

土体初始饱和度对降雨入渗的影响

薛松,童富果,郝霜,王军

(三峡大学水利与环境学院,湖北宜昌 443002)

摘要:基于水、气两相流理论,采用有限单元法计算了壤土在不同饱和度下的降雨入渗过程,以研究初始饱和度变化对降雨入渗的影响。数值模拟结果表明:降雨入渗初期孔隙气压会逐渐增大,入渗强度会因孔隙气的顶托作用逐渐减小并最终趋于稳定。稳定后的降雨入渗强度主要取决于土体基质吸力和渗透特性,与土体初始饱和度大小直接相关;入渗强度存在最大、最小值,最大值通常会出现在初始饱和度为0或1时,而最小值所对应的饱和度与土体非饱和特性有关;受土体基质吸力和水、气渗透性的双重影响,入渗强度会先随饱和度的增大而逐渐减小,当降至最小值后,入渗强度又会随饱和度的增大而增大。根据计算结果,提出了一个可计算相对稳定入渗强度的公式。

关键词:壤土;两相流;降雨入渗强度;初始饱和度;有限单元法

中图分类号:TV139.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)04-0031-05

Effects of initial degree of saturation of soil on rainfall infiltration//XUE Song, TONG Fuguo, HAO Shuang, WANG Jun(*College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China*)

Abstract: Based on the theory of gas-liquid two-phase flow, the finite element method was used to simulate rainfall infiltration in loam soil with different degrees of saturation to investigate the effects of the initial degree of saturation on rainfall infiltration. Numerical results show that the pore air pressure increases gradually in the initial stage of rainfall infiltration; then, the infiltration rate decreases to a stable value because of the jacking force caused by pore air. The stable infiltration rate is mainly determined by the matrix suction and permeability characteristics of soil, varying with the initial degree of saturation. With the variation of the initial degree of saturation, the infiltration rate reaches its maximum or minimum values. The maximum infiltration rate usually appears in the stage of residual or full saturation, while the minimum infiltration rate occurs in the unsaturated stage, depending on soil unsaturated characteristics. Affected by the matrix suction of soil and the relative permeability of water and air, the infiltration rate gradually decreases with the increase of the degree of saturation at first. When the infiltration rate drops to the minimum, it starts to rise with the increase of the degree of saturation. According to the results of numerical simulation, a formula is proposed for calculation of the relatively stable infiltration rate for different initial degrees of saturation.

Key words: loam soil; two-phase flow; rainfall infiltration; initial degree of saturation; finite element method

降雨入渗是一个涉及土中水、气两相流动的非饱和和渗流过程,其对降雨诱发滑坡、堤防渗透破坏、污染物质在水中的迁移等诸多工程问题会产生重要影响。降雨入渗通常与土体非饱和特性、土体初始饱和度、降雨强度等诸多因素有关^[1-2],其中土体初始饱和度是影响降雨入渗的关键因素之一^[3]。

人们在研究非饱和渗流时通常采用试验方法^[4-6]和数值方法^[7-12]。试验方法多用于对入渗规律的定性研究;在定量研究方面,由于对多物理量控制困难,难以准确分析单因素变化对入渗的影响。

数值方法便于多物理量控制,适于研究单一变量与入渗的相关关系。根据降雨入渗数学模型对非饱和渗流对象的描述,非饱和渗流理论可分为单相流理论和多相流理论。传统计算软件和算法多数建立在描述水分单相流动的Richards方程上^[7],计算时入渗流量边界需人为给定,而在降雨入渗的计算中入渗水量又是反映非饱和渗流规律的关键指标,因此单相流理论存在一定的不足。此外,Richards方程假定孔隙气压力恒定,未考虑水、气耦合的影响,忽略了气相的作用。非饱和渗流涉及土中水、气两相

基金项目:国家自然科学基金(51279090)

作者简介:薛松(1992—),男,硕士研究生,主要从事基于水气两相流的降雨入渗研究。E-mail:125930515@qq.com

通信作者:童富果(1972—),男,教授,博士,主要从事水工结构和岩土工程多场耦合问题及其数值方法研究。E-mail:tf@ctgu.edu.cn

的流动^[13-14],两相流理论考虑了水、气的相互影响^[15-17],能更准确地反映土中水气的运动规律。基于两相流耦合的方程只需给定降雨入渗的气压力边界,降雨入渗流量通过水、气耦合求解,因此更符合实际情况。以往对两相流的研究大多集中在土中气压力变化对入渗的影响上,而在初始饱和度对降雨入渗的影响方面研究相对较少。

鉴于此,本文基于水、气两相流全耦合的微分控制方程,考虑土中水、气的相互耦合作用,采用有限单元法计算不同初始饱和度下一维均质土柱的降雨入渗过程,探讨入渗过程中的水、气耦合机理,分析初始饱和度变化对降雨入渗强度、饱和度沿深度分布的影响。

1 水、气两相流控制方程

基于连续介质理论,将土体视为由固相、液相和气相组成的多孔连续介质,土中水、气的运动随时间和空间不断变化,可描述为关于时间和空间的偏微分方程组^[18]。水在土体中的流动主要源于水压力驱动,并受土体孔隙特征、含水状态等因素影响。基于液相质量守恒可导出土体内水流动的控制微分方程:

$$\frac{\partial(\varphi S_r)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-\frac{k_{rw}k}{\mu_w}(\nabla p_w + \rho_w \mathbf{g}) \right] - \frac{Q_w}{\rho_w} = 0 \quad (1)$$

式中: φ 为土体孔隙率; S_r 为水饱和度; μ_w 为液相黏滞系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; k_{rw} 为水相相对渗透系数; k 为由孔隙特征决定的土体本征渗透系数, m^2 ; p_w 为孔隙水压力, Pa ; Q_w 为液相内源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; ρ_w 为水相密度, kg/m^3 ; $\mathbf{g}$ 为重力加速度矢量。

气相在土体中的流动主要由气压力驱动,并受土体孔隙特征、含水状态、气相黏滞系数等因素影响。基于气相质量守恒可导出土体内气流动的控制微分方程:

$$\frac{\partial[(1 - S_r)\varphi]}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-\frac{k_{rg}k}{\mu_g}(\nabla p_g + \rho_g \mathbf{g}) \right] - \frac{Q_g}{\rho_g} = 0 \quad (2)$$

式中: μ_g 为气相黏滞系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; k_{rg} 为气相相对渗透系数; Q_g 为气相内源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; p_g 为孔隙气压力, Pa ; ρ_g 为气相密度, kg/m^3 。

基质吸力 p_c 是水气交界面承受气压力和水压力不相等所产生的不平衡力,根据其定义^[18],可表达为

$$p_c \equiv p_g - p_w \quad (3)$$

方程(1)(2)构成基于时间和空间的非线性偏微分方程组,求解时需对其进行时间和空间离散。

本文空间离散采用 Garlerkin 有限单元法,时间离散采用差分法。以孔隙气压力 p_g 、水饱和度 S_r 为未知量,通过对水、气两个方程的循环迭代计算实现每个时间步内非线性方程组的求解。

2 计算模型

2.1 几何模型

为计算通气条件下边坡的水分入渗过程,假设模拟区域为一浅层均质各向同性土体,土柱高 3 m。根据模拟对象建立有限元模型,计算网格节点数 40 个,计算单元数 20 个,单元最小厚度 0.1 m。

为研究土体的入渗强度与初始饱和度相关关系,假定降雨强度远大于入渗强度,地表始终处于饱和状态,地表径流对入渗的影响相对较小,可忽略不计。土柱整体以同种初始饱和度起算,地表与底部均为大气压边界,侧边为不透水不透气边界。

2.2 主要本构关系及参数

由于方程(1)(2)求解时,具有 5 个未知参数 S_r 、 p_w 、 p_g 、 k_{rw} 、 k_{rg} ,还需引入 3 个本构模型关系,即土水特征曲线、水相相对渗透系数曲线、气相相对渗透系数曲线。本文选取长江流域最为常见的壤土作为计算对象分析其降雨入渗规律,通过分析相关文献^[19-24]得到其具体模型及参数如下:

a. 土水特征曲线。反映土体基质吸力大小与饱和度之间的关系(图 1),本文选取应用较为广泛且几乎适用于所有土质类型的 van Genuchten 模型^[20]:

$$p_c = -P_0 \left[\left(\frac{S_r - S_{rw}}{1 - S_{rw}} \right)^{-1/m} - 1 \right]^{1-m} \quad (4)$$

式中: S_{rw} 为残余水饱和度; P_0 、 m 为与材料特性有关的参数。根据相关资料,确定壤土计算参数为 $P_0 = 0.278$ 、 $m = 0.359$ 、 $S_{rw} = 0.1$ 。

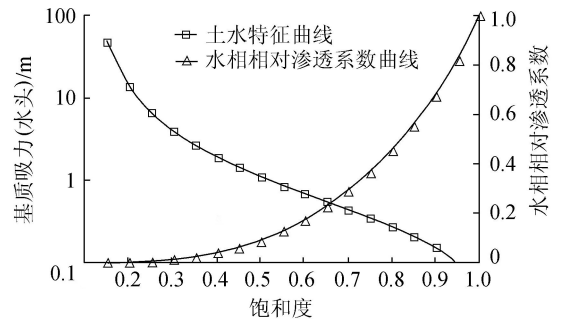


图 1 土体非饱和和渗透特性曲线

b. 水相相对渗透系数曲线。描述土体内部水相相对流动性与饱和度关系的曲线(图 1),本文选取最为常用的 van Genuchten-Mualem 模型^[20-21]:

$$k_{rw} = \left(\frac{S_r - S_{rw}}{1 - S_{rw}} \right)^{0.5} \left\{ \left[1 - \left(1 - \frac{S_r - S_{rw}}{1 - S_{rw}} \right)^{1/n} \right]^n \right\}^2 \quad (5)$$

式中 n 为与材料特性有关的参数,本文计算取 0.9。

c. 气相相对渗透系数曲线。描述土体内部气相相对流动性与饱和度关系的曲线,气体的相对渗透系数采用 Brooks-Corey 模型^[22]:

$$k_{rg} = \left(1 - \frac{S_r - S_{rw}}{1 - S_{rw} - S_{rg}}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{S_r - S_{rw}}{1 - S_{rw} - S_{rg}}\right)^2\right] \quad (6)$$

式中 S_{rg} 为残余气饱和度。

根据方程(4)(5)中参数得到土体的土水特征曲线和水相相对渗透系数曲线,亦即图 1 所示的土体的非饱和渗透特性曲线。方程(1)(2)中涉及的其他主要参数取值: $\rho_w = 1 \text{ t/m}^3$, $\rho_g = 1.29 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $\varphi = 0.4$, $\mu_w = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\mu_g = 1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $k = 2.88 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 。

3 降雨入渗与初始饱和度相关性分析

降雨入渗是一个涉及水、气两相流动的过程,入渗过程受到土中水、气两相的相互作用及土体的非饱和和渗透特性等多重因素的影响,而初始饱和度的改变对土体的水、气含量和土体的非饱和特性均具有一定的影响。本节先分析降雨入渗过程中水、气的耦合作用,而后研究降雨入渗强度与土体初始饱和度的相关关系。为便于分析比较,采用相对入渗强度来衡量降雨入渗的强弱,相对入渗强度为无量纲变量,定义为雨水入渗速率与土体饱和渗透系数之比。

3.1 降雨入渗中的水、气耦合作用

降雨入渗是水、气两相相互影响的耦合过程,孔隙气对雨水入渗的影响明显。非饱和状态下入渗强度的大小主要取决于水相相对渗透系数和孔隙水压力梯度,而孔隙水压力梯度受到基质吸力、孔隙气压力及重力的影响。

降雨入渗初期,表层土体饱和度较小,基质吸力较大,故水压力梯度较大,入渗强度较大。此时表层土体气相相对渗透系数较大,气体流动性较好,孔隙气可从表层溢出,压力接近大气压力,因而气体对入渗的影响可忽略。随着表层土体逐渐达到饱和状态,气相相对渗透系数迅速减小并趋近于 0,气体难以从土体表层溢出,孔隙气因受水分入渗的挤压,压力迅速上升并产生与入渗方向相反的顶托力,致使孔隙水压力梯度迅速下降,故入渗强度迅速下降(图 2)。随着孔隙气压力逐渐趋于稳定,气体对重力梯度的顶托也趋于稳定,此时入渗主要受到湿润锋区域基质吸力及水相渗透系数的共同作用,趋于相对稳定的入渗状态。

表层土体饱和后,受表层通气条件改变和水分下渗挤压作用的影响,孔隙气压力迅速上升,进而导

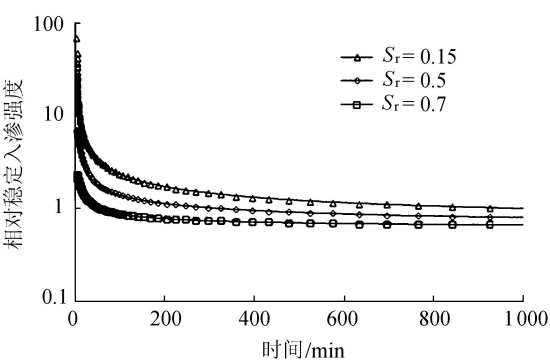


图 2 降雨入渗强度随时间变化曲线

致入渗强度迅速下降。由于前期入渗强度较大,受挤压而产生的孔隙气体来不及流动,因此孔隙气压力会出现极大值(图 3)。随着入渗强度的减小和土体内部孔隙气体的流动,孔隙气压力会缓慢下降并逐渐趋于稳定,此时入渗强度也趋于稳定。此外,随着湿润锋的推移,土体内部饱和度增大,气相相对渗透系数减小,孔隙气受挤压作用更明显,因而随着饱和度的增大孔隙气压力呈增大趋势。如土体深度 0.6 m 处,孔隙气压力随着雨水的入渗,而存在缓慢上升的趋势。

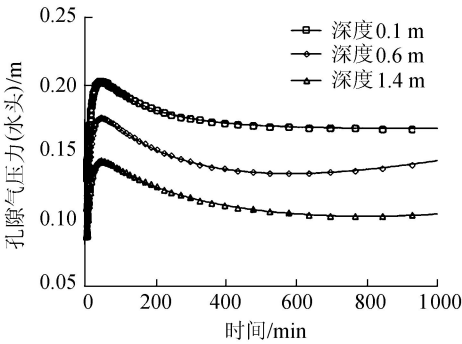


图 3 孔隙气压力随时间变化曲线($S_r = 0.5$)

土体表层饱和后,孔隙气体难以溢出,表层土体因部分孔隙被气体占据而难以达到完全饱和状态,其饱和度大小与初始饱和度关系密切(图 4)。初始饱和度较大时,土体的气相相对渗透系数较小,气压力梯度较大,孔隙气压力较大;而基质吸力的大小与孔隙气压力直接相关,孔隙气压力越大,基质吸力越大;受基质吸力较大的影响(图 1),土体所能达到的饱和度相对较小。因此初始饱和度为 0.6 时的表层含水量明显小于初始饱和度为 0.15 时的含水量,故初始饱和度越大,表层土体的饱和度越小,孔隙气压力对水分入渗影响越强。但当土体初始饱和度接近完全饱和时,孔隙气体含量极少,水分主要通过孔隙通道下渗,对气体挤压作用有限,孔隙气压力对水分入渗影响极弱。

随着初始饱和度的增大,土体单位入渗断面内,气体含量越少,水分入渗通道越多,水相相对渗透系

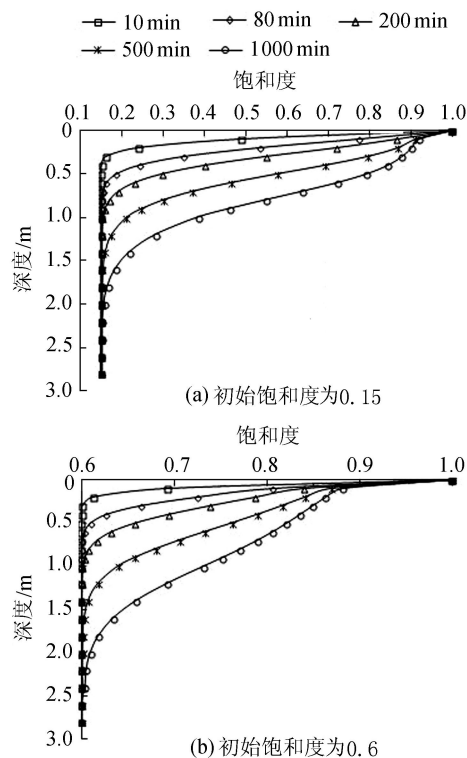


图4 不同时刻土体饱和度沿深度分布

数越大(图1)。受基质吸力与水相渗透性的影响,饱和度沿深度分布会因初始饱和度的不同而存在差异(图4),初始饱和度较小时,土体的基质吸力较大,单位区域内水分的流入强度较大,而水相相对渗透系数较小,流出强度较小,受流入流出强度差的影响会呈现出较陡的湿润锋。饱和度较大时,基质吸力较小,而水相相对渗透系数较大,入渗水量主要通过水分通道下渗,流入流出强度相差较小,故湿润锋较缓。

3.2 初始饱和度对降雨入渗的影响

降雨入渗初期,入渗强度变化剧烈,为便于比较分析,建立降雨入渗强度与初始饱和度的相关关系,本文主要研究稳定后的入渗强度。入渗稳定后,孔隙气压力趋于稳定,其对重力梯度的顶托作用已经完成,此时降雨入渗强度主要取决于基质吸力和水相、气相渗透特性,重力梯度因受气压力的顶托可忽略不计。

降雨初期,土体的入渗强度主要取决于土体表层基质吸力,基质吸力越大,孔隙水压力梯度越大,故初始饱和度越小,初期降雨入渗强度越大(图2)。随着入渗逐渐趋于稳定,入渗强度主要由湿润锋处的基质吸力和水相相对渗透系数共同决定。入渗强度与初始饱和度呈非线性关系,稳定入渗强度随初始饱和度的增大先减小后增大,稳定入渗强度的最大值会出现在残余饱和度时(有效饱和度为0)或完全饱和状态(有效饱和度为1),最小值会出现在非

饱和状态。初始饱和度较小时,土体的基质吸力较大,而水相相对渗透系数较小,水分的入渗主要由基质吸力驱动,故随着初始饱和度的增大,基质吸力减小,稳定入渗强度减小。随着初始饱和度的增大,虽然基质吸力继续减小,但水相相对渗透系数迅速增大(图1),入渗强度会因基质吸力与水相渗透性的双重影响出现最小值(图5)。入渗强度达到最小值后,随着饱和度的增大,基质吸力对入渗的影响继续减小,水相相对渗透系数趋于1,水分主要通过孔隙通道下渗,此时入渗强度主要受到水相相对渗透系数的影响,故入渗强度随初始饱和度的增大而增大。以壤土为例计算表明,壤土的稳定入渗强度的最大值出现在接近残余饱和度时,而最小值出现在饱和度为0.8~0.9时。

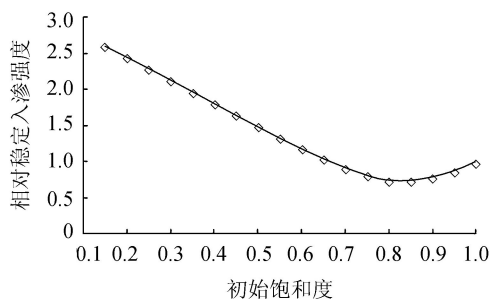


图5 相对稳定入渗强度与初始饱和度关系曲线

基于应用的需要,对本文计算所得的壤土的降雨入渗关系数据进行了简单的回归拟合,分析表明3次多项式能够较好地拟合出初始饱和度与稳定入渗强度的相关关系:

$$V(S_{i0}) = 6.37S_{i0}^3 - 8S_{i0}^2 - 0.14S_{i0} + 2.74 \quad (7)$$

式中: $V(S_{i0})$ 为相对稳定入渗强度; S_{i0} 为初始水饱和度和。

4 结 论

a. 降雨导致表层土体趋近于饱和后,孔隙气体受水分入渗的挤压作用,会产生反向的顶托力,降雨入渗强度会因气体顶托逐渐减小并趋于稳定,稳定后的入渗强度主要受基质吸力与水相相对渗透系数的影响。饱和度较小时,稳定入渗强度受基质吸力的影响较大,随饱和度的增大而减小,接近饱和时,稳定入渗强度受水相相对渗透系数的影响较大,随饱和度的增大而增大。

b. 稳定入渗强度的最大值出现在饱和度最小或完全饱和状态,最小值与土体非饱和渗透特性相关,受土水特征关系和水相、气相渗透特性的综合影响。根据计算所得的相对稳定入渗强度与饱和度的相关关系,提出了一个能估算相对稳定入渗强度的入渗公式,计算表明壤土稳定入渗强度的最大值出

现在接近残余饱和度时,最小值出现在饱和度为0.8~0.9时。

c. 入渗过程中,由于孔隙气的存在,土体表层难以达到完全饱和状态,初始饱和度越大,孔隙气压越大,气体对土体饱和度的影响越强,土体表层所能达到的饱和度相对越小。此外,受水相渗透性的影响,土体含气率大时,水分主要依靠基质吸力驱动下渗;含气率小时,水分主要通过孔隙通道下渗。

参考文献:

[1] 朱伟,陈学东,钟小春. 降雨入渗规律的实测与分析[J]. 岩土力学,2006,27(11):1873-1879. (ZHU Wei, CHEN Xuedong, ZHONG Xiaochun. Observation and analysis of rainfall infiltration [J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(11):1873-1879. (in Chinese))

[2] 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报,2008,24(7):494-499. (LÜ Gang, WU Xiangyun. Review on influential factors of soil infiltration characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008,24(7):494-499. (in Chinese))

[3] 朱伟,程南军,陈学东,等. 浅谈非饱和渗流的几个基本问题[J]. 岩土工程学报,2006,28(2):235-240. (ZHU Wei, CHENG Nanjun, CHEN Xuedong, et al. Some fundamental problems of unsaturated seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(2):235-240. (in Chinese))

[4] 刘目兴,聂艳,于婧. 不同初始含水率下黏质土壤的入渗过程[J]. 生态学报,2012,32(3):871-878. (LIU Muxing, NIE Yan, YU Jing. The infiltration process of clay under different initial soil water contents [J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(3):871-878. (in Chinese))

[5] 曾辰,王全九,樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(1):24-30. (ZENG Chen, WANG Quanjiu, FAN Jun. Effect of initial water content on vertical line-source infiltration characteristics of soil [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(1):24-30. (in Chinese))

[6] 张振华,谢恒星,刘继龙,等. 气相阻力与土壤容重对一维垂直入渗影响的定量分析[J]. 水土保持学报,2005,19(4):36-39. (ZHANG Zhenhua, XIE Hengxing, LIU Jilong, et al. Quantitative analysis of influence of air resistance and soil bulk density on one-dimensional vertical infiltration [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2005,19(4):36-39. (in Chinese))

[7] 雷志栋,杨诗秀. 非饱和土壤水一维流动的数值计算[J]. 土壤学报,1982,19(2):141-153. (LEI Zhidong, YANG Shixiu. Numerical method of one dimensional flow through unsaturated soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 1982,19(2):141-153. (in Chinese))

[8] 范严伟,黄宁,马孝义. 层状土垂直一维入渗土壤水分

运动数值模拟与验证[J]. 水土保持通报,2015,35(1):215-219. (FAN Yanwei, HUANG Ning, MA Xiaoyi. Numerical simulation and verification of layered soil water movement in vertical one-dimensional infiltration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(1):215-219. (in Chinese))

[9] 张旭明,孙建国. 光滑有限单元法及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,34(5):582-585. (ZHANG Xuming, SUN Jianguo. Smoothed finite element method and its application [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012,34(5):582-585. (in Chinese))

[10] 介玉新,秦晓艳,金鑫,等. 加筋土高边坡的有限元分析[J]. 水利水电科技进展,2012,32(1):83-86. (JIE Yuxin, QIN Xiaoyan, JIN Xin, et al. FEM analysis of high reinforced soil slopes [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(1):83-86. (in Chinese))

[11] 张晓悦,王栋,张晓乐,等. 基于水-气二相流模型的土坡稳定性分析[J]. 水利水电科技进展,2012,32(2):23-27. (ZHANG Xiaoyue, WANG Dong, ZHANG Xiaole, et al. Stability analysis of soil slope based on water-air two-phase flow model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(2):23-27. (in Chinese))

[12] 解海海,冯杰,冯青,等. 考虑大孔隙的土壤入渗模型[J]. 水利水电科技进展,2011,31(5):35-38. (XIE Hehai, FENG Jie, FENG Qing, et al. Infiltration model for soils considering macropores [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(5):35-38. (in Chinese))

[13] 彭胜,陈家军,王金生,等. 包气带水气二相流国外研究综述[J]. 水科学进展,2000,11(3):333-338. (PENG Sheng, CHEN Jiajun, WANG Jinsheng, et al. Review of foreign study on two-phase flow in vadose zone [J]. Advances in Water Science,2000,11(3):333-338. (in Chinese))

[14] 孙冬梅,朱岳明,张明进. 降雨入渗过程的水-气二相流模型研究[J]. 水利学报,2007,38(2):150-156. (SUN Dongmei, ZHU Yueming, ZHANG Mingjin. Water-air two-phase flow model for numerical analysis of rainfall infiltration [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(2):150-156. (in Chinese))

[15] SUN D, ZANG Y, SEMPRICH S. Effects of airflow induced by rainfall infiltration on unsaturated soil slope stability [J]. Transport in Porous Media,2015,107(3):821-841.

[16] SZYMKIEWICZ A, NEUWEILER I, HELMIG R. Influence of heterogeneous air entry pressure on large scale unsaturated flow in porous media [J]. Acta Geophys, 2014,62(5):1179-1191.

(下转第41页)

- incidents of embankment dams in the world re-recognition of their causes[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,1997,17(1):13-20. (in Chinese))
 - [4] 速宝玉,詹美礼. 充填裂隙渗流特性实验研究[J]. *岩土力学*,1994,15(4):46-51. (SU Baoyu, ZHAN Meili. Experimental research of seepage characteristic for filled fracture[J]. *Rock and Soil Mechanics*,1994,15(4):46-51. (in Chinese))
 - [5] 罗玉龙,张文捷,速宝玉. 基于非饱和渗流应力耦合的河堤窝崩机理[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2011,39(3):327-331. (LUO Yulong, ZHANG Wenjie, SU Baoyu. Arc collapse mechanism for riverbanks based on unsaturated seepage stress coupling[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*,2011,39(3):327-331. (in Chinese))
 - [6] 张丽,沈振中,赵斌. 某超高面板砂砾石坝面板缝局部失效渗流场有限元分析[J]. *水利水电科技进展*,2015,35(1):67-72. (ZHANG Li, SHEN Zhenzhong, ZHAO Bin. Finite element analysis for seepage field of slab joint local failure of a superhigh concrete-faced sand-gravel dam[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2015,35(1):67-72. (in Chinese))
 - [7] 蒋中明,王庆,秦卫星. 孔隙介质渗透力的细观数值解析[J]. *水利水电科技进展*,2015,35(4):35-38. (JIANG Zhongming, WANG Qing, QIN Weixing. Numerical interpretation of seepage force in porous media based on micromechanics[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2015,35(4):35-38. (in Chinese))
 - [8] LI S P, WU D X, XIE W H. Effect of confining pressure, pore pressure and specimen dimension on permeability of yinzhuang sandstone[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,1997,34(3):432-433.
 - [9] 朱珍德,张爱军,徐卫亚. 脆性岩土全应力-应变过程渗流特性试验研究[J]. *岩土力学*,2002,23(5):555-563. (ZHU Zhende, ZHANG Aijun, XU Weiya. Experimental research on complete stress-strain process seepage characteristics of brittle rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2002,23(5):555-563. (in Chinese))
 - [10] TSANG Y W, WITHERSPOON P A. The dependence of fracture mechanical and fluid flow properties on fracture roughness and sample size[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*,1983,88(3):2359-2366.
 - [11] 邹玉华,陈群,何昌荣. 不同应力条件下砾石土防渗料和反滤料联合抗渗试验研究[J]. *岩土力学*,2012,33(8):2323-2329. (ZOU Yuhua, CHEN Qun, HE Changrong. Filter tests on gravelly soil and filter material under different stress states[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2012,33(8):2323-2329. (in Chinese))
 - [12] 陈建生,刘建刚,焦月生. 接触冲刷发展过程模拟研究[J]. *中国工程科学*,2003,5(7):33-39. (CHEN Jiansheng, LIU Jiangang, JIAO Yuesheng. Simulation study on the contact scouring development between underground layers[J]. *Engineering Science*,2003,5(7):33-39. (in Chinese))
 - [13] WANG J A, PARK H D. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process[J]. *Engineering Geology*,2002,63(3):291-300.
 - [14] 沈远,邓荣贵,张丹. 大渡河长河坝水电站区域泥石流特征及危险性评价[J]. *防灾减灾工程学报*,2012,32(3):359-364. (SHEN Yuan, DENG Ronggui, ZHANG Dan. Debris flow characteristics and hazard assessment of the area of dadu river changheba hydropower station[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*,2012,32(3):359-364. (in Chinese))
 - [15] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京:水利电力出版社,1992:170-196. (收稿日期:2015-09-07 编辑:骆超)
- +++++
- (上接第35页)
- [17] KUANG X, JIAO J J, LI H. Review on airflow in unsaturated zones induced by natural forcings[J]. *Water Resources Research*,2013,49(10):6137-6165.
 - [18] TONG F, NIEMI A, YANG Z, et al. A numerical model of tracer transport in a non-isothermal two-phase flow system for CO₂ geological storage characterization[J]. *Transport in Porous Media*,2013,98(1):173-192.
 - [19] TONG F, JING L, TIAN B. A water retention curve model for the simulation of coupled thermo-hydro-mechanical processes in geological porous media[J]. *Transport in Porous Media*,2012,91(2):509-530.
 - [20] van GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1980,44(5):892-898.
 - [21] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*,1976,12(3):513-522.
 - [22] COREY A T. The interrelation between gas and oil relative permeabilities[J]. *Prod Mon*,1954,19:38-41.
 - [23] 查元源,周发超,杨金忠. 一种由土壤剖面含水率估算土壤水力参数的方法[J]. *水利学报*,2011,42(8):883-891. (ZHA Yuanyuan, ZHOU Fachao, YANG Jinzhong. An approach to estimate soil hydraulic parameters using soil profile moisture data[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2011,42(8):883-891. (in Chinese))
 - [24] 范严伟,赵文举,冀宏. 垂直一维入渗土壤水分分布与入渗特性数值模拟[J]. *兰州理工大学学报*,2012,38(2):51-55. (FAN Yanwei, ZHAO Wenju, JI Hong. Numerical simulation of soil moisture distribution and infiltration characteristics of one-dimensional vertical infiltration[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*,2012,38(2):51-55. (in Chinese)) (收稿日期:2015-11-21 编辑:熊水斌)