

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2020.04.018

饱和度及干密度对弱膨胀土土水特征曲线影响

李佳敏¹, 马丽娜^{1,2}, 张戎令^{1,2,3}, 张唐瑜¹, 王斌文¹

1. 兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 兰州 730070;

3. 卡迪夫大学 工程学院, 英国 CF24 3AA

摘要: 采用滤纸法测量不同干密度下试样的总吸力与基质吸力, 并绘制相应的土水特征曲线, 分析饱和度与干密度对土水特征曲线的影响. 实验结果表明: 在饱和度一定时, 总吸力与基质吸力均随干密度的增大而增大; 随饱和度增大, 不同干密度的总吸力差值和基质吸力差值逐渐减小; 另外, 试样的排水速率随饱和度的增大而减小, 且干密度越大, 排水速率越慢. 在较低含水率时, 试样的总吸力和基质吸力随干密度的增大而增大, 随含水率的增大, 干密度对总吸力和基质吸力的影响逐渐弱化.

关键词: 膨胀土; 滤纸法; 饱和度; 干密度; 土水特征曲线

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2020)04-0142-07

膨胀土是一种特殊土, 由蒙脱石、伊利石、高岭石等强亲水性矿物质组成的高塑性黏土, 广泛存在于高速铁路路基中^[1]. 由于膨胀土长期暴露在自然环境中, 受温度、湿度的变化和降雨等外界因素的影响, 土体的饱和度变化较大. 当饱和度很大时, 土体的吸力迅速减小甚至消失, 导致土体的抗剪强度减小, 工程特性变动明显^[2]. 因此, 研究膨胀土的吸力问题对维持高速铁路安全稳定的运营具有一定的意义.

吸力是非饱和土特有的性质, 土水特征曲线是联系吸力与饱和度(含水率)的纽带, 能够很好地反映非饱和土体的抗剪强度、变形和渗透性^[3], 所以土水特征曲线一直以来都是非饱和土力学问题的研究重点.

关于土水特征曲线, 许多学者进行了相关试验研究. 陈东霞等^[4]讨论了初始含水率、干密度、竖向应力和干湿循环对土水特征曲线的影响, 并提出 5 种剔除残余含水率参数的修正土水特征曲线模型. 王娟娟等^[5]对增(减)湿到相同含水率和相同干密度的不同结构性饱和压实黄土进行土水特征试验, 研究制样含水率引起的结构变化对非饱和压实黄土基质吸力的影响. 白福青等^[6]应用滤纸法分别测试了不同含水率下南阳中膨胀土的总吸力和基质吸力值, 并给出了总吸力和基质吸力的土水特征曲线. 褚峰

收稿日期: 2019-01-27

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划滚动支持项目(IRT_15R29); 国家自然科学基金项目(51768033); 甘肃省高校协同创新科技团队支持计划项目(2017C-08); 甘肃省教育厅高等学校科研项目(2018B-054).

作者简介: 李佳敏(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事岩土方面的研究.

通信作者: 马丽娜, 博士, 副教授.

等^[7]利用饱和和三轴仪对原状非饱和和黄土进行常含水率固结试验, 分析天然干密度和竖向应力对原状非饱和黄土土水特征曲线的影响. 罗启迅等^[8]对不同干密度的砾石进行不同竖向应力作用下土水特征曲线试验, 探讨了干密度和竖向应力对土水特征曲线的影响. Guo-qing CAI 等^[9]研究了温度对土水特征曲线的影响. 宋达等^[10]研究了黄泛区非饱和砂质粉土的土水特征曲线, 并利用 Van Genuchten 模型对曲线进行拟合. 刘星志等^[11]结合滤纸法讨论了颗粒级配对非饱和土土水特征曲线的影响. 汪时机、程明书等^[12-13]对现有土水特征曲线的表征方程的优缺点进行总结, 并且在 Fredlund 等的双应力变量理论及 Van Genuchten 方程基础上, 提出考虑土体变形及多孔隙分布形态的双应力状态变量的广义 SWCC 方程, 并对方程的合理性及适用性进行了验证.

由上可知, 影响土水特征曲线的因素有多个方面, 但是上述试验研究对象大多是黄土或砂土, 而对弱膨胀土的研究较少. 膨胀土由于其本身的特殊性质, 使得在分析各因素对其土水特征曲线的影响情况变得复杂, 需要综合一般情况并结合本身特殊性质进行对比分析.

因此本文采用滤纸法测量土体总吸力和基质吸力, 并绘制相应土水特征曲线, 讨论不同饱和度(含水率)与干密度对其土水特征曲线的影响.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用膨胀土土样取自兰新二线, 取土里程为 DK1346+300 处, 深度为 9~13.5 m. 土样为砖红—红褐色、可塑、泥质胶结, 粒径分布大小不均匀, 具有弱膨胀性. 在室内按照《铁路工程土工试验规程》(TB10102-2010)测得其物理指标如表 1 所示. 试验所用滤纸为杭州新华纸业“双圈”牌 No. 203 型定量滤纸, 直径 70 mm, 滤速为慢速.

表 1 膨胀土的基本物理性质

塑限/%	液限/%	塑性指数	相对密度	膨胀性
21.35	41.20	19.85	2.74	弱

1.2 试验原理

吸力反映的是土中水的自由能状态, 总吸力为土中水的自由能, 基质吸力为土中水自由能的毛细部分, 通常与水表面张力引起的毛细现象联系在一起, 其大小为孔隙气应力与孔隙水应力的差值. 渗透吸力为土中自由能的溶质部分, 若孔隙水中溶质浓度不变, 则任何含水率对应的渗透吸力不变. 由以上描述可知总吸力等于基质吸力与渗透吸力的和, 用公式表达如下^[14]:

$$\varphi = (u_a - u_w) + \pi$$

其中: $(u_a - u_w)$ 为基质吸力; u_a 为孔隙气压力; u_w 为孔隙水压力; π 为渗透吸力.

滤纸法是一种间接测量土中吸力的方法, 因其操作简单、价格低廉、量程大、精度高等优点而被广泛应用^[6]. 当滤纸与土体接触时, 土体中的水分及其中的盐分发生迁移, 直至土体与滤纸的吸力达到平衡状态, 此时滤纸测量的是土体的基质吸力 $(u_a - u_w)$; 当滤纸与土体不接触时, 只有水蒸气发生流动, 此时滤纸测量的是土体的总吸力 φ ^[15].

1.3 试验方案及计算公式选取

1) 将风干土样碾碎过 2 mm 孔径筛, 按表 2 所示试验方案分别配置干密度为 1.40, 1.60, 1.80 g/cm³ 的试样, 对每种干密度下的试样分别配置 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%, 18%, 20%, 22% 的含水率, 同种含水率的土样配置 2 个, 共 60 个试样, 如图 1 所示. 配好水的土样静置 24 h, 以保证水分分布均匀再进行

试样的制作.

2) 根据试验所需质量称取土样, 用制样器制作直径 61.8 mm, 高 20 mm 的环刀试样. 由于试验误差, 最终制样干密度分别为 1.40, 1.60, 1.78 g/cm³. 参照标准 ASTM D5298-10 的试验步骤, 在透明试验盒底部放 3 张滤纸(中间滤纸用于测量基质吸力, 上下两张滤纸用于保护中间滤纸不受污染), 然后将制好的环刀试样直接放置在滤纸上方, 确保光滑平整的一面与滤纸完全接触, 再放入已经经过防锈处理的铁丝环, 最后在上环放一张滤纸, 用于测量土样的总吸力, 如图 2 所示. 然后把试验盒进行密封处理, 在室内静置 10 天, 使滤纸与土样的吸力达到平衡.



图 1 实验过程图

3) 平衡结束后, 用精度为 0.001 g 的电子天平称量滤纸与铝盒质量并计算滤纸含水率. 先称量冷铝盒质量 T_c , 然后用镊子迅速将滤纸取出并放入冷铝盒中, 称量冷铝盒+湿滤纸的质量 M_1 . 之后将放有湿滤纸的铝盒放入 110 ± 5 °C 的烘箱干燥 2 h; 干燥结束后关闭烘箱, 静置 15 min, 等待热力平衡. 然后称取热铝盒+干滤纸的质量 M_2 , 取出滤纸称取热铝盒质量 T_h . 由于试验过程中滤纸含水率测量的微小误差都会对吸力的计算值造成很大影响, 因此, 称量过程应在 3~5 s 内完成, 且佩戴橡胶手套, 以减少滤纸的水分损失^[10].

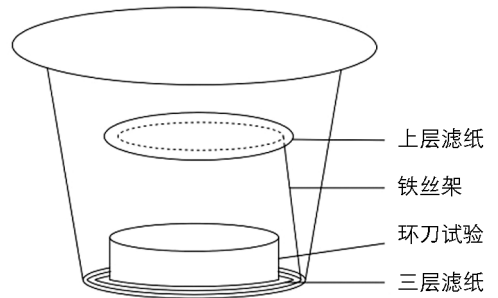


图 2 试验装置

滤纸的含水率计算过程如下:

$$M_f = M_2 - T_h$$

$$M_w = M_1 - M_2 + T_h - T_c$$

其中: M_f 为干滤纸的质量; M_2 为热铝盒+干滤纸的质量; T_h 为热铝盒的质量; M_w 为滤纸中水的质量; T_c 为冷铝盒的质量.

4) 由滤纸含水率 and 对应滤纸的率定曲线方程计算可得到试样的总吸力和基质吸力, 并由土样饱和度(或含水率)与吸力的对应关系可绘制出基质吸力和总吸力的土水特征曲线. 关于滤纸率定曲线的选择, 白福青等^[6, 15]认为滤纸的总吸力率定曲线和基质吸力的率定曲线在低吸力区差异性较大, 应采用不同方程确定土体的基质吸力和总吸力; 而 Marinho^[16]经过大量试验分析表明, 对于同一滤纸, 基质吸力与总吸力的率定曲线应该是一致的, 出现率定曲线不一致的情况是因为平衡时间不充分引起的. ASTM D5298-10^[8]中基质吸力和总吸力也是采用同一条率定曲线. 因此本次试验率定曲线采用的是唐栋等^[17]在国内已有率定曲线的基础上提出的新的双线性方程式, 滤纸的总吸力和基质吸力采用同一方程:

$$\lg \varphi = \begin{cases} 5.2964 - 0.071 & \theta < 47 \\ 2.6784 - 0.015 & \theta \geq 47 \end{cases}$$

其中: φ 为吸力; θ 滤纸含水率.

表 2 试验方案

含水率/%	干 密 度					
	1.40 g/cm ³		1.60 g/cm ³		1.80 g/cm ³	
4	①	②	①	②	①	②
6	①	②	①	②	①	②
8	①	②	①	②	①	②
10	①	②	①	②	①	②
12	①	②	①	②	①	②
14	①	②	①	②	①	②
16	①	②	①	②	①	②
18	①	②	①	②	①	②
20	①	②	①	②	①	②
22	①	②	①	②	①	②

2 结果与分析

2.1 干密度对土水特征曲线的影响

图 3、图 4 为不同干密度下基质吸力、总吸力的土水特征曲线. 由图 3(a)和图 4(a)可知, 不同干密度下基质吸力和总吸力均随含水率的增大而减小; 且曲线的斜率随含水率的增大逐渐减小, 说明土样失水速率逐渐减小. 当总吸力的值小于 6 000 kPa 时, 总吸力曲线近乎垂直于坐标轴, 滤纸含水率的变化对土样吸力影响不大, 说明在此范围内滤纸法对总吸力的测试精度不高.

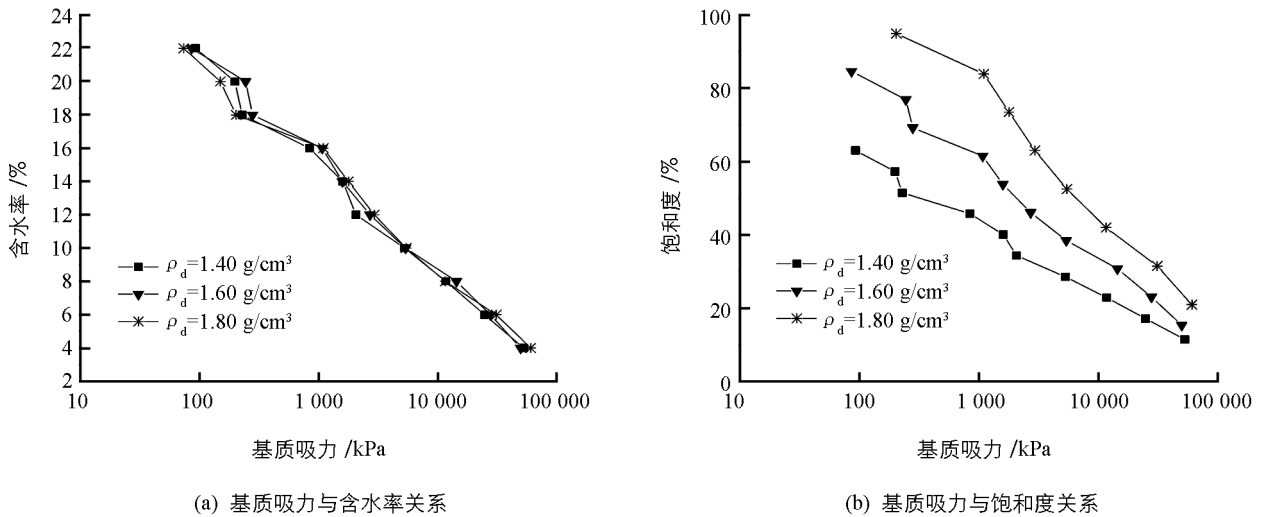


图 3 不同干密度下基质吸力土水特征曲线

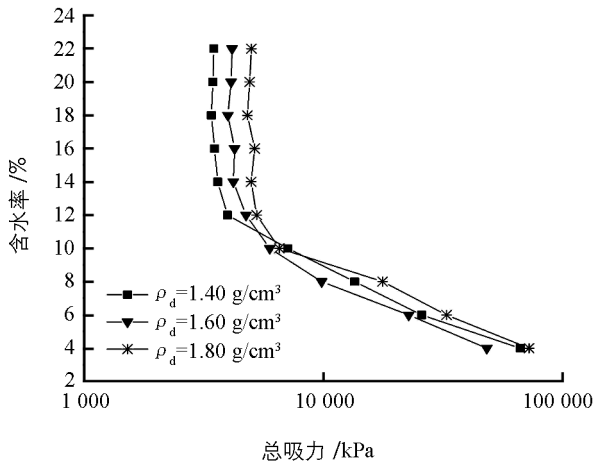
对比图 3(a)、图 3(b)和图 4(a)、图 4(b)可知, 当土水特征曲线用含水率和吸力的关系表示时, 土样的干密度对土水特征曲线的影响似乎不大. 但是用饱和度与吸力表示时, 不同干密度下的土水特征曲线具有明显差异性. 由图 3(b)和图 4(b)可知: ① 在饱和度一定的情况下, 基质吸力和总吸力随干密度的增大而逐渐增大; ② 在干密度由 1.40 g/cm^3 增大到 1.80 g/cm^3 的过程中, 随着饱和度的增大, 基质吸力间的差

值和总吸力间的差值逐渐减小,说明干密度对基质吸力和总吸力的影响随饱和度的增大而减小;③不同干密度下的土水特征曲线的斜率均随饱和度的增大而减小,说明土样的失水速率在逐渐减小,且干密度越大,曲线的斜率越小,所以在同等情况下,干密度为 1.40 g/cm^3 的土样失水速率最快,干密度为 1.80 g/cm^3 的土样失水速率最慢。这是因为:

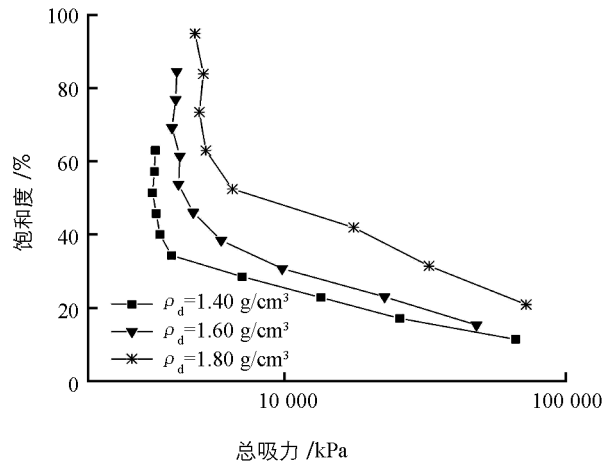
1) 就相对较低含水率和相对较高的吸力的非饱和土而言,孔隙水主要以薄膜的形式附着与土体颗粒表面,其吸力主要由土颗粒表面性质控制的电场力与范德华力作用而产生。土样干密度越大,土颗粒排列就越紧密,随着颗粒表面间距离的减小,电场力与范德华力的作用增强,吸力增大。当非饱和土处于相对较高含水率和相应低吸力状态时,孔隙水主要以毛细水的形式存在,土样干密度越大,土体中的孔隙越致密,孔隙半径越小,毛细作用的影响增强,导致吸力增大。

2) 干密度大的试样小孔隙多,而当含水率增加的时候,小孔隙先充满水,导致干密度大的试样饱和度增大更快,吸力差值逐渐减小。

3) 土样失水过程中,土样中的水首先由大孔隙排出,再由小孔隙逐渐排出,当吸力很高时,只有十分狭小的孔隙才能保持有限的水分,而干密度小的土试样大、中孔隙较多,干密度大的试样微小孔隙较多,因而干密度小的试样失水速率快。



(a) 总吸力与含水率关系



(b) 总吸力与饱和度关系

图 4 不同干密度下总吸力土水特征曲线

2.2 初始含水率对土水特征曲线的影响

由图 5 可以看到,在初始含水率相同的情况下,随着干密度的增大,基质吸力和总吸力均有变化,且随初始含水率的不同变化有所差异。由图 5(a)可知,含水率较小时,基质吸力随含水率的增大而增大,且含水率越小,基质吸力增大得越多,当含水率为 4%,6%时,基质吸力的增量分别为 $7\,705 \text{ kPa}$, $6\,293 \text{ kPa}$;当含水率小于 18%时,基质吸力的增量为 10^2 的数量级;当含水率继续增大的时候,基质吸力基本不变。这是因为随着干密度继续增大,土体孔隙减小,在土样含水率增大时,土样的饱和度增大,导致基质吸力减小,使干密度对基质吸力的影响被弱化。

图 5(b)变化情况与图 5(a)相似,在不同含水率下总吸力随干密度的增大而增大,随着含水率的增大,增量逐渐变小,其原因与含水率对基质吸力的影响相同。

以上结果与刘永等^[2],张鹏程等^[18]试验结果一致,即在低含水率时干密度对吸力影响较大,而高含水率时,吸力基本不变,说明初始含水率和干密度对弱膨胀土的影响与一般土体无异。

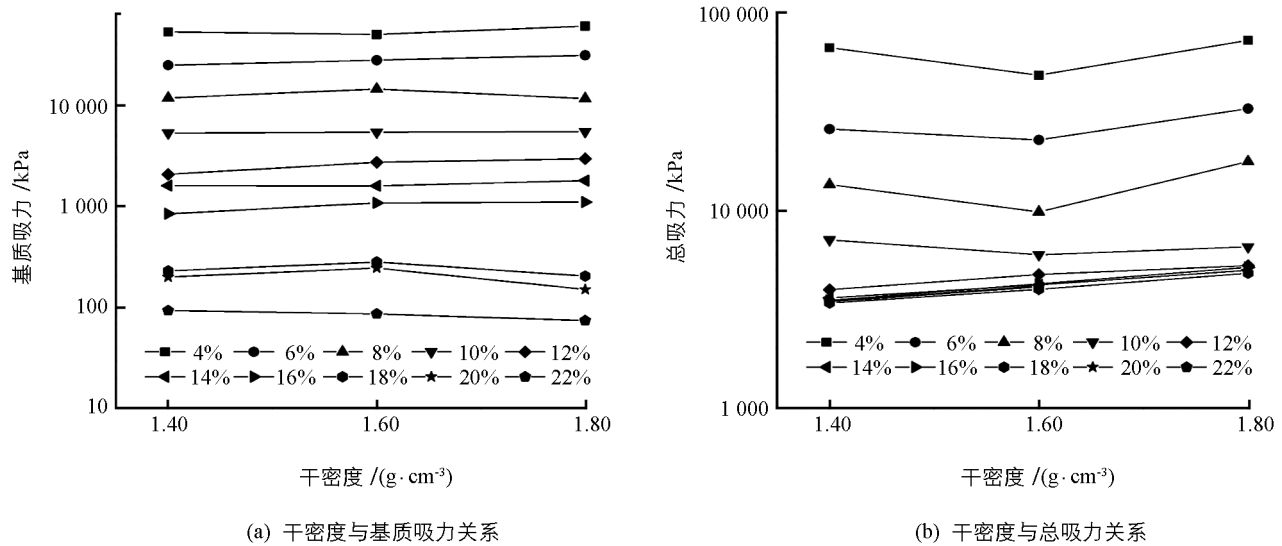


图5 含水率对吸力的影响关系

3 结论

1) 在饱和度一定的情况下,基质吸力和总吸力随干密度的增大而逐渐增大.在干密度由 1.40 g/cm^3 增大到 1.80 g/cm^3 的过程中,随着饱和度的增大,基质吸力的差值和总吸力的差值逐渐减小.

2) 土样干密度越大,土体的失水速率越小,干密度为 1.40 g/cm^3 的土样失水速率最快,干密度为 1.80 g/cm^3 的土样失水速率最慢.

3) 含水率较低的情况下,随干密度的增大,基质吸力和总吸力逐渐增大;随含水率的增大,干密度对基质吸力和总吸力影响程度逐渐弱化.

参考文献:

- [1] 马丽娜. 高速铁路路基低黏土矿物泥岩膨胀机理及影响研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- [2] 刘永, 潘宇翔, 张志军, 等. 含水率和干密度对某铀尾砂基质吸力的影响研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(11): 45-51.
- [3] 王世梅, 刘德富, 谈云志, 等. 某滑坡土体土-水特征曲线试验研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2651-2654.
- [4] 陈东霞, 龚晓南. 非饱和残积土的土-水特征曲线试验及模拟 [J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1885-1891.
- [5] 王娟娟, 郝延周, 王铁行. 非饱和压实黄土结构特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1-8.
- [6] 白福青, 刘斯宏, 袁 骄. 滤纸法测定南阳中膨胀土土水特征曲线试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 928-933.
- [7] 褚 峰, 邵生俊, 陈存礼. 干密度和竖向应力对原状非饱和黄土土水特征影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 413-420.
- [8] 罗启迅, 黄 靖, 陈 群. 竖向应力及干密度对砾石土土-水特征曲线的影响研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 729-734, 743.
- [9] CAI G Q, ZHAO C G, LI J, et al. A New Triaxial Apparatus for Testing Soil Water Retention Curves of Unsaturated Soils Under Different Temperatures [J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2014, 15(5): 364-373.
- [10] 宋 达, 岳建伟, 徐安全, 等. 黄泛区非饱和砂质粉土的土-水特征曲线试验研究 [J]. 应用力学学报, 2019, 36(1): 159-164.
- [11] 刘星志, 吴 悦, 潘诗婷, 等. 颗粒级配对非饱和红土土-水特征曲线的影响 [J]. 水利水运工程学报, 2018(5): 103-110.

- [12] 汪时机, 程明书, 李 贤, 等. 非饱和土双应力变量广义土水特征曲线理论模型构建 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 1-7.
- [13] 程明书, 李 贤, 汪时机, 等. 非饱和土双应力变量广义土水特征曲线理论模型验证 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 8-16.
- [14] 弗雷德隆德(加), 拉哈尔佐(印尼). 非饱和土力学 [M]. 陈仲颐, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [15] 白福青, 刘斯宏, 袁 骄. 滤纸总吸力吸湿曲线的率定试验 [J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2336-2340.
- [16] MARINHO F A M, OLIVERIA O M. The Filter Paper Method Revisited [J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 2002, 25(3): 1-12.
- [17] 唐 栋, 李典庆, 金浩飞, 等. 国产“双圈”牌滤纸吸力率定曲线研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(1): 1-8, 5.
- [18] 张鹏程, 汤连生, 姜力群, 等. 基质吸力与含水量及干密度定量关系研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2792-2797.

Analysis of Influence of Saturation and Dry Density on Soil Characteristic Curve of Weak Expansive Soil

LI Jia-min¹, MA Li-na^{1,2}, ZHANG Rong-ling^{1,2,3},
ZHANG Tang-yu¹, WANG Bin-wen¹

1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Road & Bridges and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

3. Cardiff University School of Engineering, UK, CF24 3AA

Abstract: The total suction and matric suction of soil samples at different dry densities were measured with the filter paper method, and the corresponding soil-water characteristic curves were drawn. The effects of saturation and dry density on the soil-water characteristic curves were analyzed. The experimental results showed that when the saturation was constant, total suction and matric suction increased with increasing dry density, and with the increase in saturation, the difference between total suction and the matrix suction at different dry density decreased. The drainage rate of the sample decreased as the saturation increased, and the higher the dry density, the slower the drainage rate. At lower water content, the total suction and matrix suction of the sample increased with the increase in dry density, and with the increase in water content, the effect of dry density on total suction and matrix suction became smaller.

Key words: expansive soil; filter paper method; saturation; dry density; water-soil characteristic curve

责任编辑 汤振金