

DOI: 10.11779/CJGE2018S1027

干密度对黄土渗透系数的影响

马亚维^{1, 2}, 谌文武^{*1, 2}, 毕 骏^{1, 2}, 郭桂红^{1, 2}, 焦贵德^{1, 2}

(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)

摘要: 非饱和渗透系数是研究非饱和土入渗规律的重要参数, 同时也是研究边坡失稳和地基浸湿变形的重要基础。本文采用变水头法测量原状黄土和重塑黄土饱和渗透系数, 基于 Childs & Collis-Geroge 模型, 结合土水特征曲线和饱和渗透系数, 详细探讨了原状黄土、不同干密度非饱和重塑黄土体积含水率与渗透系数的关系和规律。结果表明, 原状黄土的饱和渗透系数远小于重塑样, 重塑土样饱和渗透系数随着干密度的增大而减小; 黄土非饱和渗透系数减小趋势随着干密度增大而减小, 但在残余含水率附近, 不同干密度下试样的渗透性基本相同。

关键词: 非饱和土; 渗透系数; Childs & Collis-Geroge 模型; 干密度; 体积含水率

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S1-0165-06

作者简介: 马亚维(1980-), 女, 陕西户县人, 博士研究生, 主要从事岩土工程、非饱和土力学方面的研究和教学工作。E-mail: mayw@lzu.edu.cn。

Influence of dry density on coefficient of permeability of unsaturated loess

MA Ya-wei^{1, 2}, CHEN Wen-wu^{1, 2}, BI Jun^{1, 2}, GUO Gui-hong^{1, 2}, JIAO Gui-de^{1, 2}

(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, Ministry of Education, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The unsaturated permeability coefficient is one of the important parameters in the researches on the rules of unsaturated soil infiltration and the important basis of the researches on the instability of slopes and humidification deformation of foundations. The variable water head method is used to measure the permeability coefficients of undisturbed soil and remolded saturated loess. Combined with the soil-water characteristic curve and the saturated permeability coefficient, based on the Childs & Collis-George model, remolded unsaturated loess with different dry densities and the relationships between coefficient of permeability and volumetric moisture content as well as the rules of undisturbed loess are discussed. The results show that the saturated coefficient of permeability of the remolded loess samples is greater than that of the undisturbed loess samples, and it decreases with the increase of the dry density. The unsaturated coefficient of permeability of loess coefficient decreases as the moisture content is reduced, and the decrease trend decreases as the dry density increases. However, under about the residual moisture content, the permeability of the samples with different dry densities is basically identical.

Key words: unsaturated soil; coefficient of permeability; Childs & Collis-George model; dry density; volumetric moisture content

0 前 言

黄土具有显著的水敏特性, 一旦浸水或增湿, 强度弱化, 常引起边坡失稳、工程失效。而工程中常遇到非饱和土相关问题^[1-2], 如湿陷性黄土地基浸湿引起的不均匀沉降, 天然边坡土在连续长时间降雨时失稳破坏; 填埋场污染物在压实土层中的运移等, 这些问题都会涉及到非饱和土中水分迁移。非饱和土水分迁移数值分析中遇到的一个最重要的参数就是非饱和渗透系数。蒋中明等^[3]基于FLAC^{3D}平台编写了程序对边坡非饱和降雨入渗进行了分析, 认为基于非饱和渗透系数对边坡降雨入渗水分场的分析更接近实际。Ng等^[4]

通过对土质斜坡在降雨入渗下的稳定分析, 认为渗透系数对土坡稳定性有显著的影响, 稳定系数随着渗透系数的增大而增大。朱伟等^[5]认为非饱和渗透系数对土的渗流有重要的影响。Mehmet^[6]研究了土坝在水位下降时稳定性, 结果表明土的渗透特性与土坝稳定性有显著的相关性。Mitchell^[7]认为离心模拟能够正确地

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB744701); 兰州大学中央高校基本科研业务费(Izujbky-2014-5)

收稿日期: 2017-06-11

*通讯作者(E-mail: sungp@lzu.edu.cn)

描绘原污染物迁移现象, 包括非饱和细砂土中基质吸力引起的迁移。

因土体中基质吸力的存在, 非饱和土渗透系数直接测量非常困难, 不仅耗费时间, 通常需要半年多的时间甚至更长, 而且测定非饱和渗透系数的设备比较昂贵, 获取导水性质指标时有很大的不确定性。许多学者提出了间接求非饱和渗透系数的方法, 主要包括4类: ①基于统计学理论, 分析非饱和土渗透系数与土体物理化学参数之间的特定函数关系^[8-10]; ②基于分形理论, 建立非饱和土渗透系数和颗粒分布、孔隙通道形状、土壤颗粒的表面积分形特征的关系^[11-12]; ③基于土壤转换函数估算土体非饱和系数^[13-14]; ④基于实测的土水特征曲线和饱和渗透系数, 预测非饱和渗透系数^[15-17]。

各种模型因参数多而难以确定, 并且不同土类和地区在确定参数时都有很大的变异性, 限制了其应用, 而基于土水特征曲线和饱和渗透系数预测非饱和渗透系数的方法, 则能反映土体孔隙分布和颗粒联接性质, 具有较高的精确度^[18]。其中基于孔径分布函数和达西定律, 由 Childs 和 Collis-Geroge (1950 年) 提出的 CCG 模型和由 Brooks-Corey 将土水特征曲线 BC 模型代入 Burdine 模型建立的 BCB 模型以及由 Van Genuchten 将 Mualem 模型和土水特征曲线 VG 模型结合建立的 VGB 模型已被广泛用于非饱和土的渗透系数预测^[19-21]。CCG 模型具有广泛的适用性, 这种点统计模型计算精度较高; BCB 模型引入了孔隙分布参数, 具有明确的物理意义; 而 VGB 模型对于黄土的具有较好的效果。然而, 仅有很少的研究关注这些模型对于黄土拟合效果的适用性^[16], 因此有必要分析它们对于黄土的实用性。另一方面, 非饱和土渗透系数受到土性、孔隙结构和含水率等多因素的影响^[22-24], 目前的研究主要是建立渗透系数与含水率的关系, 而对于其他影响因素缺乏系统研究, 而这些影响因素也是准确预测非饱和渗透系数的基础。

因此, 本文采用压力板仪对西宁地区原状、重塑黄土进行土水特征曲线测试, 并对相应黄土的饱和渗透系数进行了试验, 采用 CCG 模型结合土水特征曲线 VG 模型对非饱和黄土渗透系数进行了预测, 在此基础上研究原状黄土、不同干密度重塑黄土非饱和渗透特性, 此结果为非饱和黄土水分迁移的研究提供参考。

1 Childs & Collis-Geroge 模型非饱和土渗透系数预测方法

1.1 Childs & Collis-Geroge 模型

Childs & Collis-Geroge 模型认为渗透系数与液体填充的孔隙尺寸分布密切有关, 而液体填充的孔径与基质吸力相关 (即土-水特征曲线)。Childs 等^[25]提出土孔径分布函数, 是依据土水特征曲线和饱和渗透系数预测非饱和渗透系数的一种方法。CCG 模型对各类土有较好的适应性, 准确性高, 在计算出点统计参数的基础上, 可以进一步针对不同土样统计简化模型, 便于应用。具体作法是将试验获得的土-水特征曲线沿体积含水率轴分成 m 等分, 用每一等分区段中点的基质吸力根据下式计算统计点的渗透系数:

$$k_w(\theta_w)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} A_d \sum_{j=1}^m [(2j+1-2i)\psi_j^{-2}] \quad (i=1, 2, 3, \dots, m) \quad (1)$$

$$A_d = \frac{T_s^2 \rho_w g \theta_s^p}{2 \mu_w N^2} \quad , \quad (2)$$

$$k_{sc} = A_d \sum_{j=1}^m [(2j+1-2i)\psi_j^{-2}] \quad (i=1, 2, 3, \dots, m) \quad , \quad (3)$$

$$N = m[\theta_s / (\theta_s - \theta_L)] \quad . \quad (4)$$

式中 $k_w(\theta_w)_i$ 为对应于第 i 个区段的中点体积含水率 $(\theta_w)_i$ 确定的渗透系数 (m/s); i 为区段编号, 随体积含水率的减小而增大, 例如, 当 $i=1$ 时, 表示第 1 个区段, 饱和体积含水率 θ_s , 当 $i=m$ 时, 表示最末一个区段, 相应于试验土-水特征曲线上最低的体积含水率 θ_L ; j 为从 1 到 m 的一个数; m 为在土-水特征曲线上, 从饱和体积含水率 θ_s 到最低容积含水率 θ_L 的区段总数; k_s 为实测饱和渗透系数; k_{sc} 为计算饱和渗透系数 (m/s); A_d 为调整常数 ($m \cdot s^{-1} \cdot kPa^2$); T_s 为水的表面张力 (kN/m); ρ_w 为水的密度 (kg/m^3); g 为重力加速度 ($N \cdot s/m^2$); μ_w 为水的绝对黏滞度 ($N \cdot s/m$); θ_s 为饱和或吸力为 0 时的体积含水率; p 为考虑不同尺寸空隙间相互影响的常数, 取为 2.0; N 为饱和体积含水率 θ_s 和零体积含水率 (即 $\theta_w=0$) 之间的总区段数。 ψ_j 为相应于 j 区段的基质吸力 (kPa)。

1.2 Van Genuchten 土水特征曲线方程^[26]

将土水特征曲线 Van Genuchten(VG) 模型和 CCG 模型结合获得一种预测非饱和渗透系数的方法, 可以通过确定土水特征曲线间接确定非饱和渗透系数。Van Genuchten 土水特征曲线方程为

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b\right]^{(1-1/b)}} \quad . \quad (5)$$

式中 a 为进气值函数的土性参数 (kPa^{-1}); b 为当基质吸力超过土的进气值时, 土中水流出率函数的土

性参数; ψ 为基质吸力 (kPa); θ_w 为体积含水率; θ_r 为残余含水率, 取 10^{-5} ; 其余同以上公式。

2 土样和试验过程

2.1 土样

试验用土取自青海西宁某工程场地, 取土深度为 2 m (YZ1) 和 5 m (YZ2), 黄土样表面为黄褐色, 土粒相对密度大约为 2.68, 颗粒曲线见图 1。YZ1 土样中砂粒、粉粒和黏粒含量分别占 27.8%, 57.8%, 14.4%, YZ2 土样中砂粒、粉粒和黏粒含量分别占 26.7%, 57.9%, 15.4%, 基本属性为低塑性粉土。黄土样的基本特性见表 1。

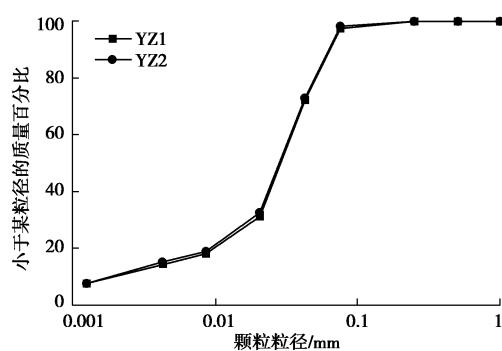


图 1 黄土样颗粒分布累积曲线

Fig. 1 Particle-size distribution of loess samples

表 1 黄土样品基本特性

Table 1 Basic properties of loess samples

土样	含水率 /%	密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	土粒相对密度	孔隙率 /%	液限 /%	塑限 /%
YZ1	11.2	1.60	2.67	45.6	23.3	14.6
YZ2	7.5	1.57	2.68	45.3	23.5	17.1

原状土样采用取土器取样, 塑料袋密封, 从现场带回试验室, 24 h 内测量土样的初始含水率。试验取样为不同取样深度下的原状土 2 个试样, 取土深度分别为 2 m (YZ1) 和 5 m (YZ2), 直接用环刀切取土样。制样时, 首先将土样烘干 24 h, 粉碎过 1 mm 筛, 喷洒水至设计含水率 15%, 充分搅拌均匀, 将土样装入塑料袋, 放置在恒温恒湿箱里 48 h。采用标准压样法将土样压制成 $7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm}$ 立方体, 随后将压实样切入环刀中。压实黄土取不同干密度为 1.5, 1.6, 1.7 g/cm^3 均两个, 分别做渗透试验和土水特征曲线试验, 取干密度 1.4, 1.8 g/cm^3 土样各一组, 做渗透试验。

2.2 试验过程

饱和土渗透系数测试采用南 55 型渗透仪变水头渗透试验方法测定, 直接用变水头装置的水头进行试样饱和, 根据我国土工试验规程, 按照标准试验过程进行试验。试验方案为原状土 1 (YZ1)、原状土 2 (YZ2)

和干密度 1.4 (GM1)、1.5 (GM2)、1.6 (GM3)、1.7 (GM4)、1.8 (GM5) g/cm^3 土样各取两个平行样, 共 12 个试样。试验结果按平均值确定。

土水特征曲线采用压力板仪进行试验。试验时将制好的环刀土样, 抽真空饱和, 放入饱和的陶土板, 开始试验。每个试样通过脱湿路径施加的基质吸力 ψ 均从 0 开始, 并逐级加至 700 kPa, 加压等级依次为 0, 70, 100, 200, 300, 400, 503, 597, 700 kPa。每级压力下每间隔一定时间测量从土样中流出的水, 直到水压力平衡试验结束。假设在每级压力下 24 h 内土样没有水流出则压力达到平衡, 因为此时土样中孔隙水压力为 0, 因此每级压力直接反映了基质吸力值。

3 结果分析和评价

3.1 饱和渗透系数

对原状土和重塑土样渗透系数测试结果见表 2。为了分析干密度对土样饱和渗透系数的影响, 基于最小二乘法采用 MATLAB 软件的 cftool 工具箱对试验数据进行拟合见图 2。随干密度增加, 土样饱和土渗透系数呈非线性降低趋势。经非线性回归分析, 符合以下分析式:

$$k_s = e^{(-48.65\rho_d^2 + 136.67\rho_d - 90.25)}, \quad (6)$$

式中, ρ_d 为重塑土样干密度 (g/cm^3), k_s 为土样饱和渗透系数 ($10^{-6} \text{ m}/\text{s}$)。

表 2 饱和黄土渗透系数 k_s 测试结果

Table 2 Saturated permeabilities of loess in tests ($10^{-6} \text{ m}/\text{s}$)

YZ1	YZ2	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5
97.0	180.0	310.0	200.0	47.0	9.6	8.0

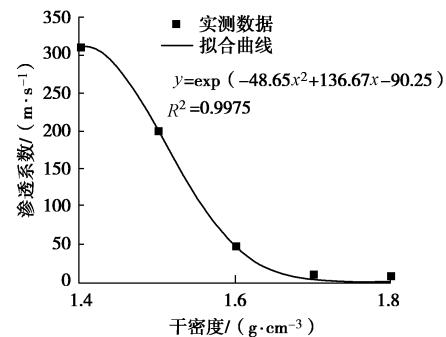


图 2 重塑黄土饱和渗透系数与干密度关系

Fig. 2 Correlation of saturated coefficient of permeability with dry density

原状黄土渗透系数大于干密度 $1.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ 的重塑土样, 而小于干密度 $1.4, 1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ 的重塑土样。为了与重塑土样进行比较, 将原状土 (YZ1\YZ2) 的干密度计算出来分别为 $1.43, 1.46 \text{ g}/\text{cm}^3$, 将参数代入公式 (6), 得出渗透系数分别为 $300.0 \times 10^{-6}, 266.6 \times 10^{-6} \text{ m}/\text{s}$,

对比原状土样实测的饱和渗透系数 97.0×10^{-6} , 180.0×10^{-6} m/s, 可知重塑样的渗透系数要远大于同一干密度原状样的渗透系数。这是由于原状土经扰动重塑后, 破坏了原有黄土的结构, 土中的裂隙、微裂隙以及残余层理结构遭到破坏, 微结构也发生变化, 从不均匀的孔隙结构变为均匀孔隙结构, 形成较多连通性差的小孔隙, 因而使得其渗透性增大。重塑土渗透系数随着干密度的增大而降低, 但是这种降低趋势随着干密度的增大而减小。这可能是因为土样的孔隙由大孔隙和毛管孔隙组成, 但渗流主要与大孔隙相关。随着干密度的增大, 重塑土中连通的大孔隙逐渐减小, 小孔隙增多, 而水分只能连通的大孔隙, 因此这时再增大干密度, 减小孔隙比, 饱和黄土的渗透系数变化不大。从图2中可以看出, 干密度大于 1.6 g/cm^3 的重塑土渗透系数变化不大, 尤其在干密度 $1.7 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ 之间变化很小。

3.2 土水特征曲线

采用VG模型对土水特征曲线进行拟合, 拟合参数结果见表3, 为了比较不同土样对模型的拟合效果, 图3给出了5个土样的拟合曲线。

表 3 土水特征曲线 VG 模型拟合参数

Table 3 SWCC fitting parameters from VG model

土样 s 编号	$a/(\text{kPa}^{-1})$	b	相关系数 R^2
YZ1	17.981	2.410	0.9995
YZ2	14.357	1.872	0.9998
GM1	1.393	1.248	0.9995
GM2	3.563	1.347	0.9979
GM3	6.296	1.358	0.9980

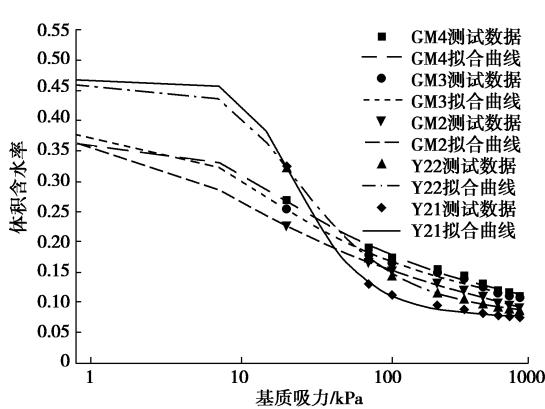


图 3 VG 模型在黄土中的拟合曲线

Fig. 3 Fitting SWCCs of VG model for loess samples with different dry densities

3.3 非饱和渗透系数预测

根据Childs & Collis-Geroge模型, 结合土水特征曲线VG模型, 将土水特征曲线分为20等分, 对应于每个等分中点的基质吸力算得渗透系数, 得出压实土不同

干密度下, 渗透系数与体积含水率关系, 结果见表4。不同原状土的渗透系数与体积含水率关系, 结果见表5。

表 4 不同干密度下压实黄土渗透系数与体积含水率关系

Table 4 Relationship between coefficient of permeability and volumetric moisture content of compacted loess with different dry densities

$\rho_d = 1.5 \text{ g/cm}^3$	$\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$		$\rho_d = 1.7 \text{ g/cm}^3$		
	体积含水率 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	渗透系数 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	体积含水率 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	渗透系数 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
0.42444	5.40×10^{-5}	0.41093	1.28×10^{-5}	0.38081	2.61×10^{-6}
0.38937	9.57×10^{-6}	0.37902	3.00×10^{-6}	0.35241	6.41×10^{-7}
0.35430	2.85×10^{-6}	0.34712	1.07×10^{-6}	0.32402	2.38×10^{-7}
0.31923	9.04×10^{-7}	0.31522	3.97×10^{-7}	0.29562	9.23×10^{-8}
0.28416	2.75×10^{-7}	0.28331	1.42×10^{-7}	0.26722	3.47×10^{-8}
0.24909	7.62×10^{-8}	0.25141	4.65×10^{-8}	0.23883	1.21×10^{-8}
0.21402	1.82×10^{-8}	0.2195	1.32×10^{-8}	0.21043	3.69×10^{-9}
0.17895	3.51×10^{-9}	0.1876	3.02×10^{-9}	0.18203	9.34×10^{-10}
0.14388	4.92×10^{-10}	0.1557	4.97×10^{-10}	0.15364	1.76×10^{-10}
0.10881	3.94×10^{-11}	0.12379	4.46×10^{-11}	0.12524	1.89×10^{-11}

表 5 不同原状土渗透系数与体积含水率关系

Table 5 Relationship between coefficient of permeability and volumetric moisture content of undisturbed loess samples

原状土 1 体积含水率 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	原状土 2 渗透系数 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		
	渗透系数 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	体积含水率 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
0.45919	2.50×10^{-5}	0.45923	4.84×10^{-5}
0.41877	1.41×10^{-5}	0.42006	2.15×10^{-5}
0.37836	8.32×10^{-6}	0.38088	1.11×10^{-5}
0.33794	4.86×10^{-6}	0.34170	5.73×10^{-6}
0.29752	2.70×10^{-6}	0.30253	2.82×10^{-6}
0.25710	1.38×10^{-6}	0.26335	1.27×10^{-6}
0.21668	6.24×10^{-7}	0.22418	5.01×10^{-7}
0.17627	2.30×10^{-7}	0.18500	1.59×10^{-7}
0.13585	5.89×10^{-8}	0.14582	3.50×10^{-8}
0.09543	7.15×10^{-9}	0.10665	3.65×10^{-9}

为了建立非饱和渗透系数与体积含水率之间的关系式, 对表4, 5中相关数据进行非线性拟合, 拟合结果见图6, 拟合参数见表6, 拟合分析关系式为

$$K_w = n e^{m\theta} \quad (7)$$

式中, K_w 为土样非饱和渗透系数, θ 为土样体积含水率, n , m 为拟合参数。

从图4可以看出, 黄土非饱和渗透系数与体积含水率的对数呈线性上升趋势, 在饱和含水率时达到最大, 相差5个数量级; 而不同干密度的土样, 随着干密度增大, 土体孔隙率减小, 土体内部孔隙也由较大的孔隙

变为较小的孔隙, 因此渗透系数减小。同时, 原状土样与压实土样相比, 具有较高的渗透系数。这是因为原状土样孔隙不均匀, 水能从裂隙或较大的连通孔隙通过, 而重塑土因压实破坏了原有土体结构, 形成了较多的小孔隙, 水难以通过。

表 6 非饱和渗透系数与体积含水率拟合曲线参数

Table 6 Results of fitting curve parameters from relationship between volumetric moisture content and unsaturated coefficient of permeability

试样	干密度 /(g·cm ⁻³)	n	m	相关系数 R ²
压实土	1.5	7.0587×10 ⁻¹⁴	48.0456	0.99932
	1.6	2.1108×10 ⁻¹³	43.6060	0.99875
	1.7	4.1039×10 ⁻¹⁴	47.1824	0.99868
原状土	原状土 1	4.2769×10 ⁻⁸	13.8809	0.99929
	原状土 3	6.9331×10 ⁻⁹	19.2580	0.99871

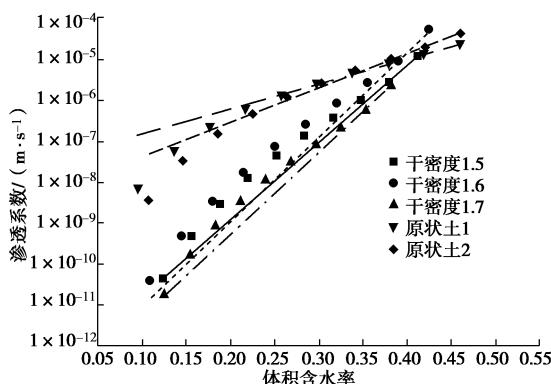


图 4 黄土非饱和渗透系数与体积含水率关系

Fig. 4 Correlation of unsaturated coefficient of permeability with volumetric moisture content

4 结 论

本文将Childs & Collis-Geroge孔径分布函数与土水特征曲线Van Genuchten方程相结合, 以实测的饱和渗透系数和土水特征曲线预测非饱和黄土的渗透系数, 并进一步采用MATLAB软件的cfotool工具对非饱和黄土渗透系数与体积含水率的关系进行了拟合, 计算出相关参数和相关系数的平方。结果表明:

(1) 原状黄土饱和渗透系数大于重塑黄土, 而重塑黄土饱和渗透系数与干密度有密切关系, 渗透系数随着干密度的增大而降低, 但是这种降低趋势随着干密度的增大而减小。减小趋势呈非线性关系, 经回归分析, 关系为 $k_s = e^{(-48.65x^2 + 136.67x - 90.25)}$ 。实测数据与关系式的相关系数大于0.99, 该公式可用于预测饱和黄土渗透系数。

(2) Van Genuchten方程用于拟合非饱和黄土的土

水特征曲线具有很好的适应性, 其相关系数的均大于0.99。采用Childs & Collis-Geroge模型和Van Genuchten模型结合, 能用来间接计算非饱和黄土渗透系数, 干密度对非饱和系数在含水率较大时影响比较大, 而在含水率较小时影响比较小。

(3) 非饱和黄土渗透系数与体积含水率、干密度有密切关系, 随着干密度增大, 渗透系数减小, 随着体积含水率增大渗透系数显著增大, 而且随着干密度增大这种趋势越大。对预测数据进行非线性拟合, 发现非饱和黄土与体积含水率呈指数函数关系: $K_w = ne^{m\theta}$ 。

参考文献:

- [1] FREDLUND D G. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (FREDLUND D G. Unsaturated soil mechanics[M]. CHEN Zhong-yi, ZHANG Zai-ming, CHEN Yu-jiong, et al, trans. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))
- [2] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201 - 272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soil and special soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201 - 272. (in Chinese))
- [3] 蒋中明, 熊小虎, 曾 铃. 基于 FLAC^{3D}平台的边坡非饱和降雨入渗分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 855 - 861. (JIANG Zhong-ming, XIONG Xiao-hu, ZENG Ling. Based on FLAC^{3D} platform unsaturated slope rainfall infiltration analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 855 - 861. (in Chinese))
- [4] NG C W W, SHI Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage[J]. Computers and Geotechnics, 1998, 22(1): 1 - 28.
- [5] 朱 伟, 程南军, 陈学东, 等. 浅谈非饱和渗流的几个基本问题[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 235 - 240. (ZHU wei, CHENG Nan-jun, CHEN Xue-dong, et al. Introduction to several basic issues of unsaturated seepage flow[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 235 - 240. (in Chinese))
- [6] MEHMET M B. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions[J]. Computers and Geotechnics, 2007, 34(2): 81 - 91.
- [7] MITCHELL R J. Matrix suction and diffusive transport in centrifuge models[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(3): 357 - 363.
- [8] BRUTSAERT W. Some methods of calculating unsaturated

- permeability[J]. American Society of Agricultural Engineers, 1967, **10**(3): 400 - 404.
- [9] MUALEMY, DAGAN F. Hydraulic conductivity of soil: Unified approach to the statistical models[J]. Soil Science Society of America 1978, **42**(3): 392 - ss395.
- [10] SNYDER V. Statistical hydraulic conductivity models and scaling of capillary phenomena in porous media[J]. Soil Science Society of America, 1996, **60**(3): 771 - 774.
- [11] CRAWFORD J W. The relationship between structure and the hydraulic conductivity of soil[J]. European Journal of Soil Science, 2010, **45**(45): 493 - 502.
- [12] PAPE H, RIEPE L, SCHOPPER J R. Interlayer conductivity of rocks-a fractal model of interface irregularities for calculating interlayer conductivity of natural porous mineral systems[J]. Colloids & Surfaces, 1987, **27**(4): 97 - 122.
- [13] BOUMA J, LANEN H A J. Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities[J]. Quantified Land Evaluation, 1986, **27**(2): 106 - 110
- [14] VAN GENUCHTEN M T, LEIJ F J. On estimating the hydraulic properties of unsaturated soils[C]// Proc Int Worksh. on Indirect Methods of Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. California: University of California, Riverside, 1992: 1 - 14.
- [15] 王成华, 李广信, 王 真. 确定非饱和土渗透系数的间接方法简评[C]// 中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集(上册), 2003: 347 - 350. (WANG Cheng-hua, LI Guang-xin, WANG Zhen. Indirect method to determine the permeability coefficient of unsaturated soil profile[C]// China Civil Engineering Society of the 9th Academic Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2003: 347 - 350. (in Chinese))
- [16] TOLEDO P G, NOVY R A, DAVIS H T, et al. Hydraulic conductivity of porous media at low water content[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, **54**(3): 673 - 679.
- [17] BROADBRIDGE P, WHITE I. Constant rate rainfall infiltration: a ersatile nonlinear model 1. analytic solution[J]. Water Resources Research, 1988, **24**(1): 145 - 154
- [18] AGUS S S, LEONG E C, SCHANZ T. Assessment of statistical model for indirect determination of permeability function from soil-water characteristic curve[J]. Géotechnique, 2003, **53**(2): 279 - 282.
- [19] SAMINGAN A S. Mechanical and hydraulic properties of compacted tropical residual soils[J]. Polymer Korea, 2009, **33**(33): 97 - 103.
- [20] GARG N K, GUPTA M. Assessment of improved soil hydraulic parameters for soil water content simulation and irrigation scheduling[J]. Irrigation Science, 2015, **33**(4): 247 - 264.
- [21] KUNZE R J, UEHARA G, GRAHAM K. Factors important in the calculation of hydraulic conductivity[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1968, **32**(6): 760 - 765.
- [22] ASSOULINE S. Modeling the relationship between soil bulk density and the water retention curve[J]. Vadose Zone Journal, 2006, **5**(2): 554 - 563.
- [23] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和原状和重塑 Q_3 黄土渗水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 1020 - 1027. (YAO Zhi-hua, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng, et al. Hydraulic conductivity of unsaturated undisturbed and remolded Q_3 loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 1020 - 1027. (in Chinese))
- [24] 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. Considering the influence of dry density of artificial compaction coefficient of permeability of unsaturated loess experimental study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(11): 2364 - 2368. (in Chinese))
- [25] CHILDS E C, COLLIS-GEORGE G N. The permeability of porous materials[C]// Proceedings of the Royal Society of London Series A. London, 1950.
- [26] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity for unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892 - 898.

(本文责编 孙振远)