

文章编号:1673-2049(2017)05-0041-18

# 面向未来的高性能桥梁结构研发与应用

邵旭东,曹君辉

(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)

**摘要:**为从根本上解决混凝土桥、钢桥及钢-混凝土组合桥中的共性技术难题,并提升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,研发了面向未来的高性能桥梁结构体系。介绍了笔者团队研发的4类高性能桥梁结构:①钢-超高韧性混凝土(STC)轻型组合桥面结构,其中的STC是钢桥面专用的UHPC;②钢-UHPC华夫板轻型组合桥梁结构;③单向预应力UHPC薄壁连续箱梁结构;④全预制快速架设UHPC城市桥梁结构。通过大量静力和疲劳试验,掌握了各类UHPC桥梁结构的基本受力性能,并建立了计算理论和设计方法。列举了钢-STC轻型组合桥面结构已推广应用于中国的17座钢桥,涵盖了梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥等各类基本桥型,典型应用包括湖南岳阳洞庭湖二桥等重大工程。到目前为止,各实桥运营状态良好,钢-STC未出现任何病害问题。综合而言,高性能桥梁结构有望突破现有桥梁中的技术瓶颈,具有广阔的应用前景。

**关键词:**桥梁工程;技术瓶颈;超高性能混凝土;高性能桥梁结构体系;研发与应用

**中图分类号:**U442.5

**文献标志码:**A

## Research and Application of High Performance Bridge Structures Toward Future

SHAO Xu-dong, CAO Jun-hui

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

**Abstract:** In order to overcome the common technical problems of concrete bridges, steel bridges, and steel-concrete composite bridges, and to improve the performance and quality of bridge structures, the research group at Hunan University developed the high performance bridge structure system based on ultra-high performance concrete (UHPC) technology. Four types of high performance bridge structures were developed: ① steel-STC lightweight composite deck, in which STC denoted a kind of UHPC specially developed for orthotropic steel decks; ② steel-UHPC waffle deck lightweight composite girder; ③ thin-wall UHPC continuous girder bridge with only longitudinal prestress; ④ fully prefabricated UHPC city bridges facilitating rapid erection. Based on a great number of static and fatigue tests, the research group revealed the basic mechanical performance of the high performance bridge structures, and developed calculation theory and design method for them. The steel-STC lightweight composite deck was applied to 17 real bridges in China, and the application covered the four basic bridge types, i. e., girder bridge, arch bridge, cable-stayed bridge, and suspension bridge. A typical pilot project is the 2nd

收稿日期:2017-07-30

作者简介:邵旭东(1961-),男,浙江富阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:shaofd@vip.163.com。

Dongting Lake Bridge in Yueyang, Hunan. All of these bridges are in good service states, without any damage developed in STC. To sum up, since the high performance bridge structures have the potential of overcoming technical bottlenecks in conventional bridges, they should have a promising future.

**Key words:** bridge engineering; technical bottleneck; ultra-high performance concrete (UHPC); high performance bridge structure; research and application

## 0 引言

在 20 世纪 50 年代,中国跨江大桥的建设需要依靠援建。经过几代人的不懈努力,中国桥梁建设取得了骄人的成绩:桥梁总数超过 100 万座,其中公路桥梁总数超过 80 万座;世界排名前十的大跨径拱桥、斜拉桥、悬索桥、跨海大桥中,中国均占据半壁江山乃至更多。中国已成为名副其实的桥梁大国。

在迈向桥梁强国的道路上,中国桥梁工程师和学者们仍然任重而道远。从材料上来划分,桥梁结构可分为混凝土桥、钢桥和钢-混凝土组合桥 3 种基本类型。工程实践表明,中国这 3 类桥梁长期以来存在着技术瓶颈,常规方法均难以治本,制约着中国桥梁建设技术的进一步发展。

预应力混凝土箱梁桥具有取材便利、经济性良好等优点,被广泛应用于 300 m 跨径范围内的桥梁,但是这类桥梁自重较大,且普遍存在主跨过度下挠、梁体开裂等问题<sup>[1]</sup>。引发这些问题的根本原因是:①混凝土抗拉强度过低,易受拉开裂;②混凝土徐变系数大,导致长期预应力损失严重;③纵横竖 3 个方向的预应力密集交错,施工质量难以有效保证。目前主要通过优化结构设计、提高施工质量等措施解决上述问题<sup>[2]</sup>,例如,中国重庆石板坡长江大桥复线桥(主跨 330 m)在跨中区段使用了钢结构<sup>[3]</sup>,以减轻自重,提升主跨跨径,改善结构受力。

钢桥具有轻质高强、施工快捷、环保耐久等优点,是现代化桥梁的主要形式,然而钢桥桥面的两大难题长期得不到解决,成为钢桥建设的拦路虎:①正交异性钢桥面板易疲劳开裂,通常运营不足 10 年便疲劳开裂<sup>[4]</sup>;②钢桥面沥青铺装频繁破损,使用 5~8 年就出现开裂、推移等病害<sup>[5]</sup>。上述顽疾属世界性难题,危及桥梁的主体安全,影响钢桥面的耐久性,导致维护成本飙升。目前主要通过加大钢面板厚度、改进构造细节、提升沥青铺装材料性能等措施来解决上述问题<sup>[6-7]</sup>,但均难以治本,根本原因是:这些方法不能从根本上提高钢桥面的局部刚度,从而改善桥面系的受力。

钢-混凝土组合梁充分发挥了混凝土的受压性能和钢材的受拉性能,具有良好的经济性,但是当应用于连续体系桥梁和大跨柔性体系桥梁时,钢-混凝土组合梁负弯矩区的混凝土板面临着受拉开裂的危险<sup>[8]</sup>。目前一般通过在混凝土中施加预应力、降低混凝土层与钢梁间剪力连接件的约束等措施来解决上述问题<sup>[9]</sup>,但这些措施同时又带来了由于混凝土收缩、徐变而引起预应力损失增长的难题。实践证明,由于钢-混凝土组合梁自重较大,当应用于连续梁桥时,跨径难以突破 120 m,当应用于跨径超过 600 m 的大跨柔性桥梁时并不经济<sup>[10]</sup>。

引起各类桥型中难题的根本原因是混凝土构件自重过大、组成结构的材料和连接的静力或疲劳抗拉性能不足,严重影响了桥梁结构的安全性、耐久性和经济性,成为制约桥梁进一步发展的主要技术瓶颈。由于常规方法均难以治本,上述难题的有效解决还有待引入新材料。超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)是一种基于最大密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,发展以 UHPC 材料为基础的高性能桥梁结构,能够为解决上述难题打开新局面。

湖南大学从 1993 年开始研究 UHPC<sup>[11]</sup>,是中国最早开展相关研究的单位之一,经过 20 余年的研究与积累,熟练掌握了 UHPC 的配制方法和基本性能<sup>[12-13]</sup>。以此为基础,笔者团队切合国家重大需求,研发了面向未来的高性能桥梁结构体系,以期从根源上解决传统桥梁所面临的难题。本文以“面向未来的高性能桥梁结构”为主旨,介绍了笔者团队基于 UHPC 研发的高性能桥梁结构,展示了相关试验和实桥应用。这些原创性研究有望攻克混凝土桥、钢桥、钢-混凝土组合桥中的共性技术难题,从本质上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<sup>[14]</sup>。最具代表性的超高性能混凝土材料为活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC),最早由法国学者于 1993 年提出<sup>[15]</sup>。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):毫米级颗粒(细石英砂骨料)的间隙由微米级颗粒(水泥、粉煤灰等)填充,而微米级颗粒的间隙由亚微米级颗粒(硅灰)填充。这种配制原理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<sup>[16]</sup>。

研究表明<sup>[17]</sup>,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 年以上。UHPC 的主要力学性能和耐久性能指标如表 1 所示。

表 1 UHPC 的基本性能指标

Tab. 1 Basic Performance Indexes of UHPC

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



图 2 等强度时不同材料截面尺寸对比

Fig. 2 Comparison of Cross Section Dimensions of Different Materials at Equal Strength

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 已成为国际上土木工程领域的研究热点之一,法国、澳大利亚、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(表 2)。

2 UHPC 在桥梁工程中的应用

目前 UHPC 已应用于高层建筑、大跨桥梁、海洋工程、水利工程、核电工程和特种结构等诸多工程领域<sup>[18]</sup>。在桥梁结构中,UHPC 已被广泛应用于主梁结构、拱桥主拱、华夫板桥面结构、桥梁接缝及旧桥加固等诸多方面。据不完全统计,目前世界各国已有超过 200 座采用 UHPC 作为主要或部分建筑

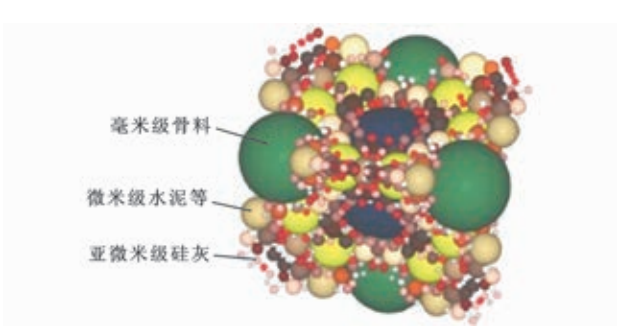


图 1 UHPC 的最大堆积密度构建原理

Fig. 1 Maximum Packing Density Construction Theory of UHPC

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(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。

材料的桥梁,限于篇幅,下面仅举数例。

1997 年,在加拿大魁北克省舍布鲁克市建成了世界上第 1 座 UHPC 人行桥——Sherbrooke 人行桥<sup>[19]</sup>。该桥为预应力 UHPC 空间桁架结构,跨径 60 m(图 3)。桥面板采用 3 cm 厚 UHPC 板,桁架腹杆采用直径 15 cm 的钢管 UHPC,下弦采用 10 m 预制 UHPC 梁节段,节段内未配置普通钢筋,仅采用后张预应力拼装而成。由于 UHPC 的使用,结构自重大大减轻,并有效抵抗了当地严冬-30℃条件下的反复冻融侵蚀。该桥在 1999 年获得 Nova 奖提名。

2001 年,法国建成了世界上最早的 UHPC 公路桥——Bourg-lès-Valence OA4 和 OA6 跨线桥(图 4)<sup>[20]</sup>,每座桥包含 2 个车行道和人行道。主梁为跨径 22.5 m 的“π”形 UHPC 梁,高 0.9 m,宽 2.4 m,UHPC 桥面板均厚仅 25 cm,桥面全宽 12 m,梁总重 37 t。主梁中仅布置了纵向预应力筋,未设置普通钢筋。

2002 年,日本第 1 座 UHPC 人行桥 Sakata-Mi-rai 人行桥建造完成(图 5)<sup>[21]</sup>。该桥主跨跨径 49.2 m,主梁截面形式为箱梁,采用预制拼装法施工,预制梁段间采用预应力张拉拼接完成。此后,日本相继建造了多座 UHPC 人行桥,如 Yamagata 桥和 Tahara 桥等均采用了箱梁截面作为主梁的截面形式。

表 2 已颁布的 UHPC 相关规范  
Tab. 2 Specifications Related to UHPC

国家	规范名称	发布机构	颁布年份
法国	National Addition to Eurocode 2 — Design of Concrete Structures; Specific Rules for Ultra-high Performance Fiber-reinforced Concrete (UHPC)	French Standard Institute	2016
澳大利亚	Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams	The University of New South Wales	2000
日本	Recommendations for Design and Construction of Ultra-high Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft)	Japan Society of Civil Engineers	2006
美国	Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, Including Connections	Federal Highway Administration	2013
瑞士	Recommendation; Ultra-high Performance Fiber Reinforced Cement-based Composites (UHPC), Construction Material, Dimensioning and Application	Maintenance Construction Society and École Polytechnique Fédérale de Lausanne	2016
中国	活性粉末混凝土	中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局	2015



图 3 加拿大 Sherbrooke 人行桥

Fig. 3 Sherbrooke Pedestrian Bridge in Canada



图 4 法国 Bourç-lès-Valence 公路桥

Fig. 4 Bourç-lès-Valence Motorway Bridge in France



图 5 日本 Sakata-Mirai 人行桥

Fig. 5 Sakata-Mirai Pedestrian Bridge in Japan

2002 年,韩国修建了 Sunyudo 人行桥,为世界

上首座 UHPC 人行拱桥(图 6)<sup>[21]</sup>。该桥由 6 个预制后张预应力“π”形节段组成,截面高 1.3 m。该桥主跨 120 m,是目前世界上已建成的跨径最大的 UHPC 桥梁。



图 6 韩国 Sunyudo 人行桥

Fig. 6 Sunyudo Pedestrian Bridge in Korea

2006 年,美国在爱荷华州建成该国第 1 座 UHPC 公路桥——Mars Hill 桥(图 7),2008 年又在弗吉尼亚州和爱荷华州各建成 1 座 UHPC 公路桥(图 8,9)<sup>[22]</sup>,这 3 座桥的主梁截面分别为 I 形、T 形和“π”形,且 UHPC 主梁均不设抗剪钢筋,只利用 UHPC 自身的高抗拉性能,极大地简化了钢筋构造。

2011 年,美国爱荷华大学研究了 UHPC 华夫桥面板结构,并首次应用于 Little Cedar Creek 桥上,其构造如图 10 所示<sup>[23]</sup>。这种桥面板整体分块预制施工,板件间及板-主梁间均采用 UHPC 现浇接缝,2013 年美国联邦公路局(FHWA)颁布了 UHPC 华夫型桥面板设计指南<sup>[24]</sup>。此外,美国正在大力推广以 UHPC 作为传统预制混凝土桥面板的接缝<sup>[25]</sup>,目前已有 30 多座桥梁采用了这种接缝形式。

2007 年,德国在 Kassel 修建了第 1 座多跨 UHPC 桥梁——Gärtnerplatz 桥<sup>[21]</sup>。该桥为人行





图 7 美国爱荷华州 Mars Hill 桥

Fig. 7 Mars Hill Bridge in Iowa State,US

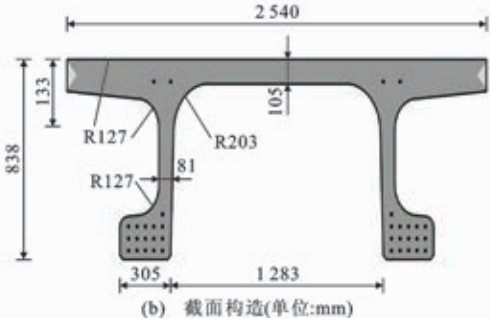


图 8 美国弗吉尼亚州 Cat Point Creek 桥

Fig. 8 Cat Point Creek Bridge in Virginia State,US



(a) 实景图

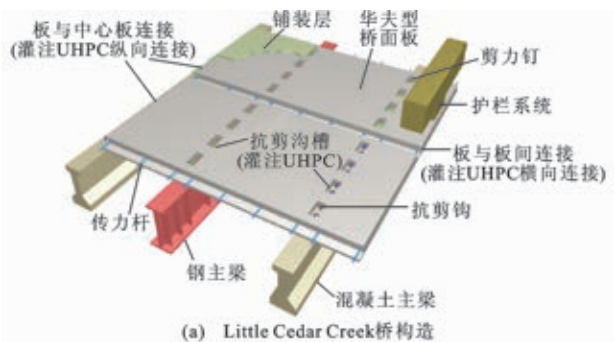


(b) 截面构造(单位:mm)

图 9 美国爱荷华州 Jakway Park 桥

Fig. 9 Jakway Park Bridge in Iowa State,US

和自行车两用桥梁,共有 6 跨,总跨径 132 m,跨越 Fulda 河(图 11)。该桥中的 UHPC 使用在了 2 个位置:① UHPC-钢桁架组合结构;② 桥面板,其中



(a) Little Cedar Creek桥构造



(b) Little Cedar Creek桥实景

图 10 华夫型 UHPC 桥面板

Fig. 10 UHPC Waffle Deck



图 11 德国 Gärtnerplatz 桥

Fig. 11 Gärtnerplatz Bridge in Germany

UHPC 桥面板与桁架的上弦杆连接。

2010 年,奥地利建成世界上第 1 座 UHPC 公路拱桥——Wild 桥(图 12)<sup>[21]</sup>。该桥总长 154 m,主拱跨径 70 m,矢高 18 m。主拱由 2 根单箱单室拱肋组成,拱肋间采用横系梁连接。单根拱肋由 6 个节段和 8 个节点构件组成,拱轴线呈多边形折线,采用竖向下放式转体法施工,节段长度约 16 m,高、宽均为 120 cm,壁厚仅 6 cm。该桥 UHPC 桁架拱结构细巧、造型优美,与风景区峡谷环境非常协调。

2014 年,马来西亚建成了该国跨径最大的 UHPC 桥梁——Batu 6 桥<sup>[26]</sup>,该桥为跨径 100 m 的简支梁桥,主梁为箱形截面,箱梁顶板和底板宽度分别为 5 m 和 2 m,高度为 4 m,底板厚度为 25 cm,其余板厚均为 15 cm;结构采用预制节段拼装法施工,即先预制 UHPC 箱梁节段,运至施工现场进行拼装后,采用后张预应力连接预制节段成桥(图 13)。近些年来,马来西亚在 UHPC 桥梁研究与应用方面发



(a) 主拱节段吊装



(b) 主拱转体施工



(c) 成桥运营

图 12 奥地利 Wild 桥

Fig. 12 Wild Bridge in Austria

展十分迅速,目前已经修建了 90 多座 UHPC 桥梁。

2011,中国广东肇庆马房大桥首次采用了由湖南大学研发的钢-UHPC 轻型组合桥面结构<sup>[27]</sup>,如图 14 所示。马房大桥为 14 跨单跨 64 m 的简支钢箱梁,桥面宽 12.1 m,桥面系采用正交异性钢面板。该桥于 1984 年建成通车,由于桥面偏柔且重载交通繁重,该桥沥青铺装常年处于破损状态,且出现了钢桥面板疲劳开裂病害。2011 底,马房大桥进行了新一轮的沥青铺装翻修,翻修中采用了多种方案,其中第 11 跨采用了笔者团队研发的钢-STC 轻型组合桥面结构方案。到目前,第 11 跨新桥面结构运营超过 5 年半,未出现任何病害问题。

2016 年,中国长沙北辰三角洲建成了首座全预制拼装 UHPC 桥梁(图 15),大桥总长 70.8 m,主跨 36.8 m,宽 6.5 m,为跨街天桥<sup>[28]</sup>。施工时首先在



(a) 节段拼装



(b) 成桥运营

图 13 马来西亚 Batu 6 桥

Fig. 13 Batu 6 Bridge in Malaysia



图 14 广东肇庆马房大桥第 11 跨

Fig. 14 The 11th Span of Mafang Bridge, Zhaoqing, Guangdong



(a) 景观效果图



(b) 实桥照片

图 15 湖南长沙北辰三角洲跨街天桥

Fig. 15 Pedestrian Bridge in Beichen Delta District, Changsha, Hunan



工厂进行 UHPC 梁节段预制,然后拖运至现场拼接成桥,整个拼装过程仅用了 10 h。得益于 UHPC 的高强度,桥梁上部结构质量比原设计方案减小了近三分之一,桥墩数由原设计的 7 个减少到 2 个。

### 3 UHPC 高性能桥梁结构体系研发与应用

#### 3.1 利用 UHPC 解决钢桥面的难题

##### 3.1.1 技术瓶颈

正交异性钢桥面具有自重轻、强度高等优点,在钢桥中得到广泛应用,但大量工程实践表明,正交异性钢桥面存在两大病害问题,得不到有效解决:一是钢桥面板易疲劳开裂(图 16);二是钢桥面沥青铺装极易破损(图 17),个别桥梁甚至遭遇“10 年 24 修”。



图 16 正交异性钢桥面疲劳开裂病害

Fig. 16 Fatigue Cracking Diseases of Orthotropic Steel Deck

引发上述病害的主要原因为:①由于局部刚度



图 17 正交异性钢桥面沥青铺装层病害

Fig. 17 Damage Issues of Asphalt Pavement on Orthotropic Steel Deck

较低,钢桥面板处于高应力运营状态,且焊接连接处应力集中现象明显,易引起疲劳开裂病害;②受重载车作用、雨水和夏季高温等多重因素的影响,沥青铺装容易开裂,进而诱发车辙、脱层等病害。

##### 3.1.2 对策方案

为整体解决钢桥的上述病害问题,2010 年,笔者团队提出了具有自主知识产权的正交异性钢板-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构(图 18)<sup>[29]</sup>。常规 UHPC 不能直接用于钢桥面,原因为:①常规 UHPC 的抗拉强度较低(一般约为 8 MPa),而钢桥面上 UHPC 的设计拉应力可达 10~15 MPa,存在受拉开裂风险;②常规 UHPC 的收缩应变较高(可达  $500 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$ ),若直接用于钢桥面,收缩受到钢板约束将导致开裂。在研究中,项目组对

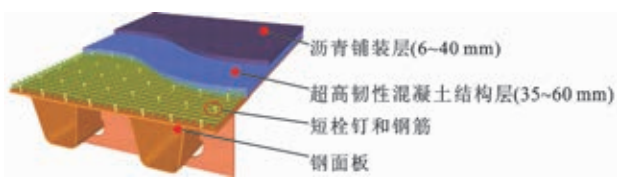


图 18 钢-STC 轻型组合桥面结构

Fig. 18 Steel-STC Lightweight Composite Deck Structure

UHPC 进行组分优化、密配钢筋,并施以高温蒸汽养护,将 UHPC 的抗拉强度提高到 42.7 MPa,收缩应变降到几乎为 0,能够用于钢桥面,项目组将此新材料称为超高韧性混凝土(Super Toughness Concrete,STC)。综合而言,STC 既属于 UHPC,又在抗裂、收缩等方面优于市场上的 UHPC。由于性能优异,STC 层按不开裂的结构层设计,使用年限可达 100 年。

研究表明,钢-STC 轻型组合桥面结构将传统钢桥面的局部刚度提高 40 倍以上。由图 19 可知,与传统钢桥面结构相比,钢-STC 轻型组合桥面结构具有以下显著优点:①钢桥面铺装的难题将不复存在;②正交异性钢桥面板在轮载作用下的应力幅可以降低 20%~80%,从而显著提高钢桥面的抗疲劳寿命;③对于新建桥梁,可根据轻型组合桥面结构的受力特性,将正交异性钢桥面中的所有疲劳裂纹萌生点都设计成无限寿命;④提高了钢桥面的防火安全性。此外,由于各层厚度较薄,轻型组合桥面结构不会增加桥面系的总厚度和自重,能够满足在特大跨径桥梁中的应用需求。

3.1.3 研究与应用

经过 7 年的深入研究,项目组开展了 500 多个试件的静力和疲劳试验(图 20),攻克多个技术难关,取得了一系列重要成果:获发明专利 8 项;掌握了涵盖设计、施工、检验与验收等方面的完整技术;编制了 2 部地方标准。

2011 年,钢-STC 轻型组合桥面结构首次应用于广东肇庆马房大桥。该桥为 14 跨简支钢箱梁桥,修建于 1984 年。由于大桥交通繁重,且桥面系局部刚度偏低,桥面沥青铺装频繁破损,同时,钢桥面板出现了疲劳开裂病害。为便于对比,大桥各跨铺装翻修共采用了 5 种不同的方案,其中钢-STC 轻型组合桥面结构应用于马房大桥第 11 跨(图 21)。

经过 5 年半的运营,采用本技术的 STC 层完好,未出现任何开裂或破损现象。相比之下,同期实施的其他 4 种沥青铺装方案的桥面均出现了开裂、车辙、坑槽、推移等破损现象。各跨桥面的运营状态

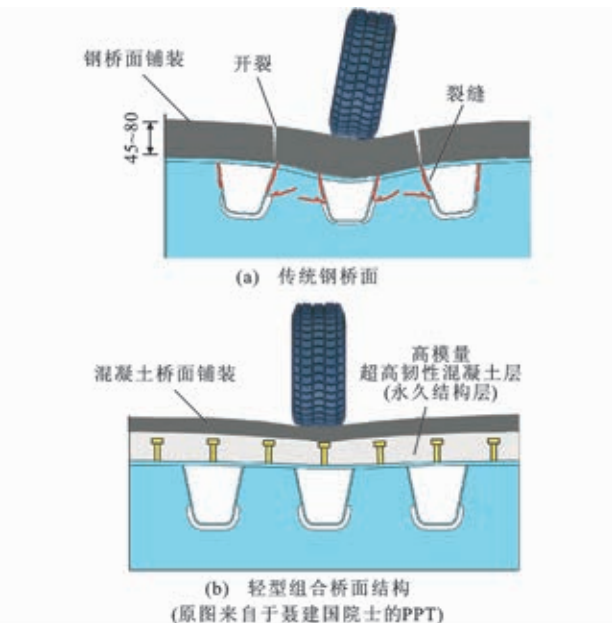


图 19 2 种桥面结构的对比(单位:mm)

Fig. 19 Comparison of Two Bridge Deck Systems (Unit:mm)



图 20 项目组开展的部分模型试验

Fig. 20 Some Model Tests by Project Team

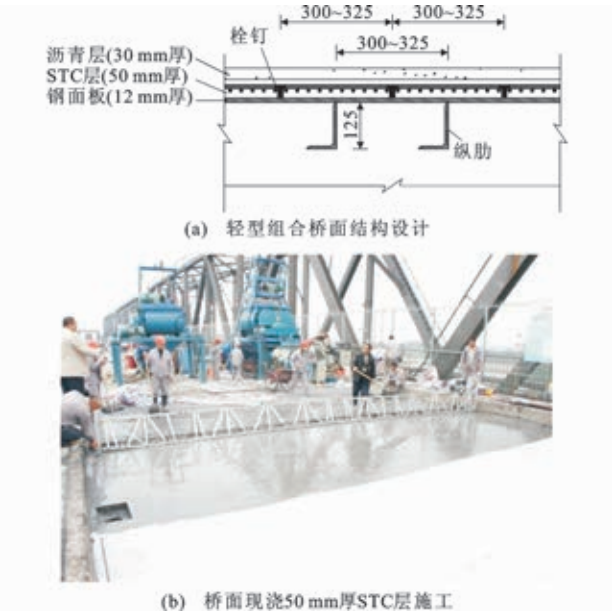


图 21 STC 应用于马房大桥(单位:mm)

Fig. 21 Application of STC in Mafang Bridge (Unit:mm)



对比如图 22 所示。



图 22 5 种铺装方案对比

Fig. 22 Comparison of Five Pavement Schemes

2015 年 9 月,鉴于除第 10 跨(日本环氧沥青方案)和第 11 跨(本技术)外,其余共 12 跨铺装层已完全破损,业主单位对这 12 跨的铺装层进行了新一轮翻修,由于种种原因,所采用的仍然是日本环氧沥青方案(第 10 跨方案),而未采用本项目技术。2017 年 2 月,实桥考察发现,新翻修的环氧沥青铺装已出现破损现象,而采用本技术铺装的桥面仍然保持完好,未出现任何病害问题。实桥对比照片如图 23 所示。

目前项目组研发的钢-STC 轻型组合桥面结构已经应用于中国 17 座实桥,涵盖了梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥等各类基本桥型。在所应用的实桥中,既有旧钢桥桥面加固,也有新建钢桥桥面铺装。各实桥的基本信息如表 3 所示,实桥应用照片如图 24 所示。

3.1.4 显著的效果

大量试验表明,钢-STC 轻型组合桥面结构具有



图 23 轻型组合桥面(第 11 跨)与相邻跨环氧沥青方案对比

Fig. 23 Comparison of Lightweight Composite Deck (the 11th Span) with Neighboring Epoxy Asphalt Scheme

优异的静力和疲劳性能,应用于正交异性钢桥面后,能够取得以下显著效果:

(1)钢桥面经 STC 强化后,局部刚度显著提高,钢桥面铺装的难题不复存在,转化为混凝土桥面铺装,今后铺装翻修简易快捷,对交通干扰小。

(2)STC 的强化作用使得正交异性钢桥面的应力平均下降 50%,钢结构的疲劳开裂风险大大降低。

(3)目前钢-STC 轻型组合桥面结构已应用于中国 17 座钢桥,涵盖了梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥等各种桥型,至今未见 STC 出现 1 条裂缝。

3.2 利用 UHPC 解决钢-混凝土组合梁的难题

3.2.1 技术瓶颈

钢-混凝土组合结构桥梁能充分发挥钢材和混凝土的优势,具有良好的经济性,但是随着桥梁跨径的增大,组合结构桥梁面临着自重、负弯矩区混凝土板易开裂等难题。引起这一现象的根本原因是:①混凝土强度低,导致截面尺寸大,且受拉时易开裂;②混凝土的收缩、徐变变形大,由于变形受到钢结构的约束,会在混凝土桥面板中产生较大的内应力,进一步加大了开裂风险。

3.2.2 对策方案

笔者团队研究发现,提高钢-混凝土组合梁的抗裂安全性并降低自重是扩大钢-混凝土组合梁在大

表 3 钢-STC 技术应用实桥汇总

Tab. 3 Bridge Collection of Application of Steel-STC Technology

序号	桥名	位置	跨径/m	桥型	应用年份
1	马房大桥第 11 跨	广东肇庆	64	简支钢箱梁桥	2011
2	佛陈大桥	广东佛山	58.51+112.8+58.51	三跨连续钢箱梁桥	2014
3	河西交通枢纽市政配套工程	湖南长沙	54	简支钢箱梁桥	2015
4	通惠河大桥	北京通州	11.5+60+18.5	上承式梁拱组合桥	2015
5	海河大桥	天津	310	独塔斜拉桥	2015
6	北运河大桥	北京通州	30+40+70+40+30	上承式拱桥	2016
7	枫溪大桥	湖南株洲	300	自锚式悬索桥	2016
8	磐石大桥	广东汕头	518	双塔双索面斜拉桥	2016
9	梨川大桥	广东东莞	138	无背索竖琴式斜拉桥	2016
10	焦山门桥	浙江嘉兴	36.5	梁桥挂孔	2016
11	歙民路桥	贵州贵阳	32+56+32	钢结构 V 构	2016
12	广中江高速龙溪互通 A 匝道桥	广东江门	28+50+28	钢箱梁桥	2016
13	沈荡大桥	浙江嘉兴	72	钢桁架梁	2016
14	五一大桥	浙江湖州	60+128+60	连续钢-混凝土混合梁桥	2017
15	洞庭湖二桥	湖南岳阳	1 480	钢桁梁悬索桥	2017
16	桐关大桥	湖南长沙	50+50	连续钢箱梁桥	2017
17	昭华大桥	湖南湘潭	168+228	自锚式悬索桥	2017

跨径桥梁上应用范围的唯一出路。由于 UHPC 的强度高,经蒸养后收缩几乎为 0,可用 UHPC 桥面板替代厚重的普通混凝土桥面板,形成钢-UHPC 轻型组合桥梁结构(图 25)。UHPC 桥面板宜设计成矮肋板(华夫板),一方面能够降低桥面板自重,另一方面能够保证桥面板的刚度。钢梁部分则可根据不同桥梁体系的需求设计成工字梁、箱梁或桁架梁等形式。

与传统钢-混凝土组合梁相比,钢-UHPC 轻型组合梁中的 UHPC 桥面板平均厚度约为 140 mm,仅为普通混凝土桥面板厚度的 40%~50%,可使组合梁的自重降低 35%左右,从而使组合梁的适用跨径获得大幅度拓展。由于 UHPC 的抗拉性能远高于普通混凝土,且收缩徐变很小,可以有效解决传统组合梁中混凝土桥面板易开裂的难题。同时,新型组合梁一般无需设置预应力,受力更为简单明确,施工更为简便。

轻型组合梁结构应用范围广泛,可应用于斜拉桥、悬索桥及梁式桥等不同结构体系。在前期研究中,项目组以南洞庭湖大桥为背景,对钢-UHPC 轻型组合桥梁结构进行了试设计,并开展了模型试验研究。该桥是湖南省南县-益阳高速公路上的控制工程,主桥采用 181.95 m+450 m+181.95 m 的双塔双索面斜拉桥,大桥总体桥型布置如图 26 所示。

该桥原设计方案采用传统的钢箱梁+31 cm(平均厚度)的混凝土桥面板+10 cm 的沥青混凝土铺

装,后因塔下桩基长度超过 110 m,基础费用过高,迫切需要减轻桥梁自重。在此背景下,项目组对南洞庭湖大桥提出了钢-UHPC 轻型组合梁方案,并进行了试设计。

主梁由 2 个分离钢箱梁与 UHPC 层结合,形成 PK 型分离双箱钢-UHPC 轻型组合梁(图 27),主梁全宽 29.3 m,梁高 3.5 m。桥面板采用 UHPC 华夫板,其中面板厚 80 mm,底部设置高 140 mm、间距 700 mm 的纵向矮肋。华夫板的总厚度 220 mm,平均厚度 140 mm。

研究表明,若采用 UHPC 华夫桥面板,大桥主梁自重降低约 35%,桥塔、基础、斜拉索数量可减少 10%~20%,综合造价与常规组合梁方案持平。预制桥面板采用部分横隔板预埋的形式,使得桥面板中不再有负弯矩横向接缝,这样避免了由于接缝处纤维不连续导致 UHPC 强度过低的问题,确保了桥面板的强度和耐久性。

3.2.3 试验研究

项目组对 UHPC 华夫板开展了纵桥向(图 28)和横桥向(图 29)抗弯性能试验,探明了试件的开裂应力、荷载-挠度曲线发展规律、破坏模式以及极限承载力。通过将试验结果与试设计计算结果对比,表明 UHPC 华夫板具有良好的受力性能,能够满足受力要求。

3.2.4 显著的效果

试设计和试验结果表明,若将钢-UHPC 轻型组





图 24 钢-STC 轻型组合桥面结构已应用实桥照片

Fig. 24 Bridge Photographs of Application of Steel-STC Lightweight Composite Deck

合梁应用于大跨径桥梁,将产生以下显著的效果:

(1)相比于传统钢-混凝土组合梁,钢-UHPC 轻型组合梁的平均板厚降低约 50%,主梁自重减轻约 35%,提高了桥梁的跨越能力。

(2)由于 UHPC 具有高强度、高韧性、低收缩、低徐变等优异性能,UHPC 华夫桥面板的抗裂性能显著提高,在运营中将基本无开裂风险。

3.3 利用 UHPC 解决预应力混凝土连续箱梁下挠开裂的难题

3.3.1 技术瓶颈

预应力混凝土连续箱梁桥具有造价相对较低、施工简便便捷等优点,是主跨 200 m 范围内的主流

桥型。然而由于常规混凝土的强度低、徐变大,造成既有大跨预应力混凝土梁桥在运营过程中普遍出现主跨过度下挠和梁体开裂等病害(图 30),严重危及桥梁的安全性和耐久性。此外,大跨混凝土梁桥自重占总荷载的比例可达 90%以上,跨径突破 300 m 级已十分困难,向更大跨发展基本不具备可能性。

3.3.2 对策方案

针对大跨预应力混凝土连续箱梁桥自重过大、主跨过度下挠和梁体开裂等难题,笔者团队提出了单向预应力 UHPC 薄壁连续箱梁新结构(图 31)。新结构的主要特点是:采用 UHPC 薄型板件,板厚仅为传统箱梁壁厚的 1/2~1/3,箱内设置了间距



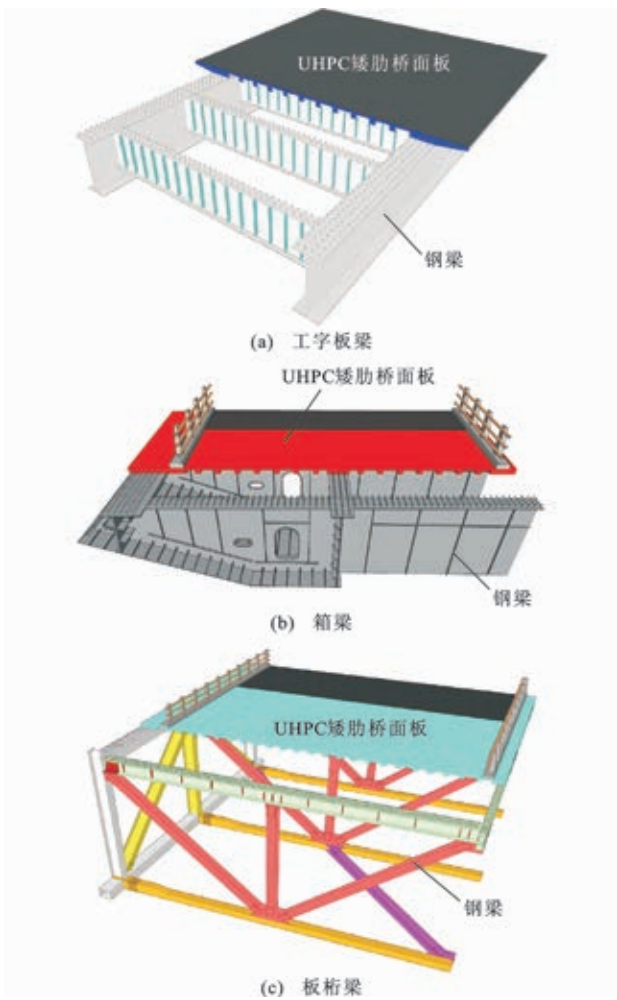


图 25 3 种钢-UHPC 轻型组合梁结构

Fig. 25 Three Types of Steel-UHPC Lightweight Composite Girder Structure

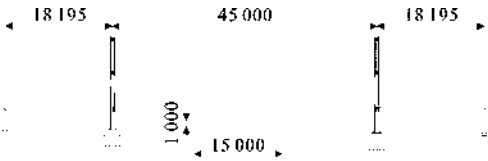


图 26 南洞庭湖大桥立面布置(单位:cm)

Fig. 26 Elevation Layout of South Dongting Lake Bridge (Unit:cm)

3~4 m 的密集横隔板。在箱梁内设置密集横隔板的目的是: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。

研究表明,这种 UHPC 箱梁的自重仅为传统预应力箱梁的 40%~50%,其中横隔板所占质量约为梁体总重的 12%~15%,宜采用节段预制拼装法施工。因自重轻、强度高、徐变小,UHPC 箱梁可避免

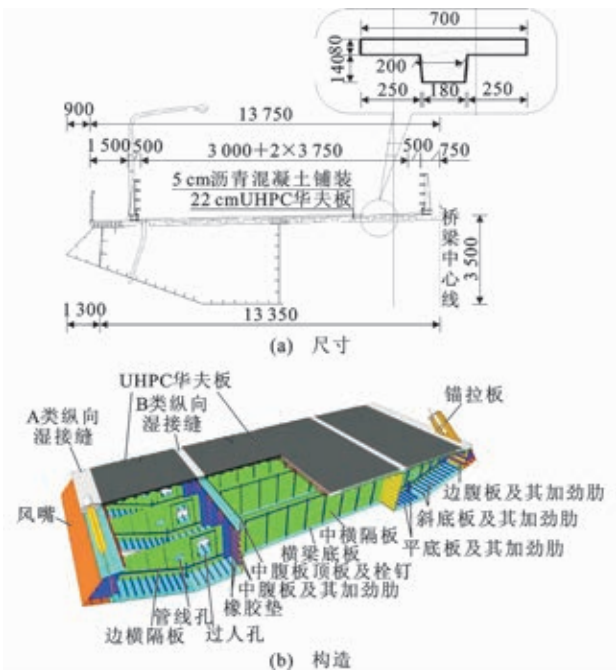


图 27 PK 型分离双箱钢-UHPC 轻型组合梁(单位:mm)

Fig. 27 PK Separated Steel-UHPC Lightweight Composite Girder (Unit:mm)

传统大跨预应力箱梁桥主跨过度下挠和梁体开裂的风险,并将混凝土连续梁桥的极限跨径拓展至 500 m,且经济性通常优于同等跨径的斜拉桥和悬索桥。

3.3.3 试验研究与拟应用工程

项目组对单向预应力 UHPC 薄壁连续箱梁结构开展了系列基础性研究,包括徐变特性、顶板局部受力性能、扭转畸变性能、接缝设计及试验、腹板抗剪性能等方面,主要试验照片如图 32~34 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。

目前单向预应力 UHPC 薄壁连续箱梁结构拟应用于 2 座实桥:①广东省英德市 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[图 35(a)];②广东省清远西部一级公路工程大有互通立交 S114 跨线主桥,为 30 m+50 m+30 m 的 UHPC 连续箱梁桥[图 35(b)]。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。

3.3.4 显著的效果

传统预应力混凝土连续梁桥自重大,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。项目组研发了单向预应力 UHPC 薄壁连续箱梁结构,若将该新型桥梁结构应用于大跨径连续梁桥,具有以下显著效果:



图 28 UHPC 华夫板纵向模型试验

Fig. 28 Longitudinal Model Tests on UHPC Waffle Deck

(1)UHPC 箱梁桥继承了常规混凝土连续梁桥的经济性优点,研究表明,UHPC 箱梁桥在 100~500 m 范围内将对其他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。

3.4 利用 UHPC 解决城市桥梁快速架设的难题

3.4.1 技术瓶颈

中国城镇化发展正在快速推进,预计到 2020 年,中国城镇化率将达到 63%。为满足城市发展和城镇人口出行需求,需大力建设城市交通设施,尤其是快速化城市桥梁。传统城市桥梁面临以下难题:①城市用地寸土寸金,而传统城市桥梁尺寸大、净空小,空间利用效率不高;②传统城市桥梁自重大,吊装施工费用高,尤其是立体交叉桥梁施工时对现有交通干扰大;③传统城市桥梁耐久性差,后期维护成本



图 29 UHPC 华夫板横向模型试验

Fig. 29 Transversal Model Tests on UHPC Waffle Deck

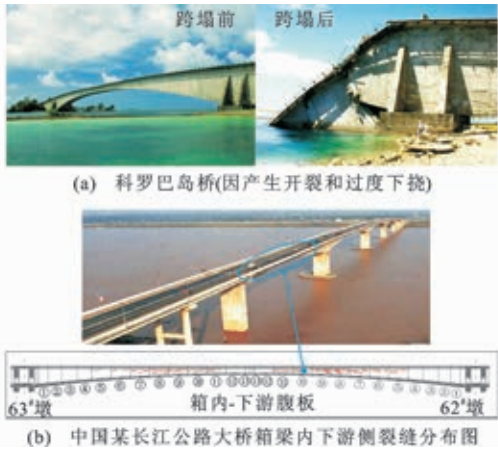


图 30 常规大跨混凝土桥梁面临的难题

Fig. 30 Difficulties for Conventional Long-span Concrete Bridges

3.4.2 对策方案

项目组认为,现代化城市桥梁应该具备以下特点:①为了保证质量,缩短现场工期,应采用工厂化预制施工;②为了保证运输方便快捷,结构必须实现轻型化;③为减少对交通的影响,需采用现场快速吊装施工;④为保证立交工程对净空的严苛要求,必须降低梁高;⑤为了降低后期维护成本,必须采用耐久性好的材料。

因此,笔者团队研发了采用 UHPC 材料的城市



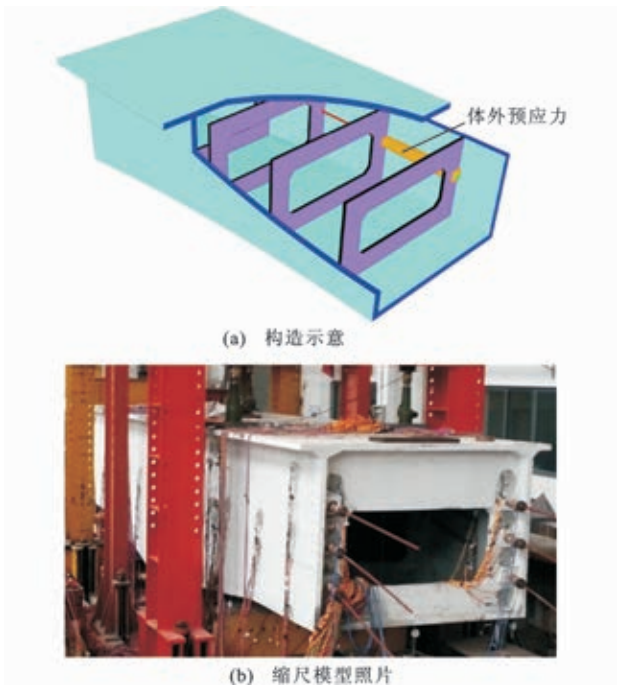


图 31 单向预应力 UHPC 薄壁连续箱梁结构

Fig. 31 Thin-wall UHPC Continuous Girder Bridge with Unidirectional Prestress



图 32 双悬臂 UHPC 工字梁徐变试验

Fig. 32 Creep Tests on UHPC I-shaped Beam with Double Cantilevers

高架桥梁结构新体系:全预制快速架设 UHPC 梁式桥结构,以期实现自重轻、施工快捷、耐久性好、零维护的高性能桥梁结构。由于 UHPC 的超高强度,能够实现主梁轻型化;工厂化整体预制可以减少梁间接缝,现场工作量小;可设计成中承式结构以适应严苛的净空要求;UHPC 材料比钢结构便宜,因而造价更有竞争力。因此,全预制快速架设 UHPC 梁式桥结构在中国城镇化进程中将具有广阔的发展前景。全预制快速架设 UHPC 梁式桥结构有以下 3 种类型:



图 33 双悬臂 UHPC 箱梁系列试验

Fig. 33 Serial Tests on UHPC Box Beams with Double Cantilevers

(1)类型一:预制 UHPC“π”形梁

基于 UHPC 优异的力学性能和耐久性能,设计出一种轻质、耐久、施工便利的装配式桥梁上部结构形式,即预制 UHPC“π”形梁(图 36)。

预制 UHPC“π”形梁具有以下优点:①整片“π”形预制,现场仅浇筑纵向接缝,且纵向接缝减少;②梁高与跨径之比约为 1/20;③单樨宽为 3 m,30 m

跨径梁自重约为 80 t,仅为传统混凝土 T 梁桥的 40%~50%;④经济适用跨径为 20~60 m,无需施加预应力。

(2)类型二:钢-UHPC 板轻型组合梁

结合钢材和 UHPC 的优点,设计出一种钢-UHPC 板轻型组合梁。钢主梁和 UHPC 桥面板均在厂内预制,现场仅需浇筑 UHPC 板间的接缝,其





(a) 双悬臂UHPC工字梁



(b) 1:6缩尺UHPC工字梁

图 34 UHPC 工字梁腹板抗剪性能试验  
Fig. 34 Shear-resisting Performance Test on UHPC I-shaped Beams



(a) 英德市省道S292线一级公路北江四桥



(b) 清远市大有互通立交省道S114跨线主桥

图 35 拟应用工程  
Fig. 35 Potential Pilot Projects

构造如图 37 所示。

钢-UHPC 板轻型组合梁具有以下优点:①梁高与跨径之比约为 1/25;②自重轻,单榀 3 m 宽,30 m 跨径梁自重约为 50 t;③大规模定制化生产,现场吊装就位后浇筑纵缝即可。

下面以 30 m 跨径为例,对钢桥、常规钢-混组合

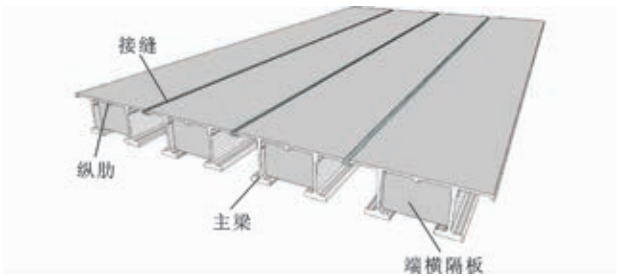


图 36 预制 UHPC “π”形梁  
Fig. 36 Prefabricated UHPC “π” Girder

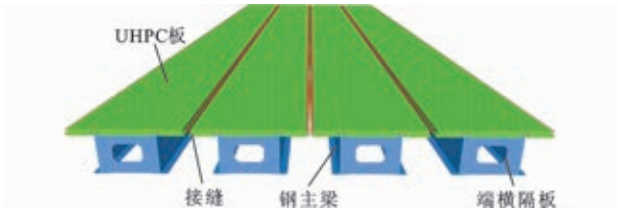


图 37 钢-UHPC 板轻型组合梁  
Fig. 37 Steel-UHPC Lightweight Composite Girder

桥、预应力混凝土桥、UHPC “π”形梁桥、钢-UHPC 轻型组合梁的自重和造价进行对比(图 38)。

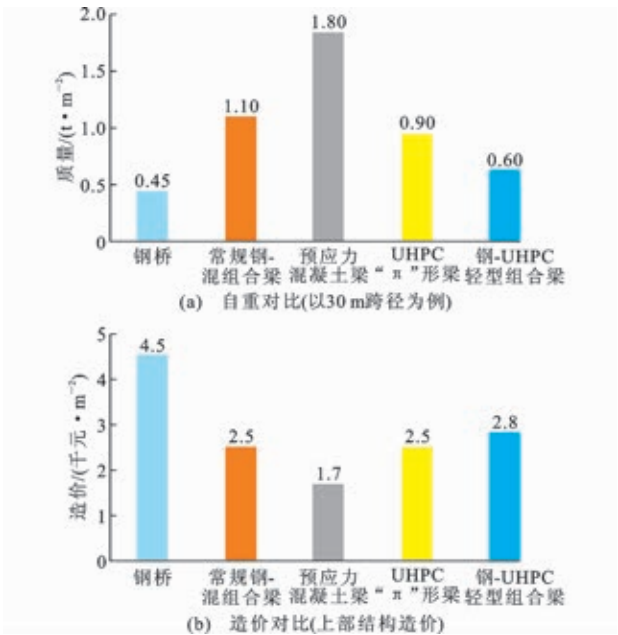


图 38 不同材料主梁对比  
Fig. 38 Comparison of Girders Made of Different Materials

通过对比可以看出,UHPC“π”形梁略重于钢桥,但造价更低,仅高于预应力混凝土梁;钢-UHPC 轻型组合梁自重与钢桥接近,但造价低于钢桥。同时,UHPC 的耐久性优于普通混凝土,其全寿命造价更低。

(3)类型三:UHPC 中承式桥梁结构

城市桥梁空间立体交叉情况复杂,为尽可能降

低立体交叉桥梁的净高,设计出一种 UHPC 中承式桥梁结构(图 39):两侧为 UHPC 主梁,中间设置 UHPC 横梁和桥面板,桥面设计为中承式构造,以提高空间利用效率。UHPC 中承式桥梁结构具有如下优点:①显著降低了立交交叉高度,增加桥梁美观;②缩短桥梁长度,减小占地面积,节约拆迁和建设成本。

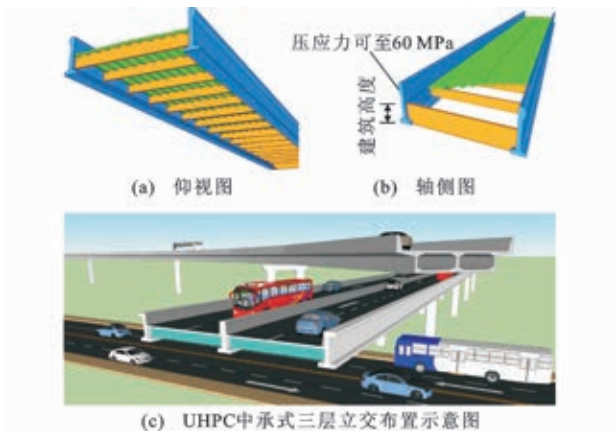


图 39 UHPC 中承式桥梁

Fig. 39 UHPC Half Through Bridge

3.4.3 试验研究

项目组对全预制快速架设 UHPC 城市桥梁结构开展了系列试验研究(图 40~42),包括预制“π”形梁整体受弯试验、UHPC 桥面板接缝性能试验、钢-UHPC 轻型组合梁接缝性能试验等。通过研究,掌握了 UHPC 梁的抗弯承载力及接缝的开裂强度,验证了方案的安全性和可行性。



图 40 预制 UHPC “π”形梁整体受弯试验

Fig. 40 Integral Flexural Tests of Prefabricated UHPC “π” Girder

3.4.4 显著的效果

根据城市桥梁建设的特点,提出了 3 种全预制快速架设 UHPC 桥梁结构。研究表明,若将这些 UHPC 桥梁应用于快速化城市桥梁建设中,将产生以下显著效果:

(1)UHPC 城市桥梁主体构件均在厂内预制,现场仅需进行梁段吊装施工和接缝施工,装配化率

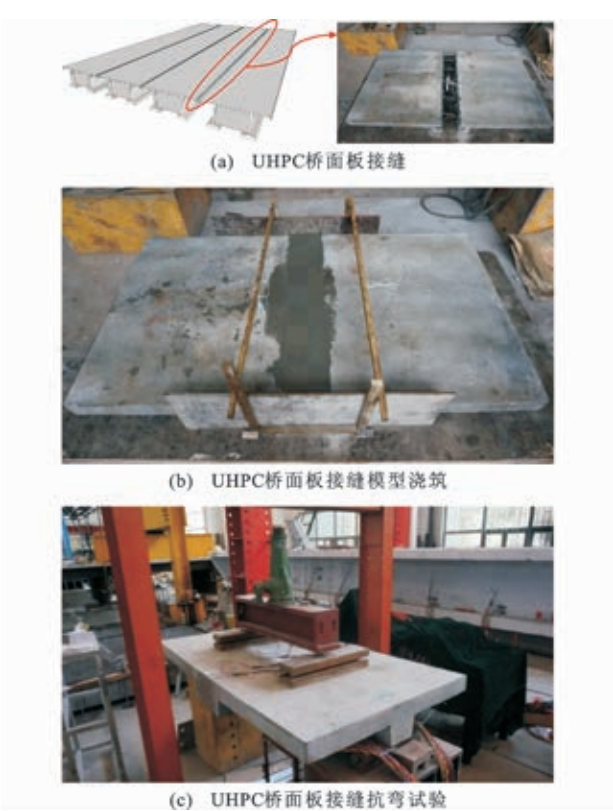


图 41 UHPC 桥面板接缝性能试验

Fig. 41 Tests on Performance of UHPC Deck Connection 达到 90%以上。

(2)UHPC 城市桥梁能够实现桥梁结构的轻质、高强和快速架设,其经济性与传统组合结构相当,而主梁和桥面板的开裂风险显著降低,大大降低了城市桥梁的运营维护成本。

4 结 语

中国已成为桥梁大国,但仍在通往桥梁强国的路上砥砺前行。桥梁科技的重大变革唯有依赖材料的突破及与之相匹配结构体系的研究。与普通混凝土相比,超高性能混凝土(UHPC)具备超高的强度和超长的耐久性,与钢结构相比,UHPC 不存在焊接残余应力问题。因此,结合 UHPC 技术解决现有混凝土桥、钢桥和钢-混凝土组合桥梁中的难题是一条理想的出路。

笔者团队以对 UHPC 20 余年的研究积累为基础,并以国家重大需求为导向,研发了基于 UHPC 的高性能桥梁结构体系,以期突破现有技术瓶颈,解决疑难问题。系列试验和工程应用表明,高性能桥梁结构能够有效克服现有桥梁结构中的不足,提升未来桥梁建设的技术水平与品质,应用前景十分

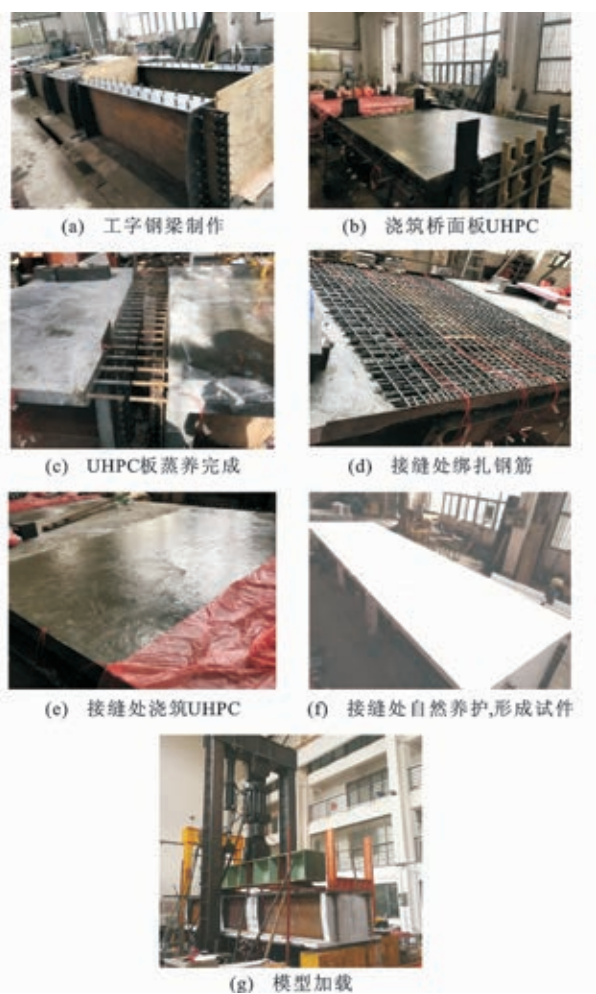


图 42 快速架设钢-UHPC 轻型组合梁接缝性能试验

Fig. 42 Tests on Performance of Rapid Erection  
Steel-UHPC Lightweight Composite  
Girder Connection

广阔。

# 参考文献:

## References:

[1] 石雪飞,杨 琪,阮 欣. 已建大跨径 PC 梁桥过量下挠及开裂处治技术[M]. 北京:人民交通出版社,2010.  
SHI Xue-fei, YANG Qi, Ruan Xin. Treatment Techniques for Excessive Deflection and Cracking of Existing Long-span Prestressed Concrete Bridges[M]. Beijing:China Communications Press,2010.

[2] 陈宇峰,徐君兰,余武军. 大跨 PC 连续刚构桥跨中持续下挠成因及预防措施[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2007,26(4):6-8,41.  
CHEN Yu-feng, XU Jun-lan, YU Wu-jun. Causes and Precautionary Measures to Long-term Deflection of Long Span Pre-stressed Concrete Box Girder of Con-

tinuous Rigid Frame Bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2007, 26(4): 6-8, 41.

[3] 邓文中,代 彤. 重庆石板坡长江大桥复线桥总体设计[J]. 桥梁建设,2006,36(6):28-32.  
TANG Man-chung, DAI Tong. Overall Design of Double Line Bridge of Shibampo Changjiang River Bridge in Chongqing[J]. Bridge Construction, 2006, 36(6):28-32.

[4] 王春生,冯亚成. 正交异性钢桥面板的疲劳研究综述[J]. 钢结构,2009,9(24):10-13,32.  
WANG Chun-sheng, FENG Ya-cheng. Review of Fatigue Research for Orthotropic Steel Bridge Decks [J]. Steel Construction, 2009, 9(24):10-13, 32.

[5] 黄 卫,刘振清. 大跨径钢桥面铺装设计理论与方法研究[J]. 土木工程学报,2005,38(1):51-59.  
HUANG Wei, LIU Zhen-qing. Research on Theory and Method of Long-span Steel Bridges Deck Surfacing Design [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1):51-59.

[6] WOLCHUK R. Empirical Design Rules for Effective Utilization of Orthotropic Decks[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(2):152-158.

[7] 钱振东,陈磊磊. 国产环氧沥青混凝土在钢桥面铺装中的应用技术[J]. 中国科技成果,2009,10(21):25-27.  
QIAN Zhen-dong, CHEN Lei-lei. Application Technology of Domestic Epoxy Asphalt Concrete on Steel Bridges[J]. China Science and Technology Achievements, 2009, 10(21):25-27.

[8] SU Q T, YANG G T, WU C. Experimental Investigation on Inelastic Behavior of Composite Box Girder Under Negative Moment[J]. International Journal of Steel Structures, 2012, 12(1):71-84.

[9] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京:人民交通出版社,2012.  
NIE Jian-guo. Steel-concrete Composite Structure Bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2012.

[10] SVENSSON H S, LOVETT T G. The Twin Cable-stayed Baytown Bridge[C]//IABSE. Proceedings of the IABSE Bridge Conference. Deauville: IABSE, 1994:361-369.

[11] 黄政宇,沈蒲生,蔡松柏. 200 MPa 超高强钢纤维混凝土试验研究[J]. 混凝土,1993(3):3-7.  
HUANG Zheng-yu, SHEN Pu-sheng, CAI Song-bai. Experimental Research on 200 MPa Super High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete[J]. Con-



- crete, 1993(3):3-7.
- [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.  
WANG De-hui, SHI Cai-jun, WU Lin-mei. Research and Applications of Ultra-high Performance Concrete (UHPC) in China[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(1):141-149.
- [13] 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.
- [14] DE LARRARD F, SEDRAN T. Optimization of Ultra-high-performance Concrete by the Using of a Packing Model[J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(6):997-1009.
- [15] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of Reactive Powder Concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7):1501-1511.
- [16] WANG D H, SHI C J, WU Z M, et al. A Review on Ultra High Performance Concrete: Part II. Hydration Microstructure and Properties[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96:368-377.
- [17] KIM B, KOH G, CHO J, et al. Toward the Next Generation of Concrete Structures: Recent Advances in UHPC Technology[C]//IABSE. Proceedings of IABSE Conference. Guangzhou: IABSE, 2016:46-59.
- [18] GU C P, YE G, SUN W. Ultrahigh Performance Concrete Properties, Applications and Perspectives[J]. Science China: Technological Sciences, 2015, 58(4):587-599.
- [19] BLAISE P Y, COUTURE M. Precast, Prestressed Pedestrian Bridge: World's First Reactive Powder Concrete Structure[J]. PCI Journal, 1999, 44(5):60-71.
- [20] HAJAR Z, LECOINTRE D, SIMON A, et al. Design and Construction of the World First Ultra-high Performance Concrete Road Bridges[C]//FEHLING E, SCHMIDT M, STURWALD S. Proceedings of International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel: Kassel University Press, 2004:39-48.
- [21] FEHLING E, SCHMIDT M, WALRAVEN J, et al. Ultra-high Performance Concrete UHPC: Fundamentals Design Examples. Berlin: Wiley Ernst & Sohn, 2013:117-160.
- [22] RUSSELL H G, GRAYBEAL B A. Ultra-high Performance Concrete: A State-of-the-art Report for the Bridge Community[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2013.
- [23] AALETI S, HONARVAR E, SRITHARAN S, et al. Structural Characterization of UHPC Waffle Bridge Deck and Connections[R]. Ames: Iowa State University, 2014.
- [24] AALETI S, PETERSEN B, SRITHARAN S. Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, Including Connections[R]. Ames: Iowa State University, 2013.
- [25] FHWA. Design and Construction of Field-cast UHPC Connections[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2014.
- [26] VOO Y L, FOSTER S J, HASSAN M F A, et al. The Current State of Art of Ultra-high Performance Concrete Bridge Construction in Malaysia[C]//The Institute of Engineers. Proceedings of the 12th International Conference on Concrete Engineering and Technology. Selangor: The Institute of Engineers, 2014, 95-102.
- [27] 邵旭东, 胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.  
SHAO Xu-dong, HU Jian-hua. The Steel-UHPC Lightweight Composite Bridge Structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [28] 丁虹. 长沙建成首座全预制拼装超高性能混凝土桥梁[EB/OL]. (2016-01-18) [2017-07-18]. <http://news.changsha.cn/h/187/20160108/386792.html>.  
DING Hong. The First Fully Prefabricated Ultra-high Performance Bridge Was Constructed in Changsha [EB/OL]. (2016-01-18) [2017-07-18]. <http://news.changsha.cn/h/187/20160108/386792.html>.
- [29] SHAO X D, YI D T, HUANG Z Y, et al. Basic Performance of the Composite Deck System Composed of Orthotropic Steel Deck and Ultrathin RPC Layer[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(5):417-428.