

大纵坡小半径钢桥面沥青铺装设计研究

潘友强^{1,2}, 郭忠印¹

(1. 同济大学 交通运输学院, 上海 201804; 2. 江苏省交通科学研究院, 江苏 南京 211112)

摘要: 钢桥面铺装是一项世界性难题, 特别是一些特殊桥梁, 对桥面铺装提出了更高的要求. 为此分析了大纵坡、小半径钢桥面铺装的施工特点和使用要求, 提出了有针对性的树脂沥青组合体系(ERS)钢桥面铺装解决方案. ERS钢桥面铺装主要由环氧黏结碎石层(EBCL)防水抗滑黏结层、树脂沥青混凝土(RA05)整体化层和沥青玛蹄脂碎石(SMA)表面功能层组成, 各层功能明确. 室内试验结果表明, ERS钢桥面铺装具有较高的强度、良好的变形能力和施工和易性. 该方案在杭州湾大桥海中平台匝道桥成功应用, 解决了大纵坡、小半径钢桥面铺装的技术难题, 具有较好的推广应用前景.

关键词: 钢桥面铺装; 大纵坡; 小半径; 环氧黏结碎石层(EBCL); 树脂沥青混凝土(RA05); 高黏改性沥青 SMA

中图分类号: U 416

文献标识码: A

Design Research on Steel Deck Asphalt Pavement of Bridge with High Lognitudinal Slope and Small Turning Radius

PAN Youqiang^{1,2}, GUO Zhongyin¹

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Transportation Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing 211112, China)

Abstract: Steel deck pavement is a world-wide problem especially on special steel bridge. Based on the analysis on the construction problem and special requirements of steel deck pavement on the bridges with high lognitudinal slope and small turning radius, the paper presents a new kind of steel deck pavement, called ERS steel deck pavement. It contains three layers, such as Epoxy bonding chips layer (EBCL) and resin asphalt mixture (RA05) and stone mastic asphalt (SMA). EBCL is used as waterproof, bonding and antiskid layer, RA05 is used as an integrated layer and the SMA10 is used as a surface functional layer. Indoor test results show that ERS steel deck pavement has excellent performance and good workablity. The

new pavement structure is used on the steel bridge connecting Hangzhou Bay Bridge with sightseeing flat. It solved the difficult problem successfully.

Key words: steel deck pavement; lognitudinal slope; small turning radius; epoxy bonding chip layer (EBCL); resin asphalt mixture (RA05); stone mastic asphalt (SMA)

钢桥面沥青铺装技术是一项世界性难题, 也是当前我国钢桥建设的重点和难点之一, 特别是一些特大跨径或者特殊结构的桥梁, 对桥面沥青铺装提出了更高要求.

钢桥面沥青铺装是铺设在钢桥面板上, 起保护钢板并保证汽车行驶要求的单层或双层构造物. 钢桥面沥青铺装的高温稳定性, 抗疲劳开裂性, 对钢板变形的随从性, 层间黏接、防排水性能以及施工的和易性等均有极高的要求^[1-2].

国内钢桥面沥青铺装经过 10 余年的研究实践, 基本上形成了以环氧沥青为代表的热固性钢桥面沥青铺装^[3]、以浇注式沥青为代表的高温拌合型钢桥面沥青铺装^[4]和以 SMA(stone mastic asphalt, 沥青玛蹄脂碎石)为代表的常规热拌钢桥面沥青铺装^[5].

杭州湾跨海大桥连接主桥与海中观景平台的钢匝道桥纵坡大, 转弯半径小, 最大纵坡 3.84%, 最大横坡 7%, 最小转弯半径 72 m, 部分位置复合坡达 8%, 无论是铺装施工还是后期的使用都对桥面铺装提出了更高的要求.

1 大纵坡小半径钢桥面沥青铺装特点分析

首先, 从施工角度考虑, 钢匝道桥纵坡大, 转弯

收稿日期: 2011-09-20

基金项目: 交通运输部西部项目(20093180001070)

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@jstri.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@tongji.edu.cn

半径小,桥面铺装施工难度大。目前国内采用的美国环氧沥青铺装方案,在摊铺碾压过程中,环氧沥青黏结层处于凝胶状态,在坡度较大的情况下摊铺机行走在未固化的环氧沥青黏结层表面会发生打滑和粘连现象^[6]。在压路机碾压过程中,由于纵坡过大,压路机会在未固化的黏结层界面上施加较大的水平剪力,容易造成黏结层破坏,影响铺装层的施工效果。美国环氧沥青钢桥面沥青铺装方案在大纵坡小半径钢桥面沥青铺装上施工难度比较大。

其次,从受力角度分析,由于匝道桥纵坡大、转弯半径小,铺装层受力非常不利,因此要求铺装层具有更高的高温稳定性和界面安全性,目前国内采用的浇注式沥青钢桥面沥青铺装在高温性能方面存在较大风险。

再次,从使用角度看,大纵坡小半径桥面要求铺装表面粗糙,抗滑系数大,以保证行车的安全性。美国环氧沥青混凝土采用了类似 AC10 型级配,细集料含量大,铺装表面宏观构造深度小,抗滑性能较差,特别是杭州湾地区海上风大、雨多,雨后桥面极易形成水膜,严重影响行车的安全性。

总体来说,大纵坡、小半径钢桥要求钢桥面沥青铺装施工简单可行,高温性能较优,界面稳定性高,铺装表面粗糙,抗滑性能好。

2 铺装方案设计

2.1 铺装方案设计

综合大纵坡、小半径钢桥的特点和使用要求,推荐树脂沥青组合体系(ERS)钢桥面铺装方案,如图1所示。ERS 钢桥面铺装主要由环氧黏结碎石层(EBCL)、树脂沥青混凝土(RA05)、SMA10 组成。

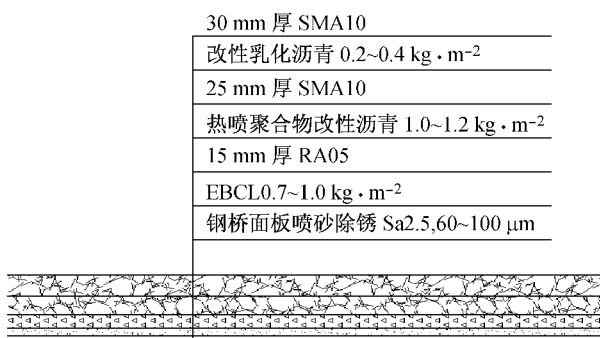


图1 杭州湾跨海大桥海中平台匝道桥 ERS 钢桥面铺装方案

Fig.1 ERS steel deck pavement of the off-ramp bridge of Hangzhou Bay Bridge

(1) 钢板要求喷砂除锈达到 Sa2.5 级,粗糙度要求达到 60~100 μm 。

(2) 然后立即涂刷一层 0.7~1.0 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的 EBCL 胶料,同时洒布 3~5 mm 粒径的碎石,碎石洒布要求达到满布面积的 80%。

(3) EBCL 层固化以后,在其上成型一层 1.5 cm 厚的 RA05 整体化层。RA05 碾压施工时,应撒布 10~13 mm 单粒径碎石,保证 RA05 表面凹凸不平。

(4) RA05 固化以后洒布防水黏结层,然后成型 SMA10 沥青混凝土层,SMA10 分两层施工,下层 2.5 cm,上层 3.0 cm。铺装总厚度控制在 7 cm。

2.2 该方案的主要特点

EBCL 层施工简便,固化时间短,可有效解决桥面铺装界面防水防腐及抗剪问题,而且固化后的 EBCL 层可以作为后期施工的平台。

RA05 冷拌树脂沥青混凝土,常温拌合施工,常温快速固化,耐高温、耐疲劳,以 RA05 做 SMA 层施工平台易施工且不易滑动。

SMA 是典型的骨架型沥青混合料,表面粗糙均匀,能够保证匝道桥行车的安全性和舒适性。

ERS 钢桥面铺装对施工环境条件的要求不高,不需要特殊的、大型的施工机具,有利于在海中匝道桥处的施工组织。

3 EBCL 层性能研究

EBCL 层作为 ERS 钢桥面铺装方案的防水抗滑黏结层,要求施工简单,固化快速,与钢板有良好的黏结强度,良好的变形性能和耐久性,而且还要为后期 RA05 和 SMA10 提供施工的平台。论文主要从施工和易性、强度、变形以及耐久性等几个方面对 EBCL 进行了研究。

3.1 施工和易性

EBCL 层作为一种环氧树脂类材料,主要采用指干时间、固化时间评价其施工可实施性。表 1 为 EBCL 层指干时间和固化时间试验结果。

表1 EBCL 胶料指干和固化时间

Tab.1 The hand dry and solidified time of EBCL

时间分类	试验温度	
	25 °C	60 °C
指干时间	1 h 46 min	25~30 min
固化时间	72 h	16 h

从试验结果可以看出 EBCL 胶料强度增长很快,25 °C 条件下基本在 3 d 左右、60 °C 条件下基本 1

d左右即可达到固化强度. EBCL 胶料固化速度快, 有利于后序施工的开展.

3.2 强度性能

钢桥面板与铺装之间的抗剪切能力不足是导致钢桥面铺装产生推移破坏的主要原因之一. EBCL 作为 ERS 钢桥面铺装方案的防水抗滑黏结层, 与钢板黏结强度的大小对于整个铺装层的安全稳定具有决定性意义. EBCL 层与钢板黏结强度通常采用拉拔强度和拉剪强度进行表征, 完全固化条件下 EBCL 层强度试验结果见表 2.

表 2 完全固化条件下 EBCL 层与钢板的黏结强度

试验温度/°C	剪切强度/MPa	拉拔强度/MPa
25	5.67	9.05
70	1.17	5.81

完全固化状态的 EBCL 胶料与钢板之间具有较高的黏结强度, 特别是在高温 70 °C 条件下, 剪切强度超过 1 MPa, 拉拔强度超过 5 MPa, 满足钢桥面沥青铺装的剪切强度要求. EBCL 层与钢板的黏结强度特别是高温条件下的强度远优于一般的沥青类防水黏结层和环氧沥青类防水黏结层.

3.3 变形性能

EBCL 用于钢桥面铺装不仅要满足强度的要求, 而且要求具有一定的变形性能. 评价 EBCL 的变形性能主要采用了断裂延伸率试验和钢板加 EBCL 组合结构变形随从性试验. EBCL 断裂延伸率试验结果见表 3.

表 3 EBCL 断裂延伸率试验结果

试验温度/°C	平均拉伸强度/MPa	平均延伸率/%
25	5.17	13.66
70	1.73	9.64

变形随从性试验采用 14 mm 厚钢板加 EBCL 层组合试件进行, 弯曲试验温度 -10 °C. 试验通过逐级加载, 观察钢板表面 EBCL 的状况. 试验结束时, EBCL 层的计算拉应变达到 $7\ 000 \times 10^{-6}$, EBCL 层未出现肉眼可见的开裂、脱层的现象(图 2).

断裂延伸率试验和变形随从性试验结果表明 EBCL 层具有较好的变形性能.

3.4 EBCL 防腐性能

为了考察 EBCL 能否对钢板进行有效的保护, 进行了钢板加 EBCL 层组合试件盐水浸泡的对比试验. 将固化后的钢板加 EBCL 组合试件置于 10% 的盐水中, 观察钢板表面的变化. 试验时间为 60 d, 试

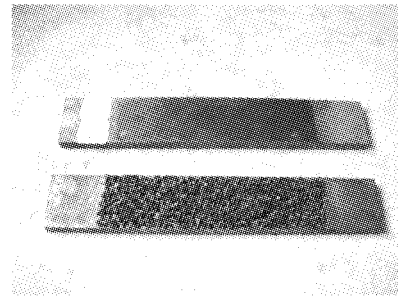
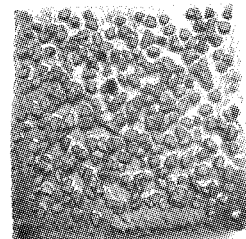


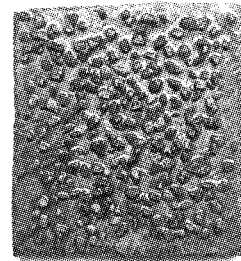
图 2 钢板加 EBCL 低温弯曲试验

Fig.2 The bending test of the specimen with steel deck and EBCL

验结束后试件表面没有出现锈蚀现象(图 3).



a 浸泡前



b 浸泡后

图 3 浸泡前、后钢板样本

Fig.3 Salt water immersion test

试验结果表明, EBCL 层对钢板有良好的防护作用. EBCL 通过完全阻断水和空气与钢板接触保证钢板不被锈蚀, 与环氧富锌漆的代偿作用不同.

4 RA05 性能研究

RA05 是整个 ERS 钢桥面铺装体系中最关键的一层, 常温施工, 具有强度高、耐高温、抗疲劳、易施工等特点.

4.1 RA05 混合料设计

RA05 作为防水层、整体化层和隔热层, 要求它不透水, 同时考虑到在坡度比较大的钢匝道桥桥面上实施要求有极好的施工和易性. 基于上述考虑, 选

择最大公称粒径为 5 mm 的连续式密级配作为 RA05 混合料级配. RA05 级配组成及油石比如表 4 所示.

表 4 RA05 级配及油石比要求

Tab.4 The gradation and binder content of RA05

范围	各筛孔(mm)通过百分率/%							油石比/%	
	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15		0.075
上限	100	100	75	55	40	28	18	10	9.5
下限	100	90	55	35	20	12	7	5	8.5

RA05 混合料所用胶结料为树脂沥青,由 A,B 两种组分按照比例混合后反应而成. RA05 混合料所用胶结料性能如表 5 所示.

表 5 25 °C 时 RA05 胶结料主要性能

Tab.5 The binder performance of RA05 at 25 °C

试验项目	技术要求	试验方法
指干时间/h	≥1.0	指干法
固化时间/h	≤96	拉拔试验
断裂伸长率/%	≥10	直接拉伸试验

4.2 基本路用性能

RA05 混合料抗水损害性能、高低温性能和疲劳性能试验结果如表 6 所示.

表 6 RA05 基本路用性能

Tab.6 The performance of RA05 mixture

序号	项目	实测	技术要求
1	70 °C 马歇尔稳定度/kN	40	≥20
2	残留稳定度/%	98.9	≥85
3	冻融劈裂比/%	80.1	≥80
4	70 °C 动稳定度/(次·mm ⁻¹)	>6 000	≥5 000
5	-10 °C 低温弯曲应变/10 ⁻⁶	3 041.7	≥600
6	15 °C, 400×10 ⁻⁶ 疲劳试验/次	>100 万	—

RA05 混合料 70 °C 马歇尔稳定度为 40 kN, 远远高于一般的沥青混合料. RA05 沥青混合料具有优良的水稳定性、高低温性能和疲劳性能.

4.3 EBCL 与 RA05 之间的抗剪强度

EBCL 与 RA05 之间的界面抗剪强度是 ERS 钢桥面铺装成功的关键之一. EBCL 和 RA05 组合结构的常温(25 °C)和高温(70 °C)条件下 45°斜剪试验结果如表 7 所示.

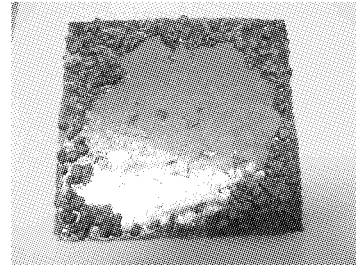
表 7 EBCL 加 RA05 复合件抗剪试验结果

Tab.7 The shear performance of EBCL and RA05 composite structure

试验温度/°C	45°抗剪强度/MPa	备注
25	5.1	EBCL 与钢板界面破坏
70	2.1	EBCL 与钢板界面破坏

EBCL 与 RA05 之间通过碎石嵌挤紧密,复合件

具有较高的抗剪强度,45°斜剪试验破坏界面均发生在 EBCL 与钢板界面,说明 EBCL 和 RA05 之间的界面有极好的抗剪切能力. 图 4 为斜剪试验破坏的界面.



a EBCL 与钢板界面



b EBCL 与 RA05 界面

图 4 斜剪试验破坏界面

Fig.4 The failure of shear test

5 高黏改性沥青 SMA10 层性能研究

大纵坡小半径钢桥沥青铺装面层除了具有良好的高低温性能、抗疲劳性能之外,还应具有良好的粗糙度,保证行车的安全性. 为此选择双层高黏改性沥青 SMA 10 作为 ERS 铺装的表面功能层. SMA 10 采用高黏改性沥青作胶结料,高黏改性沥青软化点要求大于 85 °C,60 °C 动力黏度要求超过 10 MPa·s, SHRP 性能分级满足 PG82-22. 高黏改性沥青 SMA10 沥青混合料的基本性能如表 8 所示.

表 8 高黏改性沥青 SMA10 基本路用性能

Tab.8 The performance of SMA10 with high viscosity bitumen

序号	项目	实测	技术要求
1	残留稳定度/%	97.4	≥85
2	冻融劈裂比/%	82.7	≥80
3	60 °C 动稳定度/(次·mm ⁻¹)	9 500	≥3 500
4	-10 °C 低温弯曲应变/10 ⁻⁶	2 564.3	≥2 500

从试验结果可知:高黏改性沥青 SMA 10 具有优良的抗水损害性能、高温性能和低温抗裂性能. SMA 沥青混合料表面粗糙均匀,具有较高的构造深度和摩擦系数,抗滑性能好,可以改善大纵坡、小半

径钢桥桥面沥青铺装的行车安全性.

6 工程应用

杭州湾跨海大桥海中平台匝道桥最大纵坡达到3.84%,最大横坡7%,最小转弯半径72 m,钢桥面沥青铺装的实施难度大,后期使用性能要求高. ERS钢桥面铺装在杭州湾跨海大桥海中平台匝道桥顺利实施,并运行超过1年,目前桥面铺装状况良好. ERS钢桥面铺装成功地解决了大纵坡、小半径钢桥面沥青铺装技术难题.

7 结论

为了解决杭州湾跨海大桥海中平台匝道桥钢桥面沥青铺装技术难题,研究开发了ERS钢桥面铺装技术. ERS钢桥面铺装主要由EBCL, RA05, SMA10组成, EBCL作为防水抗滑黏结层, RA05作为铺装整体化层, SMA10作为表面功能层,各层功能明确.

EBCL胶料与钢板有良好的黏结能力,可以满足桥面铺装黏结层的抗剪切要求,同时固化时间短可以满足大纵坡、小半径钢桥面铺装施工平台要求.

RA05混合料70℃的稳定度达到40 kN以上,具有优良的路用性能,而且施工简单,固化时间短,可以满足海中匝道桥桥面铺装整体化的要求.

国产高黏改性沥青SMA 10混合料,综合路用性能优良,表面粗糙、均匀,可以保证匝道桥行车的安全性和舒适性.

ERS钢桥面铺装在杭州湾跨海大桥海中平台匝道桥上的成功应用,表明该技术具有优良的施工和

易性和良好的性能,在类似钢桥中具有较好的推广应用价值.

参考文献:

- [1] 黄卫. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计理论与方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
HUANG Wei. Theory and method of deck paving design for large span bridges [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006.
- [2] 南京二桥建设指挥部, 东南大学. 南京二桥环氧沥青钢桥面铺装技术研究[R]. 南京: 东南大学交通学院, 2001.
Nanjing Second Yangze River Bridge Construction Headquarters, Southeast University. The research on epoxy steel deck pavement of Nanjing second Yangze river bridge[R]. Nanjing, School of Transportation of Southeast University, 2001.
- [3] 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(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(24): 1894.
- [4] 樊叶华, 黄卫, 钱振东, 等. 大跨径钢桥面浇注式沥青混凝土铺装应用研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2006(4): 51.
FAN Yehua, HUANG Wei, QIAN Zhendong, et al. Application study of gussasphalt concrete on pavement of long span steel deck [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2006(4): 51.
- [5] 潘世建, 杨盛福. 厦门海沧大桥建设丛书(第七、第八册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
PAN Shijian, YANG Shengfu. The collection of Xiamen Haicang Bridge constrction; vol 7 & 8[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [6] 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.