

DOI: 10.11779/CJGE201508001

非饱和砂土坡面降雨非正交入渗试验与数值模拟研究

王成华, 万正义, 张成林
(天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 传统降雨入渗分析仅以降雨强度在坡面上的正交分量作为边界条件, 不符合实际降雨非正交入渗规律。为了研究非饱和砂土的非正交入渗规律性, 采用自行研制的室内降雨试验装置对非饱和砂土坡面进行了一系列不同降雨强度、坡角和孔隙比的降雨入渗试验, 并对应地进行了正交入渗条件下的数值模拟。测量了入渗率、出渗速率及砂土储水增量随时间变化的关系曲线, 分析了雨强、坡角和孔隙比对试验结果的影响。试验结果显示各试验中均无坡面径流现象, 与正交入渗边界理论差异显著。通过分析非饱和砂土在传统坡面降雨正交入渗边界条件下的入渗率、出渗速率及砂土储水增量等数值模拟结果与对应的降雨入渗试验结果的差异, 证明按正交入渗边界理论计算得到的砂土坡面土体含水率、入渗能力及坡面边界条件转化的判别机制均与实际情况不符。

关键词: 非饱和砂土; 非正交入渗; 降雨入渗试验; 数值模拟

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)08-1357-08

作者简介: 王成华(1959-), 男, 辽宁人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、地下工程等领域的教学与科研工作。E-mail: chwang@tju.edu.cn。

Tests and numerical simulations of non-orthogonal rainfall infiltration on surfaces of unsaturated sand slopes

WANG Cheng-hua, WAN Zheng-yi, ZHANG Cheng-lin
(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The traditional rainfall infiltration boundary, which is determined by decomposing the rainfall intensity simply according to the direction of a slope surface, does not conform to the actual non-orthogonal rainfall infiltration. In order to study the rules of non-orthogonal rainfall infiltration on the surfaces of unsaturated sand slopes, a series of infiltration tests on unsaturated sand slopes under different rainfall intensities, slope angles and void ratios are carried out using a new and self-designed artificial rainfall device. In addition, numerical simulations under the same conditions corresponding to the laboratory tests are employed to analyze the rainfall infiltration. The variations of infiltration rates, seepage rates and water storage increments of sandy soil with respect to infiltration time are obtained, and the influences of the rainfall intensities, slope angles and void ratios on the test results are analyzed. The test results show that the overland flow does not emerge in all the tests. They are different from the orthogonal infiltration theory. Finally, the comparison between numerical simulations and test results unveils the differences in infiltration rates, seepage rates and water storage increments of sandy soil, and demonstrates that the moisture content of the soil slope, water infiltration capacity and the transformation mechanism of boundary conditions, which are calculated with the orthogonal infiltration theory, do not conform to the actual cases of non-orthogonal rainfall infiltration.

Key words: unsaturated sand; non-orthogonal infiltration; rainfall infiltration test; numerical simulation

0 引言

降雨入渗是指雨水通过地表或入渗界面进入土壤的过程。降雨入渗是自然界水循环中的一个重要环节, 土壤水分入渗特性研究涉及土壤、农业、水利、水文、气象及地质等学科^[1-5]。在复杂土坡稳定性分析中, 目前“有限元渗流分析+极限平衡分析”法^[6-11]和“渗流、变形和稳定性耦合有限元分析”是占主导地位的两种

方法, 但是这些方法在非饱和土降雨入渗问题上均缺乏符合实际的边界条件处理方法。稳定降雨下, 降雨初始阶段, 非饱和土坡入渗能力很大, 无坡面径流产生, 为降雨强度控制阶段, 目前均采用雨强在坡面法

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178309)

收稿日期: 2014-06-14

线方向的分量作为边界条件;对于砂土、粉土及黏土,采用同样的边界条件,随着土坡坡面入渗能力的降低,坡面出现径流,转为入渗能力控制阶段,边界条件目前有两种常用处理方法:①忽略坡面积水深度,坡面土孔隙水压力为 0,不随时间变化^[12];②考虑坡面径流深度,为水头边界,坡面土体为饱和状态,考虑坡面径流对入渗的影响^[13]。二维各向同性土坡面正交入渗边界条件^[14]:

雨强控制阶段,已知流量边界条件

$$K \frac{\partial \psi(x,y,t)}{\partial m} \Big|_{\Gamma_1} = q_m(x,y,t) \quad ; \quad (1)$$

入渗能力控制阶段,已知水头边界

$$\psi(x,y,t) \Big|_{\Gamma_2} = \psi_b(x,y,t) \quad . \quad (2)$$

式中 K 为渗透系数, ψ 为总水势, m 为以边界 Γ_1 的内法向为正向的单位向量, q_m 为边界的法向流量,降雨入渗时, q_m 等于承雨强度,以流入为正, ψ_b 为边界总水头。

然而,通过对实际降雨观察发现,降雨入渗远非简单的正交入渗。一方面,式(1)为非饱和土达西渗流理论具有一定的适用条件,降雨具有时间和空间上的不连续性,将降雨等效为时间和空间上都连续的雨强进行计算是否符合实际目前尚无定论;另一方面,坡面土的实际降雨入渗能力的确定缺少理论研究,常用确定入渗能力的理论是由积水入渗推导来的,计算方法仍以非饱和土达西渗流理论来计算,不适用于雨强控制阶段。雨强控制阶段入渗能力 $R(x,y,t)$ 等于入渗率 $i(t)$,随着降雨时间的延长, $R(x,y,t)$ 变小,边界条件由 Γ_1 转化为 Γ_2 ,此时坡面土体对应体积含水率为 θ_1 , $R(x,y,t)$ 最后趋近于定值 $k(\theta_2)$,此时体积含水率为 θ_2 。 θ_1 , θ_2 值的确定目前尚无准确的理论方法,通常是取 θ_2 等于饱和含水率 θ_s ,以坡面土体含水率饱和作为边界条件 Γ_1 与 Γ_2 的转化条件。这显然具有理论缺陷,因此有必要建立更符合实际的降雨非正交边界的确定方法。

为研究实际降雨入渗的非正交入渗现象和规律,探讨试验结果与基于传统渗流理论所得结果的差异性,本文分别进行了非饱和砂土室内降雨模型试验研究和降雨正交入渗数值模拟,通过对两者所得结果进行对比分析,表明在传统正交方法处理的渗流计算边界条件下所得的计算结果并不符合实际。

1 室内试验研究

1.1 试验装置

根据试验要求,研制了降雨入渗试验装置,如图 1 所示,土样室尺寸为 230 mm(长)×130 mm(宽)

×100 mm(高),角度调节范围为 $\alpha=0^\circ \sim 45^\circ$ 。该装置可以测量降雨过程中,土体的坡面径流量、侧面渗流量及底面渗流量。

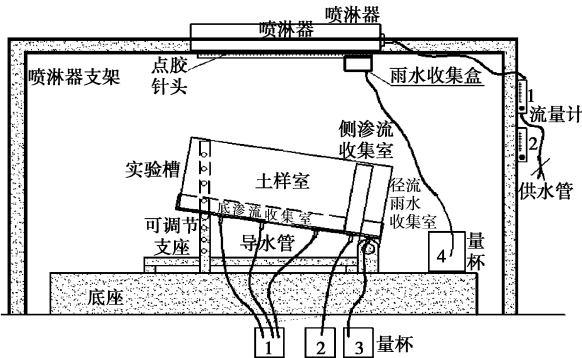


图 1 降雨入渗试验装置

Fig. 1 Artificial rainfall infiltration test device

1.2 试验方案设计

试验用砂土的土粒相对密度 d_s 为 2.67,孔隙比 e 控制 0.58, 0.64 及 0.73,砂土初始质量含水率 w 控制为 1.6%,砂土饱和渗透系数 k_s 分别为 2.28×10^{-5} m/s, 4.64×10^{-5} m/s 及 7.59×10^{-5} m/s,根据试验实际观测结果,所有降雨持时定为 1 h 能满足试验要求,试验方案见表 1,试验详细步骤见文献[15]。

表 1 试验方案

Table 1 Test schemes

试验组别	流量 $q/(mL \cdot min^{-1})$	孔隙比 e	坡角 $\alpha/(^\circ)$	实测降雨强度 $i_0/(10^{-5}m \cdot s^{-1})$	承雨强度 $i/(10^{-5}m \cdot s^{-1})$
q_{60}	60	0.58	0	2.81	2.81
q_{60}	60	0.58	15	3.01	2.91
q_{60}	60	0.58	30	3.28	2.84
q_{20}	20	0.58	30	1.37	1.34
q_{100}	100	0.58	30	5.67	4.90
q_{60}	60	0.64	0	2.79	2.79
q_{60}	60	0.64	30	3.31	2.87
q_{60}	60	0.73	0	3.01	3.01
q_{60}	60	0.73	30	3.29	2.85

注: i_0 为水平面上的降雨强度, i 为垂直于坡面的等效雨强即承雨强度, $i=i_0 \cos \alpha$ 。

1.3 试验结果

(1) 不同降雨强度试验结果

当孔隙比 $e=0.58$,坡角 $\alpha=30^\circ$ 时,试验结果显示,小降雨强度下湿润锋向下推移过程缓慢,流量控制为 20 mL/min 的降雨试验 q_{20} ,持续 30 min 后模型底面初有水渗出。随着控制流量的增大,试验过程中湿润锋的推移过程明显加快。流量计流量控制为 60 mL/min,试验 q_{60} 持续 13 min 后,模型底面开始渗水,

渗水前砂土含水率不均匀性明显; 控制流量为 100 mL/min, 试验 q_{100} 进行 8 min 模型底面开始渗水。

图 2 表明, 试验模型底面出渗速率及同一时刻的累积渗流量均随降雨强度的增大而增大, 从试验开始至底面初渗水的时间差随降雨强度的增大而逐渐减小; 对于同一试验, 水分出渗初始时段内, 出渗速率随时间的延续而逐渐增大, 后趋于稳定, 降雨强度越大, 出渗速率到达稳定状态所需时间越短, 稳定状态的速率越大, 侧面出渗规律与底面出渗相近。

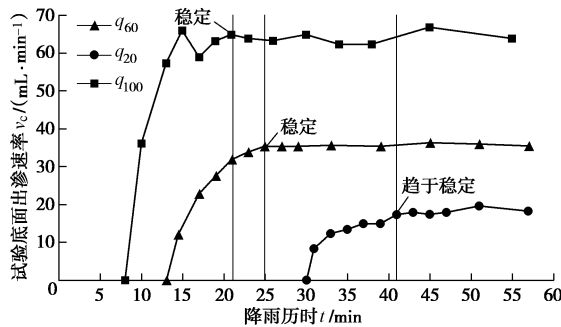


图 2 底面出渗速率随时间的变化 ($e=0.58$, $\alpha=30^\circ$)

Fig. 2 Variations of seepage rate of undersurface with time

在整个试验历程中, 降雨强度保持为常量, 由于整个试验无坡面径流产生, 因此砂土坡面降雨入渗速率保持恒定状态, 由雨强控制。图 3 给出了入渗量与总出渗量差值即砂土储水增量 ΔQ 随时间的变化关系, 出渗点之前, 差值斜率为单位时间入渗量, 此时等于坡面单位时间降雨量, 试验初渗水时, 3 组试验 ΔQ 值基本一样, 表明孔隙比和坡角一定, 降雨强度对初渗水时试验砂土储水增量的影响很小; 出渗点之后, 渐趋于稳定, 为常值, q_{20} 最小, q_{100} 最大, 表明其他条件一定, 砂土的稳定状态储水量随雨强的增大有增大的趋势。

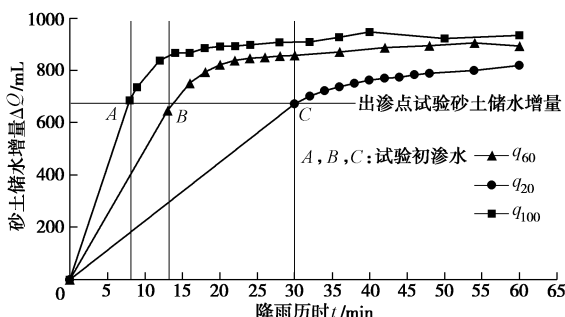


图 3 砂土储水增量随时间的变化 ($e=0.58$, $\alpha=30^\circ$)

Fig. 3 Variations of sandy soil water storage increment with time

(2) 不同孔隙比试验结果

降雨强度是降雨入渗的外部影响因素, 而孔隙比作为土体本身的特性, 直接影响了砂土的渗透特性, 孔隙比越大, 坡面入渗能力越强。如图 4, 5 所示, $e=0.58$, $e=0.64$ 及 $e=0.73$ 的试验底面初渗时间分别为 13, 14, 13 min, 侧面初渗时间分别为 13, 16, 17 min。

表明随着孔隙比增大, 模型底面出渗时间差异不明显, 侧面出渗时间随孔隙比的增大而延后, $e=0.58$ 的试验侧面出渗速率-时间关系曲线在稳定点前出现小的峰值段。

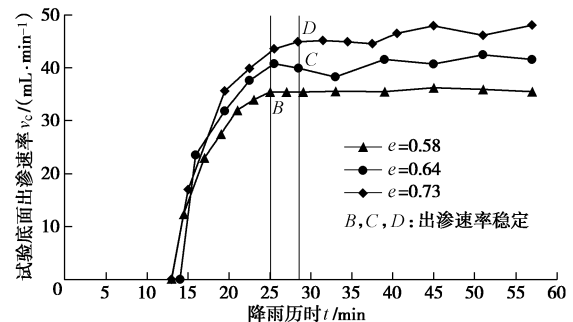


图 4 底面出渗速率随时间的变化 ($q=60$ mL/min, $\alpha=30^\circ$)

Fig. 4 Variations of seepage rate of undersurface with time

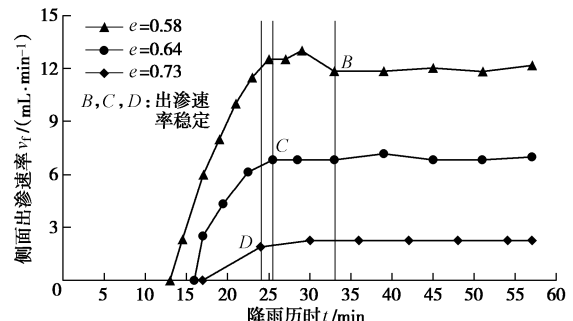


图 5 侧面出渗速率随时间的变化 ($q=60$ mL/min, $\alpha=30^\circ$)

Fig. 5 Variations of seepage rate of side face with time

砂土坡角与降雨强度一定时, 不同孔隙比的控制对砂土降雨入渗有较大影响: ①图 4, 5 显示, 随砂土孔隙比增大, 同一时刻, 侧面渗流总量与渗流速率均降低, 模型底面水分出渗速率增大, 显然孔隙比对侧面和底面的渗流影响较大; ②试验底面或侧面初渗水时, 如图 6 中的 A, B 点, 3 组试验砂土储水增量差异很小, 表明初渗水时, 砂土的储水量随孔隙比的变化并不大; ③如图 6 所示, 3 组试验结束, 趋于稳定渗流状态, 砂土储水增量差异较小。砂土总出渗水量接近, 但侧面和底面的出渗速率差异明显, 表明孔隙比对砂土土体内的渗流路径影响明显, 但对砂土储水能力影响较小。

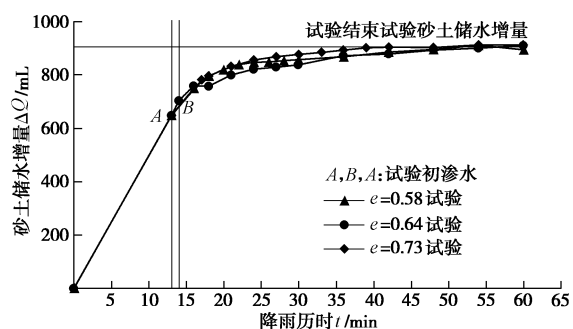


图 6 砂土储水增量随时间的变化 ($q=60$ mL/min, $\alpha=30^\circ$)

Fig. 6 Variations of sandy soil water storage increment with time

(3) 不同坡角试验结果

坡角决定了坡面实际的降雨接受量,对降雨入渗同样起着决定性作用, $e=0.58$, $q=60 \text{ mL/min}$ 条件下,坡角 α 分别为 0° , 15° 及 30° 的试验底面出渗速率结果如图7所示。相同孔隙比与近似等强降雨下随着坡角的逐渐增大,从试验开始至初渗水时刻间隔 Δt 呈先增长后变短的规律,同时,达到稳定状态所需时间越短;随着土坡坡角减小,模型底面出渗水量差异变小, $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=15^\circ$ 试验的稳定状态底面出渗速率十分接近;对于 $\alpha=0^\circ$ 的试验,在底面出渗速率达到稳定之前出现幅度较大的峰值段, $\alpha=15^\circ$ 和 $\alpha=30^\circ$ 试验没有峰值出现,渐趋于平稳,达到稳定状态。

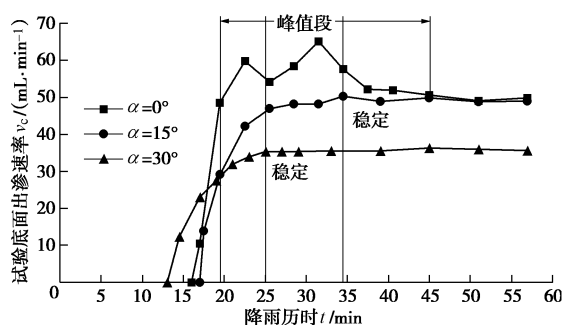


图7 底面出渗速率随时间的变化 ($e=0.58$, $q=60 \text{ mL/min}$)

Fig. 7 Variations of seepage rate of undersurface with time

图8表明, $\alpha=0^\circ$ 试验的砂土储水增量-时间曲线在初渗水阶段出现峰值, $\alpha=15^\circ$ 和 $\alpha=30^\circ$ 试验没有峰值出现,曲线渐于平缓,当试验结束, $\alpha=0^\circ$ 试验处于稳定状态,此时砂土中所储水量低于初出渗水时的水量,如图8中A,B所示。最终稳定阶段砂土所储水量 $\Delta Q|_{\alpha=0^\circ} < \Delta Q|_{\alpha=15^\circ} < \Delta Q|_{\alpha=20^\circ}$,表明在孔隙比与近似等强降雨下,随着坡角的逐渐增大,试验砂土储水增量呈现先增大后变小的趋势。同时,试验结果显示 $\alpha=0^\circ$ 整个试验过程中,侧面没有出现渗水, $\alpha=15^\circ$ 试验侧面渗水较少,出渗时间延后于 $\alpha=30^\circ$ 试验,也更快趋于稳定状态,表明随坡角的增大侧面渗流速率和渗流累积总量均增大,变化明显。

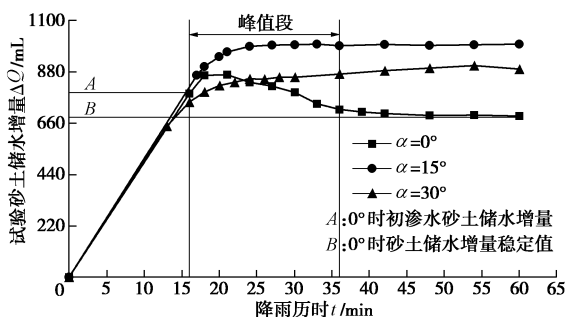


图8 砂土储水增量随时间的变化 ($e=0.58$, $q=60 \text{ mL/min}$)

Fig. 8 Variations of sandy soil water storage increment with time

综上所述,通过 α , e 及 i 变化的试验研究,得到了非饱和砂土坡面降雨入渗的规律,对于试验设计的各种降雨强度,均无坡面径流出现,与正交理论不符,表明正交边界存在缺陷,需要深入的进行探讨。

2 数值模拟分析

2.1 数值模拟分析模型

由前文试验结果可知,非饱和砂土坡面非正交降雨入渗的规律性与传统的正交入渗理论具有一定的差异,为了深入的研究坡面正交入渗理论与实际入渗的差异性,本文对降雨试验进行数值模拟,采用了商业软件(GEOSLOPE-SEEP/W)针对室内模型试验进行相应的降雨入渗数值分析。如图9所示为坡角 30° 的分析模型,模型尺寸与实际试验装置模型一致,侧面1与底面2边界条件设定为透水边界,边界3定义流量为 i ,其余边界为不透水边界。

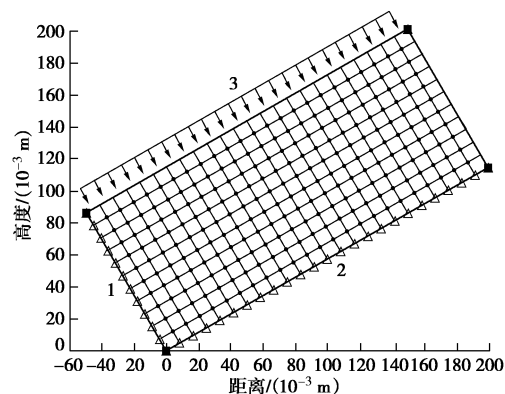


图9 坡角为 30° 分析模型

Fig. 9 Analysis model for slope of 30°

2.2 数值分析土水特征曲线 (SWCC)

试验采用 SWC-150 Fredlund 土水特征曲线压力仪对试验砂土进行土水特征曲线测量。试验砂土孔隙比分别为 0.58, 0.64 和 0.73, 测量土水特征曲线控制基质吸力范围为 0~100 kPa, 对每个孔隙比分别进行两组土水特征曲线测量试验, 具体试验操作见文献[16], 并采用 Fredlund 和 Xing 四参数方程进行拟合^[17]:

$$\theta_w = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \cdot \frac{\theta_s}{\left\{ \ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b \right] \right\}^c}, \quad (3)$$

式中, θ_w 为土的体积含水率, ψ_r 为与残余含水率相对应的吸力值(kPa), ψ 为基质吸力(kPa), θ_s 为饱和和体积含水率, a 为与进气值有关的系数(kPa), b 为基质吸力大于进气值范围内土体脱水速率有关的土参数, c 为与残余含水率有关的参数, e 为自然对数。所得拟合结果见表2,用饱和度表达的土水特征曲线

如图 10 所示。

表 2 砂土 SWCC 方程拟合参数

Table 2 Fitting parameters for SWCC of sandy soil					
孔隙比 e	拟合参数				拟合相关系数 R^2
	a/kPa	b	c	ψ_r/kPa	
0.58	3.69742	5.15481	0.66189	391	0.98535
0.64	3.17903	3.25464	0.91765	259	0.97947
0.73	3.15510	2.63899	1.17992	164	0.97603

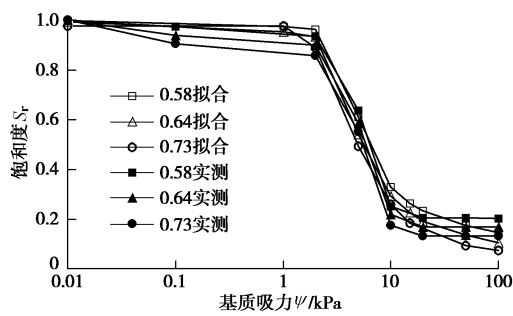


图 10 试验砂土土水特征曲线

Fig. 10 Soil and water characteristic curves of sandy soil

2.3 试验结果与数值模拟结果对比

根据室内试验结果和数值模拟结果，本文将从入渗率、砂土储水增量及侧面渗流 3 个方面对试验与数值模拟结果的差异性进行探讨。

(1) 入渗率

数值模拟分析方法采用了传统正交入渗边界进行降雨入渗计算。当 $e=0.58$ ， $\alpha=30^\circ$ 时， q_{60} 和 q_{100} 试验降雨强度均大于砂土饱和渗透系数 k_s ， q_{20} 试验小于 k_s ，试验与模拟结果如图 11 所示。 q_{60} 和 q_{100} 数值模拟所得入渗率可分为两个区段：降雨强度控制阶段与入渗能力控制阶段。降雨初期，上层润湿砂土与下部干燥砂土间始终保持高含水率梯度状态，入渗率 $i(t)$ 很高，降雨全部入渗，为降雨强度控制阶段， q_{20} ， q_{60} 和 q_{100} 试验入渗速率均等于承雨强度，为降雨强度控制；随着水分不断入渗，湿润锋不断向前推移，一定时间后坡面砂土趋于饱和，入渗率 $i(t)$ 达到稳定状态，进入入渗能力控制阶段，土体接近饱和状态，入渗能力控制阶段 $i(t)$ 数值上接近于 $k_s \cos \alpha$ ，如图 11 中 q_{60} 和 q_{100} 模拟结果，而降雨强度 i 数值上大于 k_s ，超过砂土坡面入渗能力部分的降雨转化为地表径流。降雨前期阶段，数值模拟结果与试验结果相接近，后期实际降雨入渗试验中，3 组试验均没有出现径流，一直处于降雨强度控制段内，与数值模拟表现出显著不同，差异十分显著。

孔隙比与坡角相同下，雨强越大，试验与数值模拟累积入渗量差异越明显。 q_{20} ， q_{60} 和 q_{100} 降雨入渗累积入渗量随时间变化曲线如图 12 所示，显然对于 q_{60}

和 q_{100} ，试验与数值模拟差距明显，模拟结果表明，雨强越大，出现入渗能力控制阶段的时刻越早，试验降雨入渗量大于模拟入渗量。由于 q_{20} 试验与数值模拟在整个降雨历程中均无径流，整个入渗过程均为雨强控制，累计入渗量相同，无径流出现。

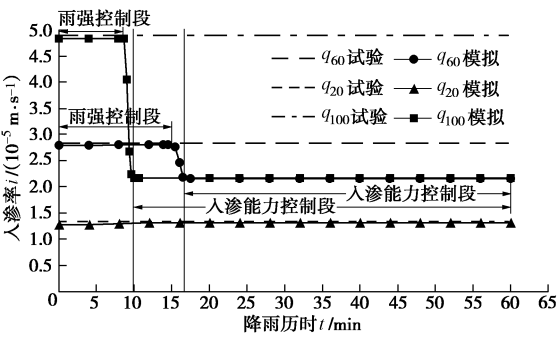


图 11 砂土坡面入渗率随时间的变化 ($e=0.58$ ， $\alpha=30^\circ$)

Fig. 11 Variations of infiltration rate of the sand slope with time

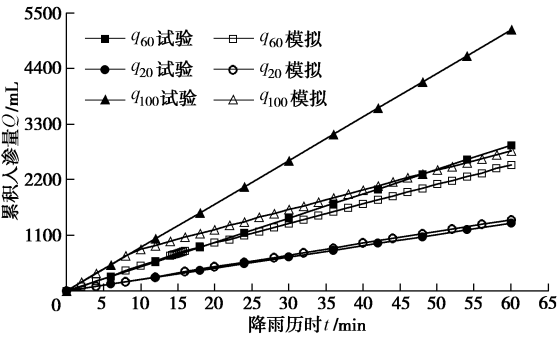


图 12 累积入渗量随时间的变化 ($e=0.58$ ， $\alpha=30^\circ$)

Fig. 12 Variations of cumulative infiltration with time

(2) 砂土储水增量

入渗率反映了砂土坡面的透水性能，而砂土储水增量则反映了砂土土体的储水能力，由入渗总量与渗出总量的差值计算得到。 $e=0.58$ ， $\alpha=30^\circ$ 的 q_{20} ， q_{60} 和 q_{100} 试验和模拟所得砂土储水增量随时间变化关系如图 13 所示，孔隙比和坡角一定的前提下，在降雨入渗砂土储水增量稳定之前，数值模拟与试验结果差异较小，这是因为在雨强控制阶段，试验和模拟进入坡面的水量相同；在数值模拟中底面或侧面初有水出渗时， q_{20} ， q_{60} 和 q_{100} 砂土储水增量差异较小，但随降雨强度增大而减小，如 E_1 ， D_1 和 C_1 数值变化，降雨试验中，差异较小，如图中 E ， D 和 C 所示；数值模拟中，砂土储水增量稳定段数值为常值，不随降雨强度发生变化，实际降雨试验中降雨强度越大，储水量越大。稳定阶段，由于降雨全部进入坡面，雨强较小的 q_{20} 试验与数值模拟结果相近， q_{60} 和 q_{100} 数值模拟与试验差异明显，显然降雨强度对最终稳定阶段的砂土储水增量有一定影响，并不是常值，反之，在砂土初出渗水时，降雨强度对砂土储水增量影响较小，试验

结果显示为常值,与数值模拟有一定的差距。

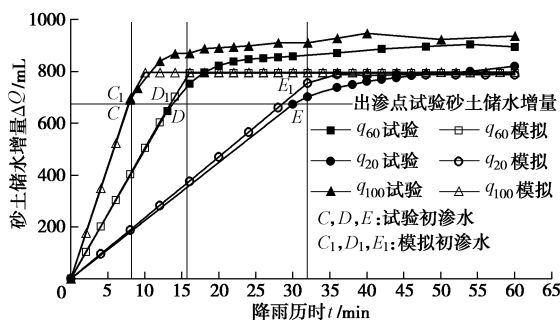


图 13 砂土储水增量随时间的变化 ($e=0.58$, $\alpha=30^\circ$)

Fig. 13 Variations of water storage increment of sandy soil with time ($e=0.58$, $\alpha=30^\circ$)

在 $\alpha=0^\circ$ 、 $q=60$ mL/min 下, $e=0.58$ 试验的降雨强度大于饱和渗透系数, $e=0.64$ 和 $e=0.73$ 的试验均小于砂土饱和渗透系数。如图 14 所示, $e=0.58$ 、 $e=0.64$ 及 $e=0.73$ 试验砂土储水增量随时间变化关系曲线呈现峰值段, 后趋于稳定, 并且孔隙比越小, 峰值段越明显; 但是在数值模拟中, 3 组模拟均从降雨开始逐渐增大, 后趋于稳定为常值, 都没有出现峰值, 降雨结束时, 试验砂土储水增量均小于相对应的数值模拟结果, 差异明显。显然, 在降雨结束时, 数值模拟分析所计算的砂土含水率偏大。

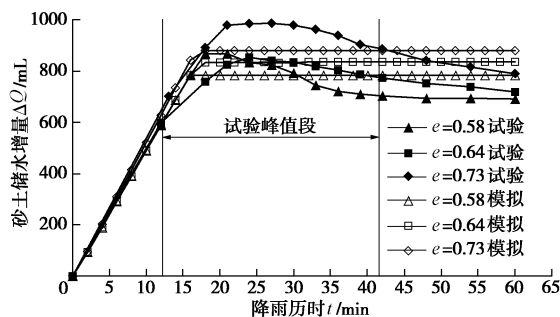


图 14 砂土储水增量随时间的变化 ($\alpha=0^\circ$, $q=60$ mL/min)

Fig. 14 Variations of water storage increment of sandy soil with time ($\alpha=0^\circ$, $q=60$ mL/min)

图 15 给出了 $e=0.58$ 、 $e=0.64$ 及 $e=0.73$ 的试验与模拟结果对比, 坡角、承雨强度均相同, 孔隙比不同, 降雨强度大于 $e=0.58$ 砂土饱和渗透系数, 小于 $e=0.64$ 、 $e=0.73$ 饱和渗透系数, 在底面或侧面初渗水前, 3 组试验结果与模拟符合度较好, 基本一致, 3 组试验初渗水时间相近, 同时三组模拟初渗水时间也相近, 模拟较试验延后, 但试验与模拟差异很小; 当底面或侧面初渗水后, 砂土储水增量随时间增长渐缓, 最后都趋于稳定; 3 组试验的最后稳定砂土储水增量结果十分接近, 表明孔隙比对其影响较小, 反之, 3 组模拟结果有一定差异性, 随孔隙比增大而增大。

(3) 侧面渗流结果对比

坡角与承雨强度相同时, 随孔隙比的变化, 数值模拟与试验侧面出渗速率的变化具有相反的规律。 $\alpha=0^\circ$ 、 $q=60$ mL/min 时, $e=0.58$ 、 $e=0.64$ 及 $e=0.73$ 侧面出渗速率随时间变化关系如图 16 所示, 从降雨开始至侧面初渗水时间, $e=0.58$ 、 $e=0.64$ 、 $e=0.73$ 依次增大, 但差距较小, 考虑到试验误差, 差距不明显, 模拟结果表明初渗水时刻十分接近, 与试验结果差异较小; 试验结果表明孔隙比越大, 同一时刻出渗速率越小, 但模拟结果却有相反的规律性, 孔隙比越大, 同一时刻出渗速率越大, 与试验结果差值越大; 另外, 关于侧面出渗速率趋于稳定的时刻, 试验结果与模拟结果对比差异明显, 随孔隙比增大, 试验出渗速率趋于稳定的时刻如图 16 中 a 、 b 和 c 点的变化趋势, 同时, 数值模拟结果为 a_1 、 b_1 和 c_1 , 表明试验中, 孔隙比增大, 越早趋于稳定, 而数值模拟呈相反的规律。

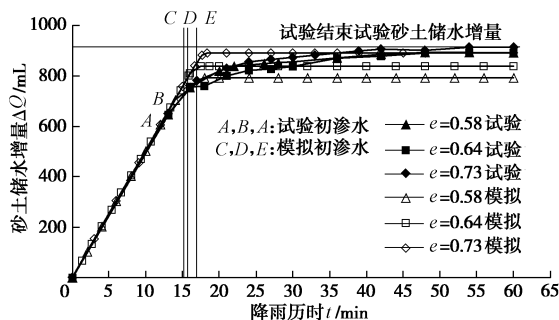


图 15 砂土储水增量随时间的变化 ($q=60$ mL/min, $\alpha=30^\circ$)

Fig. 15 Variations of water storage increment of sandy soil with time ($q=60$ mL/min, $\alpha=30^\circ$)

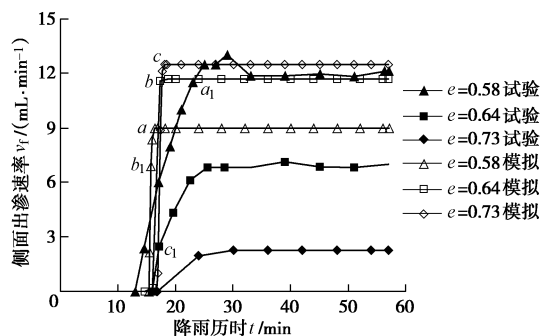


图 16 侧面出渗速率随时间的变化 ($q=60$ mL/min, $\alpha=30^\circ$)

Fig. 16 Variations of seepage rate of side face with time ($q=60$ mL/min, $\alpha=30^\circ$)

(4) 讨论

由前文所得的试验与数值模拟结果对比, 可以得到入渗率、砂土储水增量及侧面出渗速率的差异明显。入渗率最大的差别在入渗能力控制阶段, 从而证明已有的降雨入渗理论中, 非饱和砂土坡面入渗边界条件的处理是与实际存在一定差距的。

模拟结果中, 雨强为 3.28×10^{-5} m/s 就出现径流,

此时入渗率与 $k_s \cdot \cos \alpha$ 相近, 而试验结果, 雨强为 $3.28 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ 、 $5.67 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ 均未出现径流, 入渗率与 $k_s \cos \alpha$ 差距较大, 引起该差异性的原因分析如下:

a) 式(1)采用的非饱和土的达西渗流定律在非饱和砂土坡面降雨边界上是否适用, 仍值得探讨; 而理论计算中采用了时间和空间上都连续的降雨强度, 符合式(1)的适用条件, 从而导致了试验与模拟的差异性。

b) 非饱和土坡降雨入渗过程中, 不同的研究者对坡面暂态饱和区的存在具有不同的认识^[18]。图 17 为 $e=0.58$ 、 $\alpha=30^\circ$ 时, q_{20} 、 q_{60} 和 q_{100} 的坡面中点土体数值模拟孔隙水压力随时间的变化关系。图中 A、B 点孔隙水压力达到 $\phi_0=0 \text{ kPa}$, 土体达到饱和状态, C 点孔隙水压力 $\phi_0 < 0 \text{ kPa}$ 为非饱和状态, 孔隙水压力随降雨时间的延长, 达到稳定, 因此入渗率也不再变化。试验结束, 实测质量含水率 q_{20} 、 q_{60} 和 q_{100} 分别为 11.83%、14.87%、17.40%, 饱和质量含水率 $w=17.85\%$, 说明 q_{20} 和 q_{60} 处于非饱和状态, q_{100} 坡面土体虽然接近饱和, 但难以判定是否处于出现径流的临界状态。

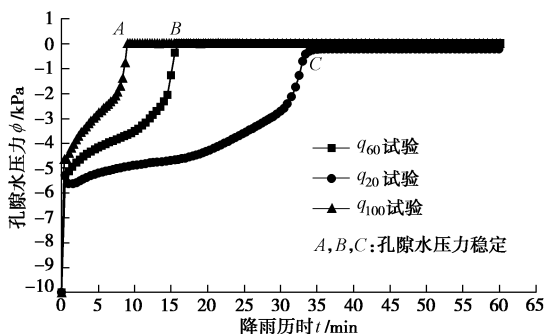


图 17 坡面土体中点孔隙水压力 ϕ_0 随时间的变化 ($e=0.58$, $\alpha=30^\circ$)

Fig. 17 Variations of pore water pressure (ϕ_0) of slope midpoint with time ($e=0.58$, $\alpha=30^\circ$)

综上所述, 采用正交入渗边界所计算的非饱和和砂土坡面土体含水率与实际存在的差异性较大; 同时以坡面土体是否饱和作为边界条件转换的判断条件具有缺陷, 根据笔者已有的试验结果表明坡面土体是否会饱和与土性、降雨强度的大小等因素有关, 不同的土体应采用相应的降雨入渗边界来描述, 符合实际的非正交降雨入渗边界仍待深入研究。

3 结 论

(1) 对非饱和砂土坡面降雨入渗的室内模型试验与数值模拟结果的差异性表明传统的考虑坡面流的正交入渗边界是不符合非饱和和砂土坡面上非正交入渗实际的。

(2) 在降雨强度大于饱和渗透系数 k_s 的降雨下, 模拟结果呈现降雨强度控制与入渗能力控制两个阶段, 但试验结果只有雨强控制阶段。

(3) 相对于孔隙比, 降雨强度和坡角对砂土在降雨历时中储水量的影响更为明显, 孔隙比影响较小; 在 0° 下, 砂土储水增量随时间变化曲线在初渗水阶段出现峰值, 与稳定段的数值差异显著。

(4) 试验结果与数值模拟结果的侧面出渗速率、砂土储水增量差异明显, 变化规律具有显著的不同。

(5) 传统正交入渗边界条件具有明显的缺陷, 故有必要研究非饱和土坡面降雨非正交入渗边界方程, 以期为非饱和土渗流分析提供更为科学合理的边界条件。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K, RALPH B Peck, Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: John Wiley and Sons, 1948.
- [2] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Physical Hydrology, 1931(1): 30 - 33.
- [3] GREEN W H, AMPT G A. Study on soil physics part I—flow of air and water through soils[J]. Agr Sci, 1911, 76(4): 1 - 24.
- [4] HORTON R E. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity[J]. Soil Sci, 1940, 5(3): 399 - 417.
- [5] PHILIP J R. The theory of infiltration: 1 The infiltration equation and its solution[J]. Soil Sci, 1957, 83(5): 345 - 358.
- [6] CASMO J M, RAHARDJO H, LEONG E C. Infiltration effects on stability of a residual soil slope[J]. Computers & Geotechnics, 2000, 26: 145 - 165.
- [7] NG C W W, SHI Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage[J]. Computers & Geotechnics, 1998, 22(1): 1 - 28.
- [8] CAI F, UGAI K, WAKAI A, et al. Effect of horizontal drains on slope stability under rainfall by three-dimensional finite element analysis[J]. Computers & Geotechnics, 1998, 23: 255 - 275.
- [9] FOURIE A B, ROWE D, BLIGHT G H. The effects of infiltration on the stability of a dry ash dump[J]. Géotechnique, 1999, 49(1): 1 - 13.
- [10] 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. (WU Meng-xi, GAO Lian-shi. Saturated-unsaturated unsteady seepage numerical analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 12: 38 - 42. (in Chinese))
- [11] WANG C H. Salient aspects in numerical analysis of rainfall

- induced slope instability[C]// Proc of the International Symposium on Slope Stability Engineering. Matsoyam, 1999: 435 - 440.
- [12] 吴礼舟, 黄润秋. 考虑地表变流量的非饱和土渗流耦合的解析分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1370 - 1375. (WU Li-zhou, HUANG Run-qiu. Analytical analysis of coupled seepage in unsaturated soils considering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1370 - 1375. (in Chinese))
- [13] 刘俊新, 刘育田, 胡启军. 非饱和地表径流 - 渗流和流固体耦合条件下降雨入渗对路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 903 - 910. (LIU Jun-xin, LIU Yu-tian, HU Qi-jun. Stability of embankment slope subjected to rainfall infiltration considering both runoff-underground seepage and fluid-solid coupling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 903 - 910. (in Chinese))
- [14] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. (LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Sen-chuan. Soil water dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese))
- [15] 张成林. 非饱和砂土坡面降雨非正交入渗的试验研究与数值分析[D]. 天津: 天津大学, 2013. (ZHANG Cheng-lin. Experimental researches and numerical analyses of non-orthogonal rainfall infiltration on the surfaces of unsaturated sand slopes[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese))
- [16] 金奎. 基于数字图像处理技术的非饱和粉土坡面降雨非正交入渗机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2013. (JIN Kui. A study of the mechanism of non-orthogonal rainfall infiltration on surfaces of silt slopes based on digital image processing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese))
- [17] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31: 521 - 532.
- [18] LI AG, YUE ZQ, THAM LG, et al. Field monitored variations of soil moisture and matric suction in sarolite slope[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42: 13 - 26.

第九届全国青年岩土力学与工程会议（一号通知）

（2016 年 10 月，重庆）

主办单位：中国土木工程学会土力学及岩土工程分会；中国力学学会岩土力学专业委员会；中国水利学会岩土力学专业委员会；中国建筑学会地基基础分会；中国振动工程学会土动力学专业委员会。

承办单位：重庆交通大学；重庆大学；招商局重庆交通科研设计院有限公司。

会议内容：征文内容涵盖岩土力学及岩土工程的各研究领域，包括但不限于以下内容：①土的本构关系及强度理论；②土工测试及仪器；③岩土工程数值模拟；④非饱和土与特殊土；⑤软土工程；⑥高边坡与危岩；⑦地下水渗流；⑧土工合成材料；⑨库岸再造与防治；⑩桩基础；⑪地基处理；⑫土石坝工程；⑬航道整治工程；⑭港口码头工程；⑮土动力学与地震工程；⑯环境岩土工程；⑰岩土工程设计与施工；⑱地下空间开发与利用；⑲岩土工程风险与管理；⑳重大岩土工程实例分析。

投稿要求：大会组委会于 2015 年 6 月 1 开始接受论文投稿。应征论文须符合上述会议内容要求且未公开发表过。每篇

论文由两位专家评审，决定是否录用。根据被录用论文的学术水平，推荐具体发表刊物。部分优秀论文在《岩土工程学报》、《地下空间与工程学报》、《重庆交通大学学报（自然科学版）》正刊发表，其它优秀论文发表在非正式出版的论文集，供会议期间交流。论文投稿格式参照《岩土工程学报》投稿要求。投稿时须向会务组提交全文电子文件（投稿邮箱附后），来稿务请注明作者的详细通讯地址、E-mail 及联系电话。

主办单位联系方式：中国土木工程学会土力学及岩土工程分会秘书处，电话：010-62797915，传真：010-62785593，邮箱：cismge@tsinghua.edu.cn，邮编：100084，地址：清华大学新水利馆 118。

承办单位联系方式：联系人：王俊杰，梁越，电话 023-62896924，13883116938，023-62459033 18983369809，传真：023-62652841，Email: nycgge2016@163.com，会议网址：nycgge2016.cqjtu.edu.cn，邮编：400074，地址：重庆市南岸区学府大道 66 号国家内河航道整治工程技术研究中心。

（中国土木工程学会土力学及岩土工程分会秘书处 供稿）