

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.01.009

吴珺华, 杨松. 干湿循环下膨胀土裂隙发育与导电特性[J]. 水利水运工程学报, 2016(1): 58-62. (WU Jun-hua, YANG Song. Crack growth and electro-conductive properties of expansive soil under drying-wetting cycles[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(1): 58-62.)

干湿循环下膨胀土裂隙发育与导电特性

吴珺华¹, 杨 松²

(1. 南昌航空大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330063; 2. 云南农业大学 水利学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 干湿循环引起膨胀土裂隙开展, 进而对土体的土水特性产生重要影响。首先进行了不同干密度、含水率状态下均质无裂隙试样的导电性能试验, 认为试样电导率与干密度、含水率呈线性关系, 可采用多元线性函数进行拟合。用远距离光学显微镜观测了膨胀土裂隙发生发展过程, 利用图像灰度熵评价裂隙形态, 试验过程中同时测定了试样的含水率和电导率, 获得了干湿循环下土体灰度熵-含水率-电导率的关系。结果表明: 随着含水率的降低, 灰度熵逐渐增大, 电导率逐渐减小; 含水率对电导率的贡献逐渐降低, 裂隙对电导率的贡献逐渐增大。当失水到一定程度时, 裂隙对电导率的贡献几乎不变, 此时表明裂隙已开展稳定; 浸水过程中, 裂隙部分闭合, 灰度熵减小, 电导率增大。经历多次干湿循环的试样, 灰度熵和电导率均有所降低, 表明土体结构产生了不可逆的改变。

关 键 词: 裂隙; 灰度熵; 电导率; 膨胀土

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)01-0058-05

膨胀土具有强烈的湿胀干缩特性。蒸发条件下, 膨胀土失水收缩; 降雨时, 膨胀土吸水膨胀。干湿循环导致土体表面产生裂隙, 结构松散, 工程性能差。裂隙的形成与含水率的变化密切相关, 含水率的变化使得膨胀土反复胀缩变形, 进而导致裂隙的不断发育^[1-2]。裂隙发育破坏了土体的完整性, 对土体的强度、变形和渗流特性有显著影响。因此有学者对干湿循环条件下膨胀土的裂隙开展进行了试验研究, 以了解裂隙开展过程中裂隙形态与土体相关参数的相互关系。龚永康等^[3]利用电导测试技术, 采用人工方法模拟裂隙的发生发展, 弄清了膨胀土裂隙开展时的电导变化规律, 一定程度上揭示了土体内部结构性的改变特征。袁俊平等^[4]利用远距离光学显微镜对膨胀土试样进行观测, 利用图像灰度熵的概念来表征裂隙的发育程度。唐朝生等^[5]在室内试验基础上, 采用计算机图片处理技术对黏性土干缩裂隙网络进行处理, 探讨了聚丙烯纤维对黏性土干缩裂隙的抑制作用和机理, 提出了区面积裂隙率和裂隙网络的分形维数可作为描述裂隙发育的指标。G. W. Horgan 等^[6-7]通过设定若干与裂隙发展相关的几何参数建立了土体裂隙生成模型模拟干缩裂隙的形成和发展过程。H. J. Vogel 等^[8-9]通过试验研究了黏性土干缩裂隙形成过程的动力学特征, 建立了裂隙发育的动力学模型。N. Lecocq 等^[10]通过试验获得了裂隙宽度的一般规律及影响因素。马佳等^[11]进行了重塑土的裂隙演化试验, 对试验过程中土体裂隙开展及土性参数进行了研究。吴珺华等^[12-13]对干湿循环下膨胀土胀缩性能进行了大量试验研究, 并对试验过程中土体的结构性变化进行了分析。

可以看出, 已有研究大都集中在裂缝网络的定量分析和几何模型建立方面, 关于裂隙发育过程中裂隙形态变化规律及其与土体相关参数之间的关系尚不多见, 定量观测干湿循环条件下土体裂隙的发育过程更鲜见报道。为了研究干湿循环条件下膨胀土裂隙发育过程, 本文在试验基础上, 采用电导测试技术和图像处

收稿日期: 2015-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408291, 51209182); 江西省教育厅科技项目(GJJ14547); 江西省交通运输厅科技项目(2013C0006)

作者简介: 吴珺华(1985—), 男, 江西吉安人, 讲师, 博士, 主要从事非饱和土及边坡稳定研究。E-mail: wjh0796@163.com

理,对干湿循环过程中不同时刻的裂隙形态进行分析,获得裂隙开展过程中含水率、电导率与裂隙之间的关系,为后续研究提供试验基础。

1 试验方法

1.1 观测设备和仪器

本文采用河海大学岩土工程研究所自行设计的远距离光学显微镜观测系统进行膨胀土裂隙开展过程的动态观测。该设备通过对不同时刻试样表面的观测,可以进行连续、非扰动、动态观测试样在不同荷载状态下微观结构的变化。试验仪器见图1,主要装置包括:美国QUESTAR公司生产的Questar_QM100型长距离显微镜,工作范围15~35 cm,用于放大试样表面;三轴位移平台,放置显微镜等观测仪器及调整显微镜与试样之间距离;试样承放平台,放置试样;压力加载系统,用于试验中试样的加载;CCD摄像仪和视频监视器,信噪比为30 Db,分辨率500 L,用于试样裂隙的观测和跟踪;电脑,用于存储CCD摄像头拍摄到的微细结构图像。辅助设备包括电源、光源和应力位移采集仪器等。

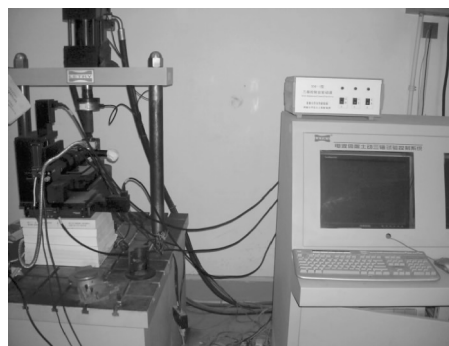


图1 远距离光学显微镜观测系统

Fig. 1 Long-distance microscope system

1.2 试验前准备

试验前,首先要获得无裂隙土体的电导率特性,进行了不同干密度、含水率下均质试样的电导率试验。需要说明的是,试样由不同初始含水率的土样压制而成,并不是经历干湿循环后的试样,这样做的目的是为了剔除裂隙发育后含水率对试样电导的贡献值,认为实测值与计算值的差值即为裂隙对电导率的贡献。土样取自南水北调中线一期工程总干渠膨胀土试验段工程,基本参数为:液限42.7%,塑限19.2%,自由膨胀率56.8%,最大干密度1.81 g/cm³,相对密度2.74。试样为环刀样($\Phi=61.8$ mm, $H=20$ mm)。每个试样上沿着直径方向对称插上两枚大头针,间距30 mm,深度约为18 mm,用于测量试样电导率(图2)。

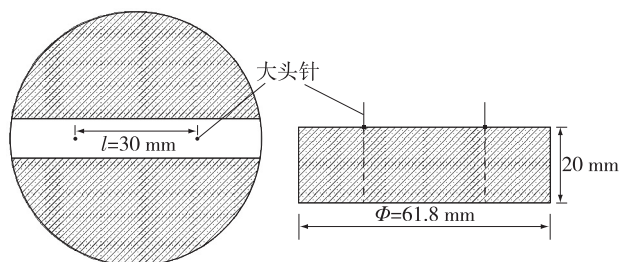


图2 电导率法率定试验装置

Fig. 2 Test device using conductivity method

图3是土体电导率与干密度、含水率的关系。这里采用的试样是重塑样,可认为是均质完整无裂隙的。可以看出,土体的电导率随着含水率和干密度的增大而增大。含水率越大,孔隙水传播电流的途径越多,且孔隙水中溶解的正负离子越多,导电能力越强,电导率越大;干密度越大,土颗粒之间接触越紧密,接触面积越大,传播电流的途径增多,导电能力增强,电导率也增大。对试验结果进行多元线性回归,拟合结果可写成如下形式:

$$\bar{F} = 1/F = a + bw + c\rho_d \quad (1)$$

式中: $\bar{F}$ 为电导率; F 为电阻率; w 为含水率(%); ρ_d 为干密度(g/cm³); a, b, c 为待定常数。由试验可得: $a = -4.77$, $b = 0.088$, $c = 2.76$ 。由于本文关于干密度的统计试样偏小,式(1)对于试样处于低含水率下的计算值有一定误差,因

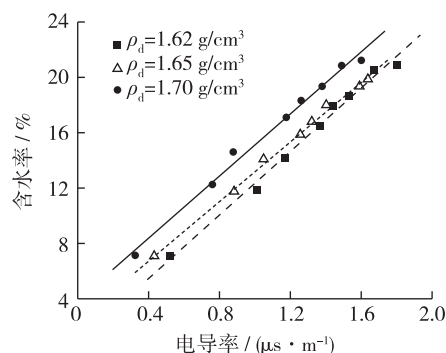


图3 不同干密度、含水率与电导率关系

Fig. 3 Dry density, water content and conductivity relationships

此式(1)仅适用于较高含水率下的计算。后续研究可增加试样的统计点,提高拟合精度。

1.3 试样制备

试样初始干密度为 1.54 g/cm^3 。将土样重塑后制备饱和小三轴样,然后用细钢丝锯沿半开膜中缝处切开试样。将其中一半试样放置于半圆柱橡皮筒内,沿试样高度方向对称地插入一枚大头针,针头间距 70 mm ,距离上下两端面各 5 mm ,深度 18 mm ,针头两端用导线连接至电导仪,获得裂隙发育过程中电导率的变化。制备好的试样实物见图 4。

1.4 试验方法

先称量橡胶半开模、大头针等与试样直接接触的物体质量。试验过程中,每拍摄一次,称量包括试样在内的总体质量以计算试样的含水率,同时记录相应的电导率。当试样质量不变时,则采用小型喷壶对试样进行喷洒,喷洒应少量多次,时间间隔不宜过长,直至水分不再渗入。用密封袋将其包住,密封时间不少于 24 h 。至此一个干湿循环过程结束。本次试验中,共进行了 3 次干湿循环,历时近 1 个月。

1.5 图像处理

为了避免边界对裂缝发育的影响,并保证不同时刻获得的图像一致,拍摄区域选取试样的正中间部分 ($20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$) 为处理图像。本文采用图像灰度熵^[4]的概念来定量描述裂隙形态,其表达式为:

$$H = - \sum_{i=0}^{255} P_i \log_2 P_i \quad (2)$$

式中: H 为图像灰度熵; P_i 为每级灰度 i 出现的频率。关于采用图像灰度熵来定量描述裂隙形态的可行性及物理意义,已有文献进行系统研究^[4,10],在此不再赘述。

2 试验结果与分析

图 5 和 6 分别为试样经历不同干湿循环次数后在失水条件下,灰度熵、电导率与含水率的关系。由于采用自然吸水方式进行试样增湿,故在第 2、3 次吸水后,其含水率均小于初始状态时的含水率。可以看出,对同一脱湿路径下的试样,随着含水率的不断降低,灰度熵总体上呈现增大趋势,电导率呈现减小趋势。而经历吸水后再脱湿的试样,灰度熵和电导率均有所降低。由于放大倍数大,微小裂隙的产生都会对图像灰度产生影响,导致灰度熵不断增大。经历 1 次干湿循环后,胀缩效应导致土体内部结构变得松散,表面裂隙逐渐模糊,从而导致灰度熵降低,电导率也减小。第 2 和 3 次失水条件下试样电导率的变化规律与首次失水条件下的相似,变化幅度逐渐减小。

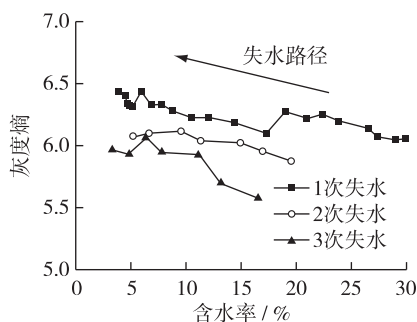


图 5 灰度熵与含水率关系

Fig. 5 Relationships between gray level entropy and water content

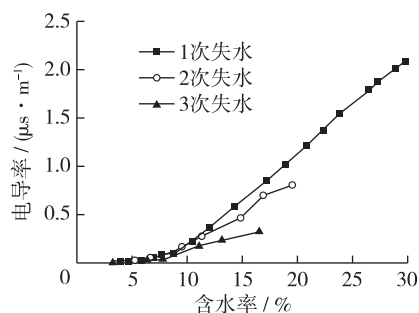


图 6 电导率与含水率关系

Fig. 6 Relationships between conductivity and water content

为剔除含水率对电导率的影响,利用式(1)计算无裂隙条件下,当前含水率、干密度对应的电导率。由于裂隙的存在,实际电导率应比计算值小,其差值即可认为是裂隙对电导率的贡献。式(1)并不适用于干湿循环后的试样,故此只计算首次脱湿条件下的结果(见图7)。可以看出,随着含水率的降低,试样裂隙逐渐开展,裂隙对电导率的贡献逐渐增大,含水率对电导率的贡献显著降低。当含水率降低到一定程度时,裂隙对电导率的贡献几乎不变,说明此时裂隙已开展稳定。由于试样较小,裂隙发育不明显,对电导率的贡献有限,此时含水率对电导率的贡献仍占主导。

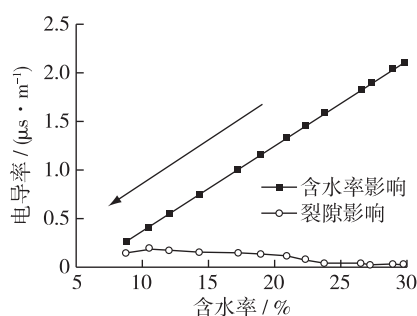


图7 含水率、裂隙对电导率的影响

Fig. 7 Effects of water content and cracks on conductivity

3 结 语

本文采用远距离光学显微镜观测系统进行了试样裂隙开展过程的动态观测,同时利用电导率法测定了试样裂隙开展过程中电导率值,结果如下:

(1)土体的电导率与干密度、含水率呈线性关系,在较高含水率条件下,可用多元线性函数进行拟合。

(2)随着含水率的降低,灰度熵逐渐增大,电导率逐渐减小。经吸水后再脱湿的试样,灰度熵和电导率均有所降低。经历一次干湿循环后,胀缩效应导致土体内部结构变得松散,表面裂隙逐渐模糊,从而导致灰度熵降低,电导率也减小。多次失水条件下试样电导率的变化规律与初次失水条件下的相似,变化幅度逐渐减小。

(3)随着含水率的降低,试样裂隙逐渐开展,裂隙对电导率的贡献逐渐增大,含水率对电导率的贡献显著降低。当含水率降低到一定程度时,裂隙对电导率的贡献几乎不变。裂隙规模较小时,含水率对电导率的贡献较大;反之,裂隙规模对电导率的贡献较大。

参 考 文 献:

- [1] 缪林昌, 刘松玉. 论膨胀土的工程特性及工程措施[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(2): 37-40, 48. (MIAO Lin-chang, LIU Song-yu. Engineering characteristics of expansive soil and engineering measures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(2): 37-40, 48. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 龚永康, 陈亮, 武广繁. 膨胀土裂隙电导特性[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(3): 323-326. (GONG Yong-kang, CHEN Liang, WU Guang-fan. Electric conductance characteristics of fissures of expansive soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(3): 323-326. (in Chinese))
- [4] 袁俊平, 殷宗泽, 包承纲. 膨胀土裂隙的量化手段与度量指标研究[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(6): 27-30. (YUAN Jun-ping, YIN Zong-ze, BAO Cheng-gang. Quantitative description method and index for fissures in expansive soils[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20(6): 27-30. (in Chinese))
- [5] 唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 影响黏性土表面干缩裂隙结构形态的因素及定量分析[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1186-1193. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Factors affecting the surface cracking in clay due to drying shrinkage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 1186-1193. (in Chinese))
- [6] HORGAN G W, YOUNG I M. An empirical stochastic model for the geometry of two-dimensional crack growth in soil[J]. Geoderma, 2000, 96(4): 263-267.
- [7] CHERTKOV V Y. Modelling cracking stages of saturated soils as they dry and shrink[J]. European Journal of Soil Science,

- 2002, 53(1): 105-118.
- [8] VOGEL H J, HOFFMANN H, ROTH K. Studies of crack dynamics in clay soil I. Experimental methods, results and morphological quantification[J]. Geoderma, 2005, 125(3): 203-211.
- [9] VOGEL H J, HOFFMANN H, LEOPOLD A, et al. Studies of crack dynamics in clay soil II. A physically based model for crack formation[J]. Geoderma, 2005, 123(3): 213-223.
- [10] LECOCQ N, VANDEWALLE N. Dynamics of crack opening in a one-dimensional desiccation experiment[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2003, 321(3-4): 431-441.
- [11] 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))
- [12] 吴珺华, 袁俊平, 杨松, 等. 膨胀土湿胀干缩特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(3): 28-31. (WU Jun-hua, YUAN Jun-ping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrink performance of expansive soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 28-31. (in Chinese))
- [13] 吴珺华, 袁俊平, 杨松, 等. 干湿循环下膨胀土胀缩性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 62-65. (WU Jun-hua, YUAN Jun-ping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrinking performance of expansive soil under wetting-drying cycles[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1): 62-65. (in Chinese))

Crack growth and electro-conductive properties of expansive soil under drying-wetting cycles

WU Jun-hua¹, YANG Song²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: The soil-water characteristics of expansive soil are influenced by cracks caused by drying-wetting cycles. Electrical conductivity tests were carried out to obtain the soil conductivity without cracks and electrical conductivity had a linear positive correlation with soil dry density and water content. A linear multivariate function was obtained to describe their relationships. A long-distance microscope system was used in observing the crack growth of the expansive soil dynamically under the conditions of drying-wetting cycles and the gray level entropy of image with the cracks was used to evaluate the crack shape. The soil water content and conductivity were obtained and the gray level entropy-water content-conductivity relationship of soil was established under the conditions of the drying-wetting cycles. The gray level entropy increased and conductivity decreased with the crack growth due to water loss. The impacts of water content on the soil conductivity decreased and impacts of cracks on the soil conductivity increased gradually. The impacts of cracks on the soil conductivity kept constant under drying to a certain degree, and the shape of cracks remained stable; the cracks were closed partially due to water absorption. The gray level entropy decreased and the soil conductivity increased. The gray level entropy and the soil conductivity decreased to some extent under the drying-wetting cycles. It was shown that the soil structure was changed irreversibly.

Key words: cracks; gray level entropy; conductivity; expansive soil