

不同级配类型薄层混合料中长期性能跟踪观测与耐久性分析

付波¹, 李琛琛¹, 翁辉¹, 吴德磊²

(1. 浙江交投高速公路建设管理有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 浙江交工集团股份有限公司设计院分公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 针对不同结构类型薄层混合料耐久性参差不齐的问题, 选取骨架密实型 bc-1、悬浮密实型 bc-2 以及骨架空隙型 bc-3, 开展室内性能评价和试验段跟踪观测。首先, 通过车辙试验和小梁低温抗裂试验分别对 3 种混合料的高、低温性能进行评价; 其次, 采用冻融劈裂和四点弯曲疲劳试验进行耐久性评价; 最后, 对 3 种混合料近五年的路面技术状况指标数据进行分析, 以评价其实际路用效果。结果表明: bc-1 的动稳定度为 9 041 次/mm, 高温稳定性较 bc-2 和 bc-3 分别提高 15.25%、12.16%; bc-1 低温弯曲应变为 2 948 μe , 较 bc-2 和 bc-3 分别提高了 9.92%、15.88%; 3 种薄层材料的疲劳寿命试验结果为 bc-1 > bc-3 > bc-2; 从路面技术状况指标来看, 3 种混合料在应用五年后均为优等, 路况指标的年均衰减率分别为 0.42%、1.10%、1.16%。

关键词: 薄层罩面; 养护工程; 耐久性

中图分类号: U414; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0001-04

Tracking Observation and Durability Analysis on Long-term Performance of Thin-layer Mixtures of Different Gradation Types

FU Bo¹, LI Chenchen¹, WENG Hui¹, WU Delei²

(1. Zhejiang Jiaotou Highway Construction Management Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. Design Institute Branch of Zhejiang Jiaogong Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: In response to the issue of varying durability of thin-layer mixtures of different structural types, the skeleton compact type bc-1, the suspended compact type bc-2 and the skeleton void type bc-3 are selected to carry out the indoor performance evaluation and tracking observation of the test section. Firstly, the high and low temperature performances of the three mixtures are evaluated through rutting tests and small-beam low-temperature crack resistance tests, respectively. Secondly, the freeze-thaw splitting and four-point bending fatigue tests are used to assess the durability. Finally, the technical condition index data of the pavement of three mixtures in the past five years are analyzed to evaluate their actual pavement effects. The results show that the dynamic stability of bc-1 is 9041 times/mm, and the high temperature stability is improved by 15.25% and 12.16% compared to bc-2 and bc-3, respectively. The low temperature bending strain of bc-1 is 2 948, improved by 9.92% and 15.88% compared to bc-2 and bc-3, respectively. The fatigue life test results of the three thin-layer materials are bc-1 > bc-3 > bc-2. From the perspective of technical condition indicators of pavement, all three mixtures are rated as excellent after five years of application, and the annual average attenuation rates of road condition indexes are 0.42%, 1.10%, and 1.16%, respectively.

Keywords: thin overlay; maintenance engineering; durability

0 引言

随着我国公路交通网络的日益完善, 公路行业

已从传统的“新建为主”转为“建养并重”^[1-3]。传统的铣刨回铺、厚层罩面等养护技术经过多年的工程验证, 效果稳定优异, 但往往存在工程量大、材料消耗多、交通中断时间长、碳排放高等问题^[4-5]。薄层罩面技术作为一种高效、经济、环保的预防性养护与功能性修复手段, 近年来被广泛应用于高等级公路的养护工程中^[6-7]。但薄层罩面种类繁多, 所用原材料、设计理念、典型厚度等也不尽相同, 最终导致实

收稿日期: 2026-03-04

基金项目: 浙江省交通运输厅重大研发项目(ZJXL-SJT-202316A)

作者简介: 付波(1986—), 男, 学士, 高级工程师, 从事交通土建工程相关工作。

通信作者: 吴德磊(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事道路养护与科研相关工作。电子信箱: 798807087@qq.com

际路用效果千差万别。目前常见的薄层沥青混合料,常见的级配类型有骨架密实型、悬浮密实型以及骨架空隙型等^[8-10]。

本研究针对不同薄层罩面措施的耐久性问题,选取了目前常见的 3 种薄层混合料 bc-1(骨架密实型)、bc-2(悬浮密实型)和 bc-3(骨架空隙型),结合室内试验和实际工程中长期性能观测,分析不同级配类型混合料耐久性,为养护工程中预防性养护方案的选择提供数据支撑。

1 原材料与试样制备

1.1 原材料

3 种薄层材料采用的改性沥青性能指标如表 1 所示,集料性能指标如表 2 所示。

表 1 3 种薄层材料采用改性沥青基本性能指标

项目	试验结果
针入度(25℃,100 g,5 s)/0.1mm	59
软化点(环球法)/℃	89.0
延度(5 cm/min,5℃)/cm	42
60℃旋转粘度/(Pa·s)	21 300
135℃运动粘度/(Pa·s)	2.450
离析,软化点差/℃	1.6

表 2 3 种薄层材料采用集料基本性能指标

项目	粗集料	细集料
石料压碎值/%	10	—
石料高温压碎值/%	12	—
洛杉矶磨耗损失/%	16	—
表观相对密度	2.8	3.0
吸水率/%	1.0	—
坚固性/%	12	12
0~4.75 mm 砂当量/%	—	56
亚甲蓝值/(g·kg ⁻¹)	—	2.6

1.2 试样制备与试验方法

1.2.1 薄层沥青混合料制备

采用马歇尔设计方法进行混合料的配合比设计,首先将集料和矿粉按设计配比在拌和机中干拌均匀,随后加入加热至 180℃的沥青进行湿拌,使沥青均匀裹覆骨料,然后将混合料取出,按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410—2025)相关要求,分别制成标准试件,3 种混合料的具体级配如表 3 所示。

1.2.2 试验方法

为评价薄层沥青混合料综合路用性能,分别对 3 种薄层沥青混合料进行动稳定度试验、小梁低温抗裂试验、冻融劈裂试验、四点疲劳试验,试验要求依

表 3 3 种设计级配

级配	通过筛孔(方孔筛,mm)百分率/%								
	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
bc-1	100.0	96.4	42.0	23.6	19.9	17.0	13.7	11.9	9.7
bc-2	100.0	92.8	37.7	26.5	22.4	19.6	14.1	9.6	8
bc-3	90.0	57.0	21.1	11.0	8.8	6.8	5.8	5.3	4.6

据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410—2025)。

2 试验结果分析

2.1 动稳定度试验

随着极端高温天气的频发,高温稳定性已经成为了影响薄层混合料耐久性的主要因素之一^[11-12]。采用动稳定度试验对 3 种薄层混合料的抗车辙性能进行评价,主要以动稳定度指标进行表征(见表 4)。

表 4 车辙试验结果

试验组	编号	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
bc-1 组	试件 1	8 875
	试件 2	9 030
	试件 3	9 218
	均值	9 041
bc-2 组	试件 1	7 963
	试件 2	7 687
	试件 3	7 885
	均值	7 845
bc-3 组	试件 1	8 061
	试件 2	8 157
	试件 3	8 211
	均值	8 061

由表 4 可知,3 种薄层混合料的动稳定度均值分别为 9 041 次/mm、7 845 次/mm、8 061 次/mm,bc-1 的动稳定度最佳,较 bc-2、bc-3 分别提高了 15.25%、12.16%。

2.2 小梁低温抗裂试验

采用小梁低温抗裂试验对 3 种薄层混合料的低温稳定性能进行评价,主要以弯曲破坏应变指标进行表征。考虑到小梁试验的离散性较大,本研究在精细化试验操作的基础上,进行了试验量的增加,每种混合料类型分为 3 个试验组,每试验组分为 3 个试件组,每组内小梁试件个数为 6,试验过程中对于离散性较大的结果进行剔除,最终以各试件组的均值作为试验结果(见表 5)。

由表 5 可知,3 种混合料的低温抗裂性能均满足规范要求,bc-1 较 bc-2 和 bc-3 低温抗裂性能分别提高了 9.92%、15.88%。

表 5 小梁低温抗裂试验结果

试验组	编号	弯曲破坏应变/ $\mu\epsilon$
bc-1 组	试件 1 组	2 930
	试件 2 组	3 068
	试件 3 组	2 847
	均值	2 948
bc-2 组	试件 1 组	2 580
	试件 2 组	2 766
	试件 3 组	2 700
	均值	2 682
bc-3 组	试件 1 组	2 688
	试件 2 组	2 597
	试件 3 组	2 346
	均值	2 544

2.3 冻融劈裂试验

水损害是薄层材料在工程中较为常见的早期病害,会严重影响混合料的耐久性,若混合料抗水损能力不足,还会诱发集料飞散剥落等问题^[13-14]。采用冻融劈裂试验对 3 种薄层混合料的水稳定性进行评价,主要以冻融劈裂强度比指标进行表征(见表 6)。

表 6 冻融劈裂试验结果

试验组	编号	冻融劈裂强度比/%
bc-1 组	试件 1 组	96
	试件 2 组	92
	试件 3 组	94
	均值	94
bc-2 组	试件 1 组	87
	试件 2 组	86
	试件 3 组	88
	均值	87
bc-3 组	试件 1 组	88
	试件 2 组	89
	试件 3 组	90
	均值	89

由表 6 可知,3 种混合料的冻融劈裂强度比分别为 94%、87%、89%,均满足规范要求,但 bc-1 较其他 2 种混合料,水稳定性存在显著优势,其骨架密实型的级配结构也使得其稳定性有较为显著的提升。

2.4 四点弯曲疲劳试验

疲劳破坏是指路面在行车荷载的反复作用下,虽然每次应力远低于材料的极限强度,但应力微应变会不断累积,最终导致内部或底部产生微裂纹,并逐渐扩展直至完全断裂的过程。100 万次疲劳寿命下的失效应变反映了混合料在重复荷载下抵抗破坏的能力。应变值越高,说明材料在长期荷载作用下的耐久性越好^[15]。

受限于施工水平、粘层材料性质以及自身厚度

等客观条件,薄层混合料在长期服役状态下,较传统厚层混合料更易发生自下而上的疲劳开裂。四点弯曲疲劳试验用以模拟混合料在重复荷载下抵抗破坏的能力,工程中常以 100 万次循环对应的失效应变作为沥青混合料的疲劳极限设计标准,因此采用四点弯曲疲劳试验对 3 种薄层混合料的疲劳性能进行评价,以 100 万次疲劳寿命下的失效应变进行表征(见表 7)。

表 7 四点弯曲疲劳试验结果

试验组	编号	失效应变/ $\mu\epsilon$
bc-1 组	试件 1 组	244
	试件 2 组	250
	试件 3 组	296
	均值	263
bc-2 组	试件 1 组	159
	试件 2 组	193
	试件 3 组	179
	均值	177
bc-3 组	试件 1 组	225
	试件 2 组	210
	试件 3 组	249
	均值	228

由表 7 可知,3 种薄层混合料 100 万次疲劳寿命下的失效应变分别为 263 $\mu\epsilon$ 、177 $\mu\epsilon$ 、228 $\mu\epsilon$,表明 bc-1 的抗疲劳性能明显优于其他两种薄层混合料,分析其原因,bc-1 作为骨架密实型结构,其粗骨料嵌挤形成高强度骨架,可以更有效地分散荷载、降低关键部位的应力应变、并抑制裂纹扩展;bc-2 作为悬浮密实型混合料,其失效应变最低,原因是其结构形式导致粗集料未能形成稳定的骨架,荷载主要由沥青砂浆来承担,沥青砂浆的刚度远低于石料骨架,在荷载重复作用下,砂浆内部会产生较大的剪切应力和弯拉应变,容易发生疲劳破坏;bc-3 的失效应变介于 bc-1 和 bc-2 之间,表明骨架空隙型混合料的应力传递与分散能力低于骨架密实型结构,通过“骨架+空隙”的模式实现了排水、降噪的功能,但同时导致了其内部的骨架结构脆弱,使其在疲劳荷载下易于破坏。

3 中长期路面使用性能分析

3.1 综合路况指标演变情况分析

PQI (panement quality inler) 即路面技术状况指数,由路面破损、车辙、平整度、跳车、磨耗等路用性能指标加权计算得出,用以反映路面结构的综合使用性能。

为研究 3 种薄层混合料的实际路用效果,于

2021年在浙江省某高速公路,分别采用3种混合料进行了试验段的铺筑,3种薄层材料的厚度分别为3.0、2.5、3.0 cm,试验段长度均为2.0 km,近五年PQI指标均值见图1。

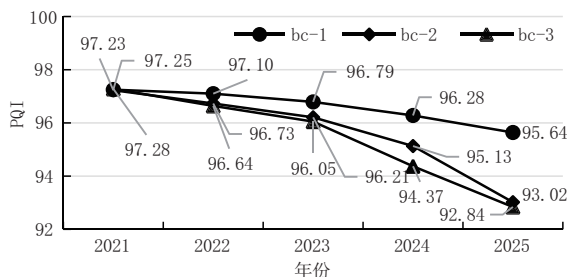


图1 3种薄层材料近五年PQI指标均值变化情况

由上图可知,经过5年的工程验证,3种薄层混合料的PQI指标均在90分以上,评分为优等,表明3种混合料均表现出了较为优异的路用性能;PQI指标的年均衰减率分别为0.42%、1.10%、1.16%;bc-1的衰减速率较bc-2、bc-3分别降低了2.82%、3.02%。

3.2 构造深度演变情况分析

路面平均断面深度(mean profile depth, MPD),是一种通过轮廓仪测量路面宏观纹理的指标,直接反映了路面的抗滑性能与排水能力,是衡量薄层罩面材料实际路用性能最重要的指标之一,近5年MPD指标均值见图2。

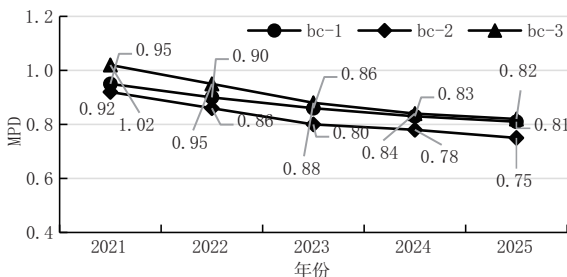


图2 3种薄层材料近五年MPD指标均值变化情况

由上图可知,3种级配类型的薄层材料,在使用初期和使用第5年时的构造深度MPD值排序为:bc-2<bc-1<bc-3,但在5年期末时bc-1和bc-3构造深度值基本相等。在使用第3年后,MPD值衰变情况趋于稳定。使用5年期末构造深度MPD衰减率为14.74%、18.48%、19.61%,表明骨架空隙型薄层材料抗滑性能略优于骨架密实型,悬浮密实型结构最差,骨架密实型薄层材料的抗滑耐久性在3种级配中最优。

4 结 论

本研究针对目前不同薄层罩面措施的耐久性参差不齐的问题,选取了3种常见的薄层混合料,骨架密实型bc-1、悬浮密实型bc-2以及骨架空隙型bc-3,

作为研究对象。通过一系列室内试验,完成了不同结构类型薄层混合料的性能评价,并结合试验段5年的跟踪检测数据对其路用效果进行了评价,主要研究结论如下。

(1)bc-1的高温稳定性最佳,较bc-2、bc-3分别提高了15.25%、12.16%。bc-3的低温性能最差,较bc-1、bc-2分别降低了15.88%、5.42%。

(2)3种混合料的冻融劈裂强度比分别为94%、87%、89%,100万次疲劳寿命下的失效应变分别为 $263\mu\epsilon$ 、 $177\mu\epsilon$ 、 $228\mu\epsilon$,即在水稳定性和重复荷载试验中,bc-1的耐久性最佳,bc-3次之,bc-2最差。

(3)3种混合料均表现出了较为优异的路用性能,但bc-1略优于bc-2、bc-3,PQI指标的年均衰减率较其他两种混合料,分别降低了2.82%、3.02%。抗滑耐久性能方面,bc-1和bc-3基本相当,但bc-1的耐久性更优。

(4)综合室内试验结果与实际路用效果分析,3种混合料耐久性为bc-1>bc-3>bc-2。

参考文献:

- [1] 江财峰.薄层罩面沥青混合料功能特性与层间性能研究[D].广州:华南理工大学,2022.
- [2] 张丽宏.沥青混合料薄层罩面结构类型对耐久性的影响[J].石油沥青,2025,39(3):58-62.
- [3] 吴林军,曾健.胶粉复合改性沥青在薄层罩面沥青混合料中的应用研究[J].现代交通技术,2024,21(6):5-9.
- [4] 王跃山,张建平,贾非.常温拌和型同步施工薄层混合料路用性能研究[J].公路,2024,69(4):292-299.
- [5] 施向东,陈先华,高见,等.薄层罩面级配特征与适用性分析[J].中外公路,2021,41(2):61-66.
- [6] 曹东伟,吴键华,李明亮.不同结构形式的薄层罩面就地热再生路面性能对比分析[J].公路,2020,65(8):360-365.
- [7] 李蕊,李彦伟,石鑫,等.薄层罩面沥青混合料的设计方法及其路用性能研究[J].中外公路,2012,32(4):263-266.
- [8] 吴寅,邱彬,闫朝杰,等.隧道复杂环境下沥青薄层罩面抗滑耐久性研究[J].森林工程,2024,40(2):188-197.
- [9] 施向东,陈先华,高见,等.薄层罩面级配特征与适用性分析[J].中外公路,2021,41(2):61-66.
- [10] 陈革联.路面养护薄层罩面施工技术研究[J].黑龙江交通科技,2014,37(12):63-64.
- [11] 李闯民,王涛.基于APA车辙深度的AC-5沥青混合料体的标准[J].公路交通科技,2015,32(7):1-7.
- [12] 林益恭,周岳华,虞将苗,等.薄层热拌沥青混凝土技术的研究[J].广东公路交通,2011(增刊1):35-38.
- [13] 蔡莉莉,吴春颖,李健,等.超韧改性沥青混合料薄层罩面性能研究[J].湖南交通科技,2024,50(1):1-4;9.
- [14] 邢培营,徐峰,史倩倩.基于均衡设计法的薄层罩面路用性能研究[J].公路交通技术,2023,39(3):8-14.
- [15] 苏凯.钢渣薄层罩面沥青混合料试验研究与工程应用[J].城市道桥与防洪,2022,(5):214-216.