

半柔性路面材料对市政重载道路力学性能影响分析

沈元结

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200125]

摘要: 半柔性路面材料已被证明具有非常好的抗车辙能力,但其在重载路面结构应用时对其他路面性能的影响还属未知。为探讨这些影响,首先,利用半柔性灌浆材料制备浆液并灌注在基体沥青混合料中,待其硬化后,用切割机切割试件,观察灌注效果;其次,对比分析了半柔性路面材料和SMA-13沥青混合料的设计参数值(抗压回弹模量);最后,分析了不同半柔性路面结构形式对路表弯沉、路表开裂和基层寿命的影响。结果表明:半柔性灌浆材料的灌注效果良好;任何温度下半柔性路面材料的回弹模量都比SMA-13沥青混合料大;半柔性路面材料可大幅减少路表开裂问题,采用双层半柔性路面材料时效果更为显著。

关键词: 半柔性路面;灌浆效果;抗压回弹模量;力学性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0265-05

Analysis on Influence of Semi-flexible Pavement Materials on Mechanical Properties of Municipal Heavy-load Roads

SHEN Yuanjie

[Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China]

Abstract: Semi-flexible pavement materials have been proven to exhibit the excellent rutting resistance, but their impacts on other pavement performances when applied in heavy-load pavement structures remain unknown. To explore these impacts, firstly, a slurry is prepared by using semi-flexible grouting material and infused into the base asphalt mixture. After hardening, the specimens are cut by using a cutting machine to observe the infusion effect. Secondly, the design parameter values (compressive resilience modulus) of semi-flexible pavement materials and SMA-13 asphalt mixture are compared and analyzed. Finally, the impacts of different semi-flexible pavement structures on the surface deflection, surface cracking, and base layer service life are analyzed. The results indicate that the infusion effect of semi-flexible grouting material is good, the resilience modulus of semi-flexible pavement materials is greater than that of SMA-13 asphalt mixture at any temperatures, the semi-flexible pavement materials can significantly reduce the surface cracking issues, and the effect is more pronounced when a double-layer semi-flexible pavement material is used.

Keywords: semi-flexible pavement; grouting effect; compressive rebound modulus; mechanical properties

0 引言

城市的开发建设必不可少地需要工程车的运输活动,而对于沥青路面这种温度敏感性材料,在高温和重载作用下极易出现车辙、开裂、坑槽等病害^[1]。因此,亟需寻找合适的路面材料来降低城市重载路面病害,延长道路使用寿命。

半柔性路面材料是通过在大孔隙沥青混合料中灌注高流动性、早强的灌浆材料而形成^[2-4],因其兼

具沥青路面的舒适性和水泥路面的高强性而多被用于重载、公交车站、交叉路口等特殊路段,并取得了良好的应用效果^[5-7]。1954年,法国航空局首次将半柔性路面材料成功应用在了飞机跑道上^[8];后来日本引进后将其广泛应用于公交站台、重载道路当中^[9]。在20世纪70年代初,美国、英国、前苏联等相继对半柔性路面材料开展了研究。

我国对于半柔性路面材料的研究,始于对其组成,即基体沥青混合料和高性能灌浆料的针对性研究;后来又逐渐开展了更为细化的相关研究^[10-12]。目前半柔性路面材料已被证明具有非常优异的抗变形、抗车辙能力。但将其应用于路面结构时,对路面

收稿日期: 2024-08-29

作者简介: 沈元结(1992—),男,硕士,工程师,从事道路设计工作。

抗裂性能、基层性能的影响尚不得而知。

因此,本文利用前期研发的半柔性灌浆材料,分析半柔性路面材料应用对重载路面结构抗裂、基层寿命等的影响。

1 材料性能

1.1 原材料性能

水泥采用42.5普通硅酸盐水泥,快硬水泥采用硫铝酸盐水泥,二者的技术性能指标见表1;矿粉技术指标见表2;灌浆料的外加剂选用膨胀剂、聚羧酸

减水剂和絮凝剂;沥青混合料的沥青采用SBS改性沥青,其性能指标见表3。

1.2 基体沥青混合料及灌浆料

大孔隙沥青混合料选用SFAC-13和SFAC-16两种级配;为了分析半柔性路面材料性能,选用SMA-13沥青混合料作为对比组(木质素纤维用量为0.3%)。3种沥青混合料级配组成和沥青用量见表4。高性能灌浆料采用先前的研究成果,质量配比为:(快硬水泥:42.5水泥):矿粉:膨胀剂:减水剂:絮凝剂=(0.15:0.85):0.2:0.04:0.001:0.005。

表1 P·O42.5水泥和快硬水泥技术指标

水泥种类	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	凝结时间/min		抗压强度/MPa				抗折强度/MPa	
		初凝	终凝	1 d	3 d	7 d	28 d	7 d	28 d
P·O42.5	310	240	380			34.6	44.2	5.62	6.77
快硬硫铝酸盐水泥	350	7	15	31.2	40.8				

表2 矿粉技术指标

含水率/%	外观	亲水系数/%
0.33	无团结颗粒	0.38

表3 SBS沥青性能指标

性能指标	测试值
针入度/(0.1 mm)	30 ℃
	25 ℃
	15 ℃
5 ℃延度/cm	54.2
软化点/℃	85.2

1.3 灌浆方法

半柔性路面材料性能的关键之一是灌浆料能够填充满基体沥青混合料中的空隙,因此灌浆效果的评价是重要参数之一。

室内试验与实际施工现场不同,室内试验采用的是小尺寸试件,如不对试件四周进行封闭处理,灌浆材料会通过试件四周流出,无法形成有效的半柔性路面材料试件。因此,本文采用一种较为简单的室内半柔性路面材料的灌浆方法。首先用塑料薄膜包裹大孔隙沥青混合料周边和底面,并用胶带缠死;之后在其表面灌注灌浆料,待灌浆料凝固后,将塑料薄膜清除,得到半柔性路面材料试件。图1为用切割机切割的试件断面图。由图1可知,半柔性灌浆料的灌注效果良好。将试件放至恒温恒湿养护箱中

养护7 d,采用马歇尔稳定度仪测得半柔性路面材料试件和对比组SMA-13沥青混合料试件的稳定度值,如表5所示。由表5可知,3种混合料试件的马歇尔稳定度都满足规范要求,同时可以看出半柔性路面材料试件的马歇尔稳定度要远大于SMA-13试件。



图1 半柔性材料试件切割断面

2 设计参数分析

抗压回弹模量是城市沥青路面结构设计时的主要材料参数。根据《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)规定,验算路表弯沉时采用20 ℃抗压回弹模量,验算弯拉应力时采用15 ℃抗压回弹模量,加载速率均为2 mm/min。另外,考虑后期分析高温

表4 3种沥青混合料级配组成

混合料类型	筛孔通过率/%											沥青用量/%
	19 mm	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm	
SFAC-13	100.0	100.0	95.0	53.5	12.0	10.0	8.5	8.0	6.5	6.0	4.0	3.36
SFAC-16	100.0	95.0	85.0	50.0	15.0	12.0	9.0	8.0	7.0	5.0	4.0	3.31
SMA-13	100.0	100.0	97.0	59.5	26.5	21.3	17.9	14.7	12.4	11.2	9.6	5.80

表 5 3 种混合料试件的马歇尔稳定度 单位:kN

混合料类型	测试值	规范要求
SMA-13	6.7	>6.0
SFAC-13	16.8	>15
SFAC-16	22.4	>15

情况下半柔性路面力学响应的需要,同时测试 50 ℃ 时的抗压回弹模量。抗压回弹模量测试所用试件的直径为 100 mm、高 100 mm,测试结果见表 6。

表 6 不同温度下混合料试件抗压回弹模量 单位:MPa

混合料类型		15 ℃	20 ℃	50 ℃
SFAC-13	SMA-13	1 824	1 566	625
	7 d 养护	2 214	1 926	756
	28 d 养护	2 647	2 285	1 003
SFAC-16	7 d 养护	2 207	2 158	864
	28 d 养护	2 879	2 784	1 212

由表 6 可知:随着试验温度的增加,半柔性路面材料内的沥青软化,其抗压回弹模量值不断减小;养护时间越长,水泥水化程度越高,半柔性路面材料的抗压回弹模量值越大。从表中还可看出,任何温度下半柔性路面材料试件的抗压回弹模量值都比 SMA-13 试件大。相比于 SMA-13 试件,15 ℃ 时半柔性路面材料试件的抗压回弹模量要比 SMA-13 试件大近 40%,20 ℃ 时大近 50%,50 ℃ 时大近 70%,说明半柔性路面材料比 SMA-13 具有更强的承载能力。

3 半柔性路面材料对重载路面结构性能影响分析

3.1 重载车荷载数据

随着城市的不断开发和建设,越来越多的重载车进入城市道路当中。然而在环境温度和雨水作用下,重载交通下的沥青路面易产生严重车辙、表层开裂、坑槽等病害。现基于某市内道路工程建设项目,采集重载车荷重数据,工程车为四轴荷载,共计 300 组数据,数据统计结果见表 7。现场实测最大荷载为

90 t,最小荷载为 62.8 t。由于现场只能测试整车的载重,不能准确测量每个轮胎下的轴载,因此按每根轴平均分配的方式计算每个轮胎对沥青路面的胎压,计算结果也列于表 7。由表 7 可见:相比于我国沥青路面设计规范中采用的 BZZ-100 标准荷载的 0.7 MPa,重载交通对沥青路面所产生的胎压要大 60%~120%;重载交通所产生的路面接地压力最大可达 1.53 MPa,其对路面的破坏影响巨大。在后续分析中,将重载车的接地压力取为 1.5 MPa。

表 7 轴重分布情况和各个轴重区间胎压

项目	60~65 t	65~70 t	70~75 t	75~80 t	80~85 t	85~90 t
数量/辆	5	52	73	85	58	27
荷载谱	0.017	0.173	0.243	0.283	0.194	0.090
平均胎压/MPa	1.09	1.18	1.27	1.36	1.44	1.53
与标准荷载相比的增量/%	56	69	81	94	106	119

3.2 重载对路面影响

抗压回弹模量是城镇沥青路面结构设计时采用的材料参数,是考虑车辆荷载行驶过程中,路面变形逐渐增大到极致后逐渐回弹而采用的回弹模量。在城镇沥青路面结构设计时,验算指标为路表弯沉、面层和基层层底拉应力。结合半柔性路面材料常温 and 50 ℃ 时的材料参数,对比常规沥青路面结构形式,分析采用单层、双层半柔性路面材料时,对重载沥青路面结构性能的影响。采用如表 8 所示的 6 个计算工况。其中:结构 1 为国内某城市主干路典型结构;结构 2 为只采用 SFAC-13 作为上面层的主干路结构;结构 3 为采用 SFAC-13 和 SFAC-16 作为上、中面层的主干路结构;结构 4 为城市次干路典型结构;结构 5 为只采用 SFAC-13 作为上面层的次干路结构;结构 6 为采用 SFAC-13 和 SFAC-16 作为上、下面层的次干路结构。计算工况中 SMA-13、SFAC-13 和 SFAC-16 的材料参数均采用上节所测得的试验结果,其余材料参数采用规范推荐值。

表 8 计算工况

结构层次	主干路结构			次干路结构		
	结构 1	结构 2	结构 3	结构 4	结构 5	结构 6
1	SMA-13	SFAC-13	SFAC-13	SMA-13	SFAC-13	SFAC-13
2	AC-16	AC-16	SFAC-16	AC-20	AC-20	SFAC-16
3	AC-20	AC-20	AC-20	水泥稳定碎石	水泥稳定碎石	水泥稳定碎石
4	水泥稳定碎石	水泥稳定碎石	水泥稳定碎石	水泥稳定碎石	水泥稳定碎石	水泥稳定碎石
5	水泥稳定碎石	水泥稳定碎石	水泥稳定碎石	级配碎石	级配碎石	级配碎石
6	水泥稳定碎石	水泥稳定碎石	水泥稳定碎石	路基	路基	路基
7	级配碎石	级配碎石	级配碎石			
8	路基	路基	路基			

在计算路面力学响应时,路表弯沉、基层层底拉应力以及路表最大拉应变采用双圆均布垂直荷载,荷载如图 2 所示。图 2 中: E 为弹性模量; μ 为泊松比; h 为结构层厚度; p 为轮胎接地压力; δ 为荷载圆半径。

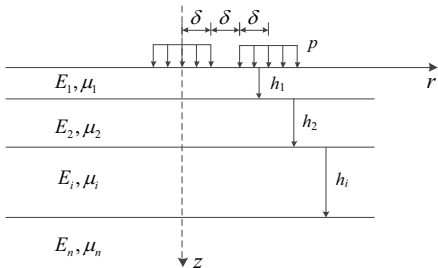


图 2 路面结构形式

在计算交叉口处路表最大拉应变时,考虑水平力作用,水平荷载的大小考虑为 0.3 倍的垂直荷载。为了分析重载对沥青路面结构性能的影响,垂直荷载选为 1.5 MPa,荷载圆半径为 10.65 cm,两圆圆心距离为 31.95 cm。因此,进行交叉口分析时,水平荷载为 0.45 MPa。路面力学响应采用 BISAR 程序进行计算。

3.2.1 常温下分析

在城镇沥青路面结构设计时,采用 15、20 ℃ 的材料参数作为设计参数,考虑最不利情况进行路面结构验算。此处采用 20 ℃ 的材料参数来验算沥青路面路表弯沉,采用 15 ℃ 的材料参数来验算基层和沥青层疲劳(层底拉应力)。沥青路面一般为半刚性基层沥青路面,沥青面层层底受压,所以并不需要验算沥青层的疲劳开裂问题。同时,重载交通容易引发沥青路面的路表开裂问题,尤其是在交叉口位置处。因此,此处仅分析半柔性路面材料对路表弯沉、基层层底拉应力、路表最大拉应变以及交叉口处路表最大拉应变的影响,结果见表 9。同时以常用的 SMA-13 沥青面层结构作为基准,即结构 1 和结构 4,分析半柔性路面材料对沥青路面结构性能的影响程度 I_M ,其表达式为:

$$I_M = \frac{|R_A - R_B|}{R_A} \times 100\%$$
 (1)

式中: R_A 为 A 工况,即结构 1 和结构 4 的力学响应; R_B 为 B 工况力学响应。

半柔性路面材料对路面力学响应影响系数计算结果见表 10。由表 10 可知,采用半柔性路面材料作为上面层或上、中(下)面层时,可以在一定程度上减少基层疲劳开裂的产生和提高路面结构的承载能力;而基层层底拉应力有略微降低,但影响很小。采

用单层或者双层半柔性路面材料作为路面表面层,虽然其回弹模量值大于常用的沥青混合料(SMA, AC),但由于其厚度相对于整个路面结构厚度来说很薄,因此半柔性路面材料对路表弯沉的改善效果较小。

由表 10 还可看出,相比于传统的主干路和次干路路面结构形式(结构 1、结构 4),采用半柔性路面材料作为面层材料时,都可以大幅降低路表(交叉口)最大拉应变。对于主干路,采用半柔性路面材料可减小 21%~29% 路表最大拉应变;对于次干路,采用半柔性路面材料可减小 19%~35% 路表最大拉应变。同时,半柔性路面材料抗拉强度要大于 SMA-13 沥青混合料,在材料强度和结构效果共同情况下,无论是对直行路面还是交叉口处的路面结构,都可以有效减小重载交通荷载以及制动启动荷载对路表开裂的影响。不过,相比于只采用半柔性路面材料作为上面层,采用双层半柔性路面材料做面层对路表最大拉应变的减小幅度更大。考虑到半柔性路面材料另一个功能是减少重载路面的车辙问题,因此在重载交通量并不是很大的情况下,可考虑只采用半柔性路面材料作为上面层;对于重载交通量较大的路段,考虑采用双层半柔性路面材料作为面层。

表 9 常温下不同结构的路面力学响应

路面力学响应	结构 1	结构 2	结构 3	结构 4	结构 5	结构 6
弯沉/(0.01 mm)	86.3	84.6	82.8	106.5	102.7	98.1
基层层底拉应力/MPa	0.250	0.245	0.242	0.450	0.440	0.430
路表最大主应变/($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	303.4	220.2	212.9	269.7	189.1	174.5
交叉口路表最大主应变/($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	332.5	243.0	239.9	321.9	259.7	250.3

表 10 常温下半柔性路面材料对路面力学响应的影响系数 单位:%

路面力学响应	结构 2	结构 3	结构 5	结构 6
弯沉	3.56	7.63	3.69	9.42
基层层底拉应力	2.00	3.20	2.22	4.44
路表最大主应变	21.89	29.47	29.92	35.30
交叉口路表最大主应变	25.95	27.52	19.32	22.24

3.2.2 高温下分析

高温状态下沥青材料黏度降低,材料的各项性能均会下降,因而易造成路面各类病害。选用 50 ℃ 下 SMA-13 和半柔性路面材料的抗压回弹模量值,计算分析路表弯沉、基层底部拉应力和路表最大拉应变,结果见表 11;半柔性路面材料对路面力学响应的影响系数见表 12。

由表 11 可见:相比于常温状态,高温状态下弯沉

表 11 高温下不同结构的路面力学响应

路面力学响应	结构 1	结构 2	结构 3	结构 4	结构 5	结构 6
弯沉/(0.01 mm)	113.6	106.7	99.0	134.2	127.8	116.6
基层层底拉应力/ MPa	0.165	0.162	0.159	0.289	0.282	0.273
路表最大主应变/ ($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	1 013.8	694.9	609.0	923.5	617.2	520.5
交叉口路表最大 主应变/($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	1 096.5	723.5	625.7	980.5	661.7	622.9

表 12 高温下半柔性路面材料对路面力学响应的影响系数 单位: %

路面力学响应	结构 2	结构 3	结构 5	结构 6
弯沉	6.07	12.85	4.77	13.11
层底拉应力	1.82	3.64	2.42	5.54
路表最大主应变	31.46	39.93	33.17	43.64
交叉口路表最大主应变	34.02	42.94	32.51	36.47

和路表最大拉应变都有一定程度的增加,说明高温状态下易引起路面车辙以及路表的开裂。同时还可看出,高温情况下,半柔性路面材料对于半刚性基层寿命提升影响较小。对于弯沉值,高温下半柔性路面材料提升效果更为明显,说明半柔性路面材料能够提升高温下路面整体刚度,提高路面抵抗变形的能力,且采用双层半柔性路面材料的效果更为明显。在路表(交叉口)拉应变方面,对于主干路,采用半柔性路面材料可减小 31%~43% 路表最大拉应变;对于次干路,采用半柔性路面材料可减小 33%~44% 路表最大拉应变,高温下半柔性路面材料对于路表开裂的提升效果更为明显。也就是说,相比于常温状态,半柔性路面材料在高温情况下对路面性能提升效果更为明显,非常适用于南方高温地区。

4 结 语

(1)半柔性灌浆材料可较好地填充基体沥青混合料的内部孔隙,测得的马歇尔稳定度要远大于 SMA-13 沥青混合料。

(2)半柔性路面材料在任何温度下的抗压回弹模量值都要比 SMA-13 大。15℃ 时比 SMA-13 大近 40%,20℃ 时大近 50%,50℃ 时大近 70%。

(3)半柔性路面材料对路面结构整体刚度(弯沉)提升效果较小,但其应用可大幅减少路表开裂问题,采用双层半柔性路面材料效果更为显著。对于重载交通量较大的路段,可考虑采用双层半柔性路面材料作为面层。

参考文献:

[1] 李宏亮.某重载市政道路路面病害调查分析与处治[J].城市道桥与防洪,2013(11):34-37;12.

[2] 邓成,黄冲,洪锦祥,等.超早强半柔性路面在市政路口的应用研究[J].公路工程,2016,41(1):116-119.

[3] KHAN M I, SUTANTO M H, YUSOFF N I M, et al. Cementitious grouts for semi-flexible pavement surfaces—A review[J]. Materials, 2022, 15(15): 5466.

[4] 张学欣,张洪剑,夏秀江,等.高频渠化交通条件下路面材料适用性研究[J].公路工程,2024,49(3):113-120.

[5] 谢若奇,吴旷怀,蔡旭,等.专用砂浆半柔性路面材料及其工程应用研究[J].中外公路,2017,37(3):201-205.

[6] 钟科,陈波,蒋恩贵,等.灌注式半柔性路面材料研究与应用综述[J].中外公路,2017,37(2):232-235.

[7] GUO X, HAO P. Influential factors and evaluation methods of the performance of grouted semi-flexible pavement (GSP)—A Review[J]. Applied Sciences, 2021, 11(15): 6700.

[8] 吕豹译.法国新型路面标准结构手册[M].北京:人民交通出版社,1987.

[9] 建设省中国技术事务所.半たわみ性コンボツト舗装の開発[J].道路建设,1992,531(4):52-60.

[10] 谭积青,张肖宁,张太平.半柔性铺装技术浅析[J].广东公路交通,2000(2):7-9.

[11] 程磊,郝培文.基于体积法的半柔性路面母体沥青混合料设计方法[J].长安大学学报(自然科学版),2002(1):1-3.

[12] 凌天清.半柔性路面材料的微观结构分析及强度理论[C]//中国公路学会第四届国际道路和机场路面技术大会论文集.北京:中国公路学会,2002:123-131.

《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

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

