

文章编号:1673-2049(2018)05-0001-08

压实高岭土干燥收缩特性试验

邵龙潭¹, 郑国锋¹, 张钧达^{1,2}

(1. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024;

2. 中国中铁工程设计咨询集团有限公司 地质路基勘察设计院, 天津 300143)

摘要:为研究初始干密度和初始含水率对高岭土干燥收缩行为的影响,探究其干燥收缩机理,采用数字图像相关法来测量环刀试样的径向变形,在设计的干燥收缩试验平台进行了一系列干缩试验,结合试验得到的收缩曲线和相应的土水特征曲线获得吸应力固结曲线。结果表明:饱和高岭土大部分收缩变形发生在进气点之前的饱和状态;试样在干缩过程中以径向变形为主,表现出比较明显的各向异性,这种各向异性的变形特性随初始饱和度的增加而减弱;随着初始干密度增大,试样干燥收缩稳定所需要的时间逐渐减小,稳定时的体积变形也相应减小,然而试样的初始干密度和饱和度对收缩变形稳定时的含水率几乎没有影响;吸应力固结曲线与饱和土的等向固结曲线近似重合的曲线形态表明吸应力和净平均应力对土收缩变形的作用效果是一致的;在等向应力条件下,有效应力是影响土体干缩变形的决定性应力;提出的结合干燥收缩试验和等向固结试验曲线的间接测量土水特征曲线的方法是相对可靠的。

关键词:干燥收缩;土水特征曲线;收缩曲线;含水率;吸应力固结曲线

中图分类号:TU973.2 **文献标志码:**A

Experiment on Drying Shrinkage Characteristics of Compacted Kaolin

SHAO Long-tan¹, ZHENG Guo-feng¹, ZHANG Jun-da^{1,2}

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. Geology and Subgrade Design Department, China Railway Design Corporation, Tianjin 300143, China)

Abstract: In order to study the effect of initial dry density and water content on the shrinkage behavior of Kaolin, and research the drying shrinkage mechanism, a series of drying shrinkage tests were carried out to measure the radial strain of the cutting specimen by digital image correlation method. The suction stress compression curve (SSCC) was proposed by combining the shrinkage curve and corresponding soil water characteristic curve (SSCC) of the soil. The test results show that most of the shrinkage deformation of saturated specimen occurs before the air-entry point while the soil is still fully saturated. The anisotropy of the shrinkage deformation of the specimen is evident as radial shrinkage strain is dominated upon drying, while the soil has a tendency to exhibit isotropic volume shrinkage behavior as water content increases. The volumetric shrinkage strain, as well as the elapsed time required for the drying process, decreases with the increase of the initial dry density. However, the water content of the specimen is the same at the end of the drying test, regardless of the initial dry density and water content. The comparison of the SSCC and saturated isotropic compression curve indicates that the suction

收稿日期:2018-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51479023)

作者简介:邵龙潭(1963-),男,吉林梨树人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:shaolt@dlut.edu.cn.

stress and net mean stress have the same effect on the contraction deformation of the soil. It concludes that effective stress plays a decisive role on the volumetric shrinkage behavior when the soil is under isotropic condition. The proposed method by combining the shrinkage curve and corresponding isotropic compression curve to indirectly measure soil water characteristic curve is relative reliable.

Key words: drying shrinkage; soil water characteristic curve; shrinkage curve; water content; suction stress compression curve

0 引言

土体在干旱少雨季节会干燥失水,通常会伴随着较大的体积收缩,从而引起土体的整体或者差异沉降,影响房屋、道路、堤坝等建筑物的稳定性和功能性。有时干燥收缩(干缩)会引起土体的开裂,裂隙的产生和拓展破坏了土体结构的完整性,使得气候对裂隙的作用更加明显,进一步加速水分的蒸发和裂隙的发展,这些裂隙在雨季时又为水分的快速入渗开辟了良好的通道,雨水入渗引起土体的吸力骤降,土体的强度和承载力也随之骤减,从而造成边坡失稳、管涌或泥石流等一系列工程问题^[1-4]。

土体的干燥收缩特性是研究土的裂隙行为并由此引发的一系列工程灾害的关键问题。目前,学者们对干燥失水时的收缩变形特征有一定的研究,比如唐朝生等^[5]发现 CO_x 泥岩的泥浆样收缩过程包含 3 个阶段,初始干密度和含水率对压实样的收缩特征有重要影响,并得到试样收缩应变与初始含水率和干密度之间的函数关系式。栾茂田等^[6]研究基质吸力对重塑土干燥收缩行为的影响,并提出屈服吸力和缩限吸力将土体的收缩过程分成弹性阶段、弹塑性阶段和缩限阶段。总体来说人们对土体干燥收缩机制的研究相对较少,学者们更多的精力专注于研究由干缩引起的土体裂隙扩展规律^[7-9],以及裂隙的存在和发展对雨水入渗或渗流行为^[10-11]和边坡稳定的影响^[12-14]。

为进一步研究土体的干燥收缩机制,选取塑性指数较大的高岭土,在无应力状态(无外荷载作用,孔隙气压力为 0)下进行一系列干燥收缩试验,研究高岭土在不同初始干密度和不同初始含水率下的干燥收缩特性。与此同时结合土体的土水特征曲线(SWCC)和收缩曲线(Shrinkage Curve)得到吸应力固结曲线(SSCC),并在此基础上提出一种结合干燥收缩试验和等向固结试验能相对可靠地获得 SWCC 的简易方法。

1 试验方案

1.1 试验土料

试验土料为山东黄色高岭土,土料颗粒分布均匀,黏粒含量较高,有较好的可塑性,干燥收缩变形明显。试验土料的颗粒级配和击实曲线分别见图 1 和图 2,基本物理指标见表 1。按颗粒级配和物理指标可知该土料是一种塑性指数较大的粉质黏土。

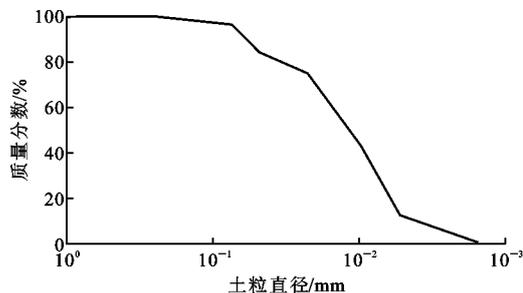


图 1 高岭土颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle-size Gradation Curves of Kaolin

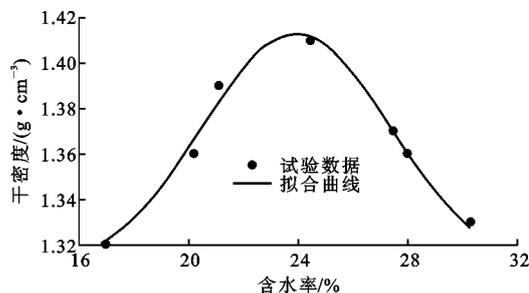


图 2 高岭土的击实曲线

Fig. 2 Compaction Curve of Kaolin

表 1 高岭土基本物理指标

Tab. 1 Basic Physical Indicators of Kaolin

相对体积质量 G_s	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	最优含水率 / %	液限 $\omega_L / %$	塑限 $\omega_P / %$	塑性指数
2.75	1.41	23.9	63.09	22.52	40.57

1.2 试验设备和试验方案

试验前先将经过风干、碾磨和筛分的高岭土置于烘箱中烘干 24 h,根据设定的初始干密度称取干土质量,按照 15%的初始含水量将蒸馏水喷洒在烘

干土样上并搅拌均匀,直至土中没有明显的团聚颗粒,随后将搅拌的土料倒入密封塑料袋中并置于恒温恒湿箱中静置 48 h,以保证土中水分充分均匀,随后采用击实的方法将土料制成直径 $D=61.8$ mm,高度 $H=20$ mm 的标准环刀试样(环刀壁涂抹一定的凡士林保证试样均匀收缩)。将制备好的试样固定在饱和器内,一同放置在装有蒸馏水的负压力锅中进行真空饱和。试样在饱和过程中无明显膨胀特性。

试样制备好以后将其移至如图 3 所示的干燥收缩试验平台,试验平台由量测系统和数据采集系统两部分组成,主要包含高精度的电子天平、高速摄像机和千分表。

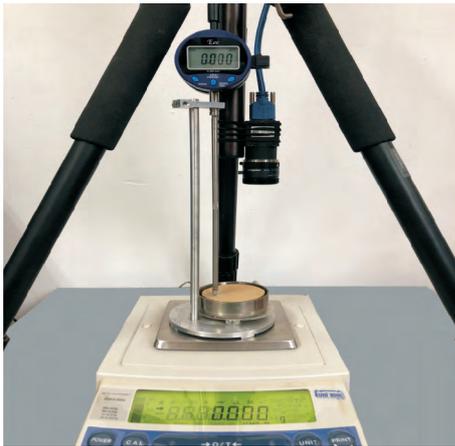


图 3 干燥收缩试验平台

Fig. 3 Experimental Platform for Drying Shrinkage

控制实验室温度为常温,将制备的环刀试样(试样上层均匀地撒一薄层白色粉末作为散斑)放置在涂抹一定量凡士林的多孔塑料薄片上以减少试样在干缩过程中的摩擦并保证试样上下表面水分均匀蒸发,然后放置于改进的收缩仪上自然干燥失水至风干状态。试样和收缩仪整体放置于高精度电子天平上以精确测量整个试验过程中的水分蒸发量,达到实时监测试样含水量的目的。试样的轴向应变 ϵ_a 是通过放置在试样上的高精度千分表测得(千分表探头与试样接触位置放一小塑料垫片);径向应变 ϵ_r 则通过固定在试样上面的摄像机按照一定的频率采集试样图像,利用数字图像相关法^[15-16]来测得试样干燥收缩过程的径向应变,那么试样体变 ϵ_v 为

$$\epsilon_v = \epsilon_a + 2\epsilon_r \quad (1)$$

因此,试样在干燥过程中的饱和度 S_r 可以表示为

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{(m_t - m_c - m_s) / \rho_w}{(1 - \epsilon_v)V_0 - m_s / (G_s \rho_w)} \quad (2)$$

式中: m_t, m_c, m_s 分别为试验中测量总质量、环刀质量和干土质量; V_0 为试样初始体积; ρ_w 为水密度。

为了研究不同初始状态试样的体积收缩变形过程及特征,控制每组试样不同初始干密度和初始饱和度,具体试验方案如表 2 所示。

表 2 干燥收缩试验方案

Tab. 2 Experimental Scheme for Drying Shrinkage

试验编号	初始干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	初始饱和度/%
S1	1.35	100
S2	1.30	100
S3	1.25	100
S4	1.35	80
S5	1.35	60
S6	1.35	40

在干燥收缩试验的同时,按干密度 $\rho_d = 1.35$ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 制备标准三轴试样($D=39.1$ mm, $H=80$ mm),经饱和后在常规的三轴仪上进行等向固结试验,获得饱和土的等向固结曲线。与此同时,结合使用压力板仪和滤纸法^[17]测得 $\rho_d = 1.35$ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 土样完整的 SWCC。

2 试验结果

试样的体变测量对试验结果的准确性具有十分重要的意义。试样轴向应变由千分表直接测得,而径向应变的测量使用数字图像相关法^[16],其基本原理是在试样表面布置一些图像识别的散斑,通过匹配试样变形前后的识别区域得到被测表面各点的位移,从而计算试样的径向应变,此方法已在试验测量各种类型试样的变形中有广泛应用。为了验证数字图像相关法(DIC 法)测量环刀试样径向应变的可靠性,将测得径向应变与通过 CAD 软件辅助确定试样直径的方法(对比图像中试样直径和固定的环刀直径)进行比较,典型的对比结果如图 4 所示。从图 4 可见,2 种方法测量得到的径向应变变化曲线基本重合,两者相差始终控制在 5% 以内,证明了利用数字图像相关法测量试样径向变形的适用性。

土体在干燥失水过程中,典型的含水率和应变随时间变化曲线($\rho_d = 1.35$ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)如图 5 所示,图 6 为相应的孔隙比和饱和度随含水率变化曲线,图 6 中孔隙比与含水率关系曲线为收缩曲线。

从图 6 可见,高岭土的干燥收缩过程有 3 个明显的阶段,唐朝生等^[5]将其区分为正常收缩、残余收缩和零收缩 3 个阶段。在正常收缩阶段,试样中的水分以一个相对恒定的速率蒸发损失,而试样近似

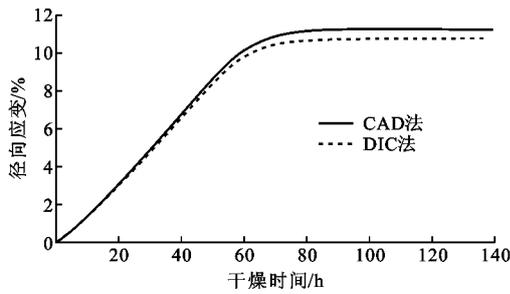


图4 径向应变测量结果对比

Fig. 4 Comparison of Different Radial Strain Measurement Results

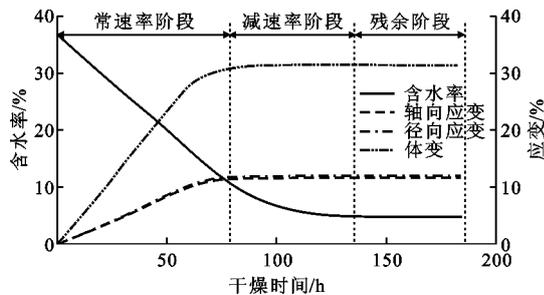


图5 干燥收缩过程中含水率和应变随时间变化曲线

Fig. 5 Change Curves of Water Content and Strains with Time During Drying Shrinkage

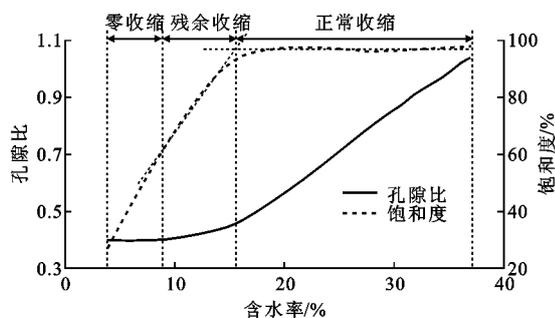


图6 孔隙比和饱和度随含水率变化曲线

Fig. 6 Change Curves of Void Ratio and Degree of Saturation with Water Content

处于饱和状态,这个阶段水分蒸发量与试样的体积减小几乎一致,可以发现正常收缩阶段结束时,试样已完成大部分体积变形。在残余收缩阶段,试样开始去饱和,失水速率逐渐降低,体积收缩变形也逐渐放缓,然而饱和度的下降却愈加明显,这个阶段由于孔隙气的存在,使得试样体积的减少量小于水分的蒸发量。在零收缩阶段,试样的体积几乎没有变化,而试样的含水率依然缓慢减小,土体饱和度在减小,直至最后趋于稳定值,这表明土体在干燥收缩过程中,水分的蒸发完成通常要滞后于体积收缩的稳定。干燥收缩结束时,试样中土颗粒之间的自由水完全蒸发,颗粒与颗粒相互接触,试样处于最密实状态,

孔隙比不再发生变化。可以将正常收缩阶段与残余收缩阶段的分界点称为进气点,作为土体从饱和向非饱和状态过渡的界限,同样地可以将残余收缩阶段与零收缩阶段的分界点称为缩限,该点通过收缩曲线趋于水平时的坐标来确定^[5]。

图7为饱和三轴试样的等向固结曲线,图8为测得土样的SWCC,用VG模型拟合SWCC得到高岭土的进气值大约为1 000 kPa,残余体积含水量 θ_{res} 为7%,对应残余饱和度 S_{res} 为14.3%。

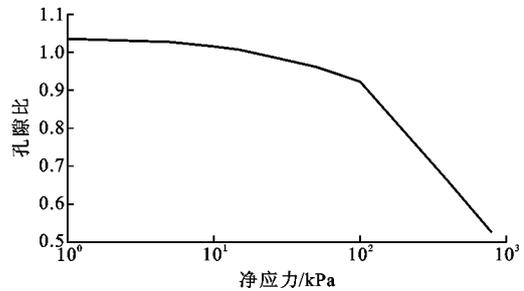


图7 饱和试样的等向固结曲线

Fig. 7 Isotropic Compression Curve for Saturated Sample

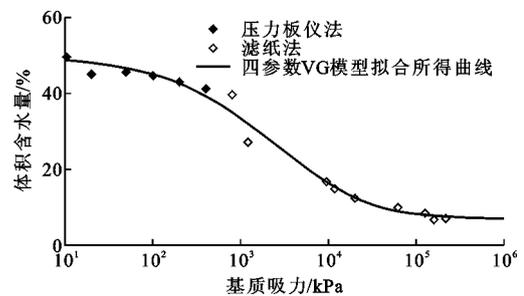


图8 高岭土的土水特征曲线

Fig. 8 Soil Water Characteristic Curve of Kaolin

3 数据分析与讨论

3.1 初始饱和度对干燥收缩变形的影响

对于干密度为 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、初始饱和度不同的试样,通过干燥收缩试验发现,随着饱和度增加,土体轴向、径向变形和体变都显著增加,干缩结束时试样具有更大的干密度。初始饱和度从40%增加到100%,干缩结束时试样的轴向应变、径向应变和体变分别增加2.7倍、4.1倍和3倍,试样干密度从 $1.51 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 增加到 $1.98 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

通过研究土体轴向变形和径向变形之间的关系,Bronswijk^[18]提出用几何因子 γ_s 来评价土体变形的各向异性,即

$$\gamma_s = \frac{\ln(V_s/V_0)}{\ln(Z_s/Z_0)} \quad (3)$$

式中: Z_0 为试样高度; V_s, Z_s 分别为试样变形稳定

后的体积和高度。

当 $\gamma_s=3$ 时试样表现为各向同性变形;当 $\gamma_s<3$ 时试样以轴向变形为主;当 $\gamma_s>3$ 时试样以径向变形为主。高岭土干燥收缩时饱和度 S_r 与几何因子 γ_s 之间的关系如表 3 所示。可见随着初始饱和度的增加,试样的几何因子逐渐减小并趋近于 3,表明试样在干燥收缩过程中表现出明显的各向异性,以径向收缩为主,而随着初始饱和度的增加,试样变形逐渐变成各向同性收缩。

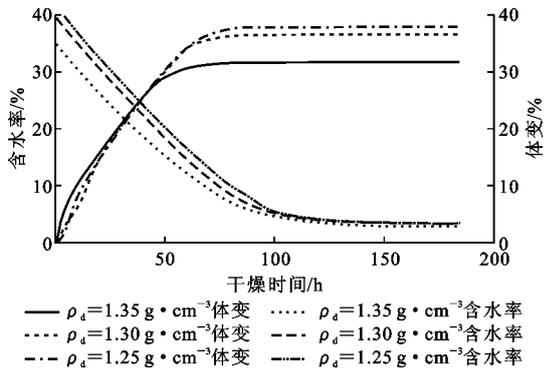
表 3 干燥收缩试验初始饱和度与几何因子关系

Tab. 3 Relationship Between Initial Degree of Saturation and Geometric Factor

初始饱和度/%	40	60	80	100
几何因子 γ_s	4.58	3.86	3.35	3.01

3.2 初始干密度对干燥收缩变形的影响

图 9 为不同初始干密度的饱和试样的含水率和体变曲线,从图 9 可知,任意干密度的土体失水过程均可以大致分成图 6 的 3 个阶段。在正常收缩阶段,土体的蒸发失水占据主导,即使密度不同,试样的失水和体积变化速率也几乎一致,而在干燥结束时的零收缩阶段,试样的含水率均趋于稳定,不同干密度的试样在干缩试验结束时的残余含水量几乎相同。从图 9 还可见,随着初始干密度的增加,试样体积收缩到稳定状态所需要的时间加长,而收缩稳定时试样的体变减小。



9 不同干密度饱和试样的含水率和体变随时间变化曲线
Fig. 9 Change Curves of Water Content and Volumetric Strain with Time for Saturated Specimen with Different Dry Densities

随着干密度的增加,试样在干燥收缩结束时的轴向应变、径向应变和体变都在减小,这主要是由于土体孔隙比和土颗粒间距减小,土体可供收缩的空间受到限制。唐朝生等^[5]和 Reeve 等^[19]也研究了初始密度对土体收缩特性的影响,均发现如果初始含水量相同,试样收缩的轴向应变、径向应变和体变

都随初始干密度增加而近似呈线性减小,而本次试验土料并没有观察到这种线性减小规律。

3.3 高岭土的干燥收缩机理

试验中试样净平均应力 $\sigma_m - u_a = 0$ (σ_m 为净平均应力, u_a 为孔隙气压力),试样在失水干燥过程中主要是内力作用下发生的变形。当土样处于饱和状态,而环境湿度低于土体湿度时,孔隙中的水分会蒸发到空气中。随着水分逐渐蒸发到一定程度,土体开始去饱和,作为土体内力的基质吸力 $s = u_a - u_w$ (u_w 为孔隙水压力)会逐渐增加,吸力作用使得土体的体积进一步收缩至残余含水量状态,此时土体残留的水分都是土颗粒表面吸附的结合水膜。

定义土体中有效应力中与吸力相关的应力为吸应力 σ_s ^[20],即

$$\sigma_s = S_e(u_a - u_w) = \frac{S_r - S_{res}}{1 - S_{res}}(u_a - u_w) \quad (4)$$

式中: S_e 为有效饱和度。

为了研究收缩过程土体吸力的作用效果,结合土水特征曲线(图 8)和收缩过程中孔隙比与含水率关系曲线(图 6 中的收缩曲线)可得到一条吸应力 σ_s 与孔隙比的关系曲线,称为吸应力固结曲线(SSCC)。将 SSCC 与饱和土的等向固结曲线(图 7)进行比较,如图 10 所示。

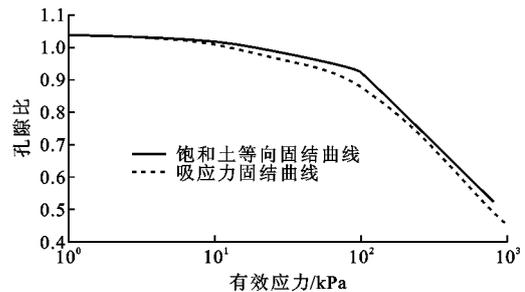


图 10 等向固结曲线和吸应力固结曲线对比
Fig. 10 Comparison of Isotropic Consolidation Curve and Suction Stress Consolidation Curve

2 种试验的试样均在等向压力作用下发生体积收缩,图 10 中等向固结曲线横坐标是净平均应力 $\sigma_m - u_a$,在饱和等向压力条件下 σ_m 为围压,而 u_a 为 0。净平均应力通常被认为是土体的外力,而 SSCC 的横坐标是吸应力 σ_s ,通常被认为是内力。明显可见 2 条曲线即使具有不同的横坐标,曲线也近似重合,这表明吸应力和净平均应力对土收缩变形的作用效果是一致的,而吸应力和净平均应力均是有效应力的一部分,因此在等向应力条件下,有效应力是影响土体干缩变形特性的决定性变量。与此同时,可以发现 2 条曲线有相似的拐点,考虑到 2 个试样

的击实和饱和方法相同,因此应该具有相同的先期固结应力,这个相似的拐点反映了相同的先期固结应力。

3.4 利用收缩曲线和固结曲线反演 SWCC

SWCC 的测定非常耗时,对试验设备和环境的要求也很高,因此获得一条准确而且完整的 SWCC 十分困难。考虑到在等向应力条件下,净平均应力和吸应力对土的收缩变形作用效果一致,可以假设土体的 SSCC 与对应饱和土等向固结曲线相同,因此可以利用饱和土的等向固结曲线和收缩曲线来反演得到 SWCC。

具体的反演过程如下:通过饱和土等向固结试验获得孔隙比-净应力关系曲线,这条曲线也被当作土体的 SSCC,可在 SSCC 上选取若干点,然后根据孔隙比去匹配相同初始干密度饱和试样的收缩曲线得到吸应力和含水率关系,根据收缩曲线确定的残余含水量可进一步得到吸力和含水率关系,最后通过数据拟合即可得到完整的 SWCC,如图 11 所示。

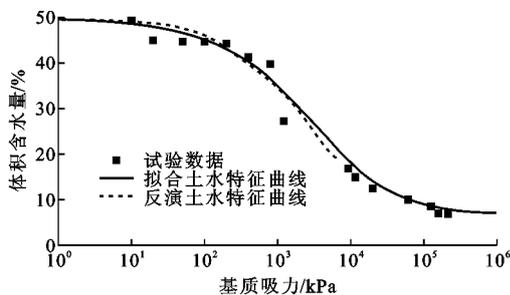


图 11 不同方法得到的土水特征曲线

Fig. 11 Soil Water Characteristic Curves from Different Methods

图 11 中虚线所示的是反演的 SWCC,实线则是高岭土的实测吸力用 VG 模型拟合得到的 SWCC。从图 11 可见,利用等向固结和收缩曲线获得的 SWCC 与利用压力板仪和滤纸法测量的 SWCC 几乎重合,满足 SWCC 的测量需要。这里尝试性地提供了一种结合干燥收缩试验和等向固结曲线试验间接测量 SWCC 的方法,可以极大地降低测量 SWCC 的复杂性,缩短测量周期,而且对试验设备的要求也大幅降低,只需要简易的干燥收缩试验装置和常规的三轴试验设备。

4 进一步验证

为进一步验证以上结论是否适用于其他类型的土体。选取一种白色高岭土和尾矿料充分混合得到一种粉质砂土的混合土($\rho_d = 1.68 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)进行干缩试验得到收缩曲线,同样根据测量的土水特征曲

线得到的 SSCC,并与对应的等向固结曲线进行比较如图 12 所示。使用相同的反演方法得到混合土用饱和度表示的 SWCC 如图 13 所示。

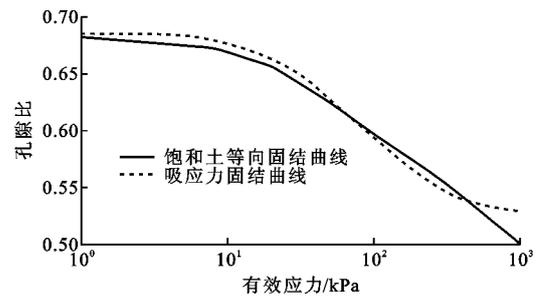


图 12 混合土等向固结曲线和吸应力固结曲线对比

Fig. 12 Comparison of Isotropic Compression Curve and SSCC of Soil Mixture

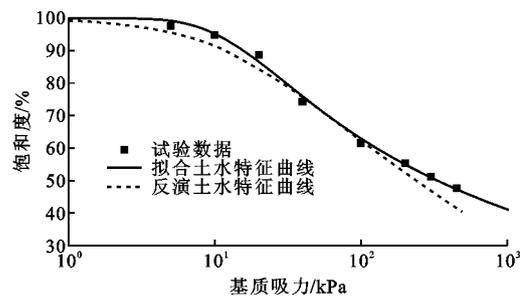


图 13 混合土土水特征曲线反演

Fig. 13 Back Analysis of SWCC of Soil Mixture

与高岭土类似,试验混合土的 SSCC 与等向固结曲线近似重合,再次证明在等向应力条件下吸应力和净平均应力对该混合土收缩变形的作用效果是一致的;利用等向固结曲线和收缩曲线反演得到的土水特征曲线也与常规方法测得的 SWCC 近似重合,这表明提出的反演方法能相对可靠地间接测量混合土的 SWCC。

5 结语

(1)饱和高岭土干燥收缩的大部分变形都发生在进气点之前的饱和状态。标准环刀试样在干缩过程中以径向变形为主,表现出明显的各向异性,而随着初始饱和度的增加,这种各向异性的变形特征会逐渐减弱。

(2)随着初始干密度的增加,试样干缩体积稳定所需要的时间逐渐减小,稳定时的体积变形也相应减小,试样的初始干密度和饱和度对干缩变形稳定时的含水率几乎没有影响。

(3)等向作用于土体的吸应力和净平均应力对土的收缩变形作用效果是一致的。在等向应力条件下,有效应力是影响土体干缩变形的决定性因素。

(4)提出一种结合干燥收缩试验和等向固结试验间接获得 SWCC 的简易方法,这种方法能降低测量 SWCC 的难度和测量周期,对试验设备的要求也更低,最后选取了一种混合土料进行干缩试验,验证了以上结论适用于该混合土。

参考文献:

References:

- [1] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in Drying Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(2): 263-277.
- [2] 姚海林, 郑少河, 葛修润, 等. 裂隙膨胀土边坡稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增2): 2331-2335.
YAO Hai-lin, ZHENG Shao-he, GE Xiu-run, et al. Assessment on Slope Stability in Cracking Expansive Soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(S2): 2331-2335.
- [3] ALBRECHT B A, BENSON C H. Effect of Desiccation on Compacted Natural Clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(1): 67-75.
- [4] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 膨胀土干湿循环效应及其对边坡稳定性的影响[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 934-939.
ZENG Zhao-tian, LU Hai-bo, ZHAO Yan-lin, et al. Wetting-drying Effect of Expansive Soils and Its Influence on Slope Stability[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 934-939.
- [5] 唐朝生, 崔玉军, TANG A M, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1271-1279.
TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG A M, et al. Volumetric Shrinkage Characteristics of Soil During Drying[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1271-1279.
- [6] 栾茂田, 汪东林, 杨庆, 等. 非饱和和重塑土的干燥收缩试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 118-122.
LUAN Mao-tian, WANG Dong-lin, YANG Qing, et al. Experimental Study on Drying Shrinkage of Unsaturated Compacted Soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 118-122.
- [7] 张家俊, 龚壁卫, 胡波, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2729-2734.
ZHANG Jia-jun, GONG Bi-wei, HU Bo, et al. Study of Evolution Law of Fissures of Expansive Clay Under Wetting and Drying Cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2729-2734.
- [8] 马佳, 陈善雄, 余飞, 等. 裂土裂隙演化过程试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2203-2208.
MA Jia, CHEN Shan-xiong, YU Fei, et al. Experimental Research on Crack Evolution Process in Fissured Clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2203-2208.
- [9] 黎伟, 刘观仕, 汪为巍, 等. 湿干循环下压实膨胀土裂隙扩展规律研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1302-1308.
LI Wei, LIU Guan-shi, WANG Wei-wei, et al. Crack Propagation Law of Compacted Expansive Soils Under Wetting-drying Cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1302-1308.
- [10] RAYHANI M H T, YANFUL E K, FAKHER A. Desiccation-induced Cracking and Its Effect on the Hydraulic Conductivity of Clayey Soils from Iran[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(3): 276-283.
- [11] HE J, WANG Y, LI Y, et al. Effects of Leachate Infiltration and Desiccation Cracks on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay[J]. Water Science and Engineering, 2015, 8(2): 151-157.
- [12] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1-15.
BAO Cheng-gang. Behavior of Unsaturated Soil and Stability of Expansive Soil Slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 1-15.
- [13] 李雄威, 代国忠, 于常瑶, 等. 基于裂隙描述的膨胀土堑坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1069-1075.
LI Xiong-wei, DAI Guo-Zhong, YU Chang-yao, et al. Stability Analysis of Cut Slope of Expansive Soil Based on Fissure Description[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1069-1075.
- [14] 殷宗泽, 徐彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 454-459.
YIN Zong-ze, XU Bin. Slope Stability of Expansive Soil Under Fissure Influence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 454-459.
- [15] LU H, CARY P D. Deformation Measurements by Digital Image Correlation: Implementation of a Second-order Displacements Gradient [J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(4): 393-400.
- [16] 王学滨, 杜亚志, 潘一山. 单轴压缩湿砂样局部及整体体积应变的数字图像相关方法观测[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1648-1656.
WANG Xue-bin, DU Ya-zhi, PAN Yi-shan. Measure-

- ments of Local and Global Volumetric Strains for Wet Sand Specimens Under Uniaxial Compression Using Digital Image Correlation Method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1648-1656.
- [17] MARINHO F A M, OLIVEIRA O M. The Filter Paper Method Revisited[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, 29(3): 250-258.
- [18] BRONSWIJK J J B. Shrinkage Geometry of a Heavy Clay Soil at Various Stresses[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(5): 1500-1502.
- [19] REEVE M J, HALL D G M, BULLOCK P. The Effect of Soil Composition and Environmental Factors on the Shrinkage of Some Clayey British Soils[J]. European Journal of Soil Science, 1980, 31(3): 429-442.
- [20] LU N, GODT J W, WU D T. A Closed-form Equation for Effective Stress in Unsaturated Soil[J]. Water Resources Research, 2010, 46(5): 567-573.