

DOI: 10.11779/CJGE201710014

水下岩溶浆液抗分散性质试验研究及工程应用

张 聪¹, 阳军生¹, 张贵金², 叶新田¹, 张智博³, 雷金山¹

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 长沙理工大学水利学院, 湖南 长沙 410041; 3. 中铁十四局集团隧道工程有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要: 开发了一种水下岩溶注浆材料抗分散性质测试装置, 能科学评价注浆浆液的抗分散性质。利用该装置进行了改性黏土水泥膏浆充填水下岩溶的抗分散性质试验, 采用留存率指标对浆液在不同水固比、岩溶水流速下的抗分散性质进行了定量评价, 并对留存体进行物理力学性能测试。试验表明, 改性黏土水泥膏浆抗分散性能受浆液水固比、岩溶充填物及岩溶水流速等因素影响明显, 在不大于 0.8 m/s 的岩溶水流速下浆液抗分散性能良好, 随着浆液水固比或岩溶水流速的减小, 浆液留存率呈增大趋势, 而充填物的存在会显著提高浆液的留存率。取留存体进行物理力学性能测试, 留存体密实度受充填物影响较大, 浆液水固比次之, 岩溶水流速影响较小; 动水岩溶环境下注浆时, 浆液顺水扩散距离大于逆水扩散距离, 浆液黏度对扩散距离影响明显, 岩溶水流速有利于浆液沿顺水流方向扩散而抑制浆液沿逆水流方向扩散; 留存体 28 d 抗压强度受抗冲条件影响明显, 影响因素中充填物对留存体的抗压强度影响最大, 其次为浆液水固比和岩溶水流速, 岩溶水养护环境下 28 d 抗压强度明显小于淡水环境养护, 但仍可达 3 MPa。经工程应用原型试验表明, 改性黏土水泥膏浆可用于一定岩溶水流速下的岩溶区治理, 室内试验提出的水下岩溶治理工程浆液配比选取原则可行, 可为盾构隧道水下岩溶注浆治理提供理论指导。

关键词: 盾构隧道; 水下岩溶; 改性黏土水泥膏浆; 抗分散性质; 留存体

中图分类号: TU94

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)10-1859-08

作者简介: 张 聪(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事基础处理及隧道工程等方面的科研。E-mail: zc8023cl@163.com。

Experimental study and engineering application of anti-washout properties of underwater karst grout

ZHANG Cong¹, YANG Jun-sheng¹, ZHANG Gui-jin², YE Xin-tian¹, ZHANG Zhi-bo³, LEI Jin-shan¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 3. Tunnel Engineering Co., Ltd., China Railway 14th Bureau Group, Jinan 250000, China)

Abstract: The test apparatus for underwater karst grouting materials, which be used to evaluate the anti-washout properties of grout, is developed. Using this device, a series of anti-washout property tests on modified clay cement paste grout in underwater karst fillings are conducted. The retention ratio index of grout is utilized for the quantitative evaluation of the anti-washout properties of grout, and the tests on physical and mechanical properties of retained body are also carried out. The result shows that the anti-washout properties of modified clay cement paste grout are greatly affected by the water cement ratio of grout, karst fillings and velocity of water flow. The anti-washout properties of grout are relatively good when the velocity of karst water flow is no more than 0.8 m/s. With the increasing water cement ratio of grout or the decreasing water flow velocity, the retention ratio of grout tends to increase and can be significantly improved with the existence of karst filling materials. The physical and mechanical performance tests on the retained body indicate that the density is greatly influenced by the filling materials. When grouting under hydrodynamic environment, the downstream grout diffusion distance is greater than the upstream one. The viscosity of grout has a great effect on the diffusion distance, and the velocity of karst water flow can be in favour of the diffusion of grout along the water flow direction and restrain the diffusion along the reverse water flow direction. The 28-d compressive strength of retained body is deeply influenced by filling materials. The 28-d compressive strength under karst water condition is significantly less than that under freshwater condition, but it is still up to 3 MPa. The engineering application of prototype tests indicates that the modified clay

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279019); 中国电力投资集团公司重大科技计划项目(2011-036-WLDKJ-X); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2016zzts075)

收稿日期: 2016-07-04

cement paste grout can be used for treatment of karst areas under certain velocities of karst water. The formula for grout in underwater karst treatment derived by indoor tests is feasible and may provide theoretical guidance for underwater karst grouting of shield tunnels.

Key words: shield tunnel; underwater karst; modified clay cement paste; anti-dispersion property; retention body

0 引言

盾构隧道穿越岩溶地层时,经常面临掌子面失稳、盾构下沉及局部液化等工程事故,而压力注浆是工程实践中广泛采用的岩溶处理手段^[1-3]。在动水岩溶治理工程中,传统水泥单液浆稳定性差,岩溶水下易于冲刷,难于达到加固防渗要求^[4-5],注浆浆液是否具有好的岩溶水下抗分散性质与留存体物理力学性能是岩溶区水下盾构隧洞施工和长期运营的重要保障。目前,学者对于浆液抗分散性质的研究相对较少,如 Khayat 等^[6-7]提出了一种未考虑实际动水条件的简易测试方法;李利平等^[8]研制了一种具有凝结时间快、遇水迅速膨胀等特性的马丽散浆液,并通过室内试验定量评价了浆液的抗冲刷性能;刘人太等^[9]将注浆材料置于大理石板上,对比分析 30 min 后浆液凝胶体在静水与动水条件下的质量变化,提出采用留存率来评价浆液抗分散性质;袁敬强等^[10]考虑浆液在未凝胶之前即面临动水冲刷的关键过程,开展了速凝浆液的抗分散性质试验,并定义浆液留存率指标,对速凝浆液在动水条件下的抗分散性质进行定量评价。但遗憾的是,尚未有学者进行岩溶水环境下浆液的抗分散性及留存体基本性能研究。

为了科学评价岩溶水环境下浆液抗分散性及留存浆液的基本性能,本文设计了水下岩溶浆液抗分散性质试验装置,进行多因素影响下的浆液抗分散性质和留存体物理力学性能试验,并通过工程应用原型试验论证了试验结果的正确性,以期科学评价水下岩溶注浆材料能否达到盾构隧道施工和长期运营要求提供依据。

1 水下岩溶浆液抗分散性质试验

1.1 试验装置

为了探讨水下不同充填物岩溶注浆时,浆液水固比、岩溶水流速与浆液抗分散性质及留存体的基本性能的关系,研制了一种水下岩溶浆液抗分散性质试验装置。该装置主要由岩溶水供应系统、可视化水槽与溶洞、注浆系统、废液收集系统及量测系统五部分构成,如图 1, 2 所示。

(1) 岩溶水供应系统

岩溶水供应系统主要由空压机、岩溶水储罐、调节阀及高压水管组成,利用空压机产生适宜压力,将

岩溶水压入高压水管内,并通过调节进水口阀门控制岩溶水流速。空压机可供压力最大达 2 MPa,岩溶水储罐可储存 300 L 岩溶水,罐顶设置有加液单向阀和泄气阀,高压水管内径为 4 cm。

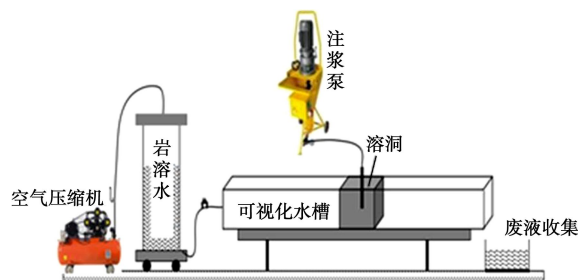


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic view of laboratory grouting test device



图 2 试验装置实图

Fig. 2 Laboratory grouting test device

(2) 可视化水槽与溶洞

可视化水槽与溶洞由高压有机玻璃和角钢等组装而成,并置于可调节高度的铁架上。可视化水槽尺寸为 200 cm×35 cm×35 cm,水槽前端与高压水管连接,后端设置有滤网,利于废液收集。可视化溶洞尺寸为 30 cm×30 cm×30 cm,上端设有可与注浆管连接的丝扣,四周用布满孔洞的有机玻璃板和角钢组装,溶洞内可充填淤泥、细砂等。

由于岩溶围岩裂隙的复杂性,且试验主要探讨浆液自身和注浆参数对浆液抗分散性质及留存体性能的影响,固仅考虑均匀裂隙下细砂不被水流带出溶洞的情况,孔洞设置大小为 0.25 mm,且尽量布满整个有机玻璃板,减小对岩溶水的阻碍。

(3) 注浆系统

注浆系统由螺杆注浆泵、注浆软管、压力表及注

浆管等组成,可真实模拟注浆过程。注浆泵容量最大可达 20 L,压力表可监测注浆过程压力变化情况,注浆软管与注浆管止浆通过丝扣连接,注浆管长 30 cm,内径为 4 cm。

（4）废液收集及量测系统

废液收集主要由废液收集桶及内置的滤网组成。监测系统主要包括秒表、电子秤、环刀及取样刀等,电子秤可测得注浆前后溶洞质量,环刀和取样刀用于取样。

（5）试验装置工作机理

调设空气压缩机压力值,将储水罐内的岩溶水压入高压水管内,通过调节阀控制岩溶水进水流速和可视化水槽排水口流速,直至可视化水槽内水流稳定。将配制好的浆液倒入注浆泵内,通过注浆泵注入可视化溶洞内,待浆液全部注入后观察可视化水槽内后端,直至后端尾水较清澈时,关闭进水阀,排出可视化水槽内岩溶水,称量溶洞重量,并取样对留存体进行基本物理力学性能测试。

1.2 试验材料

（1）岩溶水及溶洞充填物

参考大量实际工程水文地质资料,配制含典型离子含量的岩溶水和常见的细砂类、淤泥类充填物。其中,淤泥含水率 85%,液限 65.2%,塑性指数 13,相对密度为 1.22;细砂含水率 4.5%,表观密度 2.11 g/cm³。配制的岩溶水各离子含量,见表 1。

表 1 配制岩溶水成分表

Table 1 Formulation ingredients of karst water (mg/L)				
离子种类	氯离子 (Cl ⁻)	硫酸根离子 (SO ₄ ²⁻)	碳酸氢根离子 (HCO ₃ ⁻)	镁离子 (Mg ²⁺)
浓度	1.310	7.170	5.237	4.688

（2）注浆材料

试验采用自制的改性黏土水泥膏浆,由水泥、黏土、水及改性剂组成。其中,水泥为 42.5R 普通硅酸盐水泥,水泥细度通过 80 μm 方孔筛的筛余量不大于 5%,性能满足 GB175—2007 标准的有关要求;黏土采用现场附近较纯的优质黏土,塑性指数 29,黏粒(粒径<0.005 mm 为 60%,原浆比重为 1.25;改性剂成分为: A (矿物类添加剂 sodium aluminate)+B (活性剂 calcium lignosulfonate)。

1.3 试验步骤

首先配制好足量的岩溶水,倒满整个储水罐,并按图 1 所示连接好各组件,检查试验装置气密性。将可视化溶洞上盖打开,安装好注浆管,并按试验需求不装或装填满淤泥、细砂等,并称量溶洞质量 (M_0)。然后,调节空气压缩机及前后端水阀,将可视化水槽

内水流采用浮标法调设到对应恒定流速 v (0.2, 0.5, 0.8 m/s)。待可视化水槽内水流稳定后,配制工程上常用的浆液水固比 W/C (0.8:1, 1:1, 1.2:1) 置于注浆泵内,开启注浆泵注浆,待浆液全部注入后,关闭注浆泵,观察可视化水槽尾部水流,直至尾部水流较清澈时,关闭可视化水槽前端水阀,将空压机关闭,卸排掉储水罐、管道及可视化水槽内岩溶水,再次称取可视化溶洞质量 (M_S),并按要求对留存体进行取样,进行密实度、黏度及岩溶水养护下的结石体强度测试。

2 试验结果与分析

采用全面试验法对改性黏土水泥膏浆进行抗分散性质试验,共计 21 组(由于含淤泥类溶洞在动水下易被冲蚀,只考虑低水流情况),测定浆液注入前后可视化溶洞总质量,计算得到浆液留存率 GRR,见表 2。

表 2 浆液抗分散性质试验结果

Table 2 Results of anti-washout property tests				
试验序号	充填物类型	动水流速 v / (m·s ⁻¹)	水固比 W/C	GRR / %
1	不含充填物	0.2	0.8	96.20
2		0.2	1.0	93.90
3		0.2	1.2	85.33
4		0.5	0.8	90.93
5		0.5	1.0	85.37
6		0.5	1.2	75.74
7		0.8	0.8	77.60
8		0.8	1.0	76.87
9		0.8	1.2	62.62
10	含细砂	0.2	0.8	95.53
11		0.2	1.0	95.25
12		0.2	1.2	93.19
13		0.5	0.8	91.19
14		0.5	1.0	86.35
15		0.5	1.2	76.16
16		0.8	0.8	81.40
17		0.8	1.0	77.15
18		0.8	1.2	73.07
19	含淤泥	0.2	0.8	94.63
20		0.2	1.0	93.98
21		0.2	1.2	88.19

2.1 水固比对浆液抗分散性质的影响

不同岩溶水流速下,浆液留存率试验曲线如图 3 所示。

由图 3 可知,在不大于 0.8 m/s 的岩溶水流速下,改性黏土水泥膏浆在充填不同类型溶洞时浆液留存率均达 63%以上,主要为改性剂 A 加入黏土水泥浆液后会发生复杂的物理化学反应,改善浆液稳定性,生成的 Al(OH)₃ 和 3CaO·Al₂O₃·6H₂O 等水化产物进一步促进了水泥水化反应,从而使浆液迅速凝固,大幅度提高了浆液的整体性与黏聚力,使得该浆液具有一定的岩溶动水抗分散特性。而随着改性黏土水泥膏浆水固比的减小,浆液留存率呈增大趋势,最大可达 96%,

表现出水固比较小的稠浆抗分散性质相对更好；而对比不同充填物溶洞下浆液抗分散性可知，含充填物的溶洞浆液留存率要明显高于不含充填物的溶洞浆液留存率，且水固比越大表现得越明显。分析产生上述现象的原因，浆液的水固比越大，水泥与黏土形成的黏土水泥球团粒总量相应减少，与矿物类添加剂 A 反应生成的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 等水化产物也相应减少，进而导致浆液稳定性变差，胶凝过程减缓，更易被岩溶水冲蚀，而当溶洞内有充填物时，充填物不仅会降低岩溶水的冲刷力，且充当了注浆材料胶凝过程的外骨架结构，能进一步提高留存体的整体稳定性和黏聚力。

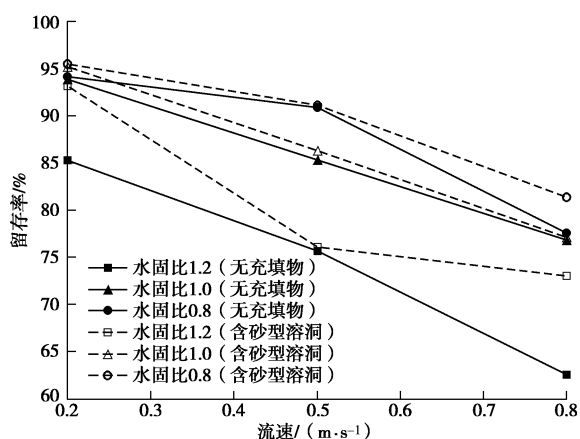


图3 水固比 W/C 对浆液留存率 GRR 影响曲线

Fig. 3 Experimental curves of GRR under different ratios of water to cement

因此，只要确保浆液能达到可泵性要求，为提高充填型溶洞注浆浆液的抗分散性，可考虑使用水固比较低的浆液，而为提高无充填物类型溶洞注浆浆液的抗分散性，可在浆液内适当掺入细砂，但为确保浆液可泵性和流动性细砂掺入量宜小于 30%。

2.2 岩溶水流速对浆液抗分散性质的影响

岩溶水不同流速下，浆液留存率试验曲线见图 4。

由图 4 可知，浆液在充填不同类型充填物溶洞时，均呈现出相同规律，即随着浆液水固比的减小，浆液留存率呈增大趋势，水固比较小的浆液抗分散性质相对较好；而比较浆液充填不同充填物溶洞的浆液留存率可知，同一水固比下，含充填物的溶洞浆液留存率要明显高于不含充填物的溶洞浆液留存率，含细砂类岩溶浆液留存率略大于含淤泥类岩溶浆液留存率，且流速越大、水固比越大表现得越明显。分析上述原因，浆液水固比越大，一方面黏土水泥浆液水化产物总量相对应的会减少，加入改性剂 A 后反应生成的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 等水化产物总量也对应减少，从而使得浆液凝胶过程变缓。另一方面，浆液

水固比越大，浆液中自由水含量也相应增加，自由水的增加会导致浆液中离子浓度的降低，从而会降低改性剂 A 的促凝速度。因此，在确保浆液可泵性和流动性的条件下，可采取水固比较低或黏土原浆比重较大等抗分散性质较好的浆液配比方案。

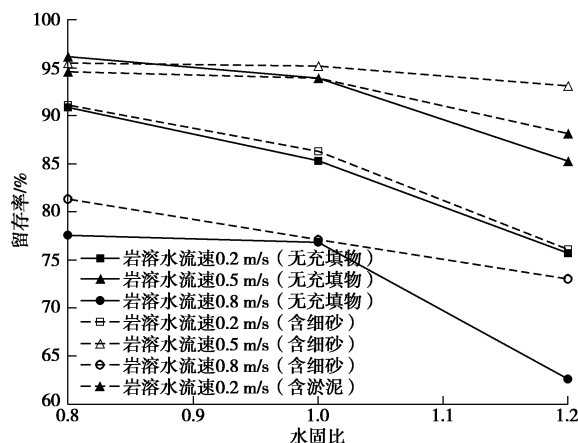


图4 流速对浆液留存率 GRR 影响试验曲线

Fig. 4 Experimental curves of GRR under different water velocities

另外，当调节岩溶水流速至 1 m/s 时，改性黏土水泥膏浆留存率急剧下降，而通过调节水固比、掺细砂等方式，尚不能得到明显改善，仍达不到封水堵漏的作用，表明改性黏土水泥膏浆仅适宜于流速不大于 1m/s 的水下岩溶区治理。

2.3 浆液抗分散性质影响因素多元回归分析

为了定量评价不同岩溶充填物下，浆液水固比和岩溶水流速对改性黏土水泥膏浆抗分散性质的影响，待试验数据进行标准化处理后，采用 SPSS 软件进行多元回归分析^[11]，得到不同岩溶充填物下，浆液留存率与各影响因素之间的关系为

$$\text{GRR}_1 = 1.33 - 0.32[v] - 0.35[W/C] \quad (1)$$

$$\text{GRR}_2 = 1.22 - 0.22[v] - 0.30[W/C] \quad (2)$$

$$\text{GRR}_3 = 0.50 - 0.63[W/C]^2 - 5.38[v][W/C] \quad (3)$$

式中， GRR_1 ， GRR_2 及 GRR_3 分别为无充填物、含细砂及含淤泥的溶洞浆液留存率； $[W/C]$ ， $[v]$ 分别为标准化处理后的浆液水固比和岩溶水流速，多元回归分析的复相关系数分别为 $r_{\text{GRR}_1}^2 = 0.924$ ， $r_{\text{GRR}_2}^2 = 0.904$ ， $r_{\text{GRR}_3}^2 = 0.988$ 。

由式 (1) ~ (3) 可以看出：浆液留存率与动水流速 v ， W/C 均呈负相关关系；岩溶水流速对浆液的留存率影响最大，水固比次之；不同充填物下水固比影响权重不一，随着浆液水固比的减小，浆液留存率增加。

3 留存体物理力学性能研究

3.1 留存体密实度

采用环刀法对留存体进行密实度测试, 为尽量减少试验误差, 每组进行 3 次取样, 计算密实度平均值, 测试结果见表 3、图 5。

表 3 留存体密实度测试结果

Table 3 Test results of density of retained body				
试验 序号	充填物 类型	流速 v $/(m \cdot s^{-1})$	水固比 W/C	密实度 /%
1	不含 充填物	0.2	0.8	59.38
2		0.2	1.0	53.74
3		0.2	1.2	47.57
4		0.5	0.8	57.93
5		0.5	1.0	51.08
6		0.5	1.2	50.53
7		0.8	0.8	55.77
8		0.8	1.0	50.30
9		0.8	1.2	46.13
10	含 细砂	0.2	0.8	77.37
11		0.2	1.0	74.09
12		0.2	1.2	71.94
13		0.5	0.8	75.60
14		0.5	1.0	73.88
15		0.5	1.2	71.29
16		0.8	0.8	74.98
17		0.8	1.0	73.70
18		0.8	1.2	70.83

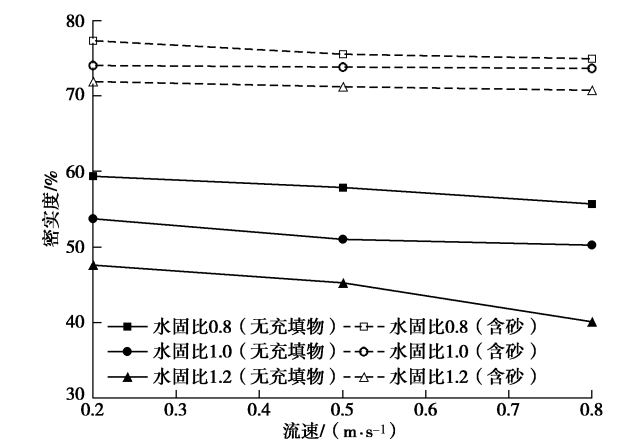


图 5 留存体密实度试验曲线

Fig. 5 Test curves of density of retained body

由表 3、图 5 可以看出, 留存体密实度与浆液抗分散条件密切相关, 充填物影响最明显, 浆液水固比影响次之。含砂类溶洞浆液留存体密实度均大于 70%, 远大于未含充填物的溶洞浆液留存体密实度; 随着浆液水固比的增大, 留存体密实度呈减小趋势; 岩溶水流速对浆液留存体密实度影响不明显。其主要原因为, 浆液水固比越小, 浆液越稠, 在有充填物的岩溶充填注浆过程中更易产生挤密效应, 从而留存体更密实。

3.2 留存体黏度及扩散距离

留存体的流变特性对注浆的影响主要体现在可灌性与浆液扩散距离两方面。对于水下岩溶注浆而言, 留存体的流变性主要反映出留存体充填满岩溶后向四周裂隙岩溶扩散的能力, 当作用于改性黏土水泥膏浆

上的剪切力小于屈服强度时, 浆体静止不动, 只有当剪切力超过屈服强度之后浆体才开始运动。采用 R/S+plus 流变仪对留存体进行黏度测试, 保持转子剪切速率为 30 s^{-1} 不变, 测得留存体黏度和剪切力, 并引用相关学者研究成果^[12], 分析留存体流变特性对扩散距离的影响, 采用式 (4)、(5) 计算浆液扩散距离, 计算结果具体见表 4。

当浆液扩散与水流方向一致时:

$$t = \frac{6\eta}{b^2 \left(p_0 + \frac{1}{2} \rho_w v^2 \right)} \left(r^2 \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) - \frac{r^2 - r_0^2}{2} \right), \quad (4)$$

当浆液扩散与水流逆向时:

$$t = \frac{6\eta}{b^2 \left(p_0 - \frac{1}{2} \rho_w v^2 - p_c \right)} \left(r^2 \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) - \frac{r^2 - r_0^2}{2} \right). \quad (5)$$

式中 t 为注浆时间, 计算时取 $t=900\text{ s}$; η 为浆液黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); P_0 为注浆压力, 计算时取 1 MPa ; P_c 为静水压力 (Pa); ρ_w 为水的密度 (kg/m^3); v 为水流流速 (m/s); b 为裂隙开度, 取 0.1 cm ; r 为浆液扩散半径 (m); r_0 为注浆孔半径, 取 0.375 m 。

表 4 留存体扩散距离计算

Table 4 Calculation of retained diffusion distance					
试验 序号	流速 v $/(m \cdot s^{-1})$	水固比 W/C	初始黏度 $/(pa \cdot s^{-1})$	扩散距离/m	
				顺水	逆水
1	0.2	0.8	42.75	1.48	1.13
2	0.2	1.0	37.96	1.55	1.25
3	0.2	1.2	16.68	1.64	1.37
4	0.5	0.8	25.06	1.67	0.82
5	0.5	1.0	18.13	1.77	0.91
6	0.5	1.2	11.30	1.83	1.09
7	0.8	0.8	07.96	1.85	0.73
8	0.8	1.0	07.84	1.86	0.77
9	0.8	1.2	07.75	1.92	0.89

由表 4 易知, 动水岩溶环境下注浆时, 浆液顺水扩散距离大于逆水扩散距离; 顺水和逆水条件下, 浆液扩散距离与浆液留存体黏度成反比, 与浆液水固比成正比, 浆液扩散距离随着浆液黏度的减小而增大, 随着水固比降低而减小; 顺水条件下, 浆液扩散距离与岩溶水流速成正比, 逆水条件下, 浆液扩散距离与岩溶水流速成反比, 表明岩溶水流速有利于浆液沿顺水流方向扩散而抑制浆液沿逆水流方向扩散。

3.3 留存体抗压强度

留存体抗压强度是盾构机能否顺利施工及隧道后期运营的最主要影响因素。对每组留存体进行取样, 尺寸为 $7.07\text{ cm} \times 7.07\text{ cm} \times 7.07\text{ cm}$, 并置于岩溶水内养护至 28 d , 采用伺服压力机进行无侧限抗压强度的测定, 结石体岩溶水养护见图 6, 测试结果见表 5。



图 6 留存体结石体养护
Fig. 6 Maintenance of stone body

表 5 留存体抗压强度

Table 5 Compressive strengths of stone body

试验 序号	充填 物类型	流速 v $/(m \cdot s^{-1})$	水固比 W/C	岩溶水养护 28 d 抗压强度/MPa
1	不含 充填 物	0.2	0.8	3.96
2		0.2	1.0	3.91
3		0.2	1.2	3.79
4		0.5	0.8	3.71
5		0.5	1.0	3.64
6		0.5	1.2	3.55
7		0.8	0.8	3.51
8		0.8	1.0	3.35
9		0.8	1.2	3.13
10	含 细 砂	0.2	0.8	6.01
11		0.2	1.0	5.92
12		0.2	1.2	5.75
13		0.5	0.8	5.48
14		0.5	1.0	5.03
15		0.5	1.2	4.96
16		0.8	0.8	4.72
17		0.8	1.0	4.61
18		0.8	1.2	4.53

由于岩溶水对试样的侵蚀是一个长期过程，仅观察 28 d 的留存体抗压强度并不能得出岩溶水对试样的侵蚀规律。但总体而言，改性黏土水泥膏浆抗侵蚀能力较强，28 d 抗压强度可达 3 MPa；留存体 28 d 抗压强度受抗冲条件影响明显，影响因素中充填物对留存体的抗压强度影响最大，其次为浆液水固比和岩溶水流速；随着浆液水固比的增大或岩溶水流速的增大，留存体抗压强度随之减小。

4 改性黏土水泥膏浆适用性分析

在盾构隧道水下岩溶治理工程中，尤其涉及环保性要求时，可综合考虑施工条件、注浆要求等来选择合适配比的改性黏土水泥膏浆。根据水下岩溶抗分散性和留存体性能试验结果，提出水下岩溶治理工程的改性黏土水泥膏浆配比选取原则：

当岩溶水流速 $v \leq 0.2$ m/s 时，在满足浆液可泵性和流动性要求下，可以通过调整水固比来达到较高的

浆液留存率和较优的留存体性能，能满足盾构隧道施工和运营要求。

当岩溶水 $0.5 \text{ m/s} \leq v \leq 0.8 \text{ m/s}$ 时，在满足浆液可泵性和流动性要求下，对于含充填物型溶洞可以通过调整水固比来达到较高的浆液留存率和较优的留存体性能，而对于未含充填物的溶洞，可采用掺砂（细砂掺量宜小于 30%）等方式来达到较高的浆液留存率和较优的留存体性能，能满足盾构隧道施工和运营要求。

当岩溶水 $v > 1.0 \text{ m/s}$ 时，改性黏土水泥膏浆留存率急剧下降，而通过调节水固比、掺细砂等方式，尚不能得到明显改善，达不到封水堵漏的作用。

5 工程应用原型试验

长沙市轨道交通 3 号线一期工程阜埠河站至灵官渡站区间全长约 2663 m，越江部分达 1400 m。工程勘测表明，该区间地层上部为填土、粉砂、卵石等，基岩主要为白云质灰岩、砂岩、砾岩，渗透系数达 $2.1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。在橘子洲梅园和湘江西河汊区间溶洞强烈发育，岩溶发育区约 323 m，详勘共 36 个钻孔，见洞率约 80.6%。溶洞为 1~12 层串珠状发育，溶洞顶板埋深最浅为 2.5 m，最深为 60 m，最高洞高达 22.46 m，岩溶构造形态不同，且垂直分布规律不明显。溶洞多数有充填，充填物为细沙、淤泥等，部分为空洞。岩溶水与湘江贯通，具有承压性，岩溶水流速在 0.2~0.5 m/s 之间。隧道主要穿越地层为中、强风化砂岩，中、强风化砾岩，中风化灰岩，围岩级别主要为 V~VI 级，具体见图 7。

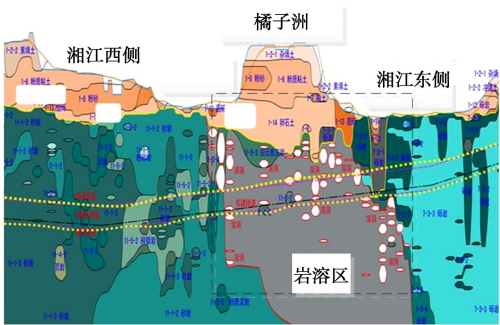


图 7 工程地质图

Fig. 7 Engineering geological map

为确保盾构机能顺利通过该区间，宜预先采用地表注浆进行治理。若采用传统注浆材料则水泥单液浆注浆易稀释，水玻璃双液浆、化灌浆液注浆污染江水。考虑国内尚无类似工程借鉴，研究提出采用改性黏土水泥膏浆进行现场原型试验。施工时，依据现场注浆试验成果，试验设计最大灌浆压力为 1.0~1.5 MPa，结合室内浆液抗分散性质和留存体性能试验结果，控制浆液原浆比重 1.25~1.30，水固比 0.8:1~1.2:1，

偏铝酸盐 2%、木质磺酸盐 0.2% (占水泥质量)。其中, 对于岩溶水流速 $v \leq 0.2$ m/s 的区域采用水固比为 1:1 的浆液, 岩溶水 $0.2 \text{ m/s} \leq v \leq 0.5$ m/s 的区域采用水固比为 0.8:1 的浆液, 岩溶水 $v > 0.5$ m/s 的区域采用水固比为 1:1 的浆液, 并掺入 20% 细砂。按 3 排梅花型布孔, 孔排距均为 1.0 m, 采用自下而上, 分段灌注。

注浆施工结束后, 采用钻孔取芯、注水试验及电法等手段对注浆效果进行评价。结果表明, 该区间地层连续性、整体性得到明显提高, 止水加固效果显著, 地层渗透系数降至 5.2×10^{-5} cm/s, 达到了预期效果, 注浆前后钻孔取芯样见图 8。



图 8 注浆前后芯样

Fig. 8 Core samples before and after grouting

6 结 论

为了科学评价岩溶水环境下浆液抗分散性质及留存体的基本物理力学性能, 设计了水下岩溶浆液抗分散性质试验装置, 进行了多因素影响下的浆液抗分散性质试验, 并对留存体进行了密实度、黏度及抗压强度等测试, 主要结论如下:

(1) 改性黏土水泥膏浆抗分散性能受浆液水固比、岩溶充填物及岩溶水流速等因素影响明显, 在不大于 0.8 m/s 的岩溶水流速下浆液抗分散性能良好, 随着浆液水固比或岩溶水流速的减小, 浆液留存率呈增大趋势, 而充填物的存在会显著提高浆液的留存率。

(2) 通过多元回归方法, 定量分析了浆液留存率与岩溶水流速、充填物类型及浆液水固比之间的关系。浆液留存率与动水流速 v , W/C 均呈负相关关系; 且岩溶水流速对浆液的留存率影响最大, 水固比次之; 且不同充填物下水固比影响权重不一, 随着浆液水固比的减小, 浆液留存率增加。

(3) 取留存体进行物理力学性能测试, 结果表明, 留存体密实度受充填物影响较大, 浆液水固比次之, 岩溶水流速影响较小; 动水岩溶环境下注浆时, 浆液顺水扩散距离大于逆水扩散距离, 浆液初始黏度对浆材扩散距离影响明显, 岩溶水流速有利于浆液沿顺水流方向扩散而抑制浆液沿逆水流方向扩散; 岩溶水养

护下, 留存体 28 d 抗压强度受抗冲条件影响明显, 影响因素中充填物对留存体的抗压强度影响最大, 其次为浆液水固比和岩溶水流速, 岩溶水养护环境下 28 d 抗压强度明显小于淡水环境养护, 但仍可达 3 MPa。

(4) 根据水下岩溶抗分散性和留存体性能试验结果, 提出水下岩溶治理工程的改性黏土水泥膏浆配比选取原则: 当岩溶水流速 $v \leq 0.2$ m/s 时, 可以通过调整水固比来达到较高的浆液留存率和较优的留存体性能; 当岩溶水 $0.5 \text{ m/s} \leq v \leq 0.8$ m/s 时, 对于含充填物型溶洞可以通过调整水固比来达到较高的浆液留存率和较优的留存体性能, 而对于未含充填物的溶洞, 可采用掺砂 (细砂含量不宜大于 30%) 等方式来达到较高的浆液留存率和较优的留存体性能。但当岩溶水 $v > 1.0$ m/s 时, 改性黏土水泥膏浆达不到封水堵漏的作用。

(5) 经工程应用原型试验验证, 改性黏土水泥膏浆可用于一定岩溶水流速下的岩溶区治理, 试验提出的水下岩溶治理工程浆液配比选取原则可行, 可为盾构隧道水下岩溶注浆治理提供理论指导。

文章仅探讨了浆液自身性能和注浆参数对浆液抗分散性质及留存体基本物理力学性能的影响, 由于水下岩溶的复杂性, 地层渗透性、围岩压力和岩溶水耦合环境等对浆液抗分散性质及留存体性能的影响有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] 倪宏革, 孙峰华, 杨秀竹, 等. 采用黏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, 24(7): 1242 - 1247. (NI Hong-ge, SUN Feng-hua, YANG Xiu-zhu, et al. Experimental study of clay hardening grouts for roadbed reinforcements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1242 - 1247. (in Chinese))
- [2] 张民庆, 黄鸿健, 苗德海, 等. 宜万线隧道工程岩溶治理技术与工程实例[J]. 铁道工程学报, 2008, 112(1): 26 - 37. (ZHANG Min-qing, HUANG Hong-jian, MIAO De-hai, et al. The technology of treating karst for Yichang-Wan Zhou railway and its engineering example[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 112(1): 26 - 37. (in Chinese))
- [3] 李利平, 李术才, 崔金声. 岩溶突水治理浆材的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3642 - 3648. (LI Li-ping, LI Shu-cai, CUI Jin-sheng. Experimental research on chemical grout for treating water inrush in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3642 - 3648. (in Chinese))
- [4] JOHNSON K S. Gypsum-karst problems in constructing dams

- in the USA[J]. Environmental Geology, 2008, **53**(5): 945 - 950.
- [5] 张旭东. 关于岩溶隧道帷幕注浆材料选择的探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2005, **3**(1): 432 - 434. (ZHANG Xu-dong. Study of material for curtain grouting in karst tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, **3**(1): 432 - 434. (in Chinese))
- [6] KHAYAT K H, YAHIA A. Simple field tests to characterize fluidity and washout resistance of structural cement grout[J]. Cement Concrete Aggregates, 1998, **20**(1): 145 - 156.
- [7] KHAYAT K H, YAHIA A. Effect of welan gum-high-range water reducer combinations on rheology of cement grout[J]. ACI Materials Journal, 1997, **94**(5): 365 - 372.
- [8] 李利平, 李术才, 崔金声. 岩溶突水治理浆材的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(12): 3642 - 3648. (LI Li-ping, LI Shu-cai, CUI Jin-sheng. Experimental research on chemical grout for treating water inrush in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(12): 3642 - 3648. (in Chinese))
- [9] 刘人太, 李术才, 张庆松, 等. 一种新型动水注浆材料的试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(7): 1454 - 1459. (LIU Ren-tai, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Experiment and application research on a new type of dynamic water grouting material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(7): 1454 - 1459. (in Chinese))
- [10] 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. (YUAN Jing-qiang, CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, et al. Experimental study of anti-washout property and gelling performance of fast-gelling grout[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(5): 960 - 967. (in Chinese))
- [11] 何少华, 文竹青. 试验设计与数据处理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002: 182 - 192. (HE Shao-hua, WEN Zhu-qing. Experimental design and data processing[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2002: 182 - 192. (in Chinese))
- [12] 湛铠瑜, 隋旺华, 高岳. 单一裂隙动水注浆扩散模型[J]. 岩土力学, 2011, **32**(6): 1659 - 1663. (ZHAN Kai-yu, SUI Wang-hua, GAO Yue. A model for grouting into single fracture with flowing water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(6): 1659 - 1663. (in Chinese))
-

本期广告索引

- 封2 北京筑信达咨询有限公司
封3 北京理正软件股份有限公司
封4 上海分元土木工程科技有限公司
后插1 重庆地质仪器厂
后插2 济南普业机电技术有限公司