

大古水电站厂引坝段牛腿施工技术

熊涛 罗朝贵 李佳宾

(中国水利水电第九工程局有限公司, 贵州 贵阳 550081)

【摘要】 牛腿结构浇筑一直是水电站施工中的重难点,为保证大古水电站厂引坝段牛腿结构浇筑质量,在牛腿施工时采用在仓面内预埋工字钢、地锚,并通过拉筋将模板、工字钢、地锚连接为一个整体的方法,保证了牛腿施工质量;通过验证工字钢和拉筋的稳定性,证明该方案是可行性的,可供类似工程借鉴。

【关键词】 大古水电站;牛腿施工;稳定性;施工质量

中图分类号: TV52

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2023)03-074-06

Corbel construction technology of dam head section of Dagu hydropower station

XIONG Tao, LUO Chaogui, LI Jiabin

(Sinohydro Bureau 9 Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

Abstract: The casting of corbel structure is always the important and difficult point in the construction of hydropower station. In order to ensure the casting quality of corbel structure in the dam head section of Dagu hydropower station, the method of embedding I-beam steel and ground anchor in the warehouse surface and connecting the formwork, I-beam steel and ground anchor as a whole through tensile reinforcement is adopted in the corbel construction. By verifying the stability of I-beam steel and tensile reinforcement, the scheme is proved to be feasible and can be used as reference for similar projects.

Keywords: Dagu hydropower station; corbel construction; stability; construction quality

1 工程概述

大古水电站为Ⅱ等大(2)型工程,开发任务以发电为主,水库总库容为0.5789亿 m^3 ,水库正常蓄水位3447.00m,相应库容为0.5528亿 m^3 ,调节库容为0.1048亿 m^3 ,为日调节水库。电站装机容量为660MW,多年平均发电量为32.05亿 $kW \cdot h$,保证出力

($P=95%$)177.03MW。根据功能区将大坝分为左岸挡水坝段、溢流坝段、冲沙底孔坝段、厂引坝段以及右岸挡水坝段。

厂引坝段牛腿位于坝上0+009.00~坝轴线0+000.00、坝左(右)0+000.00~坝右0+100.70桩号,高程3387.50~3404.00m。其中高程3389.272~3395.636m(含)段为圆弧段,高程3395.636~

收稿日期: 2022-05-27

基金项目: 中国电力建设股份有限公司科技项目经费资助;西藏高海拔复杂气候条件下碾压混凝土筑坝技术研究(DJ-ZDXM-2019-16)

作者简介: 熊涛(1996—),男,本科,主要从事水利水电工程施工管理工作。

3402.00m 段为斜面,坡度 1:1,大坝上游面牛腿最大悬挑长度 9m,见图 1。牛腿具有挑距长、浇筑荷载大、距建基面高、模板与牛腿结构难相匹配等特点,由于地处西藏高原,昼夜温差大、环境干燥多风,额外增加了施工难度。

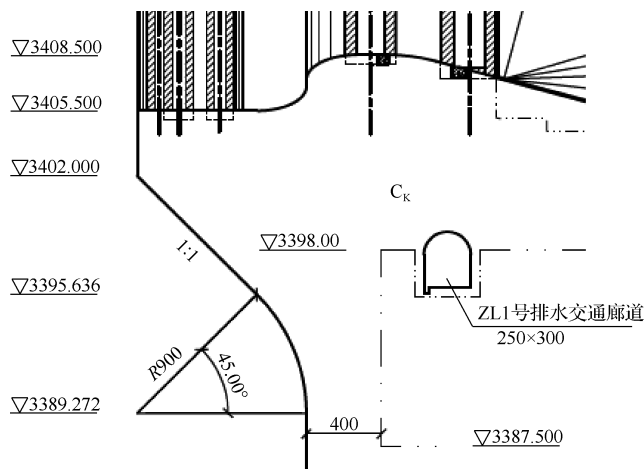


图 1 牛腿结构形式图(尺寸单位:cm)

2 工艺对比分析

2.1 斜支撑体系

斜支撑体系在施工时需要人员与机械设备密切配合,耗费大量钢材,搭设时间长、难度大,作业过程中存在的安全隐患较多,且拆卸也较烦琐,此施工方式并不经济,故在实际中采用较少。

2.2 预埋蛇形柱

牛腿模板支撑目前采用最为广泛的是在仓面内预埋蛇形柱的悬臂吊拉的施工方法,在浇筑牛腿混凝土前将蛇形柱预先埋入混凝土,通过拉筋将蛇形柱、模板、插筋之间进行连接,简化施工程序,加快施工进度,但在牛腿浇筑前需提前制作蛇形柱,在仓面内进行预埋时与牛腿部位结构钢筋间的干扰较大。

2.3 预埋工字钢

在大古水电站厂引坝段牛腿施工时对预埋工字钢工艺进行优化,在预埋的 I18 工字钢背部反向布置地锚,使用 $\phi 14$ 钢筋将牛腿模板、I18 工字钢与地锚进行连接,并在距离牛腿起始高程以下 1.0m 处搭设施工作业平台,用作辅助模板安装的外架,在浇筑混凝土前通

过施工作业平台检查模板间存在的缝隙是否使用原子灰进行填充,在浇筑混凝土时随时监测模板的变形情况,同时利于后期模板拆除。

3 牛腿浇筑施工措施

厂引坝段牛腿起始高程 3387.50m,距离建基面(高程 3334.00m)53.5m,属于特级高处作业。牛腿挑出长度为 9m,施工难度大,安全隐患多,为保证施工的便捷性和作业人员安全,当碾压混凝土浇筑至高程 3390.50m 时开始埋设 I16 工字钢形成施工作业平台,工字钢埋入混凝土深度 1.00m,外露 3.50m,间距 1.50m,为保证作业平台平整,所有预埋工字钢埋设高程必须一致,然后在悬挑的工字钢上搭设脚手架、脚手板、密目网,脚手架搭设参数为 1.5m \times 1.5m \times 1.8m。

由于牛腿为倒悬结构,悬臂翻升钢模板自重大,若采用大模板安装施工,受牛腿下部倒悬结构影响,后期拆模时安全隐患突出,故牛腿倒悬结构模板采用牛腿底部脚手架支撑+标准钢模板的方式搭设,并在牛腿起始高程以下 1m 采取预埋 I16 工字钢悬挑 3.5m 搭设操作平台,仓面内预埋 I18 工字钢立柱,用 $\phi 14$ 拉筋反拉模板,考虑到牛腿悬挑长度过大,为减小施工过程中新浇混凝土作用在模板上的侧压力,将牛腿采用 3m 分层浇筑的方式进行施工,保证牛腿结构部位的安全稳定性。

3.1 仓面内预埋件施工

3.1.1 工字钢、地锚埋设

当碾压混凝土浇筑至高程 3390.50m 时开始预埋 I18 工字钢,埋设深度 0.5m,外露 4.0m,相邻工字钢的间距为 1.5m,预埋工字钢顶部和底部上下游面采用 $\phi 14$ 钢筋进行加固,工字钢背后设置 C25 地锚($L = 110.00$ cm,弯钩外露 10.00cm)用于二次加固工字钢,工字钢、模板、地锚间用通过 $\phi 14$ 拉筋连接,避免在施工过程中出现跑模、漏模等问题。

3.1.2 冷却水管铺设

冷却水管通往布置在坝体下游侧的分控站,如果将碾压仓表面作为施工通道,布置在表面的冷却水管容易

被破坏,故在施工过程中,在碾压仓最后一层冷却水管铺设过程中进行牛腿部位冷却水管的预埋,牛腿部位仓面冷却水管铺设完成后直接与预埋 PPR 管相接。

3.2 模板选择与安装

牛腿下部倒悬结构采用标准钢模板 (P3015、P1015) 施工,其余部位采用 3m×3m 大模板施工。

3.2.1 模板安装

模板采用 3m×3m 大模板,每层钢模板共三排拉筋,在底部设置插筋与拉筋内拉。

模板采用汽车吊进行吊装,安装时先将下层模板的各紧固件卸下,用 16t 汽车吊吊至上层模板上,基本就位后将连杆连接上,通过连杆进行内外向倾角微调,最后将相邻模板面板用 U 形卡固定好^[1]。每两块钢模板之间接缝采用原子灰进行填充,以保证模板接缝严密,不漏水泥浆;浇筑混凝土前仔细检查模板的牢固性,防止有拉筋漏焊、焊接不牢固的情况;浇筑混凝土

时,派专人看护模板,随时调正模板位置,以确保模板质量,严防跑模、胀模;混凝土浇筑完成后,将锚筋预埋在混凝土表面上,为下一层的模板做准备。

3.2.2 牛腿倒悬部位模板

模板采用 P3015、P1015 标准钢模板进行安装,在底层模板安装完成后进行面层 2cm 厚胶合板安装。钢模板安装时逐块拼装,从一侧向另一侧逐层施工,在拼装过程中要检查面板的平整度,使其不超过允许偏差。模板铺设完毕后,用靠尺、塞尺和水平仪检查平整度,并进行校正。

4 牛腿整体受力分析

按照厂引坝段牛腿 3m 高、坡度为 1:1 的倒悬结构进行计算,采取一次浇筑成型的方式。牛腿部位采用小钢模 (P1015、P3015) 进行拼装,模板重量为 38.2kg/m²,牛腿内部预埋 I 18 工字钢立柱,用 $\phi 14$ 钢筋内拉模板,并反向设置 $\phi 14$ 拉筋加固牛腿,见图 2。

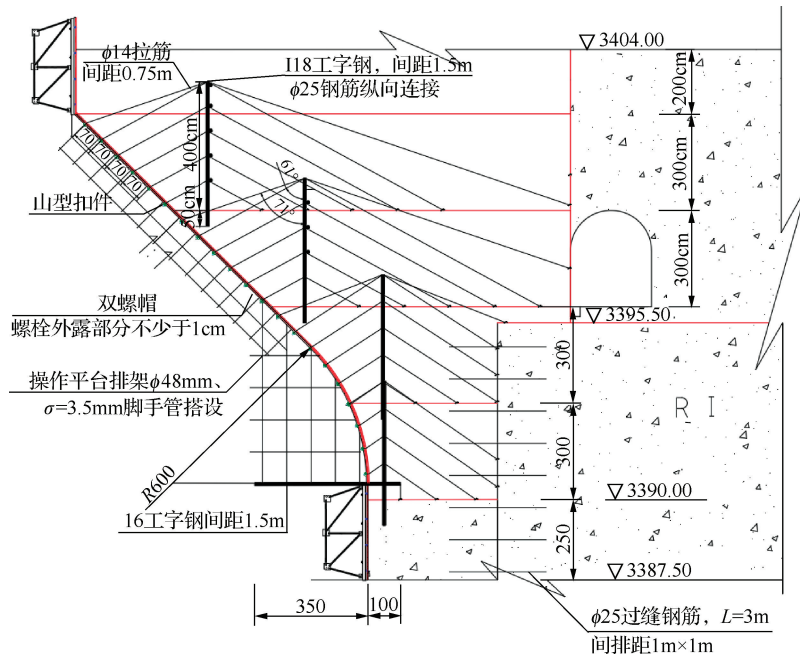


图 2 牛腿模板加固示意图

4.1 牛腿内拉拉筋计算

牛腿倒悬部位坡度为 1:1,按照最大浇筑高度 3m 进行计算,混凝土重度取 25kN/m³,水平方向 1.5m 长模板上浇筑的混凝土重力为 1.5×3×0.5×25=56.25kN,考虑到新浇筑常态混凝土的流动性,计算时

考虑 1.1 的富余系数计算,即

新浇筑混凝土每米荷载 $G_1 = 1.1 \times 56.25 / 1.5 = 41.25\text{N/m}$;

施工人员及机械设备 $G_2 = 2.5\text{kN/m}$;

混凝土倾倒冲击荷载 $G_3 = 2.5\text{kN/m}$;

混凝土振捣荷载 $G_4 = 2\text{kN/m}$;

模板自重 $G_5 = 38.2 \times 3 / \sin 45^\circ \times 10 / 1000 = 1.62\text{kN/m}$ 。

静荷载系数取 1.2, 动荷载系数取 1.4, 故作用在模板上的垂直压力 $F_N = (1.2G_1 + 1.4G_2 + 1.4G_3 + 1.4G_4 + 1.2G_5) \times \sin 45^\circ = 43.31\text{kN/m}$;

拉筋的抗拉承载力 $f = 215\text{N/mm}^2$;

$$A = \frac{N}{f} = \frac{1.5 \times 43.31 \times 10^3}{215} = 302.16\text{mm}^2$$

1.5m(宽)×3m(高)浇筑范围 $\phi 14$ 拉筋共配置 18 根(6 行 3 列), $A_s = 2770.88\text{mm}^2 > 344.44\text{mm}^2$ 。

安全系数为 $2770.88 / 344.44 = 9.17 > 2$, 满足《水电水利工程模板施工规范》(DL/T 5110—2013) 表 4.0.11 中模板附件安全系数不小于 2 的要求。

4.2 牛腿反拉拉筋地锚计算

地锚锚固段长度计算公式为

$$L_a = KN_f / (\pi D q_t)$$

式中: K 为安全系数, 取 1.8; N_f 为锚杆轴向力设计值, 取拉筋对锚杆产生的作用力为锚杆轴向力设计值, $N_f = 41.25 \times 1.5 = 61.88\text{kN}$; D 为地锚直径, 取 $D = 25\text{mm}$; q_t 为地锚与混凝土黏结强度设计值, 取 0.8 倍标准值, $q_t = 0.8 \times 1.0 = 0.8\text{MPa} = 800\text{kN/m}^2$; 故

$$L_a = \frac{1.8 \times 61.88}{3.14 \times 0.025 \times 800} = 1.77\text{m}$$

即所需锚杆锚固长度为 1.77m, 施工时在预埋工字钢背部对应位置预埋 6 根地锚, 单根地锚长度为 $1.77 / 6 = 0.3\text{m}$ 。取单根地锚长度 $L = 1.1\text{m}$, 外露弯钩长 0.1m, 单根锚固段长度为 $1.0\text{m} > 0.3\text{m}$, 满足要求。

4.3 立柱强度验算

牛腿倒悬部位采用预埋 I 18 工字钢立柱, 间距 1.5m, 立柱背部反向设置 $\phi 14$ 拉筋加固牛腿。牛腿工字钢埋深 0.5m, 外露 4m, 预埋工字钢受力按照固定端支座分析, 计算时假设每根拉筋受力均匀分布, 沿模板宽度方向单位长度 1m 总荷载为 41.25kN, 沿模板宽度方向长度 1.5m 总荷载为 $41.25 \times 1.5 = 64.97\text{kN}$, 1.5m(宽)×3m(高)范围布置 12 孔拉筋孔, 平均每孔部位荷载为 $64.97\text{kN} / 12 = 5.41\text{kN}$ 。

考虑反拉钢筋受力 85% 时的工字钢受力见表 1。

表 1 反拉钢筋受力 85% 时的工字钢受力

分力	垂直于工字钢/kN	倾斜于工字钢/kN(两侧)	合计/kN
f_1	0.71	0.65	1.36
f_2	0.71	0.68	1.39
f_3	0.71	0.69	1.4
f_4	0.71	0.69	1.4
f_5	1.48	1.46	2.94

立柱弯矩剪力见图 3。

4.3.1 抗弯计算

考虑反拉钢筋受力 85% 时, 工字钢立柱截面底部最大弯矩 $M_{\max} = 22.45\text{kN} \cdot \text{m}$, 工字钢 I18 截面模量 $W_x = 185\text{cm}^3$, 取折减系数 $f = 1.05$, 根据公式 $\delta = M_{\max} / fW_x$, 查询《钢结构设计规范》(GB 50017—2017), 工字钢(Q345 钢)容许应力 $[\delta] = 310\text{MPa}$, 带入公式, 计算结果如下:

$$\delta = \frac{22.45 \times 10^3}{1.05 \times 185} = 115.57\text{MPa} < [\delta] = 310\text{MPa}$$

强度满足要求。

4.3.2 抗剪计算

工字钢立柱截面底部最大剪力 $Q_{\max} = 13.92\text{kN}$ 。

$$\tau_{\max} = Q_{\max} [b h_0^2 - (b - t)h^2] / (8I_x t)$$

式中: I_x 为截面惯性矩, 取 $I_x = 1660\text{cm}^4$; t 为腹板厚度, 取 $t = 10.7\text{mm}$; b 为宽度, 取 $b = 94\text{mm}$; h_0 为高度, 取 $h_0 = 180\text{mm}$; h 为净高度, 取 $h = 250 - 8 \times 10.7 = 164.40\text{mm}$ 。

查询《钢结构设计规范》(GB 50017—2017), 工字钢(Q345 钢)容许应力 $[\tau] = 180\text{N/mm}^2$ 。

$$\tau_{\max} = \frac{13.92 \times 1000 \times [94 \times 180^2 - (94 - 10.7) \times 164.4^2]}{8 \times 16600000 \times 10.7}$$

$= 9.44\text{N/mm}^2 < [\tau] = 180\text{N/mm}^2$, 满足要求。

4.3.3 扰度计算

扰度计算公式为

$$W_b = \frac{Fa^3}{3EI}$$

式中: a 为拉筋作用点距工字钢立柱底部距离; F 为工字钢立柱上的作用力, 即模板面拉筋与工字钢立柱背部拉筋抵消后的合力, 按背部拉筋承担 85% 拉力计算; E 为弹性模量, 取 $E = 206000\text{N/mm}^2$; I_x 为截面惯性矩, 取 $I_x = 1660\text{cm}^4$ 。

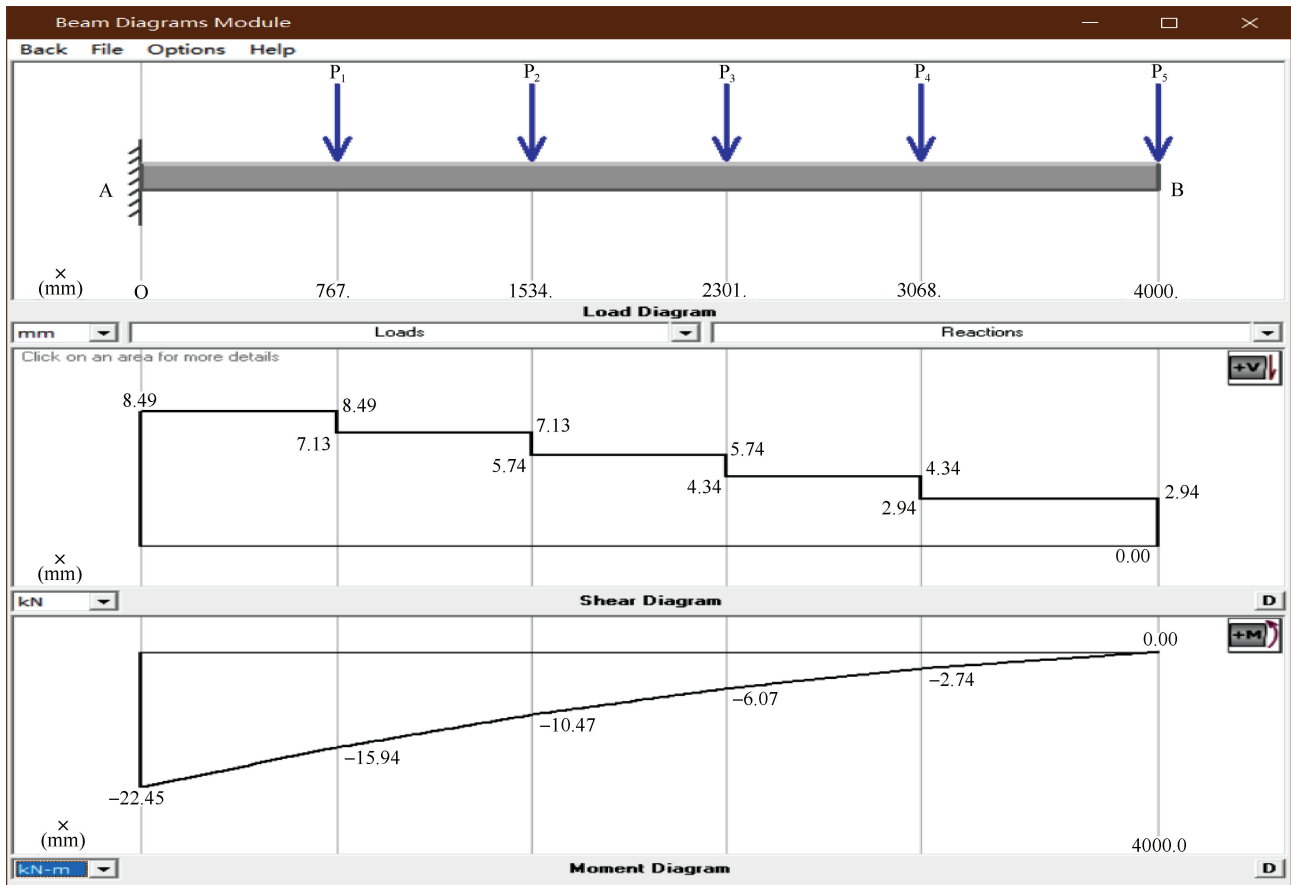


图3 考虑反拉钢筋受力85%时的工字钢受力图

由叠加法进行扰度计算,计算统计见表2。

$$W_{b1} = \frac{1360 \times 767^3}{3 \times 206000 \times 16600000} = 0.06 \text{ mm}$$

$$W_{b2} = \frac{1390 \times 1534^3}{3 \times 206000 \times 16600000} = 0.489 \text{ mm}$$

$$W_{b3} = \frac{1400 \times 2301^3}{3 \times 206000 \times 16600000} = 1.663 \text{ mm}$$

$$W_{b4} = \frac{1400 \times 3068^3}{3 \times 206000 \times 16600000} = 3.941 \text{ mm}$$

$$W_{b5} = \frac{2940 \times 4000^3}{3 \times 206000 \times 16600000} = 18.341 \text{ mm}$$

表2 挠度计算统计

挠度	距离端点距离 b/m	挠度/mm	对顶部影响挠度/mm
W_{b1}	0.767	0.06	0.313
W_{b2}	1.534	0.489	1.275
W_{b3}	2.301	1.663	2.891
W_{b4}	3.068	3.941	5.138
W_{b5}	4.000	18.341	18.341
累计扰度 $\sum W_B/\text{mm}$			27.958

$$\sum W_b = 27.958 \text{ mm} < [\nu] = 2 \times L / 250 = \frac{2 \times 4000}{250} =$$

32mm, 扰度满足要求。

4.4 立柱稳定验算

$$\sigma_{\max} = M_{\max} / (\gamma W_x) + N/A$$

式中: M_{\max} 为考虑反拉钢筋受力85%时的最大弯矩,取22.45kN·m; γ 为截面塑性发展系数,对于工字钢,取1.05; N 为工字钢立柱轴力,取合计作用在模板上的压力竖向值; $N = (1.2G_1 + 1.4G_2 + 1.4G_3 + 1.4G_4 + 1.2G_5) \sin 45^\circ \cos 61^\circ = 21\text{N}$; A 为工字钢截面面积,取30.76cm²; W_x 为截面模量, $W_x = 185\text{cm}^3$ 。

$$\sigma_{\max} = \frac{22.45 \times 1.5 \times 10^6}{1.05 \times 185 \times 10^3} + \frac{21 \times 10^3}{3076} = 180.19 \text{ N/mm} < [f]$$

= 310N/mm, 满足要求。

由上述计算可知,单根工字钢立柱焊接牛腿拉筋6根,1.5m模板水平方向共设置3列共18根拉筋,故1.5m模板(型号为P1015、P3015)水平方向设置1根

工字钢立柱,工字钢埋深 0.5m。实际施工过程中采用 C25 钢筋每隔 1m 将预埋的反拉工字钢纵向连接形成整体^[2]。

5 牛腿混凝土浇筑

牛腿部位混凝土浇筑过程中重点控制浇筑速度以及下料部位距离模板板面的距离。在浇筑过程中安排专人对模板、拉筋进行检查,混凝土下料部位距离模板满足最少 1m 的间距要求,在进行混凝土振捣时保证振捣棒距离模板拉筋至少 50cm^[3]。

5.1 混凝土铺料方法

混凝土浇筑设计主要采用平铺法浇筑,在倾斜面上浇筑混凝土时,从低处开始浇筑,浇筑面应保持水平。混凝土坯层厚度依来料强度、仓面大小、气温及振捣器具的性能,一般情况下按不超过 50cm 控制。在浇筑第一铺层混凝土前,铺设同等级砂浆,厚度 2~3cm,铺设施工工艺应保证新老混凝土结合良好^[4]。

5.2 混凝土浇筑

混凝土入仓后,人工进行平仓。混凝土平仓后及时用振捣棒振捣密实,严禁以振捣代替平仓,避免欠振和过振;对模板周边采用手持式直径 70mm 振捣棒振捣。混凝土振捣时振捣器应尽量保持铅直,在上层混凝土尚未振捣密实之前,不得铺筑下层混凝土。振捣棒离模板的距离不小于 0.5 倍有效半径,两振捣点的距离不应大于振捣器有效半径的 1.5 倍;下料点接茬处适当延长振捣时间加强振捣,以保证此处混凝土振捣密实,结合良好。浇入仓内的混凝土应随卸料随平仓随振捣,不得堆积,仓内若有粗骨料堆积时,应将堆积的骨料均匀散铺至富浆处,但不得用水泥砂浆覆盖,以免造成内部蜂窝^[5-7]。

5.3 拆模养护

模板的拆除与安装采用 16t 汽车吊进行,根据温控技术要求,大体积混凝土在混凝土浇筑开始后通水,

通水时间由计算确定,一般为 15~25d。常态混凝土温度与水温之差不超过 25℃,通水流量按 1~1.5m³/h 控制,且每 24h 改变一次水流方向,通水冷却时常态混凝土日降温幅度不应超过 1℃^[8]。

6 结 语

通过对牛腿施工工艺进行研究,提前对牛腿施工措施稳定性进行验算,保证了牛腿施工的安全性、稳定性,相较于传统施工工艺,在准备、施工、养护阶段均有利于牛腿施工,保障了牛腿工期及施工质量,对于类似工程有借鉴指导意义。◇

参考文献

- [1] 沈佐山. 水利工程中爬升模板设计与施工技术[J]. 黑龙江水利科技, 2010, 38(4): 24-25.
- [2] 李浩瑾, 刘春冬, 王永生, 等. 大兴水利枢纽消力池底板抗浮稳定性计算[J]. 价值工程, 2015, 34(30): 144-147.
- [3] 邢海燕, 王勇, 李远强. 乌东德水电站左岸出线竖井滑模质量控制分析[J]. 人民长江, 2019, 50(S1): 263-266.
- [4] 席浩, 牛宏力. 水利水电工程施工技术全书: 第 3 卷 混凝土工程: 第 7 册 混凝土施工[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [5] 国务院南水北调工程建设委员会办公室建设管理司. 南水北调工程建设专用技术标准汇编: 上册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [6] 龙滩水电开发有限公司. 龙滩水电工程建设文集 3[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [7] 马海峰, 李富英, 马伟. 小湾水电站右岸大坝标段工程施工综述[J]. 混凝土世界, 2012(6): 62-66.
- [8] 李琦, 李绍辉, 郑昌莹, 等. 丰满水电站重建工程碾压混凝土重力坝施工温度控制[J]. 水利水电技术, 2016, 47(6): 33-36.
- [9] 万均. 水利施工中混凝土的浇筑及后期养护措施探析[J]. 民营科技, 2017(7): 155.
- [10] 马建荣, 郝曼. 东江水电站厂房基础砼温度裂缝计算分析[J]. 江西水利科技, 2007(3): 148-150.