

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.03.002

# 桩-土界面残余强度影响因素分析

杨庆光<sup>1</sup>, 陈小巍<sup>2</sup>, 肖立权<sup>2</sup>, 柳雄<sup>1</sup>, 刘海媚<sup>1</sup>, 谭杰<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南省地质矿产勘查开发局四一六队, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 桩周土体因卸载或上部堆载使桩-土界面应力发生变化, 并导致桩-土界面峰值剪切强度受损而下降为残余强度。为研究法向应力、压实度、含水率及预压力等多因素对桩-土界面的残余强度影响, 利用自制的剪切试验装置对桩-土界面试件进行了剪切试验。试验结果表明: 剪切应力达峰值强度后出现软化, 法向应力越大软化越明显。残余强度随压实度和法向应力提高而增大, 随含水率的提高先增后减, 且在最优含水率附近达到最大值; 在不同的法向应力情况下, 受含水率和压实度的影响下, 残余强度表现为山峰型, 在最优含水率附近和压实度最大处达峰值, 且预压对法向应力较小情况下残余强度提高比例更高。对不同压实度下的法向应力-残余强度、法向应力-残余应力比进行了讨论, 得知有无预压界面残余强度与法向应力存在显著的线性关系, 符合莫尔-库伦剪切破坏准则, 不同压实度下残余应力比均随着法向应力的增长而衰减, 而有预压影响时, 这种现象会更明显。

**关键词:** 剪切试验; 残余强度; 桩-土界面; 最优含水率; 预压

**中图分类号:** TU411

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2022)03-0009-07

**引文格式:** 杨庆光, 陈小巍, 肖立权, 等. 桩-土界面残余强度影响因素分析[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(3): 9-15.

## Analysis of Influencing Factors of the Residual Strength of the Pile-Soil Interface

YANG Qingguang<sup>1</sup>, CHEN Xiaowei<sup>2</sup>, XIAO Liquan<sup>2</sup>, LIU Xiong<sup>1</sup>, LIU Haimei<sup>1</sup>, TAN Jie<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. No.416 Team of Hunan Provincial Geology and Mineral Exploration Bureau, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of the fact that the stress of the pile-soil interface changes due to unloading or upper stacking load of soil around the pile, which leads to the damage of the peak shear strength of the pile-soil interface and decreases to the residual strength, a shear test has been carried out by the self-made shear device of the research group so as to study the effects of normal stress, compactness, moisture content and preloading on the residual strength of pile-soil interface. The results show that a softening effect can be observed with the shear stress reaching the peak strength. The greater the normal pressure is, the more pronounced this softening effect will be. The residual strength will be improved with the increase of normal stress and degree of compaction of soil, showing an initial increasing and a subsequent decreasing trend with the increase of water content, until finally reaching the maximum near the optimal water content. Under different normal pressures, due to the influence of moisture content and degree of compaction, the residual strength is characterized with a peak distribution, reaching the maximum near the optimal moisture content and the maximum at the maximum degree of compaction. When the normal pressure of preloading is relatively small, the

收稿日期: 2021-07-10

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ6080); 湖南工业大学大学生创新创业训练计划基金资助项目(2020068); 湖南工业大学与厦门合兴包装印刷股份有限公司联合资助大学生创新创业训练计划项目(2021103)

作者简介: 杨庆光(1979-), 男, 江西黎川人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为桩-土相互作用理论,

E-mail: yqg1210@hut.edu.cn

proportion of residual strength will be higher. Based on a study on the normal stress residual strength and normal stress residual stress ratio under different degrees of compaction, it is concluded that there is a significant linear relationship between the residual strength, the residual strength after considering preloading and the normal stress. The shear failure of the interface conforms to the Mohr Coulomb shear failure criterion. Under is different degrees of compaction, the residual stress ratio decreases with the increase of normal stress, meanwhile the decrease more is obvious under the influence of preloading.

**Keywords:** shear strength testing; residual strength; pile-soil interface; optimal water content; preloading

## 0 引言

土体与结构接触面之间的相互作用至今仍然是岩土工程中的一个难点, 该类问题研究具有非常重要的理论和实践意义。自从 J. G. Potyondy<sup>[1]</sup> 通过大量直剪试验后指出粗糙度、法向应力、含水率等是影响接触面剪切强度的主要因素以来, 诸多学者就其力学特性影响因素已经进行了大量的研究。其中胡黎明等<sup>[2]</sup> 采用改进直剪仪, 针对不同粗糙度下接触面研究成果, 提出临界相对粗糙度能够较好地描述桩土界面相互作用关系。金子豪等<sup>[3]</sup> 根据现场实测的成孔孔径与深度关系, 建立了混凝土结构尺寸凹凸分布的频率统计方程, 得到一种粗糙度计算新方法。赵春风等<sup>[4-5]</sup> 采用大型直剪仪, 对黏性土-混凝土界面进行了弹塑性分析, 研究了法向应力变化历史对结构面特性的影响。贺炜<sup>[6]</sup>、王永洪等<sup>[7]</sup> 利用直剪仪, 研究了含水率与结构面-土界面剪切强度间的关系, 找到了随土含水率的增加, 界面剪切强度逐渐降低的规律。此外, 杨有莲<sup>[8]</sup>、彭凯等<sup>[9]</sup> 分别利用环剪试验和单剪试验, 对带泥皮接触面的力学特性开展过相应的研究。

桩-土接触问题力学特性研究有如下方面: 刘希亮等<sup>[10]</sup> 通过试验发现, 高压下界面上的剪切残余强度与法向压力大小有关。李永辉等<sup>[11]</sup> 通过大型界面剪切试验, 发现泥皮的润滑作用对界面摩擦角大小有明显的影。桩土界面的残余强度指桩-土界面出现破坏之后保留的残余变形与抵抗外荷载的能力, 其取值大小在施工中扮演着十分重要的角色。张明义等<sup>[12]</sup> 通过制造出不同的混凝土板表面粗糙度来模拟静压管桩的界面, 研究发现管桩桩-土界面孔压占总法向应力 10% 左右。此外, 许成顺等<sup>[13]</sup> 通过室内试验, 对比分析了 17 种不同黏性土的残余强度。成浩等<sup>[14]</sup> 基于许成顺等<sup>[13]</sup> 的研究, 对多个粗糙度下结构面残余强度的影响因素开展了研究。陈荣刚等<sup>[15]</sup> 为了研究含水率与土质条件等因素对摩擦桩侧摩阻力的影响, 通过接触面剪切试验装置, 对摩擦桩

的侧摩阻力分布规律及其影响因素展开研究。王永洪等<sup>[16]</sup> 通过自制的大型恒刚度直剪仪对非饱和黏性土进行桩-土界面剪切试验, 探讨了非饱和黏性土桩-土界面剪切特性及受黏性土饱和度的影响规律。

在工程中, 常常出现施工不当或基坑开挖引起桩身回弹, 而采取复压的措施往往导致桩-土界面出现损伤, 甚至破坏, 此时上部荷载主要由桩-土界面的残余强度来承担。已有研究大都利用环剪或者直剪试验手段, 围绕着桩-土界面峰值强度问题展开。但是, 现有的环剪或者直剪剪切装置均存在剪切过程中剪切面积逐渐减小、应力分布不均匀等问题, 不利于揭示桩-土界面的剪切特性。本文利用自制的桩-土接触面剪切装置, 通过室内模型试验, 对桩-土接触面残余强度发挥机制, 以及影响残余强度发挥的因素开展试验研究。

## 1 试验概况

### 1.1 试验装置

本文采用课题组自制的桩-土界面剪切试验装置<sup>[17]</sup> 开展了室内试验研究, 界面剪切试验装置如图 1 所示。

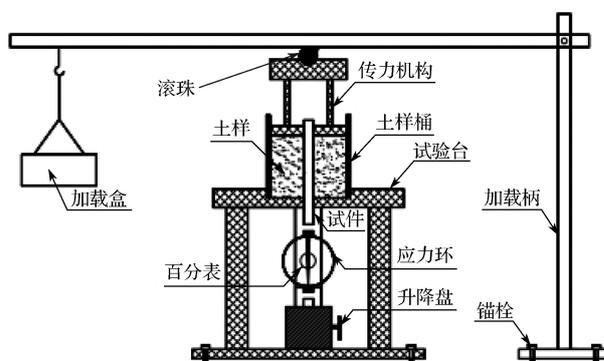


图 1 界面剪切试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interface shear test device

该装置由剪切组件、加载组件、传力组件和测量组件 4 部分构成, 首先通过特定的制样工具, 将土和桩安装至剪切组件中; 其次通过加载组件对试验土

体表面施加均布荷载(对试样表面施加法向应力);再次通过手动剪切组件对桩土界面施加剪切荷载;最后通过测量组件测量量力钢环变形和桩体变形,确定界面剪切应力的变化和剪切位移,绘制出界面剪切应力-位移全过程曲线。

1.2 试验材料

本试验土体取自某深基坑中典型黏性土,通过风干、破碎、过筛等工序处理后,获得试验土体物理力学参数如表1。

表1 试验土体基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of test soil

黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	天然含水率 $w/\%$	最优含水率 $w_p/\%$	最大干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$
23.97	35.15	17.38	12.11	2.20	39.5	20

根据张明义等<sup>[18]</sup>得出原状土与重塑土的滑动摩擦试验特性基本一致的结论,本试验采用重塑土进行桩-土界面剪切试验,试验共配置了含水率分别为8%,12%,16%的土样。此外,综合考虑工程现场桩侧地基土压实度实际情况及实验室剪切试件土样压实度控制的问题,最后确定每个含水率分别制作压实度为60%,70%和80%的土样,并分别选择剪切试验法向压力为18.91,37.86,50.80,75.74 kPa,共制作72个试验土样(预压和不预压)。模型桩试件直径为30 mm,为确保剪切面积不变,长度取210 mm。桩身材料为P.O.42.5的普通硅酸盐水泥,水灰比为0.43:1。

1.3 试验方法与步骤

进行无预压剪切试验时,首先,将某深基坑中典型黏性土,通过风干、破碎、过筛等工序处理。通过土体三相换算确定每次填筑土量,确定击实控制标准,并分3次等质量填土和击实。装样完成2周后再进行剪切试验。通过手动方式,使升降盘上升,从而使量力钢环产生压缩变形,并推动模型桩,使桩-土出现相对位移,并通过百分表读数变化计算出推力大小,同时通过另一个百分表读数差确定桩-土相对位移。为考虑预压对界面剪切特性的影响,首先需选择一定压力大小对土体进行竖向预压,然后同无预压相同竖向加压方案界面剪切试验的结果进行比较。本次模型试验共计完成了36组无预压和36组有预压界面剪切试验。

2 试验结果与讨论

2.1 剪切应力-剪切位移曲线

图2为桩-土界面剪切强度随剪切变形变化的关系曲线图。

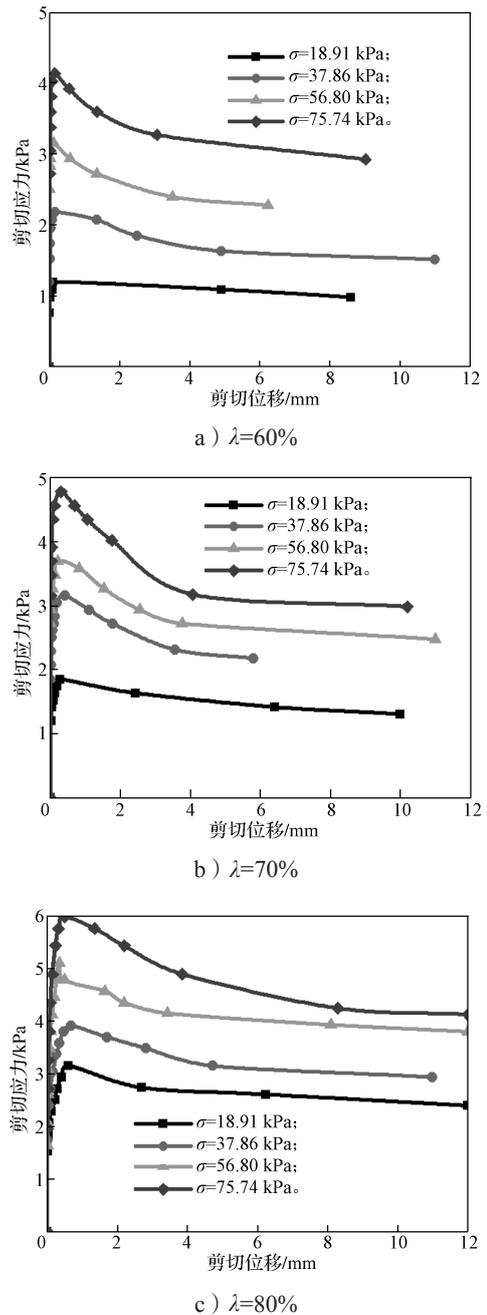


图2 桩-土界面剪切强度随剪切变形变化曲线

Fig. 2 Variation curve of shear strength of pile-soil interface with shear deformation

由图2可知,4种法向应力下曲线都表现为先快速达到剪切应力峰值,然后又缓慢下降的趋势,且法向应力越大,这种软化越明显。当 $\lambda=60\%$ 时,随法向应力的增加,对应的剪切应力降低,从0.217 kPa到1.210 kPa不等,但是随着压实度增大,这种软化现象逐渐减弱,并逐渐趋于稳定,达到剪切残余强度。从图2还可以看出,不同压实度情况下,剪切强度均表现出随法向应力增大而变大的现象。当 $\lambda=60\%$ 时,随法向应力的提高,界面剪切强度分别为1.195,2.173,3.150,4.128 kPa。

### 2.2 含水率、压实度对残余强度的影响

图3为不同法向应力和压实度下，界面剪切残余强度随含水率变化曲线。

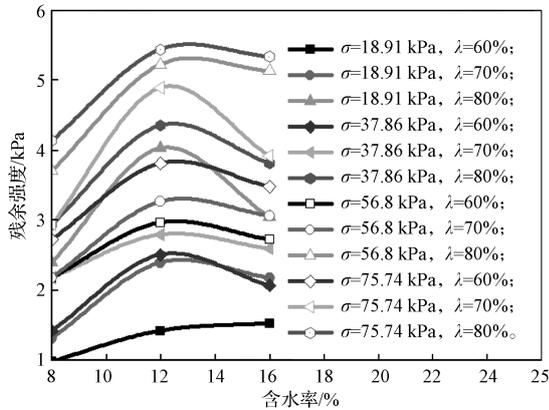


图3 桩-土界面剪切残余强度随着含水率变化曲线  
Fig. 3 Variation curve of residual shear strength of pile-soil interface with water content

由图3可知，界面残余强度随含水率增加先增后减，且增加速率略快于下降速率，并且在最优含水率处残余强度最高。当含水率和法向应力不变时，压实度越大，残余强度越高。当含水率和法向应力分别为12%和56.80 kPa时，压实度为60%，70%，80%对应的残余强度分别为2.95，3.25，5.21 kPa。受压实度影响，压实度越高，界面的颗粒强度越大，剪切时受剪切力影响越小，从而界面残余强度更高。

表2为本次试验中界面残余强度波动差值。由表可知，前三级法向应力时，低压实度变化引起界面残余强度波动值小于高压实度变化情况。反之，当法向应力为75.74 kPa时，低压实度变化引起界面残余强度波动值大于高压实度变化情况。

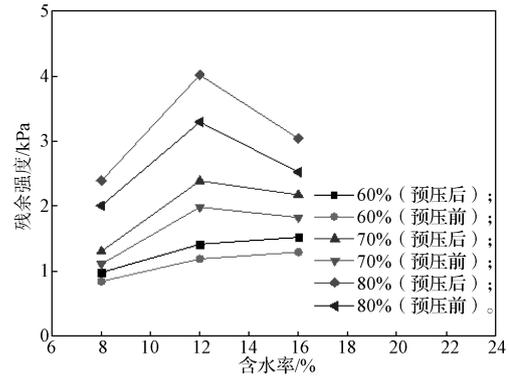
表2 桩-土界面残余强度波动差值

Table 2 Residual strength fluctuation differential values of pile-soil interface

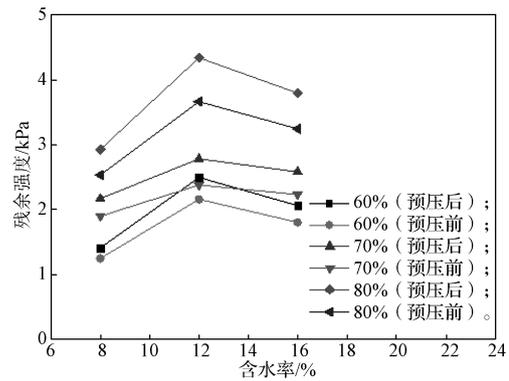
压实度变化范围	法向应力 /kPa			
	18.19	37.86	56.80	75.74
60%~70%	0.98	0.30	0.29	1.09
>70%~80%	1.63	1.96	1.56	0.54

### 2.3 预压对残余强度的影响

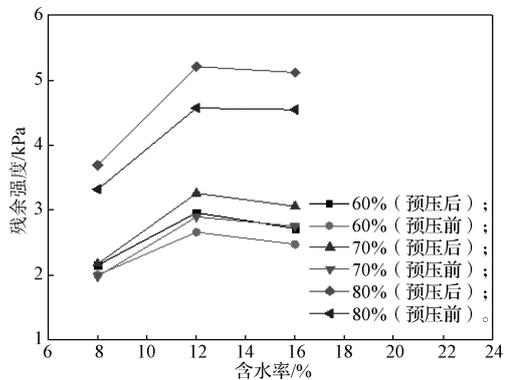
为考虑基坑开挖或外部地面堆载等作用对坑内外桩-土界面剪切特性的影响，本试验开展了45.83 kPa压力下的预压界面剪切试验，预压荷载施加1 h后立即卸载，并根据无预压加载和剪切方案开展界面剪切试验。图4为预压前后界面残余强度曲线图，据图4可知，在不同的法向应力情况下，受含水率和压实度的影响，残余强度均为山峰型，且在最优含水率附近处达到最大值，在压实度最大处达最大值。



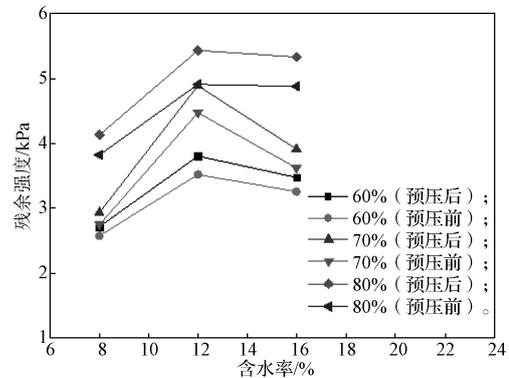
a)  $\sigma=18.91$  kPa



b)  $\sigma=37.86$  kPa



c)  $\sigma=56.80$  kPa



d)  $\sigma=75.74$  kPa

图4 预压前后桩-土界面残余强度随含水率变化曲线  
Fig. 4 Variation curve of residual strength of pile-soil interface with water content before and after preloading

图5 为预压前后界面残余强度提高比例曲线。

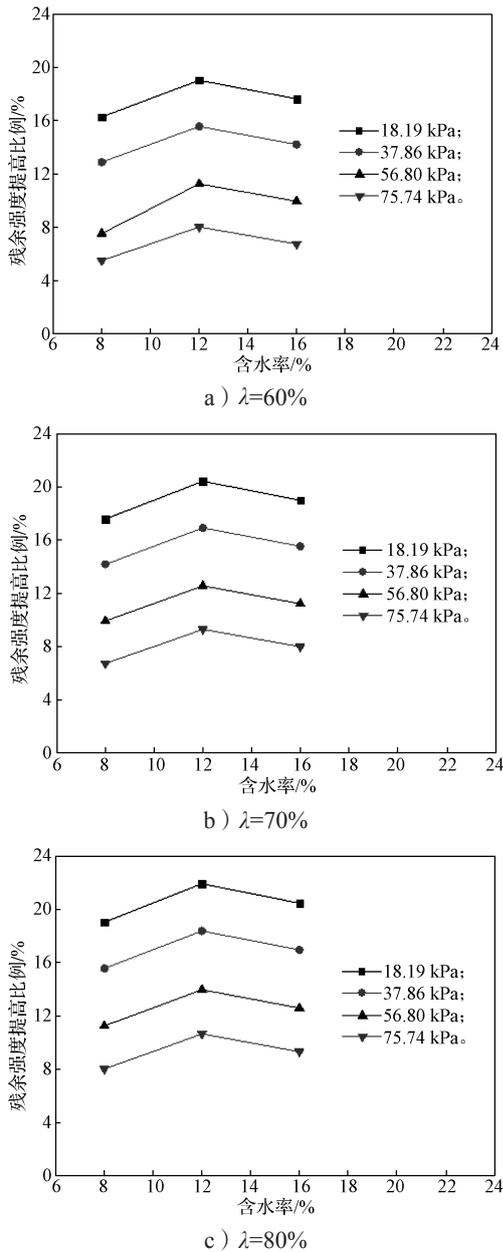


图5 预压前后桩-土界面残余强度提高比例随含水率变化曲线

Fig. 5 Curve of increasing proportion of residual strength of pile-soil interface with water content before and after preloading

由图5可知,不同压实度情况下,预压前后界面残余强度提高比例曲线均表现出先增大后降低的山峰型,且均表现出法向应力越小,提高比例越大的特点,充分表明预压对法向应力较小情况下残余强度提高比例更高。

2.4 对残余强度的讨论

2.4.1 剪切界面残余强度

图6为界面剪切残余强度随法向应力的变化散点图和拟合曲线图。从图中可以看出,压实度相同时,

界面残余强度随法向应力的增大而增大。从图中还可以看出,有无预压下界面的剪切破坏均可以采用莫尔-库伦(M-C)剪切破坏准则进行分析。即

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中:  $\tau$ 为界面剪切残余强度;  $\sigma$ 为法向应力;  $\varphi$ 为界面残余摩擦角;  $c$ 为界面残余黏聚力。

此外,由图6可知,压实度对界面残余黏聚力取值有明显的影响,压实度80%较压实度60%时界面残余黏聚力提高169%。当考虑预压影响时,由于土体压实度提高了土颗粒与结构表面的黏着或咬合作用,故界面残余黏聚力显著提升,而残余摩擦角均出现下降现象。

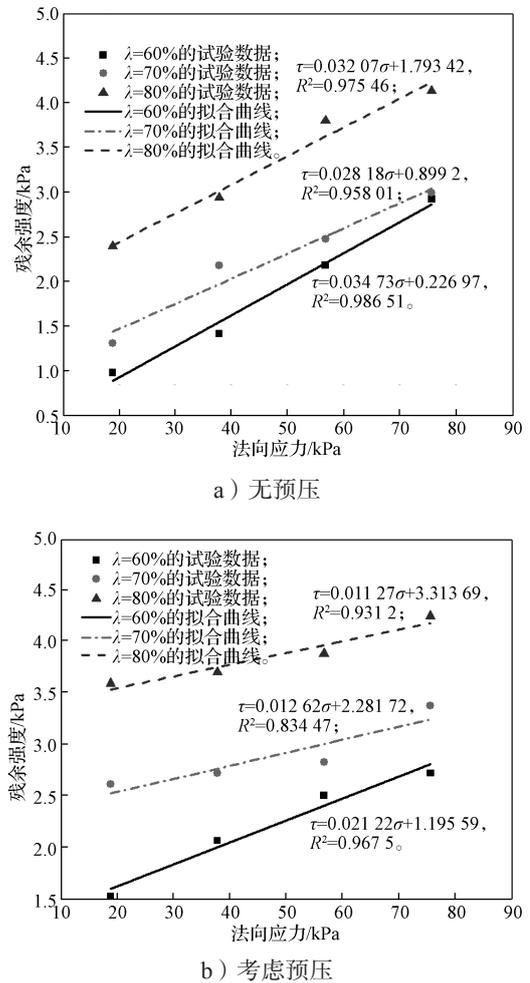


图6 不同压实度条件下的法向应力-残余强度关系图  
Fig. 6 Curves of shear residual strength versus normal stress with different values of compaction

2.4.2 残余应力比

定义残余强度与法向应力比值为界面残余应力比。图7为不同压实度下法向应力-残余应力比的关系曲线图。

由图7可知,不同压实度下,界面残余应力比表现为先急剧下降,后逐渐变缓的趋势,且压实度

越大,这种现象越明显。主要是由于无预压时,高压使桩-土界面土颗粒间相对位移引起能量耗散明显所致,而有预压情况下,土颗粒相对位移不明显,从而这种现象更为明显。

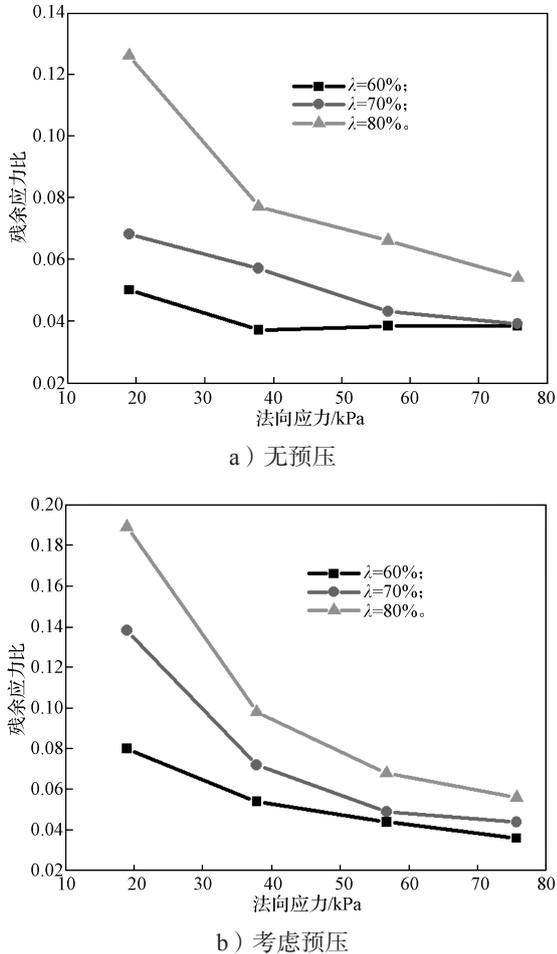


图7 不同压实度下界面法向应力-残余应力比关系曲线  
Fig. 7 Curves of residual stress ratio versus normal stress with different values of compaction

### 3 结论

1) 桩-土界面剪应力先迅速增大,达峰值后缓慢下降趋于稳定,且随法向应力提高呈软化加强的趋势;界面残余强度与压实度和法向应力呈现同向变化趋势,同含水率呈反向变化趋势,且在最优含水率附近达到最大值;

2) 在不同的法向应力情况下,受含水率和压实度的影响下,残余强度表现为山峰型,在最优含水率附近和压实度最大处达峰值,且预压对法向应力较小情况下残余强度提高比例更高;

3) 有无预压界面残余强度与法向应力存在显著的线性关系,符合莫尔-库伦(M-C)剪切破坏准则,不同压实度下,界面残余应力比表现为先急剧下降,

后逐渐变缓的趋势,且压实度越大,这种现象越明显。

### 参考文献:

- [1] POTYONDY J G. Skin Friction Between Various Soils and Construction Materials[J]. *Géotechnique*, 1961, 11(4): 339-353.
- [2] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(4): 431-435.  
HU Liming, PU Jialiu. Experimental Study on Mechanical Characteristics of Soil-Structure Interface[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 431-435.
- [3] 金子豪, 杨奇, 陈琛, 等. 粗糙度对混凝土-砂土接触面力学特性的影响试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 754-765.  
JIN Zihao, YANG Qi, CHEN Chen, et al. Experimental Study on Effects of the Roughness on Mechanical Behaviors of Concrete-Sand Interface[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 754-765.
- [4] 赵春风, 龚辉, 赵程, 等. 考虑法向应力历史的黏土-混凝土界面弹塑性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(4): 848-855.  
ZHAO Chunfeng, GONG Hui, ZHAO Cheng, et al. Elastoplastic Analysis of Interface Between Clay and Concrete Considering Effect of Normal Stress History[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(4): 848-855.
- [5] 龚辉, 赵春风, 陶帼雄, 等. 应力历史对黏土-混凝土界面剪切特性的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(8): 1712-1719.  
GONG Hui, ZHAO Chunfeng, TAO Guoxiong, et al. Research on Effect of Stress History on Shear Behavior of Interface Between Clay and Concrete[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(8): 1712-1719.
- [6] 贺炜, 文为, 孙淼. 非饱和土与混凝土界面摩擦特性试验[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 8(3): 28-32.  
HE Wei, WEN Wei, SUN Miao. Experimental Study of Shearing Behavior of Interface Between Unsaturated Soil and Concrete[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2011, 8(3): 28-32.
- [7] 王永洪, 张明义, 刘俊伟, 等. 基于非饱和黏性土桩土界面剪切特性试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(5): 1468-1474.  
WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, LIU Junwei, et al. Experimental Research on Shear Characteristics of Pile-Soil Interface in Unsaturated Clayey Soil[J]. *Chinese*

- Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5): 1468-1474.
- [8] 杨有莲,朱俊高,余挺,等.土与结构接触面力学特性环剪试验研究[J].岩土力学,2009,30(11): 3256-3260.  
YANG Youlian, ZHU Jungao, YU Ting, et al. Experimental Study of Mechanical Behaviour of Soil-Structure Interface by Ring Shear Test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3256-3260.
- [9] 彭凯,朱俊高,张丹,等.粗粒土与混凝土接触面特性单剪试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9): 1893-1900.  
PENG Kai, ZHU Jungao, ZHANG Dan, et al. Study of Mechanical Behaviors of Interface Between Coarse-Grained Soil and Concrete by Simple Shear Test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1893-1900.
- [10] 刘希亮,于广云,赵光思,等.高压下界面抗剪强度的试验研究[J].中国矿业大学学报,2003,32(1): 34-37.  
LIU Xiliang, YU Guangyun, ZHAO Guangsi, et al. Experimental Research on Shear Strength of Interface Under High Pressure[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(1): 34-37.
- [11] 李永辉,王卫东,黄茂松,等.超长灌注桩桩-土界面剪切试验研究[J].岩土力学,2015,36(7): 1981-1988.  
LI Yonghui, WANG Weidong, HUANG Maosong, et al. Experimental Research on Pile-Soil Interface Shear Behaviors of Super-Long Bored Pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1981-1988.
- [12] 张明义,白晓宇,高强,等.黏性土中桩-土界面受力机制室内试验研究[J].岩土力学,2017,38(8): 2167-2174.  
ZHANG Mingyi, BAI Xiaoyu, GAO Qiang, et al. Experimental Study on Interfacial Bearing Mechanism of Piles in Cohesive Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2167-2174.
- [13] 许成顺,王馨,杜修力,等.不同黏性土的残余强度及其抗剪强度指标特性研究[J].岩土工程学报,2017,39(3): 436-443.  
XU Chengshun, WANG Xin, DU Xiuli, et al. Experimental Study on Residual Strength and Index of Shear Strength Characteristics of Different Clay Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 436-443.
- [14] 成浩,陈晓斌,张家生,等.红黏土-混凝土结构接触面残余强度特性试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(9): 2458-2464.  
CHENG Hao, CHEN Xiaobin, ZHANG Jiasheng, et al. Experimental Research on Residual Shear Strength of Red Clay-Concrete Structure Interface[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(9): 2458-2464.
- [15] 陈荣刚,马晶,崔壮壮,等.含水率对桩-土界面剪切特性影响的试验研究[J].工业建筑,2020,50(11): 102-105, 31.  
CHEN Ronggang, MA Jing, CUI Zhuangzhuang, et al. Experimental Investigation into the Influence of Water Content on the Shear Characteristics of Pile Soil-Interface[J]. Industrial Construction, 2020, 50(11): 102-105, 31.
- [16] 王永洪,张明义,刘俊伟,等.基于非饱和黏性土桩土界面剪切特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(5): 1468-1474.  
WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, LIU Junwei, et al. Experimental Research on Shear Characteristics of Pile-Soil Interface in Unsaturated Clayey Soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5): 1468-1474.
- [17] 杨庆光,梁凌川,杨诒飞,等.填土中锚固体-土接触面剪切特性研究[J].岩土工程学报,2018,40(增刊2): 235-239.  
YANG Qingguang, LIANG Lingchuan, YANG Yifei, et al. Shear Characteristics of Anchoring Solid-Soil Interface in Filled Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 235-239.
- [18] 张明义,邓安福.桩-土滑动摩擦的试验研究[J].岩土力学,2002,23(2): 246-249.  
ZHANG Mingyi, DENG Anfu. Experimental Study on Sliding Friction Between Pile and Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(2): 246-249.

(责任编辑:申剑)