

水泥-地聚合物注浆固结土石混合体力学性能研究

文学渊¹, 韩松立², 陈 泉³

(1. 中铁三局集团第四工程有限公司, 北京 102300; 2. 中国铁设天津新亚太工程建设
监理公司有限公司, 天津 300142; 3. 川藏铁路(四川)有限公司巴塘项目部, 甘孜 627650)

摘要: 为探索注浆加固在道路损伤治理中的效果, 以土石混合体为研究对象, 考虑不同含水率工况下, 对未加固、水泥加固及地聚合物加固三种方式的固结土石混合体进行力学性能试验, 并进一步研究成分比重的影响。结果表明: 含水率为10%至20%时不同加固状态的土石体抗压强度均有增大趋势, 石块、土体、水分占比及块石粒径的增大对固结性能具有弱化作用, 各成分占比的影响程度依次为土含量 > 水含量 > 石块含量 > 石块粒径。由试验结果可知水泥和地聚合物均能显著提高土石体的承载强度, 地聚合物通过和土颗粒共同发生化学反应, 固结性能较水泥浆料更强, 加固效果受被加固体成分比重影响明显。

关键词: 土石混合体; 地聚合物; 注浆加固; 力学特性

中图分类号: TU458.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249(2026)01-0032-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.006

Study on Mechanical Properties of Cement Geopolymer Grouting Consolidated Soil Rock Mixture

WEN Xueyuan¹, HAN Songli², CHEN Xiao³

(1. China Railway No. 3 Engineering Group The Fourth Engineering Co., Ltd., BeiJing 102300, China;
2. China Railway Construction Tianjin New Asia Pacific Engineering Construction Supervision Co., Ltd.,
TianJin 300142, China; 3. Batang Project Department of Sichuan-Xizang Railway (Sichuan) Co., Ltd.,
Ganzi 627650, China)

Abstract: To explore the effect of grouting reinforcement in road damage treatment, soil rock mixtures were taken as the research object, and mechanical performance tests were conducted on three types of consolidated soil rock mixtures under different moisture content conditions unreinforced, cement reinforced, and geopolymer reinforced. The influence of component specific gravity was further studied. The results showed that the compressive strength of soil and rock under different reinforcement states increased with a moisture content of 10% to 20%. The increase in the proportion of stones, soil, moisture, and stone particle size had a weakening effect on the consolidation performance. The degree of influence of the proportion of each component was in the order of soil content > water content > stone content > stone particle size. According to the experimental results, both cement and geopolymer can significantly improve the bearing strength of soil and rock. Geopolymer has stronger consolidation performance than cement slurry through chemical reactions with soil particles, and the

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(41902292)。

作者简介: 文学渊(1996—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 岩土地下结构。

通信作者: 韩松立(1986—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程监理。

收稿日期: 2024-12-18

reinforcement effect is significantly affected by the specific gravity of the added solid components.

Key words: soil rock mixture; geopolymers; grouting reinforcement; mechanical properties

0 引言

随着我国交通线路的日渐完善和交通量的猛增,原有路面在车辆载荷和环境因素作用下出现不同程度的破坏^[1-2],常采用水泥基材料注浆加固的方式进行既有路面维护,而近年来地聚合物作为一种新型绿色胶凝材料^[3-4],因其具有快凝早强、流动性高、耐久性强等优势,逐渐取代水泥被大量使用。

广大学者也对相关内容展开了研究。如肖涛等^[5]通过不同温度的养护方式对地聚合物的抗压强度和凝结时间进行了研究;刘昱辰等^[6]对地聚合物再生混凝土的道路基层从结构力学的角度进行了性能分析;王浩等^[7]等对采用矿渣基地聚合物固化黄土后的路用性能进行了力学实验分析;冯涵等^[8]等以破碎岩体为研究对象,对地聚合物的快速注浆加固技术进行了研究;刘建飞等^[9]研究了不同碱激发剂模数对粉煤灰的激发效果以及不同养护温度条件对粉煤灰基地聚合物的砂浆力学性能的影响程度;郭雁翔等^[10]通过试验矿渣掺量、有机酸总量等物质对矿渣基地聚合物固化有机质土的强度影响规律进行了研究;易鸣等^[11]在采用高岭土碱激发制备地聚合物的基础上通过优化配合比进行了具备早强特性的地聚合物配置研究。另外,如袁宇坤^[12]针对注浆料在地层中的扩散过程,对扩散过程中造成的浆料损失、性能变化及其动态演化进行了研究;邹鸿^[13]对土石体主要针对回填土石体加固过程进行了机理研究,并给出了加固效果的评价方法;党润萌^[14]通过构建土石体非均质力学模型,从渗流的角度对注浆过程进行了理论研究,并通过数值模拟和分形研究的手段对浆料固结加固的力学响应进行了研究。

以往的研究多偏向于针对土或石块的单一加固对象以及注浆加固技术,但实际环境中待加固体常以土石混合体的形式存在,土石体注浆加固效果的主要原因归结于注浆后固结土石混合体整体的力学性能,为弥补此方面研究不足,考虑不同含水率实际工况,围绕未加固、水泥加固和地聚合物加固三种工况下的固结土石混合体开展力学实验,并进一

步分析成分比重对固结土石体力学性能的影响,相关研究成果可为实际工程应用提供借鉴。

1 试验方案设计

1.1 试验方案设计

考虑到自然环境下可能存在的含水率情况,设定2%、10%、20%、30%、40%五种含水率,通过单轴压缩试验测定土石体的应力变化规律,并以此为基础通过正交试验的方式对固结土石体性能相关的影响因素展开分析,试验的四个影响因素设定为石胶比、水胶比、土胶比、块石粒径,试验的因素水平表和方案分别见表1和表2,主要通过电液伺服电子万能试验机开展,分别进行单轴压缩、巴西劈裂和抗剪试验。

表1 因素水平表
Table 1 Factor level table

水平	因素			
	石胶比 A	水胶比 B	土胶比 C	粒径 D/mm
1	0.5	0.3	0.5	2.0~4.0
2	1.0	0.5	1.0	5.0~8.0
3	1.5	0.7	1.5	9.0~10.0

表2 试验方案
Table 2 Experimental plan

试验组	因素水平			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

1.2 试样制备

水泥注浆料采用42.5普通硅酸盐水泥拌制,地聚合浆料制作依据计量结果配置氢氧化钠溶液并冷却至室温,以矿渣为基础依次添加氢氧化钠和水玻璃进行混合搅拌均匀制成,试样的制作参照GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,将拌合物装入标准尺寸直径为50 mm,高度为100 mm的圆柱体试模中,在振动台强化均匀性,随后放入养护箱在温度(20±1)℃,相对湿度不少于90%的

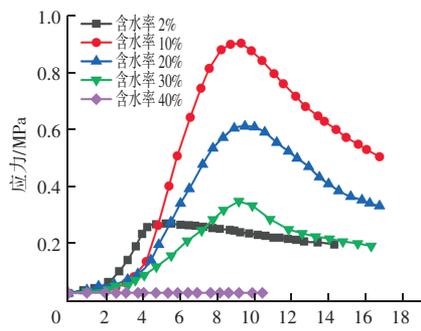
材料科学

条件下养护 28 d, 养护完成后将试样加工为 25、50、100 mm 三种高度尺寸用于劈裂、剪切和压缩试验, 试样表面进行研磨处理以达到试验要求。

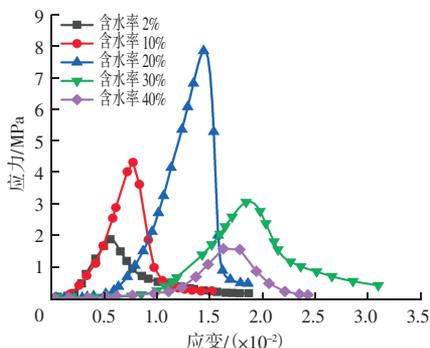
2 试验结果与分析

2.1 应力演化

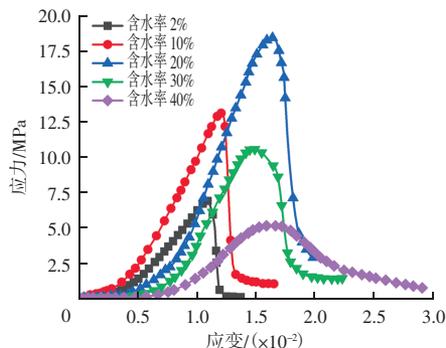
由图 1 可知, 固结土石体的应力应变曲线先后经历弹性阶段、强化阶段和变形破坏阶段, 受不同含水率影响, 当含水率为 2%~30% 时, 随着含水率增大, 土体颗粒溶解于水形成胶体微粒使土石体更易固结形成较大土石块体, 抗压强度随含水率增大而增大, 含水率为 40% 时, 自由水过饱和导致土体颗粒完全溶解, 试样基本失去承载能力。由图 1 (b)~(c) 可知, 水泥和地聚合物通过和土体颗粒发生化学反应形成胶结土体, 固结的胶结土体包裹石块形成更大团块, 试样的整体性增强, 表现为抗压强度和弹性模量增大, 但试样破坏时表现出更强的脆性, 当应力达到极限强度时土石体迅速失稳, 试样呈现劈裂破坏特征, 含水率为 40% 时, 浆料固结后的土石体仍具有一定的承载能力。通过对比不同含水率下的极限强度范围可以发现, 当含水率为 10%~20% 时为固结土石体的强度上升阶段, 说明在此范围含水率



(a) 无浆料固结



(b) 水泥固结



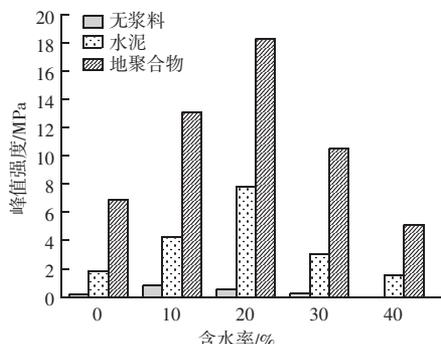
(c) 地聚合物固结

图 1 不同含水率土石体应力-应变曲线
Fig. 1 Stress strain curves of soil and rock masses with different moisture contents

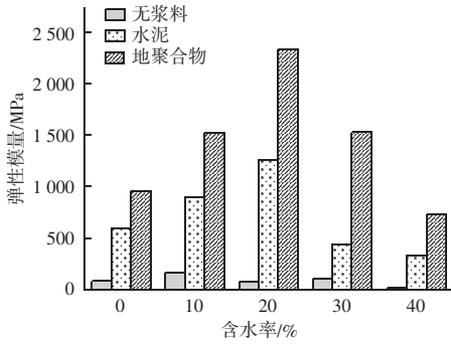
可以一定程度提高土石体的承载力, 可作为施工中岩土体的最佳含水率参考范围。

2.2 极限状态特征

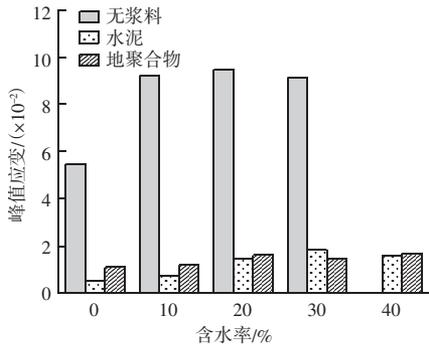
由图 2 (a) 可知三种试样各在不同含水率下最大强度分别为 0.9、7.8、18.3 MPa, 峰值强度比值约为 1:8:18, 浆料固结后的土石体抗压强度均远大于素土石体, 相较于水泥浆料, 地聚合物通过与土颗粒共同发生化学反应使形成具有网状交联结构聚合物, 因此地聚合物浆料固结强度也显著强于水泥材料, 其中素土石体在含水率为 10% 时强度最大, 胶结土石体在含水率为 20% 强度最大, 表明该范围内土石体在不同固结状态下均有相对较高的承载能力, 与最佳含水率范围相对应。由图 2 (b)~(c) 可知, 试样弹性模量变化与强度极限相比表现出相匹配的变化规律, 最大弹性模量分别为 200、1 200、2 300 MPa, 相同固结状态下各最大值之间的比值有所降低, 反映出水泥基材料和地聚合物对土石体的强度影响机理不同。因素土石体存较大的孔隙率, 导致在压缩过程呈现较大的变形特征, 土石体除组成部分间的界面摩擦力外无其他有效的荷载承载部



(a) 峰值强度



(b) 弹性模量



(c) 峰值应变

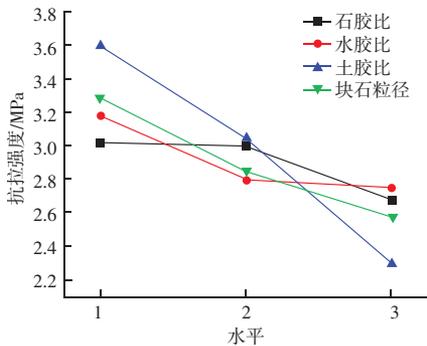
图2 土石体极限状态力学特征对比图

Fig. 2 Comparison of mechanical characteristics of ultimate state of soil and rock mass

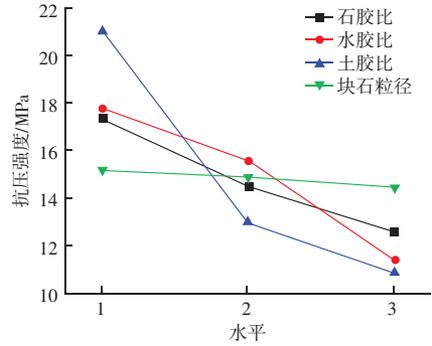
分, 在加入浆料固结后, 变形量缩小为 $1/8 \sim 1/5$, 地聚合物固结状态下土石体弹塑性能力增强导致变形相对水泥固结变化更缓。

2.3 不同含量影响

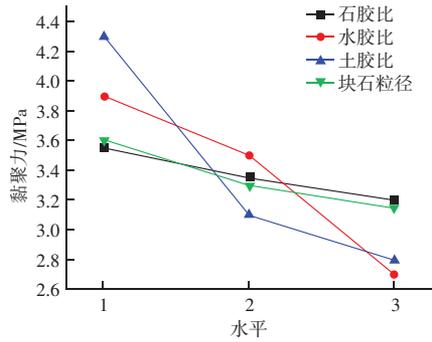
由图3(a)、(c)可知, 注浆料占比相对不变的情况下, 石块、土体、水分占比及块石粒径的增大弱化了浆料的固结性能导致土石体中形成较多的弱界面, 载荷作用下微观裂隙将更容易沿着弱界面的方向扩展, 表现为各项强度指标的降低, 各组成占比对力学特性的影响程度依次为土含量 > 水含量 > 石块含量 > 石块粒径。与之相反由图3(d)可知随



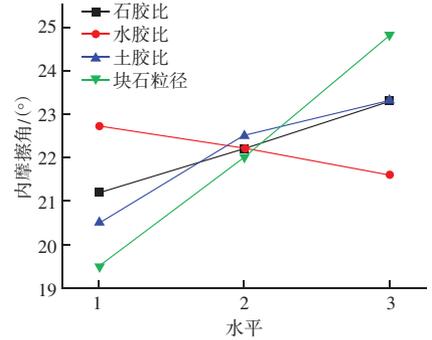
(a) 抗拉强度



(b) 抗压强度



(c) 黏聚力



(d) 内摩擦角

图3 土石体不同组成比例力学特性变化规律

Fig. 3 Changes in mechanical properties of soil and rock masses with different composition ratios

着石胶比、土胶比、块石粒径的增大, 土石体内部出现更多的硬接触, 阻碍了微观界面的相对滑动, 试验曲线中表现为内摩擦角的逐渐增大, 而水胶比的增大导致界面的相对滑动倾向增大, 在曲线中反映为内摩擦角的降低。

3 结论

通过设计正交试验对自制的土石混合体开展室内力学试验, 对不同含水率、不同浆料及成分占比影响下的土石混合体的加固效果进行了分析, 并有望以此为工程实践提供参考, 主要结论总结如下:

材料科学

(1) 加固土石混合体受压先后经历弹性阶段、强化阶段和变形破坏阶段, 当含水率为 10%~20% 时为固结土石体的强度上升阶段, 可作为施工中岩土体的最佳含水率参考范围, 水泥和地聚合物通过化学反应增强了土石体的整体性, 均能显著提供土石体的抗压强度。

(2) 三种试样各在不同含水率下, 最大强度分别为 0.9、7.8、18.3 MPa, 峰值强度比值约为 1:8:18, 其中素土石体在含水率为 10% 时强度最大, 胶结土石体在含水率为 20% 强度最大, 固结效果地聚合物 > 水泥基材料, 最大弹性模量分别为 200、12 00、2 300 MPa, 相同固结状态下各最大值之间的比值有所降低, 水泥基材料和地聚合物对土石体的强度影响机理不同。

(3) 石块、土体、水分占比及块石粒径的增大弱化了浆料的固结性能, 各项强度指标降低, 内摩擦角变化规律有所不同, 各组成占比对力学特性的影响程度依次为土含量 > 水含量 > 石块含量 > 石块粒径, 施工中应着重控制注浆料和土石体的比例关系。

参 考 文 献

- [1] 张博升. 矿粉—粉煤灰注浆材料试验及路面基层注浆加固研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [2] 张东红, 汤浩杰, 王洪卫, 等. 地聚合物搅拌桩加固软黄土地基试验研究 [J]. 路基工程, 2024 (1): 40-46.
- [3] 罗亲华. 高速公路养护中改性地聚合物注浆技术的应用 [J].

交通世界, 2024 (Z2): 145-147.

- [4] 徐昆, 刘宇, 杨雨清, 等. 基于粉煤灰—矿渣地聚合物的露天矿山运输道路筑路工艺研究 [J]. 煤炭工程, 2021, 53 (增刊 1): 13-17.
- [5] 肖涛, 马兵, 杜轶赟, 等. 不同养护方式下粉煤灰基地聚合物抗压强度与凝结时间研究 [J]. 塔里木大学学报, 2024, 36 (3): 58-66.
- [6] 刘昱辰, 寇海磊, 管晓明. 基于地聚合物再生混凝土的道路基层结构力学性能研究 [J]. 公路工程, 2020, 45 (2): 213-217.
- [7] 王浩, 廖霖, 侯泽彪, 等. 矿渣基地聚合物固化黄土路用性能试验研究 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (10): 103-111, 138.
- [8] 冯涵, 张学民, 欧雪峰, 等. 破碎岩体快速注浆加固地聚合物注浆材料试验研究 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (9): 43-50.
- [9] 刘建飞, 张营. 粉煤灰地聚合物砂浆的试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2018 (2): 46-49.
- [10] 郭雁翔, 陈庚, 陈荣伟, 等. 矿渣基地聚合物固化有机质土的强度试验及影响因素分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (2): 28-33, 63.
- [11] 易鸣, 吴大志, 夏琳玲. 偏高岭土地质聚合物的制备及其抗压强度研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2019 (6): 31-35, 71.
- [12] 袁宇坤. 基于损伤理论的土石混合体注浆扩散特性研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.
- [13] 邹鸿. 土石混合体回填土注浆扩散加固机理及效果评价研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [14] 党润萌. 土石混合体注浆固结过程的分形特性研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2023.

E-mail: fmhzhly@163.com