

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.11.020

# 纵坡和超高渐变率对超高过渡段水膜影响分析

程正刚

(广东省交通规划设计院集团股份有限公司, 广东 广州 510507)

**摘要:** 在降雨天气下,高速公路超高过渡段发生交通事故的概率明显高于其他路段,为了探究其原因并提出相应的对策措施,通过研究华南沿海多雨地区一条高速公路的交通事故资料,对事故发生时间、形态、空间分布等情况进行了整理分析,发现超高渐变段路面更易形成较厚水膜且分布复杂,因此路面抗滑能力降低引起车辆侧滑,是事故发生的重要原因之一。从纵坡和超高渐变率的因素,仿真分析水膜平面分布、水膜厚度分布特征,并提出改善措施,为提升雨天超高过渡段行车安全提供技术参考。

**关键词:** 雨天行车安全;高速公路;超高过渡段;水膜厚度;对策

**中图分类号:** U412

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2024)11-0087-04

## 0 引言

相关研究表明,雨天的交通事故发生率比晴天的交通事故发生率多 70%,且雨天的交通事故数量、事故受伤人数和死亡人数、事故所造成的经济损失等都明显高于其他恶劣天气<sup>[1]</sup>。同时,也发现交通事故率与降雨强度之间存在正相关关系,即交通事故发生概率随着降雨强度的增大而增加。

从宏观上来看:一方面,降雨时产生的水雾会影响能见度,也会对驾驶员的心理、生理产生不利影响,增大了行车风险;另一方面,降雨还会造成路表形成积水或滞水,减小车辆轮胎与地面之间的接触面积,路面抗滑能力降低,易产生滑水现象<sup>[2]</sup>。

## 1 雨天超高过渡段事故特征分析

通过对华南沿海多雨地区一条双向 8 车道高速公路近几年交通事故信息的统计,对事故发生时的天气、车道位置、类型、路段线形等情况进行分析,发现以下特征。

(1)雨天发生交通事故的概率为 48.28%,比晴天发生交通事故的概率高约 6.79%,如图 1 所示。

(2)雨天内侧两车道发生事故的概率为 60.54%,比其他车道发生事故的概率高约 21.08%,如图 2 所示。

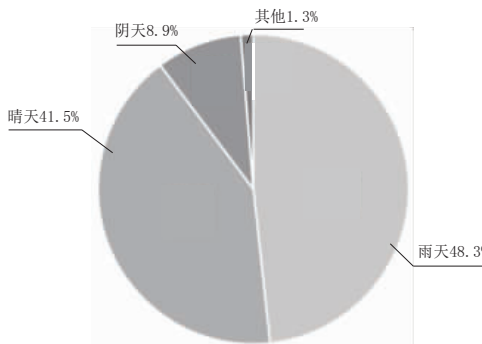


图 1 交通事故发生时天气分布

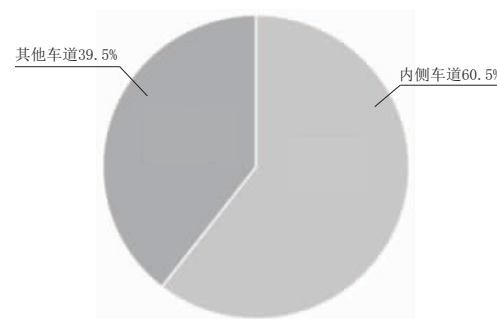


图 2 雨天交通事故车道分布

(3)雨天事故类型中:占比最大的为侧翻,约占雨天事故总数的 30.3%;其次为追尾,约占 27.1%;再次为撞护栏事故,约占 25.2%。其原因主要是车辆失控或急停,如图 3 所示。

(4)雨天事故路段中:约 51.50%的事故发生在超高过渡段,且主要是侧滑碰撞护栏或侧翻;直线段和圆曲线段的事故概率分别为 25.4%、23.1%,均远小于超高过渡段。图 4 为雨天交通事故路段分布。

收稿日期: 2023-10-09

作者简介:程正刚(1976—),男,本科,高级工程师,从事道路设计工作。

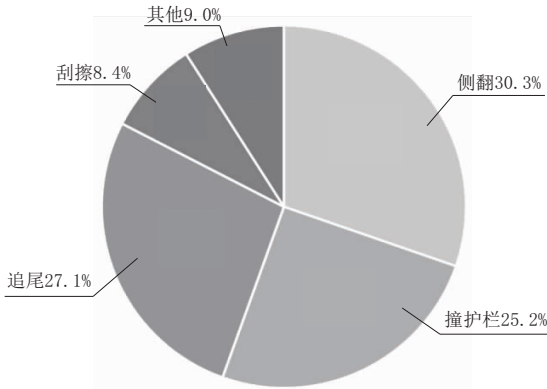


图3 雨天交通事故类型分布

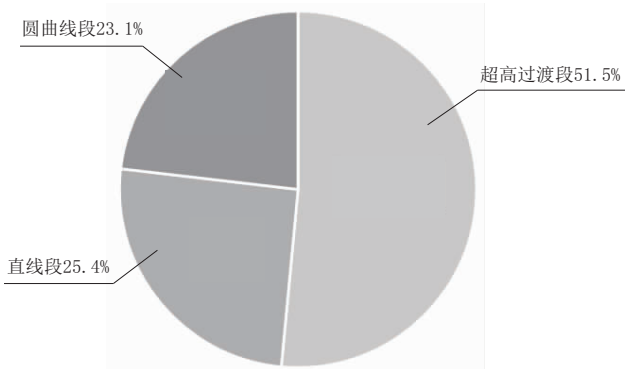


图4 雨天交通事故路段分布

(5)根据事故统计也发现,在雨天发生事故的车辆中,小客车占 87.08%,货车占 8.42%,其余车型占 4.5%。小客车发生事故的概率远大于其他车型。

综上,降雨是引发事故的重要原因。在降雨初期或临近结束降雨时,路表产生一定厚度的水膜甚至积水,进而显著降低车辆的操纵性,尤其在道路内侧更加严重,因而内侧两车道事故率远高于外侧车道。内侧车道主要行驶小客车,运行速度高,但其轮胎抗滑性能较大型车轮胎低,超高过渡段积水或水膜分布复杂,更容易发生侧翻、撞护栏等事故。因此,本研究以小客车行车安全为基础,从纵坡和超高渐变率的因素,对超高过渡段水膜厚度分布规律进行分析,提出加强行车安全的措施。

## 2 超高过渡段雨天事故成因分析

(1)路表摩擦系数降低、超速等不当行为引起。

相关研究表明:下雨初期以及小雨时路表摩擦系数变化较大,此时驾驶员往往会忽略降雨对行车安全的影响,继续高速行驶;在中雨、大雨天气,由于降雨量较大,对驾驶员视线的干扰也较小雨天气更大,驾驶员会更加注意控制车速,保障行车安全<sup>[3-4]</sup>。

(2)车辆轮胎磨损、制动不良引起。

雨天道路湿滑,引起路表摩擦系数降低,同时车辆与路面的附着系数也会降低,机动车制动距离公

式为<sup>[5]</sup>:

$$S_{\text{制动}} = \frac{V^2}{254 \times (\varphi + i)} \quad (1)$$

式中: $S_{\text{制动}}$ 为机动车制动距离,m; $V$ 为速度,km/h; $\varphi$ 为附着系数; $i$ 为道路纵坡,%(上坡为正,下坡为负)。

由式(1)可以看出,随着附着系数的降低,相同道路纵坡、车速情况下,车辆制动距离增大。

(3)路面不平整,致局部积水。

高速公路运营多年后,受施工、养护加铺、路基沉降等因素的影响,部分路段会出现横坡变缓或局部凹陷情况,造成路面排水缓慢或局部积水现象。

(4)水膜厚度随排水路径长度加大,且分布不均匀,发生侧滑。

超高过渡段因断面横坡存在由负到正再由正到负的不断变化,合成坡的大小和方向也不断变化,排水路径也较常规路段长,水流在排水路径方向上逐渐积累,水膜厚度达到较大值,抗滑能力急剧下降,从而影响行车安全。

由于水膜形成较为复杂,影响因素也较多,且实验方法不同产生的结果也不同。经过对国内外已有的典型路面水膜厚度计算模型<sup>[6-8]</sup>的对比,并通过室内外模拟降雨试验校验,本文的水膜厚度计算公式如下:

$$d = 0.39 \times I^{0.515} \times L^{0.36} \times S^{-0.276} \times T^{0.445} + r \quad (2)$$

式中: $d$ 为水膜厚度,mm; $L$ 为排水长度,m; $S$ 为路面坡度,%; $I$ 为降雨强度,mm/min; $T$ 为构造深度,mm; $r$ 为车辙深度,mm。

## 3 超高过渡段水膜厚度分布特征

超高过渡段范围横坡不断变化,在横坡正负变化范围,特别是0%横坡附近,路表水流流速变缓,容易形成积水。本次以Fluent软件进行仿真,分析纵坡和超高渐变率对超高过渡段水膜分布规律的影响。

### 3.1 Fluent软件仿真机理与条件设置

降雨后道路表面形成径流是一个复杂的两相交过程,可以分解为雨滴形成并下落、与道路表面接触后形成径流两个过程。通过ANSYS Fluent 2022中的流体模块可进行雨天宽幅道路路表径流及水膜厚度的模拟计算<sup>[9-10]</sup>。

(1)仿真模型的构建

本研究建立的道路三角网格曲面模型与降雨区域模型由若干个1m边长的三角网格平面构成。路表模型采用分散式排水,即不考虑排水设施对路表

水排出的影响,不考虑交通标志、标线影响。

降雨区域采用长方体的方式构建,长方体的顶面定义为降雨射入平面(速度入口),其余面定义为水流出出口(压力出口),如图5所示。道路模型位于降雨区域中,通过共享拓补与长方体形成整体,雨滴颗粒从模型顶面射入,落在道路曲面上形成水膜,水膜在重力、表面张力作用下流动,从压力出口排除。

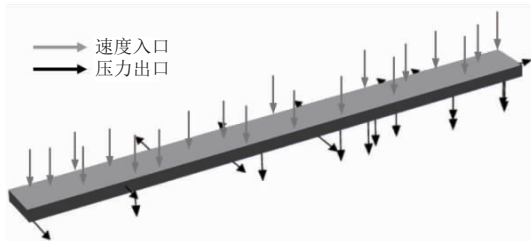


图5 降雨区域模型

(2)降雨条件模拟

模拟边界条件根据《公路排水设计规范》(JTGD 33—2012)和项目所在区降雨资料设定。按5 a一遇60 min降雨历时降雨强度为87 mm/h,换算每秒降雨强度为0.024 2 mm/s,插值法取得雨滴平均直径为2.86 mm,降雨时段取开始后的120 s,即开始时间为0 s,停止时间为120 s。这是基于降雨初期水膜厚度在短时间内超过安全阈值,然而未引起驾驶员足够重视,未采取减速、变道措施,仍保持高速行驶状态,从而引发交通事故的调研情况确定的。

3.2 水膜厚度仿真模拟

由公式(2)可以看出,排水长度主要受合成坡度影响,而超高过渡段合成坡度主要的影响因素为超高渐变率、纵坡坡度及道路宽度。在Fluent软件中输入超高过渡段三维模型,并输入上述条件参数,得到水膜厚度分布图(见图6)。

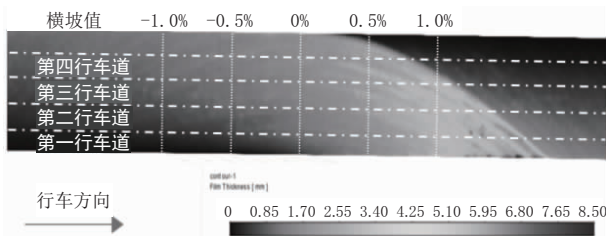


图6 超高过渡段水膜厚度分布图

可以看出,超高过渡段在0%横坡断面附近出现长度较大的弧形排水路径,水膜厚度沿着排水路径流动方向逐渐增加。为了探究影响超高过渡段水膜厚度分布的关键指标,选取第一行车道中线作为特征点,对不同路幅宽度、超高渐变率、纵坡条件下超高过渡段的水膜厚度进行分析。

水膜厚度与纵坡坡度、超高渐变率的影响关系

见图7、图8。

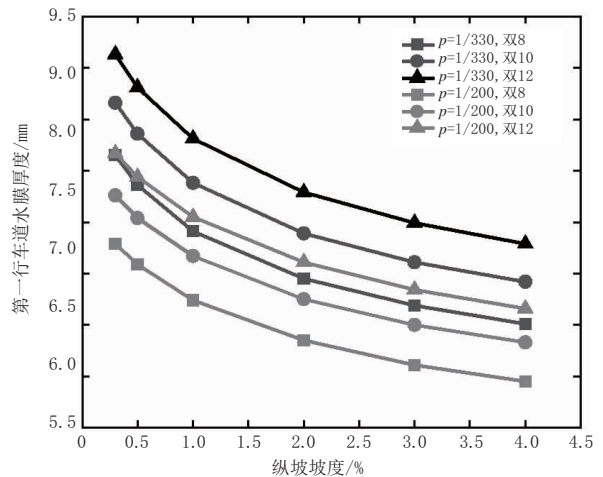


图7 水膜厚度与纵坡坡度关系图

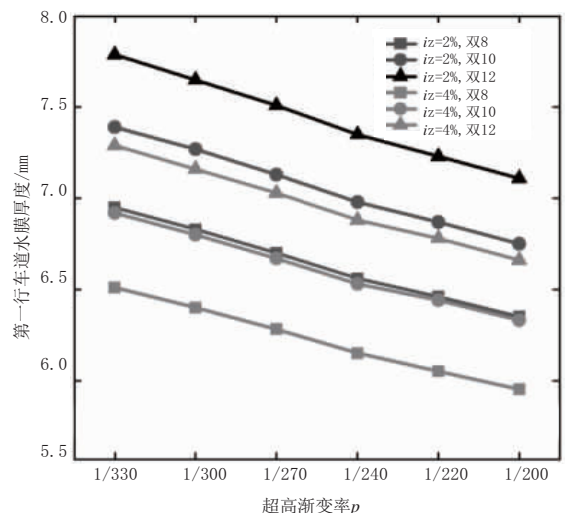


图8 水膜厚度与超高渐变率关系图

从图7、图8可以看出:

(1)在路幅宽度、超高渐变率一定时,第一行车道中线水膜厚度值随着纵坡坡度增大而减小,即纵坡的提高可以有效降低内侧行车道水膜厚度,其中纵坡在0.3%~1%范围对水膜影响效果最明显,可减少水膜厚度约0.5 mm。

(2)在路幅宽度、纵坡坡度一定时,第一行车道中线水膜厚度值随着超高渐变率增加而减小,即增大超高渐变率,可以有效减小内侧行车道范围内水膜厚度值,超高渐变率从1/270到1/200,可减少水膜厚度约0.4mm。

3.3 其他影响因素

通过水膜厚度计算公式(2)可知,水膜厚度与降雨强度、路面构造深度等有关。除此之外,相关研究表明,水膜厚度还与轮胎胎压、行驶速度有一定关联。本次研究仅在道路线形基础上分析超高过渡段排水路径线及水膜厚度分布特征,未考虑各类排水设施排水能力对路表水排出的影响,但在调研过程



中也发现排水系统不足造成水膜超标的情况,应引起重视。

#### 4 雨天高速公路超高过渡段行车安全措施

降雨天气下高速公路路面产生较厚水膜,易造成车辆侧滑、尾随相撞等交通事故。通过调研多条运营中的4~8车道高速公路,均发现超高过渡段较其他路段事故率更高,且主要集中在0%横坡前后100 m范围,并且事故率随着车道序数的增加而增加。一般情况下,运营中的高速公路很难对其平面进行调整,因此可通过优化超高过渡段纵断面、超高渐变率,并结合速度控制、排水设施设计等综合措施,有效提高超高过渡段的交通安全性。

##### (1) 优化线形设计

本文通过对不同路幅宽度、超高渐变率、纵坡组合情况下的水膜厚度进行计算,发现合理增大纵坡、超高渐变率均能在一定程度上降低第一行车道中线处水膜厚度值。建议尽量避免超高过渡段与小于0.5%的纵坡组合,在超高 $\pm 0.7\%$ 之间渐变时,尽量采用大渐变率。

##### (2) 加铺排水沥青路面

排水沥青路面空隙率在18%以上,排水能力强,能够加快雨天路表排水效率,可有效减少水漂现象。本次研究的高速公路在部分超高过渡段加铺排水沥青路面后,雨天总事故率较改造前同期下降了23.68%,个别路段结合微调超高渐变率等综合措施,事故率下降了82.42%,基本消除了降雨对行车安全的影响。

##### (3) 加强排水系统设计

加强排水系统设计可避免排水不畅造成的路表面积水,也可提高路表排水速率、减小排水路径长度及水膜厚度。一般是在超高段内侧,沿中央分隔带路缘带边缘设置纵向集水沟,间隔一定距离设置集水井,结合路面下设置的横向管,将超高段内侧路面水排出到路外。多个项目调研发现,沿中央分隔带边缘纵向集水沟设置的起点或终点一般设置在超高过渡段结束的位置(如HZ、ZH点,横坡为0点),未考虑排水路径的影响,在末端存在积水情况。本次研究发现排水路径会沿路表继续向外延伸10~20 m。考虑到

超高段排水较为复杂,特别是在部分超宽路段,建议通过路表排水专项分析,针对性地设置排水设施。

##### (4) 加强雨天车辆运行管控

通过分析发现,线形指标不变条件下,随着运行速度的增加,水膜厚度安全阈值减小。建议降雨频繁的地区,根据降雨强度制定对应的限速方案,并通过可变信息板及时发布等方式进行速度管控。同时,还应加强雨天路面巡查,及时制止超速、线形指标较低路段变道超车等行为,减少事故隐患。

## 5 结论

本研究收集华南沿海多雨地区一条高速公路的交通事故数据,分析了雨天超高过渡段的事故特征和成因,并利用Fluent仿真模拟软件进一步分析了超高过渡段的水膜厚度分布情况,发现合理增大超高渐变率和纵坡坡度可以在一定程度上降低第一行车道中线处的水膜厚度值。通过加强线形设计、加铺排水沥青路面、加强排水系统设计、加强雨天车辆运行管控等措施,可有效提高雨天高速公路超高过渡段的行车安全。

##### 参考文献:

- [1] 张燕飞. 降雨条件下多车道高速公路超高过渡段交通安全保障技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [2] 孙悦. 海绵型道路关键几何设计参数优化及雨天行车安全研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [3] 崔国峰. 路面状况与行车安全分析[J]. 公路与汽运, 2009(1): 67-69.
- [4] 何树林. 雨天对高速公路交通安全的影响及对策[J]. 内蒙古公路与运输, 2010(2): 51-53.
- [5] 盛旭高. 强风雨环境公路车辆制动安全性及行驶稳定性研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2022.
- [6] 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(12): 57-63.
- [7] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉, 等. 道路表面水膜厚度预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 1-3.
- [8] 季天剑, 安景峰, 何申明, 等. 基于人工神经网络的道路表面降雨水深预测[J]. 南京航空航天大学学报(英文版), 2006, 23(2): 115-119.
- [9] 铁卫伟, 袁雪峰, 付其然, 等. 基于ANSYS有限元数值模拟的高速公路路基变形因素分析[J]. 建筑技术开发, 2023, 50(1): 114-117.
- [10] 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.