

预制混凝土模板在老挝南欧江5级水电站 牛腿结构中的设计与应用

谭万开, 李锐, 苟仕文, 郑强

(中国水利水电第十工程局有限公司, 四川 都江堰 611830)

摘要:在水利水电工程中,由于牛腿混凝土结构的特殊体型,施工难度及安全威胁较大。经比选后最终决定采用预制混凝土模板可以使施工更加安全、简便,加快施工进度,节约施工成本。针对老挝南欧江5级水电站坝身进水口段施工情况,介绍了牛腿预制钢筋混凝土模板的设计与应用。

关键词:预制;混凝土模板;牛腿结构;设计;应用;南欧江5级水电站

中图分类号:TV7;TV52

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2017)05-0059-03

1 工程概述

南欧江5级水电站位于老挝人民民主共和国丰沙里省境内,为南欧江规划的7个梯级水电站中的第5级。该工程以发电为主,主要由混凝土重力坝、坝身进水口及坝后式厂房、坝身溢洪道及消力池、冲沙底孔及泄槽等组成。坝顶高程445 m,最大坝高74 m,总装机容量240 MW。

5#~7#进水口坝段高程398~405 m为牛腿混凝土体型结构,宽66 m,坡比为1:1。经各方案综合比较后最终决定采用预制钢筋混凝土模板。

2 预制钢筋混凝土模板的设计

2.1 模板方案

牛腿混凝土施工,其迎水斜面悬挑模板采用预制钢筋混凝土模板,侧端面采用组合钢模板。进水口上游牛腿高度为7 m,根据对预制混凝土模板运输吊装安全、方便、确保混凝土施工质量的考虑,牛腿预制模板采用分三层设计的施工方案。结合进水口坝段廊道的施工,牛腿混凝土确定分四次施工。

2.2 模板结构

根据牛腿结构、预制场地及运输条件等多方面要求,采用三层预制钢筋混凝土模板、牛腿混凝土分四次浇筑成型进行设计。为便于模板精确安装,相邻两层预制混凝土模板采用“L”型槽口连接,在预制模板仓内面槽口周边设置角钢。牛腿模板设计成上、中、下三种型式,每块模板面板标准块宽度均为298 cm,每层模板共22块,模板厚

度为15 cm。下层模板斜长337.5 cm,上端为“L”型槽口;中层模板斜长337.5 cm,上下端均为“L”型槽口;上层模板斜长330 cm,下端为“L”型槽口。上、中、下三层每块预制模板均设置12只吊环(水平向4排,竖直向3列),吊环间排距为90 cm×100 cm。

牛腿预制模板采用内拉承重结构系统,立柱为[18a槽钢,下部与已浇筑混凝土预埋的 $\phi 25$ 插筋焊接,拉条为 $\phi 16$ 圆钢,与立柱焊接并在立柱后设置后拉条。立柱间距与吊环列距相同,均为100 cm,采用 $\phi 25@100$ cm钢筋与其焊接连成整体。模板固定型式见图1。

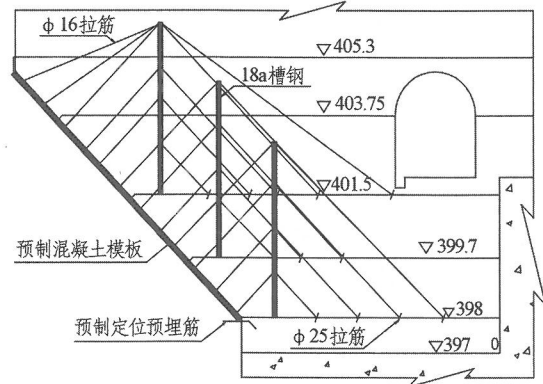


图1 预制模板支撑结构图

预制模板按照钢筋混凝土等跨外悬臂板考虑,经计算:模板采用C20混凝土,设置双层钢筋,保护层厚15 mm,纵向受力筋选用 $\phi 12@200$ mm,分布钢筋与受力筋布置相同。吊环钢筋选用一级 $\phi 18$,与预制模板中下层钢筋焊接牢固。

收稿日期:2017-08-20

2.3 模板的设计与计算

根据模板结构单元体系,拟定沿坝轴线方向为X向,模板宽3m,设3列吊点;沿牛腿斜面方向为Y向,斜长3.3m,设4排吊点;沿竖直方向为Z向,浇筑分层按整张模板高度2.33m考虑。

模板在实际受力过程中X、Y向的受力是不均匀的,若对每个区域单独进行受力计算颇为繁琐,在理论计算时按两个方向最大内力值考虑。

2.3.1 X向模板内力的计算

吊环外悬挑0.5m,吊环排距为1m,每排三个吊点,简化成“两端悬臂的双跨板”,取单元 $0.5 + 1/2 = 1$ (m)宽板计算,板厚0.15m,板长3m,模板竖直高度按最大值2.33m计算。

$$\text{模板自重 } P: P = bh\gamma g \cos\alpha = 1 \times 0.15 \times 2.5 \times 9.8 \times \cos 45^\circ = 2.6 \text{ (kN/m)}$$

$$\text{浇筑层块体混凝土重量 } q: q = bh\gamma g = 1 \times 2.33 \times 2.5 \times 9.8 = 57.09 \text{ (kN/m)}$$

$$\text{两荷载叠加为: } P + q = 2.597 + 57.085 = 59.69 \text{ (kN/m)}$$

式中 b 为计算单元宽度; h 为模板竖直高度; γ 为混凝土容重; g 为重力加速度; α 为模板与水平向夹角; P 为模板自重,kN/m; q 为浇筑层块体混凝土重量,kN/m。其内力情况见图2。

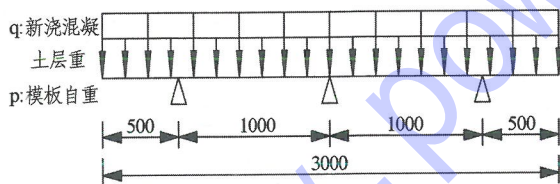


图2 X向内力图

图2 可以看成是在一均布荷载作用下的二跨等跨梁和两端悬臂的二跨等跨梁的叠加,依据《水工钢筋混凝土结构学》,查均布荷载作用下等跨连续板梁计算系数表,计算如下:

$$\text{弯矩: } M = \alpha g_1 l_0^2 + \alpha_1 q_1 l_0^2 = 7.46 \text{ (kN/m)}$$

$$\text{剪力: } V = \beta q_1 l + \beta g_1 l = -37.31 \text{ (kN)}$$

式中 g_1 、 q_1 为单位长度上的永久荷载; q_1 为单位长度上的可变荷载; l_0 为板的计算跨度; l 为板的净跨度; α 、 α_1 和 β 分别为弯矩系数和剪力系数。

根据端弯矩作用下等跨连续板梁计算系数表:

$$\text{弯矩: } M = \alpha' M_A = 0.375 \times 0.5 \times 59.69 \times 0.52 = 2.8 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

$$\begin{aligned} \text{剪力: } V &= \beta' M_A / l_0 = -1.25 \times 7.46 / 1 \\ &= -9.33 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

式中 M 为弯矩; V 为剪力; M_A 为端弯矩; α' 、 β' 分别为弯矩、剪力系数,由《水工钢筋混凝土结构学》附录七查得。

叠加后的最大弯矩及最大剪力:

$$M_{\max} = 7.46 + 2.8 = 10.26 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

$$V_{\max} = -37.31 - 9.33 = -46.64 \text{ (kN)}$$

2.3.2 Y向模板内力计算

吊环外悬挑0.3m,吊环排距为0.9m,每排四个吊点,简化成“两端悬臂的三等跨板”,取单元 $0.3 + 0.9/2 = 0.75$ (m)宽板计算,板厚0.15m,板长3.3m。

$$\begin{aligned} \text{模板自重: } P &= bh\gamma g \cos\alpha = 0.75 \times 0.15 \times 2.5 \\ &\quad \times 9.8 \times \cos 45^\circ \\ &= 1.95 \text{ (kN/m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{混凝土重量: } q &= bh\gamma g = 0.75 \times 2.33 \times \\ &\quad 2.5 \times 9.8 = 42.81 \text{ (kN/m)} \end{aligned}$$

由于浇筑层混凝土在Y方向上受力不均匀,按照最不利的情况,将两荷载叠加为:

$$P + q = 1.95 + 42.81 = 44.76 \text{ (kN/m)}$$

内力情况见图3。

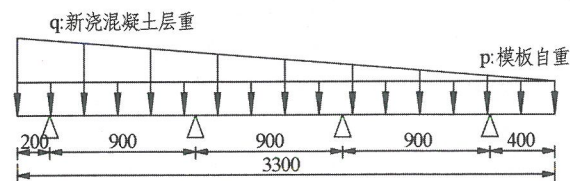


图3 Y向内力图

图3 可以看成是在一均布荷载作用下的三跨等跨梁和两端悬臂部分受均布荷载的三跨等跨梁的叠加。依据《水工钢筋混凝土结构学》,查均布荷载作用下等跨连续板梁计算系数表,计算如下:

$$\text{弯矩: } M = \alpha g_1 l_0^2 + \alpha_1 q_1 l_0^2 = 3.63 \text{ (kN/m)}$$

$$\text{剪力: } V = \beta q_1 l + \beta g_1 l_1 = -24.17 \text{ (kN)}$$

根据端弯矩作用下等跨连续板梁计算系数表:

$$\begin{aligned} \text{弯矩: } M &= \alpha' M_A = 0.6199 \times 0.5 \times 44.76 \times \\ &\quad 0.32 = 1.25 \text{ (kN} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{剪力: } V &= \beta' M_A / l_0 = -1.2667 \times 2.01 / 0.9 \\ &= -2.83 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

由《水工钢筋混凝土结构学》附录七查得; α' 为0.1699、 β' 为-1.2667。

叠加后的最大弯矩及最大剪力:

$$M_{\max} = 3.63 + 1.25 = 4.88 (\text{kN} \cdot \text{m})$$

$$V_{\max} = -24.17 - 2.83 = -27 (\text{kN})$$

2.3.3 配筋计算

通过对 X、Y 方向受力的比较,按最不利荷载情况,即 X 方向受力情况进行配筋计算。

结构安全级别一级的结构构件,结构重要性系数 $\gamma_0 = 1.1$;设计状况持久系数 $\varphi = 1$,则最大弯矩设计值:

$$M = \gamma_0 \varphi M_{\max} = 1.1 \times 1 \times 10.26 \\ = 11.29 (\text{kN} \cdot \text{m})$$

式中 γ_0 为结构重要性系数; φ 为设计状况持久系数; M_{\max} 为叠加矩的最大弯矩。

采用 C20 混凝土,轴心抗压强度设计值 $f_c = 10 \text{ N/mm}^2$;一级钢筋抗拉强度设计值 $f_y = 210 \text{ N/mm}^2$;钢筋混凝土结构系数 $\gamma_d = 1.2$;混凝土保护层厚度 $C = 15 \text{ mm}$, a 取 60 mm ,截面有效高度 $h_0 = 90 \text{ mm}$;矩形截面宽度 $b = 3000 \text{ mm}$ 。

$$\text{截面抵抗系数 } \alpha_s = \frac{\gamma_d M}{f_c b h_0^2} = 1.2 \times 11.29 \times \\ 10^6 / (10 \times 3000 \times 90^2) = 0.06$$

$$\text{相对受压区计算高度 } \xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_s} = \\ 0.07 < \xi_b = 0.614$$

$$\text{钢筋截面面积 } A_s = \frac{f_c \xi b h_0}{f_y} = 10 \times 0.07 \times 3000 \\ \times 90 / 210 = 900 (\text{mm}^2)$$

$$\text{配筋率: } \rho = \frac{A_s}{b h_0} = 900 / (3000 \times 90) = 0.33\% \\ > \rho_{\min} = 0.15\%$$

每 m 板中钢筋截面积为 900 mm^2 ,故每 m 板选用 10 根一级钢筋,间距 200 mm ,双层布置。Y 向分布钢筋与受力钢筋相同布置,选用 $\varphi 12@200$ 双层钢筋。

2.4 模板内拉支撑结构计算

2.4.1 拉杆强度校核

$$\text{混凝土自重(按 } 2.7 \text{ t/m}^3) G_{\text{混}} = \frac{bH}{2} B = 2.25 \\ \times 2.25 / 2 \times 1 \times 2.7 = 6.83 (\text{t})$$

$$\text{模板重 } G_{\text{模}} = HBh = 2.25 \times 1 \times 0.15 \\ = 0.911 (\text{t})$$

$$\text{钢筋重量 } G_{\text{钢筋}} = HB \times 0.4 = 2.25 \times 1 \times 0.4 \\ = 0.9 (\text{t})$$

$$\text{振捣荷载按 } 200 \text{ kg/m}^2 \text{ 计算: } q_1 = HB \times 0.2 = \\ 2.25 \times 1 \times 0.2 = 0.45 (\text{t})$$

$$\text{施工时产生的水平、垂直荷载按 } 600 \text{ kg/m}^2: \\ q_2 = HB \times 0.6 = 2.25 \times 1 \times 0.6 = 1.35 (\text{t})$$

$$\text{单元内的竖向荷载 } Q = 6.83 + 0.911 + 0.9 + \\ 0.45 + 1.35 = 10.44 (\text{t})$$

$$\text{拉杆内力 } F = Q / \sin \alpha + q_1 / \cos \alpha = 10.44 / \\ \sin 45^\circ + 0.45 / \cos 45^\circ = 15.41 (\text{t})$$

式中 H 为牛腿混凝土最大浇筑层高; b 为混凝土浇筑层外挑距离; B 为计算单元宽度; α 为模板与水平向夹角; h 为模板厚度; F 为拉杆内力; Q 为单元内的竖向荷载。

用 $\varphi 16$ 拉条:单根拉杆承受的最大拉力 $\delta_{\max} = 210 \times 3.14 \times 16 \times 16 / 4 = 4.22 (\text{t})$,4 根拉杆承载拉力 $\delta_{\text{总}} = 4.22 \times 4 = 16.88 (\text{t}) > F = 15.41 (\text{t})$

故最终选用 $\varphi 16$ 拉筋。

2.4.2 拉杆强度校核

$$\text{拉杆在竖向对立柱的压力 } P = F \times \sin 45^\circ = \\ 15.41 \times \sin 45^\circ = 10.89 (\text{t})。$$

假设采用槽钢 [12.6 的抗压强度:立柱有效长度 $l = 5 \text{ m}$,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,惯性矩 $I = 391 \text{ cm}^4$;长度系数 $\mu = 2$ 。

$$P_{ij} = \pi^2 EI / (\mu l)^2 = 3.14^2 \times 2.06 \times 10^5 \times 3.91 \\ \times 10^2 / (2 \times 5)^2 = 79.4 (\text{kN}) = 7.94 (\text{t})$$

假设采用槽钢 [14b 的抗压强度:立柱有效长度为 5 m ,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,惯性矩 $I = 609 \text{ cm}^4$;长度系数 $\mu = 2$ 。

$$P_{ij} = \pi^2 EI / (\mu l)^2 = 3.14^2 \times 2.06 \times 10^5 \times 6.09 \\ \times 10^2 / (2 \times 5)^2 = 123 (\text{kN}) = 12.3 (\text{t})$$

$P_{ij} > P$,故选用槽钢 [14b]。

2.4.3 混凝土承载力校核

承载力按受冲切钢筋板计算:

$$F \leq 1.05 f_t \eta U_m h_0$$

式中 f_t 为混凝土轴心抗拉强度,查得 C25 混凝土 $f_t = 1.27 \text{ MPa}$,按 7 d 强度 $1.27 \times 75\% = 0.953 \text{ MPa}$ 计算; η 为局部荷载作用面积形状影响系数,取值 1; U_m 为临界截面周长, $U_m = 0.5 \times 4 = 2$; h_0 为截面有效高度,取 0.127 。

$$F = 1.05 f_t \eta U_m h_0 = 1.05 \times 0.953 \times 1 \times 2 \times 0.127 \\ = 25.42 (\text{t})$$

$F > P$,满足承载力要求。

(下转第 70 页)

左右岸开挖弃渣料直接用于大坝上游围堰填筑方案,极大地缩短了趾板开挖弃渣料的运距,由原来的3 km减少至平均300 m,运输道路直接在开挖范围内修建,宽度也由原来的7 m更改为12 m,从而加快了左右岸趾板边坡的开挖速度。2017年4月20日~5月31日,在上游围堰填筑期间,大坝左右岸趾板开挖完成高程为650~540 m,开挖下降高度达到110 m/月,月开挖工程量达到60万m³/月,满足了大坝开挖在2017年5月开挖至河床的施工进度节点要求。

4.2 提高防洪标准方面

由于大坝开挖施工进度的加快,将开挖弃渣料直接用于上游围堰填筑,提高了围堰填筑强度,使其在短期内将围堰填筑高度增加成为可能,因此,我们将围堰防洪标准从原设计的20 a一遇提高至50 a一遇,大大增加了2017年汛期工程度汛的安全保障,可以在50 a一遇标准全年围堰的保护下进行基坑开挖、趾板浇筑、大坝填筑等施工工作,也降低了下游沿河村庄和下游南俄2水电站由于超标洪水可能导致围堰溃坝的安全风险。

4.3 节约施工成本方面

在节约施工成本方面,项目部综合考虑了大坝趾板边坡开挖弃渣运输距离减小、围堰填筑料

3 牛腿混凝土施工

3.1 模板施工

预制模板严格按设计尺寸制作成型,运输及拼装过程中注意保护,避免模板周边棱角损坏。

模板安装就位前,先行完成立柱排架及后拉条的施工,立柱距混凝土设计结构线水平距离 ≥ 1 m。模板吊装采用布置于大坝上游的MQ600B门机,模板均按与水平面呈45°角进行吊装就位,首层模板置于下层预埋的模板定位筋上,仓内通过花篮螺栓或手动葫芦精调至设计结构线后用拉筋与立柱排架焊接固定。

3.2 混凝土施工

混凝土浇筑采用平层铺筑法,混凝土下料由内向牛腿斜面的顺序,混凝土按0.3~0.5 m层厚施工。为防止牛腿模板变形,应严格控制混凝土上升速度。混凝土振捣过程中严禁触碰拉杆、立柱及模板。浇筑中设专人监护模板,全过程检查模板在浇筑过程中的变形情况,发现问题及时采

运输距离减小、面板堆石坝上游盖重料填筑运输距离减少等三个方面的因素,预估节约施工成本约5 000万元人民币。

5 结语

针对面板堆石坝的特性,该工程综合考虑了大坝边坡开挖弃渣的处置、弃渣场的布置、上游围堰防洪标准、上游盖重填筑重复利用围堰渣料等四个方面的关系,前期将大坝左右岸趾板边坡开挖弃渣直接用于上游围堰填筑,后期将上游围堰拆除弃渣直接用于上游盖重填筑,减少了弃渣运距,提高了大坝边坡的开挖强度及上游围堰防洪度汛标准,在防洪度汛安全、施工进度要求及经济方面均取得了较好的实施效果,保证了南俄3工程面板堆石坝施工进度和2017年防洪度汛安全,也为今后的面板堆石坝施工提供了土石平衡策划方面的实践经验。

参考文献:

- [1] DL/T 5397—2007,水电工程施工组织设计规范[S].
- [2] DL/T 5397—2007,混凝土面板堆石坝设计规范[S].
- [3] DL/T 5128—2009,混凝土面板堆石坝施工规范[S].

作者简介:

李锐(1977-),男,四川盐边人,项目经理,高级工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

取处理措施,以保证模板及支撑的牢固、浇筑结构体型的准确。

4 结语

建筑物在具备吊装的条件,对于特殊结构的混凝土施工采用大块混凝土预制模板,模板适时提前制作成型,拼装简便易行,从而加快施工进度、节省人工及材料占用费等,并能大幅度降低安全隐患。

参考文献:

- [1] 河海大学,大连理工大学,西安理工大学,清华大学,合编.水工钢筋混凝土结构学教材(第三版)[M].北京:中国水利水电出版社,1996.

作者简介:

谭万开(1978-),男,四川中江人,工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工作;

李锐(1977-)男,四川盐边人,项目经理,高级工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工作;

苟仕文(1968-),男,四川都江堰人,工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工作;

郑强(1976-),男,重庆荣昌人,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)