

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.06.020

一种非饱和土相对渗透系数的试验数值联合估计法

赵晓龙¹, 邱秀梅¹, 卞汉兵^{1,2}, 邱庆泰¹

(1. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安, 271018; 2. LEM3, CNRS 7239, 洛林大学, 梅兹 法国 57045)

摘要: 由于非饱和土相对渗透系数对饱和度的变化十分敏感, 因此通过试验测定非饱和土相对渗透系数并不容易。以广义达西定律和 van Genuchten 模型为理论依据, 可通过简单的蒸发试验和数值分析, 获得非饱和状态下土壤的相对渗透系数。模拟结果和试验数据的对比分析表明, 该方法得到的非饱和土相对渗透系数具有一定的可靠性, 在有限元反分析模型参数方面具有一定的创新性, 但其实际精度还有待通过试验对比来进一步验证。

关键词: 非饱和土; 饱和度; 蒸发试验; 数值分析; 相对渗透系数

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2015) 06- 1114-04

A combination method of experimental and numerical estimations for predicting the relative hydraulic conductivity of unsaturated soil

ZHAO Xiaolong¹, QIU Xiumei¹, BIAN Hanbing^{1,2}, QIU Qingtai¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;

2. LEM3 CNRS 7239, Universit  de Lorraine, 57045 Metz, France)

Abstract: The relative hydraulic conductivity of unsaturated soil is sensitive to the change of saturation, so it is hard to determine the relative hydraulic conductivity through experiments. Based on the generalized Darcy's Law and van Genuchten's model, a simplified numerical model for predicting the relative hydraulic conductivity of unsaturated soil was derived. Through the simple evaporation experiment and numerical analysis, the relative hydraulic conductivity with function of water saturation was obtained. The numerical results were compared with the observed experimental data, which suggested that this method has certain reliability and it has certain innovation in the aspects of the finite element back analysis of model parameters. However, the practical accuracy of the new method needs further verification through experimental comparison.

Key words: unsaturated soil; saturation; evaporation experiment; numerical analysis; relative hydraulic conductivity

土的渗透系数及相对渗透系数是土的主要特性指标之一, 是描述孔隙水在土壤孔隙中流动性质一种度量^[1], 是反映水在非饱和土壤孔隙中迁移的重要参数, 在雨水引起的边坡稳定性、路基变形、土石坝黏土心墙渗流控制、岩土工程施工、农业土壤环境研究中起着重要的作用, 因此是国内外非饱和土研究中的一个重要课题。

对于饱和土来说, 其渗透系数认为是孔隙比的函数^[2], 在分析问题一般假定其为常数; 而对于非饱和土, 其渗透系数同时受到孔隙比和饱和度变化的强烈影响。土壤固结以后或者在干燥失水过程中, 孔隙比变化可能很小, 它对渗透系数的影响是次要的, 但饱和度变化的影响则是十分重大的。即便是在接近饱和的状态下(吸力介于 0~ 1 kPa), 基质吸力的微小变化也将引起相对渗透系数 1~ 3 个数量级的改

变^[3]。饱和度通常描述为基质吸力的函数, 其相互关系为基质吸力与饱和度关系曲线。用基质吸力与饱和度关系曲线或土壤水分特征曲线(SWCC), 可以推导出许多预测渗透系数的模型, 如 Brooks and Corey^[4], Campbell^[5], van Genuchten^[6]。在这其中, van Genuchten 模型无疑是应用最广泛的模型^[7]。van Genuchten 在 Mualem 模型^[8]的基础上, 通过参数变换, 推导出能够预测渗透系数的闭合方程。通过 van Genuchten 模型可以明确地描述多种土样的土壤水分特征曲线(SWCC), 这些土样包括扰动土和非扰动土^[9], 粘土和壤土^[6], 甚至是泥炭土^[10]。模型模拟结果的可靠度很大程度上取决于参数的准确度(Loague and Green^[11]; Jarvis et al.^[12])。

通过试验直接测量土壤的相对渗透系数不仅耗时, 而且需要特殊的设备^[13]。另外试验测得的结果只是针对特定的

收稿日期: 2015-01-20 修回日期: 2015-10-12 网络出版时间: 2015-11-30
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2014.020.html>
基金项目: 山东省科技发展计划项目(2012GNC11203)
作者简介: 赵晓龙(1989-), 男, 山东东平人, 主要从事非线性科学与岩土工程应用等方面的研究。E-mail: longxingtianxiale@126.com
通讯作者: 邱秀梅(1962-), 女, 山东东阿人, 教授, 主要从事土体工程安全等方面的研究。E-mail: qxmxr@126.com

几个饱和度下的相对渗透系数,需要通过曲线拟合才能运用到土工计算中。间接测定方法,如土壤转换函数法^[14]、物理经验法^[15],是目前比较常用的方法^[16],但这些方法通常需要大量的土壤数据。针对现有技术中存在的局限性,本文以达西定律^[1]和 van Genuchten 模型^[6]为理论依据,提出了一种非饱和土相对渗透系数的试验数值分析联合测定法。该方法包括简单的蒸发试验和数值分析,通过对试验曲线进行拟合分析,获得非饱和状态下土壤的相对渗透系数。本方法中涉及的数值分析程序是笔者根据理论推导,并结合实际试验编写的,其适用对象主要是渗透系数较小的粘性土。对于粘性土,无论是其渗透系数还是相对渗透系数,测定时间都相当漫长,而且相对渗透系数的测定在技术上则更加困难,因此,本方法对科研、生产具有一定的实用价值。

1 理论依据

为了简化公式,本理论推导采用了几个公认的假定条件:(1)土样中的温度是恒定的;(2)土样中水分迁移的动力是基质吸力梯度;(3)渗透系数是饱和度的函数。

根据广义达西定律,水分在基质吸力作用下的迁移规律可以描述为

$$q_w = -k_w \frac{\partial P_c}{\partial x} \quad (1)$$

式中: q_w 为水分通量; P_c 为基质吸力; k_w 为广义渗透系数; x 为长度。

在非饱和状态下,广义渗透系数 k_w 可表达为

$$k_w = k_l \cdot k_r(S_w) \quad (2)$$

式中: k_l 为土壤的固有渗透系数(intrinsic hydraulic conductivity),可以通过变水头渗透试验测定,是孔隙比的函数; S_w 为土样的饱和度; k_r 为相对渗透系数(relative hydraulic conductivity),是饱和度 S_w 的函数。

建立质量平衡方程,土样的蒸发过程,其水分质量平衡方程可以表示为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q_w}{\partial x} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (4)$$

$$V_w = \phi S_w V \quad (5)$$

式中: t 为时间; θ 为土样的体积含水量; V 为土样的总体积; V_w 为土样中水的体积; ϕ 为土样的孔隙率。

将方程(1)、(2)、(4)和(5)代入到方程(3),可以得到土样蒸发过程基本控制方程为

$$\phi \cdot \frac{\partial S_w}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left[k_l \cdot k_r(S_w) \cdot \frac{\partial P_c}{\partial x} \right] \quad (6)$$

建立辅助方程。根据 Van Genuchten 提出的理论^[6],土样的保水曲线和相对渗透系数可以描述为

$$S_w = \left[1 + \left(\frac{P_c}{P_r} \right)^n \right]^{-m} \quad (7)$$

$$k_{rl}(S_w) = \sqrt{S_w} [1 - (1 - (S_w)^m)^n]^{2-2m} \quad (8)$$

式中: P_r 、 n 、 m 均为 van Genuchten 法则中的参数,且有 $n = 1/(1 - m)$,因此实际的待定参数只有 P_r 和 m 两个。利用方程(7)和(8),土样蒸发过程基本控制方程(6)可以改写为

$$\phi \cdot \frac{\partial S_w}{\partial P_c} \cdot \frac{\partial P_c}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left[k_l \cdot k_r(S_w) \cdot \frac{\partial P_c}{\partial x} \right] \quad (9)$$

式中 $\frac{\partial S_w}{\partial P_c}$ 可以利用方程(7)求得。

2 试验部分

试验部分主要是利用放置有饱和盐溶液的干燥器对非饱和土样进行蒸发试验,观测非饱和土样的失水过程,得到土样失水质量-时间变化($M-t$)曲线及其蒸发过程中的环境温度 T (°C)和湿度值 RH (%)。具体说明如下。

蒸发装置(图1)由一个干燥器构成,里面分为上下两个通过多孔陶瓷隔板分隔/连通的腔室,其中下腔室放置饱和盐溶液如氯化镁,用以控制干燥器内部的相对湿度,上腔室用于放置高精度电子秤和高精度温度湿度计。试验时将整个干燥器放置于恒温箱内,以保证试验过程温度的恒定。高精度电子秤精度为 0.01 g,用于称量土样质量。高精度温度湿度计用于测量干燥器内部的温度和湿度。带有环刀的重塑非饱和土样放置在高精度电子秤的称量盘上。试验时配备电子表一只,用于记录试件的干燥时间,在土样出现裂缝后停止试验。

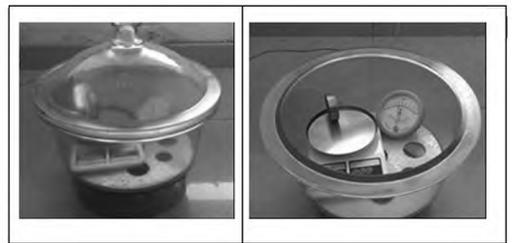


图1 蒸发装置

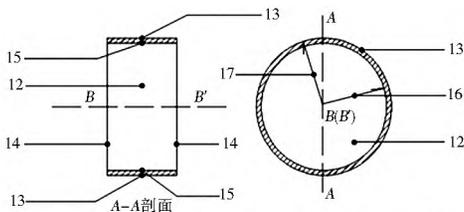
Fig. 1 Evaporation apparatus

试验前将需要的饱和盐溶液配好,然后倒入干燥器的下腔体内,确保一部分固体盐存在。将高精度电子秤和高精度温度湿度计放到干燥器内的多孔陶瓷板上,然后把干燥器顶盖盖好,顶盖与主体接触部分为涂有凡士林的磨砂玻璃。静置一段时间,直到干燥器内的温度湿度计显示其内部环境达到湿度平衡。

将制备的环刀土样放置到干燥器内。土样的左右两个表面暴露在干燥器的空气中,水分可以自由出入土样,而土样与不锈钢环刀的接触面,则认为水分不能自由出入土样。不锈钢环刀直径为 61.8 mm,高度为 20 mm。试验过程中控制干燥器内部的温度和湿度为恒定值,具体温度值 T (°C)和湿度值 RH (%)通过干燥器内部的高精度温度湿度计来测定。通过电子表和高精度电子秤来记录环刀土样随时间的质量变化曲线。

3 有限元数值模型建立

在已建立土样蒸发过程基本控制方程基础上,建立有限元数值模型。根据试验装置,在建模时即认为土样中的水分只能从左右侧面出入,而不能从土样与环刀的上下接触面自由出入。空间上使用一维有限元方法进行离散,时间上采用一阶隐式离散。为了便于说明,图2只绘出土样沿直径的一个矩形截面(A-A剖面),其左右两边为土样散失水分的侧面(即图2中土样与空气接触界面14),而上下两边为土样与环刀的接触面15。



12.非饱和和重塑土样 13.不锈钢环刀(直径为61.8 mm, 高度为20 mm) 16.土样半径 17.不锈钢环刀半径

图 2 环刀土样示意图

Fig. 2 Soil sample in the cutting ring

整个模型为一个圆柱体,划分的单元为这个圆柱体上一片片圆形面单元。在实际建模时,为便于计算,将三维模型简化为二维模型,仅取圆柱体沿直径的剖面,划分的单元则为一条条的线单元,计算域被离散成 400 个线单元。

在建立的有限元模型中,忽略了体力的影响。为了模拟土样在干燥过程中基质吸力的变化,需要将对应饱和和盐溶液的基质吸力添加到模型的两端。在试验初期,土样侧面两端的基质吸力梯度最大,水分散失较快。为了准确描述这一变化过程,需要将土样的侧面两端划分较多的单元,而土样的中间部分单元则可以划分较大些。为了保证计算的收敛性和计算精度,确保准确描述单元加载初期土样中的水压力梯度,计算模型中单元之间的距离是渐变的,土样 A-A 剖面左右两端单元间距最小,在程序中将土样左右两端单元最小间距设定为 1×10^{-13} m。土样内部相邻单元的间距则是呈固定比例的,这个比例可由程序根据给定试验土样尺寸和给定的单元数目自动算出。

在本方法的试验中,模型边界条件为 Dirichlet 边界条件,根据给定的相对湿度和温度,通过 Kelvin 方程可以得到试样两端的基质吸力为

$$P_c = \frac{RT}{M_w} \ln(RH) \quad (10)$$

式中: R 为理想气体常数; T 为绝对温度; ρ_w 为水的密度; RH 为干燥器中的相对湿度(%); M_w 为水蒸气的莫尔质量。

通过该边界条件,可以求得任意时刻的基质吸力分布,通过方程(7)可以得到试样内部的水饱和度分布。再根据方程(5)可以得该时刻试样的含水体积。

4 数值分析程序编写

数值分析程序包括基本分析和优化反分析两大基本模块。

基本分析模块是根据已建立的土样蒸发过程基本控制方程及有限元数值模型,将已输入的土样基本参数、试验曲线和优化反分析模块给出的基本参数 P_r 和 m 代入进行运算,模拟出土样的失水质量-时间曲线、饱和度分布情况和土样的相对渗透系数。

优化反分析模块是通过正交优化方法确定两个基本参数 P_r 和 m 的数值,然后调用基本分析模块,得到给定参数下的试样失水曲线,再通过对比试验和数值分析结果调整 P_r 和 m ,直到两者之间的方差为最小,得到最终优化后的参数 P_r 和 m ,最后根据方程(8)得到非饱和和状态下土样的渗透系数。优化反分析模块实际是对基本分析模块分析出的结果进行优化再运算的过程,其间仍需要不断地调用基本分析模块,对比输出的结果,直到其数值分析结果和试验结果之间

的方差最小,即达到最优。这时即可认为数值曲线可以准确地模拟试验曲线,在此曲线下确定的 P_r 和 m 值即为所求值,然后将 P_r 和 m 值代入方程(8)通过基本分析模块运算即可得到非饱和和状态下土样在不同饱和度下的相对渗透系数 k_r 。源程序用 Fortran 语言编写(文中略),其主要流程见图 3。

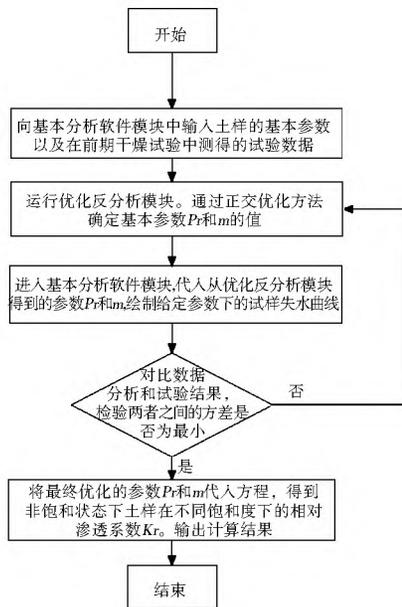


图 3 方法流程

Fig. 3 Flow chart of the method

5 数值模拟结果分析

图 4 为土样内部三个时刻基质吸力分布图。从图 4 中可以看出,随着时间的增长,同一位置的基质吸力是增大的;而同一时刻,土样两侧的基质吸力大,中间几乎为零。这是符合理论和常识认识的,因为基质吸力与土样的饱和度存在一定的关系(见辅助方程(7)),即土样饱和度越小,基质吸力越大。在试验初期,土样的两侧先变干,而土样中间水分基本没有损失,所以图 4 中两侧的基质吸力很大,而中央则几乎为零;随着时间的增长,土样失去的水分越来越多,饱和度越来越低,所以同一位置基质吸力有增大的趋势。正是由于土样中存在着这种基质吸力梯度,导致了土样内水分不断地向两侧迁移。

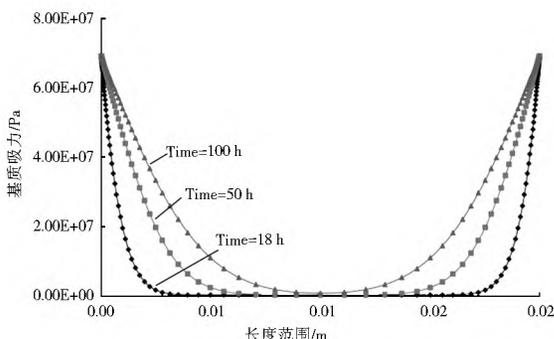


图 4 土样内部三个时刻基质吸力分布

Fig. 4 The suction distribution of inner soil at three times

图 5 是土样内部三个时刻饱和度分布图。从图 5 中可以看出,18 h 后,土样两侧的饱和度几乎为 0,而中间的饱和度在 90% 左右。这表明在 18 h 后,土样两侧表面几乎变干,而中间

则仍保有大量孔隙水。随着时间的增长,土样的水分散失由两侧逐步向中间延伸,表现为图5中曲线逐步往中间缩小。

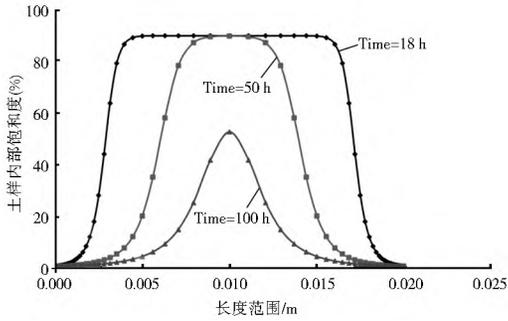


图5 土样内部三个时刻饱和度分布

Fig. 5 The water saturation distribution of inner soil at three times

图6是试验数据点的拟合曲线。从图中可以看出,经过优化反分析模块处理,调整参数 P_r 和 m 后绘出的曲线很好地拟合了试验中的数据点。因此,根据本理论建立的模型较为理想,由此通过数值模拟推算出的非饱和土的相对渗透系数具有相当的可靠性。

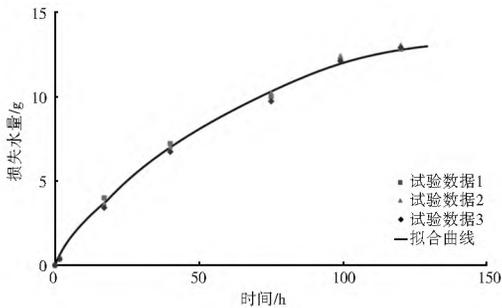


图6 试验数据点的拟合曲线

Fig. 6 The fitting curve of the experimental data points

图7是土样相对渗透系数及饱和度变化曲线。该图反映了两组变量之间的关系,一组是饱和度与基质吸力之间的关系,另一组是相对渗透系数与基质吸力之间的关系(两者之间通过饱和度建立起联系)。这两组图线的理论依据即为根据 van Genuchten 理论建立的辅助方程(7)和方程(8)。从图中可以看到,随着基质吸力增大,饱和度和相对渗透系数都减小了,且两者都呈现出非线性的关系,同时也可以看出,一定的饱和度值对应一定的相对渗透系数值。在土样接近饱和时,其渗透系数曲线的斜率非常陡,微小的基质吸力的变化就会导致相对渗透系数的剧烈改变。从图7中可得到该土样在某饱和度下的相对渗透系数值。

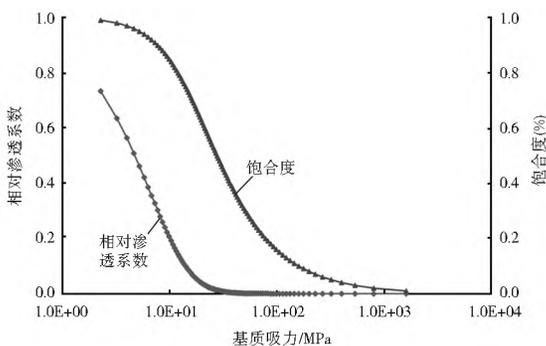


图7 土样相对渗透系数及饱和度变化曲线

Fig. 7 The variation curves of relative hydraulic conductivity and water saturation of soils

6 结语

邵明安^[17]曾经总结过求非饱和土渗透系数的四种方法,并进行了比较。当时蒸发试验的理论方法仅仅是在达西定律的基础上进行的推导,并且数值计算中采用近似和舍入误差导致其准确度偏低,其计算程序参见文献^[18]。本文则在理论方法上同时结合了达西定律和水分运动基本方程,并运用 van Genuchten 模型对试验数据曲线进行拟合模拟,使其计算精确度大大提高,且试验耗时短,不需要昂贵的设备,具有实用性和创新性。Shao^[19]提出的积分方法,假定了土壤水势分布可以用麦克劳林函数描述,计算模型参数需要湿润长度、吸水率、土样饱和和渗透系数等试验数据,而本方法所需试验数据更易测量,假定也更少,通过数值反分析手段求得最优模型参数。但本方法的实际计算精度,还有待通过其他试验结果的对比分析来进一步验证。

参考文献(References):

- [1] 弗雷德隆德 D G,拉哈尔佐 H. (陈仲颐,张在明,陈俞炯等译) 非饱和土土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (Fredlund D G, Rahardjo H. Translated by CHEN Zhongyi, ZHANG Zaoming, CHEN Yujiong, et al. Soil Mechanics for Unsaturated soils[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))
- [2] T William Lambe, Robert V. Whitman. Soil mechanics, SI version[M]. State of Michigan: Wiley, 1979.
- [3] JARVIS N J, MESSING I. Near saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture as measured by tension infiltrometers[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1995, 59(1): 27-34.
- [4] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic Properties of Porous Media [Z]. Hydrology Paper No. 3. Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Colo, 1964.
- [5] Campell G S. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1974, 117: 311-314.
- [6] Van Genuchten M T. A Closed form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44(5): 892-898.
- [7] HAN Xiangwei, SHAO Mingan and R. HORTON. Estimating van Genuchten model parameter of undisturbed soils using an integral method* 1[J]. Pedosphere, 2010, 20(1): 55-62.
- [8] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resour. Res., 1976, 12: 513-522.
- [9] Leech C, Lockington D, Hooton R D. Estimation of water retention curve from mercury intrusion porosimetry and van Genuchten model[J]. ACI structural, 2006, 103: 2872-2876.
- [10] Naasz R, Michel J C, Charpentier S. Measuring hysteric hydraulic properties of peat and pine bark using a transient method[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2005, 69: 13-22.
- [11] Loague K, Green R E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application [J]. Hydrol, 1991, 10: 51-73.

(下转第 1150 页)

分析比较。研究显示,测点的模拟计算渗压与实际监测而得的渗压拟合效果理想,说明反演成果可靠、合理。

参考文献(References):

- [1] 黄铭. 潮位影响下的海堤渗压变化特点[J]. 人民长江, 2010, 41(6): 28-31. (HUANG Ming, Analysis on variation of sea wall osmotic pressure affected by tide level[J]. Yangtze River, 2010, 41(6): 28-31. (in Chinese))
- [2] 林奇, 王伟, 王颖, 等. 潮位涨落过程中海堤渗流及稳定分析[J]. 人民长江, 2011, 44(3): 83-86. (LI Qi, WANG Wei, WANG Ying, et al. Application study of new-type rectangular settling basin in water saving irrigation[J]. Yangtze River, 2011, 44(3): 83-86. (in Chinese))
- [3] Neuman S P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements[J]. Hydraulic Div. ASCE, 1973, 99(12): 2233-2250.
- [4] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖贻. 渗流数值计算与程序[M]. 南京: 海大学出版社, 1999. (MAO Changxi, DUAN Xiangbao, LI Zhuyi. Numerical Computation in Seepage Flow and Programs Application[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1999. (in Chinese))
- [5] 辛丽萍, 王均星, 陈炜, 等. 三维饱和-非饱和瞬态渗流的 ANSYS 模拟[J]. 中国农村水利水电, 2009(7): 89-92. (XIN Liping, WANG Junxing, CHEN Wei, et al. 3D saturated-unsaturated transient seepage analysis by Ansys[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(7): 89-92. (in Chinese))
- [6] 李丹, 黄铭, 杨运宝, 等. 基于 Ansys 的海堤渗流分析[J]. 工程与建设, 2013, 27(2): 149-151. (LI Dan, HUANG Ming, YANG Yunbao, et al. Seepage analysis of seawalls based on Ansys[J]. Engineering and Construction, 2013, 27(2): 149-151. (in Chinese))
- [7] 张晓飞, 李守义, 陈尧隆, 等. 改进的 BP 神经网络在碾压混凝土坝温度场反分析中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(1): 95-99. (ZHANG Xiaofei, LI Shouyi, CHEN Yaolong, et al. Application of improved bp neural network in back analysis of temperature field in RCC Dams[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(1): 95-99. (in Chinese))
- [8] 张乾飞, 王建, 吴中如. 基于人工神经网络的大坝渗透系数分区反演分析[J]. 水电能源科学, 2001, 19(4): 4-7. (ZHANG Qianfei, WANG Jian, WU Zhongru. Divisional back analysis of dam percolation parameter based on artificial neural network model[J]. International Hydroelectric Energy, 2001, 19(4): 4-7. (in Chinese))
- [9] 景孟旗, 沈长松, 刘宾, 等. 基于 BP 神经网络的堆石坝参数反分析[J]. 电子测试, 2013(20): 35-37. (JING Mengqi, SHEN Changsong, LIU Bin, et al. Back analysis of parameters of rockfill dam based on neural network[J]. Electronic Test, 2013(20): 35-37. (in Chinese))
- [10] 骆进军, 李波, 李立辉. 基于神经网络的大坝岩体渗透系数张量反演分析[J]. 水电能源科学, 2008, 26(5): 54-56. (LU Jinjun, LI Bo, LI Lihui. Study on energy catastrophe theory analysis of gravity dam sliding along foundation plane[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(5): 54-56. (in Chinese))
- [11] 周娟, 黄铭. 基于改进神经网络的海堤渗压监测模型研究[J]. 人民长江, 2014, 45(3): 91-93. (ZHOU Juan, HUANG Ming. Multipoint seepage pressure monitoring model for sea dikes based on improved BP neural network[J]. Yangtze River, 2014, 45(3): 91-93. (in Chinese))
- [12] 王子征. 基于 ANSYS 的基坑土体参数反演及神经网络变形预测[D]. 天津: 天津大学, 2012. (WANG Zhen. Back analysis of soil strata parameters in foundation pit and deformation prediction based on neural network[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [13] 陈明. 神经网络模型[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1995. (CHEN Ming. The Neural Network[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1995. (in Chinese))
- [14] 陆琼瑜, 童学锋. BP 算法改进的研究[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(3): 648-649. (LU Qiongyu, TONG Xuefeng. Analyses of improvement algorithms, of BP neural network[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(3): 648-649. (in Chinese))
- [15] 施彦, 韩力群, 廉小亲, 等. 神经网络设计方法与实例分析[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2009. (SHI Yan, HAN Liqun, LIAN Xiaopin, et al. Shenjing Wangluo Sheji Fangfa yu Shili Fenxi[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2009. (in Chinese))
- [16] 黄敬频, 周永权. 可调激活函数递进提升输出维的选参方法[J]. 数学的实践与认识, 2005, 35(1): 142-147. (HUANG Jingpin, ZHOU Yongquan. Choose parameter method of variable activation function to recursion increase output dimension[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2005, 35(1): 142-147. (in Chinese))
- [12] Jarvis N J, Brown C D, Granitz E. Sources of error in model predictions of pesticide leaching: a case study using MACRO model[J]. Agri. Water Manage, 2000, 44: 247-262.
- [13] Or D, Wraith J M. Soil water content and water potential relationships. In Warrick, A. W. (ed.) Soil Physics Companion[M]. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2002, 49-84.
- [14] Huang G H, Zhang R D, Huang Q Z. Modeling soil water retention curve with a fractal method[J]. Pedosphere, 2006, 16: 137-146.
- [15] Hwang S I, Powers S E. Lognormal distribution model for estimating soil water retention curves for sandy soils[J]. Soil Sci., Soc. Am. J., 2003, 168: 156-166.
- [16] Janki L J, Merry R H, Forrester S T, et al. Rapid prediction of soil water retention using mid infrared spectroscopy. Soil Sci., Soc. Am. J., 2007, 71: 507-514.
- [17] 邵明安. 四种方法推求土壤导水参数的差别及其准确性[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1985(2): 54-62. (SHAO Mingan. The difference and accuracy for four methods determining soil hydraulic parameters[J]. Memoir of NISWC, Academia, 1985(2): 54-62. (in Chinese))
- [18] 石玉洁, 杨文治, 费维温. 蒸发条件下土壤导水率和扩散率的测定[J]. 水利学报, 1984(2): 33-38. (SHI Yujie, YANG Wenzhi, FEI Weiwēn. The determination of hydraulic conductivity and diffusivity of soils under evaporation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984(2): 33-38. (in Chinese))
- [19] Shao M, Horton R. Integral method for estimating soil hydraulic properties. Soil Sci., Soc. Am. J., 1998, 62: 585-592.

(上接第 1117 页)