

DOI: 10.11779/CJGE202002019

土体干缩开裂过程的边界效应试验与离散元模拟

林朱元¹, 唐朝生^{*1}, 曾 浩¹, 王怡舒², 程 青¹, 施 磐¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 为了探究土体干缩开裂过程的边界效应问题, 采用不同底面粗糙度的容器开展了多组干燥试验, 发现干缩裂隙存在从顶面向下和从底面向上两种典型的发育形式。并且, 裂隙发育程度与土样/容器界面接触条件密切相关, 从而验证了裂隙发育过程的边界效应。通过理论分析, 阐明了上边界的蒸发条件及下边界的接触条件对裂隙发育形式的控制作用。为了能更深入地理解土体干缩开裂边界效应的内在机制, 在试验的基础上建立离散元模型, 创新性地引入了沿深度的失水速率梯度参数, 模拟土样上边界的蒸发条件变化。通过设置底面摩擦系数, 模拟土样下边界的接触条件变化。将模拟结果与试验结果进行了对比分析, 发现二者具有较好的吻合度。总体上, 土体干缩裂隙的发育过程是顶面蒸发失水与底面摩擦两种边界条件共同作用的结果。当底面摩擦系数相对较小时, 裂隙发育由蒸发失水主导, 大部分裂隙由顶面向下发育。随着底面摩擦系数的增加, 底面接触条件对裂隙发育过程的主导作用逐渐增强, 由底面向上发育的裂隙数量所占比重也相应增加。

关键词: 干缩开裂; 边界条件; 离散元模拟; 底面摩擦; 蒸发失水

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)02-0372-09

作者简介: 林朱元(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质工程及环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: crecyslin@mail.nju.edu.cn。

Laboratory characterization and discrete element modeling of desiccation cracking behavior of soils under different boundary conditions

LIN Zhu-yuan¹, TANG Chao-sheng¹, ZENG Hao¹, WANG Yi-shu², CHENG Qing¹, SHI Bin¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to explore the boundary effect of the desiccation cracking process, multiple sets of drying tests are carried out using the containers with different bottom roughnesses. Two different forming patterns can be observed in the laboratory tests, initiating from the top/bottom, and there is propagation closely related to the sample/container interface contact conditions. This verifies the boundary effect of the crack propagation. In order to understand the internal mechanism of the desiccation boundary effect of the soils more deeply, a discrete element model is established based on the drying tests. A water loss rate gradient parameter along the depth is introduced innovatively to simulate the change of the evaporation condition of the upper boundary of the soil samples. By setting the friction coefficient of the bottom surface, the contact condition of the lower boundary of the sample is simulated. The simulated results are compared with the experimental ones and found to have good agreement. In general, the initiation and propagation of desiccation cracks are the result of the combination of water loss due to surface evaporation and bottom friction. When the coefficient of friction of the bottom surface is relatively small, the development of the fracture is dominated by water loss, and most of the fractures develop from the top surface. With the increase of the friction coefficient of the bottom surface, the effect of the contact condition of the bottom surface on the development of the crack gradually increase, and the proportion of the number of cracks developed from the bottom surface increases accordingly.

Key words: desiccation cracking; boundary conditions; DEM;
bottom friction; evaporation

0 引言

在干旱气候作用下, 土体会因蒸发失水而发生干

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(41925012); 国家自然科学基金项目(41572246, 41772280, 41902271); 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资金项目

收稿日期: 2019-03-28

*通信作者 (E-mail: tangchaosheng@mail.nju.edu.cn)

缩开裂, 这是一种常见的自然现象。裂隙的产生, 会导致土体的力学性能显著降低^[1]。此外, 裂隙会成为水分迁移的优先路径, 成倍地增加土体的渗透性^[2]。正因为如此, 土体中发育的干缩裂隙是许多岩土和地质工程问题的直接或间接诱因。例如在基础工程中, 裂隙引发的地基土承载力下降或者压缩性增加, 可能会导致上部建筑结构的倾斜破坏, 造成安全隐患。在水利工程中, 堤坝中的裂隙会导致渗漏甚至坝体溃决。在废弃物处置库中, 隔离带土层中的裂隙会导致污染物泄漏, 对环境造成负面影响。在边坡工程中, 裂隙会降低土坡的稳定性, 并加速雨水入渗坡体内部, 增加滑坡灾害风险^[3]。受全球气候变化影响, 极端干旱气候频发, 工程中的土体干缩开裂问题越来越显著, 也引起了人们越来越多的关注和重视。

过去对干缩开裂的研究主要集中在裂隙发育的影响因素方面。例如, Mitchell 等^[4]探究了不同黏土矿物含量对土体干缩开裂的影响, 发现蒙脱石含量越高, 裂隙发育程度越高。Lakshminantham 等^[5]研究了土体尺寸效应对裂隙形态的影响, 结果表明土体的尺寸越大, 产生裂隙时所需应力越大。唐朝生等^[6-9]对不同温度、土体厚度、干湿循环次数下的裂隙演化规律进行了系统性研究, 并提出了一系列针对土体表面裂隙网络的量化指标。

关于干缩裂隙发育的机理, 目前学界主流观点认为, 裂隙的产生是由于土体在干燥过程中产生的张拉应力超过了对应的抗拉强度^[7, 9-10]。导致张拉应力的产生主要有两个方面的原因: ①干燥过程的吸力作用; ②土体收缩变形受到限制。目前学界对前者研究较多^[7-10], 而对后者的研究相对欠缺。

总体上, 有两类因素会对土体的收缩变形产生限制作用: 土体的非均质因素和土体的边界条件。土体是一种多相多孔介质材料, 物质成分和结构存在显著的非均质性, 蒸发过程中局部的失水速率和吸力发展速率会因此存在明显的空间差异性, 导致收缩变形在某些“杂点”位置受限, 从而发生应力集中, 诱发裂隙。

对于边界条件, 无论是在自然环境还是在室内试验环境中, 都不可避免。对于上边界而言, 环境温度、湿度和风速等外部因素会改变土体的蒸发速率, 导致剖面上水分场的变化速率差异。对于下边界而言, 不同土层或土层与其它介质之间会因为干缩变形响应的差异而在界面上产生摩擦作用。这些因素都会导致土体收缩变形不均或受限而在土体顶面或底面形成张拉应力场, 为裂隙发育创造必要条件。如 Weinberger^[11]在野外发现了土层界面作用改变干缩裂隙发育方向的证据。曾浩等^[12]在控制厚度条件下对不同界面摩擦条

件下的土体开展了系列室内试验, 发现界面摩擦条件对裂隙形成和发育过程有着重要影响。

近年来, 数值模拟逐渐在土体干缩开裂研究中得到应用。其中离散元法对散体材料以及破坏过程的模拟适应性较好^[13], 在模拟黄土以及砂土方面已取得显著成果^[14-15]。与此同时, 在黏性土干缩开裂方面也展现了较好的优势。例如, Peron 等^[16]基于室内试验, 建立了长条形土样的二维均匀收缩模型, 侧重于裂隙数量及间距的分析。司马军等^[17]模拟了圆形薄层黏性土干缩裂隙的产生以及扩展过程, 定量分析了表面裂隙的几何参数。张晓宇等^[18]引入有限差分算法, 建立了紧密堆积土体失水开裂离散元模型。但上述研究局限于模拟结果中的表面裂隙与室内试验结果在表观上的对比, 对裂隙沿深度方向的发育过程缺乏深入探讨, 尤其对单一裂隙发育机理解释较少, 关于裂隙发育边界效应的数值模拟研究更是鲜有报道。

本文首先开展室内试验, 对裂隙的发育过程进行观察, 侧重分析边界条件对裂隙起始位置的影响, 并探讨不同裂隙发育形式的内在机制。在试验的基础上, 进一步建立了土体干缩开裂离散元模型, 引入沿深度的失水速率梯度参数, 模拟上边界的蒸发条件变化。通过设计底面摩擦系数, 模拟下边界的接触条件变化。将模拟结果与试验结果进行对比分析, 探讨了两种边界条件对裂隙发育过程的影响。研究成果对进一步认识土体干缩裂隙的发育机理及其边界效应具有一定参考意义。

1 室内试验

1.1 试验材料与方法

本文选用南京地区的下蜀土为研究对象, 其基本物理性质为: 相对密度为 2.73, 液限为 34.5%, 塑限为 19.5%, 塑性指数为 15。

为获得较为均匀的试样, 在土体取回后, 进行风干粉碎, 并过 2 mm 筛, 然后加水进行充分搅拌, 配置成含水率为 170% 的饱和泥浆样。将饱和泥浆样在振动台上振动 5 min, 排除泥浆内的气泡, 随后密封并静置 72 h。在泥浆沉积稳定后, 抽去表面清液, 此时测得试样含水率为 70%。

试验使用统一规格的长条形有机玻璃容器(20 cm × 1 cm × 2 cm)。为了探究底面边界条件对土样干缩裂隙发育过程的影响, 本文共开展了 3 组试验: E1、E2 和 E3, 分别选取 3 种不同规格的砂纸铺设在容器底面。砂纸的具体规格及对应的砂粒径见表 1。砂的粒径越大, 代表界面越粗糙, 则摩擦系数也越大。为了便于分析, 本文将 3 种砂纸对应的摩擦系数简单划分为大、

中和小 3 种条件。

需要注明的是, 试验开始前, 在容器侧壁涂抹凡士林, 以减小土样与壁面之间作用力对干缩开裂的影响。然后将配置好的泥浆样倒入容器中, 控制每组土体的初始厚度为 1 cm, 在 (30°C ± 1°C) 的室温条件下进行干燥。同时对土样的侧面进行定时拍照, 记录裂隙的发育过程。

表 1 室内试验参数

Table 1 Parameters of laboratory tests

试样 编号	砂纸规格 /目	砂颗粒粒 径/mm	摩擦 系数	初始厚度 /cm
E1	80	0.180	大	1
E2	120	0.120	中	1
E3	240	0.063	小	1

1.2 试验结果

在本次试验中, 可以观察到各条裂隙相互平行且沿试样截面发育, 且未发生裂隙交错及分级现象, 是典型的一维开裂问题^[12,19]。此时模型尺寸对裂隙在竖直方向上的发育影响较小。

在各组试样的裂隙发育过程中, 可明显看出裂隙的发育形态分为两类, 即裂隙首先从试样顶面产生并逐渐向下发育 (图 1) 以及裂隙首先从试样底面产生并逐渐向上发育 (图 2)。

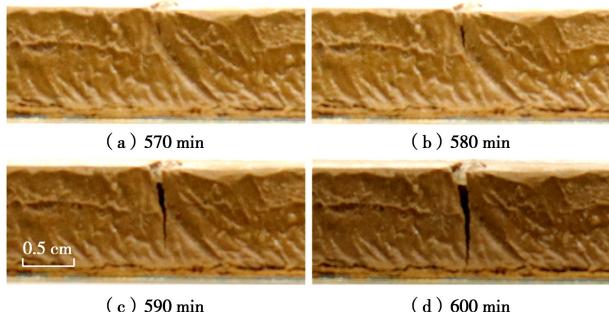


图 1 裂隙从顶面向下发育过程 (E1 组侧面局部放大)

Fig. 1 Downward propagation of crack from top (side view of E1, enlarged)

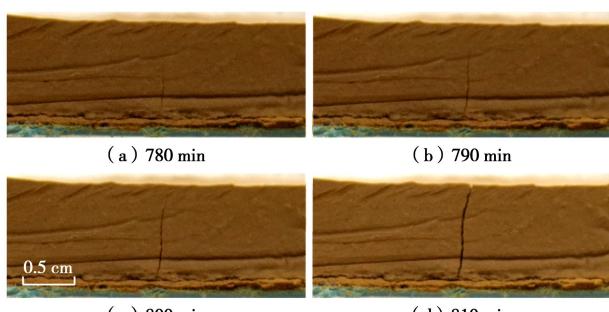


图 2 裂隙从底面向上发育过程 (E1 组侧面局部放大)

Fig. 2 Upward propagation of crack from bottom (side view of E1, enlarged)

以试验组 E1 为例, 土样的第一条裂隙在顶面产

生 (图 1)。随着土样进一步干燥收缩, 裂隙在尖端引导下逐渐向下延伸, 直到贯穿整个土样厚度。这是因为在干燥过程中, 表面蒸发导致其含水率下降, 从而在土样上部率先产生吸力及张拉应力, 当张拉应力的大小达到局部土体的抗拉强度时, 裂隙便会在相应位置产生^[20]。

随着干燥的持续, E1 组的第三条裂隙 (图 2) 从底面产生, 并逐渐向上发育。这是因为蒸发锋面从顶面逐渐向深部发展, 土样的收缩变形也从表层逐渐向整体过渡。对与下层土体而言, 其相对运动趋势会受到底面摩擦力的限制, 从而在底面产生水平方向的拉应力集中, 最终使得裂隙在试样底面产生。



图 3 室内试验最终裂隙图像 (侧面)

Fig. 3 Final crack patterns in laboratory tests (side view)

在干燥结束后, 3 组试样最终裂隙形态如图 3 所示。从图中可以看出裂隙的发育程度受底面边界条件的影响很大, 界面边界越粗糙, 裂隙发育程度越大, 裂隙间距越小。为了进一步分析边界条件对土体干缩开裂的影响, 表 2 统计了各组试样的总裂隙条数、从顶面发育的裂隙条数及从底面发育的裂隙条数。可以发现, 容器底面的粗糙度越大, 土样发育的总裂隙条数越多, 大部分裂隙均从顶面开始发育。说明在本次试验中, 蒸发作用对裂隙发育过程起主导作用。但随着容器底面粗糙度的增大, 从底面发育的裂隙条数占总裂隙条数的比重逐渐增加。由此可见, 土体干缩裂隙的发育过程存在明显的边界效应。

表 2 室内试验裂隙条数统计

Table 2 Number of cracks in laboratory tests

试样 编号	摩擦 系数	总裂隙 条数	顶面发育 裂隙条数	底面发育 裂隙条数
E1	大	9	5	4
E2	中	5	3	2
E3	小	3	2	1

2 离散元模拟

2.1 土体干缩开裂模型

研究发现^[8], 在室内试验的起始阶段, 土样处于泥浆状态, 此时土样完全饱和, 孔隙完全被水相充满。同时黏土矿物得到充分水化, 颗粒表面形成较厚的水

化膜, 增大了颗粒之间的间距, 从而为黏性土的收缩变形提供了空间。在干燥失水过程中, 土样中的基质吸力会不断增大, 而黏土颗粒表面的水化膜厚度会逐渐减小。

基于以上思路, 本文将土样一维干缩开裂过程分为力学性质变化和单元体积收缩两个方面。在建立的离散元模型中, 将土样简化为由若干圆形可收缩的单元黏结而成 (contactbond) 的集合体, 颗粒间的力学性质变化如图 4 所示。当法向力 F_n 超过其抗拉强度 T_n 或当切向力 F_s 超过其抗剪强度 T_s 时, 颗粒连接发生破坏。连接破坏后, 颗粒之间的抗拉强度及抗剪强度为 0, 在法向上只承受压力, 不承受拉力; 在切向上, 颗粒在接触位置仍受到摩擦作用。

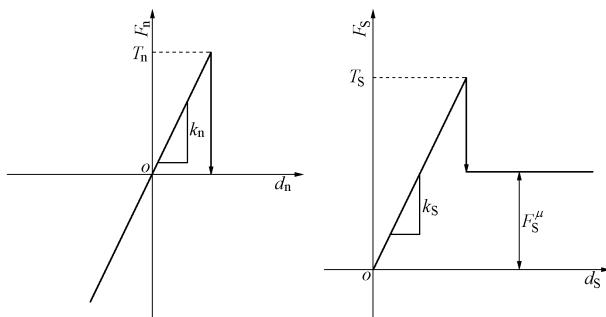


图 4 contact bond 模型的力学性质

Fig. 4 Mechanical performance of contact bond model

在实际情况中, 黏土颗粒之间的接触条件较为复杂。简单弹塑性模型无法考虑含水率随时间的变化, 不能直接用于土体干缩开裂的模拟。contactbond 模型作为一种刚性接触模型, 虽然无法表现土样在高含水率条件下的塑性变形以及破坏过程的软化现象。但考虑到土样干缩开裂是一种自发的内部破坏问题, 无需考虑在外力作用下的变形, 只要在土样干缩开裂过程中设置明确的破坏准则, 使用 contactbond 模型来研究土体的干缩开裂问题具有一定的可取之处。

从宏观尺度分析, 可以通过反演力学参数与含水率之间的关系^[21-22], 进行参数均一化, 将基质吸力以及抗拉强度引入模型, 将宏观与微观力学性质结合起来。为了简化计算, 在接触模型中设置抗拉强度与抗剪强度一致, 法向接触刚度与切向接触刚度一致。

冉龙洲等通过测试了土样在干燥过程中的抗拉强度变化^[25], 基于他们的试验数据进行反演, 可建立颗粒间连接强度 T_n (N) 与含水率 w 之间的负指数关系:

$$T_n = 14.916 \exp(-w/12) - 0.101 \quad (1)$$

根据参考文献[16], 可建立颗粒间接触刚度 k_n (N/m) 与 w 的关系式为

$$k_n = 1.25 \times 10^7 \exp(-0.2w) \quad (2)$$

在单元体积变化方面, 为了更好地表现黏性土的

体变特征, 在模拟中使用由 Youssoufi 等^[24]提出的理想化模型。将离散元模型中的单元定义为由土骨架以及周围水相两部分组成的可收缩团粒, 在土样蒸发失水过程中单元半径逐渐较小。

单元半径相对于蒸发时间的变化量通过试验得出经验公式:

$$R = R_0 \exp\left(-\beta \frac{N}{N_f}\right) \quad (3)$$

式中, R 为颗粒的单元半径, R_0 为时间 $N=0$ 时的半径, β 为反映单元收缩的材料参数, N_f 为试验的总时长 ($0 \leq N \leq N_f$)。

由于式 (3) 假定所有的单元收缩速度相同, 所有的单元半径在循环迭代过程中都乘以相同的参数。如果研究非均匀收缩, 可以对不同类型的单元设置不同的半径变化规律^[16]。将模型中单元的收缩规律与其空间位置联系起来则可以使用下式来匹配试验数据:

$$R = R_0 \exp\left[\beta(x, y) \frac{N}{N_f}\right] \quad (4)$$

式中, x 和 y 为单元的整体坐标。

为了能模拟土样在蒸发过程中内部含水率变化的空间差异性, 本文在上述模型的基础上进一步修改了离散元算法, 即赋予每个颗粒用于标识含水率的独立参数, 从而使模型中各处的抗拉强度能随含水率独立变化。基于该思路, 本文建立的颗粒之间的胶结强度与接触两端颗粒含水率之间的关系式为

$$T_{a-b} = \frac{T_n(w_a) + T_n(w_b)}{2} \quad (5)$$

式中, T_{a-b} 为单元 a 和 b 之间连接的抗拉强度, w_a , w_b 为单元 a 和 b 当前时刻对应的含水率值。

因此, 基于式 (4), (5), 在模型中实现了失水速率沿垂直高度动态变化的功能, 从而体现土样蒸发过程中内部水分场和应力场的不均匀分布, 突破了以往模型只能应用于均匀收缩、均匀力学性质的限制。

为了简化计算, 进一步建立单元失水速率与土样高度之间的线性关系为

$$\beta(y) = \beta_0 \left(1 + \frac{(2y - H)}{H} \lambda\right) \quad (0 \leq y \leq H) \quad (6)$$

式中, β 为单元实际收缩参数, β_0 为假设整体均匀收缩时对应的收缩参数, y 为单元在模型中的纵坐标, H 为颗粒堆积模型的总高度, λ 为本文引入的失水速率梯度, 即为失水速率随高度线性变化的斜率。 λ 越大, 说明试样表面的蒸发速率越大, 反之亦然。通过调整 λ 的大小, 便可模拟不同的蒸发边界条件对土样干缩开裂过程的影响。

2.2 模拟过程

由前人的室内试验结果可知^[9, 25-26], 初始为饱和

状态的土体蒸发失水过程可分为 3 个典型阶段, 分别是常速率阶段、减速率阶段和残余阶段。其中大多数裂隙均出现在常速率阶段, 而在减速率阶段和残余阶段中, 虽然土体进一步收缩, 但新生裂隙较少。由于本文的研究对象为一维条件下裂隙发育的起始位置及发育过程, 不涉及整体裂隙率以及表面裂隙形态, 因此在离散元模拟中只考虑常速率蒸发阶段, 对应土体处于饱和状态, 符合 Youssoufi 等^[24]提出的颗粒收缩模式的基本应用条件。在模拟中设置的起始与终止含水率分别为 70% 和 30%。

模拟过程中, 首先在模拟区域内生成由粒径为 0.1 mm 的颗粒组成且长度为 20 cm 的刚性簇 (clump), 作为底部摩擦界面, 锁定其移动和旋转。然后在刚性簇上方用粒径为 2 mm 的颗粒生成四边形堆积 (cubic) 试样, 对应室内试验中消除原生结构的均匀土样, 厚度为 1 cm。土样经过重力沉降达到平衡状态之后进行胶结, 初始建立的模型如图 5 所示。颗粒单元与刚性簇之间采用 smoothjoint 连接^[27], 其胶结强度为土颗粒间胶结强度的 50%。

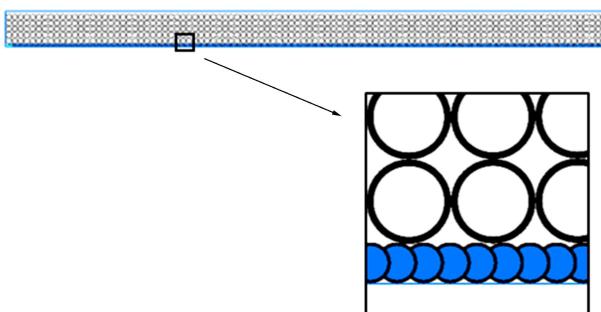


图 5 离散元模型初始状态

Fig. 5 Original state of DEM model

在模拟边界效应时, 考虑到边界颗粒与土样颗粒之间的比例关系, 依据实际大小改变砂颗粒尺寸较难体现摩擦对裂隙发育的影响。本文在保持边界颗粒尺寸不变的情况下, 通过改变边界颗粒与土样颗粒之间的摩擦系数实现界面摩擦条件的变化。需要注意的是, 在室内试验中采用不同粗细的砂纸, 界面粗糙程度有待进一步量化。为简化分析, 在模拟中设定界面摩擦

系数 分别为 0.3, 0.2, 0.1, 对应室内试验中随砂纸砂粒径减小, 界面摩擦逐步减小的变化趋势。

2.3 模拟结果

在前文的试验中, 土样初始高度一致, 且干燥过程中外界环境条件相同, 可认为 3 组试样在不同高度上的含水率变化差异即失水速率梯度相同。模型中选取失水速率梯度 λ 为 0.05, 关于 λ 与土样高度之间的关联性讨论见后文。详细模拟参数: 土颗粒密度为 2.73 kg/m³, 初始土样粒径为 2 mm, 底面颗粒粒径为 0.1 mm, 初始含水率为 70%, 终止含水率为 30%, 失水速率梯度 λ 取 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 底面摩擦系数 μ 为 0.1, 0.2, 0.3。模拟结束时 3 组土样的开裂情况如图 6 所示。随着摩擦系数的增大, 模型所产生的总裂隙条数增多。

表 3 统计了模拟结束后 3 组试样中的裂隙信息。从中可以看出, 当摩擦系数为 0.1 时, 模拟结果未能体现从底面发育的裂隙, 所有裂隙均从顶面起始发育。因此可认为在该条件下, 失水速率梯度的影响大于摩擦系数的影响。但随着摩擦系数的增大, 开始出现从底面向上发育的裂隙。并且, 摩擦系数越大, 从底面发育的裂隙条数占总裂隙条数的比例越高。总体上, 模拟结果 (表 3) 与试验结果 (表 2) 较为一致, 很好地反映了边界条件对裂隙发育过程的影响, 说明该模型可用于土体干缩开裂模拟分析, 但模型参数尚有优化空间。

表 3 数值模拟裂隙条数统计 ($\lambda=0.05$)

Table 3 Number of cracks in numerical tests ($\lambda=0.05$)

编号	摩擦系数	总裂隙条数	顶面发育裂隙条数	底面发育裂隙条数
①	0.3	8	5	3
②	0.2	5	4	1
③	0.1	3	3	0

为了进一步探究土样上表面蒸发边界条件对干缩裂隙发育过程的影响, 本文对上述 3 组不同底面摩擦系数的试样在 6 种失水速率梯度情况下的干缩开裂进行了模拟, λ 从 0 逐渐增加到 0.05 (当 $\lambda=0$ 时, 土样均匀失水)。图 7 给出了 3 组试样模拟结束后裂隙发育情况与失水速率梯度的关系。从中可以发现, 在相同底

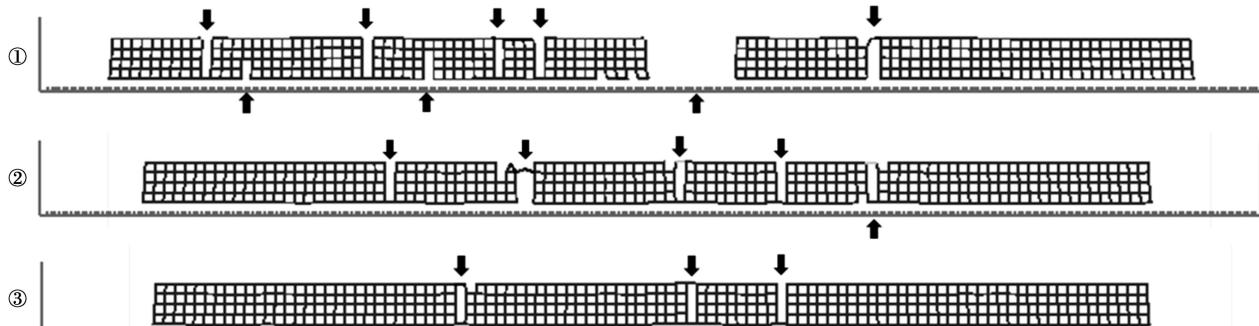


图 6 模拟结束时模型中的土样开裂情况

Fig. 6 Final crack patterns of DEM samples

面摩擦条件下, 当模型中设置的失水速率梯度较小时 ($\lambda \leq 0.01$), 所有裂隙均由底面向上发育, 结果与均匀失水的情况相一致 ($\lambda=0$)。说明在较小的失水梯度下, 土样上表面不容易发生应力集中, 但试样底部的颗粒在水平方向上的收缩位移会受到界面摩擦的限制而发生应力集中, 并最终导致底面裂隙的发育, 此时可以认为土样的裂隙发育过程由底面摩擦主导。随着 λ 的增加, 从顶面向下发育的裂隙条数逐渐增多, 主要是因为土样上部颗粒收缩速率加快, 顶面更容易出现拉应力集中。而从底面向上发育的裂隙条数则随 λ 呈现减小趋势, 当失水速率梯度为 0.02 时, 从底面向上发育的裂隙条数达到最小值, 导致模型中观察到的总裂隙条数也达到最小值。随着 λ 的进一步提高, 蒸发速率对裂隙的影响逐渐超过底面界面摩擦作用, 从顶面发育的裂隙条数占总裂隙条数的比例不断提高。

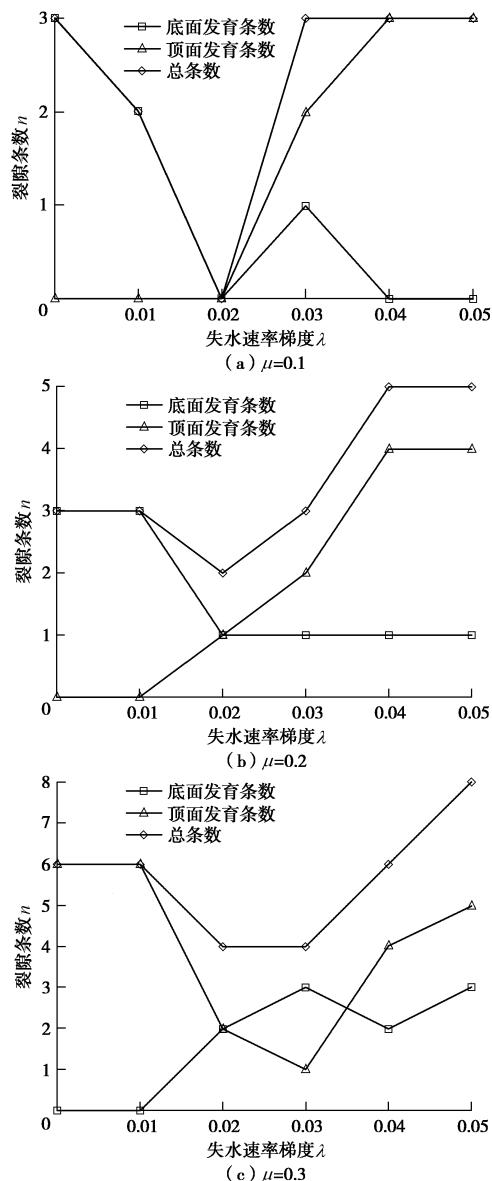


图 7 3 组摩擦系数对应不同失水速率梯度条件下的裂隙发育情况

Fig. 7 Variation of crack development with water loss gradient under three different friction coefficients

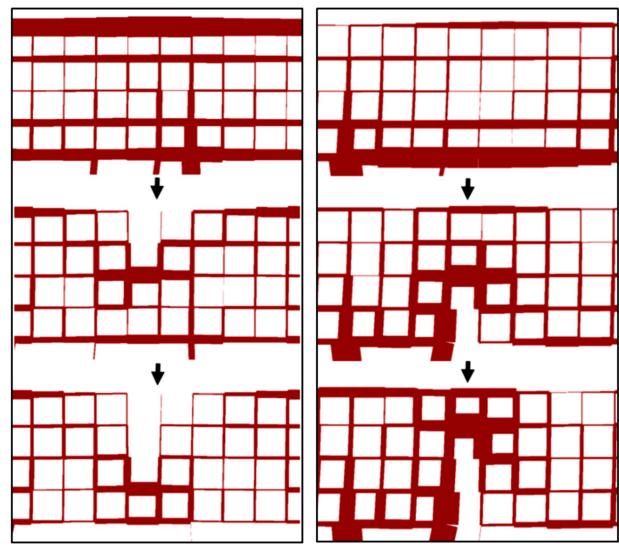
总体上, 当土样蒸发速率一定时, 界面摩擦系数越大, 裂隙总条数和从底面向上发育的裂隙条数越多。当界面摩擦系数一定时, 裂隙总条数随失水速率梯度呈先减小后增大趋势, 而从顶面发育的裂隙条数随蒸发速率总体呈上升趋势。

2.4 裂隙发育方向的界面效应

无论是在试验还是模拟中, 均观察到两种不同的裂隙发育形式, 即从顶面向下发育和从底面向上发育。为了进一步分析裂隙发育方向的边界效应, 下文选择典型的模拟结果对单一裂隙发育过程进行探讨。

(1) 裂隙从顶面向下发育情况

图 8 (a) 给出的是在相对较高的失水速率梯度下某单一裂隙从顶面向下发育的情况。从图中可以看出, 在失水速率梯度影响下, 上部颗粒收缩较快, 颗粒之间连接的刚度增大, 呈现出试样中应力在顶面集中的现象, 而试样底部应力数值相对较小。当顶面颗粒之间某处连接的拉应力达到抗拉强度时则发生断裂, 形成裂隙。与此同时, 应力场发生重分布, 即顶面应力场在裂隙形成后得到释放, 而在裂隙尖端发生新的应力集中。这一机制将一直持续下去, 直到含水率的减少及界面摩擦造成的大拉应力无法超过土样的抗拉强度, 裂隙停止发育。



(a) 模拟中裂隙从顶面向下发育情况 (b) 模拟中裂隙从底面向上发育情况
(线段越粗表示颗粒间连接受力越大, 应力集中越明显)

图 8 (a) 模拟中裂隙从顶面向下发育情况; (b) 模拟中裂隙从底面向上发育情况 (线段越粗表示颗粒间连接受力越大, 应力集中越明显)

Fig. 8 Simulated results of crack initiating from (a) top and crack initiating from bottom (b) simulation results (greater line weight indicates stronger force in contact)

(2) 裂隙从底面向上发育情况

图 8 (b) 给出的是在相对较高的界面摩擦系数条

件下某单一裂隙从底面向上发育的情况。从图中可以看出, 随着模型不断失水收缩, 底部的颗粒受到与刚性簇之间的界面摩擦影响, 水平方向上收缩变形受到限制, 颗粒之间的拉应力不断增加。由于试样相对均匀, 且两端不受到应力约束, 一般在试样中部产生最大的拉应力, 左右相互对称, 这也与前人的模拟结果相吻合^[28]。当底面某处颗粒间连接上的拉应力超过其抗拉强度时, 连接断裂, 在宏观上表现为裂隙产生, 同时也观察到应力场发生重新分布现象。即底面应力场得到一定程度的释放, 应力集中部位随裂隙尖端向上移动, 促使裂隙不断向上发育。

3 讨 论

3.1 颗粒堆积方法

在本研究中使用的是最为规则的 cubic 堆积, 笔者在实际测试过程中, 对 cubic、hexagonal (正六边形) 以及随机堆积进行了对比。在随机堆积中^[29], 由于颗粒分散较为不均匀, 即使经过多次压实和循环, 也很难消除原始缺陷 (即存在相对较为薄弱的部位), 这可以较好地对应原位土样中由于结构、构造上的不均匀性质。但在本文试验中, 所采用的试样为相对均匀的泥浆样, 更符合规则堆积的模型。

在 cubic 堆积中, 模型内部颗粒的配位数为 4, 只与上下以及左右的颗粒相连。在 hexagonal 堆积中^[18], 模型内部颗粒配位数为 6, 即在斜方向也有连接。按上文中所介绍的模拟方法进行模拟时, 模型内部的张拉应力主要集中在水平方向上, 水平连接最先达到所设置的最大拉力值并发生断裂。但在 hexagonal 堆积模型中, 出现了水平方向连接被拉断, 而斜方向上颗粒仍然存在连接的现象, 左右颗粒单元无法完全分离。这意味着在 hexagonal 模型中, 需要在同一局部位置出现超过一次的张拉破坏, 才能产生裂隙, 这显然与实际情况不符。基于上述考虑, 本文中采用 cubic 堆积模型对土样干缩开裂进行了模拟, 模拟结果与试验结果较为吻合。

3.2 失水速率梯度

本次研究中, 当选用的失水速率梯度为 0.05 时, 模拟结果与试验结果较为一致。由于试验土样在干燥过程中不存在额外水源的补充, 可对应于地下水位较深的情况。当土样厚度足够大时, 可以明显观察到干燥过程中土样剖面上的含水率变化过程^[6]。主要分为两个阶段^[30]: 阶段一, 剖面上含水率梯度逐渐变大, 直到土样上部达到一个较为干燥的状态, 此时在深部的土样含水率相对较高, 存在失水速率差异; 阶段二, 深部土样水分逐渐向上运移, 含水率降低, 剖面上的

含水率梯度逐渐减小。这一过程可用有限差分算法实现^[18], 实现相邻块体之间的水分交换。为简化计算, 本文模拟的干燥过程中采用的是恒定失水速率梯度。需要强调的是, 在不引入失水速率梯度时, 模拟出现的裂隙均由底面向上发育。由此可见, 在研究顶面失水引起的土体干缩开裂问题时, 对失水速率梯度加以考虑是必要的。并且, 失水梯度与土体厚度存在密切关系, 因此, 土体厚度对失水速率梯度的改变及其对裂隙发育的影响将作为下阶段研究的重点。

4 结 论

通过室内试验及离散元模拟对土体干缩开裂过程的边界效应进行了研究, 得到以下 5 点结论。

(1) 对于本文试验中的长条形土样, 受尺寸效应影响, 干燥过程中形成的裂隙主要垂直长轴方向并近似平行发育。

(2) 土体干缩裂隙存在从顶面向下和从底面向上两种典型的发育形式, 且具有明显的边界效应。总体上, 底面界面越粗糙, 裂隙发育条数越多, 裂隙间距越小。

(3) 干缩裂隙的发育过程是上界面蒸发失水与下界面摩擦两种边界条件共同作用的结果。当底面摩擦较小时, 底部位移限制对裂隙发育的影响不明显, 开裂由蒸发失水主导, 大部分裂隙由顶面向下发育。当底面摩擦增大时, 界面摩擦力对土体收缩变形的影响增加, 从土体底面发育的裂隙条数占总裂隙条数的比重逐渐增加。

(4) 离散元为研究土体干缩开裂过程及其边界效应提供了出色的数值模拟方法。基于失水速率梯度和界面摩擦系数建立的离散元模型能较好地模拟土样干燥过程中的上边界蒸发条件和下边界接触条件, 较好地还原了室内试验中裂隙发育形态随底面摩擦条件变化的。

(5) 离散元模拟结果表明, 当土颗粒之间某的拉应力达到与之对应的抗拉强度时则发生断裂, 即形成裂隙。与此同时, 局部应力集中现象得到一定程度缓解, 应力场发生重分布, 且在裂隙尖端形成新的应力集中, 从而促使裂隙不断延伸扩展。

本文从试验和数值模拟的角度均证实了土体干缩开裂过程中存在明显的边界效应。但需要指出的是, 无论是蒸发边界条件还是底面接触边界条件, 其对裂隙发育过程的影响在理论上都与土样厚度有关。而本次研究作为该课题的首次探索, 重在建立具有一定可操作性的土体干缩开裂离散元模型, 因此暂未过多考虑厚度因素。在接下来的工作中, 动态失水速率梯度

参数的优化以及蒸发速率-界面摩擦-土层厚度对土体干缩开裂过程的耦合作用机制将是本课题组离散元模型研究的重点。

参考文献:

[1] LOZADA C, THOREL L, CAICEDO B. Effects of cracks and desiccation on the bearing capacity of soil deposits[J]. *Geotechnique Letters*, 2015, **5**(3): 112 – 117.

[2] 袁俊平, 殷宗泽. 膨胀土裂隙的量化指标与强度性质研究[J]. *水利学报*, 2004, **35**(6): 108 – 113. (YUAN Jun-ping, YIN Zong-ze. Quantitative index of fissure and strength characteristics of fissured expansive soils[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, **35**(6): 108 – 113. (in Chinese))

[3] 姚海林, 郑少河, 葛修润, 等. 裂缝膨胀土边坡稳定性评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, **21**(增刊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**(S2): 2331 – 2335. (in Chinese))

[4] MITCHELL J K. *Fundamentals of Soil Behavior*[M]. New York: Wiley, 1993.

[5] LAKSHMIKANTHAM. R, PRATPERE C, LEDESMA ALBERTO. Experimental evidence of size effect in soil cracking[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, **49**(3): 264 – 284.

[6] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 土中水分的蒸发过程试验研究[J]. *工程地质学报*, 2011, **19**(6): 875 – 881. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, GU Kai. Experimental investigation on Evaporation process of water in soil during drying[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, **19**(6): 875 – 881. (in Chinese))

[7] 唐朝生, 施斌, 刘春. 膨胀土收缩开裂特性研究[J]. *工程地质学报*, 2012, **20**(5): 663 – 673. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun. Study on desiccation cracking behaviour of expansive soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, **20**(5): 663 – 673. (in Chinese))

[8] 唐朝生, 王德银, 施斌, 等. 土体干缩裂隙网络定量分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(12): 2298 – 2305. (TANG Chao-sheng, WANG De-yin, SHI Bin, et al. Quantitative analysis of soil desiccation crack network[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(12): 2298 – 2305. (in Chinese))

[9] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成功育过程及机理[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(8): 1415 – 1423. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, CUI Yu-jun. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(8): 1415 – 1423. (in Chinese))

[10] PERON H, HUECKEL T, LALOUI L, et al. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, **46**(10): 1177 – 1201.

[11] WEINBERGER R. Initiation and growth of cracks during desiccation of stratified muddy sediments[J]. *Journal of Structural Geology*, 1999, **21**(4): 379 – 386.

[12] 曾浩, 唐朝生, 林銮. 土体干缩裂隙发育方向及演化特征的层间摩擦效应研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(6): 1172 – 1180. (ZENG Hao, TANG Chao-sheng, LIN Luan. Interfacial friction dependence of propagation direction and evolution characteristics of soil desiccation cracks[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(6): 1172 – 1180. (in Chinese))

[13] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, **29**(1): 47 – 65.

[14] 蒋明镜, 胡海军, 彭建兵. 结构性黄土一维湿陷特性的离散元数值模拟[J]. *岩土力学*, 2013, **34**(4): 1121 – 1130. (JIANG Ming-jing, HU Hai-jun, PENG Jian-bing. Simulation of collapsible characteristics of structural loess under one-dimensional compression condition by discrete element method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(4): 1121 – 1130. (in Chinese))

[15] 张程林, 周小文. 砂土颗粒三维形状模拟离散元算法研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(增刊1): 115 – 119. (ZHANG Cheng-lin, ZHOU Xiao-wen. Algorithm for modelling three-dimensional shape of sand based on discrete element method[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, **37**(S1): 115 – 119. (in Chinese))

[16] PERON H, DELENNE J Y, LALOUI L, et al. Discrete element modelling of drying shrinkage and cracking of soils[J]. *Computers & Geotechnics*, 2009, **36**(1/2): 61 – 69.

[17] 司马军, 蒋明镜, 周创兵. 黏性土干缩开裂过程离散元数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(增刊2): 286 – 291. (SIMA Jun, JIANG Ming-jing, ZHOU Chuang-bing. Numerical simulation of desiccation cracking of clay soils by DEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, **35**(S2): 286 – 291. (in Chinese))

[18] 张晓宇, 许强, 刘春, 等. 黏性土失水开裂多场耦合

离散元数值模拟[J]. 工程地质学报, 2017, **25**(6): 1430 - 1437. (ZHANG Xiao-yu, XU Qiang, LIU Chun, et al. Numerical simulation of drying cracking using multifield coupling discrete element method[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, **25**(6): 1430 - 1437. (in Chinese))

[19] COSTA S, KODIKARA J, SHANNON B. Salient factors controlling desiccation cracking of clay in laboratory experiments[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(1): 18 - 29.

[20] KODIKARA J, CHOI X. A simplified analytical model for desiccation cracking of clay layers in laboratory tests[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Unsaturated Soil. New York, 2006: 2558 - 2569.

[21] SIMA J, JIANG M J, ZHOU C B. Numerical simulation of desiccation cracking in a thin clay layer using 3D discrete element modeling[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, **56**: 168 - 180.

[22] GUO M Y, HAN M C, YU X. Laboratory characterization and discrete element modeling of shrinkage[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, **14**: 5 - 13.

[23] 冉龙洲, 宋翔东, 唐朝生. 干燥过程中膨胀土抗拉强度特性研究[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(4): 620 - 625. (RAN Long-zhou, SONG Xiang-dong, TANG Chao-sheng. Laboratorial investigation on tensile strength of expansive soil during drying[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, **19**(4): 620 - 625. (in Chinese))

[24] EL YOUSSEFI M S, DELENNE J Y, RADIAI F. Self-stresses and crack formation by particle swelling in cohesive granular media[J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2005, **71**(51): 5 - 7.

[25] 刘昌黎, 唐朝生, 李昊达, 等. 界面粗糙度对土体龟裂影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, **25**(5): 1314 - 1321. (LIU Chang-li, TANG Chao-sheng, LI Hao-da, et al. Experimental study on eddect of interfacial roughness on desiccation cracking behavior of soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, **25**(5): 1314 - 1321. (in Chinese))

[26] 曾 浩, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 控制厚度条件下土体干缩开裂的界面摩擦效应[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(3): 544 - 553. (ZENG Hao, TANG Chao-sheng, LIN Chang-li, et al. Effect of boundary friction and layer thickness on soil desiccation cracking behavior[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **41**(3): 544 - 553. (in Chinese))

[27] ITASCA. PFC^{3D} (Particle Flow Code in 3 Dimensions), Version 3.00[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.; 2003.

[28] AMARASIRI A L, KODIKARA J K, SUSANGA C. Numerical modelling of desiccation cracking[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2011, **35**(1): 82 - 96.

[29] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUEIL S. An efficient technique to generate homogeneous specimens for DEM studies[J]. *Computers and Geotechnics*, 2003, **30**(7): 579 - 597.

[30] HILLI D. *Introduction to Environmental Soil Physics*[M]. San Diego, CA: Elsevier Science, 2004.