

利用瞬态剖面法测定宽级配砾石土水力参数试验研究

胡凯^{1,2}, 陈晓清¹

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所

山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土—水特征曲线和渗透函数是土体渗流分析和稳定性研究的重要参数。基于瞬态剖面法原理, 加工制作 30 cm×30 cm×30 cm(长×宽×高)正方体和 30 cm×60 cm(直径×高)的渗透柱, 针对宽级配砾石土进行时域反射法标定试验和渗透柱试验。此渗透柱装置可以同时测定不同断面基质吸力和体积含水率变化, 试验经进水饱和与排水蒸发阶段, 得到宽级配砾石土体积含水率与基质吸力的关系, 并根据瞬态剖面法得到非饱和渗透系数随基质吸力的变化关系; 同时, 采用 van Genuchten 和 Brooks-Corey 土—水特征曲线模型和渗透系数函数对其进行分析。结果表明: 该渗透柱适用于宽级配砾石土水力参数测定; van Genuchten 和 Brooks-Corey 土—水特征曲线模型都能很好地描述宽级配砾石土土—水特征曲线; Brooks-Corey 渗透系数函数在描述宽级配砾石土渗透系数与基质吸力关系要优于 van Genuchten 渗透系数函数。这种试验方法为宽级配砾石土水力参数的测定提供了参考。

关键词: 宽级配砾石土; 时域反射法; 瞬态剖面法; 土—水特征曲线; 渗透系数函数

中图分类号: TU411.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)04-0343-06

Laboratory Investigation of Hydraulic Parameter of Wide-Grading Gravelly Soil by Using Instantaneous Profile Method

HU Kai^{1,2}, CHEN Xiaoqing¹

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The soil-water characteristic curve and permeability function are important parameters for soil seepage and stability analysis. In order to investigate the hydraulic parameters of wide-grading gravelly soil, a 30 cm×30 cm×30 cm (length ×width ×height) cube and 30 cm×60 cm (diameter ×height) infiltration column was fabricated for the calibration test and infiltration column test of wide-grading gravelly soil. The infiltration column apparatus allows the measurement of both volumetric water content and matric suction at various levels. The infiltration column test was divided into three stages: saturation, drainage, and evaporation. And consequently, the relationship between volumetric water content and matric suction of wide-grading gravelly soil was obtained. Meanwhile, the instantaneous profile method was generally applied to determine the relationship between unsaturated permeability and matric suction. Moreover, the van Genuchten and Brooks-Corey equations and permeability functions were used to fit the test results. The infiltration column apparatus had been proved to be suitable for the determination of soil-water characteristics curves of wide-grading gravelly soil. The van Genuchten and Brooks-Corey model can accurately describe the soil-water characteristics curves. The Brooks-Corey permeability coefficient function was superior to the van Genuchten permeability coefficient function in terms of describing the relationship between the permeability coefficient and matric suction of wide-grading gravelly soil. This research will provide the method for measuring hydraulic parameters of wide-grading gravelly soil.

Keywords: wide-grading gravelly soil; time domain reflectometry; instantaneous profile method; soil-water characteristics curve; permeability coefficient function

自然界土体大多处于非饱和状态,水力参数(土—水特征曲线和渗透函数)是土体非饱和和渗流分析的基础,也是土体稳定性研究的重要参数^[1-3]。目前,渗流理论的研究还欠成熟,水力参数获得的最直接的方法就是直接量测。现有的水力参数测试方法很多,方法较为复杂、试验周期长、对环境要求较高,且国内暂时没有专门针对水力参数测定的试验规程。

“宽级配砾石土”作为泥石流源区广泛分布的一种特殊土体,颗粒组成级配非常宽,有粒径数米的巨石,也有粒径小于 0.005 mm 的黏粒,其中粒径 > 2 mm 的颗粒质量占整体重量的 50% 以上,黏粒约占 3%~20%^[4-5]。众多学者针对宽级配砾石土的渗透^[6-7]、强度^[8-9]等岩土参数进行了详细的研究。近年来,随着非饱和土力学的发展,逐渐形成了一套以降雨入渗→含水率变化→基质吸力改变→抗剪强度降低→土体失稳起动的泥石流评价理论^[10]。水力参数是计算降雨入渗土体稳定性的基础材料参数,但由于试验条件的限制,对于以粗颗粒为主的宽级配砾石土的水力参数的试验研究鲜有报告,因此有必要通过试验方法获得较为准确的宽级配砾石土水力参数。

现有测定土体水力参数的试验方法主要有稳态法和瞬态剖面法。瞬态剖面法以其可以直接监测体积含水率和基质吸力变化和无需严格控制水流量等优点而被广泛应用于相关研究中。现有的研究中,瞬态剖面法所使用的渗透柱的直径较小,主要用于细颗粒的研究^[11]。一些学者在试验中即使使用了大直径渗透柱^[12-15],也很少应用于粗颗粒土的研究中。Duong^[16],陈仁朋^[17]等加工制作了直径 30 cm,高度 60 cm 的圆柱体试验装置,用于研究最大粒径为 5 cm 的有砟轨道路基粗粒土填料土—水特征曲线和非饱和渗透系数。

本文利用自制的渗透柱装置,测定宽级配砾石土的土—水特征曲线;并采用瞬态剖面法原理,利用测定的体积含水率剖面 and 由土—水特征曲线计算的体积含水率剖面求得其非饱和渗透系数与基质吸力的关系。

1 瞬态剖面法试验原理及试验装置

1.1 试验原理

瞬态剖面法是一种适用于室内或现场确定渗透系数函数的瞬态测量技术。该方法是指,在进行瞬态渗流试验时,沿着土柱安装一系列含水量和吸力的测量点,定期地对这些点进行测量,从而可得整个土柱的含水量和吸力分布。

测定与时间相关的含水量分布的变化,可以确定在一段时间内,由土柱中某一点流动到另一点的水的体积 V_w :

$$V_w = \int_a^z \theta_w(z) A dz \quad (1)$$

式中: θ_w 为某一特定时间体积含水率与深度的函数关系,采用分段线性拟合得到; A 为流量横断面; a 为距离零流量面的距离; z 为高度变量。

通过测量与时间相关的吸力剖面,可确定驱动流动过程的水力梯度:

$$i_w = \frac{dh}{dz} \quad (2)$$

式中: i_w 为某一特定时刻试样某点的水力梯度; h 为总水头。

根据达西定律,非饱和土渗透系数 k_w 可由下式得到:

$$k_w = -\frac{dV_w}{i_w A dt} \quad (3)$$

1.2 试验装置

1.2.1 渗透柱装置 渗透柱测试装置如图 1 所示。该装置由渗透柱、TDR、张力计等部分组成,能够同时量测同一断面含水率和基质吸力。渗透柱底部一个进水口,用于进水和排水;顶部设置一个出水口,用以排气排水和稳定水头作用。渗透柱由内径为 30 cm、高度为 85 cm 的圆柱形有机玻璃制作而成,渗透柱中土样实际高度为 60 cm,土样底部和上层各铺设一层 5 cm 的鹅卵石层,防止渗透试验过程中细颗粒的运移堵塞出水口。轴向沿土层不同高度($h=10, 20, 30, 40, 50$ cm)布置 5 个 TDR 探针和 5 个张力计,侧面布置 3 个玻璃测压管($h=10, 30, 50$ cm),用于饱和和渗透系数测量。

试验所用张力计为多孔陶土头微型张力计,用于土体基质吸力的测量,由美国 Soilmoisture Equipment Corporation 公司生产,型号为 2100F。张力计读数直接由真空表读数,有效基质吸力范围为 0~85 kPa。含水率也由美国 SEC 公司生产的 TDR 探针测量,使用前应对探针进行校准。

1.2.2 TDR 标定试验装置 TDR 测定土体含水率前,应对其进行标定。宽级配砾石土 TDR 标定试验试样的尺寸为 30 cm×30 cm×30 cm(长×宽×高),试验装置由 6 mm 厚钢板焊接而成,保证足够的刚度,防止压实土体中因变形而影响试验结果(图 2)。

2 试验概况

2.1 试验材料

试验所用土料取自云南省东川区蒋家沟,根据土工试验规程^[18]规定:渗透柱直径(30 cm)与试验土样最大粒径的径径比应大于或等于 5。本试验使用土样最大颗粒粒径为 5 cm,符合径径比要求,其颗粒级配曲线如图 3 所示。从级配曲线可以看出,该土样颗

粒组成不均匀,相邻粒径的百分含量差别较大,且土样内部的粗颗粒含量较高。经计算得到其不均匀系

数 $C_u=53.6$, 曲率系数 $C_c=2.462$, $C_u>5$ 且 $1<C_c<3$, 表明试验土料级配良好。

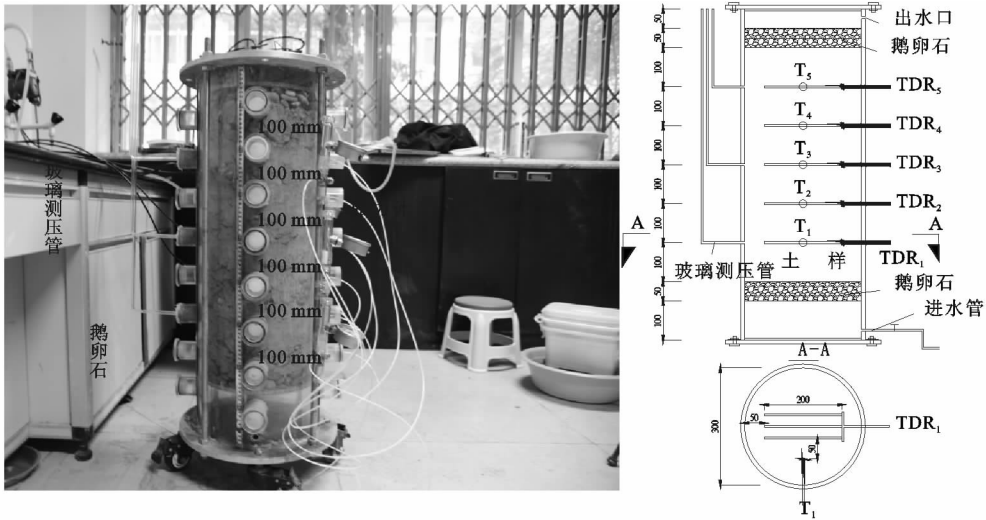


图 1 渗透柱测试装置

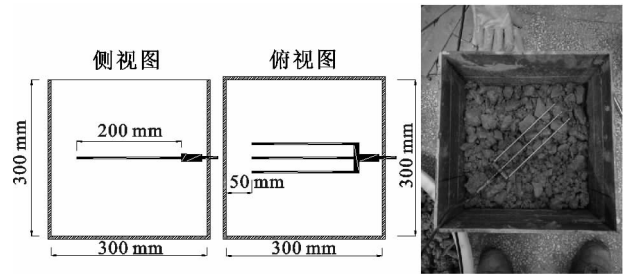


图 2 标定试验装置

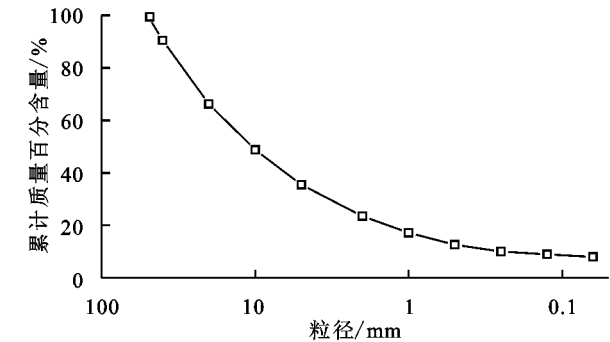


图 3 宽级配砾石土级配曲线

2.2 试验步骤

2.2.1 渗透柱试验 本试验宽级配砾石土的目标质量含水率和干密度分别为 3.0% 和 1.80 g/cm³。将土样自然风干,剔除杂物,并测量含水率;根据含水率和目标含水率,计算所需水的质量和土料质量,并将其混合均匀,密封 24 h 使水分分布均匀。渗透柱土样分 6 层填筑,每层高度为 10 cm,计算每层所需土料的重量来控制土样的干密度。当土样击实到目标高度后,将张力计和 TDR 探头铺设于土层表面,摆放位置见图 1。Duong 等^[16]指出,为避免 TDR 影响张力计的测量结果,二者间的距离应大于 4 cm,本试验陶土头距离 TDR 外侧探针为 5 cm,符合该试验要求。

试样装填完毕盖上顶盖,将其静置 24 h 后打开底部进水阀门,开始饱和试样,当顶部出水口出现水流,持续注水 24 h 后认为试样达到饱和,随后在常水头条件下测定试样的饱和渗透系数,进水饱和阶段结束,关闭底部进水阀,当各层土样 TDR 读数趋于稳定,开始排水蒸发阶段。打开底部阀门,直到水分全部排净,待 TDR 示数稳定,记录各层土体 TDR 与张力计的示数;然后关闭底部阀门,打开顶盖,让试样在室温下蒸发。蒸发过程中测试各层土体含水率与基质吸力的变化,尤其是 $h=50$ cm 处,避免其读数超过张力计量程(85 kPa),蒸发持续时间约为 190 h。

2.2.2 TDR 标定试验 计算所需的土料和水的重量,将土料与水经充分拌合、密封闷料 24 h。将试样分 3 层填装,每层高度为 10 cm,压实以预估的击实后土样的高度为控制。当压实到试样中间,水平放入 TDR 传感器。试样制备完成后,对土样进行测试,每个土样测试 3 次并取平均值作为 TDR 测试结果。测试完成后,在 TDR 传感器影响范围内取土,采用烘干法测定其质量含水量。由于土-水特征曲线中使用的为体积含水率,二者的转换关系为:

$$\theta_w = \frac{\rho}{\rho_w} \cdot \frac{w}{1+w} = \frac{\rho_d w}{\rho_w} \tag{4}$$

式中: θ_w 为体积含水率(%); w 为质量含水率(%); ρ 为湿密度(g/cm³); ρ_d 为干密度(g/cm³); ρ_w 为水的密度(g/cm³)。

3 试验结果

3.1 TDR 标定试验

宽级配砾石土体积含水率与介电常数关系如图 4 所示,参照最为常见的 Topp 等^[19]三次多项式标定

函数,同时由于纯水的介电常数为 80,故使标定函数过定点(80,100),得到宽级配砾石土的标定函数:

$$\theta_w = 5.602 \times 10^{-2} + 1.081 \times 10^{-2} K_a - 2.638 \times 10^{-4} K_a^2 + 3.452 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (5)$$

式中: K_a 为介电常数,由 TDR 传感器测得,其拟合程度 $R^2=0.841$ 。

相对于 Topp 等^[19]的标定函数,宽级配砾石土标定函数的坡度更缓,二者存在一个临界介电常数值,当介电常数小于该临界介电常数时,Topp 等^[19]得到的体积含水率小于宽级配砾石土标定函数所得的体积含水率;而当介电常数大于该交点介电常数时,Topp 等^[19]得到的体积含水率大于宽级配砾石土标定函数所得的体积含水率。主要原因是 Topp 等^[19]标定函数是基于低密度的农业土壤得到的,相对于本试验所用宽级配砾石土,该土壤具有较大的孔隙度,所以当含水率较低时,土体中气体含量较高,土的三项介质中,水、土颗粒和空气的介电常数分别为 80, 2~7,1,所以造成 Topp 等^[19]标定函数低估土体的含水率;而随着含水率的增大,低密度的农业土壤中水占比例增加,导致 Topp 等^[19]标定函数得到的土体含水率高于宽级配砾石土标定函数所得含水率。

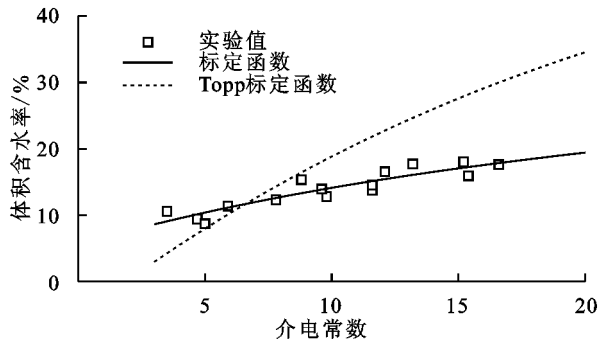


图 4 TDR 标定试验结果

3.2 渗透柱试验

体积含水率和基质吸力随时间的变化关系如图 5—6 所示。初始阶段,体积含水率和基质吸力处于稳定状态,由于装样和分层击实过程中,各层土体的土颗粒组成和干密度都存在一定的微小差别,导致各层的初始含水率和基质吸力存在微小的差别;进水饱和阶段,体积含水率迅速增大,基质吸力迅速减小,约 1 h 后土体顶部出现水流,持续注水 24 h,土体体积含水率达到最大值,基质吸力降为 0,土体达到饱和状态,此时 TDR_1 — TDR_5 的数值分别为 18.99%,18.62%,20.67%,21.66%,21.37%;蒸发阶段中, $h=30,40,50$ cm 土层的基质吸力迅速升高,含水率逐渐减小,而底部两层土体的基质吸力和含水率变化较小。

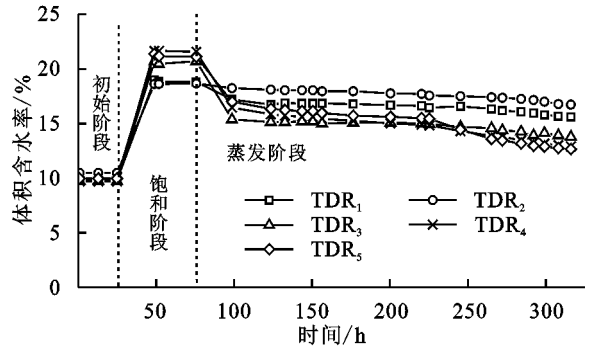


图 5 体积含水率变化情况

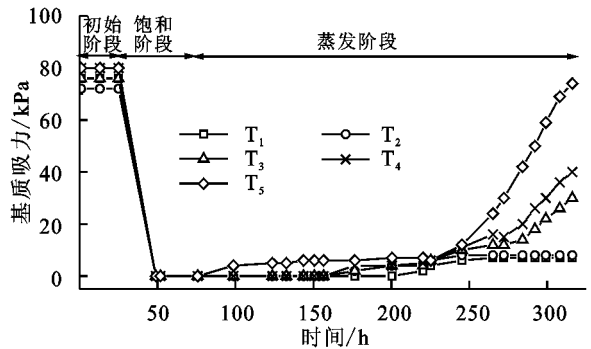


图 6 基质吸力变化情况

3.3 水力参数

渗透柱装置可同时量测同一断面土体的体积含水率及其相对应的基质吸力,所以可直接得到宽级配砾石土体积含水率与基质吸力的关系(图 7)。

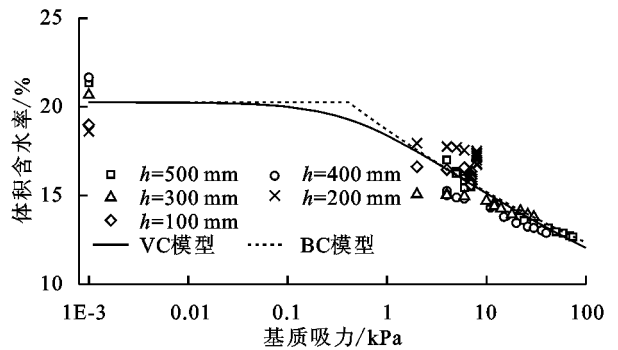


图 7 土—水特征曲线

非饱和渗透系数由瞬态剖面法得到,蒸发阶段不同时刻基质吸力和体积含水率剖面如图 8 所示。随着蒸发的时间增大,基质吸力剖面逐渐向右移动,体积含水率剖面逐渐往左移动,在 $h=50$ cm 高度处尤为明显。由于 $h=10,20$ cm 处基质吸力和体积含水率变化较小,选用 $h=50,45,40,35,30$ cm 共 5 个不同的高度,根据瞬态剖面法进行非饱和渗透系数的计算。当试样达到饱和状态,测得其饱和渗透系数为 0.035 cm/s,宽级配砾石土渗透系数与基质吸力的关系如图 9 所示。

本文采用岩土工程中应用较广的 Brooks-Corey 和 van Genuchten 土—水特征曲线模型和渗透系数函数对试验数据进行拟合分析。

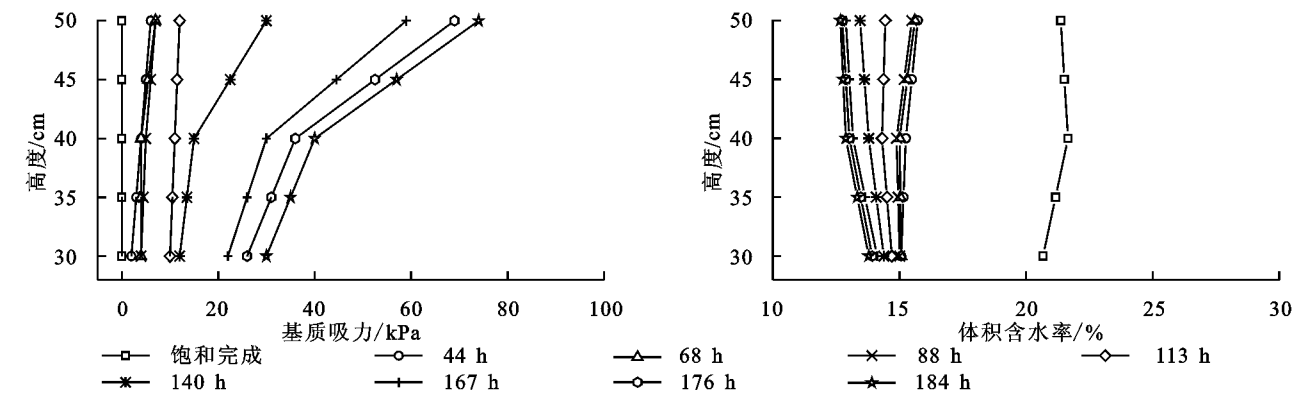


图 8 体积含水率和基质吸力剖面

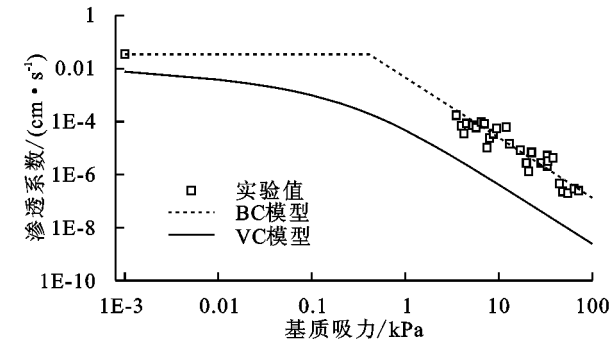


图 9 非饱和和渗透系数与基质吸力关系

不会引起土体含水率的降低,土体处于饱和状态;当基质吸力增大到进气值时,气体开始进入土体,水分从较大孔隙中排出,随着基质吸力的增大,含水率减小速度较快。由于试验仪器的量程所限,该试验结果并未明显显示随着基质吸力的继续增大,含水率的减小速度降低的过程。Van Genuchten 和 Brooks-Corey 土—水特征曲线模型所得的进气值分别为 0.56 kPa(1/ α)和 0.41 kPa。

表 1 水力特性模型与拟合参数

水力模型	模型参数
van Genuchten	$\alpha=1.80\text{ kPa}^{-1}, n=1.10, m=1-1/n=0.09$ $R^2=0.76$
Brooks-Corey	$\psi_b=0.41\text{ kPa}, \lambda=0.09$ $R^2=0.60$

如图 9 所示,随着基质吸力的增大,渗透系数逐渐减小,当基质吸力为 74 kPa 时,渗透系数由饱和和渗透系数 0.035 cm/s 降低为 2.74×10^{-7} cm/s,减小了近 5 个数量级。同时,将土—水特征曲线拟合所得参数代入相应渗透系数函数模型中,可看出,利用 van Genuchten 预测的渗透系数比试验值小将近 2 个数量级,而 Brooks-Corey 所预测的非饱和渗透系数值与试验值吻合较好,该结果与 Meerdink 等^[20]所得结果一致。Meerdink 等^[20]指出,主要原因为:体积含水率与基质吸力关系数据的不完整容易造成残余体积含水率估算出现较大偏差,从而影响非饱和渗透系数预测的结果;同时, van Genuchten 渗透函数是基于统计理论的毛细管模型发展的模型,该理论并不能完全描述非饱和土体中微小孔隙中的非饱和和渗流。

4 结论

(1) 根据瞬态剖面法,自制的在不同高度断面上同时安装张力计和 TDR 探头的大直径渗透柱装置,经进水饱和、排水、蒸发阶段,适用于宽级配砾石土土—水特征曲线和渗透函数的测定。

Van Genuchten 土—水特征曲线模型:

$$\theta=\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{[1+(\alpha\psi)^n]^m}$$
 (5)

Van Genuchten 渗透系数模型:

$$k_w=k_s\frac{\{1-(\alpha\psi)^{(n-1)}[1+(\alpha\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1+(\alpha\psi)^n]^{\frac{m}{2}}}$$
 (6)

Brooks-Corey 土—水特征曲线模型:

$$\theta=\begin{cases} \theta_s & \psi\leq\psi_b \\ \theta_r+(\theta_s-\theta_r)\left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda & \psi>\psi_b \end{cases}$$
 (7)

Brooks-Corey 渗透系数模型:

$$k_w=\begin{cases} k_s & \psi\leq\psi_b \\ k_s\left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^{2+3\lambda} & \psi>\psi_b \end{cases}$$
 (8)

式中: $\theta, \theta_r, \theta_s$ 分别为体积含水率,饱和体积含水率和残余体积含水率(%); ψ, ψ_b 分别为基质吸力和进气值(kPa); k_w, k_s 分别为渗透系数和饱和渗透系数(cm/s); α, m, n, λ 为模型拟合参数,其中 $m=1-1/n$ 。根据饱和和土样各 TDR 所测体积含水率,得到其平均饱和体积含水率 $\theta_s=20.26\%$,残余体积含水率取 $\theta_r=0.0\%$ 。相应的拟合结果如图 7、图 9 所示,相关参数见表 1。

由图 7 可知,虽然个别数据点远离拟合曲线,但整体拟合效果较好(R^2 见表 1)。土—水特征曲线存在明显的转折点,当基质吸力小于进气值(0~1 kPa)时,土—水特征曲线几乎呈水平,基质吸力的增大并

(2) 试验所得体积含水率与基质吸力、非饱和渗透系数基质吸力的关系较集中, van Genuchten 和 Brooks-Corey 土-水特征曲线模型能很好地描述宽级配砾石土土-水特征曲线;同时 van Genuchten 渗透系数模型预测结果小于试验值,而 Brooks-Corey 渗透系数模型预测结果与试验值吻合较好。

宽级配砾石土具有粒组广、弱固结的特点,决定了其物理力学特性不同于一般的土体。土体的水力参数本身较复杂,尤其是像泥石流宽级配砾石土。本试验只针对宽级配砾石土的 TDR 标定和水力参数的试验方法进行初步的研究,关于砾石土颗粒大小与颗粒级配等因素对其 TDR 标定试验结果和水力参数的影响,将为后续研究的重点。

参考文献:

- [1] 吴礼舟,黄润秋. 非饱和土渗流及其参数影响的数值分析[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(1): 94-98.
- [2] 简文星,许强,童龙云. 三峡库区黄土坡滑坡降雨入渗模型研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3527-3533.
- [3] Cuomo S, Della Sala M. Rainfall-induced infiltration, runoff and failure in steep unsaturated shallow soil deposits[J]. Engineering Geology, 2013, 162: 118-127.
- [4] 田连权,吴积善,康志成. 泥石流侵蚀搬运与堆积[M]. 成都:成都地图出版社, 1993.
- [5] 吴积善,田连权,康志成. 泥石流及其综合治理[M]. 北京:科学出版社, 1993.
- [6] 周小军,崔鹏,李战鲁. 泥石流源区砾石土渗透沉降综合测试设备研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1281-1289.
- [7] 杨进兵,陈兴长,汪惠,等. 泥石流堆积物中细颗粒含量与渗透系数关系试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3184-3190.
- [8] 魏厚振,汪稔,胡明鉴,等. 蒋家沟砾石土不同粗颗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 48-51.
- [9] Zhao H F, Zhang L M, Chang D S. Behavior of coarse widely graded soils under low confining pressures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(1): 35-48.
- [10] 刘雷激,朱平一,张军. 泥石流源地土体抗剪强度指标值与含水量的关系[J]. 山地研究, 1998, 16(2): 99-102.
- [11] Bruckler L, Bertuzzi P, Angulo-Jaramillo R, et al. Testing an infiltration method for estimating soil hydraulic properties in the laboratory[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(2): 384-395.
- [12] Stormont J C, Anderson C E. Capillary barrier effect from underlying coarser soil layer [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(8): 641-648.
- [13] Choo L P, Yanful E K. Water flow through cover soils using modeling and experimental methods[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(4): 324-334.
- [14] Yang H, Rahardjo H, Wibawa B, et al. A soil column apparatus for laboratory infiltration study[J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, 27(4): 347-355.
- [15] McCartney J S, Zornberg J G. Effect of infiltration and evaporation on geosynthetic capillary barrier performance[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(11): 1201-1213.
- [16] Duong T V, Trinh V N, Cui Y J, et al. Development of a large-scale infiltration column for studying the hydraulic conductivity of unsaturated fouled ballast[J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, 36(1): 54-63.
- [17] 陈仁朋,吴进,亓帅,等. 高速铁路基粗颗粒土水力学参数测试方法研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3365-3372.
- [18] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程 SL237—1999 [S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
- [19] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines [J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574-582.
- [20] Meerdink J S, Benson C H, Khire M V. Unsaturated hydraulic conductivity of two compacted barrier soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(7): 565-576.