DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260558

高速公路“白改黑”非全厚式加铺方案对比分析

杨旭东[1],陈　全[1],张德伟[2],彭良臣[3,4],冼旭东[2],王昌华[3]
[1.招商局公路网络科技控股股份有限公司,北京市 100022;2.广西岑兴高速公路发展有限公司,广西 南宁 530021;
3.招商局重庆交通科研设计院有限公司,重庆市 400067;4.招商智翔道路科技(重庆)有限公司,重庆市 400067]

摘　要:“白改黑”加铺沥青面层技术可充分利用旧路面剩余强度,改善行车舒适性,已成为水泥路面改造的主流方案之一。以广西某高速公路为依托工程,通过路面损坏状况指数(PCI)、行驶质量指数(RQI)、接缝传荷能力、板底脱空等现场检测与室内试验,系统分析了原水泥路面技术状况及病害特征。结果表明,行车道病害明显重于超车道,破碎板、裂缝、露骨及条状修补为主要病害类型,基层顶面当量回弹模量偏低。结合交通荷载分析,主线累计当量轴载次数已超过原设计基准期特重交通等级。在此基础上,对比了不同应力吸收层与沥青面层组合方案的技术特点、施工难度及经济性,推荐采用“2.5cm SBS改性沥青AC-10应力吸收层+4cm SBS改性沥青SMA-13”的加铺结构,为同类旧水泥路面改造工程提供技术参考。

关键词: 水泥混凝土路面;白改黑;非全厚式;加铺方案
中图分类号: U416.2;TU997　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0143-05

Comparative Analysis of “Cement-to-Asphalt” Non-Full-Thickness Overlay Schemes for Expressways

YANG Xudong[1], CHEN Quan[1], ZHANG Dewei[2], PENG Liangchen[3,4], XIAN Xudong[2], WANG Changhua[3]
[1. China Merchants Expressway Network and Technology Holdings Co., Ltd., Beijing 100022, China; 2. Guangxi Cenxing Expressway Development Co., Ltd., Nanning 530000, China; 3. China Merchants Chongqing Communications Research and Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China; 4. China Merchants Zhixiang Road Technology (Chongqing) Co., Ltd., Chongqing 400067, China]

Abstract: The “cement-to-asphalt” overlay technique can fully utilize the residual strength of the existing pavement and improve the ride comfort, which has become one of the mainstream solutions for the reconstruction of cement pavements. Relying on an expressway project in Guangxi, the technical condition and defect characteristics of the original cement pavement are systematically analyzed through field inspections and laboratory tests, including the pavement condition index (PCI), riding quality index (RQI), joint load-carrying capacity, and cavity beneath the slabs. The results indicate that the defects on the carriageway are significantly more severe than on the passing lanes. The broken slabs, cracks, exposed aggregate and strip-shaped patches are the primary types of defects. Additionally, the equivalent modulus of elasticity at the base course surface is relatively low. Combined with traffic load analysis, the cumulative equivalent axle load count on the mainline has exceeded the extra-heavy traffic class specified for the original design service life. Based on this, the technical characteristics, construction difficulty and economic viability of different combinations of stress-absorbing layers and asphalt surface courses are compared. The recommended overlay structure is a “2. 5 cm SBS-modified asphalt AC-10 stress-absorbing layer + 4 cm SBS-modified asphalt SMA-13,” which provides a technical reference for similar renovation projects involving old cement pavements.

Keywords: cement concrete pavement; cement-to-asphalt; non-full-thickness; overlay scheme

0　引　言

“白改黑”是指在旧水泥混凝土路面板上加铺沥青面层的一种路面改造技术[1]。该技术通过将刚性路面改造为复合式或柔性路面结构,既可充分利用原有路面结构承载能力,又能显著改善行车舒适性、降低噪声污染,具有经济、高效、环保等综合优势,已成为旧水泥混凝土路面改造的主流方案之一[2;3]。

我国早期修建了大量水泥混凝土道路[4],随着经济快速发展,交通量急剧增长、重载车辆比例持续攀升,加之部分路段在设计、材料、施工及养护等方

收稿日期:2026-05-18
作者简介:杨旭东(1973—),男,博士,正高级工程师,从事高速公路运营与养护管理工作。
通信作者:彭良臣(1998—),男,硕士,助理工程师,从事道路养护技术与材料研究工作。电子信箱:zxpengliangchen@cmhk.com

面存在不足，水泥混凝土路面病害问题日益突出[5]。大量投入运营的水泥路面出现了不同程度的断板、错台、裂缝、剥落、坑洞等损坏，严重影响了行车舒适性与安全性[6]。特别是服役年限较长的老旧路面，结构破损加剧，日常养护及专项维修费用不断增长，从全寿命周期成本理念出发，亟需实施系统性的路面大修改造[7]。“白改黑”工程的关键在于前期调查与针对性设计[8]。旧水泥混凝土路面技术状况变异性大，必须对原路面病害类型、分布范围、严重程度及成因进行全面调查与定量评价，结合交通荷载、环境条件等因素，在定性分析与定量检测的基础上，确定合理的加铺结构组合。如何根据具体路段条件优选适宜的改造方案，是工程设计中的核心问题[9]。

本文以广西某高速公路为依托工程，介绍旧水泥混凝土路面“白改黑”方案的设计思路与方法，涵盖建设养护情况调查、外观病害检测、结构性能评价、交通荷载分析、病害成因诊断、处治方案比选及加铺结构设计等内容，以期为同类工程提供技术参考与借鉴。

1　原路面状况与病害分析

1.1　水泥路面结构

依托广西某高速公路，对“白改黑”非全厚式加铺方案进行研究。原道路主线、互通和匝道的水泥混凝土路面结构如图 1 所示，不同路段采用了不同的路面结构形式。主线为双向四车道，设计速度为 120 km/h。路基宽度为 28 m，行车道宽 2×7.5 m，路缘带为 2×0.75 m，硬路肩为 2×3.5 m，土路肩为 2×0.75 m，中央分隔带宽 3.0 m，单幅路面宽度 11.75m。

1.2　水泥路面检测

在旧水泥混凝土路面改造工程中，应对既有道路的结构承载力及路用性能开展精准检测与科学评估，为改造方案提供可靠的数据支撑。检测内容主要分为现场检测与室内试验两部分，其中现场检测包括路面损坏状况指数 PCI、行驶质量指数 RQI、接缝传荷能力、基层顶面当量回弹模量以及板底脱空情况等关键指标；室内试验则主要测试面板混凝土抗压强度和劈裂强度等。

1.2.1　现场检测

对路面破损、平整度、跳车采用道路智能检测系统进行自动检测，路面抗滑性能采用路面横向力摩擦系数测试系统自动检测，接缝传荷能力及基层顶面当量回弹模量采用落锤式弯沉仪进行自动检测，

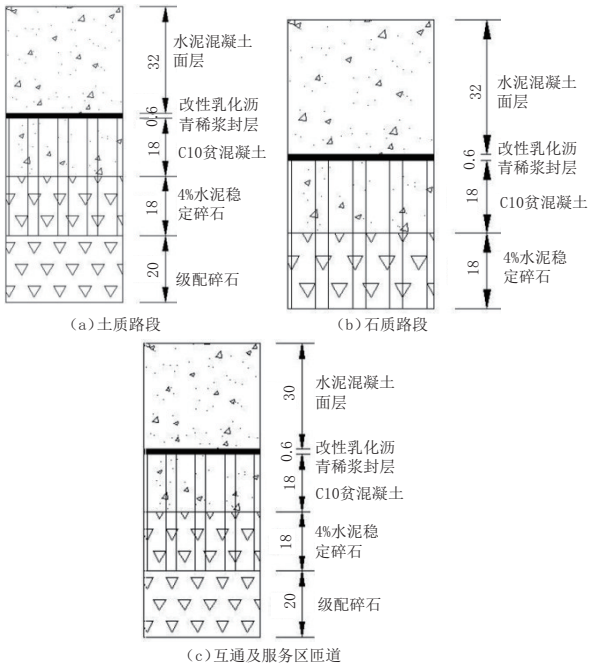


图 1　主线路面结构（单位：cm）

路面结构隐含病害采用三维雷达检测系统进行快速自动检测。水泥混凝土路面技术状况如表 1 所示。

上行和下行的路面技术状况接近，原水泥路面 PQI 在 80~90 之间，RQI 在 80~88 之间，均评定为“良”，值均接近范围下限。行车道路面损坏状况指数 PCI 评定为“中”，行车道 PCI 比超车道降低了约 10%，说明行车道破损比较严重。全路段共检测接缝传荷系数 4 239 点，经统计上行和下行的行车道平均接缝传荷系数分为 82.25%、80.96%，虽达到了优良水平，但总体值偏低，原水泥混凝土路面具有较好的传荷能力。

水泥混凝土路面各类病害面积统计结果如表 2 所示，其中破碎板、裂缝、露骨、条状修补所占比例分别为 23.67%、8.88% 、25.68%、37.88%，总计占了全部病害的 96.11%，说明水泥混凝土路面病害主要为这几种，在病害处治中需重点关注。上行和下行的行车道破碎板病害分别是超车道的 5.84 倍、3.74 倍，行车道病害更为严重，验证了 PCI 检测结果。

1.2.2　室内试验

为进一步分析原路面病害成因以及旧路面材料特性，对路面进行钻芯取样，在试验室内进行混凝土面层的力学性能分析。原水泥混凝土路面设计抗弯拉强度为 5.0 MPa，弯拉弹性模量为 31 000 MPa，对应的抗压强度为 42 MPa。

水泥混凝土路面抗压强度取芯样 45 个，检测结果如表 3 所示。结果表明抽检的芯样抗压强度测值变异较大，最大值为 69.9 MPa，最小值为 24.5 MPa，抗

表 1　水泥混凝土路面检测结果

方向	车道	PQI	PCI	RQI	PBI	SRI	平均接缝传荷系数/%	基层顶面当量回弹模量/MPa
上行	超车道	88.37	87.66	82.56	98.71	98.97	—	—
	行车道	84.11	78.61	84.09	98.97	96.86	82.25	589.7
下行	超车道	87.84	86.98	81.78	99.23	98.97	—	—
	行车道	83.34	77.48	83.64	98.71	96.33	80.96	637.7

表 2　水泥混凝土路面各类病害面积统计　　单位：m^2

病害类型	上行		下行		合计
	超车道	行车道	超车道	行车道	
破碎板	1 537.09	8 989.41	3 457.44	12 947.74	26 931.68
裂缝	735.57	3 571.71	1 097.54	4 700.10	10 104.92
板角断裂	25.80	26.15	31.26	124.34	207.55
错台	36.17	294.88	1.27	509.01	841.33
拱起	0.00	20.98	0.00	0.00	20.98
边角剥落	244.48	295.29	226.38	709.12	1475.27
接缝料损坏	21.36	200.20	68.50	678.20	968.26
坑洞	0.37	0.31	0.80	0.54	2.02
露骨	8 903.61	9 357.73	6 109.38	4 836.86	2 9207.58
块状修补	130.26	323.12	124.69	330.06	908.13
条状修补	6 549.68	14 983.37	5251.52	1 6303.82	4 3088.39

压强度平均测值为 56.2 MPa，满足规范要求。水泥混凝土路面弯拉强度结果如表 4 所示。上行和下行行车道弯拉强度标准值分别为 5.10、5.03 MPa，得出抽检路段路面弯拉强度标准值为 5.09MPa，弯拉弹性模量为 35893 MPa，满足规范要求。

表 3　水泥混凝土路面芯样抗压强度

检测范围	检测数量/点	抗压强度平均测值/MPa	最大值/MPa	最小值/MPa	标准差/MPa
全幅	45	56.2	69.9	24.5	8.929
上行	24	56.2	67.9	24.5	9.102
下行	21	56.2	69.9	37.2	8.950

表 4　水泥混凝土路面芯样弯拉强度

检测范围	检测数量/点	劈裂强度平均值/MPa	劈裂强度标准差/MPa	劈裂强度标准值/MPa	弯拉强度标准值/MPa	弯拉弹性模量标准值/MPa
全幅	45	3.66	0.48	3.16	5.09	35893
上行	27	3.67	0.48	3.17	5.10	35941
下行	18	3.64	0.50	3.12	5.03	35606

1.2.3　路面病害分析

基于检测数据与现场调研结果，路面病害占比统计及典型病害如图 2 所示。本项目高速公路水泥混凝土路面病害的分布特征可归纳为以下几个方面：

（1）不同车道病害程度差异明显。超车道各类病害程度较轻，整体服役状态良好，而行车道损坏程度明显加重，主要表现为错台与裂缝严重，并伴随唧泥、破碎板及接缝料老化缺失等现象；（2）病害类型多样且多并发。各类病害多相互伴生，在相邻多板均存在严重损坏的路段，往往呈现破碎板、裂缝、唧泥、错台等多种病害共存的局面，表现出复杂的伴生特征；（3）病害分布呈集中与离散并存特征。沿线路段病害分布复杂，既有整体状况良好区段中个别板块出现严重损坏，亦有连续多块板均存在严重病害的集中区段，反映出病害成因的多源性与局部条件的差异性；（4）基层结构损伤普遍且具隐蔽性。基层与底基层承载力偏低，顶面当量回弹模量较小，钻探芯样显示存在脱空现象。不仅在病害显性区域基层及底基层出现破碎松散，即使路面无明显损坏的位置，基层结构损坏亦广泛存在，隐性结构损伤已较为普遍。

2　非全厚式加铺方案

在高速公路大修工程的设计阶段，各条公路既有路面结构形式及长期运营后服役状况存在显著差异，路面结构组合设计往往成为整个大修方案的核心与难点。因此，路面改造方案需结合原有道路使用性能、护栏高度、沿线桥梁分布特征等因素进行综合比选与确定。

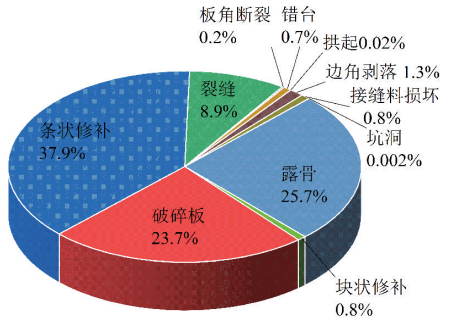
2.1　交通荷载分析

参照《公路水泥混凝土路面设计规范》（JTGD40—2011）中附录 A 关于交通荷载的分析规定，结合《高等级公路水泥混凝土路面设计规范》（DB 45/T 1551—2017）表一，对 2020—2024 年主线累计交通量和设计车道 BZZ-100 累计作用次数进行统计分析，结果如图 3 所示。随着年限增加，交通量和累计作用次数增加。截止 2024 年，主线交通荷载等级为特重交通荷载等级，行车道累计当量轴载次数已经达到 1.337×10^8 次，超过原设计基准年限 30 年内的特重交通荷载等级 47 875 820 次。

2.2　加铺方案

2.2.1　裂缝防治

根据防反射裂缝材料的使用情况以及施工工艺等因素，总结水泥混凝土路面“白改黑”成功经验，防反射裂缝方案将从以下 3 个方案进行对比：



（a）各类病害面积占比统计



（b）破碎板



（c）裂缝

图 2　路面病害占比统计及典型病害

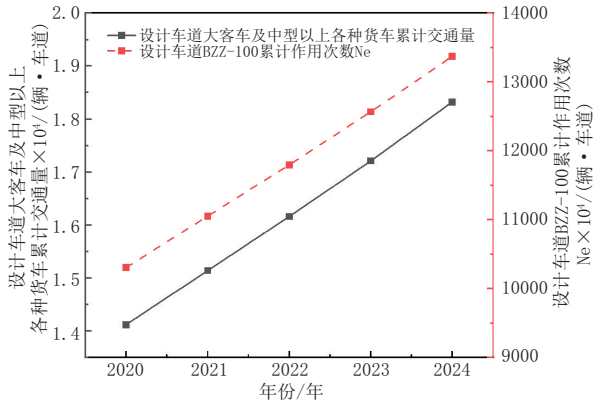


图 3　2020—2024 年历年累计当量标准轴次（行车道）

（1）2.5 cm SBS 改性沥青 AC-10 应力吸收层；（2）1.0 cm 橡胶沥青应力吸收层；（3）1.0 cm SBS 改性沥青同步碎石封层[10]。

AC-10 应力吸收层技术成熟，性能稳定，广西地区多应用于“白改黑”项目的下封层，具备足够的力学强度和一定的耐疲劳、弹性、塑性变形能力，防水密封性较好。2.5 cm 厚 SBS 改性沥青 AC-10 应力吸收层可兼调平层，有利于沥青面层平整度控制。但其成本较高，需要摊铺机进行摊铺，施工效率较低，工艺步骤相对较多，质量控制环节多[11]。

橡胶沥青在常温下黏度和柔韧度优于 SBS 改性沥青，因此其抗反射裂缝效果较好。在沥青混合料面层摊铺过程中，橡胶沥青应力吸收层顶部接触热混合料后会熔化，压实后可充分填充面层底部空隙，有效阻断水分渗入，提升结构抗水损性能[12]。同时，橡胶沥青具备优异的黏性，能够与旧水泥混凝土路面形成稳固黏结界面。橡胶沥青通常采用废旧轮胎粉生产，废物利用具有一定环保性。但橡胶沥青应力吸收层施工技术与现场质量控制要求较高，成本较高；撒布时升温温度高（200 ℃左右），消耗能源大，并会产生一定有害气体。橡胶沥青黏度大，混合料摊铺碾压工艺要求较高，且储存稳定较差，需成熟、专业的施工队伍，且成本较高[13]。

同步碎石封层经沥青与碎石撒布后，通过胶轮压路机稳压成型，可形成密实稳定的防水层结构，碎石与沥青间具备良好的黏结强度。由于改性沥青具备优良的延性与弹性恢复性能，封层可发挥应力吸收功能，能够有效抑制与减缓基层裂缝、板块构造缝向上发展形成的反射裂缝。SBS 改性沥青碎石封层成熟度高，技术难度较低，且工程造价适宜。同步碎石封层抗反射裂缝作用较橡胶沥青应力吸收层弱；施工完毕后易受重载工程运输车辆车轮黏附掉粒。

通过对以上不同方案的材料性能、经济性、施工等因素分析，结合本项目原水泥混凝土路面的实际情况，混凝土板构造缝处是罩面后产生反射裂缝的重点环节，考虑到后期道路使用的耐久性、平整度及养护费用的合理利用等因素，本次推荐采用方案 1：2.5 cm SBS 改性沥青 AC-10 应力吸收层作为防反射裂缝的技术方案。

2.2.2　磨耗层比选

主线水泥混凝土路面养护方案比选如表 5 所示。比较了三种沥青面层磨耗层：（1）4 cm 橡胶沥青 ARAC-13；（2）4 cm SBS 改性沥青 AC-13C；（3）4.0 cm SBS 改性沥青 SMA-13。

方案 1：橡胶沥青混合料具有较好的高温性能、抗老化性能、抗疲劳性能及抗水损害性能，是综合性能优良的环保型道路材料。其中掺加的橡胶颗粒可有效降低路面行车噪声，提升行车舒适性。但生产橡胶沥青混合料能耗相对较高；橡胶沥青黏度大，混合料摊铺碾压工艺要求较高，且储存稳定较差，需成

表5　水泥混凝土路面养护方案比选

结构层	方案1	方案2	方案3
面层	4 cm 橡胶沥青 ARAC-13	4 cm SBS 改性沥青 AC-13C	4.0 cm SBS 改性沥青 SMA-13
黏层	改性乳化沥青黏层		
应力吸收层	2.5cm SBS改性沥青 AC-10应力吸收层		
黏层	溶剂型防水黏结剂		
旧路面	（原路面精铣刨 1cm）经局部维修合格后的原水泥混凝土路面及基层		
造价	造价较经济，约75元/m²	造价最经济，约为70元/m²	造价较高，约为79元/m²

熟、专业的施工队伍[14]。

方案2：AC-13C混合料施工工艺成熟、应用范围广，被广泛应用于新建路面以及养护工程的磨耗层，且性价比较高；SBS改性沥青AC-13C混合料高温稳定性好、封水效果好、抗水损作用明显、耐久性好[15]。但生产SBS改性沥青较普通沥青的拌合和施工温度要求较高，能耗较大；AC-13C抗滑性能和抗裂性能相对较差。

方案3：SMA-13作为路面结构在我国作为磨耗层使用，取得了良好的使用效果；属于骨架嵌挤结构，抗车辙性能好；沥青含量高，耐疲劳开裂性能好，耐久性好；由于是骨架嵌挤结构，混合料表面的构造深度通常能达到1.1 cm，横向力系数也在70以上，而且行驶噪声较低[16]。但施工质量控制难度较大，油石比较高，造价比AC-13C高。

通过以上抗滑表层沥青混合料类型的技术优缺点对比以及经济指标分析，以混合料的抗车辙、抗滑、抗裂、抗水损以及疲劳寿命为重要目标，SBS改性沥青SMA-13在各方面性能表现优异，推荐采用4 cm SBS改性沥青SMA-13作为本项目主线范围内一般路基段水泥混凝土路面加铺罩面的养护技术方案。

3　结　语

本文依托广西某高速公路旧水泥路面改造工程，通过系统检测与综合分析，开展了“白改黑”非全厚式加铺方案研究，主要结论如下：

（1）旧水泥路面技术状况检测与病害精准诊断是加铺方案设计的基础。原路面PQI评定为“良”，但行车道PCI评定为“中”，破碎板、裂缝、露骨、条状修补四类病害面积占比达96.11%，且行车道病害面积远超超车道，呈明显的不均衡分布特征。交通荷载分析显示累计当量轴载次数已远超原设计基准期特重交通等级。上述检测数据揭示了旧路结构性能衰减与病害分布规律，为加铺方案比选提供了关键依据。

（2）对比了3种应力吸收层与3种沥青面层组合方案，从技术成熟度、施工可控性、抗反射裂缝效果、耐久性及经济性等多维度进行比选。结果表明，2.5cm SBS改性沥青AC-10应力吸收层可兼作调平层，工艺成熟、防水密封性好，有利于面层平整度控制；4cm SBS改性沥青SMA-13磨耗层是骨架嵌挤结构，抗车辙性能优异，构造深度大、抗滑性能好，且耐疲劳开裂性能优良。推荐组合兼具良好的抗反射裂缝能力与综合路用性能，工程实践表明，该方案可有效抑制反射裂缝萌生，延长加铺层服役寿命，实现旧路资源高效利用与工程投资合理控制的双重目标。

参考文献：

[1] 田旺龙，李黎，魏晋，等. 城市水泥混凝土路面白改黑设计要点分析[J]. 城市道桥与防洪，2023(9)：118-121.

[2] 马士宾，刘月钊，徐梓菲，等. 基于旧路病害的混凝土薄层加铺结构力学分析[J]. 中国科技论文，2023，18(6)：581-589.

[3] 李静. 基于实际案例分析的城市道路中“白改黑”设计[J]. 城市道桥与防洪，202 (5)：50-53.

[4] 马强. “白改黑”路面层间抗剪切性能影响因素试验研究[J]. 中外公路，2016，36(4)：86-90.

[5] 李盛，张海涛，孙煜，等. 在役水泥路面劣化行为与延寿技术综述[J]. 交通运输工程学报，2024，24(3)：25-47.

[6] 韦举向，杨旭东，李禅禅，等. 非全厚式罩面加铺技术在高速公路“白改黑”的应用与探讨[J]. 公路交通技术，2023，39(6)：13-20.

[7] 叶奋，胡诗园. 考虑旧水泥路面接缝传荷能力的超薄罩面力学特性[J]. 吉林大学学报(工学版)，2022，52(11)：2636-2643.

[8] 秦慧敏. 高速公路水泥混凝土路面“白改黑”设计与应用[J]. 公路，2024，69(11)：76-81.

[9] 姜军，彭良臣，杨德胜. “白改黑”路面土工材料防反射裂缝试验及应用研究[J]. 公路交通技术，2026，42(1)：55-62.

[10] 姜利，苏禹，程维，等. 基于应力吸收层的“白改黑”路面温度应力有限元分析[J]. 科学技术与工程，2019，19(3)：232-238.

[11] 彩雷洲，陆圣嘉，王灿升. 富油型AC-10应力吸收层的路用性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化，2020，37(11)：21-25.

[12] 余波，宾路. 大掺量橡胶沥青同步碎石封层的试验研究[J]. 城市道桥与防洪，2024(8)：245-248.

[13] 刘俊斌. 摊铺式橡胶沥青应力吸收层混合料设计和性能研究[D]. 长沙：长沙理工大学，2021.

[14] 陈芳，陈伟，马莲霞. 基于概率模型的橡胶沥青混合料疲劳寿命分析[J]. 公路交通技术：1-13.

[15] 韩静. SMA-13和AC-13沥青混合料路用性能试验研究[J]. 交通世界，2025(34)：27-29.

[16] 冯叶斌. 三种类型SMA沥青混合料综合性能对比研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2024，48(6)：1224-1229.