

DOI: 10.11779/CJGE2018S1009

净平均应力对非饱和重塑黄土渗水系数的影响

高登辉¹, 陈正汉^{2, 3}, 邢义川¹, 郭楠², 邓刚¹, 扈胜霞⁴

(1. 中国水利水电科学研究院岩土所, 北京 100048; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 3. 陆军勤务学院军事设施系, 重庆 401311;
4. 延安大学建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

摘要: 为了研究净平均应力对非饱和重塑黄土渗水系数的影响, 本文借助考虑净平均应力影响的广义土水特征曲线, 应用间接方法预估渗水系数。对重塑黄土试样进行了四个控制净平均应力为常数而基质吸力逐步增大的三轴收缩试验。采用 Van Genuchten 模型对试验获取的土-水特征曲线进行拟合, 通过拟合的连续曲线预测了不同净平均应力下非饱和重塑黄土的渗水系数。结果表明: 净平均应力对土-水特征曲线的影响有明显规律, 同一基质吸力下, 净平均应力越大, 试样的体积含水率越小, 在一定吸力范围内, 体积含水率与取对数基质吸力的关系曲线近似呈直线; 渗水系数随基质吸力的增大而减小, 同一基质吸力下, 净平均应力越大渗水系数越小, 较低净平均应力下基质吸力与取对数渗水系数的关系曲线近似呈直线, 随着净平均应力的增加, 关系曲线变为明显的折线。所得的成果为预测黄土地区高填方的增湿变形、降雨入渗下的边坡稳定性评价等方面提供了科学依据。

关键词: 非饱和重塑黄土; 基质吸力; 广义土-水特征曲线; 净平均应力; 渗水系数

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S1-0051-06

作者简介: 高登辉(1988-), 男, 河南确山人, 中国水利水电科学研究院博士研究生, 主要从事非饱和土力学及工程应用的研究。E-mail: 1403970876@qq.com。

Influence of net mean stress on permeability coefficient of unsaturated remolded loess

GAO Deng-hui¹, CHEN Zheng-han^{2, 3}, XING Yi-chuan¹, GUO Nan², DENG Gang¹, HU Sheng-xia⁴

(1. Geotechnical Engineering Institute, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Department of Military Installation, Army Service University, Chongqing 401311, China; 4. School of Architectural and Civil Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract: In order to study the influence of the net mean stress on the permeability coefficient of unsaturated remolded loess, an indirect method is used to predict the permeability coefficient through the generalized soil water characteristic curve which involves the effect of net mean stress on SWCC. To get the generalized soil water characteristic curve, four triaxial contraction tests are conducted for remolded loess samples by increasing matrix suction step by step and controlling the net mean stress as constant. Based on the measured generalized soil water characteristic curve, the Van Genuchten model for predicting the permeability coefficient of unsaturated soil is used. The permeability coefficient of every matrix suction under different net mean stresses is calculated. The results show that the permeability coefficient of unsaturated remolded loess decreases nonlinearly with the increase of the matrix suction in the semi-log coordinates. Under the same matrix suction, the smaller the net mean stress, the greater the permeability coefficient. The results may provide a useful basis for the deformation of high embankment and rainfall infiltration of slope stability evaluation in loess regions.

Key words: unsaturated remolded loess; matric suction; generalized soil-water characteristic curve; net mean stress; permeability coefficient

0 引言

饱和土的渗透系数(仅指渗水系数)可以通过渗透试验, 采用达西渗透定律很容易求得。由于非饱和土孔隙中气体占据了一定的体积, 阻碍了水的流动, 过水断面面积缩小。因此, 渗水系数较低且不能再假

定为常数, 其值将随含水率或基质吸力的变化而变化, 通过试验直接获取渗水系数的方法也变得相对复杂。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672330, 51379220); 大学生创新训练计划项目(D2016120)

收稿日期: 2017-06-11

非饱和土的渗水系数主要有直接测定法和间接计算法两种。直接测定非饱和土的渗水系数,国内外学者做了很多有益的尝试。陈正汉等^[1]利用伽马射线对水平土柱进行了渗水系数的测定,徐永福等^[2]研制了一套加压型的常水头试验装置能测量应力状态对非饱和土渗透系数的影响,李永乐等^[3]通过特制的非饱和土三轴仪尝试了非饱和土渗水系数的直接测定法,Chiu^[4]等应用瞬态法对3种不同含水率条件下的膨润土加砂混合材料的非饱和渗透系数进行了测定。以上探索对非饱和土渗水系数的直接量测具有借鉴意义。但是,由于试验设备和试验难度的限制,许多研究者回避该方法,而采用土-水特征曲线预测非饱和土渗水系数的间接法。Van Genuchten等^[5]将非饱和土渗透系数与土-水特征曲线联系起来,建立经验公式计算非饱和土渗透系数;Fredlund等^[6]在基于孔隙尺寸这一随机变量而建立的预测渗透系数模型的基础上,提出了建立在整个土-水特征曲线上的渗透函数;姚志华^[7]等沿试样长度方向分布多个TDR水分计和热传导吸力探头,对试样一端进水,获取每个断面的土-水特征曲线,由求得的容水率和扩散率计算出非饱和土的渗水系数。通过土-水特征曲线预测非饱和渗水系数的间接法,是一个很好的思路,但研究中忽略了一点,不同应力状态下的土-水特征曲线是不一样的,非饱和土的渗水系数也应该受应力状态的影响。

本文通过控制不同净平均应力的三轴收缩试验,获取了考虑净平均应力的广义土-水特征曲线。用Van Genuchten模型拟合出的土-水特征曲线,计算出各基质吸力下的非饱和土渗水系数,研究了净平均应力对重塑非饱和黄土渗水系数的影响。

1 研究方法

1.1 试验仪器与试样制备

试验仪器采用改装的三轴仪,其构造在文献[8]中有详细介绍。试验用土取自延安新区某工地,基本物理性质参数见表1^[9]。

表 1 Q₃ 黄土的基本物理性质参数

Table 1 Physical parameters of Q₃ loess

相对密度	塑限 w _p /%	液限 w _L /%	最大干密度 ρ _{dmax} /(g·cm ⁻³)	最优含水率 w /%
2.71	17.3	31.1	1.91	12.5

先将土碾碎,并过2 mm筛,然后按90%的设计饱和度用喷雾器分层喷水预湿,待土样预湿均匀(一般需要48 h)。按88%的相对压实度(工地某一功能区的实测值)设计试样,干密度为1.68 g/cm³,算出

一个土样所需的湿土,将湿土均匀分5份,在试样模中分5层压实,每层高度用套在试样模活塞上的钢环控制,试样的直径和高度分别为39.1 mm和80 mm。

1.2 试验方案

共进行了4个控制净平均应力为常数、吸力逐级增加的三轴等向压缩试验。每级荷载下,固结稳定的标准为在2 h内试样体变量不大于0.01 cm³(试样体变的量测装置及方法和常规三轴仪相同,但非饱和土三轴仪采用双层压力室、试验时采用无气水,一定程度上减少了常规三轴仪体变量测的误差),且在2 h内试样的排水量不大于0.006 cm³。具体的试验方案见表2。表中, p是净平均应力, s为基质吸力,分别由式(1)和式(2)定义如下:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - u_a = \sigma_3 - u_a \quad , \quad (1)$$

$$s = u_a - u_w \quad . \quad (2)$$

表 2 延安新区重塑黄土的广义土-水特征曲线试验方案

Table 2 Test schemes of generalized SWCC

p/kPa	基质吸力 s/kPa										
	10	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450
50	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	
100	20	50	100	150	200	250	300	350	400	—	
150	20	50	100	150	200	250	300	350	400	—	—

2 广义土-水特征曲线

通常定义体积含水率和基质吸力的关系曲线为土-水特征曲线。研究发现温度、干密度、应力状态等对土-水特征曲线都有影响,考虑这些影响因素的土-水特征曲线,可定义为广义土-水特征曲线。

这里主要研究净平均应力对土-水特征曲线的影响,按前文的试验方案可以获取考虑净平均应力的广义土-水特征曲线。

2.1 广义土-水特征曲线试验分析

根据试样的初始含水率和每级吸力稳定后的排水量,可以得出试样分别在4个不同净平均应力作用下,各级吸力稳定后的试样体积含水率(用θ(w)表示),对应值列于表3。

表3中的p_{atm}为大气压,以下同。根据表3中数据作出不同净平均应力下的土-水特征曲线如图1。

从图1中可以看出试样的体积含水率随基质吸力的增大而减小。在0~50 kPa之间曲线斜率变化相对平缓,通常定义该段为边界效应段,这是由于土样在饱和度比较高的情况下,孔隙中的空气处于封闭状态,以气泡的形式悬浮在孔隙水中,随水流动,孔隙中仅有少量的水被挤出;在50~400 kPa之间曲线斜率迅

表 3 不同净平均应力下各吸力对应的体积含水率

Table 3 Volumetric water contents of corresponding suctions under different net mean stresses

s/kPa	$\ln \frac{s+p_{atm}}{p_{atm}}$	$p=10$ kPa	$p=50$ kPa	$p=100$ kPa	$p=150$ kPa
0	0	34.53	33.63	32.97	31.56
20	0.18	33.45	32.53	31.69	30.68
50	0.40	32.57	31.76	30.88	30.00
100	0.69	29.72	28.96	28.04	27.14
150	0.91	28.17	27.55	26.63	25.64
200	1.09	27.14	26.53	25.66	24.30
250	1.24	26.39	25.73	24.91	23.65
300	1.38	25.73	25.02	24.32	23.05
350	1.49	25.27	24.51	23.60	22.63
400	1.60	25.00	24.28	23.44	—
450	1.69	24.75	23.98	—	—

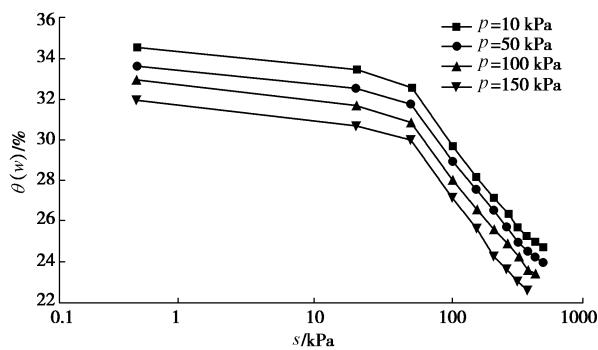


图 1 不同净平均应力下的土-水特征曲线

Fig. 1 SWCCs under different net mean stresses

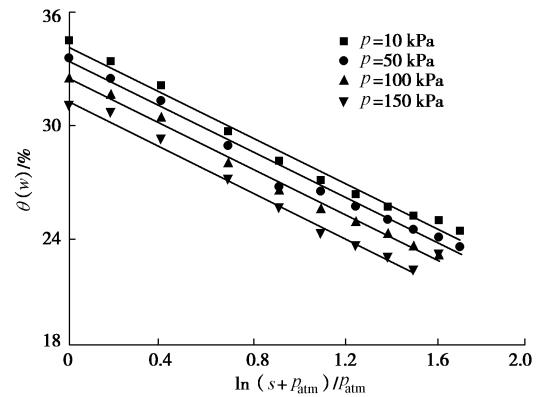
速增大, 该段被定义为过渡段, 此时气体在孔隙中处于连通和部分连通形态, 在这一区段, 空气开始进入土体, 逐渐占据土体内部较大的孔隙通道, 随着吸力增加, 孔隙中自由水快速排出; 由于设备限制更高的吸力无法施加, 理论上吸力增大到一定值, 曲线斜率将又趋于平缓, 即为残余段, 这一区段孔隙中的气体完全处于连通状态, 此时土体孔隙中自由水已经很少, 只填充在个别微小孔隙或孔隙死角中, 此时的土体具有很高的吸力, 但吸力的大幅度增加只能引起土体含水率很小变化, 这时吸力对非饱和土的性质影响变得越来越小。另外还可以看出净平均应力对土水特征曲线的影响很明显, 同一吸力下, 净平均应力越大, 体积含水率越小, 因为净平均应力作用下土样被压密, 土样中孔隙变小, 多余的自由水将被挤出。

作 $\ln(s+p_{atm})/p_{atm}$ 与 $\theta(w)$ 的关系曲线如图 2。从图 2 中可以看出, $\theta(w) - \ln((s+p_{atm})/p_{atm})$ 关系近似呈线性, 不同净平均应力下直线的斜率近似相等, 这与黄海等^[10]研究成果相一致, 本文借鉴文献[10]的广

义土-水特征曲线的表达式, 即

$$\theta(w) = \theta_0 - ap - b \ln \frac{s+p_{atm}}{p_{atm}} \quad , \quad (3)$$

式中 θ_0 为土样在无应力、无吸力作用时的起始体积含水率; a 为与净平均应力相关的常数; b 为趋势线的斜率, 可以取均值。本文中 a 取 0.02 (1/kPa), b 取 6.02。

图 2 不同净平均应力下的 $\theta(w) - \ln((s+p_{atm})/p_{atm})$ 关系曲线Fig. 2 $\theta(w) - \ln((s+p_{atm})/p_{atm})$ relation curves under different net mean stresses

2.2 广义土-水特征曲线方程拟合

在应用非饱和土土-水特征曲线时, 只有把试验获取的散点变成连续函数, 才能将土-水特征曲线应用到相应的渗水系数计算中。Fredlund 等^[6], Van Genuchten^[5]都曾提出相应的模型方程, 均能描述全吸力范围的土-水特征曲线, 并较为流行。鉴于本文的吸力试验范围较窄 (0~450 kPa), 为了拓宽试验结果的应用范围, 研究不同净平均应力作用下全吸力范围的渗水系数规律, 本文采用 Van Genuchten 模型方程对试验获取的散点进行拟合, 拟合结果如图 3。

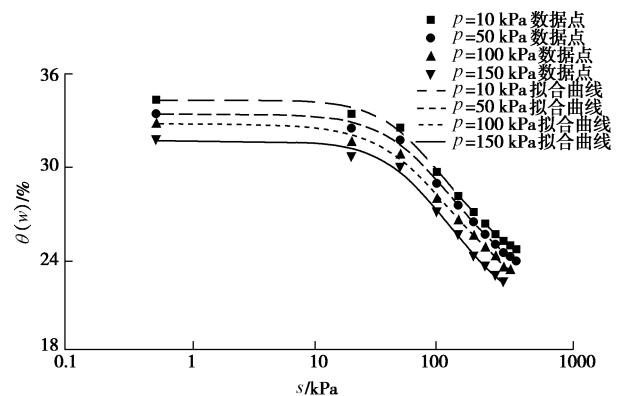


图 3 不同净平均应力下的土水特征曲线拟合

Fig. 3 SWCCs under different net mean stresses

Van Genuchten 模型方程为

$$\theta(w) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[(1 + s/a)^b \right]^{(1-1/b)}} \quad , \quad (4)$$

式中 θ_r 为残余体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率; s 为基质吸力; a 为与进气值有关的参数; b 为与土样排水有关的参数。

Van Genuchten 模型方程拟合参数及相关系数列于表 4。

表 4 广义土-水特征曲线拟合参数

Table 4 Fitting parameters of generalized SWCC

p/kPa	$\theta_s/\%$	$\theta_r/\%$	a	b	R^2
10	34.53	20.99	69.04	1.68	0.997
50	33.63	19.17	70.93	1.59	0.996
100	32.97	16.50	64.43	1.47	0.995
150	31.56	15.76	76.21	1.54	0.998

3 非饱和土渗水系数的预测

饱和土样的渗透系数可以进行现场或者室内渗透试验, 利用 Darcy 定律很容易求得。对于非饱和土可以设想水仅通过水所占有的孔隙空间流动, 而无法在空气所占有的孔隙中流动, 空气所占有的孔隙可视为与土颗粒相似, 这样随着孔隙中气体所占体积的增加, 水流动的通道将逐渐减小。根据这一假想, 非饱和土的渗透系数, 可以跟饱和土一样, 利用 Darcy 定律来求得。但是, 非饱和土渗透系数实测起来难度相对较大, 从力学模型和统计模型来对非饱和土渗透系数进行预测一直是个热点, D. G. Fredlund^[11]给出了由土-水特征曲线求非饱和土渗透系数的表达式:

$$k_w(\theta)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} A_d \sum_{j=1}^m (2j+1-2i)(u_a - u_w)_j^{-2} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (5)$$

式中 $k_w(\theta)_i$ 为第 i 等分中点的体积含水率 θ_i 对应的渗水系数 (m/s); m 为在土-水特征曲线上, 从饱和体积含水率 θ_s 到最低体积含水率 θ_L 的分段总数, 本文取 $m=20$; k_s 为实测饱和渗透系数; k_{sc} 为计算的饱和渗透系数; A_d 为调整常数; $(u_a - u_w)_j$ 为相应于 j 分段的基质吸力。式 (5) 中,

$$k_{sc} = A_d \sum_{j=1}^m (2j+1-2i)(u_a - u_w)_j^{-2} \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, m, \quad (6)$$

$$A_d = \frac{T_s^2 \rho_w g \theta_s^\xi}{2 \mu_w N^2},$$

式中 T_s 为水的表面张力 (取 $7.28 \times 10^{-5} \text{ kN/m}$); ρ_w 为水的密度 ($1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$); g 为重力加速度 (9.8 m/s^2); μ_w 为水的绝对黏滞度 ($100.5 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$); ξ 为考虑不同尺寸孔隙间相互影响的常数其值设定为 2.0; N 为在饱和体积含水率 θ_s 与土-水特征曲线上最小体积含水率之间的计算分段的总数, $N = m[\theta_s/(\theta_s - \theta_L)]$, 由于 $\theta_L \neq 0$, 所以 $m < N$ 。

为了计算不同净平均应力下的非饱和土重塑黄土的渗透系数, 首先应该测出饱和重塑黄土的渗透系数, 由文献中[12]知, 延安新区该干密度下饱和重塑 Q_3 黄土的渗透系数 $k_{s0}=1.18 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。文献[13]在对不同地区黄土渗透试验基础上, 提出了净平均应力与饱和重塑黄土渗透系数的关系表达式:

$$k_s = k_{s0} \exp(-\alpha \sigma_n), \quad (7)$$

式中 k_{s0} 为无围压作用下饱和渗透系数; α 为该区域土的拟合系数; σ_n 为有效主应力, 对于等向压缩, 其值即净围压。

由该公式计算出试样在不同净平均应力下的渗透系数如下: $p=10 \text{ kPa}$, $k_s=1.15 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$; $p=50 \text{ kPa}$, $k_s=1.04 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$; $p=100 \text{ kPa}$, $k_s=9.21 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$; $p=150 \text{ kPa}$, $k_s=8.12 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。根据式 (5) 计算出不同净平均应力下各吸力对应的渗透系数列于表 5。

由表 5 中数据, 做出不同净平均应力下, 吸力与相应渗透系数的关系曲线如图 4。

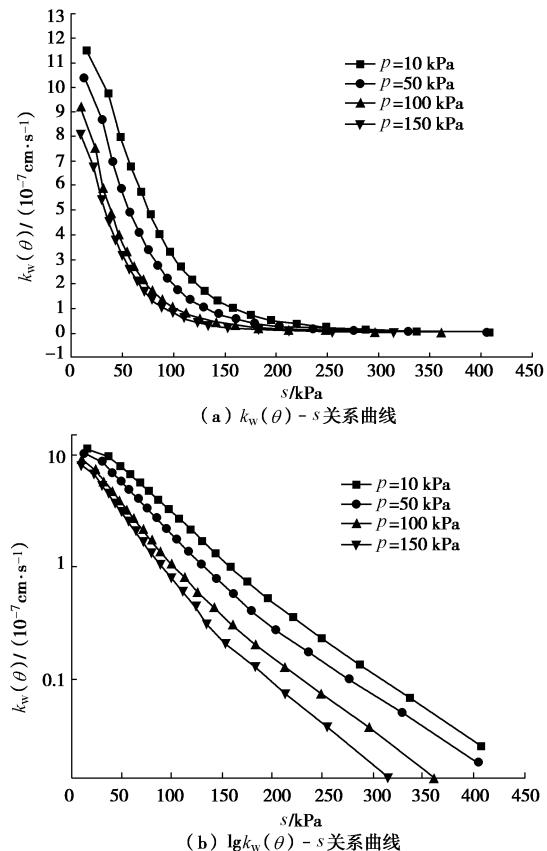


图 4 不同净平均应力下计算渗透系数

Fig. 4 Calculated permeability coefficients under different net mean stresses

从图 4 可以看出, 非饱和土的渗透系数随基质吸力的增加而减小。这是因为基质吸力的增加, 气体将逐渐取代大孔隙中的水, 而挤占水在孔隙中的流动空间, 导致水通过较小孔隙流动, 从而使流程的绕曲度

表 5 不同净平均应力下各吸力对应的渗水系数

Table 5 Permeability coefficients of corresponding suctions under different net mean stresses

点 <i>i</i>	<i>p</i> =10 kPa		<i>p</i> =50 kPa		<i>p</i> =100 kPa		<i>p</i> =150 kPa	
	<i>s</i> /kPa	<i>k_w(θ)_i</i> ($10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	<i>s</i> /kPa	<i>k_w(θ)_i</i> ($10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	<i>s</i> /kPa	<i>k_w(θ)_i</i> ($10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	<i>s</i> /kPa	<i>k_w(θ)_i</i> ($10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	15	11.490	12	10.393	9	9.205	9	8.115
2	36	9.739	30	8.688	23	7.542	22	6.750
3	48	7.988	40	6.982	31	5.880	30	5.384
4	58	6.787	49	5.867	39	4.865	37	4.511
5	68	5.743	57	4.914	46	4.022	43	3.770
6	77	4.825	66	4.088	54	3.307	50	3.132
7	86	4.018	75	3.372	61	2.698	57	2.579
8	96	3.312	84	2.753	70	2.180	64	2.103
9	107	2.698	94	2.221	79	1.742	71	1.695
10	118	2.167	104	1.766	88	1.373	79	1.347
11	130	1.712	116	1.382	99	1.065	88	1.053
12	143	1.328	129	1.061	112	0.811	99	0.807
13	158	1.006	144	0.796	125	0.604	110	0.605
14	175	0.741	161	0.580	141	0.437	124	0.441
15	195	0.528	179	0.408	160	0.306	134	0.310
16	220	0.359	203	0.274	183	0.205	153	0.207
17	249	0.230	236	0.173	212	0.129	183	0.129
18	287	0.135	276	0.100	248	0.075	213	0.074
19	337	0.068	329	0.050	296	0.037	255	0.037
20	408	0.025	405	0.018	361	0.013	315	0.013

增加, 单位时间内流出的水量将减少, 进而渗透系数降低。

从图 4 中还可以看出, 同一吸力下, 净平均应力越大, 非饱和土渗水系数越小, 这是因为净平均应力使土体固结变形, 土骨架更加紧密, 孔隙变得更小, 应力场对渗流场产生影响; 较小净平均应力下, 在半对数坐标里 $s - k_w(\theta)$ 关系曲线近似为直线, 随着净平均应力的增大, 关系曲线逐渐变成明显的折线。

4 结 论

(1) 三轴收缩试验得出的非饱和重塑黄土土-水特征曲线表明: 净平均应力对土-水特征曲线的影响规律很明显, 同一吸力下净平均应力越大, 体积含水率越小, 在一定吸力范围内 $\theta(w) - \ln((s + p_{\text{atm}})/p_{\text{atm}})$ 的关系曲线近似呈直线。

(2) 利用 Van Genuchten 模型方程拟合出的土-水特征曲线, 计算出不同净平均应力下的非饱和土渗水系数, 发现随着基质吸力的增大非饱和土渗水系数逐渐减小, 在 0~150 kPa 之间, 吸力对渗水系数有较大影响, 150 kPa 以后对渗水系数的影响逐渐减小。

(3) 对不同净平均应力下的 $s - k_w(\theta)$ 关系曲线分析发现: 同一吸力下, 净平均应力越大渗水系数越小, 在净平均应力较小时, $s - \lg k_w(\theta)$ 关系曲线近似为直线, 随着净平均应力的增大关系曲线逐渐呈明显的折线。

参考文献:

- [1] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 9~20. (CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, WANG Yong-sheng. Experimental studies of fluid motion, suction and pore pressures in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(3): 9~20. (in Chinese))
- [2] 徐永福, 兰守奇, 孙德安, 等. 一种能测量应力状态对非饱和土渗透系数影响的新型试验装置[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 160~164. (XU Yong-fu, LAN Shou-qi, SUN De-an, et al. New apparatus for measurement of stress effect on permeability of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 160~164. (in Chinese))
- [3] 李永乐, 刘翠然, 刘海宁, 等. 非饱和土的渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3861~3865. (LI Yong-le, LIU Cui-ran, LIU Hai-ning, et al. Testing study on permeability characteristics of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3861~3865. (in Chinese))
- [4] CHIU C F, NG C W W. A state-dependent elasto-plastic model for saturated and unsaturated soils[J]. Géotechnique, 2003, 53(9): 809~829.
- [5] 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**: 892 - 898.
- [6] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil water characteristic curve[J]. Can Geotech, 1994, **31**: 521 - 532.
- [7] 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 and remolded Q_3 loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 1020 - 1027. (in Chinese))
- [8] 陈正汉, 孙树国, 方祥位, 等. 非饱和土与特殊土测试技术新进展[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 147 - 169. (CHEN Zheng-han, SUN Shu-guo, FANG Xiang-wei, et al. Recent advances of the measuring technology for unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 147 - 169. (in Chinese))
- [9] 中国民航机场建设集团公司和空军工程设计研究局. 延安新区一期综合开发工程地基处理与土石方工程设计[R]. 北京: 中国民航机场建设集团公司和空军工程设计研究局, 2012. (The Air Force Engineering Research & China Airport Construction Group Corporation. Yan'an new district, foundation treatment and earthwork engineering design of first period of comprehensive development project[R]. Beijing: The Air Force Engineering Research & China Airport Construction Group Corporation, 2012. (in Chinese))
- [10] 黄海, 陈正汉, 李刚. 非饱和土在 $p-s$ 平面上屈服轨迹及土-水特征曲线的探讨[J]. 岩土力学, 2000, **21**(4): 316 - 321. (HUANG Hai, CHEN Zheng-han, LI Gang. A study on yield locus of unsaturated soils on $p-s$ plane and soil-water characteristic curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(4): 316 - 321. (in Chinese))
- [11] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [12] 高燕燕. 重塑黄土的渗透特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2016. (GAO Yan-yan. Experimental study of permeability characteristics of remolded loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese))
- [13] 郭鸿. 不同地区重塑 Q_3 黄土三轴渗透试验研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2009. (GUO Hong. Experimental study on triaxial seepage of disturbed Q_3 loess in different regions[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese))

(本文责编 明经平)

(上接第 176 页)

- [6] 程琪, 刘国彬, 张伟立. 上海地区地铁超深基坑及深基坑变形有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, **5**(增刊 2): 1497 - 1502. (CHENG Qi, LIU Guo-bin, ZHANG Wei-li. Deformation analysis of subway ultra-deep and deep excavation in Shanghai by FEM[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, **5**(S2): 1497 - 1502. (in Chinese))
- [7] 尹胜斌, 丁红岩. 软土基坑开挖引起的坑外地表沉降预测数值分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(4): 1210 - 1216. (YIN Sheng-bin, DING Hong-yan. Numerical analysis of estimation of ground surface settlement outside pit induced by soft-soil excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(4): 1210 - 1216. (in Chinese))
- [8] 张尚根, 袁正如. 软土深基坑开挖地表沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, **9**(增刊 1): 1753 - 1757. (ZHANG Shang-gen, YUAN Zheng-ru. Analysis of ground settlement induced by excavation of deep foundation pit in soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, **9**(S1): 1753 - 1757. (in Chinese))
- [9] 杨国伟, 刘建航. 邻近建筑物或地面超载作用下围护结构水平位移与坑周地表沉降关系研究[J]. 地下工程与隧道, 2002(3): 11 - 14. (YANG Guo-wei, LIU Jian-hang. Study on relationship between horizontal displacement of retaining wall and surround ground settlement of deep excavations under the action of adjacent buildings or ground overload[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2002(3): 11 - 14. (in Chinese))
- [10] 童建军, 王明年, 于丽, 等. 成都地铁车站深基坑周围地表沉降规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, **42**(3): 97 - 101. (TONG Jian-jun, WANG Min-nian, YU Li, et al. A study of the land subsidence around the deep foundation pit of the Chengdu subway station[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, **42**(3): 97 - 101. (in Chinese))
- [11] JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 2012. (JGJ120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 2012. (in Chinese))
- [12] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)