

季 节,王 哲,郝记秀,等.煤直接液化残渣改性沥青路面结构车辙预估[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(1):21-29.

Ji Jie, WANG Zhe, HAO Ji-xiu, et al. Rutting resistance of direct coal liquefaction residue modified asphalt pavement structure[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2021, 41(1): 21-29.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.01.003

煤直接液化残渣改性沥青路面结构车辙预估

季 节^{1,2},王 哲¹,郝记秀³,徐新强¹

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院,北京 100044; 2. 北京未来城市设计高精尖创新中心,北京 100044;
3. 中交投资有限公司,北京 100029)

摘 要:为研究煤直接液化残渣(DCLR)改性沥青路面的抗车辙性能,基于京新(北京—乌鲁木齐)高速公路的交通环境调查数据,以车辙深度和动稳定度为指标,采用 ABAQUS 模拟和沥青路面结构分析软件(APAD)计算 2 种方法,分别对作为中面层的 4 种沥青混合料(DCLR 改性沥青混合料、复合 DCLR 改性沥青混合料、SK-90 沥青混合料和 SBS 改性沥青混合料)在同一路面结构(4 cm AC-13 上面层、6 cm AC-20 中面层、8 cm AC-25 下面层、40 cm 水泥稳定碎石基层和 20 cm 石灰土底基层)和不同使用年限(1、2、5、10、15 年)下进行车辙预估,并通过室内车辙试验和统计学检验方法进行性能验证和模拟结果评价。结果表明:理论预测值与实际测试结果基本一致,在显著性水平取 0.05 时,2 种车辙深度模拟计算方法不存在系统误差,即车辙预估具有一致性;4 种沥青路面结构的车辙深度均随使用年限的增加呈线性增长,判定系数 R^2 均在 0.9 以上,其中复合 DCLR 改性沥青路面车辙增长速率最慢,DCLR 改性沥青路面次之,第 3 为 SBS 改性沥青路面,最差为 SK-90 沥青路面;在设计年限 15 年内,与常规的 SK-90 和 SBS 改性沥青路面相比,DCLR 和复合 DCLR 改性沥青路面分别减少了 40%~60%和 30%~50%的车辙,抗变形能力分别提高了 1.7~2.4 倍和 1.4~2.0 倍;复合 DCLR 改性沥青路面抗车辙性能最为优异,DCLR 改性沥青路面强于 SBS 改性沥青路面,SK-90 沥青路面抗车辙性能最差。

关键词:道路工程;DCLR 改性沥青;复合 DCLR 改性沥青;中面层;抗车辙性能

中图分类号:U411

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2021)01-0021-09

Rutting resistance of direct coal liquefaction residue modified asphalt pavement structure

Ji Jie^{1,2}, WANG Zhe¹, HAO Ji-xiu³, XU Xin-qiang¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China;
3. CCCC Investment Company Limited, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to study the anti-rutting performance of the direct coal liquefaction residue (DCLR) modified asphalt pavement, based on the traffic environment survey data of Beixin

收稿日期:2020-09-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51778038,52078025);北京市自然基金委-北京市教委联合项目(KZ201910016017);

长江学者和创新团队发展计划项目(IRT-17R06);市属高校基本科研业务费项目(X18259)

作者简介:季 节(1972-),女,河南信阳人,教授,工学博士,E-mail:jijie@bucea.edu.cn

(Beijing-Urumqi) Expressway, rutting depth and dynamic stability were used as indicators, and ABAQUS simulation and APAD calculation were used to analyze the four asphalt mixtures (DCLR modified asphalt mixture, composite DCLR modified asphalt mixture, SK-90 asphalt mixture and SBS modified asphalt mixture) in the same pavement structure (4 cm AC-13 upper layer, 6 cm AC-20 middle layer, 8 cm AC-25 lower layer, 40 cm cement stabilized crushed stone base layer and 20 cm lime soil base layer) and different service life (1 year, 2 years, 5 years, 10 years, 15 years) under the rutting prediction, and through indoor rutting test and statistical inspection methods for performance verification and evaluation of simulation results. The results show that the theoretical prediction value is basically consistent with the actual test results. When the significance level is set to 0.05, there is no systematic error in the two rutting depth simulation calculation methods, that is, the rutting prediction is consistent. The rutting depths of the four asphalt pavement structures all increase linearly with the in service life increase, and the correlation coefficients are all above 0.9. Among them, the rutting growth rate of composite DCLR modified asphalt pavement is the slowest, followed by DCLR modified asphalt pavement, and the third is SBS modified asphalt pavement, the worst is SK-90 asphalt pavement. Within 15 years of design life, compared with conventional SK-90 asphalt pavements and SBS modified asphalt pavements, DCLR and composite DCLR modified asphalt pavements have reduced rutting by 40% to 60% and 30% to 50%, respectively, and their deformation resistance has been increased to 1.7 to 2.4 times and 1.4 to 2 times. That is, composite DCLR modified asphalt pavement has the best rutting resistance, DCLR modified asphalt pavement is stronger than SBS modified asphalt pavement, and SK-90 asphalt pavement has the worst rutting resistance. 6 tabs, 8 figs, 29 refs.

Key words: road engineering; DCLR modified asphalt; composite DCLR modified asphalt; middle course; rutting resistance

0 引言

煤炭是中国的重要能源之一,中国远景煤炭量近 6 万亿吨。在煤炭液化提纯过程中生成相对清洁的能源同时,也会产生约占原煤料 30% 的副产品——煤直接液化残渣(direct coal liquefaction residue, DCLR)。DCLR 是一种高碳、高热量、高芳烃的复杂混合物,含有大量沥青烯、重质油、前沥青烯等有用成分,目前燃烧、焦化是 DCLR 的主要处理方式之一,由此带来了一定的负面社会和生态效应。经研究发现 DCLR 是一种宝贵资源,在开发成沥青改性剂方面具有很大潜力^[1-3]。

截止目前,国外没有关于 DCLR 改性沥青及其混合料性能的研究文献,中国学者对 DCLR 改性沥青及其混合料性能的相关研究也刚刚起步。目前中国研究了 DCLR 结构、组分,指出 DCLR 作为沥青改性剂的可行性。王寨霞等利用不同质量分数 DCLR 代替湖沥青(Trinidad lake asphalt, TLA),使改性沥青获得了 40~55 级别的针入度^[4]。罗蓉等采用动态剪切

流变仪对 DCLR 改性前后的沥青进行试验研究,发现改性后其温度敏感性降低,抵抗疲劳开裂、抗变形能力和变形恢复能力显著提高^[5]。石越峰等利用 DCLR 中的四氢呋喃可溶物(THFS)对沥青进行改性,揭示了其对沥青改性的机理,并建议 DCLR 掺量不宜超过 12%^[6-7]。季节等发现 DCLR 可以提高沥青的高温性能但对低温性能有一定损伤,当加入适量增容剂时可以增强 DCLR 改性沥青的低温抗裂性能,且经过二次复合改性后发现掺量(质量分数,下同)为 3% 的马来酸二辛脂(DOM)提升 DCLR 改性沥青的低温性能较明显^[8-10];并发现 DCLR 的加入可以提高沥青与石灰岩之间的黏附性和混合料的水稳定性,且具有较好的抵抗高温和重载的能力,能够显著降低路面车辙深度^[11-14]。

车辙是沥青路面早期损害的重要形式之一,这不仅和行车荷载有关,与路面结构也密切相关^[15-17]。Hu 等基于圆形均匀荷载下应力-应变模型,利用三维有限元对 2 种 AC 类路面结构进行永久变形量计算,发现中面层和上面层对路面结构垂

直永久变形贡献最大,中面层对路面结构横向变形影响最显著^[18]。Dong 等使用 3 种路面结构和 7 种混合料评估不同结构组合下抗变形能力,结果表明中面层和下面层的材料组合在抵抗变形能力上大于上面层和中面层的组合^[19]。Li 等通过试验对比 3 种路面结构,发现将掺量为 5%~8% 的岩沥青改性沥青混凝土应用在中面层时,其车辙深度减少了 44%^[20]。彭妙娟等对纯 AC 类、AC+SMA 类、AC+SMA+大粒径排水碎石(LSPM)类路面结构进行车辙累积规律研究,发现沥青路面中、上面层的永久变形占比高达 90%,其中中面层是车辙的主要产生区^[21-22]。张兰峰等通过研究路面结构在不同车速下的竖向变形,建立 SMA-13、AC-20、沥青稳定碎石(ATB-30)等多种沥青路面力学模型发现,蠕变和压应变主要产生于中面层的 4~10 cm 处,中面层材料蠕变参数的温度敏感性越小越有利于提高抗车辙能力^[23]。周庆华等发现路面结构的中、下面层选用高模量沥青混合料,可明显增强路面的抗车辙和疲劳性能,高温条件下中面层模量增大会使路面结构应变水平降低,抗车辙性能增强^[24-25]。许鹰等通过室内车辙试验、交通-荷载-温度耦合下车辙预估模型发现,将 DCLR 作为抗车辙剂应用到沥青路面中面层可显著提高混合料在 40℃~60℃ 下的抗车辙能力^[26]。

综上,目前学者们多是针对不同路面结构模型,辅以不同结构层位和材料的交叉组合以及路面结构所处不同环境参数等手段,来研究各层位对车辙的贡献量及其整体抗车辙效果,很少有单独研究路面结构的主要车辙产生区——中面层在不同材料参数下对路面整体结构抗车辙能力的影响。DCLR 改性沥青混合料具备优异的高温和水稳定性能^[27],可将其作为抗车辙材料应用到中面层。

因此,为充分发挥 DCLR 改性沥青混合料的高温抗变形能力,并研究其作为中面层对路面整体结构抗车辙能力的影响,本文分别采用 DCLR 改性沥青混和料和复合 DCLR 改性沥青混合料来替代常用的 SK-90 沥青和 SBS 改性沥青混合料作为中面层材料,采用 ABAQUS 模拟和沥青路面结构分析软件(APAD)计算 2 种方法,分别计算同一路面结构采用 4 种不同材料作为中面层时,不同使用年限下的车辙深度。同时,采用室内试验加以测试和验证,为 DCLR 改性沥青混和料和复合 DCLR 改性沥青混合料的推广应用提供理论指导。

1 试验方案

1.1 路面结构的拟定

根据课题组前期研究成果^[28],路面结构选取为 4 cm AC-13 上面层,6 cm AC-20 中面层,8 cm AC-25 下面层,40 cm 水泥稳定碎石基层和 20 cm 石灰土底基层,分别采用 SK-90 沥青、SBS 改性沥青、DCLR 改性沥青和复合 DCLR 改性沥青混合料作为中面层。DCLR 改性沥青由掺量 10% 的 DCLR 单一改性,复合 DCLR 改性沥青由 10% 的 DCLR、2% 的 SBS 和 15% 的橡胶粉复合改性,改性剂掺量均为其与 SK-90 沥青的质量分数。其改性沥青的性能和制备工艺见前期研究^[12,27]。

路面结构见图 1,各层位材料及参数见表 1。

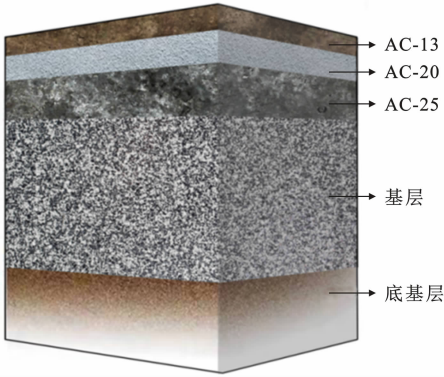


图 1 路面结构示意图
Fig. 1 Schematic of pavement structure

表 1 各层位材料参数

Tab. 1 Material parameters of each layer

层位	材料种类	10 Hz、20℃下动态 压缩模量/MPa	泊松比
上面层	SBS 改性沥青混凝土 AC-13	11 000	0.25
	SK-90 沥青混凝土 AC-20	8 081	
	SBS 改性沥青混凝土 AC-20	9 905	
中面层	DCLR 改性沥青混凝土 AC-20	10 807	
	复合 DCLR 改性沥青 混凝土 AC-20	10 407	
下面层	AH70 沥青混凝土 AC-25	10 000	0.35
基层	水泥稳定碎石	7 500	
底基层	石灰土	500	
土基		80	

1.2 有限元模型

1.2.1 模型及网格划分

前期模拟计算中发现^[29],模型水平宽度宜取荷载作用间距的 5 倍即 2.5 m,土基深度取 0.5 mm 时,其对面层蠕变变形的影响最小,土基底部 1 m 以下采

用无限元模型。本次单元类型采用二次单元。

在利用 ABAQUS 模拟数值计算分析中,考虑到模型大小、单元类型、网格尺寸等对计算结果有一定影响,为确保模拟计算的保真性,针对图 1 选定的路面结构,建立模型区域大小不同的有限元模型,假定整个模型层间完全连续。网格划分后的有限元模型见图 2。

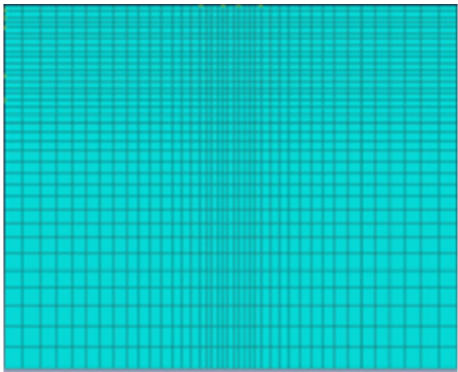


图 2 路面结构有限元模型

Fig. 2 Finite element model of pavement structure

1.2.2 荷载作用时间

有限元中,默认轮胎作用地面时接触面积为 $0.24\text{ m}\times0.15\text{ m}$ 。模拟车辙变形时,车轮荷载与作用时间的关系^[28]如下

$$t=\frac{0.36NP}{n_w p B v}$$

(1)

式中: t 为分析步总时长(s); N 为重复次数; P 为轴重(kN); n_w 为车轮数; p 为接地压力(MPa); B 为接地宽度(cm); v 为车速(km/h)。

道路在累计标准轴载次数作用下的荷载作用时间可通过式(1)计算得到,轴载作用次数越多,相当于车轮荷载作用在路面的时间越长。车辙模拟加载参数见表 2。

表 2 车辙模拟加载参数

Tab. 2 Rutting simulation loading parameters

参数	B/cm	p/MPa	n_w	P/kN	$v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	N
参数值	24	0.707	4	100	80	9 202

1.3 设计参数的确定

本文以京新(北京—乌鲁木齐)高速公路的交通环境调查数据为基准,设计车道的当量交通量为 $9\,202\text{ veh/d}$,有限元中沥青路面结构加载时间分 5 个节点,对应设计使用年限分别为 1、2、5、10、15 年。根据式(1)换算得到有限元模拟计算中 4 种沥青路面结构所对应的 5 个加载时间节点分别为 $22\,268.4$ 、 $44\,536.8$ 、 $111\,341.9$ 、 $222\,683.8$ 、 $334\,025.7\text{ s}$,为方

便计算,累积作用时间取整后分别为 2.2×10^4 、 4.5×10^4 、 1.1×10^5 、 2.2×10^5 、 $3.3\times10^5\text{ s}$ 。温度取值 $60\text{ }^\circ\text{C}$,荷载取值为 0.7 MPa 。

APAD 以《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)为依据,依次录入基本信息、交通参数、结构与材料参数、环境参数 4 个部分,见表 3~表 5。通过拟定路面结构,对沥青路面依次进行结构验算,包括沥青混合料层永久变形验算、无机结合料层疲劳开裂验算、贯入强度验算、路面低温开裂指数验算、防冻厚度验算等,进而进行路基顶面和路表验收弯沉值计算。本文着重通过沥青混合料层永久变形验算,研究不同材料下路面结构抗变形能力。

表 3 项目基本信息及交通参数

Tab. 3 Basic project informations and traffic parameters

道路等级	设计使用 年限/年	交通量平均 增长率/%	车道年平均 日交通量/ (veh·d ⁻¹)	方向 系数/%	车道 系数/%
高速公路	1、2、5、10、15	5	9 202	55	50

表 4 北京环境参数

Tab. 4 Environmental parameters of Beijing

夏季 平均 温度/ $^\circ\text{C}$	冬季 平均 温度/ $^\circ\text{C}$	年平均 气温/ $^\circ\text{C}$	温度调整系数		基准等 效温度/ $^\circ\text{C}$
			沥青混凝土、 无机结合料层 底拉应力	路基顶面竖 向压应变	
26.9	-2.7	13.1	1.23	1.09	20.1

表 5 车辆类型分布系数

Tab. 5 Vehicle type distribution coefficients

车辆类型	2 类	3 类	4 类	5 类	6 类	7 类	8 类	9 类	10 类	11 类
车辆类型 分布系数	9.9	42.3	14.8	0.0	22.7	2.0	2.3	3.2	2.5	0.2

2 研究方法

2.1 车辙试验

为对理论预估车辙进行验证,本文采用马歇尔方法进行沥青混合料设计,混合料采用 AC-20C 型,以中值级配作为试验级配。首先确定对照组(SK-90 沥青和 SBS 改性沥青混合料)最佳沥青用量为 4.3% ,其次为了使试验结果更具有可比性,DCLR 改性沥青混合料和复合 DCLR 改性沥青混合料均采用同一级配和油石比。

根据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)进行集料性能试验,其性能均满足规范要求^[27]。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),对每种沥青混合料成型 4 个标准试件并进行车辙试验,试验结果取平均值,共

16 个试件,车辙试验装置及试件见图 3。



(a) 车辙装置



(b) 车辙试件

图 3 车辙试验装置及试件

Fig. 3 Rutting test device and test piece

2.2 F 检验、t 检验

为评价 2 种模拟试验结果的一致性,本文采用 F 和 t 检验对 2 种试验结果进一步判定,其相关计算如下

$$F = \frac{S_{\max}^2}{S_{\min}^2} \quad (2)$$

$$t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sqrt{\left[\frac{S_1^2(n_1 - 1) + S_2^2(n_2 - 1)}{n_1 + n_2 - 2} \right] \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: F 、 t 分别为 F 检验和 t 检验的统计量; S_{\max}^2 、 S_{\min}^2 分别为 2 种预测结果标准差的最大和最小值; \bar{X}_1 、 \bar{X}_2 分别为 2 种预测结果的平均值; S_1^2 、 S_2^2 分别为 2 种预测结果的方差; n_1 、 n_2 分别为 2 组试验结果的个数, $n_1 = n_2 = 5$ 。

F 检验和 t 检验的目的是判断精密度是否具有显著性差异及有无系统误差,若同时通过 F 检验和 t 检验,则可以认为试验结果具有一致性。

3 结果与分析

3.1 基于有限元预测车辙深度

图 4 为 ABAQUS 模拟计算得到的在 1、2、5、10、15 年内沥青面层的车辙深度。由图 4 可知:

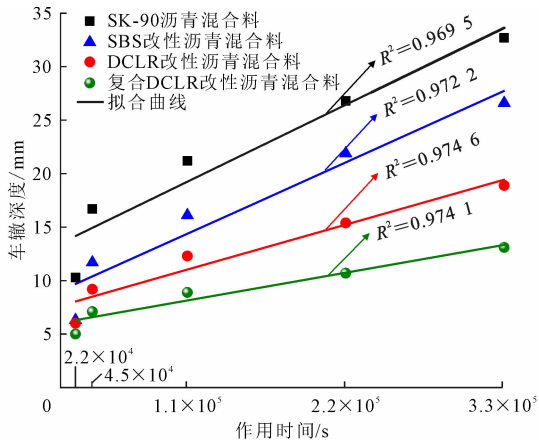


图 4 有限元模拟下 4 种沥青路面结构的车辙深度

Fig. 4 Rutting depths of 4 kinds of asphalt pavement structure under finite element simulation

(1)采用 4 种沥青混合料分别作为中面层的路面车辙深度随荷载累积作用时间呈线性增长,判定系数 R^2 均在 0.9 以上。

(2)采用 4 种沥青混合料分别作为中面层的路面车辙深度随荷载作用时间增长速率从大到小依次为 SK-90 沥青混合料、SBS 改性沥青混合料、DCLR 改性沥青混合料、复合 DCLR 改性沥青混合料。

(3)设计使用年限 15 年内,4 种沥青路面结构永久变形量平均值从大到小依次为:SK-90 沥青混合料(21.54 mm)、SBS 改性沥青混合料(16.52 mm)、DCLR 改性沥青混合料(12.36 mm)、复合 DCLR 改性沥青混合料(8.96 mm)。在第 15 年时,对比 SK-90 沥青和 SBS 改性沥青路面结构可知:DCLR 改性沥青路面可分别减少 42.20% 和 28.95% 的累积车辙深度,抗永久变形能力可分别提高 73%、41%;同时,复合 DCLR 改性沥青路面分别减少 59.94% 和 50.75% 的车辙深度,抗变形能力分别提高 150%、103%。由此可见,将 DCLR 改性沥青混和料和复合 DCLR 改性沥青混合料应用到中面层可以有效降低路面结构车辙产生。

3.2 基于 APAD 计算车辙深度

图 5 为 APAD 验算得到在 1、2、5、10、15 年内沥青面层的车辙深度。由图 5 可知:

(1)采用 4 种沥青混合料分别作为中面层的路面车辙深度随荷载累积作用时间呈线性增长,判定系数 R^2 均在 0.9 以上。

(2)采用 4 种沥青混合料分别作为中面层的路面车辙深度随荷载作用时间增长速率大小的排序情况与第 3.1 节相同,即 DCLR 改性沥青路面尤其是复合 DCLR 改性沥青路面对轴载作用次数敏感性

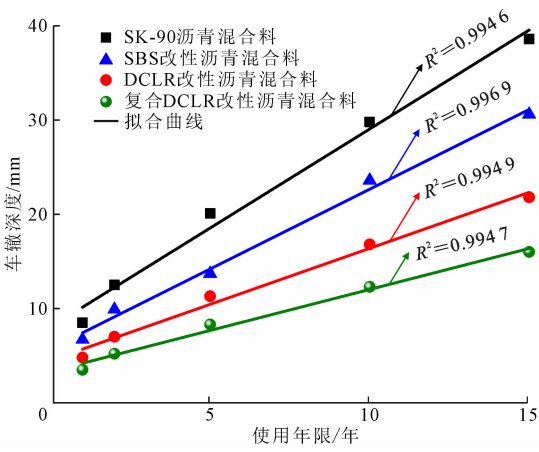


图5 APAD计算下4种沥青路面结构的车辙深度
Fig. 5 Rutting depths of 4 kinds of asphalt pavement structure calculated by APAD

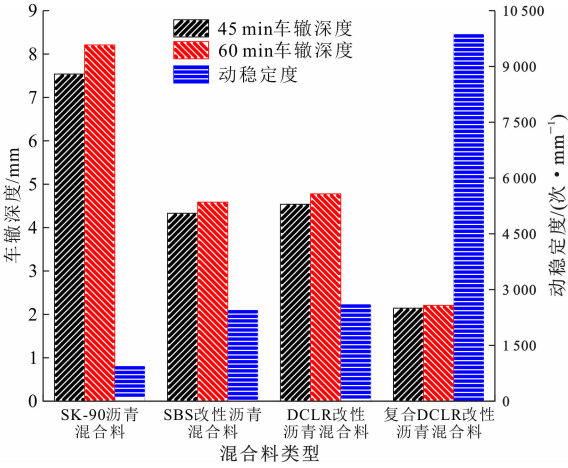


图6 4种沥青混合料的车辙深度和动稳定度
Fig. 6 Rutting depths and dynamic stabilities of 4 types of asphalt mixtures

较低,SK-90 沥青路面敏感性最高,SBS 改性沥青路面居中。

(3)15 年内 4 种沥青路面结构车辙深度平均值从大到小依次为 SK-90 沥青混合料(21.90 mm)、SBS 改性沥青混合料(16.90 mm)、DCLR 改性沥青混合料(12.34 mm)、复合 DCLR 改性沥青混合料(9.06 mm)。在第 15 年时,DCLR 改性沥青路面相比 SK-90 沥青和 SBS 改性沥青路面的车辙深度分别减少 43.52%和 28.76%,抗永久变形能力分别提高 77%、40%;同时,复合 DCLR 改性沥青路面的车辙深度分别减少 58.55%和 47.71%,抗变形能力分别提高 141%、91%。由此可见,DCLR 改性沥青路面结构具有优异的抗变形能力,4 种路面结构中,复合 DCLR 改性沥青路面结构抗车辙性能最强,DCLR 改性沥青路面强于 SBS 改性沥青路面,SK-90 沥青路面性能最差,分析结果与第 3.1 节相同。

3.3 基于车辙试验分析

以车辙深度和动稳定度为指标,4 种沥青混合料的车辙试验结果见图 6。由图 6 可知:

(1)4 种混合料中复合 DCLR 改性沥青混合料的高温抗变形能力最强,无论是车辙深度还是动稳定度,其值已远高于其他 3 种沥青混合料,SK-90 沥青混合料的抗车辙能力最差。相比 SBS 改性沥青混合料,DCLR 改性沥青混合料的车辙深度与其相当,第 45、60 min 时车辙深度差值仅有 0.2 mm,但动稳定度值却大于 SBS 改性沥青混合料,说明在标准条件下,DCLR 改性沥青混合料的抗车辙性能可与 SBS 改性沥青混合料持平甚至超越其抗变形能力。

(2)第 45、60 min 时,相比 SK-90 沥青混合料,DCLR 改性沥青混合料和复合 DCLR 改性沥青混

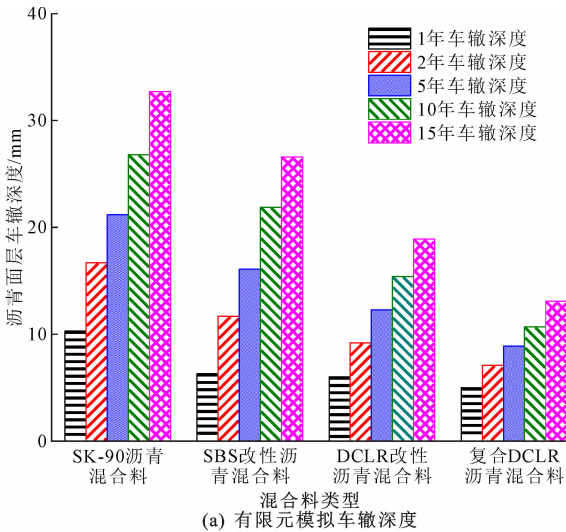
合料的车辙深度分别减少39.8%、41.8%和71.5%、73.1%,动稳定度分别提高了 2.76 倍和 10.47 倍。相比 SBS 改性沥青混合料,复合 DCLR 改性沥青混合料在第 45、60 min 时可减少 50.4%和 51.8%的车辙,动稳定度提高 4.03 倍。可见,理论预测值与实际测试结果基本上保持一致,相比于常见的 SK-90和 SBS 改性沥青混合料,DCLR 改性沥青混合料和复合 DCLR 改性沥青混合料的抗车辙性能表现优异。由此也说明,将 DCLR 改性沥青应用到沥青路面结构中面层时,相同条件下可以使路面结构获得更强的抗变形能力。

3.4 两种模拟结果对比分析

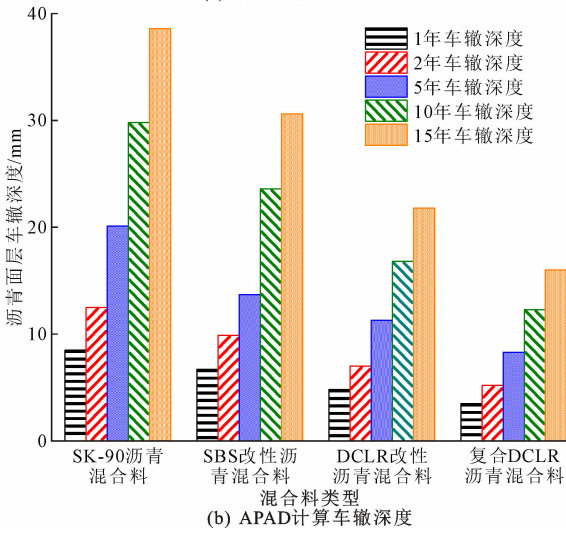
图 7 为不同使用年限内 4 种路面结构采用有限元模拟和 APAD 计算的车辙深度对比。图 8 为第 15 年时 2 种方法的计算偏差情况。由图 7、图 8 可知:

(1)4 种沥青路面车辙预测值在 ABAQUS 模拟和 APAD 计算时,随作用时间增长趋势基本一致,在第 1、2、5、10、15 年这 5 个节点下,车辙深度模拟偏差平均值从大到小依次为 SK-90 沥青路面(3.2 mm)、SBS 改性沥青路面(2.058 mm)、DCLR 改性沥青路面(1.744 mm)、复合 DCLR 改性沥青路面(1.702 mm);2 种方法的模拟结果间接验证了第 3.1 节和第 3.2 节的结论,即抗变形能力越强的路面越不易产生车辙,模拟误差也就越小,抗变形能力越差的路面越易产生车辙,模拟误差也就越大。

(2)15 年内累积车辙深度偏差值从大到小依次为 SK-90 沥青路面(5.9 mm)、SBS 改性沥青路面(4 mm)、DCLR 改性沥青路面(2.9 mm)、复合 DCLR 改性沥青路面(2.9 mm);SK-90 和 SBS 改性沥青路面的车辙深度偏差比分别为 13.1%和 15.3%,



(a) 有限元模拟车辙深度



(b) APAD 计算车辙深度

图 7 ABAQUS 模拟与 APAD 计算车辙深度对比

Fig. 7 Comparisons of rutting depth between ABAQUS simulation and APAD calculation

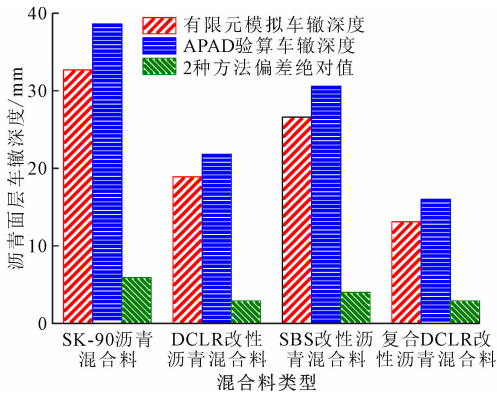


图 8 第 15 年车辙深度偏差值

Fig. 8 Rutting depth deviation values at 15th year

DCLR 和复合 DCLR 改性沥青路面偏差比分别为 13.3% 和 18.1%，偏差值较小，可以认为有限元模拟在现行规范下具有较强的适用性，为进一步判定 2 种模拟方法的可靠性，下文采用 F 检验、 t 检验进一

步对数据进行一致性分析。

将有限元模拟计为 A 组，APAD 计算作为 B 组，显著性水平 α 取 0.05，根据图 7 和式(2)、式(3)计算得到 2 组试验数据的检验结果，见表 6。

表 6 F 检验和 t 检验的结果

Tab. 6 Results of F -test and t -test

类型		SK-90 沥青混合料	SBS 改性沥青混合料	DCLR 改性沥青混合料	复合 DCLR 改性沥青混合料
平均值	A 组	21.54	16.52	12.36	8.96
	B 组	21.90	16.90	12.34	9.06
标准偏差	A 组	8.69	8.03	5.05	3.13
	B 组	12.37	9.95	7.00	5.12
F 值		2.03	1.53	1.92	2.68
t 值		0.05	0.04	0.08	0.17

由表 6 可知：

(1)在显著性水平取 0.05 时，根据 F 分布可得， $F_{\frac{\alpha}{2}}(n_1-1, n_2-1) = F_{0.025}(4, 4) = 9.60$ ，采用 4 种沥青混合料分别作为中面层的路面，在 1、2、5、10、15 年下统计量 F 值均小于 9.60，说明有限元模拟和 APAD 计算 2 种方法在精度上并没有显著性差异。

(2)在显著性水平取 0.05 时，根据 t 分布可知， $t_{\frac{\alpha}{2}}(n_1+n_2-2) = t_{0.025}(8) = 2.31$ ，即采用 4 种沥青混合料分别作为中面层的路面的 t 值在各个年限内均小于 2.31，由此可以认为，有限元模拟和 APAD 计算 2 种方法之间不存在系统误差。

综上，2 组预测数据之间的精度没有明显差异，同时也不存在系统误差，由此可以认为，有限元模拟车辙深度与 APAD 计算车辙深度具有一致性。

4 结 语

(1)采用 4 种沥青混合料分别作为中面层的路面，预测车辙深度随时间变化均呈线性增长，复合 DCLR 改性沥青路面车辙增长速率最慢，DCLR 改性沥青路面次之，第 3 为 SBS 改性沥青路面，最差为 SK-90 沥青路面。

(2)在设计年限 15 年内，DCLR 和复合 DCLR 改性沥青路面相比 SK-90 沥青路面减少了 40%~60% 的车辙，抗变形能力提高了 1.7~2.4 倍；相比 SBS 改性沥青路面减少了 30%~50% 的车辙，抗变形能力提高了 1.4~2.0 倍。

(3)复合 DCLR 改性沥青路面抗车辙性能最优，DCLR 改性沥青路面强于 SBS 改性沥青路面，SK-90 沥青路面抗车辙性能最差。

(4)理论预测值与实际试验结果基本上相同，采

用 4 种沥青混合料分别作为中面层的路面,利用有限元模拟与 APAD 计算 2 种方法进行车辙深度的预估具有一致性。

(5)本文预估了 DCLR 改性沥青混合料作为中面层时对路面整体结构抗车辙能力的影响,旨在为其推广应用提供理论支撑。目前已对 DCLR 改性沥青混合料路用性能进行了研究,发现高温和水稳定性性能优越,低温性能略差,后续还需对其疲劳性能及长期耐久性性能作进一步测试和评价。

参考文献:

References:

- [1] 谷小会. 煤直接液化残渣的性质及利用现状[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(3): 63-66.
GU Xiao-hui. Properties and utilization of coal direct liquefaction residue[J]. Clean Coal Technology, 2012, 18(3): 63-66.
- [2] 金倬伊. 煤直接液化残渣改性沥青的可行性研究[J]. 广州化工, 2014, 42(3): 23-24, 54.
JIN Zhuo-yi. Feasibility study of direct coal liquefaction residue modified asphalt[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(3): 23-24, 54.
- [3] 朱伟平. 煤直接液化残渣改性沥青的研究[J]. 神华科技, 2009, 7(6): 68-71, 85.
ZHU Wei-ping. Research on direct coal liquefaction residue modified asphalt[J]. Shenhua Technology, 2009, 7(6): 68-71, 85.
- [4] 王寨霞, 杨建丽, 刘振宇. 煤直接液化残渣对道路沥青改性作用的初步评价[J]. 燃料化学学报, 2007, 35(1): 109-112.
WANG Zhai-xia, YANG Jian-li, LIU Zhen-yu. Preliminary study on direct coal liquefaction residue as paving asphalt modifier[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2007, 35(1): 109-112.
- [5] 罗蓉, 许苑, 刘涵奇, 等. DCLR 改性沥青的流变力学性质[J]. 中国公路学报, 2018, 31(6): 165-171.
LUO Rong, XU Yuan, LIU Han-qi, et al. Rheological mechanical properties of DCLR modified asphalt binders[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(6): 165-171.
- [6] 石越峰. 煤直接液化残渣改性沥青的制备及其性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
SHI Yue-feng. Research on preparation and performance of direct coal liquefaction residue modified asphalt[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.
- [7] 武昊. 煤直接液化残渣与石油沥青相容性研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
- [8] 季节, 石越峰, 索智, 等. 煤直接液化残渣共混改性沥青的性能和微观结构[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(7): 1049-1053.
JI Jie, SHI Yue-feng, SUO Zhi, et al. Properties and micro-structure of direct coal liquefaction residue blending modified asphalt[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(7): 1049-1053.
- [9] 季节, 李辉, 王佳妮, 等. 增容剂对煤直接液化残渣改性沥青低温性能的影响[J]. 燃料化学学报, 2019, 47(8): 925-933.
JI Jie, LI Hui, WANG Jia-ni, et al. Effect of compatibilizer on low-temperature performances of modified asphalts from direct coal liquefaction residue[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2019, 47(8): 925-933.
- [10] 季节, 苑志凯, 魏建明, 等. 煤直接液化残渣改性沥青低温性能的改进[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(4): 166-173.
JI Jie, YUAN Zhi-kai, WEI Jian-ming, et al. Improvements of low temperature properties of direct coal liquefaction residue modified asphalt[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(4): 166-173.
- [11] 季节, 马榕达, 郑文华, 等. 煤直接液化残渣对沥青-集料黏附性的影响[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 27-33.
JI Jie, MA Rong-da, ZHENG Wen-hua, et al. Effect of direct coal liquefaction residue on adhesion characteristic between and aggregate[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(9): 27-33.
- [12] 季节, 陈磊, 索智, 等. 高温和重载对 DCLR 改性沥青混合料抗变形能力的影响[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(1): 1-8.
JI Jie, CHEN Lei, SUO Zhi, et al. Effect of high temperature and heavy load on deformation resistance of DCLR modified asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(1): 1-8.
- [13] JI J, WANG Z, YAO H, et al. A numerical study on rutting behaviour of direct coal liquefaction residue modified asphalt mixture[J/OL]. Road Materials and Pavement Design, 2009: 1-15 [2019-11-18]. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1690029>.
- [14] JI J, WANG Z, ZHANG R, et al. Rutting resistance of direct coal liquefaction residue (DCLR) modified asphalt mixture under variable loads over a wide temperature range[J]. Construction and Building Materi-

- als, 2020, 257, 119489.
- [15] 路贺伟, 张宏超, 孙立军. 水-荷耦合作用下的沥青混合料永久变形研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 788-792.
- LU He-wei, ZHANG Hong-chao, SUN Li-jun. Permanent deformation analysis of asphalt mixture under moisture-loading coupled action[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 788-792.
- [16] 栗培龙, 李洪华, 张争奇, 等. 沥青混合料车辙进程影响因素及预估模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(7): 57-61, 93.
- LI Pei-long, LI Hong-hua, ZAHNG Zheng-qi, et al. Research on influencing factors and prediction model of rutting process for asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(7): 57-61, 93.
- [17] 林 骋, 王金昌, 胡 蓉. 考虑水稳碎石性能劣化的沥青路面变形[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(12): 2238-2245.
- LIN Cheng, WANG Jin-chang, HU Rong. Deformation of asphalt pavement considering performance degradation of cement-stabilized macadam[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2014, 48(12): 2238-2245.
- [18] HU X, ZHONG S, WALUBITA L F. Three-dimensional modelling of multilayered asphalt concrete pavement structures; Strain responses and permanent deformation[J]. Road Materials and Pavement Design, 2015: 727-740[2015-03-08]. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2015.1028968>
- [19] DONG Z J, GONG X B, XIAO G Q, et al. Rutting resistance evaluation of structural combinations of asphalt pavement subjected to heavy duty[J]. Advanced Engineering Forum, 2012, 1946(10): 316-321.
- [20] LI L, HE Z, LIU W, et al. Rutting and fatigue performance evaluation of Qingchuan Rock modified asphalt mixture[J]. The Open Construction and Building Technology Journal, 2016, 10: 511-523.
- [21] 彭妙娟, 吴 超. 层间摩阻力下中面层及动荷载对沥青路面车辙影响的有限元分析[J]. 公路, 2016, 61(3): 1-6.
- PENG Miao-juan, WU Chao. Finite element analysis for the rutting of asphalt pavement under middle course and dynamic load base on interlaminar friction stress[J]. Highway, 2016, 61(3): 1-6.
- [22] 顾兴宇, 袁青泉, 倪富健. 基于实测荷载和温度梯度的沥青路面车辙发展影响因素分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 30-36.
- GU Xing-yu, YUAN Qing-quan, NI Fu-jian. Analysis of factors on asphalt pavement rut development based on measured load and temperature gradient[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6): 30-36.
- [23] 张兰峰. 连续变温沥青路面车辙变形数值模拟[J]. 公路交通科技, 2018, 35(2): 15-24.
- ZAHNG Lan-feng. Numerical simulation of rutting deformation of asphalt pavement at continuous variable temperature[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(2): 15-24.
- [24] 周庆华, 沙爱民. 高模量沥青混凝土路面永久变形[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(5): 13-16, 22.
- ZHOU Qing-hua, SHA Ai-min. Permanent deformation of high modulus asphalt concrete pavement[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2013, 33(5): 13-16, 22.
- [25] 王朝辉, 舒 诚, 韩 冰, 等. 高模量沥青混凝土研究进展[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 1-15.
- WANG Chao hui, SHU Cheng, HAN Bing, et al. Research progress of high modulus asphalt concrete[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2020, 40(1): 1-15.
- [26] 许 鹰, 季 节, 赵永尚, 等. 煤直接液化残渣改性沥青胶浆高温性能研究[J]. 中外公路, 2015, 35(5): 235-239.
- XU Ying, JI Jie, ZHAO Yong-shang, et al. Research on high temperature performance of direct coal liquefaction residue modified asphalt mortar[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(5): 235-239.
- [27] 季 节, 王 迪, 石越峰, 等. 煤直接液化残渣改性沥青及其混合料性能评价[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(4): 67-71.
- JI Jie, WANG Di, SHI Yue-feng, et al. Study on the performances of the DCLR modified asphalt mixtures[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2016, 37(4): 67-71.
- [28] 陈 磊. 煤直接液化残渣改性沥青混合料抗车辙性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
- CHEN Lei. Research on anti-rutting performance of direct coal liquefaction residue modified asphalt mixture[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [29] 李 辉. 沥青路面车辙形成规律与温度场关系研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
- LI Hui. Research on the relationship between rutting and temperature field of asphalt pavements[D]. Nanjing: Southeast University, 2007.