

DOI: 10.11779/CJGE202010018

膨胀土裂隙发育的厚度效应试验研究

骆赵刚¹, 汪时机^{*1, 2}, 张继伟¹, 杨振北¹

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 长江师范学院土木建筑工程学院, 重庆 408100)

摘要: 膨胀土的裂隙开展受到许多因素的影响, 包括自身的土体性质, 环境状况, 边界条件、土体尺寸等。厚度对膨胀土等黏性土体的开裂规律具有重要的影响, 为了探究这种重要因素在膨胀土失水收缩开裂过程中的具体影响规律, 试验设置了4个具有不同厚度的大直径圆形泥浆试样。运用图像处理技术, 通过记录试样的裂隙演化过程及质量的变化, 定量分析裂隙面积分形维数、长度分形维数等指标随含水率下降的动态变化关系。试验结果发现: ①厚度对膨胀土失水收缩开裂及裂隙扩展过程有明显影响, 厚度较小的试样其裂隙发育充分, 裂隙密集细长而纹理丰富; 厚度较大的试样裂隙发育单一, 裂隙宽大而边界效应明显, 通过提出厚度和试样直径的比值, 可以初步预估试样的裂隙发育情况; ②裂隙面积分形维数受厚度的影响较小, 而裂隙长度分形维数受厚度的影响较大, 结合两者可以有效地对裂隙形态及分布进行表征, 裂隙最终的长度分形维数一般在1~1.5, 而面积分形维数基本维持在1.6~1.7。此外, 结合土体开裂的张拉破坏理论以及试样的收缩蒸发情况, 对厚度影响下的土体开裂差异进行了理论分析, 进一步探究了裂隙的扩展规律。

关键词: 膨胀土; 厚度效应; 裂隙演化; 分形维数; 定量化

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)10-1922-09

作者简介: 骆赵刚(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事土体裂隙的定量化方面的研究。E-mail: lzg319818@email.swu.edu.cn。

Thickness effect on crack evolution of expansive soil

LUO Zhao-gang¹, WANG Shi-ji^{1, 2}, ZHANG Ji-wei¹, YANG Zhen-bei¹

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. School of Civil and Architectural Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China)

Abstract: The crack development of expansive soil is affected by many factors, including soil properties, environmental conditions, boundary conditions and soil sizes. Crack evolution is greatly influenced by thickness. In order to explore the specific influence rules of the thickness in the whole process of water loss shrinkage and cracking of expansive soil, four large-diameter circular mud samples with different thicknesses are prepared in the experiment. With the help of image processing technology, the dynamic change relationship of the basic crack indexes with the decrease of water content are quantitatively analyzed by recording the evolution process of cracks in the samples. The experimental results show that the process of water loss shrinkage and crack expansion of expansive soil are significantly affected by the thickness. The crack of the sample with smaller thickness is fully developed, and it is long and thin. However, the sample with larger thickness has a single wide crack and is affected by obvious boundary effect. The development of the cracks is preliminarily estimated by the ratio of thickness to diameter. In addition, the morphology and distribution of the cracks can be characterized effectively by combining the fractal dimensions of area and length. The fractal dimension of crack length is generally about 1~1.5, while the surface integral dimension is basically maintained at 1.6~1.7. Moreover, based on the tensile failure theory of soil cracking and the shrinkage and evaporation of the samples, the difference of soil cracking affected by the thickness is theoretically analyzed, and the expansion rules of cracks are further explored.

Key words: expansive soil; thickness effect; crack evolution; fractal dimension; quantification

0 引言

膨胀土是一种特殊的黏性土, 具有明显的裂隙性

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972311, 11572262); 中央高校基本业务费专项资金项目(XDK2018AB003)
收稿日期: 2019-12-09
*通信作者(E-mail: shjwang@swu.edu.cn)

和胀缩特性。在全球范围内, 膨胀土大量存在, 其恶劣的性质严重影响到了工程的建设和自然灾害防治。以膨胀土为代表的黏性土体在自然环境中会干燥开裂, 裂隙能够改变水分的渗流和输送路径, 加快下雨时对土体的侵蚀作用^[1-3]。此外, 膨胀土等黏土的路基或者边坡常常由于裂隙的产生而导致土体强度的迅速下降, 对岩土工程产生不利影响和损失^[4-5]。随着环境岩土的研究越来越多, 垃圾填埋场、核废料的填埋区等往往使用蒙脱石含量非常高的膨润土或强膨胀土作为污染隔离层, 这些胀缩性黏土层的稳定性涉及到地下水的安全^[6-7]。因此, 研究膨胀土的开裂规律具有很重要的意义。

在自然环境中, 部分土体的裂隙产生引起了人们的关注。其中, 膨胀土裂隙性突出^[8-10], 对其开裂及裂隙演化规律的研究是一项基础而必要的工作。易顺民等^[11]根据分形理论, 对膨胀土裂隙的动态演化过程、裂隙面进行了研究, 发现裂隙的分形维数与抗剪强度指标有一定相关性; 曹玲等^[12]探究降雨及蒸发条件下的膨胀土裂隙演化规律, 发现土体初始开裂的基质吸力比较接近于土体的进气值; 唐朝生等^[13]对膨胀土开裂特性进行了试验研究, 提出了吸力和抗拉强度是制约土体龟裂的两个关键力学参数。然而, 土体的开裂是一个比较复杂的过程, 它受到很多因素的影响^[14-17], 比如土体本身的矿物成分、土体结构的密实程度、颗粒的团聚状态、土体的尺寸、以及环境中的其它可变因素。其中, 厚度对土体开裂的影响尤其大。过去的一些研究初步讨论了土体厚度对裂隙开展的一些影响, 但仍缺乏细致且较为系统的研究。

本文将重点研究土体在不同厚度影响下的开裂和裂隙演化特征, 对整个裂隙开展的过程进行含水率测定, 动态观测与记录裂隙的变化。通过试验和分析, 提出裂隙面积分形维数和长度分形维数, 建立两种分形维数与其它部分指标之间的定量关系式, 结合裂隙指标的变化规律以及试样失水收缩的特点, 细致讨论分析了膨胀土体开裂及演化过程, 进一步揭示厚度影响下的膨胀土开裂规律。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验所用膨胀土取自合肥市的滨湖新区, 自由膨胀率为 51%, 属弱膨胀土。土体的液限为 52.6%, 塑限为 26.1%, 缩限为 9.7%。试验土经烘干、碾碎, 通过 2 mm 的土筛分离后, 选取 50 kg 备用。

1.2 试验过程

为了探究厚度变化带来的影响, 试验一共设置 4

个较大尺寸圆形泥浆观测试样。在制样时, 首先将每个试样配制到目标含水率 60%, 此时试样过饱和, 流动性好且黏稠度适中。接着将试样搅拌均匀并连续振捣 5 min 以上, 以保持试样的均匀性和排出气泡。试样制作完成后放置于 30℃ 的恒温环境中进行连续的称重以及拍照记录, 通过试样整体质量的变化计算得到含水率。为了避免对原观测试样的扰动, 试验额外设置 4 组厚度对应的试样, 每组 3 个, 放置于相同的试验环境中, 用于取样测量不同厚度方向上的局部含水率。环境相对湿度在 60%~70% 之间, 弱通风环境, 风速<0.2 m/s。试样水分缓慢地单面蒸发, 到缩限含水率 9.7% 以下时便不再进一步记录, 此时土体收缩异常困难, 裂隙基本不再发育。图 1 为拍照装置简图, 试样有关参数见表 1。

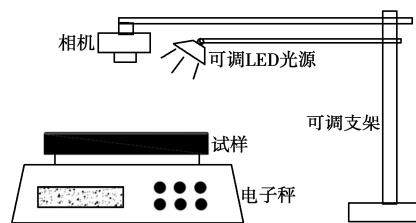


图 1 拍照装置示意简图

Fig. 1 Schematic diagram of camera devices

表 1 试样的主要参数

Table 1 Main parameters of samples

试样 编号	直径 /mm	厚度 /mm	初始含水率 /%	环境温度 /℃
S1	400	10	60	30
S2	400	20	60	30
S3	400	35	60	30
S4	400	50	60	30

1.3 图像处理

为了定量分析试验过程中产生的裂隙, 基于 MATLAB 开发了一系列可以进行图像处理和裂隙统计的程序系统 (TXCL310Lab)。试验图像尺寸为 512 × 512, 裂隙图像首先经过 Photoshop 的预处理, 将试样和背景 (容器及其它环境成分) 分离, 试样与容器的边界产生的干缩裂隙考虑在内, 然后将图像导入系统, 经过灰度化、二值化、膨胀腐蚀等一系列操作后, 裂隙被分离出来。程序计算得到结果为像素值, 可以转换为实际尺寸:

$$A_i = \beta_{i1} A_{i0} \quad , \quad (1)$$

$$L_i = \beta_{i2} L_{i0} \quad , \quad (2)$$

式中, A_{i0} 和 L_{i0} 为试样裂隙的统计像素面积和像素长度, A_i 和 L_i 分别为实际的裂隙面积和裂隙长度, β_{i1} 为面积换算系数, β_{i2} 为长度换算系数, 且 $\beta_{i2} = (\beta_{i1})^{1/2}$, β_{i1} 的定义为

$$\beta_{ii} = A_i / A_{i0} \quad , \quad (3)$$

式中, A_i 为试样实际的初始表面积, 在本试验中均为 125600 mm^2 , 而 A_{i0} 为试样图像中的初始像素面积。通过图像处理与裂隙提取, 可得到裂隙度、裂隙的总长度、裂隙均宽及分形维数等基本指标。其中裂隙度 D_f 定义为

$$D_f = A_i / A_{i1} \quad . \quad (4)$$

1.4 分形理论的应用

裂隙的形态特点可以用分形维数定量表征, 分形早期主要用于描述一些自然现象或几何结构的自相似性。易顺民等^[11]研究发现天然裂隙也存在一定的自相似性特点。然而, 膨胀土等黏性土体的裂隙在一定范围内发育有限, 这与分形几何中具有非常多重复“细节”的经典 Koch 曲线有极大差别^[18]。因此, 对于裂隙分形的研究, 目前定量上主要还是以盒维数等统计的自相似性为主。盒维数的基本计算原理^[11]如下:

$$\ln^{N_i} = A - D_h \ln^{\varepsilon_i} \quad , \quad (5)$$

式中, A 为常数, D_h 为分形维数, ε_i 为数字图像分割的尺寸, N_i 为对应 ε_i 尺寸下具有相似性的块体数量。当改变分块的边长 ε_i , 得到不同的 N_i , 将得到的一系列 \ln^{ε_i} 与 \ln^{N_i} 进行线性拟合, 斜率 D_h 即为分形维数值。本文将在分形维数计算的基础上, 讨论裂隙的面积分形维数和长度分形维数的变化规律, 进而对裂隙的发育过程以及厚度的影响有更进一步的认识。

2 试验结果

2.1 蒸发失水过程

试样放置于室内密闭环境, 试验温度为 30°C , 整个试验过程持续时间较长。试验结束后, 绘制出试样含水率随时间的变化关系曲线(图 2)。试样在含水率 50% 左右时, 土体基本转变为可塑状态, 表面基本无肉眼可见水分, 因此取 50% 含水率作为各试样蒸发失水特征曲线的含水率起点。由图 2 可知, 所有试样在初始阶段($w \approx 50\% \sim 45\%$) 蒸发速率较低, 水分充足且未开裂, 与空气接触面相对稳定, 蒸发失水相对稳定。当含水率降至 45% 以下时, 试样逐渐开裂, 裸露的面积增大, $S1 \sim S4$ 均表现不同程度的失水速度加快, 但曲线斜率在大范围内基本保持稳定。当含水率降至 20% 以下时, 各试样开始逐渐进入蒸发困难阶段。 $S4$ 在含水率 18% 左右时, 其蒸发失水特征曲线斜率开始逐渐降低, 此时试样失水变得困难; 而 $S3$ 、 $S2$ 分别在含水率 15%, 10% 左右时逐渐进入蒸发困难状态; 厚度最小的 $S1$ 无明显蒸发困难。根据数据及曲线变化趋势, 将各试样蒸发失水速率发生明显变化时对应

的含水率确定为蒸发困难状态临界点。将蒸发困难状态临界点进行连线, 可以得到一条临界线, 其斜下部分为蒸发逐渐困难状态。

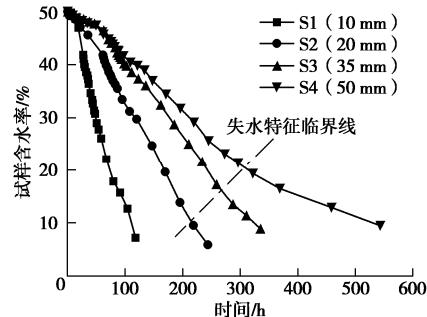


图 2 各试样蒸发失水情况

Fig. 2 Evaporation and water loss of samples

2.2 开裂演化及裂隙形态

试验得到各试样在不同含水率下的裂隙图像, 通过裂隙图像可以直观的对比裂隙发育过程。图 3 为 $S1 \sim S4$ 试样在不同阶段的部分代表图像, 可发现: 随着厚度的变化, 试样裂隙开展形态差异巨大。厚度较小的土体, 在开裂过程中裂隙密集交错, 裂隙总长度较大, 分割的土块及裂隙宽度相对较小; 厚度较大的土体裂隙更加单一化, 甚至明显受边界效应影响(如 $S4$), 裂隙总长度较小, 分割的土块及裂隙宽度相对也较大。由图 3 (a), (e), (i), (m) 可以看到, 试样在开裂初期的裂隙呈细长状, 当含水率小幅下降后(如图 3 (b), (f), (j), (n)) 裂隙发育充分, 但仍比较细长, 表面主要裂隙基本形成; 随着含水率的进一步大幅下降(如图 3 (d), (h), (l) 等), 裂隙开始拓宽, 试样逐渐收缩且被分割为数量不等的土块。通过仔细观察发现, 块体越大, 其周围裂隙相对越宽, 块体越小, 裂隙相对越细; 同一个试样中, 大块体边的数量也较多, 多为 4 边甚至 5 边。

2.3 裂隙的基本指标变化规律

本文对试样在开裂过程中的裂隙图像进行摄取并提取出相应的裂隙指标, 裂隙度、裂隙总长度、裂隙平均宽度等基本指标随含水率变化的关系曲线如图 4 所示。图 4 (a) 为裂隙度随含水率变化的关系曲线, 在试样持续失水的情况下, 裂隙经短暂的酝酿阶段后开始快速发育。在含水率 $40\% \sim 15\%$ 之间, 所有试样的裂隙度变化规律近似线性增长, 当含水率下降到 15% 以下时, 裂隙度的值增加放缓并逐渐趋于稳定。最终在含水率降至 10% 以下时, 试样裂隙发育基本趋稳, 裂隙度值保持在 $0.2 \sim 0.25$ 之间。其中 $S1$ 厚度最小, 最终的裂隙度值为 0.22 , 而 $S4$ 厚度最大, 其最终的裂隙度接近 0.25 。裂隙度本质是一个面积比的概

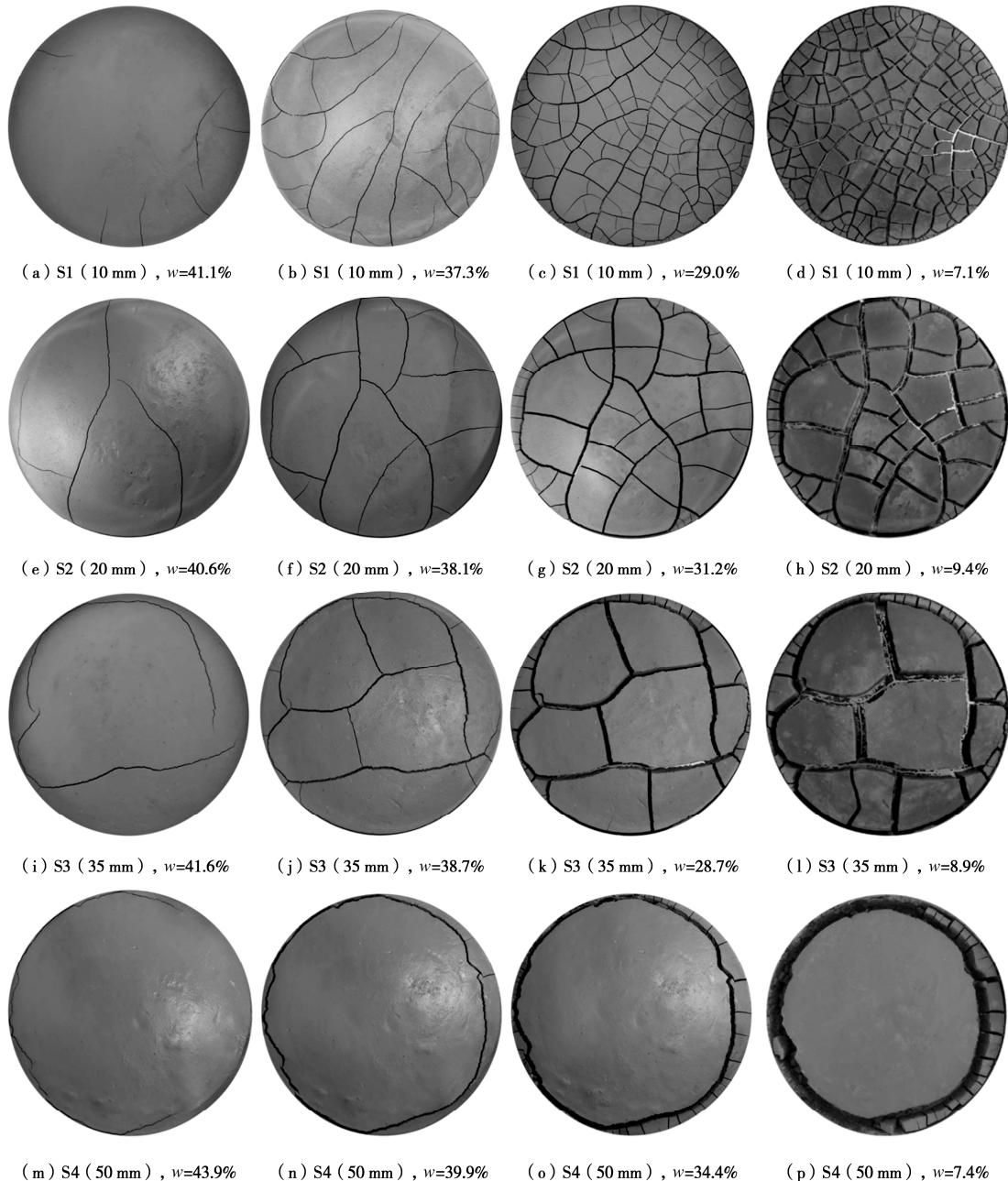


图3 各试样在不同阶段下的裂隙开展情况

Fig. 3 Crack development of samples at different stages

念, 在厚度的影响下表现出的差异相对较小。图4(b)为试样裂隙总长度随含水率变化的关系曲线, S1~S4的裂隙总长度随着含水率的降低大致会经历以下3个阶段: 快速发育阶段、发育减缓阶段、稳定阶段。S1裂隙总长度非常之大, 达到了8323 mm, 而S4仅有1406 mm, S2与S3介于两者之间, 随着厚度降低, 试样裂隙总长度越大。此外, 随着试样厚度的增加, 裂隙的总长度更早(含水率 w 更高)地趋于稳定。裂隙的总长度越长还会使得分割土块数量的增多, 厚度对试样裂隙开展具有明显的影响。

图4(c)为裂隙平均宽度随含水率的变化关系曲

线。裂隙的平均宽度一定程度上反应了裂隙的开张程度, S1~S4试样的裂隙平均宽度在含水率下降过程中逐渐增大, 在达到缩限含水率时有趋稳之势; 随着厚度的增加, 试样裂隙整体更宽, 其中S4试样的平均宽度达到了18.2 mm, 而S1仅3.2 mm, 各试样间具有明显的差异。此外, 试验结束后对试样表面裂隙进行量测得到的最大宽度值, S1~S4分别为7.5, 17, 25.5, 34.8 mm, 最大宽度值约为平均宽度值的一倍, 厚度的差异使得裂隙的宽度具有明显的差别, 厚度的增加对于裂隙拓宽具有促进作用。

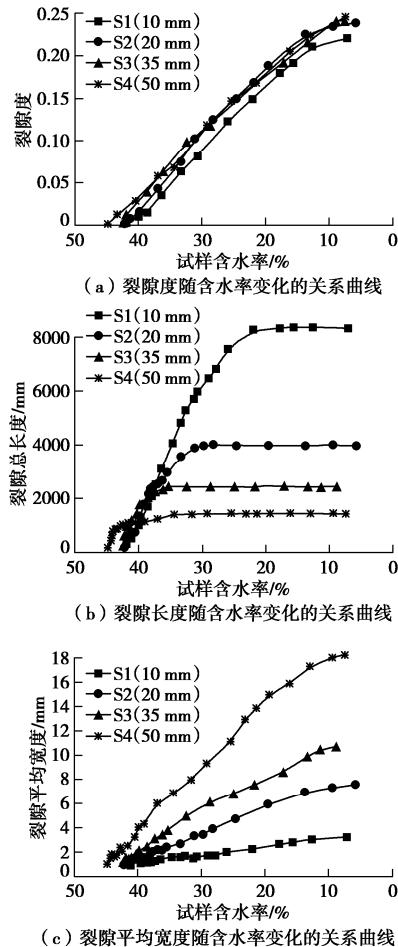


图 4 裂隙指标的变化情况

Fig. 4 Changes in indexes of crack

3 裂隙分形维数

3.1 裂隙面积分形维数的变化规律

将提取出裂隙的图像直接进行分形维数计算, 即得到裂隙面积分形维数, 图 5 (a) 为各试样裂隙面积分形维数随含水率变化的关系曲线。面积分维值随着含水率的降低, 逐渐的增长, 在初期增长较快, 在后期增长逐渐缓慢并趋于稳定。各试样的最终面积分维值在 1.6~1.7, 且厚度的变化对其影响较小, 这与图 4 (a) 裂隙度随含水率的变化规律近似。为了进一步探讨两者之间的关系, 对裂隙度与面积分维值之间的关系进行数据拟合, 得到了如下的经验公式:

$$D_{\text{ha}} = B \lg^{(D_f)} + C \quad (6)$$

式中, D_{ha} 为面积分形维数, D_f 为裂隙度, B , C 为拟合参数。通过分别对 S1~S4 的面积分形维数随裂隙度变化的关系曲线进行拟合, 得到拟合结果见表 2。

拟合参数 B 大致在 0.35~0.42 之间, 参数 C 大致在 1.85~1.98 之间, 随着厚度的增加, 参数 B , C 有降低的趋势。各试样的拟合决定系数 R^2 均在 0.995 以上, 拟合度非常的高, 初步说明了裂隙度 D_f 与面积分

形维数 D_{ha} 之间具有良好的数量关系。

表 2 $D_{\text{ha}}-D_f$ 经验拟合参数Table 2 Empirical fitting parameters of $D_{\text{ha}}-D_f$

编号	B	C	R^2
S1	0.411 ± 0.006	1.977 ± 0.008	0.998
S2	0.388 ± 0.005	1.926 ± 0.006	0.998
S3	0.388 ± 0.005	1.904 ± 0.005	0.999
S4	0.352 ± 0.004	1.854 ± 0.005	0.999

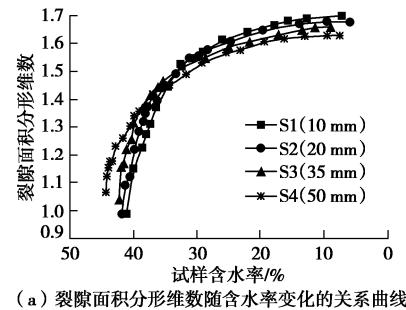


图 5 裂隙分形维数随含水率的变化关系

Fig. 5 Relationship between fractal dimension of cracks and water content

3.2 裂隙长度分形维数的变化规律

裂隙的长度分形维数与面积分形维数有着一定的差别, 长度分形维数是在裂隙提取完成后, 对裂隙进行骨架化操作, 然后对裂隙骨架进行分形维数的统计计算。这种计算的好处在于摒弃了裂隙面积的影响, 只考虑裂隙的长度及平面分布情况, 进而从另一个衡量角度对裂隙形态进行定量分析。图 5 (b) 为 S1~S4 试样的裂隙长度分形维数随含水率变化的关系曲线, 在厚度的影响下, S1 表面裂隙密集交错, 裂隙骨架呈网状结构, 裂隙长度分形维数较高, 达到了 1.52; 而 S4 表面裂隙单一, 仅有一圈主裂隙及少许边角零碎裂隙, 长度分形维数仅有 1.21, 其余两试样介于两者之间。裂隙的长度分形维数在土体干燥过程中的变化规律与图 4 (b) 裂隙长度的发育规律类似, 说明两者在一定程度上均可反应裂隙的形态、分布情况。本文定义一个裂隙长周比 R_{lp} :

$$R_{\text{lp}} = L_i / P_i \quad (7)$$

式中, L_i 为裂隙的总长度, P_i 为圆形试样的初始周长。经过数据的拟合发现 R_{lp} 与裂隙长度分形维数 D_{hl} 之间

有着与式(6)相同的经验关系, 经过数据拟合得到的相关参数以及拟合决定系数值如表3所示。

表3 $D_{hl}-R_{lp}$ 经验拟合参数Table 3 Empirically fitting parameters of $D_{hl}-R_{lp}$

编号	B	C	R^2
S1	0.478 ± 0.008	0.980 ± 0.007	0.995
S2	0.430 ± 0.015	1.012 ± 0.010	0.982
S3	0.459 ± 0.023	0.998 ± 0.014	0.951
S4	0.489 ± 0.030	1.023 ± 0.009	0.936

拟合结果显示, B 参数主要介于 0.43~0.49 之间, 而 C 参数主要介于 0.98~1.03 之间, 拟合决定系数 R^2 均在 0.9 以上, 拟合度比较高, 但是随着厚度的增加, 拟合度出现一定的下降趋势。分析可发现, 裂隙的长周比与裂隙的长度分形维数之间存在一定的数量关系, S1~S4 的裂隙形态及分布尺度范围几乎涵盖了普通土体裂隙的形态及分布, 即从 S1 类似的密布复杂裂隙到 S4 单一的宽裂隙。由此, 上述经验公式可以代表 R_{lp} 与 D_{hl} 之间的经验数量关系。

4 分析与讨论

4.1 失水收缩特点

试样的蒸发失水过程随着厚度的增加, 持续时间显著增加, 其本质是因为各试样蒸发面大小差异甚微, 而土体质量和水的质量却差异明显, 进而导致了在相同的时间内, 含水率下降的幅度差异显著。但是, 蒸发失水过程仍有部分地方值得关注。随着含水率的下降, 试样逐渐开裂, 理论上蒸发面扩大, 临近裂隙面的部分土体水分迁移路径减小, 促进土体失水; 但是由于吸力的增加又使得水分迁移困难, 进而使得长时间蒸发速率维持稳定, 究其原因是其中有“制衡”作用的存在。其次厚度越大的土体(如 S4), 更早的进入蒸发逐渐困难的状态, 而厚度极低的土体(如 S1)基本未进入蒸发困难状态。若是以“制衡”的观点去

解释, 则可认为是厚度较大的土体, 其裂隙总长度相对较短, 分割土块大, 整体而言内部水分迁移路径长, 加之吸力作用, 水分蒸发愈发困难, 裂隙面带来的失水有利作用不足以平衡吸力以及土块尺寸带来的不利作用; 此外, 厚度较小的土体, 其裂隙面多且分割块体相对更小, 水分迁移路径更短, 对失水产生较大的有利作用, 而这种作用掩盖了吸力增强的制约, 导致低厚度试样持续失水。因此, “制衡”的观点可以比较合理形象的解释不同厚度土体的失水差异。

4.2 膨胀土开裂及裂隙演化

膨胀土等黏性土体的开裂过程受到众多因素的影响, 但总体上其可塑后的表面张拉应力与抗拉强度是决定土体初始开裂的关键因素^[19]。张拉破坏是土体初期开裂的主要形式, 当张拉应力 σ_T 大于土体抗拉强度 $[\sigma_T]$ 时, 土体便会拉裂。张拉应力的形成与基质吸力密切相关, 而基质吸力与土颗粒孔径、液体收缩膜半径以及膜上张拉力有如下关系^[20]:

$$u_a - u_w = 2T_s \cos \theta / r = 2T_s / R_s \quad (8)$$

式中, $u_a - u_w$ 为基质吸力, T_s 为液体收缩膜上的张拉力, r 为颗粒孔径, R_s 为液体收缩膜的曲率半径。在土体临近开裂时, 由于表层土与空气接触, 水分蒸发较快, 而中下层土没有直接接触空气, 蒸发时水分要由底部逐渐往上穿过土体后方可散失, 加之水本身具有重力等原因, 因此靠近底部的土体其水分散失越慢, 而表层的土体水分散失越快。这种上下的失水速率差异必然会导致含水率梯度的产生^[21]。

试验通过额外测试 4 组对应厚度试样在相同环境下的底部、中部、表层含水率, 发现试样表层含水率 < 中部含水率 < 底部含水率, 其中试样中部的含水率与试样整体含水率比较接近。在开裂前及开裂初期, 10 mm 厚度试样其表层含水率与底层含水率差异在 3.0% 左右; 而在相同阶段中, 40 mm 厚度试样表层与

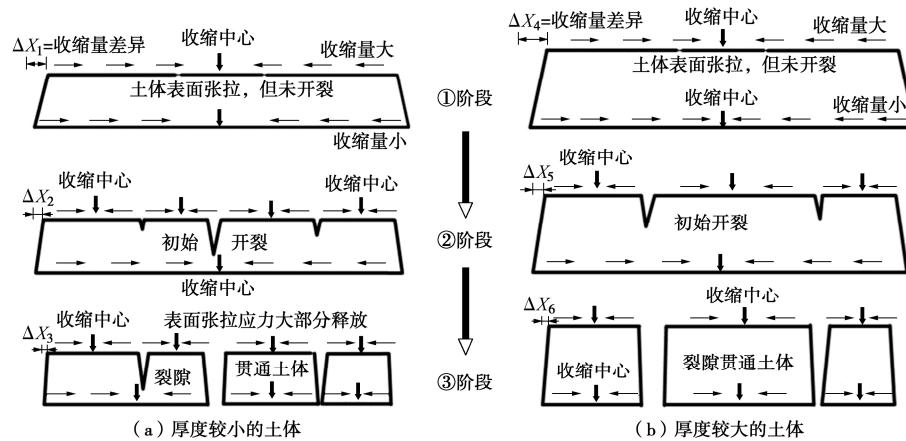


图 6 不同厚度土体的收缩及开裂演化示意图

Fig. 6 Shrinkage and crack evolution of soils with different thicknesses

底部含水率差异约 10.0%，其余两组试样介于以上两者之间，分别约为 4.0%，7.0%。含水率梯度导致收缩量的差异，即表层土体收缩大，下部土体收缩小甚至还未开始收缩。当下部土体还未收缩时，上部土体的失水收缩会受到下部土体的约束，土体表层的张拉应力不断增大（如图 6（a），（b）的第一阶段），当张拉应力超过抗拉强度，土体便会开裂。而下部土体失水亦开始收缩时，会受到底部摩擦约束，这种约束作用会不断向上传递，导致表层土体的收缩受到更大的限制，进而促使土体开裂。

厚度相对较大的土体，含水率梯度相对较大，表层和底部收缩差异越大，有更早（含水率 w 更高）开裂的趋势。在此次试验中，S1~S4 试样的开裂临界含水率分别为 41.9%，42.2%，42.5%，44.8%，随着厚度的增加试样在更高的含水率开裂。当试样开裂后，裂隙尖端的应力集中，在低抗拉强度下不断拓展，裂隙总长度值迅速增大并趋于稳定。不同厚度试样开裂及裂隙演化如图 3, 6 所示。当含水率进一步降低时，裂隙便不再分割土块，仅受土体收缩作用而不断拓宽、拓深，其原因主要有两个：①膨胀土土体抗拉强度的不断上升^[22-23]，抗拉强度 $[\sigma_T] >$ 张拉应力 σ_T ；②裂隙面的产生加速了中下部土体水分蒸发，收缩差异减小，土体表层受裂隙的分割，张拉应力已经基本得到释放。

环境温度与湿度^[24]，以及底部约束的界面摩擦度^[19]等都会一定程度的影响土体的收缩开裂。底部粗糙程度会一定程度的限制下部土体的横向收缩^[19]，本文采用的不锈钢容器底部较为光滑，因此对土体收缩的限制作用微弱。试验严格的控制了其它影响因素，比如环境温度与湿度、通风等，控制土体的干缩行为主要受到厚度的影响。土体的收缩及裂隙演化大致有 3 个阶段（图 6），其收缩中心会不断发生变化，厚度较大的土体其未开裂前的收缩量差异更大（ $\Delta X_4 > \Delta X_1$ ），但随着裂隙演化逐渐进入第二阶段，土体初期的开裂会极大的缓解表面张拉应力，收缩量差异逐渐减小且不同厚度试样差距微小（ $\Delta X_5 \approx \Delta X_2$ ），较小厚度的土体裂隙数量更多，收缩中心也随之变化。当土体逐渐进入第三阶段时，裂隙基本贯通，厚度较大的土体裂隙开口大，但是数量少，而厚度较小土体裂隙开口较小且数量更多。最终裂隙基本缓解了表面张拉应力，裂隙的张开也使得土体上下的收缩量差异甚微，土体垂直与水平方向均发生了一定收缩，土体体积较第一阶段时更小，演化过程趋于完成。因此，厚度差异带来的土体上下部分的收缩差异以及应力释放的不同是影响裂隙开展的主要原因。

试验结果显示，在厚度达到 50 mm 时试样便倾向于受边界效应的影响，主要为一圈边界大裂隙。而厚度为 35 mm 的 S3 出现了中部裂隙，而 10 mm 厚的 S1 试样裂隙密布，经分析可以提出一个尺寸参数作为裂隙发育程度的估计指标，即厚度和试样直径的比值 λ 。当 λ 在 0.05 以下时，可估计裂隙的发育充分，裂隙细长而密集，纹理丰富；当 λ 介于 0.05~0.1 之间时，可估计裂隙发育明显，有贯穿土体的几大主裂隙，裂隙宽度较宽，密集程度较低；当 λ 大于 0.1 时，可预估裂隙发育单一，裂隙宽度较大，边界效应明显，裂隙长度有限且纹理特征不明显。当然，受试样的数量以及试样形状的影响，上述经验推论在后续研究中还需进一步检验和优化。在实际工程中，裂隙开展情况复杂多变，本文研究内容能为膨胀土的裂隙发育控制，相关工程的治理，以及膨胀土坡体的灾害评估与防治等提供一定的参考。

5 结 论

本文对膨胀土受厚度效应影响的开裂及裂隙演化过程进行了试验研究，通过试验及分析得到了以下主要结论：

（1）厚度对裂隙的形态发育具有重要的影响。在土体面积一定的情况下，厚度相对较小的试样，裂隙总长度较大，裂隙密集细长，纹理丰富，分割的块体相对较小；而厚度相对较大的试样，裂隙总长较小，裂隙宽而单一化，甚至出现明显的边界效应。

（2）在土体开裂后，较小的含水率变化下裂隙便迅速扩展，土体表面的张拉应力得到有效释放，裂隙总长度充分发育并趋于稳定；当含水率进一步下降时，土体以收缩为主，新的裂隙基本不再产生，原有裂隙不断拓宽、拓深并在缩限含水率附近趋于稳定。

（3）土体裂隙的面积分形维数与长度分形维数结合起来可以很好的表征试样裂隙的发育程度，相同含水率下的裂隙面积分形维数与裂隙度之间有着很好的数量关系，相同含水率下的裂隙长度分形维数也与试样的长周比之间有着很好的数量关系，且两个关系都可以用同一个经验公式进行表征，通过数据拟合发现拟合度较高，具有一定的参考价值。

（4）厚度与试样直径的比值 λ 可以初步估计裂隙的开展形式和状态，厚度对裂隙的扩展有重要影响，但裂隙的扩展还受到土质、制样方式、环境因素等影响，把握裂隙的开展规律，对于后续的裂隙改性以及工程防治等具有重要意义，今后在这些方面仍有许多基础工作值得去做。

参考文献:

- [1] 袁俊平, 薦彦玲, 丁 鹏, 等. 裂隙诱导各向异性对边坡降雨入渗的影响[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 76 - 82. (YUAN Jun-ping, LIN Yan-ling, DING Peng, et al. Influence of anisotropy induced by fissures on rainfall infiltration of slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1): 76 - 82. (in Chinese))
- [2] 郑少河, 姚海林, 葛修润. 裂隙膨胀土饱和-非饱和渗流分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊1): 281 - 285. (ZHENG Shao-he, YAO Hai-lin, GE Xiu-run. Analysis of saturated and unsaturated seepage of cracked expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 281 - 285. (in Chinese))
- [3] 蔡正银, 朱 涣, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土裂隙演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1381 - 1389. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. Evolution rules of fissures in expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1381 - 1389. (in Chinese))
- [4] 殷宗泽, 徐 彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 454 - 459. (YIN Zong-ze, XU Bin. Slope stability of expansive soil under fissure influence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 454 - 459. (in Chinese))
- [5] 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, 35(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, 35(7): 1825 - 1830. (in Chinese))
- [6] 陈正汉, 郭 楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1 - 54. (CHEN Zheng-han, GUO Nan. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1 - 54. (in Chinese))
- [7] 崔玉军, 陈 宝. 高放核废物地质处置中工程屏障研究新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 842 - 847. (CUI Yu-jun, CHEN Bao. Recent advances in research on engineered barrier for geological disposal of high-level radioactive nuclear waste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 842 - 847. (In Chinese))
- [8] 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))
- [9] 蔡正银, 陈 皓, 黄英豪, 等. 考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(11): 1977 - 1982. (CAI Zheng-yin, CHEN Hao, HUANG Ying-hao, et al. Failure mechanism of canal slopes of expansive soils considering action of wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(11): 1977 - 1982. (in Chinese))
- [10] 黎 伟, 刘观仕, 汪为巍, 等. 湿干循环下压实膨胀土裂隙扩展规律研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1302 - 1308. (LI Wei, LIU Guan-shi, WANG Wei-wei, et al. Crack propagation law of compacted expansive soils under wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1302 - 1308. (in Chinese))
- [11] 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. (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))
- [12] 曹 玲, 王志俭, 张振华. 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): 413 - 421. (CAO Ling, WANG Zhi-jian, ZHANG Zhen-hua. Experimental research of cracking process of expansive soil under rainfall infiltration and evaporation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 413 - 421. (in Chinese))
- [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 behaviour of expansive soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 663 - 673. (in Chinese))
- [14] UDAY K V, SINGH D N. Investigation on cracking characteristics of fine-grained soils under varied environmental conditions[J]. Drying Technology, 2013, 31(11): 1255 - 1266.
- [15] TANG C S, SHI B, LIU C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. Engineering Geology, 2008, 101(3/4): 204 - 217.
- [16] 汪为巍, 黎 伟, 易 远. 南阳膨胀土裂隙发育规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(6): 1437 - 1443.

- (WANG Wei-wei, LI Wei, YI Yuan. Study on the cracking law of nanyang expansive soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, **11**(6): 1437 - 1443. (in Chinese))
- [17] 刘观仕, 陈永贵, 张贵保, 等. 压实条件对膨胀土裂隙发育影响的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(11): 91 - 97. (LIU Guan-shi, CHEN Yong-gui, ZHANG Gui-bao, et al. Crack propagation law of compacted expansive soil with various original compactness and water content[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(11): 91 - 97. (in Chinese))
- [18] 林沛元, 汤连生, 桑海涛, 等. 分形几何在岩土力学研究中的过去、现在与未来[J]. 西北地震学报, 2011, **33**(增刊1): 24 - 29. (LIN Pei-yuan, TANG Lian-sheng, SANG Hai-tao, et al. Fractal geometry in the past, present and future research of rock and soil mechanics[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, **33**(S1): 24 - 29. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 曾 浩, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 膨胀土干燥过程中收缩应力的测试与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 717 - 725. (ZENG Hao, TANG Chao-sheng, LIU Chang-Li, et al. Measurement and analysis of shrinkage stress of expansive soils during drying process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 717 - 725. (in Chinese))
- [21] 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. (ZHANG Jia-jun, GONG Bi-wei, HU Bo, et al. Study of evolution law of fissures of expansive clay under wetting and drying cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(9): 2729 - 2734. (in Chinese))
- [22] 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))
- [23] 蔡国庆, 车睿杰, 孔小昂, 等. 非饱和砂土抗拉强度的试验研究[J]. 水利学报, 2017, **48**(5): 623 - 630. (CAI Guo-qing, CHE Rui-jie, KONG Xiao-ang, et al. Experimental investigation on tensile strength of unsaturated fine sands[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, **48**(5): 623 - 630. (in Chinese))
- [24] 刘观仕, 陈永贵, 曾宪云, 等. 环境湿度与温度对压实膨胀土裂隙发育影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(2): 260 - 268. (LIU Guan-shi, CHEN Yong-gui, ZENG Xian-yun, et al. Effects of ambient air humidity and temperature on crack development of compacted expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(2): 260 - 268. (in Chinese))