

# 老挝南立1水电站溢流闸墩预应力锚块支撑体系施工

刘汉斌, 黄兴, 魏兴存

(中国水利水电第十工程局有限公司 老挝公司, 四川 成都 610072)

**摘要:**老挝南立1水电站溢流坝闸墩结构施工采用翻升大模板。鉴于闸墩预应力顶部锚块距离基础面垂直高度达到21 m,不宜直接搭设承重脚手架,经研究后决定充分利用现场已有的翻升大模板背架作为受力支撑点直接搭设脚手架支撑体系,其经受力验算满足规范要求。该支撑体系简便快速,可在类似工程中推广应用。介绍了其应用过程。

**关键词:**溢流坝;预应力锚块;悬挑结构;支撑体系;南立1水电站

**中图分类号:**TV7;TV52;TV51

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2019)增1-0099-05

## 1 工程概述

南立1水电站位于老挝万象省北部 Phon-Hong 区的 Nam Lik 河上,电站距离上游南立1—2水电站直线距离约33 km,距离万象市中心约92 km,距离万象省 PhonHong 县城约16 km,为河床式电站。枢纽建筑物从左岸到右岸依次为:门库坝段、4孔溢流坝、发电厂房和室外开关站。设计正常蓄水位高程195 m,水库最低运行水位高程191.5 m。电站总装机容量为64.72 MW(2×32.36 MW),最大坝高47.67 m。

溢流坝位于门库坝段右侧,闸顶高程197.8 m,堰顶高程177.5 m,孔口尺寸为13 m×17.5 m(W×H)。溢流坝弧形闸门闸墩及锚块采用预应力混凝土结构,工作闸门为弧形闸门,闸门净宽13 m,闸墩分2个边墩、3个中墩,中墩和右边墩厚3 m,左边墩为悬臂式挡墙,顶宽1.5 m,预应力混凝土标号为C35。

## 2 锚块模板支撑体系的设计

### 2.1 设计方案比选

溢流坝闸墩下游预应力锚块为悬挑结构,闸墩下游预应力锚块均为向外悬挑2.5 m(不考虑二期混凝土),中墩下游桩号从DD0+32.256至墩尾DD0+34.377为直径2.25 m的圆弧,左右边墩至墩尾DD0+34.377均为直边。

鉴于闸墩预应力锚块距离基础面垂直高度达21 m。结合现场施工条件和以往施工经验,采用直接搭设承重脚手架费时费力且需占用大量脚手架等周转性材料,而充分利用现场已有的翻升大

模板背架作为受力支撑点直接搭设脚手架支撑体系并利用浇筑混凝土的拉模筋作为拉结筋对脚手架进行加固具有极大的优越性。

### 2.2 翻升大模板背架模板支撑体系的设计

悬挑结构支撑体系设计均采用立杆横距75 cm、纵距75 cm、步距1 m,具体的支撑体系设计情况如下:

(1)边墩设计方案:锚块总体向闸墩两侧悬挑2.5 m,首次浇筑厚度不大于2 m,直接在悬臂翻升模板外架上搭设脚手架,模板外架宽度为1.1 m,不足部分搭设斜支撑架,上部用拉模筋进行加固。锚块正下方预留3块悬臂翻身模板不拆除作为上部承重架的支撑,模板外侧采用 $\phi 16$ 拉模筋与翻身模板中最上面一排螺栓焊接用于加固支撑架(图1)。

(2)中墩设计方案:中墩下游为直径2.25 m的圆弧墩尾,该部位的模板采用定型钢模板,模板外无背架。最终考虑在高程183 m处预埋一根36#工字钢作为圆弧墩尾处悬挑架的支撑,上游悬挑支撑的施工方法同左右边墩(图2)。

## 3 锚块模板支撑体系受力验算

### 3.1 脚手架设计的受力验算

脚手架立杆纵横间距均为75 cm、步距1 m,选取单位面积受力最大的部位进行受力验算。综合分析各部位的分仓高度,混凝土最厚处考虑2 m,验算脚手架是否满足2 m厚混凝土浇筑要求。

#### 3.1.1 荷载计算

荷载组合(计算每单元的荷载以及最不利荷载的计算):

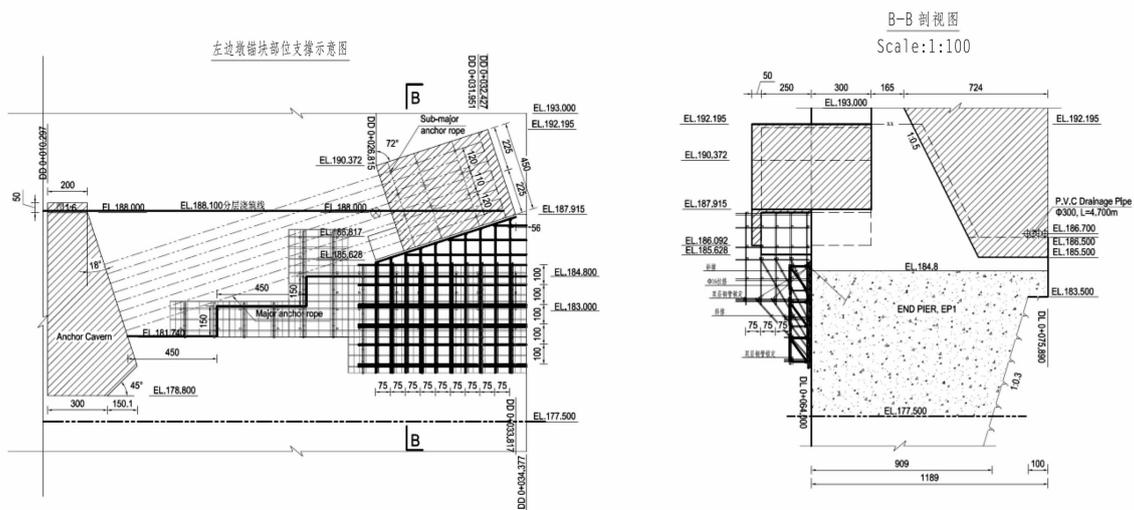


图1 溢流坝边墩锚块支撑示意图

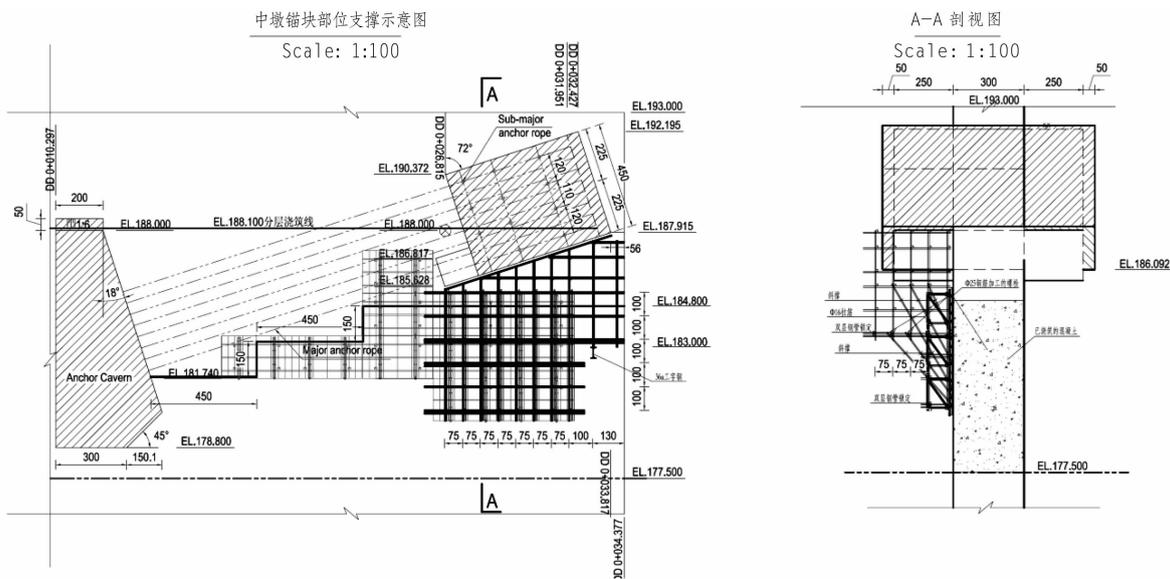


图2 溢流坝中墩锚块支撑示意图

预应力锚块钢筋、混凝土自重:

$$0.75 \times 0.75 \times 2 \times (24 + 1.5) = 28.69 \text{ (kN)}$$

模板、构件自重:

$$0.75 \times 0.75 \times 0.35 = 0.2 \text{ (kN)}$$

恒荷载总和: 28.89 (kN)

活荷载取值:

施工荷载  $1 \text{ kN/m}^2$ , 振捣荷载  $2 \text{ kN/m}^2$

$$\text{施工荷载: } 1 \times 0.75 \times 0.75 = 0.56 \text{ (kN)}$$

$$\text{振动荷载: } 2 \times 0.75 \times 0.75 = 1.13 \text{ (kN)}$$

活荷载总和: 1.69 kN

根据以上荷载取值,其荷载组合为:

$$N = 28.89 \times 1.2 + 1.69 \times 1.4 = 37.03 \text{ (kN)}$$

### 3.1.2 脚手架立杆受力验算

每根立杆承担的轴力  $N = 37.03 \text{ kN}$

不考虑风荷载时,立杆的稳定性计算公式为:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} \leq [f]$$

计算立杆的截面回转半径  $i$ :  $i = 1.58 \text{ cm}$

根据《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》,模板支撑排架立杆计算长度  $l_0$ :

$$\begin{aligned} l_0 &= k\mu_1(h + 2a) \\ &= 1.155 \times 1.422 \times (1 + 2 \times 0.05) \\ &= 1.81 \text{ (m)} \end{aligned}$$

式中  $k$  为计算长度附加系数,取值为 1.155;  $h$

为步距, 1 m;  $a$  为模板支架立杆伸出顶层横向水平杆中心线至模板支撑点的长度;  $\mu_1$  为考虑脚手架整体稳定因素的单杆计算长度系数, 查附表可得  $\mu = 1.422$ 。

则长细比  $\lambda = l_0 / i = 184 / 1.58 = 114.6$

轴心受压立杆的稳定系数  $\varphi$  由长细比的计算结果查规范附表 A.0.6 得到:  $\varphi = 0.483$

根据公式  $\frac{N}{\varphi A} \leq f$ :  $f = 37.03 \times 103 \div (0.483 \times 4.89 \times 102) = 156.78 (\text{MPa}) < f = 205 (\text{MPa})$

故脚手架立杆顶杆受力满足要求。

因此, 当预应力锚块混凝土浇筑厚度  $\leq 2$  m 时, 脚手架受力能满足要求。

### 3.2 悬臂翻升模板受力验算

脚手架搭设在悬臂翻升模板上, 模板预留 3 层暂不拆除, 每块模板设 4 根拉模筋, 共计 12 根拉模筋, 拉模筋采用 8.8 级 M24 高强螺栓。混凝土浇筑厚度按 2 m、悬挑长度按 2.5 m 计算, 总体受力为抗剪。由于悬臂翻升模板长度为 3 m, 故按 3 m 单元进行计算。

混凝土荷载  $G_1$ :

$$G_1 = 2.5 \times 2 \times 3 \times 24 = 360 (\text{kN})$$

模板、脚手架荷载: 模板及施工平台计算面积取  $3 \times 3 = 9 (\text{m}^2)$ , 取  $0.3 \text{ kN/m}^2$ , 共计  $0.3 \times 9 = 2.7 (\text{kN})$ 。脚手架钢管在计算面积内的总长约为 370 m, 加上扣件及拉模筋重量, 取 1.2 的系数, 共计  $370 \times 1.2 \times 3.85 \times 10 \div 1000 = 17.09 (\text{kN})$ 。

模板及支撑脚手架荷载  $G_2$ :

$$G_2 = 2.7 + 17.09 = 19.79 (\text{kN})$$

因此, 翻升模板承受的总荷载为:

$$360 + 19.79 = 379.79 (\text{kN})$$

根据《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ 82-2011) 计算, 每个 8.8 级 M24 螺栓的抗剪力设计值为:

$$N_v^b = k_1 \times k_2 \times n_f \times \mu \times P \\ = 0.9 \times 1.0 \times 1 \times 0.3 \times 175 = 47.25 (\text{kN})$$

式中  $k_1$  为系数, 对冷弯薄壁型钢结构 (板厚  $t \leq 6 \text{ mm}$ ) 取 0.8; 其他情况取 0.9, 本工程取 0.9;  $k_2$  为孔型系数, 标准孔取 1; 大圆孔取 0.85; 荷载与槽孔长方向垂直时取 0.7; 荷载与槽孔长方向平行时取 0.6。本工程为标准螺帽, 取值为 1;  $n_f$  为传力摩擦面数目;  $\mu$  为摩擦面的抗滑移系数, 按规范

表 3.2.4-1 和 3.2.4-2 选取, 查取值为 0.3;  $P$  为每个高强度螺栓的预拉力 (kN), 按规范表 3.2.5 采用, 查取值为 175 kN;  $N_v^b$  为单个高强度螺栓的受剪承载力设计值 (kN)。

因此, 单根拉模筋可以承受的抗剪力为 47.25 kN, 3 层模板共计 12 根拉模筋, 其总的抗剪力为  $47.25 \times 12 = 567 \text{ kN} > 379.79 \text{ kN}$ , 满足受力需要。

### 3.3 背架与模板连接螺栓应力验算

悬臂翻升模板背架与面板连接螺栓为 8.8 级 M16 螺栓, 每块模板共计 16 颗, 抗剪力计算如下, 每个 8.8 级 M16 螺栓的抗剪力设计值为:

$$N_v^b = k_1 \times k_2 \times n_f \times \mu \times P \\ = 0.8 \times 1 \times 1 \times 0.3 \times 80 = 19.2 (\text{kN})$$

式中  $k_1$  为系数, 对冷弯薄壁型钢结构 (板厚  $t \leq 6 \text{ mm}$ ) 取 0.8; 其他情况取 0.9, 本部位取 0.8;  $k_2$  为孔型系数, 标准孔取 1; 大圆孔取 0.85; 荷载与槽孔长方向垂直时取 0.7; 荷载与槽孔长方向平行时取 0.6, 本工程为标准螺帽, 取值为 1;  $n_f$  为传力摩擦面数目;  $\mu$  为摩擦面的抗滑移系数, 按规范表 3.2.4-1 和 3.2.4-2 选取, 查取值为 0.3;  $P$  为每个高强度螺栓的预拉力 (kN), 按规范表 3.2.5 采用, 查取值为 80 kN;  $N_v^b$  为单个高强度螺栓受剪承载力设计值 (kN)。

因此, 单颗 8.8 级 M16 螺栓可以承受 19.2 kN 的抗剪力, 三层模板共计 48 颗螺栓, 总抗剪力为  $19.2 \times 48 = 921.6 \text{ kN} > 316.8 \text{ kN}$ , 满足受力需要。

### 3.4 中墩墩预埋工字钢验算

在中墩 DD0+33.077, 高程 183 m 处预埋了一根悬挑长度为 3.5 m 的 36a 工字钢悬臂梁作为上部承重脚手架的支撑。立杆站立在工字钢上, 共立 2 根立杆, 在综合分析各部位的分仓高度后, 当考虑混凝土最厚为 2 m 时, 工字钢上部的浇筑厚度为 45 cm, 验算工字钢是否满足作为支撑的要求。

(1) 荷载计算。

荷载组合 (计算每单元的荷载以及最不利荷载计算)。

预应力锚块钢筋、混凝土自重:

$$0.75 \times 0.75 \times 0.45 \times (24 + 1.5) = 6.45 (\text{kN})$$

模板、构件自重:

$$0.75 \times 0.75 \times 0.35 = 0.2 (\text{kN})$$

恒荷载总和: 6.65 kN

活荷载取值: 施工荷载 1 kN/m<sup>2</sup>, 振捣荷载 2 kN/m<sup>2</sup>

施工荷载: 1 × 0.75 × 0.75 = 0.56 (kN)

振动荷载: 2 × 0.75 × 0.75 = 1.13 (kN)

活荷载总和: 1.69 kN

根据以上荷载取值, 荷载组合为:

$6.45 \times 1.2 + 1.69 \times 1.4 = 10.11$  (kN)

则每根立杆所受轴向力为 10.11 kN。

悬臂梁所承受的五个集中荷载的作用情况见图 3。

### 3.4.1 挠度验算

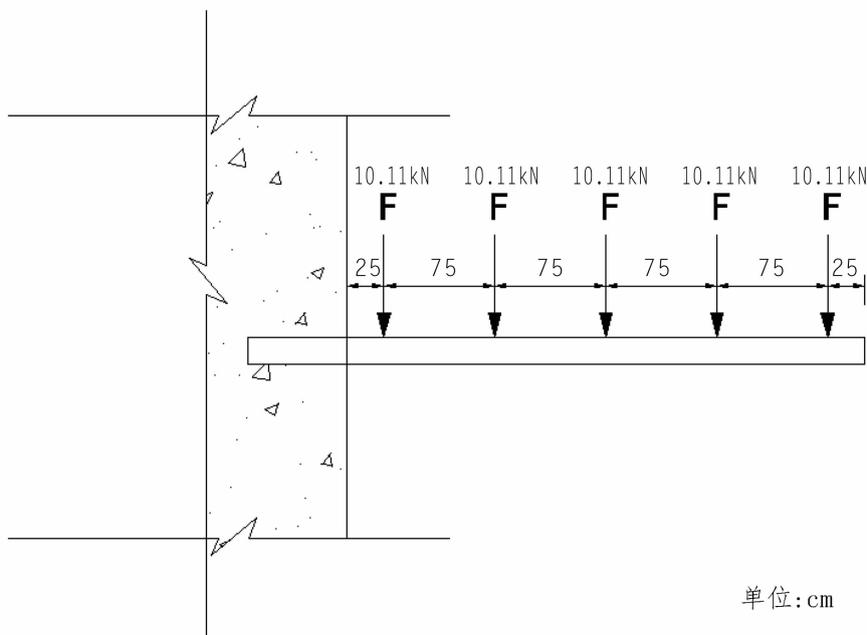


图3 工字钢悬臂梁计算简图

由于梁上各集中荷载的指向相同, 故可将梁的自由端挠度作为最大挠度, 即:

$$\omega_{\max} = \omega_D = \frac{Fb^2l}{6EI} \left( 3 - \frac{b}{l} \right)$$

式中  $b$  为集中荷载到固定端的距离;  $E$  为弹性模量, 取值为  $21 \times 10^6$  N/mm<sup>2</sup>;  $I$  为截面惯性矩, 查表得 I36a 工字钢的截面惯性矩为  $1.58 \times 10^4$  cm<sup>4</sup>。

由叠加原理可得:  $\omega_{\max} = \frac{F}{6EI} (3b^2l - b^3) =$

$$\begin{aligned} & \frac{F}{6EI} (3 \times 252 \times 350 - 253 + 3 \times 1\,002 \times 350 - 1\,003 \\ & + 3 \times 1\,752 \times 350 - 1\,753 + 3 \times 2\,502 \times 350 - \\ & 2\,503 + 3 \times 3\,252 \times 350 - 3\,253) \\ & = \frac{10.11 \times 16.35 \times 10^{10}}{6 \times 21 \times 1.58 \times 10^{10}} = 0.83 \text{ (cm)}. \end{aligned}$$

悬臂梁最大容许挠度取  $l_0/250$ 。  $l_0$  为悬挑长度的 2 倍, 则  $[\omega] = 3.25 \times 2/250 = 0.026$  (m) = 2.6 cm,  $\omega_{\max} = 0.83$  cm <  $[\omega]$ , 故 I36a 工字钢符

合要求。

### 3.4.2 抗弯强度验算

由于梁上各集中荷载的指向相同, 其对工字钢梁的弯矩影响可以通过叠加原理计算, 最大弯矩在固定端处, 通过各个集中荷载对固定端产生的弯矩叠加得到最大弯矩为:

$$\begin{aligned} M_{\max} = M_A = & F_1b_1 + F_2b_2 + F_3b_3 + F_4b_4 \\ & + F_5b_5 = 10.11 \times 0.25 + 10.11 \times 1 + 10.11 \times 1.75 \\ & + 10.11 \times 2.5 + 10.11 \times 3.25 = 88.46 \text{ (kN} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

查表得, I36a 工字钢的截面系数  $W_x = 875$  cm<sup>3</sup>, 则最大弯曲正应力为  $\sigma_{\max} = 101$  N/mm<sup>2</sup> < 抗弯强度设计值  $f = 215$  N/mm<sup>2</sup>, I36a 工字钢满足要求。

### 3.4.3 抗剪强度验算

求固定端的支座反力, 由公式  $R = F$  并根据叠加原理可得:

剪力  $V = R = 5F = 5 \times 10.11 = 50.55$  (kN), 则固定端处的剪应力  $\tau_{\max} = 16.27$  N/mm<sup>2</sup>

$\tau_{\max} <$  工字钢抗剪设计强度  $f_v = 125$  N/

$\text{mm}^2$ , 则 I36a 工字钢满足要求。

### 3.5 结 论

预应力锚块悬臂结构浇筑高度在 2 m 以内时, 支撑脚手架及悬臂翻升模板的受力均能满足要求。

## 4 锚块模板支撑架的施工

### 4.1 脚手架搭设施工流程

摆放扫地杆→搭设立杆, 紧随扫地杆扣紧→安装扫地小横杆并与立杆或扫地杆扣紧→安装第一步大横杆(与各立杆扣紧)→安装第一步小横杆→安装第二步大横杆→安装第二步小横杆→安装第三步大横杆→安装第三步小横杆→加设剪刀撑→脚手板铺设及防护栏杆搭设→检查验收→投入使用。

### 4.2 脚手架各部位搭设的具体施工方法

立杆: 立杆搭设在下部工字钢上, 立杆与横杆采用直角扣件连接。

扫地杆或锁定杆: 脚手架搭设在基础面上, 底部必须设置纵、横向扫地杆。立杆与模板背架相交处采用两根纵向杆进行锁定。

大横杆: 大横杆设于小横杆之下, 在立杆内侧采用直角扣件与立杆扣紧。大横杆采用对接扣件进行连接, 大横杆在每一面脚手架范围内的纵向水平高差不超过 5 cm。

小横杆: 小横杆两端应采用直角扣件固定在立杆上。小横杆紧固于大横杆上, 每一主节点处(即立杆、大横杆交汇处)必须设置一小横杆并采用直角扣件扣紧在立杆上, 各杆件相交伸出的断头长度均大于 10 cm, 以防滑脱。

扣件连接杆件时, 螺栓的松紧程度必须适度, 用测力扳手校核力矩, 以  $40 \sim 50 \text{ N} \times \text{m}$  为宜, 最

大不超过  $65 \text{ N} \times \text{m}$ 。

脚手板: 脚手板一般设置在三根以上小横杆上, 当脚手板长度小于 2 m 时, 可采用两根小横杆, 并应将脚手板两端与其可靠固定, 以防倾翻。

剪刀撑: 为保证脚手架的整体稳定性, 在脚手架横向设置了 3 组连续剪刀撑, 纵向设置了 2 组连续剪刀撑, 剪刀撑斜杆采用旋转扣件扣紧在立杆或横杆上, 旋转扣件中心线至主节点的距离不大于 150 mm。

### 4.3 模板施工

模板主要采用木模板; 围檩采用普通排架钢管, 均采用承重脚手架支撑。

## 5 结 语

该工程溢流坝闸墩悬挑锚块全部采用翻升大模板背架作为悬挑结构支撑体系, 在 2 个月内完成了 3 个中墩、2 个边墩的预应力混凝土悬挑锚块浇筑施工, 并在锚块浇筑后完成了锚索安装及张拉施工。该支撑体系的施工简便快速, 避免了整体满堂承重脚手架的材料积压和高大模架施工的安全威胁, 可在类似工程中推广应用。

### 参考文献:

- [1] 水利水电工程施工组织设计规范, SL303—2004[S].
- [2] 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范, JGJ 130—2011[S].
- [3] 钢结构高强度螺栓连接技术规程, JGJ 82—2011[S].

### 作者简介:

刘汉斌(1973-), 男, 四川屏山人, 工程师, 从事水利水电工程施工技术与管理工作;

黄 兴(1986-), 男, 湖南麻阳人, 工程师, 从事水利水电工程施工技术与管理工作;

魏兴存(1987-), 男, 河北邯郸人, 工程师, 从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑: 李燕辉)

(上接第 95 页)

先、管理为重、创效为本”的指导方针, 以技术为龙头、生产进度为中心、质量为生命、安全为保障、以创造效益为目的, 通过人员组织管理、设备组织管理、技术管理、质量管理、安全管理、合同管理等方面的创新, 使南坎 2 水电站于 2015 年 9 月 25 日按期完工并创造了良好的经济效益, 同时在进度、质量、安全等方面得到了当地政府和业主的一致好评, 施工管理效果显著, 为今后的混凝土面板堆

石坝施工管理积累了一定的经验, 同时为中国企业在老挝树立了良好的形象, 为后续市场开发创造了有利条件。

### 作者简介:

白云猛(1985-), 男, 山东巨野人, 工程师, 从事水利水电工程施工技术与管理工作;

刘慧芳(1987-), 女, 湖南益阳人, 工程师, 学士, 从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑: 李燕辉)