

# 全预制装配化桥涵设计 在临金高速公路项目专项应用技术研究

贾燕丽<sup>1</sup>, 吴尤东<sup>2</sup>

(1. 浙江立州交通工程检测有限公司, 浙江 杭州 311200; 2. 浙江爱丽智能检测技术集团有限公司, 浙江 杭州 311700)

**摘要:** 预制装配化桥涵设计是“绿色发展”的必由之路, 本文通过临金高速公路装配式桥梁的应用进行了介绍, 通过具体数据说明了实施施工方案的可行性与推广应用必要性。

**关键词:** 全预制装配化; 方案比选; 技术研究

**中图分类号:** U442

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006—7973 (2021) 09—0151—04

混凝土预制拼装技术在国外发展已有 30 多年的历史, 随着我国当前城市桥梁大规模建设, 面临的交通、环境和公众需求等因素的挑战, 迫切需要采用全预制拼装建造技术。2017 年 12 月 29 日, 中国公路工程咨询集团有限公司在杭州板块一楼会议室主持召开了临建高速公路工程勘察设计第八次工作例会, 本次会议从打造品质工程出发, 为提升项目影响, 积累工程经验, 推动山区高速建设转型升级, 提出:

- (1) 关于预制桥墩, 在杭徽高速以北进行综合比选。
- (2) 预制箱涵在本项目进行大规模的推广。

笔者曾作为指挥部借调人员参加过对山区高速大规模应用预制装配化桥涵进行相关资料的收集, 并补充了专项研究。

## 1 全预制装配化设计的思考

### 1.1 全预制拼装比选线位区域选择

根据 2017 年 12 月 29 日临建高速公路工程勘察设计第八次工作例会会议纪要, 项目业主拟将潜枢纽以北 22 公里范围设为先行段, 结合工程形象、项目影响、工期、运输条件、经济性等因素, 本阶段在该范围进行

[2] 余阿东, 陈睿炜. 汽车自动驾驶技术研究 [J]. 汽车实用技术, 2017(2):124-125.

[3] 朱敏慧. 逐步实现自动驾驶 5 个层级 [J]. 汽车与配件, 2016(11):4.

[4] 2018 Self-driving safety report[R]. General Motors Cooperation, February 2018.

[5] 郭旭. 人工智能视角下的无人驾驶技术分析与展望 [J]. 电子世界, 2017(20):64-65.

[6] 王科俊, 赵彦东, 邢向磊. 深度学习在无人驾驶汽车领域应用的研究进展 [J]. 智能系统学报, 2018, 13(1):55-69.

[7] On the road to fully self-driving-modeling the future challenge[R]. Waymo Safety Report, October 2017.

[8] Seif H G, 胡晓龙. 智能城市中自动驾驶汽车工业的关键挑战: 高清地图 [J]. Engineering, 2016(02):27-35.

[9] 薛建儒, 李庚欣. 无人车的场景理解与自主运动 [J]. 无

人系统技术, 2018, 1(2):24-33.

[10] Lillicrap T P, Hunt J, Pritzel A, et al. Continuous control with deep reinforcement learning[J]. Computer Science, 2015, 8(6):A187.

[11] Van HH, Guez A, Silver D. Deep reinforcement learning with double q-learning[J]. Computer Science, 2015.

[12] Scott P, Hans A, Xinxin D, et al. Perception, planning, control, and coordination for autonomous vehicles[J]. Machines, 2017, 5(1).

全预制装配化设计方案比选。

1.2 全预制拼装桥梁范围选择

本工程具有典型的山区公路特点，沿线山高谷深，高差大，地形、地质复杂，水系发达。

结合实际情况，本项目先行段主线共布置 18 座桥梁。从跨径标准化角度，结合填高、架设工法及经济性，以 30m 跨径为主，20m 跨径为辅。

从前 22km 主线桥梁的分布情况来看，上部跨径只有 20m、30m 两种，且绝大多数为正交桥梁，桥梁宽度均相同，对于预制装配化结构来说具备良好规模化的条件。

对于互通区桥梁，其具有桥梁超高、变宽、斜交，结构形式多样等特点，同时曲线半径小不适应架桥机连续作业，采用装配式结构难以发挥预制拼装规模化效应，因此前 22 公里除互通区及主线两座斜交桥外，其余 16 座桥梁本阶段进行全预制装配化方案比选。

1.3 预制构件种类选择

山区高速常规上部结构选型为 T 梁、矮 T 梁、组合箱梁，其为预制装配化结构，重点对预制下部结构进行分析说明：

本项目地质条件较好，中风化岩层埋深较浅，桩基绝大多数为嵌岩桩，预制管桩打设困难，且群桩基础需增设承台，经济性差；山区地势起伏、运输困难，大型打设、吊装设备到达每一桥墩工点不符合绿色环保理念，如采用一体式架桥机，将进一步延长工期；隐蔽工程对构件外观无较高质量要求，因此推荐采用灌注桩基础。

灌注桩基础需凿除桩头，其桩头钢筋精准定位十分困难；预制立柱吊装需设置安装调平平台，该平台内预埋连接钢筋，因此推荐采用现浇底系梁作为过渡平台。

桥台台帽为局部隐蔽工程，直接与桩基或承台相连，且有耳墙、背墙等薄壁异型构造，几何尺寸和重量较大，结构物重心整体安装时较难把握，吊装、运输风险较高，因此推荐采用现浇方式。

综上所述，拟采用预制梁、盖梁、立柱全预制装配化方案。

2 全预制拼装比较方案设计

2.1 上部结构设计

结合山区高速公路特点及经济性比较，上部结构采用目前较为成熟可靠并经济的 20m、30m 预制 T 梁，主

线标准宽度段桥梁单孔单幅布置 6 片 T 梁，横向湿接缝宽度 37cm。

2.2 下部结构设计

本项目为典型山区高速公路，地势起伏大，桥梁墩高从 1.7m ~ 43m 不等。结合国内外类似工程的成功经验，桥墩盖梁拟采用耐久性好、结构轻盈的预应力混凝土结构。根据不同墩高墩身分别采用全预制实心方墩、全预制空心方墩及预制空心方墩 + 现浇实心墩，全线预制立柱断面尺寸归并为三种类型，墩身与桩基础间采用底系梁过渡并连接。

根据计算，拟定如下表 1 构造尺寸。

表 1 比选方案预制桥墩墩身构造信息

| 30m 跨径 T 梁墩高 | 方墩尺寸 (m) | 桩基直径 (m) | 主筋直径 (mm) | 节段划分 | 节段重量 (t) |
|--------------|----------|----------|-----------|------|----------|
| 小于 10m       | 1.2      | 1.5      | 32        | 整体   | 38       |
| 10-20m       | 1.5      | 1.8      | 36        | 整体   | 117      |
| 20-30m       | 1.7      | 2        | 40        | 整体   | 139      |
| 30-42m       | 1.7+2    | 1.7 群桩   | 40        | 整体   | 139      |

备注：为缩减吊装重量，控制架桥机整体规模，1.7m 立柱为空心薄壁方墩。

2.3 预制装配化规模

本项目墩高 ≤ 10m 桥墩个数占比 36.2%，墩高 ≤ 20m 桥墩个数占比 67.5%，墩高 ≤ 30m 桥墩个数占比 88.8%。墩高 > 30m 桥墩个数占比 11.2%。前 22 公里主线桥梁，按桥长统计预制装配化率达到 9 成。

3 施工方案构想

3.1 总体思路

以构件“标准化、预制化、装配化、通用化、大型化”的“五化”为原则，实现“提高产品质量、减少环境污染、加快施工进度、降低人工消耗、合理控制造价”的目标。

3.2 施工方案的选择

根据山区高速特点、理念要求及相关调研，可能的施工方案有：地面吊机、架桥机、缆索吊装。

空心方墩布置 40 根直径 40mm 粗钢筋见图 1。

3.3 盖梁设计

全线预制盖梁形式归并为两种类型，盖梁采用预应力混凝土结构，30m 跨径跨中盖梁高 1.4m，立柱处盖

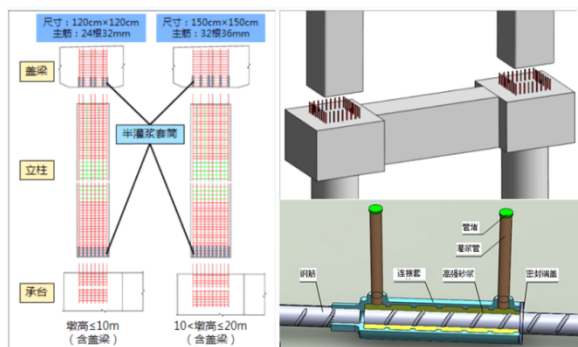


图1 墩身配筋及连接头

梁高 1.7m，20m 跨径跨中盖梁高 1.2m，立柱处盖梁高 1.5m。盖梁预应力采用双层布置，每层 4 束，钢束均采用两端张拉，为便于封锚及普通钢筋布置以及考虑美观要求，张拉端设置深埋锚。每种跨径均统一为一种盖梁构造尺寸，并在工厂一次张拉到位，如下表 2。

表 2 比选方案

| 施工方案     | 地面吊机                                                                                              | 架桥机                                                                                                          | 缆索吊装                                                                                                                     |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 本项目适用性分析 | 1. 使用范围较广。<br>2. 机动性灵活性好，国内城市高架普遍采用。<br>3. 高墩受设备能力所限。<br>4. 可以多作业面同步施工，但较高线性指标的便道需到达每一桥墩工点，环境影响大。 | 1. 普遍用于中小跨径。<br>2. 整体刚度大，拼装精度高。<br>3. 流水作业，机具效率高。<br>4. 常规设备技术成熟度高，进一步研发可满足本项目施工要求。<br>5. 一个工作面只需一处便道，环境影响小。 | 1. 一般用于独立大桥，如拱桥、悬索桥等，平面线性为直线。<br>2. 整体刚度柔，对于有曲线半径的桥梁，纵、横、竖三向移动精确拼装技术难度大。<br>3. 通用性差，针对每个工点均需单独设计和建造。<br>4. 设备重复利用率低，造价高。 |

比选方案主要采用架桥机，有条件段采用地面吊机。

### 3.4 一体化架桥机施工构想

为克服山区高速在面对预制装配化桥梁时所遇到的困难，对常规架桥机进行技术改造，以实现上下部结构的一站式安装。根据构造尺寸以及路线设计参数：前/后车起吊能力：160t，构件最大重量：150t，前/后车起升高度：10m/35m，适应曲线： $R \geq 1000m$ ，适应纵坡/横坡： $\pm 3\%/\pm 5\%$ 。上述指标要求均较高，需联合承建单位共同研发满足上述要求的新型架桥机见图 2、图 3、图 4。

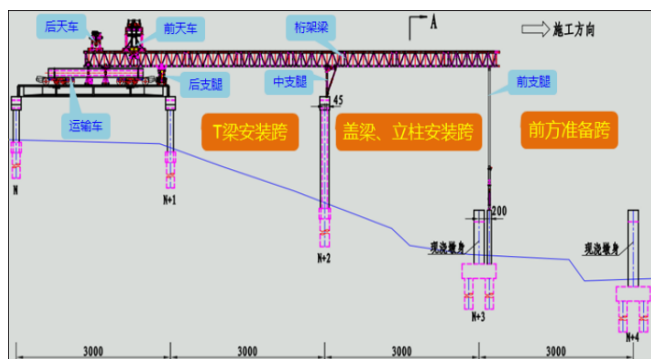


图2 一体化架桥机方案

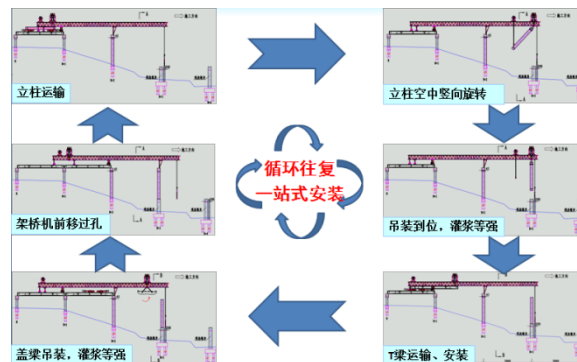


图3 一体化架桥机施工流程图

### 3.5 工期测算

#### 3.5.1 单跨工效分析

(1) 架桥机单幅安装工效。以下分析假设立柱盖梁均一次安装到位，为 24 小时作业安排，运梁及其他边界条件不影响的情况下，红色为控制线路。

| 序号 | 项目名称     | 小时 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 | 48 | 52 | 56 | 60 |
|----|----------|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 安装前跨两侧立柱 | 4  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 2  | 灌浆等强     | 24 |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 3  | 安装T梁     | 6  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 4  | 安装前跨盖梁   | 2  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 5  | 灌浆等强     | 24 |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 6  | 安装T梁     | 6  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 7  | 架桥机过孔    | 4  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

图4 单幅桥梁架桥机3天可完成一孔架设

(2) 架桥机双幅安装工效。假设桥梁为不分线桥梁且不错墩布设，通过铺设横移轨道，架桥机横向移动实现双幅交错安装。

| 序号 | 工序         | 小时 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 | 48 | 52 | 56 | 60 | 64 | 68 |
|----|------------|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 左幅前跨立柱安装   | 4  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 2  | 左幅前跨立柱灌浆等强 | 24 |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 3  | 左幅前跨T梁     | 6  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 4  | 架桥机横移右幅    | 2  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 5  | 右幅前跨立柱安装   | 4  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 6  | 右幅前跨立柱灌浆等强 | 24 |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 7  | 右幅前跨T梁     | 6  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 8  | 架桥机横移左幅    | 2  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 9  | 左幅前跨盖梁安装   | 2  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 10 | 左幅前跨盖梁灌浆等强 | 24 |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 11 | 架桥机横移右幅    | 2  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 12 | 右幅前跨盖梁安装   | 2  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 13 | 右幅前跨盖梁灌浆等强 | 24 |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 14 | 架桥机横移左幅    | 2  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 15 | 架桥机过孔      | 4  |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

图5 双幅桥梁架桥机3天可完成一孔架设

本项目分线桥梁、错墩布设桥梁较多，考虑调试、维护、天气、假日等不确定因素，暂按 6 天一孔考虑。

#### 3.5.2 主线桥梁分布情况及关键节点

以英公隧道为界，划分为两个工作段，工作段内隧道均短于 800m。

#### 3.5.3 工期测算和比选

采用以下三个方案比选：

方案一：架桥机单向流水作业。

方案二：架桥机双向流水作业。

方案三：架桥机和地面吊装联合作业（墩高≤20m桥梁采用地面吊装）。

工作段桥梁作业工期比较见下表3，表4。

表3 工期比较表

| 序号 | 桥名        | 运输条件 | 省道至工点距离 | 单台架桥机工期(天) | 双台架桥机工期(天) | 方案一  | 工作段工期 | 方案二  | 工作段总工期 | 方案三  | 工作段工期 |
|----|-----------|------|---------|------------|------------|------|-------|------|--------|------|-------|
| 1  | 九亩山桥      | 便捷   | 180m    | 36         | 18         | 架桥机  | 612   | 架桥机  | 351    | 地面吊装 | 381   |
| 2  | 塘坞坞桥      | 便捷   | 85m     | 36         | 18         | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 地面吊装 |       |
| 3  | 塘坞坞1号桥    | 便捷   | 50m     | 36         | 18         | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 地面吊装 |       |
| 4  | 塘坞坞2号桥    | 便捷   | 25m     | 不控制        | 不控制        | 常规工艺 |       | 常规工艺 |        | 常规工艺 |       |
| 5  | 竹里里桥      | 便捷   | 省道下穿    | 168        | 84         | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 地面吊装 |       |
| 6  | 塘坞坞桥      | 困难   | 400m    | 108        | 54         | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 架桥机  |       |
| 7  | 寨村桥       | 困难   | 300m    | 150        | 84         | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 架桥机  |       |
| 8  | 平公山桥      | 困难   | 220m    | 150        | 78         | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 架桥机  |       |
| 9  | 上杨岭桥      | 困难   | 160m    | 240        | 120        | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 架桥机  |       |
| 10 | 下杨岭桥      | 困难   | 400m    | 30         | 18         | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 吊装   |       |
| 11 | 坞英口桥(主线段) | 便捷   | 省道下穿    | 210        | 114        | 架桥机  | 624   | 架桥机  | 333    | 地面吊装 | 276   |
| 12 | 直坞里桥      | 困难   | 550m    | 132        | 66         | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 架桥机  |       |
| 13 | 紫竹里桥      | 困难   | 1600m   | 126        | 66         | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 架桥机  |       |
| 14 | 田坞坞桥      | 非常困难 | 隔山2km以上 | 186        | 186        | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 地面吊装 |       |
| 15 | 小曹里桥      | 非常困难 | 隔山2km以上 | 60         | 60         | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 地面吊装 |       |
| 16 | 马厩里桥      | 非常困难 | 隔山2km以上 | 18         | 18         | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 地面吊装 |       |
| 17 | 坞岭脚桥      | 非常困难 | 隔山2km以上 | 24         | 24         | 架桥机  |       | 架桥机  |        | 地面吊装 |       |
| 18 | 小曹坞口桥     | 非常困难 | 隔山2km以上 | 不控制        | 不控制        | 常规工艺 |       | 常规工艺 |        | 常规工艺 |       |

根据施工单位征询意见及工程经验，前期施工准备（包含标准化建设、预制场、施工便道、架桥机研发以及影响架桥机初始施工的桩基系梁工程等）在8个月内完工，后续附属工序6个月。

表4 施工方案技术经济比选表

|          | 方案一                                    | 方案二                                     | 方案三                                    |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| 施工方案     | 架桥机单向流水作业                              | 架桥机双向流水作业                               | 架桥机和地面吊装联合作业（墩高≤20m桥梁采用地面吊装）           |
| 架桥机数量    | 4台                                     | 8台                                      | 4台                                     |
| 优缺点      | 1.施工便道规模小，环境影响小。2.架桥机功效高，造价经济。3.总工期较长。 | 1.施工便道规模小，环境影响小。2.架桥机功效中等，造价适中。3.总工期最短。 | 1.施工便道规模大，环境影响大。2.架桥机功效低，造价最贵。3.总工期较短。 |
| 工期（月）    | 35                                     | 26                                      | 27                                     |
| 增加造价（万元） | 2000                                   | 3800                                    | 5000                                   |

根据业主总体时间安排，2020年底前本项目先行段需建成通车，考虑目前项目进度，预计今年10月开工建设，结合造价、环境影响等因素综合比选，比选方案建议采用方案二做为施工方案。4.4公里英公隧道贯通需22个月，总工期28个月。桥梁将不控制工期。

### 3.6 经济性比较

除上述全预制拼装方案外，本次设计亦分别对常规方案、高墩（>30m）现浇方案、仅盖梁预制方案进行了经济性比较，详见表3-5。

表5 经济性对比表（前22公里）

| 序号 | 中心桩号      | 桥名        | 孔数×孔跨<br>(n×m) | 墩宽<br>(m) | 桥长<br>(m) | 预制拼装方案概算<br>造价(万元) | 常规方案概算<br>造价(万元) | 高墩(>30m)<br>现浇方案概算<br>造价(万元) | 仅盖梁预制方案概算<br>造价(万元) |
|----|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|--------------------|------------------|------------------------------|---------------------|
| 1  | K0+010    | 九亩山桥      | 3×20           | 90        | 60        | 732.8              | 1.11             | 732.8                        | 1.11                |
| 2  | K1+380    | 塘坞坞桥      | 3×20           | 90        | 90        | 910.0              | 1.15             | 789.2                        | 1.15                |
| 3  | K2+538    | 塘坞坞1号桥    | 3×30           | 90        | 90        | 1304.6             | 1.09             | 1198.3                       | 1.09                |
| 4  | K5+084    | 竹里里桥      | 11×30+3×20     | 90        | 390       | 4216.1             | 1.04             | 4064.1                       | 1.04                |
| 5  | K6+728    | 塘坞坞桥      | 9×30           | 90        | 270       | 3974.8             | 0.88             | 4500.0                       | 0.87                |
| 6  | K7+520    | 寨村桥       | 14×30/11×30    | 90        | 420/330   | 5152.2             | 0.94             | 5463.0                       | 0.93                |
| 7  | K8+423    | 平公山桥      | 13×30/12×30    | 90        | 390/360   | 5681.1             | 0.90             | 6300.3                       | 0.89                |
| 8  | K8+995    | 上杨岭桥      | 20×30          | 90        | 600       | 7140.0             | 1.11             | 6434.7                       | 1.11                |
| 9  | A1K9+706  | 下杨岭桥      | 3×20/2×20      | 90        | 60        | 633.7              | 1.09             | 580.2                        | 1.09                |
| 10 | A1K14+452 | 坞英口桥(主线段) | 16×30/19×30    | 90        | 480/570   | 6339.6             | 1.12             | 5650.8                       | 1.12                |
| 11 | K16+110   | 直坞里桥      | 11×30          | 90        | 330       | 3854.6             | 1.10             | 3513.3                       | 1.10                |
| 12 | K17+632   | 紫竹里桥      | 10×30/11×30    | 90        | 300/330   | 3778.6             | 1.11             | 3409.9                       | 1.11                |
| 13 | K19+302   | 田坞坞桥      | 31×30          | 90        | 930       | 9453.0             | 1.07             | 8869.0                       | 1.07                |
| 14 | K20+100   | 小曹里桥      | 10×30          | 90        | 300       | 3214.3             | 1.06             | 3021.6                       | 1.06                |
| 15 | K20+372   | 马厩里桥      | 3×20           | 90        | 60        | 792.3              | 1.06             | 745.9                        | 1.06                |
| 16 | K20+680   | 坞岭脚桥      | 4×30           | 90        | 120       | 1552.2             | 1.07             | 1454.4                       | 1.07                |
| 合计 |           |           |                |           |           | 58729.8            | 56657.3          | 58537.0                      | 58004.6             |

如上表所示，工程数量基本一致时，预制拼装方案相比常规方案造价平均增加8%左右，前22公里采用全预制拼装方案及配跨优化调整后造价增加约2000万。考虑工期因素增设架桥机，造价增加约3800万。

### 4 存在的问题及比选建议

(1) 桥梁两端紧连隧道的情况，存在架桥机组拼空间不足。

(2) 隧道、路基需及时贯通，否则影响架桥机连续作业，影响工期，存在不确定因素。

(3) 预制构件造价定额缺失，影响概算准确程度。

(4) 连接套筒灌浆质量目前缺乏有效检测手段，急需开发。

### 5 结语

全预制化桥梁施工技术，不仅能很好地控制工程质量，而且能加快施工速度、减少环境污染，同时也符合低碳化、和谐社会的发展要求，将是一套高效、低碳、环保的桥梁建造技术，具有广阔的应用前景。这就需要科研院所、设计企业、材料、工艺、设备、产业政策等共同来推动发展，除了政策引领，还要践行“企业为主体、市场为导向、产学研深度融合”的技术创新路径，为装配式技术的持续发展提供动力。

### 参考文献：

- [1] 程航. 城市桥梁节段预制拼装技术设计与研究 [J]. 工程建设与设计, 2019, 000(009):228-231.
- [2] 张阿晋, 邓彩耘. 城市核心区高架桥梁预制装配施工关键技术 [J]. 建筑机械化, 2019.

