

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.02.018

干湿循环作用下高低液限黏土防渗性能对比研究

赵立业^{1,2}, 薛强^{1,2}, 万勇¹, 刘磊¹

(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)

摘 要: 针对低、中、高 3 种干密度的低液限和高液限压实黏土, 开展经历干湿循环过程的渗透系数和孔隙结构变化特征对比研究。结果表明: 经 3 次干湿循环后, 相同液限条件下, 高压实黏土渗透系数增加比例高于低压实黏土; 相同干密度条件下, 高液限黏土渗透系数增加比例高于低液限黏土。干湿循环过程中, 压实黏土孔隙结构损伤对渗透系数影响随着压实度和液限的提高而加大, 而裂隙的发育对渗透系数影响随着压实度的增加和液限的降低而降低。干湿循环过程中低液限压实黏土试样只收缩不开裂, 而高液限黏土裂隙发育明显, 小尺寸渗透试样无法完全反映裂隙发育对渗透系数的影响, 其渗透系数的变化更多是孔隙结构的变化所致, 建议通过现场渗透试验或室内大尺寸渗透试验对干湿循环作用下不同液限黏土渗透系数的差异作进一步研究。

关 键 词: 填埋场; 压实黏土; 液限; 渗透系数; 孔隙结构

中图分类号: TU 442

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 02 - 0446 - 08

A comparative study of anti-seepage performance of clays with high and low liquid limits under drying-wetting cycles

ZHAO Li-ye^{1,2}, XUE Qiang^{1,2}, WAN Yong¹, LIU Lei¹

(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)

Abstract: The changes of permeability coefficient and pore structure of clays with high liquid limit and low liquid limit after drying-wetting cycles are compared. For each clay three densities are examined. The results show that after three drying-wetting cycles a larger increase in permeability coefficient is observed in clay with high degree of compaction than that with low degree of compaction when the liquid limits are the same. At the same dry density, the clay with high liquid limit exhibits larger increase in permeability coefficient than low liquid limit clay after drying-wetting circles. During the drying-wetting process, the influence of pore structural damage on permeability coefficient increases as compactness and liquid limit increase. The influence of cracks on permeability coefficient, however, decreases when the compactness increases and the liquid limit decreases. In contrast to low liquid limit clay which does not crack but shrinks after drying-wetting cycles, high liquid limit clay forms significant cracks. The change in permeability coefficient of the samples of the small size is mainly caused by the pore structure, and cannot reflect the influence of cracks. It is suggested that further research on the difference between permeability coefficients of clays with different liquid limits under drying-wetting cycles be carried out through permeability test on site or indoor large-size permeability test.

Keywords: landfill; compacted clay; liquid limit; permeability coefficient; pore structure

1 引 言

为了防止填埋场中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。我国《生活垃圾卫生填埋场封场技术规程》^[1]推荐采用黏土覆盖

收稿日期: 2014-09-15

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51279199); 国家重点基础研究发展计划项目 (973 项目) (No. 2012CB719802); 国家重大水专项课题 (No. 2011ZX07104-002-02)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51279199), the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2012CB719802) and the Major National Water Project (2011ZX07104-002-02).

第一作者简介: 赵立业, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事生态岩土力学与工程方面的研究。E-mail: zly_cersm@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

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的大量热能使得填埋场处于高温负荷状态^[2]，进一步加速压实黏土内部水分的蒸发，促进干湿循环进程。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^[3]。针对干湿循环作用下的压实黏土防渗结构损伤问题，国内外学者对不同类型土壤在干湿循环作用下的渗透特性开展了大量研究工作。Brian等^[4]研究了干湿循环作用下压实黏土体积收缩与塑性指标之间的变化关系，结果表明，压实黏土体积收缩随着塑性指标的增加而增加。Rayhani等^[5]研究了干湿循环作用下压实黏土渗透系数变化与土壤塑限之间的关系，结果表明，干湿循环作用对塑限特别低和特别高的压实黏土渗透系数影响不明显。综上可知，由于土壤性质的不同，干湿循环作用对压实黏土渗透系数的影响差别明显。

近年来，众多学者对干湿循环过程中压实黏土体积收缩和开裂特性进行了大量研究工作。Phifer等^[6]对相同土壤大尺寸试样在干湿循环作用下的渗透系数进行了研究，结果显示该压实黏土渗透系数增加了2个数量级。Rayhani等^[7]比较了干湿循环作用下直径为10、30 cm的压实黏土开裂特性与渗透特性变化，结果表明，大尺寸试样渗透系数增加量明显大于小尺寸试样。Drumm等^[8]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。综上可知，干湿循环作用下压实黏土结构发生了非均匀损伤，由于试样尺寸和渗透系数测试方法的不同，导致相同土壤在干湿循环作用下渗透系数变化差异明显。

普遍认为，干湿循环作用下压实黏土宏观裂隙发育与孔隙结构损伤是导致其渗透系数剧增的主要原因。其本质是由于干湿循环作用下压实黏土孔隙结构发生不可逆的体积收缩，一方面导致脱水过程中非裂隙区孔隙结构损伤无法恢复，同时导致脱水过程中形成的宏观裂隙亦不能完全闭合。因此，可通过研究干湿循环作用下压实黏土孔隙结构的变化，评价其渗透特性的变化。近年来，大量有关干湿循环作用下压实黏土孔隙结构变化的相关研究被陆续报道^[9-14]。但这些研究多集中在膨胀土方面，应用也多集中在土-水特征曲线预测方面。

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等宏观渗透特性和压汞仪等测试设备，通过室内模拟填埋场外部干湿交

替的气候环境，系统开展了压实黏土在干湿循环作用下渗透与孔隙结构特征变化规律研究，从微观层次揭示不同压实度条件下高低两种液限黏土在干湿循环作用下的防渗性能的差异，为填埋场盖层压实黏土防渗结构与防渗失效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

本次试验低液限和高液限黏土分别取自湖北武汉地区和河南南阳地区，分别命名为LP和HP，土壤基本性质参数如表1所示，颗粒级配参数如表2所示。两种土壤中，高液限黏土中黏土含量略高于低液限黏土，但液限含水率明显高于低液限黏土。

表 1 土壤基本性质
Table 1 Fundamental properties of soils

土壤类型	土粒相对密度 G_s	天然含水率 / %	干密度 / (g/cm ³)	液限含水率 / %	塑限含水率 / %	塑性指数
LP	2.72	20.3	1.55	41.6	21.8	19.8
HP	2.74	26.6	1.57	55.4	28.1	27.3

表 2 土壤颗粒级配
Table 2 Grain gradation of soils

土壤类型	砂粒含量 (>75 μm) / %	粉粒含量(75 ~ 2 μm) / %	黏粒含量(<2 μm) / %
LP	7.4	72.9	19.7
HP	5.6	68.7	24.8

2.2 渗透试验方法

2.2.1 渗透试验仪器

渗透试验采用美国 GEOEQUIP 公司生产的 PN3230M 环境土柔性壁渗透测试系统，试样采用直径为 5 cm，高 5 cm 的圆柱体。

2.2.2 渗透试验工况

为探讨干湿循环作用对不同压实度黏土渗透系数的影响，同时考虑到不同土壤压实特性的差异，本文以初始干密度为参考量，取低、中、高 3 种干密度，对应干密度分别为 1.57、1.64、1.71 g/cm³ 作为本次试验的初始干密度，分别命名为 D1.57、D1.64、D1.71。根据已有研究成果^[5]，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。以未经干湿循环的饱和试样为初始干湿循环状态，对脱水 m 次和增湿 n 次的试样命名为 $DmCn$ 。根据压实度与干湿循环次数以及土壤种类的各种搭配，共计 24 种工况。

2.2.3 渗透试样制作方法

本次试验采用压实施法制样。将两种土风干碾碎，过 2 mm 筛，根据各自塑限含水率配置土壤。根据预设干密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。

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[2]的研究，填埋场内部温度达 70 °C，封顶处高达 50 °C。由于覆盖层顶部与外界环境直接接触，受干湿循环最为明显，故本试验的控制温度取 50 °C。干燥过程在烘箱中完成，增湿过程采用真空饱和。试验中，试样先放在饱和器中真空抽气饱和 24 h（24 h 后试样质量基本保持稳定），然后放入环境土柔性壁渗透系统中，在围压 60 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 °C 烘箱中 48 h，使试样含水率降到缩限以下，反复上述步骤，直到预设次数。

2.3 微观试验方法

2.3.1 微观试验仪器

微观试验采用美国 QUANTACHROME 公司生产的 Poremaster33 型压汞仪。该压汞仪低压范围为 1.58 ~ 344.75 kPa，可测孔直径范围为 950 ~ 4.26 μm；高压范围为 137.9 ~ 206 850 kPa，可测孔直径范围为 10.66 ~ 0.006 4 μm。

2.3.2 微观试验工况

微观试验根据渗透试验工况，对两种土均选取低、高两种干密度（D1.57 和 D1.71）、两种干湿循环状态（D0W0 和 D3W3）。根据压实度与干湿循环次数以及土壤种类的各种搭配，共计 8 种工况。

2.3.3 微观试样制作方法

微观试验试样由干湿循环前（D0C0）和 3 次干湿循环后（D3C3）渗透试验试样切割制作。MIP 试样在对应渗透试样中心处切割径 9 mm×高 10 mm 的柱体用于 MIP 试验，切割过程中避开宏观裂隙。

3 试验结果

3.1 干湿循环作用下压实黏土渗透试验结果

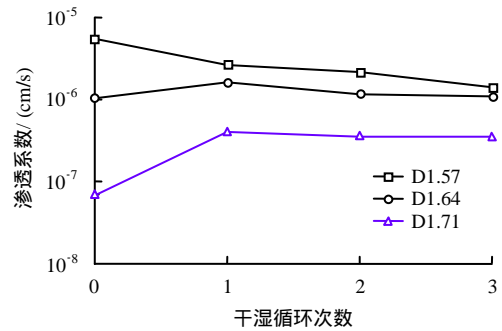
不同初始压实度和干湿循环次数下，实测两种液限黏土的渗透系数变化如图 1 所示。

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比例 δ_x （ $\delta_x > 0$ 为增加比例， $\delta_x < 0$ 为减少比例）为

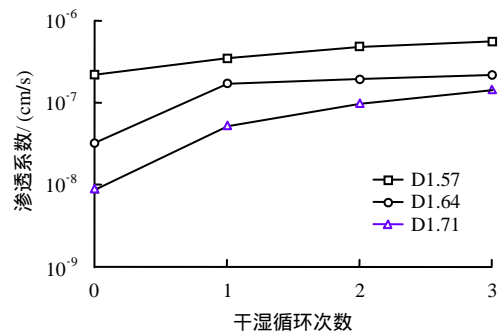
$$\delta_x = \frac{X_3 - X_0}{X_0} \times 100\% \quad (1)$$

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。

根据式（1）计算得到 3 次干湿循环后压实黏土渗透系数 K 的变化比例 δ_x 如表 3 所示。



(a) 低液限黏土 LP



(b) 高液限黏土 HP

图 1 干湿循环作用下低、高液限压实黏土渗透系数变化规律

Fig.1 Variations of permeability coefficients of clays with low and high liquid limits under drying-wetting cycles

表 3 3 次干湿循环后压实黏土渗透系数变化比例
Table 3 Change rates of permeability coefficient of compacted clay after three dry-wet cycles

土壤类型	δ_k		
	$\rho_d=1.57 \text{ g/cm}^3$	$\rho_d=1.64 \text{ g/cm}^3$	$\rho_d=1.71 \text{ g/cm}^3$
低液限	-62	103	995
高液限	152	581	1 546

由图 1(a)可知：干湿循环前，低液限压实黏土初始渗透系数随着压实度的增加逐渐减小；随着干湿循环次数增加，低压实黏土（LP-D1.57）渗透系数逐渐降低，而高压实黏土（LP-D1.71）渗透系数逐渐增加。由图 1(b)可知：干湿循环前，高液限压实黏土初始渗透系数随着压实度的增加逐渐减小，且相同干密度条件下，高液限黏土的初始渗透系数

明显小于低液限黏土；随着干湿循环次数的增加，3 种压实度的高液限黏土渗透系数均呈增大趋势。

表 3 中的数据按式 (1) 计算而得，其含义为干湿循环后的渗透系数相对于干湿循环前的变化比例（正数表示渗透系数增大，负数表示渗透系数减小）。由表 3 可知，经 3 次干湿循环后，按干密度由低到高的顺序，低液限黏土的渗透系数变化比例分别为 -62、103、995，高液限黏土的渗透系数变化比例分别为 152、581、1 546。容易得出，经 3 次干湿循环后，高低两液限黏土渗透系数的增加比例均随初始干密度的增加而增加；相同初始干密度条件下，高液限黏土渗透系数的增加比例高于低液限黏土渗透系数增加比例，但最终的渗透系数依然低于低液限黏土。

3.2 干湿循环前、后压实黏土孔隙结构特征试验结果

图 2 为干湿循环作用前和经历干湿循环后压实黏土孔径分布。由图可知：干湿循环前，两类土壤孔径分布形态（单峰型）基本相同，两种类型土壤孔径分布主要集中在 1~30 μm 的孔径范围内；随着压实度的提高，压实黏土孔径分布峰值均减小，但孔径分布形态并未改变。相同初始干密度条件下，

高液限黏土孔径分布峰值大于低液限黏土。经 3 次干湿循环后，两种类型土壤孔径分布峰值均减小，不同类型土壤和不同初始干密度压实黏土孔径分布形态（单峰型）基本相同；压实度与干湿循环作用对土壤类型的影响主要集中在 1~30 μm 的孔径范围内。

3.3 干湿循环前、后压实黏土孔隙体积变化

根据文献[15]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 3 种类型：大孔 (>30 μm)、中孔 (30~1 μm)、小孔 (<1 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。根据上述分类方法求得各分类区间的总孔隙量以及不同工况条件下孔隙体积的变化比例（由式 (1) 计算），结果如图 3、4 所示。

经 3 次干湿循环后，压实黏土总孔隙体积发生不可逆的收缩，具体表现在：土壤类型相同条件下，低压实黏土孔隙体积收缩大于高压实黏土；土壤干密度相同条件下，高液限黏土孔隙体积收缩比例大于低液限压实黏土。但经 3 次干湿循环后，大孔体积均增加，具体表现在：土壤类型相同条件下，低

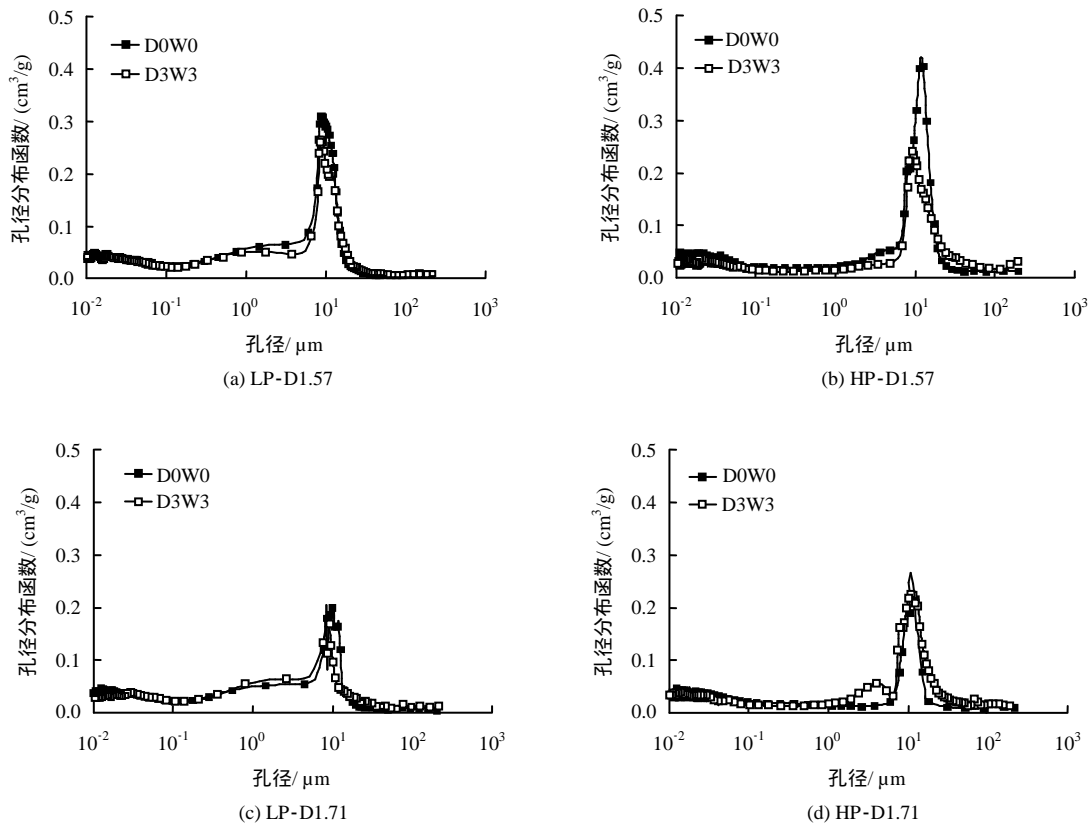


图 2 干湿循环作用下压实黏土孔径分布
Fig.2 Pore size distributions of compacted clay under drying-wetting cycles

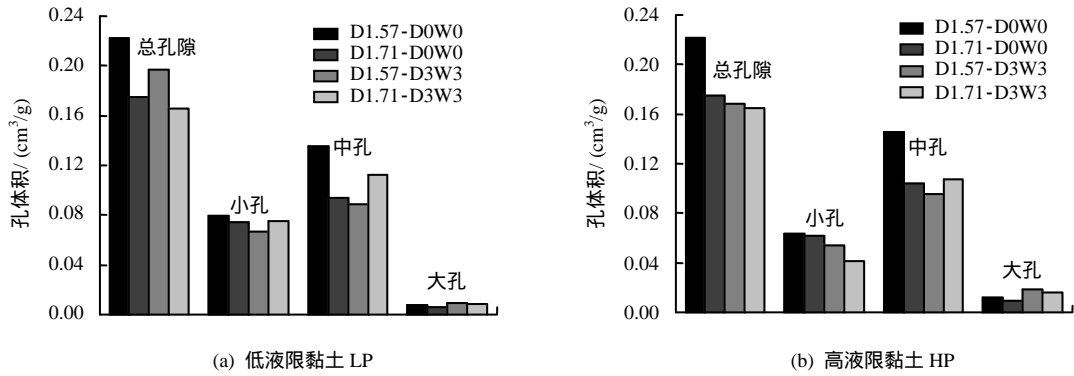


图3 干湿循环作用下压实黏土孔隙体积
Fig.3 Pore volumes of compacted clay under drying-wetting cycles

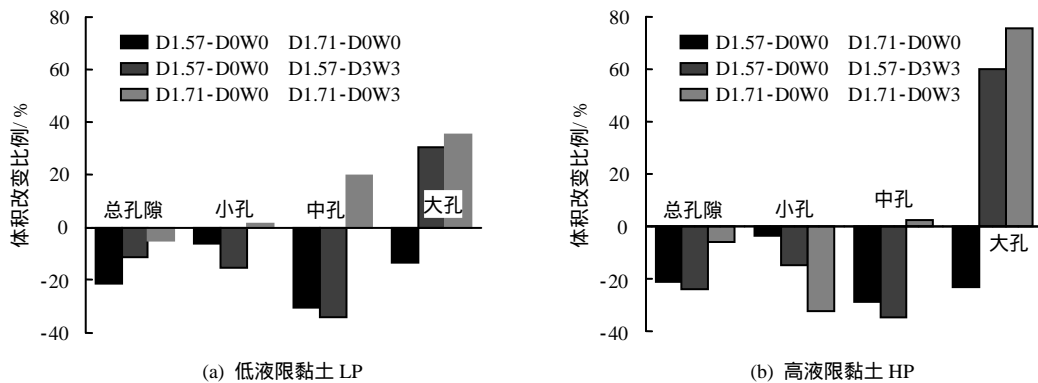


图4 干湿循环作用下压实黏土孔隙体积变化比例
Fig.4 Variation rates of pore volume of compacted clay under drying-wetting cycles

压实黏土大孔隙体积增加比例小于高压实黏土；土壤干密度相同条件下，高液限黏土大孔隙体积增加比例大于低液限黏土。经3次干湿循环后，低压实高、低两液限黏土中孔体积减少比例相当，但高压实低液限黏土中孔体积增加比例高于高压实高液限黏土。经3次干湿循环后，高压实、高液限黏土小孔体积减小，其他工况条件下小孔体积变化不明显。

4 试验结果分析

4.1 干湿循环作用下黏土宏观裂隙发育对渗透系数影响分析

干湿循环作用下压实黏土结构损伤主要包括孔径分布和孔隙连通性的变化以及宏观裂隙的发育^[16]。在填埋场压实黏土防渗结构中，由于压实黏土结构总体积（土壤颗粒体积、孔隙体积和裂隙体积之和）保持不变，因此，干湿循环过程中压实黏土内部未闭合的裂隙体积增加量等于土壤总孔隙的减少量^[16]。

图5为干湿循环过程中低液限和高液限黏土渗透试样表面开裂形态（相同性质土壤开裂形态基本相似，仅以D1.64为例）。由图可知：在干湿循环

前（W0D0），低液限和高液限黏土表面均匀性较好，且无宏观裂隙；试样经3次干燥后（W2D3），低液限黏土表面出现少量裂隙，而高液限黏土表面裂隙发育明显；试样经3次湿润后（W3D3），低液限黏土表面微小裂隙完全闭合，而高液限黏土表面裂隙未完全闭合。因此，干湿循环作用下，低液限黏土渗透系数的变化主要是黏土内部孔隙结构变化所致。造成这一现象的原因主要是室内渗透试样尺寸小于该类压实黏土的最小开裂尺寸，渗透试样在干湿循环过程中只发生体积收缩而无裂缝出现^[16]。而高液限黏土渗透系数的变化除黏土内部孔隙结构变化外，还有未闭合的宏观裂隙对其影响。这也正是干湿循环后，高液限黏土渗透系数增加比例大于低液限黏土的原因之一。

4.2 干湿循环作用下黏土孔隙结构变化对渗透系数影响分析

对低液限黏土而言，干湿循环过程中无宏观裂隙出现，且其渗透试样不可逆体积收缩严重（3次干湿循环后高、低两种压实度低液限黏土总孔隙体积减少比例分别为10.7%和5.0%）。对低压实低液限黏土，经过3次干湿循环后，虽然其大孔体积略有

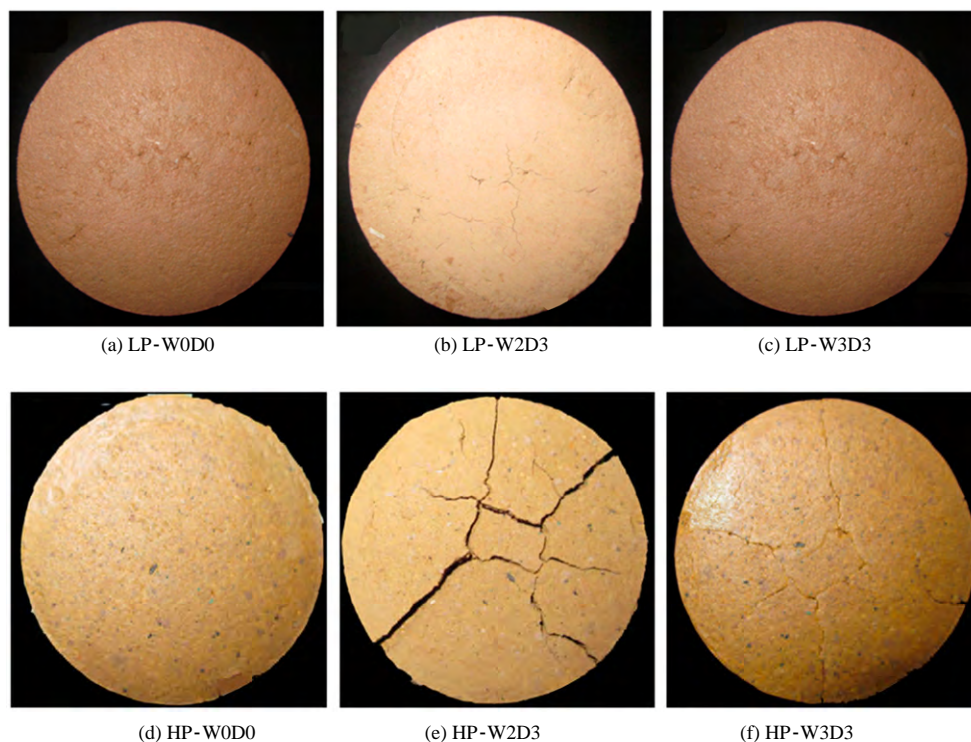


图 5 干湿循环作用下不同液限压实黏土开裂特征

Fig.5 Crack characteristics of the compacted clays with different liquid limits under drying-wetting cycles

增加，但连通大孔作用的中孔体积大幅度减少导致大孔之间更加孤立，可能会大幅度降低大孔之间连通性^[15,17]。因此，经多次干湿循环后，低压实低液限黏土渗透系数减小。对高压实低液限黏土，干湿循环过程中亦无宏观裂隙出现，但高压实黏土试样体积收缩相对低压实黏土却小很多，同时大孔和中孔体积明显增加（大孔与中孔体积的增加比例分别为 35.5% 和 19.9%）。大孔（流体主要的渗透通道）体积增加以及连通大孔作用的中孔体积增加，可能是导致高压实低液限黏土渗透系数增加的原因。

对高液限黏土而言，经 3 次干湿循环后，试样中存在大量未闭合的宏观裂隙，并且作为流体主要的渗透通道的大孔体积大幅度增加（低压实和高压实高液限黏土大孔体积增加比例分别为 61.1% 和 71.9%）。干湿循环作用下高液限黏土内部未闭合的宏观裂隙以及大孔体积的增加可能是导致其渗透系数增加的主要原因。经 3 次干湿循环作用后，低压实黏土总孔体积不可逆收缩比例高达 23.5%，大大高于高压实黏土总孔体积的不可逆收缩比例（高压实黏土为 5.9%）。由于干湿循环下压实黏土内部未闭合裂隙是由于黏土孔隙不可逆的收缩所致，因此，低压实黏土试样内部的未闭合宏观裂隙体积大于高压实黏土，因而，干湿循环作用下宏观裂隙对低压实黏土渗透系数的影响大于高压实黏土。而高

压实黏土大孔和中孔体积增加量明显大于低压实黏土，因此，干湿循环作用下高压实黏土孔隙结构损伤对其渗透系数的影响大于低压实黏土。

无论是高液限黏土还是低液限黏土，干湿循环前随着密度的提高，各类孔的体积均减小，尤以中孔体积的降低幅度最为明显，说明密度的提高主要引起团聚体内部的孔隙体积减小。在经历干湿循环后，无论密度高低，两种土的大孔体积均明显增加；但对中孔而言，低密度黏土的中孔体积减小，高密度黏土的中孔体积增大，说明随着密度的提高，团聚体内部的孔隙结构受干湿循环的影响更为明显。由此造成低密度黏土中大孔间的连通性降低，而高密度黏土中大孔间的连通性升高，宏观方面表现为，经历干湿循环后高密度黏土的渗透系数增长幅度更为明显。

由于本次渗透试验试样尺寸过小，干湿循环后，试样尺寸小于裂隙土壤特征单元尺寸，土壤不可逆的孔隙体积收缩只有小部分转化成土壤内部裂隙（大部分转化成试样的收缩），因此，本次试验中压实黏土渗透系数的增加主要是由于其内部孔隙结构损伤所致，宏观裂隙对渗透系数的影响不能完全被反映。由于高压实黏土内部孔隙结构损伤大于低压实黏土，因此，高压实黏土渗透系数的增加比例大于低压实黏土。建议通过现场渗透试验或室内

大尺寸渗透试验对干湿循环作用下不同液限黏土渗透系数的差异作进一步研究。

5 结 论

(1) 干湿循环前, 相同干密度条件下, 低液限黏土渗透系数高于高液限黏土约一个数量级。随着干湿循环次数增加, 低液限低压实黏土渗透系数逐渐降低, 而高液限低压实黏土渗透系数逐渐增加; 低液限和高液限中的高压实黏土渗透系数均增加。经3次干湿循环后, 相同土壤类型条件下, 高压实黏土渗透系数增加比例高于低压实黏土; 相同干密度条件下, 高液限黏土渗透系数增加比例高于低液限黏土。

(2) 经3次干湿循环后, 压实黏土总孔隙均发生不可逆的体积收缩, 但大孔体积均增加; 土壤类型相同条件下, 低压实黏土总孔体积收缩大于高压实黏土, 而大孔体积增加比例小于高压实黏土; 相同干密度条件下, 高液限黏土孔隙体积收缩大于低液限压实黏土, 大孔体积增加比例也大于低液限黏土。

(3) 对低压实低液限黏土, 干湿循环过程中无宏观裂隙出现, 且其渗透试样不可逆体积收缩导致渗透试样更加密实, 以及连通大孔作用的中孔体积剧减可能是导致其渗透系数降低的主要原因; 而对高压实低液限黏土而言, 干湿循环作用下大孔和中孔体积大幅度增加, 可能是导致其渗透系数增加的主要原因。对高液限黏土而言, 干湿循环后试样中存在的大量未闭合的宏观裂隙和大孔体积的大幅度增加, 是导致其渗透系数增加的主要原因。

(4) 干湿循环作用下黏土内部孔隙结构损伤对渗透系数的影响随着压实度的增加而增加, 而宏观裂隙对渗透系数的影响随着压实度的增加而降低。室内小尺寸渗透试样无法完全包含宏观裂隙对渗透系数的影响, 压实黏土渗透系数的变化更多是由于孔隙结构的变化所致, 建议通过现场渗透试验或室内大尺寸渗透试验对干湿循环作用下不同液限黏土渗透系数的差异作进一步研究。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国建设部. CJJ112-2007 生活垃圾卫生填埋场封场技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
People's Republic of China Ministry of Construction. CJJ112-2007 Technical specification for waste sanitary landfill and closure[S] Beijing: China Building Industry

Press, 2007.

- [2] 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*, 2001, 83(3): 265 - 280.
- [3] XUE Q, ZHAO Y, LIU L, 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.
- [4] BRIAN A 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, FAKHER 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] PHIFER M, BOLES D, DRUMM E, et al. Comparative response of two barrier soils to post compaction water content variations[C]//*Geoenvironment 2000: Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics*. New Orleans: American Society of Civil Engineers, 1995: 591 - 607.
- [7] RAYHANI M H T, YANFUL E K, FAKHER A. Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils[J]. *Engineering Geology*, 2008, 97(1): 25 - 31.
- [8] DRUMM E, BOLES D, WILSON G. Desiccation cracks result in preferential flow[J]. *Environmental Geotechnics*, 1997, 15(1): 22 - 25.
- [9] 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.
- [10] HOSSEIN N, FARIMAH M. Influence of suction cycles on the soil fabric of compacted swelling soil[J]. *Comptes Rendus Geosciences*, 2010, 342(12): 901 - 910.
- [11] 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 Section B*, 2005, 229(3 - 4): 443 - 456.

- China Railway First Survey & Design Institute. TB10077-2002 Code for rock and soil classification of railway engineering[S]. Beijing: China Railway Publication House, 2001.
- [11] 卢肇钧. 土的变形破坏机理和土力学计算理论问题[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(6): 65 - 74.
- LU Zhao-jun. The failure mechanism of soils and theoretical computations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1989, 11(6): 65 - 74.
- [12] 许豪, 肖宏彬, 滕珂. 南宁膨胀土直剪蠕变特性及长期强度试验研究[J]. 公路工程, 2011, 36(1): 31 - 36.
- XU Hao, XIAO Hong-bin, TENG Ke. Experimental study on direct shear creep characteristics and long-term strength for Nanning expansive soil[J]. **Highway Engineering**, 2011, 36(1): 31 - 36.
- [13] 铁道第三勘察设计院. TB10621-2014 高速铁路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
- China Railway Third Survey & Design Institute. TB10621-2014 Code for design of high speed railway[S]. Beijing: China Railway Publication House, 2014.
- [14] 铁道第三勘察设计院. TB10621-2014 高速铁路设计规范(条文说明)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
- China Railway Third Survey & Design Institute. TB10621-2014 Code for design of high speed railway (Clause description)[S]. Beijing: China Railway Publication House, 2014.
- [15] MAYNE P W, KULHAWY F H. K_0 -OCR relationships in soil[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1982; 108(GT6): 851 - 872.
- [16] 刘成宇. 土力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- LIU Cheng-yu. Soil mechanics[M]. Beijing: China Railway Publication House, 2006.

上接第 452 页

- [12] PIRES L F, COOPER M, CA'SSARO F A M. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles[J]. **Catena**, 2008, 72(2): 297 - 304.
- [13] 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.
- [14] YE W M, QI Z Y, CHEN B, et al. Mechanism of cultivation soil degradation in rocky desertification areas under dry/wet cycles[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2011, 64(1): 269 - 276.
- [15] AN Yong, XUE Qiang, LIU Lei, et al. Study on the permeability evolution law and the micro-mechanism of CCL in a landfill final cover under the dry-wet cycle[J]. **Bulletin of Engineering Geology & the Environment**, 2014, 73(4): 1089 - 1103.
- [16] XUE Qiang, WAN Yong, CHEN Yi-jun, et al. Experimental research on the evolution laws of soil fabric of compacted clay liner in a landfill closure cover under dry-wet cycle[J]. **Bulletin of Engineering Geology & the Environment**, 2014, 73(2): 517 - 529.
- [17] 万勇, 薛强, 赵立业, 等. 干湿循环对填埋场压实黏土盖层渗透系数影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 679 - 686, 693.
- WAN Yong, XUE Qiang, ZHAO Li-ye, et al. Effect of dry-wet cycles on the permeability of compacted clay cover at landfill site[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 679 - 686, 693.