

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.01.020

装配式混凝土桥墩施工技术综述

欧智菁, 薛文浩, 谢铭勤, 韦建刚

(福建工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 装配式混凝土桥墩在国内外跨海大桥、城市桥梁工程中已有大量应用,其预制拼装技术是桥梁工程领域未来的重要发展方向之一。该文从装配式混凝土桥墩的实际工程应用出发,对其施工技术方面的国内外研究进展情况进行综述。针对预制桥墩连接处相对薄弱的特点,探讨了预制混凝土桥墩节段之间、预制墩身与盖梁及承台之间的连接方式和构造特点,阐述了装配式桥墩主要施工工艺、检测技术及质量控制点,并介绍了传力可靠的新型装配式桥墩连接方式。研究结果可为预制装配式混凝土桥墩连接构造的合理选用以及施工质量控制提供重要参考,并对装配式桥墩未来的发展和研究进行展望。

关键词: 装配式桥墩; 连接方式; 灌浆套筒; 施工工艺; 质量控制

1 引言

随着中国城市化进程快速推进以及桥梁施工技术的进步,装配式混凝土桥墩凭借其施工质量高、现场作业时间短、对既有交通设施运营的影响小、绿色环保等优势,已成为中国桥梁下部结构施工建设的重要发展方向,并在中国跨海大桥和城市桥梁建设中获得了成功应用。近年来,国内外采用预制装配桥墩技术的桥梁工程如表1所示。

目前国内外对于装配式混凝土桥墩的静动力性能、设计理论方面的研究成果较为丰富。文献[3]进行了现浇式及装配式混凝土桥墩的拟静力对比试验,比较分析两者的破坏形式、水平承载力、累积耗能及位移延性等性能;文献[4]开展了装配式混凝土桥墩的抗震性能试验,建立了装配式桥墩接缝的整体分析模型,验证了并联弹簧接缝纤维模型可较好模拟干接缝连接区域的力学行为;文献[5]采用 Abaqus 有限元分析软件,建立节段预制无黏结后张预应力环形截面桥墩的实体模型,深入探讨耗能钢筋配筋率、预应力筋配筋率、预应力度等参数对结构抗震性能的影响规律;文献[6]总结了全预制装配式桥墩的设计原则,分析了其设计技术要点和设计思路;文献[7]介绍了装配式公路桥墩的性能指标和结构特点,采用 Ansys 有限元软件验

算装配式桥墩的稳定性,并通过拼装、静载和通载试验验证了桥墩结构稳定性和安全性;文献[8]总结了装配式预应力混凝土双柱桥墩的工程应用和抗震性能研究现状,介绍了基于性能设计的桥梁设计方法,为装配式双柱墩在中国的推广应用提供研究基础。

表1 国内外采用装配式混凝土桥墩的工程实例

桥址	桥名	修建时间/年	预制装配部位
美国/佛罗里达	Long Key 桥	1982	全桥
美国/佛罗里达	Seven Mile 桥	1982	
美国/北卡罗来纳	Linn Cove Viaduct 桥	1985	
美国/佛罗里达	Garcon Point 桥	1999	
美国/纽约	Belt 景观道路桥	2002	
美国/德克萨斯	Lake Ray Hubbard 桥	2003	所有桥墩
加拿大/新不伦瑞克	联邦大桥	1997	
美国/佛罗里达	Sunshine Skyway 桥	1987	
美国/德克萨斯	洛伊塔路立交桥	1998	
中国/北京	积水潭桥	1992	
中国/山东	青岛海湾桥	2011	部分桥墩
中国/上海	东海大桥	2005	
中国/浙江	杭州湾大桥	2007	
中国/上海	上海长江大桥	2009	

收稿日期:2019-04-11

基金项目:福州市科技局项目(编号:2018-G-64);福建省交通运输厅项目(编号:GY-H-16010);福建工程学院科研发展基金项目(编号:GY-Z17148)

作者简介:欧智菁,女,博士,教授,E-mail:42347271@qq.com

综上所述,目前关于装配式混凝土桥墩的研究主要集中在抗震性能和计算理论方面,而针对该类桥墩的施工方法和检测技术方面的研究相对较少,仅少量文献对预制装配式桥墩的施工流程及钢模板等技术要点进行研究。因此,该文主要针对装配式混凝土桥墩的连接构造和受力特点进行总结,介绍主要施工工艺、检测技术及重要的质量控制点,旨在为装配式混凝土桥墩的应用推广提供研究基础和技术指导。

2 装配式桥墩的连接构造

预制混凝土构件中钢筋的连接,是装配式混凝土桥墩施工的核心技术,其连接方式主要有灌浆套筒、灌浆金属波纹管、预应力筋等方式。以下分别介绍预制墩身节段、预制墩身与盖梁及承台的连接构造。

2.1 预制墩身节段之间的连接构造

2.1.1 灌浆套筒连接

灌浆套筒(图 1)由套筒、带肋钢筋和灌浆料 3 部分组成,是预制混凝土墩身节段拼装的枢纽,在施工过程中至关重要。其力学原理为:向套筒内灌注无收缩或微膨胀水泥砂浆灌浆料,随着灌浆料的硬化,钢筋横肋与套筒内壁紧密齿合,同时带肋钢筋的粗糙面

产生摩擦力,保证连接受力的平稳性和安全性,连接效果良好。

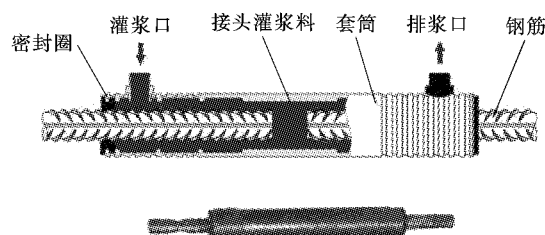


图 1 灌浆套筒

预制墩身节段连接(图 2)时的施工工序为:下部预制墩身节段顶铺设 20 mm 高强无收缩砂浆垫层并找平,接着进行上部预制墩身节段吊装;精确定位上部预制墩身节段,在其灌浆套筒内灌注高强无收缩水泥灌浆料,然后对灌浆孔及出浆孔进行密封;待连接套筒内灌浆料强度满足要求后,施工下道工序。

目前在国内外已有较多桥梁运用灌浆套筒连接构造进行连接预制墩身节段,例如美国佛罗里达州 Edison 海湾桥、佐治亚州 Interstate 85 interchange 桥梁、I-5 Grand Mount to Maytown I/C2-Span Precast Girder Bridge。中国国内也有一些灌浆套筒装配式施工工程实例,如表 2 所示。

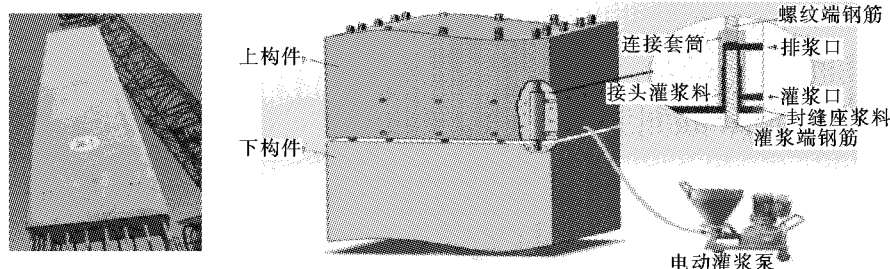


图 2 预制墩身节段之间的灌浆套筒连接

表 2 中国灌浆套筒装配式桥墩工程实例

年份	地点	工程名称
2010	上海	S6 高速公路
2010	上海	上海嘉闵北二段高架
2012	上海	上海 S26 高速公路延伸段
2014	吉林	吉林市恒山东路跨线桥
2016	上海	上海 S3 高速公路
2016	上海	上海 S7 高速公路

2.1.2 灌浆波纹管连接

灌浆金属波纹管连接的施工步骤为:预制墩身节段之间的接触面处采用高强砂浆垫层,通过预埋于上部预制墩身节段内的灌浆金属波纹管连接下部预制墩

身伸出的锚固钢筋并灌注高强无收缩水泥灌浆料填充在钢筋与金属波纹管间隙内,硬化后完成对钢筋的锚固,即可形成预制墩身节段之间的连接构造。中国采用灌浆波纹管连接装配式桥墩的工程实例有上海安波路匝道工程。

2.1.3 预应力筋连接

预制拼装桥墩中预应力筋一锚具组装件的施工原理为:预制桥墩内预留孔洞,将预应力筋一端锚固在承台的固定端锚固系统中;另一端用锚具锚固于盖梁并张拉,以实现墩身节段之间的连接(图 3)。

目前中国上海市中心城区南北高架中兴路匝道、港珠澳大桥中桥非通航孔深水区主体桥梁下部结构的墩身采用的连接方式都为此种连接构造。如港珠澳大

桥的部分装配式混凝土桥墩,采用二段式或三段式预制墩身,预应力钢筋的锚固位置分别位于上下节墩身接缝处、墩顶及承台连接处。

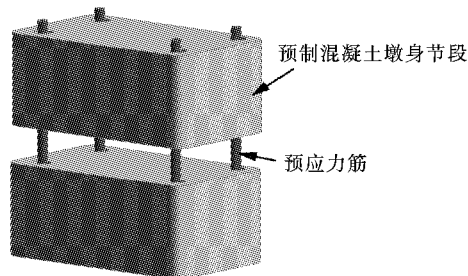


图3 预应力钢筋连接构造示意图

2.2 预制墩柱与承台的连接构造

预制混凝土桥墩与桥梁承台的连接方式主要有承插连接、定位墩连接和灌浆套筒等,以下分别介绍这3种连接方式的细部构造和应用桥例。

2.2.1 承插连接

承插式(图4)的施工原理为:预制墩身插入承台(可现浇或预制)的预留孔内,两者之间没有钢筋连接,在承台底部铺设一定厚度的砂浆,周围用细石混凝土浇筑填充。

2016年中国上海嘉闵高架北二段桥梁工程中有3 km采用了桥梁全预制拼装技术,其中一座匝道桥采用了承插式连接构造,预制桥墩与现浇承台或预制桥台连接。

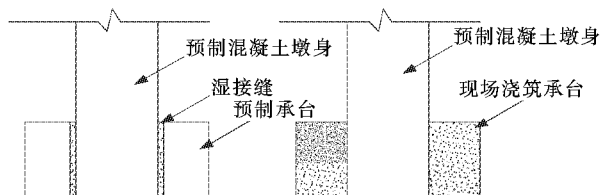


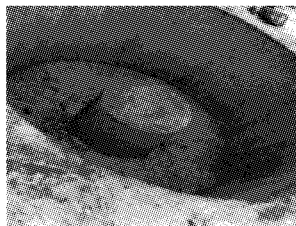
图4 承插式连接示意图

2.2.2 定位墩连接

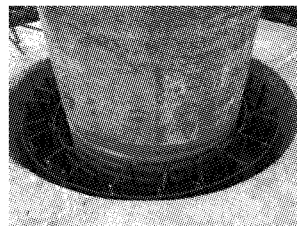
承台与预制墩身之间也可采用定位墩连接(图5),其施工原理为:承台与定位墩一体化施工,预制墩身可通过定位墩上预留的定位孔实现精准定位;定位孔下部设有构造槽,在预制墩身与定位孔之间绑扎钢筋浇筑混凝土完成连接。在京台高速安徽段改扩建工程中,其部分桥梁采用此种方式进行预制墩身与承台进行连接。

2.2.3 灌浆套筒连接

预制混凝土墩身与承台连接之间还可采用传统的灌浆套筒进行连接,灌浆套筒可设置在预制墩身或承台内部,如图6所示。



(a) 定位孔设置



(b) 预制墩身安装

图5 定位墩连接构造

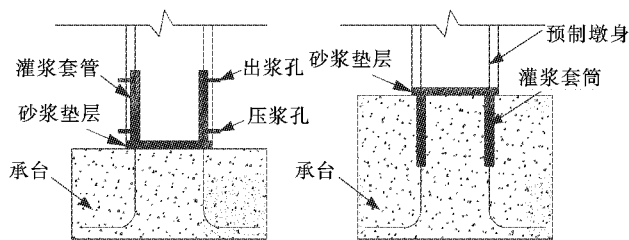


图6 墩柱与承台之间的灌浆套筒连接

2.3 盖梁与预制墩身的连接构造

预制混凝土桥墩与桥梁盖梁的连接方式主要有预埋钢板焊接连接、预应力筋连接和榫头式连接,以下分别介绍这3种连接方式的细部构造和应用桥例。

2.3.1 预埋钢板焊接连接

预制混凝土墩身与桥梁盖梁采用预埋钢板焊接连接方式(图7)的施工原理为:在预制墩身顶端和预制盖梁下端预埋钢板,安装盖梁时,将预制墩身顶端和预制盖梁下端预埋的钢板沿四周进行焊接。目前中国的九曲河大桥、重庆轨道交通1号线大学城段节点工程均是采用预埋钢板焊接的连接构造。

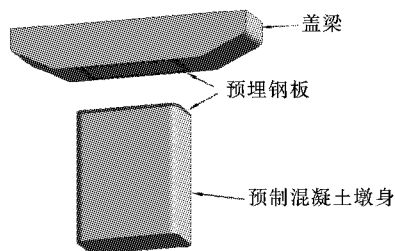


图7 预埋钢板构造示意图

2.3.2 预应力筋连接

预制盖梁与预制墩身之间可采用预应力筋连接(图8),其施工原理为:将预应力钢筋一端锚固在预制墩身的固定端锚固系统中,吊装预制盖梁时将预应力筋穿过盖梁中的预留孔洞;另一端在盖梁上用锚具进行锚固张拉以形成有效连接的方法。此外,预制墩身与盖梁连接也可采用灌浆套筒、金属波纹管等构造进行连接。

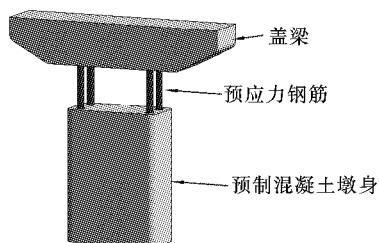


图 8 预应力筋连接

2.3.3 榫头式连接

榫头式连接(图 9)的施工方式为:在与盖梁连接的预制混凝土墩身中部区域预留混凝土凸起,在预制盖梁对应区域预留凹槽。盖梁安装时,预制混凝土墩身中部区域的混凝土凸起与盖梁的凹槽正好对接。榫头式连接的施工精度要求较高,施工难度较大,实际工程采用较少。

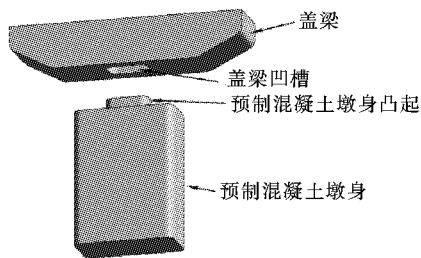


图 9 榫头式连接示意图

3 施工工艺及检测技术

预制装配式桥墩的施工工艺及检测方法是装配式桥墩在中国桥梁工程应用中的关键技术,以下以上海《预制拼装混凝土桥墩技术规程》为主要依据,针对采用灌浆套筒(波纹管)连接的装配式桥墩预制与拼装关键技术进行具体介绍。

3.1 灌浆套筒连接适用范围

灌浆套筒(波纹管)连接构造主要适用于非抗震设计、抗震防设烈度为 6 度及 7 度抗震设计区域内、装配式混凝土桥墩的设计和施工。

3.2 装配式桥墩预制施工工艺

装配式桥墩预制长度应考虑拼接缝处调节垫块厚度,主要受力钢筋的下料长度偏差应控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 范围内。墩身钢筋笼中的灌浆连接套筒应采取加固措施保证吊装及混凝土浇筑时不发生变形或移位,用于调节的预埋件也应在预制墩身预制时进行安装。墩身节段宜竖向预制,混凝土宜一次性浇筑完成。由于运输条件的限制,建议预制构件的运输重量控制在 200 t

以内。在墩身混凝土浇筑前后应对灌浆连接套筒定位、钢筋笼或钢筋定位进行检查和复测,允许偏差均为 $\pm 2\text{ mm}$ 。

灌浆连接套筒现场拼装端应采用装有定位销的定位板定位,安装允许偏差为 $\pm 2\text{ mm}$ 。灌浆连接套筒与箍筋连接时应采用绑扎,不得采用焊接连接。

3.3 装配式桥墩拼装施工工艺

装配式桥墩墩身节段的拼装工序为:首先应进行拼接缝测量,并在其拼接缝处均匀涂刷环氧黏结剂;之后进行节段拼装,并对其垂直度和标高进行测量控制和调节;最后采用灌浆套筒连接。预制墩身上节节段应设置调节设备,拼装就位后需设置临时支承措施防止倾覆。

装配式墩身与承台及盖梁的拼装工序为:首先应对拼接缝进行测量,在其四周铺设挡浆模板;之后,对放置在拼接缝处的调节垫块进行找平并铺设砂浆垫层;随后进行预制墩身的吊装,就位后应注意测量和调节预制墩身的垂直度和标高以保证定位的精度;最后进行灌浆套筒连接或者灌浆金属波纹管连接。预制墩与承台拼装前应进行匹配拼装,混凝土浇筑前后都应对预留钢筋、灌浆连接套筒或灌浆金属波纹管定位进行检查,允许偏差为 $\pm 2\text{ mm}$ 。

为保证拼装时连接构造的传力可靠,灌浆套筒内的灌浆料强度应大于 35 MPa ,拼装时气温若低于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,应对灌浆料进行保温处理,使其温度维持在 $10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内;拌和灌浆料成品温度不低于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.4 灌浆连接工艺

在进行灌浆套筒或灌浆金属波纹管灌浆前,应对其内腔再次检查以确保其内通畅无杂物,套筒内填充的高强无收缩水泥灌浆料应在拼装前一天进行流动度测试及 1 d 龄期抗压强度测试。灌浆施工应保持连续,在灌浆完成后应及时清理残留在构件上的多余浆体。同时,为保证钢筋、灌浆料及套筒体系可靠,灌浆拼接端钢筋锚固长度不应小于 $10d_s$ (d_s 为被连接纵向钢筋直径);为保证压浆质量,压浆顺序应由下至上,并保证在压浆口下缘布置箍筋,因此,压浆口下缘与端部净距应大于 20 mm 。

4 装配式桥墩新型连接方式

4.1 可检查式新型灌浆套筒

为解决传统灌浆套筒连接装配式桥墩施工中灌浆不密实的问题,文献[43]提出了一种可检查式新型灌

浆套筒,图 10 为新型套筒和现有套筒的对比图。

由图 10 对比可知:可检查式灌浆套筒相对于传统的灌浆套筒长度更长且多一个孔洞,进行连接时,可先从 C 孔进行注浆,若浆体达到或高于 B 孔所在高度则满足灌浆要求;否则需从 B 孔进行注浆以使浆体能达到 A 孔所在高度以满足灌浆要求。此种新型套筒连接可实现 BC 段灌浆质量的检查,从而有效避免传统灌浆套筒混凝土不密实等质量问题。同时,由于套筒中间为受力的薄弱部位,故采用加厚处理,保证结构安全。

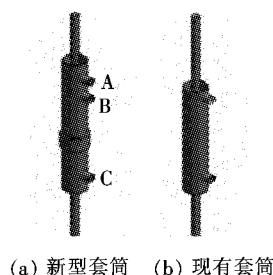


图 10 新型套筒和传统套筒对比图

4.2 内嵌钢管预应力新型装配式混凝土桥墩

2008 年 Chang Su Shim 等学者提出了内嵌钢管预应力装配式混凝土桥墩[图 11(a)],在预制节段墩柱中预留钢管孔洞,其中预应力筋穿过钢管内孔道不灌浆形成后张无黏结形式,而钢管外需灌浆。钢管与预应力筋贯通全部节段,实现桥墩装配式的功能。

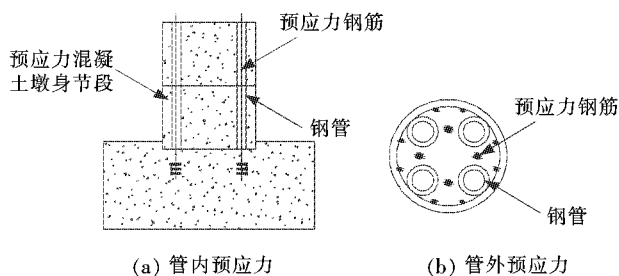


图 11 内嵌钢管预应力新型装配式混凝土桥墩

2017 年杜青等学者在此基础上,提出了内嵌钢管预应力新型装配式桥墩结构[图 11(b)],相对于内嵌钢管预应力装配式混凝土桥墩,其预应力钢筋不通过钢管,而是单独预留孔洞让其穿过,在钢管中填充混凝土。预应力筋主要提供自复位能力,而钢管主要提供耗能能力和部分抗剪能力。

国内外学者都进行了对该类构件的低周反复荷载试验,分析试件的滞回曲线、骨架曲线、耗能能力、延性等抗震性能。研究表明:内嵌钢管预应力新型装配式混凝土桥墩较传统的钢筋混凝土桥墩,具有更小的截

面和更高的强度,往复荷载作用下固有的延性和韧性更大,与普通钢筋相比有强耐火特性,由于钢管和混凝土的复合作用和约束作用有更高的承载能力。内嵌钢管的加入有效改善了节段装配式桥墩的抗剪和耗能性能,有效提高了整体抗震性能和耗能能力,并减小了配筋率。在接缝处有效抵抗剪切应力,避免了结构发生剪切破坏,显著改善了预制摇摆体系的初始刚度和屈服后刚度。

近年来,中国专家学者还提出钢板外包+U 肋+精轧螺纹钢连接、立柱嵌套连接、钢管套接的连接等装配式混凝土桥墩的连接构造,但这些新型连接构造在实际工程中尚未应用,其静力性能、抗震性能及工程适用性等需进一步的研究。

5 结 论

该文较系统地总结了预制装配式桥墩的连接方式、施工原理、细部构造以及国内外工程应用情况,介绍了装配式桥墩施工检测关键技术及质量控制要求,得到以下主要结论:

(1) 装配式墩柱的主要连接方式有灌浆套筒连接、预应力筋连接、插槽式连接等。其中灌浆套筒连接构造制作方便、施工便捷,适用面广(预制墩身节段间、预制墩身与承台或盖梁间均可采用该构造连接),适用于城市桥梁工程建设,且技术较为成熟,已有相关规程可作为装配式混凝土桥墩工程应用时的技术指导。

(2) 装配式混凝土桥墩施工时,应着重对灌浆连接套筒的定位、节段拼装预制墩身的垂直度和标高进行测量和调节,以确保施工精度;同时对混凝土浇筑过程的施工连续性进行监控,并对灌浆料的流动度及抗压强度进行检测,以保证连接质量。

(3) 介绍了可检查式套筒及内嵌钢管预应力新型装配式混凝土桥墩等传力可靠的新型连接构造,今后可针对装配式混凝土桥墩新材料、新型连接构造和 BIM 信息模型技术等促进建设工程产业化等方面开展更深入的研究。

参考文献:

- [1] 黄宜.装配式钢筋混凝土桥墩抗震性能研究[D].大连理工大学硕士学位论文,2016.
- [2] 王娟.装配式桥墩抗震性能分析[D].沈阳建筑大学硕士学位论文,2014.
- [3] 黄宜,邱文亮,黄才良,等.单节段装配式桥墩抗震性能试

- 验研究[J].大连理工大学学报,2016(5).
- [4] 葛继平,沈磊,王志强,等.基于并联弹簧接缝模型的装配式桥墩抗震分析方法[J].中外公路,2014(6).
- [5] 包龙生,王娟,于玲.后张无粘结预应力装配式桥墩抗震性能分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014(3).
- [6] 刘志磊.全预制装配式桥墩的设计技术[J].工程技术研究,2018(2).
- [7] 欧阳初,徐关尧,朱杰.装配式公路桥墩的设计[J].钢结构,2009(9).
- [8] 葛继平,王志强,李建中,等.装配式预应力混凝土双柱桥墩抗震性能研究进展[J].地震工程与工程振动,2013(3).
- [9] 黄涛,卢文良,高聪,等.预制节段桥墩模板设计试验研究[J].施工技术,2016(11).
- [10] 袁堂超.公路装配式桥墩的设计方法与施工技术分析[J].吉林交通科技,2018(1).
- [11] 曹伟.大型混凝土构件桥墩装配式制作安装施工技术研究[J].价值工程,2017(33).
- [12] 吴俊葶.预制节段拼装混凝土桥墩综述[J].科技风,2018(19).
- [13] 苟亭亭,卢文良,黄涛,等.预制拼装桥墩受力破坏行为研究[J].建筑技术,2016(12).
- [14] Pantelides CP, Ameli MJ, Parks JE, Brown DN. Seismic Evaluation of Grouted Splice Sleeve Connections for Precast RC Bridge Piers in ABC[R]. Utah Department of Transportation, 2014.
- [15] TAZARV M, SAHIDI MS. Low-Damage Precast Columns for Accelerated Bridge Construction in High Seismic Zones[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(3).
- [16] 朱敏.轨道交通预制拼装桥墩设计和施工[J].上海公路,2018(1).
- [17] 尹富秋.中心城区高架桥桥墩预制拼装施工关键技术[J].施工技术,2017(12).
- [18] 吕乃芝,欧湘萍,李俊辉,等.全预制快速桥墩施工工艺[J].工程与建设,2018(4).
- [19] 孙业发,王伟,宋书东,等.大型预制桥墩钢筋笼整体吊装对接施工技术[J].中国港湾建设,2014(9).
- [20] 叶华成.上海长江大桥水上非通航孔墩身预制安装技术[J].桥梁建设,2007(5).
- [21] 陈金彪.装配式桥梁预制空心桥墩与承台连接性能的研究与应用[D].合肥工业大学硕士学位论文,2017.
- [22] 瞿振华.跨海大桥下部结构设计与施工技术研究[D].同济大学硕士学位论文,2007.
- [23] 万绍平.预制桥墩湿接头的施工技术要点[J].城市道桥与防洪,2009(11).
- [24] 陈炜.公路桥梁桥墩预制拼装建造技术[J].交通世界,2017(25).
- [25] 姜海西,卫张震.承插式预制拼装桥墩抗震性能研究综述[J].城市道桥与防洪,2017(12).
- [26] 王辉,李硕.金塘大桥墩身预制工艺分析[J].中华建设,2012(1).
- [27] 马会天.装配式桥梁预制空心桥墩安装施工工艺[J].工程与建设,2016(2).
- [28] 魏英,扶庭阳.混凝土桥梁全预制装配施工技术[J].城市住宅,2018(6).
- [29] 沈阳云.东海大桥墩身节段预制安装的关键技术[J].公路,2005(8).
- [30] 高聪.节段预制拼装混凝土桥墩静力行为研究[D].北京交通大学硕士学位论文,2015.
- [31] 马虎.单轨装配式桥墩结构受力与变形分析[J].重庆建筑,2015(10).
- [32] 陆晓锦,周志祥,王邵锐.立柱与盖梁焊接联结方法和性能分析[J].交通标准化,2011(21).
- [33] 魏赞洋.摩擦自锁式预制桥墩连接可行性研究[D].北京工业大学硕士学位论文,2015.
- [34] 赵成贵.东海大桥墩身预制施工[C].中国公路学会第二届全国公路科技创新高层论坛论文集(上卷),2004.
- [35] 单积明.轨道交通预制盖梁与桥墩连接性能静力试验研究[J].中外公路,2017(2).
- [36] 黄建靖.城市轨道交通高架线预制盖梁接口有限元分析[J].现代城市轨道交通,2017(2).
- [37] 林信武.装配式桥墩的抗震设计技术与构造措施[J].工程技术研究,2018(7).
- [38] 彭放.新型预应力装配式桥墩在新澳西大桥中的应用[J].OVM通讯,1999(6).
- [39] 朱万旭,覃荷瑛,甘国荣,等.珠澳大桥节段预制桥墩高强度钢筋连接锚固体系的关键技术研究[J].铁道学报,2017(5).
- [40] 吴威业,奚康,布占宇.预制桥墩节段节点抗剪性能研究——拟静力试验[J].宁波大学学报(理工版),2017(2).
- [41] 布占宇,吴威业.预制拼装混凝土桥墩抗震性能拟静力循环加载试验[J].建筑科学与工程学报,2015(1).
- [42] DG/TJ 08-2160-2015 预制拼装混凝土桥墩技术规范[S].
- [43] 葛继平,高飞,郑焕强,等.灌浆套筒装配式桥墩的施工工艺及其应用[J].应用技术学报,2018(2).
- [44] Shim C S, Chung C H, Kim H H. Experimental Evaluation of Seismic Performance of Precast Segmental Bridge Piers with a Circular Solid Section[J]. Engineering Structures, 2008, 30(12):3782-3792.
- [45] 杜青,高松松,卿龙邦.内嵌钢管预应力装配式桥墩抗震性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017(9).