文章编号：1671-8496-(2026)-04-0048-08

预应力混凝土连续刚构桥施工监控实例分析

卢的
（广东全科工程检测有限公司，广东 广州 511483）

摘　要：为保障预应力混凝土连续刚构桥施工安全及成桥质量，解决施工中结构变形、内力与设计值偏差的问题，对（55+2×87+55）m跨径连续刚构桥开展施工监控研究。采用桥梁博士与Midas软件建立有限元模型进行理论分析，结合三阶段位移测试、应力应变监测等现场实测方法，对主梁线形、应力应变及合龙精度实施全过程监控。结果表明：①成桥线形平顺，梁体标高偏差、轴线偏位均满足规范要求；②主梁应力处于C55混凝土强度设计值范围内，无超应力情况；③合龙段高程偏差控制到位，合龙精度符合设计标准。结论显示，该工程应用的监控流程与方法能有效控制施工误差，保障结构施工及运营阶段的受力与变形安全，可为同类桥梁施工监控提供技术参考。

关键词：连续刚构；施工监控；线形；应力应变；合龙
中图分类号：U445.4　　**文献标识码**：A

Analysis of Construction Monitoring of Prestressed Concrete Continuous Rigid Frame Bridge

LU Di
（Guangdong Quanke Engineering Testing Co., Ltd., Guangzhou 511483, Guangdong, China）

Abstract: To ensure construction safety and bridge quality in prestressed concrete continuous rigid frame bridges, this study investigates construction monitoring for a (55+2×87+55) m span continuous rigid frame bridge. Using Bridge Doctor and Midas softwares to establish finite element models for theoretical analysis, combined with on-site methods like three-stage displacement testing and stress-strain monitoring, the research implements full-process monitoring of main girder alignment, stress-strain, and closure accuracy. The results demonstrate: ①the completed bridge maintains smooth alignment with elevation deviations and axis deviations meeting code requirements; ②main girder stresses remain within C55 concrete strength design limits without over-stress conditions; ③closure segment elevation deviations are effectively controlled, with closure accuracy meeting design standards. The conclusion indicates that this monitoring process and methodology can effectively control construction errors, ensuring structural safety during both construction and operational phases, providing technical references for similar bridge construction monitoring.

Key words: continuous rigid frame; monitoring; alignment; stress-strain; closure

随着我国基建工程快速发展，桥梁建设规模不断扩大，社会对桥梁运营舒适性、安全性与耐久性的要求显著提升。预应力混凝土连续刚构桥常采用悬臂施工工艺，但施工过程中，梁体自重、预应力损失、温度变化及混凝土收缩徐变等因素易导致结构变形与内力偏离理论值，若缺乏有效控制，可能引发合龙困难、成桥线形超标及施工期超应力等问题，严重影响桥梁建设质量与运营安全。

目前，国内外学者已针对桥梁施工监控开展相关研究，如王书涛[1]探讨了大跨径连续梁桥监控技术框架，韩永华[2]通过工程实例验证了跨线

收稿日期：2025-12-15
作者简介：卢的，工程师，本科，研究方向为桥梁施工监控及结构检测

桥施工监控的实践价值，顾小路[3]则系统分析了连续刚构桥监控的核心要点，但针对（55 +2 ×87 +55）m 跨径组合的连续刚构桥，其悬臂施工阶段的挠度协同控制、合龙温度效应适配及长期徐变影响下的应力调控研究仍需结合具体工程进一步深化。

基于此，本文以某（55 +2 ×87 +55）m 预应力混凝土连续刚构桥为研究对象，旨在通过全过程施工监控，确保施工期结构内力与变形处于安全范围，同时实现成桥线形与恒载受力状态符合设计要求。研究采用“理论建模—现场监测—参数修正—动态调控”的技术思路，先通过桥梁博士与 Midas 软件建立有限元模型进行施工阶段仿真分析，获取理论内力与挠度基准值；再结合三阶段位移测试、应力应变传感器布设等现场实测手段，对主梁线形、关键截面应力及合龙精度实施实时监控；最后通过理论值与实测值对比，动态修正计算参数，指导施工调整。研究成果可为同类跨径连续刚构桥的施工监控提供技术参考，同时丰富中小跨径连续刚构桥的监控实践数据。

1 工程概况

珠海上横大桥主桥上部构造采用预应力混凝土连续刚构，跨径组合方式为（55 +2 ×87 +55）m。箱梁腹板竖直，顶板横坡与桥面铺装一致，通过绕道路中心线旋转得到横坡，设计行车速度为 60 km/h，设计荷载为公路 - Ⅰ级，人群荷载 3.5 kN/m^2，主梁采用三向预应力混凝土结构。桥面设双向两车道 + 人行道，桥宽 14 m = 2 ×（0.25 m 人行道护栏 +2 m 人行道 +0.5 m 防撞护栏 +0.75 m 路缘带 +3.5 m 行车道）。主墩基础采用钻孔灌注桩和整体式承台，桩基布置为直径 1.8 m 的钻孔灌注桩；主墩基础承台平面为 12 m ×7.5 m 的矩形，承台厚度为 3.5 m。10 号、11 号、12 号桥墩采用双薄壁，墩顶截面尺寸为 7 m ×1 m，肢间距为 1 m。主桥布置图及横断面如图 1 ~2 所示。

该桥所处核心环境条件恶劣，设计基本风速为 37.1 m/s（百年一遇），运营阶段桥面风速 25 m/s，大风频发，全年大风日数多，7—9 月台风季易出现 8 级以上大风，长悬臂施工阶段抗风风险极高；温湿度与腐蚀环境严苛，气温波动大，极端最高温 38.5℃，气温年变幅大，混凝土收缩徐变、预应力张拉受温度影响显著，环境类别为Ⅲ类腐蚀环境，地表水/地下水对钢筋混凝土结构具微腐蚀性，高湿、氯离子环境加速结构劣化。同时该桥主桥结构施工地质条件差、跨航道与交通组织困难，场地分布厚层淤泥、软土，高压缩性、低强度，易产生不均匀沉降与震陷，局部饱和中砂层易液化，桩基施工易塌孔、串孔，基岩起伏大，桩基需穿越多层软硬不均地层，桩长与承载力控制复杂；上跨涝溪，Ⅲ级航道，通航净空 63 m ×10 m，施工不能断航，水上作业安全风险高，桥下交通与水上通航叠加，施工干扰多，临时防护与通航安全管控难度大。

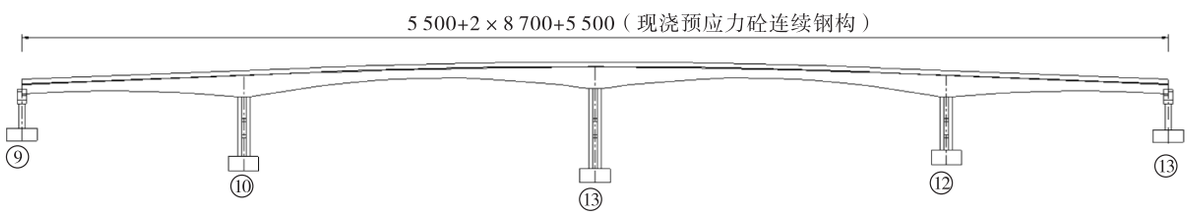

图 1　主桥桥型布置图

2 施工监控流程

大桥施工监控需要一个完整的循环过程，包括施工测量、误差识别、修正参数、预告、再指导施工。必须在施工过程中全过程跟踪计算，根据现场实际情况变化不断调整、完善计算参数以满足设计对线形及内力的要求，具体表现：结构内力合理，结构变形控制在允许范围内，并保证有足够的稳定性。具体流程见图 3。

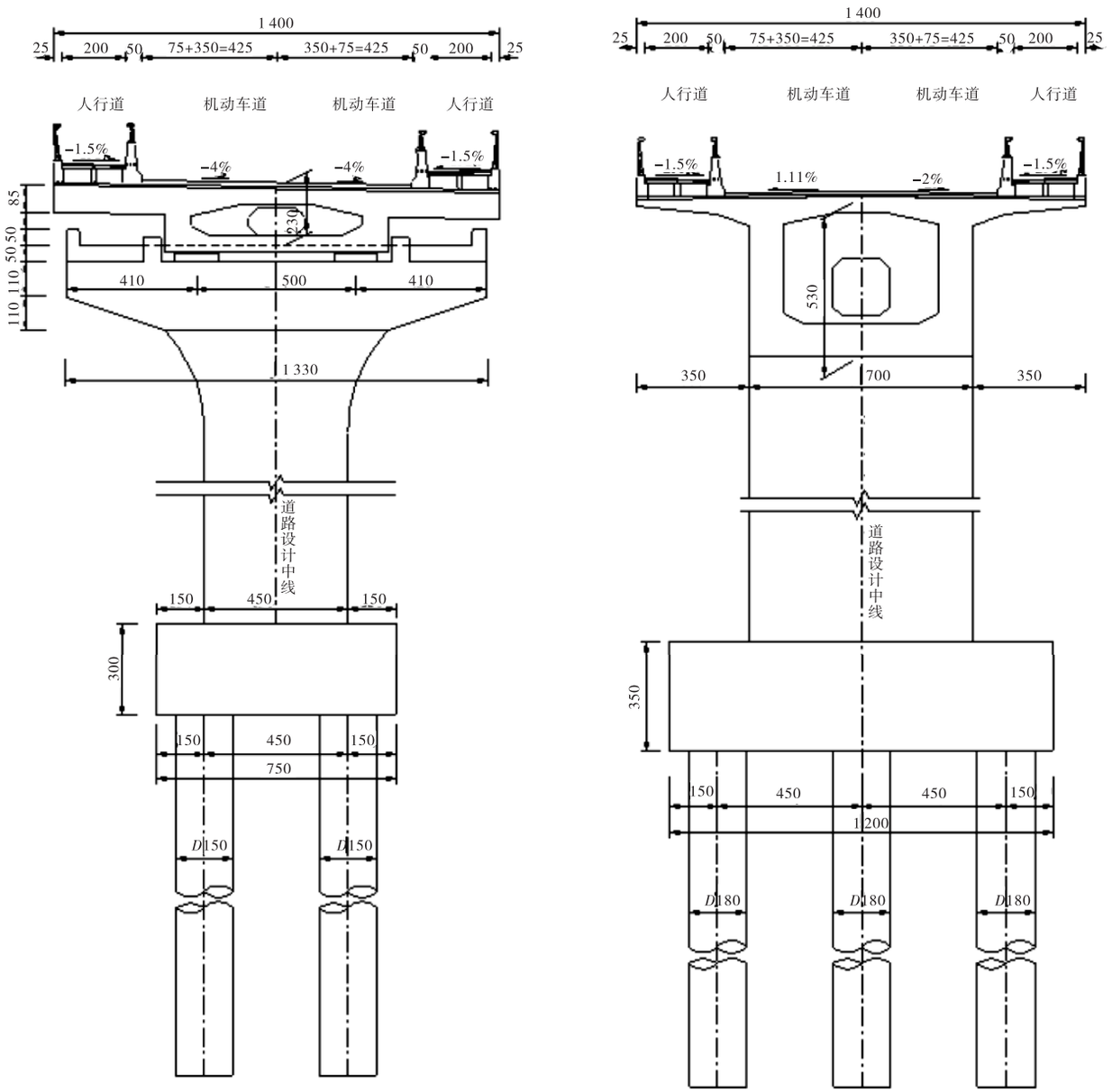

图 2　箱梁标准横断面

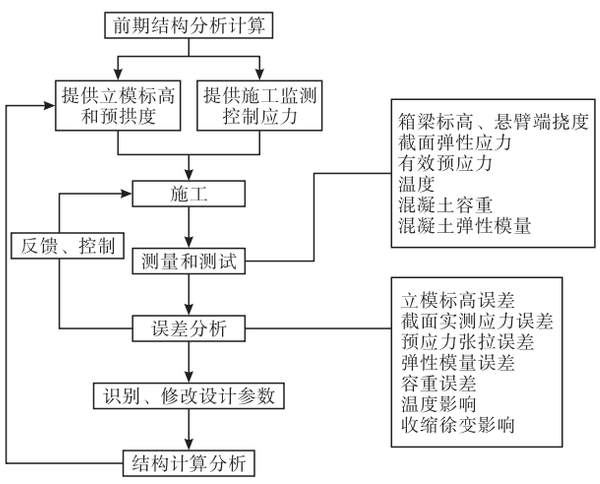

图 3　施工监控过程的参数分析流程图

3 桥梁结构理论分析

本次预应力混凝土连续刚构桥有限元模型的徐变系数、预应力损失等核心参数，均以《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362—2018）为核心依据，结合本桥C55混凝土设计指标、施工环境及现场实测数据修正，同时参考同跨径连续刚构桥工程实践，确保计算结果可靠。按照设计的施工工序，以及设计所提供的图纸和其他设计参数，对施工过程进行详细结构分析计算，模拟桥梁施工过程进行分阶段仿真分析，得到各施工状态以及成桥状态下的结构内力（或应力应变）和变形等控制数据[4]。

连续刚构桥合龙施工时，结构的温度很可能与设计拟定的合龙温度差别较大，这时需要采取顶推等施工工艺来模拟设计合龙温度下的结构内力状态[5]。所有计算数据均与设计相互校对确认无误后作为连续刚构桥施工监控的理论轨迹。全桥有限元模型及主梁模型透视图见图 4、图 5。



图 4　全桥有限元模型

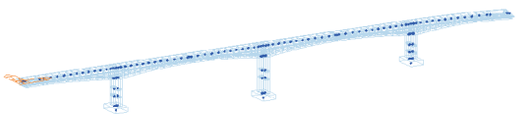

图 5　主梁模型透视图

3.1 挠度

计算结果主要关注各梁段的悬臂施工挠度和应力检测截面的应力情况。以主梁挠度为主控数据，应力为辅助数据。主梁预拱量以理论计算挠度为依据反推得到，其中考虑了施工阶段累加变形、配重加卸载、10 年徐变和活载短期效应组合[6]。根据计算：①最大悬臂状态下，主梁总体变形趋势为，边跨上翘最大值出现在 11#块，上翘量为 10. 83 mm；中跨下挠最大值出现在 8#块，下挠量为 2. 0 mm，上翘最大值出现在 11#块，上翘量为 9. 94 mm。②完成桥面铺装后，主梁最大上翘 14. 89 mm，最大下挠 6. 12 mm。③成桥 10 年后，在徐变和混凝土收缩作用下，全桥主梁最大上翘 12. 37 mm，最大下挠 27. 22 mm。④活载短期效应组合作用下，主梁最大挠度 17. 21 mm。计算结果见图 6 ~ 13。

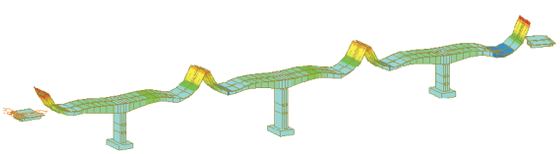

图 6　最大悬臂状态下的主梁累加竖向变形

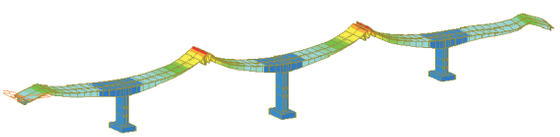

图 7　合龙段浇筑、张拉完毕并完成体系转换后的主梁累加竖向变形

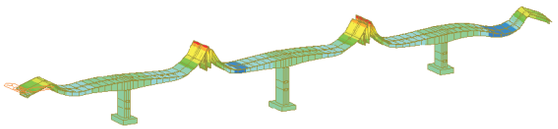

图 8　完成桥面系铺装后的成桥累加竖向变形

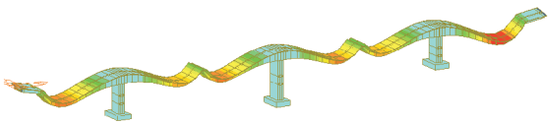

图 9　成桥恒载下累加竖向变形

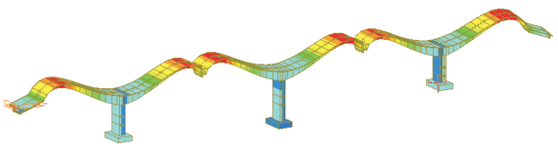

图 10　成桥预应力下累加竖向变形

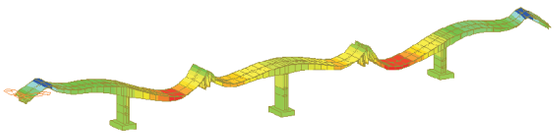

图 11　运营 3 年后的全桥累加竖向变形

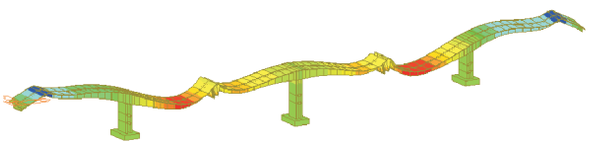

图 12　运营 10 年后的全桥累加竖向变形

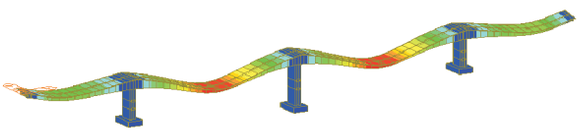

图 13　活载短期效应组合中的全桥最大挠度

3.2 应力应变

计入结构自重、混凝土时间特性、挂篮和平衡配重等荷载，按施工阶段分步骤计算。主梁的应力以最大悬臂阶段、合龙张拉、体系转换、卸载配重、施加二期恒载和 10 年徐变等 6 种情况为典型状态。施工全过程应力应变随工序推进呈现清晰的阶段性变化规律，主梁各控制截面应力以受压为主，梁顶、梁底应力分布均匀、差值稳定，无明显应力集中与截面畸变。同一截面应变随施工进度单调递增，无反向突变，与理论计算的变形协调规律一致，截面受力状态良好。主梁拉应力在最大悬臂时出现最大值，为 0. 40 MPa，

在C55混凝土抗拉强度设计值（1.89 MPa）范围内；主梁压应力在完成中跨合龙段张拉及体系转换后出现最大值，为11.66 MPa，在C55混凝土抗压强度设计值（24.4 MPa）范围内[7-8]。

主梁在上述典型工况下的最大应力值见表1。

表1 典型状态下主梁应力 单位：MPa

施工阶段	梁顶压应力	梁顶拉应力	梁底压应力	梁底拉应力
最大悬臂状态	10.56	≈0	8.55	≈0.40
完成边跨合龙段张拉	10.75	≈0	10.75	≈0.30
完成中跨合龙段张拉及体系转换	11.66	≈0	10.24	≈0
桥面铺装（二期恒载）	10.20	≈0	9.98	≈0
3年运营后	9.79	≈0	10.65	≈0
10年运营后	11.07	≈0	9.60	≈0

主梁应力分布情况以最大悬臂和成桥状态为例，见图14～17。

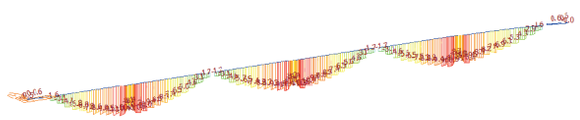

图14 最大悬臂状态下的主梁顶面应力分布

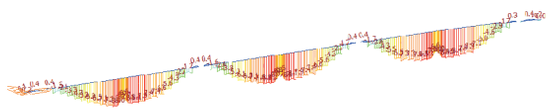

图15 最大悬臂状态下的主梁底面应力分布

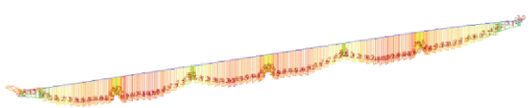

图16 成桥状态下的主梁顶面应力分布

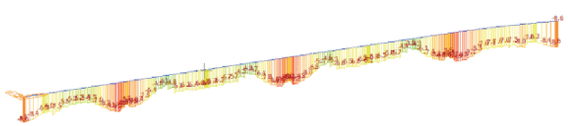

图17 成桥状态下的主梁底面应力分布

4 线形控制

4.1 高程控制点布置

主梁结构变形控制主要是通过分析施工过程的挠度观测值，对下一阶段施工立模标高进行调控，以控制桥梁施工按预定目标进行。箱梁高程控制主要利用箱梁顶面标高和底面标高，测点布置见图18。每个节段的箱梁底面标高测量两次数据：第一次在布置模板时测量，即立模标高；第二次在混凝土浇筑完成后、底模脱模之前测量。在进行第二次底面标高测量的同时，进行顶面标高的测量，并计算顶、底面标高之间的相对值，以此确定箱梁几何形状是否满足要求。

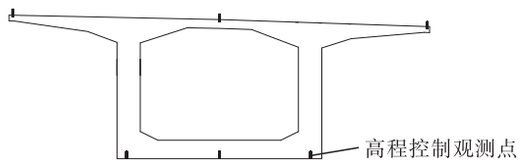

图18 主梁高程控制观测点布置示意图

4.2 立模标高

在建立正确的计算模型和性能指标后，依据设计参数和控制参数，结合桥梁结构的结构状态、施工工况、施工荷载、二期恒载、活载等，将其输入前进分析系统中，获得结构各施工阶段的内力和挠度。以及最终成桥状态的内力和挠度。假设成桥为理想状态，对桥梁结构进行倒拆分析，利用前进分析所得的数据，可获得桥梁结构最终成为理想状态的各阶段的预拱度值。根据设计标高、现场测试的混凝土材料性能、温度资料，详细分析施工过程中各工况高程及应力测点观测结果，适当调整计算预拱度值，提供施工立模标高，从而保证桥跨结构施工期间线形符合设计要求，并考虑混凝土长期收缩徐变等不利因素对结构线形的影响。提供的施工立模标高：$H_L = H_S + YY + \Delta g$，式中：$H_L$—立模标高；$H_S$—设计标高；$YY$—调整后的预拱度值；$\Delta g$—挂篮变形值。

4.3 位移监测

为确保本桥成桥线形和施工质量，在整个施工过程中需对每一梁段的标高和挠度变化情况进行监测，为箱梁标高调整和控制提供依据，对于主梁的变形监测采用三阶段位移测试方法。三阶段测量示意图见图19。

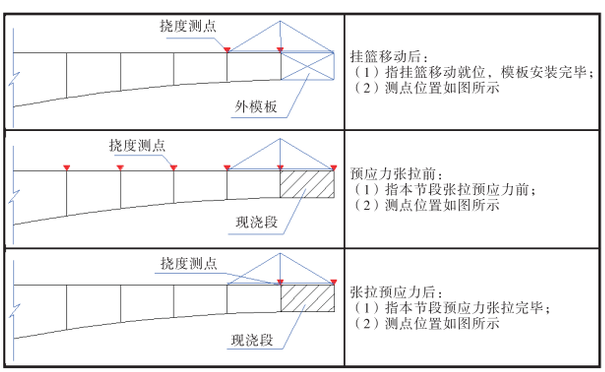

图19 三阶段测量示意图

4.4 高程控制成果

最大悬臂状态下，边跨合龙相对高差最大值为 12 mm，中跨合龙相对高差最大值为 17 mm，根据《公路桥梁施工监控技术规程》（JTG/T 3650－01—2022）第 6.3.2 条要求[8]，悬臂浇筑施工主梁合龙相对高差不应超过 20 mm，本次悬臂浇筑施工主梁合龙口相对高差控制良好，边跨、中跨合龙口两侧实测相对高差均控制在规范允许范围内，合龙精度满足设计及监控要求。

各墩 T 构的梁底标高控制基本顺利，梁底的实际高程与目标值相比，大部分现浇段偏差量在控制范围内，各悬浇块段之间衔接顺畅，且线形没有突然的折线。主梁合龙后的桥面线形基本平顺，满足线形控制要求，部分节段施工过程中，桥面标高与目标值偏差较大。桥面高程挠度偏差：最大正偏差为 12－9#大（28 mm）、10－0#小（23 mm）、12－7#小（27 mm）、12－8#小（20 mm），最大正偏差绝对值达 28 mm；最大负偏差为 13#墩（－27 mm）、11－8#大（－23 mm）、10－9#大（－24 mm），最大负偏差绝对值达 27 mm；无偏差/微小偏差为 10－7#小（0 mm）、12－3#大（0 mm）、12－10#大（0 mm）、11－7#小（－1 mm）、10－4#大（－1 mm）。梁底高程挠度偏差：整体远小于桥面偏差，绝大部分断面偏差绝对值在 ±20 mm 内，说明理论计算对桥梁主体结构变形的预测精度更高；梁底无偏差断面为 10－7#小（0 mm）、12－10#大（0 mm），与桥面无偏差断面重合，此类节段施工工艺控制精准，无额外施工扰动；局部较大梁底偏差为 10－10#大（25 mm，实测上翘大于理论）、12－2#小（－20 mm，实测下挠大于理论）、11－11#大（19 mm），主要由施工阶段挂篮变形不稳定导致立模标高调整偏差。成桥阶段桥面及梁底标高实测偏差见图 20。

理论与实测核心契合，变形趋势一致，实测主梁的上翘/下挠部位与理论计算高度匹配，如边跨 11#块、中跨 8#块为变形极值点，实测偏差也集中在这些部位，验证了理论模型对桥梁变形规律的预测准确性；预拱度补偿有效，针对 10 年徐变收缩的长期变形，理论计算提前设置了预拱度，成桥后实测线形未出现由徐变导致的过度下挠，说明长期变形的理论计算模型合理；施工阶段调控有效，通过“三阶段位移测试”对挠度进行实时监测，及时调整下一阶段立模标高，有效抵消了部分局部偏差。

挠度理论计算与实测数据的偏差机理探讨：挠度偏差并非由单一因素造成，而是计算模型假定与实际施工状况存在差异、施工工艺产生扰动以及测量误差等多方面因素共同作用的结果，其核心机理主要可归纳为：①计算参数与施工实际存在偏差，具体体现在混凝土材料参数、温度荷载以及临时荷载等方面存在差异；②计算假定与实际结构状态存在偏差，包括混凝土收缩徐变假定、结构体系转换理想化假定以及边界条件假定与实际情况不符；③施工工艺带来的误差，如挂篮变形不稳定、预应力张拉存在误差、立模与浇筑工艺不规范、荷载施加不对称等；④测量过程产生的误差，包括仪器精度与校准偏差、测量时机及环境影响、测点布置不合理和操作不当等问题。

综上所述，结构在施工过程及成桥阶段表现出的变形状态与理论计算及设计、监控要求基本一致，结构变形监控表现良好。成桥阶段实测标高及线形与理论计算及设计、监控要求基本一致。具体桥面线形及箱梁底面线形见图 21。

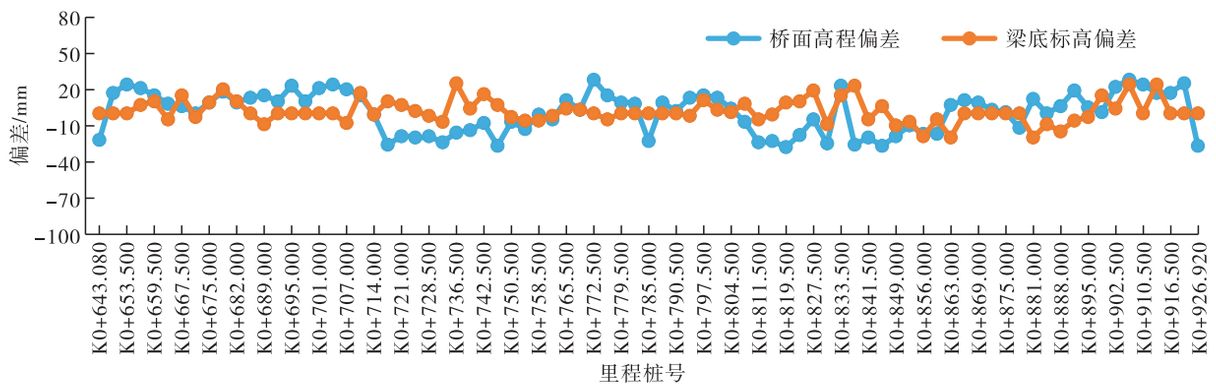

图 20　成桥阶段桥面及梁底标高实测偏差

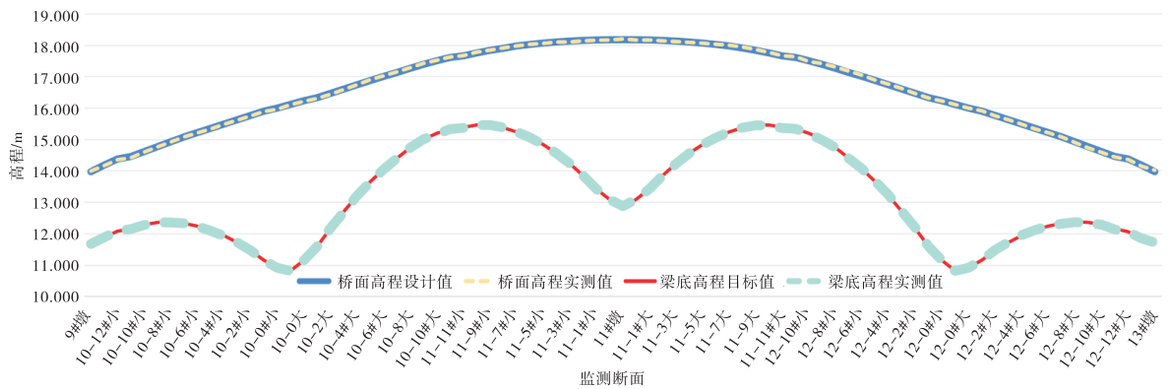

图 21　主桥连续刚构成桥阶段桥面高程及梁底高程比对图

4.5 轴线偏位监测成果

大桥第 5、9 节浇筑完成及成桥后进行全桥通测。主桥轴线水平位置坐标采用腹板外侧坐标算术平均值折算，可得出以下结论：①第 10 跨主梁最大偏位为左偏 1.8 cm；第 11 跨主梁最大偏位为右偏 2.0 cm；第 12 跨主梁最大偏位为左偏 1.8 cm；第 13 跨主梁最大偏位为右偏 2.0 cm。②主桥轴线水平位置无明显偏折。依据工程经验，连续刚构桥悬臂浇筑合龙前，两端水平错位不宜大于 20 mm，本桥实测偏位符合控制要求。

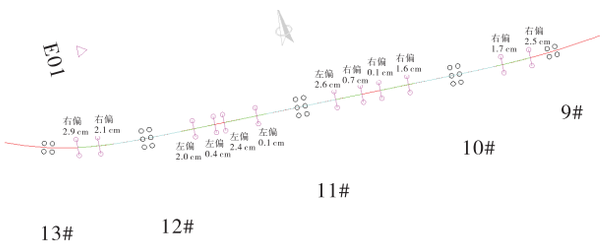

图 22　主桥轴线偏位图

5 应力应变控制

5.1 测点布置

根据《公路桥梁施工监控技术规程》第 5.3.2 条“梁桥主梁应力监测点宜布置在主梁墩顶附近、中跨跨中、中跨四分点以及其他应力控制截面的上、下缘，每个截面测点数不应少于 4 个”，结合该连续刚构桥悬臂浇筑施工期间及成桥合龙后的受力特点、应力测试内容及理论计算分析资料，拟在主梁 T 构悬臂根部（1#块）、边跨和中跨跨中、四分之一等 16 个关键截面布设 64 个应力测点[9-10]。具体布置见图 23、图 24。

5.2 应力应变控制成果

对 10#、11#、12#墩 T 构悬臂根部及全桥合龙关键截面开展全过程应变监测，涵盖悬臂逐段浇筑、预应力张拉、中跨顶推、合龙段现浇及张拉体系转换全工序。监测结果表明：主梁各控制截面全程以压应变受力为主，未出现有害拉应变；随着施工工序推进，悬臂根部压应变呈逐级递增变化规律，10#墩实测应变与理论值吻合度高、走势平稳，11#墩应变波动相对显著，最大实测压应变达 -419 με，12#墩应变响应介于两者之间。合龙顶推、浇筑及预应力张拉各阶段，主梁顶底板应变变化趋势与理论计算基本一致，张拉完成后截面受力逐步趋于稳定。在施工过程中，11#墩主梁的应变变化波动较大，但趋势大致符合理论[11-12]。所有应变计读数均未超过混凝土强度设计值范围（C55 混凝土刚度按 35.5 GPa 计算，则其抗压强度设计值 24.4 MPa 对应应变约为 687 με，抗压强度标准值 35.5 MPa 对应应变约为 1 000 με，标准立方体抗压强度值 55 MPa 对应应变约为 1 549 με）。

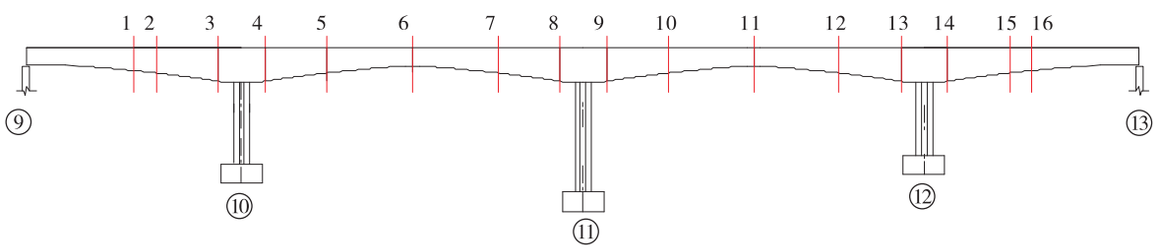

图 23　主桥应力应变监控截面整体布置及编号

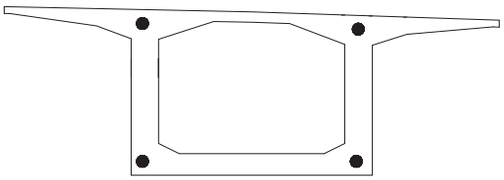

图 24　主桥主梁应力检测截面测点布置示意图

根据连续监测得到的应变和环境温度数据综合分析，结构温度每变化 1℃，应变变化 3 ~ 7 με，即混凝土线膨胀系数为 3×10^{-6} ~ 7×10^{-6}/℃。该数值明显小于理论值（8×10^{-6} ~ 12×10^{-6}/℃），推测由施工现场条件影响导致。依据《公路桥梁施工监控技术规程》确定本桥应变监测误差允许标准为相对误差≤ ±20%。统计结果表明，大部分测点误差在允许范围内，虽然部分测点应变超出误差允许范围，但实测应力仍在安全区间，超差测点最大压应变 - 419 με，对应压应力 ≈ 14.9 MPa，远低于 C55 混凝土抗压强度设计值 24.4 MPa，且应力变化趋势与理论吻合，结构最终实测受力状态在一般预应力混凝土桥的容许范围之内，结构应力状态正常，施工过程中的结构受力总体安全。分析超差原因：一是预应力张拉精度不足，千斤顶油压控制、持荷时间与理论工况存在偏差，实际预应力大于设计值；二是张拉时环境温度与计算基准温差较大，未进行精准温度补偿；三是传感器埋设与测试误差，测点位置轻微偏移、仪器零点漂移导致读数偏差[13]。

6 结论

本文以（55 + 2 × 87 + 55）m 跨径预应力混凝土连续刚构桥为研究对象，通过理论建模与现场监控结合的方式开展施工监控研究，得出以下核心结论：

实践表明，采用 Midas 与桥梁博士双软件独立建模、分阶段仿真并相互校核理论数据的监控方案，可有效保障施工精度与结构安全；成桥后主桥线形平顺，桥面与梁底标高偏差控制在 ±10 mm 允许范围内，轴线最大偏位 2.0 cm，主梁各阶段最大拉应力 0.40 MPa、最大压应力 14.9 MPa，均处于 C55 混凝土强度设计值（1.89 MPa/24.4 MPa）范围内，合龙段高程偏差控制精准，线形、应力应变、施工工序等关键技术控制指标均满足设计与规范要求[14-15]，该监控方案对同类跨径连续刚构桥具有良好适用性。

与现有大跨径连续梁桥、跨线桥监控研究相比，本文聚焦主跨 87 m 中小跨径连续刚构桥悬臂施工特性，补充了 10 年徐变效应下的预拱度设置及顶推合龙阶段应力协同控制等实践数据，完善了同类桥梁施工监控的参数调整体系：所形成的监控流程与立模标高计算公式，可直接为同类型桥梁施工提供技术模板，监控数据也可作为运营期健康监测基础资料，以降低后期维护成本。

后续研究可从三方面展开：一是结合长期运营监测数据，建立混凝土线膨胀系数与现场环境（温度、湿度）的量化关联模型，提升应力监测精度；二是引入空间有限元分析方法，细化剪力滞效应对截面应力分布的影响，优化测点布置方案；三是针对施工荷载与预应力张拉误差的耦合效应，开发基于机器学习的误差预测模型，实现施工监控的智能化调控。

参考文献：

[1]王书涛. 大跨径连续梁桥施工监控技术研究[J]. 公路，2013(8):99-101.

[2]韩永华. 漳龙铁路跨线桥桥梁施工监控实例分析[J]. 公路交通技术,2017,33(4):82-85.

[3]顾小路. 混凝土连续刚构桥梁施工监控技术[J]. 青海交通科技,2021,33(3):122-127,144.

[4]李强. 大跨连续梁拱组合桥梁施工关键阶段变形控制分析[J]. 公路交通技术,2024,40(5):142-149.

[5]王朝华,邓国良. 生米大桥主桥结构施工监控[J]. 桥梁建设,2007(2):69-71,83.

[6]闫海舟. 桥梁施工监控中预抛高设置问题研究与控制[J]. 运输经理世界,2025(20):49-51.

[7]周戈,盛光祖,李浩然. 预应力混凝土桥梁施工监控应力修正及应用分析[J]. 工程建设与设计,2020(3):161-165.

[8]JTG/T 3650 - 01—2022 公路桥梁施工监控技术规程[S].

[9]余伟. 大跨度连续刚构桥梁施工控制综合技术研究[J]. 公路工程,2018,43(2):162-166,264.

[10]吴智慧,骆伟. 连续刚构桥梁施工监测和控制[J]. 安徽建筑,2017(2):110-111,121.

[11]孙黎. 实例分析连续刚构桥梁施工监控技术[J]. 公路交通科技(应用技术版),2016,12(7):114-115.

[12]张荣华. 大跨度预应力混凝土桥梁施工监控技术的应用分析[J]. 科技咨询,2023,21(1):105-108.

[13]余钱华. 大跨混凝土桥梁施工监控中的应力分析与测试[J]. 中国公路学报,2008,21(2):68-73.

[14]汤喻杰. 桥梁施工监控技术研究综述[J]. 四川建筑，2017,43(8):97-99.

[15]何宇,李永强,乐思韬,等. 平潭海峡大小练岛水道桥施工监控[J]. 铁道建筑,2020,60(6):40-43.