

现浇悬臂桥梁无轨装配式三角挂篮设计与试验分析

李海鸥, 向治州

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要: 为解决传统挂篮行走轨道笨重, 装配化程度低, 通用性不强等痛点问题, 以全装配式节点、无轨道行走和低重量比为控制目标, 通过数值模拟、试验验证等手段, 设计了一套无轨装配式三角挂篮, 对挂篮在梁段混凝土浇筑和行走时进行了仿真分析, 对关键构件进行了安全性验算, 并通过静载试验验证。结果表明: 挂篮取消行走轨道后, 挂篮整体重量比仅为0.27, 行走系统重量比仅为2.26%; 实现无轨步履式行走方式, 单次行走距离达50cm; 挂篮杆件之间全销接, 施工方便; 静载实测数据校验系数均在0.9左右, 与理论值高度吻合; 挂篮整体和局部受力变形均满足规范要求。

关键词: 挂篮; 设计; 装配式; 轨道; 试验; 数值分析, 现浇悬臂桥梁

中图分类号: U445.33

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0210-07

Design and Experimental Analysis of Trackless Assembled Triangular Form Traveler for Cast-in-place Cantilever Bridges

LI Haiou, XIANG Zhizhou

(Sichuan Transportation Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to solve the pain points of traditional form traveler, such as the heavy walking tracks, low assembly degree and weak universality, with the control objectives of fully assembled joints, trackless walking and low weight ratio, a set of trackless assembled triangular form traveler is designed through the means such as numerical simulation and experimental verification. The simulation analysis is carried out for the form traveler during the casting of the concrete of the beam segment and its walking. The safety checks are conducted on the key components, and the verification is carried out through static load tests. The results show that after the walking track of the form traveler is removed, the whole weight ratio of the form traveler is only 0.27, and the weight ratio of the walking system is only 2.26%. The trackless walking mode is realized, and a single walking distance is up to 50cm. All the members of the form traveler are connected by pins, which is convenient for construction. The calibration coefficients of the measured static load data are all around 0.9, which highly coincide with the theoretical values. The force and deformation of the whole and local parts of the form traveler meet the requirements specified in the codes.

Keywords: form traveler; design; fabricated; track; experiment; numerical analysis; cast-in-place cantilever bridge

0 引言

挂篮悬臂浇筑^[1-2]施工已成为连续梁(刚构)桥施工中一种最为有效的施工手段, 挂篮自身的结构安全决定着整个桥梁建造过程的成败。经过多年的施工经验及总结发现, 目前行业内大部分挂篮存在如下几个痛点问题。一是行走机构复杂, 运行效率低, 挂篮前移时频繁更换轨道锚点, 过程缓慢、复杂;

二是自重大, 对部分已建类似桥梁的挂篮进行统计, 其整体重量比(挂篮自重与悬浇节段最大重量之比)基本在0.4左右, 而行走系统的重量比(挂篮行走系统重量与挂篮整体重量之比)达到了10%左右; 三是装配化程度较低, 周转利用率小, 构件部分位置连接方式仍为焊接, 高空焊接质量不易保证, 安全风险高。

近年来, 国内外学者针对挂篮也开展了一些研究和工程应用。梁厚燃等^[3]基于大量数据样本, 采用统计理论, 得到了在悬浇节段最重以及悬浇节段最长的两种情形下, 桥梁节段的重量及节段长度的设计数据, 并结合悬浇节段箱室的构造设计尺寸, 设计了一种通用型菱形挂篮, 其最大可适用于主跨跨

收稿日期: 2025-04-09

作者简介: 李海鸥(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁施工技术管理工作。

通信作者: 向治州(1994—), 男, 学士, 工程师, 从事桥梁施工技术管理工作。电子信箱: 1159107339@qq.com

度在 200 m 以内。程皓等^[4]针对超重型悬浇节段—“500 t”级的连续梁桥三角挂篮结构优化问题,基于结构力学基本原理,采用力法基本理论推导出了挂篮的各个构件在不同工况下的应力、形变简化计算公式,建立了挂篮参数化设计的数学模型,并基于遗传算法,优化求解出了挂篮最小用钢量的设计思路。方淑君等^[5]基于 MIDAS Civil 软件平台,采用有限元分析方法对菱形挂篮和三角挂篮的整体强度、刚度,以及弹性稳定性进行了对比分析。得到了菱形挂篮的整体弹性稳定性高于三角挂篮,但三角挂篮的整体刚度确优于菱形挂篮的结论。刘伟等^[6]采用优化设计理论,以挂篮后托梁和主桁为优化目标,研发出了一套自锁式挂篮主桁液压顶升装置,翼缘板模板导梁与后托梁连接装置以及底模导梁等。从而提高了挂篮在适应箱梁横坡时的主动调坡效率以及结构的整体安全性。综上,目前挂篮的优化设计主要集中在总体的用钢量上,其数值计算也是针对某一具体工程项目所使用的挂篮在特定工况下的分析,在挂篮的装配化设计及取消挂篮行走轨道方面的研究仍较少。

为此,本文在总结现有大量挂篮设计和施工中遇到的一些痛点问题^[7-10],设计了一种三角型无轨装配式挂篮,可适用于不同跨度、宽度的连续刚构(梁)桥块件悬臂施工,具有安拆便捷、行走高效、承载力高、刚度大、自重小,通用性强等优点。并进行了挂篮的仿真分析和试验研究,验证了挂篮的可靠性和计算模型的正确性,为悬臂浇筑的桥梁施工装备发展提供了新的设计思路。

1 总体设计

1.1 依托工程

成乐扩容高速青衣江大桥为(55+100+55)m 预应力混凝土连续刚构,箱梁 0 号块长度 10 m,单侧设计 13 个挂篮浇筑节段,1 个合拢段,边跨设现浇段,见图 1。从根部至跨中节段布置为:8×3 m、5×4 m、2 m (合龙段),边跨现浇段长度为 3.9 m,悬浇梁段最大重量为 2 600 kN;箱梁采用单箱双室截面,墩顶处梁高 6.5 m,跨中梁高 2.5 m,梁高以 1.8 次抛物线变化,箱梁底板宽度为 16 m,顶板宽度为 21 m。

1.2 设计原则

依托青衣江大桥悬臂浇筑施工,选择主桁构件少、重心低、安装方便的三角挂篮为对象,并遵循表 1 设计原则,设计一套无轨装配式挂篮。

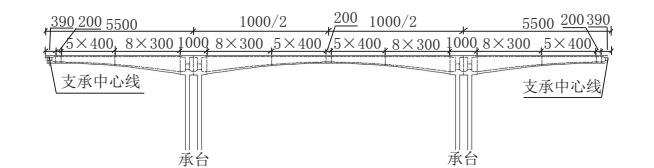


图1 青衣江大桥立面布置图(单位:cm)

表 1 挂篮设计原则

编号	设计指标	主要内容
1	装配化	各构件之间连接采用装配式设计,实现重复利用
2	承载力	构件受力明确,结构强度、刚度和稳定性满足各施工工况要求
3	重量比	优化结构形式,减轻自重、节约钢材用量,总重量比控制在 0.3 以内
4	行走方式	取消行走轨道,步履式行走方式,单次行程 50 cm
5	配重方式	不设平衡配重,利用钢锚杆锚固在已浇筑梁段上,降低主梁悬臂端临时荷载
6	安全系数	安全系数不小于 2.0

2 挂篮结构组成

挂篮结构由 7 大系统组成,各部分自成系统且又相互联系。采用 3D 建模软件 CATIA 装配模块和知识工程参数化进行优化设计,挂篮主要构件总体立面布置见图 2,断面布置见图 3。

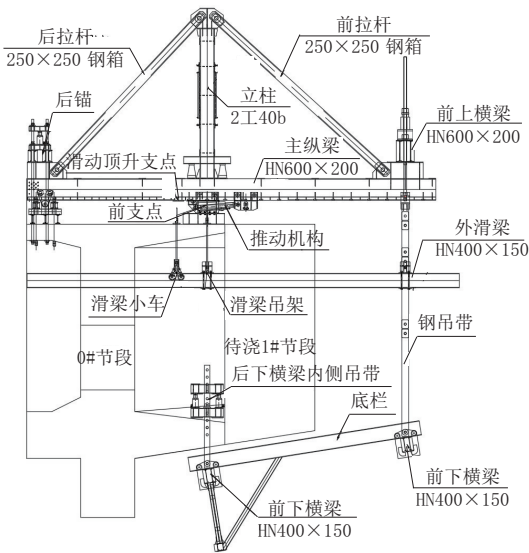


图2 挂篮立面布置图(单位:mm)

2.1 承重系统

承重系统由三角形桁架组成,包括主纵梁、立柱、斜拉杆。为充分利用材料性能、减轻挂篮自重以及为挂篮行走时提供反钩位置,采用双拼 H 型钢作主纵梁,型钢中心间距 30 cm,上下布置缀板连接,挂篮移动时反扣轮轨道采用 L80 mm×8 mm 角钢,角钢与主纵梁间设置加劲肋,每 50 cm 设前移梯档;梁端设置高度为 45 cm 的斜拉杆连接板,连接板厚度

构造方式,利用主梁端面预埋的结构钢筋锚固。加工端模时精确预留出孔道和钢筋孔位置,准确设置抗剪齿形块及角度^[11]。

底篮系统主要由前、后下横梁、底部纵梁构成。前下横梁采用H型钢组成,后下横梁采用桁架结构,保证挂篮行走时变形满足要求,桁架总高 230 cm。前、后下横梁采用H型钢作底纵梁连接形成底篮系统,底纵梁与前后下横梁的连接均采用卡板限位的方式,方便调整横向位置及安装拆卸。后下横梁下弦与底纵梁间设置4道斜撑连接,增加后下横梁的稳定性。

锚固系统设置于已浇筑节段上,主桁后节点锚固于腹板上,每处设4根铬质钢锚杆,并由锚梁锚固于已浇梁段上。

挂篮均设置封闭式安全操作平台及上下通道。包括人员上下安全爬梯、承重横梁上的横向安全通道,滑梁安全通道、底篮四周安全通道以及全封闭平台。

3 挂篮仿真分析

3.1 基本参数

挂篮结构仿真分析时参照钢结构相关规范,经统计分析,使用过程中的荷载见表2。

表2 荷载分析表

荷载类型	荷载名称	荷载数值
恒载	混凝土湿重	容重取 26 kN/m ³
	挂篮自重	容重取 78.5 kN/m ³
	模板自重	标准值取 2.0 kN/m ²
活载	施工人员、机具	标准值取 2.5 kN/m ²
	混凝土振捣、倾倒	标准值取 4.0 kN/m ²

全部荷载通过不同传力途径最终传至已浇筑完成的主梁本身,见图8, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 表示悬吊杆件轴力, N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 表示主桁架杆件轴力, F_1 、 F_2 分别表示后锚力、前支点反力。

3.2 分析工况

挂篮强度计算时,按承载能力极限状态进行荷载基本组合;刚度计算时,按正常使用极限状态进行荷载标准组合。结构重要性系数取1.1,挂篮行走冲击系数取1.3,胀模系数取1.05。拟分析主梁最重节段(P1节段)为2 600 kN,最长节段(P9节段)为4.0 m。

3.3 分析模型

运用大型有限元结构仿真分析^[12-13]软件 MIDAS 建立计算模型,见图9。共计519个节点,582个单元。挂篮杆件的装配式节点,通过释放杆单元接头

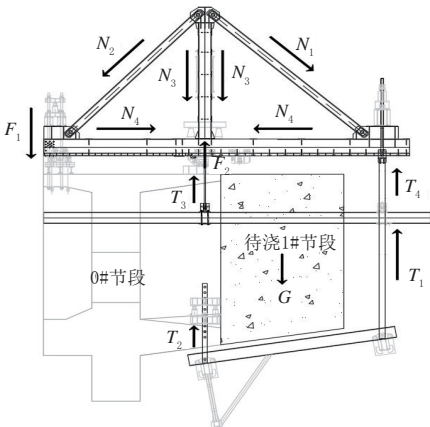


图8 挂篮传力途径

处的转动刚度来模拟。

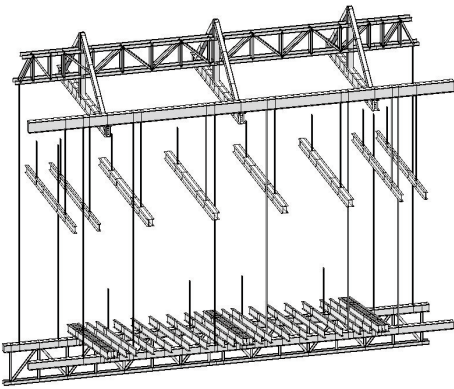


图9 挂篮有限元模型

3.4 梁段混凝土浇筑过程分析

挂篮主桁架杆件编号见图10。

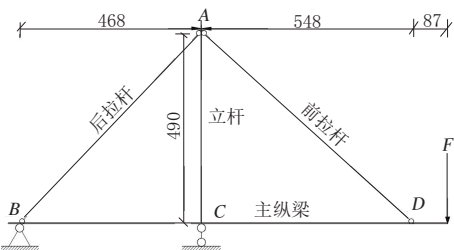


图10 挂篮主桁架示意图(单位:cm)

悬浇最重节段和最长节段时挂篮应力云图分别见图11、图12,主桁杆件受力结果汇总见表3。挂篮整体最大弯应力为157.6 MPa,最大剪力为44.9 MPa,挂篮最大竖向变形为-14.9 mm<20.0 mm,符合规范要求^[14-15]。

挂篮主要结构或构件安全系数验算结果见表4,

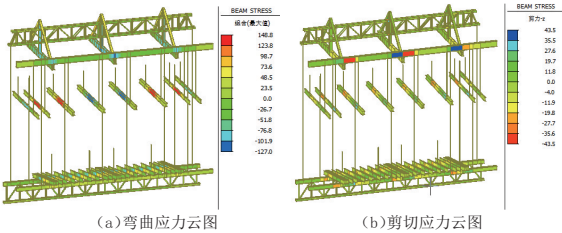


图11 混凝土浇筑时挂篮整体应力云图(浇筑最重节段时)

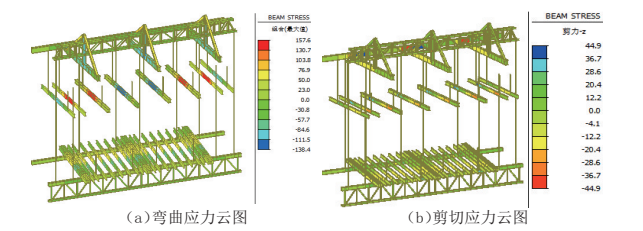


图 12 混凝土浇筑时挂篮整体应力云图(浇筑最长节段时)

表 3 主桁架杆件计算结果

构件 编号	轴力/kN		应力/MPa		强度设计 值/MPa
	最重节段	最长节段	最重节段	最长节段	
AB杆	+1 632.7	+1 770.2	+93.4	+100.8	295
AC杆	-2 010.0	-2 180.6	-111.7	-121.2	215
AD杆	+1 511.3	+1 638.6	+88.6	+95.5	295
BD杆	-1 211.9	-1 314.2	-109.3	-118.5	215

注:轴力以“+”表示拉力,以“-”表示压力;应力以“+”表示拉应力,以“-”表示压应力。
均满足要求。

表 4 安全系数统计表

类型	编号	计算值	容许值
主桁抗倾覆	K_1	2.7	2.0
锚杆抗拉	K_2	3.0	2.0
吊带抗拉	K_3	4.4	2.0
吊杆抗拉	K_4	5.8	2.0

3.5 挂篮行走过程分析

挂篮行走时,杆件最大弯应力为-141.1 MPa,剪切应力为-28.0 MPa,见图 13,均小于材料强度设计值。行走悬吊采用钢丝绳,按 4 线设计,滑轮效率系数为 0.96,计算得安全系数 $K_5=10.6>6.0$,满足要求。

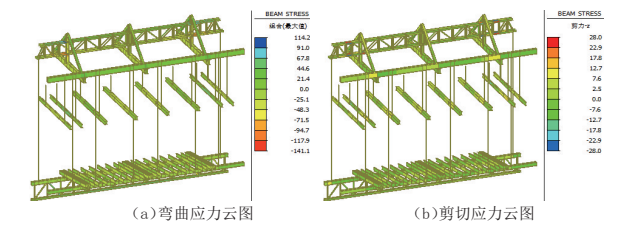


图 13 挂篮行走时整体应力云图

后下横梁靠两侧行走吊杆连接并锚固于主桁横联上,后下横梁等效为简支受力体系,等效跨径为 $L=22.2\text{ m}$ 。计算表明,挂篮行走过程中后下横梁最大竖向挠度 $f=-34.6\text{ mm}$,允许挠度 $L/400=55.5\text{ mm}$;最大应力为-97.4 MPa,发生在吊点下腹杆处,见图 14、图 15。

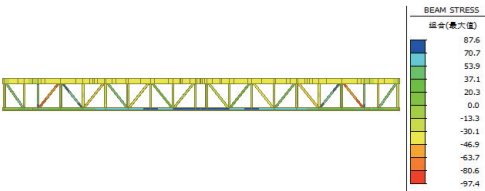


图 14 挂篮行走时后下横梁应力云图

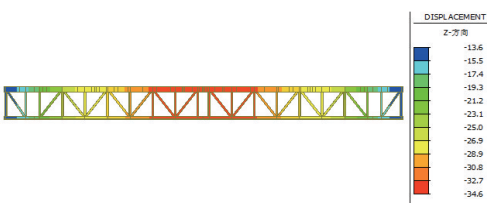


图 15 挂篮行走时后下横梁竖向位移云图

3.6 立柱稳定性分析

主桁立柱为受压杆件,立柱最大轴向力为-2 180.6 kN,立柱截面为 2I40b 组合箱形,截面特性见表 5。

表 5 立柱截面几何参数表

型号	截面面积 A/mm^2	惯性矩 I/mm^4	回转半径 i/mm	长细比 λ
2I40b	1.86×10^4	1.1×10^8	76.9	54

根据文献[14],稳定系数 $\varphi=0.839$, $\sigma=N/\varphi A=139.6<215\text{ MPa}$,稳定性满足要求。

4 试验验证

4.1 验证内容及方法

静载试验主要对结构在目标荷载作用下各杆件控制截面处的应力、典型位置处的变形、主桁架各构件的尺寸等进行测试,见表 6。

表 6 静力荷载试验内容

试验结构	截面	内容
单榀主桁架	A-A、B-B、	主纵梁、立柱及前后拉杆在控制
	C-C、D-D	截面处的组合应力
	E-E	最大变形效应

4.2 测点布置

在试验截面布设电阻应变片测试应变,并通过不同位置补偿点实现对环境、温度等因素的补偿; A-A、B-B 断面各设 6 个应变测点, C-C、D-D 断面各设 4 个应变测点,应变测点在截面布设见图 16。变形测点布置于 E-E 截面,同时在主纵梁前支点、后锚点及立柱顶端布置测点对 E-E 截面变形测点进行修正,试验中由纵梁顶板处直线位移传感器采集数据。试验过程见图 17。

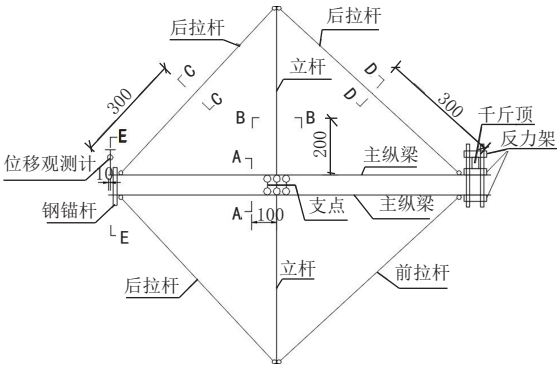


图 16 应变测试截面布置图(单位:cm)



图 17 试验过程图

4.3 试验结论

(1) 变形

在目标荷载作用下,试验桁架结构主纵梁未见明显活动性、延伸等异常现象;变形测试值见表 7,荷载卸后,变形测点最大相对残余变形值为 1.8%,低于规范^[16]所要求的 20.0% 的限值,表明主纵梁在试验中均属于弹性工作状态。测点实测变形校验系数为 0.97,实测变形低于计算值,表明主纵梁构造的刚度满足试验预期值。

表 7 变形测试值

工况分级	满载实 测值/ mm	残余变 形/mm	相对残余 变形/%	弹性 值/mm	计算 值/mm	校验 系数
100% (1 200 kN)	21.16	0.38	1.8%	20.78	21.34	0.97

(2) 应力

在目标荷载作用下,试验桁架结构各构件未见明显活动性、延伸性等异常现象;应变测试值见表 8,荷载卸后,各测点最大相对残余应变为 4.8%,低于规范^[16]要求的 20.0% 的限值,表明各测试截面在目标荷载作用下均处于弹性工作状态。各个测点实测应变校验系数介于 0.54~0.98 之间,实测值均低于模拟计算值,表明各测试截面强度满足试验预期值。

实测数据均小于理论值,且两者值变化趋势几

表 8 应变测试值

截面	测点 编号	实测 值 $\mu\epsilon$	残余应 变 $\mu\epsilon$	弹性 值 $\mu\epsilon$	计算 值 $\mu\epsilon$	校验 系数	相对残余 应变/%
A-A	A-1	-549	7	-556	-634	0.88	1.3
	A-2	-557	4	-561	-634	0.88	0.7
	A-3	158	-6	164	178	0.92	3.8
	A-4	169	-6	175	178	0.98	3.6
	A-5	-185	2	-187	-228	0.82	1.1
	A-6	-164	-2	-166	-228	0.73	1.2
B-B	B-1	-356	4	-360	-500	0.72	1.1
	B-2	-354	1	-355	-500	0.71	0.3
	B-3	-643	9	-652	-743	0.88	1.4
	B-4	-621	4	-625	-743	0.84	0.6
	B-5	-515	5	-516	-621	0.83	1.0
	B-6	-487	11	-498	-621	0.80	2.3
C-C	C-1	354	-8	362	463	0.78	2.3
	C-2	339	-11	350	463	0.54	4.6
	C-3	333	1	332	463	0.72	0.3
	C-4	408	-4	412	463	0.89	1.0
D-D	D-1	325	-3	328	436	0.75	0.9
	D-2	330	-16	346	436	0.79	4.8
	D-3	390	-6	396	436	0.91	1.5
	D-4	328	-3	331	436	0.76	0.9

乎一致,见图 18。

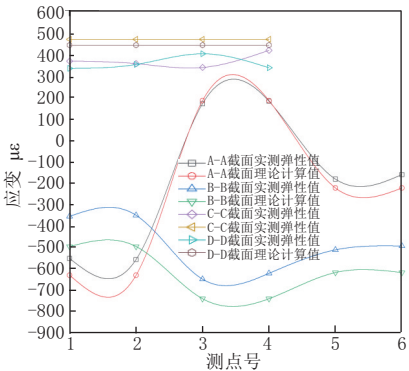


图 18 各截面实测应变与理论应变曲线对照图

(3) 结构尺寸

在抽检的 62 个主要结构尺寸测点中,有 2 个测点偏差值超过允许偏差 0.4 mm,合格率为 96.8%,满足规范要求^[16-17]。

5 工程实践

挂篮已成功运用于成乐扩容高速项目青衣江大桥悬臂浇筑施工,见图 19,单个挂篮的安装可节约工期 5 d,单次前移作业最多可在 1 h 内完成,而传统挂篮基本在 4 h 左右,该项目累计节约工期约 66 d,目前该大桥已正式通车。

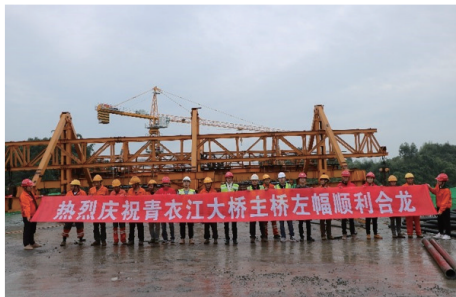


图19 青衣江大桥现场施工照片

6 结 语

本文介绍了一种无轨装配式三角挂篮的设计,并通过仿真分析、试验验证及实桥应用,得出以下结论:

(1)挂篮自重与最大节段重量比仅为0.27,达到了挂篮轻型化设计目标。挂篮各构件连接均通过栓接或销接的形式,极大地减少了现场高空作业,装配化程度高,对于不同的截面形式仅需增加(减少)主桁片数即可,可周转使用,提高了工程经济性。

(2)挂篮行走无需单独设置笨重的专用轨道,依靠主纵梁下翼缘角钢作为反扣轮锚固轨道,大行程工程液压油缸作为动力装置,并配合集成控制系统,挂篮单次前移距离达50 cm,提高了施工效率。

(3)通过仿真分析、试验验证,挂篮整个结构受力合理,刚度大,稳定性等均符合相应规范设计要求,可作为实际工程推广运用。

参考文献:

- [1] 王武勤.PC桥梁悬臂灌注施工挂篮的发展[J].桥梁建设,1997(4):55-57.
- [2] 李海鸥.混凝土超方对悬浇箱梁桥的影响研究[J].北方交通,2023(4):1-5.
- [3] 梁厚燃,解威威,魏华.连续梁桥悬臂浇筑施工通用型装配式菱形挂篮设计研究[J].公路,2024,69(10):207-212.
- [4] 程皓,郭增伟,向中富.基于遗传算法的三角挂篮设计参数的优化分析[J].结构工程师,2020,36(4):210-217.
- [5] 方淑君,杨耀,阮翔,等.三角形挂篮和菱形挂篮有限元对比分析[J].公路工程,2017,42(1):55-59.
- [6] 刘伟,宋新新,吴雨航,等.西郊大桥悬臂浇筑施工挂篮优化设计[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(4):15-20;65.
- [7] 徐田兵.涪江特大桥悬臂施工关键技术研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [8] 杨萍.三角挂篮悬臂浇筑技术在连续刚构桥中的应用研究[J].交通世界,2024(增刊1):220-222.
- [9] 四川路桥桥梁工程有限责任公司.一种应用于连续梁悬臂浇注的挂篮:CN202110953131.1[P].2021-10-26.
- [10] 四川省交通建设集团股份有限公司,四川公路工程咨询监理有限公司.一种用于挂篮施工装置的行走机构:中国,CN202022679486.X[P].2021-09-21.
- [11] 朱丽梅.大宽度连续刚构桥步履式无轨挂篮研究[J].四川建材,2023,49(9):187-188;193.
- [12] 王文祥.斜拉桥施工过程中挂篮的分析研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2017.
- [13] 高振华,张华,李亮,等.三角挂篮和菱形挂篮有限元对比分析及优化[J].工程建设与设计,2022(7):107-112.
- [14] GB 50017—2017,钢结构设计标准[S].
- [15] JTG/T 3650—2020,公路桥涵施工技术规范[S].
- [16] GB 50205—2020,钢结构工程施工质量验收标准[S].
- [17] GB/T 11263—2017,热轧H型钢和部分T型钢[S].

(上接第204页)

- [14] 张岩兵.高填方路基沉降监测与影响因素分析[J].交通世界,2024(16):66-69.
- [15] 杨晓娜.高速公路填方路基沉降监测与分析[J].中国公路,2023(19):108-109.
- [16] 马贵红,吴仕林.高填路基施工沉降监测与变形控制技术[J].云南水力发电,2021,37(10):26-32.
- [17] 蔡云鸥.高填方路基沉降分析及控制技术研究[J].工程技术研究,2021,6(7):90-91.
- [18] 郭杰.高速公路高填方路基施工关键技术[J].四川建材,2023,49(2):181-182.
- [19] 赵爱霞.山区公路工程高填方路基施工技术[J].中国新技术新产

- 品,2020(15):101-102.
- [20] 莫灿峰.高填方路基沉降预测与控制沉降施工技术探讨[J].工程技术研究,2021,6(5):58-59.
- [21] 孙合朋,郑伟.高填方路基沉降量预测综述及数值模拟[J].中国科技信息,2021(21):87-88.
- [22] 赵勇.土石混填路基变形及稳定性研究[J].西部交通科技,2023(11):9-11;122.
- [23] 张武鹏.冲击碾压技术在高速公路高填方路基施工中的应用[J].中国高新科技,2022(8):92-93.
- [24] 林孟红.高填方路基施工中冲击碾压技术的应用[J].黑龙江交通科技,2021,44(12):53-54.