

浅谈非饱和渗流的几个基本问题

朱 伟^{1,2}, 程南军², 陈学东², 赵仲辉²

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 立足于非饱和渗流问题的研究现状和应用需求, 对 4 个常见的非饱和渗流基本问题进行了论述: ①非饱和渗流及其数值模拟理论; ②非饱和降雨入渗及其模拟中的问题; ③初始水分量及其考虑; ④土的非饱和渗透特性以及对渗流计算结果的影响。通过多个计算实例的比较分析, 充分明确了这几个基本问题对非饱和渗流数值模拟所带来的重要影响。为了更加精确地进行渗流计算, 更加符合实际地解决非饱和渗流问题, 在普遍重视数值方法的现状下, 提出应该更加重视非饱和渗流基本问题试验研究的观点。

关键词: 非饱和渗流; 降雨入渗; 初始水分量

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2006)02 - 0235 - 06

作者简介: 朱 伟(1962 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土工程和环境工程方面的研究。

Some fundamental problems of unsaturated seepage

ZHU Wei^{1,2}, CHENG Nan-jun², CHEN Xue-dong², CHIU C F²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the current research studies and needs in engineering, presented and discussed the following four fundamental problems of unsaturated seepage were: ①numerical modeling theories, ②modeling of rainfall infiltration, ③ initial water content and ④hydraulic conductivity and its effect on the numerical simulation. The results of several simulations were presented to demonstrate the importance of these issues on the numerical modeling of unsaturated seepage. It was suggested that more attention should be paid to the experimental study in order to achieve more accurate predictions and to meet the needs of the practical problems.

Key words: unsaturated infiltration; rainfall infiltration; initial moisture content

0 前 言

经典岩土力学的理论基本上是在土体饱和的前提下构建的, 而我们越来越多地遇到很多非饱和土的问题。降雨后坡面的滑动破坏, 堤防在雨水、洪水渗透作用下发生的破坏, 污染物质在土体中的迁移转化等等都是土在非饱和状态下的力学性质和力学行为问题。在岩土力学日益成熟的今天, 关于非饱和土的研究水平与解决实际工程问题的需求仍有较大的差距。

从工程应用的角度, 我们较为关心的是非饱和状态下土具有什么样的力学性质。问题在于非饱和状态不是一个恒态问题, 它是一个变态问题, 也就是说非饱和状态本身也是随着孔隙内水分的多少而变化的, 同一种土在不同的非饱和状态会表现出完全不同的力学性质。因此, 关于非饱和土的研究可以分为两种, 一种是非饱和态发生变化时土体力学性质变化的研究, 另一种是自然条件下非饱和态会发生怎样变化的

研究。在这两种研究中, 水分变化的研究是因, 力学性质变化的研究是果, 两者的结合是解决非饱和土力学问题的必然。

研究非饱和态变化的问题也就是非饱和渗流的问题, 包含着非饱和状态下水分的赋存和运动规律。基本理论一般采用建立在广义达西定律和质量守恒定律的基本方程, 也就是 1931 年 Richards^[1]提出的非饱和渗流方程。70 年代左右, 非饱和渗流以解析解的研究为主^[2,3,5]。80 年代开始, 随着计算机技术的普及非饱和渗流数值解法的研究非常活跃, Neuman 的研究代表了非饱和渗流计算的主流趋势^[4,5]。从 90 年代开始, 国外认识到正确确定非饱和土的渗透特性对于数值解的精度提高有着重要的作用, 注重于非饱和土渗透特性研究的趋势逐渐形成。

结合非饱和渗流研究中经常遇到的一些问题和笔者的研究体会, 本文主要从非饱和渗流的 4 个基本

收稿日期: 2005 - 07 - 05

问题展开讨论: ①降雨入渗量及其模拟; ②初始水量及其考虑; ③水分特征曲线的实测及推算; ④非饱和和透水系数的实测及推算。希望这些讨论能够为非饱和和渗流研究者提供参考。

1 非饱和渗流及其模拟

非饱和渗流的问题实际上可以分为两个方面: ①在降雨、蒸发等外部水分条件变化下, 有多少水进入了土体(或从土中出来); ②进入土体的水分会在土体中怎样的运动、分布。在非饱和渗流的计算中我们一般把前者考虑为边界条件, 把后者考虑为瞬态渗流场的问题进行求解。

从 Richards^[1]的非饱和渗流方程, 各种数值解法非常繁多。1973年 Neuman^[6]提出了把饱和和非饱和状态进行统一考虑, 连续求解的数值解法, 在非饱和和渗流计算方面得到了学术界的认可, 后来的学者大都围绕这一方法展开了研究工作^[7,8]。

Neuman 方程的最大优点就是可以把饱和状态和非饱和状态进行统一的计算, 一般称为饱和-非饱和和渗流计算方程。在这样一个计算系统中, 浸润面被假定为零压力面在数值模型中求解, 对于非稳定渗流, 迭代时间可以大大缩短, 浸润面的确定相对简单。在之前的渗流计算分析中, 通常只是把浸润线以下的饱和和领域作为研究对象, 浸润面作为活动的自由面, 计算时必须进行反复的迭代。当有降雨入渗和表面蒸发时表面的水分得失与浸润线的连动变化问题较难处理。而饱和-非饱和系统可以较好地体现出饱和区和非饱和区渗流运动的相关性, 尤其在堤防这样的结构物, 同时受到降雨入渗和洪水入渗时, 水分的变化和浸润线的变化可同时得到合理的解决。因为这些优点, Neuman 方程的提出基本上得到了学术界的广泛认可, 目前的很多非饱和和渗流的研究多是基于这一理论而展开。

2 非饱和降雨入渗及其模拟

非饱和和渗流的研究较为偏重于瞬态渗流场的计算和模拟。而降雨过程中究竟有多少水进入了土体, 在数值计算中多被简化为边界条件进行处理。但这一边界条件的处理会对进入计算系统中的水量产生重要影响, 因此会对非饱和和渗流的模拟的结果产生决定性影响。

2.1 常用的计算方法及存在的问题

在非饱和和渗流计算中, 一般都把降雨入渗作为表面节点的边界条件来考虑, 常用的方法有以下3种。

(1) 将表面设定为流量已知边界。给定入渗速度(或降雨强度), 也就是所有的降雨都进入土体的方法^[9,10]。

(2) 将表面设定为水头已知边界。也就是在降雨过程中表面的基质吸力为0, 根据负压状态下的水力坡降和非饱和渗透系数算出能够进入土体的雨量。

(3) 当降雨强度小于饱和渗透系数 k_s 时, 降雨全部入渗, 边界条件为流量一定。当地表点的瞬态渗透系数等于饱和渗透系数时, 转换为水头已知边界。是以饱和渗透系数作为入渗能力来判断边界的变换^[11]。

另也有用基质吸力作为边界条件变化的判断标准。当土体干燥时, 基质吸力很高, 边界为流量边界, 含水率增加到土体表面基质吸力为0时, 边界条件转化为水头边界。计算中随着入渗表面的吸力变化改变边界条件^[12]。

无论采取以上的哪一种方法, 都会与实际的入渗量产生一定的区别。方法(1)在降雨强度小的情况下与实际较为符合, 而降雨强度较大时这一方法出现明显的缺陷。相反方法(2)在降雨强度较大时与实际较为符合, 而降雨强度较小时也有明显的缺陷。方法(3)有了明显的改进, 但是实际上, 表层土体的入渗能力并不等于饱和渗透系数。

2.2 降雨入渗规律

为了正确地模拟非饱和和降雨的入渗问题, 首先要了解降雨的入渗规律。陈学东^[13]作了一些试验工作。在降雨强度、降雨量、入渗量、初始水分量可调控的一维土柱试验中, 研究了降雨进入土体的量和雨强、初始水分量之间的关系。

通过试验发现, 无论是什么情况下的降雨入渗, 一般都表现出图1所示的入渗规律。入渗初期由于土柱比较干燥, 土柱的入渗能力大于降雨强度, 因此开始入渗后的一段时间内, 实际的入渗率即为降雨强度, 随着雨水入渗到土柱内, 土柱的入渗能力下降, 在积水点以后土柱的入渗能力开始小于降雨强度, 部分雨水形成地表径流。当整个土柱含水率达到饱和时, 入渗率即为土柱的饱和渗透系数 k_s 。如果降雨强度很小时, 也会发生积水点出现的情况, 同样如降雨强度很大的话, 积水点会在降雨后很短时间内出现。

根据试验结果可将整个降雨入渗过程可以分为图2所示的3个阶段, 也就是降雨强度控制入渗阶段, 非饱和状态土体控制入渗(简称非饱和入渗)阶段和饱和状态土控制入渗(简称饱和入渗)阶段。积水点和饱和点是3者的分界点。

降雨强度控制入渗阶段的土体上表面其实就是流量边界条件下的入渗过程(与方法(1)相同), 饱

和入渗阶段的土体上表面实际是在薄层积水边界条件下入渗的过程(与方法(2)相同)。因此,在复杂的雨型下,实际入渗边界是在流量边界和水头边界间的不断变换,在数值模拟时应该以积水点的出现为判断标准,对降雨入渗的边界进行转换。

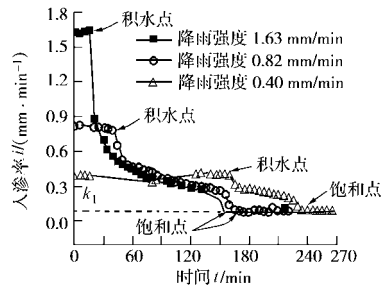


图1 不同降雨强度下的降雨入渗率规律

Fig. 1 Infiltration with different rainfall intensities

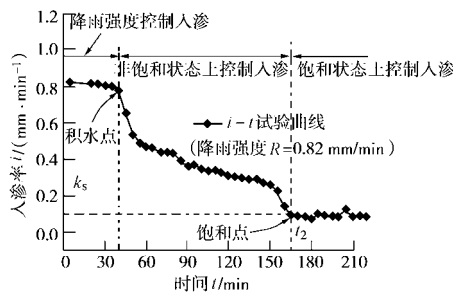


图2 降雨入渗率随时间的变化规律

Fig. 2 Infiltration with different rainfall time

2.3 以积水点为判断标准的降雨入渗计算方法

实际 FEM 方法中,地表入渗能力以地表水头和入渗率两个变量来判断。在地表节点非饱和时,以地表节点的临界水头($h=0$)下的入渗为入渗能力,判断进入水头边界条件;饱和时,以地表节点的入渗率为入渗能力,判断进入流量边界条件。程序的实现见图3。

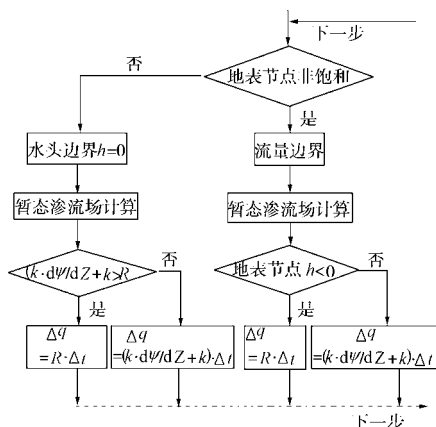


图3 降雨入渗计算方法程序流程图

Fig. 3 Flowcharts of computational method of rainfall infiltration

图4是降雨强度为0.73 mm/min,初始含水率为15.4%的不同降雨入渗计算方法计算值和试验值比较结果。

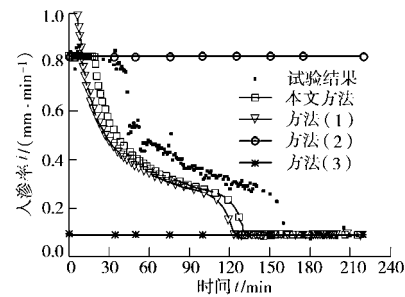


图4 不同降雨入渗计算方法的区别

Fig. 4 Contrast of different computational methods

通过比较分析,方法(1)在降雨强度大于饱和渗透系数的降雨情况下,计算得入渗雨量大于实际值;方法(2)在降雨强度较小时,积水点出现较迟,计算值与实际相差较大;方法(3)对于雨强在饱和和渗透系数附近的降雨比较适合,对于大于饱和渗透系数的降雨,相差也比较大。

在入渗率随时间的变化曲线中,本文采用的计算方法计算结果中降雨入渗控制段、非饱和入渗段、饱和入渗段界限比较明显,与试验值相比,数值计算的非饱和入渗阶段曲线的形状基本与试验一致,积水点和饱和点略有提前。

3 初始水分量及其考虑

初始水分量也就是通常所说的控制方程中的初始条件。在非稳定渗流中,能不能正确的考虑初始水分量将会对计算结果产生非常大的影响^[14-16]。

为了明确初始水分量对降雨入渗计算结果所产生的影响。笔者根据堤防实测的初始水分量,选择2个月没有前期降雨的水分条件(干燥状态下)和前4个月累计降雨量达到600 mm后的水分量(湿润状态下)作为初始水分量,对降雨时的水分变化进行了计算。

降雨强度采用15 mm/h,降雨10 h,累计降雨量为150 mm。堤防是高度为8.4 m的粉土堤防,饱和体积含水量为54%。从计算结果中整理堤坡中间位置(平台位置)的水分变化,对干燥状态和湿润状态的计算结果进行了比较,如图5,6所示。

在干燥条件下(图5),累计降雨量达到150 mm时,堤坡表面基本饱和,但是深度1.5 m以下的土体水分还没有开始变化。降雨结束后浸润锋面虽然继续向下部移动,但是前进的速度非常缓慢。2 d 浸润锋面到达2.0 m的深度,但是这一位置的水分变化很小。

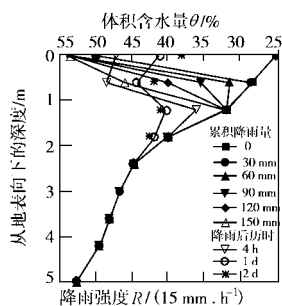


图5 干燥状态下的降雨入渗

Fig. 5 Infiltration in dry condition

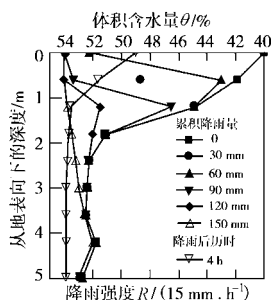


图6 湿润状态下的降雨入渗

Fig. 6 Infiltration in wetting condition

在湿润条件下,降雨引起的水分变化快速地向下传递,在降雨量为 60 mm 时,表层土基本达到饱和。浸润锋面移动迅速,在累计降雨量为 90 mm 时到达 1.0 m 附近;150 mm 时到达 3.0 m。3.0 m 以下由于初始的含水率较高,浸润锋面在水分基本不变的状态下通过这些部位,很快地引起了下部浸润面的上升,降雨结束 4 h 后,浸润面有了明显的上升(图 6)。可以看出,干燥状态下降雨入渗基本局限于堤坡的表层,而湿润条件下更多的雨水会到达堤坡的深部,对浸润线的上升产生较为明显的作用。

从这一实例计算说明在饱和-非饱和渗流计算中,初始含水率的确定是非常关键的。在同一降雨条件下,这一问题的不同处理,会得到完全不同的结果。为了解决这一问题笔者提出了以平均渗透强度来确定初始含水率的计算方法。

平均渗透强度就是把地区的年均降雨量与径流量、蒸发量看做是年均入渗量,算出每天的平均渗透强度(比如日本东京的计算平均渗透强度是 1.5 mm/d)。以这一渗透强度进行稳定流渗流计算,得到的水分状态为年平均的水分状态。以这一渗透强度考虑一个湿润系数或干燥系数可以得到降雨较多的湿润期的平均渗透强度和降雨较少的干燥期的平均渗透强度,用这些渗透强度进行稳定渗流计算可以得到不同季节的水分状态。在考虑降雨入渗时,可以以需要季节的水分状态作为初始条件进行计算,能够得到

更为符合实际的计算结果。

4 非饱和和渗透特性的影响

4.1 水分特征曲线及非饱和和渗透系数曲线

土的非饱和和渗透特性由水分特征曲线和非饱和和渗透系数组成。前者决定非饱和状态下的水力梯度分布、后者决定非饱和土的水分渗透能力,不同的土不同的密度其非饱和和渗透特性均会有较大的不同。非饱和和土中的基质吸力和含水率之间有一定的对应关系,这种关系称为水分特征曲线,如图 7 中的 $\theta - \psi$ 曲线。非饱和土的透水系数是随着水分量变化而变化的参数,一般用 $\theta - k_r$ 曲线来表示,这里 k_r 是非饱和和透水系数与饱和和透水系数的比值。

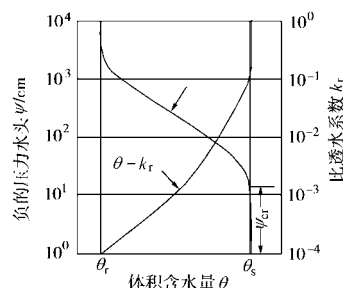


图7 土的非饱和和渗透特性

Fig. 7 Unsaturated infiltration characteristics of soil

4.2 非饱和和渗透特征的实测和数值模型

一般认为水分特征曲线和非饱和和透水系数都是与土的孔隙结构相关的,而且这两个参数之间有着较强的相关性。相对于非饱和和透水系数而言,水分特征曲线的实测要相对容易一些。因此,通过实测水分特征曲线,通过数值方法推算非饱和和渗透系数的处理方法较为常见。

土中基质吸力(pF 值)的实测往往需要几种方法的组合,土柱法、吸引法更适合基质吸力较低的范围,加压膜、离心法更适合基质吸力较高的范围。

为了数值计算上的方便,很多学者都用数学模型对水分特征曲线进行拟合,也就是在实验室测试的基础上,拟合出经验公式,常用的形式有 Van Genuchten (1980) 的公式^[17]。

先将土中水分量用土的有效饱和度 S_e 表示:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad (1)$$

式中, θ_s 是最大体积含水量, θ_r 是最小体积含水量。

$\theta - \psi$ 曲线可表达为

$$S_e = \left(\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right)^m, \quad (2)$$

式中, $m=1-1/n$, α 、 n 是土的非饱和参数。

根据 Mualem^[18]提出的水分特征曲线和非饱和透水系数的关系式, 非饱和透水系数 $\theta - k_r$ 则可根据水分特征曲线进行推定。

$$k_r = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

一般将 Van Genuchten 这一表达水分特征曲线和非饱和透水系数的拟合公式称为 VG 模型。

笔者根据对多种土的水分特征曲线进行实测, 提出了其中的主要参数 n , α 与土的粒径变化之间的关系如图 8 所示。

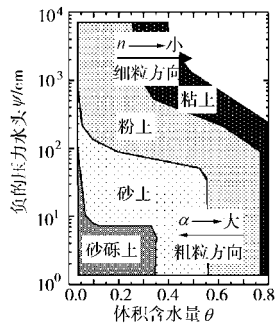


图 8 土的种类和水分特征曲线

Fig. 8 Soil-water characteristic curve of different soils

4.3 非饱和和渗透特征参数取值的影响

笔者对采用不同非饱和和渗透特征参数条件下, 非饱和和渗透计算的结果进行了比较。计算以 4.0 m 高的降雨试验土堤 (底宽 14.0 m, 坡比 1:1.5) 为对象, 在透水系数, 初始水分状态相同的情况下, 对 VG 模型中的主要参数 n , α 采用了不同的数值, 进行了降雨入渗计算。堤身土的参数: 饱和透水系数 $k = 3.0 \times 10^{-3}$ cm/s, $\theta_s = 0.77$, $\theta_r = 0.21$ 。降雨强度 15 mm/h, 累积降雨量为 480 mm。

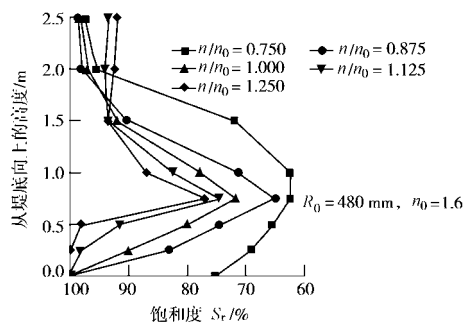


图 9 不同 n 值条件下的降雨入渗

Fig. 9 Infiltration with different values of n

在距底面高度为 2.5 m 的坡面上, 垂直取出一个剖面的计算结果, 对使用不同非饱和和渗透特征参数所得到的计算结果进行整理。其它参数相同, n 值发生变化时, 计算的结果有明显的不同 (图 9)。 n 值变小

时, 降雨过程中土体饱和度的变化比较小。 n 值变大时, 降雨所产生的影响更为明显。仅仅由于 n 值发生 50% 的变化, 计算结果出现了非常大的差异。同样, α 值的变化也引起了计算结果发生了较大的变化, 见图 10。由这一实例的计算可以看出, 非饱和和渗透计算中, 反应不同土性差异的非饱和和渗透特性是一个不容忽视的问题。

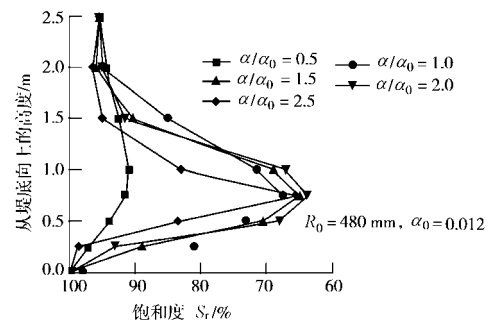


图 10 不同 α 值条件下的降雨入渗

Fig. 10 Infiltration with different values of α

5 结 论

(1) 非饱和和渗透所涉及的工程应用问题越来越广泛, 关注的程度也在不断的提高。因此, 非饱和和渗透的研究在立足于理论问题不断深入的同时, 应该围绕解决实际问题不断提高其准确性和实用性。

(2) 对于学术界最为关注的非饱和和渗透数值模拟问题, Neuman 所提出的饱和-非饱和的数学模型具有一定的先进性, 也基本代表了国际上的发展潮流。今后的研究应尽可能围绕这一方法的发展, 根据问题的需要可考虑纳入气相运移的规律、物质运移的规律。

(3) 为了进一步提高非饱和和渗透理论的应用能力, 应该较为深入地研究渗透计算中的边界条件和初始条件。包括降雨的入渗, 出渗, 水位、浸润面的变化和初始的水分状态 (或基质吸力状态)。

(4) 为了提高非饱和和渗透计算的精度, 对非饱和和渗透特征的研究必不可少。对于 pF 值的实测应该更多地考虑不同的土性、不同应力条件展开研究。对于非饱和透水系数, 开发简单实用的测定装置非常重要。

(5) 到目前为止, 我国的非饱和和渗透研究较为偏重于数值方法, 出现了很多重复的研究。希望今后更多地注重于应用问题的解决和内在规律的揭示, 开展一些试验、实测方面的工作。

参考文献:

- [1] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids in porous mediums[J]. Physics, 1931, **1**: 318 - 333.
- [2] BOUWER H. Chap 8: Surface-subsurface water relations[M]// Groundwater Hydrology. New York: Mc Graw-Hill, 1978.
- [3] CHOW V T, MAIDMENT D R, MAYS L W. Applied hydrology[M]. Singapore: Mc Graw-Hill, 1988, 99 - 126.
- [4] 西垣誠. 飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する2,3 の考察[J]. 土質工学会論文報告集, 1983, **23**(3): 165 - 177.
- [5] 草深守人, 向上拡美, 三原正哉, 北村孝海. 有限要素法による飽和—不飽和浸透の二次元非定常解析について[R]. 間組研究年報, 1977: 33 - 50.
- [6] NEUMAN S P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements[J]. Proc ASCE HY, 1973, **99**(12): 2233 - 2250.
- [7] DESAI C S. Finite element residual schemes for unconfined flow[J]. Int J Num Meth Engng, 1976, (10).
- [8] 赤木浩一, 大西有三, 西垣誠. 有限要素法による飽和—不飽和の浸透流解析[C]//土木学会論文報告集. 264: 1 - 24.
- [9] 高潤德, 彭良泉, 王 钊. 雨水入滲對非飽和土坡穩定性分析[J]. 人民長江, 2001, **32**(11). (GAO Run-de, PENG Liang-quan, WANG Zhao. Effects of rain infiltration on stability of unsaturated soil slope[J]. Yangtze River, 2001, **32**(11): 25 - 27.)
- [10] 吳宏偉, 陳守義, 龐宇威. 雨水入滲對非飽和土坡穩定性影響的參數研究[J]. 岩土學報, 1999, **20**(1): 1 - 14. (NG C W W, CHEN Shou-yi, PANG Yu-wei. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, **20**(1): 1 - 14.)
- [11] 李兆平, 張 彌. 考慮降雨入滲影響的非飽和土坡瞬態安全系數研究[J]. 土木工程學報, 2001, **34**(5). (LI Zhao-ping, ZHANG Mi. Effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, **34**(5): 57 - 60.)
- [12] 沈珠江, 米占寬. 膨脹土渠道边坡降雨入滲和變形耦合分析[J]. 水利水運工程學報, 2004, **9**(3). (SHEN Zhu-jiang, MI Zhan-kuan. Coupled analyses of seepage and deformation of expansive soil slopes during rainfall[J]. Hydro-science and Engineering, 2004, **9**(3): 7 - 11.)
- [13] 陳學東. 淺層非飽和帶降雨入滲規律的試驗與數值研究[D]. 南京: 河海大學, 2005. (CHENG Xue-dong. Experiment and simulation of rainwater infiltration in vadose zone[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.)
- [14] 朱 偉, 劉漢龍, 高玉峰, 山村和也. 河堤內非穩定滲流的實測與分析[J]. 水利學報, 2001, (3): 92 - 97. (ZHU Wei, LIU Han-long, GAO Yu-feng, YAMAMURA Kazuya. Observation and analysis of unsteady seepage flow in river embankment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (3): 92 - 97.)
- [15] 朱 偉, 山村和也. 雨水·洪水滲透時河堤的穩定性[J]. 岩土工程學報, 1999, **21**(4): 414 - 419. (ZHU Wei, YAMAMURA Kazuya. Stability of river embankment under the seepage of rain or flood[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(4): 414 - 419.)
- [16] 朱 偉, 秦建設, 高玉峰. 求解非飽和土堤初始浸潤線的一種解析法[J]. 河海大學學報(自然科學版), 2003, **31**(3): 314 - 317. (ZHU Wei, QIN Jian-she, GAO Yu-feng. Analytic method to solve initial phreatic level for unsaturated embankments[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences). 2003, **31**(3): 314 - 317.)
- [17] VAN Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci Am J, 1980, **44**(5): 892 - 898.
- [18] MUALEM Y. Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: generalized macroscopic approach[J]. Water Res, 1978, **14**(2): 325 - 334.