

DOI: 10.11779/CJGE2025S10042

高聚物注浆混凝土-粉土界面黏结试验研究

郭成超^{1,2,5}, 杨晓东^{2,3}, 刁岳亮⁶, 姚红志⁴, 白东锋⁴, 王复明^{1,2,3,5}

(1. 中山大学土木工程学院, 广东 广州 510275; 2. 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室(中山大学), 广东 广州 510275;

3. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 4. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068;

5. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 6. 合肥交投合桐高速公路有限公司, 安徽 合肥 231200)

摘要: 地下连续墙和周边土体的界面容易发生病害, 而高聚物注浆是有效修复加固界面手段, 为了研究高聚物注浆后的混凝土和粉土界面黏结性能, 采用正交试验设计方法, 使用团队自主设计制造的恒压注浆系统和自主研制的高聚物对混凝土-土界面进行渗透注浆, 通过对注浆后的试件进行直剪试验, 探究不同因素对于界面抗剪强度和界面强度参数等指标的影响规律。采用数字图像相关方法(DIC)分析直剪试验过程中界面剪切破坏演化过程。

关键词: 混凝土; 粉土; 界面注浆; 高聚物; 数字图像技术

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)S1-0233-06

作者简介: 郭成超(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事工程基础设施安全防护理论与技术研究等方面的工作。E-mail: guochch25@mail.sysu.edu.cn。

Orthogonal tests on bond of concrete-silt interface with high polymer grouting

GUO Chengchao^{1,2,5}, YANG Xiaodong^{2,3}, DIAO Yueliang⁶, YAO Hongzhi⁴, BAI Dongfeng⁴, WANG Fuming^{1,2,3,5}

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. State Key Laboratory for Tunnel Engineering,

Guangzhou 510275, China; 3. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

4. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710068, China; 5. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou

University, Zhengzhou 450001, China; 6. Hefei Communications Investment Hetong Expressway Co., Ltd., Hefei 231200, China)

Abstract: The interface between the diaphragm wall and the surrounding soil is prone to diseases, and high polymer grouting is an effective means for repairing and reinforcing the interface. In order to study the bond properties of the concrete and silt interface after high polymer grouting, the design methods of orthogonal tests are employed, and a constant-pressure grouting system designed and manufactured by the author's team independently and a high polymer developed independently are used for infiltration grouting at the concrete-soil interface. Through the straight shear tests on the specimens after grouting, the influences of different factors on the interfacial shear strength and strength parameters are investigated. The digital image correlation (DIC) is used to analyze the evolution of interfacial shear damage during the straight shear test.

Key words: concrete; silt; interfacial grouting; high polymer; digital imaging technology

0 引言

岩土工程领域中异质材料接触界面的力学性能优化始终是关键技术难题^[1-3]。近年来, 随着新型注浆体系创新发展, 学术界对界面加固技术的研究已从传统注浆材料性能评价转向复合界面增强机理探索, 而其中混凝土与土体接触界面的力学行为优化是岩土工程领域的重要研究方向^[4-6]。随着新型注浆材料的研发与应用技术进步, 采用注浆加固改善界面力学性能的创新方法逐渐成为学界关注焦点。但是现有研究多集中于传统注浆材料对界面力学参数的影响规律分析, 而针对渗透注浆工艺在混凝土-土复合界面加固中的机理研究尚存不足^[7-10]。本研究聚焦于渗透型高聚物

注浆材料在界面黏结强度提升中的作用机理, 系统探讨其加固效应, 重点阐述实验材料与方法, 为后续研究提供技术基础。

针对实际工程中复杂注浆环境模拟需求, 本研究采用自主研发的恒压注浆系统与新型高聚物注浆材料, 构建了多因素耦合作用下的界面加固试验平台。通过正交试验设计, 结合直剪试验系统定量表征界面黏结强度对注浆压力、材料配比及环境条件的参数敏感性, 引入数字图像相关技术(DIC)实现界面剪切

基金项目: 中国交通建设股份有限公司攻坚项目(2024-ZJKJ-01)

收稿日期: 2025-04-06

*通信作者(E-mail: yangxiaodong8373@163.com)

破坏全过程的应变场演化可视化分析。

1 混凝土-粉土界面剪切试验

1.1 试验材料性能

本试验用土采用试验现场，根据试验用土的粒径分析结果，绘制出本次试验用土的颗粒级配曲线图。由图 1 可知，粒径在 0.002~0.075 mm 范围内的颗粒质量为总质量的 81%，依据《公路土工试验规程》，本次试验用土为粉土。

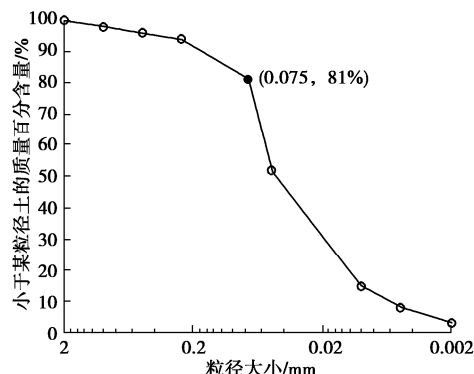


图 1 试验用土颗粒级配曲线

Fig. 1 Soil particle size distribution curve for testing

本文将界面粗糙度分为四个不同的等级，图 2 为界面粗糙度的设置。

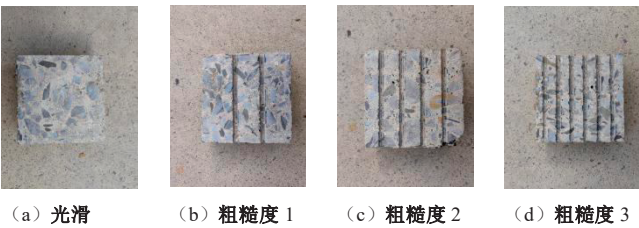


图 2 界面粗糙度切槽处理方式

Fig. 2 Interface roughness grooving treatment method

如图 3，本次试验所用注浆材料为自主研发的一种可与水反应的渗透型高聚物，通过组分 A 和组分 B 按照质量比 1：1 均匀混合制成，该高聚物注浆材料可有效填充土体中的颗粒孔隙并改善土体的力学性能^[11-13]。



图 3 渗透型高聚物

Fig. 3 Permeable polymer

图 4 为高聚物注浆材料与不同含水率试验用土等质量比混合反应后的产物。从图 4 中可以看出，高聚物和土中水反应后产生少量气体，反应后试样体积微膨胀，并且随着含水率的增大，体积膨胀率增大，固化土内部气孔增加，胶结物质的颜色由深变白，同时反应后试样黏弹性变大，可压缩性增加^[14-15]。



图 4 渗透性高聚物和不同含水率土等质量混合后产物

Fig. 4 Products obtained by mixing permeable polymers and soils with different moisture contents

1.2 注浆设备

如图 5 为恒压注浆设备示意图，注浆设备采用自主设计的恒压智能双液注浆装置，该设备可以实时控制储料桶内部压力来实现恒定压力注浆。室内界面注浆试验的模具为立方体模具，该模具内部净尺寸为长×宽×高=100 mm×100 mm×100 mm。

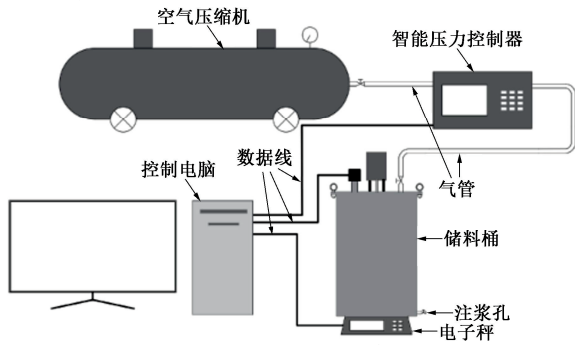


图 5 恒压注浆设备

Fig. 5 Constant pressure grouting equipment

1.3 直剪试验与数字图像设备

直剪试验采用的直剪设备是 TAW-2000 微机控制电液伺服三轴试验机，图 6 为本次 DIC 试验采用的数字散斑设备，主要由硬件部分和软件部分组成，硬件部分由 SQT D-4KB 精密测量 4K 相机、镜头、支架和配套设备组成，软件部分采用的是 Ncorr 二维数字图像校正软件。

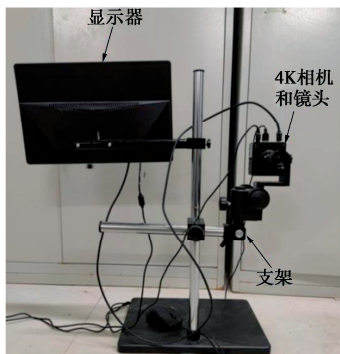


图 6 数字图像设备

Fig. 6 Digital imaging equipment

2 混凝土-粉土界面抗剪强度与参数

2.1 界面抗剪强度

渗透型高聚物在注浆压力的作用下，可以有效填充土颗粒孔隙并渗入混凝土-土界面中，通过与土中水的化学反应将土颗粒胶结在一起，并在界面形成化学胶着力，故在进行界面剪切试验中有明显的峰值抗剪

强度和稳定的残余抗剪强度。

图 7 所示多因素协同作用下的界面峰值抗剪强度变化特征表明：在恒定的法向应力条件下，峰值抗剪强度随含水率变化呈现先增大后减小特征。这种非线性响应的力学机制在于：水反应型高聚物注浆材料在最优含水率区间发生充分的反应，形成黏结结构，显著提升了界面化学黏结效应。干密度的影响规律呈现负相关性，干密度增大导致孔隙连通性减弱，严重阻碍了浆液在土骨架中的渗透扩散，导致界面有效黏结面积减少，同时限制了水化产物的生成量。界面粗糙度（JRC）通过切槽工艺调控时，抗剪强度随 JRC 值增大呈现准线性增长趋势。粗糙界面不仅通过机械黏合作用增加表观黏结强度。注浆压力与抗剪强度呈正相关关系，促进浆液在孔隙中的充填。这是由于混凝土内部抗剪强度要大于固化土内部强度和界面的黏结强度，并且在峰值抗剪强度阶段，界面破坏面多在固化土内部和界面处产生，因此混凝土强度对于界面峰值抗剪强度的影响程度最小。

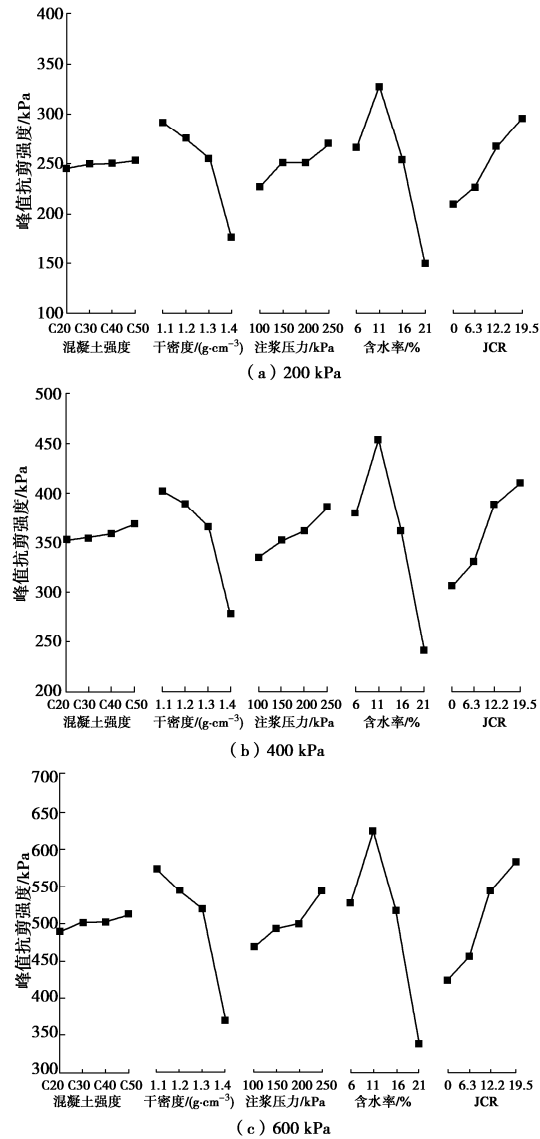


图 7 各因素对界面峰值抗剪强度的影响趋势

Fig. 7 Trends in the influence of various factors on the peak shear strength of interfaces

界面残余抗剪强度演化规律如图 8 所示。在残余抗剪强度阶段，界面黏结作用已完全失效，试验结果表明：当含水率增至 11%时，固化土体抗压强度达到最大值，此时残余抗剪强度最大；而含水率超过临界值后，土体软化效应导致摩擦系数显著降低。值得注意的是，界面形貌参数（JRC）与残余强度呈显著正相关，粗糙度提升通过增加接触面黏合深度和摩擦接触点密度双重途径增强摩擦效应。土体密实度与注浆压力对残余抗剪强度的调控呈现相反规律：密实化过程导致孔隙连通率下降，限制浆液渗透路径，致使固化土体形成不连续骨架结构。混凝土强度对于界面残余抗剪强度的影响程度最小。

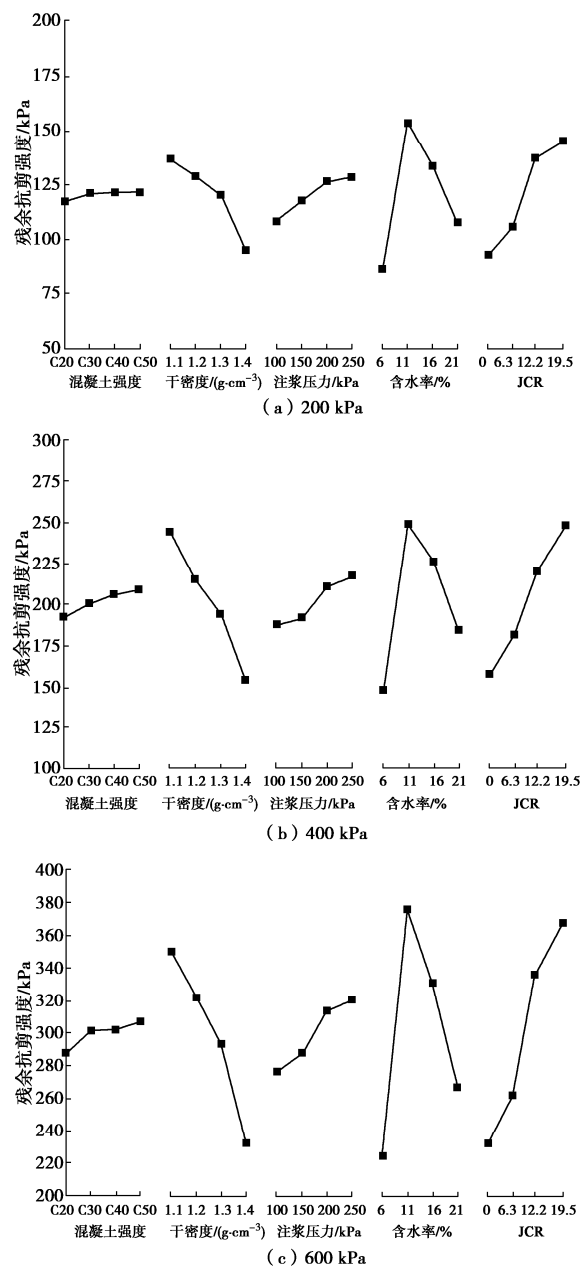


图 8 各因素对界面峰值残余强度的影响趋势

Fig. 8 Trends in the influence of various factors on the peak residual strength of interfaces

2.2 界面抗剪强度参数

由图 9 可知,随着含水率的增加峰值抗剪强度阶段界面内摩擦角和黏聚力均也呈现先增加后减小的趋势,并且在较高含水率条件下,界面内摩擦角和黏聚力下降速度加快,这主要由于所使用的注浆材料是水反应型,含水率影响界面化学胶着力和固化土的强度,而化学胶着力直接影响着界面黏聚力的大小,固化土强度也影响着界面的静摩擦力;另外,干密度和注浆压力影响着浆液在土颗粒和界面上的渗透效果,干密度越大渗透效果越差,固化土强度和界面化学胶着力越小,界面的内摩擦角和黏聚力都随之减小,而注浆压力越大渗透效果越好,界面的化学胶着力和固化土的强度越高,界面的内摩擦角和黏聚力都随之增大;界面粗糙度的增加一方面增加了固化土和混凝土表面的黏结面积,进而增加了界面的黏聚力,另一方面使界面的摩擦力增加,界面内摩擦角随之增加;由于界面剪切破坏面多发生于界面和固化土内部,所以混凝土强度依旧对界面内摩擦角和黏聚力的影响程度最小。

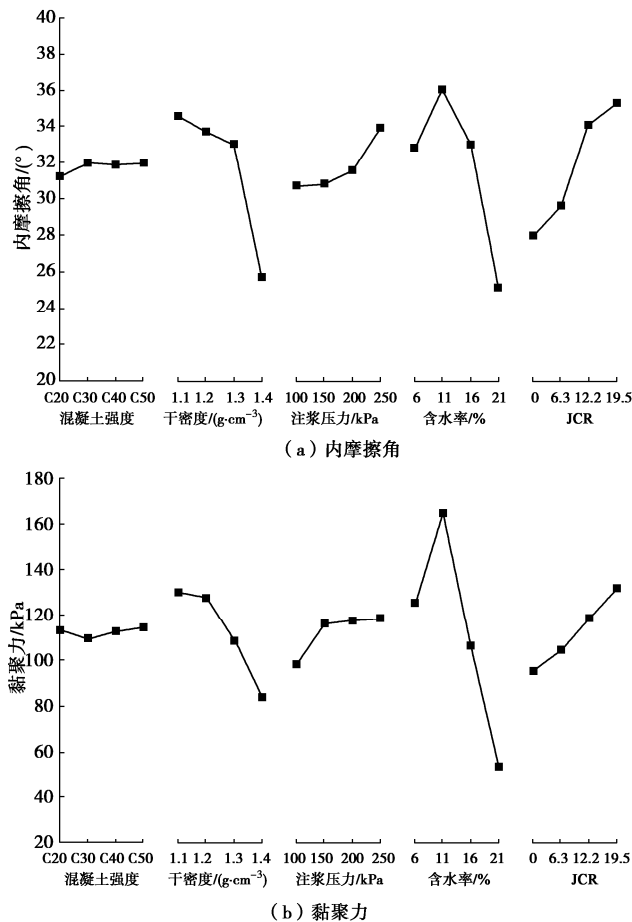


图 9 峰值抗剪强度阶段参数

Fig. 9 Peak shear strength stage parameters

从图 10 中可以看出,随着含水率的升高残余抗剪强度阶段界面内摩擦角和黏聚力均也呈现先增大后减小的趋势,峰值也出现在含水率为 11%时,这是由于

残余抗剪强度主要由滑动摩擦力组成,界面黏聚力是土颗粒间胶结和水膜联结等作用的宏观体现,并且所采用的注浆材料性能受含水率影响较大,含水率 11%下的固化土强度最高;界面粗糙度和界面内摩擦角为正相关关系,同时界面粗糙度的增加也增大了固化土和混凝土的接触面积,进而导致界面黏聚力的增加;干密度和注浆压力影响着浆液的渗透效果进而影响固化土强度和界面的黏结效果,所以在残余抗剪强度阶段,随着干密度的增加界面内摩擦角和黏聚力随之减小,而界面内摩擦角和黏聚力基本随注浆压力的增加而增大。

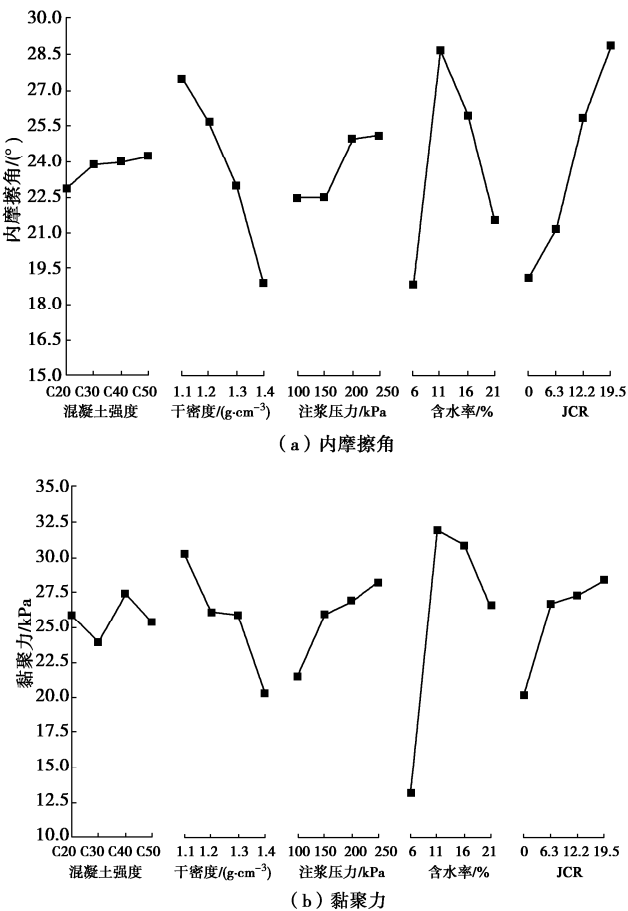
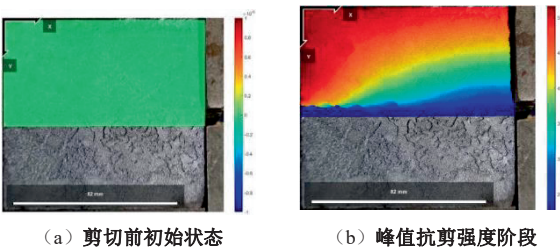


图 10 残余抗剪强度阶段参数

Fig. 10 Residual shear strength stage parameters

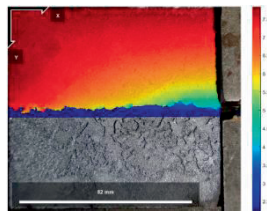
3 三阶段黏结滑移模型的建立与分析

选取试件在直剪试验过程中的剪切前初始状态、峰值抗剪强度阶段和残余抗剪强度阶段进行分析,其中图 11 是 400 kPa 法向应力下水平位移云图。



(a) 剪切前初始状态

(b) 峰值抗剪强度阶段



(c) 残余抗剪强度状态

图 11 法向应力 400 kPa 下的水平位移云图

Fig. 11 Horizontal displacement cloud map under normal stress of 400 kPa

图 12 所示试验现象表明, 在峰值剪切强度状态下, 固化土体沿加载轴线方向呈现出显著的非均匀变形特征。具体表现为: 邻近加载区的土体单元较远端产生更显著的剪切滑移量, 该区域已形成局部塑性剪切区, 而远离荷载作用端的界面仍保持有效黏结状态。试验结果表明, 剪切荷载的施加过程实质上是界面破坏区的渐进扩展过程——荷载作用端土体在剪应力作用下发生压缩变形并产生初始位移, 该位移通过土体骨架的应力传递作用逐步向远端发展。在峰值强度阶段, 界面体系尚未形成连续贯通的剪切破坏带, 仅局部区域发生材料屈服。随着荷载持续增加, 塑性区范围呈非线性扩展趋势, 当进入残余强度阶段时, 界面体系完成整体性破坏演化, 此时固化土体内部产生全域性剪切位移, 界面黏结性能完全丧失, 剪切滑移带贯通整个试样。

图 13 试件在 3 种法向应力下剪切前初始状态、峰值抗剪强度阶段和残余抗剪强度阶段的竖直位移云图, 从图 13 中可以看出, 加载端近端的固化土在剪切荷载作用下向上隆起, 在加载端远端, 固化土被压缩, 固化土中间位置存在竖向位移为零的区域。并且从图中可以看出, 在峰值抗剪强度阶段, 固化土的隆起区域界面出现较为明显的剪切破坏面, 而在固化土的压缩区域界面仍处于黏结状态。

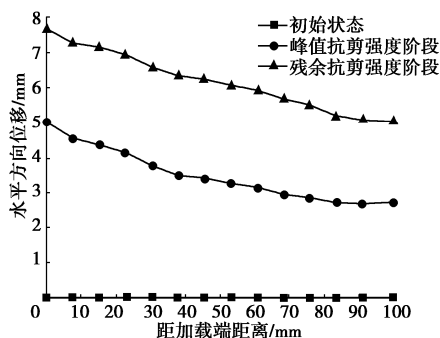
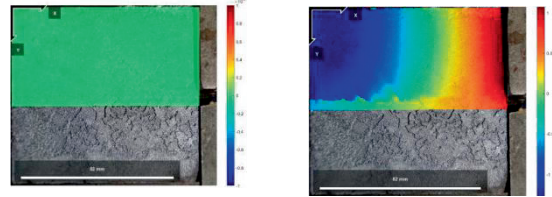


图 12 水平方向上的位移

Fig. 12 Horizontal displacement

对图 13 中 3 种状态下的竖直位移数据进行提取, 可以得出剪切面上方 0.5 cm 水平位置处固化土竖直位移图, 从图 14 可知, 随着距加载端距离的增大, 固化土的竖向位移逐渐由隆起变成向下压缩, 残余抗剪强度阶段竖向位移为零时所对应的距加载端的距离要大于峰值抗剪强度阶段; 并且随着法向应力的增大, 剪

切过程中竖向位移为零时所对应的距加载端的距离均随之增加, 同时固化土的最大竖向隆起位移和最大竖向压缩位移均随之减小。



(a) 剪切前初始状态

(b) 峰值抗剪强度阶段



(c) 残余抗剪强度状态

图 13 法向应力 400 kPa 下的竖直位移云图

Fig. 13 Vertical displacement cloud map under normal stress of

400 kPa

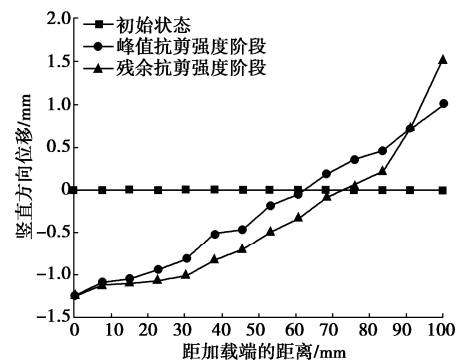


图 14 竖直方向上的位移

Fig. 14 Vertical displacement

4 结 论

使用团队自主研发的渗透性高聚物注浆材料和自主设计制造的恒压注浆设备进行混凝土-土界面的注浆加固试验, 设计正交试验方法, 通过直剪设备, 考虑了混凝土强度、干密度、注浆压力、界面粗糙度、含水率和法向应力对界面抗剪强度的影响, 并结合 DIC 技术研究了界面剪切破坏全过程, 主要得出以下两点结论。

(1) 界面峰值抗剪强度主要由渗透型高聚物化学反应产生的黏结应力和局部静摩擦力组成, 残余抗剪强度主要由法向应力作用下的滑动摩擦力组成, 可以得到含水率、干密度、界面粗糙度、注浆压力、混凝土强度对界面抗剪强度与参数的影响。

(2) 对试件直剪试验过程中采用 DIC 技术研究界面剪切破坏全过程可知, 在剪切过程中, 距离加载端越近水平位移和水平压应变越大, 在加载端近端产生竖向隆起位移和竖向拉应变, 远端产生竖向压缩位

移和竖向压应变;随着法向应力的增大,加载端最远端水平位移和水平压应变减小,加载端近端的最大竖向隆起位移和最大竖向拉应变以及加载端最远端的最大竖向压缩和最大竖向压应变也随之减小。

参考文献:

- [1] 齐添,赵川,刘飞禹,等.硫酸盐渍土-混凝土界面循环剪切特性研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(S2):4280-4288. (QI Tian, ZHAO Chuan, LIU Feiyu, et al. Study on cyclic shearing characteristics of sulfated soil-concrete interface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S2): 4280-4288. (in Chinese))
- [2] 汪优,李奕金,谭伟,等.考虑结构表层粗糙度的混凝土桩-黏土界面剪切特性试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(10):2502-2509. (WANG You, LI Yijin, TAN Wei, et al. Experimental study on shear properties of concrete pile-clay interface considering surface roughness of structure[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(10): 2502-2509. (in Chinese))
- [3] SUN T C, ZHANG W B, LIU J, et al. Effect of roughness on the shear strength of frozen soil - concrete contact surfaces in an open environment[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2025, 39(2): 1-12.
- [4] 杨逸.开敞系统中冻结粉土-混凝土界面强度试验研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2024. (YANG Yi. Experimental Study on the Strength of Frozen Silt-Concrete Interfaces in Open Systems[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang University of Railway Engineering, 2024. (in Chinese))
- [5] 朱竹亮,林斌.膨胀土-混凝土界面剪切特性研究及界面系数修正[J].科学技术与工程,2024,24(8):3348-3355. (ZHU Zhuliang, LIN Bin. Shear characteristics of expansive soil-concrete interface and correction of interface coefficient[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(8): 3348-3355. (in Chinese))
- [6] 杨俊超,夏元友,崔飞龙,等.循环荷载作用下粉质黏土-混凝土界面强度预测研究[J].岩土工程学报,2024,46(增刊2):194-199. (YANG Junchao, XIA Yuanyou, CUI Feilong. Study on the prediction of strength at the interface between silty clay and concrete under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(S2): 194-199. (in Chinese))
- [7] 张磊,问鹏辉,王朝辉,等.道路非开挖注浆加固补强材料研究进展[J].材料导报,2017,31(21):98-105. (ZHANG Lei, WEN Penghui, WANG Chaohui, et al. Advances in non-excavation grouting reinforcement materials in the road engineering[J]. Materials Review, 2017, 31(21): 98-105. (in Chinese))
- [8] 贾赫扬,李晓龙,曹东东,等.温度对自膨胀高聚物浆液在裂隙中扩散行为影响试验研究[J].岩土工程学报,2024,46(4):794-802. (JIA Heyang, LI Xiaolong, CAO Dongdong, et al. Experimental study on influences of temperature on diffusion behaviors of self-expanding polymer slurry in fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(4): 794-802. (in Chinese))
- [9] YANG W H, ZENG Y F, BAO H, et al. Development of cement-based grouting material containing high polymer and high-water resistance[J]. Construction and Building Materials, 2025, 470: 140660.
- [10] YANG K J, FANG H Y, ZHANG X J, et al. Mechanical evaluation analysis of pipe-liner composite structure before and after polymer grouting rehabilitation[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 158: 108050.
- [11] WANG L N, YANG X D, DIAO Y L, et al. Study on bonding characteristics of polymer grouted concrete-soil interface[J]. Polymers, 2024, 16(15): 2207.
- [12] 赵威帆.渗透型高聚物加固黄土的力学特性研究[D].郑州:郑州大学,2022. ZHAO Weifan. Study on Mechanical Properties of Loess Reinforced by Permeable Polymer[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022. (in Chinese)
- [13] 刘华,王梦南,冯旭晨,等.酸碱溶液污染对黄土-混凝土界面剪切特性影响试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2023,55(1):111-117. (LIU Hua, WANG Mengnan, FENG Xuchen, et al. Experimental study on influence of shear characterizes at loess-concrete interface under contaminate by acid and alkali solution[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2023, 55(1): 111-117. (in Chinese))
- [14] LI W M, XIAO J Z, WU Z M, et al. Evaluations for bond strength and failure modes of reinforcements in early-age concrete with confined pressures[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 103: 112137.
- [15] LIAO J Z, LI X Q, CHEN J F, et al. Dynamic bond-slip model for FRP-concrete interface under in-plane shear loads[J]. Construction and Building Materials, 2025, 469: 140430.

(编校:黄贤沙)