DOI:10.19789/j.1004-9398.2023.04.004
文献引用:王永洪,王鑫,李世强,等.考虑粗糙度影响的黏性土-混凝土界面剪切特性室内试验研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),2023,44(4):18-24. WANG Y H,WANG X,LI S Q,et al. Study on shear characteristics of clay-concrete interface by considering roughness[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition),2023,44(4):18-24.

考虑粗糙度影响的黏性土-混凝土界面剪切特性室内试验研究*

王永洪[1,2**],王 鑫[1],李世强[3],张 腾[1],王 军[3],张传通[3],李 勇[3]

(1. 青岛理工大学土木工程学院,山东 青岛 266033;2. 山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心,山东 青岛 266033;
3. 中建中新建设工程有限公司,山东 青岛 266109)

摘要:采用大型恒刚度桩-土界面直剪试验系统,对不同界面粗糙度条件下,施加不同法向应力,进行黏性土-混凝土桩-土界面直剪试验,分析界面抗剪强度及其参数(界面附着力、界面摩擦角),界面剪切破坏位移和界面剪切刚度。结果表明:随着混凝土表面粗糙度的增大,界面抗剪强度、界面摩擦角、界面剪切刚度系数和界面残余剪切应力均呈增大趋势,最大增幅达35.80%;而界面附着力随粗糙度的增大呈先减小后增大的趋势,增大幅度达23.70%。因此,桩-土界面的力学特性受粗糙度的影响,试验结果可为静压桩的工程实践提供借鉴与参考。

关键词:粉质黏土-混凝土;粗糙度;桩-土界面;抗剪强度特性
中图分类号:TU473 **文献标识码**:A

Study on shear characteristics of clay-concrete interface by considering roughness*

WANG Yonghong[1,2**], WANG Xin[1], LI Shiqiang[3], ZHANG Teng[1], WANG Jun[3], ZHANG Chuantong[3], LI Yong[3]

(1. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao Shandong 266033; 2. Collaborative Innovation Center for Engineering Construction and Safety of Blue Economic Zone, Qingdao Shandong 266033; 3. China State Construction Zhongxin Construction Engineering Co., Ltd, Qingdao Shandong 266109)

Abstract: Using the large-scale constant stiffness pile-soil interface direct shear test system, the direct shear test of cohesive soil-concrete pile-soil interface was carried out by applying different normal stresses under different interface roughness levels. The interface shear strength and its parameters (interface adhesion, interface friction angle), interface shear failure displacement and interface shear stiffness are analyzed. The results show that the interface shear strength, interface friction angle, interface shear stiffness coefficient and interface residual shear stress all increase with the increase of the surface roughness of concrete, with the maximum increase of 35.80%. However, the interface

收稿日期:2022-09-29
* 国家重点研发计划项目(2021YFE0113400);山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME143)
** 通信作者:hong7986@163.com

adhesion first decreases and then increases with the increase of roughness, with an increase of 23.70%. Therefore, the mechanical properties of the pile-soil interface are affected by the roughness, and the test results can provide reference for the engineering practice of static pressure piles.

Keywords: silty clay-concrete; roughness; pile-soil interface; shear strength characteristics

CLC: TU473 **DC**: A

0 引 言

桩-土界面的力学特性对分析桩-土相互作用有重要影响。在摩擦型桩的研究中,分析桩-土界面力学特性对桩基的承载力以及其他相关物理量的研究具有极大的参考价值,桩-土接触面问题对结构的整体稳定性影响巨大。研究桩-土接触面的相关问题,需要进行相关的试验研究,通过直剪试验研究土与结构接触面的力学特性方法一直以来被广大学者接纳和采用。目前,研究桩-土界面的室内试验方法除直剪试验外,还有单剪试验和环减试验等[1]。研究者针对土和结构之间接触面的力学特性展开研究:Potyondy[2]研究对于不同的土壤类型和建筑材料,通过直剪试验得出二者之间接触面的摩擦力与土壤强度之间的关系,以及表面摩擦力与各种建筑材料表面特性之间的关系,为研究桩-土界面的力学性质提供了参考依据;Clough和Duncan[3]开发了一种有限元分析方法,研究了回填土和挡土墙界面之间的力学性质,并通过室内直剪试验得出该分析方法的可靠性;Brandi[4]和Desai等[5]通过有限元分析以及室内剪切试验对土坝与混凝土挡土墙墙体之间接触面的力学特性进行研究,得出土-混凝土之间的力学特性受混凝土表面粗糙度影响较大;Du等[6]考虑海上环境条件下,桩-土界面参数评估时遇到的困难,根据剪切试验显示界面剪切试验的应力-位移曲线存在软化阶段,并且剪切应力和剪切位移从界面边缘到中心逐渐减小,剪切位移与剪切断裂的大小密切相关。

胡黎明和濮家骝[7-8]及龚辉等[9]采用直剪装置获得了土与结构物不同粗糙度接触面产生剪切破坏时的变形机制及法向应力历史对黏土-混凝土界面剪切特性的影响,研究表明当界面粗糙度接近光滑时,土与结构的接触表面发生滑动破坏,随着界面粗糙度增大,与之伴随的剪胀也就越大,且法向应力越大剪胀越显著;成浩等[10-13]用红黏土作为研究对象进行直剪试验,分析该种土与混凝土结构接触面之间存在某种特征关系,即粗糙度越大,界面残余剪切强度越大,然而随着法向应力的增大,界面残余强度在逐渐减小;陈俊桦等[14-15]以灌砂法为基础,在混凝土表面刻半圆凹槽,用大型直剪试验分析不同粗糙度影响下的抗剪强度变化规律,得出粗糙度越大,接触面的粘聚力越大,且与红黏土的粘聚力越来越接近;金佳旭等[16]通过自主设计的直剪试验仪器,研究了砂土地区摩擦作用对桩-土界面剪切特性的影响,试验结果表明,粗糙度越大其相关参数均有明显增大,并且粗糙度是影响剪切带厚度的主要因素;王波等[17]采用自制的大型直剪试验系统,研究了粉质黏土-混凝土界面抗剪强度特性受粗糙度的影响,得出粗糙度的增大会使得界面极限摩擦阻力变化显著的结论;朱俊高等[18]采用不同密度的粗粒土与毛坯板的接触面展开直剪试验,与李天降等[19]采用直剪试验研究砂土与混凝土顶管界面的摩擦特性类似,结果表明土的颗粒粒径会影响砂土与混凝土接触面的稳定性,法向应力与剪切位移的大小呈正比关系;黄维等[20]自制了研究融雪条件下黄土-卵砾石接触面残余强度的模具,制作样本进行室内环剪试验,从微观角度分析了含水率对界面残余强度的影响,试验结果表明界面抗剪强度随含水率的增加而减小,随法向应力的增大而增大。

然而,大型直剪试验过程中,同时准确测得界面法向应力和界面剪切应力的研究较少,研究桩-土界面法向应力和界面剪切应力对施工过程中桩的稳定性有着重要的意义,通过研究界面法向应力和界面剪切应力的物理特性,能够很好地抵抗桩受到外力或其他因素时产生的变形,并且可以试图通过增大或减小桩-土之间的法向应力或剪切应力,使得变形后的桩身恢复到变形前的位置,以达到稳定桩身的作用。本文通过在不同粗糙度混凝土块表面开槽嵌入式安装微型土压、水压及增敏光纤光栅应变传感器,利用有限元分析方法,研究黏性土-混凝土界面力学特性受粗糙度的影响。

1 试验方案及过程

大型桩-土界面直剪仪上下剪箱均为矩形,剪底

箱为40 cm×27 cm×20 cm,可用于多种接触界面的剪切模拟试验,该剪切箱与张明义等[21]对黏性土中桩-土界面的受力机制所用的剪切箱一致,剪切模拟装置如图1所示。

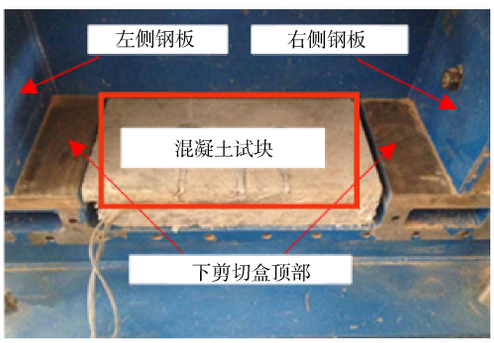
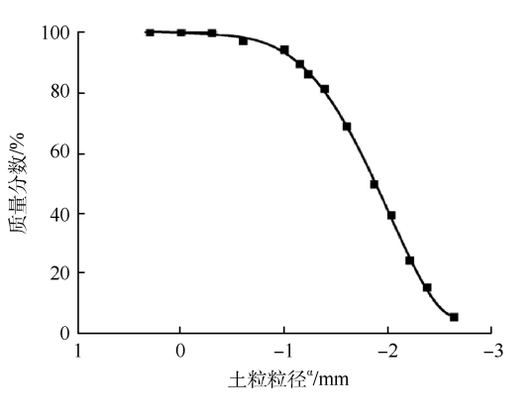


图1　剪切模拟装置[21]

本试验采用重塑粉质黏土作为研究对象,该土样的水质量分数一律为25.00%,配置含水率的过程符合《土工试验方法标准:GB/T50123—2019》[22]。土的主要物理力学参数指标包括:密度为1.98 g/cm³,干密度为1.58 g/cm³,相对密度为2.73,液限为31.30%,塑限为16.50%,内摩擦角为30.00°,黏聚力为27.00 kPa,饱和度为94.90%,孔隙比为0.728,压缩系数为0.32 MPa^{-1},压缩模量为5.50 MPa。土的颗粒级配曲线如图2所示。

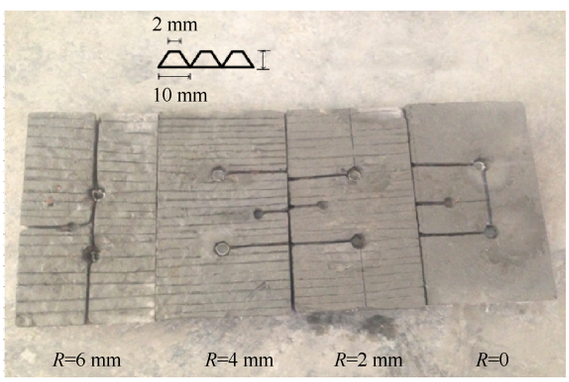
采用具有不同表面粗糙度的C50现浇混凝土板模拟预制桩侧表面,通过在混凝土表面刻齿形槽来



注:$^{\alpha}$表示十进制刻度。

图2　土的颗粒级配曲线

设置不同的粗糙度(R),其值(即齿形槽的深度)分别为0、2、4和6 mm,上下部宽度分别为2和10 mm,不同粗糙程度的混凝土板如图3所示。混凝土板的基本物理力学性质分组如表1所示。在混凝土板面安装了微型硅压阻式土压力、孔隙水压力及增敏光纤光栅应变传感器,并由其粗略控制土样的密实度。各仪器的安装与王永洪等[23-24]研究剪切速率对黏性土-混凝土界面抗剪强度影响时一致,剪切仪安装如图4所示。



注:2和4 mm表示齿形槽上下部宽度。

图3　不同粗糙度(R)的混凝土板

试验前期的准备工作需制作混凝土试块。首先用卷尺测量出直剪仪器下剪切盒的长度、宽度以及高度,再根据所测量数据制作符合内部尺寸的模具,模具内部平整无裂缝,直剪试验中采用自制的直剪试验仪进行试验,根据下剪切盒的尺寸制作符合剪切盒尺寸的混凝土板,并且混凝土板的大小保持不变,所以在剪切过程中混凝土板产生的尺寸效应对试验结果产生的影响可以忽略不计。随后采用C50混凝土浇筑,并对混凝土板上表面进行找平处理,由于施工中对于桩的制作多采用C50的混凝土,且桩的表面并不是理想化光滑,且桩周土体也并不是完全饱和无任何摩擦,所以对于桩-土界面的物理特性的室内直剪试验研究,应采用具有与实际工程中桩-土界面相同的模型来模拟,即采用C50现浇混凝土板模拟预制桩桩侧表面。待混凝土板自

表1　混凝土板的基本物理力学性质分组

力学特性	σ/kPa				R/mm				土样水质量分数/%				剪切速率/(mm·min^{-1})			
	第1组	第2组	第3组	第4组	第1组	第2组	第3组	第4组	第1组	第2组	第3组	第4组	第1组	第2组	第3组	第4组
R	25	50	100	150	0	2	4	6	28	28	28	28	1.0	1.0	1.0	1.0
含水率	25	50	100	150	0	0	0	0	18	20	25	28	1.0	1.0	1.0	1.0
剪切速率	25	50	100	150	0	0	0	0	28	28	28	28	0.4	0.6	0.8	1.0

注:σ为法向应力。

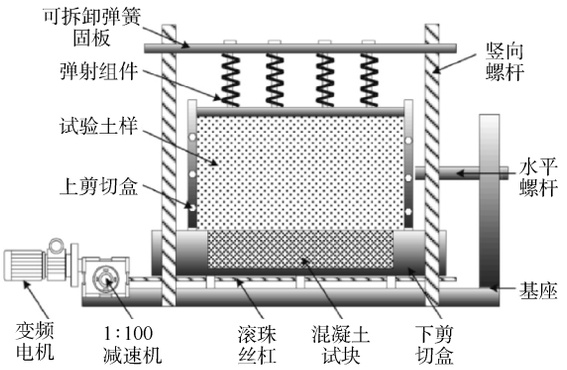


图4　剪切仪安装示意[23-24]

然晾干、脱模,静置一段时间,待静置至混凝土试块达到一定强度后用直尺在其表面沿着宽度方向画线定位,根据所需R不同,画出宽窄不同的条形,并用刻刀沿着画好的条形进行刻槽,然后将硅压阻式传感器和增敏光纤光栅传感器安装在其表面相应位置,安装完成后放入下剪切盒内。试块上的土样在静置7~10 d后分5层逐层击实,此时土样和试块都已经准备就绪,最后在装置上方分别施加法向应力(σ)25.00、50.00、100.00和150.00 kPa进行剪切试验,根据试验进度对所得数据进行实时采集。

2　R影响试验结果及分析

2.1　剪应力-剪切位移关系曲线

不同R和不同σ下剪切位移和剪应力之间的关系如图5所示。当R≤2 mm时,不同σ条件下,剪切位移由0移动至3 mm时,曲线存在重合现象,随后分开并继续增大;当σ较小时,剪切应力到达峰值点较快,曲线呈现明显的折线型;当σ≥100.00 kPa时,曲线达到峰点缓慢,且曲线增长趋势较光滑;当R≥4 mm时,同样在位移初期各曲线有明显重合阶段,随后偏离;当σ≥50.00 kPa时,剪切应力在到达峰值后出现小幅度降低趋势,随后基本保持不变,恒定在一个值。由此可知,随着混凝土试块R的增加,其相应的剪切应力总体呈上升趋势,但最后都趋于平缓。

不同σ下界面阻力和剪切位移的关系如图6所示。界面阻力与剪切位移的变化趋势基本相同,但明显观察到,在同一有效σ条件下,R<3 mm时出现明显的重合阶段,当R≤2 mm以及R≥4 mm时存在明显的分组偏离,并出现重合的现象,最后均趋于平缓,可见界面R在2~4 mm对界面阻力的影响存在一个分界值。当界面有效σ≥100.00 kPa时,界面

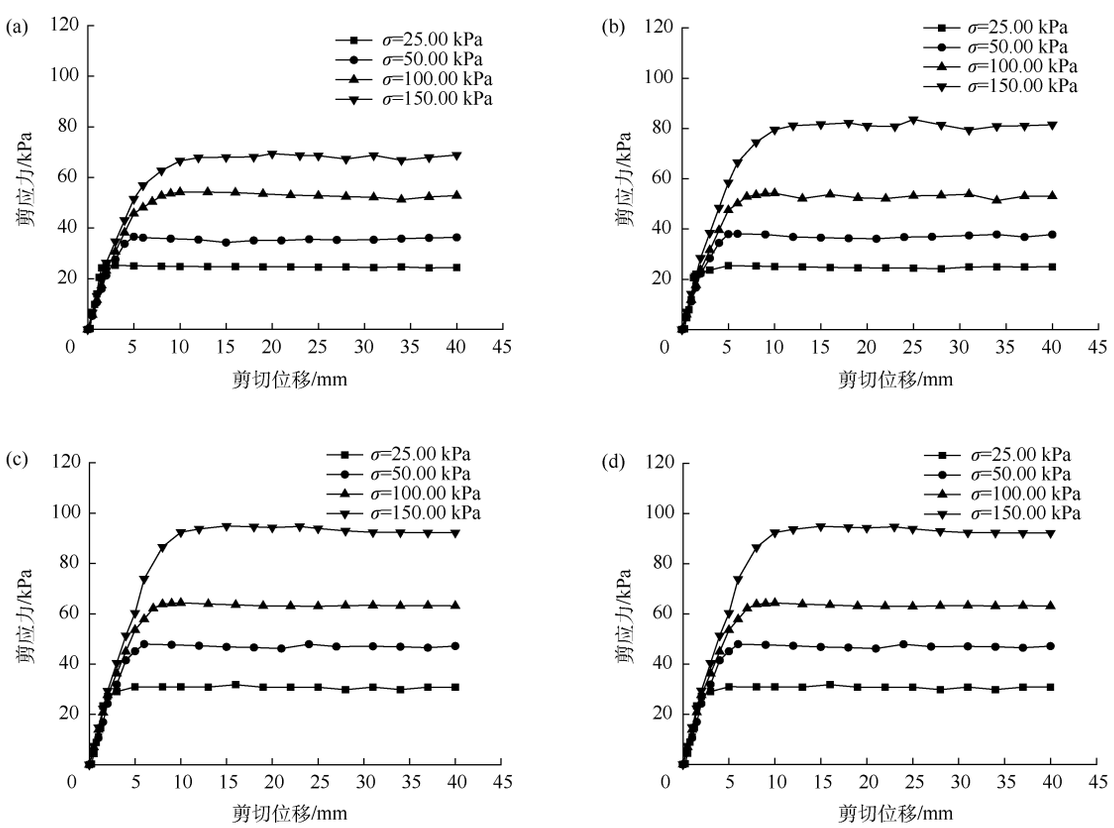


图5　不同R和不同σ下剪切位移与剪应力之间的关系曲线

(a)0;(b)2 mm;(c)4 mm;(d)6 mm

阻力达到峰值点时的剪切位移出现滞后,并且各R下的剪切位移-界面阻力曲线较σ≤50.00 kPa时的曲线明显不同,原因是此时滑动带出现弹塑性破坏,但总体都呈现上涨趋势。总的来看,界面阻力的最大值随着有效σ的增大而增长,且增长速率随有效σ的增大而减缓。

2.2　R对界面抗剪强度的影响

2.2.1　界面抗剪强度

根据不同R下界面阻力与剪切位移关系,绘制出不同R下粉质黏土-混凝土界面抗剪强度和R的变化曲线如图7所示。σ相同时,抗剪强度随R的增加而增大,当σ=150.00 kPa时,R从0增加到4 mm,界面抗剪强度从69.43 kPa增大至94.31 kPa,增大幅度为35.80%;当σ<150.00 kPa时,随着R的增加,界面抗剪强度也在逐渐增大。这表明R对粉质黏土-混凝土界面抗剪强度有显著的影响。

2.2.2　界面摩擦角和界面附着力

界面抗剪强度与σ的关系如图8所示。当R相同时,抗剪强度和σ可以近似认为是线性递增关系,满足摩尔-库仑破坏准则。拟合函数的拟合相关系数为0.978 1~0.994 3,拟合效果较好。粉质黏土-混凝土界面极限摩阻力类似于土的抗剪强度。

根据摩尔-库仑破坏准则对数据进行拟合,得到界面附着力和界面摩擦角与粗糙度关系如图9所示。桩-土界面接触产生新的界面层,生成了附着力,即界面附着力。随着R的增加,界面附着力由17.87 kPa减小到13.81 kPa,后又增长到20.63 kPa,最大达到22.11 kPa,增大幅度为23.70%。桩-土界面处于滑动的临界状态时,静摩擦力(F_s)达到最大值,此时σ与水平力之间的夹角达到最大值,即产生界面摩擦角。随着R的增加,界面摩擦角由19.29°逐渐增加至24.23°,最终为25.17°,增大幅度为30.50%。由此可知,R对于界面附着力和界面摩擦角均存在较大的影响。同时,与土体的物理力学参数作比较可知,界面附着力和界面摩擦角均小于土体的数据,但和其数值较为接近,可认为界面的剪切特征与土体的性质存在一定的联系。

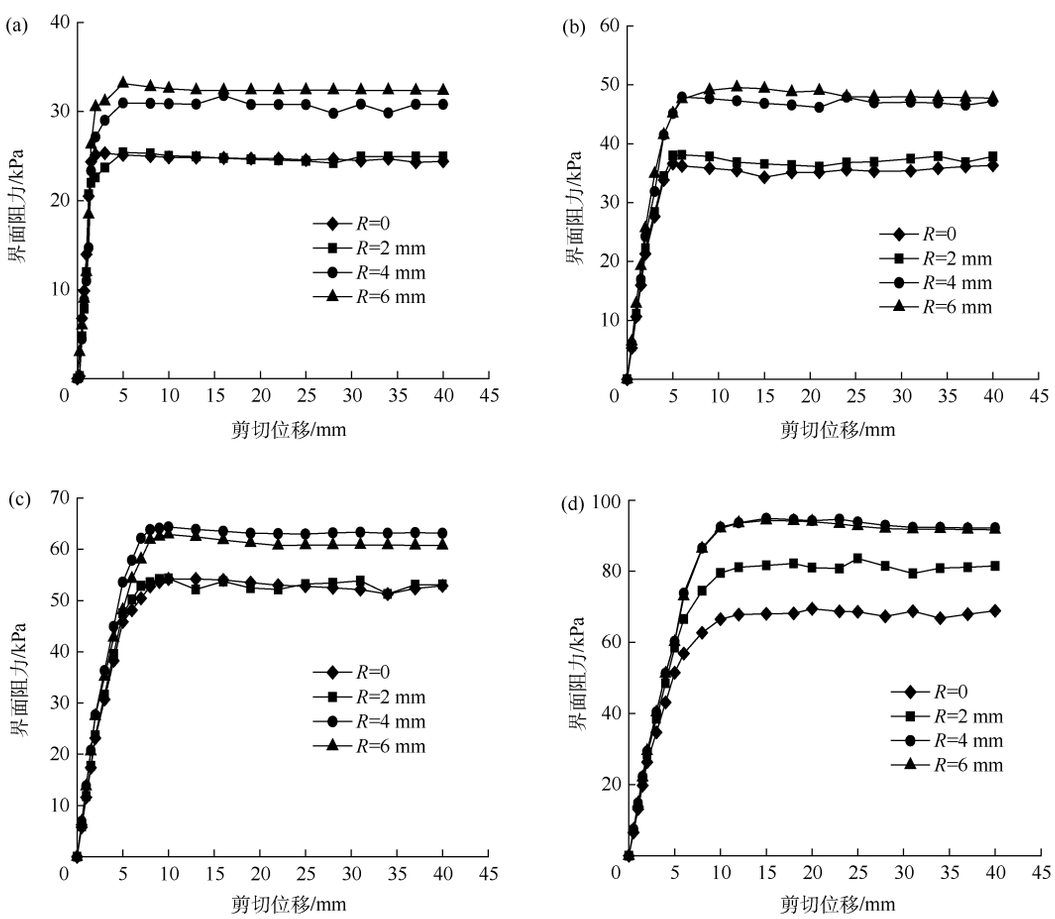


图6　不同σ下界面阻力与剪切位移变化

(a)25.00 kPa;(b)50.00 kPa;(c)100.00 kPa;(d)150.00 kPa

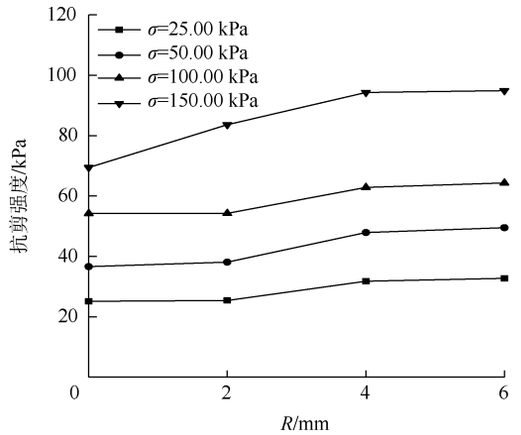


图7　粉质黏土-混凝土界面抗剪强度和R的变化曲线

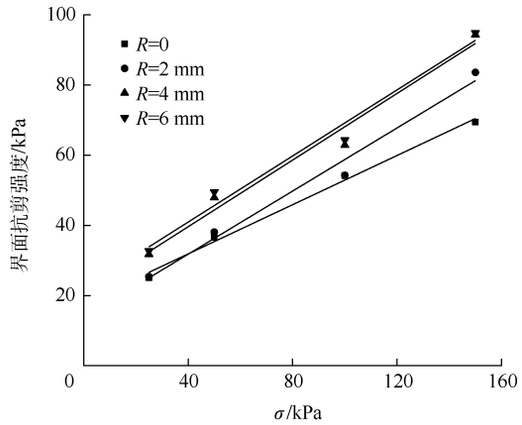


图8　界面抗剪强度和σ的关系

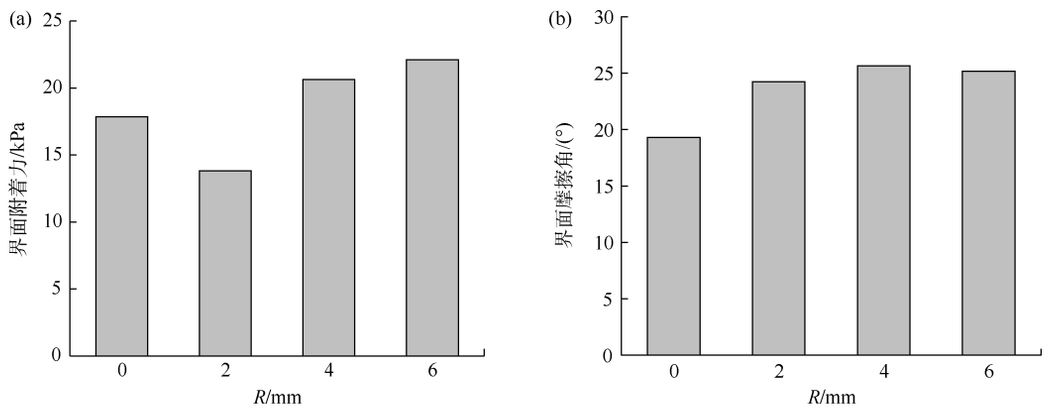


图9　界面附着力和界面摩擦角与R的关系

(a)界面附着力与R关系;(b)界面摩擦角与R关系

3　结　论

通过试验可知,对于黏性土实际沉桩过程中,由于土的不饱和性,土颗粒之间存在一定的弹性变形,桩表面的R会使得在沉桩过程中向下挤压周土体产生恒刚度。在室内试验过程中,直剪仪上部的弹簧引起的缓冲类似于沉桩时产生的恒刚度,当桩顶施加一个恒定不变的荷载时,由于桩-土之间的摩擦产生缓冲作用,其沉桩结果与恒刚度的试验结果一致。

该试验在混凝土试块设置不同的R模拟桩表面的方法具有较高的可行性,并且能够通过试验数据真实地反应桩-土界面的力学特性,并对各参量进行总结,得到如下总结:

(1)硅压阻式传感器和增敏微型光纤光栅传感器能够很好地满足不同R下粉质黏土-混凝土界面力学特性的测试要求,清晰反映出抗剪力学特性随R的变化规律。

(2)随着R由0增加到6 mm,界面抗剪强度也在不断增加,对于σ=150.00 kPa时,界面抗剪强度最大可以达到94.31 kPa,可见界面R成为影响界面抗剪强度的主要原因。

(3)R的增加会使得界面附着力先减小然后增大,最大可达22.11 kPa,增大幅度达到了23.70%;同时界面摩擦角也会受到影响,由19.29°逐渐增加,最后达到25.17°,增大幅度为30.50%。可见R的增加使得界面附近土体与界面间的相互摩擦增大,从而显著提高界面剪切滑移产生的摩擦阻力,而摩擦阻力和摩擦角成正比。

(4)通过改变混凝土的特性及对其参数进行调整可以得出:混凝土的变化并不会对桩-土界面的剪切性质产生影响;若改变黏性土的特性,则桩-土界面的剪切特性会在界面附着力及界面摩擦角的变化下而受到影响。

参 考 文 献

[1] 张嘎,张建民.大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用[J].岩土工程学报,2003,25(2):149-153.

[2] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Géotechnique, 1961, 11(4):339-353.

[3] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(12): 1657-1673.

[4] BRANDI J R T. Behavior of soil-concrete interfaces[M]. Edmonton: the University of Alberta, 1985.

[5] DESAI C, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(6): 793-815.

[6] DU W B, ZHANG L, HUANG B, et al. Pile-soil interface shear characteristic research in offshore wind power project[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 861(6): 062101.

[7] 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].岩土工程力学,2001,23(4):431-435.

[8] 胡黎明,濮家骝.土与结构物接触面损伤本构模型[J].岩土力学,2002,23(1):6-11.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 成浩,王晅,张家生,等.粗糙度对红黏土与混凝土接触面循环剪切特性的影响[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(4):146-152.

[12] 成浩,王晅,张家生,等.考虑粗糙度影响的不同土与混凝土界面大型直剪试验研究[J].工程科学与技术,2019,51(5):117-125.

[13] 成浩,曾国东,周敏,等.考虑粗糙度影响的黏土-混凝土接触面峰值剪切强度模型研究[J].工程科学与技术,2021,53(4):168-177.

[14] 陈俊桦,张家生,李键.接触面粗糙度对红黏土-混凝土接触面力学性质的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(5):1682-1688.

[15] 陈俊桦,张家生,李键.考虑粗糙度的黏性土-结构接触面力学特性试验[J].四川大学学报(工程科学版),2015,47(4):22-30.

[16] 金佳旭,袁士豪,梁冰,等.摩擦桩-砂土接触面剪切特性可视化试验研究[J].实验力学,2022,37(4):551-560.

[17] 王波,张腾,林振华,等.粗糙度对黏性土-混凝土界面剪切特性影响[J].低温建筑技术,2022,44(6):62-65.

[18] 朱俊高,汪淼,黄维,等.钢-土接触面位移与强度特性直剪试验[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):265-271.

[19] 李天降,陈雪锋,陈伟超,等.砂土与混凝土顶管界面摩擦特性试验研究[J].地质科技通报,2021,40(6):178-184.

[20] 黄维,孙畅,项伟,等.融雪条件下新疆伊犁谷地黄土-卵砾石接触面残余强度[J].地质科技通报,2020,39(6):112-120.

[21] 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.

[22] 水利部.土工试验标准方法:GB/T50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[23] 王永洪,张明义,白晓宇,等.剪切速率对黏性土混凝土界面抗剪强度影响的试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(1):48-54.

[24] 王永洪,张腾,张明义,等.静压沉桩桩土界面抗剪强度及其参数室内试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(8):799-806.

(责任编辑:兰丽丽)