

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.10.060

嘉陵江三桥双壁钢围堰结构受力分析

蔡金生¹,王佳林¹,罗利¹,罗强²

(1.中国五冶集团有限公司,四川 成都 610063; 2.东南大学材料科学与工程学院,江苏 南京 210096)

摘要: 依托蓬安嘉陵江三桥工程,利用 MIDAS Civil 有限元仿真软件,建立双壁钢围堰的有限元计算模型,考虑结构自重、静水压力、流水压力、施工荷载,分析双壁钢围堰最不利工况下的力学行为响应。结果表明:纵向加劲肋和水平斜撑是双壁钢围堰的受力薄弱部位,优化纵向加劲肋和水平斜撑的布置对保持结构整体性、避免局部屈曲意义重大;增加夹壁混凝土的高度对提高钢围堰的整体受力和减少应力集中具有重要作用。优化设计后经计算,双壁钢围堰的强度、刚度、(整体、局部、抗浮)稳定性满足要求。

关键词: 双壁钢围堰;有限元法;稳定性;结构分析

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)10-0267-04

0 引言

双壁钢围堰以其刚度大、强度高、施工简便的优点,越来越多地成为大型深水桥梁基础施工临时挡水结构的首选^[1,2]。然而,与围堰相关的桥梁建设安全事故时有发生,带来较大的生命财产损失。为保障钢围堰使用安全,掌握其力学行为十分必要。华含仁^[3]依托万州长江公路三桥项目,进行了哑铃型双壁钢围堰结构力学性能分析与应力监测研究;牟军、文洁平等^[4]对洛溪大桥拓宽工程双壁钢围堰受力性能进行探讨;樊士广^[5]对含内支撑圆形双壁钢围堰进行了力学试验研究;王秀丽等^[6]对韩江特大桥的钢围堰进行了有限元模拟与变形性能分析,秦大燕、罗小斌等^[7]提出了双壁钢围堰优化设计方法。经过国内外研究现状分析,发现目前双壁钢围堰的结构分析模型多以平面简化法为主,不能很好地体现整体性。本文依托蓬安嘉陵江三桥工程,对双壁钢围堰的力学行为进行分析,为相关工程提供参考。

1 工程概况

1.1 工程简介

蓬安嘉陵江三桥全长 1239 m,主桥采用(126+220+126)m 的连续刚构桥,桥宽 41 m。设计最高水位 337.00 m,桥下水流流速 2.72 m/s。下部结构 18#墩位于嘉陵江主河道内,为双薄壁圆端矩形桥墩,基

础为桩基接承台基础,桩基为直径 3 m 的钻孔灌注桩,每个主墩 15 根桩基,承台平面为 20 m × 27.5 m 矩形,厚 5 m。采用双壁钢围堰施工。

1.2 围堰结构

嘉陵江三桥双壁钢围堰由内外壁板、刃脚斜板、竖箱、纵肋、环板、水平斜撑、内撑钢管、刃脚水平斜撑、刃脚斜肋、封底混凝土、夹壁混凝土、桩基混凝土等组成,平面上呈圆角矩形,四角为半径 $R=1.5$ m 的圆弧,总长 31.7 m、总宽 24.2 m,共 10 个竖箱,竖箱长边布置 3 个,短边布置 2 个,如图 1 所示。围堰总高 23.01 m,夹壁厚度(内外壁板之间的间距)2.0 m,围堰封底厚度 3.5 m,围堰夹壁混凝土浇筑和承台顶高程齐平,如图 2 所示。

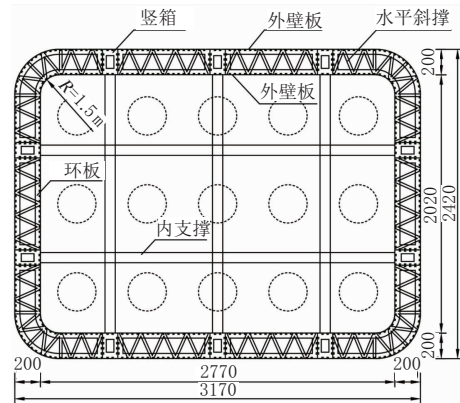


图 1 双壁钢围堰平面图(单位:cm)

双壁钢围堰均采用 Q345 钢材制作,其中壁板、刃脚斜板、竖箱壁板、竖箱环板分别采用 8、16、16 mm 的钢板,竖肋和水平斜撑分别采用 L 80 × 8 以及 2 L 100 × 10 的角钢。

收稿日期: 2023-10-26

作者简介: 蔡金生(1985—),男,本科,高级工程师,从事土木建筑及公路桥梁技术方面的研究工作。

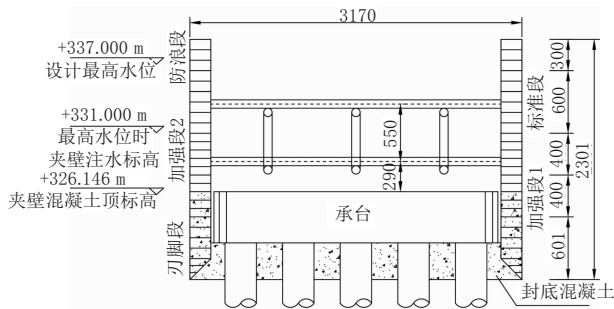


图2 双壁钢围堰立面图(单位:cm)

1.3 施工工况

双壁钢围堰施工前,先在桥梁墩位处施打多根桩基钢护筒形成一个整体式的固定平台,用于桩基成孔和首段钢围堰拼装与下水^[3]。双壁钢围堰主要包括下列6个施工工况。

(1)制作与运输:钢围堰在工厂分块分节制作完成后运输至施工现场,验收合格后现场组拼成段。

(2)首段拼装及下水:首段钢围堰在固定平台上进行组拼,拼装完成后利用钢管桩上架设的三角梁起吊钢围堰直至首段入水,入水自浮后进行刃脚混凝土浇筑。

(3)后续节段拼装:以首节段作为浮式平台拼接后续节段,通过计算注水保证下一阶段安装完成后干弦高度约1.5 m,完成围堰所有节段拼装。

(4)注水下沉:围堰拼装完成后进行注水下沉,下沉着床前确认河床面基本水平后继续加水着床。

(5)夹壁混凝土浇筑:围堰着床后进行夹壁混凝土水下浇筑,使围堰继续着床并配合水下吸泥调平。

(6)封底混凝土浇筑:拆除钢护筒及固定平台,对围堰周边进行封堵,浇筑封底混凝土。

(7)堰内抽水:封底混凝土强度达到设计要求后,进行堰内抽水^[8,9]。抽水完成后,当江面水位达到设计高水位时,围堰结构处于最不利工况,此时围堰内外水位差最大,为 $(337.000-326.146)\text{m}=10.854\text{m}$ 。

2 双壁钢围堰力学模型

2.1 计算模型

利用MIDAS Civil软件建立计算模型,如图3所示,内外壁板、刃脚斜板、环板竖箱壁板、竖箱环板采用板单元模拟(单元数量:49854),壁板纵肋、水平斜撑、刃脚水平斜撑、刃脚斜肋、竖箱纵肋、内撑钢管采用梁单元模拟(单元数量:34455),封底混凝土、夹壁混凝土采用实体单元模拟(单元数量:46313)。封底混凝土底部设一般支撑,内撑钢管与内壁板刚性连接。

各材料的弹性模量、密度、泊松比见表1所列。

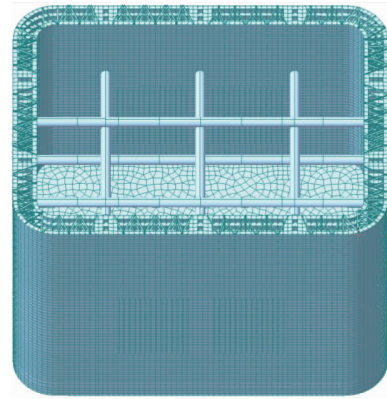


图3 双壁钢围堰计算模型

表1 材料参数

材料	弹性模量 /GPa	密度 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比
Q345	206	7 850	0.3
C30	30	2 549	0.2

2.2 计算荷载

双壁钢围堰实施过程中受到的荷载包括围堰结构和混凝土的自重,以及静水压力、流水压力等水平荷载,施工荷载。

(1)自重

自重荷载根据添加的材料特性与结构几何参数,由MIDAS Civil软件自动计算。

(2)静水压力

静水压力沿围堰周边均匀作用,根据水深呈三角形分布,计算公式如式(1):

$$p = \gamma h \quad (1)$$

式中: γ 为水的重力密度,取 10 kN/m^3 ; h 为水头高度,设计最不利工况下取 19.35 m ,自围堰底算起。

(3)流水压力

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015),作用在围堰上的流水压力标准值按式(2)计算:

$$F_w = KA \frac{\gamma V^2}{2g} \quad (2)$$

式中: F_w 为流水压力, kN ; γ 为水的重力密度,取 10 kN/m^3 ; V 为流水速度,取 2.72 m/s ; A 为阻水面积, m^2 ; g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2 ; K 为桥墩形状系数,矩形取1.3。

(4)施工机具

围堰顶施工机具荷载按 2 kN/m^2 计算。

3 双壁钢围堰强度与受力特征分析

采用容许应力法验算双壁钢围堰受力。根据《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)^[10],自重、静水压力的荷载组合系数取值1.3,流水压力、施

工机具的荷载组合系数取值 1.5。经有限元模拟分析, 得到钢围堰各构件应力响应和变形响应结果见表 2。

表 2 双壁钢围堰各部件应力与变形响应

构件	应力响应最大值 /MPa					变形响应最大值 /mm				
	刃脚段	加强段 1	加强段 2	标准段	防浪段	刃脚段	加强段 1	加强段 2	标准段	防浪段
外壁板	19.0	53.6	56.9	42.1	20.4	1.10	6.98	7.61	6.89	4.87
内壁板	28.6	66.4	66.4	55.0	29.1	1.08	6.83	7.18	6.42	4.28
环板	15.0	67.1	70.3	55.0	29.1	1.10	6.98	7.28	6.58	4.28
竖向加劲肋	22.5	296.5	183.6	153.7	83.4	1.10	3.55	6.58	6.89	4.28
水平斜撑	5.8	152.8	189.5	173.2	94.1	0.35	1.09	7.13	6.13	4.28
刃脚斜板	3.2	—	—	—	—	0.35	—	—	—	—
竖箱壁板	27.4	67.3	63.2	48.7	7.1	1.10	3.26	4.44	4.40	4.28
竖箱环板	15.0	34.2	67.4	48.7	7.1	1.10	3.26	4.34	4.32	4.28
竖箱竖肋	21.6	42.2	25.2	14.9	3.55	1.10	3.25	4.44	4.40	4.28

图 4、图 5 为双壁钢围堰的模拟计算模型,可以看出,双壁钢围堰在内外水位差最大^[9](10.854 m)的最不利工况下的应力最大值^[10-11]为 296.5 MPa,小于 Q345 钢材的设计强度值 310 MPa,结构强度满足要求。双壁钢围堰应力最大值出现的部位为加强段 1 短边夹壁混凝土顶面位置附近的纵肋处,加强段 1、加强段 2^[12-13]以及标准段的的竖肋和水平斜撑应力较大,在 150 MPa 左右;其余梁单元构件和全部板应力较小,在 100 MPa 以内^[14]。纵向加劲肋和水平斜撑的最大应力值为其余部件的 4~8 倍,表明该部件是双壁钢围堰的受力薄弱部位,对双壁钢围堰的整体性和力学性能传递意义重大。

土的高度对提高钢围堰的整体受力和减少应力集中具有重要作用。应力分布较明显的另一位置为内支撑与壁板连接处,该位置存在明显的应力集中现象,应对该连接位置进行局部加强。

4 双壁钢围堰变形分析

由表 2 可知,双壁钢围堰最大变形值为 7.61 mm,按竖向悬臂构件模型计,钢围堰允许最大变形值为 $L/500=23\ 010\text{ mm}/500=46.02\text{ mm}$,满足刚度要求。由图 6 可以看出,钢围堰最大变形部位为直接承受水压力的外壁板,最大变形位置为加强段 1 两个钢管内支撑中部,距离夹壁混凝土顶部的距离 2.0 m 左右。

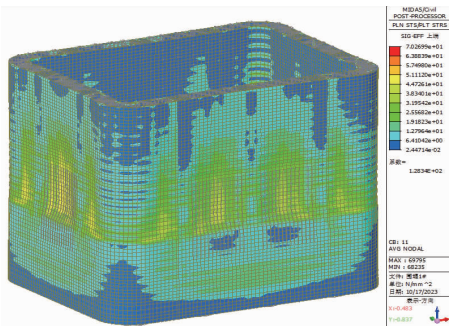


图 4 钢围堰壁板应力分布图(单位:MPa)

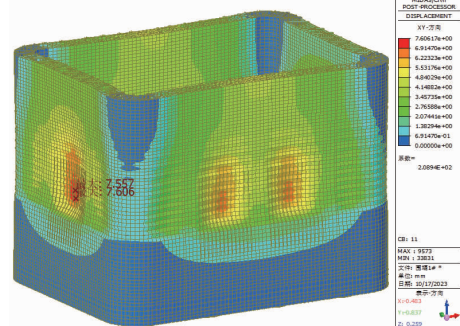


图 6 钢围堰变形图(单位:mm)

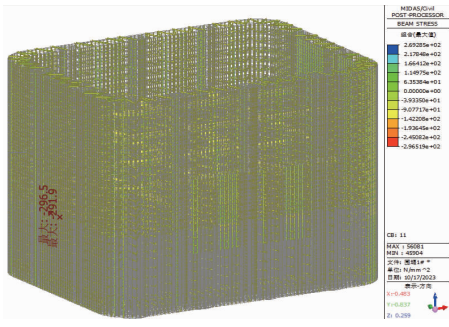


图 5 钢围堰最大应力位置(单位:MPa)

双壁钢围堰最大应力响应出现在加强段 1 短边夹壁混凝土顶面位置附近的纵肋处,表明夹壁混凝土

5 双壁钢围堰稳定性分析

5.1 整体稳定性

钢围堰整体稳定性以结构自重为不变荷载,静水压力、流水压力、施工机具荷载为可变荷载,进行一阶模态下的屈曲计算,得到整体失稳的临界荷载系数为 12.8,即表示将本文工况荷载扩大 12.8 倍后才会发生整体失稳,稳定性满足要求。

5.2 钢管内撑稳定性

内撑钢管按照压弯构件进行稳定性验算,根据

《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[11] 的规定,弯矩作用在对称平面内的实腹式压弯构件,其稳定性验算如式(3):

$$\frac{N}{\varphi_x A f} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x \cdot W_{lx} (1 - 0.8 N_{Ex})} \quad (3)$$

弯矩作用平面外的稳定性计算公式如式(4):

$$\frac{N}{\varphi_y A f} + \eta \frac{\beta_{ly} M_x}{\varphi_b W_{ly} f} \leq 1.0 \quad (4)$$

式中:各参数的含义与取值详见《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)的 8.2.1。

纵、横向 $\phi 820 \times 10$ 内撑钢管净截面面积 $A = 0.025 \text{ m}^2$, 截面塑性发展系数 $\gamma_x = \gamma_y = 1.15$, 绕主轴 x, y 的净截面模量 $W_{mx} = W_{my} = 0.004 \text{ m}^3$, 截面惯性矩 $I_x = I_y = 2.01 \times 10^{-3} \text{ m}^4$, 截面回转半径 $i_x = i_y = 0.283 \text{ m}$ 。

横向内支撑轴力 $N = -1 \text{ 272.2 kN}$, 最大弯矩值 $M_x = 73.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 长细比 $\lambda_x = \lambda_y = 78.29$, 弯矩平面内稳定系数 $\varphi_x = \varphi_y = 0.692$, 等效弯矩系数 $\beta_{mx} = \beta_{lx} = 1.0$, 参数 $N_{Ex} = 3.02 \times 10^5 \text{ kN}$, 带入式(3)、(4)获得取值 86.2 MPa 和 83.7 MPa, 均小于结构应力容许值 $[\sigma] = 310 \text{ MPa}$, 稳定性满足要求。

竖向内支撑轴力 $N = -2 \text{ 066.3 kN}$, 最大弯矩值 $M_x = 254.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 长细比 $\lambda_x = \lambda_y = 24.02$, 弯矩平面内稳定系数 $\varphi_x = \varphi_y = 0.953$, 等效弯矩系数 $\beta_{mx} = \beta_{lx} = 1.0$, 参数 $N_{Ex} = 3.20 \times 10^5 \text{ kN}$, 带入式(3)、(4)获得取值 131.0 MPa 和 122.3 MPa, 均小于结构应力容许值 $[\sigma] = 310 \text{ MPa}$, 稳定性满足要求。

5.3 水平斜撑稳定性验算

水平斜撑按照轴心受压杆件进行稳定性验算, 根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[11] 中 7.2.1 的规定按式(5)计算:

$$N / \varphi A f \leq 1.0 \quad (5)$$

水平斜撑 $2 \perp 100 \times 10$ 最大内力 -141.8 kN , 截面面积 $3.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, 截面惯性矩 $I_x = 3.52 \times 10^{-6} \text{ m}^4$, $I_y = 9.29 \times 10^{-6} \text{ m}^4$, 计算长度 $l_{0x} = 1.77 \text{ m}$, 回转半径 $i_x = 0.03 \text{ m}$ 、 $i_y = 0.05 \text{ m}$, 长细比 $\lambda_x = 58.57$ 、 $\lambda_y = 36.05 \text{ m}$, 弯矩稳定系数 $\varphi = 0.809$, 带入式(5)得平面稳定应力值为 45.5, 小于结构应力容许值 $[\sigma] = 310 \text{ MPa}$, 即不会发生失稳, 稳定性验算满足要求。

5.4 抗浮稳定性验算

双壁钢围堰内外水位差最大(10.584 m)情况下, 所受浮力最大。围堰抗浮稳定性计算公式如式(6):

$$(G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + F') / F \geq 1.0 \quad (6)$$

式中: G_1 为钢围堰自重, 取 11 196.94 kN; G_2 为封底混凝土自重, 取 38 197.49 kN; G_3 为夹壁混凝土自重, 取 41 707.44 kN; G_4 为夹壁注水自重(含竖箱内注水), 取 9 642.33 kN; F' 为护筒阻力, $F' = \tau S = 0.12 \times 435 \text{ 204} = 52 \text{ 224.48 kN}$ (τ 为摩阻力系数, 为护筒与封底接触面积); 带入式(6)得围堰整体抗浮安全系数为 1.21, 满足抗浮性能要求。

6 结语

采用 MIDAS Civil 软件对蓬安嘉陵江三桥双壁钢围堰进行有限元, 得出如下结论。

(1) 经计算, 钢围堰加强段 1 短边夹壁混凝土顶面位置附近的纵肋应力最大, 为 296.5 MPa; 加强段 1、加强段 2 以及标准段的的竖肋和水平斜撑应力较大, 最大应力 189.5 MPa; 其余梁单元构件和全部板应力较小, 在 100 MPa 以内。建议对围堰短边夹壁混凝土顶部附近进行局部加强处理, 并保证钢结构施工焊接的质量。

(2) 1# 墩钢围堰的刚度最大位置为围堰短边夹壁混凝土顶面 2 m 附近, 最大刚度为 7.61 mm。

(3) 钢管内撑稳定性、水平斜撑稳定性以及钢围堰整体稳定性验算均满足要求。

(4) 围堰整体的抗浮安全系数为 1.21, 围堰的抗浮验算满足要求。

参考文献:

- [1] 罗利, 王佳林, 罗强. 砂卵石河床锁扣钢管桩围堰设计施工研究[J]. 科技和产业, 2023, 23(11): 249-253.
- [2] 罗利. 锁扣钢管桩围堰施工监测分析——以嘉陵江三桥为例[J]. 科技和产业, 2023, 23(4): 206-212.
- [3] 华含仁. 双壁钢围堰结构力学行为分析与应力监测[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [4] 牟军, 文洁平. 洛溪大桥拓宽工程双壁钢围堰结构受力分析[J]. 公路交通技术, 2023, 39(4): 112-119.
- [5] 樊士广. 钢圆筒围堰变形及应力试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [6] 王秀丽, 舒丽红. 韩江特大桥双壁钢围堰结构有限元分析[J]. 铁道建筑, 2011(7): 14-16.
- [7] 秦大燕, 罗小斌. 双壁钢围堰结构优化设计[J]. 桥隧工程, 2016(7): 12-16.
- [8] 陈佳佳. 深水双壁钢围堰施工阶段受力分析[J]. 建设科技, 2023(10): 107-109.
- [9] 张守陆. 北辰特大桥双壁钢围堰施工过程结构力学特性数值分析[J]. 国防交通工程与技术, 2022, 20(5): 38-42.
- [10] GB 50068—2018, 建筑结构可靠性设计统一标准[S].
- [11] GB 50017—2017, 钢结构设计标准[S].