

DOI: 10.7672/sgjs2025240141

等质量法在沥青混合料击实法制件中的应用研究*

高占华^{1,2}, 陈志伟³, 魏贵岭^{1,2}, 薛冬⁴, 郭馨^{1,2}

- (1. 河北省交通规划设计研究院有限公司, 河北 石家庄 050091;
2. 公路建设与养护技术、材料及装备行业研发中心, 河北 石家庄 050010;
3. 河北交通投资集团有限公司, 河北 石家庄 050090;
4. 河北雄安荣乌高速公路有限公司, 河北 保定 071799)

[摘要] 为避免沥青混合料击实法制件中的盲目性和减少人为因素干扰, 提出了基于等质量法的沥青混合料击实法制件步骤。将等质量法和按现行规范要求制作不同高度的试件进行试验测试, 确定不同情形下沥青混合料的最佳沥青用量, 经室内各项性能试验验证, 表明采用该方法设计的沥青混合料性能均衡, 为击实法制件的可操控性提供了依据。

[关键词] 沥青混合料; 成型方法; 等质量法; 等体积法; 最佳油石比; 试验

[中图分类号] U414

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)24-0141-07

Application of Equal Mass Method in Production of Specimens by Asphalt Mixture Compaction Method

GAO Zhanhua^{1,2}, CHEN Zhiwei³, WEI Guiling^{1,2}, XUE Dong⁴, GUO Xin^{1,2}

- (1. Hebei Provincial Communications Planning, Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050091, China;
2. Research and Development Center of Transport Industry of Technologies, Materials and Equipment of Highway Construction and Maintenance, Shijiazhuang, Hebei 050010, China; 3. Hebei Transportation Investments Group Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050090, China; 4. Hebei Xiong'an Rongcheng-Wuhai Expressway Co., Ltd., Baoding, Hebei 071799, China)

Abstract: In order to avoid blindness in production by asphalt mixture compaction method and reduce human disturbance, the steps of making specimen by asphalt mixture compaction method based on equal mass method are proposed. It combines equal mass method and produces samples of different heights according to the requirements of current test specifications to determine the optimum asphalt content of asphalt mixture under different conditions. The experimental results show that the asphalt mixture designed by the compaction method has balanced performance, which provides a basis for the manipulability of the specimen made by the compaction method.

Keywords: asphalt mixture; molding method; equal mass method; equal volume method; optimal asphalt content; testing

0 引言

现行沥青混合料设计方法大部分采用马歇尔设计方法, 通过马歇尔冲击成型试件进行混合料体积参数和稳定性系数等试验的结果来确定最佳油石比^[1-4]。虽然 Superpave 及 GTM 等旋转压实方法

得到了一定程度的应用, 但马歇尔设计方法中仪器设备简单、可操控性强, 常被应用于室内试验和施工现场检验等场合^[5-7], 目前在沥青路面设计和施工中仍作为主流得到大规模推广应用。

相比于其他设计方法, 马歇尔设计方法存在室内击实成型方式和现场成型方式不匹配、测试指标稳定性和流值与路用性能相关性不强、试验测试结果离散性较大且易受人为因素干扰等缺陷, 受到不少研究者质疑^[8-12]。此外, 现行试验规程中仅规定了试件成型高度应符合 $63.5\text{mm} \pm 1.3\text{mm}$ (标准试

* 河北省交通运输厅科技项目: 高等级道路用集料关键指标与质量控制技术研究 (KT13)

[作者简介] 高占华, 硕士, 高级工程师, E-mail: zhanhuagao585@sina.com

[通信作者] 陈志伟, 硕士, 高级工程师, E-mail: 591692670@qq.com

[收稿日期] 2024-09-16

件)或 $95.3\text{mm}\pm 2.5\text{mm}$ (大型试件)区间要求,导致试件制作过程中装料数量和成型高度都会影响混合料的标准毛体积密度和最佳油石比,所确定的参数很难指导路面施工和质量评价。

鉴于马歇尔设计方法在很短时间内很难被摒弃,仍是目前我国沥青混合料的主要设计、施工质量控制手段,本文尝试采用等质量法对击实法成型试件提出要求,并对沥青混合料体积参数和性能参数进行比较分析,研究结果可为后续设计、施工提供参考。

1 材料设计

1.1 沥青

试验采用 SBS 改性沥青和胶粉复合改性沥青,按 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的规定进行试验,不同类型改性沥青各项技术指标如表 1,2 所示。

表 1 SBS 改性沥青技术指标

技术指标	技术要求	检测结果	试验方法
25℃ 针入度/0.1mm	40~60	48	T0604
软化点/℃	≥60	76.0	T0606
5℃ 延度/cm	≥20	24	T0605
135℃ 运动黏度/(Pa·s)	≤3	1.8	T0625
贮存稳定性/℃	≤2.5	1.5	T0661

表 2 胶粉复合改性沥青技术指标

技术指标	技术要求	检测结果	试验方法
25℃ 针入度/0.1mm	40~60	51	T0604
软化点/℃	≥60	74.5	T0606
5℃ 延度/cm	≥10	18	T0605
180℃ 运动黏度/(Pa·s)	0~4	2.9	T0625
贮存稳定性/℃	≤5	2.0	T0661

1.2 矿料

粗集料选用玄武岩石料,细集料和填料选用石灰岩生产的机制砂和矿粉,按 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》中的规定进行试验,矿料技术指标如表 3 所示。

表 3 矿料技术指标

矿料类型	技术指标	技术要求	检测结果	试验方法
粗集料	压碎值/%	≤26	12.1	T0316
	对沥青的黏附性	≥5 级	5 级	T0616
	针片状颗粒含量/%	≤15	8.3	T0312
细集料	砂当量/%	≥60	72	T0334
	亚甲蓝含量/(g·kg ⁻¹)	≥25	2.4	T0349
矿粉	含水率/%	≤1	0.6	T0103
	亲水系数	<1	0.7	T0353

1.3 配合比设计

试验采用 AC-13, ARHM-13, SMA-13 3 种沥青混合料矿料级配,其中 AC-13 采用 SBS 改性沥青, ARHM-13, SMA-13 采用胶粉复合改性沥青,级配设计曲线如图 1 所示。

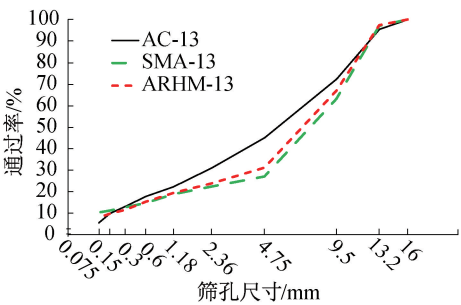


图 1 不同类型混合料级配设计曲线

Fig.1 Gradation design curves of different types of mixture

1.4 试件制备

根据经验, AC-13, ARHM-13, SMA-13 分别从 3.8%, 4.8%, 5.0% 初始油石比开始,每种级配后续油石比按 0.4% 步长进行 5 组不同油石比试件制备,试验前所有试件高度应满足试验规程的区间要求,参照 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》附录 B 和附录 C 的规定,确定 3 种混合料的最佳沥青用量,并进行各种使用性能检验。

2 成型方法改进

2.1 试件制作存在的问题分析

2.1.1 试件不同制作高度原因分析

现行规程规定标准试件成型高度应符合 (62.2mm, 64.8mm) 区间要求,然而在制件过程中如何把控是配合比设计的一个难点。理想状态是所有试件高度控制在约 63.5mm,但要精确控制每组试件高度在约 63.5mm 目前还无很好的解决办法,大多依托以往制件经验进行预估,这就造成不同设计人员因制件高度不同导致最佳油石比和体积参数出现偏差,使得在配合比设计中存在一定的变异性和不确定性。

简要说来,常规制件方法总是以成型试件高度 63.5mm 为目标,故可简称为“等体积法”,然而在制件过程中,随着油石比增加,混合料的和易性变好,简单根据经验增加等质量混合料质量(一般增加 5~10g)并不能使得试件高度在预期要求内,而且带有一定的盲目性和随机性,给后续体积参数的测试和配合比设计带来困难。

2.1.2 制件高度影响体积参数分析

制件高度直接影响体积参数和最佳沥青用量。

如果制作的试件高度普遍偏高,确定的最佳沥青用量会偏高;反之,其最佳沥青用量会偏低。与此同时,随着制件高度增加,混合料体积参数 ρ_f 和沥青饱和度(VFA)变小,空隙率(VV)和矿料间隙率(VMA)变大。若一味减小成型试件高度,可能会导致最佳沥青用量附近VMA满足不了规范中的最低要求,致使试验失败而需重新制件,更有甚者使得决策者认为原材料不能使用而需重新换料,使得本来能用的原材料因试验制件操作问题而被弃用,得不偿失。

此外,按一定间隔成型的不同沥青用量试件密度测试中,密度是否出现峰值直接影响最佳沥青用量设计参数 OAC_1 的大小,从而影响最佳沥青用量OAC的确定。目前,在所选择试验的沥青用量范围内,对于热拌沥青混合料密度是否应出现峰值或递增目前说法不一。因此,如何在成型试件过程中控制试件高度成为棘手问题,有必要对成型方法中的相关问题进行研究,以提高其试验结果的准确性。

2.2 试件制作改进方法分析

由前所述,刻意控制试件高度在约63.5mm其实相当于“等体积法”,为此,有必要采用“等质量法”进行马歇尔法试件制作。对不同沥青用量试件装料量采用等质量法进行装料,不仅可使不同沥青用量混合料的和易性不受人为因素影响,也使得不

同沥青用量试件试验测试中体积参数级配曲线较顺滑,无须进行调整。另外,实体铺筑时混合料出料量是按质量而不是按体积进行预算,按等质量法设计的配合比更能有效指导现场施工。

需要说明的是,采用等质量法制件时,前提条件有3个:①所制作不同沥青用量试件装料量相同;②所制作不同沥青用量试件高度必须满足规范规定的试件高度范围要求;③在制件过程中,设定的最低沥青用量试件高度应在规范规定试件高度上限区域,标准马歇尔法试件取值范围符合(64.0mm, 64.8mm)区间要求,大型马歇尔法试件取值范围符合(96.5mm, 97.8mm)区间要求。

3 试验结果与分析

3.1 不同成型试件高度与密度关系分析

为了对比不同成型试件高度对密度的影响,将试件高度分为(62.2mm, 63.0mm), (63.0mm, 64.0mm), (64.0mm, 64.8mm)3个区间进行3种不同级配、不同油石比条件下的配合比设计。需要说明的是,图2,3中数据为测试的不同油石比每组试件高度和毛体积密度的平均值。此外,对采用等质量法设计的3种类型混合料不同油石比条件下成型试件高度和密度的关系进行了统计,如图4,5所示。

可看出,无论是哪种级配,按常规方法成型的3个区间不同油石比条件下试件高度与毛体积密度

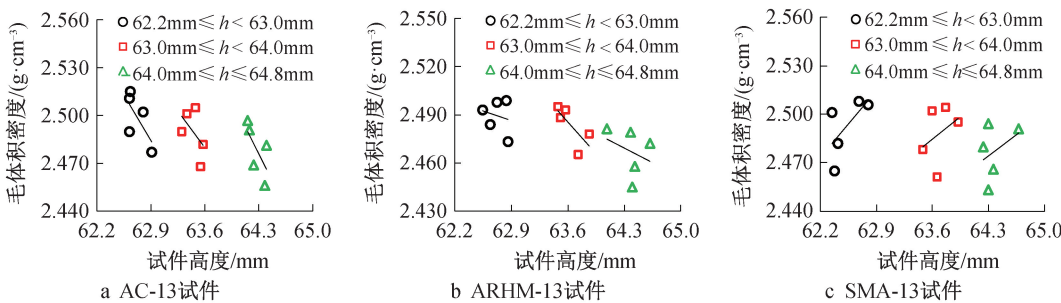


图2 不同级配类型不同成型试件高度与毛体积密度关系

Fig. 2 Relationship between the height and bulk volume density of different forming specimens with different gradation types

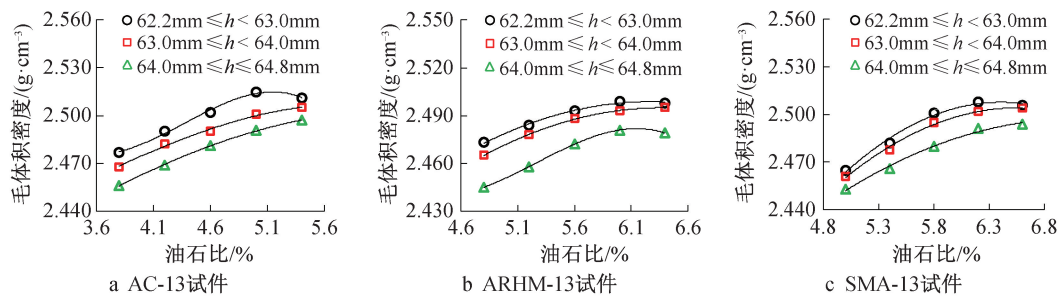


图3 不同级配类型不同沥青用量与毛体积密度关系

Fig. 3 Relationship between different asphalt dosages and bulk volume densities for different gradation types

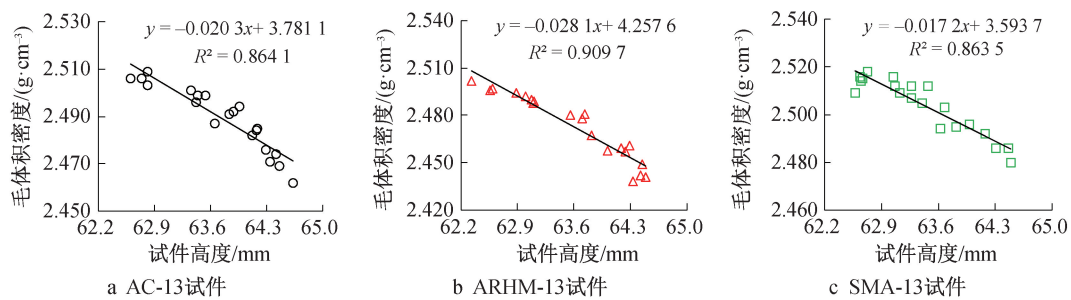


图 4 不同级配类型等质量法成型试件高度与毛体积密度关系(图中数据来源于所有试件测试值)

Fig. 4 Relationship between the height and bulk volume density of forming specimens by equal mass method with different gradation types (the data in the figure is sourced from the test values of all specimens)

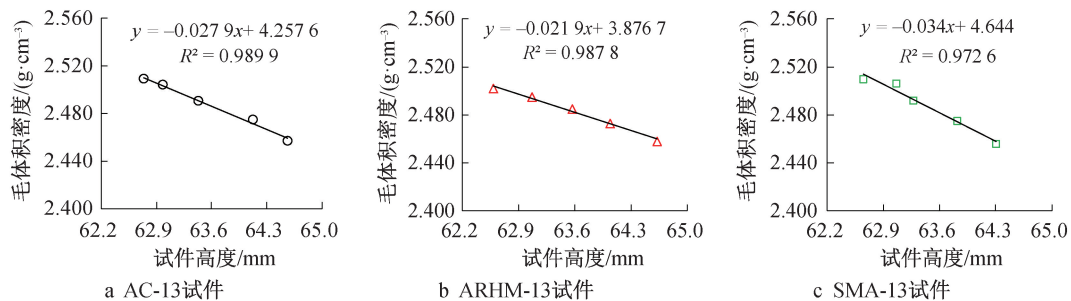


图 5 不同级配类型等质量法成型试件高度与毛体积密度关系(图中数据来源于每组试件平均值)

Fig. 5 Relationship between the height and bulk volume density of forming specimens by equal mass method with different gradation types (the data in the figure is sourced from the average value of every group of specimens)

无明显相关性(见图 2),在所选择试验的沥青用量范围内,受试件高度影响,毛体积密度出现峰值具有不确定性(见图 3)。采用等质量法成型的不同级配类型、不同油石比条件下试件高度与毛体积密度相关性良好,试件高度随油石比增加而降低,其毛体积密度呈上升趋势且无峰值,避免了试验过程中人为因素干扰。即使将所用试件密度测试值与试件高度进行数值拟合,其相关系数均>0.85(见图 4),验证了在配合比设计中等质量法成型不同油石比试件的合理性和必要性。

3.2 不同成型试件高度与体积参数关系分析

为了对比不同成型试件高度对体积参数的影响,参照规范体积参数计算方法,对不同级配类型按上述 3 个区间要求不同油石比条件下所成型的试

件高度与体积参数(VV,VMA,VFA)关系进行了统计,如图 6~8 所示。

可看出,同一级配和同一油石比条件下,体积参数与试件高度密切相关,空隙率和矿料间隙率与试件高度呈递增关系,沥青饱和度与试件高度呈递减关系。具体来说,对于悬浮-密实性结构 AC-13,在 3 个不同试件设置区间内,随着试件高度增加,空隙率和矿料间隙率约增加 0.3%,沥青饱和度约减小 1.5%;对于骨架-密实型结构 ARHM-13 和 SMA-13,试件高度对混合料体积参数影响较大,试件高度在 (62.2mm,63.0mm) 和 (63.0mm,64.0mm) 区间,随着试件高度增加,空隙率和矿料间隙率约增加 0.15%,沥青饱和度约减小 1.0%;当试件高度增加到 (64.0mm,64.8mm) 区间时,空隙率和矿料间隙率

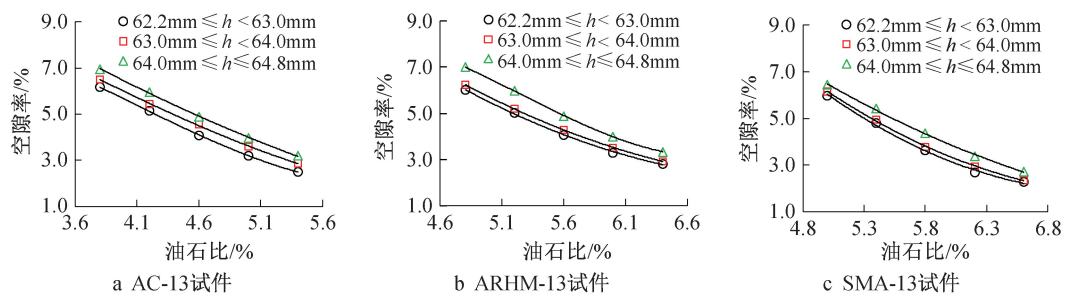


图 6 不同级配类型不同沥青用量与空隙率关系

Fig. 6 Relationship between different asphalt dosages and VV of specimens for different gradation types

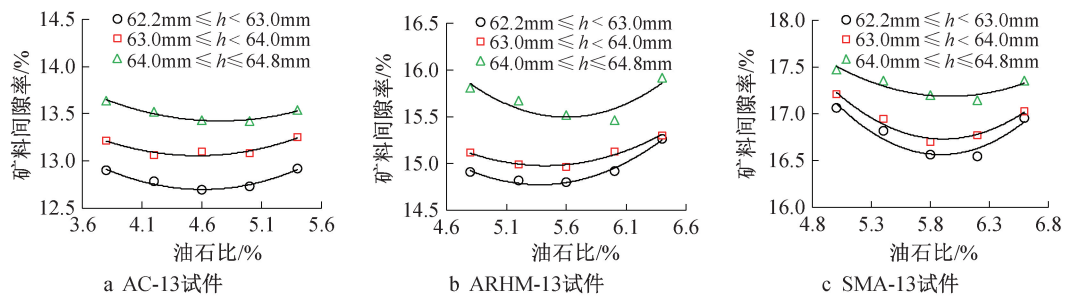


图 7 不同级配类型不同沥青用量与矿料间隙率关系

Fig. 7 Relationship between different asphalt dosages and VMA of specimens for different gradation types

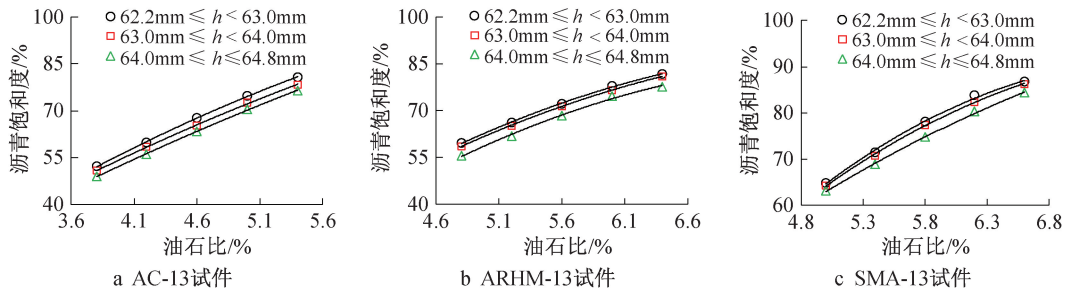


图 8 不同级配类型不同沥青用量与沥青饱和度关系

Fig. 8 Relationship between different asphalt dosages and VFA of specimens for different gradation types

约增加 0.5%, 沥青饱和度约减小 3.0%。因此, 对于不同级配类型尤其是骨架-密实型结构而言, 成型试件高度直接影响测试体积参数大小, 造成对配合比设计中最佳沥青用量和标准毛体积密度 2 个关键控制参数的影响。

3.3 不同成型试件高度与路用性能关系分析

根据前面所述试验测试结果, 对不同成型高度和等质量法要求下确定的最佳油石比结果进行统计(见表 4)。由表 4 可知, 无论采用哪种胶结料和级配类型, 不同成型试件高度条件下确定的最佳油石比差别明显(最大值和最小值差别 0.3%), 势必会给配合比设计带来困扰。等质量法和试件高度在(63.0mm, 64.0mm)区间确定的最佳油石比基本相同, 这是因为等质量法在最佳油石比附近成型的试件高度基本上在 63.5mm 附近, 这一点和试件高度在(63.0mm, 64.0mm)区间要求不谋而合, 二者路用性能相当, 不再重复进行试验。

由图 9 可知, 在不同成型高度条件下, 试件高度在(63.0mm, 64.0mm)区间确定的最佳油石比成型试件的高温稳定性最优, 与试件高度在(64.0mm, 64.8mm)区间确定的最佳油石比成型试件相比, 二者低温抗裂性能和水稳定性接近, 但优于在(62.2mm, 63.0mm)区间确定的最佳油石比成型试件的各项性能, 间接反映了等质量法在马歇尔配合比设计中应用的合理性和可靠性。

表 4 不同成型试件高度和等质量法确定最佳油石比统计结果

Table 4 Statistical results of different forming specimen heights and optimal asphalt contents determined by equal mass method

类别	最佳油石比/%		
	AC-13	ARHM-13	SMA-13
62.2mm ≤ h < 63.0mm	4.69	5.64	5.85
63.0mm ≤ h < 64.0mm	4.85	5.74	5.97
64.0mm ≤ h ≤ 64.8mm	4.99	5.96	6.15
等质量法	4.81	5.76	5.94

3.4 不同沥青用量与体积参数数据拟合分析

为了进一步确定等质量法条件下不同沥青用量对不同类型沥青混合料体积参数的影响, 将不同油石比与毛体积密度、空隙率、矿料间隙率及沥青饱和度等参数进行数据拟合, 研究分析不同沥青用量与各项体积参数间的关系(见图 10 和表 5)。可看出, 等质量法条件下不同沥青用量对不同类型沥青混合料体积参数有显著影响, 采用二阶多项式对沥青用量与不同体积参数进行数据拟合, 相关系数均在 0.95 以上, 有利于配合比设计中最佳沥青用量和体积参数的确定。

4 结语

1) 在 3 种不同制件高度区间的限定条件下, 同一级配类型、不同油石比试件高度与毛体积密度的相关性较差。而采用等质量法相同条件下试件高度与毛体积密度相关性良好, 且密度呈上升趋势而

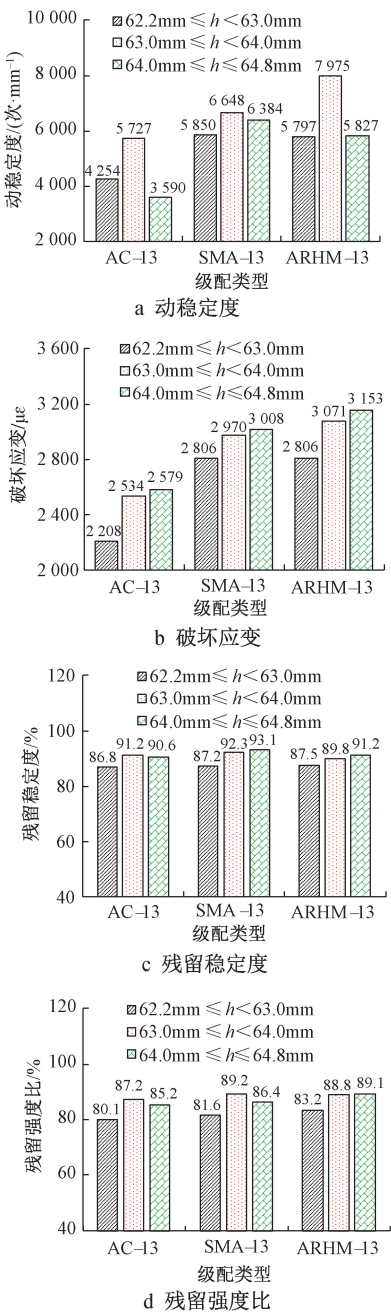


图 9 不同级配类型与路用性能关系
(沥青用量根据不同高度试件试验确定)

Fig. 9 Relationship between different gradation types and pavement performance
(asphalt dosage determined based on the tests of different height specimens)

无峰值,配合比设计中有利于最佳沥青用量的确定。

2)在3种不同制件高度区间的限定条件下,随着试件高度增加,AC-13的VV和VMA约增加0.3%,VFA约减小1.5%;ARHM-13和SMA-13的试件高度增加到(64.0mm,64.8mm)区间时,VV和VMA约增加0.5%,VFA约减小3.0%。

3)在3种不同制件高度区间的限定条件下,不同成型试件高度确定的最佳油石比差别明显(最大值和

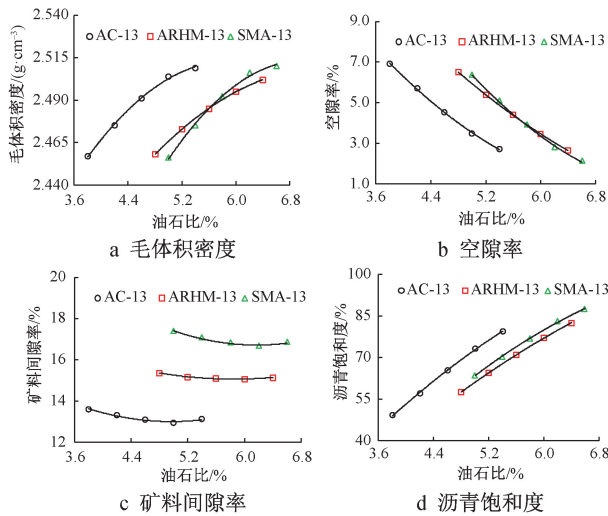


图 10 不同级配类型不同沥青用量与体积参数关系(等质量法)

Fig. 10 Relationship between different asphalt dosages and volume parameters for different gradation types (equal mass method)

最小值相差0.3%)。采用等质量法和试件高度在(63.0mm,64.0mm)区间确定的最佳油石比基本相同,这与两者成型试件高度均在63.5mm附近有关。

4)试件高度在(63.0mm,64.0mm)区间要求确定最佳油石比混合料的高温稳定性最优,低温抗裂性能和水稳定性与在(64.0mm,64.8mm)区间成型试件基本相当,优于在(62.2mm,63.0mm)区间成型试件的各项性能,证明了等质量法性能验证中的合理性。

5)在等质量法条件下不同级配类型的沥青用量与不同体积参数间数据拟合满足二阶多项式关系,相关系数均在0.95以上,有利于配合比设计中减少人为因素的影响,改善马歇尔法成型试件过程中的可操作性。

参考文献:

[1] 沈金安. 关于沥青混合料配合比设计确定最佳沥青用量的问题[J]. 公路, 2001, 46(11): 1-5.

SHEN J A. On the problem of determining the optimal asphalt content in asphalt mixture ratio design [J]. Highway, 2001, 46(11): 1-5.

[2] 李宇峙, 陈群, 刘朝晖. 不同成型方法的对比及压实特性研究[J]. 中外公路, 2003, 23(1): 82-85.

LI Y Z, CHEN Q, LIU Z H. Comparison of different molding methods and study on compaction characteristics [J]. Journal of foreign highway, 2003, 23(1): 82-85.

[3] 解晓光, 王龙, 王哲人. 沥青混合料压实工艺与被压材料相互影响的研究[J]. 公路, 2006, 51(1): 171-175.

XIE X G, WANG L, WANG Z R. Study on the interaction between asphalt mixture compaction technology and compressed materials [J]. Highway, 2006, 51(1): 171-175.

表 5 沥青用量 (P_{ai}) 与体积参数回归方程和相关系数 R^2

Table 5 Regression equations and correlation coefficient R^2 for asphalt dosage (P_{ai}) and volume parameters				
类别	P_{ai} 和 ρ_f	P_{ai} 和 VV	P_{ai} 和 VMA	P_{ai} 和 VFA
AC-13	$y = -0.012\ 9x^2 + 0.152\ 4x + 2.064\ 4$	$y = 0.308x^2 - 5.862\ 5x + 27.545$	$y = 0.5x^2 - 6.175x + 35.777$	$y = -1.919\ 6x^2 + 36.786x - 63.16$
	$R^2 = 0.997\ 9$	$R^2 = 0.999\ 9$	$R^2 = 0.978\ 6$	$R^2 = 0.999\ 3$
	$y = -0.008x^2 + 0.117\ 5x + 2.079\ 2$	$y = 0.549\ 1x^2 - 9.047\ 1x + 37.864$	$y = 0.272\ 3x^2 - 3.187\ 5x + 24.385$	$y = -1.383\ 9x^2 + 31.125x - 59.957$
ARHM-13	$R^2 = 1$	$R^2 = 0.998\ 9$	$R^2 = 0.999\ 1$	$R^2 = 0.999\ 9$
	$y = -0.014\ 7x^2 + 0.205\ 6x + 1.795\ 4$	$y = 0.473\ 2x^2 - 7.023\ 6x + 26.812$	$y = 0.450\ 9x^2 - 4.480\ 7x + 24.144$	$y = -2.187\ 5x^2 + 40.55x - 84.622$
	$R^2 = 0.996\ 6$	$R^2 = 0.999\ 4$	$R^2 = 0.980\ 7$	$R^2 = 0.998\ 9$

[4] 张方方,张捷,韩光,等. Superpave 与马歇尔两种沥青混合料设计方法探讨[J]. 中外公路,2008,28(6):236-239.
ZHANG F F,ZHANG J,HAN G,et al. Discussion on design methods of Superpave and Marshall asphalt mixtures[J]. Journal of China & foreign highway,2008,28(6):236-239.

[5] 王旭东. 一种新型沥青混合料体积设计方法的探讨[J]. 上海公路,2011(2):1-3,8,12.
WANG X D. Discussion on a new volume design method for asphalt mixture[J]. Shanghai highways,2011(2):1-3,8,12.

[6] 陈泽宏. 沥青混合料不同配合比设计方法对比研究[D]. 长沙:湖南大学,2013.
CHEN Z H. Comparative study on different mix design methods for asphalt mixes[D]. Changsha:Hunan University,2013.

[7] 陈华鑫,江星. 沥青混合料马歇尔设计异常现象分析[J]. 中外公路,2006,26(4):195-197.
CHEN H X,JIANG X. Analysis of abnormal phenomenon in Marshall design of asphalt mixture[J]. Journal of China & foreign highway,2006,26(4):195-197.

[8] 陈晓,朱春阳. 不同沥青混合料设计方法对比评价分析[J]. 中外公路,2007,27(4):267-271.
CHEN X,ZHU C Y. Comparative evaluation and analysis of different asphalt mixture design methods[J]. Journal of China & foreign highway,2007,27(4):267-271.

[9] 黄优,刘朝晖,王旭东,等. 基于骨架最紧密状态的沥青混合料配合比设计方法[J]. 中外公路,2016,36(5):216-221.
HUANG Y,LIU Z H,WANG X D,et al. Mix proportion design method of asphalt mixture based on the tightest skeleton state[J]. Journal of China & foreign highway,2016,36(5):216-221.

[10] 冯新军,康起. 试验室压实方法对热拌沥青混合料空隙率及力学性能的影响[J]. 中外公路,2020,40(3):291-297.
FENG X J,KANG Q. Evaluation of the laboratory compaction method on the air voids and the mechanical behavior of hot mix asphalt[J]. Journal of China & foreign highway,2020,40(3):291-297.

[11] MASAD E,JANDHYALA V K,DASGUPTA N, et al. Characterization of air void distribution in asphalt mixes using X-ray computed tomography [J]. Journal of materials in civil engineering,2002,14(2):122-129.

[12] 王聪,郭乃胜,赵颖华,等. 不同成型方法和级配的沥青混合料内部空隙特征[J]. 吉林大学学报(工学版),2014,44(1):74-80.
WANG C,GUO N S,ZHAO Y H,et al. Air voids distribution of asphalt mixtures in different compaction methods and aggregate gradations[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition),2014,44(1):74-80.

(上接第 97 页)

[9] 孙楠,李枫,沃布帆. 以高品质为产品导向的改造技术研究[J]. 城市建筑空间,2023,30(9):5-7.
SUN N,LI F,WO B F. High-quality product-oriented transformation technology [J]. Urban architecture space,2023,30(9):5-7.

[10] 刘欢佳,袁俭,钟易达. 三维激光扫描曲面结构点云安装复核技术在异形混凝土结构施工中的应用[J]. 城市建筑空间,2022,29(10):242-243.
LIU H J,YUAN J,ZHONG Y D. Application of three-dimensional laser scanning surface structure point cloud installation review technology in special-shaped concrete structure construction[J]. Urban architecture space,2022,29(10):242-243.

[11] 于安澜,郭讯. 地域性现代建筑设计探索——以西安热雪奇迹室内冰雪乐园为例[J]. 城市建筑空间,2024,31(4):21-27.
YU A L,GUO X. Regional modern architectural design: taking Indoor Ice and Snow Park of Bonski Snow Park in Xi'an as an example[J]. Urban architecture space,2024,31(4):21-27.

[12] 杨敏,方林,张俊. 三维激光扫描在既有建筑检测中的应用[J]. 城市建筑空间,2022,29(11):247-248,251.
YANG M,FANG L,ZHANG J. Application of three-dimensional laser scanning in the detection of existing buildings [J]. Urban architecture space,2022,29(11):247-248,251.

[13] 李德胜. 高铁站房室内设计探析 [J]. 城市建筑空间,2025,32(4):99-103.
LI D S. Interior design of high speed railway station building[J]. Urban architecture space,2025,32(4):99-103.

[14] 吴哲昊,王超益,张群力,等. 杭州运河亚运公园体育馆绿色建筑实践[J]. 建筑技艺,2023,29(5):106-109.
WU Z H,WANG C Y,ZHANG Q L,et al. Green building design of Hangzhou canal Asian games park gymnasium[J]. Architecture technique,2023,29(5):106-109.