

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.232



# 预制装配式混凝土桥梁结构 2020 年度研究进展

许子宜<sup>a</sup>, 张子颀<sup>a</sup>, 徐腾飞<sup>a,b</sup>

(西南交通大学 a. 桥梁工程系; b. 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031)

**摘要:** 预制装配式桥梁凭借施工质量好、对环境的影响小、现场作业时间短、施工安全水平高等优势, 已成为桥梁建设的重要发展方向。预制装配式混凝土桥梁既适合于交通复杂的城市道路桥梁, 也适合于施工环境艰苦的铁路桥梁建设。通过文献调研的方式, 梳理 2020 年度国内外预制装配式混凝土桥梁的研究进展。根据桥梁结构类型, 从上部结构与下部结构两个方面论述了该领域内的新技术、新构造以及典型工程应用。经过粗略总结, 在上部结构中, 节点的连接构造、抗裂性能与耐久性得到了学者的广泛关注; 在下部结构中, 随着预制装配式体系在高烈度地震区桥梁中的应用, 预制装配式桥墩的构造与抗震性能是目前的研究热点。下部结构的耐久性与抗裂性能仍有待提升。

**关键词:** 预制装配桥梁; 装配式桥墩; 装配式桥面; 桥梁快速建设

**中图分类号:** U443      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0288-09

## State-of-the-art review of prefabricated concrete bridge structures in 2020

XU Ziyi<sup>a</sup>, ZHANG Ziyang<sup>a</sup>, XU Tengfei<sup>a,b</sup>

(a. Department of Bridge Engineering; b. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

**Abstract:** Prefabricated bridges have become an important development direction of bridge construction due to the advantages of good construction quality, low impact on the environment, short on-site operation time, and high level of construction safety. Prefabricated concrete bridges are not only suitable for urban road bridges with complex traffic, but also for railway bridges in difficult construction environments. This paper sorts out the research progress of prefabricated concrete bridges at home and abroad in 2020 through the method of literature analysis. According to the types of bridge structure, new technologies, new structures and typical engineering applications in this field are discussed from two aspects: the upper structure and the lower structure. After a rough summary in this article, in the superstructure, the connection structure, crack resistance and durability of the nodes have received extensive attention from scholars; in the substructure, as the prefabricated system is applied to the bridge in the high-intensity earthquake area, the structure and seismic performance of prefabricated bridge piers are currently hot research topics. The durability and crack resistance of the substructure still need to be improved.

**Keywords:** prefabricated bridge; fabricated pier; fabricated deck; accelerated bridge construction

随着中国桥梁施工技术的进步, 预制装配式桥梁凭借施工质量好、对环境的影响小、现场作业时间短、施工安全水平高等优势, 已成为中国桥梁建设的重要发展方向。预制装配式混凝土桥梁也成为桥梁工程的新热点。预制装配式混凝土桥梁既适合于交通复杂的城市道路桥梁, 也适合于施工环境艰苦的铁路桥梁建设。

笔者通过文献调研的方式, 梳理 2020 年度国内外预制装配式混凝土桥梁的研究进展。预制构件的连接形式和构造是预制拼装结构设计的核心环节, 是其区别于传统现浇结构的典型特征。预制构件的连接形式与构造设计既要考虑连接构件的可靠性与安全性, 也要考虑连接施工的便利性与连接构造的耐久性, 甚至还需要考虑预制构件的运输条件与

**收稿日期:** 2021-08-18

**基金项目:** 国家自然科学基金(51708466、51778535)

**作者简介:** 许子宜(1986-), 男, 博士生, 主要从事装配式桥梁结构抗震性能研究, E-mail: 333310313@163.com。

徐腾飞(通信作者), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, E-mail: tengfeixu@swjtu.edu.cn。

安装设备、场地需求等。根据桥梁结构类型,将预制装配混凝土桥梁研究分为:桥墩与上部结构的预制装配两部分。在上部结构的预制装配中,介绍了上部结构连接的新形式、上部结构预制拼装连接的强度、上部结构预制拼装连接的正常使用性能、上部结构预制拼装连接的耐久性等内容。在桥墩的预制装配中,介绍了预制装配桥墩柱的强度、预制装配桥墩的正常使用性能、预制装配桥墩柱的耐久性等内容。借此,希望可以为广大同行开展相关研究工作提供参考与思路,期待预制装配桥梁得到更合适、更广泛的应用。

## 1 上部结构的预制装配

### 1.1 上部结构预制拼装连接的新形式与新构造

预制装配式混凝土桥梁由于其施工快速便捷、环境干扰小、工程质量较高等优点在桥梁中得到了广泛应用。上部结构连接对装配式混凝土桥梁的各项性能影响显著,是上部结构预制装配的研究重点。

Peng 等<sup>[1]</sup>针对中小跨径桥梁,提出了一种一体化的预制钢-混凝土组合梁桥,这种组合梁桥梁单元横截面如图 1 所示。对横截面的 6 个单元进行横向整体预制,如图 2 所示。横向连接需要考虑 6 个预制单元,包括混凝土板构件和工形钢梁构件。其中混凝土板可通过湿接缝进行连接,钢梁构件采用钢横梁连接以保证其稳定。研究发现,这种预制钢-混凝土组合梁的力学性能和施工工艺皆优于传统的分离式预制钢-混凝土组合梁。

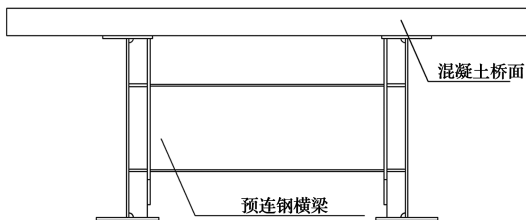


图 1 预制组合梁单元

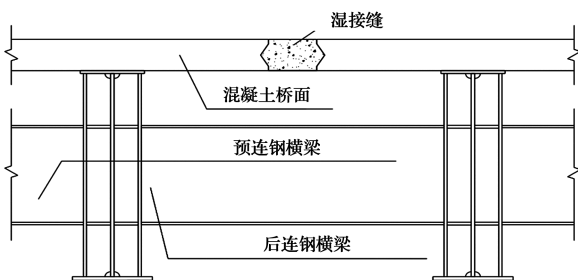


图 2 预制单元的横向连接

木-混凝土组合梁的剪力连接件,可分为销连接与凹槽连接两类。销连接延性好,但抗滑移刚度较低;凹槽连接抗滑移刚度,但延性较差。这两类连接件在性能上各自存在不足。针对现有凹槽连接件与销连接件性能上的不足,单波等<sup>[2]</sup>提出了一种如图 3 所示的螺杆外包活性粉末混凝土的装配式复合连接件。这种连接件分为上下两部分:上部嵌入预制混凝土板中,下部插入胶合竹梁内。在图 4 所示的组合

体系中,上部预制混凝土板和下部胶合竹梁的对应部位分别预留或钻取安装孔道。研究表明,相比于凹槽连接件和销连接件,复合连接件的单位面积受力更高,复合连接件的抗滑移刚度显著提高。复合连接件结合了凹槽连接高刚度与销连接高延性的优点,且便于现场装配,在性能上具有突出优势。

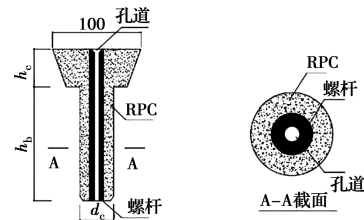


图 3 RPC-钢复合剪力连接件

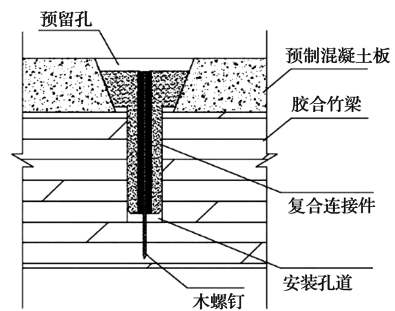
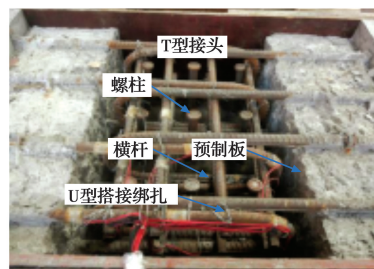


图 4 胶合竹梁与预制混凝土板组合体系

Di 等<sup>[3]</sup>设计了如图 5 所示的两种新型 U 型杆接头:带不锈钢系带的矩形接头和 T 形接头。通过实验和数值模拟的方法研究了四种弯剪力组合接头件的力学性能。T 形接头的细节有效地增加了裂纹荷载,控制了界面裂纹的发展。这四个接头细节部分的承载力也很相似。同时,提出了一种 T 形 U 型钢筋搭接接头试样承载力的估算公式,并验证了其准确性。



(a) 不锈钢绑扎的矩形接头



(b) T形接头

图 5 新型 U 型杆接头

上述新型连接工艺的使用,扩大了预制装配式桥梁的使用范围。但是在复杂服役环境下,连接装置或构造的性能退化与控制措施还需深入研究。

## 1.2 上部结构预制拼装连接的强度

保证预制拼装连接具有足够的强度是预制拼装桥梁性能的基本要求。预制拼装连接的强度又与连接构造形式密切相关。

螺栓连接器作为一种后期安装的剪切连接器,可应用于钢混组合结构中,实现钢梁与混凝土的干式连接,减少后期现浇工作量,加速桥梁建设速度, Yang 等<sup>[4]</sup>制作并测试了如图 6 所示的十个螺栓剪切连接器的推出试件,研究了多螺栓连接器的布置形式、螺栓的间距以及钢筋混凝土局部加强对剪切性能的影响。实验结果表明,螺栓连接器的剪力滑移曲线呈现出三个阶段的变化特性。同时,与具有单排螺栓的推出试件相比,有两排和三排螺栓连接器的试件其每个螺栓的平均极限抗剪强度均有一定的下降。因此,提出了一种考虑多螺栓效应的、适用于 M16 螺栓抗剪连接器的极限抗剪承载力的计算方法,抗剪承载力的计算值与实验结果吻合较好。

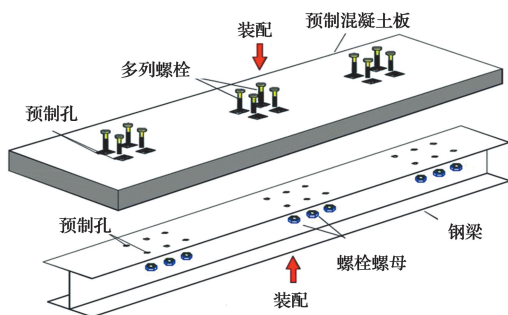


图 6 预制钢-混凝土组合梁的多螺栓剪切连接

姚志立等<sup>[5]</sup>为了改善装配式 UHPC 桥梁接缝处由于钢纤维不连续易开裂受损的问题,提出如图 7 所示的 UHPC 湿接缝方案并进行了优化及受力性能研究。研究表明,接缝梁的受弯性能均低于完整梁。接缝梁中,焊接的上下条带菱形接缝梁的刚度最高、抗裂缝发展性能最强、综合受弯性能最优,其次是未焊接上下条带菱形接缝梁、上下条带接缝梁、菱形接缝梁和直接接缝梁。

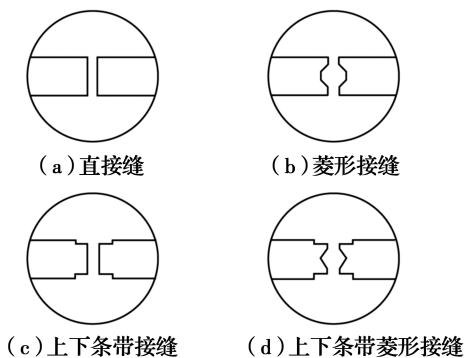


图 7 UHPC 湿接缝构造<sup>[4]</sup>

预制的钢混组合梁缩短了其施工时间,并使其易于组装和局部修复,使用高应力摩擦螺栓抗剪连接件可以大大提高

基础设施的可持续性。然而,对混凝土-钢摩擦性能的研究却十分有限。Guo 等<sup>[6]</sup>开展了 21 组试验,研究螺栓-剪力连接的极限承载力和荷载-滑移特性,建立了有效的有限元模型,通过试验验证了有限元模型的正确性。结果表明:混凝土强度与摩擦系数呈正相关,喷丸钢的性能较好;高强度摩擦螺栓的承载力比双头螺栓低 30%,但强度储备和抗拔性能比双头螺栓好。

赵辛玮等<sup>[7]</sup>提出采用常温养护型超高性能混凝土,并采用足尺试验和模拟方法对钢-常温养护型超高性能混凝土组合桥面板进行了研究,发现组合桥面板的变形在 NC-UHPC 龄期 28 天左右时已趋于稳定,但常温养护型超高性能混凝土收缩对桥面板的边侧剪力键产生了不利影响。贺欣怡等<sup>[8]</sup>设计了无配筋超高性能混凝土作铺装层的桥面板,并对其进行了受弯加载试验,认为采用胶接方式施工更方便;且桥面板延性较好,承载力高,即使存在钢板表面处理不当的情况也能保证钢-混凝土之间的有效黏结。为提高组合桥面板的协同受力性能,蔡文平<sup>[9]</sup>提出了一种基于钢管连接件的新型钢-UHPC 组合桥面板结构,分析了抗剪连接件厚度、屈服强度以及 UHPC 抗压强度对抗剪承载能力和刚度的影响。该新型组合桥面板的破坏模式为钢管内与管外混凝土发生剪切破坏,抗剪能力随钢管壁厚和强度的增大呈线性增长。

侯和涛等<sup>[10]</sup>提出了一种新型全装配钢-混凝土组合梁,该组合梁由钢梁和预制板通过抗剪连接件组合为一体;并开展了试验研究和抗剪承载力计算,研究了不同钢导槽形式、循环加载及紧固件数量对组合梁抗剪性能的影响。

如图 8 所示,采用预制桥面板和集簇式栓钉连接的装配式钢-混组合梁桥,可以使用大块预制桥面板,以减少现浇工序,加快施工速度。为研究剪力槽孔间距及剪力钉数量对组合梁共同工作程度的影响,邵林海等<sup>[11]</sup>制作了 4 片采用不同簇钉群连接参数的钢-混组合箱梁,进行了抗弯弹性全过程加载试验,研究了剪力连接度对组合梁结构受力性能的影响。结果表明:当组合梁剪力连接度由 1 降低到 0.65 时,组合梁受弯承载力减少 17%;当组合梁剪力连接度大于 1 时,受弯承载力基本未增加,而结构延性有所下降。在界面滑移方面,随剪力连接度增大,界面滑移量则明显减少。在破坏模式方面,剪力连接度越大,预制混凝土板的纵向劈裂及局部压溃成为破坏控制条件;反之,栓钉剪断及钢梁破坏易成为结构失效控制条件。

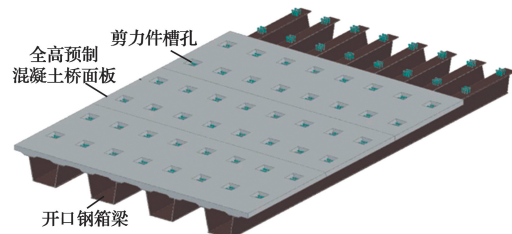


图 8 采用簇钉群连接的装配式钢-混组合箱梁构造

随着高性能混凝土、高强度钢材以及新型结构胶水的发展,传统的连接构造得到了增强,一些新型连接构造得以实

现,构件的耐久性也得到了增强。但是,目前对于这些新材料节点的耐久性研究仍然匮乏,是下一步研究的重点。

### 1.3 上部结构预制拼装连接的正常使用寿命性能

桥梁的正常使用寿命性能对桥梁的安全性和全寿命周期成本有着显著的影响。随着城市交通量和桥梁工作年限的日益增长,桥梁的正常使用寿命性能会发生退化,不再满足安全性、适用性和耐久性的要求。如何使桥梁在全寿命周期内保持正常使用寿命性能,提高桥梁的安全性和适用性是目前学术界的一个研究方向。

预应力连接的预制混凝土桥面板具有结构简单、施工快速、适应范围广等特点,目前在工程领域中得到了广泛的应用,但是预应力连接的预制桥面板受施工工艺和环境条件的影响较大。因此,已有部分学者对预应力连接的预制桥面板展开了相应的研究。

Al-Rousan<sup>[12]</sup>研究了在不同的预应力水平下,全高度预制混凝土桥面板系统的有限元分析结果。研究发现,有限元分析与原型桥结果较为吻合;全高度预制混凝土桥面板能够在 8 倍 AASHTO 荷载下保持其完整性,而不会显著降低其最终强度和刚度;6 束钢绞线连接的桥面板粘结力与 4 束钢绞线相比提升不大。Honarvar 等<sup>[13]</sup>研究了预制预应力混凝土梁的温度梯度随区域和气象季节的变化关系,测量了承受静力荷载和预应力荷载的预制预应力混凝土梁的挠度与应力,并给出了相应的修正系数。

为了研究波形钢腹板的剪切变形和箱梁的剪力滞效应对波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥自振特性的影响,冀伟等<sup>[14]</sup>运用势能驻值原理推导出了如图 9 所示的波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥的单元刚度矩阵。通过建模,对波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥自振频率的影响因素进行了分析。结果表明,钢底板的厚度对竖向基频的影响较大,而波形钢腹板的厚度对竖向基频的影响较小;随着自振频率阶数的升高,钢底板的厚度对自振频率的影响程度依次减弱,而波形钢腹板的厚度对自振频率的影响程度依次增强。

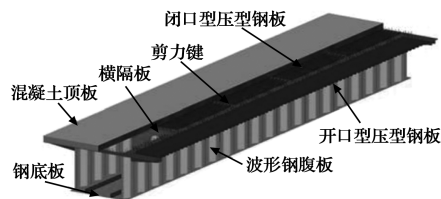


图 9 波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥

### 1.4 上部结构预制拼装连接的耐久性

目前的桥梁设计中考虑强度多而考虑耐久性少,重视桥梁的建造而不重视桥梁使用过程中的维护;而在桥梁整个生命周期中最重要的却恰恰是桥梁结构的耐久性。桥梁的耐久性差会导致结构使用性能差、使用寿命短的不良后果,这也与国际结构工程界日益重视耐久性、安全性、适用性的趋势相违背。2020 年,有部分学者针对上部结构预制拼装连接的耐久性展开了研究。

Yuen 等<sup>[15]</sup>针对后张预应力混凝土预制拼装桥梁由于桥

体老化、维护不当以及桥面板收缩不当等引起的劣化可能会导致预应力变化的问题展开了研究。研究表明,预应力变化会显著影响结构性能。他们提出了一种三维离散有限元模型,并通过实验结果验证了其整体荷载-挠度行为和局部响应。然后,采用验证模型来研究预应力变化对预制拼装桥梁响应和破坏行为的影响。项贻强等<sup>[16]</sup>研究了钢混组合梁在疲劳荷载下的剩余承载力退化规律,通过考虑不同疲劳荷载后退化为非完全抗剪结构的剩余极限承载力计算模型,建立了组合梁在常幅疲劳荷载下的剩余承载力预测计算方法,并通过试验验证了该方法的有效性。经过参数分析,得到了以下结论:疲劳加载下栓钉退化最快,混凝土板退化最慢;承载力退化速率随着加载次数的增加而不断增加,前期呈线性分布,后期呈指数型分布;栓钉间距、栓钉初始缺陷、荷载幅值是控制疲劳承载力退化的重要因素,需在工程设计中加以控制,以满足桥梁正常运营。针对现行规范中无法计算钢-混凝土组合梁在疲劳后的剩余承载力问题,汪炳等<sup>[17]</sup>提出了考虑多组件疲劳损伤的组合梁剩余承载力的计算方法。基于材料剩余强度理论,建立了完全抗剪连接和部分抗剪连接两种情形下的组合梁剩余承载力计算方法,并通过试验验证了该方法的有效性。研究结果表明,在疲劳荷载作用下,组合梁的抗剪连接度逐渐降低,剩余承载力退化明显且不可忽略。

钢混组合梁可以充分发挥两种材料的受力特性,从而达到材料耗费少、结构整体性强、施工快速的特点,目前已经在众多桥梁上得到了应用。但是组合梁的负弯矩区一直是影响组合梁服役寿命的重要问题。因此,部分学者提出了一些新的计算方法和新的设计以减小负弯矩区对组合梁整体寿命的影响。

Mager 等<sup>[18]</sup>通过全预制构件组合梁与现浇板组合梁以及部分预制构件组合梁的对比,针对全预制构件组合梁形成聚集裂缝的问题,提出了新的计算方法,利用新方法可以计算出累积裂缝和承载能力。刘新华等<sup>[19]</sup>对负弯矩区采用 UHPC 的钢-混组合梁的受力性能开展试验研究和有限元仿真分析,认为负弯矩区采用 UHPC 可有效解决负弯矩区的开裂问题,但目前 UHPC 材料造价较高,为满足经济型要求,建议负弯矩区 UHPC 纵向铺设长度取 0.1 倍的腹板高度。

## 2 下部结构的预制装配

桥梁的下部结构作为桥梁主要的承重构件,一直是桥梁设计与施工的重点。与上部结构的预制装配相比,虽然下部结构预制装配工艺发展相对较晚,但是随着近年来桥梁工程中对预制拼装桥墩的需求的提高,学术界对预制拼装桥墩的研究逐渐增加。

2020 年度,预制拼装混凝土桥墩的研究主要有这 3 类:下部结构预制拼装连接的强度、下部结构预制拼装连接的正常使用寿命性能、下部结构预制拼装连接的耐久性。

### 2.1 下部结构预制拼装连接的抗震性能

桥墩作为桥梁结构的主要承力构件,对桥梁的整体性能

有着至关重要的影响。预制拼装桥墩连接的强度作为影响桥墩承载能力的关键因素,预制墩柱的连接工艺研发与性能改进是预制装配式桥墩研究的首要问题。同时,其连接形式和相应构造的力学性能也是后续开展预制装配式桥墩抗震研究的基础。目前,灌浆套筒作为一种使用广泛的连接形式,在 2020 年针对灌浆套筒的研究较为热门。

Xia 等<sup>[20]</sup>通过振动台试验,评估了预制节段混凝土双柱(PSCDC)钢套筒连接和灌浆波纹金属导管连接桥墩的抗震能力,并说明了 PSCDC 桥墩的破坏主要是由连接节点的循环开闭引起的。韩艳等<sup>[21]</sup>较系统地研究了墩柱嵌入深度、灌浆料强度等因素对承插式装配式桥墩抗震性能的影响。试验表明,承插式桥墩的承载能力有随承插深度或灌浆料强度的增加而增大的趋势。因此,提出了通过采用合理的墩柱嵌入深度及灌浆料强度,可以使承插式装配式桥墩的抗震性能接近于整体式现浇桥墩。徐文靖等<sup>[22]</sup>比较了采用灌浆套筒连接的预制拼装桥墩与整体现浇桥墩的性能差异,以及不同直径的灌浆套筒对此类预制拼装桥墩抗震性能的影响。认为采用墩身预埋灌浆套筒连接的预制拼装桥墩时,因其套筒刚度大,易在墩身套筒连接段形成刚性区域,发生墩身曲率重分布现象,导致墩底接缝处曲率增大,应变集中,并导致桥墩最终破坏形式由传统的塑性铰区域混凝土破坏转变为墩底接缝处钢筋拉断。Yang 等<sup>[23]</sup>通过局部粘结应力滑移试验,考虑了钢筋初始施工误差对横向压力的影响;通过求解长粘结灌浆套筒连接的粘结应力滑移行为的控制方程,提出了有效的应力应变模型;通过对长粘结灌浆套筒连接和预制混凝土墩进行试验,验证了所提出模型的有效性,并利用该模型成功地模拟了预制混凝土桥墩在循环荷载作用下的性能。逯艳东等<sup>[24]</sup>针对灌浆套筒以剪切或弯剪破坏为主的矮墩抗震性能研究较少的现状,对现有桥墩抗剪强度设计公式的适用性进行了分析,同时与现有的试验结果对比,提出了基于既有的现浇桥墩计算公式、拼接缝直剪公式和整体剪切计算公式均与试验结果存在较大差异的观点,并给出了相应的修正公式。

Zhen 等<sup>[25]</sup>提出了一种如图 10 所示的采用搭接大直径钢筋和超高性能混凝土灌浆的新型连接方式。认为钢筋直径不超过 32 mm 时,UHPC 中变形钢筋的钢筋长度为钢筋直径的 5 倍就可以满足抗震要求,且较大的钢筋直径可以增强桥墩变形能力。

Liu 等<sup>[26]</sup>研究了灌浆套筒在不同部位对桥墩抗震性能的影响。通过试验发现,墩柱底部带有灌浆套筒的桥墩裂纹较少,并且塑性铰位于灌浆套筒的末端,但是其耗能能力较差。带有灌浆套筒的试件由于高强度灌浆料增强了柱与基础之间的界面粘结性能,因此每个循环的峰值荷载都更高。因此,不建议在大地震地区应用墩柱底部带有灌浆套筒的桥墩。

Jia 等<sup>[27]</sup>通过在墩柱塑性铰区域设置弹性垫片,提高了其抗震性能。结果表明,如图 11 所示的带有注浆金属波纹管连接的预制混凝土桥墩的主要地震指标与现浇桥墩相似。



图 10 搭接大直径钢筋和 UHPC 的新型连接方式

并且通过在墩柱塑性铰区域设置弹性垫片,有效地减小了桥柱底部的局部混凝土损伤,同时提高了能量消耗能力。建议在预制桥柱中使用层压弹性垫片,以保持必要的初始刚度和能量消耗能力。同时,应通过在弹性垫的中心插入矩形或方形钢管来防止纵向钢筋过度屈曲和剪切变形。

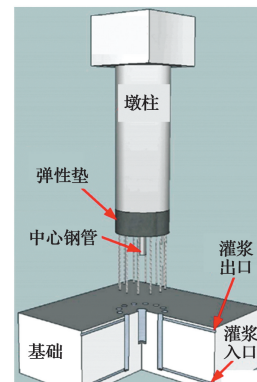


图 11 设置弹性垫片的预制混凝土桥墩

Shafieifar 等<sup>[28]</sup>提出了预制盖梁与墩柱的新型连接方式,如图 12 所示,这种连接方式将盖梁和墩柱的钢筋立柱搭接,并用超高性能混凝土封闭接缝。通过试验验证了这种连接方式具有良好的结构性能,适用于地震和非地震地区,并且能够实现足够的延展性。

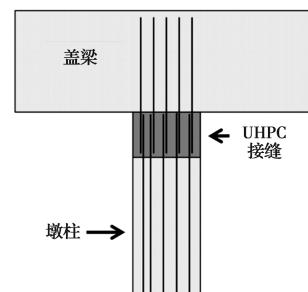


图 12 预制盖梁与墩柱连接方式<sup>[7]</sup>

李嘉维<sup>[29]</sup>开展了灌浆套筒连接装配式双柱墩的双向拟静力试验。研究发现:在强轴方向,桥墩耗能、强度、变形和延性等指标与现浇桥墩相似;但在弱轴方向,其性能明显弱于现浇墩。

为实现预制节段拼装桥墩地震动力响应与震后残余位

移的同步控制,蔡忠奎等<sup>[30]</sup>提出了以高强钢筋替代传统预制节段拼装桥墩中普通贯通钢筋的新方案。为验证该方案的有效性,对比分析了配置普通热轧带肋钢筋 HRB400、HRB500 和精轧螺纹钢 PSB785 的预制节段拼装桥墩模型的抗震性能。结果表明,将预制节段拼装桥墩贯通钢筋由常用的 HRB400 改为 PSB785 型精轧螺纹钢,可在地震时最大位移基本不变的前提下显著减小震后残余位移。因此,建议预制节段拼装桥墩贯通钢筋优先选用 PSB785 型精轧螺纹钢,借此综合提高 PSBC 抗震性能和自复位能力。王文炜等<sup>[31]</sup>提出了一种在墩底外侧设置耗能钢板的预制装配式桥墩结构,并基于三线型骨架曲线模型提出了外置耗能钢板预制拼装桥墩骨架曲线的计算方法。同时,通过参数分析给出了预应力度、钢绞线布置以及耗能钢板用量的建议。为克服利用 OpenSees 进行预制拼装桥墩纤维模型分析时干接缝区域模拟困难的问题,赵建峰等<sup>[32]</sup>提出了一种由刚性单元、非线性梁柱单元、零长度单元配合 ENT 单向受压材料组成的干接缝单元。通过与桥墩拟静力试验结果对比,验证了该干接缝单元用于模拟预制拼装桥墩干接缝区域的可行性。研究认为:设置耗能钢筋和外包钢管可以显著提高预制拼装桥墩的耗能能力、水平承载力和刚度,降低预应力损失;虽然设置墩底橡胶胶垫层也能提高预制拼装桥墩的耗能能力,但会降低桥墩的水平承载力和刚度,应根据桥墩自身刚度谨慎选择橡胶垫层。

李宁等<sup>[33]</sup>提出了一种内置耗能钢筋的预制拼装钢管混凝土自复位桥墩,并提出了一种不需要迭代的变形分析模型。通过与循环往复加载试验、已有变形分型模型和如图 13 所示的使用 OpenSees 建立的纤维模型进行了对比,认为此模型可以略保守地准确预测预制拼装 CFST 自复位桥墩的各阶段荷载-变形关系曲线。

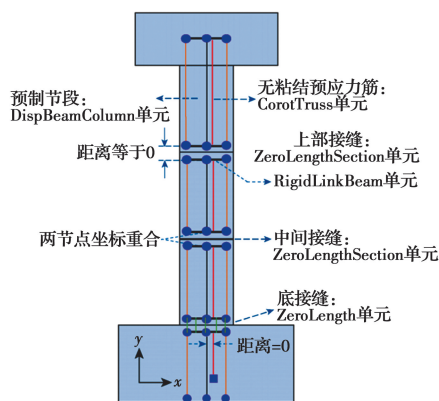


图 13 节段拼装自复位桥墩的纤维模型

Zhang 等<sup>[34]</sup>研究了在强地震作用下,具有新型自定心分段混凝土填充钢管柱的桥墩抗震性能。这种桥墩包括两根预制后张预应力自定心钢管混凝土单柱,通过支座连接到单跨度钢梁上部结构。内部无粘结的预应力钢筋安装在节段的中心,外部耗能钢筋安装在底部节段的外部。测试结果表明这种桥墩具有良好的自复位能力。Jia 等<sup>[35]</sup>针对自复位预制分段桥墩多向地震激励下的响应进行了研究,分析结果表

明,自复位预制分段桥墩具有良好的延展性,并且在与载荷的正交方向上有良好的自复位能力。白天宇<sup>[36]</sup>进行了拟静力往复加载试验,张凯迪<sup>[37]</sup>对双向地震动力响应进行了仿真分析,验证了加固措施对震损后预制节段桥墩抗震能力有明显提升,桥墩地震响应,特别是扭转变形在双向地震影响下有明显改善。杜青等<sup>[38]</sup>提出了当轴心布置预应力筋开始伸长后,计算模型需要不断进行迭代以得到墩顶某一位置时的受压区高度,进而根据截面静力平衡条件计算其抗侧强度。这种针对预制节段桥墩截面的新型设计方法使计算效率得到了明显的提升。马煜等<sup>[39]</sup>采用试验和数值仿真方法分析了在循环往复荷载情况下,预制节段拼装桥墩的恢复力特性以及破坏情况,并通过 CFRP 加固了在地震中预制节段拼装桥墩的易损伤部位。研究表明,CFRP 包裹桥墩底部节段会增强桥墩整体刚度和承载能力,使桥墩的刚度退化更加平缓,在地震作用下增强了预制节段拼装桥墩保持自身力学特性的稳定性,保证了桥梁整体的安全。

预制分段桥墩 (PSBCs) 相对现浇整体桥柱具有许多优点。然而,由于其抗震能力有限,PSBCs 可能会在地震中受到严重破坏。PSBCs 的快速修复和被修复的 PSBCs 抗震性能对使用 PSBCs 的桥梁的灾后恢复至关重要。Zhang 等<sup>[40]</sup>提出了一种如图 14 所示的使用碳纤维增强聚合物修复预制分段桥墩的方案,并将使用碳纤维增强聚合物板 (CFRP) 修复的桥墩和粘贴钢板修复的桥墩进行了试验对比。试验结果表明,CFRP 修复后的桥墩对混凝土的破坏减小,修复后的桥墩具有更大的能量耗散。随后,他们使用经过验证的有限元模型研究了 CFRP 参数对预制分段桥墩抗震性能的影响。结果表明,CFRP 截面积比对修复后的预制分段桥墩的抗震性能影响不大,CFRP 高度比对修复后的预制分段桥墩的抗震性能有较大影响。

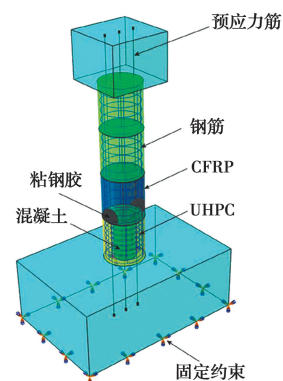


图 14 CFRP 修复桥墩的模型

Li 等<sup>[41]</sup>提出了一种如图 15 所示的预制后张分段式 UHPC 桥墩。这种桥墩与传统分段混凝土桥墩相比,可以有效地减少墩柱损伤并提高柱的耗能能力。研究评估了预制分段 UHPC 柱支撑的桥梁结构的地震易损性和地震生命周期损失。结果表明,与整体式钢筋混凝土桥相比,预制分段式 UHPC 桥有相似的峰值加速度和更大的峰值位移。但与传统的整体式混凝土桥墩相比,分段式 UHPC 桥墩的残余变形较小,可以有效降低桥梁的损坏概率和生命周期损失。因

此,在高地震活动区使用这种桥墩具有显著的经济效益。

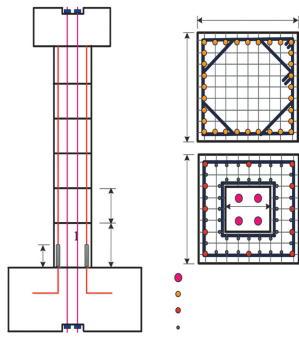


图 15 预制后张分段式 UHPC 桥墩

桥墩作为下部结构的主要承重构件,一直是桥梁设计和施工关注的重点,桥墩预制装配化也是桥梁全预制装配的关键环节之一。随着装配式桥墩在高烈度地震地区的推广使用,关于预制装配式桥墩抗震性能的研究逐渐增多。但是,针对不同连接构造的设计模型仍然匮乏。不同的连接构造对桥墩的抗震性能有显著影响,为了促进装配式桥墩的推广使用,应开展预制装配式桥墩简化分析方法的研究。

## 2.2 下部结构预制拼装连接的正常使用寿命性能

桥墩作为承载桥梁上部荷载的重要结构,桥墩的正常使用能力是一个关键的部分。桥墩变形会造成上部结构产生结构次内力,从而造成结构承载力的下降,甚至造成结构的破坏。因此,下部结构预制拼装连接的正常使用寿命性能也是一个重要的研究方向。

桥梁加速施工理念导致了预制后张法桥墩在桥梁施工中的广泛发展。目前,关于预制后张法桥墩的非线性力学和动力学的研究较少。Ahmadi 等<sup>[42]</sup>利用有限元模型研究了预制后张法桥墩的非线性静力和动力特性,认为后张拉力、高宽比、桥墩轴力和节段数对预制后张法桥墩的非线性行为有很大影响。高水平的激励振幅在预制后张法墩的共振频率处和周围表现出共存的振幅响应,并且逐渐变细,提高了预制后张法墩的动态失稳概率。同时,预制后张法桥墩的基本模态与现浇桥墩的第一模态相似。袁宏博<sup>[43]</sup>使用了一种含有橡胶的凹凸承插式新型自复位桥墩,并将这种新型自复位桥墩与传统桥墩进行了抗震分析。结果表明,与传统桥墩相比,新型自复位桥墩的耗能能力更强,残余位移更小,刚度退化更为缓慢。

灌浆套管接头为预制桥墩的连接提供了一种方便、经济的解决方案。然而,套筒连接在某些条件下可能存在灌浆不足的缺陷。为了更好地理解灌浆不足缺陷的影响,Zheng 等<sup>[44]</sup>考虑了三种荷载:单轴拉伸荷载、高应力循环荷载和大应变循环荷载,研究了带有预定垂直灌浆缺陷的灌浆套筒的力学性能。同时,还考虑了通过将灌浆材料重新填充到密封不足的灌浆材料套管来修复套管连接,并分析和讨论了失效模式、力位移响应与缺陷程度的关系。由于灌浆波纹管的连接钢筋直径和间距较小,对施工也会造成一定困难,因此 Fan 等<sup>[45]</sup>提出了使用大直径钢筋连接灌浆波纹管,并通过拟静力试验与现浇桥墩的力学性能作对比。结果表明,预制桥墩和

现浇桥墩呈现出相似的抗侧强度,但预制桥墩的延性较低。

随着预制装配式桥墩的广泛应用,使用预制装配式桥墩的桥梁逐渐增加,这些桥梁的健康检测及评估将成为一个重点。因此,针对预制构件的连接工艺,开展预制装配桥墩的无损检测方法研究,以评估既有预制装配桥墩性能是亟须解决的问题。

## 2.3 下部结构预制拼装连接的耐久性

混凝土结构物在侵蚀介质的长期作用下会产生性能退化,导致承载能力降低而引发安全隐患。海洋环境下,混凝土桥墩面临着氯离子侵蚀、混凝土碳化、冻融循环等一系列耐久性问题。由于耐久性设计不足而造成土木工程结构的提前失效,给社会带来了巨大的经济损失。随着预制装配式桥墩在高寒高腐蚀性地区的应用,也有部分学者对下部结构预制拼装连接的耐久性展开了研究。

Moradian 等<sup>[46]</sup>研究了预制后张高性能混凝土箱形梁建造的桥墩结构在海洋环境下的耐久性。结果显示,当箱型梁建造的桥墩结构有足够的钢筋混凝土覆盖时,结构的腐蚀速率可以忽略不计。然而,尽管在桥墩结构施工中使用了高性能混凝土,但部分钢筋混凝土构件保护层因厚度不足依然加剧了腐蚀速率,并造成了一些早期腐蚀问题。因此,他们根据试验结果,提出了修复桥墩结构的方法。同时在基于菲克定律的随机模型下,预测出桥墩结构的初始腐蚀时间和修复桥墩结构需要的时间。

桥梁安全性和耐久性研究已成为迫切需要解决的问题,但目前此领域的研究较少。后续可以从桥梁设计理念、结构体系和构造的角度开展好耐久性的研究,同时需要研究疲劳和超载对于桥梁结构耐久性的影响。

## 3 总结与展望

综上所述,随着预制装配式桥梁的应用日益广泛,研究者们对于预制装配混凝土桥梁的施工工艺、构造措施和预制装配结构的安全性开展了富有成效的研究。在后续研究中,更为合理地使用高性能新材料,以满足预制装配混凝土桥梁关键节点的性能需求是值得关注的热点问题之一;利用预制装配的工艺特点,实现关键构造的可更换性,以提高混凝土桥梁的抗震韧性也是预制装配混凝土桥梁研究的热点问题。

作为结构性能需求,正常使用性能与耐久性也很重要。相对而言,预制装配混凝土桥梁的正常使用性能与耐久性研究还略显不足,这有可能会制约预制装配混凝土桥梁的应用范围。以铁路桥梁为例,由于列车行车安全性和旅客乘车舒适度的需要,无论是普速铁路还是高速铁路,均对桥梁梁体与墩台的变形与刚度有较高的要求。开展铁路预制装配混凝土桥的正常使用寿命性能研究是推动预制装配工艺在铁路桥梁应用的必然要求。作为关键基础设施,在复杂环境中,经历漫长的服役期,预制装配节点的性能劣化机制与特点、无损检测方法与相应的加固技术是保障预制装配混凝土桥梁耐久性且有待解决的重要问题。

此外,随着建设实践的广泛开展,如何综合考虑标准化

设计、预制场地、预制工艺与运输、安装设备与人员,环境保护与交通扰动等因素,定量评价混凝土桥梁预制装配体系的经济社会效益问题亟待解决。

#### 参考文献:

- [1] PENG B, PENG R R, SU H H, et al. Structural rationality research on integrated prefabricated I-shaped steel-concrete composite girder bridges [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 455: 012021.
- [2] 单波,王艺莹,肖岩,等. 胶合竹-混凝土组合梁RPC-钢复合连接件试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 66-75.
- [3] DI J, HAN B, QIN F J. Investigation of U-bar joints between precast bridge decks loaded in combined bending and shear [J]. Structures, 2020, 27: 37-45.
- [4] YANG T, LIU S Y, QIN B X, et al. Experimental study on multi-bolt shear connectors of prefabricated steel-concrete composite beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 173: 106260.
- [5] 姚志立,晏班夫. 装配式UHPC桥梁湿接缝模型试验及受弯性能研究[J]. 公路工程, 2020, 45(3): 105-110, 138.
- [6] GUO Q, CHEN Q W, XING Y, et al. Experimental study of friction resistance between steel and concrete in prefabricated composite beam with high-strength frictional bolt [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 1-13.
- [7] 赵辛玮,肖汝诚,孙斌,等. 常温养护型超高性能混凝土组合桥面板收缩性能研究[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 100-108.
- [8] 贺欣怡,苏庆田,姜旭,等. 环氧胶粘结刚性铺装的正交异性桥面板力学性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(9): 25-31.
- [9] 蔡文平. 基于钢管连接件的钢-UHPC组合桥面板抗剪性能研究[J]. 公路工程, 2020, 45(2): 14-20.
- [10] 侯和涛,臧增运,鲁玉曦,等. 新型全装配钢-混凝土组合梁连接件推出试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(2): 201-210.
- [11] 邵林海,李志峰,贺志启,等. 不同剪力连接度下装配式钢-混组合箱梁受力性能试验研究[J]. 交通科技, 2020(2): 1-6.
- [12] AL-ROUSAN R. Behavior of prefabricated full-depth precast concrete bridge deck panel system: Optimum prestress level [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 44: 607-614.
- [13] HONARVAR E, SRITHARAN S, ROUSE J M, et al. Probabilistic approach to integrating thermal effects incamber and stress analyses of concrete beams [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(4): 04020010.
- [14] 冀伟,罗奎,马万良,等. 装配式波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥动力特性分析与试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(20): 1-7, 16.
- [15] YUEN T Y P, HALDER R, CHEN W W, et al. Dfem of a post-tensioned precast concrete segmental bridge with unbonded external tendons subjected to prestress changes [J]. Structures, 2020, 28: 1322-1337.
- [16] 项贻强,何百达. 考虑疲劳损伤的栓钉式组合梁剩余承载力计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(9): 33-39.
- [17] 汪炳,黄侨,刘小玲. 考虑多组件疲劳损伤的组合梁剩余承载力计算方法及试验验证[J]. 工程力学, 2020, 37(6): 140-147.
- [18] MAGER M, GEIBLER K. Zum Riss-und Verformungsverhalten von Stahlverbundträgern mit Ganzfertigteilen [J]. Stahlbau, 2020, 89(3): 203-213.
- [19] 刘新华,周聪,张建仁,等. 钢-UHPC组合梁负弯矩区受力性能试验[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 110-121.
- [20] XIA Z H, GE J P, LIN Y Q, et al. Shake table study on precast segmental concrete double-column piers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020, 19(3): 705-723.
- [21] 韩艳,董嘉雯,王龙龙,等. 承插式装配桥墩抗震性能拟静力试验与数值模拟[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(5): 63-70.
- [22] 徐文靖,马磊,黄虹,等. 套筒连接的预制拼装桥墩抗震性能研究[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 93-104.
- [23] YANG C, ZHANG L Y, ZHANG Z Y, et al. Effective stress-strain relationship for grouted sleeve connection: Modeling and experimental verification [J]. Engineering Structures, 2020, 210: 110300.
- [24] 逯艳东,李士友,胡兴安,等. 灌浆套筒连接预制拼装桥墩抗剪强度设计方法[J]. 市政技术, 2020, 38(5): 103-108, 113.
- [25] WANG Z, WANG J Q, ZHAO G T, et al. Numerical study on seismic behavior of precast bridge columns with large-diameter bars and UHPC grout considering the bar-slip effect [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020, 18(10): 4963-4984.
- [26] LIU Y, LI X P, ZHENG X H, et al. Experimental study on seismic response of precast bridge piers with double-grouted sleeve connections [J]. Engineering Structures, 2020, 221: 111023.
- [27] JIA J F, ZHANG K D, SAIIDI M S, et al. Seismic



- evaluation of precast bridge columns with built-in elastomeric pads [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 128: 105868.
- [28] SHAFIEIFAR M, FARZAD M, AZIZINAMINI A. Investigation of a detail for connecting precast columns to precast cap beams using ultrahigh-performance concrete [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(3): 04020001.
- [29] 李嘉维, 夏樟华, 余舟扬. 灌浆套筒连接装配式混凝土双柱墩的双向拟静力试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(3): 193-203.
- [30] 蔡忠奎, 王震宇, 苑激. 高强钢筋增强节段拼装桥墩抗震性能分析[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(3): 312-318.
- [31] 王文炜, 周畅, 薛彦杰, 等. 外置耗能钢板预制拼装桥墩抗震性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(9): 57-68.
- [32] 赵建锋, 孟庆一. 基于干接缝单元的预制拼装桥墩抗震性能数值模拟[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(2): 111-122.
- [33] 李宁, 张双城, 李忠献, 等. 预制拼装钢管混凝土自复位桥墩变形分析模型及验证[J]. *工程力学*, 2020, 37(4): 135-143.
- [34] ZHANG D, LI N, LI Z X, et al. Seismic performance of bridge with unbonded posttensioned self-centering segmented concrete-filled steel-tube columns: An underwater shaking table test [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 138: 106350.
- [35] JIA J F, ZHANG K D, WU S W, et al. Seismic performance of self-centering precast segmental bridge columns under different lateral loading directions [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111037.
- [36] 白天宁. 加固后预制节段 RC 空心桥墩抗震性能试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- [37] 张凯迪. 加固后预制节段 RC 空心桥墩静力和动力性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- [38] 杜青, 张森博, 卿龙邦. 预制节段拼装桥墩受力性能分析与模拟[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(7): 73-80.
- [39] 马煜, 张于晔. CFRP 加固对预制节段拼装桥墩抗震性能的影响[J]. *地震工程学报*, 2020, 42(4): 847-855.
- [40] ZHANG Y Y, TABANDEH A, MA Y, et al. Seismic performance of precast segmental bridge columns repaired with CFRP wraps [J]. *Composite Structures*, 2020, 243: 112218.
- [41] LI S, ZHAO T Y, ALAM M S, et al. Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of a seismic resistance bridge system with post-tensioning precast segmental ultra-high performance concrete bridge columns [J]. *Engineering Structures*, 2020, 225: 111321.
- [42] AHMADI E, KASHANI M M. Numerical investigation of nonlinear static and dynamic behaviour of self-centring rocking segmental bridge piers [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 128: 105876.
- [43] 袁宏博. 一种新型承插式自复位桥墩的抗震性能研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [44] ZHENG G Y, KUANG Z P, XIAO J Z, et al. Mechanical performance for defective and repaired grouted sleeve connections under uniaxial and cyclic loadings [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 233: 117233.
- [45] FAN J J, FENG D C, WU G, et al. Experimental study of prefabricated RC column-foundation assemblies with two different connection methods and using large-diameter reinforcing bars [J]. *Engineering Structures*, 2020, 205: 110075.
- [46] MORADIAN M, CHINI M, SHEKARCHI M. Durability performance of a structure made with high-performance concrete and prefabricated elements in a marine environment [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2015, 29(6): 04014174.

(编辑 颜永松)