

多车道高速公路路面水膜厚度动态演变特征

汪宏宇¹, 吴建², 何恩怀³, 何云勇³, 高建平¹

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400041; 2. 四川成芦荣高速公路有限责任公司, 四川 雅安 625008;

3. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 以西南地区某扩容双向八车道高速公路为依托, 基于主线设计、气候条件及交通运行状况等参数, 通过多元理论公式计算不同车道的水膜厚度, 分析了多车道高速公路在强降雨条件下的水膜厚度与滑水风险。研究结果表明: 外侧车道因排水路径长合成坡度小, 水膜厚度显著高于内侧车道; 降雨强度 178 mm/h 时, 最外侧车道水膜厚达 2.494 mm 约内侧 3 倍, 远超滑水临界值 1.2 mm。透水沥青路面在降雨 60 mm/h 时, 水膜厚度较普通路面降低 36%, 并抑制增幅 20%~30%。基于水膜厚度-滑水速度映射关系, 提出分车道限速策略: 降雨 60~150 mm/h 时, 外侧车道限速 60~80 km/h, 内侧车道限速 90~110 km/h; 极端降雨时全域限速降至 60~80 km/h。结合透水路面可进一步降低滑水风险, 为多车道高速排水优化、雨天交通管控及安全运营提供依据。

关键词: 道路工程; 多车道高速公路; 水膜厚度; 滑水速度; 分车道限速

中图分类号: U412.36⁺; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0007-05

Dynamic Evolution Characteristics of Water Film Thickness on Multi-lane Expressway Pavements

WANG Hongyu¹, WU Jian², HE Enhuai³, HE Yunyong³, GAO Jianping¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400041, China; 2. Sichuan Chengluying Expressway Co., Ltd., Yaan 625008, China; 3. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Relying on a certain expanded two-way eight-lane expressway in the southwest region, and based on the parameters such as the mainline design, climatic conditions and traffic operation status, the water film thickness of different lanes is calculated through multi-element theoretical formulas, and the water film thickness and aquaplaning risk of multi-lane expressways under heavy rainfall conditions are analyzed. The research results show that the water film thickness of the outer lanes is significantly higher than that of the inner lanes due to the longer drainage path and smaller synthetic slope. When the rainfall intensity is 178 mm/h, the water film thickness of the outermost lane reaches 2.494 mm about three times that of the inner lane, far exceeding the critical value of 1.2 mm for aquaplaning. When the rainfall intensity is 60 mm/h, the water film thickness of the permeable asphalt pavement is 36% lower than that of the ordinary pavement, and the increase is suppressed by 20%~30%. Based on the mapping relationship between water film thickness and aquaplaning speed, a lane-specific speed limit strategy is proposed, that is when the rainfall intensity is 60~150 mm/h, the speed limit for the outer lanes is 60~80 km/h, and for the inner lanes, it is 90~110 km/h, and in extreme rainfall conditions, the speed limit for the entire area is reduced to 60~80 km/h. Combined with permeable pavement, the risk of aquaplaning can be further reduced, providing a basis for drainage optimization, traffic control and safe operation of multi-lane expressways in rainy days.

Keywords: road engineering; multi-lane expressway; water film thickness; aquaplaning speed; lane-specific speed limits

0 引言

高速公路在极端天气条件下的行车安全是交通工程领域的研究重点。强降雨时, 传统沥青路面排水性能不足, 路面积水迅速增加, 尤其在多车道高速公路的外侧车道积水严重, 滑水风险增加。

国内外学者围绕水膜厚度与滑水速度开展了系列研究。黄兰可^[1]总结了临界滑水速度的理论与试

收稿日期: 2025-07-10

基金项目: 四川省交通运输科技项目(2025-A-08, 2025-A-09); 重庆市研究生联合培养基地建设项目(JDLHPYJD2018005)

作者简介: 汪宏宇(1999—), 男, 硕士, 从事道路交通安全研究工作。

通信作者: 吴建(1982—), 男, 本科, 高级工程师, 从事交通建设管理工作。电子信箱: 285991348@qq.com

验方法,指出水膜厚度是关键影响因素。季天剑^[2]等通过人工降雨试验建立水膜厚度预测模型,揭示了降雨强度、构造深度与坡度的定量关系。罗京^[3]等验证了水膜厚度回归模型的精度,并强调构造深度对摩阻系数的影响。汪敏^[4]等研究了多车道排水沥青路面的极限排水性能,为复杂工况下的路面设计提供了理论支撑。

在道路排水系统优化方面,陈岳峰^[5]等结合福建多雨气候,提出移动路脊法与透水层组合的排水方案,显著提升了排水效率。游金梅^[6]等通过数值模拟分析了不同排水基层对渗流场的影响,为平原微丘区排水设计提供了依据。胡玲玲^[7]等针对改扩建公路的排水系统衔接问题,提出了中分带与路肩排水的优化策略。

针对超高过渡段积水问题,贾兴利^[8]等研究发现几何线形参数对滑水速度影响显著,并给出了小型客车限速建议。赵建有^[9]等基于流体动力学模拟,揭示了降雨强度、合成坡度与积水深度的量化关系。张弛^[10]等通过构建积水分布模型,明确了横坡对径流的主导作用,为超高段坡度设计提供了优化方向。

在行车安全保障方面,罗京^[11]等通过实车试验证明薄水膜状态下轮胎-路面摩阻系数显著下降。祁颖智^[12]等提出了基于临界侧滑水深差的线形组合评价方法,为超宽道路设计提供了安全阈值。朝鹏学^[13]等分析了线形要素与积水深度的关系,揭示了道路几何设计对水膜形成的影响机制。

现有成果虽在水膜形成机理、排水技术及抗滑性能方面取得进展,但对多车道高速公路路面水膜厚度动态演变特征的限速安全管控策略研究尚显不足。本研究以双向八车道改扩建高速公路为依托,通过多元理论公式揭示车道数增加对水膜厚度分布的影响规律,并结合滑水速度与交通流特性,提出基于水膜厚度的动态限速策略,为高速公路排水设计优化与雨天动态交通管控提供理论支撑。

1 项目区域特点

1.1 主线设计

(1)公路等级与设计速度

本项目为扩容双向八车道高速公路,主线设计速度采用 100 km/h,路基宽度 41 m。

(2)纵坡分布与特性

经统计,主线路段内存在 40 处纵坡坡度小于

0.3% 的情况,且该类型路段长度较长。这种较小的纵坡条件显著阻碍了路面排水,雨水重力流速减缓,导致排水时间延长,极易引发路面积水。

(3)平纵组合及超高变化

主线线形总体较为平缓,仅包含 1 处小半径平曲线,最小曲线半径为 700 m。此外,超高过渡段存在 17 处合成坡度小于 0.5% 的路段,其较小横坡可能进一步加剧水膜的聚集。车辆行驶过程中,不同车道的水流速度和方向受到显著影响,进一步增加了排水的难度,对行车安全构成潜在威胁。合成坡度小于 0.5% 的部分路段特征见表 1。

表 1 合成坡度小于 0.5% 的路段特征

路段渐变长度/m	纵坡/%	超高渐变率
115	-0.15	1/182.54
180	-0.13	1/228.57
195	0.39	1/206.35
225	0.10	1/204.08
170	0.28	1/215.87
200	0.20	1/211.64
130	0.27	1/206.35
200	-0.37	1/253.97
290	-0.45	1/269.84

(4)路面结构

主线六车道扩宽八车道路段的面层为 4 cm 高粘改性沥青混凝土 PA-13,主线四车道扩宽八车道路段的面层为 4 cm 改性沥青玛蹄脂碎石 SMA-13,其构造深度要求均不小于 0.8 mm。较大的构造深度为雨水提供了更多的下渗和排放通道,使积水能够更快速地排离路面,降低水膜厚度以及减少水膜在路面上的形成时间。

1.2 不利气象条件

项目区域雨量充沛,属于亚热带湿润气候区,年平均降水量为 900 ~ 1 300 mm。道路改扩建后路面雨水面积增加,未设超高路段内侧车道积水流向路基边缘距离更大,外侧车道路面雨水流速更快,而全超高段和超高过渡段由于超高横坡度的连续变化及缓和段平面线形的不规则性,水膜行为也极为复杂。对降雨天气下的行车安全构成显著威胁,尤其需要关注超高过渡渐变段^[14]。

1.3 交通运行状况

根据运行速度预测结果,小型车速度分布在 100~120 km/h 范围,大型车速度相对较低且稳定分布在 70~85 km/h 范围。小型车比例较高且未来比重将逐步增长,其运行速度相对较高,与大型车车速差

异显著。这种速度差异导致车辆间相互干扰增加,在超车、变道等操作时易引发交通事故,同时也会影响路面水流的稳定性,间接对排水和行车安全产生影响。

2 水膜厚度与行车安全分析

2.1 水膜厚度与车道分布关系

在多车道高速公路的关键路段,尤其是超高过渡段或合成坡度较小的路段,超高横坡的变化和缓和段线形的不规则性,使降雨径流流向复杂,外侧车道因排水路径较长容易积水,而靠近中央分隔带车道水膜厚度较低。因此水膜分布特性主要受排水路径和超高设计影响。

为量化水膜厚度与车道分布之间的关系,采用 Gallaway^[15]等提出的多元理论公式来计算水膜厚度。水膜厚度(WFT)计算公式:

$$WFT = \left[\frac{nLi}{36.1s^{0.5}} \right]^{0.6} - MTD \quad (1)$$

式中: n 为曼宁系数; L 为排水路径长度; i 为降雨强度; S 为排水路径坡度; MTD 为平均构造深度。

单向四车道高速公路不同车道的水膜厚度存在显著差异,见图1,在降雨强度达178 mm/h时,外侧车道的水膜厚度高达2.494 mm,几乎是内侧车道0.912 mm的三倍。这一分布规律主要由排水路径长度决定,外侧车道排水路径最长,导致雨水累积更多,形成较厚的水膜层。

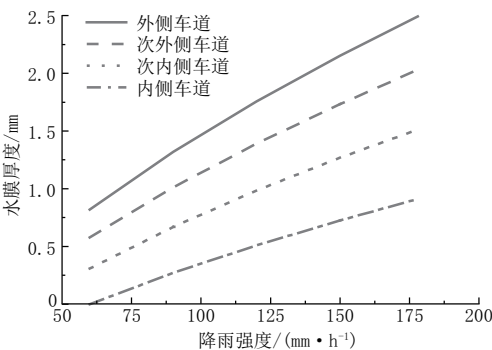


图1 不同车道下水膜厚度分布规律

此外,水膜厚度过大直接影响滑水风险,外侧车道因水膜厚度超过2.0 mm的滑水临界值,车辆在高速行驶时滑水风险显著增加;而内侧车道因水膜较薄小于1.0 mm,滑水风险相对较低,行车更为安全。同时,关键路段的超高过渡段及坡度较小区域排水能力较弱,加剧了外侧车道的积水问题。特别是超高横坡变化和缓和段线形不规则性,使雨水流动路径复杂化,进一步增加外侧车道的排水难度,影响行

车安全。

2.2 水膜厚度与滑水速度的关系

(1) 车辆运行速度分布规律

在多车道高速公路上,不同车道的运行速度分布呈现一定规律。通常,靠近中央分隔带的车道车辆行驶速度较高,而最外侧车道的车辆行驶速度相对较低。这一现象是多种因素共同作用的结果:

交通流特性:内侧车道受干扰较少,驾驶员倾向于保持较高的行驶速度,而大型货车等慢速车辆通常选择最外侧车道行驶,导致外侧车道平均车速较低。

动态速度变化:小型车为追求更高通行效率,主要选择内侧车道行驶,但在超车或避让情况下,会在不同车道间切换,形成动态变化的速度分布。

(2) 滑水速度与水膜厚度的关系

滑水速度与水膜厚度密切相关,其滑水速度(HPS)计算模型为:

当 $WFT \leq 2.4$ mm 时,

$$HPS = 41.9244 \left(\frac{WFT}{25.4} \right)^{-0.259} \quad (2)$$

式中:HPS为滑水速度;WFT为水膜厚度。

当 $WFT > 2.4$ mm 时,

$$HPS = 3.09A \quad (3)$$

$$A = \left[\frac{10.409}{WFT^{0.06}} + 3.507 \right] \quad (4)$$

$$A = \left[\frac{28.952}{WFT^{0.06}} - 7.817 \right] MTD^{0.14} \quad (5)$$

式中: A 为式(4)和式(5)中计算较大值。

单向四车道高速公路不同车道的滑水速度存在显著差异,见图2,在降雨强度为178 mm/h时,最外侧车道的水膜厚度为2.494 mm,对应滑水速度为76.48 km/h,而车辆运行速度在60~80 km/h。而在靠近中央分隔带的车道,水膜厚度显著减少至0.912 mm,滑水速度大幅提高至99.23 km/h,但车辆的运行速度在100~120 km/h,即便水膜较薄,高速行驶时,水膜效应仍可能显著影响附着力,导致制动效能下降并增加事故风险。

随着降雨强度的增加,各车道的滑水速度均呈下降趋势。外侧车道的滑水速度在低降雨强度下较高,随着降雨强度增加,滑水速度显著降低,最终趋于75 km/h以下。次外侧车道和内侧车道的滑水速度初始值高,但随着降雨强度增加也逐渐降低,在极高雨强下可降至90 km/h左右。总体来看,降雨强度对滑水速度的影响较大,尤其是在外侧车道,滑水风

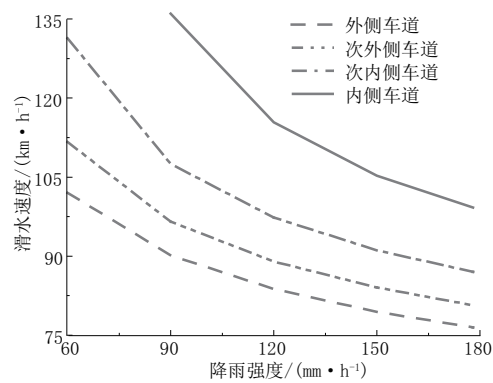


图2 不同车道下滑水速度分布规律

险随降雨强度的增加显著加大,需要特别关注外侧车道的运行速度控制。

2.3 水膜厚度与不同路面类型的关系

对于多车道高速公路合理选择排水路面对保障行车安全至关重要。特别是在超高过渡段、合成坡度较小的路段,选择透水路面比普通路面具有显著的优势。

在强降雨条件下,水膜厚度的快速增加对行车安全不利,特别是在排水不畅的路段,水膜积聚将加剧滑水风险。不同路面类型水膜厚度分布规律见图3。

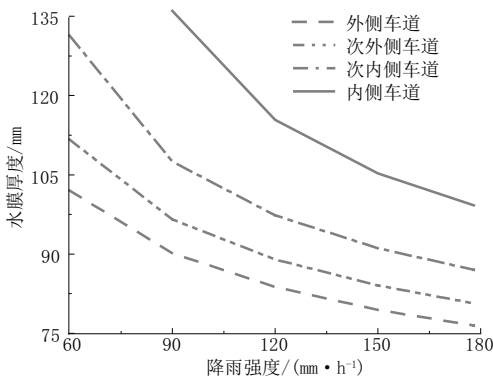


图3 不同路面类型水膜厚度分布规律

随着降雨强度增加,透水沥青路面与普通沥青路面的水膜厚度均呈上升趋势,但前者始终显著低于后者。

透水路面凭借其增大的构造深度与空隙率,有效促进了雨水下渗与横向径流,从而抑制了水膜积聚。在降雨强度为60 mm/h时,透水路面水膜厚度较普通路面降低约36%。更值得注意的是,随降雨强度增加,透水路面水膜厚度的增幅呈现减缓趋势,较普通路面增幅减缓约20%~30%。

在高降雨强度条件下,透水沥青路面的水膜厚度控制在2.5 mm以下,而普通沥青路面则超过2.5 mm,表明透水路面能够有效减缓水膜积聚,降低滑水风险,提高行车安全性。

3 强降雨条件下分车道限速策略

(1)多车道高速公路不同车道限速建议

在降雨下行驶时,水膜厚度会直接影响行车的安全性。因此,应根据不同车道的水膜厚度和降雨强度,制定动态限速策略。

最外侧车道:由于该车道积水较为严重,水膜厚度通常较大。在降雨强度为90 mm/h时,水膜厚度可能达到1.3 mm以上,这时小型车限速应控制在80~90 km/h之间。对于普通小型车的建议限速,四轮驱动车辆的限速可适当提高10~20 km/h。然而当水膜厚度超过2 mm时,即使是四驱车,也应将车速降至80 km/h以下,确保安全降至80 km/h以下。

次外侧车道:在降雨强度为90 mm/h且水膜厚度约为1.0 mm,小型车的限速可设置在90~100 km/h。随着车道位置逐渐靠近中央分隔带,水膜厚度逐步减小,限速值可适度提高。

靠近中央分隔带的车道:此类车道的水膜厚度通常较小,约0.8 mm以下。在降雨强度为60 mm/h时,小型车的限速可设置在90~110 km/h。然而,尽管水膜较薄,仍需密切监测降雨强度和水膜厚度的变化,动态调整分车道限速值。

通过合理制定限速策略,可以有效降低滑水事故发生风险,特别是在极端降雨条件下,需保障高速公路的安全运营。具体小型车分车道限速建议值见表2。

表2 分车道限速建议值		
车道位置	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	建议限速值/(km·h ⁻¹)
最外侧车道	60	70
次外侧车道	60	90
最内侧车道	60	110
最外侧车道	90	70
次外侧车道	90	80
最内侧车道	90	100
最外侧车道	120	60
次外侧车道	120	80
最内侧车道	120	90
最外侧车道	150	60
次外侧车道	150	80
最内侧车道	150	80

(2)加强交通信息的发布与引导

通过可变信息标志、交通广播等多种方式,及时向驾驶员发布路面积水状况、降雨强度以及限速值等信息,使驾驶员提前了解路面信息,做好相应的驾驶准备。

4 结 论

本研究针对多车道高速公路在强降雨条件下的排水问题,分析了水膜厚度随车道变化规律,主要结论如下:

(1)在多车道高速公路强降雨工况下,水膜厚度呈现显著的车道差异性。外侧车道因排水路径长及合成坡度小,水膜厚度可达内侧车道的 2.5~3 倍。

(2)透水路面凭借增大构造深度与空隙率,显著抑制水膜积聚。在降雨强度 60 mm/h 时,透水路面水膜厚度较普通路面降低 36%,且随降雨强度增加,透水路面水膜增幅减缓 20%~30%,凸显了其在高降雨强度下的排水优势。

(3)基于水膜厚度-滑水速度映射关系,提出基于水膜厚度车道分布差异的动态分级限速策略。在降雨强度 60~150 mm/h 范围内,外侧车道限速建议为 60~80 km/h,内侧车道限速建议为 90~110 km/h。极端降雨时,全域车道限速应统一降至 60~80 km/h,并利用可变信息标志实时发布预警,并结合透水路面可进一步降低滑水事故风险。研究结果为多车道高速公路排水设计优化、雨天动态交通管控及安全运营提供了理论依据与实践指导。

参考文献:

[1] 黄兰可. 沥青路面水膜效应及临界滑水速度研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 118-124.

[2] 季天剑,黄晓明,刘清泉,等. 沥青路面表面水膜厚度试验[J]. 公路交通科技, 2004(12): 14-17.

[3] 罗京,刘建蓓,王元庆. 路面水膜深度预测模型验证试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 57-63.

[4] 汪敏,何兆益,郝增恒,等. 极限降雨强度排水沥青路面水膜厚度预估模型[J]. 西南交通大学学报, 2023(2): 1-8.

[5] 陈岳峰,徐剑,陈礼彪,等. 福建高速公路沥青路面排水体系数值分析[J]. 公路交通科技, 2019, 36(10): 25-32.

[6] 游金梅,宋建国. 路面结构排水设计及排水数值模拟[J]. 公路工程, 2017, 42(4): 164-168.

[7] 胡玲玲,李生隆. 改扩建公路的路面排水设计研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013, 9(3): 38-40.

[8] 贾兴利,陈星澎,黄平明,等. 高速公路超高过渡段几何线形对小型客车滑水速度的影响[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(4): 140-147.

[9] 赵建有,郭万江,贾兴利,等. 多车道高速公路超高过渡段积水分布数值模拟与规律分析[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(2): 187-196.

[10] 张驰,向宇杰,林宣财,等. 考虑坡面排水的公路超高缓和段坡度组合设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(8): 2278-2286.

[11] 罗京,王元庆. 路面薄水膜状态对行车安全的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(5): 168-175.

[12] 祁颖智. 基于道路线形组合的路面径流行为研究[D]. 南京:东南大学, 2020/

[13] 管朝鹏/基于 DPM 及 EWF 模型的积水分布研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2016.

[14] 程正刚. 纵坡和超高渐变率对超高过渡段水膜影响分析[J]. 城市道桥与防洪, 2024(11): 87-90.

[15] Gallaway B M, Ivey D L, Hayes G, *et al.* Pavement and Geometric Design Criteria for Minimizing Hydroplaning[M]. FHWA-RD-79-31, FHWA, U.S.Department of Transportation, December 1979.