

DOI:10.11918/201905042

不同注浆工况对砂土-混凝土接触面剪切特性影响

吴悦^{1,2}, 赵春风^{1,2}, 刘帆³, 王有宝^{1,2}, 费逸^{1,2}

(1. 岩土与地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200135)

摘要: 为研究后注浆对土与结构物接触面力学特性的影响, 采用自主研发的注浆装置和可注浆的大型直剪仪, 通过3种注浆压力、3种注浆量和4种荷载工况下的共计22组后注浆砂土-混凝土接触面大型直剪试验, 分析不同注浆工况和荷载工况对砂土-混凝土接触面剪切力学特性、剪胀(缩)性以及强度参数等的影响。结果表明: 在注浆压力和法向应力一定的情况下, 接触面峰值剪切应力随着注浆量的增大而增大, 但随着法向应力的增大, 增加注浆量对接触面力学特性的改善效果逐渐减弱; 在注浆量和法向应力一定的情况下, 注浆压力较低时, 接触面峰值剪切应力变化不大, 当注浆压力达到一定值, 其对接触面峰值剪切应力提高效果较为明显; 不同注浆和荷载工况下接触面抗剪强度增强系数介于1.1~2.0; 浆液主要通过提高接触面等效黏聚力改善接触面力学特性, 等效内摩擦角近似与未注浆接触面一致; 接触面在未注浆工况下均发生剪缩, 且最大剪缩量随着法向应力的增大而增大; 后注浆能够转变较低法向应力下的接触面剪胀(缩)性; 同一法向应力下, 接触面最大剪胀量均随着注浆压力和注浆量的增大而增大, 而最大剪缩量则随着注浆压力和注浆量的增大而减小。

关键词: 后注浆; 注浆压力; 注浆量; 力学特性; 砂土-混凝土接触面

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)05-0095-09

Effects of grouting conditions on shear behavior of sand-concrete interface

WU Yue^{1,2}, ZHAO Chunfeng^{1,2}, LIU Fan³, WANG Youbao^{1,2}, FEI Yi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering(Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: To study the effect of post-grouting on the mechanical properties of the interface between soil and structure, a total of 22 groups of direct shear tests were conducted on samples with post-grouting sand-concrete interface under three grouting pressures, three grouting volumes, and four loading conditions. The influence of grouting conditions and loading conditions on the mechanical properties, shear dilation, and strength parameters of the sand-concrete interface were analyzed by using self-developed grouting equipment and grouting method. Test results show that the interface peak shear stress increased with the increase of grouting volume when the grouting pressure and normal stress remained unchanged. When the normal stress of the interface increased, the improvement effect of the grouting on the mechanical properties of the interface gradually decreased with the increase of the grouting volume. When the grouting pressure was low, the change of the interface peak shear stress was not obvious with the grouting volume and normal stress remained unchanged. When the grouting pressure reached a certain value, the increase of the interface peak shear stress was obvious. The shear strength enhancement coefficient of the interface was between 1.1 and 2.0 under different grouting and loading conditions. The shear behavior of the post-grouting sand-concrete interface was mainly improved by increasing the equivalent cohesion of the interface. The equivalent internal friction angle was approximately the same as that of the non-grouting interface. The shear contraction of the interface occurred under non-grouting conditions, and the maximum value of shear contraction increased with the increase of normal stress. Post-grouting could change the interface shear dilation mode for low normal stress. Under the same normal stress, with the increase of grouting volume and grouting pressure, the maximum value of shear dilation increased whereas the maximum value of shear contraction decreased.

Keywords: post-grouting; grouting pressure; grouting volume; mechanical behavior; sand-concrete interface

收稿日期: 2019-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(41672265, 41272295)

作者简介: 吴悦(1992—), 男, 博士研究生;

赵春风(1964—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 赵春风, tjzhcf@tongji.edu.cn

桩的后注浆技术是指在成桩完成后, 将水泥浆液通过注浆装置注入桩端或桩侧以改善桩端和桩侧土体力学特性进而改善桩的承载性能的一项技术。近年来, 随着工程建设的发展, 桩基础尤其是灌注桩

基础被大量应用于实际工程中,由于地质、施工等原因可能对桩基础的承载特性产生不利影响,后注浆技术得以应用于此并得到一定的发展^[1-3].

张忠苗等^[4-9]均从现场试验以及理论方面等对桩端后注浆桩基的承载特性展开了大量研究,揭示了桩端后注浆对桩承载特性改善机制、后注浆桩荷载传递特性以及浆液上返高度特性;Thiyyakkandi等^[10-11]结合室内模型试验和数值模拟的方法研究了后注浆桩的承载特性;张忠苗等^[12]通过室内模拟注浆装置研究了黏土体中压密注浆和劈裂注浆产生和发展过程;此外,戴国亮等^[13-17]均从不同角度研究了后注浆桩的竖向承载特性,对后注浆技术在桩基领域的应用做出了贡献.

在注浆土与结构物接触面力学特性方面的研究,Hossain等^[18]针对全风化花岗岩和水泥浆液接触面在不同注浆压力和法向应力条件下展开直剪试验研究,发现接触面内摩擦角大小不受注浆压力影响,而黏聚力随着注浆压力增大而增大,接触面抗剪强度与注浆压力近似呈线性变化;Yin等^[19]通过土钉拉拔试验研究了注浆压力和上覆压力对土钉与土体接触面力学特性的影响,给出了土钉抗拔承载力与注浆压力和上覆压力之间的经验公式;钱建固等^[20]开展了注浆成型螺纹桩的接触面力学特性大型直剪试验,发现注浆形成的螺纹主要通过增大接触面黏聚力进而提高接触面抗剪强度.

由于地质条件的多样性以及施工工况的复杂性等因素,目前,后注浆技术在理论研究方面落后于实际工程应用,对于后注浆土体与桩体本身的相互作用机制的研究尚不够成熟,现有研究也多侧重于后注浆对桩承载力和沉降方面的影响,而对后注浆桩土接触面软化特性以及剪胀(缩)特性等方面研究较少涉及.实际工程中桩的后注浆是指在一定注浆压力下将设计的注浆量注入桩端或桩侧,因此,注浆压力和注浆量是控制注浆效果的两个重要因素.本文采用自主研发的注浆装置和可注浆的大型直剪仪进行砂土-混凝土接触面后注浆大型直剪试验以模拟研究后注浆桩-土接触面力学特性,通过不同注

浆压力、不同注浆量以及不同荷载工况对后注浆砂土-混凝土接触面剪切力学特性、剪胀(缩)性以及强度参数等的影响,综合分析后注浆对砂土-混凝土接触面力学特性改善机理,以期后注浆技术在实际工程中的进一步应用提供参考.

1 试 验

1.1 试验设备和注浆方法

试验仪器主要采用改进的可用于注浆的大型多功能界面直剪仪和自主研发的注浆设备,其仪器原理图和注浆方法可见本课题组申请的相关发明专利(申请号:2018102091304,201810210197X,均已公开)^[21-22].

本试验中,混凝土板用作模拟灌注桩桩身,混凝土板上部土体和通过加压钢板施加在土体上的不同法向应力,则用于模拟不同深度处的桩身表面承受周围土体的荷载工况.不同于之前相关研究多将水泥浆液预先铺设于结构物与土体接触表面或是直接采用水泥土进行试验,这两种方法均无法分析浆液在土与结构物接触面渗透扩散形式,与实际工程中的注浆工艺也差别很大.本次试验中,由于浆液是通过空气压缩机和大型多功能界面剪切仪中的注浆管路将水泥浆液直接注入土与混凝土接触面,现场灌注桩后注浆亦通过桩身埋置的注浆管将水泥浆液注入桩端或桩侧,本试验能够模拟现场注浆过程中浆液的扩散,不通过预先铺设浆液或水泥土也更能接近工程实际中的注浆工艺,因此,浆液的渗透方式(包括渗透注浆、压密注浆和劈裂注浆)与实际工程注浆的浆液渗透方式可以形成相似对比,从而能够分析不同工况下的浆液渗透方式、注浆模式等变化规律.

1.2 试验材料

试验土体采用上海某工程第③₂层灰色粉砂,其基本物理力学指标为:重度 $\gamma = 19.50 \text{ kN/m}^3$,内摩擦角 $\varphi = 31.50^\circ$,含水率 $\omega = 20\%$,孔隙比 $e = 0.75$,压缩模量 $E_{s1-2} = 11.23 \text{ MPa}$.试验土样颗粒级配见表1.

表 1 试验土样颗粒分析
Tab. 1 Gradation of silt in tests

粒径分类/mm	砂			粉粒			黏粒
	1.0 ~ 0.5	0.50 ~ 0.25	0.250 ~ 0.075	0.075 ~ 0.050	0.05 ~ 0.01	0.010 ~ 0.005	< 0.005
w/%	0.3	8.4	54.6	19.0	11.4	2.0	4.3

试验混凝土板采用光滑预制混凝土板,其净尺寸为长×宽×高=590 mm×390 mm×50 mm.水泥采用普通硅酸盐水泥,标号为P. O 42.5,根据预试

验试注结果并综合考虑浆液可注性确定浆液水灰比为0.6,浆液中添加早强剂和染色剂,便于后续浆体早期强度的提高和对浆液扩散特性的观察以确定注

浆模式.

1.3 试验过程

在正式开展本试验之前,进行了大量的预试验研究,开展预试验主要是为了确定本次试验的3个变量,即注浆压力、注浆量、接触面法向应力的具体取值.按照设计的试验装置空气压缩机的压力量程,可提供最大压力为800 kPa,注浆压力分别尝试了100,200,300,400,500,600以及700 kPa,注浆量尝试了100,200,300,400以及500 mL,法向应力从100 kPa开始尝试.通过预试验结果发现,注浆压力在100~400 kPa时,难以将设定的这5种注浆量全部注入土与混凝土接触面处.当注浆压力提升至500~700 kPa时,能够将设定的注浆量注入接触面处.并且注浆模式会呈现渗透、压密和劈裂这一变化规律,因此,最终确定注浆压力为500~700 kPa,注浆量取中间3个值,即200~400 mL.进一步尝试更高的法向应力时,在设定的3种注浆压力下难以将设定的注浆量注入接触面,因此,本次试验确定最大接触面法向应力为100 kPa.为了研究法向应力变化对注浆接触面力学特性和浆液扩散特性的影响,按照25 kPa的梯度设定了4个法向应力级别,即25,50,75和100 kPa.具体试验方案为:1)在固结法向应力为25,50,75 kPa 3种荷载工况下分别进行注浆压力为500 kPa对应的3种注浆量的后注浆试验;2)固结法向应力为100 kPa下进行3种不同注浆量和3种不同注浆压力的正交后注浆试验;3)在固结法向应力为25,50,75和100 kPa下分别进行未注浆对比试验.

2 试验结果

2.1 不同注浆量下砂土-混凝土接触面力学特性

图1给出了4种法向应力下,注浆压力为500 kPa对应的3种不同注浆量和未注浆下得到的砂土-混凝土接触面剪切应力-剪切位移关系曲线.可以看出,浆液的注入显著改善了砂土-混凝土接触面的力学特性;与未注浆接触面剪切应力-剪切位移曲线比较,经过注浆的接触面其曲线初始段斜率较大,即浆液提高了砂土-混凝土接触面的初始剪切模量;同一剪切位移对应的剪切应力,后注浆接触面明显大于未注浆接触面并且其值随着注浆量的增大而增大;当法向应力为25 kPa时,3种注浆量下的接触面剪切应力-剪切位移曲线差异较大,并且与未注浆接触面曲线相比差异同样较大.而随着法向应力的增大,曲线差异逐渐缩小,例如,当法向应力为25 kPa时,未注浆接触面和3种注浆量(200,300和400 mL)下接触面的峰值剪切应力分别为20.95,

31.93,39.90和43.73 kPa,而当法向应力为100 kPa时,对应的接触面峰值剪切应力分别为70.95,77.99,

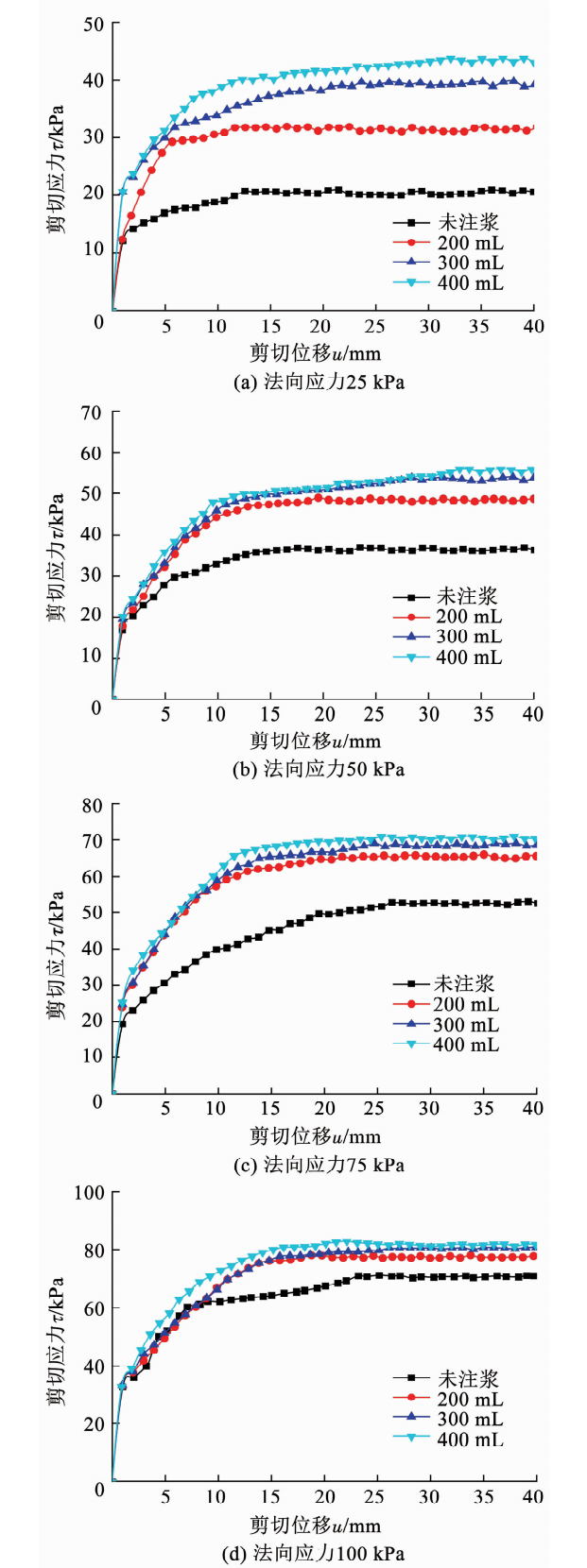


图1 注浆压力500 kPa下不同注浆量接触面剪切应力-剪切位移关系

Fig. 1 Curves of shear stress-shear displacement under different grouting volumes (grouting pressure at 500 kPa)

80.82 和 82.94 kPa,不同注浆量接触面之间以及注浆与未注浆接触面之间的峰值剪切应力差异性均随着法向应力的增大而明显减小,说明随着法向应力的增大,增加注浆量对接触面力学特性的改善效果逐渐减弱;无论是注浆还是未注浆,随着剪切位移的增大,接触面剪切应力-剪切位移曲线均未出现软化现象,呈现为理想弹塑性。

上述现象所产生的原因,可能是浆液的注入通过渗透效应进入接触面处土体从而形成浆-土混合体,此外,注浆压力产生的压密效应使接触面土体密实度增大,孔隙率降低,并且新形成的浆-土混合体其强度以及剪切模量都要优于原先未注浆砂土,因此,提高了后注浆砂土-混凝土接触面的初始剪切模量和剪切强度;在法向应力较低时,固结阶段结束后土体的初始密实度较低,孔隙率也相应较大,因此,浆液注入后更容易发生渗透,注浆量越大,渗透形成的浆-土混合体占比越大,从而导致不同注浆量下的接触面剪切应力-剪切位移曲线差异较大;而随着法向应力的增大,固结阶段结束后接触面处土体密实度较大,孔隙率较小,同一注浆压力下注入的浆液相对较难渗透进入土体中形成浆-土混合体,注浆模式将以压密注浆为主,而由于土体变形的非线性特性,土体密实度变化量逐渐减小,因此,随着接触面法向应力的增大,注浆量的增大对接触面力学特性的改善效果逐渐减弱。

2.2 不同注浆压力下砂土-混凝土接触面力学特性

图 2 给出了 3 种注浆量下,法向应力 100 kPa 对应的 3 种不同注浆压力和未注浆下得到的砂土-混凝土接触面剪切应力-剪切位移关系曲线。可以看出:同一法向应力和注浆量下,不同注浆压力对接触面力学特性的改善效果随着注浆压力的增大而增大;注浆压力为 500 和 600 kPa 对应的接触面剪切应力-剪切位移曲线差异很小,例如,注浆量为 200 mL 时对应的接触面峰值剪切应力分别为 77.99 和 79.83 kPa,注浆量 300 mL 时分别为 80.82 和 82.70 kPa,注浆量 400 mL 时分别为 82.94 和 85.88 kPa,说明在这两种注浆压力下后注浆浆液对接触面峰值剪切应力的提高差异不大;而当注浆压力为 700 kPa 时,3 种注浆量对应的接触面峰值剪切应力分别为 88.95、95.88 和 98.67 kPa,相较于注浆压力为 500 和 600 kPa 的情况,其对接触面力学特性的改善效果发生明显变化,因此,在实际注浆过程中注浆压力的选择对注浆效果有很显著的影响。但这并不意味着能够凭借不断增加注浆压力来改善接触面力学特性,应当综合考虑实际土体荷载工况、预期改善效果、经济等因素确定一最优注浆压力,这将在另外一项研究中进行阐述。

上述现象所产生的原因,可能是在本试验中当法向应力为 100 kPa 时,浆液对土体的作用主要以压密注浆为主,当注浆压力较小时,对接触面土体密实程度的改变较小,随着注浆压力的增大,浆液对土体密实程度改变也越来越大,因此,接触面力学特性的改善效果随着注浆压力的增大而增大;接触面土体所受的法向应力为 100 kPa 时,接触面土体密实度较低法向应力固结下的土体高,在较低的注浆压力下浆液将不易渗透进入土体中或者渗透形成的浆-土混合体比例也较低,当注浆压力增大时,浆液能够借助较高的注浆压力进入土体中从而形成更多的浆-土混合体,因此,当注浆压力达到一定值时,其对接触面力学特性的改善效果可能会发生明显变化。

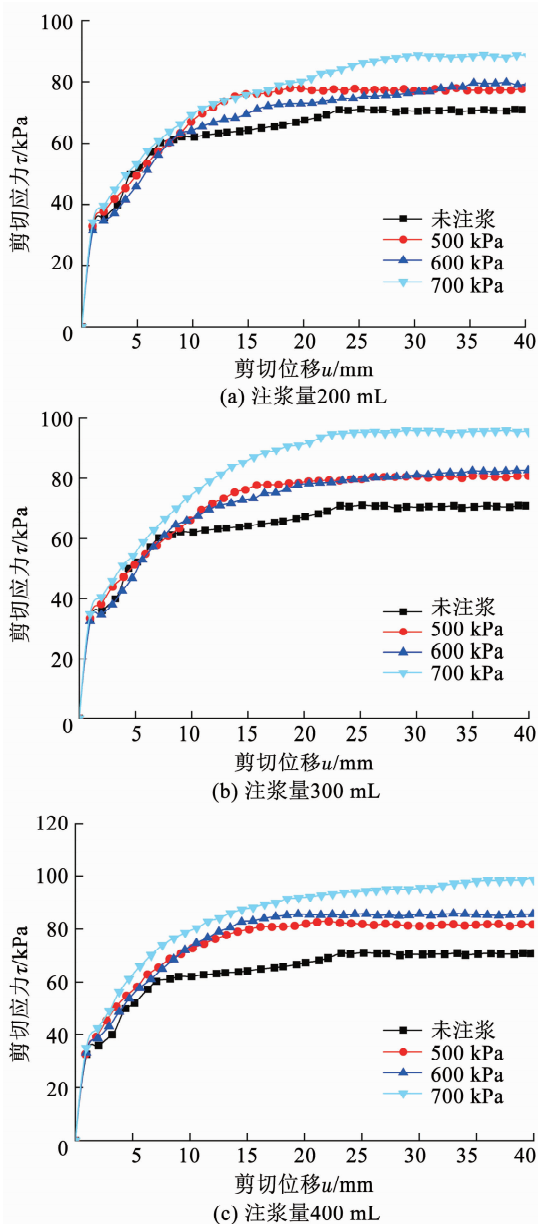


图 2 法向应力 100 kPa 下不同注浆压力接触面剪切应力-剪切位移关系

Fig. 2 Curves of shear stress-shear displacement under different grouting pressures (normal stress at 100 kPa)

2.3 不同法向应力下砂土-混凝土接触面力学特性

图3给出了未注浆和注浆压力500 kPa时,不同法向应力下的接触面剪切应力-剪切位移关系曲线。

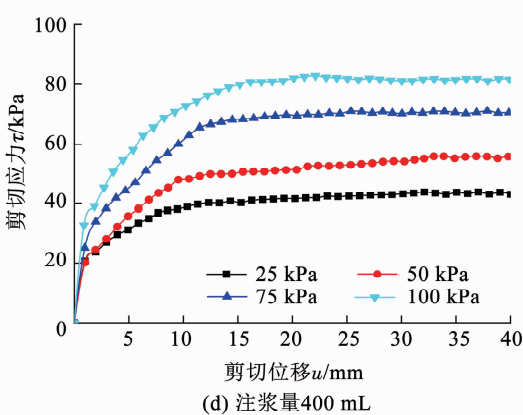
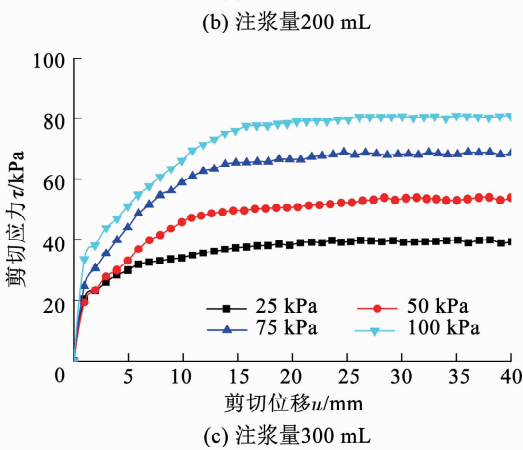
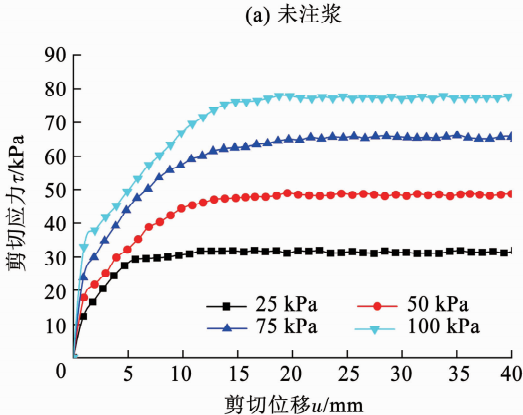
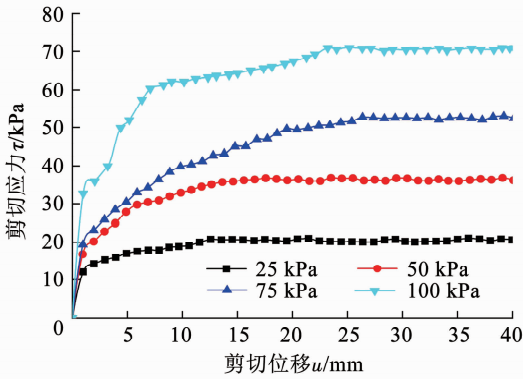


图3 注浆压力500 kPa下不同法向应力下接触面剪切应力-剪切位移关系

Fig. 3 Curves of shear stress-shear displacement under different normal stress (grouting pressure at 500 kPa)

由图3可以看出:无论注浆还是未注浆接触面,曲线初始段斜率随着法向应力的增大而增大,表明砂土-混凝土接触面初始剪切模量随着法向应力的增大而增大,这与接触面土体密实度随着法向应力的增大而增大有关;接触面峰值剪切应力与法向应力之间关系曲线如图4所示,可以看出,无论是注浆还是未注浆接触面,其峰值剪切应力均随着法向应力的增大而增大且近似呈线性关系,遵循摩尔-库伦准则:

τ_p = σ_n · tan δ + c_a. (1)

式中:c_a和δ分别为接触面等效黏聚力和等效内摩擦角,τ_p和σ_n分别为峰值剪切应力和法向应力。

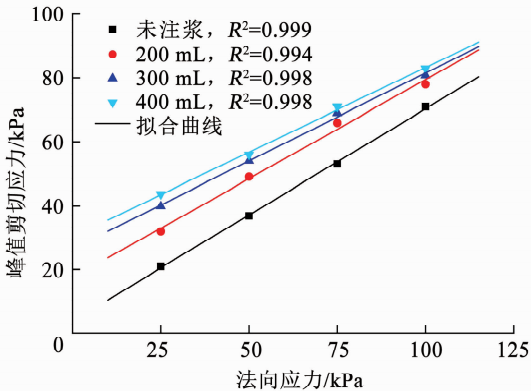


图4 注浆压力500 kPa下接触面峰值剪切应力-法向应力拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of interface peak shear stress-normal stress

2.4 抗剪强度指标分析

从图4的摩尔-库伦线性拟合曲线可以得到接触面等效黏聚力和等效内摩擦角值,如表2所示.可以看出,与未注浆接触面相比,后注浆接触面的等效黏聚力得到明显提高,从本文试验可以得到其提高范围在4~7倍;接触面等效黏聚力随着注浆量的增大而增大,但增大幅度逐渐减小;而接触面等效内摩擦角随着注浆量的变化近似在28°~32°,其值比未注浆情况下接触面等效内摩擦角(33.6°)略小,细微变化可根据Chen等^[23]的研究进行解释.Chen等研究发现,土与混凝土剪切破坏面的位置随着法向压力和接触面粗糙程度的不同,主要分为3种,即混凝土表面、土与混凝土界面和土体内部剪切破坏,3种不同剪切破坏面形式导致接触面等效内摩擦角随着不同接触面粗糙度而产生波动.对于本文试验来说,随着浆液的注入,接触面由原先未注浆情况下砂-混凝土接触面剪切形式向砂-注浆体-混凝土的接触面剪切形式转变,注浆量的增大导致接触面附近浆体厚度改变,而浆体厚度的变化亦可视为接触面粗糙度的改变,从而导致注浆接触面等效内摩擦角的细微变化。

表 2 接触面等效黏聚力和等效内摩擦角
Tab. 2 Equivalent cohesion and equivalent internal friction angle of interface

注浆压力/kPa	注浆量/mL	等效黏聚力/kPa	等效内摩擦角/(°)
500	200	17.42	31.84
500	300	26.49	28.85
500	400	30.22	27.95
500	未注浆	3.90	33.60

上述现象说明浆液主要通过显著提高砂土-混凝土接触面的等效黏聚力进而改善接触面力学特性,对接触面等效内摩擦角的改变不是很明显,在没有相关试验测试情况下可近似认为与未注浆接触面等效内摩擦角一致.

表 3,4 给出了注浆接触面与未注浆接触面峰值剪切应力比值,该比值可作为不同注浆工况和荷载工况下砂土-混凝土接触面抗剪强度增强系数.从表 3 可以看出,强度增强系数介于 1.1~2.0,与建筑桩基技术规范^[24]给定的粉砂土后注浆侧摩阻力增强系数建议值 1.6~2.0 基本接近.通过本文的试验成果分析可以发现,后注浆增强系数与接触面上覆法向应力、注浆量和注浆压力均相关,并且随着注浆量和注浆压力的增大,增强系数逐渐增大,但随着法向应力的增大,增强系数逐渐减小.因此,在实际工程中,对于后注浆增强系数的取值,在同一注浆量和注浆压力下,埋深较大位置处,增强系数宜取小值.

表 3 注浆压力 500 kPa 下后注浆侧阻力增强系数
Tab. 3 Enhancement coefficient of shaft resistance for grouting pressure at 500 kPa

法向应力/kPa	注浆量/mL		
	200	300	400
25	1.52	1.90	2.09
50	1.33	1.47	1.52
75	1.25	1.30	1.34
100	1.10	1.14	1.17

表 4 法向应力 100 kPa 下后注浆侧阻力增强系数
Tab. 4 Enhancement coefficient of shaft resistance for normal stress at 100 kPa

注浆压力/kPa	注浆量/mL		
	200	300	400
500	1.10	1.14	1.17
600	1.13	1.17	1.21
700	1.25	1.35	1.39

2.5 剪胀性分析

为了分析不同注浆工况和法向应力下砂土-混凝土接触面剪胀(缩)性,图 5 给出了注浆压力 500 kPa 不同法向应力和注浆量下接触面法向位移-剪切位移关系曲线.

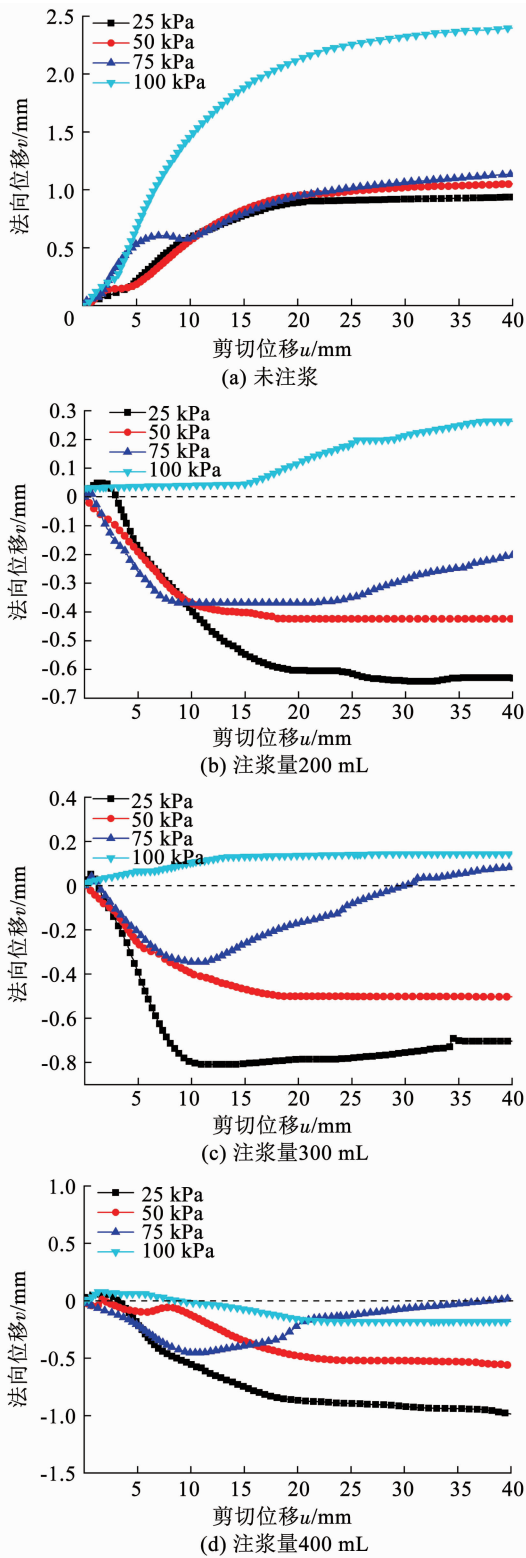


图 5 注浆压力 500 kPa 不同法向应力下接触面法向位移-剪切位移关系

Fig. 5 Curves of normal displacement-shear displacement under different normal stress (grouting pressure at 500 kPa)

图6给出了砂土-混凝土接触面最大剪胀(缩)量随不同注浆量和不同注浆压力的变化曲线. 本文约定接触面土体发生剪胀时法向位移值为负,剪缩为正,并将接触面剪切时对应的法向位移值变化量定义为接触面剪胀(缩)量. 从图5和图6(a)可以看出:未注浆工况在4种法向应力条件下接触面均从剪切开始即发生剪缩,法向位移随着剪切位移的增加逐渐趋于平稳,接触面最大剪缩量随着法向应力的增大而增大;对于后注浆砂土-混凝土接触面,同一注浆工况下,当法向应力较低时($\sigma_n < 75$ kPa),接触面均以剪胀为主并且最大剪胀量随着法向应力的增大而减小;当法向应力为100 kPa,注浆量较低时(小于300 mL),接触面则从剪切开始即发生剪缩,无剪胀出现,最大剪缩量随着注浆量的增大而减小,注浆量较高时(400 mL),随着剪切位移的增加,接触面逐渐由剪缩转变为剪胀,并基本以剪胀为主;无论法向应力大小,接触面最大剪胀量均随着注浆量的增加而增大.

从图6(b)可以看出:在法向应力100 kPa下,当注浆量较低时(200 mL),与未注浆接触面类似,不同注浆压力下接触面只发生剪缩,并且最大剪缩量随着注浆压力的增大逐渐减小;随着注浆量的增大,接触面由剪缩逐渐转向为剪胀,不同注浆压力下的接触面最大剪缩量差异不大,基本趋近零,而最大剪胀量则随着注浆压力的增大而逐渐增大.

上述现象可从能量角度进行解释. 接触面发生剪胀可以认为是砂土-混凝土接触面剪切过程中产生的摩擦势能突破上部法向应力的束缚而产生能量释放的过程^[25-27],接触面发生剪缩可以认为在剪切过程中接触面土体在法向应力作用下密实度增大能量累计的固结过程^[25-26]. 根据前述,在注浆过程中,浆液通过渗透进入土体中形成浆-土混合体,以及在注浆压力的作用下压密土体,从而能够增大接触面处土体的密实度和强度. 对于后注浆砂土-混凝土接触面,注浆量和注浆压力越大,接触面处土体密实度越大,强度越高,接触面处土体积累的能量也越多,因此,在剪切过程中,当发生剪胀时,接触面用于突破剪切法向应力束缚的能量越高,故而接触面最大剪胀量均随着注浆压力和注浆量的增大而增大;而当接触面发生剪缩时,接触面处土体在注浆压力的压密和浆液的渗透共同作用下密实度已经达到一定程度,由于土体变形的非线性特性,剪切过程中接触面土体在法向应力作用下进一步压密的效果将会弱化,并且这种弱化性随着注浆压力和注浆量的增大更加明显,因此,接触面最大剪缩量随着注浆压力和注浆量的增大而减小;从未注浆接触面法向位移-剪切位移曲线可以看出,在100 kPa法向应力下的接触面最大剪缩量远大于其他3种法向应力下的最大剪缩量,即砂土-混凝土接触面剪切过程中在100 kPa法向应力作用下产生的剪缩性远大于其他3种法向应力作用下,因此,对于后注浆接触面,即使在浆液作用下接触面土体密实度已得到提高,接触面在法向应力为100 kPa作用下发生剪切时,接触面土体依旧以剪缩为主,而在其他3种法向应力下的后注浆接触面土体则已由未注浆下的剪缩转变为剪胀.

3 结论与建议

1)后注浆能明显改善砂土-混凝土接触面强度和初始剪切模量,在注浆压力和法向应力一定的情况下,后注浆砂土-混凝土接触面峰值剪切应力随着注浆量的增大而增大,但随着法向应力的增大,增加注浆量对接触面力学特性的改善效果逐渐减弱.

2)在注浆量和法向应力一定的情况下,接触面

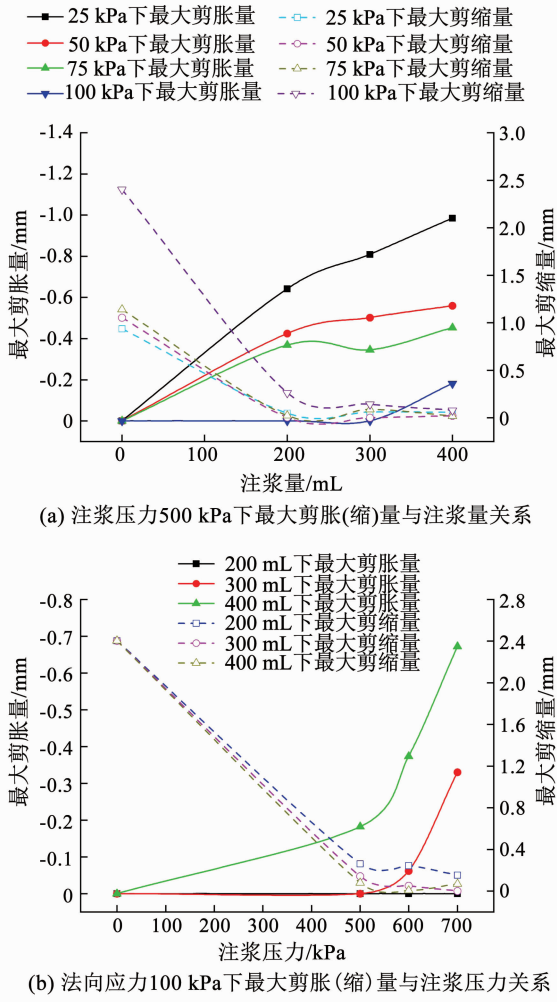


图6 接触面最大剪胀(缩)量与不同注浆工况关系
Fig. 6 Curves of maximum shear dilation of interface under different grouting conditions

峰值剪切应力同样随着注浆压力的增大而增大,但在注浆压力较低时,峰值剪切应力变化不大,当注浆压力达到一定值时,对接触面峰值剪切应力提高效果较为明显。

3)不同注浆和荷载工况下接触面抗剪强度增强系数介于 1.1~2.0,其值随着注浆量和注浆压力的增大而增大,但随着法向应力的增大而减小,在实际注浆工程中,对于同一注浆量和注浆压力下,在埋深较大位置处,增强系数宜取小值。

4)浆液主要通过提高砂土-混凝土接触面的等效黏聚力进而改善接触面力学特性,对接触面等效内摩擦角的改变不是很明显,可近似认为与未注浆接触面等效内摩擦角一致。

5)接触面在未注浆工况下均发生剪缩,且最大剪缩量随着法向应力的增大而增大;而后注浆能够转变较低法向应力下的接触面剪胀(缩)性,接触面最大剪胀量均随着注浆压力和注浆量的增大而增大,而最大剪缩量则随着注浆压力和注浆量的增大而减小。

6)后注浆浆液能够通过渗透和压密注浆模式改变土与结构物接触面力学特性,不同的注浆模式以及转变规律均与注浆压力、注浆量大小以及土体本身荷载工况相关。

参考文献

- [1]张忠苗,吴世明,包风. 钻孔灌注桩桩底后注浆机制与应用研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 681
ZHANG Zhongmiao, WU Shiming, BAO Feng. Study of mechanism and application on bored pile end grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 681
- [2]RUIZ M E, PANDO M A. Load transfer mechanisms of tip post-grouted drilled shafts in sand [C]//Proceedings of International Foundation Congress and Equipment Expo 2009. Orlando: American Society of Civil Engineers, 2009: 23. DOI:10.1061/41021(335)3
- [3]MULLINS G, WINTERS D. Predicting end bearing capacity of post-grouted drilled shaft in cohesionless soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(4): 478. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:4(478)
- [4]张忠苗,张乾青. 破坏和非破坏后注浆抗压桩受力性状现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1601
ZHANG Zhongmiao, ZHANG Qianqing. Field tests on behavior of destructive and non-destructive base-grouting piles under compression [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1601
- [5]张忠苗,邹健,何景愈,等. 考虑压滤效应下饱和黏土压密注浆柱扩张理论[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(11): 1980
ZHANG Zhongmiao, ZOU Jian, HE Jingyu, et al. Cavity expansion theory of compaction grouting in saturated clay considering pressure filtration[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(11): 1980

- [6]张忠苗,邹健,刘俊伟,等. 桩端后注浆浆液上返高度的理论研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2535
ZHANG Zhongmiao, ZOU Jian, LIU Junwei, et al. Theoretical study of climbing height of grout in pile-bottom base grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2535. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2010.08.031
- [7]邹健,张忠苗. 考虑压滤效应饱和黏土压密注浆球孔扩张理论[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(12): 119
ZOU Jian, ZHANG Zhongmiao. Spherical cavity expansion theory of compaction grouting in saturated clay considering pressure filtration [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(12): 119
- [8]房凯,张忠苗,刘志军,等. 基于荷载传递法的后注浆桩荷载沉降关系预测[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(12): 95
FANG Kai, ZHANG Zhongmiao, LIU Zhijun, et al. Load settlement relationship prediction for grouted pile based on load transfer function method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(12): 95. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2012.12.017
- [9]房凯,张忠苗,刘兴旺. 基于沉降标准的卵砾石层中后注浆桩承载力预测[J]. 岩土力学与工程学报, 2012, 31(6): 1178
FANG Kai, ZHANG Zhongmiao, LIU Xingwang. Prediction of bearing capacity of post grouting pile in gravel layer based on settlement criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1178. DOI:10.3969/j.issn.1000-6915.2012.06.012
- [10]THIYAKKANDI S, MCVAY M, BLOOMQUIST D, et al. Experimental study, numerical modeling of and axial prediction approach to base grouted drilled shafts in cohesionless soils[J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(3): 439. DOI: 10.1007/s11440-013-0246-3
- [11]YOUN H, TONON F. Numerical analysis on post-grouted drilled shafts: A case study at the Brazo River Bridge, TX[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(4): 456. DOI:10.1016/j.compgeo.2010.01.005
- [12]张忠苗,邹健,贺静漪,等. 黏土中压密注浆及劈裂注浆室内模拟试验分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1818
ZHANG Zhongmiao, ZOU Jian, HE Jingyi, et al. Laboratory tests on compaction grouting and fracture grouting of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1818
- [13]戴国亮,王志辉. 后压浆桩增强效应作用机制及荷载沉降关系研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2235
DAI Guoliang, WAN Zhihui. Enhanced mechanism and load-settlement relationship of post-grouting piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2235. DOI:10.11779/CJGE201712012
- [14]王志辉,戴国亮,龚维明. 超厚细砂地层大直径后压浆桩荷载传递计算与分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1386
WAN Zhihui, DAI Guoliang, GONG Weiming, et al. Calculation and analysis of load transfer in large-diameter grouted pile in extra-thick fine sand layers[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1386. DOI:10.16285/j.rsm.2017.0456
- [15]赵春风,李俊,邱志雄,等. 广东地区超长旋挖灌注桩桩端注浆试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015(4): 593
ZHAO Chunfeng, LI Jun, QIU Zhixiong, et al. Experimental research on bearing capacity of the super-long rotary excavating post-grouting bored pile utilized in the Guangdong region[J]. Journal of

Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2015, 31 (4): 593. DOI:10.11717/j.issn:2095-1922.2015.04.03

[16]黄生根, 张晓炜, 曹辉. 后压浆钻孔灌注桩的荷载传递机理研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 251
HUANG Shenggen, ZHANG Xiaowei, CAO Hui. Mechanism study on bored cast-in-place piles with post-grouting technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (2): 251. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2004.02.018

[17]黄生根, 龚维明, 张晓炜, 等. 钻孔灌注桩压浆后的承载性能研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1315
HUANG Shenggen, GONG Weiming, ZHANG Xiaowei, et al. Study on load bearing behavior of post-grouted bored piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1315. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2004.08.030

[18]HOSSAIN M A, YIN Jianhua. Behavior of a pressure-grouted soil-cement interface in direct shear tests [J]. International Journal of Geomechanics, 2013, 14 (1): 101. DOI:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000301

[19]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. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000045

[20]钱建固, 陈宏伟, 贾鹏, 等. 注浆成型螺纹桩接触面特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1744
QIAN Jiangu, CHEN Hongwei, JIA Peng, et al. Experimental study of mechanical behaviours of grouting-screw pile interface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (9): 1744. DOI:10.3969/j.issn.1000-6915.2013.09.003

[21]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装置和试验方法: CN108828195A[P]. 2018-11-16

[22]赵春风, 吴悦, 赵程, 等. 一种模拟桩侧后注浆的室内试验装置和试验方法: CN108613885A[P]. 2018-10-02

[23]CHEN Xiaobin, ZHANG Jiasheng, XIAO Yuanjie, et al. Effect of roughness on shear behavior of red clay-concrete interface in large-scale direct shear tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(8): 1122. DOI: 10.1139/cgj-2014-0399

[24]建筑桩基技术规范: JGJ94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008

[25]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
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. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2017.1399

[26]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
ZHAO Chunfeng, GONG Hui, ZHAO Cheng. 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. DOI:10.3969/j.issn.1000-6915.2012.04.026

[27]徐泽友, 卢延浩, 丁明武. 高塑性黏土与混凝土接触面剪切特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 71
XU Zeyou, LU Yanhao, DING Mingwu. Shear properties at interface between highly plastic clay and concrete[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(1): 71. DOI:10.3876/j.issn.10001980.2009.01.015

(编辑 刘 彤)