

城市轨道交通建桥合一长联无缝高架车站 结构设计与施工优化

雷少鑫 周永礼 鲁雪冬

(中铁二院工程集团有限责任公司, 610036, 成都)

摘要 [目的]建桥合一长联无缝高架车站将建筑与桥梁结构融合,使得车站墩柱在有刚度需求的同时,还具有空间框架结构体系复杂、体量大、超静定次数多的特点,而混凝土结构的温度与收缩徐变成为了这类车站结构设计中的控制因素。采用设置伸缩缝、加大墩柱截面尺寸、加强墩柱截面配筋等传统方法,将破坏车站结构的整体性,增加维护与建设成本。因此需从设计角度和施工角度对建桥合一长联无缝高架车站结构进行优化。[方法]以深圳地铁6号线宽9 m的岛式车站为研究对象,运用MIDAS软件,建立建桥合一的长联无缝高架车站有限元模型,并对其进行计算分析与检算。分别从设计和施工两个角度提出相应优化方案。从设计角度建立了高架车站有限元模型,对墩柱控制弯矩进行了对比分析。[结果及结论]有限元计算结果表明:车站两端墩柱受收缩徐变和温度的作用明显,其应力与配筋将是本设计的控制要点。在保证高架车站整体性的情况下,从设计角度提出了加深承台埋深,采用双薄壁墩,在墩柱顶部采用铰接等3种优化方案;从施工角度提出了设置后浇带,采用模块化装配式施工等优化方案。经模拟分析,加深承台埋深2 m,增加墩高减小桥墩刚度,可减少第13轴的墩底控制弯矩约22%;采用双薄壁墩大幅减小了桥墩刚度,可减少第13轴墩底的控制弯矩约46%;墩顶采用混凝土铰支撑,释放了上部传递至墩柱的弯矩,可减少第13轴的控制弯矩约13%。

关键词 城市轨道交通;建桥合一;高架车站;长联无缝结构

中图分类号 U442.5; U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.013

Design and Construction Optimization for Elevated Long-link Seamless Urban Rail Transit Station with Bridge-building Unified Structure

LEI Shaoxin, ZHOU Yongli, LU Xuedong

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610036, Chengdu, China)

Abstract [Objective] The elevated long-link seamless station with bridge-building unified structure integrates building

and bridge and enables the station pier column to have stiffness requirements while possessing the characteristics of complex space frame structure system, large volume, and more statically indeterminable times. Therefore, temperature, shrinkage and creep of the concrete structure become the control factors in the design of such station structure. The traditional methods such as setting expansion joint, enlarging pier column section size and strengthening pier column section reinforcement will destroy the integrity of station structure and increase the maintenance and construction cost. It is necessary to optimize the structure of the unified long-link seamless elevated station from the aspects of design and construction. [Method] The island station of Shenzhen Metro Line 6 with 9m width is taken as research object. MIDAS software is used to establish a finite element model for the above station to calculate, analyze and verify the design. The optimization scheme is proposed from the aspects of design and construction respectively, a finite element model of the elevated station is established from the design point of view, and is used to compare and analyze the control bending moment of the pier column. [Result & Conclusion] The calculation results of the finite element model show that the pier columns at both ends of the station are obviously affected by shrinkage, creep and temperature, and the stress and reinforcement are the key control points of the design. Under the condition of ensuring the integrity of the station, three optimization schemes are proposed from the design point of view, such as deepening the buried depth of the cap, adopting double thin wall pier and using hinge connection at the top of the pier column. From the construction point of view, the optimization schemes such as setting up post-grouting belt and adopting modular assembly are put forward. Simulation analysis shows that the control bending moment of the 13th axis at the bottom of the pier can be reduced by about 22% by deepening the pier cap buried depth of 2m and increasing the pier height to reduce the pier stiffness. The stiffness of the pier is greatly reduced by using the double thin-wall pier, and the control bending moment of the 13th axis at the bottom of the pier is reduced by a

bout 46% . The concrete hinge used at the pier top releases the bending moment transmitted from the upper part to the pier column, and reduces the control bending moment of the 13th axis by about 13% .

Key words urban rail transit; bridge-building unified structure; elevated station; long-link seamless structure

城市轨道交通高架车站分为建桥分离、建桥组合及建桥合一等3种结构型式^[1]。其中,建桥合一高架车站由于设计施工方便、经济适用、乘客体验佳等优点,逐渐成为高架车站的首选设计。在实际设计中,建桥合一高架车站需同时满足桥梁规范和建筑规范的规定。该车站具有空间框架结构体系复杂、体量大、超静定次数多的特点,导致温度与收缩徐变等因素对其影响较大。目前设计界对此问题普遍的解决方式为采用伸缩缝、直接加大结构尺寸或加强配筋,但这些方式在实际工程中暴露出了耐久性、经济性差等问题。

本文对温度与收缩徐变等因素引起车站结构内力增大的特点进行深入剖析。以深圳地铁6号线(以下简称“6号线”)宽9 m的岛式车站为例,建立了车站有限元模型,提出了3种既能保证耐久性、经济性,又能解决温度与收缩徐变等因素对长联无缝高架车站结构影响大的方案。结果可为城市轨道交通建桥合一高架车站的设计提供参考,对采用长联无缝混凝土结构的工民建筑设计也具有借鉴意义。

1 建桥合一高架车站结构数值模拟分析

综合收集各条线路资料发现,6号线高架车站为目前不设缝且联长较长的车站,联长为144 m。以6号线建桥合一高架车站——石岩站为例,采用MIDAS软件建立了1座长度为144 m的高架车站模型(见图1)。桥墩及上部构件立面图见图2。车站的基础、梁、柱结构均采用空间梁单元模拟,站台结构、站厅的楼面板采用薄板单元模拟。模型中模拟了楼扶梯、电梯所挖空洞,对于其他较小孔洞不予模拟。

6号线高架车站的主要承重结构为13榀桁架,桁架间距为12 m,全部采用混凝土结构现浇施工。由于地质条件对桩长的影响使各墩之间刚度差异较大,因此需依据刚度相等原则将桩基础换算成等效门式刚架。桥墩和盖梁,以及立柱与柱顶横梁之

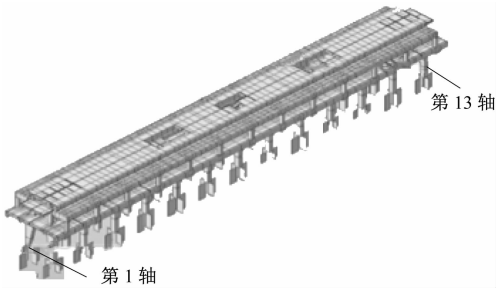


图1 6号线高架车站有限元模型

Fig.1 FEM model of the elevated station of Metro Line 6

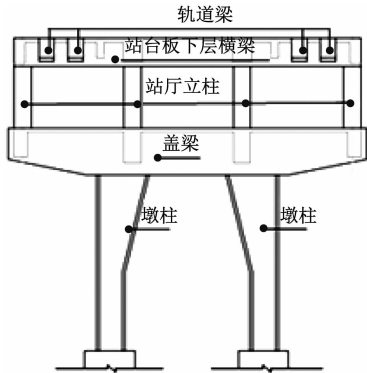


图2 桥墩及上部构件立面图

Fig.2 Vertical view of piers and the superstructure

间均采用刚臂相连。

在同时考虑来自建筑的结构自重、人群荷载、设备荷载,以及来自桥梁结构自重、行车荷载的作用下^[2],求出上部构件分别在主力、主力+附加力、主力+地震力作用下的墩底弯矩和轴力。依据TB 10092—2017《铁路桥涵混凝土结构设计规范》、GB 50157—2013《地铁设计规范》要求对高架车站结构进行检算。主力+附加力作用下墩柱顺桥向弯矩图见图3。

由图3可见:本桥端头第1轴和第13轴控制墩柱弯矩分别达到了11 995.2 kNm和11 250.3 kNm,墩柱的钢筋与混凝土应力均难以满足规范要求,需对结构进行优化。由此可见:车站两端墩柱受收缩徐变和温度的作用明显,其应力与配筋将是本设计的控制要点^[3]。

2 建桥合一高架车站结构设计与施工优化

2.1 设计优化

从设计角度提出以下3种优化方案:

1) 保持桥墩截面型式,加大靠近车站两端墩柱的承台埋深,在承台与地面之间保留地下空间或采用碎石回填,从而减小桥墩刚度。同时增加桥墩顶

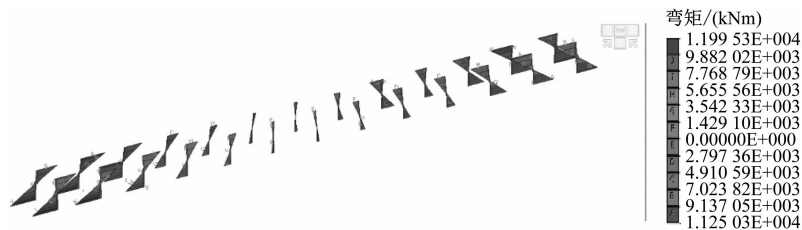


图3 主力+附加力作用下墩柱顺桥向弯矩图

Fig. 3 Bending moment diagram of pier column along bridge under main force and additional force

部位移以释放结构应力。该方法的缺点在于增加挖方量,形成的深基坑同时也会增加基坑支护等临时措施,造成工程浪费。因此当车站建筑有地下室等空间需求时,则有较高的实用性,如在地下设置电缆设备夹层等。墩柱承台埋深可按具体要求设置。

2) 改变桥墩截面型式,采用顺桥向厚 0.5 m、间距 0.3 m 的双薄壁墩。在桥墩截面大小一致的情况下,该方法可极大地减小桥墩刚度,增加桥墩顶部位移以释放结构应力。本方法对车站造型有一定影响,需要结合建筑、景观的要求进行选择。

3) 改变连接类型,将桥墩与盖梁改为铰连接。可将数个靠近端头的墩柱改为铰连接墩柱。桥墩柱体为钢筋混凝土实体柱,在柱体顶部、底部与其他混凝土构件相连接的位置设置一段无需更换的混凝土铰^[4],通过锚固钢筋与上下构件连接。该铰在桥墩顶部和底部垂直于车站纵向布置(见图 4)。

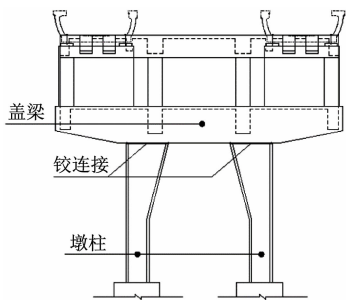


图4 桥墩盖梁混凝土铰连接

Fig. 4 Concrete hinge connection of bridge pier cap beam

混凝土铰能够产生一定量的纵向转角和位移,可将上部传递而来的纵向弯矩通过转角释放。混凝土铰上的自重荷载的竖向分力,以及部分剪力由铰传递至墩柱和承台,还可以通过调整铰的限制位移来调整盖梁传递至桥墩的弯矩。若同时在桥墩底部采用铰连接,则可完全释放弯矩。

2.2 施工优化

从施工的角度提出以下两种优化方案:

1) 在施工时将车站分节浇筑,设置后浇带。无

缝高架车站结构为多次超静定结构,联长较长,温度和混凝土的收缩、徐变对结构的影响较大。在施工时可设置后浇带,对车站进行分段浇筑,使得一部分收缩、徐变发生在结构合拢前,以减小混凝土收缩对结构的影响。对比分析车站按整体浇注与设置后浇带等两种条件下墩底的主力与温度力组合的内力发现,设置后浇带能有效减小收缩、徐变所产生的结构内力。该方式简便、易用、效果显著,已在部分实际工程应用,经比较可减小 15% 的墩柱弯矩^[5]。

2) 采用模块化装配式施工。目前装配式施工已在连续刚构桥梁和建筑中有广泛应用,如广州地铁 21 号线,但在城市轨道交通高架车站中还未见实例。该施工方法在长联无缝高架车站中尝试应用有以下优点:第一,可将施工阶段产生的收缩徐变效应提前释放,从而达到减小弯矩的目的;第二,由于各模块采用高弹性能的结构胶连结,温度作用产生的应力可在各模块间释放,使其不会传导至墩柱,同时亦无强弯矩作用。

3 传统设计缺陷实例分析及结果验证

针对温度与收缩徐变对长联无缝建桥合一高架车站影响大的问题,目前设计界的普遍做法或研究集中在如下 3 种措施上:

1) 设置伸缩缝以减小联长,从而减小温度与收缩徐变的影响^[6],但该措施存在如下缺点:伸缩缝对结构的抗震性能有一定的提升,但作用十分有限;设置伸缩缝的缺点明显,一则破坏了车站结构的整体性,二则伸缩缝易老化,存在漏水、沉陷等风险,后期养护比较困难,需要定期更换,对安装质量要求较高,严重时会影响车站运营^[7]。

2) 通过施加竖向预应力来加强墩柱结构抗弯能力,也可以抵抗温度和收缩徐变带来的影响。但竖向预应力缺点明显,其对材料、施工精度控制要求高,施工质量不易保证,给车站结构安全带来了

隐患。

3)加大墩柱截面尺寸及加强墩柱配筋,以抵抗温度与收缩徐变带来的弯矩。该方法是最为直接的解决办法,但其问题也很突出。一般设计中,车站墩柱结构为释放弯矩往往需要尽量减小刚度,设计开始时墩柱会采用较小的截面尺寸,但较小的截面尺寸难以抵抗强弯矩。为了抵抗强弯矩,会调大墩柱截面,并加强墩柱配筋,而加大墩柱截面尺寸造成的刚度增强会进一步加大弯矩,形成恶性循环,极易造成工程浪费,导致结构的经济性变差。在以往设计中,大量钢筋混凝土被用来抵抗温度荷载,在联长为120 m的情况下,梁在有温度荷载作用下的配筋要比无温度荷载作用下的配筋增大约40%,如重庆某城市轨道交通线路和南京某城际铁路车站^[6]。

鉴于传统设计方法在实际工程中已暴露出的上述问题,为了避免车站结构整体性被破坏,同时方便后期运营维护,保证设计经济性,本文优化方案均采用无缝设计。采用MIDAS软件建立了不同优化方案的有限元模型。不同优化方案下的墩柱控制弯矩,如表1所示。由表1可见:加深承台埋深2 m,增加墩高减小桥墩刚度,可减少第13轴的墩底控制弯矩约22%;采用双薄壁墩大幅减小了桥墩刚度,可减少第13轴墩底的控制弯矩约46%;墩顶采用混凝土铰支撑,释放了上部传递至墩柱的弯矩,可减少第13轴的控制弯矩约13%。在6号线的实际应用中,结合建筑地下电缆夹层的需求:设计时,通过加深承台埋深,减小了桥墩刚度,实现了减少桥墩控制弯矩的作用;施工时,通过浇筑3道后浇带,也减小了混凝土收缩对车站结构的影响。本文提出的方案可依据实际情况,结合建筑、景观、车站结构、施工要求及基础刚度综合选用,以达到优化高架车站结构的目的。

表1 不同方案下的墩柱控制弯矩	
Tab.1 Pier control bending moment under different schemes	
方案	第13轴墩底控制弯矩/(kNm)
未优化	11 995
承台埋深加深2 m	9 424
双薄壁墩	6 375
墩顶采用混凝土铰支撑	10 404

4 结语

建桥合一无缝长联高架车站涉及的专业多、设

计接口多、超静定次数多,在空间上各专业之间极易产生相互矛盾的设计,且在结构受力上荷载传递关系较为复杂,因此设计时需多方验证,尤其是在管线预埋和结构荷载传递上。高架车站下方多为城市道路,基坑设计时应考虑道路超载作用下的侧压力,同时部分基坑埋深较大,需考虑合适的基坑支护措施。设计之前应做好资料收集与解读,对荷载进行核实,并注意施工期间的空间关系,并采取相应的临时措施。

受地质情况的影响,桥墩综合刚度差异较大,计算时需精确验算基础刚度,以确保获得更为准确的内力。设计时若错误地模拟了地质情况,或采用刚接,将难以得到准确的结果,甚至与实际结果相差甚远,因此,前期勘察及地质参数应尽量准确,可采用多方法相互验证来确定高架车站地基的模型。

建桥合一无缝联长高架车站由于其结构复杂、超静定次数多的特性,存在温度与收缩徐变对其影响较大的问题。采用加大承台埋深、薄壁墩和混凝土铰是在保证车站整体性的情况下,从设计角度优化车站结构的方法。而采用分段浇筑合拢或模块化装配式施工,是从施工角度解决该方法的问题。这些解决方法不仅对城市轨道交通建桥合一无缝联长高架车站的后续设计提供参考,对其他长联无缝的工民建筑也有借鉴意义。

参考文献

[1] 黄武平. 城市轨道交通高架车站结构设计研究[J]. 智慧城市, 2019, 5(10): 129.
HUANG Wuping. Study on structure design of elevated station in urban rail transit[J]. Intelligent City, 2019, 5(10): 129.

[2] 赵进, 刘亮, 吴刚, 等. 城市轨道交通高架车站变形缝设置的探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2014(2): 33.
ZHAO Jin, LIU Liang, WU Gang, et al. Discussion on deformation gap setting for elevated station on transit[J]. Modern Urban Transit, 2014(2): 33.

[3] 傅富强. 城市轨道交通“建桥合一”车站高架结构设计探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(3): 49.
FU Fuqiang. Design of urban rail transit elevated station with unified structure[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(3): 49.

[4] 孙俊岭. 城市轻轨站桥合一结构设计中的几个问题[J]. 建筑结构, 2003, 33(10): 62.
SUN Junling. Some problems about design of station-bridge structure in Tianjin-Binhai mass transit project[J]. Building Structure, 2003, 33(10): 62.

- body model for train crash analysis[J]. International Journal of Crashworthiness, 2003, 8(4): 339.
- [4] MAYVILLE R, RANCATORE R, TEGELER L. Investigation and simulation of lateral buckling in trains[C]//Proceedings of the 1999 ASME/IEEE Joint Railroad Conference. New York: IEEE, 2002: 88.
- [5] SUN Y Q, COLE C, DHANASEKAR M, et al. Modelling and analysis of the crush zone of a typical Australian passenger train[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(7): 1137.
- [6] 谢卓君. 地铁列车多体碰撞的动态仿真方法及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- XIE Zhuojun. Method and application of dynamic simulation of multi-car crash of metro trains[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [7] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2015.
- ZHAI Wanning. Vehicle-track coupled dynamics[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.
- [8] 杨超. 列车碰撞动力学关键问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- YANG Chao. Research on key issues of train collision dynamics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [9] 肖新标. 复杂环境状态下高速列车脱轨机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- XIAO Xinbiao. Study on high-speed train derailment mechanism in severe environment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [10] 袁成标, 肖守讷, 杨宝柱. 低地板列车吸能防爬装置的碰撞特性研究[J]. 机车电传动, 2018(5): 83.
- YUAN Chengbiao, XIAO Shoune, YANG Baozhu. Study on collision properties of anti-climbing energy absorption device for low-floor vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(5): 83.
- [11] 杨超, 肖守讷, 朱涛. 非线性铁路车辆系统的时间积分算法[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(1): 88.
- YANG Chao, XIAO Shoune, ZHU Tao. Time integration algorithm in nonlinear railway vehicle system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(1): 88.
- 收稿日期: 2021-08-18 修回日期: 2022-01-10 出版日期: 2024-03-10
Received: 2021-08-18 Revised: 2022-01-10 Published: 2024-03-10
• 第一作者: 许娇, 高级工程师, xujiao0901@163.com
通信作者: 肖守讷, 研究员, snxiao@swjtu.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 73 页)

- [5] 毛学锋, 许智焰, 周永礼. 深圳地铁 3 号线高架车站结构设计研究[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(12): 94.
- MAO Xuefeng, XU Zhiyan, ZHOU Yongli. Research on structure design of elevated station of line 3 of Shenzhen metro[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(12): 94.
- [6] 何永平, 陈清华. 节段预制无支座连续刚构体系在广州地铁 21 号线中的应用[J]. 四川水泥, 2019(5): 140.
- HE Yongping, CHEN Qinghua. Application of segmental precast continuous rigid frame system without support in Guangzhou Metro Line 21[J]. Sichuan Cement, 2019(5): 140.
- [7] 曲睿佳. 地铁高架车站防水设计[J]. 四川水泥, 2018(2): 66.
- QU Ruijia. Elevated metro station waterproof design[J]. Sichuan Cement, 2018(2): 66.
- [8] 杨林, 董瀚潞. 超长高架车站结构设计与分析[J]. 现代城市轨道交通, 2019(6): 113.
- YANG Lin, DONG Hanlu. Structural design and analysis of super-long elevated station[J]. Modern Urban Transit, 2019(6): 113.
- [9] 郭建鹏. 城市轨道交通“桥-建组合式”高架车站结构设计方法[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(3): 45.
- GUO Jianpeng. Structural design of elevated station with integration of bridge and building[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(3): 45.
- [10] 周欢, 赵宏强. 120 m 长的高架车站温度影响程度分析[J]. 四川建筑, 2012, 32(6): 106.
- ZHOU Huan, ZHAO Hongqiang. Analysis of temperature influence degree on 120 m long elevated station[J]. Sichuan Architecture, 2012, 32(6): 106.
- 收稿日期: 2021-12-08 修回日期: 2022-05-28 出版日期: 2024-03-10
Received: 2021-12-08 Revised: 2022-05-28 Published: 2024-03-10
• 通信作者: 雷少鑫, 工程师, 337489926@qq.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com