

大跨径连续钢箱梁钢桥面铺装设计

潘友强^{1,2}, 郭忠印¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 江苏省交通科学研究院股份有限公司, 江苏 南京 211112)

摘要: 采用三阶段力学分析方法对崇启大桥大跨径连续钢箱梁钢桥面铺装受力特点进行分析, 结合崇启大桥的使用环境和国内钢桥面主要铺装类型的调研, 推荐双层环氧沥青铺装作为崇启大桥的钢桥面铺装方案. 针对崇启大桥大跨径连续钢箱梁桥面铺装的受力特点, 进行了崇启大桥钢桥面铺装关键材料及性能、防水黏结层性能以及钢桥面铺装组合结构疲劳性能研究, 同时从崇启大桥桥面铺装疲劳耐久性角度对富沥青环氧沥青混凝土进行了研究. 结果表明: 铺装下层采用富沥青环氧沥青混凝土能够更好地满足崇启大桥钢桥面铺装的性能要求.

关键词: 连续钢箱梁; 钢桥面铺装; 三阶段力学分析; 富沥青环氧沥青混凝土; 组合结构性能

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

Design of Steel Deck Pavement of Long-span Continuous Steel Box Girder Bridges

PAN Youqiang^{1,2}, GUO Zhongyin¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Jiangsu Transportation Research Institute, Nanjing 211112, China)

Abstract: An analysis was made of the mechanical properties of the steel deck pavement on Chongqi Bridge with a three stage mechanical analysis method. Based on the mechanical analysis results and the research conclusion of some main steel deck pavement cases, a dual layer epoxy concrete steel deck pavement was designed. A research was also made into the the pavement key material and the waterproof layer and the composite structure performance. The pavement performance of the epoxy asphalt with rich-asphalt was investigated to improve the crack resistance of the steel deck pavement. The results show that the rich-asphalt epoxy asphalt mixture can satisfy the requirements of Chongqi Bridge deck pavement better than the common epoxy asphalt mixture.

Key words: continuous steel box girder; steel deck pavement; three stage mechanical analysis; rich-asphalt epoxy asphalt concrete; composite structure performance

经过十余年的研究和大量的工程实践, 我国钢桥面铺装的技术力量和科研水平逐步加强, 形成了适合于我国国情的钢桥面铺装技术. 目前国内钢桥面铺装的主要类型以美国环氧沥青混凝土、浇注式沥青混凝土和组合式钢桥面铺装方案为主.

环氧沥青铺装具有非常优良的性能, 如铺装强度高、整体性好、高温性能好、抗疲劳性能好等优点, 但也存在着施工难度大、铺装养护时间长、后期养护难度大等缺点. 从国内已建环氧沥青钢桥面铺装的使用情况来看, 成功和失败的工程案例都有^[1-5]. 浇注式沥青钢桥面铺装具有优良的变形随从性和防水性能, 在一些大跨径的悬索桥中具有很大的应用前景. 但在国内高温重载的使用条件下, 应重点加强对浇注式钢桥面铺装高温性能的研究^[6-9]. 组合式钢桥面铺装技术是在国内早期采用的双层沥青玛蹄脂碎石(SMA)钢桥面铺装研究的基础上, 采用环氧树脂和树脂沥青混凝土解决 SMA 层与钢板的黏结问题, 从目前已经开通的钢桥面铺装项目来看使用效果良好, 但其长期使用性能还需要进一步观测验证^[10-13].

长期的工程实践经验表明, 任何桥面铺装方案都有一定的适用性. 应对每一座桥的具体特点进行专门的设计和研发, 充分考虑当地的气候条件、荷载条件、施工条件等因素, 保证桥面铺装的最终性能.

崇启大桥是目前我国联长最长、跨径最大的连续钢箱梁桥, 桥面铺装受力复杂. 大桥主桥采用六跨连续钢箱梁, 双向六车道, 主跨跨径 185 m, 钢箱梁

收稿日期: 2012-05-07

基金项目: 江苏省交通科技项目(09Y39)

第一作者: 潘友强(1980—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥面铺装结构及材料. E-mail: pyq@jsti.com

通讯作者: 郭忠印(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路交通安全、路基路面工程及道路材料.

E-mail: zhongyin@mail.tongji.edu.cn

桥长 944 m(见图 1),桥宽 33 m. 多跨连续钢箱梁结构在国内研究相对较少,受力模式与悬索或斜拉结构有较大不同,设计时需要满足跨中的挠曲变形、墩顶负弯矩区大面积的拉应变、车辆荷载的叠加效应等受力特性对桥面铺装提出的技术要求. 针对崇启大桥的结构特点,本文首先采用三阶段力学分析方法分析崇启大桥钢桥面的力学特点,结合崇启大桥的交通条件和使用环境,推荐钢桥面铺装方案,然后针对铺装关键材料展开试验研究.

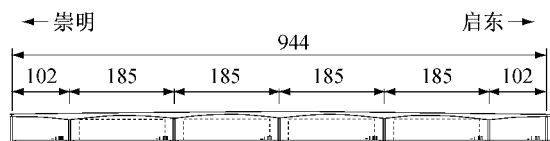


图1 崇启大桥连续钢箱梁桥(单位:m)

Fig.1 Long-span continuous steel box girder bridge of Chongqi Bridge

表1 崇启大桥钢桥面铺装累计轴载次数和轴载谱

Tab.1 The cumulative load axles and the axle spectrum of Chongqi Bridge

轮载区间/t	典型轮载/t	对应轴重/t	占全部轴载次数比例/%	代表轴重/t	10年累计轴载次数/万次
0~0.5	0.5	2	17.42	5	2 500
0.5~1.0	1.0	4	18.48		
1.0~1.5	1.5	6	15.09		
1.5~2.0	2.0	8	14.39		
2.0~2.5	2.5	10	19.27	13	1 200
2.5~3.0	3.0	12	6.63		
3.0~3.5	3.5	14	5.48		
3.5~4.0	4.0	16	2.13		
4.0~4.5	4.5	18	0.68	20	120
4.5~5.0	5.0	20	0.22		
>5.0	5.5	22	0.19	26	8

2 崇启大桥钢桥面铺装的力学分析

2.1 崇启大桥钢桥面铺装三阶段力学分析方法

钢桥面铺装早期破坏的主要原因包括:① 铺装层在光滑的钢板上受水平剪应力和弯曲剪应力作用,界面黏结强度不足导致铺装层产生了水平位移,形成开裂渗水,引起铺装层崩溃;② 铺装层受纵横隔板、U型加劲肋和荷载的共同作用,因其抗疲劳能力不足导致开裂,进而引起铺装层的破坏.

为了全面准确地把握崇启大桥钢桥面铺装的受力特点,本文采用三阶段力学分析方法对崇启大桥钢桥面铺装进行多尺度全方位的综合分析.

第一阶段:整体分析. 钢箱梁在不利荷载组合情况下发生整体挠曲变形对铺装层可能产生的界面剪应力和弯拉应变.

第二阶段:局部分析. 取一段钢箱梁作为脱离

1 崇启大桥交通荷载分析

钢桥面铺装的使用性能受交通荷载状况影响很大,对实际交通荷载掌握不准确往往是造成钢桥面铺装发生早期病害的首要原因. 崇启大桥作为江苏省内的主要过江通道,其主要的交通荷载类型与当前省内其他跨江大桥基本一致,因此调查研究省内其他主要跨江桥梁的交通量及荷载类型,有利于更准确地分析崇启大桥的钢桥面铺装使用受力特点.

本文首先对江苏省四座采用环氧沥青铺装的跨江大桥的交通量和轴载谱进行了调研,包括江阴大桥、南京二桥、南京三桥和润扬大桥,借鉴调研结果确定崇启大桥钢桥面铺装设计的累计交通荷载和计算轴载谱^[14-18]. 以桥面铺装重车道设计使用寿命 10 年计算,考虑轮迹横向分布系数 50%,最终确定崇启大桥的累计轴载次数和轴载谱如表 1 所示.

体,包括数节纵横隔板和 U 型加劲肋,假定其边界约束条件和铺装层的厚度及模量值,以有限元法建立其分析计算模型,计算不同车轮荷载布置情况下,铺装层底面(界面)和层间产生的剪应力和弯拉应变值.

第三阶段:细部分析. 刹车水平力和桥梁纵横坡以及模量和温度差异对铺装层产生的界面剪应力.

2.2 第一阶段力学分析

采用 MIDAS 桥梁分析软件构建崇启大桥的整桥模型. 考虑桥梁整体的跨数、跨度和连续梁结构形式,忽略桥面铺装恒载的作用,重点考虑分析活载作用下跨中和支座处的受力特征;考虑最不利荷载布置等不利影响,计算最不利位置的应力应变情况. 整桥计算结果(见图 2)表明,崇启大桥结构的主要受力特点为:① 钢箱梁墩顶负弯矩较大,且顶面受拉区延伸范围长,墩顶位置持续受拉;② 跨中处的钢箱梁变形曲率较大,对钢桥面铺装的受力状况不利.

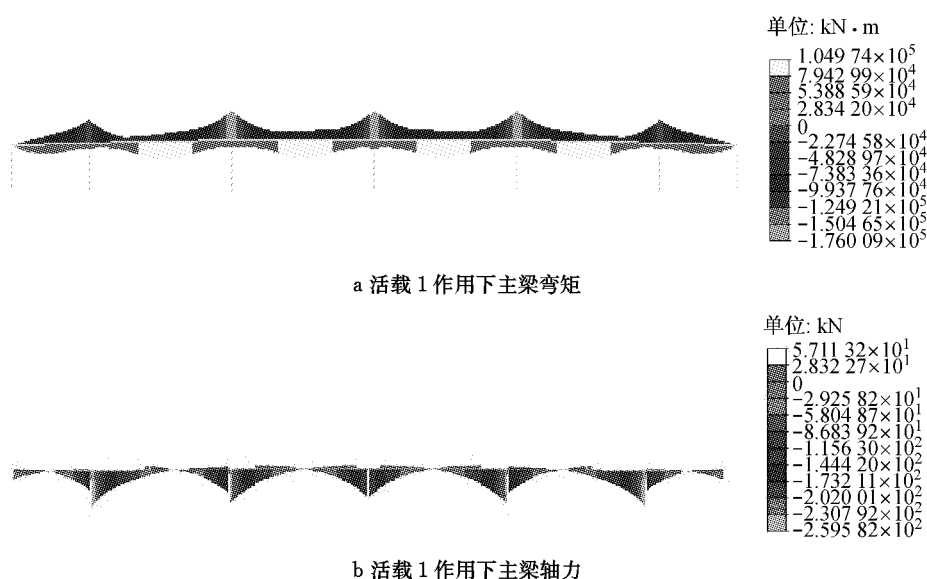


图 2 某工况条件下主梁所受弯矩和轴力

Fig.2 The bending moment and axial force diagram of the main girder

由于整桥模型里不能包括桥面铺装,为了分析桥面铺装层受桥体整体变形的影响,在 Abaqus 有限元软件中建立局部钢箱梁模型,将整桥模型计算所得的力学指标作为约束条件施加到局部模型上。根据整桥计算结果,分别建立墩顶处和跨中钢箱梁局部模型进行有限元分析,其中墩顶处钢箱梁局部模型如图 3 所示。计算所用的材料参数如表 2 所示。

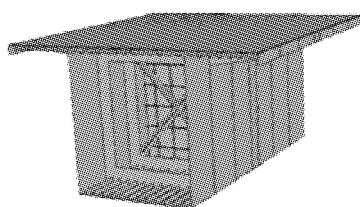


图 3 墩顶处钢箱梁有限元模型

Fig.3 The finite element model of the steel box girder at pier

表 2 有限元计算材料参数

Tab.2 The parameters of the finite element calculation

材料参数	取值
钢板弹性模量/ MPa	2.1×10^5
钢板泊松比	0.3
铺装层厚度/ mm	55
铺装层弹性模量/ MPa	1 000
铺装层泊松比	0.21

第一阶段力学分析结果:墩顶处钢桥面铺装层在整桥最不利活载作用下产生的纵向拉应变为 $170 \sim 300 \mu\epsilon$,而横向拉应变非常小,铺装层上下表面应力应变没有变化,全截面受拉,并且在实腹式横隔板与腹板交界处产生应力应变突变;跨中处钢桥

面铺装层在整桥最不利活载作用下受压,所受的压应力和压应变都很小。

2.3 第二阶段力学分析

根据《公路桥涵设计通用规范》^[19],公路一级荷载主车后轴轴重为 13 t,将后轴一侧的双轮简化为两个矩形均布荷载,两个矩形的横向尺寸取为 20 cm,根据轴重 13 t 和胎压 0.707 MPa,可以计算出纵向长度为 23 cm,两个矩形内侧边缘的间距为 10 cm。因为两轮的距离较近,可以进一步简化荷载形状,将双矩形均布荷载简化为单矩形均布荷载,荷载集度相同,仍是 0.707 MPa,如图 4 所示。

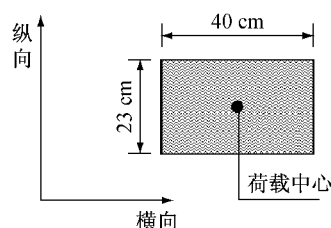


图 4 单个矩形的均布荷载分布图

Fig.4 The single rectangle distributed load

第一阶段力学分析表明,墩顶处和跨中为桥面铺装层受力不利位置,因此本阶段力学分析中分别建立墩顶处和跨中处钢箱梁及桥面层模型,分析不利位置处钢桥面铺装层的受力状况,其中跨中处钢箱梁有限元模型如图 5 所示。采用的材料参数与第一阶段相同。实际上本阶段力学分析建立的钢箱梁局部模型与第一阶段模型相同,只是约束条件不同,分析结果表明局部钢箱梁纵向两端采用不同的约束条件对计算结果影响并不大。

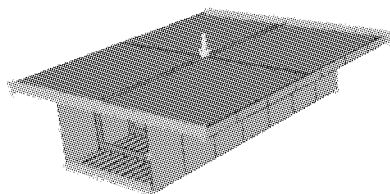


图5 跨中处局部钢箱梁有限元模型

Fig.5 The finite element model of the steel box girder at mid-span

计算横向和纵向多种不利位置荷载作用下钢桥面铺装层的力学响应,结果表明:无论墩顶处还是跨中处在最不利荷载作用下,产生的最大纵向拉应变都小于 $30\ \mu\epsilon$,产生的最大横向拉应变为 $110\ \mu\epsilon$ 左右;产生较大横向拉应变的位置不仅位于荷载作用处,也位于腹板附近.产生的纵向剪应力为 $0.083\ \text{MPa}$,横向剪应力为 $0.089\ \text{MPa}$.

2.4 第三阶段力学分析

当车辆刹车时,桥面铺装将承受较大的水平荷载.如果刹车比较急,水平力可能会作用于集中的区域,特别是在交通量比较大的区域,这种现象时常出现,久而久之将会使桥面铺装产生剪切破坏.本文选择水平荷载系数为 0.5 ,标准垂直荷载的作用集度为 $0.707\ \text{MPa}$,则水平荷载的集度为 $0.354\ \text{MPa}$,计算所得的最大应力应变结果如表3所示.

表3 考虑水平荷载的最大应力应变的计算结果

Tab.3 The computation results of the maximum stress/strain with a consideration of the horizontal force

位置	纵向		横向	
	剪应力/MPa	拉应变/ $\mu\epsilon$	剪应力/MPa	拉应变/ $\mu\epsilon$
墩顶处	0.292	93.7	0.089	105.7
跨中处	0.292	90.5	0.092	111.3

注:剪应力为铺装层底面最大剪应力,拉应变为铺装层顶面最大拉应变.

由计算结果可见,考虑纵向水平荷载后,钢桥面铺装层所受的纵向剪应力和拉应变增加了约3.5倍,而横向剪应力和拉应变几乎没有发生变化.

2.5 计算结果综合分析

综合三阶段的计算结果可以看出,第一阶段整体模型,在墩顶处横隔板与腹板交界处易产生应力突变,纵向上最大应变 $300\ \mu\epsilon$,但横向上产生的应变值较小;非应力突变处纵向最大应变普遍为 $170\sim 250\ \mu\epsilon$.第二阶段作用车辆局部荷载时,在最不利荷位,纵向产生的应变不到 $30\ \mu\epsilon$,横向上应变为 $110\ \mu\epsilon$.第三阶段当加上纵向水平荷载,纵向拉应变增加到 $90\ \mu\epsilon$,而横向拉应变基本没有变化.

在基本无拥堵的交通条件下,将第一和第二阶段叠加,墩顶处最大纵向拉应变为 $200\sim 280\ \mu\epsilon$,横向为 $105\ \mu\epsilon$;跨中最大纵向拉应变为 $30\ \mu\epsilon$,横向为 $110\ \mu\epsilon$ 左右.

如果考虑交通拥堵,需将第二和第三阶段叠加,墩顶处最大纵向拉应变为 $260\sim 340\ \mu\epsilon$,横向为 $120\ \mu\epsilon$;跨中最大纵向拉应变为 $90\ \mu\epsilon$,横向为 $110\ \mu\epsilon$ 左右.

第一阶段和第二阶段中钢桥面铺装层所受的剪应力比较小,第三阶段即考虑钢桥面铺装层受到的最大剪应力在 $0.3\ \text{MPa}$ 左右.

力学分析结果表明,崇启大桥的钢箱梁刚度比较大,特别是钢桥面板厚度比较厚,因而崇启大桥桥面铺装层在局部车辆荷载长期作用下的疲劳应变相对较小.但是由于连续钢箱梁在墩顶处会产生很大的负弯矩,在整桥变形协调影响下墩顶处产生的纵向拉应变比较大,而且长期处于这种状态,所以墩顶处对称4~6个横隔板之间的桥面铺装设计需要重点关注.

3 崇启大桥钢桥面铺装方案设计

崇启大桥钢桥面铺装方案的设计需要依据崇启大桥的特点,充分考虑当地的气候条件、荷载条件、施工条件等因素,协调平衡.崇启大桥力学计算结果显示,在局部荷载作用下铺装层受到的横向拉应变与江苏省内目前采用的环氧沥青铺装桥梁相比较小,铺装层出现纵向开裂的几率大为降低,综合考虑国内各类型方案的性能,特别是考虑到环氧沥青铺装方案在江苏省内有成功的案例,铺装的技术成熟度高,因此推荐崇启大桥钢桥面铺装采用双层环氧沥青铺装,铺装方案见图6所示,铺装总厚度为 $5.5\ \text{cm}$.但在墩顶位置存在持续受拉区,建议对墩顶位置防裂措施进行研究.

3.0 cm 环氧沥青混合料
环氧沥青黏结层
2.5 cm 环氧沥青混合料
环氧沥青
钢板喷砂除锈

图6 崇启大桥钢桥面铺装推荐方案

Fig.6 The recommended steel deck pavement of Chongqi Bridge

4 崇启大桥钢桥面铺装关键材料性能研究

4.1 环氧沥青混凝土设计及性能研究

崇启大桥环氧沥青混凝土采用镇江茅迪公司生

产的玄武岩桥面料,环氧沥青采用美国化学系统公司的Bv型环氧沥青。

本文在南京二桥、润扬大桥、杭州湾跨海大桥桥面铺装研究的基础上,经多次试配确定崇启大桥环氧沥青混凝土级配如表4所示,通过马歇尔试验确

定最佳沥青用量为6.5%。

参照我国沥青及沥青混合料试验规程(JTG052—2000),对环氧沥青混合料进行水稳定性试验、高低温性能试验、力学参数试验和疲劳性能研究,试验结果如表5所示。

表4 矿料的合成级配

Tab.4 The gradation of the epoxy asphalt mixture

级配	通过以下筛孔尺寸百分比						/%
	13.200 mm	9.500 mm	4.750 mm	2.360 mm	0.600 mm	0.075 mm	
合成级配	100	97.4	75.1	60.0	35.2	10.2	
级配范围	100	95.0~100.0	65.0~85.0	50.0~70.0	28.0~40.0	7.0~14.0	

表5 环氧沥青混合料性能试验结果

Tab.5 The test results of epoxy asphalt mixture

性能试验	试验结果
浸水马歇尔试验残留稳定度/%	98
冻融劈裂试验劈裂强度比/%	96
60℃车辙试验动稳定度/(次·mm ⁻¹)	>29 999
-10℃最大弯拉应变/ $\mu\epsilon$	6 368
抗压强度/MPa	20.98
疲劳试验(15℃,400 $\mu\epsilon$)/次	100万次未破坏

从试验结果可以看出,设计的环氧沥青混凝土具有优良的综合路用性能。

4.2 富沥青环氧沥青混凝土性能研究

崇启大桥属于多跨连续钢箱梁结构,力学分析结果表明墩顶处负弯矩较大,虽然拉应变最大值与其他桥梁相比并不算高,但墩顶处铺装层纵向拉应变的受力范围较大,并且处于长期受拉状态,对控制裂缝发展不利。为了解决墩顶处铺装层长期受拉的问题,专门开展了墩顶处富沥青环氧沥青混凝土防裂研究。

富沥青环氧沥青混凝土级配与常规环氧沥青混凝土相同,沥青用量比一般采用马歇尔方法设计的环氧沥青混凝土高,本文推荐的富沥青混凝土油石比为6.8%,比常规环氧沥青混凝土最佳沥青用量高0.3%。富沥青环氧沥青混凝土和常规环氧沥青混凝土的性能试验结果如表6所示。

表6 富沥青和常规环氧沥青混合料性能比较

Tab.6 Comparison of epoxy asphalt mixture with rich epoxy asphalt and common asphalt

试验项目	富沥青环氧沥青混凝土	常规环氧沥青混凝土
空隙率/%	1.6	1.8
马歇尔试验		
马歇尔稳定度/kN	58.3	57.2
流值/(0.1 mm)	49.3	41.1
低温弯曲最大弯拉应变/ $\mu\epsilon$	12 523	6 297
疲劳试验		
初始刚度/MPa	13 536	14 739
50%初始刚度		
疲劳次数/次	8 888	8 660
破坏时疲劳次数/次	511 875	73 750

从对比结果可以看出,富沥青环氧沥青混凝土的主要性能特别是变形性能和疲劳性能明显优于常规环氧沥青混凝土,富沥青环氧沥青混凝土具有更加优良的耐疲劳开裂性能,可以更好地满足崇启大桥墩顶处钢桥面铺装的防裂要求。

4.3 防水黏结层比选研究

防水黏结层是桥面铺装的重要组成部分,铺设在钢桥面板与铺装层之间。防水黏结层的主要作用是黏结,解决铺装层与钢板之间的黏结问题,其次是防水防腐,解决钢板的腐蚀问题。

目前国内采用的环氧沥青钢桥面铺装,一般采用环氧沥青防水黏结层,防水黏结层用量为0.68 L·m⁻²,施工过程中处于未固化状态,易造成破坏,因此需要在施工过程中采用侧喂料机等防黏措施,加大了环氧沥青混凝土施工难度。为此崇启大桥钢桥面铺装设计中研究采用环氧黏结碎石层作为环氧沥青铺装防水黏结层的可行性。

环氧黏结碎石层是指在钢板喷砂除锈完成后即涂布一层0.9~1.1 kg·m⁻²的改性环氧树脂,然后立即撒布一层3~5 mm的单粒径碎石于环氧表面,使之与环氧树脂一起固化,最终形成碎石与环氧树脂及环氧树脂与钢板黏结牢固粗糙的抗滑且防水表面,从而实现钢桥铺装层界面的防水和防剪切滑移。环氧黏结碎石层具有与钢板黏结强度高、施工简便、固化时间短等特点,环氧黏结碎石层固化后可以作为环氧沥青施工的平台,解决环氧沥青防水黏结层施工过程中的黏结破坏问题,大大降低环氧沥青钢桥面铺装的施工难度和施工风险。

为了保证本文提出的防水黏结层具有良好的黏结性能和防水防腐性能,将其与环氧沥青防水黏结层性能进行了以下试验比较:① 强度,包括防水黏结层与钢板黏结强度和自身的断裂强度试验;② 变形能力,包括防水黏结层的拉伸试验;③ 耐腐蚀性(盐雾试验);④ 组合件拉拔试验。

试验结果如表 7 所示。

表 7 环氧黏结碎石层与环氧沥青防水粘结层试验结果比较
Tab.7 The test results of epoxy resin and epoxy asphalt
adhesion layer

试验项目		环氧沥青 黏结层	环氧黏结 碎石层
与钢板之间的黏结强度/MPa	25 ℃	9.94	>20.00
	70 ℃	2.00	10.57
25 ℃断裂延伸率/%		290.3	16.9
25 ℃断裂强度/MPa		11.3	7.8
组合件拉拔强度/MPa	25 ℃	5.06	1.87
	70 ℃	1.02	0.56
耐盐雾试验		满足要求	满足要求

由表可见,采用环氧沥青黏结层的铺装组合件在 25 ℃时的拉拔强度大于 5 MPa,70 ℃的拉拔强度大于 1 MPa,破坏位置发生在环氧沥青混合料内部(见图 7b),说明钢板与铺装层之间的黏结强度超过环氧沥青混合料本身;采用环氧黏结碎石层的组合件在 25 ℃时的拉拔强度为 1.87 MPa,70 ℃的拉拔强度为 0.56 MPa,破坏位置发生在环氧沥青混合料与环氧黏结碎石层之间(见图 7a),说明钢板与环氧黏结碎石层之间黏结较为牢固,但环氧黏结碎石层与铺装层之间存在脱开的风险。组合件拉拔试验结果表明:采用环氧黏结碎石层作为环氧沥青铺装的防水黏结层时,应加强对环氧沥青混合料与环氧黏结碎石层之间黏结的处理。

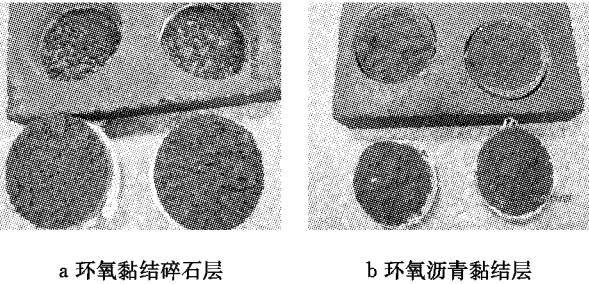


图 7 拉拔试验结果

Fig.7 Pull-off test results of the composite specimen

耐腐蚀试验(耐盐雾试验)时间为 336 h,试验后各试件表面均没有出现锈蚀现象,钢板刻槽部分的锈蚀没有进一步扩展,表明环氧富锌漆+环氧防水黏结料、环氧黏结碎石层均可以保护钢板,有效防锈。环氧黏结碎石层与环氧富锌漆的防锈机理有所不同,环氧黏结碎石层通过完全阻断水和空气与钢板接触保证钢板不被锈蚀,而环氧富锌漆则通过代偿作用保证钢板不被锈蚀。

综合以上试验结果可以看出,环氧黏结碎石层

与钢板黏结牢靠,但是与上层铺装之间黏结强度较低,综合考虑防水黏结层性能与可施工性,推荐崇启大桥钢桥面铺装采用环氧沥青防水黏结层。

5 崇启大桥钢桥面铺装组合结构研究

5.1 组合结构疲劳试验结果

为了较为准确地评价钢桥面铺装的使用性能,需要在接近实际使用条件的情况下对钢桥面铺装状况和性能进行快速的试验研究,在尽可能短的时间内取得试验结果。本文采用三点式带钢板复合件弯曲疲劳试验评价崇启大桥钢桥面铺装组合结构的疲劳耐久性。图 8 为铺装组合结构试验照片。

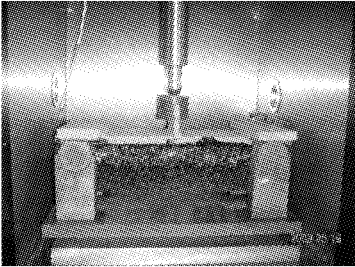


图 8 铺装组合结构疲劳试验

Fig.8 The fatigue test picture of composite specimen

带钢板疲劳试件严格按照现场施工工序进行成型,钢板采用 16 mm 厚钢板,试件铺装下层厚度为 2.5 cm,铺装上层厚度为 3.0 cm,试验采用正弦加载,加载频率 10 Hz。试验采用前文确定的轴载谱作为输入参数,如表 1 所示。根据钢板表面应变等效的原则,通过力学分析和室内试验建立现场轴载与室内荷载之间的等效关系,如轴重 13 t 对应于室内疲劳荷载 6 kN。忽略 10 t 以下轴载对铺装层疲劳寿命的影响,则疲劳试验的加载条件为 6 kN 加载 1 200 万次,9 kN 加载 120 万次,最后采用 12 kN 加载 8 万次,试验结果如表 8 所示。

表 8 双层环氧沥青铺装组合结构疲劳
试验结果(油石比 6.5%)

Tab.8 The fatigue test results of dual-layer epoxy
asphalt(asphalt-aggregate ratio:6.5%)

试件	荷载/ kN	加载次数/ 万次	动挠度/ mm	备注
1	6	1 200	0.222	试验完成,未破坏
	9	120	0.306	
	12	8	0.383	
2	6	1 200	0.227	试验完成,未破坏
	9	120	0.318	
	12	8	0.401	

注:每一根试件依次加载 6,9,12 kN。

崇启大桥钢桥面铺装组合结构经过 6, 9, 12 kN 的组合荷载, 作用总次数达到 1 328 万次的疲劳试验, 基本模拟了当前江苏省内大跨径桥梁的货车轮载情况, 最终试件未发生破坏, 试验结果表明目前设计的双层环氧沥青铺装的使用寿命可以满足崇启大桥钢桥面铺装 10 年的使用要求。

5.2 富沥青环氧沥青铺装组合结构疲劳试验结果

为了解决崇启大桥墩顶处铺装长期受拉的问题, 本文开展了富沥青组合结构疲劳试验研究。考虑到对上面层铺装粗糙度的要求, 仅在铺装下层中采用油石比为 6.8% 的富沥青环氧沥青混凝土。成型了 2.5 cm 富沥青环氧沥青铺装下层(油石比为 6.8%) 和 3.0 cm 环氧沥青铺装上层(油石比为 6.5%) 的组合结构试件, 开展了带钢板组合结构的疲劳试验。试验用钢板材质、尺寸与第 5.1 节中相同, 试验采用正弦加载, 加载频率 10 Hz。考虑到试验的可行性, 采用超载 50% 的疲劳荷载(9 kN)作为控制荷载, 以试件破坏或者作用次数超过 600 万次(相当于江苏省内跨江大桥 10 年内 50% 超载的交通荷载累计作用次数的 5 倍)作为结束标准, 表 9 为富沥青铺装组合结构疲劳试验结果。

表 9 双层富沥青环氧沥青铺装组合结构疲劳试验比较
Tab.9 Comparison of the fatigue performance of dual-layer epoxy asphalts

试件	试件类型	荷载	加载次数/ 万次	动挠度/ mm
铺装上层油石 比为 6.5%, 铺装下层油石 比为 6.8%	9 kN	600	0.302	试验完成, 未破坏
铺装下层油石 比为 6.8%	9 kN	600	0.308	试验完成, 未破坏
铺装上下层油石 比均为 6.5%	9 kN	167	0.335	试件跨中开裂

从试验结果可以看出, 在 9 kN 试验荷载条件下, 与常规环氧沥青钢桥面铺装组合结构相比, 富沥青环氧沥青钢桥面铺装组合结构能够表现出更加优良的疲劳性能, 疲劳寿命提高 2.5 倍以上。因此本文推荐崇启大桥钢桥面铺装下层中采用富沥青环氧沥青混凝土。

6 结论

(1) 多跨连续大跨径钢箱梁桥面铺装层在墩顶位置存在较大范围的持续拉应变区, 该拉应变持续时间久, 对铺装的耐疲劳性能提出了更高的要求。

(2) 环氧沥青钢桥面铺装具有优良的综合路用

性能, 且在江苏省内有成功的案例, 结合崇启大桥钢桥面铺装的受力特点和使用特点, 推荐崇启大桥钢桥面采用双层环氧沥青铺装。

(3) 环氧沥青混凝土性能试验结果表明富沥青环氧沥青混凝土的主要性能特别是变形性能和疲劳性能要比常规环氧沥青混凝土高, 可以更好地满足崇启大桥钢桥面铺装墩顶处防裂的要求。

(4) 综合考虑使用性能和施工和易性, 建议崇启大桥环氧沥青钢桥面铺装采用环氧沥青作防水黏结层。

(5) 室内带钢板组合结构疲劳试验表明在当前江苏省内跨江大桥货车交通轴载谱条件下, 双层环氧铺装的疲劳寿命可以满足崇启大桥 10 年的使用。

(6) 与常规环氧沥青钢桥面铺装组合结构相比, 铺装下层采用富沥青环氧沥青混凝土可显著提高铺装组合结构的疲劳耐久性。

参考文献:

- [1] 黄卫, 钱振东, 程刚, 等. 大跨径钢桥面环氧沥青混凝土铺装研究[J]. 科学通报, 2002, 47(24): 1894.
HUANG Wei, QIAN Zhendong, CHENG Gang, et al. The reasearch of epoxy asphalt concrete on large span steel deck pavement[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(24): 1894.
- [2] 黄卫, 胡光伟, 张晓春. 大跨径钢桥面沥青混合料特性研究[J]. 公路交通科技, 2002(2): 53.
HUANG Wei, HU Guangwei, ZHANG Xiaochun. Study on asphalt concrete paving performance on long-span steel bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002(2): 53.
- [3] 李洪涛, 黄卫. 润扬大桥钢桥面铺装实桥试验研究[J]. 公路交通科技, 2005(4): 76.
LI Hongtao, HUANG Wei. Study on deck surfacing[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005(4): 76.
- [4] 关永胜, 迟占华, 宗海. 大跨径钢桥面铺装早期病害分析及对策[J]. 中外公路, 2005, 25(6): 99.
GUANG Yongsheng, CHI Zhanhua, ZONG Hai. The studies on early age deterioration of long span steel deck pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2005, 25(6): 99.
- [5] 黄卫, 钱振东, 程刚. 环氧沥青混凝土在大跨径钢桥面铺装中的应用[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2002, 32(5): 783.
HUANG Wei, QIAN Zhendong, CHENG Gang. Application of epoxy asphalt to pavement of long span steel bridge deck[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2002, 32(5): 783.
- [6] 陈先华, 黄卫, 李洪涛. 钢桥面浇注式沥青混合料铺装的高温稳定性研究[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(1): 32.
CHEN Xianhua, HUANG Wei, LI Hongtao. Studies on high

- temperature stability of guss-asphalt used for steel deck paving [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2003, 22(1): 32.
- [7] 邓学钧. 中国江阴长江大桥桥面沥青铺装层高温稳定性[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(2): 1.
DENG Xuejun. Asphalt pavement stability at high-temperature for the Jiangyin bridge in China [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(2): 1.
- [8] 陈先华, 黄卫, 王建伟, 等. 浇注式沥青混凝土铺装破坏原因[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(4): 5.
CHEN Xianhua, HUANG Wei, WANG Jiangwei, et al. Damage causes of mastic asphalt pavement on orthotropic steel deck plate [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(4): 5.
- [9] 樊叶华, 王敬民, 陈雄飞, 等. 浇注式沥青混凝土钢桥面铺装养护对策分析[J]. 中外公路, 2005, 25(1): 81.
FAN Yehua, WANG Jingmin, CHEN Xiongfei, et al. The analysis of maintenance strategy of guss-asphalt steel deck pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2005, 25(1): 81.
- [10] 魏琛宇. 高粘度 SMA 沥青混合料在中小钢桥桥面铺装中的应用[J]. 江苏交通科技, 2011(5): 5.
WEI Chenyu. The research on the use of SMA with high viscosity bitumen in deck pavement of small span steel bridge [J]. Jiangsu Communication Science and Technology, 2011(5): 5.
- [11] 徐韵淳, 郝振华, 闫国杰, 等. 钢桥面铺装用特种沥青玛蹄脂混合料配合比设计思路及应用[J]. 城市道桥与防洪, 2010(9): 76.
XU Yunchun, HAO Zhenhua, YAN Guojie, et al. The design and application of special SMA in steel deck pavement [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2010(9): 76.
- [12] 王珏. 钢桥面 SMA 沥青铺装层应用优化研究[J]. 路基工程, 2010(4): 97.
WANG Jue. Study on optimization of SMA asphalt pavement on steel bridge surface [J]. Journal of Basement Engineering, 2010(4): 97.
- [13] 艾珺, 罗建军. SMA10 高弹性沥青混合料在钢桥面铺装的应
用研究[J]. 湖南交通科技, 2010, 36(2): 104.
AI Jun, LUO Jianjun. The research on the use of SMA10 with high viscosity bitumen in steel deck pavement [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2010, 36(2): 104.
- [14] 南京二桥建设指挥部, 东南大学交通学院. 南京二桥环氧沥青钢桥面铺装技术研究[R]. 南京: 东南大学, 2001.
Nanjing Second Yangze River Bridge Construction Headquarters, School of Transportation of Southeast University. The research on epoxy steel deck pavement of Nanjing Second Yangze River Bridge [R]. Nanjing: Southeast University, 2001.
- [15] 章登精. 南京长江第三大桥环氧沥青桥面铺装工程[J]. 公路, 2007(9): 21.
ZHANG Dengjing. The steel deck paving engineering of Nanjing Third Bridge [J]. Highway, 2007(9): 21.
- [16] 黄卫. 润扬长江公路大桥建设钢桥面铺装分册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
HUANG Wei. The collection of Runyang Yangze River Bridge construction, steel deck pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [17] 张磊. 江阴大桥钢桥面铺装病害研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
ZHANG Lei. Research on deterioration of Jiangyin Yangtze Bridge deck pavement [D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [18] 江苏省交通工程建设局, 江苏省交通科学研究院. 崇启大桥多孔大跨径连续钢箱梁桥面铺装体系研究调研报告[R]. 南京: 江苏省交通运输厅, 2011.
Jiangsu Transportation Construction Bureau, Jiangsu Transportation Institute. Research on steel deck pavement of Chongqi Bridge with long-span continuous steel box girder [R]. Nanjing: Department of Transport of Jiangsu Province, 2011.
- [19] 中华人民共和国交通运输部. JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Ministry of Transport of People's Republic of China. JTG D60—2004 General code for design of highway bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.