

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.024

大跨度自锚式悬索桥钢-UHPC轻型组合 加劲梁构造设计研究

张欣¹,李瑜¹,刘勇^{1,2*}

(1.湖南省交通规划勘察设计院有限公司,湖南长沙 410219;2.中南大学 土木工程学院,湖南长沙 410075)

摘要:为优选大跨度自锚式悬索桥钢-UHPC轻型组合加劲梁结构方案,该文以益阳市青龙洲大桥为背景,采用有限元模拟、足尺试验对比验证3种钢-超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)组合加劲梁方案,对比静力性能、经济特性等指标。结果表明:UHPC华夫板、UHPC无腹筋纵肋板、长栓钉带钢板条的UHPC纵肋板方案均可满足设计需要,长栓钉带钢板条的UHPC纵肋板有更高的抗弯刚度、抗裂安全储备,可达到需求值的5.4倍;桥面板新型T形接缝通过合理预留钢筋实现桥面板零焊接,并有效减少UHPC板内高拉应力区纤维不连续引起的断缝;钢-UHPC轻型组合梁性能优越、适用性高、经济性好,具有良好的应用前景。

关键词:悬索桥;超高性能混凝土;轻型组合梁;带纵肋桥面板;初裂应力

中图分类号:U448.25

文献标志码:A

0 引言

悬索桥是一种采用索塔悬挂缆索,缆索吊装桥面板作为上部承重结构的桥梁^[1-4]。悬索桥传力简单、受力明确,结构柔美,在大跨度桥梁中得到了广泛应用^[5-8]。随着结构设计理论的日趋成熟,新材料的发明使用,新型结构的验证采用,悬索桥应用得到了长足发展。在桥面板系中正交异性钢桥面板、钢-混凝土桥面板等新型桥面板系因结构刚度大、行车舒适、抗风耐震性好,近年来在国内外得到广泛应用^[9-11]。

在实际使用过程中,正交异性钢桥面易出现疲劳开裂问题^[12-17],钢-混凝土组合梁应用至悬索桥型中,因钢-混凝土组合主梁自重较大,引起悬索桥中索力加大,导致钢-混凝土组合梁经济跨径不大,而钢-混凝土组合主梁桥面板自身易开裂,影响桥梁整体结构的耐久性和安全性^[18]。为解决传统桥面板系出现的以上问题,国内外学者提出采用超高性能混

凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)板解决方案,并进行了初步理论模拟及试验研究,并验证了其可行性^[19-24]。

基于此,本文以益阳市青龙洲大桥为背景,提出3种新型大跨度自锚式悬索桥钢-UHPC轻型组合加劲梁形式。在详细介绍新型加劲梁方案的基础上,采用有限元分析和模型试验相结合的方法,对新型组合加劲梁的整体受力性能、桥面板抗弯、抗剪性能、接缝构造形式及经济性等方面进行具体分析,期为大跨度自锚式悬索桥钢-UHPC轻型组合加劲梁构造设计提供参考。

1 工程概况

益阳市青龙洲大桥北接白马山路延伸线,南接虎山路,横跨资江,为自锚式悬索桥,全长1 636 m,主跨跨径为(60+110+260+110+60) m=600 m。大桥立面布置图如图1所示。

收稿日期:2021-03-24

基金项目:湖南省交通科技项目(编号:201437);湖南省创新创业团队支持计划项目(编号:201913);山东省自然科学基金资助项目(编号:ZR2018LE017)

作者简介:张欣,男,硕士,高级工程师.E-mail:48206957@qq.com

*通信作者:刘勇,男,博士,工程师.E-mail:liushahust@163.com

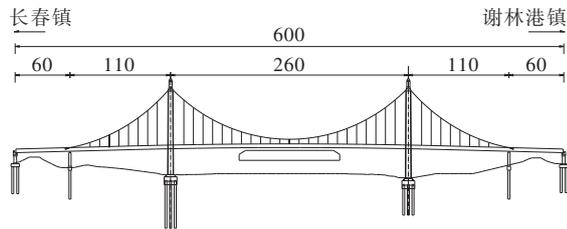


图1 益阳青龙洲大桥立面示意图(单位:m)

大桥按照双向六车道 I 级公路标准建设,主线设计车速为 80 km/h,匝道设计车速为 30 km/h,设计洪水频率为三百年一遇, $SW_{0.33\%}=42.00$ m。通航标准为 III (3) 级,单孔双向通航净宽 \times 净高为 110 m \times 10 m。最高通航水位 $SW_{5\%}=38.45$ m,最低通航水位 25.8 m。根据相关地震安评报告,大桥的地震动峰值加速度为 0.05g,反应谱特征周期为 0.35 s。

1.1 主塔及基础

长春镇侧、谢林港侧主塔的高度分别为 84.344 m、88.344 m。塔柱横桥向尺寸为 4.5 m,长春侧、谢林港侧顺桥向尺寸分别为 5.5~6.5 m、5.500~6.547 m。承台尺寸为 14.4 m \times 14.4 m \times 4.5 m。索塔基础为 9 根 D220 cm 桩基。

塔柱、横梁、塔座均采用 C50 混凝土,承台桩基采用 C30 混凝土。

1.2 缆吊系统

主缆采用 28-127 ϕ 5.1 高强热镀锌平行钢丝,吊索

采用成品钢绞线吊索,边吊索采用 29 ϕ 15.2,其余采用 15~19 ϕ 15.2,主索鞍、散索套和索夹采用全铸结构。

1.3 钢-UHPC 组合加劲梁

UHPC 是一种具有超高韧性的纤维增强水泥基复合材料,其抗压性能超过 150 MPa,直接抗拉强度可达 5 MPa 以上,并具有应变硬化特性。UHPC 颗粒级配更加优化,基体密实凝胶材料含量更高,空隙进一步减少,阻挡了有害物质的侵蚀,耐久性得到提升。

主梁采用 UHPC 桥面组合钢箱梁,其中设两道钢边纵梁,边纵梁通过横隔板连接。此主梁结构高 3.6 m(组合梁中心线处),钢梁梁高 3.38 m。全桥底板水平布置,顶板随桥面采用 2% 横坡。此外,预制桥面板厚 0.22 m,桥面铺装采用 5 cm 厚沥青(图 2)。

2 青龙洲大桥加劲梁设计关键技术

2.1 钢-UHPC 轻型组合梁板肋结构方案比选

青龙洲大桥每个节段长度为 10.5 m,宽 36.5 m,双向六车道,横隔板间距为 3.5 m,青龙洲大桥桥面板相比传统混凝土梁或钢-混凝土组合梁薄 50% 以上,为增加桥面抗弯惯性矩、增大稳定性、减小汽车荷载带来的局部效应,UHPC 桥面板应采用加肋形式。

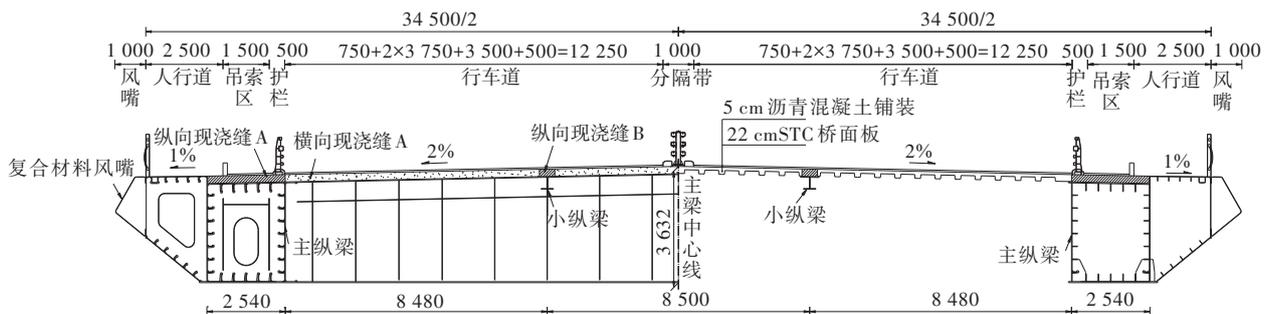


图2 钢-UHPC 轻型组合梁截面图(单位:mm)

主要比选的 UHPC 带肋板设计方案有 3 种:① 方案 1 为 UHPC 华夫板,桥面板为 8 cm 厚 UHPC 配筋板,板下即带有纵肋(间距 65 cm)与横肋(68 cm),纵肋高 14 cm,宽 18 cm;② 方案 2 为带有钢板条的 UHPC 华夫板,桥面板为 8 cm 厚 UHPC 配筋板,板下带有纵肋(间距 65 cm)与横肋(68 cm),其中纵肋底面带有 8 mm 厚的钢板条;③ 方案 3 为 UHPC 纵肋板,即取消了横肋,只有纵肋(间距为 65 cm),其中

纵肋底部带有 8 mm 厚的钢板条,面板厚 8 cm,纵肋高 14 cm,纵肋宽 18 cm。为比选两种方案,分别建立 Midas 主梁整桥有限元模型,如图 3 所示。模型主要荷载:UHPC 体积质量为 28 kN/m³,桥面荷载均简化为线荷载,汽车荷载采用车道荷载,集中力为 360 kN,均布荷载为 10.5 kN/m,局部冲击系数为 0.3。

提取主要控制截面拉应力计算结果整理如表 1 所示。

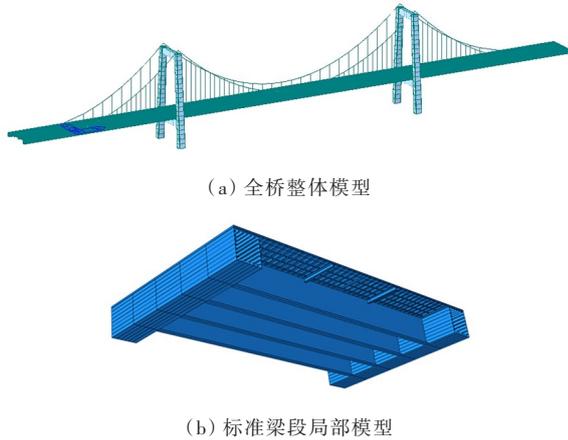


图3 益阳市青龙洲大桥有限元模型

表1 主要控制截面拉应力有限元结果

方案	结构图示	主拉应力/MPa					跨中挠度/ mm
		UHPC纵 肋底部	UHPC横 肋底部	UHPC面 板底部	钢板条	UHPC面 板顶部	
方案1		13.72	4.010	1.724	—	2.580	1.04
方案2		7.98	4.867	1.590	49.0	2.728	0.85
方案3		8.16	—	2.550	49.7	2.728	0.87

2.2 桥面板纵肋抗弯剪性能试验

2.2.1 桥面板纵肋配筋方案

基于前期有限元模型计算结果,选取UHPC纵肋板作为青龙洲大桥桥面板加肋形式,青龙洲大桥钢-UHPC纵肋板内配筋形式也有多种,设计中主要对比了两种配筋方案:方案1为肋内无腹筋,底部配置2根受力钢筋,通过箍筋组合成为一整体,如图4(a)所示;方案2为长栓钉深入板肋内,底部配置钢板条,使用长栓钉兼做箍筋不再单独配置箍筋,如图4(b)所示。

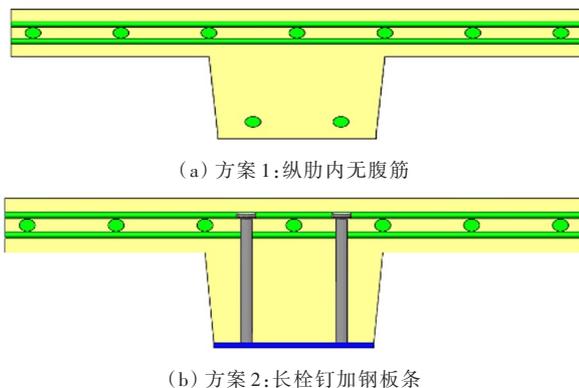


图4 纵肋配筋形式

由表1可知:与不带钢板条的华夫板(方案1)相比,带有钢板条的华夫板(方案2)的纵肋底部、面板底部主拉应力及跨中挠度分别降低42%、7.8%、18%,但横肋底部主拉应力增加了21%;与UHPC华夫板(方案1)相比,UHPC纵肋板(方案3)的纵肋底部主拉应力降低5.56 MPa,面板底部主拉应力仅增加0.826 MPa,面板顶部主拉应力增加0.148 MPa,跨中挠度减小0.17 mm。说明带钢板条的方案2拥有更高的抗弯刚度,取消横肋后UHPC板开裂风险更低,综合对比可知:方案3为最优方案。

2.2.2 桥面板纵肋试验模型

针对两种配筋方案,从青龙洲大桥主梁中选取单根纵肋的标准节段制作条带模型,开展足尺桥面板纵肋试验模型受力性能静载试验。

试验梁总长370 cm,计算跨径为横隔板间距350 cm,模型宽70 cm,模型总高22 cm,面板厚8 cm,纵肋高14 cm,宽18 cm,试验梁按照实际桥梁配筋情况配置纵横向钢筋,所有钢筋等级均为HRB400。制成的试验试件如图5所示。



图5 UHPC桥面板足尺试验试件

UHPC桥面板纵肋抗弯试验采用四点加载,通过两次分配将荷载均匀加载到构件中,分配梁试验

梁按照简支约束边界,UHPC桥面板底部约束模拟为简支约束。加载装置纯弯段约为1.5 m。试验加载装置如图6所示,试验中选取10个测点记录试件的竖向位移,并在试验过程中详细记录裂缝的长度、宽度开展情况。



图6 UHPC桥面板试验加载系统

2.2.3 桥面板纵肋试验结果

已有文献表明,UHPC表面裂缝允许达到0.05 mm,结构出现小于0.05 mm的裂缝对UHPC性能无影响,对其长期耐久性也无任何影响。因此在试验中采用裂缝宽度达到0.05 mm为正常使用极限状态的加载条件,反推UHPC板的抗弯、抗裂性能。

试验中表面裂缝达到0.05 mm时加载工况对应的无腹筋UHPC纵肋最大主拉应力为19.4 MPa,带钢板的UHPC纵肋最大主拉应力可达44.1 MPa,可认为正常使用极限状态下,无腹筋UHPC纵肋板及带钢板的UHPC纵肋能承受的最大主拉应力分别为19.4 MPa、44.1 MPa,有限元模型计算出的实桥最大主拉应力分别为13.72 MPa、8.16 MPa。将主要结果汇总于图7,抗裂安全储备可达1.41倍、5.4倍,显著降低了桥面板开裂风险。

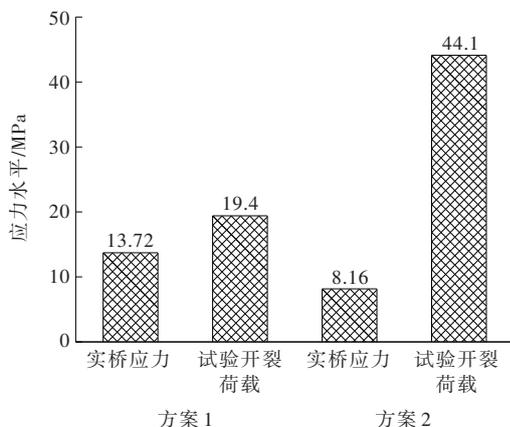


图7 不同纵肋方案主拉应力

2.2.4 UHPC桥面板纵肋抗剪性能

国内外文献及规范表明:UHPC桥面板抗剪承载力主要来源于基体、纤维、箍筋3部分。青龙洲大桥设计中单条抗剪设计方案亦采用了抗弯设计中的两个方案(图4)。

计算得到无腹筋单条UHPC纵肋、长栓钉带钢板单条UHPC纵肋抗剪承载力分别可达232 kN、336 kN,通过有限元模型计算出的实桥承载能力组合剪力值为170 kN,两种方案均可满足设计需要,长栓钉带钢板UHPC板抗剪承载力较普通无腹筋构件提升44.8%。

2.3 UHPC桥面板新型接缝受力性能

2.3.1 新型接缝构造设计

青龙洲大桥UHPC桥面板在横隔板处采用了新型T形接缝如图8所示。

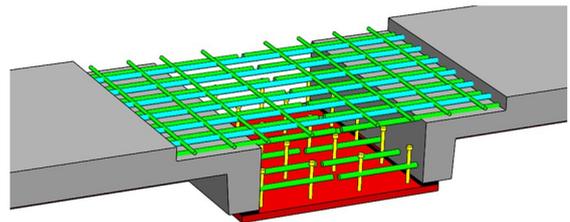


图8 横隔板处T形接缝示意图

钢横隔板位置处会出现高拉应力区、低拉应力区,如图9所示。

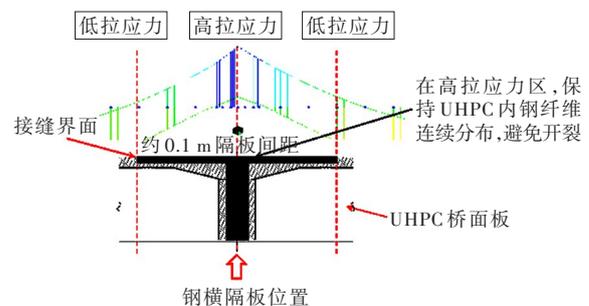


图9 T形接缝应力分布

以往设计中在接缝处高拉应力区易出现纤维不连续的薄弱环节,青龙洲大桥采用的新型T形接缝强化了易开裂截面,将薄弱面设置在低应力区,避免在高拉应力区出现断缝,并阻滞现浇UHPC收缩,避免界面出现收缩裂缝及渗透漏水等病害。通过剪力钉增强现浇UHPC与钢梁的连接作用,合理预留钢筋,实现桥面板零焊接。实际预留接缝槽如图10所示。

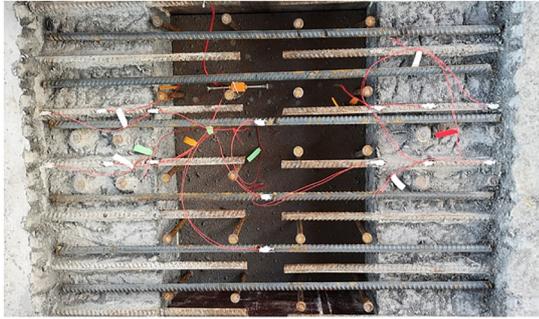


图 10 T形接缝槽

2.3.2 新型接缝模型试验

预制足尺横隔板处 UHPC 桥面板,预留接缝,后浇接缝开展接缝模型试验,对试验构件施加竖向荷载,试验如图 11 所示,记录接缝不同位置处拉应力。

横隔板 T 形接缝试验开裂强度如图 12 所示。

由图 12 可知:接缝界面处有限元计算的实桥拉应力为 1.43 MPa,试验中开裂拉应力可达 6.05 MPa,横隔板处接缝顶部有限元计算的实桥拉应力为 2.73 MPa,试验开裂拉应力可达 17.50 MPa。

2.4 桥面板经济性分析

桥梁设计中常见桥面板形式有正交异性钢桥面、混凝土桥面。对比常用方案,轻型组合梁 UHPC 桥面较混凝土桥面自重小,较钢桥面造价低,经济指标汇总见表 2。

由表 2 可知:正交异性钢桥面自重轻,但造价高,后期维护费用昂贵;混凝土桥面造价低,后期维护费用低廉,但自重大;UHPC 桥面自重略高于钢桥面,造价为钢桥面的一半,后期维护费用比混凝土桥面板稍高。



(a) 现浇接缝模型



(b) 接缝模型试验装置

图 11 横向 T 形接缝抗弯试验

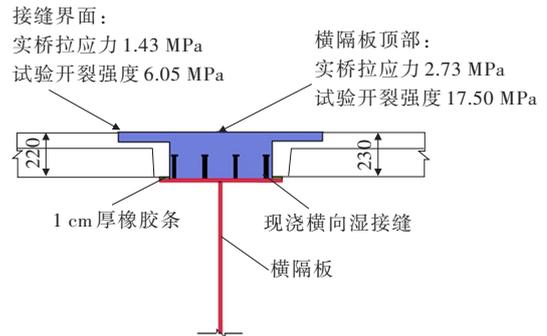


图 12 横隔板 T 形接缝试验开裂强度(尺寸单位:cm)

表 2 不同桥面方案自重与经济性对比(包含桥面与沥青铺装)

桥面类型	方案示意图	材质	桥面厚度/ mm	自重/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	建造成本/ ($\text{元} \cdot \text{m}^{-2}$)	全寿命成本/ ($\text{元} \cdot \text{m}^{-2}$)
正交异性钢桥面		钢桥面+沥青铺装	16	380	4 000	18 000
混凝土桥面		混凝土桥面+沥青	280	830	1 400	2 400
UHPC 桥面		UHPC 桥面+沥青铺装	140(平均)	500	2 000	3 000

3 结论

青龙洲大桥在设计初期做了大量方案比选工作,从不同材料的桥面板到优化UHPC桥面板,将有限元理论计算与试验室足尺模型试验结果对比,得到以下结论:

(1) 钢-UHPC轻型组合梁性能优越、适用性高、经济性好,具有良好的应用前景。

(2) UHPC华夫板、UHPC无腹筋纵肋板、长栓钉带钢板条的UHPC纵肋板均可满足设计需要,长栓钉带钢板条的UHPC纵肋板具有更高的抗弯刚度,更多的抗裂安全储备,可达到需求值的5.4倍。

(3) UHPC桥面板新型T形接缝通过合理预留钢筋实现桥面板零焊接,优化截面布置有效避免了UHPC板内高拉应力区纤维不连续引起的断缝。

参考文献:

- [1] 周孟波. 悬索桥手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [2] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [3] 陈开利. 中日悬索桥缆索养护管理关键技术[J]. 世界桥梁, 2020, 48(6): 70-76.
- [4] 肖汝诚, 庄冬利, 杨乐, 等. 部分地锚式悬索桥的基本结构性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(11): 1545-1551, 1587.
- [5] 王超, 吴联活, 张明金, 等. 大跨度悬索桥施工阶段颤振稳定性措施研究[J]. 世界桥梁, 2020, 48(6): 38-42.
- [6] 彭强, 王奇锐. 大跨径钢桁梁悬索桥加劲梁吊装过程的关键技术研究[J]. 公路, 2020, 65(12): 1-5.
- [7] 郝宪武, 舒鹏, 郝键铭. 大跨度非对称悬索桥的静风稳定性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(12): 53-59.
- [8] 毛伟琦, 胡雄伟. 中国大跨度桥梁最新进展与展望[J]. 桥梁建设, 2020, 50(1): 13-19.
- [9] 谢飞, 谢智荣, 肖百豪. 正交异性钢桥面铺装病害分析及维修对策研究[J]. 公路与汽运, 2020(5): 125-128.
- [10] 汪珍, 王莹. 正交异性钢桥面板的疲劳裂纹扩展规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(7): 1873-1882.
- [11] 张清华, 卜一之, 李乔. 正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 14-30, 39.
- [12] 赵进新. 浅谈钢桥面板疲劳破坏的影响因素及应对措施[J]. 城市建筑, 2020, 17(15): 171-172.
- [13] 王春生, 翟慕赛, HOUANKPO TON. 正交异性钢桥面板典型细节疲劳强度研究[J]. 工程力学, 2020, 37(8): 102-111.
- [14] 汪珍, 王莹. 正交异性钢桥面板的疲劳裂纹扩展规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(7): 1873-1882.
- [15] WOLCHUK R. Lessons from weld cracks in orthotropic decks on three European bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(1): 75-84.
- [16] 张海萍. 车辆荷载运营状态对预应力简支梁桥的疲劳性能影响研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
- [17] 邵旭东, 曹君辉, 易笃韬, 等. 正交异性钢板-薄层RPC组合桥面基本性能研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 40-45.
- [18] 陈胜利. 组合加劲梁悬索桥静动力性能及轻型桥面板设计方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [19] 广东冠生土木工程技术有限公司. 超高性能轻型组合桥面结构技术规程: GDJTG/T A01—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [20] TOUTLEMONDE F, RESPLENDINO J, SORELLI L, et al. Innovative design of ultra-high performance fiber-reinforced concrete ribbed slab: Experimental validation and preliminary detailed analyses[J]. American Concrete Institute, 2006, 2: 1187-1205.
- [21] SORELLI L G, FANNING P, TOUTLEMONDE F. Innovative bridge system of ultra high performance fibre reinforced concrete: Experiments, modeling and design[C]// 7th International Conference on "Short and Medium Span Bridge", Montreal, Canada, 2006: 22-24.
- [22] 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): 41-58.
- [23] 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(23): 33-43.
- [24] 李嘉, 杨波, 邵旭东, 等. 钢桥面-薄层CRRPC组合结构栓钉连接件抗剪疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 67-75.