

# 浇注式沥青混凝土组合结构车辙试验研究

闫东波<sup>1</sup>, 刘艳<sup>1</sup>, 卢现林<sup>1</sup>, 张晓华<sup>2</sup>

(1. 重庆特铺路面工程技术有限公司, 重庆市 401121; 2. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司)

**摘要:**为充分掌握影响钢桥面浇注式沥青混凝土铺装结构高温稳定性的要素,以车辙试验为主要方法,从不同试验温度、不同性能混合料组合和不同厚度组合3个方面对浇注式沥青混凝土铺装结构(GA10+SMA10)的抗车辙性能进行试验研究和理论分析。结果表明:试验温度对组合结构的动稳定度影响显著,随着试验温度的增加动稳定度呈指数趋势下降;上面层 SMA10 和下面层 GA10 的高温性能对组合结构的动稳定度均有贡献,GA10 高温性能的提高对组合结构动稳定度的影响更为显著;不同厚度组合对组合结构高温抗车辙性能有显著影响,组合结构的动稳定度随着上面层 SMA10 厚度的增加和下面层 GA10 厚度的减小呈指数趋势提高,SMA10 厚度的增加对组合结构动稳定度的影响更为显著。综合来看,要保证组合结构的高温抗车辙性能,应提高上面层 SMA 和下面层浇注式沥青混凝土的高温性能,尤其要提高下面层浇注式沥青混凝土的高温性能,并尽量增加上面层 SMA 的设计厚度。

**关键词:**钢桥面铺装;浇注式沥青混凝土;SMA;组合结构;抗车辙性能;动稳定度

中国的钢桥面铺装类型主要包括双层 SMA 体系、浇注式沥青混凝土体系、环氧沥青混凝土体系和 ERS 等。其中浇注式沥青混凝土铺装结构在国内外已普遍应用,大部分取得了良好的使用效果。“浇注式沥青混凝土+改性沥青 SMA”铺装结构已成为广泛使用的典型结构,该结构不但具有优良的路用性能,而且施工便利性和经济性都具有明显优势。举世瞩目的港珠澳大桥,技术人员历经多年的应用调研、理论分析和室内试验研究,确定采用浇注式沥青混凝土铺装结构,并取得了良好效果。

浇注式沥青混凝土因沥青用量高、流淌施工特性而具有优良的抗疲劳开裂性能和完全防水性能,然而,浇注式沥青混凝土铺装的高温抗车辙性能一直备受质疑。浇注式沥青混凝土混合料细集料用量高、矿粉用量高、沥青用量高,属于典型的悬浮密实结构,为改善浇注式沥青混合料的高温性能,不少学者从改性沥青性能、沥青用量和矿料级配等方面做了研究。

在以往的试验研究中,当胶结料采用基质沥青与天然沥青的混合沥青时,浇注式沥青混凝土的 60℃ 动稳定度为 450~750 次/mm;当胶结料采用 SBS 改性沥青与天然沥青的混合沥青时,浇注式沥青混凝土的 60℃ 动稳定度为 600~1 100 次/mm;当胶结料采用

高强度聚合物改性沥青时,浇注式沥青混凝土的 60℃ 动稳定度为 600~800 次/mm。总体来看,浇注式沥青混凝土的动稳定度都不高,虽然 SMA 是一种骨架密实型沥青混合料,高温性能优良,但“浇注式沥青混凝土+SMA”组合结构的动稳定度一般为 2 000~4 000 次/mm。

人们对浇注式沥青混凝土组合结构高温性能的影响因素和如何优化浇注式沥青混凝土组合结构的抗车辙性能研究较少,该文以车辙试验为主要试验方法,从不同试验温度、不同性能混合料组合和不同厚度组合三方面对“浇注式沥青混凝土 GA10+改性沥青 SMA10”组合结构的抗车辙性能进行研究,探索影响组合结构动稳定度的关键因素,拟合数值公式,并提出优化浇注式沥青混凝土组合结构高温性能的措施。

## 1 试件制备

试验中,浇注式沥青混凝土所用的结合料为浇注式专用高强度聚合物改性沥青,SMA 采用高弹性改性沥青,粗集料和细集料为玄武岩,填料为石灰石矿粉,根据需要添加木质素纤维,原材料性能指标均满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》和

收稿日期:2020-10-27

基金项目:四川省交通运输科技项目(编号:2019-A-03)

作者简介:闫东波,男,硕士,高级工程师, E-mail:81427305@qq.com

JTG/T 3364—02—2019《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》的要求。

参照 JTG F40—2004 和 JTG/T 3364—02—2019 中混合料的配合比设计方法,以其中 GA10 和 SMA10 级配范围的中值级配为目标级配,GA10 通过油石比变动,SMA10 通过高弹改性沥青的性能调整,制备出满足不同性能要求的 GA10 和 SMA10 混合料。浇注式沥青混合料的主要设计参数为流动性、贯入度和贯入度增量,该文对其增加车辙试验。GA10 根据贯入度、贯入度增量和动稳定度的大小分为 3 级(编号:Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ),SMA10 根据动稳定度的大小分为 3 级(编号:Ⅳ、Ⅴ和Ⅵ),性能测试结果如表 1、2 所示。

表 1 不同性能级别 GA10 的测试结果

编号	油石比/%	流动性/s	60℃贯入度/mm	60℃贯入度增量/mm	60℃动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )
Ⅰ	7.1	40	1.90	0.18	2 278
Ⅱ	7.5	15	3.15	0.31	795
Ⅲ	8.1	4	4.40	0.47	310

表 2 不同性能级别 SMA10 的测试结果

编号	油石比/%	纤维/%	60℃动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )
Ⅳ	6.3	0.3	3 431
Ⅴ	6.3	0.3	5 556
Ⅵ	6.3	0.3	9 086

将不同编号的 GA10 和 SMA10 进行组合并制作组合结构试件,GA10(厚度:35 mm)作下面层,SMA10(厚度:35 mm)作上面层,制作 9 种组合结构试样备用(各组试样数量根据试验需要有所不同),编号和组合方式见表 3。

表 3 不同性能混合料的组合结构试样

组合结构试样编号	上面层 SMA10 编号	下面层 GA10 编号
1	Ⅳ	Ⅰ
2	Ⅴ	Ⅰ
3	Ⅵ	Ⅰ
4	Ⅳ	Ⅱ
5	Ⅴ	Ⅱ
6	Ⅵ	Ⅱ
7	Ⅳ	Ⅲ
8	Ⅴ	Ⅲ
9	Ⅵ	Ⅲ

选取组合结构试样 5 中的 GA10(Ⅱ号,动稳定度:795 次/mm)和 SMA10(Ⅴ号,动稳定度:5 556 次/mm),保持组合结构总厚度 70 mm 不变,改变 GA10 和 SMA10 的厚度,制作 5 种组合结构试样备用,编号和组合方式见表 4。

表 4 不同厚度组合的组合结构试样

组合结构试样编号	上面层Ⅴ号 SMA10 厚度/mm	下面层Ⅱ号 GA10 厚度/mm
A	45	25
B	40	30
C	35	35
D	30	40
E	25	45

2 不同温度下的车辙试验

中国地域广阔,环境温度差异较大,而钢箱梁桥由于钢箱梁的储热作用,钢桥面铺装温度一般比环境温度高 25℃左右,按照北方夏季 30℃、南方夏季 40℃推算,钢桥面铺装在夏季的使用温度高达 55~65℃。

JTG/T 3364—02—2019 根据气候分区对钢桥面铺装组合结构的高温稳定性做了要求,组合结构试件厚度按设计厚度成型,当上面层为改性沥青 SMA 时,组合结构车辙试验动稳定要求如表 5 所示。

表 5 铺装组合结构车辙试验动稳定度要求

气候分区	动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )
夏炎热区	≥2 000(70℃)
夏热区	≥2 000(65℃)
夏凉区	≥2 000(60℃)

选取组合结构试样 5,分别在 45、50、55、60、65 和 70℃6 个不同温度条件下进行车辙试验,得到组合结构试样 5 的车辙动稳定度如表 6 所示。

表 6 不同温度下组合结构试样 5 的车辙试验结果

车辙试验温度/℃	动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	变异系数/%
45	13 088	11.4
50	6 814	10.8
55	5 120	6.4
60	3 116	2.2
65	1 684	5.5
70	1 150	4.7

从表 6 可以看出:“GA10+SMA10”组合结构的车辙动稳定度受温度影响十分显著,当温度升高时,车辙动稳定度明显下降。当温度为 60℃时,组合结构的动稳定度为 3 116 次/mm,满足 JTG/T 3364—02—2019 对夏凉区的要求,当温度升至 65℃时,组合结构的动稳定度降至 1 684 次/mm,已不能满足夏热区的要求。

贯入度和贯入度增量是国内外普遍应用于评价浇注式沥青混合料高温稳定性的技术指标,一般不进行车辙试验,JTG/T 3364—02—2019 也未对浇注式沥青混合料的动稳定度提出要求。组合结构试样 5 中,上面层 SMA10 的 60℃动稳定度为 5 556 次/mm,下面层 GA10 的 60℃动稳定度为 795 次/mm、贯入度为 3.15 mm、贯入度增量为 0.31 mm,均满足 JTG F40—2004 和 JTG/T 3364—02—2019 对混合料高温性能的要求,但组合结构的车辙动稳定度却不能满足夏热区和夏炎热区的要求,说明仅检测上、下面层材料的高温性能,尚不足以保证组合结构的高温抗车辙性能。这要求技术人员在应用浇注式沥青混凝土铺装方案时,应特别关注组合结构的整体抗车辙性能,设计和施工应用均应将组合结构的车辙动稳定度试验作为必检项目,及时发现组合结构高温性能的不足并采取相应措施进行优化和提高。

对表 6 中的试验结果进行数理统计和回归分析,建立铺装组合结构动稳定度与试验温度的指数计算模型,如式(1)所示:

$$y=a \cdot e^{bx} \tag{1}$$

式中: $y$  为铺装组合结构的动稳定度; $x$  为车辙试验温度; $a$ 、 $b$  为与上、下面层材料性能和厚度相关的常数。

采用式(1)对铺装组合结构动稳定度和试验温度进行指数回归拟合,得到二维图形和指数回归方程,如图 1 和式(2)所示。

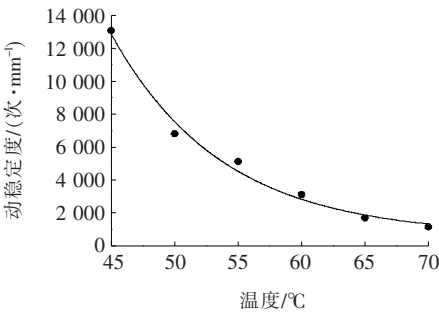


图 1 不同温度下组合结构动稳定度变化趋势图

$$y=619.75+2.11 \times 10^6 \times e^{-0.1144x} \tag{2}$$

从图 1 和式(2)可以看出:当上、下面层性能和厚

度确定后,组合结构的动稳定度与试验温度之间存在很好的指数函数关系,拟合相关系数  $R$  达 0.991。说明温度对“GA10+SMA10”组合结构的动稳定度影响显著,随着试验温度的增加,动稳定度呈指数趋势下降。

3 不同混合料性能组合的车辙试验

对表 3 中的组合结构试样 1~9 完成 60℃车辙试验,试验结果如表 7 所示。

表 7 不同性能沥青混凝土的组合结构车辙试验结果

组合结构 试样编号	60℃动稳定度/ (次·mm <sup>-1</sup> )	变异系数/%
1	4 649	6.5
2	5 088	13.7
3	7 067	12.1
4	2 816	4.5
5	3 116	2.2
6	4 804	8.0
7	2 249	3.7
8	2 767	14.4
9	3 144	16.2

为了考察上、下面层混合料性能对组合结构的影响程度,用双因素方差分析法对表 7 数据进行分析。上面层 SMA10 动稳定度的影响为因素 A,下面层 GA10 动稳定度的影响为因素 B,考虑 A、B 两个因素有交互作用的影响。分析结果如表 8 所示。

由表 8 可知:因素 A 和因素 B 均对试验结果有显著影响,两者之间的交互作用不显著;因素 B 的影响较因素 A 显著,也就是说下面层 GA10 动稳定度的改变较上面层 SMA10 动稳定度的改变对组合结构动稳定度影响更大。

根据双因素方差分析结果,排除了上、下面层动稳定度的交互作用对组合结构抗车辙性能的影响,对表 7 中的试验结果进行数理统计和回归分析,建立铺装组合结构动稳定度与上、下面层动稳定度的多元线性计算模型,如式(3)所示:

$$z=a+bx+cy \tag{3}$$

式中: $z$  为铺装组合结构的动稳定度; $x$  为铺装上面层 SMA10 的动稳定度; $y$  为铺装下面层 GA10 的动稳定度; $a$ 、 $b$ 、 $c$  为与铺装厚度和试验温度相关的常数。

表 8 组合结构车辙试验双因素方差分析结果

项目	平方和	自由度	均方	F 值	F 临界值	显著性
因素 A(上面层)	$S_A=15\,351\,712.3$	2	7 675 856.2	$F_A=24.2$	$F_{0.05}(2,18)=3.55$	显著
因素 B(下面层)	$S_B=39\,390\,771.2$	2	19 695 385.6	$F_B=62.1$	$F_{0.05}(2,18)=3.55$	显著
交互作用 A×B	$S_I=2\,717\,459.5$	4	679 364.9	$F_I=2.1$	$F_{0.05}(4,18)=2.93$	不显著
误差 e	$S_e=5\,707\,351.3$	18	317 075.1			
总和	$S_T=63\,167\,294.3$	26				

采用式(3)对铺装组合结构动稳定性和上、下面层的动稳定性进行线性回归拟合,得到三维图形和多元线性回归方程,如图 2 和式(4)所示。

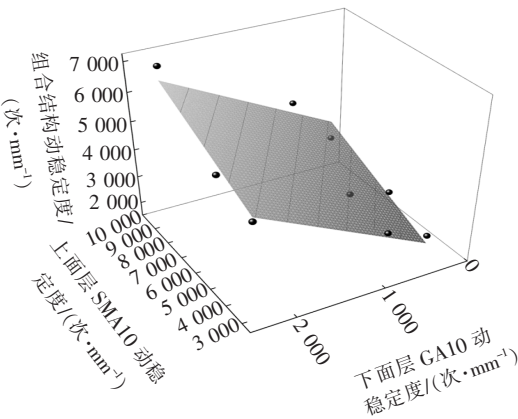


图 2 组合结构动稳定度与上、下面层动稳定度关系图

$$z=417.41+0.32x+1.44y \tag{4}$$

分析拟合结果可知:组合结构的动稳定度与上、下面层的动稳定度数据拟合效果较好,相关系数 R 达到 0.962;上面层 SMA10 和下面层 GA10 的动稳定度对组合结构动稳定度的贡献呈线性,根据拟合公式,已知上、下面层沥青混凝土的动稳定度可推算组合结构的动稳定度。

根据目前浇注式沥青混凝土的研究和应用现状,60℃动稳定度基本能够达到 500 次/mm 及以上,以组合结构动稳定度 2 000 次/mm 进行反算,得到 SMA10 的动稳定度值为 2 696 次/mm,也就是说,当 SMA10 的 60℃动稳定度达到 2 696 次/mm 时,组合结构的动稳定度即能满足 JTG/T 3364—02—2019 对夏凉区的要求,SMA 是典型的骨架密实型沥青混合料,具有优良的高温稳定性,60℃动稳定度较容易达到 2 696 次/mm 以上,说明“GA10+SMA10”组合结构的高温稳定性满足夏凉区钢桥面铺装的需求完全没有问题。

当采用“浇注式沥青混凝土+改性沥青 SMA”铺装结构时,分别或同时提高上面层 SMA 和下面层浇

注式沥青混凝土的高温性能,能够提高组合结构的抗车辙性能;相对于上面层 SMA,下面层浇注式沥青混凝土的高温性能的提高对组合结构高温抗车辙性能的影响要显著得多,因此,为提高浇注式沥青混凝土组合结构的抗车辙性能,应尽可能提高下面层浇注式沥青混凝土的高温性能,这对夏热区和夏炎热区钢桥面铺装应用浇注式沥青混凝土方案时考虑优化高温抗车辙性能的措施具有重要参考作用。

4 不同厚度组合的车辙试验

对表 4 中的组合结构试样 A~E,在 60℃条件下进行车辙试验,试验结果如表 9 所示。

表 9 不同厚度组合车辙试验结果

组合结构试样 编号	60℃动稳定度/ (次·mm <sup>-1</sup> )	变异系数/%
A	5 164	6.5
B	4 370	5.4
C	3 116	2.2
D	2 771	3.6
E	2 458	2.7

由表 4 和表 9 可知:在总厚度不变时,随着上面层 SMA10 厚度的减小和下面层 GA10 厚度的增加,组合结构动稳定度不断下降,这是由于 SMA10 的高温性能优于 GA10 而导致的。

对表 9 中的试验结果进行数理统计和回归分析,建立铺装组合结构动稳定度与上、下面层厚度的指数计算模型,如式(5)所示:

$$z=a+b \cdot e^{(cx+dy)} \tag{5}$$

式中:z 为铺装组合结构的动稳定度;x 为上面层 SMA10 的厚度;y 为下面层 GA10 的厚度;a、b、c、d 为与上、下面层材料性能相关的常数。

采用式(5)对铺装组合结构动稳定性和上、下面层



厚度进行指数回归拟合,得到三维图形和指数回归方程,如图 3 和式(6)所示。

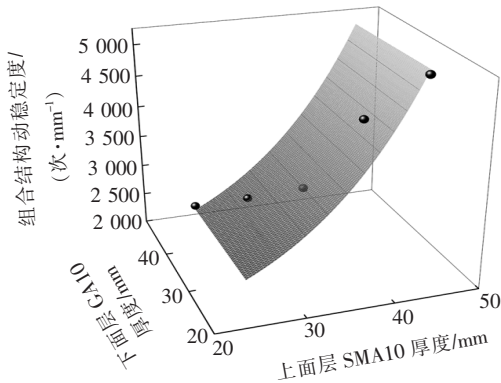


图 3 组合结构动稳定度与上、下面层厚度关系图

$$z=1\,445+175\times e^{(0.069x-0.000\,61y)} \tag{6}$$

从图 3 和式(6)可以看出:当上、下面层性能确定后,组合结构的动稳定度与上、下面层的厚度之间存在较好的指数函数关系,拟合相关系数  $R$  达到 0.953。说明调整上面层 SMA10 和下面层 GA10 的厚度对“GA10+SMA10”组合结构的动稳定度影响显著,随着上面层 SMA10 厚度的减小和下面层 GA10 厚度的增加,组合结构的动稳定度呈指数趋势下降。

相对而言,上面层 SMA10 厚度的增加比下面层 GA10 厚度的减小对组合结构抗车辙性能的优化显著得多,下面层 GA10 厚度的减少对组合结构高温抗车辙性能的影响较小;因此,当采用浇注式沥青混凝土+SMA 铺装结构时,为保证高温稳定性,宜尽量增加上面层 SMA 的厚度。

如果铺装总厚度一定,即  $(x+y)$  为定值,当  $z=2\,000$  次/mm 时,可以计算出  $x$  和  $y$  的值,即:为满足组合结构动稳定度  $\geq 2\,000$  次/mm 的要求时  $x$  的最小值和  $y$  的最大值。

目前,钢桥面“浇注式沥青混凝土+改性沥青 SMA”铺装方案的实际应用厚度一般为 60~80 mm,铺装下面层浇注式沥青混凝土均采用 GA10 型级配,设计厚度一般为 30~35 mm,由于 GA10 在 240℃ 左右条件下具有良好的流淌性,无需碾压即能达到密实状态,其摊铺厚度最低可达 25 mm,但应该视钢桥面板的平整度情况对摊铺宽度进行适当减少;铺装上面层 SMA 可采用 SMA10 或 SMA13,设计厚度一般为 30~40 mm,由于水平震荡压路机的普遍应用和胶轮压路机用于 SMA 碾压的可行性,SMA10 的铺装厚度可提高至 45 mm,SMA13 可提高至 50 mm。

5 结论

对钢桥面铺装常用的“浇注式沥青混凝土+改性沥青 SMA”组合结构进行了系统的车辙试验研究,发现试验温度、混合料性能和不同厚度组合对组合结构的抗车辙性能均有影响。研究结果对于优化钢桥面浇注式沥青混凝土铺装的高温性能、指导浇注式沥青混凝土铺装的设计和施工具有参考价值。主要结论为:

(1) 温度对浇注式沥青混凝土铺装结构的抗车辙性能影响显著,随着温度的升高,组合结构的动稳定度呈指数趋势下降,浇注式沥青混凝土铺装结构的高温稳定性在夏凉区没有任何问题,在夏热区或夏炎热区应用时,应特别加强对组合结构车辙动稳定度的检验。

(2) 上面层 SMA 和下面层浇注式沥青混凝土的高温性能对组合结构动稳定度的贡献呈线性趋势,组合结构的抗车辙性能随着上面层 SMA 和下面层浇注式沥青混凝土高温性能的提高而提高,下面层浇注式沥青混凝土高温性能的提高对组合结构抗车辙性能的影响要显著得多,优化浇注式沥青混凝土的高温性能是提高铺装组合结构高温抗车辙性能的有效手段。

(3) 保持铺装总厚度不变时,上面层 SMA 和下面层浇注式沥青混凝土厚度的调整对组合结构高温抗车辙性能有显著影响,组合结构的动稳定度随着上面层 SMA 厚度的增加和下面层浇注式沥青混凝土厚度的减小呈指数趋势提高,SMA 厚度的增加能够更加显著地提高组合结构的高温抗车辙性能,铺装设计时应尽可能提高上面层 SMA 的厚度。

参考文献:

[1] 陈仕周,闫东波. 钢桥面浇注式沥青混凝土铺装技术[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[2] 朱定,李书亮. 港澳大桥钢桥面铺装方案比选及浇注式沥青混合料(GMA)标准化施工工艺控制[J]. 中外公路,2019(2).

[3] 张领先. 基于动态贯入度试验的浇注式沥青混凝土高温性能影响因素分析[J]. 中外公路,2013(1).

[4] 王强. 浇注式沥青混凝土高温稳定性的影响因素探究[J]. 中国市政工程,2019(1).

[5] 杨志刚. 浇注式沥青混凝土复合铺装的高温稳定性能研究[J]. 交通科技,2019(5).

[6] 李浩,王志祥,刘锋,等. BRP 改性剂对 GMA 浇注式沥青混凝土高温性能影响研究[J]. 中外公路,2018(2).

[7] 冉雪,王旭龙,熊齐海,等. 沥青用量对浇注式沥青混凝土路面性能影响的研究[J]. 中外公路,2016(5).