

干湿循环作用下非饱和压实黄土变形和电阻率特征的室内试验

秦鹏举^{1,2,3}, 轩龙龙¹, 王建美⁴, 邢鲜丽⁴

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 太原 030024; 2. 山西省交通科技研发有限公司, 太原 030032;

3. 太原理工大学 土木工程防灾与控制山西省重点实验室, 太原 030024;

4. 太原理工大学 矿业工程学院, 太原 030024)

摘要: 开展了干湿循环作用下非饱和压实黄土变形和电阻率特征的室内试验。首先, 获取经历 5 次干湿循环过程的试样体积变形和电阻率特征以及干燥后表面裂隙; 其次, 采用恒应变速率法研究不同含水率试样的压缩性质, 同时获取电阻率特征; 最后, 开展了核磁共振和扫描电镜测试以探究试样微观特征。结果表明, 随着干湿循环次数的增加, 试样膨胀应变和裂隙比增大, 而电阻率减小, 并均趋于稳定; 3 次干湿循环后试样的屈服应力明显减小, 弹、塑性压缩指数增大; 随着干湿循环次数的增加, 土体内部小孔隙数量明显增加, 中、大孔隙数量变化不明显。

关键词: 非饱和压实黄土; 干湿循环; 电阻率; 含水率; 微观特征

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

Laboratory Tests on Deformation and Resistivity Characteristics of Unsaturated Compacted Loess Under Dry-wet Cycles

QIN Pengju^{1,2,3}, XUAN Longlong¹, WANG Jianmei⁴, XING Xianli⁴

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Transportation Technology Research and Development Co., Ltd., Taiyuan 030032, China; 3. Shanxi Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 4. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Laboratory tests on the deformation and resistivity characteristics of unsaturated compacted loess under dry-wet cycles were carried out. First, the volume deformation and resistivity characteristics during cycling,

as well as surface cracks after the desiccation of the sample undergoing five dry-wet cycles were obtained. Then, compression properties of the sample with different water contents were studied by the constant rate of strain (CRS) method, and the resistivity was also obtained. Finally, the nuclear magnetic resonance imaging and scanning electron microscopy were used to study the microscopic characteristics of the sample. The results show that with the increase of the number of dry-wet cycles, the swelling stain and crack ratio of the sample increase and the resistivity decreases, all of them tend to be stable as well. The yield stress significantly decreases and the elastic and plastic compression indexes increase after three wet-dry cycles. With the increase of the number of dry-wet cycles, the number of small pores in the compacted unsaturated loess obviously increases and the number of medium and large pores has a slight variation.

Keywords: unsaturated compacted loess; dry-wet cycles; resistivity; water content; microscopic characteristics

黄土在我国广泛分布。在工程实践中, 通常将原状黄土压实, 以增加密度、降低水敏性, 从而改善湿陷性黄土的工程性质^[1-2]。同时, 压实黄土处于复杂的降水-蒸发等干湿循环环境中, 土体易发生变形或者产生裂隙, 使地基或路基等的承载力急剧下降, 从而引发工程事故^[3]。因此, 有必要深入研究干湿循环作用下压实黄土变形及结构特征, 为工程安全建设提供理论基础。

收稿日期: 2023-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(42177138, 41907239); 中国博士后科学基金(2020M680909)

第一作者: 秦鹏举, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为非饱和土工程地质。

E-mail: qinpengju@tyut.edu.cn.



论文
拓展
介绍

对于干湿循环作用下非饱和压实土体积变形,随着干湿循环次数的增加,同一干密度土体的收缩变形逐渐增大,并趋于稳定^[4-5]。此外,随着干湿循环次数的增加,各级压力下侧限压缩应变增大,随后趋于稳定^[6];随着干湿循环次数的增加,压实膨胀土在较低竖向应力下膨胀,在较高竖向应力下塌陷度增加^[7]。黄雪峰等^[8]发现,压实度越高,压实黄土总变形量就越小。

恒应变速率(CRS)法具有试验周期短和自动连续记录测试数据等优势^[9]。秦鹏举等^[10]测试了压实黄土的力学性质,含水率较小时竖向电阻率随应变的增大而减小。Munoz-Castelblanco等^[11]研究了天然非饱和黄土的压缩性质后发现,CRS试验的响应与时间有关,特别是在屈服后的塑性压缩性方面,且试样在较小的应变率下似乎更硬。Cui等^[12]采用 $2\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 的轴向位移速率研究非饱和粉土的压缩特性,压缩曲线均呈现2条近似线性段,类似超固结饱和土固结曲线。

电阻率是土的固有参数之一,压实黄土试样水平和垂直电阻率都随着含水率的增加而降低^[13-15]。安然等^[16]、Zeng等^[17]、Bai等^[18]发现,土体干湿循环作用下试样电阻率随干湿循环次数的增加而增加。Hu等^[19]得出了干湿循环次数越多、幅值越大,试样电阻率下降程度越大的规律。此外,Kong等^[20]发现,红土试样电导率随裂隙深度、长度、宽度和数量的增加而减小。

在土的微观结构研究方面,谢凯楠等^[21]基于低场核磁共振探讨了干湿循环对泥质砂岩微观结构劣化特性的影响。Zheng等^[22]通过核磁共振仪对不同加载阶段饱和和重塑黏土进行测量,分析横向弛豫时间、峰值面积等对饱和和重塑黏土的变形微观响应。王铁行等^[23]分析了不同干湿循环路径下压实黄土的微观结构图像以理解黄土强度。可见,核磁共振和扫描电镜技术可较准确地给出试样的微观结构特征。

开展了干湿循环作用下非饱和压实黄土变形和电阻率特征研究。压制干密度 $1.7\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、直径80 mm、高10 mm的3组平行试样。第1组试样经历5次干湿循环,探究干湿循环过程中试样体积变形、裂隙开展及电阻率的影响;第2组试样完成干湿循环后,进行恒应变速率压缩试验,探究试样的压缩特征和电阻率变化;对于第3组试样,利用核磁共振和扫描电镜探究干湿循环作用下压实黄土微观结构特征。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用黄土取自山西太原东山,整体呈黄色,块状固体,取土深度1.2 m,现场照片见图1。X射线衍射测试结果见图2。矿物成分(质量分数)为:石英(34.6%)、钠长石(19.4%)、方解石(16.2%)、白云母(19.6%)和绿泥石(10.2%)。细颗粒含量大于50%,塑性指数小于10,因此该黄土为粉土。土的基本物理参数如表1所示,颗粒粒径分布曲线见图3。



图1 取土现场照片

Fig.1 Photo of the site for extracting soil

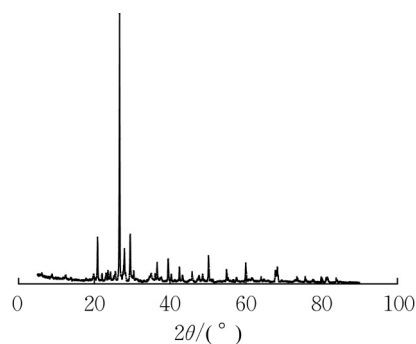


图2 X射线衍射测试结果

Fig.2 X-ray diffraction test results

表1 土的基本物理参数

Tab.1 Basic physical parameters of the soil

土粒 比重	最大干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最优含 水率/%	液限/%	塑限/%	塑性 指数	湿陷 系数
2.77	1.76	15.3	22.8	14.1	7.9	0.019

1.2 试验仪器

固结压力盒如图4所示,主要由水槽、试样环、钢珠、加载活塞、2块透水石和左右电极组成。压实后初始高度为10 mm的土样置于试样环中,试样环内径80 mm,由高强度绝缘材料制成。试样顶面边缘对称放置2块铜箔电极片,长10 mm、宽10 mm、厚0.1 mm,与试样顶面紧密贴合,并由铜导线引出,与

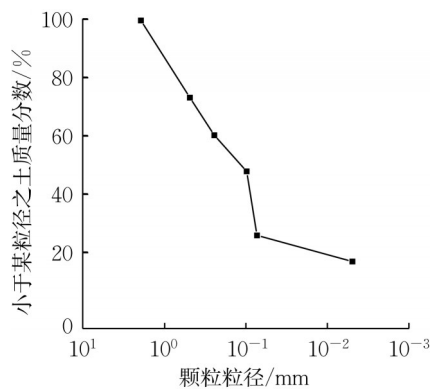


图3 颗粒粒径分布曲线

Fig.3 Distribution curve of particle sizes

LCR数字电桥上伸出的金属夹连接。试样上下各有一块透水石,上透水石置于试样环中,其上有金属上盖、钢珠,将施加的荷载均匀传递至试样。下透水石略大于试样环,用于支撑试样环及试样。为了消除金属盖和铜导线接触部分导电的影响,在接触部分设置绝缘材料。

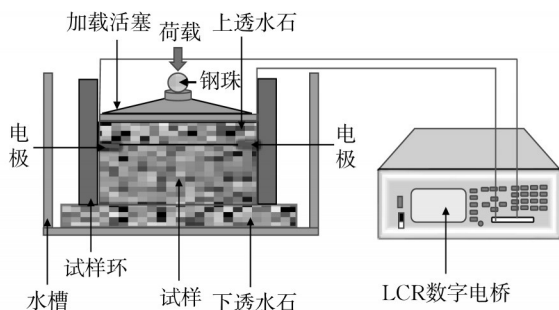


图4 固结压力盒和LCR数字电桥

Fig.4 Oedometer cell and LCR digital electric bridge

采用LCR数字电桥测量压实黄土的阻抗 Z ,电阻率计算参考文献[10]。所用固结仪为WG型单杠杆固结仪,其中固结压力盒与外部百分表和阻抗测试装置相连,实现试样侧限条件变形和阻抗测量。恒应变速率压缩试验由YHS-229WJ-50KN型压力机实现。微观结构试验采用核磁共振仪(NMR)和Gemini SEM 300扫描电镜(SEM)。

1.3 试验方法

为了制备土料,将晾干后黄土压碎,之后过2 mm筛备用。取一定质量的黄土土料,通过烘干法测得其初始含水率为1.5%。为了制备不同含水率的土料,在干燥土料上均匀喷洒一定质量的水并充分搅拌,之后密封静置24 h以使水分均匀分布于土料中。随后,为了制备压实高度为10 mm(干密度为 $1.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)的试样,取一定质量土料放入试样环中,

以 $0.4 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的均匀速率施压,直至压到10 mm高度时停止施压,随后保持试样高度不变,以减少试样回弹,然后卸载取出试样。重复上述操作直至所有试样压实完毕。压实后试样参数见表2。

表2 压实后试样参数

Tab.2 Parameters of the compacted sample

编号	循环次数	高度/mm	初始干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/%	试验
C1	5	9.995	1.700	15.01	干湿循环
H5	3	10.005	1.698	5.15	CRS
H10	3	10.005	1.698	10.20	
H15	3	9.992	1.701	15.16	
H20	3	10.010	1.697	20.50	
W5-1	1	9.943	1.709	4.95	NMR
W5-2	2	10.010	1.698	4.96	
W5-3	3	10.021	1.696	4.97	
W15-1	1	10.100	1.683	14.92	
W15-2	2	10.022	1.696	14.96	
W15-3	3	9.955	1.708	14.96	
S5-0	0	10.042	1.693	4.85	SEM
S5-3	3	10.041	1.693	4.81	
S15-0	0	10.021	1.696	14.79	
S15-3	3	9.981	1.703	14.88	

干湿循环于固结仪上进行。试样初始含水率15%—加水饱和至含水率25%—干燥至含水率1%—加水饱和至含水率15%,为1次干湿循环。循环过程中施加1 kPa竖向压力以使试验装置压紧,测量试样质量并计算试样含水率。在含水率为25%、20%、15%、10%、5%、1%时,记录试样裂隙开展情况,测量试样高度和阻抗。

对干湿循环后的试样进行恒应变速率压缩试验和电阻率测量,以获取试样的变形和阻抗。采用 $0.06 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率压缩非饱和压实黄土试样,压缩位移为3 mm,压缩过程中同时测量试样阻抗。

通过核磁共振仪(NMR)连续无损地跟踪经历不同干湿循环次数后的土体内部微观孔隙变化。此外,通过扫描电镜(SEM)观察经历0、3次干湿循环试样的微观特征。

2 试验结果与分析

2.1 干湿循环作用影响

干湿循环试验共有3组平行试样,选取最具代表性的C1试样试验结果进行分析。干湿循环作用会影响试样体积变形、裂隙开展和电阻率,本节将从这三方面展开分析。

2.1.1 体积变形特征

土体变形通常表现为体积变形^[24]和裂隙开展。图5所示为试样C1在5次干湿循环过程中干燥阶段不同含水率(ω)时竖向应变的变化,应变以试样初始高度为基准。可见,随着干湿循环次数的增加,各含水率下竖向应变均为负值,即发生了体积膨胀,一定干湿循环次数后逐渐趋于稳定,这与秦鹏举等^[25]的研究结论一致。试样含水率较高时,膨胀变形较大。这主要是由于加湿时,水分子进入黏性颗粒晶层间形成水化膜夹层,从而引起土体膨胀^[4]。干燥阶段土体未能完全收缩以及循环过程中土体内部裂隙的不断发展,使试样膨胀变形量随干湿循环次数增加而增加。

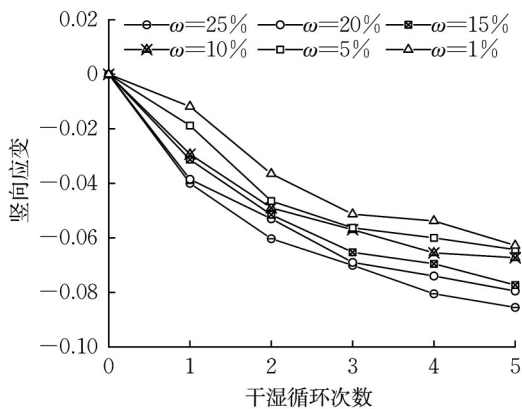


图5 不同含水率下试样C1竖向应变随干湿循环次数的变化
Fig.5 Variation of vertical strain of C1 with dry-wet cycles under different water contents

2.1.2 裂隙发育特征

图6所示为试样在干湿循环过程中干燥阶段不同含水率时试样C1裂隙。在初始制备阶段试样均是无裂隙的,随着干湿循环次数的增加,干燥阶段较低含水率的试样先于边缘产生细长条形裂隙,随后沿着裂隙的发展方向持续开展并产生部分分子裂隙。此外,由图6可知,试样含水率越低,裂隙发育越明显。这主要是由于黄土中的黏性颗粒遇水膨胀,干燥时土体失水,土体表面因毛细作用而产生吸力和张拉应力场,当张拉应力超过土体的抗拉强度时便会开裂^[24]。土体具有各向异性,土体各部位抗拉强度并不完全等同,在某些局部区域存在薄弱点,率先发育成裂隙^[26],并在裂隙尖端形成新的应力集中点,导致裂隙沿原来的发展方向持续开展。随着干湿循环达到一定次数后,土颗粒间有了一定的膨胀和收缩变形空间,裂隙发展开始减弱。含水率增大后,土体内部黏性颗粒遇水膨胀会填充裂隙^[27],同时裂隙边缘的崩塌填充作用使裂隙愈合,从而裂隙开展变弱^[26]。

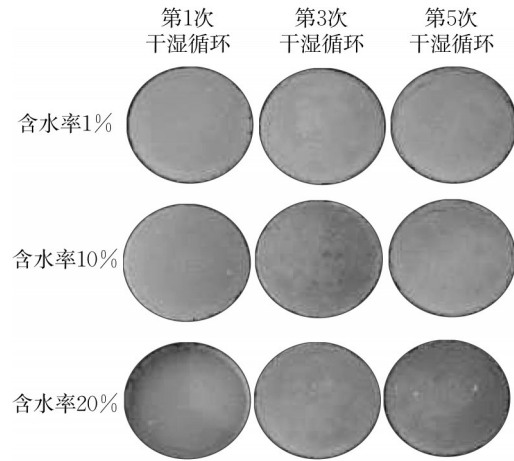


图6 干湿循环过程中干燥阶段试样C1裂隙

Fig.6 Cracks of C1 at the dry phase during dry-wet cycles

为了对试样裂隙进行了定量化分析,将采集到的试样裂隙图片二值化。采用了南京大学唐朝生团队开发的CIAS软件^[28],统计不同试样表面裂隙像素数,并计算裂隙像素数与试样表面像素数的比值,即裂隙比。不同含水率下试样C1裂隙比随干湿循环次数的变化如图7所示。

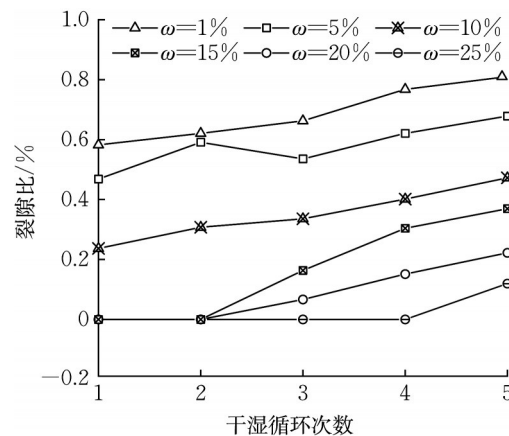


图7 不同含水率下试样C1裂隙比随干湿循环次数的变化
Fig.7 Variation of crack ratio of C1 with dry-wet cycles under different water contents

由图7可见,试样经历干湿循环次数越多且含水率越低时裂隙比越大。含水率为20%、25%时,由于含水率较高,因此分别经历了2次、4次干湿循环后才产生裂隙。含水率为1%、5%、10%、15%时,在第1次干湿循环的干燥阶段开始产生裂隙,至第4次干湿循环结束时,裂隙比分别为0.77%、0.62%、0.40%和0.30%,而第5次干湿循环中,裂隙比分别增加了0.040%、0.057%、0.070%和0.066%,增长趋于缓慢。可见,试样含水率越低,裂

隙发展越剧烈。

2.1.3 电阻率特征

图8所示为干湿循环过程中干燥阶段试样C1电阻率随干湿循环次数的变化。试样电阻率随含水率增大而减小。含水率一定时,试样电阻率随干湿循环次数的增加而减小最后趋于稳定。土体主要通过土颗粒间、土颗粒-孔隙液、孔隙液3种途径导电^[29],后两者占据主导地位。干湿循环次数的增加使土体中孔隙数量和裂隙比增大^[30],更易形成连通的孔隙液通道,试样导电能力增强,电阻率降低。此外,电阻率趋于稳定可能是由干湿循环一定次数后土体内部结构趋于稳定导致的。

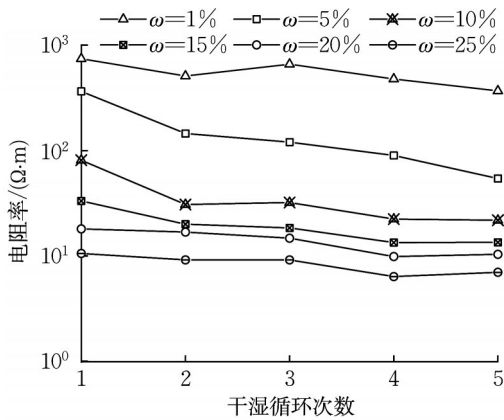


图8 不同含水率下试样C1电阻率随干湿循环次数的变化
Fig.8 Variation of resistivity of C1 with dry-wet cycles under different water contents

2.2 恒应变速率压缩试验

2.2.1 压缩曲线

图9所示为试样孔隙比-竖向应力的压缩曲线,孔隙比随竖向应力的增加而减小。此外,根据压缩曲线的形状可将其分为弹性压缩阶段和塑性压缩阶段。弹性压缩阶段的变形较小,主要是土骨架弹性变形;塑性压缩阶段的变形主要是土骨架塑性变形,即为部分不可逆压缩变形。在塑性变形过程中,土体内的部分气体排出,土颗粒排列发生改变,土体内孔隙在压缩后变小。此外,根据文献^[14],弹性压缩指数 C_e 、塑性压缩指数 C_p 和屈服应力 P_y 如图9所示。

2.2.2 力学参数

图10所示为弹、塑性压缩指数及屈服应力随含水率的变化。可见,塑性压缩指数 C_p 明显大于弹性压缩指数 C_e ,弹、塑性压缩指数均随含水率的增大而增大,屈服应力 P_y 随含水率的增大而减小。经历3次干湿循环后试样屈服应力明显小于未经历试样,但前者的弹、塑性压缩指数要大于后者。试样含水

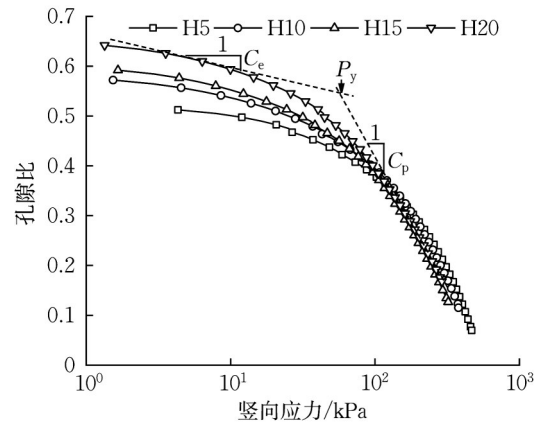


图9 不同含水率下试样孔隙比-竖向应力压缩曲线
Fig.9 Void ratio-vertical stress curves of samples under different water contents

率的增加,使土颗粒间水膜变厚,压力作用下土颗粒更易滑动。此外,黏土矿物的吸水膨胀和一些盐类矿物的溶解,使试样具有较大的压缩性并降低试样强度。干湿循环作用也会使土体劣化,因此试样屈服应力减小,弹、塑性压缩指数变大。

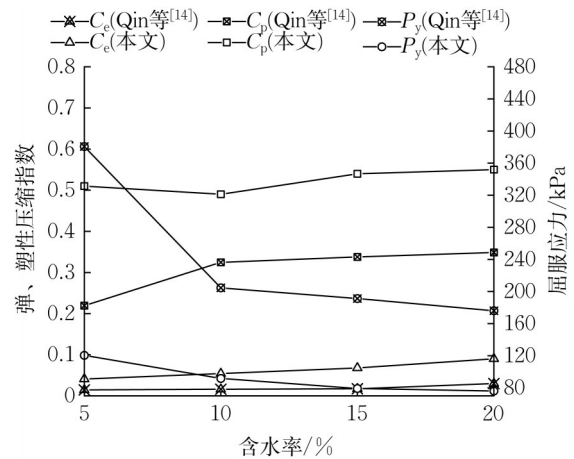


图10 弹、塑性压缩指数及屈服应力随含水率的变化
Fig.10 Variation of elastic and plastic compression index and yield stress with water contents

2.2.3 电阻率特征

图11所示为不同含水率下试样电阻率-应变曲线。对于较低含水率试样(含水率小于20%),电阻率随应变增大而减小并趋于稳定。初始阶段,随着试样饱和度增大,部分孔隙水得以连通,电流路径明显增多;随着应变增大,孔隙液通道增长有限,电阻率趋于稳定。然而,对于含水率20%的试样,随着应变的增加电阻率初始阶段减小,随后增大。这可能是由于当应变增加到一定程度时,较多的水从土体中排出,电阻率增加。

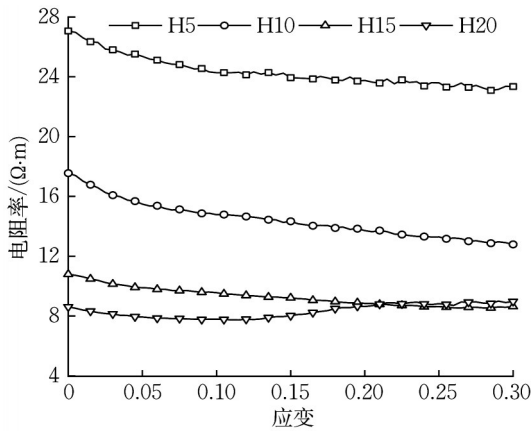


图 11 不同含水率下试样电阻率-应变曲线

Fig.11 Resistivity-strain curves of samples under different water contents

2.3 干湿循环后试样微观特征

2.3.1 NMR 试验

图 12 所示为不同干湿循环次数下试样 T_2 谱曲线。

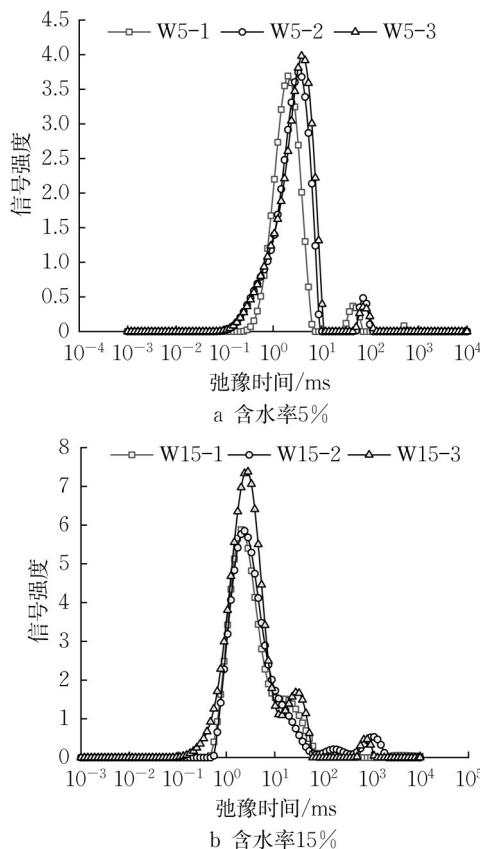


图 12 不同干湿循环次数下试样 T_2 谱曲线

Fig.12 T_2 spectral curves of samples under different dry-wet cycles

根据 T_2 值与孔隙孔径间的关系,从较小弛豫时间至较大弛豫时间的 3 个峰及周围区域积分面积分

别代表所测小、中、大孔隙的体积。图 12a 中,随着干湿循环次数的增加,所测小孔隙和中孔隙峰对应弛豫时间增大,而所测大孔隙峰逐渐消失。与图 12a 相比,图 12b 中各曲线峰值信号明显增强。同时,小、中和大孔隙峰对应的弛豫时间增大,表明随着干湿循环次数的增多,孔隙孔径呈增大趋势。

图 13 所示为试样谱峰区域面积分布。由图 13a 可见,随着干湿循环次数的增加,小孔隙面积增大,而中孔隙和大孔隙面积呈减小趋势。这是由于干湿循环作用下小孔隙逐渐增多,中孔隙和大孔隙中的水流入小孔,导致中孔面积减少,大孔隙甚至消失。由图 13b 可见,随着干湿循环次数增加,小孔隙面积呈现明显的增加趋势。这是由于孔隙越小,吸力越大,导致水分主要分布于小孔隙中。中、大孔隙规律不明显,可能是由这两类孔隙中水分较少和分布不均匀导致的,需要进一步研究。

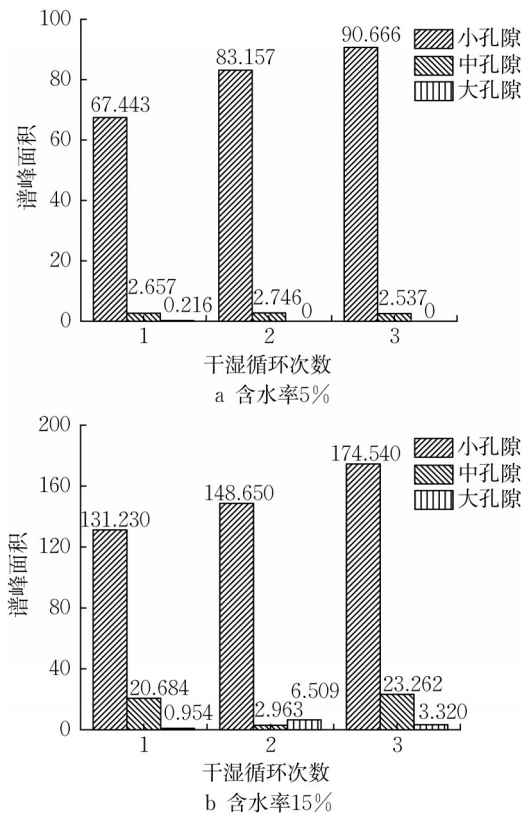


图 13 试样谱峰区域面积分布

Fig.13 Area distribution of sample spectral peaks

2.3.2 SEM 微观试验

图 14 所示为含水率 5% 和 15% 经历 0 和 3 次干湿循环试样的 SEM 图像。对比发现,经不同次数干湿循环后,土颗粒骨架和孔隙形态变化明显。未经干湿作用的土颗粒骨架连接多为面-面接触,以小孔

隙为主;随着干湿循环次数的增加,颗粒间的团聚性遭到破坏,部分团粒开始分离,颗粒发生破碎,颗粒间面-边、面-角接触明显增多,表现为土体内孔隙数量增多,结构趋于疏松。

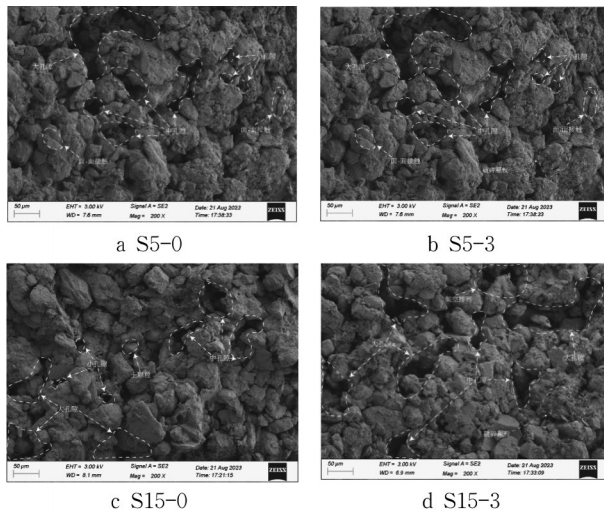


图 14 干湿循环作用后 SEM 图像

Fig.14 SEM images after dry-wet cycles

为了定量分析压实黄土所受干湿循环作用的影响,对 SEM 图片进行处理^[31],如图 15 所示。根据文献[22],可获取不同孔隙类型的分布情况。依据核磁共振测试中黄土孔隙分类,即直径 ≤ 3.6 、 $3.6 \sim \leq 20.0$ 、 $>20.0 \mu\text{m}$ 的孔隙分别为小孔隙、中孔隙和大孔隙。由图 16 可见,土体内以小孔隙为主,占总量的 90%。小孔隙数量随着干湿循环次数的增加而增加,中、大孔隙数量变化不明显。由图 17 可见,黄土孔隙的面积主要是由中、大孔隙决定的,占总面积的 90% 以上。随着干湿循环次数的增加,大孔隙面积占比增加。

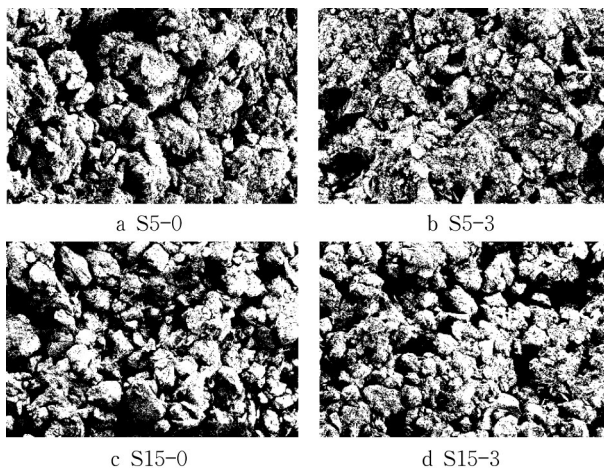


图 15 处理后 SEM 图片

Fig.15 Processed SEM images

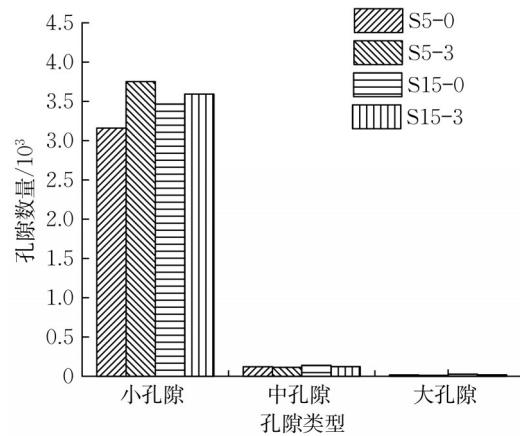


图 16 试样孔隙数量分布

Fig.16 Pore number distribution of samples

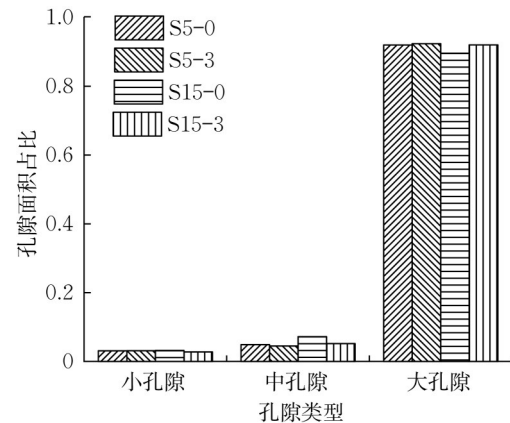


图 17 试样孔隙面积占比分布

Fig.17 Pore area ratio distribution of samples

3 结论

(1)在干湿循环过程中,试样一直处于膨胀阶段且膨胀变形逐渐稳定,裂隙开展随循环次数的增加而增加并趋于稳定。裂隙前期发育明显,后期增量减少。试样循环至含水率为 1%、5%、10%、15% 时,前 4 次循环结束时裂隙比分别为 0.77%、0.62%、0.40%、0.30%。第 5 次循环后,裂隙比变化开始趋缓分别增加了 0.040%、0.057%、0.070%、0.066%。此外,试样含水率越高电阻率越小,随干湿循环次数增加电阻率减小并趋于稳定。

(2)恒应变速率压缩过程中,孔隙比随竖向应力的增加而减小。塑性压缩指数明显大于弹性压缩指数。随着含水率的增大,弹、塑性压缩指数增大,屈服应力减小。经历 3 次循环后,试样的屈服应力明显小于未经历干湿循环试样,但前者的弹、塑性压缩指数大于后者。含水率较低时,试样电阻率随应变增大而减小;含水率较高时,试样电阻率先减小后

增大。

(3)随着干湿循环次数的增加非饱和黄土内部小孔隙数量明显增多,中、大孔隙数量变化不明显。此外,大孔隙面积占比增大,中、小孔隙面积占比减小,即随着干湿循环次数的增加大孔隙进一步发展,孔隙空间增大、结构趋于疏松。

作者贡献声明:

秦鹏举:试验设计,课题指导,论文框架提出,论文修改与审定。

轩龙:试验设计,数据分析,论文撰写。

王建美:试验设计,课题指导,论文修改与审定。

邢鲜丽:试验设计,课题指导,论文修改与审定。

参考文献:

- [1] JEFFERSON I, ROGERS C, EVSTATIEV D, *et al.* Treatment of metastable loess soil: lessons from Eastern Europe[M]. New York: Elsevier, 2005.
- [2] 胡长明,梅源,王雪艳. 离石地区湿陷性黄土地基强夯参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2903.
HU Changming, MEI Yuan, WANG Xueyan. Experimental study on dynamic compaction parameters of collapsible loess foundation in Lishi area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2903.
- [3] 王斌. 兰州铁路局管辖内湿陷性黄土路基病害模式及防治措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
WANG Bin. Study on the failure model and prevention measures of collapsible loess subgrade under the jurisdiction of Lanzhou Railway Bureau [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [4] 李向宁,倪万魁,王熙俊,等. 干湿循环过程中压实黄土的胀缩变形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 179.
LI Xiangning, NI Wankui, WANG Xijun, *et al.* Study on swelling and shrinkage deformation characteristics of compactified loess during dry-wet cycle [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 179.
- [5] 唐朝生,施斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1376.
TANG Chaosheng, SHI Bin. Characteristics of swelling and shrinkage deformation of expansive soil during dry-wet cycle [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1376.
- [6] 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.
WANG Fei, LI Guoyu, MU Yanhu, *et al.* Experimental study on deformation characteristics of compacted loess under dry-wet cycling conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2306.
- [7] ROSENBALM D, ZAPATA C E. Effect of wetting and drying cycles on the behavior of compacted expansive soils[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(1): 04016191.
- [8] 黄雪峰,孔洋,李旭东,等. 压实黄土变形特性研究与应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 37.
HUANG Xuefeng, KONG Yang, LI Xudong, *et al.* Research and application on deformation characteristics of compacted loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 37.
- [9] NGUYEN C O, TRAN T T, DAO V T T. Consolidation analysis with application of constant rate of strain consolidation tests for Vietnam clays [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(1): 833.
- [10] 秦鹏举,宋志伟,王永宝,等. 恒应变速率压缩中压实黄土结构特征试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2020, 51(4): 620.
QIN Pengju, SONG Zhiwei, WANG Yongbao, *et al.* Experimental study on structural characteristics of medium-compaction loess under constant strain rate compression [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51(4): 620.
- [11] MUNOZ-CASTELBLANCO J, DELAGE P, PEREIRA J M, *et al.* Some aspects of the compression and collapse behaviour of an unsaturated natural loess [J]. Géotechnique Letters, 2011, 1(2): 17.
- [12] CUI Y J, DELAGE P. Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt [J]. Géotechnique, 1996, 46(2): 291.
- [13] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. Transactions of the AIME, 1942, 146(1): 54.
- [14] QIN P, LIU Y, SONG Z, *et al.* An electrical resistivity method of characterizing hydromechanical and structural properties of compacted loess during constant rate of strain compression[J]. Sensors, 2020, 20(17): 4783.
- [15] 查甫生,刘松玉,杜延军,等. 黄土湿陷过程中微结构变化规律的电阻率法定量分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1692.
ZHA Fusheng, LIU Songyu, DU Yanjun, *et al.* Quantitative analysis of microstructure changes in loess during collapsibility by resistivity method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1692.
- [16] 安然,孔令伟,柏巍,等. 单轴荷载下残积土的电阻率损伤模型及干湿循环效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S1): 3159.
AN Ran, KONG Lingwei, BAI Wei, *et al.* Resistivity damage model of residual soil under uniaxial load and dry-wet cycle effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S1): 3159.
- [17] ZENG Z, KONG L, WANG M, *et al.* Assessment of engineering behaviour of an intensely weathered swelling mudstone under full range of seasonal variation and the relationships among measured parameters [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(12): 1837.

- [18] BAI W, KONG L, GUO A. Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, 5(5): 406.
- [19] HU Z, PENG K, LI L, *et al.* Effect of wetting-drying cycles on mechanical behaviour and electrical resistivity of unsaturated subgrade soil[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019(1): 3465327.
- [20] KONG L W, BAI W, GUO A G. Effects of cracks on the electrical conductivity of a fissured laterite: a combined experimental and statistical study [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2012, 35(6): 870.
- [21] 谢凯楠, 姜德义, 孙中光, 等. 基于低场核磁共振的干湿循环对泥质砂岩微观结构劣化特性的影响[J]. *岩土力学*, 2019, 40(2): 653.
XIE Kainan, JIANG Deyi, SUN Zhongguang, *et al.* Effect of dry and wet cycling based on low field nuclear magnetic resonance on microstructure degradation characteristics of argillaceous sandstone [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(2): 653.
- [22] ZHENG J, YANG Z, GAO H, *et al.* Experimental study on microstructure characteristics of saturated remolded cohesive soil during consolidation[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 18378.
- [23] 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.
WANG Tiexing, HAO Yanzhou, WANG Chao, *et al.* Experimental study on dynamic strength properties of compacted-loess under dry and wet cycling [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(6): 1242.
- [24] 林鑫, 唐朝生, 程青, 等. 基于数字图像相关技术的土体干缩开裂过程研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(7): 1311.
LIN Luan, TANG Chaosheng, CHENG Qing, *et al.* Research on shrinkage and cracking process of soil based on digital image correlation technology [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(7): 1311.
- [25] 秦鹏举, 刘宇波, 闫庆晨, 等. 高温干燥-室温加湿循环作用下压实黄土体变和电阻率特征[J]. *工程地质学报*, 2023, 31(2): 358.
QIN Pengju, LIU Yubo, YAN Qingchen, *et al.* Characteristics of volume variation and resistivity of compacted loess under high temperature drying and room temperature humidification cycle [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(2): 358.
- [26] 刘俊东, 唐朝生, 曾浩, 等. 干湿循环条件下黏性土干缩裂隙演化特征[J]. *岩土力学*, 2021, 42(10): 2763.
LIU Jundong, TANG Chaosheng, ZENG Hao, *et al.* Evolution characteristics of dry shrinkage cracks of clay under dry and wet cycling conditions [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2763.
- [27] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. *中国科学, B辑: 化学*, 1987, 17(12): 1309.
LEI Xiangyi. Pore types and collapsibility of loess in China [J]. *Science in China, B: Chemistry*, 1987, 17(12): 1309.
- [28] TANG C, SHI B, LIU C, *et al.* Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils [J]. *Engineering Geology*, 2008, 101(3/4): 204.
- [29] 刘禹阳, 王耕, 来弘鹏, 等. 干湿循环作用下原状黄土宏-微观参数关系研究[J]. *水利学报*, 2022, 53(4): 421.
LIU Yuyang, WANG Geng, LAI Hongpeng, *et al.* Study on macro-micro parameter relationship of undisturbed loess under dry-wet cycle [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(4): 421.
- [30] 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.
- [31] 谷天峰, 王家鼎, 郭乐, 等. 基于图像处理的Q₃黄土的微观结构变化研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(S1): 3185.
GU Tianfeng, WANG Jiading, GUO Le, *et al.* Study on microstructure changes of Q₃ loess based on image processing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S1): 3185.