

基于插槽式连接的预制装配式桥台设计与性能分析

郭 济

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 为研究预制装配式桥台在桥梁工程中的应用,基于国内外预制装配式桥梁结构的常用连接方式,通过对比分析选定了插槽式连接方案;结合珠海市某工程实例,详细阐述了结构设计要点和拼装流程;采用有限元软件建立精细化模型,以验证连接区域在设计荷载下的应力状态和安全性,并与同等条件下的常规现浇结构进行对比分析。研究表明:钢筋和混凝土的各项指标均满足规范要求,插槽式连接的受力性能与常规现浇结构相当,且具有施工容错率高、现场作业简便的优点,在预制桥台与桩基连接中具有较好的推广应用价值。

关键词: 预制装配;预制桥台;插槽式连接;桥台施工;有限元分析

中图分类号: U443.21;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0196-05

Analysis on Design and Performance of Prefabricated Bridge Abutments Based on Slot Connections

GUO Ji

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: To study the application of prefabricated bridge abutments in bridge engineering, based on the common connection methods of prefabricated bridge abutments at home and abroad, and by comparing and analyzing, the slot connection scheme is selected. Combined with an engineering case in Zhuhai, the design essentials and assembly process of the structures are expounded in detail. A refined model is established by using a finite element software model is established to verify the stress state and safety of the connection area under design loads, and a comparative analysis is conducted on the conventional cast-in-place structures under the same conditions. The results show that all indicators for both reinforcement and concrete meet the code requirements, and the mechanical properties of the slot connection is comparable to that of the conventional cast-in-place structure, which also has the advantages of high construction error tolerance and simple on-site operation, and has good promotion and application value in the connection between prefabricated abutments and pile foundations.

Keywords: prefabricated assembly; prefabricated abutment; slot connection; abutment construction; finite element analysis

0 引 言

近年来,随着绿色建造、低影响、快速化施工等要求的提高,预制装配式结构在桥梁工程中的应用逐渐增多^[1-3]。目前,我国装配式桥梁技术仍处于发展阶段,且多集中于桥梁上部结构,下部结构的装配化研究主要聚焦于墩柱构件^[4-11]。例如,上海S7公路、军工路高架等工程均已采用全预制装配式桥墩、

盖梁。但针对装配式桥台的研究和实践仍较为有限,因此开展相关研究具有重要的工程意义。

在现有工程实践中,美国爱荷华州布恩县桥采用了预制桥台拼装技术(见图1),其H型钢桩与预制桥台通过插槽式连接实现,利用金属波纹管预留孔洞。插槽区域内,H型钢桩侧面设有剪力栓钉,以确保连接牢固。上海S7公路在地面中小桥中也采用了预制桥台拼装技术(见图2),PHC管桩与预制桥台通过内径600 mm的金属波纹管实现插槽式连接。在PHC管桩填芯过程中,植入带剪力栓钉的工字型钢梁以替代传统桩头钢筋,工字钢的对角斜距为

收稿日期: 2025-09-23

作者简介: 郭济(1986—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

480 mm,与波纹管插槽之间保留 120 mm 的水平容错空间。



图 1 美国布恩县预制桥台

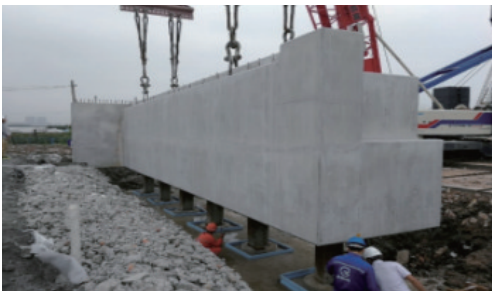


图 2 上海 S7 公路预制桥台

目前,预制桥台的研究主要集中于两个方面:一是预制桥台的设计方案;二是适用于桥台连接方式的力学性能研究。

在设计方案方面,有学者提出整浇装配式桥台设计,采用工字型截面构件组成的箱型承台,台身钢筋锚入空腔承台后浇筑无收缩自密实混凝土进行连接^[12];另有研究将装配式桥台分解为预制帽梁、预制背墙、预制耳墙和 PRC 管桩,并分别提出各构件间的连接方式^[13]。

在力学性能研究方面,李国平^[14]针对预制承台与桩基连接构造的安全可靠性问题,按 1/3 缩尺比制作了 2 个预制承台-桩连接试件和 1 个现浇试件,开展往复加载试验与非线性数值分析,验证了插槽式连接的受力性能可靠性。另有研究设计了 3 种连接形式的足尺模型试件(现浇、插槽式、法兰盘连接),并对其进行了拟静力试验,结果表明插槽式连接在延性系数、极限位移和耗能能力方面略优于现浇试件,且承载能力相当^[15]。

1 预制桥台连接方式

1.1 分类概览

在结构组成上,预制桥台与常规现浇桥台基本一致,均包括台身、台帽、耳墙等部分。其核心差异体现在预制桥台与桩基之间的连接方式,以及相应的施工技术措施。

装配式节段的常用连接方式包括钢筋灌浆套

筒、钢筋灌浆波纹管、承插式、插槽式、湿接缝、预应力钢筋、钢板连接、焊接连接等^[16]。研究人员与工程师需根据桥型特点、施工条件和工程环境等因素,合理选择连接类型及其适用范围。

装配式节段的常用连接方式及适用范围见表 1。

表 1 装配式节段的常用连接方式及适用范围	
连接方式	适用范围
钢筋灌浆套筒	墩柱与盖梁、墩柱与承台、墩柱节段间
钢筋灌浆波纹管	墩柱与盖梁、承台
承插式	墩柱与盖梁、承台;桩基与承台
插槽式	墩柱与盖梁、承台;桩基与承台
湿接缝式	墩柱与承台、墩柱节段间、盖梁节段间
预应力钢筋	墩柱与盖梁、墩柱与承台、墩柱节段间、盖梁节段间

需要特别说明的是,与墩柱和盖梁、承台之间的连接不同,预制桥台主要涉及桥台与桩基的连接。由于桩基施工受现场条件影响较大,无论是预制管桩还是现浇钻孔灌注桩,均难以保证极高的施工精度。因此,预制桥台与桩基之间的连接宜选用施工容错率较高的方式。下文将重点分析插槽式连接和承插式连接。

1.2 插槽式连接

插槽式连接的基本原理是在预制构件(如桥台)上预留略大于待接构件尺寸的带剪力键孔洞,将另一构件(如桩基)插入后浇筑混凝土,形成整体连接,如图 3 所示。

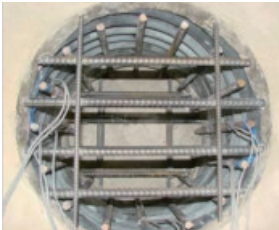


图 3 插槽式连接现场照片

为确保连接质量,插槽式连接需满足以下技术条件:

- (1)孔壁应通过钢波纹管或带齿键模板形成剪力键。
- (2)桥台主筋在插槽内应保持连续,避免与桩基预留钢筋干扰。
- (3)插槽内宜填充掺膨胀剂的高强混凝土,其强度不低于构件混凝土。
- (4)桩基预留钢筋应满足最小锚固长度要求。

该连接方式的主要特点为其受力性能和耐久性等同于现浇结构,配筋形式基本一致,且施工精度要

求较低。主要不足之处在于配筋复杂时预留插槽难度大,现场后浇作业多,养护时间较长。

1.3 承插式连接

承插式连接采用在桥台内预留略大于墩柱或桩基直径的凹槽(见图4),施工时将预制构件插入凹槽,并通过后浇混凝土或灌浆实现紧密连接,依靠摩擦力和混凝土黏结力传递荷载。



图4 承插式连接现场照片

具体而言,承插式连接是将墩柱(或桩基)与桥台(或盖梁)分别预制,并在桥台(或盖梁)内预留一个深度和直径都稍大于墩柱(或桩基)直径的凹槽。施工时,将墩柱(或桩基)插入这个凹槽内,并通过后浇混凝土、灌浆使墩柱(或桩基)与桥台(或盖梁)紧密结合,形成一个整体结构。这种连接方式主要利用墩柱与桥台(或盖梁)之间的摩擦力和混凝土的黏结力来传递荷载,确保了结构的稳定性和安全性。

从技术标准角度,承插式连接应满足以下要求:

- (1) 插入深度经计算确定,纵向钢筋满足锚固长度。
- (2) 插入段与孔壁表面应设键槽,深度和密度符合要求。
- (3) 孔壁间隙不宜小于 50 mm,填充料强度宜高于构件混凝土。
- (4) 孔周边应设水平加强箍筋,底板按抗冲切设置弯起钢筋。

该连接方式的优势体现在施工简便、速度快,整体性和抗震性能良好,对精度要求较低,有利于降低成本。但也存在一定局限性,其预留凹槽可能干扰钢筋布置,对设计和施工带来一定影响。

综合比较分析,承插式与插槽式连接均具备施工精度要求低、适应性强和力学性能优良等优点。考虑到桥梁工程中桩基多采用桩顶主筋伸入承台的连接方式,推荐采用插槽式连接作为预制桥台与桩基的主要连接形式,并借鉴承插式连接中的抗冲切钢筋设置,以提升桥台抗冲切能力,从而减小台厚、降低工程量并满足吊装要求。

2 工程设计

基于上述分析,插槽式连接更适用于预制桥台与桩基的连接。结合具体工程和规范要求,对桩基与桥台的插槽式连接进行设计。

珠海市某桥梁工程需在施工期间维持地面交通,且环保要求高。为提升工程品质、减少对周边环境的影响,项目决定采用装配式工艺,桥台和立柱均采用预制方案。上部结构为整幅设计的钢混组合梁,桥宽 9 m。单幅桥台采用 C40 钢筋混凝土构件,布置有 2 根直径 1.2 m 的现浇钻孔灌注桩,桩间距 4.2 m。台身高约 2.3 m,承台厚 1.5 m,总重约 195 t。为满足吊装要求,将预制桥台横向切分成 2 个独立部分,单个吊重约 97 t。

预制桥台除常规构造和配筋外,还具有以下特点:预留孔洞由内径 1.4 m、壁厚 3 mm 的冷弯波纹钢管构成;参考《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05—2022),在孔洞内布置 U 形抗冲切钢筋,与桥台底钢筋焊接,波纹管周边设螺旋加固筋;吊装完成后通过顶部孔洞灌注 C60 补偿收缩混凝土(见图 5)。

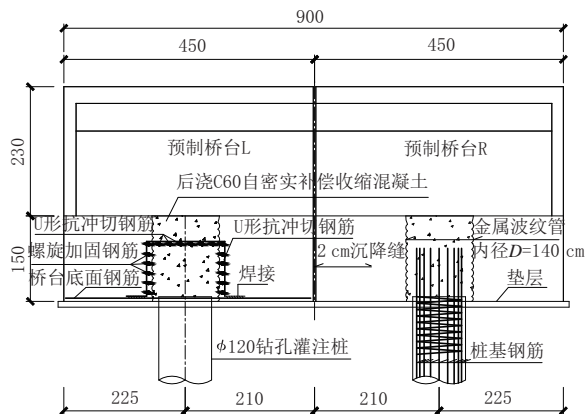


图5 桥台构造钢筋示意图(单位:cm)

3 有限元计算分析

为验证所提出的插槽式连接预制桥台在设计荷载下的受力性能和安全性,特别是桩基与桥台连接区域的应力状态,采用有限元软件建立精细化模型进行分析。

3.1 单元类型和网格划分

在模型建立过程中,桥台和桩基采用实体单元模拟,钢筋采用植入式桁架单元。不考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移,桩基齿块与桥台预留齿块仅考虑法向接触。预制桥台在预留孔洞内设置 U 形抗

冲切钢筋,并与底筋焊接。

网格采用 10 cm 四面体单元,齿块局部加密至 5 cm,具体网格划分如图 6 所示(为方便展示已翻转 180°)。

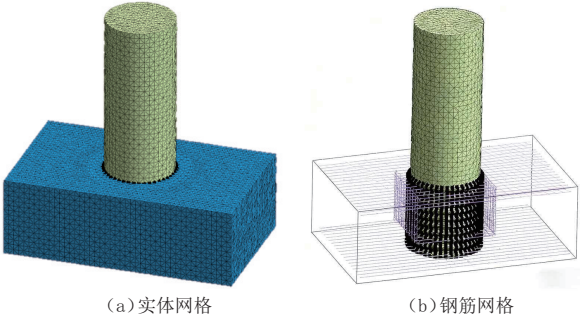


图 6 有限元网格模型

3.2 计算结果

钢筋应力分布图见图 7;混凝土应力分布图见图 8。

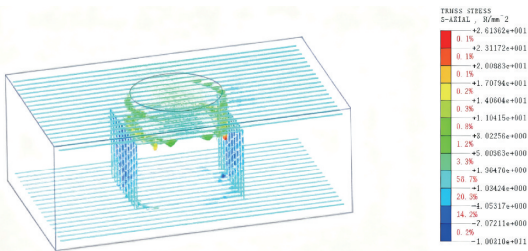


图 7 钢筋应力分布图(单位:MPa)

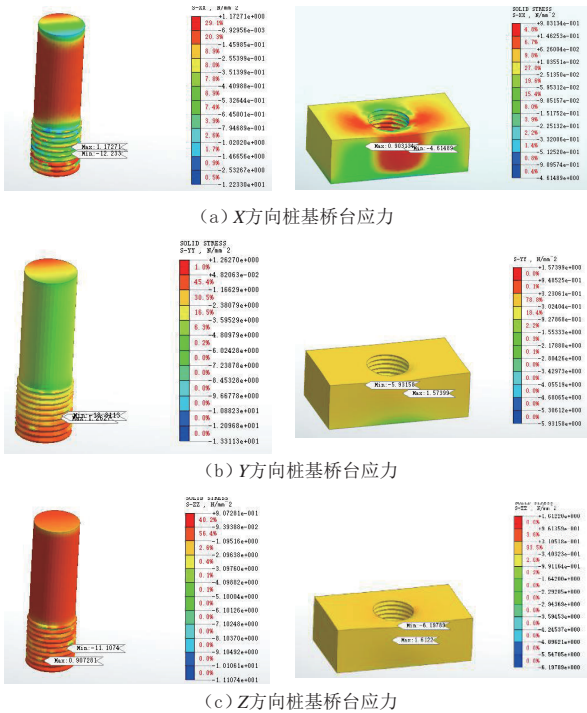


图 8 混凝土应力分布图(单位:MPa)

由图 7 可知,钢筋最大应力为 52 MPa,表明抗冲切钢筋能有效发挥作用并满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)(以

下简称《公预规》)要求。

由图 8 可知,混凝土最大拉应力为 1.61 MPa,最大压应力为 13.3 MPa,亦符合《公预规》规定。

经分析可知,插槽式连接桥台的钢筋和混凝土应力分布规律与现浇结构基本一致。进一步的分析表明,在同等荷载、边界及配筋条件下,2 种结构的应力水平均远低于《公预规》限值,且数值接近,插槽式连接在钻孔灌注桩与预制桥台之间的应用可靠。

4 施工工艺

4.1 工厂预制

桥台钢筋笼采用模块化精加工方式,在专用胎架上制作成型;桥台内设置直径 1.4 m 金属波纹管,上部钢筋网片穿透波纹管,底部主筋穿透网片,箍筋在波纹管处断开,其布置情况如图 9 所示;波纹管周边设螺旋加固筋,顶部设 U 形抗冲切筋并与底筋焊接;为避免槽口顶部钢筋过密影响振捣,预留桥台挡块钢筋,待孔洞浇筑完成后焊接并二次浇筑。



图 9 预制桥台钢筋

4.2 现场拼装

现场拼装按以下工艺流程进行:

- (1)吊装前应对拼接面进行凿毛处理,清理并保持湿润;
- (2)垫层表面设置调平钢板,根据桩头边线安装角钢挡浆模板,模板与垫层间采用双面胶封堵防漏;
- (3)按设计要求现场搅拌砂浆,摊铺于凿毛垫层上并刮平,进行桥台下放坐浆,下放过程中,桩基主筋需插入桥台主筋间隙,如有冲突需现场调整;
- (4)检查桥台与垫层间橡胶条的接触情况,确保灌浆空间密封良好;
- (5)通过调平垫块微调,使桥台纵、横坡及标高符合设计;
- (6)吊装完成后,通过顶部预留孔洞灌注 C60 补偿收缩混凝土,待强度达到 85% 后,

进行支座垫块和挡块的混凝土浇筑。

5 结 语

(1)在构造设计方面,构件宜小型化、规则化,以解决运输、吊装和安装中的尺寸问题。

(2)在连接性能方面,插槽式连接构造受力可靠,预制装配后桥台的力学性能与现浇结构基本相当。

(3)在施工工艺方面,采用插槽式连接现场作业快速、容错率高,施工流程简洁,仅需完成桩基施工、桥台吊装及孔洞灌浆即可具备架梁条件,对接简便且容错能力强。

(4)未来将进一步开展插槽式连接在长期或极端荷载下的性能表现,优化插槽构造形式和配筋方式,提升施工效率和经济性,推动相关设计规范的细化和标准化,促进预制装配式桥台的规模化应用。

参考文献:

- [1] 卢永成. 桥梁预制拼装技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2021.
- [2] 张鹏, 薛伟辰. 工业化桥梁结构体系研究与应用进展[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(6): 1-13.
- [3] 吴刚, 王景全, 刘钊. 预制混凝土桥梁结构创新发展与研究进展

[J]. 中国公路学报, 2023, 36(5): 1-20.

- [4] 刘安双, 马振栋. 预制节段拼装桥梁在轨道交通中的应用[J]. 桥梁建设, 2022, 52(4): 86-92.
- [6] 朱希同. 铁路节段拼装悬臂梁受力性能试验[J]. 铁道建筑, 2025, 45(1): 87-92.
- [7] 张门哲, 涂光亚, 王双喜, 等. 短线拼装法施工的宽幅多节段混凝土箱梁的预制控制[J]. 中外公路, 2018, 38(2): 150-154.
- [8] 黄运林, 杨聪, 万和安, 等. 石首长江公路大桥宽幅短线预制混凝土箱梁横向受力有限元计算模型分析[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 115-119.
- [9] 徐光兴, 李朝红, 梁亮, 等. 平潭海峡公铁两用大桥北东口水道桥两孔连做节段拼装技术[J]. 桥梁建设, 2018, 48(4): 98-103.
- [10] 卢永成, 邵长宇, 王天华. 上海长江大桥跨江段桥梁设计[J]. 桥梁建设, 2008(4): 1-4; 8.
- [11] 吴东升, 卢永成, 任才. 城市高架变宽预制节段梁结构设计与关键技术研究[J]. 桥梁建设, 2021, 51(6): 99-105.
- [12] 何栋. 整浇装配式桥台设计方案及有限元分析[D]. 武汉:武汉理工大学, 2011.
- [13] 许大晴, 谢玉萌. 公路桥梁装配式桥台设计与分析研究[J]. 安徽建筑, 2019, 26(10): 133-135.
- [14] 李国平, 覃忠余, 曹素功, 等. 往复加载下预制承台-桩连接构造受力性能[J]. 土木工程学报, 2021, 54(1): 106-115.
- [15] 宋浩. 预制拼装桩柱式基础抗震性能研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2019.
- [16] 齐新, 卢永成, 周海峰, 等. 桥墩预制装配连接技术特点与应用[J]. 城市道桥与防洪, 2020(8): 89-93.

(上接第166页)

参考文献:

- [1] 吴志滢. 城市大型医院周边道路交通问题剖析及改善对策——以深圳市为例[J]. 交通标准化, 2012(12): 50-52.
- [2] 格伦, 张勇. 大型医院交通问题的解决策略[J]. 中国医院建筑与装备, 2011(11): 50-56.
- [3] 张栋, 杜林, 周伟潮. 成都市华西医院区域交通组织优化实例[J]. 道路交通科学技术, 2019(6): 55-58.
- [4] 薛峥, 王玉, 赵珂. 中心城区大型医院周边交通组织优化探讨[J]. 道路与交通工程, 2019, 37(5): 51-54.
- [5] 杨萌萌, 刘行. 老城区大型医院周边交通拥堵问题分析及对策研究[J]. 科技视界, 2018(30): 59-61.
- [6] 王云云, 陈荣荣, 付波飞. 医院周边道路交通问题分析及改善对策[J]. 交通与运输, 2020, 36(6): 5-8.
- [7] 张晓春. 协同治理与品质提升——超大城市交通治理的思考[J]. 交通与运输, 2018, 34(5): 1-3.

- [8] 陈吉发, 宋雨田. 城市大型综合医院交通问题剖析及解决对策研究[J]. 交通科技, 2014(3): 186-189.
- [9] 邵勇, 高跃文. 大型综合医院交通配套规划研究[J]. 山西建筑, 2010, 36(29): 12-13.
- [10] 格伦, 李艾芳, 张集锋. 综合医院建筑的流线系统研究[J]. 新建筑, 2004(4): 18-21.
- [11] 蔡赫, 牛犇, 聂婷婷, 等. 基于交通供需条件的公交分担率计算方法[J]. 交通运输研究, 2019(5): 63-69.
- [12] 过江文. 城市中心区综合医院停车设施规划问题探讨[D]. 昆明:昆明理工大学, 2006.
- [13] 苏文涛. 与城市道路相适应的广州大型综合医院停车规划研究[D]. 广州:广州大学, 2016.
- [14] 赵奇侠. 医院交通组织停车设施规划建设指南[M]. 北京:研究出版社, 2018.
- [15] 张磊. 基于交通出行特征的医院停车需求分析[J]. 智能城市应用, 2022(7): 13-15.