

文章编号:1672-9331(2020)02-0039-07

隧道半刚性基层沥青路面沥青层疲劳开裂分析

王伟力¹, 唐中华¹, 孔令云², 邹胜楠², 黄 方³

(1. 浙江临金高速公路有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074;
3. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 为了研究隧道半刚性基层沥青路面沥青层疲劳开裂的影响因素, 建立隧道半刚性基层沥青路面有限元模型, 对隧道半刚性基层沥青路面沥青层疲劳开裂进行研究。研究表明: 对于隧道半刚性基层沥青路面, 由于沥青层内最大拉应变显著大于沥青层底拉应变, 导致沥青层内的疲劳寿命远小于沥青层底的疲劳寿命; 沥青层层底疲劳开裂寿命影响因素敏感性排序为: 基层模量 > 面层模量 \approx 面层厚度 > 基层厚度; 隧道半刚性基层沥青路面基层模量越大、基层厚度越厚、沥青面层模量越小, 对沥青面层疲劳开裂寿命越有利。

关键词: 正交试验; 疲劳开裂; 有限元; 应变响应; 疲劳寿命; 极差

中图分类号: U414

文献标识码: A

Analysis of fatigue cracking of asphalt layer of tunnel semi-rigid base asphalt pavement

WANG Wei-li¹, TANG Zhong-hua¹, KONG Ling-yun²,
ZOU Sheng-nan², HUANG Fang³

(1. Zhejiang Linjin Expressway Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;
2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
3. Central and Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to study influencing factors of fatigue cracking of the asphalt layer of tunnel semi-rigid base asphalt pavement, the fatigue cracking of the asphalt layer was researched by establishing a finite element model of tunnel semi-rigid base asphalt pavement. The results show that maximum tensile strain of the asphalt pavement inside is significantly bigger than that of the asphalt pavement bottom, which causes that fatigue life of the asphalt pavement inside is far shorter than that of the asphalt pavement bottom. The sensitivity of influencing factors of fatigue cracking life of the asphalt layer bottom is ranked as follows: the modulus of the base layer > the modulus of the surface layer \approx the thickness of the surface layer > the thickness of the base layer. The larger the base layer modulus is, the thicker the base layer thickness is and the smaller the asphalt surface layer modulus is, the more favorable for the fatigue cracking life of the asphalt layer it is.

Key words: orthogonal test; fatigue cracking; finite element; strain response; fatigue life; extreme difference

收稿日期: 2019-12-27

基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0367)

通讯作者: 孔令云(1976—), 女, 江苏南通人, 重庆交通大学教授, 主要从事沥青路面方面的研究。

E-mail: 43112443@qq.com

在已建成的公路隧道中,路面结构形式主要有水泥路面、复合式路面及少量的半刚性基层沥青路面三种类型。意大利勃朗峰隧道、奥地利托恩隧道和 Arberg 隧道,路面均为沥青混凝土路面^[1];克罗地亚隧道为半刚性基层沥青路面,其沥青层厚度为 20~24 cm,上面层为 SMA,基层为 20 cm 的水泥稳定碎石。对于沥青路面破坏原因的研究,目前应用最广的是 Paris 公式,可以揭示沥青路面发生疲劳断裂的过程、计算裂缝扩展到最终断裂的累计寿命^[2]。Doh^[3]利用数值化的疲劳寿命预估模型对比分析了不同沥青层抑制反射裂缝的能力;王雪莲等^[4]通过离散元软件对半刚性基层路面抗反射裂缝进行了研究,认为设置 LSPM 有利于防止反射裂缝的扩展;夏蕊芳^[5]建立了预设贯通裂缝的半刚性基层路面有限元模型,认为偏荷载是导致反射裂缝的主要原因,温度应力可抵消部分应力强度因子;栾利强^[6]依据疲劳断裂力学理论,对半刚性基层沥青路面疲劳裂缝的扩展与寿命预估进行了深入分析,得到疲劳寿命预估方程;谢军等^[7]基于 CT 图像研究沥青混合料疲劳破坏,发现试件剪切破坏多发生在初始孔隙分布较密集处,孔隙率越大处破坏越严重,沥青混合料剪切疲劳破坏前后过程是分形的;田海波等^[8]采用足尺试验和有限元数值模拟手段对半刚性基层沥青路面早期开裂和疲劳开裂影响因素进行了研究,得出早期开裂的主要原因是底基层开裂导致的反射裂缝,而疲劳开裂的主要影响因素为底基层的强度特性;王宏畅^[9]应用有限元数值模拟研究了半刚性基层沥青路面反射裂缝,并分析了影响裂缝扩展的材料、结构参数;周志刚等^[10]采用有限元法,对重载交通条件下组合式基层沥青路面结构进行了模拟计算,结果表明理想的组合式基层沥青路面结构应具有较厚的、模量适中的基层材料,并且具有较厚的、模量适中的稳定土底基层和强度较高的土基。

本研究依托“浙江建金高速公路隧道路面结构优化研究”项目,通过建立隧道半刚性基层沥青路面有限元模型,选取沥青层材料模量、沥青层结构厚度、基层材料模量、基层结构厚度共 4 个因素设计正交试验,对隧道半刚性基层沥青路面沥青层疲劳开裂影响因素进行研究,研究结果对隧道

路面结构选择和设计有重要意义。

1 三维有限元模型

1.1 模型的建立

采用有限元分析软件 ABAQUS 中 Standard 模块建立三维路面模型。路面模型尺寸为 $x \times y \times z = 3.5 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, x 、 y 、 z 轴分别代表道路宽度方向、道路竖向(深度)及行车方向。边界条件设为:模型底面固定 U_1 、 U_2 、 U_3 (即 $U_1 = U_2 = U_3 = 0$),模型纵向的左侧与右侧固定 U_1 (即 $U_1 = 0$),模型纵向的前后两面固定 U_3 (即 $U_3 = 0$)。各层结构网格划分均采用 C3D8R 单元,即八节点三维实体减缩积分单元。全局网格种子设为 0.2 m,面层、基层按照 0.002 5 m 设置种子,荷载作用处种子数量设为 4,模型横向和纵向采用渐变网格。

隧道半刚性基层沥青路面的计算模型:路面宽度 $W = 3.5 \text{ m}$,对半刚性基层进行贯通裂缝预设,计算该条件下路面结构的应力应变响应及疲劳寿命。相对于预设裂缝位置,加载模式采用偏载方式,路面结构荷载采用 BZZ-100 标准轴载,单轮接地压强为 0.7 MPa。按照轮胎接触面积等效原则,将车轮与地面的接地形状简化为矩形,其长为 0.213 m,宽为 0.167 m,两轮中心距为 0.106 5 m,如图 1 所示。局部网格划分情况如图 2 所示。

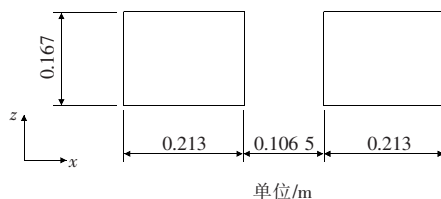


图 1 车轮与地面的接地形状

Fig. 1 The shape of the wheels contacting to the ground

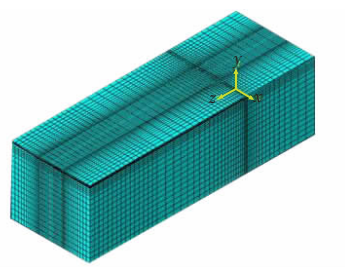


图 2 三维模型及网格划分

Fig. 2 3D model and mesh division

1.2 计算点位的选取

根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)^[11]规定的计算点位要求,竖向与横向位置如图 3 所示。

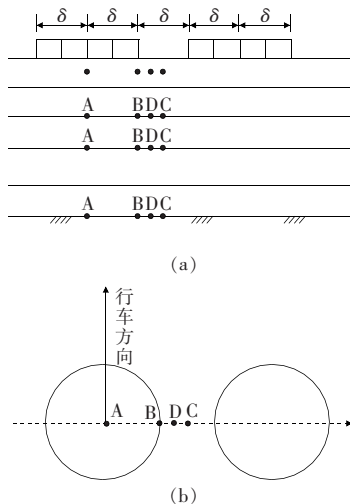


图 3 力学响应计算点位置

Fig. 3 The location of calculation points for mechanical response

1.3 正交试验设计

在路面结构力学分析中,影响力学响应的参数主要为沥青层和基层的结构参数及材料参数。因此,选取沥青层材料模量、沥青层结构厚度、基层材料模量和基层结构厚度共 4 个因素,各因素分别选取 3 个水平,按《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)规定,材料参数取动态模量。选用正交表 $L_9(3^4)$ 进行正交试验^[12],如表 1,2 所示。

本研究采用连续体系作为隧道半刚性基层路面有限元分析的基本模型。其结构层位如表 3 所示,由上到下分别为面层、基层、找平层和基岩,泊松比取值参考《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)。

表 1 材料参数因素水平

Table 1 Factor levels of the material parameters

水平	基层模量/ ($\times 10^3$ MPa)	基层厚 度/cm	沥青层模量(20 °C)/ ($\times 10^2$ MPa)	沥青层厚 度/cm
1	18	20	75	5
2	24	30	100	10
3	28	40	140	16

表 2 路面结构正交试验设计

Table 2 The design of pavement structure orthogonal test

试验号	基层模量/ ($\times 10^3$ MPa)	基层厚 度/cm	沥青层模量(20 °C)/ ($\times 10^2$ MPa)	沥青层厚 度/cm
1	18	20	100	16
2	24	20	75	5
3	28	20	140	10
4	18	30	75	10
5	24	30	140	16
6	28	30	100	5
7	18	40	140	5
8	24	40	100	10
9	28	40	75	16

表 3 路面结构

Table 3 The pavement structure

层位	结构形式	动态模量/($\times 10^2$ MPa)	泊松比
面层	改性沥青混凝土	75~140(20 °C)	0.25
基层	水泥稳定类	180~280	0.25
找平层	C20 素混凝土	1 400	0.20
基岩	基岩	2 400	0.20

2 应变响应

2.1 沿行车方向应变响应

根据所建立的三维有限元模型,按照表 2 设计的正交试验表进行模拟试验,根据图 3 所示的 A、B、C、D 四个计算点位对路面结构计算结果进行分析。沥青层层底沿行车方向拉应变云图见图 4,沥青层层底沿行车方向拉应变见图 5(图中 16+20 表示沥青层厚度为 16 cm、基层厚度为 20 cm 的路面结构,其他以此类推)。

由图 4,5 可以看出,对预设裂缝的隧道半刚性基层沥青路面,沥青层层底拉应变最大值的横向位置为 A 点,即轮胎正下方中心点。因此,后续仅分析最不利位置 A 点的力学响应、疲劳寿命等。

2.2 垂直荷载作用下沥青层应变响应

在确定了 A 点为最大拉应变的横向位置后,对沥青层拉应变最大值的竖向位置进行分析。路面的拉应变云图如图 6 所示。

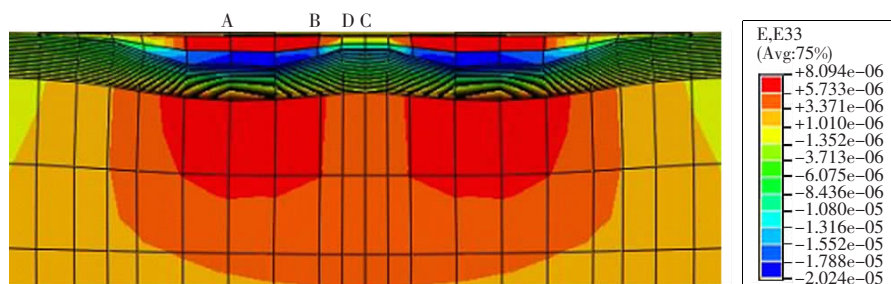


图4 沥青层底拉应变最大值的横向位置

Fig. 4 Lateral position of maximum tensile strain of the asphalt layer bottom

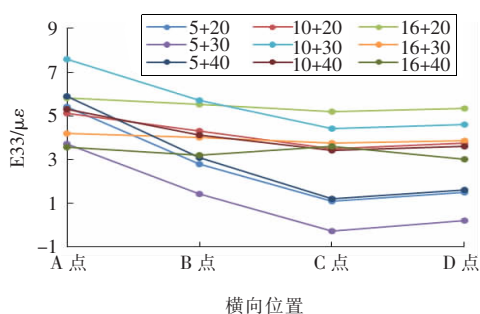


图5 沥青层层底沿行车方向拉应变的横向变化规律

Fig. 5 Lateral variation of tensile strain of the asphalt layer bottom in driving direction

由图6可以看出,在垂直荷载作用下,轮胎正下方处受到的沿行车方向的拉应变最大,其次是轮胎内侧边缘处,两轮隙中间处受到的拉应变较小。沿行车方向(z 轴)看,在轮胎接触正表面产生了压应变,轮胎作用区前后的区域产生了拉应变,但数值远小于轮胎正下方作用区。从深度方向(y 轴)看,沥青层内不同深度处既存在拉应变也存在压应变,需要具体分析应变随深度方向的变化。

2.3 水平荷载与垂直荷载共同作用下沥青层应变响应

在水平荷载与垂直荷载共同作用下,路面的拉应变云图如图7所示。

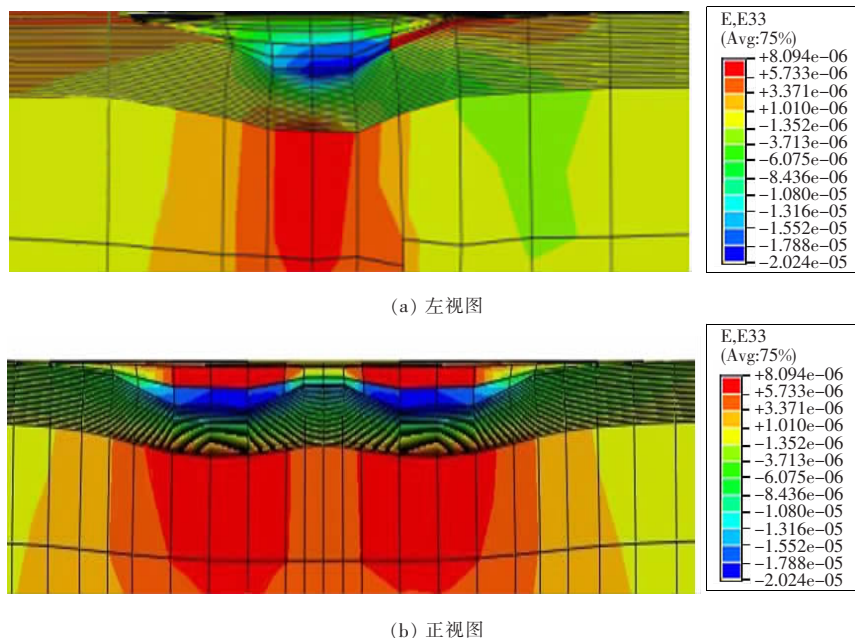


图6 垂直荷载作用下行车方向拉应变

Fig. 6 Tensile strain in driving direction under vertical load

由图7可以看出,在水平荷载和垂直荷载共同作用下,轮胎接触面 z 轴(行车方向)正方向区域表面受压,而另一侧(预设裂缝处)面层顶部受

拉,这是裂缝发展的诱因之一。在横向位置A点拉应变最大。

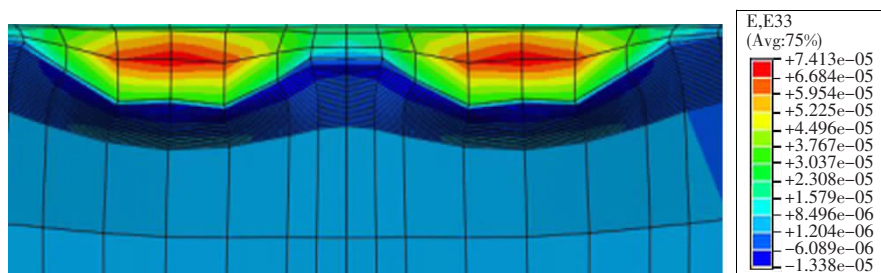


图 7 水平荷载与垂直荷载共同作用下行车方向拉应变

Fig. 7 Tensile strain in driving direction under the action of horizontal and vertical loads

2.4 沥青层应变响应结果

根据建立的三维模型,按照表 2 设计的正交试验进行了模拟计算,各结构计算点位 A 点的沥

青层沿行车方向最大拉应变值及出现的深度、沥青层底拉应变结果见表 4。

表 4 沥青层沿行车方向拉应变

Table 4 Tensile strain of the asphalt layer in driving direction

基层		沥青层		沥青层最大拉应变		沥青层
模量/ ($\times 10^3$ MPa)	厚度/ mm	模量(20 °C)/ ($\times 10^2$ MPa)	厚度/ cm	深度/ cm	最大拉应 变/ $\mu\epsilon$	底拉应 变/ $\mu\epsilon$
18	40	140	5	5.00	5.86	5.86
28	30	100	5	4.50	3.79	3.67
24	20	75	5	4.25	5.82	5.37
24	40	100	10	6.50	7.95	5.27
18	30	75	10	6.50	11.26	7.57
28	20	140	10	6.75	6.50	5.12
28	40	75	16	7.25	13.59	3.53
24	30	140	16	8.00	6.98	4.18
18	20	100	16	7.75	10.31	5.82

3 沥青层疲劳开裂影响因素分析

应变的累积是造成路面疲劳破坏的直接诱因,将路面结构模拟计算得到的沥青层内最大拉应变及层底拉应变代入《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)中的疲劳方程,可计算得到各结构形式沥青层疲劳开裂寿命,计算相关参数见表 5,计算结果见表 6,7。

从表 6 可以看出,由于沥青层内最大拉应变显著大于沥青层底拉应变,从而导致沥青层内的疲劳寿命远小于沥青层底的疲劳寿命,即隧道半刚性基层沥青路面沥青面层的疲劳开裂,其实发生在沥青结构层内。当沥青面层厚度在 5~16 cm 变化时,沥青面层内行车方向疲劳开裂发生在竖

向 5~8 cm 范围内。

各因素不同水平的疲劳寿命见图 8。分析图 8 可知:

1) 正交试验结果的极差表征了对应因素作用的大小。正交试验结果中,依据极差的大小,可知各因素对沥青层疲劳开裂寿命的影响依次为:基层模量>面层模量≈面层厚度>基层厚度。说明在隧道半刚性基层沥青路面中,基层的模量对沥青层底疲劳开裂寿命影响最大,沥青面层的厚度与其模量的影响效果相当,基层厚度的影响最小。

2) 在计算取值范围内,基层模量越大、基层厚度越厚、沥青面层模量越小越有利于延长沥青面层疲劳开裂寿命。在沥青面层厚度为 10 cm 时,沥青层疲劳开裂寿命出现最小值。

3) 基层模量因素对应的沥青层底疲劳开裂寿

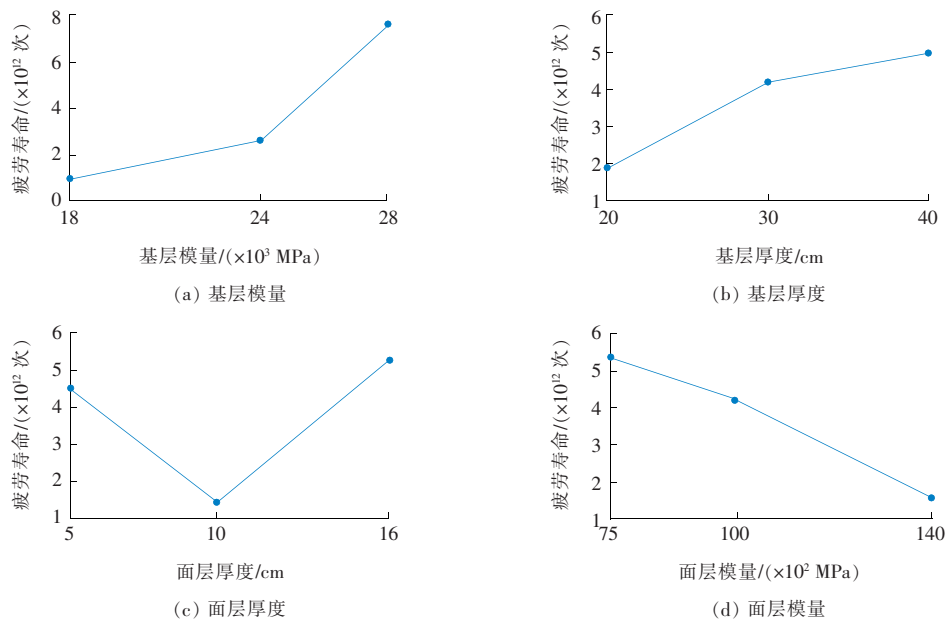


图8 沥青层底疲劳开裂寿命直观图

Fig. 8 Intuitive diagram of fatigue cracking life of the asphalt layer bottom

表5 沥青层疲劳开裂寿命计算参数

Table 5 Calculating parameters for fatigue cracking life of asphalt layer

基层模量/ ($\times 10^3$ MPa)	基层厚 度/cm	沥青层模量/ ($\times 10^2$ MPa)	沥青层 厚度/cm	目标可 靠度 β	季冻系 数 k_a	kb	$kT1$	FVA
18	20	100	16	1.65	1	0.707	1.4	65
24	20	75	5	1.65	1	0.970	1.4	65
28	20	140	10	1.65	1	0.923	1.4	65
18	30	75	10	1.65	1	0.906	1.4	65
24	30	140	16	1.65	1	0.737	1.4	65
28	30	100	5	1.65	1	0.972	1.4	65
18	40	140	5	1.65	1	0.975	1.4	65
24	40	100	10	1.65	1	0.913	1.4	65
28	40	75	16	1.65	1	0.685	1.4	65

表6 沥青层底疲劳开裂寿命

Table 6 Fatigue cracking life of the asphalt layer bottom

试验 编号	沥青层底疲 劳寿命/ ($\times 10^6$ 次)	沥青层最大拉应 变对应的疲劳寿 命/($\times 10^6$ 次)	最大拉应 变出现深 度/cm
1	362 590	176 164	8.00
2	1 080 823	781 990	4.25
3	461 632	179 872	6.75
4	258 527	53 347	6.50
5	827 939	107 950	8.00
6	3 119 196	2 731 252	4.50
7	286 733	286 733	5.00
8	696 523	136 103	6.50
9	4 024 373	19 133	7.25

表7 极差分析

Table 7 Range analysis $\times 10^6$ 次

因素	各因素不同水平的疲劳寿命			
水平	基层模量	基层厚度	面层厚度	面层模量
I	907 851	1 905 045	4 486 753	5 363 723
II	2 605 284	4 205 662	1 416 682	4 178 309
III	7 605 202	5 007 630	5 214 902	1 576 304
极差	6 697 352	3 102 585	3 798 220	3 787 419

注:I、II、III分别为各因素对应的1、2、3水平下考核指标的和。

命之和的大小排序为 $I < II < III$ 。由此可以判断,随着沥青层厚的增大,沥青层底疲劳开裂寿命随之增长。

4) 由各因素对应的I、II、III值分析可知,基

层模量 28 000 MPa、基层厚度 40 cm、沥青面层厚度 16 cm、沥青面层模量 7 500 MPa 结构组合的沥青层底疲劳开裂寿命最长。

4 结论

本研究通过建立有限元模型,对隧道半刚性基层(预设横向贯通裂缝)沥青路面沥青层疲劳开裂进行研究,得出以下结论:

1) 由于沥青层内最大拉应变显著大于沥青层底拉应变,从而导致沥青层内的疲劳寿命远小于沥青层底的疲劳寿命。

2) 沥青层底疲劳开裂寿命影响因素敏感性排序为:基层模量 > 面层模量 \approx 面层厚度 > 基层厚度。

3) 基层模量越大、基层厚度越厚、沥青面层模量越小,对沥青面层疲劳开裂寿命越有利。

4) 基层模量 28 000 MPa、基层厚度 40 cm、沥青面层厚度 16 cm、沥青面层模量 7 500 MPa 结构组合的沥青层底疲劳开裂寿命最长。

〔参考文献〕

- [1] 谢建新. 隧道连续配筋混凝土与沥青混凝土复合式路面结构研究[D]. 长沙:湖南大学,2009.
XIE Jian-xin. Study on continuous reinforced concrete and asphalt concrete composite pavement structure of tunnel[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [2] Castell M A, Ingrassia A R, Irwin L H. Fatigue crack growth in pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2000, 126(5): 283-290.
- [3] Doh Y S. Estimation of relative performance of reinforced overlaid asphalt concretes against reflection cracking due to bending more fracture[J]. Construction and Building Materials, 2009(5): 1 803-1 807.
- [4] 王雪莲, 黄晓明, 卞国剑. LSPM 对防治半刚性基层沥青路面反射裂缝机理分析[J]. 公路交通科技, 2016(7): 12-18.
WANG Xue-lian, HUANG Xiao-ming, BIAN Guo-jian. Mechanism analysis of LSPM on preventing reflection cracks in semi-rigid base asphalt pavement[J]. Highway Communications Science and Technology, 2016(7): 12-18.
- [5] 夏蕊芳. 基于有限元分析法在半刚性基层路面反射裂缝的研究[J]. 公路工程, 2017, 42(3): 18-25.
XIA Rui-fang. Research on reflective cracks in semi-rigid base pavement based on finite element analysis[J]. Highway Engineering, 2017, 42(3): 18-25.
- [6] 栾利强. 半刚性基层沥青路面疲劳裂缝扩展与寿命预估研究[J]. 土木工程学报, 2017(9): 122-132.
LUAN Li-qiang. Research on fatigue crack growth and life prediction of asphalt pavement with semi-rigid base[J]. Journal of Civil Engineering, 2017(9): 122-132.
- [7] 谢军, 袁畅. 基于 CT 图像的沥青混合料剪切疲劳破坏[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2015(12): 1-7.
XIE Jun, YUAN Chang. Shear fatigue failure of asphalt mixture based on CT images[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2015(12): 1-7.
- [8] 田海波, 郑传峰, 秦泳, 等. 半刚性基层沥青混凝土路面疲劳开裂控制因素研究[J]. 公路, 2014(6): 32-36.
TIAN Hai-bo, ZHENG Chuan-feng, QIN Yong, et al. Fatigue cracking control factors of asphalt concrete pavement with semi-rigid base course[J]. Highway, 2014(6): 32-36.
- [9] 王宏畅. 半刚性基层沥青路面反射裂缝扩展及寿命研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(2): 174-180.
WANG Hong-chang. Research on reflection crack growth and life of semi-rigid base asphalt pavement[J]. Transportation System Engineering and Information, 2012, 12(2): 174-180.
- [10] 周志刚, 叶永迪, 刘兴. 重载交通条件下组合式基层沥青路面结构数值计算分析[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2011(1): 4-9.
ZHOU Zhi-gang, YE Yong-di, LIU Xing. Numerical analysis of asphalt pavement structure of combined base course under heavy load traffic conditions[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2011(1): 4-9.
- [11] JTG D50-2017, 公路沥青路面结构设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
JTG D50-2017, Code for design of highway asphalt pavement structure[S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [12] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
CHEN Kui. Experiment design and analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.