

文章编号:1003-4722(2017)05-0112-05

超高性能混凝土薄层加固法在槽形梁桥中的应用

刘超¹, 马汝杰¹, 王俊彦², 刘国平³

(1. 同济大学土木工程学院桥梁工程系, 上海 200092; 2. 同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804; 3. 上海罗洋新材料科技有限公司, 上海 200092)

摘要: 预应力混凝土槽形梁桥的主梁连接板在运营过程中易产生开裂病害, 为修复桥面板的裂缝, 改善桥梁受力, 提出超高性能混凝土(UHPC)薄层加固法(在桥面板底部浇筑1层UHPC, 与原结构整体受力), 以沪嘉高速公路蕙藻浜大桥加固项目为背景, 论述该方法在该桥加固中的应用。为检验加固效果, 采用ANSYS建立甲式桥面板(槽形主梁连接板)的局部有限元模型进行应力分析, 并通过荷载试验分析甲式桥面板加固前、后的受力及变形。通过理论和试验分析可知: 加固后, 在车辆荷载作用下, 甲式桥面板的横向应力降至0.5 MPa以下, UHPC层拉应力为2.5 MPa; 甲式桥面板的横向应变降低了约65%, 竖向挠度降低了约60%; UHPC层的应力实测值与有限元理论值基本一致。说明UHPC薄层加固法可有效改善桥面板受力, 提高桥面板的刚度, 减小桥面板的挠度。

关键词: 公路桥; 槽形梁; 预应力混凝土结构; 超高性能混凝土; 薄层加固法; 有限元法; 荷载试验; 桥梁加固

中图分类号: U448.14; U445.72 文献标志码: A

Application of Reinforcement Method of UHPC Thin Layers to Trough Beam Bridges

LIU Chao¹, MA Ru-jie¹, WANG Jun-yan², LIU Guo-ping³

(1. Department of Bridge Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Royang Innovative Material Technologies Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The connecting slabs (deck slabs) of the main beams of the prestressed concrete trough beam bridges are prone to the crack deteriorations in operation. To remedy the cracks in the slabs and improve the load conditions of the bridges, the reinforcement method of the ultra-high performance concrete (UHPC) thin layers (i. e. a thin layer of the UHPC was to be cast at the bottom of a deck slab and the slab with the thin layer of the UHPC was made to work integrally with the existing structure) was proposed. The reinforcement construction of the Wenzaobang Bridge on Shanghai-Jiading Expressway was cited as an example and the application of the method to the deck slabs of the bridge was described. To check up the reinforcement effect, the ANSYS was used to set up the finite element model for the local part of the deck slab Type A of the bridge, the stress analysis of the slab was implemented and the stress and deformation of the slab before and after reinforcement was analyzed based on the load tests. From the theoretic and test analysis,

收稿日期: 2016-11-21

基金项目: 上海浦江人才计划项目(16PJ1409900)

Project of Pujiang Talent Program of Shanghai City (16PJ1409900)

作者简介: 刘超, 副教授, E-mail: lctj@tongji.edu.cn. 研究方向: 超高性能混凝土。

it is known that under the action of the vehicle load, the transverse stress of the slab after the reinforcement decreases below 0.5 MPa and the tensile stress of the UHPC thin layer is 2.5 MPa. The transverse strain of the slab decreases by about 65%, the vertical deflection decreases by about 60% and the measured stress values and finite element values are basically consistent, which shows that the method can effectively improve the load conditions, enhance the rigidity and reduce the deflection of the deck slabs of the trough beam bridges.

Key words: highway bridge; trough beam; prestressed concrete structure; ultra-high performance concrete; reinforcement method of thin layer; finite element method; load test; bridge reinforcement

1 引言

预应力混凝土槽形梁具有建筑高度低、断面空间利用率高、安全防护性能好、外观效果好等优点^[1-2],主要应用于铁路桥梁(如沪通长江大桥非通航孔桥^[3]及平潭海峡公铁两用大桥^[4])和城市轨道交通^[5],在公路及城市高架桥梁中的应用还处于初步阶段。

由于槽形梁桥板梁薄壁体系受力的复杂性(剪力滞效应大、扭转效应明显^[6-7])、交通运行量的不断增加和混凝土的收缩徐变,使其在运营过程中易发生混凝土开裂、主梁和桥面板下挠等病害。目前应用于槽形梁的加固方法主要有:粘贴碳纤维加固法、粘贴钢板加固法、施加体外预应力和增大截面加固法^[8]。以上每种方法都有其独特的优点和不足,针对桥面板混凝土开裂等病害,综合传统加固方法——粘贴纤维加固法^[9]和增大截面法^[10]的特点,提出了采用超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete,以下简称 UHPC)薄层修复加固槽形梁桥的新方法,即在结构下层底部浇筑 1 层 UHPC,与原混凝土形成整体受力结构。在浇筑 UHPC 过程中原结构独自受力,在 UHPC 早凝完成且拆除模板后,UHPC 与普通混凝土共同承受荷载。该技术应用于上海沪嘉高速公路槽形梁桥加固项目中,本文以沪嘉高速公路蕰藻浜大桥为背景,阐述了 UHPC 薄层加固法的方案设计和应用效果。

2 工程背景及加固方案

2.1 工程背景

沪嘉高速(S5)公路南起汶水路北至嘉定南门,全长 18.35 km,其中,蕰藻浜大桥位于沪嘉高速 K21+350.4 处,跨径组合为 11×25 m+19 m+25 m+40 m+25 m+19 m+14×25 m,双向 4 车道。桥梁设计荷载为汽车-20 级,挂车-120^[11]。沪嘉高速公路槽形梁桥的闭口槽形主梁由 U 形主梁和

乙式桥面板(封闭 U 形梁的顶板)组合而成,槽形主梁间采用预制甲式桥面板(槽形主梁连接板,尺寸为 116 cm×77 cm×6 cm)连接。槽形梁标准横断面见图 1。

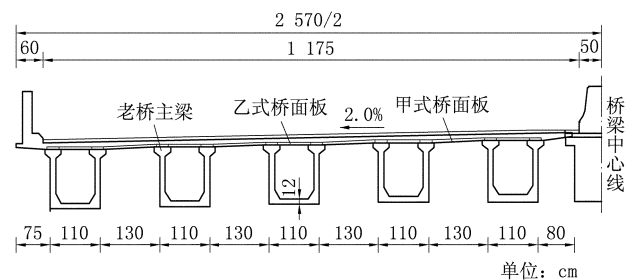


图 1 槽形梁标准横断面
Fig. 1 Standard Cross Section of a Trough Beam

蕰藻浜大桥在运营 26 年后,2014 年对其进行检测,结果发现该槽形梁桥存在以下主要病害:甲式桥面板碳化情况严重[见图 2(a)],混凝土强度降低,裂缝病害较多;槽形主梁混凝土出现碱骨料反应,梁内部积水,部分槽形梁出现底板裂缝及腹板竖向裂缝[见图 2(b)],部分槽形梁钢筋锈蚀^[12]。甲式桥面板是该桥的主要病害部位,也是修复加固的核心位置。

2.2 加固方案

为修复沪嘉高速公路蕰藻浜大桥的病害,改善桥梁受力,槽形梁内积水作排水处理,主梁裂缝进行封闭处理,甲式桥面板病害则采用 UHPC 薄层加固法加固,加固过程中不中断交通。甲式桥面板的加固设计见图 3,设计方案如下:在槽形主梁马蹄部位植入 $\phi 12$ mm 钢筋,锚固深度 15 cm,间距 10 cm。在甲式桥面板下方的槽形梁间立模,灌注 UHPC (中间厚 5 cm、两端厚 10 cm)。该项目采用的 UHPC 具有超高强度(抗压强度 ≥ 150 MPa、抗拉强度 ≥ 12 MPa)、应变硬化性能(极限拉应变 $\geq 4\ 000\ \mu\epsilon$)、高致密性、高裂纹自修复性、高耐久性及良好的施工



(a) 甲式桥面板碳化



(b) 主梁竖向裂缝

图2 温藻浜大桥病害

Fig. 2 Deteriorations of Wenzaobang Bridge

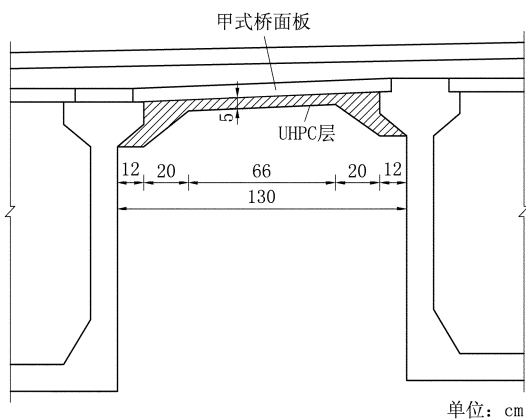


图3 UHPC薄层加固方案

Fig. 3 Reinforcement Scheme of UHPC Thin Layer

性(常温养护)等突出优点。

3 加固效果

3.1 有限元分析

3.1.1 有限元模型

为了解 UHPC 薄层加固法的加固效果,采用 ANSYS 建立桥梁跨中部位的甲式桥面板局部有限元模型(图4),分析加固前、后车辆荷载作用下的甲

式桥面板的应力变化。甲式桥面板尺寸按实桥确定,UHPC 加固层忽略端部加厚影响,加固层厚度取 5 cm。模型中,甲式板和 UHPC 层采用 Solid65 单元模拟,预应力筋采用 Link8 单元模拟,预应力效应通过降温法施加。局部模型的边界条件分铰接和固结 2 种情况进行模拟分析。车辆荷载取 70 kN,作用范围为 $0.6\text{ m}\times 0.2\text{ m}$,沥青铺装层厚 7 cm、现浇桥面混凝土厚 9 cm,按 45° 考虑车辆扩散效应,甲式桥面板均布面荷载的范围为 $0.92\text{ m}\times 0.52\text{ m}$ 。

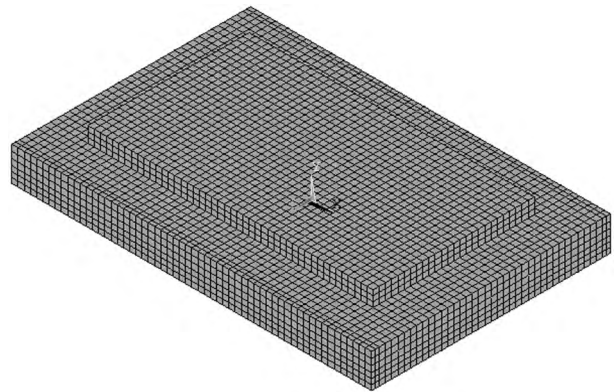


图4 甲式桥面板局部有限元模型

Fig. 4 Finite Element Model for Local Part of Deck Slab Type A

3.1.2 甲式桥面板局部效应分析

由有限元分析可知:在车辆荷载作用下,边界为铰接约束时,加固前甲式桥面板的最大横向拉应力为 7.00 MPa,加固后则降低至 0.44 MPa;边界为固结约束时,加固前甲式桥面板的最大横向拉应力为 3.10 MPa,加固后则降至 -0.44 MPa 。考虑甲式桥面板与槽形梁的实际约束,加固前甲式桥面板的应力为 $3.10\sim 7.00\text{ MPa}$,加固后则降至 $-0.44\sim 0.44\text{ MPa}$;UHPC 层与槽形梁的实际连接方式为固结,加固后 UHPC 层的最大横向拉应力为 2.47 MPa。

加固后甲式桥面板的横向应力明显减小,最大横向应力降低到 0.5 MPa 以下,此时普通混凝土不会开裂;UHPC 层横向最大正应力(2.47 MPa)远小于 UHPC 的抗拉强度(12 MPa)。说明采用 UHPC 薄层加固法可以改善甲式桥面板的受力。

3.2 荷载试验

3.2.1 现场测试方案

为验证 UHPC 薄层加固效果,对温藻浜大桥下行桥南起第 23 孔进行加固前、后的荷载试验。加固前加载车总重为 47.6 t(中、后轴总重 40.0 t),加固

后加载车总重为 47.1 t(中、后轴总重 39.2 t)。现场测试项目主要包括加固前、后甲式桥面板的横向应变和竖向挠度,UHPC 加固层的横向应变^[13]。每 2 片横隔板间有 8 片预制甲式桥面板(编号 1~8)。试验分为 2 个工况:试验车辆的中轴车轮作用于 4 号甲式桥面板为工况 1;试验车辆的中轴车轮作用于 3 号甲式桥面板为工况 2,具体见图 5。甲式桥面板的应变及位移测点布置见图 6。

3.2.2 测试结果与分析

加固前、后甲式桥面板的横向应变和挠度结果见表 1。由表 1 可知:

(1) 工况 1 时,加固后甲式桥面板的横向应变由 64 $\mu\epsilon$ 降低到 22 $\mu\epsilon$,横向应变降低 65.6%,桥面板

的竖向挠度由 0.24 mm 降低到 0.1 mm,竖向挠度减小 58.3%;工况 2 时,加固后甲式桥面板的横向应变由 80 $\mu\epsilon$ 降低到 23 $\mu\epsilon$,横向应变降低 71.3%,桥面板的竖向挠度由 0.25 mm 降低到 0.1 mm,竖向挠度减小 60.0%^[13]。

(2) 2 种工况下,加固后 UHPC 层的平均应变为 50 $\mu\epsilon$,根据弹性模量换算的应力为 2.50 MPa,与有限元计算结果(2.47 MPa)基本一致。

现场荷载试验说明 UHPC 薄层加固法可以降低桥面板的应力,提高桥面板的整体刚度,减小竖向挠度。加固后的 UHPC 层应力满足设计应用要求。

4 结 语

在预应力混凝土槽形梁桥中,为了修复主梁混凝土连接板的开裂病害,提出了 UHPC 薄层加固法,并成功应用于上海沪嘉高速公路桥加固中。通过 ANSYS 甲式板局部模型分析可知,UHPC 薄层加固桥面板可以有效降低预制板的横向拉应力(降低到 0.5 MPa 以下),在车辆荷载作用下,UHPC 层拉应力仅为 2.47 MPa(若考虑温度效应的影响,局部拉应力会更大,普通混凝土已开裂)。通过现场荷载试验可知:UHPC 薄层加固法可以增强主梁和桥面板之间的联系,降低桥面板横向应力;提高桥面板的刚度,减小桥面板的挠度;UHPC 层实测应力与有限元计算结果基本一致。上海沪嘉高速公路蕰藻浜大桥于 2016 年完成加固后,运营状况良好。说明 UHPC 薄层加固槽形梁桥面板效果可靠。

参考文献(References):

[1] 欧阳辉来,王东民,刘 兰. 槽形梁设计、研究与体会[J]. 桥梁建设,2006(S2):56-60.
(OUYANG Hui-lai, WANG Dong-min, LIU Lan. Design, Research and Personal Experiences of Channel Girders[J]. Bridge Construction, 2006(S2): 56-60. in Chinese)

[2] 王文博. 铁路简支槽形梁结构设计 with 动力仿真分析[J]. 铁道标准设计,2015,59(5):97-99.
(WANG Wen-bo. Structural Design and Dynamic Simulation Analysis of Simply-Supported Railway Channel Girders[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(5): 97-99. in Chinese)

[3] 梅新咏,侯 健,刘琳杰. 沪通长江大桥非通航孔桥设计[J]. 桥梁建设,2015,45(6):58-62.
(MEI Xin-yong, HOU Jian, LIU Lin-jie. Design of

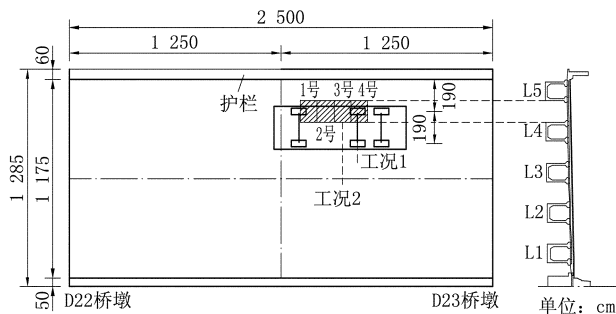


图 5 现场测试工况布置
Fig. 5 Load Cases for Tests in Field

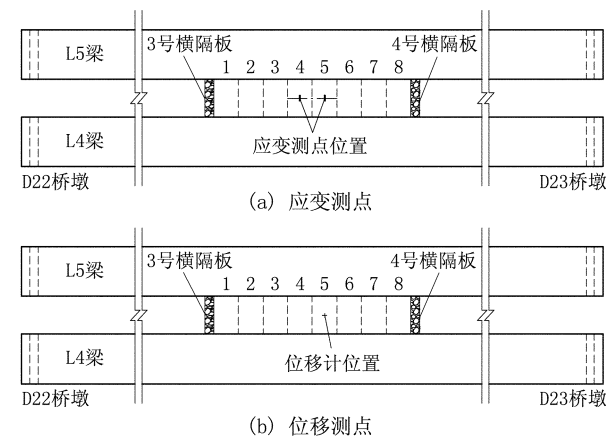


图 6 甲式桥面板的应变及位移测点布置
Fig. 6 Layout of Strain and Displacement Measurement Points on Deck Slab Type A

表 1 加固前、后结构的应变及挠度
Tab. 1 Strain and Deflection of Deck Slab before and after Reinforcement

工况	桥面板横向应变/ $\mu\epsilon$		UHPC 层应变/ $\mu\epsilon$		桥面板竖向挠度/mm	
	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后
工况 1	64	22	/	45	0.24	0.1
工况 2	80	23	/	55	0.25	0.1

- Non-Navigable Span Bridge of Hutong Changjiang River Bridge[J]. Bridge Construction, 2015, 45(6): 58—62. in Chinese)
- [4] 孙英杰,徐伟. 平潭海峡公铁两用大桥双层结合全焊钢桁梁设计[J]. 桥梁建设, 2016, 46(1):1—5. (SUN Ying-jie, XU Wei. Design of Composite Double Decks and Fully Welded Steel Truss Girder of Pingtan Straits Rail-cum-Road Bridge [J]. Bridge Construction, 2016, 46(1): 1—5. in Chinese)
- [5] 吴建侠. 槽形梁在城市轨道交通工程中的应用[J]. 建筑技术开发, 2016(3):108—110. (WU Jian-xia. Application of Trough Beams to Urban Rail Transit Engineering[J]. Building Technique Development, 2016(3): 108—110. in Chinese)
- [6] 余晓燕. 麒麟科技创新园快速公共交通工程上跨铁路转体 T 构空间受力分析[J]. 工程建设与设计, 2016(3):82—84. (YU Xiao-yan. Spatial Stress Analysis of a T-Frame Structure of Urban Rapid Transit System Swung over Railway in Chilin Science and Technology Innovation Park[J]. Construction & Design for Project, 2016 (3): 82—84. in Chinese)
- [7] Gu Dong, Wu Xun. Mechanical Behavior Analysis of Trough Girder and Arch Composite Bridge Based on ANSYS[C]//The 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation Report. Changsha: IEEE-CPS, 2014: 957—959.
- [8] JTG/T J22—2008,公路桥梁加固设计规范[S]. (JTG/T J22-2008, Specifications for Strengthening Design of Highway Bridges[S].)
- [9] 黄伟,林静,汪涛,等. 碳纤维加固 PC 空心板简支梁桥应用研究[J]. 世界桥梁, 2014, 42(4):89—93. (HUANG Wei, LIN Jing, WANG Tao, et al. Study of Application of CFRP to Strengthening Simply-Supported Beam Bridge with PC Hollow Slabs[J]. World Bridges, 2014, 42(4): 89—93. in Chinese)
- [10] McCarron P, McAdam A. 爱尔兰 3 座标志性铁路高架桥的维修加固[J]. 李猛,译. 世界桥梁, 2016, 44(1):77—82. (McCarron P, McAdam A. Preserving Ireland's Iconic Railway Viaducts[J]. LI Meng. Translated. World Bridges, 2016, 44(1): 77—82. in Chinese)
- [11] JTJ 021—89,公路桥涵设计通用规范[S]. (JTJ 021-89, General Code for Design of Highway Bridges and Culverts[S].)
- [12] 上海市城市建设设计研究总院. 沪嘉蕴藻浜新槎浦大修工程实施方案变更设计[R]. 上海:2015. (Shanghai Urban Construction Design & Research

Institute. Variation Design of Implementation Schemes for Rehabilitation Works of Yunzaobang Bridge and Xinchapu Bridge on Shanghai-Jiading Expressway[Z]. Shanghai: 2015. in Chinese)

- [13] 上海浦公检测技术股份有限公司. S5 沪嘉高速蕴藻浜大桥荷载试验检测报告[R]. 上海:2017. (Shanghai Pugong Testing Technology Co., Ltd. Report of Load Testing of Yunzaobang Bridge on Shanghai-Jiading Expressway S5[R]. Shanghai: 2017. in Chinese)



LIU Chao

刘超

1977—,男,副教授

2000年毕业于同济大学交通土建工程专业,工学学士,2006年毕业于同济大学桥梁工程专业,工学博士。研究方向:超高性能混凝土

E-mail: lctj@tongji.edu.cn



MA Ru-jie

马汝杰

1991—,男,硕士生

2014年毕业于南京航空航天大学土木工程专业,工学学士。研究方向:超高性能混凝土

E-mail: marujie2014@163.com



WANG Jun-yan

王俊颜

1982—,男,研究员

2004年毕业于重庆大学材料工程专业,工学学士,2010年毕业于同济大学材料工程专业,工学博士。研究方向:超高性能混凝土

E-mail: wangjunyan@tongji.edu.cn



LIU Guo-ping

刘国平

1967—,男,高级工程师

1989年毕业于浙江大学材料工程专业,工学学士。研究方向:超高性能混凝土

E-mail: garry.liu@royang.com

(编辑:王娣)