

# 基于混凝土面板堆石坝坝体填筑施工技术 with 质量控制

梁建明

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

**【摘要】**：为了提升混凝土面板堆石坝建设质量，保障坝体的长久稳定运行，本文重点探讨坝体分区填筑、关键施工工艺及沉降位移控制技术，同时从原材料、施工过程、检测验收三个维度构建质量控制体系。研究表明，科学划分坝体填筑分区、严格把控铺料与压实工艺、实施全过程动态监控，可有效降低坝体沉降位移量，确保填筑质量符合设计标准，提升坝体抗渗性和稳定性。研究结论可为同类混凝土面板堆石坝坝体填筑施工提供技术参考和实践指导，具有重要的工程应用价值。

**【关键词】**：混凝土面板；堆石坝；坝体填筑；施工技术；质量控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.11.031

## 引言

近些年，混凝土面板堆石坝被广泛应用于我国水利水电工程中。坝体填筑作为堆石坝施工中的核心环节，填筑质量的好坏直接决定了整个坝体的稳定性、抗渗性和耐久性。当前，随着水利工程规模不断扩大，对坝体填筑施工精度和质量要求不断提高，传统填筑技术已难以满足复杂工程的施工需求，亟需优化施工工艺、完善质量控制体系。本文围绕混凝土面板堆石坝坝体填筑施工技术展开深入研究，结合质量控制关键点，提出科学可行的施工控制方案，为工程施工提供支撑，推动混凝土面板堆石坝施工技术的进一步发展。

## 1 混凝土面板堆石坝基本结构与工作原理

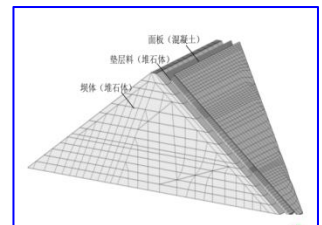
混凝土面板堆石坝的基本结构主要包括混凝土面板、趾板、坝体堆石体及排水系统。其中，混凝土面板的主要作用是避免坝体渗漏，通常铺设于堆石体上游坡面，通过趾板与地基连接；趾板位于面板底部，嵌入地基岩石中，起到固定面板、传递荷载及防渗过渡的作用；坝体堆石体则承担着挡水、抗滑及承受水压力的核心功能，通过分层填筑、分层压实形成稳定的整体；排水系统分布于堆石体内部及下游坡面，及时排出渗透水，降低坝体孔隙水压力，提升坝体稳定性。实际运营中，堆石坝借助堆石体的高强度和整体性抵御库水压力，通过面板和趾板的防渗作用阻止渗漏，借助排水系统缓解水压力影响，三者协同实现挡水、防渗、稳定的核心目标。

### 1.1 青岛崂山面板堆石坝概况

泉心河水库位于青岛市崂山区王哥庄片区，坐落于崂山东侧的峡谷内，该水库西、南、北三面环山，东面临海。枢纽主要建筑物由大坝、溢洪道、输水管道、放水管道及管理区组成，总库容为 629 万 m<sup>3</sup>，设计日供水能力为 1.67 万 m<sup>3</sup>。大坝坝型为混凝土面板堆石坝，坝顶长 338m，宽 7.8m，坝顶高程为 153.0m，最大坝高 90m；采用挤压边墙进行上游垫层料固坡，上游坡比为 1:1.35，下游综合坡比 1: 1.25，共有 34 块面板，

面板厚 0.3~0.6m，最大面板斜长约 125m，面板总面积 2.82 万 m<sup>2</sup>。该水库蓄水主要依靠山体自然汇水，因此汛期才可蓄水，主要用于非汛期当地百姓生活供水，若坝体存在渗水，损失较大，由于本工程水库蓄水主要进行供水饮用，对水体质量要求较高，不得对水体产生任何污染。根据料源及对坝料强度、渗透性、压缩性、施工方便和经济合理等要求，将坝体从上游到下游分为坝体从上游向下游根据材料不同分为：上游铺盖区、盖重区、垫层区、特殊垫层区、过渡区、主堆石区、下游堆石区、下游护坡，筑坝材料为花岗岩，属硬岩。

根据坝体材料分区，面板堆石坝工程坝体材料主要由垫层料（2A）、过渡料（3A）、主堆石料（3B）、次堆石料（3C）、垫层小区料（2B）、上游铺盖区土料（1A）和上游盖重区（1B）。过渡料位于垫层与主堆石区之间，花岗岩，最大粒径 300mm，小于 5mm 的颗粒含量小于 15%，小于 0.075mm 的颗粒含量小于 5%；主堆石料最大粒径 800mm，小于 5mm 的颗粒含量小于 20%，小于 0.075mm 的颗粒含量小于 5%。



该工程于 2020 年 9 月开工，2023 年 5 月完工，完工后并于当年汛期进行蓄水，蓄水后上游面板无塌陷，下游无渗水，并经专业机构检测水体未受到污染，可直接饮用。

## 2 混凝土面板堆石坝坝体填筑施工技术

### 2.1 坝体分区填筑施工技术

大坝填筑采用“进退错距法”错距  $L = \text{碾子宽度} / \text{碾压遍数}$ ；碾压方向：平行于坝轴线方向，大坝两侧岸坡碾压不到部位可

垂直于坝轴线碾压；过渡料与主堆料交界位置处超粒径大块料应进行清理，防止出现骨料集中造成脱空现象而形成涌水通道。主堆区预留台阶衔接部位的松散体填筑前应进行清理，防止出现衔接部位填筑不密实。大坝两侧岸坡填筑前需将土方、树枝杂草、松动石头等处理完成后并漏出原基岩面，坡度陡于1:0.25的岸坡要求进行找坡处理。主次堆区和岸坡2m宽的过渡料区虚铺85cm，采用26t碾子静碾2遍，振碾8遍，错距27cm，速度2.5-3km/h；其中岸坡边30cm过渡料范围采用液压平板夯碾压30s，振动碾碾压时应由专人看管，不得一直静碾，必须按要求静碾2遍，振碾8遍，保证碾压密实；上游面3m宽垫层料区和上游面4m宽过渡区虚铺45cm，采用18t碾子静碾2遍，振碾8遍，错距27cm，速度2.5-3km/h。严格控制各区段填料粒径（特殊垫层料粒径 $\leq 4\text{cm}$ ，垫层料粒径 $\leq 8\text{cm}$ ，过渡料粒径 $\leq 30\text{cm}$ ，主次堆区粒径 $\leq 80\text{cm}$ ），级配不连续和超粒径以及含土、树枝等杂物的料源不允许运至坝体填筑区。

### 2.1.1 垫层区填筑

垫层区的主要作用是保护混凝土面板、分散面板应力、辅助防渗与排水，通常位于面板与过渡区之间，其填筑质量对面板的受力状态和坝体防渗效果具有很大的影响。一般而言，垫层区填筑材料多选用级配良好、质地坚硬、抗冻性强的碎石料，颗粒级配需严格符合设计要求，粒径控制在5-40mm之间，含泥量不得超过3%，避免因材料不合格导致垫层区强度不足或渗透系数超标<sup>[1]</sup>。填筑期间通常需结合薄层铺料与轻型压实模式，铺料厚度控制在20-30cm，采用小型振动碾进行压实，压实度需达到98%以上。填筑顺序遵循从下游向上游、从低处向高处分层推进的原则，每填筑一层后及时进行压实检测，合格后方可进行下一层填筑，同时做好垫层区坡面的修整，确保坡面平整、坡度符合设计要求，为后续面板施工奠定良好基础。

### 2.1.2 过渡区填筑

过渡区位于垫层区与主堆石区之间，能够连接垫层区和主堆石区，协调两者之间的变形差异，传递荷载，同时阻止主堆石区的大颗粒嵌入垫层区，保障垫层区的结构完整性。该区域通常选用级配连续的中粗碎石作为填筑材料，粒径控制在40-100mm之间，含泥量不超过2%，颗粒级配需满足设计规定的渗透系数要求，确保过渡区具有良好的透水性和整体性。施工时，铺料厚度控制在30-40cm，采用中型振动碾进行压实，压实度需达到97%以上，压实过程中需避免振动碾对相邻垫层区造成扰动。过渡区填筑需与垫层区填筑同步推进，分层搭接，搭接宽度控制在50-80cm，确保两者连接紧密。不同填筑层的施工参数需严格把控，具体参数要求如下表1所示：

表1 各填筑层施工参数表

填筑层别	铺料厚度 (cm)	压实机械	压实度 (%)
过渡区下层	35-40	中型振动碾	$\geq 97$
过渡区中层	30-35	中型振动碾	$\geq 97$
过渡区上层	30	中型振动碾	$\geq 97.5$

### 2.1.3 主堆石区填筑

主堆石区位于过渡区下游，其作用是负担混凝土面板堆石坝坝体的荷载。该区域的填筑材料通常选用质地坚硬、抗压强度高、抗风化能力强的块石，粒径控制在100-800mm之间，最大粒径不得超过1000mm，含泥量不得超过1%，块石间的空隙需填充适量的中细碎石，确保堆石体的密实度<sup>[2]</sup>。填筑期间通常采用大面积铺料、重型压实的方式，铺料厚度控制在80-100cm，采用重型振动碾进行压实，碾压次数控制在6-8遍，压实度需达到95%以上。填筑顺序遵循分层填筑、分层压实、循序渐进的原则，从坝基开始，由低处向高处、由下游向上游分层推进，每填筑一层后，及时进行压实检测，检测合格后方可进行下一层填筑，同时做好堆石体的平整工作，避免出现局部凸起或凹陷，确保坝体轮廓符合设计要求。

### 2.1.4 次堆石区填筑

次堆石区位于主堆石区下游，可以辅助主堆石区承受荷载、调整坝体轮廓，同时还可以起到一定的排水作用。次堆石区填筑材料可选用强度适中、级配相对较差的块石，粒径控制在50-600mm之间，含泥量不得超过2%，可利用主堆石区填筑过程中产生的边角料进行填筑，提高材料利用率，降低施工成本。施工时，铺料厚度控制在60-80cm，采用中型振动碾进行压实，碾压次数控制在4-6遍，压实度需达到93%以上。填筑顺序与主堆石区同步推进，分层搭接，搭接宽度控制在60-80cm，确保与主堆石区连接紧密。填筑过程中，需及时清除块石中的杂草、泥土等杂质，避免影响堆石体的密实度和稳定性，同时做好排水处理，防止雨水浸泡导致堆石体软化。

## 2.2 关键施工工艺要点

### 2.2.1 铺料工艺

基于混凝土面板堆石坝坝体填料铺设的时候，施工人员需根据坝体不同分区特点制定针对性的铺料方案。铺料前应清除填筑区表面的杂草、泥土、杂物及松动岩石，确保填筑基面平整、坚实，同时检查填筑材料的质量，不合格材料严禁进场使

用。铺料采用进占法或后退法进行,主堆石区和次堆石区采用进占法铺料,可减少机械对已压实层的扰动;垫层区和过渡区采用后退法铺料,避免振动碾碾压时对坡面造成破坏。需要注意,铺料过程中需控制铺料厚度均匀,误差不得超过±5cm,铺料宽度需超出设计轮廓线20-30cm,为后续修整预留空间。铺料后还应及时平整铺料层面,清除超大粒径块石和尖锐棱角块石,避免压实过程中出现局部受力不均,确保压实效果均匀一致<sup>[3]</sup>。

### 2.2.2 压实工艺

压实的主要目的是提升坝体堆石体密实度、增强坝体稳定性和抗渗性,具体需根据填筑材料的类型、铺料厚度科学选择压实机械和压实参数。压实机械必须与填筑分区相匹配,如,垫层区应选用小型振动碾,过渡区选用中型振动碾,主堆石区和次堆石区选用重型振动碾,确保压实机械的碾压能力满足设计要求。压实参数需通过现场碾压试验确定,明确碾压次数、碾压速度、碾压遍数等关键参数,一般碾压速度控制在2-3km/h,碾压次数根据分区不同控制在4-8遍,碾压顺序遵循先轻后重、先慢后快、先边缘后中间的原则。具体压实过程中,需确保振动碾碾压到位,避免出现漏压、欠压现象,相邻碾压带的搭接宽度控制在10-20cm。

### 2.2.3 接缝与搭接施工

接缝与搭接施工环节特别容易出现接缝松动、搭接不紧密等问题,因此需严格把控接缝与搭接施工质量。坝体填筑的接缝主要包括横向接缝和纵向接缝,横向接缝是相邻填筑层之间的接缝,纵向接缝是同一填筑层不同铺料区域之间的接缝。横向接缝需采用台阶式搭接,搭接宽度控制在50-80cm,搭接处的铺料厚度需适当减薄,压实度需高于相邻区域1-2%,确保接缝处密实。纵向接缝需避免垂直搭接,采用斜向搭接,搭接角度控制在30-45°,搭接宽度不小于80cm,碾压时重点碾压搭接区域,确保搭接处无空隙、无松动。同时,坝体分区之间的搭接的施工需同步推进,垫层区与过渡区、过渡区与主堆石区、主堆石区与次堆石区的搭接宽度需符合设计要求,搭接处的材料级配需平滑过渡,避免出现级配突变,确保各分区连接紧密,协同工作。

### 2.2.4 堆石坝石料加水措施

堆石料填筑时加水的目的在于使石料浸湿,软化细料,并降低粗粒的抗压强度,以提高压实密度和压实效率,减少坝体沉降变形。加水使软化系数较大的新鲜坚硬石料表面形成湿润饱和状态,在碾压过程中颗粒间的摩擦力减少,有利于相互挤压、充填密实;对于软化系数较低的软岩,使表层湿润,降低湿轴抗压强度,使之在碾压过程中容易破碎,填充空隙,而软岩中未破碎的硬质部分形成稳定骨架,从而达到较大的碾压沉降变形,有利于坝

体稳定。同时在填筑后的坝面适当洒水可起到充填细料的作用”。

在堆石料的填筑压实践中,总是遇到压实时加水的问题。我国现行规范中列有相应的规定。堆石加水可以使堆石颗粒表面润湿、润滑,减小彼此间的摩擦力,使其在压实、运输机械的作用下,容易产生相对位移并彼此挤紧,对软化系数较小的岩石,还可以使岩块及棱角易于压碎,从而达到较高的密实度。

堆石坝填筑坝料加水的方法有:对爆破料堆加水,对运输车辆上坝料加水和对石料推平后的坝面进行洒水三种方法。一般采用后两种加水方法,即坝外加水和坝内加水。



### 2.2.5 沉降与位移控制技术

坝体填筑完成后,若沉降位移量超过设计允许值,极易导致混凝土面板开裂、坝体失稳,因此需采取科学有效的控制技术。首先,严格控制各分区的铺料厚度、压实度等参数,避免因压实不足导致后期沉降过大,同时合理安排填筑顺序,控制填筑速度,避免坝体局部受力不均引发不均匀沉降。其次,设置完善的监测系统,在坝体不同部位、不同高程布置沉降计、位移计等监测设备,实时监测坝体的沉降量和水平位移量,监测频率根据填筑进度调整,填筑期间每天监测1-2次,填筑完成后每周监测1次,及时分析监测数据,若发现沉降位移异常,立即停止填筑,查找原因并采取整改措施<sup>[4]</sup>。最后,填筑完成后还应观测一段时间,超过允许值的沉降区域采用补充碾压、注浆加固等方式进行处理,确保坝体沉降稳定,满足设计要求。

## 3 基于混凝土面板堆石坝坝体填筑施工质量控制

### 3.1 原材料质量控制

原材料质量与坝体强度、稳定性及渗漏问题密切相关,因此施工中需严格控制材料进场、检验、存储等环节。首先,明确各分区填筑材料的质量标准,根据设计要求明确规定垫层区、过渡区、主堆石区、次堆石区的材料粒径、含泥量、抗压强度等指标,选择资质齐全、信誉良好的供应商提供材料。其次,委托专业检测机构对材料的各项指标进行检测,检验合格后方可进场,不合格材料严禁进场使用,同时做好材料进场记录,留存检测报告。最后,不同类型、不同规格的材料分开存储,设置明显的标识,避免混淆,堆石材料存储过程中,需做

好防雨、防潮措施,避免雨水浸泡导致材料软化、含泥量增加,同时定期对存储材料进行复检,确保材料质量始终符合设计要求。

### 3.2 施工过程动态监控

实时动态监控整个施工过程能够及时发现施工中的质量隐患,采取针对性的整改措施,确保施工质量符合设计要求。监控内容主要包括填筑参数监控、施工工艺监控、沉降位移监控三个方面。填筑参数监控重点监测各分区的铺料厚度、压实度、碾压次数、碾压速度等参数,采用现场实测的方式,每填筑一层,对铺料厚度和压实度进行抽样检测,检测频率不低于每1000 m<sup>3</sup>检测3点,确保参数符合设计规定<sup>[5]</sup>。施工工艺监控重点检查铺料顺序、压实顺序、接缝与搭接施工等工艺的执行情况,避免出现漏压、欠压、搭接不紧密等问题。沉降位移监控通过布置的监测设备,实时采集坝体沉降和位移数据,建立监测数据库,对数据进行分析处理,若发现数据异常,立即停工整改,待问题解决后再恢复施工,确保施工过程处于可控状态。

### 3.3 质量检测与验收

科学的检测和严格的验收流程能够进一步保障坝体填筑质量符合设计要求和规范标准。质量检测可分为过程检测和竣

工验收检测两个阶段,过程检测主要针对填筑过程中的各分项工程,包括原材料检测、填筑参数检测、压实质量检测等,检测结果作为过程质量控制的依据,不合格分项工程需及时整改,直至检测合格。竣工验收重点检测坝体的整体密实度、沉降位移稳定性、渗透系数等指标,采用现场检测与室内试验相结合的方式,委托第三方专业检测机构进行检测,确保检测结果客观公正。验收工作分为分项工程验收、分部工程验收和单位工程验收三个层次,分项工程验收在每一层填筑完成后进行,分部工程验收在坝体某一区域填筑完成后进行,单位工程验收在整个坝体填筑完成后进行,验收合格后签署验收报告,方可进入下一施工环节,未经验收或验收不合格的工程,严禁进行后续施工。

## 4 结语

总而言之,本文系统研究了混凝土面板堆石坝坝体分区填筑施工技术、关键施工工艺、沉降位移控制技术,结合原材料、施工过程、检测验收三个维度的质量控制措施,构建了完善的施工与质量控制体系。实践表明,严格遵循分区填筑原则、优化关键施工工艺、实施全过程动态监控,可有效提升坝体填筑质量,控制沉降位移量,避免质量隐患。后续可结合工程实际情况进一步优化施工技术和质量控制方案,推动混凝土面板堆石坝施工技术向更高效、更优质、更安全的方向发展。

## 参考文献:

- [1] 沈凡莉,梁皓.混凝土面板堆石坝坝体填筑质量检验控制[J].云南水力发电,2025,41(07):113-117.
- [2] 赵金凤.基于面板堆石坝坝体填筑施工技术研究[J].黑龙江水利科技,2025,53(06):167-171.
- [3] 吴甘露.堆石特性对混凝土堆石坝渗流场的影响[J].水利科学与寒区工程,2025,8(06):26-29.
- [4] 田俊.不同条件下混凝土面板堆石坝应力变形研究[D].昆明理工大学,2023.
- [5] 潘天俊.水库工程项目混凝土面板堆石坝施工技术[J].黑龙江水利科技,2022,50(09):53-54+65.