# 在役高速公路沥青混凝土桥面铺装层的早期水损坏溯源分析

# 胡晓宇 俞红光

(浙江数智交院科技股份有限公司 杭州 310030)

[摘 要]以某运营高速公路沥青混凝土桥面铺装层发生大规模早期水损坏为背景,以现场典型病害路段所取芯样为对象,通过浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验对沥青混合料的水稳定性进行评价,在此基础上通过抽提筛分等系列试验对水损害成因进行定向溯源分析,并利用浸水汉堡车辙试验研究在役高速公路沥青混凝土桥面铺装层早期水损害的发展演化规律。结果表明,沥青混凝土桥面铺装层的水损害是由下往上逐步发展的整体式破坏,铺装层的压实度不足以及过大的不均匀性是产生早期水损坏的主要原因,加强下面层的质量控制对于防止水损坏的发生至关重要。

[关键词] 道路工程; 沥青混凝土桥面铺装层; 现场取芯; 早期水损害; 汉堡车辙试验

沥青路面水损坏发展速度快、严重影响行 车运营安全、是高速公路沥青路面的一种主要 早期病害类型[1]。基于车—水耦合作用下的持 续动水压力冲刷导致沥青膜与集料间的剥落是 形成沥青路面水损坏的主要机理。在此基础上, 目前对于沥青路面水损坏的研究主要集中在以 室内动水压力模拟试验为基础的水损坏特性研 究<sup>[2-4]</sup>、通过改性剂改善沥青与集料间的界面粘 结以提高沥青混合料的水稳定性能<sup>[5-7]</sup>、沥青混 合料水稳定性的多元评价表征方法[8-10]以及基 于空隙率控制的混合料级配优化对水稳定性的 影响[11-12] 等方面。上述研究主要是以实验室内 配制的沥青混合料为载体,但沥青路面的路用 性能是混合料设计、生产、铺筑等多环节的综 合反映。作为一种非均匀材料,其集料颗粒组 成的变异性以及实际生产、摊铺、压实等多环 节多因素均会影响混合料的不均匀性,而沥青 路面的早期损坏往往与这种过大的不均匀性有 关。因此,能够正确分析和认识涵盖从施工到 运营的全过程周期沥青路面的早期水损坏发展 演化行为对于此类病害的防治很有必要.但目 前这方面的研究较少。为此,本文以某在役高 速公路沥青混凝土桥面铺装层发生大规模早期 水损坏为背景, 以现场调查分析后所取芯样为 对象,通过系列试验溯源早期水损坏的成因,

分析沥青混凝土桥面铺装层的早期水损坏发展 规律,为高速公路沥青路面的早期水损坏防治 提供建议与参考。

# 1 工程背景

某高速公路设计速度 120km/h, 为双向六 车道高速公路。位于亚热带季风气候区,雨热 同季,降水充沛,多年平均降雨量为1350~ 1780mm, 梅雨季节月均降雨量在 150mm 以上, 最高峰接近 250mm。根据交通量观测统计,单 向年平均日交通量达 24750veh/d, 折算成标准 小客车为 41035pcu/d, 车型分布中货车占比 32.2%, 其中 61.3% 为重载车辆, 交通流量大, 重载比例高。降雨量、交通量和交通组成是影 响沥青路面水损坏的主要外部因素,在此三方 面该路均面临较为严苛的使用环境。该路于 2019年启动部分桥梁的桥面铺装层大修工程, 原铺装层整体铣刨后,回铺4cmSMA-13上面层 +6cm 改性沥青 Sup-20 下面层,于 2019 年 9 月 完工。至 2020 年, 经历过 6 月梅雨季节降水高 峰后,已完工沥青混凝土桥面铺装层集中爆发 了大面积的连片坑洞等早期水损坏病害。

# 2 试验方案

2.1 现场取芯方案

在现场病害调查和统计分析的基础上,选 取病害集中、具有代表性的三处路段作为典型

收稿日期: 2021-07-01

作者简介:胡晓宇(1989-),男,工程师,主要从事路基路面设计工作。

• 沩江圭孟科技 •

路段进行现场取芯,如表1所示。三处典型路 段桥梁均为大桥,上部结构均为简支桥面连续 空心板结构。每个路段分五个断面进行取芯, 为准确反映施工后的初始压实度、空隙率等指 标水平,排除运营期间行车荷载压密作用的外 部因素干扰,每个断面取芯位置位于靠近病害 处的同断面硬路肩位置,将该处的空隙率等指 标结果视为该路段施工后的初始指标。每个断 面取五个芯样,共 75 组芯样,芯样直径 150mm,每组芯样包含上、下面层。

表1 典型水损坏路段

路段名称	路段编号	病害规模
K2199 段	А	370m
K2203 段	В	250m
K2266 段	С	600m

2.2 试验分析方案

# 2.2.1 水损坏溯源分析试验

首先通过浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验 对典型病害路段沥青混合料的水稳定性进行评 价,在此基础上通过系列试验进行溯源分析。 基于在原材料、生产、铺筑等工序中均存在影 响沥青混合料水稳定性的潜在因素,为准确溯 源本次早期水损坏的成因,分别通过对回收沥 青和集料的黏附性等指标进行检测、通过抽提 筛分试验进行沥青含量和矿料级配检验以及通 过芯样毛体积相对密度和理论最大相对密度试 验,计算分析压实度和空隙率指标,对上述各 工序的主要控制因素分别进行定向溯源分析。

# 2.2.2 水损坏发展行为分析试验

常规浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验用于 评价沥青混合料的水稳定性能,但无法反映沥 青混合料的水损害发展行为。汉堡车辙试验与 沥青路面的现场性能关联度更好,相关研究表 明<sup>[13-14]</sup>利用浸水汉堡车辙试验及其剥落曲线理 论分析沥青混合料的水损坏行为是一种可靠有 效的手段。故本文通过对典型路段同位置上、 下面层芯样进行标准条件下的浸水汉堡车辙试 验,研究沥青混凝土桥面铺装层早期水损害的 发展演化规律。

#### 3 试验结果及分析

3.1 浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验

典型路段 SMA-13 上面层和 Sup-20 下面层 浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验结果如图 1 和 图 2 所示。对于 SMA-13 上面层,除 B 路段浸 水残留稳定度 MS<sub>0</sub>不满足 85%要求外,其余路 段的浸水残留稳定度 MS<sub>0</sub>和冻融劈裂试验强度比 TSR 均符合要求。



图 1 上面层 SMA-13 浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验结果

对于 Sup-20 下面层, 三个路段的浸水残留 稳定度 MS<sub>0</sub>均不满足大于 85%的要求, 而 A、B 路段的冻融劈裂试验强度比 TSR 满足大于 80% 的要求。以 MS<sub>0</sub>作为控制指标, 三个路段下面层 水稳定性均不满足要求。以 TSR 作为控制指标, A、B 路段下面层水稳定性满足要求。由上可 知, 冻融劈裂试验结果无法完全准确反映现场 发生水损害的实际情况, 浸水马歇尔试验结果 与现场的相关性更好, 总体上 SMA-13 上面层 的水稳定性优于 Sup-20 下面层。



图 2 下面层 Sup-20 浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验结果

大hilianghongzhi

#### 3.2 回收沥青和集料试验

沥青混凝土铺装层上面层集料为玄武岩, 下面集料为石灰岩,沥青均为 SBS 改性沥青。 对典型路段上、下面层的回收沥青与集料进行 基本指标检测,结果见表 2、表 3,其中用于黏 附性评价的新集料和新沥青分别为在建高速公 路项目使用的优质玄武岩 (江苏兴源料场)、优 质石灰岩(江西瑞龙料场)集料和优质 SBS 改 性沥青(江苏宝利)。可知,回收沥青与集料的 基本技术指标均符合规范要求。回收沥青与回 收集料、回收沥青与新集料及回收集料与新沥 青间的黏附性检测结果均为 5 级,回收沥青与 集料仍然具有较好的黏附性。

A 路段 B 路段 C 路段 检测项目 上面层 下面层 上面层 下面层 上面层 下面层 针入度 (25℃, 100g, 5s) /0.1mm 28 26 17 32 36 35 软化点 T<sub>B&B</sub>/℃ 76.5 69.0 75.0 76.0 63.5 73.5 黏附性(回收沥青与新集料)/级 5 5 5 5 5 5 黏附性(回收沥青与回收集料)/级 5 5 5 5 5 5

表 2 回收沥青基本指标检测结果

表 3 回收集料基本指标检测结果						
检测项目	A 路段		B 路段		C 路段	
	上面层	下面层	上面层	下面层	上面层	下面层
表观相对密度	2.911	2.714	2.918	2.712	2.894	2.709
吸水率/%	0.91	0.59	0.78	0.49	0.92	0.86
压碎值/%	13.1	21.9	12.2	20.7	13.8	22.1
黏附性 (回收集料与新沥青) /级	5	5	5	5	5	5

#### 3.3 抽提筛分试验

典型路段 SMA-13 上面层和 Sup-20 下面层 抽提筛分试验级配曲线如图 3、图 4 所示。总体 上抽提后混合料合成级配曲线走向与生产配合 比级配曲线基本一致, SMA-13 上面层混合料各 筛孔通过率均高于生产配合比,部分路段 2.36 ~9.5mm 筛孔通过率超出允许范围,级配总体 偏细。Sup-20 下面层混合料各筛孔通过率总体 处于允许范围内。SMA-13上面层生产配合比的 油石比为 6%, 抽提试验 A 路段为 5.8%、B 路 段为 5.8%、C 路段为 5.9%。Sup-20下面层生 产配合比的油石比为 4.4%, 抽提试验 A 路段为 4.3%、B 路段为 4.2%、C 路段为 4.2%。上、 下面层油石比均处于允许偏差范围内,但均小 于生产配合比。



图 3 上面层 SMA-13 抽提筛分试验级配曲线



图 4 下面层 Sup-20 抽提筛分试验级配曲线

• 消江麦盈千枝 •

#### 3.4 压实度和空隙率

三处典型路段 75 组芯样的压实度 K 和空隙 率 VV 检测结果见图 5、图 6,相应统计分析结 果见表4。可知,B路段上、下面层压实度代表 值均不满足要求,A、C 路段压实度代表值虽然 满足要求,但不合格率较高,上、下面层分别 达到了16%和24%, 压实度控制变异性大。典 型路段沥青混凝土铺装层在铺筑阶段,实际压 实施工水平控制较差. 表现为压实度不足以及 压实不均匀,变异水平高。压实度不足导致空 隙率偏大,而压实愈不均匀,空隙率偏大的位 置愈多。6%~14%的空隙率范围是易发生水损 害的敏感范围<sup>[15]</sup>,在此范围内,水易进入但不 易排出,积滞于沥青层中,为动水压力的产生 创造了条件。A、C 路段上、下面层空隙率位于 敏感区间的比例分别为16%和36%、52%, B路 段甚至达到了72%和88%。压实度不足、不均 匀性大是导致本次早期水损害的主要原因。根 据压实度不合格率和空隙率大于 6% 的比例指 标,上面层的压实施工控制水平好于下面层。



2021年第3期

表4 典型路段压实度和空隙率检测统计分析结果

		压实度 K		空隙率 VV			
路段	层位	代表 值 /%	变异 系数 /%	不合 格率 /%	代表 值 /%	变异 系数 /%	敏感区 间比率 /%
A	上面层	94. 7	0.8	16	4.8	14. 9	16
	下面层	94.8	2.9	24	3.3	66.1	36
В	上面层	92.9	1.2	68	6.3	16.9	72
	下面层	91.4	1.7	72	7.5	19.7	88
С	上面层	95	1.4	16	4.1	29	16
	下面层	93.4	1.2	24	5.8	17.5	52

3.5 浸水汉堡车辙试验

三处典型路段上、下面层浸水汉堡车辙试 验变形曲线如图 7~9 所示,蠕变速率和剥落拐 点 SIP 相应作用次数结果见表 5。标准条件下, 三处路段下面层试样均在未达到 20000 次加载 时提前发生了水损害破坏,变形曲线呈现出典 型的三阶段剥落破坏特征,经历了初始压密和 蠕变变形阶段后,在11600次左右出现了剥落 拐点,进入剥落破坏阶段后迅速丧失强度发生 破坏。A、C路段上面层试样在 20000 次加载时 仍处于蠕变变形阶,未发生水损害破坏。B路段 上面层试样的水稳定性较差,在16792次加载 时发生剥落破坏。结合前述空隙率试验结果进 行相关性分析可知,上面层空隙率大于6%的比 率要远小于下面层,其压实施工控制水平更好, SMA-13上面层水稳定性同样也优于 Sup-20 下 面层。同层位下, B 路段的空隙率和大于 6% 的 比率要远大于其它路段,其水稳定性也最差。 沥青混合料的水稳定性能与其空隙率指标呈明 显的相关性,现场压实施工的质量控制对其水 稳定性能有显著影响。

综合典型路段各层位在荷载—水—温耦合 作用下的汉堡车辙试验变形曲线结果分析可知, 现场沥青混凝土桥面铺装层的水损害演化是由 下往上逐步发展的整体式破坏。由于压实度控 制的不均匀,局部空隙率较大处降水更易进入、 积滞于铺装层内,下面层沥青混合料的抗水损 害性能更差,持续动水压力作用下沥青剥落从 下面层开始并逐步向上扩展,当下面层粗集料 上的沥青剥落后该层混凝土失去强度. 铺装层 受力模式发生改变,在行车荷载的作用下上面 层加速破坏产生局部网裂和变形,这又促进了 持续降雨过程中雨水的侵入,薄弱部位的铺装 层逐渐松散最终发展形成一个个独立的坑洞。 失去沥青裹覆的粗集料被快速行驶的车轮带出, 坑洞范围逐渐扩大,最终形成了连片的坑洞病 害。

表5 汉堡车辙试验结果

路段	层位	蠕变速率/mm/次	SIP 作用次数/次
A	上面层	1.61×10 <sup>-4</sup>	
	下面层	5.55×10 <sup>-4</sup>	11894
В	上面层	4. 19×10 <sup>-4</sup>	16792
	下面层	7.81×10 <sup>-4</sup>	11488
С	上面层	1. 21×10 <sup>-4</sup>	_
	下面层	6. 69×10 <sup>-4</sup>	11639



图 7 A 路段汉堡车辙试验变形曲线



图 8 B 路段汉堡车辙试验变形曲线



評評制

**T**hilianghongzhi

图 9 C 路段汉堡车辙试验变形曲线

#### 4 结论

(1) 通过定向溯源试验分析可知,现场摊 铺压实环节施工水平控制差,沥青混凝土桥面 铺装层的压实度不足以及过大的不均匀性是产 生本次大规模早期水损坏的主要原因。

(2) 对于在役高速公路沥青混凝土桥面铺 装层的水损坏分析,浸水汉堡车辙试验更为适 宜。与常规浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验相 比,除水稳定性评价外,利用浸水汉堡车辙试 验能够分析水损坏的发展演化行为、为病害的 准确处治提供支撑和依据。

(3) 沥青混凝土桥面铺装层的水损害是由 下往上逐步发展的整体式破坏,下面层的质量 控制对于防止水损坏的发生至关重要。

#### 参考文献

- [1] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防 [M]. 人民交通出版社, 2008: 206.
- [2] 王英, 李萍, 念腾飞, 等. 基于动水冲刷作用的沥青混合 料短期水损害特性「J]. 吉林大学学报:工学版, 2020, 50 (1): 174-181.
- [3] 郭学东, 李准, 马桂荣, 等. 饱水沥青路面动水冲刷损伤 的影响因素分析 [J]. 公路, 2019, 3: 21-26.
- [4] 姜旺恒,张肖宁,李智,等.基于动水压力模拟试验的沥 青混合料水损坏力学机理[J]. 中国公路学报, 2011, 24(4): 21-25.
- [5] 周璐,黄卫东,吕泉,等.不同改性剂对沥青粘结及抗水损 害性能影响研究 [J]. 建筑材料学学报, https:// kns. cnki. net/kcms/detail/31. 1764. TU. 20200817. 1747. 006. html
- [6] 巍腾飞, 王大明, 朱宇杰, 等. Hon7686 改性沥青混合料
- 浙江支着种技 。

抗水损害性能影响研究 [J]. 中外公路, 2019, 39 (6): 259-263.

- [7] 梁鑫. 基于沥青石料表面改性的油石界面粘结剂研究 [D]. 吉林大学, 2011.
- [8] 任敏达,丛林,孙思林,等.多次孔隙水压作用下沥青混 合料性能演化试验[J].吉林大学学报:工学版,https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20200225
- [9] 严超, 巍显权, 方杨, 等. 沥青混合料水稳定性能评价方 法研究[J]. 公路, 2019, 10: 29-33.
- [10] 卢祎苗,肖鹏,夏炎,等.玄武岩纤维沥青混合料水损伤 衰变规律分析 [J].公路工程,2020,45:(2) 55-60.
- [11] 李双艳. 橡胶沥青混合的孔隙率对水损害的影响研究 [D]. 重庆交通大学, 2015.

- [12] 杨若冲,梁锡三,赖用满,等.沥青路面水损害典型原因与对策 [J].同济大学学报:自然科学版,2008,36:
  (6) 749-753.
- [13] Lubinda F. Walubita. The Hamburg rutting test Effects of HMA sample sitting time and test temperature variation [J]. Construction and Building Materials, 2016, 108: 22-28.
- [14] 祝海折,张晓燕,李智慧.沥青混合料水稳定性试验研 究 [J].公路工程,2016,41 (5):212-214.
- [15] Novak M, Birgisson B, Mcvay M. Effects of permeability and vehicle speed on pore pressures in hot mix asphalt pavements [J]. Word journal of The international Linguistic Association, 2002, 1–19.

# • 浙江交易千技 •