

中兴大桥桥面板 UHPC- 超薄磨耗层 (SMA)层间性能分析

谢波¹, 史贤豪², 陆晓宏³

(1.宁波通途投资开发有限公司, 浙江 宁波 315000; 2.宁波市城建设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315000;

3.上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092)

摘要: 为避免由于超高性能混凝土(UHPC)与新材料面层的黏结能力较差而引起的层间摩擦滑移造成脱空破坏的现象,采用有限元模拟的手段深入研究了粘结剂作用形成组合材料桥面板的层间黏结性能。其黏结性能主要以层间剪应力和法向拉应力来表征,车轮荷载作用于钢桥面板不同位置的受力性能。研究表明:UHPC-超薄磨耗层层间剪应力和法向拉应力值会随着车轮加载位置不同而有不同的结果;宁波中兴大桥在各种加载位置下层间剪应力和法向拉应力值均小于实测强度且具有一定的强度储备;随着车轮荷载的增加,层间应力会急剧增加,造成严重的破坏。

关键词: 中兴大桥;桥面板;UHPC;超薄磨耗层;剪应力

中图分类号: U443.33

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)07-0125-05

0 引言

与其他桥面板体系相比,正交异性钢桥面板体系自重相对较小、承载能力大,适用性好但在疲劳裂纹和铺装层早期破损方面,仍存在较大缺陷,是限制其大规模应用的主要问题所在。钢桥面板上铺设的沥青铺装,基本仅用于行车舒适度的提升,无法对钢桥面板的应力进行有效分担,其缺陷仍无法避免^[1-3]。

经过学者的研究及大量工程实践,目前较为常用的方法是通过 UPHC 与新材料面层的共同作用,形成一种组合材料桥面板,提升桥面刚度,降低钢桥面应力幅,从而增强铺装层的受力性能。

超高性能混凝土简称 UHPC,主要通过对水泥、粉煤灰等原材料进行深加工后,形成的一种在抗拉、抗压、耐久性等各方面性能均有所提升的复合材料^[4-10]。

UPHC 上铺设的新材料面层,其主要功能是缓解行车荷载及外界环境对 UPHC 的损坏,同时满足车辆行驶性能要求,其种类较多。湖南大学李嘉教授团队对新材料面层有较深入的研究,其中,沥青玛蹄

脂碎石混合料(SMA)和薄层聚合物混凝土面层(TPO)在工程应用中表现较好^[11-13]。

本文通过建立有限元模型,研究分析了 UHPC-超薄磨耗层层间黏结性能与车轮荷载增大的影响,为今后设计与应用提供有效的理论依据^[14-17]。

1 有限元模型

1.1 有限元模型尺寸与材料本构

本文以宁波中兴大桥为工程背景,主桥结构形式为矮塔斜拉桥。桥面板结构为 50 mm UHPC 结构层 + 粘结层 + 20 mm 超薄磨耗层, UHPC 层中设置横纵向直径为 14 mm 的 HRB400 钢筋,见图 1。

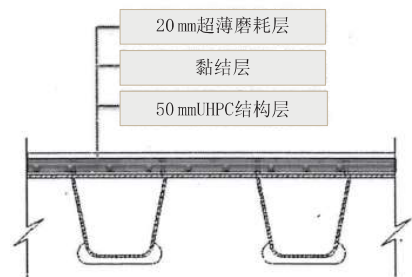


图1 桥面板构造示意图

主桥采用的超薄磨耗层厚度为 20 mm,混合料使用玄武岩作为粗集料,0~3 mm 的石英石砂为细集料,改性环氧粘层。这样的桥面板结构形式,协同受力,各展所长,极大地提高了桥面板刚度,改善了桥面板的

收稿日期: 2021-04-07

作者简介: 谢波(1988—),男,硕士,工程师,从事道路桥梁建设管理工作。

应力状态,减小了钢桥面板与加劲肋之间在行车荷载下的应力,降低了疲劳开裂的几率,从而在一定程度上缓解了钢桥面板疲劳裂纹和铺装层早期破损的问题,使用寿命得到了大大的提升。

本文采用 Midas/FEA 进行建模计算。模型取半幅桥,宽 12 m,纵向宽 13 m,包括顶板、底板、腹板、加劲肋与 5 块横隔板。具体节段模型见图 2~图 4,模型具体参数见表 1。

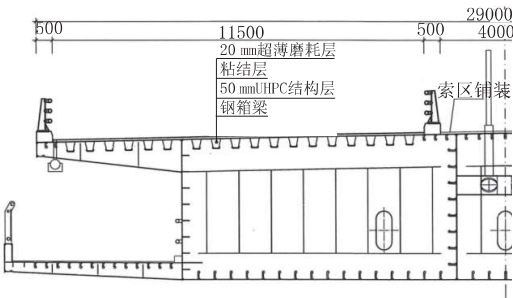


图 2 中兴大桥横断面构造图(单位:mm)

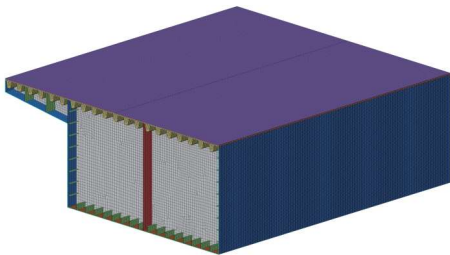


图 3 节段模型

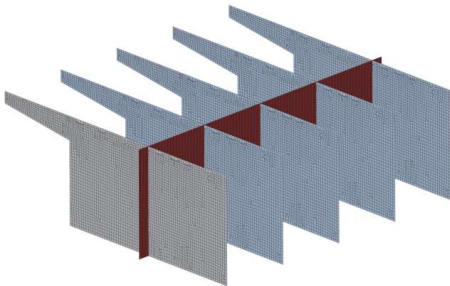


图 4 隔板模型

表 1 几何模型尺寸参数表

类别	取值
顶板厚度/mm	20
底板厚度/mm	18
腹板厚度/mm	20
U 肋厚度/mm	8
底板 T 型肋厚度/mm	14
腹板加劲肋厚度/mm	14
翼缘底板厚度/mm	20
横隔板、纵隔板/mm	14

其中钢板采用赋予材料厚度与特性的 2D 单元, UHPC 与超薄磨耗层采用赋予材料厚度与特性的 3D

单元。Midas FEA 中提供特雷斯卡、范梅赛斯等多种本构模型以供选择,同时还可以用户自定义材料。

其中钢板弹模为 206 GPa,钢板密度为 7 850 kg·m⁻³,钢板泊松比为 0.3,其他的材料特性见表 2。UHPC 模型材料性能见表 2,实测性能见表 3。模型两侧采用节点约束,模拟简支支座效果。

表 2 材料性能参数表

类别	取值
钢板弹模/GPa	206
钢板密度/(kg·m ⁻³)	7 850
钢板泊松比	0.30
UHPC 弹模/GPa	40.3
UHPC 密度/(kg·m ⁻³)	2 800
UHPC 泊松比	0.20
20℃超薄磨耗层弹模/GPa	7 000
60℃超薄磨耗层弹模/GPa	3 820
超薄磨耗层密度/(kg·m ⁻³)	
超薄磨耗层泊松比	0.33

表 3 UHPC 材料实测性能指标

材料性能(28 d 养护标准)	测试依据	指标
抗压强度/MPa	GB/T 31387 试件尺寸 100 mm×100 mm×100 mm	≥120
弹性段抗拉强度	参考瑞士 SIA2052 规范	≥8
极限抗拉强度	参考瑞士 SIA2052 规范	≥9
极限拉伸应变	参考瑞士 SIA2052 规范	≥0.2
极限抗拉强度/ 弹性阶段抗拉强度	参考瑞士 SIA2052 规范	≥1.1
抗弯拉强度	GB/T 31387	≥22
28 d 收缩率	GB/T 50082	<250
初始坍落扩展度/mm	GB/T 50080	600~700

2 不同加载位层间应力

考虑到钢箱梁桥在钢板焊接处会产生应力集中的现象,且层间应力值会随着车辆加载位置不同而变化,由此设定多种车辆加载工况,使得模拟结果更加具有普适性。

2.1 加载工况

根据现行规范《城市桥梁设计规范(2019 版)》(CJJ 11—2011)对有限元模型进行移动荷载加载。移动荷载考虑汽车竖向力、水平制动力和冲击力等。

根据中兴大桥设计标准,结合现行规范进行加载,具体加载方式见图 5。其中,单个车轮面积采用规范值(250 mm×600 mm)。汽车冲击力取 0.3,水平力系数取 0.5,模拟温度 20℃。

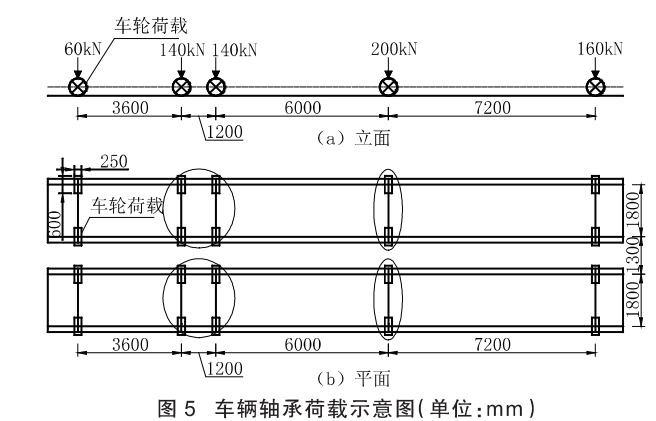


图 5 车辆轴承荷载示意图(单位:mm)

结合模型受力体系,车辆荷载工况,对纵横向进行最不利荷载布设。其中,横桥向布置 3 种荷载工况,纵桥向布置 2 种荷载工况,具体见图 6、表 4。

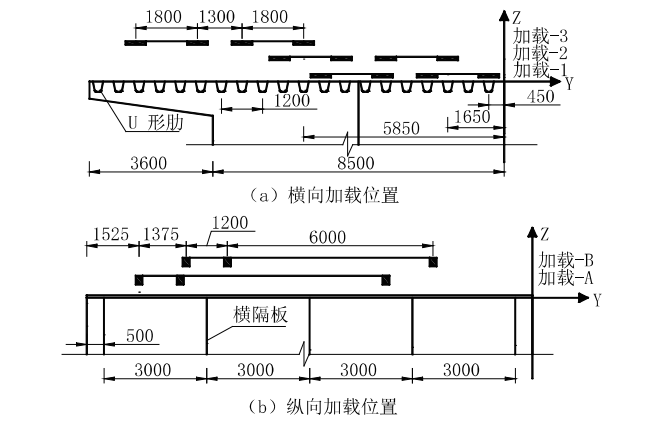


图 6 车轮加载位置示意图(单位:mm)

表 4 加载位置工况汇总表

组别	横向位置	纵向位置	车轮重/kN
S-A-1	1	A	70/100
S-A-2	2	A	70/100
S-A-3	3	A	70/100
S-B-1	1	B	70/100
S-B-2	2	B	70/100
S-B-3	3	B	70/100

2.2 层间应力结果

Midas/FEA 中拥有较为完善的后处理程序,有等值面、剖断面、剖分面等不同的观察角度,可以直观地看到应力云图的变化,同时云图还可以有带状和渐变的显示模式。

计算结果中可分别查看 2D 单元、3D 单元的应力应变,也可以直接得到反力和位移,还能直接查询计算结果,得到层间应力的最大值和最小值。

图 7 为 6 个不同荷载位置显示的应力云图,结合各图可以发现,有限元模型在移动荷载作用下,体现出很强的局部特征,在车轮荷载受力面周边会出现较大的拉应力与剪应力。

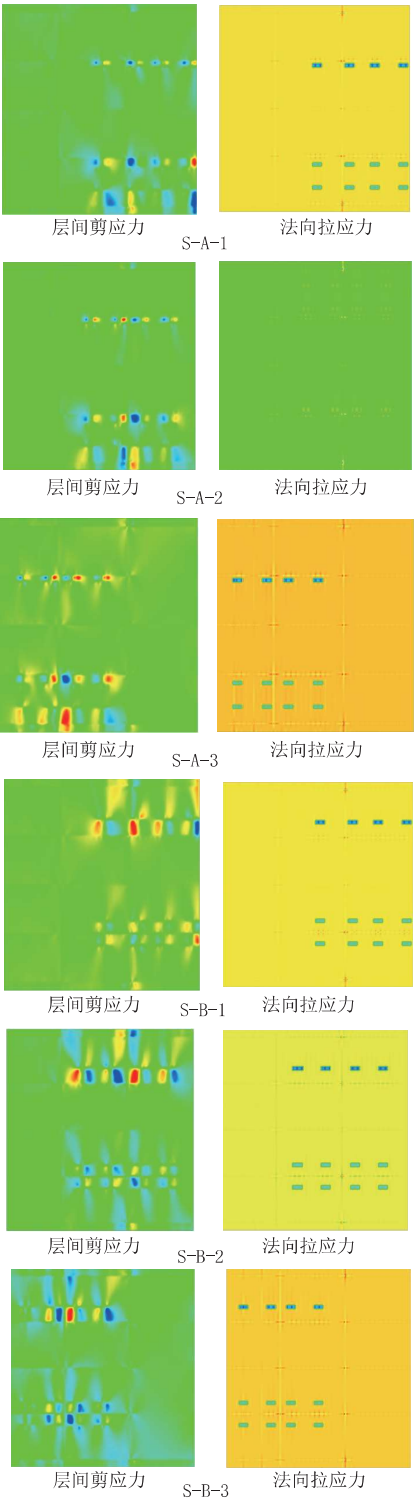


图 7 层间应力图

对应于 6 种不同的加载位置,其剪应力峰值和法向拉应力峰值仿真计算结果汇总于表 5 中。由计算结果可知在车轮荷载作用下,其层间最大法向拉应力为 0.335 6 MPa,最大层间剪应力 0.391 1 MPa。远远小于实测强度值(见表 6)。

由计算结果可知,当车轮荷载均匀的分布在横隔板和腹板上方的时候(S-B-2),受力均匀,层间剪应力较小,而法向拉应力较大。当车轮荷载作用于钢

表 5 层间剪应力及法向拉应力峰值汇总

加载位置	剪应力 /MPa	拉应力 /MPa
S-A-1	0.391 1	0.250 9
S-A-2	0.352 1	0.247 6
S-A-3	0.277 5	0.208 2
S-B-1	0.291 7	0.263 5
S-B-2	0.283 5	0.33 56
S-B-3	0.301 3	0.221 7

表 6 中兴大桥 UHPC- 超薄磨耗层 (SMA)层间性能实测值

技术指标	试验 温度/℃	试验 结果	技术 要求	备注
拉伸强度 /MPa	20	5.45	≥5.0	—
	-10	6.32	≥5.0	—
延伸率 /%	20	512	≥400	—
	-10	268	≥250	—
复合件剪切强度 (SMA+UHPC)/MPa	20	3.60	≥3.50	—
	60	1.50	≥1.5	沥青混合料破坏
复合件拉拔强度 (SMA+UHPC)/MPa	20	3.62	≥3.0	沥青混合料破坏
	60	1.15	≥1.0	
附着力拉拔强度 (UHPC)/MPa	20	2.74	≥2.5	水泥混凝土界面破坏
	60	1.23	≥1.0	

板中间的时候(S-A-3),层间剪应力较大而法向拉应力较小。

热熔型改性环氧树脂粘层性能指标见表 7。

表 7 热熔型改性环氧树脂粘层性能指标

项目	A 组分	B 组分
颜色	琥珀色	琥珀色
混合比(重量)	100 份	80 份
固含量	100%	100%
AB 组分混合后	颜色	琥珀色
	表干时间(20℃)	24 h
	完全固化(20℃)	6~10 d
固化后性能(80℃固化 6 h 后测试)		
黏结力 (与 UHPC)/MPa	20℃	ASTM D-4541/ACI-503R

3 车轮荷载影响

UHPC- 超薄磨耗层的层间应力受众多因素的影响,其中车轮荷载的影响更为敏感,由此进行建模分析。

本次固定加载位置是 S-B-2, 车轮荷载分为超载 10%、30%和 60%之后, 得到其层间应力结果, 汇总于表 8 中。

表 8 不同车轮荷载下层间应力值汇总

加载位置	剪应力 /MPa	增长率 /%	拉应力 /MPa	增长率 /%
0%	0.283 5	0	0.335 6	0
10%	0.305 9	7.8	0.356 8	6.3
30%	0.358 0	26.0	0.404 6	20.5
60%	0.432 8	52.6	0.482 7	43.8

当荷载增加 10%的时候, 层间剪应力增加了 7.8%,法向拉应力增加了 6.3%;当荷载增加了 30%的时候,层间剪应力增加了 26%,法向拉应力增加了 20.5%;当荷载增加 60%的时候,层间剪应力增加了 52.6%,法向拉应力增加了 43.8%。

可见车轮荷载不断地增加, 其层间剪应力与法向应力不断增加, 但增加的增长率与车轮荷载超载的百分比不成正比,均小于荷载增长率。按中兴大桥实际测验结果得知,当荷载增长率小于 10%时,构件相对安全。当荷载增长大于 30%时, 超薄磨耗层和 UHPC 之间会产生较大的滑移剥落现象,造成车辆行驶困难。

4 结 论

本文通过有限元数值模拟,得到 UHPC- 超薄磨耗层层间性能结果, 通过分析计算得到如下主要结论:

(1)UHPC- 超薄磨耗层层间剪应力和法向拉应力值会随着车轮加载位置不同而有不同的结果。横隔板、腹板等钢板焊接处会有应力集中的现象,均呈现较强的局部性特征。

(2)UHPC- 超薄磨耗层层间性能主要通过层间剪应力和法向拉应力值来判定。宁波中兴大桥在各种加载位置下层间剪应力和法向拉应力值均小于实测强度且具有一定的强度储备。

(3)随着车轮荷载不断地增加,其层间剪应力与法向应力不断增加, 但增长率与车轮荷载超载百分比不成正比,均小于荷载增长率。

参考文献:

[1] 李嘉,陈卫,王万鹏,等.TPO- 薄层 UHPC 轻型组合桥面层间温度应力研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018(11):91-98.
[2] Zhao Q, Du Y, Peng Y, etc. Shear Performance of Short Channel Connectors in a Steel-UHPC Composite Deck[J].International journal of

- [3] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement & Concrete Research, 1995, 25(7):1501-1511.
- [4] 李嘉, 董亮, 张坚, 等. UHPC- 沥青薄面层环氧界面剂黏结性能试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020(1):49-57.
- [5] 王万鹏. UHPC- 上面层层间黏结性能研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2018.
- [6] 冀振龙. UHPC 超高性能混凝土钢桥面复合铺装体系的优化和应用[J]. 粉煤灰, 2020, 4(2):54-56.
- [7] 朱忠. 板肋超高性能混凝土轻型组合桥面研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2018.
- [8] 夏杨嘉玲. 超高性能轻型组合桥面 UHPC-SMA 层间黏结性能研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2019.
- [9] 李嘉, 夏杨嘉玲, 王万鹏, 等. 超高性能轻型组合桥面 UHPC- 沥青薄面层间黏结性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(5):16-25.
- [10] 朱忠, 徐发生, 周燕强, 等. 带板肋的钢-UHPC 轻型组合桥面疲劳性能理论与试验研究[J]. 中外公路, 2018, 38(6):97-102.
- [11] 郑晗. 钢-UHPC 轻型组合桥面全过程及空间受力性能研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2016.
- [12] 张瀚文. 钢-超薄 UHPC 组合桥面板短钢筋连接件研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2016.
- [13] ACI 548.8-07, Specification for Type EM (Epoxy Multi-Layer) Polymer Overlay for Bridge and Parking Garage Decks[S].
- [14] 李嘉, 李杰, 邵旭东, 等. 钢板-超薄 UHPC-TPO 组合桥面静力和疲劳试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11):98-106.
- [15] 李杰. 钢桥面-超薄 UHPC-TPO 组合铺装抗弯疲劳试验研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2016.
- [16] 张瀚文, 邵旭东, 曹君辉, 等. 具有短钢筋连接件的超薄轻型组合桥面结构抗剪性能初探[J]. 公路工程, 2019, 44(2):11-16, 38.
- [17] 李文光. 轻型组合桥面 UHPC 层的弯拉静力及疲劳性能试验研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2015.

(上接第 94 页)

的设计计算。经过分级张拉锚固工艺进行静载试验验证,所设计的高强锚杆组件满足设计及使用要求,并在国内某斜拉桥项目得到工程应用。

参考文献:

- [1] 黄跃江.斜拉桥施工控制技术特点研究[J].工程建设和设计,2020(8):84-85.
- [2] 梅应华,胡可,朱大勇.芜湖长江公路二桥桥塔锚索系统性能研究[J].世界桥梁,2017,45(6):39-44.
- [7] 杜仕朝,刘仲洋,康春霞,陈伟.基于无应力状态法的斜拉桥大范围调索技术研究[J].公路,2017,62(12):128-133.
- [8] 刘钊,孟少平,吕志涛.两座大型斜拉桥索塔锚固区模型试验及对比研究[J].中国工程科学,2003(12):48-54+95.