

文章编号:1671-8879(2020)01-0107-09

车辙变形对多孔沥青路面排水性能的影响

李明亮¹,袁春坤²,李俊¹,曹东伟³,平树江³,王喜弘⁴

(1. 交通运输部公路科学研究院,北京 100088; 2. 中国路桥工程有限责任公司,北京 100011;
3. 中路高科(北京)公路技术有限公司,北京 100088; 4. 中交一公局集团有限公司,北京 100024)

摘要:为了明确多孔沥青路面发生车辙时,多孔沥青上面层的空隙率改变对其排水性能的影响。采用中国高速公路多孔沥青路面典型的层状体结构形式,首先根据车辙变形空间,提出空隙率变化率评价指标,并通过室内试验对多孔沥青路面的车辙变形与空隙率的关系进行观测;通过对实际路面的检测和有限元模拟,分析不同沥青层位对总体车辙深度的影响;最后,利用路表径流模型,分析车辙位置产生径流的条件。研究结果表明:空隙率衰减的比例与车辙变形量占原路面厚度的比例基本相当,车辙变形空间来自于空隙压缩及石料、砂浆流动;多孔沥青路面在长期使用过程中的车辙变形主要由上、中面层共同变形引起,多孔沥青上面层在经过早期压密阶段后,车辙变形稳定,总变形量较小;多孔沥青路面的竖向和横向渗透系数与空隙率成明显的线性关系,当空隙率低于 15% 时,渗透系数接近于 0;车辙深度增加时,车辙位置能够承受的极限降雨强度逐渐降低,车道数增多,也会使最外侧车道右轮迹带位置的极限降雨强度承受能力降低;但是,即使多孔沥青路面产生 10 mm 以上车辙时,仍能满足承受大雨强度标准。该研究明确了车辙对多孔沥青路面排水性能的影响规律,并为多孔沥青路面车辙养护标准的确立提供了研究基础。

关键词:道路工程;多孔沥青路面;排水性能;径流模型;车辙变形;空隙率

中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.01.011

Effect of rutting deformation on drainage performance for porous asphalt pavement

LI Ming-liang¹, YUAN Chun-kun², LI Jun¹, CAO Dong-wei³,
PING Shu-jiang³, WANG Xi-hong⁴

(1. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 2. China Road & Bridge Corporation CO., LTD., Beijing 100011, China; 3. Beijing Zhonglu Gaoke (Beijing) Road Technology CO., LTD., Beijing 100088, China; 4. CCCC First Highway Engineering Group CO., LTD., Beijing 100024, China)

Abstract: To clarify the influence of rutting on the drainage function of porous asphalt pavement, the effects of the void changes of the upper layer of porous asphalt on the drainage performance were carried out. A typical layered structure of porous asphalt pavement in China was used for analysis. Firstly, the evaluation index of the void contents changing rate was put forward according to the rutting deformation space. The relationship between the rutting deformation and voids of the porous asphalt pavement was observed. The influence of the different asphalt layers

收稿日期:2019-10-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFE0108200);交通运输部企业技术创新项目(2015315Q11020);

江苏省交通运输科技项目(2016Y01)

作者简介:李明亮(1982-),男,辽宁阜新人,副研究员,工学博士,E-mail:ml.li@rioh.cn。

on the overall rutting was analyzed by testing the actual pavement and performing a finite element simulation. Finally, the condition of the rutting position producing runoff was analyzed using the runoff model of the road surface. The results show that the proportion of void attenuation is similar to the proportion of rutting deformation to the original pavement thickness. Rutting deformation space comes from void compression as well as stone and mortar flow. The rutting deformation of porous asphalt pavement is mainly caused by the co-deformation of the upper and middle layers. After the early compaction stage of the upper layer of the porous asphalt, the rutting deformation stabilizes and the total deformation are small. The vertical and transverse permeability coefficients of the porous asphalt pavement have an obvious linear relationship with the void contents, and when the void content is less than 15%, the permeability coefficient is close to 0. With the increase of rutting depth, the ultimate rainfall intensity that the rutting position of the porous asphalt pavement can withstand gradually decreases. Increasing the number of lanes also reduces the extreme rainstorm bearing capacity of the right wheel track of the outermost lane. Through this study, the influence of the rutting law on the drainage performance of porous asphalt can be clarified, and providing a technical basis for the establishment of the maintenance standards of rutting for this type of pavement. 5 tabs, 9 figs, 23 refs.

Key words: road engineering; porous asphalt pavement; drainage performance; runoff model; rutting deformation; void content

0 引言

多孔沥青路面, 又称排水沥青路面, 指压实后空隙率在 20% 左右, 能够在混合料内部形成排水通道的沥青混凝土面层。排水沥青路面具有排水、抗滑的安全特性以及降低轮胎-路面噪声的环保性能, 在欧美、日本等国家和地区已作为一种常规的路面结构形式进行应用^[1-3]。中国近年来对多孔沥青路面的研究和推广工作逐渐加强, 截至 2017 年底, 中国新建及养护工程中应用排水沥青路面总里程达 300 km。密级配路面在车辆荷载长期作用下产生车辙时, 雨天车辙槽内易积水形成水膜, 影响雨天行车安全。多孔沥青路面由于其大孔隙特征, 雨水在路面孔隙内可以快速消散, 即使发生一定车辙时, 雨水也能够渗入表面空隙并排出, 避免了密级配轻微车辙也可能发生水滑的危险性。因此, 在多孔沥青路面养护中, 考虑可适当提高其对车辙深度的容许值, 而对于车辙容许值的确定, 需开展路面实际车辙对多孔沥青路面排水性能的影响研究。

多孔沥青路面具有大空隙骨架结构, 对车辙具有良好抵抗性能, 目前在欧美国家和地区已不把车辙作为多孔沥青路面的主要病害, 因此相关的研究较少。日本多孔沥青路面体系跟中国相近, 都采用以高黏度改性沥青作为多孔沥青路面的胶结材料^[4], 且日本跟中国的温度、气候更为接近。因此,

对于多孔沥青路面的车辙性能研究, 参考了较多的日本前期的相关工作。Takahashi 对日本多孔沥青路面的长期使用性能进行了归纳总结, 结果显示多孔沥青路面车辙几乎是常规密实路面的一半^[5]。Kondo 等采用车辙试验仪, 对比了多孔沥青路面与密级配路面的车辙深度, 结果表明多孔沥青路面车辙整体发展缓慢, 最大车辙仅相当于密级配路面的六分之一左右^[6]。Moriyoshi 等指出, 使用了 7 年的多孔沥青路面并未出现明显的车辙病害^[7-8]。由以上研究可以看到, 多孔沥青路面总体车辙较小, 且发展速率远低于密级配路面结构。Wang 等对多层多孔沥青路面的抗车辙性能进行了试验和模拟分析, 研究认为单层排水沥青路面的车辙抵抗力最好, 适于重载交通路段应用^[9]。Imaninasab 等采用有限元方法, 对橡胶沥青体系多孔沥青路面的车辙变形进行了模拟, 研究表明, 随着胶粉用量的提高, 车辙最高可降低 60%^[10]。在多孔沥青混合料抗车辙性能提升方面, Luo 等通过采用环氧沥青提高胶结料的强度和黏度, 以满足特殊路段(桥面、交叉口等)的使用需求^[11]。蒋玮等通过混合料级配优化的方式提高多孔路面的抗车辙性能^[12-13]。由上述分析可知, 目前国内外研究主要针对多孔沥青路面的抗车辙性能, 并提出采用特种胶结料或级配优化等提升其抗车辙能力。

关于多孔沥青路面的雨天排水性能, 国内外学

者已取得较多成果。在早期研究中,建立了多孔沥青路面的路表水膜模型。在同等降雨条件下,由于多孔沥青路面的渗透性能和表观构造深度,使路表水膜远低于密级配路面^[1,14]。蒋甫对多孔沥青路面进行了现场检测,拟合了渗水系数与空隙率变化的关系^[15]。余金波等采用多孔介质的水文计算公式,对排水沥青路面路表径流的产生条件进行了分析^[16-17]。李辉采用水势云图的分析方法,对多孔沥青路面排水范围内的水流深度进行了模拟^[18]。陈泽孔通过室内降雨模拟试验段,对多车道多孔沥青路面的排水效果进行了观测和验证,并对多车道排水系统设计提出建议^[19]。以上分析主要针对多孔沥青路面在表面无损的状况下的排水性能,并未涉及路面车辙变形的影响。

在现有研究中,马涛等采用离散元的方法,模拟了车辙变形对空隙率的影响,但没有与路面的排水性能建立直接联系^[20-21]。陈俊等通过室内横向渗水试验观测了不同车辙深度对横向渗透系数的影响规律,但其研究只针对排水层,未考虑路面中、下面层变形对整体车辙和排水性能的影响^[22]。

本文针对中国高速公路多孔沥青路面实际的层状体结构形式,采用中国常用的高黏度改性沥青体系多孔沥青材料开展分析。首先对多孔沥青路面的车辙变形与空隙率的关系进行了试验观测;又通过对实际路面的检测和有限元模拟,分析了不同沥青层位对总体车辙的影响;最后利用路表径流模型分析了车辙位置产生径流的条件。通过研究,明确了车辙对多孔沥青路面排水性能的影响规律,为多孔沥青路面车辙容许值的确立和路面车辙养护指标的提出提供了研究基础。

1 车辙变形对空隙率的影响

在正常条件下,雨水降落到路表后,沿着竖向空隙渗透到多孔沥青路面内部,并沿着路面横坡通过路面内部的连通空隙排出路面。车辙变形对多孔沥青路面排水性能的影响主要有:①由于车辙变形,路表空隙进一步压密,空隙率减小,造成路面渗水性能下降;②出现车辙的位置由于有效渗水厚度减小,可能会产生渗水的瓶颈,阻碍或延缓雨水的横向渗流,特别是右侧车道处于渗水路径的下游,长期受到重载、慢速车辆的荷载作用,最易产生车辙并形成横向渗水瓶颈。

1.1 空隙率变化率计算方法

如前所述,车辙变形会引起路表空隙压密,导致

路面渗水性能下降,但对于车辙引起的空隙率下降程度尚缺少定量分析,特别是对于采用高黏度改性沥青体系的多孔沥青路面。车辙变形与空隙率变化的关系可能存在 2 种形式:车辙变形全部来自于空隙的压缩;车辙变形来自于空隙压缩和骨料、砂浆的流变。将 2 种情况下的空隙与石料、砂浆比例等效为二维图形,如图 1 所示。图中: L_1 为空隙等效厚度; L_2 为石料、砂浆等效厚度; δ 为车辙变形; δ_1 为空隙变形; δ_2 为石料、砂浆变形。

对于图 1(a),空隙率变化率 C_{va} 如式(1)所示;对于图 1(b),空隙率变化率 C_{vb} 如式(2)所示。

$$C_{va} = \frac{L_1 - \delta}{L_1} V_v \quad (1)$$

$$C_{vb} = \frac{L_1 - \delta_1}{L_1} V_v \quad (2)$$

式中: V_v 为空隙率(%)。

对于工况 1,车辙变形与空隙等效厚度变化相同;对于工况 2,车辙变形为空隙和石料、砂浆等效厚度变化之和,即 $\delta = \delta_1 + \delta_2$ 。因此,在发生相同车辙变形 δ 时,工况 2 中空隙率变化率小于工况 1。

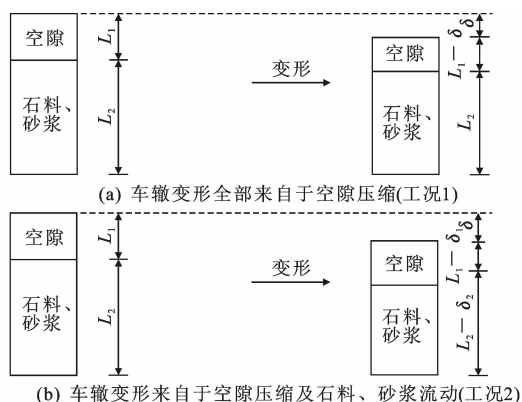


图 1 多孔沥青路面随车辙变形变化示意
Fig. 1 Schematic of changes of porous asphalt pavement with rutting deformation

1.2 空隙率变化率室内试验

首先通过室内试验研究观测多孔沥青路面的车辙变形与空隙率变化的规律。采用标准车辙试验仪,在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下对车辙板试件施加 0.7 MPa 荷载并反复作用,同时自动记录不同轴次下的车辙值。制备 PAC-13(最大公称粒径 13.2 mm) 多孔沥青车辙板试件,胶结料为 SBS 改性沥青,采用干法投放高黏度改性添加剂(HVA),SBS 改性沥青与 HVA 添加剂的质量比例为 $92:8$,高黏度改性沥青 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 动力黏度控制标准为不低于 $200\text{ kPa}\cdot\text{s}$,粗集料采用玄武岩,压碎值为 12% ,软石含量(质量分数,下

同)为 0.2%,5~10、10~15 mm 集料针片状含量分别为 8.8%和 4.6%,设计空隙率为 20%。

试验分别检测 1、2、4、8、24 h 的车辙变形量,如图 2 所示。并取芯检测车辙轮迹位置及非轮迹位置的空隙率,用以比较分析空隙率与车辙变形量之间的关系。车辙连续加载 24 h 变形曲线如图 3 所示,不同加载时间的空隙率变化率如图 4 所示,其中空隙率变化率为加载试验后与试件原始空隙率之比。由图 3 可知,加载的前 30 min,多孔沥青混合料变形率较大,呈迅速发展趋势,即多孔沥青路面进一步压密。随后变形趋势稳定,4~24 h 时,总变形量小于 1 mm。经 24 h 加载,多孔沥青路面总变形量为 4.23 mm,车辙深度为 4.5 mm,总变形率为总变形量与试件厚度(50 mm)之比,达 84.6%。图 3 中,随着加载时间延长,空隙率变化并未呈现明显的规律性,这主要与不同板件之间的结构差异有关。加载 1 h 之后,空隙率基本稳定在初始值的 90%左右,最终空隙率衰减为初始值的 88.8%。由此可见,空隙率衰减的比例略高于车辙变形量占原路面厚度的比例,或者认为二者的比例基本相当。根据等效厚度推算,车辙变形主要为图 1(b)所示工况,即车辙变形空间来自于空隙压缩及石料、砂浆流动。

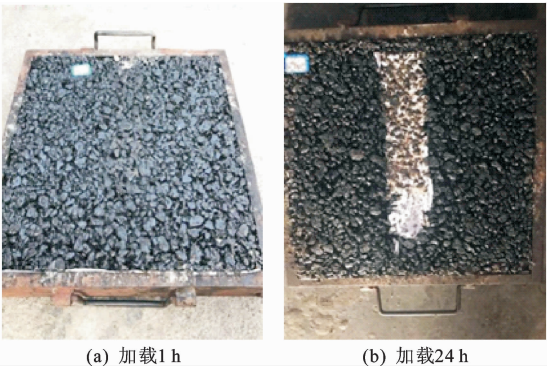


图 2 不同加载时间车辙试件变形比较
Fig. 2 Deformation comparisons of rutting samples at different loading time

2 多孔沥青路面车辙变化特性

2.1 多孔沥青路面车辙变形形式

路面整体结构车辙变化是多个沥青层次变形叠加的结构,图 5 为多孔沥青路面结构的主要车辙变形形式。设路面总变形为 Δ ,排水层变形为 Δ_1 ,下承层(中、下面层)变形为 Δ_2 。图 5 中的几种变形形式分别为:(a) $\Delta=0$;(b) $\Delta=\Delta_1$;(c) $\Delta=\Delta_2$;(d) $\Delta=\Delta_1+\Delta_2$ 。各种车辙变形对于多孔沥青路面空隙率的影响分别为:(a)无变形;(b)排水层变形,导致空

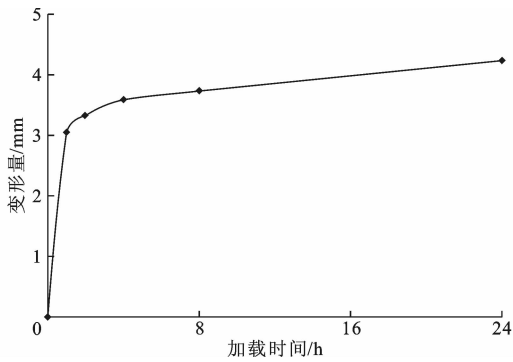


图 3 PAC-13 车辙仪连续加载变形量
Fig. 3 Deformation of PAC-13 of continuous loading test

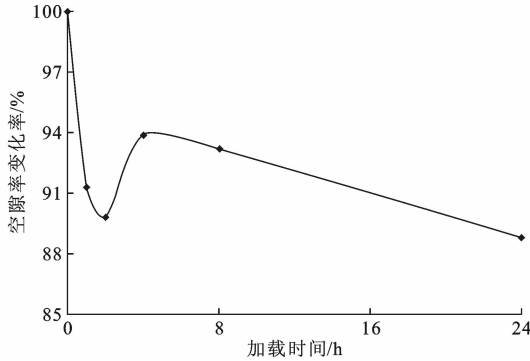


图 4 PAC-13 车辙仪连续加载空隙率变化率
Fig. 4 Change in percentage of air voids for continuously loading of PAC-13

隙压缩、空隙率降低;(c)下承层变形,不影响排水层空隙率;(d)排水层和下承层协同变形,导致空隙率部分降低。因此,本节基于多孔沥青路面整体结构分析,对其车辙深度的发展和变化趋势进行研究,为掌握车辙对排水功能的影响提供准确依据。

2.2 多孔沥青路面车辙变形的现场观测

为真实反映多孔沥青路面在使用过程中车辙变化情况,对实际工程的多孔沥青路面车辙变形进行了观测分析。江苏沿海高速 G15 多孔沥青路面修建于 2005 年^[23],营运已有 12 年之久,为多孔沥青路面长期观测提供了大量数据。沿海高速公路 2017 年车辙检测结果如图 6 所示。由图 6 可见:沿海高速公路运营 12 年后,其车辙总体状况仍良好;第 3 车道部分路面车辙深度相对较大(>10 mm),平均值约为 6.7 mm。第 1、2 车道车辙深度基本在 6 mm 以下,本试验段中没有出现大于 12 mm 的情况。

对沿海高速公路典型断面右轮迹带车辙位置进行钻芯取样,测量各芯样上、中面层厚度,由于下面层在使用中对表面车辙的贡献较小,因此本文未考虑。根据原路面设计厚度及应急车道厚度检测值计

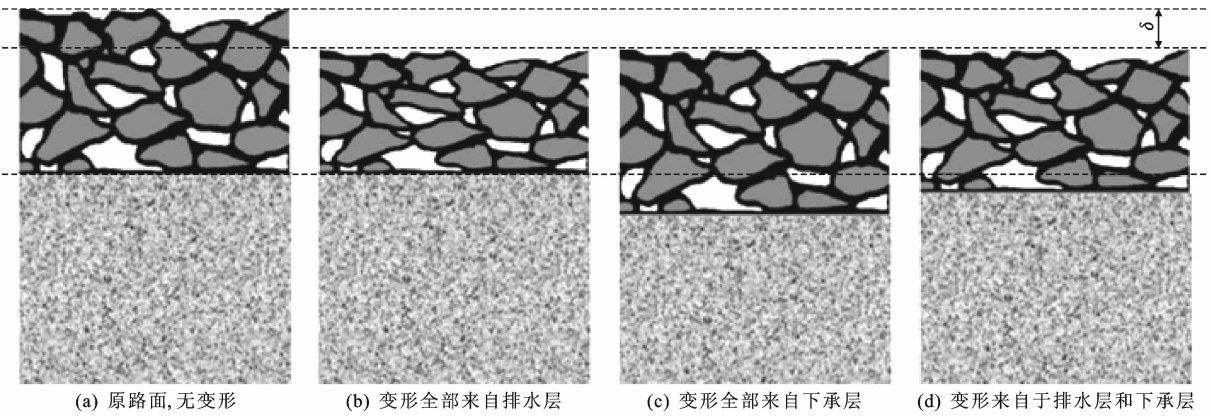


图 5 多孔沥青路面车辙变形形式

Fig. 5 Deformation of porous asphalt pavement with rutting changing

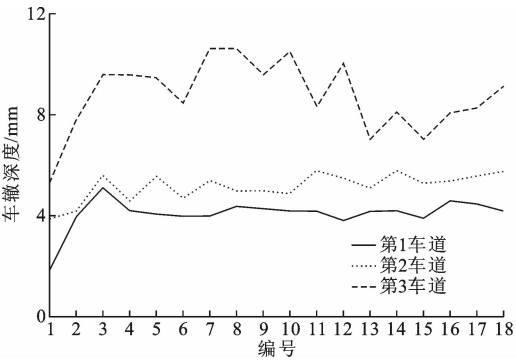


图 6 沿海高速公路多孔沥青路面车辙深度

Fig. 6 Rutting depths of porous asphalt pavement of Coastal Expressway

算各层位厚度参照值,计算结果为:上面层厚度参照值 $h_1=40\text{ mm}$,中面层厚度参照值 $h_2=58\text{ mm}$ 。

根据芯样厚度测量结果及参照厚度值,计算各断面层位变形量贡献值及总体相对变形量。取样位置为行车道右轮迹带,计算结果如表 1 所示。根据表 1 可知:芯样位置各层位的总变形量小于现场检测的车辙深度,这是由于检测数据为整个路面断面的车辙深度评价,计算结果包括路面自身变形以及车辙两端隆起变形,因此现场车辙深度检测结果大于所取芯样厚度变形量;车辙深度小于 7 mm 时,芯样变形量为 3~5 mm,排水层变形量为 1~2 mm;车辙深度大于 9 mm 时其变形量达到 4~5 mm。由此可见,多孔沥青路面在长期使用过程中的车辙变形主要为上、中面层共同变形引起的。对于排水层的变形,也有路面在使用过程中因表面磨损和细集料剥离造成的厚度值降低,因此认为,排水层的实际变形应不大于表 1 中数值。

2.3 多孔沥青路面车辙变形模拟

为模拟多孔沥青路面发展规律,分析车辙对于排水功能的影响,本文采用有限元数值模拟分析

表 1 车辙断面芯样厚度检测

Tab. 1 Thickness inspection of rutting sections mm

桩号	车辙深度	总变形量	层位	芯样厚度	变形贡献
K1110+980	6.4	4	上	39	1
			中	55	3
K1111+116	7.0	5	上	38	2
			中	55	3
K1111+210	11.1	9	上	35	5
			中	54	4
K1111+770	9.0	8	上	36	4
			中	54	4
K1114+500	5.7	4	上	38	2
			中	56	2

常用的 Bailey-Norton 蠕变模型对多孔沥青路面高温车辙进行模拟,分析不同层位车辙发展规律。模型以应力和时间单独变化来描述沥青混合料蠕变应变。在同一温度条件下,可用应力 σ 和时间 t 的函数进行表征

$$\epsilon=A\sigma^n t^m$$
 (3)

式中: ϵ 为蠕变率; A 、 n 、 m 均为量纲一化的模型参数,可通过拟合室内试验数据进行求解。

根据中国常用多孔沥青路面结构,本文模拟分析的路面结构为:4 cm 上面层多孔沥青面层 PAC-13+6 cm 中面层 AC-20+8 cm 下面层 AC-25。上面层采用高黏度改性沥青,中面层采用 SBS 改性沥青,下面层采用 AH-70 沥青。由于沥青路面车辙主要发生在高温季节,单车道设计当量轴载作用次数(equivalent single axle load, ESAL)为 2 000 万计算,高温当量 ESAL 约占总量的 10%,即 200 万。为简化有限元模拟计算,高温车辙模拟分析仅考虑 200 万高温荷载作用,但其等效于正常使用 16 年过程中 2 000 万 ESAL。

蠕变模型参数 A 、 m 、 n 通过室内静态或动态蠕

变试验进行求解。对多孔沥青混合料 PAC-13 及密级配 AC-20、AC-25 混合料开展不同温度下的 8 h 车辙试验,通过对车辙试验结果进行多变量线性回归分析,得到沥青混合料的蠕变模型参数值,如表 2 所示。

表 2 沥青混合料蠕变参数的选取

混合料类型	多孔沥青上面层	中面层	下面层
代表温度/℃	60	40	20
A	0.001 53	0.001 16	0.001 31
n	0.793 00	0.774 81	0.785 98
m	-0.785 00	-0.550 00	-0.695 35

将表 2 中各面层沥青混合料蠕变参数输入多孔沥青路面有限元模型,可对高温车辙的发展进行模拟分析。基于有限元模型的路表 60 ℃ 条件下,路面总变形量以及各层次变形量与当量轴载次数的关系,如图 7 所示。与第 2.2 节中路面实测值相比,相同的荷载作用次数下,总变形量的实测值与模拟值基本相当。其中,多孔沥青层变形量模拟值小于实测值,下面层变形量模拟值大于实测值。这主要是因为模型模拟过程中,未考虑多孔沥青路面初期的压实情况,以及下面层的代表温度取值可能与实际有所差异。

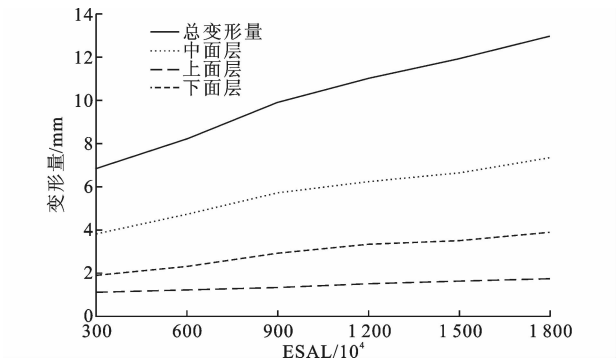


图 7 有限元模拟多孔沥青路面车辙变形发展规律

Fig. 7 Finite element simulation of rutting deformations and development of porous asphalt pavement

3 车辙对排水性能的影响

雨水从路表垂直向下渗入多孔沥青表面层是一个两阶段过程。第 1 阶段为外界控制阶段,若外界给水速率不超过下渗能力,则入渗速率等于来水速率。第 2 阶段为排水表层控制阶段,随着排水表层饱和程度增加,表层传导水的能力减弱,当小于外界给水速率时,有一部分雨水通过路表合成坡度形成径流排出路面。车辙对多孔沥青路面排水功能的影

响也可认为是车辙压密造成空隙率的降低,因此,本文中轮迹带位置产生车辙等效为空隙率变化的路面。

3.1 渗透系数

为分析多孔沥青路面车辙对排水性能的影响,首先对不同空隙率多孔沥青路面的渗透系数进行分析。本文采用常水头检测方法,分别测试多孔沥青路面竖向和横向渗透系数^[19]。竖向渗水采用常水头测试方法,横向渗透系数的水槽测定仪如图 8 所示。试件采用标准车辙板试件,试件两侧不允许水流通过,水流只能从试件内部渗流通过。试验得到的竖向和横向渗透系数与空隙率的关系如图 9 所示。由图 9 可知,多孔沥青路面的竖向和横向渗透系数与空隙率成明显的线性关系,当空隙率低于 15% 时,渗透系数接近于 0。



图 8 横向渗水系数测试

Fig. 8 Testing of transverse permeability coefficient

3.2 路表径流模拟分析

多孔沥青路面在暴雨下产生径流有 2 种可能:当暴雨强度大于瞬时渗透速率时;在排水面层内蓄水饱和后排水速率小于降雨强度时。下文分别讨论多孔沥青路面在发生车辙变形时,对这 2 种径流产生的影响。

3.2.1 模型参数取值

本文以常用 PAC-13 型多孔沥青混合料作为研究对象,多孔沥青层初始厚度设为 40 mm,空隙率为 20%。根据本文相关研究成果计算模型参数,并作以下假设:①有效排水厚度为初始厚度与车辙深度的差值;②排水层变形按式(3)车辙预估模型进行计算,同时为保证变形量与实际路面相近,人为增加不利因素,即将排水层变形设为预估值的 2 倍,并在中、下面层变形中减去排水层相应的增量,从而保持

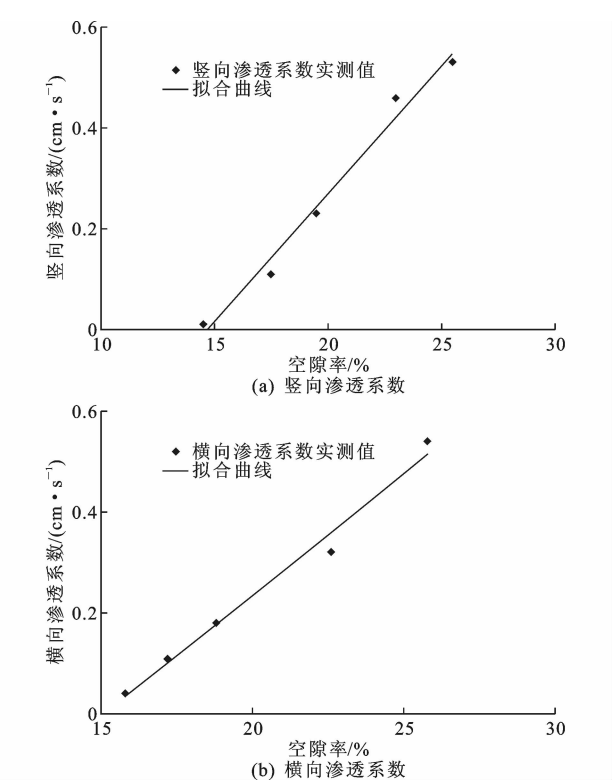


图 9 多孔沥青路面渗透与空隙率的关系
Fig. 9 Relationships between permeability and air voids content of porous asphalt pavement

总变形与预估值相同;③假定空隙率变化率与车辙变形比例相同,从而计算不同车辙变形对应的排水层空隙率;④根据图 9 中的回归模型,通过排水层空隙率计算竖向和横向渗透系数;⑤未考虑路面隆起对车辙变形的影响,但本文以路面变形值作为车辙值进行分析,条件更为不利。本文以常用 PAC-13 型多孔沥青混合料作为研究对象,多孔沥青层初始厚度设为 40 mm,空隙率为 20%,由此确定不同车辙变形下各个参数取值如表 3 所示。

表 3 多孔沥青混合料车辙变形条件下参数取值
Tab. 3 Parameter values under deformation conditions for porous asphalt pavement

编号	车辙深度/ mm	有效排水厚度/ mm	排水层变形/ mm	中、下面层变形/ mm	空隙率/ %	竖向渗透系数/ (cm · s ⁻¹)	横向渗透系数/ (cm · s ⁻¹)
1	0	40	0.00	0.00	20.00	0.27	0.24
2	2	38	0.74	1.26	19.63	0.26	0.23
3	5	35	1.85	3.15	19.08	0.23	0.20
4	10	30	2.72	7.28	18.64	0.20	0.18
5	15	25	3.71	11.29	18.15	0.18	0.16

3.2.2 竖向渗水影响

由现有研究可知^[17],降雨强度为 100 mm/h 时,只要竖向渗透系数大于 0.02 cm/s,就能保证雨

水迅速下渗。根据图 9(a),对于多孔沥青路面,只要保持空隙率在 15%以上,就具有良好的竖向渗水功能。因此,车辙对竖向渗水的影响可以忽略不计。

3.2.3 横向排水影响

多孔沥青路面车辙最严重位置一般为最右侧车道右轮迹带位置,因此,研究中以最外侧轮迹带车辙为观测对象。并将车辙位置处排水层的有效厚度等效为路面厚度。

在无明显表面径流的情况下所容许的极限降雨强度与多孔路面渗透系数、坡长、厚度等之间的关系,根据此关系式可以初步判定在给定的降雨强度下,是否会产生明显的地表径流^[16],即

$$W = \frac{4Khi}{2 + L} \tag{4}$$

式中:W 为降雨强度(cm/s);K 为排水层的横向渗透系数(cm/s);i 为纵坡坡度,本文取 2%;L 为排水路径长度(m);h 为排水层的有效厚度(mm)。

分别针对双向四车道、六车道 2 种情况计算车辙位置的极限降雨强度,设车辙最深处位于排水路径长度 7.5、11.25 m 的位置,系数 K 取值根据不同车辙深度。不同车辙位置承受的极限降雨强度计算结果如表 4 所示。降雨强度标准参见表 5。由计算结果可知,随着路面车辙深度增长,多孔沥青路面车辙位置能够承受的极限降雨强度逐渐降低;车道数的增多,也会使最外侧车道右轮迹带位置的极限暴雨承受能力降低。但是,即便多孔路面产生 10 mm 以上车辙,无论是双向四车道还是六车道路面,仍能承受大雨强度标准的降雨。同时,由于多孔沥青路面在发生车辙时,仍具有较高的连通空隙率,车辆行驶时,车辙槽内的水膜能够被轮胎压入排水层的空隙,从而降低发生水滑的可能性,加之多孔沥青路面具有较大的构造深度,能够降低路表水膜厚度,同时增强了路面抗滑性能。通过增加路面空隙率和排水层厚度,也会降低车辙对排水性能的影响。

在公路排水设计时,应根据《公路排水设计规范》(JTG/T D33—2012)中的标准降雨强度进行重现期 5 年,降雨历时为 30 min 降雨强度的验算。当发生较大强度的集中降雨时,超过表 4 中所示车辙位置能够承受的极限降雨强度时,排水沥青路面车辙位置将出现积水。

4 结 语

(1)多孔沥青路面空隙率与车辙变形量关系研究表明,空隙率衰减的比例与车辙变形量占原路面

表 4 不同车辙位置承受的极限降雨强度预估
Tab. 4 Estimation of extreme rainfall intensity at different rutting positions

车道数	车辙深度/mm	横向渗透系数/ (cm·s ⁻¹)	极限降雨强度/ (mm·d ⁻¹)	降雨强度 标准
双向四 车道	0	0.24	89.63	暴雨
	2	0.23	78.99	暴雨
	5	0.20	64.26	暴雨
	10	0.18	49.37	大雨
	15	0.16	35.72	大雨
双向六 车道	0	0.24	59.76	暴雨
	2	0.23	52.67	暴雨
	5	0.20	42.84	大雨
	10	0.18	32.91	大雨
	15	0.16	23.82	大雨

表 5 降雨强度标准

Tab. 5 Standards for rainfall intensity

降雨强度	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨	特大暴雨
降雨量/ (mm·d ⁻¹)	<10	10~24.9	25~49.9	50~99.9	100~ 249.9	≥250

厚度的比例基本相当;车辙变形空间来自于空隙压缩及石料、砂浆流动。

(2)多孔沥青路面结构在长期交通荷载作用下,中面层变形发展较快,为车辙产生的主要层位,多孔沥青上面层在经过早期压密阶段后,车辙变形稳定,总变形量较小。

(3)车辙变形对多孔沥青路面竖向渗水的影响较小;随着路面车辙变形的增长,多孔沥青路面车辙位置能够承受的极限降雨强度逐渐降低;车道数的增多,也会使最外侧车道右轮迹带位置的极限暴雨承受能力降低。但是,即使多孔路面产生 10 mm 以上车辙深度时,无论是双向四车道还是六车道路面,仍能承受大雨强度标准的降雨。多孔沥青路面总体安全特性较好。

(4)下一步将通过增加排水层空隙率和厚度的方法,降低车辙对多孔沥青路面排水的不利影响,并针对不同地区降雨量及交通荷载情况,优化多孔沥青路面的排水层结构设计;开展车辙位置出现积水后对行车安全的影响研究,为完善车辙病害处治提供依据。

参考文献:

References:

[1] 曹东伟,刘清泉,唐国奇.排水沥青路面[M].北京:人民交通出版社,2009.
CAO Dong-wei, LIU Qing-quan, TANG Guo-qi. Porous asphalt pavement[M]. Beijing:China Communica-

tions Press,2009.
[2] VAN KEULEN W,DUSKOV M. Inventory study of basic knowledge on tyre/road noise[R]. Delft: Road and Hydraulic Engineering Division of Rijkswaterstaat,2005.
[3] NIELSEN C B. Durability of porous asphalt—international experiences[R]. Washington DC:TRB,2006.
[4] XU Bin,CHEN Jing-yun,LI Ming-liang,et al. Experimental investigation of preventive maintenance materials of porous asphalt mixture based on high viscosity modified bitumen[J]. Construction & Building Materials,2016,124:681-689.
[5] TAKAHASHI S. Comprehensive study on the porous asphalt effects on expressways in Japan: Based on field data analysis in the last decade[J]. Road Materials & Pavement Design,2013,14(2):239-255.
[6] KONDO T, MORIYOSHI A, YOSHIDA T, et al. Crack formation in asphalt mixtures in the wheel tracking test at high temperature[J]. Journal of the Japan Petroleum Institute,2004,47(2):90-99.
[7] MORIYOSHI A, JIN T, NAKAI T, et al. Evaluation methods for porous asphalt pavement in service for fourteen years[J]. Construction & Building Materials,2013,42(9):190-195.
[8] MORIYOSHI A, JIN T, NAKAI T, et al. Construction and pavement properties after seven years in porous asphalt with long life[J]. Construction & Building Materials,2014,50:401-413.
[9] WANG Xiao-wei, GU Xing-yu, DONG Qiao, et al. Evaluation of permanent deformation of multilayer porous asphalt courses using an advanced multiply-repeated load test[J]. Construction & Building Materials,2018,160:19-29.
[10] IMANINASAB R,BAKHSI B,SHIRINI B. Rutting performance of rubberized porous asphalt using finite element method[J]. Construction & Building Materials,2016,106:382-391.
[11] LUO Sang,LU Qing,QIAN Zhen-dong. Performance evaluation of epoxy modified open-graded porous asphalt concrete[J]. Construction & Building Materials,2015,76:97-102.
[12] 蒋 玮,沙爱民,肖晶晶,等.基于抗车辙稳定性的多孔沥青混合料级配优化[J].华南理工大学学报:自然科学版,2012,40(11):127-132.
JIANG Wei,SHA Ai-min,XIAO Jing-jing,et al. Gradation optimization of porous asphalt mixture for rutting resistance[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 40

- (11):127-132.
- [13] SURESHA S N, GEORGE V, SHANKAR A U R. Effect of aggregate gradations on properties of porous friction course mixes [J]. *Materials & Structures*, 2010, 43(6): 789-801.
- [14] DAVID A, HUEBNER R, JOSEEPH R, et al. Improved surface drainage of pavement[R]. Washington DC: TRB, 1998.
- [15] 蒋 甫. 排水性沥青混凝土路面渗水性能及其衰变规律[J]. *公路*, 2010, 55(6): 124-128.
JIANG Fu. Permeability and decay law of porous asphalt concrete pavement[J]. *Highway*, 2010, 55(6): 124-128.
- [16] 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. Analysis of asphalt pavement anti-resistance property and OGFC design[D]. Nanjing: South-east University, 2005.
- [17] 肖 鑫, 张肖宁. 排水沥青路面排水能力分析 & 目标空隙率确定[J]. *中外公路*, 2016(1): 49-53.
XIAO Xin, ZHANG Xiao-ning. Analysis of drainage capacity of porous asphalt pavement and determination of target air voids content[J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2016(1): 49-53.
- [18] 李 辉. 开级配沥青磨耗层(OGFC)排水性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
LI Hui. The research on drainage performance open-grad friction course (OGFC) [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [19] 陈泽孔. 多车道排水沥青路面排水性能实验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
CHEN Ze-kong. Experimental research on drainage per-
- formance of multi-lane drainage asphalt pavement[D]. Chongqing, Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [20] 马 涛, 张斯琦, 陈泳陶. 基于离散元法的多孔沥青混合料空隙衰变研究[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(5): 727-732.
MA Tao, ZHANG Si-qi, CHEN Yong-tao. Research on void reduction of porous asphalt mixture based on discrete element method[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(5): 727-732.
- [21] 周 犇, 黄晓明. 多孔沥青路面空隙衰变离散元模拟[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(7): 10-16.
ZHOU Wei, HUANG Xiao-ming. Simulation of void reduction in porous asphalt mixture based on discrete element method[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(7): 10-16.
- [22] 陈 俊, 孔 燕, 黄晓明, 等. 车辙对大空隙沥青路面横向排水影响的室内模拟测试[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2016, 46(3): 584-588.
CHEN Jun, KONG Yan, HUANG Xiao-ming, et al. Laboratory evaluation of the effect of longitudinal rutting on transversal permeability in porous asphalt pavement[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2016, 46(3): 584-588.
- [23] 杨 军, 曹东伟. 沿海高速公路(南通段)排水性沥青路面试验段 5 年跟踪观测报告[R]. 南京: 东南大学, 交通部公路科学研究所, 2010.
YANG Jun, CAO Dong-wei. Five-year follow-up observation report on porous asphalt pavement trail section of Coastal Expressway (Nantong Section) [R]. Nanjing: Southeast University, Research Institute of Highway Ministry of Transport, 2010.

(上接第 106 页)

- [17] LI J, HAN M, MUHAMMAD Y, et al. Comparative analysis, road performance and mechanism of modification of polystyrene graphene nanoplatelets (PS-GNPS) and octadecyl amine graphene nanoplatelets (ODA-GNPS) modified SBS incorporated asphalt binders[J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 193: 501-517.
- [18] LI J, HAN M, MUHAMMAD Y, et al. Preparation and properties of SBS-G-GOS-modified asphalt based on a thiol-ene click reaction in a bituminous environment[J]. *Polymers*, 2018, 10(11): 1264.
- [19] WU Y, DONG J, YUAN R, et al. Investigate on mechanical and tribological properties of solution styrene butadiene and butadiene rubber composites[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018, 29(10): 2674-2682.
- [20] 张肖宁, 孟勇军, 邹桂莲. 基于重复蠕变的改性沥青高温指标[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(2): 23-28.
ZHANG Xiao-ning, MENG Yong-jun, ZOU Gui-lian. High-temperature index of modified asphalt based on repeated creep[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2008, 36(2): 23-28.
- [21] 李宁利, 赵新坡, 孙吉书, 等. 橡胶沥青老化机理研究[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(7): 18-22, 27.
LI Ning-li, ZHAO Xin-po, SUN Ji-shu, et al. Study on aging mechanism of rubber-modified asphalt[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(7): 18-22, 27.