



土体在大气作用下吸力变化特征

卢应发^{1,2}, 崔玉军³, 郑俊杰¹

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 三峡大学 土木和水电学院, 湖北 宜昌 443002;
3. 法国国立路桥大学, 法国)

摘要: 自然界土体的力学特性随大气的变化而变化, 本文目的就是探讨在大气作用下, 土体吸力变化规律。对于土体的温度和吸力变化特征, 采用 Wilson 提出的理论加以描述, 在此理论中, 分别利用 Darcy 和 Fick 定律描述水和蒸汽的流动规律, 土水特征曲线和水力传导系数假定仅仅相关于非饱和土吸力, 水的潜热系数是温度的线性函数, 温度传导系数采用 De Vries 建议方程加以计算。文中考虑降雨、温度和风速等不同因素对岩土孔隙介质力学性质的影响, 并利用 Penman 方程估算水的蒸发率。该理论被用来模拟法国 Boissy 现场实测结果, 其理论结果和现场实测结果是较一致的。

关键词: 大气; 温度; 吸力; 非饱和土; 土水特征曲线; 潜热系数; 热传导; 蒸发率

中图分类号: TU 411.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2005)10-1111-05

作者简介: 卢应发(1964-), 男, 2002 年博士毕业于法国里尔科技大学, 1989 年硕士毕业于中国科学院武汉岩土力学研究所, 1986 年学士毕业于西安交通大学工程力学系, 湖北省楚天学者, 主要从事岩土工程和路基工程的教学和科研工作。

Variation of suction of soil under atmosphere

LU Ying-fa^{1,2}, CUI Yu-jun³, ZHENG Jun-jie¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Civil and Hydroelectric Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France)

Abstract: It is well known that the atmosphere exerts influence on mechanical properties of soil. The aim of this paper was to investigate the factors influencing climate. The theories proposed by Wilson (1994) were adopted to describe the fundamental behaviors of temperature and variation of suction of soil. The Darcy's law and Fick's law described the flows and evaporation of water respectively. Some proposed assumptions including the characteristic curve of volumetric water content and hydraulic conductivity were only related to the suction of unsaturated soil. The coefficient of latent heat for water was a linear function of temperature; and the heat conductivity was calculated according to the equation proposed by De Vries. The influence of climate factors was also studied by considering rainfall, temperature and wind speed, and the evaporation rate was evaluated by Penman's equation. The above theory was adopted to simulate the in-situ results of Boissy in France, and the numerical simulation showed that the theoretical and monitored results were in good agreement.

Key words: atmosphere; temperature; suction; non-saturated soil; characteristic curve of volumetric water content; coefficient of latent heat; heat conductivity; evaporation rate

0 前 言

非饱和土渗流和力学特性的研究对土木工程具有重要的意义。研究非饱和土和大气的特性, 有利于了解滑坡和路基坍塌、桥梁破坏和核素释放等发生机理和传播规律。土的物理力学性质又受大气影响, 如: 土体含水率受风速和温度等的影响, 土体中水力梯度的大小依赖着在大气和土体之间的水和能量相互

交换和传递过程。土体表面和大气相互交换和传递, 使土体中水从一种平衡状态转换到另一种平衡状态, 这种转换过程对建立在地表上的建筑物、路基基础等存在影响, 这种影响随着大气的变化而变化。

研究路基和建筑物基础等的强度特征, 必须研究非饱和土的本构理论和渗流特性。许多学者^[1~13]提出

了相应的研究成果。水的非饱和渗流特征包含水的传输、水的扩散、水的对流和水气之间溶解过程。在一般情况下,水的对流和水气之间溶解相对水的传输和水的扩散较小,不予考虑;但在核废料贮存中,往往利用波耳定律考虑水气之间溶解,同时也考虑水的对流。文献[8~13]研究了在大气作用下,不计土体颗粒变形特征,探讨了水的传输行为。本文研究的是在大气作用下土体的基本规律,并考虑了水的蒸发。

研究大气对土体的影响,首先必须研究实际蒸发量的计算方法,从而计算入渗量的大小。对于实际蒸发量的估算存在好几种方法,本文采用的是 Penman^[1]提出的系统方程,其基本条件为温度、风速等,在干旱和半干旱地区,其蒸发量的估算是较真实的。

1 土体中水份运动方程

1.1 基本控制方程

土体中水的流动主要由水力梯度、基质吸力梯度、溶质梯度等所引起,溶质梯度可以忽略不计。土体中热量的流动主要决定于表征单元土、水和蒸汽热量的传递和能量的耗散。非饱和土单元包括能够传递应力的两相介质(土颗粒和可收缩膜)和具有压力的两相(空气和水)组成,空气被假定是连续的。为了建立方程,一些基本的假定如下:土、空气和水形成一个连续系统,表征单元可以描述其力学行为,忽略由溶质梯度所引起水的流动,水和空气的渗透系数仅仅和吸力相关,渗透系数和吸力之间的迟滞回线不予考虑,土体中任一点的水和水蒸气在任意时刻满足动态平衡,土体中任一点的温度在水的熔点之上和沸点之下,水中气体的溶解不加以考虑。在这种假设之下,Wilson建立了考虑水蒸发影响的如下基本方程。

液体和水蒸气交界面上的压力采用如下方程计算

$$P_v = P_v h_r \quad (1)$$

式中 P_v 为蒸汽压力(kPa); P_v 为饱和蒸汽压力(kPa); h_r 为土中空气的相对湿度。相对湿度可以表述成如下形式

$$h_r = \exp(\psi g W_v / (RT)) \quad (2)$$

式中 ψ 为总势能 $\psi = [(u_a - u_w) + \pi]$, $u_a - u_w$ 为吸力(kPa); u_a 为气压力(kPa); u_w 为水压力(kPa); π 为溶质吸力(kPa); W_v 为水蒸气的摩尔重量(kg/mol); R 为普通气体常数; g 为重力加速度; T 为温度(K)。

不考虑交界面空气体积改变而引起蒸汽流的变化以及不考虑植被的影响,单元中水的质量和能量守恒一维方程表述成如下的形式

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} = C_w^1 \frac{\partial}{\partial y} \left(k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + C_w^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(v, T, t) \frac{\partial T}{\partial y} \right) - L_v \frac{P + P_v}{P} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (4)$$

式中 $h_w = \psi / g \rho_w + z$, ρ_w 为水的密度, z 为相对高程(m); $C_w^1 = 1 / (\rho_w g m_2^w)$, k_w 为渗透系数(m/s), $C_w^2 = (P + P_v) / (P(\rho_w)^2 g m_2^w)$, m_2^w 为土体体积压缩模量(1/kPa), P 为大气压力(kPa); 水蒸气耗散系数(D_v (kgm/(kNs)))可以表示成如下的形式: $D_v = \langle \alpha \rangle \langle \beta \rangle (D_{vap} W_v / (RT))$, 其中: α 为修正系数($= \beta^{2/3}$), β 为横断面面积($= (1 - S_r)n$), n 为孔隙率, S_r 为水的饱和度; D_{vap} 为水蒸气在空气中的摩尔耗散系数($= 0.229 \times 10^{-4} (1 + T/273)^{1.75}$ (m²/s)), C_h 为土、水和气的综合比热系数(J/m³°C), λ 为土、水和气的综合热传导系数(W/(m°°C)), L_v 为潜热系数(J/kg)。如果以上方程不考虑水的蒸发,则与文献[8~13]一致。上述方程的相关系数决定如下。

1.2 参数决定

系统方程包含综合比热系数、综合热传导系数、潜热系数、耗散系数、水力传导系数以及综合系数 C_w^1 和 C_w^2 (共7个参数),其决定方法如下。

对于水力传导系数,利用自然比例法则^[7]计算非饱和土水力传导系数,其公式如下

$$k_w = \frac{k_s}{1 + \left(\frac{k_s}{k_{w1}} - 1 \right) \left(\frac{S}{S_1} \right)^\xi} \quad (5)$$

式中 k_s 为饱和水力传导系数; k_{w1}, S_1 分别为在某一点非饱和土的水力传导系数和吸力; ξ 为相关于土结构的比例因子。

为了决定土的饱和度,必须确定土水特征曲线关系,利用与水力传导系数相同原理,土水特征曲线关系可以表述如下

$$\theta_w = \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_{w1} - \theta_r} - 1 \right) \left(\frac{S}{S_1} \right)^\zeta} + \theta_r \quad (6)$$

式中 θ_s 为饱和体积水含量; θ_r 为残余体积水含量; θ_{w1}, S_1 分别为在某一点的非饱和土的体积水含量和吸力; ζ 为相关于土的结构的比例因子。

综合热传导系数(λ)是温度、水耗散系数、潜热系数和蒸汽压力等的函数,利用 De Vries 提出的方法,计算热传导系数的值。对于潜热系数,建议一个和温度成线性关系的方程来描述。

$$L_v = 4.186 \times 10^3 (607 - 0.7 \times T) \quad (7)$$

比热系数可以认为是土、水和气的体积比例之和

$$C_h = C_s \theta_s + C_w \theta_w + C_a \theta_a \quad (8)$$

式中 C_s, C_w, C_a 分别为土、水和气的比热系数, $\theta_s, \theta_w, \theta_a$ 分别为土、水和空气的所占体积部份,由于

空气的比热系数相对土和水很小, 不计空气的影响。其它两个综合系数 C_W^1 和 C_W^2 通过试验获取 m_2^w 确定。

2 边界条件

进行土体的饱和及非饱和渗流计算, 必须给定计算土体周边的边界条件, 当然, 获取边界条件的方法有很多种, 这里主要介绍一种借助天气预报获取土体表面边界条件的方法。在土体表面上, 存在两个平衡方程, 第一个为水量平衡方程, 第二个为能量平衡方程。降雨、径流、水的提取、渗流及蒸发, 其水量必须是平衡的, 其代数和必须时时相等, 方程如下

$$B = P' - (E + I_{nt} + R_{off}) \quad (9)$$

式中 B 为水平衡量 (mm/d); P' 为降雨量 (mm/d); E 为蒸发量 (mm/d); I_{nt} 为水提取量 (mm/d); R_{off} 为径流量 (R_{off})。在给定边界条件下 (温度、相对湿度、风速、降雨等), 在土体表面上水的蒸发量估算采用 Penman 方程, 基本形式如下

$$E = (\Delta R_n / L_v + \gamma E_a) / (\Delta + \gamma) \quad (10)$$

式中 Δ 为在当前温度下, 饱和蒸汽压力相对温度的斜率 ($\text{Pa}/^\circ\text{C}$); R_n 为输入太阳能 ($\text{J}/(\text{m}^2/\text{d})$); $E_a = 0.165 \times (e_{\text{sat}} - e_a)(0.8 + u_2/100)$ (mm/d), e_{sat} 为空气饱和蒸汽压力 (mbar), u_2 为距地表 2 m 处风速 (km/d); γ 为湿度常数 ($66 \text{ Pa}/^\circ\text{C}$)。利用式 (9) 和 (10), 能够决定地表渗透量的大小。

Tanner^[1]提出了在地表上的能量守恒方程, 其表达方程如下

$$R_n = G + H + L_e \quad (11)$$

式中 G 为温度引起的土体热流 (W/m^2) 或 ($\text{J}/(\text{m}^2/\text{s})$); H 为由温度改变所引起的敏感热流 (W/m^2) 或 ($\text{J}/(\text{m}^2/\text{s})$); L_e 为蒸发潜热流 (W/m^2) 或 ($\text{J}/(\text{m}^2/\text{s})$)。由温度引起的土体热流能够由土中温度梯度加以计算, 而敏感热流能够表述成如下的形式

$$H = \rho C_p k_H \frac{\partial T}{\partial y} \quad (12)$$

式中 ρ 为在某一温度下空气密度 (T/m^3); C_p 为在某一温度下空气比热 ($\text{J}/\text{m}^3/^\circ\text{C}$); k_H 为热在空气中涡旋耗散系数 (m^2/s); y 为长度 (m)。蒸发潜热流表达成如下形式

$$L_e = \frac{\lambda_v \rho \varepsilon k_v}{P} \frac{\partial e}{\partial y} \quad (13)$$

式中 λ_v 为空气的热传导系数 ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$); ε 为水的摩尔质量对干燥空气摩尔质量的比率; k_v 为水蒸气通过空气的耗散系数 (m^2/s); P 为大气压力 (kPa); $\partial e / \partial y$ 为在空气中的垂直蒸汽压力梯度 (kPa/m)。

在假设 k_H 和 k_v 相等和 $G = \delta H$ (δ 为常系数), 以

及敏感热流和蒸发潜热流的比率为常数 (β), 以上方程改变为如下的形式

$$L_e = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad \text{和} \quad H = \beta L_e \quad (14)$$

借助以上方程, 可以决定土体表面的水头和温度边界条件。

3 数值计算

本文利用有限差分法来获取土体中温度和吸力的变化规律。有限差分法的叠代步长为 10.1 s, 当第 $i+1$ 次计算与第 i 次计算结果之差与第 i 次计算的比值小于等于 10^{-3} , 则认为计算结果收敛。同时每次叠代时, 其蒸发量、水含量、吸力和温度等被加以计算。

4 应用

为了验证上述理论的可靠性, 将此理论应用于模拟现场实测情况。实测现场地质情况为: 土层为均质粘土, 最大孔隙率 40%, 位于巴黎的南部 (Boissy)。现场测量的物理量包括: 在距离地表 2 m 处的相对湿度、风速, 在地表面的降雨量、径流、热幅射能量, 温度的测量包括距地表以上 2.00 m、0.15 m 以及地表以下 0.50 m、1.00 m 处的温度, 另外也监测了在距地表以下 1.00 m 的水位以及饱和和水位断面的变化。模拟区域选取 1.00 m, 模拟时间为 1999 年 4 月, 在此期间, 不存在水的提取 ($I_{nt} = 0.00$), 现场测量了降雨量及径流量。2.00 m 处的风速、相对湿度和温度见图 1, 2 和图 3。地表上太阳能及降雨量分别见图 4 和 5。地表以下 1.00 m 处的温度及水头条件见图 6 和图 7。

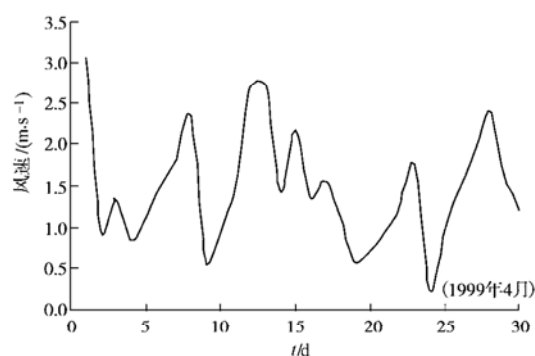


图 1 1999 年 4 月在距地表 2 m 处风速和时间的相互关系曲线
Fig. 1 Relationship of wind speed and time at 2.00 m above ground surface during April of 1999

利用边界条件和上述理论及室内实验决定相关参数, 对选定的区域进行了模拟。图 8, 9 和图 10 表述了在地表以下 0.50 m 处的温度、地下不同断面的体积水含量和吸力的变化曲线, 从图中可以看出, 对于在地表以下 0.50 m 处的温度、地下 0.25, 0.35, 0.45, 0.55 m 处体积水含量和吸力的变化, 其理论计算值是

为工程所接受的。

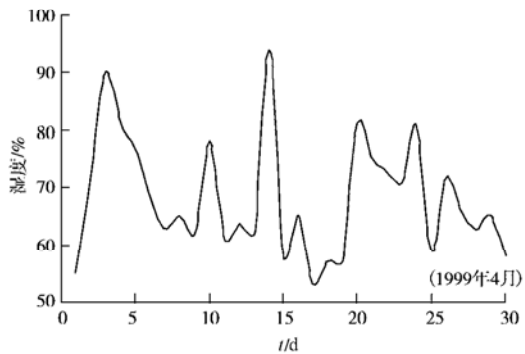


图 2 1999 年 4 月在距地表 2 m 处相对湿度和时间的相互关系曲线

Fig. 2 Relationship of relative humidity and time at 2.00 m above ground surface during April of 1999

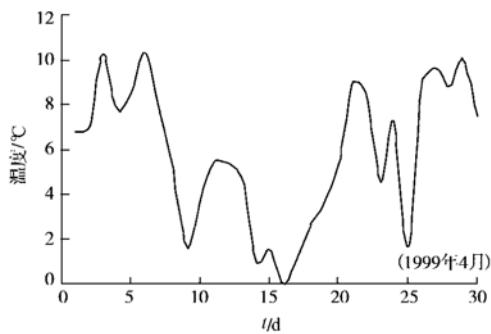


图 3 1999 年 4 月在距地表 2 m 处温度和时间的相互关系曲线

Fig. 3 Relationship of temperature and time at 2.00 m above ground surface during April of 1999

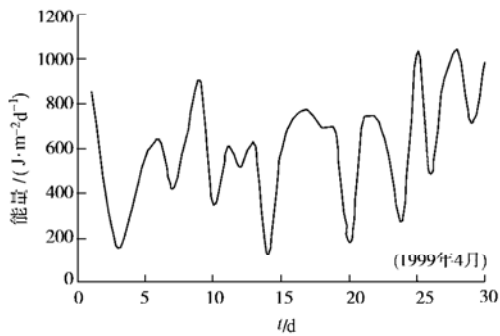


图 4 1999 年 4 月在地表能量和时间的相互关系

Fig. 4 Relationship of energy and time on the ground surface during April of 1999

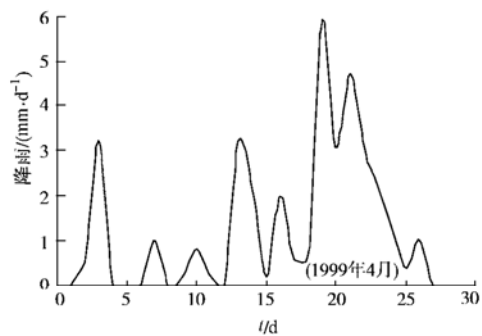


图 5 1999 年 4 月在地表降雨量和时间的相互关系

Fig. 5 Relationship of precipitation and time on the ground surface during April of 1999

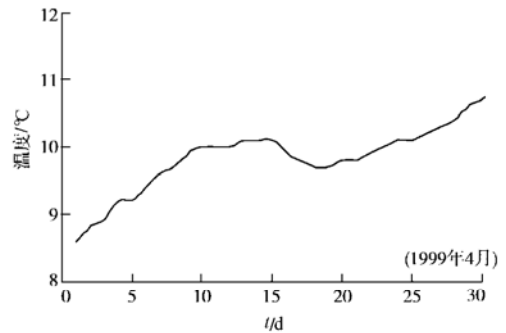


图 6 1999 年 4 月在地表以下 1 m 处温度和时间的相互关系
Fig. 6 Relationship of temperature and time at 1.00 m below ground surface during April of 1999

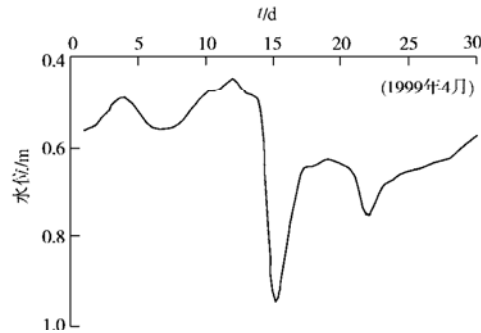


图 7 1999 年 4 月在地表以下 1 m 处水位和时间的相互关系
Fig. 7 Relationship of water table and time at 1.00 m below ground surface during April of 1999

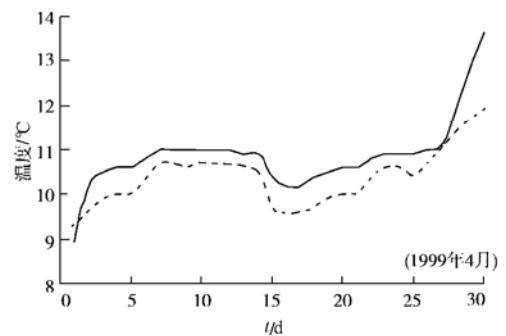


图 8 1999 年 4 月在地表以下 0.5 m 处温度和时间的相互关系(点划线为实测、实线为模拟)

Fig. 8 Relationship of temperature and time at 0.50 m below ground surface during April of 1999 (dotted line—monitored, solid line—simulated)

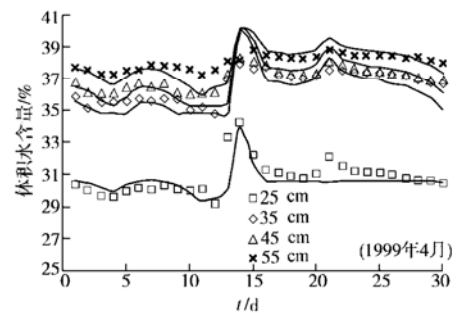


图 9 1999 年 4 月在不同断面体积水含量和时间的相互关系(方形、菱形、三角形和乘号分别表示距地表 0.25, 0.35, 0.45, 0.55 m 处体积水含量实测值, 实线为模拟值)

Fig. 9 Relationship of volumetric water content and time in different section below ground surface during April of 1999

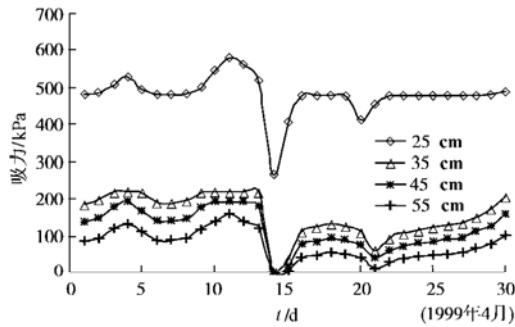


图 10 1999 年 4 月在不同断面吸力变化和时间相互关系理论计算值

Fig. 10 Theoretical curve of suction and time in different section during April of 1999

5 结 论

(1) 本文假设渗透系数和土水特征曲线仅仅与吸力相关, 利用自然比例法则, 建立了渗透系数和体积水含量与吸力的关系曲线; 对于潜热系数, 建议了一个和温度相关的线性函数。

(2) 运用 Wilson 提出的并考虑了水蒸发特性的理论描述土体的渗流特性, 计算体积水含量与现场实测结果相当吻合, 其计算吸力变化规律也是为工程所接受的。

(3) 利用 Penman 方程估算蒸发量, 结合地表方程, 由计算结果表明由此方法获取地表温度和水头边界条件是可靠的。

(4) 本文将地表水量和能量方程守恒有机地和土体结合起来, 模拟土体的基本力学特征等。

通过理论计算与现场实测结果的对比, 表明该系统方程是可以描述非饱和土在大气的作用下土体内部吸力、体积水含量和温度的变化规律, 这种研究对边坡稳定性分析、核素迁移和土体中污染规律及处理等具有一定的理论和实际指导意义。

文中现场实测数据是由法国国立路桥大学提供

的, 在此深表感谢。

参考文献:

- [1] Blight G E. Interaction between the atmosphere and the earth [J]. Géotechnique, 1997: 715 - 767.
- [2] Biot M A. General Theory of three dimensional consolidation [J]. J Appl Phys, 1941, 12: 155 - 164.
- [3] Bishop A W, Blight G E. Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils [J]. Geotechnique, 1963, 13: 177 - 197.
- [4] Dakshanamurthy V, Fredlund D G. A mathematical model for predicting moisture flow in an unsaturated soil under hydraulic and temperature gradients [J]. Water Resources Research, 1981, 17(3): 714 - 722.
- [5] Ward Wilson, Fredlund D G, Barbour S L. Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation [J]. Can Geotech J, 1994, 31: 151 - 161.
- [6] 卢应发, 崔玉军, 姚海林, 柴华友. 包气带区的渗流特性及地表模型 [J]. 岩土力学, 2003, (增刊): 8 - 13.
- [7] Juarez-Badillo E. Leyes naturales en geomechanica [A]. Volumen Raul J Marsal, SMMS, Mexico, 1992.
- [8] 吴梦喜, 高莲士. 饱和非饱和土体非稳定渗流数值分析 [J]. 水利学报, 1999, 12: 38 - 42.
- [9] 张培文, 刘德富, 黄达海, 宋玉普. 饱和-非饱和非稳定渗流的数值模拟 [J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 927 - 930.
- [10] 彭 华, 陈胜宏. 饱和非饱和非稳定渗流有限元加速技术 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2001, 34(3): 9 - 12.
- [11] 朱 军, 刘光廷, 陆述远. 饱和非饱和三维多孔介质非稳定渗流分析 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2001, 34(3): 5 - 8.
- [12] 朱岳明, 龚道勇. 三维饱和非饱和渗流场求解及其逸出面边界条件处理 [J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 67 - 71.
- [13] 陈守义. 考虑入渗和蒸发影响的土坡稳定性分析方法 [J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 8 - 22.