

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009041

干湿循环下新近系黏土杂岩裂隙演化研究

任 旺¹, 王家鼎¹, 卞小芮²

(1. 西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;

2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 本文对武乡盆地黏土杂岩在反复干湿循环下的裂隙演化特征进行室内试验研究。试验采用烘干法模拟脱湿过程, 水膜转移法模拟增湿过程, 每完成一次脱湿增湿过程都要进行数码摄影、称重以记录裂隙变化情况, 从而进行定性分析。通过应用 Matlab 软件进行图像处理以获取裂隙演化过程中的几何特征值。定性分析与定量分析相结合得到裂隙演化规律有: (1) 脱湿过程: 黏土杂岩裂隙率不断增加最终趋于稳定, 第 2 次脱湿对裂隙率影响最大; 几何特征上裂隙的变化先是沿着中间大裂隙向四周继续生长发育, 然后随着循环次数增加转而形成新的大裂隙。(2) 增湿过程: 黏土杂岩吸水膨胀, 裂隙逐渐趋于闭合, 但出现不可逆形变量, 随着增湿次数增加, 这种累积变形量逐渐减小, 第 5 次的干湿循环后, 累积变形量基本消失, 试样结构重新归于相对均一的松散结构。

关键词: 干湿循环; 裂隙演化; 图像处理; 裂隙率

中图分类号: TU411.91

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0161-07

A study of fissures evolution of the Neogene clay complexes under wetting and drying cycles

REN Wang¹, WANG Jiading¹, BIAN Xiaorui²

(1. Department of Geology, State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University,

Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: In the present investigation, laboratorial test is conducted to examine the evolution law of fissures of the Wuxiang clay complexes under wetting and drying cycles. The oven drying method and the water film transfer method are employed to simulate the drying and wetting process, respectively. Digital photography and weighing are used to record the changes of fissures in each drying and wetting process, so as to conduct qualitative analyses. Matlab is applied to image processing to obtain the geometric feature values in the evolution process of fissures. The evolution rules of fissures are obtained by combining qualitative analyses and quantitative analyses, including: (1) in the drying process, the fissure rate of the clay complexes increases continuously and finally tends to be stable, and the first and second drying have the greatest influence on the fissure rate. In terms of the geometric characteristics, the fissures first grow and develop in all directions along the middle large fissure, and then turn to form a new large fissure with the increase number of cycles. (2) In the wetting process, the clay complexes expands when it absorbs water, and the fissures gradually tend to close, but the plastic deformation occurs. With the increasing wetting times, the accumulated deformation gradually decreases. After the fifth drying and wetting

收稿日期: 2020-09-17; 修订日期: 2020-10-26

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1504703); 国家自然科学基金重点项目(41630639)

第一作者: 任旺(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为工程地质。E-mail: 1026801091@qq.com

通讯作者: 王家鼎(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事水文地质与工程地质研究。E-mail: wangjd@nwwu.edu.cn

cycle, the accumulated deformation basically disappears, and the soil structure returns to a relatively uniform loose structure.

Keywords: wetting and drying cycles; evolution law of fissures; image processing; fissures ratio

随着高铁、重载铁路的修建,越来越多的深开挖工程使得与新近系黏土杂岩有关的工程地质问题日渐凸显,引起国内外学者的关注^[1-4]。而有关新近系黏土杂岩的命名,工程地质方面的学者多直接称之为硬黏土,未考虑成岩作用,而从沉积岩角度考虑,张晓蕾^[5]将其命名为黏土杂岩,所以本文统一称之为黏土杂岩。新近系黏土杂岩按照沉积环境可以划分为两大类:以还原环境为主的中新世湖积灰绿色裂隙化黏土杂岩和以氧化环境为主的褐黄色非裂隙化洪积黏土杂岩^[6]。由于成岩时间较短,胶结较差,新近系黏土杂岩具有显著的胀缩特性。在还原环境下形成的灰绿黏土杂岩含有以蒙脱石为主的黏土矿物,而蒙脱石是典型的膨胀性黏土矿物^[6]。灰绿色黏土杂岩中蒙脱石的含量越高,预示着其膨胀能力越强。除了膨胀性,灰绿黏土杂岩还具有明显的裂隙性,这是出现大量地质工程问题的主要原因^[7]。国内外学者对不同地区、不同时代和不同成因黏土杂岩中宏观裂隙的成因提出过不同的见解,可以概括为以下几种:构造作用、干湿胀缩作用、脱水收缩作用、差异压密作用、卸荷作用、斜坡活动作用以及冰川作用等^[8-11]。

关于黏土杂岩的裂隙性,有学者从力学角度、水土耦合角度进行了深入研究。张永双等^[12]、李滨等^[13]认为干湿循环作用对黏土杂岩的胀缩性、崩解性有显著影响,弱化了土体强度。韩贝传等^[14]基于黏土杂岩裂隙的各向异性和方向性提出弹塑性损伤力学模型,指出坡脚开挖、卸荷等对裂隙进而对边坡稳定的影响。王家鼎等^[15]以吕梁山红黏土围岩段为例,探讨了水-应力耦合对红黏土的位移场和应力场的影响程度。在土体宏观裂隙特征研究方面,易顺民等^[16]在膨

胀土裂隙的分形特征研究中,指出分维与膨胀土强度指标有很好的相关性。袁俊平等^[17]利用光学显微镜观测膨胀土的裂隙演变,并探讨了将灰度熵作为膨胀土裂隙定量描述指标的可行性;马佳等^[18]利用能够精准控制湿度条件的试验装置,研究了裂土裂隙演化的过程。关于土体裂隙演化的研究,目前采用的方式有手工描绘、压汞实验、扫描电子显微镜法、CT扫描、数码摄影等^[19]。手工描绘要求过高,易产生误差。压汞实验定量分析孔径分布,是一种优秀的定量手段,但缺乏几何特征。扫描电子显微镜法和 CT 扫描法成本过高,观测过程中存在扰动,不利于推广。随着数码产品的精度越来越高,采用数码产品直接摄影成为一种成本低、时效快、扰动少的良好手段。

目前,现有的宏观裂隙特征研究多集中于膨胀土且控制条件单一,反复干湿循环下的黏土杂岩宏观裂隙演化规律研究却鲜有尝试。为此,本文以反复干湿循环下黏土杂岩宏观裂隙演化规律为方向进行研究。通过数码摄影的方式获取黏土杂岩的裂隙数字图像,并利用 Matlab 软件的图像处理技术对裂隙进行定量研究,提取裂隙信息,量化裂隙指标,进而对于干湿循环下的宏观裂隙演化规律进行理论分析。

1 试验方案

1.1 研究区概况

研究区段地层上部主要为较薄新、老黄土,下部多为新近系黏土杂岩,包括灰黄色砂层和灰绿、黄绿、黑褐及红色等各色黏土岩,局部地段基岩出露,其中灰绿色黏土杂岩层为主要地层,研究区典型工程地质剖面如图 1 所示。

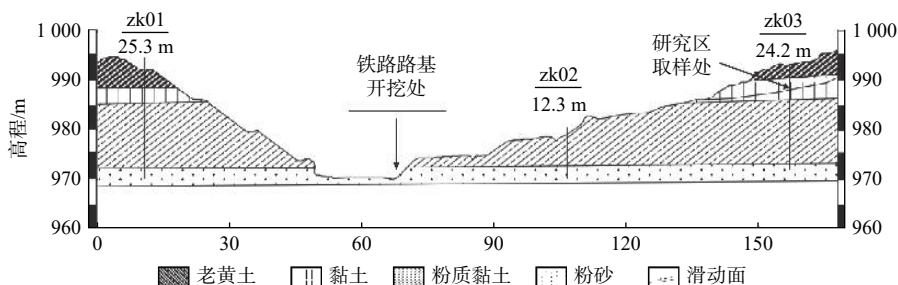


图 1 研究区工程地质剖面示意图

Fig. 1 Engineering geological section of the study area

1.2 试样性质

本次钻机取样, 将样品内置于铁皮桶中, 在其外使用 PVC 管覆盖并蜡封。在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行物理力学性质研究与 X 光衍射试验。试样基本物理指标如表 1 所示, 矿物成分见表 2。

表 1 试样物理特性指标

Table 1 Physical characteristics of the soil samples

含水率/ %	比重	天然重度/ (kN·m ⁻³)	孔隙比	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	液性 指数	自由膨胀率/ %
29	2.74	18.6	1.021	41.1	24	17.1	0.77	45

表 2 矿物成分统计

Table 2 Statistics of mineral compositions

矿物成分	石英	斜长石	钾长石	方解石	白云石	蒙脱石	伊利石	赤铁矿
含量/%	49.2	22.5	7.0	4.1	0.0	12.5	4.0	0.7

1.3 试验方案

将原状岩土体制作成环刀样, 称重记录初始重量。为了模拟实际的日照温度, 将试样放置在烘箱中 55°恒温条件下进行烘干, 在烘干 48 h 后每隔 2 h 进行烘干样的称重, 2 次称重结果不变即认为烘干至完全状态, 即为完成 1 次脱湿。烘干后的试样记录重量数据, 再采用水膜转移法进行增湿处理至初始含水率, 增湿所需总水量为试样初始重量与完全脱湿后重量的差值: 每次用滴管在环刀顶底面加等量且不超过 3 g 的水进行试样增湿, 由于试样脱湿后产生干缩变形, 不利于从底面滴加水分, 采取优先在试样与环刀之间的间隙处滴加水分, 再滴加试样的顶面。增湿过程需在 3 d 内加完, 每天滴加三分之一的总水量, 且滴加过程保持连续。加水时, 由外向内呈螺旋纹路线将滴管内蒸馏水均匀滴入环刀顶面, 滴管高度不超过 5 mm (防止土体出现因水滴重力产生的坑状表面)。每天滴加完成后用保鲜膜包裹并放置保湿箱中, 最后 1 次加水后将其放置在保湿箱中保湿 24 h, 此为完成 1 次增湿 (图 2)。每完成 1 次脱湿、增湿过程后, 都要对试样顶面进行数码摄影, 对岩土体进行称重以记录裂隙演化情况。为了保证平行试验过程中拍摄条件一致, 需要保证拍摄的角度、距离及试样位置一致, 同时在拍摄时使用幕布遮挡住一切外界光源, 仅使用日光灯进行照明, 以保证拍摄环境一致。

2 裂隙图像处理

2.1 灰度化处理

通过 Matlab 软件中的 Rgb2gray 命令将彩色图像转换成灰度图像, 见图 3(a), 这个步骤可以去除大量

与裂隙无关的信息, 并利用 Imhist 函数求出图像的灰度直方图, 处理结果如图 3(b) 所示。根据灰度直方图可知灰度等价在 50 左右时发生突变, 故存在阈值 T , 将图像分成大于 T 的像素群和小于 T 的像素群, 以此将图像内容与背景区分开。

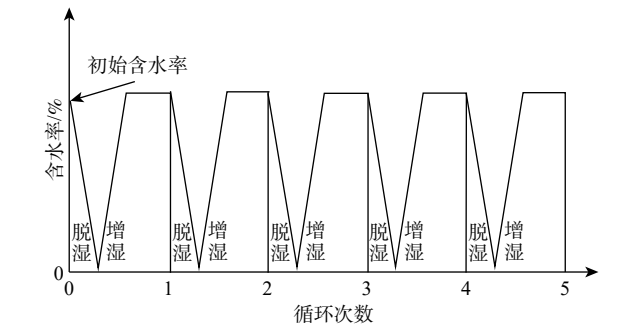


图 2 试验流程图
Fig. 2 Flow chart of the experiment

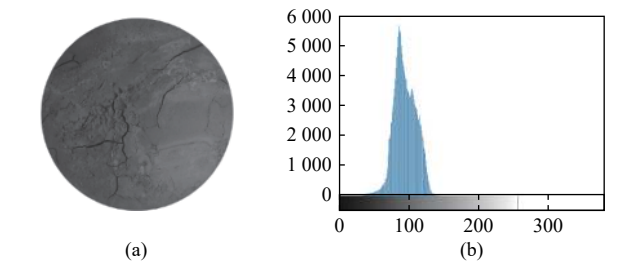


图 3 试样裂隙灰度图像
Fig. 3 Grayscale image of soil sample fissures

2.2 图像二值去杂化

已有研究成果中, 胡世昆^[20]通过数字图像的阈值判断法获取网状裂隙和线性裂隙; 厉荣宣^[21]通过阈值分割实现了对零件表面裂纹识别及特征提取。本文根据灰度直方图得到裂隙灰度阈值, 调用 Im2bw 指令获得裂隙二值化图像 (图 4)。由于照片噪声的影响, 会产生噪声杂点, 如图 4(a) 中标记处所示, 虽然杂点面积较小但其数量较多, 累积起来仍会对统计裂隙面积产生较大的影响, 所以应进行去杂处理。

裂隙相较于杂点最大的区别在于裂隙是连通的, 所以本文运用 Matlab 软件中的 Bwlabel 函数寻找连通区域, 寻找到连通区域后, 调用 Regionprops 函数对标记的连通区域进行面积统计, 裂隙的面积要远大于杂点的面积, 最后用 Bwareaopen 函数对杂点进行删除, 见图 4(b)。由于图像的拍摄角度、光线条件、系统噪声等因素的影响, 会在裂隙中产生细小的孔洞, 这会影

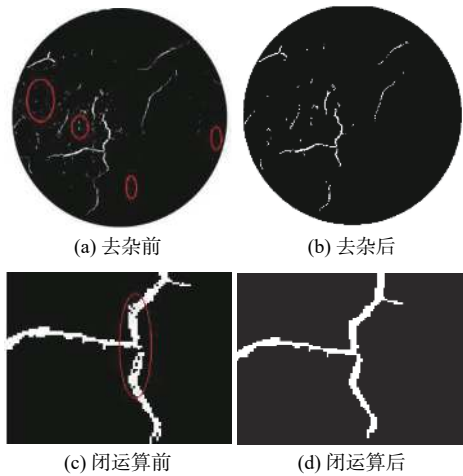


图 4 裂隙二值化去杂图像

Fig. 4 Binary declutter digital image of fissures

2.3 裂隙特征指标

在上述试验步骤的基础上,对去杂闭运算后裂隙图像中的像素总数(px)进行统计,得到裂隙的总面积。通过使用连通分量标记单条裂隙,统计连通分量可以得到裂隙的条数。引入裂隙率 δ_f 、裂隙相对面积 $\bar{A}_i$ 作为衡量裂隙发育的特征指标:

$$\delta_f = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A} \quad (1)$$

$$\bar{A}_i = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{N_i} \quad (2)$$

式中: A_i ——第 i 条裂隙面积/px;

A ——每次循环时试样总面积/px;

N_i ——裂隙总条数。

3 结果分析

本次试验通过运用 Matlab 图像处理手段共进行 3 组平行试验,根据处理后的图像从脱湿与增湿两个角度进行裂隙演化的定性分析;通过 Matlab 统计出的几何特征值计算出裂隙率 δ_f 、裂隙相对面积 $\bar{A}_i$,并给出裂隙率与循环次数的拟合函数。

3.1 脱湿过程

按照前文所述的处理方法得到裂隙演化规律灰度图(图 5)、二值化图(图 6),根据式(1)(2)计算得出裂隙率、裂隙相对面积与循环次数的关系曲线(图 7、图 8)

脱湿过程中含水率持续降低,土体会发生干缩现象并产生拉应力,根据马佳等^[18]的研究可知:当水平

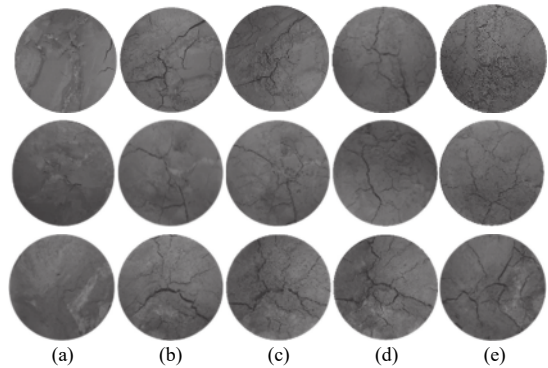


图 5 脱湿过程裂隙演化规律图

Fig. 5 Fracture evolution pattern in the drying process

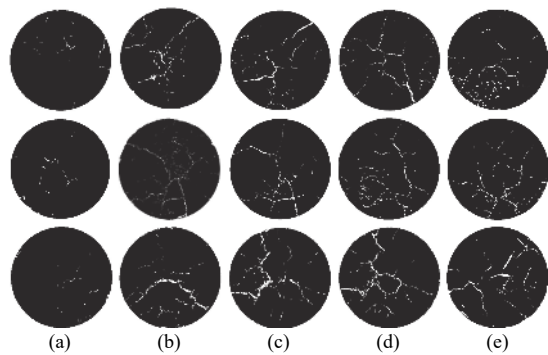


图 6 脱湿过程裂隙演化二值化图像

Fig. 6 Binarization image of fracture evolution in the drying process

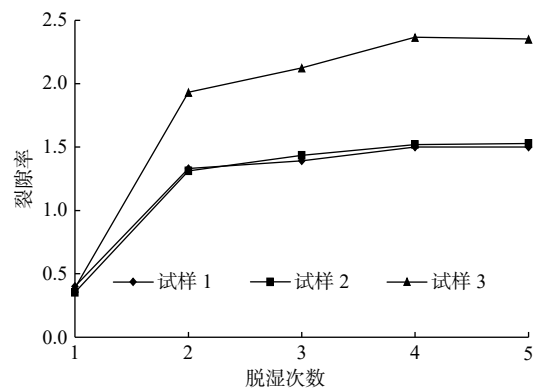


图 7 裂隙率与脱湿次数关系曲线

Fig. 7 Relationship of the fissure rate and dehumidification times

向净应力($\sigma_x - u_a$)等于抗拉强度 $t = -0.5(u_a - u_w) \tan \varphi^b$ 时,土体表层处于临界开裂状态。

当水平向净应力大于土体抗拉强度时,土体结构破坏形成裂隙。随着土体裂隙的发育,干缩产生的水平向净应力不断减小直至小于抗拉强度,至此裂隙不再发育保持稳定。由图 5、图 6 可以看出,在第 1 次脱湿过程中,试样表面产生较少数量的细小裂隙,此时土体结构完整,抗拉能力大于水平向净应力,大部分

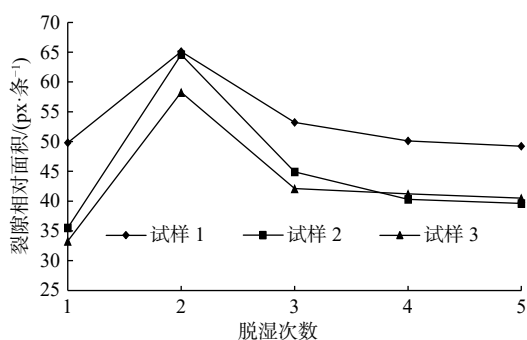


图 8 干湿循环中的相对面积规律曲线

Fig. 8 Relative area rule curve in wetting and drying cycles

水平向净应力以势能的形式储存在土体中, 而没有以裂隙的形式进行释放; 第 2 次脱湿时, 水平向净应力势能首先在中间部位释放形成大的裂隙, 此时裂隙率大幅增加, 并且沿着大裂隙生长方向的四周形成了若干细小裂隙, 土体结构开始被裂隙分割成小块状; 第 3 次脱湿时, 中部大裂隙四周发育了许多细小裂隙, 细小裂隙数增加迅速, 但裂隙仍以中间大裂隙为主。结合图 7、图 8 可以看出, 虽然此时裂隙总面积在增加, 但是裂隙条数的增加速率相对更快, 导致裂隙的相对面积反而减小。

至此, 在前 3 次干湿循环中, 裂隙的演变规律是原有裂隙的继续传播发育。由图 5、图 6 可以看出, 在第 4 次、第 5 次脱湿过程中, 裂隙不再沿着中间大裂隙的位置进行发育。马佳等^[18]研究发现裂隙的演变要么是沿着原有裂隙继续发育, 要么是发育新裂隙。在本次试验中, 黏土杂岩第 4 次、第 5 次脱湿过程中的裂隙演变规律明显属于后者。根据断裂力学理论可知, 原有裂隙继续发育对应力场要求过高, 土体应力条件更容易形成新的大裂隙, 所以此时土体表面转而形成新的大裂隙。新的大裂隙位置随机出现, 这与土体各向异性有关。

在第 4 次、第 5 次脱湿过程中, 土体已被裂隙分割成小块状, 土体结构严重受损, 周围块状的势能释放形成了新的大裂隙, 由于是在有侧限条件下, 中间最早的大裂隙反而呈闭合状, 新增的裂隙分担了部分干缩变形。结合图 7、图 8 可以看出, 在第 4 次、第 5 次脱湿过程中, 裂隙率的增加速率基本趋于平缓, 而相对面积仍呈下降状。

为揭示裂隙率与干湿循环次数的关系, 通过构建 δ_f 与循环次数 n 的指数函数关系进行拟合:

$$\delta_f = a \cdot e^{n/b} + c \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c ——函数系数。

计算得到的 a 、 b 、 c 取值范围分别为 $[-7.633, 2$,

$-5.39088]$, $[-0.7461, -0.63804]$, $[1.52835, 2.39386]$ 。函数拟合结果如图 9 所示, 曲线先是呈指数式快速增加, 然后增长速度变缓, 最后慢慢趋于稳定。由此可以得出, 在第 1 次到第 2 次循环时, 裂隙率变化最明显, 之后裂隙发育将土体切割成小块状, 土体块状越小水分散失速率越快, 拉应力也越小。当拉应力小于土体的抗拉强度时将不再产生新的裂隙, 裂隙面积最终趋于平衡状态。

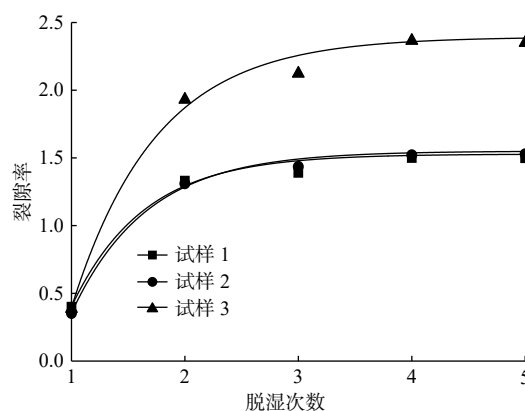


图 9 裂隙率与干湿循环次数关系拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of the fissures ratio with wetting and drying cycles

3.2 增湿过程

图 10 为增湿过程中的土体表面变化, 增湿过程中水分进入裂隙, 土体内部的黏土矿物会发生吸水膨胀现象, 胶结物被溶蚀, 在有侧限大气压下, 土体试样发生膨胀变形, 使得裂隙趋于闭合。直到试样恢复到初始含水率时, 在表面发现仍有裂隙未闭合, 这意味着在土体表面出现了不可逆的变形现象。张永双等^[6]研究发现, 新近系黏土杂岩随着干湿循环的次数增加, 其膨胀性能、持水能力也会随之增加。而膨胀性能的增加会对干湿循环所带来的不可逆变形量产生

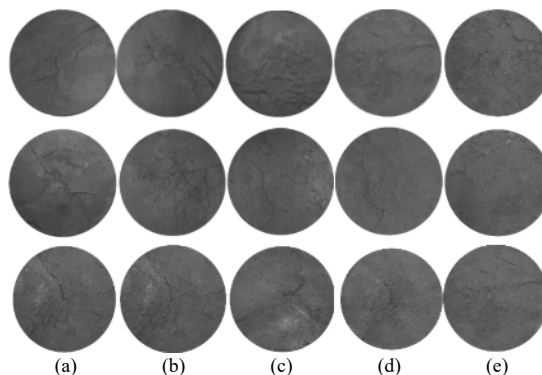


图 10 增湿次数增加的土体表面变化

Fig. 10 Surface changes in soil with the increasing wetting times

影响,使其随着循环次数的增加而逐渐减小。本次试验中,经过 5 次干湿循环后,土体原始结构基本被破坏,在水的胶结作用、膨胀作用下,再次形成稳定、均一的土体结构,而土体试样表面裂隙基本不可见,并且相比于原状样表面,表现出更均质化(图 11)。

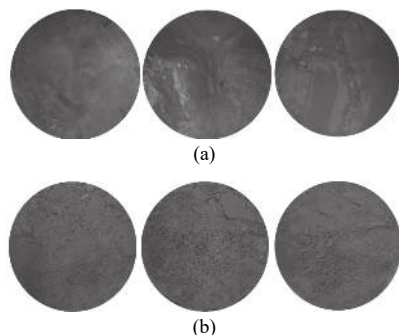


图 11 原状土体表面 (a) 与 5 次循环后土体表面 (b)

Fig. 11 (a) surface of the undisturbed soil and (b) surface of soil after 5 times of cycles

4 结论

(1)新近系灰绿色黏土杂岩在有侧限大气压条件下,裂隙率与裂隙发育程度与脱湿次数呈正相关关系,并且二者符合指数函数关系。

(2)随着脱湿次数增加,土体表面先是在中间发育大裂隙,并沿着大裂隙四周发育细小裂隙,接着土体结构遭到破坏后,土体表面不再沿着中间大裂隙发育而转向生成新的大裂隙。

(3)在有侧限大气压条件下,随着干湿循环次数增加,土体表面出现不可逆形变,不可逆形变量随着干湿循环的次数增加而逐渐降低。当循环到一定次数,这种累积形变基本消失。

参考文献 (References) :

- [1] DE KIMPE C R. Effect of air-drying and critical point drying on the porosity of clay soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1984, 21(1): 181 – 185.
- [2] KNODEL P C, DIF A E, BLUEMEL W F. Expansive soils under cyclic drying and wetting[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1991, 14(1): 96.
- [3] 张祖莲,梁谏杰,黄英,等. 干湿循环作用下红土抗剪强度与微结构关系研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(3): 78 – 85. [ZHANG Zulian, LIANG Jianjie, HUANG Ying, et al. A study of the relationship between shear strength and microstructure of laterite under drying and wetting cycles[J]. *Hydrogeology & Engineering*

Geology, 2018, 45(3): 78 – 85. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 胡小芳,胡大为,吴成宝. 多孔介质粘土颗粒群的粒径分布分形维[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(5): 99 – 102. [HU Xiaofang, HU Dawei, WU Chengbao. Fractal dimension of size distribution of particle group in porous medium clay[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 34(5): 99 – 102. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张晓蕾. 基于矿物成分的沉积岩岩性与岩石粒度的关系及其岩性组合特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2018. [ZHANG Xiaolei. Relationship between sedimentary lithology based on mineral composition and granularity and the characteristics of their sedimentary lithologic combination[D]. Xi'an: Northwest University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张永双,曲永新,周瑞光. 南水北调中线工程上第三系膨胀性硬粘土的工程地质特性研究[J]. *工程地质学报*, 2002, 10(4): 367 – 377. [ZHANG Yongshuang, QU Yongxin, ZHOU Ruiguang. Engineering geological properties of Neogene hard clay along the middle line of the north-south diversion water project in China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(4): 367 – 377. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 朱楠,刘春原,王文静,等. 衡水湖地区湿地湖泊相黏土工程地质特性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 125 – 132. [ZHU Nan, LIU Chunyuan, WANG Wenjing, et al. Investigation of engineering geological characteristics of the marshy and lacustrine clays in the Hengshui Lake area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 125 – 132. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杨爱武,郑宇轩,肖敏. 人工制备结构性软黏土长期变形特性试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(2): 133 – 140. [YANG Aiwu, ZHENG Yuxuan, XIAO Min. An experimental study of the long-term deformation characteristics of artificial structured soft clay[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 133 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [9] CHEN R, XU T, LEI W D, et al. Impact of multiple drying-wetting cycles on shear behaviour of an unsaturated compacted clay[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(19): 1 – 9.
- [10] 刘晓红,杨果林,方薇. 红粘土动本构关系与动模量衰减模型[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(3): 66 – 72.

- [LIU Xiaohong, YANG Guolin, FANG Wei. Dynamic constitutive relation and dynamic modulus attenuation model of red clay[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(3): 66 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(11): 1936 – 1941. [YANG Heping, ZHANG Rui, ZHENG Jianlong. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(11): 1936 – 1941. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张永双, 曲永新. 硬土/软岩(岩土间新类型)的确认及其判别分类的探讨[C]// 全国工程地质大会, 2000. [ZHANG Yongshuang, QU Yongxin. Confirmation of hard soil/soft rock (a new type between rock and soil) and discussion on its discriminant classification [C]// National Engineering Geology Congress, 2000. (in Chinese)]
- [13] 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. [LI Bin, WU Shuren, SHI Jusong, et al. Engineering geological properties and hazard effects of Hipparion laterite in Baoji, Shaanxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(12): 1918 – 1924. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 韩贝传, 曲永新, 张永双. 裂隙型硬粘土的力学模型及其在边坡工程中的应用[J]. *工程地质学报*, 2001, 9(2): 204 – 208. [HAN Beichuan, QU Yongxin, ZHANG Yongshuang. Mechanical model for cracked hard clay and its application to slopes engineering in Nanyang basin[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(2): 204 – 208. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王家鼎, 王建斌, 谷天峰, 等. 水-力耦合作用下三趾马红土围岩变形特征研究[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(6): 1157 – 1169. [WANG Jiading, WANG Jianbin, GU Tianfeng, et al. Research on the deformation characteristics of the surrounding rock about hipparion red clay under the action of water-force coupling[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(6): 1157 – 1169. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 易顺民, 赵文谦. 单轴压缩条件下三峡坝基岩石破裂的分形特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(5): 520 – 523. [YI Shunmin, ZHAO Wenqian. The fractal characteristics of rock fracture in dam foundation of the Three Gorges project under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(5): 520 – 523. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 袁俊平, 卢毅, 韩翔宇, 等. 岩土体孔隙结构研究中的CT图像处理方法比较[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(4): 51 – 57. [YUAN Junping, LU Yi, HAN Xiangyu, et al. Comparison of CT image processing methods in the study of pore structure of rock and soil mass[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2019, 36(4): 51 – 57. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 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 Shanxiong, YU Fei, et al. Experimental research on crack evolution process in fissured clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(10): 2203 – 2208. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 熊俊豪, 刘宝臣, 刘磊, 等. 基于摄影法的红黏土裂隙试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(2): 381 – 387. [XIONG Junhao, LIU Baochen, LIU Lei, et al. A method for crack image processing of red clay[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(2): 381 – 387. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 胡世昆. 基于数字图像处理技术的路面裂缝检测算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2012. [HU Shikun. Research on pavement crack detection algorithm based on digital image processing[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 厉荣宣, 沈希忠, 张树行, 等. 基于图像处理的轴类零件表面裂纹检测[J]. *图学学报*, 2015, 36(1): 62 – 67. [LI Rongxuan, SHEN Xizhong, ZHANG Shuhang, et al. Surface crack detection of shaft components based on image processing[J]. *Journal of Graphics*, 2015, 36(1): 62 – 67. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞