

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.099



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 湿-干循环作用下脱湿红土的无侧限 抗压强度特性

唐芸黎, 黄英, 贺登芳, 南海宇

(昆明理工大学 电力工程学院, 昆明 650500)

**摘要:**以云南红土为研究对象,以湿-干循环作为控制条件,考虑湿-干循环次数、初始含水率、干密度 3 个影响因素,进行室内无侧限抗压强度试验,研究湿-干循环作用下脱湿红土的无侧限抗压强度与湿-干循环次数、初始含水率、干密度的关系。结果表明:经过湿-干循环作用,脱湿红土的应力-应变关系曲线呈典型的应变软化型特征。相比湿-干循环前,湿-干循环后红土的应力-应变关系曲线的应变软化特征更为明显,无侧限抗压强度提高,且随着湿-干循环次数的增大,脱湿红土的无侧限抗压强度减小。不同初始含水率、干密度下,脱湿红土的应力-应变关系曲线均呈应变软化型;随着初始含水率的增大,湿-干循环前,素红土的无侧限抗压强度减小,相对应的峰值应变增大;湿-干循环后,脱湿红土的无侧限抗压强度增大,相对应的峰值应变增大。随着干密度的增大,湿-干循环前后红土的无侧限抗压强度均增大,相对应的峰值应变也呈增大趋势。

**关键词:**云南红土;湿-干循环;初始含水率;干密度;无侧限抗压强度

中图分类号:TU411.6

文献标志码:A

文章编号:2096-6717(2023)01-0112-10

## Unconfined compressive strength characteristics of dehumidified laterite under wet-dry cycle

TANG Yunli, HUANG Ying, HE Dengfang, NAN Haiyu

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P. R. China)

**Abstract:** This paper takes Yunnan laterite as the research object, takes the wet-dry cycle as the control condition. The indoor unconfined compressive strength test is carried out considering the three influencing factors of wet-dry cycle times, initial moisture content and dry density. The relationship between the unconfined compressive strength of dehumidified laterite under wet-dry cycle and the wet-dry cycle times, initial moisture content and dry density is studied. The results show that the stress-strain relationship curve of the dehumidified laterite presents typical strain-softening characteristics after the wet-dry cycle. Compared with that before the wet-dry cycle, the strain softening characteristics of the stress-strain curve of the laterite after the wet-dry cycle

收稿日期:2020-12-22

基金项目:国家自然科学基金(51568031)

作者简介:唐芸黎(1996-),女,主要从事红土的工程特性研究,E-mail:353749454@qq.com。

黄英(通信作者),女,教授,E-mail:huangying3764@sina.com。

Received:2020-12-22

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51568031)

Author brief:TANG Yunli (1996-), main research interest: engineering characteristics of laterite, E-mail: 353749454@qq.com.

HUANG Ying (corresponding author), professor, E-mail: huangying3764@sina.com.

are more obvious, and the unconfined compressive strength increases, and with the increase of the number of wet-dry cycles, the unconfined compressive strength decreases. Under different initial moisture content and dry density, the stress-strain curves of dehumidified laterite are strain softening. With the increase of initial moisture content, the unconfined compressive strength of laterite decreases and the corresponding peak strain increases before the wet-dry cycle, and after the wet-dry cycle, the unconfined compressive strength and the corresponding peak strain of dehumidified laterite increase. With the increase of dry density, the unconfined compressive strength of laterite increases before and after the wet-dry cycle, and the corresponding peak strain also increases.

**Keywords:** Yunnan laterite; wet-dry cycle; initial moisture content; dry density; unconfined compressive strength

实际岩土体结构工程,如大坝的上下游面、坝顶部位以及边坡、挡土墙、路基等存在大量的临空面,临空面上的土体处于无侧限约束,其力学特性通过无侧限抗压强度来表示。土体的无侧限抗压强度是指土体在无侧限约束条件下抵抗压缩破坏的能力,是反映土体力学稳定性的重要指标之一,受到土体的土性、含水率、干密度(压实度)、温度、时间、干湿循环、冻融循环等因素的影响,各种影响因素的综合作用降低了土体的无侧限抗压强度,可能导致临空土体发生崩塌、滑落、滑坡等工程破坏,危及工程的安全运行。因此,研究土体处于无侧限条件下的强度变化规律对实际工程具有重要的指导意义。

关于土体的无侧限抗压强度特性,主要针对改良土、膨胀土、黄土、黏性土、红土等开展了较多的研究。对于改良土,Wani等<sup>[1]</sup>研究了枯草芽孢杆菌和巴氏杆菌对软土无侧限抗压强度的影响,结果表明,两种细菌均能提高软土的无侧限抗压强度,原因是方解石晶体的形成。Liu等<sup>[2]</sup>研究了冻融循环对秸秆纤维土无侧限抗压强度的影响。Chavali等<sup>[3]</sup>研究了木质素磺酸盐对膨胀土工程性能的改善作用,结果表明,木质素磺酸盐对膨胀土的强度特性有显著提高,且土壤中的细粒含量决定了木质素磺酸盐的最佳百分比。孟凡东<sup>[4]</sup>、姜彤等<sup>[5]</sup>研究了干湿循环作用对膨胀土、粉土无侧限抗压强度的影响,结果表明,随着干湿循环次数的增加,土体的无侧限抗压强度减小。高国红等<sup>[6]</sup>、高建伟等<sup>[7]</sup>、慕现杰等<sup>[8]</sup>研究了含水率和干密度对黄土、膨胀土无侧限抗压强度的影响,结果表明,土体的无侧限抗压强度随含水率的增大而减小,随干密度的增大而增大。魏尧等<sup>[9]</sup>研究了含水率、冻融循环次数和冻结温度3因素交互作用对黄土无侧限抗压强度的影响。Jotisankasa<sup>[10]</sup>对曼谷黏土进行了无侧限压缩试

验,采用土壤张力计测定了曼谷黏土的土壤吸力和有效强度参数,结果表明,曼谷黏土的无侧限抗压强度与土壤吸力之间存在正相关关系。对于红土,王海湘<sup>[11]</sup>、陈议城等<sup>[12]</sup>研究了不同含水率对红黏土无侧限抗压强度的影响,结果表明,随着含水率的增大,红黏土的无侧限抗压强度减小。石崇喜等<sup>[13]</sup>研究了不同掺砂比例对固化改良红土的无侧限抗压强度特性的影响,结果表明,随着掺砂比例的增加,固化改良红土的无侧限抗压强度逐渐增大,但强度的增大存在一个最优的掺砂比例。

云南地区红土分布较广,红土是母岩经历不同程度的红土化作用形成的,其物质组成成分不同于其他土类,相应的工程地质特性与其他土类也不同,且云南天气多变,云南红土型大坝受干-湿循环作用的影响较大。近些年来,云南干旱天气频发,干旱时,大坝坝坡等临空面开裂增多、变形增大。故研究经过先增湿后脱湿即湿-干循环作用的脱湿红土无侧限抗压强度特性具有重大意义。笔者以湿-干循环作为控制条件,考虑湿-干循环次数、初始含水率、干密度的影响,通过室内无侧限抗压强度试验,研究脱湿红土的无侧限抗压强度特性。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料

试验红土取自昆明世博园附近地区,根据《土工试验规程》(SL 237—1999)<sup>[14]</sup>,测得该红土的基本特性见表1。由表1可见,该红土的颗粒组成主要以粉粒和黏粒为主,含量为91.3%,且粉粒含量高于黏粒含量;塑性指数为10.6,介于10.0~17.0之间;液限为42.4%,小于50.0%。该土料属于低液限粉质红土。

### 1.2 试验方案

试验旨在研究湿-干循环作用下脱湿红土的不

侧限抗压强度特性。考虑湿-干循环次数  $T$ 、初始含水率  $\omega_0$ 、干密度  $\rho_d$  的影响,以湿-干循环作为控制条件,将经过先增湿后脱湿的红土称为脱湿红土,以脱湿红土为研究对象,采用 TSZ30-2.0 型应变控制式三轴仪,开展不同影响因素下脱湿红土的无侧限抗压强度试验,研究湿-干循环作用下脱湿红土的无侧限抗压强度特性。湿-干循环次数设定为 0、1、

2、3、4、6、8 次,初始含水率设定为 23.0%、25.0%、27.0%、29.0%、31.0%,干密度设定为 1.30、1.33、1.36、1.39、1.42、1.45  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,增湿含水率控制为 27.0%,脱湿含水率控制为 15.0%,则湿-干循环幅度为 12.0% (15.0%~27.0%)。且每个影响因素下均设置 2 个平行试样,试验结果取平均值。

表 1 红土的基本特性

Table 1 Basic characteristics of laterite

比重 $G_s$	最大干密度 $\rho_{dmax}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最优含水率 $\omega_{op}/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 $I_p$	颗粒组成/%		
						砂粒 0.075~2.0 mm	粉粒 0.005~0.075 mm	黏粒 <0.005 mm
2.74	1.47	27.4	42.4	31.8	10.6	8.7	48.4	42.9

### 1.3 试验设计

1.3.1 试样制备 素红土样的制备:将试验土样风干、研磨,过 2 mm 筛,按设定的初始含水率加入一定质量的蒸馏水,静置浸润 24 h,以使土中水分分布均匀。根据设定干密度,采用分层击实法制备直径为 39.1 mm、高度为 80 mm 的素红土三轴试样。

湿-干循环试样的制备:湿-干循环过程按先增湿-后脱湿进行,增湿过程采用室温自来水浸泡法进行模拟,脱湿过程采用 40 °C 低温烘干法进行模拟,具体的循环过程见图 1。A 点为试样的初始含水率, B、D 点为脱湿含水率 15.0%, C 点为增湿含水率 27.0%。A→B、C→D 为脱湿过程, B→C 为增湿过程, B→C→D 即为一个湿-干循环过程。

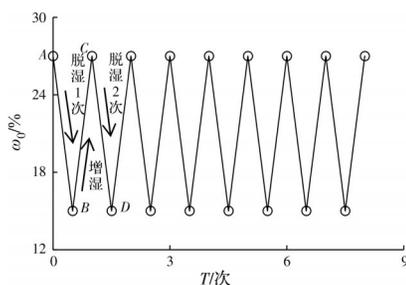


图 1 红土试样湿-干循环过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wet-dry cycle process of laterite sample

试验条件下,初始含水率均高于脱湿含水率,因此,先将不同初始含水率的素红土三轴试样(A点)放入 40 °C 的烘箱中低温脱湿至设定的脱湿含水率 15% (B点) 相对应的质量点,将试样取出后裹上保鲜膜,放入养护箱中养护 24 h,即完成第 1 次脱湿作用,作为第 1 次脱湿试样。脱湿完成后,将试样放

入装有自来水的桶中浸泡增湿至设定的增湿含水率 27.0% (C点) 相对应的质量点,增湿完成后,用保鲜膜包裹住,放入养护箱中养护 24 h,使试样含水分布均匀;之后,再将增湿完成后的试样放入烘箱中脱湿至脱湿含水率 15.0% (D点),即完成第 2 次脱湿作用,作为第 2 次脱湿试样。反复的增湿-脱湿即可完成多次的湿-干循环作用,得到不同湿-干循环次数下的脱湿红土试样。

1.3.2 试验过程 将湿-干循环完成后的脱湿红土试样安装在 TSZ30-2.0 型三轴仪上,控制应变速率为 0.18 mm/min,进行无侧限抗压强度试验,试验过程中,观测记录轴向力、轴向位移及试样破坏状态的变化。当试样破坏即停止试验。计算试验的轴向应力和轴向应变,绘制出应力-应变关系曲线,分析脱湿红土的无侧限抗压强度特性。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 湿-干循环次数的影响

2.1.1 应力-应变关系随湿-干循环次数的变化 图 2 给出了湿-干循环作用下初始含水率  $\omega_0$  不同、初始干密度  $\rho_d$  不同时,不同湿-干循环次数  $T$  下脱湿红土的轴向应力-应变 ( $\sigma_1 \sim \epsilon_1$ ) 的变化关系。

由图 2 可见,湿-干循环前 ( $T=0$  次),素红土的应力-应变关系曲线较平缓,曲线的应变软化程度较低,峰值不明显,压缩过程缓慢。随轴向应变的增大,轴向应力变化不大。湿-干循环后 ( $T=1 \sim 8$  次),不同湿-干循环次数下,脱湿红土的应力-应变关系曲线呈典型的应变软化特征,曲线的峰值明显,压缩过程较快,试样很快达到破坏,轴向应变增大到峰值以后,轴向应力急剧降低。因为湿-干循

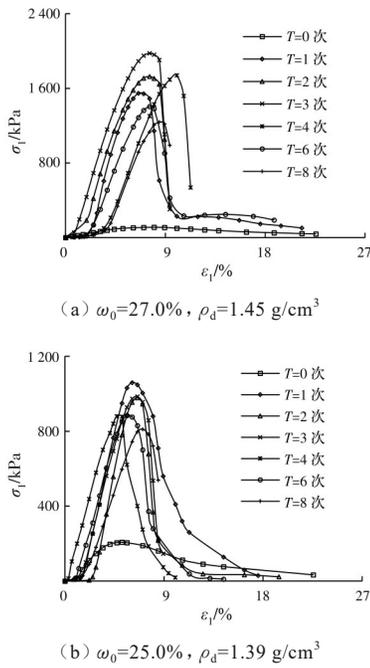


图 2 不同湿-干循环次数下红土的应力-应变关系  
Fig. 2 Stress-strain relationship of laterite under different wet-dry cycle times

环前,素红土样内部含水率较高,红土中的游离氧化铁等胶体溶解于水中,土体的基质吸力变小,且水分多,土粒间的连接力降低,土体相对较软,试样产生塑性破坏,不会发生坍塌,土样较完整。湿-干循环后,脱湿红土的含水率较低,土样中的游离氧化铁等胶体转化为结晶态,土颗粒之间的黏聚力下降,土样发生脆性破坏,受力达到一定程度后,直接坍塌,整体较破碎。

2.1.2 峰值特征参数随湿-干循环次数的变化

1) 无侧限抗压强度随湿-干循环次数的变化

无侧限抗压强度指的是应力-应变关系曲线上的最大轴向应力  $\sigma_{1f}$ ,当曲线上峰值不明显时,取轴向应变 15% 所对应的轴向应力作为无侧限抗压强度 ( $\sigma_{1f}=q_t$ )。图 3 给出了脱湿红土的无侧限抗压强度  $q_t$  与湿-干循环次数  $T$  的关系,图 4 给出了与图 3 对应的干密度加权强度  $q_{t\rho}$  和含水率加权强度  $q_{t\omega}$  与湿-干循环次数  $T$  的关系。加权强度指的是相同湿-干循环次数下,对不同干密度、不同初始含水率下红土的无侧限抗压强度分别按干密度、初始含水率进行加权平均,用以衡量干密度、初始含水率对红土无侧限抗压强度的影响,可反映出无侧限条件下脱湿红土的无侧限抗压强度随湿-干循环次数的整体变化情况。

由图 3、图 4 可见,不同初始干密度、不同初始含

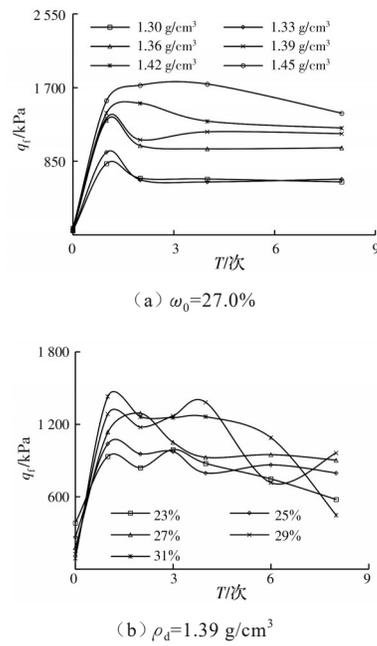


图 3 脱湿红土的无侧限抗压强度与湿-干循环次数的关系  
Fig. 3 Relationship between unconfined compressive strength of dehumidified laterite and wet-dry cycle times

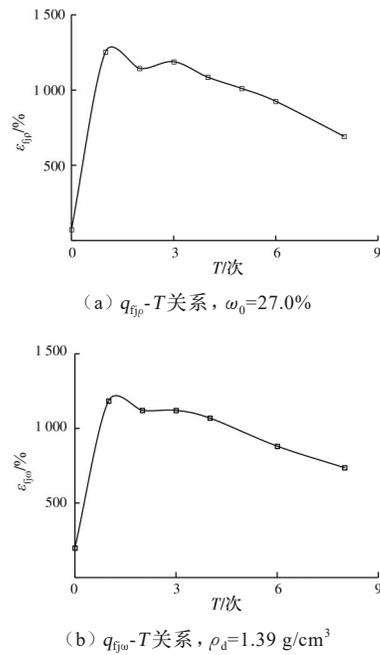


图 4 脱湿红土的加权强度与湿-干循环次数的关系  
Fig. 4 Relationship between the weighted strength of dehumidified laterite and wet-dry cycle times

水率时,随着湿-干循环次数的增大,脱湿红土的无侧限抗压强度呈急剧增大-波动减小的变化趋势。当湿-干循环次数由 0 次增大到 1 次时,无侧限抗压强度急剧增大,增大幅度为 1 301.4%~2 269.7%;当湿-干循环次数由 1 次增大到 8 次时,无侧限抗压

强度波动减小,减小幅度为 12.9%~68.7%。其相应的干密度加权强度和含水率加权强度也呈这一变化趋势。说明经过湿-干循环作用,脱湿红土的无侧限抗压强度增大。但随着湿-干循环次数的增多,最终引起脱湿红土的无侧限抗压强度减小。试验条件下,脱湿 1 次时的无侧限抗压强度存在极大值,脱湿 8 次时的无侧限抗压强度仍然大于脱湿前的相应值。因为湿-干循环后,土样的含水率下降,土体中的游离氧化物胶体由胶结态转化为结晶态,试样收缩,土体内部孔隙变小,土颗粒间的分子作用力变大,土体结构紧密,抵抗外力的能力变强,脱湿红土的无侧限抗压强度增大;但因游离氧化物状态的转变是不可逆的,多次湿-干循环后会使土体的结构发生损伤,脱湿红土的峰值强度减小。

2) 峰值应变随湿-干循环次数的变化

峰值应变指的是与土体的无侧限抗压强度相对应的轴向应变。图 5 给出了与图 4 中脱湿红土无侧限抗压强度相对应的峰值应变  $\epsilon_t$  与湿-干循环次数  $T$  的关系,图 6 给出了与图 5 对应的干密度加权峰值应变  $\epsilon_{fp}$  和含水率加权峰值应变  $\epsilon_{fw}$  与湿-干循环次数  $T$  的关系。加权峰值应变指的是相同湿-干循环次数下,对不同干密度、初始含水率下红土的峰值应变按干密度、不同初始含水率进行加权平均,用以衡量干密度、初始含水率对红土峰值应变的影响,可反映出无侧限条件下脱湿红土的峰值应变随湿-干循环次数的整体变化情况。

由图 5、图 6 可见,不同初始干密度、不同初始含水率下,随着湿-干循环次数的增大,脱湿红土的峰值应变呈波动性减小趋势,相对应的干密度加权峰值应变和含水率加权峰值应变也呈相同的变化趋势。相比脱湿前,湿-干循环次数较少时,峰值应变快速减小,减小幅度为 0.0%~46.7%;脱湿次数较多时,峰值应变有所增大,但仍然小于脱湿前的相应值。说明不论初始干密度和初始含水率的大小如何,湿-干循环作用都降低了红土达到破坏时的峰值应变,相比湿-干循环前,湿-干循环后的红土在应变更小时就达到破坏。但多次湿-干循环后,红土达到破坏时的应变有所增大。试验条件下,脱湿 1~2 次时,加权峰值应变存在极小值;脱湿 8 次时的峰值应变仍然小于脱湿前的相应值。因为湿-干循环后,土样内部的含水率较低,土颗粒之间的黏聚力下降,土体很快就达到破坏,对应的峰值应变减小。且随着脱湿次数的增加,土体内部结构重新排列分布,破坏时的应变有所增大,但相较于湿-干循环前,土体

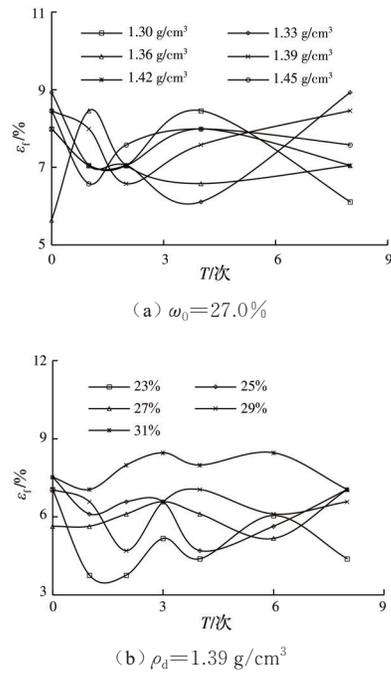


图 5 脱湿红土的峰值应变与湿-干循环次数的关系  
Fig. 5 Relationship between peak strain of dehumidified laterite and wet-dry cycle times

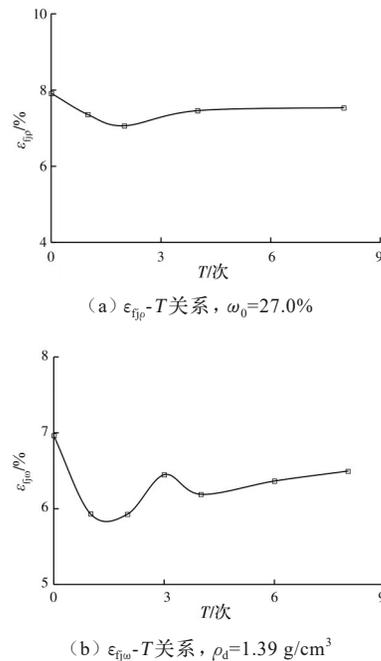


图 6 脱湿红土的加权峰值应变与湿-干循环次数的关系  
Fig. 6 Relationship between the weighted peak strain of dehumidified laterite and wet-dry cycle times

内部结构有损伤,峰值应变更小。

2.2 初始含水率的影响

2.2.1 应力-应变关系随初始含水率的变化 图 7 给出了湿-干循环作用下,干密度  $\rho_d$  为 1.39 g/cm<sup>3</sup>,

湿-干循环次数  $T$  为 0、8 次时,不同初始含水率  $\omega_0$  下脱湿红土的轴向应力-轴向应变( $\sigma_1$ - $\epsilon_1$ )关系。图 8 给出了湿-干循环作用下,干密度  $\rho_d$  为  $1.39 \text{ g/cm}^3$ ,湿-干循环次数  $T$  为 0、8 次时,初始含水率  $\omega_0$  分别为 23.0%、31.0% 的脱湿红土破坏图像。

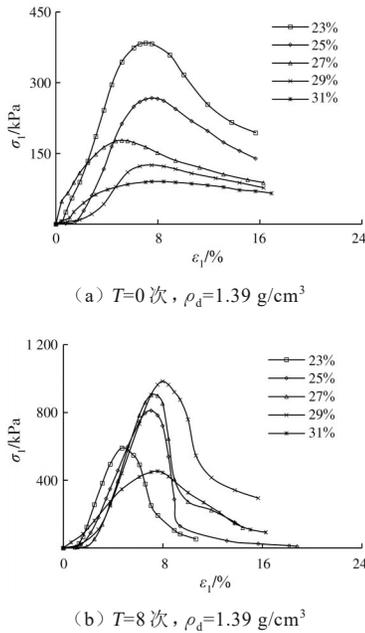


图 7 不同初始含水率下脱湿红土的应力-应变关系  
Fig.7 Stress-strain relationship of dehumidified laterite under different initial moisture content

图 7 表明,湿-干循环前( $T=0$ 次),不同初始含水率下,脱湿红土的应力-应变关系曲线均为应变软化型。当初始含水率较低时( $\omega_0=23.0\% \sim 25.0\%$ ),脱湿红土的应力-应变关系曲线呈典型的应变软化型特征,峰值明显,达到破坏后的轴向应力急剧降低,土样呈脆性破坏(图 8(a))。随着初始含水率的增大( $\omega_0=27.0\% \sim 31.0\%$ ),脱湿红土的应力-应变关系曲线的应变软化程度降低,曲线“下移”,破坏速度减慢,破坏后没有坍塌,有一条裂缝贯穿土样,且伴有土体脱落的现象(图 8(b))。

湿-干循环后( $T=8$ 次),不同初始含水率下,脱湿红土的应力-应变关系曲线为典型的应变软化型曲线,曲线顶“上移”,曲线的峰值强度明显,压缩过程较快,达到破坏后,轴向应力急剧下降,土样坍塌,发生脆性破坏(图 8(c)、(d))。相比脱湿前,脱湿后红土的应力-应变关系曲线软化程度较高,峰值强度更明显,压缩过程更快,达到破坏后轴向应力的下降速度也较快。

因为当含水率较低时,土体中水分子被矿物质

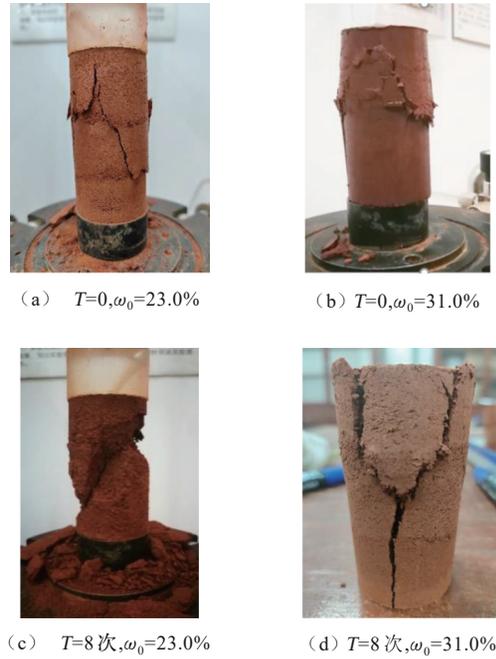


图 8 不同初始含水率下红土试样的破坏形态  
Fig.8 Failure modes of laterite samples with different initial water contents

吸附形成强结合水膜,强结合水膜具有较高的黏滞性,此时水分子与黏土矿物片、微晶态游离氧化铁吸附在一起形成一个稳定的团粒结构,且强结合水膜较薄,团粒间的分子间引力较大,团粒间胶结作用较强,红土具有较强的抵抗变形能力,无侧限抗压强度较高;随着含水率的不断增大,土中水以弱结合水膜的形式存在于团粒间,弱结合水膜较厚,由于水膜的楔入作用,团粒间的距离变大,分子间引力变小,团粒间胶结力大大降低,红土抵抗变形的能力减弱,无侧限抗压强度减小。湿-干循环后,土体中的水分迁出,土体内孔隙变多,土体更易被压缩且压缩后土体更密实,承载力更高,无侧限抗压强度增大。

2.2.2 峰值特征参数随初始含水率的变化

1) 无侧限抗压强度随初始含水率的变化

图 9 给出了脱湿红土的无侧限抗压强度  $q_f$  以及循环次数加权强度  $q_{fT}$  与初始含水率  $\omega_0$  的关系。循环次数加权强度指的是相同干密度下,对不同湿-干循环次数下红土的无侧限抗压强度分别按湿-干循环次数进行加权平均,用以衡量湿-干循环次数对无侧限抗压强度的影响,可反映出无侧限条件下脱湿红土的无侧限抗压强度随初始含水率的整体变化情况。

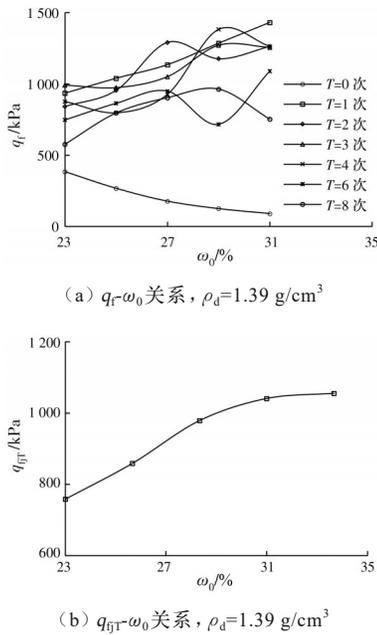


图9 脱湿红土的无侧限抗压强度与初始含水率的关系  
Fig. 9 Relationship between unconfined compressive strength of dehumidified laterite and initial moisture content

图9表明,湿-干循环前,当初始含水率由23.0%增大到31.0%时,红土的无侧限抗压强度减小了76.5%。湿-干循环后,随初始含水率的增大,各湿-干循环次数下脱湿红土的无侧限抗压强度呈增大趋势。当初始含水率由23.0%增大到31.0%时,湿-干循环次数在1~8次之间,脱湿红土的无侧限抗压强度增大26.7%~53.0%,相应的循环次数加权强度平均增大了39.2%。

因为湿-干循环前,当含水率较小时,土体含水较少,土颗粒与水分子间形成分子间作用力较强的强结合水膜,抵抗外力的能力较强,无侧限抗压强度较大,但缺少水的润滑作用,破坏后土体直接坍塌,破坏形式为明显的脆性破坏;当初始含水率增大时,红土中的游离氧化物溶解于水中,胶结作用使红土形成团粒结构,黏聚力增大,土体破坏后不会发生坍塌,只会发生错位,且水膜的楔入作用使土体抵抗变形的能力减弱,无侧限抗压强度减小。湿-干循环后,红土中的游离氧化物一部分由胶结状态转化为结晶态,一部分随着红土试样中的水分流出而流失,转化为结晶态的游离氧化物在土颗粒表面形成“包膜”,内摩擦力增大。且循环后土体的孔隙变大,压缩后土体更加密实,抵抗变形的能力增强,无侧限抗压强度增大;且当初始含水率越大,脱湿水分就越多,状态发生转变的游离氧化物就越

多,孔隙变化也越大,压缩后土体更密实,无侧限抗压强度更大。多次湿-干循环后,土体中的大颗粒被冲刷成粒径较小的小颗粒,红土试样内部裂缝增多,土体的结构受损,无侧限抗压强度减小。

## 2) 峰值应变随初始含水率的变化

图10给出了脱湿红土的无侧限抗压强度 $q_i$ 相对应的峰值应变 $\epsilon_i$ 以及循环次数加权峰值应变 $\epsilon_{gr}$ 与初始含水率 $\omega_0$ 的关系。循环次数加权峰值应变指的是,相同干密度下,对不同湿-干循环次数下红土的峰值应变按湿-干循环次数进行加权平均,用以衡量湿-干循环次数对红土峰值应变的影响,可反映出无侧限条件下脱湿红土的峰值应变随初始含水率的整体变化情况。

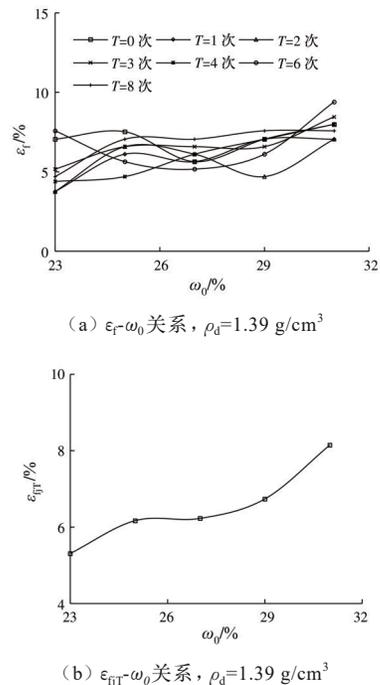


图10 脱湿红土的峰值应变与初始含水率的关系  
Fig. 10 Relationship between peak strain of dehumidified laterite and initial moisture content

图10表明,湿-干循环前,当初始含水率由23.0%增大到31.0%时,红土的峰值应变呈波动性增大,增幅为13.3%。湿-干循环后,随初始含水率的增大,各个湿-干循环次数下红土的峰值应变增大。当初始含水率由23.0%增大到31.0%时,湿-干循环次数在1~8次之间,脱湿红土的峰值应变增大了24.0%~87.5%,相应的循环次数加权峰值强度平均增大了53.4%。

因为随着初始含水率的增大,红土试样中的水分增大,孔隙减小,土颗粒的黏结力增大,土体压密

速度减慢,土样更易发生塑性破坏,破坏后峰值强度所对应的峰值应变增大。湿-干循环后,水分迁入和迁出土体引起土体内部颗粒的重分布,且初始含水率越大,湿-干循环过程中迁入和迁出的水分就越多,湿-干循环后土体结构越紧密,对应的峰值应变增大。

### 2.3 干密度的影响

2.3.1 应力-应变关系随干密度的变化 图 11 给出了湿-干循环作用下初始含水率  $\omega_0$  为 27.0%, 湿-干循环次数  $T$  为 0、6 次时,不同干密度  $\rho_d$  下脱湿红土的轴向应力-应变( $\sigma_1$ - $\epsilon_1$ )关系。

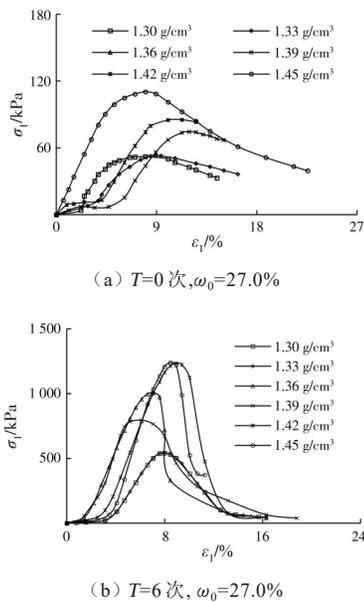


图 11 不同干密度下脱湿红土的应力-应变关系  
Fig. 11 Stress-strain relationship of dehumidified laterite under different dry densities

图 11 表明,湿-干循环前( $T=0$ 次),不同干密度下,素红土的应力-应变关系曲线呈应变软化型。当干密度较小时( $\rho_d \leq 1.36 \text{ g/cm}^3$ ),红土的应力-应变关系曲线较平缓,应变软化程度较低,峰值不明显,破坏速度较慢,试样产生塑性破坏。因为当干密度较小时,红土试样较松散,孔隙率大,试样压缩慢,破坏速度较慢,抵抗变形的能力弱。随着干密度的增大( $\rho_d \geq 1.39 \text{ g/cm}^3$ ),曲线逐渐“上移”“左移”,峰值明显,破坏速度较快。

湿-干循环后( $T=6$ 次),脱湿红土的应力-应变关系曲线为明显的应变软化型,峰值强度明显,压缩过程较快,达到破坏后,轴向应力急剧减小。且随着干密度的增大,曲线“上移”,峰值强度增大。相比脱湿前,脱湿后红土的应力-应变关系曲线的软化程度更高,峰值强度更明显,破坏速度更快。

因为干密度增大,土体的密实度增大,土体间的孔隙减小,土颗粒之间的接触面积和相互之间的咬合力增大,土体抵抗变形破坏的能力增强,土体的无侧限抗压强度增强,且试样的初始含水率为 27.0% 是试验土样的最优含水率,结构性较好,土体的破坏形式为塑性破坏,破坏后土体不会坍塌。脱湿后土体较硬,土体颗粒间黏聚力较低,土样发生脆性破坏,破坏后土样直接坍塌。且干密度越大,相同体积下所含土颗粒越多,抵抗变形的能力越强。湿-干循环后,土体中的水分减少,孔隙增大,土体更容易被压缩,压缩后的结构更密实,抵抗变形破坏的能力越强。

### 2.3.2 峰值特征参数随干密度的变化

#### 1) 无侧限抗压强度随干密度的变化

图 12 给出了脱湿红土的无侧限抗压强度  $q_t$ 、循环次数加权强度  $q_{fT}$  与干密度  $\rho_d$  的关系。循环次数加权强度指的是相同初始含水率下,对不同湿-干循环次数下红土的无侧限抗压强度分别按湿-干循环次数进行加权平均,用以衡量湿-干循环次数对无侧限抗压强度的影响,可反映出无侧限条件下脱湿红土的无侧限抗压强度随干密度的整体变化情况。

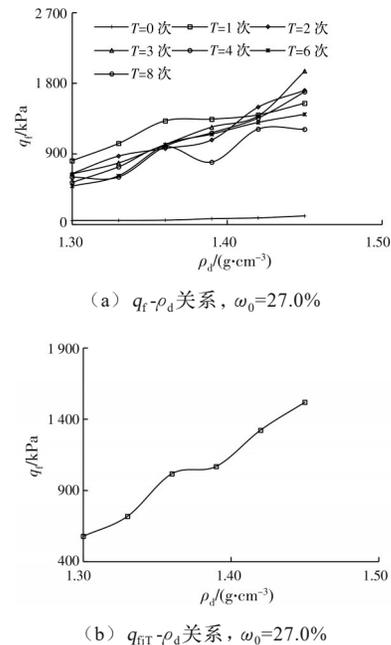


图 12 脱湿红土的无侧限抗压强度与干密度的关系  
Fig. 12 Relationship between unconfined compressive strength of dehumidified laterite and dry density

图 12 表明,随干密度的增大,湿-干循环前后,红土的无侧限抗压强度呈增大的变化趋势,相应的循环次数加权强度也呈相同的变化趋势。当干密

度从 1.30 g/cm<sup>3</sup> 增大到 1.45 g/cm<sup>3</sup> 时,湿-干循环前,红土的峰值强度增大了 111.7%;湿-干循环后,湿-干循环次数在 1~8 次之间,脱湿红土的无侧限抗压强度增大了 89.8%~202.7%,相应的循环次数加权强度平均增大了 162.8%。说明不论湿-干循环前后,土体的干密度越大,密实程度越高,抵抗外荷载的能力越强,相应的无侧限抗压强度越大。试验条件下,脱湿后的含水率(15.0%)远远低于初始含水率(23.0%~31.0%),所以,湿-干循环作用显著提高了红土的无侧限抗压强度。

2) 峰值应变随干密度的变化

图 13 给出了与图 12 中脱湿红土的峰值强度  $q_f$  对应的峰值应变  $\epsilon_f$  以及循环次数加权峰值应变  $\epsilon_{fT}$  与干密度  $\rho_d$  的关系。循环次数加权峰值应变是指相同初始含水率下,对不同湿-干循环次数下红土的峰值应变按湿-干循环次数进行加权平均,用以衡量湿-干循环次数对红土峰值应变的影响,可反映出无侧限条件下脱湿红土的峰值应变随干密度的整体变化情况。

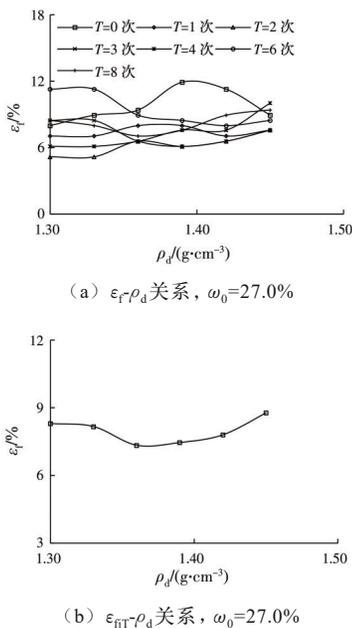


图 13 脱湿红土的峰值应变与干密度的关系  
 Fig. 13 Relationship between peak strain of dehumidified laterite and dry density

图 13 表明,湿-干循环前后,随干密度的增大,红土的峰值应变呈波动性增减的变化趋势,相应的循环次数加权峰值应变呈相同的变化趋势。当干密度从 1.30 g/cm<sup>3</sup> 增大到 1.45 g/cm<sup>3</sup> 时,湿-干循环前,红土的峰值应变增大了 11.8%;湿-干循环后,湿-干循环次数在 1~8 次之间,脱湿红土的峰值应

变的变化幅度为 -25.0%~46.6%,相应的循环次数加权峰值强度平均增大了 5.7%。试验条件下,干密度为 1.36 g/cm<sup>3</sup> 时,循环次数加权峰值应变存在极小值;但干密度达到 1.45 g/cm<sup>3</sup> 时,循环次数加权峰值应变大于干密度为 1.30 g/cm<sup>3</sup> 时。说明随着干密度的增大,红土的峰值应变增大。因为当干密度增大时,相同体积下土颗粒的含量越多,孔隙越少,土体越密实,抵抗变形的能力越强,相应的峰值应变越大。

3 结论

1) 经历湿-干循环作用后,脱湿红土的应力-应变关系曲线呈典型的应变软化型特征。相比湿-干循环前,湿-干循环后红土的应力-应变关系曲线的应变软化特征更为明显。湿-干循环作用提高了红土的无侧限抗压,减小了峰值应变。随着湿-干循环次数的增大,脱湿红土的无侧限抗压强度呈减小趋势,相对应的峰值应变呈增大趋势。

2) 不同初始含水率下,脱湿红土的应力-应变关系曲线均呈应变软化型。随着初始含水率的增大,湿-干循环前,红土的无侧限抗压强度呈减小趋势;而湿-干循环后,脱湿红土的无侧限抗压强度呈增大趋势,湿-干循环前后的峰值应变呈增大趋势。

3) 不同干密度下,脱湿红土的应力-应变关系曲线均呈应变软化型。随着干密度的增大,湿-干循环前后红土的无侧限抗压强度增大,相对应的峰值应变也呈增大趋势。

参考文献

[1] WANI K M N S, MIR B A. Unconfined compressive strength testing of bio-cemented weak soils: A comparative upscale laboratory testing [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(10): 8145-8157.

[2] LIU C, LV Y, YU X J, et al. Effects of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiber-reinforced soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(4): 581-590.

[3] CHAVALI R V P, RESHMARANI B. Characterization of expansive soils treated with lignosulfonate [J]. International Journal of Geo-Engineering, 2020, 11(1): 1-10.

[4] 孟凡东. 干湿循环效应对溧史杭灌区膨胀土特性的影响研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.

MENG F D. Study of the wet and dry cycle effect on

- strength characteristics of expansive soil in irrigation district among Pi River, Shi River and Hangbu River [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [5] 姜彤,李艳会,张俊然,等.干湿循环对豫东路基粉土无侧限抗压强度的影响[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(2):44-48.  
JIANG T, LI Y H, ZHANG J R, et al. Influences of drying-wetting cycle on the unconfined compressive strength of silt of subgrade in the eastern part of Henan Province [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2015, 36(2): 44-48. (in Chinese)
- [6] 高国红,霍俊杰.重塑黄土无侧限抗压强度与基质吸力关系[J].人民长江,2019,50(10):193-196,208.  
GAO G H, HUO J J. Relationship between unconfined compressive strength and matric suction of remolded loess [J]. Yangtze River, 2019, 50(10): 193-196, 208. (in Chinese)
- [7] 高建伟,余宏明,李科.黄土无侧限抗压强度的试验研究[J].安全与环境工程,2014,21(4):132-137.  
GAO J W, YU H M, LI K. Experimental research on unconfined compression strength of loess [J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(4): 132-137. (in Chinese)
- [8] 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(Sup1):580-582.  
MU X J, ZHANG X P. Research on mechanical properties of expansive soil under wetting-drying cycle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup1): 580-582. (in Chinese)
- [9] 魏尧,杨更社,叶万军,等.冻融黄土无侧限抗压强度的析因实验[J].西安科技大学学报,2019,39(1):103-111.  
WEI Y, YANG G S, YE W J, et al. Factorial experiment on unconfined compression strength of freeze-thawing loess [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(1): 103-111. (in Chinese)
- [10] JOTISANKASA A. Determination of effective strength parameters of soft Bangkok clay using suction-monitored unconfined compression tests [D]. Bangkok: Kasetsart University, 2009.
- [11] 王海湘.广西贺州红黏土的工程性质研究[J].公路,2018,63(1):13-19.  
WANG H X. Research on engineering properties of lateritic clay in Hezhou [J]. Highway, 2018, 63(1): 13-19. (in Chinese)
- [12] 陈议城,陈学军,吴迪,等.不同含水率下红黏土无侧限抗压强度与电阻率关系[J].桂林理工大学学报,2020,40(2):358-364.  
CHEN Y C, CHEN X J, WU D, et al. Relationship between unconfined compressive strength and electrical resistivity of red clay under different water contents [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2020, 40(2): 358-364. (in Chinese)
- [13] 石崇喜,黄英,杨玉婷,等.掺砂红土的力学特性及掺砂机理研究[J].工程勘察,2011,39(4):1-8.  
SHI C X, HUANG Y, YANG Y T, et al. Research on mechanical properties and sand-doped mechanism of the laterite improved with sand [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 39(4): 1-8. (in Chinese)
- [14] 土工试验规程:SL 237—1999 [S].北京:中国水利水电出版社,1999:78-80.  
Specification of soil test: SL 237-1999 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999: 78-80. (in Chinese)

(编辑 胡玲)