

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.08.001

拓宽道路接缝区域沥青路面的疲劳损伤特性

韩丁¹, 李阳², 刘东泽³, 朱俊骅², 黄晓明⁴

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 交通运输工程学院, 安徽 合肥 230009;
3. 中铁城市规划设计研究院有限公司, 安徽 芜湖 241000; 4. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了研究拼接路面结构的合理设计方法, 依托合宁高速公路扩建工程对拼接工况下沥青面层的疲劳损伤特性进行分析。基于拼接接缝两侧基层的当量回弹模量分布规律和以应力为变量的沥青混凝土损伤演化方程, 通过接缝区域沥青面层的损伤状况, 分析不同路面结构参数和轴载水平对沥青面层寿命的影响。随着轴载次数的累积, 道路会出现加速破坏的趋势。接缝两侧基层顶面的当量回弹模量差异是决定接缝处沥青层疲劳寿命的关键因素, 而依靠增加接缝处沥青层厚度来延缓反射裂缝的效果不明显。结果表明, 接缝区域沥青面层疲劳损伤的研究可以用来指导路面结构的优化设计, 并可对《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006) 中沥青面层的当量轴次和抗拉强度结构系数中的参数进行拼接工况下的优化。

关键词: 道路工程; 拼接特性; 数值模拟; 接缝区域; 损伤累积; 沥青混凝土

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2016)08-0001-05

Fatigue Damage Property of Asphalt Pavement in Joint Region of Road Widening

HAN Ding¹, LI Yang², LIU Dong-ze³, ZHU Jun-hua², HUANG Xiao-ming⁴

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China; 2. School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China; 3. China Railway Urban Planning & Design Institute Co., Ltd., Wuhu Anhui 241000, China; 4. School of Traffic, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: In order to study the reasonable design method of pavement structure with joints, depend on the Hefei - Nanjing expressway extension project, fatigue damage property of asphalt pavement with joints is analysed. Based on the distribution regularity of equivalent rebound modulus on both sides of a base juncture and the damage evolution equation of bituminous mixture in stress variable, through the damage state of asphalt pavement on joint region, the effects of different structural parameters and axle load levels on the asphalt pavement life are analyzed. With the accumulation of axle load times, road exhibits a tendency of accelerated failure. The difference of equivalent rebound modulus between both sides of a base juncture is the key factor of the fatigue life of asphalt layers in joint region, while the thickness increment of asphalt pavement on a joint region has a un conspicuous effect to delay reflection crack. The result shows that (1) the study of fatigue damage on the joint region can guide the optimization design of pavement structure; (2) for the parameters of the equivalent axle load and the tensile strength structural coefficient provided in *Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement* (JTG D50—2006), the study can revise these parameters under continuation condition.

Key words: road engineering; widening characteristic; numerical simulation; joint region; damage accumulation; asphalt concrete

收稿日期: 2015-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008109); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2013YF-01)

作者简介: 韩丁(1982-), 男, 安徽肥东人, 副教授, 工学博士, 硕士生导师. (handing@hfut.edu.cn)

分布, SMA-13、AC-20 和 AC-25 的弹性模量选用 1 600, 1 400, 1 200 MPa, 泊松比都为 0.3, 将该参数组合作为基准状态。

2.1 路面结构参数的影响

在参数组合基准状态的基础上, 逐个采用表 1 中参数值进行相应的替换, 形成 7 种不同的分析工况, 其中接缝处稳层顶面当量回弹模量 E_1 和原有路面顶面当量回弹模量 E_2 各包含两组取值。分别对不同参数组合工况下的计算模型进行静载分析, 获得初次荷载作用下的最大层底拉应力 σ_0 和沥青层底奇异点的应力强度因子 K_0 。将各参数组合下的沥青层底最大拉应力 σ_0 分别代入式 (1)^[12], 得到相应的损伤演化方程后进行应力-损伤全耦合有限元分析, 得到沥青层底开裂前 (损伤变量 $D=1.0$) 承受的累积轴次, 结果见表 1。

$$D(\sigma) = \begin{cases} 1.744 \times 10^{-11} \sigma_0^{1.539} \sigma N, & (1) \\ 0 \end{cases}$$

式中, σ 为压实力; N 为累积作用次数。

表 1 结构层参数选用与计算结果

Tab. 1 Parameters selection and computational result of structural layers

路面结构参数	σ_0 / MPa	K_0 / (kPa·m ^{1/2}) (×10 ⁵)	开裂前轴次/ (×10 ⁵)
基准参数组合	0.445 4	59.83	4.56
接缝处水稳层顶面当量回弹模量 E_1 /MPa	$E_1(1)$ 293	0.299 5	61.00
	$E_1(2)$ 430	0.496	57.87
原有路面顶面当量回弹模量 E_2 /MPa	$E_2(1)$ 220	0.587 4	79.96
	$E_2(2)$ 358	0.210 2	43.02
AC-25 层厚度 h /m	0.14	0.435 5	59.25
AC-25 弹性模量 E_0 /MPa	1 400	0.521 0	72.56
AC-20 弹性模量 E_m /MPa	1 600	0.448 8	60.74

各参数组合下, 累积荷载作用时奇异点应力强度因子的演化过程如图 4 所示。随着轴载次数的增加, 应力强度因子的增长呈加速趋势, 这表明道路会加速破坏。实际道路在使用过程中, 即使交通量保持稳定, 病害也会随着服役时间的增长而加速出现, 与上述结论一致。从图中可看出, 接缝两侧基层的顶面当量回弹模量应保持一致, 如差异较大, 会明显降低接缝处沥青层的疲劳寿命; 接缝两侧基层的顶面当量回弹模量存在差异时, 沥青层厚度变化对接缝处沥青层疲劳寿命的影响不大, 仅依靠增加接缝处沥青层厚度来延缓反射裂缝的措施有待商榷; 沥青中面层的弹性模量对接缝处沥青层的疲劳寿命影响不大, 但沥青底面层弹性模量的影响较大。

2.2 接缝处路面结构的优化设计

分别以基准参数组合时的计算参数和开裂前轴次

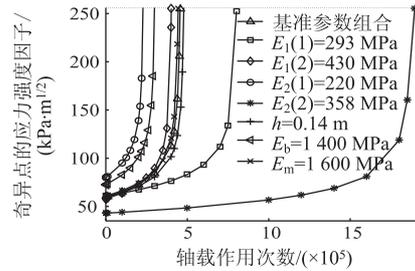


图 4 不同参数组合时奇异点应力强度因子的演化

Fig. 4 Evolution of stress intensity factor of singularities in different parameter combinations

作为分母, 将表 1 中选取的不同材料参数及其对应的开裂前轴次作为分子, 得到不同路面结构参数变化对接缝处沥青层疲劳寿命的影响, 见图 5。图中曲线的斜率越大, 表明该参数对接缝处沥青层疲劳寿命的影响越大, 在路面结构优化设计中应予以优先考虑。

当接缝两侧基层顶面的当量回弹模量相同时, 即使该值较低, 接缝处沥青层也具有较高的疲劳寿命。如图 5 中 A 和 B 点都表明两侧基层顶面的当量回弹模量值相同, 分别为 293 MPa 和 358 MPa, 其对应的接缝处沥青层疲劳寿命都较高。因此, 接缝两侧基层顶面的当量回弹模量差异是决定接缝处沥青层疲劳寿命的关键因素。

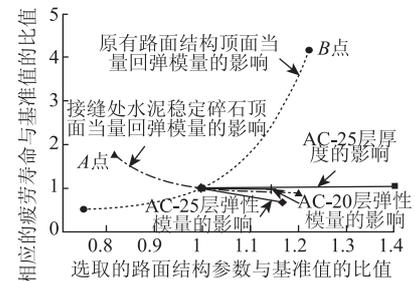


图 5 不同参数对疲劳寿命的影响

Fig. 5 Influences of different parameters on fatigue life

3 荷载水平对接缝处沥青层寿命的影响

道路使用过程中会承受不同的车辆轴载, 可基于沥青混凝土损伤演化方程来研究车辆荷载水平对拼接接缝处沥青层寿命的影响。

3.1 轮胎接地压强的影响

按表 2 改变轮胎接地压强的大小, 分别对计算模型进行静载分析, 获得初次荷载作用下的最大层底拉应力 σ_0 和沥青层底奇异点的应力强度因子 K_0 。将各轮胎接地压强水平下的沥青层底最大拉应力 σ_0 分别代入式 (1), 得到相应的损伤演化方程后进行应力-损伤全耦合有限元分析, 得到沥青层底开裂前 (损伤变量 $D=1.0$) 承受的累积轴次, 结果见表 2。

不同轮胎接地压强下, 累积荷载作用时奇异点

应力强度因子的演化过程如图6所示。随着轮胎接地压强的逐渐提高,接缝处沥青层开裂前的累积轴次逐渐降低,但不会急剧变化。

表2 不同轮胎接地压强的计算结果

Tab.2 Computational results of different tire grounding pressures

轮胎接地压强/MPa	0.55	0.70	0.85	1.00	1.15
σ_0 /MPa	0.35	0.445 4	0.540 8	0.636 3	0.731 7
$K_0/(kPa \cdot m^{1/2})$	47.01	59.83	72.65	85.47	98.29
开裂前轴次 $N_e/(\times 10^5)$	8.48	4.56	2.75	1.80	1.24

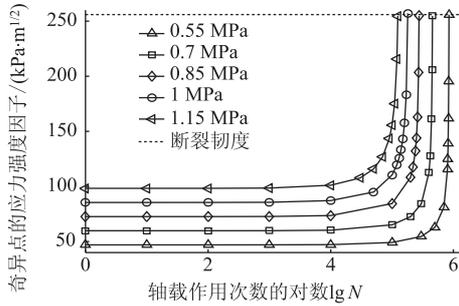


图6 轮胎接地压强对疲劳寿命的影响

Fig.6 Influences of different tire grounding pressures on fatigue life

3.2 基于损伤等效的接缝处沥青层当量轴次 N

虽然不同轮胎接地压强下接缝处沥青层的损伤历程各不相同,但其终点一致:奇异点应力强度因子达到沥青混凝土的断裂韧度时,沥青层底出现开裂。弹性层状体系满足比例加载条件,轮胎接地压强与轴载值之间也具有比例性。因此,不同轮胎接地压强下接缝处沥青层出现开裂时疲劳寿命的比值可作为不同轴载值之间的等效转化系数。将轮胎接地压强 0.7 MPa 作为换算标准 ($N_e^0 = 4.56 \times 10^5$ 次),使用表2的数据可得到基于损伤等效的当量轴次 $N = N_e^0/N_e$,如图7所示。

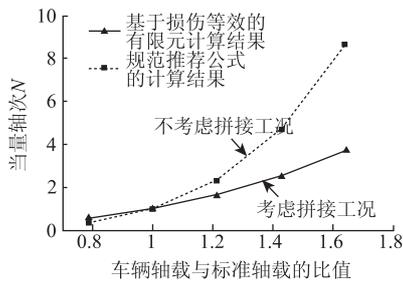


图7 损伤等效 N 与规范推荐 N 的比较

Fig.7 Comparison of N values between damage equivalence and standard recommendation

进行沥青层底拉应力验算时,单次轴载换算的函数形式为:

$$N = \left(\frac{P_1}{P}\right)^n = \left(\frac{p_1}{p}\right)^n, \quad (2)$$

式中, P 为标准轴载 100 kN; P_1 为需要转换的轴载; N 是转化为标准轴载作用的次数; p 为标准轮胎接地压强 0.7 MPa; p_1 为需要转换的轮胎接地压强。

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)规定 $n = 4.35$, 此时将表2中的不同轮胎接地压强分别代入式(2),得到的结果见图7。比较图中两条曲线,可见考虑拼接工况与否对当量轴次的影响较大。针对合宁高速扩建工程,在验算接缝处沥青层底拉应力时,使用式(2)拟合基于损伤等效的有限元计算结果,得到 $n = 2.619$ 。因为接缝两侧基层顶面的当量回弹模量差异是决定接缝处沥青层疲劳寿命的关键因素,所以轴载值影响的重要性被相对削弱。

3.3 基于损伤等效的接缝处沥青层抗拉强度结构系数 K_s

在某一轴载累积作用下达到临界破坏状态时,沥青层底奇异点处的应力强度因子值等于沥青混凝土的断裂韧度。沥青混凝土的断裂韧度 $K_{IC} = 0.28 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ [13],与各初始单次轮胎接地压强下沥青层底奇异点处应力强度因子 K_0 的比值可用来计算相应轴载水平下沥青层的抗拉强度结构系数 $K_s = K_{IC}/K_0$,使用表2的数据对系数 K_s 分别进行计算,结果见图8。

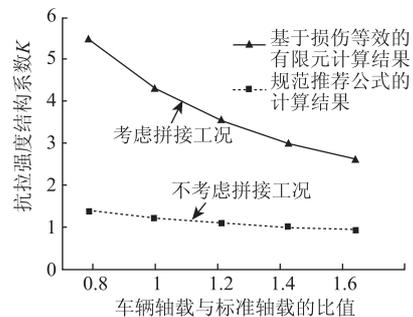


图8 损伤等效 K_s 与规范推荐 K_s 的比较

Fig.8 Comparison of K_s values between damage equivalence and standard recommendation

沥青混凝土面层的抗拉强度结构系数 K_s 的函数形式为:

$$K_s = aN_e^b/A_c, \quad (3)$$

式中, N_e 是设计年限内一方向上一个车道的累计当量轴次; A_c 是公路等级系数,高速公路一级公路为 1.0,二级公路为 1.1,三、四级公路为 1.2。

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)规定 $a = 0.09$, $b = 0.2$,此时将表2中的开裂前轴次 N_e 分别代入式(3),得到的结果见图8。比较图中两条曲线,可见基于损伤等效的接缝处抗拉结构强

度系数要明显大于规范中推荐公式的计算值,这表明拼接工况下使用规范推荐公式偏于不安全。目前的拼接路面结构设计常采用新建道路的设计方法,结果导致接缝处容易出现开裂现象。针对合宁高速扩建工程,在验算接缝处沥青混凝土面层的抗拉强度结构系数时,使用式(3)拟合基于损伤等效的有限元计算结果,得到 $a=0.02847$, $b=0.3848$ 。

4 结论

(1) 随着荷载作用次数的累积,应力强度因子的增长呈加速趋势,这表明道路会出现加速破坏。接缝两侧基层顶面的当量回弹模量差异是决定接缝处沥青层疲劳寿命的关键因素,依靠增加接缝处沥青层厚度来延缓反射裂缝的效果不明显。沥青中面层的弹性模量对接缝处沥青层的疲劳寿命影响不大,但沥青底面层弹性模量的影响较大。

(2) 通过分析不同轮胎接地压强对接缝处沥青层疲劳寿命的影响,发现拼接工况下当量轴次和抗拉强度结构系数的计算结果与规范推荐公式的计算值有较大不同。通过调整规范推荐公式的系数,为弥补当前规范未考虑拼接工况的不足提供了一种方法。

参考文献:

References:

- [1] HUANG Xiao-ming, WANG Hao. Comparison between Responses of Reinforced and Unreinforced Embankments Due to Road Widening [J]. Journal of Central South University of Technology: English Edition, 2009, 16 (5): 857-864.
- [2] 韩丁,谭华,黄晓明,等. 拼接工况下路基的参数反演与沉降特性 [J]. 交通运输工程学报, 2012, 12 (6): 7-12.
HAN Ding, TAN Hua, HUANG Xiao-ming, et al. Parametric Inversion and Settlement Characteristic of Subgrade in Joint Condition [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12 (6): 7-12.
- [3] 杨涛,李磊,李国维. 公路双侧拓宽差异沉降控制标准研究 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (5): 15-20.
YANG Tao, LI Lei, LI Guo-wei. Research on Differential Settlement Control Standard for Road Bilateral Widening Project [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (5): 15-20.
- [4] 马晓晖,李立寒. 道路拓宽中路面拼接台阶尺寸的分析 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (5): 52-55, 61.
MA Xiao-hui, LI Li-han. Analysis of Pavement Splicing Step Dimension in Road Broadening [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (5): 52-55, 61.
- [5] MO L, HUURMAN M, WU S, et al. Ravelling Investigation of Porous Asphalt Concrete Based on Fatigue Characteristics of Bitumen-stone Adhesion and Mortar [J]. Materials and Design, 2009, 30 (1): 170-179.
- [6] MO L T, WU S P, HUURMAN M, et al. Damage Accumulation Model for Monotonic and Dynamic Shear Fracture of Asphalt-stone Adhesion [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2006, 46 (2): 140-147.
- [7] 崔华杰,李立寒,刘栋. 高模量沥青混凝土低温抗裂性能研究 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (2): 37-41, 53.
CUI Hua-jie, LI Li-han, LIU Dong. Research on Low-temperature Anti-crack Performance of High Modulus Asphalt Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (2): 37-41, 53.
- [8] KIM Y R, ALLEN D H, LITTLE D N. Computational Constitutive Model for Predicting Nonlinear Viscoelastic Damage and Fracture Failure of Asphalt Concrete Mixtures [J]. International Journal of Geomechanics, 2007, 7 (7): 102-110.
- [9] AMBASSA Z, ALLOU F, PETIT C, et al. Fatigue Life Prediction of An Asphalt Pavement Subjected to Multiple Axle Loadings with Viscoelastic FEM [J]. Construction and Building Materials, 2013, 43 (43): 443-452.
- [10] 康诚,马芹永,吴金荣. 冻融腐蚀对沥青混凝土疲劳性能的影响 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (5): 47-51.
KANG Cheng, MA Qin-yong, WU Jin-rong. Effect of Freeze-thaw and Corrosion on Fatigue Property of Asphalt Concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (5): 47-51.
- [11] 董忠红,张扬,吕彭民. 拉-压交变荷载下沥青混合料的疲劳性能 [J]. 中国公路学报, 2013, 26 (2): 15-19.
DONG Zhong-hong, ZHANG Yang, LÜ Peng-min. Fatigue Performance of Asphalt Mixture Under Tensile-compressive Alternating Loading [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26 (2): 15-19.
- [12] 韩丁. 旧水泥路面碎石化及拼接时路面结构的寿命分析 [D]. 南京:东南大学, 2010.
HAN Ding. Life Analysis of Jointing of New and Old Pavements and Subgrades after PCC Rubblization [D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [13] 武建民,李晓军. 沥青混合料小梁疲劳试验的有限元模拟 [J]. 长安大学学报:自然科学版, 2004, 24 (1): 5-8.
WU Jian-min, LI Xiao-jun. Simulation of Asphalt Mixtures Beam Test with Finite-element Method [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24 (1): 5-8.