

DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2014.06.005

# 湿干循环作用对压实黏土干裂特性的影响\*

蔡光华<sup>①</sup> 薛强<sup>②</sup> 刘松玉<sup>①</sup> 陆海军<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>东南大学交通学院岩土工程研究所 南京 210096)

(<sup>②</sup>中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

**摘要** 开展了湿干循环作用下压实黏土的开裂试验和微观结构特性研究,分析了湿干循环作用对黏土开裂和孔隙结构的影响,将压汞试验(MIP)和扫描电镜(SEM)的结果与宏观开裂进行比较。结果表明:湿干循环作用显著影响了压实黏土的开裂,用开裂因子表征黏土的开裂程度,开裂因子随含水率减小而增大并明显大于湿干循环作用前;随湿干循环次数的增加,黏土孔隙的总体积、中间孔径、平均孔径、平均孔隙率和团粒内孔隙均在增加,而黏土的颗粒内孔隙、颗粒间孔隙和团粒间孔隙却在减小。湿干循环作用使黏土体从大团粒逐渐转化为小颗粒,并增大了土颗粒的凸凹性,分析SEM二值化图像得知土体孔隙率均在增加;用压汞法和扫描电镜法分析和解释土体开裂是可行的,所得的微观孔隙特征与宏观开裂规律基本相符。

**关键词** 压实黏土 湿干循环 开裂 微观结构 孔隙率

中图分类号:P642 文献标识码:A

## INFLUENCE OF WETTING-DRYING CYCLES ON DESICCATION CRACKING OF COMPACTED CLAY

CAI Guanghua<sup>①</sup> XUE Qiang<sup>②</sup> LIU Songyu<sup>①</sup> LU Haijun<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>Institute of Geotechnical Engineering, School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096)

(<sup>②</sup>State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

**Abstract** This paper adopts cracking experiments and micro experiment observations of compacted clay specimens under the influence of different wetting-drying cycles. It investigates the effects of wetting-drying cycles on clay cracking and pore structure. Moreover it compares the experimental results of Mercury Intrusion Porosimetry(MIP) and Scanning Electron Microscopy(SEM) tests with those of the macro cracking experiments. The experimental results show that the wetting-drying cycles have a great influence on compacted clay cracking. The Cracking Intensity Factor(CIF), representing the degree of compacted clay cracking, increases as moisture contents decrease, and is obviously larger than that before the wetting-drying cycles. As the number of wetting-drying cycles increases, the total volume of the pores, as the median pore diameter, the mean pore diameter, the mean porosity and the intra-aggregate pores increase. But the intra-particle pores, the inter-particle pores and the inter-aggregate pores reduce obviously. The wetting-drying cycles make the large aggregates of the clay gradually transform into small particles and increase the convexity of the soil particles. Besides, it is observed from the analysis of SEM

\* 收稿日期: 2013-11-05; 收到修改稿日期: 2014-06-09.

基金项目: 国家自然科学基金(51279032)资助.

第一作者简介: 蔡光华(1985-), 男, 博士生, 主要从事环境岩土工程和地基处理等方面研究. Email: ghcaiere@sina.com

binary image that the porosity increases with the wetting-drying cycles growing. It is plausible to employ Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) and Scanning Electron Microscopy (SEM) tests to analyze and explain the clay cracking. The micro pore characteristics derived from the tests are in line with the macro clay cracking law.

**Key words** Compacted clay, Wetting-drying cycle, Cracking, Microstructure, Porosity

## 0 引言

压实黏土作为一种低渗透性材料,在废物储藏库、矿山尾矿坝、填埋场封场和衬垫等环境岩土工程领域广泛应用<sup>[1]</sup>,对隔离填埋气体、防止渗滤液等有害污染物渗漏和扩散起着关键性作用<sup>[2]</sup>。然而压实黏土层在湿干循环作用下极易产生干裂,致使衬垫层的水传导率急剧增加<sup>[3]</sup>,增大几倍甚至上百倍<sup>[4,5]</sup>;同时,使土体抗剪强度和稳定性减小、滑动力增大,形成了部分无剪切强度的滑裂面,直接或间接地影响了构筑物的稳定性,很可能诱发边坡失稳、大坝破坏等次生灾害<sup>[6]</sup>。然而,城市化发展中开挖的大量废弃黏土多用于公路的路基压实填料、填埋场衬垫和封顶,因此压实黏土的干裂问题是岩土工程中重要的研究课题。

近年来,在有关黏土的湿干循环和开裂特性等研究方面,国内外学者多以膨胀土为对象进行宏观研究,并取得了有意义的成果,如:刘松玉等<sup>[7]</sup>、吕海波等<sup>[8]</sup>、徐彬等<sup>[9]</sup>等开展了湿干循环下膨胀土的胀缩变形、强度变化等物理力学试验研究。结果表明,湿干循环作用是诱发膨胀土胀缩、强度降低和表面裂隙产生的主要原因; Mitchell<sup>[10]</sup>提出黏土矿物的类型和含量是控制土体干裂的主要因素,裂缝尺寸随塑性指数和黏土含量的增大而增大<sup>[5,11-13]</sup>开展了黏土体湿干循环下的开裂试验,研究了宏观裂缝的发育和扩展规律。在微观结构方面,曾召田等<sup>[14]</sup>用压汞法研究了湿干循环过程中膨胀土的孔隙分布,分析了基质吸力的变化规律并建立了基质吸力与循环次数的关系;叶为民等<sup>[15]</sup>采用温度、吸力控制方法,试验研究了温度和湿干循环作用对高压实膨润土微结构的影响。

但在反复湿干循环作用下压实黏土开裂特性的微观研究却鲜有报道,对微观 SEM 图像分析仍停留在定性比较的层面。为此,本文开展了湿干循环作用下压实黏土开裂试验及微观特性研究,并尝试采用软件 Image-Pro Plus 6.0 对微观图片进行定量分析,对反复湿干循环作用下压实黏土开裂规律的演化进行有益探索。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验黏土取自武汉市东西湖区常青花园地铁口地下 3.5m 处,测得其基本物理参数(表 1)和化学成分(表 2)。在 105~110℃ 下烘干 24h 以上,经破碎研磨过 2mm 筛。黏土的最大干密度为 1.71 g·cm<sup>-3</sup>、最佳含水率为 20.77% (图 1)。

表 1 试验黏土的主要物理指标

Table 1 The main physical property indexes of the clay

名称	指标	名称	指标
天然重度 $\gamma/kN \cdot m^{-3}$	19.9	液限 $W_L/\%$	39.4
含水量 $w/\%$	37.2	塑限 $W_p/\%$	18.9
饱和度 $S_r/\%$	96.8	塑性指数 $I_p$	18.5
比重 $d_s$	2.71	液性指数 $I_L$	0.557

表 2 试验黏土的化学成分

Table 2 The mineral compositions of the clay soil

名称	含量/ $\%$
SiO <sub>2</sub>	60.69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.30
CaO	0.23

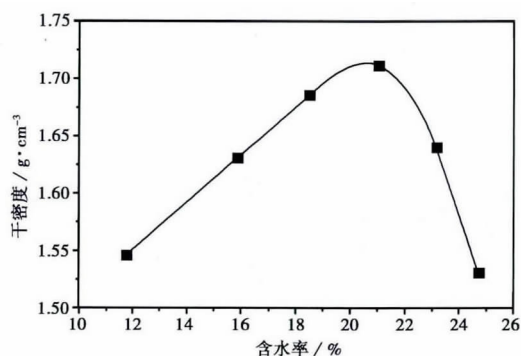


图 1 干密度-含水率的关系曲线

Fig. 1 The dry density-moisture content relation curve

### 1.2 试验方法及过程

#### 1.2.1 试样的制备

根据试样黏土的干密度-含水率的关系曲线,配制初始含水率为 20.8% 的黏土,采用压实法制取

环刀试样(直径  $d = 61.8\text{mm}$  ,高度  $h = 20.0\text{mm}$  ) ,压实后要求干密度为  $1.71\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  ,黏土试样分 3 层压实 ,每层表面要刮毛。

### 1.2.2 湿干循环试验

湿干循环试验参照 ASTM D4843-88(2009) 试验在恒室温( $27\pm 2^\circ\text{C}$ ) 内进行 ,试样置于电子天平上 ,试验过程中测量水分的变化。试样干燥过程是采用室内的自然风干 ,增湿过程采用缓慢喷湿 ,避免形成水流 ,压实黏土初次干燥后 ,进行 3 次增湿 ,3 次干燥 ,1 次增湿和 1 次干燥为 1 次湿干循环 ,共 3 次湿干循环。增湿极限为含水率不超过试样的初始含水率 20.7% ,干燥极限是质量相对损失率 0.01/h(图 2)。

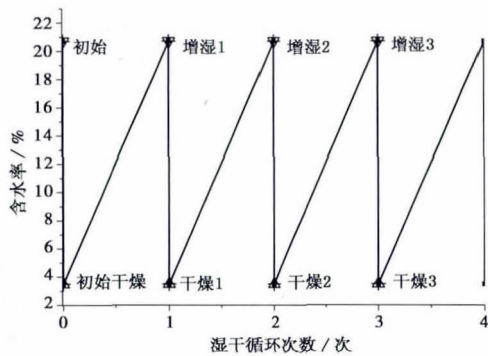


图 2 湿干循环过程

Fig. 2 Sketch of wetting-drying cycle

### 1.2.3 开裂试验

压实黏土湿干循环过程中 ,用裂缝监测装置 (放大比为 10 倍) 监测裂缝的变化 (图 3) ,并实时拍摄图片。

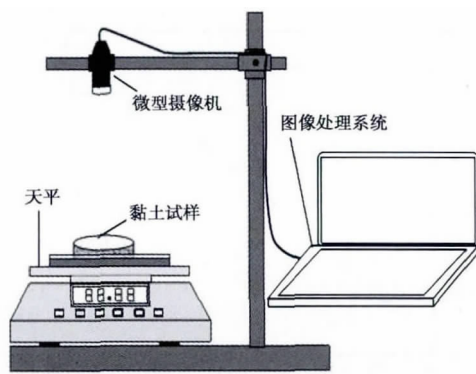


图 3 裂缝监测装置

Fig. 3 The monitoring device of cracking

### 1.2.4 微观试验

将开裂后的压实黏土切成质量约 1g 的小圆柱体 ,置于冷冻干燥阱中进行快速冷冻干燥 ,确保土中孔隙不因脱水而发生胀缩变形。试样冷冻干燥后 ,采用 Poremaster 33 高压孔隙结构仪进行压汞试验 ,

用 Quanta 250 扫描电子显微镜 (SEM) 进行微观试验。假设孔隙为一圆柱形 ,孔径为  $d$  ,高度为  $l$  ,外加压力为  $P$  ,土体与汞的接触角为  $\theta$  ;汞表面张力为  $\gamma$  。由于水银为非浸润性液体 ,在无压力时不会自行流入固体孔隙 ,其压汞试验原理 (图 4) 。根据瓦什伯恩 (Washburn) 方程<sup>[16]</sup> ,用不同压力将水银注入孔隙中 ,得出孔径为:

$$d = - \frac{4\gamma\cos\theta}{P} \tag{1}$$

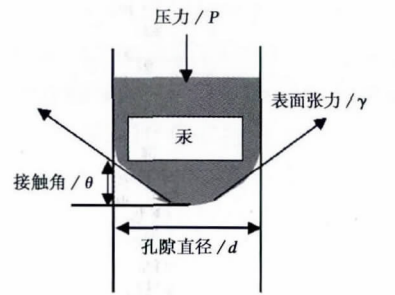


图 4 压汞试验原理图

Fig. 4 The principle of the mercury injection test

压汞试验中的计算参数(如浸润角  $\alpha$ 、表面张力系数  $\sigma$  等) 受汞纯度、土粒表面化学性质、温度等影响 ,该试验汞的表面张力为  $480\text{erg}\cdot\text{cm}^{-1}$  接触角为  $140^\circ$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 湿干循环对黏土开裂的影响

分别经过初次干燥和 3 次湿干循环后 ,压实黏土的干裂图样(图 5) ,图像采集为自动拍摄 ,所有试样拍摄条件均一样。

压实黏土干裂土样采用图像分析处理软件计算裂缝的几何形态参数 ,裂隙部分颜色深暗 ,对于裂隙深度曾有以裂隙面积率、裂隙长度比与土块平均面积比等多种定义方法 ,本文采用 Yesiller 等<sup>[6]</sup> 提出的开裂因子式(2) 来表征压实黏土开裂情况。

$$\delta_c = \frac{A_c}{A_t} = \frac{\sum_{i=1}^{n_l} A_{ci}}{A_t} \tag{2}$$

式中  $\delta_c$  为开裂因子;  $A_c$  为试样的开裂面积;  $A_t$  为试样的总面积。

经计算 ,压实黏土开裂因子随含水率的变化关系(图 6) 随湿干循环次数的变化(图 7) 。

压实黏土随湿干循环次数变化的开裂规律(图 5) ,在初次干燥失水过程中 ,压实黏土出现明显干缩 ,体积显著减小 ,并有少数发育不明显的微裂纹

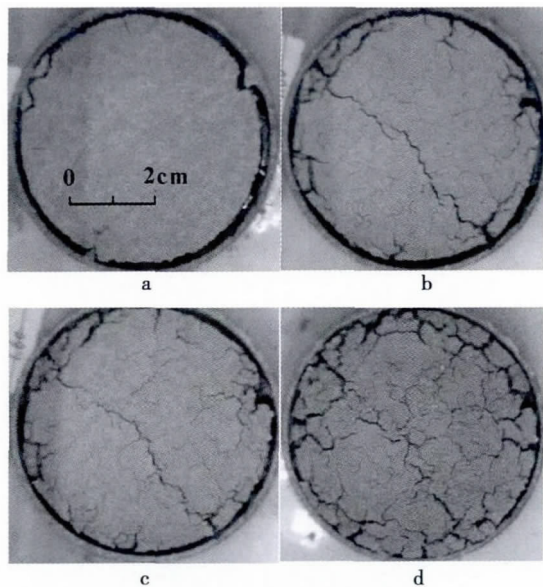


图5 压实黏土随湿干循环次数的开裂规律

Fig. 5 Cracking law of compacted clay with wet-dry cycle  
a. 初次干燥; b. 1次湿干循环; c. 2次湿干循环; d. 3次湿干循环

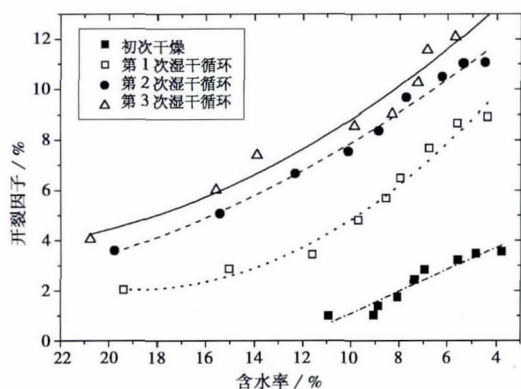


图6 压实黏土开裂因子随含水率的变化

Fig. 6 Cracking intensity factor of compacted clay changes with moisture content

出现。而3次湿干循环作用后,开裂程度明显变化,随湿干循环次数的增加,黏土试样的裂缝或裂纹逐渐增多。

图6描述了湿干循环作用下黏土开裂因子随含水率的变化情况,图7描述了开裂因子随湿干循环次数的变化关系。从图6、图7可以看出,开裂因子随含水率的减小而增大,随着湿干循环次数的增加而增大,干燥后对土样进行增湿,压实黏土的开裂因子又回弹性的减小,但并未减小至干燥前的开裂因子。说明黏土中水分损失的累加引起了开裂面积的增大,在遇水湿化阶段,颗粒间联结破坏较小,部分裂缝出现愈合,开裂因子有短暂性减小;但在后续

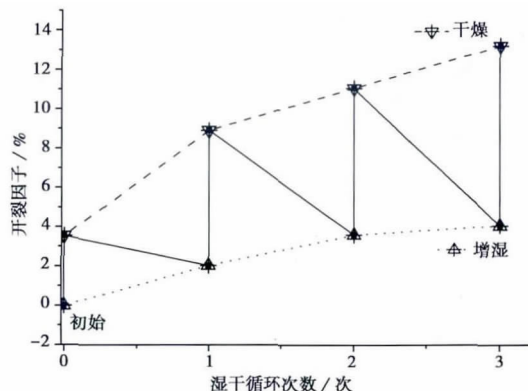


图7 开裂因子随湿干循环次数的变化关系

Fig. 7 Cracking intensity factor changes with wet-dry cycles

的循环干燥阶段,随水分的持续减小,黏土整体收缩程度减弱,裂缝重新出现,开裂因子明显超过湿化前的开裂因子,这与图5所反映现象一致。

产生上述结果的原因是:压实黏土干燥失水,土颗粒的侧向有效应力小于孔隙水压力,土颗粒收缩,导致黏土表面的土颗粒联结在黏结力最小处遭到破坏,结构劣化,产生不可逆的结构变化。压实黏土遇水湿化,使重新排列的土颗粒吸水弱化,黏土表层初现的微裂纹因吸水膨胀而部分愈合,随水的入渗,颗粒间的黏结性减弱。在接下来的干燥过程中,土体再次收缩,在结构最弱的联结破坏处将再次开裂,并逐渐扩展,开裂程度明显高于首次干燥期间的开裂。

## 2.2 压汞试验结果分析

经不同次数湿干循环后,获得压实黏土的孔径分布曲线(图8)。按照 Shear 等<sup>[17]</sup>和孔令荣等<sup>[18]</sup>给出的土体孔隙的划分标准进行研究,即包括:颗粒内孔隙(孔径  $d < 0.014\mu\text{m}$ );颗粒间孔隙( $0.014 \sim 1.8\mu\text{m}$ );团粒内孔隙( $1.8 \sim 70\mu\text{m}$ );团粒间孔隙( $70 \sim 4000\mu\text{m}$ )。根据样品体积 = 样品质量 / 表观密度,孔隙率 = 累积进汞量 / 样品体积,对压实黏土的孔隙率进行量化分析,得到压汞试验统计结果(表3)。

由压汞原理所知,进汞量反映了任意孔径范围内的孔隙体积,孔径的累积进汞量直接反映了大于该孔径的孔隙总体积。由图8可看出,不同次数湿干循环作用下压实黏土的孔径分布具有以下特征:(1)从初次干燥即为0次湿干循环开始,随着湿干循环次数的增加,总孔隙体积、孔隙的中值孔径、平均孔径、孔隙率和团粒内孔隙等微结构参数均呈递增的趋势(图8a,表3),与宏观的开裂规律相一致;(2)孔隙主要集中在  $0.1 \sim 20\mu\text{m}$  范围内,即颗粒间和团粒内(图8b);(3)累计进汞曲线分为明显的3

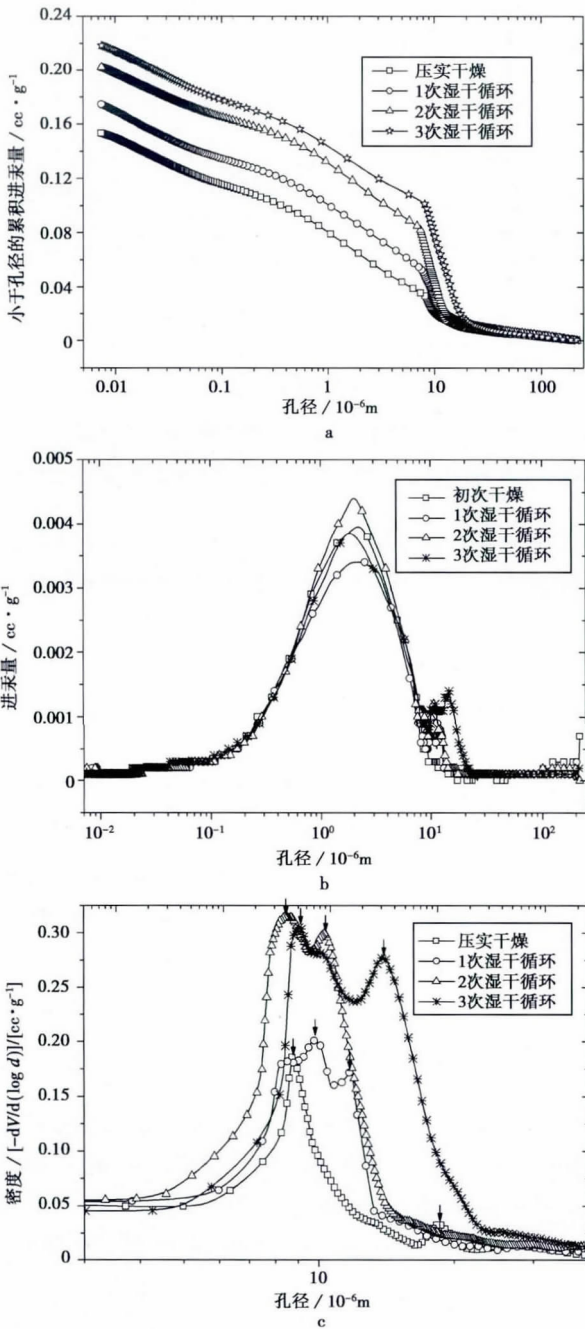


图 8 不同干燥作用下开裂黏土的压汞曲线  
 Fig. 8 Mercury intrusion curves of cracking clay under different drying effects

a. 累积进汞量随孔径的变化; b. 进汞量随孔径的变化;  
 c. 孔隙的孔径分布密度

段,中间曲线段(孔径约  $10\mu\text{m}$ ) 陡直,斜率大;前后两段曲线平缓,斜率小(图 8a);(4) 孔径分布密度曲线峰集中在  $10\mu\text{m}$  附近,且随着湿干循环次数的增加,峰值增加说明微小孔隙向大孔隙的转化速率增大(图 8c)。此外从表 3 可以看出,颗粒内孔隙、颗粒间孔隙和团粒间孔隙却随着湿干循环次数的增

加而减小。说明湿干循环作用主要促进土体团粒内裂缝发育,失水干缩致使颗粒内孔隙、颗粒间孔隙和团粒间孔隙相对减小,团粒内孔隙对整个土体孔隙率的贡献最大。究其原因,可能是湿干循环作用引起了土颗粒间黏结作用的减弱,断开的黏结键较难愈合,使小孔隙发育为中孔隙。

2.3 SEM 试验结果分析

从宏观开裂和压汞试验知,团粒内孔隙对黏土孔隙的贡献最大,故扫描电镜选用高倍率图片观测颗粒和孔隙的变化特征,图 9 为不同干燥作用下开裂黏土的 SEM 图片及二值化图像( $\times 2000$ )。

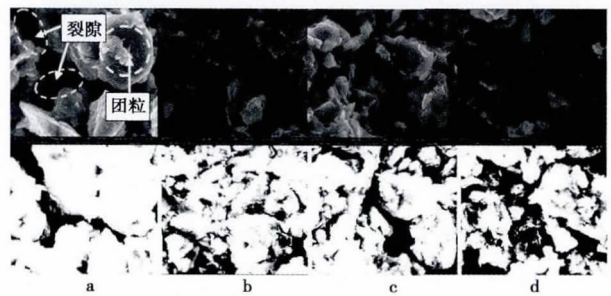


图 9 不同干燥作用下开裂黏土的 SEM 图片及二值化图像( $\times 2000$ ) (黑色代表裂隙)

Fig. 9 SEM images and binary images of cracking clay under the different drying conditions( $\times 2000$ ) (black represents fissures)  
 a. 初始干燥; b. 1 次湿干循环; c. 2 次湿干循环; d. 3 次湿干循环

从图 9 可以看出,初始干燥的压实黏土,土体内团粒相对比较完整,在 SEM 图片(a) 中是明显的大团粒,而经湿干循环作用后,大团粒明显减小,逐渐转化为较小的松散颗粒,孔隙明显发育,SEM 图片逐渐变暗。初始干燥的团粒棱边较为圆滑,经湿干循环作用,颗粒棱边变得凸出,凸凹程度增大。

为定量分析开裂黏土的微观结构,借助计算机图像处理软件 Image-Pro Plus 6.0 先对 SEM 图片的对比度、灰度平滑进行增强校准处理,后进行二值化处理将图像中颗粒和孔隙等分离<sup>[19]</sup>,得开裂黏土 SEM 二值化图像( $1023\text{ 像素}\times 884\text{ 像素}$ ),黑色表示黏土裂隙。为定量分析,二值化图像的裂隙率用裂隙的累计面积(像素<sup>2</sup>)与图像总面积(像素<sup>2</sup>)之比来表示,经计算分别为 12.65%、23.03%、26.66% 和 37.24%,与宏观试验的开裂因子和压汞分析的孔隙率变化规律一致但数值存有差异,鉴于土体材料的非均匀性和试验分析的误差,所存差别是合理的,故将微观试验用于土体开裂的研究中是可行的。

表3 开裂黏土压汞试验的孔径及孔隙率统计结果

Table 3 The pore size and porosity statistics of cracking clay by mercury test

项目	结 果						
	中值孔径/ $\mu\text{m}$	平均孔径/ $\mu\text{m}$	孔隙率/%	颗粒内孔隙/%	颗粒间孔隙/%	团粒内孔隙/%	团粒间孔隙/%
初始干燥	1.229	0.07667	21.05	5.93	50.68	39.74	3.65
1次湿干循环	1.880	0.07846	27.20	5.56	43.47	48.00	2.98
2次湿干循环	3.620	0.09892	31.63	5.00	37.14	55.29	2.57
3次湿干循环	5.774	0.1034	41.81	4.39	35.71	58.02	1.87

### 3 结 论

通过湿干循环作用下压实黏土的开裂试验、压汞试验和扫描电镜试验的研究,得出以下结论:

(1) 湿干循环作用显著影响了压实黏土的开裂,开裂强度因子随含水率减小而增大并明显大于湿干循环前,增湿作用使裂缝出现愈合,开裂因子减小;

(2) 随湿干循环次数的增加,黏土孔隙的总体积、中间孔径、平均孔径、平均孔隙率和团粒内孔隙均在增加,而黏土的颗粒内孔隙、颗粒间孔隙和团粒间孔隙却在减小;

(3) 用压汞法和扫描电镜法分析解释土体开裂是可行的,所得的微观孔隙特征与宏观开裂规律基本相符。

### 参 考 文 献

- [1] Morris P H, Graham J, Williams D J. Cracking in drying soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**(1): 263~277.
- [2] Bouazza A, et al. Analytical modelling of gas leakage rate through a geosynthetic clay liner-geomembrane composite liner due to a circular defect in the geomembrane [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, **26**(2): 122~129.
- [3] Osinubi K J, Nwaiwu C M O. Desiccation-induced shrinkage in compacted lateritic soils [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, **26**(5): 603~611.
- [4] 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.
- [5] Rayhani M H T, Yanful E K, Fagher 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.
- [6] Yesiller N, Miller C J, Inci G, et al. Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils [J]. Engineering Geology, 2000, **57**(1-2): 105~121.
- [7] 刘松玉, 季鹏, 方磊. 击实膨胀土的循环膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(1): 10~13.  
Liu Songyu, Ji Peng, Fang Lei. Approach to cyclic swelling behavior of compacted expansive clays [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(1): 10~13.
- [8] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(12): 3797~3802.  
Lü Haibo, Zeng Zhaotian, Zhao Yanlin, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(12): 3797~3802.
- [9] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 44~50.  
Xu Bin, Yin Zongze, Liu Shuli. Experimental study of factors influencing expansive soil strength [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 44~50.
- [10] Mitchell J K. Fundamentals of soil behavior [M]. New York: Wiley, 1993.
- [11] Alonso E E, Romero E, Hoffmann C, et al. Expansive bentonite-sand mixtures in cyclic controlled-suction drying and wetting [J]. Engineering Geology, 2005, **81**(3): 213~226.
- [12] Nowamooz H, Mrad M, Abdalch A, et al. Experimental and numerical studies of the hydromechanical behaviour of a natural unsaturated swelling soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**(4): 393~410.
- [13] Tang C S, et al. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles [J]. Geoderma, 2011, **166**(1): 111~118.
- [14] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 膨胀土干湿循环过程孔径分布试验研究及其应用[J]. 岩土力学, 2013, **34**(2): 322~328.  
Zeng Zhaotian, Lü Haibo, Zhao Yanlin, et al. Study of pore size distribution of expansive soil during wetting-drying cycle and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(2): 322~328.
- [15] 叶为民, 万敏, 陈宝, 等. 干湿循环条件下高压实膨润土的微观结构特征[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(8): 1173~1177.  
Ye Weimin, Wan Min, Chen Bao, et al. Micro-structural behaviors of densely compacted GMZ01 bentonite under drying/wetting cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(8): 1173~1177.
- [16] Washburn E W. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1921, **7**(4): 115~116.
- [17] Shear D L, Olsen H W, Nelson K R. Effects of desiccation on the hydraulic conductivity versus void ratio relationship for natural clay [R]. Transportation Research Record, NRC, National Academy Press, 1992, **1369**: 130~135.
- [18] 孔令荣, 黄宏伟, 张冬梅, 等. 不同固结压力下饱和和软黏土孔隙分布试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, **3**(6): 1036~1040.  
Kong Lingwei, Huang Hongwei, Zhang Dongmei, et al. Experiment study on relationship between pore distribution and different stress levels due to consolidation of soft clays [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, **3**(6): 1036~1040.
- [19] 洪宝宁, 刘鑫. 土体微细结构理论与试验 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
Hong Baoning, Liu Xin. Theory and test of soil microstructure [M]. Beijing: Science Press, 2010.