

积雪条件隧道进出口路面抗滑性能与路面温度研究

温学钧¹, 宋灿灿², 黄岩¹, 东阳¹

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092; 2.上海师范大学建筑工程学院,上海市 201418]

摘要: 为了确定隧道进出口路面积雪条件下的路面抗滑性能变化规律,采用摆式仪测量了自然降雪过程中恒山隧道和抢风岭隧道进出口间隔25 m的摆值;采用红外测温仪采集了晴天且路面干燥时2座隧道间隔10 m的路面温度。分析结果表明:隧道进出口呈现融化雪路面、松散雪路面和压实雪路面3种状态,3种路面的摆值依次降低;隧道进口的摆值波动幅度和范围均超过了隧道出口,隧道进口的摆值波动范围为洞口内50 m至洞口外170 m,隧道出口的摆值波动范围为洞口至洞口外25 m;隧道内路面温度低于路基段,隧道进出口路面存在明显的温度降低震荡。由此可知,隧道进口的压实雪路面主要是由于进口处温度降低引起的,隧道出口摆值变化与路面温度关系不显著。所作研究可以为降雪条件下隧道进出口事故的预防和预警提供技术支撑。

关键词: 隧道进出口;积雪条件;抗滑性能;路面状态;路面温度

中图分类号: U411

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)09-0206-05

0 引言

路面积雪会使路面抗滑性能下降,车辆制动距离增加,易引发追尾、侧翻和撞击固定物等事故。因此路面积雪是造成事故频发的重要原因之一。

隧道是道路穿越山岭、河流的重要结构物。受光环境、自然环境、空间环境突变的影响,隧道路段常常成为事故多发路段。降雪天气对隧道的影响,会进一步增大车辆的运行风险,原因是隧道内路基的路面状态突变。隧道进出口连接线上车速较快,由于照明强度剧烈变化、洞内外抗滑能力差异等,容易造成车辆急刹车或追尾,进而引发隧道进出口交通事故^[1]。

国内外对冰冻天气沥青路面的摩擦系数进行了长期而系统的研究。摆式摩擦系数测试仪(BPT)和动态摩擦系数测试仪(DFT)常用于路表抗滑性能的测试。Dan等^[2]使用BPT测试了结冰路面的抗滑性能,分析了路面温度、冰层厚度和水膜厚度的影响,最后提出了路面摩擦系数的经验评价模型。Tan等^[3]使用DFT系统,研究了橡胶滑块在结冰路面上的抗滑性能,分析了冰层厚度、测试速度和环境温度对路

面摩擦系数的影响,结果表明路面摩擦系数受环境温度的影响明显,而受测试速度的影响不大。杜雪松等^[4]对粗、中、细3种表面粗糙状态路面,使用BPT测量了冬季5种冰雪覆盖状态下的路面摩擦系数,其中冰雪混合路面的摩擦系数最低。Salimi等^[5]使用同步牵引车在封闭路段测试了结冰和积雪路面的横向摩擦系数,结果表明,测试速度与摩擦系数的大小并没有表现出相关性;随着车辆通过次数的增加,薄雪层即使在低温条件下也会逐渐消融,中雪层则在压实过程中变得更加光滑;即使是轻微的降雪(厚度1~3 cm)也会使路面抗滑性能大幅下降,雪层越厚路面的摩擦系数越小。

综上所述,冰雪覆盖会导致路面抗滑性能大幅下降,并且不同状态的冬季路面其摩擦系数表现出明显差异。本文测量了自然降雪过程中2条隧道进出口的摆值BPN,明确了隧道进出口路面抗滑性能波动的范围,并分析了路面温度场与摆值的影响关系。

1 试验方案

由于隧道进出口的风速、温度和积雪覆盖状态相比于路基段存在明显差异,为了获取降雪环境下隧道进出口的路面温度和路面摆值变化规律,开展了现场试验。

1.1 试验隧道

根据天气条件和试验过程中临时交通组织的可

收稿日期: 2024-02-04

作者简介: 温学钧(1962—),男,博士,教授级高级工程师,从事交通规划设计工作。

通信作者: 宋灿灿(1988—),女,博士,讲师,从事道路安全与环境研究。电子信箱: songcancan@shnu.edu.cn

实现难度,选择恒山隧道和抢风岭隧道进行现场试验。2座隧道的设计速度均为100 km/h,建筑限界10.75 m×5 m,双向4车道。试验时均为左线,恒山隧道左线长5 160 m,最大纵坡为-2.23%;抢风岭隧道左线长5 480 m,最大纵坡为1.91%。

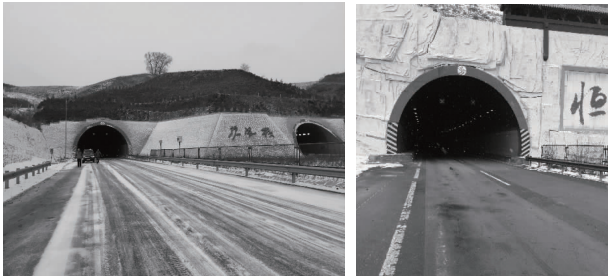
1.2 测试范围

受隧道入口风速风向影响,洞内50 m范围内的路面被积雪覆盖,如图1所示。因此,根据洞内外路面积雪状况,测量隧道进口端洞内50 m至洞外300 m的路面摆值。



图1 隧道进口路面积雪状况

隧道出口的路面积雪状况见图2。相比于隧道入口,在隧道出口端一定范围内,路面积雪较少。主要原因是风向对积雪降落点的影响。由于隧道出口端洞口内基本未形成积雪,因此测量自隧道出口端洞口至积雪状态稳定路面的摆值。



(a) (b)
图2 隧道出口路面积雪状态

测量路面温度时选择左洞,与摆值测量同侧。选择进口前50 m至出口后150 m的范围,每隔10 m取1个测点,并记录温度数据。恒山隧道和抢风岭隧道的测量时间分别为10:30—11:00、14:00—15:00。

1.3 试验设备

采用BM-III型摆式摩擦系数测试仪进行路面摆值的测量。摆式仪可以定量衡量路面的抗滑性能。在测试路段上,沿行车方向每隔约10 m设置1个测点。

采用FLUKE非接触式红外测温仪(Ti32)对路面温度场进行探测。该设备的温度探测范围可以达到-20~+600 ℃,采用红外线融合技术,将可见光图像(640px×480px)与每个红外图像融合在一起,一同显示在LCD显示屏上并存储。

2 积雪条件下隧道进出口路面抗滑性能

路面状态和摆值均能够反映路面的抗滑性能,而路面状态可以通过摆值进行分类。

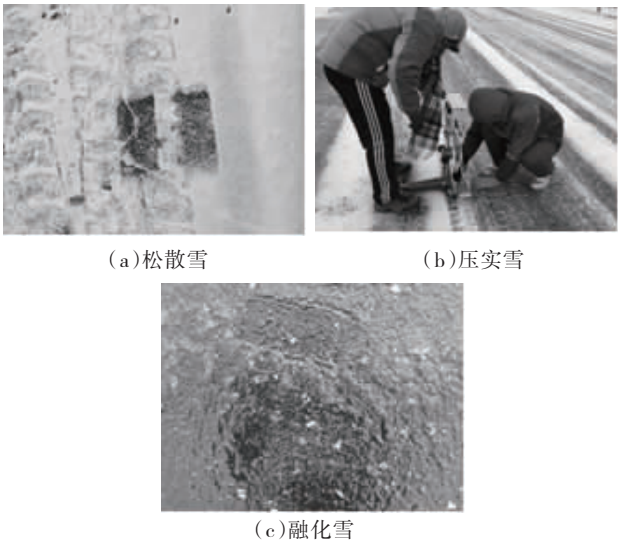
2.1 隧道进出口积雪路面状态分类

日本森永教夫^[6]将路面积雪类型分成了7种,分别是新雪、雪粉、雪粒、雪板、冰块、冰膜、融雪。根据试验隧道进出口路段积雪路面的现状情况,将隧道进出口的积雪路面状态划分为:松散雪路面、压实雪路面、融雪路面,对应森永教夫提出的新雪、雪板、融雪3种类型,如表1所示。

表1 路面积雪的特点与状态

积雪类型	特点	状态	密度 / (g·cm ⁻³)	硬度 / MPa
新雪	刚下降的雪	雪片	0.10 左右	无
雪板	呈板状压实的积雪	粒径 0.05~0.3 mm 的雪粒相互呈网状连接	0.45~0.75	200~1 700
融雪	雪融解后产物	粒径 1 mm 以上, 互不连接颗粒	0.90~0.96	无

参考《雪害地区铁路路基设计手册》,将松散雪路面定义为降雪过程中不受外力作用或作用可忽略时的自然累积雪覆盖的路面(见图3(a));压实雪路面即为路面积雪经过车轮累积碾压作用后形成的较为坚硬的表面,其摩擦系数往往较松散雪大大降低(见图3(b));融雪路面是指雪融化过程中的路面(见图3(c))。



(a)松散雪 (b)压实雪 (c)融化雪
图3 不同积雪路面状态

选择4个测点,利用摆式摩擦系数测试仪测量它们在不同积雪路面状态下的摆值。每个测点重复测量5次,2次测量结果之差不得超过3BPN;取5次测量结果的平均值作为该测点的摆值。

不同积雪路面状态下的摆值统计表见表2。

表 2 不同积雪路面状态下的摆值统计表			单位: BPN
测点	压实雪	融化雪	松散雪
1	29.00	38.00	29.20
2	29.00	46.20	35.40
3	27.00	51.60	34.40
4	33.00	47.60	33.00
平均值	29.50	45.85	33.00

由表 2 可知,融化雪路面摆值最高,其次是松散雪路面,压实雪路面摆值最低。

路面积雪融化后,路面的宏观构造裸露,使摆值整体升高,但是比干燥路面摆值低,原因是积雪融化后会在路面形成一层厚水膜,水膜的润滑作用使得摆值下降。

压实雪路面摆值比松散雪路面低 3.5BPN。原因是路面积雪在车辆轮载的反复碾压作用下变得密实,部分积雪因融化形成冰,使路表更光滑;而摆锤下摆过程中受到的浮雪阻力作用,也可能是造成松散雪摆值较高的原因之一。

2.2 隧道进口积雪路面摆值变化规律

测量隧道进口端洞内 50 m 至洞外 300 m 的路面摆值,结果见图 4。由图 4 可知,恒山隧道在积雪环境下的路面摆值要比抢风岭隧道更高,波动范围更大。恒山隧道进口端的摆值波动范围为 29~51.6BPN,抢风岭隧道进口端的摆值则在 23.6~35.2BPN 范围内波动;2 座隧道进口端路面摆值的变化趋势基本一致,波动最明显的范围是洞内 50 m 至洞外 50 m,随着与洞口距离的增大,波动范围逐渐减小,在距洞口约 175 m 的洞外时,摆值基本稳定在 30~35BPN。原因可能是实际路面环境下,2 座隧道进口端的积雪路面状态有差异,同时距离洞口越近,气象环境变化越复杂,因此使其路面摆值有较大波动。

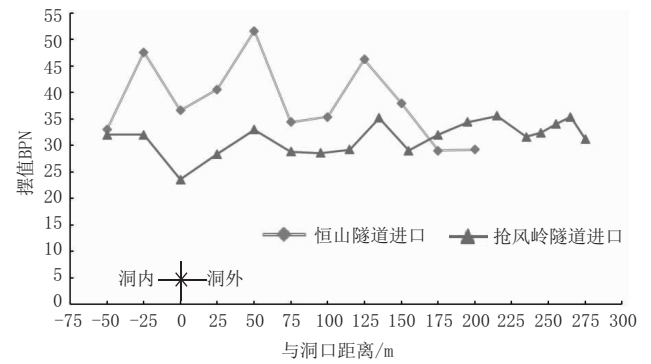


图 4 积雪条件下隧道进口摆值变化图

与路面摆值相对应,恒山隧道洞内 50 m 至洞外 175 m 范围内以融化雪路面为主;距洞口 175 m 至

300 m 范围内属于松散雪和压实雪的混合路面。

2.3 隧道出口积雪路面摆值变化规律

隧道出口积雪路面摆值与车辆前进方向距离的关系见图 5。由图 5 可知,恒山隧道与抢风岭隧道出口端的路面摆值相差较小,两者的变化趋势近似,且波动范围较小。在距离洞口 25 m 范围内,摆值急剧降低,恒山隧道与抢风岭隧道分别降低 31.4、24.4BPN,随后两者均在 30~40BPN 范围内波动。原因可能是洞口位置没有积雪覆盖,路面处于融化雪状态,洞外路面则被薄层雪覆盖。由于路面状态的差异,使得距离洞口 25 m 范围内的摆值变化明显。随后,因路面状态、环境因素均大致相同,因此摆值波动稳定。

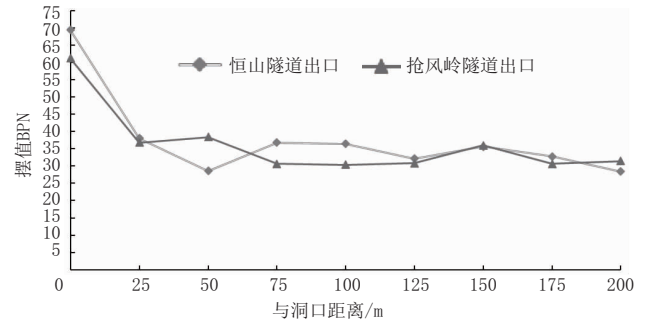


图 5 积雪条件下隧道出口摆值变化图

隧道出口为干燥路面状态,随着洞外距离的增大,隧道洞口外的路面状态快速变化为压实雪与松散雪混合状态。相比于隧道进口,隧道出口的路面状态变化路段更短,进口约为出口的 8 倍。

3 温度场与摆值的影响关系

为了进一步分析积雪路面状态的形成机理,采集隧道路段的温度数据进行分析。温度场是指某一瞬间物体内部各点温度大小,它是时间和空间的坐标函数。隧道温度场属于温度随时间变化的非稳态温度场。

3.1 路面温度与隧道纵向长度的关系

根据采集的最高温度、最低温度和平均温度,绘制了路面温度与隧道纵向长度间的关系图,见图 6。

由图 6 可知,路基段的路表温度明显高于隧道内路面温度,原因是测量温度时天气晴朗,沥青路面可以迅速地通过太阳辐射吸能,所以其温度较隧道内高。路基段的路表温度较隧道内高 2~4℃。

2 座隧道中间段的温度基本上保持稳定,尤其是抢风岭隧道;恒山隧道的向阳面与背阴面温差更为明显,所以,恒山隧道由阳面至阴面的整体温度呈下降趋势,而抢风岭隧道的洞内温度基本保持稳定。另外,隧道埋置深度也可能会对隧道中间段的路面温

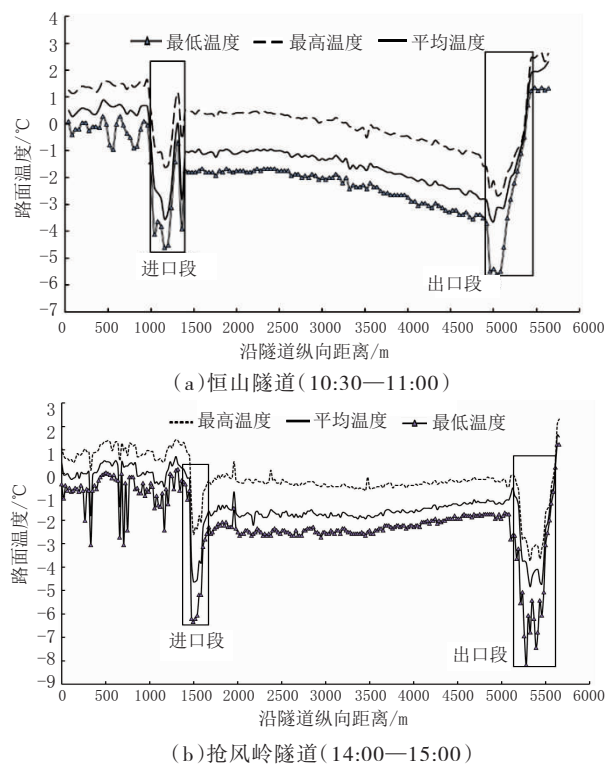


图6 路面温度与隧道纵向长度间的关系图

度产生影响。

隧道温度在进出口处发生剧烈的震荡，从震荡幅度来看，出口段的震荡幅度大于进口段，但是差异不明显。从震荡的范围看，进口段的震荡范围小于出口段。隧道进出口处的温度震荡规律均为先剧烈下降，然后维持短暂的稳定，再剧烈上升。主要原因是隧道进出口处横风的影响。

对比测量的最低温度、最高温度和平均温度，3种温度的变化趋势基本一致，突变点位高度集中，因此，在后续分析过程中仅采用平均温度进行分析。

3.2 隧道进口温度场变化

恒山隧道、抢风岭隧道进口处的路面平均温度与隧道纵向长度间的关系见图7。

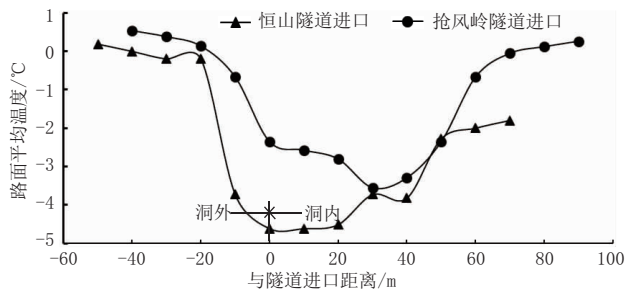


图7 隧道进口路面平均温度与隧道纵向长度间的关系

由图7可知，2座隧道进口温度场的变化趋势基本一致。2座隧道由洞外20 m至洞口范围内，路面温度变化急剧；恒山隧道由洞口至洞内40 m范围内，温度变化缓慢，波动幅度较小，波动范围为-0.5~0.5℃，

但在该范围内整体呈现上升的趋势；隧道洞内40~70 m范围内，路面温度快速上升，随后保持稳定。抢风岭隧道进口段的温度较恒山隧道的温度更高，原因可能与隧道埋置深度、风速和朝向有关。

3.3 隧道出口温度场变化

恒山隧道、抢风岭隧道出口段的路面平均温度与隧道纵向长度间的关系见图8。

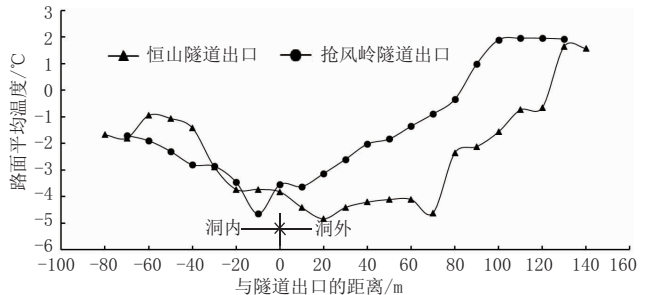


图8 隧道出口路面平均温度与隧道纵向长度间的关系

由图8可知，2座隧道出口温度场的变化趋势基本一致，但一致的程度没有进口高；抢风岭隧道温度场的平盆底明显短于恒山隧道。2座隧道在洞内的路面温度变化趋势一致，在距出口50 m时，隧道内路面温度开始急剧下降，在距出口10~20 m范围内温度降到最低点。降到最低点后，抢风岭隧道低温稳定路段长40 m，恒山隧道低温稳定路段长80 m；随后2座隧道的温度均呈急剧上升的变化趋势，抢风岭隧道升温路段长90 m，恒山隧道升温路段长60 m。隧道洞外路面温度的差异与太阳照射角度、隧道洞口朝向和风速存在很大的关系，因此，2座隧道出口外的温度差异较大。

3.4 摆值与隧道温度的影响关系分析

结合温度与摆值变化的对应关系可知，隧道进口温度场的主要变化范围为洞内70 m至洞外20 m，而摆值的变化范围为洞内50 m至洞外170 m。隧道进口温度场的降低导致路面呈现压实雪状态，而温度场影响范围外，路面为融化雪状态，说明隧道进口的压实雪路面主要是由于进口处温度降低引起的。

隧道出口温度场的主要变化范围为洞内50 m至洞外130 m，其中洞内50 m至洞内10 m为温度急剧下降的状态，直至洞外30 m，路面一直处于最低温状态。隧道出口至出口外25 m，路面摆值急剧下降，主要原因是路面表层覆盖物的变化，与路面温度的关系不明显。

4 结 语

(1)本文对积雪条件下隧道进出口的路面抗滑

性能进行研究,得到了松散雪、压实雪和融化雪路面摆值的差异。隧道进出口的路面摆值呈现波动的变化规律,进口的波动范围和程度均高于出口。隧道进出口的路面温度呈现剧烈震荡的变化规律,且进出口均呈现出温度盆的变化规律。隧道进出口的路面状态与温度场的对应关系表明,隧道进口的压实雪路面主要是由于进口处温度降低引起的,隧道出口摆值变化与路面温度关系不显著。

(2)路面状态的不连续是导致交通事故的主要原因。本文的研究明确了隧道进出口路面状态变化的范围和变化程度,因此,可以为降雪条件下隧道进出口的段事故预防、应急处置提供技术支持,有效预防降雪条件下隧道进出口的事故。

(3)隧道的地质、埋深、平纵横线形、进出口的风速风向、隧道前后的结构物、交通运行特征等因素也可能会影响隧道进出口的路面抗滑性能和温度变化

规律,后续研究可对上述影响因素进行进一步的研究。

参考文献:

[1] 彭翔,宋灿灿,王维利,等.高速公路交通事故数据分析方法研究[J].城市道桥与防洪,2020(5):64-67.

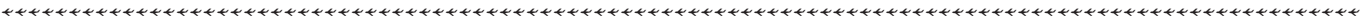
[2] DAN H C, HE L H, XU B. Experimental investigation on skid resistance of asphalt pavement under various slippery conditions [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 8(6): 485-499.

[3] TAN T, XING C, TAN Y, *et al.* Safety aspects on icy asphalt pavement in cold region through field investigations [J]. Cold regions science and technology, 2019, 161: 21-31.

[4] 杜雪松,解晓光,张小瑞,等.不同冰雪路面状态的抗滑特性研究[J].低温建筑技术,2012,34(10):1-3.

[5] SALIMI S, NASSIRI S, BAYAT A, *et al.* Lateral coefficient of friction for characterizing winter road conditions [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2016, 43(1): 73-83.

[6] 森永教夫.日本铺装技术答疑[M].北京:人民交通出版社,2006.



《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