



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309868

引用格式:李东旭,江照伟,彭建,等.基于力学响应分析的钢桥面铺装结构与材料的一体化[J].科学技术与工程,2025,25(7):2974-2982.

Li Dongxu, Jiang Zhaowei, Peng Jian, et al. Integration of steel bridge deck pavement structure and materials based on mechanical response analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(7): 2974-2982.

基于力学响应分析的钢桥面铺装结构与材料的一体化

李东旭¹, 江照伟^{2,3}, 彭建¹, 李高俊^{2,3}, 孙强^{2,3}, 张进¹, 刘恒彬^{2,3*}

(1. 安徽省引江济淮集团有限公司, 合肥 230601; 2. 山东省交通科学研究院, 济南 250102;

3. 高速公路养护技术交通行业重点实验室(济南), 济南 250102)

摘要 为解决钢桥面铺装耐久性不足问题,以两种双层沥青玛蹄脂混合料(stone mastic asphalt, SMA)铺装结构为研究对象,采用有限元分析方法确定典型桥面板最不利荷载位置,计算对比两种结构在该荷载位置下的力学响应,优选钢桥面铺装结构组合并提出设计指标要求;其次,室内制备A、B两种高黏高弹改性沥青,以沥青胶结料及混合料路用性能为考察标准,对比分析胶结料类型对钢桥面铺装沥青混合料路用性能的影响规律,优选沥青胶结料类型;最后,借助室内拉拔及斜剪试验,对铺装层与钢板之间的层间黏结状况进行评价,并结合实体工程对最不利温度条件下铺装层的黏结性能进行检验。结果表明:跨中位置为钢桥面的最不利荷位,应以铺装层在该位置的拉应力、竖向位移及层底剪应力作为钢桥面铺装的主要设计指标;所设计的两种铺装结构力学响应规律一致,其中,结构2(SMA-13+ SMA-10+ 沥青胶砂)的竖向位移及层底剪应力较小,宜作为优选结构;A、B高黏高弹改性沥青的路用性能较SBS(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物)改性沥青优势显著,又以A高黏高弹改性沥青性能最优,用其制备的混合料路用性能最为优异;拉拔试验测试结果表明,25℃及60℃温度条件下铺装层-钢板间黏结强度均满足设计要求,工程应用地区铺装结构层内温度呈周期变化规律,最高温度未超60℃,以该温度层间黏结强度作为设计指标科学合理,同时不利温度下实体工程各结构层间黏结强度均满足设计要求。

关键词 钢桥面; 铺装结构; 高黏高弹改性沥青; 温度场监测; 层间黏结性能

中图分类号 U418.8; **文献标志码** A

Integration of Steel Bridge Deck Pavement Structure and Materials Based on Mechanical Response Analysis

LI Dong-xu¹, JIANG Zhao-wei^{2,3}, PENG Jian¹, LI Gao-jun^{2,3}, SUN Qiang^{2,3},

ZHANG Jin¹, LIU Heng-bin^{2,3*}

(1. Anhui Provincial Group Limited for Yangtze-to-Huaihe Water Diversion, Hefei 230601, China;

2. Shandong Transportation Institute, Jinan 250102, China;

3. Key Laboratory of Highway Maintenance Technology and Transportation (Jinan), Jinan 250102, China)

[Abstract] To solve the issue of insufficient durability for steel bridge deck pavement, two types of double-layer stone mastic asphalt (SMA) pavement structures were used as research objects. Firstly, the most unfavorable loading position of the typical bridge deck was determined through the finite element analysis method; and the mechanical response of the above two structures at this loading position was calculated, thus the optimal structural combination for steel bridge deck pavement and its design index requirements were proposed. Secondly, two types of high viscosity and elasticity modified asphalt (A and B) were prepared; and then, taking the road performance of asphalt binders and their mixtures as the evaluation criteria, effects of asphalt binder's types on the road performance of steel bridge deck pavement asphalt mixtures were compared, thus the asphalt binder with the best properties was selected. Finally, the bonding performance between the pavement layer and the steel plate was evaluated by using the indoor pull-out and oblique shear tests. Meanwhile, the bonding performance of the pavement layer under the most unfavorable temperature conditions was tested with the actual engineering. Test results show that the middle position is the most unfavorable load position on the steel bridge deck. Therefore, the tensile stress, vertical displacement, and bottom shear stress of the pavement layer at this location can be selected as the main design indicators for steel bridge deck pavement. In addition, the two designed pavement structures exhibit the consistent mechanical response patterns,

收稿日期:2023-12-14 修订日期:2024-07-09

基金项目:国家重点研发计划(18YFB1600103);引江济淮工程科技创新项目(YJJH-ZT-ZX-20220708485)

第一作者:李东旭(1984—),男,汉族,安徽颍上人,硕士,高级工程师。研究方向:工程项目管理、技术。E-mail:lidx@anyjjh.com.cn。

*通信作者:刘恒彬(1996—),男,汉族,山东滨州人,博士,工程师。研究方向:道路工程材料。E-mail:hbliu1996@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

among which the vertical displacement and layer bottom shear stress of structure 2 (SMA-13 + SMA-10 + asphalt mortar) are relatively smaller. As for the asphalt binders, comparing with SBS (styrene butadiene styrene triblock copolymer) modified asphalt, the prepared high viscosity and elasticity modified asphalt (A and B) have the better road properties, among which the road property of A modified asphalt is the best. The pull-out test results show that, under the temperature conditions of 25 °C and 60 °C, the bonding strength between the pavement layer and the steel plate can all meet the design requirements. The actual engineering test result show that temperature inside the pavement structure layer exhibits the periodic variation pattern, with the highest temperature not exceeding 60 °C. Therefore, the design index based on the interlayer bonding strength at this temperature is scientific and reasonable, and meanwhile, the interlayer bonding strength of various structural layers in the actual engineering meets the design requirements under this unfavorable temperatures.

[**Keywords**] steel bridge deck; pavement structure; high viscosity and elasticity modified asphalt; temperature field detection; interlayer bonding performance

钢桥具有重量轻、安装速度快、跨越能力大等优点,在世界范围内广泛使用。桥面铺装是钢桥结构的重要组成部分,其性能直接影响到钢桥的使用寿命和行车安全,因服役环境复杂,钢桥桥面铺装的结构和材料设计中通常需要兼顾多种性能^[1-4]。钢桥面铺装受车辆荷载剪切效应明显,其受力愈加复杂,容易出现裂缝、车辙、脱黏等病害,严重影响其服役性能,因此,钢桥面铺装结构和材料要求应满足力学和环境需求,宜进行专项一体化设计^[5-8]。

当前,研究人员对钢桥面沥青铺装开展了相关研究工作。杨健等^[9]分析了钢桥面沥青铺装的破坏原理,认为高温和重载是导致铺装层沥青混合料稳定性下降的主要因素;高博等^[10]总结了常见3种钢桥面铺装方案(双层 SMA、浇筑式 + SMA、双层环氧沥青混凝土)的特点、常见病害及维修方法,认为钢桥面铺装一旦产生开裂或破损,会迅速发展成为严重的病害;耿巍等^[11]分析了高寒强紫外线地区常见钢混组合梁桥面铺装方案在温度-荷载耦合作用下的力学响应和蠕变变形情况,发现铺装结构和材料是影响桥面铺装性能的重要因素;刘莲娟等^[12]研究分析了冬季极端气候条件下城市快速路钢桥面铺装的力学响应,并提出了“下层 3 cm 环氧沥青混凝土 + 上层 4 cm SMA”的钢桥面铺装方案;王民等^[13]分析了钢桥面浇筑式沥青铺装复合梁的疲劳损伤规律,发现材料模量、铺装厚度及荷载水平是影响复合梁疲劳损伤的重要因素;黄赛民等^[14]研究了移动荷载和温度耦合作用下钢桥面沥青铺装层的应力响应和车辙,发现混合料的弹塑性特征很好地缓解了荷载移动对铺装层钢板的影响,同时温度对混合料性能的影响不容忽视;张心攀^[15]等在对钢桥面铺装进行有限元模拟的基础上,推荐了“上面层 SMA-13(SBS) + 下面层 SMA-10(SBS)”的双层 SMA 钢桥面铺装结构组合形式;孙娇娜^[16]等以不同目数胶粉替代细集料,采用高掺量新型 SBS 改性剂对沥青韧性进行增强,研发了一种适用于钢桥面铺装的具有微变形吸收功能的沥青混合料;此外,

文献[17-23]对钢桥面铺装所用的沥青胶砂、树脂沥青混凝土、高黏沥青混合料、环氧沥青混合料及高模量高韧性沥青混合料性能进行了研究,为钢桥面铺装材料选择提供了有益参考。

综上,众多学者就钢桥面铺装技术开展了大量研究,且多为材料性能研究,然而对于钢桥面力学计算和材料及结构一体化设计的研究较少。现以解决钢桥面铺装层易出现推移、车辙、层间脱离等病害为目标,结合已有研究成果,借助有限元模拟手段,确定钢桥面铺装材料力学指标技术要求,在此基础上,对钢桥面铺装材料与结构进行一体化设计,并结合实体工程,对其实际服役性能进行验证。研究成果有助于为钢桥面铺装结构和材料一体化研究和工程应用提供理论指导,对于提升钢桥桥面铺装耐久性具有重要的现实意义。

1 钢桥面铺装荷载力学响应分析和结构设计

1.1 钢桥面铺装最不利荷载位置确定

为准确把握典型钢桥桥面沥青铺装层结构的受力特点,采用多尺度建模方法建立钢桥面铺装结构有限元模型。主梁为钢箱梁,顶板为桥面板,采用正交异性板设计。研究铺装力学控制指标的响应的梁段采用梁单元建模,研究铺装力学控制指标的响应的梁段采用板壳单元和实体单元结合建模,所建立钢箱梁有限元模型和正交异性板有限元模型如图 1 和图 2 所示。然后,计算复合结构在最不利荷载位置下的力学响应,作为分析钢桥面沥青铺装层主要技术要求的力学指标依据,其中沥青铺装层结构采用双层 SMA 铺装结构。

参考桥梁结构设计中的车队荷载加载方式,本文中采用公路-I级均布荷载 10.5 kN/m,集中荷载设置为 360 kN,沥青铺装层横向布置 8 车道,考虑横向折减系数为 0.97。选择主梁弯矩、铺装层层底拉应变和层间剪应力作为分析指标,确定钢桥面铺装结构最不利荷载位置。按照上述参数进行加载,所生成的力学响应影响线如图 3 所示。

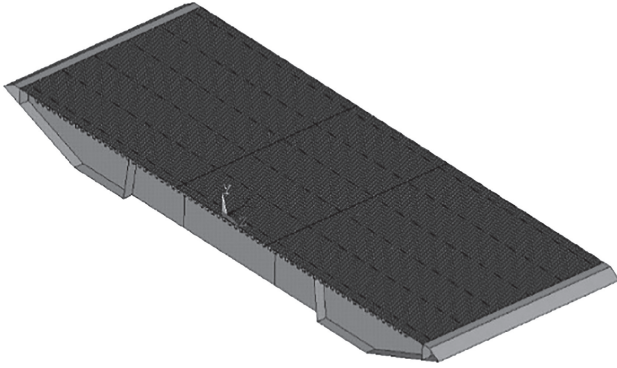


图1 钢箱梁有限元模型

Fig. 1 Finite element model of steel box girders

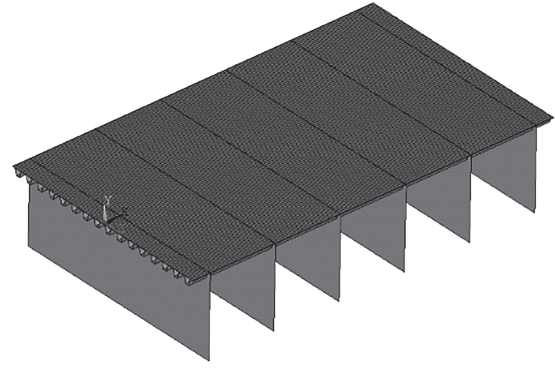


图2 正交异性板有限元模型

Fig. 2 Finite element model of orthotropic plate

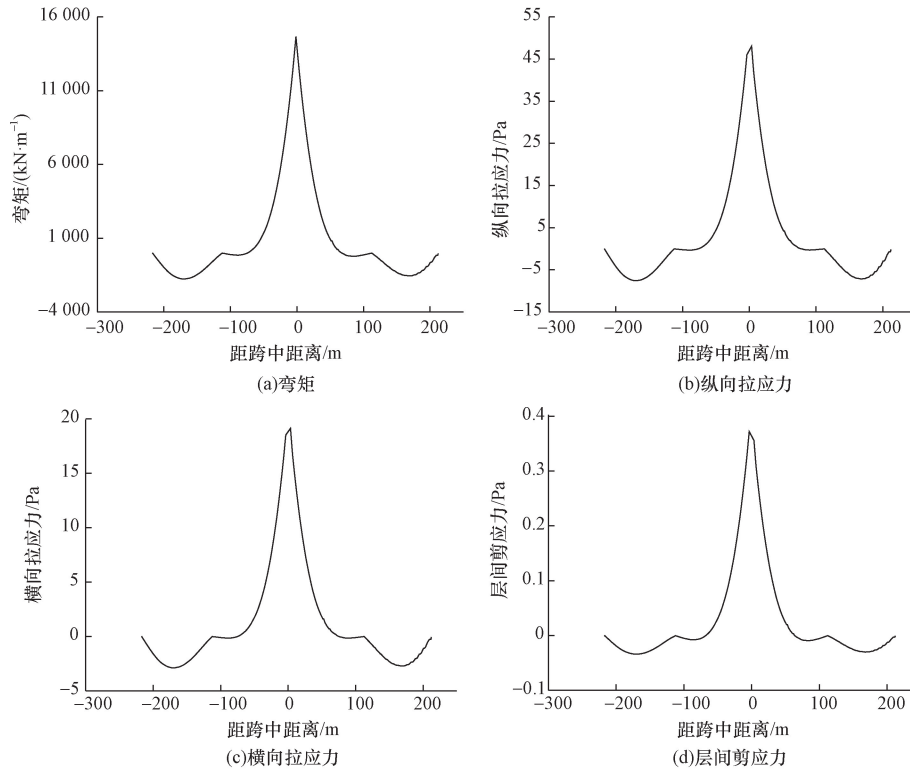


图3 钢桥面铺装复合结构力学响应影响线

Fig. 3 Mechanical response influence line of steel bridge deck paving composite structure

由图3可知,就钢桥梁结构弯矩值而言,荷载作用条件下,钢桥梁在跨中处所产生的弯矩值最大,同时,就沥青铺装层结构力学响应而言,其在跨中位置处的横向拉应力、纵向拉应力和层间剪应力同样达到最大值,即对于复合结构,沥青铺装层力学响应与主梁所受弯矩变现出一致的变化趋势,因此,跨中位置为钢桥面铺装的最不利荷载位置处,应按照影响线对钢桥面铺装复合结构跨中位置进行加载,进一步计算铺装结构层的力学响应值。

1.2 最不利荷载位置处铺装层结构力学响应分析

为分析最不利荷载位置处钢桥面铺装结构层力学响应值的变化规律,本文中设计两种铺装结构

组合形式(具体结构如表1所示),分别对其跨中位置进行加载模拟。计算过程中结构1铺装层弹性模量取10 000 MPa,结构2铺装层弹性模量取12 000 MPa,两种结构泊松比均取0.35。以铺装结构层的层底拉应力、上表面竖向挠度值及层间剪应力作为评价指标,分析不同铺装层厚度条件下铺装层结构的力学响应值变化规律,结果如图4所示。

表1 钢桥面铺装结构材料类型
Table 1 Material types of the steel bridge deck paving structure

结构	材料类型	胶结料类型
结构1	SMA-13 + SMA 10	普通 SBS 改性沥青
结构2	SMA-13 + SMA-10 + SMA-5	高黏高弹性改性沥青

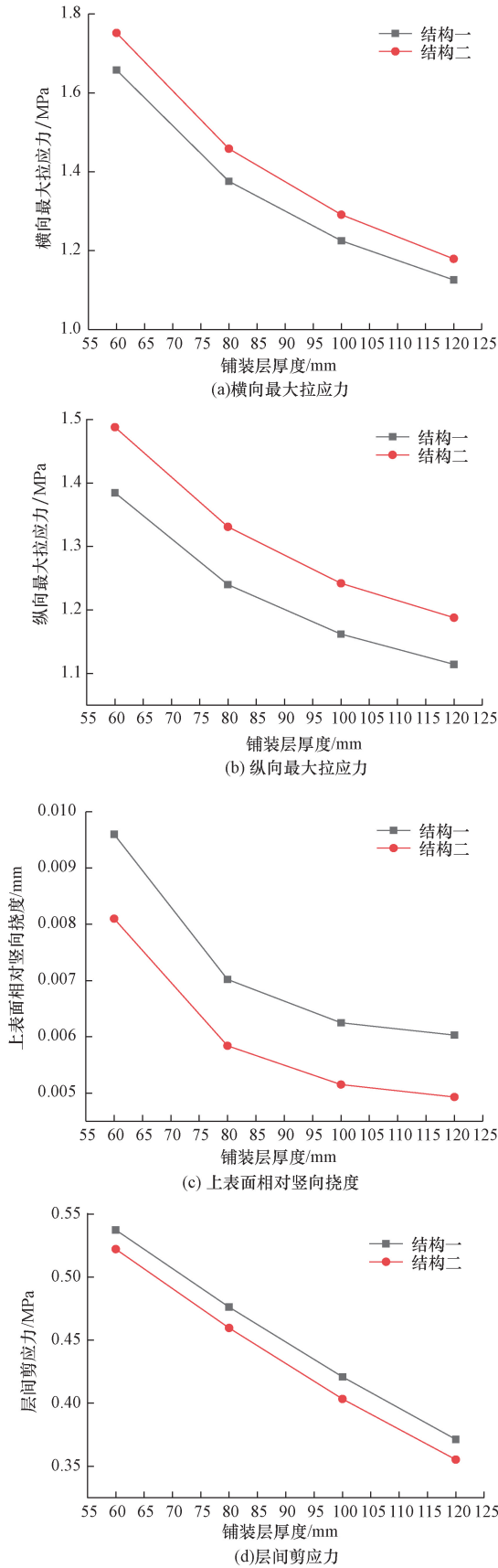


图4 两种铺装结构层的力学响应值

Fig. 4 Mechanical response values of two types of pavement structural layers

由图4可知,随铺装层厚度的增加,两种双层SMA桥面铺装层结构的层底拉应力、上表面竖向挠度值及层间剪应力值均不断减小,当铺装层结构厚度为60 mm时,铺装层结构的各项力学指标值达到最大值。此外,与铺装层结构1相比,铺装层结构2的竖向挠度和层间剪应力值较小,其具备良好的力学指标,因此本文中推荐选择结构2作为钢桥面的沥青层铺装结构。具体铺装结构方案如图5所示。

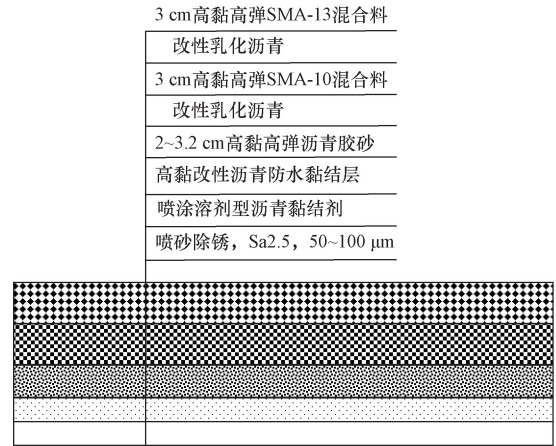


图5 推荐的钢桥面铺装结构

Fig. 5 The recommended schematic diagram of steel bridge deck pavement structure

1.3 钢桥面铺装层力学控制指标技术要求

通过上文最不利荷位力学响应分析,得到“双层SMA”铺装结构的力学响应值。为降低铺装结构产生疲劳破坏和永久变形风险,减小荷载局部效应,增强铺装层对荷载的扩散作用,应控制铺装层层顶竖向位移和铺装层表面最大拉应力。考虑后续试验环境和仪器影响,本文中各力学控制指标在常温条件下以安全系数为10进行推荐值选取,在高温条件下以安全系数为2进行推荐值选取,根据力学响应值得出双层SMA铺装材料技术要求,结果如表2所示。

表2 铺装材料及结构力学控制指标及技术要求建议值
Table 2 Structural mechanics control indicators and recommend values for the pavement materials

力学控制指标	材料及结构性能指标	材料及结构性能指标技术要求
最大拉应力	极限弯曲强度/MPa	≥10
最大竖向位移	车辙深度/mm	≤2.0
黏结层最大剪应力	25 ℃ 黏结层层间剪切强度/MPa	≥2.5
	60 ℃	≥0.4

2 胶结料类型对钢桥面铺装沥青混合料性能的影响

胶结料类型是影响沥青混合料路用性能的重

要因素,选择性质优异的沥青胶结料是保证钢桥面铺装层结构性能稳定的关键。为探究胶结料类型对钢桥面铺装层结构沥青混合料性能的影响,本文中制备两种高黏高弹改性沥青胶结料与普通 SBS 改性沥青胶结料,借助常规性能试验和流变学试验方法,对比分析不同胶结料类型的路用性质;在此基础上,成型对应的沥青胶砂和沥青混合料,对比分析不同类型沥青混合料的路用性能,优选性质优异的沥青胶结料。

2.1 沥青胶结料性能

与普通 SBS 改性沥青相比,高黏高弹改性沥青具有更高的黏性、弹性和韧性,其与集料之间的黏附性能更加优异,并且具有更好的高温性能和弹性恢复性能,考虑到钢桥面铺装层结构的性能要求,本文中 choice 高黏高弹改性沥青作为成型沥青混合料的胶结料。首先,选择 A、B 两种高黏高弹改性剂,通过高速剪切及搅拌工艺,室内制备 A、B 两种高黏高弹改性沥青;然后对其常规物理性能和流变性能进行测试,并与传统 SBS 改性沥青进行对比。根据流变性能和基本物理性能提升情况进行高黏高弹改性沥青比选研究。

2.1.1 常规物理性能指标分析

对 3 种改性沥青的针入度、延度、软化点和 60 °C 动力黏度进行测试,测试结果如表 3 所示。

由表 3 可知,两种高黏高弹改性沥青的针入度、软化点、延度与 60 °C 动力黏度值均明显高于 SBS 改性沥青,表明高黏高弹改性沥青具有更优异的高、低温性能,同时其与集料之间的黏附性能更好,由此可见高黏高弹改性剂的加入明显提升了沥青的综合路用性能。此外,A 高黏高弹改性沥青的各项指标均高于 B 高黏高弹改性沥青,表明 A 高黏高弹改性沥青性能更加优异。

表 3 高黏高弹改性沥青基本物理指标
Table 3 The basic physical indicators of high viscosity and elasticity modified asphalt

试验指标	A 高黏高弹 沥青	B 高黏高弹 沥青	SBS 改性 沥青
针入度 /0.1 mm	59	51	48
软化点/°C	95	90	82
延度/mm	53	50	45
60 °C 动力黏度/Pa	185 060	175 632	90 613

2.1.2 高温流变性能分析

相关研究表明,沥青传统性能指标多为经验性指标,其不能更为客观地表征改性沥青的路用性能,基于此,美国公路战略研究(Strategic Highway Research Program, SHRP)计划提出采用流变学试验

方法评价沥青的路用性能。本文中借助动态剪切流变仪,对不同类型改性沥青进行高温温度扫描试验,借助车辙因子 $G^*/\sin\delta$ (G^* 代表复数剪切模量, δ 代表相位角)指标对沥青的高温抗变形能力进行分析,测试温度区间范围设定为 58 ~ 94 °C,试验结果如图 6 所示。

车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 常用于表征沥青的高温抗变形能力, $G^*/\sin\delta$ 越大,则沥青材料的抗永久变形能力越好,其高温性能更加优异。由图 6 可知,随温度的升高,三种改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 均不断下降,说明沥青的高温抗变形能力降低。此外,在测试温度区间范围内,A、B 两种高黏高弹改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 明显高于 SBS 改性沥青,其中又以 A 高黏高弹改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 最大,说明 A 高黏高弹改性沥青的高温性能最好,对应混合料抵抗高温变形性能最好。

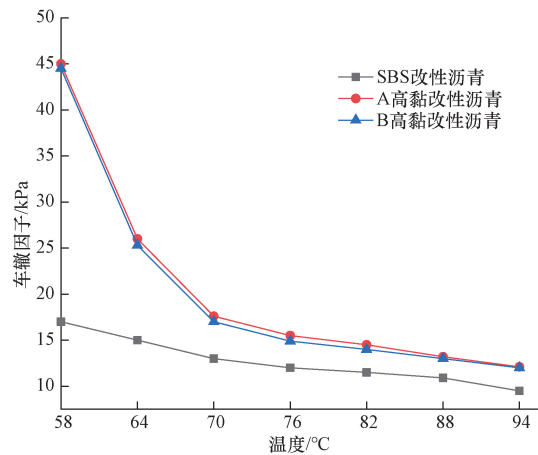


图 6 温度扫描测试结果

Fig. 6 Results of the temperature scanning test

2.1.3 低温抗开裂性能分析

为进一步分析不同类型改性沥青的低温抗开裂性能,参考美国国家公路与运输协会技术规程,对 3 种改性沥青胶结料进行低温弯曲梁流变试验,测试温度设定为 -12、-18、-24 °C,试验结果如表 4 所示。

劲度模量 S 可以反映低温条件下沥青在外部荷载下的变形能力,蠕变速率 m 指标可以反映沥青劲

表 4 沥青低温弯曲梁试验测试结果

Table 4 Results of the low-temperature bending beam test for asphalt

沥青类型	劲度模量 S /MPa			蠕变速率 m		
	-12 °C	-18 °C	-24 °C	-12 °C	18 °C	-24 °C
SBS 改性沥青	61	215	458	0.315	0.283	0.201
A 高黏沥青	36	85	160	0.375	0.315	0.215
B 高黏沥青	37	92	201	0.368	0.308	0.203

度模量随作用时间的变化速率, S 越小, m 越大,则同等条件下沥青的低温性能更加优异。由表 4 可知,两种高黏高弹改性沥青胶结料的 S 明显低于 SBS 改性沥青,同时其 m 明显高于 SBS 改性沥青,说明高黏高弹改性沥青的低温抗开裂性能优于普通 SBS 改性沥青,此外,同等条件下,A 高黏高弹改性沥青的低温抗开裂性能又明显优于 B 高黏高弹改性沥青。

2.2 沥青混合料性能

根据 1.2 节所设计的钢桥面铺装层结构类型,分别制备 SMA-5 沥青胶砂、SMA-10 及 SMA-13 沥青混合料,探究沥青胶结料类型对钢桥面铺装层沥青混合料路用性能的影响。

2.2.1 沥青胶砂混合料路用性能

对 3 种不同改性沥青制备的沥青胶砂混合料进行高温性能、低温性能和水稳定性性能试验,分析不同类型沥青胶砂混合料的路用性能,试验结果如表 5 所示。

由表 5 可知,两种高黏高弹改性沥青胶砂混合料的高温性能、低温性能及水稳定性性能均明显优于普通 SBS 改性沥青胶砂混合料,原因在于与普通 SBS 改性沥青相比,高黏高弹改性沥青具有更优异的黏弹性能,同时其与集料之间的黏附性能更好,由高黏高弹改性沥青制备的沥青胶砂性能更加稳定。此外,与 B 高黏高弹改性沥青胶砂相比,A 高黏高弹改性沥青胶砂的各项路用性能更加优异,这与沥青胶结料性质的差异密切相关。

表 5 沥青胶砂基本路用性能

Table 5 The basic road performance of asphalt mortar

试验指标	A 改性沥青胶砂	B 改性沥青胶砂	SBS 改性沥青胶砂
残留稳定度/%	86.9	85	83
冻融劈裂比/%	89.0	87	80
60 °C 动稳定度/(次·mm ⁻¹)	8 100	7 500	5 800
车辙深度/mm	1.8	1.9	2.3
-10 °C 低温弯曲应变/ $\mu\epsilon$	3 965	3 750	3 200

2.2.2 SMA 沥青混合料路用性能

为进一步探究沥青胶结料类型对混合料性能的影响,成型 SMA-10 及 SMA-13 沥青混合料,并对其常规路用性能进行测试,结果如表 6 所示。

由表 6 可知,由 A、B 两种高黏高弹改性沥青制备的 SMA-10 和 SMA-13 混合料动稳定度均超过 8 000 次,车辙深度均小于 2 mm,其明显优于普通 SBS 改性沥青制备的沥青混合料,此外,与 B 高黏高弹改性沥青混合料相比,由 A 高黏高弹改性沥青制备的两种混合料车辙深度最小,动稳定度最高,高温抗永久变形性能最好。同时,与 SBS 改性沥青制备的两种混合料相比,采用高黏高弹改性沥青制备的 SMA-13 和 SMA-10 水稳定性均有所提升,其中 A 高黏高弹改性沥青制备的两种混合料性能提升效果更为显著。此外,三种改性沥青制备的 SMA 型混合料的构造深度和摆值 (british pendulum number, BPN₂₀) 差距不大,表明高黏高弹改性沥青胶结料不会对混合料的抗滑性能产生较大影响。

综合考虑沥青胶结料及其混合料性能测试结果,A 高黏高弹改性沥青胶结料及其所制备的混合料性能最为优异,因此本文中建议选择 A 高黏高弹改性沥青作为钢桥面铺装层混合料的胶结料。

3 钢桥面铺装层层间黏结性能

钢桥面铺装结构层间黏结强度不足易导致铺装层产生推移和滑动等病害,因此确保结构层之间具有良好的黏结强度,是保证铺装体系耐久性能的关键。本文中采用室内剪切和拉拔试验评价沥青铺装层与钢板之间黏结性能,并结合实体工程和温度场监测,确定最不利温度条件,并对该温度条件下现场铺筑层的黏结性能进行检验。

3.1 铺装结构与钢板间黏结性能

沥青胶砂层与防水黏结层层间黏结强度优劣是确保铺装结构不发生推移破坏的关键,为分析铺装结构与钢板间黏结性能的优劣,室内成型钢板 + 防水黏结层 + A 高黏高弹改性沥青胶砂混合料复合试件,对其进行 25 °C 和 60 °C 温度条件下的拉拔和

表 6 SMA 沥青混合料路用性能

Table 6 The road performance of SMA asphalt mixture

试验指标	A 改性沥青 SMA-10	B 高黏高弹 SMA-10	SBS-SMA-10	A 高黏高弹 SMA-13	B 高黏高弹 SMA-13	SBS-SMA-13
残留稳定度/%	87.6	86	84	86.9	86	83
冻融劈裂比/%	88.9	85	80	89.0	85	82
60 °C 动稳定度/(次·mm ⁻¹)	8 300	7 900	5 600	8 100	7 650	5 900
车辙深度/mm	1.6	1.8	2.3	1.8	2.0	2.1
-10 °C 低温弯曲应变/ $\mu\epsilon$	4 170	4 000	3 560	3 965	3 800	3 456
构造深度/mm	0.72	0.70	0.71	0.86	0.80	0.84
摆值 BPN ₂₀	63	64	60	68	65	69

45°斜剪试验,借助拉拔强度和剪切强度指标评价层间黏结状况。试验过程如图7、图8所示,试验结果如表7所示。

由表7可知,25℃和60℃温度条件下沥青胶砂混合料和防水黏结层的剪切强度和拉拔强度均符合力学计算的控制指标要求。此外,当温度由25℃升高至60℃时,剪切强度和拉拔强度值急剧下降,说明钢桥面铺装层间的黏结性能受温度影响显著,但其数值仍满足力学指标控制技术要求。



图7 拉拔试验图
Fig.7 Pull-out test

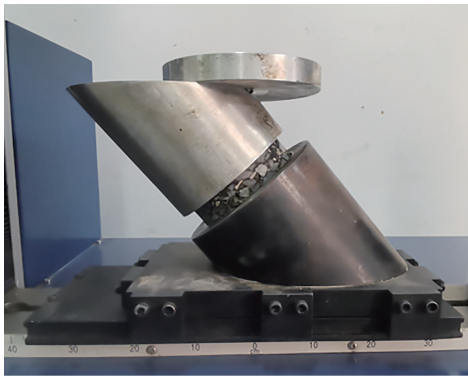


图8 斜剪试验图
Fig.8 Diagonal shear test

表7 沥青胶砂混合料与防水黏结层黏结强度
Table 7 Bond strength between asphalt mortar mixture and waterproof bonding layer

试验温度/℃	剪切强度/MPa	拉拔强度/MPa
25	2.7	0.82
60	0.49	0.37

3.2 基于实体工程温度场监测的钢桥面铺装层间黏结性能

钢桥面铺装结构和材料具有较强的温度敏感性,不同结构层之间黏结性能与温度变化密切相关,通过监测钢桥面铺装结构温度场变化,对确定

铺装结构层间强度参数和分析损坏形式的产生机理具有重要理论和现实作用。为进一步分析钢桥面铺装结构的层间黏结性能,对本文所设计的铺装结构和材料在某市政桥钢桥面铺装工程进行了应用,该钢桥属于国道跨河部分,有纵坡大、重载车辆多的特点,桥面铺装耐久保持难度较大。

为探究不利温度条件下钢桥面铺装层结构的层间黏结性能,在钢桥面铺装层表面、距道路表面3cm的上面层层底、距道路表面6cm的下面层层底、距道路表面8cm的沥青胶砂层底安装温度传感器,所布设的温度传感器可实时监测钢桥面铺装层间的温度变化。根据工程所在地温度资料,该地区在4—9月平均温度较高,因此本文中对该地区4—9月温度场数据进行汇总,温度平均值如图9所示。

由图9可知,钢桥面铺装结构层内部温度高于环境温度,距离道路表面3cm处和距离道路表面6cm处温度场数值接近,同时,8月份该地区温度场数值

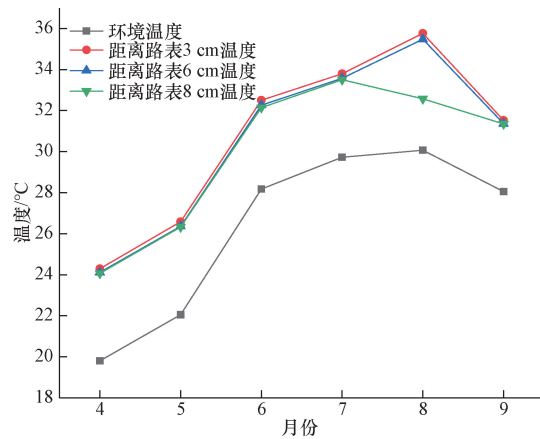


图9 温度较高月份温度场变化曲线
Fig.9 Temperature change curves in higher temperature months

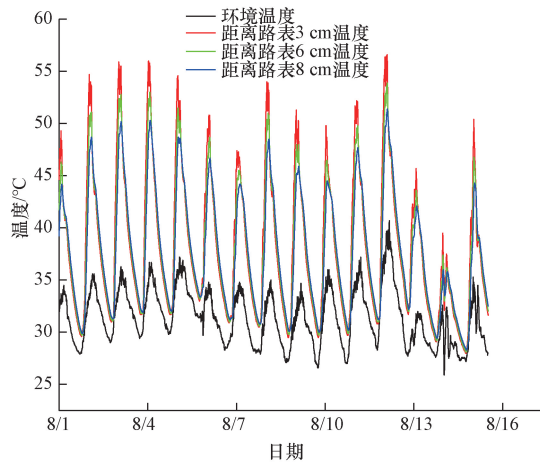


图10 8月温度场变化曲线
Fig.10 Temperature change curves in august

最大,对于钢桥面铺装结构层间黏结性能和高温抗变形性能最为不利。本文中进一步对8月上旬温度场进行分析,变化曲线如图10所示,可以看出温度场变化曲线呈现周期变化规律,结构层最高温度接近60℃,出现在距离道路表面3cm的上面层层底处,此时下面层层底和沥青胶砂层底温度均超过50℃,因此本文将60℃设定为工程所在地的最不利温度条件。

为探究不利温度条件下钢桥面铺装层结构的层间黏结性能,对工程现场已铺装结构进行取芯,对取芯试件进行60℃温度下的层间拉拔和剪切试验,结果如表8所示。

表8 现场取芯试样60℃剪切试验结果
Table 8 The shear test results of the on-site cored samples at 60℃

结构层位	上面层与下面层层间	下面层与沥青胶砂层间
剪切强度/MPa	0.65	0.56
拉拔强度/MPa	0.40	0.42

由表8可知,60℃温度条件下钢桥面铺装结构层间剪切强度均高于0.5MPa,拉拔强度均高于0.4MPa,测试数据满足本文中所推荐的技术指标要求,说明本文所设计的钢桥面铺装结构和材料可以解决该地区高温环境对铺装层间黏结性能的影响,同时能够预防层间推移等病害的产生。

4 结论

(1)根据钢桥面铺装特点,提出两种双层SMA钢桥面铺装结构,采用有限元分析方法确定钢桥面板最不利荷载位为跨中,应以铺装结构在跨中处的拉应力、竖向位移、层底剪应力作为钢桥面铺装的主要设计指标。

(2)有限元分析结果表明结构2(3cm SMA-13+3cm SMA-10+2cm SMA-5 沥青胶砂)的竖向位移及层底剪应力较小,推荐选择上述结构形式作为钢桥面的沥青层铺装结构。

(3)本文中所制备的高黏高弹改性沥青胶结料及其所成型的沥青混合料路用性能明显优于普通SBS改性沥青,其中又以A高黏高弹改性沥青性能更为优异,由其所制备的沥青混合料性能能够满足力学计算指标要求。

(4)拉拔试验测试结果表明,25、60℃温度条件下铺装层-钢板间黏结强度满足设计要求,同时,工程应用地区铺装结构层内温度呈周期性变化规律,最高温度未超60℃,以该温度层间黏结强度作设计指标科学合理,同时不利温度下实体工程各结构层间黏结强度均满足设计要求。

参 考 文 献

- [1] 徐鸣明,向顺琳,杨星皓,等. 钢桥面铺装层材料应用与发展[J]. 公路, 2022, 67(9): 44-50.
Xu Ouming, Xiang Shunlin, Yang Xinghao, et al. Application and development of steel bridge deck pavement materials[J]. Highway, 2022, 67(9): 44-50.
- [2] 杭京,杨利斌,沈建华. 钢桁架桥预防性养护技术研究[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 80-84.
Hang Jing, Yang Libin, Shen Jianhua. Research on preventive maintenance technology of steel truss bridge[J]. Zhongwai Highway, 2022, 42(3): 80-84.
- [3] 刘攀,盛兴跃,李璐. 钢桥面铺装组合结构的路用性能研究[J]. 公路工程, 2020, 45(1): 32-36.
Liu Pan, Sheng Xingyue, Li Lu. Study on road performance of steel bridge deck paving composite structure[J]. Highway Engineering, 2020, 45(1): 32-36.
- [4] 刘小清,王滔,王民. 钢桥面冷拌树脂铺装服役现状[J]. 公路, 2023, 68(4): 45-51.
Liu Xiaoqing, Wang Tao, Wang Min. Current service status of cold mixed resin pavement on steel bridge deck [J]. Highway, 2023, 68(4): 45-51.
- [5] 陈康明,黄卿维,吴庆雄,等. 采用预制-现浇UHPC板的钢桥面铺装受力性能研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(12): 130-143.
Chen Kangming, Huang Qingwei, Wu Qingxiong, et al. Study on mechanical performance of steel bridge deck pavement with prefabricated and cast-in-situ UHPC slab [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(12): 130-143.
- [6] 钟文健. 钢桥面铺装防腐层环氧富锌漆缺陷机理分析及控制[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(1): 104-108.
Zhong Wenjian. Mechanism analysis and control of defects in epoxy zinc rich paint for anti-corrosion coating of steel bridge deck pavement [J]. Journal of Wuhan University of Technology Transportation Science and Engineering Edition, 2022, 46(1): 104-108.
- [7] 付晓鹏,王民,常城,等. 高温重载条件下钢桥面浇注式沥青铺装结构优化设计研究[J]. 世界桥梁, 2023, 51(1): 100-107.
Fu Xiaopeng, Wang Min, Chang Cheng, et al. Optimization of gusset asphalt pavement on steel deck in high temperature environment and under heavy vehicle loads [J]. World Bridges, 2023, 51(1): 100-107.
- [8] 梁德章,王国清,王志斌,等. 多车激励下波形钢腹板连续梁桥沥青铺装动力学响应[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5744-5755.
Liang Dezhang, Wang Guoqing, Wang Zhibin, et al. Dynamic response of asphalt pavement of continuous girder bridge with corrugated steel webs excited by multiple vehicles [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(13): 5744-5755.
- [9] 杨健,高艳滨,郭书峰. 钢桥面沥青铺装层破坏原理分析及对策研究[J]. 公路, 2022, 67(8): 73-76.
Yang Jian, Gao Yanbin, Guo Shufeng. Analysis of the failure principle of asphalt pavement layer on steel bridge deck and research on countermeasures [J]. Highway, 2022, 67(8): 73-76.

- [10] 高博. 钢桥面典型铺装方案及其病害和维修方法[J]. 公路, 2012(7): 29-34.
Gao Bo. Typical paving scheme of steel bridge deck and its disease and maintenance method[J]. Highway, 2012(7): 29-34.
- [11] 耿巍, 任海生, 胡帮艳, 等. 高寒强紫外线地区钢混组合梁桥面铺装结构温度-荷载耦合作用分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(5): 557-566.
Geng Wei, Ren Haisheng, Hu Bangyan, et al. Analysis of temperature-load coupling effect of deck pavement structure of steel-concrete composite girder bridge in alpine and intensive ultraviolet region [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(5): 557-566
- [12] 刘莲娟, 张勳. 冬季极端气候下城市快速路钢桥面铺装力学响应[J]. 公路交通科技, 2021, 38(8): 44-49.
Liu Lianjuan, Zhang Meng. Mechanical response of steel bridge deck pavement on urban expressway in extreme weather in winter [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(8): 44-49.
- [13] 王民, 尚飞, 肖丽, 等. 钢桥面浇注式沥青铺装复合梁疲劳损伤规律分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 84-88, 102.
Wang Min, Shang Fei, Xiao Li, et al. Composite beam fatigue damage law of steel bridge deck gussasphalt pavement [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2021, 40(3): 84-88, 102.
- [14] 黄赛民. 移动荷载和温度耦合作用下钢桥面沥青铺装层应力响应与车辙[D]. 南京: 南京林业大学, 2024.
Huang Saimin. Stress response and rutting analysis of asphalt pavement layer on steel bridge deck under coupled action of moving load and temperature [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2024.
- [15] 张心攀. 双层 SMA 钢桥面铺装结构材料一体化研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
Zhang Xinpan. Integration research of material and structure of double-layer SMA steel bridge deck pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [16] 孙娇娜. 具有应变吸收功能的钢桥桥面铺装沥青混合料优化设计及力学性能研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 1358-1361.
Sun Jiaona. Study on optimal design and mechanical properties of asphalt mixture for steel bridge deck pavement with strain absorption function [J]. Building Structure, 2022, 52(S2): 1358-1361.
- [17] 唐咸远, 彭政玮, 湛文涛. 环氧树脂沥青在双塔不对称斜拉桥钢桥面铺装层的应用研究[J]. 公路, 2021, 66(8): 23-28.
Tang Xianyuan, Peng Zhengwei, Zhan Wentao. Application study of epoxy resin bitumen in steel deck paving layer of double-tower asymmetrical cable-stayed bridge [J]. Highway, 2021, 66(8): 23-28.
- [18] 任瑞波, 耿立涛, 王玉恒. 大型钢桥桥面铺装用高黏沥青混合料的研究[J]. 山东建筑大学学报, 2016, 31(5): 416-422.
Ren Ruiibo, Geng Litao, Wang Yuheng. Study on high viscosity asphalt mixture for deck paving of large steel bridge [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2016, 31(5): 416-422.
- [19] 郭忠宝. 季冻区钢桥面铺装高模量高韧性沥青混合料技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Guo Zhongbao. Research on high modulus and high toughness asphalt mixture technology for steel bridge deck paving in frozen area [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [20] 马世东. 大型钢-混组合梁桥桥面铺装用速溶型高黏沥青混合料的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
Ma Shidong. Study on instant high viscosity asphalt mixture for deck pavement of large steel-concrete composite girder bridge [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023.
- [21] 张林艳, 赵映琴, 封基良, 等. 环氧沥青混合料施工质量控制研究进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(20): 8577-8587.
Zhang Linyan, Zhao Yingqin, Feng Jiliang, et al. Research advances in construction quality control of epoxy asphalt mixture [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(20): 8577-8587.
- [22] 戴程琳, 张勳, 孙明志. 冻融作用对环氧沥青混凝土复合梁抗裂性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10917-10923.
Dai Chenglin, Zhang Meng, Sun Mingzhi. Effect of freeze-thaw on crack resistance of epoxy asphalt concrete composite beams [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10917-10923.
- [23] 张可强, 吴钊. 国产材料 PGA + AC 钢桥面铺装应用研究[J]. 公路, 2020, 65(1): 27-32.
Zhang Keqiang, Wu Zhao. Research on the application of domestic material PGA + AC steel bridge deck paving [J]. Highway, 2020, 65(1): 27-32.