

文章编号:1007-9629(2023)06-0638-06

高性能灌注式半柔性路面材料的路用性能

郑晓光*, 吴立报, 水亮亮

(上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要:研制了一种面向重载重交通场景的高性能灌注式半柔性路面材料(SFP),系统测试了其各项路用性能。结果表明:SFP的强度与高温抗变形能力极其优异,且受温度影响较小;SFP的强度随龄期增长逐渐增强并趋于稳定,其水稳定性远高于SMA-13混合料;在高温浸水及轮载作用下,SFP未出现剥落破坏,其车辙受荷载的影响远低于SMA-13混合料;SFP的低温抗裂性与抗疲劳性相对较弱,低于SMA-13混合料而显著优于普通混合料;半柔性铺装结构的长期耐久性良好,100万次加速加载后其车辙深度仅为SMA铺装结构的1/10。

关键词:半柔性路面材料;强度;抗变形能力;水稳定性;疲劳;低温抗裂

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.06.009

Road Performance of High Performance Pouring Semi-flexible Pavement Material

ZHENG Xiaoguang*, WU Libao, SHUI Liangliang

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: A high performance semi-flexible pavement material(SFP) for heavy traffic scenes was developed, and its road performance was systematically tested. The results show that the SFP has extremely excellent strength and deformation resistance, and is less affected by temperature. The strength of the SFP gradually increases and tends to stabilize with age, and the water stability of the SFP is much higher than that of SMA-13 mixture. Under the conditions of high temperature immersion and loading, no peeling is found on the SFP, and the impact of load effect on rutting is much lower than that of SMA-13 mixture. The fatigue performance and low-temperature crack resistance of the SFP are weaker than that of SMA-13 mixture, but significantly superior to ordinary asphalt mixture. The SFP has good long-term durability. The rut depth of semi-flexible pavement structure after 1 million times of accelerated loading is only 1/10 of that of the SMA pavement structure.

Key words: semi-flexible pavement material; strength; deformation resistance; water stability; fatigue; low-temperature crack resistance

城市快速公交车道渠化交通明显、车辆接地压强高,尤其在站点车辆加减速、刹车启动频繁,使路面反复承受较大推移、揉搓和剪切压实作用^[1]。沥青路面因行车振动小、开放交通快,成为快速公交车道铺装首选,并通过使用高性能改性沥青^[2]、加强层间

黏结与路面结构^[3]等措施增强其抗车辙性能。尽管如此,基于沥青铺装的快速公交路面仍易出现车辙病害。灌注式半柔性路面将特制水泥基灌浆料灌入大孔隙沥青混合料基体中,形成一种强度及抗车辙性能突出的刚柔并济路面结构,逐渐成为解决快速公

收稿日期:2022-06-20; 修订日期:2022-07-07

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2020YFC1908703);上海市“科技创新行动计划”优秀学术/技术带头人计划项目(21XD1434200);成都兴城投资集团有限公司科研项目(DXZX-20044)

第一作者(通讯作者):郑晓光(1978—),男,山东五莲人,上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司教授级高级工程师,博士.E-mail:zhengxiaoguang@smedi.com

车道等重载重交通铺面车辙病害的理想材料^[4].林忠^[5]分析了半柔性铺装在北京快速公交系统工程中的试铺情况,半柔性上层组合结构使用8个月后几乎未产生车辙. Bharath等^[6]亦发现半柔性路面材料60℃车辙为沥青混合料的1/10,现场测试表明1a后半柔性路面无车辙及开裂出现.

当前,面向城市快速公交车道等重载重交通场景的半柔性路面材料路用性能系统研究仍十分缺乏^[7].本文研制了一种高性能灌注式半柔性路面材料(SFP),系统测试了其各项路用性能,并与重载沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA)进行对比,可为面向重载重交通场景的高性能半柔性路面建设提供指导.

1 试验

1.1 水泥灌浆料

商用成品水泥灌浆材料由P·II 52.5水泥、I级粉煤灰、S95级矿渣粉、178 μm石英砂复配而成,以其为

胶凝材料,掺入0.3%(质量分数,本文涉及的掺量、水灰比等除特殊说明外均为质量分数或质量比)的聚羧酸系高性能减水剂.设定水灰比 m_w/m_c 为0.25、0.30、0.35制备水泥灌浆料.

参考文献[8]和T/CECS G: D51-01—2019《道路灌注式半柔性路面技术规程》(以下简称半柔性路面规程)测试了水泥灌浆料的抗折强度与抗压强度,结果见图1.由图1可见:随着龄期的增长,水泥灌浆料不断水化,强度逐渐增大,其7d抗折强度与抗压强度均远高于半柔性路面规程要求;水灰比为0.25的水泥灌浆料强度最高,且其流动度、泌水率及干缩率指标均满足要求.综上,本文以水灰比0.25制备水泥灌浆料.此外,研究表明^[8]水泥灌浆料的抗压强度达到5.0 MPa以上即能够满足开放交通要求.水灰比为0.25的水泥灌浆料1、3、7d抗压强度达到31.0、58.0、60.0 MPa,远远高于半柔性路面规程的要求(≥ 15.0 MPa).

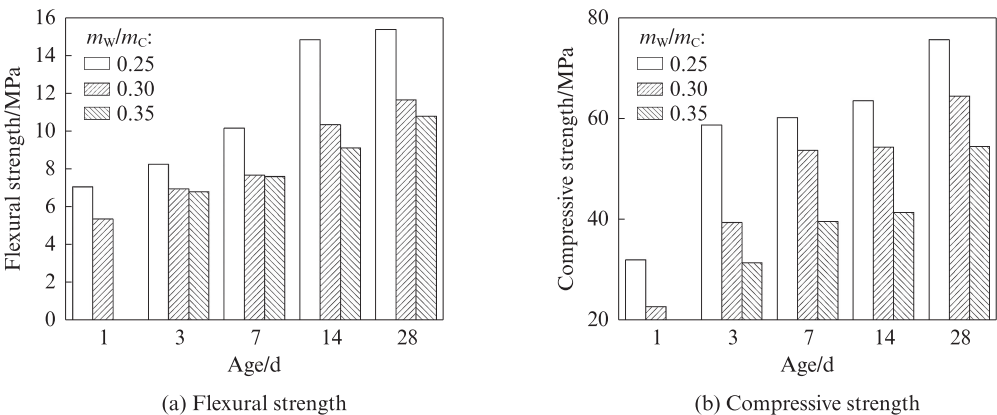


图1 水泥灌浆料的抗折强度与抗压强度
Fig. 1 Flexural strength and compressive strength of cement grouting materials

1.2 基体大孔隙沥青混合料(AML P)

AML P采用体积法设计^[2],以高黏改性沥青(HVMA-A)为胶结料,玄武岩粗集料粒径为9.5~13.2 mm,石灰岩细集料采用连续级配(最大粒径为2.36 mm). AML P整体空隙率(体积分数)为25.81%,连通空隙率为21.20%,油石比为0.025,性能指标满足半柔性路面规程要求.此外,以高性能重载混合料SMA-13为对比材料,使用高黏改性沥青(HVMA-B)为胶结料,矿料选用玄武岩粗集料、石灰

岩细集料及矿粉,油石比为0.061,外掺0.4%高模量剂及0.3%木质素纤维以增强其使用性能.高黏改性沥青的主要性能见表1,AML P与SMA-13混合料的合成级配见表2.

1.3 灌注工艺

先制备AML P,待其冷却至50℃以下,采用保鲜膜将试件底部和周围密封,仅预留1个顶面灌浆,根据试件空隙率指标制备水泥灌浆料.制备过程为:首先,将水泥灌浆料缓慢、均匀地倾倒入AML P试件表

表1 高黏改性沥青的主要性能
Table 1 Main properties of high viscosity modified asphalts

Asphalt	Penetration(25℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	Dynamic viscosity(60℃)/ (Pa·s)	Ductility(5℃, 5 cm·min ⁻¹)/cm	Softening point/℃
HVMA-A	68	75 600	70	88.5
HVMA-B	53	1 000 488	46	103.0

表2 AMLP和SMA-13混合料的合成级配
Table 2 Synthesis gradations of AMLP and SMA-13 mixture

Asphalt mixture	Passing ratio(by mass)/%									
	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
AMLP	100.0	95.0	10.7	10.7	10.0	8.2	6.3	4.1	3.2	3.0
SMA-13	100.0	95.3	63.5	27.8	22.8	19.3	16.7	15.1	12.6	10.8

面,用刮板在其表面反复拖拉,使水泥灌浆料灌注刮匀,辅以适当跟随振捣;接着采用刮板反复拖拉试件表面,至表面孔隙充满水泥灌浆料,不再产生气泡、不形成漫流为止;待水泥灌浆料渗透完毕后,刮除表面多余浆料,以露出大孔隙沥青路面表面结构.水泥灌浆料拌制完成至灌注应在15~20 min内完成.当环境温度超过30℃时,须覆盖塑料薄膜养生;当环境温度在30℃以下时,可采取露天养护.

1.4 试验方法

根据半柔性路面规程要求制作SFP试件,并在 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\text{RH}>95\%$ 的标准条件下养护,养护龄期 t 为1、3、7、28 d的半柔性路面材料分别记为SFP-1、SFP-3、SFP-7、SFP-28.根据JTGE20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》制备AMLP与SMA-13混合料试件.用马歇尔试验测试SFP试件的马歇尔稳定度及流值.在60、70℃下对SFP进行室内车辙试验.用浸水马歇尔试验与冻融劈裂试验进行水稳定性测试.用汉堡浸水车辙试验评价SFP的抗车辙变形和抗水损害能力,水浴温度为60、70℃,钢轮碾压(加载)速率为52次/min,最大加载次数2万次,最高车辙深度20 mm.用低温弯曲试验测试SFP的低温抗裂性能,试验温度为 -10°C ,加载速率为50 mm/min.用四点弯曲小梁试验评价SFP的抗疲劳性能,采用恒应变控制的连续偏正弦加载模式,测试温度为15℃,加载频率为10 Hz.采用

MMLS3小型加速加载设备评价SFP铺装结构的长期耐久性能,测试温度为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$,加载标准为BZZ-100,加载胎接地压强为0.7 MPa,加载速率为5 000次/h,加载至100万次后停止.

2 结果与讨论

2.1 马歇尔稳定度

马歇尔试验结果对比见图2.由图2可见:与水泥灌浆料强度随龄期增长规律一致,试件SFP-1的稳定度是AMLP的2倍,试件SFP-3的稳定度迅速增大,达到AMLP的6倍,是SMA-13混合料的2倍;SFP的流值也显著低于SMA-13混合料;试件SFP-7的稳定度为SMA-13混合料的3倍,远高于半柔性路面规程要求(规范要求值为15 kN),展示了SFP优异的强度. AMLP的稳定度仅为4.2 kN,而试件SFP-7的稳定度是其8倍,说明水泥灌浆料强度是SFP强度的决定因素.此外,当养护龄期从1 d增加至3 d时,水泥灌浆料的抗压强度增长率为83.5%,此时SFP的马歇尔稳定度增长率为160.4%.这间接验证了SFP强度的形成除与AMLP及水泥灌浆料的强度有关外,还与两者间的物化作用相关,包括水泥浆与集料的包裹、水泥浆—沥青膜的“硬化效应”等^[9].当养护龄期从3 d增加至7 d时,水泥灌浆料3.4%的强度增长率及半柔性路面材料48.5%的稳定度增长率进一步说明了这种相互作用随着养护龄期的延长逐渐趋于稳定.

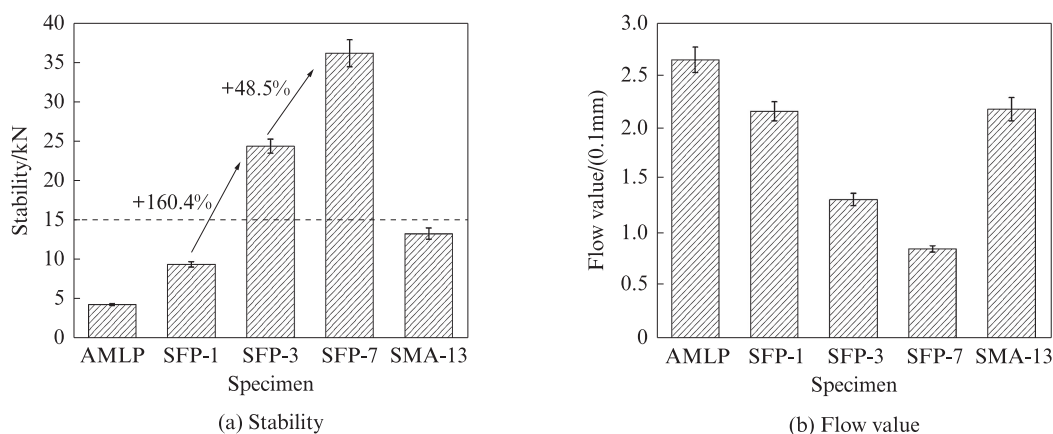


图2 马歇尔试验结果对比

Fig. 2 Comparison of Marshall test results

2.2 动稳定度

车辙试验结果对比见图3。由图3可见:当养护龄期从7 d增加至28 d时,SFP在70℃、0.7 MPa下的动稳定度增长了近2倍,这与SFP中水泥灌浆强度的不断增长以及水泥浆与 AMLP 间物化作用逐渐加深有直接关系;试件 SFP-28 在 70℃、0.7 MPa 下的动稳定度高达 60.8 万次/mm,是同等条件下 SMA-13 混合料的 62 倍,这表明水泥灌浆料与 AMLP 形成了强度高、高温抗变形能力强的整体结构,远远高于现行标

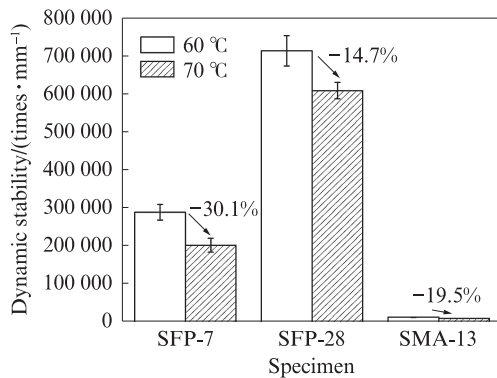
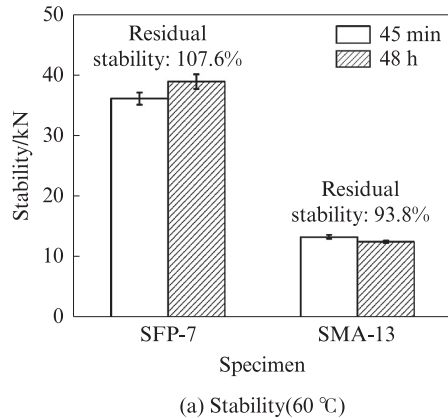
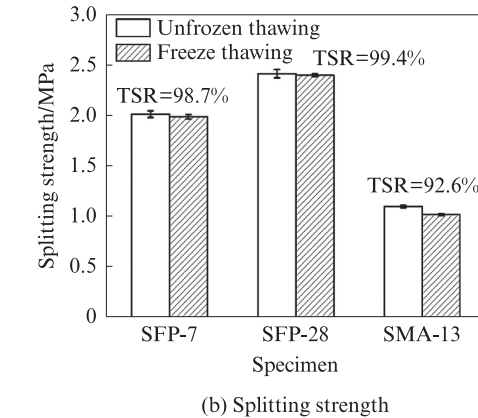


图3 车辙试验结果对比

Fig. 3 Comparison of rutting test results(0.7 MPa)



(a) Stability(60 °C)



(b) Splitting strength

图4 水稳定性试验结果对比
Fig. 4 Comparison of water stability test results

2.4 汉堡浸水车辙性能

SMA-13 混合料的汉堡浸水车辙试验结果及其与 SFP-28 的试验结果对比见图 5、6(图中 N 为加载次数)。由图 5、6 可见,所有试件的车辙演化曲线主要包含后压密(I)、蠕变(II)及剥落(III)3个阶段。后压密阶段是材料发生二次压实的过程;蠕变阶段的蠕变斜率越小表示材料抗变形能力越大;随着钢轮的进一步碾压,试件进入剥落阶段,该阶段剥落斜率越小表示材料的抗剥落能力越强。将蠕变阶段和剥落阶段曲线斜率交点对应的加载次数定义为剥落点。温度升高与荷载增加引起 SMA-13 混合料的蠕变阶段斜率与剥

准(规范要求值为 4 000 次/mm);SFP 与 SMA-13 混合料的动稳定度均随着试验温度的提高而降低;随着龄期的增长,SFP 的高温稳定性进一步增强,其变形受温度影响显著下降,这与 SFP 中刚性水泥灌浆材料受温度影响较小有关^[4];试件 SFP-28 受温度影响小于 SMA-13 混合料。

2.3 水稳定性

水稳定性试验结果对比见图 4(图中 TSR 为残留强度比)。由图 4 可见:试件 SFP-7 的残留稳定度(浸水马歇尔稳定度与标准马歇尔稳定度的比值)高达 107.6%,超过了 100%,这与水泥灌浆料在 48 h 浸水过程中强度的进一步增大有关,且 SFP 空隙率较小,水分很难进入破坏水泥灌浆料与 AMLP 混合料的界面;试件 SFP-28 的马歇尔稳定度超过仪器量程,残留强度比 TSR 也从 SFP-7 的 98.7% 增长到 99.4%。由此可见,SFP 的残留稳定度及 TSR 均高于半柔性路面规程中规定值(规范要求值分别为 90%、80%),且均优于 SMA-13 混合料。此外,测试了冻融前后 SFP 的空隙率变化,冻融前其空隙率为 0.26%,冻融后空隙率为 0.34%,变化较小,这表明水分难以侵入试件内部,SFP 的水稳定性十分优异。

落阶段斜率显著增大,同时使其剥落点前移,试件迅速进入剥落破坏阶段,这说明 SMA-13 混合料的抗变形能力与抗水损害能力受温度与荷载影响巨大。动稳定度试验表明温度对 SFP 的变形影响较小。在高温浸水与高荷载条件下,SFP 的变形始终以较低的蠕变速率增长,且最终也未进入剥落阶段,这说明 SFP 具有优异的抗高温变形与抗水损害能力。当荷载由 0.7 MPa 增加到 0.9 MPa 时,SMA-13 混合料的车辙深度变化远高于试件 SFP-28(两者相差近 20 倍),说明 SMA-13 混合料的浸水车辙性能受荷载的影响程度远高于 SFP。随着加载次数的增大,两者车辙深度差距

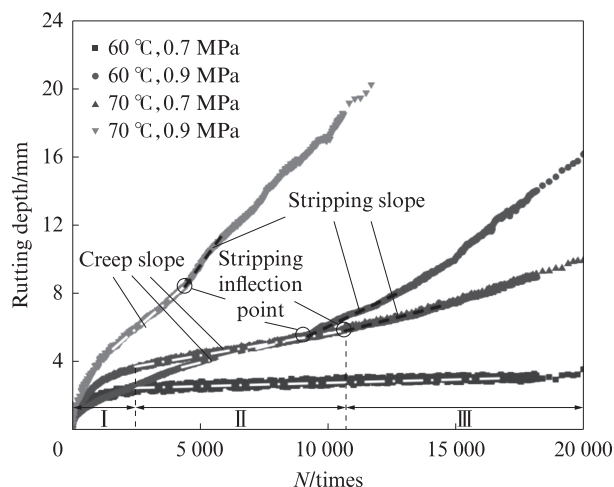


图5 SMA-13混合料的汉堡浸水车辙试验结果

Fig. 5 Hamburg wheel tracking test results of SMA-13 mixture

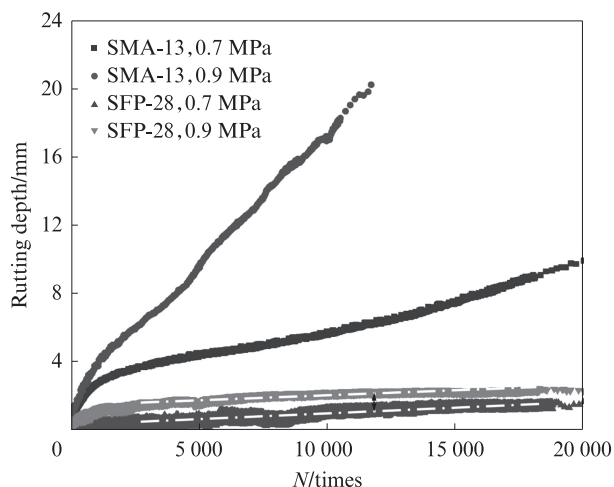


图6 汉堡浸水车辙试验结果对比

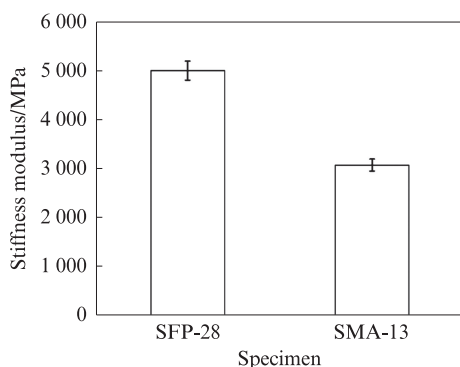
Fig. 6 Comparison of Hamburg wheel tracking test results in water bath (70 °C)

逐步增大,2万次加载后,两者的车辙深度相差6倍。

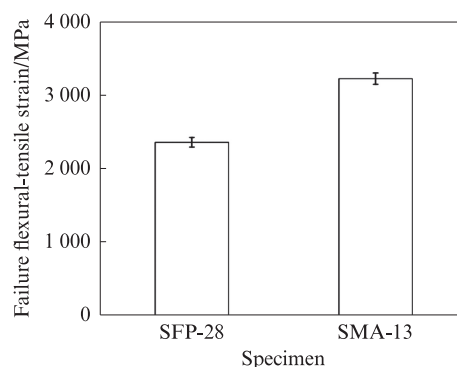
2.5 低温性能

采用破坏弯拉应变与劲度模量表征材料的低温抗裂性能,破坏弯拉应变越大,劲度模量越小,材料的低温抗裂性能越好.低温弯曲试验结果对比见图7.由图7可见,试件SFP-28的劲度模量高于

SMA-13混合料,破坏弯拉应变低于SMA-13混合料,这说明SMA-13混合料的低温抗破坏性能优于SFP,但SFP的破坏弯拉应变显著高于普通沥青混合料^[10].SFP中的水泥灌浆料和AMLPL会随着温度的变化而产生不协调变形,弱化了水泥灌浆料-AMLPL的界面强度,导致SFP低温抗裂性变差.



(a) Stiffness modulus



(b) Failure flexural-tensile strain

图7 低温弯曲试验结果对比

Fig. 7 Comparison of low temperature bending test results

2.6 抗疲劳性能

测试了SFP-28与SMA-13混合料的疲劳曲线,以试件劲度模量降低50%时的加载次数作为疲劳寿命 N_f ,结果见图8.由图8可见:试件SFP-28的初始模量远远高于SMA-13混合料;试件SFP-28的模量衰减速率较高,即使在较低疲劳加载应变速率下(400 $\mu\text{m}/\text{m}$),其疲劳寿命仍远低于SMA-13混合料(1000 $\mu\text{m}/\text{m}$),但远高于普通沥青混合料^[10].SFP中水泥灌浆料与AMLPL界面黏附不佳可能是其疲劳性能弱于SMA-13混合料的原因之一^[7].

2.7 加速加载性能

一般室内与现场加载次数的转换系数推荐为

10^[11],即室内加载100万次相当于现场荷载作用1000万次,属于重交通荷载.加速加载试验得到的铺装结构车辙深度-加载次数曲线见图9.由图9可见:100万次加速加载后,SFP铺装结构与SMA铺装结构均未出现层间脱离与开裂现象,仅出现一定程度的磨损;随着加载次数的增加,2种铺装结构的表面车辙不断加深;SMA铺装结构车辙随着加载次数增加而加速升高,50万次之后增长速率相对较慢;SFP铺装结构的抗车辙性能显著优于SMA铺装结构,其车辙深度随着加载次数的增加仅在前5万次略有增大,而后则几乎趋近平稳;100万次加速加载后,SFP铺装结构的车辙深度仅为SMA铺装结构的1/10.SFP铺装结构

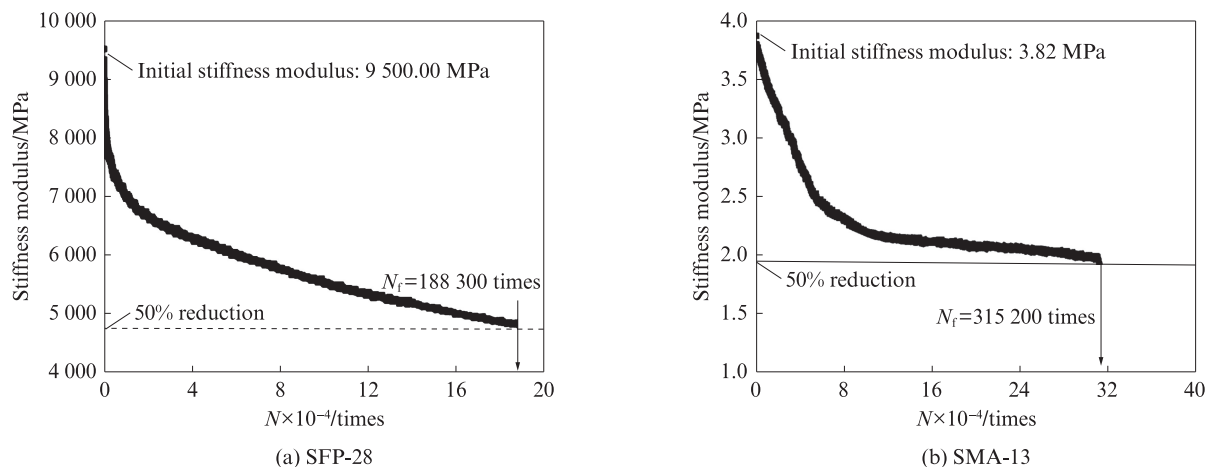
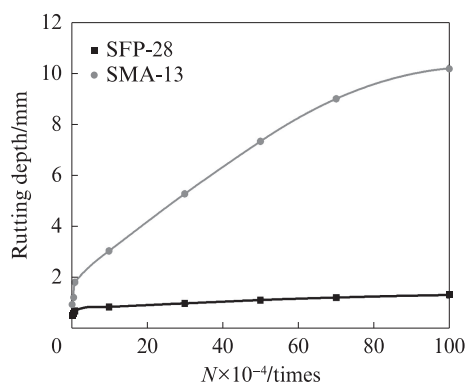


图8 SFP-28及SMA-13混合料的疲劳曲线

Fig. 8 Fatigue curves of SFP-28 and SMA-13 mixture

图9 加速加载试验得到的铺装结构车辙深度-加载次数曲线
Fig. 9 Curve of rutting depth with loading times of pavement structures by accelerated loading test

的变形主要源于前期压实与表层磨损,其结构变形几乎没有;而SMA铺装结构除了前期压密与磨损外,其后期变形更多源自结构的整体变形。

3 结论

(1)高性能半柔性路面材料(SFP)的强度形成与水泥灌浆料的强度、基体大孔隙沥青混合料(AMLP)的强度及两者间相互作用有关,且随养护龄期增长逐渐增强并趋于稳定.SFP中水泥灌浆料1 d抗压强度即达到31.0 MPa,7 d抗压强度为60.0 MPa,可显著缩短开放交通时间。

(2)SFP的强度与高温抗变形能力十分优异.养护7 d的SFP马歇尔稳定度为SMA-13混合料的3倍,养护28 d的SFP动稳定度是SMA-13混合料的62倍,且受温度影响较小。

(3)SFP水稳定性优于SMA-13混合料,远高于规范要求,这与其密实稳定的内部结构有关,水分难以侵入试件内部.在高温浸水条件下,SFP随轮载作用始终未出现剥落破坏,其车辙受荷载的影响程度

远低于SMA-13混合料。

(4)SFP的低温抗裂性能与抗疲劳性能较弱,低于SMA-13混合料而显著高于普通沥青混合料.SFP铺装结构长期耐久性能良好,常温下100万次加速加载后未出现结构脱层与开裂,车辙深度仅为SMA铺装结构的1/10。

参考文献:

- [1] HAJJ E Y, BATIOJA A D, SIDDHARTHAB R. Assessment of pavement damage from bus rapid transit: Case study for Nevada [J]. Transportation Research Record, 2016, 2591(1): 70-79.
- [2] BOURAIMA M B, ZHANG X H, ZHOU S W, et al. Impact of viscosity modifier on asphalt properties used for bus rapid transit lane in Chengdu [J]. Journal of Modern Transportation, 2017, 25(3): 185-193.
- [3] 梁小光. 防水黏结体系和弹性混凝土在BRT停泊位修复工程中的应用[J]. 公路, 2015, 60(8): 235-239.
LIANG Xiaoguang. Application of waterproof bonding system and elastic concrete in BRT berth restoration project [J]. Highway, 2015, 60(8): 235-239. (in Chinese)
- [4] HASSANIA, TAGHIPOORM, KARIMIM M. A state of the art of semi-flexible pavements: Introduction, design, and performance [J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119196.
- [5] 林忠. 日本半柔性铺装技术公路工程中的应用研究[C]// 全国沥青路面应用技术研讨会. 杭州: 中国公路学会, 2008.
LIN Zhong. Research on the application of semi-flexible pavement in highway engineering in Japan [C]// China Symposium on Asphalt Pavement Application Technology. Hangzhou: China Highway Society, 2008. (in Chinese)
- [6] BHARATH G, SHUKLA M, NAGABUSHANA M N, et al. Laboratory and field evaluation of cement grouted bituminous mixes [J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21(6): 1694-1712.
- [7] 凌森林, 王永鑫, 金辉球, 等. 灌注式半柔性路面研究进展

(下转第652页)