

苏布雷水电站主厂房桥机梁现浇工艺设计与研究

宋建威, 王建正, 刘艳丽

(中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066)

摘要:苏布雷水电站主厂房桥机T梁施工选择在高空薄壁墙体上布置支撑体系以实现高空现浇。对该施工工艺的关键点进行了详细设计,从PVC高分子模板使用、到支撑体系布置逐一进行受力计算与分析。鉴于支撑体系对高空墙体产生的较大偏心荷载,引入了有限元分析理念,采用Midas Gen软件,对高空薄壁墙体进行了安全性受力分析研究。

关键词:苏布雷水电站;桥机梁;高空;托架;现浇;PVC高分子模板;MIDAS

中图分类号:TV7;TV52;TV51

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2017)03-0104-06

1 工程概述

科特迪瓦苏布雷水电站主厂房为坝后式厂房,设置有三台单机容量为90 MW水轮机组,前后设有副厂房,满足辅机设备安装、控制、办公等功能需求。主厂房结构类型为排架结构,地面以下部分深度为39 m,地面以上部分高度为20 m,主厂房屋面为网架结构,跨度为21.5 m,坐落在主厂房上下游混凝土边墙上。

主厂房上下游墙长度为109.3 m,间距为21.5 m,上下游墙最大高度为36.6 m,其中地面(高程115.5 m)以下部分为17.1 m,地面以上部分为19.5 m,从高程108.7 m至125.75 m按设计间距布置排架柱,其余部分均为实心混凝土墙,墙体厚度有三种:从98.4 m至108.7 m高程混凝土墙体厚度为1 m,从108.7 m至133 m高程墙体厚度为0.5 m,从133 m至135 m高程墙体厚度为0.4 m。在125.75 m高程上(即排架牛腿上)布置了2 m高的混凝土T型梁,在T型梁上安装钢轨,作为400 t桥机的行走轨道,上下游墙剖面尺寸见图1。

2 施工方案初选

桥机T梁共有28榀,其中单榀最大重量为36 t,在主厂房施工区域安装有型号为MQ900B的门机一台,但门机最大起吊能力为30 t。若选择汽车吊,则受厂房周边场地狭小的因素影响,尤其是下游尾水平平台无车辆行走通道,因此,主厂房桥机T梁的施工必须选择现浇方式完成。对于现浇方式的支撑体系,若采用满堂红脚手架支撑

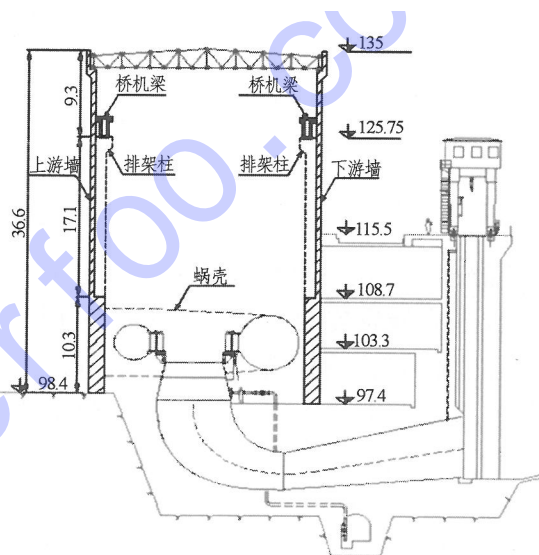


图1 主厂房上下游墙剖面总图

体系,存在高宽比过大、安全风险大等因素,且下部为蜗壳等金属结构,存在施工相互干扰的问题,因此,我们提出了一种在高空薄壁混凝土墙上设置支撑体系的现浇方式,在保障施工安全、墙体结构稳定的情况下,免除了与蜗壳金属结构安装的相互干扰。

3 高空现浇方案的设计

在T梁高空现浇方案设计中,支撑体系和模板设计为最重要的两项内容,其中支撑体系又分高空托架设计和小型满堂红设计,T梁现浇方案组成结构见图2。

3.1 高空托架设计

高空托架是支撑体系的核心,是关系到整个现浇施工工艺安全性的关键,因此,每项细节设计都至关重要。高空托架采用方钢加工,呈三角形,

收稿日期:2017-04-23

短边为 1.6 m,长边为 2 m,刚度和强度高,受力合理。高空托架与墙体的连接通过预埋爬锥实现。预埋爬锥件承受所有上部荷载且受力点集中,同时,鉴于墙体厚度仅为 0.5 m,因此,需要特制 L 型爬锥预埋件以延长爬锥杆件埋入混凝土墙中的深度。

L 型爬锥预埋件采用高强螺纹钢制作,长边 40 cm,短边 25 cm,短边朝向下侧埋设。爬锥和三角托架埋设的间距需要与顶部小型满堂红脚手架的纵距保持一致,以便于脚手架的搭设与固定,因此,爬锥和三角托架的设计间距初选为 0.5 m,二者的布置高程为 123.55 m(即 T 梁底部 2 m 处),预留出小型满堂架和操作平台的搭设空间。

3.2 小型满堂架的设计

小型满堂架在整个支撑体系中起着承上启下的作用,既承受 T 梁施工过程中的恒载、活载和施工荷载,又将上部所有荷载按照立杆间距均匀向下传递,因此,小型满堂架的设计要遵循“对称、合理、安全”的原则。小型满堂架的设计参数初选如下:杆件材质采用 $\varphi 48 \times 3.5$ 型号钢管,立杆横距为 0.5 m,立杆纵距为 0.5 m,立杆步距为 0.8 m,同时,立杆上下分别使用顶托和底托,以优

化荷载分散。

3.3 桥机 T 梁模板的设计

桥机 T 梁外侧为永久外露面。为保证混凝土外观质量,选择 PVC 高分子材料作为 T 梁外模。PVC 高分子模板为新一代环保建筑材料,具有外表光滑平整、高阻燃、吸水不变形、重复次数多及可回收使用等特点,与传统模板材料相比,具有较高的优越性。通过表 1 对比得知:PVC 高分子模板各项性能指数均优,但模板刚度不足,为了弥补这一缺点,我们对模板支撑体系进行了设计,选择 40 mm \times 60 mm、2.5 mm 厚的轻型方钢管加工制作模板龙骨排架,龙骨排架水平间距为 0.3 m,用铆钉将高分子 PVC 模板固定在龙骨排架上,形成单块长度为 1.8 m 的整体式模板,以便于转运与安拆。PVC 高分子模板加固采用高强度螺杆对拉的方式。高强度对拉螺杆具有强度高、可周转、模板开孔数量少等优点,在混凝土薄壁结构的模板加固中优先选择。在 PVC 高分子模板加固工艺中,M14 高强螺杆间距初选为 0.7 m \times 1 m,在桥机 T 梁内侧布设 PVC 套管,以便于在桥机 T 梁浇筑完成后拆除高强螺杆。

表 1 PVC 高分子模板与其他材质模板综合指标对比表

序号	性能类别	PVC 高分子模板	竹胶模板	木模板	钢模板
1	阻燃性	阻燃	不阻燃	不阻燃	阻燃
2	吸水及变形	不吸水、不变形	吸水易变形	吸水易变形	生锈变形
3	脱模过程	容易	较难	较难	难
4	使用脱模剂	否	需要	需要	需要
5	重量	较轻	轻	重	较重
6	刚度	适中	适中	适中	较大
7	可回收性	可回收	可部分回收	可部分回收	可部分回收
8	环保	无污染	污染	污染	污染

4 力学验算

4.1 PVC 高分子模板的验算

4.1.1 混凝土对模板侧压力的计算

新浇筑混凝土作用于模板上的最大侧压力计算是验算模板系统的基础,根据《混凝土结构工程施工及验收规范》,最大侧压力值取两个公式计算结果的最小值,计算公式及结果如下:

$$p_c = \min(0.22\gamma_c t_0 \beta_1 \beta_2 V^{\frac{1}{2}} \gamma_c H) = 33.5 (\text{kN/m}^2)$$

式中 p_c 为新浇筑混凝土对模板的最大侧压力,单位 kN/m^2 ; γ_c 为混凝土重力密度,取 26 kN/m^3 ; t_0 为新浇筑混凝土的初凝时间,取 6 h; β_1 为外加

剂影响修正系数,取 1.2; β_2 为混凝土塌落度影响修正系数,取 1.15; V 为混凝土的浇筑速度,取 0.5 m/h ;

4.1.2 高强度螺杆的验算

M14 高强对拉螺杆性能级别为 8.8 级,抗拉强度为 800 MPa,所能承受的拉应力计算公式及结果如下:

$$\sigma_l = \frac{p_c \times a \times b}{s} = 152.4 \text{ MPa} < [\sigma_l]$$

式中 σ_l 为单根 M14 高强度螺杆所承受的拉应力,单位为 kN/m^2 ; p_c 为新浇筑混凝土对模板的

最大侧压力,取 33.5 kN/m^2 ; s 为 M14 高强度螺栓的截面面积,取 $153.86 \times 10^{-3} \text{ m}^2$; a 为 M14 高强度螺栓布置的横距,取 1 m ; b 为 M14 高强度螺栓布置的横距,取 0.7 m ; $[\sigma_t]$ 为 M14 高强度螺栓的抗拉强度,取 800 MPa 。

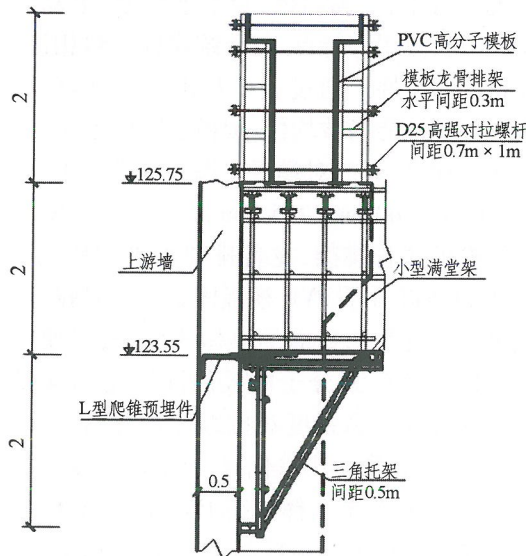


图2 T梁现浇方案设计图

从以上计算结果判断:高强度对拉螺栓的布置间距合理,满足安全性要求。

4.1.3 PVC 高分子模板的验算

PVC 高分子模板的强度计算公式及结果为:

$$\sigma_m = \frac{M}{W} = \frac{1}{10} q_1 l^2 = 6.2 \text{ MPa} < [\sigma_m]$$

式中 σ_m 为 PVC 高分子模板截面强度,单位为 N/mm^2 ; M 为 PVC 高分子模板计算的最大弯矩,单位为 $\text{N} \cdot \text{mm}$; W 为 PVC 高分子模板的抵抗矩,计算取值为 $66\ 667 \text{ mm}^3$; q_1 为作用在 PVC 高分子模板的线性荷载(考虑振动荷载作用),计算取值为 $45.8 \text{ N} \cdot \text{m}$; l 为龙骨排架的水平间距,取 0.3 m ; $[\sigma_m]$ 为 PVC 高分子模板的抗拉强度,取 15 MPa 。

PVC 高分子模板的刚度计算公式及结果为:

$$w_m = \frac{q_2 l^4}{150EI} = 0.65 \text{ mm} < [w_m]$$

式中 w_m 为 PVC 高分子模板的计算挠度,单位为 mm ; q_2 为作用在 PVC 高分子模板的线性荷载(不考虑振动荷载作用),计算取值为 $33.5 \text{ N} \cdot \text{m}$; l 为龙骨排架的水平间距,取值为 0.3 m ; E 为 PVC 高分子模板的弹性模量,取值为 $4\ 180 \text{ MPa}$; I

为 PVC 高分子模板的截面惯性矩,计算取值为 $666\ 667 \text{ mm}^4$; $[w_m]$ 为 PVC 高分子模板的允许挠度($l/400$),计算取值为 0.75 mm 。

根据以上计算结果、在龙骨排架间距选择为 0.3 m 的情况下,PVC 模板的强度和刚度计算均满足要求。

4.2 支撑系统的验算

4.2.1 三角托架的受力计算

三角托架共承受三部分荷载,即恒载 Q_1 、均布活载 Q_2 和施工荷载 Q_3 。其中,恒载 Q_1 包括 T 梁混凝土自重、模板自重及满堂架自重等,施工荷载 Q_3 包括混凝土下料荷载和振捣荷载。在单个三角托架受力模型分析中,我们假设所有荷载按最不合理组合后,在四个立杆位置以集中力 P 的形式传递到三角托架上,三角托架受力模型如图 3 所示,集中力 P 计算结果为:

$$P = \frac{1.2Q_1 + 1.4(Q_2 + Q_3)}{4} \times L_0 = 9.4 \text{ (kN)}$$

式中 P 为通过立杆传递至托架上的集中力,单位 kN ; Q_1 为三角托架以上的所有恒载,取 51.1 kN/m ; Q_2 为三角托架以上所有的均布活载,取 3.9 kN/m ; Q_3 为三角托架以上所有的施工荷载,取 9.1 kN/m ; L_0 为三角托架纵向间距,取 0.5 m 。

三角托架采用 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的方钢管加工制作而成,杆件在荷载作业下发生挠度变形,经结构力学计算,杆件 1 的最大挠度 $v = 2.5 \text{ mm}$,而杆件挠度允许值 $[v] = L/400 = 3.8 \text{ (mm)}$,即托架杆件变形值满足设计要求,三角托架位移分析见图 4。

4.2.2 L 型爬锥预埋件的受力计算

L 型爬锥预埋件采用科特迪瓦当地型号为 FeE-500 的螺纹钢制作,屈服强度为 500 MPa ,符合法国规范 NF-A-50-016 要求。预埋件直径为 25 mm ,呈直角弯钩状埋入混凝土中,锚固总长度为 650 mm 如图 5 所示。L 型爬锥预埋件所承受的拉力以及爬锥所承受的剪力来自于三角托架,因此,可以通过建立受力模型、经结构力学计算获得三角托架支座处的所有受力(图 6),其计算结果如下:

$$N_1 = 14.91 \text{ kN}; N_2 = 19.88 \text{ kN}; N_3 = 14.91 \text{ kN}$$

式中 N_1 为三角托架对爬锥及预埋件产生的拉力; N_2 为三角托架对爬锥产生的拉力; N_3 为三角

托架对混凝土墙体产生的局部压力。

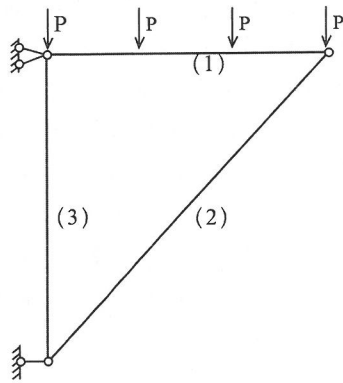


图3 三角托架受力模型图

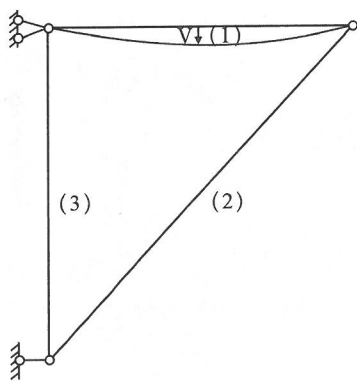


图4 三角托架位移分析图

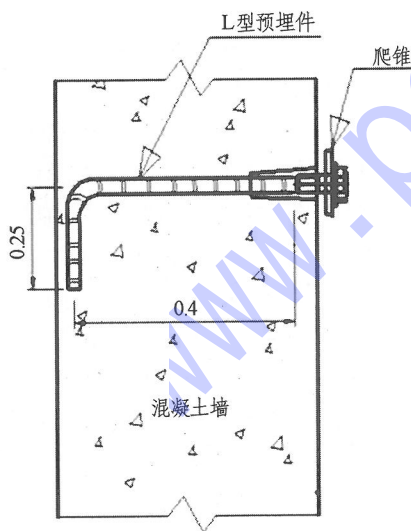


图5 L型爬锥预埋件简图

L型爬锥预埋件的受力验算可以通过计算预埋件与混凝土的粘结力并与所承受的水平拉力进行对比,计算结果如下:

$$F_a = \pi d l_m \tau_b = 127.6 \text{ kN} > N_1$$

式中 F_a 为L型爬锥预埋件与混凝土的粘结力,

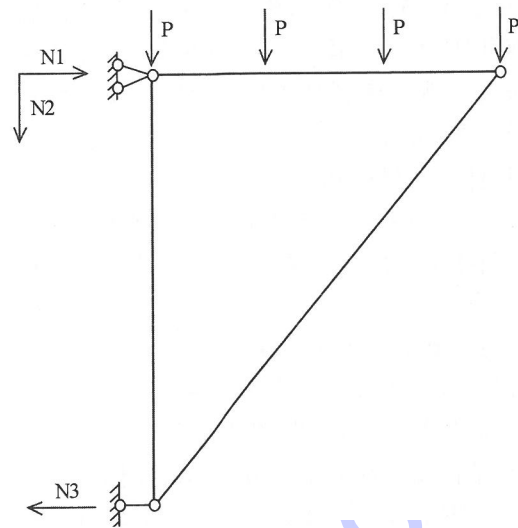


图6 三角托架支座处受力模型图

单位为kN; d 为L型爬锥预埋件直径,取25mm; l_m 为L型爬锥预埋件长度,取650mm; τ_b 为L型预埋件与混凝土粘结强度,取2.5N/mm²。

从计算结果得知:L型爬锥预埋件与混凝土粘结力大于所承受的水平拉力,判断L型爬锥预埋件受力计算结果满足要求。

4.2.3 爬锥受力计算

爬锥主要承受三角托架对其产生的剪应力和拉应力,对爬锥的抗剪、抗拉验算如下:

$$\tau_p = \frac{N_2}{A_1} = 19.45 \text{ N/mm}^2 < \tau_0$$

$$\sigma_p = \frac{N_1}{A_A} = 13.9 \text{ N/mm}^2 < \sigma_0$$

式中 τ_p 为爬锥计算剪应力,单位为N/mm²; σ_p 为爬锥计算拉应力,单位为N/mm²; A_1 为爬锥截面面积,取1071.4mm²; τ_0 为爬锥抗剪强度设计值,取450N/mm²; σ_0 为爬锥抗拉强度设计值,取900N/mm²。

从计算结果得知:爬锥所承受的实际剪应力和拉应力均小于设计值,受力计算结果满足要求。

4.2.4 混凝土局部受压计算

由于三角托架底部支座直接压在混凝土墙上,且因二者接触面积较小,故有必对混凝土局部受压承载力进行验算,计算公式及结果如下:

$$N_0 = 1.35\beta_1\beta_c f_c A_2 = 290.3 \text{ (kN)} > N_3$$

式中 N_0 为三角托架支座范围内的混凝土局部受压承载力,单位为kN; β_1 为混凝土局部受压时

的强度提高系数,取2; β_c 为混凝土强度影响系数,取0.94; f_c 为混凝土抗压强度设计值,取14.3 N/mm²; A_2 为三角托架支座与混凝土墙的接触面积,取8 000 mm²。

从计算结果得知:三角托架支座范围内的混凝土局部受压承载力大于托架传递来的压力,因此,三角托架底部支座处的混凝土局部抗压验算满足要求。

4.3 高空薄壁墙体安全性验算

在高空薄壁墙体上搭建支撑体系平台并完成T梁混凝土浇筑,其各类荷载组合对高空薄壁墙体本身结构安全性的影响务必进行建模验算。鉴于高空薄壁墙体结构复杂且荷载方向具有空间多向性,我们考虑采用Midas Gen软件进行三维有限元建模,模拟各类荷载工况与组合,系统分析高空薄壁墙体各部位内力分布状况及结构物变形位移。

4.3.1 三维有限元建模

Midas Gen软件具有强大的三维建模功能,根据高空薄壁墙体的设计结构尺寸,定义结构物的特征节点和单元并定义各单元相对应的材料特性、墙体厚度和截面形式,经过单元分割、材料和截面分配后,最终形成三维有限元模型。在建模过程中,可以通过三维透视、消隐和渲染功能下实时查看建模状况,可以对出现偏差的单元进行实时检查与纠正,高空薄壁混凝土墙体三维有限元模型见图7。

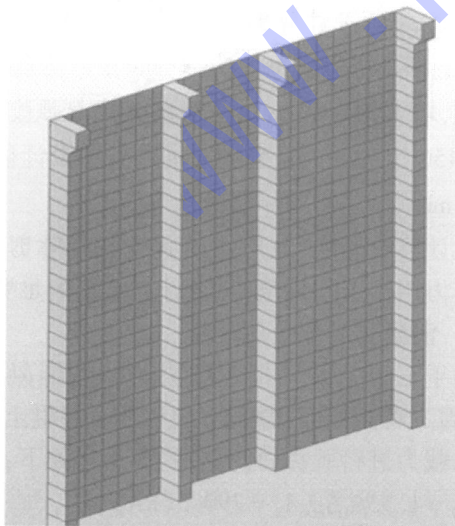


图7 墙体三维有限元模型图

4.3.2 荷载及支承分布

上游墙所承受的外部荷载主要是通过三角托架支座传递而来,在Midas Gen有限元模型荷载定义时,考虑了三种外部荷载、一种最不利荷载组合。三种外部荷载,即:恒载、活载和施工荷载;而最不利荷载组合=1.2恒载+1.4(活载+施工荷载)。各类外部荷载按照实际位置进行布置,形成整个高空薄壁墙体荷载分布模型。墙体有限元支承布置均按底部固结考虑,高空薄壁墙体荷载及支承分布情况见图8。

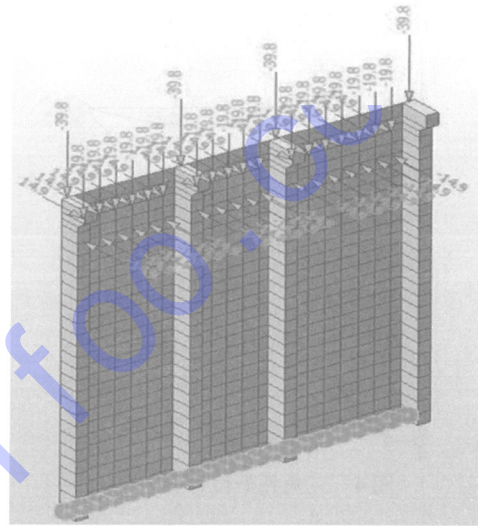


图8 模型荷载及支承分布图

4.3.3 墙体及排架柱内力分析

Midas Gen软件可以查看在各类荷载或荷载组合作用下的单元内力信息,所有数值可以在三维有限元模型上以数字、等值线及颜色填充的方式展现,必要时可以沿三维模型任意方向和角度切割,绘制内力纵断面,把整个三维有限元模型上受力最不利的位置反映出来。鉴于高空薄壁墙体承受偏心外部荷载,在三维有限元模型分析中,着重关注墙体所承受的最大弯矩值,并以此弯矩值计算出相应位置的理论配筋面积,理论配筋面积与实际配筋面积的对比结果将决定高空薄壁墙体的安全性。

从墙体内力图(图9)和排架柱内力图(图10)中得知:在最不利荷载作用下,最大弯矩值出现在墙体厚度变化处,最大弯矩值 $M_{\max} = 125.58$ kN·m/m。根据欧洲 the concrete center 认证的 spreadsheet 计算程序获得该部位理论配筋面积 $A_{s0} = 662$ mm²,而实际墙体配筋面积 $A_{s1} =$

2 090 mm², 大于理论配筋面积, 因此而判断墙体内力验算满足要求。

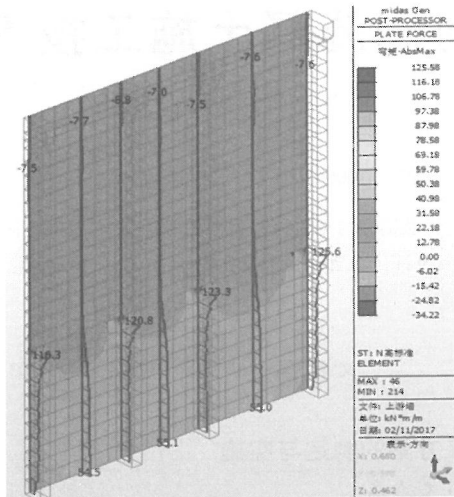


图9 墙体内力分布图

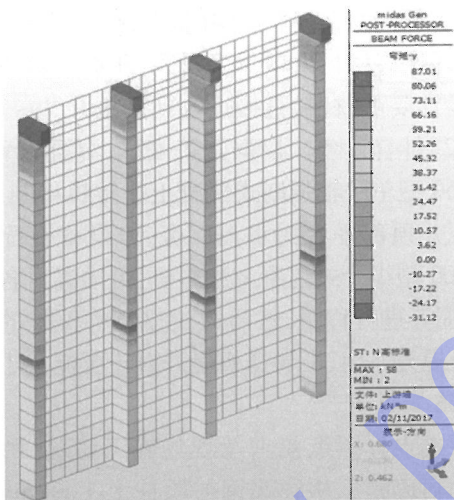


图10 排架柱内力分布图

5 结语

通过对苏布雷水电站利用高空薄壁混凝土墙实现桥机 T 梁现浇工艺的设计与论证, 同时结合现场对该方案实施后的反馈, 可以总结出以下几点:

(1) 安全方面。

无论是通过理论计算和分析, 还是实践过程中的观察与反馈, 该工艺的安全性符合要求, 支撑体系牢固可靠, 对高空墙体结构物的影响非常小, 不会对永久结构物发生破坏的现象及可能性。

(2) 施工方面。

该高空托架操作平台搭设简便易行, 同时不侵占厂房内部空间, 不影响厂房内部蜗壳的安装和焊接, 既节约土建施工的工期和成本, 又为金结机电安装提前创造了良好的工作空间, 对水电站主厂房整体工程进度的确保做出了巨大贡献。

(3) 材料方面。

该工艺采用了 PVC 高分子模板新材料, 实践证明: 桥机 T 梁混凝土外观质量达到优良级别, 在确保外观质量的前提下, 实现了成本可控、绿色环保的宗旨, 为新材料的实践与推广做出了新的尝试与努力。

作者简介:

宋建威(1986-), 男, 河南周口人, 项目总经理助理, 工程师, 学士, 从事水利水电、公路与铁路等国际工程项目技术与管理工

作;

王建正(1991-), 男, 河北南官人, 项目科长, 助理工程师, 从事水

利水电工程机电安装及金属结构安装技术与管理工

作;

刘艳丽(1990-), 女, 河南开封人, 项目副科长, 助理工程师, 从事

水利水电工程设计与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

西藏开建世界上海拔最高的电网工程

总投资达 162 亿元(人民币,下同)的西藏电网藏中联工程于 4 月 6 日在西藏林芝开工。该工程是世界上海拔最高、海拔跨度最大的高原输变电工程, 建成后将实现青藏联网工程与川藏联网工程互联, 进一步满足西藏中部的电力需求。藏中联工程由西藏藏中和昌都电网联网工程、川藏铁路拉萨至林芝段供电工程组成, 起于西藏昌都市芒康县, 止于山南市桑日县, 跨越西藏三市地十县区, 计划于 2018 年建成投运。藏中联工程地处青藏高原中东部, 工程沿线平均作业海拔超过 4 000 米, 最高塔位东达山海拔 5 295 米, 芒康 500 千伏变电站海拔 4 295 米, 建成后将分别成为世界海拔最高的 500 千伏输电塔位和世界海拔最高的 500 千伏变电站。目前, 占林芝市面积约 70% 的墨脱县、波密县和察隅县尚未纳入西藏主电网覆盖范围, 藏中联工程可实现该 3 县 8 万余人纳入主电网, 从而扩大西藏主电网覆盖区域并为西藏农村电网升级改造提供电源保障。2011 年与 2014 年, 西藏分别建成青藏联网工程与川藏联网工程, 基本解决了西藏中部和东部供电问题。而藏中联工程的建设将成为连接青藏和川藏电网的中枢, 保障未来川藏铁路、滇藏铁路的供电需要。藏中联工程建设指挥部总指挥王抒祥指出, 今年建设藏中联和拉林铁路的配套工程, 将使整个西藏形成和内地连起来的大电网, 既满足西藏经济社会对电力的需求, 也能满足西藏丰富光伏资源、大量水电资源的开发, 具有重要的战略意义。