

文章编号: 1005-0523(2023)06-0054-08



连续刚构桥边跨现浇段及合龙段一次性施工方法研究

伍海山¹, 刘凤帅², 曹国军³

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西省机电设备招标有限公司, 江西 南昌 330046;
3. 中铁二十三局集团第四工程有限公司, 四川 成都 610031)

摘要:以预应力混凝土连续刚构桥涪江大桥工程为背景, 针对特殊环境下边跨直线段施工提出了挂篮一次性浇筑边跨直线段及合龙段的施工方法, 利用理论推导及MIDAS CIVIL有限元软件对该施工方法进行分析, 主要从主梁挠度、挂篮结构安全性以及桥梁结构受力等方面分析挂篮浇筑边跨直线段施工方法的可行性。研究表明, 利用挂篮一次性浇筑边跨直线段及合龙段, 对成桥后中跨侧主梁受力和挠度影响很小, 而对成桥后边跨主梁竖向变形扰动较大, 在施工中需及时调整主梁预拱度值。与传统施工方案相比, 成桥后主梁最不利截面压应力增幅为15%, 总体上处于可控范围内。从挂篮结构安全性方面考虑, 挂篮结构在通过增设前后吊杆等优化方式后能满足施工过程中的安全要求。结果表明挂篮一次性浇筑边跨直线段及合龙段这一新的施工方法实践可行, 并已在涪江大桥上顺利实施。

关键词:连续刚构桥; 挂篮浇筑边跨直线段; 桥梁施工监控; 挂篮法; 有限元法

中图分类号: U448.21

文献标志码: A

本文引用格式: 伍海山, 刘凤帅, 曹国军. 连续刚构桥边跨现浇段及合龙段一次性施工方法研究[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(6): 54-61.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2023.06.002

Research on One-Time Construction Method of Cast-in-Place Section and Merging Section of Side Span of Continuous Rigid-Frame Bridge

Wu Haishan¹, Liu Fengshuai², Cao Guojun³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. Jiangxi Machinery & Electric Equipment Tendering Co., Ltd., Nanchang 330046, China; 3. The Fourth Construction Co., Ltd of China Railway 23rd Bureau Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: With the background of the Fujiang Bridge project, which is a prestressed concrete continuous rigid-frame bridge, a construction method for one-time pouring of edge span linear section and closure section using a hanging basket is proposed for edge span linear section construction under complex terrain. The feasibility of the hanging basket method is analyzed using structural mechanics theory and MIDAS CIVIL finite element software, focusing on the main beam deflection, hanging basket structural safety, and internal forces of girder. The study shows that the one-time pouring of edge span linear section and closure section using a hanging basket has minor impact on the mid-span side box girder internal forces and deflection after bridge completion, but has a certain influence on the vertical deformation of the edge span girder. Therefore, the pre-camber values of the box girder need to be adjusted timely during construction. Compared with traditional construction scheme, the maximum increase in the compressive stress on the worst section of the main beam after completion is 15%, which is within reasonable and controllable range. Considering the safety of the hanging basket, it can meet the safety re-

收稿日期: 2022-10-16

quirements during construction by using optimization methods such as adding front and rear suspension rods. The results show that the one-time pouring of edge span linear section and closure section using a hanging basket is feasible, and this new construction method has been successfully applied in the construction of the Fujiang Bridge.

Key words: continuous rigid-frame bridge; one-time pouring of edge span linear section with hanging basket; bridge construction monitoring; hanging basket method; finite element method

Citation format: WU H S, LIU F S, CAO G J. Research on one-time construction method of cast-in-place section and merging section of side span of continuous rigid-frame bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(6): 54-61.

随着交通基础设施建设的不断推进,我国的桥梁建造在不断地刷新各种记录^[1]。但是,对量大面广的常规型式桥梁的研究仍然具有重要意义。例如,在大跨梁式桥型中,双肢薄壁连续刚构桥因具有跨越能力大、无大吨位支座、无需施工期设临时锚固措施等优点而成为首选桥型。在这种桥型的施工技术中,通常应用挂篮对主梁进行节段平衡悬臂浇筑施工。因为全桥立面设置合理的边中跨比,使得边跨存在一定长度的支架现浇段,采用落地支架或墩顶托架进行现浇施工。目前,在连续刚构桥的施工工艺^[2-3]、施工控制^[4-5]、合龙顺序^[6-7]、挂篮设计^[8-9]等各个方面均有过系列研究,并且对其中的边跨直线段的施工方法也给予了充分讨论^[10-12]。

但是,在一些特殊条件下无法采用落地支架或墩顶托架施工边跨直线段时,如果能利用移动到最大悬臂处的挂篮直接施工,这自然是个方便的选择,目前已经有了一些实践尝试。朱英磊等^[13]提出利用挂篮先浇筑边跨直线段,再浇筑合龙段的施工工艺,并讨论了施工中的关键工序。朱忠民等^[14]提出利用挂篮连接盖梁支架,先浇筑合龙段再浇筑盖梁上

的直线梁段。本文结合四川省成绵高速上涪江大桥的施工实践,提出采用挂篮一次性浇筑边跨直线段和合龙段的新方法,并探讨它对挂篮、主梁的安全性影响。本文不仅理论上验证了新方法的可行性,更在实践中取得了更短的工期和更高的经济性,为特殊环境下边跨现浇段的施工提供新的工艺选择。

成绵高速上的涪江大桥桥型立面布置见图1,主桥为(56+100+56)m的单箱双室变截面双肢薄壁连续刚构桥。边跨现浇段长5m,重306t,合龙段长度为2m,重82.95t。主墩墩高分别为15.6m和13.6m。主桥除墩顶0号段采用托架现浇外,其余节段箱梁均采用挂篮悬浇施工。每个T构悬浇梁段划分为(8×3.5+4×4.0)m的12个节段。

涪江大桥在完成桥墩施工并浇筑部分悬臂节段后,遭遇绵阳爆发50年一遇的洪水灾害,施工铺设的道路被毁,大型设备无法到达边墩,结果无法采用托架法或支架法浇筑边跨直线段,故结合工程经验与本文的理论验证,提出了利用挂篮一次性浇筑边跨直线段及合龙段的施工方法。本文将从挂篮结构优化、主梁受力分析、线形控制等角度探讨新

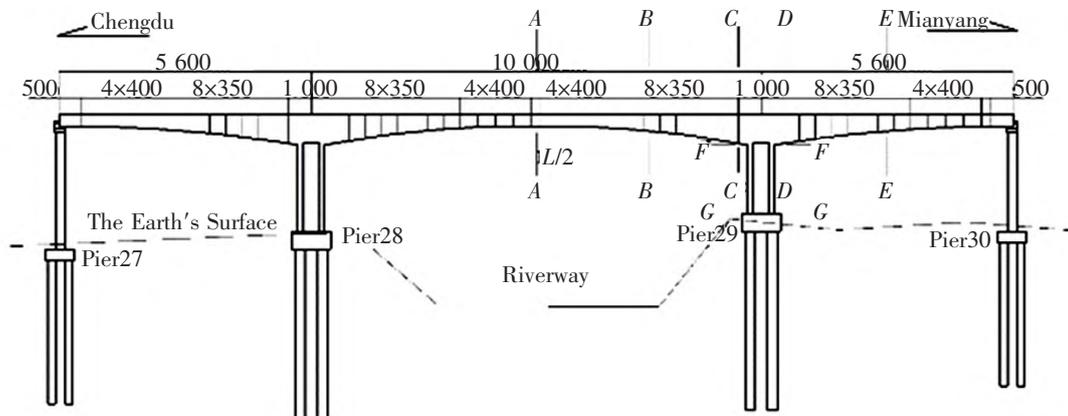


图1 涪江大桥主桥总体布置图(单位:cm)

Fig.1 General arrangement of the main bridge of Fujiang River (Unit: cm)

的施工方案带来的影响^[15-17],理论和实践证明了新方法应用于实际工程中的可行性。

1 边跨直线段施工方案

1.1 总体布置

对于涪江大桥边跨直线段施工,原设计施工方案是在边墩搭设三角托架进行施工,如图2所示。本文提出的利用挂篮一次性浇筑边跨直线段的施工方法,即边跨现浇段及合龙段钢筋进行一次性绑扎,混凝土一次性浇筑,其中梁端实心段混凝土重量由盖梁承受,挂篮一次浇筑法的布置示意图见图3。

两种方案在施工至T构最大悬臂状态阶段前工序均保持一致。在边跨现浇段施工阶段,托架方案需要在边墩上搭设托架并进行预压,在浇筑混凝土过程中,边墩另一侧托架同样施加等量配重保持边墩平衡。而挂篮方案涉及到中墩非对称施工,边跨现浇段即为不对称梁段,因此需要在中跨侧悬臂端位置施加平衡配重。

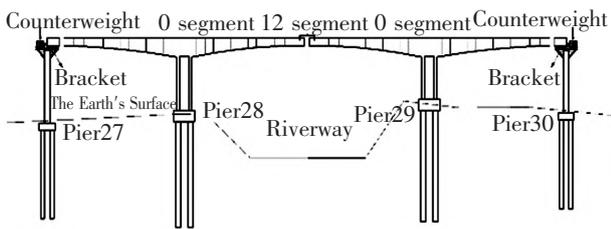


图2 托架浇筑边跨直线段示意图

Fig.2 Diagram of straight section of bracket casting side span

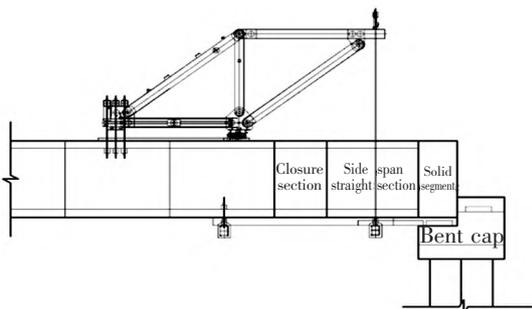


图3 挂篮一次浇筑直线段和合龙段示意图

Fig.3 Diagram of hanging basket casting both side span straight section and closure section

1.2 施工工艺及流程

挂篮一次性浇筑边跨现浇段及合龙段施工方案工艺为:1#~12#节段采用挂篮悬浇施工后,边跨侧及中跨侧挂篮同时前移至已浇12#节段。考虑挂篮在施工结束后方便拆除,需要提前拆除内滑梁及

相应吊杆并搭设内模支架,另外挂篮承载梁长大于最大悬浇节段长度时,需要额外铺设底纵梁,将加长的底纵梁一端搭接于挂篮前下横梁,另一端搭接于盖梁上。边跨直线段及合龙段施工采用一次性钢筋绑扎成型,同时一次性浇筑边跨直线段及合龙段。为了保证T构在施工中平衡,需要在浇筑混凝土过程中等量释放平衡配重。

2 挂篮悬浇边跨直线段的优化措施

采用挂篮悬浇边跨直线段的施工方案,需要对原有挂篮结构进行优化,以满足施工过程中挂篮结构的安全性要求。挂篮模型在优化前后主要区别:相比原挂篮,优化后的挂篮拆除了内滑梁及相应吊杆,加长底纵梁至盖梁上,另外由于悬浇节段的加长,增大了前吊点及后锚点的承重,因此在原有8根前吊点的情况下增加了2根前吊点,并在后锚点处每单榀菱形主桁架增加了1处后锚点,其余则一致,优化后模型见图4。

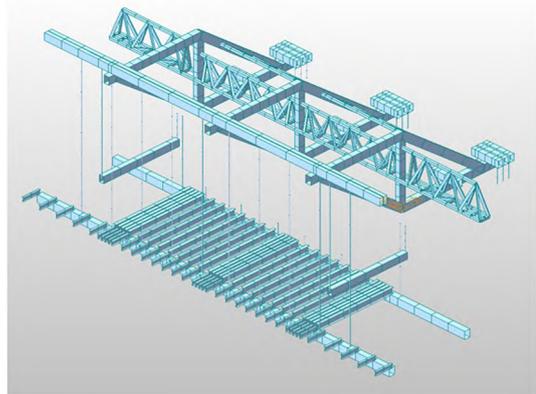


图4 优化后挂篮结构模型

Fig.4 Optimized hanging basket structure model

2.1 挂篮计算模型

在主桁架的前支点处与后锚点处均约束三向平动,主桁架系统与斜平联及所有吊杆两端均释放转动约束,底纵梁与下横梁之间和上横梁与主桁架之间采用弹性连接。混凝土和挂篮模板等荷载以等效线荷载形式施加于底模纵梁和内外滑梁上,另外在加长段,翼缘板混凝土以节点荷载施加于底纵梁上。

Q355、Q235钢材及PSB830螺纹钢弹性模量均取为 2.06×10^5 MPa,泊松比取值0.3。另外根据相关规范对菱形挂篮各组成构件规定其对应的应力限值,挂篮的整体挠度变形限值为20 mm。

2.2 挂篮结构有限元分析

通过对挂篮整体结构有限元分析,分析挂篮结构在施工1#节段以及边跨直线段时两种控制工况的受力及变形。分析结果如表1及表2所示。

表1 施工1#节段挂篮主要杆件验算结果汇总表

Tab.1 Construction 1# section hanging basket main rod test results summary table

Component name	Maximum combined normal stress/MPa	Maximum shear stress/MPa	Vertical cumulative displacement/mm
Diamond truss	151.75	80.48	-11.95
Upper crossbeam	64.04	26.80	-11.97
Gatepost couplet	3.85	0.80	-0.85
Oblique flat joint	80.25	14.77	-3.05
Inner sliding beam	117.19	16.98	-13.88
External sliding beam	194.00	28.11	-16.50
Bottom girder	140.94	27.44	-19.53
Lower crossbeam	21.26	24.75	-18.10
Rear anchor pressure beam	38.75	38.59	-1.22
Rebar	281.40		-18.02

表2 施工边跨直线段挂篮主要杆件验算结果汇总表

Tab.2 Construction side span straight section hanging basket main rod test results summary table

Component name	Maximum combined normal stress/MPa	Maximum shear stress/MPa	Vertical cumulative displacement/mm
Diamond truss	177.78	72.29	-11.44
Upper crossbeam	59.68	42.63	-11.53
Gatepost couplet	4.43	0.95	-0.87
Oblique flat joint	87.96	16.17	-2
Inner sliding beam	204.08	36.14	-17.36
External sliding beam	145.67	35.2	-18.55
Bottom girder	21.38	30.9	-17.78
Lower crossbeam	30.45	30.33	-0.93
Rear anchor pressure beam	21.32	14	-17.79
Rebar	282.48		-17.72

通过对比挂篮各构件在施工1#节段和边跨直线段时的应力及位移结果可知,在挂篮优化后进行边跨直线段施工,挂篮受力安全性得到满足。与桥梁悬浇施工最不利工况1#节段时相比,挂篮受力变化不大,也能满足刚度要求。

由表1及表2可知,优化前后挂篮的最大组合正应力出现在前后吊杆构件,其应力值基本不变。挂篮各个构件受力变化最大的为主桁架,主桁架在悬浇边跨直线段时其最大正应力增幅达到17.2%,最大剪应力降幅为10.2%,但安全富余均较大。

有限元计算结果表明,通过对挂篮前后吊点的优化后,利用挂篮悬浇边跨直线段满足施工安全要求,受力分析证明了挂篮结构优化措施的适用性。

3 不同施工方案对桥梁施工监控影响分析

3.1 理论分析

根据不同施工方案的工序及配重的差异,以简化的等截面主梁结构特性对由方案改变引起桥梁结构受力及变形的变化进行力学理论分析。主梁简化为边跨 $L/2$ 截面作为计算控制截面,仅考虑梁体自重、挂篮荷载及平衡配重,忽略预应力荷载的应力影响。

作为对比的托架现浇方案以及挂篮一次性浇筑方案,分析其中跨合拢后桥梁结构受力情况。其中挂篮荷载取设计值为 $F_1=900$ kN,支架现浇方案边合龙段配重为 $F_2=415$ kN,挂篮一次性浇筑边跨直线段方案配重为 $F_3=2\ 930$ kN,箱梁自重及二期恒载取整为 $q_a=620$ kN/m。

在中跨合拢阶段,两个T构在中跨跨中位置形成刚接,全桥形成整体,作为平面结构的桥梁为五次超静定结构。中跨合拢后,配重全部释放,挂篮拆除,计算简图见图5。

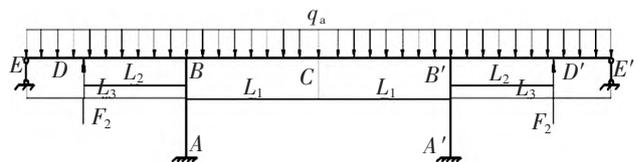


图5 中合拢阶段结构计算简图
Fig.5 Structural calculation sketch in the middle span closing stage

取力法^[18]基本结构如图6所示,求出支架方案及挂篮悬浇筑方案的结构弯矩内力图分别如图7及图8所示,并得到相关控制截面内力值见表3。

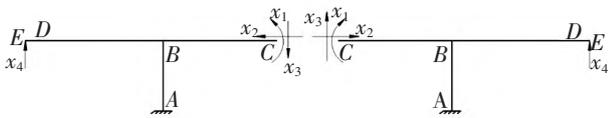


图6 基本结构确定
Fig.6 Basic structure determination

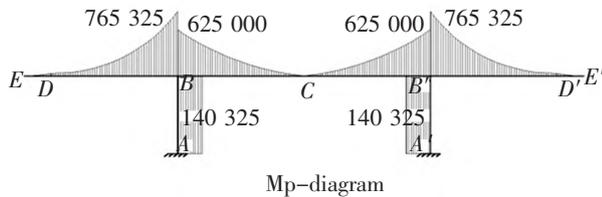


图7 支架方案弯矩图(单位:kN·m)
Fig.7 Bending moment of the bracing scheme(Unit: kN·m)

图8 挂篮悬浇方案弯矩图(单位:kN·m)

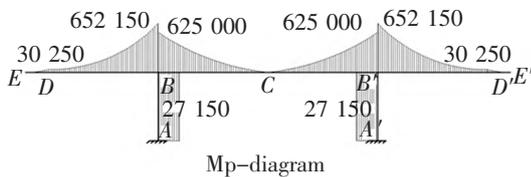


图8 挂篮悬浇方案弯矩图(单位:kN·m)
Fig.8 Bending moment of hanging basket suspension scheme(Unit: kN·m)

表3 中跨合拢阶段桥梁控制截面内力
Tab.3 Internal forces in control sections of bridges at mid-span closing stage

Critical cross-section	Bracket scheme		Hanging basket plan	
	Bending moment/(kN·m)	Shear force/kN	Bending moment/(kN·m)	Shear force/kN
A-A	220 550	0	215 990	0
B-B	91 950	12 500	96 510	12 500
C-C	414 110	25 000	409 010	25 000
D-D	241 540.2	18 231.5	306 960.4	18 905.9
E-E	123 052.6	4 231.7	169 595.2	4 905.9
F-F	160 209.8	16 291	102 049.6	10 205
G-G	84 155.2	16 291	51 025.4	10 205

根据求解后的结构内力以及截面参数等信息,计算结构最大竖向位移。结构在托架方案下最大节段位置处竖向位移。 Δ_{k1} 为边跨位移, Δ_{k2} 为中跨位移。

$$\Delta_{k1} = \sum \frac{A_{\omega} y_c}{EI} = -\frac{57\ 947\ 726.3}{EI} = -19.2\text{ mm}$$

$$\Delta_{k2} = \sum \frac{A_{\omega} y_c}{EI} = -\frac{127\ 012\ 500}{EI} = -42.1\text{ mm}$$

结构在挂篮一次浇筑方案下最大节段位置竖向位移为

$$\Delta_{k1} = \sum \frac{A_{\omega} y_c}{EI} = -\frac{121\ 389\ 323.3}{EI} = -40.2\text{ mm}$$

$$\Delta_{k2} = \sum \frac{A_{\omega} y_c}{EI} = -\frac{120\ 637\ 500}{EI} = -40.0\text{ mm}$$

从中跨合拢后主梁的控制截面内力及竖向位移结果可以看出:不同边跨直线段施工方案对中跨主梁受力及位移几乎没有影响,而在D-D、E-E截面,挂篮一次浇筑方案的弯矩均要高于托架方案,尤其在D-D主梁根部截面,最大弯矩值同比增长27%,一定程度上降低了主梁的抗弯能力,同时挂篮一次施工方案加大了边跨主梁的竖向位移,差值在2.1 cm,因此不同方案对边跨主梁线形造成一定差异,需要及时调整桥梁预拱度。

在墩顶F-F截面及墩底G-G截面,挂篮方案的弯矩均小于托架方案,挂篮一次浇筑施工方案减小了主墩所受弯矩,因此中跨主梁在后期受到收缩徐变的影响时,其留有一定偏心弯矩储备。

3.2 数值模拟分析

通过有限元软件MIDAS CIVIL采用空间梁单元建立全桥模型如图9所示。边界条件为:中墩底及相应墩梁固结,梁端竖向、横向均固定,纵向可滑动。梁体采用C50材料,墩身为C40材料,弹性模量分别为 3.45×10^4 MPa和 3.25×10^4 MPa,泊松比取值为0.2。预应力钢束采用Strand1860材料,弹性模量为 1.95×10^5 MPa,泊松比取0.3。

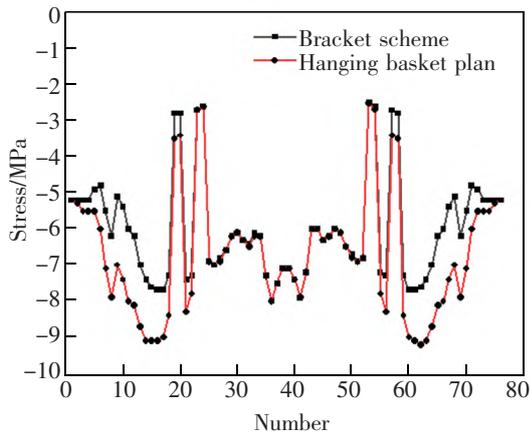


图9 涪江特大桥有限元分析模型图
Fig.9 Fujiang River Special Bridge finite element analysis model diagram

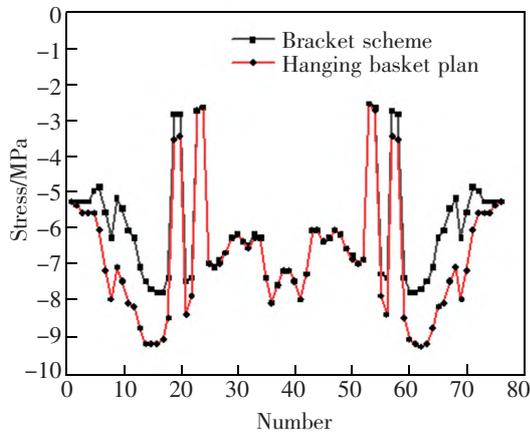
根据不同施工方案建立了两个模型:模型I是在基于原方案的施工工序建立;模型II则是根据挂篮一次浇筑的施工工序建立。两个模型除了边跨直线段施工方法不同外,其余均一致。

3.3 结构受力影响分析

利用有限元软件对两种不同的边跨直线段施工方案下桥梁结构受力特性进行研究,主梁各截面以及关键截面成桥应力结果见图10和表4。



(a) Upper edge stress diagram



(b) Lower edge stress diagram

图 10 不同方案成桥后主梁应力对比图

Fig.10 Comparison of stresses in the girder after the completion of the bridge with different solutions

表 4 成桥阶段桥梁控制截面应力

Tab.4 Bridge control section stress in bridge formation stage MPa

Critical cross-section	Bracket scheme		Hanging basket plan	
	Upper edge	Lower margin	Upper edge	Lower margin
A-A	-3.6	-7.1	-3.5	-7.1
B-B	-8.4	-6.2	-8.4	-6.2
C-C	-9.1	-6.8	-9.1	-6.8
D-D	-8.7	-7.3	-7.7	-8.4
E-E	-6.4	-6.2	-5.0	-8.1
F-F	-4.2	-1.3	-5.6	-1.7
G-G	-1.8	-4.5	-2.7	-4.5

通过图 10 和表 4 可知:挂篮一次浇筑方案与传统托架方案相比,成桥阶段主梁应力的变化趋势和规律一致,中跨主梁应力基本保持不变,但边跨主梁应力值变化明显。其中边跨主梁上缘最大应力值均位于主梁根部,压应力减小 1 MPa,边跨主梁下缘最大应力值位于 3L/4,压应力增大 1.3 MPa,增幅为 15.4%,总体上结构能够满足安全要求。

在桥墩墩顶 F-F 和墩底 G-G 截面中,不同边跨直线段施工方案对上缘应力影响较大,利用挂篮浇筑边跨直线段增大了墩顶、底的压应力,但与中跨主梁长期下挠造成主墩产生的偏心压应力异号,因此从长期来看,其一定程度上可以抵消中跨主梁产生的收缩徐变。

3.4 主梁线形影响分析

利用有限元模型对两种不同的边跨直线段施工方案所形成的结构挠度进行分析,由于涪江特大桥为三跨对称结构,故取单墩的边跨与中跨箱梁累积挠度数据进行对比分析,结果见表 5 和表 6,成桥后主梁整体线形可见图 11。

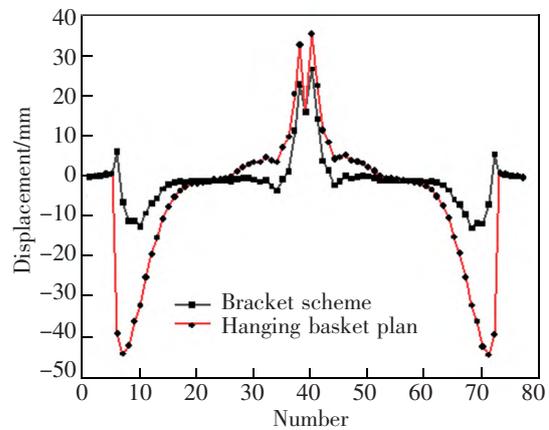


图 11 不同方案成桥后主梁线形对比图

Fig.11 Comparison of the alignment of the main girders after the completion of different solutions

表 5 与表 6 中,负号均表示箱梁向下竖向变形,截面号 13~1 表示边跨合龙段到箱梁根部的顺序编号,而截面号 13'~1'表示中跨合龙段到箱梁根部的顺序编号。

通过图 11 和表 5 可知:主梁线形在不同边跨直线段施工方案下的变化规律基本一致。在边跨箱梁挠度数据对比中,所在截面距离主梁根部越远,两种方案造成箱梁的竖向位移差值越大,最大差值位于边跨主梁 L/4 处,达到 45 mm,而且挂篮方案推

表5 边跨侧箱梁挠度数据对比

Tab.5 Comparison of deflection data of side span side box girder

Section number	Deflection /mm		Difference/mm
	Bracket scheme	Hanging basket plan	
13	0.52	0.68	0.16
12	6.07	-38.88	-44.95
11	-6.47	-44.02	-37.55
10	-11.15	-41.93	-30.78
9	-11.04	-35.83	-24.79
8	-12.36	-31.99	-19.63
7	-9.14	-24.91	-15.77
6	-6.64	-19.11	-12.47
5	-5.49	-15.17	-9.68
4	-3.16	-10.49	-7.33
3	-1.98	-7.36	-5.38
2	-1.4	-5.13	-3.73
1	-1.19	-3.54	-2.35

表6 中跨侧箱梁挠度数据对比

Tab.6 Comparison of deflection data of mid-span lateral box girder

Section number	Deflection/mm		Difference/mm
	Bracket scheme	Hanging basket plan	
13'	16.06	16.09	0.03
12'	22.79	32.55	9.76
11'	11.22	20.41	9.19
10'	1.19	9.75	8.56
9'	-0.74	7.14	7.88
8'	-3.69	3.45	7.14
7'	-2.46	3.99	6.45
6'	-0.94	4.79	5.73
5'	-1.39	3.59	4.98
4'	-0.85	3.37	4.22
3'	-0.48	2.96	3.44
2'	-0.48	2.17	2.65
1'	-0.66	1.18	1.84

后了主梁发生最大挠度的位置,由原来边跨 $3L/8$ 推后至 $L/4$ 位置。

从表6中跨箱梁挠度数据结果可以看出:中跨主梁在挂篮方案下上挠更大,对于后续跨中位置的下挠留有一定储备空间。不同边跨直线段施工方案对主梁成桥线形有较大影响,因此需要根据现场实际情况以及计算结果调整箱梁预拱度值,以保证后续合龙精度满足设计要求。

4 结论

1) 利用挂篮一次性悬浇边跨直线段,需要检算挂篮结构安全性,必要时可通过增设前吊杆及后锚点等简易优化方法提升挂篮整体强度及刚度。

2) 相比传统施工方法,利用挂篮悬浇边跨直线段,边跨侧箱梁挠度变化较大,边跨主梁位移从 $L/2$ 开始与传统方案差值大于 1 cm,因此在施工至主梁 $L/2$ 前需要确定边跨直线段施工方案,以便后续提供更加精准的预拱度值。

3) 通过理论分析及数值模拟分析,结果表明改变边跨直线段施工方案,对边跨主梁结构受力有一定影响,但总体处于可控范围。

4) 挂篮一次性悬浇边跨直线段的施工方法,可以节省工期,可操作性强,经济性好。目前涪江大桥已采用该方法顺利完成合龙,全桥线形流畅,满足设计要求。

参考文献:

- [1] 项海帆. 中国桥梁(2013—2023)[M]. 北京:人民交通出版社,2017.
XIANG H F. Bridges in China (2013—2023)[M]. Beijing: China Communication Press, 2023.
- [2] 赵天元. 沉湖汉江特大桥主桥连续刚构施工技术[J]. 桥梁建设, 2012, 42(1): 108-112.
ZHAO T Y. Continuous rigid structure construction technology for the main bridge of Han River Special Bridge at Chenhu[J]. Bridge Construction, 2012, 42(1): 108-112.
- [3] 艾占祥. 珠江特大桥主桥大跨度连续刚构的施工[J]. 桥梁建设, 2005(6): 63-65.
AI Z X. Construction of a large-span continuous rigid structure for the main bridge of the Pearl River Special Bridge[J]. Bridge Construction, 2005(6): 63-65.
- [4] 王胜杰,左家强,杨斌,等. (88+160+88)m 连续刚构梁精细化施工控制关键问题研究[J]. 中国铁路, 2022(12): 44-49.
WANG S J, ZUO J Q, YANG B, et al. Research on key

- problems of fine construction control of (88+160+88) m continuous rigid frame beam[J]. *China Railway*, 2022(12): 44-49.
- [5] 余伟. 大跨度连续刚构桥梁施工控制综合技术研究[J]. *公路工程*, 2018, 43(2): 162-166.
YU W. Comprehensive technology research on long span continuous rigid frame bridge[J]. *Highway Engineering*, 2018, 43(2): 162-166.
- [6] 江雄. 赤石特大桥主梁合龙方案研究[J]. *桥梁建设*, 2016, 46(1): 117-121.
JIANG X. Study on the main girder co-location scheme of Chishi Special Bridge[J]. *Bridge Construction*, 2016, 46(1): 117-121.
- [7] 苑辉, 杜孟翔. 连续刚构桥梁一次性合龙关键技术研究[J]. *施工技术*, 2021, 50(17): 56-59.
YUAN H, DU M X. Research on key technology of one-off closure of continuous rigid frame bridge[J]. *Construction Technology*, 2021, 50(17): 56-59.
- [8] 刘刚亮, 王中文. 轻型鹰式挂篮的总体设计[J]. *桥梁建设*, 1998(4): 64-66.
LIU G L, WANG Z W. Overall design of light eagle hanging baskets[J]. *Bridge Construction*, 1998(4): 64-66.
- [9] 魏贤华. 菱形挂篮设计与施工[J]. *桥梁建设*, 2005(1): 42-45.
WEI X H. Design and construction of diamond-shaped hanging baskets[J]. *Bridge Construction*, 2005(1): 42-45.
- [10] 唐小富. 高墩连续刚构桥长边跨现浇段施工方案比选[J]. *桥梁建设*, 2016, 46(3): 115-119.
TANG X F. Construction plan comparison for long side span cast-in-place section of high pier continuous rigid structure bridge[J]. *Bridge Construction*, 2016, 46(3): 115-119.
- [11] 张丽英. 无落地支架法现浇连续梁边跨直线段施工技术[J]. *国防交通工程与技术*, 2016, 14(S1): 91-93.
ZHANG L Y. Construction technology of straight section of side span of cast-in-place continuous girder by nonfalling bracket method[J]. *National Defense Transportation Engineering and Technology*, 2016, 14(S1): 91-93.
- [12] 龚玉华, 陈雷, 陶路, 等. 山区连续刚构桥高墩边跨现浇段施工方案[J]. *世界桥梁*, 2012, 40(3): 20-23.
GONG Y H, CHEN L, TAO L, et al. Construction plan for cast-in-place section of high pier side span of continuous rigid structure bridge in mountainous area[J]. *World Bridges*, 2012, 40(3): 20-23.
- [13] 朱英磊, 穆建廷, 雷军. 挂篮悬臂浇筑连续刚构桥边跨直线段施工方法研究[J]. *国防交通工程与技术*, 2015, 13(1): 27-30.
ZHU Y L, MU J T, LEI J. Research on construction method of straight section of side span of hanging basket cantilever casting continuous rigid bridge[J]. *National Defense Transportation Engineering and Technology*, 2015, 13(1): 27-30.
- [14] 朱忠民, 卢治国, 姚吉友, 等. 高墩刚构桥边跨挂篮配合盖梁支架施工法及施工阶段受力分析[J]. *公路工程*, 2017, 42(4): 191-193.
ZHU Z M, LU Z G, YAO J Y, et al. Construction method of side span hanging baskets with cover beam bracing for high pier rigid bridge and force analysis in construction stage[J]. *Highway Engineering*, 2017, 42(4): 191-193.
- [15] 徐建富, 余毅. 多跨刚构连续梁组合桥上部结构施工监控[J]. *世界桥梁*, 2011(4): 33-35.
XU J F, YU Y. Construction monitoring of multi-span rigid continuous girder bridge superstructure[J]. *World Bridge*, 2011(4): 33-35.
- [16] 林青松. 高墩大跨连续刚构桥悬臂施工温度效应及线形控制[J]. *铁道建筑技术*, 2023(9): 154-157.
LIN Q S. Temperature effect and linear control of cantilever construction for high pier and long span continuous rigid frame bridge[J]. *Railway Construction Technology*, 2023(9): 154-157.
- [17] 武芳文, 薛成凤, 赵雷. 连续刚构桥梁悬臂施工线形控制分析[J]. *铁道工程学报*, 2006(4): 29-33.
WU F W, XUE C F, ZHAO L. The alignment control analysis of cantilever construction for continuous rigid frame bridge[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2006(4): 29-33.
- [18] 李廉锟. 结构力学(第六版)[M]. 高等教育出版社, 2017.
LI L K. *Structural mechanics (Sixth Edition)*[M]. Higher Education Press, 2017.



通信作者: 伍海山(1977—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 2002年硕士毕业于中南大学桥梁与隧道工程专业, 同年7月进入中铁第四勘察设计院从事桥梁设计工作。2004年加入华东交通大学从事桥梁工程教学工作, 2015年博士毕业于同济大学桥梁与隧道工程专业。研究方向为桥梁健康监测及施工控制。E-mail: 1162240118@qq.com。

(责任编辑: 熊玲玲)