

DOI: 10.11779/CJGE201407014

湿干循环下压实膨胀土裂隙扩展规律研究

黎 伟, 刘观仕, 汪为巍, 姚 婷, 盛建豪

(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)

摘要: 裂隙特征作为膨胀土裂隙性研究的基础, 其量化描述有助于膨胀土工程性质的深入探究。以膨胀土平面裂隙为研究对象, 使用数码摄影获取多次湿干循环下的裂隙扩展图像, 采用优化和改进的裂隙图像处理及裂隙特征提取方法, 分析所获得的膨胀土裂隙各特征参数。结果表明: 室内压实膨胀土表面裂隙率随着湿干循环次数增加而增大, 且第二次湿干循环对裂隙率影响最为显著; 裂隙发育峰值条数在第一次湿干循环后最多, 总长度最大, 而三次湿干循环后的裂隙条数和总长度较为相近; 裂隙宽度随湿干循环次数增加而增大, 且第二次湿干循环影响最为显著; 同时, 第一次湿干循环中主裂隙发育最明显, 在第二次和第三次中宽度发育趋于均匀; 通过裂隙方向玫瑰花图发现, 裂隙主要沿着初始方向扩展, 直至下一次湿干循环; 裂隙发育方向在第一次湿干循环中是随机的, 而在第二次与第三次中有较高相似性, 表明湿干循环对裂隙发育方向的影响也主要发生在第二次。

关键词: 湿干循环; 压实膨胀土; 裂隙特征; 扩展规律

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)07-1302-07

作者简介: 黎 伟(1989-), 男, 湖北咸宁人, 硕士研究生, 主要从事特殊土力学方面的研究。E-mail: liwei890508@126.com。

Crack propagation law of compacted expansive soils under wetting-drying cycles

LI Wei, LIU Guan-shi, WANG Wei-wei, YAO Ting, SHENG Jian-hao

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The quantitative description of crack features, which is the basis of researches on crack of expansive soils, contributes to further investigation on engineering properties of expansive soils. Taking surface cracks of expansive soils as research objects, the crack images under different wetting-drying cycles are captured by digital imaging. The crack features are analyzed by using the optimized and improved methods for crack image processing and crack feature extraction. The results show that the total surface crack ratio of laboratory compacted expansive soils increases with the number of the wetting-drying cycles, and that the effect of wetting-drying cycles is mainly reflected in the second cycle. The number of cracks is the greatest and the total length of cracks is the largest at the preliminary stage of the first wetting-drying cycle, however, the final number and the total length of cracks are closer after the third wetting-drying cycle. The crack width increases with the increase of the wetting-drying cycles, and is mainly reflected in the second cycle. Meanwhile, the development of the main crack is the most obvious in the first wetting-drying cycle, and the width of cracks tends to be uniform in the second and third cycles. Based on rose diagrams of crack orientation, it is found that the cracks develop along the initial orientation until the next wetting-drying cycle. The crack orientation in the first wetting-drying cycle is random, but the orientation has high similarity in the second and third cycles, indicating that the effect of wetting-drying cycles on the crack orientation is also mainly reflected in the second cycle.

Key words: wetting-drying cycle; compacted expansive soil; crack feature; propagation law

0 引言

膨胀土是一种主要由蒙脱石等亲水性黏土矿物组成的高塑性黏土, 具有膨胀性、裂隙性和超固结性这3个特性^[1-2]。膨胀土干缩及超固结应力释放过程都会导致裂隙产生。初始裂隙的发生与扩展不仅破坏了土体的完整性, 还为水分的渗流提供了通道, 加剧了膨

胀土的胀缩和裂隙发育, 而反复湿干循环作用使土体裂隙进一步的发展, 严重破坏土体的整体结构。因此, 湿干循环作用被认为是影响膨胀土边坡稳定性的最重要的因素之一^[3-7]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279200, 51079141)

收稿日期: 2013-11-12

当前,由于现场试验研究时气候条件复杂多变以及时间、人工等成本高,对反复湿干循环条件下膨胀土裂隙的研究多采取室内模拟研究,通过数码摄影结合图形图像处理技术,对膨胀土的裂隙特征进行初步定量化分析^[8-12]。不过,目前较多裂隙研究以膨胀土泥浆为对象,与一般膨胀土的状态明显不相符;且膨胀土样厚度较薄,不能体现深度方向湿度梯度对膨胀土裂隙发育造成的影响,与膨胀土裂隙发育的实际情况也有明显差异;同时,土样尺寸效应对试验结果的影响较大,试样尺寸变小时,其整体强度即会增加,土体越不易开裂,而当尺寸逐渐增大时,尺寸效应会明显减弱,得到的试验结果与原位试验结果越相符。在室内直剪和三轴试验中,有小型、中型和大型3种尺寸,当试验尺寸大于中型尺寸之后,试样做出的试验结果与现场试验结果较为相近^[13]。

为此,本文研究制备了较大尺寸的压实膨胀土样,实时拍摄不同湿干循环次数下膨胀土裂隙扩展图像,并基于改进的裂隙图像特征参数提取方法对各阶段裂隙特征进行定量化描述,探讨不同湿干循环次数下膨胀土裂隙的扩展规律。

1 试验设计

1.1 试验土样

试验所用土样取自南阳高速公路现场,呈黄褐色,含铁锰结核,可塑,黏性较强,裂隙面呈蜡状光泽。土样主要物理参数:干密度为 1.57 g/cm^3 ,自由膨胀率为58.5%,收缩系数为0.38,体缩率为20.3%,缩限为11.0%,液限为55.4%,塑性指数为26.2。属中膨胀土。

1.2 试样制备

将膨胀土土样置于室外风干,碾碎过2 mm筛,测定其风干含水率。通过击实试验获取土体的最佳含水率及最大干密度($w=18\%$, $\rho_d=1.78\text{ g/cm}^3$)。本次湿干循环试验设定土样压实度为90%,含水率控制为 $w=21\%$,压实时根据压实度要求将密度控制为 $\rho_d=1.60\text{ g/cm}^3$ 。备样时先称取相应质量的土和水,将土水混合均匀搅拌,并尽量将较大的团粒捏散,然后将土样放入塑料袋中密封48 h闷料。压实膨胀土试样设计尺寸为40 cm(长)×40 cm(宽)×36 cm(高),采用大型固结仪自带的液压千斤顶施加反力,通过传力柱作用于土样上,利用位移控制将土样压实至指定干密度,试样共分3层进行压实,制样设备如图1所示。

1.3 湿干循环

试样制备完成后进行脱湿试验。为加快膨胀土试样的脱湿速率,将试样置于烘房中,烘房温度控制为

$25^\circ\text{C}\sim30^\circ\text{C}$,相对湿度为30%~40%。在模型箱四周设置隔热板,仅使土样上表面受热,以接近实际工程所处状态。脱湿过程中,使用数码相机对试样表面摄影,以获取试样在脱湿过程中的裂隙形态。在摄影过程中关闭烘灯以避免照片色彩失真,同时采用4个白炽灯补光,以获得正常曝光的裂隙图像。同时为防止相机参数、位置以及人为抖动等因素对图像分析造成影响,摄影时固定相机参数并利用三脚架和可以360°旋转的云台固定相机位置。



图1 制样设备

Fig. 1 Sample preparation equipment

当第一次脱湿完成(前后两次摄影裂隙形态基本不变作为判断标准)后,用气压喷壶对试样进行喷水加湿。为减小加湿过程对土样表面的冲刷破坏,将喷壶出水处调成雾化模式,水平均匀喷水让其自由降落到土样表面。待裂隙完全愈合且土样表面出现积水后停止喷水,用保鲜膜覆盖在土样表面,密封搁置12 h,保证水分充分入渗。之后打开烘灯开始加热脱湿。待脱湿完成后按照以上步骤进行下一次湿干循环,摄影记录各次湿干循环中不同时段的裂隙发育图像。

2 试验结果分析

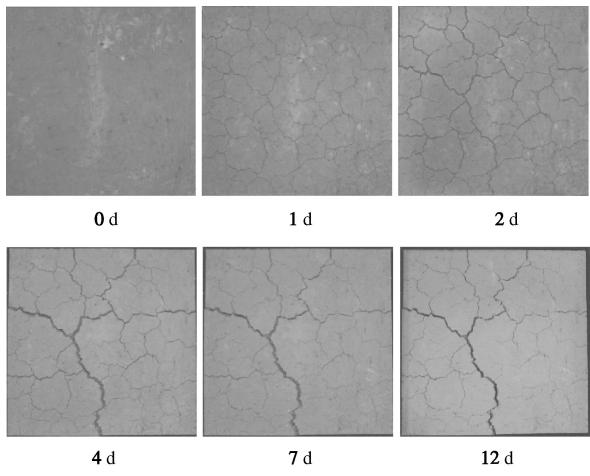
本次试验共进行3次湿干循环,第一次湿干循环即初始含水率均匀的压实土样的脱湿过程,后两次为人工喷雾加湿后再进行脱湿。通过数码摄影获取的裂隙发育图像,尺寸均为 $40\text{ cm}\times40\text{ cm}$,如图2所示。

通过二值化、去杂以及桥接等操作,获得清晰可靠的裂隙二值图像,效果分别如图3所示。在赵芳等^[14]、刘春等^[15]的基础上提出了裂隙特征参数提取的改进方法^[16],并对不同湿干循环次数下土体裂隙各特征参数,包括裂隙率、裂隙总长度、裂隙条数、裂隙均长和均宽、裂隙最大宽度以及裂隙方向,进行统计分析,探讨湿干循环次数对裂隙各特征参数的影响。

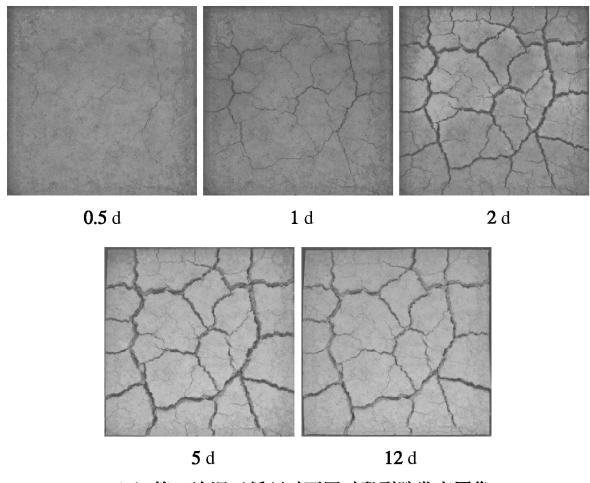
2.1 裂隙率变化规律

由于收缩在广义上也属于裂隙的范畴,可作为产生于边界的裂隙,计算裂隙率时宜考虑收缩和开裂的

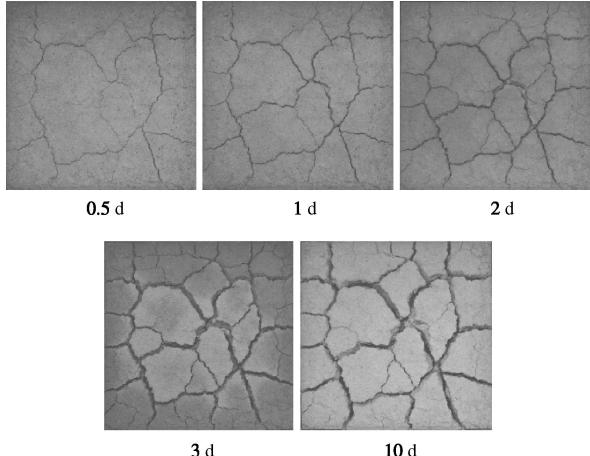
影响^[17]。由图 4~6 可见, 湿干循环过程中, 裂隙率均为先迅速增大, 然后趋于稳定或者稍有降低; 而收缩率在初始阶段增加缓慢, 之后则基本呈线性上升趋势; 总裂隙率因此表现为先迅速增大, 然后趋于一个稳定值。



(a) 第一次湿干循环时不同时段裂隙发育图像



(b) 第二次湿干循环时不同时段裂隙发育图像



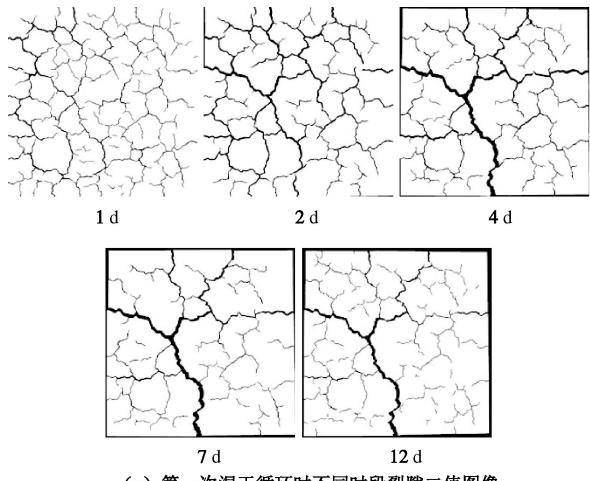
(c) 第三次湿干循环时不同时段裂隙发育图像

图 2 不同湿干循环次数下裂隙发育图像

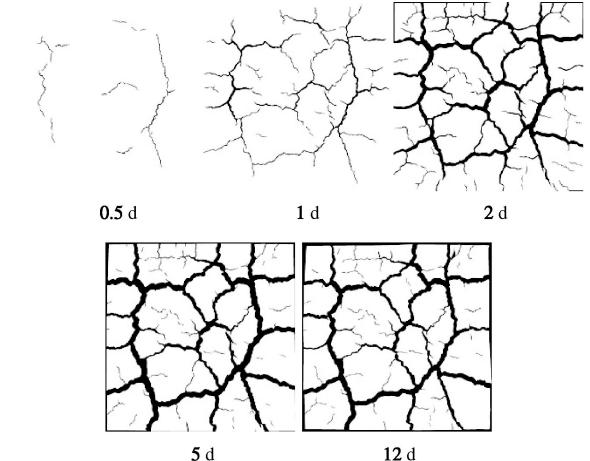
Fig. 2 Crack images after different wetting-drying cycles

初期出现裂隙主要是因为土样在烘房内干燥脱湿时, 土体表面直接受热, 脱湿速率明显比土样下部快。

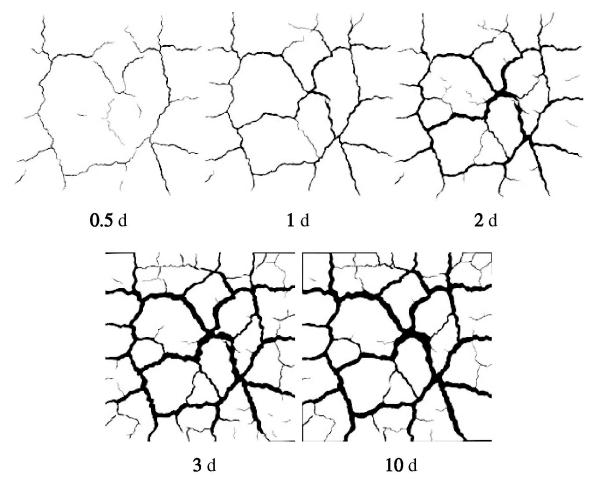
表面土体失水较快开始收缩, 下部土体水分散失较慢, 抑制表面土体的收缩, 因而在土体表面形成一定拉应力, 当该拉应力大于土体强度时, 裂隙开始产生。由于土体表面是均匀受压而成, 其土体表面强度近乎一致, 故初始裂隙的形态为网状分布的细小裂隙, 表现为初期裂隙率迅速上升。



(a) 第一次湿干循环时不同时段裂隙二值图像



(b) 第二次湿干循环时不同时段裂隙二值图像



(c) 第三次湿干循环时不同时段裂隙二值图像

图 3 不同湿干循环次数下裂隙二值图像

Fig. 3 Crack binary images after different wetting-drying cycles

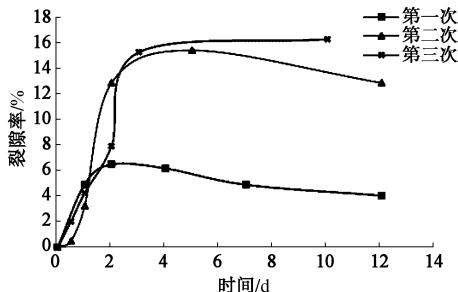


图4 不同湿干循环次数下裂隙率变化曲线

Fig. 4 Curves of crack ratio after different wetting-drying cycles

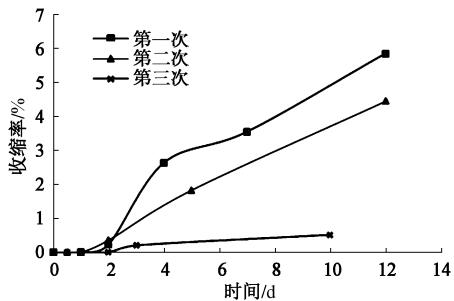


图5 不同湿干循环次数下收缩率变化曲线

Fig. 5 Curves of shrinkage after different wetting-drying cycles

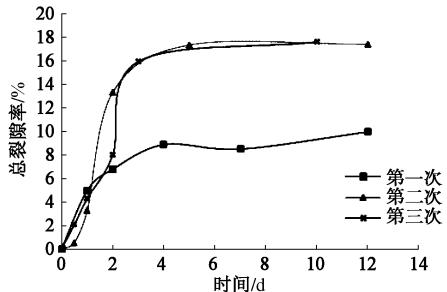


图6 不同湿干循环次数下总裂隙率变化曲线

Fig. 6 Curves of total crack ratio after different wetting-drying cycles

同时,由于下部土体限制了收缩的产生,表现为初始阶段收缩率增加缓慢。初始裂隙产生后,为下部土体水分的迁移提供了通道,整体脱湿速率加快,土样开始出现收缩。在此期间,表面进一步失水,裂隙继续扩展,主要表现为宽度的增大,裂隙率也进一步增大,此阶段裂隙率和收缩率均表现为增大。

当土体表面的水分充分散失后,表面裂隙发育基本趋于停止,土体收缩面积增大,而下部土体的收缩也将促进表面土体的收缩,原本发育的裂隙开始受到收缩带来的压应力,原本细小的裂隙受压开始出现闭合,较大裂隙的宽度也出现一定程度的减小。由于此阶段细小裂隙的闭合以及大裂隙变窄,裂隙率呈降低趋势,而收缩面积继续增大。最后土样脱湿基本趋于停止,整体含水率趋于稳定,裂隙率下降的速度与收缩率上升的速度基本一致,总裂隙率基本趋于稳定。

同时,可发现第一次湿干循环结束后,裂隙率为4.05%,而第二次和第三次湿干循环结束后,裂隙率

分别为12.88%和16.30%。这表明湿干循环作用增大了膨胀土表面裂隙率,且其影响主要集中于第二次,在该次湿干循环中裂隙率增加幅度最大,而随后的循环中裂隙率也有一定增大,但幅度小于第二次;经历三次湿干循环之后,土体产生的收缩率为0.52%,较第一次收缩率5.85%减少近10倍,这说明经历湿干循环之后,土体表面开裂面积越来越大,失水一定的情况下,相应能够收缩的面积也就越来越小。

2.2 裂隙条数变化规律

图7显示了不同湿干循环次数下裂隙条数的变化曲线,可见初始阶段的裂隙条数随着湿干循环次数的增加而减少,其中第一次湿干循环中裂隙条数的峰值要明显大于第二次,而第二次和第三次之间的差值明显减小。同时,第一次湿干循环中裂隙条数在初始阶段迅速上升,之后随着收缩的产生,细小裂隙的闭合,裂隙条数下降明显;第二次和第三次湿干循环过程中裂隙条数在初始阶段呈上升趋势,之后趋于稳定或略有下降。

第一次湿干循环中初始阶段裂隙条数最多的主要原因是该次循环中土体表面强度最大。当表面土体强度较低时,土体表面因失水而产生拉应力,并在土体薄弱处产生应力集中效应,当该拉应力大于土体强度时,土体开裂。当表层土体强度较高时,土体内产生应力集中,其拉应力短时间内不会超过土体强度,促使拉力向周围扩散,产生更多的应力集中点,当土体中拉应力足够大时,土体开始开裂,由于应力集中点更多,所以初始产生的裂隙网络更复杂,表现为初始裂隙条数越多。

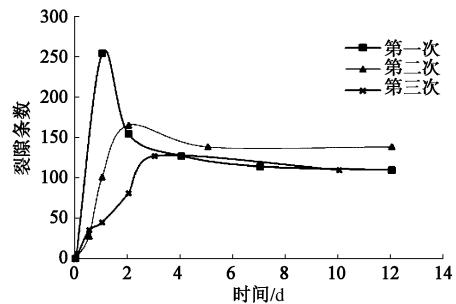


图7 不同湿干循环次数下裂隙条数变化曲线

Fig. 7 Curves of cracks after different wetting-drying cycles

另外,第二次和第三次湿干循环前采用喷雾进行湿化后,土体表层含水率增加较多,虽然表层裂隙完全闭合,但高含水率导致其强度大大降低,故最初出现裂隙时可见单条裂隙发育,与第一次湿干循环中的网状裂隙模式差别较大。第一次湿干循环中虽然初始形成网状裂隙,裂隙条数最多,但由于其失水空间的限制,只有少数裂隙宽度扩展明显,成为主裂隙,大部分裂隙未充分发育,即所谓细小裂隙,这部分裂隙在后期收缩过程中的闭合造成了裂隙条数的下降。第

二次和第三次湿干循环中, 虽然初始裂隙条数少, 但其失水空间较大, 裂隙都能够得到充分的扩展, 基本上不存在较明显的主裂隙, 如图 2(b) 和 2(c) 所示, 其裂隙在后期收缩过程中没有或者较少出现闭合, 故其裂隙条数在后期基本趋于稳定。

2.3 裂隙长度变化规律

图 8 给出了不同湿干循环次数下裂隙总长度变化曲线, 与裂隙条数的变化规律一致。第一次湿干循环中网状裂隙开始形成, 裂隙总长迅速增大, 细小裂隙闭合导致裂隙总长度下降。而第二次和第三次湿干循环中裂隙发育较充分, 闭合较少, 故其总长度趋于稳定。

图 9 显示了不同湿干循环次数下裂隙均长变化曲线, 第一次和第二次湿干循环中裂隙均长在初始增长之后趋于稳定; 第三次湿干循环中, 初始时裂隙均长存在一个明显的峰值, 主要是由于该次循环中初始阶段形成的裂隙条数较少, 而长度充分发育, 总长度较大, 造成初始时裂隙均长出现峰值, 随着裂隙条数的增加, 裂隙均长也趋于稳定。

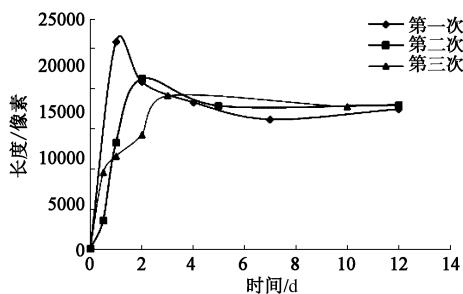


图 8 不同湿干循环次数下裂隙总长度变化曲线

Fig. 8 Curves of total crack length after different wetting-drying cycles

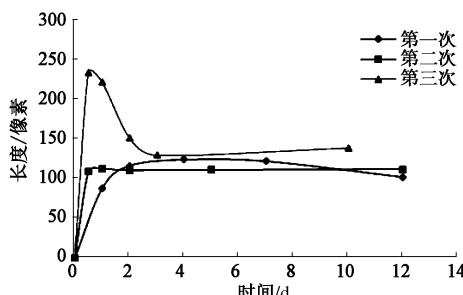


图 9 不同湿干循环次数下裂隙均长变化曲线

Fig. 9 Curves of mean crack length after different wetting-drying cycles

2.4 裂隙宽度变化规律

裂隙平均宽度变化曲线如图 10 所示, 可以看出裂隙均宽在初始阶段上升较快, 在第一次湿干循环后期略微降低, 而在第二次和第三次后期基本趋于稳定。第二次和第三次湿干循环中的裂隙均宽基本相等, 且要远大于第一次。这说明湿干循环对裂隙宽度的影响

主要体现在第二次湿干循环中。

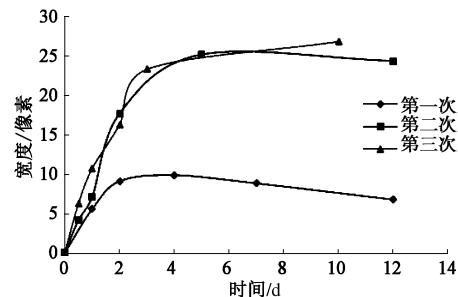


图 10 不同湿干循环次数下裂隙均宽变化曲线

Fig. 10 Curves of mean crack width after different wetting-drying cycles

图 11 显示了裂隙最大宽度的变化曲线, 其基本变化规律与裂隙均宽一致。第一次湿干循环中最大宽度约 31, 为平均宽度的 3 倍; 第二次和第三次湿干循环中最大裂隙宽度约 50, 为平均宽度的 2 倍, 说明第一次湿干循环中主裂隙发育较为明显, 最大宽度明显要大于平均宽度, 而第二次和第三次湿干循环中, 主裂隙发育的趋势明显减弱, 宽度发育趋于均匀。

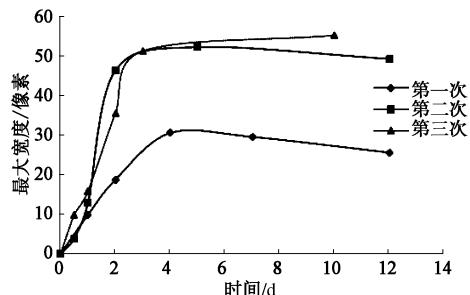


图 11 不同湿干循环次数下裂隙最大宽度变化曲线

Fig. 11 Curves of maximum crack width after different wetting-drying cycles

2.5 裂隙方向变化规律

图 12~14 显示了不同湿干循环次数下, 不同时段裂隙方向玫瑰花图。可以看出, 在各次湿干循环中, 裂隙发育方向玫瑰花图均与本次循环中初始裂隙方向玫瑰花图较为相似, 说明裂隙主要沿着初始方向扩展, 直至下一次湿干循环。

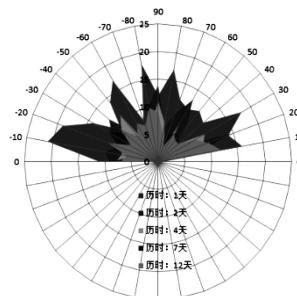


图 12 第一次湿干循环下裂隙方向玫瑰花图

Fig. 12 Rose diagram of crack orientation after first wetting-drying cycle

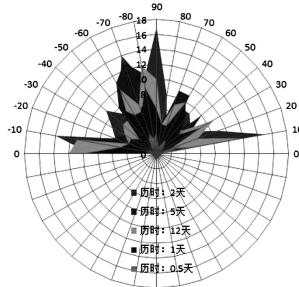


图 13 第二次湿干循环下裂隙方向玫瑰花图

Fig. 13 Rose diagram of crack orientation after second wetting-drying cycle

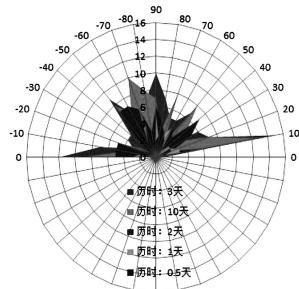


图 14 第三次湿干循环下裂隙方向玫瑰花图

Fig. 14 Rose diagram of crack orientation after third wetting-drying cycle

同时, 对比三次湿干循环中裂隙条数最多时段的裂隙方向玫瑰花图(如图15)可发现, 第一次湿干循环中裂隙发育方向与第二次存在明显差异, 即对应玫瑰花图形状相似性差; 而第二次裂隙发育玫瑰花图与第三次有较高相似性, 说明湿干循环对裂隙发育方向的影响也主要发生在第二次湿干循环。其原因主要是第一次湿干循环中膨胀土表面强度较高, 失水空间也有限, 故裂隙率相对较小; 第二次湿干循环中土体表面加湿使裂隙闭合, 土体表面强度降低较少且相对均匀, 故裂隙呈随机发育, 发育方向与第一次差别较大。然而第二次湿干循环中的裂隙率要明显大于第一次, 裂隙发育对土体表面强度的影响较大, 虽然加湿之后裂隙闭合, 但原本裂隙宽度较大处强度依然较低, 脱湿时裂隙仍然沿着原裂隙处发育, 故第三次湿干循环中裂隙发育与第二次的较为相似。

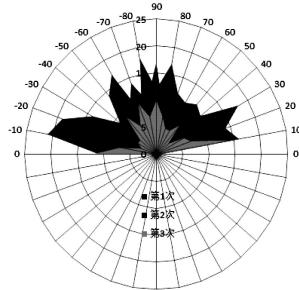


图 15 不同湿干循环次数下裂隙方向玫瑰花图

Fig. 15 Rose diagram of crack orientation after different wetting-drying cycles

3 结 论

本文研究了不同湿干循环次数下, 室内压实膨胀土裂隙各特征参数的变化规律, 主要结论如下:

(1) 压实膨胀土表面总裂隙率随着湿干循环次数的增加而不断增大, 且第二次湿干循环对总裂隙率的影响最为显著。

(2) 裂隙初始发育峰值条数在第一次湿干循环最多, 总长度最大, 而三次湿干循环最终的裂隙条数和总长度较为接近。

(3) 裂隙宽度随湿干循环次数的增加而增大, 且第二次湿干循环对宽度的影响最为显著, 同时, 主裂隙在第一次湿干循环发育较为明显, 而在第二次和第三次的发育趋势明显减弱, 宽度发育趋于均匀。

(4) 裂隙主要沿初始方向扩展, 直至下一次湿干循环; 裂隙发育方向在第一次湿干循环中是随机的, 而在第二次与第三次中有较高相似性, 湿干循环对裂隙发育方向的影响也主要发生在第二次。

参考文献:

- [1] 李生林. 中国膨胀土工程地质研究[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. (LI Sheng-lin. Study on the engineering geology of expansive soil in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1992. (in Chinese))
- [2] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Soil science of special geotechnical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [3] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Te-hong. Expansive soil problems in engineering construction[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))
- [4] 姚海林, 郑少河, 葛修润, 等. 裂隙膨胀土边坡稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 2331–2335. (YAO Hai-lin, ZHENG Shao-he, GE Xiu-run, et al. Assessment on slope stability in cracking expansive soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 2331–2335. (in Chinese))
- [5] 袁俊平. 非饱和膨胀土的裂隙概化模型与边坡稳定研究[D]. 南京: 河海大学, 2003. (YUAN Jun-ping. Generalized model of fissures distribution and slope stability analysis for unsaturated expansive soils[D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [6] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土

- 工程学报, 2004, **26**(1): 1 - 15. (BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 1 - 15. (in Chinese))
- [7] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 膨胀土干湿循环效应及其对边坡稳定性的影响[J]. 工程地质学报, 2012, **20**(6): 934 - 939. (ZENG Zhao-tian, LU Hai-bo, ZHAO Yan-lin, et al. Wetting-drying effect of expansive soils and its influence on slope stability[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, **20**(6): 934 - 939. (in Chinese))
- [8] 马 佳, 陈善雄, 余 飞, 等. 裂土裂隙演化过程试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(10): 2203 - 2208. (MA Jia, CHEN Shan-xiong, YU Fei, et al. Experimental research on crack evolution process in fissured clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(10): 2203 - 2208. (in Chinese))
- [9] 冯 欣. 膨胀土裂隙扩展与入渗试验研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009. (FENG Xin. Experimental research on cracks propagation and infiltration for expansive soil[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese))
- [10] 张家俊, 龚壁卫, 胡 波, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(9): 2729 - 2734. (ZHANG Jia-jun, GONG Bi-wei, HU Bo, et al. Study of evolution law of fissures of expansive clay under wetting and drying cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(9): 2729 - 2734. (in Chinese))
- [11] 杨和平, 刘艳强, 李晗峰. 干湿循环条件下碾压膨胀土的裂隙发展规律[J]. 交通科学与工程, 2012, **28**(1): 1 - 5. (YANG He-ping, LIU Yan-qiang, LI Han-feng. The development of cracks of compacted expansive soil under dry-wet cycling[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2012, **28**(1): 1 - 5. (in Chinese))
- [12] 黎 伟, 刘观仕, 姚 婷. 膨胀土裂隙特征研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2012, **32**(4): 78 - 82. (LI Wei, LIU Guan-shi, YAO Ting. Research progress in crack features of expansive soils[J]. Advances in Sciences and Technology of Water Resources, 2012, **32**(4): 78 - 82. (in Chinese))
- [13] 周江平, 彭雄志. 土体抗剪强度的尺寸效应[J]. 西南交通大学学报, 2005, **40**(1): 77 - 81. (ZHOU Jiang-ping, PENG Xiong-zhi. Investigation on size effect of shear strength of soil[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, **40**(1): 77 - 81. (in Chinese))
- [14] 赵 芳, 王卫星, 金文标. 基于角点分段算法的岩石裂隙宽度测量及分析[J]. 计算机应用研究, 2006, **23**(11): 137 - 140. (ZHAO Fang, WANG Wei-xing, JIN Wen-biao. Rock fracture width measurement method based on corner segment algorithm[J]. Application Research of Computers, 2006, **23**(11): 137 - 140. (in Chinese))
- [15] 刘 春, 王宝军, 施 斌, 等. 基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(9): 1383 - 1388. (LIU Chun, WANG Bao-jun, SHI Bin, et al. Analytic method of morphological parameters of cracks for rock and soil based on image processing and recognition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(9): 1383 - 1388. (in Chinese))
- [16] 黎 伟, 刘观仕, 姚 婷. 膨胀土裂隙图像处理及特征提取方法的改进[J]. 岩土力学. (LI Wei, LIU Guan-shi, YAO Ting. Progress on methods of crack image processing and crack feature extraction of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics. (in Chinese))
- [17] 周 伟. 膨胀土脱湿全过程裂隙演化规律研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2011. (ZHOU Wei. Study on law of crack evolution for expansive soil in the dehydration process[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese))