

# 公路路基湿度计算理论研究进展

郑健龙,刘绍平,胡惠仁\*

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南长沙 410114)

**摘要:**路基湿度对其刚度、变形等性能影响显著,湿度场的理论计算方法作为评价其演变规律与机理的研究手段一直是道路工程中关注的重点问题之一。该文从路基湿度计算控制方程、非饱和路基土水力特性、湿度影响因素3个方面进行回顾与总结。发现目前在整个计算方法体系中对于应力-渗流-植被-大气等多场、多因素的耦合效应研究较少,建议开展此类研究,以便准确评估路基湿度、支撑道路工程的长寿命设计与实践。

**关键词:**路基;湿度;多场耦合;理论计算;综述

**中图分类号:**U416.1 **文献标志码:**A

## 0 引言

截至2021年底,中国公路通车里程超过528万km,其中高速公路通车里程达16.91万km,居世界首位<sup>[1]</sup>。随着中国交通基础设施规模的不断扩大,快速发展过程中道路结构使用寿命偏低问题逐渐显露。同时,根据《国家公路网规划(2013—2030年)》,到2030年底中国将新增高速公路4.7万km和普通公路近100万km。道路工程的长寿命设计与实践问题急需解决<sup>[2-4]</sup>。

道路工程中最直观的危害体现在路面,如:开裂、沉陷等问题,在工程实践中也常针对路面病害进行修复,但更深层次的原因往往是路基性能发生了变化,如:刚度下降、变形过大<sup>[5-7]</sup>。研究表明:路基性能与其自身湿度随外界环境、应力状态的变化紧密相关<sup>[8-9]</sup>。因此路基湿度的评估一直是道路结构与施工关注的重点问题。在各国路基路面设计理论中均有所考虑:中国规范中采用路基平衡湿度预估方法考虑湿度对路基路面力学性能的影响<sup>[10]</sup>;美国AASHTO路基路面设计指南给出了增强型综合气候模型(EICM)用于路基湿度的计算<sup>[11-12]</sup>。此外,

结合实际工程与研究,目前路基湿度的确定方法,可以分为3类:①现场开挖法,在路基现场直接钻芯取样,利用室内烘干试验进行测试,确定路基土湿度,这一方法在公路改扩建工程中评价老路基性能时广泛应用<sup>[9,13]</sup>;②经验预估法,根据土体液限、塑限、稠度等基本性能和气候条件给出统计公式进行预估,在各国路基设计规范中应用较多<sup>[10-12]</sup>;③理论计算方法,一般基于饱和-非饱和渗流理论进行解析或者数值计算<sup>[3,14]</sup>。这一系列方法均取得了很好的研究成果,其中理论计算方法相比现场开挖法具有研究便利性,相比经验预估法具有相对较高的准确性,同时还可以揭示路基湿度变化的机理,因此是道路工程领域内一直关注的重点。

为此,本文首先梳理公路路基湿度计算基本理论方法;随后对描述非饱和土水力特性的土水特征曲线模型和渗透系数函数进行总结分析;然后对路基湿度计算时需要考虑的大气、土质、地下水等各个因素及其影响机理进行分析;最后对现有湿度理论计算方法体系的不足之处进行讨论与展望,为路基湿度计算理论的研究提供方向,进而为路基长寿命设计与实践提供支撑。

收稿日期:2023-01-30(修改稿)

基金项目:国家重大科研仪器设备研制项目(编号:51927814);湖南省研究生科研创新项目(编号:CX20220866);长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(编号:CLSJCX22005)

作者简介:郑健龙,男,博士,教授,博士生导师,中国工程院院士.E-mail:zjl@csust.edu.cn

\*通信作者:胡惠仁,男,博士研究生.E-mail:huhui ren@stu.csust.edu.cn

## 1 路基湿度计算控制方程研究

实际工程中,路基一般位于地下水位以上(为非饱和区),如图 1 所示,因此路基湿度变化的实质就是非饱和土的渗流问题。

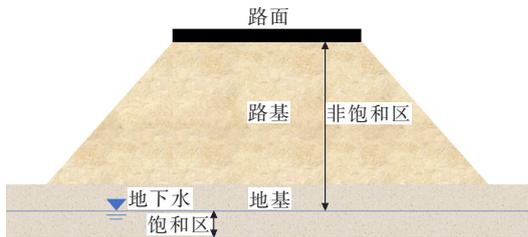


图 1 路基非饱和区域示意图

近些年非饱和土渗流理论得到了迅速发展,20 世纪初,Green 等<sup>[15]</sup>提出了降雨条件下非饱和土瞬态入渗过程的半解析法,描述了降雨入渗的物理过程,为后续研究奠定了基础。为探究降雨入渗后土中基质吸力和含水率的分布,Philip<sup>[16]</sup>基于 Green-Ampt 入渗理论,提出了降雨条件下含水率瞬态分布的计算方法。随后 Richards<sup>[17]</sup>基于广义达西定律和质量守恒原理,提出了饱和-非饱和渗流控制方程[式(1)],至此有关饱和-非饱和渗流计算的理论基本成型。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k_x(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_y(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_z(h) \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] = C(h) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $h$ 为压力水头,取负值时为基质吸力、取正值时为孔隙水压; $k_x(h)$ 、 $k_y(h)$ 、 $k_z(h)$ 分别为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向渗透系数; $t$ 为时间; $C(h)$ 为比水容量, $C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$ , $\theta$ 为含水量。

近些年研究者根据土体实际状态也在此基础上进一步开展了渗流-变形的耦合效应研究。吴礼舟等<sup>[18]</sup>给出了一维非饱和土渗流和变形耦合的控制方程,如式(2)所示,并求解了其解析解;同时,杨天娇等<sup>[19]</sup>建立了考虑孔隙介质可压缩性的二维非饱和土坡固-液-气三相渗流-变形耦合控制方程组,发现土体变形对边坡降雨入渗的推进起阻滞和延缓作用;Song 等<sup>[20]</sup>基于有限元数值计算方法,提出了考虑空间分布的渗流-变形耦合模型,探究了长时间降雨对

膨胀和湿陷性土壤等情况下斜坡的响应;熊勇林等<sup>[21]</sup>用所提出的水-土-气三相渗流-变形耦合有限元程序来进行数值模拟,程序很好地反映出由于降雨入渗引起的边坡变形;Hu 等<sup>[22]</sup>建立固体-水-空气耦合模型,模拟了长时间强降雨下均质土边坡地下水流动、输气和土体变形的耦合过程;卢玉东等<sup>[23]</sup>构建了以含水率为参数的固相物性参数方程和以孔隙比为参数的液相物性参数方程,结合固液二相控制方程,提出了考虑固液二相互态特性的流固耦合模型。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ k(h) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h}{\gamma_w} + z \right) \right] = \frac{\theta}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} + n \frac{\partial S_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} - S_e \eta \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} \quad (2)$$

式中: $\gamma_w$ 为水的重度; $z$ 为高程; $t$ 为时间; $S_e$ 为饱和度; $\epsilon_v$ 为体积应变; $\rho$ 为水密度; $n$ 为空隙率; $\eta = (1 - n)^2 / (1 - n_0)$ , $n_0$ 为初始空隙率。

此外,植被-土的相互作用作为近些年研究的热点问题,植被土的渗流控制方程研究也有了很大的进展<sup>[24-31]</sup>。研究者将植被吸水的现象作为汇项<sup>[26,30]</sup>,基于质量守恒定律给出了可考虑植被吸水作用的渗流控制方程,经典一维方程见式(3);Ni 和 Ng 等<sup>[26-28,30]</sup>基于植被土渗流控制方程推导了其二维解析解以及三维数值模拟计算方法,并利用实测数据进行了验证;Heppell 等<sup>[32]</sup>提出了非饱和土植物根系吸水的数学模型,考虑了植被土水力特性随深度的变化,进而探究了不同深度非饱和土的水分分布;Świtała 等<sup>[33]</sup>利用有限元法,改进剑桥模型,考虑植被根系加固和蒸腾的联合效应,进而提出了一个水-力耦合的模型;Willigen 等<sup>[34]</sup>比较了 4 个不同复杂度的根系吸水模型,嵌入非饱和渗流控制方程,提出了一维、二维和三维求解模型。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ k(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial k(h)}{\partial z} - S(z)H(z - L_1) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

式中: $z$ 为高程; $S(z) = g(z)T_p$ ; $g(z)$ 为描述根系形状的函数; $T_p$ 为植物蒸腾速率; $H(z - L_1)$ 为 Heaviside 功能函数, $H(z - L_1) = \begin{cases} 1 & L_1 < z \leq L \\ 0 & 0 \leq z \leq L_1 \end{cases}$ ; $L$ 为土层厚度; $L_1$ 为植被土层厚度; $k$ 为非饱和渗透系数。

综上所述,目前路基湿度场的计算控制方程体系已经形成,可以考虑变形与渗流之间的耦合、植被吸水效应等。但对于实际工程中的路基而言,所处的环境极其复杂,既要承受交通荷载和上部结构自重应力,边坡处又受植被等生物作用,因此其湿度的演变是一个变形(应力)-渗流-生物(植被)等多场、多因素耦合的结果。可以在现有渗流控制方程理论体系上进一步根据路基实际情况探究变形(应力)-渗流-生物(植被)等耦合的计算理论。

## 2 路基土水力特性研究

为了求解路基湿度场的理论方程,描述基质吸力与含水率和渗透系数之间的关系至关重要。目前已有大量研究者对其进行了研究,下文将从土-水特征曲线模型和渗透系数函数两个方面对非饱和土水力特性研究进展进行阐述。

### 2.1 土-水特征曲线模型

基质吸力与含水率之间的关系采用土-水特征曲线来描述。目前研究者主要从以下几个方面开展研究:

(1) 理论模型方面。从微观角度,栾茂田等<sup>[35]</sup>基于热力学理论,建立了等直径圆球土颗粒之间的弯液面方程,并运用迭代法进行求解,进而确定了基质吸力与饱和度(含水率)之间的理论关系;贺炜等<sup>[36]</sup>基于热力学原理,考虑不等径颗粒半径比、接触角等因素,通过几何关系获得颗粒间填充角之间的迭代关系;在此基础上,引入水量体积计算公式,即可获得基质吸力与含水率之间的关系;Yang等<sup>[37]</sup>建立了基于固液接触角预测土-水特征曲线的理论模型;刘星志等<sup>[38]</sup>基于热力学原理及二维液桥计算模型,以3个不等径土颗粒为研究对象,推导了基质吸力与含水率之间的关系函数。

此外,研究者也给出了宏观的理论模型。刘樟荣等<sup>[39]</sup>在分析非饱和土持水机制的基础上,将持水曲线划分为吸附和毛细持水区域,再基于微孔填充理论,结合Kelvin定律,构建了吸附持水曲线模型,同时基于毛细管凝聚理论和Young-Laplace方程,构建了持水曲线模型,然后通过二者的叠加,建立了全吸力范围内非饱和土的土-水特征曲线模型;杨明辉等<sup>[40]</sup>引入分形理论,考虑非饱和土孔径及渗流路径的微

观分形特性,提出了一个用于描述水在非饱和土中渗流的毛细管模型,在此基础上,推导了考虑滞后效应的土-水特征曲线方程;伏映鹏等<sup>[41]</sup>基于势能最小原理采用数值模拟方法结合Young-Laplace方程和Rosin-Rammler粒径分布函数,建立了考虑接触角及粒径级配影响的土-水特征曲线滞回模型;黄启迪等<sup>[42]</sup>基于热力学内变量理论,提出能综合考虑毛细滞回效应和非饱和土体积变形影响的土-水特征曲线模型;刘艳等<sup>[43]</sup>为了描述动态条件下土-水特征曲线,首先从热力学的基础理论出发,探讨了动态效应的理论基础,并从熵增不等式中得到了动态的土-水特征曲线方程。基于所得方程,利用边界面塑性理论,建立了可以预测任意扫描线的土-水特征曲线模型;Azizi等<sup>[44]</sup>通过引入液固接触角来解释吸力和孔隙比非单调变化,提出了考虑滞回效应的土-水特征曲线模型。

(2) 经验拟合模型。通过压力板仪、离心机、滤纸法等室内试验手段,获取基质吸力与含水率之间的对应关系,然后利用数学公式进行拟合,该方法操作简单、相对准确,应用广泛<sup>[45]</sup>,经典模型汇总见表1。20世纪50年代,Gardner<sup>[46]</sup>提出了指数形式的单参数模型,可较好描述含水率、基质吸力之间的关系;Brooks等<sup>[47]</sup>分析了大量含水率和基质吸力的室内试验数据,在此基础上考虑土的孔径分布指数 $\lambda$ ,提出了新的土-水特征曲线模型;Van<sup>[48]</sup>提出了三参数模型,用于拟合土-水特征曲线模型;在VG模型的基础上,Fredlund等<sup>[49]</sup>以孔径分布为基础提出了新的土-水特征曲线模型;Li等<sup>[50-51]</sup>考虑滞后和各种因素(应力状态和土壤结构)的影响,提出了预测粗粒土土-水特征曲线的模型;姚永胜<sup>[52]</sup>和彭俊辉<sup>[53]</sup>基于VG模型,将模型中的参数与上覆应力和压实度建立关系,进而获取了可考虑应力状态和压实度的土-水特征曲线模型;张玉伟等<sup>[54]</sup>为简便预测孔隙变化条件下黄土的土-水特征曲线,以Gardner模型为基础,引入孔隙指标建立了考虑浸水孔隙变化的黄土土-水特征曲线模型。

综上,目前对于土-水特征曲线模型的研究分成了两个层面:理论层面,从微观和力学角度在一系列假定条件下进行了理论公式的推导;另外,从统计学和宏观角度以室内试验数据为基础,给出了实用的拟合模型,但模型参数大多无物理意义,模型缺乏理

论支撑。在后续研究中可以致力于打通这两个层面的界限。此外,对于路基土而言,作为一种重塑土具有明显的分层压实特性,在干湿循环下土-水特征曲

线会发生改变,同时应力状态对其也会存在影响,因此为准确描述路基的湿度场,建立一种可考虑多因素耦合的土-水特征曲线模型具有探究价值。

表 1 几种具有代表性的土-水特征曲线模型汇总

提出者	公式	备注
Gardner <sup>[46]</sup>	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)e^{\beta h}$	$\beta$ 为去饱和系数( $\text{cm}^{-1}$ ); $\theta_s$ 为饱和体积含水率; $\theta_r$ 为残余体积含水率
Brooks 等 <sup>[47]</sup>	$\theta = \begin{cases} \theta_s & h < h_a \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{h_a}{h}\right)^\lambda & h \geq h_a \end{cases}$	$h_a$ 为进气值; $\lambda$ 为孔径分布指数
Van <sup>[48]</sup>	$\theta = \left[ \frac{1}{1 + (ah)^n} \right]^m$	$a, n, m$ 为模型参数, $m = 1 - 1/n$
Fredlund 等 <sup>[49]</sup>	$\theta = \theta_s \left[ 1 - \frac{\ln(1 + h/h_r)}{\ln(1 + 10^6/h_r)} \right] \left\{ \frac{1}{\ln[e + (h/a)^n]} \right\}^m$	$h_r$ 为残余含水率状态时的吸力值(kPa); $a, m, n$ 为拟合参数; $e$ 为自然对数常量
Li 等 <sup>[50,51]</sup>	$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\exp(n_{lv}(a_{lv}h)^{m_{lv}})} + \theta_r$	$a_{lv}, n_{lv}, m_{lv}$ 为拟合参数
姚永胜 <sup>[52]</sup>	$\theta = \left[ 1 - \frac{\ln(1 + h/10^6)}{\ln 2} \right] \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (h/a(\sigma))^{n(\sigma)}]\}^{m(\sigma)}}$	$\sigma$ 为竖向净法向应力; $a(\sigma), m(\sigma), n(\sigma)$ 为竖向应力的函数

## 2.2 渗透系数函数

水分在非饱和土中发生迁移时,流动的快慢除受孔隙结构分布的影响外,还有一个重要影响因素为基质吸力,一般土壤水分越低基质吸力越大,水分越难流动、渗透系数越低。为了描述这一关系,研究者给出了渗透系数与基质吸力之间的函数关系,部分经典模型汇总见表 2。Gardner<sup>[46]</sup>提出了指数形式的单参数模型;Brooks 等<sup>[47]</sup>分析了大量含水率和基质吸力的试验数据,在此基础上提出了与土的孔径分布指数  $\lambda$  相关的渗透系数函数;Van<sup>[48]</sup>提出了三参数数学模型,用于拟合渗透系数函数;在 VG 模型的基础上, Fredlund 等<sup>[49]</sup>以孔径分布为基础提出了新的渗透系数函数;杨明辉等<sup>[40]</sup>引入分形理论,考虑非饱和土孔径及渗流路径的微观分形特性,提出了一个用于描述水在非饱和土中渗流的毛细管模型,在此基础上,给出了渗透系数函数;Wang 等<sup>[55]</sup>利用离散元法计算出了土-水特征曲线模型,然后借助 Mualem 模型和 Kozeny-Carman 方程,对颗粒材料的渗透率也进行了预测,得到了非饱和土渗透系数函数;Averjanov<sup>[56]</sup>提出了一个幂函数形式的数学方程,用于表达渗透系数与基质吸力之间的关系;蔡国庆等<sup>[57]</sup>基于饱和度和随孔隙比变化的增量关系以及基于土-水特征曲线

预测渗透系数的方法,提出了考虑初始孔隙比的渗透系数预测方法。

综上,可以看出目前大部分渗透系数函数是基于土-水特征曲线方程提出的,并且经试验验证了其合理性,大大降低了试验量。因此与土-水特征曲线模型的研究相同,对于路基土,渗透系数函数的研究后续也可集中在考虑多因素耦合和多现象体现的渗透系数函数上。

表 2 几种具有代表性的渗透系数函数汇总

提出者	公式	备注
Brooks 等 <sup>[47]</sup>	$k(h) = \begin{cases} k_s, & h \leq h_a \\ k_s \left(\frac{h_a}{h}\right)^\eta, & h > h_a \end{cases}$	$\eta = 2 + 3\lambda$ ; $k_s$ 为饱和渗透系数
Van <sup>[48]</sup>	$k(h) = \frac{\{1 - (ah)^{n-1} [1 + (ah)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (ah)^n]^{m/2}}$	$a, n, m$ 为模型参数, $m = 1 - 1/n$
Fredlund 等 <sup>[49]</sup>	$k(h) = \Theta^q(h) \cdot \frac{\int_{\ln h}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(h)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln h_s}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy}$	$y$ 为积分 $\ln h$ 的虚变量; $b = \ln(10^6/\text{kPa})$ ; $\Theta^q$ 为考虑曲率的修正系数,指数 $q$ 通常等于单位 1
Averjanov <sup>[56]</sup>	$k(h) = k_s S_e^n$	$S_e$ 为有效饱和度; $n \approx 3.5$

### 3 路基湿度变化影响因素分析

路基湿度变化均是在土体性质、外界因素驱动下产生的,概念图如图2所示。一方面,路基湿度在外界条件的驱动下随时间发生变化,一般工后5年左右在路基中央达到相对平衡状态,路基边坡附近的湿度则会因为气候条件的影响持续出现波动<sup>[3,8,58]</sup>;另一方面,土体自身的性质和状态会影响水分在路基内的迁移,进而导致湿度变化的不同<sup>[3,52,53]</sup>。这一系列因素是准确表征路基湿度的关键,可为路基湿度计算方法的进一步完善提供方向,因此有必要逐一进行分析。

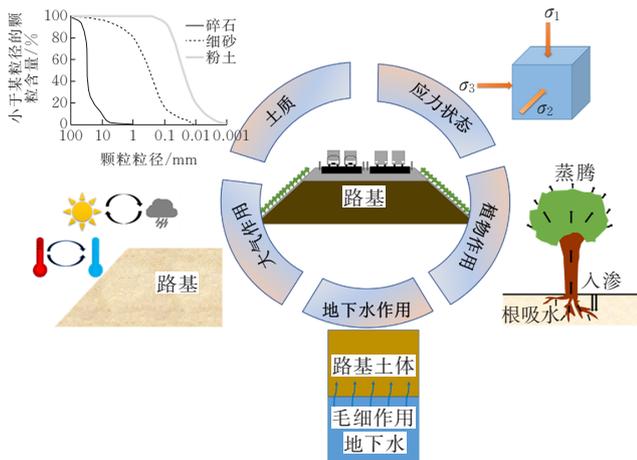


图2 各因素对路基湿度的影响示意图

#### 3.1 土质

对于路基的填料,受地域、施工条件、成本、政策等影响,不同道路采用的填料各异,最常见的有黏土、砂土、粗粒土、建筑固废等<sup>[59-61]</sup>,在中国南方地区还存在大量的特殊土,如高液限黏土、膨胀土等<sup>[52-53,58]</sup>。土质的不同存在不同的矿物组成、颗粒级配(图2),这将造成不同的孔隙结构,当水分流过这些孔隙后经过的通道大小、遇到的阻力存在差异,进而影响整个路基湿度的迁移<sup>[59,61]</sup>。以黏土为例,其亲水矿物含量高、细颗粒含量大,使单个孔隙小,当水分进入后,在固-液-气表面形成的张力(即基质吸力)作用下,水分迅速迁移,而对于粗颗粒含量大的砂土该效应极小<sup>[3,8]</sup>。

国内外已有大量学者探究了不同土质下的路基

湿度演变规律。彭俊辉<sup>[53]</sup>选取了高液限粉土和低液限黏土路基进行湿度场计算,发现路基内的含水率在通车运营后会逐步增加到平衡含水率状态,但高液限粉土达到平衡的时间早于低液限黏土,且含水率要高;吕秋丽等<sup>[62]</sup>发现粉土毛细水上升速度快、持续时间长,砂土毛细水上升速度最快、持续时间短,黏土毛细水上升速度慢、持续时间长;王中翰等<sup>[63]</sup>针对河套灌区设置风积砂隔断层路基的层状构造进行室内模型试验,发现位于饱和区的砂层会加速毛细水的上升,且会抬高毛细饱和区,进而提高毛细水位高度;位于非饱和区砂层可有效延缓毛细水的上升,降低毛细补水效率,进而降低毛细水位高度;郭剑峰等<sup>[64]</sup>以非饱和土增量非线性固结理论为基础,考虑干密度在固结过程中的变化,对延安新区黄土高填方工程进行了土体变形和土体内水分迁移的耦合分析。综上所述,不同的土质对水分迁移影响极大,目前在进行数值计算时,主要通过土体自身的水力特性来考虑土质差异对湿度的影响。

#### 3.2 应力状态

在道路工程中,路基土除了承受自身的重力外,还承受上部路面结构、交通荷载引起的附加应力和周围土体提供的围压,最后构成了路基土某一点所承受的应力<sup>[53]</sup>,如图2所示。在应力作用下,土体会被挤压变形、造成孔隙结构的重新排列组合,进而影响水分流动通道的大小和形状,造成土体水分迁移的变化;Ng等<sup>[65-66]</sup>对这一问题进行了深入探究,结果表明:上覆应力改变了土体的水力特性,随上覆应力增加,土-水特征曲线趋于平缓,饱和含水率降低,进而引起水分迁移的差异;Zhang和姚永胜等<sup>[3,8,52]</sup>探究了上覆应力对路基土土-水特征曲线的影响,进而揭示了其对路基水分迁移的影响规律,与现场实测结果比较,考虑应力影响的湿度计算结果更加接近真实值;Li等<sup>[50]</sup>从土体孔径分布曲线出发,考虑应力状态和土壤结构等因素,结合VG和FX模型,给出了考虑初始含水率、应力状态和土壤结构的土-水特征曲线模型用于湿度计算和土体性能预估;Hu等<sup>[67]</sup>考虑初始应力的影响,基于土壤PSD孔隙分布函数,并结合Mualem模型,建立了考虑初始应力状态的土-水特征曲线模型和渗透系数函数。

综上所述,对于应力状态对路基湿度的影响,在

路基湿度计算时,目前主要考虑上覆应力状态对路基土水力特性的影响,进而评估其对整个湿度场迁移的贡献,但并未考虑围压对其的影响;同时现有研究已经给出了应力(变形)-渗流耦合的控制方程,因此为准确描述路基湿度场,后续应该在考虑应力状态对土水影响的同时,也应该考虑应力和渗流的耦合作用,才能从真正意义上揭示应力对湿度场的影响规律。

### 3.3 大气环境

路基处于大气环境内,太阳辐射、气温、降雨、雪、风等大气条件均会引起路基水分的改变(图2),可以将其分为蒸发和补水两类:①引起蒸发的原因主要是太阳辐射、气温和风等因素。太阳辐射会被路基土吸收导致水分在太阳能量作用下出现蒸发;大气中的温度和风的作用也会造成水分蒸发;②降雨和雪等会补充路基土内的水分。

这一系列的影响因素是渗流计算时作为边界条件常被关注的重点。黎瀚文等<sup>[68]</sup>建立了考虑大气作用的水-热耦合高速铁路路基水分迁移计算模型,得出大气对砂土路基影响深度较浅(深度 $<3.0$  m),浅层(深度 $\leq 1.0$  m)受大气环境影响非常显著,含水率波动范围较大;粉土和黏土路基的含水率受大气影响的深度较深,超过3 m,但含水率波动范围较小;Zhang等<sup>[3,8]</sup>对路基在降雨和蒸发影响下的湿度场进行了探究,结果表明在路基靠近边坡位置,湿度随大气条件的变化常年出现波动;肖源杰等<sup>[69]</sup>为深入分析降雨入渗诱发路基病害的内在机制,基于非饱和渗流计算理论,建立了二维有限元分析模型,研究了不同降雨强度下路基降雨入渗深度、饱和区、含水率的演变规律;Liu等<sup>[70]</sup>通过建立数值模型,探讨了降雨强度和间歇时间对路基湿度场变化和分布的影响;杨洋等<sup>[71]</sup>以公路路基为研究对象,建立了考虑温度-水-应力耦合作用的路基水分迁移计算方法;刘杰等<sup>[72]</sup>基于水、蒸气的流动方程及热能的扩散方程,研究了不同气候环境影响下非饱和土路基湿度的演变规律。

综上所述,关于降雨和蒸发作为渗流计算的边界条件方面的研究相对成熟;对于路基湿度迁移而言,大气对路基坡面植被生长有显著影响,而植被的生长状态对大气施加在路基的补水和蒸发也有影

响,二者为一耦合效应,后续在路基湿度的长期计算时可以考虑此耦合效应。

### 3.4 地下水

地下水对路基湿度的影响十分显著,特别是在地下水埋深较浅的湿润地区,如中国南方地区,是路基水分含量迅速增加的主要因素之一<sup>[3]</sup>。地下水在路基土内部的毛细作用(主要为基质吸力)下水分会上升至上部路基内(图2),对于细粒土上升高度最大约10 m,对于一般路基而言,基本上整个路基区域均会受其影响。同时地下水会在大气环境和周围水系的影响下出现水位波动,这也会导致路基含水率的波动<sup>[73]</sup>。

目前,相关学者进行了一些研究。柳志军等<sup>[74]</sup>基于饱和-非饱和土渗流理论,构建了5种具备不同初始地下水位的路基数值模型,发现随着初始水位的增高,路基湿度增幅呈对数递增且处于平衡水位之上时,初始地下水位高度对降雨入渗路基引发湿度场的分布与变化状态影响显著;胡旭东<sup>[75]</sup>设计了室内路基模型试验用来模拟地下水和边坡渗水对路基湿度场的影响,结果表明:路基含水率在地下水作用下由底部向顶部逐渐增大;郝伟等<sup>[76]</sup>运用地下水渗流分析软件进行数值计算,发现水位高低对下部路基湿度的影响显著,路基受水位影响分为湿度饱和区和湿度渐变区;Liu等<sup>[77]</sup>建立了室内路基模型,发现当地下水位上升时,毛细作用明显;随着地下水位的下降,地下水位附近路基位置的水分减少,地下水位上方路基的水分基本无变化。

由此可见,现有研究对于地下水考虑较为成熟,主要是作为边界条件施加对湿度的影响。对于路基而言,地下水位受降雨以及周围水系的影响会存在波动,但实际工程中难以监测,因此在进行湿度场计算时水位的波动考虑较少,后续研究可以对路基地下水位的监测与评估方法进行深入探讨。

### 3.5 植被

在路基工程中,植被作为一种很重要的工程措施种植在路基边坡上,一方面可以降低雨水对路基坡面的冲刷<sup>[78-79]</sup>,另一方面可以起到环保美观的效果,对驾驶安全也有促进作用<sup>[80-81]</sup>。对于路基湿度而言,植被也有显著的影响:①植物的根系将土体由土颗粒、水和气的三相介质变为含有根系的四相介质,

同时也改变了其孔隙结构,进而影响水分在路基内的迁移<sup>[82-83]</sup>;当植物死亡后,根系的腐败将形成较大孔隙,在水分迁移时出现优先流<sup>[29]</sup>;②植物的生长需要根系从路基内吸收大量水分<sup>[30,84]</sup>,降低路基土水分含量;③植物的叶面会削弱部分太阳的照射、减少路基水分蒸发,同时在降雨时截留部分雨水<sup>[30-31]</sup>,使渗入路基内的水分变少。

目前植被对路基湿度的影响也是研究的热点。Ng和Leung等<sup>[30,85-87]</sup>通过室内外试验建立植被土的土-水特征曲线模型,通过理论分析建立了考虑植物吸水的控制方程并给出了数值计算方法,进而揭示了植物对非饱和土水分迁移的影响规律与机理;曹妮等<sup>[88]</sup>选择了黑麦草+白三叶、楝树、鬼针草+黑麦草、黑麦草+紫花苜蓿、鬼针草+黑麦草+艾草、小叶扶芳藤6种典型植物群落,通过实地调研获得植物群落和土壤数据,分析了不同植物群落对路基土壤水分的影响;Jotisankasa等<sup>[89]</sup>研究了香根草根系对黏土砂和低塑性粉土水力特性的影响;毛正君等<sup>[90]</sup>探究了考虑降雨入渗条件下不同生长期紫花苜蓿黄土边坡的水分迁移、防冲刷效果以及边坡稳定性;王一冰等<sup>[91]</sup>利用VADOSE/W软件对植被边坡水分迁移进行了分析,结果表明:经历10 d降雨后,裸土边坡、植被边坡、植被联合植筋带加固的边坡的降雨影响深度分别为0.6 m、0.9 m、1.2 m;再经历14 d的干燥后,植被边坡含水率大于裸土边坡。

综上所述,植物对非饱和土湿度的影响是近几年的研究热点,取得了很好的成果。但在路基工程中,草、灌、乔等植被是随机分布的,导致其叶面的分布和根系在路基内部的生长存在极大的随机性,应该通过大量的实测数据,提炼统计模型,用于数值模型的建立。同时其土-水特征曲线的测试采用张力计和水分计在大型模型上测量,或采用传统压力板仪进行测试;但植物根系的大小分布不一,会严重影响土体水力特性,如何准确进行植被土水力特性的评价也是研究的重点问题。

## 4 结论与展望

路基所处环境极其复杂,其湿度演变是一个应力-渗流-植被-大气等多场、多因素耦合的结果。本

文从路基湿度计算控制方程、水力特性以及各主要影响因素3个方面系统地梳理了路基湿度计算理论的研究现状,并给出了后续研究的方向:

(1) 非饱和土的多场耦合研究已有较大发展,在此基础上应该发展针对路基工程特性的可考虑应力-渗流-植被等耦合效应的计算方法。

(2) 对于路基土的水力特性研究应该致力于发展具有理论性和便利性的土-水特征曲线和渗透系数模型,同时也应该耦合应力、植被等因素的影响效应。

(3) 土质、应力状态、大气作用、地下水以及植物作用对土体水分迁移的影响大;后续可探究围压、大气-植被生长耦合效应、植被根系随机性、地下水波动等对路基湿度的影响,进而完善其计算方法体系。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部.2021年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].(2022-05-25)[2022-10-30].[http://www.gov.cn/shuju/2022-05/25/content\\_5692174.htm](http://www.gov.cn/shuju/2022-05/25/content_5692174.htm).
- [2] 张军辉,彭俊辉,郑健龙.路基土动态回弹模量预估进展与展望[J].中国公路学报,2020,33(1):1-13.
- [3] ZHANG J H, LI F, ZENG L, et al. Numerical simulation of the moisture migration of unsaturated clay embankments in Southern China considering stress state [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(1):11-24.
- [4] 《中国公路学报》编辑部.中国路基工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(3):1-49.
- [5] 庞炜辰,王富玉,杨旭.路面裂缝自动化修补中路径规划研究的进展概述与展望[J].中外公路,2022,42(2):68-72.
- [6] 吴旭东,何文勇,龙万学,等.基于探地雷达的路基病害正演模拟及分析[J].中外公路,2020,40(S2):105-109.
- [7] 于恒,汪益敏,王兆阳.旧路软基处治欠佳道路扩建后路面裂缝形成机理研究[J].中外公路,2017,37(2):18-23.
- [8] ZHANG J H, LI F, ZENG L, et al. Effect of cushion and cover on moisture distribution in clay embankments in Southern China[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(7):1893-1906.
- [9] ZHANG J H, DING L, ZENG L, et al. Deterioration mechanism and rapid detection of performances of an existing subgrade in Southern China[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(7):2134-2147.

- [10] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路路基设计规范:JTG D30—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [11] AASHTO. Guide for design of pavement structures[S]. American Association of State Highway and Transportation Officials:Washington, D.C., USA, 1993.
- [12] 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, 575:221-233.
- [13] 交通运输部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [14] 胡惠仁.降雨条件下非饱和土地基承载性能演化研究[D].长沙:长沙理工大学,2019.
- [15] GREEN W H, AMPT G A. Studies of soil physics (Part I):the Flow of Air and Water through Soils[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1911, 4: 1-24.
- [16] PHILIP J R. The theory of infiltration[J]. *Soil Science*, 1957, 83(5):345-358.
- [17] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous medium[J]. *Physics*, 1931, 1(5):318-333.
- [18] 吴礼舟,黄润秋.非饱和土渗流-变形耦合的数值分析[J].*土木建筑与环境工程*, 2011, 33(3):63-67.
- [19] 杨天娇,王述红,张雨浓,等.降雨条件下非饱和土坡三相流模型的渗流-变形耦合分析[J].*应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(2):355-367.
- [20] SONG Z C, LI X, LIZÁRRAGA J J, et al. Spatially distributed landslide triggering analyses accounting for coupled infiltration and volume change[J]. *Landslides*, 2020, 17(12):2811-2824.
- [21] 熊勇林,朱合华,叶冠林,等.降雨入渗引起非饱和土边坡破坏的水-土-气三相渗流-变形耦合有限元分析[J].*岩土力学*, 2017, 38(1):284-290.
- [22] HU R, CHEN Y, ZHOU C. Modeling of coupled deformation, water flow and gas transport in soil slopes subjected to rain infiltration[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(10):2561-2575.
- [23] 卢玉东,国金琦,程大伟,等.考虑固液二相互态特性的流固耦合模型[J].*中国公路学报*, 2023, 36(1):58-69.
- [24] LEUNG A K, NG C W W. Analyses of groundwater flow and plant evapotranspiration in a vegetated soil slope[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(12):1204-1218.
- [25] NG C W W, GUO H W, NI J J, et al. Effects of soil-plant-biochar interactions on water retention and slope stability under various rainfall patterns[J]. *Landslides*, 2022, 19(6):1379-1390.
- [26] NI J J, NG C W W, GAO Y F, et al. Modelling root growth and soil suction due to plant competition[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2020, 484:110019.
- [27] NI J J, LEUNG A K, NG C W W. Modelling soil suction changes due to mixed species planting[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 117(1):1-17.
- [28] NI J J, CHENG Y F, BORDOLOI S, et al. Investigating plant root effects on soil electrical conductivity: An integrated field monitoring and statistical modelling approach[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(3):825-839.
- [29] LEUNG A K, BOLDRIN D, LIANG T, et al. Plant age effects on soil infiltration rate during early plant establishment[J]. *Géotechnique*, 2018, 68(7):646-652.
- [30] NG C W W, Wang Z J, NI J J. Effects of plant morphology on root-soil hydraulic interactions of *schefflera heptaphylla*[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2021, 58(5):666-681.
- [31] 吴宏伟.大气-植被-土体相互作用:理论与机理[J].*岩土工程学报*, 2017, 39(1):1-47.
- [32] HEPPELL J, PAYVANDI S, ZYGALAKIS K C, et al. Validation of a spatial-temporal soil water movement and plant water uptake model[J]. *Géotechnique*, 2014, 64(7): 526-539.
- [33] ŚWITAŁA B M, ASKARINEJAD A, Wu W, et al. Experimental validation of a coupled hydro-mechanical model for vegetated soil[J]. *Géotechnique*, 2018, 68(5): 375-385.
- [34] WILLIGEN P D, JOS C V D, MATHIEU J, et al. Root water uptake as simulated by three soil water flow models [J]. *Vadose Zone Journal*, 2012, 11(3):1-24.
- [35] 栾茂田,李顺群,杨庆.非饱和土的理论土-水特征曲线[J].*岩土工程学报*, 2005, 27(6):611-615.
- [36] 贺炜,赵明华,陈永贵,等.土-水特征曲线滞后现象的微观机制与计算分析[J].*岩土力学*, 2010, 31(4):1078-1083.
- [37] YANG S, LU T H. Study of soil-water characteristic curve using microscopic spherical particle model[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(1):103-111.
- [38] 刘星志,刘小文,陈铭,等.基于3个不等粒径颗粒接触模型的土-水特征曲线[J].*岩土力学*, 2018, 39(2):651-656.
- [39] 刘樟荣,叶为民,崔玉军,等.基于微孔填充和毛细管凝聚理论的持水曲线模型[J].*岩土力学*, 2021, 42(6): 1549-1556.

- [40] 杨明辉,陈贺,陈可.基于分形理论的SWCC边界曲线滞后效应模型研究[J].岩土力学,2019,40(10):3805-3812.
- [41] 伏映鹏,廖红建,吕龙龙,等.考虑接触角及粒径级配影响的土水特征曲线滞回模型[J].岩土工程学报,2022,44(3):502-513.
- [42] 黄启迪,赵成刚,蔡国庆.基于热力学并考虑体变及滞回效应的土-水特征曲线模型[J].岩土力学,2016,37(7):1857-1867.
- [43] 刘艳,于建涛.动态土水特征曲线滞后模型研究[J].岩土工程学报,2021,43(1):62-68.
- [44] AZIZI A, JOMMI C, MUSSO G. A water retention model accounting for the hysteresis induced by hydraulic and mechanical wetting-drying cycles[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 87:86-98.
- [45] LU N, LIKOS W J. Unsaturated soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [46] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. Soil Science, 1958, 85(4):228-232.
- [47] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[M]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- [48] VAN G M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(4):892-898.
- [49] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4):521-532.
- [50] LI Y, VANAPALLI S K. Models for predicting the soil-water characteristic curves for coarse and fine-grained soils[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612:128248.
- [51] LI Y, VANAPALLI S K. Prediction of soil-water characteristic curves of fine-grained soils aided by artificial intelligent models[J]. Indian Geotechnical Journal, 2022, 52:1116-1128.
- [52] 姚永胜. 湿热环境下路基结构回弹模量演变规律研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2018.
- [53] 彭俊辉. 考虑路基土黏弹性质的湿-力影响下路基结构模量研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2021.
- [54] 张玉伟,宋战平,谢永利.孔隙变化条件下黄土土水特征曲线预测模型[J].岩土工程学报,2022,44(11):2017-2025.
- [55] WANG X L, LI J C. A novel liquid bridge model for estimating SWCC and permeability of granular material[J]. Powder Technology, 2015, 275:121-130.
- [56] AVERJANOV S F. About permeability of subsurface soils in case of incomplete saturated porous media[J]. Water Resources Research, 1987, 23(4):542.
- [57] 蔡国庆,盛岱超,周安楠.考虑初始孔隙比影响的非饱和土相对渗透系数方程[J].岩土工程学报,2014,36(5):827-835.
- [58] 张锐,郑健龙.公路膨胀土路堤湿度平衡规律研究[J].公路交通科技,2013,30(11):24-32.
- [59] 丁瑜,贾羽,王暄,等.颗粒级配及初始干密度对路基翻浆冒泥特性的影响[J].岩土力学,2022,43(9):2539-2549.
- [60] 张玉芝,王天亮,张飞,等.不同细粒含量下高速铁路基粗颗粒填料水气迁移特征与冻胀特性[J].中国铁道科学,2021,42(4):1-8.
- [61] 刘波,刘鹏,马刚,等.颗粒形状对粗粒土密实度的影响研究[J].人民长江,2022,53(4):155-162,170.
- [62] 吕秋丽,杨海华.不同土质孔隙结构特点及其毛细水上升规律分析[J].能源与环保,2019,41(5):102-106.
- [63] 王中翰,柴金义,张宏.层状构造土体中毛细水上升的试验研究[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2021,52(2):192-197.
- [64] 郭剑峰,陈正汉,郭楠.延安新区高填方工程的变形与水分迁移耦合分析[J].岩土工程学报,2021,43(S1):143-148.
- [65] NG C W W, PANG Y W. Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(2):157-166.
- [66] NG C W W, LEUNG A K. Measurements of drying and wetting permeability functions using a new stress-controllable soil column[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(1):58-68.
- [67] HU R, CHEN Y F, LIU H H, et al. A water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity model for deformable soils: consideration of the change in pore-size distribution[J]. Géotechnique, 2013, 63(16):1389-1405.
- [68] 黎瀚文,张璐璐,冯世进,等.复杂大气环境作用下高速铁路基水分迁移响应[J].岩土力学,2018,39(7):2574-2582.
- [69] 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.
- [70] LIU Z J. Influence of rainfall characteristics on the infiltration moisture field of highway subgrades[J]. Road Materials and Pavement Design, 2015, 16(3):635-652.
- [71] 杨洋,姚海林,卢正.蒸发条件下路基对气候变化的响应

- 模型及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1209-1214, 1220.
- [72] 刘杰, 姚海林, 胡梦玲, 等. 大气作用下非饱和土路基湿度及影响因素分析[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(5): 772-776.
- [73] 贾超, 张少鹏, 丁朋朋, 等. 地面沉降对地下水时空响应及其非工程控沉[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(7): 1032-1040.
- [74] 柳志军, 王亮亮. 降雨入渗路基湿度场演变规律[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(9): 124-128.
- [75] 胡旭东. 基于室内模型试验的路基湿度变化规律研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013, 9(12): 100-102.
- [76] 郝伟, 张争奇, 王选仓, 等. 堤防道路路基湿度场演变规律数值计算[J]. 水利水电技术, 2016, 47(11): 19-24.
- [77] LIU J, YAO H L, CHEN P, et al. Theoretical analysis and experimental study of subgrade moisture variation and underground antidrainage technique under groundwater fluctuations[J]. Journal of Applied Mathematics, 2013: 3251-3255.
- [78] 朱永杰, 王超, 刘自强. 降雨和植被覆盖对铁路路基边坡土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 8-14.
- [79] 田国行, 杨春, 杨晓明, 等. 路基边坡草灌植被消减降雨侵蚀作用机理探讨[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(7): 32-37.
- [80] 胡明. 重庆市县际公路交通安全预警方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [81] 王舸. 山区高速公路路基环境协调性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [82] 张攀. 高速公路路基边坡植物根系加固机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [83] 王昊, 杜晓燕, 叶阳升, 等. 异型纤维土六棱砖骨架护坡技术研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(9): 100-103.
- [84] 王柯. 路基坡面生态防护技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [85] NG C W W, ZHANG Q, NI J J, et al. A new three-dimensional theoretical model for analysing the stability of vegetated slopes with different root architectures and planting patterns[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 130: 103912.
- [86] NG C W W, PANG, Y W. Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(6): 1252-1264.
- [87] LEUNG A K, GARG A, NG C W W. Effects of plant roots on soil-water retention and induced suction in vegetated soil[J]. Engineering Geology, 2015, 193: 183-197.
- [88] 曹妮, 胡永歌, 陈冰, 等. 扶项高速公路边坡植被特征与稳定性比较[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 129-135.
- [89] JOTISANKASA A, SIRIRATTANACHAT T. Effects of grass roots on soil-water retention curve and permeability function[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(11): 1612-1622.
- [90] 毛正君, 张瑾鸽, 毕银丽, 等. 紫花苜蓿对黄土边坡浅层破坏防护时间效应的数值分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 72-83.
- [91] 王一冰, 杨文琦, 周成, 等. 植筋带联合植物护坡的水力特性数值分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 238-243.