

城市轨道交通主跨 150 m 连续刚构桥的关键技术

郭 兴¹ 张晓柯² 韩 超¹

(1. 河南建筑职业技术学院土木工程系, 450064, 郑州; 2. 中国中铁股份有限公司, 100070, 北京 // 第一作者, 讲师)

摘 要 繁华城区内建造桥梁需要考虑施工场地限制、地面建筑物干扰及景观协调要求等方面的因素。为此, 以深圳轨道交通 6 号线合水口站—薯田埔站区间主跨 150 m 连续刚构桥为案例, 通过桥梁设计方案比选, 以及 BIM (建筑信息建模) 和关键部件仿真等技术应用, 确定了大跨径连续 Y 型刚构桥的设计方案、关键 Y 型构部件的施工步骤及质量控制措施, 避免了大型复杂桥梁建造时可能出现的干扰问题, 保证了 150 m 大跨径 Y 型刚构桥的施工质量, 降低了施工风险, 提升了施工效率。

关键词 城市轨道交通; 大跨径连续刚构桥; Y 型刚构桥; 建筑信息建模; 质量控制

中图分类号 U448.23

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.036

Key Technologies of Main Span 150 m Continuous Rigid Frame Bridge in Urban Rail Transit

GUO Xing, ZHANG Xiaoke, HAN Chao

Abstract Construction of bridges in prosperous urban areas is limited by construction site, interference of ground buildings and structures, and coordination of urban landscape. Taking the 150 m large-span continuous rigid frame bridge between Heshuikou Station and Shutianpu Station of Shenzhen Rail Transit Line 6 as the case, through comparative selection of bridge design scheme and technological application of BIM (building information modeling) and key component simulation, the design scheme of the large-span continuous Y-shaped rigid frame bridge, construction steps and quality control measures of key Y-shaped components are determined, so as to avoid the interference problems that might occur during the construction of large and complex bridges. It ensures the construction quality of 150 m large-span Y-shaped rigid frame bridge, reducing construction risk and improving the construction efficiency.

Key words urban rail transit; large-span continuous rigid frame bridge; Y-shaped rigid frame bridge; BIM (building information modeling); quality control

First-author's address Department of Civil Engineering,

He'nan Technical College of Construction, 450064, Zhengzhou, China

大跨径桥梁特别是大跨径预应力混凝土连续刚构桥已成为我国大跨径桥梁的主要桥型^[1-3]。因桥梁建造受制于城市繁华市区景观保护及空间限制要求, 随着我国城市轨道交通的快速发展, 大跨径小曲线半径的连续刚构桥应用越来越广泛^[4-6]。随着新技术和新材料的应用, 连续刚构桥向结构轻巧化、跨径更大化方向发展。预应力混凝土 Y 型连续刚构桥在设计上可使桥梁的主梁跨度缩短, 其支肩部的负弯距较低, 结构轻巧纤细, 且可选择变截面箱梁, 因而被广泛应用。1990 年至今我国建造的代表性 Y 型支撑桥梁如表 1 所示。

本文以深圳市城市轨道交通 6 号线合水口站—薯田埔站区间 (以下称为“合薯区间”) 150 m 大跨径连续刚构桥为研究案例, 研究了繁华城区内桥梁设计建造的关键要素, 保证了 150 m 大跨径 Y 型刚构桥的施工质量, 降低了施工风险, 提升了施工效率。

1 工程概况

合薯区间大跨经桥梁位于深圳市城市轨道交通 6 号线的第 16 个区间, 该桥为大型 Y 型刚构 (以下简称“Y 构”) 桥, 其最大跨径为 150 m。该线路平面位于曲线半径为 550 m 圆曲线上, 桥梁以 90.331 m + 150.000 m + 89.791 m 的跨径组合跨越公明排洪渠及振明路。该桥全长为 330.122 m, 区间包括 12[#]~15[#]桥墩, 共 4 墩 3 跨, 上下行线路的间距为 5.2 m。该桥是我国城市轨道交通同类桥梁中大跨径的桥梁之一。

2 连续刚构桥的设计案例

2.1 主要技术参数

1) 设计年限: 100 年。

2) 桥下净空: 5.5 m。

表 1 1990 至今我国建造的 Y 型支撑桥梁

Tab.1 Constructed domestic Y-shaped pier bridges since 1990 s

桥梁名称	跨径组合/m	结构体系	桥梁类型
桂林漓江大桥	67.5 + 95.0 + 67.5	刚构桥	公路桥梁
南京集庆门大桥	32.0 + 50.0 + 32.0	连续梁桥	公路桥梁
浙江平湖青阳汇大桥	28.5 + 37.0 + 28.5	刚构桥	公路桥梁
八渡南盘江特大桥	54.0 + 2 × 90.0 + 54.0	连续梁桥	铁路桥梁
长沙湘江南大桥	66.0 + 3 × 88.0 + 66.0	连续梁桥	城市道路桥梁
东阳市东阳江大桥	50.0 + 75.0 + 50.0	连续梁桥	公路桥梁
东莞市石龙镇南三大桥	40.0 + 2 × 35.0 + 40.0	连续梁桥	公路桥梁
怀化舞水二桥	75.0 + 110.0 + 75.0	连续梁桥	城市道路桥梁
义乌市宗泽大桥	46.8 + 72.0 + 46.8	连续梁桥	城市道路桥梁
中山东明大桥	60.0 + 90.0 + 60.0	连续梁桥	城市道路桥梁
杭州湖州路跨运河大桥	40.0 + 64.0 + 52.0	连续梁桥	公路桥梁

- 3) 地震参数:基本烈度 7 度。
- 4) 持力层岩性:中等风化砂质泥岩。
- 5) 行车速度:列车最高运行速度为 100 km/h。
- 6) 线路设置:正线为双线,线间距为 5.2 m,位于半径为 550 m 圆曲线上,标准轨距为 1 435 mm。
- 7) 列车编组:采用 6 辆编组,列车采用 A 型车,车辆轴重 160 kN。

2.2 设计方案比选

在合薯区间桥梁的建造前期,共设计了 3 种方案。其中:方案一需要对公明排洪渠实施改造,设

计建造跨度组合为 42.0 m + 60.3 m + 40.7 m + 42.0 m 的刚构桥;方案二为设计建造门式刚架桥,以避免公明排洪渠的干扰;方案三设计了 90.331 m + 150.000 m + 89.791 m 的大跨径连续 Y 型刚构桥。该桥设计方案的效果及各方案比选如表 2 所示。如表 2 所示,通过对 3 个设计方案进行比选、分析,在充分考虑该桥的建造位置、景观协调、施工工期及建造难度后,确定采用方案三作为该桥的设计方案。

表 2 合薯区间桥梁 3 个设计方案比选

Tab.2 Comparative selection of three design schemes of Heshu interval bridge

比选项目	方案一	方案二	方案三
景观效果	改造公明排洪渠的交通疏导难,且桥墩对周围景观有影响	中墩调整后梁高为 4 m。桥梁位于办公楼及居民集中区,景观影响较大	桥型美观大方、线条流畅、同周围景观协调
施工难度	中墩与公明排洪渠有干扰,需对箱涵进行改造。改造审批程序较为繁杂,改造费用高,且交通疏解不易实施	门架桥的最大斜角一般不超过 75°。因该桥的最小曲线半径为 550 m,导致桥梁上下部构造结合区域应力特性复杂,桥台背后会产生偏向土压问题,施工控制难度大	150 m 跨径的连续刚构桥为国内城市轨道交通同类桥梁最大跨径桥梁之一,桥梁 Y 构的施工及质量控制是本工程的重点和难点
对既有建筑物/构筑物的影响	中墩对公明排洪渠有影响	对既有建构筑物无影响	对既有建构筑物无影响

3 关键技术及创新

3.1 桥梁 Y 构施工的关键技术

合薯区间大跨径连续刚构桥的 Y 构整体长度为 57 m,由 43 m V 型肋、3 m 实心横隔段、26 m 墩顶梁及 4 m 0 号段构成。其中,0 号块及墩顶梁采用单箱单室斜腹板截面形式。由于 Y 形墩斜腿的主要构成为劲性预应力混凝土,在形成三角形结构前,承载能力很小,且根部混凝土在自重作用下的

拉应力很大,容易开裂。因此,桥梁 Y 构部分的施工控制是本工程的重点和难点。为保障施工质量,该桥 Y 构采用 C60 混凝土分 3 次浇筑,其浇筑步骤、受力描述及质量控制措施如表 3 所示。

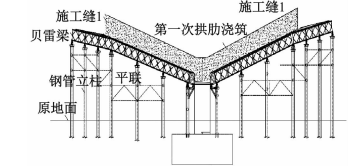
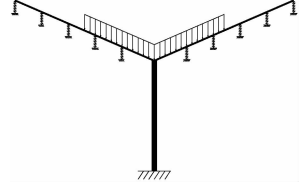
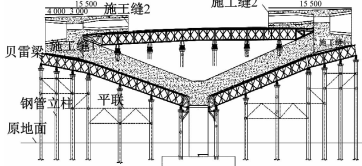
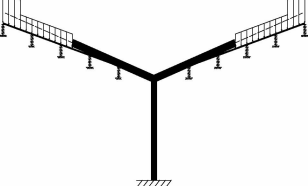
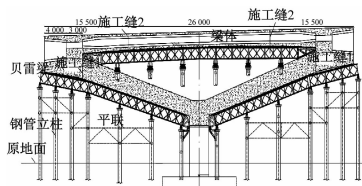
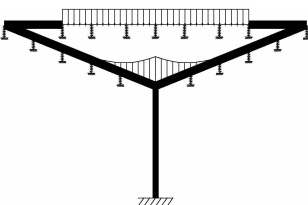
由于 Y 构为斜悬臂结构,在后续墩顶块重力和 Y 构自重的作用下,Y 构根部会产生较大的水平力和弯矩,且该桥的主墩为大张角 Y 型墩,Y 构根部弯矩效应较常规的 Y 型墩更大,会引起较大的拉应力,结构开裂的风险很大。为了保障大张角 Y 型墩

不发生开裂变形,在 Y 型墩的浇筑过程中,需要严格控制支架的变形。

本文通过仿真软件,模拟支架系统发生 3 mm、

5 mm、7 mm 变形的应力云图,如图 1 所示。图中的数值分别表示模拟支架产生变形后以零值为基点产生的最大压应力。

表 3 合薯区间桥梁 Y 构的施工步骤及质量控制措施

施工步骤	施工图示	受力图示	关键步骤及其质量控制措施
步骤 1			浇筑墩顶至 Y 构梁与墩顶梁连接处;待 Y 型梁混凝土养护 7 d 达到设计强度后,搭设拱顶梁部分现浇支架,安装钢筋、模板,对拱梁连接段(含 0 号段)开展施工
步骤 2			浇筑肋梁和顶梁结合部分;在交接段混凝土达到设计强度且张拉腹板腋角钢束后,对交接段张拉压浆,进行拱顶梁施工;待拱顶梁达到设计强度后开展预应力钢筋张拉及压浆;最后开展刚构梁支架现浇段施工
步骤 3			浇筑墩顶梁中间的 26 m 段;整个 Y 形墩施工完成后拆除支架,利用挂篮进入连续梁悬臂段施工

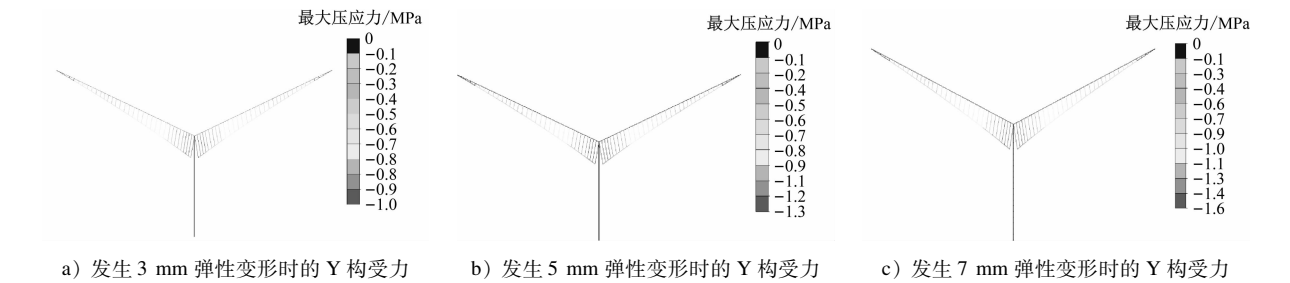


图 1 合薯区间桥梁模拟不同变形下 Y 构施工的应力云图

Fig. 1 Stress nephogram of Y-shaped structure construction under different deformation of Heshu interval bridge simulation

由图 1 可以直观反映出 Y 构的最大压应力。在 3 种位移弹性变形工况下,Y 构支撑的最大压应力分别为 1.0 MPa、1.3 MPa、1.6 MPa。设计上要求系统支架的最大变形需控制在 10 mm 以内,则其对应的最大压应力需控制在 2.0 MPa 以内,从模拟结果看可以满足设计要求。在浇筑过程中,需要严格控制浇筑肋梁与顶梁交接段施工荷载作用下支架的变形,以保障大张角 Y 构根部的质量。

3.2 BIM(建筑信息模型)技术的应用

合薯区间连续刚构桥最大跨径为 150 m,线路最小曲线半径为 550 m,设计要求按照最小曲线半

径施作曲梁。因桥梁构造复杂,施工支撑体系刚度及地基的沉降要求高,Y 构与桥墩、墩顶梁交界处钢筋布置复杂,环境影响因素多,以及桥梁的精细化管理要求高等因素,在该桥建造过程中将 BIM 技术引入到整个桥梁建造和管理过程中。

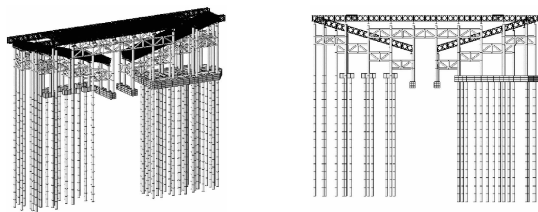
3.2.1 应用 BIM 检查各部件的干扰碰撞

由于该桥的空间位置复杂,在绘制图纸的过程中极易发生一些高程、坐标错误,这些错误难以在二维图中被发现。利用 BIM 的三维直观优势,可以更好地检查出图纸中的错误,从而减少施工变更或返工。通过 BIM 技术建立了全桥模型,然后对桥梁

的关键部件模型进行碰撞检查,对复杂区域节点处的预应力筋进行三维碰撞检查。例如,Y 构与墩顶梁交接钢筋(包括预应力钢筋)的设计异常复杂,这是本次桥梁设计和施工的重点和难点,通过 BIM 对潜在的钢筋碰撞干扰进行检查,发现了墩顶梁高程不一致的错误,避免了工程返工。由此,通过 BIM 对碰撞问题进行检查,可提前优化工程设计方案,较大地提高了工程的质量和效率。

3.2.2 应用 BIM 分析复杂支架体系布置的合理性

合薯区间连续刚构桥大张角 Y 型墩施工的质量控制是整个桥梁施工成败的关键。Y 构主体施工对临时支撑体系的刚度及地基的沉降要求高,因此,利用 BIM 技术对整个支撑体系进行建模布置,建立了扩大基础+钢管柱+贝雷梁+分配梁的支架模型。如图 2 所示,应用 BIM 模拟了 Y 构施工时立体交叉、结构复杂的支撑体系,包括钢管桩在公明排洪渠箱涵上的布置、钢管桩之间横撑与斜撑的逻辑关系、横向系梁与纵向主梁(贝雷梁)的布置、贝雷梁和分配梁间的空间位置、整体支架模型的安装拼接顺序等。



a) 支架系统侧视图

b) 支架系统正截面图

图 2 基于 BIM 的合薯区间桥梁 Y 构支架系统布置

Fig. 2 Layout of Y-shaped structure support system of Heshu interval bridge based on BIM

通过 BIM 的建模优化,最终确定了合薯区间桥梁 Y 构支架系统总体设计方案为打入桩+钢管立柱+分配梁+贝雷梁。其中:① 打入桩采用 $\varphi 630 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 螺旋管;② 钢管立柱采用 $\varphi 609 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 钢管,钢管立柱间设置水平连接,其材料为 $\varphi 377 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 钢管;③ 钢管立柱上布置横向分配梁,分配梁采用 45# 型钢;④ 墩顶梁范围内的立柱顶上的分配梁采用 HM588 型钢,翼缘处采用 I20 型钢;⑤ 横向分配梁上采用贝雷梁作为主梁,贝雷梁选用标准尺寸($3.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$)的贝雷片。贝雷梁之间采用标准支撑架连接,在竖直与水平方向均布置连接支撑架,将贝雷梁连接成整体;⑥ Y 构支架主梁通过设置调坡小楔块,使之与 Y 构角度保持一致;⑦ 拱顶梁支架立柱不支撑于 Y 构上,而是直接

支撑于打入桩基础上。图 3 为合薯区间桥梁 Y 构支架系统的现场布置图。



a) 支架系统仰视图



b) 支架系统侧面图

图 3 合薯区间桥梁 Y 构支架系统现场布置图

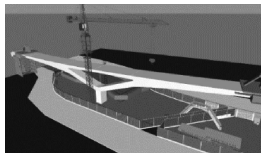
Fig. 3 Site layout of Y-shaped structure support system of bridge in Heshu interval

3.2.3 应用 BIM 精确输出工程量

基于精细化施工管理的要求,本工程通过 BIM 精确计算各种材料的工程量,进而实现精准采购,避免余料库存。以该桥悬臂端现浇的 14 个混凝土块为例,通过 BIM 技术建模,对这些混凝土块的设计工程量、BIM 输出工程量及实际工程量进行对比。经计算,BIM 工程量输出为 484.25 m^3 ,实际工程量为 493.25 m^3 。与实际工程量相比,BIM 计算输出的混凝土工程量的准确率高达 98.17%。

3.2.4 应用 BIM 优化施工场地布置

传统的施工场地布置往往都是现场技术负责人凭经验予以布置,很难及时发现场地布置中存在的问题,也缺乏场地布置方案进一步优化的可靠依据。合薯区间桥梁建造处于城市繁华市区,场地空间小,交通疏解难度大。如图 4 所示,应用 BIM 技术提前模拟场地的布置方案,通过对桥梁周边重要建筑物、构筑物进行 BIM 建模,分析模拟桥梁施工对周边环境的影响,对比、优化不同交通疏解方案的可行性和优缺点,生成三维的临时建筑布置效果图。在此基础上,通过对整体临时建筑三维效果图进行观察,对位置不合适的临时建筑予以及时调整,避免了施工场地因干扰产生的返工问题,达到了临时建筑布置美观、和谐的目的。



a) 基于 BIM 的施工场地设计方案



b) 实际施工场地

图 4 基于 BIM 技术的施工场地布置

Fig. 4 Construction site layout based on BIM Technology

4 结语

本文通过对城市轨道交通 150 m 大跨径 Y 型

连续刚构桥的设计方案进行比选,并对该桥的关键部件施工技术及 BIM 技术在建造过程中的应用进行研究,得到结论如下:

1) 繁华城区内的桥梁建造受施工空间限制、建/构筑物干扰及景观协调标准等因素的影响,应尽可能减少交通疏散及拆迁改造的工作量,大倾角、大跨径的 Y 型连续构桥梁是具有可行性的设计方案之一。

2) 在 150 m 大跨径 Y 型连续刚构桥梁施工过程中,大张角 Y 型墩的施工质量控制是整个桥梁建设成败的关键,Y 构施工中混凝土浇筑顺序、Y 型墩受力及变形控制是需要重点关注的环节。

3) BIM 技术可应用于大型复杂桥梁建造的干扰分析、支架验算、工程量分析及施工场地布置中。通过应用 BIM 技术,可开展施工的精细化管理,规避施工风险,提高施工效率。本工程 BIM 技术的应用可为后续类似大型复杂桥梁建设提供参考。

参考文献

- [1] 付小军. 商合杭高铁淮河特大桥总体设计研究[J]. 中国铁路, 2020(6):52.
FU Xiaojun. Research on overall design of Huai River super long bridge on Shangqiu-Hefei-Hangzhou High Speed Railway[J]. China Railway, 2020(6):52.

(上接第 174 页)

4 结语

本文提出了基于组合权重赋值与反馈神经网络纠正的系统健康评估可拓云模型。基于可拓云模型,结合层次分析、因子分析和反馈神经网络分析法来确定模型的权重,综合评判面向系统层级的城市轨道交通供电智能运维系统的健康状态。通过对电力设备的试验评估,降低了健康度等级划分时的不确定度,验证了该模型预测的结果与专家预测的结果的一致性。本文所建立的模型可以作为供电设备故障的预测和诊断的辅助工具。

参考文献

- [1] 严俊. 基于数据驱动轨道交通供电设备状态评估的研究及应用[J]. 隧道与轨道交通, 2021(增刊1):3.
YAN Jun. Research and application of data-driven power supply equipment status assessment for rail transit[J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(S1):3.
- [2] 许自强. 数据驱动电力变压器智能化健康管理关键技术研究[D]. 北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2020.

- [2] 王安琪,姜恒昌,张光明,等. 高速铁路大跨度连续刚构梁桥预拱度设置对无砟轨道的影响研究[J]. 铁道标准设计,2020(4):73.
WANG Anqi, JIANG Hengchang, ZHANG Guangming, et al. Study of influences of pre-camber setting of long-span continuous rigid frame beam-bridge on ballastless track of high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2020(4):73.
- [3] 叶琳. 单拱肋连续梁-拱组合桥的结构设计[J]. 城市轨道交通研究,2021(8):51.
YE Lin. Structure design of single arch rib continuous beam-arch composite bridge[J]. Urban Mass Transit, 2021(8):51.
- [4] 叶刘克,李子奇,王力. 大跨度连续刚构桥波形钢板腹板内衬混凝土承剪比研究[J]. 铁道建筑,2019(5):11.
YE Liuke, LI Ziqi, WANG Li. Study on shear ratio of concrete lining with corrugated steel webs in large span continuous rigid frame bridge[J]. Railway Engineering, 2019(5):11.
- [5] 文强. 高速铁路无砟轨道大跨组合结构桥梁应用研究[J]. 铁道工程学报,2019(2):54.
WEN Qiang. Application research on the long-span composite structure bridge on high-speed railway ballastless track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019(2):54.
- [6] 胡方健. 桥梁 BIM 模型设计阶段建模方法研究[J]. 中国市政工程,2018(5):56.
HU Fangjian. Research on modeling method to bridge BIM model in design phase[J]. China Municipal Engineering, 2018(5):56.

(收稿日期:2020-07-06)

XU Ziqiang. Research on key technologies of data-driven intelligent health management for power transformer[D]. Beijing: School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, 2020.

- [3] 高松,滕克难,陈健,等. 基于 MCM-可拓云的装备体系效能评估[J]. 兵器装备工程学报,2020(2):20.
GAO Song, TENG Kenan, CHEN Jian, et al. Effectiveness evaluation of equipment system of system based on MCM-extension cloud[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020(2):20.
- [4] 李晓峰,徐玖平,王荫清,等. BP 神经网络自适应学习算法的建立及其应用[J]. 系统工程理论与实践,2004(5):1.
LI Xiaofeng, XU Jiuping, WANG Yinqing, et al. The establishment of self-adapting algorithm of BP neural network and its application[J]. System Engineering Theory and Practice, 2004(5):1.
- [5] 马农乐,赵中极. 基于层次分析法及其改进对确定权重系数的分析[J]. 水利科技与经济,2006(11):3.
MA Nongle, ZHAO Zhongji. The analysis of calculating the proportion based on analytic hierarchy process and the improved AHP[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2006(11):3.

(收稿日期:2022-01-18)