

DOI: 10.11779/CJGE201907016

# 基于数字图像相关技术的土体干缩开裂过程研究

林 奎, 唐朝生\*, 程 青, 曾 浩, 施 磊

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 在干燥条件下, 土体极易蒸发失水收缩产生开裂, 深入研究土体干缩开裂过程对准确掌握干旱气候环境中的土体工程性质响应特性具有重要意义。通过对黏性土开展室内干燥试验, 采用数码相机实时记录土体表面裂隙的动态发育过程, 结合数字图像相关技术, 获取土体收缩开裂全过程。结果表明: ①裂隙通常在土体表面张拉应力集中处产生, 裂隙产生后周围应力场得到迅速释放并发生重排, 且裂隙间倾向于成直角相交; ②土体表面的位移场和应变场可以有效反映土体收缩开裂过程中的动态特征, 能为分析和预测裂隙的演化过程提供重要参考信息; ③土体被裂隙分割成不同的块区, 每个块区在收缩过程中都存在收缩中心现象, 且各块区的收缩中心位置会随时间而变化; ④数字图像相关技术能有效识别不同图像之间的灰度特征值, 能在完全不扰动土样的条件下准确获取土体表面干缩变形信息的时空演化特征, 为研究土体干缩开裂动态过程及机理提供了优越的技术手段, 具有较好的推广价值。

**关键词:** 干缩开裂; 数字图像相关; 收缩中心; 应变场; 位移场

中图分类号: TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)07-1311-08

作者简介: 林 奎(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事工程地质与环境岩土工程研究工作。E-mail: linluan208@126.com。

## Desiccation cracking behavior of soils based on digital image correlation technique

LIN Luan, TANG Chao-sheng, CHENG Qing, ZENG Hao, SHI Bin

(School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Under dry condition, the soil is prone to evaporation, leading to desiccation cracking. It is of great significance to deeply study the desiccation cracking process of soils to accurately grasp the engineering response characteristics of soils in arid climate environment. In conducting laboratory drying tests on cohesive soils, digital cameras are used to record the dynamic development of surface cracks in real time. By using the digital image correlation techniques, the plane strain field and displacement field of the whole process of desiccation cracking of soils are obtained. The experimental results show that: (1) The cracks are usually generated at the position where the tensile stress is concentrated, and the stress is then rearranged when the surrounding stress is rapidly released, and the cracks tend to intersect with other cracks at right angles. (2) The displacement field and strain field can effectively confirm some movement characteristics of the soils during the desiccation cracking process, thus providing assistance for analyzing the dynamic evolution process of cracks. (3) The soils are divided into different blocks by cracks, each block has its shrinkage center, and the shrinkage center will change with time. (4) The digital image correlation technique can effectively identify the gray scale feature values between different images, obtain the surface deformation information, and provide valid technical means for the study on desiccation cracking characteristics of soils.

**Key words:** desiccation cracking; digital image correlation; shrinkage center; strain field; displacement field

## 0 引言

在干燥条件下, 由于蒸发失水, 土体极易发生干缩开裂, 并在表面形成纵横交错的裂隙网络, 即自然界中常见的龟裂现象<sup>[1-2]</sup>。裂隙的存在会破坏土体的整体性, 使其结构松散, 力学性质降低, 进而引发各种工程地质问题<sup>[3-5]</sup>。例如, 在边坡工程中, 裂隙的存在会为雨水入渗到土体内部提供便捷通道, 降低土体的抗剪强度, 导致边坡失稳并可能因此引发滑坡等工程地质灾害<sup>[6-10]</sup>。在环境岩土工程中, 黏性土常因其渗

透系数小而作为垃圾填埋场和核废料地下处置库的褥垫层材料, 但黏性土的渗透性会因为裂隙的存在而成倍增加, 使其屏障功能急剧弱化<sup>[11-13]</sup>。在水利工程中, 裂隙会在土质堤坝中形成优先导流通道, 使坝体渗透增加, 强度减小, 对坝体稳定性产生威胁<sup>[12, 14-15]</sup>。因

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572246, 41772280, 41230636, 41322019); 江苏省自然科学基金项目(BK20171228、BK20170394); 中央高校基本科研业务费专项项目

收稿日期: 2018-06-07

\*通讯作者(E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn)

此,研究土体干缩开裂对预防干旱气候环境中的工程地质或环境地质问题具有重要意义。

近年来,受全球气候变化影响,极端干旱气候频发,土体干缩开裂问题引起了越来越多学者的关注和重视。为了深入了解土体干缩开裂的形成机制及其演化特征,有必要对土体表面裂隙网络几何形态进行精确的定量分析。早期的裂隙测量的方法多以手工为主,主要通过借助钢尺等工具实现对裂隙宽度和间距等的量测。近年来,随着数码照(摄)相和计算机技术的快速发展,土体干缩裂隙的测量手段也呈现多样化趋势<sup>[16-18]</sup>,在一定程度上也推动了数字图像处理技术如数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术在该领域的飞速发展。DIC正以其高精度、非接触、快速和动态等优点,在岩土体变形测量方面展现出显著的优势,很好地弥补了传统变形测量方法的不足。近20 a来,国内外学者围绕这一技术的理论研究及其应用研究等方向做了大量的工作,取得了一批重要的研究成果。例如,Kahn-Jetter等<sup>[19]</sup>采用两个固定不动的摄像机同时采集被测试件的散斑图像,之后基于DIC技术将所采集的两组二维数字图像的相关信息进行分析对比,由两组数据的视差得出了试件的三维位移场。李元海等<sup>[20]</sup>采用DIC技术对砂土地基在离心场和重力场条件下的变形进行了定性定量分析,研究了地基模型的变形模式、应变场分布、渐进破坏过程以及滑动剪切带的位置形状特点。Lee等<sup>[21]</sup>利用DIC技术以及高速摄像机研究了在几何对称加载配置和冲击载荷条件下具有单刃槽口的多层单向石墨环氧复合材料矩形试样的裂纹增长情况和断裂行为。赵程等<sup>[22]</sup>借助DIC测试技术对含有预制裂纹的类岩石脆性材料在单轴压缩作用下的裂纹扩展过程进行了宏细观多尺度研究,得到了试件的全局应变场演化过程。张昕等<sup>[23]</sup>采用DIC技术对砂土群锚上拔过程开展模型试验,从变形场角度深入分析其力学现象的内在规律并揭示了锚周土体变形破坏机制。Teng等<sup>[24]</sup>基于自主开发的可执行DIC技术的土壤变形测量设备,对低分辨率图像不可见的局部变形进行测量,在“微观”尺度以及“宏观”尺度上可视化土壤行为,从而识别其宏观破坏机制。类似的研究成果还有很多,但需要指出的是,在研究土体干缩开裂的领域中,目前学术界采用数字图像相关技术作为研究工具的报道还较为鲜见。然而,数字图像处理技术所具有一系列优点正切合了目前

在土体干缩开裂研究方面所遇到的瓶颈问题,如无法准确把握土体在干燥过程中表面收缩变形场的演化特征,以及应变场与裂隙发育过程的相关性。并且数字图像相关技术提供了一种有效的非接触性检测手段,能够在不破坏土体结构的基础上获取土体变形参数。因此,有必要将数字图像相关技术引入到土体干缩开裂研究中,为揭示土体裂隙发育机理提供更多有价值的信息。

本文通过开展一系列室内干燥试验,通过数码相机对土体干缩开裂的全过程进行了动态监测,结合数字图像相关技术,全面分析了土体表面的位移场和应变场信息,阐述了干燥条件下土体收缩变形与裂隙发育过程的演化特征。相关研究成果对深入了解土体干缩裂隙的形成机理及发育状态具有重要的参考价值,并对裂隙发育过程的预测具有启发意义。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

本次试验所用土样为南京地区0.5~1.0 m深度的下蜀土,是一种粉质黏土,呈棕黄色。该土样广泛分布于长江中下游,是众多土工建设项目不可或缺的地基土。基于土工试验,测得其基本物理性质如表1所示。此外,矿物成分分析表明,该土样的黏土矿物中含有17.9%的蒙脱石、73.6%的伊利石和8.5%的高岭石。

### 1.2 试验方法

将取回的试样风干粉碎并过2 mm筛,然后配置成初始含水率为170%的饱和泥浆,待搅拌均匀后,将泥浆倒入直径为117 mm的圆形玻璃皿中,振荡5 min以除去气泡,然后密封至少72 h至沉淀稳定,随后抽去浆液表面的清液,制备好的试样初始厚度为8 mm。

需要指出的是,由于黏性土颗粒细小,土样纹理不明显,如果未植入示踪粒子,将无法跟踪土颗粒的运动状态,后续的数字图像处理也将无法实现。因此,本试验采取在样品表面均匀喷洒黑漆斑点以获取采集面纹理特征,通常这些斑点的尺寸只有若干微米,其对试样的影响可以忽略不计。

制备好的试样需进行干燥并定时拍照。为了减少其它因素干扰,试验在恒温恒湿的条件下进行(温度25±0.5℃,相对湿度(50±3)%).将数码相机固定在

表1 土体的基本物理性质

Table 1 Physical properties of soils

颗粒相对密度 $G_S$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p$	最优含水率 $w_{opt}/\%$	最大干密度 $\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$	粒度分析/%		
2.71	76.2	29.1	47.1	18.3	1.69	24	34	42

试样正上方, 每隔 30 min 记录一次土体表面图像。为了获取光线均匀且易于处理的图像, 在样品上方设置若干 LED 灯以改善光照条件, 同时也确保每次采集的图像都具有可靠的灰度值。具体试验装置如图 1 所示。

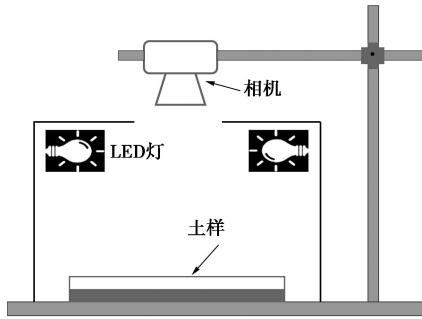


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

## 2 数据处理方法

试验中采用 DIC 技术对所获取的图像进行分析。DIC 技术最早是在 20 世纪 80 年代初由日本学者 Yamaguchi<sup>[25]</sup> 和美国学者 Ranson 等<sup>[26]</sup> 分别提出的。其基本原理是采用互相关法, 对不同运动状态的对象分两次进行曝光, 成像在两张不同的图片上, 通过将图像划分成大小合适的方形子区, 对比这些子区的灰度特征值, 识别特定子区的相似性关系, 计算像素点的位移量, 从而得出局部的位移场数据。在对整个研究区域完成分析之后, 得出整体的应变和位移场分布信息, 以图像的形式直观表现出来。

假设变形前后两帧数字图像的灰度特征函数分别为  $f(x, y)$  和  $g(x', y')$ , 其中  $x, y$  和  $x', y'$  分别为某一像素点变形前后的位置, 用  $u$  和  $v$  表示特征点沿  $x$  和  $y$  方向的位移分量。则有

$$x' = x + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \quad , \quad (1)$$

$$y' = y + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \quad . \quad (2)$$

得到变形前后两个子区的灰度分布后, 采用统计学中的相关系数作为评价两个子区之间的相似程度的标准。相关系数  $C$  定义为

$$C = \frac{\sum f(x, y) \cdot g(x', y')}{[\sum f^2(x, y) \cdot \sum g^2(x', y')]^{\frac{1}{2}}} \quad , \quad (3)$$

式中,  $f, g$  分别为变形前后某一子区的灰度特征值。当  $C=1$  时, 两个子区域完全相关;  $C=0$  时, 表示两个子区域毫无相关。

基于上述原理, 通过 MATLAB 编程开发了相应的 DIC 分析软件。在图像分析处理过程中, 基本分为 3 个步骤: 图像导入与图像质量预分析、相关性分析计算以及数据结果可视化。使用该软件可以对图像进

行取样分析, 获取图像表面纹理的灰度数据分布以及其他图像学信息, 并最终借助可视化工具, 获取平面位移场和应变场等相关信息。

需要注意的是, 数字图像相关技术的计算精度主要依赖于图像分辨率和视场尺寸。因此, 在使用该软件进行土体开裂过程的位移场分析时, 合适的子区尺寸对分析结果的正确性起到至关重要的作用。倘若子区选取得过大, 则可能无法准确反映实际的应变分布情况; 而子区域选得过小, 稳定性降低, 且会造成运行速度过慢的后果。本次研究拍摄的照片像素值为  $5184 \times 3456$ , 子区大小设为  $48 \times 48$  像素。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 土体干缩开裂过程

本次试验共持续 72 h, 图 2 给出了土体表面裂隙发育的整个动态过程。试验在蒸发至 72 h 时, 所有裂隙全部发育完成, 其后不再产生新的裂隙。可以发现, 试样表面共形成 56 条不同形态的裂隙, 其中主裂隙有 5 条, 分别为裂隙 1, 2, 3, 4 和 5。裂隙 2, 3 和 5 由于受到边界效应的影响, 在发育过程中, 均呈现出了平行于容器侧壁近似环形发育的趋势。此外, 主裂隙都形成于干燥初期, 待发育稳定后都呈现为长度较长、宽度较大的形态。主裂隙构成的主裂隙网络将试样分割成较大的块区, 本文将其称为主块区。随着干燥的持续进行, 主裂隙以外的次级裂隙通常从主裂隙的某一位置生成并近似朝垂直主裂隙方向发育, 次级裂隙的形成又将主块区细分为众多的次级块区。当干燥完全后, 主裂隙和次级裂隙共同构建了试验表面的最终龟裂网络 (图 2 (o))。

此外, 观察发现, 几乎所有新生裂隙的发育方向都倾向于与原有裂隙呈直角相交, 如裂隙 4, 6, 7 等, 这一现象可以用裂纹扩展准则来解释<sup>[27-28]</sup>。目前学界认为, 土体开裂是由于基质吸力所引起的张拉应力超过土体的抗剪强度所致, 因此吸力和抗拉强度是制约土体开裂的两个关键因素<sup>[29]</sup>。土体裂隙通常首先出现在表面张拉应力集中处, 当裂隙产生后, 周围的张拉应力便会释放, 此时最大张拉应力的方向平行于已有裂隙, 由于裂隙总是倾向于沿着垂直于最大主应力的方向发育, 因而新生裂隙就会正交于已有裂隙。但是, 若裂隙的附近存在剪切应力, 其发育方向就会发生改变。通常情况下, 裂隙的方向只受控于局部应力场状态。裂隙 6 在初期虽然是垂直于裂隙 1 开始发育的, 但是在接近裂隙 2 时, 其发育方向出现了明显的偏转, 最终呈直角与裂隙 2 相交, 裂隙 12 和 26 也反映出了类似的现象 (图 2 中的椭圆形标记处)。

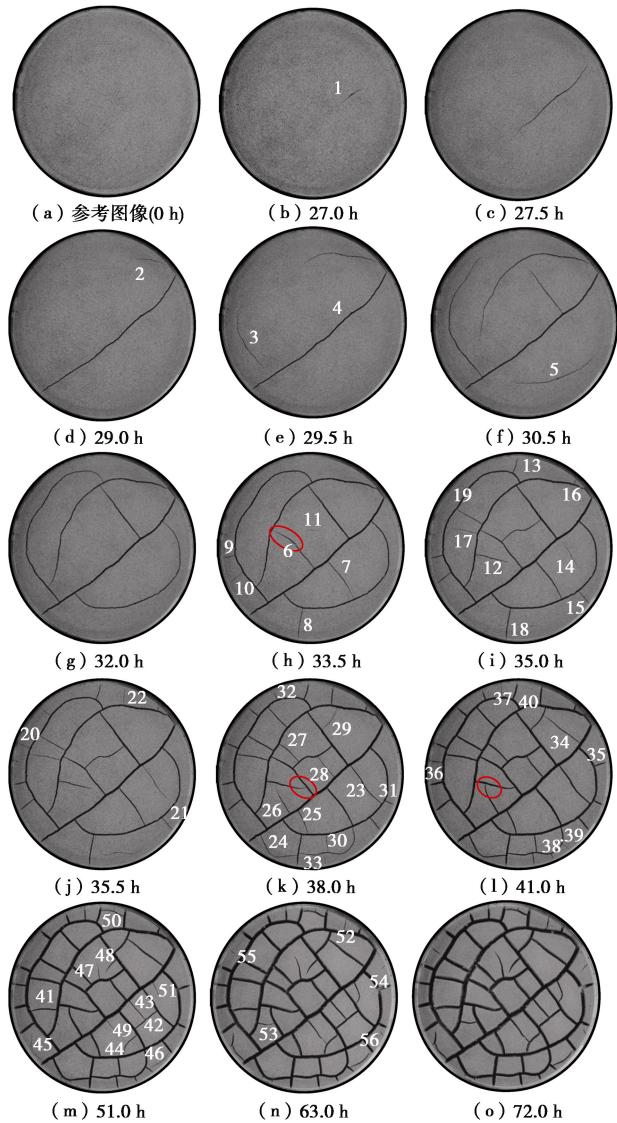


图 2 不同时刻土样表面的龟裂图像

Fig. 2 Cracking images of soils at different time

### 3.2 干缩开裂过程的变形场

受土体自身土性不均匀或外界条件如容器壁的影响，在蒸发过程中，无论裂隙产生与否，土样的收缩都是不均匀的，因而其表面的应变场分布也不均匀，图 3 给出的第一条裂隙出现前（26.5 h）以及第一条裂隙出现时对应两个时刻（27.0, 27.5 h）的土体表面应变场分布可以直观地体现出这一现象。以正负分别表示拉应变和压应变，1 和 2 分别表示对应方向的应变，即  $\varepsilon_{11}$  为沿 1 方向的应变（垂直方向）， $\varepsilon_{22}$  为沿 2 方向的应变（水平方向）， $\varepsilon_{12}$  则为 1 和 2 中间方向的应变（斜向）。可以发现，无论是哪个方向的应变，沿容器壁都出现了明显的环状压应变及拉应变集中区，且与后期平行于容器壁方向发育的 3 条主裂隙 2, 3, 5 呈现出很好的一致性（图 2）。说明根据应变集中区位置可对后续裂隙发育状态进行初步的预测和判断。此外，试样中心区域基本都是压应变集中区，这跟土样

整体向心收缩变形有关。

观察  $\varepsilon_{11}$  可以发现，在裂隙出现前，即干燥开始后的 26.5 h 时，土体表面有 3 个位置产生了明显的应变集中点，即 A, B, C。但第 1 条裂隙首先从上述应变集中点附近的 D 处产生，可能是因为 D 处表面存在瑕疵所致。当第 1 条裂隙产生后，其周围先前积聚的拉应变能得到释放，应变场重新调整，但其影响范围不大，基本未波及非裂隙周边区域的应变场。裂隙产生后由张拉应变区所包围，然而裂隙周边总伴随着高压应变区的存在，这是由于裂隙产生后宽度逐渐增加，导致其周边区域发生压缩所致。当第 1 条裂隙向两侧逐渐发展时，裂隙周边也释放了越来越多的应变，A, B, C 三处的拉应变集中区域呈缩小趋势，至 27.5 h 时，C 处的拉应变能基本已被释放完全，且影响范围也呈扩大趋势。 $\varepsilon_{22}$  和  $\varepsilon_{12}$  的分布也呈类似的结果，不同的是，沿方向 2 除容器壁附近拉应变比较大外，其他区域基本不产生拉应变集中。与  $\varepsilon_{11}$  和  $\varepsilon_{22}$  相比， $\varepsilon_{12}$  无论在哪个阶段，应变集中区域相对要小得多，除容器壁附近区域外，其他区域的应变值大多维持在零附近。根据裂隙发育位置和裂隙尖端的拉应变集中信息可知，土体干缩裂隙是典型的张拉裂隙，由拉应力诱发。

### 3.3 土体收缩开裂特性

为了探究土体表面的收缩变形特性，选择干燥到 33.5, 35.5, 38.0 h 的土样照片为代表，采用 DIC 技术获得它们相对于参考图像（图 2 (a)）的位移场分布矢量图（图 4）。以箭头长度的大小表示位移的大小，则从图 4 可以发现，在裂隙两侧也即土块边缘处的土体存在显著位移，箭头长度远大于其他区域，表现出密集程度远高于其他区域的现象，且其位移趋势都朝着块区的中部位置。而在远离裂隙边缘的其他区域，土体位移量很小甚至不发生位移。由于各块区独立发展，土体也大多以各自所属的块区为单位进行移动。伴随着干燥的持续，裂隙逐渐增多，从而土体形成的块区数逐渐减小，土颗粒的位移方向也随着原块区的切分而发生变化，但各块区的土颗粒位移矢量始终是朝向土块中心区域的。此外，受土体自身收缩特性的影响，若蒸发过程中块区不被裂隙所分割，仅存在已有裂隙的加宽现象，而裂隙宽度的增加会导致块区面积的缩小，表现出明显的收缩现象，如图 4 (a), (b) 所示。

此外，为了观测裂隙的扩展，图 5 给出了试验开始后的 36.0 h 相对于 0 h (图 5 (a)) 以及 36.0 h 相对于 35.5 h (图 5 (b)) 的土体表面位移矢量图。可以

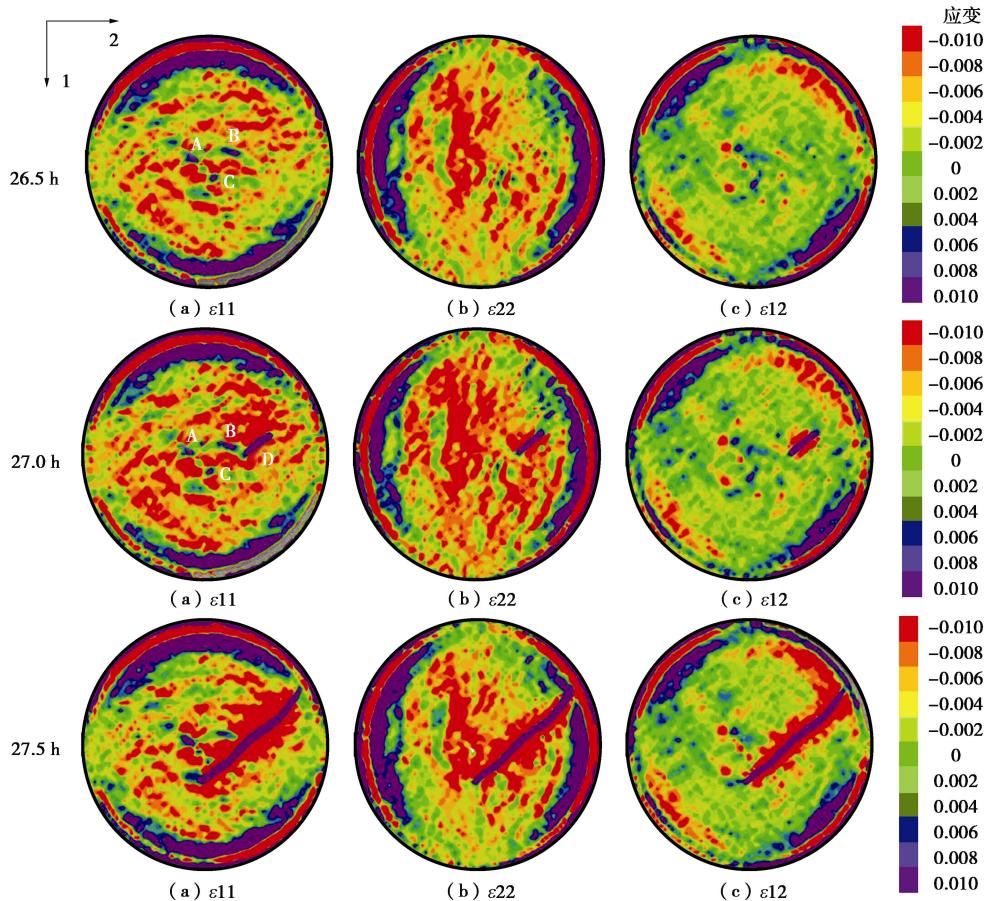


图3 不同时刻土体表面应变场分布

Fig. 3 Distribution of strain fields on soil surface at different time

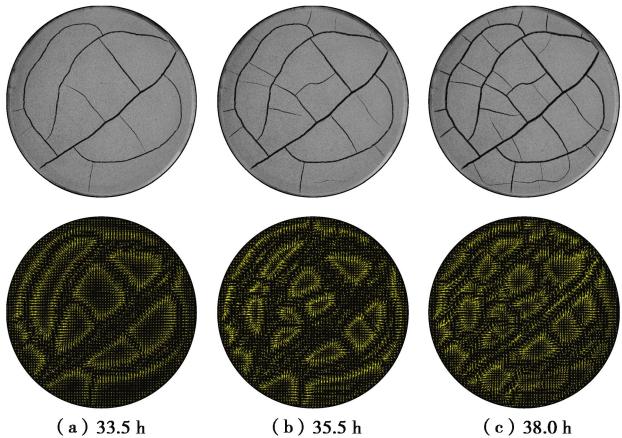


图4 不同时刻土体表面的位移矢量分布

Fig. 4 Distribution of displacement vectors of soils at different time

发现, 图5(a)的形态无异于其他任意时刻相对于起始时刻的位移矢量图, 呈现了该时刻土体表面的收缩运动特性。然而图5(b)却出现局部区域土体位移量较大的现象, 由36.0 h的裂隙图像可知, 这些区域均为新生裂隙发育的位置或已有裂隙的延长处。在对土体开裂全过程进行动态监测时, 若土体中的裂隙繁杂

交错, 一些新生微小裂隙的发育有时候极其难以被肉眼观测到, 借助数字图像相关技术这一工具可以很好解决这一问题。依据图5(b)中红色椭圆给出的位置, 沿裂隙两侧的箭头长度较之其他区域要大得多, 说明在该时间区间内(35.5~36.0 h), 这一区域的土颗粒位移量相比较图中其他区域而言要大的多。换言之, 该时间区间内的裂隙发育活动主要集中在图5(b)中的红色椭圆区域。

为了验证位移量的变化情况, 图6给出了38.5 h相对于38.0 h的土体表面位移变化量。其中方向1以垂直向下为正, 方向2以水平向右为正, 即S11和S22分别表示沿1和2方向的位移量大小。可以发现, 无论是垂直方向还是水平方向, 土块的位移量都向中心点递减。

### 3.4 土块的收缩中心

土体在失水干燥过程中存在收缩现象, 而收缩变形是土体发生开裂的重要前提。在干燥过程中, 若吸力均一发展, 土体将完全发挥收缩潜能, 即“自由收缩”。但在实际过程中, 由于受到土体本身和外界因素的影响, 包括土体均匀程度以及其容器约束条件等,

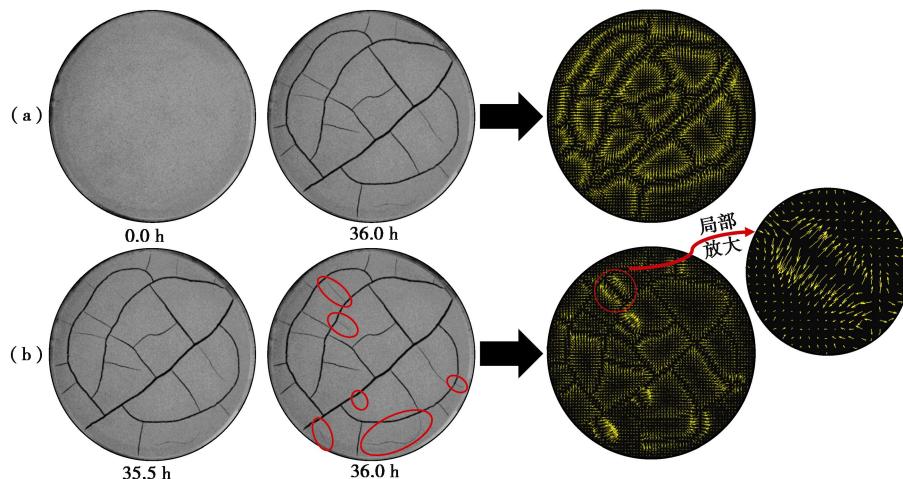


图 5 相邻时刻土体表面的位移矢量分布

Fig. 5 Distribution of displacement vectors of soils at adjacent time

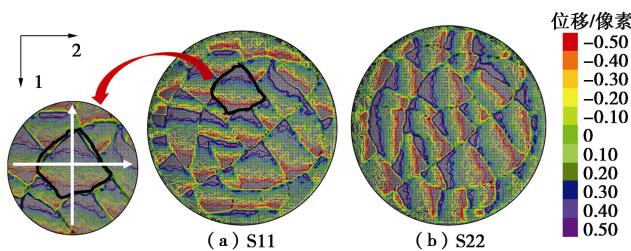


图 6 38.5 h 相对于 38.0 h 的土体表面的位移变化值

Fig. 6 Variation of displacement of soil surface at adjacent time  
(38.5 h rel. 38.0 h)

难以实现均匀收缩，当土体由于材料的各向异性或由于底部粘聚力/摩擦力作用而导致变形受限时，土体中就会形成张拉应力集中并最终导致裂隙的产生。根据土体在干燥过程中的位移场变化可发现，土体在收缩过程中存在明显的向心收缩现象，即周边土颗粒向中间某一点靠拢，本文将该点定义为收缩中心，如图 7 中的 A 点和 B 点，它们通常位于土块的中心区域，沿该点向外，土体的位移明显增大，箭头的长度和密度也明显增大。

为了解释收缩中心的形成原因，图 8 给出了收缩模型示意图。假设土体均质，内部应力场分布均匀，取土体正中心的某一土颗粒为研究对象可知，该土颗粒受到周边其他土颗粒的张拉应力作用在各个方向也是均匀的，其对中心土颗粒的作用力会相互抵消，不会导致位移。但裂隙边缘附近的土颗粒由于存在临空面，其受到的周边土颗粒的合力作用指向土块内部，导致土块周边的土颗粒整体都有向心收缩的趋势。因此，收缩过程中，土块中心位置的土颗粒位移量相对较少，这在宏观上即表现为土体向心收缩现象，即存在收缩中心。

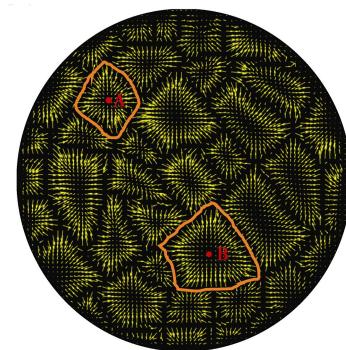


图 7 土体干燥过程中的收缩中心

Fig. 7 Shrinkage center of soils during drying

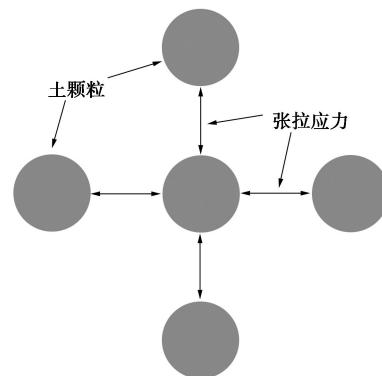


图 8 土颗粒间的张拉应力作用示意图

Fig. 8 Schematic of tensile stress between soil particles

在试验完全干燥结束之前，伴随着干燥的持续，土块的收缩中心通常并不会一直维持在恒定的位置，而是随着时间的推移发生变化。通过数字图像相关技术对图 7 中标记的两个土块的收缩变形进行连续追踪，本文得到了对应土块收缩中心的一系列位置。图 9 给出了 A 点和 B 点在 41.0~51.5 h 时间段内的位置变化。图 9 (a) 示意了计算收缩中心的方法，以土体

的圆心为坐标原点, 分别作出  $x$  轴和  $y$  轴, 依据不同收缩中心到原点的距离, 以原点为矢量原点, 收缩中心为矢量终点, 画出收缩中心到原点的位移矢量, 通过在矢量终点处标记一系列的红点, 也即各个时刻的收缩中心的位置。由于收缩中心的位移变化量通常很小, 图 9 (b) 通过对收缩中心邻近区域进行放大, 直观展现了收缩中心随时间变化的不规律性。此外, 当干燥结束后, 土颗粒的变形已达到稳定状态, 收缩中心也将最终维持在某一固定的位置。当前, 国内外对于土体收缩中心的报道基本还处于空白状态, 关于收缩中心是否最终成核于土块的几何中心及其动态演化过程和关键控制因素等, 目前课题组正在积极开展一系列相关试验, 其成果也将在后续另文发表。

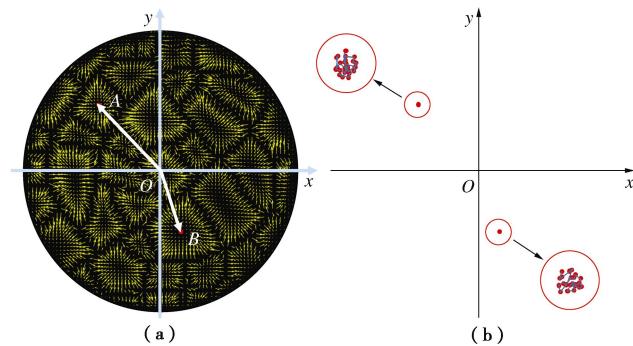


图 9 收缩中心运动的观测

Fig. 9 Observation of movement of shrinkage center

## 4 结 论

本文对黏性土开展了干燥试验, 采用数码相机对土体收缩开裂的全过程进行了动态观测, 借助数字图像相关技术, 获取了土体表面的位移场以及应变场, 进而分析了土体的收缩及开裂特性, 得出以下 5 点结论。

(1) 数字图像相关技术能对干燥过程中土体表面的收缩变形及裂隙发育状态进行实时追踪, 能有效和快速获取土体表面的位移场以及应变场, 直观展示龟裂发育动态过程。

(2) 土体干缩裂隙多是由于张拉破坏所致, 不同裂隙之间总是倾向于呈直角相交, 裂隙的产生会导致其周边的应变能释放和重分布。

(3) 基于土体表面的位移场和应变场, 可提前预知土体局部区域的干缩开裂特性, 并且可以直观地展现土体表面裂隙的动态演化过程。

(4) 基于本文的试验条件, 发现土体在收缩变形过程中存在收缩中心现象。被裂隙切割出的土块收缩变形量从周边向中心逐渐递减, 且收缩中心的位置在干燥过程中并非保持恒定, 而是会随着时间的推移而

变化, 直到收缩完成。

(5) 数字图像相关技术作为一种高精度的动态和非接触式监测手段, 对土体干缩开裂特性研究而言, 有着区别于传统土体变形测量方法的独特优势, 极具推广价值。

## 参 考 文 献:

- [1] TOWNER G D. The influence of sand - and silt - size particles on the cracking during drying of small clay - dominated aggregates[J]. European Journal of Soil Science, 1988, **39**(3): 347 - 356.
- [2] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**(2): 263 - 277.
- [3] WEINBERGER R. Initiation and growth of cracks during desiccation of stratified muddy sediments[J]. Journal of Structural Geology, 1999, **21**(4): 379 - 386.
- [4] KODIKARA J, COSTA S. Desiccation cracking in clayey soils: mechanisms and modelling[M]. Heidelberg: Springer, 2013: 21 - 32.
- [5] TANG C, SHI B, LIU C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. Engineering Geology, 2008, **101**(3): 204 - 217.
- [6] TANG C S, CUI Y J, TANG A M, et al. Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils. Eng. Geol, 2010, **114**(3/4): 261 - 266.
- [7] BAKER R. Tensile strength, tension cracks, and stability of slopes[J]. Soils & Foundations, 1981, **21**(2): 1 - 19.
- [8] 袁俊平. 非饱和膨胀土裂隙的量化模型与边坡稳定性研究[J]. 南京: 河海大学, 2003. (YUAN Jun-ping. Quantification model and slope stability of unsaturated expansive soil crack[J]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [9] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2155 - 2161. (YIN Zong-ze, YUAN Jun-ping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2155 - 2161. (in Chinese))
- [10] KRISNANTO S, RAHARDJO H, FREDLUND D G, et al. Mapping of cracked soils and lateral water flow characteristics through a network of cracks[J]. Engineering Geology, 2014, **172**(5): 12 - 25.

- [11] KLEPPE J H, OLSON R E. Desiccation cracking of soil barriers[M]. JOHNSON A J, FROBEL R K, CAVALLIS N J, et al, eds. Hydraulic Barriers in Soil & Rock. Philadelphia: ASTM, 1985, 874:13.
- [12] MILLER C J, MI H, YESILLER N. Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(3): 677 - 686.
- [13] ALBRECHT B A, BENSON C H. Effect of desiccation on compacted natural clays[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(1): 67 - 75.
- [14] FOSTER M, FELL R, SPANNAGLE M. The statistics of embankment dam failures and accidents[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 37(5): 1000 - 1024.
- [15] YESILLER N, MILLER C J, INCI G, et al. Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils[J]. Engineering Geology, 2000, 57(1): 105 - 121.
- [16] GUIDI G, PAGLIAI M, PETRUZZELLI G. Quantitative size evaluation of cracks and clods in artificially dried soil samples[J]. Geoderma, 1978, 20(2): 105 - 113.
- [17] DE-LIMA O A L, SHARMA M M. A generalized Maxwell-Wagner theory for membrane polarization in shaly sands[J]. Geophysics, 1992, 57(3): 431 - 440.
- [18] GILL D R, LEHANE B M. An optical technique for investigating soil displacement patterns[J]. Geotechnical Testing Journal, 2001, 24(3): 324 - 329.
- [19] KAHN-JETTER Z L, CHU T C. Three-dimensional displacement measurement using digital image correlation and photogrammetric analysis[J]. Experimental Mechanics, 1990, 30: 10 - 16.
- [20] 李元海, 靖洪文, 朱合华, 等. 数字照相量测在砂土地基离心试验中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 306 - 311. (LI Yuan-hai, JING Hong-wen, ZHU He-hua, et al. Experimental investigation on progressive deformation patterns of sand foundation in centrifuge test using digital photogrammetry[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 306 - 311. (in Chinese))
- [21] LEE D, TIPPUR H, KIRUGULIGE M. Experimental study of dynamic crack growth in unidirectional graphite/epoxy using digital image correlation method and high-speed photography[J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43(19): 2081 - 2108.
- [22] 赵 程, 鲍 冲, 松田浩, 等. 数字图像技术在节理岩体裂纹扩展试验中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 944 - 951. (ZHAO Cheng, BAO Chong, SONG Tian-hao, et al. Application of digital image correlation method in experimental research on crack propagation of brittle rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 944 - 951. (in Chinese))
- [23] 张 听, 乐金朝, 刘汉东. 砂土中群锚锚周土体变形特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 240 - 248. (ZHANG Xin, YUE Jin-chao, LIU Han-dong. Experimental study of soil deformation around group anchors in sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 240 - 248. (in Chinese))
- [24] TENG Y, STANIER S, GOURVENEC S M. Synchronised multi-scale image analysis of soil deformations[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2017, 17(1).
- [25] YAMAGUCHI I. A laser-speckle strain gauge[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, 14(14): 1270 - 1273.
- [26] RANSON W F, PETERS W H. Digital image techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 427 - 431.
- [27] NAHLAWI H, KODIKARA J K. Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layers[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24: 1641 - 1664.
- [28] CORTE A, HIGASHI A. Experimental research on desiccation cracks in soil[R]. Illinois: Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment, 1960.
- [29] TANG C S, SHI B, LIU C, et al. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer[J]. Applied Clay Science, 2011, 52(1): 69 - 77.