

# 高速公路改扩建的几何设计与路面排水

杨洋

(山东省交通规划设计院, 山东 济南 250031)

**摘要:** 通过分析粘滞滑水与动水压强滑水的作用机理及影响因素,明确合理的几何设计可改善路面排水性能,避免车辆行驶产生滑水情况;在既有研究成果的基础上,确定动水压强计算方法及参数取值、水膜厚度和径流长度计算方法,建立高速公路完全滑水条件检验模型;以该模型为基础,对高速公路改扩建工程的常见工况进行完全滑水分析。结果表明,一般路段发生完全滑水的可能性小,超高过渡段为最不利工况;加大纵坡对改善超高过渡段的排水条件有限,增设路拱线是改善改扩建工程路面排水条件的有效方法。

**关键词:** 公路;动水压强滑水;路面排水;几何设计;改扩建;超高渐变段;路拱线

中图分类号:U418.8

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)04-0090-04

车辆在高速公路上行驶时发生的轮胎滑水现象根据其发生机理主要分为粘滞滑水、动水压强滑水。粘滞滑水产生的直接原因是轮胎不能将路面与轮胎间的水膜穿透,影响轮胎与路面间摩擦阻力的发挥,在水膜较厚淹没道面微观凸起或水膜被油分、灰尘、油脂或橡胶所污染导致水膜粘度变大的情况下均可能发生。JTJ 073.2-2001《公路沥青路面养护技术规范》以横向力系数  $SFC$  及摆式仪的摆值  $BPN$  为评价指标对路面抗滑性能作了规定。根据周琼、赵鸿铎等对潮湿状态下路面摩擦系数的测量结果,水膜厚度为  $0\sim 1\text{ mm}$  时路面摩擦系数急剧下降,水膜厚度大于  $1\text{ mm}$  时趋于平稳,说明粘滞滑水现象可在极薄的水膜及较低的行车速度下发生。动水压强滑水由汽车高速行驶导致积水产生流体动力效应所引起。当轮胎在有薄层表面径流的路面上转动时,水被轮胎花纹和道路路面的不平整所渠化,当路表径流量超过轮胎花纹和路面表面的排水能力时,轮胎前开始出现雍水,并在轮胎与路面间形成楔形体,随着楔形体产生的动水压强逐渐增大,轮胎与路面的接触部分逐渐减少直至完全抬离,出现完全滑水现象,引起车辆失稳、失控。综上,粘滞滑水的形成与路面几何设计关系不大,其主要与路面构造深度等相关;当车辆的运行状态一定时,动水压强滑水的形成完全取决于水膜厚度,而水膜厚度与路面的几何条件密切相关。因此,在不考虑施工误差的情况下,改善路面几何设计的主要目的是减少水膜厚度,从而避免完全滑水现象的发生。随着高速公路改扩建,早期的双向四车道高速公路逐步改为双向

八车道,路面宽度增加使路面径流长度增加,从而引起水膜厚度加大,车辆完全滑水的可能性提高。特别是对于平原区高速公路,既有道路纵坡平缓,在改扩建中如何改善其路面排水条件有待进一步研究。

## 1 完全滑水状态下的水膜厚度临界值

### 1.1 动水压强计算公式

已有研究表明,轮胎与路面间楔形体的动水压强接近或大于轮胎压强时即可能产生完全滑水现象。李志勇等利用 fluent 仿真软件建立接近实际的有纵横向沟槽的三维轮胎模型,以水膜厚度、轮胎花纹及行车速度为主要影响因素进行计算,得出了以下动水压强多元模型:

$$P = -84.686 + 2.26v + 9.437h_{\text{水}} - 0.9996h_{\text{胎}} \quad (1)$$

式中: $P$  为动水压强(kPa); $v$  为行车速度(km/h); $h_{\text{水}}$  为道路表面径流水膜厚度(mm); $h_{\text{胎}}$  为轮胎花纹深度(mm)。

### 1.2 计算参数确定

(1) 轮胎压强。根据完全滑水的产生条件,首先需确定汽车的轮胎压强。根据式(1),动水压强与行车速度成正比,与轮胎花纹深度成反比,同时轮胎标准压强越大越不易产生完全滑水现象。以小汽车为研究车型,根据 GB/T 2978-2008《轿车轮胎规格、尺寸、气压与负荷》的规定,目前通用的轿车轮胎的最小标准胎压为  $170\text{ kPa}$ 。

(2) 轮胎花纹深度。根据 GB 7258-2017《机动车运行安全技术条件》,轿车轮胎胎冠上花纹深度

在磨损后应不小于 1.6 mm,其他车辆轮胎胎冠上花纹深度不小于 3.2 mm,确定花纹深度为 1.6 mm。

(3) 行车速度。雨天行车速度采用 JTG D20—2017《公路路线设计规范》中计算停车视距时所采用的速度。

### 1.3 临界值计算

根据选定的计算参数,完全滑水对应的水膜厚度见表 1。

表 1 不同设计速度下的临界水膜厚度

设计 速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	行车 速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	临界水 膜厚度/ mm	设计 速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	行车 速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	临界水 膜厚度/ mm
120	102	2.7	40	36	18.5
100	85	6.8	30	30	20.0
80	68	10.9	20	20	22.4
60	54	14.2			

陈胜营等认为导致飘滑现象的临界水流深度为 4 mm 或以上,部分飘滑在 2.5 mm 时就可发生;《海南省暴雨气象条件下公路交通安全防治技术研究》项目的研究成果表明,当水膜厚度大于 4 mm 时,易发生完全滑水。表 1 中完全滑水厚度临界值与这些研究成果基本一致。

## 2 水膜厚度计算

多位学者通过理论推导或实验回归的方式得出了水膜厚度计算公式。该文采用季天剑等提出的实验回归模型进行水膜厚度计算,公式如下:

$$h = 0.125 \ 8l^{0.671 \ 5} i^{-0.314 \ 7} r^{0.778 \ 6} TD^{0.726 \ 1} \quad (2)$$

式中: $l$  为径流长度(m<sup>3</sup>/s); $i$  为径流坡度; $r$  为降雨强度(mm/min); $TD$  为路面纹理深度(0.1 mm)。

该模型的计算结果与李志勇等推导出的理论模型计算结果差异较小,与罗京等的实验结果也基本一致。同时山东省高速公路路面层多采用 SMA-13 沥青混合料,这也是季天剑等的实验路面类型之一。因此,从准确性及适用性方面选取该模型计算水膜厚度均适合。

## 3 径流长度及坡度计算

水流在由道路横坡及道路纵坡构成的三维平面上运动,因其只受重力作用,水流方向即为合成坡度方向。将路面径流起点至路面径流终点的路段内沿

道路前进方向分成  $m$  个单元,单元沿道路前进方向的长度为  $e$ ,其中  $n$  为任一单元,因  $n$  较小,单位长度  $n$  内的横坡及纵坡均可视为常量(见图 1)。任一单位长度内的径流长度为:

$$\begin{aligned} l_{yn} &= e \\ l_{xn} &= \frac{i_x^n}{i_y^n} e \\ l_n &= \sqrt{l_{xn}^2 + l_{yn}^2} \\ i_{\text{合}n} &= \sqrt{(i_x^{n-1})^2 + (i_y^{n-1})^2} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $i_y$  为纵坡度,上坡为+,下坡为-; $R$  为竖曲线半径,凸形为-,凹形为+; $i_x$  为横坡度,外倾为+,内倾为一。

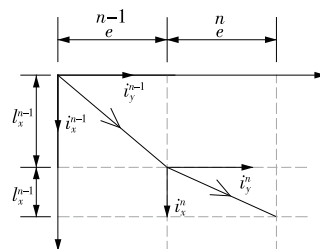


图 1 水流路径长度计算示意图

其中横坡的变化主要由超高渐变引起,计算公式如下:

$$i_x^n = i_x^{n-1} + \frac{i_y^{n-1} P}{i_x^{n-1} W} e \quad (4)$$

式中: $W$  为半幅路面宽度(m); $P$  为超高渐变率,顺时针旋转为+,逆时针旋转为一。

纵坡的变化主要受两方面的影响:1) 设计线处的纵坡变化主要受竖曲线的影响[见式(5)];2) 平行于设计线的其他路面位置的纵坡同时受超高渐变的影响,可将超高渐变视作纵向的附加坡度进行纵断面修正[见式(6)]。

$$i_y^n = i_y^{n-1} + \frac{e}{R} \quad (5)$$

$$i_y^{n'} = i_y^n + \frac{\sum_{j=1}^{n-1} (i_y^j / i_x^j e)}{W} P \quad (6)$$

$$L_x = \sum_{n=1}^m l_{xn} \leq W \text{ 时, 总径流长度为:}$$

$$L = \sum_{n=1}^m l_n \quad (7)$$

## 4 基于水膜厚度的几何设计检验

### 4.1 一般路段

一般路段是指路面宽度及合成坡度均不发生变

化的路段,在几何线形上表现为不设超高或全超高的直坡路段,即  $i_x^n = i_x^{n-1}$ ,  $i_y^n = i_y^{n-1}$ 。此时式(3)可简化为:

$$L = \sqrt{\left(\frac{i_y}{i_x}\right)^2 + 1} L_x, i_{\text{合}} = \sqrt{i_x^2 + i_y^2} \quad (8)$$

JTG D20—2017《公路路线设计规范》对公路最小纵坡的规定为不宜小于 0.3%,对合成坡度的规定为应保证路面有 0.3%~0.5%的合成坡度。根据式(2)及式(8)对常见纵坡度范围内不同工况所对应的不同路面宽度条件下的水膜厚度进行计算,结果见图 2。

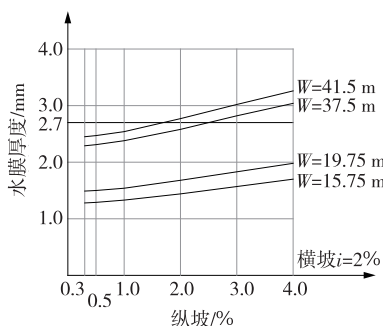


图2 水膜厚度与纵坡及横坡的关系

由图2可知:当横坡度一定时,水膜厚度随道路纵坡和路面宽度的增大而增大。因此,设计中应尽量避免使用较大的纵坡度,且在不考虑施工误差的条件下不能盲目地通过增加纵坡度以达到改善路面排水的效果。因为加大纵坡虽然增加了路面径流坡度,但会使径流长度增加,根据其贡献率的不同表现为水膜厚度增加。同时尽量减小单坡面的路幅宽度,特别是在横坡度较小的路段。如中分带开口应尽量避免设置在纵坡较大的路段、全超高路段及超高渐变段路段;辅助车道应尽量避免设置在超高渐变段路段。

#### 4.2 超高渐变段

图3为由正常路拱向全超高过渡的渐变路段。超高渐变段处的水流状况可概括为:1)路面外倾,路面水自路面内侧流至路面外边缘排出;2)路面外倾,水流自路面内边缘向外边缘流动,至外边缘处恰好横坡为零,水流继续向前沿内倾路面重新流回路面内边缘;3)路面外倾,水流自路面内边缘向外边缘方向流动,流至横坡零点处远未至外边缘,重新回流至路面内边缘,水流路径末端的水膜厚度接近临界水膜厚度;4)路面内倾,水流自路面外边缘流动至路面内边缘排至中分带。

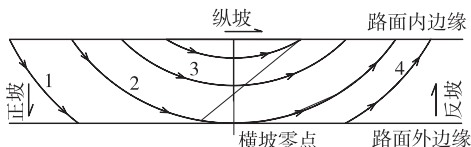


图3 超高渐变段水流路径示意图

以上4种情况中,最不利情形为水流路径2,水流路径3虽然合成坡度更缓,但路径长度短,对水膜厚度的影响较小,其原理同上节。因此,水膜厚度较大区域分布在由横坡零点附近及以后和与水流路径2、3围成的平面区域(图3中阴影部分),水膜厚度自左下向右上逐渐变厚,且内侧车道为超车道,小型车多,车速偏高,为最不利工况。

#### 4.3 超高渐变段路面排水改善措施

根据式(2),几何设计中减少水膜厚度的主要措施为增大合成坡度及缩短径流长度,其中增大合成坡度的措施包括增大纵坡及超高渐变率。对于高速公路改扩建项目,一般路段的纵断面拟合应遵循“宁填勿挖”的旧路改造原则,以最大程度实现对既有路面结构的利用。因此,在增大路线纵坡时需根据抬高的高度确定基层或面层的加铺,从而产生部分工程量。根据图2,增大纵坡对水膜厚度的改善效果十分有限,特别是对于旧路改造项目,一旦调整路面纵坡,会对路面结构层造成浪费,不推荐采用。目前普遍采用的缩短回流路径的措施为增设路拱线。设置1条路拱线对径流长度的影响机理见图4。

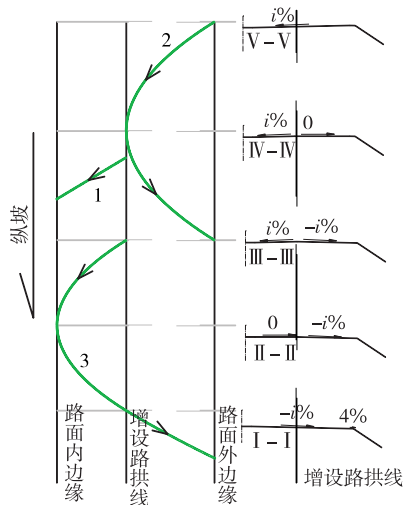


图4 设置路拱线路段路面径流路线示意图

如图4所示,图3的回流路径因路拱线的增设被拆分为3种回流路径:先旋转的半幅路面形成回流路径2;暂不旋转的半幅无回流路径,径流路径为1;后旋转的半幅形成回流路径3。同理,设置2条

路拱线时的回流路径 2、3 的表示形式见图 5,设置的路拱线越多,回流路径越短。

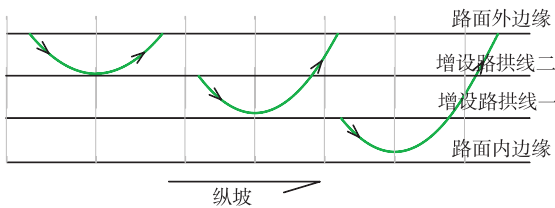


图 5 设置多条路拱线路段路面径流路线示意图

4.4 设计实例

某平原区高速公路改扩建工程由原双向四车道扩建为双向八车道。在 K281+700—K282+400 路段,既有道路以 0.3% 的单坡段与超高渐变段重合设置。扩建为双向八车道后,路面宽度大幅增加,其最不利回流路径所形成的水膜厚度见表 2。同时该路段的合成坡度小于 0.5%,超高渐变段附近的排水条件需进一步改善。若通过增加道路纵坡的方法改善排水条件,一方面会造成工程量极大浪费,需增加纵坡路段的坡长为 581 m,纵坡度增加 0.2%,则在“宁填勿挖”的原则下其抬高一侧需加铺近 1 m;另一方面,通过增大纵坡度来改善排水的效果十分有限。

表 2 八车道公路超高渐变段回流路径水膜厚度

超高渐变率	纵坡/%	路径长度/m	合成坡度/%	水膜厚度/mm
1/250	0.003	74.00	0.007	5.014
1/250	0.005	82.80	0.009	4.996
1/250	0.010	101.73	0.014	4.996
1/250	0.020	131.78	0.024	5.013
1/250	0.030	156.16	0.034	5.035

改扩建设计中,结合新旧路面的拼接位置设置路拱线,并根据原超高渐变段与扩建后超高渐变段的旋转角速度调整超高渐变率,计算得到的水膜厚度见表 3。对比表 2,水膜厚度改善明显。

表 3 设置路拱线后回流路径水膜厚度

超高渐变率	纵坡/%	路径长度/m	合成坡度/%	水膜厚度/mm
1/200	0.003	42.66	0.008	3.320
1/200	0.005	47.96	0.010	3.349
1/200	0.010	55.80	0.015	3.264
1/200	0.020	70.68	0.025	3.257
1/200	0.030	83.01	0.035	3.264

5 结论

(1) 路面滑水根据机理不同分为粘滞滑水、部分滑水和完全滑水,其中粘滞滑水和部分滑水在规范中均已考虑,八车道高速公路的路面宽度增加,对完全滑水情况应予以考虑。

(2) 一般路段发生完全滑水的可能性较小,而在超高渐变段的零坡点附近由于回流路径的存在水膜厚度大幅增加,特别对于逆时针旋转路段,水膜厚度较大范围位于超车道附近,为最不利工况。

(3) 对于改扩建项目的超高渐变段路段,增加纵坡度对水膜厚度几乎无影响,且造成工程量浪费,宜通过设置路拱线及加大超高渐变率的方式优化既有道路路面的排水条件。

参考文献:

[1] 庄继德.汽车轮胎学[M].北京:北京理工大学出版社,1999.

[2] 赵鸿铎,伍梦竹,吴世涛.沥青道面摩擦系数随水膜厚度的变化规律[J].中国民航大学学报,2015,33(2).

[3] 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.

[4] 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.

[5] 李志勇,王江帅,李彦伟,等.道路防排水技术[M].北京:人民交通出版社,2011.

[6] GB/T 2978—2008,轿车轮胎规格、尺寸、气压与负荷[S].

[7] GB 7258—2017,机动车运行安全技术条件[S].

[8] JTG D20—2017,公路路线设计规范[S].

[9] 陈胜营,汪亚干,张剑飞.公路设计指南[M].北京:人民交通出版社,2000.

[10] 罗京,刘建蓓,戈普塔,等.路面水膜厚度检验评价方法[J].交通信息与安全,2016,34(6).

[11] 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,2004,21(12).

[12] 林绍芝.高速公路扩建工程沥青路面防排水设施设计[J].公路与汽运,2015(3).

[13] 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(3).

[14] 周智涛,章琼.从公路几何设计的角度改善路面排水[J].交通科技,2007(1).

[15] 韩文涛.单侧加宽改扩建方式下的路基路面排水设计[J].公路交通科技:应用技术版,2012(4).