

# 枢纽工程悬臂式牛腿无外支撑施工技术

邱建亚

(中交一航局第一工程有限公司)

**摘要:**为解决航电枢纽工程中泄水闸悬臂式牛腿施工的技术问题,综合考虑模板体系受力计算、传统施工工艺、场地限制、工期节点、施工成本等方面,工程中采用了无外支撑施工技术。该技术主要在底层浇筑混凝土中预埋固定支撑,克服模板自重,形成“内拉”的模板体系,与传统满堂脚手架的支撑工艺相比,不仅节约了脚手架支拆和预压的时间,而且缩短了施工工期,取得了较好的经济效益。该技术在实际工程中的成功应用,为类似工程的施工提供了一种新的、有效的技术手段。

**关键词:** 枢纽工程;泄水闸;牛腿;无外支撑施工技术

## 0 引言

泄水闸闸墩牛腿工程通常表现出结构质量大、混凝土使用量大以及悬挑长度长的特性。其施工工艺的选择将直接影响到悬臂式牛腿的施工质量和安全,同时对工程成本、工期也有一定影响。因此应根据工程的具体地形位置和结构构造选择合理的施工工艺。

航电枢纽工程中的泄水闸悬臂式挑牛腿施工技术有传统施工工艺和无外支撑施工技术2种方案,从施工现场的实际情况和工程的实际需求以及可行性、经济性和安全性等多个角度出发综合比较二者的优缺点。传统施工工艺为脚手架支撑进行施工,具有以下3个问题:

- 1) 脚手架搭设占地面较大、影响吊机施工、且易受天气等影响。
- 2) 脚手架搭设属于高空危大作业,作业高度较高,增加了悬挑结构施工的安全风险。
- 3) 脚手架架体作为模板支撑的受力结构,底模拆除难度大。

与传统工艺对比,无外支撑施工技术是优化后的闸墩牛腿施工技术和管理措施,对于提高泄水闸的整体施工质量具有重要意义。

本文以信江八字嘴航电枢纽工程项目为依托,开展了悬臂式牛腿无外支撑施工技术研究。

## 1 工程概况

信江八字嘴航电枢纽工程项目是以航运为主、兼顾发电等综合利用的航电枢纽工程,正常蓄水位为18 m,通航建筑物采用船闸,泄水建筑物为

开敞型驼峰堰型泄水闸。

泄水闸共13个闸墩,11个中墩,2个边墩,中墩宽3 m,边墩宽2.5 m;闸墩悬挑部位从19 m高程起坡,坡比1:1,悬挑5 m,至24 m高程止,24 m以上3 m为直线段,悬挑部位顶标高为27 m。

## 2 施工工艺特点及比选

悬臂式牛腿的施工方法包括满堂式承重脚手架支撑法和无外支撑法。这2种方法各有特点,可根据现场实际情况合理选择。

### 2.1 满堂式承重脚手架支撑法

满堂式承重脚手架支撑法需要搭设大面积的脚手架,占用较多的地面空间,同时施工高度较高、周期较长且对基础要求较高。对于牛腿净高为14 m的闸墩,脚手架会影响吊机施工,此外,在拆除脚手架时可能存在较大的安全隐患。

### 2.2 无外支撑法

无外支撑施工技术,顾名思义,不需要在外部设置支撑结构,因此可以更好地适应场地限制。同时,通过预埋圆管,利用混凝土的抗压性能,使模板体系受力更加合理,从而提高了施工的安全性。此外,使用该技术只需要进行一次性的浇筑和预埋固定支撑,大大简化了施工工艺,减少了施工成本。

无外支撑法需要对模板体系进行重新优化,包括优化模板的模数,采用传统爬模施工工艺。底层模板可以起到支垫的作用,混凝土浇筑至顶层后可以拆除模板。模板外侧需要焊接施工平台,对于与牛腿相邻的位置,可以采用大片定型钢模

板翻模工艺进行施工。这种方法可以节省时间并保证施工效率。

### 2.3 现场情况分析

考虑现场实际情况、工期要求以及 2 种施工工艺的优缺点, 最终采用无外支撑法作为悬臂式牛腿的施工工艺。原因如下: 1) 闸墩下面有上下通道, 严重影响满堂脚手架搭设; 2) 施工时的结构基础边缘属于回填土区域, 不能满足满堂支撑架的荷载要求; 3) 受汛期影响和压载试验周期长的原因, 压载试验后不能满足现场施工进度。

## 3 无外支撑施工工艺

### 3.1 工艺原理

无外支撑悬臂式牛腿模板采用“爬模”工艺, 不拆底部模板, 全部浇筑完成后将牛腿模板统一进行拆除。模板加固采用“反向内拉”工艺, 即在模板内侧预埋钢管, 使用圆钢将模板与预埋钢管焊接相连, 以达到模板加固的效果, 工艺原理示意图见图 1。

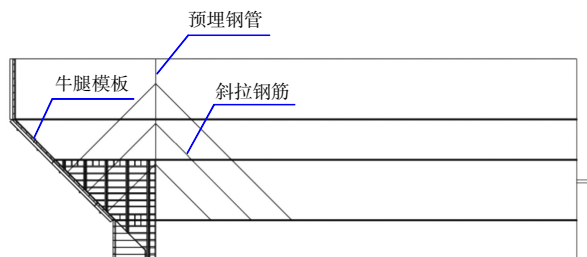


图 1 无外支撑牛腿模板工艺原理示意图

### 3.2 施工要点

#### 3.2.1 牛腿支撑圆管预埋

信江航电枢纽泄水闸闸墩牛腿共分为 4 层施工, 施工高度为 3 m/层, 分别是 15~18 m (第 1 层); 18~21 m (第 2 层); 21~24 m (第 3 层); 24~27 m (第 4 层); 从 19 m 开始悬挑牛腿, 悬挑总长度为 5 m, 坡度为 1:1, 悬臂高度至 24 m 结束, 24~27 m 共有 13 个牛腿, 其中 2 个边墩牛腿为 2.5 m 宽, 11 个标准中墩牛腿为 3 m 宽。采用无外支撑法施工牛腿, 需在 15~18 m 施工时进行支撑装置预埋。浇筑流程示意图见图 2。

第 1 层开始由圆弧渐变为牛腿直线段, 并需要预埋钢管对上一层牛腿模板进行加固。经核算, 钢管选型为: 直径 219 mm, 筒壁厚 9 mm, 单根长 6 m, 在距离上游侧圆弧顶端 2 m 处共预埋 3 根钢管, 每根间距 75 cm。预埋钢管布置情况示意图见图 3。

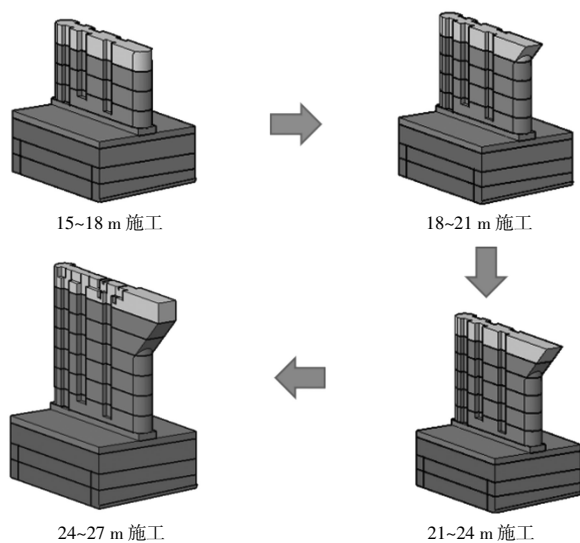


图 2 泄水闸闸墩牛腿部位浇筑流程示意图

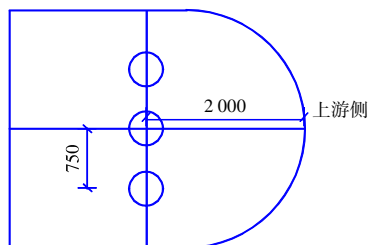


图 3 预埋钢管布置情况示意图

#### 3.2.2 悬臂牛腿混凝土浇筑

##### 1) 模板制安

第 2 层正式施工牛腿悬臂部分, 模板由两侧的梯形大片模板和 1 片牛腿斜面模板两部分组成, 斜面模板上均匀布置 9 个圆台螺母预留孔洞。

本层施工难点主要体现在以下 2 个方面:

①斜面牛腿模板的吊装。在两侧梯形模板安装完成后, 首先在模板预留孔洞上预埋圆台螺母, 内拧 25 精轧螺纹、外拧 33 mm 丝杆。在内侧精轧螺纹上、下双面满焊 4 个 10 cm×10 cm×10 mm (长×宽×厚) 钢片, 钢片中心开  $d=30$  mm 圆孔做吊点; 在外侧丝杆加装垫片并上紧螺丝。吊装时采用 2 根 20 mm 较长钢丝绳、2 根 5 t 较短柔性吊带进行吊装, 以达到起吊后形成斜面的效果。

②斜面牛腿模板的加固。模板加固采用内侧反拉形式, 首先对上一层浇筑前预埋的 3 根钢管进行加长, 并在内六角圆台螺母内拧 25 精轧螺纹、外拧 33 mm 丝杆, 在内侧精轧螺纹焊接一侧为弯钩形式的 25 mm 圆钢, 钩头按照垂直于模板板面的形式与预埋钢管相连并焊接, 在外侧丝杆加装垫片并上紧螺丝; 反方向以 45°、60°焊接同

样形式的一侧为钩头的 25 mm 圆钢至上一层预埋的圆钢上,形成反向拉力。拉筋加固图见图 4。



图 4 拉筋加固图

第 3—4 层施工原理同第 2 层。

## 2) 模板体系计算及受力分析

牛腿模板主要受力形式及所受荷载为:混凝土、模板自重、混凝土侧压力、施工荷载。

混凝土侧压力<sup>[1]</sup>(水平荷载)计算公式为:

$$F = 0.22 \times \gamma \times \beta_1 \beta_2 \times t_0 \times V^{1/2} = 0.22 \times 24 \times 1.15 \times 1.2 \times 8 \times 0.5^{1/2} = 40.8 \text{ kN/m}^2$$

式中:  $F$  为新浇混凝土对模板的侧压力;  $\gamma$  为混凝土的重力密度;  $\beta_1 \beta_2$  为修正系数;  $t_0$  为新浇混凝土的初凝时间;  $V$  为混凝土浇筑速度。

$$F = \gamma h$$

式中:  $h$  为有效压头高度。

有效压头高度计算公式为:

$$h = P/\gamma = 40.8/25 = 1.63 \text{ m}$$

混凝土侧压力图形为梯形,则侧压力线性分布荷载:

$$F_0 = Fh_1 + Fh_2/2 = (3 - 1.63) \times 40.8 + 1.63 \times 40.8 \times 0.5 = 89.1 \text{ kN/m}$$

牛腿宽 3 m, 则浇筑单仓混凝土侧压力总和:

$$G = F_0 b = 89.1 \times 3 = 267.3 \text{ kN}$$

式中:  $b$  为混凝土浇筑高度。

混凝土、模板自重<sup>[2]</sup>:

$$F_1 = S \times G_{1k} \times L$$

式中:  $F_1$  为牛腿混凝土、模板自重;  $S$  为牛腿垂直水面模板面积;  $G_{1k}$  为模板与混凝土自重标准值;  $L$  为牛腿垂直水面宽度。

计算得:

$$F_1 = S \times G_{1k} \times L = 3 \times 3 \times 3 \times 25 \times 0.5 = 337.5 \text{ kN}$$

混凝土倾倒荷载、振捣荷载:

$$F_2 = (G_{2k} + G_{3k}) \times S_1$$

式中:  $F_2$  为混凝土倾倒荷载、振捣荷载;  $G_{2k}$  为振捣混凝土荷载标准值,本次计算取  $2 \text{ kN/m}^2$ ;  $G_{3k}$  为倾倒混凝土荷载标准值,本次计算取  $2.5 \text{ kN/m}^2$ ;  $S_1$  为牛腿底部模板面积,即  $S_1 = \sqrt{2} \times 3 \times 3 = 12.726 \text{ m}^2$ 。

计算得:

$$F_2 = (G_{2k} + G_{3k}) \times S_1 = (2 + 2.5) \times 12.726 = 57.3 \text{ kN}$$

受力体系单位面积上的受力合力为斜拉杆内部轴力,但由于斜拉杆与水平面夹角为  $45^\circ$ ,计算所得水平竖直力的分量不相等,所以计算斜拉杆内部受力应该根据垂直荷载反求拉杆内力  $F_3$ <sup>[3]</sup>,则  $F_3 = (F_1 + F_2)/0.7 = (337.5 + 57.3)/0.7 = 564 \text{ kN}$ ,斜拉杆采用 9 根 25 mm 圆钢,则  $F = 564 \times 1\,000 / (3.14 \times 12.5 \times 12.5 \times 9) = 127.7 \text{ MPa} < 205 \text{ MPa}$  (抗拉强度),满足要求。

## 3) 模板安拆工艺优化

经过现场不断实践和施工总结,模板支拆顺序有了改进。

当单片模板拼装时,不仅占用了起重设备、人力资源,而且属于高空作业,存在安全风险。

经过工艺研讨,可以在地面进行一次拼装,节省了单片安装时吊机占用的时间。在地面拼装完成后再进行吊装,吊装时需要使用定制长度的吊锁具,确保顶口水平安装,最后进行法兰盘的加固。此次改进大大提高了起重设备的利用率。地面拼装效果见图 5。



图 5 地面拼装效果图

## 4) 混凝土浇筑

考虑支撑系统多且密,部分竖向钢筋长的结构,卧罐入仓落差大易引起混凝土骨料离析,故采用泵送混凝土。

混凝土浇筑时禁止出现超高现象,采用泵送

混凝土须严格控制浇筑速度  $v < 0.5 \text{ m/h}$ 。同时保持匀速浇筑,避免速度不均匀造成模板压力过大。

为满足施工需求,科学制定了混凝土振捣方案。通过优化振捣次数,确保了混凝土振捣的密实度。该方案能够确保混凝土在结构面狭窄、支撑系统多且密、部分竖向钢筋长的结构中均匀分布,从而提高工程质量。

#### 5) 混凝土养护

泄水闸闸墩混凝土的浇筑完成后,为有效地进行混凝土的养护工作,确保其强度和耐久性达到设计要求,应采取以下措施。

①及时覆盖:一旦混凝土浇筑完成,应立即在其表面覆盖一层保湿膜或塑料薄膜,防止水分过快蒸发。

②定期浇水:在养护期间,应定期浇水保持混凝土表面的湿润。浇水的时间和频率取决于环境条件和混凝土的类型。

③保持适当的温度:在混凝土养护期间,保持适当的温度对混凝土的强度和耐久性至关重要。可以根据需要进行加热或冷却,以控制混凝土的温度。

④防止冻害:养护期间,如果气温低于  $0^\circ\text{C}$ 、突风、温度骤降,应采取适当的措施,如覆盖保温材料,以防止混凝土内外温差大、受冻害。

⑤防止过度压力:在养护期间,应避免对混凝土施加过大的压力,顶部尽量不堆放重物。否则可能会导致混凝土变形或产生裂纹。

⑥定期检查:在养护期间,应定期检查混凝土的状态。如果发现任何问题,如裂纹、变形等,应立即采取措施进行修复。

#### 6) 施工注意事项

①模板的优化是关键。首先要根据工程要求和现场实际情况选择合适的模板型号和尺寸;其次,采用传统爬模施工工艺时,要控制好模板的安装和拆卸过程,确保模板的稳定性和安全性。

②对于与牛腿相邻的位置,需要采用大片定型钢模板翻模工艺进行施工,同时选择合适的翻模角度和高度,严格控制混凝土的浇筑质量和养护时间。

### 4 施工效果分析

选用无外支撑施工技术,成功且快速地完成了信江八字嘴航电枢纽工程的所有泄水闸闸墩牛

腿的施工,在工期、安全、成本方面均取得了良好的效果。

1) 工期:采用无外支撑施工技术,不仅节约了脚手架用量、安拆时间,三角架用量、安拆时间等,而且通过履带吊配合模板拆除,加快了施工进度。传统满堂脚手架的支撑工艺,从泄水闸底板+5.4~+27 m,13个闸墩牛腿均需搭设盘扣式支撑体系脚手架,需3 d搭设完成,搭设完成后进行预压试验约7 d,满足要求后才能施工。每个闸墩牛腿施工工期约10 d。而无外支撑施工技术无需搭设脚手架,每个闸墩节省工期至少10 d。

2) 安全:减少了高空作业量,降低了满堂脚手架搭设、三脚架搭设以及脚手架拆除过程中存在的安全风险。

3) 成本:无外支撑施工技术相较于传统工艺,无需搭设满堂架。综合考虑节省的脚手架成本,每个闸墩需搭设脚手架  $8 \times (27 - 5.4) \times 6 = 1\,036.8 \text{ m}^3$ ,按照  $40 \text{ 元/m}^3$ ,得出每个闸墩牛腿搭设脚手架费用为41 472元。考虑材料周转,共节约成本  $41\,472 \times 6 = 248\,832 \text{ 元}$ 。

### 5 结语

本文综合分析了传统泄水闸牛腿的满堂脚手架施工技术和无外支撑施工技术。通过对泄水闸牛腿的重要性、2种技术的特点对比、无外支撑施工技术的受力计算、模板拼装顺序的优化、混凝土的养护及效益分析等各部分的详细介绍,全过程梳理了无外支撑施工技术的关键点。

无外支撑施工技术虽然成功运用在实际的工程中,但在细节方面存在诸多问题。例如地面拼装的吊装工艺研究、操作平台的合理布设等均是后续在工程中需要关注的重点。

泄水闸牛腿的施工技术不是一成不变的,应结合施工现场环境和工程需求,科学地选择施工方案,降低施工难度。文中所叙诸多细节,包括预埋钢管的大小及位置、拉筋型号、受力杆件的规格和数量、浇筑速度、养护、注意事项等,可为类似工程提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 江正荣. 建筑施工计算手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001:443-444.
- [2] JGJ 162—2008, 建筑施工模板安全技术规范[S].
- [3] 徐伟. 施工结构计算方法与设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1999:314-346.