

波形钢腹板 PC 箱梁桥施工工艺研究^{*}许红胜¹, 覃鑫林¹, 颜东煌¹, 邢立鑫²

(1.长沙理工大学, 湖南 长沙 410114; 2.中国中铁大桥局集团有限公司, 湖北 武汉 430050)

摘要: 针对波形钢腹板 PC(预应力混凝土)箱梁桥传统节段悬臂浇筑施工中存在的问题, 将波形钢腹板预制装配化施工和异步悬臂浇筑施工工艺相结合, 开发一种预制装配化波形钢腹板 PC 箱梁桥节段悬臂施工方法, 将传统工艺中在空中悬臂完成的节段悬臂浇筑及底板与波形钢腹板连接施工作业转变为工厂化预制, 降低节段悬臂施工中高空作业工序组织难度, 并通过与传统施工工艺工期和经济效益对比分析其推广价值。

关键词: 桥梁; 波形钢腹板; PC(预应力混凝土)箱梁桥; 工厂化预制; 节段悬臂浇筑

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)04-0111-04

波形钢腹板 PC(预应力混凝土)箱梁桥利用波形钢腹板代替传统混凝土腹板, 具有结构美观、箱梁轻、材料使用效率高、可避免腹板开裂等优点, 是极具竞争力的桥型之一^[1-4]。波形钢腹板 PC 箱梁桥目前主要采用支架现浇、悬臂浇筑和顶推施工方式^[5], 随着桥梁跨径的增大, 节段悬臂浇筑施工逐渐成为主要施工方式。文献[6-7]在悬臂浇筑施工方法的基础上提出异步悬臂浇筑施工方法, 实现多个节段并行施工。异步悬臂浇筑施工方法在日本已应用于多座波形钢腹板 PC 箱梁桥建造, 如津久见川桥、鬼怒川桥等, 中国的多座波形钢腹板 PC 箱梁桥也采用了异步悬臂浇筑施工方法, 如头道河大桥、运宝黄河大桥引桥、奉化江大桥等^[8-9]。本文将波形钢腹板预制装配化施工^[10]和异步悬臂浇筑施工工艺^[11]相结合, 研究一种预制装配化波形钢腹板 PC 箱梁桥施工工艺。

1 工程概况

某分幅式三跨波形钢腹板 PC 组合连续箱梁

桥, 跨径布置为 60 m+100 m+60 m=220 m, 边中跨比例为 0.6, 变截面箱梁梁底线形按 1.8 次抛物线变化, 箱梁根部梁高 6.2 m、跨中梁高 3.1 m, 箱梁顶板全宽 11.9 m, 设 2.0% 单向横坡(见图 1)。主梁采用 C55 混凝土, 波形钢腹板及配套钢构件均采用 Q345QC 级钢。钢绞线采用 $\phi 15.2$ mm 低松弛预应力高强度钢绞线, 体内束、体外束张拉控制应力分别为 1 395 MPa、1 116 MPa。

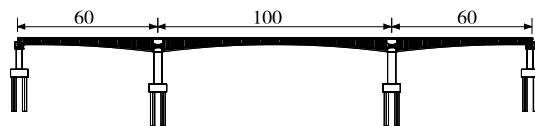


图 1 某波形钢腹板 PC 组合连续箱梁桥主桥立面布置(单位: m)

2 预制装配化施工工艺

2.1 工艺流程

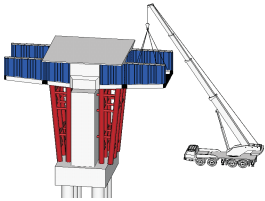
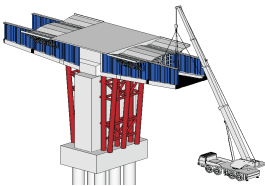
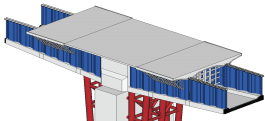

预制装配化波形钢腹板 PC 箱梁桥施工工艺流程见表 1、图 2。

表 1 预制装配化波形钢腹板 PC 箱梁桥施工工艺

施工工序	示意图
在地面进行各悬臂浇筑节段底板胎架制作; 在胎架上进行节段模板安装后, 将已绑扎完成的节段底板钢筋笼与波形钢腹板连接成整体吊装入模, 波形钢腹板与混凝土底板采用翼缘板外包式连接; 进行节段底板部分高度混凝土浇筑, 形成节段底板与波纹钢腹板共同受力的预制 U 形结构	

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878073)

续表1

施工工序	示意图
<p>在0[#]节段现浇施工完成后,用起重吊车将1[#]节段预制U形结构吊装至0[#]节段波形钢腹板位置,通过螺栓临时固定,调整定位满足设计精度要求后进行焊接加固;搭设模板进行0[#]节段底板与1[#]节段底板间湿接缝及1[#]节段底板剩余高度混凝土浇筑</p>	
<p>利用1[#]节段预制U形结构搭设满堂支架及模板,波形钢腹板与混凝土顶板采用波形钢腹板顶端焊有翼缘板与穿孔板的Twin-PBL键连接方式,在绑扎顶板钢筋的同时定位安装预应力管道;吊装2[#]节段预制U形结构,将1[#]节段与2[#]节段波形钢腹板焊接固定</p>	
<p>进行1[#]节段顶板混凝土浇筑、1[#]节段底板与2[#]节段底板间湿接缝及2[#]节段底板剩余高度混凝土浇筑;混凝土强度不小于85%设计强度且龄期不小于7d时,进行1[#]节段预应力张拉</p>	
<p>依次循环上述步骤,对称施工1[#]~9[#]悬臂节段,先进行边跨合龙,张拉相应预应力钢束,再进行中跨合龙,张拉体外预应力钢束</p>	

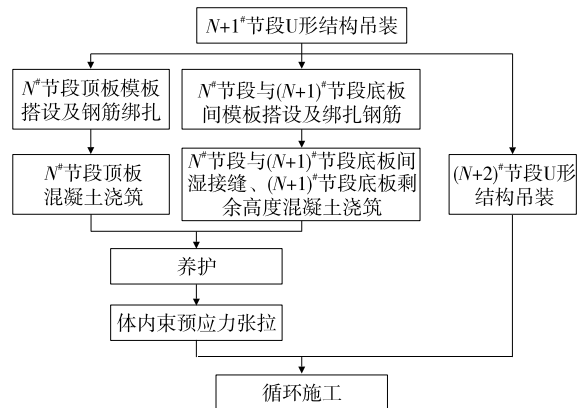


图2 预制装配化波形钢腹板PC箱梁桥施工流程

2.2 技术特点

(1) 将传统节段悬臂浇筑施工中在空中悬臂完成的节段悬臂浇筑及底板与波形钢腹板连接施工作业转变为工厂化预制,施工预制装配化程度高,受天气等因素影响小,施工质量控制较好,并能减少施工高空作业时间,降低施工过程安全风险。

(2) 多个工作平面同时开展,且利用移动式起重汽车取代传统施工挂篮,减少了挂篮安装、前移等工序,拓展了工作平面,节省了施工机械设备租赁

费用。

3 经济性对比分析

大跨径波形钢腹板PC箱梁桥的传统施工工艺主要为悬臂浇筑施工和异步悬臂浇筑施工。悬臂浇筑施工作业面单一,对施工工序衔接要求较高,难以压缩施工工期。与悬臂浇筑施工方法相比,异步悬臂浇筑施工方法能同时开展3个独立工作面并行施工,且施工挂篮较轻,施工工作区域较宽敞,施工安全性有一定提升。预制装配化施工工艺与传统施工方法相比,由箱梁腹板及底板部分高度组成的U形结构可由工厂提前预制,可以同时开展多个工作相互独立的工作区域,且不需要使用施工挂篮。下面对预制装配化施工工艺与传统施工工艺的工期和经济效益进行对比,分析其推广价值。

表2为3种施工工艺的工期对比。由表2可知:每完成一个施工循环,传统悬臂浇筑施工工艺和异步悬臂浇筑施工工艺分别需要16d、14d,而预制装配化施工工艺仅需要10d,工期比传统悬臂浇筑施工工艺减少37.5%,比异步悬臂浇筑施工工艺减少28.6%。

表 2 3 种波形钢腹板 PC 箱梁桥施工工艺的一个施工循环工期对比

施工工序	工期/d		
	传统悬臂浇筑施工	异步悬臂浇筑施工	预制装配化施工
吊装 N [#] 腹板	0.5	—	—
挂篮前移、固定	0.5	0.5	—
N [#] 顶板、(N+1) [#] 底板混凝土立模和钢筋绑扎	—	4.5	—
浇筑 N [#] 顶板、(N+1) [#] 底板混凝土,吊装 (N+2) [#] 腹板	—	1.0	—
浇筑 N [#] 顶板混凝土,(N+1) [#] 与 N [#] 底板间立模和钢筋绑扎	—	—	1.5
浇筑 N [#] 顶板、(N+1) [#] 与 N [#] 底板间湿接缝、(N+1) [#] 底板剩余高度混凝土,吊装 (N+2) [#] U 形结构	—	—	0.5
N [#] 顶、底板立模和钢筋绑扎	6.0	—	—
浇筑 N [#] 顶、底板混凝土	1.0	—	—
混凝土养护	7.0	7.0	7.0
张拉预应力、压浆	1.0	1.0	1.0
合计	16.0	14.0	10.0

根据文献[12—13] 和施工设计图计算 3 种施工工艺的分项工程量(结果见表 3~5),然后根据文献[14]计算各工艺的定额费用(结果见表 6~8),进行各施工工艺经济效益对比分析。各工艺中消耗相同的部分不进行计算。从表 3~8 可以看出:预制装配化施工工艺比传统悬臂浇筑施工工艺节省 1 755 个工日,人工工日节省 19.4%;比

异步悬臂浇筑施工工艺节省 1 010 个工日,人工工日节省 12.2%;单幅桥梁工程直接成本比传统悬臂浇筑施工工艺节约约 95.1 万元,比异步悬臂浇筑施工工艺节约约 54.6 万元。

综上,与传统悬臂浇筑和异步悬臂浇筑施工工艺相比,预制装配化施工工艺的施工经济性提高,具有良好的推广价值。

表 3 传统悬臂浇筑施工工艺的分项工程量统计

项目	分项工程工程量						总数量
	预制部分	0 [#] 块现浇	1 [#] ~9 [#] 节段现浇	边跨现浇	边跨合龙	中跨合龙	
人工工日/个		1 919	6 074	779	181	91	9 044
120 t 施工挂篮/(t·月 ⁻¹)				480			480
60 m ³ /h 以内混凝土输送泵/台班	—	5.3	16.8	2.2	0.5	0.3	25.1
钢模板/t				40			40
塔式起重机/台班				402			402

注:为桥梁单幅工程量,其中施工挂篮和钢模板在 1[#] 节段悬臂浇筑至中跨合龙期间循环使用,塔式起重机在上部结构施工全过程使用。

表 4 异步悬臂浇筑施工工艺的分项工程量统计

项目	分项工程工程量					总数量
	0 [#] 块现浇	1 [#] ~9 [#] 节段现浇	边跨现浇	边跨合龙	中跨合龙	
人工工日/个	1 919	5 329	779	181	91	8 299
80 t 施工挂篮/(t·月 ⁻¹)			320			320
60 m ³ /h 以内混凝土输送泵/台班	5.3	16.8	2.2	0.5	0.3	25.1
钢模板/t			30			30
塔式起重机/台班			383			383

注:为桥梁单幅工程量,其中施工挂篮和钢模板在 1[#] 节段悬臂浇筑至中跨合龙期间循环使用,塔式起重机在上部结构施工全过程使用。

表 5 预制装配化施工工艺的分项工程量统计

项目	分项工程工程量						总数量
	预制部分	0# 块现浇	1# ~9# 节段现浇	边跨现浇	边跨合龙	中跨合龙	
人工工日/个	1 174	1 919	3 195	778	149	74	7 289
50 t 汽车吊/台班	8	—	36	—	4	2	50
60 m ³ /h 以内混凝土输送泵/台班	—	5.3	8.9	2.1	0.4	0.2	16.9
钢模板/t	10			12			32
型钢/t	20	—	—	—	—	—	20
20 t 履带式起重机/台班	—	52	234	52	26	13	377
40 t 平板拖车/台班	16.6	—	—	—	—	—	16.6

注：为桥梁单幅工程量，其中钢模板在 1# 节段现浇至中跨合龙期间循环使用，预制结构使用平板拖车运输至现场吊装。

表 6 传统悬臂浇筑施工工艺的定额费用

费用名称	项目	工程量	定额费用/元	
			综合单价	总价
人工费	人工	9 044 个工日	106.28	961 196.3
	120 t 施工挂篮	480 t/月	180.00	518 400.0
机械设 备费	60 m ³ /h 以内 混凝土输送泵	25.1 台班	1 408.43	35 351.6
	塔式起重机	402 台班	1 132.16	455 128.3
材料费	钢模板	40 t	5 384.00	215 360.0
机械进 出场费	120 t 施工挂篮	4 个	45 600.00	182 400.0
	塔式起重机	2 台	61 552.00	123 104.0
	合计			2 490 940.2

表 7 异步悬臂浇筑施工工艺的定额费用

费用名称	项目	工程量	定额费用/元	
			综合单价	总价
人工费	人工	8 299 个工日	106.28	882 017.7
	80 t 施工挂篮	320 t/月	180.00	328 320.0
机械设 备费	60 m ³ /h 以内 混凝土输送泵	25.1 台班	1 408.43	35 351.6
	塔式起重机	383 台班	1 132.16	433 617.3
材料费	钢模板	30 t	5 384.00	161 520.0
机械进 出场费	80 t 施工挂篮	4 个	30 400.00	121 600.0
	塔式起重机	2 台	61 552.00	123 104.0
	合计			2 085 530.6

4 结语

随着土木工程建设行业的技术转型升级，预制装配化技术逐渐成为极具推广性的施工技术。预制装配化施工工艺具有简化施工操作、减少施工工期、实现工程造价控制等优势，同时能有效降低环境污

表 8 预制装配化施工工艺的定额费用

费用名称	项目	工程量	定额费用/元	
			综合单价	总价
人工费	人工	7 289 个工日	106.28	774 674.9
	50 t 汽车吊	50 台班	2 796.25	139 812.5
机械设 备费	60 m ³ /h 以内 混凝土输送泵	16.9 台班	1 408.43	23 802.5
	20 t 履带式起 重机	377 台班	891.04	335 922.1
	40 t 平板拖车	16.6 台班	1 409.76	23 402.0
材料费	钢模板	32 t	5 384.00	172 288.0
	型钢	20 t	3 504.27	70 085.4
	合计			1 539 987.4

染和资源消耗，实现工程建设可持续发展。

波形钢腹板 PC 箱梁桥预制装配化施工工艺将预制装配化技术与异步悬臂浇筑施工工艺相结合，箱梁部分结构在工厂提前预制，可以与桥梁基础工程及下部结构同步施工，缩短施工工期；该工艺不需要施工挂篮等设备，能减少现场工序组织环节，大大减少高空施工作业量；相比于传统节段悬臂浇筑工艺，该工艺可有效降低机械设备成本、人工费用及工程管理能力，提高施工经济性，具有良好的推广价值。

参考文献：

[1] 杨明,孙筠,张树仁,等.波纹钢腹板体外预应力箱梁桥的发展与展望[J].公路交通科技,2006,23(12):72—75.
[2] 赵国虎,付佰勇,周登燕.波形钢腹板组合梁桥的特性及应用[J].公路,2017,62(7):120—124.
[3] 曾强,彭更生,杜亚江.悬臂施工波形钢腹板组合梁桥施工工艺[J].中国工程科学,2013,15(8):104—107.

(下转第 124 页)