

UHPC在混凝土梁的加固应用研究进展

林上顺¹, 陈柯丹¹, 吴琛¹, 徐晓铭²

(1. 福建工程学院 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福州鑫隆达土木工程检测有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 已经在混凝土结构的加固中得到广泛的应用。文章对在役混凝土梁常见的病害及工程中常用加固方法的优缺点, 以及 UHPC 应用于混凝土梁加固的技术可行性、优缺点、应用前景进行分析, 并对既有的 UHPC 加固梁的施工工艺、受力性能及计算方法等进行综述。研究表明: 与传统的加固方法相比, 采用 UHPC 对钢筋混凝土梁进行加固, 无论在技术可行性、结构耐久性和工程造价方面, 均存在明显的优势; 与未加固的混凝土梁相比, UHPC 加固梁的承载能力和刚度等力学性能均大幅提高, 且对旧桥自重的影响有限; 其加固施工工艺是影响增大截面加固效果的重要因素, 需结合工程案例开展系统研究; 由于加固结构大多已服役数年, 在计算加固构件的承载力时, 初始损伤对结构承载力的折减是今后需要重点研究的问题。

关键词: UHPC; 混凝土梁; 加固应用

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)03-0255-06

Application of UHPC reinforced concrete beams

LIN Shangshun¹, CHEN Kedan¹, WU Chen¹, XU Xiaoming²

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informatization in Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fuzhou Xinlongda Civil Engineering Testing Company, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Ultra-high performance concrete (UHPC) has been widely used in the reinforcement of concrete structures. The common diseases of in-service concrete beams and the advantages and disadvantages of commonly used reinforcement methods in engineering, as well as the technical feasibility, advantages and disadvantages, and application prospect of UHPC applied to the reinforcement of concrete beams were analyzed. The construction technology, mechanical properties and calculation methods of existing UHPC reinforced beams were reviewed. Results show that compared with the traditional reinforcement method, UHPC has obvious advantages in terms of technical feasibility, structural durability and engineering cost for the reinforcement of reinforced concrete beams. Compared with the unreinforced concrete beams, the mechanical properties such as bearing capacity and stiffness of UHPC reinforced beams are greatly improved, and the influence on the dead weight of the old bridge is limited. Its reinforcement construction technology is an important factor affecting the reinforcement effect by increasing section area, which needs further systematic research combined with engineering cases. Since most of the reinforced structures have been in service for several years, how to consider the reduction of the bearing capacity of the structure due to the initial damage when calculating the bearing capacity of the reinforced members is a key issue that needs to be studied in the future.

Keywords: UHPC; concrete beam; reinforcement application

收稿日期: 2021-04-27

基金项目: 福建省交通厅交通科技项目(201801)

第一作者简介: 林上顺(1972—), 男, 福建永泰人, 教授, 博士, 研究方向: 预制拼装桥梁。

钢筋混凝土梁已经在桥梁工程中得到广泛的应用,但近年来的桥梁检测资料表明,大量在役钢筋混凝土梁存在不同程度的损伤,梁体病害主要出现在混凝土开裂、承载力下降和挠曲变形等^[1-3],需要进行加固与改造。目前钢筋混凝土梁常用的加固与改造方法主要有增大截面加固法、粘贴钢板加固法、粘贴纤维带加固法和预应力加固法等,其中增大截面加固法多采用普通混凝土,加固后结构自重增加较大,对桥梁下部结构的受力有一定影响;粘贴钢板加固法虽然能在一定程度上改善钢筋混凝土梁的受力性能,但由于钢板长期暴露在外,需要定期进行防腐涂装,养护费用较高;粘贴纤维带加固法主要用于混凝土表面裂缝封闭,对结构刚度提升的作用有限;预应力加固法采用体外预应力,其施工工艺较复杂,而且同样存在养护费用较高的问题。

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 是一种新型水泥基复合材料,其组成包括:水泥、级配良好的细砂、矿物掺合料、高效减水剂、微细钢纤维等。近年来,UHPC 因其具有

较高的抗压、抗拉强度和良好的耐久性能,在新桥建造、旧桥加固中得到广泛的应用,拓展了增大截面加固领域。采用 UHPC 对损伤钢筋混凝土梁进行增大截面加固,其加固层的厚度可以显著减小,对结构的自重增加有限,而且加固后的养护费用较小,具有广阔的应用前景。为此,本文拟对国内外在 UHPC 应用于混凝土梁的加固相关研究进行系统分析。

1 钢筋混凝土梁的常见病害及加固方法

目前,在役的钢筋混凝土梁存在的病害有:梁体出现蜂窝、麻面、剥落、空洞、混凝土碳化、钢筋锈蚀等,包括^[4]:梁体混凝土开裂,具体位置常在底部马蹄处、马蹄与腹板交接处、翼缘板、腹板等;钢筋裸露锈蚀等。具体如图 1 所示。

针对上述病害,混凝土桥梁的加固与改造方法主要有增大截面加固法、粘贴钢板加固法、粘贴纤维带加固法、预应力加固法等^[5]。各加固方法的适用条件及特性如表 1 所示。



图 1 钢筋混凝土梁常见病害

Fig.1 Common diseases of concrete beams

表 1 桥梁结构加固方法的适用条件及特性

Tab.1 Applicable conditions and characteristics of the reinforcement method of bridge structures

加固方法	适用范围	优点	存在不足
增大截面	梁(板)桥及拱肋的加固	加固效果显著,施工工艺较成熟	增大结构自重,可能出现基础承载力不足
粘贴钢板	需要增加配筋量的钢筋混凝土桥梁	短期内加固效果明显,采用钢板加固时对桥下净空影响较小	会对主梁造成一定的损伤,钢材容易锈蚀
粘贴纤维	需要增加配筋量或钢筋锈蚀严重的旧桥	施工方便,可操作性强,对桥下净空无影响,不增加结构自重	造价较高,对结构刚度的提升无帮助
预应力	抗弯或抗剪不能满足使用要求的钢筋混凝土桥梁	能较大幅度提升结构的刚度和承载能力	施工工艺较为复杂,桥梁的后养护费用较高

传统的增大截面加固法采用同等强度混凝土增大梁截面以提高桥梁刚度和承载能力。但由于加固后桥梁结构的自重增大,会出现桥墩和基础承载力不足等问题^[6-7]。因此,需要探讨一种新型加固方法,使加固后的钢筋混凝土梁不仅强度、刚度、耐腐蚀能力得到提高,且能满足基础承载力的要求。采用UHPC对损伤钢筋混凝土梁进行增大截面加固,一方面UHPC与混凝土具有相近的力学性能,能够有效黏结,加固效果较好;另一方面,UHPC强度高,加固层厚度不大,对结构自重的影响不明显。另外,粘贴钢板、粘贴纤维和外张预应力加固的工程造价较高,采用UHPC增大截面加固构件能够有效控制工程修复和加固的成本^[8]。

2 UHPC加固钢筋混凝土梁的施工工艺

2.1 UHPC材料制备及力学性能

目前,UHPC大多采用高温和蒸压等养护措施使其具备良好的力学性能,这不仅增加了工程应用难度同时也提高了加固成本。因此,研发一款适用于工程实际的免蒸养UHPC产品,并对其加固钢筋混凝土结构(reinforce concrete construction,RC)方法进行研究,具有重大意义。

国内外学者通过选用不同的原材料和配合比设计,对免蒸养情况下的UHPC进行一系列研究^[9-12]。结果表明,钢纤维在UHPC基体中的增强、增韧作用显著,UHPC的抗压强度随钢纤维体积掺量的增加明显提高,但钢纤维体积掺量大于3.5%时,容易降低拌合物的和易性,强度反而降低。Tam、史才军等^[13-14]的研究表明,水胶比对UHPC的力学性能影响最大,在相同材料组分条件下,水胶比增大会提高UHPC新拌合物的流动性,降低收缩性能和强度。

针对原材料中的粗骨料和胶凝材料,许多学者也开展了相关研究。Lin等^[15]选用不同粒径的骨料进行试验,结果表明:在掺入粗骨料粒径达到8mm时,UHPC的各项力学性能最佳,抗压强度达到185MPa。戎志丹等^[16]通过加入高强度骨料、大掺量超细工业矿渣,选用多种规格钢纤维复掺等方式配置UHPC,结果表明,掺入玄武岩骨料及混掺钢纤维的UHPC力学性能最好,其90d抗压和抗折强度分别达到180和20MPa。刘斯凤

等^[17]采用天然黄砂作为细骨料,掺入超细辅助性胶凝材料,制备出了28d抗压强度超过200MPa的UHPC。Wille等^[18]选用粒径极细的低热水泥和超细硅灰,通过调整硅灰掺量、水胶比和砂胶比,制备出抗压强度超过200MPa的UHPC。

2.2 UHPC与既有RC结构加固工艺

UHPC加固既有RC的关键在于既有结构的界面黏结上。Tayeh等^[19-21]对加固混凝土表面分别采用直接浇筑,以及钢丝刷刷毛、喷砂、钻孔、切槽等5种处理方式,结果表明,直接浇筑、钢丝刷刷毛以及喷砂处理3种界面处理方法均能够保证较好的黏结强度,其中喷砂处理获得的界面黏结强度最高。王冰^[22]开展了UHPC与既有RC的界面黏结性能试验研究,结果表明,原混凝土强度对界面黏结强度影响不大;原混凝土表面越粗糙,加固界面的黏性强度越大,最佳粗糙度在4~5mm;随着UHPC龄期增大,界面黏结强度增大,但逐渐减缓。

2.3 工程实例

利用UHPC对钢筋混凝土结构加固是在结构外包UHPC,通过增大构件的截面积起到提高承载力的作用,其施工工艺和加固技术与普通增大截面加固方法类似。该方法施工简便、适用范围广,利用UHPC对原构件加固能够有效避免加固后结构承载力过大、结构净空受到局限等影响。

沪嘉高速(S5)公路是我国第一条高速公路,于1988年10月通车^[23]。桥梁主梁结构为预应力槽型梁,上铺预制钢筋混凝土桥面板,由于槽型梁和桥面板均为预制而成,未形成固结,且厚度较小,承载能力较低。针对桥面出现混凝土强度降低、裂缝病害严重等问题,对该桥甲式桥面板下增设5~20cm厚的UHPC,与原梁形成组合截面,同时满足施工可行和承载力提高的要求。

3 UHPC加固梁试验研究

3.1 加固梁受弯性能试验

大量研究表明,利用UHPC加固可大幅提高钢筋混凝土梁的受力性能。Katrin等^[24]对现有混凝土结构的修复潜力进行评估,利用UHPC对12根足尺钢筋混凝土梁进行加固,受弯承载力可提高30%以上。Lampropoulos等^[25]利用UHPC对钢筋混凝土梁受拉侧加固,对加固梁进行受弯性能试验研究,再结合有限元数值模拟分析验证

试验结果。结果发现利用 UHPC 在构件受拉区加固能够有效改善加固构件的力学性能,试件加固后的开裂荷载、极限承载力和截面刚度均得到大幅提高,其中 UHPC 三向加固形式对加固梁的受弯性能提高效果最为明显,承载力最大增幅接近 40%。Prem 等^[26]制作了跨度为 1 500 mm 的缩尺梁模型,通过预压高达 80% 的破坏荷载引入初始损伤,再利用 UHPC 对损伤梁铺装层进行加固。试验结果表明,加固梁的极限承载力较未加固梁提升了 30%。

3.2 加固工艺对加固效果的影响

针对加固工艺对 UHPC 加固梁受弯性能的影响,许多学者也开展了系列的研究。Al-Osta 等^[27]为研究加固工艺对 UHPC 加固钢筋混凝土梁受弯性能的影响展开试验。一部分试件采用现浇加固方式,另一部分试件通过结构胶将 UHPC 预制板与原试件进行连接。结果表明,两种加固方式下试件均未发生界面脱离,UHPC 加固梁的承载能力和截面刚度均得到明显提高。王伟^[28]设计不同粗糙度新旧混凝土黏结面,对 3 根 UHPC 加固钢筋混凝土梁进行静力加载试验,通过加载 0.2~0.8 倍极限承载力的疲劳荷载,观察加固梁的破坏过程,结果表明,经刻槽处理的加固梁具有更高的疲劳寿命。

成煜^[29]针对不同加固方式、加固层厚度、初始混凝土强度和配筋率对 UHPC 加固钢筋混凝土梁受弯性能的影响,共开展了 20 根加固梁试验研究。研究表明:利用 UHPC-碳纤维网格复合对混凝土梁受拉区加固时,加固效果最为显著,且加固层厚度是影响加固梁承载力和刚度的主要因素。孔小芳^[30]把加固层厚度作为研究变量,利用 UHPC 对钢筋混凝土梁进行局部加固。对比未加固钢筋混凝土梁可知,加固梁具有更高的抗弯能力,承载力随着加固厚度的增加而增大,UHPC 加固梁可以有效延迟裂缝的开展,降低试件破坏时的弯曲变形。

4 加固构件计算方法

20 世纪 70 年代,我国首次引进前苏联的结构加固设计理论,考虑在平截面假定的基础上,参考叠合构件提出了增大截面后加固构件的设计计算方法。随后我国科研人员系统总结了增大截面法的加固补强案例,针对加固梁的加固位置又提

出了不同的计算方法^[31];加固部位在梁的受压区时,考虑截面“应力超前现象”,仍然沿用叠合梁的计算方法来计算加固梁的承载力;加固位置在梁受拉区时,加固后梁的承载力采用《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)^[32]中的计算方法。

在此基础上,许多学者对 UHPC 加固试件可能出现的不同情况进行系列研究。张树仁、洪刚等^[33-34]以加固混凝土和原混凝土截面是独立工作的情况,考虑加固试件二次受力的影响,推导 UHPC 加固钢筋混凝土梁受弯承载力计算方法,并结合工程实例验证公式的可靠性。杜斌等^[35]针对试件带荷载加固的情况,加固材料的强度受原结构变形的影响,同时考虑试件分阶段受力的特点,推导加固梁正截面抗弯承载力计算公式。杨斌等^[36]考虑加固试件的二次受力特征,对增大截面加固受弯构件可能出现的破坏形态进行分类研究,通过定性分析得出,在保证必要构造措施的基础上,增大截面加固受弯构件的二次受力特征主要体现在正常使用极限状态,承载能力极限状态可近似按照一次受力计算。

成煜、陈彪^[29,37]考虑新增 UHPC 加固层的承载能力未能完全发挥作用等原因,参考现有规程中增大截面加固受弯构件的承载力计算公式,引入加固部分利用系数对受弯承载力进行折减,结合试验结果给出利用系数。蒋炳炎等^[38]结合某体育馆看台加固的工程实例,推导外包钢筋混凝土在加固过程中的设计计算过程,提出增大截面加固梁承载力简化计算方法,利用静载试验对公式进行修正。

5 结论

UHPC 加固钢筋混凝土受弯构件采用增大截面加固方法。该方法使用范围广且加固效果显著,采用 UHPC 加固后的混凝土受弯构件承载能力和刚度等力学性能均得到大幅度提高。加固施工工艺是影响增大截面加固效果的重要因素。需要加固的结构,对其加固界面进行凿毛处理,并采用结构界面胶对新旧混凝土进行黏接,以保证结构的加固界面完好。在实际工程中,由于加固结构大多已服役数年,其承载力、耐久性等受力性能均有所降低。因此,在计算加固构件的承载能力时,初始损伤对结构承载力的折减,是今后需要研究的关键问题。

旧桥的技术状况评定和损伤评估,是确定采用维修、加固或拆除的依据;如果旧桥具备加固条件,那么剩余承载力评估,以及根据结构的损伤情况,开展UHPC加固后的钢筋混凝土梁的承载力计算方法,是今后需要进一步研究的内容,也是采

用UHPC进行旧桥加固的设计依据;在施工工艺方面,由于旧桥多处于通车状态,对加固施工干扰较大,因此需要结合工程案例,采用UHPC进行钢筋混凝土梁加固的施工方法的系统研究。

参考文献:

- [1] 李亚东. 既有桥梁评估初探[J]. 桥梁建设, 1997, 27(3): 20-23.
- [2] 张方, 黄俊豪, 金聪鹤, 等. 桥梁评估与加固理论2019年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 76-88.
- [3] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96.
- [4] 严浩. 预应力砼连续T梁桥病害成因分析及处治措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [5] 张开鹏, 蒋玉龙, 曾雪芳. 桥梁加固的发展与展望[J]. 公路, 2005(8): 299-301.
- [6] 高燕青, 张春生, 丁亚红. 钢筋混凝土结构体系抗震加固技术综述[J]. 混凝土, 2015(11): 129-133.
- [7] 张益多, 刘荣桂. 混凝土结构加固技术研究及应用综述[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2003, 24(6): 91-94.
- [8] MIYAMOTO A, KAWAMURA K, NAKAMURA H. Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2000, 15(1): 45-55.
- [9] 史才军, 何稳, 吴泽媚, 等. 纤维对UHPC力学性能的影响研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(8): 2227-2236, 2247.
- [10] 邵旭东, 李芳园, 邱明红, 等. 钢纤维特性对UHPC轴拉性能与弯拉性能的影响及对比研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(4): 51-64.
- [11] 杨简, 陈宝春, 苏家战. 钢纤维对超高性能混凝土弹性模量的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(5): 652-658.
- [12] 王德辉, 史才军, 吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(1): 141-149.
- [13] TAM C M, TAM V W Y, NG K M. Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong[J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 79-89.
- [14] 史才军, 肖江帆, 曹张, 等. 材料组成对UHPC性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(6): 1005-1011.
- [15] LIN Y G, KARADELIS J N, XU Y. A new mix design method for steel fibre-reinforced, roller compacted and polymer modified bonded concrete overlays[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 333-341.
- [16] 戎志丹, 孙伟, 张云升. 超高性能混凝土的制备及力学性能研究[C]//中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会纤维混凝土委员会. 第十二届全国纤维混凝土学术会议论文集. 北京: 新型建筑材料杂志社, 2008: 5.
- [17] 刘斯凤, 孙伟, 林玮, 等. 掺天然超细混合材高性能混凝土的制备及其耐久性研究[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(11): 1080-1085.
- [18] WILLE K, NAAMAN A E, PARRA-MONTESINOS G J. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): a simpler way[J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(1): 46-54.
- [19] TAYEH B A, ABU BAKAR B H, MEGAT JOHARI M A, et al. Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay[J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 538-548.
- [20] TAYEH B A, ABU BAKAR B H, MEGAT JOHARI M A. Characterization of the interfacial bond between old concrete substrate and ultra high performance fiber concrete repair composite[J]. Materials and Structures, 2013, 46(5): 743-753.
- [21] TAYEH B A, BAKAR B H A, MEGAT JOHARI M A, et al. Flexural strength behavior of composite UHPFC-existing concrete[J]. Advanced Materials Research, 2013, 701: 32-36.
- [22] 王冰. 超高韧性水泥基复合材料与混凝土的界面粘结性能及其在抗弯补强中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [23] 王春晖. 采用超高性能混凝土加固槽型梁预制桥面板技术探讨[J]. 上海公路, 2018(1): 58-61, 5.
- [24] KATRIN H, EMMANUEL D, EUGEN B. Experimental investigation of composite ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and conventional concrete members[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(1): 93-101.

- [25] LAMPROPOULOS A P, PASCHALIS S A, TSIIOULOU O T, et al. Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)[J]. *Engineering Structures*, 2016, 106: 370-384.
- [26] PREM P R, RAMACHANDRA MURTHY A, RAMESH G, et al. Flexural behaviour of damaged RC beams strengthened with ultra high performance concrete[C]// *Advances in Structural Engineering*, 2015: 2057-2069.
- [27] AL-OSTA M A, ISA M N, BALUCH M H, et al. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 134: 279-296.
- [28] 王伟. 增大截面加固构件长期性能试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [29] 成煜. UHPC 加固混凝土构件受弯性能及轴压性能试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [30] 孔小芳. UHPC 加固钢筋混凝土梁的抗弯性能研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2020, 42(4): 46-54, 17.
- [31] 周希茂. 增大截面法加固钢筋混凝土框架的非线性有限元分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [33] 张树仁, 宋建永, 张颂娟. 桥梁加固钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算方法及试验研究[J]. *中国公路学报*, 2003, 16(3): 65-69.
- [34] 洪刚. 增大截面法加固混凝土结构的应用[J]. *国外建材科技*, 2004, 25(6): 73-74.
- [35] 杜斌, 于可. 考虑分阶段受力的桥梁加固受弯构件正截面强度计算方法研究[J]. *公路工程*, 2008, 33(1): 110-113.
- [36] 杨斌, 安关峰, 单成林. 增大截面加固受弯构件的正截面承载力计算方法[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(6): 81-88.
- [37] 陈彪. 二次受力下自密实混凝土加固梁受弯性能试验研究[D]. 福州: 福州大学, 2011.
- [38] 蒋炳炎, 周益强, 杨晓峰. 钢筋混凝土框架外包加固的简化计算方法[J]. *山西建筑*, 2007, 33(10): 14-15.

(责任编辑: 陈雯)