

文章编号:1007-9629(2021)01-0115-06

非水反应高聚物与土工材料的界面剪切特性

王钰轲^{1,2,3}, 万永帅^{1,2,3}, 刘琪^{1,2,3}, 郭成超⁴, 石明生^{1,2,3}

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 郑州大学 重大基础设施检测修复技术国家地方联合工程实验室, 河南 郑州 450001;

3. 郑州大学 水利与交通基础设施安全防护河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001;

4. 中山大学 土木工程学院, 广东 广州 510275)

摘要: 基于单调直剪试验,研究了竖向应力、剪切速率对非水反应类高聚物-土工布界面及高聚物-砂土界面的剪切应力、剪切位移、抗剪强度和剪切模量等剪切特性的影响. 结果表明:在给定竖向应力和剪切速率下,随着剪切位移的增加,高聚物-土工布界面、高聚物-砂土界面均表现出剪切软化的特性;竖向应力对高聚物-土工布界面抗剪强度及剪切模量的影响显著,在剪切速率 $v=2$ mm/min 下,随着竖向应力由 50 kPa 增加至 150 kPa,高聚物-土工布界面的抗剪强度由 15 kPa 增至 46 kPa;在给定竖向应力下,剪切速率 $v=1\sim 3$ mm/min 时,剪切速率对高聚物-土工布界面的抗剪强度以及高聚物-砂土界面的抗剪强度和剪切模量的影响均较小.

关键词: 直剪试验; 高聚物; 界面特性; 抗剪强度; 剪切模量

中图分类号: TU43

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.016

Interfacial Shear Properties of Non-water Reacted Polymer and Geomaterials

WANG Yuke^{1,2,3}, WAN Yongshuai^{1,2,3}, LIU Qi^{1,2,3}, GUO Chengchao⁴, SHI Mingsheng^{1,2,3}

(1. College of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. National Local Joint Engineering Laboratory of Major Infrastructure Testing and Rehabilitation Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Collaborative Innovation Center of Water Conservancy and

Transportation Infrastructure Safety Protection, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

4. College of Civil Engineering, SunYat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on monotonic direct shear tests, the effects of normal stress and shear rate on the interface properties such as shear stress, shear displacement, shear strength and shear modulus of interface between non-water reacted polymer-geotextile and polymer-sand were studied. The test results show that, under the same normal stress and shear rate, with the increase of shear displacement, the polymer-geotextile interface and the polymer-sand interface show shear softening characteristics. The normal stress has a significant effect on the shear strength and shear modulus of the polymer-geotextile interface. The normal stress increases from 50 kPa to 150 kPa and the shear strength of the polymer-geotextile interface increases from 15 kPa to 46 kPa at the shear rate of 2 mm/min. Under the same normal stress, with the shear rate increases from 1 mm/min to 3 mm/min, the shear strength and the shear modulus of the fluctuation of two kinds of shear interface only is in a small range. The shear rate has little effect on the friction angle of the

收稿日期:2019-09-22; 修订日期:2019-12-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1510803-2);河南省高等学校重点科研项目(20A560021);河南省重大科技专项项目(181100310400);国家自然科学基金资助项目(51679219);中国博士后面上项目(2019M610461)

第一作者:王钰轲(1989—),男,河南新乡人,郑州大学讲师,硕士生导师,博士. E-mail:ykewang@163.com

通讯作者:郭成超(1973—),男,河南南阳人,中山大学副教授,博士生导师,博士. E-mail:guochch25@mail.sysu.edu.cn

polymer-geotextile interface under monotonic direct shear condition, which indicates that the shear rate has a little influence on the shear strength and shear modulus of the polymer-geotextile interface and the polymer-sand interface.

Key words: direct shear test; polymer; interface property; shear strength; shear modulus

具有自膨胀特性的双组分非水反应类高聚物材料在解决特定复杂的工程灾害问题中有突出的效果,是目前工程领域重点关注的研究方向,已在高铁无砟轨道、地下管道、道路、厂房等结构物抬升等工程,以及堤坝及地下工程防渗抢险中得到了广泛应用^[1-3].由于其具有安全环保、反应迅速且可调节、膨胀率高、抗渗防水、耐久性好等一系列特点且综合性能优良,在隧道、公路、桥梁、铁路、大坝等基础设施的加固和维修方面展现出广阔的发展前景^[4-8].

随着化学材料在各类土建工程中越来越广泛的应用,对本团队所提出的高聚物注浆材料的各项物理、化学及力学特性的深入研究显得尤为重要.目前,已有很多学者就高聚物注浆材料的静态力学性能、动态力学性能、耐久性、膨胀特性、水稳性、温度稳定性、界电特性、隔振性能等方面展开了相关研究^[9-16].郑新国^[7]模拟了无砟轨道结构抬升时的重力反压作用,研究了反压成型高聚物注浆材料的膨胀特性及其固结体的力学性能.王娟等^[8]通过单轴压缩试验研究了轴压荷载作用下高聚物碎石混合料的力学响应,针对不同高聚物密度和碎石粒径对桩体强度的影响规律进行了探讨.边学成等^[13]通过大型模型试验研究了高速铁路路基沉降高聚物注浆修复后的动态力学性能.石明生等^[14]研究了高聚物注浆材料的吸水特性及温度变化对材料体积的影响,同时也探究了高聚物吸水后的胀缩特性.孟美丽等^[15]采用网络分析仪技术,对不同密度的试件在不同频率下的介电性能进行了试验研究和影响因素分析,研究了其介电特性和力学特性之间的关系.陈洋洋等^[16]对某干涸河床一侧的土坝坝顶进行了高聚物的隔振性能试验,初步给出了高聚物注浆屏障隔振技术路径可行性的试验依据,为进一步的理论研究和分析工作奠定基础.

关于高聚物浆液成型后与其他土工材料接触界面的力学特性研究尚未见报道.而关于土工材料的界面剪切特性,已有大量的研究.如:Liu等^[17]和Wang等^[18]通过一系列直剪以及循环剪切试验来探究土工格栅与土的界面特性,考虑了土颗粒粒径、竖向应力、剪切速率和剪切位移峰值等因素对筋-土界面力学性能的影响;刘方成等^[19]通过单

调直剪试验研究了接触面粗糙度、竖向应力以及土的物理状态对粉质黏土-混凝土界面力学性能的影响;王永洪等^[20]通过直剪试验研究了剪切速率和竖向应力对黏性土-混凝土界面抗剪强度的影响;石熊等^[21]采用大型直剪仪进行红黏土与混凝土接触面的单向直剪试验,研究了不同法向应力与不同混凝土表面、不同粗糙度条件下红黏土-混凝土界面的力学特性;徐超等^[22]通过直剪试验研究了剪切速率、竖向应力和材料特性对土工合成材料-砂土界面抗剪强度的影响;黄文彬等^[23]通过直剪试验研究了剪切速率对土工合成材料-砂土界面特性的影响.

本文基于单调直剪试验,对高聚物-土工布界面与高聚物-砂土界面的剪切特性进行研究,主要考虑剪切速率 v 、竖向应力 p 对界面剪切应力、剪切位移、抗剪强度和剪切模量的影响,旨在为非水反应类高聚物材料在实际工程中的应用提供初步的数据参考和理论支撑.

1 试验

1.1 原材料

高聚物为非水反应类双组分发泡体,属于聚氨酯类材料.砂土试样为单一粒径(1~2 mm)的石英砂,其干密度为 2.65 g/cm^3 .土工布的单位面积质量为 300 g/m^2 ,横向抗拉强度为 12 kN/m ,纵向抗拉强度为 10 kN/m ,横向极限断裂延伸率为 64% ,纵向极限断裂延伸率为 70% .

1.2 试件的制备

注浆模具主要由上、下中空的立方体铁壳、铁盖板、长通丝以及盖板上的注浆头等组成.试样制备过程为:用长通丝将上、下底面的钢板通过螺丝固定,将2个钢板压在立方体的上、下2个面上,中空的立方体与上、下钢板之间用双层石棉纸密封并涂上润滑油,然后通过注浆头开始注浆,注浆量根据方案设计的高聚物密度进行确定;25℃下约1 h后拆模,使高聚物浆液完全反应,并形成足够的强度,从而确保脱模成功;将试样在车床上进行加工,去掉边角以及注浆头位置处不规整的固结部分,即得到试件.试件尺寸有2种,分别为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 和 $400\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 150\text{ mm}$,其密度均

为 0.2 g/cm^3 .

1.3 试验方法

采用改进的大型直剪仪,包括上、下 2 个剪切盒,其盒内净尺寸分别为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 、 $400\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 150\text{ mm}$. 为了实现剪切过程中剪切面积的恒定,下剪切盒沿剪切方向上的长度大于上剪切盒的长度,实行位移控制的直剪试验. 剪切试验过程中,上剪切盒固定不动,下剪切盒在剪切方向上移动,并由高精度电机带动一系列齿轮来加以控制,其水平方向的最大剪切位移可达 100 mm ,可控制的剪切速率范围为 $0.000\ 03\sim 15\text{ mm/min}$. 本试验设定的剪切位移幅值为 30 mm ,当剪切位移达到 30 mm 时结束试验. 单调直剪试验方案见表 1.

表 1 单调直剪试验方案
Table 1 Scheme of monotonic direct shear tests

Test number	Interface type	p/kPa	$v/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$
A01	Polymer-geotextile	50	1
A02	Polymer-geotextile	50	2
A03	Polymer-geotextile	50	3
A04	Polymer-geotextile	100	1
A05	Polymer-geotextile	100	2
A06	Polymer-geotextile	100	3
A07	Polymer-geotextile	150	1
A08	Polymer-geotextile	150	2
A09	Polymer-geotextile	150	3
B01	Polymer-sand	100	1
B02	Polymer-sand	100	2
B03	Polymer-sand	100	3

2 结果及分析

2.1 剪切速率对剪切应力-剪切位移曲线的影响

竖向应力 p 分别为 50 、 100 、 150 kPa 时,高聚物-土工布界面的剪切应力-剪切位移(τ - γ)曲线见图 1. 由图 1 可见:不同剪切速率下高聚物-土工布界面的剪切应力-剪切位移曲线均呈现出相似的规律,即剪切应力均随着剪切位移的增大而增大,到达峰值以后剪切应力轻微减小后达到稳定状态,即表现出剪切软化的特性;不同剪切速率下 τ - γ 曲线走势比较接近,但其剪切应力峰值及其对应的位移略有差别;剪切应力峰值随着剪切速率的增大而减小,但下降幅度不大,说明剪切速率对高聚物-土工布界面的剪切特性具有一定的影响.

由图 1 还可见:当竖向应力 $p=150\text{ kPa}$,剪切速率分别为 2 、 3 mm/min 时,与其他加载条件下的情况不同,当剪切应力随着剪切位移达到峰值后开始发生明显的持续减小,这可能是由于土工布结构发生变化,因而随着剪切位移的增大,剪切应力发生持续减小的现象.

竖向应力 $p=100\text{ kPa}$ 时,高聚物-砂土界面的剪切应力-剪切位移曲线见图 2. 由图 2 可见:与高聚物-土工布界面的剪切应力-剪切位移曲线相似,不同剪切速率下高聚物-砂土界面的剪切应力也是随剪切位移增大而增大,到达峰值以后剪应力减小,减小到一定程度后又趋于平缓,亦呈现出剪切软化的特性;各剪切速率下曲线的剪切应力峰值及其对应的剪切位移值差别不大.

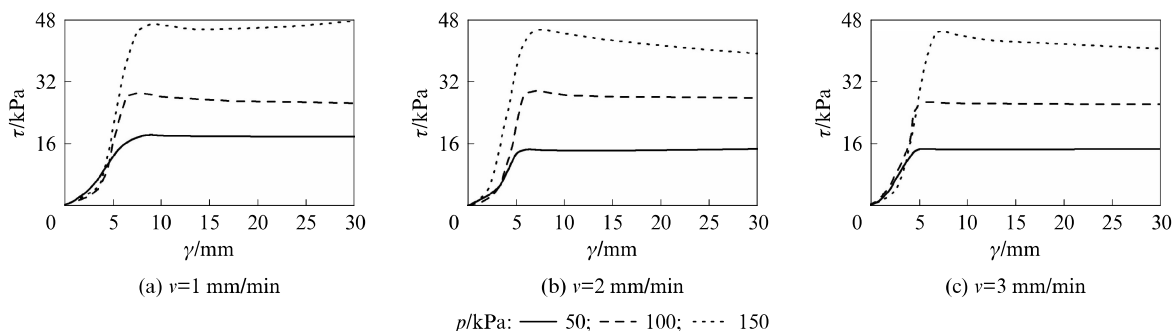


图 1 高聚物-土工布界面的剪切应力-剪切位移曲线
Fig. 1 τ - γ curves of polymer-geotextile interface

2.2 竖向应力对剪切应力-剪切位移曲线的影响

由图 1(b)可见:剪切速率 $v=2\text{ mm/min}$ 时,不同竖向应力下高聚物-土工布界面的剪切应力-剪切位移曲线均呈现出相似的规律,即剪切应力均随着剪切位移的增大而增大,到达峰值以后剪切应力减

小,减小到一定值后又逐渐趋于平缓,表现出剪切软化的特性;不同竖向应力下曲线的剪切应力峰值及其对应的剪切位移值差别十分明显.

2.3 剪切速率对抗剪强度的影响

界面的抗剪强度 σ_s 为界面剪切应力-剪切位移

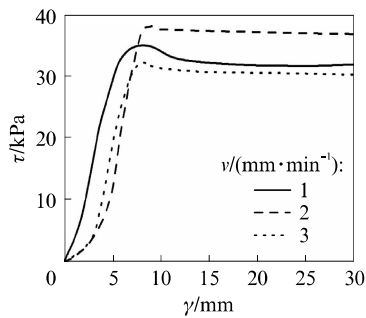


图2 高聚物-砂土界面的剪切应力-剪切位移曲线
Fig. 2 τ - γ curves of polymer-sand interface ($p=100$ kPa)

曲线的剪切应力峰值. 由图1可见: 当 $p=50$ kPa, 剪切速率为2、3 mm/min时, 高聚物-土工布的界面抗剪强度值相比于剪切速率为1 mm/min时减小了约20%; 当 $p=100$ kPa时, 界面的抗剪强度在最大剪切速率下比剪切速率1、2 mm/min下减小了约10%; 当 $p=150$ kPa时, 界面的抗剪强度在剪切速率为1 mm/min时最大, 在剪切速率为3 mm/min时最小, 最小值比最大值减小了约2.5%. 由此可见: 在施加相同竖向应力的条件下, 高聚物-土工布界面的抗剪强度随着剪切速率的增大而减小, 但是减小的幅值不大; 抗剪强度减小的幅值在竖向应力等于50 kPa时最大, 并且随着竖向应力的增大而减小; 在竖向应力等于150 kPa时, 不同剪切速率下界面的抗剪强度几乎相同. 由图2可见: 当剪切速率 v 为2、3 mm/min时, 界面抗剪强度与 $v=1$ mm/min时相比, 变化范围在9%以内; 在 $v=2$ mm/min时所得抗剪强度最大.

综上, 在竖向应力给定的情况下, 剪切速率对高聚物-土工布界面和高聚物-砂土界面的抗剪强度具有一定影响, 但是影响不大.

2.4 竖向应力对抗剪强度的影响

由图1可见: 相同剪切速率下, 界面的剪切应力峰值随着竖向应力的增大而增大, 且增加幅度很大; 在剪切速率 $v=2$ mm/min下, 随着竖向应力由50 kPa增加至150 kPa, 高聚物-土工布界面的抗剪强度由15 kPa增至46 kPa. 表明竖向应力对高聚物-土工布界面的抗剪强度具有明显的影响.

2.5 剪切速率对强度参数的影响

不同剪切速率下, 高聚物-土工布界面的抗剪强度与竖向应力的拟合直线见图3. 由图3可见: 高聚物-土工布界面的抗剪强度随着竖向应力的增大呈近似线性增加, 拟合直线相关系数为0.980, 拟合度较好, 表明该界面抗剪强度与竖向应力之

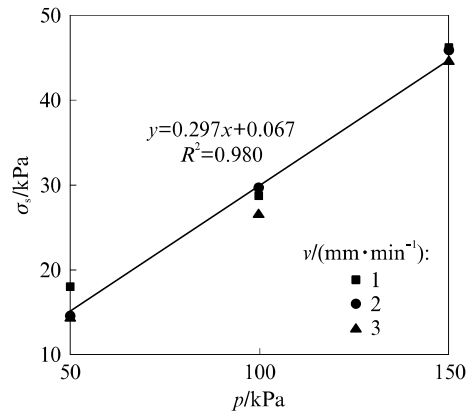


图3 高聚物-土工布界面的抗剪强度与竖向应力的拟合直线

Fig. 3 Relationship between shear strength and normal stress levels of polymer-geotextile interface

间表现出了良好的线性相关性, 遵循摩尔-库伦准则:

$$\sigma_s = p \tan \varphi' + c' \quad (1)$$

式中: φ' 为高聚物-土工布界面有效摩擦角; c' 为高聚物-土工布界面似黏聚力. 经计算可得, 该界面似黏聚力均近似为0 kPa, 摩擦角为 16.5° .

2.6 剪切速率对剪切模量的影响

高聚物-土工布界面的剪切模量 (G) 见图4. 由图4可见, 相同竖向应力作用下, 随着剪切速率的增加, 高聚物-土工布界面的剪切模量均呈逐渐增大的趋势, 但增加幅度不大. 由此可见, 剪切速率对高聚物-土工布界面的剪切模量影响较小.

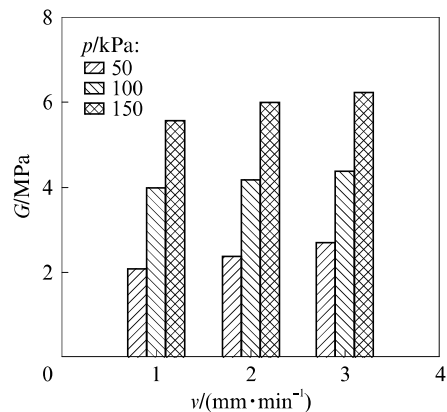


图4 高聚物-土工布界面的剪切模量

Fig. 4 Shear modulus of polymer-geotextile interface

2.7 竖向应力对剪切模量的影响

由图4还可见, 相同剪切速率下, 随着竖向应力的增加, 高聚物-土工布界面的剪切模量均呈明显增大的趋势. 这表明竖向应力对高聚物-土工布界面的剪切模量影响较大.

3 结论

(1)在给定的竖向应力和剪切速率下,随着剪切位移由 0 mm 增加到 30 mm,高聚物-土工布界面与高聚物-砂土界面均发生了剪切软化现象。

(2)竖向应力对高聚物-土工布界面的抗剪强度及剪切模量的影响显著。在剪切速率 $v=2$ mm/min 下,随着竖向应力由 50 kPa 增加到 150 kPa,高聚物-土工布界面的抗剪强度由 15 kPa 增至 46 kPa;高聚物-土工布界面的抗剪强度与竖向应力之间表现出了良好的线性相关性;不同竖向应力 p (50、100、150 kPa)下的高聚物-土工布界面剪切模量差值较大,即竖向应力对高聚物-土工布界面的剪切模量影响较大。

(3)在竖向应力 $p=100$ kPa 条件下,随着剪切速率由 1 mm/min 增加至 3 mm/min,高聚物-砂土界面的抗剪强度仅发生小范围波动;高聚物-土工布界面的抗剪强度变化亦较小,其剪切模量均呈逐渐增大的趋势,但增加幅度不大,表明剪切速率对高聚物-砂土界面的抗剪强度影响不大,对高聚物-土工布界面的剪切强度和模量影响亦较小。

参考文献:

- [1] 郭成超,王复明,钟燕辉.水泥混凝土路面脱空高聚物注浆技术研究[J].公路,2008(10):232-236.
GUO Chengchao, WANG Fuming, ZHONG Yanhui. Research on polymer grouting technology for cement concrete pavement void[J]. Highway, 2008(10):232-236. (in Chinese)
- [2] 高翔,黄卫,魏亚,等.聚氨酯高聚物注浆材料抗压强度测试与模拟[J].复合材料学报,2017,34(2):438-445.
GAO Xiang, HUANG Wei, WEI Ya, et al. Experiment and modeling for compressive strength of polyurethane grout materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(2):438-445. (in Chinese)
- [3] 石明生,于冬梅,王复明.高聚物注浆材料的弯曲性能[J].材料科学与工程学报,2010(4):514-517.
SHI Mingsheng, YU Dongmei, WANG Fuming. Bending properties of a polymer grout[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2010(4):514-517. (in Chinese)
- [4] 郭成超,王复明,徐建国.隧道高聚物快速维修技术研究[J].筑路机械与施工机械化,2008,25(12):60-62.
GUO Chengchao, WANG Fuming, XU Jianguo. Study on polymer grouting technology for tunnel quick maintenance[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(12):60-62. (in Chinese)
- [5] 张君静,肖昭升.高聚物注浆技术处治高速公路病害的经济效益分析[J].公路工程,2013(2):12-15.
ZHANG Junjing, XIAO Zhaosheng. Analysis of economic benefits about polymer grouting technique for treating highway diseases[J]. Highway Engineering, 2013(2):12-15. (in Chinese)
- [6] 王复明,王建武,石明生,等.堤坝防护高聚物注浆技术的发展[C]//大坝技术及长效性能国际研讨会.郑州:中国水利水电出版社,2011:381-385.
WANG Fuming, WANG Jianwu, SHI Mingsheng, et al. Development of polymer grouting technology for dam protection [C]//International Symposium on Modern Technologies and Long-Term Behavior of Dams. Zhengzhou: China Water & Power Press, 2011:381-385. (in Chinese)
- [7] 郑新国.反压成型高聚物注浆材料膨胀特性及其固结体力学性能研究[J].中国铁道科学,2017(1):9-15.
ZHENG Xinguo. Expansion characteristics of polymer grouting material cured under pressure and mechanical properties of its consolidated body[J]. China Railway Science, 2017(1):9-15. (in Chinese)
- [8] 王娟,方宏远,余自森,等.高聚物碎石混合料单轴受压性能试验研究[J].建筑材料学报,2019,22(2):158-164.
WANG Juan, FANG Hongyuan, YU Zisen, et al. Experimental study on uniaxial compressive properties of polymer gravel mixtures[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2):158-164. (in Chinese)
- [9] 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,2018,31(21):98-105.
ZHANG Lei, WEN Penghui, WANG Chaohui, et al. Advances in non-excavation grouting reinforcement materials in the road engineering[J]. Materials Reports, 2018, 31(21):98-105. (in Chinese)
- [10] 石明生,夏威夷,王复明,等.高聚物锚固体与粉土间黏结性能试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(4):724-730.
SHI Mingsheng, XIA Weiyi, WANG Fuming, et al. Experimental study on bond performance between polymer anchor-body and silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4):724-730.
- [11] GUO C C, CHU X X, WANG F M. The feasibility of non-water reaction polymer grouting technology application in seepage prevention for tailings reservoirs[J]. Water Science and Technology:Water Supply, 2017, 18(1):203-213.
- [12] SONG W M, WU H, YIN J, et al. Using a polymer-based sealant material to make crack repair of asphalt pavement[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2018, 46(5):2056-2066.
- [13] 边学成,程翀,王复明,等.高速铁路路基沉降高聚物注浆修复后动力性能及长期耐久性的试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(3):562-568.
BIAN Xuecheng, CHENG Chong, WANG Fuming, et al. Experimental study on dynamic performance and long-term durability of high-speed railway subgrade rehabilitated by polymer injection technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3):562-568. (in Chinese)
- [14] 石明生,罗静,张蓓.高聚物注浆材料吸水特性及温度变化对体积影响试验研究[J].中外公路,2010,30(3):289-291.
SHI Mingsheng, LUO Jing, ZHANG Bei. Experimental study on influence of water absorption characteristics and temperature

- ture change of polymer grouting materials on volume [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(3): 289-291. (in Chinese)
- [15] 孟美丽, 王复明. 高聚物注浆材料介电特性及其与工程特性关系的研究 [J]. 公路, 2015, 60(7): 251-254.
MENG Meili, WANG Fuming. Study on the dielectric properties of polymer grouting materials and its relationship with engineering properties [J]. Highway, 2015, 60(7): 251-254. (in Chinese)
- [16] 陈洋洋, 谭平, 陈建秋, 等. 高聚物注浆屏障隔振性能的试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(6): 194-198.
CHEN Yangyang, TAN Ping, CHEN Jianqiu, et al. Experimental study on vibration isolation performance of polyurethane fast injecting barrier [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(6): 194-198. (in Chinese)
- [17] LIU F Y, WANG P, GENG X, et al. Cyclic and post-cyclic behaviour from sand-geogrid interface large-scale direct shear tests [J]. Geosynthetics International, 2015, 23(2): 129-139.
- [18] WANG J, LIU F Y, WANG P, et al. Particle size effects on coarse soil-geogrid interface response in cyclic and post-cyclic direct shear tests [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(6): 854-861.
- [19] 刘方成, 尚守平, 王海东. 粉质黏土-混凝土接触面特性单剪试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1720-1728.
LIU Fangcheng, SHANG Shouping, WANG Haidong. Study of shear properties of silty clay-concrete interface by simple shear tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1720-1728. (in Chinese)
- [20] 王永洪, 张明义, 白晓宇, 等. 剪切速率对黏性土混凝土界面抗剪强度影响的试验研究 [J]. 土木与环境工程学报, 2019, 41(1): 48-54.
WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, BAI Xiaoyu, et al. Experimental research effect of shear rate on shear strength of clayey soil-concrete interface [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 48-54.
- [21] 石熊, 张家生, 刘蓓, 等. 红黏土与混凝土接触面剪切特性试验研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, 46(5): 1826-1831.
SHI Xiong, ZHANG Jiasheng, LIU Bei, et al. Experimental research on shearing properties of interface between red clay and concrete [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(5): 1826-1831. (in Chinese)
- [22] 徐超, 孟凡祥. 剪切速率和材料特性对筋-土界面抗剪强度的影响 [J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3101-3106.
XU Chao, MENG Fanxiang. Effects of shear rate and material properties on shear strength of geosynthetic-soil interface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3101-3106. (in Chinese)
- [23] 黄文彬, 陈晓平. 土工织物与吹填土界面作用特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2831-2837.
HUANG Wenbin, CHEN Xiaoping. Experimental studies of interface characteristics between geotextile and hydraulic fill soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2831-2837. (in Chinese)

(上接第 98 页)

- [8] 陈潇, 王杰, 朱国瑞, 等. 地聚合物力学性能主要调控因素的研究综述 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(9): 2994-3002.
CHEN Xiao, WANG Jie, ZHU Guorui, et al. A review of the main control factors on mechanical properties of geopolymers [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(9): 2994-3002. (in Chinese)
- [9] 梁健俊, 马玉玮, 黄科, 等. 粉煤灰物理化学性能对碱激发材料的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(8): 2497-2502.
LIANG Jianjun, MA Yuwei, HUANG Ke, et al. Influence of the physical and chemical properties of fly ash on the alkali-activated fly ash/slag [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(8): 2497-2502. (in Chinese)
- [10] 郑文忠, 朱晶. 碱矿渣胶凝材料结构工程应用基础 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015: 1-53.
ZHENG Wenzhong, ZHU Jing. Application foundation of alkali-activated slag cementitious material in structural engineering [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015: 1-53. (in Chinese)
- [11] ISMAIL I, BERNAL S A, PROVIS J L, et al. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 45: 125-135.
- [12] YIP C K, LUKEY G C, VAN DEVENTER J S J. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(9): 1688-1697.
- [13] 施惠生, 郭晓滢, 夏明, 等. 地聚合物凝胶结构特性的分子动力学研究 [J]. 功能材料, 2015, 46(4): 4081-4085.
SHI Huisheng, GUO Xiaolu, XIA Ming, et al. Structural characterization of geopolymeric gel by molecular dynamic simulation [J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(4): 4081-4085. (in Chinese)