

UHPC 在装配式桥墩节点连接中的应用综述

米家禾

(临沂市政集团有限公司, 山东 临沂 276000)

摘要: 对于现浇湿接缝装配式桥墩体系来说, 节点受力性能是影响整体结构稳定性的关键, 超高性能混凝土 (UHPC) 的推广和应用为现浇湿接缝装配式连接提供了优秀的材料选择。文章从 UHPC 在桥梁工程领域的应用现状入手, 基于节点力学性能, 系统概述了 UHPC 与普通混凝土 (NC) 和钢筋之间协同工作能力以及黏结性能的影响因素, 并整理了 UHPC 在装配式桥墩中的应用及受力特征。结果表明: 1) UHPC - NC 之间的黏结性能良好, 且受到 UHPC 龄期、界面粗糙度、UHPC 中的纤维长度、钢筋锚固长度、界面配筋率的影响; 2) UHPC - 钢筋黏结力显著优于 NC - 钢筋, 二者黏结性能与保护层厚度、UHPC 养护龄期、箍筋配置、钢筋强度、UHPC 抗压强度、UHPC 中纤维体积率相关; 3) UHPC 在装配式连接中可用于薄弱区域加固、原材料替换、灌浆材料, 充分发挥高性能材料的力学性能优势, 在钢筋配置及保护层厚度合理的前提下, 均可达到等同现浇结构的连接效果, 大大保证了整体稳定性; 4) UHPC 作为节点加固及替换材料时, 可达到快速恢复损伤墩柱抗震性能、改善薄弱区域损伤过程的优化效果。

关键词: UHPC; 装配式桥墩; 综述; 力学性能; 节点连接

中图分类号: U443.3

文献标识码: A

文章编号: 1673 - 8993 (2024) 12 - 0008 - 08

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.12.154

Review of the application of UHPC in assembled bridge piers

MI Jiahe

(Linyi Municipal Group, Linyi 276000, Shandong, China)

Abstract: As an important force bearing and force transmitting component in the bridge substructure, the pier plays a key role in the normal operation and maintenance of the bridge structure. For the cast-in-situ wet joint fabricated pier system, the mechanical performance of joints is the key to affect the stability of the overall structure. The promotion and application of ultra high performance concrete (UHPC) provides an excellent material selection for the cast-in-situ wet joint fabricated connection. Starting from the application status of UHPC in the field of bridge engineering, and based on the mechanical properties of joints, this paper systematically summarizes the cooperative work ability between UHPC and ordinary concrete (NC) and reinforcement, as well as the influencing factors of bonding (bonding) performance; The application and mechanical characteristics of UHPC in fabricated piers are summarized. The results show that the bonding performance between UHPC and NC is good, and it is affected by UHPC age, interface roughness, fiber length in UHPC, anchorage length of reinforcement and interface reinforcement ratio; The bond strength of UHPC reinforcement is significantly better than that of NC reinforcement. The bond performance of UHPC reinforcement is related to the thickness of protective layer, UHPC curing age, stirrup configuration, reinforcement strength, UHPC compressive strength and fiber volume ratio in UHPC; UHPC can give full play to the mechanical properties of high-performance materials in the cast-in-place wet joint fabricated connection. No matter at the pier pile cap joint or cap beam pier column joint, under the premise of reasonable reinforcement configuration and protective layer thickness, it can achieve the same connection effect of cast-in-place structure, and greatly ensure the overall stability; UHPC can not only be applied to the connection of Precast Pier Column Joints, but also be used

收稿日期: 2024 - 01 - 17

作者简介: 米家禾 (1997—), 男, 硕士研究生, 从事装配式桥梁结构及新型材料应用研究。

with high-strength reinforcement to strengthen the weak parts of the pier at the same time, so as to achieve the reinforcement effect of restoring the seismic performance of damaged pier columns and even optimizing the performance.

Key words: UHPC; assembled bridge pier; review; mechanical properties; nodal connection

我国地势西高东低, 地理类型复杂多样, 东西跨度大, 从而形成了丰富的气候。因此, 在进行桥梁建设时, 往往要面对诸多挑战, 恶劣的施工应用条件和气候因素严重制约了传统施工方式的应用, 而桥梁预制装配式技术的推广和新材料的应用大大缓解了传统施工压力。

目前常见装配式连接技术有承插式连接^[1]、灌浆套筒连接^[2]、灌浆波纹管连接^[3]、现浇湿接缝连接^[4]、后张拉预应力连接^[5]等, 以抗震性能为依据, 又可将装配式桥墩的连接形式划分为等同现浇体系和非等同现浇体系^[6]。装配式结构的稳定性很大程度上取决于节点连接, 传统的节点连接方法存在一些缺点, 如施工周期长、连接强度不足等。因此, 研究人员开始关注新型工程材料在此领域的应用潜力, 高性能新材料的研发与应用成为了工程结构创新与发展的重要驱动力^[7]。在 20 世纪 90 年代初, LARRARD 等^[8]基于颗粒紧密堆积原理和纤维增强机理研制出超高性能混凝土 (ultra-high-performance concrete, UHPC), 该材料是在高度致密化水泥基复合材料基础上发展而来, 主要由水泥、硅灰、石英砂、石英粉、钢纤维及高效减水剂等材料组成, 具有优异的力学性能和耐久性能。因此, UHPC 从发明至今一直受到桥梁工程领域的广泛关注, 主要用于桥梁建设、桥梁结构加固与修复、结构构件连接等, 截至 2021 年, 世界各国共计 1000 多座桥梁应用 UHPC, 其中中国约有 120 座桥梁使用了 UHPC 材料^[9-10]。

虽然 UHPC 性能优异, 发展迅速, 但实际工程中的应用量明显不足, 制约其发展的一大因素是价格高昂, 因此, 如何采用较少的材料用量充分发挥 UHPC 性能优势成为了工程师和学者们关注的热点问题, 对于装配式桥墩来说, 利用 UHPC 优化节点连接非常值得推广。本文将简要介绍 UHPC 在装配式桥墩节点连接中的理论基础及相关应用研究, 以期为 UHPC 的后续研究、推广及应用提供参考。

1 UHPC - NC 界面力学性能研究

不论是新建 UHPC - NC 组合结构还是后浇 UHPC 加固改造, 都要面临 UHPC 与 NC 结合共同工作的问题, 二者之间的界面是组合结构最薄弱的部位, 一旦发生界面滑移破坏势必影响荷载传递和结构耐久性。因此, 考虑到结构的安全性和耐久性, 研究 UHPC - NC 界面的黏结性能对于装配式连接十分重要。

SEMENDARY 等^[11-14]通过拉伸试验、剪切试验和斜剪试验研究 UHPC - NC 界面的黏结性能影响因素 (图 1), 对比混凝土基体类型、骨料特征、表面处理方式、UHPC 龄期和试验方法等设计因素的影响。结果表明, UHPC 与 NC 之间具有优异的黏结力, UHPC 的早强特点使其界面黏结性在养护前期增长较快; 随着 UHPC 龄期和界面粗糙度的增加, 黏结性能大幅提高; 设置抗剪钢筋会大幅减少界面失效前的滑移, 且干燥的界面会降低界面失效概率。

张阳等^[15]、冯铮等^[16]分别针对后浇 UHPC 加固普通钢筋混凝土结构湿接缝界面抗剪性能和抗拉强度进行研究, 制备整体现浇试件及后浇 UHPC 湿接缝试件进行对比。结果表明: 交界面处未出现收缩开裂等病害, 界面抗剪强度高、耐久性好; 在 UHPC - NC 界面连接处对进行植筋处理, 有助于提高构件的稳定性及延性, 并且增加钢筋锚固长度、界面配筋率可以有效改善界面抗拉强度。

VALIKHANI 等^[17]对不同粗糙度样品 (混凝土基材 - UHPC 修复层) 进行双表面剪切试验, 发现通过增加表面粗糙度, 可以获得更高的黏结失效及破坏载荷——约为混凝土试样强度的 80% ~ 90%。YU 等^[18]发现界面粗糙度对界面的力学性能产生积极影响, 试验表明: 当表面粗糙度从 0.41 mm 增加到 1.31 mm 时, C40 混凝土和 C50 混凝土基底的抗拉强度分别增长了 100% 和 64%。同时, 剪切强度分别增长了 202% 和 121%。

JANG 等^[19]基于剪切试验对比 UHPC - UHPC

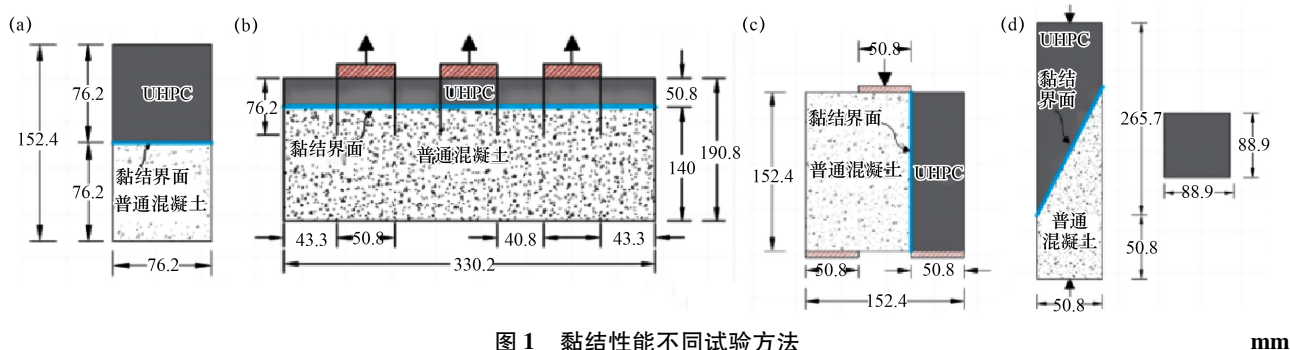


图 1 黏结性能不同试验方法

mm

试件和 UHPC-NC 试件界面的抗剪强度,研究钢纤维对界面黏结性能的影响。结果表明:相较于 UHPC 与普通混凝土的组合试件, UHPC-UHPC 试件表现出更好的界面延性性能,这是由于钢纤维使用提高了界面粗糙程度,钢纤维之间、钢纤维和混凝土孔隙之间的相互作用有效抑制了微裂缝发展。

JU 等^[20]基于劈裂拉伸试验,研究钢纤维掺量、水灰比对 RPC(活性粉末混凝土)-NC 界面劈裂拉伸强度的影响,图 2 为劈裂拉伸试验结果^[18],其中 X、Y、Z 分别为钢纤维体积分数 1.0%、1.5%、2.0%;A、B、C 分别为水灰比 0.20、0.22、0.24;1、2、3 分别为刷削、切削、铣削。可以看出:钢纤维体积分数的提高增强了界面劈裂拉伸强度和机械咬合力,钢纤维含量对黏结强度也存在一定提升。提高 RPC 水灰比对劈裂拉伸强度的影响强于钢纤维体积分数,是因为更强的水化反应产生更多水化产物增大了界面之间机械咬合力和摩擦力。

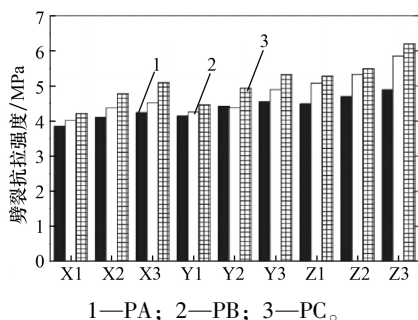


图 2 劈裂拉伸试验结果

综上所述表明: UHPC-NC 界面黏结性能良好, UHPC 作为后浇湿接缝材料与原混凝土结构协同工作及共同受力能力可靠。在黏结界面采用凿毛、刻槽等方式处理后界面粗糙度显著增大,对于 UHPC-NC 界面黏结性能的提升效果明显,具体表现在黏结失效及破坏荷载增大、基底抗拉强度及剪切强度显著提升;设置抗剪钢筋、植筋及

增大钢筋锚固长度、界面配筋率可改善界面抗拉强度、减少界面失效前的滑移; UHPC 的龄期、纤维掺量和水灰比均是影响界面黏结的关键因素,可通过增大龄期、提升钢纤维含量和水灰比来达到增大界面粗糙度的效果。

2 UHPC-钢筋力学性能研究

节点核心区的损伤是造成结构破坏的主要原因,故节点连接是预制装配式结构抗震设计关键部位,为满足“强节点、弱构件”的抗震设计原则,必须保证节点具有足够的强度、刚度及延性要求,相邻构件的钢筋连接是影响节点稳定性的重要部分。

TAZARV 等^[21-22]通过进行灌浆套筒拉拔试验研究 UHPC 灌浆料与钢筋黏结强度,结果发现 UHPC 与钢筋之间的黏结力是普通混凝土材料的 8 倍, UHPC 代替普通灌浆料作为套筒填充物可大大减小钢筋锚固长度,说明在 UHPC 灌浆料内采用较短的钢筋搭接长度即可保证预制构件的连接;而后基于拟静力试验研究 UHPC 灌浆套筒连接桥墩试件抗震性能,结果表明 UHPC 灌浆套筒连接的装配式试件表现出等同现浇的抗震性能。

韩方玉等^[23]通过拉拔试验研究 UHPC-钢筋锚固性能,发现随着锚固长度与 UHPC-钢筋黏结强度呈负相关关系,并提出钢筋的锚固长度宜为 $4d$ (d 为钢筋直径, mm) 以上的设计建议; UHPC 内钢纤维可以有效抑制锚固钢筋周边拉应力的传递,提升锚固性能。

黄俊等^[24]通过低周反复试验研究 UHPC 后浇段节点构件抗震性能发现,构件 UHPC 节点处钢筋之间搭接长度超过 $14d$ 后承载力不再提升。

LIANG 等^[25]对搭接 UHPC 拼接梁进行四点弯曲试验,分析搭接长度、箍筋等设计因素对主梁

黏结性能的影响, 结果表明试样的黏结强度随着搭接长度的增加而降低, 搭接长度从 $6d$ 增加到 $15d$ 导致黏结应力降低 26%, 表明黏合应力沿搭接长度分布不均匀; 而 RONANKI 等^[26] 发现峰值黏结应力出现在距搭接头末端约 $2 \sim 3d$ 距离处, 超过该距离黏结应力几乎均匀分布。

梁芮等^[27] 研究 UHPC 强度、纤维体积率、纤维尺寸形状对 UHPC - 高强钢筋的黏结性能影响, 图 3 为拔出试验示意图^[27], 图中 d_b 为高强钢筋直径。结果表明黏结强度随着 UHPC 抗压强度的增大而增加; 随着纤维体积率和纤维长径比的提高, UHPC - 钢筋黏结强度会明显提升。

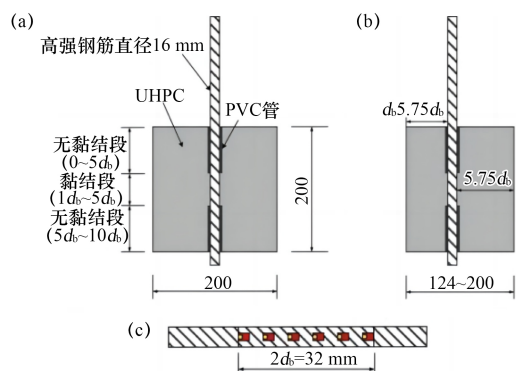


图 3 拔出试件构造及尺寸 mm

侍刚等^[28] 基于拔出试验研究锚固长度、UHPC 保护层厚度、钢纤维掺量和钢筋直径 4 种参数对 HRB400 钢筋与 UHPC 黏结性能的影响, 试验锚固试件设计如图 4 所示^[28]。图中, l_a 为钢筋锚固长度, b 为锚固钢筋插入 PVC 管内长度, c 为保护层厚度。实验结果表明: 以上因素对 UHPC - 钢筋黏结性能影响程度从大到小依次为: 锚固长度、UHPC 保护层厚度、钢纤维掺量和钢筋直径。

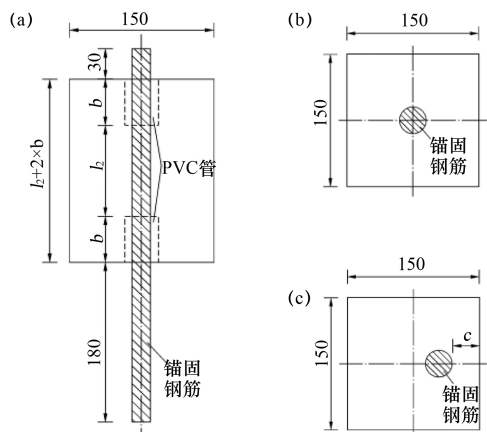


图 4 钢筋 - UHPC 锚固试件设计 mm

综上所述, UHPC - 钢筋黏结性能可靠, 钢筋与超高性能混凝土之间的机械咬合力较大, UHPC - 钢筋的黏结力是普通混凝土 - 钢筋的 8 倍, 不论是钢筋搭接还是套筒连接, 在保证搭接长度和锚固深度的前提下, 均可取得良好的黏结效果, 其中: 锚固长度宜为 $4d$ 以上, 二者之间黏结强度随 UHPC 抗压强度、纤维体积率和纤维长径比的提高而提升; 黏结应力在距搭接头末端约 $2 \sim 3d$ 距离处最大, 超过该距离后黏结应力分布不均匀, 且随长度增加而减低。锚固或搭接时采用后浇材料的组成及物理性质也是影响黏结效果的重要因素。

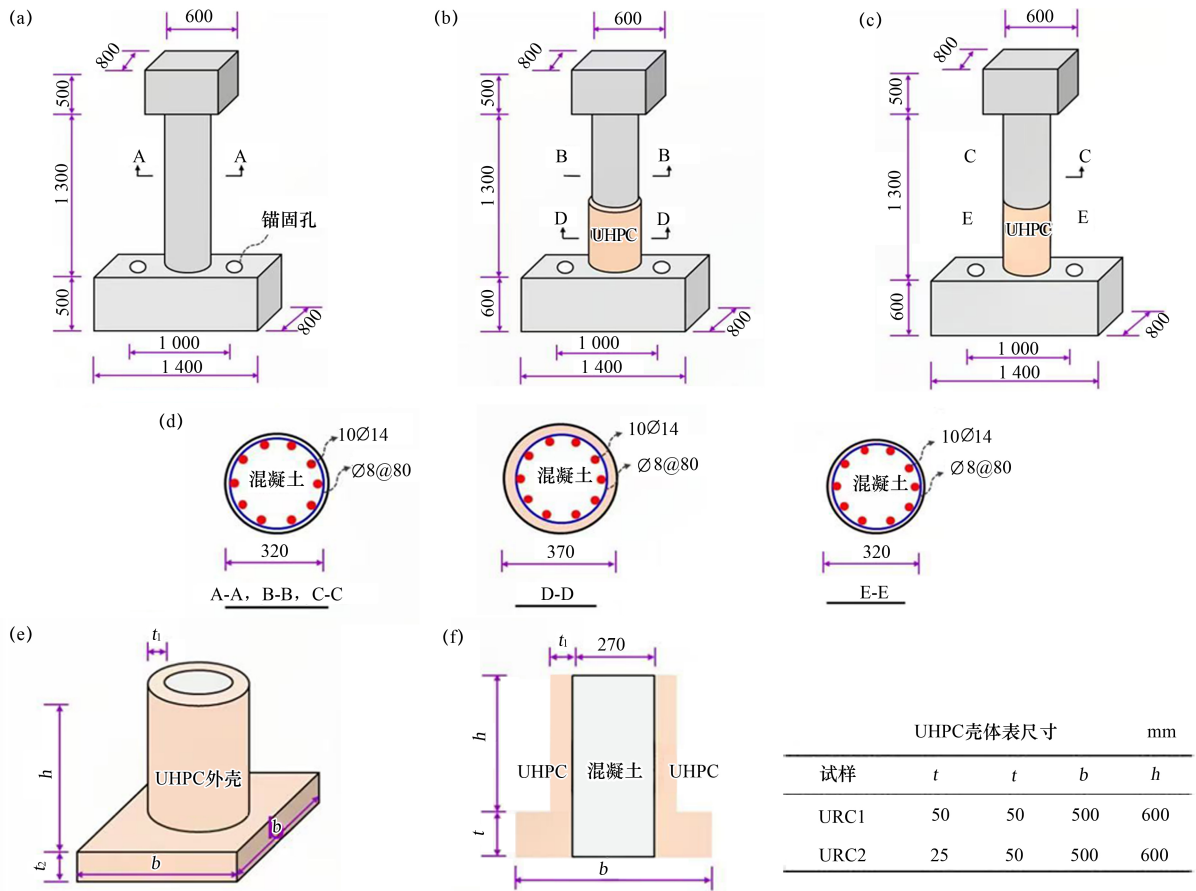
3 UHPC 在装配式桥墩节点连接中的应用

影响装配式桥墩接缝受力性能的两大关键因素是混凝土与 UHPC 的黏结和钢筋与 UHPC 间的黏结。上文文献研究表明 UHPC 和普通混凝土之间具有良好的界面黏性性能, 钢筋与 UHPC 之间的黏结性能远优于普通混凝土。因此, 如何充分发挥 UHPC 优势是装配式连接技术研究的热点问题。

YUAN 等^[29] 制作 3 个试件进行拟静力试验, 其中普通钢筋混凝土试件 RC1 为对照组, URC1 和 URC2 进行局部加固改造, 分别采用 50 mm 及 25 mm 的 UHPC 护套代替混凝土保护层, 如图 5 所示^[29], 图中 t_1 为 UHPC 护套加固墩柱厚度, h 为 UHPC 护套加固墩柱高度, t_2 为 UHPC 护套扩大基础厚度, b 为 UHPC 护套扩大基础宽度。结果表明: UHPC 护套中随机分布的钢纤维的裂纹桥接能力改善了桥墩塑性铰区域破坏过程, 同时显著提升桥墩抗震性能和使用性能。

徐文靖等^[30] 针对采用 UHPC 连接的预制拼装桥墩(如图 6 所示), 采用拟静力试验方法研究其节点损伤情况、整体破坏形式和滞回性能, 试验结果表明, 墩底后浇 UHPC 连接段未发生破坏, 说明构造节点连接可靠; 高墩破坏形式表现为 UHPC 连接段上部普通混凝土的弯曲破坏, 矮墩则表现为接缝明显张开且承台钢筋滑移; 采用 UHPC 连接的预制拼装桥墩具有良好的滞回性能和承载能力。

段昕智等^[31]、王银辉等^[32] 基于拟静力试验和



(a) RC1 的尺寸; (b) URC1 的尺寸; (c) URC2 的尺寸;

(d) 钢筋详图; (e) UHPC 零件的三维视图; (f) UHPC 零件垂直剖面图

图 5 试件尺寸及构造图

mm

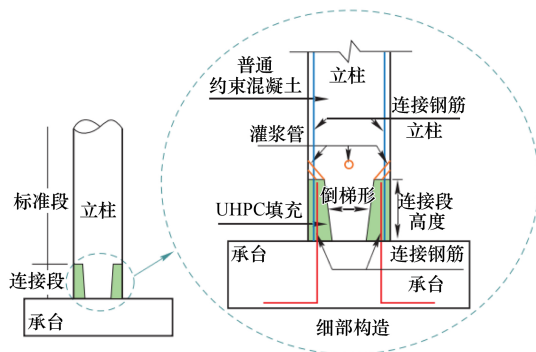


图 6 采用 UHPC 连接的预制拼装桥墩构造

车辆撞击模拟研究 UHPC 连接节段拼装桥墩(图 7)的抗震性能和耐撞性能,结果表明,UHPC 连接节段拼装桥墩的延性、承载能力、耗能能力和残余变形均接近于整体现浇桥墩,具有良好的抗震性能,在往复荷载作用下墩底连接段几乎无损伤,说明该连接方式稳定可靠;UHPC 连接节段拼装桥墩抗撞击性能与整体现浇柱基本一致,并且增大 UHPC 段高度可明显提升预制拼装桥墩的耐撞性能。

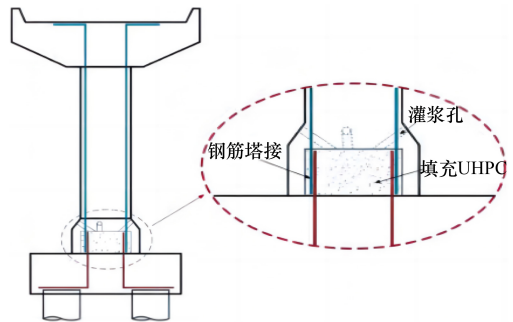


图 7 UHPC 连接节段拼装桥墩

辛崇升等^[33-34]设计制作两种采用 UHPC 加强节点连接的装配式桥墩,结构形式如图 8 所示, d 为钢筋直径。通过拟静力试验对比两装配式桥墩与整体现浇桥墩损伤过程、抗震性能差异,结果表明:UHPC 加强了装配式桥墩节点连接,提高了墩柱损伤容限;损伤过程均为塑性铰上移至普通混凝土区段,墩底接缝张开变形;装配式桥墩与整体现浇桥墩滞回性能相似,且展示出更加优异的刚度保持能力和延性,残余变形明显小于现浇

桥墩,说明两种连接形式可靠。

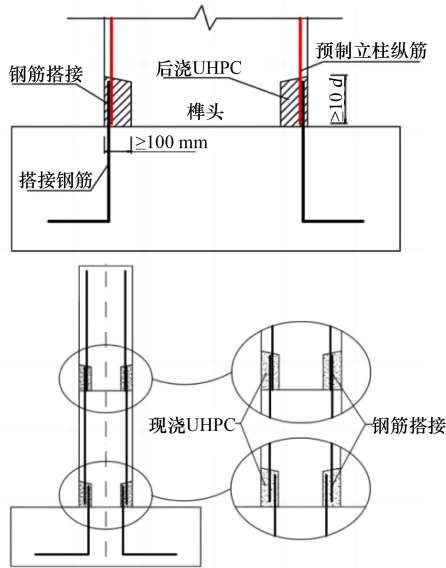


图8 UHPC墩周连接及墩周节段连接

SHAFIEIFAR 等^[35]提出两种采用 UHPC 连接的墩柱与盖梁连接方式,具体构造形式如图 9 所示,对设计构件进行拟静力试验研究连接性能和结构稳定性。结果表明:两种方式连接的试件均表现出良好的延性,并且均有效防止了盖梁破坏。

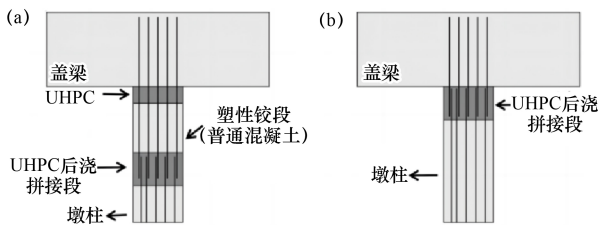


图9 墩柱与盖梁的两种 UHPC 连接方式

FU 等^[36-38]提出了一种带有空心夹层的预制桥墩,并采用超高性能混凝土作为套筒灌浆材料,以套筒内是否配置高强钢筋和空心夹层空心率为变量分析预制桥墩抗震性能影响因素,结果表明:预埋空心钢管的预制墩弯曲承载力略高于预制实心方墩和现浇方墩,并且改善了墩柱变形,柱中高强度钢筋的配置对整体抗震性能存在优化作用;针对震后破坏的预制空心截面桥墩采用 UHPC 和 HTRB600E 高强钢筋加固连接节点(图 10),基于拟静力试验对比加固前后的预制墩抗震性能指标,结果表明:使用 UHPC-高强钢筋加固层显著提高了改造后试件的抗弯能力、能量耗散和初始刚度,有效恢复并增强了其抗震性能。

张广达等^[39]提出新型墩柱-承台承插式节点

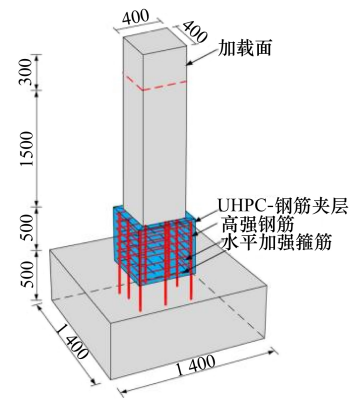


图10 预制墩柱加固方式 mm

连接,如图 11 所示,该连接形式的承台插槽区域预留齿形剪力键,通过 UHPC 墩柱与承台连成整体。经拟静力试验验证,新型 UHPC 连接节点的连接性能可靠;并提出在承插深度不小于 0.8 倍墩柱宽度时,节点连接和承台保持弹性无损伤,即该连接方式节点部位具备良好的耐久性。

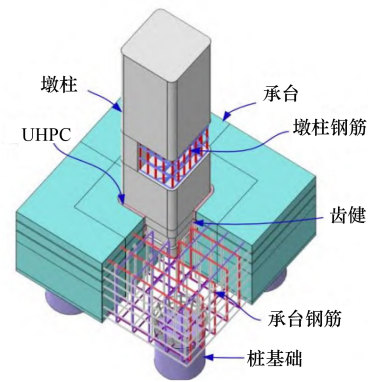


图11 新型承插节点连接构造

结合以上关于 UHPC 在装配式桥墩节点中的应用可知:UHPC 在装配式桥墩节点连接中的应用主要可用于薄弱区域加固、原材料替换、灌浆材料,其中薄弱区域加固多为 UHPC 护套、增大截面法加固等,原材料替换是采用 UHPC 替换原有普通混凝土材料达到优化力学性能的作用,而 UHPC 作为灌浆材料可充分发挥装配式连接形式丰富的优势,可用于湿接缝连接、灌浆套筒连接、金属波纹管连接、承插式连接等。经大量试验及数值模拟研究可知,不论机械连接还是钢筋搭接的后浇超高性能混凝土节点物理性能及抗震性能均可达到甚至优于现浇水平,结合 UHPC 与合理的钢筋连接方式可以保证节点良好的稳定性、耐用性、承载力、变形能力以及耗能能力。

4 结 论

(1) 装配式连接节点部位力学性能是影响预制拼装桥墩抗震性能优劣的重要因素,新材料的兴起为优化节点连接提供新思路,主要应用于薄弱区域加固、原材料替换、灌浆材料。研究常基于拉拔试验、剪切试验和抗震试验等方法对 UHPC 连接节点的力学性能进行评估,包括强度、刚度、位移能力和耐久性等。

(2) UHPC 与普通混凝土之间的界面是组合结构最薄弱的部位,一旦发生界面滑移破坏势必影响荷载传递和结构耐久性,影响二者界面连接的主要因素有 UHPC 龄期、界面粗糙度、钢筋锚固长度、界面配筋率、UHPC 钢纤维。增大界面之间粗糙度可提升黏结失效载荷、破坏载荷、基底抗拉强度及剪切强度。

(3) UHPC 与钢筋的黏结性能直接影响到构件整体质量或节点连接效果,影响 UHPC-钢筋黏结性能主要因素有钢筋锚固长度、钢筋搭接长度、保护层厚度、UHPC 养护龄期、箍筋配置、钢筋强度、UHPC 抗压强度、UHPC 中纤维体积率。锚固长度宜为 $4d$ 以上,二者之间黏结强度随 UHPC 抗压强度、纤维体积率和纤维长径比的提高而提升;黏结强度随着搭接长度的增加而降低。

(4) UHPC 与钢筋混凝土结构协同工作能力良好,可为预制构件提供稳定的节点连接。UHPC 还可用于修复受损桥墩、加固结构薄弱点,使其恢复抗震性能,甚至可达到增强效果。UHPC 作为替换材料可优化节点力学性能。

(5) 目前缺乏装配式结构节点连接形式相关规范,难以实现标准的设计、施工、验收一体化;在重点关注预制装配式结构节点连接稳定性的同时,也应当提升对施工技术及安装设备等发展的关注度。

参考文献:

- [1] XU Y, ZENG Z, WANG Z, et al. Experimental studies of embedment length of precast bridge pier with socket connection to pile cap[J]. Engineering Structures, 2021, 233(2): 111906.
- [2] LIU Y, ZHOU B, CAI J, et al. Experimental study on seismic behavior of precast concrete column with grouted sleeve connections considering ratios of longitudinal reinforcement and stirrups[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16(12): 6077-6104.
- [3] MASHAL M, PALERMO A. Emulative seismic resistant technology for Accelerated Bridge Construction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 119(9): 197-211.
- [4] 王宁宁, 赵奇, 米家禾, 等. UHPC 墩周连接装配式桥墩抗震性能研究[J]. 地震工程学报, 2023(4): 780-791.
- [5] LI Z, DU C, LIANG X, et al. Experimental and numerical investigation on hysteretic behavior of posttensioned precast segmental Concrete-filled double skin steel tubular piers[J]. Structures, 2023, 54: 1772-1787.
- [6] 石岩, 张智超, 钟正午, 等. 预制装配式桥墩连接类型及抗震性能研究综述[J]. 世界地震工程, 2022, 38(2): 205-219.
- [7] 滕锦光. 新材料组合结构[J]. 土木工程学报, 2018, 51(12): 1-11.
- [8] LARRARD F, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model [J]. Cement and concrete research, 1994, 24(6): 997-1009.
- [9] 袁万城, 钟海强, 党新志, 等. 装配式桥墩连接形式抗震性能研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(3): 609-622.
- [10] HU F, YANG C, ZHOU P, et al. Experimental study on mechanical behavior of precast large-cantilevered UHPC bent caps with π -shaped cross-sections[J]. Structures, 2024, 62(4): 106333.
- [11] SEMENDARYA, HAMID W, KHOURY I, et al. Experimental investigation of direct tension bond performance of high-strength concrete and ultrahigh-performance concrete connections[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(9): 1-13.
- [12] SEMENDARY A, SVECOVA D. Factors affecting bond between precast concrete and cast in place ultrahigh performance concrete (UHPC)[J]. Engineering Structures, 2020, 216: 1-15.
- [13] SEMENDARY A, HAMID W, STEINBERG E, et al. Shear friction performance between high strength concrete (HSC) and ultra high performance concrete (UHPC) for bridge connection applications[J]. Engineering Structures, 2020, 205(2): 110122. 1-110122. 14.
- [14] SEMENDARY A, SVECOVA D. Bond Characterization and Interfacial Coefficients at Precast UHPC and Cast-in-

- Place UHPC Interface[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(7): 1–20.
- [15] 张阳, 王兴旺. UHPC 加固 RC 结构交界面抗剪性能试验研究[J]. *中外公路*, 2017(2): 105–111.
- [16] 冯峥, 李传习, 李海春, 等. 超高性能混凝土湿接缝界面粘结性能[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(11): 2393–2404.
- [17] VALIKHANI A, JAHROMI A, MANTAWY I, et al. Experimental evaluation of concrete-to-UHPC bond strength with correlation to surface roughness for repair application[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 238: 117753.
- [18] YU J, ZHANG B, CHEN W, et al. Multi-scale study on interfacial bond failure between normal concrete (NC) and ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 57: 104808.
- [19] ANG H, LEE H, CHO K, et al. Experimental study on shear performance of plain construction joints integrated with ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152: 16–23.
- [20] JU Y, SHEN T, WANG D. Bonding behavior between reactive powder concrete and normal strength concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242, 118024.
- [21] TAZARV M, SAIIDI M. UHPC-filled duct connections for accelerated bridge construction of RC columns in high seismic zones[J]. *Engineering Structures*, 2015, 99(9): 413–422.
- [22] TAZARV M, SAIIDI M. Design and construction of UHPC-filled duct connections for precast bridge columns in high seismic zones[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, 13(6): 743–753.
- [23] 韩方玉, 刘建忠, 刘加平, 等. 基于超高性能混凝土的钢筋锚固性能研究[J]. *材料导报*, 2019, 33(增刊1): 244–248.
- [24] 黄俊, 康爽, 单英杰等. UHPC 后浇装配式节点抗震性能试验研究[J/OL]. *铁道科学与工程学报*: 1–12 [2023–09–30].
- [25] LIANG R, HUANGY. Development length and bond behavior of lap-spliced reinforcement in Ultra-high performance concrete beams[J]. *Engineering Structures*, 2023, 291: p. 116354.
- [26] RONANKI V S, AALETI S, VALENTIM D. Experimental investigation of bond behavior of mild steel reinforcement in UHPC[J]. *Engineering Structures*, 2018, 176(9): 707–718.
- [27] 梁芮, 黄远. 高强钢筋与超高性能混凝土黏结性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(9): 294–302.
- [28] 侍刚, 邵旭东, 高立强, 等. HRB400 钢筋与超高性能混凝土粘结性能试验研究[J]. *桥梁建设*, 2021, 51(6): 61–67.
- [29] YUAN W, WANG X, GUO A, et al. Cyclic performance of RC bridge piers retrofitted with UHPC jackets: Experimental investigation[J]. *Engineering Structures*, 2022, 259(5): 114139.
- [30] 徐文靖, 邵晓东, 马磊, 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.
- [31] 段昕智, 徐文靖, 李建中. UHPC 连接预制拼装桥墩拟静力试验[J]. *结构工程师*, 2022, 38(3): 75–82.
- [32] 王银辉, 冯泽牛, 罗征. 车辆撞击下 UHPC 连接预制拼装桥墩动力响应及耐撞性能优化[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(10): 73–81.
- [33] 辛崇升, 赵奇, 米家禾, 等. UHPC 墩周连接装配式桥墩拟静力试验[J]. *工程抗震与加固改造*, 2023, 45(4): 83–92.
- [34] 巩茂康, 米家禾, 亓兴军, 等. UHPC 连接预制节段桥墩抗震性能拟静力试验研究[J]. *结构工程师*, 2023, 39(5): 148–156.
- [35] SHAFIEIFAR M, FARZAD M, AZIZINAMINIA. new connection detail to connect precast column to cap beam using ultra-high-performance concrete in accelerated bridge construction applications[J]. *Transportation Research Record*, 2018(2672): 207–220.
- [36] FU T, ZHU Z, LIU Y, et al. Study on the seismic performance of prefabricated square pier with hollow interlayer[J]. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 2022(6): 158.
- [37] FU T, ZHU Z, REN X, et al. Research on the seismic behaviour of hollow with high-strength reinforcement using UHPC grouting materials[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e01816.
- [38] FU, T, WANG K, ZHU Z, et al. Seismic performance of prefabricated square hollow section piers strengthened by jacketing using UHPC and high-strength steel[J]. *Structures*, 2023, 47: 449–465.
- [39] 张广达, 苏思博, 韩强等. UHPC 灌浆预制桥墩-承台承插节点抗震性能研究[J/OL]. *中国公路学报*: 1–15 [2023–09–30].