

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.10.005

不同成型方法 SMA-13 混合料性能评价

蒋应军, 张文辉*, 张嘉伟, 范江涛, 易 勇
(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 为了对比成型方法对 SMA-13 混合料性能的影响, 研究了垂直振动法 (VVTM)、马歇尔法 (Marshall Method)、旋转压实法 (SGC Method) 制备的 SMA-13 混合料路用性能, 进而对 SMA-13 混合料性能进行了评价。结果表明: VVTM 对混合料施加了振动作用, 集料处于振动状态, 静摩擦力逐渐转变为动摩擦力, 内摩阻力会减小, 集料移动更加充分, 易达到密实, 且骨架结构完整, 从而提高路面性能; 与 Marshall 法、SGC 法相比, VVTM 制备的 SMA-13 混合料试件密度增大, 最佳油石比、空隙率、矿料间隙率减少; 3 种成型方法制备的 SMA-13 混合料试件压实度和粗集料破碎率均得到了有效增加; 矿料级配一定, 在各自最佳油石比下, 相比 Marshall 法和 SGC 法成型的试件, VVTM 设计的试件马歇尔稳定度、动稳定度、抗剪强度、劈裂强度均有明显提升, 力学性能至少提高 30% 和 5%, 同时可以反映出高温稳定性有大幅度提升; VVTM 疲劳方程截距值更大, 斜率值更小, 不同应力水平下 VVTM 设计混合料都具有更好的抗疲劳性能, 且 VVTM 设计的混合料疲劳寿命较 Marshall 法至少提高了 31%, 较 SGC 法至少提高了 10%; 采用室内试验方法模拟 SMA-13 混合料的短期老化和长期老化过程, 在长期老化后 VVTM 设计 SMA-13 具有较好的抗老化性能, 而且性能变化幅度较小。因此, VVTM 成型的 SMA-13 混合料相较于 Marshall 法和 SGC 法有更好的路用性能。

关键词: 道路工程; 性能评价; 成型方法; SMA-13 混合料; 力学性能; 抗疲劳性; 抗老化性

中图分类号: U414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 10-0035-08

Performance Evaluation on SMA-13 Mixture by Different Molding Methods

JIANG Ying-jun, ZHANG Wen-hui*, ZHANG Jia-wei, FAN Jiang-tao, YI Yong
(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University,
Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: In order to compare the influence of molding method on the performance of SMA-13 mixture, the pavement performance of SMA-13 mixture prepared by vertical vibrocompression testing method (VVTM), Marshall method and superpave gyratory compactor (SGC) method are studied, then the performance of SMA-13 mixture is evaluated. The result shows that (1) VVTM exerts vibration action on the mixture, the aggregate is in the state of vibration, the static friction force is gradually changed into the dynamic friction force, the internal friction force is reduced, the aggregate moves more fully, and the compactness is easy to be achieved, and the skeleton structure is complete, thus improves the road surface performance; (2) compared with Marshall method and SGC method, the SMA-13 mixture prepared by VVTM has higher density, lower optimum ratio of asphalt-aggregate, and lower porosity and aggregate porosity; (3) the compactness and crushing rate of coarse aggregate of SMA-13 mixture samples prepared by 3 molding methods effectively increase; (4) compared with the samples made by Marshall method and SGC method, the samples designed by VVTM show a significant improvement in Marshall stability, dynamic stability, shear strength

收稿日期: 2022-01-12

基金项目: 吉林省交通运输科技计划项目 (2017ZDGC-7)

作者简介: 蒋应军 (1975-), 男, 浙江兰溪人, 教授, 博士生导师. (1689205654@qq.com)

* 通讯作者: 张文辉 (1998-), 男, 广东湛江人, 硕士. (wenhui1689205654@163.com)

and splitting strength under the same gradation of mineral materials and each optimal asphalt-aggregate ratio, the mechanical properties are improved by at least 30% and 5%, and the high temperature stability is greatly improved; (5) the fatigue equation of VVTM has larger intercept value and smaller slope value, and the mixture designed by VVTM has better fatigue resistance under different stress levels, and the fatigue life of the mixture designed by VVTM is increased by at least 31% compared with Marshall method, at least 10% higher than SGC method; (6) the short-term and long-term aging process of SMA-13 mixture is simulated by laboratory test. After long-term aging, the performance of SMA-13 designed by VVTM has better ageing resistance, and the change range of performance is small. Therefore, SMA-13 mixture molded by VVTM has better road performance than Marshall method and SGC method.

Key words: road engineering; performance evaluation; molding method; SMA-13 mixture; mechanical property; fatigue resistance; ageing resistance

0 引言

沥青玛蹄脂碎石 (SMA) 因良好骨架密实结构和路用性能而被广泛应用。目前, SMA 设计方法普遍采用 Marshall 法, SGC 法, Hveem 法等, 其差别主要在于成型方法的不同^[1]。Marshall 法属于击实成型法, 可根据实际情况调整设计参数^[2-5]; Hveem 法属于揉搓压实法, 是美国根据实际经验提出的最典型的碾压方法^[6]; SGC 法属于旋转压实法, 对试件同时施加使试件旋转的力及竖向力^[7]。随着我国交通快速发展, 交通量增加迅速, 车辆荷载也不断提升, Marshall 法设计与我国工程实际不匹配, 难以适应现代交通。我国规范设计指标取值简单, 适用范围不明确等, 导致路面更易出现车辙、裂缝、水毁等病害^[8]。

针对这些问题, 道路研究者进行了一系列的研究: Zaumanis 等^[9-11]研究发现 Marshall 法交通量划分简单, 不能准确模拟车轮对路面的影响; Zhang 等^[6]指出 Hveem 法中沥青性能相关性低且体积参数未作为设计指标; 张书华^[12]研究说明 SGC 法设计性能优异, 但设备昂贵, 难以普及; 肖燕等^[13]研究认为 SGC 法设计 SMA 沥青混合料温度敏感性低; 随后 Allpressr 等^[14]对旋转压实、振动压实、轮碾压实及现场机械压实的沥青混合料力学性能进行了对比研究, 指出旋转压实和振动压实的沥青混合料具有更好的力学强度和永久抗变形能力; 蒋应军等^[15-19]基于 VVTM, 对 AC-20 和 ATB-30 混合料做了相关研究, 指出 VVTM 碾压效果更接近路面现场碾压效果, 力学性能更佳且成型试件密度约为 Marshall 试件密度的 1.02 倍, 发现 VVTM 试件与路面现场芯样力学强度相关性高达 92.1%, 具有良好的路用性能, 然而到目前为止, 关于振动成型方法在 SMA 混合料设计当中的运用和研究仍然相对较少。

鉴于此, 本研究以 SMA-13 沥青混合料为研究对象, 通过室内试验对比研究 VVTM, SGC 法和 Marshall 法设计的 SMA-13 试件体积参数, 路用性能和耐久性。验证了 VVTM 的可靠性和优越性, 完善 SMA-13 的相关设计规范, 为我国 SMA-13 设计提供更多的方法选择, 提供理论支撑、实践基础。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料与级配

(1) 沥青

沥青使用韩国某牌 SBS 改性沥青, 技术性质见表 1。实测指标满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004) 要求。

表 1 SBS 改性沥青技术性质

Tab. 1 Technical properties of SBS modified asphalt

指标	测试值	规范值
25 ℃ 针入度/(0.1 mm)	72	60~80
5 ℃ 延度/cm	43	≥30
软化点 (环球法)/℃	83	≥55
135 ℃ 运动黏度/(Pa·s)	2.0	≤3.0
15 ℃ 密度/(g·cm ⁻³)	1.04	实测记录
质量损失/%	-0.29	±1.0
RTFOT 残留物	针入度比/%	70
	5 ℃ 延度/cm	≥60
		≥20

(2) 细集料

细集料来自陕西某建设的石灰岩机制砂, 各指标见表 2。

(3) 粗集料

粗集料使用来自陕西商洛的玄武岩碎石, 指标见表 3。

(4) 矿粉和纤维

矿粉为陕西商洛洛南某矿业有限公司生产提供

表 2 细集料技术性质

Tab. 2 Technical properties of fine aggregate

指标	测试值	规范值
表观密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.78	≥ 2.5
坚固性/%	4.7	≤ 12
砂当量/%	90	≥ 60
棱角/s	32.8	≥ 30

表 3 粗集料技术性质

Tab. 3 Technical properties of coarse aggregate

指标	下列规格集料技术指标测试值			规范值
	9.5~ 16 mm	4.75~ 9.5 mm	2.36~ 4.75 mm	
表观相对密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.98	2.98	2.76	≥ 2.6
针片状颗粒含量/%	7.5	6.2		≤ 12
压碎值/%	14	14	14	≤ 26
磨耗值/%	15	15	15	≤ 28
磨光值	43	43	43	≥ 40
对沥青的黏附性 (级)	5.0	5.0	5.0	≥ 5

的矿粉, 纤维类型为木质素纤维, 纤维掺量 0.5%, 技术性质略。

(5) 级配

以 SMA-13 沥青混合料为研究对象, 级配组成见表 4^[20]。

表 4 SMA-13 沥青混合料矿料级配

Tab. 4 Mineral grading of SMA-13 asphalt mixture

筛孔尺寸/mm	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
质量通过百分率/%	100.0	91.2	63.5	28.8	24.5	20.4	15.2	13.3	11.6	9.5

1.2 试验方案

(1) 力学性能

SMA-13 性能试验包括马歇尔稳定度 (MS)、抗剪强度 (τ_d)、动稳定度 (DS)、劈裂强度 (R_t)、低温弯曲应变 (ε_i)、残留稳定度 (MS_0)、残留强度比 (TSR) 等试验均按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[21] (JTG E20—2011) 中的试验方法进行。

(2) 老化性能

短期老化: 用小型拌和机在标准条件下拌和混合料, 拌和均匀后以 21 kg/m^2 密度摊铺在盘中, 放入烘箱在 $(135 \pm 3)^\circ\text{C}$ 温度强制通风条件下加热 4 h, 混合料每小时翻拌一次, 完成短期老化。

长期老化: 在完成短期老化的基础上, 制作 3 种设计方法的试件, 放入烘箱在 $(85 \pm 3)^\circ\text{C}$ 温度强制通风后连续加热 5 d, 自然冷却不少于 16 h 至室

温, 完成长期老化。

沥青回收: 烘箱老化后, 利用离心抽提仪抽提沥青溶液, 达到透明清澈停止, 然后在离心管中用高速离心法除去矿粉, 离心力大于 $770g$, 离心时间大于 30 min。然后采用阿布森法从抽提液中回收沥青, 从抽提开始到回收结束全过程时间应小于 8 h。

(3) 疲劳性能

采用 MTS810 万能试验机进行间接拉伸疲劳试验, 采用正弦波荷载作为应力控制模式加载, 以模拟路面在行车荷载作用下的实际波形, 加载频率为 10 Hz, 应力水平分别为 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 试验温度为 15°C 。

1.3 不同设计方法设计参数

3 种设计方法采用设计参数^[19-20]见表 5。

表 5 SMA-13 混合料设计参数

Tab. 5 Design parameters of SMA-13 mixture

设计参数	下列方法 SMA-13 设计标准		
	VVTM	Marshall 法	SGC 法
试件尺寸/mm	$\Phi 100 \times h 63.5$	$\Phi 101 \times h 63.5$	$\Phi 101 \times h 63.5$
压实功	振动击实 65 s	双面击实 75 次	旋转击实 100 次
VV/%	2.5~4.0	3.0~4.0	3.5~5.0
VFA/%	74~83	75~85	70~80
VMA/%	≥ 14.5	≥ 17	≥ 13.5

VVTM 采用的垂直振动压实仪构造见图 1, 工作时只有垂直方向产生正弦激振力, 无水平方向激振力。振动仪参数: 工作重量为 3.0 kN (上车系统 1.2 kN, 下车系统 1.8 kN), 工作频率为 37 Hz, 名义振幅为 1.2 mm。

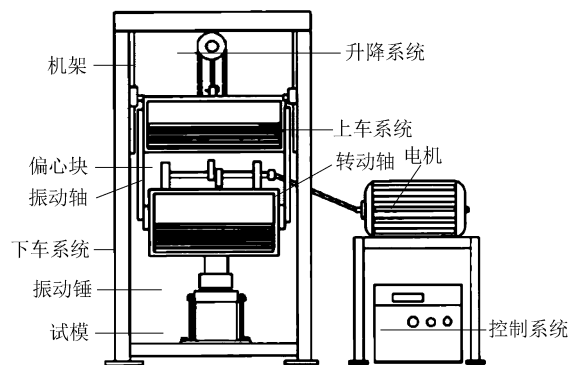


图 1 振动击实试验仪构造

Fig. 1 Equipment structure of vibration compaction tester

2 试验结果与分析

2.1 不同方法对体积参数与级配影响

2.1.1 体积参数

3 种设计方法成型试件的最佳油石比及体积参数

结果见表 6。

表 6 三种方法设计的 SMA-13 混合料最佳油石比及
体积参数

Tab. 6 Best asphalt-aggregate ratios and volumetric
parameters of SMA-13 mixture designed by 3 methods

设计方法	不同方法设计 SMA-13 体积参数				
	最佳油石比/%	密度/(g·cm ⁻³)	VV/%	VMA/%	VFA/%
Marshall 法	5.7	2.52	4.2	17.0	76.1
SGC 法	5.4	2.55	4.0	16.5	76.0
VVTM	5.4	2.58	3.0	15.0	81.0

如表 6 所示, 3 种成型方法下混合料最佳油石比及体积参数均有所不同, VVTM 和 SGC 法 SMA-13 比

表 7 不同压实方式和压实功下 SMA-13 试件级配对比

Tab. 7 Gradation comparison of SMA-13 specimens by different compaction methods and compaction power

成型方式	通过下列筛孔孔径 (mm) 质量百分率/%									
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
原级配	100.0	95.1	62.6	27.0	20.5	19.0	16.1	13.1	12.1	10.2
Marshall50	100.0	95.4	63.8	28.8	21.3	19.7	16.9	13.6	12.7	10.6
Marshall75	100.0	95.9	64.6	30.0	22.4	20.3	17.1	14.1	13.2	10.8
Marshall155	100.0	96.9	66.8	34.5	23.4	21.1	17.8	14.2	13.1	10.9
VVTM10	100.0	95.6	64.0	29.2	22.0	20.1	16.9	13.7	12.6	10.5
VVTM65	100.0	96.3	65.7	31.1	22.6	20.5	17.3	14.2	13.2	11.1
SGC50	100.0	95.4	63.5	28.1	21.3	19.6	16.4	13.6	12.5	10.3
SGC65	100.0	95.7	63.8	29.2	21.6	19.7	16.8	13.6	12.6	10.4
SGC130	100.0	96.5	66.3	31.6	22.7	20.5	17.3	14.2	13.1	10.9

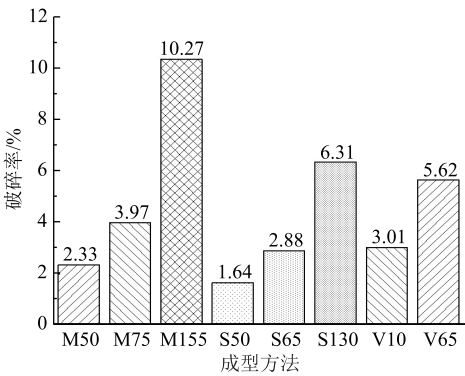


图 2 不同成型方法试件 4.75 mm 以上粗集料破碎率

Fig. 2 Fragmentation rates of coarse aggregate above
4.75 mm specimens by different molding methods

由表 7 和图 2 可知, 成型方式相同时, 压实功越大, 粗集料破碎越多。Marshall 法、SGC 法、VVTM 压实度增加 1%, 粗集料破碎率分别增加 2.8%, 1.8%, 1.2%; 压实功相同时, VVTM 和 SGC 法试件粗集料破碎率较小。SGC50 较 Marshall50 粗集料破碎率降低 0.69%; SGC65, VVTM10 较

Marshall 法 SMA-13 最佳油石比减少了 0.3%, 密度分别提高了 2%, 1%, VV 分别减小了 1.2%, 0.2%, VMA 减小了 2.0%, 0.5%, 而 VFA, VVTM 增大了 5%, SGC 法减少了 0.1%, 说明 VVTM 试件的压实程度最大。这可能是因为 VVTM 成型试件时, 对混合料施加了振动作用, 集料处于振动状态, 静摩擦力逐渐转变为动摩擦力, 内摩阻力会减小, 集料移动更加充分, 易达到密实, 而且骨架结构完整, 从而提高路面性能。

2.1.2 级配

SMA-13 混合料最佳油石比下不同压实方式和压实功下试件的矿料级配见表 7, 各试件粒径 4.75 mm 以上粗集料破碎率见图 2。

Marshall75 粗集料破碎率分别降低 0.96%, 1.09%; SGC130, VTM65 较 Marshall155 粗集料破碎率分别降低 3.97%, 4.65%。压实功越大, SGC 法, VVTM 较 Marshall 法试件粗集料破碎率降低幅度越大。这是因为 Marshall 法压实是靠冲击作用使矿料颗粒发生移动来达到压实效果, 试件的两端都会出现破碎; SGC 法在试件压实过程中, 边旋转试件, 边对试件施加竖向力, 能够更好地模拟实际路面施工状态, 有效降低了集料的破碎; VVTM 施加振动压力波, 集料破碎情况接近路面芯样。

2.2 不同方法对路用性能影响

2.2.1 力学性能

3 种方法设计 SMA-13 的结果见表 8 和图 3。表中 R_m , R_s , R_v 分别指 Marshall 法、SGC 法、VVTM 试件性能。

由表 8 和图 3 可知, 矿料级配一定, 在各自最佳油石比下, VVTM 设计混合料的性能相比于 Marshall 法试件, SGC 法试件有明显提升, VVTM 试

表 8 三种方法最佳油石比下混合料力学性能

Tab. 8 Mechanical properties of mixture with optimal asphalt-aggregate ratio by 3 methods

测试指标	不同方法设计 SMA-13 力学性能		
	Marshall 法	SGC 法	VVTM
MS/kN	14.3	19.0	21.2
DS/(次·mm ⁻¹)	5 758	6 914	7 450
τ _d /MPa	1.2	1.5	1.7
R _i /MPa	3.4	4.2	4.4
ε _i /μξ	3 216	3 287	3 081
MS ₀ /%	90	91	94
TSR/%	85	87	88

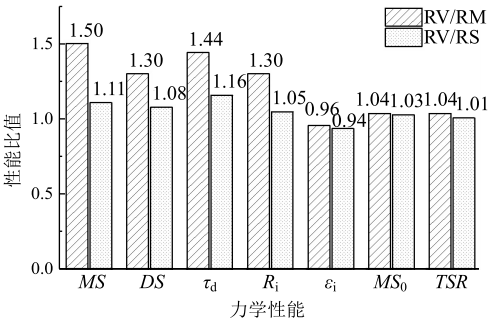
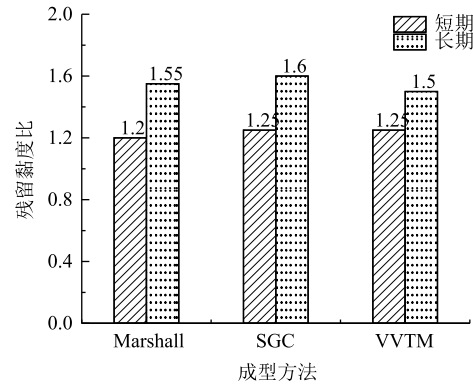
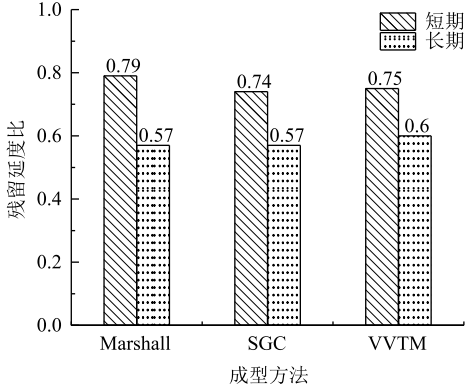


图 3 性能对比

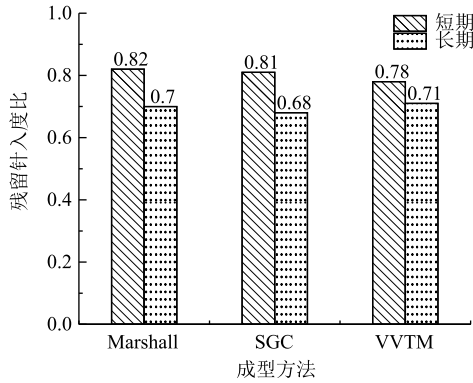
Fig. 3 Performance comparison



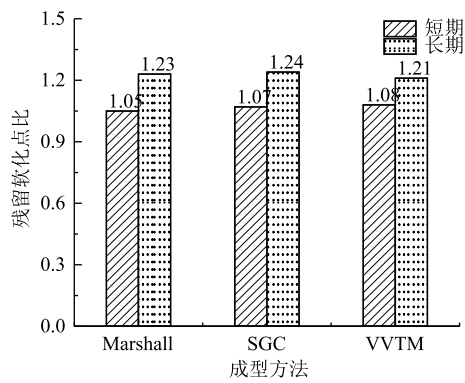
(a) 残留黏度比



(b) 残留延度比



(c) 残留针入度比



(d) 残留软化点比

图 4 沥青老化性能对比

Fig. 4 Comparison of asphalt ageing performance

件马歇尔稳定度、动稳定度、抗剪强度、劈裂强度比 Marshall 法试件分别提高了 50%, 30%, 44%, 30%, 即力学性能提高至少 30%; 比 SGC 法试件提高了 11%, 8%, 16%, 5%, 即力学性能提高至少 5%。同时可以反映出高温稳定性有大幅度提升; 低温稳定性略有降低; 水稳定性提升约 3%。

2.2.2 抗老化性能

回收沥青完成之后, 进行了针入度 (25 ℃), 黏度 (135 ℃), 延度 (5 ℃) 及软化点试验, 并与原样沥青进行对比, 以评价老化过程对沥青性能的影响, 表中 R 代表沥青性能, 下标 S, L 分别表示短期老化过程和长期老化过程。试验结果见表 9。

表 9 老化过程对沥青性能的影响

Tab. 9 Influence of ageing process on asphalt performance

沥青性能	原样	Marshall 法		SGC 法		VVTM	
	沥青	R _S	R _L	R _S	R _L	R _S	R _L
针入度/(0.1 mm)	65.0	53.0	45.5	52.5	44.5	50.5	46.0
延度/cm	41.4	32.6	23.8	30.8	23.5	31.2	24.7
软化点/℃	85.0	89.5	104.5	91.0	105.0	91.5	103.0
黏度/(Pa·s)	2.0	2.4	3.1	2.5	3.2	2.5	3.0

对表 9 中不同混合料提取的沥青测试结果进行对比, 结果见图 4。

表 9 和图 4 可知,不同方法设计 SMA-13 老化回收后,沥青性能的变化趋势相同,即老化程度增加,针入度和延度降低,软化点和黏度增加。相同老化时间下,VVTM 设计的沥青混合料比 Marshall 法和 SGC 法沥青经短期老化之后性能变化幅度更大,抗老化性能较差;经过长期老化后,变化幅度更小,抗老化性能提升。

短期内老化时,沥青膜厚度越大,混合料的抗老化性能更好,VVTM 沥青用量较少,导致沥青膜厚度较小,所以经短期老化过程之后,VVTM 试件中沥青的老化程度更深。而沥青混合料的长期老化主要受氧气、水、光照等外界因素的影响,VVTM 试件具有较大的密度及较小的空隙率,外界的水、氧气、光照不易进入混合料内部,故混合料老化程度较小,所以考虑路面使用时 VVTM 设计的 SMA 混合料具有更好地抗老化性能。

2.2.3 抗疲劳性能

劈裂强度在 MTS810 试验机上进行测量。劈裂强度试验结果见图 5,疲劳试验结果见表 10。

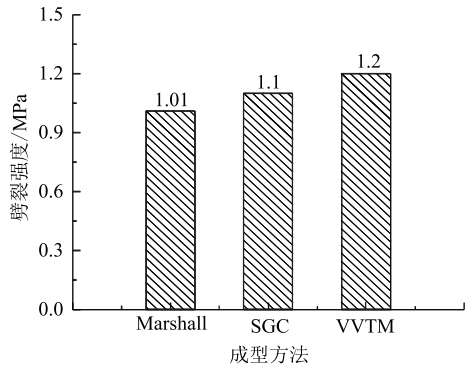


图 5 劈裂强度试验结果
Fig. 5 Splitting strength test result

由表 10 可知,VVTM 试件的劈裂强度相较于 Marshall 法试件和 SGC 法试件分别提升 20%和 9%。因为 VVTM 试件压实时的振动压力波使得试件骨架结构更加密实,提高混合料的内摩擦力和黏结力。

疲劳寿命离散性大,采用 Weibull 分布对疲劳试验数据进行整理分析具有良好的相关性^[21]。疲劳寿命 N 服从两参数 Weibull 分布,建立失效概率和疲劳寿命之间的对应关系。

$$\ln \frac{1}{1-P} = \alpha \ln N - \alpha \ln u, \tag{1}$$

令 $y = \ln \ln \frac{1}{1-P}$, $x = \ln N$, $\beta = \alpha \ln u$, 得式 (2):

$$y = \alpha x - \beta, \tag{2}$$

式中, α 为形状参数; u 为尺度参数; N 为疲劳寿

命; n 为随机变量 N 的特征值。

表 10 疲劳试验结果
Tab. 10 Fatigue test result

设计方法	不同应力水平 S 对应的疲劳次数 N				
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
Marshall 法	17 130	4 694	2 071	717	306
	22 697	5 764	2 345	889	415
	19 831	3 577	1 217	1 135	460
	23 135	4 229	2 849	1 216	675
	17 119	4 700	2 074	715	306
SGC 法	23 429	3 745	1 527	840	419
	22 718	6 137	2 413	1 158	684
	19 362	4 641	3 412	1 373	535
	26 696	5 823	3 012	1 528	482
	23 048	5 089	2 590	1 224	536
VVTM	20 454	4 258	1 715	1 014	485
	25 324	6 111	2 520	1 209	592
	26 462	6 658	3 475	1 475	743
	28 292	7 190	3 751	1 588	811
	20 451	4 259	1 725	1 004	486

根据式 (1) 和表 10 得到不同应力水平下的回归系数 α , β 和相关系数 R^2 , 在不同应力水平条件下,线性回归相关性系数 R^2 均大于 0.9, Weibull 分布处理数据结果良好。

由式 (2) 反算不同失效概率下 SMA-13 混合料疲劳寿命 N , 然后采用式 (3) 计算疲劳方程回归系数和相关系数 (R^2), 结果如表 11 所示。

$$\ln N = a - b \lg S, \tag{3}$$

式中, a , b 为方程待定回归系数; S 为应力水平; N 为疲劳寿命。

表 11 疲劳方程回归系数及相关系数

Tab. 11 Regression coefficients and correlation coefficients of fatigue equation

设计方法	系数	不同失效概率 (%) 下疲劳方程系数					
		5	10	20	30	40	50
Marshall 法	a	1.419 7	1.571 8	1.727 8	1.827 0	1.902 3	1.966 0
	b	5.098 3	4.907 8	4.715 1	4.590 6	4.497 0	4.418 2
	R^2	0.995 0	0.996 5	0.997 3	0.997 3	0.997 0	0.996 5
SGC 法	a	1.723 5	1.834 2	1.938 0	2.002 6	2.052 3	2.094 6
	b	4.563 5	4.481 6	4.398 8	4.347 6	4.308 0	4.274 1
	R^2	0.982 4	0.987 7	0.991 2	0.992 2	0.992 3	0.991 8
VVTM	a	1.733 3	1.840 4	1.960 0	2.034 3	2.091 3	2.140 1
	b	4.473 7	4.413 4	4.338 3	4.292 5	4.257 2	4.226 3
	R^2	0.965 4	0.978 0	0.987 9	0.992 4	0.994 7	0.995 9

研究表明,应力比 $S=0.45$ 是疲劳寿命 N 发生大幅改变的分界点^[22],采用 $S=0.45$ 进行疲劳寿命分析,结果见表 12。

表 12 0.45 应力水平下疲劳寿命
Tab. 12 Fatigue life at stress level 0.45

失效概率/%	不同方法下疲劳寿命		
	Marshall 法	SGC 法	VVTM
5	1 603	1 941	2 201
50	2 987	3 749	4 159

由表 12 可知, VVTM 设计的 SMA-13 疲劳寿命较 Marshall 法最少提高了 31%, 较 SGC 法最少提高了 10%, 即 VVTM 设计的 SMA-13 沥青混合料具有更好的抗疲劳性能。

SMA-13 混合料疲劳方程式 (3) 中的回归系数 a 越大, 表征应力作用下材料抗疲劳性能越好; 回归系数 b 越小, 表征材料对应力变化越不敏感, 材料的抗疲劳性能越好^[23]。由表 11 可知, VVTM a 值在各个失效概率下普遍大于 Marshall 法和 SGC 法, b 值全部小于 Marshall 法和 SGC 法。

根据表 11 中数据, 以 $\lg N$ 纵坐标, $\lg S$ 为横坐标绘图, 见图 6。

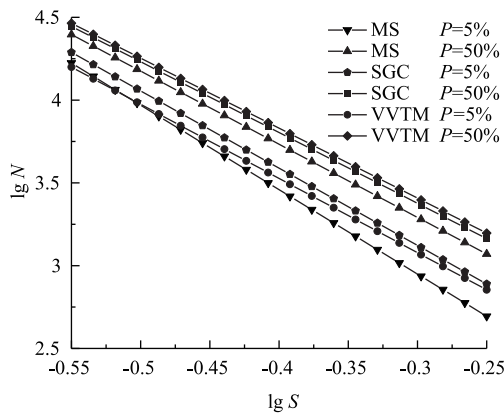


图 6 不同设计方法混合料 $\lg N$ - $\lg S$ 曲线

Fig. 6 $\lg N$ - $\lg S$ curves of mixture by different methods

由表 11 及图 6 可知, 采用不同方法设计的 SMA-13 混合料, $\lg S$ 随 $\lg N$ 呈线性变化, 相关性强, 且不同的成型方法对 SMA-13 的疲劳性能影响显著; VVTM 设计 SMA-13 混合料的疲劳特性良好, 对应力变化敏感性良好, 具有一定的抗疲劳优势; 5% 失效概率下 VVTM 明显优于其他两种方法, 对比分析失效概率为 5% 及 50% 时 VVTM 试件下的疲劳预估寿命曲线可知, 在不同失效概率下 SMA-13 混合料的疲劳寿命存在较大差异, 在低失效概率下不同方法差异明显, 失效概率增大导致各方法差异减小。

3 结论

(1) VVTMSMA-13 比 Marshall 法 SMA-13 最佳油

石比减少了 0.3%, 密度提高了 2%, VV 减小了 1.2%, VMA 减小了 2.0%, 而 VFA 增大了 5%, VVTM 试件的压实程度最大, 相同压实功下 VVTM 试件集料破碎率最小。

(2) VVTM 设计混合料的路用性能和耐久性更好, 矿料级配一定时, 在各自最佳油石比下, 与 Marshall 法相比马歇尔稳定度、抗剪强度、动稳定度、劈裂强度分别提高了 50%, 44%, 30%, 30%; 与 SGC 法试件相比, 分别提高了 11%, 16%, 8%, 5%。

(3) 采用室内试验方法模拟 SMA 混合料的短期老化和长期老化过程, 在长期老化后 VVTM 设计 SMA-13 具有较好地抗老化性能。

(4) 随着应力水平的增加, 疲劳次数均呈下降趋势; VVTM 疲劳方程截距 a 值更大, 斜率 b 值更小, 在不同应力水平下 VVTM 设计混合料都具有更好的抗疲劳性能。且在 $S=0.45$ 应力水平下 VVTM 设计的 SMA-13 疲劳寿命较 Marshall 法最少提高了 31%, 较 SGC 法最少提高了 10%。

参考文献:

References:

- [1] 蒋应军, 张勇, 张大强, 等. 不同方法设计 SMA 沥青混合料路用性能评价 [J]. 公路交通技术, 2020, 36 (3): 31-36.
JIANG Ying-jun, ZHANG Yong, ZHANG Da-qiang, et al. Performance Evaluation of SMA Asphalt Mixture Design by Different Methods [J]. Technology of Highway and Transport, 2020, 36 (3): 31-36.
- [2] 冯小伟, 支鹏飞. 基于马歇尔试验的 AR-SMA-13 橡胶沥青混合料线膨胀性能研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (3): 31-36.
FENG Xiao-wei, ZHI Peng-fei. Study of Linear Expansion Performance of AR-SMA-13 Asphalt Rubber Mixture Based on Marshall Test [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (3): 31-36.
- [3] GOETZ W H. The Evolution of Asphalt Concrete Mix Design [J]. Asphalt Concrete Mix Design: Development of More Rational Approaches. ASTM International, 1989.
- [4] XU B, CHEN J Y, ZHOU C H, et al. Study on Marshall Design Parameters of Porous Asphalt Mixture using Limestone as Coarse Aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 846-854.
- [5] TAN Y Q, SUN Z Q, GONG X B, et al. Design Parameter of Low-temperature Performance for Asphalt Mixtures in Cold Regions [J]. Construction & Building Materials, 2017, 155: 1179-1187.
- [6] ZHANG C, WANG H N, YOU Z P, et al. Compaction Characteristics of Asphalt Mixture with Different Gradation

- Type Through Superpave Gyratory Compaction and X-ray CT Scanning [J]. Construction and Building Materials, 2016, 129: 243-255.
- [7] HAN D D, WEI L Y, ZHANG J X. Experimental Study on Performance of Asphalt Mixture Designed by Different Method [J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 407-414.
- [8] 由诗园. 沥青路面早期车辙破坏原因分析 [J]. 工程建设与设计, 2019 (16): 78-79.
- YOU Shi-yuan. Causes Analysis of Early Rutting Damage of Asphalt Pavement [J]. Construction & Design for Engineering, 2019 (16): 78-79.
- [9] ZAUMANIS M, POULIKAKOS L D, PARTL M N. Performance-based Design of Asphalt Mixtures and Review of Key Parameters [J]. Materials & Design, 2018, 141: 185-201.
- [10] TAPKIN S, KESKIN M. Rutting Analysis of 100 mm Diameter Polypropylene Modified Asphalt Specimens Using Gyratory and Marshall Compactors [J]. Materials Research, 2013, 16 (2): 546-563.
- [11] 刘宏晋. AC-25S 沥青混合料马歇尔设计方法研究 [J]. 公路交通技术, 2016, 32 (4): 15-21, 25.
- LIU Hong-jin. Study on Marshall Design Method for AC-25 S Asphalt Mixture [J]. Technology of Highway and Transport, 2016, 32 (4): 15-21, 25.
- [12] 张书华. 贝雷法和 CAVF 法在 AK-13A 和 SMA-13 的混合料级配设计中的应用 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (9): 15-20.
- ZHANG Shu-hua. Application of Bailey Method and CAVF Method in Designing Mixture Gradation of AK-13A and SMA-13 [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (9): 15-20.
- [13] 肖燕. 基于图像分析技术的不同压实方法沥青混合料级配变化特征研究 [J]. 公路交通技术, 2016, 32 (1): 42-47.
- XIAO Yan. Research on Change Features of Gradation of Asphalt Mixture in Different Compaction Methods Based on Image Processing Technique [J]. Technology of Highway and Transport, 2016, 32 (1): 42-47.
- [14] ALLPRESS C, ARTAMENDI I, ALLEN B, et al. Effect of Laboratory Compaction Method on the Mechanical Properties of Bituminous Materials [J]. International Journal of Pavement Engineering & Asphalt Technology, 2017, 18 (1): 44-61.
- [15] 蒋应军, 赵占林, 李明杰. 两种方法设计沥青混合料的疲劳特性 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2016, 37 (4): 473-478.
- JIANG Ying-jun, ZHAO Zhan-lin, LI Ming-jie. Two Methods to Design the Fatigue Characteristics of Asphalt Mixture [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2016, 37 (4): 473-478.
- [16] 蒋应军, 孔令飞, 陈浙江. ATB-30 沥青混合料 VVCM 与马歇尔设计对比 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (6): 6-11.
- JIANG Ying-jun, KONG Ling-fei, CHEN Zhe-jiang. Comparison of VVCM and Marshall Method for ATB-30 Asphalt Mixture Design [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (6): 6-11.
- [17] 薛金顺, 蒋应军, 陈豫, 等. 垂直振动压实 SRX 稳定碎石力学性能影响因素研究 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (4): 1387-1392, 1429.
- XUE Jin-shun, JIANG Ying-jun, CHEN Yu, et al. Influence Factors of Mechanical Property of SRX Stabilized Crushed Stone Base on Vertical Vibration Test Method [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37 (4): 1387-1392, 1429.
- [18] 蒋应军, 韩占闯, 胡永林. 冷再生混合料垂直振动成型法设计与评价 [J]. 南京理工大学学报, 2019, 43 (2): 186-192.
- JIANG Ying-jun, HAN Zhan-chuang, HU Yong-lin. Design and Evaluation of Vertical Vibration Molding Method for Cold Recycled Mixture [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43 (2): 186-192.
- [19] 张毅, 薛金顺, 陈浙江, 等. 成型方法对 ATB-30 混合料性能的影响 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (10): 1-6.
- ZHANG Yi, XUE Jin-shun, CHEN Zhe-jiang, et al. Effect of Compaction Methods on Performance of ATB-30 Asphalt Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (10): 1-6.
- [20] 薛金顺. SMA 混合料振动压实试验方法及设计关键技术 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
- XUE Jin-shun. Research on Vertical Vibration Test Method and Key Technology of SMA Mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [21] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S].
- JTG E20—2011, Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixture of Highway Engineering [S].
- [22] JIANG Y J, LIU H P, XUE J S. Fatigue Performance of Vertical Vibration Compacted Cement-stabilized Recycled Pavement Materials [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2018, 46 (5): 2251-2264.
- [23] 易勇, 蒋应军, 谭云鹏, 等. 不同成型方式乳化沥青冷再生混合料力学特性研究 [J]. 重庆大学学报, 2021, 44 (5): 50-58.
- YI Yong, JIANG Ying-jun, TAN Yun-peng, et al. Mechanical properties of emulsified asphalt cold recycling mixture with different forming methods [J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44 (5): 50-58.