

黄河上游超大型双壁钢围堰结构受力分析*

王达¹, 严伟飞², 刘旺¹, 杨涛², 郭智刚²

(1.长沙理工大学, 湖南 长沙 410114; 2.浙江省大成建设集团有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要:黄河上游滩涂地质条件复杂, 随机分布孤石、大漂石及板块结硬, 对大型双壁钢围堰的施工形成巨大挑战。文中以宁夏中卫南站黄河大桥 17[#] 主墩承台双壁钢围堰结构为研究对象, 结合双壁钢围堰结构特点和施工工艺, 采用有限元程序 ANSYS/Workbench 对主墩承台围堰进行结构分析, 并通过监控实测值验证理论分析结果。结果表明, 封底砼达到设计强度, 围堰内抽水准备安装第 1 层内支撑时为最不利工况, 变形和应力均达到最大, 围堰施工过程中应严格控制抽水水位; 实测值与理论计算值基本一致, 有限元模型模拟较合理; 围堰结构应力整体较小, 但刚度突变和构件连接处易发生应力集中, 导致局部应力较大。

关键词:桥梁; 双壁钢围堰; 受力分析; 应力; 变形

中图分类号: U443.16

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)04-0135-05

1 工程概况

宁夏中卫南站黄河大桥全长 1.409 km, 主桥采用(100+130+40) m 中承式异形梁拱组合体系, 是连接机场大道与高铁站的控制性工程。主桥 17[#] 墩处于黄河主河道内, 其承台为主桥施工的关键性工程。17[#] 主墩结构为 V 腿刚构下接整体式承台, 单个 V 腿尺寸为 4 m(顺桥向)×5 m(横桥向), V 腿底部平面尺寸为 8 m(顺桥向)×5 m(横桥向), 承台平面尺寸为 14.4 m(顺桥向)×43.2 m(横桥向), 厚 4.8 m; 基础为 27 根直径 2 m 钻孔灌注桩。承台采用双壁钢围堰施工。

参考多个钢围堰及封底砼受力分析实例, 采用有限元程序 ANSYS/Workbench 对 17[#] 主墩承台围堰进行结构受力分析, 并与实测值对比, 验证理论分析结果, 从而有效指导实际施工。

2 钢围堰结构形式与施工工艺

2.1 结构形式

双壁钢围堰同样采用矩形形式, 高度 18.7 m, 顺桥向宽度 18.0 m, 横桥向宽度 46.6 m。围堰沿高度方向分为 3 节依次拼装下水, 3 节高度分别为 7.6、7.0、4.1 m(见图 1、图 2)。钢围堰由内外壁板、隔舱板、竖向加劲肋、钢管内支撑、水平环板和水平横撑组成, 还包括封底砼和隔舱砼。

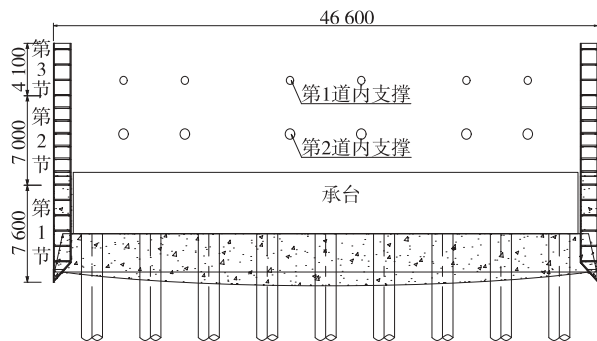


图 1 钢围堰立面图(单位:mm)

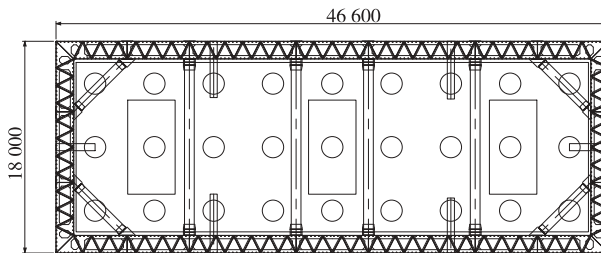


图 2 钢围堰平面图(单位:mm)

钢围堰所用钢材均为 Q235B, 内、外壁板采用 6 mm 厚钢板。隔舱板采用非等间距布置, 共设置 20 道, 间距最小为 5.2 m、最大为 9.0 m。隔舱板与内、外壁板焊接形成隔舱。竖向加劲肋布置在内、外壁板上, 间距均为 330 mm, 均采用 $\angle 63 \text{ mm} \times 63 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 等边角钢, 沿围堰高度方向对内、外壁板和隔舱板进行加劲。钢围堰结构沿围堰高度方向设置 2 层内支撑, 第 1 层内支撑距离围堰顶部 2.9 m, 采

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878072)

用 $\phi 630\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 钢管;第2层内支撑距离围堰顶部7.1 m,采用 $\phi 820\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 钢管。每层内支撑共设置4道顺桥向水平直杆支撑和4道水平斜杆支撑。钢围堰结构共设16层环板和水平横撑,水平横撑与环板和内、外壁板焊接。环板宽度有220和280 mm 2种,中间7~12层环板宽度为280 mm,其余环板宽度为220 mm。隔舱砼采用C25砼,填充高度为6.7 m。封底砼采用C30砼,厚度为3 m。

2.2 施工工艺

双壁钢围堰结构施工工艺流程为:搭设钢套箱拼装平台→拼装底节钢套箱→安装吊放系统→下沉底节钢套箱→拼装接高第2、3节钢套箱→开挖下沉→清基封堵→水下封底→安装内支撑→承台施工。

3 钢围堰受力分析

3.1 计算荷载与工况

3.1.1 计算荷载

钢围堰受力情况复杂,根据文献[8]对荷载进行简化计算。考虑的荷载主要有:

(1) 围堰结构自重。有限元程序自动计算。

(2) 土侧压力 q_1 。按主动土压力计算,填土高度10.1 m,内摩擦角 30° ,计算得土侧压力为 58.3 kN/m^2 。

(3) 静水压力。围堰外侧静水压力 q_2 ,最大入水深度16.6 m,计算得静水压力为 166 kN/m^2 ;隔舱内静水压力 q_3 ,注水高度5 m,静水压力为 50 kN/m^2 。

(4) 流水压力 q_4 。设计水流速度取施工期较大值 3.0 m/s ,计算得流水压力为 5.96 kN/m^2 。

(5) 等效静阵风荷载 q_5 。计算得顺桥向静风荷载为 5.7 kN/m^2 ,横桥向静风荷载为 4.6 kN/m^2 。

3.1.2 荷载组合

该钢围堰采用极限状态法计算,钢材和砼材料承载力取强度设计值,钢材抗压、抗拉及抗弯强度设计值为 215 MPa ,抗剪强度设计值为 125 MPa 。钢材弹性模量取 $2.06\times 10^5\text{ MPa}$,泊松比为0.3;砼弹性模量取 $3.00\times 10^4\text{ MPa}$,泊松比为0.2。围堰自重、土侧压力和静水压力作用分项系数取1.2,流水压力和风荷载作用分项系数取1.4,材料抗力分项系数取1.0。

3.1.3 分析工况

根据施工工艺流程,分析得到4个较为关键的

计算工况:工况1为围堰下沉到位;工况2为封底砼达到强度要求,围堰内抽水至第1层内支撑以下0.5 m,准备安装第1层内支撑;工况3为围堰内抽水至第2层内支撑以下0.5 m,准备安装第2层内支撑;工况4为围堰内抽水完成,内外水位差达到最大。各工况下荷载受力情况见图3。

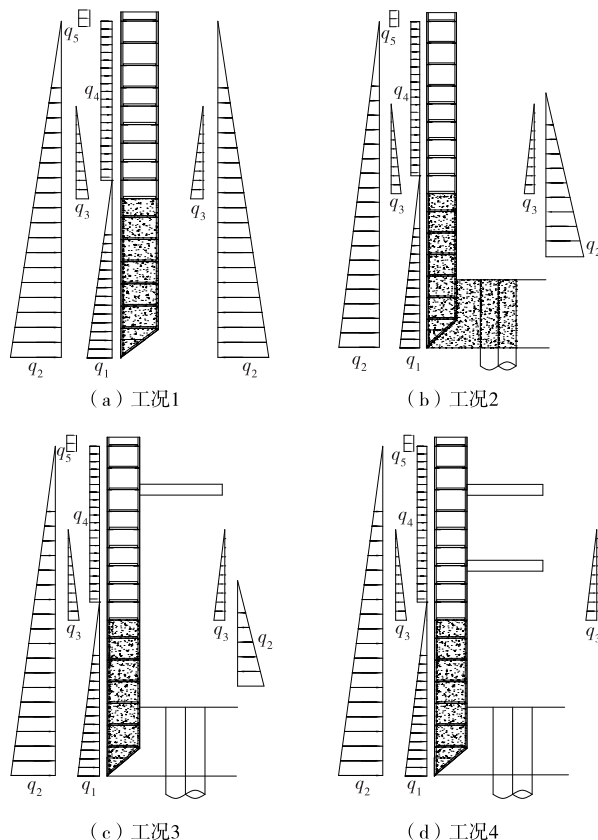


图3 各工况下荷载分布

3.2 有限元模型

双壁钢围堰结构形式复杂,构件种类繁多,根据围堰结构特点,有限元模拟时需进行结构简化。钢围堰构件之间的连接均进行了局部加厚处理,结构形式较复杂,有限元模型中将其简化为节点耦合连接,如此得到的分析结果更保守。

根据构件受力特点,内外壁板、隔舱板、竖向加劲肋、钢管内支撑和水平环板均采用壳单元Shell181模拟,水平横撑采用杆单元Link180模拟,砼采用实体单元Solid186模拟,围堰底部采用固结约束,各单元间通过节点耦合约束连接。有限元模型见图4。

由于封底砼与围堰内壁接触范围内变形较大,为提高有限元模型计算效率,将封底砼的支撑作用模拟为边界条件,封底砼与围堰内壁底部3 m接触

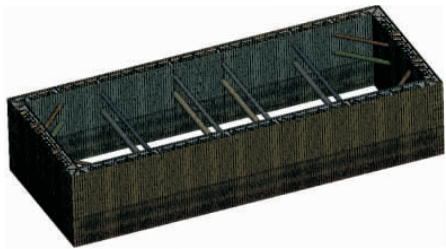


图 4 钢围堰有限元模型

范围内固结约束(见表 1)。

表 1 有限元模型边界设置

工况号	边界条件
1	仅围堰底部固结约束
2	围堰底部及内壁板底部 3 m
3	范围内固结约束
4	

3.3 计算分析结果

经有限元计算分析,得到各工况下构件变形和应力,限于篇幅,仅列出最不利工况即工况 2 下变形和应力云图(见 5~10),各工况下变形和应力最不利值见表 2。

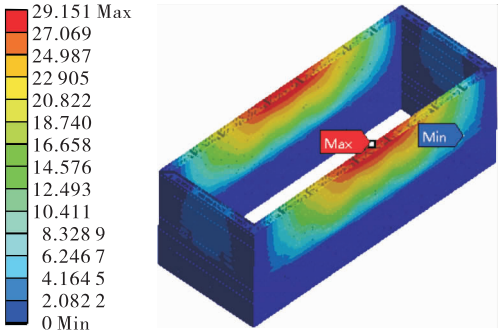


图 5 工况 2 下整体变形(单位:mm)

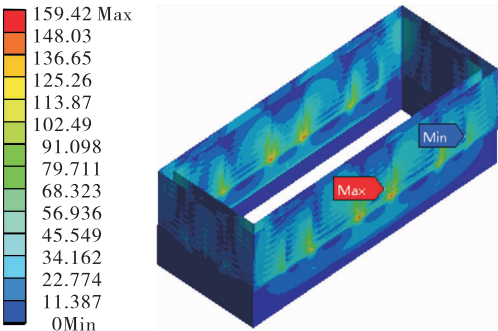


图 6 工况 2 下内外壁板应力(单位:MPa)

由表 2 可知:1) 围堰结构整体最大变形为 29 mm,小于容许值 $L/400 = 116$ mm;最大应力为 194.77 MPa,理论分析的最不利值均小于材料强度设计值,结构强度和刚度均满足要求。2) 钢管内支

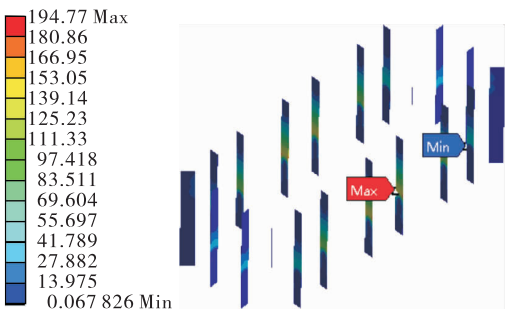


图 7 工况 2 下隔舱板应力(单位:MPa)

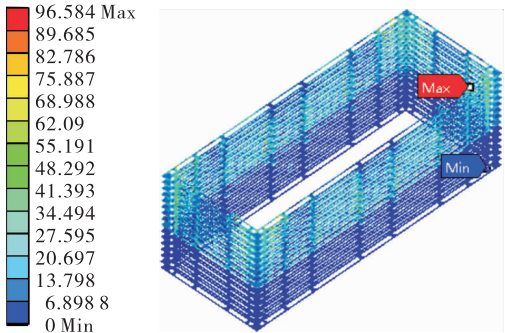


图 8 工况 2 下水水平环板应力(单位:MPa)

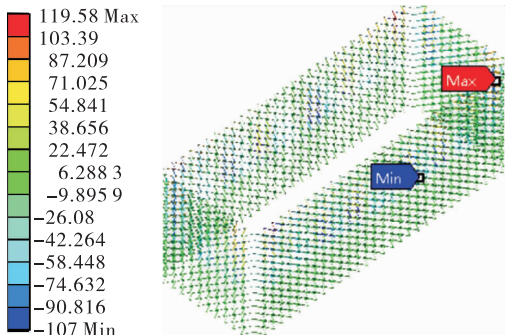


图 9 工况 2 下夹壁水平横撑应力(单位:MPa)

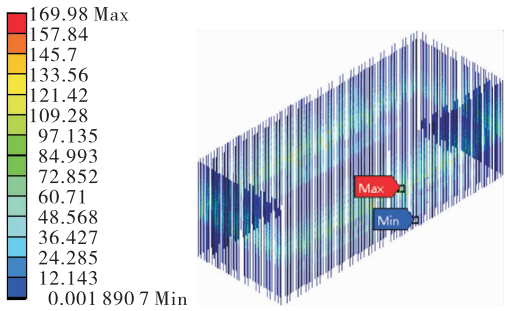


图 10 工况 2 下竖向加劲肋应力(单位:MPa)

撑受力情况为工况 3 最不利,最大应力为 143.24 MPa,根据文献[7]计算得稳定系数为 0.967,材料容许应力为 215 MPa。内支撑压杆稳定临界力 $N = \varphi A[\sigma] = 4\,084$ kN,钢管内支撑最大轴力 $F = 2\,802$ kN,小于受压失稳临界值,稳定性满足要求。

表 2 各工况下变形和应力最不利值

工况号	整体最大 变形/mm	最大应力/MPa					
		内外壁板	隔舱板	水平环板	水平横撑	竖肋	内支撑
1	3	26.75	13.58	49.18	8.15	104.11	—
2	29	159.42	194.77	96.58	119.58	169.98	—
3	11	52.70	115.94	125.99	123.58	156.80	143.24
4	9	46.70	84.78	143.48	124.51	140.13	108.21

注：“—”表示内支撑未安装。

3.4 实测应力结果对比

为保证围堰施工期间结构安全,在围堰内外壁板 and 内支撑等主要构件上布置应力传感器(见图

11、图 12),根据应力实测结果验证理论结果的正确性。实测结果与理论计算值对比见图 13~16。

由图13~16可知:仅个别测点的实测结果与理

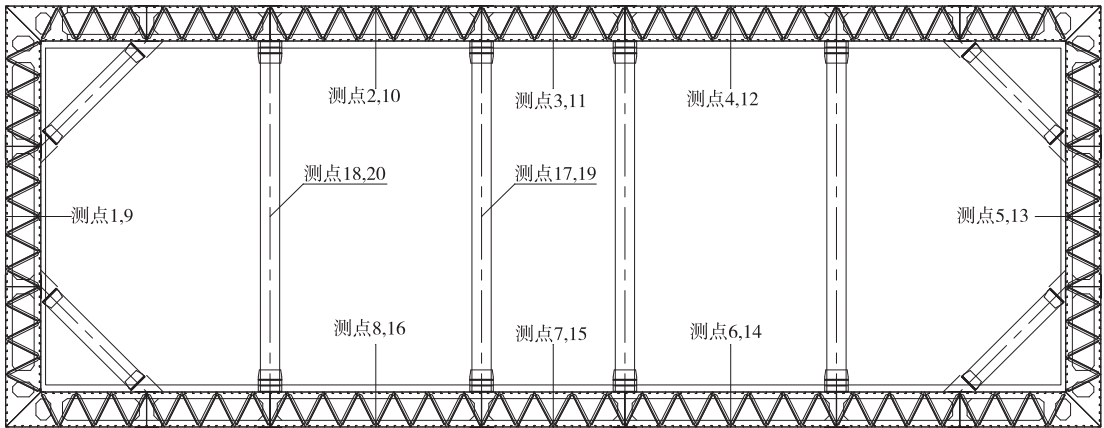


图 11 钢围堰测点布置平面图

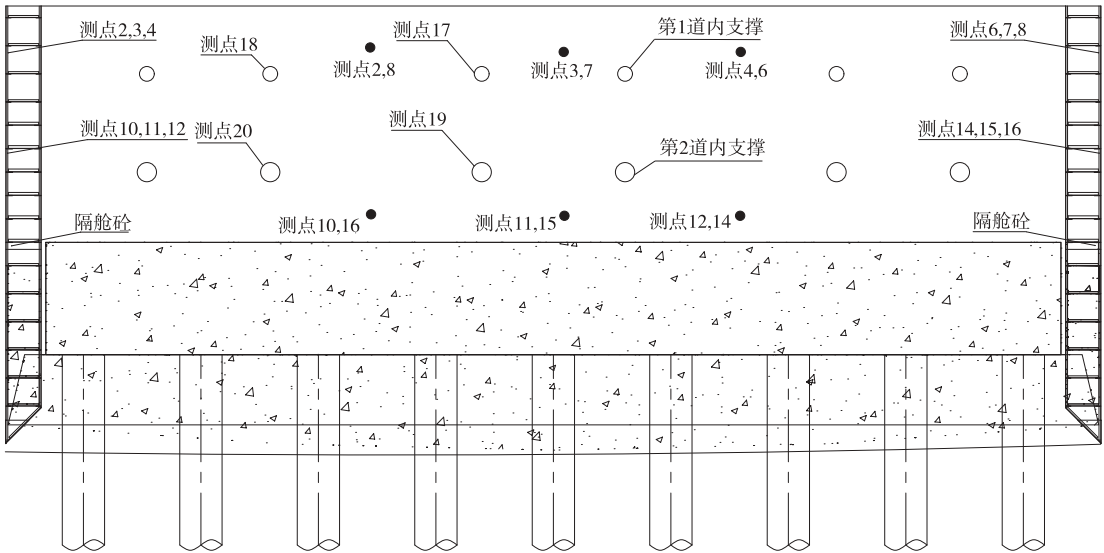


图 12 钢围堰测点布置立面图

论计算值误差较大,主要原因是施工影响导致传感器受损。整体实测应力与理论计算值基本一致,理论分析结果对实际施工具有指导意义。

4 封底砣受力分析

封底砣厚度 3 m,材料为 C30 砣。对封底砣建

立局部分析模型,采用实体单元模拟,封底砣与围堰内壁和钢护筒之间的黏结作用采用固结约束边界条件。有限元模型见图 17,分析结果见图 18~19。

封底砣承受的荷载主要有砣自重、浮力(依据规范计算)、砣与围堰和钢护筒之间的黏结力(参考相关文献,取较不利经验值)。由图18、图19可知:封

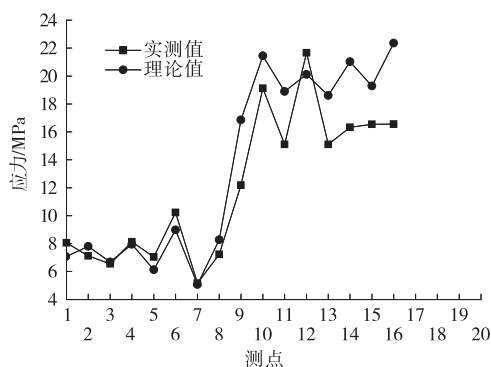


图 13 工况 1 下应力实测结果与理论计算值对比

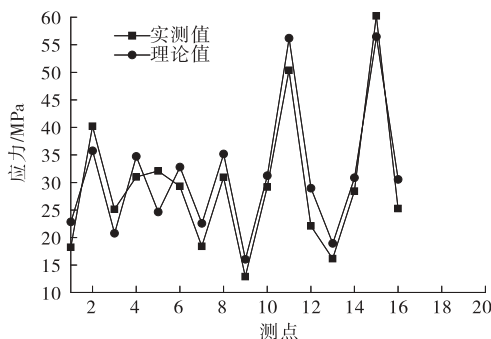


图 14 工况 2 下应力实测结果与理论计算值对比

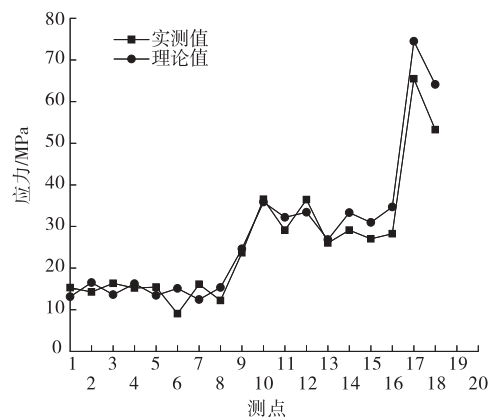


图 15 工况 3 下应力实测结果与理论计算值对比

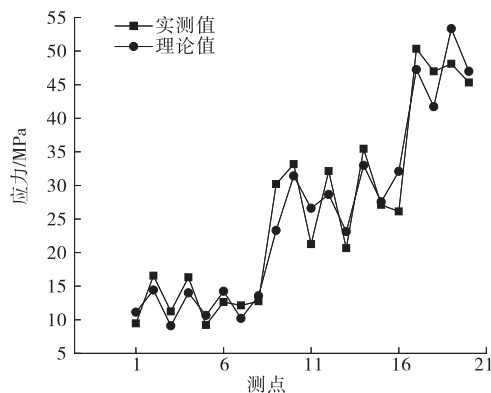


图 16 工况 4 下应力实测结果与理论计算值对比



图 17 封底砿有限元模型

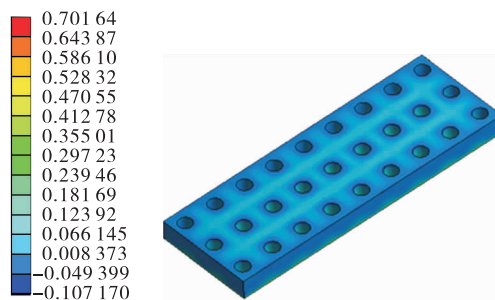


图 18 封底砿第一主应力(单位:MPa)

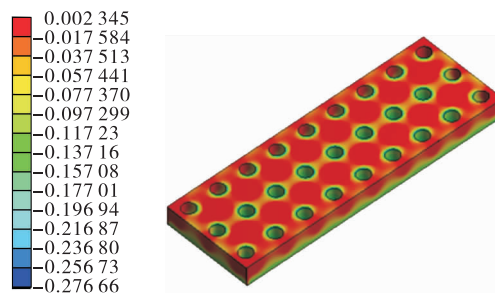


图 19 封底砿第三主应力(单位:MPa)

底砿最大拉应力为 0.702 MPa,最大压应力为 0.277 MPa,最大拉、压应力分别小于抗拉设计强度 1.39 MPa 和抗压设计强度 13.8 MPa,具有较大安全储备。实际施工中将封底砿优化至 2.5 m,最大拉应力为 0.986 MPa,最大压应力为 0.734 MPa,有效缩短了施工周期,带来了良好的经济效益。

5 结论

通过对中卫南站黄河大桥主墩承台双壁钢围堰结构的受力分析,得到以下结论:

(1) 围堰内抽水至第 1 层内支撑以下 0.5 m,准备安装第 1 层内支撑为结构受力最不利情况,应严格控制抽水水位;应力实测值与理论计算值的变化趋势一致,整体误差较小,且实测值往往小于理论计算值,表明理论计算结果偏安全,可指导实际施工。

(2) 围堰各构件平均应力均较小,最大应力主

(下转第 145 页)

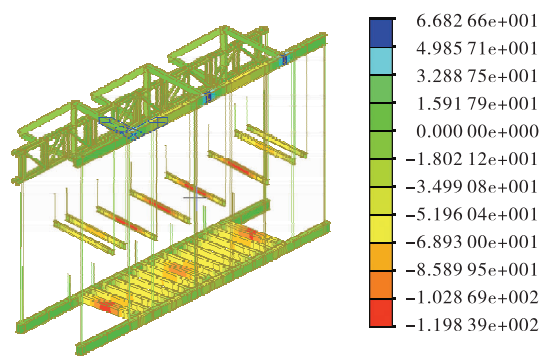


图 19 优化后工况 2 下挂篮整体应力云图(单位:MPa)

由图 18、图 9 可知:优化后挂篮整体最大位移出现在中腹板下底篮纵梁端头部位,最大应力出现在内导梁中间位置,其值分别为 11.55 mm、119.84 MPa,均满足规范要求。

5 结论

菱形挂篮在悬臂施工中具有良好的受力性能,且施工进度快、安全系数高。通过有限元软件对江西吉安赣江大桥危桥改造工程中新桥建设所采用的宽幅挂篮进行局部和整体分析验算,根据其受力特点进行优化,得出在最不利荷载工况下,优化后挂篮整体最大位移出现在中腹板下底篮纵梁端头部位,最大应力出现在内导梁中间位置,其值分别为 11.55

mm、119.84 MPa,均满足规范要求。通过优化设计,降低了挂篮的整体自重荷载,将矩形吊带更换成高强度螺纹钢,使施工更方便简洁,提高了施工效率和施工安全。

参考文献:

- [1] 卓海金,胡文学,段跃华.菱形挂篮与三角斜拉式挂篮施工应用对比分析[J].西部交通科技,2019(11):69—73.
- [2] 赵锐.跨海大桥悬臂浇筑施工菱形挂篮施工力学特性与施工技术[J].水利水电技术,2021,52(3):1—10.
- [3] 周翔海,杜娟.汉江特大桥超宽超重牵索挂篮设计与施工关键技术[C]//中国土木工程学会.2017(第六届)国际桥梁与隧道技术大会论文集.北京:中国土木工程学会,2017:86—90.
- [4] 李辉.红跃双线连续梁桥挂篮设计与线形监控[D].石家庄:石家庄铁道大学,2017.
- [5] 刘琼华.大跨度现浇悬臂挂篮法施工技术[J].智能城市,2020,6(17):119—120.
- [6] 蒙雪宁.连续刚构桥悬臂施工菱形挂篮施工技术研究[J].企业科技与发展,2020(5):125—126.
- [7] 李长坤,魏玲利.大跨度宽幅连续刚构桥挂篮设计与优化[J].内蒙古公路与运输,2019(6):31—34.

收稿日期:2021-01-22

(上接第 139 页)

要出现在构件连接处,引起应力集中现象。隔舱板的受力情况最为不利,尤其在隔舱顶面位置,刚度突变对应力结果影响较大。

(3) 封底砦的最大拉应力、最大压应力均小于设计强度,满足强度设计要求。依据理论计算对封底砦进行优化设计,可为施工创造良好的经济效益。

参考文献:

- [1] 赫宏伟.黄河机场特大桥基础钢板桩围堰水下封底混凝土设计及施工[J].中外公路,2019,39(1):121—125.
- [2] 付宗运.汉江水域特大型桥梁双壁钢围堰施工结构安全设计[J].施工技术,2019,48(增刊1):1145—1149.
- [3] 李荣.双壁钢围堰支撑体系优化设计研究[J].中外公路,2018,38(1):187—191.
- [4] 张益多,周亚运,张国云,等.大型桥梁承台双壁钢围堰施工三维有限元分析[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2016,30(5):508—512.
- [5] 陈俊生,曹洪,莫海鸿,等.复杂构造双壁钢围堰三维有

限元分析[J].公路交通科技,2012,29(8):71—77.

- [6] 杨美良,陈丹,夏桂云,等.湘江特大桥双壁钢套箱围堰受力分析及优化处理[J].桥梁建设,2012,42(4):39—44.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [8] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [9] 温涛.双壁钢围堰封底混凝土与钢护筒间粘结力取值模型试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.
- [10] 曾振海.深水基础钢围堰施工关键技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2012.
- [11] 赵君杰.深水双壁钢围堰参数敏感性分析及优化设计[D].西安:长安大学,2020.
- [12] 朱亮.大变幅水位双壁钢围堰力学行为分析及过程监测[D].重庆:重庆交通大学,2019.

收稿日期:2020-09-08