

DOI: 10.11779/CJGE2021S2045

# 不同固结度下原状软土先动后静强度特性

卢 渊<sup>1, 2</sup>, 陈栋格<sup>8</sup>, 陈 健<sup>\*1, 2, 3, 4, 5, 6</sup>, 余 颂<sup>7</sup>, 黄珏皓<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 付晓东<sup>1, 2</sup>, 马 超<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 湖北省环境岩土工程重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 岩土力学与工程国家重点实验室宁波工程学院工程软土实验中心,  
浙江 宁波 315211; 5. 中国-巴基斯坦地球科学研究中心, 伊斯兰堡 巴基斯坦; 6. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心,  
湖北 武汉 430063; 7. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430050; 8. 云南省滇中引水工程有限公司, 云南 昆明 650051)

**摘 要:** 经历动荷载作用后的软土在一段时间后处于完全固结和未固结的中间状态, 该状态可用振后固结度的概念进行描述。当前, 考虑振后固结度对土体振后强度特性影响的研究较少。因此, 通过开展一系列动、静三轴试验, 对珠江入海口原状软土的振后强度特性进行研究, 重点分析了初始固结围压、循环应力比及振后固结度的影响。试验结果表明: 不同条件下土体应力应变曲线的变化趋势相似; 土体的振后抗剪强度随着初始围压、循环应力比及振后固结度的增大而增加。其中, 当固结围压为 20 kPa, 振后固结度从 0% 增加到 100% 时, 抗剪强度从 20.2 kPa 增加到 33.0 kPa; 对于振后完全固结的试样而言, 当固结围压从 20 kPa 增加到 60 kPa 时, 对应的抗剪强度从 33.0 kPa 增加到 39.5 kPa。另一方面, 存在一临界循环应力比, 在该循环应力比作用下, 振后土体抗剪强度与相同围压条件下未经历循环荷载作用的土体抗剪强度基本一致。

**关键词:** 原状软土; 循环荷载; 初始围压; 固结度; 循环应力比; 振后强度特性

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0189-04

**作者简介:** 卢 渊(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事软土动静力学特性及随机场在隧道工程的应用研究。E-mail: 462488580@qq.com。

## Post-cyclic strength behaviors of undisturbed soft soils with different degrees of reconsolidation

LU Yuan<sup>1, 2</sup>, CHEN Dong-ge<sup>8</sup>, CHEN Jian<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup>, YU Song<sup>7</sup>, HUANG Jue-hao<sup>1, 2, 3, 4</sup>, FU Xiao-dong<sup>1, 2</sup>, MA Chao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hubei Key Laboratory of Geo-Environmental Engineering, Wuhan 430071, China; 4. The Soft Soil Research Center in Ningbo University of Technology, State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Ningbo 315211, China; 5. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, Islamabad, Pakistan; 6. National-Local Joint Engineering Research Center of Underwater Tunneling Technology, Wuhan 430063, China; 7. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Wuhan 430050, China; 8. Central Yunnan Provincial Water Diversion Project Co., Ltd., Kunming 650051, China)

**Abstract:** The soft soil after cyclic loading is often in an intermediate state between unconsolidated and fully reconsolidated after a period of time, which can be described by the concept of degree of reconsolidation. At present, there are few studies considering the effects of different degrees of reconsolidation on the post-cyclic strength behaviors of soils. Therefore, aseries of dynamic and static triaxial tests are carried out to study the post-cyclic strength behaviors of undisturbed soft soils at the Pearl River Estuary. The effects of the initial consolidated confining pressure, cyclic stress ratio and different degrees of reconsolidation on the post-cyclic strength behaviors of soils are analyzed. The test results show that the variation trends of stress-strain curves under different conditions are similar. The post-cyclic shear strength of soils increases with the increase of the initial confining pressure, cyclic stress ratio and degree of reconsolidation. When the confining pressure is 20 kPa and the degree of reconsolidation increases from 0 % to 100 %, the shear strength increases from 20.2 to 33.0 kPa. For the fully reconsolidated specimens after cyclic loading, when the confining pressure increases from 20 to 60 kPa, the corresponding shear strength increases from 33.0 to 39.5 kPa,

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52079135); 国家自然科学基金青年项目(51909259); 中国科学院青年创新促进会项目(2021325)

收稿日期: 2021-08-16

\*通信作者(E-mail: jchen@whrsm.ac.cn)

respectively. On the other hand, there is a critical cyclic stress ratio, at which the post-cyclic shear strength basically equal to that of soils without cyclic loading under the same confining pressure.

**Key words:** undisturbed soft soil; cyclic loading; confining pressure; degree of reconsolidation; cyclic stress ratio; post-cyclic strength behavior

## 0 引言

近年来,国内外学者针对经历循环荷载历史后土体的剪切特性进行了大量研究<sup>[1-5]</sup>。一般来说,循环荷载会使土体的超孔隙水压力增大,平均有效应力降低,从而导致土体的循环后强度降低。王淑云等<sup>[1]</sup>针对重塑粉质黏土,在不同围压下进行了一系列静三轴和动-静三轴不排水试验,发现粉质黏土的振后不排水强度衰减程度取决于动载引起的动应变和孔压值;郑刚等<sup>[2]</sup>认为原状土样的振后不排水抗剪强度显著衰减,而重塑土的抗剪强度变化不甚明显;Moses 等<sup>[3]</sup>发现土体的振后不排水强度随循环荷载幅值的增加而减小;Yasuhara 等<sup>[5]</sup>研究了重塑 Ariake 黏土的循环后剪切特性,发现循环荷载作用后土体累积孔压可以很好地评价振后不排水剪切强度,并提出了预测土体振后抗剪强度的经验模型。

然而,经历循环荷载作用后的土体往往处于未固结和完全固结的中间状态,该状态可用振后固结度这一概念进行描述。目前针对原状软土在不同振后固结度条件下的剪切特性研究较少。因此,有必要针对不同振后固结度下的软土振后剪切特性进行研究。本文选取珠江入海口原状软土,通过一系列的动-静三轴试验,分析了初始围压,循环应力比以及振后固结度对土体振后剪切特性的影响,以期加深对软土振后静力特性的理解,为工程设计提供试验基础。

## 1 土体试样和试验方案

### 1.1 土样基本物理力学特性

试验选取珠江入海口原状软土为研究对象,土壤呈深灰色,取土深度为 0~7 m。依据《土工试验规程(GB/T 50123—2019)》获得土体的基本物理力学指标和土体的粒径分布曲线分别见表 1 和图 1 所示。

### 1.2 试验方案

通过薄壁取土器进行现场取土,并将原状土样保存在恒温恒湿箱中。按照《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》的要求,将土体制成直径 38 mm,高 76 mm 的原状试样,并采用真空饱和及反压饱和法对试样进行饱和。首先对所有圆柱试样进行真空饱和,然后将试样置于压力室内进行反压饱和,当  $B$  值达到 0.95 以上时,可认为土体已经饱和。随后,对试样施加一定的固结压力,进行等向固结,当试样排水体积

速率小于  $100 \text{ mm}^3/\text{h}$  时,认为土样固结完成。为研究有效固结围压对振后强度的影响,本次试验中选取有效固结围压分别为 20, 40, 60 kPa。

表 1 原状软土基本物理力学指标值

Table 1 Indices of basic physical and mechanical properties of undisturbed soft soils

物理力学特性	取值
天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.54~1.79
含水率 $w/\%$	38.3~69.1
孔隙比 $e$	1.12~1.91
相对质量密度 $G_s$	2.71
液限 $w_L/\%$	38.5~61.8
塑限 $w_P/\%$	19.4~28.0
塑性指数 $I_P$	19.1~33.8
渗透系数 $K/(10^{-7}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	8.79~10.80
压缩系数 $a_v/\text{MPa}^{-1}$	0.48~1.15
侧压力系数 $K_0$	0.44

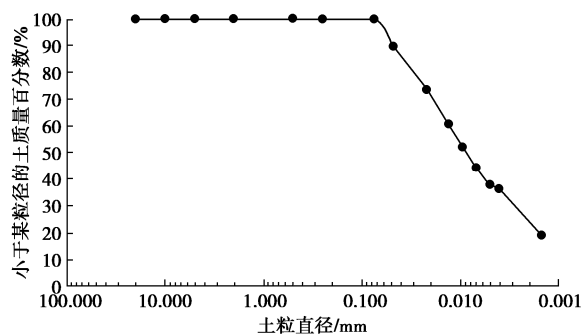


图 1 粒径分布曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve

对固结完成后的土体在不排水状态下开展循环三轴试验,并采用 Sakai 等<sup>[6]</sup>提出的循环应力比 CSR 描述循环偏应力大小,即

$$\text{CSR} = q/2p'_0 = q/2\sigma'_3, \quad (1)$$

式中,  $q$  为循环偏应力幅值,  $p'_0$  为固结完成后的有效围压。为研究 CSR 对振后土体强度的影响,在围压为 60 kPa 下, CSR 值分别取 0.08, 0.17, 0.25, 0.33。循环轴向偏应力采用半正弦波形,频率为 0.1 Hz,且循环振次为 1000 次。

对振动后的试样再次进行固结过程,并采用振后固结度这一概念描述振后土体固结程度。试验过程中为得到不同振后固结度的土体,可通过向振后试样施加不同的反压。具体为:向经历循环荷载作用后的土体施加一定的反压  $p_u$ ,此时,振后土体在一定围压作用下进行固结,振动过程中产生的超孔隙水压力将逐

渐降低直至与反压相等。因此, 振后不同固结度  $U_r$  可通过下式计算得到,

$$U_r = 1 - \frac{p_u}{(\Delta u)_{cy}}, \quad (2)$$

式中,  $p_u$  为再固结过程中施加在试样上的反压,  $(\Delta u)_{cy}$  为振动过程中产生的超孔隙水压力。

当试样再次固结完成后, 对土体进行三轴固结不排水剪切试验。其中, 剪切过程中均采用应变控制, 剪切速率为 0.1%/min。当应变达到 20%时, 试验结束。对于经历和未经历循环荷载作用的土体而言, 若静力剪切过程中应力应变曲线出现峰值点, 其不排水抗剪强度为峰值偏应力的 1/2; 若未出现峰值点, 则土体不排水抗剪强度取 20%应变处对应偏应力的 1/2。整个试验方案如表 2 所示, 其中 ST-20, ST-40 和 ST-60 为未经历循环荷载作用的土体在不同围压条件下的静三轴试验。经历和未经历循环荷载作用的土体强度用  $S_u$  表示。

表 2 试验方案

Table 2 Test schemes

试样 编号	$p'_0$ /kPa	$q^{ampl}$ /kPa	CSR	循环 次数	$U_r$ /%	$S_u$ /kPa
U01	20	10	0.25	1000	0	20.2
U02	20	10	0.25	1000	25	24.4
U03	20	10	0.25	1000	75	22.8
U04	20	10	0.25	1000	100	33.0
U05	40	20	0.25	1000	100	40.4
U06	60	30	0.25	1000	100	39.5
U07	60	10	0.08	1000	100	32.7
U08	60	20	0.17	1000	100	31.5
U09	60	40	0.33	1000	100	42.9
ST-20	20	—	—	—	—	28.5
ST-40	40	—	—	—	—	33.4
ST-60	60	—	—	—	—	33.5

2 试验结果

2.1 固结围压对振后土体强度的影响

图 2 展示了循环荷载后完全固结试样在不同围压下的偏应力 - 应变曲线。其中,  $CSR=0.25$ ,  $U_r=100\%$ 。可以看出, 不同围压下的  $q-\varepsilon$  曲线变化趋势相同。当应变较低时, 应力在小应变范围内迅速增加。随着应变的增加, 应力增速放缓, 当轴向应变为 20%左右时, 偏应力趋于稳定。不同围压下完全固结的振后试样强度大于相同围压无循环荷载作用历史的土体静强度。例如, 当围压为 60 kPa 时, 试样的振后强度比未经历循环荷载作用下的强度大 6.0 kPa。此外, 对比发现, 实验条件相同的情况下, 振后土体的抗剪强度随着围压的增加基本呈增大趋势。具体为完全固结的振后试样在初始固结围压为 20, 40, 60 kPa 时, 对应的抗剪

强度分别为 33.0, 40.4, 39.5 kPa。

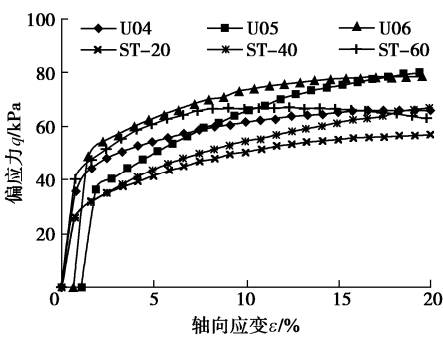


图 2 不同围压下振后土体的偏应力 - 应变曲线

Fig. 2 Post-cyclic deviator stress-strain curves under different confining pressures

2.2 循环应力比对振后土体强度的影响

图 3 展示了不同循环应力比循环荷载作用后完全固结试样 ( $U_r=100\%$ ) 的偏应力 - 应变曲线。其中, 初始固结围压为 60 kPa。可以看出, 初始应变随着 CSR 的增加而增加。当 CSR 值分别为 0.08, 0.17, 0.25 和 0.33 时, 对应的初始应变分别为 0.24%, 0.43%, 0.66%, 4.27%。当  $CSR>0.25$  时, 试样的振后剪切强度明显大于静态剪切强度 (表 2)。相较于未经历循环荷载的土体静强度, 当  $CSR=0.08$  时, 振后土体强度增幅为 -0.8 kPa; 当  $CSR=0.33$  时, 振后土体强度增幅为 9.4 kPa。同样地, 土体振后剪切强度随着 CSR 的增大而增大。当 CSR 从 0.08 增大到 0.33 时, 土体振后剪切强度从 32.7 kPa 增大到 42.9 kPa。

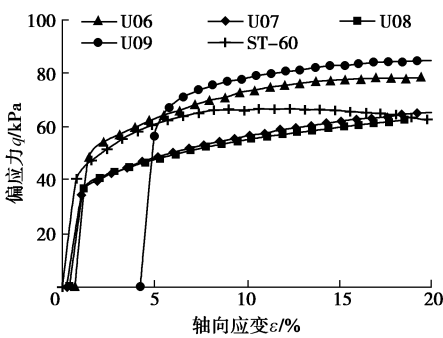


图 3 不同循环应力比下振后土体的偏应力 - 应变曲线

Fig. 3 Post-cyclic deviator stress-strain curves under different CSRs

2.3 振后固结度对振后土体强度的影响

图 4 为不同振后固结度下土体的偏应力 - 应变曲线。其中, 初始固结围压为 20 kPa,  $CSR=0.25$ 。通过与未经历动荷载的试样  $q-\varepsilon$  曲线对比发现,  $U_r$  在 75%~100%存在临界值, 使得振后土体强度等于相同围压下未经历动荷载作用的土体强度。当固结围压为 20 kPa, 固结度为 0%, 25%, 75%, 100%时, 抗剪强度分别为 20.2, 24.4, 22.8, 33.0 kPa。试验结果表明

土体的振后抗剪强度随  $U_r$  的增大而增加。

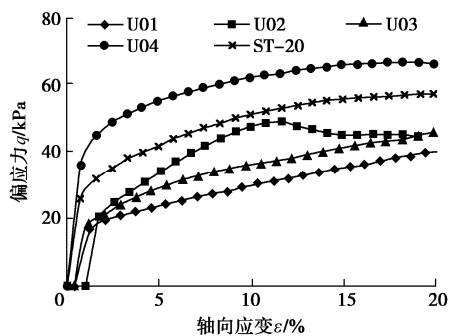


图 4 不同振后固结度下振后土体的偏应力 - 应变曲线

Fig. 4 Post-cyclic deviator stress-strain curves under different degrees of reconsolidation

### 3 结 论

本文通过对珠江入海口原状软土开展一系列动、静三轴试验，对其振后强度特性进行了研究。

(1) 经历循环荷载作用后的土体，不同因素影响下对应的偏应力 - 应变曲线变化趋势基本一致。不同固结围压影响下，振后完全固结试样的振后抗剪强度大于未经历动荷载土体静强度。另一方面，土体振后抗剪强度随初始固结围压的增大呈增加趋势。

(2) 当循环应力比大于 0.25 时，振后完全固结状态下土体剪切强度明显大于相同围压下未经历循环荷载作用的土体静态剪切强度。另一方面，振后完全固结的土体，其振后剪切强度随着循环应力比的增大而增加。

(3) 土体振后抗剪强度随振后固结度的增加而增大，且振后固结度存在某一临界值，使得土体的振后抗剪强度与相同围压条件下未经历循环荷载作用的土体抗剪强度基本一致。

### 参考文献:

- [1] 王淑云, 鲁晓兵, 赵 京, 等. 粉质黏土周期荷载后的不排水强度衰化特性[J]. 岩土力学, 2009, **30**(10): 2991 - 2995. (WANG Shu-yun, LU Xiao-bing, ZHAO Jing, et al. Post-cyclic loading undrained strength degradation characteristics of silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(10): 2991 - 2995. (in Chinese))
- [2] 郑 刚, 霍海峰, 雷华阳. 循环荷载后原状与重塑饱和粉质黏土不排水强度性状研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 400 - 408. (ZHENG Gang, HUO Hai-feng, LEI Hua-yang. Undrained strength characteristics of saturated undisturbed and remolded silty clay after cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(3): 400 - 408. (in Chinese))
- [3] MOSES G G, RAO S N, RAO P N. Undrained strength behaviour of a cemented marine clay under monotonic and cyclic loading[J]. Ocean Engineering, 2003, **30**(14): 1765 - 1789.
- [4] WANG Y Z, LEI J C, GONG X L, et al. Post-cyclic undrained shear behavior of marine silty clay under various loading conditions[J]. Ocean Engineering, 2018, **158**: 152 - 161.
- [5] YASUHARA K. Postcyclic undrained strength for Cohesive Soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **120**(11): 1961 - 1979.
- [6] SAKAI A, SAMANG L, MIURA N. Partially-drained cyclic behavior and its application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. Soils and Foundations, 2003, **43**(1): 33 - 46.

(编校: 胡海霞)