

气态水对路面结构力学响应模拟研究

李 键¹, 罗传熙¹, 崔浩斌²

(1. 广州肖宁道路工程技术研究事务有限公司, 广州 510641; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410114)

摘要:为探究气态水对沥青路面力学响应的影响规律,利用有限元软件 ABAQUS,建立考虑气态水的路面结构三维有限元模型。基于疲劳寿命计算公式与室内试验,分析常规水气浓度场与实际非均匀水气浓度场对路面疲劳寿命的影响差异。结果表明,气态水会影响路面力学指标,常规水气浓度场在计算疲劳寿命时大于路面实际的疲劳寿命,高估了路面结构的抗疲劳能力。室内试验表明,沥青混合料经过气态水的侵蚀后同样会缩短其疲劳寿命,导致路面缺乏安全性,路面在设计及疲劳寿命预估时,引入实际非均匀水气浓度场可提高结果准确性。

关键词:沥青路面;气态水;有限元软件;室内试验;疲劳寿命

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)16-0220-06

随着交通行业的迅猛发展,公路建设规模也得到了极大的提高。沥青路面因其行车舒适性好、噪声小等优点成为我国高速公路最常用的面层铺装形式^[1-2],其设计及寿命预测对我国道路事业发展起着至关重要的作用,且沥青路面处于复杂的服役环境中,结构力学响应与环境因素息息相关^[3],因此,充分考虑服役环境因素并进行路面结构力学响应计算显得尤为重要。宋福春^[4]等利用 COMSOL 有限元软件,验证了面层内部水反复泵吸现象是导致沥青路面出现水损害的根本原因。周志刚^[5]等采用非线性有限元算法,揭示了非线性渗流比线性渗流产生的水损害更为严重。藏振宇^[6]通过移动荷载作用下的有限元模型,分析饱和沥青路面水力损伤机制,发现沥青面层深度 0.05 m 范围内容易出现水力损伤。已有研究多是针对液态水对路面力学的响应展开的,并未考虑水气对路面力学及疲劳寿命的影响,而大量干旱少雨地区仍出现的水损害现象^[8],表明气态水对路面结构影响同样巨大,这一影响因素长期未受到重视。且路面结构内部不是单一、均匀分布的水气浓度,实则为非均匀水气浓度场^[9-10],引起路面材料模量呈非均匀分布,进而导致计算得到的路面结构响应及疲劳寿命与实际不符。基于此,本文研究非均匀水气浓度场及单一水气浓度作用下的沥青路面结构响应,以应变、应力等指

标量化水气浓度场对路面结构力学的影响,进一步通过室内试验验证被水气侵蚀的沥青混合料疲劳寿命下降趋势,为沥青路面材料、结构设计提供参考与补充。

1 模型建立

1.1 材料参数

依托银洲湖高速公路工程项目,路面组合结构如图 1 所示,采用 ABAQUS 有限元软件建立模型,模型尺寸为 6 m×8 m×3 m,各层层间完全连续,路面模型四周法向约束,底面完全约束。结构各层材料中,面层采用黏弹性材料定义,基层及土基等采用弹性材料定义,相关数据参考潘雁石^[11],如表 1 和表 2 所示。

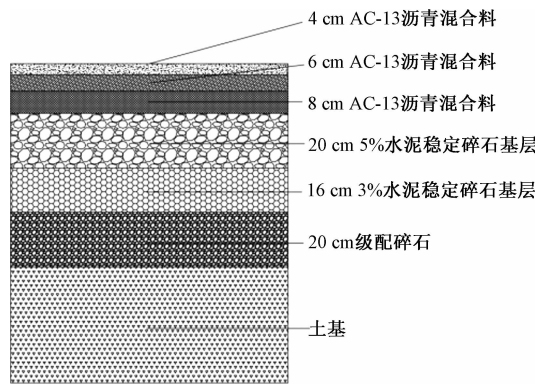


图 1 路面结构示意图

收稿日期:2023-04-24

作者简介:李键(1995—),男,河南信阳人,广州肖宁道路工程技术研究事务有限公司,工程师,硕士,研究方向为路面健康管理;罗传熙(1992—),男,广东韶关人,广州肖宁道路工程技术研究事务有限公司,工程师,博士,研究方向为路面健康管理;崔浩斌(1997—),男,内蒙古呼伦贝尔人,长沙理工大学交通运输工程学院,硕士研究生,研究方向为道路维修养护技术。

表 1 材料参数定义

材料	厚度/ cm	模量/ MPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)
AC-13C 混合料	4	见表 2	0.35	2 300
AC-20C 混合料	6			
AC-25C 混合料	8			
5%水泥稳定碎石基层	20	1 600	0.20	2 200
3%水泥稳定碎石基层	16	1 400		
级配碎石	20	350	0.35	2 100
土基	—	50	0.40	1 800

表 2 沥青混合料黏弹性参数

松弛时间(<i>t</i>)/s	不同类型混合料的松弛模量 Prony 级数		
	AC-13C	AC-20C	AC-25C
1.00×10 ⁻⁵	0.068 9	0.100 7	0.167 9
1.00×10 ⁻⁴	0.095 4	0.103 9	0.179 3
1.00×10 ⁻³	0.191 7	0.177 3	0.255 5
1.00×10 ⁻²	0.280 8	0.235 6	0.219 4
0.1	0.217 7	0.200 3	0.104 9
1	0.087 7	0.103 6	0.036 8
10	0.028 0	0.040 1	0.012 9
100	0.008 9	0.014 2	0.004 8
1.00×10 ³	0.004 2	0.007 4	0.002 2
瞬态剪切模量(20℃)MPa	12 900	12 500	14 500

1.2 荷载及分析步定义

目前沥青路面设计规范将车轮荷载简化为当量圆形均布荷载^[12],标准轴载为 100 kN,轮胎接触压力 $P=0.7\text{ MPa}$,采用双轮组车轴,每一侧轮载用两个直径为 0.213 m 的当量圆表示。荷载设置为半正弦波型动态荷载,即

$$P(t)=\begin{cases} P_{\max}\sin\left|\frac{\pi t}{T}\right|, & 0\leqslant t\leqslant T \\ 0, & T\leqslant t\leqslant T_a \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P(t)$ 为荷载随时间变化值; $P_{\max}$ 为均布荷载作用值,即 0.7 MPa; T 为荷载作用时间。以车速 100 km/h 为例,荷载作用时间为 0.046 s,计算并绘荷载随时间变化的曲线如图 2 所示。该模型计算动载作用下的黏弹性响应,因此采用黏性分析步。

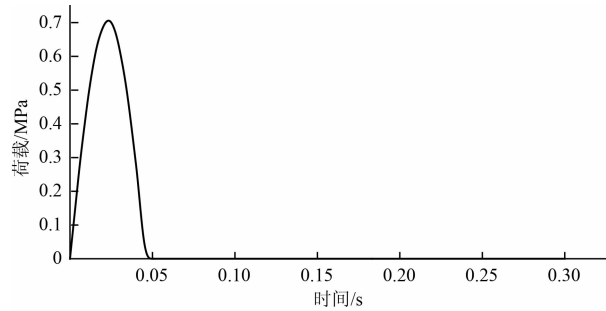


图 2 荷载随时间变化曲线

1.3 预定义场设置

1.3.1 温度场

温度对沥青路面结构响应具有较大影响,当研究水气浓度的影响时,需要控制不同条件下温度场相同。在进行预定义场设置时,调用广州夏季某天环境条件参数,以最不利条件为例,即路面结构整体温度最高时刻作为预定义温度场时刻,进行路面结构响应计算。各层温度极值发生在 13:00—19:00 时,此时的温度数据如表 3 所示。为了分析最不利温度场,采取归一化的方法,将表 3 中各层底温度值除以温度极值并求和,得到路面结构温度归一化系数。由表 3 中计算的归一化参数可知,14:00 和 15:00 十分接近。但 14:00 时路面结构上面层和中面层温度更高,因此选取 14:00 为最不利温度场时刻。

表 3 13:00—19:00 不同深度位置处温度

时间	不同深度位置温度/℃				路面结构 温度归一 化系数 <i>T</i>
	路表 0 cm	上面层底部 4 cm	中面层底部 10 cm	下面层底部 20 cm	
13:00	57.17	49.15	39.97	32.41	3.825
14:00	56.52	49.97	41.44	33.43	3.896
15:00	54.21	49.61	42.34	34.37	3.897
16:00	50.36	48.07	42.59	35.17	3.826
17:00	45.22	45.44	42.15	35.74	3.687
18:00	39.37	41.97	41.04	36.06	3.495
19:00	36.93	39.46	39.77	36.14	3.369

1.3.2 水气浓度场

选取最不利温度场时刻对应的水气浓度场,即 14:00 水气浓度场作为路面结构实际的非均匀水气浓度场。针对常规方法,研究发现,未经水气养生处理的 AC-13C、AC-20C 混合料试件内部相对湿度(20℃)均在 40%左右^[13],即将内部水气浓度设为 7 g/m³。

1.4 模型运算原理及计算点选取

导入预定义场后,提交模型运算。此时,面层各层单元网格首先读取预定义温度场和水气浓度场,根据所处位置名称在 UTRS 子程序中选择对应的参数计算位移距离,根据荷载频率计算模量值用于后续模拟。结合荷载和边界条件模拟计算水气影响下的路面结构响应,取值点如图 3 所示,图中 d 为车轮直径,取 18.9 cm,调取该位置路面结构深度方向上应变、应力值进行分析。

2 沥青路面结构响应分析

2.1 路面结构各层底应变分析

2.1.1 水平应变

A 点与 B 点下方各结构层底水平应变峰值对

比如图 4 所示。水气浓度使得面层模量衰减后,造成各结构层的水平应变增大,上面层尤其严重,其水平应变峰值增大了 110.68%,且为拉应变,易引发

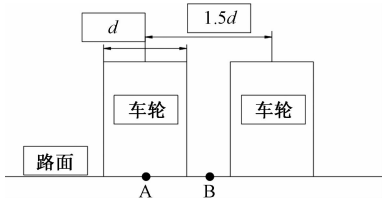
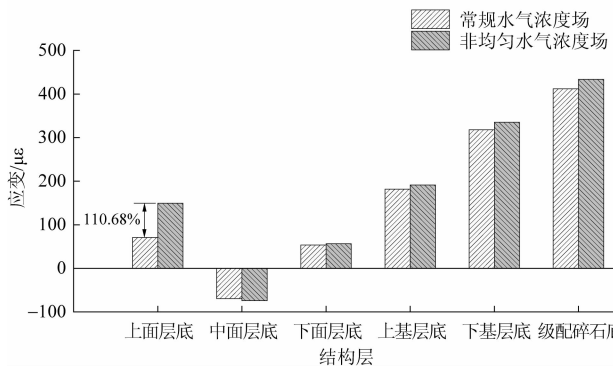


图 3 路面结构荷载作用图



疲劳开裂,同时基层水平应变增大,同样也会加大基层开裂的风险。B点各结构层在受到非均匀水气浓度影响后应变同样增大,但程度小于A点。

2.1.2 竖向应变

A、B作用点在竖向应变规律类似,仅对比作用点A下方各结构层底竖向应变值如图5所示。对比常规方法,考虑实际最不利非均匀水气浓度场的路面结构各层底应变均增大。上面层压应变增加109.57%,中面层拉应变增加28.92%,中面层开裂风险增大。

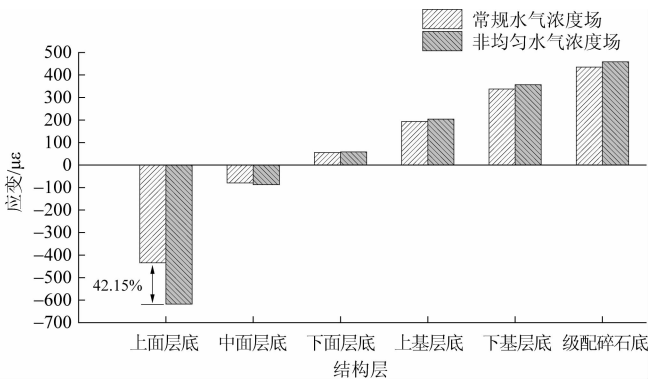


图 4 水气浓度影响下路面 A 点(左图)与 B 点(右图)最大水平应变值对比

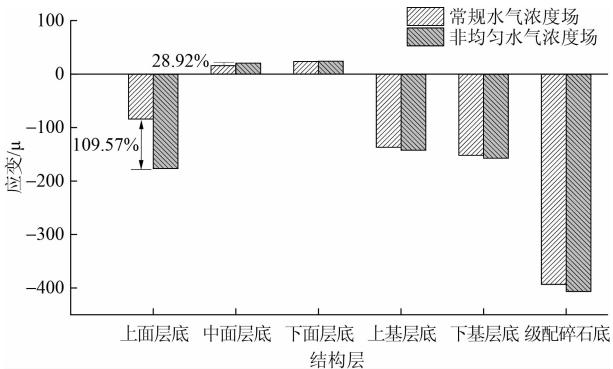


图 5 水气浓度影响下路面不同位置处最大竖向应变值对比

无论是水平应变还是竖向应变,考虑实际非均匀水气浓度场后,都呈现上升趋势,增大了结构层疲劳开裂的风险。

2.2 路面各结构层底应力

2.2.1 水平应力

根据模型计算结果,绘制不同时刻最大水平应力对比值如图6所示。相较于其他面层,A点与B点处路面结构下面层底受较大拉应力。分析其原因为温度沿路面结构方向逐渐降低,导致下面层模量较高,进而承担了较大拉应力。对比分析考虑实际最不利水气浓度场可以发现,路面结构下面层所

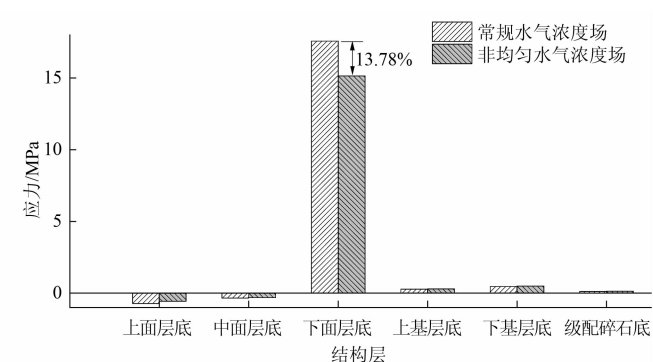
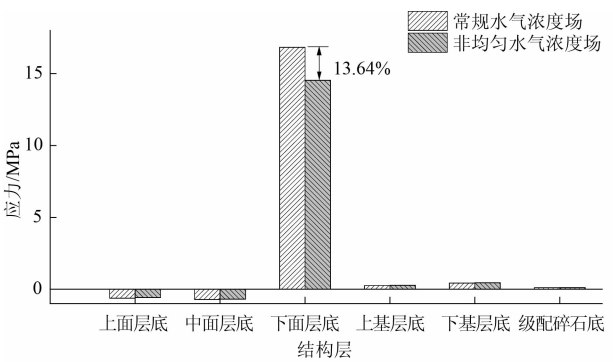


图 6 水气浓度影响下路面 A 点(左图)与 B 点(右图)处最大水平应力值

受水平应力分别下降 13.64%与 13.78%,其原因为面层结构模量衰减后,可分担的应力变小,转由路面下部结构分担。各基层受到水平应力增加 5%左右,加大了基层产生开裂,形成纵向裂缝的可能性增大。

2.2.2 竖向应力

对 A 点处竖向应力进行分析如图 7 所示。路面结构各层竖向应力由面层向下依次递减。对比可知,考虑最不利非均匀水气浓度场对竖向应力影响不大。

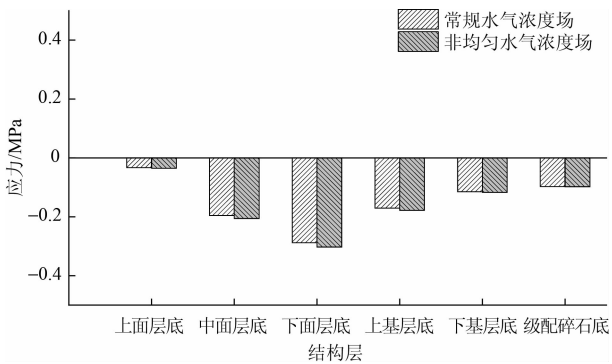


图 7 水气浓度影响下路面不同位置处最大竖向应力值

3 疲劳寿命计算

3.1 有限元疲劳寿命计算

3.1.1 预定义水气浓度设置

现行规范中疲劳寿命计算方法将温度限定为 20℃^[12],因此将模型预定义温度设置为 20℃;针对考虑实际非均匀浓度场的情况,建立路面结构年平均水气浓度场。根据广东地区 2022 年平均湿度换算得到环境年平均水气浓度。参考 2022 年中国统计年鉴^[14]广东 2022 年平均气温 23.7℃、相对湿度 75%,计算得空气中水气浓度为 12.3 g/mm³。同时,由级配碎石处相对湿度 100%、温度 20℃换算得水气浓度为 17.29 g/mm³。设置温度为 20℃,将水气边界条件循环加载 7 d,模拟得到年平均湿度环境下的路面结构非均匀水气浓度场(图 8)。针对常规方法,将预定义水气浓度设为 7 g/m³。为分析考虑实际非均匀水气浓度场对路面结构疲劳寿命的影响,根据中交公路科学研究所^[12]选取 ABCD 4 个取值点(图 9),其中 d 为车轮直径,取 18.9 cm。

3.1.2 水平拉应变分析

通过模型计算结果统计路面不同位置处最大水平应变如表 4 所示。

分析计算结果可以发现,20℃温度环境下,路面结构上、中面层水平方向处于受压状态,下面层水平方向受拉,最大值出现在两车轮中间位置。考

虑实际非均匀水气浓度场使得下面层水平拉应变增大 4%左右,意味着疲劳寿命会衰减。

3.1.3 疲劳寿命计算

规范中沥青混合料层疲劳寿命的预估模型计算公式为

$$N_f = 6.32 \times 10^{(15.96-0.29\beta)} k_a k_{T1}^{-1} \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{3.97} \left(\frac{1}{E_a}\right)^{1.58} \times VFA^{2.72} \left[\frac{1 + 0.3E_a^{0.43} VFA^{-0.85} e^{(0.024h_a - 5.41)}}{1 + e^{(0.024h_a - 5.41)}}\right]^{3.33} \tag{2}$$

式中: N_f 为疲劳开裂寿命(轴次); k_a 为季节性冻土地地区调整系数; VFA 为沥青混合料的沥青饱和度(%); k_{T1} 为温度调整系数。依据中交公路科学研究所^[12]可查得, β 为 $1.65k_a$, k_a 为 1。

针对考虑实际非均匀水气浓度场和常规方法,根据模型计算结果,统计 20℃、10 Hz 下各层动态模量及面层当量模量、厚度如表 5 所示。

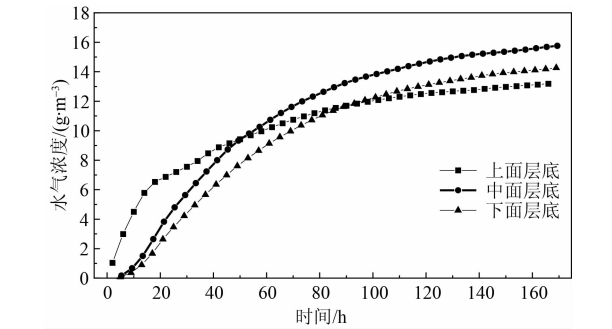


图 8 年平均湿度环境下路面结构各层水气浓度

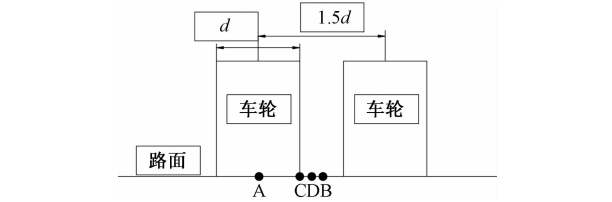


图 9 计算点位

表 4 路面不同位置处最大水平应变						
方法	路面不同位置处最大水平应变/ μ					
	A(车轮正下方)			B(两车轮中间)		
	上面层底	中面层底	下面层底	上面层底	中面层底	下面层底
常规	-49.434	-36.132	36.696	-138.006	-41.360	39.294
水气场	-47.591	-37.307	37.920	-147.712	-42.995	40.609
增大比/%	-3.73	3.25	3.34	7.03	3.95	3.35
方法	C(车轮边缘)			D(B,C 中间)		
	上面层底	中面层底	下面层底	上面层底	中面层底	下面层底
常规	-56.957	-38.411	38.932	-98.829	-40.31	39.232
水气场	-55.707	-39.668	40.243	-103.235	-41.799	40.550
增大比/%	-2.19	3.27	3.37	4.46	3.69	3.36

对比 ABCD 4 个计算点,将最大层底拉应变及相关值代入可得路面结构的疲劳寿命。上、中面层水平方向为压应变,故此处不考虑其疲劳寿命。将下面层疲劳寿命计算结果列于表 6 中。

由表 6 可知,考虑实际非均匀水气浓度场后,下面层疲劳寿命由 1.967×10^8 降低为 1.726×10^8 ,降低 12.246%。表明目前以规范为代表的常规方法在计算疲劳寿命时大于路面实际疲劳寿命,高估了路面结构抗疲劳性能,导致设计的路面结构偏于危险。

表 5 20℃、10 Hz 下各层动态模量及面层当量模量、厚度

方法	20℃、10 Hz 下动态模量/MPa			当量模量/MPa	当量厚度/mm
	上面层	中面层	下面层	面层	面层
常规	10 621.8	8 805.2	12 543.1	10 952.4	100
水气场	8 909.8	7 649.0	11 651.9	9 725.8	100

表 6 考虑非均匀水气与否的路面结构疲劳寿命

路面结构层	方法	当量模量/MPa	沥青饱和度 VFA/%	疲劳加载系数 k_b	层底拉应变 $\mu\epsilon$	温度调整系数 K_{TI}	疲劳寿命 $N_f/10^8$
下面层	常规	10 952	59.3	0.956	39.294	1.097	1.967
	水气场	9 726		0.956	40.209	1.039	1.726

3.2 室内试验疲劳寿命计算

通过室内试验验证水气对沥青混合料性能的影响,将 AC-13 沥青混合料放置于 50℃和 99%湿度的环境中进行 24 h 水气侵蚀如图 10 所示。将初始状态和水气侵蚀后的 AC-13 沥青混合料轮碾压实成型后,切制棱柱体小梁,采用重复弯曲试验评价水气侵蚀过程对混合料疲劳性能的影响,在室温下,选择半正弦波形加载模式,试验频率 10 Hz,应力比分别设为 0.3、0.4、0.5 和 0.6。试验测试结果如表 7 所示。

由图 10 可知,不同水气侵蚀程度沥青混合料的疲劳寿命对数 $Ig N_f$ 和应力比呈现良好的线性关系,根据试验数据进行线性拟合分析,可以求出沥青混合料的疲劳方程。



图 10 沥青混合料经受水气侵蚀

表 7 不同水气侵蚀程度混合料疲劳试验数据

老化程度	0.3	0.4	0.5	0.6
初始状态	5 669	3 681	2 899	2 246
水气侵蚀	2 598	1 891	1 501	1 081

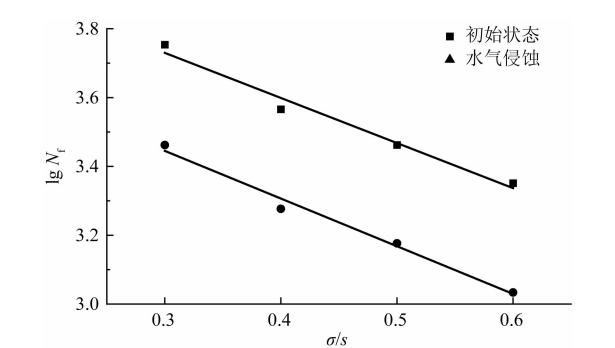


图 11 不同水气侵蚀程度的疲劳试验拟合

$$lg N_f = K - n(\sigma/s) \tag{3}$$

式中： N_f 为疲劳寿命次数； σ/s 为应力比； K 为疲劳方程截距； n 为疲劳方程的斜率。

不同水气侵蚀程度沥青混合料的拟合方程及相关系数结果如表 8 所示。

疲劳寿命方程中的截距 K 可以表征混合料的抗疲劳性能,斜率 n 可以表征混合料疲劳寿命对应力比的敏感性,由表 8 可知,随着水气侵蚀程度的加深,沥青混合料的 K 值减小, n 值增大,表明随着水气侵蚀程度的加深,沥青混合料疲劳性能出现下降,疲劳寿命呈现快速衰减的趋势。

表 8 不同水气侵蚀程度的沥青混合料疲劳寿命对数方程

沥青状态	疲劳寿命对数拟合方程	R^2
初始状态	$lg N_f = 4.1228 - 1.31(\sigma/s)$	0.967 77
水气侵蚀	$lg N_f = 3.7606 - 1.39(\sigma/s)$	0.980 4

4 结论

根据广东省 2022 年气候文件,基于银洲湖高速公路实体工程,采用有限元数值模拟技术对展开常规水气浓度场与实际非均匀水气浓度场对路面力学响应的差异,基于规范疲劳公式,分析其对疲劳寿命的影响,并结合相关室内试验,进一步验证水气侵蚀后沥青混合料疲劳寿命的变化趋势,主要结论如下。

1)在非均匀水气浓度场的影响下,上面层底部水平拉应变车轮正下方位置增大 110.68%,其余层位水平拉应变增大 5%左右。表明实际水气浓度场的存在使得上面层更易产生开裂。应力方面,面层水平应力减小约 10%,基层、底基层承担的应力增加 10%左右,增大了基层病害产生的危险。

2)对比规范中疲劳寿命计算方法,考虑实际非均匀水气浓度场使得面层疲劳寿命降低 12.246%,表明常规方法在计算疲劳寿命时大于路面实际的疲劳寿命,室内试验拟合结果同样表明沥青混合料被水气侵蚀后会缩短其疲劳寿命,因此,在道路寿命预估时,需引入实际非均匀水气浓度场提高预估准确性。

参考文献

[1] 李文鹏,徐永丽,周吉森. 动荷载与温度场作用下沥青路面坑槽修补界面力学特性研究[J]. 科学技术与工程, 2023,23(8):3466-3473.

[2] 陈文锋,周加佳,余凯. 高温多雨气候条件耐久性沥青混合料设计及性能研究[J]. 科技和产业, 2023, 23(3): 260-266.

[3] 吕润华,张海虎. 考虑层间接触状态的沥青路面力学性能分析[J]. 科学技术与工程, 2022,22(25):11203-11211.

[4] 宋福春,白祥鸽. 基于非达西渗流定律的沥青饱水路面结构动力特性研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023,39(1):97-103.

[5] 周志刚,李岩,俞文生,等. 不同荷载模式作用下饱水沥青路面结构动力响应对比分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019,35(2):263-276.

[6] 臧振宇. 饱和沥青路面动力流固耦合响应特性分析[J]. 路基工程, 2022(2):157-161.

[8] 陈少全. 甘肃高速公路沥青路面水损害及防治措施研究[D]. 西安:长安大学, 2011.

[9] 罗蓉,黄婷婷. 沥青混合料内的水气运动[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016,35(S1):49-60.

[10] 马荣辉. 水气作用下沥青混合料性能劣化特征研究[D]. 西安:长安大学, 2021.

[11] 潘雁石. 基于扩展有限元的沥青路面开裂研究[D]. 西安:西南交通大学, 2018.

[12] 中交公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范(JTG F40—2004)[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.

[13] XI L,LUO R,LIU H. Evaluating the influence of humidity on asphalt mixture performance by the flow number test[J]. Construction and Building Materials, 2021,284(1):122754.

[14] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2022.

Simulation of Mechanical Response of Gaseous Water to Pavement Structure

LI Jian¹, LUO Chuanxi¹, CUI Haobin²

(Guangzhou Xiaoning Institute of Roadway Engineering,Guangzhou 510641,China; Changsha University of Science & Technology,Changsha 410114,China)

Abstract: In order to explore the influence law of gaseous water on the mechanical response of asphalt pavement, a three-dimensional finite element model of pavement structure considering gaseous water was established by using finite element software ABAQUS. Based on fatigue life calculation formula and laboratory test, the influence difference between conventional and actual non-uniform water and air concentration fields on pavement fatigue life was analyzed. The results are as follows. The fatigue life calculation of conventional water-gas concentration field is greater than the actual fatigue life of pavement, which overestimates the anti-fatigue ability of pavement structure. Laboratory tests show that the fatigue life of asphalt mixture after the erosion of gaseous water will also shorten its fatigue life, resulting in the lack of safety of pavement. The actual inhomogeneous moisture concentration field can improve the accuracy of the results.

Keywords: asphalt pavement; vaporous water; finite element software; laboratory test; fatigue life