

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.05.007

干湿循环与持续浸泡下老黏土强度与变形特性变化

黄少平¹, 晏鄂川¹, 陈前¹, 尹晓萌²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 信阳师范学院 建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000)

摘 要: 为探究重塑老黏土强度与变形受干湿循环与浸泡作用影响规律, 系统开展大量三轴压缩试验, 结合数理统计方法建立重塑老黏土强度与变形受干湿循环、浸泡作用劣化模型。研究表明: 随干湿循环次数增加黏聚力呈指数衰减, 前期衰减幅度较大, 衰减趋势不断减缓逐渐趋于稳定; 干湿循环过程中裂隙由试样四周向中间发展, 裂隙增长、增大、增多, 裂隙发育是强度衰减的根本原因之一; 试样呈应变硬化现象, 抗剪强度随干湿循环增加显著降低。同时, 黏聚力随浸泡时间增加亦呈指数衰减, 前期衰减最明显, 浸泡 1, 2 d 衰减幅度最大。受端部效应影响, 试样近端部变形微弱; 横向变形随干湿循环次数、浸泡时间的增加呈增大趋势, 集中于距离顶端 40 ~ 50 mm 处。干湿循环对土体强度、变形的劣化作用明显强于浸泡作用。

关键词: 老黏土; 干湿循环; 浸泡作用; 强度衰减; 横向变形

中图分类号: TU 442 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1005-3026(2020)05-0649-06



Variation of Strength and Deformation Characteristics of Paleo-Clay Under Dry-Wet Cycle and Continuous Soaking

HUANG Shao-ping¹, YAN E-chuan¹, CHEN Qian¹, YIN Xiao-meng²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China. Corresponding author: YAN E-chuan, E-mail: yecyec6970@163.com)

Abstract: In order to explore the effect of dry-wet cycle and continuous soaking on the strength and deformation of the remolded Paleo-clay, a large number of triaxial compression tests were carried out systematically. Meanwhile, with the adoption of the mathematical statistics method, a strength and deformation degradation model of remodeled Paleo-clay subjected to dry-wet cycle and soaking was established. The results indicate that the cohesion decreases exponentially with the increasing dry-wet cycles, the early degradation range is large, the degradation trend slows down and gradually stabilizes. The crack develops from the periphery to the middle during the dry-wet cycle, the crack length, width and amount all increased, fracture development is one of the root causes of strength degradation, the shear strength decreases significantly with increasing dry-wet cycles, and the sample exhibits a strain hardening phenomenon. In addition, the cohesion degrades exponentially with increasing soaking time, as well, and the early degradation is obvious. The most significant degradation of peak strength occurs after soaking for 1 or 2 days. The proximal deformation is less pronounced due to the end effect, the lateral deformation is concentrated at a distance of 40 ~ 50mm from the top, and the lateral deformation increases with dry-wet cycles and soaking time. The degradation effect of dry-wet cycle on soil strength and deformation is obviously stronger than that of soaking effect.

Key words: Paleo-clay; dry-wet cycle; soaking effect; strength degradation; lateral deformation

收稿日期: 2019-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(2019053086).

作者简介: 黄少平(1989-), 男, 江西宜春人, 中国地质大学(武汉)博士研究生; 晏鄂川(1969-), 男, 四川成都人, 中国地质大学(武汉)教授, 博士生导师.

老黏土是指第四系晚更新世 Q_3 及以前沉积含铁锰质结核与高岭土条纹的黏性土,其分布十分广泛,尤其是在湖北中部和北部、河南中部及安徽中部和北部等地区。由于地区气候周期性变化,老黏土总在地下水位变化、降雨、蒸发等作用下经历干湿循环作用,同时由于每次作用时长不同,导致老黏土经历不同时间尺度的浸泡作用。由于老黏土具有复杂的水土-力学性质及其受干湿循环和浸泡作用影响导致该类边坡发育的地质灾害种类繁多、机制复杂。

针对老黏土工程特性,国内外做了大量研究。艾传井等^[1]通过室内和现场试验对老黏土地基变形参数和承载性能进行了研究。李芳^[2]则通过大量工程地勘资料和室内土工试验成果,分析了武汉市东西湖区老黏土的基本工程地质特性。老黏土工程特性主要由其土体结构、物质组成、颗粒之间作用力等决定,干湿循环作用破坏土体结构、弱化土体颗粒间作用力,导致土体强度降低^[3-4]。关于干湿循环对土体强度劣化作用,国内外学者取得了丰硕研究成果;杨和平等^[5]、Aldaood 等^[6]和 Chen 等^[7]通过不同试验条件对土样进行了干湿循环作用下强度及其指标变化规律的试验研究,得到了强度指标随循环次数的衰减规律。吕海波等^[8]通过试验得到了膨胀土抗剪强度随干湿循环次数而衰减的规律,发现最初 1~2 次循环强度衰减幅度最大。慕现杰等^[9]得到了膨胀土随干湿循环强度的变化规律,随着循环次数的增加,土体的大裂缝逐渐减少并产生了大量的微裂缝,膨胀土的抗剪强度逐渐减小。卢再华等^[10]利用 CT 扫描试验研究干湿循环过程中裂隙演化过程,观

察分析了裂隙产生、发展和闭合过程。沈珠江等^[11]对干湿循环过程中土体裂缝的形成、发展到闭合的整个过程进行了数值模拟。综上,现有研究主要通过现场、室内试验及数值模拟等手段揭示土体强度随干湿循环衰减规律和获取裂隙演化过程,但仅仅对影响规律作定性分析,很少给出经验公式,对浸泡作用影响岩土体强度及其机制未作深入分析;且很少对试样横向变形(径向变形)受干湿循环和浸泡作用影响规律进行研究;同时,鲜有研究从裂隙演化角度揭示干湿循环对岩土体强度劣化机制。

因此,本文以湖北省嘉鱼县地区的典型老黏土为研究对象,通过三轴不固结不排水试验,对老黏土在干湿循环与浸泡作用下强度与变形的影响规律进行探究,建立劣化模型,揭示试样横向变形规律,同时从裂隙演化、水土作用角度揭示强度衰减机理。研究成果为进一步揭示干湿循环与持续浸泡作用对老黏土强度与变形特性的劣化规律提供理论依据和经验数据;为构建干湿循环与浸泡作用导致老黏土边坡失稳破坏预测模型、工程治理提供依据。

1 试验方案和过程

1.1 主要试验设备

试验主要仪器:台秤、应变式三轴仪(图 1a)、TYS-50 土样压实装置(图 1b)、真空抽气机(图 1c)、烘箱。试验加载由有级变速电机控制,加载速率 0.01~3 mm/min;围压采用气压加载。

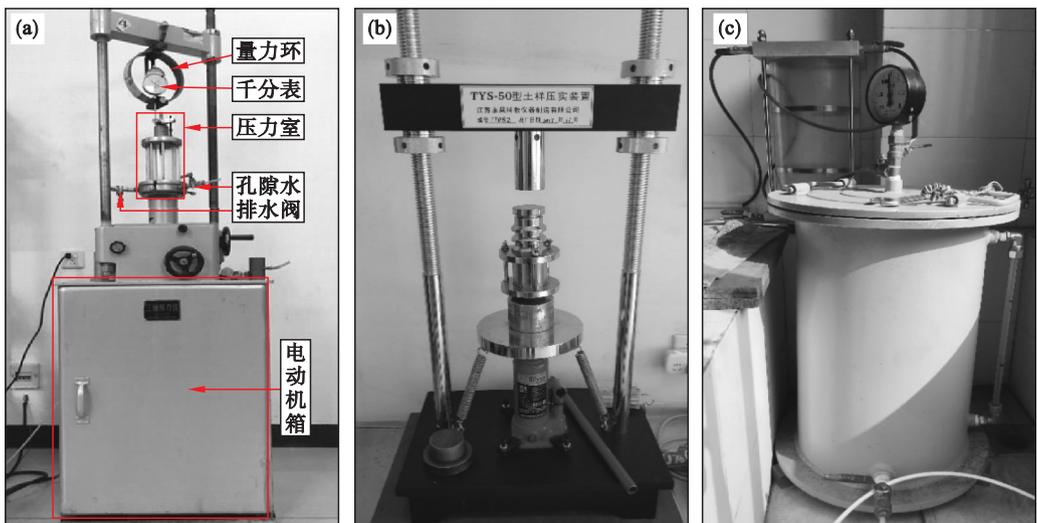


图 1 试验设备

Fig. 1 Test equipments

(a) 一应变式三轴压缩仪; (b) 一试样制作仪; (c) 一真空抽气浸泡缸。

1.2 试验土样

试验用土取自嘉鱼县石鼓岭村不稳定斜坡典型老黏土层. 采用直径 39.1 mm、高 80 mm 圆柱形标准试样. 土体基本物理力学参数见表 1.

表 1 老黏土基本物理力学参数表

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of Paleo-clay

密度 $\times 10^{-3}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	液限/%	塑限/%	干密度 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	最佳含水率/%
2.73	36.98	20.65	1.64	18.10

1.3 试验方案及过程

1) 干湿循环试验. 受气候周期性影响, 土体在降雨作用下达到或接近饱和状态, 雨过天晴后, 土体含水率降低并维持稳定值. 通过干湿循环试验模拟土体在自然状态下受气候周期性作用的真实情况, 揭示其对土体强度与变形作用规律.

干湿循环试验共 18 个试样, 分 0, 1, 2, 5, 7, 10 次 6 组, 其中 0 次为参照组试样, 每组 3 个相同土样. 首先将所有相同试样装饱和器中置于真空抽气机中抽气 2 h, 浸泡 24 h; 然后将试样取出放入 65 °C 烘箱中, 连续烘干至试样恒重. 即完成干湿循环 1 次, 静置冷却 2 h 后进行下一循环^[5].

2) 浸泡试验. 鉴于气候周期性变化、降雨时长不同, 土体受浸泡作用时间不同, 为此, 本次浸泡试验采用改变试样在水中持续浸泡时长来揭示其对土体强度与变形的作用规律.

浸泡试验共 21 个试样, 分别浸泡 0, 1, 2, 4, 7, 10, 24 d 7 组, 每组取 3 个相同试样.

3) 三轴压缩试验. 将完成预定浸泡时长、干湿循环次数的试样置于压力室, 分别进行围压 100, 200, 300 kPa 的不固结不排水试验, 加载速率 0.5 mm/min. 当试样完全破坏或者是轴应变达到

15% 时, 试验停止, 试验试样如图 2 所示.



图 2 三轴压缩试样

Fig. 2 Samples after triaxial compression

2 试验结果与分析

2.1 干湿循环对老黏土强度与变形影响

试验过程中可明显观察到试样表面出现裂隙. 几乎所有试样干湿循环 1 次后端面四周出现径向短小裂隙, 少量由于制样产生的非均质性 or 受到不对称应力形成软弱面产生相对较宽的裂隙. 通过监测记录试样裂隙演化过程获取裂隙发育情况 (图 3). 由图可知, 试样裂隙在干湿循环 1, 2 次时发展迅速, 5 次以后相对缓慢趋于动态稳定. 宏观角度来看, 干湿循环次数增加表现为试样裂隙发展明显, 通过对试样测量分析可直观获取裂隙演化过程和试样收缩程度. 干湿循环后试样四周出现径向间断细小裂隙和径向收缩现象, 侧面可见近端部裂隙. 此外, 由图 3d ~ 图 3e 可知随着干湿循环次数的增加试样裂隙由四周向中间扩展, 裂隙增大、增长、增多, 最终贯穿, 试样收缩明显.

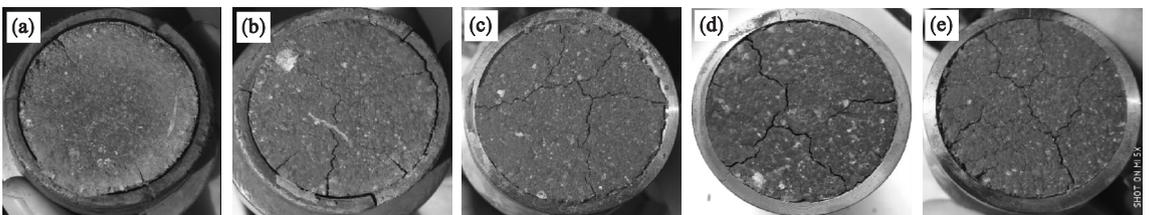


图 3 不同干湿循环次数裂隙发育情况

Fig. 3 The cracks development under dry-wet cycles

(a)— $n=1$; (b)— $n=2$; (c)— $n=5$; (d)— $n=7$; (e)— $n=10$.

2.1.1 应力应变关系曲线

基于试验数据绘制老黏土试样应力-应变关系曲线, 对不同干湿循环次数老黏土应力应变曲线 (图 4) 进行对比分析.

相对于参照组, 干湿循环后的应力应变曲线有所差异. 随干湿循环次数的增加, 产生相同轴向应变时对应的主应力差明显减小, 前期曲线越缓, 趋于平稳阶段出现越晚. 可见干湿循环对老黏土

强度具有劣化作用,干湿循环次数越多对老黏土 劣化作用越明显。

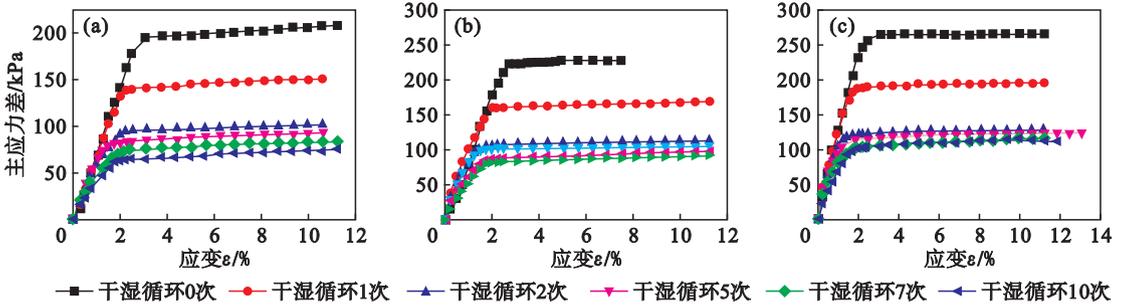


图 4 不同围压下不同干湿循环次数应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of different dry-wet cycles under different confining pressure

(a)—100 kPa; (b)—200 kPa; (c)—300 kPa.

由图 4 可知,干湿循环 1,2 次后,主应力差减小幅度最大,随后降低幅度呈变缓趋势,说明干湿循环破坏土体结构。从图 4 可知刚开始经历干湿循环时土体受到初次破坏,使得原生裂隙进一步发展,属于突变过程;反复干湿循环时,仅已有裂隙渐进性地扩张,少量原生裂隙萌生,对土体损伤没有起初强烈,损伤程度明显减弱。

2.1.2 抗剪强度指标

为研究干湿循环作用对老黏土强度特性的影响,通过三轴不固结不排水试验建立强度包络线获取不同干湿循环次数下老黏土强度参数。从图 5 可知老黏土属于弹塑性强化材料,采用强化弹塑性力学模型进行分析,运用莫尔-库伦破坏准则,基于试验数据绘制应力莫尔圆获取老黏土抗剪强度参数。重塑老黏土干湿循环 0 次黏聚力 c 为 77.8 kPa,内摩擦角 φ 为 6.2° ;1 次 c 为 57.3 kPa, φ 为 5.8° ;2 次 c 为 40.8 kPa, φ 为 5.5° ;5 次 c 为 35.5 kPa, φ 为 5.4° ;7 次 c 为 30.5 kPa, φ 为 5.5° ;10 次 c 为 25.1 kPa, φ 为 5.3° ;可知干湿循环对老黏土黏聚力劣化作用显著,内摩擦角变化微弱,针对此现象进行系统研究,揭示其影响规律,探究成因机制。

为揭示黏聚力 c 劣化规律,将得到的 c 进行无量纲化处理,即取不同干湿循环次数 n 下的黏聚力 c_n 与未进行干湿循环的黏聚力 c_0 进行比值,记为 η_{cn} 。基于试验数据的整理,结合数据分析软件进行拟合(图 5),构建 η_{cn} 随干湿循环次数 n 的劣化关系式:

$$\eta_{cn} = 0.633 \times e^{-n/1.71} + 0.367, R^2 = 0.9623. \quad (1)$$

基于此,推导 c_n 表达式:

$$c_n = \eta_{cn} \times c_{n0}, R^2 = 0.9623. \quad (2)$$

综上所述可知, c 随 n 的增加呈指数衰减,干湿循环 1,2 次时劣化作用最明显,衰减幅度较大,

衰减趋势不断减缓逐渐趋于稳定,干湿循环 5 次后,衰减到 45.6%,这与裂隙发展演化情况基本一致,可知裂隙发育是试样强度劣化的根本原因之一。基于拟合结果可知老黏土抗剪强度经历多次干湿循环后将趋于平衡状态。

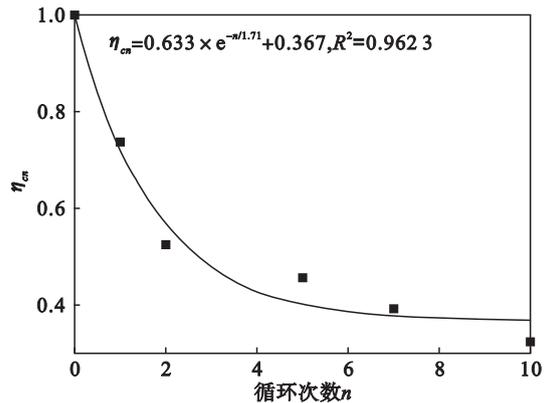


图 5 η_{cn} 与 n 的关系拟合曲线

Fig. 5 Relational fit curve of η_{cn} and n

脱湿过程中土体收缩,原生裂隙进一步扩展,同时形成新的裂隙,孔隙含量增加,对土体结构造成损伤,破坏土体完整性;增湿过程中土体内空隙被水分充填,使得颗粒中的胶结物得到溶蚀,同时颗粒之间的摩擦力减小,亲水性矿物吸水膨胀,使得土骨架反复收缩膨胀。反复的干湿循环导致裂隙加深加宽,数量增加,破坏土体的均匀性和完整性,造成不可逆转的结构损伤。因此在干湿循环过程中土体的黏聚力劣化明显。

2.1.3 横向变形特征

为进一步探究干湿循环对老黏土强度的影响,对试验后破坏试样的变形进行系统研究,揭示试样横向变形受干湿循环作用的影响规律。研究表明试样横向变形受干湿循环影响显著。

采用游标卡尺测量试验后试样直径,归纳总结其变形规律(图 6):试样横向变形随干湿循环

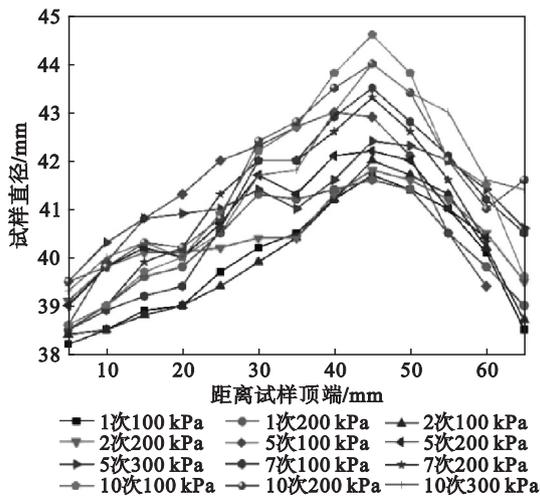


图 6 不同干湿循环次数试样横向变形规律
Fig. 6 Lateral deformation law of samples with different dry-wet cycles

次数的增加逐渐增大,随围压的增大而减小。脱湿过程中,土骨架收缩,原生裂隙凸显,试样表面可见明显裂隙,试样中微小孔隙扩张,孔隙含量增加。增湿过程中,水分充填裂隙,亲水性矿物吸水膨胀,导致试样体积增大。反复干湿循环增加试样孔隙含量,降低颗粒间黏结力,致使试样受压缩后产生更大变形。

2.2 浸泡作用对老黏土强度与变形影响

2.2.1 应力应变关系

基于三轴试验结果绘制不同围压条件下不同浸泡时间的应力应变曲线图(图 7),根据试验结果可知三个围压下应力应变曲线变化趋势与特征相似。由图 7 可明显看出,老黏土浸泡 1 d 后抗剪强度衰减最大,其次为浸泡 2 d,随着浸泡时间增加衰减幅度逐渐减小。浸泡后试样逐渐由应变软化向应变硬化转变,说明试样浸泡过程中对其结构有一定的损伤作用,浸泡时间越长劣化作用越明显。浸泡过程中试样可溶性物质溶于水破坏试样结构,含水率升高胶结物浓度降低,弱化其胶结作用。相对于干湿循环作用,劣化趋势基本相同,但浸泡作用对试样强度的劣化幅度和速度更小,这主要由于在干湿循环脱湿过程中破坏土体结构,加速原生裂隙发展,致使土体收缩,破坏土体整体性、粒间连接结构和胶结作用,使得黏聚力大幅度降低。

2.2.2 抗剪强度指标

根据三轴压缩试验,老黏土浸泡 0 d c 为 87.2 kPa, φ 为 8.5°; 浸泡 1 d c 为 77.8 kPa, φ 为 8.2°; 浸泡 2 d c 为 64.2 kPa, φ 为 8.3°; 浸泡 4 d c 为 55.4 kPa, φ 为 9.3°; 浸泡 7 d c 为 49.3 kPa, φ 为 9.2°; 浸泡 10 d c 为 46.6 kPa, φ 为 9.1°; 浸泡

24 d c 为 42.4 kPa, φ 为 8.8°; 黏聚力随浸泡时间 t 变化显著,而摩擦角受其影响较小。将试验数据系统总结归纳,建立抗剪强度参数随浸泡时间经验劣化公式(图 8),揭示其衰减规律,探究其劣化机理。

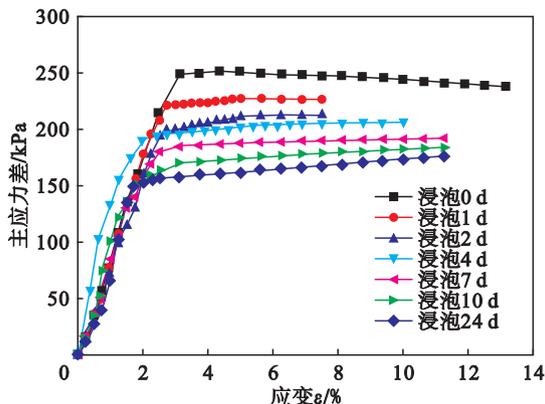


图 7 200 kPa 不同浸泡时间应力应变曲线图
Fig. 7 Stress-strain curves of different soaking time under confining pressure 200 kPa

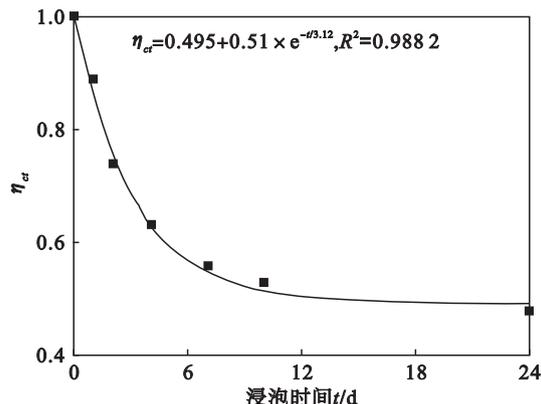


图 8 衰减系数 η_{ct} 随浸泡时间 t 变化关系图
Fig. 8 Relationship between attenuation coefficient η_{ct} and soaking time t

建立老黏土 c_t 与浸泡时间 t 的关系式:

$$c_t = \eta_{ct} \times c_{t0} = (0.495 + 0.51 \times e^{-t/3.12}) \times c_{t0}, \quad R^2 = 0.9882. \quad (3)$$

式中: t 为浸泡时间, d; c_{t0} , kPa; c_t , kPa. $R^2 = 0.9882$ 说明其可以很好地反映本文研究的老黏土 c 随浸泡时间 t 的劣化规律。综上可知,老黏土 c 随浸泡时间的增加呈指数趋势衰减,浸泡 1 d 衰减幅度最大,随着浸泡时间的增加黏聚力衰减幅度明显降低,逐渐趋于稳定。试样浸泡后,含水量升高,胶结物浓度降低,部分胶结物溶解,弱化胶结作用,亲水性物质经过浸泡后吸水膨胀,破坏土体骨架,从而使得黏聚力衰减。浸泡过程中老黏土吸湿、体积膨胀、含水率增大,浸泡刚开始时,试样含水量变化较大、胶结物浓度和试样体积变化最大,试样结构受影响最明显,因此浸泡 1 d 后黏聚

力衰减最快. 随着试验的进行各种作用逐渐减弱, 黏聚力降低幅度趋于稳定.

2.2.3 横向变形特征

统计试验结果绘制试样横向变形与浸泡时间关系曲线图(图 9), 可明显看出试样随浸泡时间的增长横向变形呈增大趋势, 试样出现剪胀现象, 试样两端横向变形较小, 在分层接触处体积有所增大, 距离试样顶端 40 ~ 50 mm 处横向变形略大, 试样直接剪切破裂的较少, 相对经过干湿循环作用的试样来说, 试样横向变形较小. 由于试样两端受到摩擦和约束作用, 导致两端变化微小.

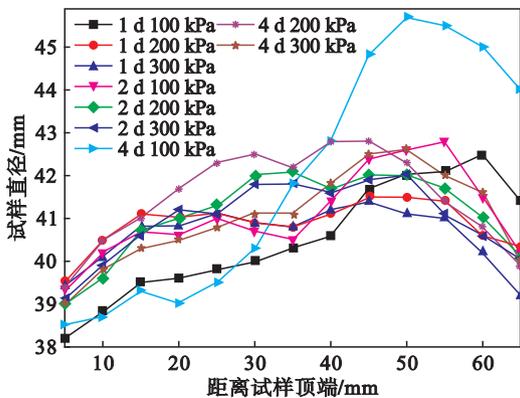


图 9 横向变形与浸泡时间关系曲线图

Fig. 9 Relationship between lateral deformation and soaking time

3 结 论

1) 老黏土黏聚力随干湿循环次数增加呈指数衰减, 1, 2 次衰减幅度较大, 衰减趋势不断减缓逐渐趋于稳定, 内摩擦角保持稳定. 干湿循环造成土体结构损伤, 裂隙发展是强度衰减的宏观表现, 随着干湿循环次数的增加试样裂隙由四周向中间扩展, 裂隙增大、增长、数量增加, 1, 2 次干湿循环裂隙发展显著, 5 次以后相对缓慢, 裂隙发育是试样强度劣化的根本原因之一.

2) 抗剪强度受干湿循环作用呈降低趋势, 且先快后慢, 最初对土体结构破坏为突变过程, 后期为裂隙渐进性扩张.

3) 黏聚力随浸泡时间的增加呈指数衰减趋势, 表现出先快后慢. 主要通过提高含水量溶解降低胶结物溶解浓度, 弱化胶结作用, 破坏土体结构.

4) 横向变形随干湿循环次数、浸泡时间的增加呈增大趋势, 随围压增大有一定减小.

参考文献:

[1] 艾传井, 唐辉明, 罗红明, 等. 武汉市青山区老黏土的变

形参数及承载性能研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(8): 72-74.

(Ai Chuan-jing, Tang Hui-ming, Luo Hong-ming, et al. Research on the deformation parameter and bearing performance of Paleo-clay in Qingshan area of Wuhan[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2006(8): 72-74.)

[2] 李芳. 武汉市东西湖区老黏土的工程地质特性浅析[J]. 土工基础, 2004, 18(3): 55-56.

(Li Fang. The geological characteristic of old clay in Dongxi Lake in Wuhan[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2004, 18(3): 55-56.)

[3] 涂义亮, 刘新荣, 钟祖良, 等. 干湿循环下粉质黏土强度及变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3581-3589.

(Tu Yi-liang, Liu Xin-rong, Zhong Zu-liang, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of silty clay during wetting-drying cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(12): 3581-3589.)

[4] 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, 1942.

(Yuan Zhi-hui, Ni Wan-kui, Tang Chun, et al. Experimental study of structure strength and strength attenuation of loess under wetting-drying cycle[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(7): 1894-1902, 1942.)

[5] 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.)

[6] 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.

[7] Chen R, Xu T, Lei W, et al. Impact of multiple drying-wetting cycles on shear behaviour of an unsaturated compacted clay[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(19): 683-691.

[8] 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.

(Lyu Hai-bo, Zeng Zhao-tian, Zhao Yan-lin, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12): 3797-3802.)

[9] 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(sup 1): 580-582.

(Mu Xian-jie, Zhang Xiao-ping. Research on mechanical properties of expansive soil under wetting-drying cycle[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(sup 1): 580-582.)

[10] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的 CT 试验研究[J]. 岩土力学, 2002(4): 417-422.

(Lu Zai-hua, Chen Zheng-han, Pu Yi-bin. A CT study on the crack evolution of expansive soil during drying and wetting cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002(4): 417-422.)

[11] 沈珠江, 邓刚. 黏土干湿循环中裂缝演变过程的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(sup 2): 1-6.

(Shen Zhu-jiang, Deng Gang. Numerical simulation of crack evolution in clay during drying and wetting cycle[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(sup 2): 1-6.)