

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.06.007

黄土中毛细上升速率的现场测试

李 萍¹,李同录¹,侯晓坤¹,牛树轩²,付昱凯¹,赵权利¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054; 2. 中交路桥技术有限公司,北京 100011)

摘要:以陇东高原马兰黄土为对象,设计了现场毛细上升试验,将试验得到的黄土中毛细上升速率与基于非饱和黄土的土-水特征曲线,与根据 Terzaghi 理论以及 Lu 等提出的方法计算得到的黄土中毛细上升速率进行了比较。结果表明:Terzaghi 理论由于将湿润峰处的渗透系数假定为饱和渗透系数,得到的结果偏大,而 Lu 等的方法考虑了土的非饱和渗透性,预测精度较高,在没有条件进行现场试验的情况下,可用于对黄土中毛细上升速率的估算。

关键词:黄土;毛细上升速率;毛细上升高度;土-水特征曲线;渗透系数

中图分类号:TU441⁺.32 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2014)06-0503-05

Field experiment on rate of capillary rise in loess

LI Ping¹, LI Tonglu¹, HOU Xiaokun¹, NIU Shuxuan², FU Yukai¹, ZHAO Quanli¹

(1. School of Geology Engineering and Geometrics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
2. CCCC Road and Bridge Consultants Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: This study focused on the Malan loess on the Longdong Plateau. A field experiment was conducted in order to study the capillary rise, and the rate of capillary rise in the loess was obtained. According to Terzaghi's theory and the estimation method proposed by Lu and Likos, the rate of capillary rise in the loess was calculated on the basis of the unsaturated soil-water characteristic curve, and was compared with the experimental value. The results show that the value obtained by Terzaghi's theory was larger because the permeability coefficient at the wetting front was presumed to be a saturated permeability coefficient. In contrast, the value obtained by the Lu and Likos method, which considered the unsaturated permeability of soil, had high prediction accuracy. It can therefore be used to estimate the rate of capillary rise in the loess if there is no access to a field experiment.

Key words: loess; rate of capillary rise; height of capillary rise; soil-water characteristic curve; permeability coefficient

在大气中将一小玻璃管插入水中,一方面由于气-水分界面两侧存在压降,分界面产生表面张力,另一方面由于玻璃管的亲水性,使水沿玻璃管上升,即为毛细现象。在地下水位以上的非饱和土中,同样存在着毛细现象。由于表面张力能够承受拉力作用,以及作为毛细管壁的土颗粒与水分子之间具有吸引力,使得非饱和土比饱和土具有更高的强度。毛细上升会使地下水位以上土体含水率增加,强度降低,造成土体变形增加,降低或毁坏地表构筑物性能,如路基回弹等。目前,人们关注较多的是毛细上升高度,如研究不同粒度组成及化学成分土中的最大毛细上升高度^[1-3],以及提出适用于测量各类土中毛细上升高度的试验方法等^[4]。事实上,毛细上升速率对非饱和土-水体系的整体性质也有重要影响,如在地下水位突然上升或形成滞留水层的情况下,掌握毛细上升速率可以为施工的安全进行以及防护措施的经济合理提供理论基础。

对毛细作用的研究最早可追溯至 Edward 等^[5]提出的毛细管流方程。国外对于毛细上升速率的研究,如 Terzaghi^[6]基于 Darcy 定律与饱和渗透系数提出了估算一维土柱中毛细上升速率的简单理论。随后, Lane 等^[7]通过系统性试验,论证了 Terzaghi 理论的准确性。Lu 等^[8]在 Terzaghi 理论上,基于 Gardner 的单参

数非饱和和渗透系数函数模型,提出一种求解毛细上升速率的方法,并基于 Lane 等的试验数据与 Terzaghi 理论进行了对比。国内毛细上升速率的研究多是为了研究毛细上升对路基的影响,尤其在冻土地区和盐渍土地区。杜红普等^[9]结合 Gardner 土-水特征曲线模型和多孔介质的结构形态参数,建立了一维非饱和和毛细上升模型,同时采用有限差分法进行非稳态求解,获得不同时刻湿度场和毛细吸力的分布情况,并给出了量化多孔介质毛细上升过程的理论方法。张平等^[10]通过观察同一含水率下不同粒径及级配土中的毛细上升速率,发现毛细上升随细颗粒含量增多其相对速度由慢变快。董斌等^[11]通过室内竖管法毛细上升高度试验,认为粗粒土毛细上升高度与时间可用对数坐标下二次多项式回归方程进行模拟和预测,方程参量与土的颗粒组成和填装密实度密切相关。苗强强等^[12]利用自制的毛细上升高度试验系统对广州佛山含黏土沙进行了试验,得出该类黏土沙毛细上升高度与时间呈幂函数关系的结论。

鉴于目前对黄土中毛细上升速率的试验及理论研究较少,本文以陇东马兰黄土为对象,设计了现场毛细上升试验,得到黄土的毛细上升速率。考虑到现场毛细上升速率试验耗时耗力,基于黄土的土-水特征曲线,根据 Terzaghi 理论及 Lu 等提出的方法,计算得到黄土的毛细上升速率,并与试验结果进行了比较。

1 研究区概况及试验场地布置

试验场地设置在甘肃省正宁县蔡裕村,位于东经 108°19'57",北纬 35°30'47",海拔 1 418 m,地理位置如图 1 所示。场地地处陇东黄土高原东部、子午岭西麓,年平均降水量 623.5 mm,年蒸发量超过 1 500 mm,属于干旱气候条件。该区地下水位埋深约 120 m,出露地层主要有 N₃ 红黏土和连续的第四系黄土。

在试验场地人工开挖 1 个 3.0 m×1.0 m×2.0 m 的探槽,开挖深度范围内地表以下约 0.5 m 为黑垆土,再以下至探槽底为 Q₃ 马兰黄土。探槽宽度方向上一侧放缓坡度,并设有台阶,便于试验人员上下探槽、安装设备及观测数据等。利用输液管向探槽底部均匀补给水分使其饱和,水分会在毛细作用下沿探槽壁上升。输液管上端插进固定在探槽上方的塑料软管,并用玻璃胶密封,下端则固定在均匀插入地表的铁丝(长约 30 cm)上,这样一方面是控制水流方向,另一方面是避免输液管插进土壤造成堵塞。塑料软管一端和具有一定水头高度的储水桶相连,另一端则与大气相通,置于同一水头高度。试验开始后,打开所有输液管,并调至预定速度,向地表均匀补给水分。试验过程中用土工布遮住探槽以减小蒸发量,随时观察储水桶中的水位,保证水分补给不间断,并于每天 8:00、12:00、16:00、20:00 借助探槽壁一侧安装的竖尺观测毛细上升高度。试验开始于 2011 年 6 月 8 日,结束于 7 月 1 日,共 24 d。图 2 为试验过程中的毛细上升现象。

探槽开挖过程中取得马兰黄土原状土样,室内采用环刀法测得天然密度为 1.44 g/cm³,烘干法测得天然含水率为 16.3%,比重瓶法测得相对密度为 2.70,搓条法及锥式仪法分别测得塑限为 20.7%、液限为 32.4%,计算得到干密度为 1.24 g/cm³、孔隙比为 1.177。筛分法测得粒径级配累积曲线如图 3 所示。

2 试验结果分析

试验观测到几个毛细上升高度为 10 cm、22.5 cm、33 cm、40 cm、48 cm、55 cm,所对应的时间分别为 10.0 h、35.5 h、70.5 h、105.5 h、190 h、239.5 h,通过数据拟合,发现毛细上升高度 z 和时间 t 呈对数函数关系:

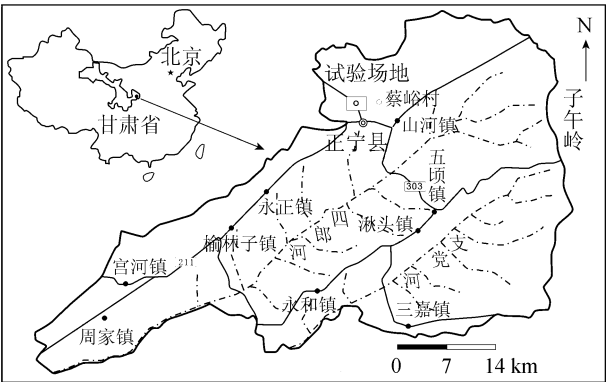


图1 取样点地理位置示意图

Fig. 1 Geographical locations of monitoring sites

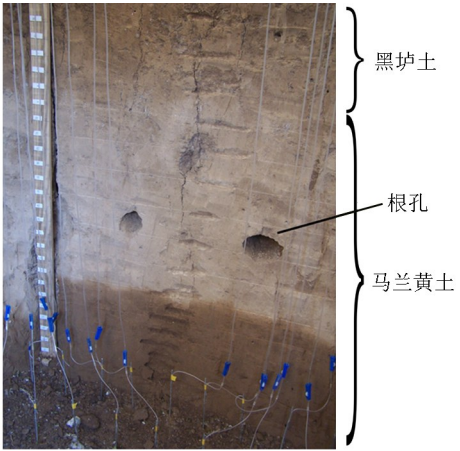


图2 毛细上升现象

Fig. 2 Phenomenon of capillary rise

$$z = 13.97 \ln t - 24.65 \quad (1)$$

毛细上升高度和时间的拟合结果见图4, $R^2 = 0.98$ (R 为相关系数)。从图4可以看出,毛细上升速率随时间的增长而减小,这是因为一方面随着距探槽底高度的增加,土体饱和度减小,水相的渗透系数大幅度减小;另一方面随着高度的增加,毛细上升需要克服的重力势能越大,重力势能与基质势能的差值越小,造成水分迁移的驱动势能减小。

3 毛细上升速率的理论计算

3.1 最大毛细上升高度

假设非饱和土中气、液、固三相为大气、水、土颗粒,通过对毛细管内气-水-固体系受力平衡分析,得到最大毛细上升高度:

$$h_c = \frac{4T_s \cos \alpha}{d \rho_w g} \quad (2)$$

式中: h_c ——最大毛细上升高度,cm; T_s ——水的表面张力,温度25℃时为71.79 J/m²; α ——接触角,是气-水交界面上的切线与水-固交界面上直线之间的夹角; d ——毛细管直径,cm; ρ_w ——水的密度,温度25℃时为0.998 g/cm³; g ——重力加速度,9.81 m/s²。

尽管土体在脱湿过程中接触角 α 可假设为零,但实际土的粒径、级配与排列方式复杂多样,毛细管直径仍难以确定。为此前人总结了一些经验公式估算实际土的最大毛细上升高度,如Lane等^[7]通过分析8种土的毛细上升高度试验结果,认为最大毛细上升高度与 D_{10} 呈线性关系:

$$h_c = -990 (\ln D_{10}) - 1540 \quad (3)$$

式中: D_{10} ——10%的细颗粒直径,mm。

由图3可知马兰黄土的 D_{10} 约为0.105 mm,则计算得 h_c 为691.26 mm。计算得到的 h_c 明显大于现场试验观测到的最大湿润峰高度55 cm,这是由于毛细上升高度越大,水分的迁移量越小,土体浸湿现象变得越不明显,导致观测到的最大湿润峰高度小于实际的最大毛细上升高度。

3.2 Terzaghi 建立在饱和渗透系数上的毛细上升速率

Terzaghi 提出了预测土柱中毛细上升速率的简单理论,但是建立在2个主要假设之上。

假设一,适合饱和流动的Darcy定律同样适合非饱和流动,并将Darcy定律表示为如下形式:

$$q = k_s i = n \frac{dz}{dt} \quad (4)$$

式中: q ——流速; k_s ——土柱的饱和渗透系数; i ——水力梯度; n ——孔隙率; z ——湿润峰位置与水位之间的距离。

几何模型如图5所示,图中 h_a 为土体的进气水头; β 为孔隙尺寸分布参数,cm⁻¹,表示吸力水头增长时相应渗透系数的下降速率, β 的倒数可认为是进气水头值,或等价于毛细上升作用形成的饱和带高度。

假设二,湿润峰范围内引起毛细上升作用的 i 可近似表示为

$$i = \frac{h_c - z}{z} \quad (5)$$

对式(4)(5)联合求解, $t=0$ 时相应的 $z=0$,得到 z 与 t 之间的函数关系式:

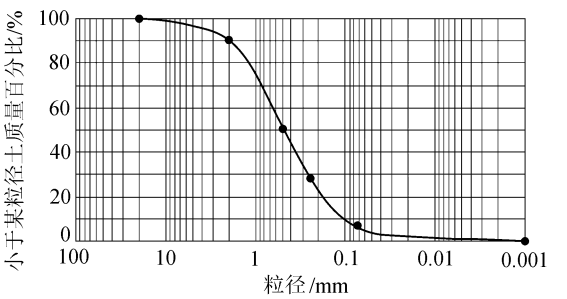


图3 粒径级配累积曲线

Fig. 3 Particle-size distribution accumulative curve

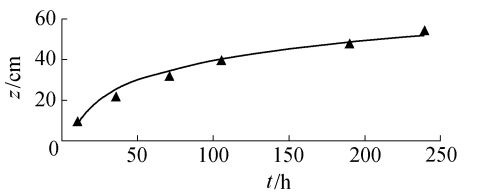


图4 毛细上升高度和时间关系曲线

Fig. 4 Relationship between height of capillary rise and time

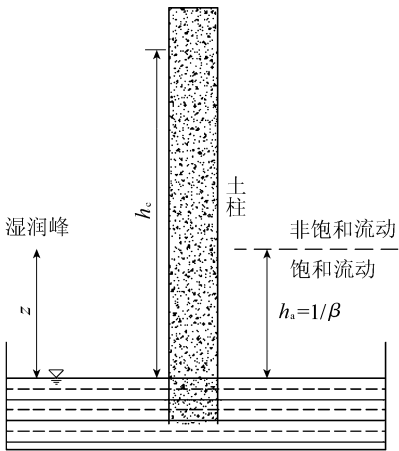


图5 毛细上升几何模型

Fig. 5 Geometric model for capillary rise

$$t = \frac{nh_c}{k_s} \left(\ln \frac{h_c}{h_c - z} - \frac{z}{h_c} \right)$$

(6)

3.3 建立在非饱和渗透系数上的毛细上升速率

Lu 等^[13]结合 Gardner 的单参数非饱和渗透系数函数模型提出了一种求解毛细上升速率的方法。Gardner 模型可表示成如下形式^[14]：

$$k(h) = k_s \exp(\beta h)$$

(7)

式中： k ——吸力水头为 h 时的非饱和渗透系数。

结合 Gardner 单参数非饱和渗透系数函数模型，毛细上升速率的控制方程(式4)可表示为

$$\frac{dz}{dt} = \frac{k_s}{n} \exp(-\beta z) \frac{h_c - z}{z}$$

(8)

式(8)的解析解可用级数表示为

$$t = \frac{n}{k_s} \sum_{j=0}^{m=cc} \frac{\beta^j}{j!} \left(h_c^{j+1} \ln \frac{h_c}{h_c - z} - \sum_{s=0}^j \frac{h_c z^{j+1-s}}{j+1-s} \right)$$

(9)

式中： m ——分数段。

若设置 $m=10$ ，则可得到方程典型的收敛解。

3.4 土-水特征曲线

在试验场地附近取得马兰黄土原状土样，采用张力计法测定黄土的增湿土-水特征曲线。张力计法操作简单，测量精度较高，可测量 0 ~ 100 kPa 范围的基质吸力。本次试验所用张力计为浙江托普仪器有限公司生产的 TEN 型张力计，探测管长度为 30 cm。测得的基质吸力与体积含水率关系曲线(土-水特征曲线)如图 6 所示。图 7 为室内使用张力计测量基质吸力。

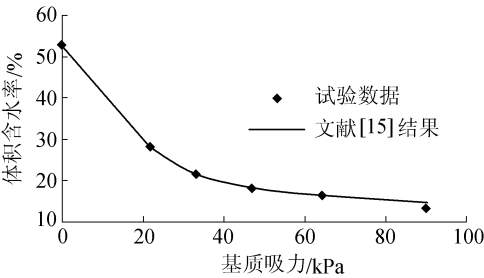


图 6 马兰黄土的土-水特征曲线



图 7 张力计法测基质吸力

Fig. 6 Soil-water characteristic curve for Malan loess

Fig. 7 Matrix suction measured by tensionmeter

根据 Fredlund 等^[15]提出的建立在孔径分布基础上适用于描述非饱和砂土、淤泥质土、黏土的土-水特征曲线方程(式(10))如下：

$$\theta_w = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^b \right] \right\}^c}$$

(10)

式中： θ_w ——体积含水率，%； θ_s ——饱和体积含水率，%； ψ ——基质吸力，kPa； a ——与进气值有关的参数，kPa； b ——当基质吸力大于进气值后与土体脱水速率有关的参数； c ——与残余含水率有关的参数。

对试验数据进行拟合，拟合结果见图 6，拟合参数 $a=11.8$ kPa， $b=5.289$ ， $c=0.539$ 。从拟合曲线与测量点的吻合程度可以看出，拟合精度较高。

根据式(10)，扩大基质吸力的范围，可得到较完整的基质吸力与体积含水率的半对数坐标关系曲线，从而得到非饱和黄土的进气值 $u_a=9.3$ kPa，则 $\beta=0.0105$ cm⁻¹。

3.5 毛细上升速率对比

根据 Terzaghi 提出的基于 Darcy 定律与饱和渗透系数以及 Lu 等提出的基于 Gardner 单参数非饱和渗透系数函数模型的毛细上升速率估算方法计算得到黄土的毛细上升速率，与试验所得结果比较如图 8 所示。

从图 8 可以看出，Terzaghi 理论将湿润峰处的渗透系数假定为饱和渗透系数，得到的毛细上升速率几乎是观测值的 2 倍，显然高估了毛细上升速率。事实上，随着土饱和度的降低，渗透系数会大幅度降低，当湿润

峰快要达到最大毛细上升高度时,相应的饱和度降低很小,但渗透系数比饱和渗透系数要低 5 ~ 7 个数量级,同时驱动水头也显著下降,导致毛细上升速率大幅度降低。而 Lu 等提出的方法,由于考虑了土的非饱和渗透性,预测精度较高。实际观测到的毛细上升速率小于 2 种方法计算得到的速率,可能是随着毛细上升高度增大,水分迁移量减小,湿润峰变得不明显所致。

4 结 论

通过现场毛细上升速率试验,得到黄土的毛细上升速率,并利用 Terzaghi 理论及 Lu 等提出的方法估算黄土的毛细上升速率。与试验结果相比, Terzaghi 理论由于将湿润峰处的渗透系数假定为饱和渗透系数,得到的结果偏大; Lu 等的方法考虑了土的非饱和渗透性,预测精度较高,在没有条件进行现场试验的情况下,可应用于对黄土毛细上升速率的估算。

参考文献:

[1] 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. (TAN Yunzhi,KONG Lingwei,GUO Aiguo,et al. Capillary effect of moisture transfer and its numerical simulation of compacted laterite soil[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(7):2289-2294. (in Chinese))

[2] 李锐,赵文光,陈善雄. 基于 GEO-SLOPE 的膨胀土路基毛细水上升分析[J]. 华中科技大学学报:城市科学版,2006,23(1):36-39. (LI Rui,ZHAO Wenguang,CHEN Shanxiang. Capillary water upward movement analysis of expansive soil roadbed based on GEO-SLOPE[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology:Urban Science Edition,2006,23(1):36-39. (in Chinese))

[3] 许健,牛富俊,牛永红,等. 东北黏质黄土有害毛细上升高度预测研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2011,43(4):501-506. (XU Jian,NIU Fujun,NIU Yonghong,et al. Forecast on the effect height of frost damage of clayey loess in Northeast China[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology:Natural Science Edition,2011,43(4):501-506. (in Chinese))

[4] 张建国,赵慧君. 地下水毛细上升高度及确定[J]. 地下水,1988,10(3):135-139. (ZHANG Jianguo,ZHAO Huijun. Groundwater capillary rise height and its determination[J]. Groundwater,1988,10(3):135-139. (in Chinese))

[5] EDWARD W,WASHBURN S E. The dynamics of capillary flow[J]. Physics Review,1921,17(3):272-283.

[6] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York:Wiley,1943:214-251.

[7] LANE K S,WASHBURN S E,KRYNINE D P. Capillary tests by capillarmeter and by soil filled tubes[J]. Highway Research Board,1946,26:460-473.

[8] LU N,LIKOS W J. Rate of capillary rise in soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2004,130(6):646-650.

[9] 杜红普,刘波,王华军,等. 基于土水特征曲线预测多孔介质毛细上升过程[J]. 工程地质学报,2013,21(3):345-350. (DU Hongpu,LIU Bo,WANG Huajun,et al. Prediction of capillary rise in porous media based on soil water characteristic curve [J]. Journal of Engineering Geology,2013,21(3):345-350. (in Chinese))

[10] 张平,吴昊,殷洪建,等. 颗粒级配对毛细水上升影响的研究[J]. 节水灌溉,2010(7):24-26. (ZHANG Ping,WU Hao,YIN Hongjian,et al. Effect of particle size distribution on capillary upward movement[J]. Water Saving Irrigation,2010(7):24-26. (in Chinese))

[11] 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. (DONG Bin,ZHANG Xifa,LI Xin,et al. Comprehensive tests on rising height of capillary water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(10):1569-1574. (in Chinese))

[12] 苗强强,陈正汉,田卿燕,等. 非饱和含黏土砂毛细上升试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(增刊1):327-333. (MIAO Qiangqiang,CHEN Zhenghan,TIAN Qingyan,et al. Experimental study of capillary rise of unsaturated clayey sand[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(Sup1):327-333. (in Chinese))

[13] LU N,WILLIAM J L. Unsaturated soil mechanics[M]. Hoboken:J Wiley and Sons,inc,2004:104-145.

[14] GARDNER W R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. Soil Science,1958,85(4):228-232.

[15] FREDLUND D G,XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal,1994,31(3):521-532.

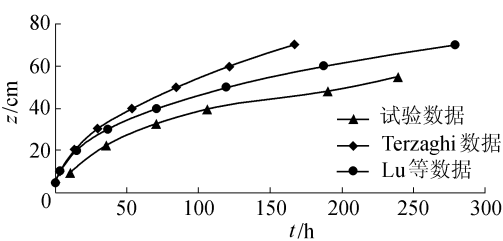


图 8 理论计算与试验所得的毛细上升速率对比
Fig. 8 Comparison of rates of capillary rise obtained by field experiment and theoretical calculation