

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.132



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



## 装配式 RC 桥墩研究现状及展望

林上顺<sup>1</sup>, 张建帅<sup>1</sup>, 夏樟华<sup>2</sup>, 叶世集<sup>1</sup>, 赵锦冰<sup>3</sup>

(1. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室(福建理工大学), 福州 350118; 2. 福州大学土木工程学院, 福州 350108; 3. 皓耀时代(福建)集团有限公司, 福州 350108)

**摘要:** 基于相关工程案例, 对装配式桥墩的结构体系进行介绍; 从结构受力性能、耐久性、施工便利性角度, 对不同类型装配式桥墩的优缺点进行分析比较。通过分析既有研究成果发现: 既有研究大多集中于桥墩的抗震性能, 涉及装配式 RC 桥墩的抗压、抗剪性能等研究较为少见, 《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05—2022) 虽提出了装配式混凝土桥墩的结构计算方法, 但尚未根据不同类型装配式桥墩的拼接构造特征提出相应的局部构造的极限承载力验算方法; 《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05—2022)、《公路装配式混凝土桥梁施工技术规范》(JTG/T 3654—2022) 规定了部分类型装配式桥墩的构造要求、施工工艺, 一些地方标准已涉及装配式桥墩的抗震设计、施工、验收等, 可用于指导部分类型的装配式桥墩的设计与施工, 但内容不全面。在此基础上提出装配式桥墩在结构设计、施工、质量管控等方面存在的不足以及今后的发展方向。

**关键词:** 桥梁工程; 装配式 RC 桥墩; 连接方式; 工程应用; 研究进展

**中图分类号:** U443.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)06-0135-13

## Research status and prospect of assembled RC piers

LIN Shangshun<sup>1</sup>, ZHANG Jianshuai<sup>1</sup>, XIA Zhanghua<sup>2</sup>, YE Shiji<sup>1</sup>, ZHAO Jinbing<sup>3</sup>

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Information in Civil Engineering(Fujian University of Technology), Fuzhou 350118, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China; 3. Hao Yao Times (Fujian) Group Co., Ltd., Fuzhou 350108, P. R. China)

**Abstract:** This analysis is based on relevant engineering cases in domestic and international contexts, the structural system of assembled bridge piers is introduced. The advantages and disadvantages of different types of assembled piers are analyzed and compared from the perspectives of structural stress performance, durability and construction convenience. Through analysis of the existing research results found that: most of the existing research focused on the seismic performance of the piers, but the research involving the compressive and shear performance of assembled RC piers is still relatively rare, *Pacifications for Design of Highway Precast Concrete Bridges* (JTG/T 3365-05—2022) although the structural calculation method of assembled concrete piers, but

**收稿日期:** 2022-06-15

**基金项目:** 福建省自然科学基金(2019J01779、2020J1477)

**作者简介:** 林上顺(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事预制拼装桥梁、无伸缩缝桥梁、桥梁抗震研究, E-mail: linshangshun@fjut.edu.cn。

夏樟华(通信作者), 男, 博士, 副研究员, E-mail: xiatian@fzu.edu.cn。

**Received:** 2022-06-15

**Foundation items:** Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2019J01779, 2020J1477)

**Author brief:** LIN Shangshun (1972-), PhD, professor, main research interests: prefabricated assembled bridges, bridge without expansion joints, bridge seismic, E-mail: linshangshun@fjut.edu.cn.

XIA Zhanghua (corresponding author), PhD, associate researcher, E-mail: xiatian@fzu.edu.cn.

not yet according to the different types of assembled piers of the splicing structure characteristics, the corresponding limit of the local structure bearing capacity calculation method; *Pacifications for Design of Highway Precast Concrete Bridges* (JTG/T 3365-05—2022), *Specifications for Construction of High Wary Precast Concrete Bridges* (JTG/T 3654—2022) for some types of assembled piers construction requirements, construction techniques, some local standards have involved assembled piers seismic design, construction, acceptance, etc. These standards can be used to guide the design and construction of some types of assembled piers, but its content is still not comprehensive. On this basis, the shortcomings of assembled piers in structural design, construction, quality control and other aspects as well as the future development direction are proposed.

**Keywords:** bridge engineering; assembled RC piers; connection method; engineering application; research progress

桥墩是桥梁关键构件之一,截至 2021 年底,中国公路桥梁已建成 96.11 万座<sup>[1]</sup>,其中超过 90% 的桥墩采用传统的整体现浇施工方法,不仅施工周期长,而且对现有的交通及环境影响很大。为解决这些问题,推动装配式桥墩的工业化发展至关重要。美国得克萨斯州于 20 世纪 70 年代就在 Corpus Christi 跨 JFK 堤道公路桥首次使用了节段装配式 RC 桥墩。此后美国一些非震区、低烈度地区的桥墩也逐渐采用这种快速建造方法。与传统的现浇桥墩相比,装配式桥墩的施工周期较短,适合于在海洋等恶劣环境下施工,且对现状交通影响较小<sup>[2]</sup>,符合建筑工业化发展方向,具有广阔的应用前景。近年来,装配式桥墩在中国的一些城市桥梁和跨海大桥得到一些应用,但尚未得到全面推广。

装配式 RC 桥墩结构体系大致可分为“等同现浇”“非等同现浇”“混杂型”三大体系<sup>[3-6]</sup>。“等同现浇”结构体系通过在预制桥墩节段之间的拼接部位采用强连接,使得拼接后的桥墩的受力性能达到或接近于整体现浇桥墩;“非等同现浇”结构体系一般在预制桥墩节段之间的拼接缝处采用弱连接,使之具备开合或错动能力,并通过在拼接后的桥墩施加预应力,从而使得装配式桥墩具备一定的耗能能力和自复位能力;而“混杂型”结构体系是在“等同现浇”结构体系相关构造的基础上,通过对装配式桥墩采取施加预应力等措施,进一步提高“等同现浇”结构体系的抗震性能。装配式 RC 桥墩结构设计的关键是采用合适的连接构造<sup>[7]</sup>,并采用合适的施工方法,提高拼接部位的受力性能。

学者们针对不同结构体系的装配式 RC 桥墩的受力性能开展大量试验研究和理论分析,相关单位在大量工程实践和开展大量科研工作的基础上,编制出一些技术规范、规程,如《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05—2022)<sup>[8]</sup>、《公路装配式混凝土桥梁施工技术规范》(JTG/T 3654—2022)<sup>[9]</sup>等。项贻强等<sup>[10]</sup>、Khan<sup>[11]</sup>等针对快速桥梁施工,在规划、设计、施工方法等方面进行全盘考虑,通过构件

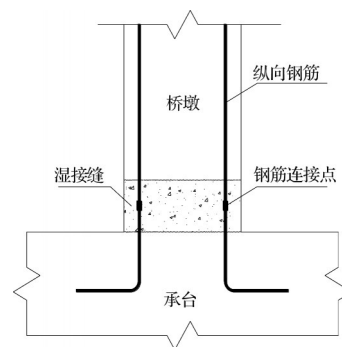
的工厂化预制,采用一些专门的运输设备将构件运至现场进行安装,以加快桥梁现场建设速度。为此,笔者在收集不同类型装配式桥墩工程案例的基础上,结合相关科研成果,从装配式桥墩的受力性能、施工便利性、耐久性等方面出发,系统分析不同结构体系的优缺点、工程适用性。

## 1 装配式桥墩主要结构体系

### 1.1 等同现浇结构体系

#### 1.1.1 现浇湿接缝连接

现浇湿接缝连接通过在桥墩预制节段与承台之间(或桥墩预制节段之间),预留一段现浇混凝土湿接缝,实现构件之间的连接,如图 1 所示。中国已



(a) 现浇湿接缝连接示意图



(b) 杭州湾跨海大桥

图 1 现浇湿接缝连接

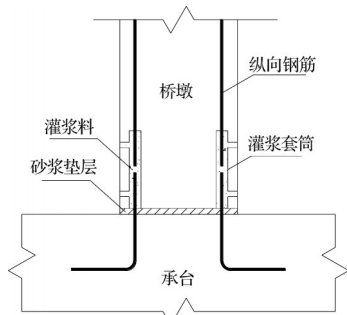
Fig. 1 Cast-in-place concrete joint connection

建成的杭州湾跨海大桥、东海大桥、港珠澳大桥等工程的桥墩均采用这种连接方法。采用现浇湿接缝的连接方法将预制构件连接后整体性与现浇方式基本相同,一般认为受力性能可靠,针对这类的试验研究较少,文献[12]进行现浇湿接缝装配式桥墩的拟静力试验,将现浇段布置在塑性铰区,试验结果表明:该柱抗震性能接近于整体现浇桥墩,具有良好的侧向刚度、延性和等效耗能能力,是可靠的连接构造。

然而在海洋环境中,由于湿接缝的存在,桥墩施工周期较长,其后浇的湿接缝混凝土的施工质量容易受到强风、波浪等影响;施工期间,桥墩预制节段在强风、波浪等作用下,需要采取一定的防侧翻措施;桥墩预制节段、承台之间也需要采用一些临时锁定的措施,避免二者间隙受到强风、波浪等影响。中国较早对杭州湾跨海大桥<sup>[13]</sup>中部分桥墩采用了现浇湿接缝的连接方式,且桥墩采用的是整体吊装,随后又对港珠澳大桥<sup>[14]</sup>等工程的部分桥墩采用该连接方式。但是由于这种拼接方式的施工难度较大,目前已较少采用。

1.1.2 灌浆套筒连接和灌浆波纹管连接

灌浆套筒连接采用环氧树脂砂浆、普通砂浆、结构胶等作为混凝土的界面粘结材料,其桥墩预制节段与承台之间的钢筋,则通过采用灌浆套筒或灌浆波纹管进行连接。灌浆套筒连接构造如图 2 所



(a) 灌浆套筒连接示意图



(b) 上海 S26 高速公路延伸段

图 2 灌浆套筒连接

Fig.2 Grouted splicing sleeve

示,通过将预埋在桥墩预制节段、承台内的预埋钢筋,插入金属套筒内,然后将灌浆料充填金属套筒,依靠灌浆料与钢筋、金属套筒的筒壁间的粘结作用,实现桥墩预制节段受力钢筋和承台受力钢筋的连接,钢筋与灌浆料和灌浆料与套筒内壁之间的粘结作用由材料粘附力、表面摩擦力和结合面之间的机械咬合力构成,相对闭合的套筒可有效约束灌浆料,增强结合面处的粘结锚固作用,确保灌浆套筒的传力能力<sup>[15]</sup>。灌浆套筒连接已经在跨海大桥和城市高架桥得到广泛的应用,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、上海 S6 高速公路、上海嘉闵北二段高架、上海 S26 高速公路延伸段、上海 S3 高速公路、上海 S7 高速公路等。

与采用灌浆套筒连接的桥墩类似,灌浆金属波纹管连接也采用环氧树脂砂浆、普通砂浆、结构胶等作为混凝土的界面粘结材料。通过预先在承台或盖梁内埋置金属波纹管,并在金属波纹管内部灌注高强砂浆,然后将预制墩身节段的外露主筋植入金属波纹管之中,从而使得预制墩身节段的外露主筋与承台或盖梁形成整体,如图 3 所示。

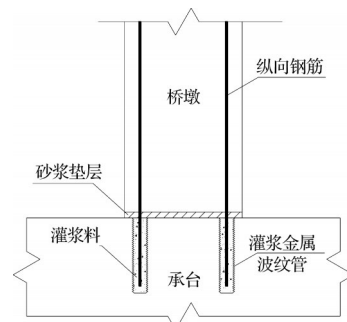


图 3 灌浆波纹管连接

Fig.3 Rebar splicing by grouted corrugated steel pipe

总体而言,灌浆金属波纹管连接的工作原理和施工方式与灌浆套筒连接存在类似之处,不过灌浆金属波纹管的长度比套筒增大较多,且承台或盖梁内一般不设伸入灌浆金属波纹管的预埋钢筋。灌浆金属波纹管连接已经在国内外得到较多应用<sup>[16]</sup>,如,美国得克萨斯州 Lake Ray Hubbard 桥、华盛顿州 Lake Belton Hubbard 桥和 5 号州际公路桥以及上海安波路匝道工程等。

与采用湿接缝连接的桥墩相比,采用灌浆套筒或灌浆波纹管连接的装配式 RC 桥墩,其桥墩预制节段与承台之处可以实现直接接触,二者之间不需要采用作为临时支承的垫块,施工相对较为便捷。但在灌浆套筒内的灌浆料强度尚未形成之前,为防止桥墩预制节段在强风等作用下出现侧翻,施工时



仍需要采取一些措施对桥墩预制节段进行约束。从工程管理的角度,由于桥墩预制节段的每根受力主筋均需要配套的灌浆套筒或灌浆波纹管,其现场灌浆工作量较大,且套筒内部的灌浆质量的检测手段仍不完善,这也成为限制其推广应用的主要原因之一。

在结构耐久性方面,采用灌浆套筒或灌浆波纹管连接的装配式RC桥墩的拼接缝多采用平缝,且一般采用传统的界面粘结材料进行拼接面的粘结,其水平抗剪能力不如整体现浇桥墩,因此,在水平地震、汽车制动力、温度变化等作用下,拼接缝将不可避免地出现开合和错动,导致空气、雨水对桥墩钢材进行腐蚀,存在一定安全隐患。

#### 1.1.3 承插式连接

承插式连接一般用于桥墩和盖梁(或承台)间的连接(见图4),具体连接构造是在盖梁(或承台)内设置预留孔,施工时将预制墩身直接嵌入盖梁(或承台)内,然后在二者间隙注入混凝土或砂浆,使之形成整体。为提高连接效果,一般对交界面处的预制构件表面进行粗糙处理。

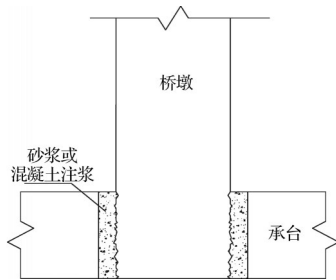


图4 承插式连接

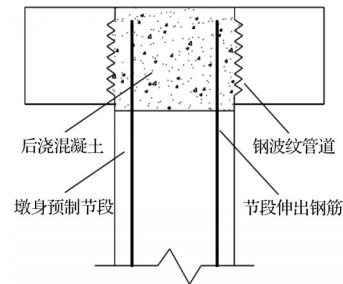
Fig. 4 Socket connection

与湿接缝连接和浆锚连接不同,采用承插式连接的墩柱和盖梁(或承台)之间,并没有钢筋连接。承插式连接已在美国华盛顿州5号州际公路桥、美国得克萨斯州 Redfish Bay 桥、美国爱荷华州 Boone County IBRC Project 桥、中国上海嘉闵高架北二段、中国淮河特大桥引桥等工程中得到应用。承插式连接的优点<sup>[17]</sup>在于对施工精度的要求较低,现场湿作业量少,施工速度较快;但要求设置预留孔的构件在预留孔四周应具有足够的强度,以便抵抗预制桥墩在地震作用下发生水平变形时所引起的撬起力。然而,采用在承台进行大范围开孔进行拼接的装配式桥墩,难免对承台的强度、完整性有一定的削弱,而且在拼接间隙的灌浆料强度未形成之前,还存在墩身和盖梁(或承台)之间的临时约束问题。

#### 1.1.4 钢筋插槽式连接

钢筋插槽式连接用于墩柱与盖梁、墩柱与承台之间的连接(见图5),其具体的连接构造是在承台

(或盖梁)内设置预留槽孔,墩身节段预留外露钢筋,连接时将预制节段插入槽孔,将粘结材料灌入槽孔,将预制节段和承台(或盖梁)连接形成整体。该连接方式已在美国 Redfish Bay 桥、美国爱荷华州 Boone County IBRC Project 桥、浙江省宁波市机场快速路南延(鄞州大道—岳林东路)部分桥墩中得到应用。



(a) 钢筋插槽式连接示意图



(b) 美国 Redfish Bay 桥

图5 钢筋插槽式连接

Fig. 5 Steel bar slot connection

#### 1.1.5 混合式连接

混合式连接是以“等同现浇”体系为基础,通过组合“等同现浇”体系多种的构造措施形成新的连接方式(见图6),以追求装配式桥墩在抗震性能上等同或优于现浇桥墩。



图6 榫卯-灌浆套筒混合连接

Fig. 6 Tenon joint-grouting sleeve hybrid connection

为改善预制拼装RC桥墩拼接缝的受力性能和耐久性,提高拼装效率和施工安全性,文献[18-21]提出了钢管混凝土榫卯-灌浆套筒混合连接的新型连接方式。

采用钢管榫卯-灌浆套筒混合连接的装配式RC桥墩,其预制桥墩与承台之间的混凝土采用普通砂

浆进行粘结,由于拼接缝处的砂浆强度远低于混凝土的强度,因此,在结构后期受力过程中,拼接缝仍然是易损坏位置,桥墩结构中的拼接缝处的钢筋非常容易受到海洋性气候的腐蚀,直接影响到桥墩整体结构的耐久性。为此,文献[22]进一步提出采用现浇UHPC-RC凸榫的榫卯混合连接的新型装配式桥墩接头构造,在桥墩的拼接位置采用现浇UHPC实现预制桥墩与承台之间的拼接,现浇段的预制桥墩钢筋与承台预埋钢筋采用焊接连接,如图7所示。



图7 现浇UHPC-榫卯混合连接

Fig. 7 Cast-in-situ UHPC-mortise and tenon hybrid connection

## 1.2 非等同现浇体系

后张拉预应力连接是通过钢绞线穿过桥墩各节段、承台和盖梁,然后张拉预应力筋形成整体的装配连接方式(见图8),预制构件间接缝可以采用湿接缝、干接缝或环氧树脂胶等方式处理,使得预制桥墩在地震作用下的非线性转动主要集中在摇摆节点,从而保证预制构件部分基本保持弹性<sup>[23]</sup>。该连接构造可有效避免地震作用下桥墩墩底产生的非线性转动,取而代之的是墩底的张开与闭合,预制桥墩墩底的受拉损伤能得到有效降低,而且后张预应力筋为预制桥墩提供了较强的自复位能力,其残余位移接近于零,但桥墩接缝在重复的张开与

闭合作用下会产生混凝土的局部开裂、剥落以及在接缝位置附近的混凝土压碎等现象。这种连接方式在国外较为常用,例如,美国科罗拉多州 Vail Pass 桥、美国佛罗里达州 Sunshine Skyway 桥、美国纽约州 I-287 高架桥置换工程等;中国也有一些工程应用案例,例如,新澳丞大桥、港珠澳大桥、厦门二通道工程等。

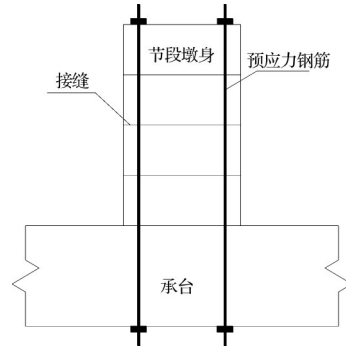


图8 后张拉预应力连接

Fig. 8 Post tensioned prestressed connection

学者们对后张拉预应力连接预制桥墩的抗震性能进行了大量的研究。文献[24-26]通过试验研究了干接缝无粘结预应力独柱墩的抗震性能及震后恢复性能,发现预应力装配式RC桥墩具有较强的自复位能力、较小的残余位移、墩身的损伤较小等优点,初始应力和预应力配筋率都对自复位能力存在影响,采取这类连接方式的结构对震后的墩柱采用补张预应力筋、修复墩身混凝土的措施,就可以及时地在震后抢险中使用。文献[27-29]对采用有粘结和无粘结的预应力筋进行连接的装配式RC桥墩进行拟静力试验,相比于整体桥墩,采用无粘结预应力筋的桥墩具有更高的水平极限承载能力、更小的水平滑移、更好的桥墩自复位能力;采用有粘结的桥墩,其耗能更好,横向刚度大,但是在加载后期由于粘结部位钢筋开裂,会出现预应力较大的损失,以至于产生较大的残余位移。文献[30]进行了低周往复试验,通过研究提出了水平力-位移骨架曲线解析计算方法;文献[31]对预应力连接预制空心墩进行了振动台试验研究,在试验的基础上提出了一种计算水平力-位移骨架曲线的解析方法。文献[32]根据集中塑性铰理论和刚体摩擦变位分析方法,对预应力装配式桥墩的工作机制及结构耗能进行分析,建立预应力装配式桥墩在不同荷载作用下结构的位移和内力关系式。

与“等同现浇”结构体系相比,“非等同现浇”结构体系具有更强的自复位能力。其拼接缝虽然采用一些浅槽式凹凸剪力键加强接缝处的水平抗剪能力,但在水平荷载作用下仍不可避免地出现开合



和错动,接缝处的材料破坏后,雨水、腐蚀气体等会通过接缝进入墩身,因此,其桥墩预应力钢材同样容易受到腐蚀。“非等同现浇”结构体系在拼接缝处不采用灌浆套筒,省去了大量套筒的灌浆操作,然而,由于该桥墩体系在墩身设置预应力,其工程造价明显高于整体现浇RC桥墩和“等同现浇”装配式RC桥墩。

### 1.3 混杂型连接体系

后张拉预应力预制桥墩有很好的自复位能力,但是耗能能力较差,近年来大多数学者主要的研究方向为提高后张拉预应力预制桥墩的耗能能力,期望得到的预制桥墩抗震性能能够兼有良好的耗能能力和自复位能力,于是逐渐形成混杂型连接体系装配式桥墩,如图9所示。

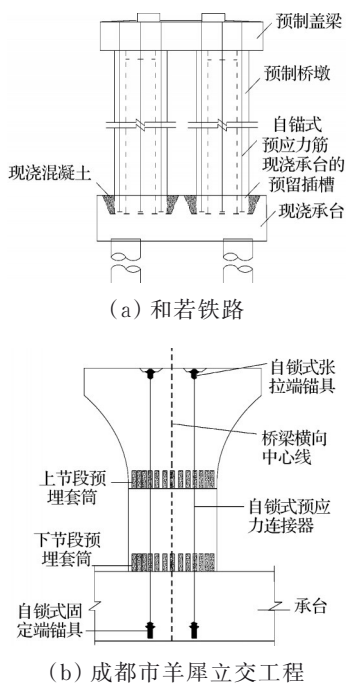


图9 混杂型连接体系

Fig. 9 Hybrid connection system

混杂型连接体系以预应力连接为基础,再结合其他连接方式,期望装配式桥墩兼具多种连接方式的优点,来提高装配式桥墩的抗震性能。文献[33-37]通过在预应力连接的装配式RC桥墩中添加耗能构件,例如,钢管、剪力键、耗能钢筋等,可以有效地增加试件耗能能力,减少构件的残余位移,减小其地震响应,有利于控制接缝张开,并且减小墩底曲率。目前中国已有这类连接方式的工程运用,如和若铁路的部分桥墩、成都市羊犀立交的部分桥墩。混杂型连接体系包含了预应力和其他连接方式,在力学性能上有较大的优势,但由于存在多种连接方式,施工工艺较为复杂,施工周期相对较慢。

在实际工程应用中一般应考虑结构的自复位

性能和耗能能力之间的平衡。文献[38]在节段接缝处设置了凹凸剪力连接键或榫卯剪力键,同时对装配式桥墩施加后张预应力,通过试验发现剪力键能显著提高装配式桥墩的水平抗剪能力、结构整体性、自复位能力。可见混杂型连接体系的构造细节与其他装配式桥墩差异较大,研究主要在抗震性能上,对其抗压、抗剪性能研究较少,不同连接构造对桥墩整体力学性能的影响不够明确,且尚未提出较系统的结构设计方法。

## 2 装配式RC桥墩受力性能研究

### 2.1 等同现浇结构受力性能

#### 2.1.1 灌浆套筒和灌浆波纹管连接性能

文献[39-40]在试验的基础上,进行灌浆波纹管连接装配式桥墩拟静力试验,结果表明装配式桥墩的抗震能力接近于整体现浇桥墩,灌浆波纹管连接安全可靠,为灌浆套筒连接装配式桥墩在实际桥梁工程中得到推广应用提供理论基础。

文献[41]基于装配式桥墩的双向拟静力试验,指出在双向压弯作用下的桥墩截面的P-MX-MY三维屈服面能够较准确地校核节段拼装墩的极限承载能力;文献[42-43]进行了装配式双柱墩的单向、双向拟静力试验,结果表明装配式双柱墩的极限承载能力小于现浇墩,且抗震性能略差于现浇墩,但两者破坏模式较为接近。相关研究可为工程技术人员进行装配式桥墩的双向受力分析提供借鉴。

文献[44-46]进行了多组的灌浆波纹管的钢筋拉拔试验,分析了钢筋锚固长度、孔径比和螺旋箍筋约束等因素对灌浆连接锚固性能的影响,提出了可以反映粘结应力分布变化的粘结-滑移本构关系简化模型。文献[15, 47]对装配式桥墩的试验过程进行损伤评估,发现灌浆波纹管连接的预制拼装立柱的损伤主要集中在柱底接缝处及塑性铰区域处。上述研究为今后开展装配式桥墩的局部受力分析、损伤评估等奠定基础。

王志强等<sup>[47]</sup>、葛继平等<sup>[23, 48]</sup>开展了2段式预应力预制拼装混凝土桥墩和整体现浇混凝土桥墩试件的拟静力试验,结果表明预应力拼装桥墩的残余位移只有整体现浇桥墩的44%,但耗能能力只有整体现浇桥墩的1/3,并进行了整体现浇RC桥墩和采用灌浆波纹管连接的拼装RC桥墩的单、双向拟静力试验,研究了预制拼装桥墩在双向荷载作用下的耦合效应。上述研究表明,预应力连接装配式桥墩的抗震性能低于灌浆套筒连接装配式桥墩。

### 2.1.2 承插连接性能

文献[49-51]所开展的拟静力试验研究表明:采用承插式连接的装配式RC桥墩在抗震性能上可以等同现浇桥墩,并基于试验结果对不同承插深度的装配式RC桥墩给出了设计建议。文献[52-55]推导了承插式连接受力计算模型,提出了较可行的OpenSEES数值模拟,并研究了承插的合理深度。文献[56]提出在承插式连接装配式RC桥墩的承台设置U形抗冲切钢筋,通过研究表明U形抗冲切钢筋可有效地改善承台受力,避免承台发生局部的冲切破坏。目前承插式连接装配式桥墩在实际工程应用不多,其承台预留凹槽的工作机理、预制桥墩与承台之间的界面受力性能,以及承插构造的设计方法等,还有待今后进一步开展系统深入的研究。

### 2.1.3 混合式连接性能

文献[20]设计了整体现浇桥墩试件、传统灌浆套筒连接试件、钢管剪力键连接试件,进行拟静力试验。结果表明:3类试件均具有良好的吸收和耗散地震能量的能力,同时试件无明显的刚度退化,构件损伤过程和最终的破坏形态相近。与整体现浇试件相比,采用钢管剪力键的混合连接试件的极限承载力和位移延性系数有明显的提高,其滞回曲线也呈现饱满的纺锤形。

文献[21]设计了整体现浇构件、CFST榫卯-灌浆套筒混合连接试件,开展了拟静力试验,研究结果表明,这两类混凝土桥墩试件累积耗能能力接近,均无明显的刚度退化,钢管榫卯-灌浆套筒混合连接构件与整体现浇构件的水平峰值荷载接近,与整体现浇构件和灌浆套筒构件相比,钢管榫卯-灌浆套筒混合连接构件的极限位移和位移延性系数均有明显的提高。

文献[57]对预埋位置灌浆套筒进行数值模拟试验。结果表明:灌浆套筒预埋在基础试件与现浇试件破坏形态、承载力相近;而灌浆套筒预埋在墩身的试件损伤集中在有无套筒的交接部位,主要是试件的刚度大于无套筒部位,导致塑性铰位置上移,同时其承载力优于预埋在基础和现浇试件;3类试件的抗震性能相近,但预埋灌浆套筒的试件延性不如现浇试件。

文献[22]通过现浇UHPC-RC凸榫混合连接装配式桥墩拟静力试验发现,采用现浇UHPC-RC凸榫混合连接的装配式桥墩延性性能和耗能能力较强,与整体现浇桥墩相比,二者的破坏特征一致,刚度退化率接近,水平承载能力稍大,但其自复位能力稍差一些。

文献[18]分别进行整体现浇试件、灌浆套筒连

接试件、CFST榫卯拼装试件、灌浆套筒和CFST榫卯混合连接试件的受压极限承载力试验,结果表明:在大、小偏压荷载作用下,试件的破坏模式和损伤过程与整体试件在总体上相近,小偏压状态下表现为受压侧混凝土压碎破坏,在大偏压状态下表现为受拉侧钢筋屈服破坏;CFST榫卯拼装试件的受压极限承载力最低;灌浆套筒连接试件的极限承载力稍低于整体现浇试件;CFST榫卯混合连接试件的受压极限承载力最高。

上述研究表明:混合连接装配式桥墩的抗震能力与抗压性能均优于传统的装配式桥墩(含灌浆套筒连接、承插式连接、预应力连接等)。与灌浆套筒连接装配式桥墩相比,混合连接装配式桥墩的榫卯构造能够对预制桥墩进行约束,可避免预制桥墩在施工过程中由于受到风荷载等作用,可能出现的侧翻事故;与承插式装配式桥墩相比,混合连接装配式桥墩不需要在承台设置预留凹槽,因此,不会影响承台的受力;与预应力连接装配式桥墩相比,混合连接装配式桥墩不需要进行张拉预应力等施工步骤,在施工便利性方面具有明显的优势。混合连接装配式桥墩兼具施工便利、受力性能好等优点,有望在今后的桥梁工程中得到推广应用。

## 2.2 非等同现浇结构受力性能

文献[33]通过所开展的双向拟动力试验研究表明:“非等同现浇”装配式RC桥墩在双向地震作用下,桥墩混凝土开裂和压碎集中在接缝区域,其骨架曲线没有强度稳定阶段,预应力束会出现脆断现象,破坏模式不够理想,其受力性能不如“等同现浇”装配式桥墩。因此,“非等同现浇”装配式RC桥墩一般不宜用于地震烈度较高的地区。

## 2.3 混杂型连接受力性能

文献[58]进行采用无粘结后张拉预应力和滑动接缝的大尺寸混合摇摆-滑移(Rocking-Sliding)桥墩的准静态循环荷载试验,结果表明:滑动体系提供了一定的能量耗散能力,通过上部节段在接缝处的滑移来实现摩擦耗能。文献[59-61]通过拟静力试验研究发现,采用后张预应力筋与灌浆套筒连接或后张预应力筋与灌浆波纹管连接的混杂连接形式的预制桥墩具有较好的耗能能力,无粘结后张预应力有利于减小残余变形,使试件各方面性能更接近现浇墩。文献[62-63]研究预应力连接与承插式的混杂连接形式,提高初始预应力能够使桥墩屈服荷载和屈服后刚度提高,增大不锈钢筋配置率使水平承载力和耗能能力的提升较为明显,但也造成残余位移的增大。

混杂型连接装配式桥墩整合了“等同现浇”装



装配式桥墩、“非等同现浇”装配式桥墩的连接构造,通过进行合理设计,其在抗震性能上能接近于整体现浇桥墩,且具有更强的自复位能力。然而,混杂型连接装配式桥墩的整体构造较为复杂,与混合连接装配式桥墩相比,其工程造价较高,且施工较为麻烦。

### 3 装配式RC桥墩标准化建设

在实际工程中,桥梁建设者一般在参照相关研究资料的基础上,以相关规范或技术规程作为工程设计、施工质量控制等实施依据。如果缺乏系统的规范或技术规程作为技术支撑,势必影响到装配式RC桥墩在实际工程中的推广应用。因此,推动装配式RC桥墩的标准化建设,是促进桥梁工业化施工的关键<sup>[64]</sup>。装配式RC桥墩和现浇桥墩在施工工艺、抗震设计方法存在根本性的差异,因此目前现浇桥墩的施工、设计规范不能直接套用到装配式RC桥墩。

美国AASHTO发布的*Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges*对装配式RC桥墩的设计和施工进行了一些规定,但近年来中国装配式桥墩的拼接构造与以往存在较大差异,需要进一步研究。在设计方面,《公路装配或混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05—2022)对不同连接方式(含钢筋灌浆套筒、钢筋灌浆波纹管、构件承插式、钢筋插槽式、湿接缝式、预应力钢筋等)的装配式混凝土桥墩的适用位置进行规定<sup>[8]</sup>,但尚未针对不同类型的装配式桥墩的适用范围进行规定;对采用灌浆套筒连接和承插式连接的装配式桥墩的构造要求进行规定,但未涉及其他类型的装配式桥墩;提出了装配式混凝土桥墩的结构计算方法,但尚未根据不同类型的装配式桥墩的拼接构造特征,提出相应的局部构造的极限承载力验算方法。在施工方面,《公路装配式混凝土桥梁施工技术规范》(JTG/T 3654—2022)对采用灌浆套筒连接、灌浆波纹管连接、预应力连接、湿接缝连接的装配式桥墩的施工工艺进行规定,尚未涉及其他类型的装配式桥墩。中国一些地区还发布了装配式RC桥墩的地方标准,如《四川省城市桥梁预制拼装桥墩生产、施工与质量验收技术标准》(DBJ51/T 120—2019);内蒙古《市政桥梁装配式混凝土结构施工及质量验收规程》(DBJ/T 03-86—2018)等标准对灌浆套筒、灌浆波纹管、预应力等连接方式做了相应的施工、验收要求;上海《预制拼装桥墩技术规程》(DG/TJ 08-2160—2015)、山东省《城市轨道交通桥墩预制拼装技术规程》(DB37/T 5100—

2017)、吉林省《装配式混凝土桥墩技术标准》(DB22/T 5013—2018)、广东省《装配式市政桥梁工程技术规范》(DBJ/T 15-169—2019)等标准,对不同连接方式(含灌浆套筒、灌浆波纹管、预应力等连接)提出装配式RC桥墩的抗震设计、施工、验收等要求。相关研究可为装配式桥墩在实际工程的推广应用提供参考借鉴,但其内容尚未全面涉及在实际工程中已得到应用的各种类型的装配式桥墩,有待进一步补充完善。

### 4 存在问题与未来研究方向

2020年7月3日,住房和城乡建设部等部门联合印发了《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》,为桥梁工程建造指明了方向。桥梁工业化及智能建造是建筑业转型升级的重要组成部分,加快桥梁工业化升级、装配式构造创新、BIM技术的全过程实施,有助于形成设计、生产、施工、服务一体的产业链体系。

大量工程实践证明,跨海桥梁、城市桥梁采用装配式RC桥墩,可明显缩短建造周期,减少现场作业和劳动力数量,且对城市现状交通、生态环境的影响较小,符合中国建筑行业目前提倡的建筑工业化、智能建造的发展方向。一般情况下,装配式RC桥墩的造价会略高于现浇桥墩,但是当桥梁长度达到5 km时,装配式RC桥墩和现浇桥墩两者的造价相当。

目前常用的装配式桥墩结构体系的拼接构造在结构耐久性、施工便利性、经济性、方便质量管控等方面均存在一定的提升空间。近年来随着装配式桥墩在实际工程的推广应用,大量工程建设者将进一步探讨在桥墩的拼接位置采用新型构造和新材料,提高拼接构造的受力性能和耐久性,并提升施工安全性和施工效率,现存的这些问题将随着装配式RC桥墩的持续性工程应用,逐步得到解决。

从工程设计角度,目前已经有一些关于装配式RC桥墩的技术手册或地方标准,对装配式RC桥墩起到一定的参考借鉴作用。然而,学者们对不同连接方式装配式RC桥墩的研究主要还聚焦在抗震性能上,且相关资料仍较为分散,缺乏系统的装配式RC桥墩的抗震能力的分析和抗震设计计算方法,如将其用于强震区,仍有很多关键性的技术问题有待解决。现有的研究对装配式RC桥墩的抗剪、抗压性能关注不多,有待进一步补充。为形成完整的装配式RC桥墩结构设计体系,从结构的全寿命周期考虑装配式桥墩的连接构造的可靠度和抗震性能,今后需要根据工程设计需求进一步开展系统性



的研究。

从工程管理的角度,采用灌浆套筒、灌浆波纹管进行主要受力钢筋连接的装配式RC桥墩,其灌浆数量巨大,相应的工程管理成本较大,目前灌浆套筒、灌浆波纹管等灌浆质量的检测方法主要有预埋传感器法、预埋钢丝拉拔法、超声波法、X射线法<sup>[65-66]</sup>,这些方法在实际运用上存在一定的问题,有待提出较好的灌浆质量的检测和评估方法,以及较为完善的质量控制标准和控制手段。因此,如何进行灌浆套筒、灌浆波纹管的灌浆质量管控,是今后采用灌浆套筒连接或灌浆波纹管连接等装配式RC桥墩需要解决的一个关键性问题。

此外,由于中国对基础建设的大力投资所带来的新的发展机遇,装配式RC桥墩在标准化设计、施工设备、智能建造技术、施工管理水平等方面均有望得到提升,相关产业配套也将进一步得到完善。已有研究表明:采用BIM技术可以有效提高桥梁的建造、养护、管理等一体化水平,无人机、机器人等智能检测技术也可以提高桥墩检测精度和效率,人工智能和5G技术的发展也为结构防灾减灾带来新的思路<sup>[67]</sup>。从结构的全寿命角度,装配式RC桥墩的建造成本和运营成本有望得到大幅下降,从而使装配式RC桥墩的工业化、标准化成为现实。

## 5 结论

1)灌浆套筒或灌浆波纹管连接的装配式RC桥墩属于“等同现浇”体系,在中国城市桥梁应用较多;后张预应力连接装配式RC桥墩属于“非等同现浇”体系,具有自复位能力较强、残余位移较小等优点,但是耗能能力相对较差,施工较复杂,在其他国家应用较多,在中国较为少见;“混杂型体系”已经在中国的一些跨海大桥得到应用。

2)采用榫卯和灌浆套筒混合连接的装配式RC桥墩,与采用灌浆套筒或灌浆波纹管连接的装配式RC桥墩相比,其施工便利性、受压性能、抗震性能均有所提升,但如何提高接缝的耐久性仍有待进一步研究;而采用榫卯和现浇UHPC混合连接的装配式RC桥墩,与采用榫卯和灌浆套筒混合连接的装配式RC桥墩相比,虽然在受力性能方面较为接近且可改善接缝的耐久性,但其接缝处的现浇UHPC养护时间较长,在施工便利性方面不占优势。

3)在装配式桥墩的受力性能研究和结构设计方面,既有研究大多集中于桥墩的抗震性能的研究,但涉及桥墩的抗压、抗剪承载力等试验研究较为少见;《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05—2022)等规范对装配式桥墩的结构计

算、构造要求进行规定,但尚未根据不同类型的装配式桥墩的拼接构造特征,提出相应的局部构造的极限承载力验算方法、构造要求、适用范围,有待进一步补充完善。

4)在施工与质量管控方面,装配式RC桥墩的连接构造复杂,套筒或波纹管的灌浆质量直接影响桥墩的受力性能。在进行桥墩的拼接施工时,桥墩拼接面的密贴程度、粘结剂的饱满程度以及桥墩的垂直度等,对桥墩的承载力也有一定的影响。《公路装配式混凝土桥梁施工技术规范》(JTG/T 3654—2022)仅针对部分类型的装配式桥墩的施工和质量验收要求进行规定,有待进一步补充完善。随着建筑信息化、智能化的技术发展,将BIM技术、机器人智能检测、人工智能、5G技术等合理运用到装配式RC桥墩的施工,实现施工质量的有效管控,是今后重要的发展方向。

## 参考文献

- [1] 交通运输部. 2021年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2022-05-25.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. 2021 Statistical Bulletin on the Development of the Transportation Industry [N]. China Communications News, 2022-05-25. (in Chinese).
- [2] AMELI M J, PARKS J E, BROWN D N, et al. Seismic evaluation of grouted splice sleeve connections for reinforced precast concrete column-to-cap beam joints in accelerated bridge construction [J]. PCI Journal, 2015, 60(2): 80-103.
- [3] 张鸿, 张喜刚, 丁峰, 等. 短线匹配法节段预制拼装桥梁新技术研究[J]. 公路, 2011, 56(2): 76-82.  
ZHANG H, ZHANG X G, DING F, et al. Research on new technology of segment prefabricated assembled bridge by short line matching method [J]. Highway, 2011, 56(2): 76-82. (in Chinese)
- [4] BILLINGTON S L, BARNES R W, BREEN J E. Alternate substructure systems for standard highway bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(2): 87-94.
- [5] BILLINGTON S L, BARNES R W, BREEN J E. A precast segmental substructure system for standard bridges [J]. PCI Journal, 1999, 44(4): 56-73.
- [6] 王景全, 王震, 高玉峰, 等. 预制桥墩体系抗震性能研究进展: 新材料、新理念、新应用[J]. 工程力学, 2019, 36(3): 1-23.  
WANG J Q, WANG Z, GAO Y F, et al. Review on aseismic behavior of precast piers: New material, new concept, and new application [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3): 1-23. (in Chinese)

- [7] LIU H T, CHEN J N, XU C S, et al. Seismic performance of precast column connected with grouted sleeve connectors [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 31: 101410.
- [8] 公路装配式混凝土桥梁设计规范: JTG/T 3365-05—2022 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2022.  
Specifications for design of highway precast concrete bridges: JTG/T 3365-05—2022 [S]. Beijing: China Communications Press, 2022. (in Chinese)
- [9] 公路装配式混凝土桥梁施工技术规范: JTG/T 3654—2022 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2022.  
Specifications for construction of highway precast concrete bridges: JTG/T 3654—2022 [S]. Beijing: China Communications Press, 2022. (in Chinese)
- [10] 项贻强, 竺盛, 赵阳. 快速施工桥梁的研究进展[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(12): 1-27.  
XIANG Y Q, ZHU S, ZHAO Y. Research and development on accelerated bridge construction technology [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(12): 1-27. (in Chinese)
- [11] KHAN M A. Accelerated bridge construction: Best practice and techniques [M]. Boston: Elsevier, 2014.
- [12] KIM D H, MOON D Y, KIM M K, et al. Experimental test and seismic performance of partial precast concrete segmental bridge column with cast-in-place base [J]. *Engineering Structures*, 2015, 100: 178-188.
- [13] 吴伟胜, 王仁贵, 王梓夫. 杭州湾跨海大桥高墩区引桥总体及上部结构设计[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会 2005 年全国桥梁学术会议论文集. 杭州, 2005: 68-74.  
WU W S, WANG R G, WANG Z F. The overall and superstructure design of the Hangzhou Bay Cross-sea Bridge's approach bridge in the high pier area [C]// Proceedings of the 2005 National Bridge Academic Conference of the Bridge and Structural Engineering Branch of the China Highway Society, 2005: 68-74. (in Chinese)
- [14] 郭熙冬. 港珠澳大桥承台墩身工厂化预制施工技术[J]. *桥梁建设*, 2014, 44(2): 107-111.  
GUO X D. Construction techniques for factory precasting of pile caps and pier shafts of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge [J]. *Bridge Construction*, 2014, 44(2): 107-111. (in Chinese)
- [15] EINEA A, YAMANE T, TADROS M K. Grout-filled pipe splices for precast concrete construction [J]. *PCI Journal*, 1995, 40(1): 82-93.
- [16] 姜海西, 王志强, 沈佳伟. 灌浆金属波纹管连接预制拼装立柱抗震性能试验研究[J]. *结构工程师*, 2016, 32(5): 132-138.  
JIANG H X, WANG Z Q, SHEN J W. Anti-seismic performance testing of prefabricate assembly Pillars connected with grouting metal corrugated pipe [J]. *Structural Engineers*, 2016, 32(5): 132-138. (in Chinese)
- [17] 徐艳, 曾增, 王志强, 等. 承插式桥墩连接构造及其力学行为的研究进展[J]. *土木工程学报*, 2023, 56(1): 90-108.  
XU Y, ZENG Z, WANG Z Q, et al. Research progress on connection structure and mechanical behavior of socket-and-socket piers[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(1): 90-108. (in Chinese)
- [18] 林上顺, 林永捷, 夏樟华, 等. 不同拼接构造的装配式圆柱墩偏压性能试验[J]. *工业建筑*, 2022, 52(4): 91-97.  
LIN S S, LIN Y J, XIA Z H, et al. Experimental research on mechanical properties of prefabricated cylindrical piers with different splicing structures under eccentric compression [J]. *Industrial Construction*, 2022, 52(4): 91-97. (in Chinese)
- [19] 杨切. 灌浆套筒混合连接装配式圆柱墩受压性能试验研究[D]. 福州: 福州大学, 2020  
YANG Q. Experimental study on compressive performance of grouting sleeve hybrid connection assembled cylindrical pier [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2020. (in Chinese)
- [20] 欧智菁, 谢铭勤, 秦志清, 等. 带钢管剪力键的装配式混凝土桥墩抗震性能[J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(6): 1169-1175, 1191.  
OU Z J, XIE M Q, QIN Z Q, et al. Seismic performance test and FEM analysis of assembled concrete pier with sleeve and steel tube shear connector [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2021, 56(6): 1169-1175, 1191. (in Chinese)
- [21] 张乐彤. 采用混合接头的装配式方柱墩受压性能试验研究[D]. 福州: 福州大学, 2020.  
ZHANG L T. Experimental study on compression performance of square column pier assembled with grouting sleeve and built-in steel pipe shear connector [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2020. (in Chinese)
- [22] 林长庚. 榫卯连接装配式 RC 桥墩抗震性能研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2021.  
LIN C G. Study on seismic behavior of prefabricated RC bridge piers joined on tenon and mortise [D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [23] 葛继平, 闫兴非, 王志强. 2 段式预制拼装预应力混凝土桥墩的抗震性能[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(11): 2390-2398.  
GE J P, YAN X F, WANG Z Q. Seismic performance analysis of two-segment bridge columns with prestressing bars [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(11): 2390-2398. (in Chinese)
- [24] MANDER J B, CHENG C T. Seismic design of bridge columns based on control and reparability of damage [R]. Technical Rep NCEER-97-0013, National Center for

- Earthquake Engineering Research, Buffalo, State University of New York, 1997.
- [25] PALERMO A, PAMPANIN S, MARRIOTT D. Design, modeling, and experimental response of seismic resistant bridge piers with posttensioned dissipating connections [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133(11): 1648-1661.
- [26] OU Y C, WANG P H, TSAI M S, et al. Large-scale experimental study of precast segmental unbonded post-tensioned concrete bridge columns for seismic regions [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(3): 255-264.
- [27] OU Y C, TSAI M S, CHANG K C, et al. Cyclic behavior of precast segmental concrete bridge columns with high performance or conventional steel reinforcing bars as energy dissipation bars [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 39(11): 1181-1198.
- [28] BU Z Y, GUO J, ZHENG R Y, et al. Cyclic performance and simplified pushover analyses of precast segmental concrete bridge columns with circular section [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2016, 15(2): 297-312.
- [29] HEWES J T, PRIESTLEY M J N. Seismic design and performance of precast concrete segmental bridge columns [R]. San Diego: University of California at San Diego, 2002.
- [30] YAMASHITA R, SANDERS D H. Seismic performance of precast unbonded prestressed concrete columns [J]. *ACI Structural Journal*, 2009, 106(6): 821-830.
- [31] 程麦理, 马静, 杨红霞. 预应力拼装桥墩工作机制及抗震性能研究[J]. *中国科技论文*, 2018, 13(13): 1533-1538.
- CHENG M L, MA J, YANG H X. Evaluation of working mechanism and seismic performance of prestressed assembled piers [J]. *China Sciencepaper*, 2018, 13(13): 1533-1538. (in Chinese)
- [32] 林上顺, 夏樟华, 赵凌志, 等. 预制拼装PC箱形墩双向拟动力试验研究[J]. *桥梁建设*, 2019, 49(5): 33-38.
- LIN S S, XIA Z H, ZHAO L Z, et al. Bidirectional pseudo-dynamic test of precast and assembled prestressed concrete box pier [J]. *Bridge Construction*, 2019, 49(5): 33-38. (in Chinese)
- [33] 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.
- [34] KIM T H, LEE H M, KIM Y J, et al. Performance assessment of precast concrete segmental bridge columns with a shear resistant connecting structure [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(5): 1292-1303.
- [35] 葛继平, 魏红一, 王志强. 循环荷载作用下预制拼装桥墩抗震性能分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(7): 894-899.
- GE J P, WEI H Y, WANG Z Q. Seismic performance of precast segmental bridge column under cyclic loading [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(7): 894-899. (in Chinese)
- [36] 葛继平, 王志强. 干接缝节段拼装桥墩振动台试验研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(9): 122-128.
- GE J P, WANG Z Q. Shake table tests of segmental bridge columns with match-cast dry joints [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(9): 122-128. (in Chinese)
- [37] 王军文, 张伟光, 艾庆华. PC与RC空心墩抗震性能试验对比[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(4): 76-85.
- WANG J W, ZHANG W G, AI Q H. Comparative experiment on seismic performance of PC and RC hollow piers [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(4): 76-85. (in Chinese)
- [38] 包龙生, 王贺鑫, 汤维维, 等. 采用榫卯剪力键的预应力装配式双柱桥墩拟静力分析[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(4): 692-702.
- BAO L S, WANG H X, TANG W W, et al. Pseudo static analysis of assembly type double column pier based on ABAQUS [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2018, 34(4): 692-702. (in Chinese)
- [39] PANG J B K, EBERHARD M O, STANTON J F. Large-bar connection for precast bridge bents in seismic regions [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2010, 15(3): 231-239.
- [40] 贾俊峰, 郭扬, 宋年华, 等. 基于灌浆波纹管锚固连接的预制拼装RC墩柱抗震试验[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(12): 211-220.
- JIA J F, GUO Y, SONG N H, et al. Seismic testing of precast RC bridge pier columns anchored by grouted corrugated ducts [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(12): 211-220. (in Chinese)
- [41] 葛继平, 夏樟华, 江恒. 灌浆波纹管装配式桥墩双向拟静力试验[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(12): 221-230, 266.
- GE J P, XIA Z H, JIANG H. Biaxial quasi-static experiment of precast segmental bridge piers with grouting corrugated pipe connection [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(12): 221-230, 266. (in Chinese)
- [42] 夏樟华, 余舟扬, 葛继平, 等. 灌浆波纹管装配式PC双柱墩双向拟静力试验[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(1): 93-103.
- XIA Z H, YU Z Y, GE J P, et al. Bi-axial quasi-static experiment for assembled double-column piers with grouting metal corrugated pipe and prestressed tendons [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(1): 93-103. (in Chinese)



- [43] 包龙生, 张远宝, 桑中伟, 等. 波纹管连接装配式桥墩抗震性能拟静力试验与数值模拟[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 242-249.  
BAO L S, ZHANG Y B, SANG Z W, et al. Quasi-static test and numerical simulation analysis for seismic performance of fabricated assemble bridge piers base on bellows connection [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 242-249. (in Chinese)
- [44] 王浩, 柳家为, 石棚, 等. 钢筋-金属波纹管灌浆连接的锚固性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(2): 215-221.  
WANG H, LIU J W, SHI P, et al. Experimental study on anchorage performance of rebar-corrugated metal duct for grout splicing [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(2): 215-221. (in Chinese)
- [45] 柳家为, 王浩, 沙奔, 等. 钢筋与波纹管约束灌浆料的粘结-滑移本构关系试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(6): 818-824.  
LIU J W, WANG H, SHA B, et al. Experimental study on the bond-slip constitutive relationship between rebar and corrugated duct confined grouting [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(6): 818-824. (in Chinese)
- [46] 石棚, 王浩, 柳家为, 等. 钢筋插入式波纹管浆锚连接受力性能数值分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(6): 810-817.  
SHI P, WANG H, LIU J W, et al. Numerical analysis of anchorage properties of grouting connection of pre-buried bellows with steel bars inserted [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(6): 810-817. (in Chinese)
- [47] 王志强, 卫张震, 魏红一, 等. 预制拼装联接件形式对桥墩抗震性能的影响[J]. 中国公路学报, 2017, 30(5): 74-80.  
WANG Z Q, WEI Z Z, WEI H Y, et al. Influences of precast segmental connector forms on seismic performance of bridge pier [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(5): 74-80. (in Chinese)
- [48] 葛继平, 闫兴非, 王志强. 机械套筒连接的轨道交通预制拼装桥墩抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(6): 143-153.  
GE J P, YAN X F, WANG Z Q. Seismic performance analysis of rail transit segmental bridge columns with mechanical splices [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(6): 143-153. (in Chinese)
- [49] MATSUMOTO E E. Emulative precast bent cap connections for seismic regions: Component tests-cap pocket full ductility specimen (unit 3) [R]. Sacramento: California State University, 2009.
- [50] XU W J, MA B, DUAN X Z, et al. Experimental investigation of seismic behavior of UHPC connection between precast columns and footings in bridges [J]. Engineering Structures, 2021, 239: 112344.
- [51] WHITE S, PALERMO A. Quasi-static testing of posttensioned nonemulative column-footing connections for bridge piers [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(6): 04016025.
- [52] CANHA R, CAMPOS G M, DEBS M K E. Design model and recommendations of column-foundation connection through socket with rough interfaces [J]. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2012, 5(2): 182-218.
- [53] CAMPOS G M, CANHA R M F, M KELDEBS, et al. Design of precast columns bases embedded in socket foundations with smooth interfaces [J]. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2011, 4(2): 304-323.
- [54] HARALDSSON O S, JANES T M, EBERHARD M, et al. Seismic resistance of socket connection between footing and precast column [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18: 910-919.
- [55] 徐艳, 曾增, 葛继平, 等. 承插式预制拼装桥墩的最小合理承插深度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 1706-1711.  
XU Y, ZENG Z, GE J P, et al. Minimum reasonable socket depth of precast pier-footing with socket connection [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(12): 1706-1711. (in Chinese)
- [56] 孙贵清, 王志刚, 曾增, 等. 公路桥装配式桥墩承插式连接的桩基承台研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(3): 81-85.  
SUN G Q, WANG Z G, ZENG Z, et al. Study of socket connection between modular piers and pile caps for highway bridge [J]. Bridge Construction, 2020, 50(3): 81-85. (in Chinese)
- [57] 樊泽, 曾明辉, 胡志坚. 预制拼装桥墩连接构造抗震性能分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(2): 357-362.  
FAN Z, ZENG M H, HU Z J. Seismic performance analysis of precast segmental bridge piers connection configuration [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 43(2): 357-362. (in Chinese)
- [58] SIDERIS P, AREF A J, FILIATRAULT A. Quasi-static cyclic testing of a large-scale hybrid sliding-rocking segmental column with slip-dominant joints [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(10): 04014036.
- [59] WANG Z Q, QU H, LI T, et al. Quasi-static cyclic tests of precast bridge columns with different connection details for high seismic zones [J]. Engineering Structures, 2018, 158: 13-27.
- [60] 邱发强, 夏樟华, 朱三凡, 等. 预应力灌浆波纹管预制拼装桥墩抗震性能分析[J]. 地震工程与工程振动,

- 2018, 38(1): 144-153.
- QIU F Q, XIA Z H, ZHU S F, et al. Seismic performance analysis of prestressing prefabricated bridge piers with grouting bellows [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(1): 144-153. (in Chinese)
- [61] 葛继平, 闫兴非, 王志强. 灌浆套筒和预应力筋连接的预制拼装桥墩的抗震性能[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(2): 42-52.
- GE J P, YAN X F, WANG Z Q. Seismic performance of prefabricated assembled pier with grouted sleeve and prestressed reinforcements [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(2): 42-52. (in Chinese)
- [62] 钱辉, 叶晨阳, 李宗翱, 等. 自复位承插式多节段预制桥墩抗震性能数值模拟[J]. 土木工程学报, 2020, 53(Sup2): 301-308.
- QIAN H, YE C Y, LI Z A, et al. Numerical simulation on seismic performance of re-centering socketed segmental precast pier [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Sup2): 301-308. (in Chinese)
- [63] 钱辉, 叶晨阳, 李宗翱, 等. 自复位承插式多节段预制桥墩抗震性能理论分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(1): 35-43.
- QIAN H, YE C Y, LI Z A, et al. Theoretical analysis on seismic performance of re-centering socketed segmental precast pier [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(1): 35-43. (in Chinese)
- [64] 来猛刚, 杨敏, 翟敏刚, 等. 桥梁工业化智能建造[J]. 公路, 2021, 66(7): 195-202.
- LAI M G, YANG M, ZHAI M G, et al. Industrialized intelligent construction of bridge [J]. Highway, 2021, 66(7): 195-202. (in Chinese)
- [65] 杜永峰, 杜进府. 基于压电波动法的套筒灌浆质量缺陷识别研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(9): 49-55.
- DU Y F, DU J F. Research on recognition of sleeve grouting quality defects based on piezoelectric wave method [J]. Building Structure, 2021, 51(9): 49-55. (in Chinese)
- [66] 渠明, 邵志伟, 赵伟涛, 等. 灌浆套筒构件密实度超声波层析成像无损检测研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(9): 207-215.
- QU M, SHAO Z W, ZHAO W T, et al. Research on nondestructive testing of grouting sleeve members by ultrasonic tomography [J]. Industrial Construction, 2021, 51(9): 207-215. (in Chinese)
- [67] 勾红叶, 杨彪, 华辉, 等. 桥梁信息化及智能桥梁2019年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 14-27.
- GOU H Y, YANG B, HUA H, et al. State-of-the-art review of bridge informatization and intelligent bridge in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 14-27. (in Chinese)

(编辑 胡玲)