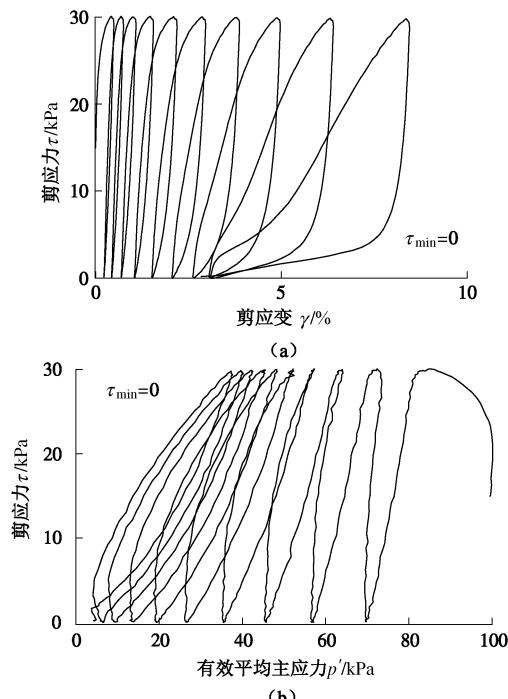


图 4 土样 C11 的不排水循环扭剪试验结果

Fig. 4 Results of undrained cyclic torsional shear tests on sample C11

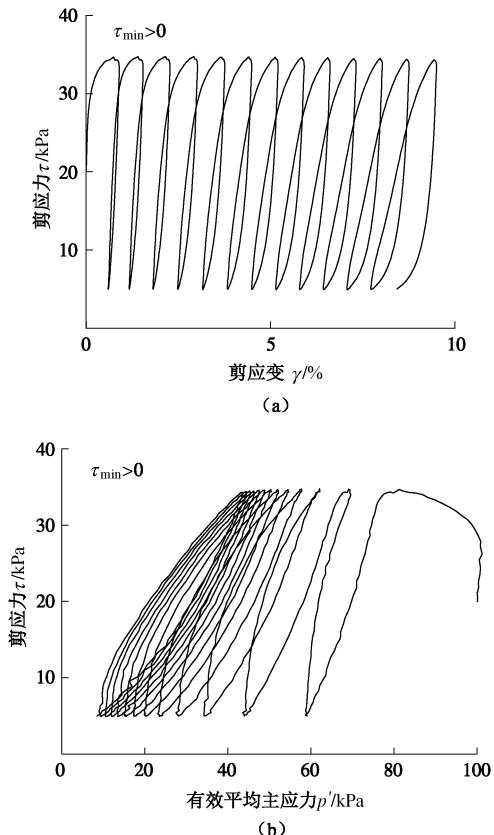


图 5 土样 C14 的不排水循环扭剪试验结果

Fig. 5 Results of undrained cyclic torsional shear tests on sample C14

2.1 破坏标准的选择

具有初始剪应力作用的饱和粉土的破坏模式和机理分为两种，即循环液化和过大的累积应变，如图 6 所示。由图 3, 4 可知，当最小剪应力 $\tau_{\min} \leq 0$ 时，土样可以达到初始液化，其破坏模式为循环液化。当 $\tau_{\min} > 0$ 时，即使累计塑性应变达到 10%，土样仍未达到初始液化，土样的破坏模式为过大的累积应变。在循环三轴试验中，常采用双幅轴向应变 5% 作为饱和土体液化破坏的标准。循环三轴试验中通常将土样的 45° 斜面作为破坏面，其所产生的剪应变 $\gamma = 1.5 \varepsilon_d$ ^[16]。为了与循环三轴试验中土样破坏标准的含义一致，本文将双幅剪应变为 7.5% 作为土样的破坏标准。当土样为循环液化破坏时，如图 6 (a) 所示，取双幅剪应变 $\gamma_{DA} = 7.5\%$ 作为破坏标准；当土样为过大的累积应变破坏时，如图 6 (b) 所示，取累积塑性应变 $\gamma_p = 7.5\%$ 作为破坏标准。

2.2 初始剪应力对循环强度的影响

在不同循环应力比 ($CSR = \tau_{cy}/p'_0$) 作用下饱和粉土土样达到双幅剪应变 γ_{DA} 或累积塑性应变 $\gamma_p = 7.5\%$ 时的破坏振次 N_f 与初始剪应力比 ($SSR = \tau_s/p'_0$) 关系如图 7 所示。可以看出，无初始剪应力时 ($SSR = 0$) 土样达到破坏所需的振次明显高于有初始剪应力时

($SSR \neq 0$) 的振次, 且随着 SSR 值的增加, 饱和粉土土样的破坏振次呈先减小后增大的趋势。这是因为 $SSR=0$ 时, 土样的土颗粒处于某种紧密的接触状态, 随后对土样施加的扭剪应力使土样的 $SSR \neq 0$, 打破了土颗粒原有的接触状态, 和 $SSR=0$ 相比, 土颗粒更易于滑动。当初始剪应力 τ_s 小于循环剪应力 τ_{cy} 时, 即 $\tau_{min} < 0$, 剪应力的方向发生 90° 偏转, 土颗粒易于滑动, 土样会产生较大的循环变形, 导致大量的能量损耗, 使土样中的孔压快速增大达到初始有效围压, 土样发生初始液化。当 τ_s 大于 τ_{cy} 时, 即 $\tau_{min} > 0$, 剪应力的方向不再发生偏转, 减小了土样的变形速率和幅度, 减缓了耗损能量的产生, 使土样中孔压的发展速度减慢, 土样不会发生液化现象, 表现为过大的累积塑性应变破坏形式。此时, τ_s 越大, 土样达到累积塑性应变 $\gamma_p = 7.5\%$ 时所需的破坏振次 N_f 值也越大。

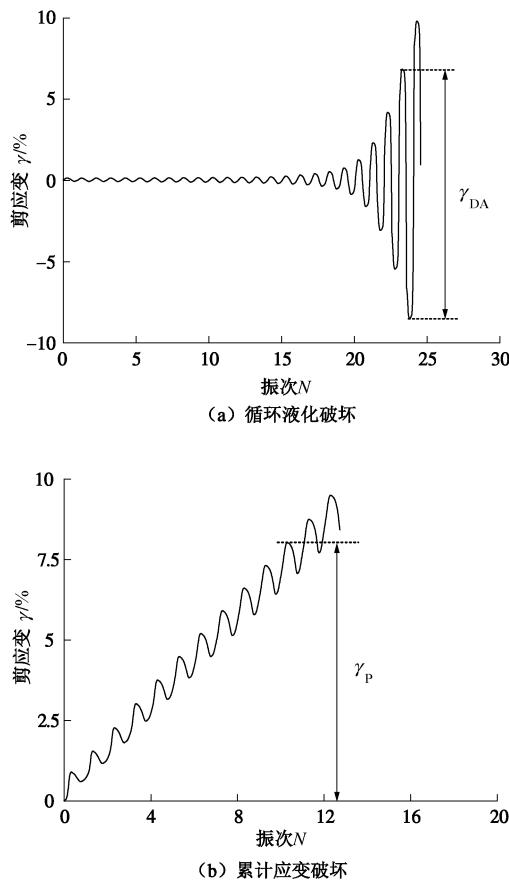


图 6 循环荷载作用下土样的破坏模式

Fig. 6 Failure patterns under cyclic loading

土的循环强度定义为在一定循环荷载作用次数下试样达到某一破坏标准所需循环应力比的大小。图 8 给出了破坏振次的等值线图。由图可知, 土样的循环强度随着初始剪应力比 SSR 的增加而呈现先逐渐减小、后逐渐增大的趋势, 且 SSR 约为 $0.1 \sim 0.15$ 时的循环强度最小。这种变化规律与 Hyde 的循环三轴试

验结果一致, 但转折点的位置有所差异^[12]。因此, 循环荷载作用下, 初始剪应力比为 $0.1 \sim 0.15$ 的饱和粉土试样最易发生破坏。

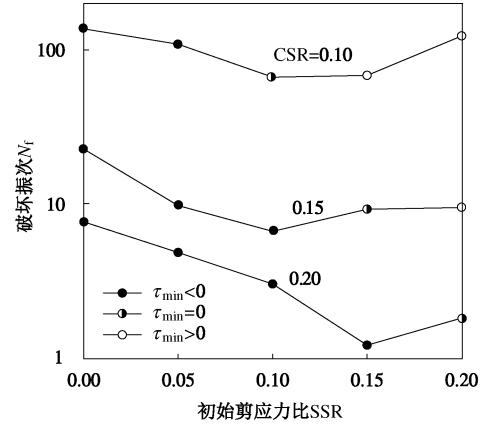


图 7 土样在不同循环应力比作用下破坏振次与初始剪应力比的关系

Fig. 7 Relationship between number of cycles and initial static shear stress ratio of soil samples under different cyclic shear stress ratios

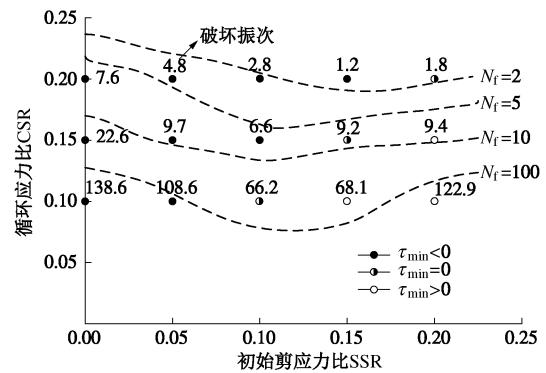


图 8 土样的循环剪应力比、初始剪应力比和破坏振次关系曲线

Fig. 8 Relationship among number of cycles, cyclic shear stress ratio and initial static shear stress ratio

2.3 初始剪应力对孔隙水压力发展规律的影响

定义循环荷载作用下饱和粉土土样的孔隙水压力 u 与初始有效围压 p' 的比值为孔压比 R_u 。具有不同初始剪应力比 SSR 的饱和粉土土样的孔压比 R_u 与循环振次 N 的关系如图 9 所示。可以看出, 随着循环剪应力比 CSR 的增大, 具有相同 SSR 的饱和粉土土样达到双幅剪应变 γ_{DA} 或累积塑性应变 $\gamma_p = 7.5\%$ 时的循环振次 N_f 大幅减小, 且孔压比的发展模式与 SSR 值有关。当 $SSR \leq 0.1$ 时, 孔压比的发展模式随着 CSR 的增加由“快—平稳—急剧”的增长模式向“快—平稳”的增长模式转变, 这种孔压比发展转变的模式与文献 [17] 关于南京细砂的试验结果类似。当 $SSR > 0.1$ 时, 孔压比初期增长很快, 最终趋于平稳, 呈现“快—平稳”的增长模式。

SSR 的大小对孔压比的初期增长速度和最终稳定值均有影响, 且 SSR=0 时孔压比的初期增长速度明显低于 SSR $\neq 0$ 时孔压比的初期增长速度。从图 9 (a) 可知, 当 CSR=0.1 时, 孔压比的初期增长速度随着 SSR 的增大而加快; 当 CSR=0.15, 0.20 时, 孔压比的初期增长速度在 $\tau_{\min}=0$ 时有明显的降低, 随后再继续增大, 如图 9 (b)、(c) 所示。另外, 从图 9 中还可以看出, 当 $\tau_{\min}\leq 0$ 时, 孔压比逐步增大, 最终接近于 1.0, 即孔压可以到达初始有效围压值; 当 $\tau_{\min}>0$ 时, 孔压比逐步增大, 但不能达到 1.0, 即孔压小于初始有效围压值。

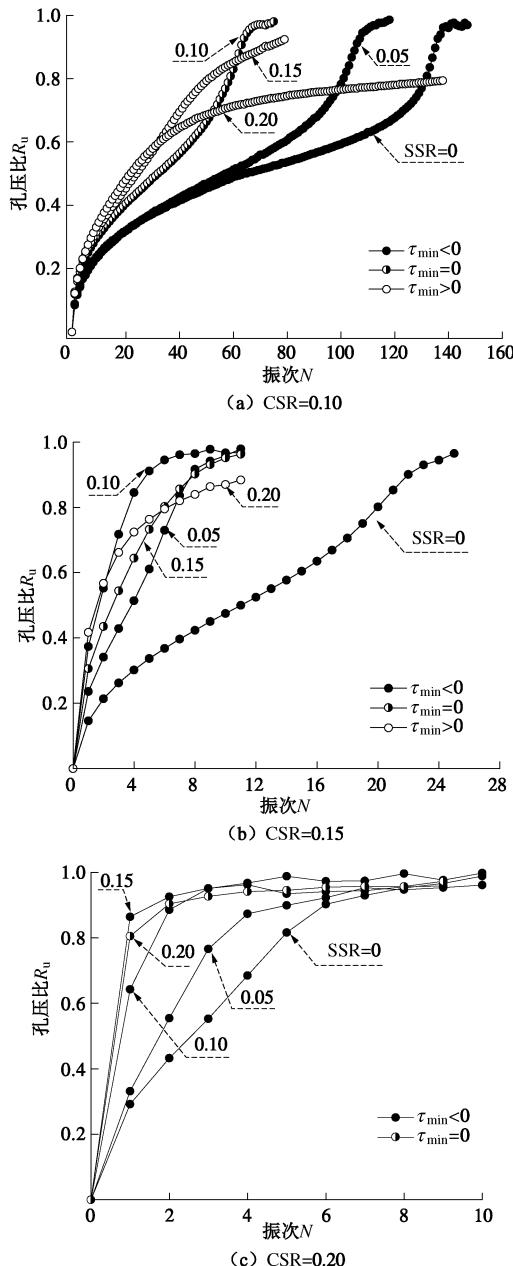


图 9 土样的初始剪应力比、孔压比和循环振次的关系曲线

Fig. 9 Relationship among initial static shear stress ratio, pore pressure ratio, and number of cycles under different cyclic stress ratios

图 10 给出了土样双幅剪应变 γ_{DA} 或累积塑性应变 $\gamma_p=7.5\%$ 时的孔压比 R_{uf} 。可以看出, 当 $SSR\leq 0.1$ 时, 不同的 CSR 作用下土样达到双幅剪应变 $\gamma_{DA}=7.5\%$ 时的 R_{uf} 约为 0.95; 而当 $SSR>0.1$ 时, 呈现出 R_{uf} 随 SSR 值的增大而减小、随 CSR 值的减小而减小的发展趋势。

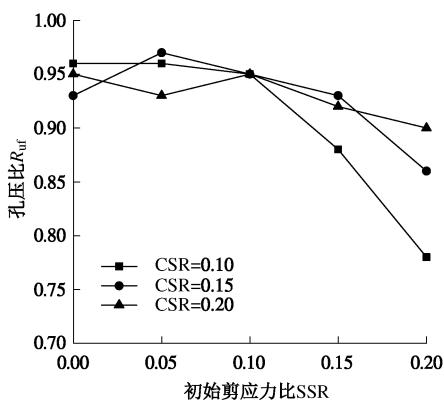


图 10 土样在不同循环剪应力比作用下破坏孔压比与初始剪应力比的关系

Fig. 10 Relationship between pore pressure ratio and initial static shear stress ratio of soil samples under different cyclic stress ratios

3 结 论

(1) 根据循环扭剪试验, 得到不同初始剪应力和循环剪应力作用下饱和粉土的应力应变关系和有效应力路径, 可分为三种应力状态: $\tau_{\min}<0$, $\tau_{\min}=0$ 和 $\tau_{\min}>0$ 。当 $\tau_{\min}\leq 0$ 时, 饱和粉土的破坏模式为循环液化; 当 $\tau_{\min}>0$ 时, 其破坏模式为过大的累积应变。

(2) 根据饱和粉土的破坏模式, 将双幅剪应变 $\gamma_{DA}=7.5\%$ 或者累计塑性应变 $\gamma_p=7.5\%$ 作为粉土破坏的标准。饱和粉土的循环强度随着初始剪应力比由 0 增加到 0.20 的过程中, 呈先减小后增大的规律变化, 当初始剪应力比 $SSR=0.1\sim 0.15$ 时, 循环强度最低。

(3) 当初始剪应力比 $SSR\leq 0.1$ 时, 孔隙水压力发展模式随着循环剪应力比的增加由“快—平稳—急剧”的增长模式向“快—平稳”的增长模式转变, 当 $SSR>0.1$ 时, 孔隙水压力呈现“快—平稳”的增长模式。当 $\tau_{\min}\leq 0$ 时, 饱和粉土的孔压可以达到初始有效围压而发生液化; 而 $\tau_{\min}>0$ 时, 土样产生大变形, 孔压仍达不到初始有效围压, 不会发生液化现象。

参 考 文 献:

- [1] YOSHIMI, Y, OH-OKA, H. Influence of degree of shear stress reversal on the liquefaction potential of saturated sand[J]. Soils and Foundations, 1975, 15(3): 27 - 40.
- [2] SEED H B. Earthquake-resistant design of earth dams[C]//

- Proceedings of the Symposium on Seismic Design of Earth Dams and Caverns. New York, 1983: 41 - 64.
- [3] VAID Y P, CHERN J C. Cyclic and monotonic undrained response of saturated sands[C]// Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions. ASCE, 1985: 120 - 147.
- [4] SEED R B, HARDER L F. SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength[C]// Proceedings of H.B. Seed Memorial Symposium. California: University of California Berkeley, 1990: 351 - 376.
- [5] YANG J, SZE H Y. Cyclic behaviour and resistance of saturated sand under non-symmetrical loading conditions[J]. Géotechnique, 2011, **61**(1): 59 - 73.
- [6] SIVATHAYALAN S, HA D. Effect of initial static shear stress on the cyclic resistance of sands in simple shear loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(10): 1471 - 1484.
- [7] CHIARO G, KOSEKI J, SATO T. Effects of initial static shear on liquefaction and large deformation properties of loose saturated Toyoura sand in undrained cyclic torsional shear tests[J]. Soils and Foundations, 2012, **52**(3): 498 - 510.
- [8] 王余庆, 袁芳, 韩清宇, 等. 预测轻亚粘土液化势的统计公式[J]. 岩土工程学报, 1980, **2**(3): 103 - 112. (WANG Yu-qing, LUAN Fang, HAN Qing-ya, et al. Explorations of liquefaction problems of saturated sands[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1980, **2**(3): 103 - 112. (in Chinese))
- [9] 石兆吉, 郁寿松, 王余庆, 等. 饱和轻亚黏土地基液化可能性判别[J]. 地震工程与工程振动, 1984, **4**(3): 71 - 82. (SHI Zhao-ji, YU Shou-song, WANG Yu-qin, et al. Prediction of liquefaction potential of saturated clayey silt[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1984, **4**(3): 71 - 82. (in Chinese))
- [10] 刘恢先. 唐山大地震震害(第一册)[M]. 北京: 地震出版社, 1989. (LIU Hui-xian. The Tangshan Great Earthquake in 1976[M]. Beijing: Earthquake Press, 1989. (in Chinese))
- [11] GBJ11—89 建筑抗震设计规范[S]. 1989. (GBJ11-89 Code for seismic design of buildings[S]. 1989. (in Chinese))
- [12] HYDE A F, HIGUCHI T, YASUHARA K. Liquefaction, cyclic mobility, and failure of silt[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(6): 716 - 735.
- [13] 沈扬, 张朋举, 闫俊, 等. 主应力轴旋转下小偏压固结密实粉土崩塌特性及孔压模型研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(9): 2561 - 2568. (SHEN Yang, ZHANG Peng-ju, YAN Jun, et al. Collapse characteristics and unified pore water pressure model of slightly anisotropically consolidated dense silt under principal stress axis rotation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(9): 2561 - 2568. (in Chinese))
- [14] SAĞLAM S, BAKIR B S. Cyclic response of saturated silts[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, **61**: 164 - 175.
- [15] HYODO M, MURATA H, YASUFUKU N, et al. Undrained cyclic shear strength and residual shear strain of saturated sand by cyclic triaxial tests[J]. Soils and Foundations, 1991, **31**(3): 60 - 76.
- [16] 牛建新, 汪闻绍. 循环扭剪试验中饱和砂土的某些动力特性[J]. 水利学报, 1994(5): 77 - 83. (NIU Jian-xin, WANG Wen-shao. Some dynamic properties of saturated sands with torsional shear apparatus[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(5): 77 - 83. (in Chinese))
- [17] 王炳辉, 陈国兴. 循环荷载下饱和南京细砂的孔压增量模型[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(2): 188 - 194. (WANG Bing-hui, CHEN Guo-xing. A pore water pressure increment model for saturated nanjing fine sand subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(2): 188 - 194. (in Chinese))