

DOI: 10.7672/sgjs2026020062

预制拼装桥墩节点构造与经济分析*

付林伟^{1,2}, 付宏伟³, 郑俊¹, 吴珂¹

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310000; 2. 中国建筑第四工程局有限公司, 广东 广州 510665; 3. 上饶市宏优公路勘察设计院有限公司, 江西 上饶 334100)

[摘要] 介绍了预制拼装桥墩的技术特点和连接构造,通过工程实例进行了传统现浇桥墩、球墨铸铁钢套筒预制拼装桥墩和新型钢柱脚预制拼装桥墩的经济对比,结果表明,新型钢柱脚预制拼装墩柱的单柱施工工期相比于球墨铸铁灌浆钢套筒预制拼装桥墩缩短约 21.62%,相比于传统现浇桥墩单柱施工工期缩短约 60%;新型钢柱脚预制拼装墩柱的单柱施工成本相比于球墨铸铁灌浆钢套筒预制拼装桥墩降低约 12.25%,相比于传统现浇桥墩单柱降低约 14.55%。综合对比结果表明,新型钢柱脚预制拼装桥墩在工期和成本上具有显著优势。

[关键词] 桥梁;节点连接;预制拼装;桥墩

[中图分类号] U443.22

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0062-05

Joint Construction and Economic Analysis of Prefabricated Assembly Bridge Piers

FU Linwei^{1,2}, FU Hongwei³, ZHENG Jun¹, WU Ke¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310000, China;

2. China Construction Fourth Engineering Division Co., Ltd., Guangzhou,

Guangdong 510665, China; 3. Shangrao Hongyou Highway Investigation and Design Institute Co., Ltd., Shangrao, Jiangxi 334100, China)

Abstract: This paper introduces the technical characteristics and connection construction of prefabricated assembly piers. The economic comparison of traditional cast-in-place piers, ductile iron steel sleeve prefabricated assembly piers and new steel column foot prefabricated assembly piers is carried out through engineering examples. The results show that the single column construction period of the new steel column foot prefabricated assembly piers is about 21.62% shorter than that of the ductile iron steel sleeve prefabricated assembly piers, and about 60% shorter than that of the traditional cast-in-place piers. The single column construction cost of the new steel column base prefabricated assembly pier-column is about 12.25% lower than that of the nodular cast iron steel sleeve prefabricated assembly pier, and about 14.55% lower than that of the traditional cast-in-place pier single column construction cost. The comprehensive comparison results show that the new steel column base prefabricated assembly bridge pier has significant advantages in construction period and cost.

Keywords: bridges; joint connection; prefabricated assembly; piers

0 引言

我国约 90% 的桥梁建设采用传统现浇施工工艺,传统施工工艺受环境影响因素大,如施工质量

难以保证,施工中占路周期长,高空作业和高空坠落安全风险大,材料资源浪费大,各工序间存在一定制约关系,劳动力投入大,现场管理协调难度大等不可控因素,制约项目工期。为解决传统现浇桥梁施工存在的问题,推动预制拼装桥梁工业化发展已迫在眉睫。

近年来,在国家政策的引导下,虽然预制拼装桥梁技术在国内交通基础设施建设中得到了一定应用,

* 宁波市交通运输科技项目(202113)

[作者简介] 付林伟,硕士,工程师,E-mail: flwmp@zuaa.zju.edu.cn

[通信作者] 吴珂,博士,副教授,博士生导师,E-mail: wuke@zju.edu.cn

[收稿日期] 2025-01-16

但尚未得到全面推广应用。国内外学者在预制拼装桥梁方面也进行了深入研究,但对预制拼装桥墩不同连接构造的经济对比分析方面的研究相对较少。因此,有必要对不同连接构造在工程应用方面的经济对比进行分析,旨在为预制拼装桥墩的推广应用提供参考。

1 预制拼装桥墩的技术特点和连接构造

预制拼装桥墩是通过将桥墩的各组成部件在预制工厂集中预制,再将这些预制部件进行快速拼装,形成完整的桥墩结构。相比于传统现浇桥墩施工工艺,预制拼装桥墩具有如下明显优势:①施工效率高和质量有保证,预制墩柱在预制厂集中生产,可满足标准化批量生产,预制厂生产不受外界环境影响,预制构件质量可控,废品率低;②现场安装便捷,无须现场搭设支架及支架底部硬化,劳动力投入少,仅需设备吊装,安装效率高;③有利于环境保护和施工占地小,现场无需大量湿作业,对周边居民影响小,施工节能,环境污染小,安装时占用现有交通时间短,无须大面积封路、交通导行;④资源充分利用,钢模板周转率高,钢筋和混凝土材料可精准计算,减少材料浪费;⑤施工安全风险降低,现场投入人力少,无须搭设支架,无高空作业,安全作业风险明显降低。

预制拼装桥墩的主要连接方式有灌浆钢套筒连接、承插式连接、灌浆波纹管连接、预留槽孔灌浆连接、现浇湿接缝连接、后张预应力连接、新型钢柱脚连接等。

1) 灌浆钢套筒连接。灌浆钢套筒连接构造主要由钢套筒、纵向带肋钢筋和高强灌浆料 3 部分组成^[1],如图 1 所示。预制墩柱的纵向钢筋与承台预留钢筋间的锚固性能主要由灌浆料、钢套筒和纵向带肋钢筋三者间的黏结强度决定^[2]。有研究表明,灌浆钢套筒连接在合理设计和施工条件下,可满足实际工程抗震需求^[3]。灌浆钢套筒连接的优点在于现场湿作业少、施工速度快、具有较好的延性破坏形态、连接钢筋构造简单、钢筋间传力机制明确。其缺点是对施工精度要求高,钢套筒安装误差较难控制,需专用定位钢板,且灌浆钢套筒价格高昂;灌浆料使用条件苛刻,灌浆钢套筒在预制墩柱过程中易被堵塞,灌浆料饱满度缺少检测手段,墩柱底部接触部位需 2cm 厚坐浆,灌浆钢套筒会增加墩柱混凝土保护层厚度,墩柱设计需增加抗裂缝钢筋网片,钢筋锚固长度、钢套筒形状和灌浆料种类等因素均会影响预制墩柱抗震性能^[1]。

2) 承插式连接。承插式连接是在现场承台顶

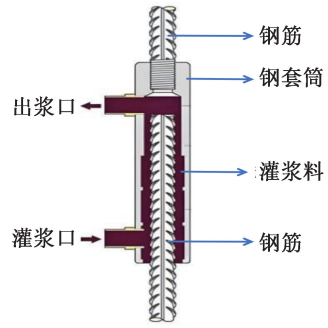


图 1 灌浆钢套筒

Fig. 1 Grouting steel sleeve

部预留对应预制墩柱的预留承插槽,将预制墩柱嵌入进去,承台与预制墩柱间的空隙填充混凝土或高性能填充材料养护而成的一种刚接连接方式,如图 2 所示。其优点是构造简单、技术成熟、施工精度要求较低、施工方便和节点连接相对可靠;缺点是预制墩柱与承台接触表面需凿毛处理,安装现场需二次浇筑混凝土,承台界面需二次凿毛处理和垫块调平,承台混凝土养护阶段预制墩柱需临时支撑固定。预制墩柱的承载力和稳定性与墩柱承插深度有关,且与二次浇筑的混凝土强度也有一定关联。

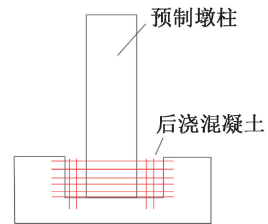


图 2 承插式连接

Fig. 2 Socket connection

3) 灌浆波纹管连接。预制墩柱中预埋金属波纹管,通过灌注浆液与承台预留钢筋形成浆锚连接,如图 3 所示。预制墩柱所承受外力通过灌浆波纹管传递至灌浆料,灌浆料传递给承台预留钢筋,灌浆波纹管与预留钢筋间的连接是依靠灌浆料间的握裹力实现。灌浆波纹管连接构造的承载力可等同于传统现浇结构,但其变形延性及能量耗散性能均比现浇方式低^[1]。其优点是减少现场湿作业、对施工精度要求低、施工相对方便、在经济上比灌浆套筒更具优势,且具有与现浇相似的抗震性能;缺点是灌浆波纹管内需钢筋锚固较长、波纹管材料刚度小、易变形堵管、节点钢筋布置错综复杂。

4) 预留槽孔灌浆连接。预制墩柱中预留一部分钢筋插入承台或盖梁的预留槽孔,槽孔用高性能混凝土或砂浆填充,如图 4 所示。槽孔节点受力主要由预留钢筋、槽孔和二次浇筑混凝土三者间的黏

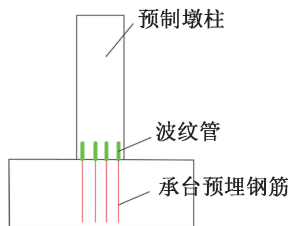


图 3 金属波纹管连接

Fig. 3 Metal bellows connection

结力来传递。其优点是施工方便、精度要求低、整体性较好和受力稳定;缺点是现场二次浇筑混凝土工作量大,预留钢筋位置控制困难,节点连接锚固较长,施工效率较低。

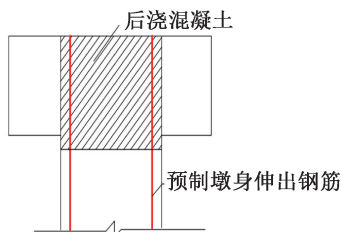


图 4 预留槽孔灌浆连接

Fig. 4 Grouting connection for pre-slotted holes

5) 现浇湿接缝连接。预制墩柱中预留钢筋与承台预留钢筋连接形成的锚固使预制墩柱与承台连接成整体,如图 5 所示。其优点是施工方法相对简易、对施工操作人员要求低、技术难度小,施工精度要求不高、连接方式整体性好和受力可靠;缺点是湿接缝二次浇筑工程量较大,现场需搭设模板,施工效率低,经济环保性差,在湿接缝强度未达到设计要求时需设置临时支撑固定墩身^[4]。

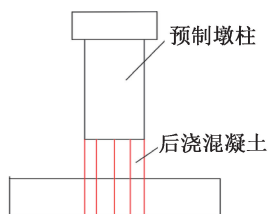


图 5 现浇湿接缝连接

Fig. 5 In-situ wet joint connection

6) 后张预应力连接。预制墩柱或节段墩柱通过预应力钢筋锚固在承台或盖梁上,施加预应力使墩柱与承台或盖梁形成整体,如图 6 所示。其优点是可将大体积墩柱切分成小体积构件,方便运输和施工,在地震时具有较好的自复位能力,震后残余位移小;缺点是在往复荷载过程中预应力易损失,降低结构的耐久性,使得承载力降低,施加预应力施工难度大,施工不便利,预应力增加了集中轴力,

会导致墩柱顶部混凝土过早损伤^[5]。

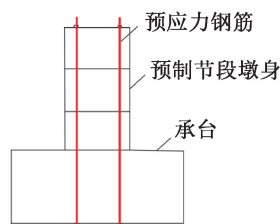


图 6 后张预应力连接

Fig. 6 Post-tensioned prestress connection

7) 新型钢柱脚连接。钢柱脚连接是一种新型预制拼装桥墩的连接方式,钢柱脚连接系统由钢底板、承台内锚栓定位预埋板、柱脚板、柱底加劲板、PBL 开孔板、套筒顶部端头板、GLG40 高强螺纹钢筋系统等组成。预制墩柱纵向钢筋穿过钢柱脚底部的 PBL 开孔板采用螺栓连接,与墩柱浇筑混凝土一体成型,预制墩柱与承台预埋的钢柱脚连接系统采用螺栓固定为一体,如图 7 所示。其优点是可实现预制墩柱与承台间的连接转换成钢与钢间的螺栓连接,连接受力可靠,现场无须二次灌浆,施工便捷,安装效率高,且在震后可二次拆卸进行更换,可修复性高^[6];缺点是钢柱脚加工难度大,需专业厂家加工。

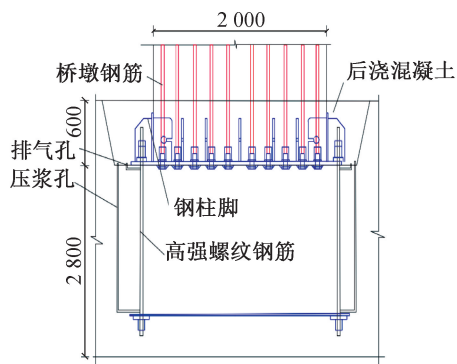


图 7 新型钢柱脚连接

Fig. 7 New steel column foot connection

2 预制拼装桥墩工程实例经济对比分析

目前,多种连接方式在国内有工程实践。湿接缝连接在国内最先应用于工程实践中^[7],结合各种连接的优缺点,目前仅灌浆钢套筒连接和灌浆波纹管连接方式应用较广泛,灌浆波纹管连接因锚固长度限制,大多数应用于预制墩柱与盖梁连接。为了推广新型钢柱脚连接方式,有必要对灌浆钢套筒连接和新型钢柱脚连接在工程应用中的经济性进行对比分析,以便在工程应用中综合优选连接方式。

2.1 工程概况

本研究选取江西省赣州市中心城区快速路工程赣南大道 IV 标段作为工程背景。该工程主线桥

梁上部结构采用后张法预应力混凝土预制小箱梁,桥梁标准桥宽为 25.1m,双向 6 车道。桥梁下部结构采用预制拼装墩柱+预制节段拼装倒“T”形盖梁。全桥墩柱结构形式有现场浇筑墩柱、球墨铸铁灌浆钢套筒连接预制墩柱和新型钢柱脚连接预制墩柱,预制墩柱高度为 3.8~13.6m,平均高度为 8m。在国内高架桥中首次采用新型钢柱脚预制拼装桥墩。

2.2 工期分析

本研究依据已论证的专项施工方案和施工现场实测情况计算工期。在工期计算中,桥梁墩柱均以墩柱平均高度 8m 计算单根墩柱施工周期,具体结果如表 1,2 所示。由表 1,2 可知,传统现浇墩柱单柱施工工期 21d,钢套筒连接预制拼装墩柱单柱施工工期 11.25d,新型钢柱脚连接预制拼装墩柱单柱施工工期 9.25d,新型钢柱脚连接预制拼装墩柱施工工期较传统现浇墩柱缩短约 60%,相比于球墨铸铁灌浆钢套筒连接预制拼装桥墩缩短 21.62%。由图 8 可知,预制拼装桥墩工期缩短得益于其工艺不同,传统现浇墩柱在支架搭设及地基处理上消耗 8d,球墨铸铁灌浆钢套筒预制墩柱在墩柱安装过程中需注浆和坐浆等工序,以及灌浆料养护,而新型钢柱脚则无需灌浆工序。因此,新型钢柱脚预制拼装桥墩在工期方面具有明显优势。

表 1 现浇墩柱工期

Table 1 Construction period of cast-in-place pier-column

序号	工序	工序时间/d	备注
1	支架基础平整硬化	1.00	
2	基础混凝土养护	6.00	
3	墩柱钢筋绑扎	3.00	
4	防护支架搭设及验收	1.00	各工序不可与桩基础同步施工
5	墩柱组合钢模板安装	1.00	
6	墩柱混凝土施工	1.00	
7	支架和模板拆除	1.00	
8	墩柱混凝土养护	7.00	
9	合计	21.00	

表 2 预制拼装墩柱工期对比

Table 2 Construction period comparison of prefabricated assembly pier-column

序号	工序	工序时间/d	套筒连接	新型钢柱脚
1	墩柱钢筋绑扎	1.00	√	√
2	墩柱组合钢模板安装	0.25	√	√
3	墩柱混凝土施工	0.25	√	√
4	墩柱混凝土养护	7.0	√	√
5	墩柱钢模板拆除	0.25	√	√
6	现场运输吊装	0.25	√	√
7	承台凿毛处理	0.25	√	—
8	套筒灌浆及坐浆	2.00	√	—
9	预应力张拉	0.25	—	√

注:表中“√”表示存在此项工序,“—”表示不存在此项工序

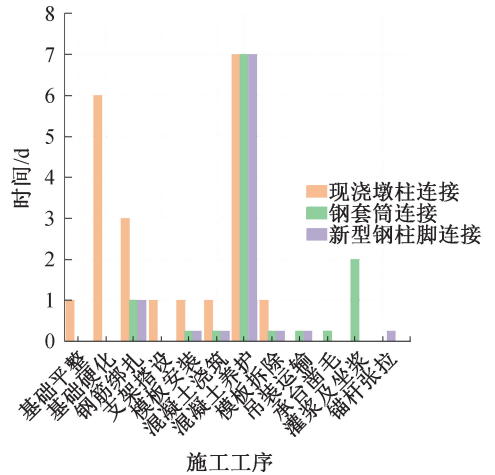


图 8 3 种不同连接桥墩单柱工期对比

Fig. 8 Construction period comparison of single column for three different connection piers

2.3 经济分析

以本研究中的桥梁工程为例进行经济分析。以实例工程中的预制墩柱平均高度 8m 计算单根墩柱施工成本,如表 3~5 所示。其中,表 4,5 中预制梁场摊销费用是按整体工程预制构件(包含预制墩柱、预制小箱梁和预制节段盖梁)综合摊销计算,包含梁场征地及租金、梁场建设、预制构件生产线、梁场办公和生活等费用;梁场设备按租赁计算,租赁价格已包含在预制构件实体工作量单价中。由表 3~5 可知,预制拼装桥墩的单柱施工成本均比传统现浇桥墩低,其中球墨铸铁灌浆钢套筒连接预制拼装桥墩施工成本比传统现浇降低约 2.62%,新型钢柱脚预制拼装桥墩施工成本比传统现浇降低约 14.55%,新型钢柱脚预制拼装桥墩施工成本比球墨铸铁灌浆钢套筒预制拼装桥墩降低约 12.25%,因此新型钢柱脚预制拼装桥墩在施工成本方面具有显著经济效益。

表 3 现浇墩柱施工成本分析

Table 3 Construction cost analysis of cast-in-place pier-column

序号	名称	工程数量	单价/元	合价/元
1	支架地基硬化处理	25.00m ²	210.00	5 250.00
2	防护支架搭设	280.00m ³	28.00	7 840.00
3	墩柱定型钢模板安装	60.80m ²	150.00	9 120.00
4	墩柱混凝土施工	28.80m ³	1 110.00	31 968.00
5	钢筋制作安装	7.37t	6 103.00	44 979.11
6	墩柱定型钢模板摊销	1 项	2 410.80	2 410.80
7	合计	—	—	101 567.91

由图 9 可知,传统现浇墩柱施工工艺在支架搭设阶段,对支架地基基础处理所需增加施工成本约 1.4 万元,预制拼装桥墩则无需此工序,有利于成本

表4 钢套筒预制拼装墩柱施工成本分析

Table 4 Construction cost analysis of prefabricated assembly pier-column with steel sleeve

序号	名称	工程数量	单价/元	合价/元
1	定型钢模板安装	60.80m ²	80.00	4 864.00
2	混凝土浇筑	28.80m ³	1 080.00	31 104.00
3	钢筋制作安装	7.37t	6 083.00	44 831.71
4	球墨铸铁灌浆钢套筒	38.00个	180.00	6 840.00
5	墩柱运输及安装	28.80m ³	105.00	3 024.00
6	灌浆及坐浆	0.39m ³	5 020.00	1 957.80
7	定型钢模板摊销	1项	964.32	964.32
8	墩柱钢筋网片	0.29t	6 083.00	1 764.07
9	预制梁场摊销费	1项	3 556.00	3 556.00
10	合计	—	—	98 905.90

注:本工程梁场生产预制构件有预制小箱梁、预制盖梁、预制墩柱等,梁场摊销费已扣除残值计算

表5 新型钢柱脚预制拼装墩柱施工成本分析

Table 5 Construction cost analysis of prefabricated assembly pier-column with new steel column foot

序号	名称	工程数量	单价/元	合价/元
1	定型钢模板安装	60.80m ²	80.00	4 864.00
2	混凝土浇筑	28.80m ³	1 080.00	31 104.00
3	钢筋制作安装	4.87t	6 063.00	29 526.81
4	墩柱运输及安装	28.80m ³	105.00	3 024.00
5	钢柱脚系统	1套	13 750.00	13 750.00
6	定型钢模板摊销	1项	964.32	964.32
7	预制梁场摊销费	1项	3 556.00	3 556.00
8	合计	—	—	86 789.13

注:本工程梁场生产预制构件有预制小箱梁、预制盖梁、预制墩柱等,梁场摊销费已扣除残值计算

降低。新型钢柱脚预制拼装桥墩在墩柱预制中预制墩柱纵向钢筋与承台是分开的,无须将纵向钢筋连接至承台内部,则可大幅度减少钢筋用量,并且在现场安装过程中无需复杂的灌浆和坐浆工序,因此在单柱成本上相较于球墨铸铁灌浆钢套筒预制拼装桥墩可降低施工成本约1.2万元。

3 结语

由对传统现浇桥墩、球墨铸铁灌浆钢套筒预制拼装桥墩和新型钢柱脚预制拼装桥墩在工程实例中的工期和经济方面的分析可知,新型钢柱脚预制拼装桥墩在工期和经济方面展现出显著优势。在进行工程设计时,应结合工程实际情况对预制拼装桥墩的连接构造形式进行综合考虑,以确定最合适的连接方式。

参考文献:

- [1] 张凯迪,贾俊峰,程寿山,等.等同现浇预制装配桥墩抗震性能研究综述[J].北京工业大学学报,2022,48(12):1248-1259.

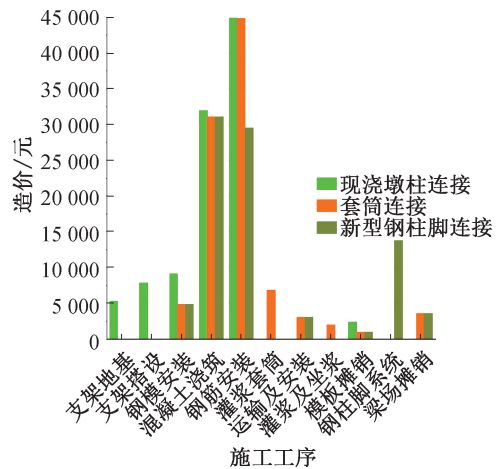


图9 3种不同连接桥墩单柱施工成本对比

Fig. 9 Construction cost comparison of single column for three different connection piers

ZHANG K D, JIA J F, CHENG S S, et al. Seismic performance of emulative cast-in-place precast bridge columns-state of the art review[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(12):1248-1259.

- [2] 郑永峰,郭正兴.变形灌浆套筒连接性能试验研究及有限元分析[J].建筑结构学报,2016,37(3):94-102.
- ZHENG Y F, GUO Z X. Experimental study and finite element analysis on behavior of deformed grout-filled pipe splice[J]. Journal of building structures, 2016, 37(3):94-102.
- [3] 魏红一,肖纬,王志强,等.采用套筒连接的预制桥墩抗震性能试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(7):1010-1016.
- WEI H Y, XIAO W, WANG Z Q, et al. Experimental study on seismic performance of precast bridge pier with grouted splice sleeve[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2016, 44(7):1010-1016.
- [4] 姜海西,查义强,周良,等.城市桥梁墩柱预制拼装关键技术研究[J].上海建设科技,2016(1):5-7,13.
- JIANG H X, ZHA Y Q, ZHOU L, et al. Research on key technologies of prefabrication and assembly of pier columns of urban bridges[J]. Shanghai construction science & technology, 2016(1):5-7,13.
- [5] OU Y C, CHIEWANICHAKORN M, AREF A J, et al. Seismic performance of segmental precast unbonded posttensioned concrete bridge columns[J]. Journal of structural engineering, 2007, 133(11):1636-1647.
- [6] ZHOU Q, LIU Y Q, LI Y J. Pseudostatic behavior of precast piers with composite pier-pile cap connections: experimental investigation[J]. Journal of bridge engineering, 2022, 27(5):04022024.
- [7] 沈阳云.东海大桥墩身节段预制安装的关键技术[J].公路,2005(8):7-12.
- SHEN Y Y. Key techniques of pier precasting and installing of Donghai Bridge[J]. Highway, 2005(8):7-12.