

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.10.010

# 干湿循环作用下压实黏土力学特性与微观机制研究

万 勇<sup>1,2</sup>, 薛 强<sup>1,2</sup>, 吴 彦<sup>3</sup>, 赵立业<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 湖北省固体废弃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.中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

**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结构损伤等问题, 系统开展了干湿循环作用下(室内模拟填埋场气候环境)压实黏土力学特性及微观结构特征试验研究, 从微观层次揭示了压实黏土在干湿循环作用下变形特性和强度衰减内在本质。研究表明: 随着干湿循环次数的增加, 压实黏土初始变形段区间割线模量增加, 末段区间割线模量大幅度降低, 变化幅度随初始压实度的增加而增加; 同时, 压实黏土剪切强度呈减小趋势, 但减小幅度随初始压实度和围压的增加而减小。经过 3 次干湿循环后, 压实黏土发生不可逆的体积收缩, 体积收缩比例随压实度的增加而减小, 低压实黏土和高压实黏土的体积收缩 20.5%和 11.5%。同时, 低压实黏土和高压实黏土的大孔体积增加 25.7%和 53.9%, 微裂隙体积增加 3.1%和 41.7%, 增加幅度随初始压实度的增加而增加。压实黏土不可逆的体积收缩致使土体更加密实, 从而导致压实黏土初始切线模量和强度增加。同时, 大孔体积增多和微裂隙的发育, 导致压实黏土剪切强度和末端切线模量降低, 干湿循环对不同压实度黏土力学特性影响是二者的综合表现。

**关 键 词:** 压实黏土; 干湿循环; 力学特性; 孔径分布; 微观机制

**中图分类号:** TU 411

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7598(2015)10-2815-10

## Mechanical properties and micromechanisms of compacted clay during drying-wetting cycles

WAN Yong<sup>1,2</sup>, XUE Qiang<sup>1,2</sup>, WU Yan<sup>3</sup>, ZHAO Li-ye<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 Utilization of MSW, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China)

**Abstract:** To investigate the problems such as the failure of compacted clay liners as the anti-seepage structure in the landfills cover system under the action of drying-wetting cycles, experiments under the simulated climatic environment of landfills have been conducted to determine the mechanical properties of compacted clay and its microstructure characteristics during the drying-wetting cycles and hence to reveals the intrinsic nature of the damage of compacted clay from the micro level. The experimental results show that as the number of drying-wetting cycle increases, all the secant moduli of low-, medium- and high-compacted clays increase at initial stage, while they decrease significantly at later stage, and the magnitude of secant modulus variation increases with the increase of initial compactness. Meanwhile, the shear strengths of above-mentioned three compacted clays decrease, and the magnitude of variation decreases with the increase of initial compactness or confining pressure. After three drying-wetting cycles, the total pore volume of compacted clay shows irreversible shrinkage, resulting in the increase of initial tangent modulus and shear strength. The shrinkage ratio decreases with the increase of compactness, and the shrinkage ratios of low- and high-compacted clays are 20.5% and 11.5%, respectively. The large pore volumes of low- and high-compacted clays increase 25.7% and 53.9% and the microcrack volumes increase 3.1% and 41.7%, respectively, resulting in a decrease in the shear strength and tangent modulus at later stage. The effect of drying-wetting cycles on the mechanical property of compacted clay with different compactness is controlled by two factors, i.e. the decrease of total pore volume and the increase of big-pore and microcracks.

收稿日期: 2015-02-01

基金项目: 国家 973 项目 (No. 2012CB719802); 国家重大水专项课题 (No. 2011ZX07104-002-02); 国家自然科学基金 (No. 51279199)。

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: qhdxyw2008@163.com

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

**Keywords:** compacted clay; drying-wetting cycles; mechanical property; pore size distribution; micromechanism

## 1 引言

为了防止填埋场中的渗滤液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范》<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,强度不断降低。加之生活垃圾降解所释放出的大量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。压实黏土强度的降低,易造成填埋场盖层失稳破坏,致使整个盖层完全失去防渗能力,因此,有必要对干湿循环作用下填埋场压实黏土盖层的强度特性进行研究<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,大量有关干湿循环作用下岩土介质力学特性变化规律的文献陆续被报道。Rayhani等<sup>[5]</sup>开展了干湿循环作用下压实黏土开裂特性,并探讨了土壤液限和试样尺寸对压实黏土层裂隙率的影响。张芳枝等<sup>[6]</sup>对反复干湿循环作用下压实黏土力学特性进行比较,发现非饱和土经过反复干湿循环的应力路径后,其力学特性将产生不可逆转的变化。曹玲等<sup>[7]</sup>通过三轴试验探讨了干湿循环作用下三峡库区滑带饱和原状土剪切强度特性,得出了黏聚力和内摩擦角下降规律。袁俊平等<sup>[8]</sup>对不同裂隙发育程度的非饱和膨胀土进行了三轴剪切试验,建立了饱和度、裂隙度与抗剪强度之间的关系。杨和平等<sup>[9]</sup>对宁明原状膨胀土进行了有荷载条件模拟干湿循环过程的试验研究,得到其胀缩变形和强度的变化规律。安骏勇等<sup>[10]</sup>对原状膨胀土用平面应变等应力比卸荷试验,发现土体强度降低与卸荷试验过程中微裂隙的张开有关。刘华强等<sup>[11]</sup>采用室内直剪仪,研究了不同干湿循环次数下膨胀土的饱和抗剪强度规律,指出干湿循环是导致膨胀土饱和抗剪强度迅速衰减的主要原因。徐彬等<sup>[12]</sup>通过室内干湿循环试验获得的含裂隙的膨胀土试样直剪和三轴剪切试样,探讨了含水率、密度以及裂隙度对膨胀土强度的影响规律。吴珺华等<sup>[13]</sup>进行了干湿循环下膨胀土现场大型剪切试验研究,结果表明,干湿循环作用下膨胀土变形出现明显的软化特性。

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>[14]</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>[15]</sup>通过对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>[16]</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>[17-18]</sup>采用吸力控制方法对不同初始密度下 expansive bentonite/silt mixture 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。Pires等<sup>[19]</sup>采用 Gamma ray 法对不同干湿循环次数下土壤微观结构进行了分析比较。Pires等<sup>[20]</sup>采用图像分析方法对3种不同类型黏土在不同干湿循环次数下的微观结构进行了分析比较。叶为民等<sup>[21-22]</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。

综合可知,目前对干湿循环作用下岩土介质损伤机制研究,主要集中在膨胀土等高液限黏土方面,研究也多侧重干湿循环次数、裂隙度以及含水率对其宏观力学强度的衰减规律,对其变形特性以及深层次的微观机制研究还比较薄弱。对填埋场压实黏土防渗结构而言,压实度是工程中的主要控制因素,但有关压实度和干湿循环耦合作用下压实黏土,特别是低液限压实黏土力学特性的研究还少见报道。

本文以填埋场压实黏土封场覆盖层为工程背景,借助三轴剪切仪和MIP、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力学特性和微观结构演化规律试验研究,从微观层次揭示了压实黏土覆盖层在干湿循环作用下的失稳内在本质。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,同时可为其他压实黏土结构稳定分析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,埋深约为5 m,天然干密度为1.55 g/cm<sup>3</sup>,天然含水率为20.3%,其他物理参数如表1所示。由表1可知,该土壤属于

低液限粉质黏土。将土壤风干过 2 mm 筛, 进行轻型击实试验, 得到该土壤最优含水率为 19.5%, 最大干密度为 1.74 g/cm<sup>3</sup>。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 Soil properties of soil

土粒相对 密度 $G_s$	塑限 含水率 /%	液限 含水率 /%	颗粒含量/%		
			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 含量/%	石英 69.14	橄榄石 6.04	辉石 12.18	坡缕石 7.30	基铁矾 5.35

## 2.2 试验方法

### 2.2.1 试验仪器

采用南京土壤仪器厂生产的 TSZ-6A 型应变控制式三轴仪进行力学特性试验。采用美国 QUANTA-CHROME 公司生产的 Poremaster33 型压汞仪进行微观结构特征试验。

### 2.2.2 试验工况

根据《生活垃圾卫生填埋技术规范》<sup>[2]</sup>, 当采用压实黏土做封场防渗层时, 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) 作为本次三轴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>。因填埋场封场覆盖系统处于填埋场表层, 覆盖层厚度约为 1 m, 因此, 选取 30、50、100、150 kPa 作为本次三轴试验的围压。根据已有研究成果<sup>[6]</sup>, 黏土经过 3 次干湿循环后土中孔隙的结构趋于稳定, 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)。根据压实度与干湿循环次数的各种搭配, 共计 12 种工况。

微观试验根据三轴试验工况, 选取初始压实度为 90% 和 98% 压实黏土在干湿循环前和 3 次干湿循环后作微观试验。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

本次试验采用击实法制样, 直径为 39.1 mm, 高为 80 mm。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 层击实成型, 然后放入真空饱和器中抽气饱

和。每种工况 5 个试样, 共 60 个试样。

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 °C, 封顶处高达 50 °C)。本文将试样在常温 26 °C (地表雨水侵入时温度) 环境中真空抽气饱和, 饱和时间为 48 h; 然后将试样放入 50 °C 烘箱中干燥, 干燥时间为 72 h。如此反复, 直到预设干湿循环次数。

当试样达到预设干湿循环后, 从饱和器中拿出相同工况的 5 个试样, 4 个用于三轴试验, 1 用于微观结构试验。微观结构试样采用冷冻干燥法制作, 由三轴试样切割成约直径 6 mm×高 10 mm 的柱体用于 MIP 试验。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 干湿循环作用下压实黏土力学特性变化分析

#### 3.1.1 压实黏土三轴试验结果

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 12 组压实黏土应力-应变曲线如图 1~3 所示。由图可知, 干湿循环前, 随着应变的增加, 应力逐渐增加, 但应力增长速率逐渐降低, 即发生刚度软化现象, 3 种压实度黏土应力-应变曲线类型均为硬化型。随着干湿循环次数的增加, 刚度软化现象进一步加剧, 应力-应变曲线类型由强化型逐渐过渡为稳定型和软化型。

#### 3.1.2 压实黏土变形特性分析

为探讨干湿循环作用下压实黏土变形特性, 将压实黏土变形分成初始变形 (应变为 0%~1%)、中段变形 (应变为 1%~5%)、末端变形 (应变为 5%~16%) 3 个区间段。并采用 3 个区间段的区间割线模量 (即该区间应力的增量与区间长度的比值) 来衡量该区间平均的刚度变化程度。根据图 1 中不同干湿循环次数下压实黏土应力-应变关系, 求得了 3 个区间对应的区间割线模量  $E_1$ 、 $E_5$  和  $E_{16}$ , 计算结果如图 4~6 所示。由图可知, 在干湿循环作用前,  $E_1$ 、 $E_5$  和  $E_{16}$  均随压实度和围压的增大而增大。随着干湿循环次数的增加, 初始变形段区间割线模量  $E_1$  均呈上升趋势; 而末端变形段区间割线模量  $E_{16}$  均呈下降趋势, 其中高压实和中压实黏土  $E_{16}$  下降幅度较大, 低压实黏土下降不明显; 中段变形段区间割线模量  $E_5$  的变化介于  $E_1$  和  $E_{16}$  之间, 有升有减, 且变化幅度较小。

#### 3.1.3 压实黏土强度特性分析

图 7 为干湿循环作用下压实黏土峰值应力变化规律 (未出现峰值应力-应变曲线采用应变 16% 对应的应力作为峰值应力)。干湿循环前, 压实黏土峰

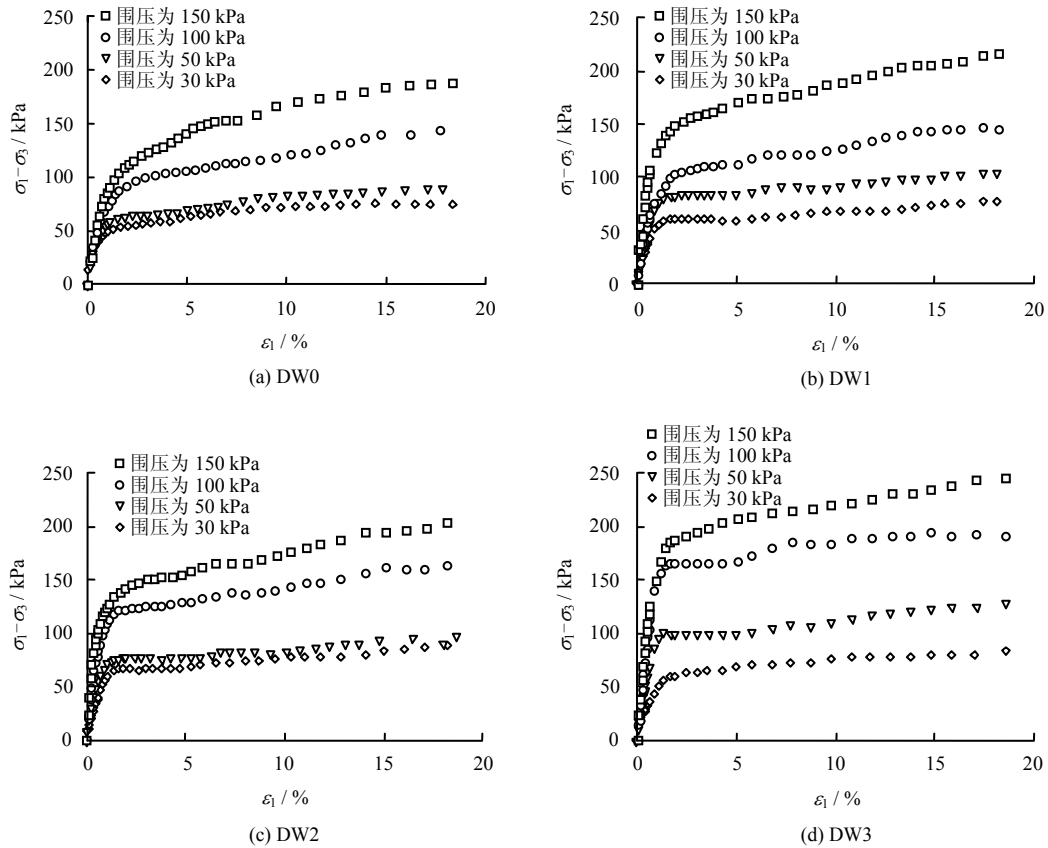


图1 干湿循环作用下C90压实黏土应力-应变关系

Fig.1 Stress-stain relations of compacted clay C90 during drying-wetting cycles

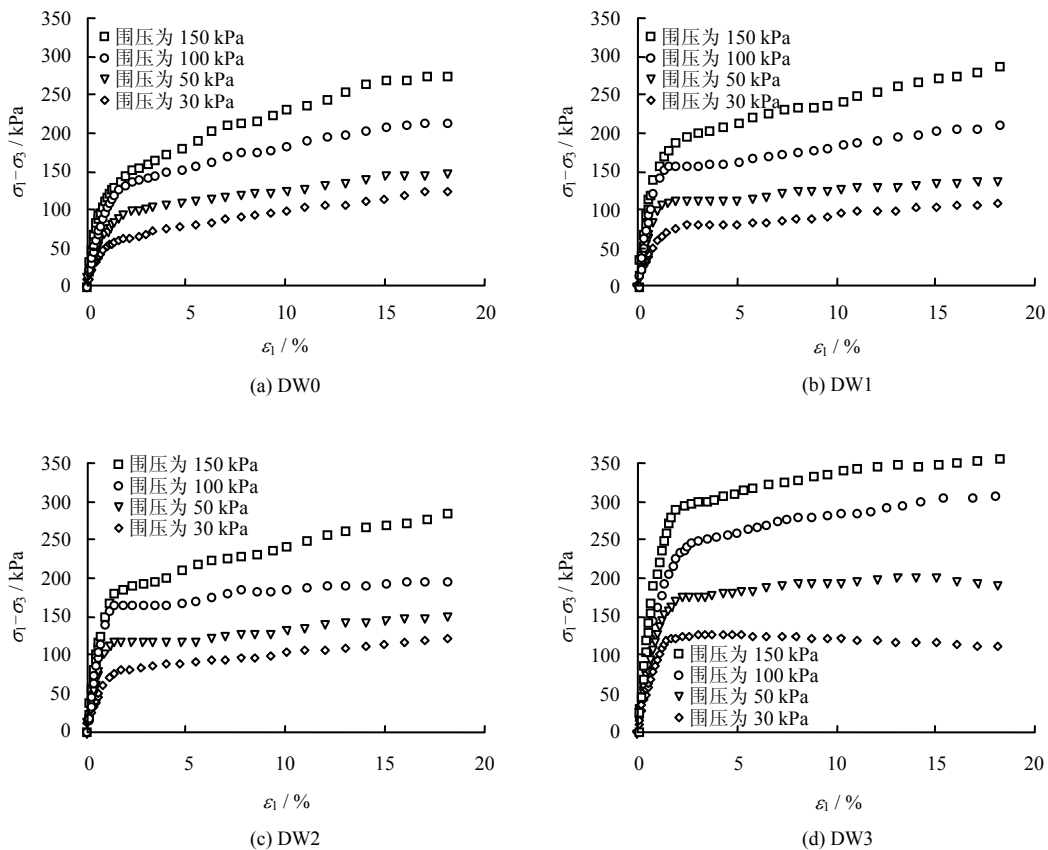


图2 干湿循环作用下C94压实黏土应力-应变关系

Fig.2 Stress-stain relations of compacted clay C94 during drying-wetting cycles

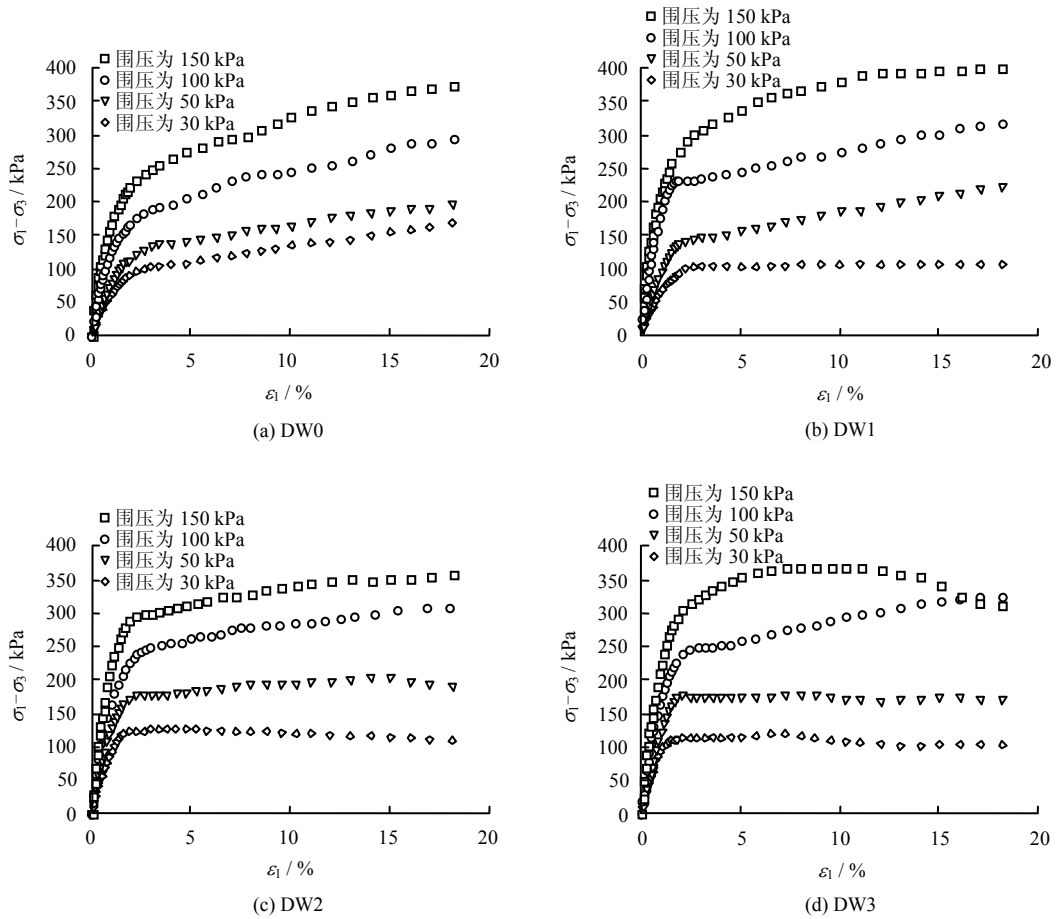


图 3 干湿循环作用下 C98 压实黏土应力-应变关系

Fig.3 Stress-stain relations of compacted clay C98 during drying-wetting cycles

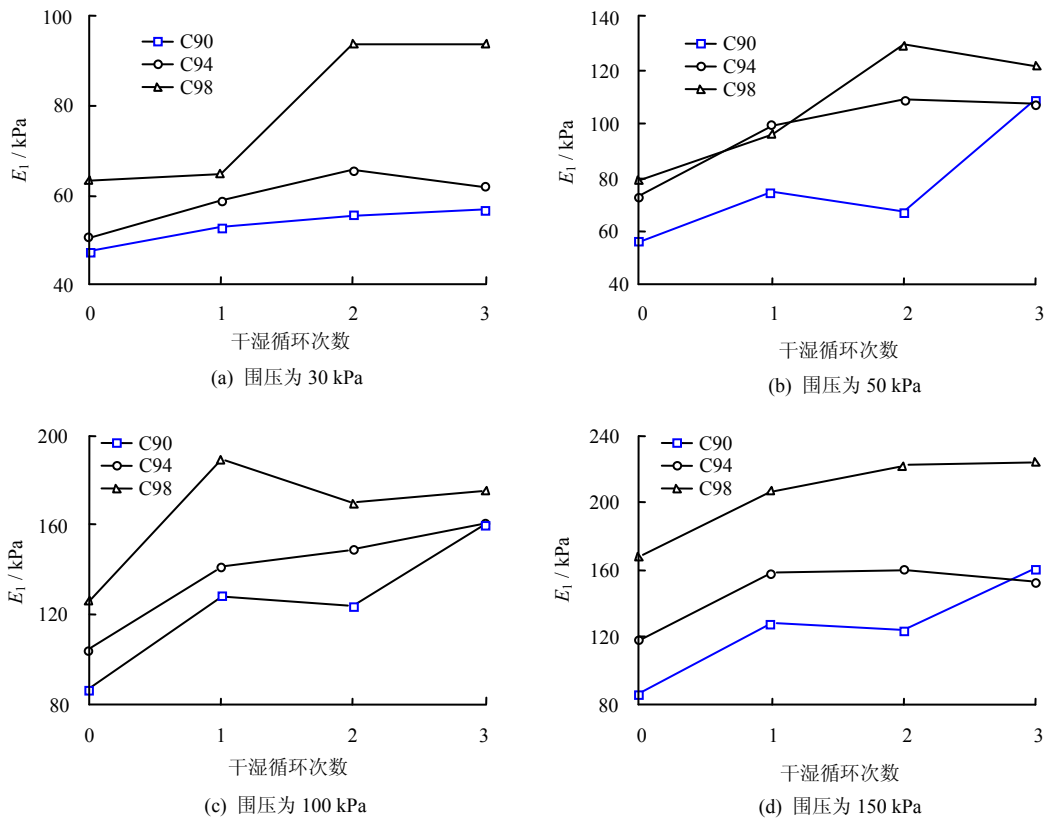


图 4 干湿循环作用下压实黏土区间割线模量  $E_1$  的变化规律

Fig.4 Variations of secant modulus  $E_1$  for compacted clay during drying-wetting cycles

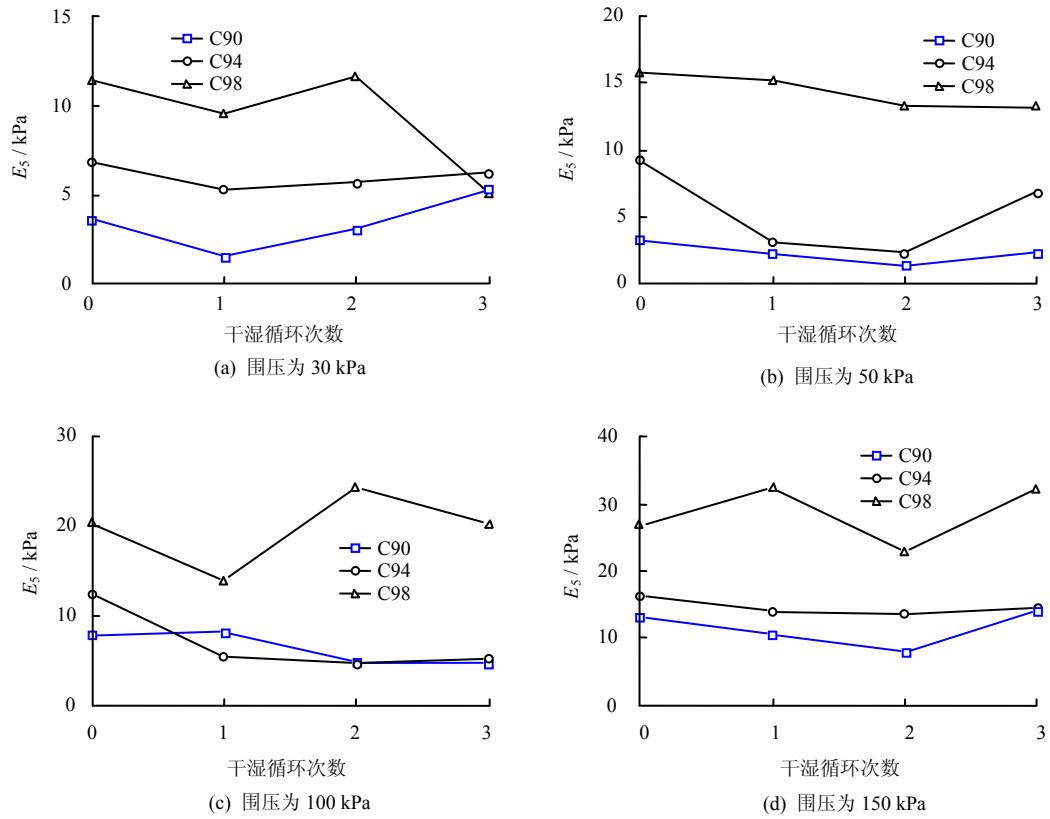


图 5 干湿循环作用下压实黏土区间割线模量  $E_5$  的变化规律

Fig.5 Variations of secant modulus  $E_5$  for compacted clay during drying-wetting cycles

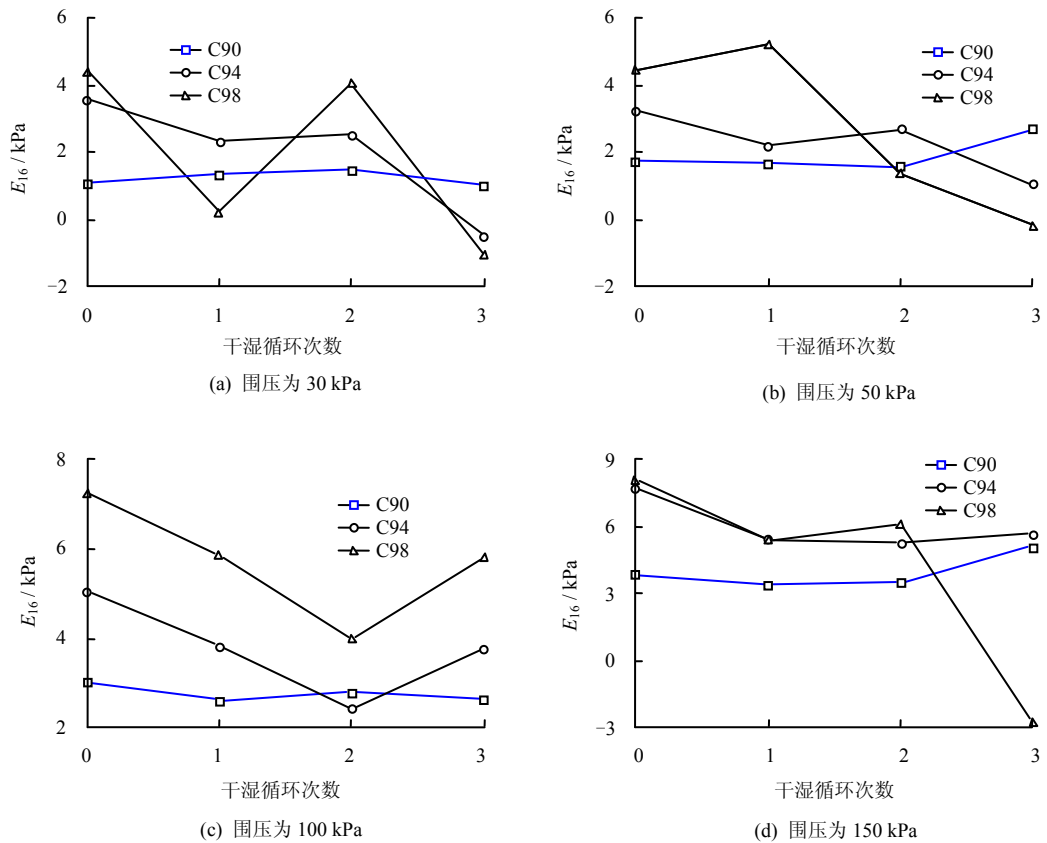


图 6 干湿循环作用下压实黏土区间割线模量  $E_{16}$  的变化规律

Fig.6 Variations of secant modulus  $E_{16}$  for compacted clay during drying-wetting cycles

值应力随着压实度和围压的加大而逐渐增加。随着干湿循环次数的增加，低压实黏土 C90 的峰值强度（围压为 30 kPa 时除外）呈微弱增长趋势，而高压实黏土的峰值应力呈减小趋势，但相同工况条件下高压实黏土峰值应力仍然高于低压实黏土。中压实黏土的峰值强度变化（围压为 30 kPa 时除外）不明显。围压为 30 kPa 时，3 种压实度黏土峰值应力均随干湿循环次数增加逐渐减少，经 3 次干湿循环后，应力峰值减少幅度（压实度从高到底）依次为 4.4%、27.3%和 33.8%。

基于干湿循环作用下不同压实度黏土在不同围压条件下的峰值应力，求得干湿循环作用下压实黏土的强度参数  $c$ 、 $\varphi$ ，如图 8 所示。由图可知，干湿循环前，随着压实度的提高，压实黏土黏聚力  $c$  大幅度提高，内摩擦角  $\varphi$  也略有增加。随着干湿循环

次数的增加，低压实黏土黏聚力  $c$  呈增加趋势，而中压实和高压实黏土黏聚力  $c$  呈减小趋势，而内摩擦角  $\varphi$  均程增加趋势。尽管干湿循环过程中强度参数变化趋势明显，但数据局部波动性较强。造成这一现象的主要原因为：本文试样尺寸选择过小，干湿循环过程中压实黏土结构损伤信息不能被该尺寸试样完全包含，致使试验结果具有一定的随机误差。同时，干湿循环作用后，强度参数的线性拟合相关系数  $R$  降低，这主要是干湿循环作用作用下同种类型的不同试样损伤不一致所致。

由上述干湿循环作用下压实黏土强度变化规律分析可知，干湿循环作用下压实黏土在低围压条件下衰减加剧，而在高围压条件下衰减幅度较小。同时，相同围压条件下，随着压实度的增加，强度衰减加剧，而低压实黏土的强度还略有提高。

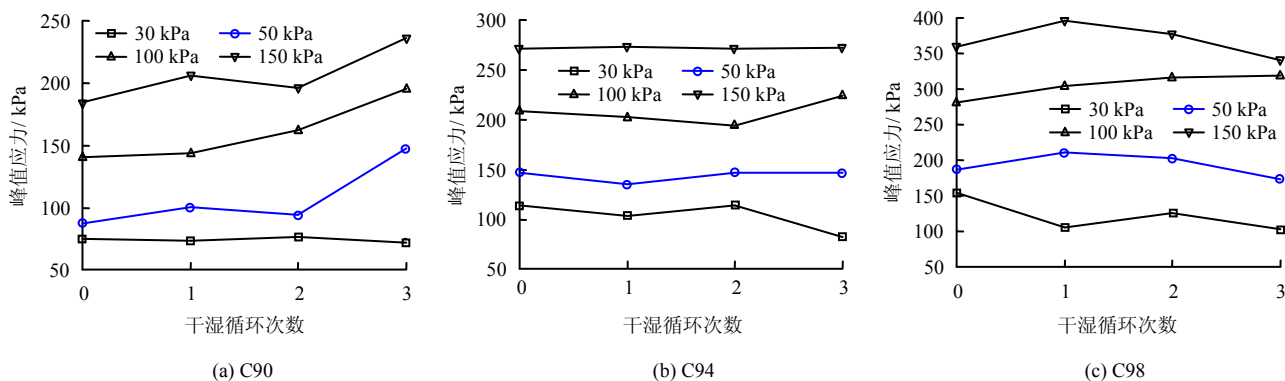


图 7 干湿循环作用下压实黏土峰值应力变化规律

Fig.7 Peak values of stress of compacted clay during drying-wetting cycles

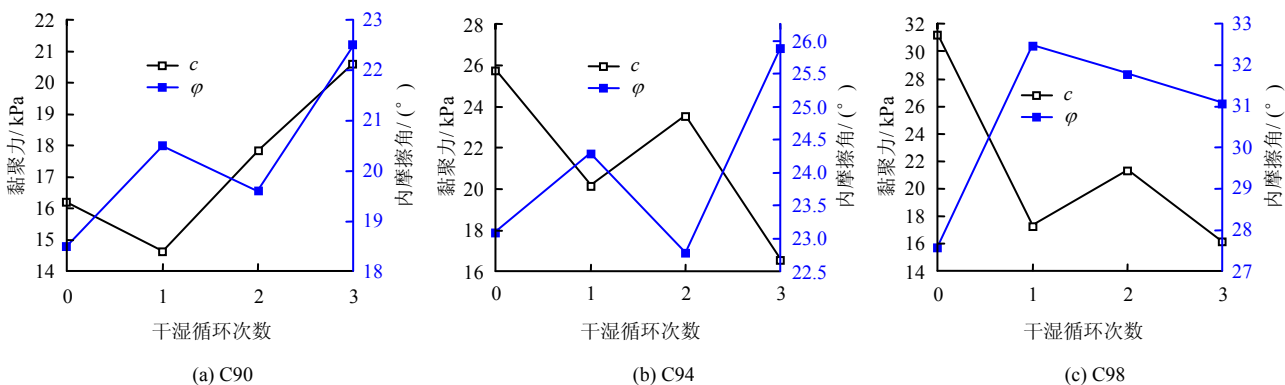


图 8 干湿循环作用下压实黏土强度参数变化规律

Fig.8 Variations of strength parameters of compacted clay during drying-wetting cycles

### 3.2 干湿循环对压实黏土力学特性影响微观机制分析

#### 3.2.1 干湿循环作用下压实黏土孔径分布测试结果

图 9 为干湿循环前、后压实黏土孔径分布。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[23]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 μm)、大孔 (>20 μm)、中孔 (5~20 μm)、小孔 (0.4~5 μm)、微孔 (<0.4 μm)。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。

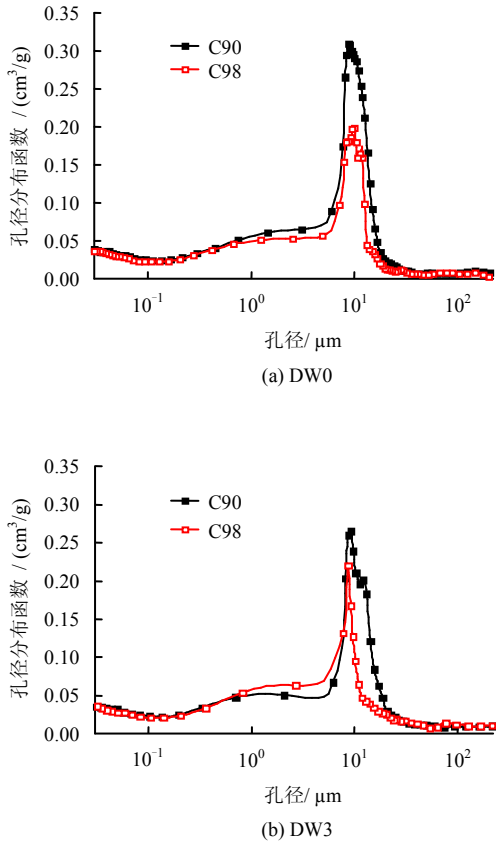


图 9 干湿循环作用下压实黏土孔径分布函数  
Fig.9 Pore size distribution functions of compacted clay during drying-wetting cycles

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量以及相对变化百分比如图 10 所示。由图可知，随着压实度的提高 (C90→C98)，除微孔外，各类孔隙均减小，减少量差别较大，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，土壤总孔隙体积收缩高达 20.5% (C90) 和 11.5% (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。

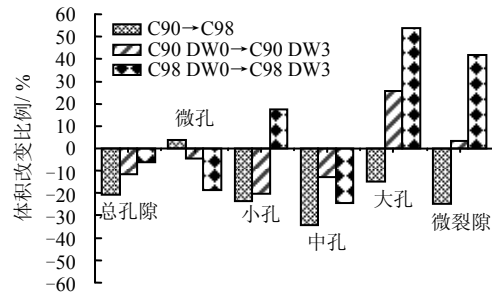


图 10 干湿循环前、后压实黏土各类孔隙相对变化量  
Fig.10 Variation rate of various pores in compacted clay before and after drying-wetting cycles

### 3.2.2 压实黏土力学特性变化微观机制分析

由上述干湿循环作用下压实黏土变形特性分析可知，干湿循环作用对压实黏土变形影响主要表现为：随着干湿循环次数的增加，压实黏土初始变形段区间割线模量增加，而末段区间割线模量减小，变化幅度均随压实黏土初始压实度的增加而增加。其内在微观机制为：干湿循环作用下，黏土发生了不可逆的体积收缩，经 3 次干湿循环作用后，低压实和高压实黏土体积收缩分别达到了 4.83% 和 2.25% (由干湿循环前、后总孔隙率求得)，土体更加密实，由此导致压实黏土初始切线模量增加。其力学机制为：压实黏土经历干湿循环后，由于干湿循环过程中的超高基质吸力致使土壤发生超固结，导致其初始切线模量增加。同时，干湿循环后，大孔体积增加，微裂隙高度发育，从而导致压实黏土末端切线模量减小。

由干湿循环作用下压实黏土强度特性分析可知，干湿循环作用对压实黏土强度影响主要表现在：不同压实度相同围压时，低压实黏土强度衰减幅度低于高压实黏土；相同压实度不同围压时，高围压条件下压实黏土强度衰减幅度低于低围压条件下黏土强度衰减幅度。其微观机制为：干湿循环作用下，黏土体积发生不可逆的收缩，从而导致同时土体更加密实，强度增加；干湿循环作用下压实黏土大孔体积的增加，微裂隙的发育，从而导致压实黏土强度的降低。干湿循环作用下压实黏土强度的变化是上述两因素的综合表现。由于干湿循环作用下高压实黏土体积收缩比低压实黏土小，而大孔的增加和微裂隙的发育高于低压实黏土，因此，高压实黏土强度衰减高于低压实黏土。同时，随着围压加大，土体固结体积收缩增大，由干湿循环作用形成的微裂隙部分闭合，因此，干湿循环作用对高围压下强度的影响明显低于低围压条件时。



### 3.3 压实黏土力学特性变化讨论

3.1 节和 3.2 节中分析了干湿循环作用下压实黏土力学特性和微观机制, 得出经多次干湿循环后, 低压实黏土强度弱微增加, 而高压实黏土强度大幅降低, 并对该试验进行了微观层次的解释。但该试验现象与实际工程中仍有所差别, 一是经多次干湿循环后, 低压实黏土强度弱增而高压实黏土强度剧减; 二是试验结果虽然大体趋势明显, 但局部波动性较大。

针对上述问题, 其主要原因在于干湿循环作用下, 压实黏土结构出现非均匀性损伤, 原本均匀的土壤已变得不均匀, 由于非均匀裂隙的存在, 压实强度特性存在明显的尺寸效应, 而本文所用三轴试样已小于裂隙岩土体的特征单元, 已不能完全包括裂隙岩土体的全部信息, 从而导致试验结果局部波动明显。对低压实黏土, 经过 3 次干湿循环后, 体积收缩 4.83%, 体积严重收缩, 在实际工程中, 由于土壤的收缩受到限制, 必然导致土壤中存在大量宏细观裂隙, 此时, 整个压实黏土防渗系统的强度将由土壤中的宏细观裂隙控制, 即使黏土自身强度增加, 其整个压实黏土防渗系统的强度也会大幅度降低。对高压实黏土, 经过 3 次干湿循环后, 体积收缩 2.25%, 体积有一定的收缩, 必然导致土壤中存在少量宏细观裂隙, 本文试验结果同样低估了高压实黏土强度的衰减特性。

由于压实黏土在干湿循环过程中均具有一定的收缩性, 从而导致压实黏土均匀性存在明显尺寸效应, 因此, 开展多尺度下的压实黏土水力特性的研究将是压实黏土防渗材料研究的一个重要方向。

## 4 结 论

(1) 随着干湿循环次数的增加, 压实黏土初始变形段区间割线模量增加, 末段区间割线模量大幅度降低, 变化幅度随初始压实度的增加而增加; 同时, 压实黏土剪切强度成减小趋势, 但减小幅度随初始压实度和围压的增加而减小。

(2) 经过 3 次干湿循环后, 压实黏土发生不可逆的体积收缩, 体积收缩比例随压实度的增加而减小; 同时, 大孔和微裂隙体积增加, 增加幅度随初始压实度的增加而增加。

(4) 压实黏土不可逆的体积收缩致使土体更加密实, 从而导致压实黏土初始变形段区间割线模量和强度增加; 同时大孔体积增多和微裂隙的发育, 导致压实黏土强度和末段区间割线模量降低。干湿循环对不同压实度黏土力学特性影响是二者的综合

表现。

(4) 干湿循环作用引发的岩土体的非均匀损伤导致压实黏土力学特性存在明显的尺寸效应, 特别是其不可逆的体积收缩将导致工程尺度下岩土体中存在大量宏观裂隙, 因此, 室内小尺寸压实黏土力学试验将严重低估干湿循环作用下压实黏土的强度衰减特性。

### 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. CJJ17-2004 生活垃圾卫生填埋技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [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] 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.
- [6] 张芳枝, 陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41-46.  
ZHANG Fang-zhi, CHEN Xiao-ping. Influence of repeated drying and wetting cycles on mechanical behaviors of unsaturated soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(1): 41-46.
- [7] 曹玲, 罗先启. 三峡库区千将坪滑坡滑带土干-湿循环条件下强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 93-97.  
CAO Ling, LUO Xian-qi. Experimental study of dry-wet circulation of Qianjiangping Landslide's unsaturated soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(Supp.): 93-97.

- [8] 袁俊平, 殷宗泽. 膨胀土裂隙的量化指标与强度性质研究[J]. 水利学报, 2004, (6): 108—113.  
YUAN Jun-ping, YIN Zong-ze. Quantitative index of fissure and strength characteristics of fissured expansive soils[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2004, (6): 108—113.
- [9] 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 He-ping, ZHANG Rui, ZHENG Jian-long. 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.
- [10] 安骏勇, 蒋刚, 王钊. 基于平面应变试验的非饱和膨胀土强度分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2649—2652.  
AN Jun-yong, JIANG Gang, WANG Zhao. Analysis of shear strength of unsaturated expansive soil under plane strain test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(12): 2649—2652.
- [11] 刘华强, 殷宗泽. 裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 727—731.  
LIU Hua-qiang, YIN Zong-ze. Test study of influence of crack evolution on strength parameters of expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 727—731.
- [12] 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 Zong-ze, LIU Shu-li. Experimental study of factors influencing expansive soil strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(1): 44—50.
- [13] 吴珺华, 袁俊平. 干湿循环下膨胀土现场大型剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 103—107.  
WU Jun-hua, YUAN Jun-ping. Field tests on expansive soil during wetting-drying cycles using large shear apparatus[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(1): 103—107.
- [14] 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微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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] NOWAMOOZ H, MASROURI F. Influence of suction cycles on the soil fabric of compacted swelling soil[J]. **Comptes Rendus Geoscience**, 2010, 342(12): 901—910.
- [19] PIRES L F, BACCHI O O S, REICHARDT K. Gamma ray computed tomography to evaluate wetting/drying soil structure changes[J]. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, 2005, 229(3—4): 443—456.
- [20] PIRES L F, COOPER M, CÁSSARO F A M, et al. Micro-morphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles[J]. **Catena**, 2008, 72(2): 297—304.
- [21] 叶为民, 黄雨, 崔玉军, 等. 自由膨胀条件下高压密膨胀黏土微观结构随吸力变化特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4570—4575.  
YE Wei-min, HUANG Yu, CUI Yu-jun, et al. Microstructural changing characteristics of densely compacted bentonite with suction under unconfined hydrating conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4570—4575.
- [22] 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.
- [23] SHEAR D L, OLESEN 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: 1365—1370.