

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.006



剪切速率对黏性土-混凝土界面抗剪强度影响的试验研究

王永洪, 张明义, 白晓宇, 刘俊伟

(青岛理工大学 土木工程学院; 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:通过自行研制的大型恒刚度桩-土界面直剪仪,进行6种剪切速率的黏性土-混凝土界面剪切试验,探讨剪切速率对黏性土-混凝土界面抗剪强度的影响规律。结果表明:在黏性土-混凝土界面,超孔隙水压力随着剪切速率的提高而增大;法向应力和剪切速率通过影响超孔隙水压力大小,决定黏性土-混凝土界面剪切峰值强度和剪切破坏位移的大小;剪应力-剪切位移关系曲线由基本一致变化到一定范围内产生偏离,且法向应力和剪切速率越大偏离越显著,并出现明显的应变软化现象;剪切速率从0.4 mm/min增加至5.0 mm/min,黏性土-混凝土界面抗剪强度减小幅度增大,摩擦系数减小0.1,有效黏着力的变化介于0.81~5.93 kPa之间。

关键词:剪切速率;直剪;黏性土;抗剪强度;超孔隙水压力

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)01-0048-07

Experimental research on effect of shear rate on shear strength of clayey soil-concrete interface

Wang Yonghong^{1,2}, Zhang Mingyi^{1,2}, Bai Xiaoyu^{1,2}, Liu Junwei^{1,2}

(College of Civil Engineering; Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China)

Abstract: The direct shear tests of clayey soil-concrete interface with six series of shear rates were carried out by using the self-developed large-scale constant normal stiffness pile-soil interface shear apparatus. The effect of shear rate on shear strength of clayey soil-concrete interface was explored in this paper. The test results indicate that excess pore water pressure increases with the increased shear rate. The excess pore water pressure is influenced by both normal stress and shear rate, which is closely related to shear peak strength and shear failure strain of clayey soil-concrete interface. The shear stress-shear strain curves are basically identical at the beginning and then deviate in a certain range, which deviate the more obviously and present significant strain-softening appearing, with higher normal stress and faster shear rate. The decreased magnitude on shear strength of clayey soil-concrete interface increases, and the friction coefficient decreases to 0.1 and the effective adhesive force varies from 0.81 kPa to 5.93

收稿日期:2018-06-26

基金项目:国家自然科学基金(51778312,51809146,41772318);山东省重点研发计划(2017GSF16107,2018GSF117010,2018GSF117008);山东省自然科学基金(ZR2016EEP06,ZR2017DEE006)

作者简介:王永洪(1984-),男,博士生,主要从事土力学及桩基础研究,E-mail:hong7986@163.com.

Received:2018-06-26

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51778312,51809146,41772318); The Shandong Key Research and Development Program(No. 2017GSF16107,2018GSF117010,2018GSF117008); Natural Science Foundation of Shandong(No. ZR2016EEP06,ZR2017DEE006)

Author brief: Wang Yonghong(1984-), PhD candidate, main research interests: soil mechanics and pile foundation, E-mail:hong7986@163.com.

kPa as the shear rate increases from 0.4 mm/min to 5.0 mm/min.

Keywords: shear rate; direct shear; clayey soil; shear strength; excess pore water pressure

预制桩沉桩过程中,桩侧阻力大小是通过桩身材料和桩周土体相互作用发挥出来的,因此,桩-土界面的力学特性直接决定着预制桩的沉桩阻力,是预制桩沉桩过程的最关键技术指标,同时,受到很多因素的影响。界面剪切试验是研究土与混凝土结构物接触面受力变形规律的常用方法^[1-2]。

受到土的种类及试验条件的影响,土与混凝土接触面的剪切机制非常复杂。这些影响因素包括土的类别及物理状态、界面粗糙度、应力历史及大小、剪切速率等^[3]。关于这一课题,虽然目前已取得了众多的研究成果,但对其中的主要影响因素仍没有得到一致的结论,原因是试验材料、试验条件及试验方法的不同^[4-6]。

土的种类对界面剪切特性的影响非常显著。众多学者研究了土体与混凝土界面的相互作用特性,土的种类包括砂土^[7-9]、粗粒土^[10]和黏性土^[11-13]。张嘎等^[14]、张治军等^[15]、彭凯等^[16]、朱俊高等^[17]还研究了泥皮的存在对界面力学特性和作用机制的影响。关于界面剪切强度受剪切速率的影响,孙涛等^[18]对超固结黏土在 3 种不同剪切速率下进行环剪试验,分析表明,剪切速率在 1 cm/s 时残余强度几乎与剪切速率在 0.01 cm/s 和 0.1 cm/s 一样。黄文熙^[19]认为在低法向应力下,干砂的抗剪强度受剪切速率影响可以忽略不计。周杰等^[20]在 5 种不同剪切速率和 16 组高法向应力试验条件下,得到了标准砂抗剪强度高、低应力分界点和快慢剪切速率分界线。徐肖峰等^[21]研究了粗粒土随剪切速率变化抗剪强度和颗粒破碎的变化规律,剪切速率在 5 mm/min 以上时,抗剪强度随剪切速率减小而降低,剪切速率在 5 mm/min 以下时剪切速率越小,颗粒破碎率越大。

综上所述,目前有关剪切速率对黏性土与混凝土界面剪切强度影响的研究较少,尤其缺少桩-土界面抗剪强度受剪切速率影响的研究。笔者对黏性土-混凝土界面进行了不同剪切速率下的大型直剪试验,探讨了桩-土界面抗剪强度受剪切速率变化的影响规律。

1 试验方案

1.1 试验仪器

试验所用仪器为自行研制的大型恒刚度桩-土界面直剪仪。该试验系统由恒刚度加载系统、剪切

模拟系统、传动系统以及数据采集系统 4 部分组成,试验系统如图 1、图 2、图 3 所示。该仪器剪切速率由滚珠丝杠实现了螺杆旋转运动变为下剪切盒直线运动,丝杠旋转一圈,下剪切盒移动 10 mm。数控机床通过变频电机、减速机及变频器控制箱控制下剪切盒移动、停止及剪切速率。采用滚珠丝杠和数控机床最终实现了上剪切盒静止,下剪切盒移动,最大单向剪切位移为 200 mm。大型恒刚度桩-土界面直剪仪主要参数指标见表 1。

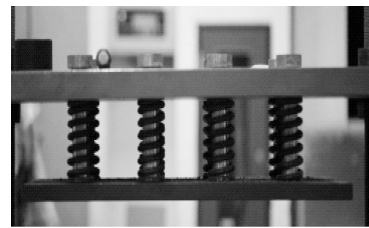


图 1 恒刚度弹簧加载系统

Fig. 1 Main part of constant normal stiffness direct shear apparatus

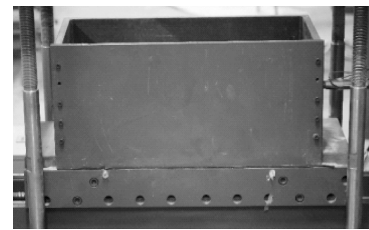


图 2 桩-土界面剪切模拟系统

Fig. 2 Shear simulation system of pile-soil interface

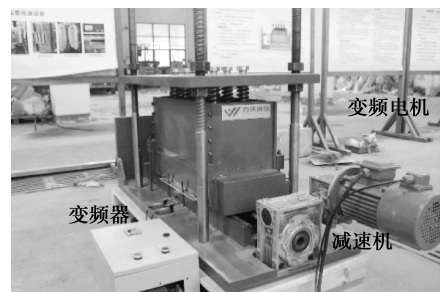


图 3 大型恒刚度桩-土界面剪切仪

Fig. 3 Large-scale constant normal stiffness direct shear apparatus of pile-soil interface

表 1 大型恒刚度桩-土界面直剪仪主要参数指标
Table 1 Main parameters index of large-scale constant normal stiffness pile-soil interface shear apparatus

剪切速率/ (mm · min ⁻¹)	有效接触 面积/m ²	最大位移/mm	
		往复	单向
0.15~15	0.21	100	200

1.2 土样制备

黏土取自青岛某地基坑开挖,按照《土工试验方法标准》(GB 50123—1999)^[22]的要求重塑土样,原状黏土需要烘干、粉碎和 0.075 mm 过筛 3 道工序,预配含水率为 28%、干密度为 1.58 g/cm³ 的饱和土样并分 5 次分层击实,预配结束后静置 2~3 d。试验制备黏土参数如表 2 所示。

表 2 试验制备黏土参数

Table 2 Parameters of seepage property for sandstone

相对密度	密度/ (g · cm ⁻³)	干密度/ (g · cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数/%
2.72	1.98	1.58	31.3	13.5	17.8

1.3 传感器安装

为了测试在不同剪切速率下进行的剪切试验过程中黏性土与混凝土界面超孔隙水压力的变化情况,在留有锯齿状的混凝土块上预留孔洞,安装 2 个微型硅压阻式孔隙水压力传感器,测试黏性土与混凝土界面超孔隙水压力大小,孔隙水压力传感器尺寸为 8 mm × 15 mm。同时,在距离孔隙水压力传感器中点 10 cm 处安装 1 个微型硅压阻式土压力传感器,土压力传感器测试结果为黏性土与混凝土界面的法向应力,土压力传感器尺寸为 20 mm × 10 mm。孔隙水压力和土压力传感器安装如图 4 所示。

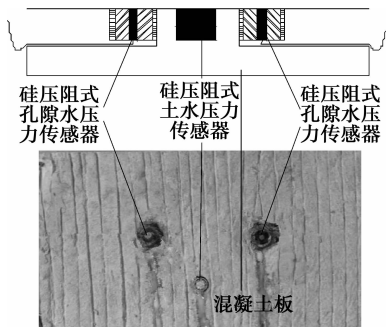


图 4 微型硅压阻式孔隙水压力和土压力传感器安装

Fig. 4 Installation of silicon piezoresistive pore water pressure and soil pressure sensors

1.4 试验过程

直剪试验方案如表 3 所示。首先,给各土样都施加法向应力 200 kPa,使土体固结稳定至超孔隙水压力基本保持不变。然后,将法向应力分别卸至 25、50、100、150 kPa,由于试验土样是低塑性的黏性土,对黏性土结构性影响小,不考虑因形成不同超固结比造成的影响。最后,保持法向应力不变,在 0.4、0.6、0.8、1.0、2.0、5.0 mm/min 剪切速率下进行大型直剪试验。

表 3 直剪试验方案

Table 3 Program of direct shear test

剪切速率/ (mm · min ⁻¹)	法向应力/kPa	试验组数
0.4	25、50、100、150	4
0.6	25、50、100、150	4
0.8	25、50、100、150	4
1.0	25、50、100、150	4
2.0	25、50、100、150	4
5.0	25、50、100、150	4

2 试验结果分析

2.1 黏性土与混凝土界面超孔隙水压力变化曲线

试验之前将硅压阻式孔隙水压力传感器置于水中 15 min,使传感器透水石内充满水。首先给土体施加法向应力 200 kPa,此时两个孔隙水压力传感器读数均较大。进行剪切试验前记录法向应力分别卸载至 25、50、100、150 kPa 时的两个传感器读数,即初始超孔隙水压力,两个传感器读数基本一致,法向应力越大,超孔隙水压力越大,此规律与桩-土界面产生的超孔隙水压力随沉桩深度(上覆压力)增加而增大的规律相似^[23-24],不同法向应力时的初始超孔隙水压力大小如图 5 所示。

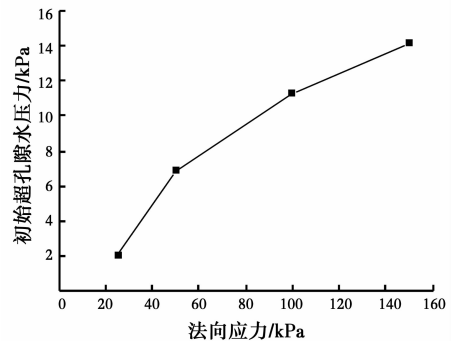
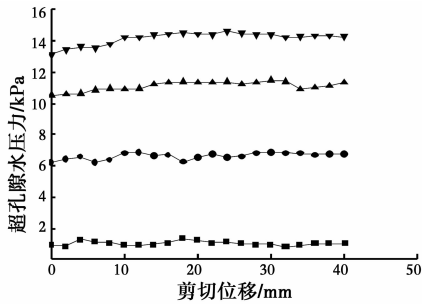


图 5 不同法向应力时的初始超孔隙水压力大小

Fig. 5 Variation curves of initial excess pore water pressure under different normal stresses

以 0.4 mm/min 剪切速率为例,超孔隙水压力与剪切位移变化曲线如图 6 所示,由图可见,超孔隙水压力变化不大,在法向应力 25、50 kPa 时,剪切位移在 0~5 mm 超孔隙水压力呈上升趋势,剪切位移增大时,超孔隙水压力出现波动,最后趋于稳定;在法向应力 100、150 kPa 时,超孔隙水压力随着剪切位移增大缓慢上升,最后趋于稳定,但超孔隙水压力变化均没超过 2 kPa。由此可见,超孔隙水压力剪切发生时,既没有消散,也没有因超孔隙水压力过大而

产生土体隆起破坏的现象。其他剪切速率下超孔隙水压力随剪切位移变化曲线没有一一列出,超孔隙水压力随着剪切速率变大而变大。



注: —■— 25 kPa —●— 50 kPa —▲— 100 kPa —▼— 150 kPa
图 6 剪切速率 0.4 mm/min 时超孔隙水压力与剪切位移变化曲线

2.3 剪切速率对剪应力-剪切位移曲线的影响

图 8 为不同总法向应力剪应力-剪切位移(τ - u)曲线。由图 8 可见,剪切峰值强度需要克服越来越大的剪应力才能达到稳定,其对应的剪切破坏位移也越来越大,剪切破坏位移在 25 kPa 和 150 kPa 时分别为 2~3 mm 和 10~12 mm。

当总法向应力为 25、50 kPa 时, τ - u 曲线在不同剪切速率下基本重合,但剪切速率 5.0 mm/min 的曲线在最下方,当总法向应力增大到 100、150 kPa 时, τ - u 曲线在不同剪切速率下产生了一定的偏离,且总法向应力越大偏离越明显,剪切速率越大偏离越大,剪切速率 5.0 mm/min 的曲线仍是在最下方。如图 8(d)所示,总法向应力 150 kPa 时,在剪切速率 5.0 mm/min 时,应变软化现象最明显。可以认为剪切速率越大,超孔隙水压力来不及消散,土颗粒间没有进行定向排列,越容易出现软化现象,由此推断, τ - u 曲线与剪切速率有关^[18]。

Fig. 6 Variation curves of excess pore water pressure versus shear strain with the shear rate of 0.4 mm/min

2.2 不同剪切速率下的剪应力-剪切位移曲线

根据有效应力原理,有效法向应力等于总应力减去超孔隙水压力,超孔隙水压力随着剪切速率提高而变大,从图 7 可以看出剪应力-剪切位移曲线在不同剪切速率下大体一致,在同一剪切速率下,剪切峰值强度和剪切破坏位移随有效法向应力增大而增大。

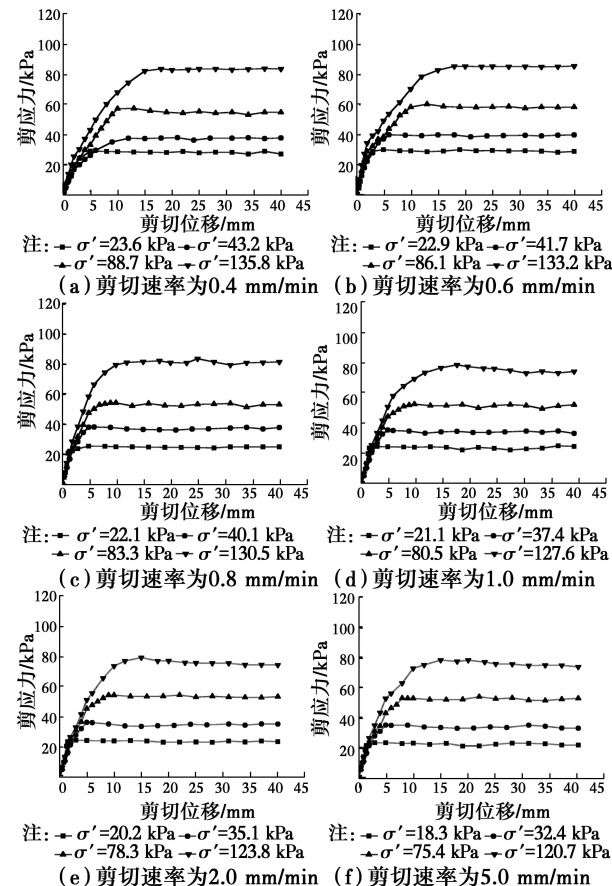


图 7 不同剪切速率下的 τ - u 曲线
Fig. 7 Shear stress-shear displacement curves under different shear rate

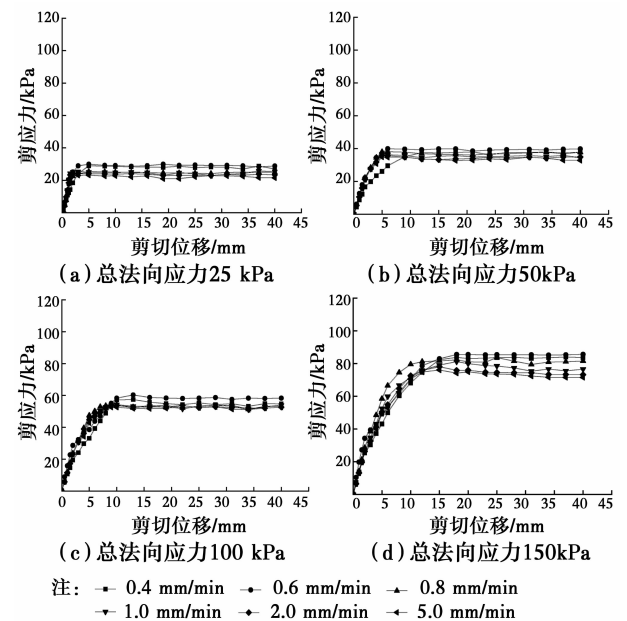


图 8 不同总法向应力下的 τ - u 曲线
Fig. 8 Shear stress—shear displacement curves under different effective normal stresses

2.4 剪切速率对抗剪强度的影响

根据不同剪切速率下黏性土与混凝土界面抗剪强度试验值,图 9 给出了在 4 种不同总法向应力状态下黏性土与混凝土界面抗剪强度随剪切速率的变化情况。从图 9 可以看出:总法向应力为 25、50 kPa 时,抗剪强度在最大和最小剪切速率下的差值小于 10%。但当总法向应力为 100、150 kPa 时,在 0.4~5.0 mm/min 剪切速率范围内抗剪强度变化可达 15% 以上。

本文的研究结果与周杰等^[20]和徐肖峰等^[21]的试验结果类似,周杰的试验表明:剪切速率增大抗剪强度减小,且随着法向应力增大,减小的速率越快。徐肖峰的粗粒土的大型直剪试验结果表明:剪切速率由 5 mm/min 增大到 10 mm/min,抗剪强度反而明显减小约 14%。与孙涛等^[18]的直剪试验结果稍有差别,孙涛的超固结饱和黏土环剪试验结果随着剪切速率增大,剪切峰值强度和稳定残余强度及对应的剪切破坏位移反而增加。

根据已有研究成果及直剪试验结果可尝试性的总结两点结论:1)在一定的剪切速率下,如文中的 1.0~5.0 mm/min 和周杰的 1.0 mm/min 对界面抗剪强度产生影响;2)就黏性土而言,在快速剪切条件下,超固结饱和黏性土对剪切速率可能更加敏感,此时黏性土的应力历史对黏性土与混凝土界面抗剪强度的影响很大。

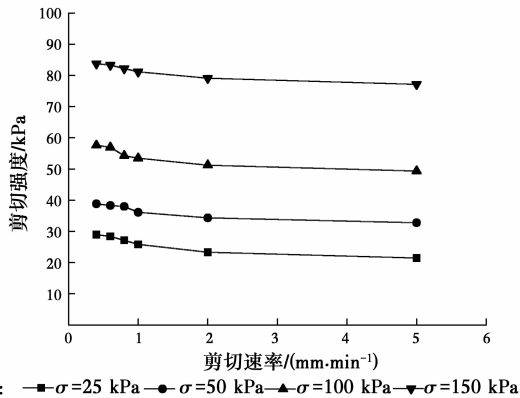


图 9 抗剪强度与剪切速率的关系曲线

Fig. 9 Curves of shear strength with shear rate

2.5 剪切速率对强度参数的影响

黏性土与混凝土界面的抗剪强度参数在抗剪强度曲线上得以体现。图 10 为试验中不同剪切速率时黏性土与混凝土界面的抗剪强度拟合直线。由图 10 可知,黏性土与混凝土界面抗剪强度随着有效法向应力的增大呈线性增加,拟合直线相关系数分别为:0.998、0.969、0.996、0.994、0.995、0.996,遵循摩尔库伦强度破坏准则

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

式中: τ_f 定义为黏性土与混凝土界面抗剪强度, kPa; σ' 定义为黏性土与混凝土界面有效法向应力, kPa; φ' 定义为黏性土与混凝土界面有效摩擦角; c' 定义为黏性土与混凝土界面有效粘着力, kPa。

为了分析黏性土与混凝土界面的抗剪强度参数受剪切速率的影响,将 4 种剪切速率下黏性土与混凝土界面的抗剪强度拟合直线进行比较。剪切速率不同,抗剪强度拟合直线斜率稍有变化,黏性土与混

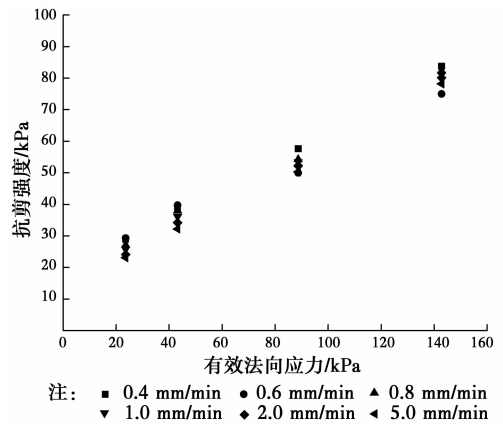


图 10 不同剪切速率下黏性土-混凝土界面 τ_f - σ' 曲线
Fig. 10 Shear strength-effective normal stresses curves of cohesive soil-concrete interface under different shear rate

凝土界面在剪切速率增大时,抗剪强度拟合直线斜率减小,如图 11(a)所示,即黏性土与混凝土界面摩擦系数受到了剪切速率的影响,剪切速率从 0.4 mm/min 增加至 5.0 mm/min,摩擦系数减小 0.1。

黏性土与混凝土界面在剪切速率增大时有效黏聚力出现波动,如图 11(b)所示,但剪切速率由 0.4 mm/min 增加至 0.6 mm/min 时,有效黏着力增加 0.87 kPa,剪切速率由 0.6 mm/min 增加至 5.0 mm/min 时,有效黏着力减小 5.93 kPa。

由以上分析可知,剪切速率影响黏性土与混凝土界面抗剪强度参数,这与根据图 9 所得到的结论一致。

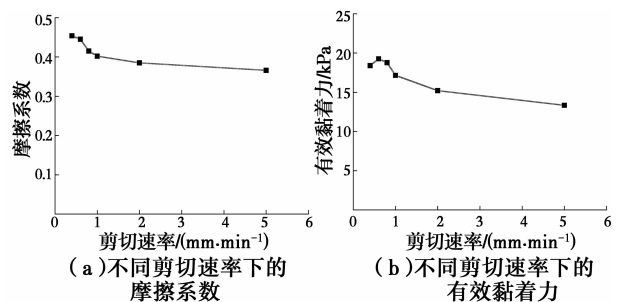


图 11 不同剪切速率下的摩擦系数和有效粘着力

Fig. 11 Friction coefficient and effective adhesive force under different shear rate

3 结论

基于不同剪切速率下的黏性土-混凝土界面直剪试验,可以得出如下结论:

1)黏性土-混凝土界面超孔隙水压力同时受法向应力和剪切速率的影响,随着法向应力增大和剪切速率的提高,超孔隙水压力逐渐增大。

2)随着剪切速率提高,剪应力-剪切位移曲线走

向大体一致,在相同剪切速率下,剪切峰值强度和剪切破坏位移随法向应力增大而增大。

3)在法向应力较小时,剪应力-剪切位移曲线在各剪切速率下基本重合,法向应力增大,较快剪切速率下曲线出现明显偏离,剪切速率 5.0 mm/min 的曲线在最下方,剪切破坏位移由 2~3 mm 增大到 10~12 mm。较快剪切速率下曲线产生了明显的应变软化现象,在剪切速率 5.0 mm/min 时,应变软化现象最明显。

4)总法向应力为 25、50 kPa 时,剪切速率增大,抗剪强度会略有减小,抗剪强度的差值小于 10%,当总法向应力为 100、150 kPa 时,抗剪强度受剪切速率影响,变化可达 15%以上。

5)黏性土与混凝土界面摩擦系数有效黏着力受到了剪切速率的影响,剪切速率从 0.4 mm/min 增加至 5.0 mm/min,摩擦系数减小 0.1,有效黏着力随着剪切速率的增大出现波动。

参考文献:

- [1] BASUDHAR P K. Modeling of soil-woven geotextile interface behavior from direct shear test results[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(4): 403-408.
- [2] LIU H B, SONGE X, LING H I. Constitutive modeling of soil-structure interface through the concept of critical state soil mechanics [J]. Mechanics Research Communications, 2006, 33(4): 515-531.
- [3] 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 C, SHANG S 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)
- [4] 肖成志, 冯晓静. 土工格栅-黏性土界面特性的拉拔试验分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(3): 47-51.
- XIAO C Z, FENG X J. Pullout-test analysis on properties of interface between geogrid and clay [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(3): 47-51. (in Chinese)
- [5] RICHARD P J, TUNCER B E, PETER J R, et al. Effect of particle shape on interface behavior of demsimulated granular materials [J]. The International Journal of Geomechanics, 2001, 1(1): 1-19.
- [6] 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 Z. Constitutive model for negative simple-sheared soil concrete interface [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(2): 1303-1306. (in Chinese)
- [7] GOMEZ J E, FILZ G M, EBELING R M, et al. Sand-to-concrete interface response to complex load paths in a large displacement shear box [J]. Geotechnical Testing Journal, 2008, 31(4): 358-369.
- [8] HU L M, PU J L. Testing and modeling of soil-structure interface [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(8): 851-860.
- [9] 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 L M, PU J L. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 431-435. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 龚辉, 赵春风, 陶幅雄, 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 C 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)
- [12] 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 S, LI J. Influence of interface roughness on mechanical properties of red clay-concrete interface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 47(5): 1682-1688. (in Chinese)
- [13] 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 H, LIU B, et al. Experimental research on shearing properties of interface between red clay and concrete [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 46(5): 1826-1831. (in Chinese)
- [14] 张嘎, 张建民. 夹有泥皮粗粒土与结构接触面力学特

- 性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1374-1378.
- ZHANG G, ZHANG J M. Experimental study on monotonic behavior of soil-structure interface with slurry[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1374-1378.
- [15] 张治军, 饶锡保, 王志军, 等. 泥皮厚度对结构接触面力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2433-2438.
- ZHANG Z J, RAO X B, WANG Z J, et al. Experimental study on influence of slurry thickness on mechanical behavior of interface between gravel and concrete [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2433-2438. (in Chinese)
- [16] 彭凯, 朱俊高, 张丹, 等. 粗粒土与混凝土接触面力学特性单剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1893-1900.
- PENG K, ZHU J G, ZHANG D, et al. Experimental study on mechanical behaviour of soil-structure interface by ring shear test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3256-3260. (in Chinese)
- [17] 朱俊高, Shakir R R, 杨有莲, 等. 土-混凝土接触面特性环剪单剪试验比较研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 692-696.
- ZHU J G, SHAKIR R R, YANG Y L, et al. Comparison of behaviors of soil-concrete interface from ring-shear and simple shear tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 692-696. (in Chinese)
- [18] 孙涛, 洪勇, 栾茂田, 等. 采用环剪仪对超固结黏土抗剪强度特性的研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2000-2010.
- SUN T, HONG Y, LUAN M T, et al. Shear strength behavior of overconsolidated clay in ring shear tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2000-2010. (in Chinese)
- [19] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利水电出版社, 1983.
- HUANG W X. Engineering properties of soils[M]. Beijing: Hydraulic and Hydropower Press, 1983. (in Chinese)
- [20] 周杰, 周国庆, 赵光思, 等. 高应力下剪切速率对砂土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2805-2810.
- ZHOU J, ZHOU G Q, ZHAO G S, et al. Analysis of influence of shear rate on shear strength of sand under high stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2805-2810. (in Chinese)
- [21] 徐肖峰, 魏厚振, 孟庆山, 等. 直剪剪切速率对粗粒土强度与变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 728-733.
- XU X F, WEI H Z, MENG Q S, et al. Effects of shear rate on shear strength and deformation characteristics of coarse-grained soils in large-scale direct shear tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 728-733. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国国家标准编写组. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Standard for soil test method; GB/T 50123-1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [23] 唐世栋, 何连生, 傅纵. 软土地基中单桩施工引起的超孔隙水压力[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 725-732.
- TANG S D, HE L S, FU Z. Excess pore water pressure caused by an installing pile in soft foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 725-732. (in Chinese)
- [24] 王育兴, 孙钧. 打桩施工对周围土性及孔隙水压力的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 153-158.
- WANG Y X, SUN J. Influence of pile driving on properties of soils around pile and pore water pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 153-158. (in Chinese)

(编辑 胡玲)