

半柔性抗车辙沥青混合料路用性能与力学性能研究

吴平¹, 林俊杰², 朱武权¹, 李萍², 牛奇奇², 马国纲¹, 关甫洋¹, 张艺多¹

(1. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 半柔性沥青路面是解决公路与城市道路抗车辙的主要路面形式之一, 其材料参数与力学性能是影响该路面结构优化设计的主要因素。通过对基体SFAC-13(Semi-Flexible Asphalt Concrete)混合料的配合比设计, 采用研发的ZQKL型水泥基灌浆材料灌注成型试件, 验证SFAC-13混合料的高、低温稳定性, 并采用UTM-100仪测试沥青混合料的无侧限抗压性能。结果表明: 水泥基浆材料灌注饱满且均匀, 半柔性沥青混合料的稳定度远大于基体沥青混合料的稳定度; 半柔性沥青混合料不但兼顾了低温性能, 且其高温稳定性远优于其基体SFAC-13混合料; 在无侧限条件下, SFAC-13混合料具有较高的抗压强度和回弹模量, 可显著提高路面的承载能力。研究成果可为日后半柔性抗车辙沥青路面的优化设计提供参考。

关键词: 抗车辙; 半柔性沥青混合料; 单轴贯入强度; 无侧限抗压强度; 抗压回弹模量

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0260-05

Study on Pavement Performance and Mechanical Properties of Semi-flexible Rut-resistant Asphalt Mixture

WU Ping¹, LIN Junjie², ZHU Wuquan¹, LI Ping², NIU Qiqi², MA Guogang¹, GUAN Fuyang¹, ZHANG Yiduo¹

(1. China Municipal Engineering Northwest Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China; 2. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Semi-flexible asphalt pavement is one of the main pavement forms to solve the rut resistance of highways and urban roads. Its material parameters and mechanical properties are the main factors affecting the optimal design of the pavement structure. Through the mix proportion design of matrix SFAC-13 (Semi-Flexible Asphalt Concrete) mixture, the self-developed cement-based grouting material ZQKL is used to pour and form specimens to verify the high and low temperature stability of SFAC-13 mixture. The UTM-100 instrument is used to test the unconfined compressive performance of asphalt mixture. The results show that the cement-based slurry material was fully and evenly poured. The stability of semi-flexible asphalt mixture is much greater than that of matrix asphalt mixture. Semi-flexible asphalt mixture not only takes into account the low-temperature performance, but also has better high-temperature stability than matrix asphalt mixture of SFAC-13. Under the unconfined condition, SFAC-13 mixture has high compressive strength and resilient modulus, which significantly improves the bearing capacity of the pavement. The research result can provide a reference for optimizing design of semi-flexible rut-resistant asphalt pavement in the future.

Keywords: rut resistance; semi-flexible asphalt mixture; uniaxial penetration strength; unconfined compressive strength; compressive resilient modulus

0 引言

近年来随着城市道路的交通量不断增加, 城市道路的交叉口和车站等处的沥青路面会出现不同

程度的车辙、推挤与拥包等病害, 不仅加剧了市政道路养护部门的压力, 且由于需要反复维修这些特殊路段, 还导致道路拥堵与市民出行不便等影响交通与社会效益问题。为了解决城市道路特殊路段沥青路面的抗车辙问题, 目前已有许多研究人员提出了采用半柔性抗车辙沥青路面提高沥青路面的抗车辙性能, 该路面是在大空隙母体沥青混合料中灌入水泥类基浆材料后所形成的一种路面形式, 其特点是充分利用水泥基浆材料的“刚性”, 再结合沥青混合料的“柔性”, 形成“刚柔相济”的路面结构, 重点解决

收稿日期: 2024-09-09

基金项目: 甘肃省住房和城乡建设厅科技项目(JK2023-17); 中国市政工程西北设计研究院科技项目(XBSZKY2338)

作者简介: 吴平(1983—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事道路工程方向工作。

通信作者: 林俊杰(1998—), 男, 硕士, 从事道路工程研究工作。电子邮箱: 845424423@qq.com

车辆频繁启动和制动引起的路面结构抗塑性变形和抗剪性能不足的问题^[14]。

我国针对半柔性沥青路面的母体沥青混合料和水泥基浆材料的配合比设计以及施工技术等方面已开展了广泛的研究,如季端武等^[5]通过结合南通市市政道路维修工程开展了半柔性SFP-13(Semi-Flexible Asphalt Concrete)路面的配合比设计以及路面性能检验发现,SFP-13路面的车辙深度、代表弯沉值、渗水系数以及摆值都小于AC-13路面的测试值,说明该路面形式提升了城市道路交叉路口的抗车辙能力,是一种路用性能优良的路面结构形式;田瑞乾等^[6]研究了不同灌浆材料种类对路用性能的影响,发现灌注抗裂型灌浆材料和超早强型灌浆材料可有效提高SFP路面抗裂性能,而灌注抗裂型灌浆材料更有利于提高SFP后期低温抗裂性能;邓甲等^[7]提出将空心玻璃微珠加入水泥基灌浆料中,优化灌注式水泥基材料配合比,通过玻璃微珠对水泥基材料的流动性、力学性能及热学性能的影响分析,结果表明随着玻璃微珠掺入量的不断增加,水泥试块的抗压强度和导热系数会出现下降的趋势;谭建军等^[8]以SFP-13半柔性路面材料大空隙沥青混合料为基体,以水泥基灌浆料JGM-301为灌浆料,采用车辙、动态模量、单轴贯入和斜剪等试验,对比分析SFP-13、AC-20和SUP-20混合料的高温性能,研究表明SFP-13混合料的高温性能明显优于其他两种混合料,是高温环境下用以抗车辙的优选材料;陈波等^[9]以灌入式复合基体GOAC-13为研究对象,采用基体骨架的基本性能、水泥砂浆灌入效果和复合材料性能指标作为综合评判该路面的三阶段标准,研究表明适当减小灌入式沥青混合料的公称最大粒径有利于增强其抗剪切强度和高温稳定性能;Gong等^[10]通过SCB试验研究发现不同半柔性路面的抗拉强度随温度升高而降低,并且通过疲劳试验得到不同应力比的疲劳寿命;周盼堰等^[11]通过对比传统沥青路面说明半柔性沥青表现出优秀的承载力和耐久性,验证了半柔性沥青路面在提高道路性能和延长使用寿命方面的有效性,为城市道路建设提供了有力的技术支持;王远辉等^[12]基于当前的研究现状,分析了水泥灌浆沥青混合料的特点及设计流程,综合评述了集料级配、材料组成等对力学和路用性能的影响,并对水泥灌浆沥青混合料进行了微观力学分析,对水泥灌浆沥青混合料的应用现状和研究方向进行了展望;凌森林等^[13]认为半柔性路面的大孔隙沥青混合料和水泥基

浆形成的复合路面结构,其结构强度较高,但是如何评价这种特殊复合材料路用性能成为灌注式半柔性路面的研究难点。

综上所述,国内外针对半柔性抗车辙沥青路面已有很多工程实践应用,但这种复合材料路面难以采用现行刚性和柔性路面的结构设计方法,且其路面材料设计和结构验算参数的选用还存在不确定性,半柔性抗车辙沥青路面结构材料设计参数选取与力学性能研究滞后于其工程应用。因此,本文基于3种级配沥青混合料级配设计,采用课题组研发的ZQKL型水泥灌浆材料,开展对SFAC-13型混合料的高、低温路用性能、无侧限抗压强度和抗压回弹模量等的研究,可为未来半柔性抗车辙沥青路面的结构设计提供技术支撑。

1 原材料检测

(1) 沥青

本文选用SBS改性沥青I-C,依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[14],对SBS改性沥青I-C技术指标进行测试,结果如表1所列。依据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2017)^[15]中对沥青的规范要求,该沥青的各项指标均符合要求。

表1 SBS改性沥青指标测试结果

技术指标		实测值	技术要求
针入度(25℃/100 g/5 s)/ 0.1 mm		71	60~80
软化点 $T_{R\&B}$ /℃		81	≥75
5℃延度(5 cm/min)/ cm		37	≥35
针入度指数 PI		—	—
135℃运动黏度/(Pa·s)		2.12	1.8~3
弹性恢复(25℃)/%		95.3	≥85
溶解度/%		99.80	≥99
闪点/℃		297.5	≥230
密度/(g·cm ⁻³)	15℃	1.024	—
	25℃	1.016	—
贮存稳定性(离析,48 h软化点差)/℃		1.5	≤2.5

(2) 粗、细集料

依据《公路工程集料试验规程》(JTG 3432—2024)^[16],对其粗、细集料技术指标进行测试,结果如表2与表3所列,均可见指标符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2017)中对粗、细集料技术要求。

(3) 水泥

本文采用P.O.42.5硅酸盐水泥,对该水泥的标准稠度、初凝时间及终凝时间等进行测试,结果如表4

表2 粗集料技术指标测试结果

技术指标	实测值	技术要求
针片状含量/%	12.00	≤15
洛杉矶磨耗率/%	15.90	≤30
吸水率/%	0.55	≤2.0
压碎值/%	15.80	≤28
表观相对密度	2.98	≥2.5
坚固性/%	11.50	≤12

表3 细集料技术指标测试结果

技术指标	测试结果	技术要求
表观相对密度	2.93	>2.5
坚固度/%	8.60	≤12
含泥量/%	2.20	≤3
砂当量/%	86.20	≥60

所列,其技术要求均满足使用要求。

表4 P.O.42.5硅酸盐水泥技术指标测试

测试参数	测试结果	技术要求
表观密度/(g·cm ⁻³)	3.095	—
标准稠度/%	28	—
初凝时间/min	190	≥400
终凝时间/min	372	≤600
安定性	合格	—

(4)外加剂

依据《混凝土外加剂匀质性试验方法》(GB/T 8077—2023)^[17],对YX-JS聚羧酸高效减水剂技术指标进行测试,结果如表5所列,符合现行《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119—2013)^[18]中的技术指标要求。

表5 YX-JS聚羧酸高效减水剂测试结果

技术指标	实测值	技术要求
氯离子含量/%	0.020	≤0.6
总碱量/%	0.71	≤10.0
含固量/%	23.22	0.9~1.10
密度/(g·cm ⁻³)	1.056	1.050±0.020
pH	4.03	3~5
硫酸钠含量/%	0.48	≤5.0

表8 SFAC-13的矿料级配组成

级配类型 (4#:3#:2#:1#:矿粉)	筛孔通过率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配A (80:12:1:5:2)	100	81.5	19.9	9.5	6.3	5.2	4.3	3.1	2.6	2.1
级配B (77:12:2:6:3)	100	82.2	22.9	12.3	8.2	6.9	5.8	4.4	3.7	3.1
级配C (73:12:4:8:3)	100	83.1	26.9	16.1	10.0	8.2	6.7	4.8	3.9	3.2
级配要求范围	100	70~100	10~50	5~25	4~20	3~18	3~16	3~14	2~12	1~10

(5)灌浆用砂

采用洁净的河砂作为灌浆用砂,其颗粒级配如表6所列,符合现行《建筑用砂》(GB/T 14684—2011)^[19]和现行《城市道路灌入式半柔性路面技术规范》(T/CECS 1016—2022)^[20]中的规定。

表6 灌浆料用砂的颗粒级配

筛孔尺寸/mm	筛孔通过率/%	
	实测值	技术要求
1.18	100	100
0.6	100	≥80
0.075	≤2	≤2

(6)水泥基浆材料

课题组自行研发的ZQKL型灌浆材料为采用响应曲面法测试得到的各项指标均在范围内的水泥基灌浆材料,确定最佳水胶比为0.46,最佳砂胶比为0.15。依据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)^[21],对水泥基灌浆材料技术指标进行测试,结果如表7所列。可见该水泥基灌浆材料符合现行《城市道路灌入式半柔性路面技术规范》(T/CECS 1016—2022)中的技术指标要求。

表7 水泥灌浆材料测试结果

技术指标	实测值	技术要求
初始流动度/s	10.08	10~14
30 min流动度/s	14.58	10~18
3 h自由泌水率/%	0.76	≤1
抗压强度/MPa	3 h	≥10
	1 d	≥15
	28 d	≥25
28 d抗折强度/MPa	9.9	≥2.5
28 d干缩率/%	0.08	≤0.3

2 半柔性沥青混合料配合比设计

(1)基体沥青混合料级配设计

矿料中集料的规格为:1#料为1~3 mm,2#料为3~5 mm,3#料为5~10 mm,4#料为10~15 mm,采用憎水石灰岩矿粉。针对SFAC-13型混合料初选3种级配,其矿料级配组成如表8所列。

根据经验初步确定油石比为 4.3%,木质素纤维掺量为沥青用量的 0.3%,沥青混合料制备中,沥青和矿料的加热温度分别为 160~175 ℃和 170~190 ℃,采用 10 L 的沥青混合料拌合机在 170~180 ℃的控制温度下拌和,马歇尔电动击实的控制温度为 165 ℃,平行试件为 5 个,按双面各击实 75 次的方法成型。成型试件后分别测定基体沥青混合料空隙率、连通空隙率、稳定度、析漏与飞散损失,结果如表 9 所列。

表 9 3 个级配的基体沥青混合料试件测试结果

测试参数	级配 A	级配 B	级配 C	技术要求
油石比/%	4.30	4.30	4.30	—
孔隙率/%	29.80	26.77	25.77	16~28
连通孔隙率/%	28.33	24.33	23.22	15~25
稳定度/kN	2.81	4.59	5.07	≥3
析漏损失/%	0.14	0.14	0.06	≤0.5
飞散损失/%	55.96	24.77	31.96	≤30

根据表 9 的测试结果,确定级配 B 为最佳级配。根据施工经验和配合比设计经验,初步确定的油石比 4.3%,按照沥青用量 $(4.3\pm 0.3)\%$ (4.0%、4.3%、4.6%),制作马歇尔试件,测定相应的技术指标,测试结果如表 10 所列。结合基体沥青混合料技术要求与经济性要求,选用油石比为 4.3% 作为基体 SFAC-13 沥青混合料的最佳沥青用量。

表 10 级配 B 的基体沥青混合料技术指标测试

测试参数	油石比/%			技术要求
	4.0	4.3	4.6	
孔隙率/%	29.60	26.77	24.96	16~28
连通孔隙率/%	27.44	24.33	23.49	15~25
稳定度/kN	2.55	4.59	4.86	≥3
析漏损失/%	0.03	0.14	0.36	≤0.5
飞散损失/%	43.53	24.77	18.58	≤30

(2)水泥基浆灌浆效果

采用上述水泥基浆材料对油石比为 4.3% 的级配 B 进行灌浆,对灌浆饱满度及稳定度进行检验结果如表 11 所列。对比表 11 和表 10 中油石比为 4.3% 时基体沥青混合料和半柔性 SFAC-13 混合料的稳定度,可知自行研发的 ZQKL 型水泥基灌浆材料灌注充分且均匀,灌浆后相较灌浆前混合料的稳定度提高了 223.09%。

表 11 SFAC-13 试件灌浆饱满度及稳定度测试

检验项目	实测值	技术要求
灌浆饱满度/%	97.65	≥85
稳定度/kN	14.83	≥10

3 试验结果分析与讨论

3.1 SFAC-13 高温、低温性能

(1)车辙试验

以 SFAC-13 混合料为研究对象,车辙板采用轮碾成型的方法,待冷却至 40 ℃,不脱模进行灌浆,直到混合料表面不再冒出气泡为止,保证灌浆饱和度,用刮板将沥青混合料刮平,直到露出集料表面,在标准条件下进行养生 7 d,如图 1 所示。标准试件规格为 300 mm×300 mm×50 mm,规定温度为 60 ℃,轮压为 0.7 MPa,往返碾压速度为 42 次/mm,测试动稳定度和车辙深度,测试结果如图 2 所示。可见 3 个试件平均动稳定度为 26 250 次/mm,满足现行《城市道路灌入式半柔性路面技术规程》(T/CECS 1016—2022)中的动稳定度≥10 000 次/mm 的要求。



图 1 车辙试验的车辙板

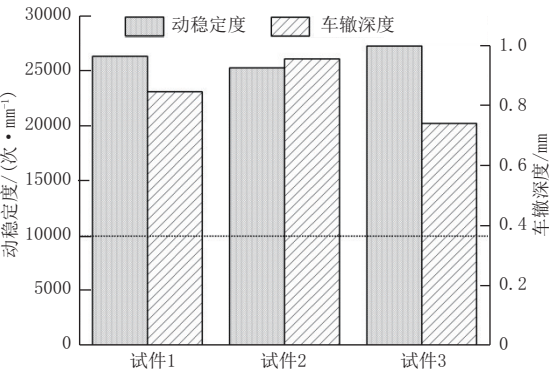


图 2 SFAC-13 试件车辙试验结果

(2)单轴贯入强度

单轴贯入强度为现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)^[22]要求的设计参数,是用于控制沥青路面在荷载作用下高温稳定性的另一项指标。使用旋转压实法成型并钻芯获得圆柱形试件(直径 100 mm、高度 100 mm),采用 UTM-100 试验机进行单轴贯入强度测试,试验加载速率为 1 mm/min,控制温度为 60℃±2℃,压头尺寸为 28.5 mm,试验结果如图 3 所示。3 个试件的平均单轴贯入强度为 1.116 MPa,

均满足设计规范中贯入强度 ≥ 0.9 MPa的要求。

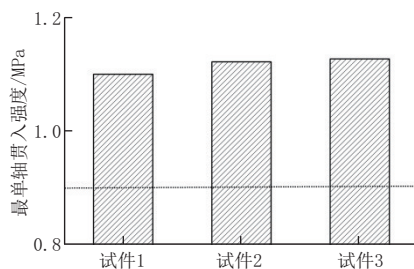


图3 SFAC-13试件的单轴贯入强度试验结果

(3)小梁低温弯曲试验

本研究采用的车辙板为轮碾成型法,成型并切割为250 mm $\times$ 30 mm $\times$ 35 mm的小梁试件,标准条件下养护7 d,采用MTS万能材料试验机,加载速率为50 mm/min,试验温度为 -10°C ,小梁低温弯曲试验结果如图4所示。3个试件的平均最大弯拉应变为3 532 $\mu\epsilon$,平均抗弯拉强度为8.694 MPa,满足现行《城市道路灌入式半柔性路面技术规程》(T/CECS 1016—2022)对最大弯拉应变 $\geq 2\ 300\ \mu\epsilon$ 的要求。

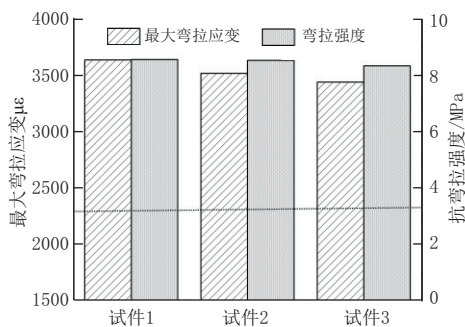


图4 SFAC-13试件的小梁低温弯曲试验结果

3.2 SFAC-13混合料抗压性能

半柔性沥青路面SFP-13型混合料的高温稳定性优于热拌沥青混合料的高温稳定性,但是其抗压性能不同于刚性与半刚性路面的抗压性能。

采用旋转压实仪成型试件,钻取与切割成直径为100 mm、高100 mm的圆柱体试件。采用UTM-100试验机,温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$,加载速率为2 mm/min,回弹测试荷载分为7级,加载稳定为1 min,卸载为1 min,再加下一级荷载。无侧限条件下,SFAC-13混合料的抗压性能测试如表12所列,能满足江苏省现行规范《抗车辙半柔性路面应用技术规程》(DB32T 4074—2021)^[23]中的技术要求。

4 结 语

(1)研发的ZQKL型水泥基灌浆材料在SFAC-13混合料中灌浆饱满度高,且其稳定度远大于灌浆前基体沥青混合料的稳定度,是高效的半柔性抗车辙

表12 SFAC-13试件无侧限抗压强度与抗压回弹模量

测试项目	实测值	平均值	技术要求
无侧限抗压强度/MPa	试件1	3 825.34	—
	试件2	3 922.13	
	试件3	3 994.56	
抗压回弹模量/MPa	试件1	2 655.43	2 500~4 000
	试件2	2 897.86	
	试件3	2 792.59	

沥青路面的灌浆材料。

(2)SFAC-13混合料高温稳定性提升比较显著,且低温稳定性也得到了兼顾,可有效地应用于广大季节冻土区公路与城市道路抗车辙路段。

(3)在无侧限条件下,SFAC-13混合料具有较高的抗压承载力,这不仅为半柔性沥青路面结构验算提供了依据,也为更加经济地优化半柔性抗车辙沥青路面结构层组合设计提供了参考。

(4)沥青与灌浆材料会形成界面过渡区,多次冻融循环后水泥灌浆料与沥青界面的黏结性会逐渐退化,致使路用性能降低。后续应进一步深入研究在温、湿环境交替变化条件下半柔性抗车辙沥青路面的结构耐久性。

参考文献:

- [1] 郑晓光,吴立报,水亮亮.高性能灌注式半柔性路面材料的路用性能[J].建筑材料学报,2023,26(6):638-643;652.
- [2] 郭浩亮,叶文亚,陶志强.高性能半柔性灌浆料设计与应用研究[J].上海公路,2023(1):119-123;183.
- [3] 何兆玄.抗车辙半柔性沥青路面施工技术应用探讨[J].交通建设与管理,2023(3):89-91.
- [4] 陶丽萍.水泥灌浆半柔性沥青路面研究综述[J].城市道桥与防洪,2021,266(6):64-68.
- [5] 季瑞武.灌入式复合沥青路面在交叉口车辙防治中的应用[J].山西建筑,2023,49(9):166-168.
- [6] 田瑞乾,王伟赫,刘逢涛,等.灌浆材料类型对半柔性路面路用性能影响研究[J].公路交通技术,2023,39(5):45-53.
- [7] 邓甲.含玻璃微珠的低导热灌注式水泥基材料设计与性能评价[J].北方交通,2021(4):49-52.
- [8] 谭建军,邓松,龚明辉,等.半柔性沥青混合料高温抗车辙性能研究[J].湖南交通科技,2021,47(3):40-44.
- [9] 陈波,魏小皓,吴逸飞,等.灌入式复合路面基体沥青混合料检验方法研究[J].中外公路,2021,41(1):228-232.
- [10] Gong M., Xiong Z., Chen H., et al. Evaluation on the Cracking Resistance of Semi-Flexible Pavement Mixture by Laboratory Research and Field Validation[J]. Construction and Building Materials, 2019(207): 387-395.
- [11] 周盼堰.半柔性沥青路面施工技术研究[J].运输经理世界,2024(16):4-6.
- [12] 王远辉,成猛,席爽,等.水泥灌浆沥青混合料设计与性能研究综述[J].建材世界,2024,45(2):59-62.

(下转第269页)