

文章编号:1005-0523(2016)02-0100-06

重塑黏土毛细上升高度研究

耿大新¹,王迎迎¹,李宇晗²

(1.华东交通大学土木建筑学院岩土研究所,江西 南昌 330013;2.南京水利科学研究院岩土工程研究所,江苏 南京 210029)

摘要:非饱和土中复杂的孔隙特点是影响毛细现象的最直接因素。对不同黏粒含量的重塑黏土试样进行土-水特征试验和垂直一维毛细试验,借助于 MATLAB 软件用 van Genuchten 模型拟合,得到完整的土-水特征曲线。研究土体结构内部孔隙孔径情况,总结试验结果得到黏土颗粒等效孔径的计算公式,在此基础上估算非饱和土最大毛细上升高度,并通过垂直一维毛细试验结果证明了该计算方法的合理性与可行性。该毛细上升高度的估算可以为由毛细现象引起的路基病害的处理提供相应的参考。

关键词:非饱和土;土-水特征曲线;最大毛细上升高度

中图分类号:TU411.93 **文献标志码:**A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.02.015

非饱和土内部结构复杂,土颗粒形状、大小、排布及颗粒间的孔隙情况等是影响土体结构组成的重要因素,同时与毛细现象息息相关。公路工程中,由于毛细水的侵蚀作用导致了较多的路基病害,因此引起人们对毛细上升现象的重视^[1-3]。尹升华^[4]和张志军^[5]均对毛细上升高度与时间的关系进行研究。尹升华等^[4]从粒径方面着手,研究不同矿石粒径条件下毛细上升情况,根据实验数据拟合毛细上升高度和时间关系曲线指出最大毛细上升高度及上升速率和材料粒径呈负相关,且细颗粒含量多少将直接影响矿堆渗透效果。张志军等^[5]以某尾矿坝尾矿砂为研究对象进行毛细水上升试验,结果表明毛细水上升呈现先快后慢的变化趋势,且前3天毛细水上升高度能达到稳定时最大高度的30%;以幂函数的形式对毛细上升高度和时间的关系进行拟合,得到上升高度和上升速率分段计算公式。谈云志等^[6]借助于水平吸渗试验原理,运用自制毛细上升试验装置研究初始干密度对毛细上升高度的影响,指出两者之间的关系如同土-水特征曲线,相同时间内干密度大的试样毛细上升高度反而越小,且存在最优含水率点。杜红普等^[7]认为砂类路基材料中毛细水的运移方式由较大的孔隙特征决定,因而对多种粒径范围的砂进行毛细水分上升高度测试,结合其他参数模拟毛细水的吸渗过程,并通过数值模拟计算了垂直一维砂柱吸渗过程中的高度与时间的关系。周奇等^[8]通过室内试验和数值模拟对不同压实度下黄土土柱的毛细上升规律进行研究,指出有效的压实可以对土壤内水分迁移速度产生阻碍作用,即压实度的增加引起毛细上升速度减小。

鉴于土体内部的孔隙特征是影响毛细上升现象的最直接因素,本文则从土体孔径方面着手,建立在大量实验的基础之上,分析黏土颗粒孔隙孔径情况,得到等效孔径计算公式,并以此定量计算最大毛细上升高度。

1 理论推导

在不失土体体系一般物理特性的条件下,将土内孔隙简化为小直径毛细管:管半径为 r ,土-水接触角为

收稿日期:2015-08-26

基金项目:江西省自然科学基金项目(20142BAB206002)

作者简介:耿大新(1977—),男,副教授,博士,硕士生导师,主要从事地下工程与岩土特性等方面的教学和科研。

α , 带动水分向上迁移的表面张力为 T_s 。Lord Kelvin 于 1871 年提出一个反映气-水交界曲面上的压力变化与交界曲面上方蒸汽压之间关系的公式, 又名开尔文公式^[9]:

$$-\frac{RT}{v_w} \ln \frac{u_{v1}}{u_{v0}} = \frac{2T_s \cos\alpha}{r} = u_a - u_w \quad (1)$$

式中: R 为通用气体常数, $J \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为热力学温度, K ; u_{v0} 为温度 T 条件下平衡状态的自由水饱和蒸汽压值, kPa ; u_{v1} 为平衡状态的溶液蒸汽压值, kPa ; v_w 为水蒸气的偏摩尔体积, $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$; $u_a - u_w$ 为基质吸力, kPa 。

定义相对湿度 $RH = u_{v1}/u_{v0}$, 代入到(1)式可得:

$$RH = \exp \left(- \frac{(u_a - u_w)v_w}{RT} \right) \quad (2)$$

则毛细半径(又称开尔文半径)以 RH 或 $u_a - u_w$ 的形式表示如下:

$$r = - \frac{2T_s v_w \cos\alpha}{RT \ln(RH)} \quad (3a)$$

$$r = - \frac{2T_s \cos\alpha}{u_a - u_w} \quad (3b)$$

当相对湿度为 35%~100% 之间, 或者相应的基质吸力介于 144 000~0 kPa 之间时, 毛细作用为土中孔隙持水的主要因素, 适用于该毛细孔径计算方法。借助于土-水特征曲线, 将各变量定义为与相对湿度或者基质吸力成一定函数关系的微小增量形式: 令 $(u_a - u_w)_1 = 100 \text{ kPa}$, 以 $(u_a - u_w)_i = (u_a - u_w)_{i-1} + 50(i-1)$ ($i=2, 3, 4 \dots$) 的方式选取基质吸力于 144 000 kPa ~0 kPa 之间的数据。则实际孔隙半径表示为

$$r_p^i = r_k^i + t^i \quad (4)$$

其中, 开尔文半径 r_k^i 可通过(3a)或(3b)来进行估算; 吸附水膜厚度 t^i 用 Halsey 方程表示如下:

$$t^i = \tau \left[- \frac{5}{\ln(RT^i)} \right]^{1/3} \quad (5)$$

式中: $\tau = 2.77 \text{ \AA}$, 表示吸附水分子的有效直径。将相邻两增量步之间孔隙半径的平均值定义为平均孔隙半径:

$$(r_p^i)_{\text{avg}} = \frac{r_p^i + r_p^{i-1}}{2} \quad (6)$$

当相对湿度或基质吸力为第 i 增量步时, 单位质量土体孔隙体积 V_p^i ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) 定义为

$$V_p^i = \frac{w^i}{\rho_w} \quad (7)$$

式中: w^i 表示质量含水率, 可通过土-水特征曲线直接获得; ρ_w (取 1 g/cm^3) 表示水的密度。则每增加一步, 单位质量土体内孔隙体积变化量 ΔV_p^i :

$$\Delta V_p^i = V_p^{i-1} - V_p^i \quad (8)$$

已有的研究多围绕土样的粒度、孔隙特征等方面^[7, 10], 并没有给出土体内复杂孔隙孔径的定量计算方法。考虑到非饱和黏土土体结构内部复杂的孔隙特征, 对南昌孔目湖地区土样进行室内试验, 总结大量的试验结果, 并结合统计理论中加权平均值计算公式, 笔者给出(9)式计算孔径, 并定义为等效毛细直径 d 计算式:

$$d = 2r = \frac{2}{\beta} \frac{\sum (\Delta V_p^i (r_p^i)_{\text{avg}})}{\sum \Delta V_p^i} \quad (9)$$

式中: $(r_p^i)_{\text{avg}}$ 为孔隙体积变化量 ΔV_p^i 大于 0.01 cm^3 时所对应的孔径; β 为无量纲修正系数。考虑到计算时步长的设定、体积小于 0.01 cm^3 的孔隙及封闭孔隙的影响, 经大量试验, β 取值 0.02。

对于非饱和土,其内部相互连通的孔隙为毛细上升创造了条件。水源充足时,毛细管力带动水分向上迁移至一定的高度。当这种向上的张力正好和水柱的重力相平衡时,毛细管内的水柱上升到最大高度 h_{\max} ,如图 1 所示,该力学平衡表达式如下:

$$h_{\max} \rho_w g \frac{\pi}{4} d^2 = T_s \pi d \cos \alpha \quad (10)$$

则最大毛细上升高度 h_{\max} 表示如下:

$$h_{\max} = \frac{4T_s \cos \alpha}{d \rho_w g} \quad (11)$$

式中, g 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

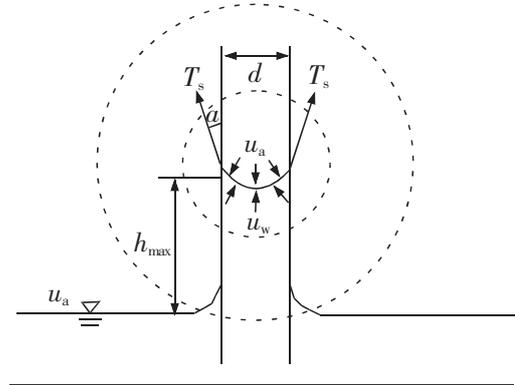


图 1 小直径管内毛细上升的力学平衡

Fig.1 Mechanical equilibrium of capillary rise in small diameter tubes

2 试验方案

试验用土取自南昌孔目湖地区,通过室内土工试验测定其基本物理指标为:黏粒含量 60.8%,土

粒比重 $G_s=2.71$,最优含水率 21.3%,液限 $w_L=48.2\%$,塑限 $w_p=23.5\%$,根据黏粒含量定名 CL-61。为研究不同黏粒含量对土体孔隙及毛细上升高度的影响,掺砂配置另外两种土:CL-50 黏粒含量 50.2%,土粒比重 $G_s=2.68$,液限 $w_L=25.2\%$,塑限 $w_p=17.5\%$;CL-38 黏粒含量 38.4%,土粒比重 $G_s=2.65$,液限 $w_L=20.9\%$,塑限 $w_p=14.0\%$ 。在最优含水率条件下,每放入 300 g 土标准击实 30 次制样,并将制好的试样放置在封闭的空间内,试验期间室内温度 20~25 °C。

2.1 土-水特征试验

为保证试样充分饱和,将其放入真空饱和器中 24 h。采用 DIK-4303 土壤 pF 水分特征曲线测定仪进行土-水特征试验:首先,用精度为 1 mg 的电子天平称好试样质量并记录,放入测定仪中测试,连接好仪器与陶土板之间的通道,拧紧上盖,以防漏气。然后分级加压,并在每次加压前称取每个试样的质量做好记录。最后一次加压结束立刻称重后放入烘箱烘干(温度设为 110 °C),根据试验规范连续烘干 48 h,冷却至室温后称重。

2.2 垂直一维毛细试验

垂直一维毛细试验使用高 1.1 m 直径 11 cm 的试验用 PVC 管制样,装样高度 100 cm。每种土样制作 5 根作为一组并做好标记,同时静置在蓄水箱中,浸水端放两层滤纸,以纱网包裹并用橡皮筋固定。水箱水位恒为 20 cm,水箱底部铺一层透水性良好的砂。静置 30 d 后,试验结束依次取出试样,以从下往上的切割顺序每隔 5 cm 分段编号,测定含水率和压实度。

3 计算分析

室内土-水特征试验加压条件有限,只能得到较小基质吸力范围内的土-水特征曲线。为了排除每种土样人为压实的影响,根据压实度结果将每组去掉一个最大值和一个最小值,剩余的使用 MATLAB 软件 van Genuchten 模型进行拟合,以得到完整的土-水特征曲线。拟合方程为

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + a^n (u_a - u_w)^n} \right]^m + \theta_r \quad (12)$$

其中: a, m, n 均为拟合参数。Clayton 于 1996 年指出,当各拟合参数为相互独立的变量时,所拟合出的曲线与室内实际试验数据吻合非常好^[9],因此本完整土-水特征曲线的拟合将 a, m 和 n 均视为相互独立的参数。拟合后的图形如图 2,图 3,图 4 所示。

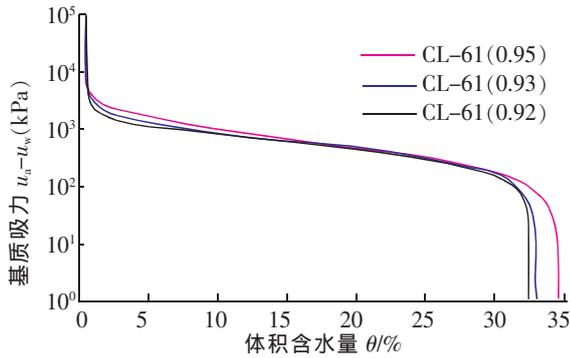


图 2 CL-61 土样完整土-水特征曲线

Fig.2 The whole SWCC of CL-61 samples

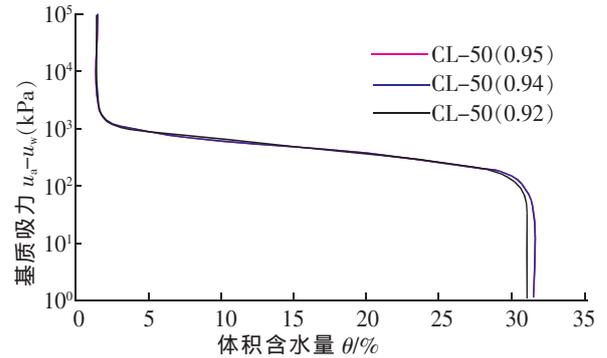


图 3 CL-50 土样完整土水特征曲线

Fig.3 The whole SWCC of CL-50 samples

假设接触角 $\alpha=0$, 水的表面张力取 $T_s=0.072 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, 通用气体常数 $R=8.314 \text{ J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$, 热力学温度 $T=298 \text{ K}$, 水蒸气的偏摩尔体积 $v_m=1.8\times 10^{-5} \text{ m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$ 。根据理论推导公式, 通过, 的方式选取基质吸力于 144 000 kPa~0 kPa 之间的数据, 逐步计算。以 CL-61(0.95) 为例, 计算结果如表 1 所示。

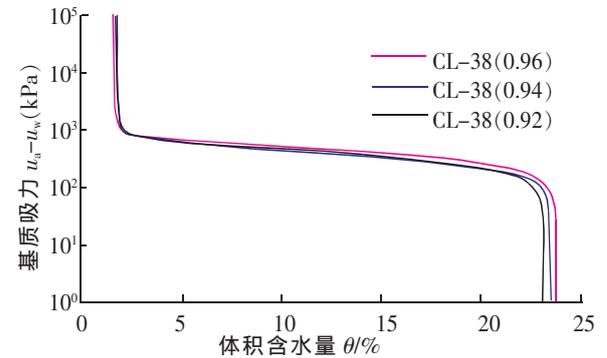


图 4 CL-38 土样完整土水特征曲线

Fig.4 The whole SWCC of CL-38 samples

表 1 CL-61(0.95) 等效孔径计算表格

Tab.1 The calculation form of equivalent aperture about CL-61(0.95)

u_a-u_w kPa	$w/$ ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	$RH/$ %	V_p $l(\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1})$	r_k \AA	l^i \AA	r_p \AA	ΔV_p $l(\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1})$	$(r_k)_{\text{avg}}$ \AA	$(r_p)_{\text{avg}}$ \AA	$\Sigma(V_p)$ $l(\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1})$
100	0.119 8	99.93	0.119 8	14 400.0	52.7	14 452.7	-	-	-	-
150	0.113 9	99.89	0.113 9	9 600.0	46.0	9 646.0	0.005 9	12 000.0	12 049.4	0.005 9
250	0.101 4	99.82	0.101 4	5 760.0	38.8	5 798.8	0.012 5	7 680.0	7 722.4	0.018 4
400	0.083 0	99.71	0.083 0	3 600.0	33.2	3 633.2	0.018 4	4 680.0	4 716.0	0.036 8
600	0.062 3	99.57	0.062 3	2 400.0	29.0	2 429.0	0.020 7	3 000.0	3 031.1	0.057 5
850	0.043 5	99.38	0.043 5	1 694.1	25.8	1 719.9	0.018 8	2 047.1	2 074.5	0.076 3
1 150	0.028 8	99.17	0.028 8	1 252.2	23.3	1 275.5	0.014 7	1 473.1	1 497.7	0.091 0
1 500	0.018 7	98.92	0.018 7	960.0	21.4	981.4	0.010 1	1 106.1	1 128.4	0.101 1
1 900	0.012 2	98.63	0.012 2	757.9	19.7	777.6	0.006 5	858.9	879.5	0.107 6
2 350	0.008 2	98.31	0.008 2	612.8	18.4	631.2	0.004 0	685.3	704.4	0.111 6
2 850	0.005 8	97.95	0.005 8	505.3	17.2	522.5	0.002 4	559.0	576.8	0.114 0
3 400	0.004 4	97.56	0.004 4	423.5	16.3	439.8	0.001 4	464.4	481.2	0.115 4
4 000	0.003 5	97.14	0.003 5	360.0	15.4	375.4	0.000 9	391.8	407.6	0.116 3
4 650	0.003 0	96.68	0.003 0	309.7	14.7	324.3	0.000 5	334.8	349.9	0.116 8
5 350	0.002 7	96.19	0.002 7	269.2	14.0	283.1	0.000 3	289.4	303.7	0.117 1
6 100	0.002 4	95.67	0.002 4	236.1	13.4	249.5	0.000 1	252.6	266.3	0.117 2
6 900	0.002 3	95.11	0.002 3	208.7	12.8	221.5	0.000 1	222.4	235.5	0.117 3
7 750	0.002 2	94.53	0.002 2	185.8	12.4	198.2	0.000 1	197.3	209.9	0.117 4
8 650	0.002 2	93.91	0.002 2	166.5	11.9	178.4	0.000 0	176.1	188.3	0.117 4
							0.002 2			0.119 6

根据公式(9)的适用条件,选择孔隙体积变化量 ΔV_p^i 在 0.01 cm^3 以上的数据计算等效毛细直径:
 $d_{CL-61(0.95)}=334 \ 519$,然后代入公式(11)计算最大毛细上升高度 $h_{\max}=87.85 \text{ cm}$ 。用同样的步骤计算其它几组数据,并将计算结果与试验结果汇总于表2(由于一维毛细上升试验结束后每隔 5 cm 切割测定含水率,因此只能得到毛细上升的范围):

表2 计算与实验结果对比
 Tab.2 Comparison between calculation and experimental results

土样	等效孔径/ \AA	计算值/cm	试验范围/cm
CL-61(0.95)	334 519	87.85	
CL-61(0.93)	345 432	85.08	80~90
CL-61(0.92)	352 264	83.43	
CL-50(0.95)	354 347	82.93	
CL-50(0.94)	366 548	80.17	75~85
CL-50(0.92)	374 805	78.41	
CL-38(0.96)	399 373	73.58	
CL-38(0.94)	423 428	69.40	65~75
CL-38(0.92)	429 462	68.43	

由上表易得:针对试验用非饱和黏土,将等效毛细直径公式计算结果代入到力学公式(10)得到的毛细上升高度数值,与室内一维毛细上升高度试验结果相近,即计算结果在试验范围之内。证明该等效毛细直径计算公式具有一定的合理性,且通过等效毛细直径计算公式推算最大毛细上升高度具有一定的可行性。

4 结论

针对不同黏粒含量土样,本文根据土体结构内部孔隙的孔径研究毛细上升现象,通过理论计算并结合室内试验得到如下结论:

1) 运用该方法从孔隙孔径分布情况着手,估算最大毛细上升高度。既可以从微观上分析土体孔径分布规律,亦可以宏观上预测毛细上升现象对路基影响的区域。可为实际工程中因毛细现象而导致的路基病害的范围预测及治理提供一定的参考。

2) 本文计算最大毛细上升高度的公式存在较多假设和一定的简化,是对非饱和土最大毛细上升高度定量研究的初步探讨,因此后续工作中有必要进一步完善。

参考文献:

- [1] LI J,ZHAO C,CAI G,et al. A model considering solid-fluid interactions stemming from capillarity and adsorption mechanisms in unsaturated expansive clays[J]. Chinese Science Bulletin,2014,59(26):3314-3324.
- [2] 刘杰,姚海林,卢正,等. 非饱和土路基毛细作用的数值与解析方法研究[J]. 岩土力学,2013,34(2):421-427.
- [3] 董斌,张喜发,李欣,等. 毛细水上升高度综合试验研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(10):1569-1574.
- [4] 尹升华,陈勋,姜立春. 矿石粒径对矿堆内溶液毛细渗流的影响特征[J]. 工程科学学报,2015,37(5):561-567.
- [5] 张志军,李亚俊,刘玄钊,等. 某金属矿山尾矿坝中毛细水的上升规律[J]. 中国有色金属学报,2014,24(5):1345-1351.
- [6] 谈云志,孔令伟,郭爱国,等. 压实红黏土水分传输的毛细效应与数值模拟[J]. 岩土力学,2010,31(7):2289-2294.

- [7] 杜红普,李敏,齐承英,等. 洗砂柱一维毛细吸渗过程数值模拟和试验研究[J]. 公路交通科技,2014,31(6):34-40.
- [8] 周奇,陈太红,朱振南,等. 黄土路基毛细水上升规律试验模拟研究[J]. 烟台大学学报:自然科学与工程版,2015,28(1):54-60.
- [9] LUN, LTKOS W J. 非饱和土力学[M]. 韦昌富,候龙,简文星,译,北京:高等教育出版社,2012:98-100,110-116.
- [10] ARYA L M,PARIS J F. A physic empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. Soil Science Society of America Journal,1981,45(6)1023-1030.

Study on Height of Capillary Rise for Remolded Clay

Gen Daxin, Wang Yingying, Li Yuhan

(1. Geo-technical Research Institute, School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Geo-technical Research Institute, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The complexity of pores in unsaturated soil is the most direct factor affecting the capillary. The soil-water characteristic test and the vertical one-dimensional capillary test of the clay samples with different clay contents were used to fit the van Genuchten model by way of MATLAB, and the complete soil water characteristic curve was obtained. Based on pores of the soil structure, the calculation formula of equivalent aperture about clay particles was gained after summarizing experimental results. On the basis of the above, the maximum height of capillary rise of unsaturated soil was estimated, which proved to be rational and feasible by results of vertical one-dimensional capillary test. This estimation of capillary rise height can provide reference for the treatment of the subgrade diseases caused by capillary.

Key words: unsaturated soil; SWCC; the maximum height of capillary rise

(责任编辑 王建华)