

# 塞内加尔高速公路沥青路面抗车辙技术

吕欢, 蒋勇, 张建国, 曾峰

(中国路桥工程有限责任公司, 北京市 100011)

**摘要:**为了解决西非塞内加尔某高速公路可能面临的车辙风险问题,该文从公路沿线气候以及进场沥青品质角度深入分析了可能产生车辙风险的原因,然后从沥青品质、级配调整、沥青含量、添加外掺剂和降低沥青混合料空隙率5个方面进行了车辙试验,根据试验结果提出了应对车辙风险问题的技术对策。通过对后续试验结果分析得到,高速公路路面抗车辙能力获得了巨大的提升,取得了良好的效果。

**关键词:**法国标准; 沥青路面; 车辙; 技术对策

车辙是沥青路面最具危害的破坏形式之一,车辙的存在,不仅会降低路面的路用性能,还会缩短沥青路面的使用寿命,甚至危及行车安全。境外某高速公路位于气候炎热的西非塞内加尔(以下简称“TT项目”),完全按照法国标准进行设计、施工、监理。TT项目的沥青混合料级配也是将原材料送至法国,由位于法国的某国家级实验室进行配合比设计。项目路面采用全厚式路面结构,从下到上分别为25 cm的水泥改善红土砾料垫层(GLC)、22 cm的沥青碎石基层(GB4)、6 cm的沥青混凝土面层(BBSG3)。塞内加尔炎热的气候环境与法国存在巨大差异,但按照项目合同,项目必须严格执行法国技术标准,因此该文依据法国技术标准,分析评价该项目的车辙风险,制定出经济合理、技术可行的技术对策,以此解决塞内加尔沥青路面常见车辙问题。

## 1 TT项目车辙影响因素

### 1.1 气候环境因素

TT项目采用法国标准设计,但是塞内加尔与法国相隔较远,因此在分析车辙风险原因时,必须考虑塞内加尔与法国的气候差异。地理纬度的差异造成塞内加尔与法国气候存在明显的差别,位于热带的塞内加尔,属于热带稀树草原气候,终年炎热;位于温带的法国本土大部分属于海洋性气候,冬温夏凉。图1、2为TT项目沿线的捷斯、久尔贝勒两个城市和法国巴黎的气温与降雨走势图,由图1、2可见:TT项目沿线在

气候上与法国有相当大的差异,法国气温明显较低,且月降雨均匀,而塞内加尔终年高温,降雨集中。

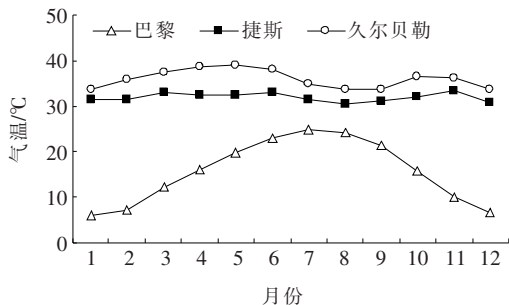


图1 月最高温平均值走势图

TT项目在PK20与PK110附近埋设温度传感器,测得BBSG3层底的温度如图3所示,BBSG3层底的最高温达58.2°C,并且每天温度40°C以上的持续时间最长可达15 h。由此可见:塞内加尔终年炎热的气候导致TT项目沥青路面会有很高的温度与较长的高温持续时间。

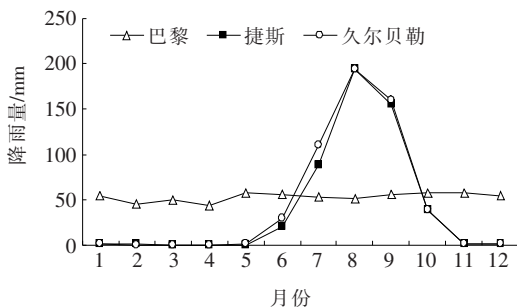


图2 降雨量走势图

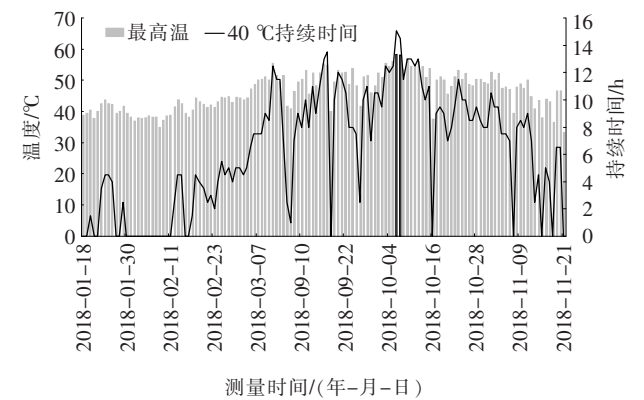


图3 BBSG3层底温度数据统计

为研究温度对 TT 项目沥青混合料高温稳定性的影响程度,选用相同的沥青,采用 BBSG3 级配,在不同温度条件下进行车辙试验,试验结果见表 1。表 1 表明:温度由 55℃ 上到 70℃,每升高 5℃,动稳定度下降 30%~40%,沥青高温稳定性随着温度的升高迅速下降。

TT 项目沿线月均气温均为 30℃ 以上,较高的温度可导致沥青变软,黏结性能下降,抗变形能力减弱,在渠化交通作用下,沥青混合料容易产生横向流动变形,随着变形的不断积累而在轮迹带处形成车辙。因此,塞内加尔炎热的气候条件是产生车辙风险的重要原因。

表 1 温度变化对动稳定度的影响

温度/℃	动稳定度平均值/(次·mm <sup>-1</sup> )
55	2 538.8
60	1 757.8
65	1 006.1
70	640.9

1.2 沥青因素

基于法国沥青混合料耐疲劳性能突出的设计理念,法国实验室提供的 GB4 与 BBSG3 级配均按照最大密度理论设计,属于悬浮密实型结构,与中国习惯采用的骨架嵌挤型级配存在很大差异。在保证优良抗疲劳性能的同时,为提高沥青混合料的抗车辙能力,法国通常采用较硬的沥青以提高混合料的“刚度”(例如该项目按照法标使用 35/50 号沥青)。因此硬质沥青的品质对于该项目沥青混合料的抗车辙能力具有重要影响。

在采取防范车辙风险的措施前,进场沥青的针入度与软化点频率分布如图 4、5 所示。针入度主要集中在 45(0.1 mm)左右,在规范规定值 35~50(0.1 mm)

的偏上限;软化点主要集中为 50~51℃,在规范规定值 50~58℃ 的偏下限。说明进场沥青尽管在合同要求的范围内,但总体偏软,会对 GB4 与 BBSG3 的抗车辙性能造成不利的影响。

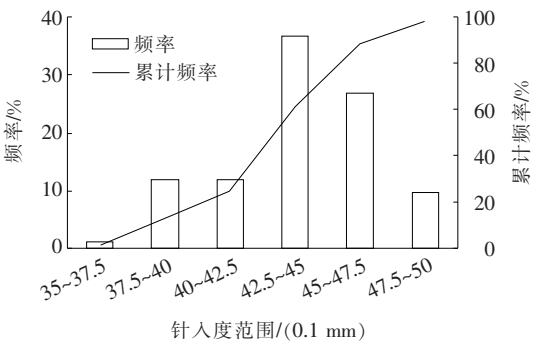


图4 沥青针入度频率分布图

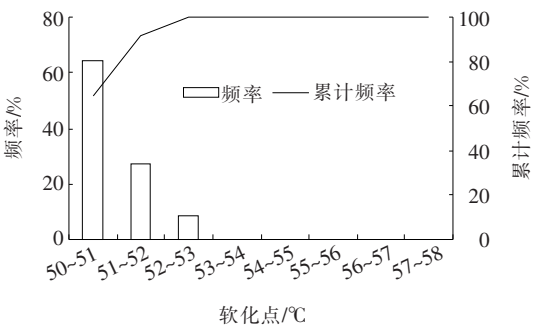


图5 沥青软化点频率分布图

2 防止车辙风险的措施

为了选取合适的方法提高 TT 项目道路的抗车辙能力,防止道路出现车辙问题,分别选取可能影响抗车辙能力的多个变量,进行了大量车辙试验,根据试验结果分析各个变量对抗车辙能力的影响程度,进而提出解决 TT 项目车辙风险问题的对策。

2.1 沥青品质

欧标、法标大量使用低标号沥青,与中国差异很大。法国用细级配、高油石比,增强了路面耐久性,用低标号沥青,增强了路面刚度和抗车辙能力,这样沥青品质就成为了问题的关键。为了分析不同品质沥青对抗车辙能力的影响,找到适合 TT 项目的沥青指标,分别采用不同品质沥青进行车辙试验。

对于 GB4 沥青混合料,在 98% 压实度情况下的试验结果如表 2 所示。

由表 2 可见:沥青品质对 GB4 抗车辙能力有显著的影响。35/50 沥青指标范围过大,不利于实际工程

表 2 不同沥青 GB4 车辙试验结果

沥青编号	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	平均动稳定度/ (次·mm <sup>-1</sup> )
35/50 沥青 1	49	49.7	1 253.8
35/50 沥青 2	41	52.8	2 076.9
35/50 沥青 3	42	51.2	1 734.6
35/50 沥青 4	40	51.5	2 279.4
20/30 沥青 5	26	61.0	6 077.9

中的沥青质量控制。对于硬质沥青,针入度,特别是软化点指标,每变动 1 个单位,混合料的动稳定度都会有较大变化。送法国实验室测得的沥青针入度为 41 (0.1 mm),软化点为 53 ℃,其能够满足法标 60 ℃下 30 000 次轮碾的车辙深度要求,对应的中国标准的动稳定度指标也能达到较高水平。根据动稳定度与针入度、软化点的关系,考虑到送法国实验室的沥青指标,可以在法国标准范围内对沥青针入度、软化点增设内控标准,将沥青针入度控制为 35~40(0.1 mm),软化点控制为 53~58 ℃。

对于 BBSG3 沥青混合料,绘制 BBSG3 动稳定度与沥青的针入度、软化点关系如图 6、7 所示。采用函数拟合,针入度为 35~40(0.1 mm)时,动稳定度为 1 594~2 857 次/mm;软化点为 53~58 ℃时,动稳定度为 2 242~3 503 次/mm。同样地,对于 BBSG3 层,将沥青针入度控制为 35~40(0.1 mm),软化点控制为 53~58 ℃,也可以取得不错的动稳定度提升效果。

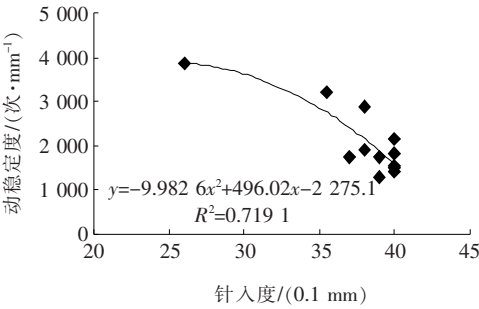


图 6 BBSG3 动稳定度与针入度关系

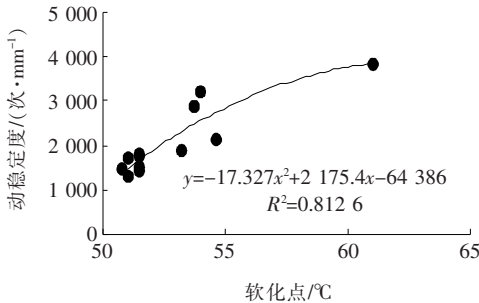


图 7 BBSG3 动稳定度与软化点关系

为了提高 GB4、BBSG3 层的抗车辙能力,直接将沥青标号调低到 20/30 是个不错的选择,但这样不满足项目专用条款的规定,难以执行。因此,从项目实际情况出发,可以与沥青供货商签订补充协议,要求之后的沥青针入度控制为 35~40(0.1 mm),软化点控制为 53~58 ℃。

2.2 沥青混合料级配

由上文对 GB4 与 BBSG3 级配分析可知,GB4 与 BBSG3 均为悬浮密实型结构,而这种结构对于道路的抗车辙能力是不利的。法国标准对级配要求较为宽泛,而项目专用条款给出的级配上下限也较为宽泛,因此可以考虑在允许范围内,对级配进行适当的调粗处理,以提高抗车辙能力。为了从级配调整角度寻求提高沥青混合料抗车辙性能的办法,对于 GB4,选取项目专用条款规定 GB4 级配下限、嵌挤型结构的 ATB25 两种级配,按照单一粒径精配的方法配料,完成马歇尔试验确定毛体积密度与最佳油石比后进行车辙试验;对于 BBSG3,选取调粗的 BBSG 级配,完成马歇尔试验确定毛体积密度与最佳油石比后进行车辙试验。5 种级配的对比图如图 8、9 所示。调整级配后的沥青混合料高温稳定性能如表 3 所示。

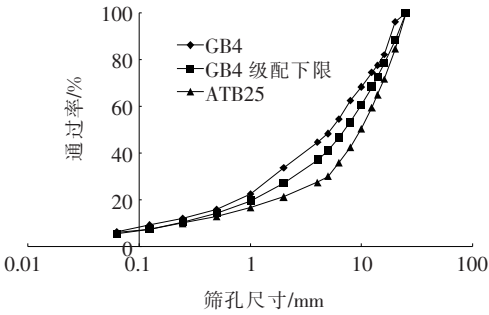


图 8 GB4 与调粗级对比

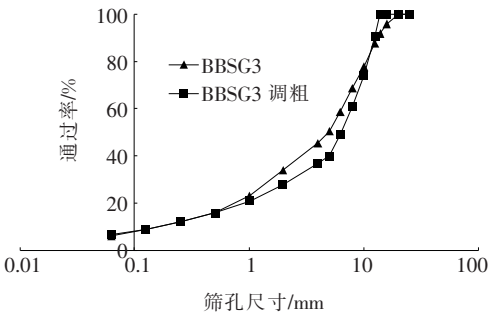


图 9 BBSG3 与调粗级对比

由表 3 可知:对于 BBSG3,将其级配调粗,可以将其动稳定度提升 15.9%,为 1 785 次/mm,提升效果不明显。对于与 GB4 相关的 3 种混合料试验结果,

ATB25 动稳定度最大,GB4 级配下限次之,而 GB4 级配动稳定度最小,这与 3 种混合料的粗细程度相契合。当 GB4 调整到级配下限时,动稳定度可提升 14.2%,为 2 158.5 次/mm,提升效果依然有限;如果将级配调整到嵌挤型结构的 ATB25,可以将动稳定度提升 1 倍,为 3 753.9 次/mm,可见将级配调整为嵌挤型结构可以很好地提高混合料的高温稳定性,但是这样就突破了项目专用条款的限制,难以实现。

表 3 不同级配对高温稳定性的影响

级配	日期	动稳定度平均值/(次·mm <sup>-1</sup> )	相对变形平均值/%
GB4	2017/10/29	1 890.1	8.3
GB4 级配下限	2017/08/30	2 158.5	8.2
ATB25	2017/09/22	3 753.9	6.3
BBSG3	2017/09/09	1 539.9	9.9
BBSG3 调粗	2017/09/29	1 785.0	9.3

对于 TT 项目,将沥青混合料级配调至嵌挤型结构是能够解决车辙风险问题的有效措施,也是中国高速公路经常采用的抗车辙措施,但是由于项目专用条款对级配的限定,无法将沥青混合料调整至嵌挤型结构,但是如果仅仅将级配在规定范围内调粗,又无法达到理想的提升效果,并且生产中容易使级配超出规定范围。因此,只通过级配调整来提升 TT 项目路面动稳定度的方法不切项目实际,略微调粗级配仅可作为提升抗车辙能力的辅助手段。

2.3 沥青含量

过多的沥青用量将在沥青混合料中形成游离自由沥青,在高温条件下,这部分自由沥青可在荷载作用下发生明显的流动变形,从而导致混合料的永久塑性变形,发生车辙病害。因此,可以考虑通过适当降低油石比来提高抗车辙能力。

由于 TT 项目专用条款要求油石比范围为 4%±0.3%,选取 GB4 级配与 GB4 级配下限,分别采用 4.0%与 4.3%两种油石比进行车辙试验,试验结果见表 4。

由表 4 可知:对于 GB4 级配,降低 0.3%的油石比可以将动稳定度提升 13.9%至 2 153.5 次/mm;对于 GB4 级配下限,降低 0.3%的油石比可以将动稳定度提升 6.4%至 2 158.5 次/mm。二者的提升效果均不明显,并且法标要求 GB4 的丰度系数大于等于 2.9,若降低油石比,容易导致丰度系数不足。对于 GB4,适当调低油石比只可作为改善抗车辙性能的方法,并不

表 4 油石比与高温稳定性关系

级配	日期	油石比/%	动稳定度平均值/(次·mm <sup>-1</sup> )	相对变形平均值/%
GB4 级配	2017/09/06	4.00	2 153.5	8.2
	2017/09/05	4.30	1 890.1	8.3
GB4	2017/08/30	4.00	2 158.5	8.2
级配下限	2017/09/07	4.30	2029.3	9.0

能作为解决车辙问题的办法。  
对于 BBSG3,为了保证丰度系数,法标 NF EN13108—1 建议的最小沥青含量为 5%,项目外委法国实验室确定的最佳油石比已经在下限附近,因此,在油石比上,BBSG3 可调整范围有限。

2.4 抗车辙剂

结合塞内加尔既有高速公路经验,可以采用在沥青混合料中掺加抗车辙剂的方法来提高抗车辙能力,国内外工程经验表明,抗车辙剂可以大幅度提高道路的抗车辙性能。

为了研究抗车辙剂掺量对沥青路面抗车辙性能的影响规律,获得经济有效的抗车辙剂的掺量,选取 TT 项目所用的 GB4 与 BBSG3 两种级配,掺入不同剂量的抗车辙剂,分别按照马歇尔击实试验测得集料毛体积密度,然后精配,成型车辙板试件,进行车辙试验,结果如图 10、11 所示。

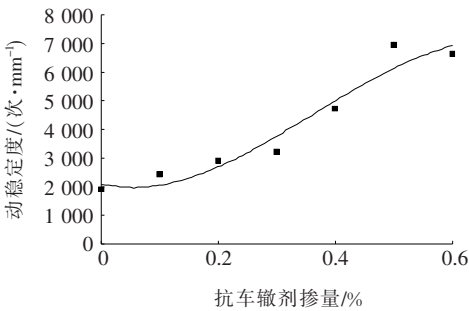


图 10 抗车辙剂掺量与 GB4 动稳定度关系图

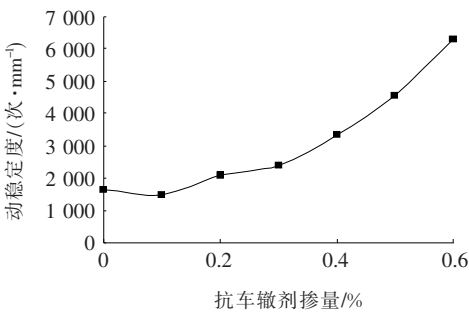


图 11 抗车辙剂掺量与 BBSG3 动稳定度关系图



由图 10、11 可知:抗车辙剂改善沥青混合料抗车辙性能的效果显著,随着抗车辙剂掺量的增加,混合料的动稳定度呈上升趋势。

对于 GB4,当抗车辙剂添加量从 0% 增加到 0.3% 时,动稳定度增加缓慢;当掺量从 0.3% 增加到 0.5% 时,动稳定度迅速增大;当掺量从 0.5% 增加到 0.6% 时,动稳定度增长变缓,出现这种现象与抗车辙剂在沥青混合料中的形态和分布密度有关。由于抗车辙剂掺量为 0.4%~0.5% 时,GB4 的动稳定度增加明显,动稳定度可达到 5 000~7 000 次/mm,已能够满足 TT 项目抗车辙要求,因此,结合经济性和实用性,对于 GB4,抗车辙剂掺量为 0.4%~0.5% 较为合适。

对于 BBSG3,当抗车辙剂的添加量从 0% 增加到 0.2% 时,动稳定度增加幅度较小;当掺量从 0.2% 增加到 0.6% 时,动稳定度迅速增大。考虑到经济性与抗车辙效用,对于 BBSG3,抗车辙剂掺量选用 0.5%~0.6% 较为合适。

对于 TT 项目部分车速较慢的特殊路段,比如匝道、爬坡、收费站附近,可以考虑在 BBSG3 层中添加抗车辙剂来提高其高温稳定性。

## 2.5 压实度水平

合理提升压实度能够增加沥青混合料的致密程度,从而增加内摩擦角,提高内摩阻力,提高路面抗车辙能力。为探究压实度对动稳定度的影响,选用 BBSG3 级配,采用 98%、100%、102% 共 3 档压实度,动稳定度平均值如图 12 所示。

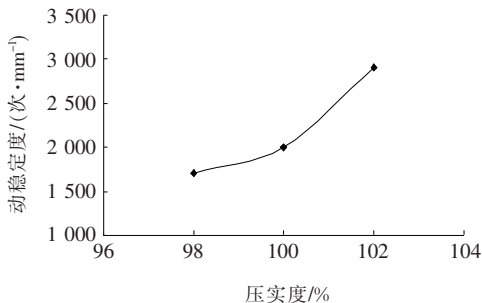


图 12 动稳定度与压实度关系图

由图 12 可知:压实度每提升 2%,BBSG3 动稳定度能够提升 17%~45%,提升效果显著。TT 项目在施工过程中,与压实度相关的主要有两个因素:压实功和压实温度。因此,可通过适当提升压实功和压实温度来提高压实程度,进而提升路面抗车辙能力。由于项目专用条款规定现场空隙率的范围为 4%~8%,范围较大,可以在施工过程中对项目进行施工控制,使现场空隙率进一步向下限偏移,尽量控制在 4%~6%,

从而提升路面整体压实程度,进而提升路面抗车辙能力。

## 3 抗车辙措施方案的确定

根据前文试验分析,控制沥青品质、特殊路段采用抗车辙剂、控制现场空隙率是 TT 项目防止车辙问题切实可行的手段。为了防止车辙病害,结合 TT 项目的实际情况以及工期进度,拟采取如下措施:

(1) 与沥青供货商签订补充协议,要求之后沥青的针入度为 35~40(0.1 mm),软化点为 53~58 ℃。

(2) 对于较大爬坡、收费站、重载车较多的匝道等交通量大且车速慢的特殊路段,在 BBSG3 中掺加 0.5% 的抗车辙剂,其他风险较低的特殊路段在 BBSG3 中掺加 0.3% 的抗车辙剂。

(3) 在铺筑沥青混合料时严格控制压实功,适当提高碾压温度,并以芯样的实际空隙率作为控制施工质量的关键指标,要求现场空隙率为 4%~6%。

(4) 提前在主路的第一层 GB4 上修筑 BBSG3 试验段,开放施工车辆进行碾压,监测车辙发展情况。

## 4 抗车辙措施的实施效果

从 2017 年 12 月开始,TT 项目开始采取以上措施解决车辙风险问题。图 13 为 GB4 混合料采取措施前后对比,采取措施前,动稳定度集中为 2 500 次/mm 左右,采取措施提升抗车辙能力后,动稳定度集中为 3 500 次/mm 左右,提升了 40%,取得了较好的效果。

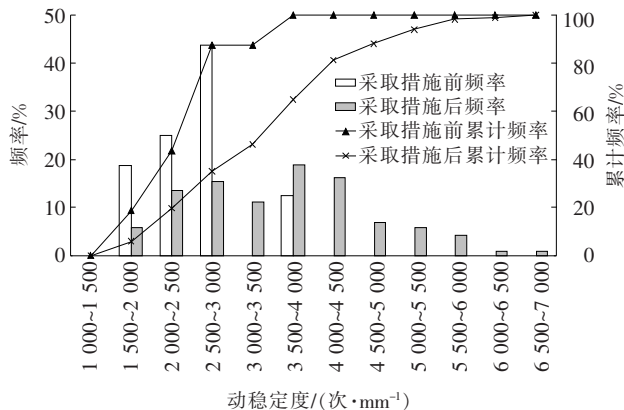


图 13 GB4 动稳定度频率统计图

对于 BBSG3 层,动稳定度频率分布如图 14 所示。由图 14 可知:分布图上明显出现了 3 个峰值,分别集中在动稳定度为 3 000 次/mm 附近的不掺加抗车辙

剂路段、7 000~8 000 次/mm 附近的参加 0.3% 抗车辙剂的特殊路段、10 000~11 000 次/mm 附近的参加 0.5% 抗车辙剂的特殊路段。由此可见,采取以上措施后,BBSG3 层的抗车辙能力也获得了很大的提升。

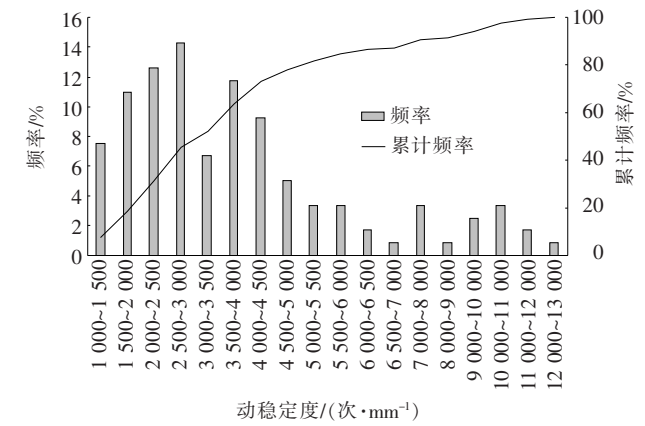


图 14 BBSG3 动稳定度频率统计图

此外,为了确保沥青混合料不出现车辙问题,在某些路段,还在碾压成型后的路面上使用切割机直接切取车辙板,进行车辙试验,试验结果如表 5 所示,这些位置均未参加抗车辙剂。

表 5 现场切取车辙板动稳定度测试结果

段落	现场切取车辙板动 稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )
BBSG3 末端接头位置现场切取	2 930.5
BBSG3 非接头位置现场切取	4 517.2
BBSG3 日常检测良好路段现场切取	6 183.8
BBSG3 日常检测动稳定度较低路段切取	4 732.4
BBSG3 日常检测良好路段现场切取	6 862.0
GB4 主路现场切取	8 290.3
GB4 匝道现场切取	4 505.8

由表 5 可知:在采取上述措施后,沥青层都具有很高的动稳定度,路面具有非常高的抗车辙能力。

综上所述可以看出,TT 项目在采取一系列提升道路抗车辙能力的措施后,解决了车辙隐患问题,取得了令人满意的效果。

5 结语

由于历史原因,塞内加尔修建的公路大多采用与其气候差异巨大的法国标准,再加之中法两国沥青混

合料设计和施工理念、方法的差异性,对 TT 项目路面的抗车辙能力提出了巨大的挑战。该文通过对影响道路抗车辙能力各个因素的逐一分析并进行试验验证,找到了既满足法国技术标准和项目专用技术条款要求,又技术经济可行的解决方案,避免了塞内加尔常见的沥青路面车辙问题,取得了良好的应用效果。

参考文献:

[1] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程

[2] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S]

[3] EN C E N. 12697—22. Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 22: Wheel Tracking[S]. Brussels: European Committee for Standardization,2003.

[4] Jean-Luc Delorme, Chantal De la Roche, Louisette Wendling. Laboratoire Central Des Ponts et Chaussées.; Groupe de Travail RST Formulation Des Enrobés. LPC Bituminous Mixtures Design Guide[M]. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées,2007.

[5] 郝培文. 沥青与沥青混合料[M]. 北京:人民交通出版社,2009.

[6] 汤文,吴学文,孙立军. 沥青路面车辙的多参数预估模型研究[J]. 中外公路,2016(1).

[7] 杨毅,郭彤,栾利强. 掺加 PR 抗车辙剂的沥青混凝土疲劳性能研究[J]. 中外公路,2017(1).

[8] 肖庆一,芮少权,王航,等. 添加 PRPLASTS 抗车辙剂沥青混合料试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2006(7).

[9] 陈振富,吴旦,全锋,等. 沥青路面车辙主要影响因素综述[J]. 中外公路,2016(4).

[10] 邵腊庚,张仕,严二虎,等. 沥青结合料高温性能指标的研究[J]. 中外公路,2018(6).

[11] 苏凯,孙立军. 沥青路面车辙产生机理[J]. 石油沥青,2006(4).

[12] 吴瑞麟,李娜,李向东. 全厚度车辙试验中对试件压实度的控制研究[C]. 全国城市公路学会学术年会,2005.

[13] 王辉,李雪连,张起森. 高温重载作用下沥青路面车辙研究[J]. 土木工程学报,2009(5).

[14] 彭余华,沙爱民,廖志高. 车辙试验的影响因素分析研究[J]. 中外公路,2005(1).

[15] 张志祥,孙文州. 沥青混凝土路面车辙病害原因的调查分析与评价[J]. 公路,2004(6).

[16] 张争奇,陶晶. 高速公路沥青混凝土路面车辙成因分析[J]. 公路,2009(4).

[17] 周岚,倪富健,赵岩荆. 环境温度及荷载对沥青路面车辙发展的影响性分析[J]. 公路交通科技,2011(3).