

钢桥面沥青铺装车辙研究

饶志鹏¹,熊先达¹,何亮²,凌天清²,段亮¹

(1.江西省交通设计研究院有限责任公司,江西 南昌 330052;2.重庆交通大学 交通土工材料国家地方联合工程实验室,重庆市 400074)

摘要:钢桥面沥青铺装层车辙病害问题日益凸显,已不容忽视。综合近年来钢桥面沥青铺装车辙的研究现状与发展趋势,针对钢桥面沥青铺装层车辙类型与形成机理、车辙预估研究及车辙主要影响因素进行了详细剖析与总结,结果表明:较之于沥青路面,钢桥面沥青铺装层车辙主要为材料抗剪切能力不足引起的流动性车辙,不同铺装材料的车辙形成机理不同;在车辙预估研究方面,以 Bailey-Norton 与修正 Burgers 蠕变模型表征高温下铺装材料非线性行为的有限单元法已取得了一定的成果,但仍有诸多需改进之处;国内已形成了以“上层环氧+下层浇注”和“上层 SMA+下层浇注”为主流的优良抗车辙性能铺装结构,影响铺装层车辙发展的最主要因素有铺装材料性能、铺装层结构、温度、车辆荷载及施工质量,因此优化铺装材料与结构设计、严控重超载车辆及改善施工工艺质量应为今后延缓铺装层车辙发展的重要措施。研究结果可为钢桥面铺装层的抗车辙设计与后期维养工作提供参考依据。

关键词:钢箱梁桥;沥青铺装;车辙;影响因素分析;文献综述

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)09-0211-08

0 引言

正交异性板钢箱梁桥以其优越的跨越能力、造价低廉、耐震、便于机械化制造与施工等众多优势,近些年来倍受大跨径桥梁建设者的青睐。尽管钢箱梁桥拥有一系列优势,但也对其上的铺装体系带来了巨大的挑战^[1-2]。大多钢桥面铺装层在特殊的正交异性支撑方式、复杂的交通状况以及严苛的高低温考验等服役环境下,易导致在通车后不久便产生大量的早期病害,诸如车辙、裂缝、拥包、推移及粘结层失效等,其中车辙是铺装层最为普遍且影响最为深远的病害之一,形成的主要危害有^[3]:(1)减薄了铺装层厚度,严重降低铺装层强度,易诱发其他次生病害;(2)致使铺装层在雨天大量积水,削弱其抗滑性能,增大行车事故的发生几率;(3)降低铺装层平整度,大大增加车辆操纵的难度,影响乘车舒适性。严重的铺装层车辙“顽疾”已成为制约铺装层使用寿命的瓶颈,成为世界各国针对大跨径钢桥面铺

装层需攻克的重点难题,因此必须对钢桥面铺装层车辙进行深入研究,以提升铺装层使用性能,延长其服役年限。

钢桥面铺装体系一般由铺装层、粘结层及正交异性板等复合而成。在充分考虑各种铺装材料的优异特性之后,当前国内外铺装层主要是以环氧沥青混凝土、浇注式沥青混凝土、SMA(Stone Mastic Asphalt)及改性密级配沥青混凝土等材料组成的单层同质、双层同质及双层异质结构^[4],且前三类铺装材料在钢桥面铺装的应用中最为普遍。环氧沥青混凝土作为热固性沥青混合物,其模量大、强度高,易产生疲劳裂缝但不易形成高温车辙^[5-6],如表1所示。相比之下,浇注式沥青混凝土与 SMA 混合料的高温抗永久变形能力更差,通常为铺装层车辙的主要来源^[7-8],亦为目前钢桥面沥青铺装层车辙研究的关键所在。

目前国外对钢桥面铺装层车辙的研究较少,因为车辙并不是国外钢桥面铺装的主流病害。而近年来经过国内学者的不懈努力,在钢桥面沥青铺装层车辙问题的研究上已取得初步成果。因此,本文尝试对钢桥面沥青铺装层车辙类型与形成机理、铺装层车辙预估研究及影响铺装层车辙发展因素的研究现状进行详细梳理与深入分析,以期为解决钢桥面铺装层车辙问题的同类研究提供思路与参考。

收稿日期:2023-09-27

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52278440);中国教育国际交流协会中国-中东欧国家高校联合教育项目(2021090)

作者简介:饶志鹏(1991—),男,硕士,工程师,从事路面材料与结构研究工作。

表 1 三种主流钢桥面铺装材料早期病害情况^[8]

铺装类型		典型病害及原因分析
双层 SMA	车辙	铺装层沥青混合料高温稳定性不足,重载、超载严重
	开裂	铺装层沥青混合料疲劳破坏,钢桥面顶板较薄,重载、超载严重
	推移	钢桥面铺装黏结层强度不足,尤其是高温条件下黏结强度较低
浇注式	车辙	铺装层沥青混合料高温稳定性不足,重载、超载严重
	开裂	铺装层沥青混合料疲劳破坏,钢桥面顶板较薄,重载、超载严重
环氧沥青	鼓包开裂	施工过程中桥面铺装内部进入水分,高温膨胀,轮胎冲击作用
	纵向开裂	铺装层沥青混合料疲劳或强度破,重载、超载严重
	脱层开裂	钢桥面铺装粘结层强度不足或失效

1 铺装层车辙类型与形成机理

1.1 铺装层车辙类型

根据沥青路面领域的工程实践与理论研究成果,常见的沥青混凝土路面车辙一般分为三类^[3]:(1)磨损性车辙;(2)结构性车辙;(4)流动性车辙。磨损性车辙为自然环境与车辆轮胎磨损综合作用的结果,尤其是冬季结冰期载重车的防滑车链,更加重了沥青路面的磨损,增加磨损性车辙的深度,如图 1(a)所示。结构性车辙为当行车荷载超过沥青路面及路基各结构层强度时,各层发生的竖向永久变形的总和,通常宽度较大呈 U 字形,且周边不存在隆起现象,如图 1(b)所示。流动性车辙为荷载在铺装层内作用产生的剪切应力大于铺装材料的抗剪强度时,导致沥青发生流动的水平侧向永久变形,在路面表层不断累积后形成明显的 W 型车辙,如图 1(c)所示。



(a) 磨损性车辙 (b) 结构性车辙 (c) 流动性车辙

图 1 主要车辙类型^[3]

通常钢桥面沥青铺装的材料质量都较高,且施工工艺流程都控制得较为严格,抗磨耗性能较好。此外钢桥面铺装材料是利用中间粘结层铺筑在钢桥面板上的沥青薄层,一般只相当于沥青路面的上面层,其下没有基层、垫层及路基等多层坚实材料,且钢桥面板基本不发生永久变形。因此,钢桥面铺装层车辙类型主要为高温条件下荷载累积作用导致的流动性车辙,而无显著的磨损性车辙和结构性车辙。

1.2 铺装层车辙形成机理

在严格的材料质量与施工工艺的控制下,结合

铺装体系的特性,钢桥面沥青铺装层一般只产生流动性车辙,随着荷载作用次数的增加,形成过程依次包括压密阶段、塑性流动阶段及破坏阶段^[9],如图 2 所示。

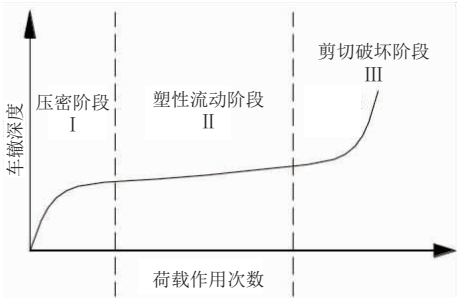


图 2 车辙深度发展曲线图^[9]

首先,沥青混合料是由沥青结合料、集料及空隙组成的非均质的多相材料,在碾压成型后内部隐伏大量的微孔隙,在荷载重复作用后微孔隙中的空气逐渐排出,孔隙体积不断减少,混合料压密变形大于其剪切变形,从而形成一定的竖向永久变形,轮迹带中心处混合料产生凹陷,但其两侧并未明显隆起。压密阶段一般发生在大桥建成通车后的 3~4 a 内。接着,在铺装层压密过程完成后,随着荷载作用的不断进行,沥青铺装材料逐渐产生塑性流动,轮迹带中心处的铺装层进一步凹陷,同时两侧也产生了明显的隆起。这本质上是由于铺装材料的抗剪切强度不足,荷载作用下铺装材料内的剪应力大于其抗剪强度,致使铺装层车辙深度不断加深。最后,经过前两个阶段的累积变形,在荷载的持续作用下,铺装层将出现超限的塑性永久变形,直至破坏。此时形成的永久变形值一般作为铺装层车辙深度的控制指标。以往研究表明,混合料塑性流动阶段的剪切变形对车辙的贡献最大。加州大学的 C.L.Monismith 与杨若冲等^[10]都对沥青路面进行了钻芯取样与剪切试验,并通过单轴和三轴压缩蠕变试验表明混合料剪切变形远大于其体积变形。因此,钢桥面沥青铺装层车辙主要形成于塑性流动变形阶段。

但对于不同类型的沥青铺装材料,其车辙的形成机理稍有不同。现场调查与室内车辙试验结果均表明,密级配沥青混凝土和 SMA 铺装层车辙的形成过程存在上述明显的 3 个阶段。而对于浇注式沥青混凝土而言,由于其理论空隙率为 0(实际小于 1%),因此混合料压密阶段对车辙的贡献基本可以忽略不计,其铺装层车辙主要是由于材料的抗剪切变形能力的不足。导致上述铺装层材料车辙形成机理差异的是沥青混合料结构类型与空隙率的不同^[10]。

综上所述,相比于普通沥青路面,钢桥面沥青铺装体系的结构特殊与材料性能优异,决定了其车辙多为荷载反复作用下的高温流动性车辙,而无其他两类车辙。铺装层流动性车辙的产生一般应历经压密阶段、塑性流动阶段及破坏阶段,其中塑性流动阶段最为主要,且温度越高,沥青铺装层的抗剪切能力越小,车辙越显著。由于结构类型与空隙率的差异,致使各种铺装材料的车辙形成机理略有不同,如浇注式沥青混凝土空隙较小,其车辙基本不存在压密阶段。因此,参照钢桥面沥青铺装层的车辙类型及其形成机理,应在设计阶段提高铺装材料的抗剪切变形能力(通过添加抗车辙剂等方式),并严格控制施工流程中的温度与压实度等工艺质量,以此作为限制铺装层车辙深度发展的有效手段。

2 铺装层车辙预估研究综述

自上世纪60年代交通量增长、超重载车辆大量出现后,世界各国的沥青路面车辙病害问题便日益凸显^[1],此后各国学者历经数十年的潜心研究,提出了以经验法、经验理论结合法、理论法为代表的3种传统的沥青路面车辙预估方法。至90年代,道路科研人员又提出了有限单元的车辙预估法,大大丰富了路面车辙预估工作的研究思路,提升了车辙研究工作的效率。

车辙是由于沥青混合料黏弹塑性的非线性行为导致沥青路面结构永久变形的结果,而分析发现,与前3种传统的车辙预估方法相比,有限元方法适用性广、针对性强、准确性高,考虑到了整个车辙区域,更合理地对路面结构的真实受力状态进行了模拟,有效地弥补了层状理论的不足。鉴于此,加之计算机技术的发展,运用ANSYS、ABAQUS及ADINA等有限元软件或自编程序来构建钢桥面铺装层车辙的预估模型、模拟铺装材料的非线性特征、进行有限单元法求解并最终获得车辙深度值的预估方法,为今后钢桥面沥青铺装层车辙预估的研究重点与发展趋势。

近年来国内利用有限元法对钢桥面铺装车辙进行预估的研究屡有报道,取得诸多成绩。在早期阶段,东南大学刘振清与张磊^[4,12]针对不同使用程度的热塑性沥青铺装层,采用ANSYS软件提供的时间硬化与Norton蠕变模型对铺装层的永久应变进行模拟,并结合层-应变法最终得到如式(1)所示的铺装层车辙预估模型。杨若冲^[13]采用运用有限元软件产生的弹塑性模型与蠕变模型,预估了超限运输条件

下的沥青铺装层车辙情况。早期对铺装层车辙预估研究的探索,一般仅针对铺装材料的非线性特性行为,而并未详加考虑铺装层的正交异性支撑方式、温度等因素对车辙预估的影响,其结果往往并不准确。

$$\Delta h = C_d \sum_{i=1}^n \varepsilon_{p-di} h_i (1 + K_L) \quad (1)$$

式中: Δh 为车辙深度,mm; C_d 为混合料综合修正系数; n 为铺装层亚层数; ε_{p-di} 为第*i*亚层应变, 10^{-6} ; h_i 为第*i*亚层应变的厚度,mm; K_L 为侧向隆起系数,取0.5。

其后,杨军^[14]与Luo^[15]采用ABAQUS软件提供了如式(2)所示的Bailey-Norton高温蠕变模型,并分别运用三轴重复加载试验与恒高度剪切疲劳试验确定了材料蠕变参数,构建了完整的铺装体系有限元模型,最终计算得到了铺装层车辙的深度值,但这仅仅是针对固定温度(60℃)下的车辙,与铺装层的实际状况仍存在差异。在此基础上,胡靖与钱振东^[16]、马雪城^[9]另外增加了对连续变温环境下的铺装层车辙的研究内容,分析了夏季高温条件下一天和一年的气温变化对铺装层车辙发展结果的影响,结果表明一天当中的10:00—16:00和一年当中的6—8月份导致了大部分的铺装层车辙,并建议此时段应对铺装层进行降温处理,以延缓车辙的发展。

$$\dot{\varepsilon}_c = A \sigma^m t \quad (2)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_c$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为轴向偏应力,MPa; t 为荷载累积作用时间,h; A 、 m 及 n 铺装材料蠕变参数,取决于温度与应力。

考虑Bailey-Norton模型对铺装层非线性行为的表征总体上过于简化、针对性较弱。李国芬等^[17]基于修正的Burgers模型预估了铺装层车辙的发展趋势,并利用单轴蠕变试验获得了其模型参数,计算了车辙深度的预估值并与实测值进行对比,发现两者仅相差5.51%,说明铺装层车辙预估结果较为准确。谢发祥等^[18]通过沥青铺装材料的贯入试验获得了基于修正Burgers模型的沥青混合料的黏弹性Prony参数,构建了铺装体系的ANSYS有限元模型,利用静力等效法预估了铺装层车辙深度并对比其实际车辙量,研究表明车辙预估结果均较为可靠,预估方法可推广应用于实际铺装层车辙的分析研究。

此外,章登精等^[19]基于沥青铺装材料的动稳定度与动态模量,通过系统分析温度、车速、行车道及汽车轮载之间的关系,并结合南京区域的超载情况,建立了长江四桥铺装层在设计年限内的车辙评估模型,如式(3)所示,并预测出其铺装层在2013年至

2022年内的累积车辙深度值为14.3 mm。Chen等^[20]依托嘉绍大桥建设项目,采用加速加载室内试验监测了ERS(Epoxy Resin System)钢桥面铺装系统的各项性能,结果表明ERS铺装层具有优异的抗车辙性能。对铺装层车辙的室内试验研究准确性较高,但存在耗费大、成本高、周期长等缺陷,且只针对特定铺装材料与结构,不利于其推广应用。

$$D=C \times C_t \times C_v \times C_w \times \sum_{i=1}^n (365 \times \frac{N_i}{DS}) \quad (3)$$

式中: D 为车辙深度,mm; C 为现场车辙与室内试验条件间差异的修正系数; C_t 为温度修正系数; C_v 为车速修正系数; C_w 为车道荷载修正系数; N_i 为第 i 年的日均当量轮次,次/d; DS 为复合件动稳定度,次数/mm。

综上所述,有限元预估法克服了层状理论的缺陷,能够对铺装层结构的受力状况进行真实的模拟,具有其他车辙预估方法难以比拟的优势,因此基于有限元法的钢桥面沥青铺装层车辙预估为当前的研究热点。多数研究运用ANSYS、ABAQUS等有限元软件提供的Bailey-Norton模型、修正Burgers模型等蠕变模型表征了沥青铺装层的非线性行为,通过单轴或三轴重复加载试验及恒高度剪切疲劳试验等获取了模型的蠕变参数,构建了包含正交异性钢板的铺装体系完整模型,最终计算出钢桥面沥青铺装层的车辙深度值。

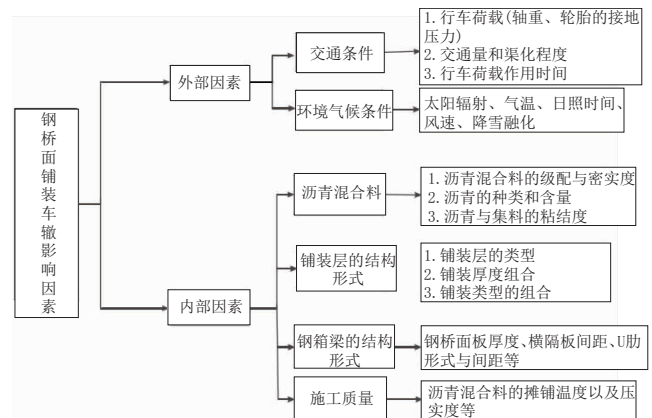
3 铺装层车辙影响因素

钢桥面沥青铺装层车辙的形成受众多因素影响,明确各种因素对铺装层车辙影响的正、负相关性及其影响程度,对从铺装体系设计的根源上杜绝和削弱车辙病害的发生至关重要,对后期针对铺装层车辙病害的维修养护也大有益处。纵观近些年的文献研究结果发现,影响钢桥面沥青铺装层车辙形成的因素无外乎外部环境因素与内部因素两大点。其中外部环境因素包括交通状况、环境气候等,内部因素如沥青混合料、正交异性板、粘结层及施工质量等,具体如图3所示。下面从铺装体系(沥青混合料、正交异性板及粘结层)、外界荷载(温度、重载及超载)与施工质量三方面主要因素对造成铺装层车辙影响的具体情况进行详细剖析与总结。

3.1 铺装体系

3.1.1 沥青铺装材料

沥青铺装材料的高温性能很大程度上决定了铺装层车辙的产生情况,因此需特别关注钢桥面铺装



常用的热塑性沥青混合料(浇注式沥青混凝土与SMA)的高温性能状况。

(1) 沥青结合料

浇注式沥青混凝土结合料一般由普通沥青或改性沥青与特立尼达湖沥青(TLA, Trinidad Lake Asphalt)混合而成,罗桑、钱振东等^[21]分别选用30#、70#沥青及SBS改性沥青与TLA按一定比例配制成三种结合料,并研究了三种结合料性能及其浇注式沥青混凝土性能,结果表明TLA掺量越大,结合料软化点越高、针入度与延度越小,可见TLA掺量的增大可以显著改善浇注式沥青混合料的高温性能。三种结合料中,30#沥青+TLA浇注式沥青混凝土的高温性能较好,SBS改性沥青+TLA浇注式沥青混凝土的拉伸变形能力较好。万涛涛^[22]得到各种沥青胶浆的抗变形能力为:70#沥青<70#+TLA沥青<SBS改性沥青<SBS+TLA沥青<TLA沥青。

王宏畅、李国芬等^[23]研究发现,浇注式沥青混凝土动稳定度随含油量增大而减小,即含油量的增大削弱了其高温性能^[24]。杨娥^[25]对比了沥青结合料短期老化前后的车辙因子,发现其老化过程大幅度增大了车辙因子、增强了结合料的抗车辙性。张华、钱觉时^[26]与张顺先^[27]发现浇注式沥青胶浆的抗车辙性能随粉胶比(即矿粉与沥青之比)的增大而增大。

(2) 矿料级配

侍冬前^[24]选用了细级配、中级配及粗级配三种矿料级配,利用车辙试验与贯入度试验研究了矿料级配对浇注式沥青混凝土高温性能的影响,结果发现其动稳定度增大、贯入度减小,但贯入度变化并不大,说明浇注式沥青混凝土的高温性能受级配影响程度并不大^[28]。赵国云等^[29]依据沥青胶浆理论,通过室内试验分析了矿料级配和棱角性对浇注式沥青混凝土高温性能的影响,分析结果表明其高温性能随

4.75 mm 筛孔通过率的增大而提升,随 2.36 mm 和 0.075 mm 筛孔通过率的减小而提升。因此集料棱角性越好、形成的嵌挤结构越高,混合料抗车辙性能越好。另有研究显示,随着车辙的发展,铺装材料中矿料间密实嵌挤结构的形成会迟滞车辙的进一步发展^[17]。

(3)外掺剂

添加外掺剂通常作为改善沥青混合料性能的常用手段之一。向源等^[28]选取了路强剂与 Domix 两种抗车辙剂掺入浇注式沥青混凝土,并与未掺外掺剂的混合料进行对照,结果显示路强剂与 Domix 分别改善和削弱了混合料高温性能。因此采用抗车辙剂提升铺装层的抗车辙性能时,务必选取正确的、改善作用显著的优良抗车辙剂,否则可能适得其反。

(4)铺装层结构

经过科研人员不断探索,综合各类铺装材料的优势、多种材料组合结构的铺装层型式逐渐受到道路工程界的关注与使用。李国芬等^[17]基于南京长江四桥的“上层高弹改性 AC+ 下层浇注式”铺装结构,发现下层浇注式沥青混凝土为车辙的主要贡献者,占总车辙深度值的 63%,这主要是由于浇注式沥青混凝土模量相对较小所导致的。铺装层厚度越大,其造成的车辙越大,在铺装层总厚度不变的情况下,由于浇注式沥青混凝土粗集料对上层的支撑作用,减小下层厚度则总车辙厚度也将减小。

环氧沥青混合料强度较高,浇注式沥青混凝土协同变形能力较好,胡靖、钱振东等^[16]因而采用子模型和多尺度有限元方法,研究了高温下“上层环氧+下层浇注”铺装结构的力学特性与车辙性能,结果发现总车辙值为 0.32 mm,其中浇注式混凝土贡献的车辙占比超过 90%,环氧沥青混合料的车辙较小。“上层环氧+下层浇注”铺装结构充分发挥了各自的材料优势,具备良好的高温抗车辙性能。

罗桑等^[30]利用环氧与浇注式沥青混凝土组合出 5 种铺装结构,对比了 5 种铺装结构的永久变形情况,结果如表 2 所示。结果表明,在“环氧+浇注”组合铺装结构中,浇注式沥青混凝土总是为车辙的主要贡献者,最高可达 99.53%;在双层同质铺装结构中,上层浇注与上层环氧的车辙贡献率分别为 71.49%和 87.89%,即车辙主要形成于上层,故浇注式沥青混凝土不应作为铺装层上层结构。

目前常用的浇注式沥青混凝土有两类,分别为英国浇注式 MA(Mastic Asphalt)与德国浇注式 GA(Guss Asphalt),两者的主要区别在于生产工艺不

表 2 五种铺装结构车辙情况

类型	总车辙 深度 / mm	上层		下层	
		车辙深 度 /mm	贡献 率 /%	车辙深 度 /mm	贡献 率 /%
①双层 6 cm 浇注	4.12	2.94	71.49	1.17	28.51
②下层 3 cm 环氧 + 上层 3 cm 浇注	1.97	1.96	99.53	0.01	0.47
③下层 3.5 cm 瓷注 + 上层 2.5 cm 环氧	0.68	0.03	4.79	0.64	95.21
④下层 3 cm 浇注 + 上层 3 cm 环氧	0.21	0.02	8.20	0.19	91.80
⑤双层 6 cm 环氧	0.01	0.009	87.89	0.001	12.11

同,但均具备粗集料少、细集料多及沥青多、高温下自流成型的特性,因此两者均被称为 MA 类铺装材料^[31-32]。卢姝杰等^[33]依托港珠澳大桥,将以 GA 工艺尝试替代 MA 工艺所配制的铺装材料定义为 GMA,并利用加速加载试验研究了 MA+SMA 与 GMA+SMA 的抗变形能力,结果发现 GMA 的抗车辙能力优于 MA,表明以 GA 工艺替代 MA 工艺是可行的。车辙的产生主要是由于 SMA 被压入了 GMA/MA 中,车辙深度主要取决于 GMA/MA 铺装层。

此外,很多研究也表明,撒布一定数量的沥青预裹碎石在铺筑成型的浇注式沥青混凝土表面,可以极大地改善其高温稳定性。但当沥青预裹碎石数量达到 12 kg/m² 后,其稳定度未有明显改善^[34]。

综上所述,沥青结合料、矿料级配、外掺剂及铺装层结构等因素,均能在不同程度上影响沥青铺装层车辙的发展,其中沥青结合料与铺装层结构对车辙的影响尤为显著。研究表明 TLA 掺量对浇注式沥青混凝土的高温性能具有决定性影响,TLA 掺量的提升能大大改善浇注式混凝土的抗车辙性能。以“上层环氧+下层浇注”和“上层 SMA+ 下层浇注”为主要的双层异质铺装结构是当前大跨径钢桥铺装层用料的首选^[30,35-36],其高温下抗变形能力优良,形成的车辙深度较小,且主要集中于浇注式沥青混凝土。从设计角度考虑,采取对沥青结合料参配适量的优质 TLA 沥青、选取棱角性能好的集料、控制沥青混合料含油量、添加抗车辙剂等措施,可以限制或延缓钢桥面沥青混合料铺装层车辙病害的发展。

3.1.2 正交异性板

沥青铺装层以正交异性板为载体,特殊的正交异性是致使钢桥面铺装层较之于沥青路面,更是易产生病害(车辙、疲劳裂缝等)的关键所在。正交异性板主要由钢桥面钢板、纵向加劲肋与横隔板组成,各个组成部分的几何尺寸及间隔距离与铺装层的车辙

性能息息相关。

杨军等^[14]研究了钢桥面板厚度在4个特征值(12、14、16、18 mm)情况下的铺装层车辙变化,结果显示其车辙深度分别为3.904、3.893、3.880、3.867 mm,车辙深度随钢桥面板厚度增加而逐渐下降,但总体来说影响并不明显。同时,增大钢板厚度也增加了桥梁自重,对整个桥梁结构也有负面影响。另外,铺装层车辙深度并不受横隔板间距的影响,当改变横隔板间距后,车辙深度基本维持不变。总体而言,正交异性板几何参数对铺装层车辙深度的影响较小。

3.1.3 粘结层

性能良好的粘结层是使铺装层与钢桥面板协调变形、共同受力的关键,因此对粘结层性能的研究历来为桥面铺装人员所关注^[37-38]。如果粘结层失效,将造成铺装层和钢桥面板无法协同工作,在荷载作用下正交异性的钢桥面板会形成极为复杂的受力情况,将直接导致其上的铺装层无法承受巨大的拉应力作用,产生拉裂和滑移现象,进而引发或加剧铺装层的车辙病害^[10]。虎门大桥就曾因粘结层失效而加剧了其车辙病害的发展。

3.2 外界荷载

外界荷载是导致铺装层病害的最直接和最主要的因素,荷载作用越大、越频繁,造成的铺装层病害就越严重。我国复杂多变的气候(温度、水分等荷载)与屡禁不止的超载,是危害大跨径钢桥铺装层的“超级杀手”。

3.2.1 温度荷载

目前绝大多数车辙,是由于高温下沥青铺装层的抗剪切变形能力不足而导致的。沥青混合料是典型的温度敏感材料,温度的改变会直接影响其模量的变化,触发铺装层车辙的形成。温度越高,铺装层模量越小,其抗剪切变形能力越弱。大跨径钢桥在日常运营通车过程中,环境温度决定了其铺装层内部的温度变化趋势,进而也决定了车辙的发展。如图4所示,铺装层车辙的发展主要集中于6、7、8、10月,其中又以7、8月最为突出,这是由于气候温度的升高导致铺装层内温度随之变化,加剧了车辙的发展^[9]。

3.2.2 车辆荷载

随着近些年我国经济社会建设的迅猛发展,路面交通量日益增长,重载、超载现象更是屡禁不止,这对沥青路面和桥面铺装的影响是毁灭性的。重载直接导致了车辆轴载与接地压力的增大,研究发现

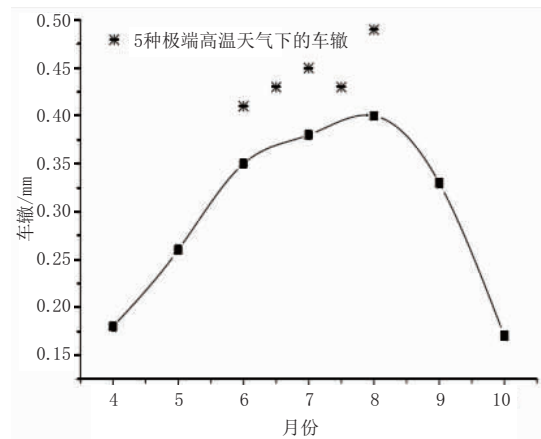


图4 各月份铺装层车辙变化情况^[9]

同样作用50万次,轴载由100 kN变化至250 kN后,其铺装层出现车辙的涨幅高达80%^[9]。张晨阳采用了COMSOL软件分析了重载条件下沥青铺装层的永久变形情况,分别在0.7、0.9、1.1、1.4 MPa的接地压力的影响下,车辙深度值由0.6 mm加深为1.3 mm,增长了近120%^[39]。

王民等^[40]依托马鞍山长江公路大桥,研究了“浇注式+SMA”组合铺装结构的车辙发展,并建立了组合铺装结构的有限元模型,分析了温度及荷载等相关因素对车辙深度的影响。结果表明,车辙深度与荷载作用次数和温度分别呈对数函数与幂函数关系,且相关性显著,如式(4)所示。运用该车辙预估模型计算可知,该桥铺装结构在达到设计寿命15 a时的车辙深度为2.354 mm。

$$R_D = 0.00121 \ln(N) T^{1.58} (\tau/\tau_0)^{0.472} \quad (4)$$

式中: R_D 为车辙深度,mm; N 为荷载作用次数; T 为温度,℃; τ/τ_0 为抗剪性能参数。

综上所述,外界荷载中的温度与车辆荷载对车辙影响较大。沥青混合料的感温性能决定了其在高温条件下抗变形能力不足,进而导致车辙的不断发展。车辆荷载越大、车速越慢,铺装层的车辙破坏越严重^[41],荷载位置也对铺装层车辙存在一定的影响。

3.3 施工工艺质量

沥青混合料的拌和时间、拌和温度及施工压实度,均对铺装层车辙有不同程度的影响。由于浇注式沥青混凝土的施工拌和温度较高(200~240℃),会导致其产生短期老化,有利于铺装层抗变形能力的提升。由陈剑华的研究^[42]可知,拌和5 h后,拌和温度由200℃升至240℃,沥青混合料的动稳定度会增大数十倍,说明拌和时间越长,动稳定度也越大。这是由于拌和温度的升高与拌和时间的延长,导致了浇注式沥青的老化热氧化反应,并加剧了沥青中活

泼官能团氧化反应的速率。老化后沥青模量增大,其高温抗变形能就越强。

但是老化温度越高、时间越长,沥青的老化程度就越高,直接降低了沥青铺装层的质量均匀性与耐久性。因此,施工时应结合铺装材料的各方面性能,确定合理的拌和温度与时间,不可过度升高温度或延长拌和时间,否则将会对沥青混合料的整体性能产生负面影响。

4 结 语

与沥青路面相比,钢桥面沥青铺装层车辙类型主要是以高温下抗剪切变形能力不足导致的流动性车辙为主。各种沥青铺装材料车辙的形成机理略有差异,密级配沥青混合料与 SMA 铺装层车辙破坏存在明显的压密阶段、塑性流动阶段及剪切破坏阶段,而浇注式沥青混凝土由于其实际空隙率小于 1%,其车辙形成过程中几乎不存在压密阶段。

目前主流的钢桥面沥青铺装层车辙预估方法有加速加载试验法和有限元法。加速加载试验周期长、耗费大、成本高,一般只针对特定铺装材料与结构,不利于推广应用。采用 Bailey-Norton 与修正 Burgers 等蠕变模型、表征高温下沥青铺装层非线性行为的有限单元求解法适用性较好,已取得了一定成果。车辙预估有限元法模拟条件应力与其实际服役环境相贴合,今后可考虑从以下几点提升车辙预估结果的准确性:(1)以实际车轮动载替代目前过于简化的静载;(2)考虑高温环境下密闭钢箱梁的保温效应对铺装层温度场的影响;(3)避免铺装体系内层间完全连续的假设,构建真实的层间接触状态。

(3)分析结果表明,影响钢桥面沥青铺装层车辙的主要因素有:铺装体系(沥青铺装材料、正交异性板与粘结层)、外界荷载(温度与车辆荷载)及施工质量等,其中沥青铺装材料与结构、粘结层性能、外界荷载及施工质量的影响较大。目前国内已形成了以“上层环氧+下层浇注”和“上层 SMA+ 下层浇注”为主、具备优良抗车辙性能的铺装结构。未来可从以下几方面预防沥青铺装层的车辙病害:(1)加大沥青铺装材料高温下抗变形性能的研究力度,优化铺装层材料设计,探索抗车辙性能最佳的复合铺装结构;(2)严格管控重载及超载车辆,从限制车辆荷载的层面延缓铺装层车辙发展;(3)改善铺装层的施工工艺质量,寻求合理的铺装材料拌和温度、拌和时间及拌和机械。

参考文献:

- [1] Pelikan W, Esslinger M. Diestahlfahrbahn berechnung undkonstruktion[J]. M A N Forsch-Hft, 1957(7):305-345.
- [2] Huang W, Qian Z D, Cheng G, et al. Epoxy asphalt concrete paving on the deck of long-span steel bridges[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(21):2391-2394.
- [3] 王勇.大跨度复合浇注式沥青混凝土钢桥面铺装车辙预估研究[D].南京:南京林业大学,2014.
- [4] 刘振清.大跨径钢桥桥面铺装设计关键技术研究[D].南京:东南大学,2004.
- [5] 饶志鹏,何亮,李冠男,等.钢桥面铺装疲劳性能研究综述[J].公路, 2018, 63(9):18-27.
- [6] 关永胜,迟占华,宗海.大跨径钢桥桥面铺装早期病害分析及对策[J].中外公路,2005(6):99-102.
- [7] 王金生.钢桥面浇注式沥青混凝土铺装病害分析及对策[D].南京:东南大学,2005.
- [8] 谢伟伟.钢桥面铺装病害分析及修复材料研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [9] 马雪城.高温重载下钢桥面铺装车辙预估研究[D].南京:南京林业大学,2017.
- [10] 杨若冲,程刚.钢桥面铺装车辙破坏机理及成因分析[J].公路,2004(3):52-55.
- [11] 黄晓明,张晓冰,邓学钧.沥青路面车辙形成规律环道试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2000(5):96-101.
- [12] 张磊,刘振清,黄卫.钢桥面热塑性沥青混合料铺装车辙预估方法[J].公路交通科技,2005(12):84-87.
- [13] 杨若冲.超限运输对钢桥面铺装使用性能影响的研究[D].南京:东南大学,2004.
- [14] 杨军,丛菱,朱浩然,等.钢桥面沥青混合料铺装车辙有限元分析[J].工程力学,2009,26(5):110-115.
- [15] Luo S, Lu Q, Qian Z D, et al. Laboratory investigation and numerical simulation of the rutting performance of double-layer surfacing structure for steel bridge decks[J]. Construction & Building Materials, 2017(144): 178-187.
- [16] 胡靖,钱振东,杨宇明.GA+EA 钢桥面铺装复合结构的高温性能与力学特性[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(5): 1946-1952.
- [17] 李国芬,王宏畅,王勇,等.基于修正 Burgers 模型的钢桥面铺装车辙有限元分析[J].林业工程学报,2016,1(5):120-125.
- [18] 谢发祥,高翔,章登精,等.考虑钢桥面板铺装层黏弹性特性的车辙计算[J].林业工程学报,2019,4(2):126-132.
- [19] 章登精.复合浇注式钢桥面铺装车辙评估模型研究[J].中国工程科学,2013,15(8):63-69.
- [20] Chen F, Zhong K, Wei X H. Pavement evaluation for ERS steel deck pavement using accelerated loading test[J]. Key Engineering Materials, 2017(744):97-104.
- [21] 罗桑,钱振东,王汇.钢桥面铺装用浇注式沥青结合料的制备与试验研究[J].石油沥青,2011,25(1):32-35.
- [22] 万涛涛.浇注式桥面铺装材料高温性能研究[D].广州:华南理工大学,2013.

[23] 王宏畅,李国芬,章登精.浇注式沥青混凝土性能影响因素研究[J].中国工程科学,2013,15(8):70-74.

[24] 侍冬前.浇注式沥青混凝土高温稳定性研究[D].南京:南京林业大学,2013.

[25] 杨娥.掺量对 TLA 混合沥青的高温性能影响和应用研究[D].广州:华南理工大学,2014.

[26] 张华,钱觉时,吴文军.粉胶比对浇注式沥青胶浆高低温性能的影响[J].重庆大学学报,2009,32(6):663-667.

[27] 张顺先. 江阴长江大桥钢桥面铺装层改性沥青浇注式砼的组成与性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.

[28] 向源,赵新美,闫东波,等.浇注式沥青混凝土高温稳定性影响因素分析[J].中外公路,2009,29(5):236-238.

[29] 赵国云,邵强,闫东波.钢桥面铺装浇注式沥青混合料级配性能[J].公路交通科技,2013,30(6):75-81.

[30] 罗桑,钟科,钱振东.钢桥面复合铺装结构永久变形预估[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(3):397-401.

[31] M. Karahin. Anisotropic Characteristics of Granular Material[J]. Proceedings of the Fifth International Symposium on Unbound Aggregates in roads,2000:139-142.

[32] BS1447:1988, Specification for Mastic Asphalt for roads, footways and paving in building[S].London: British Standards Institution, 1988.

[33] 卢姝杰.钢桥面 MA 类铺装加速加载试验高温性能研究[D].广州:华南理工大学,2013.

[34] 魏祎.复合浇注式沥青钢箱梁桥面铺装设计研究[D].南京:东南大学,2015.

[35] 容洪流. 港珠澳大桥 MA 类浇注式沥青钢桥面铺装加速加载试验研究[D].广州:华南理工大学,2018.

[36] 王民,方明山,张革军,等.港珠澳大桥钢桥面沥青铺装结构设计[J].桥梁建设,2019,49(4):69-74.

[37] 何亮,饶志鹏,凌天清,等.大跨径钢桥沥青铺装层裂缝行为研究进展[J].公路,2018,63(7):71-81.

[38] 李书亮,朱定,刘攀,等.港珠澳大桥钢桥面铺装防水粘结层粘结强度试验研究[J].世界桥梁,2019,47(4):64-69.

[39]张晨阳.基于 COMSOL 的钢桥面铺装层温度与荷载耦合分析[D].南京:东南大学,2018.

[40] 王民,肖丽,胡德勇,等.钢桥面浇注式 +SMA 组合结构车辙变形深度预估[J].中国公路学报,2021,34(6):10-18.

[41] 江山.复合浇注式沥青混凝土钢桥面铺装车辙预估[D].南京:东南大学,2021.

[42] 陈剑华.MA 用混合沥青触变及老化特性的多尺度研究与应用[D].广州:华南理工大学,2015.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿邮箱:cdq@smedi.com

电话:021-55008850

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com>