

文章编号: 1007-2993(2023)05-0614-04

干湿循环对膨胀性泥岩裂隙和强度的影响研究

宋磊¹ 张荣宽¹ 汤勇²

(1. 华设计集团股份有限公司, 江苏南京 210029; 2. 江苏禹衡工程质量检测有限公司, 江苏盐城 224014)

【摘要】 通过对合肥地区某水利工程场地膨胀性泥岩的原状样进行室内干湿循环试验, 分析不同干湿循环次数下的膨胀性泥岩的裂隙图像, 对不同干湿循环次数下的试样进行直剪试验, 得出膨胀性泥岩在限制浸水膨胀变形的条件下, 随干湿循环次数的增加, 黏聚力和内摩擦角的减小速率变缓, 裂隙度逐渐增加, 裂隙长度和裂隙总面积增加。研究成果对该类膨胀性泥岩地区工程建设具有指导意义。

【关键词】 膨胀性泥岩; 干湿循环; 强度; 裂隙

【中图分类号】 TU 411

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.05.016

Study on the Effect of Drying and Wetting Cycles on the Crack Evolution and Strength of Expansive Mudstone

Song Lei¹ Zhang Rongkuan¹ Tang Yong²

(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210029, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Yuheng Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Yancheng 224014, Jiangsu, China)

【Abstract】 Based on the indoor drying and wetting cycles test of the undisturbed expansive mudstone in a water conservancy project in Hefei area, the crack images of expansive mudstone under different times of drying and wetting cycles were analyzed, and the direct shear test was carried out. The results show that the cohesion and internal friction angle of expansive mudstone decrease with the increasing number of drying and wetting cycles time, and the fracture length and total fracture area increase with the increasing number of drying and wetting cycles under the condition of limited water swelling deformation. The research results have guiding significance for engineering construction in this kind of expansive mudstone area.

【Key words】 expansive mudstone; drying and wetting cycles; strength; fracture

0 引言

膨胀性岩土遇水膨胀, 失水收缩, 对水极为敏感。我国膨胀性岩土地区分布广泛, 受大气降水等因素的影响, 在膨胀性岩土场地进行基坑和边坡工程建设, 干湿循环问题不可避免。研究干湿循环对膨胀性岩土强度的影响规律有助于工程设计和施工。

前人对膨胀土的干湿循环后强度的变化规律已有一定研究, 但对于膨胀性岩石干湿循环后的强度变化规律研究较少。20 世纪 50 年代, Badger 等^[1] 总结提出了干燥页岩遇水崩解的两大机理: 气致崩解和胶体物质消散。傅晏^[2]、刘新荣等^[3] 研究了砂岩在干湿循环作用下抗剪强度的变化规律, 并在库岸边坡的稳定分析中应用。邓华锋等^[4] 对三峡库区的红层

软岩进行浸泡-风干循环水岩作用试验, 表明水的干湿循环作用对红层软岩造成了不可逆的渐进累积损伤, 微观层面由相对致密的结构转变成微观裂隙、孔隙发育的松散多孔结构, 宏观层面岩石抗压、抗剪强度劣化和破坏模式会变化。

本文针对合肥地区某水利工程的膨胀性岩石在干湿循环条件下的裂隙及强度变化规律进行了研究, 研究成果对类似工程建设具有一定的指导意义。

1 试验岩样基本特性

试验岩样取自合肥地区某水利工程边坡开挖现场, 暗红色, 结构面发育, 具有遇水膨胀、失水收缩的特性。岩样的基本物理力学性质指标见表 1。

作者简介: 宋磊, 男, 1984 年生, 汉族, 安徽淮南人, 硕士, 高级工程师, 从事岩土与地下工程方向研究。E-mail: 497940140@qq.com

通讯作者: 张荣宽, 男, 1991 年生, 汉族, 山东济宁人, 硕士, 工程师, 从事岩土与地下工程方向研究。E-mail: 627583901@qq.com

表 1 岩样基本物理力学性质指标

干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/%	比重	孔隙比	自由 膨胀率 /%	抗压强度 /MPa	耐崩 解指 数/%
1.62~1.69	18.6~24	2.59	0.53~0.6	51	1.1	1.2

2 试验方案

按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)制备环刀原状样 24 个, 制备完成的试样见图 1。试样制备完成后, 称取环刀样质量, 并用切削剩余的岩样量测初始含水率。饱和时采用环刀饱和器固定环刀样(见图 2)。环刀饱和器限制了浸水饱和时环刀内岩样的膨胀, 减少了由于岩样膨胀带来的次生孔隙, 以确保岩样强度的衰减基本缘自于干湿胀缩引起的裂隙发展。若不采用环刀饱和器固定环刀样, 则烘干后浸水的岩样会产生明显膨胀, 由膨胀带来的次生孔隙大大增加, 加重了岩样的损伤劣化, 裂隙的发展、次生孔隙的增加共同引起了抗剪强度的衰减, 导致通过直剪试验得出的岩样抗剪强度偏小。



图 1 加工后的原状泥岩环刀样



图 2 环刀饱和器实物

干湿循环试验时, 首先将原状样在真空缸中抽气 2 h 后浸水饱和 24 h, 将此作为 0 次干湿循环。将抽气饱和 24 h 后的原状样在 100°C 下脱湿 24 h, 再抽气饱和 24 h, 将此作为第 1 次干湿循环。依此类推, 共做 5 次干湿循环。对 0—5 次干湿循环后的试样分别进行直剪固结快剪试验, 竖向压力为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa, 得到每次干湿循环后对应的黏聚力和内摩擦角, 直剪试验按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)的要求进行。以剪应

力为纵坐标, 剪切位移为横坐标, 绘制剪应力剪切位移关系曲线。选取线上的峰值点或稳定值作为抗剪强度, 当无明显峰点时, 取剪切位移 4 mm 对应的剪应力作为抗剪强度。以抗剪强度为纵坐标, 垂直单位压力为横坐标, 根据图上各点拟合出一条直线, 直线的倾角为内摩擦角, 直线在纵坐标轴上的截距为黏聚力。试样每次烘干后均对岩样表面拍照、观察裂隙, 并用裂缝宽度测量仪测量岩样表面裂缝宽度。拍照时, 为保证每次拍摄的距离、位置以及外界光线环境一致, 将摄像头置于环刀样表面正中央约 5 cm 高度处拍摄, 且均在晴朗白天正常采光的室内进行拍摄。

3 干湿循环对膨胀性泥岩裂隙的影响

图 3 为 1—5 次烘干后的环刀样表面的裂隙变化。第一次完全脱湿后, 试样表面裂隙较长, 宽度较大; 随着干湿循环次数的增加, 裂隙数量增加、长度变短、宽度变小, 但裂隙总面积和总长度增加, 裂隙将土样分割成的块体体积逐渐减小。干湿循环过程中, 裂隙的增加包括原生裂隙的扩展和新裂隙的产生。烘干后的土样重新饱和时, 裂隙会闭合, 但裂隙处的土体抗拉强度并未得到恢复。因此, 当土样再次脱湿时, 闭合的裂隙由于抗拉性能遭到破坏将会首先张开, 且张开更为容易, 同时裂隙会进一步开展产生更多次生裂隙。岩样的完整性被纵横交错的裂隙破坏, 使岩样的强度降低。

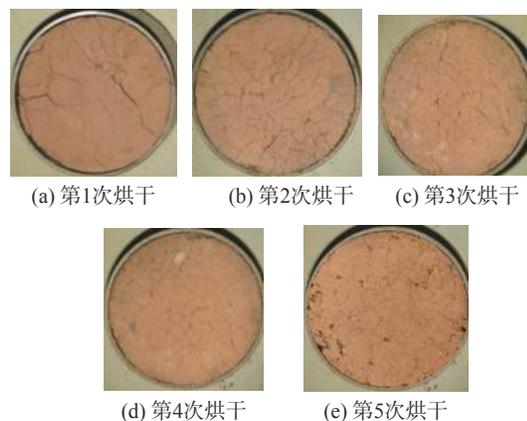


图 3 不同烘干次数下的表面裂隙发育情况

为了定量分析裂隙的数量、长度、宽度等在干湿循环过程中的变化规律, 需用图像处理软件对 5 次烘干后的试样表面裂隙照片做进一步处理, 使裂隙更清晰地展现, 以便于量化计算。首先用 photoshop 将 5 次烘干后表面裂隙照片用直径比环刀内径(61.8 mm)略小的圆截取, 这里采用直径 375(像素点个数)的圆进行裁剪, 对应的圆的真实直径为 60 mm, 因此 6.25 个直线型排列的像素点的长度相当于

1 mm。然后对图像进行 USM 锐化处理,使图像清晰度增加,将裂隙更明显地展现出来。随后将图像二值化,先将图像的对比度调至最高,然后调整阈值至同一默认值 128,即可完成图像二值化处理,二值化处理结果如图 4 所示。

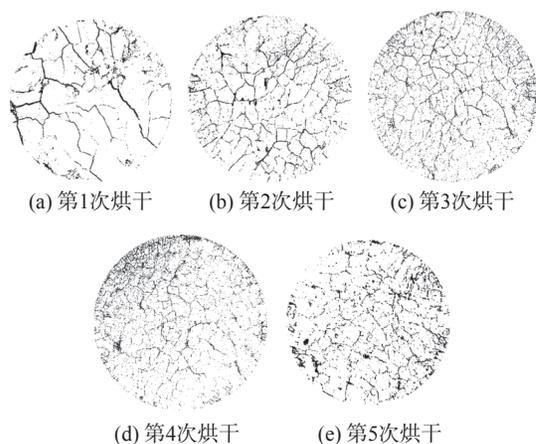


图 4 不同烘干次数后二值化处理后的裂隙

运用 Image-Pro 图像处理软件可将每次烘干后的最大裂隙长度、最大宽度及裂隙度算出。二值化处理后的图像中黑色代表裂隙,裂隙度为试样上表面裂隙的面积占总面积的百分比。裂隙长度、宽度与干湿循环次数的关系见图 5、图 6。由图 5、图 6 可知,随干湿循环次数的增加,裂隙度逐渐增加,且增加速度逐渐变缓。从第 1 次烘干到第 5 次烘干,裂隙度由 5.38% 增长到 7.3%。最大裂隙长度和最大裂隙宽度显著减小,随烘干次数的增加减小速度逐渐变缓,最大裂隙长度由 57 mm 减小至 23 mm,最大裂隙宽度由 0.95 mm 减小至 0.63 mm,二者的大幅度减小主要发生在第 1—2 次干湿循环中。在干湿循环的初期,失水收缩引起的拉应力大部分以势能的形式存储于试样内部,没有以产生裂隙的形式释放,由于干缩产生的变形集中在较少的几条较大宽度的裂隙上,裂隙数目较少,单个裂隙长度较长,此时裂隙的总面积相对较小。随干湿循环次数的增加,干缩引起的拉应力

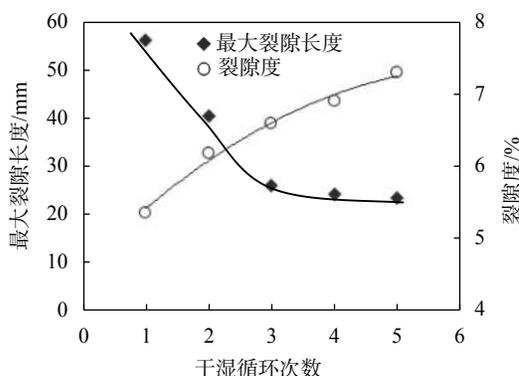


图 5 裂隙长度与干湿循环次数的关系

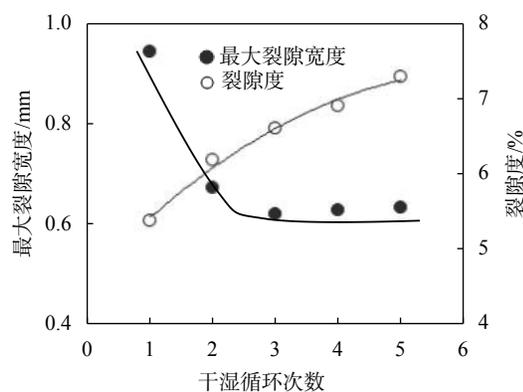


图 6 裂隙宽度与干湿循环次数的关系

逐步得到释放,裂隙在原有基础上逐渐发展延伸、分叉,同时产生更多新的裂隙,干缩变形分散在数目逐渐增加的裂隙中,因此单条裂隙宽度和长度减小,但裂隙总面积增加。随着裂隙发育到一定程度,由裂隙分割成的块体体积逐渐减小,干缩产生的拉应力已通过产生众多裂隙进行释放,不再产生新的裂隙,裂隙的长度和宽度逐渐趋于稳定值。

4 干湿循环对膨胀性泥岩强度的影响

膨胀性泥岩原状样的强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随着干湿循环次数的变化情况见图 7 和表 2。可知黏聚力 c 值随着干湿循环次数的增加明显减小,且减小幅度随干湿循环次数的增加而变缓。其中第一次干湿循环后的黏聚力 c 下降 96.78 kPa,降幅 51.48%,而由第一次干湿循环到第五次干湿循环,黏聚力 c 值下降 57.23 kPa,降幅 30.44%。表明干湿循环对原状样的强度指标 c 值影响显著,且前几次干湿循环影响较大,随干湿循环次数的增加而趋于稳定。内摩擦角 φ 同样随干湿循环次数的增加而减小,经历 5 次干湿循环后,内摩擦角减小 9° ,约减小 32%,比黏聚力 c 的减小幅度小。抗剪强度参数的减小是由于干湿循环使裂隙的逐渐发育,岩样内部裂隙增多,内部软弱结构面数目增多,影响了岩样的整体结构性。

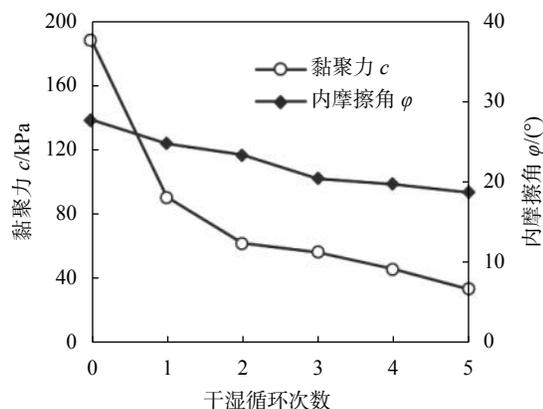


图 7 黏聚力和内摩擦角随干湿循环次数的变化

表 2 试验结果

干湿循环次数	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ (°)
0	188	28
1	91	25
2	62	23
3	56	21
4	46	20
5	34	19

随着干湿循环次数的增加, 裂隙数目逐渐增加, 试样结构逐步由完整变为破碎, 内部产生大量的软弱结构面, 同时随着干湿循环次数的增加土颗粒由外向内逐渐损失, 内部空隙增大, 密实度减小, 进一步对试样的结构造成损伤; 干湿循环产生的结构空隙及裂隙使试样剪切时颗粒间黏聚作用不能充分发挥, 同时在外力作用时结构单元更容易重新排列, 因此抗剪强度逐步降低^[5]。黏土质胶结物在吸水膨胀和收缩过程中, 黏土颗粒内部微元调整, 产生了微裂纹及微孔隙, 这些微观损伤是不可逆的^[6], 这与试验结果中孔隙度的逐渐增加和抗剪强度参数的逐渐减小现象表明结论是一致的。

烘干脱湿过程中, 泥岩试样表面的脱湿速度大于内部脱湿速度^[7], 表层泥岩体积收缩大于内部, 不均匀的收缩产生了拉应力, 岩样的抗拉强度不能抵抗收缩拉应力时便产生了裂隙。干燥试样遇水后, 蒙脱石等亲水性黏土矿物大量吸水, 导致矿物颗粒体积显著膨胀; 部分黏土矿物在水的作用下会产生溶蚀, 如在部分钾长石水的作用下发生溶解溶蚀; 不均匀分布的黏粒吸水后, 黏粒周围形成水膜, 使黏粒间距增加, 造成泥岩显著膨胀; 水分子进入黏土颗粒的晶格中使黏土颗粒的晶格膨胀, 内部产生次生孔隙^[8-9]。

黏聚力受颗粒之间的胶结程度影响较大, 在干湿循环作用下劣化较快, 而内摩擦角受颗粒嵌固程度和颗粒本身强度的影响较大, 干湿循环作用下劣化速度相对较慢^[10]。如图 7 所示, 黏聚力随干湿循环次数的增加而减小的幅度明显大于内摩擦角随干湿循环次数增加而减小的幅度。

5 结论

(1) 随干湿循环次数的增加, 裂隙度逐渐增加, 且

增加速度逐渐变缓, 同时裂隙宽度减小, 裂隙总长度和总面积增加。表明在干湿循环作用下, 膨胀性泥岩结构因裂隙增加逐渐破碎、疏松, 干湿循环对膨胀性泥岩结构损伤是显著的。

(2) 在限制浸水膨胀变形的条件下, 膨胀性泥岩的黏聚力和内摩擦角均随干湿循环次数的增加而减小, 黏聚力随干湿循环次数的增加而减小的幅度更大, 且随干湿循环次数的增加, 黏聚力和内摩擦角的衰减速率均减缓。干湿循环对膨胀性泥岩结构的损伤是不可逆的, 在膨胀性泥岩地区实际工程应用中, 应采取避免膨胀性泥岩水分的反复蒸发和饱和。当未采取有效防胀缩措施时, 应取多次干湿循环后的抗剪强度参数进行工程设计。

参 考 文 献

- [1] BADGER C W, CUMMINGS A D, WHITMORE R L. The disintegration of shale[J]. Journal of the Institute of Fuel, 1956, 29: 417-423.
- [2] 傅 晏. 干湿循环水岩相互作用下岩石劣化机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [3] 刘新荣, 傅 晏, 王永新, 等. (库)水-岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1298-1302.
- [4] 邓华锋, 周美玲, 李建林, 等. 水-岩作用下红层软岩力学特性劣化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 3481-3491.
- [5] 李玲芸. 基于干湿循环的膨胀土工程特性试验研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015.
- [6] 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, 23(4): 417-422.
- [7] 杨建林, 王来贵, 李春林, 等. 遇水-风干循环作用下泥岩断裂的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3606-3612.
- [8] 黄维辉. 干湿交替作用下砂岩劣化效应研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [9] 邓华锋, 李建林, 刘 杰, 等. 浸泡-风干循环作用对砂岩变形及破坏特征影响研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1620-1626.
- [10] 张惠梅, 杨更社. 冻融岩石损伤劣化及力学特性研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1756-1762.

收稿日期: 2022-07-26