

拱坝牛腿结构预制混凝土模板施工技术

吴政总， 谢 斌

(中国水利水电第七工程局有限公司，四川 成都 610081)

摘 要：杨房沟水电站为混凝土双曲拱坝，坝身设置有 3 个泄洪中孔及 4 个泄洪表孔，孔口下方布置有牛腿结构，现场通过对孔口牛腿结构部位采用预制混凝土模板的施工技术，既节约了备仓工期，又保证了工程质量，还减少了安全风险，为工程创优及工程提前发电打下了坚实的基础。笔者对上述施工技术作了较为详细的介绍，包括预制混凝土模板设计、加工、安装、混凝土浇筑施工方法及相关控制要点，可供其他类似工程参考。

关键词：杨房沟水电站；拱坝；牛腿结构；混凝土预制模板

中图分类号：TV642.4；TV331；TU755.2+2 **文献标识码：** B **文章编号：**1001-2184(2021)01-0073-05

Technology on Formwork Construction for Precast
Concrete of Arch Dam Corbel Structure
WU Zhengsi, XIE bin
(Sinohydro Bureau 7 Co. , LTD, Chengdu, Sichuan, 610081)

Abstract: Concrete double-curvature arch dam is designed for Yangfanggou hydropower station. The dam is with three middle outlets and four surface outlets. The corbel structure is arranged under the orifice. Through technology on formwork construction for precast concrete of the corbel structure, the construction period is saved, the project quality is guaranteed, and the safety risk is reduced, which lays a solid foundation for earlier generation. This paper introduces the above construction technology in detail, including design, processing and installation of precast concrete formwork, concrete pouring method and related control points, which can be referenced for other similar projects.

Key words: Yangfanggou Hydropower Station; arch dam; corbel structure; pre-casted concrete formwork

1 概 述

杨房沟水电站位于四川省凉山彝族自治州木里县境内，工程规模为一等大(1)型工程，是国内首个采用 EPC 模式的百万千瓦级水电站。其挡水建筑为混凝土双曲拱坝，最大坝高 155 m，坝体共计分为 17 个坝段，设置有 4 个表孔和 3 个中孔泄洪，由于孔口牛腿结构部位通常在设计时属于钢筋、冷却水管、预埋件等布置密集区，孔口牛腿部位按照传统施工工艺，采用模板内侧预埋钢筋三角柱或槽钢内拉，外侧布置钢管围檩，将围檩与模板内侧槽钢连接组成的受力固定系统，在牛腿混凝土中预埋锚筋支撑点。同时，利用钢管搭设外侧悬空操作和安全防护平台的方式，将影响钢筋制安、冷却水管铺设和混凝土浇筑下料，因

此，对备仓工期及浇筑时间控制要求较高。此外，牛腿浇筑完成后施工人员需利用外侧悬空平台实施模板拆除、缺陷修补、外露拉杆切割封堵以及后期防护拆除等工作，安全风险较大。而相较于传统施工工艺，采用预制型钢支撑的钢筋混凝土预制模板施工技术，其预制模板主体在模板预制场内完成，现场仅进行仓面安装和加固，备仓时间相对常规施工较短，能有效提高坝体上升速度。且预制模板在仓内安装施工，施工人员可避免在倒悬牛腿外侧进行悬空作业，后期无安全防护结构拆除、缺陷修补处理等工作，安全风险更低。

2 预制混凝土模板设计及加工

2.1 模板总体构造

拱坝中孔钢衬进出口、表孔进出口闸墩及溢流面均采用坡比为 1：1 的牛腿结构，孔口部

位牛腿最大悬挑长度为 20.23 m,立模面积总计 2 637.84 m²,结构形式见图 1。预制模板混凝土浇筑仓垂直升层最大高度为 3 m,主要由三部分

组成:钢筋混凝土面板、内支撑桁架、预埋锚固件及连接件,三个部分间采用钢板焊接连接,其结构见图 2。

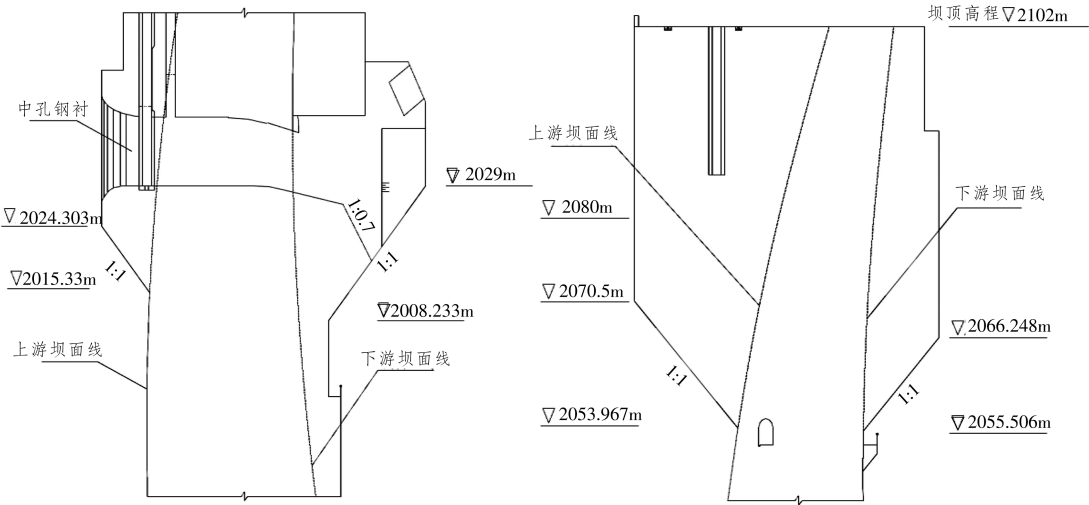


图 1 大坝孔口牛腿结构布置图

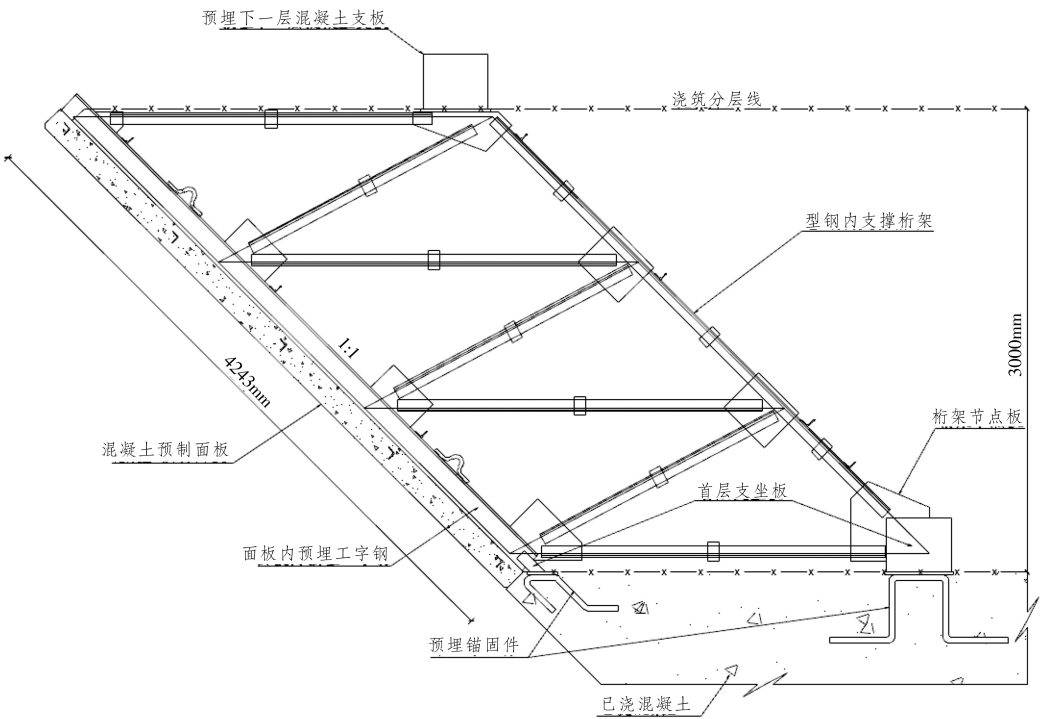


图 2 预制混凝土模板结构

2.2 钢筋混凝土面板

预制混凝土面板采用 16 cm 厚 C40 混凝土,斜长最大为 4.234 m,考虑仓内吊装设备采用 25 t 汽车吊,面板最大宽度为 1.8 m,每块面板与内支撑系统连接面的四周,预留 2 cm 倒角用于砂浆勾缝,局部区域根据牛腿宽度及斜长限制对模板

尺寸进行微调。面板内受力钢筋为 B12 钢筋,分布钢筋为 φ8 mm 钢筋,间距均按照 20 cm 安装。面板内预埋热轧普通工字钢(I25b)和角钢(∠56×5)采用焊接连接,预埋型钢用于成型后与内支撑系统连接,预埋工字钢(I25b)外侧总计布置 4 个吊耳便于后期模板安装时吊装。混凝土尺寸及

预埋型钢位置误差严格控制在±1 mm,预制前将钢筋、预埋角钢及工字钢表面除锈,钢筋混凝土面

板结构布置见图 3。
2.3 预制面板混凝土浇筑

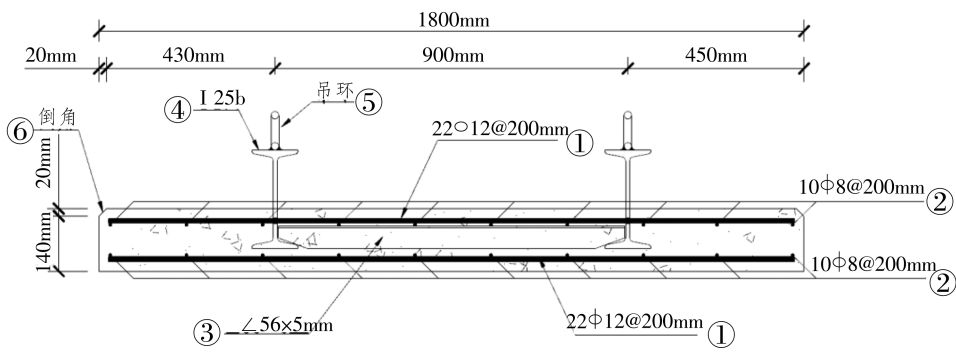


图 3 预制混凝土面板结构图

预制模板面板混凝土采用混凝土罐车运输至预制场地,直接卸料或搭设溜槽辅助入仓,φ50 mm 软轴振捣器进行振捣,浇筑前模板面板应涂脱模剂^[1],预制面板与大坝混凝土交接表面,采用冲毛枪进行冲毛,冲毛标准为表面乳皮、露出粗砂、微露小石。预制面板混凝土浇筑后采用人工洒水及覆盖麻袋片进行保湿养护,养护安排专人负责,并作好养护记录,养护时间不少于 28 d^[2],每块预制模板成型后用油漆在其侧面刷上日期及编号,以便于后续现场拼装。

2.4 内支撑桁架

每块预制模板采用两榀内支撑桁架,内支撑桁架间距 0.9 m(预制模板宽度小于 1.8 m 的内支撑间距按照比例相应减小,下同),桁架距预制板侧边 0.45 m。桁架杆件为角钢(∠75×10)双肢构件,采用桁架节点板连接桁架杆件,桁架杆件中间加填板。内支撑桁架焊接时,焊条型号为 CHE507,焊缝均为角焊缝,焊缝高度不小于 6 mm。单榀桁架制作过程中应做好施工期桁架定型,桁架制作好后与面板上工字钢拼装焊接。两榀内支撑桁架的横向联系均采用角钢(∠75×10)连接成整体。预制模板安装前,当结构钢筋与桁架有冲突时,需对结构钢筋作调整,仓面混凝土浇筑前内支撑桁架需除锈至表面无锈蚀。

2.5 预埋件及连接件

预制模板现场安装前需在上一仓先浇筑坝体混凝土中预埋锚固件(锚筋和钢板),在预埋件混凝土浇筑完成后,锚筋、钢板不能高出混凝土面。在预制模板吊装测量定位调整到位后方可进行现场焊接,焊接前预埋板须去污、除锈。待焊缝达到

受力要求方可将桁架与支座板焊接。由于支座板与预埋板、支座板与桁架节点板连接为现场焊接,该节点受力较大,焊接时采用 CHE507 焊条^[3],要求焊缝满焊,高度不小于 10 mm^[4]。

3 预制混凝土模板施工

3.1 预制混凝土模板与坝体关系

由于牛腿部位混凝土结构尺寸扩大 16 cm,为保证预制混凝土模板在安装时不侵占拱坝结构线,安装后预制混凝土模板和拱坝为一整体,后期预制混凝土模板不拆除。因此,在首仓预制模板安装前应先浇筑一仓以便找平层,而预制模板在靠近中孔钢衬区域,还应考虑水流过流时预制模板与牛腿混凝土结合面为薄弱部位,在靠近钢衬出口区域的牛腿模板顶部采用预留小模板浇筑混凝土的方式,其具体布置为:中孔出口牛腿预制混凝土模板分别于出口钢衬底板及侧面预留 30 cm、60 cm 缝隙,采用内拉覆膜面板进行补缝,为保证该部位受力强度,缝隙部位增加 C16 加强筋和锚固钢筋,20 cm 间排距布置,锚固筋锚入结构长度不少于 35 d,布置见图 4。

3.2 预制混凝土模板安装

3.2.1 安装流程

单块首层预制混凝土模板拼装及仓内安装施工程序:找平层浇筑(含预埋件施工)→预制模板混凝土面板浇筑→面板养护等强→模板型钢内撑制作→预制件出场验收→30 t 缆机吊入仓内→模板外露面保温材料安装→测量放线→首层支座板与预埋件焊接→模板仓内用 25 t 汽车吊运至牛腿部位→节点板与支座板焊接→下一层混凝土支座板焊接→模板间倒角砂浆勾缝

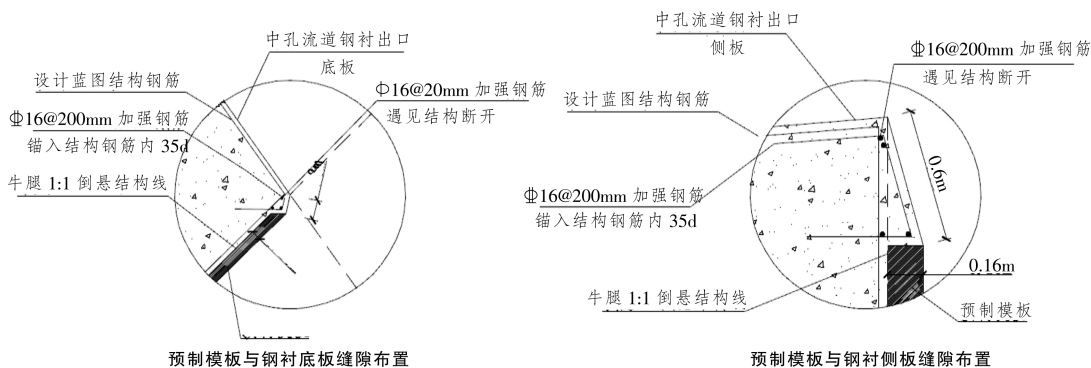


图4 预制混凝土与坝体结构关系及预留缝隙图

→预制件安装验收。

3.2.2 安装要求

预制混凝土模板安装时,上一仓混凝土强度不低于 5 MPa,安装前先对预埋板平整度等进行复测,以确保安装工作能够顺利进行。复测完成后将首层支座板与预埋板(锚固件)焊接,待焊缝到达受力要求后,吊装模板就位,测量配合调整误差,调整完毕后将桁架节点板与首层支座板焊接。支座与预埋板、桁架节点板焊接前需作去污、除锈处理。上述焊缝均为满焊,高度不小于 10 mm,由于该节点受力较大,需严格控制现场焊接质量,每块预制模板在安装完成前采用手动葫芦+地锚的方式对其加固,以防安装过程中发生倾斜或局部位移。

3.2.3 安装过程吊装控制

(1)预制混凝土模板在仓内采用 25 t 汽车吊起重吊装,开始起吊时应先将模板调离地面 200~300 mm 后暂停,检查汽车吊稳定性、制动装置可靠性、构件的平衡性和绑扎的牢固性,无误后方可继续起吊。

(2)吊装过程中汽车吊起重最大仰角不超过 78°,最小仰角不小于 45°^[5],起重吊装吊点根据仓内情况提前选定,以减少起重臂在吊装过程中的伸缩,若因现场仓面结构限制需要在吊装过程中伸缩时,应将起吊荷载控制在其额定值的 50% 以内。

(3)预制混凝土模板单块最大重量为 47.1 kN,采用四根直径为 24 mm 的钢丝绳吊索吊装,吊索采用 6×37 型钢丝绳制作成 8 股头式,吊索与预制混凝土模板的水平夹角按不小于 30° 控制。

3.3 预制混凝土模板找平层浇筑

预制混凝土模板以不侵占大坝结构线为原则,牛腿部位混凝土结构尺寸扩大 16 cm,在实施前应先浇筑一仓找平层,找平层牛腿部位结构边线按设计结构边线外扩预制混凝土模板厚度控制,找平层牛腿部位按传统内拉内锚方式布置,采用“P6015+P1015”组合钢模板,模板通过钢管围檩、拉杆(φ20 mm)、预埋 L18a 槽钢、地锚形成内拉系统固定,并在收仓面预埋混凝土预制模板锚固件,找平层布置见图 5。

3.4 预制混凝土模板部位结构钢筋安装

泄洪中孔牛腿部位均布置有结构钢筋和限裂钢筋网,限裂钢筋网每层设计间距为 50 cm,结构钢筋间排距为 20 cm,钢筋保护层厚度 10 cm。受预制混凝土模板型钢内拉系统限制,需对钢筋布置进行局部调整,原则如下:

(1)限裂钢筋网调整不改变设计钢筋数量和钢筋直径。与模板型钢内拉系统冲突时,上下调整间排距,确保每一仓收仓面下 5~10 cm 处有一层水平限裂钢筋网片。

(2)结构钢筋设计沿牛腿结构面双层双向布置,外层结构钢筋保持不变。内层结构钢筋与型钢内拉系统冲突时,按立筋位置改变,间排距不变,水平钢筋直段调整为交叉锚固段,且按照锚固长度不小于 35d 为原则调整。

(3)调整后钢筋保护层厚度不变,且应紧贴模板型钢内拉系统。

4 施工要点控制

(1)混凝土分层。由于预制混凝土模板具有成型后形体无法调整的特殊性,模板设计前应根据大坝设计图纸绘制三维模型^[6],做好牛腿倒悬部位结构细分、浇筑分层规划工作,以确定牛腿找

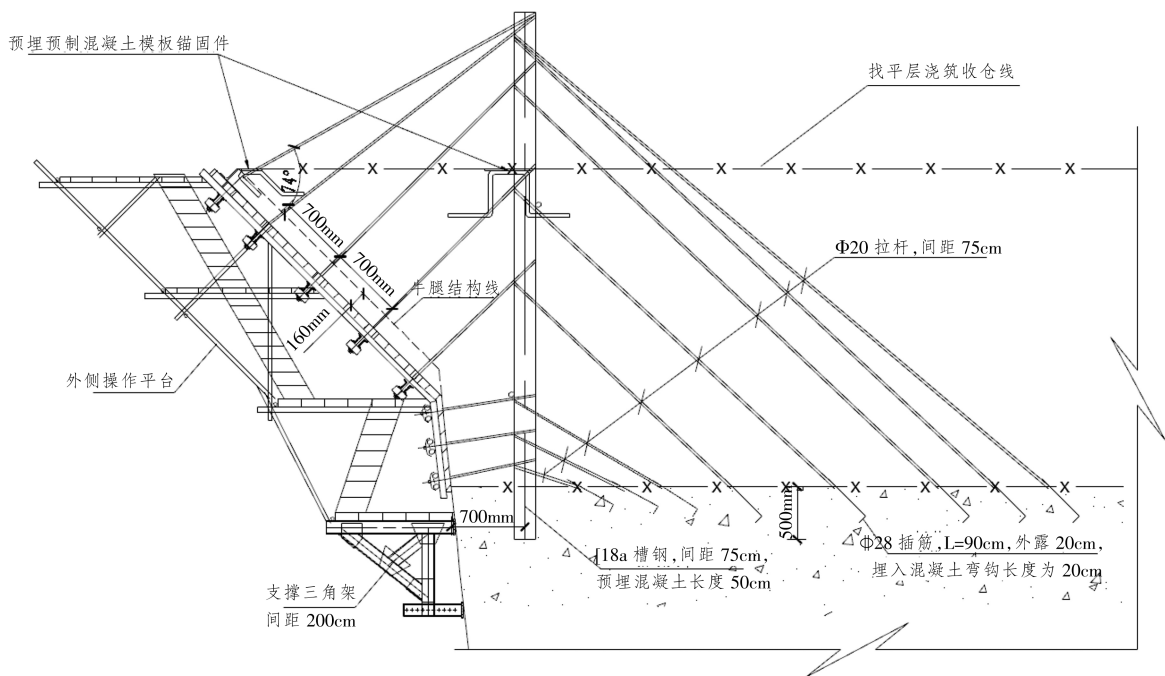


图 5 找平层牛腿部位模板及锚固布置图

平层高程、牛腿预制模板层浇筑高度以及与出口流道衬钢交接预留缝隙位置。

(2)倒角处理。水平施工缝面上、下游牛腿结构部位结构边角应采用倒角处理,且确保混凝土厚度不少于 30 cm。为改善预制模板安装后的整体外观效果,在预制面板外露面四边设计了 2 cm 倒角,使预制面板拼缝后达到横平竖直效果^[7],并在牛腿混凝土浇筑前采用砂浆勾缝以避免漏浆。

(3)模板外表面保温。牛腿倒悬结构粘贴苯板后若出现脱落将难以恢复,影响其保温效果,施工时对于无须拆除保温材料的下游坝面,可在安装前采用膨胀螺丝锚固的方式固定预制模板外侧苯板,对于上游挡水坝面可根据需要在预制模板外侧喷聚氨酯保温材料,但应做好与混凝土的色差控制。

(4)焊接。模板制作时应严格控制预制模板支撑型钢桁架焊接质量,其焊缝均应采用 CHE507 焊条,焊缝长度、宽度均不能小于设计值。

(5)验收。牛腿预制模板面板浇筑养护完成、预埋件埋设完成、支撑大梁模板支撑体系安装完成且预制混凝土模板仓内焊接安装完成后应及时组织验收,合格后挂牌投入使用。通过上述四项过程验收确保模板及支撑体系安装质量满足设计、施工要求,混凝土浇筑体型偏差满

足设计要求。

(6)操作安全。仓内吊装作业时应实时监控风速及风向,遇 6 级以上大风应停止作业。仓内安装预制混凝土模板焊缝未焊完毕且达到受力要求之前,模板应采用地锚加手动葫芦方式进行加固。在大坝中孔牛腿倒悬部位混凝土浇筑时,为保证预制模板受力稳定,在模板上配合缆机卸料人员按不超过 1 人配置,振捣作业人员按不超过 2 人配置。

5 结 语

(1)采用预制混凝土模板技术后,预制模板主体在预制场内完成,现场仅进行仓面安装和加固,悬臂预制模板安装和加固时间约 3~4 d,较传统内拉内锚施工工艺提前 8~9 d。

(2)预制混凝土模板浇筑成型后外观面无须做二次缺陷处理工作,外侧不需要搭设操作排架及支撑系统,为后续坝面缺陷处理节约工期,并减少人员悬空作业风险。

(3)预制混凝土模板安装采用机械人工配合作业,极大地提高了施工效率,对于施工过程中已完成的测量定位焊接可免于后续模板的调整。预制混凝土模板技术用于中孔牛腿倒悬部位施工,可使该部位的模板作业达到节约工期、节省材料、

(下转第 87 页)

5 结 语

杨房水电站地下厂房岩性为花岗闪长岩,岩石坚硬完整,中等地应力水平。厂址区构造作用强烈,结构面较发育,下游边墙围岩变形破坏模式划分为:应力型破坏、结构面型破坏、结构面~应力组合型破坏三种类型。主要破坏类型为结构面型破坏,其表现为近洞向陡倾角节理发育、节理密集带以及断层及影响带。下游边墙开挖过程中,针对围岩的三类不同变形破坏模式,采用了系统锚喷+系统预应力锚索+局部预应力锚杆和扶壁墙等支护措施,经支护后,监测成果显示围岩稳定性好。

参考文献:

[1] 冯科锋,杨师东,郭纹华.大型地下洞室围岩稳定性分析及实践探讨[J].科技信息(科学教研),2008,(21):450-451.
[2] 王 鹏,楚文杰,陈 磊,张嘉瑶.大型地下洞室岩梁开挖主要工程地质问题及处理措施讨论[J].岩土工程学报,2019,

41(11):2165-2172.

[3] 黄 达.大型地下洞室开挖围岩卸荷变形机理及其稳定性研究[D].成都理工大学,2007.
[4] 杨 葛,林志旺,彭 伟.大型地下洞室快速开挖施工方法探究[J].四川水力发电,2018,37(04):84-87.
[5] 苏 超,茆晓静,赵业彬,魏琳帆.复杂地质条件下大型地下洞室群围岩稳定性研究[J].水力发电,2018,44(03):19-22+28.
[6] 李 璐,陈秀铜.大型地下厂房洞室群施工开挖顺序及围岩稳定分析[J].中国安全生产科学技术,2016,12(S1):5-12.

作者简介:

闫兴田(1981-),男,山东临沂人,高级工程师,从事水利水电工程勘察工作;
段伟锋(1965-),男,湖北英山人,正高级工程师,从事水利水电工程勘察及管理工作;
杨日昌(1965-),男,福建三明人,正高级工程师,从事水利水电工程勘察及管理工作。

(责任编辑:吴永红)

(上接第 77 页)

减小安全风险、减轻劳动强度、提高工程质量的施工效果。通过现场实践,不断积累总结经验,预制混凝土模板施工技术也将进一步完善和提高,对于后续其他工程倒悬部位大体积混凝土施工具有极大的借鉴意义。

参考文献:

[1] DL/T 5110-2013,水电水利工程模板施工规范[S].北京:中国电力出版社,2013.
[2] DL/T 5144-2015,水工混凝土施工规范[S].北京:中国电力出版社,2015.
[3] GB 50661-2011,钢结构焊接规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[4] GB 50017-2017,钢结构设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
[5] JGJ 276-2012,建筑施工起重吊装工程安全技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
[6] 高俊锋.浅谈预制混凝土模板技术在白鹤滩大坝施工中的应用[J].四川水泥,2020,(03):349.
[7] 周 勇,熊淑兰.溪洛渡拱坝预制模板快速施工技术[J].广东水利水电,2013,(11):44.

作者简介:

吴政缙(1994-),男,重庆渝北人,本科,助理工程师,从事水利水电工程施工管理工作;
谢 斌(1979-),男,四川南部人,本科,高级工程师,从事水利水电工程施工管理工作。

(责任编辑:吴永红)

国内首个百万千瓦级 EPC 杨房沟水电站下闸蓄水

2020 年 12 月 30 日,由中国电建水电七局·华东院联合承建的国内首个百万千瓦级 EPC 水电工程—杨房沟水电站 1 号导流洞下闸,工程开始蓄水。2021 年 1 月 2 日,大坝泄洪中孔过流,期间大坝各项监测指标正常。

自 2016 年 1 月 1 日工程主体开工以来,杨房沟总承包部充分发挥设计施工一体化的优势,5 000 多名建设者历时 1 827 天,提前完成大坝全线到顶目标后,又顺利实现工程下闸蓄水重大的节点目标。目前该电站大坝及厂引系统后续土建及金结机电设备安装正在有序推进,确保实现 2021 年首台机组发电目标。

杨房沟水电站位于四川省凉山彝族自治州木里县境内,总装机容量 150 万千瓦,水库正常蓄水位 2 094 米,总库容 5.12 亿立方米,调节库容 0.54 亿立方米,单独运行时具有日调节能力,与两河口水库电站联合运行时具有年调节能力。

(中国水电七局·华东院杨房沟总承包项目部 供稿)