

初始含水率对三趾马红土失水收缩特性影响

杜长城, 祝艳波, 苗帅升, 高明明, 祝俊华, 赵法锁

(长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054)

摘要:三趾马红土胀缩特性明显,其失水收缩开裂对天然斜坡和工程边坡稳定性影响显著。利用设计的试验监测装置,开展不同初始含水状态三趾马红土重塑样的干燥脱湿试验,并运用数字图像定量处理技术获得试样干缩变形的动态定量数据,得到以下结论:(1)三趾马红土试样失水曲线呈现明显的3个阶段:快速失水期、减速失水期和残余失水期,且失水曲线受初始含水率影响显著,初始含水率越大,试样失水速率相对越快,失水过程越剧烈;(2)三趾马红土试样收缩曲线呈现明显的4个阶段:快速收缩阶段、减速收缩阶段、残余收缩阶段和零收缩阶段,且收缩曲线受初始含水率影响显著,初始含水率越大,收缩过程越剧烈,最终径向收缩应变越大;(3)三趾马红土试样的最终收缩应变与初始含水率呈良好线性关系。

关键词:三趾马红土; 脱湿; 干缩变形; 含水率; 数字图像定量处理

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)01-0227-07

Effect of Initial Moisture Content on the Shrinkage Characteristics of the Red Soil of Hipparion

DU Changcheng, ZHU Yanbo, MIAO Shuaisheng, GAO Mingming, ZHU Junhua, ZHAO Fasuo

(College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The swelling and shrinkage characteristics of red soil of Hipparion were obvious, and the water shrinkage cracking had significant effect on the stability of natural slope and engineering slope. We used the designed test monitoring devices to carry out different initial moisture state hipparion red clay reshape sample drying dehumidifying test, and used digital image processing technology to obtain quantitative sample drying shrinkage deformation of dynamic quantitative data, and get the following conclusions. (1) The hipparion red soil specimen water loss curve presents obvious three stages: rapid water loss, slow water loss, and residual water loss, and water loss curve is significantly influenced by the initial moisture content, the greater the initial moisture content is, the faster the sample water loss rate is, and more intense filtration process is; (2) The hipparion red soil specimen contraction curve presents obvious four stages: rapid shrinkage phase, slow contraction phase and residual phase and zero contraction phase, and a significant contraction curve is influenced by the initial moisture content, the greater the initial moisture content is, the more intense the shrinkage process is, and the greater eventual radial shrinkage strain is; (3) The ultimate shrinkage strain and initial moisture content of the tri-toe horse red soil sample has the significantly linear relation.

Keywords: red soil of Hipparion; dehumidification; dry shrinkage deformation; moisture content; digital image quantitative processing

我国西北黄土底部广泛分布有一套红色地层,因其富含三趾马动物群化石,而被称为三趾马红土。研究表明,往往一些大型黄土滑坡沿着三趾马红土顶

部滑动^[1-3]。这是由于上部黄土垂直节理裂隙发育,雨水易于下渗,而下部相对致密坚硬的三趾马红土具有良好的隔水条件,在极端暴雨、干旱或地下水位往

收稿日期:2018-04-01

修回日期:2018-04-23

资助项目:国家自然科学基金“受三趾马红土控制的黄土滑坡滑带土的非饱和蠕变特性研究”(41502278);陕西省自然科学基金资助项目“黄土—三趾马红土接触面滑坡异质滑带的剪切力学特性研究”(2017JQ4021)

第一作者:杜长城(1993—),男,陕西延安人,硕士研究生,主要从事岩土工程性质的科研工作。E-mail:1161422811@qq.com

通信作者:祝艳波(1985—),男,辽宁阜新,工学博士,副教授,主要从事岩土工程性质与稳定性的科研与教学工作。E-mail:342948684@qq.com

复抬升的作用下,土体强度衰减、蠕滑变形,易形成层间软弱带,从而诱发滑坡产生。

此外,由于三趾马红土富含蒙脱石、伊利石和高岭石等黏土矿物,所以具有吸水膨胀、失水收缩的特点。而我国西北地区的公路、铁路、水利、建筑和煤炭资源开发等工程地质活动不可避免的穿越三趾马红土地层。开挖后的三趾马红土暴露于空气,含水率逐渐降低,产生失水收缩变形效应(图 1),从而对隧洞、边坡和大型构筑物的稳定和安全造成影响^[4]。

从 90 年代起,学者们对三趾马红土的成因、矿物组成、物化性质、力学特性和致灾机理开展了大量研究,其中肖荣久^[5]、彭淑贞^[6]、郑苗苗^[7]等基于 X 射线衍射、热分析和理化分析,对三趾马红土的黏土矿物组成、微观结构及工程性质进行了较系统的研究,并与上覆第四纪黄土和古土壤样品进行分析对比;张云翔^[8]等从埋藏学角度对三趾马红土的成因进行了分析;张子然^[9]等开展了黄土—三趾马红土的蠕变特性试验,从力学角度对黄土—三趾马红土型滑坡的成因机理进行了分析;曹福明等^[10]以北方三趾马红土和南方网纹红土为例对比总结了二者的物理水理指标、结构构造、力学性质和胀缩性等工程地质特性;吴圣林^[4]针对露天煤矿三趾马红土的工程地质性质及改良方法进行了探究;曲永新^[11]、李滨^[12]等对三趾马红土的工程特性、形成机理的宏观、微观和致灾机理进行了综合研究分析。周瑞光等^[13]开展了三趾马红土的单轴和三轴流变试验,探讨了三趾马红土的力学性质。同时在黏性土方面,唐朝生^[14-15]、袁俊平^[16]、Kleppe^[17]等对黏土收缩引起的开裂机制及其行为描述进行了深入系统的研究,对认识黏性土收缩变形机理起到积极作用。



图 1 天然三趾马红土失水干缩裂隙

以往研究主要集中在三趾马红土的成因、物质组成、微观结构和力学性质等方面,而对三趾马红土胀

缩特性的研究相对较少,针对连续监测并分析三趾马红土失水收缩动态过程的研究更是鲜见。因此以三趾马红土为研究对象,开展不同初始含水率三趾马红土试样的脱湿试验,研究其干燥脱湿过程中的失水规律,并应用数字图像定量分析软件研究试样收缩变形特征。研究成果对涉及三趾马红土的工程建设具有参考意义。

1 材料和试验方法

1.1 试验材料

试验所用三趾马红土取自陕西省白鹿原某滑坡滑带。其颜色呈砖红色,质地坚硬,富含游离的 Fe₂O₃,黏粒含量高达 59.6% 以上,黏土矿物主要以蒙脱石和伊利石混层矿物为主,含量约为 67.36%~71.69%,表 1 给出了三趾马红土的主要物理性质指标。

表 1 主要物理性质指标

物理性质	比重	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	天然密度/ (g·cm ⁻³)	最优 含水率/%	天然 含水率/%
数值	2.73	44.9	25.1	19.8	1.93	15.3	13

1.2 试验方法

土样取回后,经风干,碾压成粉,过 2 mm 的筛,置于烘箱内 108℃ 下烘干 36 h,分别配置初始含水率 13%,14.5%,16%,17.5%,19%,20.5%,22% 的湿土料,闷料 48 h 后,用静压法制样器制成高 20 mm,直径 61.8 mm、干密度 1.7 g/cm³ 的环刀试样若干组(每种含水率设置 3 个平行样)。将含水率为 13% 的环刀试样进行饱和并密封 48 h,使水分充分运移,以备试验。试验方案见表 2。

表 2 试验方案

试样	编号	干密度/ (g·cm ⁻³)	温度/ ℃	含水率/ %	平行样/ 个
第一组(饱和)	S ₁	1.70	40	23.8	3
	S ₂	1.70	40	13.0	3
	S ₃	1.70	40	14.5	3
	S ₄	1.70	40	16.0	3
第二组(非饱和)	S ₅	1.70	40	17.5	3
	S ₆	1.70	40	19.0	3
	S ₇	1.70	40	20.5	3
	S ₈	1.70	40	22.0	3

1.3 试验过程

将各组试样置于恒温恒湿干燥箱中,控制脱湿温度 40±1℃、相对湿度 60±5%,利用设计的试验装置进行干燥脱湿试验,见图 2。每隔 10 min 对试样进行拍照,并通过读取天平读数获得试样质量变化和

含水率变化,当 2 h 内试样含水率不变化,则认为干燥脱湿完成。利用南京大学开发的数字图像定量分析软件(PCAS),对试样干缩照片进行二值化、去杂、骨架化和数据处理等一系列操作(图 3),最终获得试样失水干缩过程的相关试验数据。PCAS 软件及数字图像处理相关流程和操作可见文献[18]。本文所研究的收缩均指径向收缩,这是由于黏性土环刀试样的失水主要产生径向收缩,而轴向收缩相对较小^[14]。

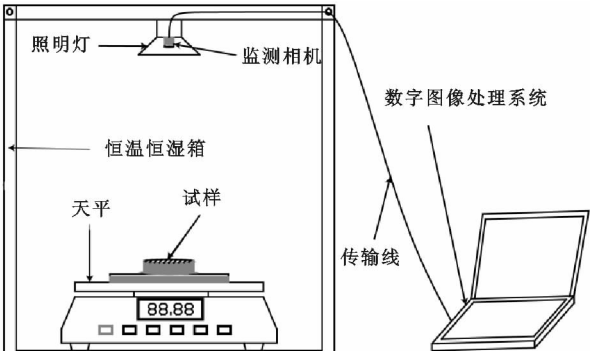


图 2 试验装置

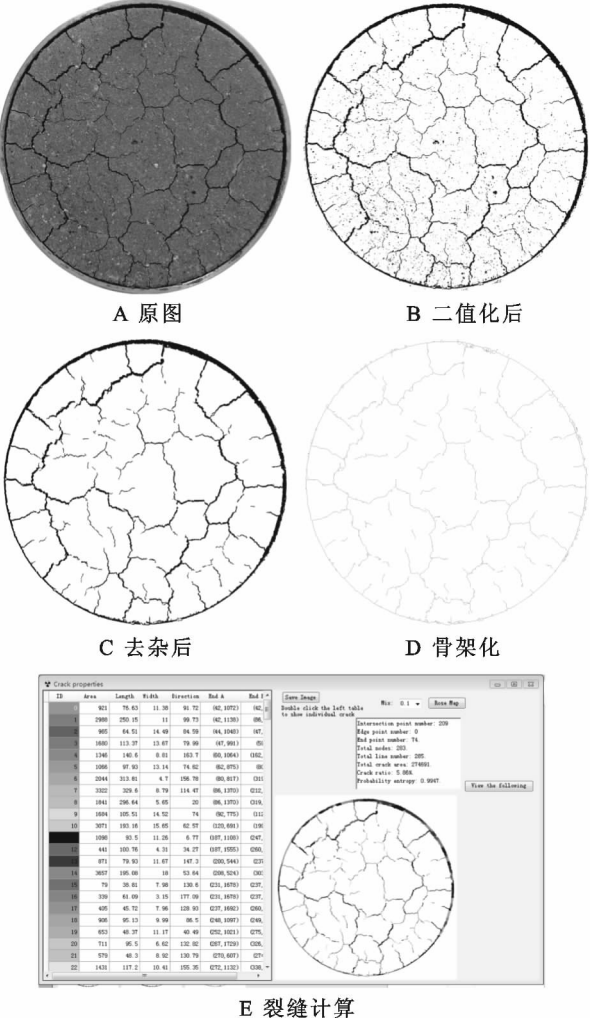


图 3 数字图像定量处理过程

2 结果与分析

2.1 三趾马红土失水规律

土体水分蒸发是土壤一大气物质和能量交换的过程,对土体工程性质有着重要影响。绘制不同初始含水率试样的失水曲线(图 4)。可见各试样的失水过程均呈现明显的 3 个阶段:快速失水期、减速失水期和残余失水期。

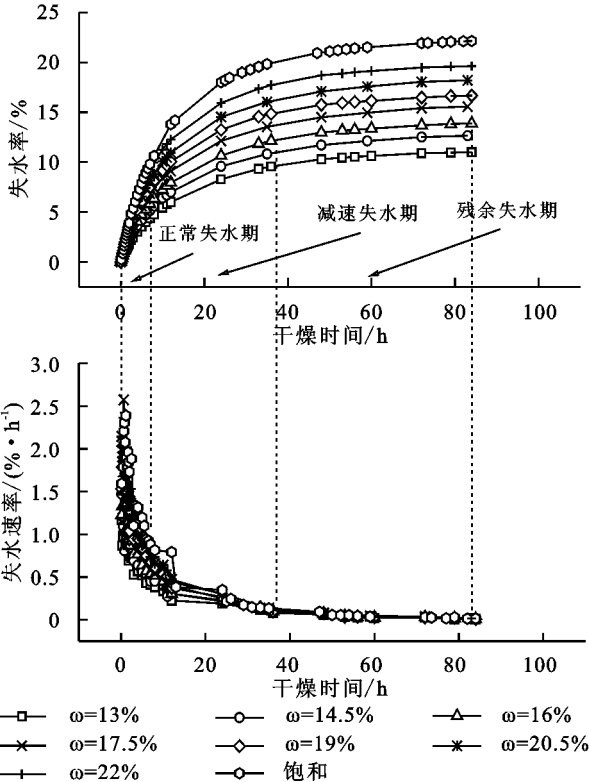


图 4 不同初始含水率试样失水过程曲线

快速失水期(0—2 h):试样失水率迅速增加,失水速率较大,且随着脱湿进行,失水速率下降较快,失水过程剧烈。这是由于非饱和土中,水分主要以自由水和结合水形式存在。自由水通过毛细力保存在团聚体间的大孔隙和团聚体内的小孔隙中(图 5),而结合水则通过分子力或者静电力稳定地吸附在土颗粒表面。干燥初期,试样含水率较高,水分均匀分布于试样表面和内部,由于较大水蒸气压力差的影响,试样表面易于蒸发的自由水首先进入大气,失水速率相对较快。

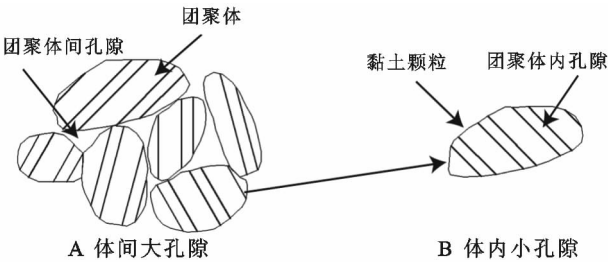


图 5 团聚体结构示意图

减速失水期(2—39 h):试样失水率持续增加,失水速率相对较小且仍不断减小,失水过程逐渐缓和。这是由于随着不断干燥脱湿,在水—汽界面下移和大孔隙水逐渐消失的影响下,产生的水汽传输阻力和气动阻力使得水蒸气从蒸发面传输到土体表面、水蒸气从土体表面传输到大气中的阻力增大^[19-23](图 6),试样失水难度加大,表现为失水速率逐渐减小,失水率缓慢增加。

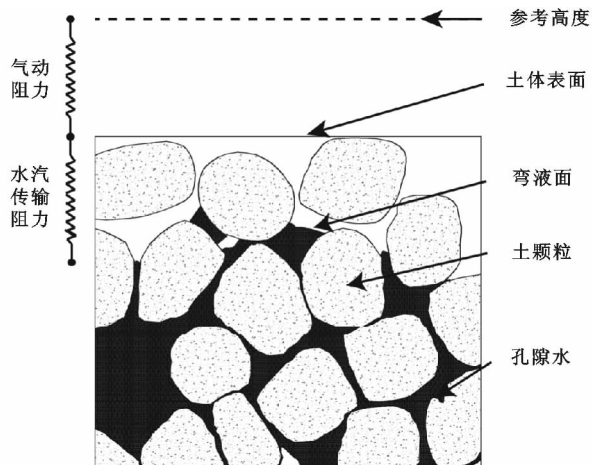


图 6 蒸发阻力模型(据徐士康,2017)

残余失水期(39—83 h):试样失水速率逐渐减小至零,失水曲线趋于平稳,失水过程基本结束。此阶段内试样内部的孔隙水基本逸散结束,受蒸发作用的影响,土体内部颗粒表面稳定的结合水开始逸散,最后试样失水难度达到最大,失水速率几乎为零,失水率逐渐趋于稳定。

由图 4 还可以看出,试样失水曲线受初始含水率影响显著,初始含水率越大,试样失水速率相对越快,失水过程越剧烈。这是由于初始含水率较大试样,压实制样后水分占据空间的影响,导致其内部孔隙相对较大且均匀。失水过程中,在试样水—汽界面附近的饱和水汽压同实际水汽压差值较大的影响下,初始含水率较高试样相对易于失水,水分蒸发流失速率快,在失水过程中表现为较高初始含水率试样失水曲线层叠于较低初始含水率试样失水曲线上方。

2.2 三趾马红土收缩特征

三趾马红土水敏特性显著,易失水收缩开裂(图 7),其收缩机理在于黏性土富含蒙脱石和伊利石等黏土矿物,具有吸水膨胀、失水收缩的特点。根据经典双电层理论,黏土颗粒表面带电,四周形成电场。在电场作用下,水中阳离子和极性水分子被吸引到颗粒四周定向排列,形成由强弱结合水和自由水组成的水化膜。当含水率升高时,水化膜逐渐变厚,产生的“楔力”使得土体发生膨胀。当含水率降低时,颗粒、团聚体或晶层间的水化膜逐渐变薄,弯液面(图 8)所产生

的张力为土体的收缩开裂提供了动力^[14-15,17,24]。

图 9 给出了饱和试样 S1 在 40℃ 条件下,干燥至不同含水率时对应的典型收缩开裂图像。可见未失水时试样表面未见收缩开裂现象。此后随着脱湿过程进行,当干燥时间为 0.5 h、含水率为 22.74% 时(图 9B),试样边缘逐渐产生少量收缩裂缝,并不断向内扩展,此时收缩量为 48 989 像素。随着含水率不断减小,试样表面裂缝迅速扩展并交织成网(图 9C、图 9D),收缩开裂特征显著。当干燥时间达 24 h、含水率下降至 5.60% 时(图 9E),试样内部收缩力使试样表面裂缝逐渐减小,整体收缩间隙(图 7)产生,但总体收缩量(429 125 像素)持续增加,土体收缩仍在进行。随着含水率进一步降低,当干燥时间达 82 h、含水率降为 1.49% 时(图 9F),试样收缩停止,收缩量(432 945 像素)达到最大,收缩开裂过程结束。

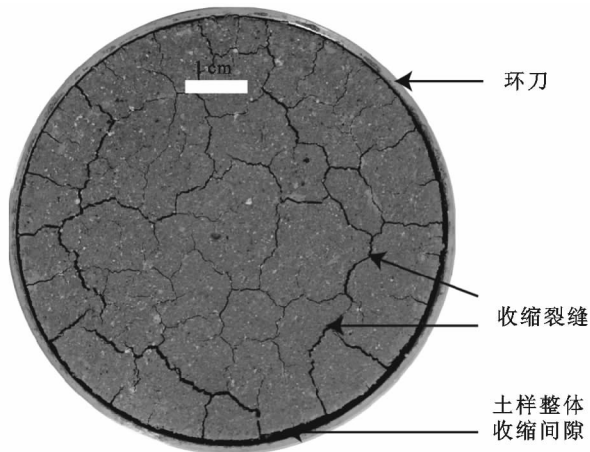


图 7 典型试样干缩开裂照片

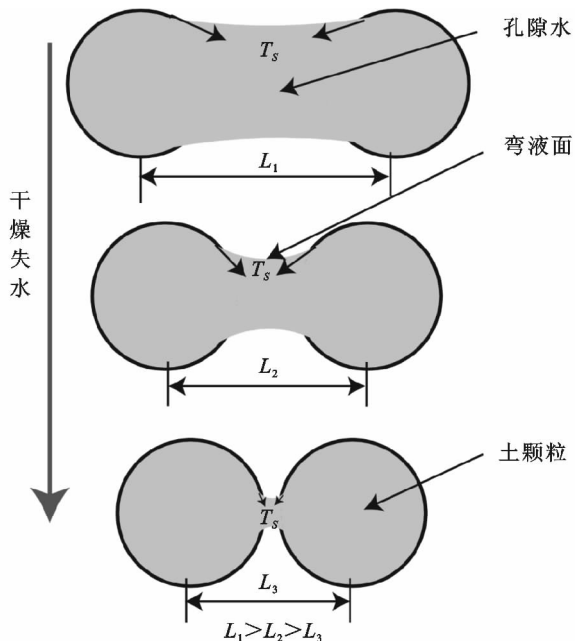
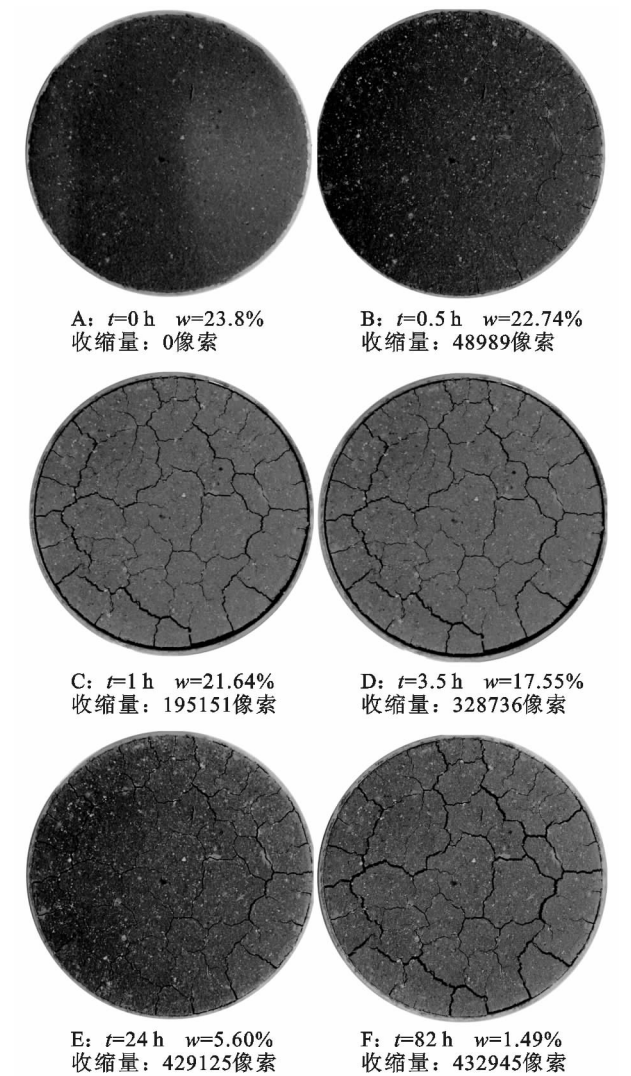


图 8 弯液面变化示意图(据唐朝生,2011)

运用 PCAS 数字图像定量分析软件对不同时刻试样干缩开裂图像定量处理,得到试样收缩裂缝面积

和整体收缩间隙面积,并定义下式:

收缩应变=收缩裂缝面积+整体收缩间隙面积 / 环刀面积



注:收缩面积均以像素为单位,收缩裂缝面积和整体收缩间隙面积说明如图 7。

图 9 饱和试样不同时刻收缩开裂特征

绘制不同初始含水率试样收缩应变—时间曲线(图 10)。可见各试样在收缩过程中均呈现明显的 4 个阶段:快速收缩阶段、减速收缩阶段、残余收缩阶段和零收缩阶段。

快速收缩阶段(0—2 h):试样收缩应变增长较快,收缩应变速率较大但整体呈下降趋势,收缩过程较为剧烈。这是由于干燥早期,蒸发作用影响,团聚体间的孔隙水易于逸散,收缩优先产生于大孔隙^[25],试样收缩开裂现象明显。

减速收缩阶段(2—8 h):试样收缩应变速率相对较小且整体呈减小趋势,收缩应变增长缓慢,收缩过程相对缓和。此阶段内,随着含水率进一步降低,土收缩开始出现于颗粒团聚体内部的小孔隙,试样收缩

难度加大,收缩应变增长缓慢,收缩过程趋于缓和。

残余收缩阶段(8—17 h):试样收缩应变速率减小至趋于零,收缩应变曲线趋于平稳。此阶段内,孔隙水基本逸散结束,大、小孔隙不再收缩,受蒸发作用影响,稳定的结合水开始逸散,土颗粒间距离进一步靠近,土体收缩过程非常缓慢,宏观收缩应变变化不大,收缩过程趋于结束。

零收缩阶段(17—83 h):试样收缩应变速率减小为零,收缩应变稳定不变,收缩曲线为直线,收缩过程完全结束。结合图 4 和图 9 可见此阶段内试样虽在缓慢失水,但收缩应变不再变化,这是由于土体进入缩限,土颗粒间达到最密实状态,颗粒间距离不再随含水率的减小而靠近,试样收缩过程完全结束。

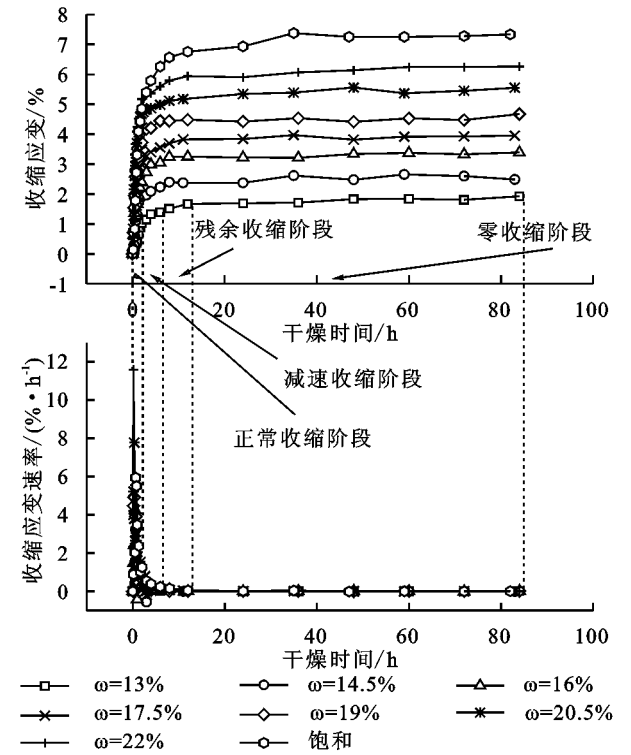


图 10 不同初始含水率试样收缩应变—时间曲线

由图 10 还可见试样收缩曲线受初始含水率影响显著,初始含水率越高,其收缩过程越剧烈,收缩结束后,收缩应变也相应越大。这是由于含水率较高试样,其土体孔隙内水分相对较丰富,在失水过程中,随着颗粒间弯液面曲率的不断增大,其所提供的收缩动力也相对较大(图 11),并且由于含水率较高试样,在制样过程中,土体受水挤压作用,内部孔隙相对较大且均匀,为颗粒间距离的靠近、位置的重排提供了收缩空间,宏观上表现为试样收缩剧烈,收缩应变增长较快。

对各初始含水率试样的最终收缩应变进行统计,相关数据见表 3,并拟合各初始含水率试样最终收缩应变随含水率变化曲线,见图 12 所示。

表 3 试样干燥结束后的径向收缩应变结果

试样 编号	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	含水率/ %	最终 直径/cm	径向 应变/%
S ₁	1.70	40	饱和	5.73	7.22
S ₂	1.70	40	13.0	6.07	1.82
S ₃	1.70	40	14.5	6.02	2.60
S ₄	1.70	40	16.0	5.98	3.27
S ₅	1.70	40	17.5	5.94	3.96
S ₆	1.70	40	19.0	5.90	4.51
S ₇	1.70	40	20.5	5.85	5.36
S ₈	1.70	40	22.0	5.80	6.17

由图 12 可见三趾马红土试样初始含水率由低到高对应的最终收缩应变依次为 1.82%, 2.60%, 3.27%, 3.96%, 4.51%, 5.36%, 6.17%, 7.22%, 表明试样初始含水率越大, 最终收缩应变也越大。试样初始含水率每升高 1.5%, 最终收缩应变增大约 0.2 倍, 且试样最终收缩应变与初始含水率呈良好的线性关系 ($R^2=0.992\ 76$)。所以对于 $1.7\ \text{g}/\text{cm}^3$ 干密度、 $40\ ^{\circ}\text{C}$ 脱湿条件下, 三趾马红土的最终收缩应变变量与初始含水率可用一个线性函数表示, 即:

$$s=a\omega+b$$

式中: a 大于零、 b 小于零, 为试验常数。

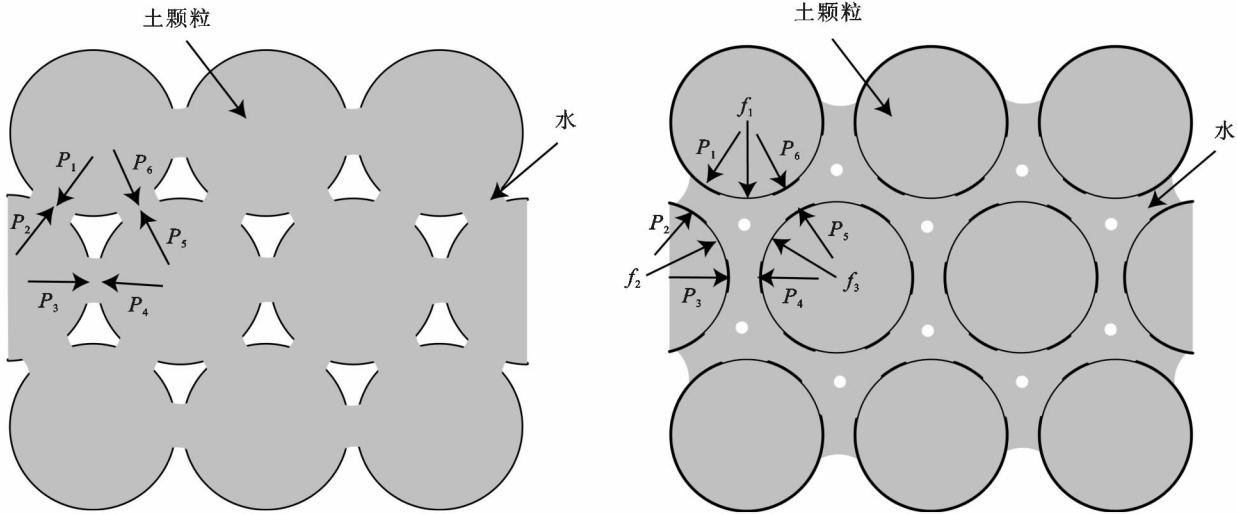


图 11 土体收缩动力

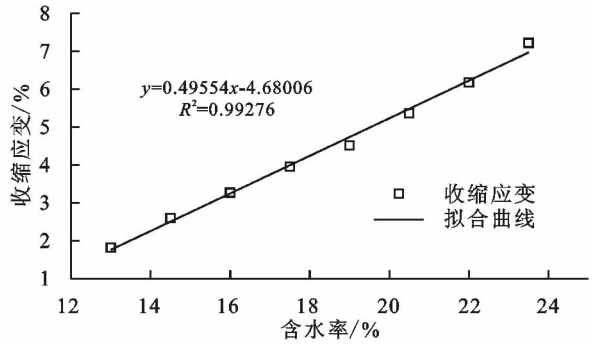


图 12 不同初始含水率试样最终收缩应变

应变也相应越大。

(3) 三趾马红土试样初始含水率每升高 1.5%, 最终收缩应变增大约 0.2 倍, 且试样最终收缩应变与初始含水率呈良好的线性关系 ($R^2=0.992\ 76$)。所以实际工程活动中应减少雨水和地下水对三趾马红土的侵蚀和浸泡, 以防止其发生剧烈的干缩变形, 从而对工程活动产生影响。

参考文献:

[1] 文宝萍. 黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究[M]. 北京:地质出版社,1997.

[2] 曲永新,张永双,覃祖森. 三趾马红土与西北黄土高原滑坡[J]. 工程地质学报,1999,7(3):257-265.

[3] 王根龙,张茂省,伍法权,等. 受三趾马红土控制的黄土滑坡机理研究评述[C]//全国工程地质大会,2012.

[4] 吴圣林,许惠德. 内蒙古元宝山露天煤矿三趾马红土的工程地质性质及其改良[C]//全国工程地质大会,1996.

[5] 肖荣久,赵强,邓媛华. 陕西三趾马红土工程地质特性初步研究[C]//全国工程地质大会论文选集,1992.

[6] 彭淑贞,郭正堂. 风成三趾马红土与第四纪黄土的黏土

3 结论

(1) 三趾马红土失水曲线均呈现明显的 3 个阶段:快速失水期、减速失水期和残余失水期。试样失水曲线受初始含水率影响显著,初始含水率越大,试样失水速率相对越快,失水过程越剧烈。

(2) 三趾马红土收缩曲线均呈现明显的 4 个阶段:快速收缩阶段、减速收缩阶段、残余收缩阶段和零收缩阶段。试样收缩曲线受初始含水率影响显著,初始含水率越高,其收缩过程越剧烈,收缩结束后,收缩

- 矿物组成异同及其环境意义[C]//中国科学院地质与地球物理研究所 2007 学术论文汇编, 2008:277-285.
- [7] 郑苗苗, 郑泓, 李同录. 关中西部大型黄土滑坡滑带土的物理力学特性研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1):343-348.
- [8] 张云翔, 薛祥煦. 甘肃武都龙家沟三趾马动物群化石的埋藏特点及该地区“三趾马红层”的成因[J]. 科学通报, 1995, 40(19):1782-1784.
- [9] 张子然. 黄土—三趾马红土滑坡蠕变特性研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
- [10] 曹福明, 刘文连. 南北方红土工程地质特性对比分析:以北方三趾马红土和南方网纹红土为例[J]. 价值工程, 2015(3):280-281.
- [11] 曲永新, 王玉洲, 吴芝兰, 等. 内蒙古中部阿巴嘎地区的三趾马(N₂)红土及其工程特性的形成[J]. 工程地质学报, 1995, 3(4):77-85.
- [12] 李滨, 吴树仁, 石菊松, 等. 陕西宝鸡市三趾马红土工程地质特性及灾害效应[J]. 地质通报, 2013, 32(12):1918-1924.
- [13] 周瑞光, 杨继申. 三趾马红土力学性质试验研究[C]//全国工程地质大会, 1996.
- [14] 唐朝生, 崔玉军, Anh-minh Tang, 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.
- [15] 唐朝生, 王德银, 施斌, 等. 土体干缩裂隙网络定量分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12):2298-2305.
- [16] 袁俊平. 非饱和膨胀土的裂隙概化模型与边坡稳定研究[D]. 南京:河海大学, 2003.
- [17] Kleppe J H, Olson R E. Desiccation cracking of soil barriers[M]//Hydraulic barriers in soil and rock, 1985.
- [18] 刘春, 王宝军, 施斌, 等. 基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9):1383-1388.
- [19] Monteith J L. Evaporation and surface temperature [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 107(451):1-27.
- [20] Kondo J, Saigusa N. A parameterization of evaporation from bare soil surfaces [J]. J. Appl. Meteor., 1990, 29(5):385-389.
- [21] Kondo J, Saigusa N, Sato T. A model and experimental study of evaporation from bare-soil surfaces[J]. Journal of Applied Meteorology, 2010, 31(3):304-312.
- [22] 欧阳斌强, 唐朝生, 王德银, 等. 土体水分蒸发研究进展[J]. 岩土力学, 2016, 37(3):625-636.
- [23] 徐士康, 唐朝生, 李吴达, 等. 土体水分蒸发模型研究进展[J]. 高校地质学报, 2017, 23(4):640-649.
- [24] Tang C S, Shi B, Liu C, et al. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer [J]. Applied Clay Science, 2011, 52(1):69-77.
- [25] 谈云志, 喻波, 刘晓玲, 等. 压实红黏土失水收缩过程的孔隙演化规律[J]. 岩土力学, 2015, 36(2):369-375.

~~~~~

(上接第 226 页)

- [18] Jiang Y, Liu X, Song S, et al. Diversity and distribution of ground bryophytes in broadleaved forests in Mabian Dafengding National Nature Reserve, Sichuan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2):13-19.
- [19] Pescador D S, Bello F D, Valladares F, et al. Plant trait variation along an altitudinal gradient in Mediterranean high mountain grasslands:Controlling the species turnover effect [J]. Plos One, 2015, 10(3):e0118876.
- [20] 孙守琴, 王根绪, 罗辑, 等. 苔藓植物对环境变化的响应和适应性[J]. 西北植物学报, 2009, 29(11):2360-2365.
- [21] 李粉霞, 王幼芳, 刘丽, 等. 浙江西天目山苔藓植物物种多样性的研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(2):192-196.
- [22] Astrom M, Dynesius M, Hylander K, et al. Slope aspect modifies community responses to clear-cutting in boreal forests[J]. Ecology, 2007, 88(3):749-758.
- [23] Sternberg M, Shoshany M. Influence of slope aspect on Mediterranean woody formations: comparison of a semiarid and an arid site in Israel [J]. Ecological Research, 2010, 16(2):335-345.
- [24] 刘旻霞, 王刚. 高寒草甸植物群落多样性及土壤因子对坡向的响应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2):259-265.
- [25] 陈龙, 吴玉环, 李微, 等. 沈阳市地面苔藓植物的分布及对环境因子的响应[J]. 生态科学, 2009, 28(3):206-211.
- [26] 张元明, 曹同, 潘伯荣. 新疆博格达山地面苔藓植被的数量分类与排序研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(1):10-16.
- [27] 张元明, 曹同, 潘伯荣. 新疆古尔班通古特沙漠南缘土壤结皮中苔藓植物的研究[J]. 西北植物学报, 2002, 22(1):18-23.
- [28] 范苗, 伍玉鹏, 胡荣桂, 等. 武汉市城区苔藓植物多样性和分布及与环境因子的关系[J]. 植物科学学报, 2017, 35(6):825-834.