DOI：10.19789/j.1004-9398.2023.01.004
文献引用：李兆龙，张腾，王永洪，等.基于MEMS传感器测试的黏性土-混凝土力学特性研究[J].首都师范大学学报（自然科学版），2023，44（1）：21-27. LI Z L，ZHANG T，WANG Y H，et al. Clay-concrete mechanical characteristics based on MEMS sensors[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2023，44（1）：21-27.

基于MEMS传感器测试的黏性土-混凝土力学特性研究*

李兆龙[1]，张　腾[2]，王永洪[2**]，张明义[2]，崔金辉[1]，毛从平[1]，刘雪颖[3]，桑松魁[4]

（1. 中青建安建设集团有限公司，山东 青岛　100855；2. 青岛理工大学土木工程学院，山东 青岛　266033；3. 青岛地矿岩土工程有限公司，山东 青岛　266071；4. 青岛绿色理工岩土工程有限公司，山东 青岛　266033）

摘要：为更好地测量桩与土界面处的孔隙水压力和径向土压力，在混凝土试块表面安装硅压阻式微电子机械系统（MEMS）传感器，安装方式为开孔嵌入式。通过大型直剪实验系统对不同湿度条件下，含水率分别为18%、20%、25%和28%的粉质黏土-混凝土界面进行力学性能研究，分析了粉质黏土-混凝土界面的抗剪强度特性受水分特性的影响。对混凝土界面性能进行实验研究，结果表明，随着黏性土含水率的增大，界面抗剪强度、剪切破坏位移和界面残余剪切应力均呈先增大后减小趋势，含水率在20%~28%存在一个最优含水率使得界面抗剪特性最优。由此可知，粉质黏土-混凝土界面的抗剪强度特性受含水率影响十分明显，实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；硅压阻式传感器；含水率；测试分析；抗剪强度特性
中图分类号：TU473　　**文献标识码**：A

Clay-concrete mechanical characteristics based on MEMS sensors*

LI Zhaolong[1]，ZHANG Teng[2]，WANG Yonghong[2**]，ZHANG Mingyi[2]，CUI Jinhui[1]，MAO Congping[1]，LIU Xueying[3]，SANG Songkui[4]

（1. Zhongqing Jianan Construction & Installation Construction Group Co.，Ltd，Qingdao Shandong 100855；2. College of Civil Engineering，Qingdao University of Technology，Qingdao Shandong　266033；3. Qingdao Geology and Minerals Rock and Soil Engineering Co.，Ltd，Qingdao Shandong　266071；4. Qingdao Green Polytechnic Geotechnical Engineering Co.，Ltd，Qingdao Shandong　266033）

Abstract：In order to better measure the pore water pressure and radial earth pressure at the interface between the pile and the soil，a silicon piezoresistive micro-electro mechanical system（MEMS）sensor was installed on the surface of the concrete block，and the installation method was embedded in the hole. The mechanical properties of the silty clay-concrete interface with moisture contents of 18%，20%，25% and 28% under different humidity conditions were studied by a large-scale direct shear test system，and

收稿日期：2022-03-20
* 国家重点研发计划项目（2021YFE0113400）
** 通信作者：hong7986@163.com

the influence of moisture properties on the shear strength characteristics of silty clay-concrete interface was analyzed. The experimental study on the interface properties of concrete shows that with the increase of the moisture content of the cohesive soil, the interface shear strength, shear failure displacement and interfacial residual shear stress all increase first and then decrease. There is an optimal moisture content between 20% to 28%, which makes the interface shear resistance optimal. It can be seen that the shear strength characteristics of the silty clay-concrete interface are significantly affected by the moisture content. The test results can provide reference for the engineering practice of static pressure piles.

Keywords: silty clay-concrete; silicon piezoresistive sensor; moisture content; test analysis; shear strength characteristics

CLC: TU473 **DC**: A

0 引 言

目前,桩-土界面剪切特性的研究方法主要包括室内实验[1-2]、理论研究[3-4]以及现场实验[5-6]。其中室内直剪实验凭借其可控变量、低成本和易操作等优点逐渐成为主要研究方法。成浩等[7-8]通过红黏土-混凝土界面的剪切实验,研究了残余强度受粗糙度影响的规律,得出粗糙度的增加可以提高残余抗剪强度,法向应力也影响着残余强度的大小,认为接触面力学性质可能受到该结构周围土体的某些性质以及结构表面的粗糙程度等因素影响;刘俊伟等[9]基于桩-土界面剪切仪进行了土-预应力高强度混凝土(pre-stressed high-strength concrete, PHC)管桩界面的剪切实验,对剪切疲劳退化问题进行了深入研究,并分析了剪切退化幅度与剪切循环数的变化规律;宋丙辉等[10]在大型室内直剪仪进行下的实验,研究了不同含水率下的滑动带土的剪切特性,得出剪切应力-应变关系的特点为弱应变硬化,且法向应力越大,该特点越明显;周怡等[11]通过直剪实验系统用于测试不同含水率条件下砂-混凝土界面的剪切性能,同时也研究了含水率对砂-混凝土界面力学参数的影响;尚文昌[12]采用恒定法向刚度(constant normal stiffness, CNS)桩-土界面循环剪切实验和数值粒子流代码(particle flow code, PFC)粒子流模拟,系统地展示了循环荷载作用下不同影响因素对界面弱化的影响;王永洪课题组[13-15]通过桩-土界面直剪实验和室内大比例模型实验等方法系统研究了黏性土中静力压桩过程桩的受力特性,根据含水率和法向应力分析剪切应力-剪切位移关系,表明界面剪切强度随含水率增加而降低,但剪切强度与法向应力始终保持线性关系;刘建军[16]基于室内大型直剪实验,考虑到级配参数的影响,通过控制试样的质量和体积达到实验所需的压实程度,分析了各主要参数对土石混合体抗剪强度的影响规律;周凯等[17]通过对不同桩-土界面的直剪实验研究,得出法向应力较小时,各界面的剪应力变化不大,法向应力较大时,表现出塑料材质与土界面处的剪切强度最大;陈荣刚等[18]通过研究含水率与土质条件等因素对摩擦桩侧摩阻力的影响,表明含水率变化对粉土和细砂的极限摩阻力改变显著,而对粉质黏土的极限摩阻力变化相对不敏感,且极限摩阻力最大值均在最优含水率时发生;桑伟等[19]采用直剪实验研究了含水量对金属刀具切削黏土时界面剪切强度的影响,实验结果表明,随着含水量的增加,界面剪切强度先增大后减小,在含水量接近塑限和最佳含水量时达到峰值;刘涛等[20]为了研究导水条件下膨胀地基中地基特性对桩-土界面的影响,并对原地体和接触面的强度进行了实验研究,结果表明,含水量对土壤强度的影响比对接触面强度的影响更为重要。

针对静压桩沉桩过程改变桩-土界面多个实验条件展开室内实验研究目前比较缺乏,无法准确获得黏性土的桩-土界面力学特性影响因素。本文利用大型恒刚度直剪仪,结合硅压阻式微电子机械系统传感器(micro-electro mechanical systems, MEMS)对4组不同含水率条件下的黏性土-混凝土接触面,分别施加不同的法向应力,以研究法向应力和含水率对黏性土中桩-土界面抗剪强度及其参数的影响。本文明确了含水率对剪切破坏位移和界面剪切刚度的影响,从微观层面解释了上述因素对剪切特性的影响机制。

1 界面剪切

1.1 仪器

直剪实验仪器(青岛理工大学自行研制)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直剪实验[21],直剪实验仪器平面如图1所示。实际沉桩过程中,桩身进入土体时,会使得桩侧一定量的土体产生扰动现象,该程度的扰动会使得位于弹性区域的黏性土体在沉桩过程中发生弹性变形,可以采用理想化弹簧模型以达到表征土体变形特性的目的,即认为黏性土中的实际沉桩过程中具有恒刚度。

MEMS传感器具有构造简单,易于应用的特点,并具有稳定性好、耐电磁干扰好、耐腐蚀性强、检测精度高、灵敏度高、动态范围宽和线性度高的优势。为了掌握土压和孔隙水压对应深部土体所产生的变化特性,需对其水平、竖向位移进行数据采集和监测。因此,根据MEMS传感器的作用特性,在混凝土试块抗压强度表面,开孔嵌入式安装硅压阻式传感器,可及时掌握土体内部的深层水平和竖向位移,以便于对黏性土体在沉桩工程中产生的变化情况作出判断,以实现对土体扰动情况的实时监测。硅压阻式传感器参数见表1。

1.2　实验设计

实验土样参考《土工试验方法标准:GB/T50123—1999》[22]统一配置中压缩性重塑粉质黏土。对原状土进行烘干、粉碎和过筛操作。烘干机采用我国浙江绍兴市沪越仪器设备有限公司生产的型号为202-0A/B电热恒温鼓风干燥箱,将取好的土样放入干燥箱,干燥箱温度设置在105~110 ℃下进行烘干,注意干燥箱内不应同时出现其他杂物。烘干结束后,将烘干的土样放在橡皮板上,用木碾碾散,此时要保证橡皮板处于干燥状态,对不含沙和砾的土样可用碎土器碾散,对分散后的粗粒土和细粒土,应按上述标准表B.0.1的要求过筛。对含细粒土的砾质土,应先用水浸泡并充分搅拌,使粗细颗粒分离后,按该实验项目的要求进行过筛,称取过筛的风干土样平铺于搪瓷盘内,然后进行加水制备含水率(ω)分别为18%、20%、25%和28%的土样,将水均匀喷洒与土样上,充分拌匀后装入盛土容器内盖紧,浸润一夜随后取出。值得注意的是,测定不少于2个湿润土样不同位置处的含水率。土样的物理指标为:土样密度为1.98 g/cm^3,干密度为1.58 g/cm^3,相对密度为2.73,液限为31%,塑限为16%,内摩擦角ρ = 30°,黏聚力为27 kPa,饱和度为95%,孔隙比为0.728,压缩系数为0.32 MPa^{-1},压缩模量为5.5 MPa。土样制备完成后,随后对该土样进行法向应力的施加,其大小分别为25、50、100和150 kPa。

1.3　混凝土试块制作及传感器安装

首先,把制备好的混凝土试块放置于剪切仪器的下剪切盒内部,模拟桩身混凝土,设计布置表面带有凹陷槽的混凝土模拟实际预制桩界面粗糙度。

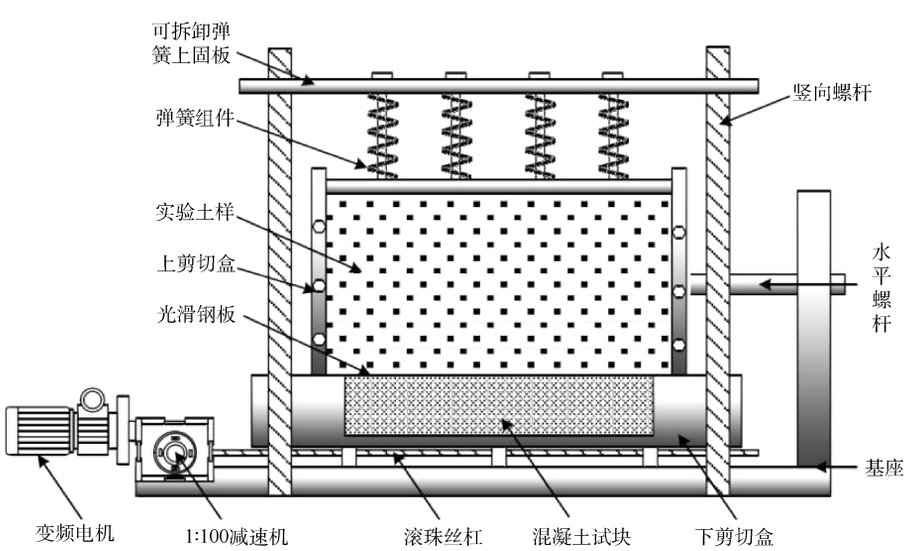


图1　直剪实验仪器平面

表1　硅压阻式传感器参数

种类	尺寸/(mm×mm)	动态频响/kHz	精度/%	工作电压/V
土压力	10×6	2 000	0.1	0~5
孔隙水压力	6×12	2 000	0.1	0~5

设计试样的基本尺寸为500 mm×280 mm×100 mm，混凝土的强度等级为C40，水泥、砂、碎石和水的质量比为2∶4.08∶7.82∶1，其中，水和灰质量比为1∶2，采用物质的量百分比为0.8%的聚羧酸减水剂，对其室内养护为标准养护，时间为28 d，用水泥砂浆对混凝土上表面抹平处理，硬化后对其进行光滑打磨，打磨所需器具为1 000目砂轮。随后，把硅压阻式传感器采用嵌入式安装的方法安装在混凝土试块表面开孔内[23]，以达到直接测量桩-土界面处的径向土压力与孔隙水压力。布设传感器时，首先在混凝土板上画出定位线；其次切槽，将传感器放入槽内，用环氧树脂和AB胶封置；最后用砂浆找平混凝土板。传感器具体参数见表1，传感器安装及数据采集装置如图2所示。

2　ω影响实验结果及分析

2.1　剪应力-剪切位移关系

不同ω及不同法向应力(σ)下的剪应力(τ)-剪切位移(u)曲线，即τ-u曲线，而τ与u之比即为土-混凝土结构界面剪切模量，计算式为

$$G=\frac{\tau}{u}, \tag{1}$$

式中：τ为界面线弹性极限剪应力；u为界面线弹性极限剪切位移；G为土-混凝土结构界面等效剪切模量。

不同ω和σ下的τ-u曲线如图3所示。不同ω实验条件下桩-土界面均出现了τ峰值和u，在ω相同的条件下，随着σ的逐渐增大，τ峰值和u也随之增大；当ω=28%时，τ-u曲线开始出现应变软化现象，此时τ达到峰值，即出现了应变软化阶段，最后趋于稳定；当ω<28%时，τ达到峰值后，随着u的增加基本保持不变，表现出典型的弹塑性变形。该现象的发生是因为随着黏土ω的增加，黏土与混凝土块之间的结水厚度增加，随之便是桩-土界面τ峰值减小，u增大。

2.2　ω对界面抗剪强度的影响

粉质黏土-混凝土界面抗剪强度在不同ω下的变化曲线如图4所示。在一定的σ下，ω在增加，抗剪强度先增大后减小，当σ=150 kPa时，随着ω从18%增加到25%，界面抗剪强度从69.15 kPa增大至81.65 kPa，增大幅度为24%；随着ω继续增加至28%，界面抗剪强度从81.65 kPa减小至77.14 kPa，减小幅度为6%。ω对界面抗剪强度的影响是在黏性土中，随着ω增大，黏性土与混凝土块间的结膜水厚度就会随之增大，从而导致桩-土界面抗剪强度降低。

界面抗剪强度和σ的关系如图5所示，ω相同，抗剪强度和σ可以近似认为是二次函数的关系，拟合度>97%，证明拟合较好。

2.3　ω对界面剪切破坏位移的影响

剪切破坏的含义是指在一定的荷载作用下，发生连续剪切滑动面破坏处于粉质黏土-混凝土界面。其破坏具有以下特征：当界面上的荷载达到某一数值时，首先剪切破坏会在界面边缘的土体处发生；当荷载增加，剪切破坏区也会相应地扩大，最后连续的滑动面会在界面中形成。此实验中粉质黏土-混凝土界面发生剪切破坏时的位移变化就是剪切破坏位移。不同ω下粉质黏土-混凝土界面发生剪切破坏位移变化曲线如图6所示。当σ=150 kPa时，随着ω从18%增加到20%，剪切破坏位移从17 mm增加到了23 mm，增幅达到35%，表明粉质黏土-混凝土界面剪切破坏位移受到ω的影响十分显著[24]。

2.4　ω对界面剪切刚度的影响

由ω和界面剪切刚度二者之间的关系，能得出刚度越大，则材料的刚性越强，进而能够确定界面剪切刚度的大小。在土力学中，通常采用剪切模量表示固体结构的剪切刚度，剪切模量是指剪切应力

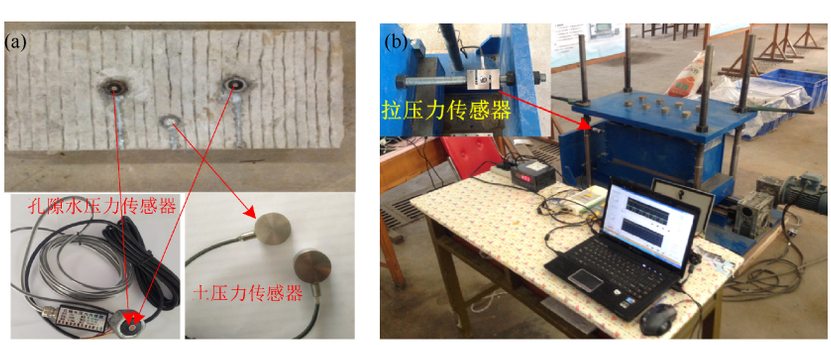


图2　检测示意

(a)传感器安装；(b)数据采集

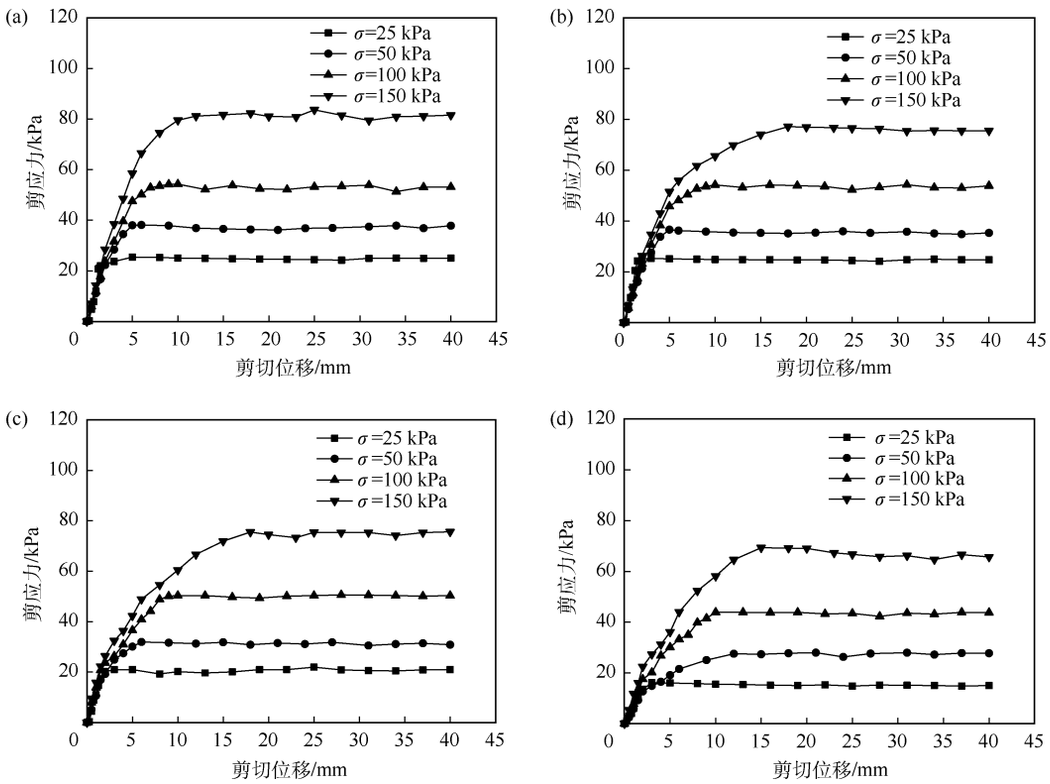


图3　不同含水率和法向应力下的τ-u曲线

(a)ω=18%;(b)ω=20%;(c)ω=25%;(d)ω=28%

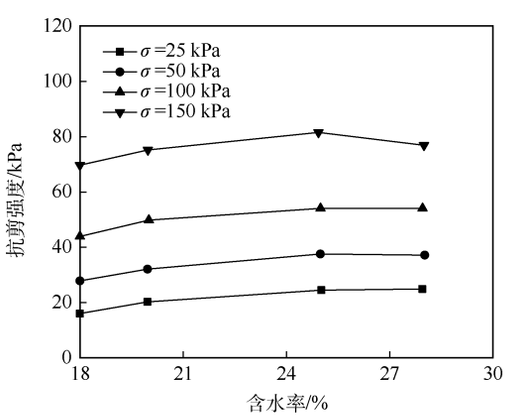


图4　粉质黏土-混凝土界面抗剪强度在不同含水率的变化曲线

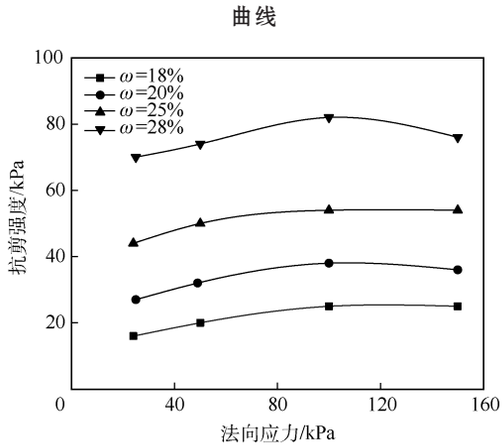


图5　界面抗剪强度和法向应力的关系

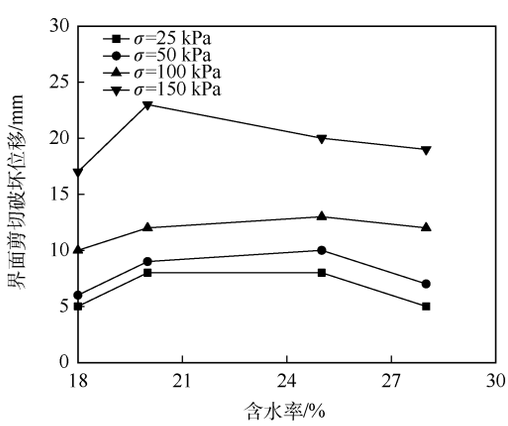


图6　界面剪切破坏位移和含水率的关系

与剪切应变之比,通过该比值作出相应的折线图,折线段中直线段的斜率表示土-混凝土结构界面的等效剪切模量,但通过直剪实验剪切模量却无法获得上述相应的结论。界面剪切刚度和ω的关系如图7所示。在加载初期,τ与u曲线可近似看作直线,界面剪切刚度随着该直线段的斜率逐渐增大。当σ为25和50 kPa时,ω越大,界面剪切刚度越大;而σ为100和150 kPa时,界面剪切刚度随着ω的增大呈现出先增大后减小的趋势;当σ=50 kPa时,随着ω从18%增加到20%,G从3.6 kPa/mm增大至4.4 kPa/mm,增幅为22%。由此可知,ω的增加对

u的影响是随着σ的变化而变化的,在较高σ下,存在最优ω,是影响界面剪切刚度的关键因素,其作用机制有待进一步的研究[25]。

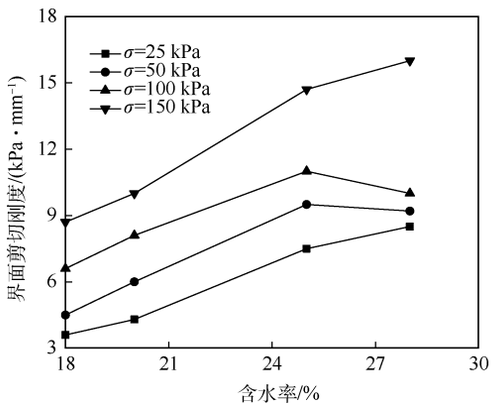


图7 界面剪切刚度和含水率的关系

2.5 ω对界面残余剪切强度的影响

界面残余剪切强度是土体直剪实验应力-应变曲线越过峰值后粉质黏土-混凝土界面的近似最终稳定强度。界面残余剪切强度与ω的关系如图8所示。当σ为150 kPa时,ω从18%增加到25%,界面残余剪切强度从66.68 kPa增大至81.46 kPa,增幅为22%。界面残余剪切强度与界面抗剪强度相比,减小幅度不大,这同样是由于黏土与桩的黏结度较高所导致的[20]。

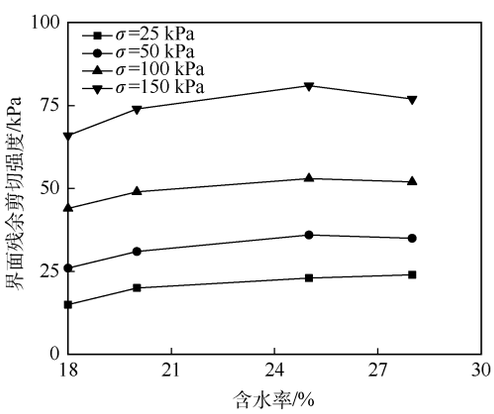


图8 界面残余剪切强度与含水率的关系

3 结 论

本文通过大型直剪实验系统对不同湿度条件下粉质黏土-混凝土界面进行力学性能研究,分析了粉质黏土-混凝土界面的抗剪强度特性受水分特性的影响,并对混凝土界面性能进行实验研究,得出以下结论:(1)硅压阻式MEMS传感器能够很好地满足粉质黏土-混凝土界面抗剪特性的测试要求,清晰反映出抗剪强度随ω的变化规律,硅压阻式MEMS传感器具有直接测量桩-土界面径向土压力和孔隙水压力的良好效果,与类似结果相比,本文进一步阐明了不同ω和σ对黏性土中桩-土界面的影响。(2)当σ相同时,随着ω增加,黏土-混凝土界面抗剪强度逐渐增大;当ω<最优含水率(25%)时,界面附着力逐渐增加,当ω>最优含水率后,界面黏聚力迅速减小。(3)ω的增加对u的影响是随着σ的变化而变化的,在较高σ下,存在着最优ω。

参 考 文 献

[1] XIAO S, SULEIMAN M T, ELZEINY R, et al. Soil-concrete interface properties subjected to temperature changes and cycles using direct shear tests [C]// BRANDON T L, VALENTINE R J. Geotechnical Frontiers 2017 Orlando: the Industrial Fabrics Association International and the Geo-Institute of ASCE, 2017: 175-183.

[2] HOSSAIN M A, YIN J H. Behavior of a pressure-grouted soil-cement interface in direct shear tests [J]. International Journal of Geomechanics, 2014, 14(1): 101-109.

[3] O'ROURKE T D, DRUSCHEL S J, NETRAVALI A. Shear strength characteristics of sand-polymer interfaces [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(3): 451-469.

[4] BASU P, PREZZI M, SALGADO R, et al. Shaft resistance and setup factors for piles jacked in clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 140(3): 04013026.

[5] KOU H L, CHU J, GUO W, et al. Field study of residual forces developed in pre-stressed high-strength concrete (PHC) pipe piles [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(4): 696-707.

[6] ELKASABGY M A, HESHAM EI N M. Axial compressive response of large-capacity helical and driven steel piles in cohesive soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(2): 224-243.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 刘俊伟,张明义,俞峰,等.土与PHC管桩界面剪切疲

劳退化试验研究[J].岩土工程学报，2013，35(增刊2)：1037-1040.
[10] 宋丙辉，谌文武，吴玮江，等.锁儿头滑坡滑带土不同含水率大剪试验研究[J].岩土力学，2012，33(增刊2)：77-84.
[11] 周怡，彭振斌，尹泉，等.板岩质砂土-混凝土界面剪切特性研究[J].中南大学学报(自然科学版)，2019，50(9)：2233-2241.
[12] 尚文昌.循环荷载下桩-土界面弱化机制研究[D].青岛：青岛理工大学，2016.
[13] 王永洪.黏性土中静力压入单桩受力特性试验研究[D].青岛：青岛理工大学，2018.
[14] 王永洪，张明义，刘雪颖，等.基于桩土界面应力测试的开闭口桩静力沉桩室内试验对比研究[J].中南大学学报(自然科学版)，2021，52(2)：599-606.
[15] 王永洪，张明义，白晓宇，等.不同含水率状态下黏性土-混凝土界面剪切特性室内试验研究[J].防灾减灾工程学报，2018，38(1)：118-123+192.
[16] 刘建军.土石混填路基工程特性及其稳定性分析[D].长沙：湖南大学，2016
[17] 周凯，程寅，黄新.不同桩-土界面直剪试验研究[J].路基工程，2011(5)：93-95+99.
[18] 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.
[19] 桑伟，王保田，刘文彬，等.粘土切削时含水率对界面抗剪强度的影响[J].广西大学学报(自然科学版)，2015，40(4)：943-948.
[20] 刘涛，王勇，孙吉主，等.吸湿环境下膨胀土与桩接触面强度特性试验研究[J].岩土工程学报，2015，37(增刊1)：161-166.
[21] 王永洪，张明义，刘俊伟，等.一种大型桩土界面直剪试验装置的研制与应用[J].岩石力学与工程学报，2018，37(增刊1)：3714-3721.
[22] 中华人民共和国水利部.土工试验标准方法：GB/T50123—2019[S].北京：中国计划出版社，2019.
[23] 张嘎，张建民.粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J].岩土工程学报，2004，26(1)：21-25.
[24] 张嘎，张建民.循环荷载作用下粗粒土与结构接触面变形特性的试验研究[J].岩土工程学报，2004，26(2)：254-258.
[25] 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.

(责任编辑：兰丽丽)

(上接第20页)

[17] LAZARIAN A, POGOSYAN D. Statistical description of synchrotron intensity fluctuations: studies of astrophysical magnetic turbulence[J]. The Astrophysical Journal, 2012, 747(1): 5.
[18] LAZARIAN A, POGOSYAN D. Spectrum and anisotropy of turbulence from multi-frequency measurement of synchrotron polarization [J]. The Astrophysical Journal, 2016, 818(2): 178.
[19] GOLDREICH P, SRIDHAR S. Toward a theory of interstellar turbulence II: strong alfvenic turbulence[J]. The Astrophysical Journal, 1995, 438: 763-775.
[20] WAELKENS A H, SCHEKOCHIHIN A A, ENSSLIN T A. Probing magnetic turbulence by synchrotron polarimetry: statistics and structure of magnetic fields from Stokes correlators [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2009, 398(4): 1970-1988.
[21] STONE J M, GARDINER T A, TEUBEN P, et al. Athena: a new code for astrophysical MHD [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2008, 178(1): 137-177.
[22] HAYES J C, NORMAN M L, FIEDLER R A, et al. Simulating radiating and magnetized flows in multiple dimensions with ZEUS-MP [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2006, 165(1): 188-228.
[23] CHO J, LAZARIAN A. Compressible magnetohydrodynamic turbulence: mode coupling, scaling relations, anisotropy, viscosity-damped regime and astrophysical implications [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2003, 345(1): 325-339.
[24] PLANCK C, ADAM R, ADE P A R, et al. Planck 2015 results X diffuse component separation: foreground maps [J]. Astronomy and Astrophysics, 2016, 594: A10.
[25] YANG B, ZHANG J F, LAZARIAN A, et al. Statistical tracing of turbulent magnetic fields in the optically thick interstellar medium [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 503(1): 768-776.

(责任编辑：兰丽丽)