

文章编号:0559-9350(2021)03-0359-10

干湿循环作用下压实黄土三轴剪切特性试验研究

郝延周¹, 王铁行¹, 汪朝², 金鑫³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055;

3. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 为研究干湿循环引起的压实黄土结构损伤对其应力-应变特征及三轴剪切强度的影响, 对最优含水率条件下压实到干密度为 1.7 g/cm^3 的黄土试样进行不同路径的干湿循环试验和三轴剪切试验。结果表明: 干湿循环对压实黄土的三轴剪切特性影响显著, 随着干湿循环次数的增加, 压实黄土的应力-应变曲线先急剧下移, 再逐渐上移, 最后趋于稳定; 干湿循环对压实黄土三轴剪切强度具有劣化作用, 存在临界干湿循环次数 n_c , 当干湿循环次数小于临界干湿循环次数时强度指标急剧减小, 等于临界干湿循环次数时强度指标最小, 大于临界干湿循环次数时强度指标逐渐增大并趋于稳定; 分段函数能够较好反映三轴剪切强度指标的劣化规律和劣化过程; 受干湿循环幅度影响, 压实黄土存在干湿循环最劣含水率 w_w , 可以根据压实完成后黄土的瞬时含水率是否接近或等于最劣含水率来评价干湿循环对三轴剪切强度的劣化程度。

关键词: 干湿循环; 压实黄土; 应力-应变曲线; 临界干湿循环次数; 劣化度; 最劣含水率

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200296

1 研究背景

压实处理后的黄土坝基、路基和边坡等在后期运营中受自然因素如水位升降、降水、蒸发等反复干湿循环的作用, 导致其力学性能发生变化。干湿循环会使岩土体的力学性质发生不可逆转的变化^[1-3], 对岩土体的微细观结构造成一定的损伤, 引起强度的劣化^[4-5]。直接用压实黄土的三轴剪切特性去评价长期运营中土的力学特性会产生一定的误差, 导致压实黄土坝基、地基、边坡等在后期运营中出现沉降、开裂等工程问题。因此, 研究干湿循环作用下压实黄土的强度变化规律具有重要的工程意义。

目前, 不少学者对干湿循环作用下土的力学特性进行了研究。干湿循环导致土体强度和变形模量明显降低, 且在第一次干湿循环后的衰减最大^[6]。吕海波等^[7]通过试验得出膨胀土抗剪强度随干湿循环次数增加而衰减, 最终趋于稳定。原状膨胀土的抗剪强度在同一级荷载下随着干湿循环次数的增多而衰减^[8-10]。孙德安等^[11]对初始状态相同南阳膨胀土试样进行 1~6 次干湿循环, 干湿循环过程中相同吸力的试样含水率略降低、孔隙比略增大、持水能力略降低。Al-Homoud^[12]、Zhang 等^[13]、Nowamooz 等^[14]研究了干湿循环对膨胀土的变形特性的影响, 膨胀土的变形在第一次干湿循环时最为明显, 且在经历 3~5 次循环后达到平衡状态。Aldaoood^[15]等研究发现干湿循环导致人工改良土的强度衰减。刘文化等^[16-17]通过试验对大连典型粉质黏土 6 次干湿循环前、后的力学特性的变化规律研究, 发现初始干密度对干湿循环响应具有影响, 干湿循环过程中试样内部结构调整和基质吸力的压密作用使得土体的力学特性发生了不可逆转的变化。程富阳等^[18]通过不固结不排水三轴试验, 得出随干湿循环次数增加和干湿循环幅度增大, 饱和红土的黏聚力和内摩擦角减小, 干湿循环次数的影响大

收稿日期: 2020-05-01; 网络首发时间: 2020-11-12

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20201112.1235.003.html>

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018ZDCXL-SF-30-9)

作者简介: 郝延周(1982-), 博士, 讲师, 主要从事黄土力学特性研究。E-mail: 30010508@hncj.edu.cn

于干湿循环幅度的影响。曹玲等^[19]通过三轴试验探讨了三峡库区滑带土经过多次干湿循环后饱和试样的黏聚力和内摩擦角下降情况。袁志辉等^[20]发现干湿循环对原状黄土与压实黄土的抗剪强度均会产生劣化效应；王飞等^[21]认为割线模量与干湿循环次数呈指数减小，与初始压实度呈指数增大关系；刘宏泰等^[22]通过三轴压缩和三轴渗透试验，得出干湿循环作用使重塑黄土强度逐渐衰减和渗透性增强的规律；胡长明等^[23]建立了考虑干密度、干湿循环幅度、干湿循环下限含水量的干湿循环强度劣化模型，通过该模型分析了压实黄土填方边坡稳定，并揭示了强度劣化的微观机制；张芳枝等^[24]研究发现吸湿-脱湿循环过程不仅使非饱和土的有效内摩擦角降低，而且对吸力内摩擦角值产生一定影响。王铁行等^[25]通过试验研究了干湿循环作用下压实黄土动强度性质，结果表明压实黄土的动强度随干湿循环次数的增加先减小再逐渐增大。

上述研究大多认为土体在3~6次干湿循环作用后其强度趋于稳定，但受土的类型、结构和矿物成分以及干湿循环路径和干湿循环幅度等影响，这一结论具有一定的局限性，且对更多干湿循环次数和不同干湿循环路径条件下土的强度性质变化趋势的研究甚少；另外，上述研究主要集中在干湿循环作用下土的强度劣化规律，对于干湿循环作用下强度劣化程度的评价方法还未提出。因此，需要对更多干湿循环次数和不同干湿循环路径条件下的压实黄土强度变化趋势进行深入研究，并从中得出能够评价干湿循环作用下压实黄土强度劣化程度大小的方法。基于此，本文通过对不同干湿循环次数和不同干湿循环路径的压实黄土试样进行三轴剪切试验，研究不同干湿循环路径和多次干湿循环作用下压实黄土的三轴剪切特性变化规律，探讨能够指导压实黄土实际工程的干湿循环强度劣化程度评价方法。

2 试验概况

2.1 试样制备 试验所用黄土样取自西安市某基坑，属于Q₃马兰黄土，呈黄褐色、可塑、稍湿-湿，其物理性质指标见表1。通过室内标准击实试验测定土的最大干密度为1.73 g/cm³，最优含水率为18.9%。将现场土层中取得的原状黄土土样自然风干，用橡皮锤捶碎，然后过2 mm孔径筛，配制含水率 w 为18.9%的土样，密封放置48 h以上使水分分布均匀。将土样分4层竖向压实，制备干密度为1.70 g/cm³(压实度为98.3%)，土样尺寸为直径39.1 mm、高80 mm的干湿循环试样，干湿循环后用于三轴剪切试验。干密度误差小于等于0.02 g/cm³。

表1 黄土的主要物理特性指标

液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	颗粒组成/ $\%$			
		>0.075mm	0.075~0.01mm	0.01~0.005mm	<0.005mm
30.8	18.6	3.72	52.18	15.44	28.66

2.2 干湿循环试验 为使干湿循环作用对压实黄土强度劣化充分发挥，设置4种干湿循环路径(见表2)，对应的试验编号分别为a、b、c、d，下限含水率分别设置为：18.9%、12.9%、6.9%、0.9%，对应的干湿循环幅度(A)分别为：4.1%、10.1%、16.1%和22.1%，以模拟压实黄土施工完成后不同深度处饱和(水位上升)、减湿(水位下降)、再饱和、再减湿的循环过程。试样饱和过程采用抽真空饱和法，试验测得饱和后的含水率均在23%左右，且相差不超过0.1%，饱和度大于98%；减湿过程采用烘干法(40 ℃)，由于d循环路径采用低温烘干无法达到目标含水率0.9%，因此，d循环路径在低温烘干至含水率3%后采用高温烘干(105 ℃)法减湿至目标含水率；干湿循环历时(1循环)包括饱和过程时间和减湿至目标含水率的时间(见表2)。试样增湿或减湿后用保鲜膜密封放置在保湿缸中24 h以上使试样中含水率达到均匀分布。将试样制备好后用保鲜膜包裹并用胶带轻松缠绕以利于土中水分只能通过试样的两端进行迁移，近似模拟水分的一维迁移。试样的含水率通过控制其质量来实现，精度控制在±0.1 g。干湿循环次数达到试验要求的次数后由饱和和减湿至同一试验含水率18.9%进行三轴剪

表2 压实黄土干湿循环方案

试验编号	干密度 $\rho_d/(g/cm^3)$	初始含水率/%	循环路径(含水率/%)	历时(1循环) t/h	干湿循环次数 n
a	1.70	18.9	18.9—饱和—18.9	16.1	0, 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21
b	1.70	18.9	18.9—12.9—饱和—12.9	19.6	0, 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21
c	1.70	18.9	18.9—6.9—饱和—6.9	22.9	0, 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21
d	1.70	18.9	18.9—0.9—饱和—0.9	28.3	0, 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21

切试验，以利于试验数据的对比分析。

2.3 三轴剪切试验 三轴剪切试验采用SLB-1型应力应变控制式三轴仪，采用不固结不排水剪切试验(UU)，剪切速率为0.5 mm/min，围压设置为100、200和300 kPa。应力-应变曲线有峰值时取峰值偏应力作为三轴剪切强度，无峰值时取轴向应变15%所对应的偏应力作为三轴剪切强度。试验结束的标准为轴向应变达到20%。

3 试验结果分析

3.1 应力-应变关系 不同干湿循环次数和不同干湿循环路径压实黄土的三轴剪切应力-应变关系曲线见图1，限于篇幅，这里仅列出各干湿循环路径在围压为100 kPa的应力-应变关系。

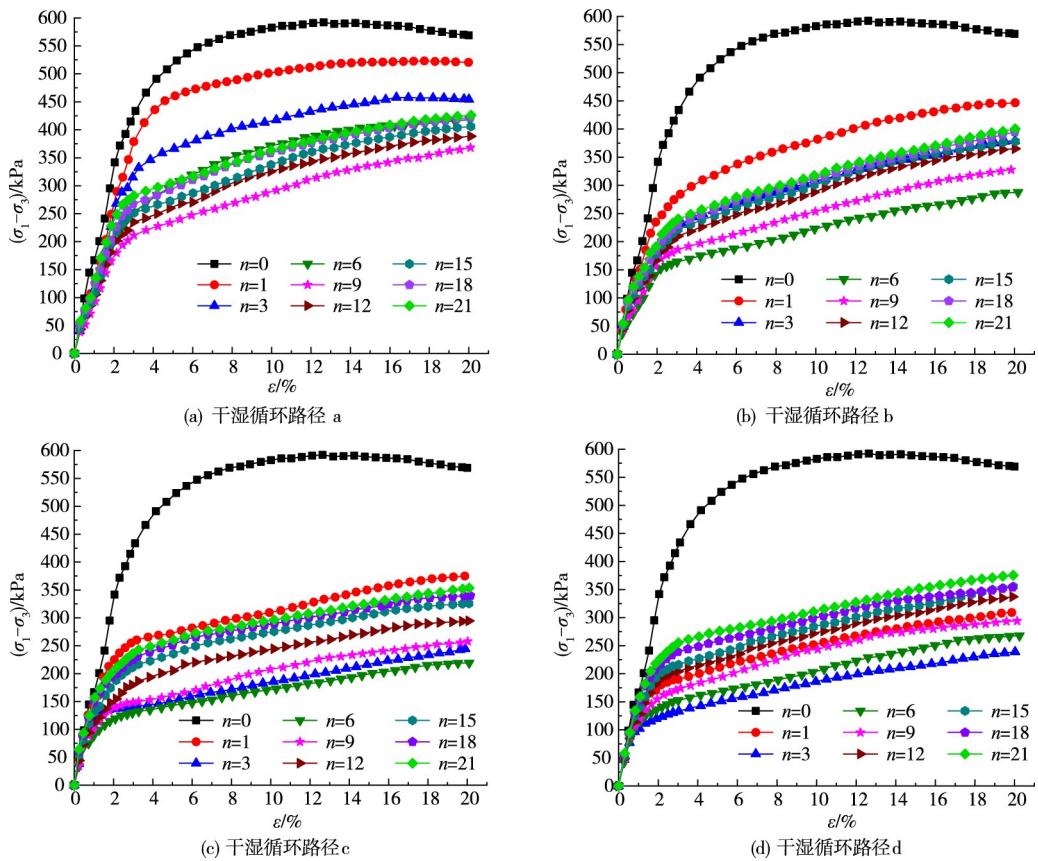


图1 干湿循环作用下压实黄土应力-应变曲线 ($\sigma_3=100kPa$)

由图1可以明显得出，不同干湿循环路径和不同干湿循环次数的压实黄土应力-应变曲线差异比较明显。除 $n=0$ 时的初始应力-应变曲线呈弱软化型外，其余应力-应变曲线均呈应变硬化型。

同一围压条件下，随着干湿循环次数的增加，压实黄土的应力-应变曲线均在 $n=0$ 时应力-应变曲线的下方，这说明干湿循环对压实黄土初始结构具有损伤作用，导致其力学特性降低。在 $n=1$ 和

$n=3$ 时降低幅度最大,这与此前学者^[7,9-11]的研究结论一致,当 $n \geq 6$ 时,压实黄土的应力-应变曲线分布在一定范围内。

随着干湿循环次数的增加,各干湿循环路径压实黄土试样的力学特性并非逐渐减小趋于稳定值,当干湿循环次数达到一定值时,压实黄土的应力-应变曲线位于最底部,之后逐渐上移,其力学特性有所提高,但均距离 $n=0$ 时的初始应力-应变曲线较远。

对比分析不同干湿循环路径的压实黄土应力-应变曲线可以得出,随着干湿循环次数的增加,各干湿循环路径的应力-应变曲线下移至最底部对应的干湿循环次数不同,其中a路径对应的干湿循环次数 $n=9$,b、c路径对应的干湿循环次数 $n=6$,d路径对应的干湿循环次数 $n=3$ 。当干湿循环次数继续增加时,各干湿循环路径的应力-应变曲线开始上移,d路径上移幅度最大,a路径上移幅度最小,其中a、b、d路径在 $n \geq 12$ 时,c路径在 $n \geq 15$ 时,曲线分布在较窄的区域,但应力-应变曲线整体缓慢上移。

3.2 干湿循环作用下压实黄土的三轴剪切强度 为进一步分析干湿循环作用下压实黄土三轴剪切强度的变化特征,对各循环路径在不同干湿循环次数的三轴剪切强度进行统计分析,建立三轴剪切强度与干湿循环次数 n 的关系见图2。由图2可知,压实黄土的三轴剪切强度随着干湿循环次数的增加先减小后逐渐增大,但增大幅度较小。其中,干湿循环路径a的强度劣化主要集中在前9次,干湿循环路径b、c的强度劣化主要集中在前6次,干湿循环路径d的强度劣化主要集中在前3次。将三轴剪切强度达到最小值对应的干湿循环次数定义为临界干湿循环次数 n_c ,则干湿循环路径a、b、c、d的临界干湿循环次数 n_c 分别为9次、6次、6次和3次。当干湿循环次数小于临界干湿循环次数时,各干湿循环路径的三轴剪切强度逐渐减小,当干湿循环次数继续增加大于临界干湿循环次数 n_c 时,各干湿循环路径的三轴剪切强度相对于临界干湿循环次数 n_c 对应的三轴剪切强度有增大的趋势,但曲线较平缓;在 $\sigma_3=100\text{kPa}$ 时, $n=21$ 次对应的三轴剪切强度相对于临界干湿循环次数 n_c 对应的三轴剪切强度增幅:干湿循环a路径为18.69%,干湿循环b路径为38.7%,干湿循环c路径为64.32%,干湿循环d路径增幅达到60.07%。

压实黄土的三轴剪切强度变化受干湿循环路径的影响显著。不同干湿循环路径中三轴剪切强度

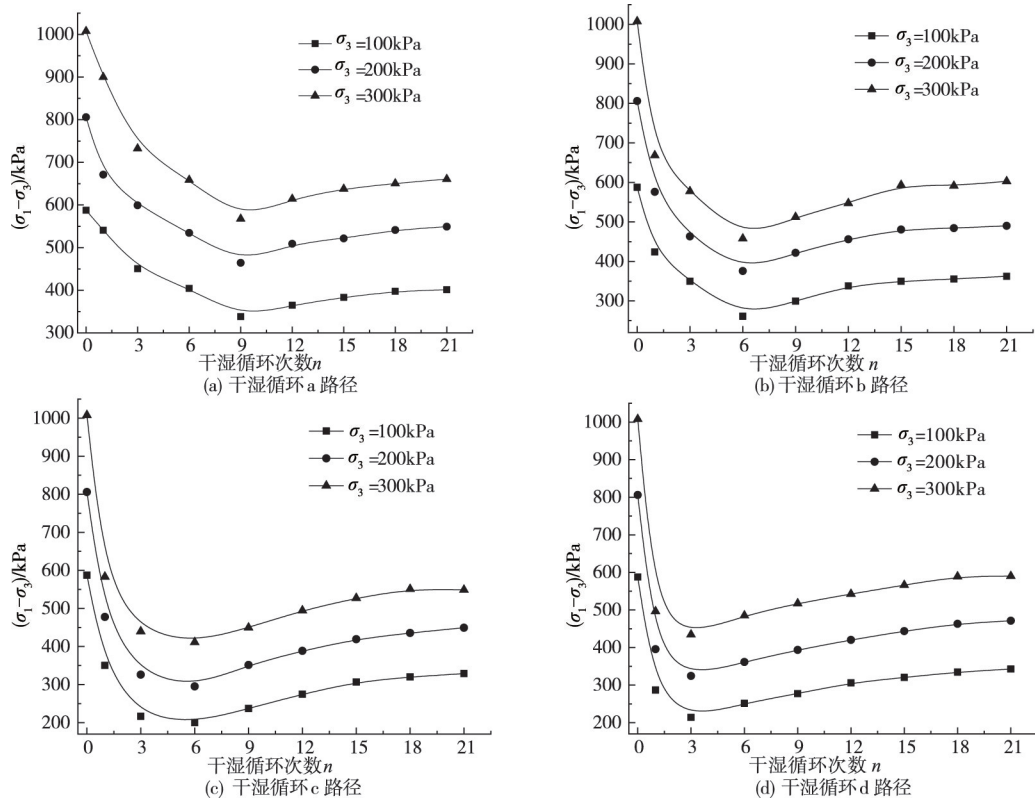


图2 干湿循环作用下压实黄土三轴剪切强度变化规律

与干湿循环次数的关系曲线在临界干湿循环次数 n_c 之前斜率逐渐减小，且减大幅度较大，其中在 $n=1$ 时曲线最陡，斜率最大；干湿循环路径a的强度在临界干湿循环次数 n_c 之前随干湿循环次数的增大减小相对比较缓慢，曲线斜率相对较小，而干湿循环路径d的强度减小相对比较剧烈，曲线斜率相对较大；对比分析不同干湿循环路径在相同围压条件下的强度与干湿循环次数关系曲线的最低点对应的强度值可以明显得出，干湿循环c路径的强度值最小，其次为d路径和b路径，a路径的强度值相对最大。在临界干湿循环次数 n_c 之后强度与干湿循环次数的关系曲线斜率由负值变为正值后逐渐增大，增大幅度相对较小，其中干湿循环路径a、b在 $n \geq 15$ 时，干湿循环路径c、d在 $n \geq 12$ 时曲线趋于平缓。

干湿循环幅度和下限含水率对压实黄土三轴剪切强度的劣化具有一定影响。随着干湿循环幅度的逐渐增大和下限含水率的逐渐减小，在 $\sigma_3=100$ kPa围压下，不同干湿循环路径压实黄土三轴剪切强度劣化的最大程度分别为：干湿循环路径a($A=4.1\%$)为42.48%，干湿循环路径b($A=10.1\%$)为55.55%，干湿循环路径c($A=16.1\%$)为65.95%，干湿循环路径d($A=22.1\%$)为63.56%；其中干湿循环路径c的三轴剪切强度劣化最明显。在 $\sigma_3=100$ kPa围压下，不同干湿循环路径的压实黄土试样在干湿循环12次后的三轴剪切强度最终劣化程度分别为：干湿循环路径a为37.93%，干湿循环路径b为42.49%，干湿循环路径c为53.22%，干湿循环路径d为44.54%。

根据摩尔-库伦理论求得抗剪强度指标：黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。建立黏聚力 c 和内摩擦角 φ 与干湿循环次数 n 的关系曲线见图3和图4。由图3可知压实黄土的黏聚力随着干湿循环次数的增加先急剧减小再逐渐增大，具有明显的转折点，转折点与干湿循环路径有关。转折点前的曲线较陡，斜率较大。干湿循环路径a的黏聚力在 $n=9$ 次以后开始逐渐增加，但增大幅度不大，干湿循环路径b、c的黏聚力在干湿循环 $n=6$ 次以后开始逐渐增大，干湿循环路径d的黏聚力在干湿循环 $n=3$ 次以后开始逐渐增大；干湿循环路径a、b、c、d分别在其曲线转折点处的黏聚力与初始值相比分别降低了36.1、43.71、74.23和72.05 kPa，其中干湿循环路径c的降低幅度最大，干湿循环路径a的降低幅度最小。当干湿循环次数大于12次时，压实黄土的黏聚力与干湿循环次数的关系曲线斜率逐渐减小；当干湿循环次数大于15次时，各干湿循环路径的黏聚力变化曲线逐渐趋于平缓。

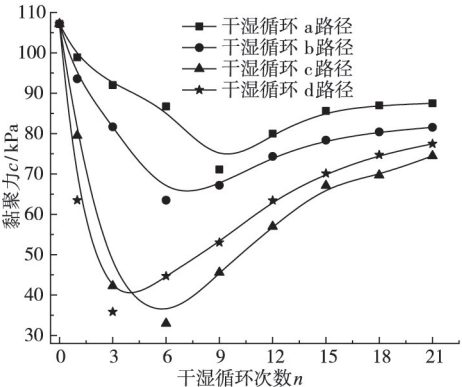


图3 黏聚力与干湿循环次数的关系

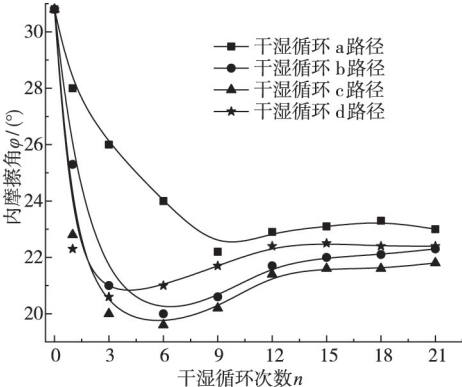


图4 内摩擦角与干湿循环次数的关系

由图4可知压实黄土的内摩擦角随干湿循环次数增加的变化规律与黏聚力的变化趋势相似，在 $n=1$ 次干湿循环作用下除干湿循环a路径外其他路径内摩擦角减小明显，在达到各自临界干湿循环次数 n_c 之后内摩擦角稍有增加，仅在约 $0 \sim 3^\circ$ 很小的范围内变化。当干湿循环次数大于12次时，压实黄土的内摩擦角曲线趋于平缓。

实际填方工程中压实黄土在后期运营中经历无数次干湿循环，且干湿循环路径和幅度复杂多变，压实黄土的三轴剪切强度及其强度指标在其孔隙和颗粒结构基本趋于稳定之后，三轴剪切强度的指标趋于稳定值。本文黏聚力和内摩擦角趋于稳定值所对应的干湿循环次数分别为 $n=15$ 和 $n=12$ 次，其他干湿循环路径及循环幅度条件下的压实黄土强度及强度指标变化特征还需在后续的工作中

继续研究。

3.3 干湿循环作用下压实黄土强度指标的劣化度 为进一步定量研究干湿循环作用下压实黄土的三轴剪切强度指标劣化程度,将三轴剪切强度指标按式(1)、式(2)定义的三轴强度参数指标劣化度对不同干湿循环作用次数压实黄土的黏聚力和内摩擦角进行计算,计算结果见图5和图6。

$$DR_c = \frac{c_0 - c_n}{c_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$DR_\varphi = \frac{\varphi_0 - \varphi_n}{\varphi_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: DR_c 、 DR_φ 分别为黏聚力劣化度和内摩擦角劣化度,当 $DR=0$ 时,强度指标未发生劣化,当 $0 < DR < 1$ 时,强度指标表现为劣化,%; c_0 、 c_n 分别为干湿循环次数为0的初始黏聚力和干湿循环次数为 n 的黏聚力, kPa; φ_0 、 φ_n 分别为干湿循环次数为0的初始内摩擦角和干湿循环次数为 n 的内摩擦角,°。

由图5可知,干湿循环路径a、b、c、d的黏聚力劣化度均随干湿循环次数先增大至峰值后逐渐减小,其中在峰值之前各干湿循环路径的曲线由陡变缓的顺序为d、c、b、a,之后曲线逐渐趋于平缓。干湿循环路径a、b、c、d的黏聚力最大劣化度分别出现在干湿循环 $n=9$ 次、 $n=6$ 次、 $n=6$ 次、 $n=3$ 次,这与临界干湿循环次数一致。

由图6可知,不同干湿循环路径的压实黄土内摩擦角劣化度变化趋势与黏聚力的劣化度变化趋势相似,随着干湿循环次数的逐渐增加,内摩擦角劣化度先增大,之后缓慢减小。其中干湿循环路径b、c、d均在干湿循环次数 $n=3$ 次时达到最大值,在之后的9次干湿循环中,内摩擦角劣化度变化相对不大,只在0~5%范围内变化。干湿循环路径a的内摩擦角劣化度逐渐增大,在干湿循环次数 $n=9$ 次时达到最大值,之后缓慢减小。干湿循环路径a、b、c、d的内摩擦角劣化度曲线达到峰值之后随着干湿循环次数的继续增加逐渐减小,在 $n=12$ 次之后内摩擦角劣化度变化很小,曲线趋于平缓。

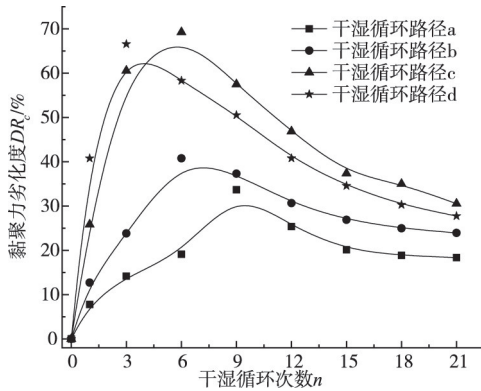


图5 不同干湿循环路径黏聚力劣化度

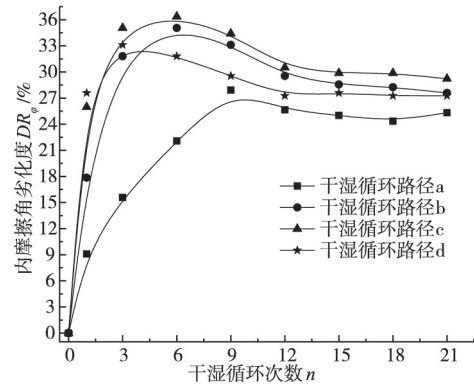


图6 不同干湿循环路径内摩擦角的劣化度

采用分段函数法利用式(3)对压实黄土黏聚力劣化度和内摩擦角劣化度计算结果进行拟合,拟合参数见表3和表4。

$$DR_{c(\varphi)} = \begin{cases} b_{c(\varphi)}n + c_{c(\varphi)}n^2 & n \leq n_c \\ a_{c(\varphi)} - \frac{b'_{c(\varphi)}}{e^{n'_{c(\varphi)}}} & n > n_c \end{cases} \quad (3)$$

式中: $a_{c(\varphi)}$ 为最终劣化度,%; $b_{c(\varphi)}$ 、 $b'_{c(\varphi)}$ 为控制劣化发展速度的参数; $c_{c(\varphi)}$ 、 $c'_{c(\varphi)}$ 为控制劣化曲线发展方向(增大或减小)的参数; n 为干湿循环次数; n_c 为临界干湿循环次数。

由表3和表4的拟合参数可以看出,式(3)对压实黄土的黏聚力劣化度和内摩擦角劣化度拟合分别具有很高的相关性,相关指数 R^2 均大于0.97以上,该分段函数关系式能够反映出劣化度随干湿循环次数的变化过程,各拟合参数能够较好的反映出曲线的发展规律。因此,可利用式(3)对压实黄土

表3 压实黄土黏聚力 c 劣化度拟合参数

干湿循环路径	参数						
	b	c	$R^2(n \leq n_c)$	a	b'	c'	$R^2(n > n_c)$
a	4.232	-0.071	0.968	16.541	-751.769	0.605	0.992
b	10.263	-0.587	0.989	21.686	-440.804	0.549	0.999
c	28.797	-2.876	0.999	27.800	-836.376	0.545	0.979
d	50.054	-9.289	0.999	26.880	-432.965	0.530	0.984

表4 压实黄土内摩擦角 φ 劣化度拟合参数

干湿循环路径	参数						
	b	c	$R^2(n \leq n_c)$	a	b'	c'	$R^2(n > n_c)$
a	6.027	-0.335	0.983	24.250	-301.160	0.674	0.989
b	16.568	-1.797	0.990	27.800	-330.661	0.645	0.997
c	20.417	-2.417	0.948	29.020	-506.845	0.689	0.995
d	35.877	-8.279	0.999	27.27	-96.367	0.619	0.983

的劣化度进行预测计算，以评估一定干湿循环作用后压实黄土的强度性质。

3.4 压实黄土干湿循环最劣含水率 干湿循环幅度对黏聚力和内摩擦角的劣化度影响显著。其中c路径的干湿循环幅度为16.1%，其黏聚力劣化程度最大，在 $n=6$ 次时达到了69.24%；干湿循环幅度最小的a路径(干湿循环幅度为4.1%)的黏聚力降低程度在 $n=9$ 次时为33.68%，仅为干湿循环c路径的黏聚力劣化程度的一半。相同干湿循环次数下，黏聚力劣化从小到大依次为干湿循环路径a、b、d、c。在21次干湿循环过程中，干湿循环路径a的内摩擦角降低程度最小，仅为9.09%；干湿循环路径c的内摩擦角降低程度最大，达到36.36%。

存在一个最劣干湿循环幅度 A_w ，在最劣干湿循环幅度条件下，压实黄土强度指标劣化度最大，最劣干湿循环幅度 A_w 对应的从饱和含水率减湿到的下限含水率定义为压实黄土干湿循环最劣含水率 w_w ，干湿循环达到最劣含水率时压实黄土的强度劣化度最大，对压实黄土后期运营最不利。为确定最劣干湿循环幅度 A_w ，分别建立干湿循环幅度 A 与黏聚力劣化度和内摩擦角劣化度的关系曲线见图7和图8，根据曲线峰值所对应的横坐标值即为最劣干湿循环幅度 A_w 。由图7和图8可以得出本文压实度为98.3%的压实黄土的黏聚力最劣干湿循环幅度 A_{wc} 为18.05%，对应的黏聚力最劣含水率为 $w_{wc}=4.95\%$ ；内摩擦角最劣干湿循环幅度 $A_{w\varphi}$ 为14.1%，对应的内摩擦角最劣含水率为 $w_{w\varphi}=8.9\%$ 。

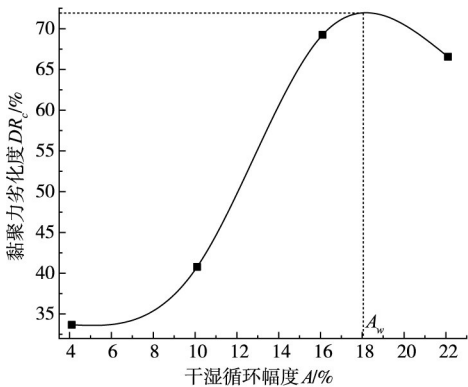


图7 黏聚力劣化度与干湿循环幅度的关系

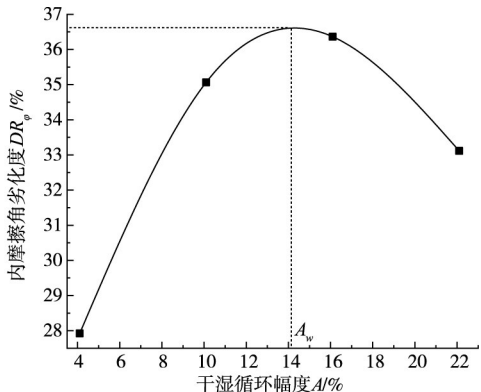


图8 内摩擦角劣化度与干湿循环幅度的关系

在压实黄土实际工程中，可以根据压实完成后黄土的瞬时含水率是否接近或等于最劣含水率来评价干湿循环对其强度的劣化程度，当压实黄土的含水率接近或等于最劣含水率时，压实黄土的强度劣化程度最大，反之最小。压实施工完成之后尽量避免使压实黄土在最劣干湿循环幅度 A_w 范围内进行干湿循环，通过对压实土体表面覆盖遮挡物等措施降低太阳辐射、风对土体水分的蒸发，从而

减小干湿循环幅度以避免减湿至最劣含水率，从而保证压实黄土施工完成后干湿循环使其三轴剪切强度的劣化程度降到最低。

3.5 剪切强度劣化机制分析 干湿循环使压实施工完成后的黄土体初始结构发生损伤，结构的损伤导致其强度发生劣化。增湿过程使压实黄土中的微小土颗粒不断填充大孔隙，使大孔隙向中小孔隙演化，但总孔隙率增大，导致土颗粒间的吸附强度减弱；减湿过程会使土样内部和表面产生裂隙（图9），裂隙又使土样的孔隙率增大，进一步加剧吸附强度的减弱；孔隙数量增多和裂隙的发育是导致压实黄土发生结构损伤和强度降低的主要因素。随着干湿循环幅度的增大，土样在减湿过程中，体积含水率不断减小，基质吸力不断增大，基质吸力的增加不仅加剧了土样中裂隙的发育，同时由基质吸力导致的压应力使土颗粒间的孔隙间距减小，孔隙比减小。

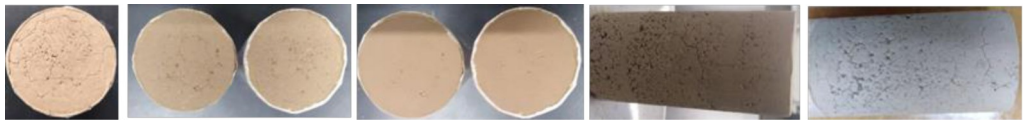


图9 干湿循环过程中试样表面裂隙发育

当干湿循环次数小于临界干湿循环次数时，增、减湿不仅使土中孔隙率增大，还会使土的孔隙率减小，在这一阶段，孔隙率以增大为主，最终导致压实黄土的三轴剪切强度降低。当干湿循环次数大于临界干湿循环次数时，基质吸力对土颗粒的反复作用使土颗粒相互靠近，孔隙比相对降低；颗粒对大、中孔隙和裂隙的充填减小了孔隙率和提高了颗粒间的联结作用及咬合作用，使压实黄土的三轴剪切强度相对于临界干湿循环次数所对应的三轴剪切强度有所增大，但增大幅度相对较低。随着干湿循环次数的不断增加，最终压实黄土的三轴剪切强度趋于定值，该定值不会达到或超过压实黄土的初始三轴剪切强度。

为进一步验证上述分析的合理性，对压实黄土a、b、c、d路径的试样分别在干湿循环作用0次、3次、6次和12次后的试样进行电镜扫描试验得到SEM图像，限于篇幅，本文只列出干湿循环c路径的SEM图像见图10。对的SEM图像分析可知：干湿循环为0次时，干密度为 1.70 g/cm^3 的压实黄土骨架颗粒为集粒，呈凝块状；颗粒间以线-面、面-面的镶嵌接触为主；颗粒间以中、小孔隙为主，大孔隙含量相对较少；土颗粒棱边、棱角相对比较明显（图10(a)(e)）。随着干湿循环次数的增加，颗粒间的线-面接触减少，面-面接触增加；土中孔隙由大、中孔隙逐渐向中、小孔隙演化（图10(b)）—(d)(f) —(h)）。增湿过程中水的作用使微小颗粒填充颗粒间大孔隙和中孔隙，初始结构发生损伤，大、中孔隙不断向中、小孔隙演化，使孔隙数量增加；另外随着团粒表面微小颗粒和可溶盐被冲刷，团粒内部孔隙数量增加，总孔隙率增大。减湿过程中土发生干缩，干缩使土中裂隙和微裂隙发育，增大了压实黄土的孔隙率。当干湿循环次数超过临界干湿循环次数(c路径为6次)时，土中微小颗粒不断填充大、中孔隙，同时干缩导致土体体积减小，土中孔隙率降低^[25]。

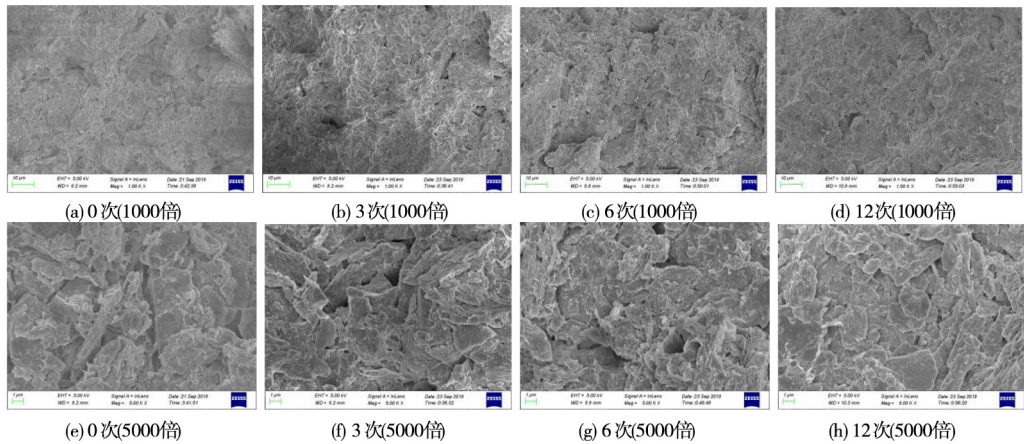


图10 c路径不同干湿循环次数的SEM图像

4 结论

通过对压实度为 98.3% 的黄土试样进行干湿循环试验、三轴剪切试验(UU), 研究了不同干湿循环次数和不同干湿循环路径条件下压实黄土的三轴剪切力学特性, 得出以下结论: 干湿循环作用下的压实黄土应力-应变关系曲线随着干湿循环次数的增加在坐标中先逐渐下移, 然后又逐渐上移, 最终逐渐趋于稳定。干湿循环对压实黄土三轴剪切强度具有劣化作用。存在临界干湿循环次数 n_c , 当 $n < n_c$ 时, 三轴剪切强度及强度指标急剧减小; 当 $n > n_c$ 时, 三轴剪切强度及强度指标逐渐增大并最终趋于稳定。三轴剪切强度指标劣化度能够定量反映干湿循环作用下压实黄土的强度劣化规律, 通过分段函数对劣化度进行拟合, 拟合相关系数均在 0.97 以上, 分段函数能够较好反映强度指标的劣化过程。压实黄土干湿循环最劣含水率对应的强度指标劣化度最大, 在压实黄土实际工程中, 可以根据压实完成后黄土的瞬时含水率是否接近或等于最劣含水率来评价干湿循环对三轴剪切强度的劣化程度。增湿过程使土颗粒间的吸附强度减弱和减湿过程使土样内部和表面产生裂隙是压实黄土强度劣化的主要原因。基质吸力的压密作用和土颗粒对大、中孔隙和裂隙的充填提高了颗粒间的联结作用及咬合作用, 使压实黄土的强度有所增大, 但增大幅度相对较低, 最终趋于定值。

参 考 文 献:

- [1] GUAN G S, RAHARDJO H, CHOON L E . Shear strength equations for unsaturated soil under drying and wetting [J] . Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(4): 594-606 .
- [2] 王伟, 龚传根, 朱鹏辉, 等 . 大理岩干湿循环力学特性试验研究[J] . 水利学报, 2017, 48(10): 1175-1183 .
- [3] 韩铁林, 师俊平, 陈蕴生 . 化学腐蚀和干湿循环作用下砂岩 I 型断裂韧度及其强度参数相关性的研究[J] . 水利学报, 2018, 49(10): 1265-1274 .
- [4] 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: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2005, 229(3): 443-456 .
- [5] TANG C S, CUI Y J, SHI B, et al . Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles[J] . Geoderma, 2011, 166(1): 111-118 .
- [6] WANG D Y, TANG C S, CUI Y J, et al . Effects of wetting-drying cycles on soil strength profile of a silty clay in micro-penetrometer tests[J] . Engineering Geology, 2016, 206: 60-70 .
- [7] 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 .
- [8] 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 .
- [9] 杨和平, 肖夺 . 干-湿循环效应对膨胀土抗剪强度的影响[J] . 长沙理工大学学报(自然科学版), 2005, 2(2): 1-5 .
- [10] 慕现杰, 张小平 . 干湿循环条件下膨胀土力学性能试验研究[J] . 岩土力学, 2008, 29(S1): 580-582 .
- [11] 孙德安, 黄丁俊 . 干湿循环下南阳膨胀土的土水和变形特性[J] . 岩土力学, 2015, 36(S1): 115-119 .
- [12] AL-HOMOUD A S, BASMA A A, HUSEIN M A I, et al . Cyclic swelling behavior of clays[J] . Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(7): 562-565 .
- [13] ZHANG R, YANG H P, ZHENG J L . The effect of vertical pressure on the deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Unsaturated Soils . Carefree, AZ, 2006 .
- [14] NOWAMOOZ H, JAHANGIR E, MASROURI F . Volume change behavior of a swelling soil compacted at different initial states[J] . Engineering Geology, 2013, 153: 25-34 .
- [15] ALDAOOD A, BOUASKER M, AL-MUKHTAR M . Impact of wetting-drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils[J] . Engineering Geology, 2014, 174: 11-21 .

- [16] 刘文化, 杨庆, 唐小微, 等. 干湿循环条件下不同初始干密度土体的力学特性[J]. 水利学报, 2014, 45(3): 261-268.
- [17] 刘文化, 杨庆, 孙秀丽, 等. 干湿循环条件下干燥应力历史对粉质黏土饱和和力学特性的影响[J]. 水利学报, 2017, 48(2): 203-208.
- [18] 程富阳, 黄英, 周志伟, 等. 干湿循环下饱和红土不排水三轴试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1017-1026.
- [19] 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(S1): 93-97.
- [20] 袁志辉, 倪万魁, 唐春, 等. 干湿循环下黄土强度衰减与结构强度试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1894-1902.
- [21] 王飞, 李国玉, 穆彦虎, 等. 干湿循环条件下压实黄土变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2306-2312.
- [22] 刘宏泰, 张爱军, 段涛, 等. 干湿循环对重塑黄土强度和渗透性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2010(4): 38-41.
- [23] 胡长明, 袁一力, 王雪艳, 等. 干湿循环作用下压实黄土强度劣化模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2804-2817.
- [24] 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.
- [25] 王铁行, 郝延周, 汪朝, 等. 干湿循环作用下压实黄土动强度性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1242-1251.

Experimental study on triaxial shear characteristics of compacted loess under drying and wetting cycles

HAO Yanzhou¹, WANG Tiehang¹, WANG Zhao², JIN Xin³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3. School of Civil and Architectural Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: A series of drying and wetting cycles test and triaxial shear test were carried out for the loess samples which were compacted to dry density of 1.7g/cm^3 under the optimum moisture content condition to investigate the influence of the structure damage of the compacted loess caused by the drying and wetting cycles on its stress-strain characteristics and triaxial shear strength. The results indicate that the drying and wetting cycles have a significant effect on the triaxial shear properties of compacted loess, with the number of drying and wetting cycles increasing, the stress-strain curve of compacted loess moves down sharply, then up gradually, and finally tends to be stable. The drying and wetting cycles degrade the triaxial shear strength of compacted loess. The defined strength index degradation degree can better reflect the degradation rule and process of the triaxial shear strength index. Affected by the range of dry and wet cycles, there is the worst moisture content of drying and wetting cycles in compacted loess. The degradation degree of strength index is the largest under the condition of the worst moisture content. The degradation degree of triaxial shear strength can be evaluated according to whether the instantaneous moisture content of loess after compaction is close to or equal to the worst moisture content.

Keywords: drying and wetting cycles; compacted loess; stress-strain curve; critical number; deterioration; the worst moisture content

(责任编辑: 韩 昆)