

考虑卸荷效应的砂土 - 混凝土接触面剪切特性影响研究

赵春风^{1, 2}, 吴悦^{1, 2}, 赵程^{1, 2}, 刘丰铭³, 刘帆^{1, 2}

(1. 同济大学 岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 成都市城乡建设委员会, 四川 成都 610094)

摘要: 采用上海某工程第③₂层灰色粉砂, 通过对 3 种粗糙度的砂土 - 混凝土接触面在 3 种不同固结法向应力下进行的共计 36 组加、卸荷大型直剪试验, 分析不同加、卸荷状态下接触面的力学特性, 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。试验结果表明: 固结法向应力主要通过影响接触面土体密实度和含水率间接对峰值剪切应力产生影响; 接触面峰值和残余剪切应力均随着卸荷比的增大而线性降低; 粗糙度对接触面峰值和残余剪切应力随卸荷比的降低速率没有明显影响; 同一剪切法向应力下, 接触面残余剪切应力值随粗糙度增大逐渐趋向于剪切法向应力值; 接触面软化现象随卸荷比增大而越明显, 而粗糙度 r 对接触面软化性的影响存在一临界值, 约为 10 mm, 当 $r < 10$ mm 时, 接触面软化现象受粗糙度的影响较小, 软化现象不明显, 当 $r > 10$ mm 时, 接触面软化现象随粗糙度的增大而越明显; 加荷条件下接触面土体均发生剪缩, 卸荷条件下随着卸荷程度的减小由剪胀逐渐向剪缩发展; 在同一粗糙度下, 接触面最大剪胀量随着卸荷程度的增大而增大, 而接触面最大剪缩量则随着卸荷程度的增大而减小。

关键词: 土力学; 卸荷效应; 粗糙度; 软化性; 砂土 - 混凝土接触面; 力学特性

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)04 - 1020 - 10

Effect of unloading on shear behavior of interface between sand and concrete

ZHAO Chunfeng^{1, 2}, WU Yue^{1, 2}, ZHAO Cheng^{1, 2}, LIU Fengming³, LIU Fan^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Chengdu Urban and Rural Construction Commission, Chengdu, Sichuan 610094, China)

Abstract: A total of 36 groups of direct shear tests to samples with the sand-concrete interface were conducted under three different initial normal stresses and three roughness values of interface to analyze the mechanical properties of the interface and the effects of the unloading ratio and roughness on its softening and shear dilation. The soil for test is the gray silt in ③₂ layer from Shanghai. The test results show that the initial normal stress influences indirectly the peak shear stress of interface by affecting the density and moisture content of the soil at interface. The peak and residual shear stress of interface decrease linearly with the increasing of the unloading ratio. The roughness of interface has no significant effects on the decreasing rate of peak and residual shear stress varied with the unloading ratio. The residual shear stress of interface increases gradually with the increasing of

收稿日期: 2017 - 10 - 30; **修回日期:** 2017 - 12 - 17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41672265, 41572262); 上海市启明星计划项目(17QC1400600)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 41672265 and 41572262) and Shanghai Rising-Star Program(Grant No. 17QC1400600)

作者简介: 赵春风(1964 -), 男, 1998 年于同济大学岩土工程专业获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事于岩土工程理论与应用方面的研究工作。E-mail: tjzhchf@tongji.edu.cn. 通讯作者: 吴悦(1992 -), 男, 现为博士研究生。E-mail: wuyuetj@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1399

roughness and tends to reach the same value as the applied normal stress when specimens were sheared. The softening phenomenon of the interface becomes more obvious with the increasing of the unloading ratio. There exists a critical value for the roughness r of interface, i.e., the softening of the interface is little affected by the roughness when $r < 10$ mm and is affected by the roughness when $r > 10$ mm. The shear contraction of interface appears under the loading conditions, and the shear dilation of interface transforms gradually to the shear contraction as the unloading degree decreases. The maximum value of shear dilation of interface increases with the increasing of unloading degree, whereas the maximum value of shear contraction decreases under the same roughness of interface.

Key words: soil mechanics; unloading effect; interface roughness; softening phenomenon; sand-concrete interface; mechanical behavior

1 引言

土与结构物接触面力学特性一直是岩土工程领域研究的热点,其涉及到如桩-土接触面、土-坝体接触面、土-挡土墙接触面等实际工程。已有的研究表明,土与结构物接触面力学特性受到土体类别、土体密实度、含水率、结构物表面特征以及应力水平等因素的影响。

对于土与结构物接触面力学特性问题,国内外已有很多学者展开了较为深入的研究。G. W. Clough 和 J. M. Duncan^[1]通过直剪试验研究砂土与结构物接触面的力学特性,提出了接触面剪切应力-剪切位移曲线满足双曲线模型并且给出了其数学表达式; C. S. Desai 等^[2]通过多自由度循环剪切仪(CYMDOF)研究了土与结构物接触面的静、动力学特性,确定了对接触面力学特性的相关影响因素; J. G. Potyondy^[3]利用应力控制式和应变控制式直剪仪进行了大量土与结构物的剪切试验,分析出了影响接触面剪切强度的主要因素; M. Zeghal 等^[4]认为,对于土与混凝土界面存在从界面到土体内部未发生剪切位移的带状区,被定义为剪切带,界面剪切带厚度受到接触面粗糙度的影响,粗糙度越大,剪切带越厚; 龚辉等^[5-7]对黏土与混凝土板在不同条件下的接触面剪切力学特性展开了研究; 张嘎等^[8-9]利用大型土与结构接触面循环加载剪切仪研究了粗粒土与人工粗糙钢板在单调以及循环荷载作用下接触面力学特性; 胡黎明和濮家骝^[10]通过砂与不同相对粗糙度混凝土板接触面剪切试验给出了临界粗糙度的概念,分析出接触面附近剪切带厚度约为砂土平均粒径的 5 倍; 陈俊桦等^[11-12]通过大型直剪仪研究不同粗糙度条件下红黏土和混凝土接触面力学性质。

现有的研究多集中在加荷条件下土与结构物接

触面力学特性,而在实际工程中经常涉及到卸荷条件下土与结构物接触面力学特性问题。为此本文针对不同粗糙度和不同加、卸荷条件下的砂土-混凝土接触面,进行了一系列的室内大型直剪试验。通过研究考虑加、卸荷条件下的砂土-混凝土接触面的力学性质,分析不同加、卸荷条件和不同粗糙度对接触面力学特性的影响,以及卸荷程度和粗糙度对接触面软化性和剪胀(缩)性的影响,为深入研究砂土-混凝土接触面力学特性提供有价值的试验支撑。

2 试验方案

2.1 试验设备

大型直剪仪由于其原理简单,操作方便,虽然有其固有缺陷,但仍经常应用于接触面研究。本次直剪试验是在同济大学自主研发的大型多功能界面剪切仪 SJW-200 上进行的。该剪切仪具有较大尺寸的剪切盒,剪切盒净尺寸长×宽×高为 600 mm×400 mm×200 mm,壁厚 40 mm,其水平向和竖直向均配备了先进的伺服和控制系统,试验量程较大,可施加的荷载较大,能够满足本文关于试验的要求。其剪切原理图如图 1 所示。

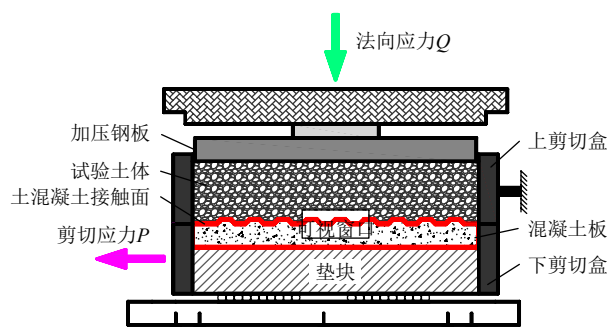


图 1 SJW-200 大型直剪仪原理图

Fig.1 Sketch of large direct shear apparatus SJW-200

2.2 试验土样

本次试验采用的土样为上海某工程第③₂层灰色粉砂。试验土样的物理力学指标见表 1，其颗粒级配曲线如图 2 所示。

表 1 试验土样物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of silt in tests

重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	含水率 $\omega / \%$	孔隙比 e	压缩模量 E_{s1-2} / MPa
19.50	31.50	20	0.75	11.23

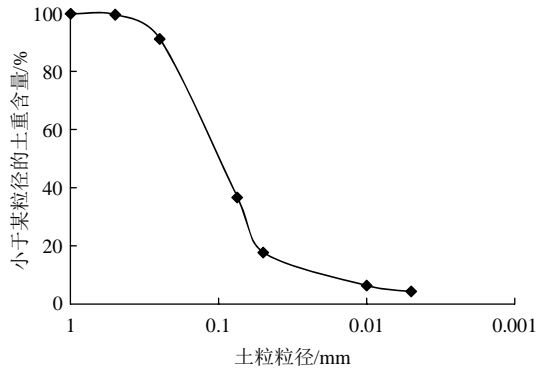


图 2 试验土样级配曲线

Fig.2 Curve of particles sizes of silt used in tests

2.3 混凝土板

为研究砂土与混凝土接触面的剪切特性，需考虑砂土 - 混凝土接触面物理形态的影响，而其中的关键则是如何模拟和定义混凝土板的粗糙度，综合之前学者对界面粗糙度定义的方法^[8, 13-15]，并结合基桩孔壁的实际情况，本文选用的界面粗糙度模型如图 3 所示。将人工粗糙度混凝土板表面制作成如图 3 所示的标准齿型形状，齿型截面为梯形，并保持齿型角度 $\alpha = 45^\circ$ ，且使凸出部分梯形截面上底边 S_2 与凹陷部分梯形截面下底边 S_3 长度相等，由此可知，界面的凹处部分体积始终和凸出部分体积相等，在保持其他条件不变的情况下(齿型角度、齿型空间位置关系等)，通过改变齿型高度(图 3 中梯形截面

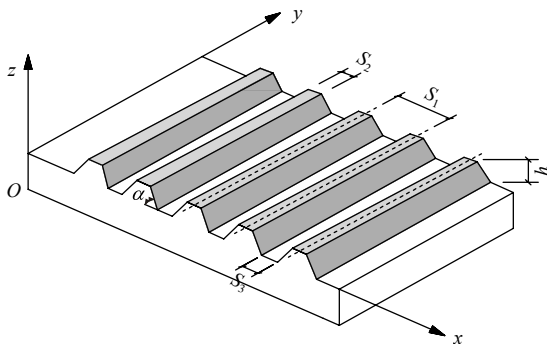


图 3 界面粗糙度模型示意图

Fig.3 Illustration of the roughness model of interface

高度) h 来调整混凝土板表面粗糙程度，因此，界面粗糙度 r 即可用 h 的大小来表示。

按上文所述的混凝土界面粗糙度的定义方法，本次试验所用的混凝土板共分 3 种，即 $r = 0, 10$ 和 20 mm ，不同粗糙度混凝土板的具体尺寸如图 4 所示，混凝土板宽度为 400 mm ，混凝土板中加入直径为 $\phi 8 \text{ mm} @ 100 \text{ mm}$ 双向钢筋，选用 C25 强度等级混凝土进行浇筑。

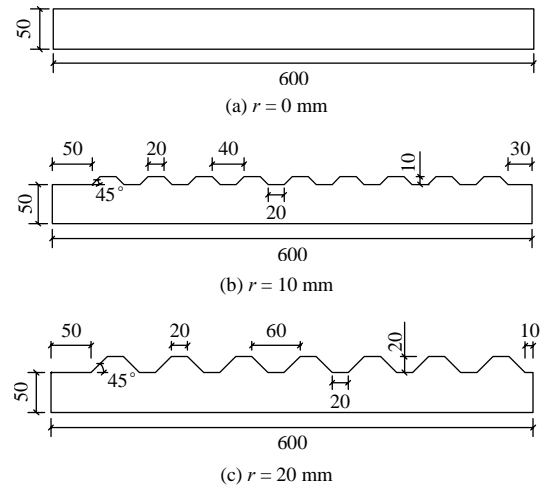


图 4 不同粗糙度混凝土板尺寸(单位: mm)

Fig.4 Sizes of concrete plates with different values of interface roughness(unit: mm)

2.4 试验过程

本次试验加载方案共分为 36 组，共有 3 块不同粗糙度的混凝土板，每块混凝土板 12 组，具体加载方案如表 2 所示：首先将装置完成的土体与混凝土板在设定的固结法向应力下进行固结，固结完成的判断标准为砂土的竖向变形趋于稳定值，且每次固结时间不低于 1 h ；固结完成后将固结法向应力以 0.5 kPa/s 的速率卸荷至指定剪切法向应力，在该级

表 2 试验加载方案

Table 2 Loading schemes of experiments

粗糙度 r / mm	固结法向应力 / kPa	剪切法向应力 / kPa					
		300	250	200	150	100	50
0	300	300	250	200	150	100	50
	200	200	150	100	50		
	100	100	50				
10	300	300	250	200	150	100	50
	200	200	150	100	50		
	100	100	50				
20	300	300	250	200	150	100	50
	200	200	150	100	50		
	100	100	50				

剪切法向应力下砂土的竖向变形不再发生变化时进行水平向剪切，若该级剪切法向应力与固结法向应力相等(即加荷条件下剪切)，则固结完成后直接在该级固结法向应力下进行水平向剪切。

为研究卸荷效应对混凝土 - 砂土接触面剪切特性的影响，具体的法向加卸荷方案为：(1) 初始固结法向应力为 300 kPa，分别法向卸荷至 50, 100, 150, 200, 250 kPa；(2) 初始固结法向应力为 200 kPa，分别法向卸荷至 50, 100, 150 kPa；(3) 初始固结法向应力为 100 kPa，卸荷至 50 kPa；(4) 初始固结法向应力为 100, 200 和 300 kPa，不进行法向卸荷，直接进行剪切。剪切采用等速率控制，剪切速率为 2 mm/min。

3 试验结果

3.1 加、卸荷对砂土 - 混凝土接触面力学特性的影响

为了分析加、卸荷对砂土 - 混凝土接触面力学特性的影响情况，图 5, 6 给出了 3 种不同粗糙度下，固结法向应力分别为 100, 200 和 300 kPa 卸荷至 100 和 50 kPa 进行剪切得到的剪切应力 - 剪切位移关系曲线，图中图例的第一个数值表示固结法向应力，第二个数值表示剪切法向应力。

从图 5 中可以看出：粗糙度较小时($r = 0$ 和 10 mm)，卸荷条件(200 - 100 和 300 - 100)下接触面峰值剪切应力随着固结法向应力的增大而增大但均小于加荷状态(100 - 100)下的峰值剪切应力；随着粗糙度 r 的增大($r = 20$ mm)，接触面峰值剪切应力则随着固结法向应力的增大而增大；对于粗糙接触面($r = 10$ 和 20 mm)，剪切法向应力相同，则接触面残余剪切应力在不同加卸荷条件下均趋于一致，而对于 $r = 0$ mm 接触面，则只在卸荷条件下接触面残余剪切应力趋于一致；对于 $r = 10$ mm 接触面，不

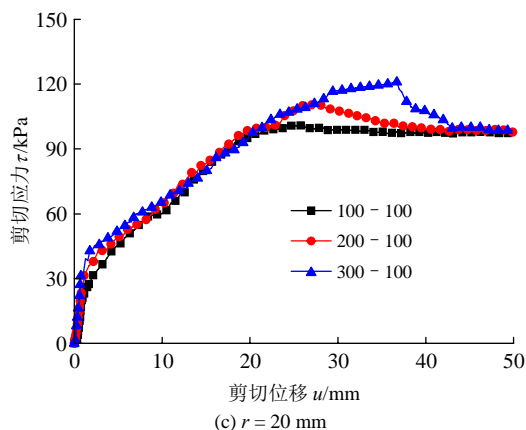
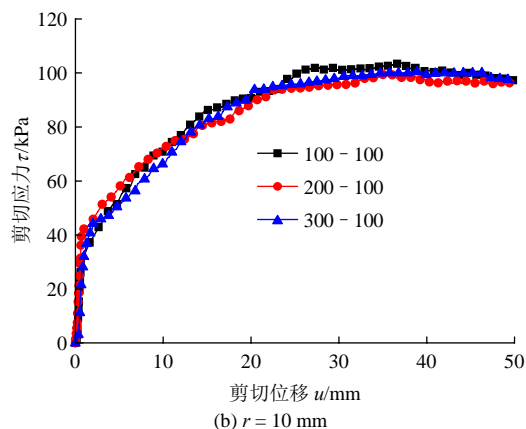
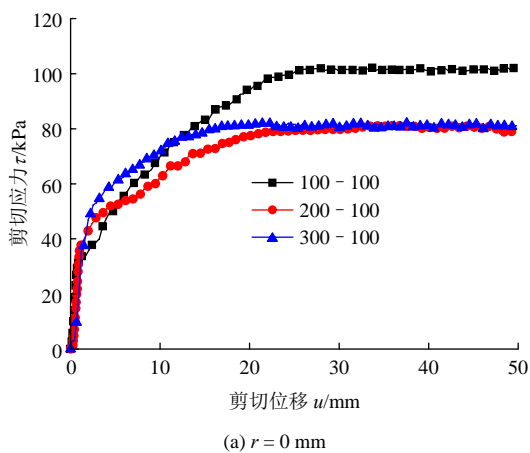
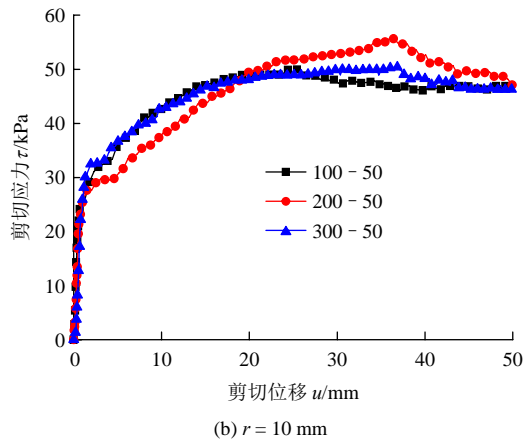
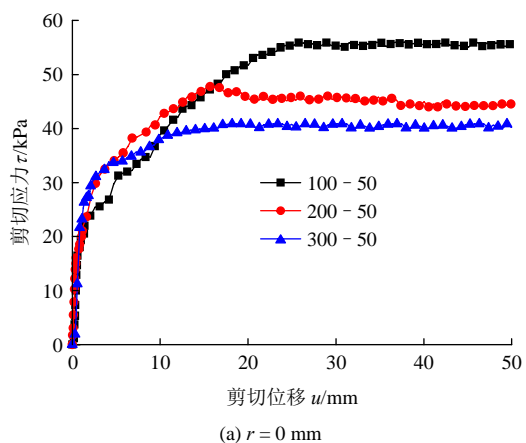


图 5 加、卸荷条件下剪切应力 - 剪切位移关系曲线(卸荷至 100 kPa)

Fig.5 Curves of shear stress-shear displacement under loading and unloading conditions(unloading to 100 kPa)



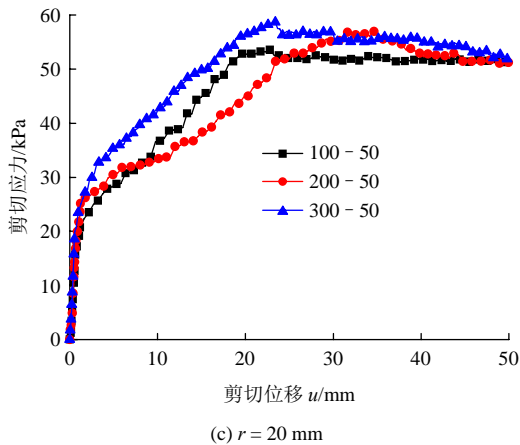


图6 卸荷条件下剪切应力-剪切位移关系曲线(卸荷至50 kPa)

Fig.6 Curves of shear stress-shear displacement under unloading conditions(unloading to 50 kPa)

同加卸荷条件下接触面残余剪切应力趋于96 kPa, 对于 $r = 20 \text{ mm}$ 接触面, 不同加卸荷条件下接触面残余剪切应力趋于97 kPa, 而对于 $r = 0 \text{ mm}$ 接触面, 卸荷条件下接触面残余剪切应力趋于80 kPa, 因此可以看出考虑卸荷条件下接触面残余剪切应力在接触面粗糙度较低时随着其值的增大而增加, 当粗糙度增大到一定值时, 即存在一临界粗糙度, 此时接触面残余剪切应力随粗糙度的增大变化很小, 并且接触面残余剪切应力值大小逐渐趋向于施加的剪切法向应力值, 从本文试验分析可知该临界粗糙度约为10 mm。

从图6中可以看出: 此时的剪切法向应力均为50 kPa, 不同粗糙度下的接触面剪切应力随固结法向应力的变化规律与图5呈现的有所不同, 具体表现为对于光滑接触面($r = 0 \text{ mm}$), 其峰值剪切应力随固结法向应力的增大逐级降低, 当接触面粗糙度 $r = 20 \text{ mm}$ 时, 其峰值剪切应力则随固结法向应力的增大而增大, 接触面粗糙度 $r = 10 \text{ mm}$ 时, 接触面峰值剪切应力随固结法向应力变化规律介于 $r = 0 \text{ mm}$ 和 $r = 20 \text{ mm}$ 二者之间; 对于粗糙接触面($r = 10$ 和 20 mm), 不同加卸荷条件下接触面残余剪切应力与图5呈现出相同的规律。

分析上述试验现象产生的原因, 可能是当粗糙度较大时, 砂土-混凝土接触面的峰值剪切应力受砂土本身的密实度影响较大, 固结法向应力越大会导致接触面土体密实度越高, 从而增大了其峰值剪切应力; 而当粗糙度较小时, 密实度对接触面峰值剪切应力的影响受到了削弱, 接触面土体含水率成为控制峰值剪切应力的主导因素, 固结法向应力越

大, 接触面处土体固结排水越充分, 当低于最优含水率时, 可能便会出现固结法向应力越大接触面峰值剪切应力反而越小的情况; 加、卸荷状态下剪切应力-剪切位移曲线均呈双曲线变化, 且在同一粗糙度下, 不同加、卸荷状态下均表现出软化现象, 说明加、卸荷状态对砂土-混凝土接触面力学特性的影响主要是改变了接触面峰值剪切应力的大小, 对接触面的破坏模式没有根本改变。

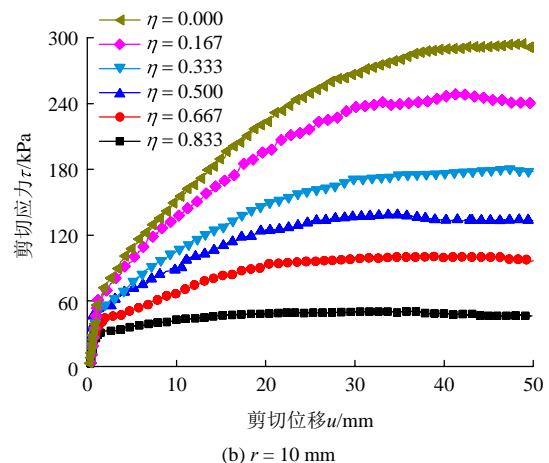
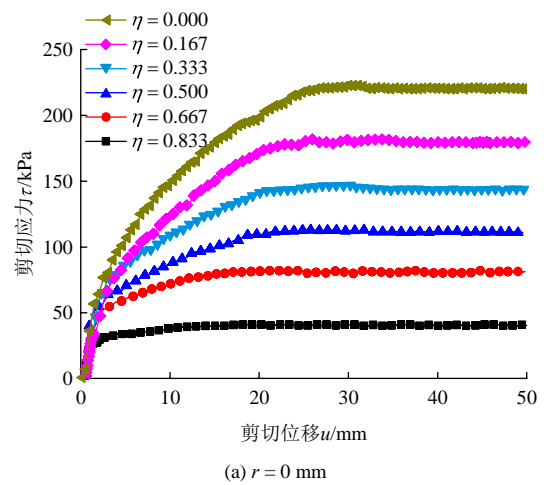
3.2 卸荷程度对砂土-混凝土接触面力学特性的影响

研究考虑卸荷效应的砂土-混凝土接触面的力学特性, 必然需要研究卸荷程度的影响, 本文采用卸荷比量化卸荷程度从而研究其对接触面力学特性的影响, 令卸荷比^[16]为

$$\eta = \frac{\sigma_c - \sigma_s}{\sigma_c} \quad (1)$$

式中: σ_c 和 σ_s 分别为固结法向应力和剪切法向应力。

图7给出了固结法向应力为300 kPa时, 不同卸荷比下的接触面剪切应力-剪切位移关系曲线, 从图中可以看出: 卸荷程度对砂土-混凝土接触面



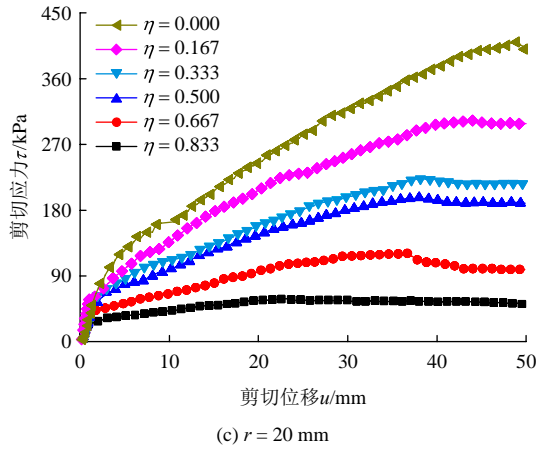


图 7 不同卸荷程度下剪切应力与剪切位移关系曲线
Fig.7 Curves of shear stress-shear displacement under different unloading degrees

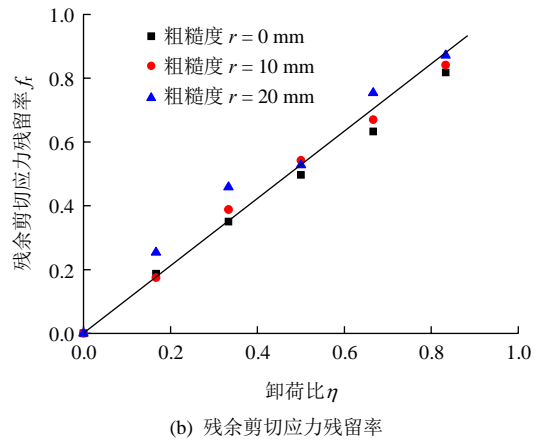


图 8 剪切应力残留率与卸荷比关系曲线
Fig.8 Relationship curves of unloading ratio vs. residual rate

的力学特性有显著的影响，具体表现为，在同一粗糙度 r 下，随着卸荷比的增大，接触面峰值剪切应力逐渐降低，其达到峰值剪切应力所需的剪切位移也逐渐降低；随着卸荷比的增大，剪切应力 - 剪切位移关系曲线的变化趋势逐渐趋缓，其起始段斜率逐渐减小，表明砂土 - 混凝土接触面的初始剪切模量 G_0 随着卸荷比的增大而逐渐减小。

令剪切应力残留率^[16]为

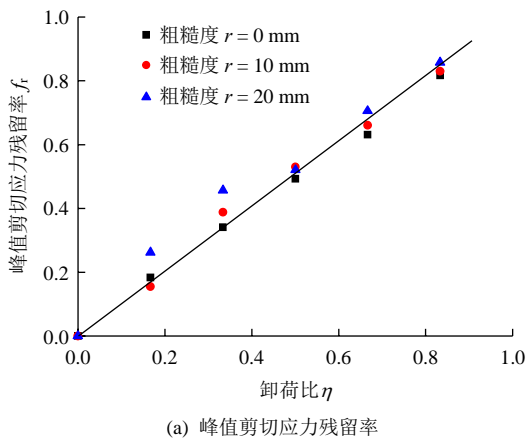
$$f_r = \frac{\tau_c - \tau_s}{\tau_c} \quad (2)$$

式中： τ_c 和 τ_s 分别为固结法向应力下不卸荷剪切对应的峰值(残余)剪切应力和卸荷至指定的剪切法向应力下的峰值(残余)剪切应力。对于接触面残余剪切应力的取值，本文选取剪切位移为 50 mm 对应的剪切应力。图 8 给出了固结法向应力 300 kPa 不同粗糙度下接触面峰值剪切应力残留率和残余剪切应力残留率随卸荷比的变化曲线。从图 8 可以看出，砂土与混凝土接触面峰值剪切应力和残余剪切应力均随着卸荷比的增大而线性降低；不同粗糙度下的接触面峰值剪切应力和残余剪切应力随卸荷比降低

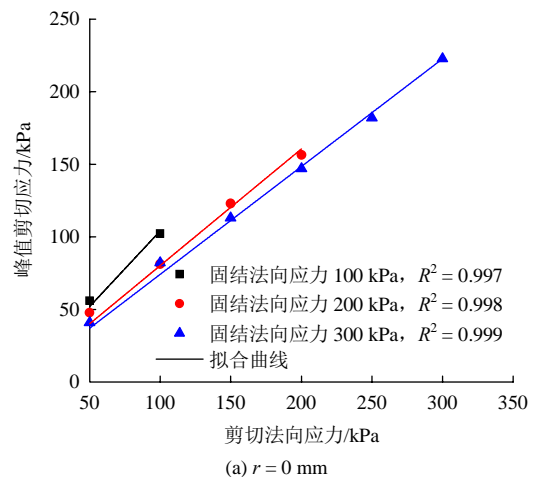
的速率基本一致，即粗糙度对接触面峰值剪切应力和残余剪切应力随卸荷比的降低速率没有明显影响。

3.3 固结法向应力对砂土 - 混凝土接触面力学特性的影响

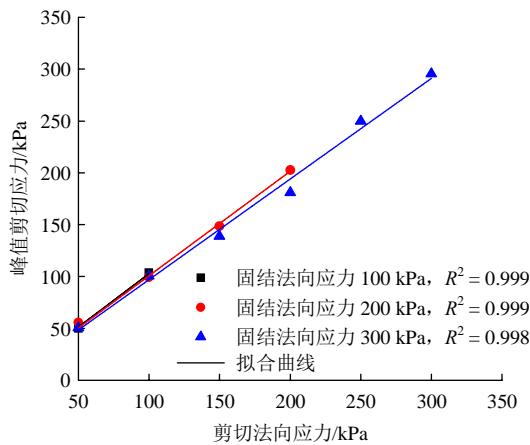
为了分析固结法向应力对砂土 - 混凝土接触面峰值剪切应力的影响，按粗糙度的不同，将不同固结法向应力下的峰值剪切应力与剪切法向应力进行截距为零的线性拟合，得到如图 9 所示的峰值剪切应力与剪切法向应力拟合曲线，参照 Mohr-Coulomb 线性拟合，该拟合曲线的斜率定义为接触面等效内摩擦角 ϕ 的正切值。从图 9 中可以看出：当粗糙度 $r = 0, 10$ mm 时，随着固结法向应力的增大，其拟合曲线的斜率逐渐降低，拟合所得的接触面等效内摩擦角 ϕ 逐渐变小，表明在相同的剪切法向应力下，随着固结法向应力的增大，砂土 - 混凝土接触面峰值剪切应力逐渐变小；当粗糙度 $r = 20$ mm 时，3 条拟合曲线斜率随固结法向应力的增大而增大，表明在相同的剪切法向应力下，砂土 - 混凝土接触面峰值剪切应力随固结法向应力的增大而增大。这与



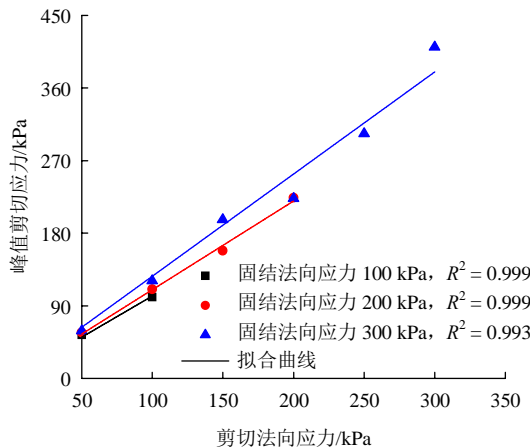
(a) 峰值剪切应力残留率



(a) $r = 0$ mm



(b) $r = 10\text{ mm}$



(c) $r = 20\text{ mm}$

图9 不同固结法向应力下峰值剪切应力与剪切法向应力拟合曲线

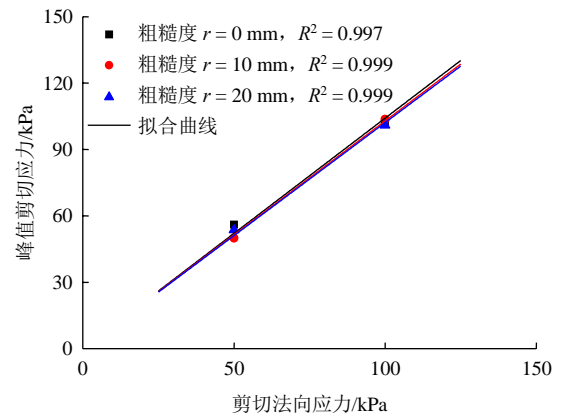
Fig.9 Fitting curves of peak shear stress vs. applied normal stress under different initial normal stresses

上文试验数据的分析结果一致，说明固结法向应力对砂土 - 混凝土接触面峰值剪切应力的影响较为复杂，除了本身固结法向应力大小的影响外，还会通过影响接触面处土体密度以及含水率从而改变接触面等效内摩擦角 φ ，进而对接触面峰值剪切应力产生影响。

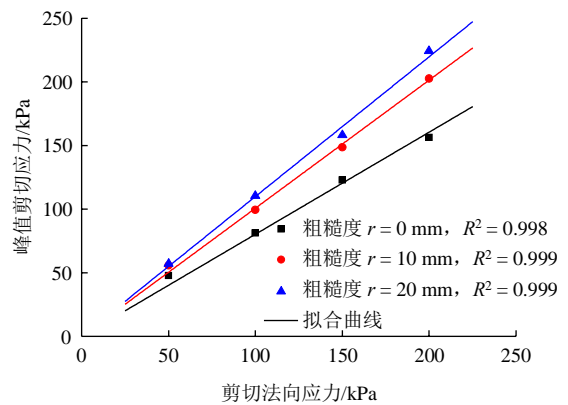
3.4 粗糙度对砂土 - 混凝土接触面力学特性的影响

图 10 给出了不同粗糙度下的接触面峰值剪切应力与剪切法向应力截距为 0 的线性拟合曲线。从图 10 中可以看出：在同一固结法向应力下，接触面等效内摩擦角 φ 值随着粗糙度的增大而增大；且 φ 值增大速率随着固结法向应力增大而增大。说明接触面的等效内摩擦角 φ 值主要受接触面粗糙度 r (二者成正比) 和固结法向应力的影响，且固结法向应力越大，接触面的等效内摩擦角 φ 值随粗糙度 r 增大速率越快。

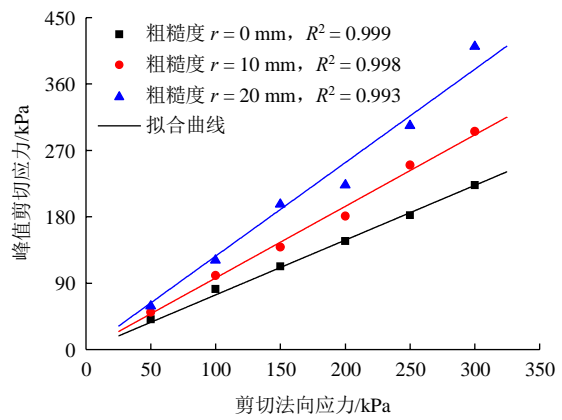
图 11 给出了固结法向应力 300 kPa 不同粗糙度



(a) 固结法向应力 100 kPa



(b) 固结法向应力 200 kPa



(c) 固结法向应力 300 kPa

图 10 不同粗糙度下的峰值剪切应力与剪切法向应力拟合曲线

Fig.10 Fitting curves of peak shear stress vs applied normal stress under different roughness conditions

下的接触面残余剪切应力与剪切法向应力截距为 0 的线性拟合曲线。参照接触面等效内摩擦角 φ 概念定义接触面残余等效内摩擦角 φ_r ，从图 11 可以看出其变化规律与接触面等效内摩擦角 φ 一致，在此不做赘述。

3.5 软化性分析

为了分析粗糙度和加卸荷效应对接触面软化特性的影响，引入软化比的概念，令软化比为

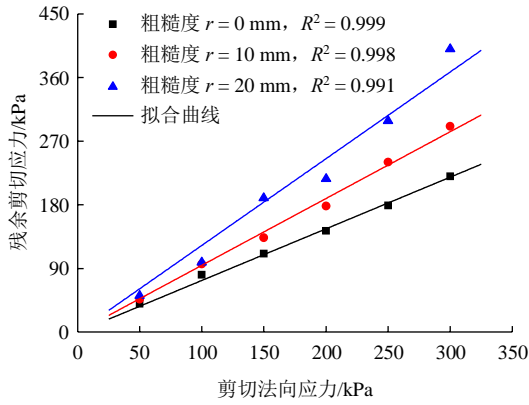
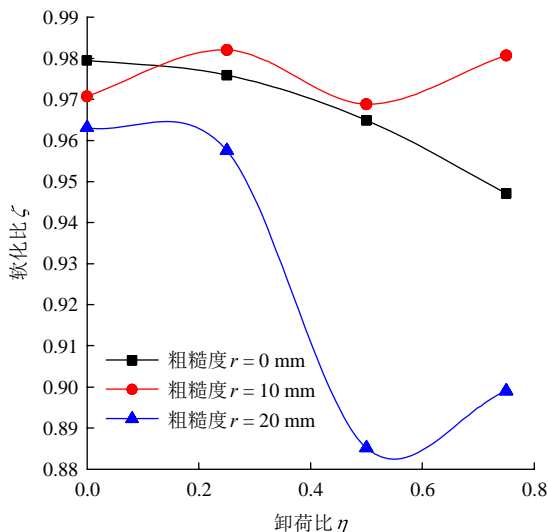


图 11 固结法向应力 300 kPa 下残余剪切应力与剪切法向应力拟合曲线

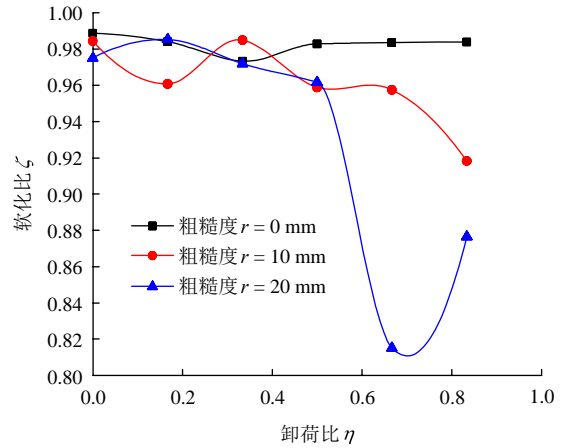
Fig.11 Fitting curves of residual shear stress vs. applied normal stress under different roughness conditions and initial normal stress at 300 kPa

$$\zeta = \frac{\tau_r}{\tau_p} \quad (3)$$

式中： τ_p 和 τ_r 分别为接触面峰值剪切应力和对应的残余剪切应力，软化比越小则说明接触面软化现象越显著。图 12 给出了固结法向应力分别为 200 和 300 kPa 不同粗糙度下的接触面软化比与卸荷比关系曲线。从图 12 可以看出，当接触面粗糙度较小($r < 10$ mm)时，接触面软化现象随卸荷比的增大变化较小，软化比值在 0.98 附近波动；当接触面粗糙度较大($r > 10$ mm)时，接触面软化现象随卸荷比的增大波动较大，软化比值在 0.80~0.98 范围内波动；软化比随卸荷比变化的总体规律是随着卸荷比的增大而减小，即卸荷比越大接触面软化现象越明显；而软化比随接触面粗糙度变化的规律为当接触面粗糙度大于一临界值(本文约为 10 mm)时，软化比随粗糙度的增大而减小，即接触面软化现象随着粗糙度



(a) 固结法向应力 200 kPa



(b) 固结法向应力 300 kPa

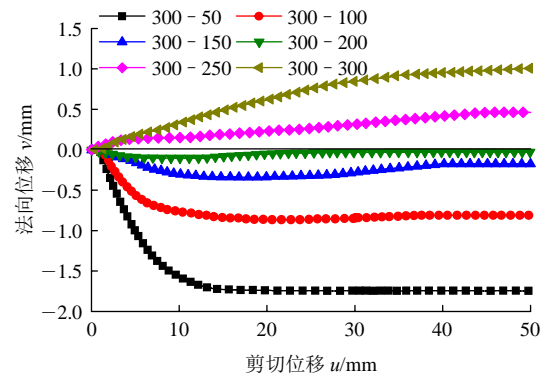
图 12 软化比与卸荷比关系曲线

Fig.12 Relationship curves of unloading ratio vs. softening ratio

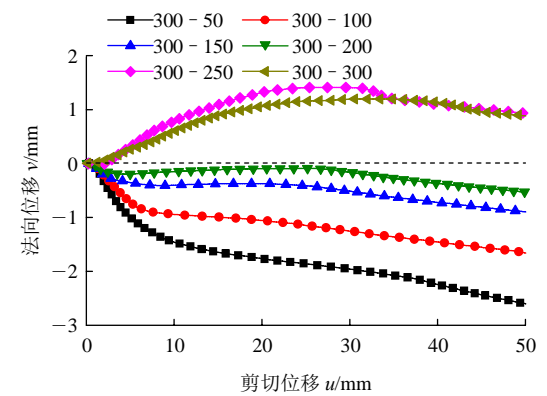
的增大而越明显。

3.6 剪胀性分析

为了分析加卸荷效应下接触面剪胀(缩)性，图 13 给出了固结法向应力 300 kPa 下 3 种不同粗糙度接触面法向位移 - 剪切位移曲线。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。从图 13 中可以看出：加荷条件下，3 种不同粗糙度砂土 - 混凝土接触面均从剪切开始即发生剪缩；卸荷条件下，对于 3 种不同粗糙度砂土 - 混凝土接触面，其



(a) $r = 0$ mm



(b) $r = 10$ mm

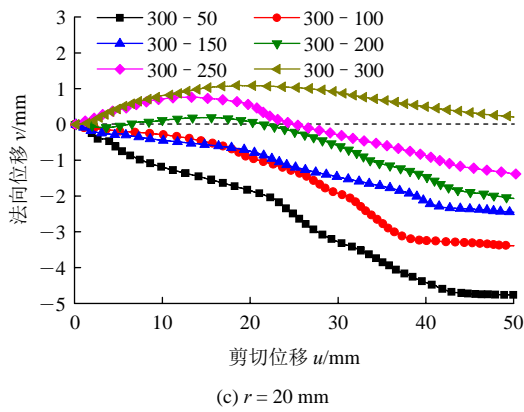
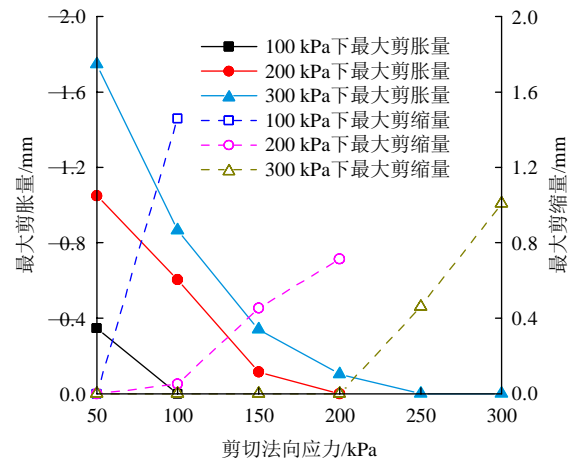


图 13 固结法向应力 300 kPa 下接触面法向位移与剪切位移变化曲线

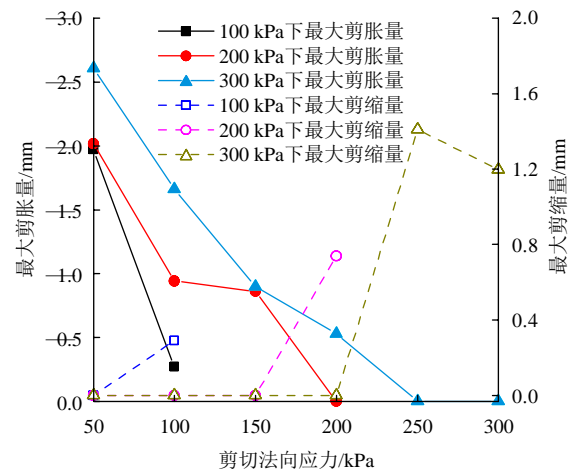
Fig.13 Curves of vertical vs. shear displacements of interfaces at initial normal stress of 300 kPa

剪胀均发生在低剪切法向应力下，且随着剪切法向应力的增大，接触面土体逐渐由剪胀向剪缩发展；法向位移随着剪切位移的增加速率有减缓的趋势，即随着剪切位移的增大，接触面法向位移会趋于稳定值；对于接触面发生剪胀的情况，初始阶段法向位移增加速率随着剪切法向应力的增大而减小，而当接触面发生剪缩时，初始阶段法向位移增加速率随着剪切法向应力的增大而增大。

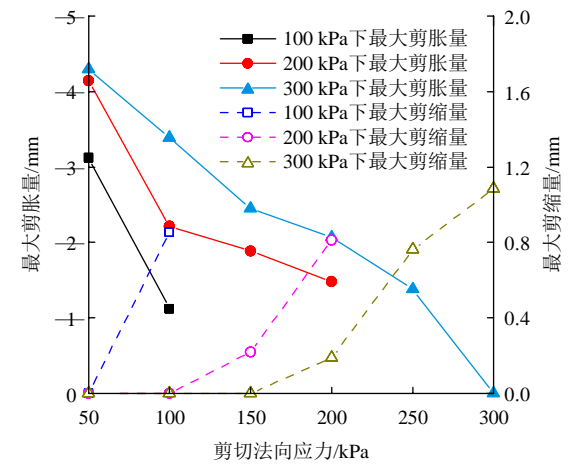
图 14 为不同固结法向应力下接触面最大剪胀(缩)量随剪切法向应力变化曲线。从图 14 可以看出：在同一粗糙度和固结法向应力下，接触面最大剪胀量随着剪切法向应力的增大而呈非线性减小，而最大剪缩量则随着剪切法向应力增大至一定值(固结法向应力 300 kPa 下，剪切法向应力大于 200 kPa 才开始出现剪缩)后从 0 开始增大；在同一粗糙度和剪切法向应力下，接触面最大剪胀量随着固结法向应力的增大而增大，而最大剪缩量则随着固结法向应力的增大而减小，综上所述，即在同一粗糙度下，接触面最大剪胀量随着卸荷程度的增大而增大，而接触面最大剪缩量则随着卸荷程度的增大而减小。分析其原因，可能是接触面若要发生剪胀，则砂土-混凝土接触面剪切过程中产生的摩擦势能必须要突破上部剪切法向应力的束缚而产生能量释放的过程^[6, 17]，而对于接触面土体发生剪缩可以看成在剪切过程中接触面土体在剪切法向应力作用下密实度增大能量累计的固结过程^[6]，因此在同一粗糙度和固结法向应力下，接触面最大剪胀量随着剪切法向应力的增大而减小，而最大剪缩量随着剪切法向应力的增大而增大；在同一粗糙度和剪切法向应力下，固结法向应力越大，则接触面处土体密实度越大，



(a) r = 0 mm



(b) r = 10 mm



(c) r = 20 mm

图 14 不同工况下接触面最大剪胀剪缩量变化曲线

Fig.14 Variation curves of maximum shear dilation of interface under different situations

接触面处积累的能量越大，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随着固结法向应力的增大而增大，而当发生剪缩时，由于土体变形的非线性特性，同一剪切法向应力对接触面最大剪缩量的贡献必然随着固结法向应力的增大而减小。

4 结论与建议

本文采用上海某工程第③₂层灰色粉砂作为试验土体, 通过对 3 种粗糙度混凝土板在 3 种不同固结应力下进行的共计 36 组加、卸荷试验, 分析了加、卸荷状态下砂土 - 混凝土接触面的力学特性, 以及卸荷程度和粗糙度对接触面力学特性、软化性和剪胀(缩)性的影响, 主要得到以下结论:

(1) 固结法向应力对砂土 - 混凝土接触面峰值剪切应力的影响较为复杂, 除了本身固结法向应力大小的影响外, 还会通过影响接触面土体密实度和含水率间接对峰值剪切应力产生影响; 在粗糙度和固结法向应力一定的情况下, 峰值剪切应力随着卸荷程度的增大而减小。

(2) 砂土与混凝土接触面残余剪切应力随着卸荷比的增大而线性降低; 不同粗糙度下的接触面峰值剪切应力和残余剪切应力随卸荷比降低的速率基本一致, 即粗糙度对接触面峰值剪切应力和残余剪切应力随卸荷比的降低速率没有明显影响; 同一剪切法向应力下, 粗糙度对接触面残余剪切应力提高效应存在一临界值, 约为 10 mm, 随着粗糙度继续增大接触面残余剪切应力逐渐趋向于剪切法向应力值。

(3) 接触面软化现象随卸荷比增大而越明显; 粗糙度对接触面软化性的影响存在一临界值, 约为 10 mm, 当粗糙度小于 10 mm 时, 接触面软化现象受粗糙度的影响较小, 接触面软化性较小, 当粗糙度大于 10 mm 时, 接触面软化现象随着粗糙度的增大而越明显。

(4) 加荷条件下接触面土体均发生剪缩, 卸荷条件下随着卸荷程度的减小由剪胀逐渐向剪缩发展; 在同一粗糙度下, 接触面最大剪胀量随着卸荷程度的增大而增大, 而接触面最大剪缩量则随着卸荷程度的增大而减小。

参考文献(References):

[1] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1971, 97(SM12): 1 657 - 1 673.

[2] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(6): 793 - 815.

[3] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. *Geotechnique*, 1961, 11(4): 339 - 353.

[4] ZEGHAL M, EDIL T B, PLESHA M E. Discrete element method for sand-structure interaction[C]// *Proceedings of the 3rd International*

Conference on Discrete Element Methods. Santa Fe, New Mexico: [s. n.], 2010: 317 - 322.

[5] 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): 1 712 - 1 719.(GONG Hui, ZHAO Chunfeng, TAO Guoxiong, 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): 1 712 - 1 719.(in Chinese))

[6] 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.(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.(in Chinese))

[7] ZHAO C, ZHAO C, GONG H. Elastoplastic analysis of the interface between clay and concrete incorporating the effect of the normal stress history[J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2013, 2013(12): 1 - 12.

[8] 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.(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.(in Chinese))

[9] 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.(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.(in Chinese))

[10] 胡黎明, 濮家骊. 土与结构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))

[11] 陈俊桦, 张家生, 李 键. 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.(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*, 2015, 47(4): 22 - 30.(in Chinese))

[12] 陈俊桦, 张家生, 李 键, 等. 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): 1 682 - 1 688.(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): 1 682 - 1 688.(in Chinese))

[13] HORVATH R G, KENNV T C, KOZICHI P. Method of improving the performance of drilled piles in weak rock[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, 20(4): 758 - 772.

[14] DOVE J E, JARRETT J B. Behavior of dilative sand interfaces in a geotribology framework[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(1): 25 - 37.

[15] 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 Ga, ZHANG Jianmin. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(2): 149 - 153.(in Chinese))

[16] 潘林有, 程玉梅, 胡中雄. 卸荷状态下黏性土强度特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2001, 22(4): 490 - 493.(PAN Linyou, CHENG Yumei, HU Zhongxiong. Experimental study on the shear strength of clay under the unloading state[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(4): 490 - 493.(in Chinese))

[17] 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 - 74.(XU Zeyou, LU Tinghao, DING Mingwu. Shear properties at interface between highly plastic clay and concrete[J]. *Journal of Hohai University: Natural Science*, 2009, 37(1): 71 - 74.(in Chinese))