

钻遇复杂溶洞群注浆处置材料室内试验研究

魏涛¹, 刘利松¹, 严文钦^{*2}, 王乐^{3,4}, 吉文龙⁵, 孙平贺²

(1. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 湖南长沙 410007;
2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083; 3. 国家管网集团工程技术创新有限公司, 天津 300450;
4. 中山大学土木工程学院, 广东广州 510275; 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:以潇水某盾构掘进工程段为案例, 研究解决岩溶地质条件下注浆材料配比的关键问题。在试验前期使用粘土、砂石和水泥等原料开展了一系列预实验, 在此基础上通过就地取土的方式进行膏浆配比因素的正交试验。试验结果表明, 干土和水胶比是对膏浆抗压强度影响最大的因素; 膏浆坍落度的主要影响因素是水胶比, 而干土和砂的掺量对坍落度的贡献相当; 在抗压强度方面, 贡献度依次为水胶比>干土>砂。综合考虑膏浆性能参数和经济性, 建议选用6号(A2B1C3)膏浆作为本次施工的填充注浆材料。研究结果表明, 利用施工现场的粘土和机制砂制备膏浆可以满足设计院对岩溶填充材料的性能指标要求。

关键词: 注浆工程; 注浆材料; 溶洞群; 膏浆配比; 盾构施工

中图分类号: P634; U455 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)03-0037-08

Indoor experimental study of grouting and disposal materials for drilling complex cavern clusters

WEI Tao¹, LIU Lisong¹, YAN Wenqin^{*2}, WANG Le^{3,4}, JI Wenlong⁵, SUN Pinghe²

(1. China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Changsha Hunan 410007, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;
3. Pipe China Engineering Technology Innovation Co., Ltd., Tianjin 300450, China;
4. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong 510275, China;
5. The Fourth Branch of China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Taking a shield tunneling project section in Xiaoshui as a case study, research was conducted to solve the key problem of the proportioning of grouting materials under karst geological conditions. A series of pre-tests were carried out in the pre-test period using raw materials such as clay, sand, gravel and cement, on the basis of which orthogonal tests on the factors of paste slurry proportioning were carried out by means of in situ soil extraction. The test results show that the dry clay and water-cement ratio are the factors that have the greatest influence on the compressive strength of the paste; The main influencing factor of the slump of the paste is the water-cement ratio, and the mixing amount of dry clay and sand contributes to the slump quite a lot; In terms of the compressive strength, the degree of contribution is in the order of the water-cement ratio>dry clay>sand. Considering the performance parameters and economy of paste slurry, it is recommended to choose No.6 (A2B1C3) paste slurry as the filling grouting material for this construction. The results of the study show that the preparation of paste slurry using clay and mechanism sand from the construction site can meet the requirements of the Design Institute for the performance index of karst filling

收稿日期: 2024-03-22; 修回日期: 2024-05-01 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.03.005

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 414010113)

第一作者: 魏涛, 男, 汉族, 1985年生, 高级工程师, 地质资源与地质工程专业, 主要从事岩土工程相关设计及研究工作, 湖南省长沙市韶山中路18号, 52559946@qq.com。

通信作者: 严文钦, 男, 汉族, 1999年生, 博士研究生, 地质资源与地质工程专业, 主要从事边坡支护、注浆方面的研究工作, 湖南省长沙市麓山南路932号, 235001037@csu.edu.cn。

引用格式: 魏涛, 刘利松, 严文钦, 等. 钻遇复杂溶洞群注浆处置材料室内试验研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(3): 37-44.

WEI Tao, LIU Lisong, YAN Wenqin, et al. Indoor experimental study of grouting and disposal materials for drilling complex cavern clusters[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 37-44.

materials.

Key words: grouting engineering; grouting material; cavern clusters; paste slurry proportioning; shield tunneling

0 引言

在“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的推动下,我国正努力构建现代城市交通系统,对地下空间高效利用提出了相关要求。尽管地下空间具有巨大的潜在应用价值,但由于其复杂性,工程实践中经常面临如地下岩溶发育等一系列复杂且严峻的问题。注浆技术因其在多个领域的卓越应用而备受青睐,学者们一直在深入研究地下岩溶注浆技术。这些研究成果不仅在学术领域取得了显著进展,更在工程实践中取得了卓越成果^[1-5]。

膏浆作为岩溶充填的常用材料,其性质直接影响着注浆效果,从而决定工程是否能够达到实际期望。膏浆的基本性质包括密度、粘度、结实率、流动度、单轴抗压强度等,为提高注浆效果,众多学者对膏浆的物理化学性质开展了深入研究。例如,刘健等^[6]、张庆松等^[7]研究了浆液粘度随时间变化的规律,通过模型试验证明了考虑浆液粘度时变性能更好地符合实际工程,为工程提供了更为精准的技术和理论指导。周瑶等^[8]开展了浆液性能的影响因素研究,通过室内试验分析了粒径对浆液可注性能的影响,研究结果表明,浆液中悬浮颗粒的大小直接影响了浆液的流动性和稳定性。武朝光等^[9]、张铎等^[10]的研究表明,水灰比对膏浆的流动度和凝结时间产生较大影响,因此在实际工程中需要合理调控水灰比。此外,长期的工程实践中,学者们发现往膏浆中添加外加剂可以明显改善其性质^[11],例如聚羧酸、萘系等减水剂,以及粉煤灰、矿粉、硅灰等掺

和料。戎密仁等^[12]的研究发现,适量添加减水剂能够改善膏浆的流动性,而增加掺和料则明显提高了膏浆整体的和易性以及凝固后的力学性能。

在膏浆配方研究方面,由于其工作量庞大,考虑的因素繁多,常见的研究方法包括正交设计法^[13-16]、均匀设计法^[17]、神经网络设计法^[18]、全面试验法等,这些方法各有优劣,实际应用时需根据试验特点合理选择。

本文基于潇水某盾构钻进工程段溶洞群的实际条件,根据工程情况和设计要求研制了多种膏浆体系,利用正交试验对这些膏浆的性能进行逐一验证,找到各种膏浆体系下的最优配比,以满足实际工程需求,并为今后类似工程提供数据和试验基础。

1 工程概况

该隧道工程潇水某盾构掘进工程段,设计沿着4.501%的坡度向下延伸,总长度为286.63 m。随后,隧道以同样的坡度向上延伸164.06 m,直至达到接收井。接收井采用咬合灌注桩支护结构。在隧道变坡点之间设置了竖向曲线,曲线半径为2000 m。始发井直径为12.5 m、深25.6 m,接收井直径为9.0 m、深26.9 m。

在项目勘查过程中,发现隧道轴线及周边区域存在岩溶发育。通过对该隧道工程中溶洞的详细调查和补充勘查,主要的溶洞分布如图1所示,表1是各个溶洞的大小和填充状况。

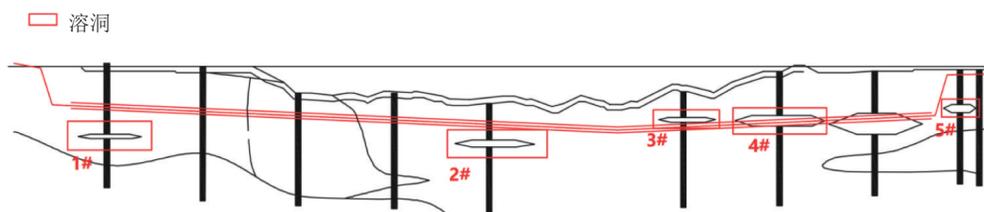


图1 潇水盾构隧道勘查纵断面

Fig.1 Longitudinal section of Xiaoshui shield tunnel survey

根据物探初步查明,5个岩溶充填总量达1万 m^3 以上。由于充填量较大,在满足工程要求的情况下,降低材料的成本也是本次研究的关键之一。基于盾构隧道穿越溶洞发育地层影响及溶洞群处理

标准研究,设计院对岩溶填充材料提出了以下指标性能要求:

(1)针对轴线经过的大溶洞,应采取较高强度(>3 MPa)的注浆材料,以保证正常掘进。

表1 溶洞详勘情况及处理范围

序号	尺寸(长×高)/m	与隧道轴线距离	填充情况
1	33×2.2	下方13.0 m	无填充
2	42×3.5	下方6.8 m	无填充
3	30×2.4	上方1.0 m	无填充
4	46×5.6	轴线	无填充
5	18×4.0	接收竖井	填充粉砂

(2)对于轴线周边的大溶洞,应采用具有一定强度(>1 MPa)的注浆材料,以保证掘进安全。

鉴于上述溶洞与隧道的位置关系以及性能指标要求,为确保隧道盾构安全掘进,计划就地取材进行注浆材料试验,以确保施工安全、控制成本并保证经济性。

2 注浆材料试验

影响膏浆性能的因素繁多,常规有粘土、水泥、水、砂的掺量等,研究这些因素需要大量试验。正交试验是一种有效的方法,能辨识和分离多个因素对试验结果的影响,从而减少样本量和试验次数,尤其适用于研究多个因素对某事物影响的情况。在本膏浆试验中,主要考虑干土、砂、水胶比等因素。因此,选择合适的正交试验设计表(如 $L_9(3^4)$)能高效地实现试验目标。完成试验设计后,需要进行极差分析。其基本原理是通过计算不同因素水平下试验结果的最大值 $Y_{i,max}$ 与最小值 $Y_{i,min}$ 之差,并以此来评估各因素对试验结果的贡献度。此外,计算每个因素水平的平均值也可以用于比较各因素水平之间的显著差异。

2.1 试验方案与前期准备工作

前期试验的目的在于研究和筛选出适用于不同岩溶位置的膏浆材料,以满足设计院所要求的指标性能。同时,鉴于施工现场需要大量膏浆,经济性也是一个极为重要的考虑因素。

在试验前期,使用粘土、砂石和水泥等原料进行了一系列膏浆预试验。为了降低膏浆成本,正式试验采用试验场地附近的红粘土。膏浆的制作流程如图2所示。制浆完成后,立即测定了膏浆的性能,包括:相对密度、坍落度和流动度。同时采用的模具为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm)的标准模具装模,并在2~3 d后进行脱模养护。分别测试7、

14、28 d 试件的抗压强度。图3为试验的部分照片。

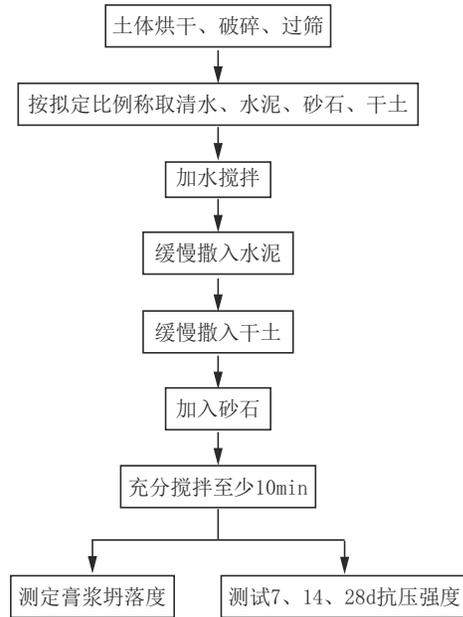


图2 膏浆的制备工序

Fig.2 Preparation process of paste



图3 试验过程照片

Fig.3 Photographs of the test process

2.2 预试验及试验结果分析

为了了解膏浆性能,节约成本,采用粘土、水泥

材料开展了前期试验,试验用粘土为岳麓山地区典型的红粘土,制备过程要经历烘干、碾碎、过筛等步骤。为缩短施工工期,为了提高结石体的早期强度,预试验中选择了水玻璃和湖南宏禹工程集团有限公司研制的HY-4两种速凝剂。根据正交试验要求,选择正交试验设计表 $L_9(3^4)$,采用了三水平三因素的正交法设计试验。粘土-水泥膏浆体系的三因素三水平试验表见表2。试验检测结果见表3。

表3中的数据结果表明,粘土-水泥膏浆体系的样品密度低,强度整体偏小,为了进一步提高膏浆强度,采取掺入标准砂的方法设计了粘土-水泥掺

表2 粘土-水泥膏浆体系成分掺量

Table 2 Clay-cement paste system component dosage table

因素	水平		
	1	2	3
粘土	基准(1.0)		
A:水泥	0.2	0.25	0.3
B:水	0.6	0.7	0.8
C:外加剂	0	HY-4(5%)	水玻璃(5%)

砂复合膏浆体系,并采取三因素三水平的方法设计了试验(见表4),试验测试结果见表5。

表3 粘土-水泥膏浆体系性能参数

Table 3 Clay-cement paste system performance parameters

编号	相对密度均值	流动度/mm	抗压强度/MPa			样品密度/($g \cdot cm^{-3}$)			含水量/%		
			7 d	14 d	28 d	7 d	14 d	28 d	7 d	14 d	28 d
1	1.695	112.5	0.307	0.386	0.531	1.67	1.68	1.69	48.27	48.96	46.39
2	1.644	187.5	0.210	0.259	0.315	1.61	1.64	1.61	56.56	55.33	54.76
3	1.611	225	0.109	0.116	0.195	1.56	1.55	1.60	61.67	63.99	59.58
4	1.660	127.5	0.500	0.570	0.731	1.67	1.69	1.67	49.00	49.62	47.83
5	1.661	185	0.271	0.363	0.524	1.65	1.65	1.57	52.31	51.72	47.24
6	1.643	292.5	0.208	0.257	0.401	1.58	1.56	1.52	52.83	52.47	48.98
7	1.716	75	0.634	0.925	1.287	1.67	1.70	1.67	45.59	44.11	40.45
8	1.688	210	0.431	0.540	0.799	1.66	1.63	1.58	49.28	47.45	41.52
9	1.638	277.5	0.344	0.405	0.651	1.61	1.59	1.52	56.29	54.21	43.80

表4 粘土-水泥掺砂复合膏浆体系成分掺量

Table 4 Clay-cement with sand composite paste system component dosage table

因素	水平		
	1	2	3
粘土	基准(1.0)		
A:水泥	0.4	0.6	0.8
B:水	0.8	0.9	1.0
C:砂	0.5	1.0	1.5

对比发现,经过掺砂处理后的膏浆结石体强度有了明显提高,完全达到了工程的需求。

2.3 正式试验及试验结果分析

预试验结果表明,粘土-水泥掺砂复合膏浆体系能够满足工程实际要求。试验采用场地附近的粘土,但粘土含砾较多,在遵循就地取材原则的前提下,选择采用机制砂和当地的粘土来制备膏浆。试验设计采用正交试验方法,根据正交试验设计表

$L_9(3^4)$,采用了三水平三因素的正交法进行了试验。具体试验方案如表6所示。

根据正交试验设计表,结合拟定的影响因素及水平,获得正交试验设计方案见表7。

通过试验测试获得了表8中各组膏浆的性能数据。为了深入了解膏浆在该盾构掘进工程中的适用性以及各种影响因素对膏浆性能的影响程度,开展了结石体抗压强度分析和极差分析。

2.3.1 结石体抗压强度结果分析

膏浆结石体的抗压强度是评估注浆加固效果的关键指标,尤其对于增强注浆帷幕的加固与防渗功能至关重要。因此,在完成膏浆制备后,迅速进行了相对密度和流动度测试,并将膏浆倒入模具中,使其凝固成结石体。随后,在7、14、28 d时分别测试其抗压强度指标。

图4展示了各体系下膏浆结石体抗压强度随时间变化的趋势。观察发现,随着养护时间的增加,

表5 粘土-水泥掺砂复合膏浆体系性能参数
Table 5 Performance parameters of clay-cement-sand composite paste system

编号	相对密度均值	流动度/ mm	抗压强度/MPa			样品密度/(g·cm ⁻³)			含水量/%		
			7 d	14 d	28 d	7 d	14 d	28 d	7 d	14 d	28 d
1	1.730	152.5	0.568	0.760	0.943	1.72	1.71	1.70	39.53	41.08	39.59
2	1.810	185	0.609	0.744	1.018	1.75	1.77	1.70	34.72	32.18	28.89
3	1.859	210	0.505	0.616	0.734	1.81	1.82	1.70	30.16	28.78	22.13
4	1.921	95	2.055	2.220	2.856	1.92	1.93	1.90	26.72	26.81	26.77
5	1.915	125	1.676	1.868	2.287	1.91	1.88	1.89	24.26	24.59	24.09
6	1.721	230	1.252	1.571	2.003	1.66	1.67	1.60	36.00	36.03	31.01
7	1.998	99	4.434	4.913	6.397	1.96	1.98	2.00	21.55	21.24	21.92
8	1.805	130	3.149	3.345	4.270	1.78	1.79	1.79	32.72	33.31	33.84
9	1.838	160	2.635	2.981	3.539	1.79	1.79	1.82	28.90	28.45	29.93

表6 膏浆成分掺量
Table 6 Paste composition mixing table

因素	水平		
	1	2	3
水泥	基准(1.0)		
A:干土	1.5	2.0	2.5
B:砂	6.0	7.0	8.0
C:水胶比	0.4	0.5	0.6

表7 正交试验设计方案
Table 7 Orthogonal experimental design program

编号	掺入量		
	干土/kg	砂/kg	水胶比/%
1	1.5	6.0	0.4
2	1.5	7.0	0.5
3	1.5	8.0	0.6
4	2.0	7.0	0.4
5	2.0	8.0	0.5
6	2.0	6.0	0.6
7	2.5	8.0	0.4
8	2.5	6.0	0.5
9	2.5	7.0	0.6

各组试样的抗压强度均增强,且在养护前期增长速率较高,后期较慢。对比发现,1号试样的抗压强度远高于其他试样,表明A1B1C1配方的性能明显优于其他配方,但这不一定是整个体系中的最佳配比,为了进一步研究,需要进一步对试验数据进行分析。

2.3.2 正交试验结果的极差分析

为深入分析,采用了极差分析方法对正交试验结果进行了处理,着重分析了28 d的抗压强度和样品密度数据。极差分析得到了各水平因素对应的R值,具体数值见表9。由于3个影响因素对样品密度的影响较小,故在R值分析表中省略了该因素的数据。试验结果表明,水胶比是影响坍落度的主要因素,其反映了膏浆的流动性质,坍落度越大膏浆越稠,过于稠密的膏浆可能影响其可注性。对28 d的抗压强度R值的观察显示,干土和水胶比是对膏浆抗压强度影响最大的2个因素,其中水胶比的影响更为显著。

为了直观反映正交试验结果,绘制了坍落度、含水量(28 d)、抗压强度(28 d)的水平均值图(见图5~7)。图中的数值越大则代表该因素对于影响膏浆性能的贡献越大。

图5展示了28 d时抗压强度的各影响因素的水平均值。观察可得,两者的结石体在最佳抗压强度配比上均为A1B2C1。通过R值分析,可以确定干土和水胶比对膏浆结石体抗压强度的影响相近。而在3组不同掺砂量下的试验组中,总体抗压强度的轻微差别表明,在需要提供支撑或承重的工程中,应该更多地考虑干土掺量和水胶比对膏浆性质的影响。

图6展示了膏浆含水量在28 d时各影响因素的水平均值。分析表明,当膏浆配比为A3B1C3时,第7 d和第28 d的膏浆含水量最高。这3个因素对含水量的贡献程度相当,表明膏浆的含水量受到它们

表8 浆液性能数据

Table 8 Slurry performance data sheet

编号	相对密度均值	流动度/mm	坍落度/mm	抗压强度/MPa			样品密度/(g·cm ⁻³)			含水量/%		
				7 d	14 d	28 d	7 d	14 d	28 d	7 d	14 d	28 d
1	2.17	140	238	6.042	7.112	7.846	2.18	2.13	2.20	11.56	11.38	11.74
2	2.18	170	146	4.047	5.727	5.678	2.17	2.17	2.17	12.76	11.61	13.12
3	2.15	170	192	3.53	4.760	4.981	2.12	2.12	2.18	13.03	12.41	13.08
4	2.17	150	271	4.089	5.651	6.212	2.17	2.16	2.19	12.37	11.82	12.42
5	2.16	165	181	2.809	4.055	4.085	2.15	2.14	2.16	13.49	12.74	13.63
6	2.09	205	45	2.106	2.711	3.139	2.07	2.07	2.08	17.13	16.27	17.13
7	2.15	155	213	3.194	4.065	5.105	2.15	2.12	2.16	13.73	12.77	14.02
8	2.07	175	72	2.374	3.353	3.630	2.08	2.04	2.07	17.16	15.72	17.08
9	2.06	210	42	1.37	1.859	2.038	2	2.04	2.05	19.63	17.40	19.30

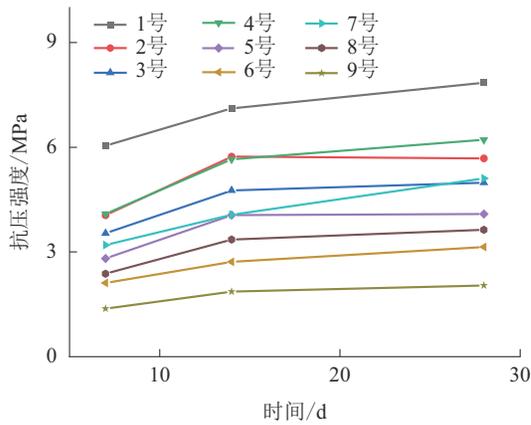


图4 膏浆结石体抗压强度的时变情况

Fig.4 Time-varying compressive strengths of paste-slurry agglomerates

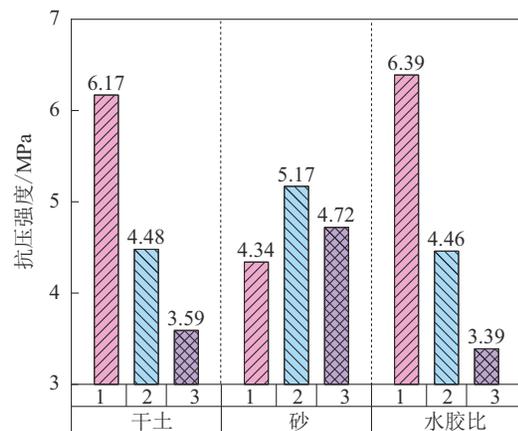


图5 抗压强度影响因素的水平均值

Fig.5 Plot of water mean values of factors affecting compressive strength

表9 各因子R值统计

Table 9 Statistical table of R-value for each factor

测试参数	影响因素		
	干土	砂	水胶比
坍落度/mm	83.0	87.0	147.7
28 d 抗压强度/MPa	2.6	0.8	3.0

的共同影响。

图7展示了各项影响因素对坍落度的平均水平。从图中可以观察到,A1B1C3配比的膏浆坍落度最高。通常情况下,提高抗压强度会牺牲一部分膏浆的流动性。表9中的R值结果也显示,水胶比、砂、干土掺量对于浆料坍塌度的贡献度是递减的,膏浆的抗压强度性能则是主要由水胶比和干土掺量共同决定。可见,水胶比对于浆料的流动性能和

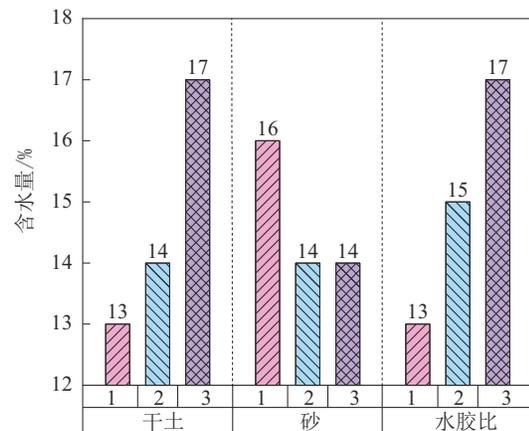


图6 含水量影响因素的水平均值

Fig.6 Plot of water mean values of factors affecting compressive strength

混凝土的抗压强度至关重要。在实际工程中,应当严格控制水胶比,平衡抗压强度与坍塌度,以确保膏浆的性能可以符合实际要求。此外,A3B3C1配比的坍塌度最小,表明此时的膏浆具备较好的可注性。

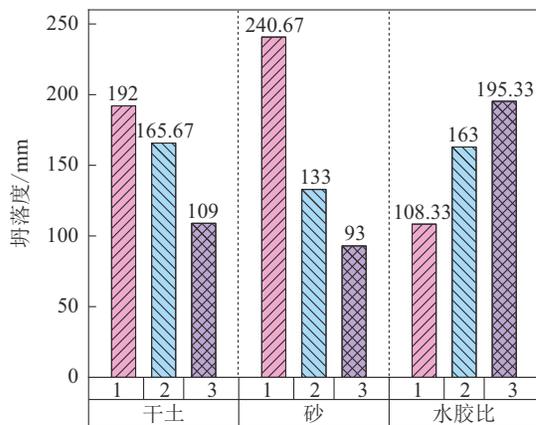


图7 坍塌度影响因素的水平均值

Fig.7 Plot of water mean values of slump-influencing factors

结石体的抗压强度反映了膏浆固结后形成的固体块的硬化程度和承载能力,在实际工程中具有重要意义。试验结果表明,采用工程现场采集的材料制备膏浆来防治溶洞是可行的。对比不同组别的膏浆性能,发现9号膏浆(A3B2C3)流动性好但抗压强度未达到3 MPa标准;1~5号膏浆强度足够但流动性较差,可能导致施工困难。基于此标准,优选6号(A2B1C3)和8号(A3B1C2)膏浆。考虑材料经济性,由于水泥价格高于干土和砂石,6号膏浆在满足设计院性能指标要求下,最符合工程实际需求。因此,综合考虑,建议选择6号(A2B1C3)膏浆作为本次施工的填充注浆材料。

3 结论与展望

本文以潇水某盾构钻进工程段工程为研究背景,为解决项目周边岩溶发育问题就地取材开展了正交试验。在设计中充分考虑了干土、砂、水胶比3个因素,对坍塌度、抗压强度(28 d)进行了测试,并采用极差分析方法进行了深入研究。研究结果总结如下:

(1)干土和水胶比是对膏浆抗压强度影响最大的两个因素;干土、砂、水胶比3个因素对含水量的贡献程度相当;水胶比直接影响膏浆的流动性能和

结石体的抗压强度,但两者并非完全对立。在实际工程中,应根据具体需求权衡这两个因素,以确保膏浆的性能符合实际需要。

(2)根据试验结果分析,膏浆坍塌度的主要影响因素是水胶比,而干土和砂的掺量对坍塌度的贡献相当;在抗压强度方面,贡献度依次为水胶比>干土>砂。综合考虑膏浆性能参数和经济性,建议选用6号(A2B1C3)膏浆作为本次施工的填充注浆材料。研究表明,利用施工现场的粘土和机制砂制备膏浆可以满足设计院对岩溶填充材料的性能指标要求,确保潇水某盾构掘进工程段施工的顺利进行。

(3)该研究的后续工作将在正式试验的基础上深化正交试验的设计,精选方案,有望在更低的经济成本下实现符合设计院的要求。

参考文献(References):

- [1] 翁敦理,陈明辉.深孔注浆技术在地铁暗挖隧道施工中的应用[J].现代隧道技术,2012,49(2):137-141.
WENG Dunli, CHEN Minghui. Application of deep hole grouting technology in the construction of metro hidden tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012,49(2):137-141.
- [2] FRANSSON A, TSANG C F, RUTQVIST J, et al. A new parameter to assess hydromechanical effects in single-hole hydraulic testing and grouting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007,44(7):1011-1021.
- [3] 程万,孙家应,张毅,等.煤层底板多分支水平井渗透注浆扩散规律数值模拟研究[J].钻探工程,2023,50(5):133-139.
CHENG Wan, SUN Jiaying, ZHANG Yi, et al. Numerical simulation research on diffusion law of seepage grouting in multi-branch horizontal well of coal seam floor[J]. Drilling Engineering, 2023,50(5):133-139.
- [4] 代永文,李建强,林恩,等.强岩溶地区盾构隧道注浆处理方案设计[J].钻探工程,2021,48(6):118-125.
DAI Yongwen, LI Jianqiang, LIN En, et al. Grouting design for shield tunnels in strong karst areas[J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):118-125.
- [5] 谭宝宝,冯杨文,陈晓东,等.有压动水覆盖层帷幕成幕及控制灌浆技术研究与应用[J].钻探工程,2021,48(12):120-125.
TAN Baobao, FENG Yangwen, CHEN Xiaodong, et al. Research and application of curtain forming and controlled grouting technology for overburden with pressurized flow water[J]. Drilling Engineering, 2021,48(12):120-125.
- [6] 刘健,张载松,韩焯,等.考虑黏度时变性的水泥浆液盾构壁后注浆扩散规律及管片压力模型的试验研究[J].岩土力学,2015,36(2):361-368.
LIU Jian, ZHANG Zaisong, HAN Ye, et al. Backfilled grouting diffusion law and model of pressure on segments of shield tunnel considering viscosity variation of cement grout[J]. Rock

- and Soil Mechanics, 2015, 36(2):361-368.
- [7] 张庆松,张连震,张霄,等.基于浆液黏度时空变化的水平裂隙岩体注浆扩散机制[J].岩石力学与工程学报,2015,34(6):1198-1210.
ZHANG Qingsong, ZHANG Lianzhen, ZHANG Xiao, et al. Grouting diffusion in a horizontal crack considering temporal and spatial variation of viscosity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6):1198-1210.
- [8] 周瑶,刘长友,谢志清,等.粒径对煤矸石浆液的性能影响研究[J].矿业研究与开发,2023,43(12):118-123.
ZHOU Yao, LIU Changyou, XIE Zhiqing, et al. Study on the effect of particle size on the performance of gangue slurry[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(12):118-123.
- [9] 武朝光,陈治亚,李梓焜,等.缓凝型水泥浆液配合比优化及锚孔浆岩界面特性影响研究[J].铁道科学与工程学报,2024(1):1-13.
WU Zhaoguang, CHEN Zhiya, LI Zikun, et al. Study on optimization of mix ratio of slow setting cement slurry and influence of slurry rock interface characteristics of anchor hole [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024(1):1-13.
- [10] 张铎,岑孝鑫,赵炬,等.气化灰渣灌浆流动特性实验研究[J].煤矿安全,2022,53(4):29-35,44.
ZHANG Duo, CEN Xiaoxin, ZHAO Ju, et al. Experimental study on flow characteristics of gasification ash slag grouting [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(4):29-35, 44.
- [11] Schokker A J, Hamilton H, Schupack M. Estimating post-tensioning grout bleed resistance using a pressure-filter test [J]. PCI Journal, 2002, 47(2):32-39.
- [12] 戎密仁,薛志坤,李向国,等.管道压浆浆液外加剂类型及掺量影响研究[J].地质与勘探,2023,59(2):398-407.
RONG Miren, XUE Zhikun, LI Xiangguo, et al. Study on the effect of type and dosage of pipeline slurry admixtures[J]. Geology and Exploration, 2023, 59(2):398-407.
- [13] 庞建勇,姚韦靖,王凌燕.采空区超细粉煤灰注浆充填材料正交试验及回归分析[J].长江科学院院报,2018,35(9):103-108.
PANG Jianyong, YAO Weijing, WANG Lingyan. Orthogonal test and regression analysis of ultrafine fly ash grouting and filling materials in the mining area [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2018, 35(9):103-108.
- [14] 张聪,阳军生,谢亦朋,等.富水岩溶越江盾构隧道注浆材料试验与应用研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(9):2120-2130.
ZHANG Cong, YANG Junsheng, XIE Yipeng, et al. Experimental and applied research on grouting materials for water-rich karst cross-river shield tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9):2120-2130.
- [15] 戴勇,阳军生,张聪,等.泥水盾构弃渣在同步注浆材料中的再利用研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(10):40-45.
DAI Yong, YANG Junsheng, ZHANG Cong, et al. Research on recycling of discarded soil produced from slurry shield in synchronous grouting materials[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(10):40-45.
- [16] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等.正交试验设计和分析方法研究[J].实验技术与管理,2010,27(9):52-55.
LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9):52-55.
- [17] 杨坪,陈安.均匀设计在室内大型注浆试验研究中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(3):9-11.
YANG Ping, CHEN An. Application of uniform design in indoor large-scale grouting pilot study[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2006, 33(3):9-11.
- [18] 宋彦波,高全臣.神经网络结合遗传算法在注浆材料配方优化中的应用[J].建井技术,2006(2):22-25,43.
SONG Yanbo, GAO Quanchen. Application of artificial neural network combined with genetic algorithm in the optimisation of grouting material formulation[J]. Mine Construction Technology, 2006(2):22-25, 43.

(编辑 王文)