

宽幅菱形挂篮施工受力分析及设计优化

明德江¹, 殷新锋²

(1.四川路桥华东建设有限责任公司, 四川 成都 610200; 2.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:以吉安赣江大桥危桥改造工程中新桥悬臂施工所运用的宽幅菱形挂篮为例,分析验算 3 种主要不利条件下菱形挂篮的变形、强度和稳定性,并进行优化设计。经过有限元分析结果与规范值对比,优化后宽幅菱形挂篮在悬臂施工中的受力和变形满足规范要求且受力良好。

关键词:桥梁;宽幅菱形挂篮;悬臂梁桥;受力分析;设计优化

中图分类号:U445.4

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2021)04-0140-06

由于挂篮具有结构简单、稳定牢固、可循环利用等优点,被广泛应用于悬臂梁桥施工,且使用挂篮施工能使悬臂梁桥砦和钢筋融合更紧密。挂篮施工技术 with 吊车相比具有足够的灵活性,能有效提高施工效率。该文以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为例,运用有限元软件建立挂篮三维模型进行受力分析,针对受力情况进一步优化宽幅菱形挂篮设计。

1 工程概况

江西吉安赣江大桥全长 1 501.2 m,为(75+2×

120+75) m 多跨变截面梁桥,主桥长度 390 m;东西引桥采用 24~42.7 m 不等高变截面连续梁结构;承台基础由 38.6 m 逐渐变化到 41.85 m;主梁截面高度从 13.5~7.2 m 按 1.8 次抛物线变化,采用箱梁截面形式;梁顶板和底板均为渐变宽度,悬臂长度 3 m;分两幅设置,两副之间设置 1.0 m 间隙(见图 1)。主梁采用对称悬臂施工方式。

2 宽幅菱形挂篮设计

2.1 主要设计和计算依据

计算模板、支架和拱架的刚度时,容许挠度值不

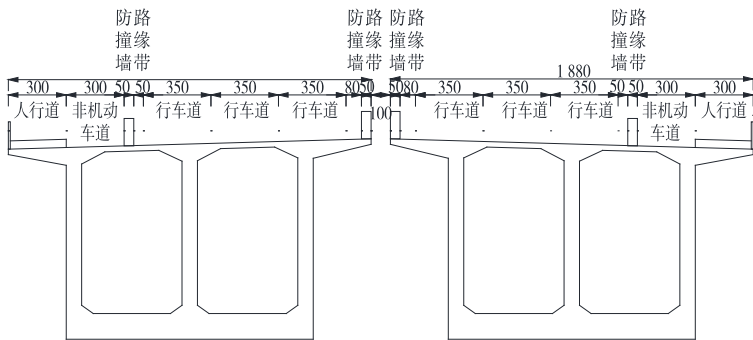
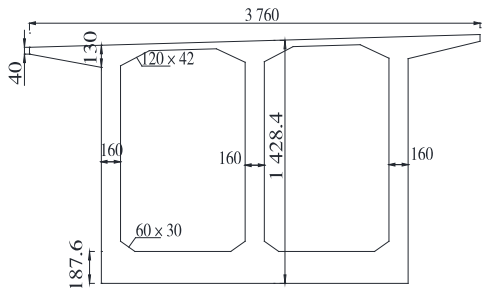


图 1 主线桥梁断面示意图(单位:cm)



得超过表 1 的要求。由表 1 确定的挂篮各结构容许挠度值见表 2。

表 1 各部件容许挠度 mm

结构部位	容许挠度
结构表面外露的模板	$\leq L/400$
结构表面隐蔽的模板	$\leq L/250$
受载后挠曲的杆件	承载状态 $\leq L/400$ 空载状态 $\leq L/250$
钢模板的面板	1.5
挂篮最大变形	≤ 20

表 2 挂篮结构的容许挠度 mm

结构名称及工况	杆件跨度	容许挠度
底篮纵梁	5 000	12.500
底篮横梁走行	20 450	81.800
内导梁浇筑	5 000	20.000
外导梁浇筑	5 000	12.500
导梁走行	9 250	37.000
前上横梁	6 450	16.125
主桁	—	20.000
轨道走行	2 000	5.000
后锚扁担梁	1 550	3.875

2.2 主要构造

2.2.1 主梁承重系统

菱形挂篮主梁承重系统主要由3片菱形主桁、后下横梁、前上下横梁和滑道组成。菱形桁架为 $2 \times [36a$ 组成的箱形截面,前上横梁为双H形钢结构,前后下横梁均为H形钢结构。

2.2.2 底模、后锚和悬吊系统

(1) 菱形挂篮的底模系统主要包括腹板下纵梁($H400 \times 200$)、底板下纵梁($H400 \times 200$)、底篮后横梁($H390 \times 300$ 桁架)、底篮前横梁($H390 \times 300$ 桁架),其纵梁采用工字型钢和大块钢模。

(2) 锚固系统由扁担梁、预应力筋、连接锚筋和后锚箱构成,后锚梁型号为 $2 \times [32b$ 。走行由滑道和后上横梁构成。

(3) 吊杆系统主要由底板前吊带(实心矩形 160×40 钢结构)、后吊杆(实心矩形 160×40 钢结构)、模板吊杆(精轧螺纹钢 $D32$)组成。

2.2.3 模板系统

菱形挂篮的内外模板系统靠吊挂在已浇筑梁段和前上横梁上的滑梁构成。箱梁外模为整体钢模,内模为组合型钢模,内外模板靠对拉螺栓连成一体。挂篮整体布置见图2。

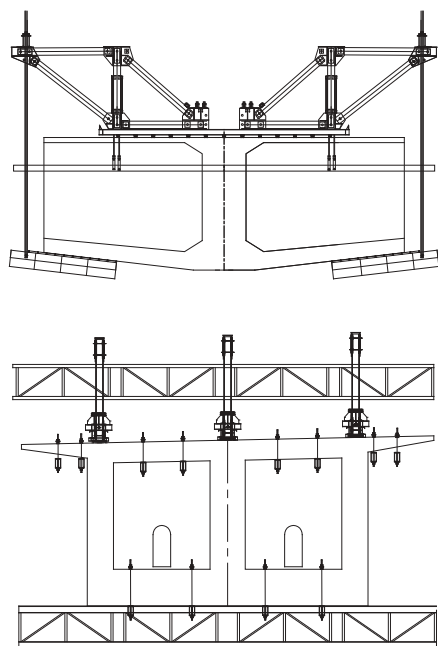


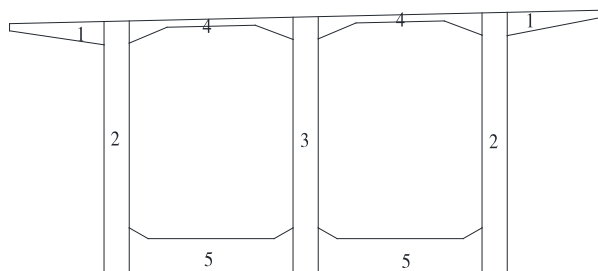
图2 挂篮结构示意图

3 挂篮计算分析

3.1 挂篮荷载及其工况组合

根据箱梁结构截面的受力特点,将箱梁划分成

不同节段(见图3)。



1~5为节段号

图3 梁体划分

通过建立各节段箱梁三维模型并查询各部分体积,计算箱梁断面内各梁段重量和长度,计算结果如表3所示。

表3 各梁段重量

节段号	各块梁段重量/kN		
	1#块	6#块	11#块
1	101.50	118.19	135.15
2	421.35	386.37	238.24
3	413.93	377.63	273.22
4	155.82	181.79	217.30
5	356.16	295.74	242.48
梁段长度/m	3.0	3.5	4.0

挂篮在悬臂施工中产生的其他荷载见表4。荷载组合分为2种:荷载组合Ⅰ包括砼重量、挂篮自重、超载重量、机械荷载和人群荷载;荷载组合Ⅱ包括冲击附加荷载+挂篮自重。

表4 挂篮的其他荷载

项目	荷载值
半个T形结构单侧外模重量/kN	66
半个T形结构内模重量/kN	83
半个T形结构底模重量/kN	72
半个T形结构挂篮杆件重量/kN	810
施工机械和人群荷载/kPa	2.5
倾倒砼产生的荷载/kPa	2
振捣砼产生的荷载/kPa	2
半个T构兜底产生的荷载/kN	50

挂篮浇筑施工承载时,采用有限元软件对3种工况进行计算,施工承载工况1~3分别为浇筑1#、6#和11#块时砼浇筑后还未凝固,分析挂篮受力和变形情况。

3.2 有限元计算分析

采用MIDAS/Civil 2019建立图4所示挂篮有限元模型。

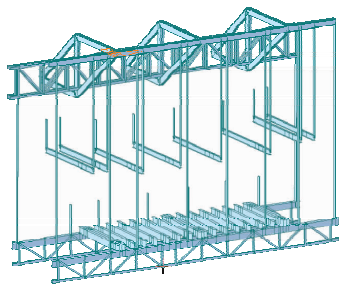


图4 挂篮三维模型

3.2.1 腹板系统计算分析

表5为腹板下纵梁荷载,图5为工况1下挂篮底篮系统施加荷载计算模型。计算所得工况1下底篮系统应力和变形分别见图6、图7,底篮系统吊点反力见表6。

由图6、图7可知:挂篮底篮系统最大应力出现在边腹板下底篮纵梁中间位置,为138.12 MPa,产生的最大位移为8.48 mm,均满足规范要求。

表5 腹板下纵梁荷载

位置	砼荷载/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	模板荷载/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	人群及机械 荷载/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	施工砼产生的 荷载/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	下纵梁上均布 荷载/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
边腹板	221.21	1.5	3.5	5.6	61.82
中腹板	217.31	1.5	3.5	5.6	60.78
底板	28.77	1.5	3.5	5.6	34.12

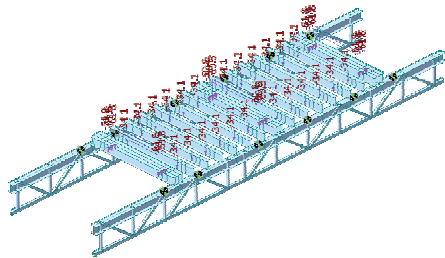


图5 底篮系统计算模型

表6 工况1下底篮系统吊点反力 kN

位置	吊点反力	
	前横梁	后横梁
边腹板外侧	141.0	144.8
边腹板内侧	295.3	293.1
中腹板外侧	308.6	311.1

同理可得工况2、工况3下底篮最大应力均出现在边腹板下底篮纵梁中间位置,分别为122.42、83.23 MPa,最大位移分别为7.69、5.78 mm,均满足规范要求。

3.2.2 主桁系统计算分析

最不利工况下单片主桁前节点的最大荷载 $P=800\text{ kN}$,图8为最不利工况下挂篮主桁系统施加荷载和约束条件的计算模型。

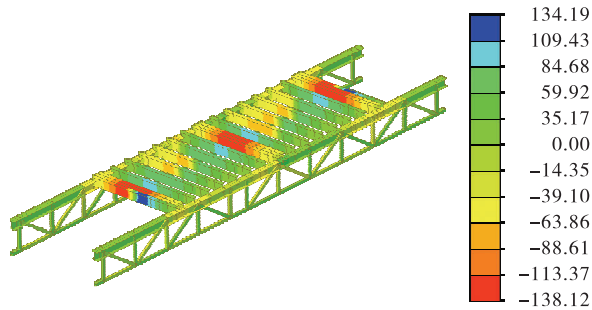


图6 工况1下底篮系统整体应力云图(单位:MPa)

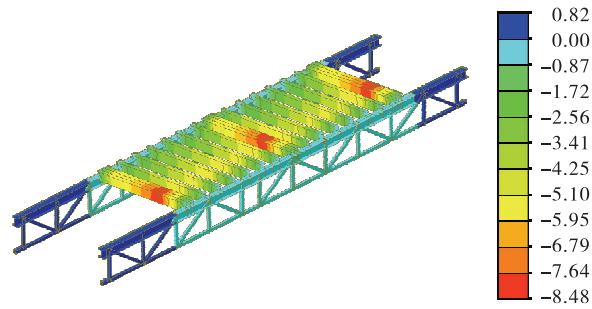


图7 工况1下底篮系统整体变形云图(单位:mm)

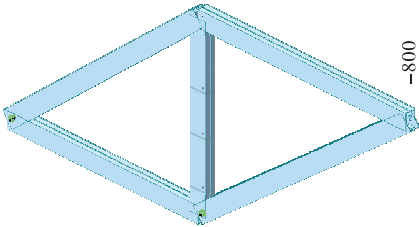


图8 最不利工况下主桁系统计算模型(单位:kN)

在砼浇筑但未凝固时计算挂篮主桁系统工作状态的受力和变形状态,最不利工况下主桁系统应力和轴力分别见图9、图10。

由图9、图10可知:挂篮主桁系统最大应力出现在主桁后斜杆上,为43.55 MPa,最大轴力为419.7 kN,满足规范要求。

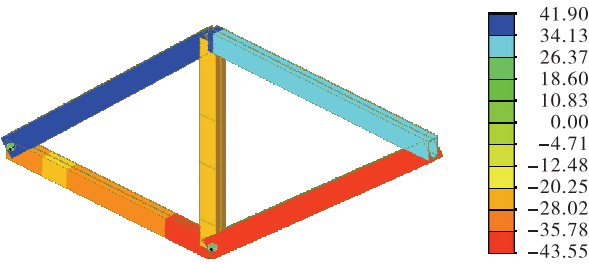


图 9 最不利工况下主桁系统应力云图(单位:MPa)

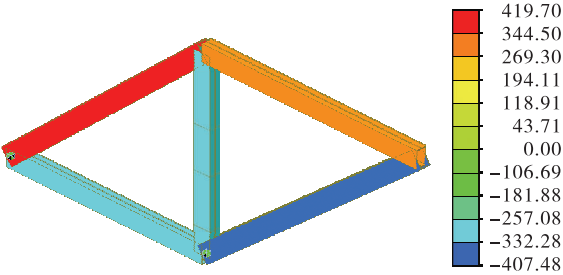


图 10 最不利工况下主桁系统轴力云图(单位:kN)

主桁的后锚精轧螺纹钢设计数量为 6 根,每根的实际受力 $F=276.1/(1.2\times 6)=38.35\text{ kN}$,其应力为:

$$\sigma_b = N/A = \frac{38.35 \times 10^3}{804.2} = 47.68\text{ MPa} \quad (1)$$

PSB830 精轧螺纹钢的设计应力为 705 MPa,其安全储备为:

$$K = 705/47.68 = 14.78 > 2.5 \quad (2)$$

主桁系统的受力满足要求。

3.2.3 吊挂系统受力分析

工况 1 下吊带系统轴力见图 11。

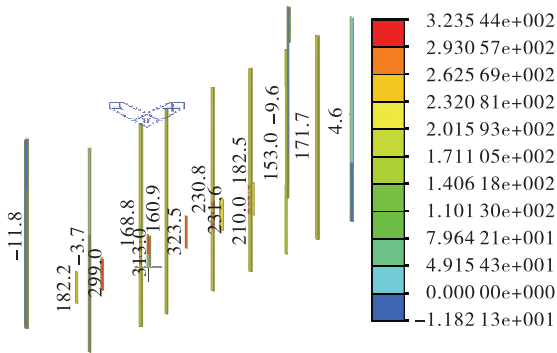


图 11 工况 1 下吊带轴力云图(单位:kN)

吊带采用 Q355 钢材,结构形式为 $t40\times 160$,销孔直径为 $\phi 60\text{ mm}$,承受的实际最大支点反力为 $323.54/1.2=269.62\text{ kN}$,则其应力为:

$$\sigma_b = N/A = \frac{269.62 \times 10^3}{40 \times (160 - 60)} = 67.4\text{ MPa} \quad (3)$$

Q355 钢材的设计应力为 295 MPa,其安全储备为:

$$K = 295/67.4 = 4.38 > 2 \quad (4)$$

吊挂系统的受力满足要求。

3.2.4 挂篮整体计算分析

根据以上计算结果,挂篮浇筑 6[#] 块时前上横梁承受的荷载最大,故计算该节段正常浇筑状态下挂篮的整体变形。计算挂篮整体变形时,腹板下纵梁荷载见表 7。

作用于内导梁上的荷载为:模板加载在导梁上的荷载 9.22 kN/m,砼加载在导梁上的荷载 25.97 kN/m。作用于外导梁上的荷载为:模板加载在导梁

表 7 边腹板与底板下纵梁荷载

位置	砼荷载/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	模板荷载/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	人群及机具荷载/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	砼施工产生的荷载/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	下纵梁上的均布荷载/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
边腹板	134.87	1.25	2.5	4	38.03
底板	21.74	1.25	2.5	4	25.56

上的荷载为 9.78 kN/m,砼加载在导梁上的荷载为 22.51 kN/m。计算整体变形时,底篮横梁的荷载为:横梁上的兜底荷载 1.19 kN/m。计算得工况 2 下挂篮整体变形和应力分别见图 12、图 13。

由图 12、图 13 可知:挂篮整体最大位移出现在内导梁端头,最大应力出现在内导梁中间位置,其值分别为 17.93 mm、126.01 MPa,均满足规范要求。

4 设计优化

为节省钢材用量、减少挂篮自身重力,对挂篮设

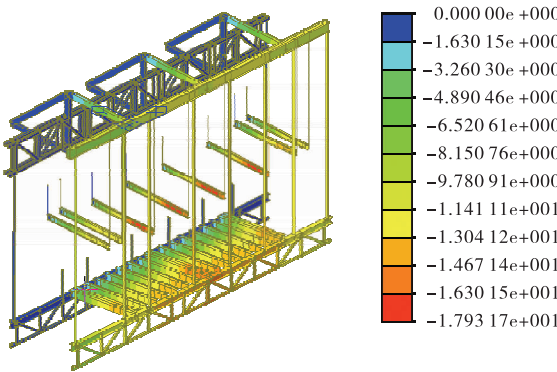


图 12 工况 2 下挂篮整体变形云图(单位:mm)

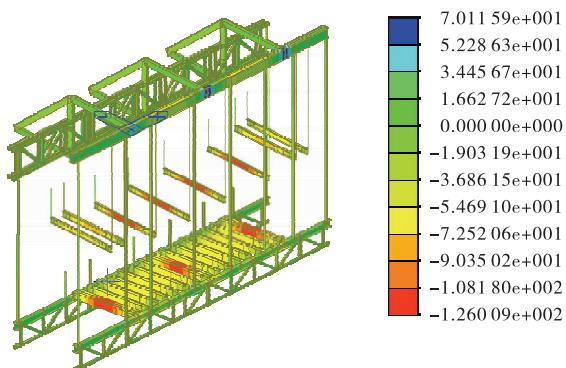


图 13 工况 2 下挂篮整体应力云图(单位:MPa)

计进行优化,将原挂篮采用的 $t40 \times 160$ Q355 吊带换成 2 根直径为 32 mm 的 PSB930 精轧螺纹钢,将底篮桁架替换为 $2H600 \times 200$ 钢材。图 14 为优化后挂篮三维模型。

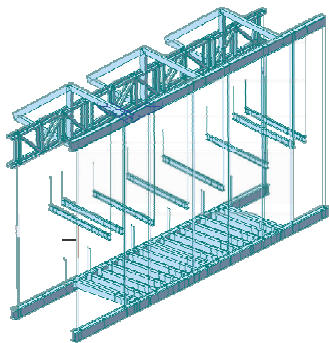


图 14 优化后挂篮模型

4.1 优化设计后底篮验算

工况 1 下底篮系统变形和应力验算结果分别见图 15、图 16。

由图 15、图 16 可知:底篮系统最大位移出现在边腹板下底篮纵梁端头位置,最大应力出现在边腹板下底篮纵梁中间位置,其值分别为 11.09 mm、124.765 MPa,均满足规范要求。

4.2 优化后吊挂系统受力

优化后工况 1 下吊带轴力见图 17。采用直径

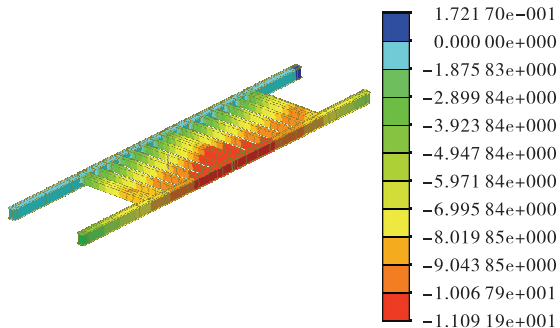


图 15 优化后工况 1 下底篮系统变形云图(单位:mm)

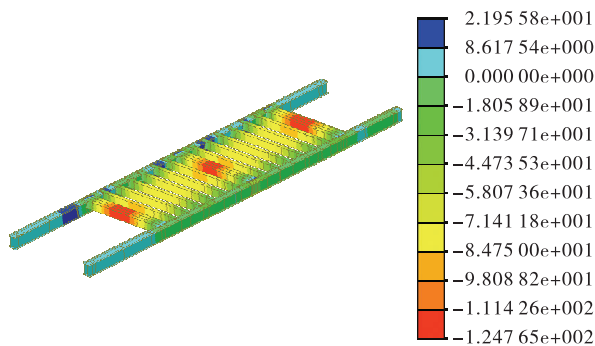


图 16 优化后工况 1 下底篮系统应力云图(单位:MPa)

为 32 mm 的 PSB930 精轧螺纹钢,其所承受的实际最大支点反力为 $286.258/1.2 = 238.55$ kN,则其应力为:

$$\sigma_b = N/A = \frac{238.55 \times 10^3}{16^2 \pi} = 296.61 \text{ MPa} \quad (5)$$

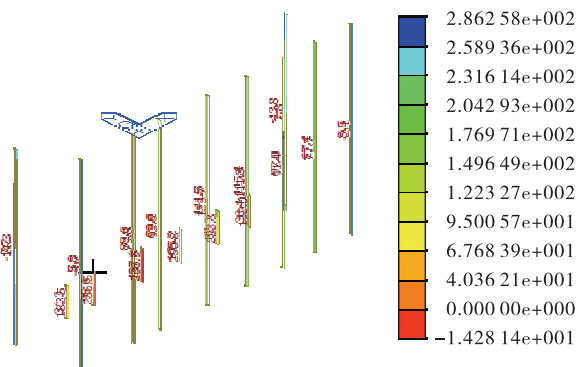


图 17 优化后工况 1 下吊带轴力云图(单位:kN)

PSB930 精轧螺纹钢的设计应力为 744 MPa,其安全储备为:

$$K = 744/296.61 = 2.51 > 2 \quad (6)$$

吊挂系统受力满足要求。

4.3 优化后挂篮整体计算

优化后挂篮荷载与优化前相同。优化后工况 2 下挂篮整体变形和应力分别见图 18、图 19。

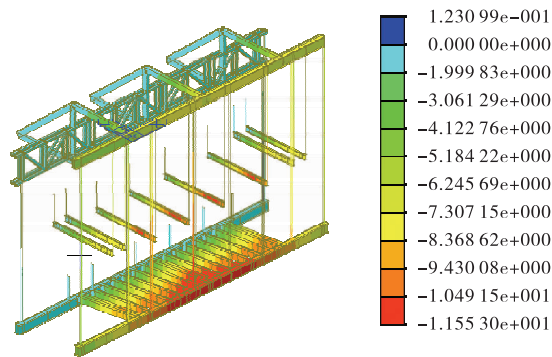


图 18 优化后工况 2 下挂篮整体变形云图(单位:mm)

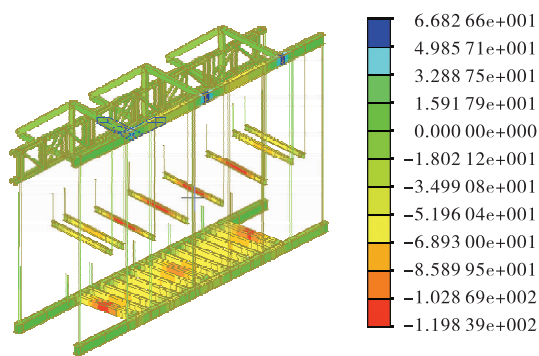


图 19 优化后工况 2 下挂篮整体应力云图(单位:MPa)

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