

大体积水下自密实混凝土的试验研究及应用

李凤玉

(中国水利水电第七工程局有限公司,四川成都 611730)

摘要:阐述了水下自密实混凝土在锦屏一级水电站左岸导流洞出口围堰工程中的研究与应用过程。通过采用中热硅酸盐水泥、优质Ⅰ级粉煤灰、高效减水剂等技术手段,降低了混凝土的用水量,改善了混凝土的施工性能,有效地保证了混凝土质量,取得了较好的效果。

关键词:中热硅酸盐水泥;水下自密实混凝土;配合比试验;施工应用;锦屏一级水电站;围堰

中图分类号:TV7;TV22;TV41;TV43;TV49

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2022)06-0044-04

Experimental Studies and Application of Underwater Self-compacting Mass Concrete

LI Fengyu

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 611730)

Abstract: This paper expounds the research and application process of underwater self-compacting concrete in the cofferdam of the diversion tunnel exit on the left bank of Jinping I Hydropower Station. Through the application of technological measures, such as utilization of moderate-heat cement, class I fly ash with high quality, and effective water-reducing admixture, etc., the water consumption of concrete was reduced, the workability of concrete mixture was improved, the quality of concrete was guaranteed effectively, and great results have been achieved.

Key words: Moderate-heat Portland cement; Underwater self-compacting concrete; Mix proportion experiment; Construction application; Jinping I Hydropower Station; Cofferdam

1 概述

锦屏一级水电站枢纽建筑物主要由混凝土双曲拱坝(包括水垫塘和二道坝)、右岸泄洪洞、右岸引水发电系统及开关站等组成。大坝设计坝高 305 m,是目前世界上已建与在建水电工程中的最高拱坝。锦屏一级水电站左岸导流洞呈直线和圆弧段布置,穿过左岸大坝帷幕灌浆线至下游。导流洞总长度为 1 209.1 m,采用过流有压洞设计,断面采用圆拱直墙式,断面尺寸为 15 m×19 m(宽×高),进、出口底板高程分别为 1 638.5 m 和 1 634 m,导流洞底板纵坡为 3.832‰。

锦屏一级水电站蓄水发电前需对导流洞进行封堵,且其封堵顺序为先左岸后右岸。左岸导流洞下闸后,右岸导流洞仍在导流且出口水流对冲左岸。受高速水流及推移质的多年冲击,左岸导流洞出口淤积层的最大厚度可达 2 m,淤积层主

要为细砂夹杂少量碎石且其水深为 12 m。左岸导流洞出口如采用常规的堆石体围堰,受右岸导流洞出口水流冲刷,将严重影响到左岸导流洞出口围堰的施工,导致其施工质量无法保证。鉴于上述情况,专家建议该电站左岸导流洞出口围堰采用水下自密实混凝土施工。

自密实混凝土技术是 20 世纪 80 年代后期由日本研究开发并应用的一项混凝土技术^[1],我国引进后广泛应用于建筑行业。由于水电水利行业施工的特殊性,部分混凝土需要进行水下浇筑施工,进而对自密实混凝土的应用提出了更高的要求。但由于目前水电水利行业中关于水下自密实混凝土的应用技术尚不完善,部分技术还处于探索阶段,可供参考的技术资料和经验缺乏。鉴于此,项目部技术人员依托锦屏一级水电站左岸导流洞出口围堰开展了水下自密实混凝土的相关研究与应用,介绍了具体的研究与应用过程。

收稿日期:2022-04-04

2 原材料

水泥为P·MH 42.5级中热水泥,产自乐山嘉华。满足《中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥》GB/T 200—2017中的中热水泥要求。其主要物

表1 水泥物理力学性能检测结果表

检测项目	比表面积 /m ² ·kg ⁻¹	安定性	凝结时间 /min		抗压强度 /MPa		
			初凝	终凝	3 d	7 d	28 d
嘉华PMH42.5级中热水泥	316	合格	201	264	15.6	27.3	48.5

粉煤灰为F类I级粉煤灰,产自云南曲靖,满足《水工混凝土掺用粉煤灰技术规范》DL/T5055—2007中的F类I级粉煤灰要

表2 粉煤灰检测结果表

检测项目	细度,45 μm筛余/%	需水量比/%	烧失量/%	含水量/%	密度/g·cm ⁻³	活性指数/%
曲靖F类I级	7.8	92	2.6	0.1	2.27	74

骨料为砂岩人工骨料,无碱活性。其中,粗骨料粒径为0~20 mm,细骨料为II区中砂,满足《水工混凝土施工规范》DL/T5144—2015中的相关要求,粗骨料检测结果见表3,细骨料检测结果

表3 粗骨料检测结果表

检测项目	泥块含量 /%	含泥量 /%	吸水率 /%	压碎指标 /%	针、片状颗粒 含量/%	超径 /%	中径 /%	逊径 /%
粗骨料	0	0.7	0.8	6.7	12	3	53	8

表4 细骨料检测结果表

检测项目	细度模数	石粉含量/%	泥块含量/%	饱和面吸水率/%	表观密度/kg·m ⁻³	坚固性/%
细骨料	2.79	12.4	0	1.2	2 690	4

进行水下自密实混凝土的配合比设计^[2]时,不仅要求其抗压强度、耐久性满足设计要求,还需保证混凝土拌合物具有良好的施工性能。水下自密实混凝土施工性能包括流动性、抗离析性和填充性,分别通过坍落度扩展度试验、V漏斗试验(或T50试验)和U型箱试验进行检测^[3]。此外,研究中模拟现场施工条件,同时在静水和空气中成型7 d和28 d抗压强度试件用以对比不同成型条件下的混凝土强度关系。考虑到水下混凝土长期处于急速水流中,且其实体下部处于高压环境,进行了混凝土抗渗性、抗冻性等室内耐久性试

表5 推荐配合比参数表

混凝土标号	扩展度 /mm	T ₅₀ /s	水胶比	水 /kg·m ⁻³	砂率 /%	粉煤灰掺量 /%	减水剂掺量 /%	引气剂掺量 /%
C25W10F100	650±50	3~20	0.39	170	53	20	0.6	0.5

理性能检测结果见表1,满足相关规范要求。与硅酸盐和普通硅酸盐水泥相比,中热水泥的水化热更低,能够有效降低大体积混凝土的内部温升,已在水电水利工程中广泛使用。

求,粉煤灰检测结果见表2。高品质的粉煤灰能够降低混凝土的用水量,改善拌合物的和易性。

见表4。

外加剂采用JG—2H型缓凝高效减水剂和JM—2000型引气剂。

3 混凝土配合比试验

考虑到水下混凝土无法振捣,仅能通过自身重力和流动性达到自密实,因此,在静水中成型时不振捣,对其外露表面通过切割打磨的方法进行平整处理。

3.1 配合比设计

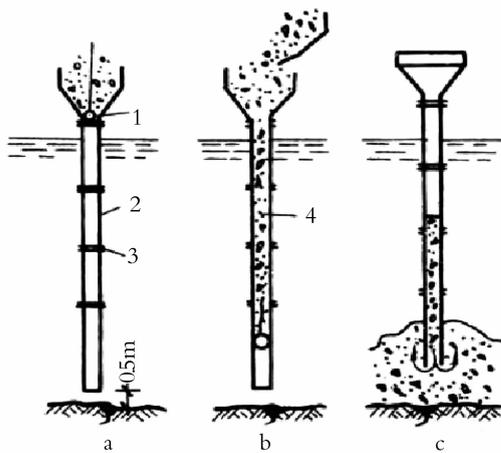
参照《自密实混凝土应用技术规程》CECS203:2006中的配合比设计要求,对其单位体积用水量、水粉比、单位体积粉体量、单位体积粗骨料绝对体积和单位体积浆体量等参数进行了选择。所推荐的配合比参数见表5,混凝土性能试验结果见表6。

表 6 混凝土性能试验结果表

水粉比	粉体量 /m ³	浆体量 /m ³	粗骨料绝对 体积 /m ³	坍落度 /mm	扩展度 /mm	T ₅₀ /s	含气量 /%	抗渗 等级	抗冻 等级	抗压强度 /MPa	
										7 d	28 d
0.98	0.17	0.34	0.31	248	658	4.3	3.6	≥10	≥100	24.4	33.6

3.2 模拟施工试验

为保证工程质量,在现场选取适合的部位进行了水下自密实混凝土浇筑模拟试验^[4]。模拟试验采用混凝土搅拌车运输、导管法浇筑水下混凝土。模拟试验主要考察了水下立模工艺、混凝土施工性能、导管直径、导管之间的间距、导管埋入混凝土中的深度、拔管速度等工艺。导管法浇筑水下混凝土情况见图 1。结果证明:采用以下工艺在左岸导流洞出口浇筑水下自密实混凝土切实可行。(1)采用 2.5 mm 厚的钢板作模板并用 Φ48 mm 钢管对模板进行支撑加固;水下混凝土上游侧不立模,由水下混凝土自然堆积。(2)所推荐的混凝土配合比基本上能够满足施工性能要求,但模拟试验与配合比试验使用的骨料存在差异,故应对配合比进行微调。(3)导管直径为 225 mm、间距为 3.5 m,应将导管距离底板的起始距离控制在 0.5 m 以内,导管埋入混凝土的深度为 4~6 m 时开始拔管,拔管后导管埋入混凝土的深度以 2 m 左右较为适宜。



a. 装第一斗混凝土;b. 排走导管内的水或泥浆;c. 混凝土向下推进。①隔水塞;②导管;③接头;④混凝土

图 1 导管法浇筑水下混凝土示意图

4 实际工程中的应用

4.1 混凝土浇筑施工质量控制

(1) 混凝土拌和所用的原材料必须满足《水

工混凝土施工规范》DL/T 5144—2015、《自密实混凝土应用技术规程》CECS 203:2006 及其它相关规范与设计的要求,必需加强对原材料的检测,若发现现场使用的原材料与配合比中的原材料品质存在较大差异时,应及时调整配合比参数以确保混凝土浇筑的连续性。

(2) 水下混凝土立模及浇筑施工过程中会受到右岸导流洞出口水流的巨大冲击,且易受到由于左岸导流洞进口处闸门不严密产生的下泄水流冲击,对模板的稳定和混凝土浇筑造成影响。针对这种情况,在围堰外修筑了一个挡流用的丁坝,将急流的水头减小,使围堰施工处于一个接近静水的环境。浇筑前,派潜水员用高压水枪将底板上的淤泥清理干净。

(3) 由于混凝土在浇筑过程中不能振捣,主要靠混凝土的自重压力自行密实,故无法直观了解到浇筑情况^[5]。浇筑前,由专业的试验检测人员对混凝土拌和物的性能进行检测并确认,并对导管进行闭水试验、流畅性试验,在导管内放置一个用于排水排气的球,用混凝土将球压出(混凝土加压管内的气压将管内的水和气体一起排出)。放料过程中,应严格控制放料的连续性和均匀性。

(4) 采用预冷混凝土,埋设冷却水管,按照相关规范及设计要求实施温控。

(5) 为保证结构物的运行安全,混凝土浇筑完成后应严格按照设计要求实施封堵灌浆。

(6) 鉴于水下混凝土浇筑的工序复杂,浇筑过程因人为原因造成质量事故的可能性极高,因此,施工前必须对每个参与施工的员工进行质量技术交底,并在浇筑过程中加强对现场质量的巡查和监督管理工作。

4.2 施工质量

锦屏一级水电站左岸导流洞出口围堰采用导管法水下自密实混凝土施工,历时 7 d,所浇筑的混凝土总量约为 5 000 m³。采用调整后的水下自密实混凝土配合比进行围堰施工,整个

浇筑过程连续、均匀,浇筑质量得到有效控制。所拌制的混凝土和易性、黏聚性、流动性较好,浇筑过程中无泌水、离析、堵管现象。对于混凝土硬化性能方面,其抗压强度、抗冻性、抗渗性均满足设计要求,围堰施工完成后无渗漏。左

岸导流洞封堵施工期间,基坑内基本无渗水。围堰施工完成后,采用声波法对混凝土结构进行了检查,围堰整体结构密实,无空洞、蜂窝、断层、裂缝等质量缺陷。水下自密实混凝土检测结果见表7。

表7 水下自密实混凝土检测结果表

项目	实际扩展度(均值) /mm	实际含气量(均值) /%	抗压强度(均值) /MPa	抗冻性(均值)	抗渗性(均值)
检测结果	610	4.1	36.2	≥F100	≥W10
检测组数	9	8	9	2	2

5 结语

水下自密实混凝土作为一种新兴的混凝土技术,通过采用适宜的配合比和施工工艺,能够保证混凝土的施工性能及浇筑质量。水下自密实混凝土在锦屏一级水电站左岸导流洞出口围堰中的实际应用取得了以下成果:

(1)配合比设计时,应对各种原材料进行优选,通过采用中热水泥、掺加适量的掺合料(如粉煤灰)、使用高性能减水剂等技术手段,可以设计出性能良好、经济合理的配合比。

(2)配合比设计时,其不仅应满足设计指标,还应重点考察混凝土的施工性能,且其施工性能应与施工工艺相匹配。

(3)大体积水下混凝土应采取预冷混凝土,在混凝土中埋设冷却水管并通水冷却。还应埋设混凝土温度监测设备,密切监控混凝土的内外温差,以便于即时调整冷却水的流量、温度及通水时间。

(上接第43页)

压。终压又称为收迹碾压,其作用是为了将复压造成的轮迹收光。终压采用普通双钢轮压路机无振动碾压收迹1~2遍即可。碾压终了时,其路表温度应大于90℃。

4 结语

以云龙湾大桥为依托工程,采用高黏高弹沥青应用于柔性桥面薄层铺装,运行两年后经检查未发现常见的桥面铺装病害。本案例的成功应用,从施工角度对黏结基面处理要求、黏结层做法、混合料摊铺几个关键施工控制点进行了叙述,所取得的经验对采用同类施工方法的项目施工具有借鉴和参考意义。

参考文献:

(4)浇筑过程中,为减少水流对浇筑部位的扰动,应采取一定的保护措施,使浇筑部位周围处于静水状态。此外,采用导管法施工时,其导管直径、间距、拔管速度等工艺参数对混凝土施工质量的影响较大,应通过探索找出适宜的施工参数。

参考文献:

- [1] 林祖宏. 自密实混凝土配合比及其性能研究现状综述[J]. 混凝土, 2016, 44(9): 97-99.
- [2] 水工混凝土配合比设计规程, DL/T 5330-2015[S].
- [3] 自密实混凝土应用技术规程, CECS203-2006[S].
- [4] 水下不分散混凝土试验规程, DL/T 5117-2000[S].
- [5] 樊艺峰. 自密实混凝土研究综述[J]. 山西水利, 2011, 27(8): 34-35.

作者简介:

李凤玉(1981-),男,宁夏中卫人,高级工程师,从事水利水电工程试验检测技术工作。

(责任编辑:李燕辉)

- [1] 司魁. 桥面沥青铺装层裂缝病害分析及处理措施[J]. 交通世界(建养、机械), 2015, 22(12): 104-105.
- [2] 袁野, 杨成柱, 陈彦忠. 玛瑞原油生产和易性高黏高弹沥青的研究[J]. 石油沥青, 2018, 32(4): 51-53.
- [3] 公路钢桥面铺装设计与施工技术规范, JTJ/T 3364-02-2019[S].
- [4] 城镇桥梁沥青混凝土桥面铺装施工技术标准, CJJ/T 279-2018[S].
- [5] 兰海, 王刚, 郭荣国, 等. 钢桥面高黏高弹沥青 SMA 混合料铺装压实技术研究[J]. 工程机械, 2020, 51(7): 28-35.

作者简介:

徐池(1978-),男,四川仁寿人,副总经理,高级工程师,硕士,从事建筑工程市场营销与市政工程施工技术与管理工作;
苟圣(1994-),男,四川阆中人,项目副主任,助理工程师,从事市政工程施工技术与质量管理工作。

(责任编辑:李燕辉)