

DOI: 10.11779/CJGE2015S1031

吸湿环境下膨胀土与桩接触面强度特性试验研究

刘涛¹, 王勇², 孙吉主¹, 李雄威³

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 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;
3. 常州工学院常州市建设工程结构与材料性能研究重点实验室, 江苏 常州 213002)

摘要: 为探讨水分迁移条件下, 土质特性对膨胀土地基中桩-土接触面的影响规律, 以广西南宁中强膨胀土为研究对象, 针对大气环境作用对膨胀土宏微观特性的影响, 进行原状土体强度与接触面强度的对比试验研究。结果表明: 吸湿环境下, 含水率对土体强度的影响比接触面强度的影响显著, 原状膨胀土和桩-土接触面的黏聚力均随含水率的增加而减小, 而含水率增加引起土体摩擦角减小的影响远大于桩-土接触面; 接触面的摩擦角始终大于土体内摩擦角, 受含水率变化影响不大; 当膨胀土吸湿临近饱和含水状态时, 桩-土接触面的强度与原状土体强度近似相等。利用回归分析, 得出了用土体强度参数表征的桩-土接触面抗剪强度关系表达式。利用该式, 能够对吸湿环境下原状膨胀土与结构接触界面的强度进行预测分析。

关键词: 膨胀土; 桩-土接触面; 吸湿; 抗剪强度

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)S1-0161-06

作者简介: 刘涛(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为软土地基处理。E-mail: liutao1987702@126.com。

Experimental study on pile-soil interface strength of expansive soil under environment of moisture absorption

LIU Tao¹, WANG Yong², SUN Ji-zhu¹, LI Xiong-wei³

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Changzhou Key Laboratory of Structure Engineering and Material Properties, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

Abstract: Based on the effects of atmospheric environment on macro-microcharacteristics of expansive soil, the comparative tests on shear strength characteristics between the undisturbed soil and the pile-soil interface were carried out on the middle expansive soil in Nanning area, Guangxi in order to investigate the influence rules of variation of soil properties on behaviours of the pile-soil interface in expansive soil foundation under the environment of moisture migration. The results show that the moisture content has more significant impact on the strength of expansive soil than that of the pile-soil interface in path of the moisture absorption. The cohesive strengths of both the soil and the interface decrease with the increase of water content, and the effect on the decrease of friction angle of expansive soil is much greater than that of pile-soil interface. The friction angle of the interface is always larger than that of the soil, and less affected by changes in moisture content. When the water content of expansive soil is close to the saturation, the strength of pile-soil interface is approximately equal to that of the soil. Through regression analysis, a relational expression for the shear strength of pile-soil interface is obtained by the description of strength parameters of expansive soil. Correspondingly, the strength of pile-soil interface in expansive soil foundation can be predicted by using the soil strength under the environment of natural moisture absorption.

Key words: expansive soil; pile-soil interface; moisture absorption; shear strength

0 引言

膨胀土是在自然地质过程中形成的一种多裂隙且具有显著胀缩特性的地质体, 具有晶格结构的蒙脱石黏土矿物是其特殊工程性状的物质基础^[1]。当在大气降雨入渗、蒸发蒸腾以及地下水循环变动等环境因素

作用时, 膨胀土发生的吸水膨胀软化、失水干缩开裂的胀缩特性, 使土体强度呈现出区别于一般黏性土的

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102229); 湖北省自然科学基金项目(2011CDB407)

收稿日期: 2015-03-26

典型变化特性^[2]。这种典型的胀缩特性和强度特性使桩-土接触界面产生的差异变形,是桩基承载性能的重要影响因素之一^[3]。然而,膨胀土的初始含水率、初始干密度以及上覆土压力对其胀缩特性具有重要的影响^[4],进而对土体以及桩-土接触面强度特性产生重要的影响作用。

研究表明,大气环境作用对膨胀土宏微观特性具有重要的影响,特别是温、湿度条件对膨胀土胀缩过程中水化速率的影响较大^[5]。然而,目前的试验研究大多忽视了胀缩过程中温、湿度条件对膨胀土微观结构特征的影响,而微观结构变化对土体强度、变形以及渗透性等宏观工程性状具有重要的影响。此外,现有的研究中,在探讨膨胀土的工程特性时,多从脱湿路径来进行试验;而在实际工程中,吸湿比脱湿环境下的膨胀土灾害问题更为常见,且吸湿过程中土体含水率的分布和微裂隙发展更为均匀,便于获取均一土样来开展室内试验。因此,开展吸湿环境下膨胀土及桩-土接触面强度特性研究更具实际意义。

本文着重于膨胀土胀缩过程中温、湿度条件对其微观结构特征的影响,通过恒温恒湿设备控制和模拟气候条件,利用常规三轴剪力仪和土工环剪仪,开展膨胀土及桩-土接触面强度试验,研究吸湿路径下接触面强度与土体强度关系,探讨宏观预测原状膨胀土与结构接触界面力学强度参数的方法。

1 土样性质与备样过程

1.1 土样性质

膨胀土取自广西南宁市郊外广西农业科学院水牛所草场坡地,取自地表以下1.8~2.5 m,呈灰白色、可塑、黏性较强,天然含水率较高,裂隙面呈蜡状,具有典型膨胀土的特征。土样基本物理性质:密度 $\rho=1.93\text{ g/cm}^3$,天然含水率 $w=26.8\%$,干密度 ρ 为 1.53 g/cm^3 ,土颗粒相对密度 $G_s=2.72$,液限 w_L 为 64.4% ,塑限 w_P 为 24.4% ,塑性指数 $I_p=40\%$,缩限 $W_s=15\%$,收缩系数 C_{s1} 为 0.50 ,体缩率 $\delta_v=16.6\%$,自由膨胀率 δ_v 为 80% , $<5\text{ }\mu\text{m}$ 黏粒含量为 74.6% 。该处膨胀土属于中强膨胀土。

1.2 备样环境与过程控制

为避免膨胀土内水分迁移受到温、湿度条件和水化速率的影响,结合南宁地区自然气候条件,本次试验设定统一的温湿环境,备样过程控制在温度 25°C 、湿度 80% 的环境中进行。膨胀土原状样的初始含水率接近饱和含水率(饱和含水率为 28.6%),缩限含水率为 15% ,依据膨胀土收缩试验,选取4个特征含水率点,分别为 10% 、 15% 、 20% 和 25% 。

利用自制的削土刀和环刀,将选取的典型膨胀土制备成高 80 mm ,直径 39.1 mm 的原状土三轴试验样品,和直径 160 mm ,高 10 mm 的原状土圆饼状样品。将三轴样品和圆饼状样品装入饱和器中,静置在真空泵中抽真空 2 h ,浸水饱和后取出;将试样在控制温度为 25°C 的水槽中继续浸水饱和 48 h 。将饱和后的土体试样置入恒温恒湿箱内($T=25^\circ\text{C}$, $H=80\%$),采用定时测定土样重量控制试样含水率的方法,先脱湿后吸湿备样。先将恒温恒湿箱内的试样脱湿至残余含水率,然后用湿毛巾包裹并用湿毛巾布铺垫和覆盖,定时向包有试样的毛巾上均匀喷洒水雾,保证试样吸湿的均匀性;待试样吸湿至4个特征含水率点时,分别取出3组平行试样,用保鲜膜将试样包裹,静置在保湿缸内保湿待用。

备好的三轴试验样品,在常规三轴剪力仪上开展常含水率剪切试验;备好的圆饼状样品,利用加工好的环形模具和美工刀,制备成外径 150 mm 、内径 100 mm 、高 10 mm 的环形样品,与预制的同样尺寸的加筋水泥环形样品一起,在土工环剪仪上开展模拟桩-土接触面的剪切强度试验。

2 试验仪器与控制标准

由于控制吸力平衡的非饱和土试验周期较长,且本次研究试验量较大,简便起见,利用常规土工三轴仪,进行常含水率条件下的固结不排水剪切试验,获取土体的总应力强度,探讨吸湿路径下含水率对土体以及桩-土接触面强度的影响规律。试验围压分别控制为 $100, 200, 300\text{ kPa}$;因剪切过程不能控制吸力平衡,采用尽可能小的剪切速率进行试验,剪切速率控制为 0.073 mm/min 。

膨胀土与混凝土接触面强度试验在DTA-138型土工环剪仪上完成,采取固结不排水试验,为保证与土体剪切试验具有相同的法向应力和剪切应变速率,环剪试验控制法向应力为 $100, 200, 300\text{ kPa}$ 和剪切速率为 $3.285^\circ/\text{min}$ 的条件,获取接触面剪切应力应变行为,分析桩-土接触面的强度。

3 试验结果与分析

3.1 原状膨胀土的应力-应变关系

图1为原状膨胀土的主应力差-应变关系曲线,土体抗剪强度关系式与强度参数整理如表1所示。由图1可知,不同围压和含水率条件下,土体应力-应变关系曲线均呈应变软化特性,在 $1\%\sim 5\%$ 轴向应变范围内均能够达到峰值;相同围压时,峰值随含水率的增加而显著减小,达到峰值所对应的应变随含水率

的增加而增大;同时,含水率越小,不同围压对峰值主应力差的影响越弱。

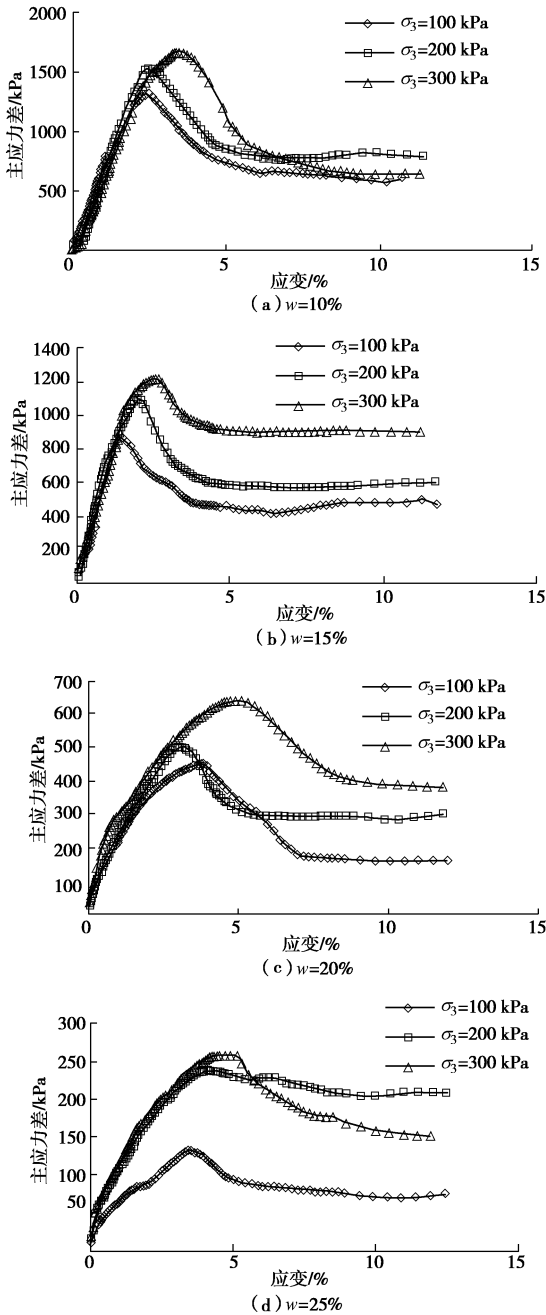


图 1 土体的主应力差 - 应变关系曲线

Fig. 1 Principal stress difference-strain curves of intact expansive soil

表 1 土体抗剪强度关系式与强度参数

Table 1 Relation of soil shear strength and strength parameters

含水率/%	抗剪强度关系式	c/kPa	φ/(°)
10	$\tau_s = 0.54 \sigma + 337.9$	337.9	28.4
15	$\tau_s = 0.52 \sigma + 220.8$	220.8	27.5
20	$\tau_s = 0.35 \sigma + 117.3$	117.3	19.3
25	$\tau_s = 0.25 \sigma + 27.9$	27.9	14.0

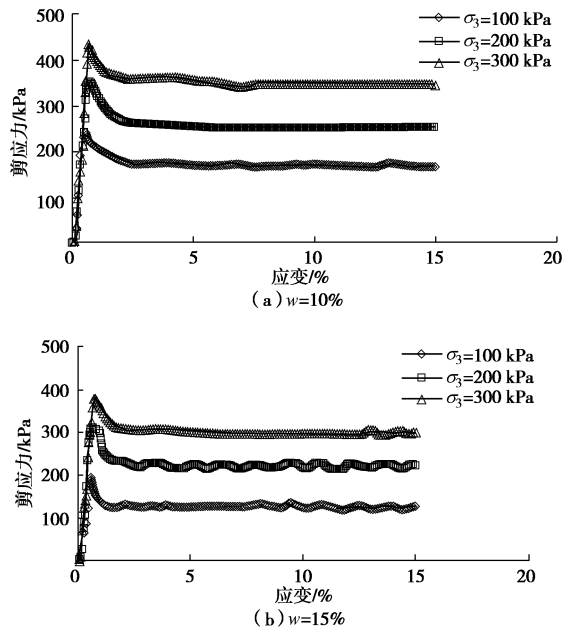
从表 2 可知,含水率由 10%增加至 25%,土体总黏

聚力由 337.9 kPa 减小至 27.9 kPa,内摩擦角由 28.4° 减小至 14.0°,即吸湿环境下,土体的总黏聚力和内摩擦角均减小,从而导致土体强度快速衰减。

究其原因,主要是基质吸力的存在对膨胀土的抗剪强度具有重要的贡献,而基质吸力与含水率密切相关^[6]。膨胀土是一种典型的非饱和土,受大气环境作用所引起的土体含水率变化影响,使由基质吸力所产生的附加黏聚力即表观凝聚力随含水率增加而快速衰减。吸湿环境下,在低含水率时,表观凝聚力对土体抗剪强度具有较为显著的影响作用;当含水率增加时,表观凝聚力降低,抗剪性能被削弱;同时,由低含水率状态吸湿至较高含水率状态的过程中,孔隙水不断向破裂面富集,形成一层薄结合水膜,在土体内部起到润滑的作用,使土体黏聚力和内摩擦角降低。另一方面,膨胀土的蒙脱石等黏土矿物具有特殊的双层结构^[7],有很强的吸水性能;随含水率的增加,吸附水膜厚度显著增厚,土颗粒之间的接触连结和胶结作用被削弱,主要是颗粒在较厚的吸附水膜的润滑作用下更易于滑动,从而使土体抗剪强度降低。

3.2 桩-土接触面的应力 - 应变关系

图 2 为土体与混凝土接触面的剪应力 - 应变关系曲线;接触面的抗剪强度关系与强度参数整理如表 2 所示。由图 2 可知,不同含水率状态下,接触面剪应力 - 应变曲线均呈现出显著的应变软化特性;相同含水率时,在很小的切向应变(0.5%~1%)范围内即可达到峰值,峰值应变前,应力 - 应变关系呈直线变化,表现出线弹性特征,且峰值应力和残余应力随法向应力的增大而增加;相同法向应力时,峰值剪应力随含水率的增加而减小,且含水率对峰值抗剪强度和残余剪应力均有显著影响。



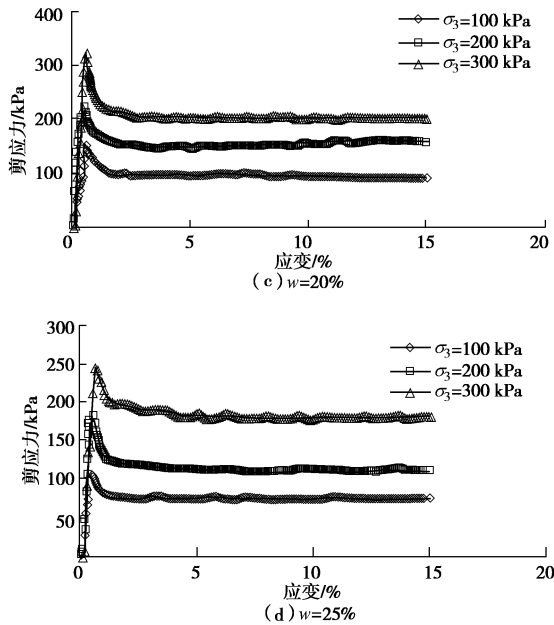


图2 桩-土接触面的剪应力-应变关系曲线

Fig. 2 Shear stress-strain curves of pile-soil interface

表2 接触面抗剪强度关系式与强度参数

Table 2 Relationship of the shear strength of contact surface and the strength parameters

含水率/%	抗剪强度关系式	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
10	$\tau_f = 0.98 \sigma + 147.3$	147.3	44.4
15	$\tau_f = 0.97 \sigma + 100.4$	100.4	44.1
20	$\tau_f = 0.88 \sigma + 56.4$	56.4	41.3
25	$\tau_f = 0.70 \sigma + 33.9$	33.9	35.0

从表2可看出, 随含水率的增加, 接触面黏聚力和内摩擦角均减小, 但含水率对接触面黏聚力的影响比对内摩擦角的影响效果显著, 即接触面黏聚力的减小是其抗剪强度衰减的重要因素。

研究表明^[8], 接触面上的剪切破坏是由接触表面向土体内部逐渐发展的结果。由于塑性材料对剪切应力的缓冲作用, 即土体在法向压力作用下产生的压缩变形能够减缓剪切应力对材料的破坏, 当接触面两边材料刚度差别较大时, 剪切面附近存在一定厚度的剪切带, 且剪切带的厚度随含水率的增加而增大, 峰值剪应力随剪切带的增加而减小。吸湿环境下, 土体塑性增强, 刚度降低, 接触结构与土体之间的刚度比增大, 剪切缓冲作用增强, 致使产生较厚的剪切带, 使剪切滑移破坏面向土体内部发展, 峰值剪应力相应减小。

3.3 土体与接触面抗剪强度对比分析

为对比分析土体和接触面的强度特性, 分别以土体应力-应变关系曲线中峰值主应力差为土体的抗剪强度取值标准, 以接触面剪应力-应变关系曲线中峰值剪应力为桩-土接触面的抗剪强度取值标准, 将不同

围压和法向应力作用时, 土体强度和桩-土接触面强度随含水率的变化规律汇总如图3所示。

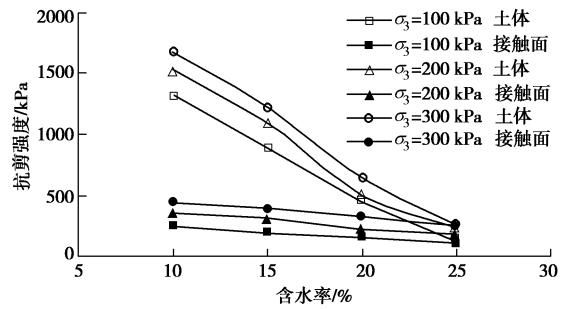


图3 土体和接触面强度与含水率关系曲线

Fig. 3 Strength-water content curves of expansive soil and contact surface

由图3可知, 含水率对土体强度的影响比对接触面强度的影响效果显著, 二者的差异性随着含水率的增大而逐渐减小, 当土体吸湿至25%含水率(即接近土体饱和含水率28.6%)时, 土体强度与接触面强度近似相等。

土体剪切破坏特征与接触面剪切破坏特征具有差异性。当含水率较小时, 土体黏聚力较大, 接触结构与土体之间的刚度比较小, 剪切滑移破坏面向土体内部发展, 需要克服很高的土体黏聚力, 最终在紧贴于结构的接触面上发生滑移, 在很小的剪切应变下即达到应力峰值, 随后进入峰后的残余强度阶段, 导致接触面的强度与土体自身强度差别较大; 随着含水率的增大, 土体黏聚力迅速衰减, 接触结构与土体之间的刚度比增大, 剪切面呈现出越来越明显的塑性材料破坏特征, 紧贴接触面的剪切滑移破坏向土体内部转移, 剪切带厚度增加, 土体自身的塑流破坏先于紧贴结构处的土体滑移破坏, 接触面强度趋近由土体强度控制。

为进一步分析土体和接触面的强度参数, 将表1, 2中相应黏聚力和摩擦角与含水率关系汇总如图4, 5所示。由图4, 5可知, 当含水率较小时, 土体黏聚力与接触面黏聚力差别较大, 随着含水率的增加, 接触面的黏聚力逐渐趋近于土体黏聚力; 但含水率对内摩擦角的影响不明显, 接触面的摩擦角一直大于土体的内摩擦角。

殷宗泽等^[8]认为接触面的剪切变形分为土体基本变形和剪切破坏变形。在剪切变形的初始阶段, 受接触面黏聚力和摩擦力的共同作用, 当剪应力达到最大黏聚力和最大摩擦力之和时, 即达到接触面峰值抗剪强度, 之后土体进入破坏变形阶段, 桩-土界面产生相对滑移, 此时是剩余土体在接触结构表面残留土体上的滑移, 残留土体在接触结构与剩余土体之间充当泥皮的作用, 致使桩-土接触面黏聚力和内摩擦角均随含

水率的增大而减小。

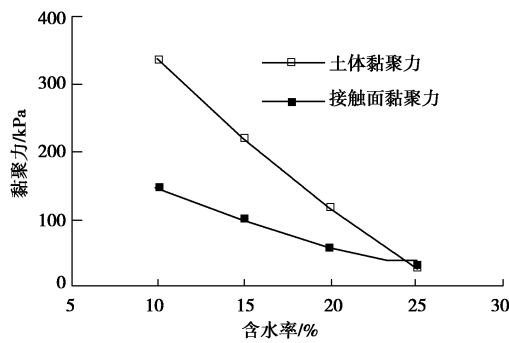


图 4 土体与接触面黏聚力与含水率关系曲线

Fig. 4 Cohesion-moisture content curves of soil and contact surface

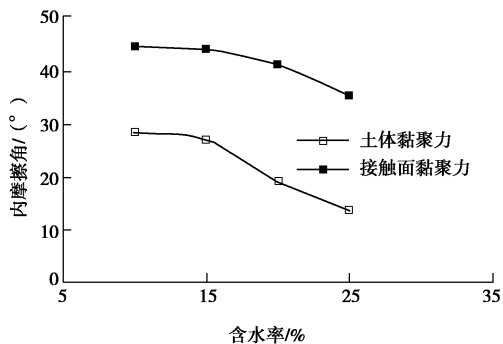


图 5 土体与接触面内摩擦角与含水率关系曲线

Fig. 5 Friction angle-moisture content curves of soil and contact surface

3.4 土体与接触面强度的相关性

相同含水率条件下, 土体强度与接触面强度虽有区别, 但存在一定的联系。若能建立土体强度参数与相应接触面参数的关系, 可借助较易获取的土体强度参数, 预估膨胀土地基中一定深度处的桩-土接触面强度。

由图 4, 5 可知, 膨胀土和接触面的黏聚力和摩擦角与含水率间关系符合线性关系, 将其线性拟合关系汇总如表 3 所示。

表 3 土体和接触面强度参数与含水率拟合关系

Table 3 Fitting relationship among strength parameters, moisture content of soil and contact surface

强度参数		线性关系表达式
c/kPa	土体	$c_s = -20.67w + 537.7$
	接触面	$c_f = -7.68w + 218.97$
$\varphi/(^\circ)$	土体	$\varphi_s = -1.03w + 40.29$
	接触面	$\varphi_f = -0.62w + 52.05$

由于土体和接触面强度参数与含水率间均符合线性关系, 可假设用土体强度参数表征的接触面强度参

数亦符合线性关系, 即

$$c_f = ac_s + b \quad (1)$$

$$\varphi_f = c\varphi_s + d \quad (2)$$

式中, a, b, c, d 是表征参量。由莫尔-库仑抗剪强度表达式:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (3)$$

将式 (1)、(2) 代入式 (3) 中可得到用土体强度参数表征的桩-土接触面抗剪强度方程:

$$\tau_f = \sigma \tan(c\varphi_s + d) + ac_s + b \quad (4)$$

由前述吸湿路径下土体与接触面强度参数的试验成果拟合关系式, 通过含水率作为中间变量, 可得出接触面强度预测参数, $a=0.37, b=19.19, c=0.60, d=27.82$ 。

4 结 论

针对大气环境作用对原状膨胀土宏微观特性的影响, 利用恒温恒湿设备控制制样过程, 模拟环境温、湿度条件, 对吸湿环境下原状膨胀土及与桩接触界面强度特性展开试验研究, 得到以下 3 点结论。

(1) 吸湿环境下, 含水率对土体强度的影响比对接触面强度的影响效果更明显, 影响效果的差异性随含水率的增加而减小; 当土体吸湿至接近饱和含水率状态时, 原状膨胀土与桩的接触面强度近似等于土体强度。

(2) 土质特性对桩-土接触面强度特性具有重要的影响作用。膨胀土在黏聚力和内摩擦角随含水率增加而减小的过程中, 其桩-土接触面的黏聚力和摩擦角也随含水率的增加而减小。

(3) 通过土体和接触面强度参数与含水率的拟合关系, 得到用土体强度参数表征的桩-土接触面抗剪强度表达式, 利用该式能够实现吸湿环境下原状膨胀土与混凝土桩接触界面的宏观强度预测。

参考文献:

- [1] 高国瑞. 近代土质学[M]. 南京: 东南大学出版社, 1990. (GAO Guo-ru. Modern science of rock and soil[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1990. (in Chinese))
- [2] 缪林昌, 仲晓晨, 殷宗泽. 膨胀土的强度与含水率的关系[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 71 - 75. (MIAO Lin-chang, ZHONG Xiao-chen, YIN Zong-ze. The relationship between strength and water content of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 71 - 75. (in Chinese))
- [3] 肖宏彬. 竖向荷载作用下大直径桩的荷载传递理论及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005. (XIAO Hong-bin. Theoretical and application research on load transfer of

- vertically loading diameter piles[D]. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese))
- [4] 缪林昌, 仲晓晨, 殷宗泽. 非饱和膨胀土变形规律的试验研究[J]. 大坝观测与土工测试, 1999, **23**(3): 36 - 39. (MIAO Lin-chang, ZHONG Xiao-chen, YIN Zong-ze. Test research of unsaturated expansive soil laws[J]. Observation and Geotechnical Tests, 1999, **23**(3): 36 - 39. (in Chinese))
- [5] 孔令伟, 李雄威, 郭爱国, 等. 脱湿速率影响下的膨胀土过程性状与持水特征初探[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3): 335 - 340. (KONG Ling-wei, LI Xiong-wei, GUO Ai-guo, et al. Preliminary study on engineering behaviors and water retention characteristics of expansive soil under influence of drying rate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 335 - 440. (in Chinese))
- [6] 缪林昌, 殷宗泽. 非饱和土的剪切强度[J]. 岩土力学, 1999, **20**(3): 1 - 6. (MIAO Lin-chang, YIN Zong-ze. Shear strength of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, **20**(3): 1 - 6. (in Chinese))
- [7] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工程工业出版社, 1997. (LIU Te-hong. Problems related to expansive soil in engineering constructions[M]. Beijing: China Architecture and Buildings Press, 1997. (in Chinese))
- [8] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(3): 14 - 22. (YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structure material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(3): 14 - 22. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)