

玄武岩纤维膨润土水泥膏浆的注浆加固 工程应用研究

周生伟^{1,2,3}, 孙平贺^{1,2,3}, 杨胜兴^{*4}, 曹 函^{1,2,3}, 韦帮第^{1,2,3},
邹子昊^{1,2,3}, 何瑜瑞^{1,2,3}, 王李昌^{1,2,3}, 王 乐⁵, 吉文龙⁵

1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 湖南长沙 410083;
2. 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 湖南长沙 410083;
3. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;
4. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵州 贵阳 550005;
5. 中国石油管道局工程有限公司第四分公司, 河北 廊坊 065000

摘要:岩溶塌陷是盾构法隧道工程穿越岩溶地层面临的关键问题之一,其不仅会对油气管道造成破坏,还会导致油气泄漏、破坏生态环境、威胁沿线居民生命财产安全等问题。针对湖南永州某地盾构法隧道穿越的岩溶地层溶洞发育特点,优选兼具良好流变性能和力学性能的玄武岩纤维膨润土水泥膏浆配方,开展玄武岩纤维膨润土水泥膏浆原位注浆充填加固实验,并通过钻孔取心和室内实验的方法检验了该注浆材料的加固效果,实验结果表明:钻孔取心获得的地层岩心密实,胶结强度较强,岩心采取率满足施工要求的80%;受地下水的影响,钻孔深度为6~7 m的注浆固结体28 d的无侧限抗压强度较小,平均为0.32 MPa,但试样较为完整;钻孔深度为7~8 m的注浆固结体28 d的无侧限抗压强度较6~7 m的注浆固结体增加了约5.36倍。采用玄武岩纤维膨润土水泥膏浆进行原位注浆充填加固的注浆固结体强度大于施工要求的强度指标,有效保障了岩溶地区盾构穿越工程的安全性。

关键词:玄武岩纤维;膨润土水泥膏浆;注浆加固;盾构隧道

中图分类号:U455 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2023)S1-0520-06

Research on the application of basalt fibre bentonite-cement paste for grouting reinforcement engineering

ZHOU Shengwei^{1,2,3}, SUN Pinghe^{1,2,3}, YANG Shengxing^{*4}, CAO Han^{1,2,3}, WEI Bangdi^{1,2,3},
ZOU Zihao^{1,2,3}, HE Yurui^{1,2,3}, WANG Lichang^{1,2,3}, WANG Le⁵, JI Wenlong⁵

1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China;
2. Key Laboratory of Non-Ferrous Resources and Geological Hazard Detection, Changsha Hunan 410083, China;
3. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;
4. Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang Guizhou 550005, China;
5. No. 4 Branch Company of China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei 065000, China

Abstract: Karst collapse is one of the key issues in shield tunneling through karst formations. It will not only cause damage to oil and gas pipelines, but will also lead to oil and gas leaks, damage to the ecological environment and

收稿日期:2023-07-26; 修回日期:2023-08-14 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.085

基金项目:中石油管道局科技计划项目“小断面泥水盾构水城溶洞群工程技术研究”(编号:KJZX-JSFW-2022-001)

第一作者:周生伟,男,汉族,1999年生,硕士研究生在读,地质工程专业,湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号,zhoushengwei@csu.edu.cn。

通信作者:杨胜兴,男,汉族,1967年生,高级工程师,工程硕士,主要从事探矿工程、水工环地质、地热能应用研究工作,贵州省贵阳市南明区宝山南路564号,770573823@qq.com。

引用格式:周生伟,孙平贺,杨胜兴,等.玄武岩纤维膨润土水泥膏浆的注浆加固工程应用研究[J].钻探工程,2023,50(S1):520-525.

ZHOU Shengwei, SUN Pinghe, YANG Shengxing, et al. Research on the application of basalt fibre bentonite-cement paste for grouting reinforcement engineering[J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):520-525.

threaten the lives and property of people living along the route. This paper is aimed at the characteristics of cave development in karst strata encountered by shield tunneling at a site in Yongzhou, Hunan Province. The formulation of a basalt fibre bentonite-cement paste with good rheological and mechanical properties was preferred. In-situ grout filling and reinforcement experiments with basalt fibre bentonite-cement paste were carried out, and the reinforcing effect of the grouting material was tested by means of borehole coring and indoor experiments. As a results, the cores obtained from the boreholes are dense and have a strong cementation strength. The core take rate meets 80% of the construction requirements. The 28d unconfined compressive strength of the grouted consolidation bodies drilled to a depth of 6~7m was small, averaging 0.32MPa, due to the influence of groundwater. But the cores were relatively intact. The 28d unconfined compressive strength of the grouted consolidation at a drilling depth of 7~8m increased by approximately 5.36 times compared to the grouted consolidation at 6~7m. The strength of the grouted solids reinforced by in-situ grouting with basalt fibre bentonite-cement paste is greater than the strength index required for construction, effectively guaranteeing the safety of shield crossing in karst areas.

Key words: basalt fiber; bentonite-cement paste; grouting reinforcement; shield tunnel

0 引言

随着地下管网建设需求的快速增长,隧道穿越工程广泛应用于地下管网的建设施工。在岩溶地区施工中可能出现涌水、地面坍塌、土壤液化等不良地质现象^[1-3],因此需要采取有效措施加固岩溶地层,注浆充填是常用的方法之一,其能有效提升地层的力学性能和抗渗性能^[4]。注浆材料会极大影响注浆效果,目前常用的注浆材料有化学注浆材料 and 水泥基注浆材料 2 种^[5]。化学注浆材料具有较好的可注性,而且能根据工程需要调节浆液的胶凝时间,可满足复杂地层的注浆条件^[6-7],但化学注浆材料由于会对环境造成污染而无法达到国家对生态环保的要求,因此受到了一定的使用限制。水泥基注浆材料具有绿色环保、成本低、耐久性强等优点,能适应岩土体堵水、加固及防渗等注浆需求^[8]。水泥膏浆是在水泥基浆的基础上加入一定量的外加剂(粘土、膨润土、粉煤灰等)形成的注浆充填材料,具有良好的保水性、粘度和耐久性,被广泛用于全风化岩体、松散土层、溶洞、节理裂隙密集发育岩体等松软透水岩体的注浆加固工程中^[9-10]。但膨润土水泥膏浆应用过程中仍存在力学强度不足的问题,在其中加入一定量的纤维可以增强其抗压和抗拉强度,有效抑制水泥基材料的收缩,增强耐久性和耐高温性^[11-12]。

玄武岩纤维是以天然玄武岩矿石为原料,在高温熔融的情况下,通过铂铑合金拉丝漏板高速拉制而成的连续纤维。作为一种无机非金属矿物纤维,玄武岩纤维具有抗拉强度大,耐酸、耐碱性强以及绝缘性能好的特点,其被广泛应用于航空航天工程材

料和土木建筑材料领域^[13-16]。此外,玄武岩纤维的主要成分为二氧化硅、氧化铝、氧化亚铁和三氧化二铁,化学稳定性良好^[17],且化学成分与水泥基复合材料相似,具有天然的相容性^[18]。

结合湖南永州某地盾构法隧道穿越工程钻遇岩溶地层的特征,在室内实验的基础上,选取玄武岩纤维作为膨润土水泥膏浆改性的主要材料,在兼顾其良好的流变性能和力学性能的同时,构建玄武岩纤维膨润土水泥膏浆溶洞充填加固体系,在现场得到成功应用。

1 工程概况

1.1 项目概况

该盾构穿越项目位于湖南永州境内,穿越长度 469 m,隧道内径 2.44 m。拟穿越场区地理位置概况见图 1。



图 1 场区地理位置示意

该项目穿越区域为岩溶发育区,岩体裂隙较发育,富含裂隙水;轴线方向溶洞较多,且部分为未填

充状态。溶洞具体情况为:1号溶洞位于隧道轴线下方13 m处,高2.2 m,长33 m;2号溶洞位于隧道轴线下方6.8 m处,高3.5 m,长42 m;3号溶洞位于隧道轴线上方1.05 m处,高2.4 m,长30 m;4号溶洞位于隧道轴线上,高5.54 m,长46.84 m;5号溶洞位于接收井锁口盘下部18.8 m处,高4 m,长18 m;其中1~4号溶洞内均无填充,5号溶洞内为粉砂全填充。为保证穿越工程顺利进行,需对上述溶洞进行

注浆加固,且注浆加固完成后钻孔取心得到的注浆固结体28 d无侧限抗压强度 ≥ 0.15 MPa。

1.2 工程水文地质条件

本项目所在地区的主要地层为中等风化灰岩及中等风化白云岩。其中,中等风化灰岩岩溶强发育,中等风化白云岩钻探未揭露溶洞,但不排除溶洞发育。地层分布情况见表1。

表1 地层分布情况

地 层	层厚/m	底板标高/m	岩 性
中等风化灰岩(D ₃ s)	2.60~57.80	38.10~95.05	灰色,微晶结构,块状构造,主要矿物成分为方解石,节理裂隙稍发育一较发育,岩体总体上较完整、局部较破碎,岩心多呈短柱状一柱状、少量呈长柱状、局部呈碎块状
中等风化白云岩(D ₃ s)	5.00~25.00	42.18~65.03	灰褐一黑色,泥状、隐晶质结构,块状构造,主要矿物成分为粘土矿物、方解石,粘土矿物含量高,节理裂隙发育,岩体破碎,岩心多呈块状、局部段呈土夹碎块状,遇水扰动后易出现软化崩解

该区域的水文地质情况根据地下水埋藏条件分为2类,即第四系松散岩类孔隙潜水和碳酸盐岩类裂隙-岩溶水。第四系松散岩类孔隙潜水分布于河道两岸的漫滩部位,含水层主要由砂及卵石层组成,地层的渗透性好、富水性强;地下水主要接受大气降雨垂直入渗及河水的补给,与河水具有统一的水位线,其补-径-排严格受潇水河的控制,与河水水力联系密切;碳酸盐岩类裂隙-岩溶水分布于河两岸的平坝及河床覆盖层之下,含水层以灰岩为主,地下水主要赋存在灰岩的地下暗河、溶洞系统中,其分布和富水性、与岩石的裂隙、可溶性矿物含量及岩溶发育程度密切相关。场地内岩溶强发育,可能存在溶洞、岩溶通道与河水贯通,且勘察期间实测东岸地下水水位埋深为1.30~7.70 m(标高114.47~117.41 m),西岸地下水水位埋深为1.60 m(标高111.76~112.27 m)。

2 玄武岩纤维作用机理及优选

玄武岩纤维主要通过桥接效应减少试样破坏时的裂缝宽度和数量,以降低材料的脆性特征,其具有抗拉强度高、热稳定性好、耐久性强、弹性模量优异、绝缘性能良好以及成本低廉等优点^[19]。玄武岩纤维对水泥基复合材料的力学性能表现出良好的增强效果,本课题组相关研究人员已进行大量室内实验进行玄武岩纤维含量和长度2个参数对膨润土水泥

膏浆的力学和流变性能影响的综合分析,通过流变测试、无侧限抗压强度测试和劈裂拉伸强度测试实验,得到膨润土水泥膏浆兼具良好的流变性能和力学性能的玄武岩纤维最优体积掺量和长度。此外,研究结果还表明玄武岩纤维的添加并不会改变膨润土水泥膏浆的流变模型,且玄武岩纤维的增强效果随着固化时间的增加而增加。

在流变性能和机械强度实验的基础上,使用HS-YS4A型岩石声波参数测试仪进行玄武岩纤维膨润土水泥膏浆的纵波测试,纵波速度是评价水泥基复合材料内部损伤的重要参数之一,其大小可以反映材料的密度及内部结构的均匀性特征。声波实验如图2所示,实验中采样频率为20 MHz,样品规格为50 mm×100 mm。

实验结果如图3所示,由该图可得不同含量的



图2 声波实验

玄武岩纤维在长度为6 mm时试样的纵波波速最大,即6 mm的玄武岩纤维在膨润土水泥膏浆中的

分散更加均匀。基于上述实验结果,本次现场注浆实验玄武岩纤维长度优选为6 mm。

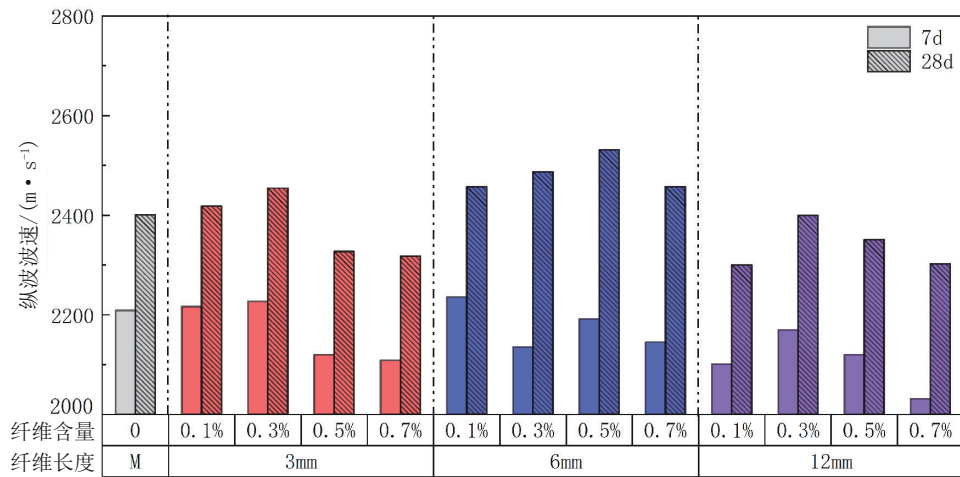


图3 玄武岩纤维对膨润土水泥膏浆纵波速度的影响

3 现场实验

为验证玄武岩纤维膨润土水泥膏浆注浆加固效果,在项目穿越区域进行现场注浆实验,并对复合土体的物理力学性质进行测试,此次注浆实验布设1个注浆孔,孔径为50 mm,孔深为15 m。

3.1 注浆配方

现场实验主要采用玄武岩纤维膨润土水泥膏浆作为注浆材料,基于玄武岩纤维膨润土水泥膏浆和现场材料的基本性能及室内实验结果,注浆材料的基浆配方为钙基膨润土:水泥:水=240:200:300;纤维掺量为5 kg/m³,现场注浆材料配合比如表2所示。

表2 现场注浆材料配合比

注浆材料	钙基膨润土/kg	普通硅酸盐水泥/kg	水/kg	玄武岩纤维/(kg·m ⁻³)
玄武岩纤维膨润土水泥膏浆	240	200	300	5

3.2 注浆设备及施工工艺

注浆设备主要有搅拌机和注浆泵等,其中搅拌机为高速搅拌机与低速搅拌机的组合,注浆泵为H-095型注浆泵,现场注浆实验如图4所示。注浆前进行膏浆的制备,首先将膨润土、水和玄武岩纤维放入高速搅拌机中搅拌3 min,其次加入水泥并搅拌3 min,最后将膏浆注入低速搅拌机中搅拌。

现场注浆实验采用后退分段式注浆工艺,即将注浆管放置注浆孔孔底,由下往上依次注浆,每次注浆段为0.5 m,第一次注浆完成后回拖注浆管,再进行第二注浆段的注浆。在预实验的基础上,本次注浆实验的注浆压力为0.3~0.5 MPa、总注浆量为2.5 m³。

4 注浆效果评价

注浆效果的检测参数不同于注浆质量,注浆质量一般是指在注浆施工过程中监测的注浆参数,如注浆压力、注浆量、地表位移等;而注浆效果是指注浆结束之后加固复合土体或结石体的物理力学性质的改善程度。注浆效果评价是确保注浆质量的关键,且注浆效果的检验方法与注浆加固的目的及注浆现场的外界条件有关。

本次注浆实验以充填溶洞、提高地层承载力为目的,因此,通过钻孔取心的方法得到目标地层注浆材料固化28 d的岩心样品,钻取的岩心试样如图5所示,其分别为钻孔深度6~7 m和7~8 m的典型试样,由图5可看出此次注浆采取的岩心较为完整,未出现破碎现象,且岩心采取率不低于施工要求的80%。

对每个注浆段的岩心分别进行含水率、天然密度、干密度和无侧限抗压强度等参数的测试,以检验注浆充填的加固效果,室内实验结果如表3所示。由表3可得,样品7-1与样品7-2含水率较高,分别



(a) 注浆实验现场



(b) 浆液搅拌机



(c) 现场膏浆制备



(d) 注浆泵

图4 现场注浆实验



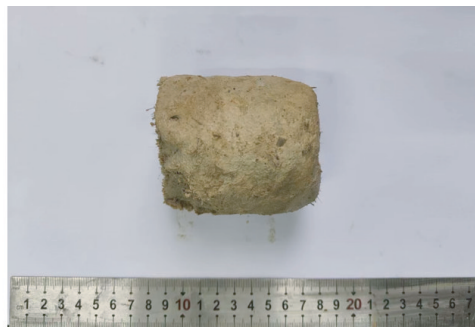
(a) 样品7-1



(b) 样品7-2



(c) 样品8-1



(d) 样品8-2

图5 典型岩心试样

为62.66%和75.68%;力学强度较低,无侧限抗压强度分别为0.26 MPa和0.38 MPa,平均为0.32 MPa,但仍保持一定的胶结强度。样品8-1与样品8-2的含水率分别为28.27%和27.04%,抗压强度分别为1.86 MPa和2.21 MPa,平均2.035 MPa,相较于6~7 m段试样的强度增加了1.715 MPa,提高了5.36倍。出现上述现象的原因为6~7 m段存在地下水导致玄武岩纤维膨润土水泥膏浆的胶结时间减缓,因此其固结体的含水率较高,无侧限抗压强度较低;而7~8 m段试样的样品未被水侵入,水泥水化作用并未减缓,因此该段试样的抗压强度较高。此次注浆实验获得的岩心较为完整,这也说明玄武岩纤维膨润土水泥膏浆的抗分散性强,不易被水稀释。

表3 室内实验结果

式样编号	取样深度范围/m	含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	干密度/(g·cm ⁻³)	无侧限抗压强度/MPa
7-1	6~7	62.66	1.78	0.86	0.26
7-2	6~7	75.68	1.93	0.81	0.38
8-1	7~8	28.27	2.86	1.53	1.86
8-2	7~8	27.04	2.74	1.66	2.21

5 结论

(1)玄武岩纤维膨润土水泥膏浆作为一种新型的绿色注浆材料,具有良好的注浆性能,注浆效果可满足盾构法隧道穿越工程的施工要求。

(2)在流变性能和机械强度实验的基础上,通过玄武岩纤维膨润土水泥膏浆试样的纵波测试,优选出的玄武岩纤维长度为6 mm,其在兼具良好的流变性能和力学强度的基础上具有较好的分散性,并对湖南永州某地盾构法隧道穿越的的溶洞进行注浆加固处理,注浆孔直径为50 mm、深度为15 m,钻孔取心所得的岩心密实,胶结强度高,岩心采取率不小于施工要求的80%。

(3)在注浆效果评价中,钻取深度为6~7 m的注浆固结体的28 d无侧限抗压强度平均为0.32 MPa,深度为7~8 m的注浆固结体的28 d无侧限抗压强度平均为2.035 MPa,比6~7 m段试样提高了5.36倍,不同深度下的试样均较为完整,且大于施工要求的强度指标。实验结果表明玄武岩纤维膨润土水泥膏浆应用于岩溶注浆充填加固工程具有良好的

效果。

参考文献:

- [1] 张聪,阳军生,张贵金,等. 充填注浆浆液稳定性试验研究与工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3604-3612.
- [2] 倪宏革,孙峰华,杨秀竹,等. 采用粘土固化浆液进行岩溶路基注浆加固试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(7): 1242-1247.
- [3] 张聪,阳军生,叶新田,等. 盾构隧道松散地层可控注浆机制及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2324-2332.
- [4] 袁敬强,陈卫忠,谭贤君,等. 速凝浆液抗分散性质与凝胶性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 960-967.
- [5] 殷金虎,贺子奇. 地下工程注浆材料与注浆技术的研究应用现状[J]. 建材技术与应用, 2007(9): 13-15.
- [6] 周新星,郑玉婴,陈乘鑫,等. 隧道突水害聚氨酯复合注浆材料的制备及性能评价[J]. 化学工程与装备, 2022(8): 4-9.
- [7] 涂传奇,任晓雨,许汉华,等. 高聚物化学注浆在隧道斜井突涌水抢险加固中的应用[J]. 江西建材, 2022(1): 179-181.
- [8] 刘红彬,唐伟奇,肖凯璐,等. 水泥基注浆材料的研究进展[J]. 混凝土, 2016(3): 71-75.
- [9] 张贵金,胡荣宗,钟平,等. 新型可控性粘土水泥膏浆试验研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(2): 66-70.
- [10] 赵卫全,符平,张金接,等. 新型水泥膏浆研究及应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008(1): 19-22.
- [11] 谢尔盖,李中鄂. 玄武岩纤维材料的应用前景[J]. 纤维复合材料, 2003(3): 17-20.
- [12] LI W M, XU J Y. Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading[J]. Materials Science and Engineering: A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2009(1-2): 178-186.
- [13] 高真,曹鹏,孙新建,等. 玄武岩纤维混凝土抗压强度分析与微观表征[J]. 水力发电学报, 2018, 37(8): 111-120.
- [14] 贾明皓,肖学良,谷元慧,等. 玄武岩纤维及其格栅增强水泥基复合材料力学性能对比研究[J]. 化工新型材料, 2020, 48(12): 246-249.
- [15] 刘晓阳,任宪利,裴鑫雨. 玄武岩纤维增强沥青混合料作用机理及性能研究[J]. 四川建材, 2022, 48(1): 29-30.
- [16] 施成. 应用玄武岩纤维筋的轨道板静载受力性能试验研究[J]. 铁道建筑, 2021, 61(10): 109-112.
- [17] 陈鹏,张谏虎,王成勇,等. 玄武岩纤维主要特性研究现状[J]. 无机盐工业, 2020, 52(10): 64-67.
- [18] WANG D X, WANG H W, LARSSON S, et al. Effect of basalt fiber inclusion on the mechanical properties and microstructure of cement-solidified kaolinite[J]. Construction and Building Materials, 2020, 241.
- [19] 周生伟,孙平贺,苏卫锋,等. 玄武岩纤维堵漏体系在高海拔非开挖钻进中的应用研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(3): 139-145.

(编辑 周红军)