

文章编号:1671-8879(2016)03-0013-06

# 降雨量对排水沥青路面交通安全的影响

魏莘欣,陈华鑫,夏慧芸

(长安大学 材料学院,陕西 西安 710061)

**摘要:**为验证排水沥青路面(OGFC)的雨天交通安全性能,以 OGFC 路段上的交通事故为研究对象,结合当地的气象资料,对比相邻 1 段普通沥青混合料路段上的交通事故,分析了在不同降雨量下路面材料对道路交通安全的影响,并通过曲线回归得出研究路段上普通沥青路面和 OGFC 路面在不同降雨量下的亿车公里事故率预测模型。研究表明:对于研究路段而言,当降雨量为 10 mm 以下时,OGFC 路面的事故率比普通沥青路面低 74%,当降雨量为 10.0~24.9 mm 时,OGFC 路面的事故率比普通沥青路面低 50% 以上,当降雨量大于 50 mm 时,OGFC 路面的事故率比普通沥青路面低 85% 以上。此外,对于不同事故类型,在 OGFC 路段上发生的雨天追尾事故数比普通路段低 33% 以上;在 OGFC 路段上发生的雨天侧面刮碰事故数比普通路段低 40% 以上;在 OGFC 路段上发生的雨天撞固定物事故数比普通沥青路段低 50% 以上。

**关键词:**道路工程;山区高速公路;事故率;事故预测;OGFC 路面;降雨量

**中图分类号:**U414 **文献标志码:**A

## Effect of precipitation on traffic safety of OGFC pavement

WEI Xin-xin, CHEN Hua-xin, XIA Hui-yun

(School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the traffic study of OGFC pavement under adverse weather, this paper chose a road segment of OGFC as research subject, compared its traffic crash rate with that of common asphalt pavement according to local meteorological data, and analyzed the effect of different pavement materials on traffic safety under different precipitation. Based on this, the prediction model of the studied road segment based on precipitation of common asphalt pavement and OGFC pavement was developed. The results show that OGFC pavements can decrease more than 74% of crash rate when precipitation is below 10 mm. At the same time, OGFC pavements can reduce more than 50% crashes compared to common asphalt pavement when the precipitation is between 10-24.9 mm. It is also observed that OGFC pavements have less than 85% crashes compared with common asphalt pavement when precipitation is above 50mm. In term with crash type, OGFC pavement can decrease more than 50%, 40%, 30% of the no-collision crashes, rear-end and side swipe collisions, respectively. 4 tabs, 5 figs, 20 refs.

**Key words:** road engineering; mountain highway; crash rate; crash prediction; OGFC pavement; precipitation

收稿日期:2016-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51202016);中国博士后科学基金项目(2015M570805);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310831151080)

作者简介:魏莘欣(1988-),女,陕西延安人,工学博士研究生,E-mail:408519299@qq.com.

## 0 引言

高速公路的事故率在很大程度上受到不良天气的影响<sup>[1-2]</sup>。根据美国对其国内30年交通事故原因的调查研究,因路滑而引起的交通事故约占事故总数的25%;对北京市某段公路调查了2年发生的交通事故,因雨天滑溜而导致的交通事故占到了事故总数的25%<sup>[3-8]</sup>。为了解决这个问题,透水沥青混合料被应用在道路面层中。OGFC(open-graded fiction courses)称为开级配沥青排水路面、透水(排水)路面、多孔隙沥青、开级配路面等。20世纪70年代早期,美国联邦公路局(FHWA)进行了研究,并且第1次提出OGFC这一术语。之后OGFC路面在英国、奥地利、日本等国家得到了广泛应用。OGFC路面是在普通沥青路面或水泥混凝土路面或其他路面结构层上铺筑1层具有很高孔隙率的沥青混合料的沥青路面,孔隙率能达到17%~22%,较大的孔隙率可以及时排走路面积水、消除水雾、减少眩光,具有较好的安全性能。目前,各国专家学者对OGFC路面的初期设计如配合比设计、疲劳性能、高低温性能以及排水性能做了广泛的研究<sup>[9-14]</sup>。然而,OGFC路面在实际应用中的雨天安全性能以及OGFC路面的排水能力却鲜有文献报导<sup>[15-19]</sup>。

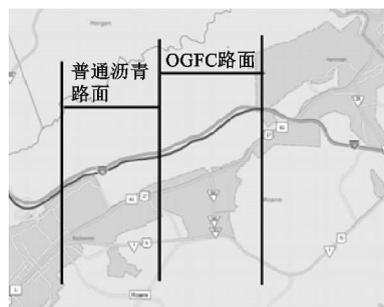
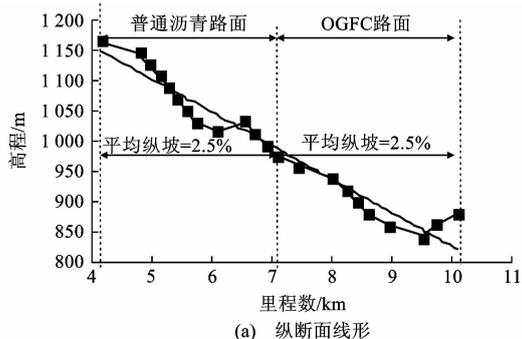
为此,本文采集了美国田纳西州Roane县2008年8月31日至2015年12月31日的天气数据以及路段I-40上307起交通事故数据,采用回归分析和对比研究的方法,研究OGFC路面上降雨量与事故率的关系,得出OGFC路面的适用条件,为OGFC路面的推广使用提供了科学数据支撑。

## 1 数据描述

本文数据来源于美国田纳西州智能交通管理系统(Enhanced Tennessee Roadway Information Management System, E-TRIMS),该系统可以查询2002~2015年间发生在田纳西州的交通事故及其事故描述。本文研究对象为I-40路段上一段高速公路,起点位于I-40进入Roane县后4.13 km处,终点位于I-40进入Roane县后10.85 km处,全长6.72 km。

2008年8月31日,该路段7.49~10.85 km范围内加铺了OGFC抗滑层。为了对比研究,本文将路段分为长度相等的2个部分,每段长度都为3.36 km。其中第1段为4.13~7.49 km,道路铺面材料为普通沥青混合料;第2段为7.49~10.85 km,道路铺面材料为OGFC路面。之所以选

择相邻路段为研究对象,是因为相邻路段的道路环境相同(图1),便于对比研究;该路段为双向4车道公路,中间完全分离,限速96 km/h,无路灯照明,纵坡度为2.5%左右,年平均日交通量为30 740 veh。



(b) 平面线形

图1 地理特征

Fig. 1 Geography features

自2008年8月31日至2015年12月31日,该研究路段共发生交通事故307起,其中232起为发生在普通沥青路面路段上,剩余75起发生在OGFC路面路段上。

降雨资料来自于美国国家气象中心(National Climatic Data Center)网站<sup>[20]</sup>,该网站可以获得美国各地区每天的最高气温、最低气温以及降雨量。调查发现,Roane县2008年8月31日至2015年12月31日共降雨865 d,具体情况见表1。

表1 Roane县降雨统计(2008-08-31~2015-12-31)

Tab. 1 Daily precipitation of Roane County (8/31/2008~12/31/2015)

降雨量/mm	降雨类别	降雨天数/d
<10.0	小雨	499
10.0~24.9	中雨	224
25.0~49.9	大雨	102
50.0~99.9	暴雨	36
>100.0	大暴雨	4

## 2 数据描述事故率与降雨量的关系

一般来说,下雨后路表会存有一定量的积水,形成“水膜”,导致公路的抗滑性下降。根据牛顿第

二定律,路面抗滑性与车辆的刹车距离成反比,即抗滑性越差,刹车距离越长。因此,下雨后车辆的刹车距离变长,更容易导致事故的发生。

## 2.1 不同降雨量下的事故率分布

为了对比 OGFC 路面与普通沥青路面的安全性能,引用雨天事故指数作为评价指标,其表达式为

$$V_{i,i+1} = 100 \frac{C_{i,i+1}}{P_{i,i+1}} \quad (1)$$

式中: $V_{i,i+1}$ 为降雨量在  $i \sim i+1$  mm 范围内的事故指数; $C_{i,i+1}$ 为降雨量在  $i \sim i+1$  mm 范围内发生的交通事故次数; $P_{i,i+1}$ 为降雨量在  $i \sim i+1$  mm 范围内的天数。

雨天事故指数越高,表明该降雨量下道路的安全性越差。由式(1)可分别计算出 OGFC 路面与普通沥青路面在不同降雨量下的事故指数,结果如图 2 所示。

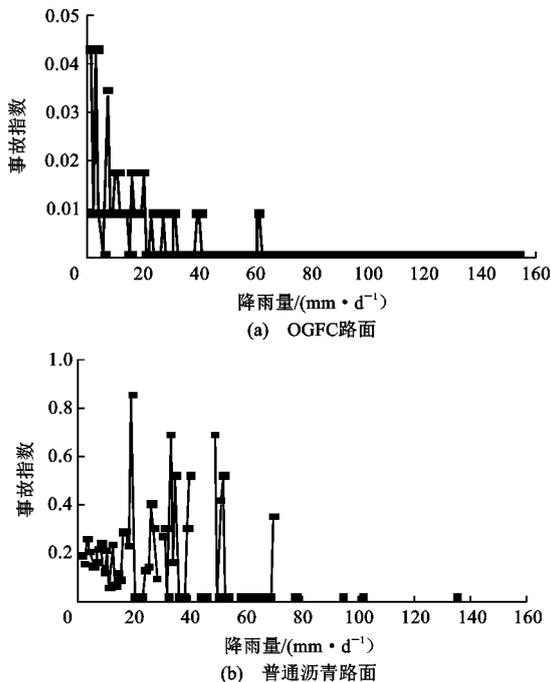


图 2 降雨量与事故率的关系

Fig. 2 Relationship between crash rate and precipitation

由图 2 可以看出,在不同降雨量下,OGFC 路段上事故指数均小于普通沥青路面,其中 OGFC 路面的事故指数的变化范围为  $0 \sim 0.043$ ;普通沥青路面路段事故指数的变化范围为  $0 \sim 0.833$ 。对于 OGFC 路面,随着降雨量的增加,OGFC 路段上的事故指数逐渐降低,而对于普通沥青路段,车辆事故指数呈现波动状态,在降雨量为  $0 \sim 20$  mm 时,车辆事故指数较为平稳,主要集中在  $0.2$  附近;当降雨量为  $20 \sim 40$  mm 时,车辆事故指数出现高峰,最高可达  $0.833$ ,非常危险;在降雨量大于  $40$  mm 时,车辆事故

指数变化规律不明显。由此可知,与普通沥青路面相比,OGFC 路面可以大大提高山区道路的雨天交通安全性能,尤其当降雨量为  $20 \sim 40$  mm 时,普通沥青路段事故指数可达  $0.833$ ,而 OGFC 路段的事故指数仅为  $0.01$ ,因此 OGFC 路面的最佳适用范围是降雨量为  $20 \sim 40$  mm 的地区。

为了进一步比较普通沥青路面与 OGFC 路面雨天的交通安全性能,本文根据气象学知识将降雨量分为小雨( $10$  mm 以下)、中雨( $10.0 \sim 24.9$  mm)、大雨( $25.0 \sim 49.9$  mm)、暴雨( $50.0 \sim 99.9$  mm)、大暴雨( $>100$  mm)5 类,并计算出不同降雨条件下 OGFC 路面与普通沥青路面的事故数差异率(表 2)。其中事故数差异率的计算公式为

$$R_j = \frac{C_{NCA,j} - C_{NOGFC,j}}{C_{NCA,j}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $R_j$ 为降雨类型  $j$  时的事故数差异率, $j$  包括小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨; $C_{NCA,j}$ 为普通路面的事故次数; $C_{NOGFC,j}$ 为 OGFC 路面的事故次数。

表 2 Roane 县 7 年间不同路面的雨天事故次数

Tab. 2 Crash number of different pavements on rainy weather

降雨量/mm	普通沥青路面 事故数	OGFC 路面 事故数	事故率差值/%
$<10.0$	87	23	74
$10.0 \sim 24.9$	31	13	58
$25.0 \sim 49.9$	25	4	84
$50.0 \sim 99.9$	8	1	88
$>100.0$	2	0	100

表 2 为 Roane 县 2008 年 8 月 31 日至 2015 年 12 月 31 日 7 年间的事 故记录 和降雨统计,可以看出 OGFC 路面在不同降雨量下的事故数均小于普通沥青路面。总体来说,OGFC 路面的事故数比普通沥青路面的事故数少  $55\%$  以上。在大暴雨时,OGFC 路面的事故数比普通沥青路面少  $100\%$ ,此时两者相差幅度最高;在中雨时,OGFC 路面的事故数比普通沥青路面少  $58\%$ ,此时二者相差幅度最低。可以推测 OGFC 适合用于多雨山区道路,特别是降雨量大于  $25$  mm 的地区,OGFC 的使用效果更为明显,可减少  $80\%$  以上交通事故的发生。

## 2.2 不同降雨量下事故类型分布研究

车辆事故类型按照碰撞方式可以分为追尾、侧面刮碰和撞物 3 种类型。不同事故类型造成的事故严重性不同,在 3 种事故类型中,撞物类事故造成的经济财产损失最为严重。下页图 3 描述了 OGFC 路面和普通沥青路面的雨天事故类型分布。

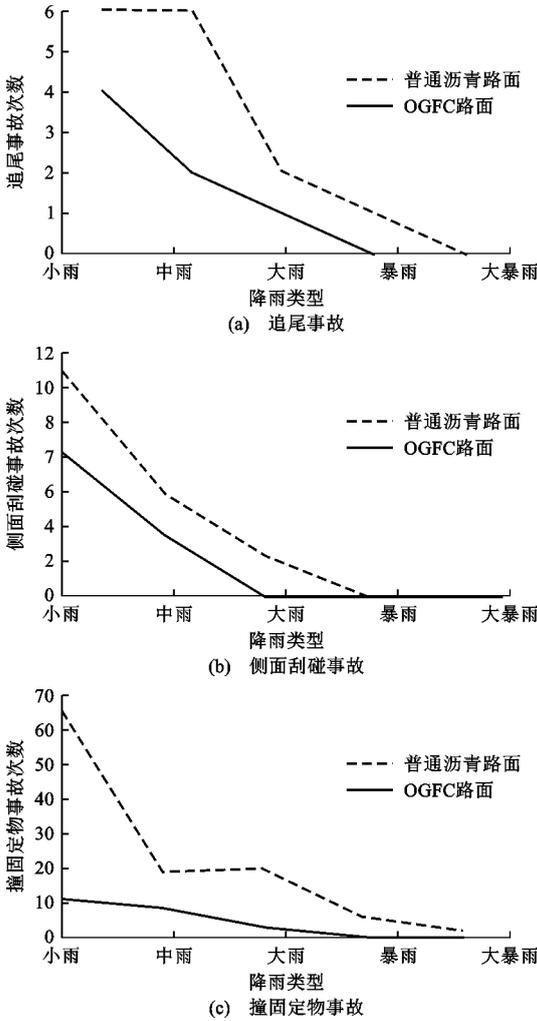


图3 不同事故类型下事故数的分布

Fig. 3 Distribution of crash number under different crash types

由图3可得,对于不同的事故类型,OGFC路段的事故数均小于普通沥青路面的事故数。对于追尾类事故,在OGFC路段上发生的事故数比普通路段的事故数低33%以上;对于侧面刮碰类事故,在OGFC路段上发生的事故数比普通路段低40%以上;对于撞固定物类事故,在OGFC路段上发生的事故数比普通沥青路段低50%以上。可见OGFC路面对撞固定物类事故的影响最大,使用OGFC路面可以大大减少雨天撞固定物类事故的发生,从而保障了交通安全。

### 2.3 基于降雨量的事故率预测

为了预测不同降雨量下的事故发生率,采用亿车公里事故率  $I$  为研究对象,计算公式为

$$I = \frac{10^8 C_N}{I_{AADT} L S} \quad (3)$$

式中: $I$ 为亿车公里事故率; $C_N$ 为事故次数; $I_{AADT}$ 为

年平均日交通量 AADT(veh)的计算参数; $L$ 为研究路段长度(km); $S$ 为研究期限(d)。

计算得出研究路段在不同降雨量下 OGFC 路面与沥青路面的亿车公里事故率,如图4所示。

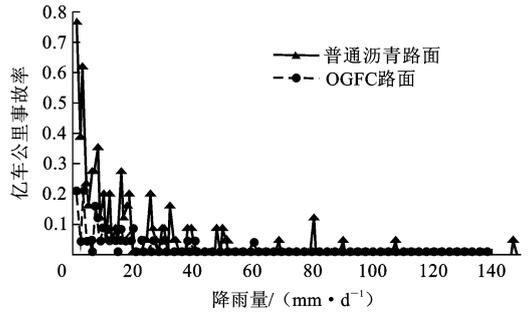


图4 亿车公里事故率与降雨量的关系

Fig. 4 Relationship between  $I$  and precipitation

由图4可知,在不同降雨量下,研究路段中普通沥青路面的亿车公里事故率均高于OGFC路面,且二者的事故率都随降雨量的增加而降低。

为了进一步得出不同路面类型的事故率预测模型,采用曲线拟合的方式,将现有数据拟合到线性、对数、倒数、二次曲线、三次曲线这5种曲线中,用最小二乘法检验其拟合效果,拟合效果用  $R^2$  (判定系数)来表示。拟合曲线及  $R^2$  值见图5和下页表3、表4。

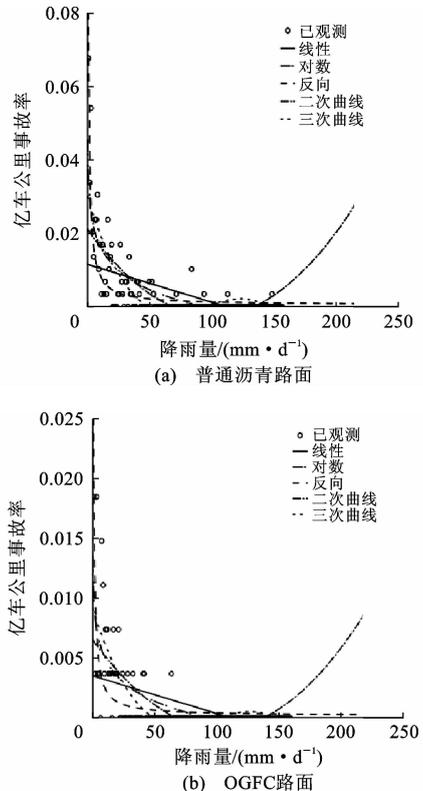


图5 曲线拟合结果

Fig. 5 Fitting results

表 3 普通沥青路面曲线拟合模型评价

Tab. 3 Evaluation of prediction model of common poventent

回归方法	残差	自由度	F 值	显著性	常数项 $B_0$	一次项系数 $B_1$	二次项系数 $B_2$	三次项系数 $B_3$	判定系数 $R^2$
线性	1.047	1	54.087	0.000	0.122	-0.001			0.264
对数	0.549	1	239.992	0.000	0.361	-0.080			0.614
倒数	0.365	1	437.172	0.000	0.000	0.859			0.743
二次曲线	0.734	2	70.249	0.000	0.226	-0.005	$2.591 \times 10^{-5}$		0.484
三次曲线	0.546	3	79.631	0.000	0.322	-0.013	0.000	$-5.181 \times 10^{-7}$	0.616

表 4 OGFC 路面曲线拟合模型评价

Tab. 4 Evaluation of prediction model of OGFC poventent

回归方法	残差	自由度	F 值	显著性	常数项 $B_0$	一次项系数 $B_1$	二次项系数 $B_2$	三次项系数 $B_3$	判定系数 $R^2$
线性	0.089	1	16.374	0.000	0.033	0.001			0.235
对数	0.058	1	152.217	0.000	0.094	-0.021			0.505
倒数	0.055	1	166.654	0.000	0.020	0.206			0.524
二次曲线	0.066	2	56.914	0.000	0.060	-0.001	$7.008 \times 10^{-6}$		0.431
三次曲线	0.054	3	57.105	0.000	0.085	-0.003	$3.729 \times 10^{-5}$	$-1.311 \times 10^{-7}$	0.535

由表 4 可知,对于研究路段的普通沥青路面,线性、对数、倒数、二次曲线、三次曲线都可拟合事故率,其中倒数模型拟合效果最好,其  $R^2 = 0.743$ ,线性模型拟合效果最差,其  $R^2 = 0.264$ 。对于 OGFC 路面而言,线性、对数、倒数、二次曲线、三次曲线同样可拟合事故率,其中三次曲线模型拟合效果最好,其  $R^2 = 0.524$ ;线性模型拟合效果最差,其  $R^2 = 0.235$ 。一般来说,当  $R^2 > 0.8$  时,认为模型拟合效果很好;当  $0.5 < R^2 < 0.8$  时,认为模型拟合效果可以接受。因此,研究路段可以选择倒数模型预测在不同降雨量下普通沥青路面的亿车公里事故率,选择三次曲线模型预测在不同降雨量下 OGFC 路面的亿车公里事故率,其预测模型为

$$I_{CA} = \frac{1}{0.859P} \quad (4)$$

$$I_{OGFC} = -0.085 - 0.003P^3 + 3.729 \times 10^{-5}P^2 - 1.311 \times 10^{-7}P \quad (5)$$

式中: $I_{CA}$ 为普通沥青路面亿车公里事故率; $I_{OGFC}$ 为 OGFC 路面亿车公里事故率; $P$ 为降雨量(mm/d)。

### 3 结 语

(1)在平均纵坡为 2.5%、平面线形为直线且年均降水量为 2 000 mm 的 4 车道高速公路上,铺筑 OGFC 路面可以大大降低道路的雨天事故率。在降雨量为 10 mm 以下时,OGFC 路面的事故率比普通沥青路面低 74%;在降雨量为 10.0~24.9 mm 时,OGFC 路面的事故率比普通沥青路面低 50%以上;降雨量大于 50 mm 时,OGFC 路面的事故率比普通沥青路面低 85%以上。

(2)在平均纵坡为 2.5%、平面线形为直线且年均降水量为 2 000 mm 的 4 车道高速公路上,铺筑 OGFC 路面可以大大降低雨天事故的严重性。侧面刮碰事故、追尾事故、撞固定物事故是常见的 3 种事故类型,其中撞固定物的事故后果最严重。对不同事故类型,在 OGFC 路段上发生的雨天追尾事故数比普通路段的事故数低 33%以上;在 OGFC 路段上发生的雨天侧面刮碰的事故数比普通路段低 40%以上;在 OGFC 路段上发生的雨天撞固定物事故数比普通沥青路段低 50%以上。可见 OGFC 路面对撞固定物类事故的影响最大,使用 OGFC 路面可以大大减少雨天撞固定物类事故的发生。

(3)通过曲线回归发现,在平均纵坡为 2.5%、平面线形为直线且年均降水量为 2 000 mm 的 4 车道高速公路上,降雨量与亿车公里事故率存在较强的相关关系。对于普通沥青路面,降雨量与亿车公里事故率存在倒数关系,其判定系数大于 0.7,对于 OGFC 路面,降雨量与亿车公里事故率存在三次曲线关系,其判定系数大于 0.5。

(4)本文只考虑了当天降雨对事故的影响,并未考虑路面积水和降雨的滞后性对事故的影响,因此,有关降雨滞后效果的分析模型有待于进一步的研究。

### 参考文献:

#### References:

- [1] YU R J, XIONG Y G, ABDEL-ATY M. A correlated random parameter approach to investigate the effects of weather conditions on crash risk for a mountainous

- freeway[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 50: 68-77.
- [2] BRIJS T, KARLIS D, WETS G. Studying the effect of weather conditions on daily crash counts[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2008, 40(3): 1180-1190.
- [3] 张宜洛, 支喜兰. AK, SMA, OGFC, ASC 型沥青混合料路用性能的研究[J]. *重庆交通学院学报*, 2003, 22(3): 40-43.  
ZHANG Yi-luo, ZHI Xi-lan. Research on the road performance of the AK, SMA, OGFC and ASC bituminous mixture[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2003, 22(3): 40-43. (in Chinese)
- [4] 郑木莲, 王秉纲, 胡长顺. 大孔隙混凝土组成设计及路用性能[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2003, 23(4): 6-10.  
ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang, HU Chang-shun. Component design and performance of porous concrete[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2003, 23(4): 6-10. (in Chinese)
- [5] ABDEL-ATY M, EKRAM A, HUANG H L. A study on visibility obstruction related crashes due to fog and smoke[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2011, 43(5): 1730-1737.
- [6] AHMED M, HUANG H L, ABDEL-ATY M, et al. Exploring a Bayesian hierarchical approach for developing safety performance functions for a mountainous freeway[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2011, 43(4): 1581-1589.
- [7] 候全岐. 陕南多雨地区高速公路上 OGFC 的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.  
HOU Quan-qi. Application of OGFC pavement on southern Shaanxi rainy areas[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [8] 邹艳琴, 陈博, 陶家朴. 多孔排水沥青路面[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2010, 27(11): 43-46.  
ZOU Yan-qin, CHEN Bo, TAO Jia-pu. Porous drainage asphalt pavement[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2010, 27(11): 43-46. (in Chinese)
- [9] EISENBERG D. The mixed effects of precipitation on traffic crashes[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2004, 36(4): 637-647.
- [10] SHERRETZ L A, FARHAR B C. An analysis of the relationship between rainfall and the occurrence of traffic accidents[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, 17(5): 711-716.
- [11] AHMED M, ABDEL-ATY M, YU R J. Assessment of the interaction between crash occurrence, mountainous freeway geometry, real-time weather and traffic data[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2012(2280): 51-59.
- [12] COOLS M, MOONS E A, Wets G. Assessing the impact of weather on traffic intensity[C]//TRB. Proceedings of the 87th annual meeting of Transportation Research of the National Academies Board, Washington DC: Transportation Research Board, 2008: 60-68.
- [13] 徐斌. 排水性沥青路面理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
XU Bin. The theory and practice of porous asphalt [M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)
- [14] EKRAM A. Reduced visibility related crashes in Florida: crash characteristics, spatial analysis and injury severity [D]. Orlando: University of Central Florida, 2009.
- [15] 张宏洲. 高速公路路基路面排水施工技术[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2012, 29(5): 54-57.  
ZHANG Hong-zhou. Construction technology of base and pavement drainage for expressway[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2012, 29(5): 54-57. (in Chinese)
- [16] BALAGH A K G, NADERKHANI F, MAKIS V. Highway accident modeling and forecasting in winter[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, 59: 384-396.
- [17] KHATTAK A J, DE PALMA A. The impact of adverse weather conditions on the propensity to change travel decisions: a survey of Brussels commuters[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1997, 31(3): 181-203.
- [18] KHATTAK A J, KANTOR P, COUNCIL F M. Role of adverse weather in key crash types on limited-access roadways: implications for advanced weather systems[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1998(1621): 10-19.
- [19] KOETSE M J, RIETVELD P. The impact of climate change and weather on transport: an overview of empirical findings[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2007, 14(3): 205-221.
- [20] 余金波. 沥青路面的抗滑性分析及 OGFC 抗滑表层设计[D]. 南京: 东南大学, 2005.  
SHE Jin-bo. The analyses of the capability of asphalt pavement to resist slip and the design of OGFC[D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese)