

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.05.043

钢桥面浇注式沥青+改性沥青 SMA 铺装结构 疲劳抗裂性能评估

王民^{1,2}, 万国琪¹, 胡德勇², 李开一¹

(1.重庆交通大学土木工程学院, 重庆市 400067; 2.重庆市智翔铺道技术工程有限公司, 重庆市 401336)

摘要:为评价钢桥面铺装材料抗疲劳开裂性能,采用四点弯曲试验进行不同温度和应变条件下的高弹改性 SMA10 疲劳试验,建立不同温度下的疲劳行为方程;通过有限元模型提取铺装层顶面最大弯拉应力,计算 SMA10 在不同温度区间疲劳损伤度,建立钢桥面铺装疲劳开裂预估模型。研究表明:温度和应变对钢桥面铺装开裂影响显著;温度每升高 10℃,高弹改性 SMA10 的疲劳寿命提高 4~5 倍;应变条件和疲劳寿命之间具有很好的指数函数关系,其相关性系数均大于 0.9;预估模型结果表明,浇注式沥青混合料 GA10+ 高弹改性沥青 SMA10 结构的疲劳开裂寿命为 16 a,其预估结果为钢桥面铺装方案的选择提供了理论依据。

关键词:钢桥面铺装;高弹改性 SMA10;开裂;疲劳行为方程;预估模型

中图分类号: U416.221

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)05-0172-04

0 引言

钢桥面铺装作为桥梁工程的重要组成部份,一直是一个世界性难题,倍受行业与社会关注^[1-4]。在我国特殊的交通、气候条件下,钢桥面铺装运营早期病害频发,大跨径钢桥桥面铺装使用寿命难以达到设计寿命。疲劳开裂是一种最常见的钢桥面早期病害,如我国 1997 年建成的虎门长江大桥、1999 年建成的江阴长江公路大桥、2000 年建成的南京长江二桥等均出现了不同程度的疲劳开裂病害^[5-6]。此类病害对沥青路面的行车舒适性和安全性影响并不大,但其破坏了钢桥面结构的整体性和连续性,雨水通过裂缝渗入铺装层内部,在行车载荷作用下发生冲刷和唧泥现象,进而加速铺装层的破坏,导致松散、坑槽等病害的出现,这不仅降低了行车舒适性,还增加了行车的危险性^[7]。

目前国内大跨径钢桥基本采用的是正交异性钢桥面板支撑结构,U 肋、横隔板以及纵腹板等起到加劲作用,但同时也造成了该部位钢桥面铺装产生应力集中,反复出现弯拉应力,引起疲劳开裂。针对钢桥面铺装出现的疲劳开裂,徐伟^[8]等基于沥青材料

的黏弹性分析了钢桥面铺装材料疲劳损伤特征;黄文通^[9]等基于应变条件下的弯曲试验分析了不同钢桥面铺装材料的疲劳性能;张顺先^[10]等建立环氧沥青混凝土铺装材料疲劳寿命预估模型。

本文基于马鞍山长江公路大桥钢桥面铺装的铺装材料和使用条件,建立疲劳开裂预估模型,为今后我国大跨径钢桥面铺装使用状况进行预测,并指导钢桥面铺装的养护工作,可有效促进钢桥面铺装的使用品质及耐久性提升。

1 材料及实验条件

(1) 铺装材料

高弹改性 SMA 具有优异的随从变形能力和抗疲劳开裂性能,与正交异性板有很好的适配性,形成了国内应用最为广泛的典型铺装——浇注式沥青混合料+高弹改性 SMA 组合结构。因此,在研究过程中,选用高弹改性 SMA10 作为研究对象进行疲劳试验。高弹改性沥青技术指标见表 1,高弹改性 SMA10 最佳油石比为 6.4%,聚酯纤维用量为 0.2%,混合料技术指标见表 2。

表 1 高弹改性沥青技术指标

项目	25℃针入度 /0.1 mm	软化点 /℃	5℃延度 /cm	弹性恢复率 /%
测试结果	66	93	58	98
设计要求	60~75	≥90	≥55	≥90

收稿日期: 2021-10-18

基金项目: 重庆市技术创新与应用示范项目(cstc2018jscx-msyb0907)

作者简介: 王民(1979—),男,博士,研究员,从事沥青路面材料与结构研究工作。

表 2 高弹改性 SMA10 混合料技术指标

空隙率 /%	马歇尔稳定度 /kN	飞散损失 /%	析漏损失 /%	浸水残留稳定度 /%	冻融劈裂强度 /%	70℃动稳定度 / (次·mm ⁻¹)	低温弯曲张应变 /με
3.4	8.8	3.2	0.07	91.5	85.8	3 810	10 246

注:低温弯曲张试验试件尺寸为 300 mm×100 mm×50 mm。

(2) 实验条件

四点弯曲试验采用澳大利亚的气动伺服四点弯曲试验仪,试验采用偏正弦波加载,加载频率为 10 Hz,采用应变控制模式。试验过程中,设定 3 种试验温度,每种温度下设定 3~4 个应变水平。每组试验进行 3 组平行试验,以劲度模量降低 50%为判断疲劳失效标准。具体试验条件见表 3。

表 3 四点弯曲疲劳试验条件

试验温度 /℃	试验频率 /Hz	应变水平 /με
5	10	400、600、800
15	10	400、600、800
25	10	800、1 000、1 100、1 200

2 铺装材料疲劳行为方程

2.1 试验结果

根据上节设定的试验条件,制作成型试件(380 mm×63.5 mm×50 mm)进行四点弯曲试验,试验结果见表 4。由试验结果可以看出,在高温区域,高弹改性沥青 SMA10 表现出比较好的疲劳特性,在低应变条件下几乎不出现开裂,即使在高应变条件下也表现出优异的疲劳耐久性;在低温区域,沥青混合料的劲度模量较高,抗疲劳开裂能力明显下降。

表 4 四点弯曲疲劳次数 单位:万次

温度 /℃	应变水平 /με					
	400	600	800	1 000	1 100	1 200
5	100	11	2	-	-	-
15	670	176	81	-	-	-
25	-	-	546	208	124	36

2.2 疲劳行为方程

根据不同温度和应变条件下的试验结果,对疲劳次数与应变水平进行回归分析,得到不同温度时的疲劳次数与应变水平的指数关系曲线,如图 1 所示。从图 1 可知,三条回归曲线的相关性系数 R 都大于 0.9,说明疲劳次数与应变水平之间具有显著性的相关性。

在室内疲劳试验时,考虑试验条件比桥面铺装的更实际受力条件严格,如室内试验时荷载间歇时间要远低于铺装层实际的荷载情况,荷载间歇时间

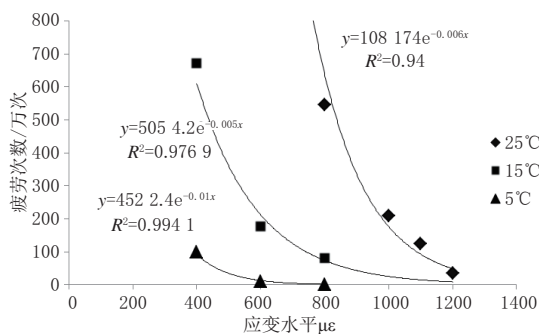


图 1 不同温度下的疲劳次数与应变水平的对数关系

短将加速裂缝的扩展。为了使室内试验结果较准确地反应桥面铺装实际情况,需要采用修正系数对室内试验结果进行修正,以代表实际铺装层疲劳状况。考虑到间歇时间、裂缝扩展时间等因素的影响,采用的修正系数为 5^[11]。修正后的高弹改性沥青在每种温度下的应变疲劳方程见表 5。

表 5 疲劳试验回归结果

温度 /℃	疲劳方程	相关系数
25	$N=540\ 870e^{-0.006\varepsilon}$	0.994 1
15	$N=25\ 321e^{-0.005\varepsilon}$	0.976 9
5	$N=22\ 612e^{-0.01\varepsilon}$	0.940 0

其中, N 为荷载疲劳次数, ε 为应变水平。

3 钢桥面铺装疲劳开裂预估模型

3.1 钢桥面拉应变有限元分析

建立基于马鞍山长江公路大桥结构条件的有限元计算模型,对 GA+SMA 铺装结构的力学响应状态进行力学分析。通过采用 solid95 单元模拟桥面铺装结构层和钢箱梁顶板,采用 shell93 单元模拟加劲肋和横隔板等除顶板之外的正交异性钢桥面板组件。同时,考虑到计算机计算能力和精度的平衡,不同部位的单元划分有所侧重,对加载区域的单元划分进行了适度的加密。

在对铺装结构进行荷载响应力学分析时,采用公路 I 级荷载车辆荷载的双后轴(2×140 kN)作为基本荷载,冲击系数选为 1.3。有限元分析时正交异性钢桥面板的几何参数见表 6,铺装下层浇注式沥青混合料 GA10、上层高弹改性 SMA10 力学参数见表 7。通过实桥结构条件的有限元模型,分析了不同温度状态下的钢桥面铺装层表面最大横向弯拉应变,分析结果见表 8。

3.2 温度区间内钢桥面铺装预估荷载作用次数

将计算出的不同温度下的铺装层最大弯拉应变代入疲劳方程中,计算不同温度下的铺装层预估荷

表 6 正交异性钢桥面板几何参数 单位:mm

顶板厚度	加劲肋上开口宽度	加劲肋下开口宽度	加劲肋间距	加劲肋厚度	加劲肋高度	横隔板间距	横隔板高度
14	300	200	600	8	280	3 200	1 000

表 7 沥青混合料力学参数取值

混合料类型	抗压回弹模量 /MPa			泊松比 μ		
	5℃	15℃	25℃	5℃	15℃	25℃
浇注式沥青混合料 GA10	2 373.3	1 641.3	1 067.2	0.25	0.30	0.35
高弹改性 SMA10	1 208.6	890.1	655.1			

表 8 不同温度下的铺装层出现的弯拉应变

温度 /℃	5	15	25
最大弯拉应变 $\mu\epsilon$	150	480	809

载最大作用次数,计算时安全系数选为 1.3,计算结果见表 9。

表 9 铺装层预估荷载作用次数

温度 /℃	5	15	25
预估荷载最大作用次数 /(10^6 次)	50.10	22.97	42.17
预估荷载最大作用次数 1.3/(10^6 次)	38.54	17.67	32.44

表 10 马鞍山长江公路大桥桥区逐月平均气温

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均气温	2.9	4.7	9.2	15.5	20.9	24.8	28.3	27.7	23.1	17.6	11.3	5.2
最大值	6	8.6	11.4	18.4	23.5	26.9	30.8	30.6	25.5	19.3	14.2	7.9
最小值	-1	0	6.1	13	18.8	23	26.2	24.6	21.3	15.1	7.8	0.9

表 11 不同温度区间的标准轴载作用次数

温度 /℃	5	15	25
标准轴载作用次数 $N_{si}/10^6$ 次	5.80	9.67	7.73

3.4 钢桥面疲劳开裂预估模型

用于疲劳损伤计算公式为

$$PLD_i = \frac{N_{s_i}}{N_{y_i}/1.3} \quad (1)$$

式中: PLD_i 为疲劳损伤度; N_{s_i} 为标准轴载实际作用次数; N_{y_i} 预估荷载最大作用次数。每个温度区间下的疲劳损伤度计算结果见表 12。

表 12 不同温度下的疲劳损伤度

温度 /℃	5	15	25
疲劳损伤度 PLD_i	0.150	0.547	0.238
铺装层疲劳损伤度 PLD	0.935		

结合路面的疲劳损伤度和设计使用年限内的标准轴载累计作用次数可确定建立钢桥面铺装疲劳寿

3.3 温度区间内钢桥面铺装标准轴载作用次数

马鞍山长江公路大桥位于长江下游,该地区年平均温度为 15.9℃,一年中最热月为 7 月,平均温度为 28.3℃,最冷月为 1 月,平均温度为 2.9℃。每月气温的统计结果见表 10。

根据统计结果,按照 5℃、15℃、25℃ 温度区间进行划分,其中 5℃ 代表的月份为 12 月、1 月、2 月,15℃ 代表的月份为 3 月、4 月、5 月、10 月、11 月,25℃ 代表的月份为 6 月、7 月、8 月、9 月。

同时,根据温度时间分区(5℃、15℃、25℃),各温度区间长度在一年中所占的比例分比为 3/12、5/12、4/12,假设每年内的交通量在时间长度上平均分布,则可根据温度区间所占的时间比例计算出在路面设计使用年限内各温度区间的标准轴载作用次数。

马鞍山长江公路大桥钢桥面铺装以公路 - I 级荷载为设计标准轴载,根据初步设计对交通量预测的结果,现按照设计年限内一个车道标准轴载的累计当量轴次为 23.2×10^6 次计算。根据以上温度区间所占的时间比例,可得到设计年限内一个车道在各温度区间内累计当量轴次数,见表 11。

命 SM_{pl} ,其预估模型为

$$SM_{pl} = \frac{1}{0.935} \cdot \sum_{i=1}^n N_{s_i} \quad (2)$$

式中: SM_{pl} 为钢桥面铺装疲劳开裂时的寿命,以预估疲劳荷载作用次数表示; N_{s_i} 为第 i 个温度区间的设计年限内的标准轴载作用次数。

根据马鞍山长江公路大桥钢桥面铺装预估模型和设计年限内的标准轴载作用次数,可以计算出当浇注式沥青混凝土 GA10+ 高弹改性 SMA10 铺装结构出现开裂时标准轴载作用次数将达到 2.48×10^6 次。按照设计年限为 15 a 的累计标准轴载次数计算,马鞍山长江大桥钢桥面铺装出现疲劳开裂时的寿命为 16.0 a。

高弹改性沥青是针对钢桥面铺装使用特点开发出来的一种沥青结合料,具有非常好的低温延度,其 5℃ 延度一般要求大于 50 cm,远远优于普通的改性沥青。采用该种沥青拌制的沥青混合料 SMA10(称为

高弹改性 SMA10)也具有优异的抗开裂性能,其-10℃低温弯拉应变是普通沥青混合料 2~3 倍,其四点弯曲疲劳次数是普通沥青混合料的 8~10 倍。正是由于高弹改性沥青优异的抗疲劳开裂能力,使其更好地适应了钢桥面铺装反复出现大变形的特点,有效遏制钢桥面铺装疲劳开裂病害的出现。

4 结论

(1) 高弹改性 SMA10 疲劳寿命受温度影响显著。在相同应变条件下,温度每升高 10℃,其疲劳寿命提升 4~5 倍;温度越高,其疲劳寿命提升的幅度越大。因此,在高温期,钢桥面铺装几乎不会出现开裂。

(2)高弹改性 SMA10 在不同温度区间,疲劳开裂作用次数与所承受的应变条件之间存在指数函数关系,相关性系数均大于 0.9,表明所建立的疲劳方程能很好地揭示高弹改性 SMA10 的疲劳行为。

(3)从疲劳行为方程可以看出,应变条件对高弹改性 SMA10 的影响显著。而钢桥面铺装出现的大部分应变都是由于车辆荷载所引起的,且重载车辆往往容易引起更大的变形,这也揭示了重载车辆是造成钢桥面铺装开裂的一个重要因素。

(4)通过疲劳行为方程以及实桥最大弯拉应变的有限元力学计算结果,推导出钢桥面铺装疲劳寿命预估模型。通过疲劳寿命预估模型,计算出浇注式沥青混合料 GA10+ 高弹改性 SMA10 铺装结构出现开裂的疲劳寿命为 16 a。这表明:在钢桥面铺装的设计

年限内(15 a),浇注式沥青混合料+高弹改性 SMA10 铺装结构不会出现开裂,这位大跨径钢桥桥面铺装方案的选择提供了理论依据。

参考文献:

- [1]郝培文,胡磊,陈志一,等.大跨径钢箱梁桥面铺装研究与发展[J].筑路机械与施工机械化,2008(6):12-16.
- [2]曹海波,钱振东,李智.环氧沥青混凝土在大跨径悬索桥钢箱梁桥面铺装中的应用[J].现代交通技术,2009,6(1):11-14.
- [3]薛昕,王民,张华,等.浇筑式沥青混凝土在桥面铺装中的应用与发展现状[J].公路交通技术,2011(5):98-100.
- [4]Hee Mun Park, Ji Young Choi, Hyun Jong Lee, etc. Performance evaluation of a high durability asphalt binder and a high durability asphalt mixture for bridge deck pavements [J]. Construction and Building Materials, 2009(23): 219-225.
- [5]崔冰,吴冲,丁文俊,等.车辆轮迹线位置对钢桥面板疲劳应力幅的影响[J].建筑科学与工程学报,2010,27(3):19-23.
- [6]程庆,王大明,吴春颖.钢桥面沥青铺装层病害及成因分析[J].公路工程,2010,35(3):112-115.
- [7]彭华,尹健,池漪,等.沥青路面裂缝修补材料性能评价指标及方法[J].铁道科学与工程学报,2014(4):90-95.
- [8]徐伟,张肖宁.钢桥面铺装材料粘弹性及疲劳损伤特征的试验研究[J].中南公路工程,2006,4(31):111-115.
- [9]黄文通,虞将苗等.钢桥面铺装材料疲劳性能研究[J].公路工程,2007,32(4):37-39.
- [10]张顺先.基于使用性能的钢桥面铺装环氧沥青混合料设计研究与疲劳寿命预测[D].广东:华南理工大学,2013.
- [11]杨毅.不同加载频率下沥青混合料疲劳损伤特性研究[D].湖南:长沙理工大学,2009.

—————
(上接第 156 页)

参考文献:

- [1]丛嵩森,杨晓东,田彬.深基坑防渗体的设计施工与应用[M].北京:知识产权出版社,2012.
- [2]王清友,孙万功,熊欢.塑性混凝土防渗墙施工[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [3]宗敦峰,刘发建,肖恩尚,等.超深与复杂地质条件混凝土防渗墙施

- 工关键技术[M].北京:中国水利水电出版社,2018.
- [4]中国土木工程学会土力学及岩土工程分会.深基坑支护技术指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [5]龚晓南.深基坑工程设计与施工手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [6]刘洋.岩石地层超深地下连续墙成槽施工技术[J].建筑施工,2017,39(11): 1585-1590.