

DOI: 10.11779/CJGE201903017

控制厚度条件下土体干缩开裂的界面摩擦效应

曾 浩, 唐朝生*, 刘昌黎, 林 鑑, 王东伟, 施 磊

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 土体厚度和界面粗糙度对土体干缩开裂有着重要影响, 为了探究土体在不同厚度和界面粗糙度条件下的干缩开裂特性, 开展了一系列室内干燥试验。试验中共配置了9组初始饱和的泥浆样, 分别设置3种不同的土体厚度和3种不同的界面粗糙度, 并在恒温30℃的条件下进行干燥, 实时记录试样含水率变化及表面裂隙的演化过程, 利用数字图像处理技术, 对裂隙网络进行了定量分析, 得到不同厚度和不同界面粗糙度条件下土体龟裂的动态发展过程及相关参数。试验结果表明: ①界面粗糙度越大, 龟裂发育速度越快, 然而土体厚度越大, 龟裂发育速度越慢, 且土体整体收缩效应越明显; ②界面粗糙度越大, 龟裂发育程度越高, 然而增加土体厚度可以削弱界面粗糙度对龟裂发育过程的影响; ③土体厚度和界面粗糙度都对土体开裂时的临界含水率有重要影响, 且两者对龟裂发育过程的影响具有耦合作用关系。最后, 结合土体干燥收缩特性, 探讨了上述两种因素对龟裂的影响机理。

关键词: 龟裂; 土体厚度; 界面粗糙度; 数字图像处理; 定量分析; 耦合关系

中图分类号: TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)03-0544-10

作者简介: 曾 浩(1995-), 男, 江西玉山人, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程和工程地质方面的研究工作。E-mail: MG1729094@sina.com

Effects of boundary friction and layer thickness on desiccation cracking behaviors of soils

ZENG Hao, TANG Chao-sheng, LIU Chang-li, LIN Luan, WANG Dong-wei, SHI Bin

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

Abstract: As the layer thickness and interfacial roughness of soils are the most important factors affecting their desiccation cracking, a series of desiccation tests are therefore conducted to investigate the shrinkage and cracking characteristics under various soil thicknesses and interfacial roughnesses. In the tests, nine slurry specimens of initial saturation are prepared and dried under a constant temperature of 30℃ and three different soil layer thicknesses and interfacial roughnesses. The change of water content and surface cracking are kept in a real-time record during the whole process of drying. The image processing technique is employed for quantitative analysis of crack network. The dynamic desiccation cracking process is recorded and the relative parameters are obtained under different soil layer thicknesses and interfacial roughnesses. The results show that: (1) The larger the interfacial roughness, the faster the rate of cracking development, while the greater the thickness of soil layer, the slower the rate of cracking development, and the more significant the effects of integrated shrinkage of soils; (2) The larger the interfacial roughness, the higher the degree of cracking development. However, the increase of soil thickness can restrain the influences of interfacial roughness on cracking development; (3) The influences of interfacial roughness and soil layer thickness on cracking have certain influences on the average water content during the initial cracking of soils. Additionally, the influences of the two factors on cracking development have coupling relationship. Finally, the influence mechanism of the two factors is explored by expatiating the mechanism of soil shrinkage.

Key words: desiccation cracking; thickness of soil layer; interfacial roughness; image processing; quantitative analysis; coupling relationship

0 引言

在干旱气候作用下, 自然界的土体会因失水收缩在表面发育纵横交错的裂隙网络, 即人们所熟悉的龟裂现象。随着全球极端干旱气候频发, 土体的龟裂问

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572246, 41772280); 优秀青年科学基金项目(41322019); 国家自然科学基金重点项目(41230636); 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: 2018-02-08

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

题引起了越来越多国内外学者的关注^[1-3]。龟裂的产生能弱化土体的工程性质, 引发各种各样的岩土工程问题。如裂隙的产生会弱化土体的承载力, 增加土体的压缩性, 导致地表建筑结构发生倾斜和开裂^[4]; 裂隙会破坏土体结构的整体性, 为雨水快速入渗到土体内部提供便捷通道, 加速边坡失稳、诱发滑坡和泥石流等灾害^[5-6]; 城市垃圾填埋场中, 黏土衬垫层常常因为龟裂而失去其功能性, 垃圾渗滤液容易通过裂隙对地下水源造成威胁^[7]; 地下核废料处置库中, 常以压实膨润土作为缓冲/回填材料, 其干缩产生的裂缝为围岩裂隙水和放射性核废物的运移提供了快捷通道, 从而对生态环境造成污染^[8]。除此之外, 裂隙的存在还会极大增加了土体的风化面积和风化深度, 从而导致水土流失加剧, 生态环境快速恶化^[9]。与土体龟裂相关的工程问题还有很多, 涉及岩土、地质、水利和环境工程等多个学科领域, 具有一定的普遍性。

造成土体龟裂的原因有很多, 其中在干燥条件下, 土体内水分蒸发引起土体收缩变形, 当土体收缩变形受到限制而导致开裂是龟裂产生的主要原因之一^[10]。近年来, 国内外学者对土体龟裂的研究主要集中在裂隙发育的影响因素方面。如 Lakshminathan 等^[11]研究发现土体尺寸对裂隙形态有着重要的影响, 试验表明: 土体发生开裂所需的应力大小与土体尺寸有关, 土体尺寸越大, 开裂时所需要的应力越大; Mitchell 等^[12]指出黏土矿物成分和含量对土体的干缩开裂性质有着重要影响, 黏土矿物含量越高, 土体干缩开裂程度越高; Tollenaar 等^[13]通过试验发现土体初始含水率越高, 龟裂发育程度越高; Tang 等^[14-16]研究了温度、干湿循环次数和土体厚度等因素对土体龟裂发育过程的影响, 结果表明: 温度越高, 龟裂形貌越简单, 龟裂条纹越宽; 随着循环次数的增加, 龟裂发育程度增加, 裂隙之间的连通性变差, 微裂隙增多, 块区的形状越来越不规则; 裂隙条数随土体厚度的增加而减小, 而宽度则显著增加。

在自然界中, 土体通常成层分布, 每层土体的物理性质不尽相同, 如矿物成分、密实度、土颗粒粒径和颗粒磨圆度等。此外, 在高放核废物处置库和垃圾填埋场中, 用于缓冲回填的黏土材料也是通过分层的方式来进行压实。受施工工艺影响, 各层土体的性质也会存在差异。因此, 当这类具有分层属性的土体发生干缩变形时, 上下土层间会因为收缩变形程度不同而产生相对位移。由于土层界面并不完全光滑, 存在

一定的摩擦力, 其对土层的收缩变形具有限制作用, 并会影响裂隙发育过程。然而, 目前学界关于土体龟裂发育过程中界面摩擦效应的报道比较鲜见, 有必要对此开展针对性研究。

界面的摩擦效应除了与界面粗糙度有关外, 还与正压力大小有关。对于自然界的土体而言, 界面上的土压力主要与取决于土体的自重, 即与土体厚度有关。此外, 在干燥过程中, 土体沿深度方向的蒸发速率和含水率变化均受土体厚度的制约^[16], 所以土体厚度可以影响剖面上基质吸力的变化规律, 进而影响蒸发条件下土体中张拉应力场的演化及收缩特性。根据前文所提到的, 界面摩擦力大小与土体蒸发过程中由内部应力场所引起的收缩变形有关。因此, 在研究界面摩擦效应对土体龟裂的影响时, 还应该同时考虑土体厚度因素。

本文设计了3种不同的土体厚度和3种不同的界面粗糙度, 通过在恒定温度下开展室内干燥试验, 研究不同厚度条件下界面粗糙度对土体表面龟裂发育的影响, 借助数字图像处理技术, 对龟裂发育过程中的裂隙几何形态进行了定量分析, 并探讨了界面粗糙度和厚度对土体表面龟裂发育的影响机理。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本次试验所采用的黏性土为南京地区的下蜀土, 呈褐黄色, 取土深度约1.5 m, 其基本物理性质如表1所示。

1.2 试样制备

为了去除原状土体内的大颗粒杂质, 将取回后的土样经过风干粉碎, 过1 mm筛。随后将过筛后的土样配成含水率为170%的泥浆样, 并在振动台上振动5 min, 以排除搅拌过程中泥浆内部产生的气泡, 然后密封在容器中, 静置48 h。待泥浆沉积稳定后, 抽去表面清液, 测得此时含水率为70%, 最后将泥浆倒入试验容器进行干燥。试验所用容器为19 cm×19 cm的正方形有机玻璃盒, 容器高度为4 cm。

1.3 试验方法

为了研究界面摩擦效应对龟裂的影响, 试验设计了3种界面条件, 分别选用凡士林和120目、240目规格的砂纸, 利用环氧树脂(AB胶)将砂纸粘贴在容器底面或在容器底面涂抹凡士林来改变界面粗糙

表1 下蜀土基本物理性质

Table 1 Physical properties of Xiashu soil

比重 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 ρ_d $/(g \cdot cm^{-3})$	颗粒百分含量/%
2.73	34.5	19.5	17.5	16.2	1.7	1~0.074 mm 2 0.074~0.005 mm 67 <0.005 mm 31

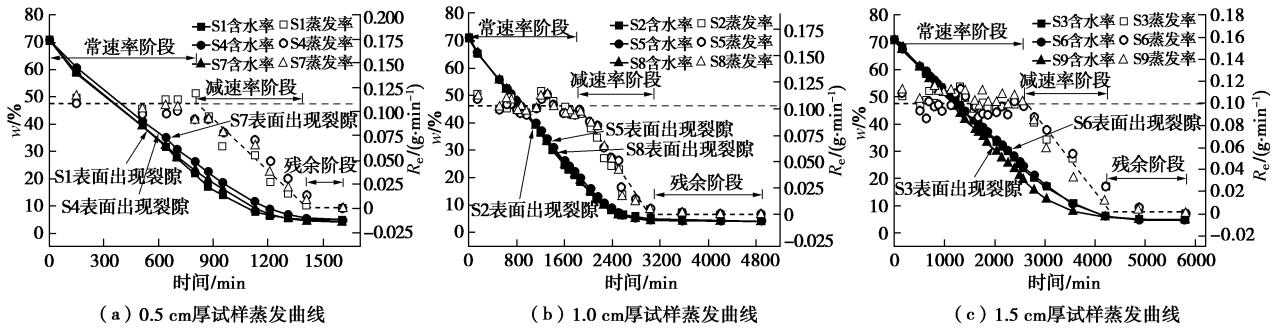


图 1 土体蒸发曲线

Fig. 1 Curves of evaporation process of soils

度。其中 120 目规格（对应砂粒径 $\leq 0.12\text{ mm}$ ）的砂纸粗糙度大于 240 目规格（对应砂粒径 $\leq 0.063\text{ mm}$ ）的砂纸，容器底部涂抹凡士林则可以有效降低界面的摩擦作用，近似光滑界面。一共开展了 9 组试验，分别对应 3 种不同界面条件和土层厚度 (H)。其中 S1 ($H=0.5\text{ cm}$)、S2 ($H=1\text{ cm}$)、S3 ($H=1.5\text{ cm}$) 对应 120 目砂纸条件，S4 ($H=0.5\text{ cm}$)、S5 ($H=1\text{ cm}$)、S6 ($H=1.5\text{ cm}$) 对应 240 目砂纸条件，S7 ($H=0.5\text{ cm}$)、S8 ($H=1\text{ cm}$)、S9 ($H=1.5\text{ cm}$) 对应凡士林条件。

将所有试样置于恒定 30°C 的空调房间内进行干燥，并使用固定在支架上的相机对各组试样表面拍照，记录其表面裂隙发育的全过程。为了研究试样的蒸发特性，在干燥过程中利用精度为 0.01g 的电子天平实时称取各个试样的重量，计算出各试样的含水率变化。上述试验装置与称重过程可参考相关文献^[15]。

1.4 数字图像处理

近些年来，随着计算机科学的发展，数字图像处理技术被广泛用于龟裂网络定量分析中^[17-19]。为了定量分析龟裂网络的几何形态学特征，课题组自主开发了一套裂隙图像处理系统 NJU-CIAS (免费下载地址：www.climate-engeo.com)，利用该系统可实现对裂隙图像的前期处理以及相关参数的获取。具体原理和操作过程可参考相关文献^[17]。

本文利用 NJU-CIAS 对每组试样在龟裂发育过程中不同时刻的裂隙几何形态进行定量分析，得到一系列不同时刻裂隙几何形态特征参数：表面收缩率 R_s ，裂隙总长度 L_{sum} ，裂隙条数 N_{seg} ，裂隙交点个数 N_n ，裂隙平均宽度 W_{av} ，土块个数 N_a 和土块平均面积 S_{av} 。上述参数的定义可参考相关文献^[20]。

为了消除容器边界效应对裂隙定量分析结果的影响，本文只选取了龟裂图像的中间区域 ($18\text{ cm} \times 18\text{ cm}$) 进行定量分析。需要说明的是，由于表面收缩率 R_s 所反映的是土体总体收缩程度，因此，可以不考虑边界效应对土体收缩的影响，在分析表面收缩率时，所选取的龟裂图像区域为土体初始表面积 ($19\text{ cm} \times 19\text{ cm}$)。

cm)，即分析区域包括试样在干缩过程中与容器侧壁形成的裂缝面积。

2 试验结果

2.1 水分蒸发过程

在干燥过程中，试样重量的变化是由土体内水分蒸发而引起，因此通过称重实时记录每组试样的重量，可以得到每组试样试验过程中的平均含水率变化曲线，如图 1。从图 1 中可以看出，对于相同厚度的试样，平均含水率随时间的变化趋势基本一致，几乎不受界面粗糙度的影响。在开始阶段，平均含水率随时间呈线性递减，随着干燥时间的增加，平均含水率最终趋于稳定。对于不同厚度的试样，平均含水率达到稳定时对应的时间随厚度的增加而增加。

此外，根据含水率结果，进一步计算了各组试样的蒸发速率 R_e ，相关结果也展示于图 1 中。总体上，水分蒸发过程可以分为 3 个典型阶段：常速率、减速率和残余阶段，这与唐朝生等^[21]的研究结果一致。从图中可以看出，各组试样的初始蒸发速率均为 $0.1\text{ g}/\text{min}^{-1}$ ，受厚度和界面粗糙程度的影响不明显。这主要是因为 9 组试样初始处于饱和状态，土体内部有源源不断的水分供给表面蒸发的需要，此时的蒸发速率主要受外界环境相对湿度和温度等因素的影响。而本次试验过程中的蒸发环境相对恒定，因此各组试样的初始蒸发速率几乎一致。

结合试验观察到的裂隙发育情况，发现所有试样表面出现裂隙时，都处于常速率蒸发阶段，此时土体含水率相对较高 ($20\%\sim 40\%$)，如图 1 所示。Peron 等^[22]、Tang 等^[23]也在试验中发现了类似的现象。此外，本次试验记录了各组试样发育第一条裂隙所对应的临界时间 t_{IC} ，并测算了此时对应的临界含水率 w_{IC} ，具体结果如表 1 所示。发现在相同界面粗糙度条件下，土体厚度越薄，土体表面出现裂隙的时间越早，出现裂隙时的临界含水率 w_{IC} 越高；在相同厚度条件下，土体龟裂发生时的 w_{IC} 随界面粗糙度的增加而增加。

并且, 从表 2 中可以推算出, 随着厚度增加, 不同界面粗糙度条件下, 土体出现第一条裂隙时的临界时间和临界含水率相差的越大, 如厚度 0.5 cm 条件下的试样 S1 和 S7 的临界时间差异约 100 min, 临界含水率的差异约为 4%。而厚度 1.0 cm 条件下的试样 S2 和 S8 的临界时间差异约 400 min, 临界含水率的差异约为 9%。需要说明的是, 试验中很难确定第一条裂隙出现时的准确时间, 本文以试样表面第一条裂隙发育到约 2 mm 长时对应的时间作为参考, 因为此时肉眼能够清晰分辨裂隙的形态。

表 2 试样发生开裂时对应的时间和含水率

Table 2 Time and water contents for crack initiating

试样 编号	界面粗糙 条件	试样厚度 /cm	t_{IC} /min	w_{IC} /min
S1	120 目砂纸	0.5	500	38
S2	120 目砂纸	1.0	1000	37
S3	120 目砂纸	1.5	2100	32
S4	240 目砂纸	0.5	550	37
S5	240 目砂纸	1.0	1300	32
S6	240 目砂纸	1.5	2300	28
S7	凡士林	0.5	600	34
S8	凡士林	1.0	2400	28
S9	凡士林	1.5	无裂隙发育	

2.2 龟裂发育动态过程

通过对所有试样定期拍照, 记录龟裂发育动态过程。以 S2 为例, 图 2 给出了不同时刻获得的龟裂图像。从图中不难看出, 裂隙出现时试样含水率约为 39.09% (图 2 (a)), 甚至高于土体的液限 (34.5%, 表 1)。且绝大部分裂隙都在相对较高的含水率区间发育完成, 裂隙网络基本定型 (图 2 (a) ~ (d))。此后试样含水率虽然不断减小, 但无新裂隙产生, 龟裂网络几何形态不再发生明显变化 (图 2 (e) ~ (f))。

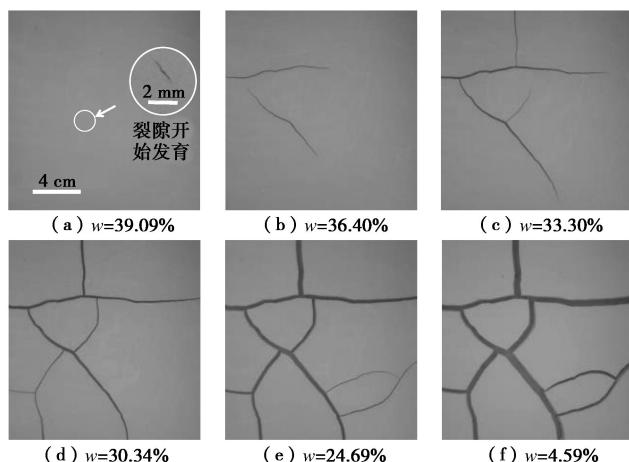


图 2 S2 在干燥过程中不同含水率对应的典型龟裂图像

Fig. 2 Typical crack patterns of S2 under different water contents during drying

为了更好地分析在不同土体厚度和界面粗糙度条

件下, 裂隙发育过程中所呈现的规律, 本文将所有试样在龟裂发育过程中所获取的表面龟裂图像进行了定量分析。将定量分析后所得的数据进行分类汇总, 得到各个参数在不同条件下随时间的变化曲线, 如图 3 所示。需要说明的是, S9 在干燥过程中呈现整体收缩现象, 并且收缩区域主要体现在土体边缘, 而分析区域内 ($18 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$) 表面无龟裂发育, 因此在对其进行裂隙几何形态定量分析过程中, 认为裂隙总长度、裂隙条数、裂隙交点个数, 裂隙平均宽度为 0, 土块个数为 1。从图 3 中可以看出, 当试样龟裂开始发育后, 裂隙几何形态参数都呈现出先快速增长, 随后趋于稳定的变化过程。

此外, 从图 3 中还可得出试样在龟裂发育过程中各几何形态参数从开始快速增长到进入稳定阶段的大概时间点, 具体结果如表 3 所示。从表中数据不难看出, 厚度相同的试样, 裂隙平均宽度达到稳定阶段用时最长。以 S7 为例, 龟裂发育过程中, 裂隙平均宽度进入稳定阶段时间点大约为 1400 min, 然而裂隙总长度、裂隙条数、裂隙交点个数早在约 950 min 时达到稳定阶段。并且, 界面粗糙度对裂隙几何参数进入稳定阶段的影响较小, 而试样越厚, 裂隙几何参数达到稳定阶段所用的时间越长。

表 3 裂隙几何形态参数达到稳定状态的时间

Table 3 Experienced time of geometrical parameters of crack network to reach steady state

试样 编号	$t(L_{sum})$ /min	$t(W_{av})$ /min	$t(N_{seg})$ /min	$t(N_n)$ /min
S1	950	1400	950	950
S2	1600	2800	1600	1600
S3	2800	3600	2800	2200
S4	950	1400	950	950
S5	1600	2800	1600	1600
S6	2800	3600	2800	2200
S7	950	1400	950	950
S8	1600	2800	1600	1500
S9	—	—	—	—

结合平均含水率变化过程 (图 1) 可以发现, 裂隙几何形态定量参数快速增长阶段主要集中在常速率蒸发阶段, 而在进入残余蒸发阶段前, 裂隙几何形态定量参数变化基本稳定。以 S4 为例, 干燥过程中, 试样裂隙几何形态都在 1400 min 前达到稳定, 而此时试样对应的蒸发率处于减速率阶段。此外, 从图 3 (a) ~ (c) 和 (g) ~ (l) 中裂隙几何形态参数变化曲线的斜率上不难看出, 相同厚度条件下, 界面粗糙越大, 裂隙总长度、裂隙条数、裂隙交点个数越发育的越快; 从图 3 (d) ~ (f) 中裂隙几何形态参数

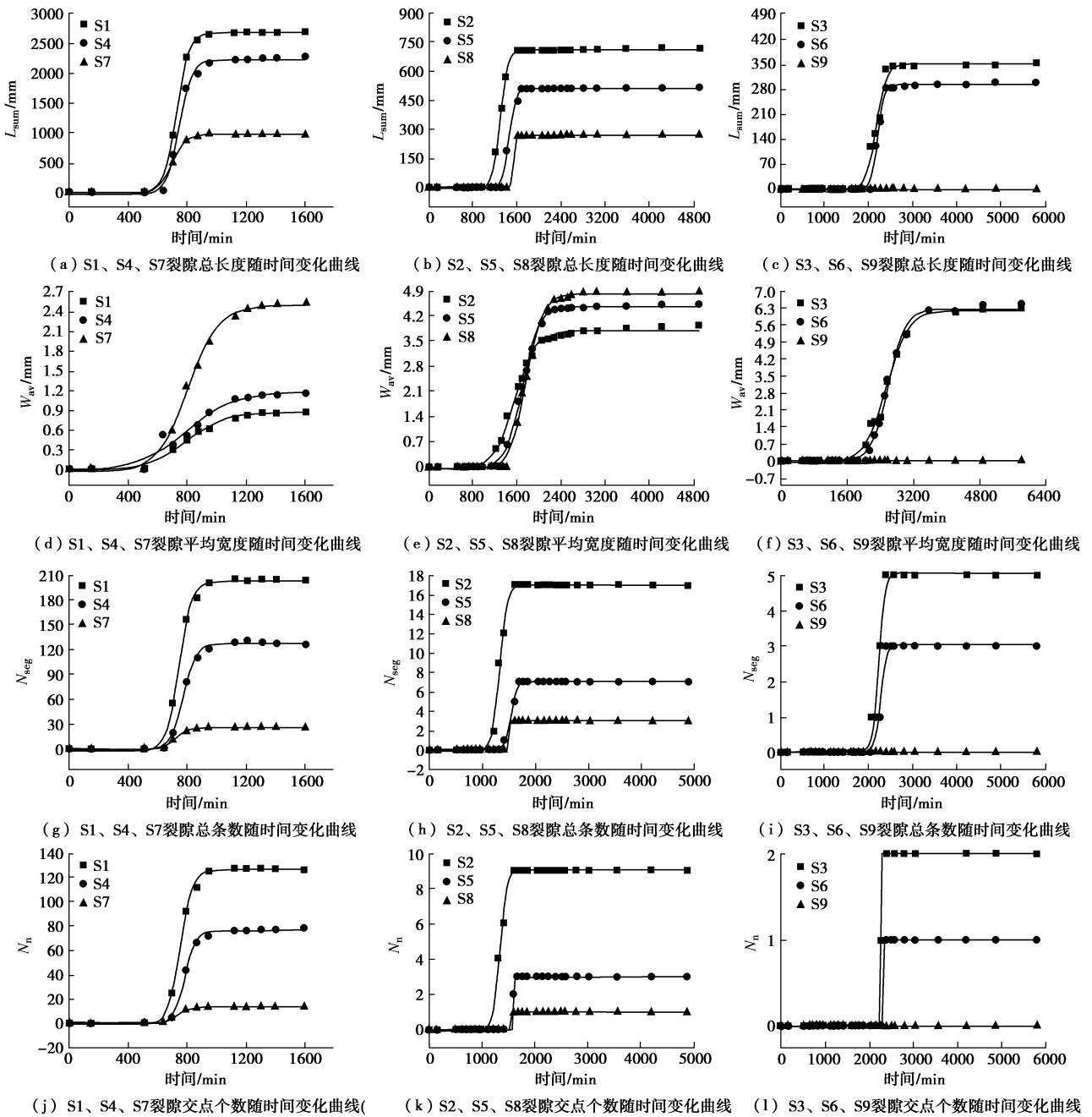


图 3 9 组试样干燥过程中裂隙网络的定量分析结果

Fig. 3 Quantitative results of desiccation crack images of nine soils during drying

变化曲线的斜率上可以看出，在相同的土体厚度条件下，界面粗糙度越小，裂隙平均宽度发育越快，并且土体厚度越薄，这一现象越明显。

2.3 干燥结束后的龟裂几何形态特征

图 4 给出了 9 组试样干燥结束后的最终龟裂图像。从图 4 可以大致看出，土体越厚或者界面粗糙度越小，土体表面裂隙发育程度越低。为了更好地分析厚度和界面粗糙度对土体龟裂的影响，利用 NJU-CIAS 对图 4 中各试样的最终裂隙几何形态进行了定量分析，相关结果如图 5 和图 6 所示。图 5 的数据表明，在相同厚度条件下，随着界面粗糙度的减少，试样表面收缩率呈增加趋势；在相同界面粗糙度条件下，随着厚度

的增加，试样表面收缩率呈增加趋势。

图 6 (a) ~ (d) 给出了与裂隙相关的参数，从中可以看出，在相同的厚度条件下，裂隙总长度、裂隙条数和裂隙交点个数随界面粗糙度的增加而增加，并且试样厚度越大，界面粗糙度对上述裂隙几何形态定量参数的影响越小。在相同界面粗糙度条件下，裂隙总长度、裂隙条数和裂隙交点个数随着试样厚度的增加而减少。对于裂隙平均宽度而言，在相同厚度条件下，裂隙平均宽度随着界面粗糙度的增大而减小，并且在相同界面粗糙度条件下，裂隙平均宽度随着试样厚度的增加而增加（图 6 (b)）。

图 6 (e)、(f) 给出了与土块相关的定量分析结

果, 从中可以看出, 在相同厚度条件下, 界面粗糙度越大, 土块个数越多, 土块平均面积越小, 随着试样厚度的增加, 界面粗糙度对土块个数的影响减小, 而对土块平均面积的影响增加。在相同界面粗糙度条件下, 随着试样厚度增加, 土块个数减少, 土块平均面积增大。

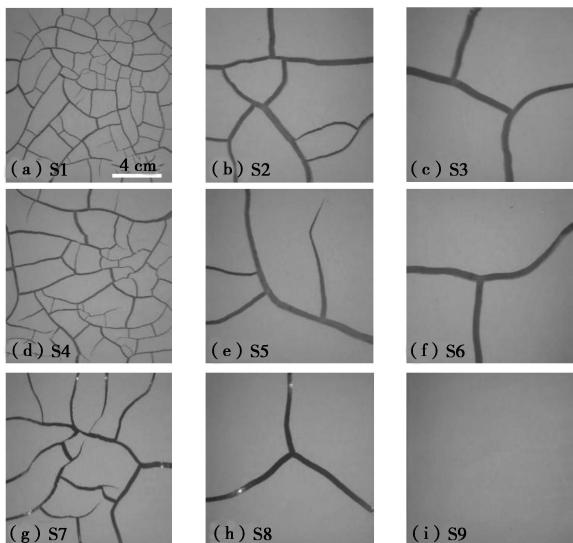


图 4 9 组试样干燥结束后的裂隙图像

Fig. 4 Crack images of nine soils after drying

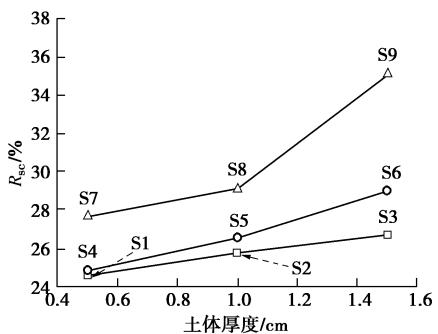


图 5 9 组试样干燥结束后对收缩率的定量分析结果

Fig. 5 Quantitative results of nine soils for shrinking rates after drying

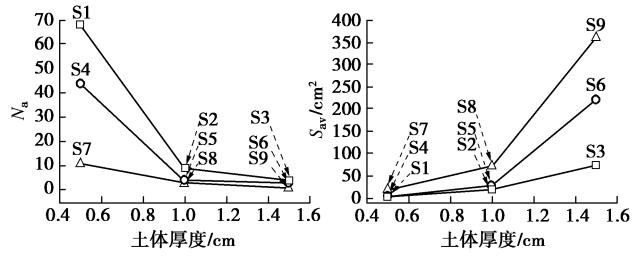
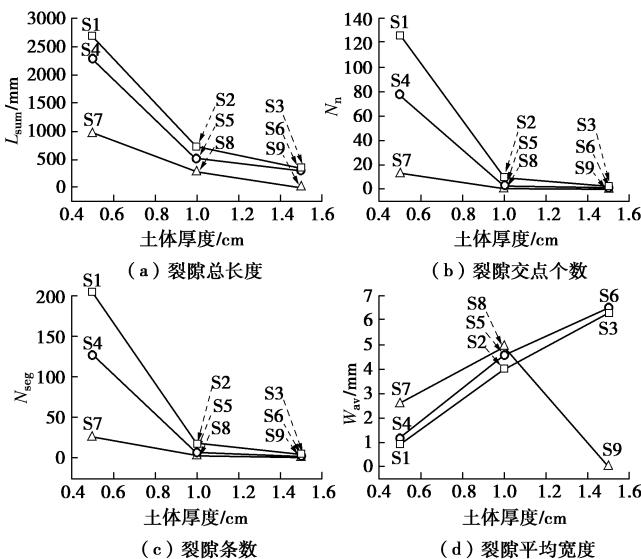


图 6 9 组试样干燥结束后裂隙网络的定量分析结果

Fig. 6 Quantitative results of desiccation crack images of nine soils after drying

考虑到每条裂隙长度和宽度都存在一定的差异, 为了能更好地反映这种差异性, 基于 NJU-CIAS 的统计数据, 绘制了各组试样裂隙长度和宽度的分布图(图 7)。结果表明, 在相同厚度条件下, 随着界面粗糙度的增加, 裂隙长度和宽度的分布范围有减小趋势, 意味着试样发育短裂隙和细裂隙的概率增加, 而在相同界面粗糙度条件下, 随着试样厚度的增加, 试样发育长裂隙和宽裂隙的概率增加。例如, 以 S1 作为基点进行比较, 并且裂隙长度以及宽度大小以像素点(pixels)作单位, 可发现 S1 裂隙形态大部分都集中在长度为 0~450 pixels 和宽度 0~30 pixels 的范围内, 而与其相同厚度而不同界面粗糙条件的 S7 裂隙形态大部分都集中在长度为 200~1200 pixels 和宽度 15~60 pixels 的范围内。此外, 与 S1 相同界面粗糙度条件而不同厚度的 S3 裂隙形态大部分都集中在长度为 650~1100 pixels 和宽度 60~100 pixels 的范围内。

3 讨 论

土体在蒸发失水过程中, 由于毛细作用, 孔隙水在土颗粒之间会形成弯液面, 即收缩膜, 并且收缩膜表面存在表面张力^[23]。根据非饱和土力学理论, 土体内基质吸力(空气压力 u_a 与毛细水水压力 u_w 之差)与收缩膜表面张力存在如下关系:

$$S = u_a - u_w = \frac{2T_s \cos \theta}{r} = \frac{2T_s}{R_s}, \quad (1)$$

式中, S 为基质吸力, u_a 为空气压力, u_w 为毛细水水压力, T_s 为收缩膜的表面张力, r 为毛细孔的半径, θ 为毛细水的接触角, R_s 为收缩膜的曲率半径。干燥过程中, 基质吸力随含水率的减小而逐渐增加, 并在土体中产生张拉应力, 使土颗粒相互靠拢, 宏观上表现为土体竖向和横向收缩变形^[24]。龟裂是由土体在横向收缩变形过程中内部张拉应力超过土体抗拉强度而引起的, 因此基质吸力和抗拉强度是控制土体龟裂发育的两个关键力学指标^[25]。

3.1 土体厚度对含水率变化的影响

在初始含水率相同的条件下, 土体越厚, 在蒸发

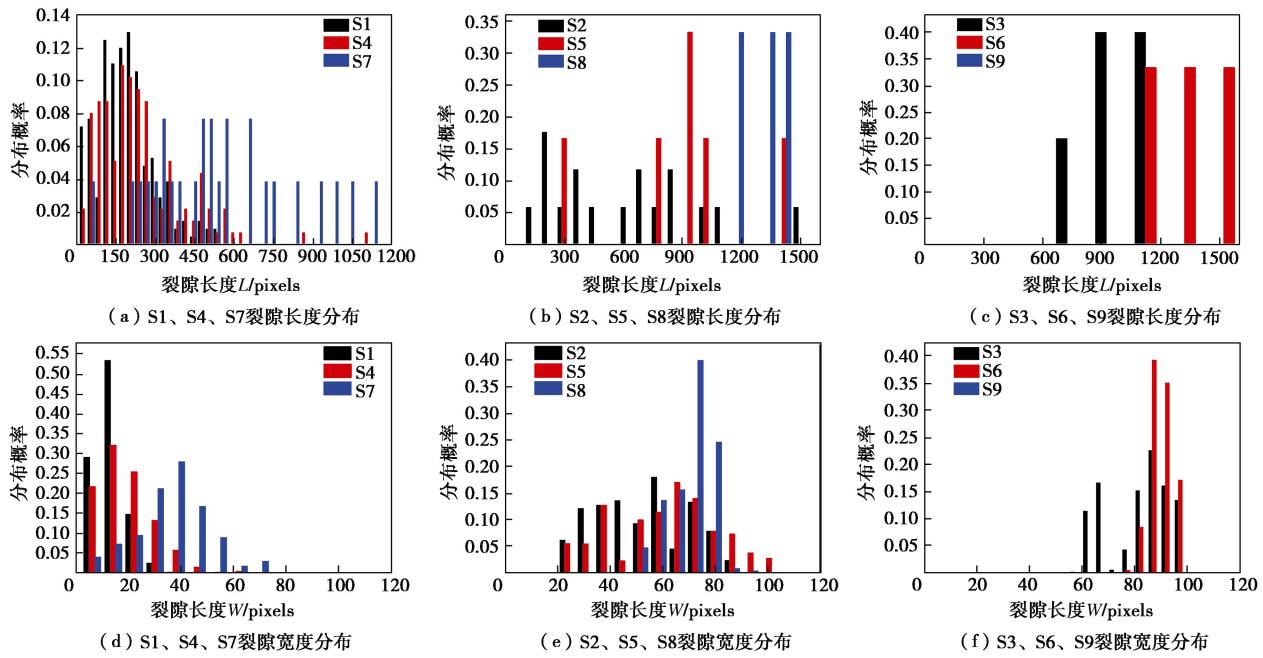


图 7 裂隙网络形态定量参数的分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of quantitative parameters of crack network

过程中,从土体内部供应到蒸发面的水分越多,因此土体干燥完全所经历的时间越长^[26]。此外,随着蒸发的持续,从下层孔隙水中逃逸出来的水分子需要穿越上部干燥层才能到达蒸发面(土/气界面),水分子的迁移路径延长,蒸发速率必然随时间降低^[21]。对于较厚的土体而言,水分子到达蒸发面的路径及历时相对较长(图1)。

3.2 界面粗糙度对龟裂发育过程的影响

在蒸发过程中,如果土体横向收缩变形受到限制,那么土颗粒间无法相互靠拢,随着蒸发失水的持续,收缩膜曲率半径不断减小。根据式(1),随着收缩膜曲率半径不断减小,基质吸力不断上升,从而张拉应力不断增加并且无法释放而发生应力集中。当土体内部张拉应力集中到超过土体抗拉强度时,裂隙便会产生,张拉应力所集聚的能量得以释放。因此,如果土层界面存在显著的摩擦作用,必然会对土体的横向收缩变形产生限制,进而影响张拉应力集中和裂隙发育过程。在土体厚度相同的条件下,界面粗糙度越大,对土层横向收缩变形的限制也越强,从而张拉应力集中越快,达到土体抗拉强度和开裂所用的时间越短。换言之,在相同厚度条件下,如果界面粗糙度越大,则土体表面出现裂隙时的临界含水率 w_{IC} 越高,裂隙发育速度越快(图1, 3),表面收缩率越小(图5),并且干燥完全后,形态上为短而且细的裂隙占绝大多数(图7)。

此外,在干燥过程中,土体出现裂隙时通常是在含水率较高阶段^[2],因此从土体第一条裂隙出现到土

体干缩开裂完成还需要一段时间。在裂隙发育的前期,土体内含水率较高,土体抗拉强度低^[24],界面上只要提供较小的摩擦力,就可以使土体内部张拉应力集聚到超过土体抗拉强度。但随着蒸发的持续,土体内基质吸力不断上升,土颗粒间有效应力增加,土体自身抗拉强度也不断增加,因此在土体干燥收缩后期,要使裂隙继续发育,则需要界面上提供更大的摩擦力来限制土颗粒间相互靠拢。所以在龟裂发育过程中,在相同土体厚度条件下,界面粗糙度越大,龟裂发育程度越高,裂隙数量越多(图4, 6)。

3.3 土体厚度对龟裂发育过程的影响

前文提到,土层界面之间的摩擦作用是制约裂隙发育的重要因素^[27]。对于均质的土体和均匀的界面接触条件,可以假设界面的摩擦系数 μ 也是均匀的。为简单起见,下面以示意图8为例,对二维条件下土层干缩开裂过程进行力学分析。当土层在干燥过程中发生水平向收缩变形时,界面上会产生与收缩变形方向相反的摩擦力 F ,对收缩变形产生限制作用,并在土层内部形成水平向的张拉应力 σ 。如果土层足够薄,可以假设 σ 沿土层厚度 d 分布均匀。根据剖面上的受力平衡,上述变量之间存在如下关系:

$$F = \sigma \times d \quad (2)$$

此外,界面摩擦力的大小与界面上的应力 f 和作用长度 L 有关,其中 F 是界面摩擦系数 μ 的函数,取决于界面粗糙度,如下式所示:

$$F = f(\mu) \times L \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),可得

$$\sigma = \frac{f(\mu) \times L}{d} \quad . \quad (4)$$

在干燥过程中, 当张拉应力 σ 达到土体的抗拉强度 σ_{cr} 时, 土体发生开裂, 存在如下临界关系式:

$$\sigma_{cr} = \frac{f(\mu) \times L_{cr}}{d} \quad , \quad (5)$$

由式(5)可知, 对于相同的土体, 当抗拉强度一定时, 在同等的界面接触条件下(界面粗糙度), 裂隙发育对应的临界长度 L_{cr} 与土层厚度呈正相关关系。 L_{cr} 实际上反映的是土块的边长和裂隙间距, 也间接反映了土块面积的大小。这解释了前文发现的裂隙长度和土块面积随厚度的增加而增加的现象(图6)。换言之, 土体越厚, 整体收缩现象越明显, 表面收缩率越大, 龟裂发育程度越低, 并且干燥完全后, 形态上为长而且宽的裂隙占绝大多数。

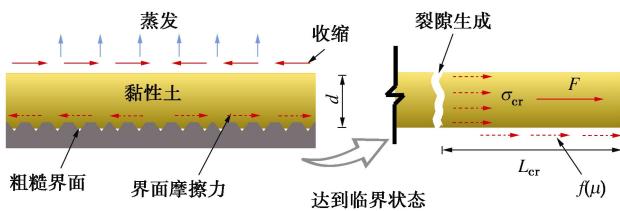


图8 土体干缩开裂时的受力状态

Fig. 8 Stress state of soil in desiccation cracking

前文提到, 土体厚度对常速率蒸发阶段的蒸发速率影响不明显, 则该阶段土体内由含水率变化引起的张拉应力场发展无明显差异, 而土体越厚, 土层发生开裂需要的拉力越大(式(5))。因此, 在相同界面粗糙度条件下, 要使越厚土体发生开裂, 需要更长时间的蒸发来达到其产生裂隙的临界应力状态。这解释了为什么越厚的土体, 表面出现裂隙的时间越晚, 临界含水率 w_{lc} 越低, 龟裂发育速度越慢。

此外, 在土体收缩过程中, 由于界面粗糙度不同, 界面上摩擦力增长的速率也不同, 界面粗糙度越大, 界面上摩擦力增长的越快, 从而使土层开裂的所需要的时间越短。对于较厚的土体而言, 由于土层发生开裂需要的拉力较大, 从而土体内部张拉应力集聚到使土层发生开裂的临界条件需要一定的时间。因此, 界面上摩擦力的增长速度对土层开裂临界时间和含水率影响显著。相反, 对较薄的土体而言, 由于开裂需要的拉力较小, 收缩过程中, 界面上摩擦力很快就可以积聚到满足土层发生开裂的条件, 因此界面粗糙度大小对土层开裂临界时间和含水率影响不大。这解释了表2数据所体现出的在相同土层厚度条件下, 不同界面粗糙度之间, 土层裂隙发育在临界时间和临界含水率方面所存在的差异, 并且厚度越大, 差异越明显。

3.4 界面粗糙度和土体厚度对龟裂发育的耦合关系

结合上文分析不难发现, 增加土体厚度和降低界面粗糙度对龟裂发育过程有相似影响, 减小土体厚度和增加界面粗糙度对龟裂发育过程也有相似影响, 这也可以通过式(5)进行充分体现。换言之, 合理地改变界面摩擦条件或土层厚度, 理论上可以实现二者对土体内部张拉应力场的影响达到等效水平, 即表现出相似的龟裂特征。

需要指出的是, 由于摩擦力的产生需要接触物体之间存在相对运动趋势, 所以界面上摩擦力的大小不但与界面粗糙度有关, 而且还与土体收缩变形趋势有关。在实际的蒸发过程中, 由于蒸发首先从表面开始, 沿土体深度方向上含水率逐渐升高, 对应的基质吸力逐渐减少, 从而导致土体沿深度上的收缩变形趋势也存在差异, 即表层土体收缩变形比深部要快。如果土层越薄, 蒸发作用能很快影响到界面上的含水率变化, 激发界面上的摩擦效应, 进而主导后续裂隙的发育过程。相反, 如果土层越厚, 蒸发作用需要经过较长时间才能对界面上的含水率产生影响, 激发摩擦效应, 而此时土层的整体含水率相对较小, 尤其是上部土层的抗拉强度因长时间蒸发而显著增加, 界面上产生的摩擦力大小难以达到土层拉裂破坏所需的临界值, 其影响范围有限。因此, 土层越厚, 界面摩擦效应对龟裂的影响越弱, 相比较而言, 在这种条件下, 由蒸发所引起的表面张拉应力对裂隙发育过程起主导作用。如S3、S6和S9, 虽然3组样的容器底部都涂抹了凡士林, 但S9表面并未发育裂隙, 主要是因为S9的厚度较大, 超过这种界面摩擦条件的影响范围(小于1.5 cm)。据此可以推测, 不同的界面摩擦条件可能对应不同的临界影响范围, 且该临界影响范围随界面粗糙度的增加而增加。如果土层厚度小于该临界影响范围, 界面摩擦效应对裂隙发育起主导作用, 否则由蒸发引起的表面张拉应力对裂隙发育起主导作用。为了验证上述观点, 后续需要围绕该课题开展更精细的研究。此外, 对于理想光滑的界面, 且假设土体是完全均质的, 则干燥过程中土体的收缩变形理论上不会受到任何限制而产生应力集中, 因此不会发育裂隙。

4 结 论

本文通过一系列室内干燥试验, 研究了不同厚度和界面粗糙度条件下土体龟裂的动态发展过程及裂隙网络的几何形态特征, 得到如下主要结论:

(1) 土体水分蒸发过程可分为3个典型阶段: 常速率阶段、减速率阶段和残余阶段; 土体越厚, 表面出现裂隙的临界含水率越低, 并且随着厚度的增加, 不同界面粗糙度之间, 土体表面出现裂隙时的临界时

间和临界含水率差异越大；在相同土体厚度条件下，随着界面粗糙度的增加，土体开裂时的平均含水率增加。

(2) 裂隙交点个数、裂隙总长度、裂隙条数随界面粗糙度的增加而增加，随土体厚度的增加而减少；且随土体厚度的增加，界面粗糙度对上述参数影响效应减弱。

(3) 表面收缩率、裂隙平均宽度随界面粗糙度的增加而减少，随土体厚度的增加而增加；且随着土体厚度的增加或界面粗糙度的减小，土体整体收缩效应越明显，裂隙发育程度越低。

(4) 在龟裂动态发育过程中，土体厚度相同的条件下，如果界面粗糙度越大，裂隙交点个数、裂隙总长度、裂隙条数发育的越快，而裂隙平均宽度发育的越慢，且该现象随土体厚度减小越发明显。

(5) 在相同土体厚度条件下，界面粗糙度越大，土块个数越多，土块平均面积越小；随着土体厚度的增加，界面粗糙度对土块个数的影响减小，而对土块平均面积的影响增加；在相同界面粗糙度条件下，随着土体厚度增加，土块个数减少，土块平均面积增大。

(6) 在相同厚度条件下，随着界面粗糙度的增加，裂隙长度和宽度的分布范围有减小趋势，土体发育短裂隙和细裂隙的概率增加。在相同界面粗糙度条件下，随着试样厚度的增加，土体发育长裂隙和宽裂隙的概率增加。

(7) 土体厚度和界面粗糙度对龟裂发育过程的影响具有耦合作用关系。

参考文献：

- [1] 龚壁卫, 程展林, 胡波, 等. 膨胀土裂隙的工程特性研究[J]. 岩土力学, 2014(7): 1825–1830. (GONG Bi-wei, CHENG Zhan-lin, HU Bo, et al. Research on engineering properties of fissures in expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(7): 1825–1830. (in Chinese))
- [2] 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.
- [3] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 201–272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 201–272. (in Chinese))
- [4] MSORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**(2): 263–277.
- [5] 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))
- [6] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(7): 1065–1073. (KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, GUO Ai-guo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(7): 1065–1073. (in Chinese))
- [7] MILLER C J, HONG M, YESILLER N. Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, **34**(3): 677–686.
- [8] MILLER C J. Field investigation of clay liner movement[J]. Hazardous Waste & Hazardous Materials, 1988, **5**(3): 231–238.
- [9] STOLTE J, RITSEMA C J, ROO A P J D. Effects of crust and cracks on simulated catchment discharge and soil loss[J]. Journal of Hydrology, 1997, **195**(1/2/3/4): 279–290.
- [10] TOWNER G D. The mechanics of cracking of drying clay[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1987, **36**(2): 115–124.
- [11] LAKSHMIKANTHAM R, PRATPERE C, LEDESMA ALBERTO. Experimental evidence of size effect in soil cracking[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **49**(3): 264–284.
- [12] MITCHELL J K, SOGA K, MITCHELL J K, et al. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 1976.
- [13] TOLLENAAR R N, PAASSEN L A V, JOMMI C. Observations on the Desiccation and Cracking of Clay Layers[J]. Engineering Geology, 2017.
- [14] TANG Chao-Sheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. Engineering Geology, 2008, **101**(3/4): 204–217.
- [15] TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG A M, et al. Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils[J]. Engineering Geology, 2010, **114**(3/4): 261–266.
- [16] TANG Chao-sheng. Experimental investigation on evaporation process of water in soil during drying[J]. Journal

- of Engineering Geology, 2011.
- [17] LIU Chun, TANG Chao-Sheng, SHI Bin, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. Computers & Geosciences, 2013, **57**(4): 77 – 80.
- [18] WANG Jun-jie, ZHU Jun-gao, CHIU C F, et al. Experimental study on fracture toughness and tensile strength of a clay[J]. Engineering Geology, 2007, **94**(1): 65 – 75.
- [19] 易顺民, 黎志恒. 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. (YI Shun-min, LI Zhi-heng. The fractal characteristics of fractures in expansion soil and its significance[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(3): 294 – 298. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] 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))
- [22] TANG Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer[J]. Applied Clay Science, 2011, **52**(1/2): 69 – 77.
- [23] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: Wiley, 1993.
- [24] BRONSWIJK J J B. Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils[J]. Journal of Hydrology, 1988, **97**(3): 199 – 212.
- [25] 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))
- [26] HILLEL D. Introduction to soil physics[J]. Introduction to Soil Physics, 2011: 321 – 357.
- [27] GROISMAN A, KAPLAN E. An experimental study of cracking induced by desiccation[J]. Epl, 2007, **25**(6): 415.

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达咨询有限公司
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 南瑞集团水利水电技术分公司