

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2023.01.040

基于 Midas Civil 悬臂施工菱形挂篮仿真分析

罗小伟, 宁丽艳, 张桥, 韩福德, 黄刚
(中建一局集团第二建筑有限公司, 北京市 102600)

摘要: 基于某桥梁工程实例展开分析, 借助 Midas Civil 对该项目浇筑工序所用挂篮进行仿真模拟, 确定了浇筑作业时挂篮的内力水平及变形情况, 同时验算了挂篮结构的稳定性。结果表明, (1) 挂篮悬浇梁能够起到节省材料的作用; (2) 该桥箱梁的截面高度大, 腹板混凝土荷载较大, 底篮纵梁弹性变形接近容许值, 采用分层浇筑至顶板对称施工, 可以控制分层厚度; (3) 挂篮施工时, 需反复调整锚杆内锚固力和吊带装置; (4) 挂篮施工受到风荷载侧向作用力影响时, 需考虑保温材料荷载, 为桥梁悬臂挂篮施工提供了指导和参考。

关键词: 菱形挂篮; Midas Civil 计算软件; 仿真分析

中图分类号: U445.466

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)01-0159-03

0 引言

随着城市立体交通网络的发展, 出现了越来越多的城市跨线、跨河桥梁, 挂篮悬臂浇筑施工因此被广泛使用^[1]。研究表明, 挂篮的承载能力、稳定性及变形性能对桥梁工程的质量起着决定性作用^[2]。借助 Midas Civil 完成建模、有限元分析即可对结构做出力学验算^[3], 指导技术人员研判结构的可靠性, 并为结构的进一步处理提供数据支持。

1 工程概况

本文以某桥梁工程为例展开分析。该项目全长约 516.0 m, 设计边中跨比为 0.6。桥梁上部结构选用连续箱梁, 其材料选为预应力混凝土, 预应力施加方向为纵、横双向。顶板设计宽度约为 12.2 m, 且设计有坡度为 2% 的单向坡; 底板设计宽度约为 6.2 m, 且设计有坡度为 2% 的单向坡。同时, 翼缘板悬挑伸出长度约为 3.0 m。

本项目设计方案选用菱形挂篮悬臂浇筑, 项目沿线共设置有 4 个 T 构、3 套挂篮。其中, 挂篮的设计宽度约为 15.0 m。箱梁按照施工的实际条件可在东、西半幅各 2 个主墩的墩顶处划分为 1 个支架现浇段, 即 0 号区段。以 0 号区段为中心向箱梁两端分别划分 12 个挂篮悬浇段, 即 1~12 号区段。其中, 1~5 号区段、5~10 号区段和 11~12 号区段分别长约 3.0 m、3.5 m 和 4.0 m。

收稿日期: 2022-01-26

作者简介: 罗小伟(1995—), 男, 本科, 助理工程师, 从事桥梁工程技术研究工作。

2 挂篮设计计算

2.1 主要技术参数

(1) 混凝土自重 $G_c=25.0 \text{ kN/m}^3$, 混凝土湿重系数 1.04。

(2) 钢弹性模量 $E_s=2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。

(3) 各种钢材强度设计值参照《钢结构设计标准》(GB 50017—2017), 挂篮主桁、节点箱为 Q235 钢材, 主销轴为 40Cr 钢材。钢吊带为 Q345 钢材, 精轧螺纹钢型号为 PSB785。

2.2 挂篮构造

(1) 主桁系统。挂篮为菱形挂篮, 主桁前上横梁杆件为 2 根 I 40 工字钢加焊 2 cm 缀板组合受力, 立柱杆件用 2 根 32# 槽钢与 2cm 缀板焊接而成。每个腹板位置处设置 1 片主桁片, 共 2 榀主桁片, 横向平联将 2 片桁架片联结系连接起来构成一个整体。

(2) 底篮系统。底篮前下横梁使用 2 根 I 40 工字钢, 后下横梁使用 2 根 I 40 工字钢, 纵梁采用 HN350 × 175 型钢, 纵梁在底板位置处横向按 53 cm 间距布置, 腹板底横向按 20 cm 间距布置。纵梁跟前、后横梁用焊接进行连接。

(3) 吊带及后锚系统。吊带采用 200 mm × 16 mm 矩形钢吊带, 前断面横梁共采用 6 根吊带, 导梁采用 2 根精轧螺纹钢。后断面底板 3 根精轧螺纹钢, 顶板 2 根精轧螺纹钢, 翼缘板 2 根精轧螺纹钢。主桁架锚固时, 每个节点箱后锚梁 3 组, 共 6 根精轧螺纹钢。

(4) 行走系统。轨道采用 2 根 25a 槽钢, 挂篮反扣轮作用上缘加焊 1 cm 厚钢板组合受力, 轨道相邻节

段之间采用4组螺栓进行连接。轨道锚固钢筋采用长1.5 m精轧螺纹钢,外露25 cm,腹板锚固1.25 m。

(5)模板体系。采用定型钢模板。

2.3 有限元建模

2.3.1 结构空间几何模型

假定本项目所建立的有限元模型满足以下假设:

(1)以梁单元来代替实体挂篮结构中的杆件,杆件间的连接做释放梁端约束处理。

(2)以杆件中性轴来表征单元的空间位置。

(3)不考虑由于杆件搭接带来的空间错动,其模型如图1所示。

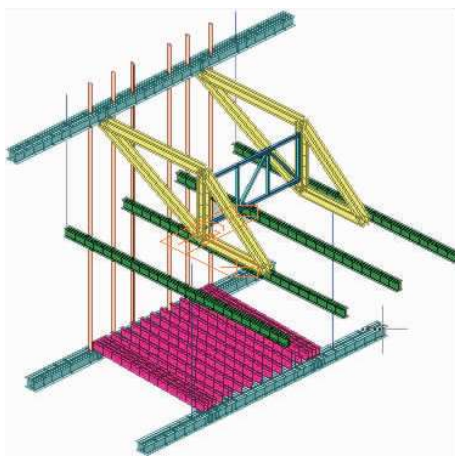


图1 Midas Civil 中建立的挂篮模型

2.3.2 约束条件

(1)一般支承

- a. 菱形挂篮2个后锚点采用固定铰支座模拟,现场实际为12根精轧螺纹钢受力。
- b. 以滑动铰支座来替代实体挂篮的前支点,同时做出横向约束。
- c. 内滑梁及外导梁吊杆与混凝土面之间的连接采用固接进行模拟。

(2)连接模拟

- a. 对于前上横梁、底篮后下横梁与吊带或精轧螺纹钢接触为铰接,铰接采用释放梁端的抗弯刚度的方式模拟。
- b. 在模拟分析中以刚接替代焊接,导致计算机分析的杆端弯矩略大于实际杆端弯矩。
- c. 非接触点均看作刚接处理。

2.3.3 考虑的荷载

- (1)静荷载:挂篮、模板以及新浇混凝土的自重。
- (2)可变荷载:施工人员及施工机具运输或堆放的荷载、振捣混凝土时产生的竖向荷载、风荷载。

2.4 结构分析结果

按照设计方案中可能出现的各类不利条件,结构

分析主要针对底篮及主桁系统展开分析,且分别对挂篮前移(工况一)和重量最大区段的混凝土浇筑(工况二)两种不同工况下结构的强度展开验算,得到如下结果。

2.4.1 应力结果

借助 Midas Civil 有限元分析软件对底篮、主桁以及悬吊系统做计算机分析,即可得到结构内应力水平(见表1)。

表1 主要构件应力计算

| 构件名称 | 荷载工况 /MPa | | 最不利工况下的应力 /MPa | 容许应力 /MPa | 结论 |
|-------|-----------|-------|----------------|-----------|-----|
| | 工况一 | 工况二 | | | |
| 底篮下纵梁 | 74.1 | 200.4 | 200.4 | 205 | 不满足 |
| 下横梁 | 27.4 | 195.8 | 195.8 | 205 | 满足 |
| 主桁架 | 44.7 | 156.8 | 156.8 | 205 | 满足 |
| 吊带 | 17.3 | 89.2 | 89.2 | 295 | 满足 |

从工况一下的有限元分析中可以发现,主桁系统中应力峰值出现在前支点位置,其值为44.7 MPa,应力分布如图2所示;底篮系统中应力峰值出现在下横梁腹板位置,其值为74.1 MPa,应力分布如图3所示。

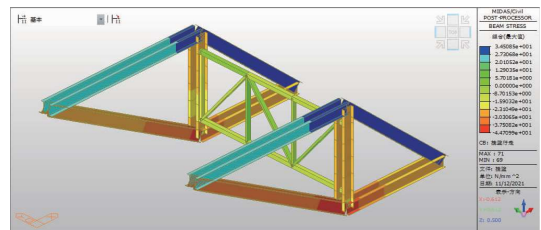


图2 工况一下主桁系统应力分布

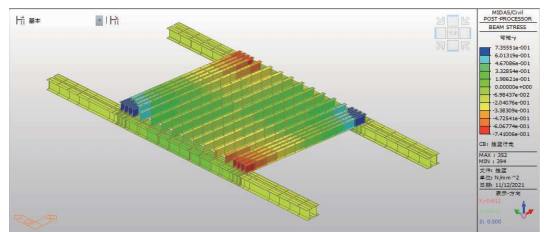


图3 工况一下底篮系统应力分布

从工况二下的有限元分析中可以发现,主桁系统中应力峰值出现在前支点位置,其值为156.8 MPa,应力分布如图4所示;底篮系统中应力峰值出现在腹板对应纵梁跨中位置,其值为200.4 MPa,应力分布如图5所示。

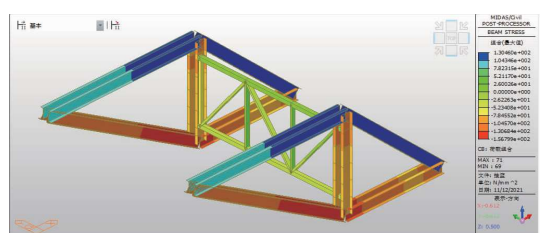


图4 工况二下主桁系统应力分布

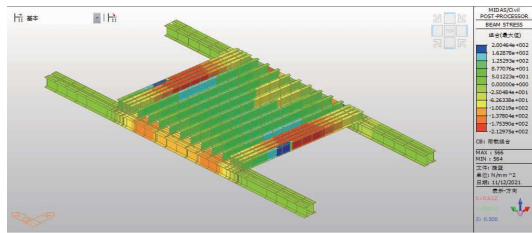


图 5 工况二下底篮系统应力分布

2.4.2 位移结果

根据《桥梁悬臂浇筑施工技术标准》的要求:(1)挂篮最大允许变形量不超过 20 mm;(2)受载后挠曲的构件,其承载状态的弹性挠度不应大于 $L/400$;(3)受载后挠曲的构件,其空载状态的弹性挠度不应大于 $L/250$ 。

当挂篮向前移动时,可先将后锚件拆除并下放底篮系统,使其能够自由活动。由工况一下的有限元分析可知,主桁系统中位移峰值出现在前上横梁与主桁纵梁连接位置,其值为 6.1 mm;底篮系统中位移峰值出现在前下横梁双拼工字钢端部,其值为 8.6 mm。

由工况二下的有限元分析可知,主桁系统中位移峰值出现在前上横梁与主桁纵梁连接位置,其值为 17.6 mm;底篮系统中位移峰值出现在腹板位置纵梁跨中位置,其值为 32.9 MPa。

2.4.3 锚固系统计算

在每根主梁中设计有 3 组后锚筋,每组 2 根。后锚筋应力可按下式计算:

单根吊杆拉力:

$$N_{\text{单}} = N/6 = 906.4/6 = 151\ 100\text{N}$$

吊杆拉应力:

$$\sigma = N_{\text{单}}/A = 151\ 100/804.2 = 187.9\ \text{MPa} < 670\ \text{MPa}$$

2.4.4 主构架销轴验算

本工程挂篮设计销轴材料为 40Cr,直径 $D=100\text{mm}$,其许用剪应力为 534 MPa。依据规范规定销轴最小需满足 2 倍安全系数,求得允许剪应力 $[\tau]=267\ \text{MPa}$ 即每个销轴所能承受最大应力为 267 MPa。

销轴最大允许剪力 $[F]=\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2[\tau]$,得 $F=2\ 096\ \text{kN}$

即每个销轴所能承受最大轴力为 2 096 kN。

由主桁内力图可知,主构架内产生的最大轴力为 1 375.6 kN,则主桁销轴承受的最大剪力为 1 375.6 kN,小于 $[F]=2\ 096\ \text{kN}$,满足要求。

此挂篮设计销轴拉板厚度为 30 mm,菱形架槽钢壁厚 10 mm,因此销轴拉板总厚度为 40 mm,按销轴所能承受最大轴力 $F=1\ 375.2\ \text{kN}$ 考虑:

销轴板所受轴力为:

$$P = \frac{F}{2} = \frac{1\ 375\ 200}{2} = 687\ 600\ \text{N}$$

销轴板厚度为 $\delta \frac{P}{D[\sigma]}$,求得 $\delta = 28.5\ \text{mm}$ 。

通过上述公式计算可知,在销轴所能承受的最大轴力下,销轴板总厚度 $\delta=28.5\ \text{mm}$,小于 40 mm,满足要求。

2.5 行走状态抗倾覆验算

2.5.1 后锚点焊缝验算

反扣轮上部与主构架为满焊连接,焊缝强度验算如下:

$$N \leq h_e l_w \beta_f f_t^w = 20 \times 0.7 \times (340+400-2 \times 20) \times 1 \times 215 = 2\ 107\ \text{kN}$$

即此反扣轮处焊缝所能承受最大拉力 $N=2\ 107\ \text{kN}$ 。

由模型分析得行走状态单侧菱形架后锚点最大反力为 148.8 kN,小于 2 107 kN,满足要求。

2.5.2 后锚点销轴强度验算

单片主桁架反力由 2 个 $\phi 55\ \text{mm}$ 反扣轮销轴受力,材质为 40Gr,所能承受最大应力为 534 MPa。依据规范规定销轴最小需满足 2 倍安全系数,因此通过计算求得允许应力 $[\tau]=267\ \text{MPa}$,即每个销轴所能承受最大应力 267 MPa。求得 $[F]=634.0\ \text{kN}$,即每个销轴所能承受最大轴力为 634.0 kN。

依模型反力图可得,行走状态下挂篮后锚反扣轮处拉力为 148.8 kN,小于 634.3 kN。

3 结语

本文以我国某工程为例,结合有限元分析软件展开仿真模拟,为挂篮的施工提供了指导,并对同类型工程的开展带来了相应的参考。根据该项目的数值模拟分析,可以得出以下结论:

(1)挂篮自身重量为 80 t,其与悬浇梁段重量之比为 0.31,小于 0.5,能够起到节省材料的作用。

(2)由于该桥箱梁的截面高度大,混凝土浇筑时,腹板混凝土荷载较大,底篮纵梁计算得出的弹性变形接近容许值。不同加载方式下结构的变形存在较大差异,所以在浇筑混凝土时,应当遵照“由中至边对称进行”“先底板,再腹板,后顶板”的基本原则。对于腹板较高的节段,可采用分层浇筑至顶板,分层时 T 构两端左右腹板对称施工,控制分层厚度。

(3)在浇筑工序施工之前,应当反复调整锚杆内锚固力至合适水平。

(4)挂篮前移动时,拆除后锚梁后侧模落到滑梁

(下转第 165 页)

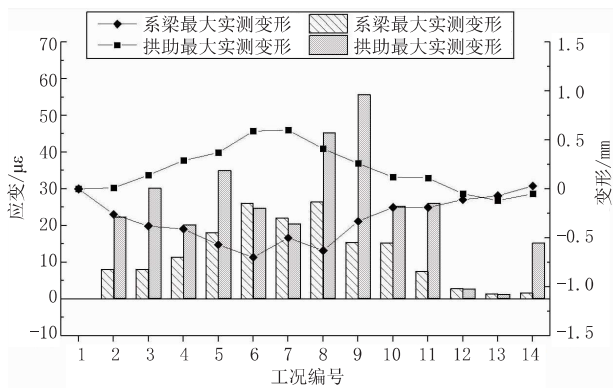


图 5 系梁、拱肋应变与变形实测计算结果

综上所述,在本次吊杆更换施工过程中桥梁结构变形、应变均小于理论值,说明结构处于安全状态。吊杆更换完成后,系梁和拱肋各监控截面的应变和变形均与原桥状态接近,且新吊杆拉力及钢管内力与原桥基本一致,说明桥梁在更换吊杆施工后达到了恢复原桥状态的基本目标。

5 结论

本文通过分析对比多个系杆拱桥吊杆更换施工工艺,结合更换设计原则,以及本桥吊杆外套钢管的情况,拟选直接更换法,并结合有限元计算,论证了直接更换法的可行性。现场施工时,采用施工监控的方法监控施工过程中该桥的受力、变形,并对结果进

行分析。结果表明:采用直接更换法进行吊杆更换对刚性系杆的系杆拱桥影响较小。综上所述,在对施工过程中进行计算分析、论证桥梁安全后,采用直接更换法进行系杆拱桥吊杆更换施工是一种经济、高效的施工方法。

参考文献:

[1] 高欣,欧进萍.钢管混凝土拱桥索类构件的常见病害与检测方法[J],公路,2012(3):10-16.

[2] 荆秀芬.钢管混凝土系杆拱桥养护技术研究[J].桥梁建设,2002(6):1-5.

[3] 马志华,温天宇,杨辉.系杆拱桥吊杆更换方案与施工控制[J].中外公路,2015,35(2):161-164.

[4] 赵洋,焦洪波.混凝土系杆拱桥吊杆更换施工[J].施工技术,2011,40(17):33-36.

[5] 王解元,潘德鹏.某拱桥系杆换索设计与施工[J].世界桥梁,2010(2):66-69.

[6] 张武.济南市顺河高架系杆拱桥吊杆更换设计[J].铁道标准设计,2017,61(8):74-78,83.

[7] 康孝先,刘路,丁洪华.系杆拱桥系杆更换关键技术研究[J].公路,2015,60(8):110-114.

[8] 李正嘉,孙广俊,李鸿晶,等.系杆拱桥吊杆更换数值模拟与方案优化[J].公路工程,2017,42(6):48-53,63.

[9] 丁毅,王东阳.三拱肋无风撑系杆拱桥吊杆更换技术研究[J].公路,2014,59(1):22-26.

(上接第 161 页)

上滑动,放松吊带后底模下放,在该情况下挂篮的反压轮则扣压在轨道上便于吊篮移动。首先,应严格控制轨道的平整度和平直度,避免行走过程中产生较大晃动,保证挂篮施工作业人员安全。其次,为防止连接桁架的平联产生较大的内力,严格控制挂篮两榀桁架行走时产生的位移差。

(5)当挂篮移动至合适位置后,需要及时调整吊带装置至合适状态。

(6)挂篮行走时,风荷载会给挂篮侧向的作用力,

如冬季施工需要对挂篮进行保温覆盖,则在挂篮稳定性计算需提前考虑保温材料荷载。

参考文献:

[1] 庄晓.大型菱形挂篮在高墩大悬臂条件下的安拆技术[J].工程建设与设计,2020(15):196-198.

[2] 李扬奇.桥梁工程中大跨度箱形连续梁菱形挂篮悬灌施工技术[J].低碳世界,2021,11(4):244-245.

[3] 何泉.桥梁工程中的挂篮施工技术要点探究[J].工程建设与设计,2020(17):166-167,173.