

钢桥面 UHPC 铺装层的黏结性能试验研究

郁龙清

(深圳市南山区建筑工务署, 广东 深圳 518052)

摘要: 在钢桥面的铺装设计中,由于标高控制和自重控制要求,普通混凝土铺装层因厚度大、自重高难以满足设计要求,因此亟需薄厚度、高性能的铺装层,而超高性能混凝土(UHPC)是潜在可满足设计要求的铺装材料。但在循环交通荷载下,UHPC 铺装层与钢板之间的黏结作用尚缺乏试验研究。研究开展了五点弯曲疲劳试验和剪切试验,研究 UHPC 钢桥面铺装层的黏结特性和抗疲劳破坏能力,并基于数值计算结果,将疲劳加载次数转换为标准轴载作用次数。研究发现,在标准车辆轮载作用下难以快速对试样产生损伤。即使试样黏结界面边缘开裂,稳定不变的变形也暗示裂缝并未扩展至内部,即试样内部损伤有限,仍然具有良好的承载力。含有栓钉的 UHPC-钢桥面黏结界面的等效抗剪切强度为 12.4 MPa 左右,其破坏形式为栓钉的剪切破坏。UHPC 与钢板之间协同作用十分显著,铺装后相对于无铺装的钢板刚度提升 1 倍左右。

关键词: 钢桥面;UHPC;铺装;黏结性能;疲劳试验

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)02-0163-06

0 引言

城市交通体系中钢正交异性桥梁因其跨度大、自重轻、施工方便等特点在跨越河流、道路时具有独特优势。作为城市交通的一部分,钢桥面上铺装层的服役性能直接关系到道路的通过性和行车的安全性。由于钢桥面与铺装层的材料性质差异,铺装层在循环交通荷载作用下的失效多数开始于界面黏结性能的丧失,进而开裂并扩散至磨耗层。钢桥面铺装的开裂、变形不仅影响行车安全,同时也进一步加剧钢桥面的竖向变形,对钢板的疲劳损伤增加,造成隐患^[1-2]。

目前在深圳市龙珠一路跨大沙河钢桥面中,为提高钢桥面铺装材料的抗疲劳性能,若采用普通混凝土材料或沥青材料,则按规范设计所需的铺装层厚度过大,造成二期恒载过高,需加大钢结构桥梁的横断面,影响到防洪和道路标高控制。因此需要采用厚度小、自重轻,同时具有高黏结性能的新型铺装材料。

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)作为近年来快速发展的建筑材料,逐渐在道路、桥梁的铺装材料及结构构件上推广使用^[3-9]。当前,不少学者^[4,10]研究了 UHPC-钢桥面体

系的短剪力钉抗剪性能、静力承载性能、开裂强度影响参数、疲劳承载性能、抗水渗透性能等,发现组合体系 UHPC 层不仅能够满足抗裂性能要求,还具备较大的静力承载能力富余度,经过 500 万次循环荷载加载,未出现明显裂缝。周尚猛等^[11]研究了沥青铺装和 UHPC 铺装条件下钢箱梁的应力幅变化,发现采用 UHPC 铺装后的钢箱梁中的应力幅大幅降低。赵秋等^[12]采用 Abaqus 分析了 UHPC 层对钢桥面各细节疲劳性能的影响,得出 UHPC 层大幅增加了钢桥面板的刚度,降低了各疲劳细节的应力幅水平,减少了各细节发生疲劳开裂的概率。彭学理等研究了 UHPC-钢桥面组合铺装体系的抗水渗性,研究表明该体系在无裂缝时抗渗性满足使用要求,可有效保护钢板免受雨水侵蚀,而带裂缝工作的组合桥面,运营过程中裂缝逐渐闭合,具有一定的抗渗储备。

有部分学者也研究了体系中 UHPC 的开裂性能。吴美艳等^[13]采用有限元分析和模型试验研究 UHPC 组合钢桥面在静力加载过程中的裂缝扩展形态和位移、应变的变化规律。结果表明钢结构先于超高性能混凝土破坏,超高性能混凝土组合钢桥面的承载能力依赖于钢结构自身的承载能力。刘益铭^[14]指出, UHPC 开裂虽然降低了结构的局部刚度,但得益于 UHPC 中纤维的桥连效应与钢筋网对裂缝宽度的限制作用,高性能混凝土开裂对结构疲劳性能影响有限。

但目前针对 UHPC 与钢桥面之间黏结性能的疲

收稿日期: 2020-08-19

作者简介: 郁龙清(1966—),男,本科,高级工程师,从事工程管理工作。

劳试验鲜见开展,如前所述,黏结性能的丧失是组合体系疲劳破坏的肇始。本文研究开展疲劳试验,针对实际工程中 UHPC 材料与钢板组合体系的黏结性能开展实验室研究,为实际工程在铺装材料的选择上提供依据。

1 工程概况

龙珠一路跨大沙河桥位于深圳市南山区,西起沙河西路,东接现状龙珠一路,紧邻大沙河文体中心。拟建桥梁斜交跨越大沙河,新建桥梁全长 76.08 m,跨径 75.0 m,桥宽 35.1 m。主桥采用纵横梁格体系、正交异性桥面板的钢箱梁,上设钢拱辅助受力,全桥整体为简支结构。钢桥面铺装材料拟采用高性能、薄厚度、低自重的铺装材料。

2 试验方案

2.1 试样制作

2.1.1 疲劳试验试样规格

UHPC 和钢板之间的黏结性能疲劳测试尚无规范可循。参考规范《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》(JTG/T 3364-02-2019),并做相关改进,进行 UHPC 铺装材料的抗疲劳特性试验。由规范可知,五点弯曲抗疲劳特性试验的破坏多为与钢板的黏结疲劳破坏,而三点弯曲疲劳试验多为表层磨损层破坏。考虑到磨损层开裂后重新铺设较为容易,而与钢板直接相接的 UHPC 层若发生黏结失效,则修复困难,且直接影响到桥面复合体系的受力形式与服役寿命。因此研究重点为钢板与 UHPC 铺装层的黏结失效特性,采用五点弯曲试验。制作 700 mm × 200 mm 和 700 mm × 300 mm 两种试样,每种规格试样各 2 个,共计 4 个五点弯曲试样,同时研究试样规格对试验结果的影响。

2.1.2 试验材料

为使试样等效为从实际桥面上切割而来的试样,采用与钢桥面设计厚度同为 16 mm 的钢板,按照施工标准进行涂装富锌漆,并按设计间距进行剪力钉、钢筋网和后期加劲肋焊接,如图 1a 所示。其中钢筋网格尺寸为 50 mm × 50 mm,直径为 10 mm;剪力钉规格为 M13 × 40 mm,间距为 150 mm × 150 mm。采用如图 1b 所示的试验材料,并按表 1 的质量份数进行配比,进行 UHPC 材料制作。在材料搅拌过程中,将钢纤维加入,如图 1c 所示。按设计要求,采用 5 cm 厚的 UHPC 铺装层,在钢板试件周围固定好模具之后,将搅拌后的 UHPC 进行注模,如图 1d 所示。

最后将浇筑完毕的试样进行蒸汽养护 3 d,形成所需试样。

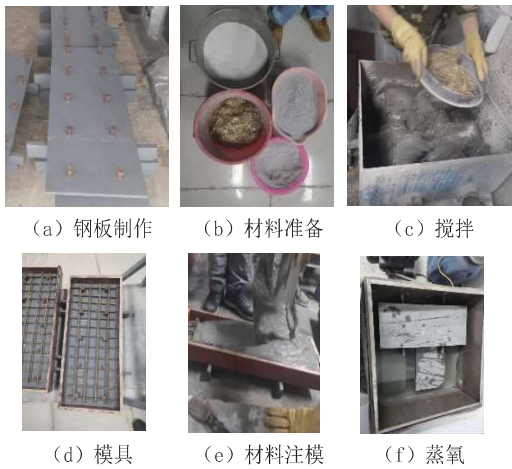


图 1 试验材料及试样制作流程

表 1 UHPC 各成分配比表(质量份数)

石英砂	水泥	核心料	钢纤维 A	钢纤维 B	水
400	440	210	60	30	100

2.1.3 疲劳试验设置

对试样进行循环荷载试验,按规范要求进行夹具设计制作,将夹具四个脚施加于试样底板的加劲肋上,进行五点弯曲疲劳试验。试验设置如图 2 所示,实际加载照片如图 3 所示。

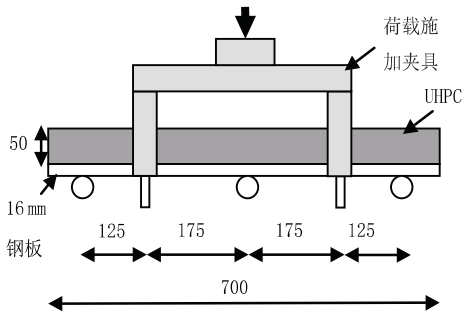


图 2 试验安装示意图(单位:mm)

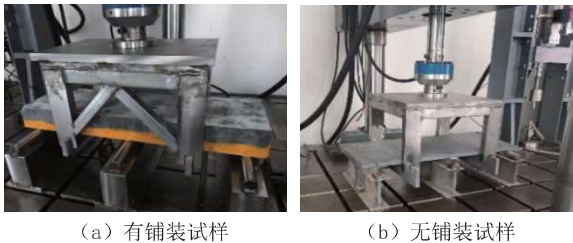


图 3 试验实际设置照片

试验中,对试样施加 10 Hz 的正弦波循环荷载。为确定试验中循环荷载的最大荷载和最小荷载,按规范建议,对无铺装层的钢板在相同试验设置条件下进行静力测试,得到钢板加筋肋上的变形,如图 3b 所示。得到钢板变形 0.5 mm 时,0.2 m 宽的钢板上所施加的力(F_c)为 40 kN,而 0.3 m 宽的钢板上所

施加的力(F_c)为 50 kN。根据规范,以此荷载作为加载时的最大荷载,以 $0.15F_c$ 为最小荷载,分别对两种不同宽度的试样进行疲劳试验(见图 4)。

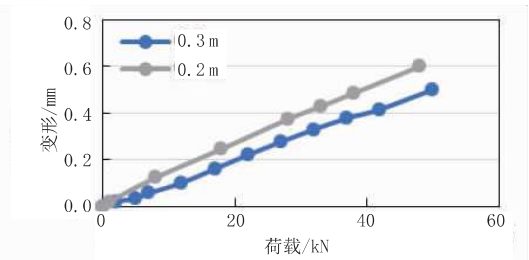


图 4 不同宽度钢板的变形

该研究采用两种加载形式,一种为最大荷载恒定的形式对 700 mm × 300 mm 规格的试样进行疲劳试验,另一种为研究不同荷载条件下试样的变形及开裂情况,采用最大荷载分级增加的形式对 700 mm × 200 mm 规格的试样进行疲劳试验。加载情况如图 5 所示。

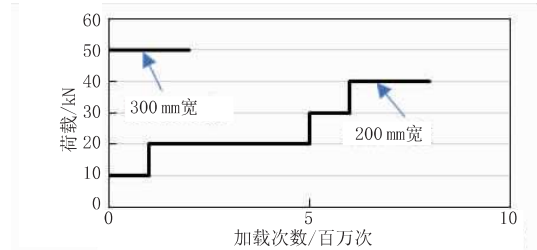
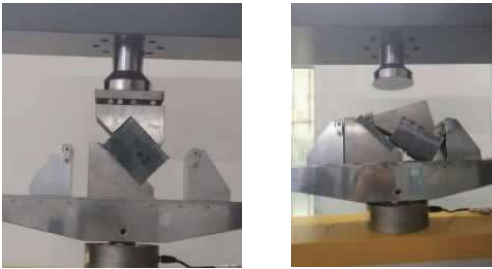


图 5 不同宽度钢板的变形

2.1.4 剪切试验设置

钢桥面的铺装层在承受竖向荷载的同时,还承受来自轮载的水平向剪切力。该研究中制备 0.1 m × 0.1 m 的方块剪切试样,如图 6a 所示。试样制作方式为取 0.1 m × 0.1 m 的钢板,中心设置一个剪力钉,在其上铺设 50 mm 厚的 UHPC 铺装层。按《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》(JTG/T 3364-02—2019)规范加工相应的夹具,设置如下:施加静力荷载,荷载方向与剪切面呈 45°角,加载速率采用 10 mm/min。相应的剪切面上的剪应力可根据竖向力 F 和式(1)求得:

$$\tau = \frac{F \sin \alpha}{S} \tag{1}$$



(a) 剪切前 (b) 剪切后

图 6 剪切试验设置

2.1.5 数值分析

由于试样相当于从钢桥面中切割得到,边界条件与其在桥面中相比已发生变化,因此需要将疲劳试验中所施加的荷载等效为桥面上的轮载。疲劳试验中,单次循环对试样黏结层造成的损伤主要与层底拉应变有关,即与试样变形有关。因此选取变形一致原则,将施加在试样上的荷载转换为施加在桥面上的轮载。采用数值模拟的方法建立桥面弹性模型,获得与疲劳试验中试样变形一致时所对应的轮载大小。

采用 Abaqus 软件建立 6 m × 6 m 的钢桥面铺装模型,采用两个圆形均布荷载来模拟双轮轮载,施加于梁格之上,水平方向上梁格间距为 0.3 m,采用条形简支支座进行模拟,如图 7 所示。其上铺装层结构从上至下依次为 40 mm 沥青磨耗层、50 mm UHPC 铺装层、16 mm 钢板,所采用的模型参数见表 2。

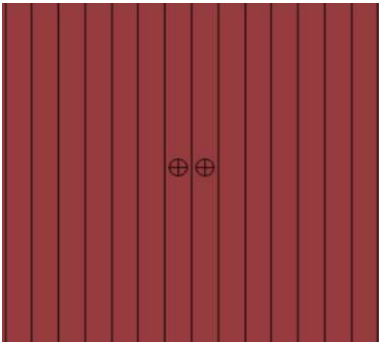


图 7 数值模型

表 2 数值模型材料参数

结构	厚度 /mm	弹性模量 /GPa	泊松比	本构模型
磨耗层	40	3	0.25	线弹性
UHPC 铺装层	50	30	0.25	线弹性
钢板	16	200	0.25	线弹性

3 结果与分析

3.1 数值结果

双圆形荷载为模拟普通标准轴的双轮轮载,半径为 0.2 m,间距为 0.3 m,双轮的总荷载从 50 kN (标准轮载)逐渐提升,并考虑动力冲击放大系数 1.5,得到相应于轮载圆心处的钢板变形情况(见图 8),相应的应力云图如图 9 所示。可见,对于该弹性模型,变形与荷载之间呈线性关系。但需要指出的是,双轮轮载极少有超过 400 kN 的水平,由图 8 可知,正常桥面 UHPC 层的变形在 0.03~0.2 mm。以此变形作为损伤等效的条件,可将疲劳试验中所施加

的荷载等效转换为钢桥面上的轮载。

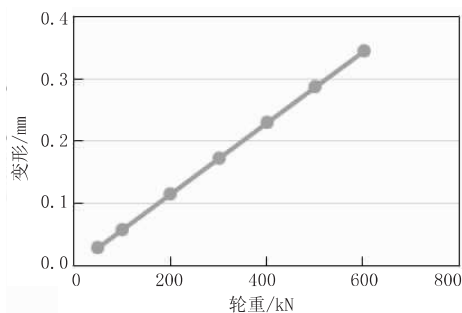


图 8 轮载圆心处的钢板变形情况

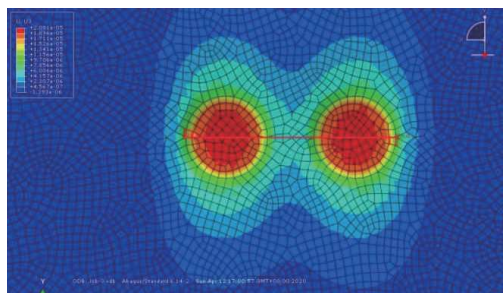


图 9 应力云图

3.2 试验结果

3.2.1 疲劳试验

在疲劳试验中,对 700 mm × 200 mm 的试样施加 10 kN 循环荷载 100 万次,20 kN 循环荷载 400 万次,30 kN 循环荷载 100 万次,试样完好无损,钢板与 UHPC 界面处无裂缝产生。在不同的荷载之下,700 mm × 200 mm 的试样变形情况如图 10a 所示。其中对应于每一级荷载的变形随着循环次数的累积并无明显变化,说明试样中无明显损伤累积。可见,采用比较小的荷载难以对试样的黏结层造成损伤,而对比图 10a 和图 8 中的变形范围,该变形范围已经涵盖了正常的交通荷载所能产生的最大变形。

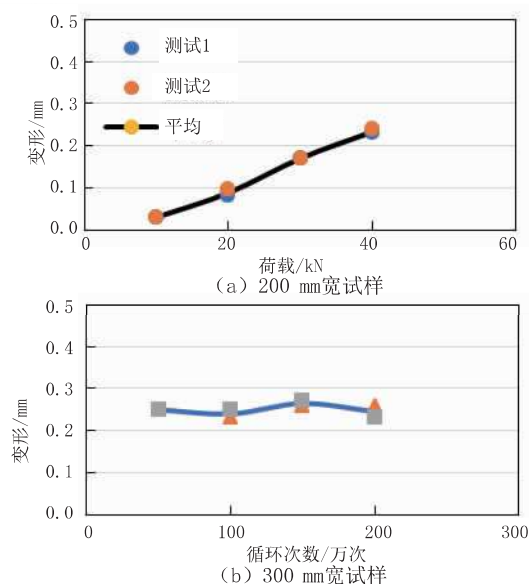


图 10 荷载-变形曲线

进一步增加荷载至 40 kN,该荷载对于 700 mm × 200 mm 的试样,达到规范规定的最大荷载。进行 10 Hz 条件下的疲劳试验,在 80 万次循环时,出现一段极为微小的裂缝,随后随着循环次数的累积,裂缝逐渐变长。最终在 200 万次循环时,共计出现 3 条裂缝,裂缝总长度为 600 mm。在 250 万次循环时,达到 950 mm,所产生的裂缝形貌如图 11 所示。两个 700 mm × 200 mm 的试样发生了相似的开裂情况。按照规范《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》(JTG/T 3364-02—2019)规定,当裂缝长度达到周长的一半时(即 900 mm),试样可认为已被破坏。但从变形来看,试样的变形并未发生明显变化,这说明试样的刚度并未发生大的破坏,可以预测试样内部并未产生完全脱开的损伤。这说明在有剪力钉和钢筋网的加筋作用下,即使试样边缘发生了开裂,但内部并未有实质性损伤。

根据图 4 所示,700 mm × 300 mm 宽的无铺装钢板在变形 0.5 mm 条件下的荷载为 50 kN。在该最大荷载条件下进行疲劳试验,700 mm × 300 mm 试样随循环次数的最大变形情况如图 10b 所示。由图可知,试样的最大变形基本稳定在 0.2~0.24 mm。该变形和 700 mm × 200 mm 试样在 40 kN 下的变形相当,可见 200 mm 宽试样和 300 mm 宽试样的响应是一致的。两个 700 mm × 300 mm 试样分别在 85 万次左右和 80 万次左右发生开裂,裂缝均在 200 万次左右扩展至周长一半。同样,尽管边缘开裂,但循环荷载下试样的变形并未发生显著增加,说明试样内部并未发生损伤破坏,整体上仍然具有协同承载能力。

对比图 4 和图 10 发现,铺装 UHPC 后的试样相对于仅有钢板的情况,变形大幅减小。以 40 kN 条件下的变形为例,铺装后的变形减小为无铺装时的一半。主要原因在于 UHPC 铺装层和钢板的协同变形,增大了总体的刚度。对于五点弯曲试样,即集中荷载下的两跨连续梁,刚度与变形之间的关系如式(2)所示:

$$\omega = \frac{0.911Fl^3}{100EI} \quad (2)$$

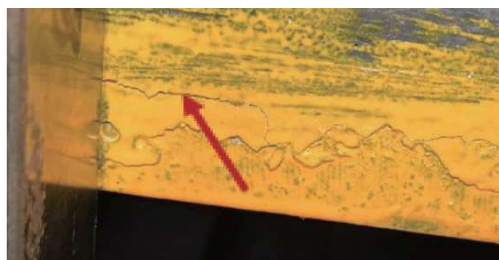


图 11 界面处产生裂缝的形貌

可见,变形与刚度成反比关系,若变形减小至原来的一半,则刚度相对于钢板增加了1倍。

另外,两种宽度的试样取得了较为一致的结果,说明试样宽度在200~300 mm变化对结果造成的影响不大。由于试样承载力较强,标准轮载所产生的变形不能快速对试样造成损伤,只有在远超标准轮载范围的荷载才能快速造成损伤,并压缩试验时间。按照《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》(JTG/T 3364-02—2019)规定,对于中等、轻交通等级条件(本文工程即为此等级),疲劳试验达到80万次即可满足要求。可见,UHPC钢桥面铺装可完全满足规范要求。

3.2.2 剪切试验

UHPC铺装层在服役条件下,不可避免地受到交通荷载的剪切作用。但由于剪力钉的存在,试样在外部荷载的作用下,不仅对黏结表面进行剪切,同时还对剪力钉产生剪切作用(见图12)。



图12 剪切试验实物图

结果发现,最终都以剪力钉的剪切破坏为试样破坏的标志。试样的荷载-位移如图13所示。当剪力钉发生破坏以后,试样发生脆性破坏。根据式(1)进行计算,剪切面上发生破坏时的剪应力达到12.4 MPa(见表3)。根据数值计算,标准轮载作用下,考虑制动与刹车的动力冲击作用,钢板和UHPC之间的剪切力非常低,该剪切力不足以对桥面铺装层产生损害。

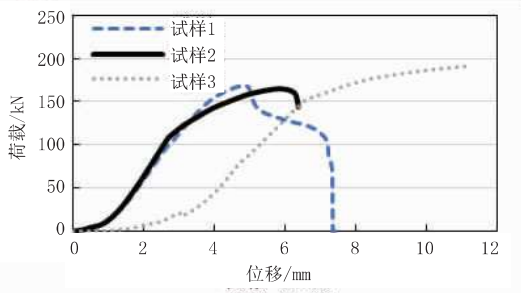


图13 剪切试验结果

3.2.3 标准轮载作用次数

根据前述分析,采用变形相等的原则,将疲劳试

表3 界面抗剪强度

试样	最大荷载/kN	抗剪强度/MPa
试样1	168	12.4
试样2	165	
试样3	192	

验的循环次数转换为钢桥面上轮载的作用次数。由图8和图10可知,在变形相等的前提条件下,可将700 mm×200 mm疲劳试验荷载和数值模型中钢桥面上的轮载列入对比,见表4。700 mm×300 mm试样在50 kN条件下的变形和700 mm×200 mm试样在40 kN条件下的变形相当。

表4 相同变形下疲劳试验荷载和数值模型轮载的转换

试样规格/mm	疲劳试验荷载/kN	试样变形/mm	循环次数/百万次	对应数值轮载/kN	等效标准轴载作用次数/百万次
700×200	10	0.03	100	50	1
	20	0.09	400	175	92
	30	0.17	100	300	88
	40	0.23	200	400	362
					543
700×300	50	0.25	200	450	486

根据荷载等效原则,可将数值模型中的轮载初步转换为标准轴载(100 kN),根据式(3):

$$\frac{N_e}{N} = \left(\frac{P}{P_e} \right)^n \tag{3}$$

式中: N_e 为标准轴载下的等效循环次数; N 为不同轴载下的循环次数; P 为不同轴载; P_e 为标准轴载; n 为指数,与路面刚度有关,如刚性道路一般取4,柔性道路为3.8左右。参考相关研究报告,保守起见,取 n 为2.5。

则总共施加于试样上的循环次数可等效为标准轴载下的5亿次循环。200 mm宽试样和300 mm宽试样均得到类似结果。该等效标准轴载可满足市内低交通量桥面的全寿命周期服役要求。值得说明的是,尽管试样四周出现了裂缝,但试样整体的承载能力并未丧失,仍然具有承载交通荷载的能力。同时由于整体变形的减小,在相同荷载作用下,钢板和磨耗层的变形相应减小,降低了钢板和磨耗层内的拉应变,因而进一步提高了磨耗层和钢板的抗疲劳性能。由于UHPC铺装层不产生车辙,因而墙面总车辙可进一步减小。另外,含有钢纤维的UHPC层不易发生收缩裂缝,减少了反射裂缝发生的可能性。总体而言,UHPC是优异的钢桥面铺装材料。

4 结 语

本文研究针对 UHPC 钢桥面铺装层与钢板的黏结性能尚缺乏试验研究这一现状,开展了室内疲劳试验和剪切试验,揭示了 UHPC 钢桥面铺装层的黏结特性和抗疲劳损伤能力,并基于数值计算结果,将疲劳加载次数转换为标准轴载作用次数。得出以下结论:

(1)无铺装钢板试样变形 0.5 mm 所确定的荷载作用下,铺装 UHPC 的试样在 100~200 万次内发生边缘裂缝,而低于此荷载的疲劳加载难以快速对试样产生损伤。

(2)即使试样黏结界面边缘开裂,稳定不变的变形也暗示裂缝并未扩展至内部,即试样内部损伤有限,仍然具有良好的承载力,且 200~300 mm 宽度的试样测试结果展示了良好的一致性。

(3)含有栓钉的 UHPC-钢桥面黏结界面的等效抗剪切强度为 12.4 MPa 左右,其破坏形式为栓钉的剪切破坏,可满足交通荷载引起的层间剪切要求。

(4)结果表明 UHPC 与钢板之间协同作用十分显著,铺装后相对于无铺装的钢板刚度提升 1 倍左右。

参考文献:

[1] 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),2020,40(1):49-57.

[2] 陈杰,要荆荆. 某正交异性板钢箱梁斜拉桥 UHPC 组合桥面改造方案研究[J]. 世界桥梁,2020,48(3):80-85.

[3] 张孝俊. 钢-UHPC 组合桥面板性能分析及应用[J]. 山西交通科技,2019(3):79-83.

[4] 田启贤,高立强,周尚猛,等. 超高性能混凝土-钢正交异性板组合桥面试验研究[J]. 桥梁建设,2019,49(S1):13-19.

[5] 陈李峰,李款,潘友强,等. 免蒸养 UHPC 在正交异性钢桥面铺装中的应用[J]. 公路,2020,65(3):154-159.

[6] 邵旭东,张瀚文,李嘉,等. 钢-超薄 UHPC 轻型组合桥面短钢筋连接件抗剪性能研究[J]. 土木工程学报,2020,53(1):39-51.

[7] 陈孔生. 钢桥面板系统的疲劳受力行为及 UHPC 铺装层影响研究[D]. 福州:福州大学,2018.

[8] 裴必达. 钢-UHPC 轻型组合结构构造细节疲劳评估与优化研究[D]. 长沙:湖南大学,2019.

[9] 廖子南. 钢-UHPC 组合结构受弯试验与有限元模拟[D]. 长沙:湖南大学,2017.

[10] 田启贤,高立强,周尚猛,等. 超高性能混凝土-钢正交异性板组合桥面试验研究[J]. 桥梁建设,2019,49(S1):13-19.

[11] 周尚猛,王伟. 超高性能混凝土铺装体系在钢桥面中的应用[J]. 桥梁建设,2019,49(S1):20-25.

[12] 赵秋,郭杨斌,陈孔生,等. 超高性能混凝土铺装层对钢桥面板疲劳性能影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(6):961-969.

[13] 吴美艳,周尚猛. 超高性能混凝土组合钢桥面承载性能试验研究[J]. 桥梁建设,2017,47(3):25-29.

[14] 刘益铭. 大纵肋正交异性钢-高性能混凝土组合桥面板疲劳失效机理研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.

(上接第 155 页)

用到实际工作中,优化设施,提高管理效率和水平。

3.6 建立完整的从“发现问题”到“解决问题”的工作机制

建议针对区管标志标线缺失损坏现象,道路管理部门内部建立一套完整的发现问题解决问题的工作机制。标志标线缺失损坏以道路管理部门自查发现为主,市民投诉、交警发现为辅,一方面充分发挥养护单位等社会力量,规范养护巡查频率和内容职责,做到有问题及时发现及时处理,另一方面挖掘道路管理部门内部力量,通过提升用人效率、扩编等方

式加强内部人员在此方面的作用。

4 结 语

道路交通和标线不仅关系到城市交通的运行安全及运行效率,同时也是一座的名片,是城市管理水平的深层次体现。到 2035 年上海致力于建设成为卓越的全球城市,城市价值位列世界前三,形成一套科学、高效、绿色、经济的交通标志和标线管理及技术体系,对于保障城市的高品质运行,实现“人民城市为人民”的城市建设发展目标,意义重大。