

# 基于现场湿度和损伤密度的固化土基层 疲劳性能仿真

江训利<sup>1</sup>, 罗 雪<sup>1</sup>, 张裕卿<sup>2</sup>, 李 辉<sup>2</sup>, 杨海露<sup>3</sup>, 黄志义<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189;

3. 北京科技大学 国家材料服役安全科学中心, 北京 100083)

**摘要:** 为了有效分析固化土基层在现场湿度分布下的疲劳性能, 构建了考虑现场湿度的固化土路面结构数值仿真计算框架。首先基于平衡基质吸力的求解和回弹模量的预估, 实现了固化土路面结构内部由于应力依赖和湿敏性引起的材料非线性力学性能的特征; 然后基于能量力学法和损伤力学理论构建了非饱和固化土基层疲劳性能仿真实验建模方法; 最后利用 Comsol Multiphysics 软件分析程序中的 PDE-FE 方法实现了在湿度场和应力场耦合作用下的非饱和固化土基层疲劳性能仿真计算。结果表明, 该数值仿真计算框架可以较好地实现固化土路面结构的疲劳仿真分析, 能够考虑现场湿度分布的影响, 从而得到固化土路面结构内部真实力学响应。

**关键词:** 固化土基层; 现场湿度; 疲劳开裂; 损伤密度; 多物理场仿真

中图分类号: U416

文献标志码: A

## Simulation of Fatigue Performance of Stabilized Soil Road Based on Field Humidity and Damage Density

JIANG Xunli<sup>1</sup>, LUO Xue<sup>1</sup>, ZHANG Yuying<sup>2</sup>, LI Hui<sup>2</sup>,  
YANG Hailu<sup>3</sup>, HUANG Zhiyi<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. National Center for Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To effectively investigate the fatigue performance of stabilized soil base, a framework combining analytical models and numerical simulations that considers field humidity distribution was proposed in this paper. First, based on the solution of equilibrium

matrix suction and the estimation of the resilient modulus, the nonlinear mechanical properties of the material caused by stress dependence and moisture sensitivity inside stabilized soil roads were characterized. Subsequently, based on the energy-based mechanistic (EBM) approach and the damage mechanics theory, the fatigue performance simulation of unsaturated stabilized soil was constructed. Finally, the PDE-FE method in Comsol Multiphysics was used to conduct the multi-field coupling simulation analysis of the fatigue performance of unsaturated stabilized soil base. The results show that the framework proposed could effectively simulate the fatigue damage analysis of stabilized soil base under field humidity distribution.

**Keywords:** stabilized soil base; field humidity; fatigue cracking; damage density; multiphysics-based simulation

随着我国基础建设的不断扩大, 固化土技术越来越多地应用于道路工程中, 尤其是近几年, 出现了大量的新兴固化材料<sup>[1]</sup>。虽然这些新兴固化材料能在一定程度上提高固化土的路用性能, 但对于土体材料来说, 由于内部的多孔性及较高的表面自由能使得其具有很强的亲水性, 而水的存在会影响材料的水稳定性和力学性能。Mainfort<sup>[2]</sup>的研究指出, 无机固化材料一般具有良好的胶结性能, 但不具有防水性能, 所以水分的存在对固化土材料的蠕变性能、疲劳开裂性能、抗冻性能等影响较大。此外, 谢华昌等<sup>[3]</sup>的研究表明, 随着含水率的增大, 固化土路基和基层的回弹模量会显著降低。路基和基层的回弹模量是道路结构设计的重要参数之一, 会影响道

收稿日期: 2023-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(52108423); 重大工程材料服役安全研究评价设施国家重大科技基础设施开放课题(MSAF-2020-105)

第一作者: 江训利, 工学博士, 主要研究方向为路基路面工程及道路新材料。E-mail: jxunli@zju.edu.cn

通信作者: 罗 雪, 研究员, 博士生导师, 哲学博士, 主要研究方向为道路结构与材料。E-mail: xueluo@zju.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

路结构的整体性能,所以如何确定固化土路面结构内部湿度分布,并分析湿度对固化土路面结构整体性能的影响尤为重要。

路基湿度状态往往受地下水位以及外部气候环境等的影响,并在使用期内会逐渐发生演变,由建成初期的最佳压实含水量状态逐渐演变成服务运行期的平衡含水量状态<sup>[4]</sup>。为此,近些年来,许多学者对路基内部湿度状态的演化规律及影响因素进行了研究<sup>[5]</sup>。Yue等<sup>[6]</sup>评估了从俄克拉荷马州 Mesonet 气象站获取的路面应用历史气候数据,并建立了路基土平衡基质吸力与 TMI(thornthwaite moisture index)之间的关系。路基湿度的变化又会进一步影响道路结构内部的受力状态,为此,许多学者采用 Comsol Multiphysics 分析软件对道路内部湿度和应力的耦合作用进行分析<sup>[7]</sup>。Sun等<sup>[8]</sup>利用 Comsol Multiphysics 软件研究了非饱和和透水沥青路面在移动荷载作用下的动力响应,并建立了基于非饱和渗流理论的水-气-力耦合沥青路面三维有限元模型。目前,关于湿度场耦合作用影响的研究大多集中在路面面层,对于固化土半刚性基层及路基结构的多场耦合受力分析还较少。

因此,本文将构建一套考虑现场湿度影响的固化土路面结构数值仿真计算框架,基于现场湿度分布预估的多场耦合有限元分析,实现对固化土路面结构受力合理性及长期路用性能的分析 and 预测,从而为固化土路面结构设计提供较为科学的参考取值。

## 1 考虑现场湿度的固化土路面结构仿真计算框架

### 1.1 现场湿度分布预估方法确立

本文采用 Saha等<sup>[9]</sup>提出的相关模型和方法来确定路基内部平衡基质吸力大小。这种方法是一种基于力学-经验的方法,其中包括 Mitchell<sup>[10]</sup>提出的稳态扩散方程和 Gay<sup>[11]</sup>建立的 TMI 与年平均水分深度之间的函数关系,以及 Fredlund等<sup>[12]</sup>提出的土水特征曲线(soil-water characteristic curve, SWCC)预估模型等。具体求解步骤包括气候数据收集及分析,综合湿度指数 TMI、归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、植被覆盖率  $F_v$  及非饱和土壤表面距水分活动区域的平均深度  $Z_m$  等相关参数的计算,SWCC 模型参数的确定,平衡基质吸力的求解等。

在确定道路结构的平衡基质吸力后,还需要求解道路结构内部不同深度处的含水率,以及对应的基质吸力大小,从而实现道路结构内部湿度场分布的预估。为此采用线性插值的简化方法来确定不同深度处基质吸力大小,如图1所示。图1中A、B两点分别代表在湿季和旱季路表或地表的基质吸力大小,C点表示在水分活动区域深度  $Z_m$  处的平衡基质吸力大小;AC曲线为湿季对应的基质吸力分布曲线,BC曲线为旱季对应的基质吸力分布曲线,DC曲线则为平衡状态下的基质吸力变化曲线,其中D点为路表或地表平衡时的基质吸力代表值,取湿季和旱季条件下的基质吸力平均值作为其参考值。将C和D两点进行直线连线,可以得到简化的路基内部平衡基质吸力纵向分布曲线。最后根据不同深度进行插值计算得到各层的基质吸力大小,并通过 SWCC 模型及参数确定不同深度处平衡状态时的含水率大小。

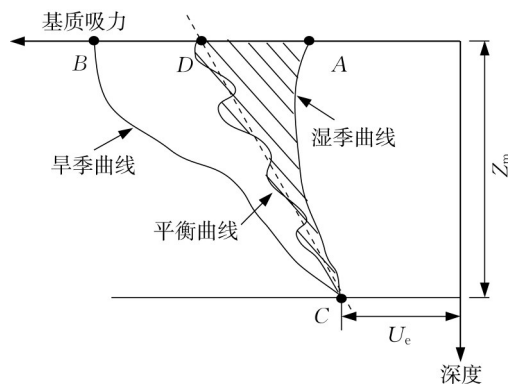


图1 道路结构内部基质吸力分布求解示意图

Fig. 1 Schematic diagram of matrix suction distribution inside road structure

### 1.2 固化土路基及基层模量预估

为了考虑基质吸力对回弹模量的影响,本文采用 Lytton<sup>[13]</sup>在1995年提出的回弹预估模型进行分析,其具体表达式如下:

$$M_R = k_1 P_a \left( \frac{\theta - 3\theta_w f h_m}{P_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3} \quad (1)$$

式中:  $M_R$  为回弹模量;  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为模型参数,可以通过拟合得到;  $\theta$  为体应力;  $\tau_{oct}$  为八面体剪应力;  $\theta_w$  为体积含水率;  $f$  为饱和度影响因子;  $h_m$  是基质吸力;  $P_a$  为标准大气压强。

### 1.3 固化土基层疲劳开裂模拟方法

#### 1.3.1 疲劳开裂模型及参数求解方法

为了分析固化土路面结构的疲劳性能,本课题组早期已经建立了一套固化土材料疲劳性能仿真的

理论建模方法<sup>[14-16]</sup>。自主设计了一套 RDT (repeat direct tensile test) 试验流程,并基于能量力学法,给出了固化土材料的疲劳损伤密度求解过程,然后通过断裂力学和损伤力学相结合的方法,建立了改进的 Paris 疲劳损伤演化模型来表征固化土材料的多裂缝疲劳开裂演化过程<sup>[17]</sup>。基于  $J$  积分和损伤密度的 Paris 疲劳损伤模型的具体形式如下:

$$\frac{d\phi}{dN} = A'(J)^{n'} \quad (2)$$

式中:  $\phi$  为损伤密度;  $N$  为加载周期;  $A'$  和  $n'$  为模型参数;  $J$  为基于耗散应变能  $W_{DSE}$  (dissipated strain energy) 计算得到的  $J$  积分。

在这一疲劳力学机理模型中,包含两类模型参数,一类是材料属性参数,一类是结构属性参数。其中材料属性参数是与材料种类,材料干湿状态以及其他材料行为方式相关的一类参数,可以通过  $A'$  和  $n'$  两个具体参数来反应;结构属性参数是与道路结构形式及具体服役状态相关的一类参数,受交通荷载行为、气候环境及结构组合的影响,通过参数  $J$  来反映。其中  $A'$  和  $n'$  需要通过基于能量力学法的损伤密度求解方法进行求解,而  $J$  需要通过有限元分析软件进行迭代求解<sup>[18]</sup>。

### 1.3.2 基于 COMSOL 的固化土基层多场耦合疲劳仿真建模

考虑到结构属性参数  $J$  具有多场耦合求解需求,因此本文将改进的 Paris 疲劳损伤模型嵌入到 Comsol Multiphysics 软件分析程序中,通过 PDE-FE 方法对现场湿度影响下的固化土路面结构疲劳问题进行有限元建模仿真,再基于 Comsol Multiphysics 对弱形式偏微分方程进行耦合数值求解,从而实现考虑现场湿度影响的固化土基层疲劳性能仿真的理论建模。

#### (1) 应力场-湿度场的变量表达及弱形式转换

固化土基层采用包含基质吸力影响的回弹预估模型来表示由于应力依赖和湿敏性引起的材料非线性力学特性,其表达如式(1)所示。

步骤1:定义材料相关参数,将其作为模型输入或定义变量所需参数。

步骤2:通过弱形式 PDE 模块建立一个新的物理场,并将其两个因变量定义为  $u_{11}$  和  $u_{12}$ ,单位为  $N \cdot m^{-2}$ 。此外,在线弹性材料模块中已经为固化土材料定义了全局变量,该模块包括3个方向上的位移分量,即  $u$ 、 $v$  和  $w$ 。

步骤3:在弱表达式中定义因变量的本构方程,

COMSOL 将对体积区域上的弱表达式进行数值积分,并找到所有因变量的解。

步骤4:通过因变量将与竖向垂直应力相关的模量定义为变量,定义如下:

$$E_b = k_1 P_a \left[ \left( |u_{11} - 3\theta_w f h_m| / P_a \right)^{k_2} (u_{12} / P_a)^{k_3} \right] \quad (3)$$

需要注意的是,对于固化土基层材料,  $u_{11}$  总是负的,因为基层中的第一主应力总是表现为压缩状态,而 COMSOL 中将压缩定义为负值,所以,此处使用  $u_{11}$  的绝对值计算与应力相关的模量。

#### (2) 疲劳损伤模型的弱形式转化

采用 1.3.1 节中提出的固化土基层疲劳开裂损伤演化模型进行分析。考虑到疲劳损伤问题同样是一个典型的耦合问题,它涉及到应力、应变和模量等材料力学性能参数之间的循环依赖关系,因此也可以通过在弱形式的 PDE-FE 方法中创建一个额外的因变量来定义与材料受力状态有关的损伤密度。

步骤1:定义材料相关参数,将其作为模型输入或定义变量所需参数。

步骤2:创立一个新的物理场,将关于损伤密度的因变量定义为  $u_3$ 。

步骤3:在弱表达式中定义因变量的本构方程。

步骤4:在系数形式偏微分方程中通过判定语句写入损伤演化模型及损伤判定准则。

#### (3) 疲劳损伤问题的耦合求解

由于材料发生疲劳损伤会引起模量的变化,因此会对整个道路结构的受力产生影响。根据 CDM (continuum damage mechanics) 理论,在材料满足基于能量平衡和力学平衡的平衡假定和各向同性损伤假定时,材料表观应力应变与真实应力应变之间存在以下关系<sup>[19]</sup>:

$$\sigma_{ij}^A = \sigma_{ij} (1 - \phi) \quad (4)$$

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^A (1 - \phi) \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{ij}$  和  $\epsilon_{ij}$  为有效应力和有效应变;  $\sigma_{ij}^A$  和  $\epsilon_{ij}^A$  为试验测试中得到的表观应力和表观应变。

根据以上关系可以进一步得到材料受损后真实回弹模量与表观回弹模量之间的关系,并将其在有限元中进行变量表达,从而实现疲劳损伤模型与材料本构模型的耦合作用,其具体表达形式如下:

$$E_z = (1 - \phi)^2 E_b = (1 - \phi)^2 k_1 P_a \left[ \left( |u_{11} - 3\theta_w f h_m| / P_a \right)^{k_2} (u_{12} / P_a)^{k_3} \right] \quad (6)$$



#### 1.4 固化土路面结构疲劳性能数值仿真计算框架

基于以上理论,本文确定了多场耦合作用下固化土路面结构疲劳性能数值仿真计算方法,其仿真框架如图2所示。

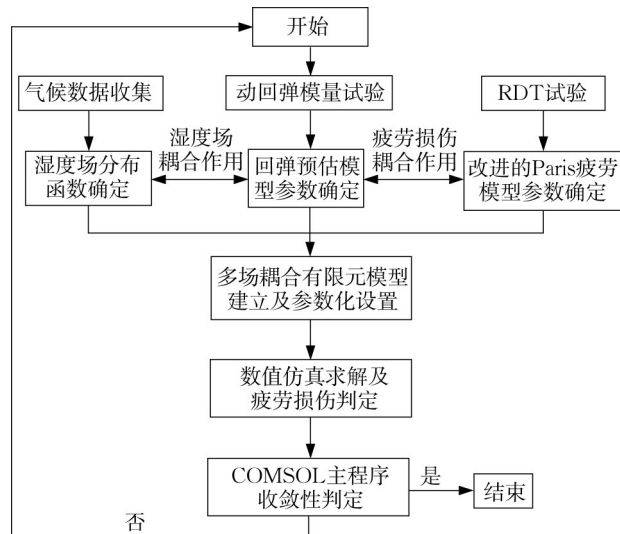


图2 固化土路面结构疲劳性能数值仿真计算框架

Fig. 2 Numerical simulation calculation framework of fatigue performance of stabilized soil roads

## 2 疲劳性能数值仿真计算的参数获取

### 2.1 湿度分布预估参数获取

本文对浙江地区进行了相关参数获取和分析<sup>[16]</sup>。本次收集的数据类型主要包括浙江省1981—2010年月平均气温,1981—2010年年平均降雨量以及各地区植被覆盖率等信息。在获得相关气候数据后,需要进一步求解TMI指数和 $F_r$ 、 $Z_m$ 参数<sup>[9]</sup>。其中TMI指数主要根据浙江地区各市的月平均温度和年平均降雨量求得, $F_r$ 参数根据浙江地区各市的归一化差值植被指数NDVI计算得到。图3为浙江省湖州市NDVI的年际变化图<sup>[20]</sup>。 $Z_m$ 参数则采用该地区植被覆盖率对无植被覆盖和全植被覆盖时的平均 $Z_m$ 进行线性插值得到。

确定了以上参数后,还需要进一步求得SWCC的模型参数。本研究采用ANN模型预估方法进行模型参数确定,使用的ANN模型是由美国Texas A&M University课题组<sup>[21]</sup>提供。本次以湖州地区为例,进行参数预测,其中表1为土壤基本物理力学参数,表2为ANN模型预测结果。最后求得湖州地区典型路段的平衡基质吸力大小为 $U_e=2.966$  pF,其中pF为基质吸力单位<sup>[16]</sup>;基质吸力分布曲线可以表

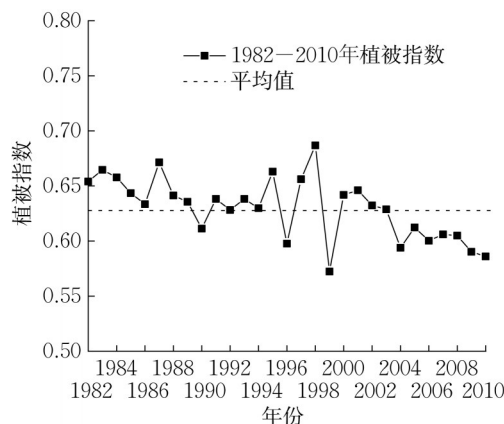


图3 浙江省湖州市NDVI年际变化图

Fig. 3 NDVI interannual changes in Huzhou, Zhejiang Province

示为: $Z=-581.0038U+2178.7643$ ,其中 $Z$ 为距离路表深度(cm), $U$ 为该深度处对应的平衡基质吸力值。

表1 土壤基本物理力学性质参数

Tab. 1 Physical parameters of soil

参数	数值
4.75 mm筛孔过筛率	100
75 μm筛孔过筛率	42
最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.780
液限	36
塑性指数	17
饱和体积含水率/%	37.50
渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	$8.4 \times 10^{-6}$

表2 湖州淤泥土SWCC模型参数

Tab. 2 SWCC model parameters

$a_f$	$b_f$	$c_f$	$h_r/\text{kPa}$
405.561	0.7610	0.9108	4500.345

注:  $a_f$ 、 $b_f$ 、 $c_f$ 、 $h_r$ 为Fredlund-Xing模型中的4个拟合参数。

### 2.2 回弹模量预估参数获取

为了建立固化土路基及基层回弹模量与应力和湿度的关系,对路基固化土和基层固化土分别进行回弹模量试验。图4为部分试验结果,反应了不同土体回弹模量与偏应力之间的关系,表3和表4为最终拟合分析结果。

### 2.3 疲劳开裂模型参数获取

在基于能量力学法的疲劳损失密度求解过程中,首先利用RDT实验得到在不同应变水平下固化土材料的应力应变数据,然后通过一系列分析求解过程得到材料在无损和有损状态下的表观有效应力幅值、真实有效应力幅值、表观耗散应变能、真实耗散应变能、表观可恢复应变能、真实可恢复应变能、

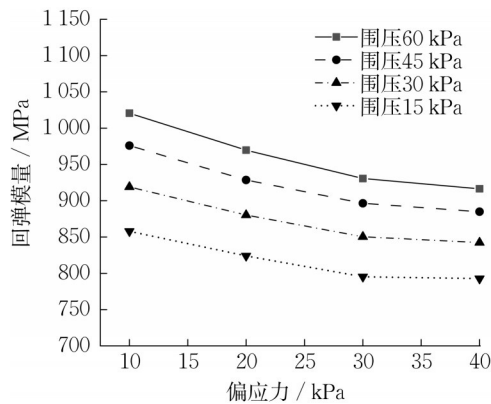


图4 基层固化土回弹模量与偏应力之间的关系

Fig. 4 Relationship between  $M_R$  and deviatoric stress of stabilized soil base

表3 固化土体的SWCC模型参数

Tab. 3 SWCC model parameters of stabilized soils

土体	$a_f$	$b_f$	$c_f$	$h_f/\text{kPa}$
路基固化土	503.98	0.821 3	1.023 1	3 478.244
基层固化土	664.31	0.789 6	0.993 2	4 504.496

表4 回弹模量预估模型拟合分析结果

Tab. 4 Fitting results of resilient modulus prediction model

土体	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R^2$
路基固化土	1.169	0.712 7	-0.012 3	0.957
基层固化土	2.031	0.808 0	-0.009 7	0.961

真实复数模量和真实相位角等,最后确定固化土材料在损伤状态下的损伤密度变化曲线。其中基层固化土在应变为 $200 \times 10^{-6}$ 加载条件下的损伤密度和真实耗散应变能的试验结果及拟合曲线如图5和图6所示。

在得到损伤密度变化曲线后,还需要根据损伤演化方程的推导过程和参数求解方法,进一步求得基层固化土的材料属性参数 $A'$ 和 $n'$ ,其中 $A'$ 和 $n'$ 的求解公式如下:

$$n' = \frac{1-b}{b-d} \quad (7)$$

$$A' = a^{n'+1} \left( \frac{2A}{ed} \right)^{n'} \left( \frac{dn'+1}{n'+1} \right)^{n'+1} = (ab)^{\frac{1-d}{b-d}} \left( \frac{2A}{ed} \right)^{\frac{1-b}{b-d}} \quad (8)$$

式(7)、(8)中: $a$ 、 $b$ 为损伤密度曲线拟合方程的系数,具体形式如式(9)所示; $e$ 、 $d$ 为耗散应变能 $W_{DSE}$ 变化曲线拟合方程的系数,具体形式如式(10)所示。

$$\phi = aN^b + c \quad (9)$$

$$W_{DSE} = eN^d \quad (10)$$

通过以上求解步骤最终可以求得损伤演化模型

的材料属性参数 $A'$ 和 $n'$ ,并将其应用在后续有限元模型中进行求解计算。基层固化土材料的求解结果见表5。

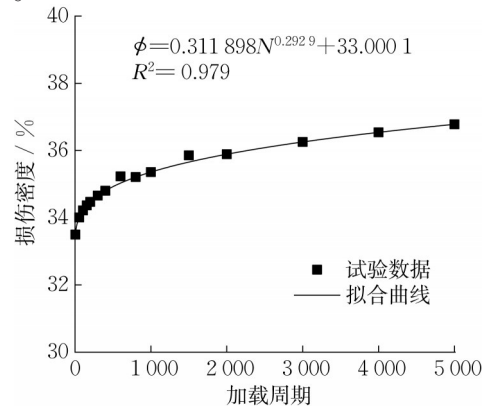
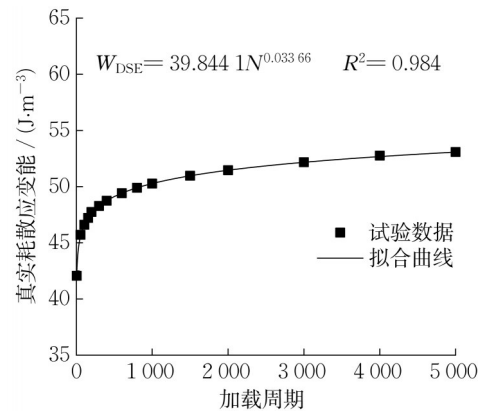
图5 应变为 $200 \times 10^{-6}$ 时的损伤密度变化曲线Fig. 5 Damage density at  $200 \times 10^{-6}$ 图6 应变为 $200 \times 10^{-6}$ 时的真实耗散应变能拟合结果Fig. 6 Fitting results of  $W_{DSE}$  at  $200 \times 10^{-6}$ 

表5 固化土基层材料断裂系数求解结果

Tab. 5 Solution results of fracture coefficient of stabilized soil

$a$	$b$	$e$	$d$	$A'$	$n'$
0.31	0.29	39.84	0.34	$1.01 \times 10^{-10}$	2.73

### 3 固化土路面结构多场耦合模型建立

#### 3.1 工程概况

试验段依托工程为浙江省湖州市某工程,设计标准为三级公路,全长1.671 km,路基设计宽度8.5 m(2车道 $\times$ 3.75 m+2 $\times$ 0.75 m土路肩),路面宽度7 m,无中央分隔带。其原道路结构设计包括地基、 $\geq 80$  cm宕渣路基填料,35 cm水泥稳定碎石基层,5 cm AC-13C沥青面层,在本研究中,采用固化土基层和底基层代替原设计路面结构的水泥稳定碎石基层和宕渣路基层。

### 3.2 几何模型

根据湖州试验路原设计方案确定几何模型,采用二维轴对称模式进行几何建模,具体几何模型结构尺寸及结构层设置见示意图7。

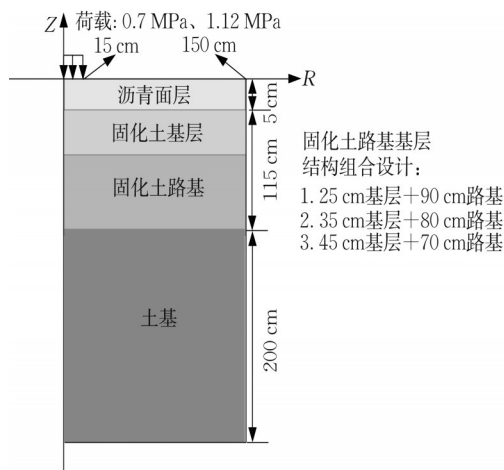


图7 固化土路面结构有限元分析几何模型示意图

Fig. 7 Finite element geometric model of stabilized soil road

### 3.3 材料属性及参数设置

在有限元建模分析过程中需要用到不同参数,如材料参数、模型参数以及湿度场相关参数等。其中湿度场相关参数见表3,基层及路基固化土材料的非线性弹性模型相关参数见表4,基层固化土疲劳损伤模型参数见表6,其他相关参数见文献[16]。

表6 基层固化土疲劳损伤模型参数

Tab. 6 Parameters of fatigue damage model of stabilized soil base

$A'$	$n'$	$w_s / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$c_0 / \text{mm}$	$G / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$
$1.01 \times 10^{-10}$	2.73	0.030 3	1.047	18.424

注:  $w_s$  为固化土材料的表面能;  $c_0$  为基于裂纹连续分布概念定义得到的平均裂纹尺寸;  $G$  为临界起裂能量。

### 3.3 边界条件及网格设置

在建模过程中,动荷载加载形式为Haversine荷载波形(半正矢波),频率为10 Hz,无间隙时间。汽车轴载选择0.7、1.12 MPa两种情况。边界条件设置根据试验路现场情况进行确定,其中Z轴为中心对称轴,底部设置为完全约束,侧边考虑到试验路为填方路基,且道路两侧布设边沟排水,所以路基以上部分设置为侧边自由,地基设置为侧边完全约束,各层间接触良好无滑移。采用用户控制网格模式进行网格剖分,网格形状为四边形网格,通过固定边界单元数和预定义的网格分布形式来实现对面层、基层

及荷载作用范围处等关键部位的精细化剖分。

## 4 有限元分析结果及讨论

### 4.1 湿度场对固化土路面结构力学性能的影响

湿度场的变化会影响土体中回弹模量等性能参数的变化,最终导致道路结构的受力状态发生改变。为了深入了解湿度场分布情况对道路结构有限元分析结果的影响,本节以25 cm固化土基层+90 cm固化土路基的结构设计方案为例,设置了3种湿度状态进行有限元分析,分别是雨季条件下湿度场均匀分布情况、旱季条件下湿度场均匀分布情况和现场湿度场梯度分布情况。其中雨季条件下湿度场内部基质吸力按  $U_{\text{wet}} = 3.0 \text{ pF} \approx 98 \text{ kPa}$  设定,旱季条件下湿度场内部基质吸力按  $U_{\text{wet}} = 4.5 \text{ pF} \approx 3100 \text{ kPa}$  设定,现场湿度场梯度分布按2.1节中预估得到的湖州地区湿度场分布曲线进行设定。

图8给出了在0.7 MPa交通荷载作用下,基层回弹模量在峰值荷载时对应的分布图。从图8中可以看出,固化土基层结构中材料的回弹模量不是一个定值,而是在结构内部呈一定方式分布的,与所处位置的受力大小和湿度状态有很大关系。其中在荷载作用范围处,由于竖向应力较大而会造成该处材料的回弹模量快速增大,其回弹模量分布以基层顶面中心轴位置为中心以圆环形向外呈递减趋势扩散。随着湿度场变化,固化土材料的回弹模量也存在较大变化。当固化土中含水率较大时,固化土材料的回弹模量会相应减小。如在雨季湿度场均匀分布情况下,基层固化土材料接近饱和状态,此时材料的回弹模量大幅降低,其中基层最大回弹模量为2 843 MPa;而在旱季湿度场均匀分布情况下,固化土路基和基层材料的刚度增加,基层最大回弹模量达到3 578 MPa;现场湿度预估分布情况下,材料处于中度饱和状态,此时回弹模量介于两者之间,其中基层最大回弹模量为2 973 MPa。综上分析可以知道,考虑湿度场分布的影响对道路结构有限元分析非常重要,会直接影响材料内部回弹模量等性能参数的分布和取值,从而造成受力分析结果的不同。

图9为3种湿度场条件下道路结构内部受力状态。从图9a中可以看出,压应力在基层顶面中心轴位置出现最大值,并呈现由中心轴向外逐渐减小趋势。其中压应力主要集中在距离中心轴水平距离15 cm范围内,在距离中心轴水平距离15~30 cm区间内下降较为明显,而后在距离中心轴水平距离60



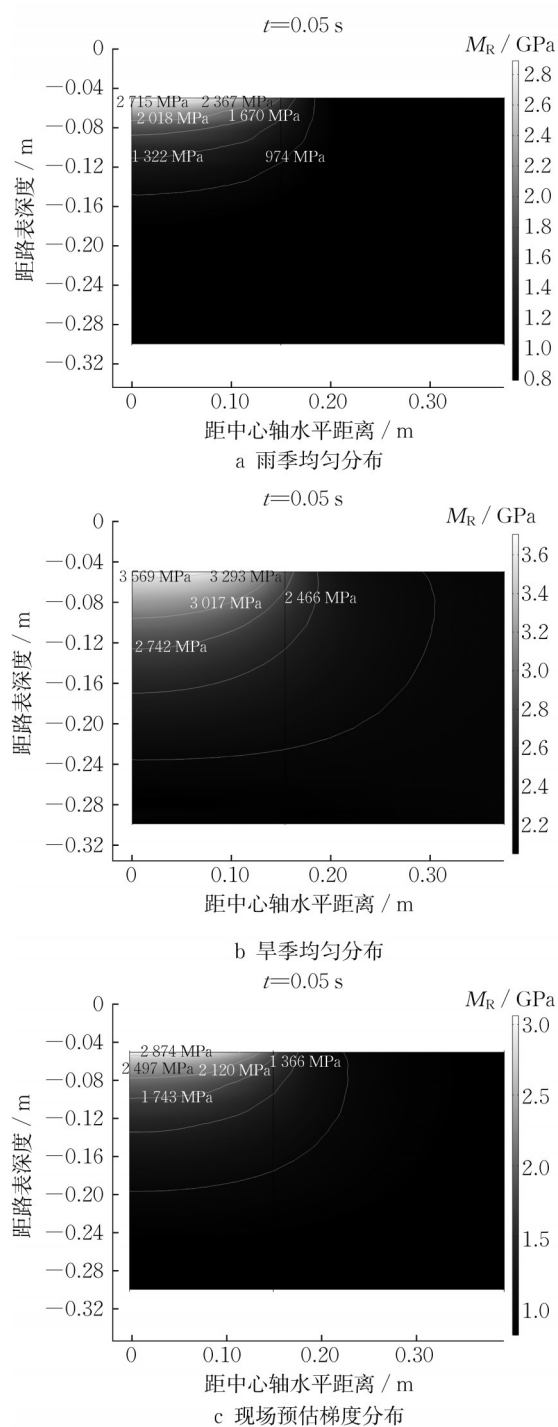


图8 3种湿度场条件下基层回弹模量在峰值荷载时( $t=0.05$  s)的分布

Fig. 8 Distribution of base resilient modulus at peak load ( $t=0.05$  s) under three humidity field conditions

cm后压应力作用几乎消失。比较3种湿度场条件下的压应力分布曲线可以看到,在基层顶面,压应力极值从大到小分别是雨季均匀分布场、现场预估湿度场和旱季均匀分布场,其值依次为812.62、749.88、

612.79 kPa。图9b为拉应力在固化土基层层底的分布情况,与压应力相同,都在中心轴位置处出现最大值。在固化土基层层底,拉应力作用区间主要集中在0~30 cm左右,而后会出现反拉区间,其中雨季均匀分布场条件下层底拉应力最大,为190.53 kPa,旱季均匀分布场次之,为126.62 kPa,现场预估湿度场最小,为107.93 kPa。从以上分析可以看出,在相同动荷载作用下,固化土路面结构在3种湿度场条件下的力学响应差别较大,这主要是因为湿度场影响了固化土材料在结构内部回弹模量的分布,进而影响了结构的受力性能,造成了关键位置力学响应的不同。这也进一步表明在固化土路面结构有限元分析中,考虑湿度场分布的重要性的必要性,这对准确模拟道路结构内部真实受力状态具有重要作用。

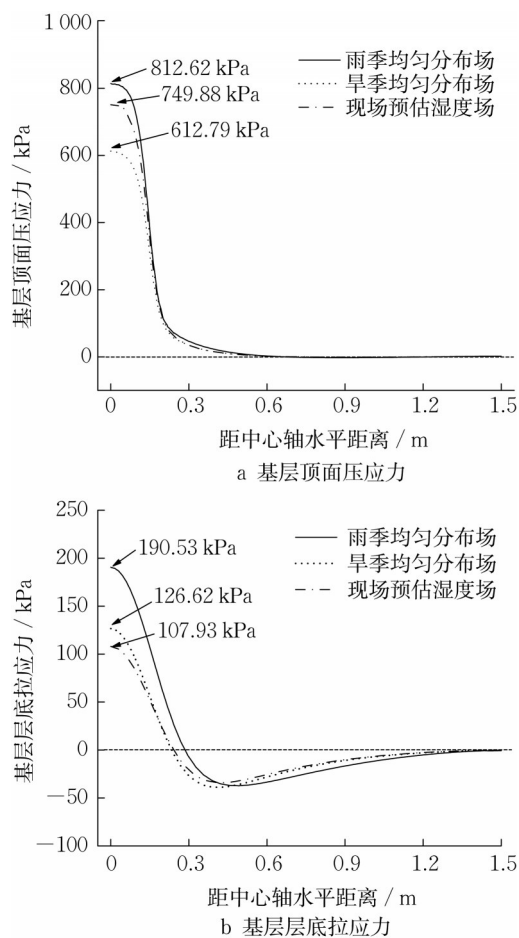


图9 沿宽度方向道路结构力学响应( $t=0.5$  s)

Fig. 9 Mechanical response of road structure along width direction ( $t=0.5$  s)

#### 4.2 结构厚度对固化土路面结构力学性能的影响

为了分析不同厚度组合对固化土路面结构力学性能的影响,设置了3种路基基层结构厚度组

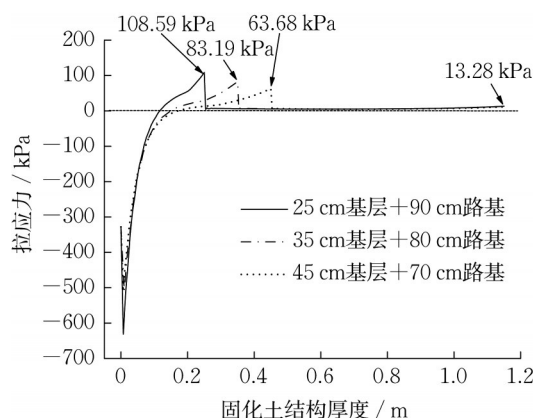
合形式,分别是25 cm基层+90 cm路基、35 cm基层+80 cm路基、45 cm基层+70 cm路基,然后通过多场耦合有限元分析,对结构内部关键位置的受力状态进行比较。建模过程中,湿度场为现场预估湿度场分布形式,荷载为0.7 MPa交通动荷载。

图10为固化土结构层中心轴上的拉、压应力分析结果。从图10a中可以看出,沿着纵向深度方向,拉应力在基层中先呈负值而后在一个临界深度处进入拉应力区,并在基层层底达到峰值,而后在固化土路基顶面拉应力迅速消失,并随着深度增加以缓慢速度逐渐增大,最后在固化土路基层底又出现一个较小的拉应力极值。比较3种结构形式下的拉应力分布曲线,可以看到三者基层中的拉应力临界深度和峰值大小都不同,临界深度随着基层厚度增大而增大,拉应力峰值随着基层厚度的增大而减小,其中3种厚度组合形式中基层层底拉应力随基层厚度增加依次为108.59、83.19、63.68 kPa。这说明固化土路面结构设计中基层厚度的变化对基层层底拉应力影响较大,随着基层结构厚度的增加,基层底部发生拉伸疲劳破坏的概率减小。图10b和图10c为固化土基层层底拉应力和层顶压应力随时间变化的曲线。从时程曲线中也可以明显看出,基层厚度对结构受力的影响较大。此外,比较拉、压应力时程曲线可以发现,基层厚度的变化对层底拉应力的影响要比对层顶压应力的影响更大。综上分析可以得出,增大基层厚度可以提高固化土路面结构的抗疲劳开裂性能。

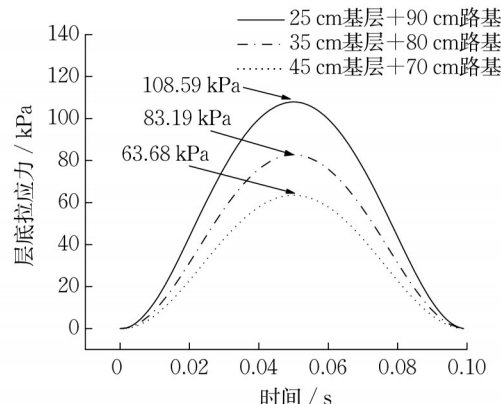
#### 4.3 固化土基层结构疲劳损伤行为分析

对于半刚性基层沥青路面来说,基层的疲劳开裂一直是道路结构受力分析中需要重点关注的问题。前面的力学响应分析也说明了在固化土路面结构中,基层中存在较大的拉应力区,尤其是在固化土基层底面的中心轴位置,当拉应力较大时,有可能会引起基层结构的疲劳开裂。

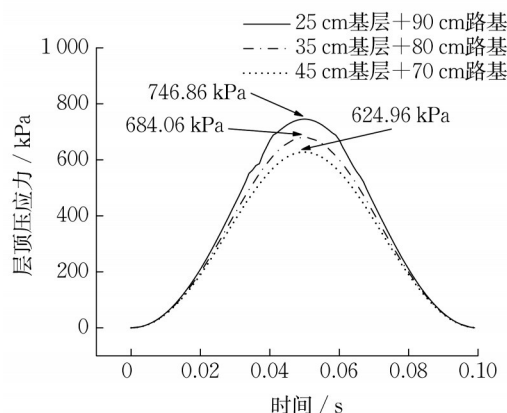
为了分析在固化土路面结构中的基层疲劳开裂问题,本次有限元建模过程中引入了疲劳开裂损伤模型,对固化土基层疲劳开裂的可能及损伤演化规律进行了重点分析。通过分析得到在0.7 MPa交通荷载作用下,只有25 cm基层+90 cm路基结构发生了疲劳损伤,具体如图11a所示,图中白色光亮区域即为疲劳损伤区域。而在1.12 MPa交通荷载的作用下,除了25 cm基层+90 cm路基结构外,35 cm基



a 固化土结构层中心轴上拉应力随深度变化曲线( $t=0.25$  s)



b 固化土基层中心轴上层底拉应力



c 固化土基层中心轴上层顶压应力

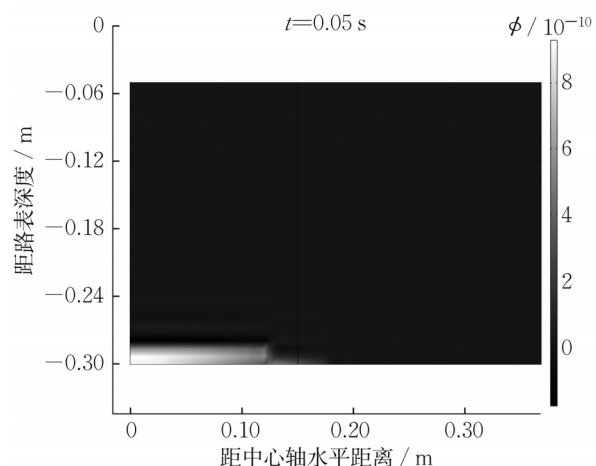
图10 固化土基层中拉、压应力的时间历程

Fig.10 Time course of tensile and compressive stress in stabilized soil bases

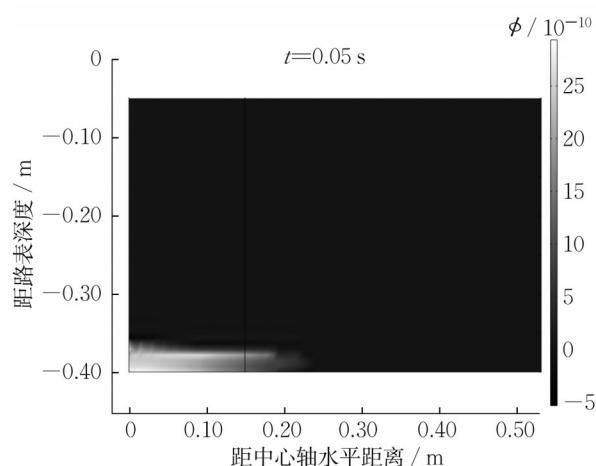
层+80 cm路基组合结构的基层底部也发生了疲劳损伤,如图11b所示。此外,对于存在疲劳损伤区域的道路结构来说,随着交通轴载作用次数的增加,其疲劳损伤也会逐渐累积,呈一定规律演化发展,最后形成宏观裂纹。综合以上分析结果可以得出,45 cm基层+70 cm路基组合结构未出现疲劳损伤破坏,表明这一厚度组合形式下的固化土路面结构具有较强的抗疲劳破坏能力,能够基本满足路面结构使用性



能要求。



a 0.7 MPa交通荷载作用下25 cm基层+90 cm路基结构



b 1.12 MPa交通荷载作用下35 cm基层+80 cm路基结构

图11 固化土基层结构疲劳损伤区域分布图

Fig. 11 Distribution of fatigue damage area of stabilized soil base

## 5 结论

本文针对固化土基层结构在服役环境条件下的疲劳性能提出了综合考虑现场湿度的固化土路面结构数值仿真计算框架,具体结论如下:

(1)基于固化土基层疲劳性能仿真理论建模方法和固化土非线性弹性模型构建了考虑现场湿度分布影响的固化土基层结构的多场耦合建模方法,实现了真实服役环境下的固化路面结构内部应力响应和基层疲劳性能的仿真分析。

(2)湿度分布状态对固化土基层结构内部回弹模量分布及动力响应具有较大影响,其中在固化土基层中拉应力极值从大到小依次是雨季均匀分布场、旱季均匀分布场和现场预估湿度,其值分别为

190.53、126.62和107.93 kPa。

(3)提出了固化土路基层结构组合设计分析方法,分析结果发现,随着基层结构厚度的增大,在相同位置处固化土基层层底拉应力呈减小趋势,其中25 cm基层+90 cm路基、35 cm基层+80 cm路基、45 cm基层+70 cm路基3种组合结构的基层层底拉应力依次为108.59、83.19和63.68 kPa。

(4)通过引入疲劳开裂损伤本构模型,对固化土在现场湿度场耦合作用下的基层疲劳开裂损伤演化规律进行了重点分析,结果发现45 cm基层+70 cm路基结构组合形式具有较好的抗疲劳性能。

### 作者贡献声明:

江训利:理论推导,试验方法设计,仿真模拟分析,数据分析和解释,论文初稿撰写。

罗雪:论文思路指导,理论推导验证,论文审阅与修订。

张裕卿:仿真模拟指导,论文审阅与修订。

李辉:试验设计验证与核实。

杨海露:试验设计验证与核实。

黄志义:数据分析和解释。

### 参考文献:

- [1] 杜延军,刘松玉,覃小纲,等.电石渣稳定过湿黏土路基填料路用性能现场试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2014,44(2):6.  
DU Yanjun, LIU Songyu, QIN Xiaogang, *et al.* Field investigations on performance of calcium carbide residues stabilized over-wet clayey soils used as highway subgrade materials [J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2014, 44 (2): 6.
- [2] MAINFORT R C. Soil stabilization with resins and chemicals [J]. Highway Research Board Bulletin, 1955, 108: 112.
- [3] 谢华昌,吴海平,凌建明.湿度和吸力对处治土路基回弹模量的影响[J].中国公路学报,2001,14(S1):19.  
XIE Huachang, WU Haiping, LING Jianming. Influence of moisture content and suction on modulus of pavement subgrade [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14 (S1): 19.
- [4] BEDDOE R A, TAKE W A, ROWE R K. Development of suction measurement techniques to quantify the water retention behaviour of GCLs [J]. Geosynthetics International, 2010, 17 (5): 301.
- [5] HEDAYATI M, HOSSAIN M S, MEHDIBEIGI A, *et al.* Real-time modeling of moisture distribution in subgrade soils [C]//Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability. Atlanta: Geo-Congress 2014, 2014: 3015-3024.

- [6] YUE E, BULUT R. Equilibrium matric suctions in subgrade soils in Oklahoma based on thornthwaite moisture index (TMI) [R]//Advances in Transportation Geotechnics and Materials for Sustainable Infrastructure. Commonwealth: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2014:17-24.
- [7] 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):12.  
QIN Xiaotong, CUI Kai, QING Yulan. 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): 12.
- [8] SUN Y, GUO R, WANG X, *et al.* Dynamic response characteristics of permeable asphalt pavement based on unsaturated seepage[J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2019, 8(4): 403.
- [9] SAHA S, HARIHARAN N, GU F, *et al.* Development of a mechanistic-empirical model to predict equilibrium suction for subgrade soil[J]. Journal of Hydrology, 2019, 575:221.
- [10] MITCHELL P W. The structural analysis of footings on expansive soil[C]//Expansive Soils. Commonwealth: ASCE, 1980: 438-447.
- [11] GAY D A. Development of a predictive model for pavement roughness on expansive clay[D]. College Station: Texas A&M University, 1994.
- [12] FREDLUND D G, MORGENTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15: 313.
- [13] LYTTON R L. Foundations and pavements on unsaturated soils [J]. Paris: International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1995, 3:1201.
- [14] LUO X, LUO R, LYTTON R L. Energy-based mechanistic approach for damage characterization of pre-flawed visco-elasto-plastic materials[J]. Mechanics of Materials, 2014, 70:18.
- [15] LUO X, LUO R, LYTTON R L. Characterization of fatigue damage in asphalt mixtures using pseudostrain energy [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(2):208.
- [16] 江训利. 稻壳灰无机复合固化土微观机理及非线性力学性能研究[D]. 杭州:浙江大学, 2022.  
JIANG Xunli. Microscopic mechanism and nonlinear mechanical behaviors of inorganic composite stabilized soils with rice husk ash [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [17] LUO X, GU F, LYTTON R L. Mechanistic composition - specific fatigue life of asphalt pavements [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2017, 143(12): 04017136.
- [18] LUO X, RONG L, LYTTON R L. Modified Paris's Law to predict entire crack growth in asphalt mixtures [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2373(1):54.
- [19] ZHANG Y Q, GU F, BIRGISSON B, *et al.* Viscoelasticplastic - fracture modeling of asphalt mixtures under monotonic and repeated loads [J]. Transportation Research Record, 2017, 2631(1): 20.
- [20] 何月, 樊高峰, 张小伟, 等. 浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应[J]. 生态学报, 2012, 32(14):11.  
HE Yue, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, *et al.* Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province [J]. Journal of Ecology, 2012, 32(14): 11.
- [21] SAHA S, GU F, LUO X, *et al.* Prediction of soil-water characteristic curve for unbound material using Fredlund - Xing equation-based ANN approach[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(5): 06018002.