

# 阅江路黄埔涌慢行桥精细化施工控制研究

甄文君

(广州新中轴建设有限公司, 广东 广州 510000)

**摘要:** 阅江路黄埔涌慢行桥以“榕生水岸, 水鸟天堂”为主题, 为保证其独特的拱形斜拉-梁组合体系在施工过程中的结构安全和成桥目标状态的实现, 对桥梁进行施工监控。过程中对桥梁进行数值模拟分析, 比选优化施工方案, 识别修正监控数据与理论模拟数据, 引入BIM技术, 高效、准确地对成桥状态进行了预测, 优化、调整了施工过程中桥梁的受力状态, 顺利实现了成桥的目标状态。为新型空间拱形斜拉-梁组合体系的发展积累了工程经验, 有益地推进了新型桥梁的发展, 同时拓展了BIM技术在桥梁施工监控方向的应用。

**关键词:** 拱形斜拉-梁组合体系; 施工监控; 施工方案优化; BIM

**中图分类号:** U445; TU997

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2025)12-0231-05

## Study on Refined Construction Control in Yuejiang Road Huangpuchong Slow-traffic Bridge

ZHEN Wenjun

(Guangzhou New Central Axis Construction Co. Ltd., Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** The theme of the Yuejiang road Huangpuchong slow-traffic bridge is “Banyan Waterfront, Waterfowl Paradise”. The construction monitoring of the bridge is carried out to ensure the structural safety of the bridge construction process and the realization of the target state of the bridge. The structure static analysis were based on simulation analysis. A comparative analysis of the construction sequence is conducted to select the most reasonable construction procedures. The construction monitoring data and the theoretical simulation data were identified and corrected. The adoption of BIM technology in the monitoring process has enhanced the prediction of the state of the bridge efficiently and accurately. The state of the bridge during the construction process was optimized and adjusted. The target state of bridge completion has been successfully achieved. It has accumulated engineering experience for the development of the arched cable-beam composite system, which has beneficially promoted the development of bridges. At the same time, it has expanded the application of BIM technology of bridge construction monitoring.

**Keywords:** arched cable-beam composite system; construction monitoring; construction scheme optimization; BIM

## 0 引言

空间拱形斜拉-梁组合体系为国内首创的结构类型, 属于新型结构桥梁, 结构为连续梁和拱形拉杆、斜撑杆共同受力, 属于超静定结构<sup>[1]</sup>体系, 其理想的成桥状态与施工过程“路径”和“时间”效应密切相关<sup>[2]</sup>, 桥梁结构从开始施工到成桥必须经历一个复杂的多阶段构件施工安装和体系转换过程, 目标状态只是理想目标, 施工过程中将受到许多确定和不确定因素的影响, 导致桥梁结构的实际状态偏离理论计算分析状态, 尤其对新型结构桥梁, 由于其创新性, 施工不确定因素的影响更为明显。因此, 有必

要在施工过程中进行施工监控<sup>[3]</sup>。从工程角度, 监控工作可以使施工过程处于安全、可控状态, 成桥后桥梁结构内力及线形满足设计目标要求<sup>[4]</sup>; 从科研角度, 监控工作可以将所采集的结构变形和受力状态与理论计算进行对比, 为推动此类新型桥梁的发展提供数据支撑。

## 1 工程概况

阅江路黄埔涌慢行桥位于广东省广州市, 北临珠江, 南临阅江路, 整体呈东西走向跨越黄埔涌。桥梁立意“榕生水岸, 水鸟天堂”, 桥梁如水中生长的榕树, 独具岭南意韵, 桥梁效果图入图1所示。

全桥跨径组合为: (9.864 m+14.832 m+25 m)+(95 m+85 m+49.918 m)=279.614 m。桥梁设计线平面上呈圆弧形布置, 半径534.25 m, 桥梁平面中间宽,

收稿日期: 2025-09-30

作者简介: 甄文君(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程建设管理工作。



图1 桥梁效果图

两侧窄,最大桥宽 21.8 m,最小桥宽 10.4 m。桥梁设置快行、慢行步行道,由拱形斜拉结构分隔,桥梁总体布置图如图 2 所示。

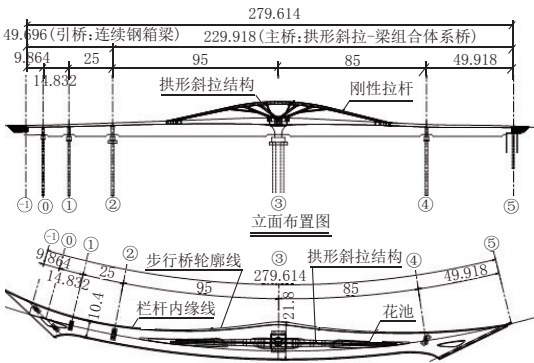


图2 桥梁总体布置图(单位:m)

桥梁主桥上部结构采用 95 m+85 m+49.918 m 大跨度曲梁空间拱形斜拉-梁组合体系,拱形斜拉结构高 8.5 m,为刚性拉杆,截面采用单箱单室薄壁钢箱;刚性拉杆与主梁之间设置斜撑杆,截面采用单箱单室薄壁钢箱;主梁采用变高度、变宽度单箱多室薄壁钢箱,梁端较窄处采用单箱三室,主墩处采用单箱五室。

2 施工全过程数值模拟分析

桥梁结构的最终形成,必须经历一个复杂的施工过程及结构体系转化过程,对施工全过程的数值模拟分析,可以反映施工过程中各个阶段的结构行为,确定结构各个阶段的理想状态,为施工提供中间过程的目标状态。

2.1 施工整体工艺

步行桥位于黄埔涌和珠江交界处,北侧为珠江,施工场地条件较好,无通航限制,吊装区域清淤后可以满足 660 t 浮吊吊装需求。

桥梁采用临时支架<sup>[5]</sup>+浮吊吊装的总体施工方案,桥梁架设按照“先梁后拉杆”的安装顺序。主桥共计划分为 15 个节段,其中拱形拉杆划分为 3 个节段,主桥梁体划分为 12 个节段,节段划分如图 3 所示,主桥梁体最大节段尺寸 21.8 m×13.7 m×4 m,梁体

节段最大重量 275.3 t。拱形拉杆 46.8 m×11.5 m×4.1 m,节段重量约 360 t。

结合图 3 节段划分示意图,主桥施工总体步骤:施工墩台及主梁临时支架→主桥节段 6 吊装施工→主桥节段 7 吊装施工→主桥节段 8 吊装施工→主桥节段 5 吊装施工→主桥节段 4 吊装施工→拉杆节段 A 安装→主桥节段 9 吊装施工→主桥节段 10 吊装施工→主桥节段 11 吊装施工→主桥节段 12 吊装施工→主桥节段 3 吊装施工→主桥节段 2 吊装施工→主桥节段 1 吊装施工→拉杆节段 B 吊装施工→拉杆节段 C 吊装施工→焊接钢拱肋→拆除拉杆临时支架→安装最外侧剩余支撑杆→拆除临时支架→二期恒载。

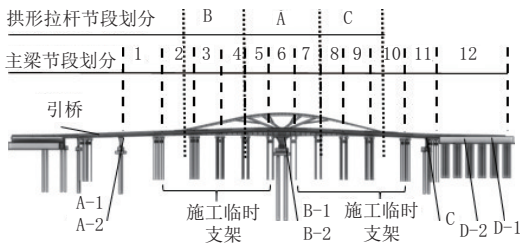


图3 节段划分示意图

2.2 施工全过程数值模拟分析

采用 MIDAS Civil 建立主桥全施工过程的数值模拟分析模型。由于桥梁平面圆弧布置,桥梁宽度沿道路中心线单侧由窄变宽后再收窄,因此以结构中心线作为梁单元结构的基准线。钢箱梁采用梁单元模拟,截面形状随道路中心线不断变化,截面宽度、截面高度、顶、底、腹板厚度及纵向加劲的布置与尺寸根据设计图纸取用。刚性拉杆及斜撑杆均采用梁单元模拟,截面尺寸及板件厚度按照设计图纸取用。主桥共离散为 155 个单元,252 个节点。刚性拉杆与主梁节点、刚性拉杆与斜撑杆之间采用刚性的弹性连接模拟,永久支座采用一般弹性连接,通过设置连接的水平刚度来模拟支座固定及滑动,临时支架采用只受压弹簧模拟,数值分析模型如图 4 所示。

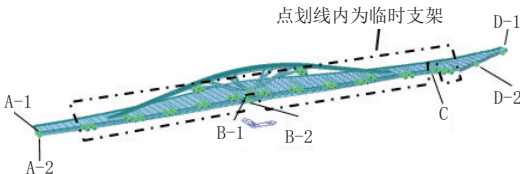


图4 数值分析模型

临时支架脱架后结构理论变形值如图 5 所示,由于主桥主跨跨径的不对称、边跨的布置等影响,主桥各跨径的桥跨竖向位移差别较大,其中跨径为 95 m 桥跨的跨中最大竖向位移 129 mm,跨径为 85 m 桥跨

的跨中最大竖向位移 28 mm。

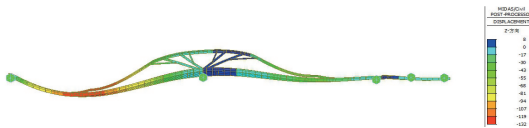


图5 临时支架脱架后结构理论变形值(单位:mm)

临时支架脱架后结构理论应力值见图6和图7。95 m跨径主梁在拉杆附近上缘压应力29.5~53.8 MPa,下缘拉应力28.1~52.2 MPa;85 m跨径主梁在拉杆附近上缘压应力7.3~30.1 MPa,下缘拉应力5.5~14.7 MPa;墩顶主梁上缘拉应力37.7 MPa,下缘压应力64.5 MPa。经模拟计算分析,主梁以连续梁受力特征为主,由于拱形拉杆的作用,拉杆与主梁连接处,竖向对主梁提供一定的弹性支撑,使得主梁在拉杆交界处相较于常规连续梁局部呈现一定的弯矩调整。

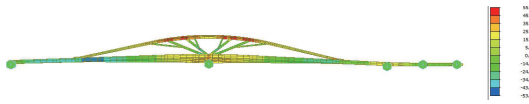


图6 临时支架脱架后结构上缘应力(单位:MPa)

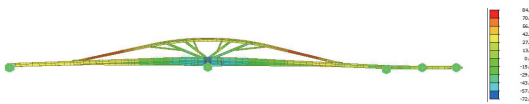


图7 临时支架脱架后结构下缘应力(单位:MPa)

拱形拉杆拱顶附近上缘拉应力31.5~51.7 MPa,下缘拉应力5.4~46.3 MPa,经模拟计算分析,拱形拉杆整体呈现受拉状态,与斜撑杆交界处由于撑杆的弹性支撑呈现上缘拉应力增加,下缘拉应力降低的受力特征。

3 施工方案优化

本项目主桥施工过程中共设置11组水中临时支架,钢箱梁整体焊接成型形成连续结构后,进行临时支架的拆除。对于线弹性结构,只要最终结构单元的无应力长度、无应力曲率、外加荷载和支座位置一定,则结构最终成桥状态的结构内力、位移与结构的形成过程和施工方法无关<sup>[6]</sup>。临时支架的拆除顺序并不会影响成桥状态的位移及内力,但不同的拆架顺序会对结构的施工临时状态产生较大影响,合理选择临时支架的拆除顺序对保证结构的受力安全及优化结构施工状态的受力性能有极大的意义。

原施工方案:主梁支架从跨中向两侧拆除,(A1)拆除主桥节段2/节段3、节段9/节段10临时支架→(A2)拆除主桥节段3/节段4、节段8/节段9临时支架→(A3)拆除主桥节段1/节段2、节段10/节段11临时支架→(A4)拆除主桥节段4/节段5、节段7/节段8

临时支架→(A5)拆除主桥节段5/节段6、节段6/节段7、节段11/节段12临时支架。原施工方案对应的永久支座反力历程如表1所示。

表1 原施工方案永久支座反力表 单位:kN

| 支座位<br>施工阶段 | A-1 | A-2 | B-1    | B-2    | C     | D-1 | D-2 |
|-------------|-----|-----|--------|--------|-------|-----|-----|
| (A1)        | 404 | 260 | 2 316  | 1 858  | 425   | 733 | 292 |
| (A2)        | 507 | 76  | 3 155  | 1 291  | 301   | 733 | 270 |
| (A3)        | 628 | 785 | 3 581  | 1 684  | 2 504 | 692 | 77  |
| (A4)        | 624 | 862 | -3 206 | 2 373  | 2 705 | 666 | -90 |
| (A5)        | 712 | 871 | 5 540  | 12 368 | 2 431 | 639 | 392 |

注:施工阶段仅用序号表述,支座编号见图4。

由表1可知,在(A4)拆除主桥节段4/节段5、节段7/节段8临时支架时,中墩的永久支座出现负反力,当继续(A5)拆除主桥节段5/节段6、节段6/节段7、节段11/节段12临时支架后,中墩的永久支座反力由负转正,数值浮动变化较大,不利于结构安全,产生此现象的主要原因是由于95 m跨的跨中竖向位移远大于85 m跨的跨中竖向位移,当采用“从跨中向两侧拆除”的方案时,95 m跨随着跨中临时支架的拆除,其中墩附近的反力向位于跨中的临时支架转移,从而导致中墩的永久支座在施工过程中临时脱空。为防止永久支座在施工过程中产生脱空现象,调整临时支架拆除的原则,先拆除85 m跨的临时支架后再拆除95 m跨的临时支架,同时为了减小跨中支架拆除后,中墩附近的反力向位于跨中的临时墩转移的效应,每跨先将靠近中墩附近的临时支架拆除后,再从跨中向两侧拆除其余的临时支架。经过优化后,施工方案调整为:(B1)拆除主桥节段6/节段7临时支架→(B2)拆除主桥节段9/节段10临时支架→(B3)拆除主桥节段8/节段9临时支架→(B4)拆除主桥节段10/节段11临时支架→(B5)拆除主桥节段11/节段12临时支架→(B6)拆除主桥节段7/节段8临时支架→(B7)拆除主桥节段5/节段6临时支架→(B8)拆除主桥节段2/节段3临时支架→(B9)拆除主桥节段3/节段4临时支架→(B10)拆除主桥节段1/节段2临时支架→(B11)拆除主桥节段4/节段5临时支架。优化的施工方案对应的永久支座反力历程见表2。

对比分析表1与表2,可知调整施工过程中临时支架的拆除顺序不会对成桥状态的支座反力产生影响,当采用合理的支架拆除顺序时,可以避免施工过程中出现受力不利的工况,从而保证施工过程的安全,结构受力的合理。



| 表 2 优化施工方案永久支座反力表 |     |     |       |        |       |     | 单位: kN |
|-------------------|-----|-----|-------|--------|-------|-----|--------|
| 支座位<br>施工阶段       | A-1 | A-2 | B-1   | B-2    | C     | D-1 | D-2    |
| (B1)              | 345 | 352 | 2 276 | 3 021  | 470   | 734 | 305    |
| (B2)              | 344 | 352 | 2 288 | 3 052  | 425   | 733 | 293    |
| (B3)              | 344 | 352 | 1 953 | 2 648  | 298   | 733 | 272    |
| (B4)              | 343 | 350 | 1 821 | 2 738  | 2 673 | 682 | 76     |
| (B5)              | 343 | 349 | 1 798 | 2 801  | 3 049 | 565 | 365    |
| (B6)              | 342 | 347 | 3 870 | 9 630  | 3 560 | 483 | 251    |
| (B7)              | 342 | 346 | 4 152 | 10 418 | 3 597 | 477 | 238    |
| (B8)              | 329 | 311 | 4 097 | 10 348 | 3 592 | 477 | 238    |
| (B9)              | 290 | 226 | 3 900 | 9 969  | 3 583 | 479 | 240    |
| (B10)             | 635 | 652 | 3 681 | 9 415  | 3 170 | 525 | 289    |
| (B11)             | 712 | 871 | 5 540 | 12 368 | 2 431 | 639 | 392    |

注: 施工阶段仅用序号表述, 支座编号如图 4 所示。

4 桥梁施工监控

施工监控的目标是确保结构在施工中内力、变形和稳定状态在允许范围内, 从而确保施工阶段桥梁结构的安全和竣工后桥梁的内力和线形最大限度的符合设计目标状态, 为得到比较准确的控制调整措施, 监控过程在闭环反馈控制基础上, 增加系统辨识过程, 形成自适应控制系统<sup>[7]</sup>。按照“施工→量测→识别→修正→预告”<sup>[8]</sup>的自适应控制系统, 综合采用参数识别修正法<sup>[9]</sup>、预测控制法<sup>[10]</sup>和最大宽容度法<sup>[11]</sup>进行控制。

线形控制是保证桥梁景观效果的前提条件<sup>[12]</sup>。主梁和拱形斜拉结构的线形是保证桥梁达到预期目标的关键, 主梁每个节段的环口设置 4 个测点, 测点布置在结构顶板顶面, 拱形斜拉顶部设置 2 个测点, 测点布置在结构顶板顶面, 测点布置如图 8 所示。

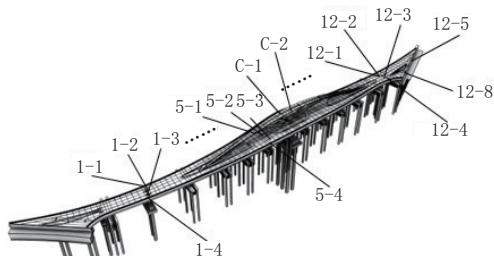


图 8 测点布置

施工过程中对测点处的标高进行了跟踪测量, 现场钢结构安装如图 9 所示, 测点各施工控制阶段(梁体落架及二期铺装)的梁体竖向位移变形与理论计算值如图 10 所示。梁体实际的竖向变形趋势与理论计算一致, 实测与理论差值最大处位于 95 m 跨的跨中附近, 落架时最大偏差 17 mm, 最大偏差与跨

径比值为 0.18‰。完成桥面铺装后最大偏差 18 mm, 最大偏差与跨径比值为 0.19‰。由数据可知, 位移偏差主要出现在钢梁落架时, 根据参数识别分析, 产生此偏差主要因素为钢板厚度的正偏差及焊接材料的重量。实测的梁体竖向变形连续光滑, 桥面线型较为平顺, 梁体的竖向变形实测与理论差值较小, 按照理论设置施工预拱能较好的抵消结构自重竖向变形, 保证了桥梁成桥线形的质量要求。拱形斜拉顶部落架时理论竖向位移落架时最大偏差 1 mm。完成桥面铺装后最大偏差 1 mm。拱形斜拉结构的线形平顺, 因压杆支撑作用, 拱形斜拉顶部竖向实测位移与理论值相近。



图 9 钢结构安装

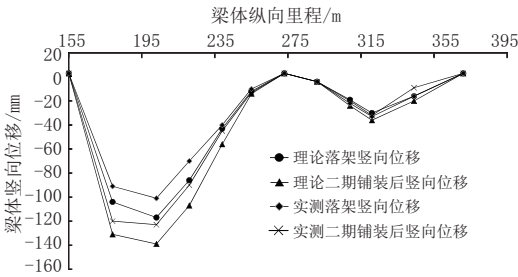


图 10 施工控制阶段结构竖向位移对比图

在施工监控过程中, 采用了 BIM 技术<sup>[13]</sup>, 能够对建筑进行数据化、信息化模型整合<sup>[14]</sup>, 对于复杂的异形桥梁工程, 有助于更好地解决施工过程中遇到的难题<sup>[15]</sup>。实时更新数据模型如图 11 所示, 通过模拟施工架设过程, 跟据现场各节段吊装架设的实际位置实时更新数据模型, 直观反馈现状施工状态, 模拟实际施工状态对成桥目标状态的影响, 为监控修正指令提供科学、可靠的数据支持。

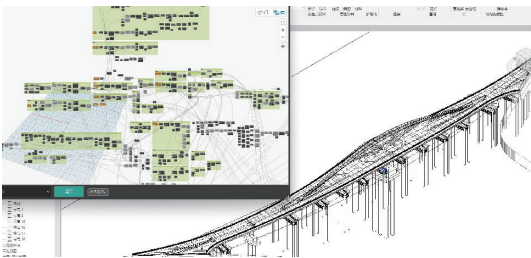


图 11 实时更新数据模型

# 5 结 语

以国内首创的拱形斜拉-梁组合体系为工程背景,进行新型结构的施工监控研究,根据数值模拟分析结果优化施工方案。通过现场各种监测手段收集桥梁的控制数据,进而修正数值模拟分析,反馈调整参数,保证成桥的目标状态。成桥实景如图 12 所示,并在此基础上取得如下经验。



图 12 成桥实景

(1)空间拱形斜拉-梁组合体系以连续梁为主要受力形式,拱形斜拉结构参与受力并提供一定的竖向刚度;

(2)对于异形结构,多支架施工是一种便于达到成桥目标状态控制的施工方法,但支架的拆除过程可能对结构产生不利的影响,应结合结构受力特点合理安排临时支架的拆除;

(3)采用 BIM 技术可以有效的提高监控效率,实

时更新施工情况,根据采集的数据快速响应,直观表现模拟预测成果。

## 参考文献:

- [1] 朱慈勉. 结构力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [2] 刘学武. 大型复杂钢结构施工力学分析及应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [3] JTG/T 3650-01—2022, 公路桥梁施工监控技术规程[S].
- [4] 郑平伟, 钟继卫, 汪正兴. 大跨度桥梁的施工控制[J]. 桥梁建设, 2009(增刊 2): 19-22.
- [5] 姚昌荣. 大跨度桥梁的施工控制理论与实践[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [6] 秦顺全. 桥梁施工控制-无应力状态法理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [7] 徐君兰. 大跨度桥梁施工控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [8] 石雪飞. 斜拉桥结构参数估计及施工控制系统[D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [9] 陈德伟, 郑信光, 项海帆. 混凝土斜拉桥的施工控制[J]. 土木工程学报, 1993(1): 1-11.
- [10] 张志新. 大跨径预应力连续梁桥施工控制技与应用[D]. 西安: 长安大学, 2003.
- [11] 张鸿. 大跨度斜拉桥几何非线性及施工控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [12] 但启联. 基于无应力状态控制法的分阶段成形桥梁结构线形控制理论及应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [13] GB/T 51212—2016, 建筑信息模型应用统一标准[S].
- [14] 陈文宝, 魏志松, 张航, 等. BIM 技术在装配式桥梁工程中的应用[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(4): 65-70.
- [15] 徐大明. BIM 技术在大跨度钢结构施工管控中应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.