

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.03.016

沥青路面水膜效应及临界滑水速度研究综述

黄兰可

(苏交科集团股份有限公司,江苏 南京 210019)

摘要:回顾了沥青路面水膜研究的历程,分析了国内外水膜厚度计算成果,对滑水类型和判定标准进行了总结,并基于试验、力学模型建立的方程以及数值模拟和仿真等方面的相关成果对临界滑水速度进行归纳总结并对比分析。

关键词:沥青路面;水膜厚度;完全滑水;滑水判定标准;临界滑水速度

中图分类号:U412

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2022)03-0118-07

Research review on water film effect and critical hydroplaning velocity of asphalt pavement surface

HUANG Lanke

(JSTI Group, Jiangsu, Nanjing 210019, China)

Abstract: In order to reduce the traffic accidents that occur in rainy days due to the water film effect, this paper reviewed the research progress of water film on asphalt pavement, analyzed the calculation results of water film thickness at home and abroad, and summarized the types and decision criteria of hydroplaning. Meanwhile, the critical hydroplaning velocity was described in detail from the aspects of experiment, formula or equation established by the mechanical model, numerical modeling and simulation. Finally, the summary and comparative analysis were conducted.

Key words: asphalt pavement surface; water film thickness; completely hydroplaning; hydroplaning criterion; critical hydroplaning velocity

水膜是雨天在沥青路面表面形成的一定厚度的径流。汽车在有水膜覆盖的路面上行驶,某些时候轮胎不能与路面接触而产生摩擦,造成汽车无法获得足够的附着力,使汽车失去控制,发生侧滑或侧翻等。一般情况下,水膜效应是从汽车的前轮开始的。与大客车和货车相比,由于楔状水膜的作用,小客车特别是采用前驱的小客车在完全滑水时会快速向某一方转向,若驾驶员紧急制动,汽车将向相反方向跑偏,极易造成严重的交通事故。目前,公路行业相关规范对路面排水有一些规定,但并没有专门针对降雨条件下水膜的指标要求以及基于水膜厚度计算的临界滑水速度的规定。在我国降水量较大的地区,如长江三角洲、珠江三角洲等公路项目中,虽然相关设计、施工能够满足现行规范的要求,但某些项目仍会出现路面积水的现象,在短时强降雨时尤为明显,给安全行车带来隐患。因此,根据降雨强度计算不同道路特征变量下的水膜厚度、确定滑水的判定标准和临界滑水速度非常重要。

1 水膜厚度计算

1.1 国内外研究进展

降雨天气汽车在行驶时轮胎与沥青路面间的水膜厚度与降雨强度直接相关。自 20 世纪 60 年代开始,国外很多学者对沥青路面水膜效应进行了研究。1968—1995 年, Ross 等^[1-4]基于室内试验或现场试验成果建立模型,计算得到水膜厚度计算的公式。Anderson^[4]与 Ross 等^[1]公式相比,参数基本相同,只是系数和指数有所差别。路面水膜厚度为路表水膜厚度与路表构造深度之和(图 1),但两个公式均未考虑路表构

作者简介:黄兰可(1977—),女,高级工程师,主要从事道路工程勘察设计、咨询研究。E-mail:hlk@jsti.com

引用本文: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.

HUANG Lanke. Research review on water film effect and critical hydroplaning velocity of asphalt pavement surface[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(3): 118-124.

造深度的影响。虽然 Gallaway 等^[2]和 Wambold 等^[3]经验公式考虑了路表构造深度,但由于试验观测条件、排水长度选取等方面的局限性,应用受到一定的限制。

我国对水膜的研究起步较晚,自 1997 年 8 月 JTJ 018—97《公路排水设计规范》发布后,对公路排水设计才有了系统的认识。21 世纪以来,国内学者越来越重视水膜对行车的影响,基于国内道路情况开展了大量的研究。2004 年,季天剑等^[5]通过人工降雨试验实测了水膜厚度,回归了相关计算公式并与 Anderson^[4]公式进行了对比。周琼^[6]在路表径流理论的基础上建立模型,得到水膜厚度计算的微分方程,并利用 MATLAB 求解方程式。罗京等^[7]在模拟降雨大厅(分别采用 4 套独立下喷式、2 套独立侧喷式自动测控降雨系统,水膜厚度采用双平行探针式测试仪测量)中对不同降雨强度和坡度下的水膜厚度进行了测量,通过回归得到了水膜厚度的计算公式,并与典型回归模型进行了对比分析。乔建刚等^[8]基于内外侧不同车辆行驶时相互影响而产生的“移动水坝”现象,考虑外侧车辆对内侧车辆径流的阻碍造成水膜厚度成倍增加以及降雨增长量等因素,得到了“移动水坝”存在时的水膜厚度计算公式。

除上述回归公式外,国外一些学者基于曼宁系数的数学物理模型得到了水膜厚度的计算公式^[9]。但根据季天剑等^[10]的研究,由于曼宁公式中未考虑水滴拍打路面后的紊流状态以及流水的阻力,因此不宜采用。

典型水膜厚度的计算公式见表 1。

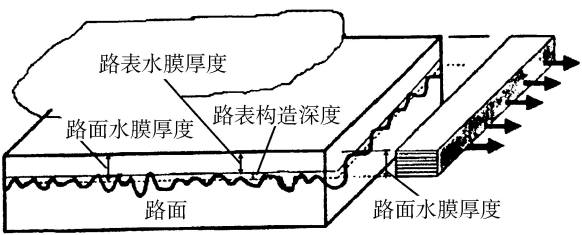


图 1 水膜厚度示意

Fig. 1 Schematic map of water film thickness

表 1 典型水膜厚度计算公式

Table 1 Typical calculating formulas of water film thickness

年份	作者	计算公式	参数含义	说明
1968	Ross 等 ^[1]	$d=0.017(LI)^{0.47}i^{-0.2}$	d 为水膜厚度; L 为排水长度; I 为降雨强度; i 为坡度	未考虑路表构造深度
1971	Gallaway 等 ^[2]	$d=3.38\times10^{-3}[(1/T)^{-0.11}L^{0.43}I^{0.59}(1/i)^{0.42}]-T$	T 为路表构造深度	无风条件下进行的试验观测
1983	Wambold 等 ^[3]	$d=j_1T^{j_2}I^{j_3}i^{j_4}-T$	$j_1j_2j_3j_4$ 为经验系数	仅对排水长度为 11 m 时有效
1995	Anderson ^[4]	$d=0.15(LI)^{1/2}i^{(-1/2)}$		未考虑路表构造深度
2004	季天剑等 ^[5]	$d=0.1258I^{0.6715}i^{-0.3147}I^{0.7786}I^{0.7261}$	l 为坡面长度	奠定国内水膜厚度研究的基础
2013	周琼 ^[6]	$d\propto L^{1.655}i^{-1.6009}I^{5.6278}$		为近似公式,由基本微分方程推导而来,误差较大
2015	罗京等 ^[7]	$d=0.068\frac{L^{0.32}I^{0.41}T^{1.17}}{i^{0.31}}$		精度较高,可应用到已知道路平纵线形和路表构造特征的路段
2018	乔建刚等 ^[8]	$d=2h_0+It_2/60$ 其中 $h_0=1.3589\left[\frac{qbnl}{6(i_x^2+i_y^2)^{1/4}}\right]^{3/5}$	h_0 为正常排水条件下的水膜厚度; t_2 为车辆行驶整个车长用时; b 为与道路分水岭的距离; n 为粗糙系数; i_x 为横坡坡度; i_y 为纵坡坡度	考虑内外侧不同车辆行驶时产生的“移动水坝”现象

1.2 主要计算公式对比分析

根据表 1 列出的典型水膜厚度计算公式,剔除部分局限性大或应用较少的公式,对 Ross 等^[1]、Gallaway 等^[2]、Anderson^[4]、季天剑等^[5]、罗京等^[7]5 种水膜厚度计算公式进行对比分析。

根据中国气象局降水等级划分标准^[11]:凡 24 h 内降水量超过 50 mm 的降雨过程统称为暴雨,降水量大于或等于 200 mm 为特大暴雨,该标准是一个平均值的概念。真正威胁行车安全的强降雨过程历时较短,因而采用短时强降雨强度更能反映暴雨的影响。根据吴建军等^[12]的研究,当 1 min 降雨强度达到 0.7~1.0 mm(即 42~60 mm/h)时,短时强降雨将具有一定的危害;当 1 min 降雨强度达到 2 mm(即 120 mm/h)时,短时强降雨将具有明显的危害。此外,吴建军等^[12]采用的降雨强度与 JTG/TD 33—2012《公路排水设计规范》中缺乏自记雨量计资料时经验公式的计算结果相差不大,因此本文的降雨强度综合吴建军等的研究成果和规范公式确定。

计算时取排水长度为 20 m,降雨强度分别为 42 mm/h、60 mm/h、120 mm/h,路面坡度为 2%,路表构造深度为 0.7 mm。根据 5 种典型水膜厚度计算公式得到的计算结果见表 2。从表 2 可以看出,Ross 等^[1]和 Anderson^[4]公式由于未考虑路表构造深度,计算结果相差较大。Gallaway 等^[2]、季天剑等^[5]、罗京等^[7]公式

计算结果较为接近,其中 Galloway 等^[2]公式计算结果基本介于罗京等^[7]和季天剑等^[5]公式之间。

图 2(a) 为水膜厚度与排水长度(道路特征变量)关系曲线,计算时取降雨强度为 60 mm/h,路面坡度为 2%,路表构造深度为 0.7 mm。从图 2 可以看出,5 种计算公式得到的曲线总体趋势一致,水膜厚度随着排水长度的增加而增大。Ross 等^[1]公式计算结果最小,Anderson^[4]公式计算结果最大,两公式计算结果与 Galloway 等^[2]、季天剑等^[5]、罗京等^[7]公式相比相差很大,而后两者为基于我国道路状况实测后回归得到的。从图 2 可以看出,由于季天剑等^[5]公式与 Galloway 等^[2]公式类似,计算结果较为接近。罗京等^[7]公式有所不同,当排水长度小于 13 m 时,计算得到的水膜厚度大于 Galloway 等^[2]、季天剑等^[5]公式;当排水长度逐渐增大到超过 13 m 时,Galloway 等^[2]、季天剑等^[5]公式计算得到的水膜厚度大于罗京等^[7]公式,但总体来看基于 3 种公式计算得到的水膜厚度差异较小。

表 2 5 种典型水膜厚度计算公式计算结果对比

Table 2 Comparison of calculated results with five typical formulas of water film thickness

公式	d/mm		
	I=42 mm/h	I=60 mm/h	I=120 mm/h
Ross 等 ^[1]	0.30	0.35	0.49
Galloway 等 ^[2]	1.73	2.30	3.82
Anderson ^[4]	9.72	11.62	16.63
季天剑等 ^[5]	1.88	2.49	4.26
罗京等 ^[7]	1.82	2.11	2.80

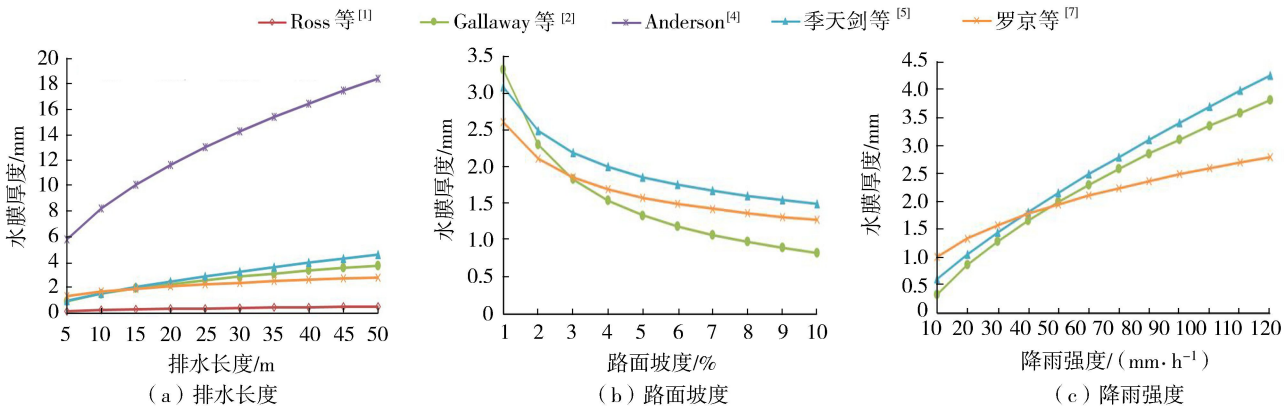


图 2 水膜厚度与排水长度、路面坡度及降雨强度关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between water film thickness and parameters including the drain length, road slope value and rainfall intensity

图 2(b) 为水膜厚度与路面坡度(道路特征变量)关系曲线,计算时取降雨强度为 60 mm/h,排水长度为 20 m,路表构造深度为 0.7 mm。从图 2(b)可以看出,水膜厚度随着路面坡度的增加而减小,当路面坡度小于 5% 时,减小趋势较为明显,其中基于 Galloway 等^[2]公式计算得到的曲线减小趋势尤为明显;当路面坡度大于 5% 时,曲线逐步趋于收敛,其中 Galloway 等^[2]公式计算曲线收敛较慢。

图 2(c) 为水膜厚度与降雨强度(环境变量)关系曲线,计算时取排水长度为 20 m,路面坡度为 2%,路表构造深度为 0.7 mm。从图 2(c)可以看出,水膜厚度随着降雨强度的增加而增大,与图 2(a)关系曲线类似,Galloway 等^[2]和季天剑等^[5]公式计算结果非常接近。罗京等^[7]公式有所不同,当降雨强度小于 50 mm/h 时,罗京等^[7]公式计算得到的水膜厚度大于 Galloway 等^[2]、季天剑等^[5]公式,当降雨强度大于 50 mm/h 时,Galloway 等^[2]、季天剑等^[5]公式计算得到的水膜厚度大于罗京等^[7]公式。

综上,从 5 种典型水膜厚度计算关系曲线来看,虽然 Galloway 等^[2]、季天剑等^[5]、罗京等^[7]公式计算结果较为接近,但由于试验条件、回归计算模型等的不同,计算结果存在一定的差异。Galloway 等^[2]、季天剑等^[5]的研究开展较早,试验手段相对简单。如季天剑等^[5]采用高压清洗机模拟降雨,由于试验条件有限,降雨强度较小时测得的水膜厚度或者较小或者无法测量,且采用三角尺或 U 形管测量水膜厚度只能精确到 0.5 mm;而罗京等^[7]公式采用长安大学降雨大厅内的自动测控降雨系统,并采用分辨率为 0.01 mm 的水膜厚度测试仪,通过多个测点观测结果的回归,得到的计算公式更加准确。

2 滑水类型和判定标准

对水膜厚度进行计算后,需分析和评价其对行车安全的影响。当水膜厚度增大到一定数值后,会发生轮

胎滑水现象。轮胎滑水主要有 3 种类型^[10]:动力滑水、黏滞滑水、轮胎胎面橡胶返原性滑水,其中动力滑水为最常见类型,是轮胎产生滑水的主要原因,又可分为局部滑水和完全滑水^[13]。

汽车在降雨天气行驶时轮胎与沥青路面存在 3 种接触状态,见图 3。其中,水膜区为悬浮区,即轮胎与沥青路面完全不接触,这种情况下轮胎不产生任何驱动力或制动力,随着轮胎的前进,轮胎下水膜被向两侧推挤,水膜厚度逐渐变薄;过渡区为不完全接触区,即同时存在水膜被完全推挤而形成的干燥区和由于路面表面构造凹陷而形成的积水区;接触区为完全接触区,即水膜基本被完全推挤,接近干燥状态,这种情况下轮胎产生有效的驱动力。

汽车在降雨天气行驶时 3 种接触状态均存在,轮胎与沥青路面的附着力主要由接触区和过渡区提供。由于水膜会对水膜区产生反作用力,水平方向分力成为轮胎行进的阻力,垂直方向分力对轮胎产生托举力,这时轮胎产生局部滑水现象;随着汽车行驶速度的增大,当达到某一临界速度时接触区完全消失,这时轮胎产生完全滑水现象。对于局部滑水,在规范中已充分考虑,因此应重点考虑完全滑水情况^[14]。

评价滑水风险主要是确定水膜厚度是否超过安全容许值^[15]。对于水膜厚度判定标准,国内很多学者开展了大量的研究^[15-19],但总体来看,目前广泛应用的判定标准主要基于海南省相关标准,以水膜厚度 2.5 mm 和 4.0 mm 作为是否部分滑水和完全滑水的标准(表 3),当水膜厚度大于 4.0 mm 时需改善设计如平、纵等以减少水膜厚度,降低车辆失控的风险。此外,有些学者还根据道路的几何线形、互通立交等大型工点等情况,调整了完全滑水时的判定标准,如一般路段水膜厚度按不大于 5 mm 控制^[15,20]。

3 临界滑水速度

当轮胎产生完全滑水时将与路面脱离,此时轮胎速度达到的某一临界值称为临界滑水速度。目前,国内外学者对临界滑水速度进行了大量研究,得到了车速与滑水速度之间的关系成果。

3.1 基于试验建立经验公式

1962 年,Horne 等^[21]通过试验得到了影响深远的 NASA 滑水公式:

$$v = 6.36\sqrt{p}$$
 (1)

式中: v 为临界滑水速度; p 为轮胎压力。

Pelloli^[22]研究认为,临界滑水速度与水膜厚度、轮胎花纹等因素有关。Gallaway 等^[23]通过 1 300 多次试验成果回归得到临界滑水速度经验公式:

$$v = S_D^{0.04} p^{0.3} (T_D + 1)^{0.06} A$$
 (2)

式中: A 取 $\left[\frac{10.409}{d^{0.06}} + 3.507\right]$ 、 $\left[\frac{28.952}{d^{0.06}} - 7.817\right]T^{0.14}$ 两者的大值; S_D 为速度下降的百分比(根据车辆分别在湿滑和干燥路面上的转速计算); p 取 165 kPa; T_D 为轮胎花纹深度。

1985 年,Horne 等^[24]考虑轮胎的宽高比,对 NASA 滑水公式进行了修正。Ivey 等^[25]根据试验成果建立了卡车临界滑水速度公式。江守一郎^[26]通过试验得到影响水膜厚度的因素和临界滑水速度公式:

$$v = 159.08\sqrt{Q/(BdC_H)}$$
 (3)

式中: Q 为轮胎荷载; B 为轮胎最大接地长度; C_H 为升力系数。

Anderson^[27]基于滑水速度模型得到水膜厚度小于 2.4 mm 时的临界滑水速度公式:

$$v = 96.84 d^{-0.259}$$
 (4)

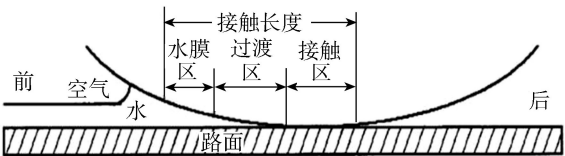


图 3 轮胎的接触状态
Fig. 3 Contact state of wheel-rail

表 3 海南省滑水判定标准
Table 3 Hydroplaning criterion in Hainan Province

水膜厚度范围/mm	判定标准	对应措施
<2.5	一般值	可接受
2.5 ~ 3.2	对四车道及以下高速公路 采用 2.5 mm 作为一般值	需考虑水膜影响
3.2 ~ 4.0	对四车道以上高速公路 采用 3.2 mm 作为一般值	需考虑水膜影响
>4.0	极限值	需改善设计

对于水膜厚度判定标准,国内很多学者开展了大量的研究^[15-19],但总体来看,目前广泛应用的判定标准主要基于海南省相关标准,以水膜厚度 2.5 mm 和 4.0 mm 作为是否部分滑水和完全滑水的标准(表 3),当水膜厚度大于 4.0 mm 时需改善设计如平、纵等以减少水膜厚度,降低车辆失控的风险。此外,有些学者还根据道路的几何线形、互通立交等大型工点等情况,调整了完全滑水时的判定标准,如一般路段水膜厚度按不大于 5 mm 控制^[15,20]。

由于采用的是第一手数据,基于试验建立经验公式或方程可靠性较高,特别是 Gallaway 等^[23]为美国交通部门建立的公式,历经上千次试验,目前应用较多;NASA 滑水公式由于建立较早且仅考虑水膜厚度的影响,虽然进行了一定的修正,但是仍然不够全面。江守一郎^[26]、Anderson^[27]公式由于公式简单,也有较多应用,其中水膜厚度较小时可采用 Anderson^[27]公式,我国学者较多采用江守一郎^[26]公式进行计算。

3.2 基于力学模型建立公式

2004 年,季天剑^[10]采用弹性流体动力润滑理论,根据表面粗糙状态下的滑水数据,回归出临界滑水速度方程:

$$d = 0.001 v^2 - 0.2798 v + 21.499 \quad (R^2 = 0.96)$$

余治国等^[28]采用动量定理得到水膜较薄和较厚两种情况下的临界滑水速度公式:

$$v = \sqrt{p/\rho} \quad (d \leq 3 \text{ mm})$$

$$v = G/\rho W \sqrt{2Rd - d^2} \quad (d > 3 \text{ mm})$$

式中: ρ 为水的密度; G 为轮胎负载; W 为胎面宽度; R 为轮胎半径。

南佛罗里达大学根据相关研究成果建立力学模型^[29],得到如下计算公式:

$$v = W_L^{0.2} d^{0.5} \left(\frac{0.82}{t^{0.06}} + 0.49 \right)$$

式中: W_L 为模型计算宽度; t 为参数。

张璠等^[30]采用动量定理得到车辆重力等于向上反力时的临界滑水速度公式:

$$\rho W v^2 \sqrt{2Rd - d^2} = G$$

李强^[31]采用动量定理计算得到临界滑水速度:

$$v = 0.8 \sqrt{\frac{3p_{\max}}{2Rd - d^2}}$$

式中 $p_{\max}$ 为轮胎接地中心处胎压。

此外,同济大学李少波等^[32]通过伯努利定理得到了理想状态下的临界滑水速度公式。

由于缺乏试验验证,且采用的力学模型主要针对轮胎胎面单元进行分析,根据相关研究,基于力学模型建立的公式或方程与基于试验得到的结果相差较大,并不能反映实际的滑水状态^[33]。

3.3 数值模拟和仿真

2001 年,Koishi 等^[34]采用 MSC. Dytran 有限元软件模拟水膜现象,得到了不同轮胎花纹条件下的临界滑水速度。Fwa 等^[35]采用 Fluent 软件进行滑水分析,得到临界滑水速度与水膜密度、轮胎花纹深度的关系公式。董斌等^[36-37]采用 Fluent 软件建立三维轮胎模型,考虑动水压力作用,计算得到不同条件下的临界滑水速度。

轮胎作为一种复合材料,具有高度的非压缩性、非线性、各向异性,且水膜与轮胎单元的耦合较为复杂,使得数值模拟和仿真研究进展缓慢,且不同学者得到的研究成果差异很大。

为进一步研究临界滑水速度与水膜厚度的关系,采用江守一郎^[26]公式进行计算,得到某采用子午线轮胎的小客车临界滑水速度与水膜厚度关系曲线,见图 4。随着水膜厚度的逐渐增大,临界滑水速度逐渐减小;曲线斜率在初始阶段最大,随后逐渐减小。水膜厚度为 4 mm 时对应的临界滑水速度为 80 km/h 左右,这也是我国大多数排水完善的高速公路在雨天经常采用的限速值。采用其他如 Anderson^[27]公式进行计算,得到的关系曲线趋势与按江守一郎^[26]公式计算得到的曲线基本一致,临界滑水速度略小于按江守一郎^[26]公式计算得到的结果。

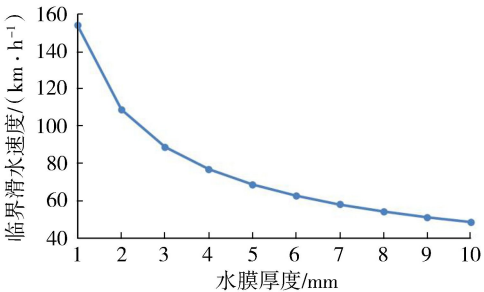


图 4 临界滑水速度与水膜厚度关系曲线
Fig.4 Relationship curve of critical hydroplaning velocity and water film thickness

4 结 语

- a. 随着国民经济的发展,多车道高速公路特别是八车道及以上高速公路陆续出现,宽幅路面排水问题尤为突出。受人工模拟降雨大厅场地的限制,现有水膜厚度观测试验路面宽度一般较小,基于试验得到的成果与多车道高速公路实际情况有所不同。
- b. 受水流回流的影响,超高渐变段零坡附近水膜厚度将大幅增加,加大了行车的安全隐患,但这方面内容鲜有学者研究。
- c. 临界滑水速度目前多采用国外学者基于试验建立的经验公式或方程,同时综合道路几何条件、视距、能见度等确定限制速度,相关研究还需进一步结合我国道路实际进行完善。

参考文献:

[1] ROSS N F, RUSSAM K. The depth of rain water on road surface [R]. Crowthorne: Road Research Laboratory, Ministry of Transport, 1968.

[2] GALLAWAY B M, ROSE J G. The effect of rainfall intensity, pavement cross slope, surface texture, and drainage length on pavement water depths [R]. College Station: Texas Transportation Institute, 1971.

[3] WAMBOLD J C, HENRY J J, HEGMON R R. Evaluation of pavement surface texture significance and measure techniques [J]. Wear, 1983, 83 (2) : 351-368.

[4] ANDERSON J A. Depth of rain water on road surface [J]. Highways and Transportation, 1995, 42 (5) : 45-49.

[5] 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. (JI Tianjian, HUANG Xiaoming, LIU Qingquan, et al. Test depth of water film on asphalt pavement surface [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004 (12) : 14-17. (in Chinese))

[6] 周琼. 路表水膜厚度计算及其对路面抗滑性能影响研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2013.

[7] 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. (LUO Jing, LIU Jianbei, WANG Yuanqing. Validation test on pavement water film depth prediction model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28 (12) : 57-63. (in Chinese))

[8] 乔建刚, 吴艳霞, 张雪洁. 基于“移动水坝”的高速公路雨天行车安全性研究 [J]. 中国公路学报, 2018, 31 (4) : 304-311. (QIAO Jiangang, WU Yanxia, ZHANG Xuejie. Traffic safety of rainy day expressway with “moving dam” [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31 (4) : 304-311. (in Chinese))

[9] ANDERSON D A, HUEBNER R S, REED J R, et al. Improved surface drainage of pavements [R]. Washington D. C. : Transportation Research Board, 1998.

[10] 季天剑. 降雨对轮胎与路面附着系数的影响 [D]. 南京: 东南大学, 2004.

[11] 中国气象局. 降水的等级划分 [EB/OL]. [2021-09-10]. http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2012zhuant/20120928_1_1_1_1/2010052703/201212/t20121212_195616.htm.

[12] 吴建军, 袁成松, 周曾奎, 等. 短时强降雨对能见度的影响 [J]. 气象科学, 2010, 30 (2) : 274-278. (WU Jianjun, YUAN Chengsong, ZHOU Zengkui, et al. Impact of short term heavy rainfall on the monitoring and forecast of sudden visibility descent [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, 30 (2) : 274-278. (in Chinese))

[13] 周昂. 雨天行车轮胎打滑机理及行车安全研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.

[14] 杨洋. 高速公路改扩建的几何设计与路面排水 [J]. 公路与汽运, 2019 (4) : 90-93. (YANG Yang. Geometric design and pavement drainage of highway reconstruction and extension [J]. Highways and Automotive Applications, 2019 (4) : 90-93. (in Chinese))

[15] 罗京, 刘建蓓, GUPTA P K, 等. 路面水膜厚度检验评价方法 [J]. 交通信息与安全, 2016, 34 (6) : 54-59. (LUO Jing, LIU Jianbei, GUPTA P K. An inspection and evaluation method of thickness of water film on road surface [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2016, 34 (6) : 54-59. (in Chinese))

[16] 陶鹏飞, 金盛, 王殿海. 基于人工势能场的跟驰模型 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2011, 41 (4) : 854-858. (TAO Pengfei, JIN Sheng, WANG Dianhai. Car-following model based on artificial potential field [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41 (4) : 854-858. (in Chinese))

[17] 孙朋, 成卫, 席建锋, 等. 雨天高速公路安全车速及关闭标准研究 [J]. 道路交通与安全, 2014 (1) : 8-12. (SUN Peng, CHENG Wei, XI Jianfeng, et al. Research on expressway safe speed and closure standard in rainy day [J]. Journal of

Transportation Engineering,2014(1):8-12. (in Chinese))

- [18] 王保成. 降雨对高速公路行车安全的影响[J]. 中国水运,2015(7):229-230. (WANG Baocheng. Influence of rainfall on expressway driving safety[J]. China Water Transport,2015(7):229-230. (in Chinese))
- [19] 张驰,王博,贺九平,等. 基于行车动力学的高速公路积水路段行车风险分析[J]. 交通信息与安全,2019(5):9-17. (ZHANG Chi,WANG Bo,HE Jiuping,et al. Traffic risk analysis of ponding sections on freeways based on driving dynamics[J]. Journal of Transport Information and Safety,2019(5):9-17. (in Chinese))
- [20] 乔贵. 基于路面水膜厚度对行车安全影响的道路设计研究[J]. 四川水泥,2019(4):113-167. (QIAO Gui. Road design based on the influence of pavement water film thickness on driving safety[J]. Sichuan Cement,2019(4):113-167. (in Chinese))
- [21] HORNE W B,LELAND T J W. Influence of tire tread pattern and runway surface condition on braking friction and rolling resistance of a modern aircraft tire[R]. Washington D. C. :NASA,1962.
- [22] PELLOLI R. Road surface characteristics and hydroplaning[C]//Second International Skid Prevention Conference. Washington D. C. :Transportation Research Record,1972:27-32.
- [23] GALLAWAY B M,IVEY D L,HAYES G,et al. Pavement and geometric design criteria for minimizing hydroplaning[C]//FHWA-RD-79-31,FHWA. Washington D. C. :Federal Highway Administration,1979.
- [24] HORNE W B,YAGER T J,IVEY D L. Recent studies to investigate of tire footprint aspectratio on dynamic hydroplating speed [C]//The Tire Pavement Interface. Pennsylvania:ASTM Special Technical Publication,1986:26-46.
- [25] IVEY D L,HORNE W B,TONDA R D. Strategies for reducing truck accidents on wetpavements[R]. Washington D. C. :Transportation Research Record,1986:1-8.
- [26] 江守一郎(日). 汽车事故工程[M]. 刘希柏,译. 北京:人民交通出版社,1987.
- [27] ANDERSON J A. Depth of rain water on road surface[J]. Highways and Transportation,1995,42(5):45-49.
- [28] 余治国,李曙林,朱青云. 机轮动力滑水机理分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2004(5):9-11. (YU Zhiguo,LI Shulin,ZHU Qingyun. Mechanism analysis of wheel power water skiing[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition),2004(5):9-11. (in Chinese))
- [29] 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,2015.
- [30] 张璠,程迎迎. 沥青路面的雨天行车安全性分析[J]. 南通航运职业技术学院学报,2009,8(1):80-83. (ZHANG Pan,CHENG Yingying. Driving safety analysis of asphalt pavement in rainy days[J]. Journal of Nantong Vocational and Technical Shipping College,2009,8(1):80-83. (in Chinese))
- [31] 李强. 临界滑水速度的计算研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2011(5):989-993. (LI Qiang. Calculation and research of hydroplaning critical velocity[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science),2011(5):989-993. (in Chinese))
- [32] 李少波,张宏超,孙立军. 动水压力的形成与模拟测量[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007(7):915-918. (LI Shaobo,ZHANG Hongchao,SUN Lijun. Development and simulation measurement of dynamic hydraulic pressure[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2007(7):915-918. (in Chinese))
- [33] SMITH B L,BYRNE K G,COPPERMAN R B,et al. An investigation into the impact of rainfall on freeway traffic flow[C]//Proceedings of the 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board. WashingtonD. C. :Transportation Research Board,2004.
- [34] KOISHI M,OKANO T,OLOVSSON L,et al. Hydroplaning simulation using fluid-structure interaction in LS-DYAN[C]//The 3rd European LS-DYAN Users Conference. Kanagawa :Fujitsu,2001.
- [35] FWA T F,SANTOSH S K,ONG G P,et al. Study of effect of tire on hydroplaning by analytical modeling[C]//TRB 2008 Annual Meeting. Washington D. C. :The National Academies of Sciences,Engineering,and Medicine,2008:109-118.
- [36] 董斌. 部分滑水条件下高速公路车辆行驶安全性研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2011.
- [37] 董斌,唐伯明,刘唐志. 基于 Fluent 软件的雨天潮湿路面滑水现象研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2011,35(4):700-713. (DONG Bin,TANG Boming,LIU Tangzhi. Hydroplaning research of wet highway pavement based on Fluent[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering),2011,35(4):700-713. (in Chinese))