

超高性能轻型组合桥面 UHPC-沥青面层 层间黏结性能研究

李嘉^{1,2†}, 夏杨嘉玲^{1,3}, 王万鹏⁴, 李树原^{1,5}

(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; 3. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507;
4. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 5. 广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘要:UHPC 下承层与沥青面层牢固黏结对延长桥面使用寿命, 避免滑移、脱层等病害十分重要。采用有限元分析和室内试验, 研究不同类型黏结剂、环境温度等对 UHPC-沥青面层层间黏结性能的影响。复合试件剪切试验和拉拔试验表明:环境温度对 UHPC-沥青面层层间强度有较大影响, 高温(60℃)下层间黏结强度较常温(20℃)时有显著下降;KD-HYP 环氧、202 环氧较环氧沥青、壳牌 HV、橡胶沥青表现出更佳的黏结性能;环氧沥青高温黏结性能优于壳牌 HV、橡胶沥青, 但常温下三者无明显差别。洞庭湖二桥有限元仿真计算得出, UHPC-SMA 层间最大剪应力在 20℃(常温)和 60℃(高温)时分别为 0.696 MPa、0.422 MPa, 层间最大法向拉应力分别为 0.167 MPa、0.152 MPa。研究表明, 洞庭湖二桥在超载、紧急制动及动荷载等最不利荷载组合下, KD-HYP 环氧和 202 环氧能满足常温和高温条件下层间黏结性能要求, 并且具有足够的安全储备;而壳牌 HV、橡胶沥青和环氧沥青无法满足高温层间黏结性能要求。

关键词:道路工程;黏结性能;超高性能混凝土;沥青面层;有限元分析;室内试验
中图分类号:U443.33 **文献标志码:**A

Bond Performances between Asphalt Surface and UHPC of Ultra-High Performance Lightweight Composite Decks

LI Jia^{1,2†}, XIAYANG Jialing^{1,3}, WANG Wanpeng⁴, LI Shuyuan^{1,5}

(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;

3. Guangdong Province Communications Planning & Design Institute Co., Ltd, Guangzhou 510507, China;

4. Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute, Shanghai 200092, China;

5. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd, Nanning 530029, China)

Abstract: It is important to guarantee strong bonding between UHPC and asphalt surface to prolong the service

* 收稿日期:2018-01-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678229, 51778223), National Natural Science Foundation of China(51678229)

作者简介:李嘉(1962—),女,湖南长沙人,湖南大学教授

† 通讯联系人, E-mail:lijia@hnu.edu.cn

life and avoid the diseases of the bridge deck, such as slippage and delamination. Finite element analysis and laboratory tests were conducted to investigate the influences of kinds of binders and ambient temperatures on bonding performances. The test results showed that the ambient temperature had a great effect on the interface strength by shear and pull-off tests of composite specimens. Compared with normal temperature (20°C), the interface bonding performances had been decreased greatly at high temperature (60°C). Epoxy binders named KD-HYP and 202 exhibited better bonding ability than epoxy asphalt, Shell HV and rubber asphalt. Although epoxy asphalt had higher bonding strength than Shell HV and rubber asphalt at high temperature, but there were no obvious differences among them at normal temperature. The finite element simulation of the second Dongting Lake Bridge showed that the maximum shear stress between UHPC-SMA was 0.696MPa and 0.422MPa respectively at 20°C (normal temperature) and 60°C (high temperature), and the maximum tensile stress was 0.167MPa and 0.152MPa respectively. The researches indicate that, under the most unfavorable load combinations consisting of overload, braking hardy and dynamic loads, KD-HYP and 202 can meet the requirements of interface bonding stresses, and are of sufficient safety at normal temperature and high temperature. But Shell HV, rubber asphalt and epoxy asphalt cannot do at high temperature.

Key words: road engineering; bond performances; ultra-high performance concrete; asphalt surface; finite element analysis; laboratory test

钢结构桥梁具有轻质高强、跨越能力大等优点,已广泛地应用在大跨径桥梁工程建设中。然而,钢桥面存在着桥面疲劳开裂和沥青铺装频繁破损两大难题^[1-2]。作者所在研究团队以提升桥面刚度、降低钢桥面应力幅的新思路,提出基于超高性能材料的钢桥面新体系,即“钢-薄层 UHPC (Ultra-High Performance Concrete)-沥青磨耗层”轻型组合桥面结构^[3-4]。该新体系中水泥基材料 UHPC 下承层与沥青面层牢固黏结是需要解决的主要技术问题之一,它对延长桥面使用寿命、保护 UHPC 结构层、避免滑移、脱层等病害至关重要。

对于常规水泥混凝土板与沥青面层层间黏结问题,国内外学者开展了大量的研究。Ozer 等^[5]通过室内直接剪切试验、路面加速加载试验机和有限元计算等方式,探究水泥混凝土板与沥青铺装层间的黏结性能,包括剪切强度和拉拔强度;Zhen^[6]等进行了热拌沥青混合物 HMA 与波特兰水泥混凝土 PCC 层间剪切试验,指出影响层间黏结强度的因素为温度、热拌沥青混合物和黏结层材料性能、黏结剂涂抹量和水泥混凝土表面处理方式等;Bocci 等^[7]的研究表明,环氧沥青作为层间黏结剂具有较好的抗剪性能,且受温度影响小;贾晓阳等^[8]采用有限元分析

混凝土桥面沥青铺装层间水平剪应力与法向正应力的分布关系,提出层间剪应力临界边界,并找出层间剪应力临界边界的影响因素,给出了临界边界方程形式;刘云等^[9]对混凝土箱梁沥青铺装层间黏结性能的研究表明,SBS 改性沥青和橡胶沥青可作为混凝土箱梁与沥青铺装层的层间黏结材料;李萍等^[10]针对桥面铺装层抗剪强度和黏结强度不足而出现的病害,研究剪切角度、黏层油种类与用量、温度等对水泥砼桥面沥青铺装层抗剪性能的影响。国内外现有研究主要关注沥青上下面层或沥青层与常规水泥混凝土下层之间的联结问题。由于 UHPC 材料组分内不包含粗骨料,颗粒粒径一般小于 1 mm,成型后表面致密且光滑,其材料组成、力学性能、表面特征等方面均与沥青混合物、普通混凝土存在很大差异^[11],因此有必要开展 UHPC-沥青面层层间黏结性能研究。

本文通过常温、高温条件下 UHPC-SMA 复合试件层间力学试验,探讨不同类型黏结剂对 UHPC-SMA 层间受力性能的影响,采用斜剪强度和拉拔强度评估复合试件层间黏结能力;基于实桥有限元计算,确定最不利荷载组合下 UHPC-SMA 层间最大剪应力及法向拉应力,对比实测结果分析不同黏结

剂的适应性,为“钢面板-超薄 UHPC-沥青铺装”超高性能轻型组合桥面的工程应用提供技术支持。

1 UHPC-沥青面层层间设计控制指标

UHPC 是高强致密又耐久水泥基材料,其材料特性决定了 UHPC 层不会产生开裂、车辙、推移和拥包等病害;另一方面,沥青面层主要保护 UHPC 结构层免受行车磨损及外界环境因素影响,同时满足车辆行驶性能要求;薄层沥青层起磨耗层作用,厚度仅为 2~4 cm。因此,UHPC-薄面层复合铺装体系最有可能出现的破坏是界面黏结不足而导致层间滑移、脱层等,必须控制 UHPC 与沥青面层层间剪切破坏和受拉破坏。

综合考虑设计计算、施工控制、竣工验收 3 方面,制定 2 个 UHPC-沥青面层设计控制指标,采用剪切强度和拉拔强度来评价黏结材料层间黏结性能,见式(1)和式(2)。

1.1 层间剪应力

$$\tau_{\max} \leq [\tau]_d \tag{1}$$

式中: τ_{\max} 为最不利荷载作用下,层间最大剪应力,MPa,由计算确定; $[\tau]_d$ 为层间剪切强度设计值,MPa,基于实测层间抗剪强度,并保证足够的安全储备,综合确定。

1.2 层间法向拉应力(表征抗掀起能力)

$$\sigma_{l,\max} \leq [\sigma]_d \tag{2}$$

式中: $\sigma_{l,\max}$ 为最不利荷载作用下,层间最大法向拉应力,MPa,由计算确定; $[\sigma]_d$ 为层间抗拉强度设计值,MPa,基于试验实测层间拉拔强度,并保证足够的安全储备,综合确定。

2 UHPC-沥青面层复合试件黏结试验

影响薄层结构层间黏结性能的因素众多,如:下承层的表面纹理提供的层间摩阻力、黏结剂自身的黏结力和外界环境因素等。由于 UHPC 材料组分内不包含粗骨料,表面粗糙度不及普通混凝土,故选择合适的界面黏结剂十分重要。本文重点研究黏结剂类型、环境温度等对复合试件层间黏结性能的影响。

2.1 原材料

UHPC 基体成分包括水泥、硅灰、石英砂、高效减水剂和水,钢纤维掺量按体积分数 3.5% 掺入。面层采用沥青玛蹄脂碎石混合料 SMA-13,主要成分包括 SBS 改性沥青、玄武岩碎石、聚丙烯腈纤维、矿粉,油石比 5.8%。

本试验选用的黏结剂为 3 种类型,第一类为改性环氧树脂,即 KD-HYP 环氧黏层油(以下简称 KD-HYP 环氧)和热熔型改性环氧树脂 202(以下简称 202 环氧),其基本技术指标见表 1;第二类为改性沥青黏结剂,即壳牌 HV 高黏高弹沥青(以下简称壳牌 HV)和胶粉掺量为 22% 的橡胶沥青,其基本技术指标见表 2;第三类为林武环氧沥青,基本技术指标见表 3。

表 1 改性环氧树脂黏层技术指标

Tab.1 Technical indexes of bonding layer of modified epoxy resins

技术指标	KD-HYP 环氧	202 环氧
固体含量/%	≥99	≥99
表干时间/h	20 ℃ 24	16
实干时间/h	20 ℃ 72	48~168
拉伸强度/MPa	23℃ >3.0	≥2.0
	-10℃ >5.0	—
断裂延伸率/%	23℃ >400	≥100
	10℃ >250	—
柔韧性(-20 ℃±2 ℃)	无裂纹	无裂纹

表 2 改性沥青黏结剂技术指标

Tab.2 Technical indexes of modified asphalt binders

技术指标	壳牌 HV	橡胶沥青
软化点/℃	91.5	≥55
延度(5 ℃)/cm	≥29	≥10
延度(15 ℃)/cm	≥80	≥90
针入度(25 ℃)/dmm	45.7	>40
弹性恢复(25 ℃)/%	>90	≥70
闪点/℃	>260	≥280
溶解度/%	>99.5	—
韧性/(N·m)	>15	—
动力黏度(60 ℃)/(Pa·s)	>40 000	>16 000
质量损失%	0.09	≤±1.0
薄膜烘箱试验	针入度比	≥60
	延度(5 ℃)/cm	≥20

表3 环氧沥青技术指标

Tab.3 Technical indexes of epoxy asphalt

指标	质量比(A:B)	稳定度/kN	断裂延伸率 (20℃)/%	拉伸强度 (20℃)/MPa
数值	100:290	≥45	≥200	≥2.0

2.2 试件制备

制备 10 块 300 mm×300 mm×30 mm UHPC 基板,养护完成后对 UHPC 表面进行抛丸处理,控制构造深度在 0.4~0.55 mm,如图 1 所示;然后在清洁干燥的 UHPC 板表面分别涂刷 5 种黏结剂,每种黏结剂刷 2 块板.黏结剂配合比、洒布量、拌和温度、洒布温度和养生条件见表 4.

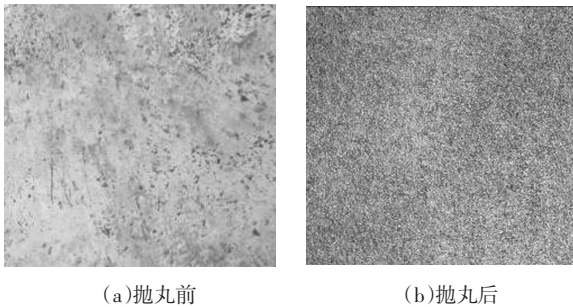


图1 UHPC 表面抛丸处理

Fig.1 Shot blasting surface treatment of UHPC

表4 黏结剂涂刷要求

Tab.4 Binder coating requirements

黏结剂	配合比 (A:B)	洒布量/ (kg·m ⁻²)	拌和温 度/℃	洒布温 度/℃	养生条件
KD-HYP 环氧	100:100	0.6	25~30	25	20℃,24h
202 环氧	100:90	0.7	60	25	20℃,24h
壳牌 HV	—	1.5	—	180~190	无需养生
橡胶沥青	22%胶 粉掺量	2.5	180~190	180~190	无需养生
环氧沥青	100:760	1.5	145~155	110~130	无需养生

黏结剂按配合比称量,将 A、B 组分分别恒温到拌和温度,然后倒入烧杯中,用电动搅拌机搅拌 3 min,然后在规定温度下,将黏结剂均匀涂刷在 UH-PC 表面上,黏结剂涂刷完成后如图 2 所示.

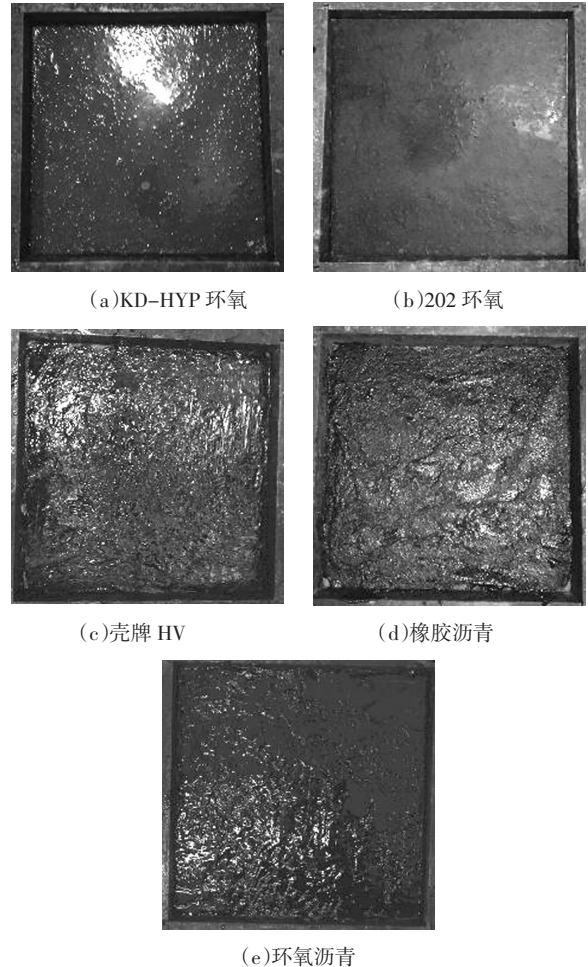


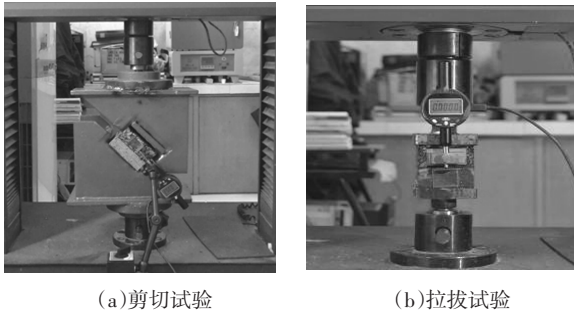
图2 涂刷黏结剂

Fig.2 Brushing binders

最后用轮碾法成型 3 cm 厚的 SMA-13;待自然冷却后将其中 5 块不同黏结剂的复合试板切割成 90 mm×90 mm×60 mm 的小试件,用于斜剪试验;另外 5 块复合试板切成 70 mm×70 mm×60 mm 的小试件,用于拉拔试验.本次试验 UHPC-SMA 复合试件共 60 块.

2.3 试验方法

采用剪切强度和拉拔强度来评价层间黏结性能.斜剪试验、拉拔试验参考美国标准试验方法 ASTM C882/C882M-13^[12]、ASTM D7234-12^[13]进行.试验设备为测力量程 50 kN 的 UTM 微机控制万能试验机,剪切试验加载速率为 1 kN/s,拉拔试验加载速率为 0.5 kN/s,试验装置如图 3 所示.分别测试 20℃和 60℃下,UHPC-SMA 界面剪切强度和拉拔强度.



(a)剪切试验 (b)拉拔试验

图 3 复合试件层间力学试验

Fig.3 Interface mechanical tests of composite specimens



图 6 环氧沥青黏结剂复合试件剪切破坏形态

Fig.6 Shear failure modes of epoxy asphalt binder composite specimens

3 试验结果与分析

3.1 复合试件剪切强度

采用环氧树脂类黏结剂的 UHPC-SMA 复合试件,其剪切破坏均发生在 SMA 内部,破坏面接近黏层(如图 4 所示);而沥青类黏结剂的复合试件,破坏面出现在层间,黏层发生破坏,如图 5、图 6 所示。



图 4 环氧黏结剂复合试件剪切破坏形态

Fig.4 Shear failure modes of epoxy binder composite specimens



图 5 沥青黏结剂复合试件剪切破坏形态

Fig.5 Shear failure modes of asphalt binder composite specimens

UHPC-SMA 复合试件层间剪切试验结果见表 5。

表 5 复合试件剪切试验结果

Tab.5 Results of shear test of composite specimens MPa

温度/℃	界面黏结剂类型					
	KD-HYP 环氧	202 环氧	壳牌 HV	橡胶 沥青	环氧 沥青	
20	实测值	1.79*	2.25*	0.74	0.60	0.56
		1.77*	2.26*	0.93	0.64	0.56
		1.73*	2.03*	0.84	0.68	0.70
	平均值	>1.76	>2.18	0.84	0.64	0.61
60	实测值	1.09*	0.80*	0.26	0.24	0.19
		0.89*	0.67*	0.25	0.21	0.34
		0.87*	0.70*	0.24	0.21	0.27
	平均值	>0.95	>0.72	0.25	0.22	0.27

注:* 试件破坏发生在沥青混合料内部,表明层间强度大于该数据。

分析表 5 可知:

1)20 ℃(常温)、60 ℃(高温)时,采用环氧树脂类黏结剂的 UHPC-SMA 复合试件,实测破坏应力为沥青混凝土的剪切强度,由此推断环氧黏结剂强度大于该数据。

2)20 ℃(常温)、60 ℃(高温)时,采用改性沥青和环氧沥青的复合试件,其剪切破坏均发生在 UHPC-SMA 界面,故实测破坏应力即为黏层剪切强度. 20 ℃(常温)时剪切强度排序为:壳牌 HV 沥青>橡胶沥青>环氧沥青;60 ℃(高温)时剪切强度排序为:环氧沥青>壳牌 HV 沥青>橡胶沥青。

3)环境温度对层间剪切强度有较大影响,特别是沥青黏层复合试件.与常温(20℃)相比,高温(60℃)条件下,壳牌 HV、橡胶沥青、环氧沥青强度分别下降 70.2%、65.6%、55.74%,这是因为沥青材料热塑性所致;环氧沥青兼具环氧树脂与沥青的特性,高温强度优于壳牌 HV、橡胶沥青.KD-HYP 环氧、202 环氧 60℃(高温)剪切强度分别达到 0.95 MPa、0.72 MPa 以上,说明环氧材料的热固性使得其高温稳定性明显优于沥青材料.

3.2 复合试件拉拔强度

采用环氧树脂黏层的复合试件,其拉拔破坏均发生在沥青混凝土内部,此时黏层尚未破坏,见图 7.

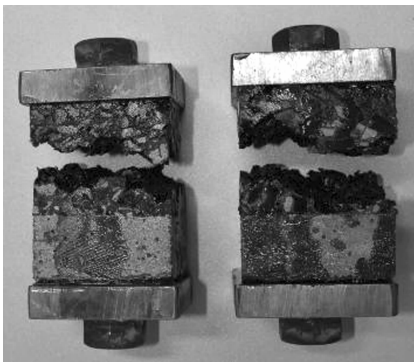
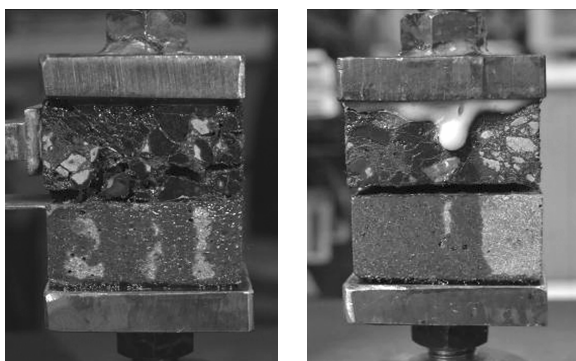


图7 环氧树脂黏结剂复合试件拉拔破坏形态

Fig.7 Pull-off failure modes of epoxy binder composite specimens

采用改性沥青的复合试件,其拉拔破坏约 50%发生在沥青混凝土内部,另 50%出现在 UHPC-SMA 层间;环氧沥青复合试件,拉拔破坏约 70%发生在沥青混凝土内部,30%发生在 UHPC-SMA 层间,破坏形态如图 8 所示.



(a)SMA 内部破坏 (b)UHPC-SMA 层间破坏

图8 沥青黏结剂复合试件拉拔破坏形态

Fig.8 Pull-off failure modes of asphalt binder composite specimens

UHPC-SMA 复合试件拉拔试验结果见表 6.

表 6 拉拔试验结果

		界面黏结剂类型				
温度/℃		KD-HYP	202	壳牌	橡胶	环氧
		环氧	环氧	HV	沥青	沥青
20	实测值	1.17*	1.03*	1.45*	1.78*	1.43*
		1.48*	1.55*	1.20*	1.78	1.59
	平均值	1.51*	1.21*	1.32	1.78	1.74*
		>1.39	>1.26	>1.32	≥1.78	>1.59
60		0.24*	0.24*	0.13	0.09	0.14
	实测值	0.16*	0.19*	0.14	0.11	0.20
		0.15*	0.20*	0.15	0.12	0.18
	平均值	>0.18	>0.21	0.14	0.10	0.17

注:* 试件破坏发生在沥青混合料内部,表明层间强度大于该数据.

分析表 6 可知:

1)20℃(常温)、60℃(高温)时,采用环氧树脂黏结剂的 UHPC-SMA 复合试件,其拉拔破坏面位于 SMA 内部,实测破坏应力为 SMA 的拉拔强度,由此推断环氧黏层强度大于该数据.

2)20℃(常温)时,改性沥青、环氧沥青复合试件破坏面发生在沥青混凝土内部或 UHPC-SMA 层间,故层间黏结强度应大于或等于此时实测的拉拔破坏应力.拉拔强度大致排序为:橡胶沥青>环氧沥青>壳牌 HV.

3)60℃(高温)时,采用改性沥青、环氧沥青的复合试件,拉拔破坏面均出现在 UHPC-SMA 层间,且破坏面平整,故此时破坏应力即为改性沥青、环氧沥青的层间黏结强度;拉拔强度排序为:环氧沥青>壳牌 HV>橡胶沥青,由此说明环氧树脂的加入一定程度改善了黏层高温稳定性.

4)环境温度对层间黏结强度的影响较大,由于沥青类材料的热塑性,壳牌 HV、橡胶沥青、环氧沥青高温(60℃)强度分别比常温(20℃)强度下降 89.4%、94.4%、89.3%;与剪切强度相似,环氧树脂的热固性使得其在高温下拉拔强度较高,KD-HYP 环氧、202 环氧在 60℃(高温)拉拔强度分别达到 0.18 MPa、0.21 MPa 以上.

综上所述,环境温度对层间黏结性能有显著影响,环氧黏层由于其热固性,高温稳定性明显优于

热塑性的沥青类黏层;另一方面,拉拔强度较剪切强度高温稳定性更差,原因在于黏层材料的感温性,而层间机械咬合力基本不受温度影响,因此,部分依赖嵌锁力的剪切强度受温度影响较小,而主要依靠黏结力的拉拔强度受影响明显.

4 洞庭湖二桥 UHPC-SMA 层间黏结性能研究

杭瑞高速岳阳洞庭湖二桥位于洞庭湖入长江交汇口处,主桥为 1 480 m 双塔钢桁梁悬索桥,桥面系采用正交异性钢桥面,桥面钢板厚 12 mm,加劲 U 肋厚 8 mm,面板上铺筑 45 mmUHPC,其上铺筑 40 mmSMA 磨耗层,形成超高性能轻型组合桥面结构.

4.1 有限元计算模型及计算参数

以洞庭湖二桥为原型,采用 ANSYS 有限元软件,建立轻型组合钢桥面结构有限元计算模型(见图 9).横向取半截面宽 17.285 m,纵向取一个标准节段 16.8 m.

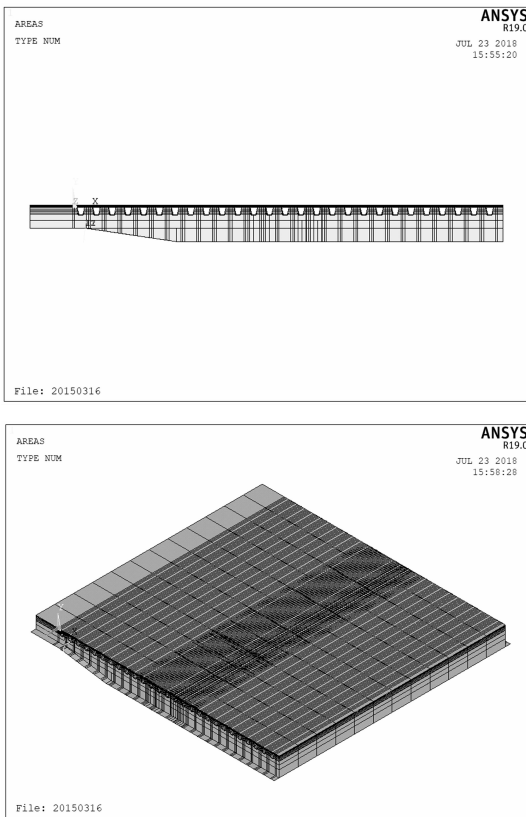


图 9 有限元模型

Fig.9 Finite element model

采用如下计算假定:各层为连续、均匀、各向同性的弹性体,钢箱梁部分采用壳单元 SHELL63 模拟,UHPC 层和沥青面层均采用实体单元 SOLID45 模拟,UHPC 层与钢箱梁的顶面连接、沥青面层与 UHPC 层顶面的连接均采用共节点形式处理.为节约计算资源,钢箱梁取半幅,横桥向采用对称约束,纵桥向采用固结,材料物理力学参数见表 7.

表 7 材料物理力学参数

Tab.7 Material physical and mechanical parameters

项目	数值	项目	数值
钢板弹性模量	206 GPa	UHPC 弹性模量	42 GPa
20 °CSMA 模量	1 600 MPa	60 °CSMA 模量	320 MPa
钢板泊松比	0.30	SMA 泊松比	0.25
SMA 密度	2 450 kg/m ³	UHPC 泊松比	0.20
UHPC 厚度	45 mm	SMA 厚度	40 mm
钢板密度	7 850 kg/m ³	UHPC 密度	2 800 kg/m ³

计算中的加载方式参照《公路桥涵设计通用规范(JTG D60—2015)选用,车辆荷载为 550 kN 标准车,由于标准车车轴的纵向间距较大,计算中仅考虑后轴的双联轴作用^[4],如图 10 中虚线范围所示.加载轴中每个车轮作用面积为 200 mm×600 mm(纵桥向×横桥向).竖向荷载考虑 1.3 的冲击系数,水平荷载取竖向荷载的 0.5 倍(模拟车辆紧急制动,水平力系数取 0.5).车辆荷载立面、平面布置如图 10 所示.

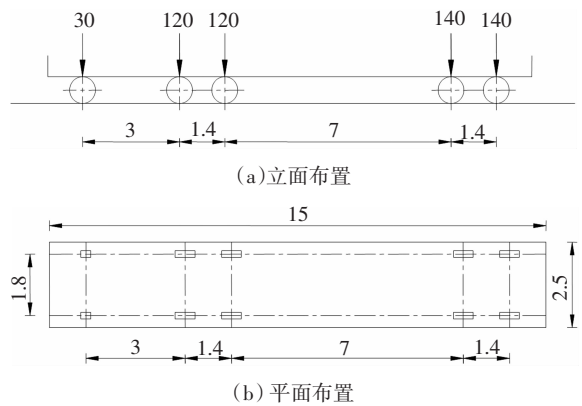
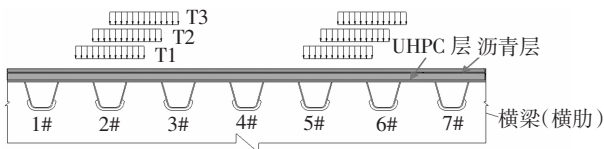


图 10 车辆荷载布置图(单位:mm)

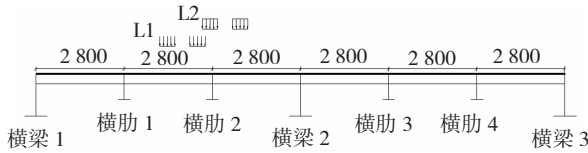
Fig.10 Arrangement of traffic loads (unit:mm)

横桥向布设 3 种荷载位置^[5],如图 11(a)所示;对于每一个横向荷位工况,沿纵桥向布设 2 种加载

位置,如图 11(b)所示。



(a)横桥向的3种荷载工况(T1~T3)



(b)纵桥向的2种荷载工况(L1、L2)

图 11 轮载位置(单位:cm)

Fig.11 Location position of wheel load (unit: cm)

4.2 有限元计算结果

与前述关注位置相对应,提取 UHPC-SMA 层间应力峰值计算结果,见表 8。

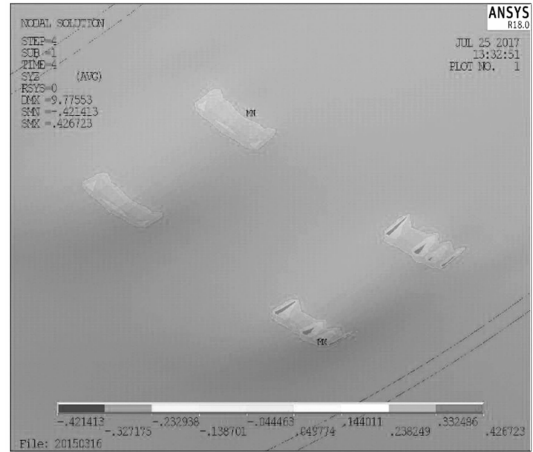
表 8 UHPC-SMA 层间应力峰值汇总

Tab.8 Peak value of UHPC-SMA interface stress MPa

荷载工况	常温 20℃		高温 60℃			
	剪应力		法向拉	剪应力		法向拉
	纵向	横向	应力	纵向	横向	应力
LC-T1-L1	-0.543	0.405	0.157	-0.272	0.304	0.146
LC-T2-L1	-0.413	0.404	0.157	-0.234	0.307	0.142
LC-T3-L1	-0.549	0.427	0.162	-0.274	0.311	0.146
LC-T1-L2	-0.528	0.378	0.161	-0.274	0.309	0.148
LC-T2-L2	-0.513	0.399	0.166	-0.257	0.321	0.152
LC-T3-L2	-0.529	0.395	0.167	-0.274	0.320	0.151
最大应力	0.696	0.167	0.422		0.152	

注:荷载工况中第一个数字表示横桥向位置,第二个数字表示纵桥向位置,“-”表示与坐标轴的方向相反。

计算结果表明,常温(20℃)时,UHPC-SMA 层间最大剪应力为 0.696 MPa,如图 12(a)所示;高温(60℃)时层间最大剪应力为 0.422 MPa,如图 12(b)所示。层间法向拉应力峰值 σ_m 分别为 0.167 MPa(20℃,图 13(a))和 0.152 MPa(60℃,图 13(b))。



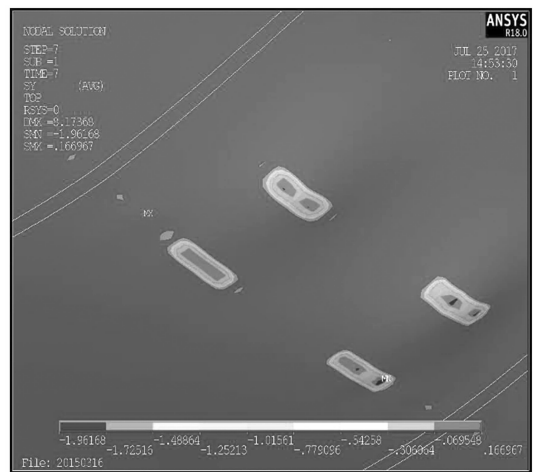
(a) 20℃



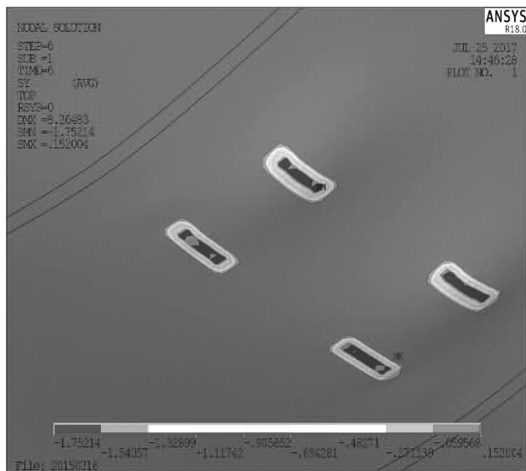
(b) 60℃

图 12 最大层间剪应力(单位:MPa)

Fig.12 Maximum interface shear stress (unit:MPa)



(a) 20℃



(b)60 °C

图 13 层间法向拉应力(单位:MPa)

Fig.13 Interface normal tensile stress (unit:MPa)

4.3 UHPC-SMA 层间黏结性能评价

有限元计算得到的 UHPC-SMA 层间最大剪应力 τ_m 、最大法向拉应力 σ_m (见表 8)与复合试件层间强度(见表 5 和表 6)之比,分别用剪切强度系数 K_r 与拉拔强度系数 K_s 表征,见表 9。

表 9 层间剪切强度系数 K_r 与拉拔强度系数 K_s
Tab.9 Interface shear stress coefficient K_r and tensile stress coefficient K_s

温度/°C	强度系数	KD-HYP 环氧	202 环氧	壳牌 HV	橡胶 沥青	环氧 沥青
20	$K_r = \frac{\tau_s}{\tau_m}$	>3.2	>4.0	1.5	1.2	1.1
	$K_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_m}$	>8.3	>7.5	>7.9	>10.7	>9.5
60	$K_r = \frac{\tau_s}{\tau_m}$	>3.0	>2.2	0.8	0.7	0.8
	$K_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_m}$	>1.2	>1.4	0.9	0.7	1.1

表 9 显示,高温(60 °C)环境下,壳牌 HV、环氧沥青和橡胶沥青等 3 种黏结材料,剪切强度系数 $K_r < 1$,无法满足最不利荷载组合下 UHPC-SMA 层间受力要求;而 KD-HYP 环氧和 202 环氧两种材料无论是在常温(20 °C)还是在高温(60 °C),都具有很大的剪切宽容性,且拉拔强度系数 K_s 也能满足层间受力要求。

数值模拟分析与实测强度对比分析发现,KD-HYP 环氧和 202 环氧黏结剂能满足超载、紧急制动

及动荷载等最不利荷载组合下层间受力的所有要求;壳牌 HV、橡胶沥青和环氧沥青虽然基本满足常温下的层间受力要求,但无法满足高温受力要求。

5 结 论

1)复合试件层间强度试验表明,不同类型黏结剂剪切强度、拉拔强度存在较大差异.KD-HYP 环氧、202 环氧较壳牌 HV、橡胶沥青表现出更佳的黏结性能;环氧沥青高温黏结性能优于壳牌 HV、橡胶沥青,但常温下三者无明显差别。

2)环境温度对复合试件层间强度有较大影响。壳牌 HV、橡胶沥青、环氧沥青 60 °C 剪切强度分别比 20 °C 时下降 70.2%、65.6%、55.74%;拉拔强度下降 89.4%、94.4%、89.3%;高温(60 °C)环境下,环氧树脂黏结剂具有明显优势,KD-HYP 环氧、202 环氧剪切强度分别达到 0.95 MPa、0.72 MPa 以上;拉拔强度分别达到 0.18 MPa、0.21 MPa 以上。

3)有限元计算结果表明,最不利荷载组合下,UHPC-SMA 层间最大剪应力在 20 °C(常温)和 60 °C(高温)时分别为 0.696 MPa、0.422 MPa,最大法向拉应力分别为 0.167 MPa、0.152 MPa。

4)数值模拟分析与实测强度对比分析发现,在超载、紧急制动及动荷载等最不利荷载组合下,KD-HYP 环氧和 202 环氧能满足 20 °C(常温)和 60 °C(高温)条件下层间受力性能要求,并且具有足够的安全储备;而壳牌 HV、橡胶沥青和环氧沥青无法满足 60 °C(高温)条件下层间黏结性能要求。

参考文献

[1] 黄卫.大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J].土木工程学报,2007,40(9):65—77.
 HUANG W. Design of deck pavement for long-span steel bridges [J]. China Civil Engineering Journal,2007,40(9):65—77. (In Chinese)

[2] 童乐为,沈祖炎.正交异性钢桥面板疲劳验算[J].土木工程学报,2000,33(3):16—21.
 TONG L W, SHEN Z Y. Fatigue assessment of orthotropic steel bridge decks [J]. China Civil Engineering Journal,2000,33(3):16—21. (In Chinese)

[3] SHAO X D, YI D T, HUANG Z Y, et al. Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultra

- thin RPC layer [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18(5): 417—428.
- [4] 邵旭东,张哲,刘梦麟,等.正交异性钢-RPC组合桥面板弯拉强度的实验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(10): 7—13.
- SHAO X D, ZHANG Z, LIU M L, *et al.* Research on bending tensile strength for composite bridge deck system composed of orthotropic steel deck and thin RPC topping [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2012, 39(10): 7—13. (In Chinese)
- [5] OZER H, AL-QADI I L, WANG H, *et al.* Characterisation of interface bonding between hot-mix asphalt overlay and concrete pavements: modelling and in-situ response to accelerated loading [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2012, 13(2): 181—196.
- [6] ZHEN L, AL-QADI I L, CARPENTER S H, *et al.* Interface bonding between hot-mix asphalt and various Portland cement concrete surfaces laboratory assessment [J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2009, 2057(1): 46—53.
- [7] BOCCI E, CANESTRARI F. Experimental evaluation of shear resistance of improved steel-asphalt interfaces [J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2013, 2370(1): 145—150.
- [8] 贾晓阳,李立寒.混凝土桥面沥青铺装粘层抗剪设计方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(3): 402—407.
- JIA X Y, LI L H. A design guide to shear resistance of bonding layer in concrete bridge deck asphalt pavement [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(3): 402—407. (In Chinese)
- [9] 刘云,于新,戴忧华,等.混凝土箱梁桥铺装防水粘层力学性能[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(1): 57—61.
- LIU Y, YU X, DAI Y H, *et al.* Mechanical properties of waterproof adhesive layer on concrete box girder bridge [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(1): 57—61. (In Chinese)
- [10] 李萍,念腾飞,张雅莉,等.基于斜剪试验的水泥砼桥面沥青铺装层抗剪切性能研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2015, 37(11): 48—53.
- LI P, NIAN T F, ZHANG Y L, *et al.* Study on anti-shearing property of asphalt pavement for concrete bridge deck based on oblique shear test [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2015, 37(11): 48—53. (In Chinese)
- [11] 龙广成,谢友均,王培铭,等.活性粉末混凝土的性能与微细观结构[J]. *硅酸盐学报*, 2005, 33(4): 456—461.
- LONG G C, XIE Y J, WANG P M. Properties and micro/micro structure of reactive powder concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2005, 33(4): 456—461. (In Chinese)
- [12] ASTM C882/C882M-13 Standard test method for bond stress of epoxy-resin systems used with concrete by slant shear [S]. West Conshohocken, US: ASTM International, 2013: 1—4.
- [13] ASTM D7234-12 Standard test method for pull-off adhesion strength of coating using portable pull-off adhesion testers [S]. West Conshohocken, US: ASTM International, 2012: 1—5.
- [14] 张士红,邵旭东,曹君辉,等.轻型组合桥面板球扁钢纵肋-横隔板连接细节局部应力分析[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(12): 97—107.
- ZHANG S H, SHAO X D, CAO J H, *et al.* Analysis on local stress at bulb flat rib-diaphragm connections in a lightweight composite bridge deck [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(12): 97—107. (In Chinese)
- [15] 李嘉,曾玉,易笃韬,等.超高性能轻型组合桥面设计指标近似计算方法[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(9): 1—9.
- LI J, ZENG Y, YI D T, *et al.* Approximate calculation of design indices for high-performance lightweight composite bridge decks [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(9): 1—9. (In Chinese)