

奇龙大桥钢桥面铺装质量控制与防水抗滑层的应用研究

黎超尘, 曾国东, 黄红明*

(佛山市公路桥梁工程监测站有限公司, 广东 佛山 528041)

摘要: 针对环氧树脂防水抗滑层在奇龙大桥钢桥面铺装中的应用, 总结分析了其桥面铺装方案选择、施工质量控制和施工要点, 开展了环氧树脂防水黏结层及抗滑层的性能试验研究, 评价了环氧树脂黏结层的养生强度增长规律。结果表明: 在环氧黏结剂未完全固化前, 其拉剪强度随着养生时间的增加逐渐增长, 待其达到完全固化强度后趋于稳定, 且养生温度是其拉剪强度增长的关键影响因素。跟踪调查了奇龙大桥通车1年后的桥面铺装层状况, 调查结果表明其桥面铺装整体路用性能表现良好, 其长期性能有待于进一步跟踪观测。

关键词: 钢桥面铺装; 环氧树脂; 防水抗滑层; 质量控制; 应用研究

近年来, 随着中国交通建设的快速发展, 大跨径钢桥面铺装结构与铺装材料得到深入系统的研究, 包括钢桥面铺装结构受力分析、铺装材料与防水黏结材料研发、铺装结构与方案设计、钢桥面铺装施工质量控制等。目前中国新建钢桥面铺装基本形成了“四种铺装材料, 三类铺装结构”的格局, 主要有浇筑式类、SMA类、环氧沥青类及中国新兴的树脂沥青组合体系(ERS), 铺装结构主要有同质单层、同质双层和异质双层三类, 钢桥面铺装方案的选择主要根据其桥面板结构、交通荷载、所处气候环境、工程特点、工程造价、施工条件及工期要求等因素综合确定。该文主要研究分析环氧树脂防水抗滑层在奇龙大桥钢桥面铺装中的应

用, 开展防水黏结层及抗滑层的性能试验研究, 总结分析其桥面铺装方案选择、铺装工程施工质量控制与通车后的使用效果。

1 奇龙大桥钢桥面铺装方案研究选择

1.1 奇龙大桥交通荷载及气候特点

奇龙大桥是佛山市魁奇路东延线二期工程 K2+570~K2+965 段, 桥梁全长 395 m, 跨越东平水道, 采用独塔空间双索面混合梁斜拉桥, 桥宽 40.5 m, 顶板为正交异性钢桥面板, 桥面板厚度 16 mm, 钢箱梁主要参数如表 1 所示。

表 1 钢箱梁主要参数

mm

横隔板间隔	横隔板厚度	顶板厚度	顶板 U 肋	底板厚度	底板 U 肋	纵腹板形式	端横梁
3 000	12~16	16~25	高度 280, 厚度 8 (10), 间距 600	14~25	高度 260, 厚度 6 (8, 10), 间距 800	实腹式	长度 4 980, 高度 3 600

佛山市魁奇路东延线二期工程大致呈东西走向, 西起湖景路, 途经鄱阳村、奇槎村, 向东跨越东平水道, 与佛山一环东线相交后落地, 终止于西龙村附近, 主路为双向八车道, 采用一级公路标准兼顾城市道路功能。由佛山一环东线及魁奇路已有交通量和中远期交通量预测情况总体分析可知, 奇龙大桥段属于中等交通条件, 由于主路市区白天限货等因素, 白天以小轿车通行为主, 晚上存在较大比例重载车辆通行。

奇龙大桥所处地区夏季炎热、高温持续时间长, 每年 5—10 月份的月平均气温为 25~30 ℃, 月平均最高气温为 32~38 ℃; 年降雨量 1 681.2 mm, 年平均雨日 146.5 d, 雨季集中在 4—9 月份, 期间降雨量约占全年总降雨量的 80%, 所处地区的大气 pH 值为 4.37, 酸雨下降几率 83%, 其自然地理气候条件见表 2。

1.2 奇龙大桥钢桥面铺装方案确定

通过对奇龙大桥钢桥面板结构、交通荷载及所处

收稿日期: 2018-04-27

作者简介: 黎超尘, 男, 大学本科, 工程师. E-mail: 36493485@qq.com

* 通信作者: 黄红明, 男, 硕士, 工程师. E-mail: 849225015@qq.com

表 2 自然地理气候条件

地理 位置	极端最 高气温/ ℃	极端最 低气温/ ℃	多年平 均气温/ ℃	多年月平 均最低气 温/℃	多年月平 均最高气 温/℃	最大年 降雨量/ mm	多年平 均年降雨 量/mm	年蒸 发量/ mm	潮湿 系数	大气 pH 值
亚热带	38.7	—1	21.8	13	28.8	2 000	1 681.2	1 400~1 600	>1	4.37

地理气候特点等综合分析,其钢桥面铺装方案应考虑的主要工程特点为:钢桥面板相对较厚;中等交通条件,夜间存在重载交通;高温多雨。同时综合考虑奇龙大桥工程特点、施工条件、工程造价等因素,根据表 3

结果,最终确定采用双层 SMA 的铺装方案,桥面铺装设计总厚度 70 mm,铺装结构组成为:40 mmSMA—13+黏层+30 mmSMA—10+黏层+防水抗滑层+防水黏结层,其桥面铺装结构形式如图 1 所示。

表 3 推荐铺装方案类型比选

项目	技术成熟度	施工难 易度	路用性能	维修养护 难易度	造价成本
方案 1:浇筑式 沥青方案	应用时间较长,技术 成熟		在高温、中等交通 条件下表现良好	较容易	
方案 2:SMA 铺 装方案	应用时间较长,技术 成熟	方案 2<方案 1<方案 3	在高温、中等交通 条件下表现良好	较容易	方案 2<方案 1<方案 3
方案 3:热拌环 氧沥青方案	应用时间相对较短, 技术较成熟		在高温、重载交通 条件下表现良好	难度较大	

铺装上层	改性沥青 SMA-13,厚度:40 mm
黏层	改性乳化沥青,用量:0.3~0.5 kg/m ²
铺装下层	改性沥青 SMA-10,厚度:30 mm
黏层	改性乳化沥青,用量:0.5~0.7 kg/m ²
防水抗滑层	撒布 4.75~9.5 mm 单粒径碎石,满铺面积为 60%~70%
防水黏结层	环氧黏结剂,厚度:0.7~0.9 mm
钢桥面板	环氧黏结剂,厚度:0.3~0.5 mm
	喷砂除锈,清洁度:Sa2.5 级;粗糙度:50~100 μm

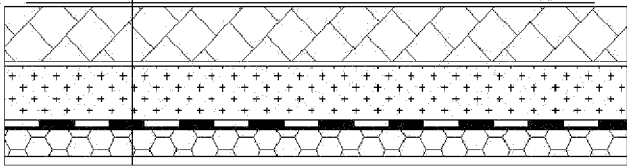


图 1 钢桥面铺装结构方案

2 环氧黏结剂的施工控制试验研究

2.1 环氧黏结剂—钢板界面拉伸剪切强度试验研究

钢桥面铺装防水黏结层的主要作用:① 对钢桥面板起到防水保护作用,防止钢桥面板生锈;② 黏结钢板与铺装层,同时承受较大的荷载剪应力。为了研究环氧树脂黏结层在不同环境温度、不同养护时间条件下拉剪强度变化规律,将黏结好的环氧树脂拉剪试件在 30、40、50 ℃ 温度条件下养护不同时间后进行拉伸剪切试验,试验结果见表 4。

表 4 拉剪强度与养护温度、养护时间的关系

养护温 度/℃	不同养护时间(h)时拉剪强度/MPa									
	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96
30	1.18	1.79	2.62	3.78	4.03	4.59	4.73	4.85	5.07	5.60
40	2.42	3.66	4.72	5.06	5.73	5.76	5.80	5.88	5.81	5.83
50	3.12	4.12	4.87	5.26	5.79	5.85	5.82	5.76	5.88	5.80

由表 4 可知:在同一养生温度条件下,环氧黏结剂的拉剪强度随着养护时间的增加而增长,其完全固化后的拉剪强度接近 6 MPa;在同一养护时间条件下,其拉剪强度随着养生温度的增加而增长,当养生温度为

30 ℃ 时,养护 48 h 后其拉剪强度达到 3.78 MPa,达到最终强度的 64.8%,当养生温度大于 40 ℃ 时,养护 24 h 其强度达到 2.42 MPa 以上,拉剪强度即达到最终强度的 41.5% 以上。环氧黏结剂—钢板界面拉伸剪切强

度试验研究结果表明:在环氧黏结剂未完全固化前,其拉剪强度随着养生时间的增加逐渐增长,待其达到完全固化强度后趋于稳定,且养生温度是其拉剪强度增长的关键影响因素。

2.2 环氧黏结剂—钢板界面黏结强度试验研究

为了进一步分析环氧黏结剂与钢板之间的黏结效果,确定黏结层与钢桥面板的黏结强度,对其进行拉拔试验,试验温度为 25、60 ℃,拉拔速率 10 mm/min,圆形拉头底面直径 $D=25\text{ mm}$,按式(1)计算黏结强度:

$$\sigma = \frac{F}{\pi \cdot D^2} \times 10^3 \tag{1}$$

式中: σ 为黏结强度(MPa); F 为对拉头施加的最大拉力(kN); D 为圆形拉头底面半径(mm)。

计算得到 25、60 ℃时环氧黏结剂—钢板界面黏结强度分别为 9.56、8.75 MPa,说明环氧黏结剂具有较高的黏结强度;环氧黏结剂从 25 ℃升高到 60 ℃温度条件下时,其黏结强度仅衰减 8.5%,说明环氧黏结剂温度敏感性较低。

2.3 环氧黏结剂拉伸试验研究

为了进一步分析环氧黏结剂的抗拉强度与拉伸剪切强度的关系,对其展开拉伸强度试验研究。将搅拌均匀的混合树脂制作成哑铃状试件,待养生完成后采用专门的材料试验机进行试验,拉伸速率为 500 mm/min,试验温度 23 ℃,拉伸强度按式(2)计算,试验结果见表 5。

表 5 环氧黏结剂的拉伸试验结果

试样宽度/mm	试样厚度/mm	试验力值/N	拉伸强度/MPa	拉伸强度/拉剪强度
5.9	2.9	290.2	17.0	2.87
5.8	2.9	266.3	15.8	
5.9	2.7	269.7	16.9	
5.9	2.8	280.5	17.0	
平均值			16.7	

$$\sigma_t = \frac{p}{bd} \tag{2}$$

式中: σ_t 为拉伸强度(MPa); p 为试件断裂时的最大荷

载(N); b 为试件宽度(mm); d 为试件厚度(mm)。

由表 5 可知:环氧黏结剂的拉伸强度为 16.7 MPa,其拉伸强度是拉剪强度的 2.87 倍,说明环氧黏结剂具有较高的拉伸强度。

2.4 铺装层—钢板界面黏结强度试验研究

为了进一步分析铺装层与钢板的黏结效果,首先将打磨好的钢板涂布防水黏结层,涂布厚度为 0.4 mm,待防水黏结层达到强度要求后,涂布防水抗滑层的同时撒布 4.75~9.5 mm 单一粒径碎石,待防水抗滑层达到强度要求后,洒布 0.6 kg/m² 的改性乳化沥青黏层,第二天将 SMA-10 混合料倒入已放入钢板的试模中碾压成型,待养生完成后取出试件并在钢板正上方进行钻芯,到达钢板厚即停止。对铺装层—钢板界面组合试件进行拉拔试验时,试验温度为 25 ℃和 60 ℃,拉拔速率为 10 mm/min,圆形拉头底面直径 $D=95\text{ mm}$,得到 25、60 ℃时铺装层—钢板界面黏结强度分别为 0.63、0.10 MPa,其破坏界面基本上都是界面混合料破坏;组合试件从 25 ℃升高到 60 ℃时其黏结强度衰减 84.1%,说明铺装层与钢板界面黏结强度对温度敏感性较高。

3 奇龙大桥钢桥面铺装施工质量控制

3.1 配合比设计

奇龙大桥钢桥面铺装层由 SMA-13 铺装上层和 SMA-10 铺装下层组成,混合料所用沥青采用 SBS 高黏改性沥青,所用集料采用闪长岩碎石。SMA-13 及 SMA-10 混合料矿料合成级配见表 6,根据配合比设计确定的 SMA-13、SMA-10 混合料最佳油石比分别为 6.1%、6.3%。

3.2 防水黏结层与抗滑层施工质量控制

奇龙大桥钢桥面铺装层在 9 月中旬进行环氧黏结层的施工,对其典型气候条件进行了 24 h 的气温、箱体桥面板温度检测,施工期间全天气温为 28~36 ℃,箱体顶板温度为 29~54 ℃。确定抛丸除锈后的钢板表面在 45 min 内进行 0.3~0.5 mm 防水黏结层施工,最长施工时间控制在 1h 以内,该项目采用梯队施工基

表 6 桥面铺装层矿料合成级配(目标级配)

混合料类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
SMA-13	100	94.4	61.5	27.9	19.3	15.9	12.9	11.7	10.9	10.3
SMA-10	100	100	99.8	42.7	26.2	20.0	15.0	13.0	11.8	10.8

本小于 30 min。完成防水黏结层施工 2 d 后,检测其黏结层的强度,结果如表 7 所示,其强度满足要求后,进行防水抗滑层撒布施工。

表 7 环氧黏结剂的强度试验结果

项目	黏结强度 (25℃)/MPa	剪切强度/MPa	
		70℃	25℃
技术要求	≥4.0	≥2.5	≥3.0
试验结果	11.4(现场实测)	6.1(室内检测)	8.7(室内检测)

注:合格率 100%。

防水抗滑层的施工首先是涂布一层 0.7~0.9 mm 环氧黏结层,在涂布的同时撒布一层 4.75~9.5 mm 单粒径碎石。环氧类黏结料的各组分按照比例配制后,在搅拌机内搅拌均匀,从加第一组分材料开始至搅拌均匀可以出料的时间宜根据气温控制在 5~15 min 之间,净搅拌时间不得低于 3 min 以保证各组分搅拌均匀,从加入固化剂组分开始至搅拌均匀可以出料的时间不得高于 25 min 以保证在材料初始固化前有足够的时间进行碎石撒布工作,其制备总时间及净搅拌时间随气温的变化规律见表 8。

表 8 不同气温条件下环氧黏结料拌和参考时间

气温范围/ ℃	制备总 时间/min	净搅拌 时间/min	加固化剂至制备 完成时间/min
15~20	17~30	15~20	≤25
20~25	14~25	10~15	≤20
25~30	11~20	7~10	≤15
30~35	8~15	5~7	≤10
35~40	5~10	3~5	≤5

3.3 钢桥面铺装全幅施工质量控制

奇龙大桥钢桥面铺装采用全幅摊铺施工工艺,解决了钢桥面铺装沥青混合料施工冷接缝等薄弱环节问题,较好地衔接了沥青混合料的出料、运输、摊铺及碾压全过程施工工艺,确保了 SMA 混合料的摊铺温度和压实质量。钢桥面全幅施工有利于保证 SMA 混合料的摊铺速度与供料速度的平衡,减少了摊铺机的停顿次数,同时有利于减少 SMA 混合料的离析现象。奇龙大桥钢桥面铺装施工过程中基本没出现推移及离析问题,较好地完成了 SMA 混合料铺装的全幅施工。

4 奇龙大桥通车后的铺装性能表现

调查跟踪了奇龙大桥钢桥面 SMA 铺装通车 1 年

后的使用性能情况,在中等交通及高温、雨季、低温的循环作用下,其钢桥面铺装路面使用性能表现良好,表面构造较佳,通车后的检测情况如表 9 所示,长期性能还有待于进一步跟踪观测。

表 9 通车 1 年后桥面铺装性能表现

项目	平整度/ (m·km ⁻¹)	构造深 度/mm	横向力 系数	车辙深 度/mm
检测结果	2.15	1.21	65	4.05
技术要求	≤2.5	≥0.85	≥54	≤10

5 结论

(1) 根据奇龙大桥钢桥面板结构、交通荷载等级、气候特点、工程造价、施工条件及工期要求等因素综合研究其钢桥面铺装结构方案,最终比选确定采用双层 SMA 的铺装方案。

(2) 试验评价了环氧树脂黏结层的养生强度增长规律,在环氧黏结剂未完全固化前,其拉剪强度随着养生时间的增加逐渐增长,待其达到完全固化强度后趋于稳定,且养生温度是其拉剪强度增长的关键影响因素;环氧黏结剂—钢板界面黏结强度较高,对温度敏感性较低。

(3) 针对防水抗滑层在奇龙大桥钢桥面铺装应用之际,提出了防水黏结层及抗滑层的施工控制要求;钢桥面全幅施工有利于减少 SMA 混合料的离析现象,较好地衔接了沥青混合料的出料、运输、摊铺及碾压全过程施工工艺。

(4) 调查跟踪了奇龙大桥钢桥面 SMA 铺装通车 1 年后的使用情况,其桥面铺装整体路用性能表现良好,长期性能有待于进一步跟踪观测。

参考文献:

- [1] 徐伟,张肖宁,涂长卫.虎门大桥钢桥面铺装维修方案研究与工程实施[J].公路,2012(5).
- [2] 赵峰军,李宇峙,易伟建,等.钢桥面铺装环氧防水粘结层材料与结构试验研究[J].公路,2006(7).
- [3] 张顺先.基于使用性能的钢桥面铺装环氧沥青混合料设计与疲劳寿命预测[D].华南理工大学博士学位论文,2013(4).
- [4] 李嘉,冯啸天,邵旭东,等.STC 钢桥面铺装新体系的力学计算与实桥试验对比分析[J].中国公路学报,2014(3).
- [5] 李星星,李宇峙,邵腊庚,等.耐高温环氧树脂胶粘剂在钢桥面粘结层中的应用试验研究[J].公路,2007(1).

基于无应力状态控制法的斜拉桥安装计算方法研究

徐林, 刘琪

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 根据无应力状态控制法的基本理论,以某斜拉桥为例,由成桥最终状态求解施工中间状态,并计算出合理成桥状态的斜拉索无应力长度,以无应力索长作为控制量进行施工正装计算,对比合理成桥状态和施工正装最终状态。结果表明:无应力状态控制法应用于斜拉桥的正装计算结果精确,能确保合理成桥目标状态的实现。

关键词: 无应力状态控制法; 无应力长度; 无应力曲率; 斜拉桥; 施工安装计算

1 前言

对于具有高次超静定特点大跨径斜拉桥而言,混凝土主梁一般采用分节段悬臂浇筑,而钢主梁一般采用悬臂拼装的施工方法。设计之初不必考虑施工过程,而是首先确定结构最终形成的合理成桥状态,然后以该成桥状态为目标来倒推各施工安装阶段理想状态,保证结构按预先拟定的施工工序成桥后,内力及线形与合理成桥状态吻合。国内外对确定斜拉桥合理成桥状态经过长期的理论研究和实践,总结的方法主要有指定受力或者位移状态的刚性支承连续梁法、弯曲能量最小法、影响矩阵法等。由于斜拉桥的内力、线形与施工过程密切相关,斜拉桥施工过程中除恒载外,还布置有用于施工的临时荷载,施工临时荷载的控制直接影响到斜拉桥最终的成桥状态,再加上混凝土的收缩徐变,使问题更加复杂。所以设计过程中的关键环节在于确定各施工阶段的拉索张力。

倒拆分析法是斜拉桥计算中的一种常用方法,该方法是一种逆序施工计算方法,以合理成桥状态为计算原点(一般以二期恒载加载完起算),按结构杆件以及拉索的安装顺序、施工临时荷载的加载顺序逐步倒

拆单元和荷载,可计算出各施工阶段的拉索力,再进行正装分析。倒拆分析法不能适应结构体系及外荷载的变化,若外荷载的加载时间、空间有变,则应重新进行倒拆—正装的循环分析直至闭合。文献[1]提出的正装迭代法脱离了对结构的倒拆计算分析工作,该方法不需要倒拆,只做正装计算。其计算原理是先任取一组自定义的控制索力,模拟完整的施工计算最后得到成桥状态,运用最小二乘法的原理使该状态与优化的合理成桥状态相差趋于最小,对施工阶段的张拉控制索力进行更新后再进行下一轮的正装计算,到收敛为止。正装迭代法在施工方案或施工临时荷载发生变化时,同样需要再次进行计算,以至于需要在后续施工过程中反复张拉斜拉索。

无应力状态控制法由秦顺全院士提出,是一种基于分阶段施工的理论方法。该方法深入研究了结构的初始状态和分阶段最终成形状态的联系,揭示了当外界条件一定时,无应力状态量(构造单元的无应力长度和无应力曲率)的变化才是最终导致结构内力、位移发生变化的原因,通过这个贯穿结构体系施工全过程并且维持不变的结构固有特性,直接求解出斜拉桥张拉到位的索力,可以处理施工阶段大量同步施工作业的问题,提高了施工效率。无应力状态控制法已运用到

- *****
- [6] 张大斌,李宇峙,张平.钢桥面铺装粘结剂的高温稳定性能[J].中外公路,2012(4).
- [7] 王建伟,沈家林,钱振东.国产环氧沥青混合料施工控制[J].东南大学学报:自然科学版,2009(6).
- [8] 陈志一.大跨径正交异性钢桥面铺装防水粘结层研究

- [D].长安大学硕士学位论文,2008(5).
- [9] 王民,高博,郝增恒.钢桥面沥青铺装压实工艺智能控制技术[J].公路,2015(4).
- [10] 王勤福,张伟.京杭运河特大桥钢桥面环氧沥青铺装设计与施工[J].交通科技,2013(10).

收稿日期:2018-03-18

作者简介:徐林,男,硕士,高级工程师,E-mail:9937965@qq.com