

DOI: 10.11779/CJGE201906023

土体干缩裂隙发育方向及演化特征的层间摩擦效应研究

曾 浩, 唐朝生*, 林 鑑, 徐金鉴, 刘俊东, 荣德政, 王东伟, 施 磐

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 自然界中的土体通常成层分布, 在干旱条件下, 表层土体的干缩开裂过程极易受层间接触条件的制约。为了探究土层间摩擦效应对土体干缩裂隙发育方向及其演化特征的影响, 开展了一系列室内干燥试验。试验共配置了3组初始饱和的泥浆样, 在30℃的室温条件下干燥失水, 通过在试样底部铺设不同粗糙度的砂纸来模拟不同土层间的摩擦效应。试验过程中对试样表面及侧面进行定时拍照, 从不同角度记录了裂隙发育全过程, 通过分析, 获得了一些新发现: ①干缩裂隙不仅能从土体表面向下发育, 而且还可能率先从土体底部向上发育, 这不同于以往的习惯性认识; ②初始裂隙的发育位置受土质条件及基底摩擦条件的共同制约, 对于非均质性比较严重或者表面存在明显“杂点”的土体而言, 裂隙往往首先从表面“杂点”处产生并向下发育, 而对均质性较好的土体而言, 在基底摩擦效应的影响下裂隙可以率先从土体底部生成并逐渐向上发育, 且土体底部的裂隙发育程度甚至会高于表面的裂隙发育程度; ③底部生成的裂隙以斜向上发育居多, 这可能与裂隙发育过程中受到的剪切应力作用有关; ④干燥过程中, 土体呈向心收缩, 存在明显的收缩核现象; ⑤基底摩擦效应能改变土体干缩开裂过程中内部应力场的演化, 从而对土体的横向和纵向收缩应变及剖面含水率的空间分布产生影响, 如基底摩擦越大, 土体横向收缩应变越小, 而纵向收缩应变越大。

关键词: 干缩开裂; 摩擦效应; 裂隙发育方向; 收缩应变; 剖面含水率; 收缩核

中图分类号: TU445.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)06-1172-09

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@smail.nju.edu.cn。

Interfacial friction dependence of propagation direction and evolution characteristics of soil desiccation cracks

ZENG Hao, TANG Chao-sheng, LIN Luan, XU Jin-jian, LIU Jun-dong, RONG De-zheng, WANG Dong-wei, SHI Bin
(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: As the soils in nature are distributed in layers, the desiccation cracking process of the top soil is easily constrained by the contact conditions between the soil layers under drought conditions. A series of laboratory desiccation tests are therefore conducted to investigate the influences of interfacial frictional effect between soil layers on the developing direction and evolution characteristics of soil desiccation cracking. In the tests, three slurry samples with the initial saturation are prepared and dried under a constant room temperature of 30℃. Different interfacial friction conditions are designed at the bottom of the samples to simulate the frictional effect between soil layers in nature. During drying, photos of the surface and side of the samples at regular intervals are taken to record the development process of soil cracks from different angles. Some new discoveries show: (1) The soil desiccation cracks can develop from the surface downwards and may be firstly generated from the bottom of the soil and gradually develop upwards, which is different from the previous habitual understanding; (2) During the drying process, the initial development position and development degree of cracks are constrained by both the soil properties and the substrate friction conditions. For the soils with severe inhomogeneous or obvious flaws on the surface, the cracks are generated and develop from the surface flaws of soils, while for the relatively homogeneous soils, the cracks can be firstly generated from the bottom of the soil and gradually develop upwards under the influences of the substrate friction. Moreover, after the drying is completed, the development degree of the bottom cracks of the soils is even higher than that of the surface cracks. (3) The bottom cracks mostly propagate in inclined direction, and they are probably related to the developed shear stress. (4) During drying, the soil shrinks concentrically, and noticeable shrinkage nucleus at

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资助项目(2015-2020)

收稿日期: 2018-04-25

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

the bottom of soil appears at the bottom of the soils. (5) The substrate friction effect can change the internal stress field during the desiccation cracking process of soils, and therefore affects the transverse and longitudinal strains and profile water content distribution of the soils. For example, the larger the substrate frictional degree, the smaller the transverse strain of soils, but the greater the longitudinal strain of soils.

Key words: desiccation cracking; frictional effect; crack development direction; shrinkage strain; profile water content; shrinkage nucleus

0 引言

在干旱气候条件下, 土体干缩开裂是一种常见的自然现象, 也是近些年来岩土/地质工程等领域一直关注的热点问题。这主要是因为裂隙的产生使得土体完整性遭到破坏, 极大地弱化了土体结构, 导致土体强度和稳定性降低^[1-6]。此外, 土体中的裂隙能为水分迁移提供快速通道, 加速水分在土体内的渗流。在降雨条件下, 雨水能通过裂隙快速入渗到土体内部, 导致力学性质劣化, 从而诱发滑坡和泥石流等灾害^[7-10]。受全球气候变化的影响, 未来干旱气候的发生频率和影响范围有增加趋势, 土体的干缩开裂问题可能越发严重。深入掌握裂隙的发育过程及现象背后的机理, 对提升工程界应对气候变化的能力和指导防灾减灾具有重要意义。

然而, 目前国内外学者对土体干缩开裂的研究还存在很多不足。比如研究角度几乎都停留在对土体表面裂隙发育及演化过程的分析上, 且主要局限在表面裂隙发育的影响因素及表面裂隙网络几何形态学特征描述等方面。如探究温度、黏粒含量、试样尺寸和试验条件等相关因素对表面裂隙发育程度的影响^[11-17]; 将分形维数、数字图像处理技术和统计学方法等应用于表征裂隙网络的几何形态^[11-12, 18-24]。但必须指出的是, 土体裂隙发育及演化过程存在于三维空间中, 如果将研究角度仅仅停留在二维表面上, 必然会在很大程度上制约人们对土体干缩裂隙发育及演化机理的认知。

此外, 目前学界普遍认为, 干燥条件下土体收缩变形受到限制是导致开裂的主要原因之一^[14-15, 25-30]。而在自然界中, 对土体干缩变形的限制主要来自于土体的边界条件, 这是因为自然界中的土体在形成过程中存在成层分布特征, 不同土层的物理性质往往存在较大的差异, 干燥过程中上下土层间会因为收缩变形程度不协调而产生相对位移现象。由于土层界面并不完全光滑, 存在一定的摩擦效应, 通常会对土体收缩变形产生限制作用, 进而影响土体干缩裂隙的发育过

程。过去国内外部分学者围绕该问题开展了一些探索性研究, 发现界面粗糙度越大, 土体表面裂隙发育程度越高, 且基底摩擦的存在能使薄层土体快速断裂^[31-33]。然而, 以往的研究都是基于土体表面的裂隙发育现象来探讨层间摩擦效应的影响, 忽视了土体内部裂隙的发育情况, 尤其是有关土层界面上是否会发育裂隙? 如果发育裂隙, 裂隙又会如何演化? 存在什么规律? 这些问题尚未在国内外文献中见到报道。

为了进一步阐明土体干缩开裂的层间摩擦效应, 尤其是不同界面接触条件下干缩裂隙的发育方向及演化特征, 本文有针对性地模拟了多种土层界面接触条件, 开展了一系列室内干燥试验, 对观测到的一些试验现象及其机理进行了探讨, 相关成果对进一步理解自然界中土体的干缩开裂问题具有参考意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用土样为南京地区的下蜀土, 呈褐黄色, 取土深度约为 0.5~1.5 m, 其基本物理性质如表 1 所示。

1.2 试样制备

土样取回后经过风干粉碎, 过 2 mm 筛。为了使试样均匀, 首先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 72 h。待泥浆沉积稳定后, 抽去表面清液, 测得此时含水率为 67%, 最后将泥浆倒入特制的试验容器中进行干燥。试验所用容器规格为长 50 cm、宽 10 cm 以及高 30 cm 的特制有机玻璃盒。为了便于后期利用相机清晰地记录侧面裂隙发育过程, 有机玻璃盒的一面侧壁板设计为可拆卸模式(图 1)。需要说明的是, 在倒入泥浆前应对容器内壁涂抹凡士林使其光滑, 以尽量消除内壁摩擦作用对土样收缩变形的影响。

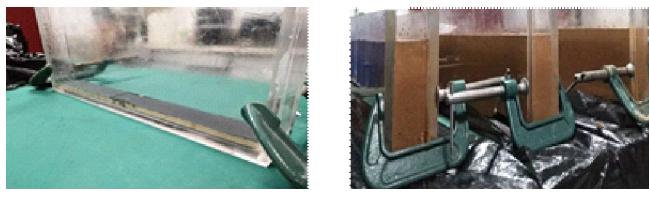
1.3 试验方法

为了探究土层间摩擦效应对土体干缩裂隙的影

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 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	黏粒含量($d < 0.005 \mu m$)/%
2.73	34.5	19.5	18	16.2	1.70	22



(a) 特制有机玻璃容器

(b) 泥浆试样

图 1 试样制备照片

Fig. 1 Photos of sample preparation

响, 本次试验共制备了 3 组初始饱和的泥浆样 (S1, S2 和 S3), 分别选用了 80 目 (对应砂粒径为 0.18 mm)、120 目 (对应砂粒径为 0.12 mm) 和 240 目 (对应砂粒径为 0.063 mm) 3 种规格的砂纸铺设在容器底面来模拟不同的界面接触条件, 其中目数越小的砂纸对应粗糙度越大, 理论上在土体收缩变形过程中所能产生的摩擦效应也越强。每组土样初始厚度均为 13.5 cm, 并在同等条件下制备了 3 个平行样, 相关参数如表 2 所示。

表 2 各组试样的参数

Table 2 Parameters of samples

试样 编号	底面粗糙 条件	砂纸中砂颗粒粒 径/mm	试样初始厚 度/cm
S1	80 目砂纸	0.18	13.5
S2	120 目砂纸	0.12	13.5
S3	240 目砂纸	0.063	13.5

将 3 组试样置于恒定 30℃ 的空调房间内进行干燥, 待试样蒸发一段时间, 土体达到一定硬度后, 卸下有机玻璃盒的侧板, 定时对试样表面及侧面进行拍照, 记录裂隙的形成及发育过程。在干燥结束后, 测定所有试样的最终厚度, 计算纵向收缩应变 (厚度减小量与初始厚度的比值百分数)。需要指出的是, 由于土体的收缩变形存在空间差异性, 干燥结束后土体厚度并不均一, 需要测量多个点计算平均值, 以减小误差。此外, 试验结束后在不同深度处取样, 利用烘干法测定各组试样的剖面含水率分布情况。

2 试验结果

2.1 干缩裂隙发育过程

在试验过程中, 通过对各组试样定期拍照, 记录了其表面及侧面裂隙发育的动态过程。考虑到各组平行样展示了相似的试验现象, 下文将选取典型试样为代表进行分析。以试样 S1 和 S2 为例, 图 2 给出了试样 S1 第一条裂隙 C₁₁ 的整个发育过程。从图中不难看出, 由于试样土质无法做到绝对均一, 以及容器侧壁涂抹的凡士林不够均匀, 致使试样表面容易形成“杂点” (图 2 (a))。裂隙 C₁₁ 首先在表面“杂点”处生

成, 并在裂隙尖端的引导下不断横向延伸, 直至横穿整个土体表面 (图 2 (b))。随着干燥的持续进行, 下层土体水分不断减小, 裂隙 C₁₁ 逐渐向下发育, 并最终贯穿整个土体剖面 (图 2 (c))。当裂隙 C₁₁ 贯穿整个土体剖面以后, 一方面由于裂隙两侧土块收缩变形失去了侧向约束, 另一方面由于裂隙形成后增加了试样水/气接触面积, 加速了土体局部失水收缩, 进而导致裂隙 C₁₁ 两侧土块不断朝相反方向收缩, 裂隙宽度不断扩展 (图 2 (d))。对于上述反映的土体表面裂隙首先从“杂点”处产生的这一试验现象, 近年来国内外学者通过试验也得出了类似的结论^[20, 34-36]。

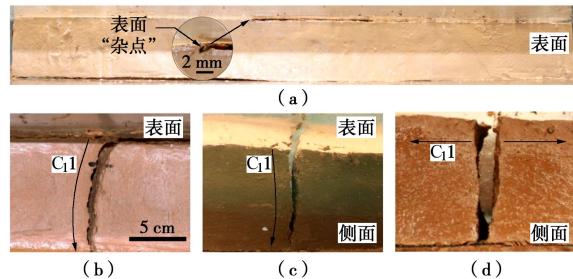


图 2 试样 S1 第一条裂隙从表面“杂点”处生成并发育

Fig. 2 First crack of sample S1 generated and developed from surface flaws

当 C₁₁ 裂隙贯穿整个剖面后 (图 3 (a)), 随着干燥的持续, 从侧面观察到试样 S1 的底部开始产生新的裂隙 C₁₂, 并从底部向上发育 (图 3 (b))。与土体表面近似向下垂直发育的裂隙不同, 从底面发育的裂隙的初始方向与基底垂直方向存在一定的角度, 即呈斜向上生长 (图 3 (b) ~ (e))。此外, 在干燥结束后, 并非每一条从底部产生的裂隙都能贯穿整个土体剖面, 部分裂隙可能在土层中间位置终止发育 (C₁₂), 亦或与其他裂隙相交 (C₁₄)。对于此类裂隙, 是无法从土体表面上观察到的。这一现象说明, 土体的干缩裂隙并不完全像以往文献中所强调的那样始终从表面向下发育, 在特定条件下也可以从底部向上发育。此外, 笔者在试样底部铺设不同粒径的砂土模拟真实的土层条件时, 也发现了类似现象, 即部分裂隙率先从底部生成并向上发育 (受篇幅限制, 相关试验照片未在本文展示)。

为了更好地掌握土体干缩裂隙的发育方向和演化规律, 下面以试样 S2 为例做进一步说明。图 4 所呈现的是试样 S2 在干燥过程中不同时刻侧面的裂隙图像。从图中可以清晰地看出, 试样 S2 在干燥过程中的第一条裂隙 C₂₁ 是从土体底部生成并斜向上发育, 最终贯穿整个土体剖面 (图 4 (a), (b))。随着干燥的持续, 裂隙 C₂₂, C₂₃, C₂₄ 分别从试样表面和底部产生并逐渐纵向扩展 (图 4 (c), (d))。裂隙 C₂₂ 的

产生与试样 S1 中的第一条裂隙 C₁ 产生原因一致, 也是从表面“杂点”处产生并发育(图 4(c))。此外, 就试样裂隙的整个发育过程来看, 在干燥后期, 新裂隙的产生主要由基底摩擦效应所导致, 且裂隙主要的发育方向及演化特征为由底部产生并逐渐斜向上发育, 最终在土层中部位置发育终止, 如裂隙 C₂6~C₂15(图 4(e))。

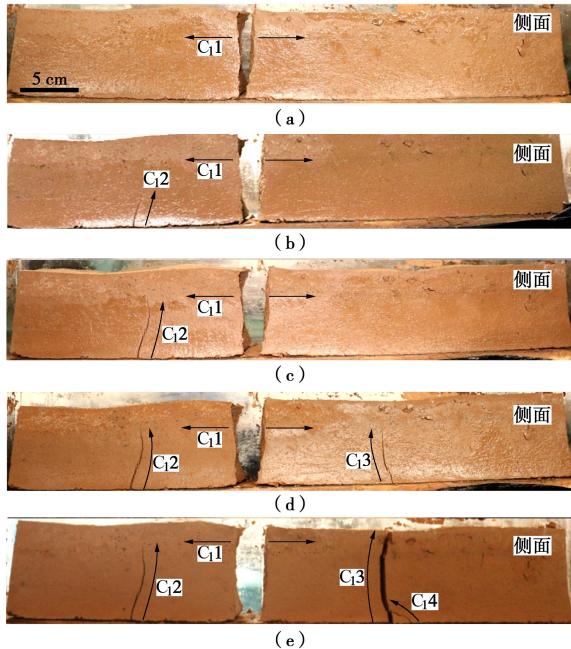


图 3 试样 S1 部分裂隙从底部生成并向上发育

Fig. 3 Partial cracks of sample S1 generated from bottom and their upward development

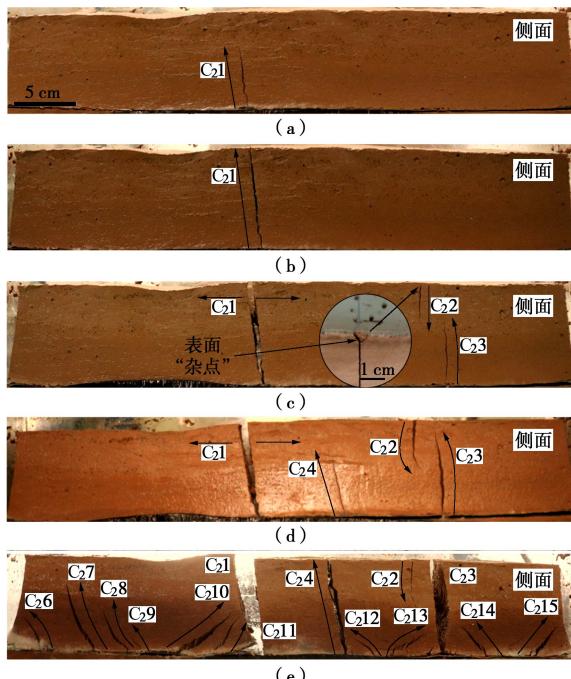


图 4 试样 S2 裂隙发育过程

Fig. 4 Development of cracks of sample S2

2.2 干燥结束后裂隙形态特征

为了比较各组试样在干燥结束后, 表面和底面裂隙发育程度, 本文统计了 3 组试样干燥完全后, 由表面生成并向下发育以及从底部生成并向上发育的裂隙条数。需要指出的是, 为了便于肉眼区别, 本文所统计的裂隙长度都在 1 cm 以上, 且裂隙形态较为连续。图 5 展示了 3 组试样干燥结束后的最终状态, 其中 Cs 表示的是从表面生成并向下发育的裂隙, 而 Cx 表示的是从底边生成并向上发育的裂隙。将统计数据汇总到表 3 中, 不难发现, 各组试样干燥结束后, 由表面率先发育的裂隙均只有 1 条, 这与由底部产生并向上发育的裂隙条数数值上相差很大。如试样 S2, 由底部产生并向上发育的裂隙有 13 条之多(图 5(b))。此外, 图 5(b)、(c) 更加明显地展现出, 从底部生成的大多数裂隙在向上发育过程中, 无法贯穿土体剖面, 并且其发育方向偏离基底垂直方向。值得注意的是, 也存在部分从底部生成的裂隙其发育过程类似与表面生成的裂隙, 即发育方向基本垂直于基底, 如图 5(b) 中的裂隙 Cx11。需要指出的是, 除了在试样底部铺设砂纸模拟相对粗糙的界面条件外, 笔者对底部涂抹凡士林的界面条件也开展了相应的试验研究, 发现由表面向下发育的裂隙也只有 1 条, 但未发现由底面向上发育的裂隙(受篇幅限制, 相关试验照片未在本文展示)。

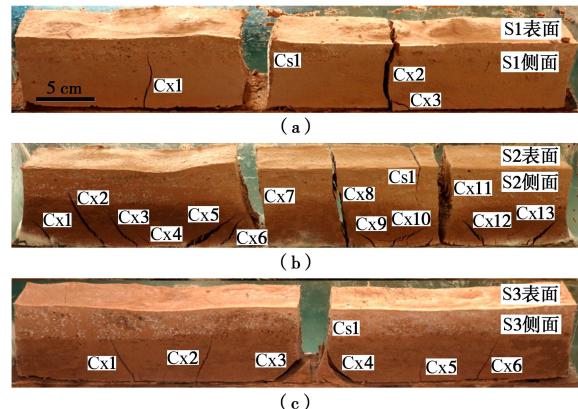


图 5 各组试样干燥结束后的形态特征

Fig. 5 Morphological characteristics of three samples after drying

表 3 各组试样干燥结束后表面与底部裂隙发育程度

Table 3 Development of surface and bottom cracks of three samples after drying

试样编号	从表面向下发育的裂隙条数/条	从底面向上发育的裂隙条数/条
S1	1	3
S2	1	13
S3	1	6

在各组试样干燥完成后, 通过观察试样底部裂隙

几何形态(图 6), 可清晰发现, 土体收缩过程中呈现向心收缩现象, 并且在基底摩擦效应的影响下, 土体底部存在明显的收缩核, 即土体底部裂隙围绕着某一近似圆形小区域而展开, 裂隙形态也呈现圆弧状。该现象与唐朝生等^[36]通过对土体表面裂隙进行 PIV(粒子图像测速技术)动态演化分析所得出的现象类似, 他们发现土样在干缩过程中表面也存在收缩核现象。此外, 图 6 还反映出了两个收缩核之间必存在一条或多条纵向裂隙, 如试样 S1 中的裂隙 Cx1 以及试样 S3 中的裂隙 Cx5(图 6(a), (c))。

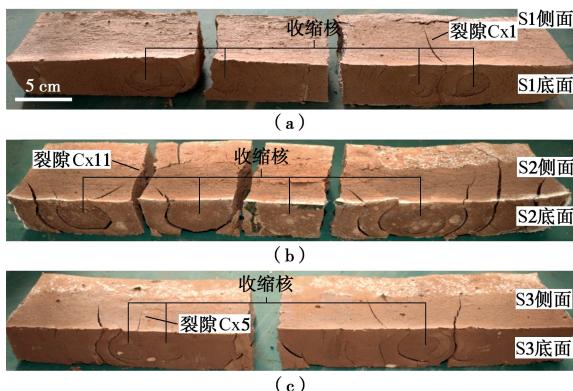


图 6 收缩核现象

Fig. 6 Shrinkage nucleus phenomena

2.3 蒸发与收缩特性

干燥过程中, 土体裂隙产生的基本过程可划分为: 水分蒸发—体积收缩—裂隙形成。因此在探究土体干缩裂隙演化的过程中, 有必要对其蒸发以及收缩特性进行定量描述。因此本文测定了各组试样在干燥结束后的表面横向收缩应变和剖面方向上的纵向收缩应变, 并通过对不同深度处的土样测定其对应的含水率, 从而获得各组试样剖面含水率的分布特征, 相关数据如表 4 和图 7 所示。表 4 的数据表明, 基底摩擦效应对试样的干缩变形变具有较大的影响。基底摩擦效应越大, 对应试样的横向收缩应变越小, 而纵向收缩应变越大。如对比试样 S1 与 S2, 其中 S1 基底粗糙程度大于 S2, 在干燥结束后, 试样 S1 的横向收缩变形为 14.91%, 比试样 S2 小 0.38%, 而纵向收缩应变为 51.85%, 比试样 S2 大 4.44%。对于底面涂抹凡士林的试样, 测得横向收缩应变为 19.14%, 比表 4 中的 3 组试样都要大。值得注意的是, 相比纵向收缩应变的差异, 各组试样间表面横向收缩应变相差不大。

表 4 干燥结束后各组试样的横向和纵向收缩应变值

Table 4 Transverse and longitudinal strain values of three samples after drying

试样编号	横向收缩应变/%	纵向收缩应变/%
S1	14.91	51.85
S2	15.29	47.41
S3	16.12	45.19

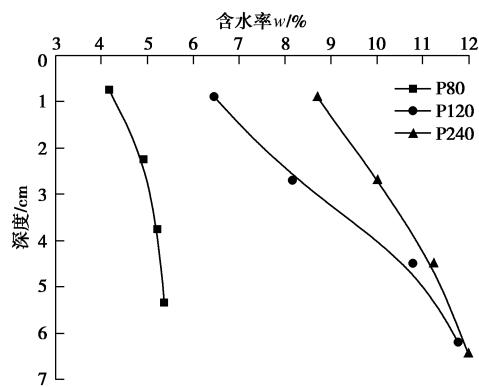


图 7 各组试样干燥结束后的剖面含水率分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of profile water content of three samples after drying

此外, 从各组试样剖面含水率分布曲线可以看出(图 7), 基底摩擦效应越大的试样, 其剖面含水率总体较小, 并且随着深度的增加, 对应区域的含水率也逐渐增加。此外, 由曲线的斜率可知, 含水率的变化幅度也随着深度的增加而逐渐变缓。如干燥结束后, 试样 S1 在 0.75~2.25 cm 深度区间内含水率变化幅度约为 0.7%, 而在 2.25~3.75 cm 深度区间内含水率变化幅度大约只有 0.3%。关于剖面含水率沿深度方向的变化趋势与 Tollenaar 等^[37]通过试验所得出的现象基本一致。

3 讨 论

3.1 干缩裂隙自上而下的发育过程

在干燥过程中, 随着土体内水分不断蒸发, 土颗粒在基质吸力的作用下逐渐相互靠拢^[26, 38], 土体在宏观上发生横向和纵向收缩变形^[34, 39]。由于水分蒸发首先从土体表面开始, 因此表面土体最先发生收缩变形。对于土质不均匀或表面存在“杂点”的土体而言, 在收缩变形过程中由基质吸力产生的张拉应力容易在“杂点”处发生应力集中^[34~36], 当所集聚的张拉应力超过土体自身的抗拉强度时, 裂隙在表面“杂点”处随之产生^[13, 36], 如图 8 给出了土体干缩裂隙自上而下发育过程中受力状态示意图。虽然裂隙形成后局部应变能释放, 但在裂隙尖端处由于裂隙两侧收缩变形方向相反, 使得该处始终为应力集中位置(图 8), 因此裂隙在“杂点”处形成后, 在裂隙尖端的指引下沿内部张拉应力最大的土体表面横向传播。随着干燥的持续进行, 下层土体受到的张拉应力随含水率的减小而逐渐增加, 从而驱使裂隙在尖端的“牵引”下不断向下发育^[26, 36]。由于本次试验对象为经搅拌后结构相对均匀的泥浆样, 从而干燥过程中裂隙尖端周围的应力场分布较为均匀, 由此表面裂隙生成后可以近似垂直

地向下发育。

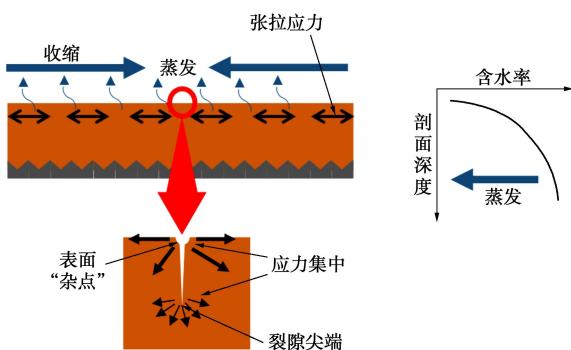


图 8 干燥过程中土体表面开裂时的受力状态示意图

Fig. 8 Mechanical state of crack initiation and propagation on soil surface during drying

3.2 层间摩擦效应对干缩裂隙发育的影响

如前所述, 目前学界普遍认为干缩裂隙的产生主要是由张拉应力集中所引起的^[14-15, 25-30, 34-35], 根本原因在于干燥过程中土体横向收缩变形受到限制^[14]。由此可见, 基底摩擦效应的存在正是能够限制干燥过程中上覆土体的横向收缩变形(表4数据也可以证明该观点), 进而对其干缩裂隙的发育产生影响。图9给出了, 在基底摩擦效应影响下, 干燥过程中土体底部产生裂隙以及发育时的受力状态示意图。

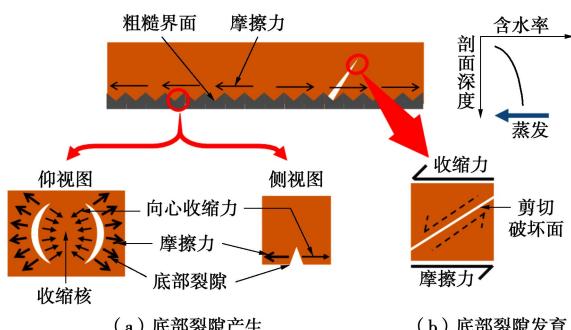


图 9 干燥过程中土体底面开裂时的受力状态示意图

Fig. 9 Mechanical state of crack initiation and propagation on soil substrate during drying

结合图6观察到的现象, 即干燥结束后底部收缩核周围呈现明显的环状裂隙, 可以说明: 当界面上土体发生收缩变形时, 基底摩擦力会对收缩变形产生限制作用, 并在试样底面形成张拉应力, 当张拉应力集聚并最终超过试样的抗拉强度时, 底面便会产生裂隙, 如图9(a)。与表面产生的裂隙发育过程类似的是, 随着蒸发的持续, 在底部产生的裂隙也在其尖端的牵引下不断向上发育(图4(a), (b))。然而, 与干燥过程中完全由自身张拉应力集聚所导致的土体裂隙不同点在于, 基底摩擦力虽然是由土体自身收缩所引起, 但对上覆土体而言总归是一种外力作用, 并且直接作用面始终在试样底部。当底部形成的裂隙向上发育时,

由于裂隙尖端附近土体内部的收缩力与基底摩擦力不在同一水平面上, 且方向可能相反, 从而导致土体受到剪切作用(图9(b))。根据材料力学原理, 剪切作用形成的破坏面与剪切应力方向必成一角度, 其角度大小与所受剪切应力大小有关。因此, 笔者推断, 由底部产生的裂隙大多呈斜向上发育现象(图4)很可能与试样中的剪切应力作用有关, 但该观点有待进一步论证。

上述现象也有例外的情况, 如图5(b)中的裂隙Cx11和图5(c)中的裂隙Cx5, 其发育方向都是垂直于土体底面。对于这一现象的形成机理, 需要根据界面上土体的收缩特点来加以说明。同样是结合图6观察到的收缩核现象, 发现从底部近似垂直向上发育的裂隙主要存在于两个收缩核的中间位置。由此可以推断, 上述裂隙发育起点处的土体实际上受到了方向相反且分别指向两侧收缩核核心的拉应力, 因此该类从底部垂直向上发育的裂隙也是张拉破坏所导致, 其破坏机制与表面发育的裂隙类似。由以上分析可知, 两个收缩核中间位置产生的裂隙主要受张拉应力的控制, 而围绕某一收缩核产生的斜向裂隙在形成时受张拉应力控制, 但在后期发育过程中则可能受剪切应力控制。为了验证上述观点, 以及阐明收缩核的形成原因和影响因素, 后续需要围绕该课题开展更精细的研究。

需要指出的是, 摩擦力的产生需要接触物体之间存在相对运动趋势, 所以基底摩擦力的大小与土体收缩变形趋势有关。由于干燥过程中水分蒸发在土体剖面上存在梯度变化^[19, 26], 蒸发作用需要经过较长时间才能对界面上的土体含水率产生影响, 使其发生收缩变形, 进而激发摩擦效应。而在此之前, 上层土体已经经历了较长时间的蒸发, 土吸力相对较高, 土体自身抗拉强度也与初始饱和状态时相比有了很大的提高^[13], 这使得上层土体在干燥后期很难产生新的裂隙, 此时土体裂隙的生成与发育主要由基底摩擦效应所主导, 而且大多数由基底产生的裂隙在向上发育的过程中无法穿透上层土体, 在剖面中间位置处即停止生长(图3~5)。此外, 摩擦力对界面上土体的收缩限制作用覆盖了整个接触面, 只要界面上某处土体一旦发生收缩, 摩擦力的限制作用就会随之产生。这使得在基底摩擦效应的影响下, 界面上土体很容易发生开裂。因此干燥结束后土体底部裂隙发育程度高于表面(表3)。并且, 对于较为均质的土体而言, 即使干燥过程中表面未产生裂隙, 但随着干燥的持续, 裂隙也会在基底摩擦的影响下从底部产生(图4(a))。而对于底面涂抹了凡士林的试样, 由于基底相对光滑, 摩擦力非常小, 不足以形成能使试样发生破坏的张拉应力, 因此试验中

未在底部发育裂隙。

3.3 层间摩擦效应对土体内部应力场和水分场演化的影响

对于表 4 数据所反映的现象, 即土体收缩变形与基底摩擦效应存在关联, 主要是因为土颗粒横向收缩受到基底摩擦的限制, 使得干燥过程中由土体内部张拉应力所产生的应变能主要通过颗粒间相对自由的纵向位移来释放, 如图 10 给出了在基底摩擦效应影响下土体颗粒间应力场分布的示意图。由此可见, 基底摩擦效应能导致土体内张拉应力场的演化形式发生改变, 从而对土体收缩变形程度产生影响。因此, 在干燥过程中, 基底摩擦效应越大, 土体横向收缩受到的限制越大, 则纵向收缩变形越发明显。然而, 由于本次试验过程中试样相对较厚, 导致界面上的摩擦效应对土体表面横向收缩的影响较弱, 因此表 4 中不同界面粗糙度条件下, 土体表面横向收缩变形的数据差距不大。

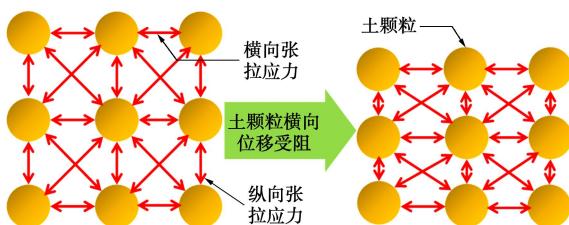


图 10 在基底摩擦效应影响下土体应力场的分布

Fig. 10 Distribution of stress field of soil impacted by substrate friction effect

值得注意的是, 土体纵向收缩应变实质上为厚度的变化。土体厚度的大小对干燥过程中水分场空间分布特征有重要影响^[19, 23]。越厚的土体, 蒸发过程中水分子逸出土体内的迁移路径越长, 并且对存在于下层土体的水分子而言, 在外逸过程中需要克服由上层土体吸力所产生的阻力, 水分子离土体表面越远, 整个外逸过程需克服的阻力越大, 水分子越难向上层迁移。因此沿剖面向下, 土体含水率也大, 并且变化幅度也逐渐减小。结合前文分析过的干燥过程中基底摩擦效应与土体纵向收缩应变的关系, 可以推出基底摩擦效应越大, 土体在干燥过程中纵向收缩变形越大, 即土体厚度变化越大, 使得土体内水分越容易向外蒸发, 干燥结束后土体剖面含水率越小(图 7)。此外, 根据上述土体剖面含水率的空间分布规律, 也可以看出干燥过程中下层土体含水率相对较高, 抗拉强度较低, 导致收缩过程中, 在摩擦力的作用下, 下层土体容易产生裂隙。

4 结 论

本文开展了一系列室内干燥试验, 探究了土层间

摩擦效应对土体干缩裂隙发育特征的影响, 得到如下主要结论:

(1) 土体干缩裂隙不仅能在表面产生, 也能在土层底部产生。裂隙初始发育位置受土质条件与基底摩擦条件的共同制约。当土体表面存在“杂点”时, 裂隙优先从表面“杂点”处生成, 否则裂隙有可能在基底摩擦效应作用下率先从底部生成。

(2) 从表面生成的裂隙, 其发育方向几乎垂直向下, 属于典型的张拉破坏, 而从底面产生的裂隙, 大部分都呈斜向发育, 该现象可能与剪切应力作用有关。此外, 许多从底部向上发育的裂隙在干燥结束后未能贯穿整个土体剖面, 而是发育到在土层中间位置处便终止。

(3) 在干燥后期, 基底摩擦效应对土体干缩裂隙发育起主导作用, 新生裂隙绝大部分由基底摩擦效应所引起, 且干燥结束后底部裂隙发育程度远高于表面。

(4) 基底摩擦效应能影响土体在干燥过程中内部应力场与水分场的演化特征。基底摩擦效应越大, 干燥结束后土体横向收缩变形和剖面含水率越小, 而纵向收缩应变越大。此外, 土体剖面含水率沿深度向下不断增加, 但变化幅度逐渐减弱。

(5) 土体干燥收缩过程中具有向心收缩特征, 存在明显的收缩核现象, 且两个收缩核之间必定存在一条或多条裂隙。

需要指出的是, 受沉积环境的影响, 自然界中土层间相互交错, 各土层性质变化多样, 干缩裂隙发育过程非常复杂。本文基于室内试验, 初步探讨了土体干缩开裂的层间摩擦效应。虽然试验过程存在着假设和简化, 但根据研究结果可以确定的是, 土体分层属性对土体干缩裂隙发育方向及演化特征有着极为重要的影响。尤其是本文发现干缩裂隙并非总是从表面向下发育, 很多情况下都是从土层底部向上发育, 且底部的裂隙发育程度甚至高于表面, 更是颠覆了以往的习惯性认识。此外, 由于从底部向上发育的裂隙很大一部分无法贯穿土体剖面, 隐伏于土体内部, 因此, 如果只从表面来研究土体的干缩开裂问题, 则会严重低估土体的裂隙发育程度, 进而导致工程中高估土体的力学性能, 引发潜在的风险。为了进一步明确本文观测到的试验现象, 课题组接下来将开展针对性的原位调查和试验, 以期提供更有价值的成果。

参考文献:

- [1] KODIKARA J, COSTA S. Desiccation cracking in clayey soils: mechanisms and modelling[M]// Multiphysical Testing of Soils and Shales. Berlin: Springer, 2013: 21 – 32.
- [2] HEWITT P J, PHILIP L K. Problems of clay desiccation in

- composite lining systems[J]. *Engineering Geology*, 1999, **53**(2): 107 - 113.
- [3] RAYHANI M H, YANFUL E K, FAKHER A. Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductive[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, **44**(3): 276 - 283.
- [4] NELSON J D, MILLER D J. Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering[M]. New York: John Wiley, 1992.
- [5] AYAD R, KONRAD J M, SOULIÉ M. Desiccation of a sensitive clay: application of the model CRACK[J]. *International Zoo Yearbook*, 1997, **34**(34): 943 - 951.
- [6] LOZADA C, THOREL L, CAICEDO B. Effects of cracks and desiccation on the bearing capacity of soil deposits[J]. *Géotechnique Letters*, 2015, **5**(3): 112 - 117.
- [7] BAKER R. Tensile strength, tension cracks, and stability of slopes[J]. *Soils & Foundations*, 1981, **21**(2): 1 - 19.
- [8] 陈守义. 考虑入渗和蒸发影响的土坡稳定性分析方法[J]. *岩土力学*, 1997(2): 8 - 12. (CHEN Shou-yi. A method of stability analysis taken effects of infiltration and evaporation into consideration for soil slopes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1997(2): 8 - 12. (in Chinese))
- [9] 姚海林, 郑少河, 陈守义. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. *岩土工程学报*, 2001, **23**(5): 606 - 609. (YAO Hai-lin, ZHENG Shao-he, CHEN Shou-yi, et al. Analysis on the slope stability of expansive soils considering cracks and infiltration of rain[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, **23**(5): 606 - 609. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] TANG C S, CUI Y J, 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.
- [12] 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 - 219.
- [13] 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 behavior of expansive soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, **20**(5): 663 - 673. (in Chinese))
- [14] TOWNER G D. The mechanics of cracking of drying clay[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1987, **36**(2): 115 - 124.
- [15] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, **40**(4): 827 - 866.
- [16] LAKSHMIKANTHAM R, PRATPERE C, LEDESMA ALBERTO. Experimental evidence of size effect in soil cracking[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, **49**(3): 264 - 284.
- [17] 袁权, 谢锦宇, 任柯. 边界约束对膨胀土干缩开裂的影响[J]. *工程地质学报*, 2016, **24**(4): 604 - 609. (YUAN Quan, XIE Jin-yu, REN Ke, et al. Effect of boundary constrains on desiccation crack of swelling soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, **24**(4): 604 - 609. (in Chinese))
- [18] 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]. *岩石工程学报*, 1999, **21**(3): 294 - 298. (YI Shun-min, LI Zhi-heng, ZHANG Yan-zhong. The fractal characteristics of fractures in expansion soil and its significance[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, **21**(3): 294 - 298. (in Chinese))
- [19] 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(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(6): 875 - 881. (in Chinese))
- [20] TANG C S, CUI Y J, SHI B, et al. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles[J]. *Geoderma*, 2011, **166**(1): 111 - 118.
- [21] LIU C, TANG C S, SHI B, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. *Computers & Geosciences*, 2013, **57**(4): 77 - 80.
- [22] KODIKARA J, BARBOUR S L, FREDLUND D G. An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, **34**(4): 477 - 488.
- [23] 唐朝生, 施斌, 刘春. 影响黏性土表面干缩裂缝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. Factors affecting the surface cracking in clay due to drying shrinkage[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, **38**(10):

- 1186 – 1193. (in Chinese))
- [24] 唐朝生, 王德银, 施 斌. 土体干缩裂隙网络定量分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 33(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, 33(12): 2298 – 2305. (in Chinese))
- [25] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(2): 263 – 277.
- [26] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [27] 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.
- [28] AMARASIRI A L, COSTA S, KODIKARA J K. Determination of cohesive properties for mode I fracture from compacted clay beams[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(8): 1163 – 1173.
- [29] 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, LIU Chang-li, et al. Effects of boundary friction and layer thickness on desiccation cracking behaviors of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 544 – 553. (in Chinese))
- [30] HUECKEL T. On effective stress concepts and deformation in clays subjected to environmental loads: discussion[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(6): 1120 – 1125.
- [31] 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 the effect of interfacial roughness on desiccation cracking behavior of soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5): 1314 – 1321. (in Chinese))
- [32] SHORLIN K A, DE BRUYN J R, GRAHAM M, et al. Development and geometry of isotropic and directional shrinkage-crack patterns[J]. Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 1999, 61(6 Pt B): 6950.
- [33] GROISMAN A, KAPLAN E. An experimental study of cracking induced by desiccation[J]. Europhysics Letters, 2007, 25(6): 415.
- [34] 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.
- [35] PERON H, LALOUI L, HU L, et al. Desiccation cracking of soils[J]. Chemosphere, 2009, 13(7/8): 869 – 888.
- [36] 唐朝生, 施 斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. 岩土工程学报, 2018: 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: 1415 – 1423. (in Chinese))
- [37] TOLLENAAR R N, PAASSEN L A V, JOMMI C. Observations on the desiccation and cracking of clay layers[J]. Engineering Geology, 2017, 230: 23 – 31.
- [38] LU N, LIKOS W J. Unsaturated soil mechanics[M]. J. Wiley, 2004.
- [39] 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.

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 上海分元土木工程有限公司