

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.202100591



加卸荷工况对注浆砂土-混凝土接触面剪切特性影响

吴悦^{1,2,3,4,5}, 刘丰铭^{3,6}, 赵春风³, 侯忠伟^{1,2}, 王有宝³, 涂义亮^{1,2}, 韩达光⁴

(1.重庆交通大学 山区桥梁与隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074; 2.重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074;
3.同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 4.重庆鲁汶智慧城市与可持续发展研究院, 重庆 401135;
5.重庆建筑工程职业学院, 重庆 400072; 6.成都市城乡建设委员会, 四川 成都 610094)

摘要:土-结构物接触面力学特性是岩土工程领域研究的重点与热点问题之一, 揭示其机理有利于促进对桩基础、挡土墙等结构物承载性能的认识。本文采用自主设计研发的注浆设备和室内后注浆试验方法, 对3种注浆量和4种加、卸荷工况下, 共计28组注浆和未注浆大型接触面进行直剪试验, 分析不同加、卸荷工况对注浆砂土-混凝土接触面力学特性和剪切影响范围的影响。结果表明: 注浆可逐渐消除加卸荷产生的接触面初始剪切模量和剪切应力差异。未注浆接触面未出现软化; 注浆接触面呈现软化现象, 并且软化出现在剪切法向应力较小的卸荷接触面剪切过程中。后注浆主要通过提高接触面等效黏聚力, 改善接触面力学特性, 对接触面等效内摩擦角无明显影响。同一注浆量下, 浆液对无卸荷工况接触面等效黏聚力的改善效果优于卸荷工况; 卸荷工况的接触面剪切影响范围略大于无卸荷工况; 加卸荷和注浆工况下, 接触面剪切影响范围与接触面峰值剪切应力呈正相关。同一剪切法向应力下, 注入浆液, 通过压密注浆形成浆块, 增大接触面混凝土板的粗糙度, 改善卸荷接触面剪切特性; 通过浆液渗透形成浆土混合物, 对无卸荷接触面处土体特性进行改善。研究成果可为实际工程中桩基工程后注浆提供指导。

关键词:接触面; 卸荷; 剪切带; 力学特性; 注浆

中图分类号: TU473.2

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2022)05-0103-08

Effects of Normal Loading and Unloading on the Post-grouting Sand-Concrete Interface Shear Behavior

WU Yue^{1,2,3,4,5}, LIU Fengming^{3,6}, ZHAO Chunfeng³, HOU Zhongwei^{1,2}, WANG Youbao³, TU Yiliang^{1,2}, HAN Daguang⁴

(1.State Key Lab. of Mountain Bridge and Tunnel Eng., Chongqing Jiaotong Univ., Chongqing 400074, China; 2.School of Civil Eng., Chongqing Jiaotong Univ., Chongqing 400074, China; 3.College of Civil Eng., Tongji Univ., Shanghai 200092, China; 4.Chongqing Smart City and Sustainable Development Academy, Chongqing 401135, China; 5.Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China; 6.Chengdu Urban and Rural Construction Commion, Chengdu 610041, China)

Abstract: The mechanical properties of the soil-structure interface have always been one of the key and hot issues in the field of geotechnical engineering, and revealing its mechanism is helpful to promote the understanding of the bearing characteristic of structures such as pile foundations and retaining walls. A total of 28 groups of large direct shear tests with the post-grouting sand-concrete interface were conducted under three different grout volumes and four kinds of loading and unloading conditions to analyze the interface mechanical properties and the distribution of shearing influence range. The test results show that grouting can gradually eliminate the difference between the interface's initial shear modulus and shear stress due to the loading and unloading of the interface. The softening phenomenon doesn't exist in the un-grouted interface, while the post-grouting interface exhibits softening and the softening occurs in the unloading interface shearing process with low applied normal stress. The

收稿日期: 2021-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672265; 51808083); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202100705); 重庆鲁汶智慧城市与可持续发展研究院开放基金项目(20210602); 在渝高校与中科院所属院所合作项目(HZ2021009)

作者简介: 吴悦(1992—), 男, 博士生, 讲师. 研究方向: 桩基础; 浆液扩散理论. E-mail: cqjtuwy@cqjtu.edu.cn

网络出版时间: 2022-07-27 14:31:00 网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20220726.1740.004.html>

<http://jsuese.ijournals.cn> <http://jsuese.scu.edu.cn>

grout cement improves the mechanical properties of the interface by increasing the equivalent cohesive force of the interface but has no significant effect on the equivalent internal friction angle of the interface. The improvement of the interface equivalent cohesive force on the loading interface is better than the unloading interface under the same grout volume. The distribution of interface shearing influence range under unloading conditions is slightly larger than that under the loading conditions. Regardless of the loading, unloading, and grouting conditions, the distribution of interface shearing influence range is positively correlated with the interface peak shear stress. Under the same applied normal stress, the mechanical properties of the unloading post-grouting interface were improved due to the formation of the grout bulb by compaction grouting to increase the roughness of the concrete plate, while the mechanical properties of the loading post-grouting interface were improved by penetration grouting to form the soil-cement mixture. The research results can provide guidance for the post-grouting of pile foundations in practical projects.

Key words: interface; unloading; shear bands; mechanical properties; grouting

土-结构物接触面力学特性是岩土工程领域研究的重点与热点。目前,国内外已有众多学者针对土与结构物接触面力学特性开展了大量研究。Potyondy^[1]通过直剪仪对不同种类的土与混凝土板接触面力学特性进行了研究,发现接触面粗糙度是影响接触面剪切强度的重要因素之一;陈俊桦^[2]、金子豪^[3]等研究亦得出类似结论。Zhao^[4]、赵春风^[5]等采用大型直剪试验,研究了卸荷情况下砂土及黏土与混凝土板接触面的力学特性,系统分析了不同加、卸荷状态下土与结构物接触面的力学特性,以及卸荷程度、粗糙度等对接触面软化特性和剪胀(缩)性的影响。赵春风等^[6]建立了不同粗糙度和应力历史的黏土与混凝土板接触面弹塑性模型。张嘎^[7-8]、胡黎明^[9]、Clough^[10]等研究不同工况下土与结构物接触面力学特性,得到了一系列有益的分析结果。

当土与结构物接触面力学特性不能满足实际工程需要时,往往采用接触面注浆改善接触面力学特性,比如,桩侧后注浆、盾构隧道壁后注浆等。万征等^[11]研究桩侧后注浆桩的水平承载特性,发现采用桩侧后注浆技术,可显著提高灌注桩水平承载特性;叶飞等^[12]通过理论分析,研究盾构隧道壁后注浆浆液扩散模式,以及对隧道管片压力的影响,发现浆液扩散半径及浆液对管片产生的压力与注浆压力、注浆时间、土体特性及浆液性质等因素有关;费逸等^[13]通过砂土-混凝土接触面注浆剪切试验,模拟研究了桩侧后注浆过程的桩-土接触面力学特性,但其研究暂未考虑桩侧土体存在卸荷工况的影响;Chu等^[14]进行了一系列全风化花岗岩-水泥浆体接触面直剪试验,发现接触面剪切强度取决于法向应力水平、土的含水率及接触面粗糙程度;Hossain等^[15]研究了不同注浆压力和法向应力对全风化花岗岩-水泥浆体接触面力学特性的影响,该试验结果表明,注浆压力对接触面内摩擦角无明显影响,接触面黏聚力随着注浆压力的增大而增大;Chen等^[16]在直剪试验中对水泥浆进行测试,发现水泥浆的剪切强度与法向压力成线性关系;Yin等^[17]通过土钉抗拔试验,研究灌浆压力和上覆土应力对土钉界面抗剪力的影响;Dano等^[18]

对比研究了注浆和未注浆砂土力学特性,发现注浆砂土的内摩擦角、泊松比与未注浆砂土基本一致,可认为未发生改变,而黏聚力及剪切模量得到显著提高。

较多学者研究正常应力条件下常规的土与结构物接触面力学特性,而对于接触面存在卸荷工况下的力学特性研究还不够深入。在实际工程中,经常涉及接触面存在卸荷工况,比如,灌注桩桩侧与土体相互作用,由于灌注桩成孔过程存在卸荷,因此可归为卸荷土与结构物接触面力学特性。工程中,对于不同注浆工况及不同接触面加卸荷工况下,土与结构物接触面力学特性问题研究鲜少涉及。因此,本文采用自主研发的注浆装置和改进的可用于注浆的大型多功能界面剪切仪,开展不同注浆量和不同加、卸荷工况下的注浆砂土-混凝土接触面剪切试验,研究不同加、卸荷工况对注浆和未注浆接触面剪切力学特性、强度参数等的影响;同时,通过自行设计的接触面剪切影响范围观测方法,分析不同加、卸荷工况对注浆和未注浆接触面剪切影响范围的影响。

1 直剪试验

1.1 试验材料

试验材料主要包括试验土体、混凝土板和水泥浆液。试验土体采用上海某工程第③2层灰色粉砂,其主要物理力学指标见表1。

表1 试验土样物理力学指标^[5]
Tab. 1 Parameters of silt in tests^[5]

重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\delta/(\text{^\circ})$	含水率 $\omega/\%$	孔隙比 e	压缩模量 $E_{\text{S1-2}}/\text{MPa}$
19.50	31.50	20	0.75	11.23

采用C25混凝土浇筑混凝土板,混凝土板尺寸(长×宽×高)为590 mm×390 mm×50 mm,混凝土板内部添加直径为8@100、HPB300级双向钢筋,混凝土板表面为平面,本文暂不考虑粗糙度对注浆砂土-混凝土接触面剪切特性的影响,粗糙度的影响将在后续研究中开展。

水泥浆液配置:采用普通硅酸盐水泥,水泥强度等级为P.O 42.5;根据预试验中浆液的可注性及戴国

亮等^[19]给出的现场桩的后注浆的浆液水灰比为0.5~0.7,桩数占统计总桩数的90.15%,综合确定本次试验的水灰比为0.6;水泥浆液中添加染色剂,便于试验完成后进行开挖观测浆液分布形态。

1.2 试验仪器

试验仪器主要有包含空气压缩机和注浆罐的注浆设备以及改进的多功能界面剪切仪。其中:空气压缩机用于提供注浆过程所需的注浆压力;注浆罐用于存放配置好的水泥浆液;多功能界面剪切仪包含上、下剪切盒、加载装置和数据采集系统,上、下剪切盒尺寸(长×宽×高)为600 mm×400 mm×100 mm,加载装置用于对制作好的剪切盒内的土体进行加压固结和后续剪切,数据采集系统用于自动采集试验所需的应力、位移等数据。

整套试验装置的基本原理为空气压缩机连接注浆罐,注浆罐通过管路连接多功能界面剪切仪上剪切盒,通过空气压缩机提供的压力将注浆罐内的浆液注入砂土与混凝土接触面处。具体原理和操作方法参见文献^[20]。

1.3 测定剪切影响范围

图1为剪切影响范围的标志原理图。由图1可见,测定剪切影响范围的操作步骤如下:1)在上剪切盒内装入试验砂土,进行表面平整处理。2)按照设定位置对上剪切盒内试验砂土进行钻孔,在孔内灌入彩色砂,直条纹即代表灌注的彩色砂标志。剪切过程中,下剪切盒内混凝土板的移动会带动与之接触的一定厚度范围内的土体颗粒的运动,从而在靠近剪切板附近形成具有一定厚度的剪切带。3)试验完成后,进行开挖处理,测定变形后的剪切带变化范围和距离,试验测定垂直剪切影响范围 S_y ,剪切位移 S 及水平剪切影响范围 S_x ,精确至0.5 mm。

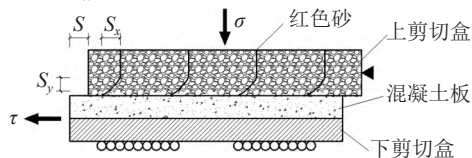


图1 剪切影响范围标志原理图

Fig. 1 Schematic of the shear impact range

通过对试验测定结果的整理,可探讨砂土-混凝土接触面在剪切过程中其垂直剪切影响范围 S_y 和水平剪切影响范围 S_x 随不同工况下的变化规律。详细原理和操作方法参见文献^[21]。

1.4 试验过程

试验研究不同法向加、卸荷工况对注浆砂土-混凝土接触面剪切特性的影响。通过预试验发现,在设定的500 kPa注浆压力下,可注入的最大注浆量约为400 mL。因此,注浆量分别设定为200、300和400 mL,

注浆压力保持为500 kPa。接触面法向加、卸荷工况如下:1)先期固结法向应力25、50、75和100 kPa下,对接触面土体进行固结,不进行法向卸荷,待接触面处土体竖向位移在固结法向应力下稳定后进行注浆;2)先期固结法向应力100 kPa,对接触面土体进行固结,待固结稳定后分别卸荷至剪切法向应力25、50和75 kPa 3种荷载工况,再次等待接触面处土体在剪切法向应力下变形稳定后进行注浆;3)在上述两种加、卸荷工况下,进行未注浆接触面剪切对比试验,试验合计28组(注浆21组、未注浆7组)。

2 试验结果分析

2.1 加、卸荷对接触面剪切应力-剪切位移影响

图2为不同注浆量、不同剪切法向应力下归一化剪切应力-位移曲线。图2中:图例表示固结法向应力 σ_0 -剪切法向应力 σ_n ,例如,100-25表示在固结法向应力100 kPa下,接触面先固结,再卸荷至剪切法向应力25 kPa下,注浆或剪切;归一化剪切应力的计算方法为测定的接触面剪切应力除以对应的剪切法向应力。

由图2可以发现:

1)对于未注浆接触面,在同一剪切法向应力下,卸荷工况的接触面剪切初始线性段斜率比无卸荷工况的接触面剪切初始线性段斜率大,即卸荷接触面初始剪切模量大于无卸荷接触面初始剪切模量;并且卸荷工况下的同一剪切位移对应的剪切应力比无卸荷工况下的同一剪切位移对应的剪切应力高。无论接触面是否存在卸荷以及剪切法向应力大小,未注浆接触面的归一化剪切应力在整个剪切过程中都小于1;归一化剪切应力随着剪切法向应力的增大而减小,即接触面剪切应力在整个剪切过程中始终小于对应的剪切法向应力,并且随着剪切法向应力的增大,剪切应力与剪切法向应力的差值逐渐增大。

2)对于注浆接触面,在同一剪切法向应力和注浆量下,接触面初始剪切模量基本一致,即注浆可消除由于卸荷产生的接触面初始剪切模量差异。在同一注浆量下,当剪切法向应力较小时,注浆接触面初始剪切模量要明显高于未注浆接触面初始剪切模量,注浆接触面的归一化剪切应力大于1,并且卸荷工况下的注浆接触面峰值剪切应力高于无卸荷工况下的注浆接触面对应的峰值剪切应力;随着剪切法向应力的增大,注浆与未注浆接触面初始剪切模量差异逐渐缩小,注浆接触面的归一化剪切应力逐渐减小至小于1,而接触面卸荷与否对注浆接触面峰值剪切应力影响逐渐减小。但是无论剪切法向应力大小,注浆接触面的归一化剪切应力始终大于未注浆接触面的归一化剪切应力,即注浆能够显著改善接触面

剪切力学特性。未注浆接触面归一化剪切应力-剪切位移曲线未出现软化;注浆接触面归一化剪切应力-

剪切位移曲线呈现软化现象,并且软化出现在剪切法向应力较小及存在卸荷的接触面剪切过程中。

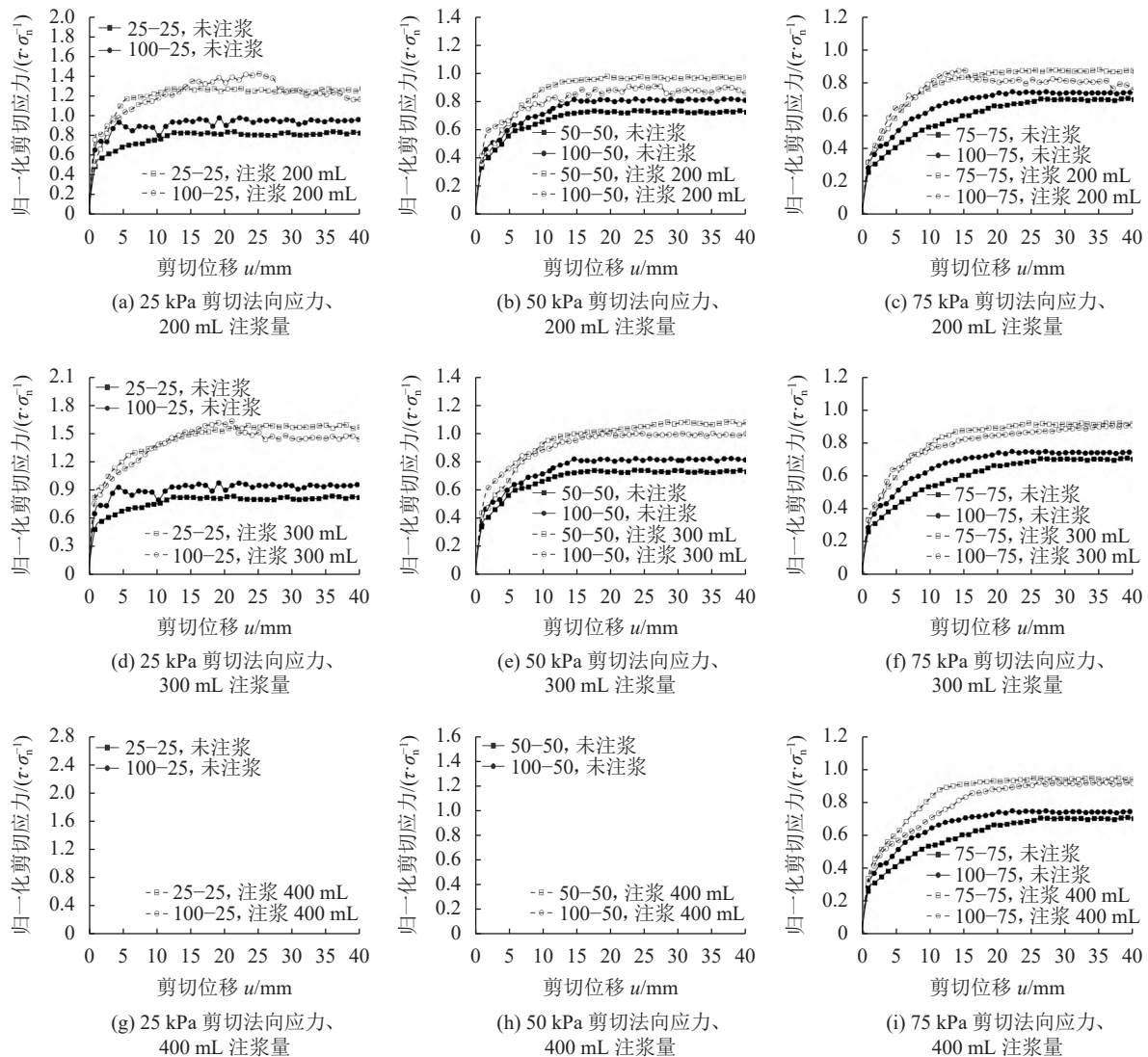


图 2 加、卸荷接触面归一化剪切应力-位移曲线

Fig. 2 Curves of interface normalized shear stress-shear displacement under loading and unloading conditions

3)在同一剪切法向应力下,注浆接触面归一化峰值剪切应力随着注浆量的增大而增大,但增大幅度随着注浆量增大而逐渐降低。即随着注浆量的增大,单位注浆量浆液对接触面剪切特性的改善效果逐渐减弱。因此,在实际注浆过程中,不能仅靠增大注浆量来改善土与结构物接触面力学特性。

分析上述现象产生的原因,从能量角度,接触面在固结法向应力作用下可以视为能量累计的过程,卸荷至剪切法向应力可视为能量释放的过程^[6]。因此,对于未注浆接触面,在同一剪切法向应力下,由于卸荷接触面经历了先期法向应力的固结积累能量,然后卸荷至与无卸荷接触面相同的剪切法向应力下进行剪切,虽然卸荷会导致能量的释放,但是由于土体变形的非线性特性,卸荷的接触面的密实度及接触

面处积累的总能量必然高于无卸荷接触面的密实度及接触面处积累的总能量;在后续剪切过程中,卸荷接触面剪切特性优于无卸荷接触面剪切特性。对于注浆接触面,由于浆液对接触面土体具有渗透、压密等特性,从而改善接触面土体的剪切力学特性,故注浆接触面剪切力学特性要优于未注浆接触面剪切力学特性。因此,对于同一剪切法向应力下的接触面,卸荷工况的接触面比无卸荷工况接触面的土体密实度高。一般而言,密实度越高的土体,浆液更不易发生渗透,使得在同一注浆压力和注浆量下,无卸荷工况接触面注入到接触面处的浆液发生渗透注浆形成浆土混合体的比例,高于卸荷工况接触面的比例;在卸荷接触面处水泥浆液将产生压密注浆效应,在混凝土板上形成注浆体,注浆体与光滑混凝土板结合

可以视为增加了接触面的粗糙度。因此,对于卸荷接触面,注入浆液,通过增大接触面混凝土板的粗糙度,改善接触面剪切特性;对于无卸荷接触面,注入浆液,形成浆土混合体,土与结构物接触面的剪切特性与土体本身的力学特性有较大的关联性,通过接触面处土体特性的改善,从而改善剪切特性。因此,注浆可逐渐消除由于加、卸荷产生的接触面剪切力学特性差异。文献[5]研究表明,接触面软化现象更可能出现在较大粗糙度与卸荷程度较大的接触面处,这与本文注浆接触面试验软化现象一致。这也验证了注入浆液,通过增大接触面混凝土板的粗糙度,改善了卸荷接触面的剪切特性。

2.2 加、卸荷对接触面抗剪强度参数的影响

根据接触面剪切应力-位移曲线,得到不同荷载工况和注浆量下的接触面峰值剪切应力,见表2、3。

表 2 无卸荷接触面峰值剪切应力

σ_n/kPa	τ_p/kPa			
	未注浆	注浆200 mL	注浆300 mL	注浆400 mL
25	20.95	31.93	39.90	43.73
50	36.84	48.99	54.00	55.93
75	52.98	65.99	68.97	70.96
100	70.95	78.00	80.82	82.94

表 3 卸荷接触面峰值剪切应力

σ_n/kPa	τ_p/kPa			
	未注浆	注浆200 mL	注浆300 mL	注浆400 mL
25	24.43	35.62	40.87	52.49
50	41.00	45.49	49.94	60.98
75	55.96	65.55	67.81	68.98
100	70.95	78.00	80.82	82.94

由表2、3可见接触面峰值剪切应力和剪切法向应力之间关系,并进行摩尔-库伦线性拟合,拟合表达式如下:

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \tan \varphi + c_a \tag{1}$$

式中, σ_n 和 τ_p 分别为接触面剪切法向应力和峰值剪切应力, φ 和 c_a 分别为接触面等效内摩擦角和等效黏聚力。

拟合接触面峰值剪切应力与剪切法向应力如图3所示。由图3可以发现,加、卸荷条件下,无论接触面注浆与否,其峰值剪切应力和剪切法向应力之间均很好地满足摩尔-库伦线性破坏准则。

从拟合的线性表达式可以得到接触面等效黏聚力和等效内摩擦角,见表4。由表4可见:与未注浆接触面相比,注浆接触面等效黏聚力得到显著提升,并且接触面等效黏聚力随着注浆量的增大而增大;当

接触面存在卸荷工况时,注浆接触面等效黏聚力与未注浆接触面等效黏聚力的比值随着注浆量的增大分别为2.05、2.69和4.39;当接触面不存在卸荷工况时,注浆接触面等效黏聚力与未注浆接触面等效黏聚力的比值随着注浆量的增大分别为4.47、6.79和7.75。因此,同一注浆量下,浆液对无卸荷接触面等效黏聚力的改变效果要优于卸荷工况下的接触面等效黏聚力,这与第2.1节中描述的在无卸荷工况下,浆液接触面土体内渗透效应相一致。浆液渗透改变了土体本身力学特性,从而与混凝土接触面相互作用,达到更大的等效黏聚力。无论加、卸荷工况,不同注浆量下的注浆接触面等效内摩擦角与未注浆接触面等效内摩擦角均在30°左右波动,因此,可以认为注浆对接触面等效内摩擦角的改变影响不大。同一注浆量下,不同加、卸荷接触面等效黏聚力数值基本相一致,等效内摩擦角也无明显差异。因此,在浆液的作用下,注浆可逐渐消除由于加、卸荷产生的接触面剪切特性差异。

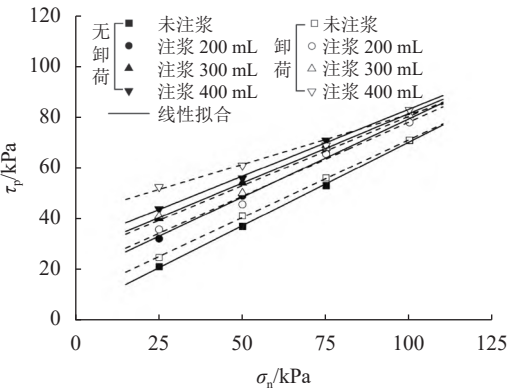


图 3 接触面峰值剪切应力-剪切法向应力拟合曲线
Fig. 3 Fitting curves of interface peak shear stress-applied normal stress

表 4 接触面等效黏聚力和内摩擦角

注浆工况	等效黏聚力 c_a/kPa		等效内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	
	无卸荷	卸荷	无卸荷	卸荷
未注浆	3.90	9.45	33.60	31.72
200 mL	17.42	19.36	31.84	30.49
300 mL	26.49	25.43	28.85	28.85
400 mL	30.22	41.51	27.95	21.67

综上所述,浆液在接触面处土体内主要发生渗透和压密效应,而渗透注浆对土体颗粒内部的框架结构没有产生实质影响,浆液颗粒填充于土颗粒与土颗粒之间孔隙部分,故而,对接触面等效内摩擦角没有产生明显影响[18,22]。而压密效应在混凝土板表面形成的浆液块体相当于增加了接触面的粗糙度,陈俊桦等[23]研究结果表明,接触面粗糙度对土-混凝

土接触面等效内摩擦角无明显影响。故对于发生渗透和压密注浆的土与结构物接触面而言,其等效内摩擦角基本不随注浆工况的改变而变化。接触面等效黏聚力包含土颗粒间的黏聚力和土颗粒与混凝土表面颗粒间的黏聚力作用,并且后者相对较小,浆液渗透进入土体内部过程中,改变了土颗粒之间的黏聚作用,从而提高了接触面等效黏聚力,这与文献[18,22]得出的结论较为一致。

2.3 加、卸荷对接触面剪切影响范围的影响

土与结构物接触面发生剪切时,结构物表面往往会带动周围一定的土体而形成一个剪切错动带^[24](图1)。本试验通过测定剪切错动带评定不同加、卸荷工况下的注浆砂土-混凝土接触面剪切过程中形成的接触面剪切影响范围,图4为加、卸荷工况下接触面水平和垂直剪切影响范围随接触面剪切法向应力的变化曲线。

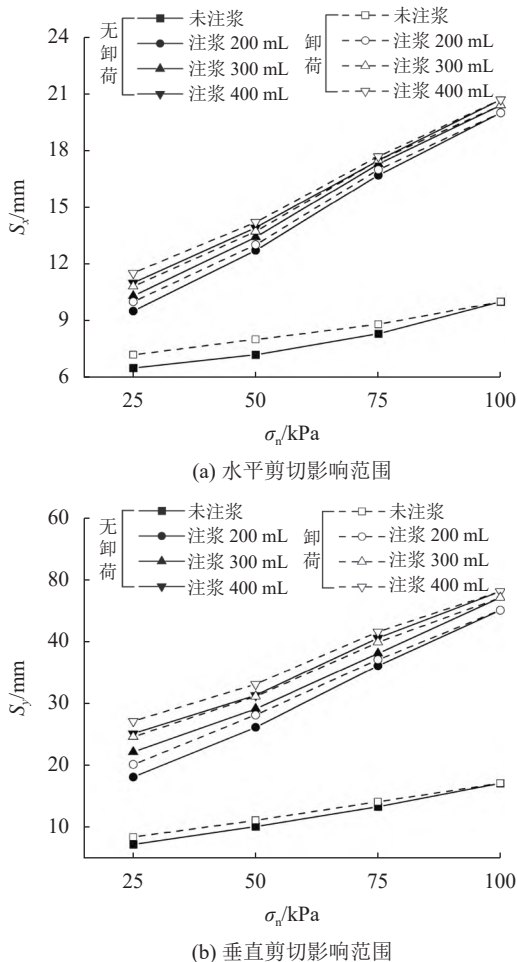


图 4 剪切影响范围随剪切法向应力变化曲线

Fig. 4 Curves of interface shearing influence range-applied normal stress

从图4(a)可以看出:注浆接触面水平剪切影响范围明显高于未注浆接触面水平剪切影响范围,并且注浆量的增长对接触面水平剪切影响范围的变化

不明显;卸荷工况下的接触面水平剪切影响范围略大于无卸荷工况下的接触面水平剪切影响范围;接触面水平剪切影响范围与接触面达到峰值剪切应力对应的剪切位移基本一致。从图4(b)可以看出:接触面垂直剪切影响范围与注浆量变化关系同接触面水平剪切影响范围与注浆量变化关系基本一致,但是接触面垂直剪切影响范围明显高于接触面水平剪切影响范围;无论加、卸荷和注浆工况变化,接触面水平和垂直剪切影响范围均与接触面剪切法向应力近似呈线性关系,与接触面峰值剪切应力与剪切法向应力关系相一致。因此,可以认为接触面水平和垂直剪切影响范围与接触面峰值剪切应力呈正相关。

综上,并根据刘丰铭^[25]研究发现,在桩基础中,根据剪切位移法,桩侧土体在发挥侧摩阻力过程时会带动桩周一定范围内的土体产生变形,桩侧剪切影响范围 r_m 满足:

$$r_m = \frac{\tau_0 r_0}{\eta \cdot G_0} \quad (2)$$

式中: τ_0 为桩侧摩阻力; r_0 为桩体半径; G_0 为土体初始剪切模量; η 为一极小值,可通过试验确定,Randolph^[26]建议 η 的取值范围为 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5}$ 。在桩身半径和土体确定的情况下,剪切影响范围 r_m 与桩侧摩阻力 τ_0 呈正相关。

直剪试验中,通过土与混凝土板的相互作用,可用于模拟桩身与桩侧土体之间的相互作用。因此,实际工程中,描述桩侧剪切影响范围关系的式(2),亦可用于解释土与混凝土接触面剪切试验形成的剪切影响范围分布关系。但此时,桩侧摩阻力 τ_0 需用直剪试验中的接触面峰值剪切应力 τ_p 代替。因此,直剪试验中,接触面剪切影响范围与接触面峰值剪切应力呈正相关。

3 结 论

本文采用自主研发的注浆设备和剪切设备开展了3种注浆量和4种不同加、卸荷工况下的注浆砂土-混凝土接触面剪切试验,系统研究了不同加、卸荷工况对注浆和未注浆接触面剪切力学特性以及剪切影响范围的影响,得到以下结论:

1)对于未注浆接触面,在同一剪切法向应力下,卸荷工况的接触面初始剪切模量大于无卸荷工况的接触面初始剪切模量;而注浆接触面初始剪切模量要高于未注浆接触面初始剪切模量,并且二者差值随着剪切法向应力的增大逐渐缩小;注浆可逐渐消除由于加卸荷产生的接触面初始剪切模量差异。

2)未注浆接触面归一化剪切应力-位移曲线未出现软化;注浆接触面归一化剪切应力-位移曲线呈

现软化现象,并且软化出现在剪切法向应力较小及卸荷的接触面剪切过程中。在同一剪切法向应力下,注浆接触面峰值剪切应力随着注浆量的增大而增大,但增大幅度随着注浆量增大而逐渐降低。

3)无论接触面是否注浆,以及是否存在加、卸荷工况,其峰值剪切应力与剪切法向应力之间均满足摩尔-库伦破坏准则;与未注浆接触面相比,注浆接触面等效黏聚力得到显著提升,并且接触面等效黏聚力随着注浆量的增大而增大,但注浆对接触面等效内摩擦角无明显影响;同一注浆量下,浆液对无卸荷接触面等效黏聚力的改变效果优于卸荷接触面。

4)注浆接触面水平和垂直剪切影响范围均明显高于未注浆接触面,并且注浆量的增长对接触面剪切影响范围的变化影响不明显;卸荷工况下的接触面剪切影响范围略大于无卸荷工况下的接触面剪切影响范围;在加、卸荷和注浆工况下,接触面剪切影响范围与接触面峰值剪切应力呈正相关。

5)对于卸荷接触面,注入浆液,通过增大接触面混凝土板的粗糙度来改善接触面剪切特性;对于无卸荷接触面,注入浆液,形成浆土混合体,通过改善接触面处土体特性来体现对剪切特性的改善。

参考文献:

- [1] Potyondy J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. *Geotechnique*, 1961, 11(4): 339-353.
- [2] Chen Junhua, Zhang Jiasheng, Li Jian. Influence of interface roughness on mechanical properties of red clay-concrete interface[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(5): 1682-1688. [陈俊桦, 张家生, 李健. 接触面粗糙度对红黏土-混凝土接触面力学性质的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(5): 1682-1688.]
- [3] 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. [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.]
- [4] Zhao Chunfeng, Wu Yue, Zhao Cheng, et al. Experimental research on the clay-concrete interface shear behaviors considering the roughness and unloading effect[C]// *Proceedings of Geoshanghai 2018 International Conference: Fundamentals of Soil Behaviours*, 2018: 522-530.
- [5] Zhao Chunfeng, Wu Yue, Zhao Cheng, et al. Effect of unloading on shear behavior of interface between sand and concrete[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(4): 1020-1029. [赵春风, 吴悦, 赵程, 等. 考虑卸荷效应的砂土-混凝土接触面剪切特性影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(4): 1020-1029.]
- [6] Zhao Chunfeng, Gong Hui, Zhao Cheng, et al. Elastoplastic analysis of interface between clay and concrete considering effect of normal stress history[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(4): 848-855. [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.]
- [7] Zhang Ga, Zhang Jianmin. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 21-25. [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.]
- [8] Zhang Ga, Zhang Jianmin. Experimental study on cyclic behavior of interface between soil and structure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(2): 254-258. [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.]
- [9] Hu Liming, Pu Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 431-435. [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.]
- [10] Clough G W, Duncan J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1971, 97(12): 1657-1673.
- [11] Wan Zheng, Qiu Rendong. Horizontal static load test research for pile lateral friction and tip resistance of grouting technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Suppl): 3588-3596. [万征, 秋仁东. 桩侧桩端后注浆灌注桩水平静载特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊1): 3588-3596.]
- [12] Ye Fei, Zhu Hehua, He Chuan. Back-filled grouts diffusion model and its pressure to segments of shield tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1307-1312. [叶飞, 朱合华, 何川. 盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5): 1307-1312.]
- [13] Fei Yi, Zhao Chunfeng, Wang Youbao, et al. Shear experiment study of sand-concrete interface considering grouting[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2019, 41(4): 46-50. [费逸, 赵春风, 王有宝, 等. 砂土-混凝土接触面注浆剪切试验研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(4): 46-50.]
- [14] Chu L M, Yin J H. Study on soil-cement grout interface shear strength of soil nailing by direct shear box testing method[J]. *Geomechanics and Geoengineering*, 2006, 1(4): 259-273.
- [15] Hossain M A, Yin Jianhua. Dilatancy and strength of an unsaturated soil-cement interface in direct shear tests[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2015, 15(5): 04014081.
- [16] Chen Jianhang, Hagan P C, Saydam S. Shear behaviour of a

- cement grout tested in the direct shear test[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 166: 271–279.
- [17] Yin Jianhua, Zhou Wanhuan. Influence of grouting pressure and overburden stress on the interface resistance of a soil nail[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(9): 1198–1208.
- [18] Dano C, Hicher P Y, Tailliez S. Engineering properties of grouted sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(3): 328–338.
- [19] Dai Guoliang, Wan Zhihui, Zhu Mingxing, et al. The model of grout migration height for pressured grouting at pile tip based on time-dependent behavior of viscosity and its engineering application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(8): 2941–2950. [戴国亮, 万志辉, 竺明星, 等. 基于黏度时变性的桩端压力浆液上返高度模型及工程应用[J]. *岩土力学*, 2018, 39(8): 2941–2950.]
- [20] 赵春风, 吴悦, 赵程, 等. 一种模拟桩端后注浆浆液上返的室内试验方法: 中国, CN108828195B[P]. 2020–10–02.
- [21] 赵程, 王文东, 赵春风, 等. 一种砂土与结构接触面剪切特性的观测方法: 中国CN106323766B[P]. 2018–10–26.
- [22] Clough G W, Sitar N, Bachus R C, et al. Cemented sands under static loading[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1981, 107(6): 799–817.
- [23] Chen Junhua, Zhang Jiasheng, Li Jian. Experimental research on mechanical characteristics of cohesive soil-structure interface by considering its roughness[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2015, 47(4): 22–30. [陈俊桦, 张家生, 李健. 考虑粗糙度的黏性土-结构接触面力学特性试验[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(4): 22–30.]
- [24] Zhang Dongji, Lu Tinghao. Establishment and application of a interface model between soil and structure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(6): 62–66. [张冬霖, 卢廷浩. 一种土与结构接触面模型的建立及其应用[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(6): 62–66.]
- [25] Liu Fengming. The vertical bearing mechanism of compressive pile with post grouting in tip in sand by considering of the radial unloading[D]. Shanghai: Tongji University, 2017. [刘丰铭. 砂土中考虑土体径向卸荷效应的桩端后注浆抗压桩竖向承载机制[D]. 上海: 同济大学, 2017.]
- [26] Randolph M F, Wroth C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1978, 104(12): 1465–1488.

(编辑 张凌之)

引用格式: Wu Yue, Liu Fengming, Zhao Chunfeng, et al. Effects of normal loading and unloading on the post-grouting sand-concrete interface shear behavior[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(5): 103–110. [吴悦, 刘丰铭, 赵春风, 等. 加卸荷工况对注浆砂土-混凝土接触面剪切特性影响[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(5): 103–110.]