

一种浅槽粘贴钢板条加固薄壁闸墩的设计方法

徐 鹏, 张亚川, 吴佩兰, 欧珠光

(武汉大学, 武汉 430072)

摘要: 探索介绍一种浅槽粘贴钢板条加固薄壁闸墩的设计方法。通过裂缝检测及工程力学验算发现近尾洲水电厂泄洪闸薄壁闸墩存在安全隐患, 为此提出了浅槽粘贴钢板条加固处理方案, 并采用有限元仿真对加固方案进行优化设计。由于《混凝土结构加固设计规范》GB 50367-2013 未收录过类似方法, 因而其设计与施工经验可为类似的加固工程提供新的思路, 为水工建筑工程加固处理提供参考。

关键词: 浅槽; 钢板条; 加固; 闸墩; 裂缝; 工程力学; 有限元仿真;

中图分类号: TU 746 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-1021-04

Design method of thin wall sluice pier reinforced with a shallow groove paste steel bar

XU Peng¹, ZHANG Ya chuan¹, WU Pei lan¹, OU Zhu guang¹

(Institute of Civil engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This paper introduces the design method to reinforce the thin wall sluice pier by pasting the steel bar to the shallow groove. Through the crack detection and engineering mechanics calculation, a safety hazard was found in the thin wall pier of sluice gate in the Jinweizhou hydropower plant. The reinforcement scheme of shallow groove paste steel bar was proposed to solve the problem, and finite element simulation was performed for the optimal design of reinforcement scheme. No similar approach has been included in The Reinforced Concrete Structure Design Code GB 50367-2013, therefore the proposed design method can provide new ideas and reference for the reinforcement of hydraulic structure engineering projects.

Key words: shallow groove; steel bar; reinforcement; sluice pier; cracks; engineering mechanics; finite element simulation

随着环氧树脂黏结剂的问世, 外部粘贴钢板加固法出现^[1], 浅槽粘贴钢板条加固法随之被提出来, 这种加固法是用环氧树脂等黏结剂把钢板条牢固地粘贴在被加固构件的表面凹槽里, 达到补强和加固的目的, 与粘贴整块钢板法比较, 具有粘贴牢固、结构美观、材料节省等优点。对于水工建筑结构中的薄壁闸墩, 主要病害是出现大面积裂缝, 针对裂缝发生的状况, 经过工程检测分析和工程力学验算, 若其存在较严重的安全问题, 则必须寻找治理对策, 进行加固处理。针对实际工程, 结合以往建筑物补强加固技术, 研究了近尾洲水电厂泄洪闸薄壁闸墩的加固。

1 工程加固依据

1.1 工程检测分析

近尾洲水利水电枢纽工程位于湘江干流中游衡阳市境内。2012年进行了“泄洪闸薄壁闸墩裂缝对闸坝安全稳定影响研究”项目, 通过现场检测发现该工程的泄洪闸薄壁闸墩中有裂缝352条, 多数裂缝为铅直状、垂直于闸墩平面, 少

量为斜状裂缝, 倾角 $30^\circ \sim 45^\circ$ ^[2], 现场裂缝照片及闸墩裂缝分布素描图见图1、图2。大量裂缝位于闸墩牛腿附近扇形配筋区域。有的裂缝已造成钢筋外露, 加快钢筋腐蚀, 给闸墩的安全运行埋下隐患。还有一些贯穿裂缝对闸坝的安全运行产生更大的危害^[3]。



图1 现场裂缝照片

Fig. 1 Photo of cracks

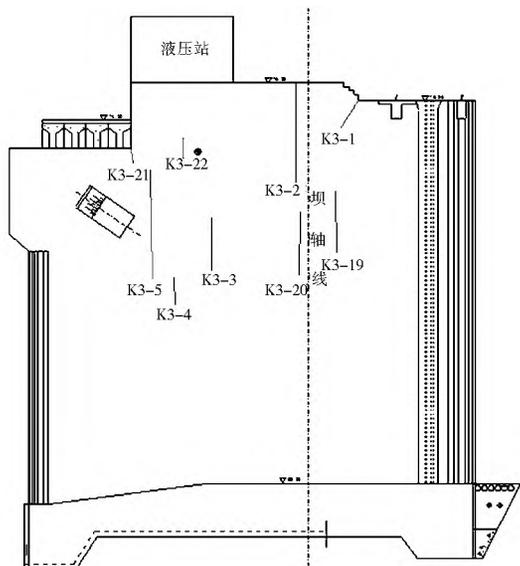


图 2 闸墩裂缝分布素描图

Fig. 2 Schematic diagram of pier crack distribution

1.2 力学验算分析

依据《水工混凝土结构设计规范》DL/T 5057-2009^[4]对闸墩承载力采用工程力学方法进行复核验算,包括闸墩局部受拉钢筋截面面积验算和受拉区裂缝控制验算。各种工况验算的公式及其计算结果如下。

弧门支座附近闸墩局部受拉钢筋截面面积符合下列规定。

(1) 闸墩受两侧弧门支座推力作用时。

$$F \leq \frac{1}{r_d} f_y \sum_{i=1}^n A_{s_i} \cos \theta_i \quad (1)$$

式中: F 为闸墩一侧弧门支座推力的设计值; r_d 为钢筋混凝土结构的结构系数; f_y 为局部受拉钢筋的强度设计值; A_{s_i} 为闸墩一侧局部受拉有效范围内的第 i 根局部受拉钢筋的截

面面积; θ_i 为第 i 根局部受拉钢筋与弧门推力方向的夹角。

(2) 闸墩受一侧弧门支座推力作用时。

$$F \leq \frac{1}{r_d} \left(\frac{B'_0 - \alpha_s}{e_0 + 0.5B - \alpha_s} \right) f_y \sum_{i=1}^n A_{s_i} \cos \theta_i \quad (2)$$

式中: F 、 r_d 、 A_{s_i} 、 f_y 、 θ_i 含义同式(1), B'_0 为受拉边局部受拉钢筋中心至闸墩另一边的距离; B 为闸墩厚度; e_0 为弧门支座推力对闸墩厚度中心线的偏心距。 α_s : 纵向钢筋合力点至截面近边缘的距离。

弧门支座附近闸墩局部受拉区的裂缝控制应符合下列规定。

(1) 闸墩受两侧弧门支座推力作用时。

$$F_k \leq 0.7 f_{tk} b B \quad (3)$$

式中: F_k 为由标准值计算的闸墩一侧弧门支座推力值; f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值; b 为弧门支座宽度; B 为闸墩厚度。

(2) 闸墩受一侧弧门支座推力作用时。

$$F_k \leq \frac{0.55 f_{tk} b B}{\frac{e_0}{B} + 0.20} \quad (4)$$

式中: F_k 、 f_{tk} 、 b 、 B 含义同式(3), e_0 为弧门支座推力对闸墩厚度中心线的偏心距。

由现场检测数据通过理论力学计算可知作用在平底闸段闸门上的总水压力为 10 260 kN, 沿闸门合力作用线方向上的力为 1 078 445 kN, 则平底闸段启门瞬间侧向推力: $10260/2 + 10780.445 = 6208.445$ kN。统计平底闸段闸墩扇形钢筋 $\sum_{i=1}^n A_{s_i} \cos \theta_i$ 为 19 714 mm², 中墩及边墩计算数据如下: $f_y = 300$ N/mm², $B'_0 = 2 100$ mm, $B = 2 200$ mm, $\alpha_s = 100$ mm, $e_0 = 1 700$ mm, $r_d = 1.2$, 由公式(1)、公式(2)计算, 闸墩平底闸段钢筋截面面积复核计算结果见表 1; 由公式(3)、公式(4)计算, 受拉区裂缝控制安全复核结果见表 2。

表 1 平底闸段扇形钢筋截面面积结果

Tab. 1 Cross sectional area of the fan-shaped bar of the flat sluice

设计工况水位 /m	部位	F/kN	$\frac{1}{r_d} f_y \sum_{i=1}^n A_{s_i} \cos \theta_i / kN$	$\frac{1}{r_d} \left(\frac{B'_0 - \alpha_s}{e_0 + 0.5B - \alpha_s} \right) f_y \sum_{i=1}^n A_{s_i} \cos \theta_i / kN$	结论
66.0	中墩	6 208.45	4 928.5	3 650.74	不满足要求(DL/T 5057-2009)
	边墩			3 650.74	不满足要求(DL/T 5057-2009)

表 2 底闸段闸墩受拉区裂缝控制安全复核结果

Tab. 2 Crack control safety check results in the tension zone of the flat sluice pier

设计工况水位 /m	部位	F/kN	$0.7 f_{tk} b B / kN$	$\frac{0.55 f_{tk} b B}{\frac{e_0}{B} + 0.20} / kN$	结论
66.0	中墩	6 208.45	3 129	2 528	不满足要求(DL/T 5057-2009)
	边墩			2 528	不满足要求(DL/T 5057-2009)

由表 1、表 2 表明闸墩平底闸段扇形钢筋截面面积和受拉区裂缝控制两者均不满足现行规范 DL/T 5057-2009 要求。

1.3 加固依据

经过现场工程检测分析及工程力学方法验算, 对裂缝成因分析如下: (1) 混凝土收缩(包括化学收缩和自身收缩)是引起闸墩顶部与弧门液压站房楼梯的结合部位斜裂缝的主要原因。(2) 混凝土收缩外加设计荷载下的受拉是造成闸墩

中部、支铰及牛腿附近垂直向裂缝的主要原因, 而环境温度变化形成的温度应力对裂缝也有一定的影响。

本工程存在问题: 现行钢筋配筋面积不足、闸墩受拉区裂缝失控。危害性: 裂缝的出现将造成钢筋的外露, 加快钢筋锈蚀, 随着钢筋不断的锈蚀、锈蚀物膨胀, 使混凝土开裂脱落失去共同受力作用, 在温度效应的作用下钢筋承受裂缝收缩时所产生的附加应力, 使钢筋受损, 因而给闸墩的安全运行埋下

隐患。应对闸墩进行补强加固,保证结构的安全运行。

2 加固措施

2.1 加固设计

针对闸墩出现的问题,有以下加固设计思路。

(1) 闸墩裂缝破坏结构整体性,须采用封缝胶封堵裂缝使之构成一个密闭性空腔,然后采用灌缝胶注满裂缝达到饱满、密实状态。裂缝两侧混凝土通过胶体重重新黏结成一体,恢复混凝土结构的强度及刚度^[5]。(2) 对于扇形区域钢筋不足的混凝土闸墩,采用在浅槽里粘钢板条加固,提高闸墩配筋率。为了达到等效增加钢筋面积的效果,沿牛腿垂直于闸墩方向在牛腿根部表面四周黏贴钢板条,其边缘紧贴闸墩面;在垂直于之前所贴钢板条的平面即在闸墩表面沿牛腿粘贴钢板条,再将两块钢板条焊接在一起,且在两块钢板条间适当布置加劲板,采用焊接形式,并适当加螺栓锚固;在中墩及边墩局部受拉区的扇形局部受拉钢筋处的混凝土外表面沿扇形发散的方向凿出浅槽并粘贴钢板条,将扇形发散钢板条焊接在之前粘贴与闸墩上的钢板条上,并在扇形钢板条上加螺栓锚固,见图 1。(3) 在处于下游部分的闸墩表面水平方向粘贴碳纤维布,在闸门下游方向闸墩表面及闸墩端部布置压条锚固碳纤维布,在两块压条之间根据实际情况适当再布置几条压条^[6],从而将墩边裂缝控制在规范范围内。

钢板条分布在钢筋受拉的方向,经裂缝灌浆及粘贴碳纤维布处理,钢筋不再外露且钢板条与闸墩钢筋混凝土共同工作,恢复了闸墩的整体性。但粘贴多少块钢板条才能符合安全与经济的原则,可通过有限元仿真来优化加固方案。

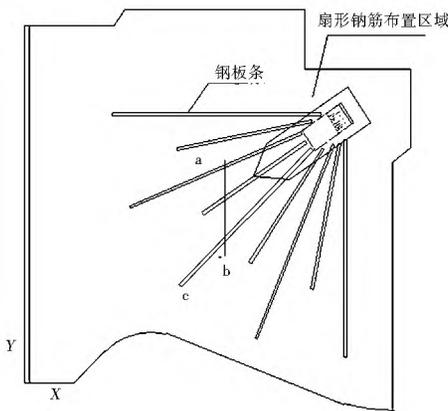


图 3 溢流坝闸墩浅槽粘贴钢板条加固示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the reinforcement of shallow groove paste steel bar

2.2 粘钢优化

为了使采用的钢板条既能达到配筋要求又不至于材料浪费,根据以往理论计算及工程经验,钢板条须均匀对称分布于闸墩扇形配筋区域外表面,并结合前述配筋验算初步设想采用 13、15、17、19 块钢板条加固方案^[7]。为进一步的确定最优方案,采用有限元仿真法计算,包括加固前及采用 13、15、17、19 块钢板条加固时闸墩典型部位(见图 3 中 a、b、c 点)应力变化情况。有限元仿真计算中材料性能、单元的使用、与钢筋的组合、本构关系情况如下:

(1) 混凝土弹性模量 $E=24\ 000\ \text{MPa}$,泊松比 $\mu=0.2$,单轴抗拉强度 $f_t=3\ 112.5$,裂缝张开传递系数 0.35,裂缝闭合传递系数 1。钢筋为双线性随动硬化材料,弹性模量 $E=2E_5\ \text{MPa}$,泊松比 $\mu=0.25$,屈服应力 $\sigma_{0.2}=360\ \text{MPa}$,硬化斜率为 20 000,配筋率为 0.01,沿长度方向和宽度方向放置钢筋。建模时不考虑混凝土的压碎^[8]。

(2) 混凝土闸墩采用空间三维实体单元形式 SOLID65 单元^[9];钢筋采用 LINK8 单元来模拟;钢板条采用 SOLID45 单元,此单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力钢化、大变形、大应变等功能。

(3) 混凝土与钢筋的组合采用分离式模型:把钢筋和混凝土作为不同的单元来处理,各自被划分为足够小的单元,两者的刚度矩阵分开求解。钢筋长细比过大,不考虑横向抗剪强度,将钢筋作为线单元处理^[10]。

(4) 混凝土本构关系是基于现有的连续介质力学的本构理论,并结合混凝土的力学特性,调整本构关系中各种所需的材料参数。

结合闸墩数据资料,其中平底闸墩厚 2 200 mm,高 21 000 mm,宽 2 500 mm,所粘贴钢板条规格为长 100 mm,宽 10 mm,仿真计算后将四种方案的三个典型部位主应力值汇总见表 3。

表 3 闸墩典型部位应力变化

Tab. 3 Variation of stress in the typical position of pier

应力点 钢板条数	a 点应力 /MPa		b 点应力 /MPa		c 点应力 /MPa	
	未考虑 裂缝	考虑 裂缝	未考虑 裂缝	考虑 裂缝	未考虑 裂缝	考虑 裂缝
未黏贴钢板条	0.056	0.0652	0.077	0.086	0.055	0.064
黏贴 13 块钢板条	0.046	0.056	0.067	0.075	0.045	0.055
黏贴 15 块钢板条	0.043	0.052	0.064	0.071	0.040	0.051
黏贴 17 块钢板条	0.039	0.047	0.059	0.067	0.036	0.046
黏贴 19 块钢板条	0.034	0.041	0.054	0.063	0.032	0.040

闸墩表面粘贴钢板条处理后,钢板条与闸墩混凝土一起协同受力,闸墩的整体性能得到恢复,并提高了闸墩的强度、刚度及稳定性。在优化计算中可知:当粘贴 13 块钢板条时,闸墩典型部位应力可以减小 18% 左右,粘贴 19 块钢板条时闸墩典型部位应力可以减小 40% 左右;随着粘贴钢板条数的增加闸墩应力能够进一步的减小,但应力减小幅度随着钢板条数的增加逐步减低。考虑到安全与经济的原则,采用 15 块钢板条对薄壁闸墩进行加固处理为优化后的最好方案。

2.3 加固具体措施

采用 15 块钢板条浅槽粘贴法对薄壁闸墩进行加固处理,具体步骤如下。

(1) 构件表面处理。¹ 对粘合面进行打磨,除去 1~2 mm 厚表层,并用无油压缩空气吹除粉粒。^o 在闸墩局部受拉区较新的混凝土表面沿扇形发散的方向凿出浅槽,浅槽断面为 110(宽)×30(深),用压缩空气除去粉尘,冲洗干净,待完全干燥后用脱脂棉沾丙酮擦拭表面^[11]。

(2) 裂缝灌浆封闭,竖缝自下而上,平缝自一端向另一端。使处理部位胶体饱满、密实^[12]。

- (3) 钢板条表面用喷砂打磨,并用脱脂棉沾丙酮擦拭干净。
- (4) 放下闸墩检修门对被加固构件进行卸荷。
- (5) 现场配制黏结剂。
- (6) 涂胶黏钢板条。涂抹黏结剂,厚度 1~3 mm,黏好后敲打如无空洞声,表示已粘贴密实,否则应剥下钢板条,补胶重新粘贴。
- (7) 钢板条粘贴好后立即用螺帽夹紧、固定,并适当加压,以使胶液刚从钢板边缝挤出为度^[13]。
- (8) 粘贴碳纤维布。将底胶均匀涂抹于闸墩混凝土表面,厚度不超过 0.4 mm,用整平胶找平,最后涂抹粘胶料,贴

碳纤维布^[14]。

2.4 加固结果

根据《水工混凝土结构设计规范》DL/T 5057-2009,按工程力学方法对采用 15 块钢板条加固后的闸墩(钢板条按等效钢筋面积考虑,总钢筋面积 $\sum_{i=1}^n A_{si} \cos \theta_i$ 为 38 888 mm²)进行复核算,计算结果(见表 4)表明粘贴了钢板条以后满足了规范配筋要求。闸墩裂缝经过处理后,恢复了闸墩的强度、刚度、稳定性,也满足了规范裂缝控制要求。正常运行后,再进行现场检测,检测结果表明其与有限元仿真计算应力值基本一致。说明该加固设计方案是正确可信的。

表 4 底闸闸墩受拉区裂缝控制安全复核结果

Tab. 4 Crack control safety check results in the tension zone of the flat sluice pier

设计工况水位 /m	部位	F/kN	$\frac{1}{r_d} f_y \sum_{i=1}^n A_{si} \cos \theta_i / \text{kN}$	$\frac{1}{r_d} (\frac{B'_0 - \alpha_s}{e_{0+} + 0.5B - \alpha_s}) f_y \sum_{i=1}^n A_{si} \cos \theta_i / \text{kN}$	结论
66.0	中墩	6 208.45	9 726	7 201.6	满足要求(DL/T 5057-2009)
	边墩			7 201.6	满足要求(DL/T 5057-2009)

3 结论

- (1) 通过浅槽粘贴钢板条法加固处理,有效解决了近尾洲水电厂泄洪闸薄壁闸墩混凝土开裂和配筋不足的问题,使病险工程变成了健康工程。
- (2) 与粘贴整块钢板法比较,浅槽粘贴钢板条法具有粘贴牢固、结构美观、材料节省、实施简便等优点。对类似薄壁闸墩的加固工程提供了新的思路,可为类似水利工程的加固提供参考。

参考文献(References):

- [1] 张继文,腾锦光,吕志涛.粘钢板加固集中荷载下混凝土双向板的性能研究[J].土木工程学报,2002,35(2):20-25. (ZHANG Ji wen, TENG Jin guang, LV Zhi tao. The behavior of two way reinforced concrete slabs externally strengthened with steel plate to subject patch load[J]. China Civil Engineering Journal. 2002, 35(2): 20-25. (in Chinese))
- [2] 刘礼华,欧珠光.近尾洲水电厂泄洪闸薄壁闸墩加固及裂缝处理技术研究[R].2013. (LIU Li hua, OU Zhu guang. Jinwei zhou hydropower sluice gate thin walled pier reinforcement and crack treatment technology research[R]. 2013. (in Chinese))
- [3] 江怀雁.钢筋混凝土闸墩裂缝扩展性分析[J].大坝与安全,2013(3):20-22. (JIANG Hua yan. Analysis on extension of cracks on the reinforced concrete piers[J]. Large Dam & Safety, 2013(3): 20-22. (in Chinese))
- [4] DL/T 5057-2009,水工混凝土结构设计规范[S]. (DL/T 5057-2009, Hydraulic concrete structure design code[S]. (in Chinese))
- [5] 姚正平,牛汉德.石泉大坝 24#~27#坝段帷幕化学灌浆处理[J].大坝与安全,2003(5):42-43. (YAO Zheng pin, NIU Han de. Chemical grouting treatment for BL24 to BL27 of Shiquan dam[J]. Large Dam & Safety, 2003(5): 42-43. (in Chinese))
- [6] 姜新佩,党永华,丁声荣,等.碳纤维布加固闸墩承载力计算研究[J].水利水电技术,2006,37(8):91-93. (JIANG Xin pei, DANG Yong hua, DING Sheng rong et al. Study on calculation of bearing capacity of pier strengthened by CFRP[J]. Water Resources and

- Hydropower Engineering, 2006, 37(8):91-93. (in Chinese))
- [7] 李贵生,鲁琦,杨敏慧.刘家峡水电站泄水建筑物补强加固措施研究及应用[J].大坝与安全,2002(2):44-46. (LI Gui sheng, LU Qi, YANG Min hui. Study on the rehabilitation of discharge structures in Liujiaxia hydropower station[J]. Large Dam & Safety, 2002(2): 44-46. (in Chinese))
- [8] 陈明祥,黄本忠,常晓林,等.陆水试验水利枢纽主坝闸墩加固[J].大坝与安全,2004(6):54-57. (CHENG Ming xiang, HUANG Ben zhong, CHANG Xiao lin, et al. Reinforcement of dam piers in Lushui hydro project[J]. Large Dam & Safety, 2004(6): 54-57. (in Chinese))
- [9] 陆新征,江见鲸.用 ANSYS Solid65 单元分析混凝土组合构件复杂应力[J].建筑结构,2003,33(6):22-24. (LU Xin zheng, JIANG Jian jing. With complex stress analysis of composite components ANSYS Solid65 unit[J]. Building Structure, 2003, 33(6): 22-24. (in Chinese))
- [10] 王勖成,邵敏.有限单元法基本原理与数值方法[M].北京:清华大学出版社,1997. (WANG Xu cheng, SHAO Min. The basic principle of the finite element method and numerical method[M]. Beijing: Tsinghua university press, 1997. (in Chinese))
- [11] 刘尚玲.综合防渗技术在黄冈水库防渗加固工程中的应用[J].大坝与安全,2007(1):57-60. (LIU Shang ling. Integrated anti seepage technique application in huanggang reservoir reinforcement engineering[J]. Large Dam & Safety, 2007(1): 57-60. (in Chinese))
- [12] 江桂荣,郭文泉.洪门水电站溢洪道闸墩裂缝处理[J].大坝与安全,2007(4):56-59. (JIANG Gui rong, GUO Wen quan. Treatment for cracks on piers of the spillway at Hongmen hydropower station[J]. Large Dam & Safety, 2007(4): 56-59. (in Chinese))
- [13] 黄华平.水工混凝土缺陷检测和处理[M].中国水利水电出版社,1997. (HUANG Hua ping. Hydraulic concrete defect detection and processing[M]. China water conservancy and hydropower press, 1997. (in Chinese))
- [14] 刘小明.碳纤维复合材料(CFRP)加固修复混凝土结构新技术在水利工程中的应用[J].大坝与安全,2003(1):49-52. (LIU Xiao ming. Application of CFRP into rehabilitation of hydropower projects[J]. Large Dam & Safety, 2003(1): 49-52. (in Chinese))