

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.104

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



预制装配式混凝土桥梁结构 2019 年度研究进展

张子颀^a, 邓开来^{a,b}, 徐腾飞^{a,b}

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

摘要: 预制装配式结构具有施工速度快、占用场地少、构件质量高、建造过程绿色环保等显著优势,是实现建筑工业化的可靠途径,近年来获得了学界、工业界的高度重视。在桥梁工程领域,预制装配式混凝土桥梁结构得到了快速发展,针对预制装配式混凝土桥梁结构的研究快速增加,诸多新型预制装配式混凝土桥梁结构已应用于实际工程。总结 2019 年预制装配式混凝土桥梁结构的研究进展,从下部结构与上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。经过总结发现:预制装配式桥墩的连接构造及其抗震性能是本领域的研究重点,也是阻碍装配式桥梁结构向高烈度地震区发展的关键问题;预制装配式上部结构中,基本预制构件之间的连接构造形式受到大量学者的关注,连接构造的抗裂能力,疲劳性能等有待进一步提升,旨在实现“等同现浇”的力学性能。

关键词: 预制装配桥梁; 装配式桥墩; 装配式桥面; 桥梁快速建造

中图分类号: U445.47 **文献标志码:** R **文章编号:** 2096-6717(2020)05-0183-09

State-of-the-art review of prefabricated concrete bridge structures in 2019

Zhang Ziyang^a, Deng Kailai^{a, b}, Xu Tengfei^{a, b}

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

Abstract: Prefabricated structure has the advantages of accelerating the construction, saving energy and resource, and mitigating the impact on the environment. Prefabricated structure is a reliable way to realize the industrialization of buildings. In recent years, researchers and design engineers have carried out studies on the prefabricated structure. In the field of bridge engineering, due to the rapid development of prefabricated concrete bridge structures, research on prefabricated concrete bridge structures has increased rapidly, and many new prefabricated concrete bridge structures have been applied in practical engineering. This paper presents state of the art on prefabricated concrete bridges in 2019, in views of prefabricated substructure and prefabricated superstructure to discuss the new technology, new structure and typical

收稿日期: 2020-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(51708466, 51778535)

作者简介: 张子颀(1995-), 男, 博士生, 主要从事装配式桥梁结构抗震性能研究, E-mail: zzyzyy0512@gmail.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。

Received: 2020-04-02

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51708466, 51778535)

Author brief: Zhang Ziyang (1985-), PhD candidate, main research interest: seismic performance of assembled bridge structures, E-mail: zzyzyy0512@gmail.com.

Xu Tengfei (corresponding author), PhD, associate professor, doctoral supervisor, E-mail: tengfeixu@swjtu.edu.cn.

engineering applications in this field. From the summary of this paper, it was found that the structure of connection and seismic performance of prefabricated bridge piers are the focuses of the research in this field. It is also a key issue that hinders the construction of prefabricated bridge in high intensity region. In the prefabricated superstructure field, the connection structure between the basic prefabricated components has attracted a lot of researchers' attention. The crack resistance and fatigue performance of the connection structure need to be further improved, aiming to achieve the 'emulative' mechanical properties.

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

与传统混凝土桥梁施工相比,预制装配化施工能加快建造速度,节约资源、能源,既降低环境对施工的干扰,又降低施工对环境(含既有交通)的影响,提升建设质量与安全水平等。因此,预制装配混凝土桥梁特别适用于交通复杂的市政道路、艰险环境下的公路与铁路建设。

随着混凝土桥梁的预制装配工艺被广泛应用,预制装配混凝土桥梁也逐渐成为研究热点。笔者通过文献调研的方式,梳理 2019 年度预制装配式混凝土桥梁的研究进展,希望可以为广大同行开展相关研究工作提供参考与思路,期待预制装配桥梁在中国得到更合适与更广泛的应用。

根据上部结构与下部结构的不同,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等两部分。在桥墩的预制装配中,介绍预制墩柱的连接工艺与节点性能、预制装配桥墩的抗震性能、高性能新材料的应用与新型预制装配桥墩体系等。在上部结构的预制装配中,介绍桥面连接节点的力学性能、预制装配桥面的整体性能、预制装配组合梁等。

1 桥墩的预制装配

总体而言,2019 年预制装配桥墩的研究占比相对较高,这与桥梁预制装配工艺的技术演进有关。桥梁上部结构建造已经较多地使用预制装配技术,相关技术也比较成熟;而预制装配桥墩体系自 1955 年新奥尔良 Pontchartrain 桥首次采用以来,工艺技术有了长足的进步,但无论是连接构造、节点性能还是装配式墩柱的整体性能都需要进一步研究与发展。

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。

近年来,随着桥梁工程中对预制拼装桥墩需求的提高,学术界对预制拼装桥墩的研究逐渐重视。2019 年度,预制拼装混凝土桥墩的研究主要有 4 类:预制墩柱的连接工艺与节点性能、预制装配桥墩

的抗震性能、高性能与新材料的应用、新型预制装配桥墩体系。

1.1 预制墩柱的连接工艺与节点性能

预制墩柱的连接工艺研发与性能改进是预制装配桥墩研究的首要问题。连接节点或相应构造的力学性能也是后续开展预制装配桥墩抗震研究的基础。

常用的预制墩柱连接工艺有:灌浆套筒连接、灌浆波纹管连接、承插式连接、插槽式连接、现浇湿接缝连接、后张预应力连接与法兰盘连接等。套筒灌浆作为一种在预制装配式桥墩中应用较为广泛的连接方式,学者们对其研究较多。

随着灌浆套筒连接的广泛使用,现场施工发现,装配工艺对预制构件的精度有较高的要求,无论是工程预制还是现场拼装的施工偏差与缺陷将影响预制装配桥墩的性能。Xu 等^[1]从粘结滑移关系出发,解释了钢筋连接套筒的约束作用对钢筋与灌浆料间粘结强度的增强机理,考虑实际装配过程中钢筋在灌浆套筒中的偏心效应,提出了钢筋与灌浆套筒粘结滑移本构。Lu 等^[2]研究了楔形灌浆套筒和楔形螺纹灌浆套筒这种新型套筒单轴拉力下的力学性能,给出了钢筋在接头中所需嵌入长度约为接头钢筋直径的 6~6.4 倍的结论。同时,接头的抗拉能力随着接头杆锚固长度增加以及套管两端楔形的长度和斜率的增加而增加,且螺纹不会显著提高套筒的抗拉能力。匡志平等^[3]通过人为控制灌浆料含量,研究了实际工程中灌浆不足的缺陷对灌浆套筒连接性能的影响。套筒灌浆连接承载力取决于灌浆料含量,且随着钢筋与灌浆料间黏结承载力和钢筋抗拉承载力的相对大小的变化,会产生钢筋拔出和钢筋拉断的破坏模式。这些研究表明:施工偏差与缺陷改变了预制装配桥墩的性能。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。

1.2 预制装配桥墩的抗震性能

作为桥梁的主要承重和抗侧力构件,预制装配

桥墩的抗震性能一直以来都是学术界与工程界关注的重点。装配式桥墩在非震区、低烈度区中已得到较广泛应用,但因对其抗震性能缺乏充分认识,导致预制桥墩体系在中高烈度区的应用受到限制。特别是中国幅员辽阔,地震带多且频繁,如果不具有良好的抗震性能,预制装配桥墩在中国的应用将大大受限。因此,采用各种连接方式的预制装配式桥墩在地震作用下的极限承载力、变形与耗能能力、结构韧性以及这些性能的改进方法均是研究的热点。2019 年度的文献围绕着钢筋连接形式^[3]、灌浆套筒埋置位置^[4]、承插式桥墩插入深度和侧向剪力的影响^[5-6]、预应力连接的预应力度^[7-8]等展开了相关的抗震性能研究。

在灌浆套筒方面,樊泽等^[4]研究了灌浆套筒位置的影响,提出在合理的结构设计下套筒预埋在基础的预制桥墩与套筒预埋在墩身的预制桥墩的抗震性能均能满足要求。

承插式连接与灌浆套筒和灌浆波纹管等拼接工艺相比,施工精度要求较低;与现浇湿接缝、预应力节段拼接等工艺相比,现场作业少,是一种较为简便的连接方式。对这种连接方式,徐艳等^[5]研究了承插深度对整个桥墩抗震性能的影响,研究表明,在良好的施工情况下,承插深度对桥墩整体的抗震性能影响不大;并给出了利用嵌岩桩嵌入基岩的深度计算最小合理承插深度的方法。Cheng 等^[6]认为承插式连接中的侧向抗剪机制可以提供显著的阻力,从而有利于大垂直载荷的传递。

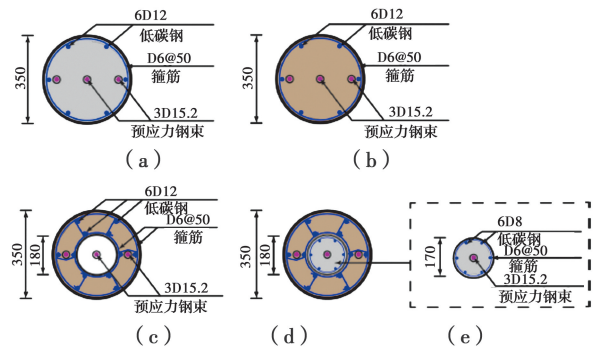
预应力节段拼装桥墩因无需考虑接缝区钢筋和不同龄期混凝土对桥墩整体性能的影响,目前在低烈度区得到了广泛应用,而在中高烈度区,由于其性能尚不明确,目前应用较少。禹智涛等^[7]分析了不同预应力轴压比对节段拼装式桥墩力学性能的影响,提出轴压比在 10%~20% 的结构拥有较好的力学性能。包龙生等^[8]通过有限元模拟和拟静力试验对预应力度对节段拼装桥墩抗震性能的影响进行研究,发现随着预应力度增大,承载力、屈服力和耗能能力有所增强,但对延性及残余位移影响不大,并建议在节段间榫卯以提高抗滑移作用。

以上研究表明,通过合理设计预制构件间的连接形式,装配式混凝土桥墩可以满足不同水准的抗震需求。然而,预制装配桥墩的抗震性能与连接构造密切相关,其地震响应与抗震性能与现浇桥墩存在一定差异,相关性能分析与计算依赖于试验与非线性有限元方法。为了促进预制装配桥墩的实际应

用,应开展预制装配桥墩的简化分析方法与设计计算方法研究。

1.3 高性能新材料的应用

高性能新材料是提高结构性能的重要途径。目前,应用于预制装配式桥墩的新材料主要有超高性能混凝土、纤维增强复合材料、形状记忆合金等。Zhang 等^[9]提出一种超高性能纤维混凝土(UHFC)应用于预制分段桥墩墩柱底部的新型结构(图 1),可以获得更大的侧向承载力与耗能能力,减小震后的混凝土损伤与残余位移。Zhuo 等^[10]提出高强耗能钢筋用于预制分段式桥墩连接(图 2),以获得更大的侧向强度、自复位能力和耗能能力。Tong 等^[11]将无黏结预应力筋和 H 型高强度耗能钢筋应用于预制混凝土桥墩加固中(图 3),以提高承载力、屈服后刚度与耗能能力。



注:灰色:普通混凝土;棕色:UHFC

图 1 UHFC 装配式桥墩截面(单位:mm)^[9]

Fig. 1 Section of the UHFC precast pier(units:mm)^[9]

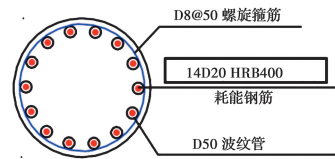


图 2 高强耗能钢筋桥墩^[10]

Fig. 2 High-strength ED bars pier^[10]

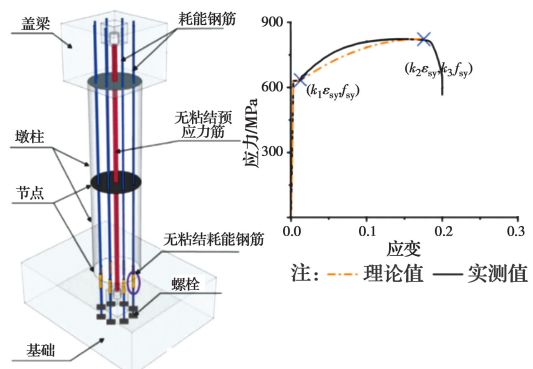


图 3 高强耗能钢筋桥墩^[11](单位:mm)

Fig. 3 High-strength ED bars pier^[11](units:mm)

然而,高性能新材料通常伴随着高成本,这又限制了其大规模应用于土木工程结构。预制装配工艺设计与施工相对灵活,可以在预制构件中使用传统材料,在连接构造上使用高性能新材料。一方面利用高性能新材料改善连接节点性能,另一方面降低高性能新材料的使用率,获取更好的经济效益。然而,预制构件连接位置采用高性能新材料引起的力学特性不连续也可能引发新的问题。例如,利用UHPC 现浇段连接普通混凝土预制构件,UHPC 与普通混凝土的收缩徐变特性差异,现浇 UHPC 与预制混凝土的龄期差异,都将导致 UHPC 与普通混凝土界面处的约束拉应力,从而产生开裂风险。

1.4 新型预制装配桥墩体系

自复位桥墩是“非等同现浇”的新型抗震桥墩体系。在地震作用下,可以利用节点接缝的张开与闭合实现桥墩的转动能力,避免结构损伤;同时,后张预应力提供预制桥墩震后恢复初始位置的自复位能力。Yang 等^[12]研究了界面摩擦系数、初始张拉力对自复位桥墩性能的影响,提出了提高自复位桥墩抗震性能的方法。Han 等^[13]提出了一种具有良好的耗能 and 自复位性能且修复便捷的自复位双柱墩体系,从而提高了预制装配桥墩的抗震韧性(图 4)。Mashal 等^[14]提出了一种在装配式桥墩底部安装金属耗能装置的自复位桥墩体系,以提高自复位预制装配桥墩的耗能能力(图 5)。

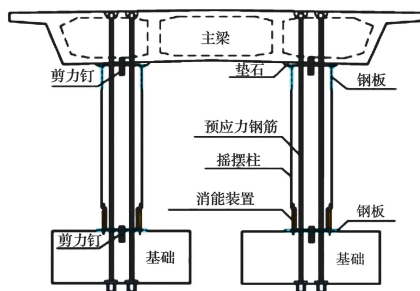


图 4 自复位双柱^[13]

Fig. 4 Self-centering double-column pier^[13]

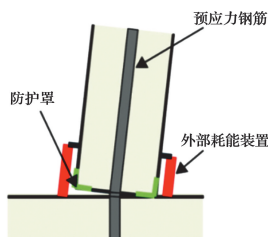


图 5 摇摆连接自复位桥墩^[14]

Fig. 5 Self-centering pier with DCR connections^[14]

除了自复位桥墩,也有一些混合体系桥墩被提出;墩柱和承台采用承插式连接,墩柱到墩帽采用灌浆套筒连接的桥墩^[15](图 6);底部与承台同时预制的预应力连接桥墩^[16](图 7);内嵌式法兰拼装的预制混凝土桥墩^[17](图 8)。

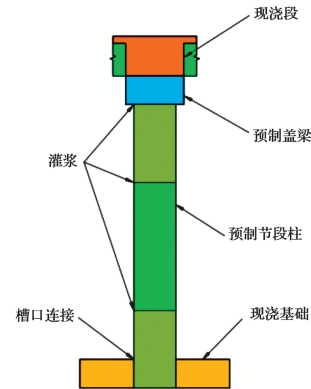


图 6 混合体系桥墩^[15]

Fig. 6 Precast pier with mixed connections^[15]

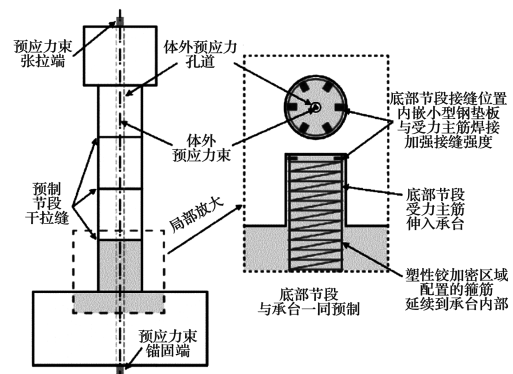


图 7 混合体系桥墩^[16]

Fig. 7 Precast pier with mixed connections^[16]

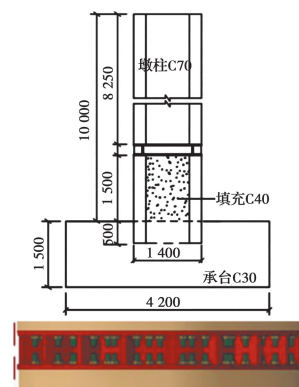


图 8 内嵌法兰拼装桥墩(单位:mm)^[17]

Fig. 8 Precast pier with flange connection(units:mm)^[17]

增加外置可更换耗能装置,能克服自复位桥墩的耗能能力相对较差的缺点,也能提高“非等效现浇”预制装配桥墩的震后性能恢复能力。同时,这也对“非等效现浇”桥墩的耐久性有了更高的要求,特

别在是复杂服役环境下,连接装置或构造的性能退化与控制措施还需深入研究。

2 上部结构的预制装配

桥梁上部结构的预制装配工艺有:预制节段拼装混凝土、节段预制拼装预应力束体系,预制装配钢-混组合梁等。2019 年学者们对连接节点的力学性能、预制装配桥面的整体性能、预制装配组合梁等主题进行了研究。

2.1 预制装配桥面板连接构造及力学性能

连接构造对预制装配桥面板的各项性能影响显著,是上部结构预制装配的研究重点。

Shoushtari 等^[18]对钢筋铰槽口连接、灌浆波纹管连接、SDCL 梁-盖梁连接、梁-桥面板灌浆槽口连接、桥面板接缝 UHPC 连接、桥面板-盖梁上部 UHPC 填充连接这 6 种节点的抗震性能进行评估,给出了不同节点的优化措施。沈殷等^[19]对节段预制拼装混凝土桥梁腹板处多齿剪力键的剪应力分布规律进行推导,提出多齿剪力键根部剪应力分布的不均匀系数的概念。Ahmeda 等^[20]提出了提高剪力件抗剪能力的方法,并对 AASHTO 公式进行了优化。Huang 等^[21]对 UHPC 连接节点在地震作用下的响应进行评估,认为这种连接节点也适用于中高烈度区。Dong 等^[22]分析了影响预应力槽口的性能的因素,并给出相应建议。张勇等^[23]对钢板梁桥 U 形钢筋湿接缝力学性能进行了研究,认为应预防湿接缝与桥面板的施工缝开裂。

同时,针对上述研究所展现的问题,也有一些学者提出了增强节点抗剪能力的一些新方法。Qi 等^[24]提出了一种使用钢筋网来增强燕尾榫 UHPC 接头的方法(图 9)。研究表明,这种方案可以提高 UHPC 平板的抗弯性能且 UHPC 试件开裂后仍有相当大的承载能力;同时,在受压区 UHPC 仅出现了局部压溃,认为对钢筋网所需的最小搭接长度还需进一步研究。Youssef 等^[25]对 UHPFRC 节点连接受弯剪性能进行了研究。通过对测试结果讨论和分析,给出了预测和实验剪切强度的比较、最小拼接长度以及破坏的影响因素。Tawadrous 等^[26]提出一种桥面板槽口连接方案(图 10),并对选择槽口尺寸,槽口锚固和加固进行了研究,以最大化其连接能力,并保证足够的装配误差。邵旭东等^[27]基于

UHPC 材料,提出了 3 类高性能装配式桥梁结构,并初步建立了计算理论和设计方法。

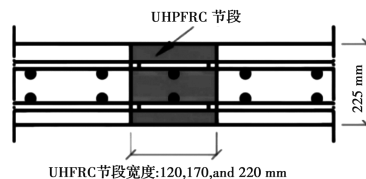


图 9 UHPFRC 节点^[25]

Fig. 9 UHPFRC joint^[25]

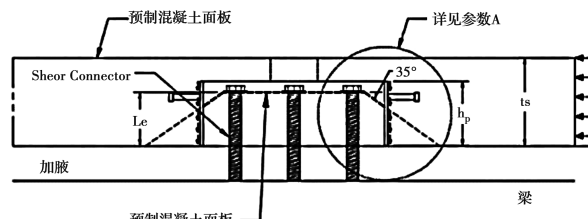


图 10 新型槽口连接方案^[26]

Fig. 10 New design of pocket connection^[26]

当前,预制装配桥面板的连接构造及力学性能大多是基于承载能力的研究。作为直接提供桥梁使用功能的主要构件,连接构造的正常使用性能与耐久性也需要关注。同时,在连接构造的防水、防锈等方面,还需要进一步开展研究。

2.2 预制装配桥面板整体性能

在预制装配桥面板整体性能方面,Koh 等^[28]对 T 型梁接缝的耐久性进行了研究,认为由于受拉接缝部分碳化深度的增加,使用寿命大大缩短,在维护过程中应特别注意接缝。Tawadrous 等^[29]开发了一种在横向上预张,在纵向上后张的新型预制混凝土桥面板系统,试验表明,这种预制桥面板系统的后张有效,且桥面板和主梁结合良好,其施工性能、承载能力和耐久性均有所提高。Minh Ha 等^[30]对不同粉煤灰含量的混凝土高耐久性预制预应力混凝土面板进行了弯曲和剪切试验,发现含有粉煤灰的桥面板与不含粉煤灰的桥面板相比,远期承载能力均有所提高。

2.3 钢-混组合梁的预制装配化

钢-混组合梁可以充分发挥混凝土与钢材的性能,提高桥梁整体性能,并且具有极好的施工性能,并充分发挥钢结构的可装配性,是实现钢-混组合梁的预制装配化的有效途径。这也使得钢-混组合梁的预制装配化工艺、装配组合梁的力学性能与耐久性均成为上部结构预制装配研究的热点。

Zhao 等^[31]引入预应力沉孔螺栓(图 11),实现

预制 UHPC 组合桥面板全干式连接,模型试验结果验证了该连接工艺的有效性,以及采用该技术的 UHPC 组合桥面板的良好力学性能。为了增强燕尾形接头的耐久性,Zhao 等^[32]提出了一种新型 RPC 混凝土燕尾形湿式接头(图 12),研究了强度比和燕尾形的角度,给出了建议设计参数。在板梁连接构造上,Wang 等^[33]提出了埋入式螺栓的连接构造,实现了预制 UHPC 板和工字钢的全干式连接(图 13);足尺试验表明,该构造具有良好的刚度和承载力,是实现预制桥梁建造的有效技术手段。

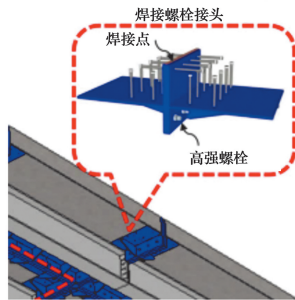


图 11 双头螺栓连接 UHPC 桥面板^[31]

Fig. 11 UHPC deck with bolted-welded joint^[31]

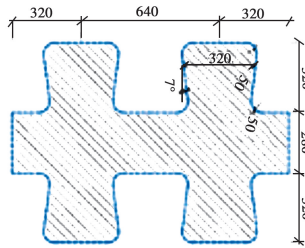


图 12 RPC 混凝土燕尾形湿接头(单位:mm)^[32]

Fig. 12 Dovetail-shaped RPC wet joint(units:mm)^[32]

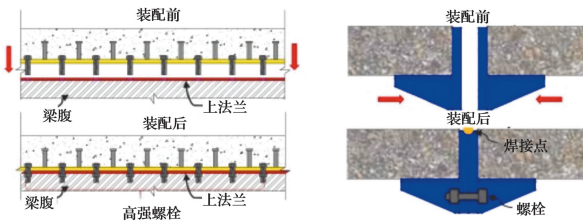


图 13 完全干式连接的预制组合梁^[33]

Fig. 13 Fully dry-connected prefabricated composite beam^[33]

Balkos 等^[34]利用防滑贯通螺栓剪力连接件实现钢-混组合梁的预制装配化(图 14),并用试验验证了其静力和疲劳性能。Farzad 等^[35]提出了一种使用钢-UHPPFC-钢作为腹板的预制桥面板(图 15),研究表明,这种结构施工快捷,且抗冻、耐腐蚀、耐疲劳和耐磨损能力都较强。张瀚文等^[36]提出一种用于钢-超薄 UHPC 新型短钢筋剪力连接件(图

16),这种连接件具有构造形式简单、成本低等优点,但其破坏为脆性破坏,仍需继续研究和优化。

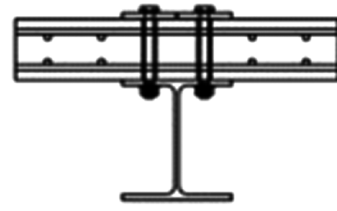


图 14 防滑贯通螺栓连接预制组合梁^[34]

Fig. 14 Steel-precast composite beam specimens with through-bolt shear connectors^[34]

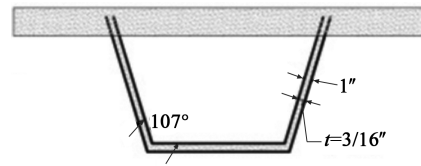


图 15 钢-UHPPFC-钢预制桥面板^[35]

Fig. 15 Steel-UHPPFC-steel precast deck^[35]

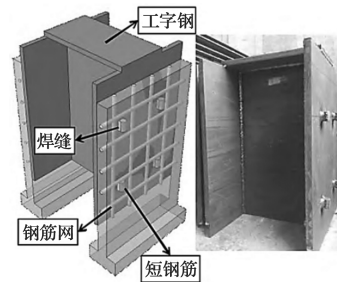


图 16 短钢筋剪力连接件^[36]

Fig. 16 Short steel bar shear connection^[36]

与此同时,随着这些新型预制装配组合梁结构体系的提出,组合梁的计算方法也有发展,如:考虑了混凝土龄期差异的计算模型^[37]、关于 SBSC 的抗剪承载力计算公式^[38]、全深度预制混凝土桥面板连接器抗剪强度计算方法^[39]。

随着高性能材料在预制装配组合梁中的应用,传统的连接构造得到了增强,一些新型连接构造也得以实现,构件的耐久性也得到了增强。但是,目前考虑疲劳、收缩、徐变与耐久性都是单因素的,多个因素共同作用的组合结构性能研究仍然缺乏。因此,对多因素共同作用情况下的预制装配组合梁性能的研究是下一步工作的重点。

3 结论与展望

随着预制装配式桥梁的应用日益广泛,研究者们对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性能研究是推动预制装配工艺在铁路桥梁的应用的必然要求。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等问题亟待解决。

参考文献:

- [1] XU T F, LI Q W, ZHAO R D, et al. On the early-age bond-slip behavior of an eccentric bar embedded in a grouted sleeve [J]. *Engineering Structures*, 2019, 190: 160-170.
- [2] LU Z W, HUANG J, LI Y B, et al. Mechanical behaviour of grouted sleeve splice under uniaxial tensile loading [J]. *Engineering Structures*, 2019, 186: 421-435.
- [3] 匡志平, 郑冠雨, 焦雪涛. 灌浆不足对钢筋套筒连接力学性能影响试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(7): 934-945.
KUANG Z P, ZHENG G Y, JIAO X T. Experimental study on effect of mechanical behavior of grout sleeve splicing for reinforced bars due to lack of grout [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(7): 934-945. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] CHENG Z, SRITHARAN S. Side shear strength of preformed socket connections suitable for vertical precast members [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(5): 04019025.
- [7] 禹智涛, 潘浩, 贺绍华. 预应力轴压比对节段拼装桥墩力学性能影响分析[J]. *广东工业大学学报*, 2019, 36(4): 85-91.
YU Z T, PAN H, HE S H. Influence of prestressed axial compression ratio on mechanical properties of segmental bridge piers [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2019, 36(4): 85-91. (in Chinese)
- [8] 包龙生, 宋吉宏, 于玲. 预应力度对节段拼装桥墩抗震性能影响研究[J]. *大连理工大学学报*, 2019, 59(3): 302-309.
BAO L S, SONG J H, YU L. Research on effect of prestress degree on seismic performance of segmental assembly piers [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2019, 59(3): 302-309. (in Chinese)
- [9] ZHANG Y Y, FAN W, ZHAI Y, et al. Experimental and numerical investigations on seismic behavior of prefabricated bridge columns with UHPFRC bottom segments [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(8): 04019076.
- [10] ZHUO W D, TONG T, LIU Z. Analytical pushover method and hysteretic modeling of precast segmental bridge piers with high-strength bars based on cyclic loading test [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2019, 145(7): 04019050.
- [11] TONG T, ZHUO W D, JIANG X F, et al. Research on seismic resilience of prestressed precast segmental bridge piers reinforced with high-strength bars through

- experimental testing and numerical modelling [J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109335.
- [12] YANG C C, OKUMUS P, REN R L. A hysteretic model for self-centering precast concrete piers with varying shear-slip between segments [J]. *Engineering Structures*, 2019, 188: 350-361.
- [13] HAN Q, JIA Z L, XU K, et al. Hysteretic behavior investigation of self-centering double-column rocking piers for seismic resilience [J]. *Engineering Structures*, 2019, 188: 218-232.
- [14] MASHAL M, PALERMO A. Low-damage seismic design for accelerated bridge construction [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(7): 04019066.
- [15] MASHAL M, PALERMO A. Emulative seismic resistant technology for accelerated bridge construction [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 124: 197-211.
- [16] 张于晔, 吴刚, 孙泽阳, 等. 采用混合体系的预制拼装桥墩抗震性能分析[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(1): 70-80.
ZHANG Y Y, WU G, SUN Z Y, et al. Analysis of seismic performance of a hybrid prefabricated bridge pier system [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2019, 39(1): 70-80. (in Chinese)
- [17] 丁怡宣, 曾玉昆, 韩军峰, 等. 法兰连接预制装配桥墩力学性能分析[J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(4): 40-51.
DING Y X, ZENG Y K, HAN J F, et al. Mechanical capacity analysis of prefabricated bridge piers with flange connection [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(4): 40-51. (in Chinese)
- [18] SHOUSHTARI E, SAIIDI M S, ITANI A, et al. Design, construction, and shake table testing of a steel girder bridge system with ABC connections [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(9): 04019088.
- [19] 沈殷, 蔡鹏, 陈立生, 等. 节段预制拼装混凝土桥梁剪力键接缝的抗剪强度[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(10): 1414-1420.
SHEN Y, CAI P, CHEN L S, et al. Shear strength of keyed joints in segmental precast concrete bridges [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(10): 1414-1420. (in Chinese)
- [20] AHMED G H, AZIZ O Q. Stresses, deformations and damages of various joints in precast concrete segmental box girder bridges subjected to direct shear loading [J]. *Engineering Structures*, 2020, 206: 110151.
- [21] HUANG C, SONG J W, ZHANG N S, et al. Seismic performance of precast prestressed concrete bridge girders using field-cast ultrahigh-performance concrete connections [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(6): 04019046.
- [22] DONG LEE J, BAROOAH U R, MCKEE C D, et al. Recommendations for design of concentrically pretensioned, precast concrete bent caps [J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2019, 24(1): 04018034.
- [23] 张勇, 曹素功, 叶品, 等. 钢板梁桥 U 形钢筋湿接缝力学性能试验研究[J]. *中国市政工程*, 2019(5): 95-97, 114.
ZHANG Y, CAO S G, YE P, et al. experimental study on mechanical properties of U-shaped steel bar wet joint of steel plate girder bridge [J]. *China Municipal Engineering*, 2019(5): 95-97, 114. (in Chinese)
- [24] QI J N, BAO Y, WANG J Q, et al. Flexural behavior of an innovative dovetail UHPC joint in composite bridges under negative bending moment [J]. *Engineering Structures*, 2019, 200: 109716.
- [25] YOUSSEF M H, AHMED E A, BENMOKRANE B. Structural behavior of GFRP-RC bridge deck slabs connected with UHPFRC joints under flexure and shear [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(9): 04019092.
- [26] TAWADROUS R, MORCOUS G. Design of shear pocket connection in full-depth precast concrete deck systems [J]. *Engineering Structures*, 2019, 179: 367-386.
- [27] 邵旭东, 邱明红. 基于 UHPC 材料的高性能装配式桥梁结构研发[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(2): 160-167.
SHAO X D, QIU M H. Research of high performance fabricated bridge structures based on UHPC [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2019, 51(2): 160-167. (in Chinese)
- [28] KOH T H, KIM M K, YANG K H, et al. Service life evaluation of RC T-girder under carbonation considering cold joint and loading effects [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 226:

- 106-116.
- [29] TAWADROUS R, MORCOUS G, MAGUIRE M. Performance evaluation of a new precast concrete bridge deck system [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(6): 04019051.
- [30] MINH HA T, URA S, FUKADA S, et al. Development and application of a highly durable precast prestressed concrete slab deck using fly ash concrete [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, 16(9): 1228-1246.
- [31] ZHAO C H, WANG K K, XU R Y, et al. Development of fully prefabricated steel-UHPC composite deck system [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2019, 145(7): 04019051.
- [32] ZHAO C H, WANG K K, ZHOU Q F, et al. Full-scale test and simulation on flexural behavior of dovetail-shaped reactive powder-concrete wet joint in a composite deck system [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(8): 04018051.
- [33] WANG K K, ZHAO C H, WU B, et al. Fully-scale test and analysis of fully dry-connected prefabricated steel-UHPC composite beam under hogging moments [J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109380.
- [34] BALKOS K D, SJAARDA M, WEST J S, et al. Static and fatigue tests of steel-precast composite beam specimens with through-bolt shear connectors [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(5): 04019036.
- [35] FARZAD M, SHAFIEIFAR M, AZIZINAMINI A. Experimental and numerical study on an innovative sandwich system utilizing UPFRC in bridge applications [J]. *Engineering Structures*, 2019, 180: 349-356.
- [36] 张瀚文, 邵旭东, 曹君辉, 等. 具有短钢筋连接件的超薄轻型组合桥面结构抗剪性能初探[J]. *公路工程*, 2019, 44(2): 8-13, 35.
- ZHANG H W, SHAO X D, CAO J H, et al. Preliminary study on shear performance of ultra thin lightweight composite bridge deck with short rebar connections [J]. *Central South Highway Engineering*, 2019, 44(2): 8-13, 35. (in Chinese)
- [37] HUANG D W, WEI J, LIU X C, et al. Experimental study on long-term performance of steel-concrete composite bridge with an assembled concrete deck [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 214: 606-618.
- [38] WANG Y H, YU J, LIU J P, et al. Experimental and numerical analysis of steel-block shear connectors in assembled monolithic steel-concrete composite beams [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(5): 04019024.
- [39] LEBLOUBA M, BARAKAT S, AHMED M S A, et al. Shear strength at the interface of precast bridge concrete decks and girders subjected to cyclic loading with varying speeds [J]. *Engineering Structures*, 2019, 196: 109296.

(编辑 章润红)