

DOI:10.11918/202206044

有机复合客土基材接触面剪切力学特性试验

李明阳¹, 刘 瑾¹, 梅 红¹, 卢洪宁¹, 宋泽卓^{1,2}, Debi Prasanna Kanungo³, 祁长青¹

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211100; 2. School of Engineering, Royal Melbourne Institute of Technology, Melbourne Vic 3001, Australia; 3. Council of Scientific and Industrial Research, Central Building Research Institute, Roorkee 247667, India)

摘 要: 为研究高分子材料和接触面粗糙度对土-岩接触面剪切力学性能的影响, 设计预制混凝土模块作为岩面相似材料, 开展一系列改进型直剪试验, 分析高分子材料和接触面粗糙度的影响规律, 并结合扫描电镜试验深入揭示高分子材料的改良机制。结果表明, 高分子材料主要通过提高黏聚力极大地改善基材土和接触面的剪切力学性能, 掺量 2% 的基材试样黏聚力达 41.76 kPa, 提高了约 3 倍。掺量 2% 的不同接触面试样黏聚力提高了 2~7 倍; 增大接触面粗糙度主要通过提高黏聚力增强接触面剪切力学性能, 粗糙度为 6.5 mm 的不同接触面间黏聚力提升幅度为 12.27~23.77 kPa, 提高了 0.4~3.9 倍; 对于平坦接触面和粗糙接触面, 高分子材料对剪切性能的强化表现为两种不同模式; 高分子材料与接触面粗糙度对接触面的剪切性能具有协同强化效应。

关键词: 有机复合基材; 土-岩接触面; 有机高分子材料; 接触面粗糙度; 改进型直剪试验

中图分类号: TU44 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2023)06-0134-09

Shear mechanical properties of contact surface of organic composite base material

LI Mingyang¹, LIU Jin¹, MEI Hong¹, LU Hongning¹, SONG Zezhuo^{1,2}, Debi Prasanna Kanungo³, QI Changqing¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. School of Engineering, Royal Melbourne Institute of Technology, Melbourne Vic 3001, Australia;

3. Council of Scientific and Industrial Research, Central Building Research Institute, Roorkee 247667, India)

Abstract: To investigate the influence of polymer material and contact surface roughness on the shear mechanical properties of soil-rock contact surface, we designed precast concrete samples as similar materials for rock surface and conducted a series of improved direct shear tests. The influence of organic polymer material and contact surface roughness was discussed. The improvement mechanism of polymer material was revealed by scanning electron microscope (SEM). Test results show that the polymer material could greatly improve the shear mechanical properties of the base soil and the contact surface by increasing the cohesive force, and the cohesive force of the substrate sample with 2% doping reached 41.76 kPa, which was increased by about 3 times. The cohesive force of different contact surface samples with 2% doping increased by about 2-7 times. The increase in the contact surface roughness could enhance the shear properties of contact surface by increasing the cohesive force, and the cohesive force of different contact surfaces with roughness of 6.5 mm increased from 12.27 kPa to 23.77 kPa, which was increased by 0.4-3.9 times. For flat contact surface and rough contact surface, the shear properties of polymer materials were strengthened in two different modes. The polymer material and the contact surface roughness had a synergistic strengthening effect on the shear properties of contact surface.

Keywords: organic composite base material; soil-rock interface; organic polymer material; contact surface roughness; improved direct shear test

相比原样地貌, 结构类型复杂且分布广泛的裸露边坡稳定性差、易受扰动, 可能造成严重的工程地质隐患。随着工程地质领域对生态环保理念的日益重视, 针对裸露岩质边坡的生态护坡技术逐渐成为研究热点^[1-2]。其中, 客土喷播是关注较多的一项

生态护坡技术。针对客土基材, 添加稳定剂改善土壤诸项性能是一种成熟手段。土壤稳定剂根据成分可分为石灰水泥类、矿渣硅酸盐类、离子类、生物酶制剂类和高分子聚合物类^[3-7]。其中, 高分子聚合物类稳定剂具有掺入少、固化效果稳定、生态环保等

收稿日期: 2022-06-10; 录用日期: 2022-07-08; 网络首发日期: 2022-09-14

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20220913.0955.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41877212); 河海大学国际合作交流引导资金专项(2022)

作者简介: 李明阳(1999—), 男, 硕士研究生; 祁长青(1979—), 男, 研究员, 博士生导师

通信作者: 刘 瑾, Jinliu920@163.com

优点,成为土壤稳定剂领域的研究热点^[8]。

客土基材喷播到岩质坡面,与岩质界面形成基材土-岩体二元结构。土-岩接触面是表现二元结构不均匀性和各向异性的主要区域,容易发生结构失稳,酝酿次生灾害^[9]。在客土基材变形与接触面稳定问题中,土-岩接触面的剪切特性是长期以来关注的重点^[10-14]。

目前,针对有机高分子材料改良客土基材的研究集中于喷播方式、材料配比等对基材土物理力学特性的影响^[8,15-18];针对土-岩接触面的接触特性研究集中于试验方案设计、模型构建、粗糙度评价方法、基材土物性影响等方面^[9-10,13-14,19]。现有针对改良材料与接触面粗糙度对土-岩接触面稳定性复合影响的研究评价较少。接触面的剪切力学特性是评价客土稳定的重要指标,揭示高分子材料和接触面粗糙度对接触面剪切力学特征的影响规律具有理论与现实意义。本文采用预制混凝土模块作为岩面相似材料,以 PVAc 型有机高分子材料作为改良材料,开展一系列改进型直剪试验,分析有机高分子材料含量和接触面粗糙度对接触面剪切特性的影响,并结合扫描电镜试验揭示高分子稳定剂和接触面粗糙度对接触面剪切力学特性的强化机制。

1 试 验

1.1 试验材料

试验用土为粉质黏土,取自南京市江宁区,具有可塑性强、膨胀性微弱、失水后易开裂收缩等特性。土样的粒径曲线如图 1 所示,土样的物理参数如表 1 所示。

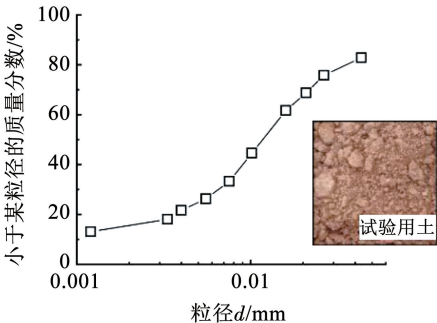


图 1 试验用土粒径曲线

Fig. 1 Particle size curve of test soil

表 1 土样物理参数

Tab. 1 Physical parameters of soil sample				
最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最优含水率 w _p /%	塑限 w _p /%	液限 w _L /%	相对密度 G
1.79	20.3	23.8	40.2	2.71

试验所用高分子材料为 PVAc 型稳定剂。PVAc 是一种生态友好型高分子聚合物,由疏水长链和大量的亲水性基团组成^[8]。在各类稳定剂中,PVAc 型高分子稳定剂因其价格低廉、生态友好、改良效果显著、长效持久等特性成为了研究热点^[8,15-18],具体理化参数如表 2 所示。

表 2 PVAc 的理化参数

Tab. 2 Physicochemical parameters of PVAc polymer stabilizer

可溶性	pH	沸点/ ℃	密度/ (g·cm ⁻³)	黏度/ (MPa·s)	总固体质量 分数/%
可溶	6~7	40.2	1.05	400	41

1.2 试验方法

设计表面有折线形凹槽的混凝土模块模拟粗糙岩面,于 25 ℃ 干燥环境下养护 26 d。为综合考虑接触面上凹凸体高度与体积的统一影响,采用灌砂法计算粗糙度 R ,即

$$R = \frac{V_s}{A_0} \tag{1}$$

式中: R 为接触面粗糙度, V_s 为整平粗糙起伏表面需要灌入砂的体积, A_0 为整平状态下的表面积。粗糙度 R 表征接触面的宏观粗糙起伏形态,不涉及微观表面摩擦参数。

将土样置于 105 ℃ 环境下干燥 10 h,冷却后粉碎,过 2 mm 标准筛。试验设置 0、0.5%、1%、2% 4 组稳定剂质量分数变量,0、1.5、2.5、6.5 mm 4 组接触面粗糙度变量。将对应质量分数的稳定剂溶液与处理后的黏土颗粒混合,与模块置于专用压实设备中压实。制得规格为高 20 mm、直径 61.8 mm、基材密度 1.75 g/cm³、含水率 25% 的直剪试样。将试样置于 25 ℃ 恒温箱内湿养 48 h。试验采用仪器为改造型应变式直剪仪(图 2(c)),可使剪切过程中直剪样的剪切面正好位于基材与混凝土模块的接触面上。剪切试验施加各法向应力为 100、200、300、400 kPa,剪切加载速率为 1.2 mm/min。试验流程及所用仪器如图 2 所示。

2 试验结果与分析

通过改进型直剪试验对有机复合客土基材-岩面的剪切力学特性进行研究,得到试验变量稳定剂质量分数 P 、接触面粗糙度 R 和接触面各抗剪强度指标间的关系如表 3 所示。

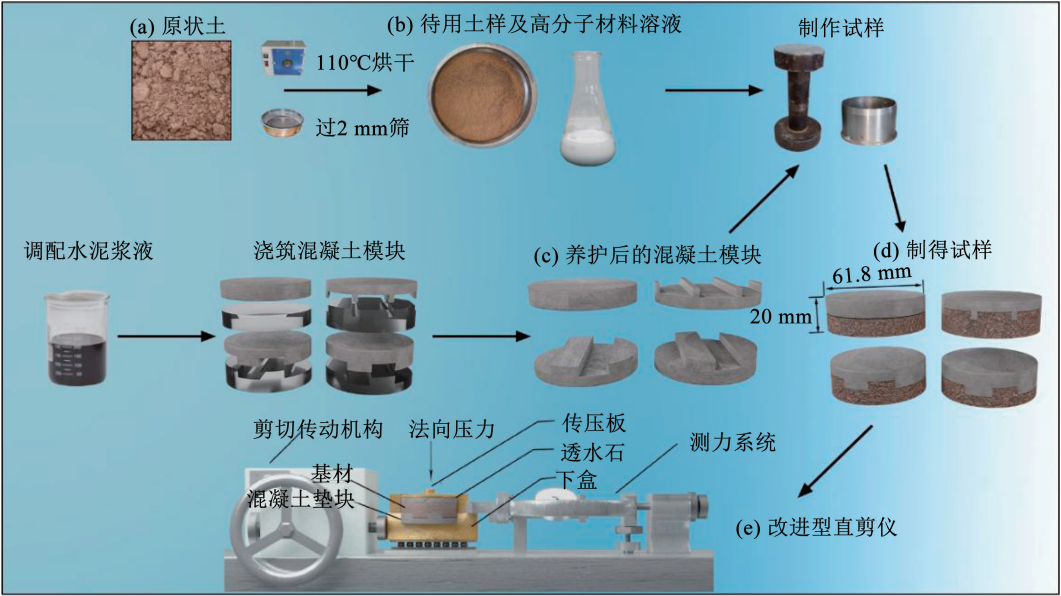


图 2 试验流程及所用仪器

Fig. 2 Test process and instruments

表 3 试样接触面的抗剪强度指标

Tab. 3 Shear strength indexes of contact surface of samples

试样编号	稳定剂质量分数/%	模块粗糙度	各级法向应力下抗剪强度/kPa				黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
			100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa		
P0 - S	0	无模块	34.13	53.98	74.93	100.94	10.65	12.48
P0 - R0		0	36.49	53.05	86.16	118.23	3.90	15.55
P0 - R1.5		1.5	39.84	72.52	100.49	132.84	9.69	17.06
P0 - R2.5		2.5	52.50	84.39	124.62	163.64	12.88	20.49
P0 - R6.5		6.5	57.75	108.88	144.37	186.04	19.17	22.80
P0.5 - S	0.5	无模块	52.72	72.84	105.07	122.14	28.08	13.52
P0.5 - R0		0	50.50	79.31	107.29	141.88	19.21	16.81
P0.5 - R1.5		1.5	56.56	105.07	135.95	158.21	29.99	18.56
P0.5 - R2.5		2.5	60.96	115.51	149.77	172.31	32.56	20.22
P0.5 - R6.5		6.5	67.39	111.95	163.32	179.33	33.70	21.17
P1 - S	1	无模块	68.70	85.15	113.99	143.00	39.78	14.13
P1 - R0		0	57.48	97.83	135.56	153.82	29.49	18.09
P1 - R1.5		1.5	68.44	109.18	136.64	177.47	34.30	19.52
P1 - R2.5		2.5	73.99	105.86	143.74	182.61	35.61	19.99
P1 - R6.5		6.5	80.20	125.83	173.07	202.72	41.76	22.53
P2 - S	2	无模块	69.49	103.10	123.56	153.95	44.07	15.31
P2 - R0		0	60.85	134.67	126.38	157.54	33.34	17.43
P2 - R1.5		1.5	82.44	123.18	148.50	188.55	48.27	18.96
P2 - R2.5		2.5	81.13	144.73	169.95	202.12	52.43	21.22
P2 - R2.5		6.5	96.78	160.21	194.18	239.55	57.11	24.81

2.1 有机高分子材料改良客土基材抗剪强度参数分析

为保证试验完整性,首先评价高分子稳定剂改

良基材土的效果。统计基材试样的黏聚力、内摩擦角与稳定剂质量分数的关系并做拟合曲线(如图 3

所示)。结果表明,2% 掺量的基材黏聚力增加了 33.42 kPa,比无稳定剂的提高了 313.91%。随着稳定剂质量分数从 0 增加至 2%,黏聚力的增长速率降低。以黏聚力增量与稳定剂质量分数增量的无量纲比值为黏聚力增长速率,稳定剂质量分数从 1% 增加至 2%,黏聚力平均增长速率降低至 4.29,比 0~1% 区段的黏聚力增速降低了 85.28%;基材土的黏聚力增长集中于稳定剂质量分数从 0 增长至 1% 的区段,占总增量的 87.17%。质量分数继续增加至 2% 时,基材土黏聚力增长速率减缓并接近停滞。这是因为未添加稳定剂时,客土基材内部黏聚力主要取决于含水率和自身颗粒特性。随着稳定剂的加入,宏观上基材土在稳定剂成膜作用、充填作用下整体性得到了提高;细观上基材土内部黏土颗粒在稳定剂 PVAc 长链大分子间的包裹、桥接与分子间作用下,整体性增强。但随着稳定剂质量分数的增加,稳定剂对基材土的强化作用发挥充分,基材土黏聚力的提高速率呈降低趋势。不同质量分数下基材试样内摩擦角分别为 12.48°、13.52°、14.13°和 15.31°,数据标准差为 1.02。结果表明,增加稳定剂质量分数能为基材试样的内摩擦角带来 2.83°的微小增长,但影响微弱。

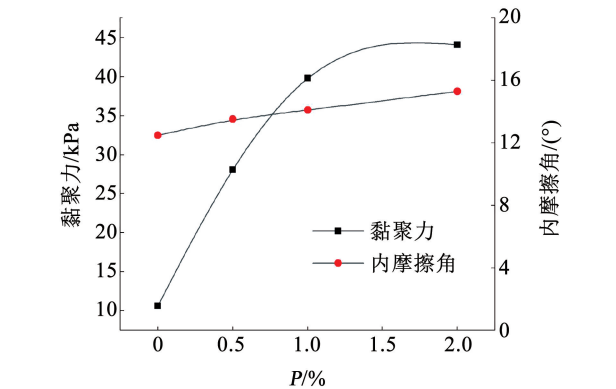


图 3 不同稳定剂质量分数下基材试样的黏聚力和内摩擦角
Fig. 3 Cohesive force and internal friction angle of substrate samples under different stabilizer concentrations

2.2 应力 - 应变曲线分析

图 4 为部分不同条件下接触面剪切应力 - 应变曲线。其中,图 4(a) ~ (d) 为稳定剂质量分数 $P = 1\%$,不同粗糙度的接触面剪切应力 - 应变曲线;图 4(e) ~ (h) 为接触面粗糙度 $R = 6.5\text{ mm}$,不同稳定剂质量分数下接触面剪切应力 - 应变曲线。

图 4 表明,在试验选用剪切方案下,各法向压力对应的应力 - 应变曲线总体上表现出非软化特征;试样的峰值剪应力在不同粗糙度、不同稳定剂质量分数下,均会随着法向应力的增大而提高。

对比图 4(a) ~ (d) 以及图 4(e) ~ (h) 可以看

出,在相同法向压力下,粗糙度 R 越大、稳定剂质量分数越高,接触面的抗剪强度峰值越大。这初步说明,添加有机高分子材料和提高接触面粗糙度都可强化接触面的剪切强度特性。同时, $P2 - R6.5$ ($P = 2\%$, $R = 6.5\text{ mm}$) 组各法向应力下的抗剪强度分别为 96.78、160.21、194.18、239.55 kPa,高于 $P1 - R6.5$ 组与 $P2 - R0$ 组数据。这表明稳定剂与接触面粗糙度对接触面抗剪强度的强化具有协同效应。

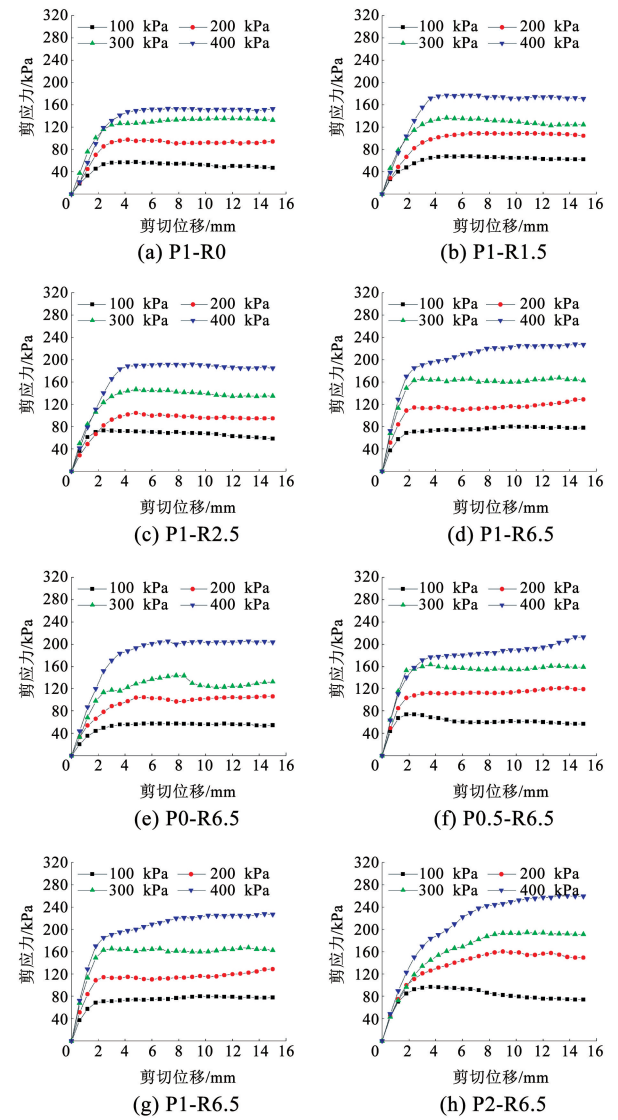


图 4 不同条件下接触面的剪切应力 - 应变曲线
Fig. 4 Shear stress-strain curves of contact surfaces under different conditions

在不同粗糙度和稳定剂质量分数下,应力 - 应变曲线变化趋势具有同质性,总结为 3 个阶段。初始阶段为近弹性变形阶段,接触面上层基材在法向应力作用下被不断压密,抵抗剪切变形。在初始剪切作用下,剪应力与剪切位移之间呈线性关系。第二阶段为弹塑性变形阶段,黏土基材与接触面间的相互作用,稳定剂高分子材料对土体的强化作用开

始参与抵抗剪切变形。整体上,接触面上土-岩相互作用、稳定剂强化作用的参与程度随着剪切继续进行提高,剪应力也持续提高,增长速率逐步降低。第三阶段为变形破坏阶段,随着剪切继续进行,接触面间相互作用与稳定剂的强化作用充分发挥,接触面的剪应力达到最大。继续剪切,试样开始出现剪切破坏变形,在试验采用的一系列高法向应力作用下,试样的剪应力保持不变或继续增加,呈现出非软化特征。

2.3 岩面粗糙度与稳定剂质量分数对土-岩接触面抗剪强度影响特征分析

接触面粗糙度和稳定剂质量分数对接触面抗剪强度的影响见图 5。图 5(a)~(d)结果表明,在不同法向压力和稳定剂质量分数下,增大粗糙度 R 可提高接触面的抗剪强度。随着接触面粗糙度 R 从 0 增加至 6.5 mm,接触面粗糙度增加使接触面抗剪强度提升 15.72~74.01 kPa,增幅为 21.47%~105.24%;图 5(e)~(h)表明不同接触面粗糙度下,增加稳定剂质量分数可提高接触面的抗剪强度,随着稳定剂质量分数从 0 增长至 2%,不同接触面试样抗剪强度提升了 28.63~61.71 kPa,增幅为 23.52%~121.99%。

取图 5 中法向应力 300 kPa 对应数据为分析对象,得接触面抗剪强度变化与粗糙度 R 、稳定剂质量分数 P 关系如图 6 所示。抗剪强度增量占比 $\Delta\tau$ 在不同粗糙度变化区段分布如图 6(a)所示。 $P=0$ 时,接触面粗糙度 0~1.5 mm、>1.5~2.5 mm、>2.5~6.5 mm 区段 $\Delta\tau$ 分别为 24.62%、41.45%、33.93%,表明抗剪强度在 3 个区段增长较为均匀; $P=0.5\%$ 时相应 $\Delta\tau$ 为 51.45%、24.67%、24.18%,表明抗剪强度增长主要发生在 0~1.5 mm 区段; $P=1\%$ 时,抗剪强度增长 78.19% 发生在 >2.5~6.5 mm 区段; $P=2\%$ 时,抗剪强度增长均匀分布于 3 个区段。以抗剪强度增量与粗糙度 R 的无量纲比值抗剪强度关于 R 的增长速率 v_r ,得 v_r 与 R 的关系如图 6(b)所示。图 6(b)表明,不同质量分数下,粗糙度 >2.5~6.5 mm 区段 v_r 处于 3.39~7.33,除 $P=1\%$ 外,均明显小于粗糙度 0~1.5 mm、>1.5~2.5 mm 区段。这初步说明随着数值的继续增大,粗糙度 R 对接触面抗剪强度的强化效率会逐渐衰减。陈俊桦等^[19]的研究证明了这一点。

图 6(c)为抗剪强度增量占比 $\Delta\tau$ 在不同稳定剂质量分数变化区段分布。可以看出, $R=0$ mm 时,稳定剂质量分数变化 0~0.5%、>0.5%~1%、>1%~2% 区段 $\Delta\tau$ 分别为 42.77%、57.23%、-18.58%,表明抗剪强度增长发生在 0~0.5%、

>0.5%~1% 区段; $R=1.5$ mm 时相应抗剪强度增量占比变化为 73.86%、1.44%、24.70%,表明抗剪强度增长主要发生在 0~0.5% 区段; $R=2.5$ mm 时,抗剪强度增长均匀地发生在 0~0.5%、>1%~2% 区段; $R=6.5$ mm 时,抗剪强度增长主要发生在 0~0.5%、>1%~2% 区段。这表明不同粗糙度下,稳定剂质量分数从 0 增至 0.5% 能明显增强接触面抗剪强度。 $R=0$ 和 $R=2.5$ mm 两组数据呈现出增加稳定剂质量分数对接触面抗剪强度的负面影响。这可能是由重塑土直剪样造成的数据误差,具体规律应结合其余抗剪强度参数分析揭示。

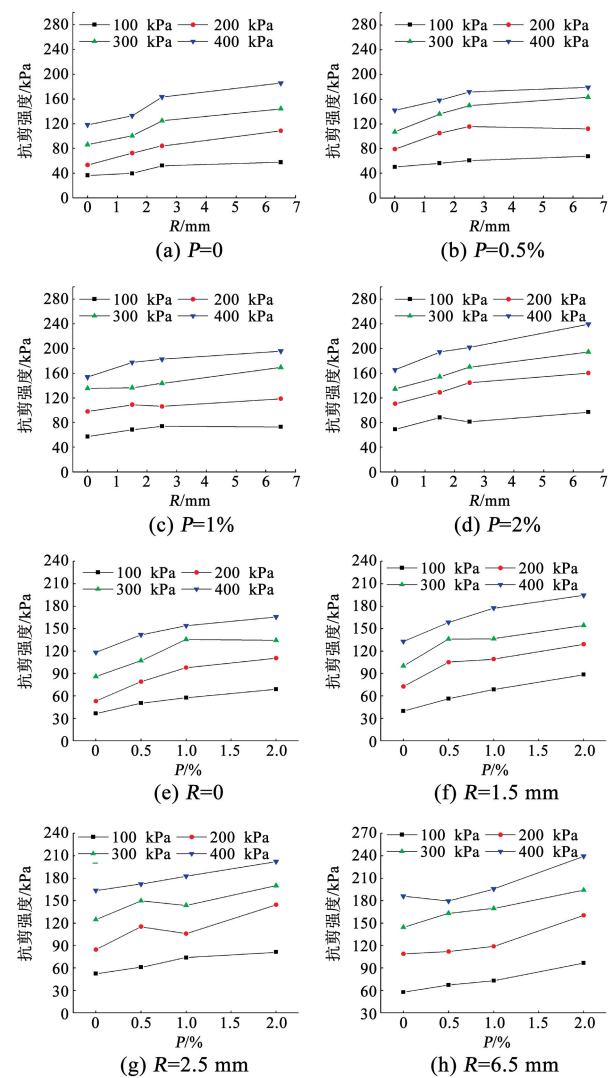


图 5 接触面粗糙度与稳定剂质量分数对接触面抗剪强度的影响

Fig. 5 Influence of contact surface roughness and stabilizer concentration on shear strength of contact surface

2.4 岩面粗糙度与稳定剂质量分数对土-岩接触面黏聚力影响特征分析

黏聚力表现无法向应力下的抗剪强度。图 7 为接触面粗糙度和稳定剂质量分数对接触面黏聚力的影响。

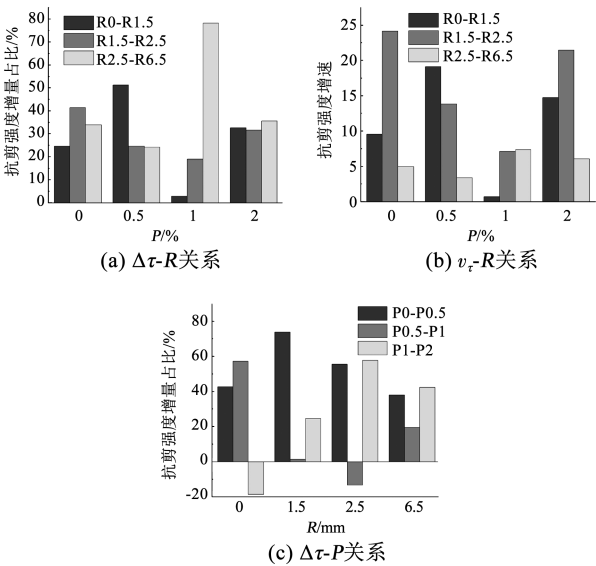


图 6 300 kPa 法向压力下接触面抗剪强度变化

Fig. 6 Changes in shear strength of contact surface under 300 kPa normal pressure

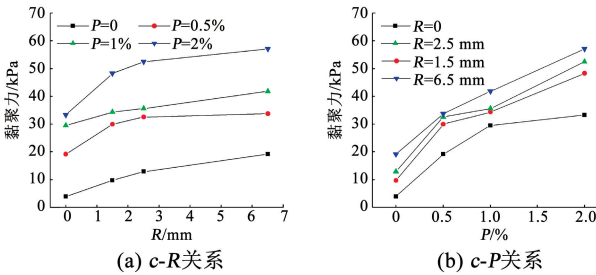


图 7 接触面粗糙度与稳定剂质量分数对接触面黏聚力影响

Fig. 7 Influence of contact surface roughness and stabilizer concentration on cohesive force of contact surface

图 7 (a) 表明,随着粗糙度从 0 mm 增加至 6.5 mm,接触面黏聚力持续增长,不同稳定剂质量分数下黏聚力关于粗糙度的最终增幅为 12.27 ~ 23.77 kPa,增长率为 41.61% ~ 391.54%。不同质量分数稳定剂下,黏聚力关于粗糙度 R 的增长关系具有趋同性,表现为两种区段,即粗糙度 0 ~ 1.5 mm 变化区段的陡增段与 >1.5 ~ 6.5 mm 的缓增段。这是因为 $R=0$ mm 时,接触面表面平坦缺乏宏观嵌合结构,黏聚效果依赖黏土颗粒、渗出水与混凝土颗粒之间的微弱作用。 R 由 0 mm 增加至 1.5 mm,接触面间出现显著宏观嵌合结构,两种颗粒之间接触面积增加,增强了二元结构的微弱黏聚作用;同时,在剪切过程中,接触面上部薄层土体会被粗糙接触面调动参与到剪切破坏过程,高俊合等^[14]称其为接触面厚度。光滑接触面调动上层土体有限,接触面剪切破坏以基材土沿接触面滑动位移为主;粗糙接触面的宏观嵌合结构提高了接触面调动上部土体参与接触面抵抗剪切破坏的能力,接触面剪切破坏表现为基材土沿接触面滑动位移与接触面厚度内基材土

自身变形位移两种模式,黏聚力出现显著增长。随着 R 继续增大,土-岩接触面间的黏聚作用并未出现机制上的新变化。 $R=1.5$ mm 之后,粗糙度 R 继续增加,黏聚力关于 R 的增长率降低。

图 7(b) 表明,随着稳定剂质量分数 P 从 0 增加至 2%,接触面黏聚力出现明显增长,不同粗糙度下黏聚力的最终增幅为 29.44 ~ 37.94 kPa,增长率为 197.91% ~ 754.87%;光滑接触面与粗糙接触面下黏聚力 c 关于 P 的增长关系表现出两种形式: $R=0$ mm 的光滑接触面,黏聚力关于 P 的增长区段可划分为 0 ~ 0.5% 区间的陡增段, >0.5% ~ 1% 区间的稳定增长段, >1% ~ 2% 区间的增长衰弱段;对于 R 不为 0 的粗糙接触面,黏聚力关于 P 的增长区段可划分为 0 ~ 0.5% 区间的陡增段, >0.5% ~ 1% 区间的衰弱段, >1% ~ 2% 区间的陡增段。

接触面的黏聚力主要由土中水对土颗粒的吸引力、土中水对接触面间颗粒的吸引力提供^[20],掺入稳定剂后,高分子材料也参与强化接触面间的黏聚作用。光滑接触面的剪切破坏形式以基材土沿接触面滑动位移为主;粗糙接触面存在宏观嵌合结构,增加了异相颗粒间的接触面积,强化了接触面调动上层土参与抵抗剪切破坏变形的能力,剪切破坏包括基材土沿接触面滑动位移与上部薄层土体变形位移两种形式。未加入稳定剂时,接触面黏聚力由土中水对两种异相颗粒的吸附力提供。加入稳定剂后,稳定剂高分子材料通过包裹、勾连、胶结、成膜等作用,参与强化接触面黏聚力。对于平坦接触面,稳定剂主要通过胶结关联吸附两种异相颗粒方式增强接触面黏聚力;对于粗糙接触面,稳定剂主要通过胶结关联吸附两种异相颗粒、强化接触面上薄层土体的剪切力学性能两种方式增强接触面黏聚力。稳定剂强化模式的差异导致平坦接触面与粗糙接触面黏聚力关于稳定剂质量分数 P 的增长关系表现出两种形式:平坦接触面黏聚力关于稳定剂质量分数 P 的增长表现为逐渐衰弱特征;粗糙接触面黏聚力关于稳定剂质量分数 P 的增长表现出更为复杂的形式。

2.5 接触面粗糙度与稳定剂质量分数对土-岩接触面内摩擦角影响特征分析

图 8(a)、(b) 分别为接触面粗糙度 R 和稳定剂质量分数 P 对接触面内摩擦角 φ 的影响。

图 8(a) 表明,随着粗糙度 R 从 0 mm 增加至 6.5 mm,接触面内摩擦角持续增长,不同稳定剂质量分数下内摩擦角关于 R 的最终增幅在 4.36° ~ 7.38°,增长率为 24.52% ~ 46.62%。以 P0.5 组为例, R0 - R6.5 对应的接触面内摩擦角分别为 16.81°、18.56°、20.22°、21.17°,随着 R 的增大,内

摩擦角分别增大了 1.75° 、 1.66° 、 0.95° 。同时, P0 - P2 组下内摩擦角变化极差分别为 7.25° 、 4.36° 、 4.44° 、 7.38° 。这表明不同稳定剂质量分数下, 接触面粗糙度 R 的增大会增加接触面的内摩擦角, 但对内摩擦角增大的影响有限。图 8 数据揭示, 接触面粗糙度 R 对接触面剪切特性的影响表现在对黏聚力和内摩擦角两方面, 其中 R 对黏聚力的影响占主要因素。

如图 8(b) 所示, 接触面粗糙度一定时, R0 - R6.5 组内摩擦角标准差分别为 0.94 、 0.91 、 0.46 、 1.30 。结果表明, 稳定剂对内摩擦角造成的影响微弱。以 R1.5 组为例, P0 - P2 对应的接触面内摩擦角分别为 17.06° 、 18.56° 、 19.52° 、 18.96° , 可见稳定剂质量分数变化使接触面内摩擦角在 $17.06^\circ \sim 19.52^\circ$ 微弱波动。土 - 岩接触面的内摩擦角表征接触面摩擦特性, 包括发生剪切破坏时接触面上层过渡带内土颗粒克服表面粗糙度需要的滑动摩擦, 颗粒间相互挤压、嵌合、解锁产生的咬合摩擦, 以及基材土与岩面粗糙结构体之间在宏观上产生的摩阻力。作为一种柔性材料, PVAc 型高分子稳定剂的掺入虽然可在一定程度上增强基材土体内部的整体性, 并广泛参与土 - 岩接触面之间的耦合作用, 却无法明显改造基材土内部的颗粒形态与土 - 岩接触面间土颗粒及混凝土微骨料颗粒的表面粗糙度。因此, 接触面的内摩擦角受稳定剂添加量影响微弱。

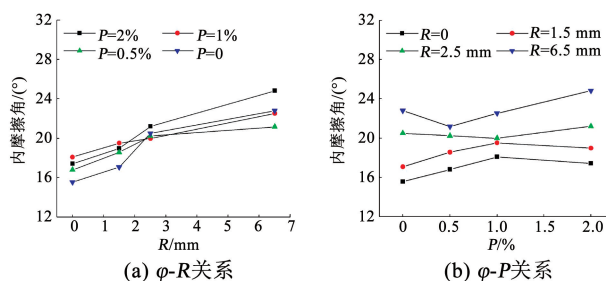


图 8 接触面粗糙度与稳定剂质量分数对接触面内摩擦角影响

Fig. 8 Influence of contact surface roughness and stabilizer concentration on internal friction angle of contact surface

3 机制分析

3.1 高分子材料改良机制分析

PVAc 型稳定剂主要成分为含有大量极性羧基 ($-\text{CH}_3\text{COO}$) 的聚醋酸乙烯酯长链大分子。长链大分子通过多种相互作用彼此相互勾连, 缠绕包裹黏土颗粒、充填颗粒孔隙从而增强黏土的整体性, 改善基材土和接触面的力学强度特性。

PVAc 长链大分子的强化作用具体可分为化学强化作用和物理强化作用。首先, PVAc 乳液在常态下会吸附大量的阴离子, 表现出负电性。稳定剂与黏土颗粒接触后, 长链大分子通过静电吸引与黏土颗粒表面结合。随着稳定剂的运移扩散, 黏土颗粒表面吸附的长链大分子延伸勾连逐渐充分; 稳定剂中存在的大量亲水基团会减小黏土颗粒间的水合膜厚度, 颗粒间斥力减小, 毛细水与黏土颗粒的接触面积与表面张力显著增强, 提高黏土颗粒之间的关联性 (图 9(a))。同时, 黏土颗粒表面的羟基也会与 PVAc 的极性羧基之间反应生成氢键 (图 9(b))。PVAc 型稳定剂是一种具有大量亲水基团的聚合物乳液, 其与黏土颗粒充分混合后, 乳液中含有的大量极性羧基基团会与黏土颗粒表面双电层中的碱性金属离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等) 发生置换反应 (图 9(c))。极性羧基中的 H^+ 取代了黏土颗粒表面的碱金属离子。黏土颗粒表面双电子层厚度变薄, 颗粒间的吸引力增加, 促进了黏土颗粒之间的聚集结合。随着 PVAc 浓度的增加, 黏土颗粒之间通过氢键与延伸勾连的 PVAc 长链大分子相互关联靠近, 增强土体力学特性。

经一定时间恒温养护, 稳定剂扩散渗透, 长链大分子对黏土基材的一系列物理化学作用充分开展。土体内部形成充填黏土颗粒孔隙, 紧密连接大量黏土颗粒的三维网状膜结构, 整体性和工程力学特性获得显著增强。

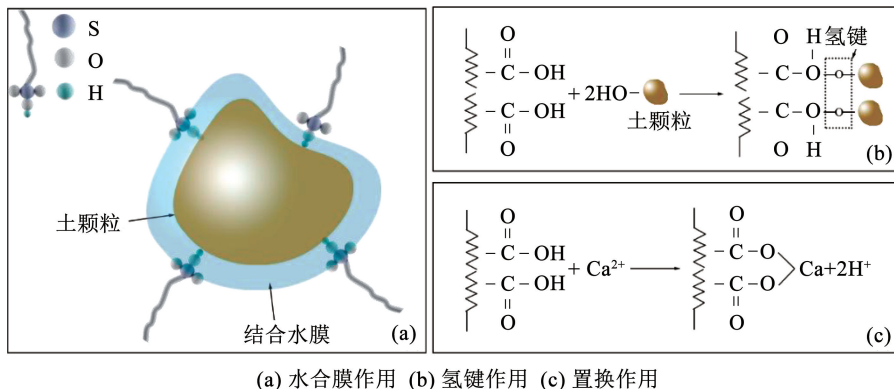


图 9 PVAc 型稳定剂改良机制

Fig. 9 Improvement mechanism of PVAc stabilizer

对改良黏土基材进行扫描电镜试验分析其微观特征。图 10 是不同放大倍率下改良黏土基材的 SEM 图像,由图 10(a)、(b)可以看出,在稳定剂与土壤接触后,一部分稳定剂聚合物渗透到土壤内部

并填充大多数颗粒间的孔隙,这增强了颗粒之间的关联性。PVAc 在黏土颗粒表面形成的立体膜结构如图 10(c)所示。这些膜结构具有良好的疏水性和强度,可以紧密联系附近的黏土颗粒。

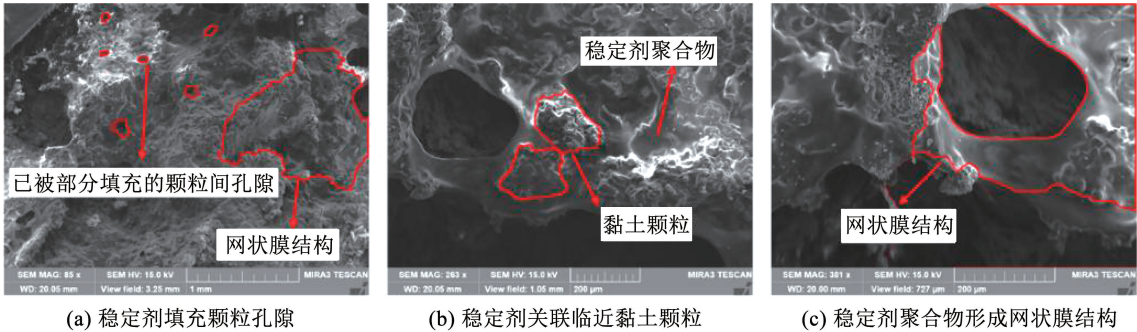


图 10 PVAc 型稳定剂改良基材土内部电镜照片

Fig. 10 SEM image of section of inner soil modified with PVAc stabilizer

3.2 接触面起伏形态影响接触面剪切变形特征机制分析

黏土基材与混凝土模块之间的接触面是典型的异相介质接触面,上层黏土颗粒与下层混凝土微骨料颗粒之间具有明显的各向异性。粗糙起伏的土-岩接触面抵抗剪切变形性能是接触面上层黏土颗粒间黏结摩擦、黏土颗粒与模块表面微骨料颗粒挤压啮合、黏土体与模块宏观嵌合结构间接触咬合作用的统一表现。以上作用的相对变化决定土-岩接触面的剪切变形特征。接触面粗糙度 R 对接触面剪切强度特性的影响主要体现在:

1) 一定范围内增大的粗糙度 R 可以明显增大黏土基材与混凝土模块之间的接触面积,提高了黏土颗粒与混凝土微骨料颗粒之间的接触耦合机会。在法向应力的作用下,黏土基材渗出的层间浸润水、分散至层间的稳定剂分子也会参与并强化两种颗粒之间的接触啮合作用。

2) 接触面粗糙起伏程度的增大为土-岩耦合提供了明显的宏观嵌合结构。具有明显粗糙形态的接触面的剪切变形破坏不会仅局限在接触面上,同时可能会发生在接触面上层一定厚度的土体之中。土-岩接触面的粗糙度会对接触面间的土-岩耦合作用和基材土体内部颗粒土颗粒的运移、转动、破碎分散以及剪切作用下形态主轴和主应力轴向的偏转等作用造成显著影响。且在一定范围内,上层土体受影响范围和程度与接触面的宏观粗糙程度密切相关^[10,14,19]。

3.3 上覆基材参与岩质边坡稳定性分析

以生态友好性手段提高裸露岩坡的稳定性是客土喷播的主要目标。稳定黏附在陡倾岩层表面的客土基材可通过一系列作用提高岩质边坡的抗滑稳定性。

1) 覆盖作用。将有机复合客土基材喷播至粗糙岩坡表面,坡面上形成相对稳定的基材土-岩体二元结构。二元结构中基材土和接触面均具有良好的剪切力学特性。稳定覆盖在岩面上的客土基材可关联岩坡表面破碎岩体,增强软弱结构面附近岩体间整体性,提高岩质边坡表层岩体的稳定性。

2) 隔离作用。裸露岩坡的各类软弱结构面、破碎岩体、不良地质体等缺少上覆土体保护,受到多类外营力的强烈负面影响。进行客土喷播后,基材发挥隔离作用,可有效降低气候、水文等外营力因子对边坡岩体稳定性造成的一系列不良影响。

3) 生态作用。PVAc 型高分子材料具有良好的生态友好性,经其改良的客土基材可通过植被自然侵入或草种喷播引入植被护坡。护坡植被通过根系的力学作用和茎叶的水文效应保护上覆客土基材,保障客土基材对岩质边坡稳定性的强化作用。

PVAc 型高分子材料通过一系列物理和化学作用提高基材土和土-岩接触面的剪切力学特性;接触面粗糙度通过提供土-岩接触面积与宏观嵌合结构提高土-岩接触面的剪切力学特性。喷播有机复合客土基材可配合锚固和支护等主要防护手段,在提高岩质边坡抗滑稳定性中发挥辅助作用。

4 结 论

1) PVAc 型高分子稳定剂可以明显提高基材土的剪切力学性能,改良效果主要表现在对基材土黏聚力的提高上。掺量 2% 的基材黏聚力增加 33.42 kPa,相比素土基材黏聚力提升了 313.91%。

2) 增加接触面粗糙度可提高土-岩接触面的剪切力学性能,具体表现在增大黏聚力和内摩擦角两方面,其中,对黏聚力的强化占主要因素。粗糙度

R 对黏聚力的强化幅度在 12.27 ~ 23.77 kPa, 强化效率为 41.61% ~ 391.54%; 粗糙度 R 对内摩擦角的强化幅度在 $4.36^\circ \sim 7.38^\circ$, 强化效率为 24.52% ~ 46.62%。

3) 高分子稳定剂对不同粗糙度接触面剪切力学性能表现出良好的强化效果, 主要体现为对黏聚力的强化。稳定剂对不同粗糙度接触面的黏聚力强化幅度在 29.44 ~ 37.94 kPa, 强化效率为 197.91% ~ 754.87%。对于平坦接触面和粗糙接触面, 高分子稳定剂对剪切性能的强化表现为两种不同模式; 不同稳定剂质量分数下, 黏聚力关于接触面的增长关系具有趋同性。PVAc 型高分子稳定剂与接触面粗糙度对于接触面的剪切性能具有协同强化效应。

参考文献

- [1] 张俊云, 周德培, 李绍才. 岩石边坡生态护坡研究简介[J]. 水土保持通报, 2000(4): 36
ZHANG Junyun, ZHOU Depei, LI Shaocai. Brief introduction of study on slope ecoengineering for rock slope protection[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000(4): 36. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2000.04.010
- [2] 许文年, 叶建军, 周明涛, 等. 植被混凝土护坡绿化技术若干问题探讨[J]. 水利水电技术, 2004(10): 50
XU Wennian, YE Jianjun, ZHOU Mingtao, et al. Several problems of vegetation technology for protecting slopes using vegetation-growing concrete[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004(10): 50
- [3] SAADELDIN R, SIDDIQUA S. Geotechnical characterization of a clay-cement mix[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2013, 72(3): 601
- [4] MA C, QIN Z, ZHUANG Y, et al. Influence of sodium silicate and promoters on unconfined compressive strength of Portland cement-stabilized clay[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(5): 1222
- [5] SHORIN V A, KAGAN G L, VEL'SOVSKII A Y. A new diagnostic instrument and method for stabilization of heaving soil in the beds of structures[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2008, 45(4): 144
- [6] KHAN T A, TAHA M R. Effect of three bioenzymes on compaction, consistency limits, and strength characteristics of a sedimentary residual soil[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 2015: 9
- [7] ONYEJEKWE S, GHATAORA G S. Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(2): 651
- [8] SONG Z, LIU J, BAI Y, et al. Laboratory and field experiments on the effect of vinyl acetate polymer-reinforced soil[J]. Applied Sciences, 2019, 9(1): 208
- [9] 杨烜宇, 王闫超, 陈辉, 等. 模拟不同形态土-岩界面的直剪试验[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(5): 2030
YANG Xuanyu, WANG Yanchao, CHEN Hui, et al. Direct shear test simulating soil-rock interface with different forms[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(5): 2030
- [10] 丁瑜, 杨奇, 夏振尧, 等. 生态护坡基材土-岩接触面原位剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊2): 383
DING Yu, YANG Qi, XIA Zhenyao, et al. In-situ shear tests on base material soil-rock interface in ecological slope protection system[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup.2): 383. DOI:10.16285/j.rsm.2015.S2.053
- [11] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Geotechnique, 1961, 11(4): 339
- [12] 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
- [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(3): 14
YIN Zongze, ZHU Hong, XU Guohua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994(3): 14
- [14] 高俊合, 于海学, 赵维炳. 土与混凝土接触面特性的大型单剪试验研究及数值模拟[J]. 土木工程学报, 2000(4): 42
GAO Junhe, YU Haixue, ZHAO Weibing. Characteristics study of interface between soil and concrete by using large size single shear apparatus and numerical analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2000(4): 42. DOI:10.15951/j.tmgxb.2000.04.009
- [15] LIU J, BAI Y, SONG Z, et al. Evaluation of strength properties of sand modified with organic polymers[J]. Polymers, 2018, 10(3): 287
- [16] LIU J, WANG Y, LU Y, et al. Effect of polyvinyl acetate stabilization on the swelling-shrinkage properties of expansive soil[J]. International Journal of Polymer Science, 2017
- [17] MASOUMI E, ABTAHI F S M, ABDI N F. Problematic soft soil improvement with both polypropylene fiber and polyvinyl acetate resin[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013, 31(1): 143
- [18] BU F, LIU J, BAI Y, et al. Effects of the preparation conditions and reinforcement mechanism of polyvinyl acetate soil stabilizer[J]. Polymers, 2019, 11(3): 506
- [19] 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
CHEN Junhua, ZHANG Jiansheng, 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. DOI:10.15961/j.jsuese.2015.04.004.
- [20] 卢廷浩, 王伟, 王晓妮. 土与结构接触界面改进直剪试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006(1): 82
LU Tinghao, WANG Wei, WANG Xiaoni. Experimental study on soil-structure contact surface behavior by improved direct shear tests[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2006(1): 82

(编辑 刘 彤)