

文章编号:1005-0523(2018)03-0091-06

密度及干湿循环影响下的煤系土土-水特征曲线

杨继凯, 郑明新

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:利用 PF 土壤水分特征曲线仪, 测定了不同干密度的重塑非饱和煤系土试样的土-水特征曲线; 并对其中一组试样进行 3 次干湿循环试验, 并利用 VG 模型对实测数据进行拟合, 初步研究了煤系土土-水特征曲线在干湿循环条件下的变化规律。研究表明: 干密度对煤系土的土-水特征曲线有较大影响, 干密度越大的试样饱和含水率越低, 失水速率也越慢, 持水能力越好, 土-水特征曲线也越平缓; 干湿循环作用使得煤系土孔隙相互贯通扩张, 孔隙率增大, 土体的持水能力减弱, 干湿循环对煤系土 SWCC 的影响主要集中在第 1 次干湿循环, 3 次干湿循环后煤系土 SWCC 基本稳定。

关键词:土-水特征曲线; 煤系土; 干密度; 干湿循环

中图分类号: TU44

文献标志码: A

土-水特征曲线(SWCC)表征非饱和土的吸力与含水率(或饱和度)的关系, 对于确定非饱和土的渗透系数^[1-2]、抗剪强度等^[3-5]有着十分重要的意义。陈宇龙^[6]研究了不同干密度下砂土 SWCCs, 得出其在不同路径下的滞回特性; 赵天宇等^[7]研究了不同干密度及不同干湿循环状态下重塑黄土 SWCCs, 给出了黄土土-水特征曲线的进气值及残余含水率值等特征值, 并从微观上分析了干密度和干湿循环对黄土土-水特征曲线的影响; 刘奉银等^[8]研究了不同初始干密度下的黄土的减湿 SWCCs, 通过分析 Gander 模型拟合参数来研究干密度对黄土 SWCC 的影响, 并通过 2 次干湿循环试验对比不同路径 SWCCs 上体积含水率的差异, 提出“滞回度”的概念; 刘朋飞等^[9]针对甘肃东乡原状黄土 SWCCs 进行了干湿循环试验, 讨论了不同的 SWCCs 模型的适用性, 并分析了不同模型在吸湿和脱湿过程中的差异性; 郑娟等^[10]利用压膜仪研究了不同干密度下的黄土 SWCCs, 并利用微型贯入仪获得了基质吸力与地基承载力、液性指数及压缩模量间的关系; 吴培华等^[11]采用滤纸法测定了干湿循环下膨胀土的基质吸力, 并绘制其土-水特征曲线; 谭晓慧等^[12]基于渗析法及滤纸法试验, 测定了合肥市某工地 SWCCs 并以 VG 模型拟合, 得出 SWCCs 试验数据点应具有代表性, 对提高 SWCC 试验的拟合精度及试验效率提供了参考。刘文化等^[13]使用压力板仪实测了粉质粘土击实试样和泥浆固结试样的脱湿 SWCCs 以及泥浆固结试样在不同干湿循环后的 SWCCs, 得到了不同制样方法对 SWCCs 造成的差异, 泥浆固结试样在经历 2~3 次干湿循环后趋于稳定。

目前关于土水特征曲线(SWCCs)的研究手段主要是基于轴平移技术, 利用压力板仪、张力计、Temp 仪等获得不同路径下的 SWCCs; 滤纸法操作方便、可测量较大吸力范围及不同含水率路径下的 SWCCs, 但其试验精度受人为因素影响较大; 目前对于干湿循环过程的控制主要是通过轴平移技术来实现, 而自然状态下的干湿循环过程比室内试验要复杂得多, 有必要模拟自然状态下的干湿循环来研究煤系土 SWCCs 的变化规律。

煤系土土层软硬不均、层间胶结差、结构松散、开挖后风化速度快、遇水易崩解软化、稳定性差^[14-17]。目前

收稿日期: 2018-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51568022); 江西省自然科学基金项目(20171BAB206056); 江西省高等学校科技落地计划(KJLD13036)

作者简介: 杨继凯(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为滑坡与路基病害防治。

通讯作者: 郑明新(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为地质与岩土工程、滑坡与路基病害防治。

主要是针对黄土、膨胀土等工程中常见的岩土体进行 SWCCs 的研究,关于煤系土 SWCCs 的研究尚未见报道,本文针对不同干密度及干湿循环条件下的煤系土 SWCCs 展开研究。

1 试验设备和试验方案

1.1 试验设备

试验设备为日本 PF 土壤水分特征曲线仪,型号为 DIK-3403(图 1 所示),吸力测量范围为 0~1 500 kPa,加压设备为自动调压器和空气压缩机(低于 160 kPa 用调压器,160~1500 kPa 用空气压缩机)。利用轴平移技术来控制基质吸力,通过施加不同的气压来得到在不同的吸力下土体的基质吸力和含水率的关系,最后对实测数据进行点绘。本试验仅对脱湿路径下的煤系土 SWCCs 进行研究。

1.2 试验土样的基本性质及试样制备

本试验用土取自南昌至上栗高速公路 K213+440~K213+650 处路堑边坡开挖所出露的煤系地层。属含砂粘质土(CLS),呈灰黑色,最优含水率为 18.4%,土体相对密度 $G_s = 2.61$,液限、塑限含水率分别为 23.4%和 14.5%,如表 1 所示。试样系煤系土重塑试样,为减少试验影响因素,所有试样初始含水率均控制在 $(20 \pm 0.2)\%$,搅拌均匀后密封,在恒温处放置 24 h,确保土样含水率均匀。将制备好的土样按照土工试验规程制成击实样,用 $\Phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 环刀取样,每组制备 5 个试样,干密度误差控制在 $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 。为研究干湿循环对煤系土 SWCCs 的影响,对其中一组试样进行干湿循环试验。试验中为模拟土体在自然状态下的干湿循环,将制备好的土样放在室外使其自然风干脱水,定时称取质量,直至试样质量不再变化为止;脱湿完成后用喷壶对准试样表面喷水,直至试样全部浸湿,至此试样完成一次干湿循环。完成干湿循环操作的试样需放入叠式饱和器中,使其在真空缸中抽气饱和,完成后续 SWCCs 试验。

表 1 试验用土的主要物理力学参数

Tab.1 Physical-mechanical properties of specimen

液限含水率/%	塑限含水率/%	塑性指数 I_p	最优含水率/%	最大干密度/ (g/cm^3)	相对密度 $G_s/(\text{g/cm}^3)$
14.5	23.4	8.9	18.4	1.857	2.61

1.3 试验研究方案

为研究初始干密度对煤系土 SWCCs 的影响,干密度分别控制为 1.54,1.62,1.68 g/cm^3 。试验前将制备好的试样抽气饱和,称取饱和试样质量,计算试样在试验前的饱和体积含水率;然后分别控制其基质吸力为 10,20,50,100,150,200,300,400,500,600,700,800 kPa,待其排水稳定后分别称取质量,测得在不同吸力下的含水率,每组制备 5 个试样,为提高试验精度,试验过程中取其含水率平均值。最后点绘土-水特征曲线(SWCCs)。

为研究干湿循环对煤系土 SWCCs 的影响,对第二组试样进行上述干湿循环操作,控制干湿循环次数为 0~3 次,每次干湿循环完成后将试样放入土壤水分特征曲线仪中,完成 SWCC 试验。具体实验方案见表 2。



图 1 DIK-3403 型 PF 土壤水分特征曲线仪

Fig.1 Layout of DIK-3403 PF type SWCCs apparatus

表 2 煤系土土水特征曲线试验方案

Tab.2 Test scheme of soil water characteristic curve for coal soil

试样分组	初始含水率/%	干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	干湿循环次数/次
M1	15	1.54	0
M2	15	1.62	3
M3	15	1.68	0

2 试验结果分析

2.1 SWCCs(VG)模型

用于直接测量土-水特征曲线的试验方法,通常提供了揭示吸力和含水量之间关系的一系列离散数据点。而要使用土-水特征曲线来预测发生在非饱和土内的水流流动、应力和应变现象^[18],首先要把测得的数据表达为联系的数学公式^[19]。

依据上述不同干密度及干湿循环条件下煤系土 SWCCs 的实测数据,考虑 VG 模型使用范围广、拟合精度高的特点^[6-7,20],故选用 VG 模型对煤系土 SWCCs 试验数据进行拟合^[21-22]。其表达式如下:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \psi)^n} \right]^m \quad (1)$$

式中: θ, θ_s 为分别为体积含水率和饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; ψ 为吸力/kPa; α, m, n 均为拟合参数。 α 与土体的进气状态有关,约等于进气压力值的倒数,其单位为 kPa^{-1} ,参数 n 与土体的减湿率有关,参数 m 与土-水特征曲线的整体对称性有关,常与参数 n 有以下直接的函数关系:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

关于拟合参数 $\theta_s, \theta_r, \alpha$ 和 n 的选取及拟合,首先通过 Origin9.1 软件自定义模型公式,并赋予其初始值,输入试验数据后自动进行求取,具体的模型推导及拟合参数的求取过程参考文献[22]。

2.2 初始干密度对煤系土 SWCCs 的影响

图 2 所示为不同干密度下煤系土 SWCCs 的试验数据及拟合曲线。可见煤系土 SWCCs 呈倒 S 形,在不同的吸力段呈现出不同的特性,在 1~10 kPa 吸力段,土体含水率随基质吸力的增大并无明显变化,在此吸力段,土体仍处于饱和状态;在 10~50 kPa 吸力段,煤系土试样进入快速失水状态,在吸力为 14 kPa 处不同干密度下的 SWCCs 出现交叉;在吸力大于 50 kPa 段,土体含水率随基质吸力的增大已无明显变化,此时进入土水特征曲线残余段,土体含水率基本不再随吸力的增大而变化。

通过对比不同干密度下的煤系土 SWCCs,可以发现,干密度较小的试样孔隙率相对较高,因此饱水状态下有较高的含水率,且孔隙间连通性较好,同时也使得在吸力较低的时候试样就开始失水;反之,干密度较大的试样相对孔隙率较低,饱和含水率较低,试样孔隙中互相连通的孔隙较少,土体持水能力较强,失水速率较低;而最终,当基质吸力增大到一定程度(50 kPa)后,不论是干密度大的试样还是干密度小的试样,土体中较大孔隙中的水已被孔隙气体所代替,而残余的水分则存在于试样较小的孔隙或封闭的孔隙中,吸力的增大已经很难将这些孔隙中的水分排出,所以土体含水率趋于稳定;而且干密度越大,残余含水率越高,因为干密度大的土体更为密实,其内部残余的水分比干密度较小试样更难排出。

从 VG 模型参数 $\alpha, n, \theta_s, \theta_r$ 的变化规律也可以总结干密度对煤系土 SWCC 的影响,表 3 为不同干密度下煤系土 SWCCs 的 VG 模型参数,从不同干密度下 VG 模型拟合参数的相关性系数 R^2 值的大小可以看出, VG 模型对不同干密度下的煤系土 SWCCs 有很好的适用性;参数 α 随干密度的增大呈减小趋势,而 α 值为进气值的倒数,故 α 越小,进气值越大;干密度越大,煤系土土体饱和含水率 θ_s 越低,残余含水率 θ_r 越高;参数 n 随干密度的增大而减小;说明土体失水速率随干密度增大而减小。

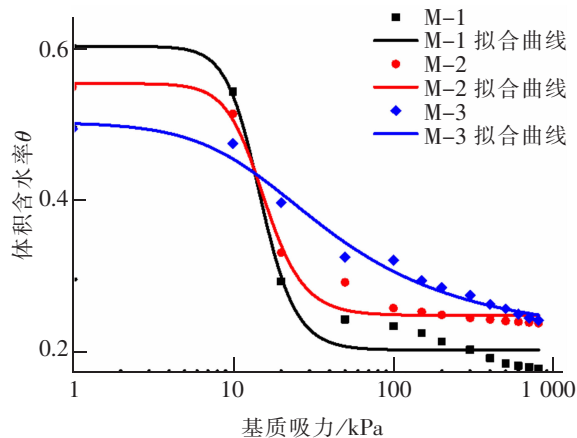


图 2 不同干密度下煤系土的土-水特征曲线
Fig.2 SWCCs of coal soil in different dry densities

表3 不同干密度下VG模型参数计算结果
Tab.3 Calculation result of VG model parameters for different densities

试样分组	α	n	θ_s	θ_r	R^2
M-1	0.073 2	4.376 78	0.612	0.282	0.979 1
M-2	0.071 86	3.655 87	0.558	0.303	0.985 6
M-3	0.070 84	1.590 32	0.503	0.328	0.978 6

2.3 干湿循环对非饱和煤系土 SWCCs 的影响

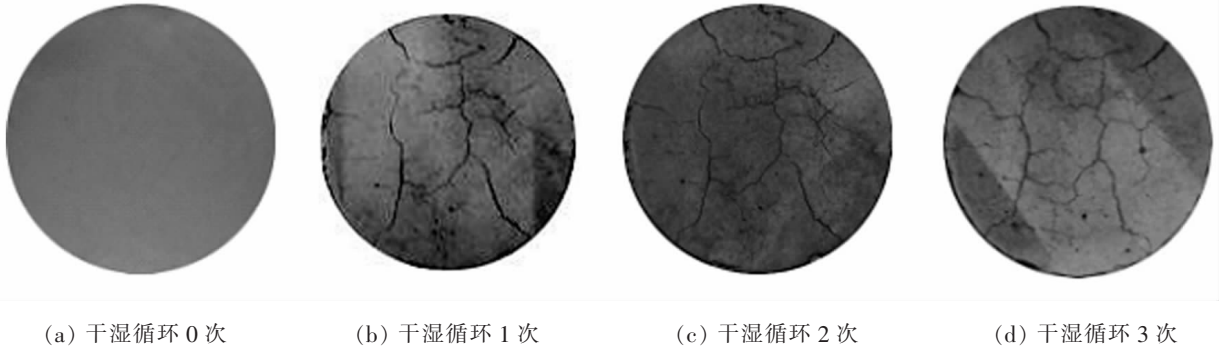


图3 干湿循环条件下煤系土的裂隙发育

Fig.3 Fracture development of coal soil under dry-wet circulation

对第二组试样(M2)进行了3次干湿循环,其裂隙发育情况如图3所示。从图3可以看出,未经过干湿循环的试样表面平整,无任何裂隙,在经过1次干湿循环后,试样表面生成6条主裂缝,且较为明显,土体在经过2次干湿循环后,裂隙开始发育有贯通趋势,并有少量微小裂隙产生,土体表面破碎程度加剧;经过3次干湿循环后,试样表面主裂隙基本相互贯通,裂隙边缘土颗粒被溶蚀,裂隙形态变得模糊,且有更多的微小裂隙生成。可以看出在干湿循环过程中,煤系土主裂隙先生成,随着干湿循环次数的增加,主裂隙不断发育,并未形成新的主裂隙,可以推测,干湿循环对煤系土的孔隙结构影响主要发生在第1次的干湿循环过程中,经过3次干湿循环后,土体的孔隙结构基本稳定。

干湿循环影响煤系土孔隙结构主要是因为土体孔隙在饱和状态下被水充满,脱湿过程中,部分孔隙因为水分的蒸发而扩张,还有一部分孔隙随着干燥过程中基质吸力的增大使得土体有效应力增加,土骨架被压缩。而随后的吸湿过程并不能完全恢复土骨架的压缩变形,反复的干湿循环使得裂隙扩张和压缩变形变得不可逆转。随着干湿循环次数的增加,土体结构趋于稳定。图4为M-2组试样在不同干湿循环条件下的SWCCs的试验数据及拟合曲线。同图2一样,干湿循环条件下的煤系土SWCCs也存在明显的阶段特性。在1~10 kPa吸力段,随着干湿循环次数的增加,煤系土试样的饱和含水率有不同程度的提高,说明土体在未经干湿循环作用时存在封闭的孔隙,干湿循环使得煤系土土体黏粒吸水膨胀又失水收缩,产生裂隙,同时也造成了大量封闭空隙因干湿循环而贯通;在10~50 kPa吸力段,不同干湿循环次数下的土-水特征曲线在吸力为20 kPa处出现交叉,且干湿循环次数越多,土体失水速率越快;在吸力大于50 kPa段,土

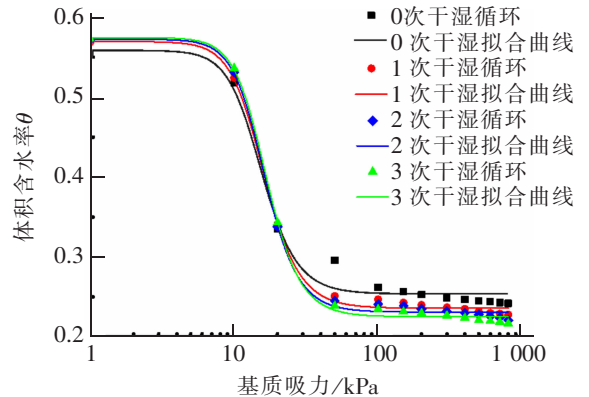


图4 不同干湿循环条件下的煤系土土水特征曲线
Fig.4 SWCC of coal soil in different drying-wetting cycles

体含水率随基质吸力的增大已无明显变化,此时进入土水特征曲线残余段,且随着干湿循环次数增多,土体的残余含水率越低。通过对比不同干湿循环次数下的煤系土 SWCCs 可以看出,干湿循环对煤系土 SWCCs 的影响主要发生在第 1 次干湿循环,第 2 次干湿循环后的煤系土 SWCC 与第 3 次干湿循环后的 SWCC 接近重合,说明 3 次干湿循环后,煤系土 SWCC 已基本稳定。

表 4 不同干湿循环条件 VG 模型参数计算结果
Tab.4 Calculation results of VG model parameters in different drying-wetting cycles

干湿循环次数	α	n	θ_s	θ_r	R^2
0	0.071 86	3.655 87	0.558	0.303	0.985 6
1	0.078 93	3.956 61	0.575	0.273	0.996 9
2	0.079 56	4.162 35	0.579	0.251	0.996 9
3	0.079 73	4.141 5	0.581	0.247	0.997 5

表 4 为不同干湿循环条件下煤系土 SWCCs 的 VG 模型参数,从 α 的变化可以看出,随着干湿循环次数的增加, α 呈减增大趋势(土体进气值呈减小趋势),且 1 次干湿循环后 α 增加最为明显,第 2 次及第 3 次干湿循环后 α 值并无明显差异;参数 n 随干湿循环次数的增加呈增大趋势,且第 2、第 3 次干湿循环后参数 n 无明显差异,且第 1 次干湿循环对煤系土 SWCC 的影响最为明显,3 次干湿循环后,煤系土 SWCC 已基本稳定;同时,从 VG 模型参数的相关性系数 R^2 值的大小也可以看出,利用 VG 模型对不同干湿循环条件下的煤系土 SWCCs 拟合均有较高的相关性,进一步说明,VG 模型对于不同条件下的煤系土 SWCCs 均有很好的适用性。

3 结论

利用 PF 土壤水分特征曲线仪测试了不同干密度及干湿循环条件下煤系土的 SWCCs,并选用 VG 模型对煤系土 SWCCs 进行拟合,得出如下结论:

- 1) 煤系土 SWCCs 在不同吸力段呈现出不同的特性,在 1~10 kPa 吸力段,土体含水率随基质吸力的增大并无明显变化;在 10~50 kPa 吸力段,煤系土试样进入快速失水状态;在吸力大于 50 kPa 段,随着基质吸力的不断增大,土体失水速率逐渐降低,含水率基本不再随吸力的增大而变化。
- 2) 干密度对煤系土 SWCCs 有较大影响,在低吸力段,干密度越大,饱和含水率越低,进气值越高;在吸力大于 50 kPa 段,干密度越大,残余含水率越高,土体失水速率越慢,持水能力越强。
- 3) 干湿循环致使煤系土孔隙贯通扩张,孔隙率增大,饱和含水率增大,残余含水率降低,失水速率增大,持水能力减弱;第 1 次干湿循环对煤系土 SWCCs 的影响最为明显,3 次干湿循环后,煤系土的 SWCC 已基本稳定。

参考文献:

- [1] FREDLVND DG, XING AQ, HUANG S Y. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geo mechanics Abstracts, 1995, 32(4): 553-546.
- [2] VAN GENUCHTEN M T. A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892-898.
- [3] DASTJERDI M T. Effect of confining stress on soil water retention curve and its impact on the shear strength of unsaturated soils [J]. Vadose Zone Journal, 2014, 13(5): 1-11.

- [4] FREDLUND D G, XING A Q, FREDLUND M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(3): 440-448.
- [5] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D G, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(3): 379-392.
- [6] 陈宇龙, 内村太郎. 不同干密度下非饱和土土-水特征曲线[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2017, 48(3): 813-819.
- [7] 赵天宇, 王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲线[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(6): 2445-2453.
- [8] 刘奉银, 张昭, 周冬, 等. 密度和干湿循环对黄土土-水特征曲线的影响[J]. *岩土力学*, 2011, 32(S2): 132-136+142.
- [9] 刘朋飞, 殷跃平, 李滨, 等. 非饱和黄土干湿循环土水特征曲线试验及渗透系数预测[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(4): 125-129.
- [10] 郑娟, 赵丽娅, 刘保健. 非饱和黄土的土水特征曲线试验研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(6): 1138-1142.
- [11] 吴培华, 袁俊平, 杨松. 基于滤纸法的裂隙膨胀土土水特征曲线试验[J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33(5): 61-64.
- [12] 谭晓慧, 余伟, 沈梦芬, 等. 土-水特征曲线的试验研究及曲线拟合[J]. *岩土力学*, 2013, 34(S2): 51-56.
- [13] 刘文化, 杨庆, 唐小微, 等. 制样方法和干湿循环对粉质黏土土-水特征曲线影响[J]. *大连理工大学学报*, 2015, 55(2): 179-184.
- [14] 王宇航, 洪宝宁. 广梧高速公路路块状煤系土的物理力学特性[J]. *河南科学*, 2014, 32(11): 2309-2312.
- [15] 胡昕, 洪宝宁, 王海明, 等. 高液限土和煤系土抗剪强度的水敏感性比较研究[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2010, 42(1): 54-59.
- [16] 祝磊, 洪宝宁. 粉状煤系土的物理力学特性[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5): 1317-1322.
- [17] 祝磊, 洪宝宁. 广东云浮砾状煤系土的物理力学特性[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(1): 86-89.
- [18] KATSUO S, NOBUTOMO O, KEIJI T. Influence of void ratio and stress-path to the soil-water characteristic curve of unsaturated sandy soil[J]. *Journal of the Japan Landslide Society*, 2008, 45(4): 457-462.
- [19] NING LU, W J L. 非饱和土力学[M]. 高等教育出版社, 2012: 359-369.
- [20] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geo mechanics Abstracts*, 1995, 32(4): 521-532.
- [21] 许淑珍, 白晓红, 马富丽. 利用 MATLAB 拟合压实黄土土-水特征曲线的研究[J]. *太原理工大学学报*, 2015, 46(1): 81-84.
- [22] 甄雪, 王红雨, 李雨佳, 等. 利用 Origin8.0 绘制土水特征曲线的方法[J]. *宁夏工程技术*, 2016, 15(3): 262-265+269.

Effects of Density and Drying-wetting Cycle on Soil Water Characteristic Curve of Coal Soil

Yang Jikai, Zheng Mingxin

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: A series of tests were carried out by means of PF-type SWCC device for SWCCs for remodelled unsaturated coal soil specimens at different initial dry density in this study. Based on test results, the influence of initial dry density on unsaturated coal soil soil water characteristic curve were studied through analyzing the VG curve model. The three times of drying-wetting cycles tests for a specimen at certain initial density were also carried out. The research results show that the dry density has a great influence on the soil-water characteristic curves of coal-bearing soil. Specimens with higher dry density generally have lower saturated content, higher water-losing speed, and better water-holding capacity. The drying-wetting cycles leads to structure change and big pore increase in soil, and water-holding capacity of coal soil can also be reduced. The effect of the 1st drying-wetting cycle on coal soil SWCCs is most obvious. The SWCC of the coal soil is basically stable after the third wet-dry cycle.

Key words: soil-water characteristic curve; coal soil; dry density; drying-wetting cycle