DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250893

预制拼装桥墩UHPC环形连接节点力学性能研究进展

陈　伟[1,2],徐文靖[3,4],高健峰[5],管仲国[4]

(1.新疆交通装配式建造与养护重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830016;2.新疆交通建设集团股份有限公司,新疆 乌鲁木齐 830016;3.上海城建职业学院,上海市 200438;4.同济大学 土木工程防灾全国重点实验室,上海市 200092;5.中建三局集团有限公司,湖北 武汉 430075)

摘　要: 超高性能混凝土(ultra-high performance concrete,UHPC)环形节点连接是近年提出的一种具有良好应用前景的新型预制桥墩连接形式,针对其力学性能的研究进展、存在的问题和未来的研究方向进行了综述。研究指出:传统的钢筋拔出试验尽管便于与普通混凝土状况形成直接对比,但其应力状态与UHPC环形节点的情况并不相符;此外,在UHPC与钢筋的黏结性能方面尚缺乏针对束筋的相关研究;2种弯曲破坏模式均会导致UHPC连接桥墩的延性能力低于整体现浇墩柱,有待于开展兼具2种破坏模式以提升墩柱整体延性能力的相关研究;UHPC连接节点的抗剪性能研究存在显著的尺寸效应问题,整个区域的抗剪机制非常复杂,亟待开展深入的相关研究。

关键词: 桥墩;预制拼装;UHPC;环形连接节点;力学性能

中图分类号: U448.28;TU997　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0005-06

Study on Mechanical Properties of UHPC Annular Connection Nodes for Prefabricated Bridge Piers

CHEN Wei[1,2], XU Wenjing[3,4], GAO Jianfeng[5], GUAN Zhongguo[4]

(1. Key Laboratory of Prefabricated Construction and Maintenance for Transportation in Xinjiang, Urumqi 830016, China; 2. Xinjiang Communications Construction Group Co., Ltd., Urumqi 830016, China; 3. Shanghai Urban Construction College, Shanghai 200438, China; 4. National Key Laboratory of Disaster Prevention in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 5. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., Wuhan 430075, China)

Abstract: The ultrahigh performance concrete (ultra-high performance concrete, UHPC) annular node connection is a new type of prefabricated bridge pier connection form proposed in recent years, which has a good application prospect. The research progress, existing problems and future research directions of its mechanical properties are reviewed. The research result shows that the traditional rebar pull-out test is convenient for direct comparison with the conditions of ordinary concrete, but its stress state does not match that of the UHPC annular node. In addition, there is still a lack of relevant research on the bonding performance between UHPC and rebars for bundled bars. Both bending failure modes will result in the ductility of UHPC-connected piers being lower than that of integral cast-in-place piers. There is a need to carry out relevant research that combines two failure modes to enhance the overall ductility of the piers. There is a significant size effect problem in the research on the shear resistance performance of UHPC connection nodes. The shear resistance mechanism of the entire region is very complex and in-depth related research is urgently needed.

Keywords: bridge pier; prefabrication; annular connection node; mechanical property

0　引　言

近年来,桥梁下部结构预制拼装技术发展非常迅速。这种工业化建造方式,可以显著降低施工现场的作业要求,建造速度高、结构质量高、环境友好,是土木工程当前和未来主流的建造模式[1-2]。

超高性能混凝土(UHPC)是由水泥、硅灰、石英

收稿日期:2025-09-09
基金项目:疆维吾尔自治区'2+5'重点人才计划项目"新疆装配式桥梁设计与施工关键技术研究";新疆交通投资(集团)有限责任公司科技项目(XJJTZZB-FWCG-202401-0002)
作者简介:陈伟(1988—),男,硕士,高级工程师,从事装配式桥梁结构与材料研究与应用工作。
通信作者:管仲国(1976—),男,博士,教授,博士生导师,从事桥梁工程教学与研究工作。电子信箱:guanzhongguo@tongji.edu.cn

砂、石英粉、钢纤维和高效减水剂等材料组成的高度致密化水泥基复合材料，具有超高的抗压、抗拉强度，与钢筋的黏结锚固性能远优于普通混凝土，可以在较短的搭接长度下实现粗钢筋的完全传力，为预制拼装桥墩提供了一种新型节点连接构造。相比常用的灌浆套筒连接方式，这种新型构造可以显著降低构件施工精度要求、简化连接节点构造、提高施工作业效率，同时大幅度降低隐蔽工程的施工质量风险[3-9]。

UHPC环形节点连接是近年提出的一种具有良好应用前景的新型预制桥墩连接形式[10-11]，如图1所示。利用预制柱芯作为墩柱安装时的支撑可同时减少UHPC的用量，并且连接节点与预制段具有相同的截面尺寸，符合美学要求。

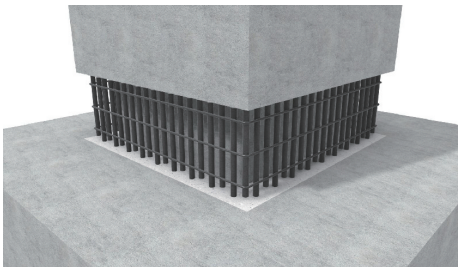


图1　预制桥墩UHPC环形节点

目前，围绕UHPC环形节点的力学性能已开展了一定的研究工作，并在工程实践中得到应用。本文旨在系统梳理相关研究进展，探讨进一步的研究需要。

1　UHPC与钢筋的黏结性能研究

采用UHPC连接的预制墩柱纵筋和承台预留钢筋并不进行焊接或机械锚固等直接连接，需依赖UHPC为交错搭接的纵筋提供可靠的锚固传力，因此UHPC与钢筋的黏结性能是其首要的安全保障。

1.1　钢筋拔出试验

图2(a)为常见的普通混凝土-钢筋的黏结性能拔出试验，通过改变钢筋插入混凝土的深度来检验确定钢筋的锚固长度[12]。

对于UHPC-钢筋的黏结性能研究，一些学者也采用了类似的试验方法，由于UHPC对钢筋的黏结更强，还通过设置绝缘段的方式来准确控制黏结段的长度并确保黏结段受力状态基本一致[13-20]，见图2(b)。这种试验方法便于与普通混凝土-钢筋的黏结拔出试验形成对比，直观反映UHPC-钢筋的黏结性能优势。然而，对于UHPC环形连接节点，关注的并不是UHPC对钢筋的锚固长度研究，而是UHPC对相互搭接钢筋的传力机制。

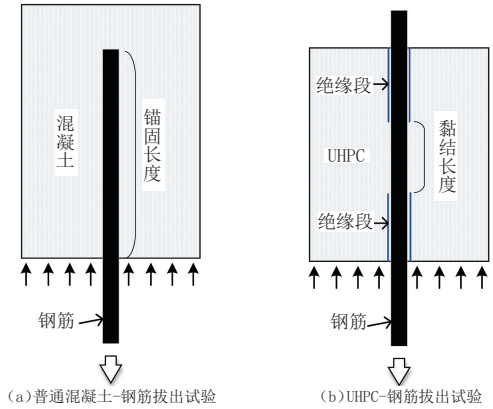


图2　钢筋黏结锚固拔出试验

这2种状态下的混凝土部分受力状态是不同的，因此UHPC环形节点中钢筋的搭接长度并不能直接取图2(b)试验所确定的锚固长度。

1.2　黏结模型试验

为了模拟UHPC环形节点中UHPC-钢筋的实际构造和黏结传力状态，一些学者提出了类似图3所示的黏结模型试验。相关的研究参数包括UHPC的抗压和抗拉强度、纤维的含量和走向、纵筋的直径和间距以及相互搭接的长度、保护层的厚度等[13-20]。结果显示：保护层厚度和纵筋搭接长度是影响最为显著的2个要素。其中，当保护层厚度较大时，破坏形态以钢筋拔出或者拉断为主，保护层厚度较小时，则多为UHPC劈裂破坏为主，前者的平均黏结强度主要与UHPC抗压强度的平方根存在显著相关关系，后者则主要与UHPC的抗拉强度相关，总体上随保护层厚度的降低而降低；纵筋的极限锚固应力基本与搭接长度成正比。需要指出的是，对于钢筋极限锚固应力与保护层厚度和纵筋搭接长度的关系，Lagier[16-17]、Haber[19]、Zhou等[20]的研究结果之间仍存在不小的差异，尚需进一步研究。此外，Hu等[14-15]指出，随着纵筋直径的增大，混凝土-钢筋的平均黏结强度逐渐降低；Yuan等[13]的试验结果显示，纤维走向对混凝土-钢筋的黏结性能影响不大。

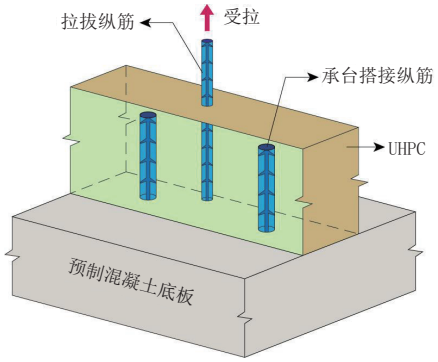
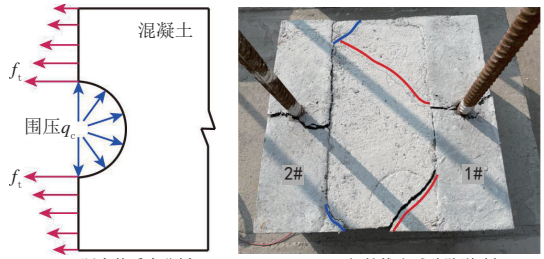


图3　UHPC连接节点黏结模型钢筋拉拔试验

根据前述研究，实际桥墩中的纵筋直径一般较大，保护层厚度与纵筋直径之比也就相对较小，在黏结性能上处于不利的参数状态，在搭接长度不足的情况下，通常均为劈裂破坏[14-15]。劈裂失效下纵筋与混凝土之间的黏结机理如图 4(a)所示，在纵筋受拉时与周围混凝土之间产生径向挤压应力 q_c，进而在环向上形成拉应力，当拉应力 f_t 超过材料抗拉强度时即发生劈裂破坏。图 4(b)所示即为高健峰等[21]在 UHPC 试验中观察到的钢筋拔出试验中的劈裂破坏形态。



(a)隔离体受力分析　(b)UHPC-钢筋拔出试验劈裂破坏

图 4　UHPC 黏结劈裂破坏分析

众所周知，横向钢筋有助于降低混凝土中的拉应力，Ma 等[18]也通过试验证实对于 UHPC 中搭接传力的纵筋，适当的箍筋配置可提高 UHPC 对纵筋的锚固能力。高健峰等[21]进一步开展了模拟环形连接构造的有箍筋配置的 UHPC-钢筋黏结性能模型试验(见图 5)，结果显示，对应箍筋体积配箍率 0.8% 的情况，最大平均黏结锚固应力可提升 37%[21]。

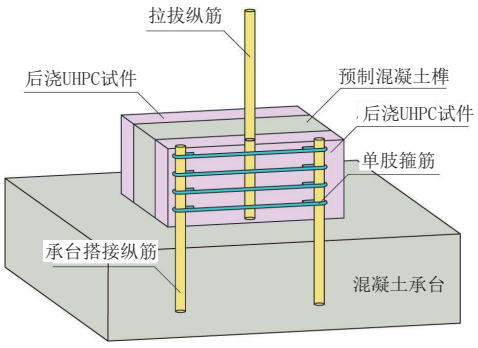


图 5　有箍筋 UHPC-钢筋黏结性能模型试验

需要指出的是，目前已开展的 UHPC-钢筋黏结性能试验，特别是模拟环形连接节点实际构造和工作状态的黏结模型试验，绝大部分是针对单筋情况，而实际桥墩中的纵筋，特别是高烈度强震区的桥墩多采用束筋的布置形式，相关的黏结性能试验尚缺乏相关研究。

2　UHPC 连接的桥墩抗弯性能研究

2.1　破坏模式

如前所述，UHPC 连接节点旨在为交错搭接的纵筋提供可靠的黏结锚固。在不发生黏结失效的前提下，UHPC 连接节点内的纵筋密度更大，相比其他截面具有更高的抗弯能力，因此 UHPC 节段本身并不会发生抗弯破坏。

研究显示，采用 UHPC 连接的桥墩发生弯曲破坏的部位主要为预制段的底部或者 UHPC 节段与承台的接缝处。前者主要表现为墩底塑性铰上移至原预制墩的墩底处，可将 UHPC 连接节点视为承台的延伸结构，在预制墩底部产生与现浇结构相同的塑性铰(见图 6(a))[22]，墩柱整体的抗弯性能基本等同于与预制墩柱同尺寸的现浇钢筋混凝土墩柱；后者主要表现为 UHPC 节段底部接缝的显著张开(见图 6(b))，由于接缝受压区上缘的 UHPC 具有很高的抗压强度，下缘的承台混凝土则处于三向围压状态，均不易发生破坏，其破坏一般为座垫层混凝土的压碎和纵筋的拉断。

(a)塑性铰上移　(b)底部接缝显著张开

图 6　预制桥墩 UHPC 环形连接破坏形态

2 种破坏模式的发生主要取决于各自截面处的能力需求比。当墩柱高度较矮时，UHPC 节段底部接缝处的弯矩需求会显著高于预制墩底部，当承台伸出的纵筋数量与墩柱纵向相差不大时，则 UHPC 节段底部接缝处的能需比相对较小，易发生接缝处的破坏；反之，当墩柱高度较高，且承台伸出的钢筋相对桥墩预留纵筋较多时，则预制墩底截面的能需比相对较小，易发生塑性铰上移模式的破坏；而当两者的能需比较为接近时，首先屈服的截面随后会发生一定的强化效应，导致另一处截面也达到屈服，进而发生 2 种破坏状态兼有的破坏模式。

2.2　延性能力

连接后整体桥墩的延性能力与其破坏模式直接相关。当发生塑性铰上移破坏时，墩柱的延性能力等同于与预制墩柱同尺寸的现浇钢筋混凝土墩。但

需要指出的是，这种等同现浇是对应墩高折减（减去UHPC连接节点的高度）情况下比较的。众所周知，在塑性铰转动能力一致的情况下，桥墩的侧向变位能力与墩高成正比，因此这种墩高的折减实际上是在一定程度上降低了桥墩的变形能力。当墩柱发生UHPC环形节点底部与承台接缝处的破坏形态时，跨越裂缝的纵筋将发生显著的应力集中现象，既有试验研究显示，这种以接缝为主的破坏模式对应的墩柱整体侧向变位能力显著低于现浇整体墩柱。徐文靖[22]的试验结果显示，以接缝为主的破坏模式比现浇整体墩柱侧向极限变形能力的降低幅度可达25%。由此可见，当前UHPC环形连接的2种典型的破坏模式均会导致墩柱整体的延性能力低于整体现浇墩柱。

综上所述，UHPC环形连接用于高烈度地震区的预制拼装桥墩还应考虑延性能力提升的相关研究。值得注意的是，尽管前述2种破坏模式均会导致其延性能力低于整体现浇墩柱，但如果能够通过特殊的配筋设计，使UHPC环形节点上下截面的峰值抗弯能力与弯矩需求之比非常接近，进而使得先发生屈服的截面能在强化过程中驱使另一处截面也进入屈服，进而能兼具2种破坏模式，如图7所示。其中：H_p为预制墩墩高；H_{UHPC}为UHPC连接节点的高度；θ_u为预制墩塑性铰的转角；θ_{Jonit}为墩底接缝的转角。可以看出，同时利用连接节点上部塑性铰的变形能力和底部接缝的变形能力，可提升墩柱整体的延性能力，弥补因单一破坏模式导致的延性能力不足的问题。

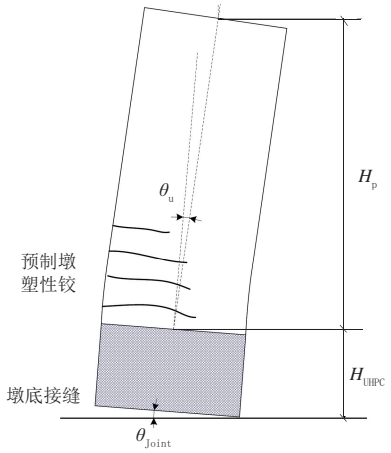


图7　2种破坏模式均衡下的墩柱延性能力

3　UHPC连接节点的抗剪性能研究

3.1　尺寸效应

UHPC环形连接节点由于预制墩柱的芯段与承台和盖梁并无纵筋连接，即使存在座垫层混凝土，在弯剪受力状态下芯段一般处于截面的受拉区而无法实现可靠的抗剪机制[23-25]，因此UHPC环形连接节点区域的抗剪传力主要依赖于UHPC环形构造。

目前，对于UHPC环形连接节点的墩柱试验模型均为缩尺模型，但考虑环形连接节点UHPC的黏结构造与传力的影响，墩柱纵筋和UHPC环缝的高度、厚度等尺寸一般不进行缩尺，导致连接节点区域UHPC环形截面面积占比存在较大的差异。如徐文靖[22]试验的墩柱原型尺寸为2 000 mm×2 000 mm，UHPC环形截面的占比约为28%，而模型墩柱尺寸为500 mm×500 mm，UHPC环形截面的占比约为84%（见图8）。由于UHPC相比普通混凝土在抗拉、抗剪强度方面具有显著优势，因此缩尺模型节点区域的抗剪承载力验算通常并不控制；但对于截面尺寸较大的原型墩柱，仅依赖UHPC环形构造未必能满足连接节点的抗剪能力需要。由此可见，模型墩和原型墩的尺寸效应会对其抗剪承载能力存在显著影响，目前尚缺乏相关的深入研究。

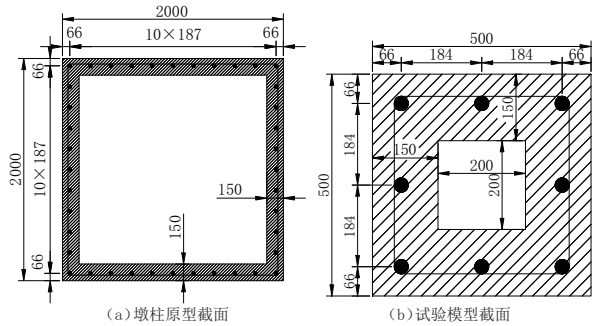


图8　UHPC环形节点原型与缩尺模型对比（单位：mm）

3.2　环形连接节点的抗剪承载机制

对于采用UHPC环形连接的预制拼装桥墩原型结构，预制柱芯与承台之间没有钢筋连接，同时在墩底弯矩作用下，由于外围UHPC较高的弹性模量和抗压承载力[26-28]，截面受压区将基本上由UHPC承担，进而导致绝大部分甚至全部的柱芯截面处于受拉区，因此由柱芯直接传递至承台的水平力将很小，绝大部分的水平剪力必须经由环形的UHPC结构传递至承台[29]。由此可见，在水平承载机制上，预制墩柱、环形UHPC结构和承台总体上是串联传力与承载体系。

如前所述，UHPC环形节点的高度主要受纵筋搭接长度要求控制，即使采用直径32 mm的钢筋和12倍钢筋直径的搭接长度要求，UHPC环形节点的高度一般不超过450 mm，相比原型桥墩结构将远小于其

截面边长。因此，从斜截面承载机制上，实际的节点抗剪区域将包含一部分预制墩柱、预制柱芯及其外围环形 UHPC 结构组成的复杂结构（见图 9）。需要指出的是，实际的预制墩柱箍筋一般采用复合箍，预制柱芯中同样可以采用复合箍，但环形 UHPC 的箍筋仅可设置简单的环形箍筋。通常情况下，墩柱预制时不便使预制柱芯的箍筋伸出，并与 UHPC 的环形箍筋连接形成与预制墩柱段相同的复合箍。也就是说，预制柱芯与外围的 UHPC 之间并无钢筋连接，界面间无法传递拉力，在预制墩柱、环形 UHPC 结构和承台总体上为串联传力体系的情况下，预制柱芯的箍筋和 UHPC 的环形箍筋并不能形成并联共同承载的抗剪机制，因此整个区域的抗剪机制非常复杂，目前对此尚缺乏相关研究。

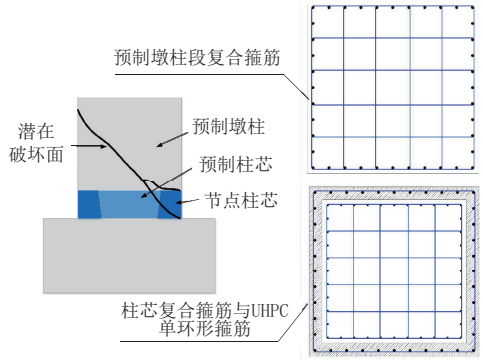


图 9　预制桥墩与 UHPC 连接节点箍筋布置

3.3　箍筋的多重受力效应

如前所述，UHPC 环形连接节点是利用 UHPC 高强、韧性的特性对交错搭接的纵筋进行连接的，反过来也会导致钢筋周围的 UHPC 中产生胀裂效应，当保护层较小时，需要设置一定量的箍筋以防止黏结失效；与此同时，UHPC 环形连接节点内的箍筋在墩柱受剪状态下还需承担抗剪作用[30]。由此可见，UHPC 环形连接节点内的箍筋存在多重受力效应，故而参照 UHPC 梁或柱结构的抗剪计算方法，将 UHPC 环形连接节点内的全部箍筋均视为可以 100% 承担抗剪功效。这可能导致不安全的结果，但目前对此尚缺乏深入研究。

4　结　语

（1）UHPC 节点中钢筋的搭接长度不能直接取用标准锚固抗拔试验的钢筋锚固长度，目前模拟环形连接节点实际构造与工作状态的黏结模型试验对高烈度强震区常采用的束筋形式研究较少。

（2）UHPC 连接桥墩发生弯曲破坏的部位主要为预制段的底部或者 UHPC 节段与承台的接缝处。2 种典型破坏的延性能力均低于整体现浇墩柱，可通过特殊的配筋设计，使墩柱能兼具 2 种破坏模式，进而提升其整体延性能力。

（3）模型墩和原型墩的尺寸效应对连接节点的抗剪承载能力存在显著影响。目前对于节点区域的抗剪机制和箍筋的多重受力效应均缺乏深入研究。

参考文献：

[1] 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.

[2] 陈安，郭文健，孙静. 国际快速施工桥梁技术新进展[J]. 中国公路，2020（3）：54-57.

[3] GRAYBEAL B, BRUHWILER E, KIM B S. *et al.* International perspective on UHPC in bridge engineering[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25（11）: 04020094.

[4] AMRAN M, HUANG S S, ONAIZI A M. *et al.* Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects[J]. Construction and Building Materials, 2022（352）: 129029.

[5] BAJABER M A, HAKEEM I Y. UHPC evolution, development, and utilization in construction: A review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021（10）: 1058-1074.

[6] CHANG Y, SHI J, HOU Y. *et al.* Experimental study on the uniaxial compression performance of ultrahigh performance concrete constrained by stirrups and fibers[J]. Engineering Structures, 2021（243）: 112656.

[7] GONG J, MA Y, FU J. *et al.* Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: A review[J]. Composites Part B: Engineering, 2022（241）: 109995.

[8] HUNG C C, EL-TAWIL S, CHAO S H. A review of developments and challenges for UHPC in structural engineering: behavior, analysis, and design[J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147（9）: 03121001.

[9] 王瑞龙，马骉，黄虹. 超高性能混凝土连接装配式桥墩设计理念与实践[J]. 城市道桥与防洪，2021（1）：68-70；87.

[10] DAGENAIS M A, MASSICOTTE B, BOUCHER-PROULX G. Seismic retrofitting of rectangular bridge piers with deficient lap splices using ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23（2）: 04017129.

[11] 徐文靖，邵晓东，马骉，等. 采用UHPC连接的预制拼装桥墩构造及试验研究[J]. 土木工程学报，2022，55（12）：105-116；127.

[12] GB/T 50152—2012，混凝土结构试验方法标准[J].

[13] YUAN J, GRAYBEAL B A. Bond behavior of reinforcing steel in ultra-high performance concrete[R]. Rep. No. FHWA-HRT-14-090. United States: Federal Highway Administration, 2014.

[14] HU X, XUE W, LV Y. et al. Experimental investigations of bond behavior of double-row spliced rebars in Ultra-High Performance Concrete (UHPC) [J]. Engineering Structures, 2023, 284: 115929.

[15] HU A, LIANG X, SHI Q. Bond characteristics between high-strength bars and ultrahigh-performance concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32（1）: 04019323.

[16] LAGIER F, MASSICOTTE B, CHARRON J P. Experimental investigation of bond stress distribution and bond strength in unconfined UHPFRC lap splices under direct tension[J]. Cement and

Concrete Composites, 2016, 74: 26-38.
[17] LAGIER F, MASSICOTTE B, CHARRON J P. Bond strength of tension lap splice specimens in UHPFRC[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 84-94.
[18] MA F, DENG M, FAN H. et al. Study on the lap-splice behavior of post-yield deformed steel bars in ultra high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120611.
[19] HABER Z B, GRAYBEAL B A. Lap-spliced rebar connections with UHPC closures[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23 (6): 04018028.
[20] ZHOU Z, QIAO P. Bond behavior of epoxy-coated rebar in ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 182: 406-417.
[21] GAO J, MA B, LIU P, et al. Experimental and numerical investigations of seismic performance of precast bridge columns with novel lap splice connections by UHPC[J]. Engineering Structures, 2025, 322: 119165.
[22] 徐文靖.UHPC连接预制拼装桥墩的抗震性能试验研究[D].上海:同济大学,2022.
[23] WANG Z, WANG J, ZHAO G, 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: 4963-4984
[24] SHAO Y, OSTERTAG C P. Bond-slip behavior of steel reinforced UHPC under flexure: Experiment and prediction[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 133: 104724.
[25] CHAN T, MACKIE K R, HABER Z B. Precast seismic bridge column connection using ultra-high-performance concrete lap splice[J]. ACI Structural Journal, 2020, 117(1): 217-229.
[26] DBJ43/T 325—2017,活性粉末混凝土结构技术规程[S].
[27] ZHANG X, LU Y, WU X, et al. Constitutive model for ultra-high performance concrete (UHPC) considering the size effect under cyclic compressive loading[J]. Construction and Building Materials, 2023, 368: 130499.
[28] T/CBMF 37/T/CCPA 7—2018,超高性能混凝土基本性能与试验方法[S].
[29] BABY F, BILLO J, RENAUD J C. et al. Shear resistance of ultra high performance fibre-reinforced concrete I-beams[C]//IA-FraMCoS. Proc., FraMCoS7, 2010:1411-1417.
[30] T/CECS G:D60-02—2023,公路超高性能混凝土(UHPC)桥梁技术规程[S].

(上接第4页)

51-63.
[4] DUDZIŃSKI W, PĘKALSKI G, HARNATKIEWICZ P, *et al.* Study on fatigue cracks in steel-concrete shear connection with composite dowels [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2011, 11 (4): 839-858.
[5] CLASSEN M, HEGGER J. Shear-slip behaviour and ductility of composite dowel connectors with pry-out failure[J]. Engineering Structures, 2017, 150: 428-437.
[6] KOPP M, WOLTERS K, CLAßEN M, *et al*. Composite dowels as shear connectors for composite beams – Background to the design concept for static loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 147: 488-503.
[7] KOŻUCH M, LORENC W. The behaviour of clothoid-shaped composite dowels: Experimental and numerical investigations[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 167: 105962.
[8] LORENC W. Concrete failure of composite dowels under cyclic loading during full-scale tests of beams for the "Wierna Rzeka" bridge[J]. Engineering Structures, 2020, 209: 110199.
[9] WOLTERS K, CHRISTOU G, FELDMANN M. Crack propagation and residual load-bearing behavior of composite dowels – Effects on the global behavior of composite girders under cyclic loading[J]. Ernst & Sohn, 2021, 4(2-4): 657-665.
[10] CHRISTOU G, WOLTERS K, UNGERMANN J, *et al*. Combined shear-tension loading of composite dowels in cracked concrete—Experimental investigations and design[J]. Applied Sciences, 2022, 12 (3): 1449.
[11] CHRISTOU G, SCHMIDT C, HEGGER J, *et al*. The effect of concrete fatigue on the cyclic behaviour of composite dowels – Derivation of a design approach based on experimental findings[J]. Engineering Structures, 2022, 253: 113743.
[12] 李现辉,李国强.腹板嵌入式组合梁中抗剪连接件推出试验[J].建筑结构学报,2009,30(4):78-84.
[13] 孔凡磊,黄平明,梅葵花,等.改进螺旋线型组合销剪力连接件承载力试验研究[J].桥梁建设,2020,50(2):43-48.
[14] PETZEK E, SCHMITT V, METEŞ E, *et al*. Romanian projects and integral bridge solutions based on composite dowels[J]. Steel Construction, 2016, 9(3): 161-169.
[15] PETZEK E, TOMA L, METEŞ E, *et al*. Innovative composite overpasses on the Romanian A1 motorway[M]. PETZEK E, BĂNCILĂ R, Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2014: 155-179.