

气态水与液态水综合作用下的路面力学结构响应

——以江门市银洲湖高速公路项目为例

谭锦志

(江门市银洲湖高速公路有限公司, 广东 江门 529000)

摘要: 为探究沥青路面水损害产生的原因及机理,利用有限元软件 ABAQUS,结合广东省银洲湖高速公路路面结构组合,并基于渗流理论,分别建立常规水气浓度场、实际非均匀水气浓度场及综合考虑实际非均匀水气浓度场和液态水的三种工况下有限元模型,分析路面在不同工况下的力学响应。结果表明:实际非均匀水气浓度场的存在增大了上面层开裂风险,随着降雨导致的液态水介入,面层处在正负交替的孔隙水压力中,反复冲刷疲劳开裂部位,进一步加速沥青与集料剥离,最终导致水损害相关病害,而上面层经受的空隙水压力最为严重,因此路面在设计过程中,应重点增强上面层的抗水损能力。

关键词: 沥青路面; 水损害; 水气浓度场; 液态水; 力学响应

中图分类号: U416.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)02-0257-06

随着我国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^[1-3],但其水损害已经成为南方多雨地区路面较为普遍的早期病害,严重影响着道路行车安全。宋福春和白祥鸽^[4]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。周志刚等^[5]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,分析饱和和沥青路面水力损伤机制,发现沥青面层深度为 0.05 m 范围内容易出现水力损伤。基于饱和渗流场作用下的路面力学分析已有较多研究,但气态水对路面结构影响同样巨大^[7-8],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],但结合实际非均匀水气浓度场与饱和渗流场共同作用下路面力学响应却少有研究。鉴于此,本文基于银洲湖高速公路实体工程分别建立了常规水气浓度场与实际非均匀水气浓度场,并引入液态水渗流场,对比分析三种不同工况下道路力学响应影响差

异,从而为多雨地区的路面设计提供参考与补充。

1 基本理论假设与方法

1.1 水气、液态水对路面结构影响方式的假设

不同水气浓度与温度养生后的试件表现出不同程度的动态模量衰减,因此将水气、温度归于影响材料参数的类别。荷载为动载形式,会同时影响混合料的动态模量和路面结构的应力状态。同时,液态水仅考虑改变混合料中孔隙压力进而影响路面结构的应力状态分布。将各因素总结如图 1 所示。

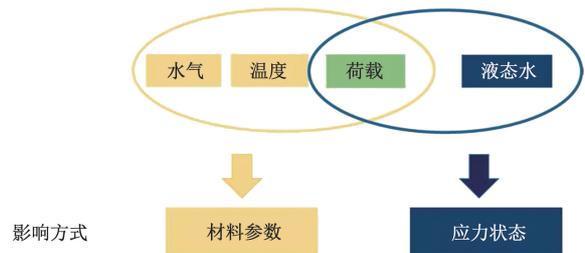


图 1 各因素对路面结构响应的影响方式

1.2 渗流理论

在考虑液态水方面,目前学者均采用渗流理论^[11],由于其计算复杂性,普遍采用有限元方法进行计算。控制方程主要有两个,分别为渗流控制方

收稿日期: 2024-06-30

作者简介: 谭锦志(1988—),男,广东江门人,工程师,研究方向为高速公路建设管理、施工管理。

程与渗流-应力耦合方程。在有限元模拟含液态水的路面结构响应时,首先根据渗流控制方程和渗流连续方程将节点位移和孔隙水压力空间离散,然后在位移和渗流边界的条件下,对每个时间步内的方程进行求解^[12]。

1.2.1 渗流控制方程

ABAQUS 中定义多孔介质时,将有限元网格定义为固相,液相可渗透通过该网格单元。将流入多孔介质中的液体分为可自由流动的自由水和与固体结合的结合水,体积分别为 V_w 和 V_t 。多孔介质某一点上存储的液体质量的增加速率与在时间增量内流入该点的液体质量的增加速率相等,将这种连续性陈述以变分方程形式写为^[11]

$$\int \frac{1}{J} \frac{d}{dt} [J \rho_w (n_w + n_t)] dV = - \int \frac{1}{J} \rho_w n_w n v_w dS \quad (1)$$

式中: ρ_w 为液体密度, kg/m^3 ; n_w 、 n_t 分别为自由水、结合水与总体积的比值; V 为固体体积; n 为界面外法线向量; v_w 为液体渗入速度, m/s ; $J = dV/dV^0$; S 为面积。

1.2.2 渗流应力耦合方程

根据虚功原理,某时刻多孔介质内部应力在虚应变上做的功与外力在虚位移上所作的功相等^[11]。即

$$\int \sigma \delta \epsilon dV = \int f_S \delta_r dS + \int f \delta_r dV + \int f_w \delta_r dV \quad (2)$$

式中: δ_r 为多孔介质的虚位移场; $\delta_\epsilon = \partial \delta_r / \partial x$; f_S 为多孔介质受到的面荷载; f_w 为单位体积中的孔隙水的重力; f 为除孔隙水外的单位体积重力。

多孔介质中的内力 σ 并非全部作用在骨架上,还有一部分以孔隙水压力的形式存在。作用在多孔介质骨架上的应力即为有效应力,其表达式为

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (3)$$

带入式(2)可得应力耦合平衡方程为

$$\int (\sigma' + u_w \delta_\epsilon) dV = \int f_S \delta_r dS + \int f \delta_r dV + \int n \rho_w g \delta_r dV \quad (4)$$

式中: n 为某方向与体积相关的系数。

2 有限元模型建立

2.1 材料参数与力学指标

依托广东省内某实际工程路面组合结构,采用 ABAQUS 有限元软件建立模型,模型尺寸为 $6 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,路面采用常规的半刚性结构,各层层间完全连续,同时对垂直于路线方向两侧 x 方向进行

约束,对延路线方向两侧 z 方向(延路线方向)进行约束;模型底面完全约束。渗流场边界条件设定路面及两侧为透水边界,车辆经过时荷载作用区域为不透水边界。路面模型如图 2 所示。路面结构各层材料中,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,数据参考相关文献^[13-15],如表 1 和表 2 所示。

2.2 荷载及分析步定义

2.2.1 荷载

目前我国沥青路面设计规范将车轮荷载简化为

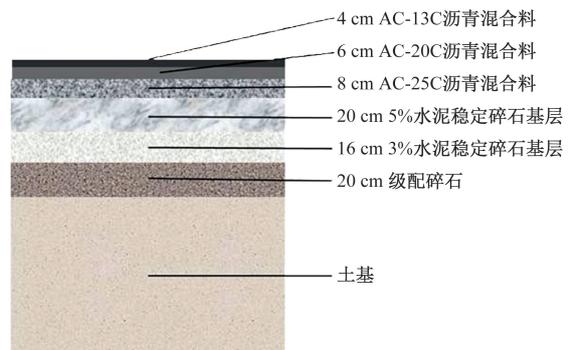


图 2 路面结构组合形式

表 1 材料参数定义

材料	厚度/ cm	模量/ MPa	泊松 比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
AC-13C 混合料	4				3.44×10^{-7}
AC-20C 混合料	6		0.35	2 300	8.16×10^{-7}
AC-25C 混合料	8				5.26×10^{-6}
5%水泥稳定碎石基层	20	1 600	0.20	2 200	1×10^{-9}
3%水泥稳定碎石基层	16	1 400			
级配碎石	20	350	0.35	2 100	1×10^{-9}
土基	—	50	0.4	1 800	1×10^{-9}

表 2 沥青混合料黏弹性参数

松弛时间(t)/s	不同类型混合料的松弛模量 Prony 级数		
	AC-13C	AC-20C	AC-25C
2.0×10^5	0.002 78	0.001 50	0.002 26
2.0×10^4	0.006 17	0.003 32	0.004 49
2.0×10^3	0.014 84	0.008 67	0.010 99
2.0×10^2	0.031 46	0.021 73	0.026 41
2.0×10	0.056 88	0.048 20	0.057 55
2	0.086 00	0.087 30	0.103 17
0.2	0.109 62	0.125 31	0.144 67
2.0×10^{-2}	0.120 53	0.144 75	0.159 57
2.0×10^{-3}	0.117 65	0.140 11	0.144 61
2.0×10^{-4}	0.104 76	0.118 90	0.113 68
2.0×10^{-5}	0.087 43	0.092 20	0.081 35
2.0×10^{-6}	0.061 61	0.061 99	0.051 51
2.0×10^{-7}	0.197 94	0.143 52	0.096 27
瞬态剪切模量 (20 C)MPa	16 711.02	13 788.54	15 508.98

当量圆形均布荷载^[16],标准轴载 100 kN,轮胎接触压力 $P=0.7 \text{ MPa}$ 。本文所用为双轮组车轴,则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

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

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,与轮载作用半径有关,荷载与计算点间距离超过 6δ 时,基本不会影响计算点。因此令作用时间 $T=12\delta/v$, v 为车速。

以车速 100 km/h 为例,荷载作用时间为 0.046 s,计算并绘制荷载随时间变化的曲线如图 3 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。

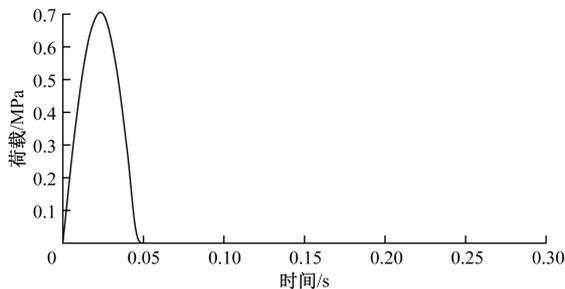


图 3 荷载随时间变化曲线

2.2.2 预定义场设置

1) 温度场

温度对沥青路面结构响应应具有较大影响,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—19:00,13:00—19:00 的温度数据如表 3 所示。为分析最不利温度场,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 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。

2) 水气浓度场

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 °C) 均在 40% 左右^[16],即内部水气浓度为 7 g/m^3 。因此,针对常规水气浓度场,

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/°C				路面结构 温度归一 化系数(T)
	路表	上面层底部	中面层底部	下面层底部	
	0 cm	4 cm	10 cm	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

将预定义水气浓度设为 7 g/m^3 。非均匀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。

3) 饱和渗流场

在车辆荷载作用前,路面结构已处于平衡状态,即重力荷载和孔隙水压力作用下结构内部存在应力,且位移为零。因此在进行有限元的渗流荷载耦合作用分析前,需进行地应力平衡分析;方法为通过渗流分析以获取内部的应力状态,并作为预定义应力场导入。因此分析步的流程包括:①首先建立稳态渗流分析步,表征路面结构在降雨过程中达到饱和渗流状态。其中预定义场为温度场、水气浓度场。计算完成后将应力场、内部孔隙水压力分布导出。②在原模型上进行修改,将渗流分析步改为地应力平衡分析步,再添加一个瞬态渗流分析步用于车辆荷载加载,时长同样为 0.3 s,导入初始应力场、孔压分布、温度场、水气浓度场作为预定义场。

2.2.3 模型运算原理及计算点选

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。然后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。路面结构响应取值点如图 4 所示,其中 d 为路面结构荷载当量圆直径。荷载计算模型为双轮组,选取车轮正下方和双轮组两车轮中间两个作用点为分析点进行取值,调取该位置路面结构深度方向上的竖向位移和应变、应力值进行分析。

3 路面结构响应分析

3.1 路面结构各层位移

根据模型计算结果,统计三种不同工况下不同位置竖向位移峰值如图 5 所示,对比以上数据可知,水气造成的材料模量衰减对竖向位移影响并不显

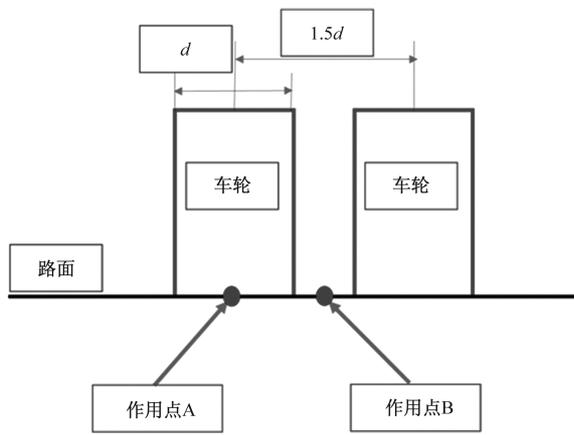


图 4 路面结构荷载作用

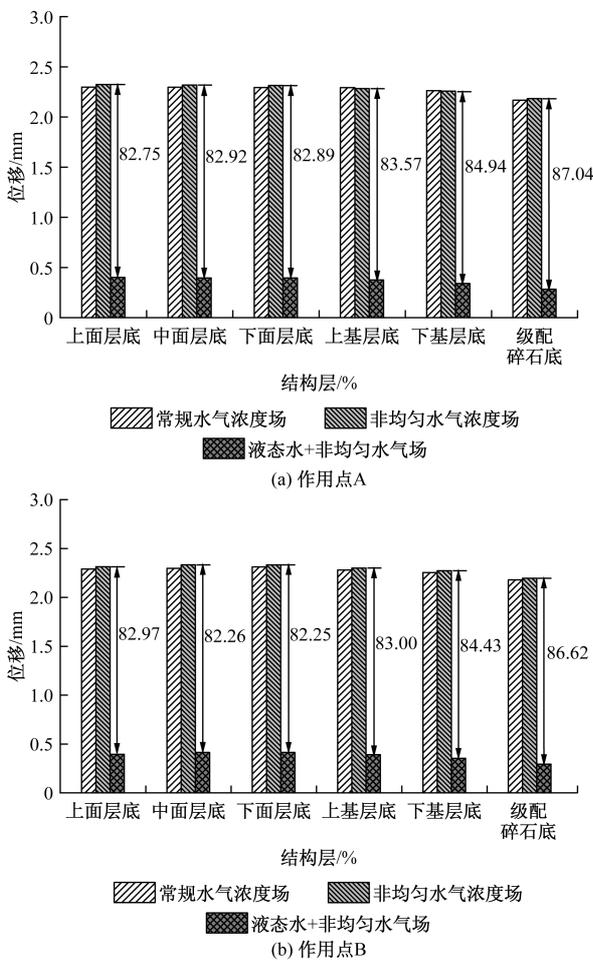


图 5 液态水、水气场综合影响下路面不同位置处最大竖向位移值对比

著,而液态水严重减小了路面结构的竖向位移,减少约 80%。由于考虑的为饱水状态,因此孔隙中的水分担了部分荷载,同时孔隙中的水无法压缩,使得路面结构整体竖向位移减小。由于本文采用的是饱和渗流模型,未考虑动水压力的耗散,故计算偏小,液态水作用下路面实际位移小于该值。

3.2 路面结构各层底应变

根据模型计算结果,绘制不同工况下的层底拉应变峰值对比如图 6 所示,水气造成的材料模量衰减会大幅度增大水平应变。但在此基础上,降雨产生的液态水饱和路面结构反而使得面层结构水平应变减小 10%左右,基层结构各层水平应变减小 15%左右;唯一不同的是上面层水平应变仍增加 5%左右。

竖向应变方面,A、B 作用点规律类似,故仅对比作用点 A 下方各结构层底竖向应变值,如图 7 所示,引入饱和液态水之后,基层应变小幅度增加,但考虑其为压应变对整体结构影响不大。

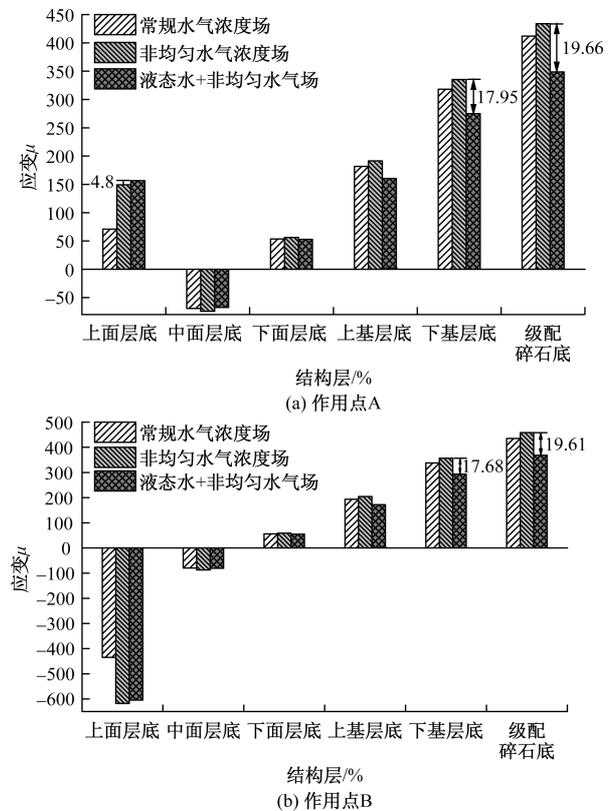


图 6 液态水、水气场综合影响下路面不同位置处最大水平应变值对比

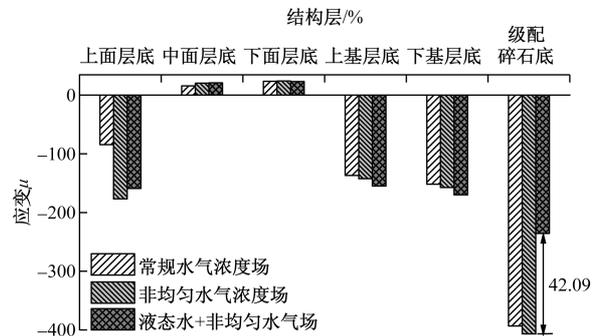


图 7 液态水、水气场综合影响下路面不同位置处最大竖向应变值对比

3.3 路面各结构层底应力

进一步分析液态水作用下各层水平、竖向两个方向的应力变化,同样分析 A、B 两点路面结构深度方向。当液态水与非均匀水气共同作用后,水气造成的材料模量衰减使得面层可承担的应力减小,进而由基层承担,增大了基层开裂的风险。在此基础上,当液态水作用后,整体承受的水平应力减小 20%左右。如图 8 所示。

3.4 孔隙水压力

孔隙水压力的存在会使得混合料集料与沥青剥离,产生水损害现象,因此分析孔隙水压力的分布有助于从路面结构的角度确定路面可能出现水损害的位置。通过分析孔隙水压力可以发现:各结构

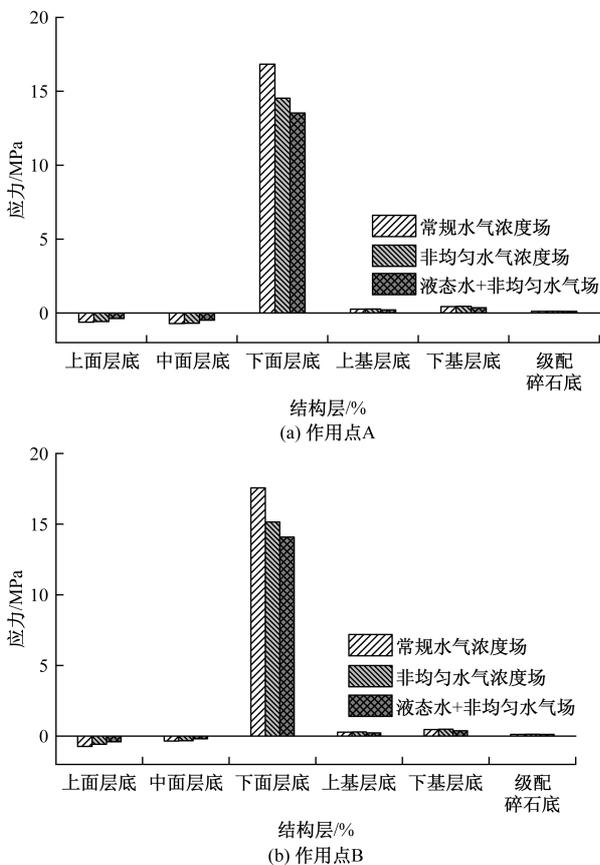


图 8 液态水、水气场综合影响下路面不同位置处最大水平应力值对比

层相比,面层的孔隙水压力最大,且面层处于交替变化的孔隙水压力中;如表 4 所示,正值代表压力,峰值为 0.311 MPa,负值代表吸力,峰值为 -0.306 MPa,面层在这种压力、吸力交替的孔隙水压力下受到反复冲刷,加大了对混合料黏附性的考验,易产生水损害现象。孔隙水压力的最大值出现在车轮下方,原因是该区域为不透水边界,其余位置对应路表区域为透水边界,对应边界孔压为 0。因此路面在设计过程中,应增强上面层的抗水损能力,同时在维护过程中,重点关注路表轮迹带位置的水损害现象。如图 9 所示。

4 结论

利用有限元软件分别建立了常规水气浓度场与考虑实际非均匀水气浓度场下的三维有限元模型,基于渗流理论,在实际非均匀水气浓度场的基础上引入了饱和液态水渗流场,对不同工况下模型进行了路面结构位移、应变、应力及空隙水压力分析,主要结论如下。

(1) 竖向位移方面,液态水的存在使得路面结构竖向位移大幅度减小约 80%,原因是孔隙中的水不可压缩,转化为孔隙水压力作用于混合料。

(2) 液态水减小了结构层的水平应力、应变;但面层竖向变形增大,可承担应力减小;削弱了面层的承载能力,加大了基层的竖向承载负担。

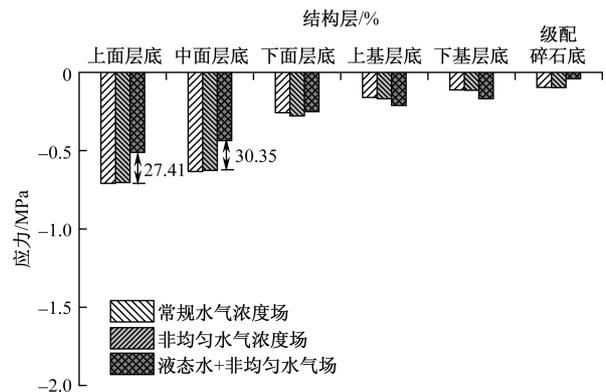


图 9 液态水、水气场综合影响下路面不同位置处最大竖向应力值对比

表 4 路面不同位置处最大孔隙水压力

作用力	路面轮下位置不同深度处最大孔隙水压力/MPa					
	上面层底	中面层底	下面层底	上基层底	下基层底	级配碎石底
压力	0.311	0.277	0.268	0.002	0.002	0.071
吸力	-0.306	-0.283	-0.234	-0.033	-0.046	0.000
作用力	路面两轮中间位置不同深度处最大孔隙水压力/MPa					
	上面层底	中面层底	下面层底	上基层底	下基层底	级配碎石底
压力	0.207	0.282	0.282	0.002	0.002	0.070
吸力	-0.178	-0.236	-0.224	-0.037	-0.053	0.000

(3)路面结构水损害现象是液态水、水气共同作用的结果。水气环境造成的模量衰减导致面层应变增大,进而增加了疲劳开裂的危险。随着降雨导致的液态水介入,面层处在正负交替的孔隙水压力中,反复冲刷疲劳开裂部位,进一步加速沥青与集料剥离,最终导致水损害相关病害,上面层尤为严重。因此路面在设计过程中,应增强上面层的抗水损能力,同时在维修过程中,重点关注路表轮迹带位置的水损害现象。

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.
- [7] 牛思学. 甘肃省沥青路面水损坏调查分析[J]. 甘肃科技, 2010(21): 3.
- [8] 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.
- [9] 柳子尧. 沥青混合料穿透型水气扩散影响因素研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [10] 李键,罗传熙,崔浩斌. 气态水对路面结构力学响应模拟研究[J]. 科技和产业, 2023, 23(16): 220-225.
- [11] 丁永富. 透水沥青路面渗流特性与雨水控制效果模拟研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [12] 吕从聪,李宗利,李东奇. ABAQUS 渗流应力耦合分析中渗透荷载施加问题探讨[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(5): 68-72.
- [13] 郑健龙,钱国平,应荣华. 沥青混合料热粘弹性本构关系试验测定及其力学应用[J]. 工程力学, 2008(1): 34-41.
- [14] 梁洪涛. 移动荷载作用下层状沥青路面结构时程响应分析[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [15] 郭乃胜,谭忆秋,赵颖华. 动荷载下饱水沥青路面黏弹性分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 7.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 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.

Mechanical Structural Response of Pavement under the Combined Effects of Gaseous and Liquid Water: Taking the Yinzhouhu Expressway Project in Jiangmen City as an Example

TAN Jinzhi

(Jiangmen Yinzhouhu Highway Co. LTD. , Jiangmen 529000, Guangdong, China)

Abstract: In order to explore the cause and mechanism of water damage on asphalt pavement, the finite element software ABAQUS was used, combined with the pavement structure combination of Yinzhou Lake Expressway in Guangdong Province, and based on the seepage theory, the finite element models under the three working conditions of conventional water concentration field, actual non-uniform water concentration field and comprehensive consideration of actual non-uniform water concentration field and saturated liquid water were established respectively. The mechanical response of pavement under different working conditions was analyzed. The results show that the actual presence of non-uniform water vapor concentration field increases the cracking risk of the upper layer. With the intervention of liquid water caused by rainfall, the surface layer is in the alternating positive and negative pore water pressure, repeatedly scour the fatigue cracking site, further accelerating the stripping of asphalt and aggregate, and finally leading to water damage related diseases. The upper layer is subjected to the most serious void water pressure. Emphasis should be placed on enhancing the water damage resistance of the upper layer.

Keywords: asphalt pavement; water damage; water vapor concentration field; liquid water; mechanical response