

不同当量轴载作用下结冰路面抗滑性能变化规律研究

宋超¹, 蒙磊¹, 宋灿灿²

(1.贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550081; 2.上海师范大学, 上海市 200234)

摘要: 路面抗滑性能受路面水环境影响巨大,不同的交通荷载也会对抗滑产生影响,开展不同当量轴载作用下结冰路面抗滑性能变化规律研究意义重大。通过在交通部公路交通试验场开展实车实验,研究了不同路段、不同当量轴载作用次数与不同结冰厚度条件下,路面摆值变化的规律,厚冰层表面温度与摆值的关系,以及室内实验和室外实验结果对比。结果表明:厚冰层表面温度每上升1℃,路面摆值将下降0.87BPN。由于受试验条件限制,不同轴载作用下结冰路面抗滑测试数据未能呈现明显的变化规律。

关键词: 结冰路面; 沥青路面; 轴载; 抗滑性能; 变化特征

中图分类号: U411

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)09-0219-05

0 引言

近年来,我国极端天气频现,对我国的生产生活造成不利影响。2024年春节假期期间,我国华中地区遭受严重的凝冻灾害,以湖北省为例,暴雪冻雨恶劣天气导致境内多趟列车晚点甚至停运、高速公路交通大范围陷入瘫痪,大批返乡人员滞留在了回家的路上^[1],严重影响居民出行。此外,因凝冻灾害天气导致的多车事故时有发生。

国外关于沥青路面抗滑性能的研究起步较早,且在变化机理研究方面已取得一定的成果^[2]。国内在路面抗滑方面展开多方面研究,如温度对沥青路面抗滑性能的影响^[3],湿热地区沥青路面抗滑性能演变行为及衰减特性^[4],冰冻沥青路面抗滑特性评价方法^[5]等,有研究标明,沥青路面抗滑性能在冬季冰雪条件下将降低50%~75%^[6],通过改善路面摩擦力,可以大幅提高路面的安全性,减少交通事故^[7]。此外,针对交通荷载对路面抗滑性能影响也有研究^[8];但在不同当量轴载作用下结冰路面抗滑性能变化规律研究方面较少,随着车辆轮载的反复作用,路面摩擦系数、构造深度等指标随时间推移发生不同程度的衰减,其变化规律的研究将利于路面的养护时间的确定,保证车辆的行驶安全。

目前,路面抗滑性能衰减规律的研究方法、结论

趋于一致^[9-10]。基于室内小型加速加载实验,研究者发现路面摩擦系数随着轮载作用次数呈指数关系或对数关系。路面前期摩擦系数衰减明显,后期趋于平稳。该结论存在较多缺点。因室内小型加速加载设备的加载速度、荷载水平、轮胎、路面结构等均与实际存在较大差异,故需要进一步的研究,以保证抗滑衰减规律与实际情况更加相符。

1 实验方案

1.1 实验影响因素设定

(1) 加载车辆

实验场地位于交通部公路交通试验场,由4辆双后轴10轮载重车,后轴单轴载重量为16t的车辆循环加载。

(2) 实验路段的选择

选择试验场不同路面表层的路段进行实验,实验路段包括YB-STR5、YB-STR3、YB-STR2、YB-STR1、STR12、STR7、STR9、STR16,如图1所示,实验现场如图2所示。各路段路面结构见表1。

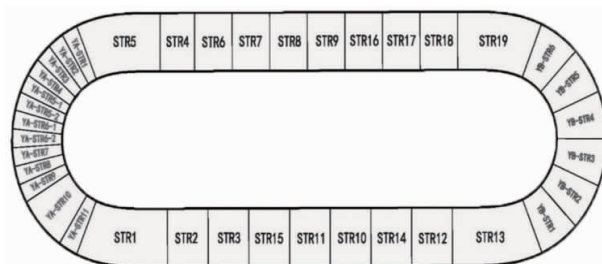


图1 实验路段布局

收稿日期: 2023-11-17

作者简介: 宋超(1990—), 男, 学士, 工程师, 从事公路设计和咨询工作。



表1 不同路段路面结构设置表

路段	YB-STR5	YB-STR3	YB-STR2	YB-STR1
结构	4 cm SBS I-DS10-AC13(70%) 沥青混凝土 +6 cm A30-AC- 20 沥青混凝土 +8 cm A30- AC25 型沥青混凝土	4 cm AR(22%)-AC13(70%) 沥青混凝土 +6 cm AR(22%) -AC-20 沥青混凝土 +8 cm AR(22%)-AC25 沥青混凝土	4 cm SBS I-DS10-AC13(70%) 沥青混凝土 +6 cm 抗车辙(8%) -AC-20 沥青混凝土 +8 cm A70-AC25 沥青混凝土	4 cm 抗车辙(8%)-AC13(70%) 沥 青混凝土 +6 cm 抗车辙(8%)-AC- 20 沥青混凝土 +8 cm A70-AC25 沥 青混凝土
路段	STR 12	STR 7	STR 9	STR 16
结构	4 cm SBS-AC-13(65%) 沥青 混凝土 +8 cm SBS-AC-20 沥青混凝土 +12 cm A70- AC25 沥青混凝土	4 cm SBS-AC-13(70%) 沥青 混凝土 +6 cm SBS-AC-20 沥 青混凝土 +8 cm A70-AC25 沥 青混凝土	4 cm SBS I-DHV4 AC-13(80%) 沥青混凝土 +6 cm SBS-AC-20 沥青混凝土 +8 cm A70-AC25 沥青混凝土	4 cm SBS-AC-13(75%) 沥青 混 凝土 +8 cm SBS-AC-20 沥青混凝土 + 12 cm A70-AC25 沥青混凝土 +12 cm A70-AC25 沥青混凝土

1.2 当量轴载换算系数

根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)规定,按式(1)计算当量轴载换算系数^[11]:

$$k=c_1c_2\left(\frac{P_i}{P_s}\right)^b$$

(1)

式中: P_s 为设计轴载, kN; P_i 为实验车辆单轴载重, kN; b 为换算指数。分析沥青层疲劳和沥青层永久变形时, $b=4$; 分析路基永变形时, $b=5$; 分析无机结合料层疲劳时, $b=13$; c_2 为轮组系数, 双轮组为 1.0, 单轮时取 4.5; c_1 为轴组系数, 前后轴间距大于 3 m 时, 分别按单个轴计算, 轴间距小于 3 m 时, 按表 2 取值。

根据加载车辆类型、单轴载重, 取 $P_i=160$ kN, $P_s=100$ kN, $b=4$, $c_2=1.0$, $c_1=2.1$, 代入式(1), 得: $k=13.76$ 。通过统计, 每天 4 辆车共计作用 1 000 次, 换算成当量轴载作用次数, 即为 13 760 次, 取整按 14 000 次计算。

2 路面摆值变化趋势

经过 4 辆双后轴 10 轮载重车的连续作用 4 d, 共计 56 000 次后, 路面摆值的变化情况如表 3 所示。可以发现, 摆值的变化没有明显的规律。由于摆值测量过程存在较大的操作误差, 故导致摆值存在一定波动。

实验过程中, 同一路段的最大摆值与最小摆值

(3)实验过程

- a. 利用摆式仪对不同路面结构的初始摆值进行检测。
- b. 加载过程: 加载过程中, 4 辆双后轴 10 轮载重车的后轴单轴载重量为 16 t, 平均车速保持为 30 km/h。车辆每加载 11~12 h, 采集路面表面摆值 BPN, 并同时记录空气温度 T_a 。

表2 轴型系数取值

设计指标	轮轴型	c_1 取值
沥青层疲劳 沥青层永久变形	双联轴	2.1
	三联轴	3.2
路基永久变形	双联轴	4.2
	三联轴	8.7
无机结合料类结构层疲劳	双联轴	2.6
	三联轴	3.8

差, 即 $4<BPN_{max}-BPN_{min}<9$ 。由此可见, 摆值在轮载的反复作用下, 出现较小程度的衰减。由于在此次测量之前, 已加载 12 万次。根据室内试验的结论, 路面抗滑在加载初始阶段变化迅速, 随后变化平缓。因此, 此次测量的结论与室内试验相一致。

由于数据采集量较少、采集间隔短, 使得路面抗滑性能衰减规律在短时间内无法完整描述, 故需要进一步的测量。同时, 因为摆式仪测试方法缺陷多, 故有必要采用先进的设备进行测试, 如横向力系数测试车等, 确保实验数据的科学性、有效性和准确性。

3 不同当量轴载作用下结冰路面抗滑性能变化规律

路面抗滑性能随车辆轮胎作用次数、环境等因素的耦合作用而逐渐减小。当路面被积雪、冰层覆盖时, 抗滑力降低明显。当路面被薄层冰覆盖时(指冰

表 3 车辆荷载作用后摆值变化趋势

	YB-STR5	YB-STR3	YB-STR2	YB-STR1	STR12	STR7	STR9	STR16
14 000 次	61.4	55	54.4	61.2	60	62	55	63.2
28 000 次	54.8	51.8	59	57.2	57.2	56	59	59
42 000 次	55.8	55	59.8	64	60	55	63.2	60
56 000 次	55.6	58.4	56.2	65.6	53.4	55	60	61.6
BPN_{max}	61.4	58.4	59.8	65.6	60	62	63.2	63.2
BPN_{min}	54.8	51.8	54.4	57.2	53.4	55	55	59
$BPN_{max}-BPN_{min}$	6.6	6.6	5.4	8.4	6.6	7	8.2	4.2

层厚度小于路面构造深度,即路面表面未被完全冰层覆盖,仍有部分集料裸露),轮胎依然与路面表面有一定接触。当路面覆盖厚冰层时(厚冰层指冰层完全将路表构造深度覆盖,形成平整冰面,未有集料裸露),车轮与路面构造没有直接接触,因此路面结构对抗滑性能没有直接影响。该实验研究路面抗滑性能发生衰减后,路面附着薄冰、厚冰后,从路面结构、冰层结构与特性出发,分析湿滑性能的变化规律,建立路面摩擦系数、当量轴载作用次数、路面状态(冰层表面温度)、冰层硬度(针对厚层冰)间的定量关系模型。

3.1 实验过程

(1)待每天加载完成后,在实验路段上安置好摆式仪,喷洒水膜,水膜厚度逐层增加,直至积水完全覆盖测试段路表面。水膜分 3 次喷洒,第一次喷水时,调节喷头使其喷出雾状水膜,模拟路面附着薄层

冰状态;第二次喷水量与第一次相当。第三次喷水时,调节喷头使其喷出柱状水膜,以保证路面完全被冰层覆盖,模拟路面覆盖厚冰层状态。

(2)每次喷水完成后,迅速喷洒液氮降温结冰,待路面完全结冰后,测试其表面摆值 BPN ,并使用温枪探测冰层表面温度 T_i 。

(3)第三次洒水结冰完成后,摆值数据采集完成后,测试冰层表面的硬度 H 。

3.2 实验数据分析与处理

不同路段、不同当量轴载作用次数与不同结冰厚度条件下,路面摆值变化趋势如图 3 所示。由图 3 可知,路面摆值随着冰层厚度的增加而下降。不同路段,在不同结冰厚度下的摆值变化范围见表 4。

第一次结冰时,由于喷洒雾状水膜,路面宏观构造深度范围内并没有冰层出现,裸露的集料表面附

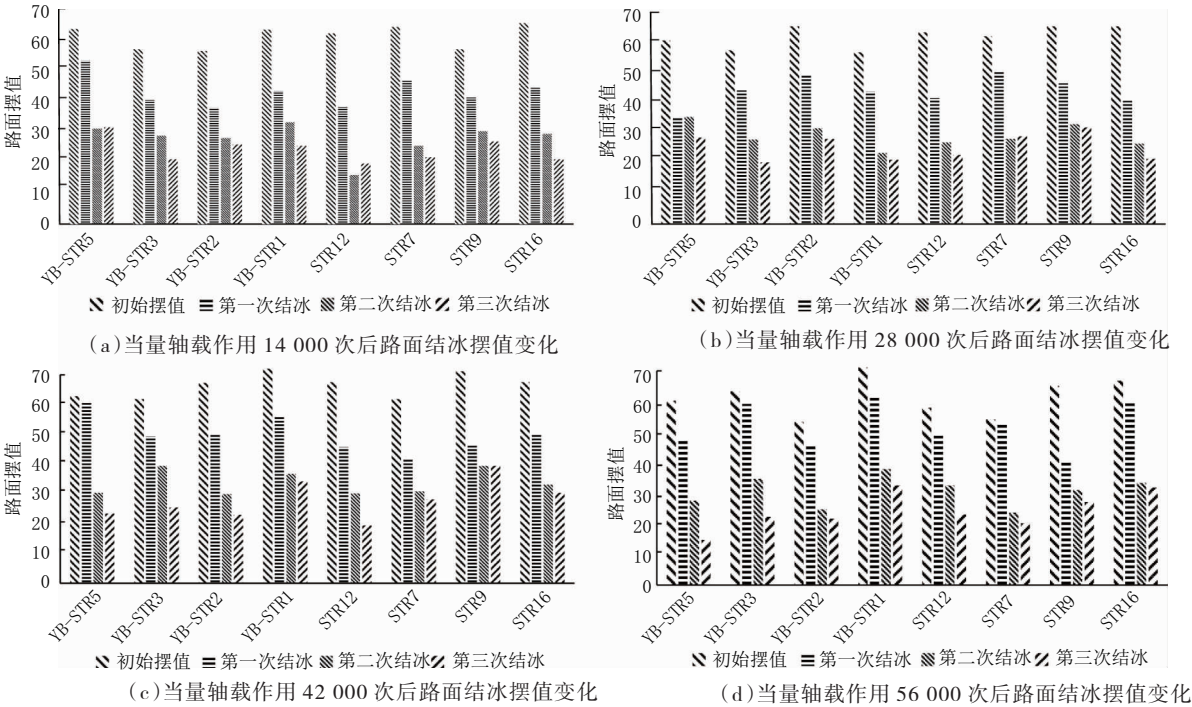


图 3 不同轴载作用下结冰路面摆值变化趋势

着一层较薄的冰。当摆式仪的摆锤下落后,路面较深的宏观构造仍能起到一定抗滑作用。从摆值变化角

度看,第一次结冰后摆值最小值 $BPN_{min}>30$,且 65% 以上的摆值 BPN 大于 40。

表 4 不同结冰厚度下路面摆值变化规律

轴载作用 次数 / 次	第一次结冰 摆值范围	第二次结冰 摆值范围	第三次结冰 摆值范围
14 000	(35,52)	(25,32)	(19,30)
28 000	(31,46)	(21,32)	(18,29)
42 000	(37,54)	(26,35)	(17,35)
56 000	(37,55)	(22,35)	(13,30)

随着结冰厚度的增加,冰层逐渐填充路面宏观构造深度范围内的空间,直至完全充满并覆盖。此时,摆式仪摆锤的橡胶片的接触界面为冰层,抗滑性能完全由冰表面提供,使得第三次结冰时,路面摆值

显著降低。

为比较不同荷载作用次数下,不同结冰次数后路面摆值与初始摆值的差异,绘制不同结冰次数下,所有实验路段的路面摆值下降率箱型图,如图 4 所示。其中,第一次结冰后,除第四天摆值下降率平均值低于 20%,前三天的摆值下降率平均值在 30% 范围内波动;第二次结冰后,路面摆值下降率平均值均大于 50%;第三次结冰后,路面摆值下降率维持在 60% 以上。可见,路面一旦出现结冰现象,路面摆值下降明显,随着结冰厚度的增加,摆值下降率降低。

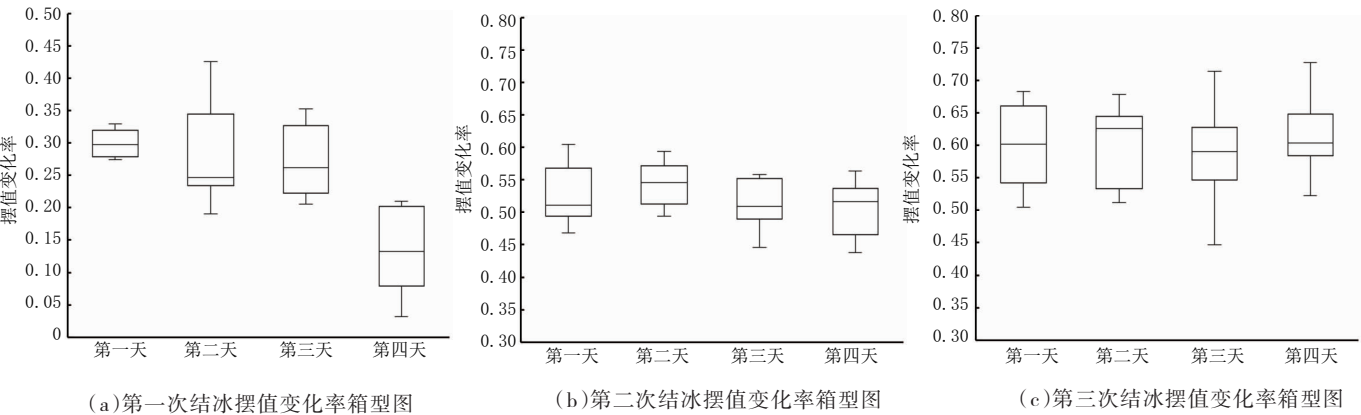


图 4 不同路段、不同冰厚下摆值变化率箱型图

根据已有的室内加速加载实验,随着加载次数的增加,轮迹带处试件集料下陷,细集料相对上浮,粗集料棱角被磨碎,构造深度与周边不受轮载作用的混合料相比有所减小。因此,随着当量轴载作用次数的不断增加,路面构造深度对结冰的影响作用应随之变小,且冰层厚度的影响并不显著。由于试验路段加载次数较少,路表面抗滑性能较好,使得测试数据未能呈现明显的变化规律。因此需要进一步的实验与研究。

3.3 厚冰层路面摆值与温度规律

实验过程中,第三次结冰时,因冰层已完全将路表构造覆盖,故摆式仪摆锤的橡胶块与冰面形成一对摩擦副。冰面作为橡胶的接触界面,与路面构造特征没有直接联系。此时,摆值变化趋势与冰面特征存在一定联系,如冰层表面温度、硬度、冰层表面状态、清洁度等。冰层表面温度与摆值关系如图 5 所示。可知,随着冰层表面温度的降低,路面摆值逐渐增加。杨一洋的研究表明在低于 -20℃ 低温情况下,冰面的摩擦系数非常的高,与一些金属表面的摩擦系数相当。此时橡胶在冷冰上具有非常强的黏附作用,但当温度接近融化点时,黏附力迅速减小,由此产生的摩

擦力也迅速减小,直至消失殆尽。

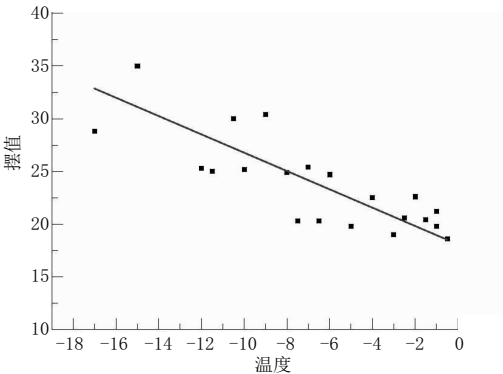


图 5 冰层表面温度与摆值关系图

由图 5 可知,冰层表面摆值与表面温度存在一定线性关系。因此,使用统计学方法进行进一步论证。

摆值与冰层表面温度相关性检验表如表 5 所示。可知,两者的相关性在 0.01 层上双尾显著,表明摆值与冰层表面温度存在线性相关性。

建立冰层表面摆值与温度关系模型,结果见表 6。取 $\alpha=0.05$,T 检验结果表明, $p<\alpha$,模型满足统计要求。

故冰层表面摆值与温度模型如式(2)所示,拟合程度较好。该模型表明,温度每上升 1℃,路面摆值将下降 0.87BPN。

表 5 摆值与温度相关性检验表			
		温度	摆值
温度	皮尔森 (Pearson) 相关	1	-.844 ^①
	显著性 (双尾)		.000
	N	31	31
摆值	皮尔森 (Pearson) 相关	-.844**	1
	显著性 (双尾)	.000	N
	31	31	

注:①相关性在 0.01 层上显著 (双尾)。

表 6 回归结果					
模型	非标准化系数		标准化系数		显著性
	B	标准错误	Beta	T	
(常数)	18.084	0.843		21.456	2.42 × 10 ⁻¹⁹
1 温度	-0.870	0.103	-0.844	-8.458	2.55 × 10 ⁻⁹

$$BPN_{ICE} = 18.084 - 0.87T_i \quad R^2 = 0.712 \quad (2)$$

式中: BPN_{ICE} 为冰层表面摆值; T_i 为冰层表面温度。

4 结 语

本文选择交通部公路交通试验场进行室外实验,研究了不同路段、不同当量轴载作用次数与不同结冰厚度条件下,路面摆值的变化规律;厚冰层路面摆值与温度规律。结果表明,路面一旦出现结冰现象,路面摆值下降明显,随着结冰厚度的增加,摆值

下降率降低;受实验条件限制,不同当量轴载作用次数下测试的摆值数据未能呈现明显的变化规律。室外环境下厚冰层表面温度与摆值存在一定线性关系。

参考文献:

[1] 杨雁琳.为何导致交通陷入瘫痪?除冰难度有多大?解读湖北暴雪冻雨的几大疑问 [EB/OL]. (2024-02-06) [2024-09-10]https://www.cqcb.com/minshengkuaidi/2024-02-06/5498569_pc.html.

[2] 钱朝清.国外沥青路面抗滑性能影响因素研究[J].城市道桥与防洪, 2019(2):165-167.

[3] 潘岳.温度对沥青路面抗滑性能影响的研究——基于北京足尺环道[D].重庆:重庆交通大学,2021.

[4] 许新权.湿热地区沥青路面抗滑性能演化行为及长效抗滑表层设计研究[D].南京:东南大学,2021.

[5] 王潇婷.冰冻沥青路面抗滑特性评价方法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

[6] 张焱发,黄志才.动静态因素下路面摩擦系数试验研究[J].中外公路,2013,33(5):43-47.

[7] 黄晓明,郑彬双.沥青路面抗滑性能研究现状与展望[J].中国公路学报,2019,32(4):32-49.

[8] 曹明明,黄晚清,叶建等.交通荷载对沥青路面抗滑性能衰减特征的影响[J].成都大学学报(自然科学版),2023,42(4):432-428.

[9] 宁斌权.沥青路面抗滑性能衰变规律及修复技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.

[10] 王元元.沥青路面抗滑特性与其表面粗糙特性之关系研究[D].南京:东南大学,2017.

[11] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com