

湿喷混凝土添加纳米回弹抑制剂在工程中的应用

周平, 范正春, 郑强, 徒鹏飞

(中国水利水电第十工程局有限公司, 四川 都江堰 611830)

摘要: 喷射混凝土的施工工艺有三种: 干喷、潮喷和湿喷。通常隧洞施工要求采用湿喷工艺, 不允许采用干喷工艺。在喷射混凝土施工中, 回弹率过高会造成材料的极大浪费、施工作业时间的延长, 进而增大施工成本并使施工现场空气中的粉尘含量过高而造成施工环境不达标。本文阐述了在湿喷混凝土中添加纳米回弹抑制剂前后从室内和现场性能测试两个方面进行的对比试验, 并对试验成果进行了总结。

关键词: 湿喷混凝土; 纳米回弹抑制剂; 绰斯甲水电站; 回弹率; 环保; 缩短工期; 降本; 提质; 增效

中图分类号: TV7; TV52; TV544; TV42

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2022)05-0029-04

Application of Nano Rebound Inhibitor for Wet Shotcrete in Engineering

ZHOU Ping, FAN Zhengchun, ZHENG Qiang, TU Pengfei

(Sinohydro Bureau 10 CO., LTD., Dujiangyan, Sichuan, 611830)

Abstract: There are three construction technologies of shotcrete: dry spraying, damp spraying and wet spraying. Usually wet spraying is required in tunnel construction, and dry spraying is not allowed. In shotcrete construction, high rebound rate will result in great waste of materials, prolonged construction time, increased construction cost, and high dust content in the air of the construction site, resulting in substandard construction environment. In this paper, comparative tests before and after adding nano rebound inhibitor to wet-sprayed concrete were conducted from both laboratory and field, and the test results were summarized.

Key words: Nano rebound inhibitor; Chuosijia Hydropower Station; Rebound rate; Environment protection; Construction period shortening; Cost reduction, quality improvement; Efficiency increase

1 概述

绰斯甲水电站位于四川省阿坝州壤塘县和金川县境内, 是绰斯甲河梯级水电开发规划中的第三级, 上接蒲西水电站, 下游与观音桥水电站库尾衔接, 为闸坝引水式电站。

绰斯甲水电站有压引水隧洞布置于绰斯甲河左岸山体中, 总长度为 21.185 km, 引用流量 $Q=232 \text{ m}^3/\text{s}$ 。进水口底板高程为 2 767 m, 至调压井底高程为 2 720 m, 隧洞纵坡降为 2.384%。引水隧洞低压段(10+588.00 桩号上游)Ⅲ类围岩采用平底马蹄形断面, 马蹄形断面底宽 7 m, 高 10 m, 设计为边顶拱挂网锚喷支护, 底板素混凝土衬砌; 引水隧洞高压段(10+588.00 桩号下游)Ⅲ类围岩和全隧洞的Ⅳ类、Ⅴ类围岩均采用内径 8.9 m 的圆形断面, 钢筋混凝土衬砌。

湿喷混凝土中添加的纳米回弹抑制剂是根据

新奥法的施工特点和发展方向研发出的一种全新产品, 其通过添加减水、防腐、防水、引气、气密以及增强增黏组分用以增加湿喷混凝土的密实性、进而提高湿喷混凝土抵抗不良水质的侵入能力。通过添加高性能引气剂以提高湿喷混凝土的抗冻性和耐久性; 通过添加复合阻锈防腐剂以获得不良水质侵入后对钢筋及混凝土的防护, 提高湿喷混凝土抗硫酸盐侵蚀的性能, 使湿喷混凝土的工作性能更好, 强度更高, 施工速度更快, 能够及时有效地对围岩进行封闭式的保护和加固, 提高围岩的强度和承载力。阐述了在湿喷混凝土中添加纳米回弹抑制剂前后从室内和现场性能测试两个方面进行的对比试验, 并对试验成果进行了总结。

2 室内湿喷混凝土添加纳米回弹抑制剂前后的性能测试对比试验^[1~3]

2.1 测试材料

水泥: 攀枝花华新 P. O42.5 水泥、亚东洋房

牌 P. O42.5 水泥;

砂:标准砂、中砂(机制砂);

人工小石:粒径为 5~10 mm;

速凝剂:无碱速凝剂(标准样);

减水剂:高性能减水剂(标准样);

添加剂:纳米回弹抑制剤 JY-N,以下简称纳米材料。

水:都江堰市生活用水。

2.2 测试方法

按照试验要求分别测试了不同工况下的水泥净浆凝结时间、水泥胶砂强度、混凝土拌和物坍落度及硬化混凝土强度,综合评价了纳米材料的性能。

2.3 性能测试对比试验

2.3.1 水泥净浆凝结时间对比试验

初凝时间比:掺速凝剂及纳米材料的初凝时间与掺速凝剂的初凝时间之比;

终凝时间比:掺速凝剂及纳米材料的终凝时间与掺速凝剂的终凝时间之比。

试验成果分析:添加纳米材料后,攀枝花华新

P. O42.5 水泥净浆的凝结时间大幅度降低,初凝时间比为 44%(即:1 min 15 s/2 min 50 s),终凝时间比为 90%(即:10 min 35 s/11 min 46 s);亚东洋房牌 P. O42.5 水泥净浆的凝结时间亦大幅度降低,初凝时间比为 58%(即:1 min 50 s/3 min 10 s),终凝时间比为 56%(即:4 min 40 s/8 min 20 s)。

2.3.2 水泥胶砂强度对比试验

试验成果分析:相对于基准水泥胶砂试件,添加 6%或 10%的纳米材料均能有效提高混凝土 7 d 及 28 d 强度。添加 6%或 10%的纳米材料对比混凝土 7 d 强度数据与之类似,而 28 d 混凝土抗压强度数据表明 10%的掺量明显高于 6%的掺量,说明随着纳米材料添加量的提高,水泥胶砂试件后期强度会有明显地提升。

2.3.3 室内湿喷混凝土试拌试验^[4,5]

采用亚东洋房牌 P. O42.5 水泥进行了室内湿喷混凝土试拌试验,室内湿喷混凝土试拌试验成果见表 1。

表 1 室内湿喷混凝土试拌试验成果表

水胶比	水 /kg·m ⁻³	水泥 /kg·m ⁻³	砂 /kg·m ⁻³	人工小石 /kg·m ⁻³	减水剂 /%	无碱 速凝剂 /%	纳米 材料 /%	坍落度 /mm	抗压强 /MPa			抗渗性	备注
									3 d	7 d	28 d		
0.45	193	430	977	800	1	5	0	116	28.8	32	48.4	>W12	基准
0.45	193	430	977	800	1	5	6	110	36.2	43	60.4	>W12	外掺
0.45	193	430	977	800	1	5	6	113	36.2	43.9	63.3	>W12	内掺
0.45	193	430	977	800	1	5	10	117	42.4	50.6	65.2	>W12	外掺

按照《水电水利工程锚喷支护施工规范》DL/T 5181-2017 要求,湿喷混凝土坍落度宜为 8~12 cm。由表 1 可以看出:相对于基准湿喷混凝土试件,添加 6%或 10%的纳米材料均能有效提高湿喷混凝土 3 d、7 d 及 28 d 抗压强度。外掺 6%、内掺 6%的纳米材料对比看与不同龄期混凝土抗压强度类似,外掺 10%纳米材料的混凝土其抗压强度最高。

相对于基准湿喷混凝土,随着纳米材料添加量的增加,所制备的湿喷混凝土的抗渗性能逐步提升,表明添加纳米材料后,对湿喷混凝土的密实度有大幅度的提高。

2.3.4 湿喷混凝土抗硫酸盐侵蚀试验

采用亚东洋房牌 P. O42.5 水泥进行了室内湿喷混凝土试拌试件抗硫酸盐侵蚀试验,室内湿喷混凝土试拌试件抗硫酸盐侵蚀试验成果见表 2。

表 2 室内湿喷混凝土试拌试件抗硫酸盐侵蚀试验成果表

水胶比	水 /kg·m ⁻³	水泥 /kg·m ⁻³	砂 /kg·m ⁻³	人工小石 /kg·m ⁻³	减水剂 /%	无碱 速凝剂 /%	纳米 材料 /%	坍落度 /mm	15 次对比 强度 /MPa	15 次干湿 循环强度 /MPa	抗蚀 系数 /%	备注
0.45	193	430	977	800	1	5	6	110	68	62.2	91.4	外掺
0.45	193	430	977	800	1	5	6	113	69.9	63.5	90.8	内掺
0.45	193	430	977	800	1	5	10	117	69.5	65.5	94.2	外掺

由表 2 可以看出:相对于基准湿喷混凝土,随着纳米材料添加量的增加,所制备的湿喷混凝土抗硫酸盐侵蚀系数逐渐提高,即湿喷混凝土的抗蚀性能逐步提升,表明湿喷混凝土的密实度有较大幅度地提高。

3 现场添加纳米材料前后喷射混凝土性能测试对比试验

(1)试验地点:中国水利水电第十工程局有限公司施工的绰斯甲水电站引水隧洞 6 号洞。

(2)试验目的:现场测试添加纳米材料前后的湿喷混凝土,对其在引水隧洞施工中的实际回弹量、喷射时间、喷射效果以及喷射混凝土的抗压强度等指标进行对比分析。

(3)参与单位:中国水利水电第十工程局有限公司中心试验室、四川琪汇新材料有限责任公司、中国水利水电第十工程局有限公司绰斯甲水电站引水隧洞工程项目经理部。

(4)试验材料:

水泥:甘肃永固 P. O42. 4R 水泥。

骨料:人工砂、人工小石。

水:工程附近用水。

外加剂:QH-02 聚羧酸高性能减水剂、QH-05 无碱液体速凝剂。

表 3 甘肃永固 P. O42. 5R 水泥现场喷射试验添加纳米材料前后配合比表

序号	水胶比	水 /kg·m ⁻³	水泥 /kg·m ⁻³	人工砂 /kg·m ⁻³	人工小石 /kg·m ⁻³	QH-02 减水剂 /%	QH-05 速凝剂 /%	纳米材料 /%	备注
1	0.42	197	469	947	704	1	8	0	基准
2	0.42	177	449	947	704	0.7	8	5	添加后

工间隔时间不一致,而现场采用进行对比的施工工作面基本相同,故分别对每车(3 m³)喷射混凝土的施工时间进行了单独的统计对比:基准时,平均每车的施工时间为 14 min;添加纳米材料后,平均每车的施工时间为 9 min。

由此得知:添加纳米材料后比基准时平均每 m³ 施工时间减少 1.6 min,每循环按照约 30 m³ 湿喷混凝土施工量计算,每循环缩短循环时间 48 min。按照 10 000 m³ 湿喷混凝土计算,可节约时

间 16 000 min(267 h),约为 11.11 d;按照洞内施工人员 6 人/班组,工资 8 000 元/人/月计算,每 10 000 m³ 湿喷混凝土节约人员工资约为 17 776 元。

(5)现场实际情况。根据对绰斯甲水电站引水隧洞 6 号洞施工的具体情况进行分析后认为:采用大型湿喷机械手施工较为适合进行喷射混凝土施工对比试验。为确保工况相近,最终决定采用工况大致相同的 4 榦工字钢锚喷支护进行对比试验。

(6)现场喷射混凝土性能测试对比项目:

①添加纳米材料前后的湿喷混凝土配合比对比分析;

②添加纳米材料前后的湿喷混凝土喷射时间对比分析;

③添加纳米材料前后的湿喷混凝土回弹率对比分析;

④添加纳米材料前后的湿喷混凝土现场施工状态、环保情况对比分析;

⑤添加纳米材料前后的湿喷混凝土抗压强度对比分析;

⑥添加纳米材料前后的湿喷混凝土对比试验结论。

(7)现场喷射混凝土性能测试。

①配合比对比分析。甘肃永固 P. O42. 5R 水泥现场喷射试验添加纳米材料前后配合比见表 3。

②喷射时间对比分析。因每车湿喷混凝土施

工间隔时间不一致,而现场采用进行对比的施工工作面基本相同,故分别对每车(3 m³)喷射混凝土的施工时间进行了单独的统计对比:基准时,平均每车的施工时间为 14 min;添加纳米材料后,平均每车的施工时间为 9 min。

由此得知:添加纳米材料后比基准时平均每 m³ 施工时间减少 1.6 min,每循环按照约 30 m³ 湿喷混凝土施工量计算,每循环缩短循环时间 48 min。按照 10 000 m³ 湿喷混凝土计算,可节约时

间 16 000 min(267 h),约为 11.11 d;按照洞内施工人员 6 人/班组,工资 8 000 元/人/月计算,每 10 000 m³ 湿喷混凝土节约人员工资约为 17 776 元。

③回弹率对比分析。同时选取 4 榦工字钢开挖程度大致相同的作业面,相连 2 榦为一组,基准作业面 2 榦,添加纳米材料作业面 2 榦。分别对 3 m³ 喷射混凝土喷射两组作业面进行对比。分别收集两组喷射混凝土作业面的回弹量后称量并计算回弹率,其回弹率对比分析情况见表 4。

表 4 回弹率对比分析表

序号	工 况	总方量 /m ³	综合回弹混凝土重量 /kg	近似回弹方量 /m ³	近似回弹率 /%
1	基准	3	2 819.33	1.216 8	40.56
2	添加纳米材料	3	1 288.32	0.550 8	18.36

④现场施工状态、环保情况对比分析。通过进行现场试喷情况对比,对现场管理人员及相关作业人员进行了调查,具体情况如下:

a. 试验室:添加纳米材料后,喷射混凝土的和易性明显较好,强度高,初凝时间约为3 h,可以在机械故障等特殊情况下确保喷射混凝土和易性能正常使用。

b. 工程部:添加纳米材料后,喷射混凝土和易性较好,回弹量明显降低,洞内施工工作面的粉尘降低,特别针对有水洞段,未发现喷射混凝土大量掉块现象。采用添加纳米材料后的喷射混凝土初支喷层厚度大约可由基准时的5~7 cm提高到10~25 cm左右,从而在一定程度上加快了喷射混凝土施工进度。

c. 架子队:施工过程顺畅,回弹量明显降低,

洞内施工工作面粉尘明显降低,无不反感。

d. 作业班组:添加纳米材料后,喷射混凝土喷射施工一段时间后未出现明显掉块。

e. 抗压强度对比分析。对于每次试验循环,试验室按照要求预留了大板试件湿喷混凝土7 d、28 d龄期抗压强度试验结果。实测基准时的7 d/28 d喷射混凝土平均抗压强度为25.5 MPa/31.5 MPa;实测添加纳米材料后的7 d/28 d喷射混凝土平均抗压强度为29.6 MPa/37.6 MPa。

4 综合经济效益对比分析

根据绰斯甲水电站引水隧洞6号洞的实际情况,结合项目各原材料的采购单价,湿喷混凝土不同工况下单 m^3 的综合成本及该标段整体综合参考成本对比情况见表5。

根据表5中的数据,按照理论1万 m^3 湿喷

表5 湿喷混凝土不同工况下单 m^3 综合参考成本对比表

项目		水泥	人工砂	人工小石	速凝剂	纳米材料	减水剂	水
基准 配合比	单价 /元/ $\cdot t^{-1}$	600	70	60	3 000	3 700	3 000	5
	用量 / $kg \cdot m^{-3}$	469	947	704	37.52	0	4.69	197
	单项成本 /元	281.4	66.3	42.2	112.6	0	14.1	1
	每 m^3 成本 /元					518		
	完成1 m^3 喷射混凝土作业综合成本					658		
添加纳米 材料配合比	用量 / $kg \cdot m^{-3}$	449	947	704	37.52	23.45	3.14	177
	单项成本 /元	269.4	66.3	42.2	112.6	86.8	9.4	0.9
	每 m^3 成本 /元					588		
	完成1 m^3 喷射混凝土作业综合成本					728		

混凝土计算,实际施工方量按照超方30%计算,实际湿喷混凝土方量约为1.3万 m^3 。

采用两种配合比实际发生湿喷混凝土在不同工况下的回弹率后,其总方量约为:

①基准时,总方量为 $1.3 \text{ 万 } m^3 \times (1 + 40.56\%) = 1.82728 \text{ 万 } m^3$ 。

②添加纳米材料时,总方量为 $1.3 \text{ 万 } m^3 \times (1 + 18.36\%) = 1.53868 \text{ 万 } m^3$ 。

表6 湿喷混凝土不同工况下以1万 m^3 理论喷射混凝土综合参考成本对比表

序号	配合比	费用 /元					实际总方量 / m^3	总成本 /万元
		拌和站	运输费	机械费	材料费	每 m^3 成本		
1	基准配合比	50	30	60	518	658	1.82728	1202.35
2	添加纳米材料配合比	50	30	60	588	728	1.53868	1120.16
3	总费用差额(约可节约综合成本)							82.19

湿喷混凝土不同工况下以1万 m^3 理论喷射混凝土综合参考成本对比情况见表6。表6中的统计费用系按照大型湿喷机械手单价进行统计(计价规则按照实际方量计量)。如果采用小型湿喷机施工,计价规则应按照设计方量计量,总费用

对比时可不考虑机械费。

5 结语

在湿喷混凝土中添加纳米材料后,通过所进行的室内及现场喷射性能测试对比试验取得的成

(下转第36页)

的土石料直接用于填筑场地东北侧的边坡。沉淀池与吸附过滤槽的底板采用钢筋混凝土结构,边墙护壁和各级池的间隔墙均采用砂石厂开采的块石料砌筑的浆砌石结构。

4 沉淀池的运行和维护情况

南德瑞瓦图砂石厂破碎筛分系统及废水处理沉淀池建设完成并投入生产运行后,肉眼观察经沉淀过滤的外排水外观清澈。塔乌瓦镇水质检测部门对外排水取样检测的指标结果表明其符合当地生产废水排放标准的要求。在砂石厂实际生产运行过程中,实际观察显示一级沉淀池的沉淀效果很好,绝大部分淤泥均沉淀在一级沉淀池中,从而印证了该设计方案扩大一级沉淀池容量的合理性,每个月均须对一级沉淀池进行一次清理,清理时一般将淤泥厚度控制在不超过 1.5 m 以保证装载机进入沉淀池作业时的安全性;二级沉淀池约每半年时间清理一次且淤泥沉淀量不大;三级沉淀池基本上不需要清理。沉淀池清理时,一般选择在塔-南公路车辆较少的时间段,且在两端道路均需安排人员值守并指挥车辆,以保证清淤施工的顺利进行,同时尽量减少对过往车辆的影响,保证安全。在旱季缺水时,将第三级沉淀池内沉淀后的水通过水泵回收循环利用进行洗砂施工,既保证了生产的连续进行,又减少了向外界的排水,取得了良好的环保效果。

5 结语

斐济南德瑞瓦图砂石厂由于所处地形狭窄,且因上南德瑞瓦图高原的唯一公路从砂石厂场

地中经过,导致外部影响和限制因素多,因而对系统的合理布置、安全生产和环境保护要求均很高。经过对系统建设各个方面科学、细致地设计和合理布置,特别是因地制宜地对沉淀池进行设计并精心组织施工,使系统按时投产,对生产废水处理的效果达到了斐济当地的高标准要求,对所产生的淤泥进行了晒干、转运及堆置处理,很好地保护了当地环境,做到了节能减排。同时,在砂石厂废水处理应用平流式沉淀池时,因地制宜地进行了大胆的设计修改,以最佳的效果满足了工程实际需要,这一成功的尝试可为类似工程提供借鉴。

参考文献:

- [1] 王忠禄. 人工制砂技术的应用与发展[J]. 贵州水力发电, 2011, 25(3): 1-8.
- [2] 刘伟, 涂明刚. 人工砂石加工系统废水处理工艺与设备选型初探[J]. 四川水力发电, 2008, 27(6): 43-45, 67.
- [3] 程里, 金玲. 鲁地拉水电站人工砂石系统废水处理工艺[J]. 云南水力发电, 2013, 29(3): 142-144.
- [4] 宋自平, 黄志军. 浅析斐济南德瑞瓦图可再生能源项目骨料开采破碎系统的开发和安全环保[J]. 四川水力发电, 2012, 31(4): 35-38, 148.
- [5] 闫静. 污水处理厂平流式沉淀池的设计[J]. 内蒙古石油化工, 2013, 39(5): 69-70.

作者简介:

吴建军(1967-),男,四川简阳人,国际公司副总经理,高级工程师,硕士,从事水利水电工程施工技术与管理工

宋自平(1979-),男,四川威远人,项目总工程师,正高级工程师,从事土木工程施工技术与管理工

(责任编辑:李燕辉)

(上接第 32 页)

果表明:在有效保证施工质量、满足设计要求的前提下,大大减小了施工回弹率,加快了施工进度,减少了施工综合成本,降低了操作人员的健康风险,安全环保,尤其适用于回弹率大、富水区施工的地下洞室工程。因此,在湿喷混凝土中添加纳米材料具有很高的经济效益和社会价值,所取得的经验可在类似工程中进行推广与应用。

参考文献:

- [1] 通用硅酸盐水泥, GB175-2007[S].
- [2] 水电水利工程锚喷支护施工规范, DL/T5181-2017[S].
- [3] 水工混凝土外加剂技术规程, DL/T5100-2014[S].

[4] 水工混凝土配合比设计规程, DL/T5330-2015[S].

[5] 水工混凝土试验规程, DL/T5150-2017[S].

作者简介:

周平(1979-),男,四川双流人,高级工程师,从事建筑工程材料试验检测技术与管理工

范正春(1974-),男,重庆忠县人,高级工程师,从事建筑工程材料试验检测技术与管理工

郑强(1976-),男,重庆荣昌人,工程师,从事建筑工程材料试验检测技术与管理工

徒鹏飞(1990-),男,陕西渭南人,工程师,从事建筑工程材料试验检测技术与管理工

(责任编辑:李燕辉)