

军工路高架桥面防水黏结层关键技术研究

张汉琦

[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

摘要: 为突破钢混叠合梁超薄铺装体系中防水黏结层的技术瓶颈,以上海市军工路快速路高架桥工程为背景,针对“取消找平层+7 cm超薄铺装(3cm浇筑式沥青GA-10+4 cm SMA-13)”的创新型铺装结构,系统研究了该体系下防水黏结层的材料选型、施工工艺优化及性能验证。通过对比溶剂型沥青黏结剂、甲基丙烯酸甲酯树脂和热熔型改性环氧树脂的性能,选择热熔型改性环氧树脂作为核心材料,其25℃拉拔强度达1.5~2.0 MPa、60℃抗剪强度0.9~1.2 MPa、耐热性不低于200℃,兼具高耐水性(强度保持率85%~90%)与施工适应性。施工工艺通过精细化控制实现质量提升,施工前采用抛丸处理确保基面粗糙度0.5~1.0 mm;采用人工刮涂施工方式,每平方米材料用量严格控制在0.55~0.6 kg。性能测试表明:全线拉拔强度平均值2.21~2.53 MPa(远超设计不小于1.5 MPa),合格率100%;25℃抗剪强度全线均值1.02 MPa,60℃高温下仍达0.78 MPa(超规范不小于0.5 MPa);浸水7 d后强度保持率87.5%,80℃加速老化7 d后拉拔与抗剪强度保持率分别为86.3%和82.1%。研究表明,采用热熔型改性环氧树脂的施工工艺,可显著提升层间黏结强度与高温稳定性,解决超薄铺装体系层间脱空与水损害难题,为同类工程提供了材料选型标准、工艺控制方法及性能验证体系。

关键词: 钢混叠合梁;超薄铺装;防水黏结层;热熔型改性环氧树脂;层间性能

中图分类号: U443.31; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0117-05

Research on Key Technology of Waterproof Bonding Layer of Elevated Bridge Decks in Jungong Road

ZHANG Hanqi

[Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: In order to overcome the technical bottleneck of the waterproof bonding layer in the ultra-thin paving system of steel-concrete composite beams, taking the Shanghai Jungong Road Expressway Elevated Bridge Project as the background, and focusing on the innovative paving structure of “canceling the leveling layer + 7 cm ultra-thin paving (3 cm poured asphalt GA-10 + 4cm SMA-13)”, the material selection, construction process optimization and performance verification of the waterproof bonding layer under this system are systematically studied. By comparing the properties of solvent based asphalt binder, methyl methacrylate resin and hot-melt modified epoxy resin, the hot-melt modified epoxy resin is selected as the core material. Its 25℃ tensile strength reaches 1.5~2.0 MPa, 60℃ shear strength is 0.9~1.2 MPa, heat resistance is not lower than 200℃, and it has high water resistance (strength retention rate of 85% -90%) and construction adaptability. The construction process achieves quality improvement through refined control. Before construction, the shot blasting treatment is used to ensure a roughness of 0.5~1.0 mm on the base surface. The manual scraping and coating construction method is adopted, and the material consumption per square meter is strictly controlled at 0.55~0.6 kg. The performance tests show that the average tensile strength of the entire line is 2.21~2.53 MPa (far exceeding the design not less than 1.5 MPa) with a pass rate of 100%. The average shear strength of the entire line at 25℃ is 1.02 MPa, and it still reaches 0.78 MPa at high temperature of 60℃ (exceeding the specification not less than 0.5 MPa). After 7 d of immersion, the strength retention rate is 87.5%, and after accelerated aging at 80℃ for 7 d, the tensile and shear strength retention rates are 86.3% and 82.1%, respectively. The research shows that the construction technology with the hot-melt modified epoxy resin can significantly improve the interlayer bonding strength and high-temperature stability, solve the problems of interlayer delamination and water damage in ultra-thin paving systems, and provide the material selection standards, process control methods and performance verification systems for similar projects.

Keywords: steel-concrete composite beam; ultra-thin paving; waterproof bonding layer; hot melt modified epoxy resin; interlayer performance

收稿日期: 2025-10-30

作者简介: 张汉琦(1992—),男,本科,工程师,从事道路路面工程技术研究与管理工作。

1 概 述

近年来,我国城市高架桥梁建设中,钢混叠合梁的应用占比逐年提升^[1-2]。然而,传统依赖水泥混凝土找平层的设计存在自重过大、施工周期长等问题^[3]。为此,多地开始探索“取消找平层+超薄铺装”的新型体系,试图将沥青铺装总厚度压缩至 8 cm 以内,但因防水黏结层性能不足,部分工程出现了层间脱空、水损害等病害^[4-5]。当前,针对超薄铺装体系的防水黏结层研究仍存在技术瓶颈。一方面,现有溶剂型黏结材料在高温摊铺环境下易软化失效^[6-7],25℃拉拔强度多偏低;另一方面,钢混界面的复杂应力导致常规黏结层难以满足长期耐久性要求^[8-9]。据不完全统计,约 35% 采用超薄铺装的桥梁在通车 3 年内出现层间病害,凸显技术升级的迫切性^[10-11]。此外,现有规范对防水黏结层的指标要求较为宽泛,缺乏高温抗剪及长期老化等关键指标,导致工程实践缺乏统一标准^[12]。

在此背景下,上海市军工路高架采用了“3 cm 浇筑式沥青混合料+4 cm SMA”的超薄铺装体系,对防水黏结层性能提出了严苛要求。本文结合该工程实例,通过实测数据分析了防水黏结层的材料选型与施工工艺,并利用拉拔试验、剪切试验等验证其可靠性。

2 工程概况与桥面结构层次

军工路高架全长 7.306 km,主线为双向 4 车道,设计时速 60 km/h,全线采用钢梁+预制混凝土桥面板的钢混叠合梁结构,是上海市首次在混凝土桥面板上大面积应用浇筑式沥青铺装层的工程^[13]。桥面结构见图 1,具体结构层次见表 1。

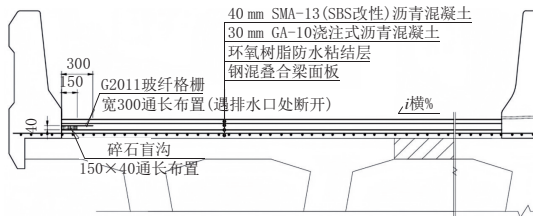


图 1 军工路高架桥结构图

表 1 军工路高架桥面结构层

结构层	厚度/cm	材料类型
钢混叠合梁面板	—	预制混凝土+钢梁
防水黏结层	0.3~0.5	环氧树脂黏结剂Ⅱ型
浇筑式沥青混合料	3	GA-10
SMA 沥青混合料	4	SMA-13(SBS 改性)

这种“3 cm 浇筑式沥青+4 cm SMA”的超薄组合,总厚度仅 7 cm,较传统铺装减薄约 40%,但因取消找平层后直接依赖层间黏结传递荷载,对防水黏结层的强度、耐久性及与上下层的协同性提出了远超常规工程的严苛要求。

3 防水黏结层材料选型

为筛选适配该超薄铺装体系的防水黏结材料,通过室内试验对 3 种主流材料进行全面性能对比,测试项目包括常温与高温黏结强度、耐热性、耐水性及施工适应性。试验结果见表 2。

表 2 不同防水黏结材料性能对比结果

检测项目	溶剂型沥青黏结剂	热熔型改性环氧树脂	甲基丙烯酸甲酯树脂(MMA)
25℃拉拔强度/MPa	0.8~1.2	1.5~2.0	1.8~2.2
60℃抗剪强度/MPa	0.5~0.7	0.9~1.2	1.0~1.3
耐热性/℃	≥160	≥200	≥180
耐水后强度保持率/%	65~75	85~90	88~92
施工方式	辊涂	刮涂	刮涂
单价/(元·m ²)	35~45	80~90	120~140

从表 2 可知,不同材料在 25℃拉拔强度、耐热性等关键性能上差异显著。综合性能与经济性分析,最终选用热熔型改性环氧树脂,其核心技术指标如下:

(1) 实测表干时间不大于 4 h(25℃),实干时间不大于 24 h(25℃),适应快速施工需求;

(2) 实测断裂伸长率不小于 300%,满足梁体变形适应性;

(3) 与钢面板黏结强度不小于 3.0 MPa(25℃),与混凝土面板黏结强度不小于 1.5 MPa(25℃);

该材料在高温摊铺环境下(浇筑式沥青温度达 230~250℃)能保持稳定性,且与浇筑式沥青、SMA 混合料均具有良好的相容性,可形成连续的黏结界面。

4 防水黏结层施工工艺

4.1 施工参数控制

针对本次钢混叠合梁面板特性,制定了精细化施工参数,确保防水黏结层质量,见表 3。现场检测见图 1。

4.2 施工工艺优化

针对钢混叠合梁面板的材质特性与超薄铺装体系对层间黏结的严苛要求,通过现场试验与工艺迭

表 3 防水黏结层施工参数控制标准及检测要求

工序	关键参数	控制标准	检测频率	检测方法
抛丸处理	表面粗糙度： 0.5~1.0 mm (ISO 8503)	无可见浮锈、油污，露出新鲜混凝土面	3 点/ 1 000 m ²	铺砂法
防水层	用量：0.5~ 0.6 kg/m ²	涂层连续，满布，无堆积，无气泡、针孔	3 点/ 1 000 m ²	称量法+ 视觉检查
成品检测	与混凝土桥面板黏结强度、与浇筑式沥青铺装黏结强度	黏结强度(与桥面板，25℃)不小于 1.5 MPa 黏结强度(与 GA-10，25℃)不小于 1.0 MPa	3 点/ 1 000 m ²	CJJ/T 279— 2018 附录 A



(a) 粗糙度检测



(b) 拉拔检测(与桥面板)



(c) 拉拔检测(与GA-10)

图 2 防水黏结层施工现场检测图

代,对防水黏结层施工的关键环节进行精细化优化,确保各工序质量可控,具体如下:

(1)抛丸处理:采用桥面专用自行式抛丸机(功率不小于 15 kW),施工前需对设备进行调试,确保

钢丸输送量稳定在 50~80 kg/min。作业时,抛丸机行走速度严格控制在 3~5 m/min,丸料选用粒径 0.8~1.2 mm 的高碳铸钢丸(硬度 HRC 40~50),通过高速旋转的叶轮(转速不小于 2 800 r/min)将钢丸以 60~80 m/s 的速度喷射至面板表面。同时,配备强力吸尘器(负压不小于 20 kPa)同步清除表面浮尘与残留钢丸,确保处理后表面粗糙度达到 0.5~1.0 mm (ISO 8503 标准),形成均匀分布的“麻面”结构,既去除面板表面的浮锈、脱模剂等杂质,又通过微观凹凸纹理增强与防水黏结层的机械咬合力。

(2)环氧材料预混:环氧树脂黏结剂分 A 组分和 B 组分,使用前应分开存放,避免混堆。夏季使用时现场应有遮阳措施,避免太阳暴晒;冬季使用时应视低温情况加热保温至 30℃左右以利于降低黏度和搅拌均匀。施工时按照材料使用说明将两种材料进行混合,用手持式搅拌设备搅拌,须搅拌 1~3 min(视环境温度而定),直至达到均匀的乳白色液体状态。搅拌好的环氧树脂黏结剂应现配现用,倾倒入施工区,不得在容器存放过久以避免过早固化初凝。

(3)环氧树脂辊涂:将搅拌均匀的黏结剂倾倒入施工区,采用橡胶齿耙对环氧树脂黏结剂进行摊铺,铺满整个施工区域。环氧黏结剂用量 0.5~0.6 kg/m²,宜按照每组黏结剂的重量提前圈定施工面积来保证施工用量。涂布应均匀,对于漏涂、龟裂、流坠、针眼和气泡等缺陷应及时修补。为避免搭接处出现厚度偏差,相邻喷涂幅宽重叠量控制在 5~10 cm,且同一区域分两次交叉辊涂,确保涂层厚度均匀性。辊涂过程中安排专人实时监测涂布均匀性,发现漏涂、起皱、堆积等缺陷时立即处理。

4.3 主防水层厚度检测结果

采用测厚仪对军工路高架全线 7.306 km 桥面的主防水层厚度进行随机抽样检测,共选取 49 个检测点,每 150 m 布设 1 点,最后一个点位于 7.30 km 处,距前一点间隔为 100 m。涵盖直线段、曲线段及立交区等不同工况区域)。检测结果见图 2。

如图 2 所示,主防水层实测厚度最小值为 0.32 mm,位于翔殷路立交曲线段;最大值为 0.48 mm,位于逸仙路立交匝道区,整体波动范围控制在 0.3~0.5 mm 的设计厚度区间内,无超出规范允许偏差±0.1 mm 的测点。49 个测点的厚度平均值为 0.41 mm,接近设计中值 0.4 mm;标准差为 0.05 mm,变异系数(标准差/平均值)计算得 12.2%,远低于行业公认的 20% 合格阈值,表明不同区域的厚度差异较小。所有测点厚

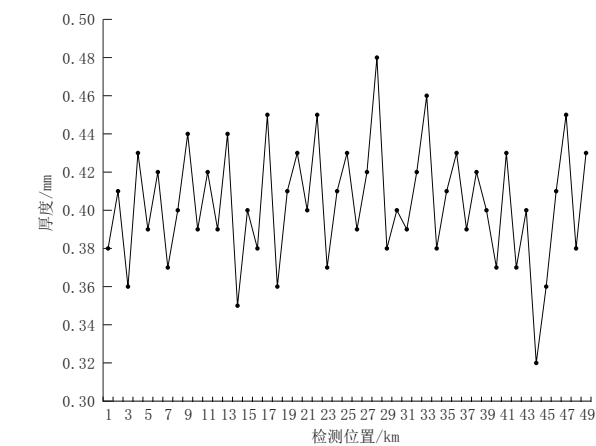


图2 主防水层厚度沿程分布曲线图

度均满足设计及规范要求,合格率达 100%,其中厚度在 0.35~0.45 mm 区间的测点占比 82%,充分表明

表4 不同路段拉拔强度检测结果

检测路段	设计黏结强度/MPa	检测点数量	强度范围/MPa	平均值/MPa	标准差/MPa	变异系数/%	合格率/%
左幅1标(ZK0+151-ZK2+090左幅)	≥1.5	60	1.81~4.29	2.53	0.52	20.56	100
右幅1标(ZK0+151-ZK2+090右幅)	≥1.5	48	1.73~3.49	2.28	0.41	18.01	100
左幅2标(ZK2+647-ZK6+981左幅)	≥1.5	82	1.51~3.81	2.25	0.47	20.89	100
右幅2标(ZK2+647-ZK6+981右幅)	≥1.5	85	1.52~3.72	2.21	0.43	19.46	100
匝道(P1、P4等6条匝道)	≥1.5	22	1.65~2.90	2.26	0.35	15.49	100

从表4可知,各路段防水黏结层的拉拔强度表现优异。左幅1标、右幅1标、左幅2标、右幅2标及匝道的所有测点黏结强度均满足设计要求的不少于 1.5 MPa,合格率达 100%,平均值均远超设计标准,变异系数在 15.49%~20.89% 之间,表明各路段强度均匀性良好。同时,试验过程中同步记录的破坏形式显示,左幅1标、2标及右幅2标共 12 个测点出现“内聚破坏”(防水黏结层自身断裂),占比 48%;右幅1标及匝道共 13 个测点为“混合破坏”(部分黏结面脱开+部分内聚断裂),占比 52%,未出现完全“界面破坏”(黏结面彻底脱开)。

5.2 长期性能测试

为提前验证防水黏结层在长期服役环境下的性能稳定性,开展了实验室耐水性、老化性能模拟测试,结果如下。

(1)耐水性测试:制作 10 组尺寸 150 mm×150 mm 代表性试件,浸入 23 ℃蒸馏水 7 d(液面高出试件表面 50 mm),期间每天换水 1 次。试验前拉拔强度平均值 1.77 MPa,浸水后降至 1.55 MPa,强度保持率 87.5%,且试件表面无起鼓、分层现象,表明水稳定性优良,能抵抗长期潮湿环境影响。

(2)老化试验:取上述 10 组试件进行人工加速老化试验,在 80 ℃烘箱中持续放置 7 d,模拟 5 年

优化后的无气喷涂参数及交叉喷涂工艺能确保主防水层厚度严格受控且均匀性良好,为层间黏结性能的一致性奠定了可靠基础。

5 防水黏结层性能测试与分析

5.1 现场拉拔试验结果

拉拔试验作为评估层间黏结强度的核心指标,采用 DL-5000 型数显拉拔仪(速率 5 mm/min)对不同路段进行检测。检测范围覆盖军工路快速路新建工程路面及道路照明工程全线关键结构段,包括左幅 1 标、右幅 1 标、左幅 2 标、右幅 2 标和匝道。每个标段及匝道区域均避开桥面伸缩缝及构造物边缘 30cm 范围,按随机抽样原则选取检测点。检测结果见表 4。

自然老化。测试后拉拔强度从初始 1.77 MPa 降至 1.53 MPa,保持率 86.3%; 25 ℃抗剪强度从初始 1.02 MPa 降至 0.84 MPa,保持率 82.1%,均满足行业对长期性能的要求,说明材料抗老化能力可靠。

鉴于工程尚未完全竣工,后续将在全线开放交通后,按 1 年、3 年、5 年周期开展跟踪监测,重点复测拉拔强度、抗剪强度及层间外观状态,进一步验证防水黏结层的长期服役性能。

6 结 论

通过对军工路高架桥面防水黏结层的材料选型、施工工艺优化及性能测试进行系统研究,结合工程实测数据,得出以下结论:

(1)热熔型改性环氧树脂防水黏结层与“3 cm 浇筑式沥青混合料+4 cm SMA 沥青混合料”的超薄铺装体系适配性良好,其 25 ℃拉拔强度平均值达 2.21~2.53 MPa,远超设计要求的不少于 1.5 MPa。同时,材料在高温摊铺环境(230~250 ℃)下稳定性优异,与上下层材料相容性良好。

(2)优化后的施工工艺(抛丸处理粗糙度 0.5~1.0 mm、主防水层辊涂厚度 0.3~0.5 mm)可确保防水黏结层质量稳定。全线 49 个测点厚度合格率 100%,平均值 0.41 mm,变异系数 12.2%,表明施工精度高、

均匀性好,为层间黏结性能的一致性提供了可靠保障。

(3)实验室长期性能模拟测试验证了材料的耐水后强度保持率 87.5%,80℃老化 7 d 后拉拔强度保持率 86.3%、抗剪强度保持率 82.1%,均满足行业长期性能要求,表明该防水黏结层具备抵抗潮湿环境与老化作用的能力。后续将在全线通车后开展长期跟踪监测,进一步验证其服役性能。

综上,本研究形成的热熔型改性环氧树脂防水黏结层材料选型标准、精细化施工工艺及性能检测方法,可为同类钢混叠合梁超薄铺装体系工程提供技术参考。

参考文献:

- [1] 赵一波.大跨度钢混叠合梁斜拉桥顶推控制分析及技术研究[D]. 济南:山东大学,2023.
- [2] 张利平.简支预制槽形钢混组合梁在城市桥梁中的应用[J].城市道桥与防洪,2023(7):87-90.
- [3] 顾晓伟.刍议如何提高沥青混凝土桥面铺装平整度[J].科技创新与应用,2015(16):190-191.
- [4] 董亚平.上海北横通道北虹立交钢桥面 RB-ECO 应用[J].城市道桥与防洪,2020(12):199-201.
- [5] 黄金生,姚波,何超,等.环氧沥青钢桥面铺装早期裂缝病害形态分析[J].公路,2024,69(6):1-11.
- [6] 李珩.钢桥面铺装环氧沥青防水黏结层的应用研究[J].城市道桥与防洪,2015(4):180-183.
- [7] 马兰.超薄桥面铺装结构试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2023.
- [8] 刘强,闫东波,刘敬峰,等.不同类型桥面铺装 PMMA 防水黏结层失效原因分析及其设计施工要点[J].中国建筑防水,2016(22):33-36.
- [9] 龙承梁.基于胎路摩擦行为的聚氨酯超薄磨耗层抗剥落耐久性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.
- [10] 钱喜红,张辉.基于结构安全的在役桥梁水泥混凝土桥面铺装薄层改造关键材料与结构性能试验研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(6):270-272.
- [11] 赵胜兵,罗献燕,李琪.桥梁伸缩缝处积水病害的研究——以广西南宁市东西向快速高架桥梁为例[J].广西城镇建设,2023(7):52-59.
- [12] JTG/T 3364-02—2019 公路钢桥面铺装设计与施工技术规范[S].
- [13] 袁卓铨.上海市军工路快速路新建工程总体设计[J].城市道桥与防洪,2024(7):47-51.
- [6] 江泊洵,俞演名,宁顺理,等.深厚软基区海堤填筑下穿对既有桥梁桩基的影响[J].工程科学与技术,2020,52(4):108-116.
- [7] 马志龙,潘春辉.软土地区大面积堆载对邻近高架桥墩的影响分析研究[J].城市道桥与防洪,2021(9):212-215;220.
- [8] 方国华,耿长春,丁志全.大面积堆载对临近桩基力学性能的影响[J].水运工程,2024(8):288-294.
- [9] 田帅.近海填土对既有桥梁桩基影响分析与建议[J].城市道桥与防洪,2021(10):216-218;234.
- [10] 赵九斋.连云港软土路基沉降研究[J].岩土工程学报,2000,22(6):643-649.
- [11] 孔纲强.堆载条件下现浇扩底楔形群桩负摩阻力特性研究[J].岩土工程学报,2011(增刊1):364-368.
- [12] 杨庆,孔纲强,郑鹏一,等.堆载条件下单桩负摩阻力模型试验研究[J].岩土力学,2008,29(10):2805-2810.
- [13] 陈欢.软土地基上堆载工程对既有高速铁路桥梁桩基影响及其控制技术研究[D].南京:东南大学,2017.
- [14] 王周庆,陈亿琳.软基中桥头路基填筑对邻近桥桩的影响研究[J].市政技术,2026(4):204-206;230.
- [15] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].
- [16] TJG 3363—2019 公路桥涵地基与基础设计规范[S].

(上接第 88 页)