

图 2 典型断面图(单位:mm)

2 施工方案比选

依据设计文件结合现场实际提出 3 种施工方案,梁段编号 SZ 表示南侧跨中,NZ 表示北侧跨中,SB 表示南侧边跨,NB 表示北侧边跨,临时支架采用扩大基础,临时墩采用桩基础。

(1) 方案 1:少支架桥位散拼方案。利用履带吊逐块吊装板单元,焊接成节段,利用桥面吊机对称拼装两侧挑臂,在合适的温度条件下施工中跨合龙段,浇筑中墩支点处钢梁底板结合混凝土,拆除临时支架,保留 SB8、NB8、SZ6、NZ6 梁段下 4 个临时墩,分块现浇部分桥面板,拆除临时支墩,浇筑剩余桥面板,完成施工,具体施工方案见图 3、4。

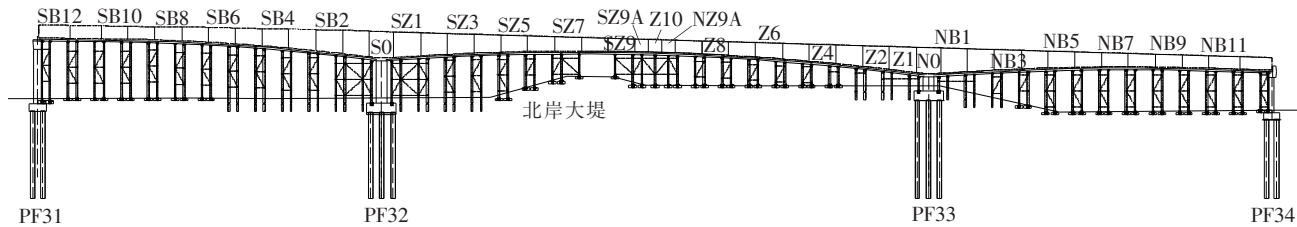


图 3 少支架桥位散拼

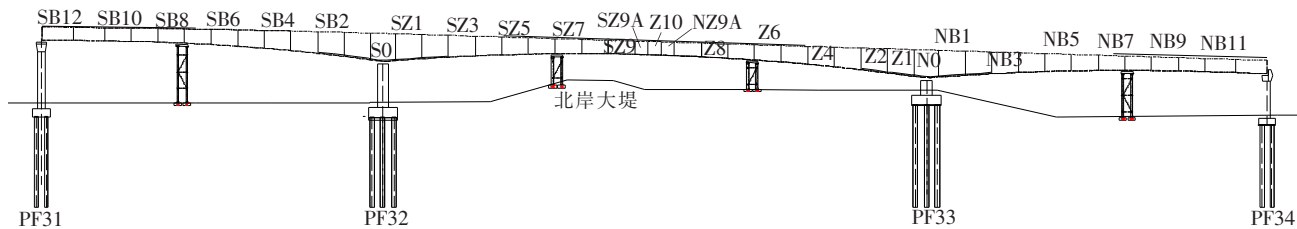


图 4 保留 4 个临时支墩

(2) 方案 2:桥面吊机对称悬拼方案。在堤内变跨区存梁,利用桥面吊机对称悬拼堤外侧 T 构,SB11# ~ SB13# 与 NB11# ~ NB13# 利用支架散拼施工、边跨合

龙,在合适的温度下锁定中跨合龙段,浇筑中墩支点处钢梁底板结合混凝土,拆除临时墩及散拼支架,从跨中和边跨梁端分别向中墩浇筑剩余混凝土桥面板,见图 5。

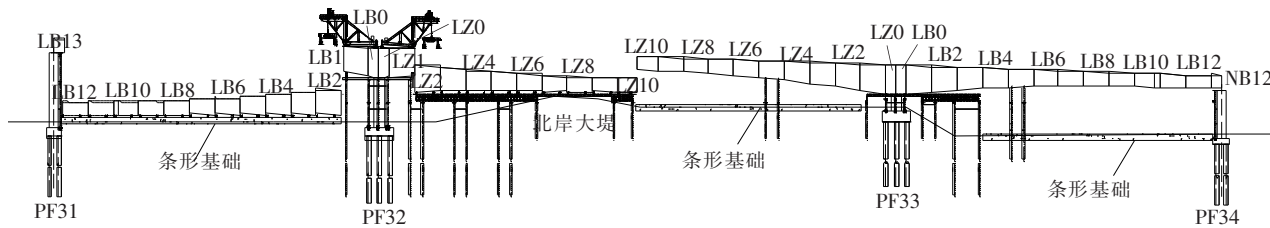


图 5 桥面吊机对称悬拼

(3) 方案 3: 支架周转桥位散拼方案。搭设北侧堤外 T 构少支点支架并安装拼装胎架, 利用履带吊吊装板单元至拼装胎架, 中间箱体拼装完毕后利用桥面吊机吊装两侧挑臂, 挑臂安装滞后一个节段, 北侧 T 构完成施工以后拆除临时墩转移至南侧 T 构完成南侧

T 构施工, 浇筑中墩支点处钢梁底板结合混凝土, 选择合适温度进行中跨合龙, 拆除临时支架, 保留 SB8、NB8、SZ6、NZ6 节段下 4 个临时墩, 分块现浇部分桥面板, 拆除临时支墩, 浇筑剩余桥面板, 完成施工, 见图 6。

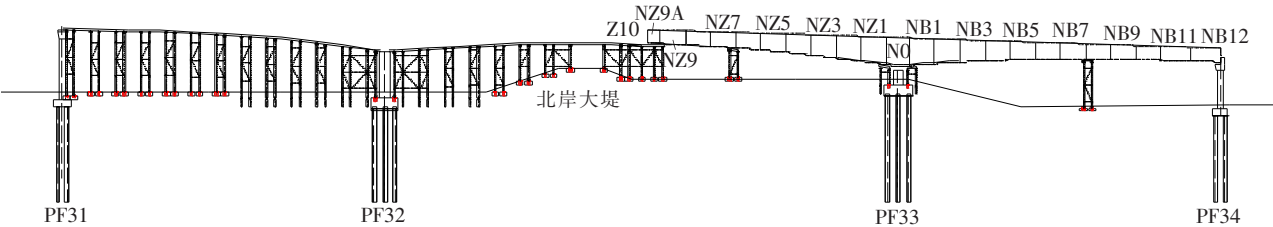


图 6 支架周转桥位散拼

3 有限元分析

3.1 材料参数

钢梁主体结构采用 Q345qE 和 Q420qE。挑梁和

斜底板采用 Q345qE 材料, NB6~NB12 梁段与 SB6~SB12 梁段为 Q345qE 材料, 其余梁段为 Q420qE 材料, 依据 GB 50017—2017《钢结构设计标准》钢材力学性能指标见表 1。

表 1 钢材力学性能指标

| 钢材     | 弹性模量/MPa             | 泊松比 | 抗拉抗压抗弯强度设计值/MPa |                  | 抗剪强度设计值/MPa |                  | 重度/(kN·m <sup>-3</sup> ) |
|--------|----------------------|-----|-----------------|------------------|-------------|------------------|--------------------------|
|        |                      |     | 钢材厚度≤16 mm      | 16 mm<钢材厚度≤40 mm | 钢材厚度≤16 mm  | 16 mm<钢材厚度≤40 mm |                          |
| Q345qE | 2.06×10 <sup>5</sup> | 0.3 | 305             | 295              | 175         | 170              | 76.98                    |
| Q420qE | 2.06×10 <sup>5</sup> | 0.3 | 375             | 355              | 215         | 205              | 76.98                    |

3.2 有限元模型计算

采用 Midas/Civil 有限元软件建立北侧跨大堤引桥的梁单元模型, 主跨 245 m, 桥面最大宽度为 61.7 m, 竖向为二次曲面变化, 横向为线性变化, 模型分为中间箱体和两侧挑臂, 均采用梁单元模拟, 有限元模型见图 7~12。

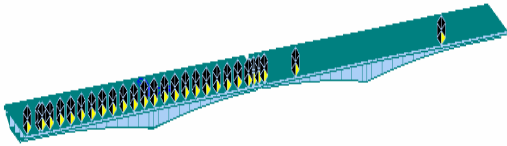


图 9 合龙前临时支架边界条件

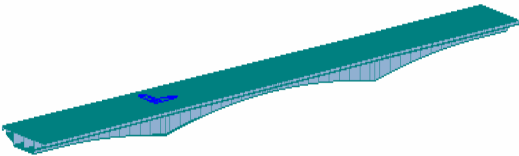


图 7 整体模型

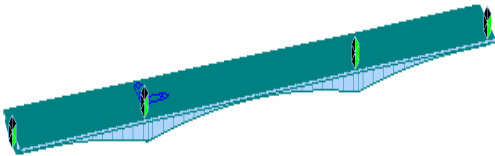


图 10 合龙后永久支座边界条件

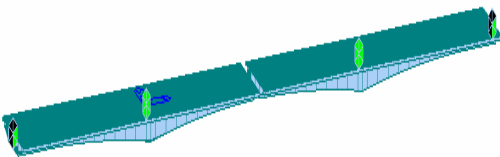


图 8 合龙前永久支座边界条件

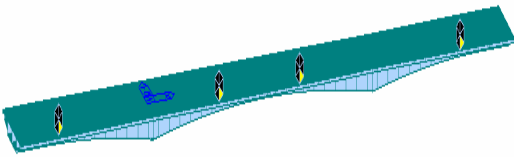


图 11 合龙后临时墩边界条件

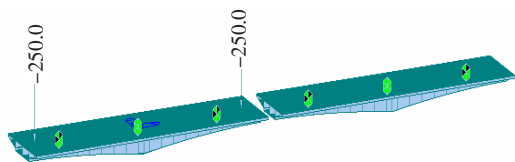


图 12 对称悬拼方案有限元计算(单位:m)

少支架桥位散拼与支架周转桥位散拼方案在受力计算上基本相同,方案区别点在于支架的拆除时机,对结构受力体系没有影响。以支架周转桥位散拼方案为例,桥梁永久支座采用一般支撑模拟,临时支架采用仅受压节点弹性支撑模拟,桥面板以均布荷载施加。

桥面吊机对称悬拼方案永久支座及临时墩均采用一般支撑模拟,单个桥面吊机采用 250 t 节点荷载模拟。

### 3.3 线形控制

大跨连续钢混组合梁高精度的线形控制是桥梁达到理想设计线形的基础。跨大堤引桥钢结构总重量接近 2.3 万 t,桥位处存在 5~8 m 的三级落差,竖向为二次抛物线变化,横向为线性变化,桥面纵坡包括 1%、2.45% 线形坡度及 120 m 半径为 8 300 m 的圆曲线,连续梁跨度大且刚度相对小从而主梁预拱度大,线形施工控制难度大。

(1) 少支架桥位散拼与支架周转桥位散拼方案主梁控制预拱度相同,中跨最大预拱度为 1 026 mm,边跨最大预拱度为 183 mm,板单元按照制造预拱度拼接成梁段,通过 200 t 三向千斤顶调位,选择合适的温度条件下焊接码板,施作环缝。

(2) 桥面吊机对称悬拼施工时,梁段重量大,悬臂状态预拱度控制难度相对较大,需要通过增加临时支撑等措施协助控制,中跨跨中最大预拱度为 1 059 mm,边跨最大预拱度为 208 mm,桥面吊机悬拼部分梁段通过增加预拱度消除悬臂施工过程中竖向变形的影响。桥面吊机吊装就位后,选择合适的温度条件焊接码板和环缝。

3 种方案在临时墩位置处的预拱度值相同,从成桥线形的角度考虑,3 种方案均能满足设计要求,主梁预拱度见图 13。

### 3.4 应力对比分析

采用有限元方法计算 3 种不同施工方案、不同施工工序主梁的最大应力及最小应力,结果如表 2、图 14、15 所示。

由表 2、图 14、15 可知:

(1) 少支架板单元桥位散拼方案中,临时支架拆

除之前桥梁主梁均处于无应力施工状态,能有效保证施工质量,拆除临时支架后仅保留 4 个临时支墩,跨中主梁上缘承受最大压应力为 67.90 MPa,主梁下缘承受的最大拉应力为 127.12 MPa。

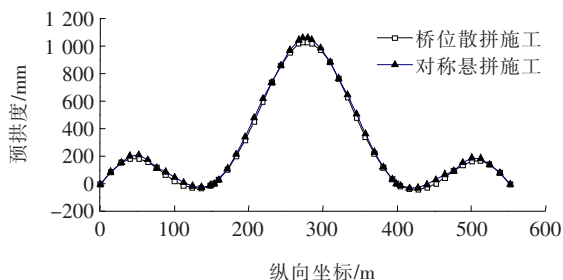


图 13 主梁预拱度

表 2 施工过程中主梁应力值

| 方案 | 上缘应力/MPa |        | 下缘应力/MPa |         |
|----|----------|--------|----------|---------|
|    | 最大值      | 最小值    | 最大值      | 最小值     |
| 1  | 57.81    | -67.90 | 127.12   | -137.88 |
| 2  | 91.63    | -53.51 | 76.23    | -175.07 |
| 3  | 57.81    | -67.90 | 127.12   | -137.88 |

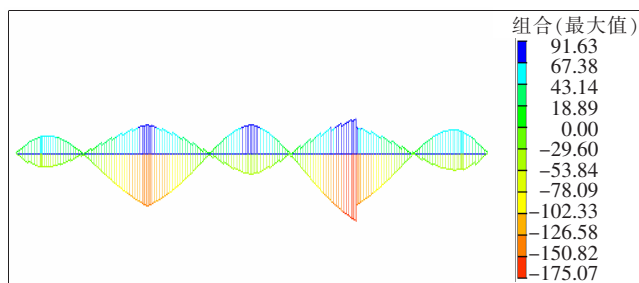


图 14 对称悬拼施工应力包络图(单位:MPa)

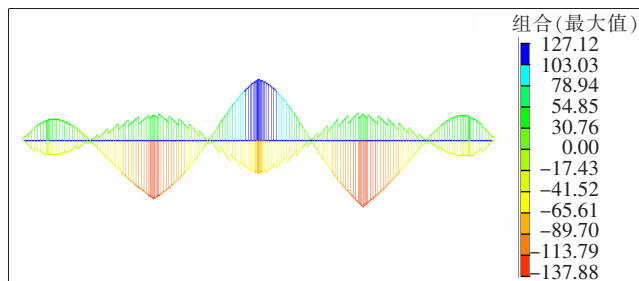


图 15 桥位散拼方案应力包络图(单位:MPa)

(2) 桥面吊机对称悬拼方案中,施工过程中,PF33 墩柱上缘承受最大拉应力为 91.63 MPa,下缘承受最大压应力为 175.07 MPa,均小于材料的允许应力值。但是钢结构一般要求无应力焊接工艺,有应力焊接对钢结构的抗拉压、疲劳等材料性能产生较大影响,

桥面吊机对称悬拼方案虽然能够满足施工阶段应力要求,但有应力焊接对桥梁使用寿命产生较大影响。

(3) 支架周转桥位散拼方案与少支架桥位散拼方案不同之处在于:方案 3 为北侧 T 构完成后将部分临时支架转移至南侧周转使用,北侧主梁合龙口位置下设置临时支架,能够保证中跨梁段合龙时主梁的无应力焊接状态,合龙前 PF33 墩柱支点顶板最大拉应力为 23.49 MPa,底板最大压应力为 30.71 MPa,临时支

架拆除后 4 个临时支墩的受力与方案 1 相同。

从结构受力考虑,3 个方案均能满足施工阶段的受力要求,但是方案 2 中有应力焊接工艺对材料性能产生一定的不利影响,方案 1 和方案 3 能够满足无应力焊接工艺要求。

3.5 综合方案比选

3 种方案施工过程中的主要投入和方案的优缺点比较见表 3。

表 3 综合方案比选

| 施工方案          | 主要投入   | 优点   | 缺点                                  |
|---------------|--|--|-------------------------------------|
| 方案 1:少支架桥位散拼  | 支架:9 500 t;设备:2 台 200 t 履带吊,2 台桥面吊机;工期:390 d   | ① 无需增加新拼装场地;② 开辟平行作业面缩短工期                      | ① 焊接变形控制难度大;② 高空作业量大,安全风险高          |
| 方案 2:桥面吊机对称悬拼 | 支架:1 600 t;设备:2 台桥面吊机,1 台 450 t 履带吊;总拼场地:2 处,合计 1 万 m <sup>2</sup> (另含总拼及移运设备共 2 套);工期:350 d | ① 施工组织灵活,临时支架投入较少;② 装配化施工、机械化程度高               | ① 工序转换工艺复杂;② 需增加 2 处总拼场地;③ 钢节段有应力焊接 |
| 方案 3:支架周转桥位散拼 | 支架:5 500 t;设备:2 台 200 t 履带吊,2 台桥面吊机;工期:500 d   | ① 与方案 1 相比节省近一半临时支架,材料费用节省近 2 000 万元;② 无需增加新场地 | ① 焊接变形控制难度大;② 高空作业量大,安全风险高;③ 工期延长   |

综合考虑主梁线形控制、结构应力、主要投入以及施工过程的优劣因素,进行对比分析得到:方案 1 与方案 3 在主梁线形控制方面具有明显优势,方案 2 线形控制相对困难;3 个方案施工过程中主梁应力均能满足规范要求,但是方案 2 不能满足钢结构无应力焊接的要求;方案 1 需要投入 9 500 t 临时支架,无需增加新的拼装场地,平行作业面多可以缩短工期,方案 2 需要投入 1 600 t 临时支架,装配化程度较高,但是需要增加现场钢结构拼装场地,方案 3 需要 5 500 t 临时支架,无需增加拼装场地,但是作业面减少,工期延长,由于跨大堤引桥施工不在关键线路上,工期的延长对整个标段的施工没有影响。

综上所述,支架周转桥位散拼方案相较于方案 1 节省支架 4 000 t,具有良好的经济效益,相较于方案 2 能够满足钢结构无应力施工的要求,因此该桥选用支架周转桥位散拼方案。

4 结语

济南凤凰路黄河大桥北侧跨黄河大堤引桥采用 (154+245+154) m 变截面连续钢混组合梁桥型方

案,主梁纵横向截面变化,施工难度极大,提出了 3 种施工方案:少支架桥位散拼;桥面吊机对称悬拼;支架周转桥位散拼。综合考虑主梁线形控制、结构应力、主要投入以及施工过程的优劣因素,最终选定支架周转桥位散拼方案,能够有效地保证施工的安全性,节省支架近 4 000 t,具有良好的经济效益。关于有应力梁段焊接问题适用于所有钢结构焊接施工,悬臂状态需要保证无应力焊接的施工工艺,有应力焊接对钢结构桥梁的使用寿命产生较大影响,类似项目要重点关注。

参考文献:

[1] 翁方文,田卿,田飞.大跨连续钢箱梁桥顶推施工控制技术研究[J].公路,2018(3).

[2] 周超舟,赵剑发.大跨度钢桁梁柔性拱拱肋施工方案研究[J].世界桥梁,2018(6).

[3] 周伟明.钢管混凝土拱桥中横梁施工方案比选[J].铁道建筑,2019(9).

[4] 陶路,马旭明,彭旭民,等.云南月亮湾大桥 PC 加劲梁湿接缝浇筑方案比选[J].桥梁建设,2019(S1).

[5] 万璐.曲线钢箱梁桥空间受力行为研究[D].西南交通大学硕士学位论文,2018.