

大悬臂分段盖梁反拉法施工工艺试验及评估

于国伦,王兵

[上海城建市政工程(集团)有限公司,上海市 200065]

摘要:分段盖梁反拉法施工工艺比传统落地支架法具有安全、快速、经济、高效等特点,更加适用于交通繁忙路段桥梁的建造。为形成并完善预制盖梁反拉法装配工艺,掌握盖梁反拉法装配时下部结构性能演化全过程,通过典型盖梁节段的现场反拉法装配工艺预演,以及多类型标准盖梁的反拉法施工全过程监测,对预制盖梁反拉法装配进行技术评估,形成适用于大悬臂、小墩距盖梁的预制盖梁反拉法装配施工工艺,可为类似工程提供借鉴。

关键词:大悬臂;分段盖梁;反拉法;试验

中图分类号: U445.46

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)05-0194-06

0 引言

混凝土桥梁采用预制施工可以显著缩短工期,提高施工质量和安全性,降低施工成本和环境影响,其社会效益和经济效益比传统工法更为突出。同时,随着桥梁车道数和跨径的增加,桥梁盖梁出现悬臂长度和体量都越来越大的趋势,大量高架桥的预制拼装盖梁必须采用分节拼装施工。但在盖梁节段和桥墩进行拼装连接的过程中,盖梁节段的重心线和墩柱不一致时,导致节段成为不平衡的机动体系。常规方法是设置落地支架作为临建结构,实现辅助平衡。然而,落地支架占用地面道路,影响甚至阻断交通,且支架安装需要加固地面,支架安装拆卸复杂,材料利用率低,施工成本高,与城市桥梁工业化建造的优越性产生矛盾,极大降低了盖梁预制施工的先进性。

依托工程为绍兴越东路项目,共有盖梁117榀,包括3种标准类型:GL1型、GL2型和GL5型。盖梁长24.9 m,宽2.6 m,中心高2.6 m,总重量达309 t,整体运输起吊困难。双立柱的墩距4.8 m,悬臂长近10 m,为常见大悬臂、小墩距盖梁。采用两节段对称预制,中间位置设置后浇段,节段吊装后湿接段合龙施工。相比胶接缝合龙方式,采用湿接缝合龙在盖梁整体强度和耐久性方面均具有高度可靠性,但盖梁

节段预制拼装施工存在以下主要难点:

(1)为确保桥梁建造中的社会效益、经济效益和环保效益,施工期间地面辅路要求能“保通”,不能设置落地支架。而盖梁节段吊装后通过灌浆套筒和立柱连接,连接过程中盖梁和立柱为不对称非刚接体系,盖梁节段重心偏离立柱中心,盖梁倾覆力矩大,抗倾覆施工设计要求高。

(2)城市高架桥的桥墩高度大,立柱高度范围常见5.0~12.0 m,不能采用常规落地支架的情况下,立柱受倾覆力矩影响大。且立柱常为钢筋混凝土结构,施工阶段的自重压应力仅0.1~0.2 MPa,压应力储备小,墩柱施工不平衡弯矩产生的拉应力控制要求高。

(3)全线盖梁节段种类多、重量大,盖梁节段吊点重心把握难度高,传统吊装效率低下。盖梁和立柱拼接时,拼接面要求水平且拼接过程平稳。为保障盖梁和立柱拼接前的就位精度,每种盖梁在吊装过程中都存在姿态调整问题。

因此,针对城市特异型分段盖梁的高效预制装配施工技术难题,创新性提出大盖梁节段预制装配施工的无支架反拉平衡施工方法^[1]。这种方法具有施工安全、快速、经济、高效等优点,可确保城市盖梁分段拼装施工时地面辅道的保通需求。

悬臂盖梁反拉法装配施工示意图见图1。

1 盖梁反拉法工艺试验目的和内容

预制盖梁反拉法装配现场试验包括现场工艺试验和全过程监测试验两部分内容。

现场工艺试验选取依托工程中较低高度典型盖

收稿日期:2023-12-14

作者简介:于国伦(1980—),男,本科,高级工程师,主要从事道路桥梁施工工作。

通信作者:王兵(1981—),男,本科,高级工程师,主要从事道路桥梁施工工作。电子信箱:12346946@qq.com

GL1型盖梁反拉法装配施工,首先吊装东侧节段,其次吊装西侧节段,最后进行盖梁两节段湿接缝合龙施工。

3.1 东侧节段吊装施工

GL1型试验盖梁节段吊装首先对东侧节段吊装进行工艺试吊,然后进行东侧节段的吊装安装,同时对整个吊装过程进行位移、应变和反拉力等的实时测量。

3.1.1 反拉力

东侧节段吊装施工时,3根钢筋从张拉开始到锚固结束一共耗时10 min,施工速度快,满足接缝砂浆层1 h快速施工需求。

东侧节段吊装时,关键控制荷载步对应的总拉力设计值和实测值比较见表1。设计值和实测值之比在0.842~1.091,平均值0.987,标准差0.085。所有钢筋锚固后的总拉力设计值和实测值之比在0.956,数据稳定,吻合程度高,说明盖梁节段采用精轧螺纹钢进行反拉锚固在吊装阶段性能稳定,施工过程可控。

表1 东侧节段总拉力设计值和实测值比较

荷载步	内容	总拉力 设计值/kN	实测值/ kN	实测值/ 设计值
1	张拉 N1	449.0	378.1	0.842
2	张拉 N1	1 164.0	1 269.9	1.091
5	张拉 N2 和 N3	2 004.0	2 073.9	1.035
7	张拉 N2 和 N3	2 577.0	2 522.8	0.979
11	张拉 N2 和 N3	3 455.7	3 530.7	1.022
12	锚固后 N2 和 N3	3 383.0	3 233.2	0.956
			平均值	0.987
			标准差	0.085
			变异系数	0.086

3.1.2 预应力损失

东侧节段吊装时,每根精轧螺纹钢在关键控制步对应的钢筋拉力设计值和实测值比较见表2。反拉力设计值和实测值之比在0.842~1.100,平均值0.987,标准差0.079。N1钢筋锚固后的拉力设计值和实测值之比在1.018,N2钢筋锚固后比值为0.899,N3钢筋锚固后比值为0.950,可见数据吻合程度高。

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)第6.2节,精轧螺纹钢作为体外束,需考虑锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩产生的损失,混凝土弹性压缩产生的损失,预应力钢

表2 东侧节段钢筋反拉力设计值和实测值比较

荷载步	内容	反拉力设计值/kN	实测值/kN	实测值/设计值
1	张拉 N1	449.0	378.1	0.842
2	张拉 N1	1 164.0	1 269.9	1.091
4	锚固 N1	1 127.7	1 148.2	1.018
5	张拉 N2	438.2	482.2	1.100
7	张拉 N2	724.7	692.3	0.955
9	张拉 N2	1 164.0	1 218.6	1.047
11	锚固 N2	1 127.7	1 013.8	0.899
5	张拉 N3	438.2	443.5	1.012
7	张拉 N3	724.7	682.3	0.942
9	张拉 N3	1 164.0	1 163.9	1.000
11	锚固 N3	1 127.7	1 071.2	0.950
		平均值		0.987
		标准差		0.079
		变异系数		0.080

筋的应力松弛产生的损失和混凝土收缩和徐变产生的损失。其中,压缩值可参考表3进行计算:带螺帽锚具一次张拉锚固取2~3 mm,水泥砂浆接缝取1 mm。所以,压缩值按规范可考虑为3~4 mm。根据钢筋锚固前后拉力实测值来推算预应力损失,以及锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩值,数据见表3。根据前述钢筋实时监测数据,锚固后的钢筋拉力变化非常小,且非常稳定。所以,此处将所有发生的预应力损失实测值全部按锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩产生的损失来计算,可以求得压缩量为3.57~7.88 mm,略大于规范给出的建议值3~4 mm。这是由于东侧节段吊装是首节吊装的节段,反拉锚固过程中操作和流程还不是很熟悉,特别是螺纹钢锚固螺帽拧紧程度上有些差异,导致预应力损失偏大。另外,由于锚固后钢筋拉力稳定,说明松弛等导致的预应力损失数值较小。

表3 东侧节段钢筋预应力损失实测值

钢筋	锚固前拉力 /kN	锚固后拉力 /kN	损失拉力 /kN	应力损失 /MPa	压缩量 /mm
N1	1 269.9	1 148.2	121.7	62.01	4.68
N2	1 218.6	1 013.8	204.8	104.36	7.88
N3	1 163.9	1 071.2	92.7	47.24	3.57

3.1.3 过程姿态

3.1.3.1 立柱姿态

东侧节段吊装过程中,立柱顶面倾斜角度监测数据见图3。采用10周期移动平均后所得倾角实测数据线较为稳定,仅在吊装初始立柱有少量扰动,扰动倾角较小,南北向变化范围-0.007~0.002,东西向变化范围-0.020~0.000。

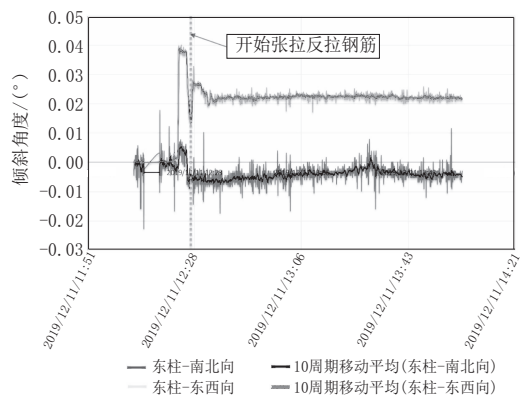


图3 东侧立柱倾斜角度监测数据

根据弹性阶段，立柱顶面倾角与位移的计算关系见图4,推导立柱顶面水平位移,可得墩顶水平位移的南北向测量值为0.31 mm，东西向为0.99 mm。采用Midas Civil考虑施工过程计算所得南北向位移值为0 mm，东西向为1.01 mm。测量值和计算值基本一致,误差在0.31 mm以内,说明节段吊装施工过程中产生的扰动对立柱位移影响很小,几乎可以忽略,立柱垂直姿态可控。

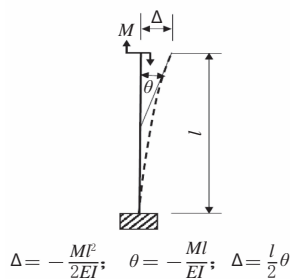


图4 立柱顶面倾角与位移的关系

3.1.3.2 盖梁姿态

东侧节段吊装过程中，节段悬臂端竖向位移增量监测数据见图5。自精轧螺纹钢张拉开始，吊装过程中的悬臂端竖向位移变化范围-8.975~2.725 mm，变化幅度为11.7 mm,变化幅度小。吊装后节段悬臂端的竖向位移增量的终值为-3.13 mm,有限元理论计算值为-3.6 mm,实测值和理论值吻合较好,说明整个吊装过程中节段安装过程稳定，采用的多阶段张拉和卸载流程可以满足预制的大偏心节段平稳就位的需求。

3.1.4 立柱应力

东侧节段立柱应力的实测值和理论值的比较见表4。从表中可知，立柱内侧混凝土应力增量为-0.69 MPa，混凝土总应力为-1.01 MPa，立柱外侧混凝土应力增量为-1.23 MPa，混凝土总应力为-1.34 MPa，均为持续增加的压应力。与有限元理论分析值比较,实测值与理论值相差仅0.08~0.48 MPa，

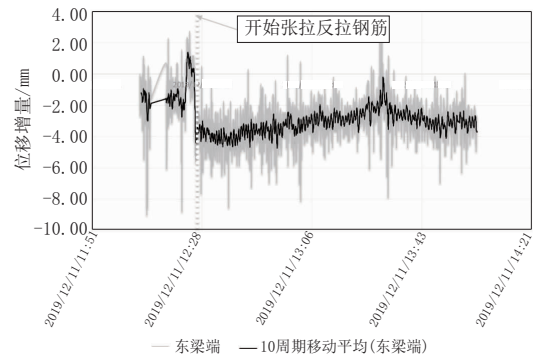


图5 东侧节段悬臂竖向位移增量监测数据

且立柱混凝土全截面受压，满足盖梁预制拼装施工过程中立柱混凝土应力状态要求。

表4 东侧节段立柱应力实测值和理论值比较

参数名称	位置	实测值			理论值	实测值 - 理论值	是否全 截面 受压
		最小值	最大值	终值			
微应变 增量 /με	内侧	1.01	-38.39	-21.33	-28.34	7.01	是
	外侧	3.27	-26.77	-31.76	-45.51	13.75	
应力 增量 /MPa	内侧	0.03	-1.25	-0.69	-0.92	0.23	
	外侧	0.11	-0.87	-1.03	-1.48	0.45	
立柱 应力 /MPa	内侧	-0.31	-1.56	-1.01	-1.49	0.48	
	外侧	-0.31	-1.18	-1.34	-1.42	0.08	

3.1.5 盖梁应力

节段悬臂根部上缘混凝土应力实测值和理论值比较见表5。因南北两侧应力实测值基本对称,取南北两侧的平均值1.77 MPa作为节段悬臂根部上缘混凝土应力增量，与前述理论值1.70 MPa基本一致。因为悬臂盖梁中有预制阶段张拉的预应力钢筋，吊装时的预应力储备是-1.72 MPa。可见，盖梁节段反拉锚固后，盖梁控制截面仅出现0.05 MPa的实测拉应力，满足盖梁施工阶段应力控制要求。

表5 东侧节段悬臂根部上缘正应力实测值和理论值比较

参数名称		实测值			计算值	是否满足抗裂性
		南侧	北侧	平均值		
微应变增量 / $\mu\varepsilon$	最大	52.80	49.80	51.30	49.28	是
	终值	52.80	49.58	51.19		
应力增量 /MPa	最大	1.82	1.72	1.77	1.70	
	终值	1.82	1.71	1.77		
预应力储备 /MPa					-1.72	
悬臂根上缘应力 /MPa					-0.02	

3.2 节段合龙后

盖梁东侧节段和西侧节段安装完成后,采用湿接缝合龙。湿接缝浇筑完成达到设计强度要求后,进行盖梁体内预应力张拉。

3.2.1 反拉力

盖梁东西节段湿接缝合龙后,反拉力变化监测值见表6。盖梁节段吊装后,到节段合龙预应力钢束张拉完成,反拉力的变化值理论计算为42.30 kN,变化率为1.3%。现场监测数据表明,东侧和西侧所有N1~N3反拉钢筋的监测变化值均小于理论计算值,变化率范围在±1.3%以内。可见,节段合龙措施和过程对反拉钢筋的拉力影响很小。理论计算中,盖梁预应力钢束张拉对反拉钢筋有一定的卸载作用。实测结果表明,这种卸载作用并不明显,因为还受到现场实际工作环境,包括温度、风力等的影响。

3.2.2 立柱应力

盖梁合龙后,立柱底应力监测值见表7。立柱吊装后,立柱底的理论初始应力为-0.27 MPa。盖梁节段吊装开始后,对立柱底微应变增量进行监测,并由

表6 盖梁合龙后反拉力变化监测值

参数名称	吊装后	合龙后	变化值	变化率(变化值/理论值)/%	
				变化值	理论值
东侧反拉力/kN	N1 实测值	1 148.20	1 137.17	11.03	1.0
	N2 实测值	1 013.80	1 014.20	-0.40	0.0
	N3 实测值	1 071.20	1 084.79	-13.59	-1.3
	总实测值	3 233.20	3 236.16	-2.96	-0.1
	总理论值	3 233.20	3 190.90	42.30	1.3
西侧反拉力/kN	N1 实测值	1 087.30	1 095.60	-8.30	-0.8
	N2 实测值	1 056.10	1 047.74	8.36	0.8
	N3 实测值	1 010.60	1 024.79	-14.19	-1.3
	总实测值	3 154.00	3 168.13	-14.13	-0.4
	总理论值	3 233.20	3 190.90	42.30	1.3

此推测吊装后和合龙后的立柱底应力实测值。合龙后立柱底应力实测值表明,立柱底全截面受压,压应力范围-2.72~-1.37 MPa,东侧立柱和西侧立柱应力水平基本对称,立柱体现出非常良好的受力状态。应力实测值和理论值之差在-0.17~0.63 MPa之间,实测值和理论值吻合程度较好。

表7 盖梁合龙后立柱底应力监测值

参数名称	立柱底微应变增量 $\mu\epsilon$		立柱底应力 /MPa				是否全截面受压
	吊装后	合龙后	吊装后实测值	合龙后实测值	合龙后理论值	合龙后实测值 - 理论值	
东侧立柱	外侧	-27.68	-70.95	-1.22	-2.72	-2.83	0.11
	内侧	-24.09	-31.10	-1.10	-1.34	-1.17	-0.17
	南面	-16.76	-31.97	-0.85	-1.37	-2.00	0.63
	北面	-18.39	-31.75	-0.90	-1.37	-2.00	0.63
西侧立柱	外侧	-24.72	-63.85	-1.12	-2.47	-2.83	0.36
	内侧	-20.33	-32.20	-0.97	-1.38	-1.17	-0.21
	南面	-19.26	-42.67	-0.93	-1.74	-2.00	0.26
	北面	-22.18	-46.07	-1.04	-1.86	-2.00	0.14

3.2.3 立柱应力

盖梁合龙后,盖梁悬臂根部上缘应力监测值见表8。预制盖梁节段出厂前张拉首批预应力钢束,盖梁上缘压应力储备为-1.72 MPa。盖梁节段吊装开始后,对盖梁上缘微应变增量进行监测,并由此推测吊

装后和合龙后的盖梁悬臂上缘应力实测值。合龙后,东侧盖梁悬臂上缘实测值为-5.96 MPa,西侧为-6.21 MPa,与理论值比较,最大误差仅-0.59 MPa,可见实测值和理论值吻合程度较好。

表8 盖梁合龙后盖梁应力监测值

参数名称	盖梁上缘微应变增量 $\mu\epsilon$		合龙后盖梁上缘应力 /MPa				是否满足抗裂性
	吊装后	合龙后	实测值	平均实测值	理论值	实测值 - 理论值	
东侧	南面	53.24	-106.27	-5.39	-5.96	-5.62	-0.34
	北面	49.58	-139.30	-6.53			
西侧	南面	39.56	-158.88	-7.20	-6.21	-5.62	-0.59
	北面	41.33	-101.16	-5.21			

3.2.4 盖梁位移

盖梁合龙后,悬臂端部竖向位移监测值见表 9。位移监测从合龙预应力开始张拉到张拉结束,实测合龙预应力产生的竖向位移 4.0 mm,有限元理论计算值为 4.5 mm,实测值和理论值吻合程度较好,误差在 -0.5 mm 以内。

表 9 盖梁合龙后悬臂端部竖向位移

参数名称	合龙预应力产生的竖向位移 /mm		
	实测值	理论值	实测值 - 理论值
东侧节段悬臂端部	4.0	4.5	-0.5
西侧节段悬臂端部	4.0	4.5	-0.5

4 结 语

综合 GL1 型等多种类型的盖梁的反拉法盖梁装配施工工艺试验监测结果进行分析,得出以下结论:

(1)盖梁节段吊装时间可以控制在 10~15 min,能满足座浆料施工时间控制要求,实现盖梁高效快速拼装施工。

(2)盖梁节段采用精轧螺纹钢进行反拉锚固施工,在吊装阶段反拉钢筋加载稳定,施工过程可控。

(3)反拉钢筋的预应力损失计算可以采用规范建议值,计算时主要考虑多项压缩量对预应力损失的影响,钢筋松弛损失可忽略。

(4)节段吊装施工中产生的扰动对立柱位移影响很小,几乎可以忽略,立柱垂直姿态可控。

(5)整个吊装过程中,节段安装过程稳定,采用的多阶段张拉和卸载流程可以满足预制的大偏心节段平稳就位的要求。

(6)立柱混凝土全截面受压,满足盖梁预制拼装施工过程中立柱混凝土应力状态要求。

(7)盖梁节段反拉锚固后,盖梁控制截面仅出现最大 0.05 MPa 的实测拉应力,满足盖梁施工阶段应力控制要求。

(8)盖梁合龙后,立柱底全截面受压,立柱应力水平基本对称,立柱体现出非常良好的受力状态,立柱应力实测值满足施工阶段受力要求。

(9)盖梁合龙后,悬臂根部上缘压应力实测值均大于理论值,盖梁应力实测值满足施工阶段受力要求。

(10)盖梁节段施工过程的控制指标监测值和有限元理论计算值吻合程度好,说明理论计算方法适宜。

参考文献:

[1] 王兵,万星,沈殷.基于可靠度理论的盖梁无支架反拉法设计[J].建筑结构,2021,51(增刊 1): 394-399.
[2] 叶可炯,赵国强,沈殷,等.大悬臂盖梁节段拼装施工及应用[J].上海公路,2019,155(4): 40-45.

(上接第 188 页)

参考文献:

[1] 吴富毅.锚索框格梁施工在高边坡路基防护中的应用[J].西部交通科技,2018(9):45-59.
[2] 余洋.浅谈锚杆框格梁施工工艺[J].黑龙江交通科技,2013,36(11): 186.
[3] 吴永强.高边坡预应力锚索框格梁防护施工技术[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(6):52-54.
[4] 谢振安.公路扩建工程既有高边坡防护设计[J].工程技术研究,2021,6(12):205-206.

[5] 刘楠.城市高边坡开挖稳定性分析及防护方案设计[J].黑龙江交通科技,2022,45(10):58-60.
[6] 苏相岗,赖世民,陈振林,等.高边坡防护工艺设计与施工技术研究[J].工程建设与设计,2023(2):137-139.
[7] 刘魏.锚杆-框架梁结构在高边坡中的应用[J].公路与汽运,2014(1):99-102.
[8] JTG/T 3334—2018,公路滑坡防治设计规范[S].
[9] 王二赞.公路路基高边坡防护的设计核心探究[J].河南科技,2020,39(28):118-120.
[10] JTG D30—2015,公路路基设计规范[S].