

•水利与土木工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400182



本刊网刊

残积土含水率和混凝土表面粗糙度对界面剪切特性影响

刘飞禹¹, 马克超¹, 杨 军^{1,2}

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444; 2. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要:工程实践经验表明,土与结构界面易发生破坏,而结构表面粗糙度和周围土体性质是影响界面力学特性的重要因素。为了深入研究花岗岩残积土含水率和混凝土表面粗糙度对界面剪切特性的影响,通过设计 3 种法向应力(100、200 和 300 kPa)、4 种含水率(14%、19%、24% 和 29%)和 5 种混凝土表面粗糙度系数(0.4、5.8、9.5、12.8 和 16.7)的室内大型直剪试验,分析了含水率和粗糙度对界面剪切应力-位移曲线、抗剪强度、竖向位移的影响,并采用数值模拟对土颗粒细观变化进行了分析。试验结果表明:界面抗剪强度随含水率的升高先增加后减少,其中,当含水率为 19% 时,界面抗剪强度和黏聚力最大;当法向应力为 100 kPa 时,数值分别为 82.40 kPa 和 30.17 kPa。含水率对应力-位移曲线影响显著,低含水率(14%~19%)时表现为剪切软化型,高含水率(24%~29%)时表现为剪切硬化型。随着混凝土粗糙度系数的增大,界面的黏聚力和内摩擦角逐步增大,但达到临界粗糙度后,界面黏聚力和内摩擦角保持稳定,不再增长。数值模拟结果表明:试样上部 5 cm 范围内的颗粒孔隙率随剪切进行不断增加,而其他部位显示出相反的趋势;随着与界面距离的增加,颗粒孔隙率受其影响的程度逐渐减小;法向接触力和切向接触力各向异性的主方向随剪切方向发生偏转。

关键词:土与结构界面;含水率;粗糙度;剪切特性;数值模拟

中图分类号: TU411.7

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)02-0168-11

土与结构界面相互作用问题广泛存在于岩土工程研究中的各个领域^[1]。界面的相互作用是影响工程安全性的关键因素^[2]。因此,研究其宏观力学性能的劣化规律及其细观机制,对岩土结构的设计、施工及灾害防治具有重大现实意义^[3]。

对于桩基^[4]、锚杆^[5]、地下管线^[6]等岩土工程结构,土与结构界面的力学性质主要由土体的性质和结构面粗糙度决定。关于土体的性质,杨忠平等^[7]探究了土石混合体中含石率对剪切带形状的影响,观察到剪切带厚度随含石率的提高而增大。Chen 等^[8]对不同相对密度的砂与光滑混凝土界面进行研究,发现致密砂的应力应变曲线为软化型,而松散砂为硬化型。Ferreira 等^[9]研究了土体含水率对筋土界面抗剪性能的影响,发现含水率对界面抗剪强度的影响程度取决于土体密度和法向应力。Liu 等^[10]通过循环直剪试验,分析了颗粒规则度对筋土界面竖向位移、剪切刚度和阻尼比的影响。在数值模拟方面,Liu 等^[11]用离散元模型对橡

胶-砂混合物的细观力学机制进行分析,发现较大的粒径比对接触力链网络的形成有促进作用。

对结构表面粗糙度的研究,首先要准确评价表面粗糙度系数。Barton 等^[12]对大量岩体结构表面进行研究,提出了经典的 JRC-JCS 模型,该模型被广泛用于结构表面粗糙度系数(JRC)的研究。Abolfazli 等^[13]根据 Barton 方程,运用三维激光扫描仪记录结构表面粗糙度特征,发现采样间距对 JRC 评估具有重要影响。甘磊等^[14]基于 JRC-JCS 模型,运用三维扫描技术,对混凝土粗糙度特征进行处理,构建了混凝土表面粗糙度系数与混凝土表面形貌特征参数的函数关系。Yang 等^[15]通过大型直剪试验分析了粉质黏土-混凝土界面的力学特性,并利用一种改进的粗糙度评价指标,建立了界面峰值抗剪强度预测公式。

在合理确定结构表面粗糙度系数的基础上,Chen 等^[16]研究了混凝土表面粗糙度对界面剪切特性的影响,发现粗糙界面的摩擦角在纯黏土与光滑界面的摩

收稿日期:2024-03-18 修回日期:2024-04-28 网络出版日期:2024-06-05

基金项目:国家自然科学基金项目(52378355;52078285)

作者简介:刘飞禹(1976—),男,教授,博士。研究方向:地基处理和土动力学。E-mail:lfyju@shu.edu.cn

擦角之间波动。Wang 等^[17]分析粗糙度对红黏土-混凝土界面的影响,发现粗糙度的增大会导致最大剪切刚度增大,但对最大阻尼比的影响有限。Liu 等^[18]应用数字摄影测量软件,分析了砂土与不同粗糙度混凝土界面的位移场,得到强剪切带的最大厚度为中位粒径的 6.25 倍。赵衡等^[19]在桩-岩界面粗糙度量化模型基础上,提出了相应的界面剪切模型,并通过试验和理论分析,证明该模型能较准确地预测界面剪切应力。Fan 等^[20]提出了一种将三维岩石节理形态转换为二维节理轮廓的方法,并根据二维节理剖面建立了岩石节理峰值抗剪强度计算模型。Feligha 等^[21]通过直剪试验发现,剪切破坏分为界面滑移破坏、土体内部剪切破坏和介于二者之间的破坏;成浩等^[22]进一步指出界面破坏模式与结构表面粗糙度存在关联。Dou 等^[23]通过对土与基岩进行环剪试验,发现土的含水率和结构面的粗糙度是影响界面剪切行为的主要因素。

以上研究表明,土体性质与结构表面粗糙度对界面力学特性至关重要,但关于花岗岩残积土含水率与混凝土表面粗糙度的研究较少。因此,本文采用室内大型直剪仪对土-混凝土界面进行单调直剪试验,分析了含水率、粗糙度对界面力学特性的影响,并建立数值模拟模型,分析了剪切过程中花岗岩残积土的细观力学变化。

1 试 验

1.1 试验设备

试验设备为大型动态直剪仪,如图 1 所示。大型直剪仪上、下剪切盒尺寸分别为(305×305×150) mm³、(405×305×150) mm³,该设备剪切面积远大于普通直剪仪(直径 61.8 mm、高度 20 mm),有助于减小尺寸效应和边界效应对试验结果的影响。设备配置了精密传感器和数据采集系统,以保证数据记录的准确性。

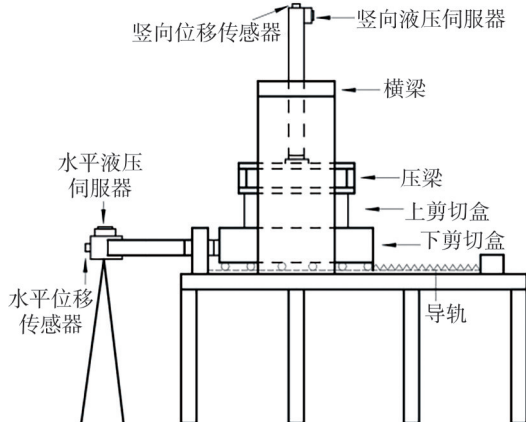


图 1 大型动态直剪仪

Fig. 1 Large dynamic direct shear apparatus

1.2 试验材料

1.2.1 花岗岩残积土

试验所用的花岗岩残积土取自广州市某项目施工现场,其基本物理性质列于表 1 中,通过滤纸法试验^[24]得到的土体基质吸力列于表 2 中。颗粒级配曲线及土体形态分别如图 2、3 所示。

表 1 物理性质

Tab. 1 Physical property

天然含水率 $w_0/\%$	最优含水率 $w_{opt}/\%$	土粒相对 密度 d_s	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_l/\%$
23.8	14.3	2.69	23.2	41.5

表 2 土体基质吸力

Tab. 2 Soil matrix suction

含水率 $w/\%$	基质吸力 s/kPa
14	1 478
19	583
24	23
29	1

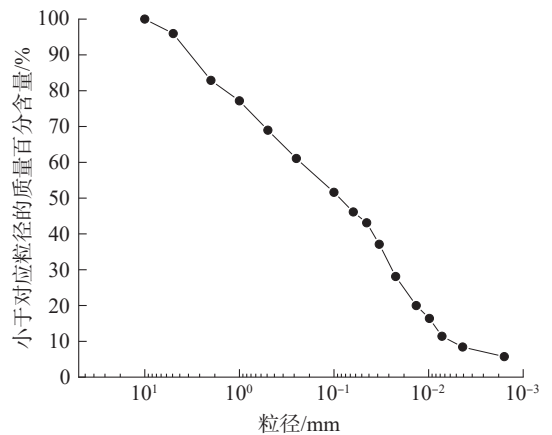


图 2 颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle grading curve



图 3 不同含水率下的土体形态

Fig. 3 Soil morphology under different water contents

1.2.2 混凝土试块

Barton 等^[12]通过大量试验、理论推导和指标检验工作,提出了结构面粗糙度系数(JRC),并绘制出 10 条不同 JRC 对应的标准结构面粗糙度曲线。试验选取其中 5 条标准结构面粗糙度曲线(JRC 分别为 0.4、5.8、9.5、12.8、16.7),用于制作不同粗糙度的混凝土试块。

混凝土试块按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)进行制作,最终制成的混凝土试块如图 4 所示。

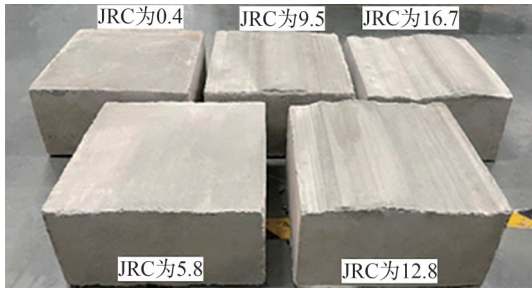


图 4 不同粗糙度的混凝土试块

Fig. 4 Concrete test blocks with different roughness

1.3 试验方案

为研究含水率、混凝土表面粗糙度系数和法向应力对界面剪切特性的影响,共设计了 36 组试验方案(表 3)。含水率选取时考虑天然含水率 23.8% 和最优含水率 14.3%,以 5% 为梯度,确定含水率取值为 14%、19%、24% 和 29%。法向应力值选取深桩、高坝等岩土工程中常见值(100、200 和 300 kPa)^[16]。

表 3 试验方案

Tab. 3 Test schemes

含水率 $w/\%$	粗糙度系数 JRC	法向应力 σ_n/kPa	组数
14、19、24、29	9.5	100、200、300	12
14	0.4、5.8、12.8、16.7	100、200、300	12
19、24、29	0.4、5.8、12.8、16.7	100	12

试验中剪切位移设定为 60 mm,剪切速率为 1 mm/min。装填剪切盒土样时,采用分层压实方法,将重塑花岗岩残积土分 5 层,每层 3 cm,压实到剪切盒中,以确保制样均匀并使干密度达到 1.4 g/cm^3 ^[25]。试验程序均根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)进行。

2 试验结果与分析

2.1 剪切应力-位移

不同含水率 w 及法向应力 σ_n 条件下,试样的剪切应力-位移曲线如图 5 所示。由图 5 可知,含水率对剪切应力会产生显著影响。当含水率为 14%、19% 时,剪切应力-位移曲线呈现应变软化特征;当含水率为 24%、29% 时,剪切应力-位移曲线呈现应变硬化特征,

土体在法向应力的作用下,内部少量的水被挤出至界面处,压实度逐渐提高,导致界面剪切应力不断增长,但增长速率逐步减小。试验结束后,对含水率进行检测,发现含水率明显下降,但变化幅度在 1% 以内。在同一含水率下观察到,法向应力的增大会显著提高界面峰值剪切应力。例如,当 w 为 19% 时,法向应力由 100、200 kPa 分别提高至 200、300 kPa,界面峰值剪切应力分别增长了 62.66% 和 39.19%。这是因为:法向应力的提高,一方面能增大残积土与混凝土的接触面积,使两者更紧密地贴合在一起;另一方面可以提高残积土的压实度,增强其力学性能,从而提高土-混凝土界面抗剪能力。

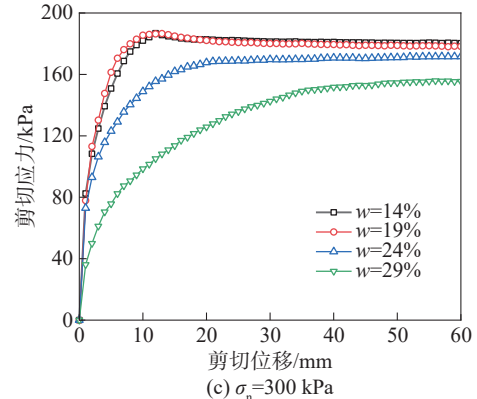
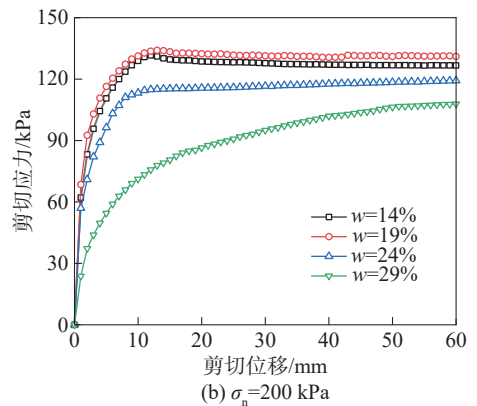
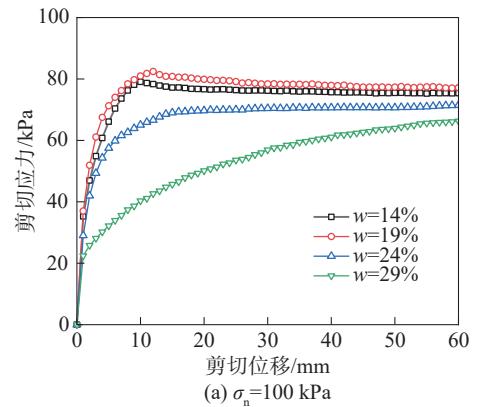


图 5 不同含水率下土-混凝土界面剪切应力-位移曲线
Fig. 5 Shear stress-shear displacement curves of soil-concrete interface under different water contents

为分析法向应力对界面剪切特性的影响,引入界面归一化系数 μ ,其计算公式为:

$$\mu = \tau_p / \sigma_n \quad (1)$$

式中, τ_p 为界面峰值剪应力。

剪切过程中,归一化系数与剪切位移的变化如图6所示。从图6中观察到: μ 随法向应力的增加而减小,这表明法向应力对剪切应力强化作用逐渐减弱。当含水率为14%、19%,法向应力为100 kPa时,达到界面峰值,剪切应力的应变为3.26%和3.98%;而在200 kPa和300 kPa的法向应力下,对应的切向应变分别为3.84%、

4.17%和3.96%、4.35%。这表明在一定程度上,法向应力的提高可以增强界面的剪切延性。

图7展示了含水率为14%的条件下,混凝土粗糙度系数对残积土-混凝土界面剪切特性的影响。图7中,剪切应力-位移曲线均表现为应变软化型,且在峰值后表现出剪切黏滑现象。在同一法向应力下,粗糙度的增大,导致峰值剪切应力和残余剪切应力增长,但两者的差幅逐步减小,剪切应力达到峰值点所需剪切位移逐渐增大,这表明了界面的软化特征随粗糙度的增大而减弱,而界面的剪切延性随之提高。

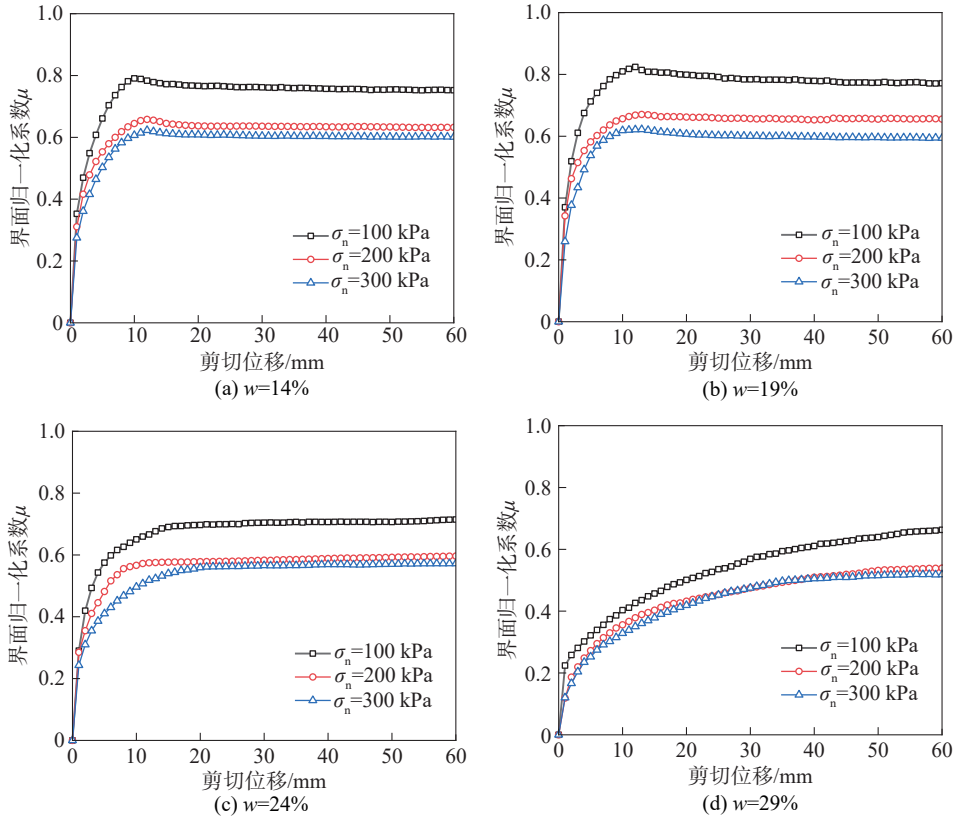


图6 界面归一化系数与剪切位移之间的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between interface normalized coefficients and shear displacement

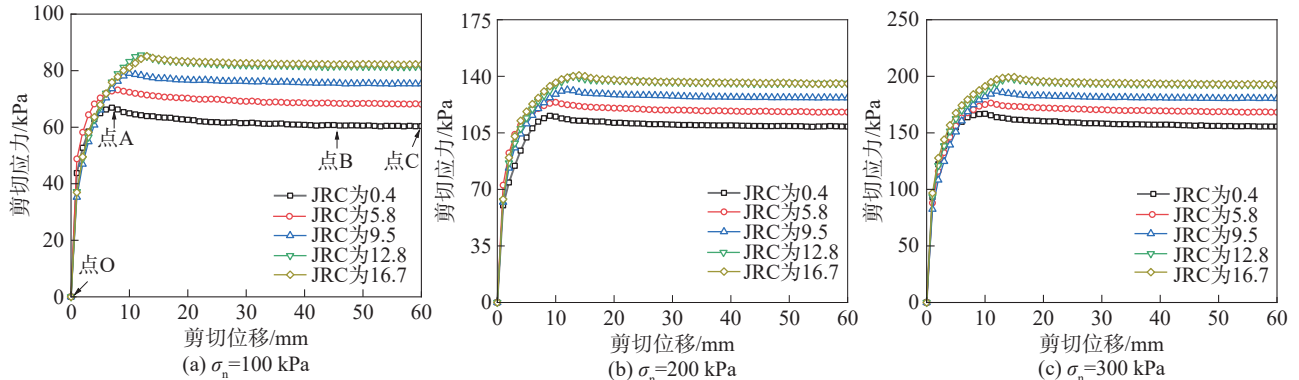


图7 不同粗糙度下土-混凝土界面剪应力-剪切位移曲线

Fig. 7 Shear stress-shear displacement curves of soil-concrete interface under different roughness

综上,界面峰值剪切应力、残余剪切应力均随法向应力的增加而明显增大。但对试验数据进行分析,发现

法向应力会弱化粗糙度增长对界面峰值剪切应力的影响。当法向应力为100 kPa时,对于JRC为0.4、5.8、9.5、

12.8 的情况,对应界面峰值剪切应力相较于前一个对应点增长率分别为 9.40%、8.03%、8.20%;当法向应力为 200 kPa 和 300 kPa 时,对应增长率分别下降为 7.24%、6.19%、6.35% 和 5.72%、5.93%、6.24%。

图 8 为峰值剪切应力与粗糙度系数之间的关系曲线。由图 8 可知,在相同法向应力下,界面峰值剪切应力、残余剪切应力随粗糙度的增加先增大而后稳定。这种粗糙度增大而峰值剪切应力保持稳定甚至略有下降的情况,是由于粗糙度达到了临界粗糙度。这一现象可以解释为:当混凝土表面接近光滑时,界面抗剪强度主要源于土体与混凝土之间的摩擦阻力,此时剪切破坏面位于混凝土表面;当混凝土表面粗糙时,混凝土表面凹槽会对土体进行“咬合”,咬合力的出现提高了界面抗剪强度水平^[26],剪切破坏面由界面处向土体内部发展^[27],形成局部剪切带^[28];随着粗糙度的进一步增大(超过临界粗糙度),更多土颗粒被填入粗糙表面的凹槽中,这些土颗粒的填充会使得混凝土表面的有效粗糙度下降,此时咬合效应达到了边际效应,界面抗剪强度不再增长,甚至有所下降。

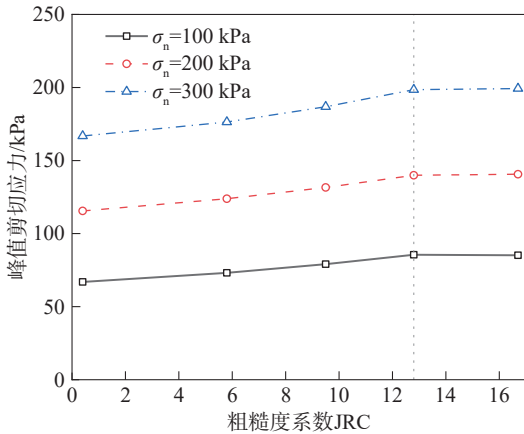


图 8 峰值剪切应力与粗糙度系数之间的关系曲线

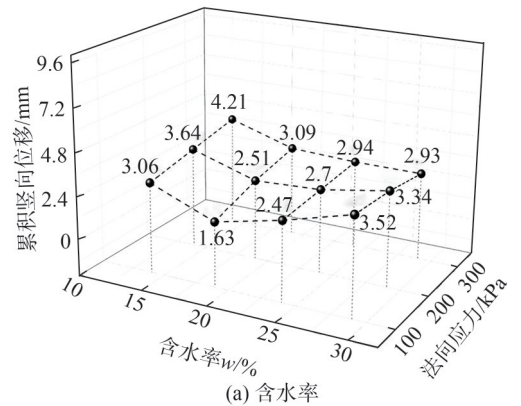
Fig. 8 Relationship curves between peak shear stress and roughness coefficient

为了更好地描述试验中剪切应力-位移曲线,把试验过程中剪切历程分为 3 个阶段^[29],如图 7 所示:弹塑性强化阶段(OA)、塑性软化阶段(AB)、残余稳定阶段(BC)。在弹塑性强化阶段,随着剪切的进行,残积土压实度逐渐增加,与混凝土接触面积不断扩大,剪切应力也逐渐增长至峰值;在塑性软化阶段,残积土变形进一步增大,破坏了残积土与混凝土界面的原有结构,界面抗剪强度开始衰减;在残余稳定阶段,剪应力主要由滑动摩擦力提供,保持相对稳定。

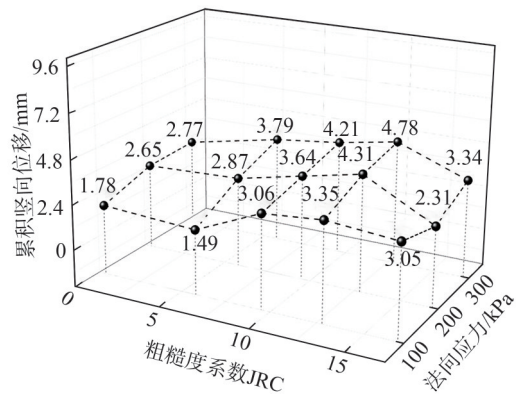
2.2 竖向位移分析

剪切过程中,剪切盒底面积保持不变,因此,竖向

位移也可以表示土体的体积变化。图 9 展示了花岗岩残积土与混凝土界面含水率、粗糙度系数、法向应力与累积竖向位移的关系,其中,竖向位移正方向代表体积收缩。由图 9(a)可知:当含水率为 14%、19% 和 24% 时,累积竖向位移与法向应力呈正相关关系;然而,当含水率为 29% 时,这种关系转变为负相关。这一现象是由于高含水率的花岗岩残积土的承载能力较弱,施加荷载时会发生类似压缩固结的现象。法向应力水平越高,前期的压缩固结量就越大,导致后期体变能力降低。此外,从残积土击实曲线中可见,高含水率残积土的干密度上限较小,土体的压缩余量也相对较小。



(a) 含水率



(b) 粗糙度

图 9 含水率、粗糙度系数、法向应力与累积竖向位移关系
Fig. 9 Relationships between moisture content, roughness coefficients, normal stress, and cumulative vertical displacement respectively

由图 9 可知:在试验过程中,花岗岩残积土与 5 种不同粗糙度混凝土界面的剪切过程均呈现出体积收缩现象。累积竖向位移随粗糙度的增大呈现先增大而后减小,这表明较大粗糙度会抑制体积收缩的发展。这是由于粗糙度的增大,使得困在混凝土凹槽中受压缩残积土的数量增加,这些土体困在凹槽中难以错动逸出,随混凝土移动而移动,导致体积收缩量减小。在 JRC 为 5.8 的情况下,当法向应力为 100、200、300 kPa 时,对应累积竖向位移分别为 1.49、2.87、3.79 mm,这

表明法向应力的增加可以促进剪切过程中体积的收缩,抑制体积膨胀的现象。

2.3 界面强度参数

根据摩尔-库仑定律,对试验数据进行线性回归分析,图 10 为 JRC 为 9.5 时,不同含水率下界面抗剪强度包络线, R^2 为决定系数。抗剪强度参数见表 4。由表 4 可知:在 14%、19% 含水率下,界面内摩擦角相对稳定;随着含水率进一步提高,土颗粒之间相互作用减弱,基质吸力下降^[30],且土颗粒表面水膜变厚,产生较强润滑作用,导致了内摩擦角的减小。此外,界面黏聚力与含水率也存在密切的关系,水分子的存在首先增加了颗粒间的接触面积,从而提高界面黏聚力,而后随着水膜变厚,自由水出现,颗粒间静电引力减小,同时水分子之间的排斥力增强,最终导致界面黏聚力减小。

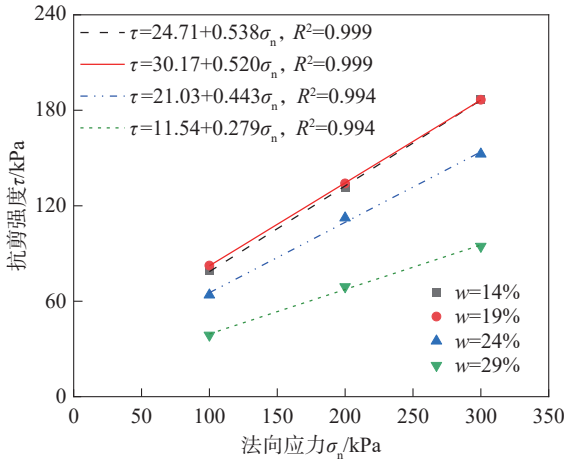


图 10 不同含水率下界面抗剪强度包络线

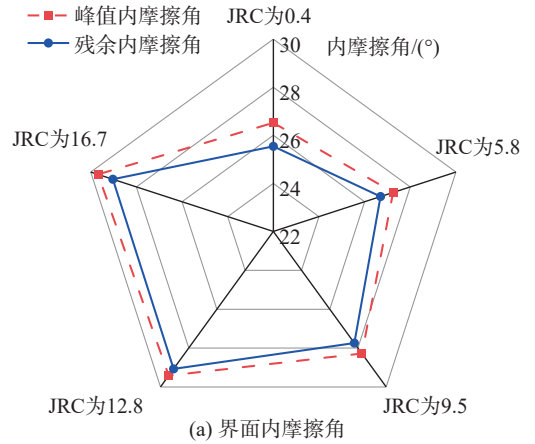
Fig. 10 Interface shear strength envelopes under different water contents

表 4 花岗岩残积土-混凝土界面抗剪强度参数

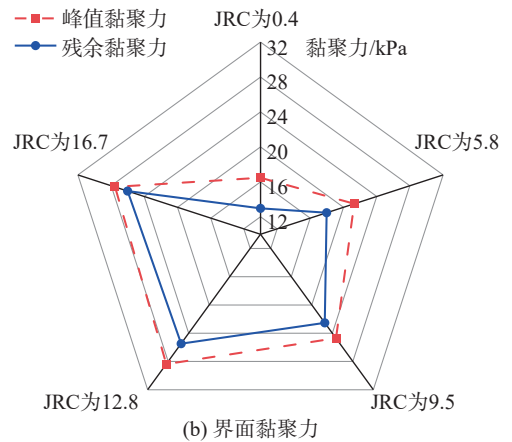
Tab. 4 Shear strength parameters of granite residual soil-concrete interface

含水率 w /%	粗糙度系数 JRC	内摩擦角 φ /(°)	黏聚力 c /kPa	决定系数 R^2
14	9.5	28.28	24.71	0.999
19		27.47	30.17	0.999
24		23.89	21.03	0.998
29		15.59	11.54	0.995

图 11 展示了抗剪强度指标与 JRC 的关系,可知混凝土粗糙度的增加可以显著改善界面摩擦性能。一方面,混凝土表面的凹陷和凸起使接触面积不断增加,需要更大的剪应力产生滑动;另一方面,凹槽对附着在表面的土体产生束缚作用,凹槽内的土体和其下部土体会发生翻滚、相互错动,进一步提高了摩阻力水平。当 JRC 达到 12.8 时,界面抗剪强度指标不再增长,保持相对稳定,表明混凝土粗糙度系数达到临界值。



(a) 界面内摩擦角



(b) 界面黏聚力

图 11 抗剪强度指标与 JRC 关系

Fig. 11 Relationship between shear strength index and JRC

3 直剪试验数值模拟

3.1 直剪试验模型建立及验证

采用离散元软件 PFC 对直剪试验进行数值模拟分析。模拟中,剪切盒和混凝土由墙体组成,尺寸与实际试验保持一致,剪切过程为下剪切盒向右移动。考虑到花岗岩残积土部分颗粒较小,按实际生成颗粒数目较多,影响计算速率。因此,为保证计算速率与模拟的真实性,把最小颗粒半径控制在 2.5 mm,最大颗粒半径控制在 7.0 mm。模型共生成 54 794 个颗粒,建模结果和测量球的布置见图 12。

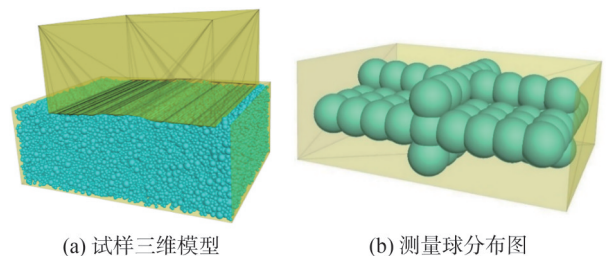


图 12 PFC 模型示意图

Fig. 12 Schematic diagram of PFC model
在建模中,颗粒与墙之间采用“Linear Model”接触模型,考虑到花岗岩残积土具有黏聚力,颗粒间采

用“Adhesive Rolling Resistance Linear Model”这一接触模型,具体试验参数见表5。

表5 数值模型参数

Tab. 5 Numerical model parameters

参数名称	标定值
杨氏模量 E_s/Pa	8×10^7
刚度比 K	1
阻尼比 β	0.5
颗粒摩擦系数 μ_p	0.4
墙体摩擦系数 μ_w	0.5
颗粒密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 300

数值模拟试验过程与室内试验保持一致,包括试样、伺服加载和剪切3个步骤。为验证数值模拟结果的准确性,图13分别对比了当 w 为14%、JRC为9.5、 σ_n 为100 kPa时剪切应力-剪切位移与竖向位移-剪切位移的试验和数值模拟曲线。

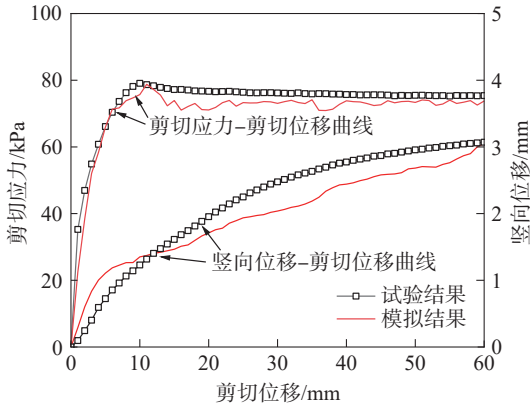


图13 试验与数值模拟曲线

Fig. 13 Experimental and numerical simulation curves

3.2 颗粒位移场及孔隙率分析

图14展示了颗粒在剪切过程中的位移场变化情况,其中,箭头表示颗粒运动方向,P1~P4为试样内部不同受力与变形特征的关键区域。在剪切开始前,颗粒在法向应力的作用下呈现向下运动的趋势,逐渐被压缩,而两端的颗粒则产生轻微的水平位移。混凝土表面的粗糙凹陷使得混凝土两端向下传递的法向力更为显著,导致图14中P1、P2区域的颗粒压缩更加明显。

随着剪切的进行(当水平剪切位移达到5 mm),颗粒呈现向混凝土中部凹陷的移动趋势。这种移动导致颗粒填充凹陷并被固定在其中,进而降低混凝土的有效粗糙度。这一现象解释了峰值剪切应力不会随着粗糙度的增大而持续增长的原因。在剪切过程中,大多数颗粒伴随着下方剪切盒的运动发生向右的同步位移。值得注意的是,与其他区域相比,P3区域的位移水平较小,这可以归因于该区域颗粒受到混凝土作用较强烈。

当剪切位移达到60 mm时,混凝土强烈作用的颗粒范围,形成了狭长的剪切应变强烈变形带P4,该区域可粗略视为剪切带。

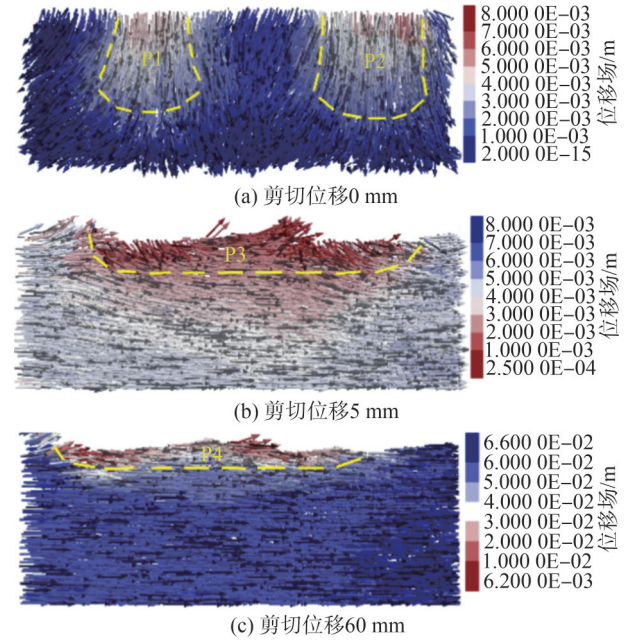


图14 颗粒位移场

Fig. 14 Particle displacement fields

为深入理解试样内部孔隙率的演变,将测量球的垂直方向划分为上、中、下3个关键区域,分别标记为Z1、Z2和Z3。通过对每个区域内的测量球孔隙率监测值进行平均处理,得到孔隙率随剪切位移变化曲线,如图15所示。由图15可知,相较于Z1和Z3区域,Z2区域的孔隙率一直保持最小值。随着剪切的进行,Z2和Z3区域的孔隙率逐渐减小,这表明剪切使得这两个区域的颗粒更加紧密。特别值得注意的是Z1区域,其孔隙率的变化最为显著,在剪切进行的过程中,Z1区域的孔隙率持续增加。这可以归因于该区域存在剪切带,颗粒之间的相互作用较剧烈,颗粒的翻滚和错动显著,从而导致孔隙率的增大。

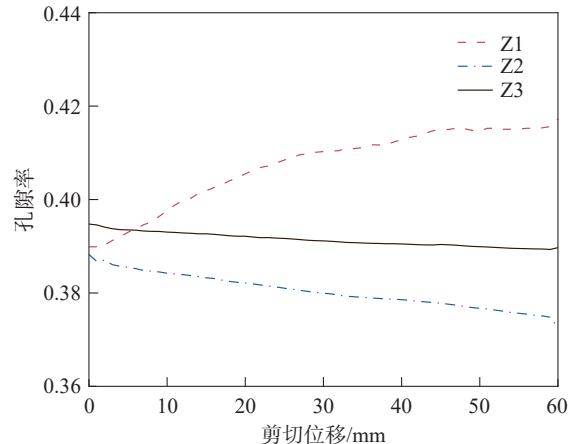


图15 剪切过程中孔隙率的变化曲线

Fig. 15 Change curves of porosity during shearing process

总体来看,孔隙率随剪切位移的变化范围相对较小。且随着离界面距离的增加,孔隙率受到的影响程度逐渐减小。试样内孔隙率在剪切过程中的演变受到离界面的距离影响。离界面较远的区域,其孔隙率变化相对缓慢,表明该区域的颗粒结构在受到剪切影响时相对稳定。

3.3 颗粒力链变化分析

在法向荷载和切向荷载传递的复杂过程中,荷载倾向于有选择地沿着颗粒间的接触传递,从而形成具有结构性的力链。这些力链的结构形态及演变过程直接反映了土体内部结构及其力学响应。通过数值模拟获得的颗粒力链演化,如图 16 所示。

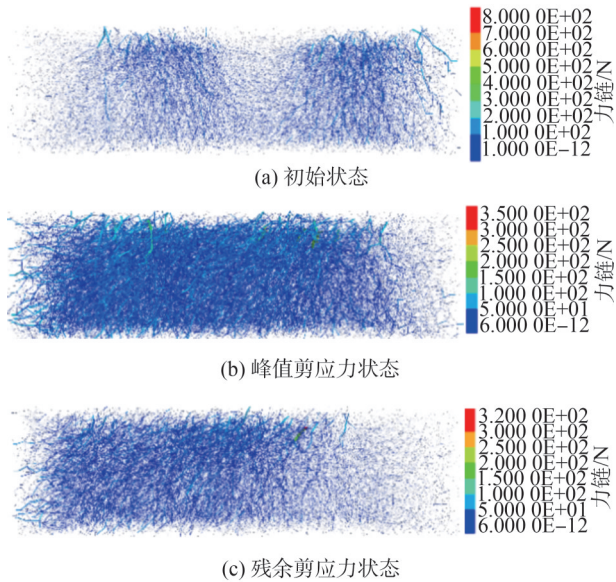


图 16 颗粒力链演化

Fig. 16 Evolution of particle force chain

由图 16 可知,初始状态下,在重力和法向应力的共同作用下,力链分布呈现不均匀状态。混凝土中部凹陷处的力链相对疏松,其两侧力链则显得更为密集。此时接触力链的主要方向是法向。随着剪切应力

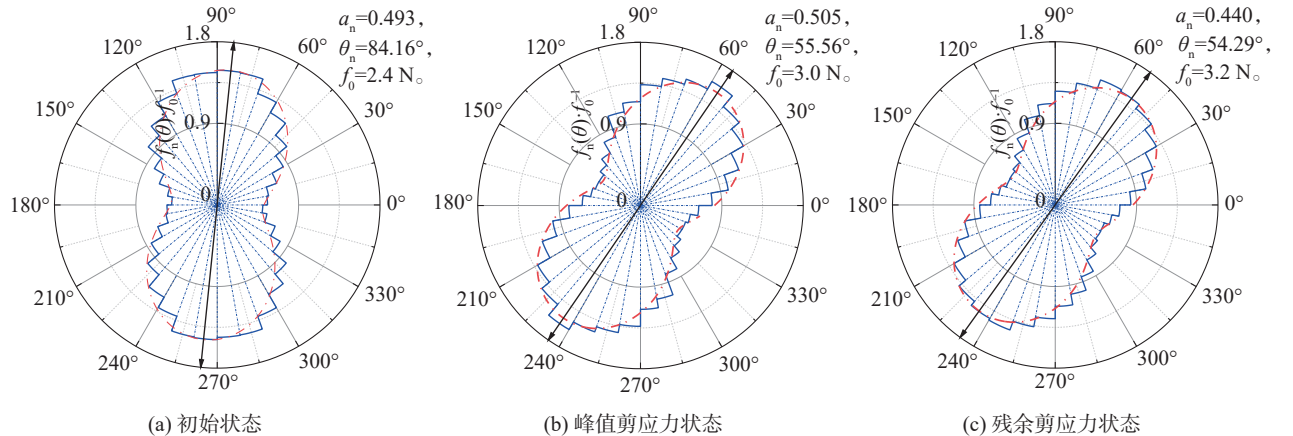


图 17 法向接触力的归一化分布

Fig. 17 Normalized distribution of normal contact force

的逐渐增长至峰值,颗粒间的接触变得更为密集,力链网络更加饱满,由此可见,在剪切作用下,土体的微观结构调整,颗粒重新排列,形成新的接触点和力链,从而在宏观上表现出剪切强度的提高。当试样达到残余应力状态时,剪切应力主要由左侧颗粒承受,导致力链网络呈现左疏右密的特征。与峰值剪应力状态相比,力链数量有所下降。

3.4 颗粒组构各向异性演化分析

颗粒细观组织的演化与试样在剪切过程中表现出的宏观强度特性密切相关, Rothenburg 等^[31]提出可用傅里叶函数近似描述单调剪切试验中颗粒间法向接触力和切向接触力各向异性的变化规律:

$$f_n(\theta) = f_0(1 + a_n \cos(2(\theta - \theta_n))) \quad (2)$$

$$f_t(\theta) = -f_0 a_t \sin(2(\theta - \theta_t)) \quad (3)$$

式(2)、(3)中, a_n 和 a_t 分别为法向接触力和切向接触力的各向异性系数, θ_n 和 θ_t 分别为法向接触力和切向接触力各向异性的主方向, f_0 为平均法向接触力, $f_n(\theta)$ 、 $f_t(\theta)$ 分别为接触法向为 θ 时的平均法向接触力和平均切向接触力。

图 17、18 展示了试样在不同状态下法向接触力和切向接触力在 xoz 平面(x 轴为水平剪切方向, z 轴为竖直法向应力方向)投影的归一化分布。归一化法向接触力 $f_n(\theta)/f_0$ 和归一化切向接触力 $f_t(\theta)/f_0$ 的分布分别形似“花生”(图 17)和“花瓣”(图 18), 在初始状态下, 颗粒主要受重力和法向应力的影响, 力沿垂向呈现对称分布的特征, 各向异性主方向接近 90° 。当达到峰值剪应力后, 法向接触力和切向接触力的主方向(用双箭头线表示)随剪切方向发生倾斜, 分别倾斜 28.60° 和 31.32° 。当剪切至残余强度时, 法向接触力和切向接触力主方向相对稳定, 但各向异性系数下降明显, 说明剪切过程中颗粒的重新排列, 降低了接触力分布的各向异性, 该状态下应力分布更加均匀。

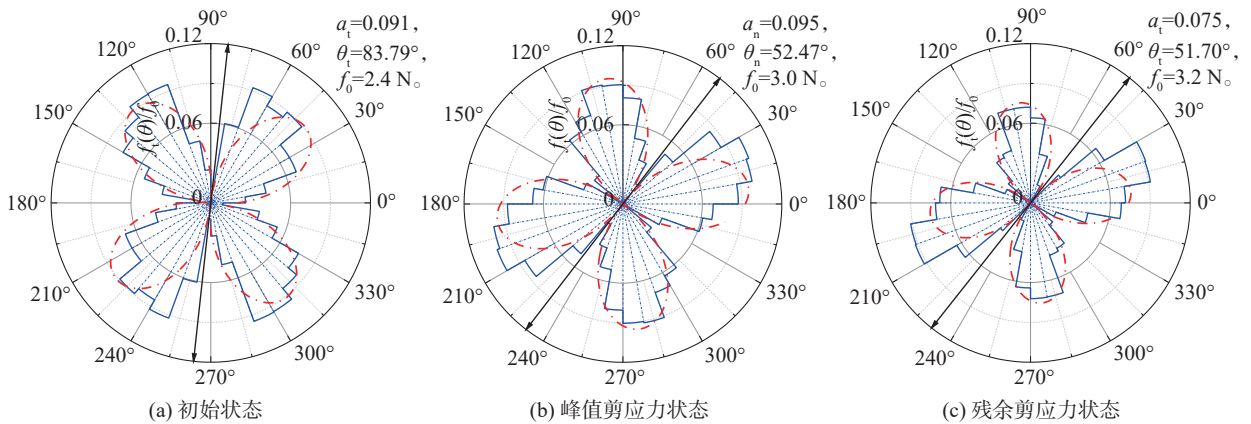


图 18 切向接触力的归一化分布

Fig. 18 Normalized distribution of tangential contact force

4 结论

为了研究含水率与粗糙度对残积土-混凝土界面剪切特性的影响,进行了一系列室内大型直剪试验,并采用数值模拟分析了土体在剪切过程中的细观力学行为,得到以下结论:

1)随着含水率的增加,界面抗剪强度和黏聚力先增大后减小,当 w 为19%时达到峰值,而内摩擦角从 28.28° 逐步减小至 15.59° 。低含水率(14%、19%)时,应力-位移曲线表现为剪切软化型;高含水率(24%、29%)时,则表现为剪切硬化型。

2)混凝土表面存在临界粗糙度(JRC为12.8),在此之前,界面抗剪强度、黏聚力、内摩擦角均随粗糙度的增大而增长,并达到峰值;达到临界粗糙度后,这些参数值均有所下降。

3)随着剪切位移的发展,法向接触力和切向接触力的各向异性愈发显著,各向异性主方向倾向沿着最大压应力方向排列,以增强抗剪切变形的能力。

4)根据试验结果,可在基础工程中按需求制定合适的含水率控制策略。此外,通过合理设计混凝土表面粗糙度,可以有效增加基础与地基土之间的摩擦力,从而提高界面的抗剪性能。

参考文献:

- [1] Liu Feiyu, Zhao Chuan, Sun Honglei, et al. Study on the effect of salt content on the shear characteristics of the interface between sodium sulphate saline soil and concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(8): 1680–1688. [刘飞禹, 赵川, 孙宏磊, 等. 含盐量对硫酸钠盐渍土-混凝土界面剪切特性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(8): 1680–1688.]
- [2] Wang Jun, Zhu Chen, Liu Feiyu, et al. Shear strength of reinforced soil interface under normal cyclic loading and its prediction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 954–960. [王军, 朱晨, 刘飞禹, 等. 法向循环荷载下筋土界面的剪切应力规律及预测[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 954–960.]
- [3] An Ran, Kong Lingwei, Zhang Xianwei, et al. A multi-scale study on structure damage of granite residual soil under wetting-drying environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 758–767. [安然, 孔令伟, 张先伟, 等. 干湿循环效应下花岗岩残积土结构损伤的多尺度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 758–767.]
- [4] Zhao Mi, Wang Weiwei, Huang Jingqi, et al. Simplified time history analysis for soil-structure interaction under earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 111–117. [赵密, 王维伟, 黄景琦, 等. 地震作用下土-结构相互作用的简化时程分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 111–117.]
- [5] Liu Hongbo, Liang Chongxu, Liu Feiyu. Seismic response analysis of granite residual soil slopes considering the effect of water content[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 342–350. [刘洪波, 梁崇旭, 刘飞禹. 考虑含水率影响的花岗岩残积土边坡地震响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 342–350.]
- [6] Yu Wenzhao, Zhu Honghu, Wang Deyang, et al. A review of research on vertical uplift failure of buried pipelines[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 189–200. [喻文昭, 朱鹤鸣, 王德洋, 等. 埋地管道竖向隆起破坏研究综述[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 189–200.]
- [7] Yang Zhongping, Li Jin, Jiang Yuanwen, et al. Influences of stone content on shear mechanical properties of soil-rock mixture-bedrock interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(8): 1443–1452. [杨忠平, 李进, 蒋源文, 等. 含石率对土石混合物-基岩界面剪切力学特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1443–1452.]
- [8] Chen Chen, Yang Qi, Leng Wuming, et al. Experimental investigation of the mechanical properties of the sand-

- concrete pile interface considering roughness and relative density[J].*Materials*,2022,15(13):4480.
- [9] Ferreira F,Vieira C,de Lurdes Lopes M.Cyclic and post-cyclic shear behaviour of a granite residual soil-geogrid interface[J].*Procedia Engineering*,2016,143:379-386.
- [10] Liu Feiyu,Ying Mengjie,Yuan Guohui,et al.Particle shape effects on the cyclic shear behaviour of the soil-geogrid interface[J].*Geotextiles and Geomembranes*,2021,49(4):991-1003.
- [11] Liu Feiyu,Li Haoze,Sun Honglei.Effect of rubber-sand particle size ratio on shear properties of rubber-sand mixtures under normal cyclic loading[J].*Construction and Building Materials*,2023,406:133415.
- [12] Barton N,Choubey V.The shear strength of rock joints in theory and practice[J].*Rock Mechanics*,1977,10(1):1-54.
- [13] Abolfazli M,Fahimifar A.An investigation on the correlation between the joint roughness coefficient(JRC) and joint roughness parameters[J].*Construction and Building Materials*,2020,259:120415.
- [14] Gan Lei, Ma Hongying, Shen Zhenzhong. Relationship between characteristic parameters of concrete rough surface morphology and joint roughness coefficient[J]. *China Civil Engineering Journal*,2022,55(7):57-65.[甘磊,马洪影,沈振中.混凝土粗糙面形貌特征参数与节理粗糙度系数关系研究[J].*土木工程学报*,2022,55(7):57-65.]
- [15] Yang Junchao,Xia Yuanyou,Chen Wudi,et al.Shear behavior of silty clay-concrete interface based on large-scale direct shear test[J].*International Journal of Geomechanics*,2023,23(7):04023084.
- [16] 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):1122-1135.
- [17] Wang Xuan,Cheng Hao,Yan Peng,et al.The influence of roughness on cyclic and post-cyclic shear behavior of red clay-concrete interface subjected to up to 1 000 cycles[J].*Construction and Building Materials*,2021,273:121718.
- [18] Liu Shanwei,Zhang Qianqing,Ma Bin,et al.Study on surface roughness effect on shear behavior of concrete-soil interface[J].*Engineering Failure Analysis*,2023,145:107050.
- [19] Zhao Heng,Hou Jichao,Zhao Minghua.Roughness quantization model and shear mechanism of pile-rock interfaces[J].*China Journal of Highway and Transport*,2022,35(11):1-11.[赵衡,侯继超,赵明华.桩-岩界面粗糙度量化模型及其剪切机制研究[J].*中国公路学报*,2022,35(11):1-11.]
- [20] Fan Wenchen,Cao Ping.A new 3D JRC calculation method of rock joint based on laboratory-scale morphology testing and its application in shear strength analysis[J].*Bulletin of Engineering Geology and the Environment*,2020,79(1):345-354.
- [21] Feligha M,Hammoud F,Belachia M,et al.Experimental investigation of frictional behavior between cohesive soils and solid materials using direct shear apparatus[J].*Geotechnical and Geological Engineering*,2016,34(2):567-578.
- [22] Cheng Hao,Zeng Guodong,Zhou Min,et al.Peak shear strength model for clay-concrete interface considering roughness[J].*Advanced Engineering Sciences*,2021,53(4):168-177.[成浩,曾国东,周敏,等.考虑粗糙度影响的黏土-混凝土接触面峰值剪切强度模型研究[J].*工程科学与技术*,2021,53(4):168-177.]
- [23] Dou Hongqiang,Xie Senhua,Chen Feng,et al.Study on shear characteristics and a mechanics model of granite residual soil-rock interface[J].*Bulletin of Engineering Geology and the Environment*,2023,82(6):212.
- [24] Sun Dean,Liu Wenjie,Lü Haibo.Soil-water characteristic curve of Guilin lateritic clay[J].*Rock and Soil Mechanics*,2014,35(12):3345-3351.[孙德安,刘文捷,吕海波.桂林红黏土的土-水特征曲线[J].*岩土力学*,2014,35(12):3345-3351.]
- [25] Tang Liansheng,Wang Hao,Sun Yinlei,et al.Change of tensile strength of granite residual soil during drying and wetting[J].*Rock and Soil Mechanics*,2022,43(7):1749-1760.[汤连生,王昊,孙银磊,等.干湿过程中花岗岩残积土抗拉强度变化研究[J].*岩土力学*,2022,43(7):1749-1760.]
- [26] Cheng Hao,Wang Xuan,Zhang Jiasheng,et al.Large-scale direct shear tests of interfaces between different soils and concrete considering roughness effect[J].*Advanced Engineering Sciences*,2019,51(5):117-125.[成浩,王暉,张家生,等.考虑粗糙度影响的不同土与混凝土界面大型直剪试验研究[J].*工程科学与技术*,2019,51(5):117-125.]
- [27] Su Lijun,Zhou Wanhuan,Chen Weibin,et al.Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface[J].*Measurement*,2018,122:339-346.
- [28] Hu Liming,Pu Jialiu.Testing and modeling of soil-structure interface[J].*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,2004,130(8):851-860.
- [29] Zeng Weide,Zhang Jiasheng,Long Yao.Experimental study of mechanical behaviour of red clay soil-concrete smooth interface by direct shear test[J].*Journal of Railway Science and Engineering*,2015,12(4):795-800.[曾维德,张家生,龙尧.红黏土-混凝土光滑接触面直剪试验研究[J].*铁道科学与工程学报*,2015,12(4):795-800.]
- [30] Lin Peng,Zhang Jingjing,Huang He,et al.Strength of unsaturated granite residual soil of Shantou coastal region considering effects of seepage using modified direct shear test[J].*Indian Geotechnical Journal*,2021,51(4):719-731.
- [31] Rothenburg L,Bathurst R J.Analytical study of induced anisotropy in idealized granular materials[J].*Géotechnique*,1989,39(4):601-614.

Influence of Water Content and Roughness on the Shear Characteristics of Granite Residual Soil–Concrete Interface

LIU Feiyu¹, MA Kechao¹, YANG Jun^{1,2}

(1.College of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2.Guangzhou Municipal Engineering Design Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract:

Objective Studying the shear characteristics of the interface between granite residual soil and concrete is crucial for ensuring the safety of geotechnical engineering applications, including pile foundations, anchor rods, and underground pipelines. At present, the shear characteristics of the interface are primarily influenced by the water content of the soil and the roughness of the concrete surface. This study investigates the effects of these two factors on the shear characteristics through experimental and numerical analysis.

Methods Based on the standard structural surface roughness curve, a three-dimensional model representing surfaces with different roughness levels was established. TPU molds with varying roughness values were produced using 3D printing technology, and concrete test blocks exhibiting different surface roughness characteristics were cast. Indoor large-scale direct shear tests were conducted under four water content levels (14%, 19%, 24%, and 29%) shear stress displacement curve, shear strength, and vertical displacement were analyzed. Finally, discrete element software was employed to investigate meso-mechanical characteristics, including porosity, force chain distribution, and fabric anisotropy, of granite residual soil during the shearing process.

Results and Discussions The test results indicated that the interfacial shear strength initially increased and decreased with increasing water content. At a water content of 19%, the maximum interfacial shear strength and interfacial cohesion were achieved, with values of 82.4 kPa and 30.17 kPa, respectively, under a normal stress of 100 kPa. Water content exerted a pronounced influence on the stress-strain behavior of the interface. At lower water content levels ranging from 14% to 19%, shear softening behavior was observed, whereas higher water content levels from 24% to 29% exhibited shear hardening behavior. At a water content of 14%, the strains corresponding to peak interface shear stress were 3.26%, 3.84%, and 3.96% under normal stresses of 100 kPa, 200 kPa, and 300 kPa, respectively, indicating enhanced shear ductility with increasing normal stress. As the concrete roughness coefficient increased, the interface shear strength increased gradually; however, once the critical roughness value was reached, further increases in roughness did not result in additional shear strength enhancement. When the concrete surface was relatively smooth, the interface shear strength mainly originated from frictional resistance between the soil and concrete, and the shear failure surface was located at the interface. When the concrete surface became rougher, grooves on the surface interlocked with soil particles, generating a biting effect that increased the interface shear strength and caused the shear failure surface to shift from the interface into the soil, forming a localized shear band. With further increases in roughness beyond the critical value, additional soil particles filled the surface grooves, which reduced the effective roughness of the concrete surface and led to a marginal occlusion effect. Therefore, the shear failure surface no longer propagated deeper into the soil and even exhibited slight regression, resulting in no further increase in interface shear strength. Numerical simulation results further demonstrated that the particle porosity within the upper 5 cm range of the sample increased during shearing, whereas the porosity in the remaining regions showed an opposite trend. The influence of porosity on particle behavior gradually decreased with increasing distance from the interface. In addition, the principal anisotropy directions of both normal and tangential contact forces deflected consistently with the shear direction.

Conclusions A critical roughness value was identified at the soil–concrete interface. Before reaching this critical roughness, the shear strength, interfacial cohesion, and internal friction angle of the interface increased with increasing roughness. However, once this critical value (JRC equals to 12.8) was exceeded, further increases in these parameters ceased, and a stable state was reached. Simulation results indicated pronounced anisotropy in both normal and tangential contact forces, with the principal anisotropic direction aligned with the direction of maximum compressive stress, enhancing resistance to shear deformation. In practical foundation engineering applications, the water content of foundation soil can be appropriately controlled based on experimental findings. In addition, the surface morphology of concrete can be designed with reference to the critical roughness value, improving interface shear resistance.

Key words: soil–structure interface; moisture content; roughness; shear characteristics; numerical simulation

(编辑 吴芝明)

引用格式: Liu Feiyu, Ma Kechao, Yang Jun. Influence of water content and roughness on the shear characteristics of granite residual soil–concrete interface[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(2): 168–178. [刘飞禹, 马克超, 杨军. 残积土含水率和混凝土表面粗糙度对界面剪切特性影响[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(2): 168–178.]