

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240201002

多雨地区路基湿度变化对路面力学响应影响研究*

何亮¹, 李慧丽², 刘维正³, 粟双全¹, 黄轩嘉³

(1. 湖南省衡永高速公路建设开发有限公司, 湖南 衡阳 421600; 2. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙 410203; 3. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 为了分析多雨地区环境作用下路基湿度变化对路面结构力学响应的影响, 通过建立考虑应力水平和基质吸力的动态回弹模量 M_R 预估模型, 采用COMSOL软件建立路基路面结构数值模型, 运用系数型偏微分方程将 M_R 嵌入数值模型的本构关系中, 结合实测数据与规范法计算结果对比, 验证了模型的适用性, 并对不同降雨和地下水位条件下路面弯沉和疲劳寿命的历时变化规律进行分析。结果表明: 回弹模量随含水率增加而减小, 弯沉值随含水率增加而增大; 当路基土的饱和度由79%增至90%时, 路面最大弯沉值增加了126 μm 。当地下水位由-5 m升至0 m时, 路表最大弯沉值增加62%。采用我国和美国路面设计规范中的疲劳寿命计算方法得到的沥青路面层疲劳寿命结果均有较高的准确度, 最大误差只有2%。随着地下水位的升高, 面层底最大拉应力呈线性增大而疲劳寿命减小; 当地下水位升高5 m, 面层底拉应变提升28.35%, 沥青路面层疲劳寿命降低62.8%。研究结果为多雨地区道路结构设计和长期性能保障提供理论依据。

关键词: 道路工程; 力学响应; 数值模拟; 路基土; 弯沉值; 疲劳寿命

中图分类号: U416 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1151-12

Study on Effect of Subgrade Moisture Variation on Pavement Mechanical Response in Rainy Regions

HE Liang¹, LI Huili², LIU Weizheng³, SU Shuangquan¹, HUANG Xuanjia³

(1. Hunan Hengyong Expressway Construction and Development Co., Ltd, Hengyang 421600, China;

2. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410203, China;

3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: To analyze the effect of subgrade moisture variations on the mechanical response of pavement structures under environmental conditions in rainy regions, a prediction model for the dynamic resilient modulus (M_R) considering stress levels and matric suction was established. A numerical model of the subgrade and pavement structure was developed using COMSOL software. The M_R was then embedded into the constitutive relationship of the numerical model through the application of a coefficient-type partial differential equation. The applicability of the model was verified by comparing measured data with results calculated using specification methods. The temporal variation patterns of pave-

* 收稿日期: 2024-02-01; 修回日期: 2024-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078500)、湖南省自然科学基金项目(2019JJ40344)资助

作者简介: 何亮(1977—), 男, 高级工程师。主要从事交通岩土工程研究。E-mail: 1121807285@qq.com

通信作者: 刘维正(1982—), 男, 副教授, 博士。主要从事路基低碳低扰与绿色智能建造研究。E-mail: liuwz2011@csu.edu.cn

ment deflection and fatigue life under different conditions of rainfall and groundwater tables were further analyzed. The results showed that the resilient modulus decreased with increasing moisture content, while the deflection value increased. When the saturation of subgrade soil increased from 79% to 90%, the maximum pavement deflection increased by 126 μm . Additionally, when the groundwater table rose from -5 m to 0 m, the maximum surface deflection increased by 62%. Both the fatigue life calculation methods specified in Chinese and American pavement design specifications yielded highly accurate results for asphalt pavement surface layers, with a maximum error of only 2%. As the groundwater table increased, the maximum tensile stress at the bottom of the surface layer increased linearly, while the fatigue life decreased. When the groundwater table rose by 5 meters, the tensile strain at the bottom of the surface layer increased by 28.35%, and the fatigue life of the asphalt pavement layer declined by 62.8%. These findings provide a theoretical basis for road structure design and long-term performance assurance in rainy regions.

Keywords: road engineering; mechanical response; numerical simulation; subgrade soils; deflection value; fatigue life

0 引言

在我国广东、云南、贵州、湖南等潮湿多雨地区,红黏土路基湿度受降雨和地下水水位的影响变化幅度较大^[1]。这些地区的路基土层在运营期间含水率整体比施工阶段高^[2],导致路基回弹模量下降^[3-4]。由于路基土刚度的减小,在交通荷载和环境条件(含水率变化)作用下,势必会对路基上部的基层及面层力学响应产生影响^[5-7]。因此,研究路基湿度变化对路面力学响应的影响具有重要意义。

路基作为路面结构的基础,其刚度直接影响到路面结构的使用寿命^[8-9]。路基回弹模量是表征刚度的主要指标,其易受环境湿度变化的影响,导致路面结构的承载力发生改变^[10-11]。S. Zuo等^[12]在现场试验段对路基土压力、孔隙压力和沉降进行长期监测,发现路基土含水率的变化会导致路基基底压力方向的变化。祁孔庆等^[13]和M. Elshaer等^[14]分别通过有限元法和弹性理论计算方法分析了落锤式弯沉仪作用下路面变形随含水量的变化规律,发现水位抬升会导致沥青面层层底拉应变和路基顶面压应变呈指数增长,而回弹模量随着水位的上升呈现线性减小趋势。董城等^[15]和李志勇等^[16]通过二次开发将动态回弹模量模型嵌入到ABAQUS中,分析了路基动态回弹模量对路面动力响应的影响,发现当路基土含水率从最优含水率-3%增加到最优含水率+3%时,回弹模量相应显著减小,路面顶

面最大弯沉增加,路面板的板底最大拉应力增加,路面结构的疲劳寿命减少。通过对上述文献分析发现目前的研究主要考虑了路基土回弹模量的变化对于路基路面响应的影响规律,但是对于环境引起路基湿度变化对路面结构力学响应的影响研究较少。

综上,本文通过建立考虑应力水平和基质吸力的动态回弹模量 M_R 预估模型,采用COMSOL软件建立路基路面结构数值模型,运用系数型偏微分方程将 M_R 嵌入数值模型的本构关系中,与现场实测数据和规范法计算结果对比验证模型的正确性,并对不同降雨和地下水水位条件下路面弯沉和疲劳寿命的历时变化规律进行分析。研究结果为多雨地区道路结构综合性能评价及结构设计提供科学有效的指导。

1 湿度变化下非饱和路基土动态回弹模量预估模型

为了考虑含水率变化对回弹模量值的影响,基于前期湿度变化下红黏土动态回弹模量试验结果和路基土 M_R 预估模型的研究成果^[17],将基质吸力对土应力水平产生的影响作为围压的应力分量引入 M_R 预估模型中。关于应力水平和基质吸力的 M_R 预估模型表达式如式(1)所示:

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (1)$$

式中, k_1, k_2, k_3 为模型参数; θ 为体应力, $\theta = 3\sigma_c + \sigma_d$; $\tau_{oct} = (\sqrt{2}/3)\sigma_d$; Θ 为相对体积含水率, $\Theta = \theta/\theta_s$; ψ 为基质吸力; P_a 为大气压强, 取 100 kPa; τ_{oct} 为八面体剪应力, 取 13 kPa; κ 为拟合参数, 考虑到不同类型土样参数 κ 的变化, 将其表示为塑性指数 I_p 的经验函数关系式^[18]:

$$\kappa = -0.0016I_p^2 + 0.0975I_p + 1 \quad (2)$$

基于课题组前期研究成果^[17], 采用 SPSS 回归分析建立模型参数 k_1, k_2, k_3 分别与塑性指数 I_p (%)、液限 w_L (%)、黏粒含量 $Clay$ (%)、细颗粒含量 $P_{0.075}$ (%)、干密度 ρ_d (g/cm³)、活性指数 $AI(I_p/P_{0.075})$ 和 $w_{PI}(I_p \cdot P_{0.075})$ 之间的经验关系, 如式(3)所示:

$$\left. \begin{aligned} \ln k_1 &= 2.531 + 0.108I_p - 0.039w_L - \\ &\quad 0.016\%Clay + 2.008\rho_d \\ k_2 &= 0.653 - 0.017P_{0.075} + 1.054\rho_d \\ k_3 &= -3.838w - 0.04P_{0.075} - 17.662AI + \\ &\quad 0.112w_L - 0.786\rho_d \end{aligned} \right\} (3)$$

综上, 采用本文 M_R 模型计算路面弯沉所需主要参数有饱和度—深度函数关系 ($S-Z$), SWCC (土水特征曲线), 土基层物理性质参数, 面层物理力学性质参数和基层物理力学性质参数。

SWCC 曲线方程采用 D.G. Fredlund 等^[19] 提出的修正预估模型(式(4))。

$$S = \frac{\theta_w}{\theta_s} = \frac{1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 1000000/\psi_r)}}{1 / (\ln(e + (\psi/a)^n))^m} \quad (4)$$

式中, S 为土体饱和度; e 为 2.718; a, n, m, ψ_r 分别为模型参数。

2 考虑 M_R 的路基路面结构数值模型

2.1 模型建立

本文以某高速公路改扩建工程为研究对象^[18], 采用 COMSOL 对该工程外车道中心及以下的路基纵剖面进行建模, 计算沥青路面弯沉。由于路面

层、基层和路基层的物理力学性质差异明显, 在计算路面弯沉盆时路基路面结构分层对计算的精度影响较大^[20]。因此, 在数值建模时, 将路基路面结构划分为沥青混凝土面层、水稳碎石基层和路堤。

整个模型剖面尺寸为 4 m × 7.54 m, 其中, 沥青面层厚 0.18 m、基层厚度为 0.36 m、路堤至地基层为 7 m。模型采用矩形网格进行划分, 路堤网格细长比为 1:5, 定义瞬态分析过程。计算过程中不考虑地基层的变形, 模型底部边界竖向位移设置为 0, 两侧边界横向位移设置为 0, BZZ-100 标准轴载加载区域之外的顶部边界采用自由边界条件。模型共划分为 924 个单元, 986 个节点。数值模型如图 1 所示。

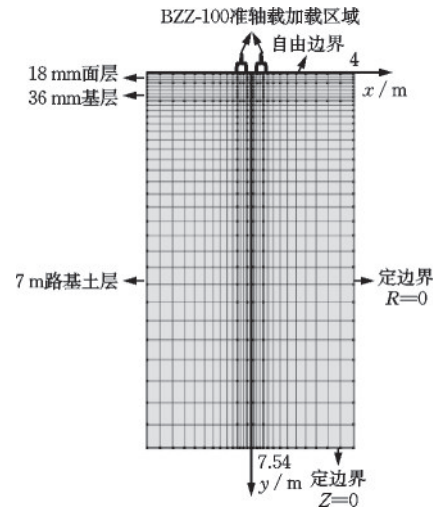


图 1 路基和路面结构数值模型

Fig.1 Numerical model of subgrade and pavement structure

2.2 计算参数及工况

2.2.1 计算参数

路基土物理性质参数如表 1 所示; 土水特征曲线 SWCC 如图 2 所示; 沥青面层及路基土的回弹模量、泊松比和密度取值如表 2 所示; 根据《公路沥青路面设计规范》^[21], 计算荷载采用标准单轴双轮组加载(BZZ-100)。

表 1 路基土物理性质参数

Table 1 Parameters of physical properties of subgrade soil

土样名称	塑性指数	塑限/%	液限/%	细颗粒含量 $P_{0.075}/\%$	粉粒含量 $0.005 \text{ mm} \leq d \leq 0.075 \text{ mm}/\%$	黏粒含量 $d \leq 0.005 \text{ mm}/\%$	最优含水率/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	天然含水率/%
低液限黏土	18.5	25	43.5	79.1	38.4	40.7	17.2	1.75	18.2

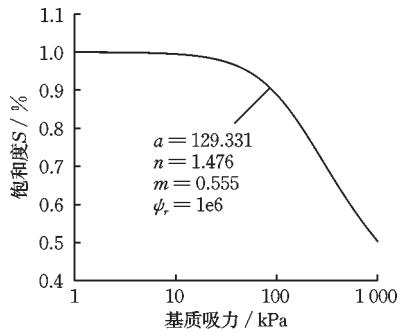


图2 土水特征曲线

Fig.2 Soil water characteristic curve

表2 面层及路基土力学性质汇总

Table 2 Summary of mechanical properties of pavement surface and subgrade soil layers

结构层	回弹模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
面层沥青混凝土	2 000	0.35	2 500
基层水稳碎石层	1 500	0.25	2 500
路基土层	OMC 状态	160.6	0.20 2 000
	任意状态	文献[17]	

在保证两轮的中心间距为 $1.5d=31.8\text{ cm}$ 不变的情况下,需要对穿压面当量圆直径进行修正;因此假定轮胎接地面宽度为 $B=18.8\text{ cm}$,轮胎边缘间距为 13 cm ,轮胎接地压强为 0.7 MPa ,单轴双轮组加载示意图如图3所示。为模拟路面结构的实际加载状况,FWD荷载频率对路面进行半正弦波形加载^[22],荷载峰值参照BZZ-100标准轴载取 0.7 MPa 。

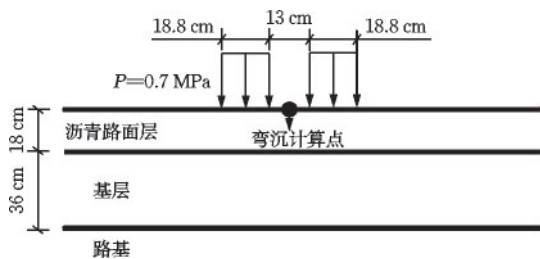


图3 单轴双轮组加载示意

Fig.3 Schematic diagram of single-axle double-wheel set loading

2.2.2 计算工况

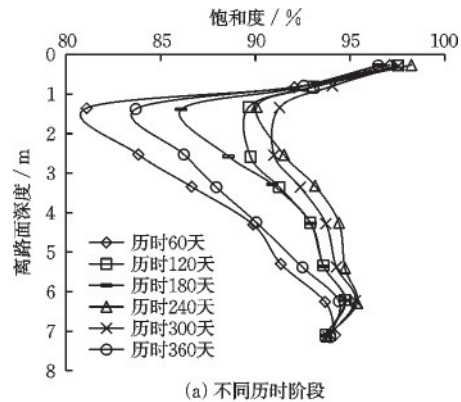
(1) 仅考虑降雨条件影响

为分析在气候条件及行车荷载作用下路基路面结构应力应变响应,根据不同历时阶段下的路基湿度场计算结果确定数值计算过程的6个工况,分别为历时60、120、180、240、300、360天六个时间段,

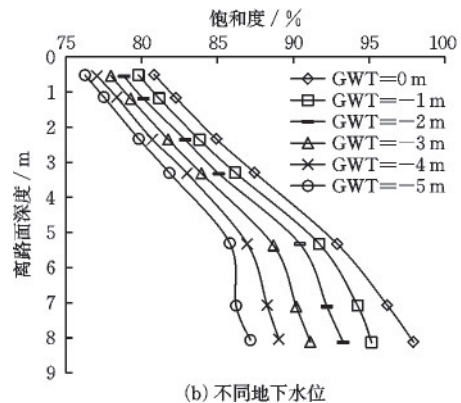
不同历时阶段下路基湿度随深度变化规律如图4(a)所示。

(2) 仅考虑地下水位影响

为分析在不同地下水位(Groundwater table, GWT)条件下路基路面结构应力应变响应,现根据不同地下水位下的路基湿度场计算结果拟定六个地下水位工况,不同地下水位的路基湿度随深度变化规律如图4(b)所示。



(a) 不同历时阶段



(b) 不同地下水位

图4 路基湿度随深度变化规律

Fig.4 Variation patterns of subgrade moisture with depth

2.3 M_R 预估模型在 COMSOL 中的实现

为考虑路基土在不同空间位置上的应力状态差异性对回弹模量的影响,在COMSOL软件中的系数型偏微分方程模块实现对路基土层材料的回弹模量的定义^[23]。具体步骤如下:

(1)定义材料的基本物理力学性质参数(k_1 、 k_2 、 k_3 、大气压);

(2)用 Δc 系数型偏微分方程模块创建一个新物理场并在其中定义两个独立变量 u_{21} 和 u_{22} ;

(3)使用两个独立变量 u_{21} 和 u_{22} 定义其与路基应力状态 solid.II1s (第一应力不变量), solid.II2s (第二应力偏量不变量)的弱解型本构关

系(式(5));

$$\begin{cases} (-u_{21} - \text{solid.II1s}) * \text{test}(u_{21}) \\ -(u_{22} - \text{sqrt}(\text{solid.II2s} * 2/3)) * \text{test}(u_{22}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\text{test}()$ 为试算函数; solid.II1s (第一应力不变量), solid.II2s (第二应力偏量不变量) 为软件预定义。

(4) 将回弹模量按式(6)定义为变量并赋值给路基层网格。考虑到 u_{21} 与 u_{22} 在迭代过程中可能出现负值, 采用 $\text{abs}()$ 函数将其规定为正值; 同时考虑到避免括号内的值为零, 在 $\text{abs}(u_{21})$ 后加上一个最小计算精度 eps , 保证其为正值。

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\text{abs}(u_{21})}{P_a} + \text{eps} \right)^{k_2} \left(\frac{\text{abs}(u_{22})}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (6)$$

式中, eps 为极小的常数。

表3 路基土层物理性质参数^[16]

Table 3 Parameters of physical properties of subgrade soil layers^[16]

土样名称	塑性指数	粗砂颗粒含量/%	细砂颗粒含量/%	细颗粒含量 $P_{0.075}/\%$	粉粒含量 $0.005 \text{ mm} \leq d \leq 0.075 \text{ mm}/\%$	黏粒含量 $d \leq 0.005 \text{ mm}/\%$	最优含水率/%	最大干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	相对重度	孔隙比	孔隙率
粉砂	无塑性土	8	64	28.2	19.2	9	14	1.78	1 345	2.65	0.97	0.49

表4 面层及路基土层力学性质

Table 4 Mechanical properties of pavement surface and subgrade soil layers

结构层	回弹模量/MPa	泊松比	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
面层沥青混凝土 (69 mm)	2 000 (20 °C)	0.35	2 500
基层热混合沥青混凝土 (140 mm)	2 000 (20 °C)	0.35	2 500
土基层粗颗粒粉砂	三参数模型、本文模型	0.20	2 300

表5 粗颗粒粉砂 SWCC 参数

Table 5 SWCC parameters of coarse-grained silt

a	n	m	ψ_r/kPa
10.08	20	0.075	22.96

(2) 计算工况

为对比分析路基土层在不同地下水位情况下的路面弯沉盆曲线的差异, 采用俄克拉荷马地区四个月的含水率随深度变化实测数据(图5), 计算地下水位分别取-2.6、-2.38、-3、-3.48 m。

2.4 模型验证

2.4.1 计算参数及工况

(1) 计算参数

为了验证考虑基质吸力 M_R 预估模型法以及新分层法用于计算考虑含水率对路面弯沉的可行性。采用文献[16]中典型柔性公路路面结构进行建模, 该柔性路面取自美国俄克拉荷马州 LTPP 研究计划的公路测试段。路基土物理学性质参数、泊松比、密度如表3所示; 面层、基层材料种类以及回弹模量、泊松比、密度如表4所示。采用规范法以及本文 M_R 预估模型计算 FWD 弯沉时所需土基粗颗粒粉砂 SWCC 中的模型参数 a, n, m 和 ψ_r 如表5所示。本文弯沉试验所用重锤力为 40 kN, 经换算可知其半正弦波荷载的峰值为 0.57 MPa。

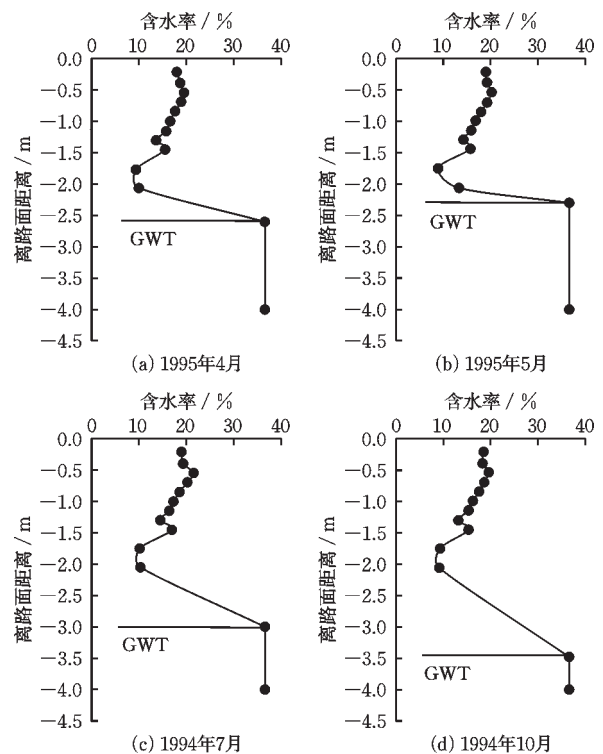


图5 俄克拉荷马测试地区含水率随深度变化剖面

Fig.5 Profiles of variation of moisture content with depth in Oklahoma test area

结合文献[14]中的公式(式(7))和图5(a)可计算得到回弹模量、含水率与路基深度的关系(图6)。由图可知,在路基深度0~1.75 m范围内,随着含水率的下降,回弹模量上升;在路基深度1.75~2.3 m范围内,随着含水率的上升,回弹模量下降。

$$\log \frac{M_R}{M_{R_{opt}}} = a + \frac{b-a}{1 + \exp\left[\ln \frac{-b}{a} + k_m(S - S_{opt})\right]} \quad (7)$$

式中, $M_{R_{opt}}$ 为最优含水率状态下的回弹模量; S 为饱和度; S_{opt} 为最优含水率状态下的饱和度; a 、 b 、 k_m 为模型参数。

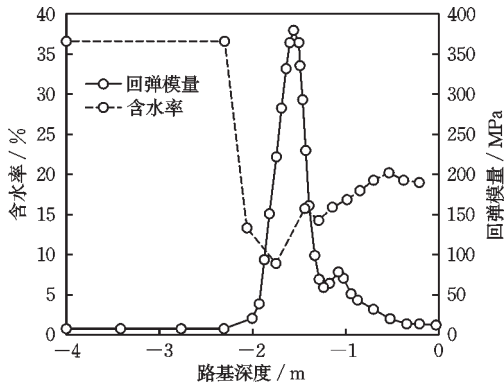


图6 回弹模量、含水率与路基深度的关系

Fig.6 Relationship between resilient modulus, moisture content, and subgrade depth

2.4.2 计算结果对比分析

图7为在40 kN重锤标准下FWD半正弦加载得到的四个月的实测值、公路沥青路面设计规范^[21]计算值和模型计算值,通过对比发现,考虑应力水平和基质吸力 M_R 预估模型计算得到的弯沉盆大小与形状与实测弯沉盆曲线较为吻合,而采用规范法^[21]计算得到的弯沉值较大。

为了准确评估不同计算方法所得结果的精度,通过式(8)对规范法^[21]和本文模型所得结果的决定系数值 R^2 进行对比分析。

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (8)$$

式中, SSE 为残差平方和, SST 为总离差平方和。

图8为规范法和本文计算模型所得弯沉盆计算结果与实测值对比图,发现采用本文考虑应力水平和基质吸力的 M_R 预估模型法拟合优度最高,决定系数依次为:0.975、0.965、0.974、0.939;规范法所得到的弯沉盆计算结果与实测值拟合度较差,决定系数 R^2 不超过0.8。因此,本文提出的考虑基质吸力的

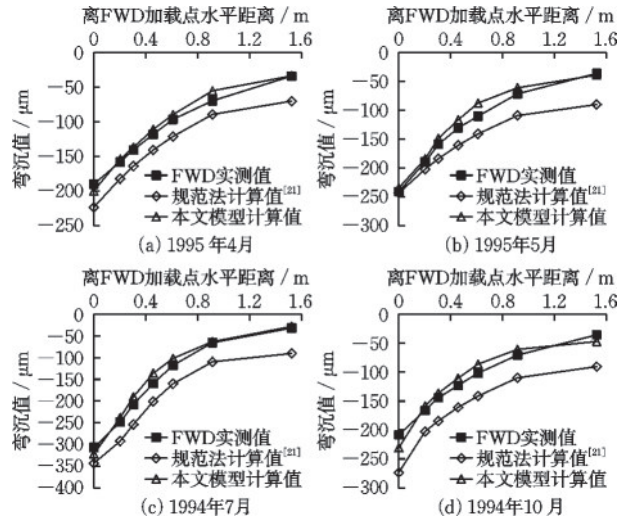


图7 路面弯沉曲线实测值与计算值

Fig.7 Measured and calculated values of pavement deflection curves

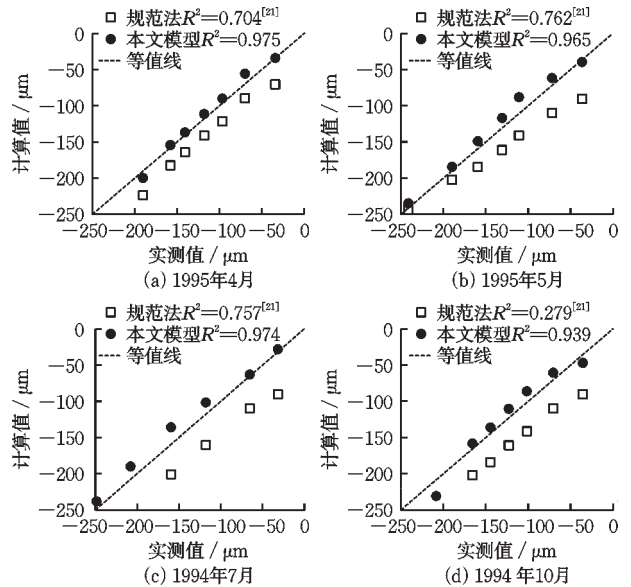


图8 弯沉盆实测值与计算值对比验证

Fig.8 Comparison and validation of measured and calculated deflection basin values

M_R 预估模型法以及新分层法可用于计算考虑含水率对路面弯沉的影响。

3 路面结构力学响应分析

3.1 路面弯沉计算结果分析

3.1.1 仅考虑降雨条件影响

不同时间段路基内回弹模量随深度变化如图9所示,标准轴载下不同时间段路面弯沉曲线如

图10所示。可以发现,在路基湿度水平较高的时间段,路面弯沉值明显高于路基湿度水平较低的时间段,且在标准轴载加载范围附近路面弯沉值达到峰值。历时240~300天的时间段,路基湿度水平较高,路面弯沉峰值达到413 μm ,在历时0~60天时间段,路基湿度水平较低,路面弯沉峰值仅有287 μm 。

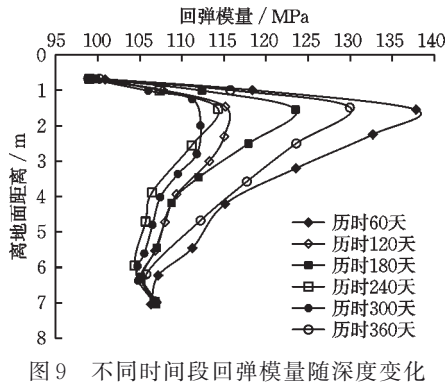


图9 不同时间段回弹模量随深度变化
Fig.9 Variation of resilient modulus with depth at different time periods

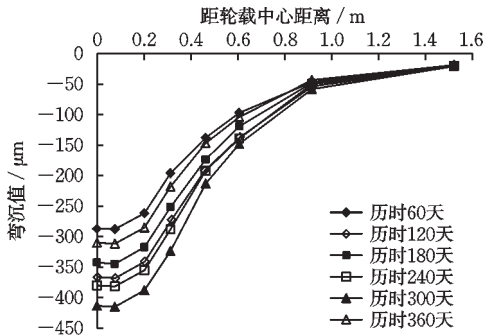


图10 不同时间段路面弯沉曲线
Fig.10 Pavement deflection curves at different time periods

图11(a)为不同深度位置对应的路基土饱和度以及回弹模量值随路基湿度变化的历时曲线。由图可知,路基土回弹模量值变化趋势与路基湿度呈反比,在0~120天历时阶段,路基湿度在降雨入渗作用下,回弹模量值不断降低;在120~180天历时阶段,由于降雨减弱,路基湿度整体呈下降趋势,回弹模量随含水率降低而增大;在180~300天历时阶段,降雨增强,路基含水率增大并达到峰值,路基土回弹模量也逐渐降低并达到最小值。其次,在距路面2~6 m范围内,回弹模量值随路基含水率变化的幅度越来越小。由于距路面的深度越大,路基土离地下水位越近,含水率几乎饱和,且这些区域受外界环境影响较小,所以回弹模量值受含水率变化影响较小。

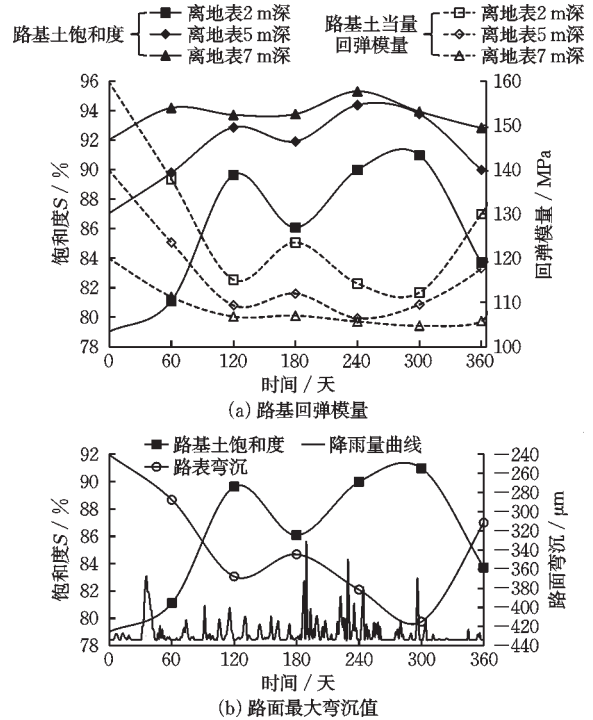


图11 路基回弹模量和路面最大弯沉值随饱和度变化曲线
Fig.11 Variation curves of subgrade resilient modulus and maximum deflection value of pavement with saturation degree

图11(b)为路面最大弯沉随路基湿度变化的历时曲线,由图可知,当降雨量曲线上升,路基土饱和度曲线随之上升,而路表弯沉曲线下降。在0~120天历时阶段中,路基湿度由饱和度79%增至饱和度90%,计算得到的路面最大弯沉值则由240 μm 增至366 μm ;在180~300天历时阶段中,路基湿度水平达到最大,路面弯沉值也达到最大的413 μm 。降雨会导致水分渗透到路基中并改变路基的湿度,降低了路基材料的黏聚力和回弹模量,路基抵抗变形的能力减弱,因此在相同交通荷载作用下路面会产生更大的弯沉^[24]。

3.1.2 仅考虑地下水位影响

不同地下水位的路基回弹模量随深度变化图如图12所示,标准轴载下不同地下水位的的路表弯沉曲线如图13所示。由图12可知,在任意地下水位状态下,随着距路面深度越大,路基土回弹模量值越小,这是由于自路面至地下水位位置范围内,路基湿度状态从最优含水率附近逐渐上升至饱和状态。由图13可知,在标准轴载作用下,地下水位自0 m下降至-5 m的过程中,路表最大弯沉值

由 $303 \mu\text{m}$ 减少至 $187 \mu\text{m}$, 这是由于在地下水位下降过程中, 路基刚度随湿度降低而增大, 抵抗变形能力加强, 导致路面弯沉也随之降低。

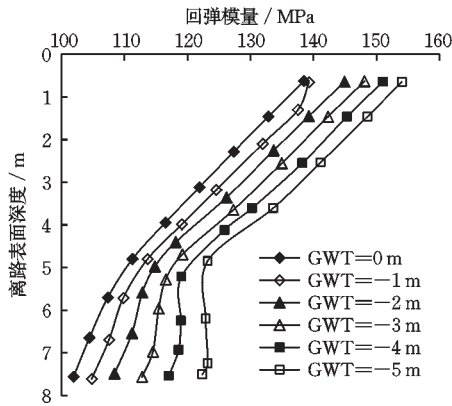


图 12 不同地下水位的路基回弹模量随深度变化

Fig.12 Variation of subgrade resilient modulus with depth under different groundwater tables

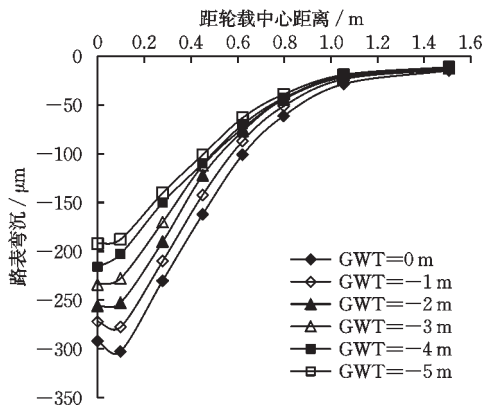
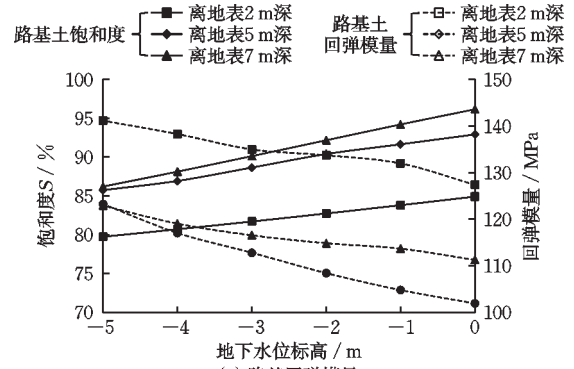


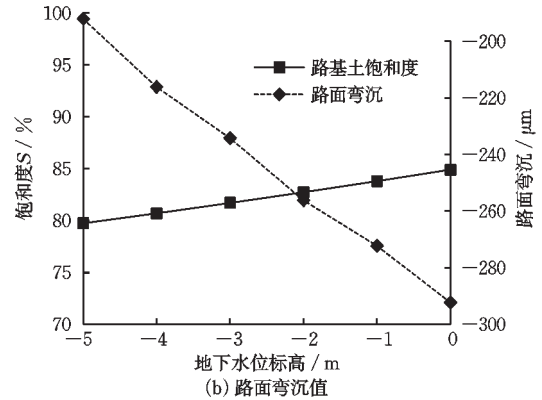
图 13 标准轴载下不同地下水位的路表弯沉曲线

Fig.13 Pavement surface deflection curves under standard axle load at different groundwater tables

图 14(a) 为不同地下水位路基回弹模量随饱和度变化曲线图。由图可知, 路基土回弹模量值与路基湿度呈反比, 且距路面深度越大, 路基整体湿度水平越高, 回弹模量值越小。图 14(b) 为不同地下水位路面弯沉值随路基饱和度变化曲线, 由图可知, 随着地下水位逐步升高, 路基饱和度上升, 路面弯沉呈线性下降; 在地下水位由 0 m 降至 -5 m 时, 路面最大弯沉减小 34.47% 。随着地下水位的升高, 路基土发生湿胀变形导致土颗粒之间的胶结能力减弱, 在土颗粒的薄弱处出现应力集中现象, 产生微小裂缝; 当下层土体接近饱和后, 土体内部的湿胀变形和微小裂缝进一步扩展, 最终表现为土体的动态回弹模量发生衰减^[11]。



(a) 路基回弹模量



(b) 路面弯沉值

图 14 饱和度对路基回弹模量和路面弯沉值的影响

Fig.14 Effect of saturation on subgrade resilient modulus and pavement deflection value

3.2 路面疲劳寿命计算分析

3.2.1 按照我国规范验算

根据《公路沥青路面设计规范》^[21] 疲劳寿命计算方法:

$$N_{fi} = 6.32 \times$$

$$10^{15.96 - 0.29\beta} k_a k_b k_{T1}^{-1} \left(\frac{1}{\epsilon_a} \right)^{3.97} \left(\frac{1}{E_a} \right)^{1.58} (VFA)^{2.72} \quad (9)$$

式中, N_{fi} 为沥青混合料层疲劳开裂寿命, 次; β 为目标可靠指标, 取 1.65; k_a 为季节性冻土地区调整系数, 取 1; k_{T1} 为温度调整系数, 取 1.5; VFA 为沥青饱和度, 取 0.75。

$$k_b = \left[\frac{1 + 0.3E_a^{0.43} (VFA)^{-0.85} e^{0.024h_a - 5.41}}{1 + e^{0.024h_a - 5.41}} \right]^{3.33} \quad (10)$$

式中, h_a 为沥青面层厚度, mm; E_a 为沥青混合料 20°C 时动态压缩模量, MPa; ϵ_a 为沥青混合层层底拉应变, 10^{-6} 。

3.2.2 按照 AASHTO 路面设计指南计算

AASHTO 公路路面设计指南^[25] 认为沥青面层疲劳寿命与面层表面拉应变的倒数呈指数关系, 并且疲劳寿命易受沥青混合层厚度及体积影响, 本节

采用 AASHTO 路面设计指南提出的面层疲劳寿命预测模型进行计算,如式(11)所示:

$$N_f = k \cdot C \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{3.9492} \left(\frac{1}{E}\right)^{1.281} \quad (11)$$

式中, N_f 为轴载作用次数,次; E 为面层弹性模量, MPa; ϵ_t 为沥青路面层底的拉应变; C 为与沥青混合料体积有关的系数, 10^{16} ; k 为与沥青混合层厚度有关的系数,取 2.92。

3.2.3 计算结果对比分析

(1) 仅考虑环境降雨因素影响

每个历时阶段面层底拉应力与沥青路面层疲劳寿命计算结果如表 6 所示。从表 6 计算结果可知,《公路沥青路面设计规范》^[21] 计算结果与 AASHTO 公路路面设计指南^[25] 计算结果相近,计算得出的疲劳寿命最大误差只有 2.13%。

表 6 不同降雨条件对面层底拉应力及疲劳寿命的影响

Table 6 Effect of different rainfall conditions on tensile stress and fatigue life at bottom of pavement surface layers

历时/ 天	面层底拉 应变/ 10^{-6}	疲劳寿命/轴次		误差/ %
		JTG D50-2019 ^[21]	AASHTO	
60	74.7	67 889	68 968	1.56
120	83.3	44 048	44 849	1.79
180	81.3	48 509	49 367	1.74
240	92.8	28 689	29 277	2.01
300	98.8	22 372	22 860	2.13
360	79.6	52 754	53 663	1.69

面层底拉应力随路基湿度水平变化的历时曲线如图 15(a)所示,可以看出,面层底部拉应力随着时间的变化趋势与路基土湿度变化趋势呈正比,路基湿度水平越高,面层底拉应变越大,面层底拉应变峰值为 98.8×10^{-6} 。由于路基湿度增加,路基刚度性能(回弹模量)整体降低,在相同荷载下,路基的竖向变形更大,导致面层底部拉应变增大。

图 15(b)为路基湿度对面层底拉应力和疲劳寿命的影响。由图可知,当降雨量曲线上升,路基土饱和度曲线随之上升,而沥青路面层疲劳寿命下降。在 0~60 天历时阶段,路基湿度由最优含水率增至第一个峰值,面层疲劳寿命由 68 000 轴次左右降低至 44 000 轴次,降低了 35.3%;在 120~180 天历时阶段,路基湿度水平下降,面层疲劳寿命也随之增至 49 000 轴次,这与日降雨量的变化趋势相吻

合。在雨水较多的季节,如图中 180~300 天历时阶段,路基湿度水平较高,此时面层疲劳寿命由于路基软化的影响将大大降低。因此,建议在雨季来临之前,需要对面层做好防护措施以防止路面开裂。

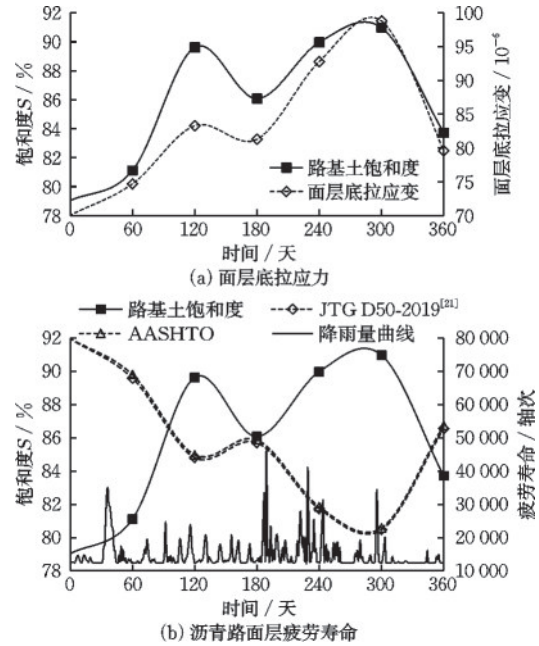


图 15 路基湿度对面层底拉应力和疲劳寿命的影响
Fig.15 Effect of subgrade moisture on tensile stresses and fatigue life at bottom of pavement surface layer

(2) 仅考虑地下水位变化影响

不同地下水位对面层底拉应力及疲劳寿命的影响如表 7 所示。由表可知,两种规范计算结果相近,最大误差只有 1.79%,不超过 2%。因此,采用两种规范方法计算沥青层疲劳寿命都有较高的准确度。

图 16 为地下水位对面层底拉应力和疲劳寿命的影响。由图可知,随着地下水位由 -5 m 升至 0 m

表 7 不同地下水位对面层底拉应力及疲劳寿命的影响

Table 7 Effect of groundwater tables on tensile stress and fatigue life at bottom of pavement surface layer

地下水位/ m	面层底拉 应变/ 10^{-6}	疲劳寿命/轴次		误差/ %
		JTG D50-2019 ^[21]	AASHTO	
0	83.3	44 048	44 849	1.79
-1	79.6	52 754	53 663	1.69
-2	75.8	64 061	65 099	1.59
-3	71.2	82 137	83 358	1.47
-4	68.8	94 114	95 446	1.40
-5	64.9	118 651	120 184	1.28

的过程中,路基湿度呈线性增大,面层底拉应变也由 64.9×10^{-6} 增至 83.3×10^{-6} , 沥青路面层疲劳寿命随之大致呈线性减小, 从 120 000 轴次左右降至 40 000 轴次左右, 降低了 62.8%。这是由于随着地下水位升高, 路基整体湿度水平增加, 刚度降低, 路基层抵抗变形的能力降低。因此在相同的荷载水平下, 随着地下水位的升高面层底最大拉应力呈线性增大, 且疲劳寿命减小。

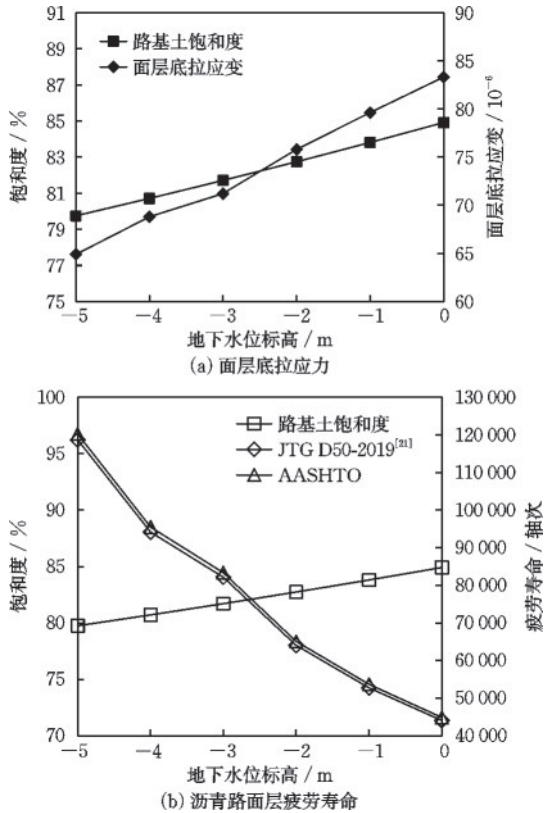


图 16 地下水位对面层底拉应力和疲劳寿命的影响

Fig.16 Effect of groundwater table on tensile stress and fatigue life at bottom of pavement surface layer

4 结 论

通过建立动态回弹模量 M_R 预估模型, 采用 COMSOL 软件建立路基路面结构数值模型, 将 M_R 嵌入数值模型的本构关系中, 并对不同工况下路面弯沉和疲劳寿命的历时变化规律进行分析。主要得到以下结论:

(1) 基于应力相关的 M_R 模型, 引入基质吸力 ψ 和非饱和有效应力系数, 建立了考虑含水率影响的压实路基土 M_R 预测模型, 并将 M_R 嵌入数值模型的本构关系中, 通过与现场实测数据和规范法计算结

果对比, M_R 预估模型所得结果的决定系数 R^2 是规范法的 1.5 倍, 验证了所建模型的适用性。

(2) 在仅考虑降雨条件影响时, 随着降雨时长的增加, 回弹模量随含水率增加而减小, 弯沉值随含水率增加而增大, 并且随着深度的增加, 回弹模量值随路基含水率变化的幅度越来越小。当路基土的饱和度由 79% 增至 90% 时, 计算得到的路面最大弯沉值由 $240 \mu\text{m}$ 增至 $366 \mu\text{m}$ 。

(3) 在仅考虑地下水位影响时, 随着地下水位上升, 路基土饱和度越大, 路基土回弹模量降低, 而路面弯沉值增大。在地下水位由 -5 m 升至 0 m 时, 路表最大弯沉值由 $187 \mu\text{m}$ 增加至 $303 \mu\text{m}$, 提升幅度达到 62%。

(4) 采用我国和美国路面设计指南中的疲劳寿命计算方法所得结果相近。在分别考虑不同降雨和地下水位条件下, 最大误差分别仅有 2.13% 和 1.79%。

(5) 面层底最大拉应力、应变随路基湿度增大而增大, 沥青路面层疲劳寿命随路基湿度增大而降低; 当地下水位由 -5 m 升至 0 m 时, 面层底拉应变由 64.9×10^{-6} 增至 83.3×10^{-6} , 面层疲劳寿命从 120 000 轴次左右降至 45 000 轴次左右, 降低了 62.8%。

本文在计算路面应力应变响应时并未考虑到路基土的塑性力学行为、各向异性和回弹模量的空间不均匀性, 导致计算结果与实际路面力学响应产生偏差, 后续将进一步探究考虑黏弹塑性的路基土回弹模量及其空间不均匀分布对路面力学响应的影响。

参考文献:

- [1] Zhang J H, Peng J H, Zheng J L, et al. Characterisation of stress and moisture-dependent resilient behaviour for compacted clays in south China[J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21(1): 262-275.
- [2] 蒋红光, 曹让, 马晓燕, 等. 考虑路基平衡湿度状态的黄泛区中高液限黏土抗剪强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2819-2828.
- Jiang H G, Cao R, Ma X Y, et al. Shear strength of the medium-high liquid limit clay in the yellow river flooded areas considering the subgrade equilibrium moisture condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2819-2828. (in Chinese)
- [3] 蒋红光, 陈思涵, 孙辉, 等. 黄泛区中高液限黏土动、静

- 态回弹模量及预估模型研究[J].中国公路学报,2021,34(3):103-112.
- Jiang H G, Chen S H, Sun H, et al. Dynamic and static resilient modulus and their prediction models of medium-high liquid limit clay in yellow river[J].China Journal of Highway and Transport,2021,34(3):103-112. (in Chinese)
- [4] Silva M, Ribeiro M, Furlan A P, et al. Effect of compaction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil [J]. Transportation Geotechnics,2020,26:1-9.
- [5] 刘维正,万家乐,徐阳,等.反复湿化和动载作用下路基红黏土累积变形特性研究[J].中国公路学报,2022,35(8):129-139.
- Liu W Z, Wan J L, Xu Y, et al. Accumulative deformation characteristics of lateritic clay under combined action of cyclic wetting and dynamic [J].China Journal of Highway and Transport,2022,35(8):129-139. (in Chinese)
- [6] 刘洪波,梁崇旭,刘飞禹.考虑含水率影响的花岗岩残积土边坡地震响应分析[J].防灾减灾工程学报,2023,43(2):342-350.
- Liu H B, Liang C X, Liu F Y. Seismic response analysis of granite residual soil slopes considering the effect of water content [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2023,43(2):342-350. (in Chinese)
- [7] 刘恩龙,尹霄,张冲,等.冻融作用下非饱和土热水力耦合数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2022,42(5):953-960.
- Liu E L, Yin X, Zhang C, et al. Numerical simulation of thermo-hydro-mechanical coupling for unsaturated soil subjected to freezing-thawing actions [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2022,42(5):953-960. (in Chinese)
- [8] Zhang Y, Li R, Chen J. The cooperative control of subgrade stiffness on symmetrical bridge-subgrade transition section [J].Symmetry-basel,2022,14(5):1-15.
- [9] 郭桂宏,丛林.固化土结构功能层对沥青路面结构力学的影响[J].公路,2021,66(9):118-123.
- Guo G H, Cong L. Influence of structural functional layer of solidified soil on structural mechanics of asphalt pavement [J].Highway,2021,66(9):118-123. (in Chinese)
- [10] Freitas J, Rezende L, Gitirana G. Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions [J].Engineering Geology,2020,270(30):1-14.
- [11] 凌建明,陈卉,钱劲松,等.湿度有限波动下非饱和黏土路基动态回弹模量[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(2):613-620.
- Ling J M, Chen H, Qian J S, et al. Dynamic resilient modulus for unsaturated clay soils considering effect of limited moisture content fluctuation [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2020,50(2):613-620. (in Chinese)
- [12] Zuo S, Li J, Cui X Z, et al. Study of the distribution and change law of stress in subgrade immersed in water in the Hetao irrigation area [J]. Journal of Testing and Evaluation,2021,49(6):4540-4549.
- [13] 祁孔庆,汤钧尧,黄晓明.浸水条件下路基当量回弹模量分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2020,41(4):484-490.
- Qi K Q, Tang J Y, Huang X M. Analysis on subgrade equivalent resilient modulus under soaking condition [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition),2020,41(4):484-490. (in Chinese)
- [14] Elshaer M, Ghayoomi M, Daniel J S. Methodology to evaluate performance of pavement structure using soil moisture profile [J].Road Materials and Pavement Design,2018,19(4):952-971.
- [15] 董城,张瑞蕾,周轮,等.基于路基动态回弹模量的水泥混凝土路面动力响应分析[J].公路,2018,63(12):41-47.
- Dong C, Zhang R L, Zhou L, et al. Dynamic response analysis of cement concrete pavement based on dynamic resilient modulus of subgrade [J]. Highway,2018,63(12):41-47. (in Chinese)
- [16] 李志勇,董城,邹静蓉,等.路基含水量对水泥混凝土路面疲劳寿命的影响分析[J].中外公路,2015,35(6):41-46.
- Li Z Y, Dong C, Zou J R, et al. Analysis of the influence of roadbed moisture content on the fatigue life of cement concrete pavement [J]. Journal of China and Foreign Highway,2015,35(6):41-46. (in Chinese)
- [17] 刘维正,曾奕珺,姚永胜,等.含水率变化下压实路基土动态回弹模量试验研究与预估模型[J].岩土工程学报,2019,41(1):175-183.
- Liu W Z, Zeng Y J, Yao Y S, et al. Experimental study and prediction model of dynamic resilient modulus of compacted subgrade soils subjected to moisture variation [J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(1):175-183. (in Chinese)
- [18] Yao Y S, Zheng J L, Chen Z S, et al. Field measure-

- ments and numerical simulations of temperature and moisture in highway engineering using a frequency domain reflectometry sensor [J]. *Sensors*, 2016, 16 (6) : 857-863.
- [19] Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(4):521-532.
- [20] 杨博,刘境奇,冯恺雯,等.基于Rayleigh波频散特征的路基模量反演成像方法与试验研究[J].*中国公路学报*,2022,35(1):189-199.
Yang B, Liu J Q, Feng K W, et al. Inversion imaging method and experimental study of subgrade modulus based on Rayleigh wave dispersion characteristics [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(1) : 189-199. (in Chinese)
- [21] 公路沥青路面设计规范:JTG D50—2019[S].北京:人民交通出版社,2019.
- [22] 张军辉,范海山,张石平,等.考虑层间接触状态的路面动力响应解析解及参数反演[J].*中国公路学报*,2021,34(5):11-23.
Zhang J H, Fan H S, Zhang S P, et al. Analytical solution for the dynamic responses and parameter inversion of pavement structures considering the condition of inter-layer contact [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(5) : 11-23. (in Chinese)
- [23] 肖源杰,陈刘欣,卢小永,等.降雨入渗下铁路路基含水率分布及影响分析[J].*铁道工程学报*,2020,37(7):7-12.
Xiao Y J, Chen L X, Lu X Y, et al. Variation in water content and influences on rail track embankment subject to rainfall infiltration [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(7) : 7-12. (in Chinese)
- [24] 秦晓同,崔凯,青于蓝.水热耦合作用下季节冻土边坡降雨入渗规律及入渗机理[J].*中国公路学报*,2022,35(4):87-98.
Qin X T, Cui K, Qing Y L, et al. Study on rainfall infiltration law and mechanism of seasonal frozen soil slope under hydro thermal coupling effect [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4) : 87-98. (in Chinese)
- [25] Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials: AASHTO Designation: T 307—99[S]. [S.I.]: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.

(本文编辑:苏泽云)