

基于 UHPC 材料的高性能装配式桥梁结构研发

邵旭东^{1,2}, 邱明红^{1,2}

(1. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对现有装配式桥梁结构中中共性的技术难题, 提升装配式桥梁结构的性能与品质, 笔者团队以超高性能混凝土(UHPC)为基础, 研发了具有高施工性能、高使用性能和高耐久性能的高性能装配式桥梁结构体系。本文介绍了笔者团队研发的 3 类高性能装配式桥梁结构: (1) 装配式 UHPC 箱梁结构; (2) 全预制 UHPC “ π ” 形梁; (3) 全预制钢-UHPC 轻型组合“ π ”形梁。通过大量的试验研究和理论分析, 掌握了各类装配式 UHPC 桥梁结构的基本受力性能, 并初步建立了计算理论和设计方法。研究结果表明: (1) 等强度承载条件下, 装配式 UHPC 桥梁结构自重可降为传统结构的 40%~50%, 以方便运输, 实现大构件快速化架设; (2) 因 UHPC 中钢筋锚固长度仅需 10 倍钢筋直径, 现场各梁间结合部可大幅度缩小, 可实现现场零焊接, 减少现场作业量, 并完全规避节点开裂、渗漏的风险; (3) 结构抗腐蚀、抗冻、防渗漏性能优良, 基本实现结构设计寿命周期内免维护。综合而言, 基于 UHPC 材料的高性能装配式桥梁结构有望突破现有装配式桥梁中的技术瓶颈, 具有广阔的应用前景。

关键词: 桥梁工程; 装配式结构; 超高性能混凝土; 高性能桥梁结构体系

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)02-0160-08

Research of high performance fabricated bridge structures based on UHPC

SHAO Xudong^{1,2}, QIU Minghong^{1,2}

(1. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To address at the common technical problems existing in fabricated bridges, and to improve the performance and quality of bridge, based on ultra high performance concrete (UHPC) technology, the research group at Hunan a high performance fabricated bridge structure system is developed with excellent performance in workability, serviceability and durability. In this paper, three types of high performance bridge structures were introduced: i. e. fabricated UHPC box girder; fully fabricated UHPC π -shaped girder; and fully fabricated steel-UHPC π -shaped composite girder. Based on a great number of experimental studies and theoretical analysis, the research group revealed the basic mechanical performance of the fabricated UHPC bridge structure, and preliminarily developed the calculation theory and design method for them. Results show that: (1) With the same load-bearing capacity, the self-weight of UHPC fabricated bridge structure can be reduced to 40%~50% compared with conventional fabricated bridge structures, and it's convenient for large bridge component to be transported and hoisted, (2) Since the anchorage length of rebars can be dropped to 10d in UHPC, the field-cast joint between various girders can be obviously reduced. As a result, the welding of rebars and the amount of work in the construction site can be canceled and decreased respectively, while the risk of cracking and leakage in joint could be completely avoided; (3) The UHPC fabricated bridge structures could be maintenance-free in the service life owing to its excellent corrosion, freeze-thaw cycles and leakage resistance. To sum up, since the high performance fabricated UHPC bridge structures have the potential of overcoming technical bottlenecks in conventional fabricated bridges, they should have a promising future.

Key words: bridge engineering; fabricated structure; ultra high performance concrete; high performance bridge structure

收稿日期: 2018-10-01 修改稿日期: 2019-03-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0705400); 湖南省科技重大专项(2017SK1010); 广东省交通运输厅科技项目(2013-02-036)、广东省交通运输厅 2017 年重大科技专项(科技 2017-01-002); 湖南省研究生科研创新项目(CX2017B119)

第一作者: 邵旭东(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事大跨与新型桥梁结构、基于 UHPC 的高性能桥梁新结构及旧桥加固技术研发等方向的研究。E-mail: shaoxd@hnu.edu.cn

装配化是桥梁工业化的主要特征,也是我国建设领域“十三五”期间转型升级与战略产业发展方向。2016年9月,国务院印发《国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见》,力争10年内使装配式建筑占新建建筑的比例达到30%;2016年7月,交通运输部印发《交通运输部关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见》,指出大力推进钢结构桥梁建设标准化设计、工业化生产、装配化施工,提升桥梁工程的质量品质。

中小跨径装配式桥梁在我国桥梁建设中具有举足轻重的地位。根据交通运输部统计资料,到2017年底,全国公路桥梁达到83.25万座,其中中小跨径桥梁73.61万座,占比达88.4%。推动装配式中小跨径桥梁的发展,对推动桥梁施工方式变革、提高工程质量、缩短工期、减少劳动强度、降低造价、节能环保等具有重要意义。

装配式桥梁目前主要有装配式混凝土梁(空心板、T梁、小箱梁等)、装配式钢-混凝土组合梁、装配式钢箱梁等三大类型。但大量的工程实践表明,现有的装配式桥梁结构仍存在以下两个主要技术瓶颈。

(1)现有装配式桥梁结构或吊装重量大,或现场施工作业量大,装配化水平有待进一步提高:预应力混凝土梁(空心板、T梁、小箱梁)自重较大,跨径超过30 m,梁体重量偏大,对运输、吊装设备和施工安全性要求更高,导致大尺寸构件的装配化施工难以实施;常规混凝土梁和钢-混凝土组合梁桥面板现场作业量大、工期长;钢箱梁现场焊接量大,施工质量不易控制。因此上述常规结构的装配化施工水平仍有提高空间。

(2)现有装配式桥梁结构的梁体、连接节点易开裂、破损、渗漏,耐久性较差,后期维护费用较高:预应力混凝土梁(空心板、T梁、小箱梁)横向连接节点属于薄弱环节,易失效开裂导致单梁(板)受力,且易出现渗漏等技术难题;钢-混凝土组合梁负弯矩区桥面板在实际运营阶段易出现裂缝,加之雨水渗入侵蚀,影响结构安全性和耐久性;钢箱梁采用传统的正交异性钢桥面系,存在钢桥面板易出现疲劳裂缝和钢桥面铺装极易损坏的难题。上述病害导致常规结构的后期维护费用偏高。

总体而言,现有装配式中小跨径桥梁在施工性能、使用性能、耐久性能等方面仍有很大的改进空间。面对桥梁标准化、装配化、工业化的现实需求,在现有中小跨径桥梁结构体系的基础上,

发展具有高施工性能、高使用性能、高耐久性能的高性能装配式桥梁结构是重要发展趋势。

结构技术的重大变革,材料突破是根本途径。目前传统中小跨径桥型结构已基本定型,结构性能的突破将依赖于新材料的应用。超高性能混凝土(Ultra-high performance concrete, UHPC)是一种基于最大密实度原理配制的水泥基复合材料,具有优异的力学性能和耐久性,被认为是20世纪最具创新性的水泥基工程材料之一。因此, UHPC的引入,将有望给传统装配式中小跨径桥梁技术带来革命性的变化,实现装配式桥梁的高性能化。

湖南大学从1993年开始研究UHPC^[1],是国内最早开展相关研究的单位之一,经过20余年的研究与积累,熟练掌握UHPC的配制方法和基本性能^[2-4]。以此为基础,笔者团队切合国家重大需求,研发了具有高施工性能、高使用性能和高耐久性能的高性能装配式桥梁结构体系,以期从根源上解决传统桥梁所面临的难题。本文介绍了团队基于UHPC材料研发的高性能装配式桥梁结构,展示了相关试验和工作基础。这些原创性研究有望攻克现有装配式桥梁中的共性技术难题,提升桥梁结构的性能与品质,具有十分广阔的应用前景。

1 关于超高性能混凝土(UHPC)

超高性能混凝土(UHPC),系指抗压强度在150 MPa以上,具有超高韧性、超长耐久性的水泥基复合材料的统称^[1]。最具代表性的超高性能混凝土材料为活性粉末混凝土RPC(Reactive Powder Concrete),最早由法国学者于1993年提出^[6]。UHPC主要由水泥、硅灰、细骨料、高效减水剂及钢纤维等材料组成,按照最大密实度原理构建(图1),使得材料内部的缺陷(孔隙与微裂缝)减至最少,从而获得优异的力学性能和耐久性^[7]。

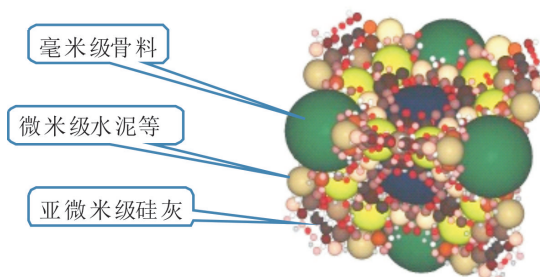


图1 UHPC的最大堆积密度配置原理

Fig.1 Maximum packing density construction theory of UHPC

研究表明^[8],由于UHPC中分散的钢纤维可以大大减缓材料内部微裂缝的扩展,从而使材料

表现出超高的韧性和延性;同时,由于结构致密、孔隙率低,UHPC材料的耐久性可达200 a以上。

UHPC的主要力学性能和耐久性能指标如表1所示。

表1 UHPC材料的基本性能指标

Tab. 1 Basic performance indexes of UHPC

抗压强度	抗折强度	弹性模量	徐变系数	收缩应变	氯离子扩散系数
≥ 150 MPa	≥ 25 MPa	40~60 GPa	0.2~0.8	蒸养后为0	约为普通混凝土的1%

由于力学性能和耐久性能优异,UHPC备受学者和工程师的青睐。目前UHPC已成为国内外土木工程领域的热点研究之一,法国、日本、美国、瑞士、中国等国家相继颁布了UHPC材料或结构的技术规程^[4]。

由于UHPC具有超高的强度,在同等承载力条件下,UHPC结构的尺寸介于普通混凝土结构和钢结构之间,且接近于钢结构(图2)。因此,当UHPC应用于实际工程时,可大大减小截面尺寸、降低结构自重,并有利于装配化施工。目前,UHPC已逐步在国内外的中小跨径的装配式桥梁中获得应用,并显示出广阔的应用前景。据不完全统计^[9],到2016年底,世界各国应用UHPC材料的装配式桥梁已超过400座。

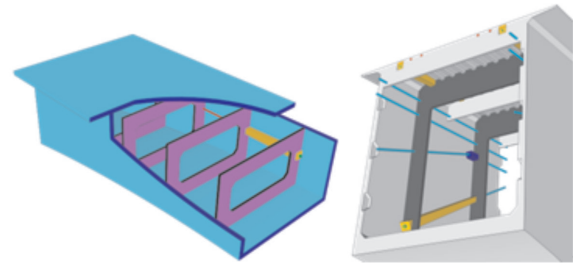


图3 装配式UHPC箱梁

Fig. 3 Assembled UHPC box girder

具体分析,其技术要点包括:

(1)结构轻型化:利用UHPC轻质高强的特点,减小结构板件尺寸,板件尺寸仅为传统箱梁的 $1/2 \sim 1/3$,大幅减轻结构自重,自重一般约为普通混凝土箱梁的40%~60%;

(2)设置密集横隔板:箱内设置了间距3~5 m的密集横隔板,以达到以下目的:①防止箱梁扭转畸变;②对顶板加劲,从而取消横向预应力;③对腹板加劲,从而取消竖向预应力;④对底板加劲,以防止承压失稳;⑤方便体外预应力的转向与锚固;

(3)仅采用单向预应力:由于UHPC高抗拉强度,同时UHPC箱梁中密集分布横隔板对箱梁顶、底、腹板的加劲作用,可取消箱梁横向预应力及竖向预应力,从而将传统的三向预应力体系转变为单向(纵向)预应力体系,简化预应力体系施工,更易于保证箱梁预应力的施工质量;

(4)采用体内、外混合配束:由于UHPC箱梁板件厚度的限制,纵向预应力布置为部分体内索、部分体外索;

(5)采用节段预制拼装施工方法:UHPC经高温蒸养,后期收缩基本为零,后期徐变大幅度减小。为有效解决主跨过度下挠问题,UHPC箱梁桥宜考虑采用预制节段法施工,以方便UHPC箱梁的养护,保证施工质量和加快施工速度。

2.3 基本受力性能与工作基础

自2012年以来,项目组针对新型装配式UHPC箱梁结构开展了一系列试验研究,包括UHPC徐变特性、顶板局部受力性能、扭转畸变性能、剪力滞、接缝构型、腹板抗剪性能等方面,



图2 不同材料等强度截面尺寸对比

Fig. 2 Comparison of cross section dimensions of different materials at equal strength

2 装配式UHPC箱梁结构研发

2.1 研发背景

大跨预应力混凝土箱梁桥以其良好的结构性能和经济性,在60~200 m范围内极具竞争力。大量工程实践表明,目前在役的大跨箱梁桥普遍存在梁体开裂、跨中过度下挠等病害和梁体自重过大、采用悬臂浇筑施工工期较长等问题^[10-12]。

2.2 研发思路及技术要点

针对大跨箱梁桥的上述病害和不足,项目组利用UHPC高抗拉强度和低徐变的特点,提出了一种与UHPC特性相匹配的新型装配式UHPC箱梁结构^[13],如图3所示。

如图4所示.通过试验,掌握了UHPC薄壁箱梁在不同荷载模式下的基本受力性能,验证了本技术的可行性:

(1)UHPC梁徐变变形仅为常规混凝土梁的20%;

(2)密集横隔板UHPC箱梁通过高性能材料的应用和对桥面支承体系的改变,扩展了桥面板线弹性工作区间,试验结果发现5.5倍设计车轮局部荷载作用下桥面板仍处于线弹性受力阶段,具有较高的抗超载能力;

(3)不同隔板间距的1:5缩尺UHPC箱梁模型的偏心扭转试验表明,相比隔板间距为1.07 m的UHPC箱梁,隔板间距为0.8 m时UHPC箱梁最大扭转畸变应力可降低30%以上;

(4)UHPC箱梁抗剪试验结果表明UHPC腹板剪切抗裂强度约为8 MPa,而主跨400 m的UHPC连续箱梁桥腹板(壁厚30 cm)的最大主拉应力约4.5 MPa,抗裂安全度为1.8.



图4 装配式UHPC箱梁试验

Fig. 4 Experimental tests of assembled UHPC box girder

目前装配式UHPC箱梁结构拟应用于两座实桥:(1)英德市S292线延长线一级公路新建工程北江四桥,为单跨102 m的UHPC简支箱梁桥;(2)拟应用于广东省清远西部一级公路工程大有互通立交省道S114跨线主桥,为30+50+30 m UHPC连续箱梁桥.基于拟应用工程,项目组编制了专用技术规程,作为设计、施工的受控文件.

2.4 适用条件与显著效果

传统预应力混凝土箱梁桥自重大,且普遍存在主梁下挠、开裂等问题,限制了跨径的进一步提高,并影响了桥梁的使用性能,且悬臂浇筑施工周期较长.项目组研发了装配式UHPC箱梁结

构,适用于60~500 m的连续梁或连续刚构桥.若将该新型桥梁结构应用于大跨径连续梁或连续刚构桥,具有以下显著效果:

(1)UHPC箱梁桥继承了常规混凝土箱梁桥的经济性优点,研究表明,UHPC箱梁桥在60~500 m范围内将对其它桥梁方案形成有力竞争;

(2)得益于UHPC优异的力学性能,UHPC箱梁桥能够同时避免梁体开裂、下挠等常见病害,提高了耐久性.

(3)采用节段预制拼装施工方法,UHPC箱梁桥可实现快速化施工,节省施工周期.

3 全预制UHPC“π”形梁研发

3.1 研发背景

混凝土空心板和T梁桥具有结构简单、受力明确、造价低廉、架设方便等优势,因而在我国既有公路中小跨径桥梁中应用广泛.空心板主要用于20 m跨径以内和桥下净空受限等情况,T梁桥主要用于20~40 m跨径范围内.但多年的工程实践表明,空心板铰缝易损坏导致单板受力,T梁桥在运营期横隔板易损坏、翼缘板纵向接缝易开裂、渗漏^[14-15].装配化施工过程中,湿接缝钢筋需焊接,增加了现场工作量.此外,对于预应力混凝土空心板和T梁,由于存在预应力反拱问题,需设置浇筑桥面调平层,也增大了现场浇筑量.

3.2 研发理念及技术要点

针对上述混凝土空心板和T梁的不足之处,项目组利用UHPC优异的力学性能和耐久性能,提出了一种轻质、耐久、施工便利、可适应严苛净空的全预制UHPC“π”形梁^[16],如图5所示.

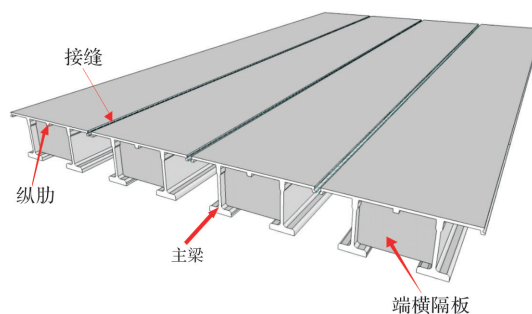


图5 全预制UHPC“π”形梁

Fig. 5 Fully fabricated UHPC π-shaped girder

具体分析,其技术要点包括:

(1)结构轻型化:利用UHPC轻质高强的特点,减小结构板件尺寸,梁体高跨比可降至1/20,大幅减轻结构自重,自重一般约为普通混凝土T梁的40%~60%;

(2)采用 π 形预制单元:通过两片T梁整体预制形成“ π ”形预制单元,减少梁间纵向接缝数量,同时“ π ”形断面可增强施工过程稳定性,避免施工过程中梁体的倾覆,并将单幅“ π ”梁预制宽度控制在3 m左右,30 m跨径吊装重量约70 t,便于公路运输和现场吊装;

(3)强化纵向接缝构造:对于UHPC材料,接缝处纤维不连续,为受力薄弱环节,应对其进行强化处理,采用局部加高的“T”形接缝(图6)可达到节点强度高于母材的设计要求。同时利用UHPC与钢筋良好的粘结性能,可将钢筋锚固长度降低至10 d以内,简化湿接缝钢筋构造,避免焊接,减少现场作业量;

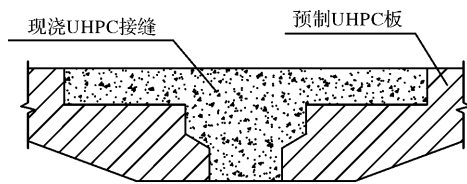


图6 局部加高“T”形接缝构造

Fig. 6 Locally elevated T joint

(4)采用断续分布横隔板构型:为加强梁体的横向受力整体性,在“ π ”形预制单元内跨中、四分点等位置设置横隔板,通过调整相邻“ π ”形预制单元的间距和强化纵向接缝构造等措施,可取消“ π ”形预制单元之间的跨中、四分点等位置横隔板,形成断续分布横隔板构型;与此同时,取消“ π ”形预制单元间横隔板,可简化现场模板搭设,便于快速化施工;

(5)取消预应力筋:利用UHPC高韧性和高抗裂性能,40 m跨径内可取消预应力筋,简化现场施工程序;同时,由于取消预应力筋,梁体反拱不一致的问题得到解决,进而可取消桥面调平层,减少现场浇筑量,提高结构装配化水平。

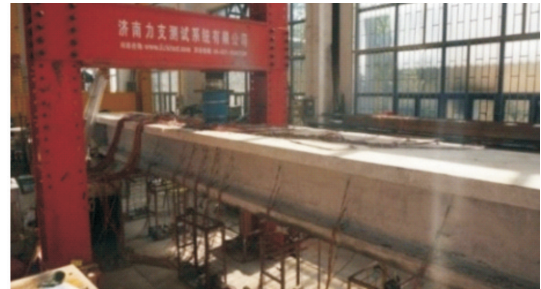
3.3 基本受力性能与工作基础

为了解全预制UHPC“ π ”形梁的受力性能,项目组开展了1:2缩尺抗弯、剪性能试验(图7)、UHPC桥面板湿接缝试验(图8),试验结果表明验证了方案的安全性和可行性:

(1)UHPC梁抗弯、抗剪试验表明UHPC“ π ”形梁弯拉应力的抗裂安全度为1.63,主拉应力的抗裂安全度为1.09;

(2)局部加高的强化湿接缝构造初裂点和最终的破坏截面均位于预制UHPC板处,避免了UHPC湿接缝处钢纤维不连续的不利影响,实现节点强度高于母板。

此外,在试验研究的基础上,项目组研究并掌握了全预制UHPC“ π ”形梁抗弯、抗剪承载能力和裂缝宽度计算方法,为全预制UHPC“ π ”形梁的应用和推广提供了理论基础。



(a) 抗弯试验



(b) 抗剪试验

图7 预制UHPC“ π ”形梁缩尺模型试验

Fig. 7 Scale model test of precast UHPC π -shape beam



图8 UHPC桥面板湿接缝试验

Fig. 8 Experimental tests of wet joint in UHPC slab

3.4 适用条件与显著效果

传统混凝土空心板和T梁桥运营过程中横向连接易破损,导致单板(梁)受力,易出现渗漏等病害,装配化施工过程中湿接缝钢筋焊接量大,且需浇筑桥面调平层,影响结构的快速化施工。项目组研发了全预制UHPC“ π ”形梁结构,适用于10~50 m的简支梁与连续梁。若将该新型桥梁结构应用于替代空心板和T梁,具有以下显著效果:

(1)与同等跨径的混凝土空心板和T梁桥相比,UHPC“ π ”形梁自重可减轻40%~60%,便于整体化运输和快速化架设;

(2)利用UHPC优异的力学性能,强化连接节

点受力性能,实现节点强度高于母材,完全规避节点开裂、渗漏的风险;

(3)由于UHPC优异的性能,UHPC中钢筋锚固长度可减至 $10d$ 以内、 $40m$ 跨径内UHPC梁可取消预应力,进而可实现现场零焊接和取消现浇桥面调平层,实现结构的快速化施工;

(4)梁体高跨比可降低至 $1/20$,UHPC“ π ”形可适用于桥梁净空受限的情况。

4 全预制钢-UHPC组合“ π ”梁研发

4.1 研发背景

钢-混凝土组合梁一般而言可充分利用钢材受拉的性能、混凝土受压的性能,具有较好的经济性能。但在负弯矩区域会产生混凝土受拉,钢梁受压的不利情况。正常使用阶段,混凝土桥面板易开裂,降低组合梁刚度,影响结构的安全性和耐久性^[17]。对于施工性能而言,装配式钢-混凝土组合梁中,桥面板为部分预制,浇筑桥面板接缝工作量大,现场施工工作量大。这些问题都给这类结构的推广应用造成了一定的困扰。

4.2 研发理念及技术要点

针对组合梁负弯矩区混凝土易开裂和现浇湿接缝量大的难点,项目组提出一种钢-UHPC轻型组合“ π ”梁^[18],其构造如图9所示,这类结构的主要特点是用UHPC桥面薄板代替原钢-混凝土组合梁中的混凝土桥面板。

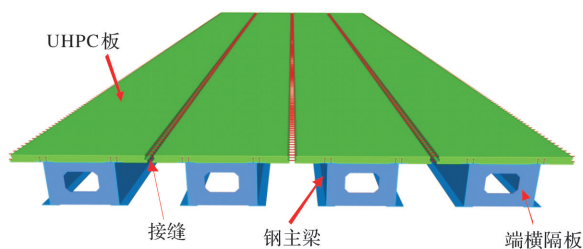


图9 全预制钢-UHPC轻型组合“ π ”形梁

Fig. 9 Fully fabricated steel-UHPC lightweight π -shaped composite girder

具体分析,其技术要点包括:

(1)结构轻型化:利用UHPC轻质高强特点,可将UHPC桥面板厚度降低至 $12\sim 20\text{ cm}$,进而可降低组合梁自重 $30\%\sim 40\%$;

(2)组合梁一次成型:钢主梁和UHPC桥面板均在厂内预制,现场仅需浇筑UHPC板和相邻跨间的接缝,组合梁整体受力,可节省用钢量,梁体高跨比可降至 $1/25$,适用于净空受限情况,并大大减少了现场湿接缝浇筑量;

(3)采用“ π ”性预制单元:由两片工字形组合

梁整体预制形成“ π ”形预制单元,大幅减少纵向接缝数量,同时“ π ”形断面可增强施工过程稳定性,避免施工过程中梁体的倾覆,并将单根“ π ”梁预制宽度控制在 3 m 左右, 30 m 跨径吊装重量约 45 t ,便于公路运输和现场吊装;

(4)强化纵、横向接缝构造:纵向接缝构造与3.2节所述全预制UHPC“ π ”形梁一致,墩顶负弯矩区现浇接缝采用如图10所示的带嵌入式钢板的“T”形接缝方案,提高负弯矩区现浇接缝抗裂安全性;

(5)采用断续分布横隔板构型:为加强梁体的横向受力整体性,在“ π ”形预制单元内跨中、四分点等位置设置钢横隔板或横梁,通过调整相邻“ π ”形预制单元的间距和强化纵向接缝构造等措施,可取消“ π ”形预制单元之间的跨中、四分点等位置钢横隔板或横梁,形成断续分布横隔板构型;与此同时,取消“ π ”形预制单元间横隔板,可简化钢横梁的连接施工。

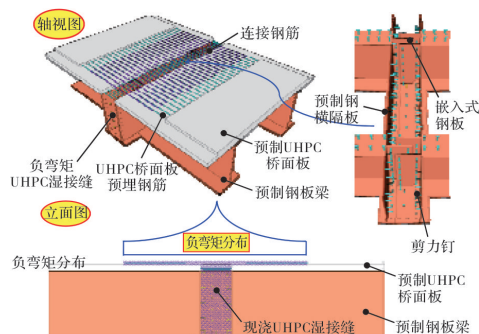


图10 钢-UHPC组合梁负弯矩区现浇接缝构造

Fig. 10 Steel-UHPC composite girder connection at negative moment region

4.3 基本受力性能与工作基础

为了深入了解钢-UHPC组合梁负弯矩区现浇湿接缝受力性能,项目组开展了 $1:2$ 缩尺模型试验(图11),试验结果表明负弯矩区UHPC接缝名义开裂应力超过 30 MPa ,验证了接缝方案的安全性和可行性。与此同时,还开展了钢-UHPC组合梁弯、剪试验、桥面板纵向抗剪试验、界面静力与疲劳推出试验、长期收缩徐变试验和钢-UHPC组合梁设计方法研究工作。

4.4 适用条件与显著效果

传统钢-混凝土组合梁负弯矩区域混凝土桥面板易开裂,降低组合梁刚度,影响结构的安全性和耐久性。装配化施工过程中,装配式钢-混凝土组合梁中,桥面板为部分预制,浇筑桥面板接缝工作量大,现场施工工作量大。项目组研发了全预制钢-UHPC“ π ”形梁结构,适用于 $20\sim 100\text{ m}$ 的

钢混组合梁. 若将该新型桥梁结构应用于替代传统钢-混凝土组合梁, 具有以下显著效果:

(1) 将与同等跨径的钢-混凝土组合梁相比, 钢-UHPC “ π ” 形梁自重可减轻 30%~40%, 便于运输和吊装;



图 11 钢-UHPC 组合“ π ”形梁墩顶负弯矩区现浇接缝模型试验

Fig. 11 Test of steel-UHPC composite girder connection at negative moment region

(2) 利用 UHPC 优异的力学性能, 强化桥面板和墩顶负弯矩区连接节点受力性能, 实现节点强度高于母材, 完全规避节点开裂、渗漏的风险, 解决组合梁负弯矩区易开裂的难题;

(3) 由于 UHPC 优异的性能, UHPC 中钢筋锚固长度可减至 10 d 以内, 进而可实现现场零焊接, 实现结构的快速化施工;

(4) 梁体高跨比可降低至 1/25, 钢-UHPC “ π ” 形组合梁可适用于桥梁净空受限的情况。

5 结论

UHPC 是一种具有优异的力学性能和耐久性的水泥基复合材料, 被认为是 20 世纪最具创新性的水泥基工程材料之一。UHPC 的引入, 将有望给传统装配式中小跨径桥梁技术带来革命性的变化, 实现装配式桥梁的高性能化:

(1) 等强度承载条件下, 自重可降为传统结构的 40%~60%, 以方便运输, 实现大构件快速化架设;

(2) 因 UHPC 中钢筋锚固长度仅需 10 倍的钢筋直径, 现场各梁间结合部可大幅度缩小, 并可实现现场零焊接;

(3) 结构抗腐蚀、抗冻、防渗漏性能优良, 基本实现结构设计寿命周期内免维护;

装配式中小跨径桥梁中引入高性能材料 UH-PC 实现高性能化, 有望基本解决现有装配式桥梁结构的技术难题, 实现结构高施工性能、结构高使用性能、结构高耐久性能的可持续发展战略, 结束我国传统“粗放”式的高劳动强度、高能耗建造模式, 符合目前国家大力发展装配式建筑政策导向和大力推进建设领域“供给侧结构性改革”的总体目标, 是提升我国桥梁结构建设品质的重要途径。

参考文献 References

- [1] 黄政字, 沈蒲生, 蔡松柏. 200MPa 超高强钢纤维混凝土试验研究[J]. 混凝土, 1993, (3): 3-7.
HUANG Zhengyu, SHEN Pushen, CAI Songbo. Experimental research on 200 MPa super high strength steel fiber reinforced concrete [J]. Concrete, 1993, (3): 3-7.
- [2] 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.
WANG Dehui, SHI Caijun, WU Linmei. Research and application of ultra-high performance concrete (UHPC) in China [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(1): 141-149.
- [3] 方志, 杨剑. FRP 和 RPC 在土木工程中的研究与应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(4): 54-61.
FANG Zhi, YANG Jian. Study and application of FRP and RPC in civil engineering [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(4): 54-61.
- [4] 邵旭东, 曹君辉. 面向未来的高性能桥梁结构研发与应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 41-57.
SHAO Xudong, CAO Junhui. Research and application of high performance bridge structures toward future [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5): 41-57.
- [5] LARRARD F. De, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by using a packing model [J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(6): 997-1009.
- [6] RICHARD Pierre, CHEYREZY Marcel. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement and Concrete Composites, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [7] WANG Dehui, SHI Caijun, WU Zemei, et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration microstructure and properties [J]. Construc-

- tion and Building Materials, 2015, 96: 368-377.
- [8] KIM Byun-Suk, KOH Gyungtaek, CHO Jeongrae, et al. Toward the next generation of concrete structures: recent advances in UHPC technology [C]//Proc. of IABSE Conference. Guangzhou:isbse 2016, 46-59.
- [9] 邵旭东,邱明红,晏班夫,等. 超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J]. 材料导报, 2017, 31(12):33-43.
- SHAO Xudong, QIU Minghong, YAN Banfu, et al. A review on the research and application of ultra-high performance concrete in bridge engineering around the world[J]. Materials Review, 2017, 31(12):33-43.
- [10] 楼庄鸿. 大跨径梁式桥的主要病害[J]. 公路交通科技, 2006, 23(4):84-87.
- LOU Zhuanghong. Main faults in large span beam bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (4):84-87.
- [11] 王国亮,谢峻,傅宇芳. 在用大跨度预应力混凝土箱梁桥裂缝调查研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(8): 52-56.
- WANG Guoliang, XIE Jun, FU Yufang. Investigation research on crack of long-span prestressed concrete box girder bridges in service[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (8):52-56.
- [12] 谢峻,王国亮,郑晓华. 大跨径预应力混凝土箱梁桥长期下挠问题的研究现状[J]. 公路交通科技, 2007, 24 (1), 47-50.
- XIE Jun, WANG Guoliang, ZHENG Xiaohua. State of art of long-term deflection for long span prestressed concrete box-girder bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (1):47-50.
- [13] 邵旭东,詹豪,雷薇,等. 超大跨径单向预应力 UHPC 连续箱梁桥概念设计与初步实验[J]. 土木工程学报, 2013, 46(8):83-89.
- SHAO Xudong, ZHAN Hao, LEI Wei, et al. Conceptual design and preliminary experiment of super-long-span continuous box-girder bridge composed of one-way prestressed UHPC [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(8), 83-89.
- [14] 王岗. 混凝土空心板梁桥典型病害机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 8-11.
- WANG Gang. Mechanism analysis on typical diseases of prestressed concrete hollow-core slab bridge [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 8-11.
- [15] 储兵, 杨未蓬. 简支变结构连续 T 梁病害原因分析及处理措施[J]. 工程建设, 2018, 50(3):50-53.
- CHU Bing, YANG Weipeng. Analysis of disease causes of simply-supported variable structure continuous T beam and treatment measures [J]. Engineering Construction, 2018, 50(3):50-53.
- [16] 邵旭东,管亚萍,晏班夫. 预制超高性能混凝土 π 形梁桥的设计与初步试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31 (1):46-56.
- SHAO Xudong, GUAN Yaping, YAN Banfu. Design and preliminary experiments of UHPC π -shaped girder bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(1):46-56.
- [17] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011:134
- NIE Jianguo. Steel-concrete composite bridge [M]. Beijing: China Communication Press, 2011: 134.
- [18] 邓舒文,邵旭东,晏班夫,等. 全预制快速架设钢-UHPC 轻型组合城市桥梁 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(3):159-166.
- DENG Shuwen, SHAO Xudong, YAN Banfu, et al. Lightweight steel-UHPC composite bridge with overall prefabrication and fast erection in city [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 33(3):159-166.

(编辑 沈 波)