

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.03.011

# 干湿循环对填埋场压实黏土盖层 渗透系数影响研究

万 勇<sup>1,2</sup>, 薛 强<sup>1,2</sup>, 赵立业<sup>1</sup>, 杜延军<sup>3</sup>, 刘 磊<sup>1</sup>

(1. 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, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所  
湖北省固体废物安全处置与生态高值化利用工程技术研究中心, 湖北 武汉 430071; 3. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 针对干湿循环作用下填埋场封场覆盖系统压实黏土防渗失效等问题, 系统开展了干湿循环作用下(室内模拟填埋场气候环境)压实黏土渗透特性及微观结构特征试验研究, 探讨了干湿循环次数、压实度、试样尺寸对压实黏土渗透系数影响并从微观层次揭示其防渗失效内在本质。研究表明: 干湿循环前, 相同压实度的大、小两种尺寸渗透试样所测渗透系数基本相同, 经 3 次干湿循环后, 不同尺寸、不同压实度黏土渗透系数增加量却存在明显差异。干湿循环作用下, 小尺寸高、低两压实黏土试样均只收缩不开裂, 并且高压实黏土微观结构损伤大于低压缩黏土, 其渗透系数的增加量也大于小尺寸低压实黏土。而大尺寸试样裂隙发育与现场压实黏土裂隙发育相似, 高压实黏土内部裂隙体积小于低压实黏土, 其渗透系数的增加量也小于低压实黏土。同时, 大尺寸试样内部大量未闭合宏观裂隙致使其渗透系数增加量大于同等压实度条件下小尺寸试样渗透系数增加量。室内小尺寸试样无法体现干湿循环作用下压实黏土层内部干缩裂隙对其渗透性能的影响, 因此, 其渗透试验结果不宜作为评价压实黏土长期防渗性能的评价指标。

**关键词:** 填埋场; 压实黏土层; 干湿循环; 防渗失效; 微观结构; 尺寸效应

**中图分类号:** TU 442

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2015) 03 - 679 - 09

## Effects of wetting-drying cycles on permeability of compacted clay cover at landfill site

WAN Yong<sup>1,2</sup>, XUE Qiang<sup>1,2</sup>, ZHAO Li-ye<sup>1</sup>, DU Yan-jun<sup>3</sup>, LIU Lei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Safety Treatment and Ecological High-value of MSW, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** This paper studies the anti-seepage failure of compacted clay layer (CCL) during wetting-drying cycles in a landfills cover system. The permeability and microstructure tests are conducted. The effects of wetting-drying cycles, degree of compaction and specimen size on permeability coefficient of CCL are discussed. The essence of anti-seepage failure is revealed at microscopic level. The research results show that the permeability coefficients of two size specimens are the same before wetting-drying cycles, but the increments of permeability coefficient of CCL with different degrees of compaction and specimen sizes are different after three times of wetting-drying cycles. The high-compacted and low-compacted small-size specimens both show shrinkage but no crack during wetting-drying cycles. For small-size specimens, the microscopic structural damage and the increment of permeability coefficient of high-compacted clay are larger than those of low-compacted clay. Unclosed cracks in large-size specimens result in larger increment of permeability coefficient than those in small-size specimens with the same degree of compaction. The small-size specimens can not reflect the influence of shrinkage cracks on the permeability of CCL. Therefore the permeability results of small-size specimens are not suitable for evaluating long-term seepage capacity of CCL.

**Keywords:** landfill; compacted clay layer; wetting-drying cycles; failure of anti-seepage; microstructure; size effect

收稿日期: 2014-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(No.51279199); 中国科学院学科交叉与合作创新团队项目(No.Y426011C01)

第一作者简介: 万勇, 男, 1985 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事生态岩土力学与工程方面的研究。E-mail: qhdxy2008@163.com

通信作者: 薛强, 男, 1975 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体废物安全处置与填埋场灾变机制方面的研究。E-mail: qiangx@whrsm.ac.cn

## 1 引言

为了防止填埋场中的雨水下渗和有害气体挥发对地下水以及大气造成污染,垃圾填埋场填满以后均需设置封场覆盖系统进行环境隔离<sup>[1]</sup>。我国《生活垃圾卫生填埋技术规程》<sup>[2]</sup>推荐采用黏土覆盖结构作为封场覆盖系统。但因覆盖系统直接与大气接触,在大气干湿循环影响下,黏土层干缩裂隙发育明显,渗透系数持续增大。加之生活垃圾降解所释放大量的热能使得填埋场处于高温负荷状态<sup>[3]</sup>,进一步加速了压实黏土内部水分的蒸发,促进了干湿循环进程。干湿循环作用下填埋场压实黏土封场覆盖系统的长期稳定性受到严峻考验<sup>[4]</sup>。

针对干湿循环作用下的岩土体结构损伤而引发的诸多工程问题,国内外学者开展了一系列研究。Omid等<sup>[5]</sup>比较了干湿循环作用下,直径为10 cm的压实黏土柔性壁渗透试验与现场双环渗透试验,结果显示室内渗透试验严重低估了干湿循环作用下压实黏土渗透系数的增加幅度。Drumm等<sup>[6]</sup>对裂隙土不同区域渗透系数进行了探讨,证实了干湿循环作用下压实黏土结构的非均匀损伤特性。Rayhani等<sup>[7]</sup>开展了干湿循环作用下压实黏土开裂特性研究,并探讨了干湿循环作用对不同类型土壤渗透系数的影响规律。此后, Rayhani等<sup>[8]</sup>又开展了大尺寸裂隙土渗透试验研究,并比较了试样尺寸对裂隙土渗透系数的影响。何俊等<sup>[9]</sup>对干湿循环作用下武汉地区压实黏土渗透系数进行了研究,认为湿化过程中干燥裂隙不能完全愈合及微裂隙的形成可能是导致渗透系数增大的主要原因。综上所述,干湿循环作用下,压实黏土结构发生了非均匀损伤,宏观与微观裂隙的存在导致其渗透系数剧增,同时也导致渗透系数具有明显的尺寸效应。研究表明,提高压实度可降低宏观裂隙的发育<sup>[10]</sup>,同时压实度也是填埋场防渗结构设计的一个主控因素,但有关干湿循环作用下不同压实黏土渗透系数的对比研究,特别是考虑压实黏土渗透系数尺寸效应的研究还少见报道。

为探讨干湿循环作用下岩土介质结构损伤内在机制,国内外众多学者对干湿循环作用下岩土介质微观结构进行了探讨。姚志华等<sup>[11]</sup>通过CT-三轴浸水试验,发现无约束条件下的膨胀土试样增湿和干燥都能引发裂隙的产生和闭合。吕海波等<sup>[12]</sup>开展了南宁地区原状膨胀土经历干湿循环后的强度试验,并通过孔径分布试验对干湿循环作用下膨胀土强度衰减特性进行了微观解释。曾召田等<sup>[13]</sup>探讨了不同干湿循环次数下膨胀土孔径分布特征,并将其应用于土-水特征曲线的预测中。Hosseini等<sup>[14-15]</sup>采用吸力控制方法对不同初始密度下膨胀土与砂混合物在

干湿循环过程中的吸力循环进行了研究,并结合压汞与氮吸附试验方法比较了不同干湿循环次数下相同吸力时刻的孔径分布特征。叶为民等<sup>[16]</sup>采用压汞试验方法研究了在不同温度、不同侧限约束条件下的高压实高庙子膨润土微观结构在干湿循环作用下的变化规律。综上所述,对干湿循环作用下压实黏土微观结构的研究主要集中在膨胀土方面,其研究成果也多应用于对压实黏土结构土-水特征曲线的研究,对干湿循环作用下压实黏土渗透系数与微观结构之间的关系的研究还少见报道。

本文以填埋场压实黏土封场覆盖层为工程背景,借助环境土柔性壁渗透仪和压汞仪(MIP)、扫描电镜(SEM)等土壤微观结构观测设备,通过室内模拟填埋场内部高温及外部干湿交替的气候环境,系统开展了压实黏土在反复干湿循环作用下渗透特性和微观结构演化规律试验研究,从微观层次揭示了干湿循环作用对不用初始压实度与不同尺寸压实黏土试样渗透系数影响差异的内在本质。本研究成果可为填埋场压实黏土封场覆盖层优化设计与安全评价提供理论依据,同时可为其他工程压实黏土防渗结构提供理论参考和试验参数。

## 2 材料和方法

### 2.1 试验材料

本次试验土壤取于武汉市洪山区,为武汉市地铁2号线(在建)隧道开挖土壤,天然干密度为 $1.55 \text{ g/cm}^3$ ,天然含水率为20.3%,其他物理参数如表1所示。由表可知,该土壤属于低液限粉质黏土。该类土壤在武汉地区分布广泛,且常用于该地区填埋场封场覆盖防渗层。将土壤风干过2 mm筛,进行轻型击实试验,得到最优含水率为19.5%,最大干密度为 $1.74 \text{ g/cm}^3$ 。并通过X衍射仪测得土壤矿物成分如表2所示。

表1 土壤物理力学性质

Table 1 Physico-mechanical properties of soil

土粒相对 密度 $G_s$	塑限含 水率/%	液限含 水率/%	质量百分比/%		
			砂粒(2 000 ~ 75 $\mu\text{m}$ )	粉粒(75 ~ 2 $\mu\text{m}$ )	黏土(<2 $\mu\text{m}$ )
2.72	21.8	41.6	3.20	77.1	19.7

表2 土壤矿物成分

Table 2 Mineral compositions of soil

矿物名称	质量百分比/%
石英	64.05
伊利石	6.63
高温型钠长石	21.12
斜长石	8.20

### 2.2 试验方法

#### 2.2.1 试验仪器

渗透试验采用美国GEOEQUIP生产的PN3230M环境土柔性壁渗透测试系统。微观结构特征试验采

用美国QUANTACHROME公司生产的Poremaster33型压汞仪和Quanta250型扫描电镜。

### 2.2.2 试验工况

根据《生活垃圾卫生填埋场封场技术规程》<sup>[2]</sup>,当采用压实黏土作封场防渗层时,其压实度不得小于90%。据此,本文渗透试验选择3种压实度(90%、94%、98%分别命名为C90、C94和C98)作为本次渗透试验试样的初始压实度,对应干密度分别为1.57、1.64、1.71 g/cm<sup>3</sup>。根据已有研究成果<sup>[7]</sup>,黏土经过3次干湿循环后土中孔隙结构趋于稳定,本文将最高干湿循环次数设置为3次(实际为4种干湿循环状态0~3次,分别命名为DW0、DW1、DW2和DW3)。为探讨试验试样尺寸对渗透系数的影响,结合试验仪器试样尺寸,本文选择直径为30、5 cm两种尺寸作为本次试验的试样直径。考虑到边界效应,参考文献[7-8]中不同尺寸渗透试验试样高度的选取标准,本次试验大小尺寸试样高度分别为10、5 cm,根据压实度与干湿循环次数以及试样尺寸的各种搭配,共计24种工况。

根据渗透试验工况,选取初始压实度为90%和98%的压实黏土在干湿循环前和3次干湿循环后做微观试验。2种压实度、2种干湿循环状态(0和3次),共计4种工况。

### 2.2.3 试样制作方法

#### (1) 渗透试样制作方法

本次试验采用压实法制样。将土壤风干碾碎过2 mm筛,加水配置成含水率为19.5%(最优含水率)的土壤。根据预设压实度计算称量试样所需土壤质量,在制样筒中分4层压实成型(试样制作过程如图1所示)。



图1 试样制作与渗透试验过程  
Fig.1 Process of specimen preparation and permeability testing

### (2) 微观试样制作方法

微观试验试样由干湿循环前和3次干湿循环后小尺寸渗透试验试样切割制作。渗透试验结束后将试样等分成上、中、下3个柱体(在试样侧壁沿径向浅层切割一周然后掰分),然后放入液氮中冷冻,并迅速放入真空冷冻干燥器中干燥48 h。冷冻干燥后,在中间柱体中心处切割约直径9 mm×高10 mm的柱体用于MIP试验,在上或者下柱体中心处切割边长约10 mm的立方体(保留原掰分面)用于SEM试验。

### 2.2.4 试验过程

为使室内试验更接近填埋场封场覆盖层实际工程状态,根据文献[3]的研究(填埋场内部温度达70℃,封顶处高达50℃)。本文将试样放在特制饱和器(饱和器内径为30 cm,高为12 cm)中浸泡饱和24 h,然后放入环境土柔性壁渗透仪中反压饱和12 h(渗透试样安装过程如图1所示),然后在围压50 kPa、渗透压20 kPa条件下渗透12 h,并记录试验数据。渗透试验完成后,将试样取出,放入50℃烘箱中48 h,每隔一定时间对试样进行拍照,观察干缩过程中压实黏土开裂特性,反复上述步骤,直到预设干湿循环次数。

## 3 结果与分析

### 3.1 干湿循环作用下压实黏土层渗透试验结果

#### 3.1.1 干湿循环作用下压实黏土层开裂特性

图2为干湿循环过程中大尺寸试样收缩开裂过程形态特征,由图可知,在试样脱水过程中,大尺寸试样中裂隙从试样周边逐渐向中心扩展,扩展一定距离后分叉扩展。裂隙在垂直方向穿透整个试样。

图3为土壤完全脱水后,小尺寸(直径为5 cm)、大尺寸(直径为30 cm)以及试验取土附件土壤表层开裂形态特征。土壤完全脱湿后,小尺寸试样只发生体积收缩,而无明显裂纹出现。其原因主要是试样尺寸较小时,试样内部土壤均匀性较好,土壤均匀脱水,无拉裂区出现。并且,试样较小时,土壤内部脱水时间减少,难以形成较大的含水率梯度,加之试样干缩过程中周边无位移限制条件,从而导致小尺寸试样在干收过程中未出现干缩裂缝。土壤完全脱湿后,大尺寸试样与取土附件表层土开裂形态基本相同,但试样周边裂隙单元面积明显大于中间两裂隙单元的面积。说明大尺寸试样边界依然影响着试样开裂形态。大尺寸试样虽然大于该类土壤的最小开裂尺寸,但却小于该类土壤开裂后的最小特征单元。

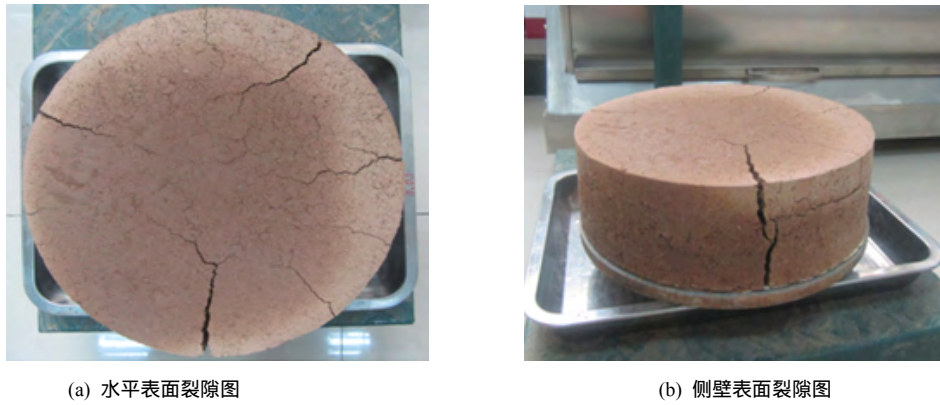


图 2 脱湿过程中大尺寸渗透试样开裂形态  
Fig.2 Crack characteristics of large-size specimen during drying process

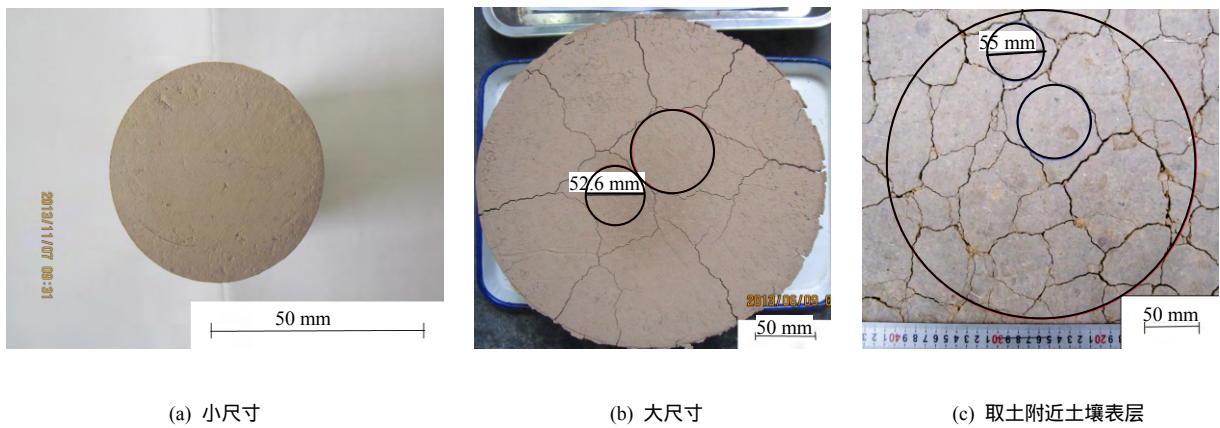


图 3 土壤脱水后开裂形态  
Fig.3 Crack characteristics of CCL after dewatering

3.1.2 干湿循环作用下压实黏土层渗透特性

根据上述试验方案，测得不同初始压实度和干湿循环次数下大尺寸、小尺寸压实黏土渗透系数变化情况如图 4 所示。

为分析干湿循环前、后压实黏土渗透系数与孔隙结构的变化，定义某一参数  $X$  在 3 次干湿循环后的变化量为  $\Delta_X$  ( $\Delta_X > 0$  为增加量,  $\Delta_X < 0$  为减少量)

与变化比例  $\delta_X$  计算式分别为

$$\Delta_X = X_3 - X_0 \tag{1}$$

$$\delta_X = \frac{X_3 - X_0}{X_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中： $X_0$ 、 $X_3$  分别为该参数  $X$  在干湿循环前和 3 次干湿循环后的值。

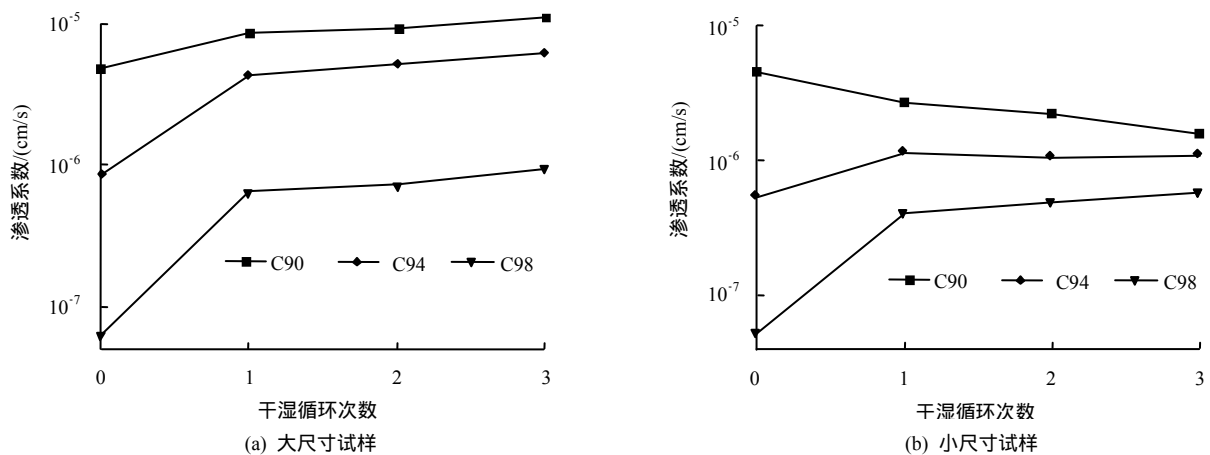


图 4 干湿循环作用下大、小尺寸压实黏土渗透系数变化规律  
Fig.4 Variations of permeability coefficient for compacted clay during wetting-drying cycles

根据式 (1) (2) 计算得到 3 次干湿循环后压实黏土渗透系数  $K$  的变化量  $\Delta K$  与变化比例  $\delta_K$  如表 3 所示。

表 3 3 次干湿循环后压实黏土渗透系数的增加量及其比例  
Table 3 Increments and increment rates of permeability coefficient for compacted clay after three times of wetting-drying cycles

工况类型	大尺寸		小尺寸	
	$\Delta K/(\text{cm/s})$	$\delta_K/\%$	$\Delta K/(\text{cm/s})$	$\delta_K/\%$
C90	$6.20 \times 10^{-6}$	129	$-2.92 \times 10^{-6}$	-62
C94	$5.29 \times 10^{-6}$	632	$5.47 \times 10^{-7}$	103
C98	$8.87 \times 10^{-7}$	1 417	$5.23 \times 10^{-7}$	995

由图 4(a)与表 3 可知, 干湿循环前, 压实黏土初始渗透系数随着压实度的增加逐渐减小, 3 种压实度黏土中, 只有 C98 的压实黏土能满足填埋场封场覆盖系统防渗要求《生活垃圾卫生填埋场封场技术规程》<sup>[2]</sup>中规定压实黏土渗透系数需小于  $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。随着干湿循环次数的增加, 3 种压实度大尺寸黏土层渗透系数均成上升趋势。经 3 次干湿循环后的渗透系数的增加量随着初始压实度的增加逐渐减小, 但其增加比例随着初始压实度的增加逐渐增大。干湿循环作用下, 压实黏土渗透系数的增加主要发生在第 1 次干湿循环后, 经 3 次干湿循环后渗透系数基本稳定, 且低压实黏土 C90 稳定时刻渗透系数仍明显高于高压实黏土 C98。

由图 4(b)和表 3 可知, 干湿循环前, 相同压实度黏土在不同试样尺寸条件下测得的渗透系数基本相同, 但随着干湿循环次数的增加, 相同工况条件下 (压实度和干湿循环次数相同) 压实黏土渗透系数却发生明显差别。具体表现在: 干湿循环作用下, 大、小两尺寸高压实黏土渗透系数变化规律基本相同, 但 3 次干湿循环后小尺寸试样渗透系数的增加量略小于大尺寸渗透试样; 大、小两尺寸中压实黏土渗透系数的变化趋势基本相同, 但 3 次干湿循环后小尺寸渗透系数的增加量明显低于大尺寸试样; 干湿循环作用下, 小尺寸低压实黏土渗透系数的变化规律出现反常现象, 经 3 次干湿循环后, 小尺寸试样渗透系数反而减小。

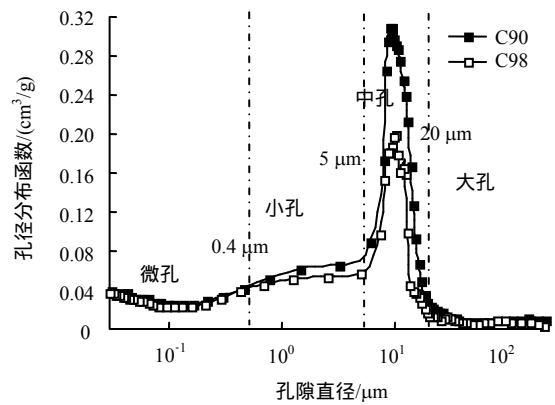
### 3.2 干湿循环前、后压实黏土微观结构特征试验结果

#### 3.2.1 干湿循环作用下压实黏土孔径分布特征

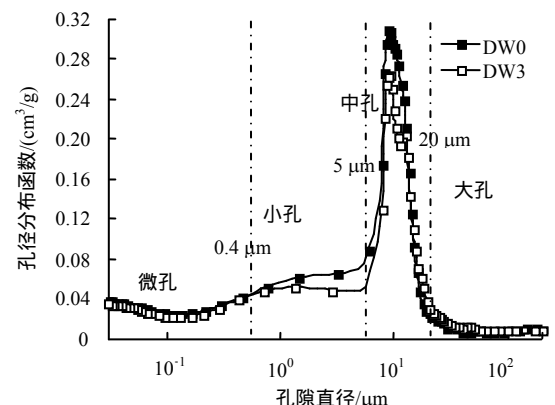
图 5 为干湿循环前、后压实黏土孔径分布函数, 由图可知, 该压实黏土孔径分布主要集中在  $0.4 \sim 20 \mu\text{m}$  的孔径范围内, 同时该区域也是压实度和干湿循环作用的主要影响区域。根据文献<sup>[17]</sup>中孔径分类方法, 结合本试验压实黏土孔径分布特点, 将

压实黏土孔径分为 5 种类型: 微裂隙 ( $>100 \mu\text{m}$ ) 大孔 ( $>20 \mu\text{m}$ ) 中孔 ( $5 \sim 20 \mu\text{m}$ ) 小孔 ( $0.4 \sim 5 \mu\text{m}$ ) 微孔 ( $<0.4 \mu\text{m}$ )。其中: 大孔主要为团聚体间的孔隙, 中孔主要为团聚体内的孔隙, 小孔主要为颗粒间的孔隙, 微孔主要为颗粒内的孔隙。

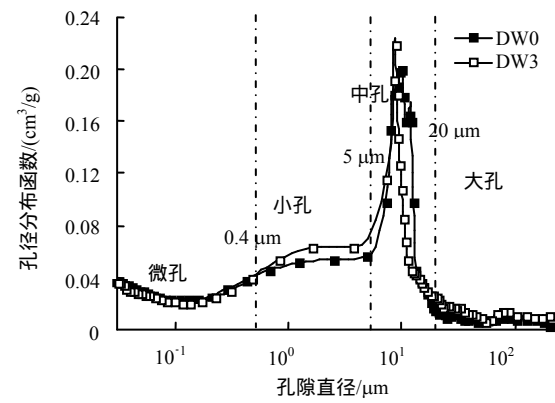
根据上述孔径分类方法, 得到干湿循环前、后压实黏土各类孔隙体积和孔隙体积变化比例 (如图 6 所示)。由图 6 可知, 随着压实度的提高 (C90→C98), 各类孔隙体积 (除微孔外) 均减小, 各类孔隙体积



(a) DWD 状态



(b) C90 压实黏土



(c) C98 压实黏土

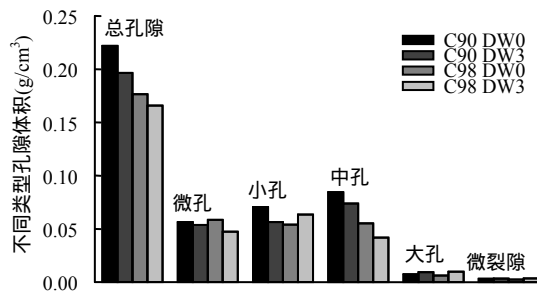
图 5 干湿循环作用下压实黏土孔径分布函数

Fig.5 Pore size distribution functions of compacted clay during wetting-drying cycles

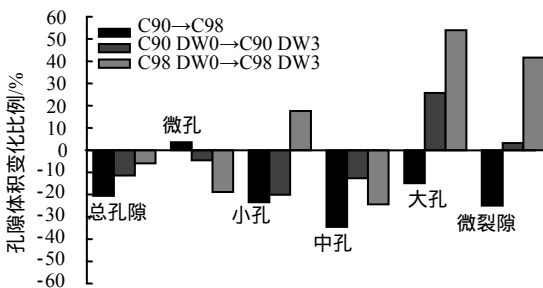
的减少量差别较大,但减少比例基本一致。微孔变化较少,进一步证明了颗粒间孔隙的不可压实性。随着干湿循环次数的增加(DW0→DW3),压实黏土发生不可逆的体积收缩,经3次干湿循环后,土壤总孔隙体积减少比例高达11.5%(C90)和6.0%(C98),同时也说明提高压实度可减少土壤体积的不可逆收缩,抑制压实黏土宏观裂隙的发展。并且大孔和微裂隙的体积增加,大孔增加比例分别为25.7%(C90)和53.9%(C98),微裂隙增加比例分别为3.1%(C90)和41.7%(C98),说明干湿循环作用下高压实黏土微裂隙发育明显高于低压实黏土。

### 3.2.2 干湿循环作用下压实黏土孔隙结构特性

为直接观察压实度和干湿循环作用对压实黏土微观结构的影响,本文对低压实(C90)和高压实(C98)黏土在干湿循环前与3次干湿循环后的试样进行了SEM试验研究,试验结果如图7(a)所示(扫描倍数为300)。从图可知,干湿循环前,低压实黏土(C90)以小团聚体结构为主,团聚体间孔隙较为分散,随着压实度增加,小团聚体结构逐渐形成大团聚体结构,团体间孔隙逐渐集中。经过3次干湿循环后,高、低两种压实度黏土均以大团聚体为主,并且团聚体更密实。



(a) 不同类型孔隙体积



(b) 孔隙体积变化比例

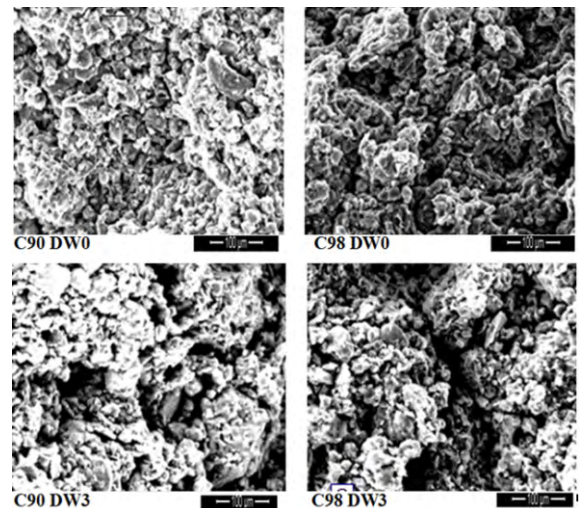
图6 干湿循环前、后压实黏土各类孔隙体积与相对变化量  
Fig.6 Pore volume and variation rate of various pores in compacted clay before and after wetting-drying cycles

为观察干湿循环前、后孔隙面积与连通性的变化,本文对SEM结果进行二值化处理(如图7(b)所示)并统计了各图片中不同类型孔隙的面积与个数

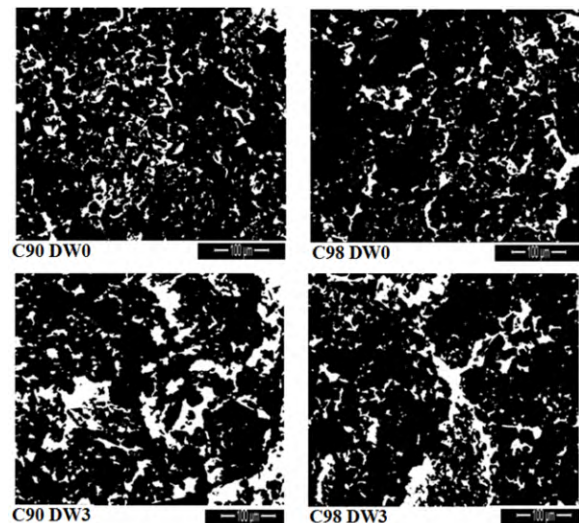
(如表4所示),二值化处理与孔隙结构参数的统计方法参考文献[18]。由图7(b)和表4可知,由SEM统计的孔隙面积变化趋势与MIP统计结果基本一致。经3次干湿循环后,高压实黏土中孔隙连通性明显增加,并伴有微裂隙出现。而经3次干湿循环后,低压实黏土没有微裂隙出现,虽然大孔面积增加,但孔隙多成孤立状,连通性并未增加,其原因可能是起到连通大孔作用的中孔面积与数量急剧减少所致。

表4 干湿循环前、后高低压实黏土孔隙面积与个数统计  
Table 4 Area and number of pore in high-compacted and low-compacted clays before and after wetting-drying cycles

工况类型	中孔		大孔		微裂隙	
	面积/ $\mu\text{m}^2$	孔隙数	面积/ $\mu\text{m}^2$	孔隙数	面积/ $\mu\text{m}^2$	孔隙数
C90DW0	15 585	212	7 845	27	0	0
C90DW3	10 179	176	17 179	24	0	0
C98DW0	14 787	201	6 436	23	0	0
C98DW3	12 052	179	15 273	15	14 101	1



(a) SEM 原始图片



(b) SEM 二值化图片

图7 干湿循环前、后压实黏土扫描电镜试验结果  
Fig.7 SEM results of compacted clay before and after wetting-drying cycles

### 3.3 干湿循环作用对压实黏土渗透系数影响分析

#### 3.3.1 初始压实度对渗透系数影响分析

经3次干湿循环后,小尺寸低压实黏土渗透系数明显降低,在Phifer等<sup>[20]</sup>的研究成果中亦有类似现象(干湿循环后压实黏土渗透系数降低)出现。其给出的原因是:干湿循环作用下小尺寸渗透试样发生不可恢复的体积收缩但未开裂所致。已有研究表明<sup>[20]</sup>,压实黏土渗透系数除其矿物成分外,主要受大孔和裂隙影响。由干湿循环前、后低压实黏土微观结构试验发现,经3次干湿循环后,小尺寸渗透试样无宏观裂隙出现,但试样体积收缩严重(3次干湿循环后低压实黏土总孔隙减少比例为11.4%)。虽然大孔体积略有增加,但连通大孔作用的中孔和小孔体积大幅度减少导致大孔之间更加孤立,连通性明显降低。由此导致多次干湿循环后,小尺寸低压实黏土渗透系数减小。

而经3次干湿循环后,小尺寸高压实黏土渗透系数增大,干湿循环作用对压实黏土渗透系数的作用效果与渗透试样初始压实度有关。由干湿循环前、后高压实黏土微观结构试验发现,经3次干湿循环后,小尺寸高压实黏土渗透试样体积亦发生不可逆的收缩,但高压实黏土试样体积收缩相对低压实黏土却小很多(高压实黏土总孔隙减少比例为6.0%);同时,尽管高压实黏土总孔体积减小,但流体的主要渗透通道(大孔)的体积却明显增大(大孔体积的相对增加量为41.6%),而且大孔之间的连通性明显增加;并且,3次干湿循环后,高压实黏土出现微裂隙。上述原因导致干湿循环后小尺寸高压实黏土渗透系数明显增加。

由以上分析可知,干湿循环对不同压实度黏土小尺寸试样渗透系数的影响明显不同,其原因主要是干湿循环作用下不同初始压实度黏土结构损伤存在差异所致。已有研究表明:干湿循环过程中,土壤内部水分的非均匀变化,导致土壤内部非均匀变形是致使土壤结构破坏的根本原因<sup>[21]</sup>。高压实黏土初始渗透系数低,脱湿过程中内部水分难于散发,但一旦外界环境(如持续的高温干燥环境)致使压实黏土表层水分持续蒸发而达到某一水平,高压实黏土内部在脱湿过程中将形成更大的含水率梯度(与低压实黏土相比)。因此,干湿循环作用下高压实黏土微观结构的损伤大于低压实黏土。最终导致干湿循环作用下高压实黏土渗透系数的增加大于低压实黏土。

#### 3.3.2 试样尺寸对压实黏土渗透影响分析

干湿循环前,压实黏土内部结构均匀,无明显

微观与宏观裂隙存在,其渗透系数主要由土壤孔径分布和孔隙连通性控制。相同压实度条件下,大、小两尺寸渗透试样渗透系数差别不大,说明试样尺寸对压实黏土内部初始孔隙结构影响不明显。

经3次干湿循环后,相同初始压实度大、小两压实黏土渗透系数发生不同的变化趋势。对大尺寸渗透试样而言,因试样尺寸较大,试样脱湿过程中内部水分的非均匀性大于小尺寸试样,因此,在脱湿过程中大尺寸试样出现大量宏观裂隙(如图2所示)。完全脱湿试样再次饱和后,由于裂隙单元体(如图3中多边形裂隙单元)体积收缩不能完全恢复,试样饱和后,大尺寸试样在脱湿过程中形成的宏观裂隙不能完全闭合。由于干湿循环作用下大尺寸试样内部存在大量未闭合和宏观裂隙,导致大尺寸试样渗透过程中除孔径相对较小的管道流外,还可能存在裂隙流等优势流。因此,干湿循环作用后,相同初始压实度大尺寸试样渗透系数增加量大于同等工况条件下的小尺寸试样渗透系数增加量。

通过比较干湿循环前、后高低两压实黏土总孔隙的变化可知,经3次干湿循环后,高、低两压实黏土的总孔隙体积减少比例为11.4%和6.0%,进一步证实了干湿循环作用后压实黏土孔隙收缩不能完全恢复。同时,由于干湿循环后高压实黏土不可恢复的孔隙体积大大小于低压实黏土,因此,大尺寸高压实黏土试样内部未闭合的宏观裂隙体积小于低压实黏土试样。因此,经3次干湿循环后,高压实大尺寸试样渗透系数的增加量明显低于大尺寸低压实黏土试样。

## 4 结 论

(1) 干湿循环前,相同压实度大、小两种尺寸渗透试样所测渗透系数基本相同,低(C90)、(C94)、高(C98)3种压实度黏土渗透系数分别为 $4.8 \times 10^{-6}$ 、 $8.33 \times 10^{-7}$ 、 $6.259 \times 10^{-8}$  cm/s。经3次干湿循环后,不同尺寸、不同压实度黏土渗透系数增加量却存在明显差异。相同压实度条件下,大尺寸试样渗透系数增加量大于小尺寸试样。相同试样尺寸条件下,小尺寸高压实黏土渗透系数的增加量大于小尺寸低压实黏土,而大尺寸高压实黏土渗透系数的增加量却小于低压实黏土。

(2) 经3次干湿循环后,小尺寸低压实黏土体积发生了不可逆的收缩,土壤总孔隙体积减少比例高达11.5%,由此导致其团聚体间孔隙连通性减弱,渗透系数降低;而小尺寸高压实黏土总孔体积收缩比例小于低压实黏土,并且大孔体积增加比例高达

41.6%，同时伴有微裂隙发育，因此，其 3 次干湿循环后渗透系数大幅度增加。

(3) 干湿循环作用下，小尺寸试样只收缩不开裂，其无法体现干湿循环作用下压实黏土层内部干缩裂隙对其渗透性能的影响，因此，其渗透试验结果不宜作为评价压实黏土长期防渗性能的评价指标。而大尺寸试样裂隙发育与现场压实黏土裂隙发育相似，其内部大量未闭合宏观裂隙致使其渗透系数增加量大于小尺寸试样。提高压实度可明显降低干湿循环作用下未闭合宏观裂隙对渗透系数的影响。

### 参 考 文 献

- [1] 薛强, 赵颖, 刘磊, 等. 垃圾填埋场灾变过程的温度-渗流-应力-化学耦合效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 1970—1988.  
XUE Qiang, ZHAO Ying, LIU Lei, et al. Study of thermo-hydro-mechanical-chemical coupling effect of catastrophe process of landfill[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(10): 1970 - 1988.
- [2] 中华人民共和国建设部. CJJ112—2007 生活垃圾卫生填埋技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [3] KLEIN R, BAUMANN T, KAHAPKA E, et al. Temperature development in a modern municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash landfill with regard to sustainable waste management[J]. **Journal of Hazardous Materials B**, 2001, 83(3): 265 - 280.
- [4] 万勇, 薛强, 陈亿军, 等. 填埋场封场覆盖系统稳定性统一分析模型构建及应用研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1636 - 1644.  
WAN Yong, XUE Qiang, CHEN Yi-Jun, et al. Construction of consistent stability analysis model of landfill cover system and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1636 - 1644.
- [5] OMIDI G H, THOMAS J C, BROWN K W. Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a compacted clay liner[J]. **Water, Air, and Soil Pollution**, 1996, 89(1 - 2): 91 - 103.
- [6] DRUMM E, BOLES D, WILSON G. Desiccation cracks result in preferential flow[J]. **Geotech. News, Vancouver**, 1997, 15(1): 22 - 25.
- [7] RAYHANI M H T, YANFUL E K, FAKHER A. Desiccation induced cracking and its effect on hydraulic conductivity of clayey soils from Iran[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2007, 44(3): 276 - 283.
- [8] RAYHANI M H T, YANFUL E K, FAKHER A. Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils[J]. **Engineering Geology**, 2008, 97(1 - 2): 25 - 31.
- [9] 何俊, 万娟, 王宇. 压实黏土干燥裂隙及渗透性能研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3): 397 - 402.  
HE Jun, WAN Juan, WANG Yu. Desiccation cracks on hydraulic performance of compacted clay liner via laboratory wet-dry cycling tests[J]. **Chinese Journal of Engineering Geology**, 2012, 20(3): 397 - 402.
- [10] BENSON C, BOUTWELL G. Compaction condition and scale depended hydraulic conductivity of compacted clay liners, Constructing and controlling compaction of earth fills[M]. Madison: University of Wisconsin, 2000.
- [11] 姚志华, 陈正汉, 朱元青. 膨胀土在湿干循环和三轴浸水过程中细观结构变化的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 68 - 76.  
YAO Zhi-hua, CHEN Zheng-han, ZHU Yuan-qing. Meso-structural change of remolded expansive soils during wetting-drying cycles and triaxial soaking tests [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(1): 68 - 76.
- [12] 吕海波, 曾召田, 赵艳林. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797 - 3802.  
LÜ Hai-bo, ZENG Zhao-tian, ZHAO Yan-lin. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3797 - 3802.
- [13] 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 Zhao-tian, LÜ Hai-bo, ZHAO Yan-lin, 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.
- [14] HOSSEIN N, FARIMAH M. Hydromechanical behaviour of an expansive bentonite/silt mixture in cyclic suction-controlled drying and wetting tests[J]. **Engineering Geology**, 2008, 101(3 - 4): 154 - 164.
- [15] HOSSEIN N, FARIMAH M. Influence of suction cycles on the soil fabric of compacted swelling soil[J]. **Comptes Rendus Geoscience**, 2010, 342(12): 901 - 910.



- 33(1): 137 - 142.
- [11] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 2 - 8.
- [12] 周科平, 李杰林, 许玉娟, 等. 冻融循环条件下岩石核磁共振特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 731 - 737.
- ZHOU Ke-ping, LI Jie-lin, XU Yu-juan, et al. Experimental study of NMR characteristics in rock under freezing and thawing cycles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(4): 731 - 737.
- [13] 张元中, 肖立志. 单轴载荷下岩石核磁共振特征的试验研究[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(6): 731 - 734, 755.
- ZHANG Yuan-zhong, XIAO Li-zhi. Experimental study of the NMR characteristics in rock under uniaxial load[J]. **Nuclear Electronics & Detection Technology**, 2006, 26(6): 731 - 734, 755.
- [14] 朱和玲, 周科平, 张亚民, 等. 基于核磁共振技术的岩体爆破损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1410 - 1416 .
- ZHU He-ling, ZHOU Ke-ping, ZHANG Ya-min, et al. Experimental study of rock damage by blasting based on nuclear magnetic resonance technique[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(7): 1410 - 1416.
- [15] 李杰林. 基于核磁共振技术的寒区岩石冻融损伤机理试验研究[D]. 长沙: 中南大学. 2012: 96 - 100.
- 
- 上接第 686 页**
- [16] 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 Wei-min, 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.
- [17] SHEAR D L, OLSEN H W, NELSON K R. Effects of desiccation on the hydraulic conductivity versus void ratio relationship for a natural clay[M]. Washington D. C.: National Academy Press, 1993.
- [18] 毛灵涛, 薛茹, 安里千. MATLAB 在微观结构 SEM 图像定量分析中的应用[J]. 电子显微学报, 2004, 23(5): 579 - 583.
- MAO Ling-tao, XUE Ru, AN Li-qian. Quantitative analysis of SEM image of microstructure with MATLAB[J]. **Journal of Chinese Electron Microscopy Society**, 2004, 23(5): 579 - 583.
- [19] GARCIA B I, LOVELL C W, ALTSCHAEFFL A G. Pore distribution and permeability of silty clay[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1979, 105(7): 839 - 856.
- [20] PHIFER M, DRUMM E, WILSON G. Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil[M]. [S.l.]: ASTM, 1994.
- [21] 吴珺华, 袁俊平, 卢廷浩. 基于变湿应力概念的膨胀土初始开裂分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1631 - 1636.
- WU Jun-hua, YUAN Jun-ping, LU Ting-hao. Analysis of initial cracking behavior of expansive soil due to moisture change stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1631 - 1636.