

文章编号: 1673-9469 (2018) 01-0032-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.01.008

## 干湿循环作用下膨胀土裂隙开展室内试验研究

李亚帅<sup>1, 2</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所,  
江苏南京 210098)

**摘要:** 为了解裂隙开展演化规律, 以合肥黑色中膨胀土为研究对象, 对模型试样进行一系列干湿循环试验, 研究降雨蒸发作用下膨胀土裂隙演化规律。利用图像识别程序对面积裂隙率等进行定量分析并观测土样侧面裂隙开展形态以及深度。结果表明: 单次脱湿情况下, 土体的面积裂隙率、裂隙分形维数等形态参数和裂隙深度随时间逐渐增加, 且土体表面形态参数存在极限值; 干湿循环作用表现为裂隙的反复开裂、愈合使得土体结构趋于松散, 裂隙率、裂隙分维趋于稳定; 由侧向剖面观测得到边坡失稳是横向裂隙发展贯通而引起的。

**关键词:** 膨胀土; 边坡工程; 裂隙; 室内试验; 图像识别

**中图法分类号:** TU443

**文献标识码:** A

## Research on the fissure development indoor test of expansive soil cracks under the action of dry-wet circulation

LI Yashuai<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University,  
Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; )

**Abstract:** In order to know the regulation of crack evolution, dry wet cycling test taking hefei expansive soil as the research object is carried out to study the expansive soil crack evolution under rainfall evaporation. The image recognition program is used to quantitatively analyze the crack rate of the area and observe the shape and depth of the lateral fissure. The results show that in the case of single dehumidification, the area crack rate, fracture fractal dimension and other morphological parameters and fissure depths gradually increase with dehumidification time, and the soil surface morphological parameters have the limit value. The wet cycle is characterized by repeated cracking and healing of fissures, which tend to loosen the soil structure, and the crack rate and fissure fractal dimension tend to be stable. The lateral slope instability is caused by lateral fracture development through lateral profile observation.

**Key words:** Expansive soil; Slope; Crack; Laboratory test; Image recognition technique

膨胀土是一种主要由蒙脱石和伊利石等强亲水性矿物组成, 对环境湿度变化敏感, 具有多裂隙性、强胀缩性和强度衰减性的高塑性粘土<sup>[1]</sup>。在蒸发作用下, 膨胀土失水产生大量的裂隙, 破坏了土体完整性, 导致了土体强度的降低, 也成为降雨入渗和水分蒸发的通道<sup>[2-3]</sup>。裂隙对膨胀土力学性质有重要影响, 学者们对膨胀土裂隙开展已经做了一些研究。

袁俊平等<sup>[4-5]</sup>利用远距离光学显微镜对土体的表面裂隙进行观测, 并提出利用图像灰度熵、裂隙分维作为裂隙发展定量描述的指标。但这些成果是建立在某一次脱湿的基础上, 没有考虑干湿循环作用。张家俊等<sup>[6]</sup>针对环刀土样, 采用烘干—抽气饱和法模拟脱湿—饱和过程, 但烘干—抽气饱和法与自然条件下的降雨—蒸发效应相比, 裂隙产生过于“生

收稿日期: 2017-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272327); 安徽省水利厅项目(20168011716); 中央高校业务费资助项目(2015B25514)

作者简介: 李亚帅(1992-), 男, 河北石家庄人, 硕士, 主要从事非饱和土和边坡工程研究。

硬”；考虑尺寸效应，环刀尺寸相对较小。因此，部分学者采用模型试样进行裂隙观测<sup>[7-13]</sup>，但多集中在平面观测，针对竖直裂隙观测相关报道较少。

本文通过在实验室模拟降雨—蒸发条件，开展膨胀土在干湿循环交替作用下裂隙演化试验，利用数码相机记录下膨胀土失水开裂和湿化愈合的过程，研究大气作用下，膨胀土裂隙在平面和剖面上的演化规律，以加深对膨胀土裂隙开展演化过程的认识。

## 1 实验方案

### 1.1 实验材料

试验用土样取自安徽省合肥市蜀山区小庙镇引江济淮工程试验段，K41+600 断面 3 级坡坡面以下 1.5 ~ 1.8 m，土样基本饱和。土样的基本物理性质见表 1，土样具有中等膨胀性。

### 1.2 实验装置

一般的膨胀土裂隙试验多为烘干加热标准环刀试样 ( $30 \text{ cm}^2 \times 2 \text{ cm}$ ) 促进土体裂隙开展。标准环刀试样尺寸较小，尺寸效应对裂隙开展的影响严重。为克服这种情况，本试验采用的试样尺寸为  $30 \text{ cm}$  (长)  $\times 30 \text{ cm}$  (宽)  $\times 30 \text{ cm}$ /20 cm(高)。现场取样尺寸为  $50 \text{ cm}$  (长)  $\times 50 \text{ cm}$  (宽)  $\times 50 \text{ cm}$  (高)，将试样运送至实验室，再削减成实验所用尺寸，放置在亚克力板制作的模型箱中。

试验原状土样取样地区地处中纬度地带，属于亚热带季风湿润气候，夏季平均气温最大值达到  $34.9^\circ\text{C}$ ，故试验加热温度采取  $35^\circ\text{C}$ ，采用电子温控系统控制。裂隙图像用深圳京杭科技公司生产的 JHSM m 系列工业相机进行采集。利用三角架将相机固定，并通过 USB 接口与计算机相连，记录下实验过程中裂隙开展情况。实验装置如下图 1 所示。实验过程中关闭实验室所有窗帘，仅采用日光灯光源进行照射，以保证拍摄过程中光照条件的一致性。

### 1.3 实验方案

实验方案的设计以引江济淮试验工程为背景，

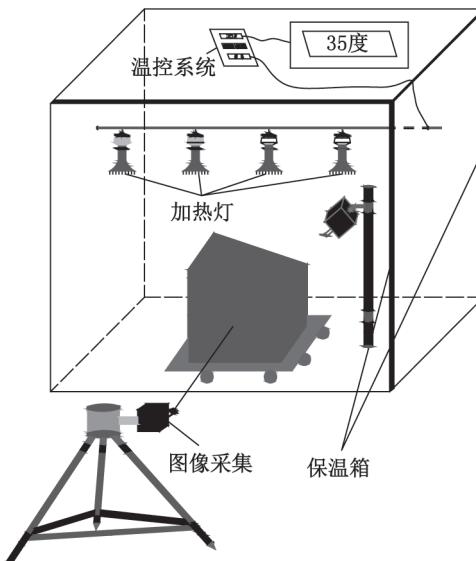


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test device

研究原状膨胀土模型试样在干湿循环反复作用下的表面裂隙和裂隙深度发展情况。

#### (1) 试样预处理

将现场取回的原状试样放入水中进行吸水，抵消取样和搬运过程中的失水量，并将土样削成模型大小。

#### (2) 试验方法

步骤一，将试样放入恒温箱中，进行 1 h 的预热，目的是为了使试样温度在试验开始时能更快到达预定干燥温度；

步骤二，开启加热灯对土样进行加热，分别在加热时间为 6、10、21、25、30、42、48、56、64、72、96 h 进行拍照，记录下裂隙开展情况；

步骤三，关闭加热系统，采用气压喷壶给干燥开裂的土样表面喷水至表面裂隙完全闭合并形成径流，用以模拟坡面降雨效果；

步骤四，重复步骤二所表述的过程，将试样反复模拟干湿循环 5 次，以模拟降雨蒸发反复作用。

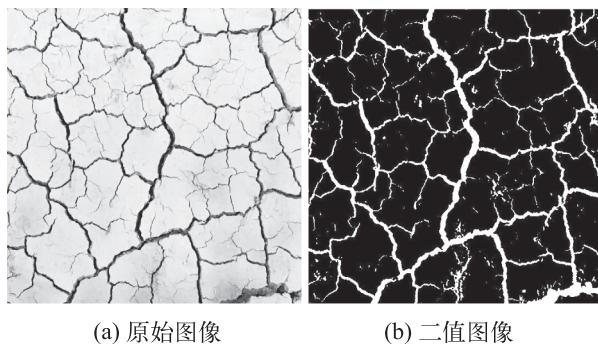
### 1.4 裂隙描述方法

实验过程中，对不同时间的膨胀土裂隙发展进行实时拍照，记录平面裂隙开展状态，并人工测量模型试样裂隙开展深度，观测裂隙空间分布形态。

表 1 观测土样基本物理特性  
Tab.1 The basic physical properties of soil samples

膨胀等级	天然含水率 $W/\%$	自由膨胀率 $F_s/\%$	比重 $G_s$	干密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 $I_p$
中膨胀	25.21	89	2.71	1.62	51.44	20.87	31

图像裂隙率计算过程如下：将采集到的彩色图片，转化为灰度图，灰度图像只表示图像的亮度信息而没有任何色彩信息，因此灰度图像的每个像素点上只包含一个量化的灰度级，即灰度值。但不同环境下拍摄照片的亮度会有差异，需将照片进行进一步处理。对灰度图像进行除噪、滤波处理后，转化为二值图像，处理效果图如图2所示。按照公式(1)计算裂隙率。



(a) 原始图像

(b) 二值图像

图2 裂隙图像

Fig.2 Crack image

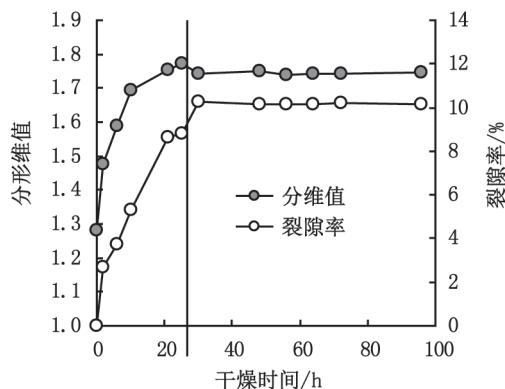


图3 裂隙分形维值、裂隙率随干燥时间的变化

Fig. 3 The fractal dimension of soil mass and the change of fracture rate with dehumidification time

$$\delta_f = \text{裂隙点像素个数} / \text{总像素个数} \quad (1)$$

图像裂隙分形维数的计算采用盒维数法<sup>[14]</sup>。具体做法是在选定的膨胀土裂隙区内，将膨胀土裂隙网络分为若干边长为 $\varepsilon$ 的格子，确定存在几何体的格子数目 $N(\varepsilon)$ ，然后改变 $E$ 求相应的 $N(\varepsilon)$ 。依次类推，最后由下式(2)求出分形维值：

$$\lg N(\varepsilon) = A - D \cdot \lg \varepsilon \quad (2)$$

## 2 试验结果与分析

### 2.1 单次干燥过程中裂隙演化特性

依据(1)式和(2)式，第5次干燥过程中膨胀土

的表面裂隙率和分形维数计算结果见表2。

图3为第5次干燥过程中的分形维值和裂隙率随时间的变化曲线。由图3可以看出，前30 h内，土体裂隙的分形维值和面积裂隙率随干燥时间的增加而增大，在30 h左右达到峰值，超过30 h后面积裂隙率和分形维值基本达到稳定，且略小于峰值。

干燥过程中，试样上部与热空气直接接触导致土体上下受热不均匀，从而使得上下部土体失水速率不同产生差异，引起土体的不均匀收缩，致使土体开裂。随着干燥时间的延长，土体收缩量变大，裂隙宽度变大，同时部分裂隙间的土块产生次裂隙，导致裂隙面积率增加。由于裂隙形成过程复杂，裂隙的开展处于不规则状态，结构复杂。分维是建立在一种统计分布上，分形维值越高，说明裂隙开展越复杂，受气候影响的膨胀土结构破坏越强烈<sup>[15]</sup>，裂隙的形成过程伴随其分形维值的增大。

干燥30 h后，上部土体含水率已经较低，其水分散失亦趋于缓慢，因此，后期试样脱湿速率的空间分布出现逆转，含水率梯度逐步降低，含水率分布趋于均匀。随着试样下部土体的干缩，试样上部土体由受拉转变为受压，裂隙被压缩，裂隙面积率因而减少。一些细微的次裂隙因受压而闭合，故分形维数减小。同时上部土体被分割成无数的小土块，土体水分会很快在小土块间达到平衡，很难出现裂隙开展所需要的较高含水率梯度，裂隙开展状态基本处于稳定，裂隙面积率和分形维值达到稳定。

图4为第5次干燥过程中裂隙开展深度随时间

表2 不同干燥时间下的裂隙率和分形维值

Tab.2 The fracture rate and fractal dimension of different dehumidification time

干燥时间/h	裂隙像素/个	非裂隙像素/个	总像素/个	裂隙率/%	分形维数
0	221	2 559 779	2 560 000	0.00	1.279 7
6	68 171	2 491 829	2 560 000	2.66	1.475 8
10	95 543	2 464 457	2 560 000	3.73	1.588 1
21	135 587	2 424 413	2 560 000	5.30	1.692 3
25	22 1634	2 338 366	2 560 000	8.66	1.753 8
30	225 234	2 334 766	2 560 000	8.80	1.773 5
42	259 632	2 300 368	2 560 000	10.14	1.743 1
48	260 181	2 299 819	2 560 000	10.16	1.788 3
56	259 403	2 300 597	2 560 000	10.13	1.789 5
64	259 832	2 300 168	2 560 000	10.15	1.782 4
72	260 681	2 299 319	2 560 000	10.18	1.781 8
96	259 857	2 300 143	2 560 000	10.15	1.786 3

的变化关系。图4显示，裂隙深度随干燥时间的增加而增大，增加的速率如图5所示。前30 h内裂隙迅速开展，平均开展速率为 $0.283 \text{ cm/h}$ ；超过30 h后，裂隙开展缓慢，平均速率为 $0.068 \text{ cm/h}$ 。前者速率是后者的4.16倍。

土体失水收缩不均匀导致开裂，同时因为土体的低渗透性，使得深部土体中的水分通过上部土体的蒸发量很小，裂隙的存在便成为下部土体中分散失水的通道。裂隙视为土体失水的临空面，裂隙底部尖端的土体水分通过裂隙快速散发至空气中，产生较高的失水速率，引起裂隙尖端土体开裂，宏观表现为裂隙向下发展。同时上部土体由于含水率已经较低，水分散失趋于缓慢，下部土体由于上覆压力的作用而产生较大的“阻碍力”，所以裂隙在深度方向开展放缓。

综上，单次干燥过程土体表面裂隙率与裂隙分形维数随时间而增大，且存在一个极限稳定值。土体因失水收缩不均匀而引起开裂，裂隙深度随时间而增加，在表面裂隙率和分形维数达到稳定前，裂隙深度开展较迅速，达到稳定后，裂隙在竖直方向

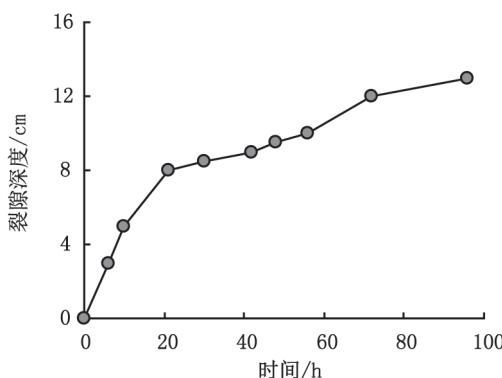


图4 土体裂隙深度脱湿时间的变化

Fig.4 The change of soil fracture depth dehumidification time

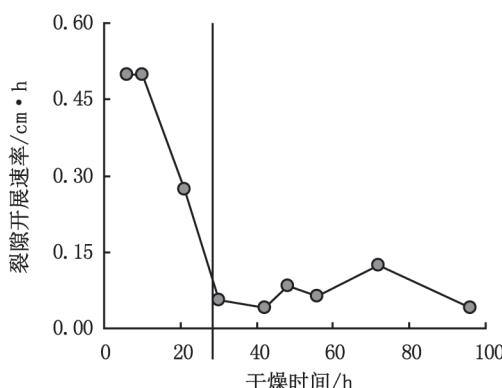


图5 土体裂隙深度开展速率随脱湿时间的变化

Fig.5 The depth of soil fracture is changed with the time of dehumidification

开展放缓。

## 2.2 反复干湿循环过程中裂隙演化特性

图6、图7分别为干湿循环过程中面积裂隙率和分形维值随干燥时间的关系曲线。由图可以看出，干湿循环过程的裂隙面积率和分形维值的变化规律基本一致，随干燥时间延长而逐渐增大。

图8为每次干燥稳定后裂隙面积率 $\delta_f$ 和分形维数 $D$ 的统计结果。由图8可以看出，裂隙面积率 $\delta_f$ 在第1次干湿循环结束后达到极值，随后逐渐减小直至稳定；分维值 $D$ 随着干湿循环次数逐渐增大，至第3次干燥结束时曲线基本趋于水平，裂隙分维基本趋于稳定。图8中的分形维数关系曲线说明，前期干湿循环对土体结构的破坏明显，裂隙开展剧烈，后期结构破坏导致裂隙开展并不明显。

首次干燥过程中，土样结构完整、整体性良好，失水产生的收缩拉应力主要用于裂隙的产生和宽度的开展，故裂隙发育不充分，裂隙率和分形维数都比较小。经过初次干燥后的土样，整体性遭到破坏。再次干燥过程中，原有裂隙随着干燥而率先开裂并

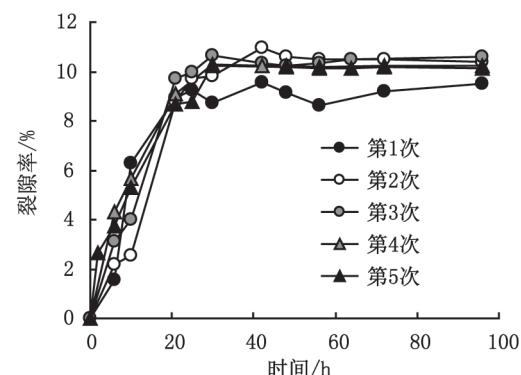


图6 干湿循环下面积裂隙率变化曲线

Fig.6 The change curve of area crack rate under wet cycle

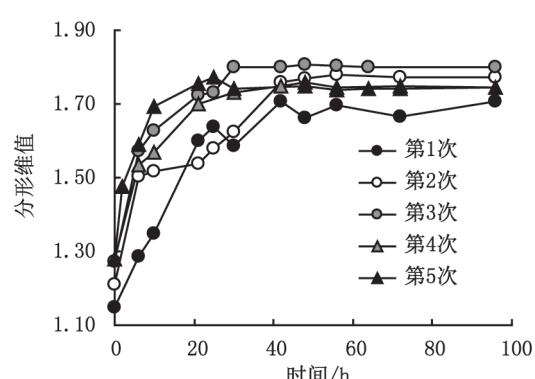


图7 干湿循环下裂隙分维值变化曲线

Fig.7 The curve of fractal dimension change under wet cycle

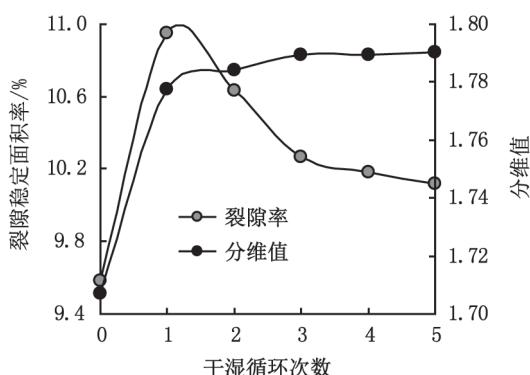


图 8 干湿循环次数对应裂隙稳定面积率和分维值  
Fig.8 The number of dry and wet cycle times corresponds to the crack stability area and fractal dimension

且不断发育，同时某些因最初拉应力小于抗拉强度未有裂隙产生的部位，其拉应力大于抗拉强度，产生新的裂隙。开裂过程中，拉应力产生的能量耗散主要体现在裂隙条数增加。随着干湿循环次数增加，土体结构破坏，失水收缩拉应力产生的势能下降，裂隙面积率随即减小，并逐步达到稳定值。

分形维数不仅表征裂隙发育的程度，还表示裂隙网格分布的不规则程度。干湿循环过程中裂隙条数增多，裂隙发育更加不规则，故当裂隙发育稳定后，循环次数越多，分形维数稳定值越大。

图 9 为裂隙开展深度随着干湿循环次数的变化规律。图 9 表明，随着干湿循环次数的增加，裂隙深度在逐渐增大，且第 2、3 次增加的幅度最明显。

综上，干湿循环过程土体表面裂隙率在第 1 次循环后达到最大值，后期逐渐趋于稳定；裂隙分形维数随循环次数而增大，在第 3 次趋于稳定；裂隙深度随循环次数增加而增加。

### 2.3 湿化过程中平面裂隙演化特性

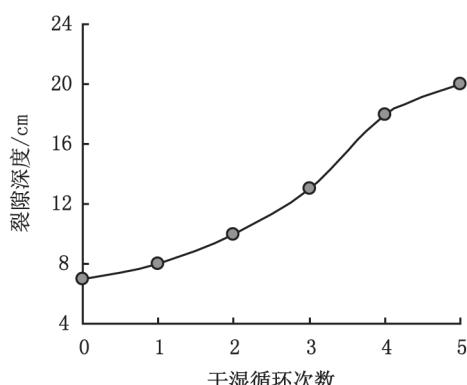


图 9 裂隙深度随干湿循环次数的变化  
Fig.9 The depth of fractures varies with the number of dry wet cycles

图 10 显示的是表面土体湿化、裂隙愈合的过程。湿化过程中，土体膨胀引起次裂隙先行闭合，主裂隙宽度逐渐变窄，且伴随表面冲刷崩解颗粒填充到主裂隙中，使得裂隙看似“愈合”。

被颗粒填充而“愈合”的部分其结构比较松散，即裂隙面处土粒之间结构联结减弱，强度较周围土体小很多，导致土体完整性被破坏。当试样再次干燥时，原裂隙处的土体会首先开展，且开裂含水率较前次干燥过程高。在较高的含水率下干燥容易产生较高的含水率梯度，同时土体应力状态已经变化，造成周边土块裂隙开展，进一步破坏土体完整性。这种干湿影响作用随着循环次数的增多而不断累积，存在累积效应。

### 2.4 边坡失稳剖面裂隙开展特性

图 11 为干湿循环过程中竖向裂隙开展过程，裂隙深度在逐渐增加。裂隙发展深度内，上部大量存在横向裂隙，裂隙呈现无序状态；下部裂隙以竖向为主。

在蒸发作用下，土体失水收缩。由于侧向土的

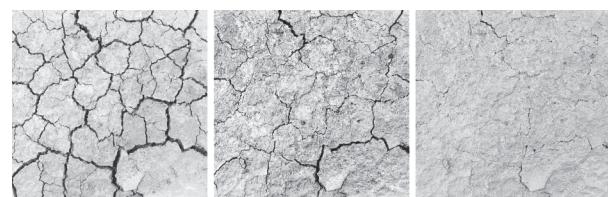


图 10 裂隙湿化过程  
Fig.10 The process of crevasse humidification

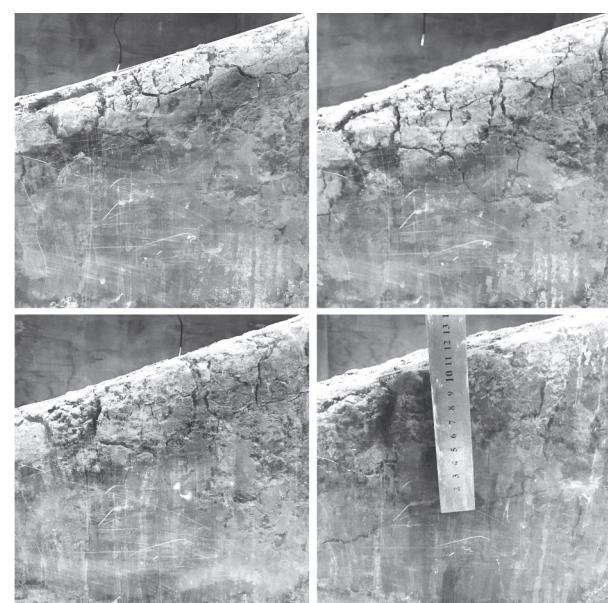


图 11 竖向裂隙开展过程  
Fig.11 Vertical crack initiation process

约束，水平向收缩受到限制。收缩拉应力的作用面是竖向的，导致竖向裂隙首先开展。竖向裂隙的开展为水分蒸发提供快速通道，竖向裂隙两侧的土体产生高含水率梯度而开裂，因此产生横向裂隙。随着干湿循环的进行，不仅仅竖向裂隙在发展，横向裂隙也在逐渐扩大、延伸。当横向裂隙贯通的时候，裂隙上层土体与下部间的粘结强度极低，降雨情况下，横向裂隙成为水分渗流的通道，将裂隙间的颗粒冲刷、带走，上部土体近乎悬空，产生滑动。

### 3 结论

1) 单次干燥情况下，表面裂隙率和分形维数随干燥时间延长而增加，且存在稳定值。在表面达到稳定值前，裂隙深度开展也较迅速，达到稳定值后，裂隙深度开展放缓。

2) 干湿循环对表面土体结构的破坏主要发生在前2次干燥过程中，后期的循环对结构破坏不再明显，表面裂隙发育趋于稳定，能量主要用于裂隙深度开展。

3) 湿化过程中颗粒填充主裂隙，造成裂隙近似“愈合”，改变土体应力分布状态，为下次干燥裂隙开展创造条件。干湿循环过程对裂隙开展和土体结构破坏有累计效应。

4) 膨胀土边坡失稳是横向裂隙贯通的结果。横向裂隙贯通使得上部土体悬空，在降雨作用下发生滑坡。

### 参考文献

- [1] 崔可锐，毛由田. 岩土工程实用手册 [M]. 北京：化学工业出版社，2007.
- [2] 包承刚. 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.
- [3] 孔令伟，陈建斌，郭爱国，等. 大气作用下膨胀土边坡现场响应试验研究 [J]. 岩土工程学报，2007，29(7): 1065-1073.
- [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.
- [5] 徐永福，黄寅春. 分形理论在研究非饱和土力学性质中的应用 [J]. 岩土工程学报，2006，28(5): 635 - 638.
- [6] 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.
- [7] VENKATARAMANA K, HANUMANTHA R B, SINGH D N, et al. Some investigations on cracking characteristics of soils[C]// Proceedings of the 12th IACMAG: Geomechanics in the Emerging Social and Technological Age. Goa, India: IACMAG, 2008: 1532-1538.
- [8] PERON H, HUECKEL T, LALOUI L, et al. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterization and mechanisms identification[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46: 1177-1201.
- [9] 曹玲，王志俭，张振华，等. 降雨-蒸发条件下膨胀土裂隙演化特征试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2016，35(2): 0413-0421.
- [10] 曹玲，王志俭. 土体表面干缩裂隙的形态参数定量分析方法 [J]. 长江科学院院报，2014，31(4): 63-67.
- [11] 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，2014，35(12): 3619-3626.
- [12] 吴珺华，袁俊平，卢廷浩. 基于变湿应力概念的膨胀土初始开裂分析 [J]. 岩土力学，2011，32(6): 1631-1636.
- [13] 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.
- [14] 易顺民，黎志恒，张延中. 膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义 [J]. 岩土工程学报，1999，21(3): 294-298.
- [15] 徐永福，黄寅春. 分形理论在研究非饱和土力学性质中的应用 [J]. 岩土工程学报，2006，28(5): 635-638.

(责任编辑 王利君)