

DOI: 10.11779/CJGE2018S1004

# 基于不同渗透持时的非饱和黄土渗透系数预测分析

谌文武<sup>1, 2</sup>, 刘伟<sup>1, 2</sup>, 王娟<sup>1, 2</sup>, 孙冠平<sup>1, 2</sup>, 吴玮江<sup>3</sup>, 侯小强<sup>4</sup>

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;  
3. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000; 4. 甘肃建筑职业技术学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 首先通过渗透试验和压力板仪试验获得不同渗透持时的黄土的土水特征曲线, 在此基础上利用 van Genuchten 模型对土水特征曲线进行拟合, 最后利用拟合参数结合 van Genuchten 渗透模型进行不同渗透持时的非饱和黄土渗透系数预测分析。研究发现, 随着渗透持时的增加, 非饱和黄土的渗透系数一直在减小, 减小幅度超过 50%。渗透持时相同的条件下, 非饱和黄土渗透系数随着体积含水率的增加而增加, 且在接近饱和状态时, 增加的幅度开始减缓。结合扫描电镜试验结果发现, 黄土渗透系数减小的重要原因系由于随着渗透持时的增加, 黄土中大孔隙减少而中小孔隙增加造成。

**关键词:** 渗透持时; 非饱和黄土; 渗透系数; 土水特征曲线; van Genuchten 模型

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000 - 4548(2018)S1 - 0022 - 06

**作者简介:** 谌文武(1966 - ), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害与文物保护工程等方面的教学和科研工作。  
E-mail: sungp@lzu.edu.cn。

## Prediction of coefficient of permeability of unsaturated loess with different seepage durations

CHEN Wen-wu<sup>1, 2</sup>, LIU Wei<sup>1, 2</sup>, WANG Juan<sup>1, 2</sup>, SUN Guan-ping<sup>1, 2</sup>, WU Wei-jiang<sup>3</sup>, HOU Xiao-qiang<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Geological Hazards Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 510000, China; 4. Gansu Construction Vocational Technical College, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The coefficient of permeability of unsaturated loess is very important to seepage calculation and slope instability analysis of loess. Using the direct method to test the coefficient of permeability of unsaturated loess is time-consuming and more expensive. Now scholars prefer to obtain the unsaturated coefficient of permeability through calculation from the soil water characteristic curve (SWCC). Firstly, the saturated coefficient of permeability is obtained through the permeability tests and the SWCC by pressure plate apparatus tests. Then van Genuchten model is chosen to calculate the unsaturated coefficient of permeability by the SWCC. The results show that the coefficient of permeability of unsaturated loess becomes higher with the increase of the volumetric water content and the decrease of the matric suction. The decrease of coefficient of permeability is more 50%. In order to understand the change of unsaturated coefficient of permeability of loess, SEM tests are conducted by JSM-6701F. From the SEM of loess, it is clear that the large pores become to decrease and the small and medium pores become to increase with the time.

**Key words:** seepage duration; unsaturated loess; coefficient of permeability; SWCC; van Genuchten model

## 0 引言

岩土体的渗透特性是评价其在渗流状态下力学稳定性的一个关键因素之一<sup>[1]</sup>。渗透系数直接决定着水在岩土体中的流动特性。非饱和渗透系数是岩土体体积含水率或者基质吸力的函数。直接测试非饱和渗透系数耗时耗力, 且测试成本较高。目前使用较多的方法是基于岩土体的土水特征曲线进行非饱和渗透系数的预测分析。Mualem<sup>[2]</sup>将目前的基于土水特征曲线预测非

饱和渗透系数的方法分为经验模型、统计模型以及宏观流体模型 3 大类。通常情况下, 统计模型能够提供较为准确的预测结果<sup>[3-6]</sup>, 与实测数据的差别较小, 获得了广泛应用。统计模型假定土水特征曲线与孔隙分

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目  
(2014CB744701); 国家自然科学基金项目(41362014); 甘肃省科学院项目(2015jk-01); 甘肃省建设科技项目(JK-2016-23)

**收稿日期:** 2017-06-11

布具有类似的形式, Romero 等<sup>[7-9]</sup>介绍了统计模型的适用范围。此外, Vecchia 等<sup>[10]</sup>基于电阻率层析成像方法对非饱和土增湿中引起局部含水率变化情况进行了研究。Zhou 等<sup>[11]</sup>利用 MFX 和 Fredlund<sup>[12]</sup>公式进行了非饱和粒状土相对渗透系数的预测分析。Ye 等<sup>[13]</sup>通过研究发现了温度对于非饱和渗透系数有一定影响。Zhai 等<sup>[14]</sup>提出了一种基于电子分析表的获得非饱和渗透系数的方法。van Genuchten<sup>[15]</sup>于 1980 年提出了预测非饱和渗透系数的简化模型, 该模型所需参数少, 使用较为方便。在基于上述模型对非饱和渗透系数进行预测的过程中, Rahimi 等<sup>[16-17]</sup>发现土水特征曲线的范围对于非饱和渗透系数预测的准确性影响较大, 相对完整的土水特征曲线能够获得较为准确的预测结果。并且提出一种利用颗粒分布曲线准确预测土水特征曲线的方法, 通过该方法间接提高了非饱和渗透系数预测的准确性。

由于黄土高原地区气候干旱, 因此在黄土高原地区存在大量的持续灌溉活动。灌溉过程中黄土经历了非饱和至饱和的状态转变, 饱和之后随着灌溉量的不同经历了不同的灌溉持续时间, 而灌溉结束之后, 黄土立即由饱和状态转变为非饱和状态。此时, 黄土的结构相比未灌溉前已经发生了变化, 后期少量灌溉引起的黄土当中非饱和渗流过程已经和初始状态的非饱和渗流过程截然不同。即黄土首次渗流过程对于后续渗流过程会产生影响, 对于滑坡的孕育、启动以及分期分次滑动方面均具有重要意义。

目前相关学者仅对黄土饱和渗流问题以及长期渗流引起的黄土劣化问题进行了研究<sup>[18-20]</sup>, 但对于上述工况中提到的基于不同灌溉持续时间后黄土的非饱和渗流问题则鲜有学者进行研究。

本文通过原状黄土的饱和渗透试验以及压力板仪试验对黄土在不同渗透持续时间条件下的饱和渗透系数和土水特征曲线进行测试, 在此基础上利用 van Genuchten 模型对土水特征曲线进行拟合并获得对应的拟合参数。利用获得的拟合参数结合 van Genuchten 渗流预测模型和已经获得饱和渗透系数对黄土的非饱和渗透系数进行预测。获得黄土非饱和渗透系数与体积含水率和基质吸力的变化规律。

## 1 试验原理和设备

本研究中首先将从兰州九州石峡口滑坡后壁处所取黄土试样进行抽气饱和, 利用饱和后的黄土原状试样进行不同持续时间的渗透试验。所用渗透仪为南京土壤仪器厂生产的 TST55 渗透仪。渗透结束后将试样从渗透仪中小心取出, 进行压力板仪试验, 利用美国

土壤仪器公司生产的 1500 型压力板仪测试不同渗透持续时间后的黄土试样土水特征曲线。利用获得的饱和渗透系数和土水特征曲线进行不同渗透持续时间下黄土非饱和渗透系数的预测分析, 结合扫描电镜试验分析渗透系数差异性的原因。

## 2 试验方案

### 2.1 试验用黄土基本性质

试验黄土取自兰州九州石峡口滑坡后壁处, 取样处理深 5 m, 黄土较为均匀, 所含植物根系较少, 大孔隙和垂直节理发育。黄土中可见少量白色的钙质结核, 呈不规则状分布于黄土中。

将现场所取黄土试样拆封后碾碎、烘干、过筛后进行颗粒试验、比重试验、界限含水率试验以及密度和含水率试验等。试验结果中发现(图 1, 表 1), 九州黄土液限和塑限较低, 黏土颗粒含量相对较少。为便于对比, 此处同时列出了渗透试验结束后的黄土试样的颗粒分布曲线。图 1 中 H 表示原状黄土试样, “L-1~L-4”表示黄土试样的渗透持续时间为 5 d、10 d、15 d 和 20 d。渗透后黄土中的黏土颗粒含量与未渗透黄土相比明显减少。

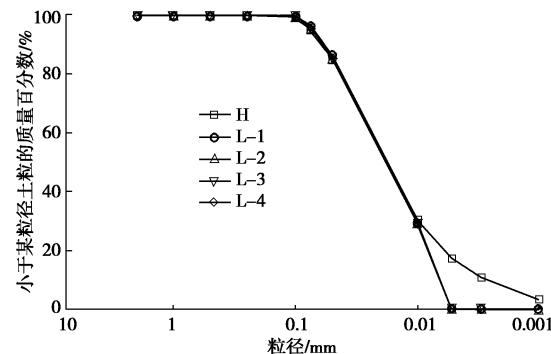


图 1 黄土颗粒分布曲线

Fig. 1 Particle-size distribution curves of loess

表 1 黄土试样基本性质

Table 1 Basic properties of loess

密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率 /%	比重	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
1.42~1.44	3.2~4.5	2.70	27.20	18.10	9.10

### 2.2 黄土饱和渗透试验

本文选用黄土原状样进行饱和渗透试验, 试验所用设备为南京土壤仪器厂生产的 TST55 渗透仪。

试验中首先将制好的原状黄土试样夹在饱和器中进行抽气饱和。然后利用饱和黄土试样进行渗透试验, TST55 渗透仪的主要不足之处在于渗透过程中的侧壁漏水问题, 为此, 试验中通过均匀涂抹凡士林以及环刀上下放置密封圈的方法克服侧壁漏水问题。

为了研究灌溉持续时间不同条件下黄土的渗透特性,本次试验中设置渗透持续时间为0 d, 5 d, 10 d, 15 d 和 20 d。计算不同渗透周期后黄土的最终渗透系数。试验结果见图2。从图2可以发现随着渗透时间的增加,饱和黄土的渗透系数一直在减小,渗透时间进一步增加之后,渗透系数减小幅度开始减小,并最终趋于稳定。

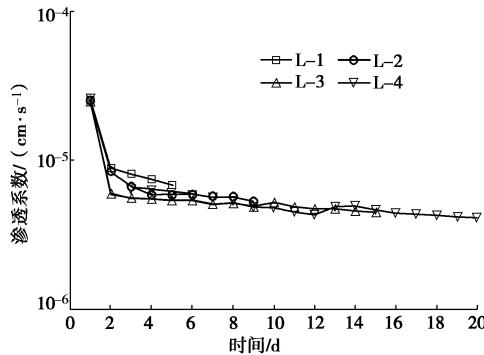


图2 黄土渗透系数随时间变化关系

Fig. 2 Relationship between coefficient of permeability and time of loess

### 2.3 土水特征曲线测试试验

土水特征曲线测试所用设备为美国土壤水分仪器厂生产的1500型压力板仪,该设备陶土板分为5 bar和15 bar两种规格。

试验中先将不同渗透持续时间的饱和黄土试样从渗透仪中取出,利用内径40 mm和高度10 mm的小环刀在渗透环刀的顶部和底部分别切取原状样。称重后将渗透试验结束后的饱和试样和小环刀一起置于陶土板上,通过施加不同的压力测试其对应含水率条件下的基质吸力。

基质吸力测试中,起始压力值为10 kPa,最大压力值为700 kPa。由于过高的基质吸力值在岩土工程中相对较为少见且试验中空压机最大储气压力为750 kPa,故高于750 kPa的基质吸力未进行测试。为便于预测分析,本文中土水特征曲线均使用van Genuchten模型<sup>[15]</sup>进行了拟合(图3~7)。

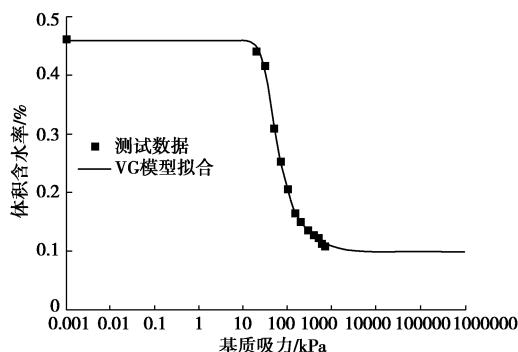


图3 H 土水特征曲线及其拟合结果

Fig. 3 Fitting performance and SWCC of H

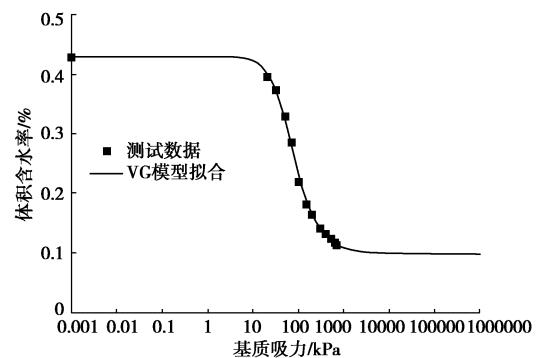


图4 L-1 土水特征曲线及其拟合结果

Fig. 4 The fitting performance and SWCC of L-1

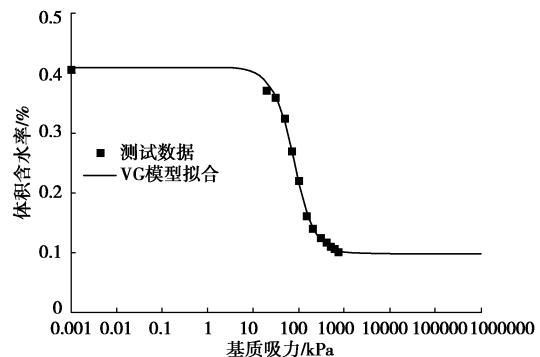


图5 L-2 土水特征曲线及其拟合结果

Fig. 5 Fitting performance and SWCC of L-2

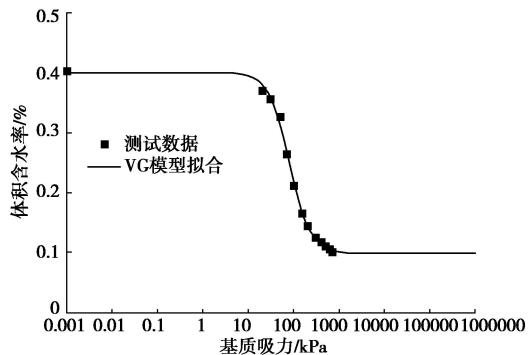


图6 L-3 土水特征曲线及其拟合结果

Fig. 6 Fitting performance and SWCC of L-3

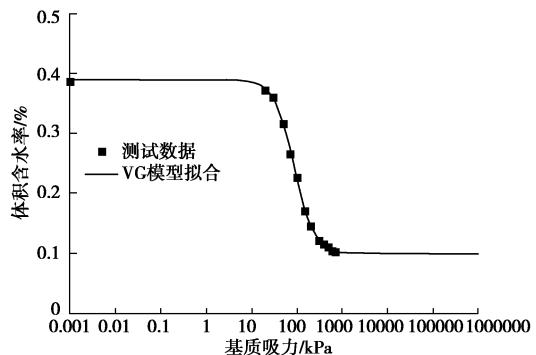


图7 L-4 土水特征曲线及其拟合结果

Fig. 7 Fitting performance and SWCC of L-4

van Genuchten 模型的形式如下:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[ 1 + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right]^m}, \quad (1)$$

式中,  $a$ ,  $m$ ,  $n$  均为拟合参数,  $\theta_s$  和  $\theta_r$  为饱和体积含水率和残余体积含水率,  $\theta$  为体积含水率,  $\psi$  为基质吸力。

## 2.4 扫描电镜试验

为深入认识不同渗透持续时间条件下黄土非饱和渗透系数变化规律的内在原因, 本文对压力板仪试验结束后的黄土试样的微观结果进行了 SEM 试验。试验前先将风干的黄土试样削制成薄片状, 然后对试样进行冷干喷粉处理, 处理后进行放大倍数 1000 的扫描电镜试验。所用扫描电镜型号为 JSM-6701F, 结果见图 8~12。

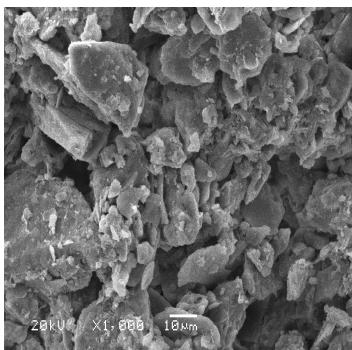


图 8 H 试样 SEM 照片

Fig. 8 SEM of H

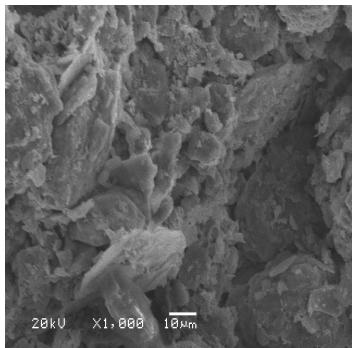


图 9 L-1 试样 SEM 照片

Fig. 9 SEM of L-1

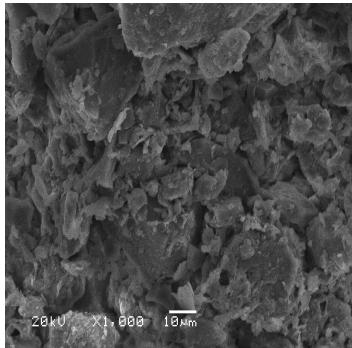


图 10 L-2 试样 SEM 照片

Fig. 10 SEM of L-2

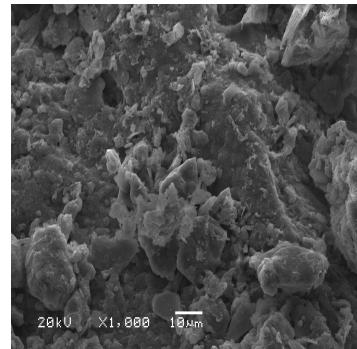


图 11 L-3 试样 SEM 照片

Fig. 11 SEM of L-3

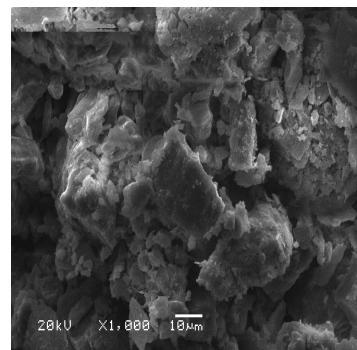


图 12 L-4 试样 SEM 照片

Fig. 12 SEM of L-4

## 3 试验结果分析

通过对九州石峡口滑坡后壁黄土原状样进行不同持续时间的渗透试验以及压力板仪试验, 获得了黄土不同持续时间后渗透系数以及不同渗透持时之后的黄土土水特征曲线。

基于上述试验数据结合 van Genuchten 模型拟合土水线获得的拟合参数可利用 van Genuchten 渗流模型进行黄土非饱和渗透系数的预测。van Genuchten 渗流模型<sup>[15]</sup>的基本形式如下:

$$K_r = \nabla^{0.5} \left[ 1 - (1 - \nabla^{1/m})^m \right]^2, \quad (2)$$

$$\nabla = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad (3)$$

式中,  $m$  为拟合参数,  $\theta_s$  和  $\theta_r$  为饱和体积含水率和残余体积含水率,  $\theta$  为体积含水率,  $K_r$  为基质吸力为  $\psi$  时的相对渗透系数, 即非饱和渗透系数与饱和渗透系数的比值。

图 13 和图 14 为根据公式 (1) ~ (3) 以及与黄土饱和渗透系数相结合获得的不同渗透持时条件下黄土的非饱和渗透系数与体积含水率和基质吸力的关系图。从图 13, 14 中可以发现, 不同渗透持时条件下的饱和黄土的非饱和渗透系数随着体积含水率的增加呈

现增大的趋势,与未渗透黄土的非饱和渗透系数相比,经过渗透后的黄土非饱和渗透系数均减小。非饱和渗透系数随着基质吸力的增加而减小,减小幅度甚至超过 50%,相同基质吸力情况下,原状黄土非饱和渗透系数远远高于经历过渗透的黄土试样值。

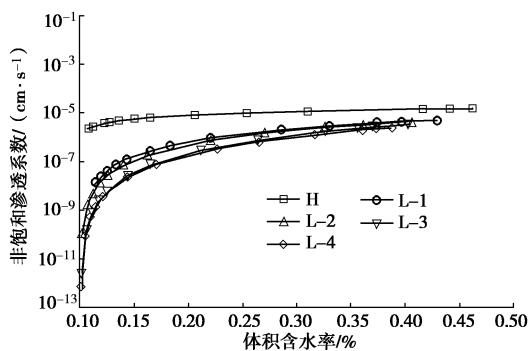


图 13 黄土非饱和渗透系数与体积含水率关系

Fig. 13 Relationship between unsaturated coefficient of permeability and volumetric water content of loess

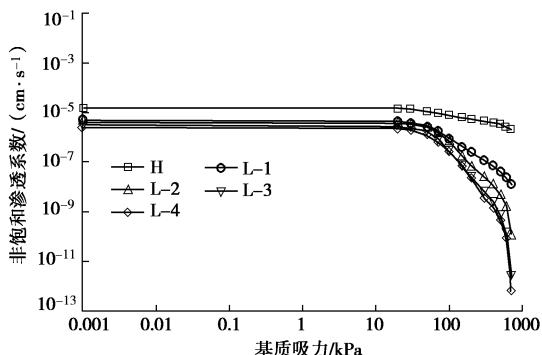


图 14 黄土非饱和渗透系数与基质吸力关系

Fig. 14 Relationship between unsaturated coefficient of permeability and matric suction of loess

通过对图 8~12 的 SEM 照片进行二值化处理,并在二值化处理基础上进行黄土内部孔隙数量的统计,发现渗透过程改变了黄土内部的孔隙结构形态。随着渗透持续时间的增加,黄土内部的大孔隙数量减少,而中小孔隙的数量开始增加,孔隙尺寸按文献[21]进行定义选取<sup>[21]</sup>。计算发现,渗透持时由 0 d 增加至 20 d,黄土中的中小孔隙与大孔隙的比值从 10% 增大至 45%。渗透持续时间越久,这种大孔隙转化成中小孔隙持续的时间越久。这也是随渗透持续时间增加,黄土渗透系数持续减小的重要原因。

黄土渗透系数随着渗透持时不断减小,对于黄土边坡稳定性分析具有重要作用。尤其在不同灌溉持时以及不同降雨持时条件下的黄土边坡稳定性分析中,首次灌溉及降雨的持续时间会直接影响第二次以及第三次灌溉及降雨在黄土中的渗流情况,而多期多次降雨及灌溉在黄土中的渗透量和渗透深度均会发生变

化,这些变化也是引起黄土滑坡多期多次滑动以及启动滞后于降雨和灌溉过程的重要原因。

## 4 结 论

本文通过测试石峡口滑坡后壁黄土不同渗透持时下的渗透系数以及渗透后黄土的土水特征曲线,基于 van Genuchten 模型计算后得出如下结论:

- (1) 基于试验结果计算获得不同渗透持时下黄土的非饱和渗透系数,并且得到了黄土渗透系数随着体积含水率增加而增加,随着基质吸力增加而减小的变化规律。
- (2) 利用扫描电镜试验结果,分析发现随着渗透持时的增加,黄土中大孔隙减少,中小孔隙增加的变化规律。
- (3) 黄土渗透系数随着渗透持时的变化规律对于黄土边坡稳定性分析至关重要,本文同时得到了黄土饱和及非饱和渗透系数的变化规律。

## 参 考 文 献:

- [1] RAHARDJO H, NIO A S, ENGCHOON L, et al. Effects of groundwater table position and soil properties on stability of slope during rainfall[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(11): 1555 – 1564.
- [2] MUALEM Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas[J]. Agronomy. A Series of Monographs-American Society of Agronomy. 1986: 799 – 823.
- [3] LEONG E C, RAHARDJO H. Permeability functions for unsaturated soils[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(12): 1118 – 1126.
- [4] FREDLUND D G. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice[M] Unsaturated soil mechanics in engineering practice. New York: Wiley, 2012.
- [5] MARSHALL T J. A Relation between permeability and size distribution of pores[J]. European Journal of Soil Science, 1958, 9(1): 1 – 8.
- [6] KUNZE R J, UEHARA G, GRAHAM K. Factors important in the calculation of hydraulic conductivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1968, 32(6): 760 – 765.
- [7] ROMERO E, GENA A, LLORET A. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay[J]. Engineering Geology, 1999, 54(1/2): 117 – 127.
- [8] ROMERO E, VECCHIA G D, JOMMI C. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils[J]. Géotechnique, 2011, 61(4): 313 – 328.

- [9] ROMERO E. A microstructural insight into compacted clayey soils and their hydraulic properties[J]. *Engineering Geology*, 2013, **165**(20): 3 – 19.
- [10] VECCHIA G D, COSENTINI R M, MUSSO G, et al. Estimation of the hydraulic parameters of unsaturated samples by electrical resistivity tomography[J]. *Géotechnique*, 2012, **62**(7): 583 – 594.
- [11] ZHOU W H, YUEN K V, TAN F. Estimation of soil–water characteristic curve and relative permeability for granular soils with different initial dry densities[J]. *Engineering Geology*, 2014, **179**(11): 1 – 9.
- [12] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil–water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, **31**(4): 521 – 532.
- [13] YE W M, WAN M, CHEN B, et al. Temperature effects on the unsaturated permeability of the densely compacted GMZ01 bentonite under confined conditions[J]. *Engineering Geology*, 2012, **126**(4): 1 – 7.
- [14] ZHAI Q, RAHARDJO H. Estimation of permeability function from the soil–water characteristic curve[J]. *Engineering Geology*, 2015, **199**: 148 – 156.
- [15] 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.
- [16] RAHIMI A, RAHARDJO H, LEONG E C. Effect of range of soil–water characteristic curve measurements on estimation of permeability function[J]. *Engineering Geology*, 2015, **185**: 96 – 104.
- [17] RAHIMI A, RAHARDJO H. New approach to improve soil–water characteristic curve to reduce variation in estimation of unsaturated permeability function[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, **53**: 717 – 725.
- [18] 王 辉, 岳祖润, 叶朝良. 原状黄土及重塑黄土渗透特性的试验研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2009, **22**(2): 20 – 22. (WANG Hui, YUE Zu-run, YE Chao-liang. Calculation and analysis on flexural strengthening with CFRP laminate considering the preexisting strain[J]. *Journal of Shijiazhuang Railway Institute (Natural Scinence)*, 2009, **22**(2): 20 – 22. (in Chinese))
- [19] 王铁行, 卢 靖, 张建锋. 考虑干密度影响的人工压实非饱和黄土渗透系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(11): 2364 – 2368. (WANG Tie-hang, LU Jing, ZHANG Jian-feng. Experimental study on permeability coefficient of artificially compacted unsaturated loess considering influence of density[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(11): 2364 – 2368. (in Chinese))
- [20] 安 鹏, 张爱军, 刘宏泰, 等. 重塑饱和黄土长期渗流劣化机制及其渗透性分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 1965 – 1971. (AN Peng, ZHANG Ai-jun, LIU Hong-tai, et al. Degradation mechanism of long-term seepage and permeability analysis of remolded saturated loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(7): 1965 – 1971.(in Chinese))
- [21] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑), 1987, **17**(12): 1309 – 1318. (LEI Xiang-yi. The pore types and collapsibility of loess in China[J]. *Science China Chemistry*, 1987, **17**(12):1309 – 1318. (in Chinese))

(本文责编 明经平)