

# 粉土-混凝土界面与粉土剪切对比试验研究

李梦瑶, 李永辉, 吕梦凡, 郭院成

(郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001)

**摘要:**采用自制的大型直剪仪开展不同含水量条件下黄泛区粉土-混凝土界面剪切及粉土直剪试验,研究不同含水量下粉土-混凝土界面及粉土剪切力学特性。试验结果表明:粉土-混凝土界面和粉土直剪的剪切应力-剪切位移曲线均为应变硬化型;粉土直剪的剪缩变形明显大于界面剪切结果;相同条件下,粉土-混凝土界面的剪切强度大于粉土的直剪强度,随着含水量的增大,粉土-混凝土界面与粉土剪切强度的差异逐渐减小,粉土趋近饱和时,两者强度基本相同;粉土直剪破坏时的剪切位移大于界面剪切破坏时的剪切位移;粉土直剪的黏聚力和界面黏聚力、摩擦角随含水量的增大均近似呈线性减小趋势,粉土直剪的内摩擦角随含水量增加呈现先缓慢后加速减小的变化趋势。

**关键词:**大型直剪试验;粉土;粉土-混凝土界面;含水量;剪切强度

中图分类号:TU411.7

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2022)01-0171-08

## Comparative Shear Test Study on Silt-concrete Interface and Silt

Li Mengyao, Li Yonghui, Lü Mengfan, Guo Yuancheng

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China)

**Abstract:** A self-developed large direct shear apparatus was used to carry out the silt-concrete interface and silt shear tests in the yellow flood area under different water content. Through comparative analysis, the shear mechanical properties of the silt-concrete interface and silt under different normal stresses and water content were studied. The results showed that the shear stress-shear displacement curves of the silt-concrete interface and the silt exhibit strain hardening characteristics. The shear shrinkage deformation of the silt direct shear test is significantly greater than the silt-concrete interface. Under the same normal stress and water content, the shear strength of the silt-concrete interface is greater than that of the silt. As the moisture content increases, the difference in the shear strength between the silt-concrete interface and the silt gradually decreases. When the silt is close to saturation, the strength of the two is basically the same. In addition, the shear displacement of the silt under direct shear failure is greater than that at the silt-concrete interface. The cohesive force of silt, the cohesive force and friction angle of the silt-concrete interface are approximately linearly decreasing with the increase of water content, and the internal friction angle of silt increases slowly and then accelerately decreases as the water content increases.

**Keywords:** large direct shear test; silt; silt-concrete interface; water content; shear strength

## 0 引言

“黄河流域生态保护和高质量发展”国家战略

的提出,为沿黄中下游城市带来大量地下工程实践。黄河中下游处于因近代黄河决堤、改道、河(洪)流泛滥淤积形成的黄泛区,粉土地层分布

收稿日期:2021-06-18(修改稿)

作者简介:李梦瑶(1997—),女,河南洛阳人,硕士生,主要从事岩土工程、地下工程等领域的科研工作。

E-mail:Limengyao3063@163.com

通讯作者:李永辉(1983—),男,河南淮滨人,博士,副教授,主要从事土与结构相互作用、桩基、基坑工程等领域的教学与科研工作。E-mail:liyh109930@162.com

基金项目:国家自然科学基金(51508522)

广泛。黄泛区粉土工程性状复杂,具有黏性、渗透性较大,塑性指数及液限较低等特点<sup>[1]</sup>。粉土的抗剪强度不仅受垂直压力、干密度、温度、剪切速率等因素的影响,更与含水量密切相关<sup>[2-7]</sup>。研究表明,黄泛区粉土具有明显的水敏感性,随含水量增加,土体强度显著减小,变形增长,稳定性降低。地下工程普遍涉及土与结构界面剪切作用问题,而土体的力学性状是土与结构界面剪切力学行为的关键因素,粉土含水量增加产生的土体强度劣化必将引起土与结构界面剪切强度的降低,进而引发工程问题或事故。实际工程中,受降雨入渗、管线渗漏等因素的影响,土体增湿难以避免,因此,有必要研究不同含水量条件下黄泛区粉土与结构物接触面的力学特性及强度变化规律。

国内外关于土体与结构物接触面的相关研究始于 20 世纪 60 年代。1961 年, Potyondy<sup>[8]</sup> 利用应力应变式直剪仪研究了多种土体和结构物接触面之间的力学特性问题,发现法向应力、接触面粗糙度、含水量及桩周土体的性质对土体与结构物接触面的抗剪强度影响巨大。胡黎明等<sup>[9]</sup>、Su 等<sup>[10]</sup>、Al-Emami 等<sup>[11]</sup>、郭聚坤等<sup>[12]</sup> 通过直剪仪研究了砂土与混凝土、钢板、木板之间的相互作用特性,总结了界面粗糙度、含水量、孔隙比和法向应力对界面剪切行为的影响规律。殷宗泽等<sup>[13]</sup> 在直剪试验基础上,利用有限元分析的方法,分析了土体-混凝土界面的剪切变形特性,提出了接触面为刚-塑性变形的观点。Hamid 等<sup>[14]</sup> 发现基质吸力对土体抗剪强度和界面剪切强度的影响是非线性的。Liu 等<sup>[15]</sup>、杜鹃等<sup>[16]</sup>、王永洪等<sup>[17]</sup> 研究了冻土、碎石土、黏性土与混凝土界面的力学特征,发现:冻土-混凝土界面峰值剪切强度与含水量呈非线性关系;碎石土-混凝土界面的内摩擦角随含水量的增大逐渐减小,低含水量条件下,黏聚力随含水量的增加而增大。李永辉等<sup>[18]</sup> 通过桩土界面剪切试验发现,界面剪切作用对土体具有一定的影响范围,并在接触界面附近土体中逐渐形成剪切破坏带。王天亮等<sup>[19]</sup> 对粉土钢板接触面进行直剪试验研究,定量分析了温度、接触面粗糙度对接触面抗剪强度及其参数的影响。

目前,针对水敏感性较强的黄泛区粉土,考虑含水量影响的土与结构界面剪切力学特性的试验研究鲜有所见,相同条件下粉土和粉土与结构界面剪切性状及强度的差异尚未有学者进行对比分析。本文采用自行研制的大型直剪仪开展黄泛区粉土-

混凝土界面剪切与粉土直剪对比试验,研究不同法向应力和含水量条件下粉土-混凝土界面与粉土剪切力学特性的差异,探究含水量对剪切强度及其指标的影响规律,以期在明确含水量对黄泛区粉土抗剪强度影响的基础上,深入分析相同条件下粉土与混凝土结构界面剪切力学特性的内在机理,为黄泛区粉土地层地下工程实践提供有益参考。

## 1 室内大型直剪试验

### 1.1 试验仪器

采用郑州大学自行研制的大型直剪仪进行黄泛区粉土及粉土-混凝土界面剪切试验,如图 1 所示。该试验平台主要由结构加载反力架、剪切试验箱和电动伺服加载系统等组成。单个伺服加载作动器最大静载为 150 kN、行程距离为 300 mm。剪切试验箱由上剪切箱、下剪切箱、底梁转接板、加载板等组成;上剪切箱内部尺寸为 500 mm×500 mm×150 mm(长×宽×高),下剪切箱内部尺寸为 650 mm×500 mm×150 mm(长×宽×高),下剪切箱长度大于上剪切箱,可以保证试验过程中土-结构接触面面积的恒定;上、下剪切箱间设置滑动导轨,如图 2 所示,其限定剪切位移方向,亦减小剪切盒接触摩擦阻力;底梁转接板安装在反力架底梁上,转接板顶部安装水平移动导轨,且配置调平装置。

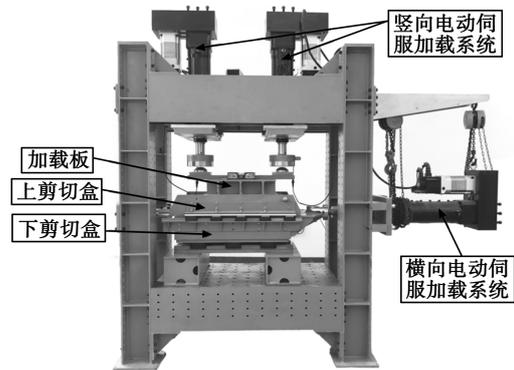


图 1 大型直剪试验平台

Fig. 1 The large direct shear apparatus

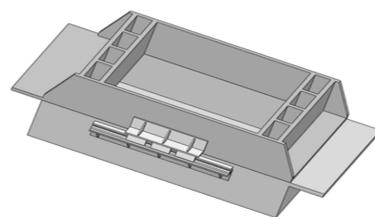


图 2 剪切试验箱

Fig. 2 Schematic view of shear boxes

加载板尺寸为 500 mm×500 mm×90 mm,通过半球状支点与两个竖向作动器接触,以实现协调施加法向荷载。水平剪切可采用应力或应变控制,也可实现单调加载、往返加载等自定义加载路径。与小型直剪仪相比,该试验平台不仅能较好消除尺寸效应的影响,且剪切过程施加的垂直压力均匀稳定,数据采集精度高,试验可控性和重复性较好。

## 1.2 试验土样

试验用土选用郑州市中原区某地铁站地下 7 m 处粉土,参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)测定其基本物理力学性质,如表 1 所示。取烘干土样 200 g 采用筛分法与密度计法相结合的方法测其颗粒级配,试验结果如表 2 所示,绘制成的颗粒级配累计曲线如图 3 所示。由试验结果可知,试验用土的颗粒粒径主要集中于 0.05~0.075 mm,其中粉粒含量高达 90%以上。土样的有效粒径  $d_{10}=0.0357$ ,中值粒径  $d_{30}=0.0572$ ,限定粒径  $d_{60}=0.0704$ 。不均匀系数  $C_u=1.972$ ,曲率系数  $C_c=1.262$ ;试验土颗粒级配不良。

表 1 试验土样的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of soil samples

天然密度 /( $g \cdot cm^{-3}$ )	含水量 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	比重
1.577	13.24	21.574	15.185	6.389	2.705

表 2 土样粒径分析试验结果

Table 2 Soil samples particle size analysis test results

粒径/mm	>0.1	0.1~0.075	0.075~0.05	<0.05
粒组含量 /%	17.9	11.8	56.8	13.5

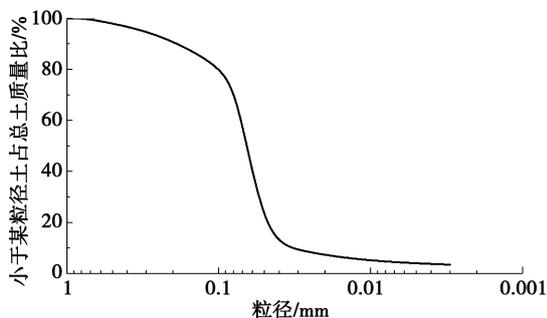


图 3 土体颗粒级配累计曲线图

Fig. 3 Soil particle gradation cumulative curve

试验前,将粉土碾碎、晾晒、过筛,并测得晾晒后的土体含水量。依据试验方案,分别进行 10%、13%、16%和 19%含水量土样的配置,配置完成后

装入密封箱密封,并放置于阴凉处静置 2 d,以实现土样含水量的均匀。试验装填土样时分别从土体的 3 个不同位置处取样、烘干测定其剪切试验时的含水量,分别为 10.52%、13.57%、16.65%和 19.54%。

## 1.3 混凝土板制作

根据粉土-混凝土界面剪切试验要求,制备 500 mm×600 mm×100 mm(长×宽×高)的混凝土板作为界面剪切混凝土试样。混凝土板制备采用 C30 混凝土,其配合比为 0.38:1:1.11:2.72(水:水泥:砂:石子)。制备时,用混凝土搅拌机充分搅拌均匀后,浇筑定制模具中成型、养护。实际工程中,挡土墙和预制混凝土桩等结构表面无明显凹凸起伏时,可视其结构表面为“光滑”<sup>[19]</sup>。因此,进行混凝土板制备时,对混凝土板与粉土接触的表面进行抹光处理,使其表面粗糙程度与实际工程结构表面基本接近。如图 4 所示,混凝土板表面无明显凹凸起伏和裂纹,可将其视为“光滑”表面。

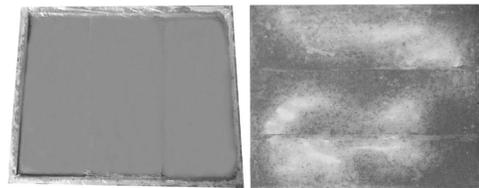


图 4 混凝土试样照片

Fig. 4 Photos of concrete sample

## 1.4 试验方案

为进行对比分析,本次试验不仅开展粉土与混凝土界面剪切试验,亦进行相同条件的粉土大型直剪试验。试验粉土含水量分别为 10.52%、13.57%、16.65%和 19.54%,法向压力分别为 100 kPa、200 kPa 和 400 kPa,剪切速率均为 1 mm/min。进行 24 组试验,试验方案如表 3 所示。

表 3 剪切试验方案

Table 3 Shear test scheme

试验类型	含水量 $\omega$ /%	法向应力 $\sigma_n$ /kPa	剪切速率 $v$ / ( $mm \cdot min^{-1}$ )
粉土直剪 试验	10.52、13.57、 16.65、19.54	100、 200、400	1.00
粉土-混凝土 界面剪切试验	10.52、13.57、 16.65、19.54	100、 200、400	

## 1.5 试验过程

试验过程按如下步骤进行:(1)试样装填。对于粉土直剪试验,上剪切盒和下剪切盒中均分 3 层

装填土体,依据剪切盒尺寸及粉土密度确定装样总质量及每层装土样的质量,分层填土后压实,并确保填土均匀,填土表面基本水平。对于粉土-混凝土界面剪切试验,下剪切盒放置混凝土板,为便于混凝土板放置与调平,制备的混凝土板尺寸略小于下剪切盒尺寸,混凝土板下铺设干砂,混凝土板与下剪切盒之间的缝隙用干砂填充密实,通过调试确保混凝土板表面与下剪切盒上表面平齐;上剪切盒按照上述要求装填制备好的土样;填土完成后安装加载板并用水准尺确定加载板水平。(2)法向加载。通过加载系统控制两个竖向作动器协同逐级施加法向荷载。(3)剪切加载。在试验所需法向荷载下,变形稳定后,采用应变控制法进行剪切试验,剪切速率为 1 mm/min。(4)试验完成。剪切位移超过 80 mm 或剪切位移-剪切应力曲线呈现水平,即剪切应力基本稳定,停止剪切;试验结束后将竖向电动缸和下剪切盒复位,取出土体并取样测定其含水量。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 剪切应力与剪切位移关系

剪切应力与剪切位移关系曲线如图 5 所示。由图可知,粉土-混凝土界面剪切试验和粉土直剪试验的剪切应力随剪切位移均呈现非线性增长现象;粉土含水量较小时,剪切应力与剪切位移曲线逐渐趋于水平,即剪切应力达到基本稳定值;粉土含水量较大时[如图 5(d)所示],随剪切位移的增加,剪切应力未趋于稳定,且法向应力越大,增长幅度越明显。总体上,剪切应力与剪切位移曲线均无明显的软化现象,基本遵循应变硬化规律。究其原因,试验土样为重塑压缩粉土,在试验法向荷载和剪切应力共同作用下,土体产生较大的剪缩变形,使土体体积减小,密实度增大;剪切试验完成后,取上剪切盒上部土样和剪切破坏带附近的土样分别测其含水量,测试结果显示剪切破坏带附近土样的含水量小于剪切盒上部的土样含水量,而且当粉土含水量较高时,肉眼可见剪切盒表面处有水分析出,表明剪切过程土样存在水分迁移及含水量的变化。因此,随着剪切位移的增大,伴随着剪切破坏带逐渐形成,非饱和粉土剪切带内土体含水量减小,密实度增加,粉土颗粒间的咬合作用增大,基质吸力作用增强,使得剪切应力与剪切位移曲线呈现硬化特征;对于制备的粉土试样,当含水量较高时(趋近饱和),由于直剪箱中未设置排水通道,剪

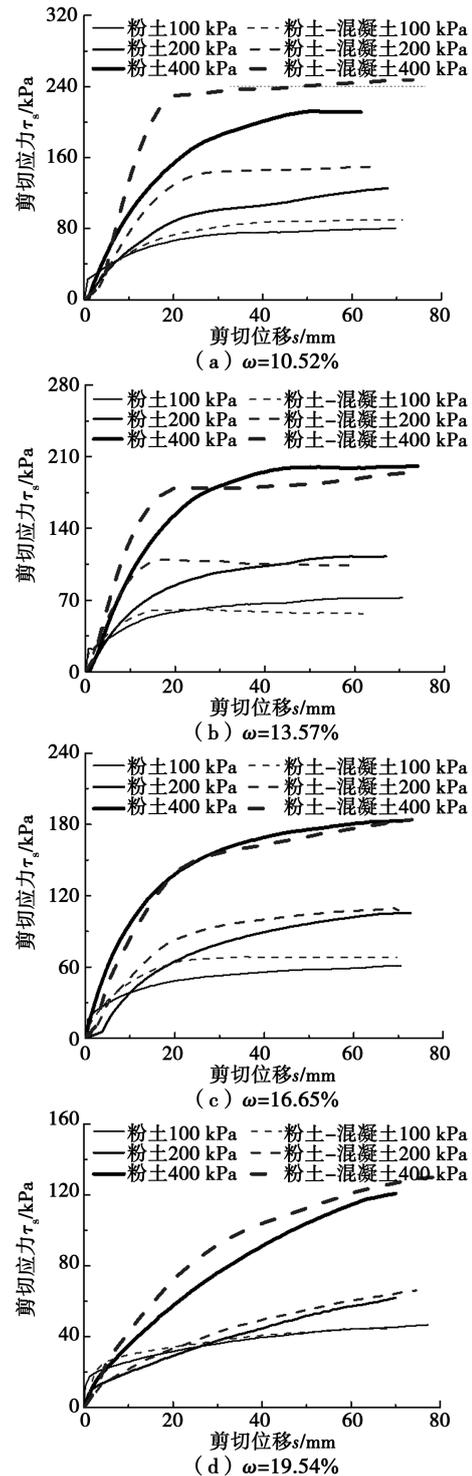


图 5 粉土-混凝土界面及粉土剪切应力-剪切位移曲线  
Fig. 5 Shear stress-displacement curves at silt-concrete interface and silt

切初期试样中的孔隙水无法顺利快速排出,剪切过程中可能产生明显的超静孔隙水压力。同时,由于试样尺寸较大,剪切过程时间较长,而粉土渗透性较强,随着剪切试验的进行,试样中的孔隙水将从上下剪切盒的缝隙中渗出或迁移到混凝土板表面,

剪切面附近超静孔隙水压力存在逐渐消散的趋势。有效应力逐渐的增长,使得剪切应力在较大剪切位移时仍呈现较为明显的增长状态<sup>[21-22]</sup>。

粉土含水量相同时,粉土-混凝土界面和粉土的剪切应力均随法向应力的增加而增大。法向应力由 100 kPa 增加至 400 kPa 时,剪切破坏时剪切应力增大约 3 倍左右。其主要作用机理为法向压力越大时,剪切破坏面附近土体由于挤压的原因,土体颗粒咬合更加紧密,土体颗粒之间的胶结破坏及颗粒平移、滚动、翻越及重分布需要更多外力做功;加之外力越大,剪切破坏带内土体含水量越小,基质吸力越大,使得剪切应力随法向应力增加成倍增长。对于剪切应力趋于基本稳定值时的剪切位移,粉土-混凝土界面剪切试验结果明显小于粉土直剪试验,且含水量越小越显著。这表明,受近似刚体的混凝土界面约束作用,粉土-混凝土界面剪切时土体颗粒胶结破坏与颗粒移动及重分布完成较快,剪切破坏带形成较早,且土样含水量越低,剪切过程越不易形成超孔隙水压力或超孔隙水压力越易消散,上述试验现象越明显。

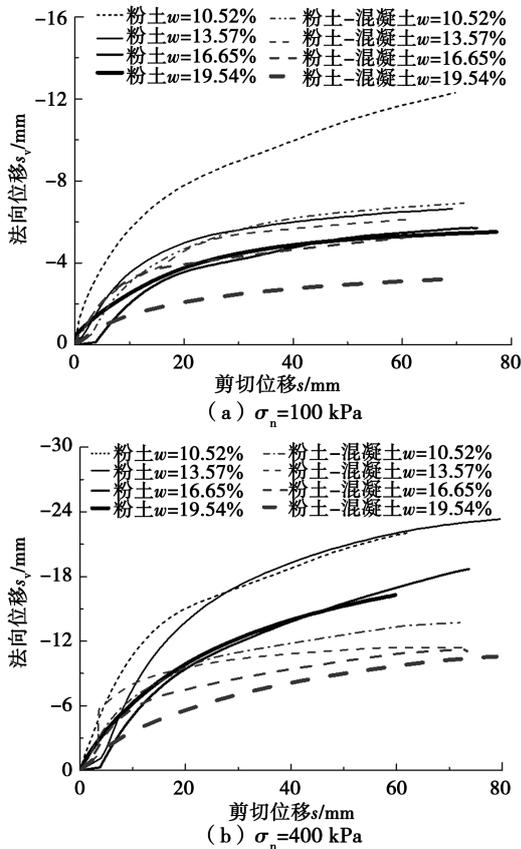


图6 粉土-混凝土界面及粉土法向位移-剪切位移曲线  
Fig. 6 Normal displacement-shear displacement curves of silt and silt-concrete interface

试验过程中,界面处的粉土颗粒在水平剪切力的作用下发生移动、翻转和重新排列,在宏观上土体表现出水平方向上的剪切位移和竖向的剪缩,如图6所示。剪切试验的剪缩变形使得粉土密度增加,引起剪切过程中粉土颗粒相互作用的提高,这与前述随剪切位移增加剪切应力的硬化机理一致。粉土-混凝土界面和粉土剪切法向位移与剪切位移曲线具有相似的变化规律,剪切过程中,粉土的体变随着剪切位移的增大先迅速增大,之后缓慢增加。相对而言,粉土-混凝土界面受到混凝土板的刚性约束,土颗粒的滑移、滚动及重分布仅发生在上剪切箱中,而粉土直剪试验剪切面上下的土颗粒均会随之发生运动,其剪缩变形明显大于粉土-混凝土界面剪切试验。相同法向应力下,粉土-混凝土界面剪切试验和粉土直剪试验的竖向变形均随含水量的增大而减小,但粉土直剪过程中法向位移的减小量远大于粉土-混凝土界面剪切法向位移的减小量。其主要原因为粉土含水量越低,剪切试验土体的影响范围越大,形成的剪切破坏带也越厚,剪切过程耗能越高,需要克服的剪阻力越大。同时,土体剪切扰动及产生土颗粒移动的范围越大,即引起较大的竖向变形。

## 2.2 剪切强度分析

取试验过程中的峰值剪切应力作为粉土-混凝土界面剪切强度及粉土直剪强度(无明显峰值剪切应力时,取剪切变形达到 60 mm 时的剪切应力作为剪切强度),绘制出粉土-混凝土界面剪切强度及粉土直剪强度与粉土含水量之间的关系曲线,如图7所示。由图可知,粉土-混凝土界面剪切强度和粉土直剪强度均随粉土含水量的增大而减小。相同法向应力条件下,粉土含水量较低时,粉土直剪强度明显小于粉土-混凝土界面剪切强度;随着粉土含水量增大,粉土直剪强度与粉土-混凝土界面剪切强度趋于接近。对比前述试验结果,当含水量达到 19.54% 时,两者的剪切应力与剪切位移曲线亦基本重合。表明粉土含水量的增加,不仅明显降低土体的抗剪强度,亦会显著减弱土体与混凝土结构界面的剪切作用,且粉土含水量趋近饱和时,粉土-混凝土界面与粉土具有较为一致的剪切力学行为。

为了定量分析含水量对粉土-混凝土界面剪切及粉土直剪强度的影响,将粉土-混凝土界面剪切和粉土直剪强度随法向应力的变化关系绘制成散点图,并进行线性拟合,如图8所示。由图可知,粉土-混凝土界面剪切强度及粉土直剪强度随法向应

力的增大均近似呈线性增大,但其增加的幅度随含水量的不同而略有不同,含水量较高时,两者剪切强度随法向应力增加而增长的幅度相对较小。通过拟合曲线可知其剪切强度包络线基本符合摩尔库伦强度理论,根据摩尔库伦强度准则,确定不同含水量时粉土-混凝土界面剪切及粉土直剪强度指标,并将其汇总,如表 4 所示。

表 4 粉土-混凝土界面剪切及粉土直剪强度指标

Table 4 Index of shear strength of silt and silt-concrete interface

含水量 $\omega / \%$	粉土		粉土-混凝土界面	
	黏聚力 $c_s / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi_s / (^\circ)$	黏聚力 $c_j / \text{kPa}$	摩擦角 $\varphi_j / (^\circ)$
10.52	33.47	24.00	42.14	26.97
13.57	28.77	23.00	29.34	21.69
16.65	19.63	21.98	26.07	20.82
19.54	16.12	13.38	13.95	14.69

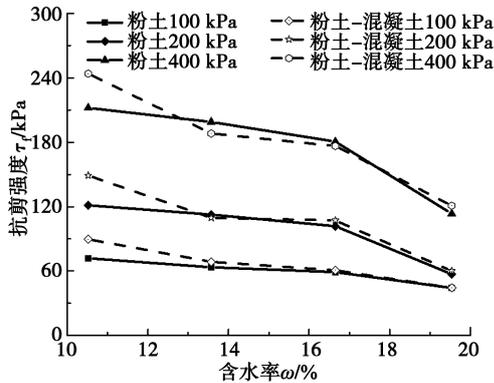


图 7 粉土-混凝土界面剪切强度及粉土直剪强度与含水量关系

Fig. 7 Relationships between the shear strength of silt and silt-concrete interface and the water content

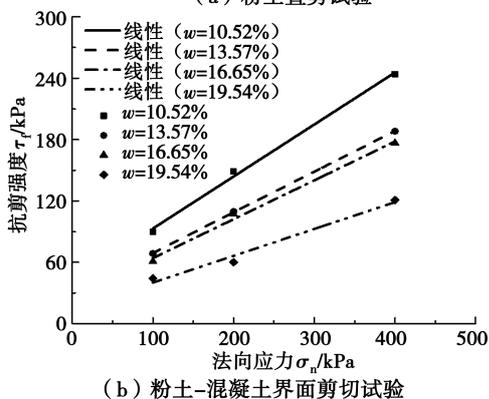
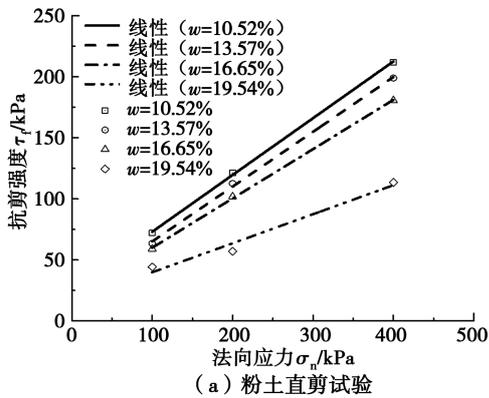


图 8 粉土-混凝土界面剪切及粉土直剪强度与法向应力关系

Fig. 8 Relationships between shear strength and normal stress of silt and silt-concrete interface

由表 4 可知,在一定的含水量范围内,粉土的含水量越大,粉土的黏聚力和内摩擦角及粉土-混凝土界面的黏聚力和摩擦角越小。当含水量从 10.52% 增大到 19.54% 时,粉土黏聚力减小了约 2.08 倍,内摩擦角减小了约 1.79 倍;而粉土-混凝土界面黏聚力减小了 3.02 倍左右,界面摩擦角减小了约 1.84 倍。粉土-混凝土界面剪切及粉土直剪试验过程中,一方面需要克服土颗粒间存在的胶结作用做功,另一方面土颗粒破碎、移动及重分布亦产生能耗。对于非饱和粉土,剪切初期其强度主要源于土体的黏聚力和由于毛细作用而形成的基质吸力;随着剪切应力的增大,土颗粒间的胶结作用破坏,黏聚力发挥的作用越来越小,土颗粒破碎、移动及重分布也逐渐趋于稳定,此时粉土直剪强度的主要来取决于土体的滑动摩擦力和基质吸力。粉土-混凝土界面剪切强度的发挥与粉土直剪试验类似,其差异的主要原因为界面对土体的刚性约束作用及界面影响下土体参与剪切做功的范围不同。因此,当含水量越大时,粉土黏聚力和内摩擦角越来越小,基质吸力越小,加之超孔隙水压力形成与消散的影响,粉土-混凝土界面剪切强度及粉土直剪强度也越小<sup>[23]</sup>。

2.3 含水量与强度指标的关系

为定量研究粉土-混凝土界面剪切强度指标与粉土含水量之间的关系,对比分析粉土-混凝土界面与粉土剪切强度的异同,对粉土-混凝土界面剪切及粉土直剪强度指标与含水量关系进行整理分析,如图 9 所示。由图可知,在试验的含水量范围内,粉土-混凝土界面黏聚力基本大于粉土黏聚力,而粉土-混凝土界面摩擦角在低含水量时大于粉土内摩擦角,而在较高含水量时略低于粉土内摩擦角。此外,粉土黏聚力随含水量的增加基本呈线性

减小;粉土内摩擦角亦随含水量的增大而减小,但土样含水量较低时,减小幅度较缓,随着含水量增大至一定值后,粉土内摩擦角减小幅度加速增长;粉土-混凝土界面粘聚力和摩擦角均随含水量的增大呈线性减小趋势。基于上述,构建粉土-混凝土界面剪切及粉土直剪强度指标随含水量变化的拟合方程,如表5所示。

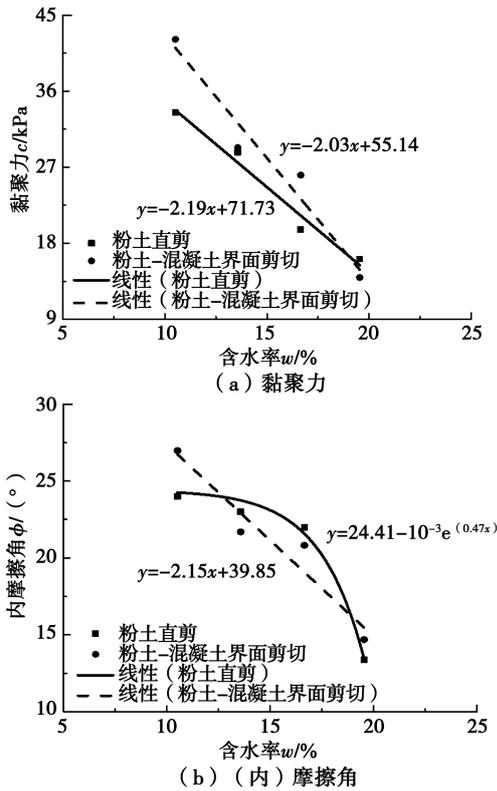


图9 粉土-混凝土界面剪切及粉土直剪强度指标随含水量变化关系

Fig. 9 Relationship between silt-concrete interface and silt shear strength index with water content

表5 粉土-混凝土界面剪切及粉土直剪强度指标随含水率变化的拟合方程

Table 5 Fitting equations of silt-concrete interface and silt shear strength index with water content

试验类型	强度指标	拟合公式	R <sup>2</sup>
粉土-混凝土界面剪切试验	黏聚力/kPa	$c_j = -2.03\omega + 55.14$	0.98
	摩擦角/(°)	$\varphi_j = -1.25\omega + 39.85$	0.93
粉土直剪试验	黏聚力/kPa	$c = -2.19\omega + 71.73$	0.96
	内摩擦角/(°)	$\varphi = 24.41 - 10^{-3}e^{(0.47\omega)}$	0.99

根据摩尔库伦强度准则,考虑含水量影响时,可采用如下表达式估算黄泛区粉土-混凝土界面剪切强度和粉土直剪强度。

$$\tau_f = c_{(w)} + \sigma_n \tan \varphi_{(w)} \quad (1)$$

式中: $\tau_f$ 为黄泛区粉土-混凝土界面的剪切强度或粉土直剪强度; $\sigma_n$ 为法向应力; $c_{(w)}$ 、 $\varphi_{(w)}$ 分别为粉土-混凝土界面剪切或粉土直剪强度指标,由表5所示粉土-混凝土界面剪切及粉土直剪强度指标与粉土的含水量之间的函数关系确定。

### 3 结论

(1)粉土-混凝土界面剪切试验和粉土直剪试验剪切应力与剪切位移曲线均无明显的软化现象,基本遵循应变硬化规律;粉土-混凝土界面与粉土直剪的剪切法向位移随剪切位移变化规律较为一致,但粉土直剪的剪缩变形明显大于粉土-混凝土界面剪切结果。

(2)粉土-混凝土界面剪切及粉土直剪强度均随粉土含水量的增大而逐渐减小,随着法向应力的增大近似呈线性增大。

(3)相同法向应力和含水量条件下,粉土-混凝土界面剪切强度大于粉土直剪强度;随着粉土含水量的增大,粉土-混凝土界面剪切强度与粉土直剪强度之间的差值逐渐减小,粉土趋近饱和时,两者强度基本相同;粉土直剪破坏时的剪切位移大于粉土-混凝土界面剪切破坏时的剪切位移。

(4)粉土-混凝土界面剪切及粉土直剪强度均符合摩尔库伦强度准则,强度指标均随含水量的增大而减小;粉土直剪黏聚力及粉土-混凝土界面黏聚力随含水量均基本呈线性变化趋势,粉土-混凝土界面摩擦角亦随含水量呈现线性变化,但粉土直剪内摩擦角随含水量变化呈现非线性,含水量较小时,变化较为平缓,含水量增大时,减小幅度急剧增加。

### 参考文献 (References)

[1] 贾志刚. 黄泛区粉土水力特征参数研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017. (Jia Zhigang. Research on hydraulic parameters for silty soil in the yellow river flood area [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese))

[2] 张海明, 姚爱军, 王兆辉, 等. 非饱和粉土力学特性的大型直剪试验[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(10): 1352-1356. (Zhang Haiming, Yao Aijun, Wang Zhaozhui, et al. Mechanical properties of unsaturated silt with large scale shear test [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2014, 33(10): 1352-1356. (in Chinese))

- [3] 晏长根, 王婷, 贾海梁, 等. 冻融过程中未冻水含量对非饱和粉土抗剪强度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(6): 1-9. (Yan Changgen, Wang Ting, Jia Hailiang, et al. Influence of unfrozen water content on shear strength of unsaturated silt during freezing and thawing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(6): 1-9. (in Chinese))
- [4] 孙树林, 王利丰. 饱和、非饱和有机质粉土抗剪强度的对比[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1932-1935. (Sun Shulin, Wang Lifeng. Comparison of shear strength between saturated and unsaturated sandy silt [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1932-1935. (in Chinese))
- [5] 边加敏, 王保田. 含水量对非饱和土抗剪强度参数的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(1): 17-21, 43. (Bian Jiamin, Wang Baotian. Research on influence of water contents on the shear strength behavior of unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(1): 17-21, 43. (in Chinese))
- [6] 李宣, 孙德安. 非饱和砂土和粉土的抗剪强度及其预测[J]. 工业建筑, 2017, 47(3): 102-106, 136. (Li Xuan, Sun Dean. Shear strengths of unsaturated sand and silt and their predictions [J]. Industrial Construction, 2017, 47(3): 102-106, 136. (in Chinese))
- [7] 唐军平, 何国东, 付旭, 等. 佛山地基软土物理力学指标间的相关性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增2): 645-653, 659. (Tang Junping, He Cuodong, Fu Xu, et al. Study on the relevance between the physico-mechanical parameters of foundation soft clay of Foshan [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(Supp. 2): 645-653, 659. (in Chinese))
- [8] Potyondy J G. Skin friction between various soils and construction material [J]. Géotechnique, 1961, 11(4): 339-353.
- [9] 胡黎明, 濮家骥. 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 Liming, Pu Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 431-435. (in Chinese))
- [10] Su L J, Zhou W H, Chen W B, et al. Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface [J]. Measurement, 2018, 122: 339-346.
- [11] Al-Emami O, Al-Attar T S, Al-Neami M A, et al. Investigation of soil-steel interface behavior of Iraqi soil by direct shear apparatus [J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 162:01003.
- [12] 郭聚坤, 雷胜友, 王瑞, 等. 结构物-标准砂界面剪切机理试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 722-733. (Guo Jukun, Lei Shengyou, Wang Rui, et al. Study on interface shear mechanism between structures and standard sand [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(3): 722-733. (in Chinese))
- [13] 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 Zongze, Zhu Hong, Xu Guohua. Deformation and mathematical simulation of the interface between soil and structural materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 14-22. (in Chinese))
- [14] Hamid T B, Miller G A. Shear strength of unsaturated soil interfaces [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 10(46): 595-606.
- [15] Liu J K, Lyu P, Cui Y H, et al. Experimental study on direct shear behavior of frozen soil-concrete interface [J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 104: 1-6.
- [16] 杜鹏, 张国栋, 刘晓玲. 土与混凝土接触面大型直剪试验方法研究[J]. 土工基础, 2016, 30(3): 383-386. (Du Peng, Zhang Guodong, Liu Xiaoling. Research on large direct shear test method of soil-concrete interface [J]. Soil Engineering and Foundation, 2016, 30(3): 383-386. (in Chinese))
- [17] 王永洪, 刘俊伟, 张明义, 等. 大型土与结构相互作用恒刚度直剪试验装置研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1667-1673. (Wang Yonghong, Liu Junwei, Zhang Mingyi, et al. Development of a large-scale direct shear test apparatus with constant normal stiffness for pile-soil interface [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1667-1673. (in Chinese))
- [18] 李永辉, 王卫东, 黄茂松, 等. 超长灌注桩桩-土界面剪切试验研究[J]. 岩石力学, 2015, 36(7): 1981-1988. (Li Yonghui, Wang Weidong, Huang Maosong, et al. Experimental research on pile-soil interface shear behaviors of super-long bored pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1981-1988. (in Chinese))

- or thermoplastic-determination of tensile stress-strain properties (GB/T 528-2009) [S]. Beijing: China National Standardization Management Committee, 2009. (in Chinese))
- [19] 宁奕冰,唐辉明,张勃成,等. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J]. 岩石力学, 2020, 41(6): 1-11. (Ni Yibing, Tang Huiming, Zhang Bochong, et al. Research on rock similar material proportioning test based on orthogonal design and its application in base friction physical model test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 1-11. (in Chinese))
- [20] Nurult R, Wisnua A. Analysis of structural and microstructure of lanthanum ferrite by modifying iron sand for microwave absorber material application[J]. Advanced Materials Research, 2014, 896: 423-427.
- [21] Liu Y S, Li J, Wu Q L, et al. Sensitivity analysis and proportioning design of rock burst similar materials[J]. Functional Materials, 2017, 24(3): 496-500.
- [22] 岳哲,叶义成,王其虎,等. 基于量纲分析的岩石相似材料抗压强度计算模型[J]. 岩石力学, 2018, 39(1): 216-228. (Yue Zhe, Ye Yicheng, Wang Qihu. A model for calculation of compressive strength of rock-like materials based on dimensional analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 216-228. (in Chinese))
- [23] Li D Y, Zhang Y K, Feng L Y, et al. Capacity of modified suction caissons in marine sand under static horizontal loading[J]. Ocean Engineering, 2015, 102: 1-16.
- [24] 费康,张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009. (Fei Kang, Zhang Jianwei. Application code of ABAQUS in geotechnical engineering [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2009. (in Chinese))
- [25] 水电水利规划设计总院. 风电机组地基基础设计规范试行(FD 003-2007) [S]. 北京:中国水利水电出版社, 2007. (The General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design. Design regulations on subgrade and foundation for wind turbine generator system (FD 003-2007) [S]. Beijing: China Water Conservang and Hydropower Press, 2007. (in Chinese))

### (上接 178 页)

- [19] 王天亮,王海航,王鸥,等. 粉土与凹槽结构面抗剪强度特性试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(3): 115-121. (Wang Tianliang, Wang Haihang, Wang Ou, et al. Experimental study on shear strength characteristics of silt and groove structural surface [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(3): 115-121. (in Chinese))
- [20] 金子豪,杨奇,陈琛,等. 粗糙度对混凝土-砂土接触面力学特性的影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 754-765. (Jin Zihao, Yang Qi, Chen Chen, et al. Experimental study on effects of the roughness on mechanical behaviors of concrete-sand interface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 754-765. (in Chinese))
- [21] 王永洪,张明义,刘俊伟,等. 考虑超孔隙水压力的桩土界面直剪试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增1): 359-367. (Wang Yonghong, Zhang Mingyi, Liu Junwei, et al. Research on effect of pore water pressure on shear test of pile-soil interface [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(Supp. 1): 359-367. (in Chinese))
- [22] 张磊,刘慧,王铁行. 不同泥皮厚度下黄土-混凝土接触面剪切试验[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增2): 564-568, 575. (Zhang Lei, Liu Hui, Wang Tiexing. Shear tests on interface between loess and concrete under various slurry thicknesses [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(Supp. 2): 564-568, 575. (in Chinese))
- [23] 陈高峰,杨帅东,苏涛,等. 不同含水量下土体抗剪强度试验及破坏过程分析[J]. 人民珠江, 2016, 37(12): 37-41. (Chen Gaofeng, Yang Shuaidong, Su Tao, et al. Study on shear strength tests and failure process for soils under different moisture content [J]. Pearl River, 2016, 37(12): 37-41. (in Chinese))