

DOI: 10.11779/CJGE2020S1045

北疆白砂岩与泥岩的土水特征曲线及渗透曲线实验研究

谭志翔¹, 王正中^{1, 2}, 葛建锐¹, 江浩源¹, 刘铨鸿¹, 孟晓栋¹

(1. 西北农林科技大学旱区寒区水工程安全研究中心旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 中国北疆地区大型渠道基土多为白砂岩和泥岩, 其水力特性决定着渠道结构病害的形成与发育。为此以新疆阿勒泰北屯灌区的白砂岩、泥岩为研究对象, 测试其物理力学和抗渗各项指标; 根据非饱和土理论, 采用滤纸法得到其土水特征曲线, 并基于 Gardner 模型、Van Genuchten 模型和 Fredlund & Xing 模型对土水特征曲线进行参数拟合并分析其持水特性; 结合其土水特征曲线进一步采用 Childs & Collis-Geroge 模型研究了其非饱和渗透曲线。试验结果表明: 白砂岩、泥岩具有膨胀性且为低渗透性土体。白砂岩抗剪强度高、压缩性低。白砂岩、泥岩土水特征曲线拟合效果最好的分别是 GA 模型、VG 模型, 泥岩较白砂岩的持水性能更好。相对渗透系数随基质吸力增加而急剧降低, 一定基质吸力范围内两者在双对数坐标系中呈直线型曲线。

关键词: 白砂岩与泥岩; 土水特征曲线; 滤纸法; 基质吸力; 渗透系数

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S1-0229-05

作者简介: 谭志翔(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事寒区水工程安全研究。E-mail: tanzx1224@163.com。

Experimental study on soil-water characteristic curve and permeability curve of white sandstone and mudstone in northern Xinjiang

TAN Zhi-xiang¹, WANG Zheng-zhong^{1, 2}, GE Jian-rui¹, JIANG Hao-yuan¹, LIU Quan-hong¹, MENG Xiao-dong¹

(1. Cold and Arid Regions Water Engineering Safety Research Center, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The foundation soil of large channels in northern Xinjiang is mostly white sandstone and mudstone, and its hydraulic characteristics determine the formation and development of channel structural diseases. To this end, the white sandstone and mudstone of Beitun Irrigation in Altay, Xinjiang are taken as the objects to test their physical mechanics and impermeability indexes. According to the theory of unsaturated soil, the soil-water characteristic curve is obtained by the filter paper method, and based on the Gardner, Van Genuchten and Fredlund & Xing models the parameters of the soil-water characteristic curve is fitted and their water-retention characteristics are analyzed; combined with the soil-water characteristic curve. Combined with its soil-water characteristic curve, the Childs & Collis-Geroge model is used to study the unsaturated permeability curve. The results show that the white sandstone and mudstone are expansive and low-permeability soil. The white sandstone has high shear strength and low compressibility. The best fitting effect of the SWCC of white sandstone and mudstone are the GA model and VG model, respectively, and mudstone has better water-retention performance than the that white sandstone. The relative permeability coefficient decreases sharply with the increase of matrix suction. Within a certain range of matrix suction, they are linear curves in a double-logarithmic coordinate system.

Key words: white sandstone and mudstone; soil-water characteristic curve; filter paper method; matrix suction; permeability coefficient function

0 引言

中国西部大开发战略促进新疆地区的工程建设。北疆地区修建的众多输水渠道、公路及铁路等重大工程均穿越含泥岩、白砂岩的地基^[1-2]。此类地基土具有吸水膨胀软化、失水收缩干裂等特性, 影响工程的安

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405102); 国家自然科学基金项目(51279168); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201801)

收稿日期: 2020-06-03

*通信作者(E-mail: wangzz0910@163.com)

全运行^[3]。目前,通常采用非饱和土水力特征来预测非饱和土的工程特征^[4],研究其水力特性对保障工程安全运行十分必要。非饱和土水力特征包括土壤水分特征曲线和渗透系数曲线。土水特征曲线(SWCC)是描述土壤水的基质势随土壤水含量的变化曲线,反映了土壤水分能量和数量之间的关系,为研究非饱和土强度、渗透性以及本构理论的提供基础^[5]。非饱和土的渗透系数是表征渗透系数与基质吸力的关系,是研究非饱和土渗流、沉降变形、结构稳定以及溶质运移等问题的重要参数^[6]。

本文以阿勒泰北屯灌区总干渠渠基中白砂岩和泥岩这两种特殊土为研究对象,测试其物理力学和抗渗各项指标;根据非饱和土理论,采用滤纸法得到了土水特征曲线。基于 3 种典型土水特征曲线模型对试验结果进行参数拟合,得到反映土体吸力与含水率之间的关系及特征参数。基于 SWCC 试验数据,得到新疆北屯白砂岩和泥岩的 Childs & Collis-Gerge 渗透系数预测模型。以期为此类土地区水工程基土渗透特性及物理力学特性研究提供分析方法与定量数据支撑。

1 试验土样

试验土样为北疆北屯灌区某输水渠道表层的灰白色白砂岩和灰色泥岩。按照《土工试验方法标准》对土样进行室内试验。其中泥岩黏粒含量大于 50%,塑形指数 28,故泥岩属于黏性土。白砂岩压缩系数 0.128 MPa⁻¹,砂粒含量 78%~84%,粗、中砂含量较高,细粒含量 10.5%~16%,颗粒成分中胶粒含量 1.5%~7%,故具有砂、黏性土的相关特性、低压缩性及胶结性。其物理参数、饱和渗透系数、抗剪强度指标,结果见表 1。

表 1 土样物理、渗透、力学指标

Table 1 Physics, permeability and mechanical indexes of soil		
参数	白砂岩	泥岩
相对密度 G_s	2.68	2.70
自由膨胀率/%	43.0	96.0
膨胀力/kPa	75	320
最优含水率/%	10.0	17.0
最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.01	1.75
饱和渗透系数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	7.23×10^{-7}	1.20×10^{-8}
黏聚力 c/kPa	48	24
内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	35	5

2 土水特征曲线试验

2.1 试验仪器和材料

Whatman No.42 型无灰定量分析滤纸 ($\phi=55$ mm);定性滤纸 ($\phi=70$ mm);电子天平(精度 0.0001 g、0.01 g);烘箱(温度 105℃);恒温箱(控制温度

25℃~27℃);密封塑料罐($H=10$ cm, $\phi=10$ cm);直剪环刀;测量铝盒;镊子、防水胶带、保鲜袋等。

2.2 试验内容与步骤

土体压实标准取为 96%,即白砂岩的干密度控制为 1.90 g/cm³,泥岩的干密度控制为 1.70 g/cm³。

(1) 试样制备

将土样(白砂岩、泥岩)碾压过筛,分散配置含水率,放入密封袋中闷 24 h 以便土水混合均匀。采用静压法制样,按照图 1 的方法在两土样中间依次放置滤纸,并采用防水胶带将两环刀黏结,装入密封袋,水平放置于塑料密封罐中,将密封罐放入 25℃~27℃ 的恒温箱中,其试验过程见图 2。

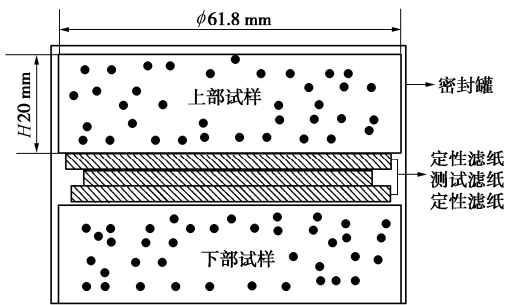


图 1 滤纸法试验装置图

Fig. 1 Test devices of filter paper method



图 2 试样制作过程

Fig. 2 Production process of sample

(2) 取样检测

待试样静置 20 d 后,土样和测试滤纸间水分平衡^[7]。快速取出测试滤纸并迅速使用电子天平(精度 0.0001 g)称量测试滤纸质量,取环刀中心处土样,采用烘干法称量“干土+铝盒”、“干滤纸+铝盒”质量。

鉴于滤纸具有重量轻、水分敏感性高、易挥发等特点,试验过程中需操作细致,称量迅速,避免用手直接接触测试滤纸,防止测试滤纸水分发生变化。

2.3 试验结果与分析

本次试验采用 Whatman No.42 测试滤纸,其吸力率定曲线直接采用 Leong 等^[8]的公式,如下:

$$\lg \psi_2 = \begin{cases} 5.327 - 0.0779w & w < 45.3\% \\ 2.412 - 0.0135w & w > 45.3\% \end{cases}, \quad (1)$$

式中, w 为滤纸含水率 (%); ψ_2 为土吸力值 (kPa)。

目前, 基于基质吸力和含水率试验数据点, 采用土水特征曲线拟合模型进行参数拟合, 常用的模型有: GA (Gardner) 模型、VG (Van Genuchten) 模型和 FX (Fredlund & Xing) 模型, 分别如下:

$$w = \frac{w_s - w_r}{1 + (\psi_2 / \alpha)^n} + w_r \quad , \quad (2)$$

$$w = \frac{w_s - w_r}{\left[1 + (\psi_2 / \alpha)^n\right]^m} + w_r \quad , \quad (3)$$

$$w = \frac{w_s}{\left\{\ln\left[e + (\psi_2 / \alpha)^n\right]\right\}^m} + w_r \quad . \quad (4)$$

式中 w 是对应于吸力 ψ_2 的质量含水率; w_s 为饱和和质量含水率; w_r 为残余质量含水率; a , n , m 为模型拟合参数。其中 a 值与进气压力值有关, m 值与曲线整体对称性有关, n 值为曲线内弯点斜率有关的参数^[9-10]。

根据白砂岩、泥岩的试验数据, 基于 VG 模型、FX 模型、GA 模型利用 Matlab 中的 Lsqcurvefit 函数进行参数拟合, 得到拟合参数和相关系数 R^2 , 白砂岩、泥岩土水特征曲线拟合参数见表 2, 3。

表 2 白砂岩 3 种模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters for three models of white sandstone			
拟合值	FX 模型	VG 模型	GA 模型
a	107.74	43.63	290.74
n	0.39	0.46	0.40
m	1.70	0.48	—
W_r	0.11	0	1.6
R^2	0.999	0.999	0.999

表 3 泥岩 3 种模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters for three models of mudstone			
拟合值	FX 模型	VG 模型	GA 模型
a	832.45	2088.37	1992.85
n	1.387	0.805	1.11
m	0.763	0.803	—
W_r	0	2.8	6.3
R^2	0.970	0.997	0.998

图 3 表示白砂岩、泥岩在宽广吸力范围内的持水曲线, 呈现单峰土水特征曲线 (“S 型”), 基质吸力随含水率增加而减小。3 种模型都可以较好的拟合白砂岩、泥岩的土水特征曲线, 除泥岩的 FX 模型 R^2 为 0.97, 其余模型 R^2 均达到 0.99 以上。但是, 从图形上来看, 泥岩 3 种模型在低吸力范围 (0~100 kPa) 拟合效果较差, VG 模型相对较好。结合模型 R^2 及各参数的物理意义, 白砂岩、泥岩土水特征曲线拟合效果最好的分别是 Gardner 模型、VG 模型。

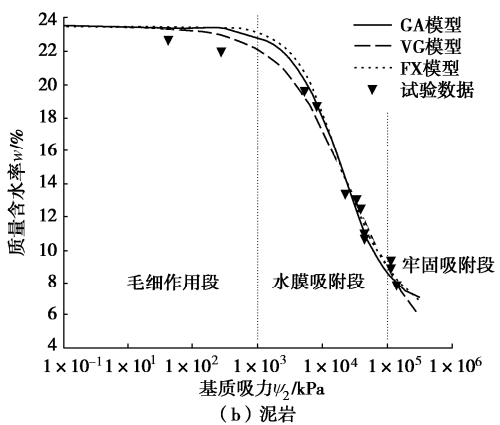
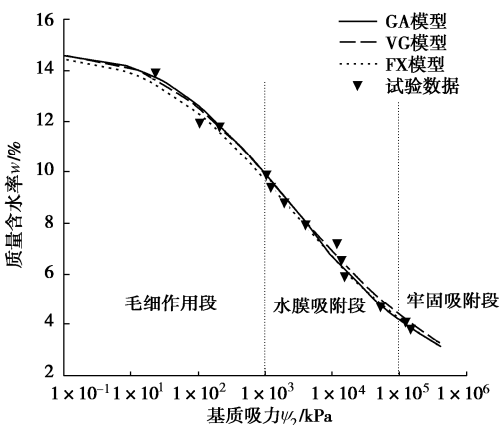


图 3 3 种模型的拟合效果

Fig. 3 Fitting effects of three models

McQueen 和 Miller 根据基质吸力值为 0, 10², 10⁴, 10⁶ kPa 将 SWCC 分为一个三段式模型^[11], 分别为毛细作用段、水膜吸附段、牢固吸附段。当基质吸力较大 (10⁴~10⁶ kPa) 时, 孔隙水依靠氢键吸附在土颗粒表面; 当基质吸力处于 10²~10⁴ kPa 时, 孔隙水以薄膜形式吸附于土颗粒表面; 当基质吸力较小 (0~10² kPa) 时, 土体含水率较大, 毛细作用将对孔隙水含量起主导作用, 土壤孔隙和土颗粒尺寸特征将决定土的持水能力^[12]。土的持水能力在一定范围内主要受到土体孔隙大小的控制, 孔隙分布也可以用来解释宏观持水特征^[13]。从图 3 可以看出, 两者持水曲线在整体上差异较大, 主要在于泥岩较白砂岩进气值更大。在毛细作用段, 白砂岩含水率随吸力增加呈线性下降趋势, 而泥岩呈水平稍微下降趋势。主要是由于泥岩中的大量黏粒具有较大的颗粒比表面积和颗粒表面电荷密度, 这使得在短程吸附作用条件下, 泥岩要比白砂岩能够持有大量水分, 具有较大的进气值, 毛细作用段含水率随吸力变化不明显; 而白砂岩中的粗、中砂粒颗粒间孔隙影响低吸力状态下的脱湿过程, 颗粒比表面积和表面电荷密度较低, 进而造成进气值较小, 毛细作用段含水率随吸力变化明显。同时, 相同基质吸

表 4 CCG 模型计算值
Table 4 Calculated values of CCG model

土样	饱和渗透系数 $k_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\theta_s/\%$	$\theta_r/\%$	黏度 $/(N\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$	表面张力 $/(kN\cdot\text{m}^{-1})$	N	调整系数 A $/(m\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{kPa}^2)$	计算的饱和渗透 系数 $k_{sc}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
白砂岩	7.23×10^{-7}	28.88	3.04	1.01×10^{-3}	7.28×10^{-5}	22	4.45×10^{-9}	2.18×10^{-6}
泥岩	1.2×10^{-8}	39.95	10.71	1.01×10^{-3}	7.28×10^{-5}	27	5.52×10^{-9}	4.78×10^{-12}

力作用下泥岩对应的含水率较白砂岩更大，故泥岩的持水特性更好。

3 渗透系数曲线模型预测

由于非饱和土渗透系数的试验测定技术不成熟，不仅耗时，且测量精度较低，难以准确获取非饱和土渗透系数。许多学者提出利用 SWCC 来预测非饱和和渗透系数的间接方法^[14]。Childs & Collis-Geroge (CCG) 模型是常用的预测模型^[15]，将孔径分布与基质吸力联系起来，建立在任意孔径分布基础上的预测非饱和和渗透系数。Fredlund 运用 CCG 模型预测的细砂的非饱和和渗透系数与测量数据有很好的 consistency。其计算步骤如下：

①将 SWCC 沿体积含水率轴分成 b 等分；②根据水的特征系数按照式 (5) 计算调整系数 A ；③根据调整系数分段按照式 (6) 计算 K_{sc} ；④根据饱和渗透系数 k_s 、 k_{sc} 、等分中点的吸力值 ψ_2 按照式 (7) 计算吸力对应的非饱和和渗透系数 $k(\psi_2)$ 值。

$$A=\frac{T_s\rho_wg\theta_s^p}{2\mu_wN^2}, \tag{5}$$

$$k_{sc}=A\sum_{j=1}^b\left[(2j+1-2i)(\psi_2)_j^{-2}\right] \quad (i=0), \tag{6}$$

$$k(\psi_2)_i=\frac{k_s}{k_{sc}}A\sum_{j=1}^b\left[(2j+1-2i)(\psi_2)_j^{-2}\right] \quad (i=1,2\cdots b) \tag{7}$$

式中 ψ_2 为基质吸力 (kPa)； k_s 、 k_{sc} 、 $k(\psi_2)_i$ 为饱和和渗透系数、计算的饱和和渗透系数、非饱和和渗透系数 (m/s)； T_s 、 μ_w 、 ρ_w 为水的表面张力 (kN/m)、绝对黏度 (N·s/m²)、密度 (kg/m³)； $g=9.8$ m/s²； p 为不同尺寸孔隙的相互作用系数，取 $p=2$ ； θ_s 为饱和体积含水率 (%)； N 为 θ_s 与 θ_r 间的间断总数， $N=b\theta_s/(\theta_s-\theta_r)$ ； i 为间断编号； j 为从 i 到 b 的计数。

基于 CCG 模型根据试验结果计算白砂岩、泥岩的非饱和和渗透系数。取 $b=20$ ，水的特征参数按照温度以 27℃ 为标准，计算的特征值见表 4。

取 $i=1\sim 20$ 分别计算第 i 个区间上的非饱和和渗透系数。由于非饱和和渗透系数变化值较大，故引入相对渗透系数 k_r (即 $k_r=k(\psi_2)/k_s$)，结果见图 4。

白砂岩、泥岩的饱和渗透系数均表征为低透水性

土体 ($k_s<10^{-6}$ m/s)。从饱和状态变成非饱和状态时，渗透系数变化明显。从图 4 能够看出，白砂岩、泥岩相对渗透系数均随着基质吸力增加而减小，且在一定吸力范围内两者在双对数坐标系中呈线性关系，相关系数达 0.96 以上。但是泥岩在低吸力、高吸力范围内拟合效果较差。同一基质吸力下，泥岩相对渗透系数大于白砂岩，其比值达 10^5 数量级。白砂岩、泥岩非饱和和渗透曲线的建立反映了白砂岩具有良好的抗渗、防渗性能，为研究该地区非饱和土渗流、沉降变形、结构稳定以及溶质运移等问题提供重要参数。

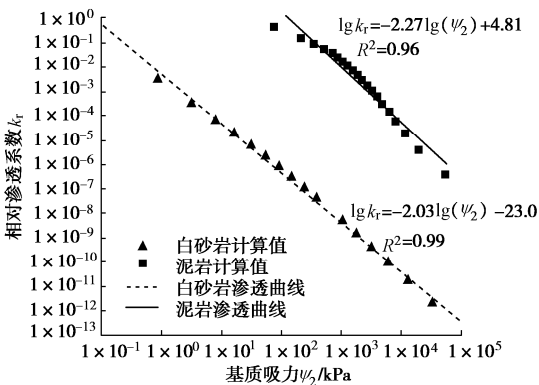


图 4 相对渗透系数曲线

Fig. 4 Curves of relative permeability coefficient

4 结 论

本文通过室内试验，研究了新疆北屯输水渠基土白砂岩、泥岩的物理、力学以及土水特征曲线，基于试验数据，得出其非饱和和渗透系数预测模型。可得到以下结论：

(1) 通过室内试验测定了泥岩、白砂岩的各项力学、抗渗、物理指标。两种土样均具有遇水膨胀性且为低渗透性土体 ($k_s<10^{-6}$ m/s)。白砂岩具有较高的抗剪强度指标、较低的压缩系数，为后期该地区材料选择、安全评价提供依据。

(2) 对于北疆白砂岩、泥岩土水特征曲线拟合效果最好的分别是 Gardner 模型、VG 模型。泥岩持水性能优于白砂岩。白砂岩中的大颗粒间孔隙影响低吸力状态下的脱湿过程，进而造成其具有较低的进气值。

(3) 采用 CCG 模型对两种土样进行非饱和和渗透系数进行预测。两种土样相对渗透系数随基质吸力增

加而急剧减小,一定吸力范围内在双对数坐标系中可采用线性拟合,相关系数达 0.96 以上。同一基质吸力下,泥岩相对渗透系数大于白砂岩,其比值达 10^5 数量级。非饱和渗透系数为研究该地区非饱和土渗流、沉降变形、结构稳定以及溶质运移等问题的提供重要参数。

参考文献:

- [1] 罗文灵, 余 勇, 张 恒. 白砂岩在高填方工程中的应用[J]. 新疆水利, 2001(6): 10 - 13. (LUO Wen-ling, YU Yong, ZHANG Heng. Application of white sandstone in high fill engineering[J]. Xinjiang Water Resources, 2001(6): 10 - 13. (in Chinese))
- [2] 李万逵, 海来提, 王凤民. 新疆乌伦古河南干渠白砂岩的工程地质评价[J]. 新疆水利, 2005(4): 24 - 28. (LI Wan-kui, HAI Lai-ti, WANG Feng-min. Engineering geological evaluation of white sandstone in Henan Main Canal, Wulungu, Xinjiang[J]. Xinjiang Water Resources, 2005(4): 24 - 28. (in Chinese))
- [3] 朱 洵, 蔡正银, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土力学特性及损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(6): 1233 - 1241. (ZHU Xun, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Research on mechanical properties and damage evolution law of expansive soils under the cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(6): 1233 - 1241. (in Chinese))
- [4] RAO H R H, VENKATARAMANA K V, SINGH D N S N. Studies on the determination of swelling properties of soils from suction measurements[J]. Géotechnique, 2011, 48(3): 375 - 387.
- [5] 陈正汉, 郭 楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1 - 54. (CHEN Zheng-han, GUO Nan. New advances in mechanics and engineering applications of unsaturated soils and special soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1 - 54. (in Chinese))
- [6] NING LU, WILLIAM J L. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012. (NING LU, WILLIAM J L. Unsaturated Soil Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese))
- [7] 王 柯, 刘 强, 孙 冲. 滤纸法在多种土类吸力测量中的应用[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 198 - 203, 227. (WANG Ke, LIU Qiang, SUN Chong. Application of filter paper method in suction measurement of various soils[J]. Yangtze River, 2019, 50(9): 198 - 203, 227. (in Chinese))
- [8] LEONG E C, HE L, RAHARDJO H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements[J]. Geotechnical Testing Journal, 2002, 25(3): 322 - 333.
- [9] SIMMS P H, YANFUL E K. A pore-network model for hydromechanical coupling in unsaturated compacted clayey soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 499 - 514.
- [10] FREDLUND D G, XING ANQING. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31: 521 - 532.
- [11] MCQUEEN I S, MILLER R F. Approximating soil moisture characteristics from limited data: empirical evidence and tentative model[J]. Water Resources Research, 1974, 10(3): 521 - 527.
- [12] 谌文武, 贾全全, 童艳梅. 莫高窟壁画地仗土-水特征曲线的测定与拟合[J]. 岩土力学, 2020(5): 1 - 10. (CHEN Wen-wu, JIA Quan-quan, TONG Yan-mei. Determination and fitting of soil-water characteristic curves of the frescoes of Mogao Grottoes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020(5): 1 - 10. (in Chinese))
- [13] 姚海林. 关于基质吸力及几个相关问题的一些思考[J]. 岩土力学, 2005(1): 67 - 70. (YAO Hai-lin. Thinking about matrix suction and several related issues[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(1): 67 - 70. (in Chinese))
- [14] 温天德. 非饱和土的渗透系数研究及其应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2019. (WEN Tian-de. Study on the Permeability Coefficient of Unsaturated Soil and Its Application[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [15] CHILDS E C, COLLIS-GEORGE N. The permeability of porous materials[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1950, 201: 392 - 405.

(编校: 黄贤沙)