

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.01.015

压实黏土干缩裂缝扩展规律试验研究

叶伟¹,马福恒^{1,2},胡江¹,李子阳¹,霍吉祥¹

(1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所,江苏 南京 210029;
2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029)

摘要: 为探究影响压实黏土干缩裂缝扩展的影响因素,制备不同干密度与初始含水率的压实土样开展试验分析。通过模拟干旱环境,使压实土样逐渐产生干缩裂缝,采用数字图像处理技术对形成的裂缝进行定量统计与分析,并通过裂缝参数变化密度函数分析裂缝发育速度的影响因素。结果表明:初始含水率限制裂缝出现速度,裂缝条数、最大裂缝宽度随着干密度的增大而减小,裂缝宽度的增长速度随含水率的增大而增大;土体干密度对裂缝发育速度影响不明显;初始含水率相同时,分形维数随干密度的增大而减小。

关键词: 压实黏土;干缩裂缝;图像处理;干密度;含水率

中图分类号:TV443⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)01-0102-08

Experimental study on propagation law of shrinkage cracks in compacted clay

YE Wei¹, MA Fuheng^{1,2}, HU Jiang¹, LI Ziyang¹, HUO Jixiang¹

(1. Dam Safety and Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to explore the influencing factors of shrinkage crack propagation of compacted clay, compacted soil samples with different dry densities and initial moisture contents were prepared for the experimental study. By simulating drought conditions, shrinkage cracks gradually appeared in the compacted soil samples. During the test, the digital image processing technology was used to conduct the quantitative statistics and analysis on the formed cracks, and the influencing factors of crack development speed were analyzed by the variable density function of crack parameters. The results show that the initial water content limits the crack occurrence speed, and the number of cracks and the maximum crack width decrease with the increase of dry density. The growth rate of crack width increases with the increase of water content, but the influence of dry density on the crack development rate is not obvious. At the same initial water content, the fractal dimension decreases with the increase of dry density.

Key words: compacted clayey soil; shrinkage crack; image processing; dry density; water content

近年来我国极端旱涝事件呈加剧态势^[1-2],给水利工程建设与管理带来全新的挑战。长时间的干旱导致土体失水收缩产生裂缝,尤其在全球变暖、城市热岛效应和旱涝灾害日渐频繁发生的背景下,土体开裂现象更为普遍。作为坝体防渗体系的重要组成部分,黏土(铺盖、斜墙)的防渗性能关乎大坝渗流安全,然而土体干缩裂缝的产生直接导致土体渗透性的增大,裂缝的出现使得挡水建筑物直接面临严重的渗流问题,美国 Stockton 和 Wister 大坝^[3]、1989—1993 年匈牙利境内的防洪堤^[4]、20 世纪 90 年代山东峡山水库^[5]、2007 年重庆地区大旱中的 1200 座水库大坝、2014 年河南白龟山土石坝^[6]均因干旱导致土体开裂而出现不同程度的险情。为了能防患于未然,需了解土体受旱过程中的裂缝演化规律,对裂缝进行前期预防以及后期治理。

目前,由于现场试验研究时气候条件复杂多变以及时间成本、人工成本高,对干旱条件下填土裂缝的研究多采取室内模拟方式。Tang 等^[7-11]通过系列试验分析了温度、土层厚度、干湿循环次数以及土样种类等对土体干缩裂缝表面结构形态及应力的影响,结果表明随着土层厚度的增加,平均裂缝长度、宽度、裂缝强度均

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y721008);国家重点研发计划(2019YFC1510802)
作者简介: 叶伟(1992—),男,工程师,博士,主要从事水工结构安全诊断与评估研究。E-mail:1079053235@qq.com
引用本文: 叶伟,马福恒,胡江,等. 压实黏土干缩裂缝扩展规律试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):102-109.
YE Wei, MA Fuheng, HU Jiang, et al. Experimental study on propagation law of shrinkage cracks in compacted clay[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(1):102-109.

增大,裂缝长度和宽度的主要分布范围也增大,该结果也验证了 Corte 等^[12]的研究,并在 Valette 等^[13]进行的数值分析研究中得到证实。干湿循环次数会使得裂缝变得破碎,减小了裂缝的强度,而土样种类的影响主要表现在颗粒级配及塑性指数方面。对于土体干缩裂缝,直观表现是含水率减小与土体收缩,然而是否含水率直接控制着土体的开裂有待进一步研究。有学者发现初始含水率越大,径向收缩对最终体积收缩的贡献越大^[14];张家俊等^[15]对裂缝的演化规律分析结果表明,影响裂缝深度和张开程度的关键因素并非土体含水率,而是含水率的变化率;Augier 等^[16]发现黏土干燥包括两个阶段,含水率大于临界含水率时土体收缩,其中固体颗粒滑动形成更紧凑的排列,含水率小于临界含水率时,固体密度基本保持不变,表现为非收缩相。当裂缝不断向土体内部扩展时含水率自土体表面往内部也越来越大,而水分始终需从土体表面蒸发或裂缝较为发育时沿裂缝壁蒸发,此时若外部环境持续干燥,裂缝是否会不断向内部扩展,土体内外部含水率的差异是否决定着裂缝的发育深度尚无研究涉及。Towner^[17]在试验中采用数段含水率不同的土条,控制其受旱过程中在某一方向上收缩开裂,结果发现土条出现裂缝时的土体含水率基本相同,预示着土体开裂与初始含水率无关,土体存在着一个临界含水率;然而试验中土体初始含水率均较高,含水率降低至某个特定值后开始出现裂缝,但初始含水率低于这个特定值时是否对裂缝的变化产生影响还有待研究。土体的干缩裂缝也可称之为不均匀收缩裂缝,当土体内部的收缩应力大于土体的抗拉强度时会产生裂缝^[18-24],而土体的抗拉强度受干密度的影响,因此分析干密度变化对裂缝扩展的影响同样重要。

本文通过对不同干密度与初始含水率的土样开展室内干燥试验,采用数字图像处理技术对获得的干缩裂缝网络进行系统的定量对比分析,并结合裂缝网络的几何形态特征对一些关键指标的统计学特征进行了探讨,以期对揭示压实黏土裂缝演变规律提供参考。

1 试验材料与方法

为分析裂缝扩展与土体干密度、初始含水率的关系,通过制备压实土体试样模拟干燥过程来分析裂缝演化过程。

1.1 试验土样

试验所选土体为红黏土,可塑,黏性较强,经测试,试验土体最大干密度为 1.72 g/cm³,最优含水率为 26.3%,土粒相对密度为 2.73,液限为 35.9%,塑限为 15.8%,塑性指数为 20.1,土体颗粒分曲线见图 1。测得干密度为 1.4 g/cm³、1.5 g/cm³、1.6 g/cm³ 和 1.7 g/cm³ 时,收缩系数分别为 0.135、0.148、0.161 和 0.179。

1.1 试样制备

试验模型箱为有机玻璃所制,直径为 30 cm,试验前将土样置于室外风干、碾碎过 2 mm 筛,测定其风干含水率,根据试验需求称取一定质量的土体制备不同干密度、含水率的土样,然后将土样放入塑料袋中密封 48 h 闷料。

各组土样基本参数见表 1,压实土样采用分层填筑方法,以 2 cm 为一层,完成各层土体填筑后将表面土体打毛再填筑下一层,保证各层土体之间不存在明显的分界面。填筑完土体试样见图 2,由于第 3 组试样未出现裂缝,补做第 6 组试验。

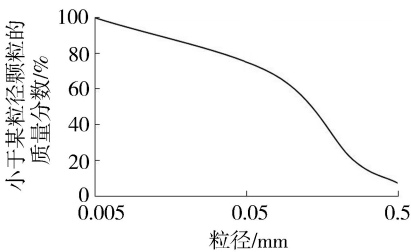


图 1 土体颗粒分曲线
Fig.1 Particle size distribution curve of soil

表 1 压实土样基本参数

Table 1 Basic parameters of compacted soil samples

序号	干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	土层厚度/cm	孔隙比
1	1.6	15	15	0.71
2	1.6	20	15	0.71
3	1.7	10	15	0.61
4	1.5	15	15	0.84
5	1.4	15	15	0.89
6	1.7	10	15	0.61



图 2 土体试样
Fig.2 Soil sample

试验中采用烘灯模拟干旱环境,保证土体上部温度不低于 35℃,烘灯旁边安装摄像机,用于定时抓拍土面裂缝照片,抓拍间隔为 30 min。用电子秤称量

填筑完成的试样质量,通过试样质量的变化分析土体水分蒸发情况,电子秤量程为 30 kg,精度为 $\pm 0.1\text{ g}$ 。

2 裂缝图像处理

试验中由于第 3 组试样脱湿过程未出现裂缝,因此不对其进行图像处理,第 1、2、4、5 组试样裂缝发展过程如图 3~6 所示,图像二值化处理过程中忽略边界效应产生的裂缝。



图 3 第 1 组试样裂缝发展过程
Fig. 3 Crack propagation process in the first set of samples



图 4 第 2 组试样裂缝发展过程
Fig. 4 Crack propagation process in the second set of samples

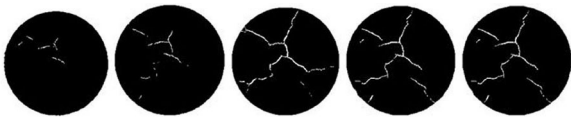


图 5 第 4 组试样裂缝发展过程
Fig. 5 Crack propagation process in the fourth set of samples



图 6 第 5 组试样裂缝发展过程
Fig. 6 Crack propagation process in the fifth set of samples

第 3 组试样初始干密度为 1.7 g/cm^3 ,接近最大干密度 1.72 g/cm^3 ,含水率为 10%,表面碾压密实,密度较大且含水率较低,裂缝不易发育,但上层土体收缩后从土柱侧壁向内部产生裂缝。该现象的出现是因为分层缝未处理密实,使得整个圆柱体无法均匀收缩,裂缝自分层面向土体内部发展。为进行验证,重新填筑相同干密度与含水率的第 6 组试样,试验结果如图 7 所示,除了土体收缩与模型箱外壁之间产生缝隙外,土体中间部位几乎无裂缝产生。



(a) 第3组试样 (b) 第6组试样

图 7 第 3 组与第 6 组试样试验结果

3 试验结果与分析

3.1 含水率变化

每组试验的结束时间根据试样容器总质量变化确定,当质量减少量较小且稳定即结束试验,各组试验含水率(土体整体含水率)变化过程线如图 8 所示。试验中土体总质量的减少即为水分的蒸发,单位时间含水率的变化可近似看作为蒸发率。

如图 9 所示,土体的蒸发率随时间逐渐减小,即实际蒸发率随含水率的减小而减小。土体的蒸发过程一般分为常速度阶段(初期恒定蒸发速度阶段)、减速度阶段(蒸发速度衰减阶段)和残余阶段(蒸发消滞阶段或滞缓阶段)3 个典型阶段^[25]。观察各组试样含水率变化,由于各试样均不是从饱和状态开始,不存在一般

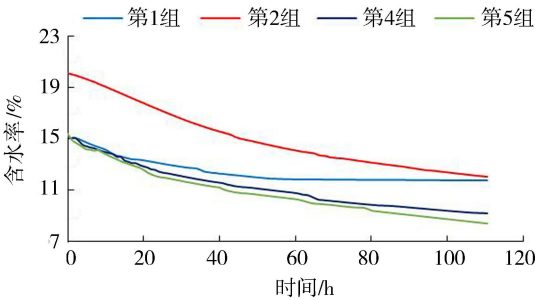


图 8 各组试样含水率随时间变化
Fig. 8 Variation of water content with time for each set of samples

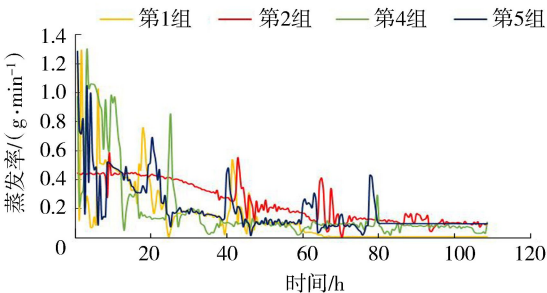


图 9 各组试样蒸发率随时间变化
Fig. 9 Variation of evaporation rate with time for each set of samples

蒸发过程中的初期稳定蒸发过程。除第 2 组试样外,其余 3 组试样初始含水率均为 15%,土体的塑限为 15.8%,因此试样在试验开始 15 min 左右就产生裂缝,而第 2 组试验初始含水率为 20%,高于塑限含水率,试验开始 40 min 左右含水率降至 15% 左右时开始出现裂缝,表明脱湿过程中土体出现裂缝需满足含水率低于塑限的条件。初始裂缝的出现对应一个特定的基质吸力,对于不同土体该基质吸力值不同,但在相应的土水特征曲线中与这一基质吸力相对应的含水率基本在塑限附近。对于同一干密度土体,结合土水特征曲线,基质吸力与蒸发率有如下关系^[26-27]:

$$\frac{E_a}{E_p} = \frac{\exp\left(\frac{-u_s g W_v}{RT}\right) - h_a}{1 - h_a}$$

(1)

式中: E_a 为实际蒸发率; E_p 为潜在蒸发率; u_s 为基质吸力,kPa; h_a 为参考面处空气相对湿度; W_v 为水的摩尔质量,取 0.018 kg/mol; R 为气体常数,为 8.314 32 J/(mol · K); T 为绝对温度,K。高含水率表明基质吸力较小,相应的蒸发率应该越大。根据图 9,初始含水率相同的土体在脱湿后期稳定状态下的蒸发率随着干密度的降低而增大,而此时土体的干密度越大相应含水率越大,也就表明干密度越大土体蒸发率越小,干密度的增大了限制了土体水分蒸发。

3.2 裂缝变化

为反映裂缝的扩展规律,选取裂缝条数、最大裂缝宽度、裂缝占比度及分形维数等参数进行统计分析,由于第 3 组与第 6 组试样未出现裂缝,这两组试验不进行统计。

3.2.1 裂缝条数变化规律

不同于泥浆试验中先出现初级裂缝然后出现次级裂缝的逐渐演化过程,压实黏土受旱后裂缝的出现具有随机性,裂缝通常发生在表面缺陷处,在这些缺陷处会发生收缩变形和应力集中。在承受拉应力的土体单元中,开裂前的应变能累积可表示为^[28]

$$E_p = \frac{1.299\sigma^2 S^2 t}{E}$$

(2)

式中: E_p 为应变能,kN · m; σ 为拉应力,kPa; S 为孔径,m; t 为土层厚度,m; E 为杨氏模量,GPa。可以看出,应变能与孔隙大小呈正比,相对于土颗粒自然聚集产生的孔隙,压实土内难以避免的填筑缺陷孔径更大,因此缺陷部位的应变能更大,受旱过程中缺陷部位更容易开裂。而泥浆试验由于土颗粒悬浮于水中,在水分蒸发过程中,土颗粒自然聚集,孔隙相对较均匀,使得受旱过程中出现的裂缝分布均匀。

裂缝条数的统计方式是每出现 1 条新裂缝记录 1 次,最终裂缝的发展结果会形成多条裂缝相互交叉相连的情形,为满足裂缝条数只增不减的要求,即使裂缝在长度充分发育后连接为一体,依旧认为其是多条裂缝。经统计,各组试样的最终裂缝条数分别为 6 条、7 条、10 条和 12 条。第 1 组、第 4 组和第 5 组试验第 1 条裂缝出现的时间基本在试验开始后 15 min 左右,而第 2 组试验第 1 条裂缝出现的时间在试验开始后 40 min。从图 10 可以看出,对于同一初始含水率的第 1 组、第 4 组及第 5 组试样,裂缝最终条数随干密度的减小而增大,主要原因在于干密度越大土体内部大孔隙数量相对越少,即现存孔隙的孔径 S 越小,使得应变能 E_p 越小,而裂缝的出现需要足够大的应变能,因此干密度越大产生的裂缝越少。由于干缩裂缝的出现源于土体某一部位的收缩应力大于该处的抗拉强度,在受旱过程中收缩应力与土体基质吸力正相关,而含水率越高,基质吸力越小,只有含水率降低至足够小时收缩应力才会大于抗拉强度,促使裂缝出现,因此认为含水率控制裂缝的出现速度,含水率越大,裂缝越难出现。为此,对比分析同一干密度下不同初始含水率的试样(第 1 组与第 2 组)裂缝条数变化,从图 10 可以看出,含水率较小的第 1 组试样裂缝条数在初期即迎来快速增长期,裂缝出现速度远大于含水率较大的第 2 组试样,并且第 1 组试样很快即达到了裂缝条数发育的极限值。然而,对于拥有相同干密度的第 1 组与第 2 组试样,裂缝最终的发育条数基本相同。

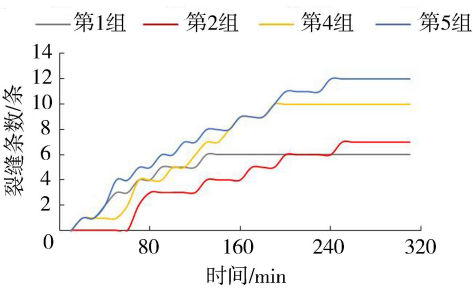


图 10 各组试样裂缝条数变化

Fig. 10 Variation of crack number for each set of samples

当土体缺陷部位出现较大的应变能后,将应变能简化分析为缺陷处受到大小相等方向相反的应力作用。由于土样为圆柱形,在均匀受热干燥的环境下,土体产生向心收缩,即土体内部分布有指向中心的收缩应力 σ_1 ,缺陷处的应力 σ_2 大于该部位收缩应力 σ_1 时,土体开裂(图11)。若干密度足够大,压实土体内部缺陷孔隙很小,在受旱过程中缺陷部位应变能较小,土体不易出现裂缝,试验中第3组、第6组土体在受旱过程中土体整体产生了收缩,在与容器接触面出现了缝隙,但土体内部未出现裂缝。

3.2.2 裂缝宽度变化规律

根据图像识别结果进行裂缝宽度测量,虽然各组试样中会出现多条裂缝,但裂缝宽度测量只针对最发育的一条裂缝。裂缝的宽度以像素为单位,经测量,各组试样最大裂缝宽度分别为95像素、102像素、122像素和183像素。从图12可以看出,对于同一干密度不同初始含水率的两组试样,含水率较低的第1组试样裂缝宽度增长速度低于含水率较高的第2组试样,但最终最大裂缝宽度接近。从同一组试验也可以看出,随着土体内水分的不断蒸发,土体含水率不断减小,裂缝宽度增长速度也在不断降低。实际上,影响裂缝发育的关键因素并非土体含水率,而是水势梯度,脱湿速度的空间分布以及土体渗透特性则是决定水势梯度大小的关键因素^[15]。在试验开始前,近似认为完成填筑后试样内部含水率分布是均匀的,受旱过程中,试样上部因与热空气直接接触,其脱湿速度远高于底部,导致土体上下层之间形成上高下低的水势梯度。此外,由于土体渗透性小,土体水势梯度在短时间内难以自我平衡,最终表现为土体渗透系数越小,水势梯度越大。土体蒸发率实际是土体的脱湿速度,在蒸发环境一致、土体渗透性相同的情况下,蒸发率与土体内部基质吸力呈负相关关系,即与含水率正相关;同样从图9也可以看出,除去少数波动点外,含水率最大的第2组试样蒸发率最大,即脱湿速度最大,相应水势梯度也越大,导致出现裂缝后裂缝发育速度较快。

对于相同含水率不同干密度的土样,最大裂缝宽度随着干密度的增大而减小,且裂缝宽度的增长速度也随着干密度的增大而减小。由于裂缝宽度的增大实际是源于未产生裂缝的土体的收缩,而土体的收缩又是源于土体孔隙体积减小,土体干密度越大,对应的孔隙比越小,初始孔隙比第1组(0.71)小于第5组(0.89),当土体失水至残余含水率后裂缝不再发育^[29],此时两组试样的孔隙比接近,可以看出干密度越小的土体最终裂缝宽度越大。根据前述对水势梯度的分析,干密度越大,受渗透性影响的水势梯度越大,从而裂缝发育速度越大,但图12中表现出的现象为干密度越大裂缝发育速度越小,主要原因在于干密度越大的土体蒸发率越小,即脱湿速度越小,导致裂缝宽度发育速度越小,因此认为干密度对裂缝发育速度有影响但起主导作用的是含水率变化。

各组土样裂缝宽度在土体出现裂缝之后均是一个快速增长的趋势。裂缝宽度增长一方面源于表层土体在水平面方向的收缩,另一方面是底部土层水平方向收缩变形的叠加,受水势梯度影响,刚出现裂缝时表面土体含水率快速降低开始收缩,深层土体水分散失较慢,含水率相对稳定,抑制了表面土体的进一步收缩。初期裂缝宽度增长速度较快主要是由于表层土体的水平向收缩变形大,后期裂缝宽度的缓慢增长是由于表层土体已逐渐接近收缩极限。后期裂缝宽度的进一步增大需要中下部裂缝壁两侧土体进一步收缩,而内部土体由于脱湿速度低,导致裂缝宽度增长缓慢。

3.2.3 裂缝占比度变化规律

裂缝占比度为裂缝面积占土体总面积的百分比,各组试样最大裂缝占比度分别为3.92%、4.12%、7.18%和10.21%。从图13可以看出,从第1组至第5组(第3组除外)试样,裂缝占比度增长速度及最终值逐渐变大。同一干密度的土体试样,初始含水率越大,蒸发各阶段的实时含水率越大,相应的裂缝占比度增长速度越大,但最终裂缝占比度基本一致。对于第2组试样,由于其较高的含水率,脱湿初期裂缝发育过

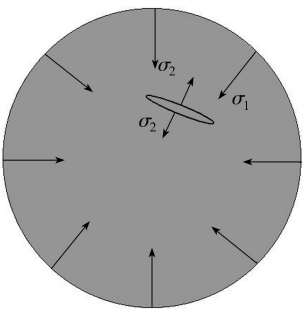


图 11 土体开裂受力分析

Fig. 11 Stress analysis of soil cracking

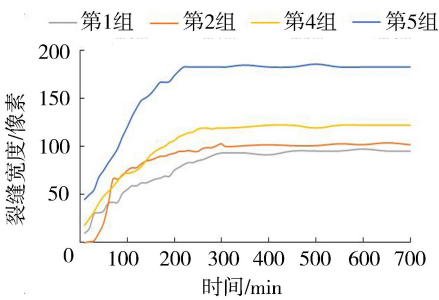


图 12 压实土样裂缝宽度变化

Fig. 12 Variation of crack width in compacted soil samples

程相较其他组试验稍显滞后,但出现裂缝之后由于水势梯度较大,中期裂缝发育速度快于第 1 组试样。裂缝占比度试验结果与裂缝条数和宽度试验结果一致,即初始含水率影响土体裂缝发育速度,而干密度影响土体裂缝发育程度。

3.2.4 裂缝分形维数变化规律

裂缝分形维数采用盒维数方法计算,分形维数的大小反映土体产生裂缝的分布范围,分形维数越大,裂缝分布越广。在图像识别程序中插入盒维数计算程序,可在裂缝识别过程中直接读取分形维数值。

根据计算结果,各组土样最终形成裂缝的分形维数分别为 1.3706、1.3814、1.5128 和 1.6913。图 14 为土样裂缝分形维数变化,由于第 2 组试样含水率较高,出现裂缝的时间点晚于其他各组试样,因此最初分形维数较小,但随着脱湿的继续进行,该组试样裂缝快速出现,分形维数快速增大。对于拥有相同初始含水率的土样,分形维数随干密度的增大而减小。对于相同干密度的土样,在开始出现裂缝之后,含水率越大,分形维数的增长速度越大。

3.2.5 裂缝参数变化密度函数

裂缝网络具有非常复杂的几何形态特征,裂缝长度、宽度和土块面积在尺度上具有较大的变化范围,前述对裂缝宽度的分析仅仅是针对这些指标的平均值,为了更为客观地描述裂缝网络变化差异,引入概率密度函数,从统计学的角度对相关量的度量指标的分布特征进行分析,使裂缝网络变化量化结果更加可靠。裂缝网络概率密度是在复杂几何网络情况下对各条裂缝进行统计分析,然而由于压实土样裂缝数量较少,针对样本数量进行分析会由于样本容量较少而失去统计意义,因此将一般概率密度函数中的样本数量转变为样本随时间的变化量,给出适用于压实土体的干缩裂缝参数变化密度函数:

$$f(x,t)=\frac{\Delta x_i}{x_0\Delta t}$$

(3)

式中: x_0 为样本最大值; Δx_i 为 t_i 至 $t_i+\Delta t$ 时段内样本值增加量。裂缝参数变化密度函数与单一裂缝参数变化率的区别在于前者反映参数相对于其变化过程的变化速度,与其最终发育程度有关,后者反映的是参数绝对变化速度。

图 15、图 16 用变化密度函数分别描述了 4 组试样裂缝宽度与裂缝占比度变化特征。图 15 中,第 1 组、第 4 组与第 5 组试样裂缝宽度在试验初期变化率最大,随着试验的进行不断减小,这 3 组试样初始含水率相同,均为 15%,试验初期干密度最小的第 5 组试样裂缝宽度变化率最大,前述分析中已知土体干密度限制裂

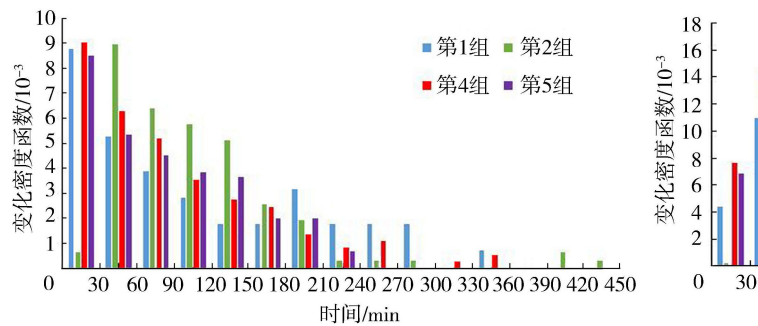


图 15 裂缝宽度变化密度函数

Fig. 15 Density function of crack width growth

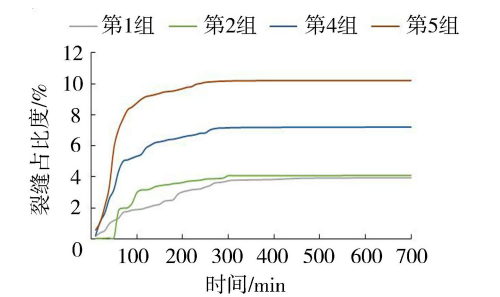


图 13 压实土样裂缝占比度变化

Fig. 13 Variation of crack proportions in compacted soil samples

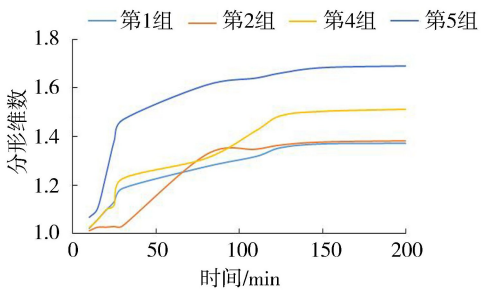


图 14 压实土样裂缝分形维数变化

Fig. 14 Variation of fractal dimension of cracks in compacted soil samples

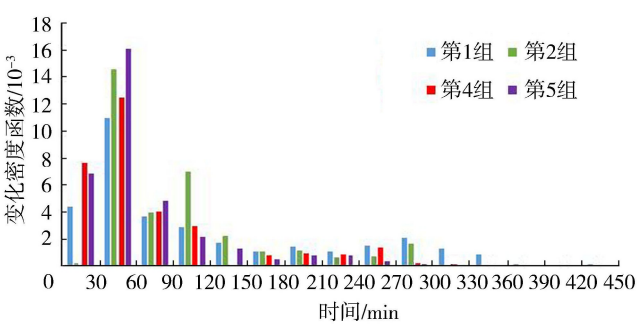


图 16 裂缝占比度变化密度函数

Fig. 16 Density function of crack proportion growth

缝发育速度,但在图 15 中却出现部分时间段低密度土体裂缝宽度变化率小于高密度土体的现象,主要原因在于宽度变化密度函数考虑了最终裂缝宽度,结合裂缝发育程度对比不同干密度土体裂缝发育速度可以看出,土体干密度对裂缝发育速度无明显影响。第 2 组试样由于初始含水率较大,在试验初期裂缝宽度变化率较小,说明初始含水率限制裂缝出现速度,但当裂缝出现后,含水率越大,裂缝发育速度越快,结合前述裂缝宽度增长过程的分析,进一步表明土体含水率控制裂缝发育速度,在裂缝出现之后,含水率越大,裂缝发育速度越快。从图 16 可以看出,各组试样裂缝占比度变化率均在 30~60 min 时最大,该时间段新裂缝不断出现,裂缝宽度、长度不断增大。由于土体干密度控制裂缝发育程度的影响,干密度最小的第 5 组试样裂缝发育程度最大,使得该阶段裂缝占比度增长速度最大。由于含水率控制裂缝发育速度,含水率最大的第 2 组试样裂缝发育速度最快,其裂缝占比度增长仅次于第 5 组试样。

3.2.6 裂缝深度发展

对裂缝深度的测量采用蜡封法,将低熔点、低黏度费托蜡置于烧杯中,采用酒精灯加热融化,融化后的液体蜡沿裂缝灌入土体,待液体蜡凝固后将土体剖开,量测蜡渗入的深度即得到裂缝的深度。试验结束后,第 1 组、第 2 组、第 4 组、第 5 组试样的裂缝深度分别为 9.5 cm、10.1 cm、7.9 cm 和 15 cm,15 cm 的裂缝深度表明土层已贯穿,而未贯穿试样的含水率变化曲线依旧在持续减小(图 9),裂缝深度尚处于发展阶段。由于裂缝深度在持续变化,且在发展过程中无法实时测量,因此对于裂缝发展深度的分析仅限于针对同一时间(试验结束时)裂缝深度与干密度和初始含水率的关系。从最终测量结果可以看出,干密度较大的试样在相同时间点裂缝的发育深度较小;同一干密度时,含水率大的试样在脱湿过程中存在较大的含水率梯度,且此时土体抗拉强度也较小,因此裂缝发展速度快,表明在同样的时间内裂缝可以达到的深度更大。相同初始含水率时,干密度大的土样有较大的抗拉强度,土体需在较低含水率时产生更大的收缩应力才会开裂,因此裂缝的深度随着干密度的增大而减小。

4 结 论

- a. 压实土样在裂缝发展过程中,同一含水率的试样裂缝条数、裂缝占比度增长趋势基本一致,同一干密度的试样裂缝最终条数、占比度均相同。
- b. 对于相同初始含水率不同干密度的压实土样,最终裂缝宽度随着干密度的增大而减小,裂缝宽度增长速度随着含水率的增大而减小。在考虑裂缝发育程度后发现土体干密度对裂缝发育速度影响不明显。
- c. 未出现裂缝时,初始含水率影响裂缝的出现速度,出现裂缝后,含水率变化控制裂缝发育速度,土体干密度控制裂缝发育程度。
- d. 受含水率梯度及抗拉强度影响,干密度较大的试样在相同时间点裂缝的发育深度较小,裂缝深度随着干密度的增大而减小。

参考文献:

[1] 张建云,王国庆. 气候变化与水库大坝安全[J]. 中国水利,2008(20):17-20. (ZHANG Jianyun,WANG Guoqing. Climate change and dam safety[J]. China Water Resources,2009(20):17-20. (in Chinese))

[2] 张建云,王国庆,刘九夫,等. 国内外关于气候变化对水的影响的研究进展[J]. 人民长江,2009,20(4):39-41. (ZHANG Jianyun,WANG Guoqing,LIU Jiufu,et al. Review on worldwide studies for impact of climate change on water[J]. Yangtze River,2009,20(4):39-41. (in Chinese))

[3] SHERARD J L. Embankment dam cracking;in embankment-dam engineering (Casagrande volume)[M]. New York:John Wiley & Sons,1973:271-353.

[4] LAZANYE L,HORVATH G,FARKAS J. Volume change induced cracking of flood protection dikes built of clay[C]//Proceeding of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils. Beijing:International Academic Publishers,1998:213-218.

[5] 杨正华,刘嘉炯. 峡山水库大坝渗流安全评价[J]. 水利水电科技进展,2007,27(2):40-44. (YANG Zhenghua,LIU Jiaxin. Seepage stability evaluation for dam of Xiashan Reservoir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007,27(2):40-44. (in Chinses))

[6] 叶伟,马福恒,胡江,等. 旱涝急转下斜墙坝渗流特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(10):1923-1929. (YE Wei,MA Fuheng,HU Jiang,et al. Seepage behaviors of inclined wall dams under drought-flood abrupt alternation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(10):1923-1929. (in Chinses))

[7] TANG Chaosheng,SHI Bin,LIU Chun,et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils

- [J]. *Engineering Geology*, 2008, 101(3): 204-217.
- [8] TANG Chaosheng, CUI Yujun, TANG A M, et al. Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils[J]. *Engineering Geology*, 2010, 114(3): 261-266.
- [9] TANG Chaosheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Experimental investigation of the desiccation cracking behavior of soil layers during drying[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23(6): 873-878.
- [10] GU Kai, TANG Chaosheng, SHI Bin, et al. A study of the effect of temperature on the structural strength of a clayey soil using a micropenetrometer[J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2014, 73(3): 747-758.
- [11] TANG Chaosheng, CHENG Qin, LENG Ting, et al. Effects of wetting-drying cycles and desiccation cracks on mechanical behavior of an unsaturated soil[J]. *Catena*, 2020, 194: 104721.
- [12] CORTE A, HIGASHI A. Experimental research on desiccation cracks in soil; research report 66[R]. Wilmette, Illinois: US Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment, 1960.
- [13] VALETTE G, STEPHANIE P, LUCAS L, et al. A dynamic model of cracks development based on a 3D discrete shrinkage volume propagation[J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, 27(1): 47-62.
- [14] 唐朝生, 崔玉军, TANG A M, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(8): 1271-1279. (TANG Chaosheng, CUI Yujun, TANG A M, et al. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(8): 1271-1279. (in Chinese))
- [15] 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 Jiajun, GONG Biwei, 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))
- [16] AUGIER F, COUMANS W J, HUGGET A, et al. On the risk of cracking in clay drying[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2002, 86(1): 133-138.
- [17] TOWNER G D. The mechanics of cracking of drying clay[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1987, 36(2): 115-124.
- [18] 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 Chaosheng, LIU Changli, 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))
- [19] HU Liangbo, PÉRON H, HUECKEL T, et al. Desiccation shrinkage of non-clayey soils: multiphysics mechanisms and a microstructural model[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, 37(12): 1761-1781.
- [20] PENG X, HORN R. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(3): 584-592.
- [21] ALONSO E E, ROMERO E, HOFFMANN C, et al. Expansive bentonite-sand mixtures in cyclic controlled-suction drying and wetting[J]. *Engineering Geology*, 2005, 81(3): 213-226.
- [22] BRAUDEAU E, COSTANTINI J M, BELLIER G, et al. New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(3): 525-535.
- [23] TRIPATHY S, RAO K S S. Cyclic swell-shrink behaviour of a compacted expansive Soil[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27(1): 89-103.
- [24] NAJM M A, MOHTAR R H, WEISS J, et al. Assessing internal stress evolution in unsaturated soils[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(5): W00C11.
- [25] 夏琼, 王旭, 窦顺, 等. 土体水分潜在蒸发确定方法研究进展[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(4): 793-801. (XIA Qiong, WANG Xu, DOU Shun, et al. Advances on determining potential evaporation of soil moisture [J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(4): 793-801. (in Chinese))
- [26] AYDIN M, YANG S L, KURT N, et al. Test of a simple model for estimating evaporation from bare soils in different environments [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182: 91-105.
- [27] 欧阳斌强, 唐朝生, 王德银, 等. 土体水分蒸发研究进展[J]. *岩土力学*, 2016, 37(3): 625-636. (OUYANG Binqiang, TANG Chaosheng, WANG Deyin, et al. Advances on soil moisture evaporation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(3): 625-636. (in Chinese))
- [28] COSTA S, KODIKARA J, SHANNON B. Salient factors controlling desiccation cracking of clay in laboratory experiments[J]. *Geotechnique*, 2013, 63(1): 18-29.
- [29] 唐朝生, 崔玉军, ABH-MINH T, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(8): 1271-1279. (TANG Chaosheng, CUI Yujun, ABH-MINH T, et al. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(8): 1271-1279. (in Chinese))