DOI:10.13409/j. cnki. jdpme. 2018. 01. 016

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^{*}

王永洪^{1,2},张明义^{1,2},白晓宇^{1,2},刘俊伟^{1,2},高 强¹

(1.青岛理工大学土木工程学院,山东 青岛 266033;

2. 青岛理工大学蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心,山东青岛 266033)

摘要:利用青岛理工大学自行研制的恒刚度直剪仪,完成了18%、20%、25%、28%共4组不同含水率黏性土与混 凝土大型直剪试验,重点对不同含水率和法向应力下剪应力—剪切位移关系曲线进行分析,探讨了含水率的变化 对黏性土与混凝土界面力学特性的影响规律。试验结果表明:黏性土与混凝土界面的剪应力—剪切位移关系曲线 受到含水率变化的影响。当含水率较高时,界面剪应力达到峰值后剪切变形表现为典型的弹塑性变形;当含水率 较低时,界面剪应力—剪切位移关系曲线呈现出折线型关系。界面抗剪强度随含水率的增大而减小,但抗剪强度 与法向应力始终保持线性关系,黏聚力受临界含水率25%左右的影响,小于临界含水率时,黏聚力随含水率的增大 而增大,大于临界含水率后,黏聚力随含水率的增大而减小;摩擦系数受含水率的影响较小,变化幅度仅为5.5%。

关键词: 含水率; 黏性土与混凝土界面; 剪切特性; 室内试验 中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1672-2132(2018)01-0118-06

Laboratory Experimental Study on Shear Behavior of Clayey Soil-concrete Interface under Different Moisture Conditions

WANG Yonghong^{1,2}, ZHANG Mingyi^{1,2}, Bai Xiaoyu^{1,2}, LIU Junwei^{1,2}, GAO Qiang¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

 Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: Based on a self-made constant-stiffness direct shear instrument designed by Qingdao University of Technology, direct shear tests were conducted on four types of clayey soil-concrete interface with water contents of 18%, 20%, 25% and 28%. The shear stress-strain response was analyzed under different water contents and normal stresses, and the effect of water content on the properties of the clayey soil-concrete interface was discussed. Test results showed that water content affected the shear deformation of the clayey soil-concrete surface. When the water content was high, shear deformation exhibited a typical elasto-plastic deformation after the peak interface shear stress was reached. In contrast, when the water content was low the curve of interface shear stress versus shear displacement showed a shape of fold line. The interface shear

^{*} 收稿日期:2017-12-22;修回日期:2018-01-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51078196;41502304)、山东省重点研发计划项目(2017GSF16107)、山东省自然科 学基金项目(ZR2016EEP06)资助

作者简介:王永洪(1984-),男,讲师,博士研究生。主要从事土力学与桩基础工程研究。Email:hong7986@163.com

strength decreased with the increase of water content, but a linear relationship held between shear strength and normal stress. The cohesion was affected by the critical water content of 25%; it increased with increasing water contents when the water content was less than the critical value. However, it decreased with increasing water contents while the water content was more than the critical value. Water contents exerted a limit impact on the frictional coefficient, whose variation was merely 5.5%.

Keywords: water content; clayed soil-concrete interface; shear behavior; laboratory experiment

引 言

在土木工程和水利工程的大量实际工程中,存 在土与结构物的相互作用问题,为了准确模拟土与 结构物之间的接触面性状,国外学者对不同类土与 不同材料结构物接触面进行了深入研究[1-7],国内学 者对砂土、粗粒土和黏性土与结构物接触面也进行 了大量试验研究[8-15],总结出了影响接触面力学特 性的主要因素是接触面的粗糙度、法向应力和土的 物理状态。但上述试验均是基于改变砂土和粗粒土 的粒径大小、颗粒级配和密实度等展开的研究。王 伟等[16-17] 通过对不同含水率的黏性土与混凝土接触 面进行正反向单剪试验,并建立了接触面剪切模型, 研究了接触面摩擦角和黏聚力受含水率变化的影响 规律,摩擦角随含水率的的增大而减小,黏聚力则是 先增大后减小;卢廷浩等[18]通过研究土与不同接触 材料的接触面在4个含水率下的力学行为,得到了 含水率增大时,黏土与混凝土和砖接触面的摩擦角 急剧降低,黏聚力先增大后减小的结论;贺炜等^[19] 通过自制的混凝土-非饱和土试样,认为粘性土存在 界面粘聚力,界面剪切强度及对应的剪切破坏位移 呈现含水率增加剪切强度减小、剪切破坏位移增大 的特性;李建华等^[20]研究了红粘土与混凝土结构物 的接触面力学特性,发现界面粘聚力随含水量的增 加先增大后减小,且存在峰值粘聚力,摩擦角线性较 小。上述试验虽然改变了土的含水量这一物理状 态,但是因试验材料、试验条件及试验方法的不同, 关于不同含水率的黏性土与混凝土剪切特性规律仍 没有得到一致的结论。

本文利用室内大型恒刚度剪切仪,制定了4种 不同含水率、不同法向应力下的黏性土与混凝土界 面剪切试验方案,通过分析试验数据得到剪应力— 剪切位移关系曲线,以期研究含水率对黏性土与混 凝土界面剪切特性的影响,得出不同含水率的黏性 土与混凝土界面剪切特性规律。

1 试验方案

1.1 试验仪器

恒刚度剪切仪是青岛理工大学自行研制的,该 仪器主要部分是土与混凝土剪切模拟系统,包括上 剪切盒、下剪切盒两部分,采用恒刚度弹簧系统提供 法向力,下剪切盒的直线运动靠滚轴双向传动系统 实现,同时也可以往复循环运动,滚轴双向传动系统 包括数控电机和双向控制部件,数控电机包括变频 电机、减速机和变频器,双向控制部件包括形成开关 和刻度标尺。该仪器不但避免了传统直剪仪中的尺 寸效应问题,而且成功实现了在剪切过程中剪切面 积保持不变,且采用恒刚度弹簧加载更符合实际的 土与混凝土相互作用机理。恒刚度剪切仪弹簧加载 系统如图1所示,恒刚度剪切仪主体部分如图2所 示,恒刚度剪切仪主要参数指标如表1所示。

表1 恒刚度剪切仪主要参数指标

 Table 1
 Main parameters index of constant normal stiffness shear apparatus

上剪切盒尺寸/mm			下剪切盒尺寸/mm			有效接触面积/
长	宽	高	ĸ	宽	高	m^2
700	300	300	900	320	120	0.21



图 1 恒刚度剪切仪弹簧加载系统

Fig. 1 Spring-based loading system of constant-stiffness direct shear apparatus

1.2 试样制备

本次试验采用重塑黏性土为研究对象,原状黏



图 2 恒刚度剪切仪主体部分

Fig. 2 Main part of constant-stiffness direct shear apparatus

性土取自青岛即墨市某地教学楼基坑内的粉质黏 土。原状土的物理力学性质见表 2。采用重塑土直 剪试验方法,参照《土工试验方法标准》^[22],经过烘 干、粉碎、过筛 3 道工序制成土样,重塑土的含水率 通过干密度和添加水量来控制,根据原状土的干密 度把重塑土的干密度控制在 1.59 g/cm³,通过添加 不同水量制备含水率为 18%、20%、25%、28%的 4 组重塑土样。

表 2 原状土的物理力学性质 Table 2 Mechanical characteristics of undisturbed soil

相对	密度/	干密度/	液限/	塑限/	塑性
密度	$(g \cdot cm^{-3})$	$(g \cdot cm^{-3})$	%	%	指数/%
2.72	1.98	1.58	31.3	13.5	17.8

1.3 重塑土直剪试验方案

根据排水直剪试验将剪切速率取为 0.1 mm/min, 认为超孔隙水压力消散。分别施加 25、50、100、150 kPa 的法向应力,研究重塑黏性土样在不同含水率 状态下与混凝土接触面的剪切特性。通过记录剪切 过程刻度标尺上的剪切位移,下剪切盒剪切位移为 6 mm 时停止剪切,取剪切位移 4 mm 对应的剪应 力为抗剪强度。重塑黏性土物理力学性质如表 3 所 示。

表 3 重塑黏性土物理力学性质 Table 3 Mechanical characteristics of remolded clayey soil

相对	密度/	干密度/	液限/	塑限/	塑性指数
密度	$(g \cdot cm^{-3})$	$(g \cdot cm^{-3})$	%	%	/ 1/0
2.73	1.97	1.59	31.6	13.8	17.9

2 试验结果分析

2.1 不同含水率条件剪应力一剪切位移曲线特性

利用恒刚度剪切仪的自动数据采集系统,得到 20 剪切过程的剪应力和法向应力数据,绘制了不同含 水率条件下黏性土与混凝土界面的剪应力与剪切位 移(τ-μ_s)关系曲线,如图 3 所示。

从图 3 可以看出,本文试验结果与贺炜等^[19]和 李建华等^[20]的研究结果类似:同一含水率土样施加 的法向应力越大,剪应力峰值和剪切破坏位移越大; 各含水率状态下黏性土与混凝土界面的剪应力均出 现了明显的峰值,剪应力峰值随着含水率的增大而 减小,剪切破坏位移随着含水率的增大而增大,但与 李建华等和贺炜等的研究结果不同之处主要有:

(1)含水率为28%的试验条件,剪应力与剪切 位移关系曲线呈现出明显的应变软化现象,剪应力 峰值过后强度逐渐降低,进入应变软化阶段,最后稳 定到残余强度。

(2) 对于含水率为 18%、20%、25% 的试验条件,剪应力峰值强度达到峰值后趋于稳定,对应的剪切位移持续增加,呈现出典型的弹塑性变形。

2.2 不同法向应力条件剪应力一剪切位移曲线特性

为进一步分析含水率对黏性土与混凝土界面剪 应力与剪切位移($\tau - \mu_s$)关系曲线,绘制各法向应力 下不同含水量率的 $\tau - \mu_s$ 关系曲线,如图 4 所示。

由图 4 可知,剪应力峰值随着含水率的增加而 减小,达到剪应力峰值所需的剪切破坏位移则增大, 与图 3 得到的结论一致,含水率较大的黏性土与混 凝土界面首先发生破坏,与杨丽君等^[21]的结论相 同。同时可以看出以下几点:

(1)剪应力与剪切位移关系曲线初始斜率基本 一致,随着含水率的增加,曲线斜率不再一致,含水 率越大的黏性土与混凝土界面关系曲线斜率越大。

(2)法向应力在 25、50、100 kPa 时,剪应力与剪 切位移关系曲线达到峰值后呈现刚塑性的变形特 征,曲线近似为双折线型,没有应变软化的现象,当 法向应力施加到 150 kPa 时,剪应力与剪切位移关 系曲线出现波动,呈现不明显的软化现象。

2.3 黏性土-混凝土界面抗剪强度特性

由以上剪应力与剪切位移关系曲线试验数据, 可得到不同含水率时的黏性土与混凝土界面抗剪强 度与法向应力呈较好的直线关系(图 5),符合摩 尔一库伦强度关系式如下:

 $\tau_f = \sigma \tan \varphi + c \tag{1}$

式中: τ_f 为黏性土与混凝土界面抗剪强度;c为黏性 土与混凝土界面黏聚力; φ 为黏性土与混凝土界面







Fig. 4 Shear stress-displacement curves of different normal stresses

摩擦角;σ为黏性土与混凝土界面摩擦系数。

由图 5 可见, 黏性土与混凝土界面抗剪强度随 着含水率的增加而降低。





Fig. 5 Relationship between shear strength and normal stress of interface

2.4 黏性土-混凝土界面黏聚力和摩擦角特性

通过黏性土与混凝土界面抗剪强度与法向应力 线性曲线可以总结出黏性土与混凝土界面黏聚力和 摩擦角的变化规律,图6、图7分别为黏性土与混凝 土界面黏聚力和摩擦角与含水率的关系曲线。





Fig. b Curves of water content versus conesion of interface

试验结果表明:黏聚力随着含水率的增加先增 加后下降(图 6),当黏聚力达到峰值时临界含水率 约在 25%左右,此时黏性土样在法向应力作用下处 于塑性状态,黏性土与混凝土界面粘结状态最好,所 以达到了峰值黏聚力,随着含水率增加,土体与混凝 土界面会形成一层润滑薄膜,只是黏性土与混凝土 界面黏聚力降低,抗剪强度也随着降低。

黏性土与混凝土界面摩擦角随着含水率的增加 而下降,最后趋于稳定,摩擦系数下降幅度仅为 5.5%左右(图7),由此可得,黏性土与混凝土界面



图 7 界面含水率与摩擦系数关系曲线

Fig. 7 Curves of water content versus coefficient of friction of interface

抗剪强度受含水率影响的主要是黏聚力,黏聚力随 着含水率的变化是致使抗剪强度变化的关键原因。

3 结论及展望

(1)界面法向应力和土样含水率均对黏性土与 混凝土界面剪应力和剪切位移影响,对剪应力而言, 界面法向应力比土样含水率影响大,土样含水率对 剪切位移的影响比界面法向应力更明显。

(2)黏性土与混凝土界面剪应力峰值随含水率的增大而减小,剪切破坏位移随含水率的增大而增大,含水率越大越易出现软化现象,含水率越小越呈现出典型的弹塑性变形。

(3)法向应力越小,剪应力与剪切位移曲线近似 为双折线型,没有应变软化现象,当法向应力增大到 150 kPa时,剪应力与剪切位移曲线出现波动。

(4)黏性土与混凝土界面抗剪强度与法向应力 呈线性关系,黏聚力随着含水率的增加先增加后下 降,摩擦角随着含水率的增加而下降,黏聚力随着含 水率的变化是影响抗剪强度的主要因素。

参考文献:

- Potyondy J G. Skin friction between various soils and construction material[J]. Geotechnique, 1961,11(4): 339-353.
- [2] Clough G W, Duncan J M. Finite element analysis of retaining wall behavior [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, 97 (12):1657-1672.
- [3] Uesugi M, KishidaH. Influential factors of between steel and dry sands [J]. Soils and Foundations, 1986,

26(2):33-46.

- [4] Uesugi M, Kishida H, Tsubakihara Y. Behavior of sand particles in sand-steel friction [J]. Soils and Foundations, 1988,28(1):107-118.
- [5] Evgin E, Fakharian K. Effect of stress paths on the behavior of sand-steel interfaces [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996,33(6):485-493.
- [6] Fakharian K, Evgin E. Cyclic simple-shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, 123 (12): 1096-1105.
- [7] Desai C S, Rigby D B. Cyclic interface and joint shear device including pore pressure effects [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997,123(6):568-579.
- [8] 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.
 HuLM, PuJL. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001,23(4):431-435. (in Chinese)
- [9] 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.

Zhang G, Zhang J M. Development and application of a cyclic shear apparatus for soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003,25 (2):149-153. (in Chinese)

[10] 冯大阔,侯文峻,张建民. 粗粒土与结构接触面三维 力学特性的直剪试验研究[J]. 土木工程学报,2012, 45(5):169-175.

Feng D K, Hou W J, Zhang J M. Large-scale direct shear test investigation of the 3D behavior of a gravelstructure interfaces[J]. China Civil Engineering Journal, 2012,45(5):169-175. (in Chinese)

[11] 陆 勇,周国庆,夏红春,等.高压下粗粒土-结构接 触面特性受结构面形貌尺度影响的试验研究[J].岩 土力学,2013,34(12):3491-3499.

Lu Y, Zhou G Q, Xia H Ch, et al. Effect of shape scale on characteristics of coarse grained soil-structural interface under medium and high pressures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002,23(2):213-216. (in Chinese)

[12] 刘方成,尚守平,王海东. 粉质黏土-混凝土接触面特 性单剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30 (8):1720-1728.

Liu F Ch, Shang Sh P, Wang H D. Study of shear properties of silty clay-concrete interface by simple shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(8):1720-1728. (in Chinese)

- [13] 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 H, Zhao Ch F, Tao G X, 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. (in Chinese)
- [14] 石 熊,张家生,刘 蓓,等. 红黏土与混凝土接触 面剪切特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学 版), 2015,46(5):1826-1831.
 Shi X, Zhang J Sh, Liu B, et al. Experimental research on shearing properties of interface between red clay and concrete [J]. Journal of Central South University, 2015,46(5):1826-1831. (in Chinese)
- [15] 陈俊桦,张家生,李 键. 接触面粗糙度对红黏土-混凝土接触面力学特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(5):1682-1688.
 Chen J H, Zhang J Sh, Li J. Influence of interface roughness on mechanical properties of red clay-concrete interface[J]. Journal of Central South University, 2016,47(5):1682-1688. (in Chinese)
- [16] 王 伟,卢廷浩,宰金珉,等. 土与混凝土接触面反 向剪切单剪试验[J]. 岩土力学,2009,30(5):1303-1306.

Wang W, Lu T H, Zai J M, et al. Negative shear test on soil-concrete interface using simple shear apparatus [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1303-1306. (in Chinese)

 [17] 王 伟,卢廷浩,周爱兆.土与混凝土接触面反向单 剪本构模型[J].土木建筑与环境工程,2011,33(2): 1303-1306.

Wang W, Lu T H, Zhou A Zh. Constitutive model for negative simple-sheared soil concrete interface [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011,33(2):1303-1306. (in Chinese)

[18] 卢廷浩,王 伟,王晓妮,等.土与结构接触面改进 直剪试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报,2006,22(1): 82-85.

(下转第 192 页)