

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.02.011

应力状态对土-水特征曲线的影响规律

胡孝彭,赵仲辉,倪晓雯

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要:为系统地探讨不同应力状态对土-水特征曲线的影响,以河南新乡地区的黏土为对象,采用非饱和固结仪与双室三轴仪分别研究 K_0 和等向应力状态对压实黏土的土-水特征曲线的影响规律。试验结果表明:低应力(小于 100 kPa)下等向应力状态对土-水特征曲线的影响与 K_0 状态相似,固结后孔隙比不同决定着土-水特征曲线的形状有所差异。土体的空气进入值随着孔隙比的减小而增加,土体进气后,干燥与增湿曲线的斜率随着孔隙比的增加而增大,且孔隙比较大时土体的滞回特性更明显。

关键词:非饱和土;土-水特征曲线;应力状态

中图分类号:TU43 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2013)02-0150-06

Influence of stress state on soil-water characteristic curve

HU Xiaopeng, ZHAO Zhonghui, NI Xiaowen

(Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to systematically investigate the influences of various kinds of stress states on the soil-water characteristic curve (SWCC), an unsaturated soil oedometer and a double-cell triaxial apparatus were used to study the influences of K_0 and the isotropic stress state on the SWCC of the compacted clay soil taken from Xinxiang, in Henan Province. The test results show that the effects of isotropic and K_0 compression on the SWCC were similar in the low stress regime (<100 kPa), and the void ratio after consolidation controlled the shape of the SWCC. The air-entry value increased with the decrease of the void ratio, and the gradients of the drying and wetting curves increased with the increase of the void ratio. In addition, the hydraulic hysteresis between the drying and wetting curves was more significant with a higher void ratio.

Key words: unsaturated soil; soil-water characteristic curve; stress state

土-水特征曲线(SWCC)用于描述非饱和土体中基质吸力与含水率之间的关系,这种关系在干燥和增湿过程所呈现的曲线不同。SWCC 反映了非饱和土的持水能力,借助它可以间接估计非饱和土的强度^[1-2]和渗透特性^[3-4]。

前人已经针对土的矿物成分、孔隙结构、应力情况等因素对 SWCC 的影响进行了深入的研究^[5-7]。在岩土工程中,土体总是承受某一水平的应力,会表现出相应的压缩变形,导致土体组构改变,这无疑会影响土体的持水性能,同时非饱和土的力学性状也会随着基质吸力的变化而变化,可见,土体所处的应力状态与其持水特性之间存在很强的耦合作用,因此不能忽视应力状态对 SWCC 的影响。

传统的 SWCC 测试装置(如压力板仪)无法施加外部应力和量测体变,Ng 等^[8]利用改进的体积压力板装置量测了香港地区残积土在 K_0 状态下的 SWCC,指出轴向应力越大,土体的进气值越高,体积含水率的变化范围越小。龚壁卫等^[9]利用研制的应力式体积压力板仪探讨了应力对膨胀土 SWCC 的影响,初步研究表明一维固结和各向等压应力状态下膨胀土的 SWCC 呈线性变化趋势,干燥与增湿过程几乎没有滞后现象。陈正汉^[10]通过重塑非饱和黄土的三轴收缩试验,指出不同的净平均应力对应着不同的 SWCC,对于相同饱

和度的土,作用的净平均应力越大,则对应的吸力越小。实际上土体所受的应力状态相当复杂,不同应力状态下土体的持水特性究竟有何种异同?造成这些差别的根本原因是什么?针对这些问题,笔者采用非饱和土固结仪和双室三轴仪量测不同竖向应力和等向应力作用下的 SWCC,以期深入研究应力状态对 SWCC 的影响规律。

1 试验材料与方法

1.1 试验土样

试验土样取自河南新乡地区,土粒密度为 2.68 g/cm^3 ,液限为 34%,塑限为 16%,砂粒含量(质量分数,下同)为 20.7%,粉粒含量为 76.3%,黏粒含量为 3.0%,最大干密度为 1.81 g/cm^3 ,最优质量含水率为 16%。根据土的分类方法^[11],该土样属于低液限黏土。

1.2 试验仪器与试样制备

试验仪器主要有 2 种:非饱和土固结仪(图 1)和双室三轴仪(图 2),它们均基于轴平移技术控制试样的基质吸力。非饱和固结仪的主要装备为台架、底座、压力室、加载系统、排水系统、百分表等部件,其中加载系统与常规固结仪相同,杠杆比为 1:12。试验过程中为了减少气压力变化对竖向变形量测的影响,将通往压力室的气压管分为 2 支,一支经进气孔通向压力室,另一支连接到图 1 所示的活塞上,由支架将该活塞固定于压力室活塞的正上方,使压力室活塞两端的气压相同。

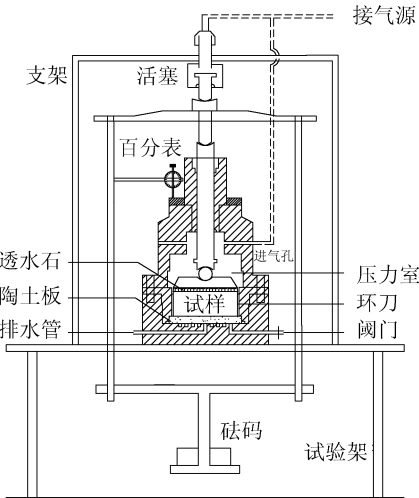


图 1 非饱和土固结仪

Fig. 1 Unsaturated soil oedometer

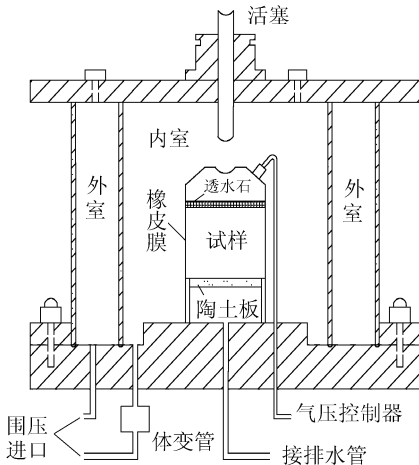


图 2 双室三轴仪

Fig. 2 Double-cell triaxial apparatus

双室三轴仪由常规三轴仪改进而来,在分别控制试样基质吸力和净平均应力条件下,通过安装在体变管和排水管上的传感器来测量体变,试样的体变反映为内室水的体积改变,试验加压时内外压力室的压力相等,可以大幅度减小内室体积量测误差。由于压力变化、蠕变、温度变化等会引起体变量测误差,因此采用文献[12]的方法对试验量测结果进行误差修正。

试样的初始干密度为 1.65 g/cm^3 ,初始质量含水率为 14%。对于固结仪试样,采用压样器以静压力制备压实环刀样(直径 61.8 mm,高度 20 mm);对于三轴仪试样(直径 39.1 mm,高度 32 mm)的制备,采用与试样直径相同的击样筒,分 2 层击实,制备方法见文献[13]。制备好的试样视为初始状态相同的土样,将其装入饱和器进行抽气饱和,以备使用。

1.3 试验方法

为获得不同应力状态下的 SWCC,试验分为固结、干燥和增湿 3 个过程。将饱和试样分别在 25 kPa, 50 kPa 与 100 kPa 下固结(分为 K_0 固结、等向固结),待固结完成后,在控制净应力不变的条件下逐级增加吸力至最大吸力值(300 kPa),之后将吸力逐级减小至零。应力路径如图 3 所示。

2 试验结果和分析

2.1 竖向应力对 SWCC 的影响

图4为不同竖向应力对SWCC的影响关系。从图4(a)可以看出曲线的性状基本一致,竖向应力越大,初始饱和和体积含水率 θ_s 越低。Fredlund等^[14]提供了一种通过作图来确定进气值的方法:过干燥曲线的下降段作斜线与 $\theta=\theta_s$ 的交点即为土的进气值(u_a-u_w)_b,如图4(a)所示,该线斜率的绝对值定义为干燥率。半对数坐标系中,对SWCC下降段进行拟合,求得空气进入值和干燥率,见表1。

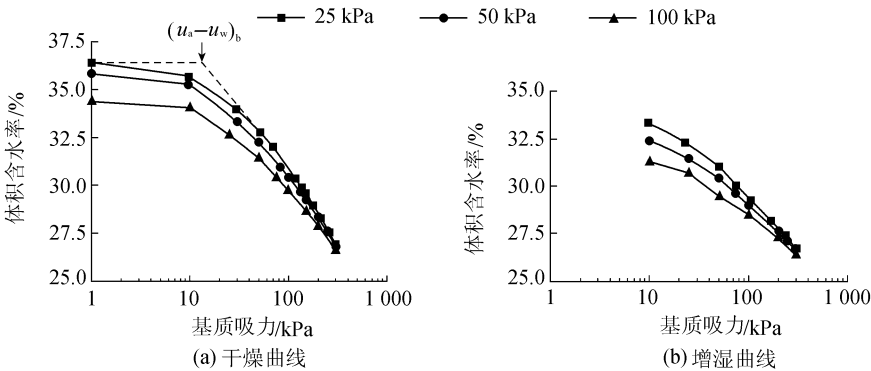


图4 竖向应力对SWCC的影响
Fig. 4 Effects of vertical stress on SWCC

从表1可以清楚地看到随着竖向应力的增加,空气进入值增大,这与Vanapalli等^[15]的结论有相同之处;另外,干燥率呈现逐渐减小的趋势,亦即干燥曲线越趋于平缓。这是因为试样在竖向应力作用下发生固结,孔隙体积会减小,竖向应力越大,则土颗粒间的胶结越紧密、孔隙比越小且存在一定数量的微孔隙,导致相应的空气进入值越大,SWCC越平缓。

从图4(b)可以看出,随着竖向应力的增加,曲线斜率的绝对值也逐渐变小,即竖向应力越大,增湿曲线越平缓,土体向内吸水越困难。试样在干湿循环后土体的体积含水率均无法回到初始的饱和体积含水率,主要原因在于增湿过程中水无法将土样中存在的气泡完全赶出。

综合干燥与增湿过程考虑,针对某一竖向应力下的SWCC,干燥率明显大于增湿率,同一吸力值对应2个不同的体积含水率 θ ,主要原因如下:一方面是土中孔隙尺寸大小不均匀,根据Fredlund等^[14]的“瓶颈效应”模型,增湿过程中较粗的孔径起控制作用,大孔隙较易进出水分,而干燥过程中吸力大于细孔隙对应的毛管力时粗孔隙保持的水分才能被排出,显然细孔隙需要的吸力值大,水分进出较难,这样干燥过程中小孔隙中残余的水分使含水率高于增湿过程吸水时的含水率;另一方面是干燥和增湿过程中水-气分界面接触角大小不同,干燥时小,增湿时大。

2.2 等向应力对 SWCC 的影响

图5为不同等向应力条件下量测的SWCC,在半对数坐标系中求得空气进入值、干燥率,结果见表1。

2.3 不同应力状态下 SWCC 的对比

对比不同应力状态下得到的SWCC,可以发现,虽然SWCC形状基本相似,但存在一些明显的差异。等向固结作用下土体的初始饱和和体积含水率较相应 K_0 固结小些,SWCC的空气进入值较大,干燥率和增湿率略小。

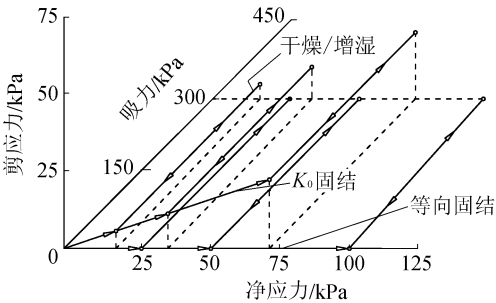


图3 试验应力路径
Fig. 3 Stress paths of testing program

表1 SWCC 的进气值与干燥率

Table 1 Air-entry value and gradient of drying curve of SWCC

应力状态	净应力/kPa	进气值/kPa	干燥率/%
竖向应力	25	13.9	3.28
	50	18.1	3.16
	100	23.6	2.85
等向应力	25	17.8	3.09
	50	22.1	2.96
	100	24.2	2.54

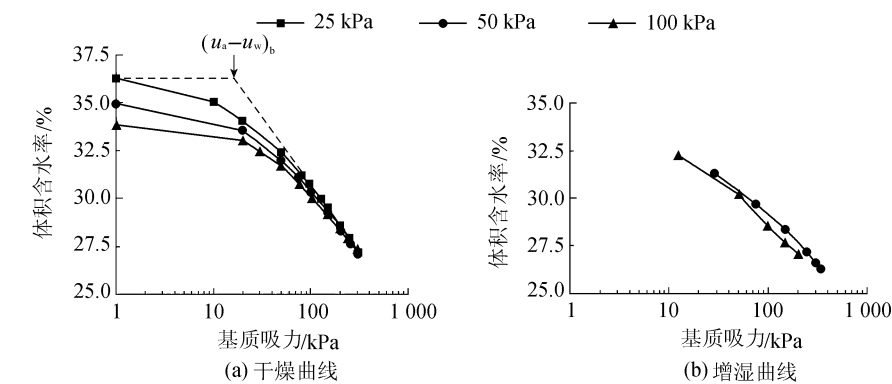


图 5 等向应力对 SWCC 的影响

Fig. 5 Effects of isotropic stress on SWCC

固结后的孔隙比与 SWCC 的空气进入值、干燥率与增湿率之间的关系如图 6、图 7 所示。由图 6、图 7 可以看出,不同应力状态下试样固结完成后的孔隙比与 SWCC 的空气进入值、干燥率存在良好的线性关系,孔隙比与空气进入值成反比,与干燥(增湿)率成正比。等向固结对土体的挤密变形作用比相应的 K_0 固结强,固结完成后土样的孔隙比更小,空气进入值、干燥率反映土体中毛细力的大小,而毛细力与孔隙体积成反比^[15],因而孔隙比越小,空气进入值越大,干燥速率越小。孔隙比变化的不同导致含水量随吸力的变化也不尽相同,随着基质吸力的增加,试样发生收缩,孔隙比不断减小,干燥率明显大于增湿率。

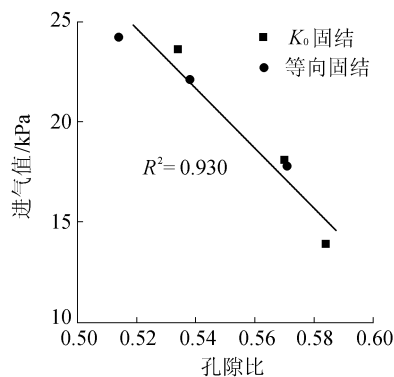


图 6 孔隙比与空气进入值的关系

Fig. 6 Relationship between void ratio and air-entry value

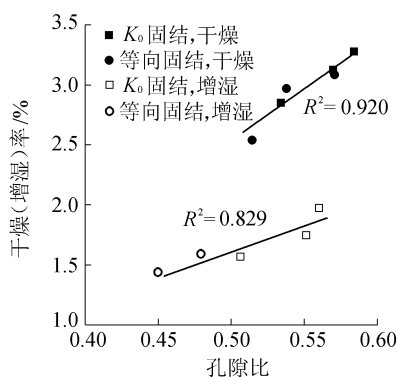


图 7 孔隙比与干燥(增湿)率的关系

Fig. 7 Relationship between void ratio and gradient of drying (or wetting) curve

图 8 为不同应力状态下 Fredlund 等^[16]的三参数模型拟合曲线,采用他们的三参数 SWCC 模型^[16]对固结应力为 50 kPa, 100 kPa 下量测的试验数据,用最小二乘法进行拟合:

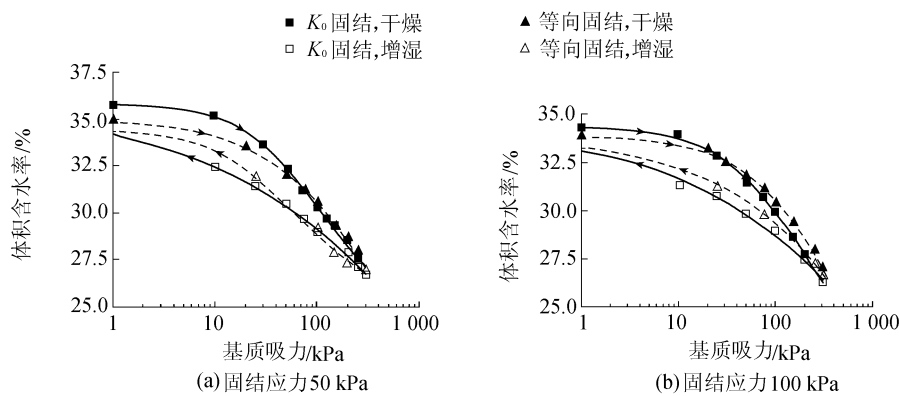


图 8 不同应力状态下的滞回特性

Fig. 8 Hydraulic hysteresis under different stress states

$$\theta = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m}$$

(1)

式中: ψ ——基质吸力; a, n, m ——拟合参数。

由图8可以发现,干湿循环后试样的 θ 没有回到初始值,且比初始体积含水率低;从吸力在1~300 kPa范围内形成的滞回圈看,应力值越大,土体的滞回特性越不明显,与 K_0 固结相比,相应等向固结应力下土体的滞回特性更弱。固结完成后的孔隙比与滞回圈面积之间的关系如图9所示。由图9可知,孔隙比与滞回圈面积线性相关程度较高,不同固结应力作用下土体的孔隙比不同,孔隙比越大则滞回圈面积越大、持水能力越弱,固结后的孔隙比反映了不同应力状态对SWCC的影响差异。值得注意的是,本试验的孔隙比变化范围不大,其他应力比条件下,孔隙比变化范围较大时该结论的适用性还有待于验证。另外,土体经过干湿循环后会生成新的封闭气泡,它是导致滞回现象的一个重要原因,而孔隙比是土体中孔隙(连通孔隙与封闭孔隙)分布的平均指标,因此,下一步的研究工作应对干湿循环过程中生成的封闭气泡所占的比重加以考虑。

3 结 语

采用非饱和土固结仪和双室三轴仪量测在竖向应力和等向应力作用下压实黏土的SWCC,较深入地研究不同应力状态对SWCC的影响规律,试验结果表明:

- a. 随着固结应力增大,SWCC的空气进入值逐渐增大,土体进气后干燥与增湿曲线的斜率随着应力增加而减小。
- b. SWCC的滞回特性随着应力水平的提高而逐渐减弱。
- c. 与 K_0 固结相比,同一净应力值下等向固结作用下的土体孔隙比更小,对应SWCC空气进入值较大,干燥和增湿曲线的斜率较小,滞回特性也较弱。可见,低应力(<100 kPa)主要是通过改变土体的孔隙结构来影响SWCC,固结后的孔隙比可以反映不同应力状态对SWCC的影响差异。

参考文献:

[1] FREDLUND D G, XING A, FREDLUND M D. The relationship of the unsaturated soil shear strength function to the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 440-448.

[2] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379-392.

[3] van GENUCHTEN M T H. A close-from equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44(5): 892-898.

[4] 卢应发, 陈高峰, 罗先启, 等. 土-水特征曲线及其相关性研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2481-2486. (LU Yingfa, CHEN Gaofeng, LUO Xianqi, et al. Study of soil-water characteristic curve and its influential factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2481-2486. (in Chinese))

[5] 刘艳华, 龚壁卫, 苏鸿. 非饱和土的土水特征曲线研究[J]. 工程勘察, 2002(3): 8-12. (LIU Yanhua, GONG Biwei, SU Hong. Study on characteristic curve of soil and water for unsaturated soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2002 (3): 8-12. (in Chinese))

[6] 毛尚之. 非饱和膨胀土的土-水特征曲线研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 129-134. (MAO Shangzhi. A study on soil-water characteristic curve of unsaturated soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(2): 129-134. (in Chinese))

[7] 栾茂田, 李顺群, 杨庆. 非饱和土的理论土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 611-615. (LUAN Maotian, LI Shunqun, YANG Qing. Theoretical soil-water characteristic curve for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 611-615. (in Chinese))

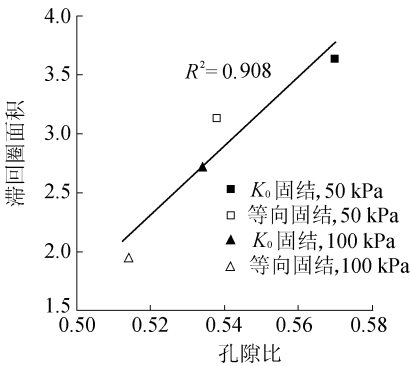


图9 孔隙比与滞回圈面积关系
Fig. 9 Relationship between void ratio and area of hysteresis loop

[8] NG C W W, PANG Y W. Influence of stress states on soil-water characteristics and slope stability [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(2):157-166.

[9] 龚壁卫,吴宏伟,王斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12):1915-1918. (GONG Biwei, WU Hongwei, WANG Bin. Influence of stress states on soil-water characteristics of expansive soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12):1915-1918. (in Chinese))

[10] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1):82-90. (CHEN Zhenghan. Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1):82-90. (in Chinese))

[11] GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S].

[12] 倪晓雯. 应力状态对土水特征曲线的影响及其在边坡稳定分析中的应用[D]. 南京:河海大学, 2011.

[13] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].

[14] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐,张在明,陈愈炯,等,译. 北京:中国建筑工业出版社, 1997.

[15] VANAPALLI S K, PUFAHL D E, FREDLUND D G. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic of a compacted till[J]. Geotechnique, 1999, 49(2):143-159.

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

· 简讯 ·

第四届全国岩土与工程学术大会将在杭州召开

为充分交流我国岩土与工程领域取得的成绩,全面推动岩土与工程领域的科技进步,由中国岩石力学与工程学会、中国建筑学会工程勘察分会等主办,中国水电顾问集团华东勘测设计研究院、浙江大学建筑工程学院等承办的第四届全国岩土与工程学术大会将于 2013 年 11 月在浙江杭州召开。

会议主要议题:岩土的基本性质与本构关系;岩土工程数值分析与仿真;边坡、基坑与地下工程典型案例;岩土力学实验研究方法;软土地基处理的新概念、新技术、新工艺;复杂地质条件下施工安全和工程稳定问题;岩土工程的加固与防护新理念、新方法、新技术;重大地质灾害形成机理预警与防治;环境友好的岩土工程技术;岩土文物的勘察与保护技术;岩土与工程技术应用的新领域;岩土工程风险评价与管理等。

大会秘书处联系电话:0571-56738228, 13989893611 (程平); E-mail: shy@zju.edu.cn, ytlx2013@sohu.com。

(本刊编辑部供稿)