

基于撒布磨耗料的SMA沥青路面早期抗滑性能改善研究

江照伟^{1,2}, 韦金城^{1,2}, 刘航³, 孙强^{1,2}, 李夏^{1,2}

(1. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250031; 2. 高速公路养护技术交通行业重点实验室(济南), 山东 济南 2500313;
3. 山东高速股份有限公司, 山东 济南 250014)

摘要:针对SMA-13路面早期抗滑性能不佳的现象,分析已有研究成果并实体检测,发现大构造路面不能提供良好的早期抗滑性能检测值。基于撒布磨耗料的原理,提出了两种改善SMA路面早期抗滑性能的方法,确定磨耗料粒径为2.36~4.75 mm,撒布量为0.82 kg/m²,验证了方法的安全性。检测结果表明:两种方法均可小幅提高摆式抗滑系数,方法2改善保证率更高;方法1实施后动态摩擦系数、横向力系数提升10%、13.2%,横向力系数仍不能满足要求,方法2使动态摩擦系数、横向力系数上升73.2%、77.8%;两种方法均使构造深度降低,但仍维持在0.8 mm以上,认为构造深度并非越大越好,宜设置上限以保证初始抗滑性能。两种方法对路面长期抗滑性能的影响还需研究。

关键词:SMA沥青路面;抗滑性能;磨耗料;摆式抗滑系数;动态摩擦系数;横向力系数

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

SMA沥青路面以优异的高低温及水稳性能被越来越多地应用于高等级路面表面层,因需要为车辆高速行驶提供安全保证,SMA沥青路面的抗滑性能也是广大研究者关注的对象。通常认为,基于高标准原材料要求和间断级配设计的SMA混合料在微观和宏观层面均能提供良好的抗滑性能,但服役早期的SMA沥青路面却表现出横向力系数(C_{SFC60})合格率低的现象。

不少学者已针对SMA路面早期抗滑性能展开研究,娄禹岚^[1]对已通车的高速公路进行了为期6个月的跟踪检测,发现检测期间路面动态摩擦系数(C_{DF60})和横向力系数(C_{SFC60})均呈现先降后升的变化趋势,认为SMA路面的大构造深度与检测方法不匹配是造成检测数据不稳定的重要原因;和松^[2]的研究支持这一观点;职雨风等^[3]认为SMA施工完5 d内抗滑指标较高,5 d后抗滑指标迅速下降,通车后3~6个月内摩擦系数呈上升趋势,指标稳定一段时间后再

下降,分析了抗滑指标呈现上述规律的原因,推荐了在交工阶段SMA路面SFC测定及评定过程中存在问题的解决方案;张洪^[4]认为刚完工的SMA路面抗滑指标的检测结果不具代表性,推荐经6个月磨耗后的路面抗滑值为准;文献[5-8]分析了各因素对SMA路面抗滑性能的影响并提出相应的对策以提高早期抗滑性能。众多研究在一定程度上揭露了SMA沥青路面早期抗滑指标不佳的原因,提出了对应的改善方法,但实际工程中成品路面形成所经历的不确定因素太多,即使针对早期抗滑不足问题采取预防性控制措施,往往也无可观效果。目前普遍认为SMA路面抗滑不足的问题会随开放交通时间的延长而得以缓解,但这段时间内的道路行车安全问题仍需考虑,因此,寻求一种能有效改善SMA沥青路面的早期抗滑性能的方法十分必要。

本文以SMA-13沥青路面为研究对象,提出两种改善其早期抗滑性能的方法并对工程效果进行初步探究,希望能对SMA路面的早期抗滑性能改善提供有益帮助。

收稿日期:2021-06-25

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2018YFB1600103)

作者简介:江照伟,男,工程师.E-mail:86799314@qq.com

1 改善方法的提出

笔者整理分析几条在建高速 C_{SFC60} 检测数据时发现存在检测数值明显增大的段落,遂对其进行了情况调查并检测了其 C_{SFC60} ,结果见表1。

表1 调查及检测结果汇总

高速	桩号	横向力系数	摆式摩擦系数	动态摩擦系数	构造深度	备注
A	K76+000~K77+000	45.4	—	0.26	1.21	交通封闭
	K77+000~K79+400	53.6	—	0.32	1.06	交通开放
	右幅K16+300~K23+600	44.4	63.0	0.25	1.25	正常段落
B	右幅K23+700~K25+600	75.8	61.0	0.27	0.95	隧道
	左幅K16+300	73.0	75.3	0.30	0.75	轻微泛油

针对上述现象查阅了相关资料,王元元^[9]认为胎路之间真实接触面积的大小和接触区域的分布对路面抗滑性能具有决定性影响,间距较小、密集程度较高的微观纹理形貌特性会改善沥青路面的抗滑性能。从能量耗散角度考虑,构造深度小的路面与检测设备的接触面积大,单位长度内产生的耗散能大,表现出高检测指标。为验证上述观点,采用摆式摩擦系数仪测定了AC-13路面的抗滑系数(BPN20),发现平均构造深度为0.7 mm的AC-13路面BPN20平均值为95.5,而平均构造深度1.1 mm的SMA-13路面BPN20值为69.7,两者相差明显,初步认为针对中国现行抗滑指标评价体系,连续级配更具有优势。

文献[3]、[7]中关于改善SMA路面早期抗滑性能的措施方面均提到了撒布机制砂提高路表粗糙度的方法,结合前述试验检测结果,笔者认为通过撒布一定数量的特定规格机制砂,磨耗SMA路面的沥青膜或在SMA表面形成更加连续的级配可以有效改善SMA路面早期抗滑性能,故本文以高等级路面常见的SMA-13路面为研究对象,对不同表面粗糙处理方法的工程效果进行初步探索。

在铺筑完成的路面上撒布0~10 mm人工砂或1~3 mm的预拌沥青机制砂磨耗沥青膜是SMA路面常见的表面粗糙处理方式,但所选取的磨耗料含有较多细小颗粒,易过度堵塞路面构造并形成浮动层,影响胎路接触和路面排水,在改善抗滑性能方面往往得不偿失,因此宜对磨耗料选择与施工方法予以优化。

表面层混合料与轮胎接触的部分是路面抗滑性

检测数据表明:大构造深度路面并未表现出预期的优异抗滑性能,相反地,构造深度较小路段 C_{SFC60} 、 C_{DF60} 指标反而更好,尤其是作为高等级路面交竣工验收指标的 C_{SFC60} ,其与构造深度(TD)指标的关系更值得引起注意。

能的主要影响因素,对大构造的SMA-13沥青路面,若通过技术措施使其表面集料粒径分布类似AC-13,则可实现保留SMA骨架嵌挤结构的同时提高早期抗滑性能。一般地,工程生产中SMA-13混合料间断2.36~4.75 mm,故本文选取棱角性良好的2.36~4.75 mm集料为磨耗料,假设该档集料在混合料内理想分布,则1 m²路面所需磨耗料用量通过式(1)确定:

$$R = \frac{GV}{10^5} A \quad (1)$$

式中: R 为磨耗料撒布量(kg/m²); G 为SMA-13毛体积密度(kg/m³); V 为2.36~4.75 mm集料在混合料中所占比例(%); A 为磨耗料等效粒径(mm),计算公式如下:

$$A = \frac{4.75 \times P_{4.75}}{100} + \frac{2.36 \times P_{2.36}}{100} \quad (2)$$

式中: $P_{4.75}$ 为4.75 mm通过率(%); $P_{2.36}$ 为2.36 mm通过率(%)。

除磨耗料撒布量外,处理方法也是影响抗滑性能改善效果的重要因素,本文拟定如下两种处理方法:①模拟磨耗沥青膜改善抗滑性能;②形成连续级配表面改善抗滑性能。

方法1:磨耗料无需预拌,按确定撒布量将磨耗料撒布在SMA-13成型面,胶轮压路机碾压2遍,采用轻型车辆正常行驶碾压3 d后人工扫除浮动磨耗料,开放交通。

方法2:磨耗料采用0.3%道路石油沥青预拌,按确定撒布量撒布于摊铺面,按常规SMA-13碾压工艺碾压完成即可。

2 改善方法的实施

依托山东省内某新建高速,上面层为 SMA-13,设计厚度 4 cm,所用玄武岩集料、SBS(I-D)改性沥青、纤维、填料等原材料均符合规范^[10]要求。生产级配曲线见图 1。

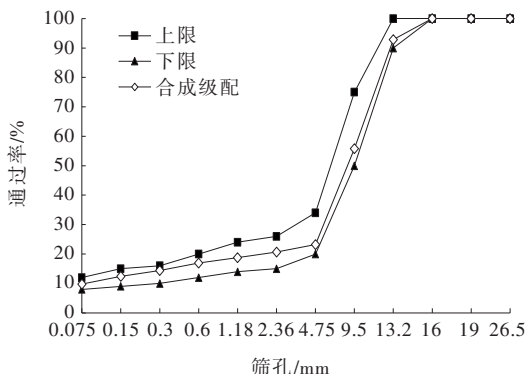


图 1 SMA-13 级配曲线

SMA-13 混合料毛体积密度为 $2\,576\text{ kg/m}^3$, 根据工程经验, 2.36~4.75 mm 在混合料中所占比例取 7%, 磨耗料级配如表 2 所示, 由式(2)得到磨耗料等效直径为 4.5 mm, 由式(1)得到 R 为 0.82 kg/m^2 ; 确定好处理区域后, 以 1 m^2 为单位划分网格, 采用人工撒布的方式将确定重量的磨耗料均匀撒布。

表 2 嵌挤料通过率

筛孔/mm	通过率/%	筛孔/mm	通过率/%
4.75	91.2	2.36	8.5

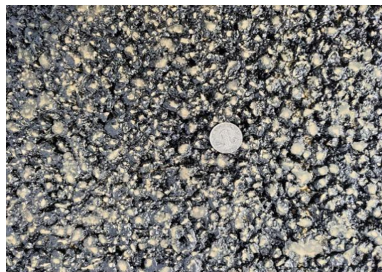
为考察方法 2 实施后的磨耗料颗粒脱落情况, 按照确定的 SMA-13 级配和磨耗料撒布量, 室内成型车辙板试件, 采用 HL-120 扫刷磨耗仪进行扫刷磨耗试验, 过程中不间断用喷壶洒水。其中, 车辙板成型步骤如下: ① SMA-13 装料整平; ② 按量均匀撒布磨耗料; ③ 轮碾成型。

试件磨耗损失率见表 3, 磨耗处理前后试件如图 2 所示。

表 3 方法 2 磨耗损失率

试件编号	磨耗前质量 m_0/g	磨耗后质量 m_1/g	损失率/%
1	12 785	12 716	0.54
2	12 697	12 596	0.80
3	12 744	12 661	0.65
4	12 790	12 686	0.81

由图 2 可见: 沥青预拌磨耗料经碾压嵌入 SMA-13 混合料后黏结牢固, 极少出现脱落现象, 因磨耗料脱落造成的安全担忧被排除。此外, 澳大利亚相关研究^[11]调查了 7 类不同抗滑等级要求的路面抗滑情况, 发现 SMA 路面早期抗滑性能比其他路面低约 20%, 提出撒布砂砾提高 SMA 路面表面抗滑的方法并推荐了方法的工程应用范围。



(a) 未处理



(b) 方法 2 处理后

图 2 试件磨耗处理前后状态

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

选取该高速公路 K6+905~K7+000 段, 按方法 1 处理, 划分为 12 个区段, 按处理前、后 3 d、处理后 9 d 选点检测 BPN20、构造深度、 C_{DF60} 、 C_{SFC60} , 以 10 m 为区间计算了处理前和处理后 9 d 的横向力系数 C_{SFC60} ; 选取某互通匝道 AK0+760~AK0+810 实施方法 2, AK0+700~AK0+750 为对比段, 分别在两个段落上检测了相同数量的 BPN20、构造深度、 C_{DF60} , 以 10 m 为区间分别计算了横向力系数 C_{SFC60} 。由于 BPN 和构造深度检测受仪器和人为影响较大, 本文采用固定仪器、人员的方式对不同阶段路面抗滑指标进行实测, 检测结果见图 3~6。

3.2 摩擦机理及结果分析

3.2.1 不同处理方法抗滑性能改善机理

文献[12-13]将胎-路摩擦力形成归纳为接触面

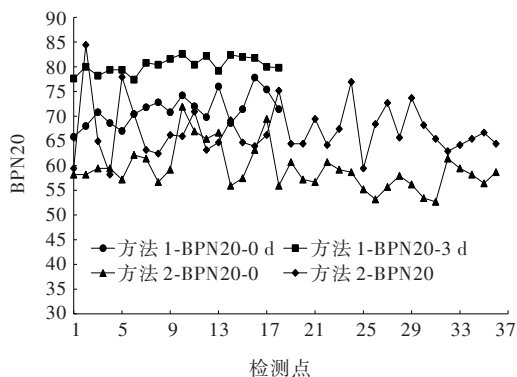


图3 不同方法下BPN20变化图

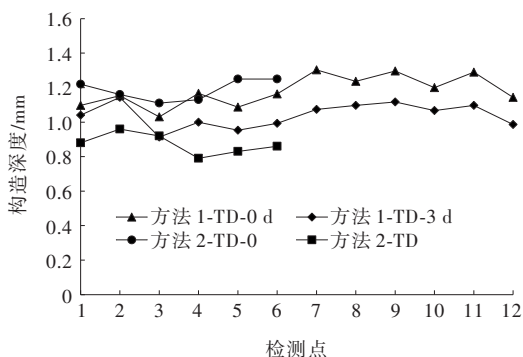


图4 不同方法下构造深度变化图

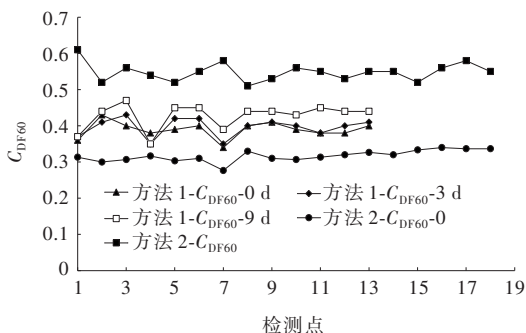


图5 不同方法下C_DF60变化图

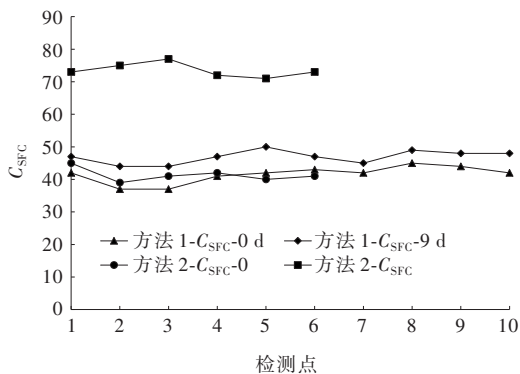


图6 不同方法下C_SF60变化图

间的分子力作用、接触面间的黏着作用、微凸体的微切削作用和轮胎变形产生耗散能四部分,前两者为黏附分量,后两者为滞阻分量。

文献[14]通过将胎-路接触区域划分为下沉区、过渡区和牵引区,对湿润路面胎-路摩擦力的形成机理进行了科学解释。通过分析,在路面构造深度足以有效排出积水的条件下,增大过渡区与牵引区的摩擦力即可实现抗滑性能的提升,上述两个区域的摩擦机理可从宏观纹理和微观纹理两个方面进行分析。

(1) 对于方法1,实施后产生以下效果:① 磨耗料在外界的揉搓挤压下与混合料产生相对滑动,使混合料集料所覆盖沥青膜减薄甚至露出集料本身节理特性;② 部分磨耗料嵌入路面构造中。

该方法对于路面抗滑性能的提升,在宏观纹理方面,轮胎一定行进距离 l 内耗散能 E_c 计算如下^[9]:

$$E_c = \frac{\pi l}{D} E' \sigma_m^2 \sin \delta \quad (3)$$

式中:滞后角 δ 、复合模量 E' 均为轮胎的材料常数; σ_m 为轮胎应力峰值。

可见: E_c 为 D 的减函数,说明在相同行进距离内,凸出体间距 D 小的沥青路面轮胎耗散能更大,抗滑性能更好;而凸出体间距 D 小的路面还可为胎-路体系提供更多的接触面积,有助于提高黏附分量。

本方法中,少量2.36~4.75 mm颗粒的嵌入导致凸出体间距 D 减小(构造深度的减小从侧面证明这一结果),轮胎耗散能增大,且多出部分体积小的凸出体,增大了应力峰值 σ_m 和切削效应;在微观纹理方面,沥青膜减薄、集料自身节理的露出、无沥青裹附磨耗料的嵌入导致路面微观纹理形貌高度和锋利程度增大,容易刺破水膜更深入地切削轮胎,密集程度增大可产生更大的黏附分量,综合作用下改善路面抗滑。

(2) 对于方法2,实施后,预拌2.36~4.75 mm磨耗料嵌入SMA-13路面表面。与方法1相比,宏观纹理方面,有更多数量的2.36~4.75 mm磨耗料嵌入路表,大幅降低凸出体间距 D 的同时为路表提供了更多小体积凸出体,切削作用点更多,相同距离内轮胎产生的耗散能进一步增大;微观纹理方面,虽然磨耗料经过沥青预裹附,但沥青用量只有0.3%,对磨耗料微观纹理和锋利程度几乎无影响,磨耗料数量的增加使路面微观纹理更密集更丰富,抗滑性能更大程度改善。

3.2.2 结果分析

(1) 不同方法对BPN20的影响

因摆式摩擦系数检测结果受人为影响较大,为准确考察不同处理方法对摆式摩擦系数指标的影

响,本文增大检测样本数量以消除数据离散造成的指标描述偏差。根据试验结果(图3),方法1实施后3 d,90%的检测点摆式摩擦系数升高,摆式摩擦系数均值升高8个单位,而实施方法2的段落所有测点摆式摩擦系数值均高于对比段,总体提高9个单位,方法2改善抗滑性能的保证率高于方法1。

(2) 不同方法对构造深度的影响

实施方法1的路面构造深度减小0.14 mm,实施方法2的路面构造深度降低0.31 mm。不同方法对构造深度指标的影响与嵌入路表构造的磨耗料的数量有直接关系。因SMA-13具有较高的初始构造深度,加之磨耗料粒径选择原因,即使经方法2处理后的SMA-13路面构造深度依然维持在0.8 mm以上,满足相关规范要求。由胎-路摩擦机理结合实际检测结果,就保证路面初始抗滑性能而言构造深度并非越大越好,宜在保证一定构造深度有效排出路表水的前提下设置构造深度上限,为胎-路提供更多的接触面以保证初始抗滑性能。

(3) 不同方法对动态摩擦系数的影响

由图5可知:方法1实施3 d后动态摩擦系数检测结果处理前几乎无差别,但9 d后检测值较处理前增大10%;方法2的实施则对动态摩擦系数指标产生明显影响,使其值增大73.2%。

(4) 不同方法对横向力系数的影响

不经处理新施工SMA-13路面横向力系数值约为41,低于规范要求值。由图6可知:方法1实施9 d后横向力系数均值为47.0,较之前升高13.2%,但仍无法满足要求;方法2对于横向力系数的改善表现出较强效果,横向力系数均值由41提升至73.5,增大77.8%,方法2可有效提升SMA路面早期抗滑性能,但表面级配连续化对长期抗滑性能的影响应继续关注。

4 结论与展望

(1) 通常的摆式摩擦系数、横向力系数指标检测方法无法有效体现大构造路面的抗滑优异性,连续级配混合料更加适应目前的抗滑性能评价体系。

(2) 提出两种改善SMA-13路面早期抗滑性能的方法,分别模拟磨耗沥青膜改善抗滑性能、形成连续级配表面改善抗滑性能,确定磨耗料规格为2.36~4.75 mm,撒布量为0.82 kg/m²,并通过扫刷磨耗试验

验证了方法安全性。

(3) 两种方法均小幅提升摆式摩擦系数,方法2改善抗滑性能的保证率高于方法1;方法1在改善动态摩擦系数、横向力系数指标方面效果有限,分别提升10%、13.2%,处理后横向力系数仍不能满足要求,方法2可使动态摩擦系数、横向力系数提升73.2%、77.8%,改善效果明显。

(4) 两种方法分别使路面构造深度降低0.14 mm、0.31 mm,降低幅度与磨耗料的嵌入量有关,处理后的路面构造深度仍维持在0.8 mm以上,满足规范要求,构造深度并非越大越好,宜设置上限以保证初始抗滑性能。

参考文献:

- [1] 姜禹岚,李伟.SMA-13沥青混合料使用初期摩擦系数发展规律的研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(12):155-157.
- [2] 和松,夏礼秀.高速公路路面摩擦系数的测试与评价[J].公路交通科技,2002,19(1):8-11,15.
- [3] 职雨风,苏堪祥.南方多雨地区SMA路面摩擦系数变化规律研究[J].公路工程,2019,44(3):176-180.
- [4] 张洪,陈曦.对SMA路面抗滑指标与标准的探讨[J].市政技术,2009,27(3):221-223.
- [5] 刘志华,李智,刘安,等.改善SMA沥青路面初期抗滑性能的应用技术研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(6):125-127.
- [6] 张波.SMA沥青路面早期抗滑性能特征与对策简述[J].科技创新与应用,2019(12):134-137.
- [7] 肖能立,向中富,黎晓.公路路面抗滑性能影响因素研究[J].山西建筑,2011,37(27):136-138.
- [8] 马宝国.基于抗滑性能的SMA沥青混合料配合比设计方法研究[D].西安:长安大学,2008.
- [9] 王元元.沥青路面抗滑特性与其表面粗糙特性之关系研究[D].南京:东南大学,2017.
- [10] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F 40—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [11] Main Roads Western Australia Materials Engineering branch. Initial skid resistance of stone mastic asphalt[R]. Materials Engineering Branch. Document No. 71/06/1359, 2010-07-19.
- [12] 王野平.论轮胎与路面间的摩擦[J].汽车技术,1999(2):10-14.
- [13] 彭旭东,谢友柏,郭孔辉.轮胎摩擦学的研究与发展[J].中国机械工程,1999,10(2):215-219.
- [14] 廖亦源.基于足尺环道的沥青路面抗滑性能衰变规律的研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.