

# 高质量堆石坝混凝土面板施工技术研究

刘 杰

(中国水利水电第十二工程局有限公司,浙江 杭州 310000)

**摘要:**国内已建、在建和规划设计中的抽水蓄能电站,上下水库的挡水建筑物的主要坝型为混凝土面板堆石坝;建造高质量的堆石坝混凝土面板,对于确保电站的功能正常、机组的运行稳定和电站周边村镇城市的人民财产安全至关重要。笔者以浙江宁海抽水蓄能电站上下库大坝面板混凝土施工为例,阐述堆石坝混凝土面板的质量控制关键点,为广大抽水蓄能电站工程建设者提供一些借鉴和参考。

**关键词:**抽水蓄能电站;堆石坝;混凝土面板

**中图分类号:**TV641.4+3

**文献标志码:** B

**文章编号:**1001-2184(2023)06-0011-05

## Research on High-Quality Construction Technology of Concrete Face of Rockfill Dams

LIU Jie

(Sinohydro Bureau 12 Co., LTD., Hangzhou Zhejiang 310000)

**Abstract:** The concrete faced rockfill dams are used as the main dam type of the water retaining structures of the upper and lower reservoirs in the pumped storage power stations that have been built, are under construction, and are under planning and design in China. The construction of high-quality concrete faced rockfill dams is crucial to ensuring the normal function of the power station, the stable operation of the units, and the safety of people's property in the surrounding villages and towns of the power station. This article takes the concrete face construction of the upper and lower reservoirs of Zhejiang Ninghai Pumped Storage Power Station as an example to elaborate on the key quality control points of concrete faces for rockfill dams, providing some reference for the construction of pumped storage power station projects.

**Key words:** Pumped storage power station; Rockfill dams; Concrete face

## 0 引言

抽水蓄能电站的上下水库规划选址遵循因地制宜、综合布置的原则,通常利用垭口筑坝或台地筑环形坝加库盆开挖形成水库,采用一座或多座坝将山顶洼地或垭口封闭形成水库。在工程所在地地质条件良好、岩性满足筑坝条件、库盆需要开挖成型、技术指标符合规范要求的前提下,选择混凝土面板堆石坝无疑是最经济的。这也是国内已建和在建的抽水蓄能电站上下水库以混凝土面板堆石坝居多的主要原因。混凝土面板堆石坝是以堆石料或砂砾石料分层填筑的堆石坝体作为支撑结构,并在上游设置混凝土面板、趾板与坝基帷幕等组成防渗体系的坝型。而在整个坝体中,混凝土面板又是位于堆石坝体上游面、直接承受库水压力的混凝土防渗结构<sup>[1]</sup>,长条形薄板结构的特

殊性再加上防渗功能的重要性,注定其在整个混凝土面板堆石坝中处于举足轻重的位置。

常规抽水蓄能电站的上下水库库容不大,电站投产运行后如果因为库盆渗漏、坝体渗水造成水量损失,将会严重影响电站的发电量,同时增大充水和补水费用,甚至危及工程安全。如何在坝体规范填筑,沉降期和沉降速率都满足规范要求的前提下,浇筑出少缝甚至无缝的高质量混凝土面板,是所有水电建设者努力的方向。宁海抽水蓄能电站(以下简称“宁蓄电站”)上下水库挡水建筑物均为混凝土面板堆石坝,本文从前期施工准备到施工过程中的配合比试验、混凝土供应、原材料稳定、施工期质控和养护等方面阐述,为打造高质量混凝土面板的施工提供一定参考借鉴。

## 1 工程概况

宁蓄电站位于浙江省宁海县大佳何镇境内,

收稿日期:2023-08-10

为一等大(1)型工程,总装机容量 $4 \times 350$  MW。上水库大坝最大坝高 59.8 m,坝顶长度 550 m,共分 49 块面板,长度超过 90.00 m 的面板 10 块,单块最大长度 95.54 m,面板设计宽度 7.6~12.0 m、厚度 40.4~56.7 cm。下水库大坝最大坝高 96.3 m,坝顶长度 280 m,共分 25 块面板,长度超过 100.00 m 的面板共 16 块,单块最大长度 158.33 m,面板设计宽度 6.0~12.0 m、厚度 41.5~67.6 cm。

2022 年 4 月 6 日上水库大坝填筑完成,9 月 26 日首仓面板开始浇筑,坝体预沉降期 5 个月 20 天,面板浇筑前累计最大沉降量为 190 mm;2022 年 4 月 26 日下水库大坝填筑完成,10 月 12 日首仓面板开始浇筑,坝体预沉降期 5 个月 15 天,面板浇筑前累计最大沉降量为 226 mm,上下库大坝在面板浇筑前 3 个月的月沉降变形值均小于 5 mm,完全满足坝体预沉降期宜为 3~6 个月,顶部坝体最大沉降速率小于 5 mm/月的双控指标<sup>[1]</sup>。

## 2 配合比试验

配合比是影响混凝土强度和稳定性的关键因素。宁蓄电站面板混凝土设计强度等级 C30、设计龄期 28 d、抗渗等级 W10、抗冻等级 F100、极限拉伸值 $\geq 1.0 \times 10^{-4}$ <sup>[2]</sup>、弹性模量 $\geq 30$  GPa、泊松比 $\geq 0.167$ 。溜槽入口处的混凝土坍落度计划按 5~7 cm 控制。为了在满足设计指标的前提下,进一步提高面板混凝土的和易性和抗裂性能,宁蓄电站以工程使用混凝土原材料为基础,提前半年进行面板混凝土的配合比试验,以“普通面板混凝土”“VF 补偿收缩面板混凝土”和“VF 补偿收缩+玄武岩纤维面板混凝土”三种方案分别进行试验研究。通过三种配比方案的混凝土性状比较,优选具有防裂效果的最佳混凝土配合比。配合比试验技术路线流程图见图 1。

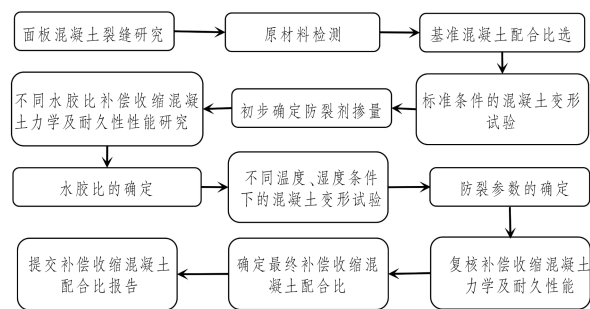


图 1 配合比试验技术路线流程图

### 2.1 VF 防裂剂配方选定试验

VF 防裂剂是一种以明矾石、石膏、高铝熟料及添加剂为原料共同研磨配制而成的粉状混凝土外加剂,是由宁蓄电站施工单位所属科研院研制的,可以为薄壁混凝土提供补偿收缩功能。试验通过不同配方的四种不同组份防裂剂性能指标研究,最终确定掺入面板混凝土的防裂剂组份,各组份防裂剂性能指标检测结果见表 1。

表 1 各组份防裂剂性能指标检测结果

检测项目	限制膨胀率 / %		抗压强度 / MPa	
	水中	空气中	7d	28d
	7 d	21 d		
质量标准	$\geq 0.035$	$\geq -0.015$	$\geq 22.5$	$\geq 42.5$
配方 1	0.029	-0.019	37.0	53.5
配方 2	0.034	-0.015	39.6	53.0
配方 3	0.048	-0.009	36.1	52.5
配方 4	0.060	0.002	30.2	49.8

### 2.2 玄武岩纤维原材料检测试验

试验人员通过对工程行业混凝土外加剂市场调研发现,在国内很多水利工程、工民建、铁路和公路工程结构混凝土和砂浆拌制过程中掺入一种短切玄武岩纤维,可以有效减少混凝土和砂浆的早期裂缝产生。该种纤维是以天然火山岩为原料生产加工而成的一种纯天然绿色纤维,拥有较高的拉伸强度、剪切强度和弹性模量,并具有良好的化学稳定性和热稳定性、抗老化耐酸碱、耐高温和低温、绝热和电绝缘、隔音等特性<sup>[3]</sup>。短切玄武岩纤维成品见图 2。



图 2 短切玄武岩纤维成品

对照合成纤维的相关规范和标准要求,试验人员通过对厂家提供的短切玄武岩纤维成品的纤维直径、纤维长度、抗拉强度、弹性模量、断裂伸长率、耐碱性能和单丝断裂强度保留率<sup>[4-5]</sup>等进行检测,结果显示全部符合标准相关要求,玄武岩纤维性能指标检测结果见表 2。

### 2.3 其他不同材料的性能对比实验

试验人员利用电站的混凝土原材料,又分别

表 2 玄武岩纤维性能指标检测结果

检测项目	公称直径 / $\mu\text{m}$	公称长度 /mm	直径偏差 /%	长度偏差 /%	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	断裂伸长率 /%	耐碱性能、单丝断裂强度保留率 /%
质量标准	20.0	18.00	$\pm 10.0$	$\pm 10.0$	$\geq 1050$	$\geq 34$	$\leq 3.1$	$\geq 75$
检测结果	19.0	18.60	-5.0	+3.3	2830	94	3.0	82

进行了聚羧酸高效减水剂、萘系高效减水剂混凝土拌和物的性能比对试验和混凝土抗压强度试验,以及 4 种不同石粉含量的人工砂拌和物的性能比对试验和混凝土抗压强度试验。经过大量的试验最终确定了适合宁蓄电站面板混凝土的减水剂种类和人工砂最佳石粉含量,结论如下:

(1)两种高效减水剂作用下的混凝土拌和物抗压强度和以 28 d 为基准的强度增长率基本相同,但萘系减水剂 60 min 时,坍落度损失为 40 mm,不符合《混凝土面板堆石坝施工规范》DL/T 5128—2021 标准要求,建议采用聚羧酸高效减水剂。

(2)当电站砂石料加工系统生产的人工砂石粉含量控制在 14%~16% 范围内时,混凝土拌和物性能、力学性能最佳。

#### 2.4 补偿收缩面板混凝土配合比试验

在明确了面板混凝土原材料后,试验人员通过普通混凝土、掺 VF 防裂剂的补偿收缩混凝土和 VF 防裂剂 & 玄武岩纤维双掺抗裂混凝土等三种不同配合比设计,并经过一系列的拌和物性能指标试验对比,结论如下:

(1)使用聚羧酸高效减水剂并严控石粉含量的人工砂作为细骨料的情况下,设计的普通混凝土配合比即可满足设计提出的面板混凝土相关指标要求,其中极限拉伸值为  $1.03 \times 10^{-4}$ 。

(2)试验确定配方的防裂剂掺量为 10% 时,5、20、35  $^{\circ}\text{C}$  下 C30W10F100 混凝土最大收缩变形均小于混凝土极限拉伸变形,可有效避免混凝土收缩裂缝的产生。

表 4 推荐“补偿收缩+纤维面板”混凝土配合比

强度等级	水胶比	砂率 /%	坍落度 /mm	每立方混凝土材料用量 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )									
				水泥	粉煤灰 20%	VF 防裂剂 10%	人工砂	碎石 /mm		减水剂	引气剂	纤维	水
								5~20	20~40				
C30W10 F100	0.42	38	50~70	222	63	32	726	533	651	4.44	2.22	2.5	133

备注:每方混凝土拌和物的质量计算值为  $2\ 367 \text{ kg/m}^3$ ,质量实测值为  $2\ 380 \text{ kg/m}^3$ ,配合比校正系数为 1.00。

### 3 混凝土供应

(3)选定的成品玄武岩纤维掺量在  $3.5 \text{ kg/m}^3$  以内时,对混凝土配合比的用水量、和易性等没有明显影响;掺量在  $1.5 \text{ kg/m}^3$  以内时,混凝土极限拉伸值无明显变化,掺量增加到  $2.5 \text{ kg/m}^3$  时,混凝土极限拉伸值从  $1.03 \times 10^{-4}$  提高到  $1.22 \times 10^{-4}$ ,有较明显的提高。

(3)玄武岩纤维掺量分别为  $1.20 \text{ kg/m}^3$ 、 $1.35 \text{ kg/m}^3$ 、 $1.50 \text{ kg/m}^3$ 、 $2.00 \text{ kg/m}^3$ 、 $2.50 \text{ kg/m}^3$ 、 $3.00 \text{ kg/m}^3$ 、 $3.50 \text{ kg/m}^3$  时,C30W10F100 混凝土最大收缩变形均小于混凝土极限拉伸变形,可有效避免混凝土收缩裂缝的产生,但玄武岩纤维掺量超过  $2.50 \text{ kg/m}^3$  后,混凝土极限拉伸值趋于稳定,不同纤维掺量混凝土极限拉伸值见表 3。

表 3 不同纤维掺量混凝土极限拉伸值

配合比编号	水胶比	纤维掺量 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	极限拉伸值 / $10^{-4}$
MBN11	0.42	0.00	1.02
MBN12	0.42	1.20	1.01
MBN13	0.42	1.35	1.03
MBN14	0.42	1.50	1.03
MBN15	0.42	2.00	1.16
MBN16	0.42	2.50	1.22
MBN17	0.42	3.00	1.21
MBN18	0.42	3.50	1.22

#### 2.5 最终选定配合比

综合以上各项试验数据,最终确定宁蓄电站面板混凝土采用 VF 防裂剂掺量 10%,玄武岩纤维掺量为  $2.5 \text{ kg/m}^3$  的混凝土配合比,推荐“补偿收缩+纤维面板”混凝土配合比见表 4。

对于面板混凝土施工,浇筑过程中应减少运

输、等待时间,避免混凝土发生分离、泌水或坍塌过大等现象,拌制的混凝土应尽量降低坍落度并控制在 20 mm/h 以内。针对上述面板混凝土拌和物的具体要求,为了确保混凝土拌和物的性能和质量,宁蓄电站在上下库大坝一侧坝头各建了一座临时拌和站,专门为面板施工供应混凝土,平均水平运输距离仅 200 m。同时考虑到混凝土搅拌车无法运输低坍落度混凝土,又对拌和站下料口进行改装,使拌制后的混凝土直接卸入小型自卸汽车运至仓面,最大程度上保证了面板混凝土的低坍落度性状,所有面板混凝土仓面坍落度均控制在 30 mm 以内,并且由于玄武岩纤维材料的掺入,拌制过程中在混凝土内部分散均匀,在低坍落度情况下仍能保证仓面溜槽内的混凝土具有很好的流动性。

#### 4 原材料稳定

较好的混凝土拌制运输条件是混凝土拌和物质量的保证,但要保持拌和物的性状稳定,优选配合比中的各原材料的稳定性也十分关键。宁蓄电站面板混凝土施工前,为了避免因原材料的差异而导致各仓面板混凝土拌和物的质量波动,采取了以下措施:

(1)租赁场外固定灰罐,提前 2 个月存储足量水泥降温备用,进场水泥温度均在 40℃ 左右。

(2)场内专用灰罐存储专供面板混凝土的粉

煤灰。

(3)设置专门堆场提前储存机制砂,做好场地防雨排水措施,严控人工砂细度模数在 2.4~2.8 之间,储存的人工砂石粉含量确保在 14%~16% 之间。

(4)在拌和站布置专用外加剂库一次性存储够 VF 防裂剂和玄武岩纤维等掺和料,并根据拌和站每一拌的混凝土方量,将掺合料等量袋装,避免了现场二次称量带来的误差。

(5)专用水箱存储上下库导流洞出口天然地表水,专供坝头面板混凝土拌和站。

#### 5 施工期质控和养护

(1)切断约束。尽可能减小坝体与混凝土面板之间的约束,是水库运行工况下,确保薄板结构不因水压力以外的其他外力作用而产生结构破坏的关键,特别是抽水蓄能电站的上下水库,水位变幅大、涨落频繁,更加考验混凝土面板的自身结构稳定。而在面板混凝土施工过程中,结构钢筋安装必须借助理入坝体的插筋作为架立筋。如果在混凝土浇筑过程中,不将这些架立筋与坝体断开连接,则各块混凝土面板无形中就会与坝体形成若干个约束点。宁蓄电站面板混凝土浇筑过程中,随着混凝土浇筑面的上升,安排专人对浇筑面上方的架立插筋点焊割除,并在混凝土覆盖前由当班质检员逐个检查。插筋点焊割除和检查验收见图 3。

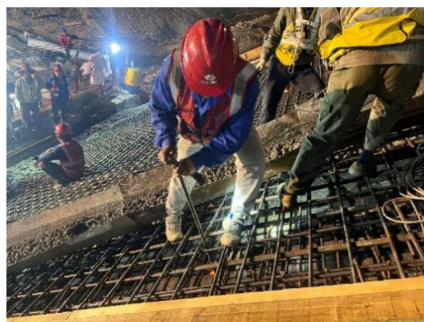
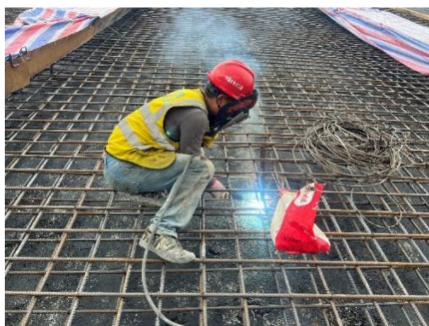


图 3 插筋点焊割除和检查验收

(2)规范振捣。面板混凝土采用的是无轨滑模施工工艺,混凝土经坝面布置的溜槽入仓至滑模体前方,依靠溜槽左右摆动均匀布料,然后利用软轴振捣器振捣混凝土。宁蓄电站的所有面板混凝土浇筑块,施工过程中安排振捣经验丰富、操作责任心强的振捣工进行振捣。同时,为了确保不漏振、不过振,根据每仓滑模体的长度不同,安排

不同数量的振捣工和振捣器一字排开,在均匀铺料结束后,通过动作统一听指挥、振捣范围定宽度、振捣时长掐表数进行规范操作。同时,侧模止水部位的混凝土在下料后也由专人负责精细振捣,严禁触碰止水。

(3)保养到位。根据前期配合比设计试验得出的混凝土变形曲线结果表明,掺用防裂剂的混

凝土干缩率明显低于普通混凝土,说明掺用防裂剂能明显抵消或减小混凝土的收缩。但最终暴露在空气中的混凝土仍呈收缩趋势,加强养护才能充分发挥补偿收缩混凝土的补偿优势。为了最大程度降低面板混凝土干缩裂缝的产生,宁蓄电站的面板混凝土采取了分阶段养护措施,具体养护流程为:二抹结束薄膜覆盖→初凝撤膜换布压住→两布一膜低温保护,在混凝土终凝后,外界气温非负温的情况下,在土工布和混凝土之间利用坝体布置的单阀单控的花洒长流水养护。

## 6 结 语

宁蓄电站上下库大坝面板混凝土,首次采用 VF 防裂剂 & 玄武岩纤维双掺防裂配合比,并通过科学精细的施工前准备、规范有效的混凝土振捣、严格细微的施工中质控和阶段分明的施工后养护。上水库历时 77 d 和下水库历时 65 d 完成共计 74 块面板混凝土的施工,三个月后对面板进行裂缝普查,上库大坝 3.15 万 m<sup>2</sup> 的面板仅 12 条裂缝,其中 I 类缝 1 条,II 类缝 11 条;下库大坝 3.2 万 m<sup>2</sup> 面板共发现 51 条裂缝,其中 I 类缝 2 条,II 类缝 49 条,且上述裂缝均属于浅层非贯穿裂缝。裂缝控制水平在国内抽水蓄能电站类似工

(上接第 4 页)

用智能组价,记录组价耗时,并由专业人员对组价精度进行评估。经过评估发现:智能组价的准确度高于或接近人工组价结果,速度较人工组价提升百倍以上。此外,研发团队还通过走查法,观察造价师组价过程和使用智能组价功能过程,优化界面布局和工程参数,以提升组价效率。

## 6 结 语

笔者从手动组价到智能组价的演进过程着手分析,提出了智能组价的特征、实施步骤及训练过程,并结合语义分析、云计算等 AI 技术不断优化和改进智能组价模型,以达到提高组价效率的目的。中国电建成都院在智能组价上的探索已经取得阶段成果,这是将造价工作经验转换为知识成果的开始,也是工程造价、工程大数据与人工智能技术融合的开始,更是响应行业数字化转型的工作成果。工程公司的数字化转型具有长期性、复杂性和艰巨性的特点,行胜于言,质胜于华。在后续工作中,将进一步探索工程造价与三维协同设

程中十分突出,真正意义上打造出了高质量的少缝面板,获得中国水电水利规划设计总院专家们的一致好评。

充分准备是基础,配比选对靠技术,质控细微不含糊,保养到位为要务。相信随着国内防裂混凝土新材料和新技术的不断发展创新,再加上施工全过程的精心策划和严格管控,在抽水蓄能电站甚至常规水电站的堆石坝工程中,会涌现出更多少缝、甚至无缝的高质量混凝土面板。

## 参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. DL/T 5128-2021, 混凝土面板堆石坝施工规范[S]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [2] 水利水电规划设计总院. NB/T 10871-2021, 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2022.
- [3] 中国建筑材料联合会. GB/T 23265-2009, 水泥混凝土和砂浆用短切玄武岩纤维[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [4] 中国电力企业联合会. DL/T 5797-2019, 水利水电工程纤维混凝土施工规范[S]. 北京:中国电力出版社,2020.
- [5] 中国工程建设标准化协会. CECS 13:2009, 纤维混凝土试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,2010.

## 作者简介:

刘 杰(1984-),男,安徽舒城人,学士,从事抽水蓄能电站施工技术与质量管理工作。

(责任编辑:吴永红)

计融合,与智慧水电业务融合,提升造价工作的数字化水平,更好地服务可再生能源生产业务,助力国家能源转型大战略。

## 参考文献:

- [1] 李喜梅. 基于人工智能技术的建筑工程造价估算研究[J]. 城市建筑,2021,18(05):146-148.
- [2] 王琼. 面向人工智能的建筑工程造价计算性模式研究[J]. 土木建筑工程信息技术,2021,13(4):120-124.
- [3] 王琼. 人工智能工程造价信息管理平台构建研究[J]. 建筑经济,2020,41(10):69-72.
- [4] 王琼. 人工智能时代下工程造价行业的发展现状分析[J]. 山西建筑,2019,45(17):166-167.
- [5] 李丽芝. 工程造价人工智能时代的期待与展望[J]. 建材与装饰,2018(36):134-135.

## 作者简介:

张 然(1988-),男,重庆人,硕士,高级工程师,一级造价师,从事工程造价方面工作;

马 岗(1983-),男,汉族,本科,陕西榆林人,从事企业数字化转型、工程大数据及智能应用工作。

(责任编辑:吴永红)