

文章编号:1673-2049(2019)05-0052-10

干湿循环下红黏土边坡裂隙演变规律

陈开圣

(贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为研究干湿循环下红黏土边坡裂隙的演变规律,采用室内边坡模型模拟日照-降雨干湿循环方式,并使用图像处理技术对获得的裂隙光栅图像进行二值化处理,提取了红黏土边坡裂隙率、裂隙条数、裂隙总长度、土块个数等量化指标,分析了降雨-蒸发循环作用下裂隙指标的演变规律与干湿循环次数的关系。结果表明:导致红黏土开裂的主要原因是含水率梯度引起的土体上下部基质吸力的差异性,致使土体收缩不均匀,而土体的胀缩性、渗透性和脱湿速率的空间分布则是决定含水率梯度的关键因素;裂隙的宽度、深度和裂隙率随干湿循环次数的增加先增大然后趋于稳定;裂隙总条数、土块个数和裂隙总长度在第1次干湿循环后达到最大值,第2次干湿循环后均出现不同程度的降低,之后裂隙总数量趋于稳定,但裂隙总长度和土块个数在后期干湿循环中仍有小幅增大。

关键词:红黏土;模型试验;干湿循环;裂隙;图像处理

中图分类号:TU446

文献标志码:A

Evolution Law of Fissures of Red Clay Slope Under Wet-dry Cycles

CHEN Kai-sheng

(College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: In order to study the evolution law of fissures of red clay slope under wetting and drying cycles, the indoor slope model was used to simulate the sunshine-rainfall dry-wet cycle, and the grating images were binarized by image processing technology. The quantitative indexes such as the fissure rate, the number of fissures, the total length of fissures and the number of soil blocks were extracted. The relationship between the evolution of fracture indexes and the number of cycles was analyzed under the rainfall evaporation cycle. The results show that the main cause of red clay cracking is the difference of matric suction between upper and lower parts of soil caused by water content gradient, resulting in uneven soil shrinkage, and the spatial distribution of soil swelling and shrinkage. Permeability and dehumidification rate are the key factors to determine the water content gradient. The width, depth and fracture rate of the fissure increase firstly and then tend to be stable with the increase of the number of cycles. The total number of fissures, the number of soil blocks and the total length of the fissure reach the maximum after the first dry-wet cycle, and decrease to varying degrees after the second cycle, and then the total number of fissures tends to be stable, whereas the total length of the fissure and the number of blocks still increase slightly in the later cycle.

收稿日期:2018-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51368010,51668011);贵州科技厅-贵州大学联合资金项目(黔科合 LH 字[2014]7663);

贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2016]2005,黔科合支撑[2018]2833)

作者简介:陈开圣(1975-),男,湖南洞口人,教授,工学博士,E-mail:chen_kaisheng@163.com。

Key words: red clay; model test; wet-dry cycle; fissure; image processing

0 引言

红黏土是一种对环境湿度变化敏感和具有多裂缝性、强胀缩性和强度衰减性的高塑性黏土。干旱季节时土中含水量降低,土体收缩使土体原始结构受到不同程度的破坏而产生裂缝。梅雨季节时气候湿润,雨水渗入裂缝,土体黏聚力急剧降低,强度衰减,导致边坡浅表层稳定性降低,随着干湿循环次数的增加,裂隙进一步发育,加速了边坡的失稳,诱发滑坡等地质灾害^[1]。

近年来,国内外许多学者关于干湿循环作用下土质边坡裂隙发育规律及其对边坡稳定性影响做出了初步探索。王利明^[2]针对南宁典型的非饱和膨胀土进行了土体干缩裂缝的相关研究,并分析了其对边坡稳定性的影响。赵亮^[3]以南水北调中线工程总干渠南阳段膨胀土为研究对象,研究了膨胀土的裂隙特性及其对边坡稳定的影响。吕晓光^[4]以溧史杭灌区内的膨胀土为研究对象,分析总结了膨胀土裂隙发育与分布规律,研究了膨胀土裂隙发育与演变对膨胀土边坡稳定性的影响。高志朋^[5]对膨胀土干

湿循环开裂特性及路堑边坡开裂演变过程进行了研究。卢再华等^[6]对南阳重塑膨胀土在干湿循环过程中裂缝的演变进行了 CT 试验研究。袁俊平等^[7]利用远距光学显微镜对膨胀土试样进行观测,采用图像处理软件对观测图像进行合适的灰度处理,计量裂缝造成的暗色区域所占面积比例或灰度熵。

由此可见,目前许多学者关于干湿循环下土体边坡裂隙的研究主要集中在膨胀土方面^[8-22],对红黏土边坡的开裂机理、发展规律的研究很少,而开裂恰恰是导致边坡破坏的内因。为此,本文采用模型试验方法制备了室内较大尺寸边坡模型,模拟日照-降雨干湿循环方式,并用图像处理技术对降雨-蒸发循环作用下裂隙指标的演变规律进行了探讨。

1 边坡模型试验方案

1.1 试验土样

试验所用红黏土取自贵阳市花溪二道旁施工现场,土样呈红褐色,稍湿,裂隙不发育,其基本物理性质参数见表 1。

表 1 红黏土基本物理性质指标

Tab. 1 Basic Physical Property Indexes of Red Clay

最佳含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	相对密度	塑限/%	液限/%	塑性指数/%	不均匀系数	曲率系数	不同粒径(mm)的颗粒所占比例/%		
								<0.002	0.002~0.075	>0.075
22.2	1.61	2.72	25.2	43.6	18.4	9.38	1.6	11.34	71.41	17.25

1.2 边坡模型制作

长方体边坡模型箱(图 1)尺寸为 100 cm×60 cm×80 cm。制作边坡模型时,将含水率 ω 为 4.55% 的风干红黏土加水,拌合配制成含水率为 22.2% 和压实度 k 为 90% 的土样,然后将土样分 12 层装入模型箱分层击实,每层击实后控制高度为 6.67 cm,以保证击实后边坡坡顶高度为 80 cm。土层压实完成后,用塑料薄膜覆盖 48 h,然后进行削坡,坡度 i 为 1:1.5。边坡模型制作完成后,选取边坡 4 个尺寸为 18 cm×21 cm 的长方形区域(坡面 1 号、坡面 2 号、坡底 3 号、坡顶 4 号)进行裂隙发育情况的统计,见图 2。

1.3 干湿循环试验

边坡制作完成后,进行 5 次干湿循环,降雨过程采用气压式喷水壶,并将喷壶喷头固定至边坡上方木架上(图 3),降雨过程结束标准:继续洒水时,大部分的降水开始沿坡面顺坡滑至坡脚位置,只有少



图 1 边坡模型
Fig. 1 Slope Model

量入渗到边坡内部,并且坡脚有积水产生,即认为降雨湿化过程结束;干燥过程则采用浴霸模拟太阳光照,暖风机模拟自然风(图 4),持续干燥约 7 h 后,每隔 1 h 测量各区域选点处裂隙宽度和深度,直至裂隙宽度、深度不再发生变化则认为干燥过程结束,到此则完成 1 次干湿循环。

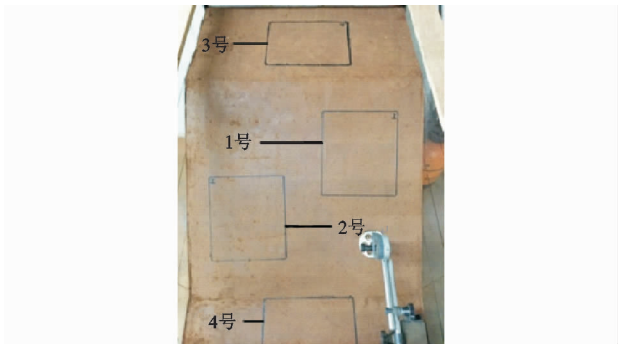


图 2 裂隙统计区
Fig. 2 Statistical Area of Fissure



图 3 边坡降雨
图 4 边坡烘干
Fig. 3 Slope Rainfall
Fig. 4 Slope Drying

2 裂隙图像的提取与处理分析

2.1 裂隙图像提取

为了分析干湿循环作用下红黏土裂隙的形成、发育及演变规律,在模型试验过程中,通过相机拍照对各所选长方形区域裂隙的发育情况进行观测,并为后期裂隙定量化分析奠定基础。拍摄照片时,相机镜头平行于边坡表面,且不断调整相机与边坡距离,使矩形区域 4 条边与相机拍摄视野边界保持重合,以尽量保证每次的拍摄角度、拍摄距离一致,调整过程见图 5。

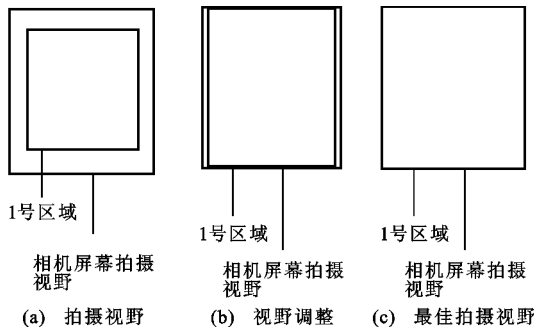


图 5 最佳拍摄位置
Fig. 5 Optimum Shooting Location

2.2 裂隙图像处理

试验中相机拍摄各区域裂隙照片均为 RGB 彩

色图像,其裂隙与土块的差异主要体现在色彩的颜色不同,由于彩色图像所含数据量较大,从中提取裂隙信息较难,因此,为了更加高效和准确地对裂隙网络进行定量分析,需要对裂隙进行以下预处理操作:第 1 步将彩色图像转化为灰度图像;第 2 步为二值化处理,设置阈值对图像进行二值化,将灰度值大于阈值的裂隙区变为黑色,小于阈值的土块区变为白色,实现裂隙与土块的视觉分离;第 3 步为 Photoshop 去杂点,由于边坡表面是不均匀的,可能会因为土颗粒的存在,使得二值图像中代表土块的白色区域内出现孤立黑点,但它们不是裂隙,这些多余的黑点会影响后期裂隙定量分析结果,通过 Photoshop 橡皮擦功能去除;第 4 步为裂隙中心线提取,提取二值图像裂隙的中心线主要是为了统计裂隙长度的变化。经过处理后的裂隙图像见表 2。

表 2 干湿循环后的裂隙图像

Tab. 2 Crack Pictures After Wet and Dry Cycle

干湿循环次数	坡面 1 号原始图像	坡面 1 号二值图像
1		
2		
3		
4		
5		

注:边坡参数 $k=90\%$, $w=22.2\%$, $i=1:1.5$ 。

2.3 裂隙量化指标

根据裂隙图像所呈现的特征,提出以下裂隙指标进行定量分析^[8]。

(1)裂隙率为裂隙统计区域内裂隙面积占该区域总面积的比率。该指标反映区域土体的整体开裂程度。

(2)裂隙条数定义为 2 个相邻节点之间的裂隙线为 1 条裂隙,反映了土体裂隙的多少。裂隙数量的提取方法则是根据裂隙二值图像数出相邻节点个数之间的裂隙条数(图 6)。

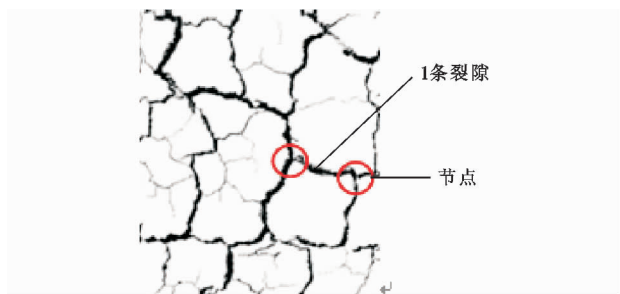


图 6 裂隙二值图像

Fig. 6 Binary Image of Cracks

(3)裂隙总长度为根据裂隙中心线图计算的区域内所有裂隙长度之和。

(4)裂隙宽度和深度为第 1 次干湿循环结束后,在每个区域内选取 3 个裂隙点(图 7),测量其每次干湿循环后裂隙宽度和深度。宽度测量采用游标卡尺,深度测量采用插丝法。

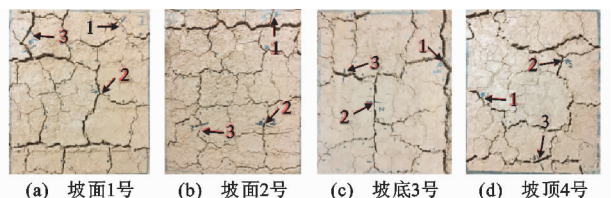


图 7 各区域裂隙宽度、深度测量位置

Fig. 7 Measurement Positions of Fissure Width and Depth in Each Region

(5)土块个数定义为由裂隙所围成的封闭区域数量,反映了土体的破碎程度。

3 裂隙演变试验结果

3.1 烘干过程中裂隙的演变规律

图 8 为坡面 2 号区域选点处裂隙宽度、深度与烘干时间关系。由图 8 可知,各区域选点处裂隙宽度和深度随烘干时间先快速增大后逐渐趋于稳定,表明脱湿前期裂隙的开裂深度和宽度增长较快,而后期裂隙扩展逐渐减缓,裂隙宽度和深度大致保持

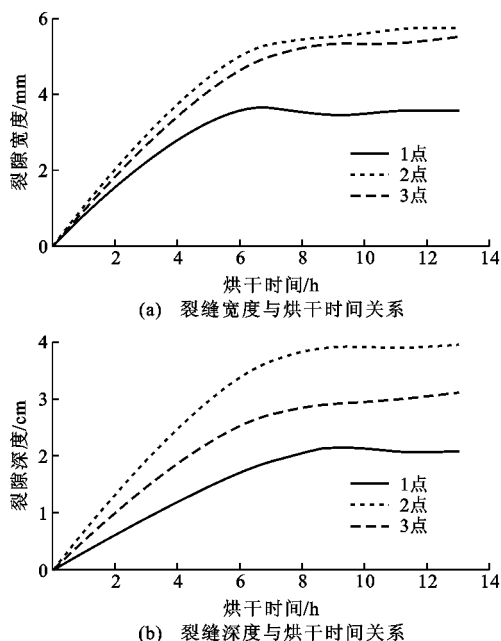


图 8 坡面 2 号区域选点处裂隙宽度、深度与烘干时间关系

Fig. 8 Relationships Between Fissure Width, Depth and Drying Time at Point in Slope Area 2

稳定。

在降雨湿化完成后,边坡表层以下一定范围内土体含水率大致是相同的,烘干过程初期,边坡土表层最先受热,水分开始散失,含水量降低,土体基质吸力逐渐增大,而由基质吸力分解产生的净水平拉应力使得土体表面最先处于受拉状态。基于各向同性和线弹性假设,有

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x - u_a}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_y + \sigma_z - 2u_a) + \frac{u_a - u_w}{H} \quad (1)$$

$$\sigma_x = \sigma_y \quad (2)$$

式中: ϵ_x 为 x 方向的应变; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 x, y, z 方向的应力; u_a 为孔隙气压力; u_w 为孔隙水压力; $u_a - u_w$ 为土体基质吸力; ν 为土体泊松比; E 为与净法向应力变化有关的弹性模量; H 为与 $u_a - u_w$ 有关的弹性常量。

土样未开裂前,有

$$\epsilon_x = 0 \quad (3)$$

将式(2),(3)代入式(1)可推导出水平向净应力为

$$\sigma_x - u_a = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_z - u_a) - \frac{E}{H(1-\nu)}(u_a - u_w) \quad (4)$$

表层土 $\sigma_z = 0$, 故式(4)可化为

$$\sigma_x - u_a = -\frac{\nu}{1-\nu}u_a - \frac{E}{H(1-\nu)}(u_a - u_w) \quad (5)$$

边坡表层处于临界开裂时的条件为

$$\sigma_x - u_a = \sigma_t \quad (6)$$

式中: σ_t 为抗拉强度。

当土体表面处任何区域所受净水平拉应力大于等于土体本身的抗拉强度 σ_t 时, 土体表面处任何区域应力状态满足上述应力条件, 土体即产生拉裂, 裂隙随机产生^[23-26]。

边坡表面裂隙产生后, 随着烘干的继续, 在边坡模型箱内, 距离表面不同深度处的脱湿速率是不相同的^[4]。边坡表层由于与模拟光照和热风直接接触, 其水分的脱湿速率最大, 距边坡表面深度越大, 脱湿速率越小。烘干开始后, 由于边坡不同深度处脱湿速率的不同, 会在边坡的表层至深处逐渐形成一个下高上低的含水率梯度。同时红黏土具有较低的渗透性, 使得土体难以在较短时间内通过自身水分的迁移将含水率梯度消除, 所以在土体脱湿速率不同的前提下, 这种自上而下形成的含水率梯度值随烘干时间增加不断增大。含水率梯度使得边坡土体基质吸力自上而下逐渐减小, 加之红黏土具有失水收缩的特性, 在含水率梯度的作用下, 边坡表层土体的收缩量会大于土体内部, 边坡上下层土体的收缩变形不均匀。这种非均匀收缩变形致使土体裂隙继续发育, 宏观体现在裂隙宽度和深度的不断加大。除此之外, 裂隙产生后土体应力状态发生了一定变化。裂隙出现后按照断裂力学理论, 其尖端存在应力奇异性, 应力场重新分布也会导致新裂隙的出现。

烘干过程末期, 当裂隙深度达到某一值时, 光照和热风对裂隙尖端两侧土体的脱湿速率影响很小时, 裂隙尖端处土体脱湿速率与下层土体脱湿速率几乎相等且趋于 0, 裂隙尖端处上下层土体的含水率保持初始含水率状态, 基质吸力保持不变, 由基质吸力分解的水平应力和有效应力之间达到平衡, 裂缝停止扩展, 裂隙宽度和深度趋于稳定。

3.2 裂隙率与干湿循环次数的变化关系

图 9 给出了边坡各区域裂隙率随干湿循环次数的变化关系。由图 9 可以看出, 各区域裂隙率在前 3 次干湿循环过程中不断增大, 且第 1 次干湿循环过程后裂隙率增长最快, 第 2、3 次干湿循环后裂隙率增幅减小, 3 次循环以后, 裂隙率虽有小幅波动但总体趋于稳定。原因主要是第 1 次干湿循环脱湿过程是裂隙的首次发育, 在加热装置干燥条件下, 土体中上下部分的含水率梯度最大, 致使上下部土体受力相差较大, 土体不均匀收缩最明显, 因此裂隙的发育速率也最快, 宏观上则表现为裂隙发育较快, 对应的表面裂隙率增长也最快。

第 2、3 次干湿循环的脱湿过程均在上次循环的

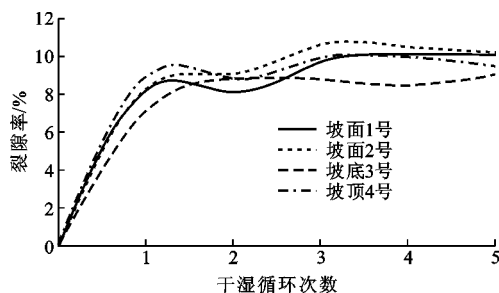


图 9 裂隙率与干湿循环次数的变化关系

Fig. 9 Relationship Between Fissure Rate and Number of Cycles

基础上, 边坡烘干时, 由于降雨而愈合的裂隙并没有恢复裂隙处土体的抗拉强度, 因此愈合的裂隙便会首先开裂。与初始开裂相比, 这些愈合裂隙的开裂加速了下部土体水分的散失, 使上下部土体的脱湿速率差异减小, 最终使土体内的含水率梯度减小, 土体含水率基本保持不变, 由基质吸力产生的净水平拉应力减小, 土体的不均匀收缩现象减弱, 因此产生的新裂隙数量减小, 原有裂隙宽度的增大量也减小。第 2、3 次干湿循环后裂隙率的增长速率减缓, 裂隙率的增大幅度减小。

3.3 裂隙条数与干湿循环次数的变化关系

图 10 为边坡不同区域内裂隙条数随干湿循环次数的变化关系。

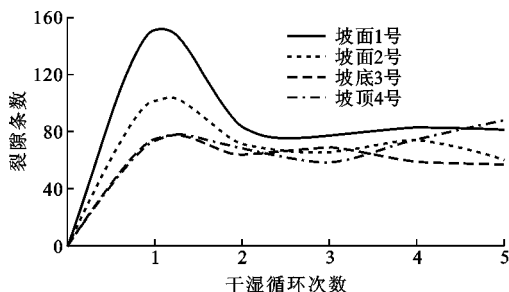


图 10 裂隙条数与干湿循环次数的关系

Fig. 10 Relationship Between Number of Fissures and Number of Cycles

由图 10 可知, 坡面各区域内裂隙条数在第 1 次干湿循环后达到最大值, 第 2 次干湿循环后裂隙条数呈现不同程度的减少, 2 次干湿循环以后各区域裂隙条数虽有小幅波动, 但总体保持稳定。裂隙条数呈现如此变化规律, 主要是因为第 1 次干湿循环脱湿时, 土体含水率梯度大, 上下部土体拉应力差异性最大, 上下部土体不均匀收缩最明显, 裂隙的发育最快, 尤其是细小裂隙数量较多, 裂隙呈网状分布, 导致裂隙总数量急剧增大。第 2 次干湿循环后, 裂隙数量减少, 其主要原因与土体结构的变化和胀缩

变形有关,对于重塑土来讲,反复的干湿循环作用一方面使得土体的易溶盐被溶蚀,和土颗粒产生重新排列,改变了原有土体的内部结构,从而使得土体的孔隙发生了改变;另一方面反复的干湿循环及易溶盐的溶蚀会使得土颗粒表面更加光滑,土体形状更加圆滑,从而使得土体中大孔隙增多^[27],且 2 次干湿循环后,土体经历了反复的胀缩变形,土体结构逐渐处于松散状态。因此,第 2 次降雨吸水后土体产生膨胀变形,致使裂隙闭合;第 2 次烘干过程中,土体松散使得土颗粒之间的黏聚性减小,土颗粒连接性降低,土体由于失水产生的收缩量减小;最终在土体松散和收缩量降低两方面影响下,2 次干湿循环后,细小裂隙处土体的收缩量并未使得原有细小裂隙再次开裂,形成肉眼可见裂隙,致使裂隙总数量减少。从微观角度而言,在第 2 次烘干时,土体已经过 2 次降雨过程,表层土颗粒之间黏结物质溶蚀,土颗粒之间连接性减小,在第 2 次烘干过程中,土体因连接性显著降低导致土颗粒之间承受收缩应力的能力减弱,当土颗粒之间连接力小于收缩应力时,土颗粒被拉开,原有微裂隙导致的土体开裂位移最终被原有微裂隙周围土体颗粒间的间隙增大而取代,使得肉眼可见裂隙消失。3 次干湿循环后,土体结构和胀缩变形逐渐趋于稳定,裂隙的发育也基本趋于稳定,裂隙的数量则基本保持不变。

3.4 裂隙长度与干湿循环次数的变化关系

图 11 给出了边坡不同区域内裂隙长度随干湿循环次数的变化关系。

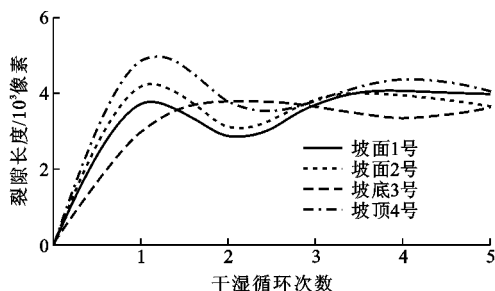


图 11 裂隙长度与干湿循环次数的关系

Fig. 11 Relationship Between Fissure Lengths and Number of Cycles

由图 11 可知,裂隙长度在前 2 次干湿循环的变化规律与裂隙条数的变化规律基本一致。第 1 次干湿循环后,各区域裂隙总条数最多,裂隙的总长度急剧增大,第 2 次干湿循环过程中,细小裂隙的消失致使裂隙总长度减小。3 次干湿循环后,裂隙长度则出现不同程度的增大趋势,这看起来好像与第 3 次干湿循环后裂隙条数稳定的结果相悖,但其实是一

致的,因为第 3 次干湿循环后裂隙的数量虽保持稳定,但部分未贯通裂隙的长度继续发育增大,导致了裂隙数量不变情况下,裂隙长度反而有所增大的现象。3 次干湿循环后,裂隙发育趋于稳定,裂隙长度也随之保持不变。

3.5 土块个数与干湿循环次数的变化关系

由于裂隙的发育过程实际是对土体进行“切割”的过程,只有当切割出的土块面积小于某一临界值后,该土块才不会被新生裂隙继续切割。图 12 为边坡不同区域内土块个数随干湿循环次数的变化关系。

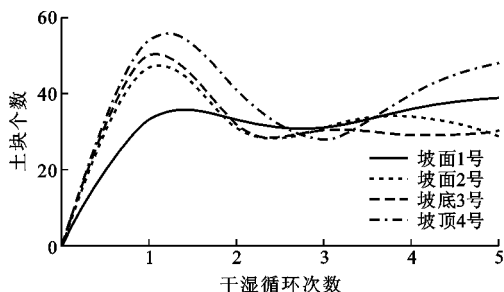


图 12 土块个数与干湿循环次数的变化关系

Fig. 12 Relationship Between Number of Soil Blocks and Number of Cycles

由图 12 可以看出,各选区内土块个数随干湿循环次数增加先增大后减小,之后有小幅波动但总体数量趋于稳定。表明第 1 次干湿循环后,土块个数达到最大值,原因是第 1 次干湿循环后,边坡表面微裂隙数量最大,由微裂隙分割的土块个数较多,但微裂隙的深度较小,因此第 2 次干湿循环后,随着边坡表面微裂隙的减少,土块个数也减少;2 次干湿循环以后裂隙发育基本稳定,土块个数则基本保持不变。坡顶 4 号和坡面 2 号区域土块个数在后期干湿循环中仍有增大趋势,这是因为原有的未贯通裂隙继续发育,裂隙长度增大,逐渐和其他裂隙相互贯通,致使土块的数量有增大现象。

3.6 各区域选点处裂隙宽度、深度与干湿循环次数关系

图 13 给出了坡面 2 号、坡底 3 号 2 个区域各选点处裂隙宽度和深度随干湿循环次数的变化关系。由图 13 可知,坡面 2 号区域内,1 点和 2 点处裂隙宽度随干湿循环次数的增加先增大后逐渐趋于稳定,在第 3 次干湿循环结束后,裂隙宽度达到最大值,之后裂隙宽度保持不变;3 点处裂隙宽度随干湿循环次数增加先增大后减小,且在第 3 次干湿循环后裂隙宽度达到最大值,之后裂隙宽度逐渐减小,原因是 3 次干湿循环后,3 点处土块沿坡面平行方向和垂直坡面的裂隙贯通,导致该土块向 3 点方向松

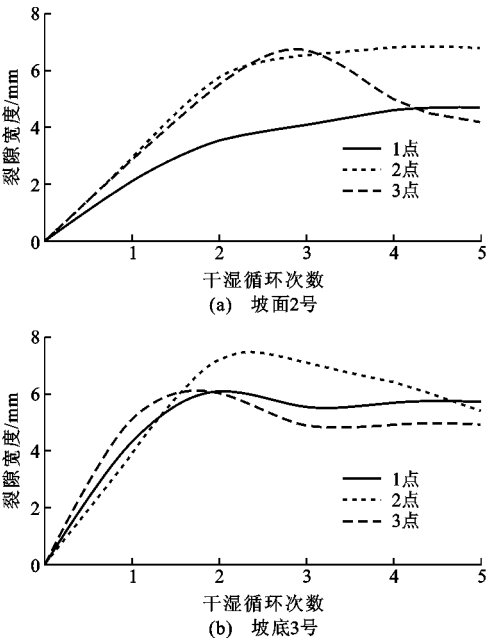


图 13 各区域选点处裂隙宽度与干湿循环次数的关系

Fig. 13 Relationship Between Fissure Width and Number of Cycles at Selected Points in Each Area

动错位,从而使 3 点处裂隙宽度减小,但是 3 点处裂隙宽度的减小不会引起该区域表面裂隙率的减小。假如土块未发生错位,可以认为干湿循环后期裂隙宽度均趋于稳定。坡底 3 号区域内各点处的裂隙宽度变化规律与坡面 2 号一致。

图 14 给出了坡面 2 号、坡底 3 号 2 个区域各选点处裂隙深度随干湿循环次数的变化关系。由图 14 可知:坡面 2 号区域各选点处裂隙深度均随干湿循环次数的增加先增大后逐渐保持稳定不变,其中 1 点和 3 点处裂隙深度是在第 2 次干湿循环以后便保持稳定,而 2 点处裂隙深度在第 4 次干湿循环后保持稳定不变。原因在于浴霸和暖风机模拟烘干时,对该区域不同位置的烘干不均匀,致使不同位置裂隙发育不同步。对于坡底 3 号区域,各选点处裂隙深度均随干湿循环次数发展先增大后基本趋于稳定。

4 边坡裂隙演变规律与机理

4.1 边坡裂隙演变规律

图 15 给出了压实度为 90%、坡度为 1:1.5 的边坡 5 次干湿循环后边坡整体的裂隙发育情况。

由图 15 可知:5 次干湿循环后,边坡裂隙整体呈网状分布,具有显著的随机性和不规则性;干湿循环下土体裂隙将土体切割为大小不等的土块,土块形状以不规则四边形为主。主要原因可能是,从整体

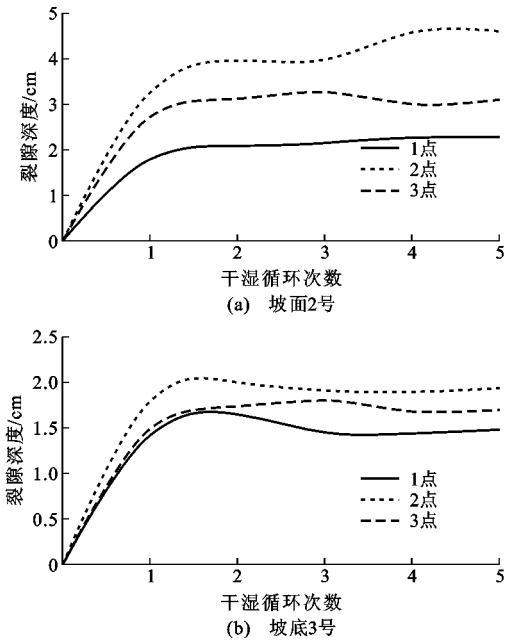


图 14 各区域选点处裂隙深度与干湿循环次数的关系

Fig. 14 Relationship Between Fissure Depth and Number of Cycles at Selected Points in Each Area

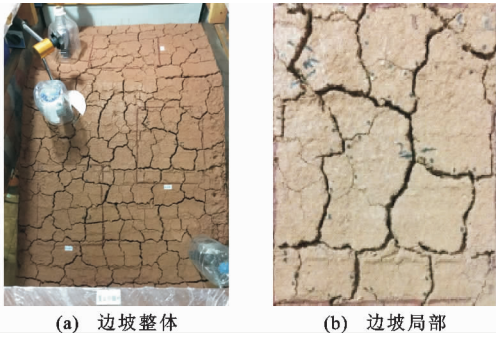


图 15 边坡裂隙发育情况

Fig. 15 Development of Slope Fissures

来看,土体主要沿水平、前后和上下三维空间产生胀缩变形。第 1 次烘干过程初期,土体温度迅速升高,土体失水较快,在前后方向和水平方向产生的收缩应力也快速增大,当收缩应力大于某处土体抗拉强度时,土体在该处产生水平向或竖向裂隙;随着烘干的持续进行,土体会在下个薄弱点处产生水平向或竖向裂隙,土体双向裂隙的不断延伸与增多便将边坡整体分割成不规则四边形。随着干湿循环的持续进行,土体的反复胀缩致使土体在原有裂隙的基础上继续发育,土体破坏进一步加重。

4.2 边坡裂隙演变机理

4.2.1 初始开裂

土体的初始开裂是由于脱湿条件下上下部土体不均匀收缩引起的,土体的失水收缩性和裂隙初次产生的随机性表明土体具有一定的抗拉强度,只有

失水收缩产生的水平应力大于抗拉强度时才伴随裂隙的产生。对于重塑土而言,其抗拉强度主要来源于有效抗拉强度和吸附强度。有效抗拉强度只与土的成分和密度有关,只要土体的密度不发生变化,其值为定值,而其吸附强度是由土体的基质吸力和毛细压力形成的强度,该强度与外力无关,表现出一般黏聚力的特点,被称为吸附强度^[28],即只要某处因失水收缩产生的水平应力大于抗拉强度,就会有裂隙产生。

4.2.2 干湿循环下裂隙发育

干湿循环下裂隙的发育与土体结构的变化有关。首先,在距离坡面一定区域的表层区域,土体初次开裂后,在干湿循环作用下,土体产生反复胀缩变形,土颗粒之间连接作用降低,宏观则表现为土体逐步松散,细小裂隙逐渐消失;其次,反复的干湿循环作用使得土体中的胶结物被溶蚀从而导致了黏聚力减小;除此之外,土中胶结物的溶蚀造成了土体的中小孔隙向中大孔隙发展,而小孔隙是影响基质吸力的主要因素,导致了由基质吸力和毛细压力形成的吸附强度降低,因此土体的抗拉强度降低,土体结构性降低。在接下来的干湿循环过程中,由于土体整体结构性减弱和膨胀变形作用,土体中原有细微裂隙数量和土块个数减少。

在反复干湿循环过程中,原有较大裂隙并未因土体结构削弱和胶结物溶蚀而愈合,其结果是高温下加速了下部土体水分的散失,使得裂隙在宽度和深度上继续发展。随着裂隙加深,裂隙尖端承受两侧土体自重作用产生的水平分力逐渐增大;另外,裂隙的加深加大使上下部土体的脱湿速率差异减小,最终使土体内的含水率梯度减小,土体含水率基本保持不变,由基质吸力产生的净水平拉应力减小,土体的不均匀收缩现象减弱。当水平拉应力等于裂隙尖端两侧土体自重作用产生的水平分力时,裂隙的发育则趋于稳定。

5 结 语

(1)土体开裂的主要原因是含水率梯度引起的土体上下部基质吸力的差异性,致使土体收缩不均匀,而土体的胀缩性、渗透性和脱湿速率的空间分布则是决定含水率梯度的关键因素。

(2)红黏土边坡裂隙在干湿循环作用下是逐渐发育的,主要体现在裂隙的宽度、深度和裂隙率随干湿循环次数发展先增大而后逐渐趋于稳定。第1次干湿循环中边坡土体裂隙发育是随机的,之后则在

原有裂隙基础上继续发育,呈现高度的相似性,但干湿作用有限,后期干湿循环后裂隙指标逐渐趋于稳定。

(3)裂隙总条数、土块个数和裂隙总长度在第1次干湿循环后达到最大值,第2次干湿循环后由于细小裂隙的消失,裂隙总数量、土块个数和裂隙总长度均出现不同程度降低,而2次干湿循环之后裂隙总数量则趋于稳定,但由于原有裂隙的继续延伸贯通,使得部分区域裂隙总长度和土块个数在后期循环中增大。

参考文献:

References:

- [1] 王培清,付强.降雨入渗对裂隙性红粘土边坡的稳定性影响分析[J].公路工程,2013,38(5):165-170,192.
WANG Pei-qing, FU Qiang. Analysis on Stability of Red Clay with Cracks Based on Rainfall Infiltration [J]. Highway Engineering, 2013, 38(5): 165-170, 192.
- [2] 王利明.非饱和土干裂缝及其对边坡稳定性影响研究[D].南宁:广西大学,2011.
WANG Li-ming. Test Study on Shrinkage Cracks of Unsaturated Soils and the Influence of Slope Stability [D]. Nanning: Guangxi University, 2011.
- [3] 赵亮.膨胀土的裂隙特性及其对边坡稳定的影响研究[D].武汉:长江科学院,2012.
ZHAO Liang. Study on Fissure Characteristics and Its Impact on Slope Stability of Expansive Soil [D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2012.
- [4] 吕晓光.膨胀土裂隙发育与演化对边坡稳定性的影响研究[D].合肥:合肥工业大学,2012.
LU Xiao-guang. Research on Influence of Development and Evolution of Expansive Soil Fissures on Slope Stability [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [5] 高志朋.膨胀土干湿循环开裂特性及路堑边坡开裂演化过程研究[D].长沙:长沙理工大学,2007.
GAO Zhi-peng. The Research on the Cracking Property of Expansive Soils in Wet-dry Cycling of Natural Weather and Cracking Evolution of Cutting Slope [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007.
- [6] 卢再华,陈正汉,蒲毅彬.膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的CT试验研究[J].岩土力学,2002,23(4):417-422.

- LU Zai-hua, CHEN Zheng-han, PU Yi-bin. A CT Study on the Crack Evolution of Expansive Soil During Drying and Wetting Cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 417-422.
- [7] 袁俊平, 殷宗泽, 包承纲. 膨胀土裂隙的量化手段与度量指标研究[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(6): 27-30.
- YUAN Jun-ping, YIN Zong-ze, BAO Cheng-gang. Quantitative Description Method & Index for Fissures in Expansive Soils[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20(6): 27-30.
- [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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 王文良, 王晓谋, 王家鼎. 膨胀土填方边坡裂隙发育规律试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2016, 36(2): 17-25.
- WANG Wen-liang, WANG Xiao-mou, WANG Jia-ding. Experiment of Expansive Soil Fissure Traits in Fill Slope[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2016, 36(2): 17-25.
- [12] 黎 伟, 刘观仕, 姚 婷. 膨胀土裂隙图像处理及特征提取方法的改进[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3619-3626.
- LI Wei, LIU Guan-shi, YAO Ting. Improvement of Methods for Crack Image Processing and Crack Feature Extraction of Expansive Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3619-3626.
- [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.
- [14] 周 健, 徐洪钟, 胡文杰. 干湿循环效应对膨胀土边坡稳定性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 152-156.
- ZHOU Jian, XU Hong-zhong, HU Wen-jie. Impact of Wetting-drying Cycle Effects on Stability of Expansive Soil Slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 152-156.
- [15] 张雨灼, 王柳江, 刘斯宏, 等. 干湿循环下膨胀土边坡响应的模型试验[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2015, 36(6): 114-118.
- ZHANG Yu-zhuo, WANG Liu-jiang, LIU Si-hong, et al. Model Test on the Performance of the Expansive Soil Slope During Wetting-drying Cycles[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2015, 36(6): 114-118.
- [16] 陈爱军, 张家生. 基于线弹性力学的非饱和红粘土裂缝开展分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(3): 198-204.
- CHEN Ai-jun, ZHANG Jia-sheng. Analysis of Crack Development of Unsaturated Red Clay Based on Linear Elasticity Mechanics[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(3): 198-204.
- [17] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in Drying Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(2): 263-277.
- [18] 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.
- [19] 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): 216-266.
- [20] MILLER C J, MI H, YESILLER N. Experimental Analysis of Desiccation Crack Propagation in Clay Liners[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(3): 677-686.
- [21] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797-3802.
- LU Hai-bo, ZENG Zhao-tian, ZHAO Yan-lin, et al. Experimental Studies of Strength of Expansive Soil in Drying and Wetting Cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3797-3802.
- [22] 陈正汉, 方祥位, 朱元青, 等. 膨胀土和黄土的细观结构及其演化规律研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1):

- 1-11.
- CHEN Zheng-han, FANG Xiang-wei, ZHU Yuan-qing, et al. Research on Meso-structures and Their Evolution Laws of Expansive Soil and Loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 1-11.
- [23] 郑少河, 金剑亮, 姚海林, 等. 地表蒸发条件下的膨胀土初始开裂分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2229-2233.
- ZHENG Shao-he, JIN Jian-liang, YAO Hai-lin, et al. Analysis of Initial Cracking Behavior of Expansive Soil Due to Evaporation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2229-2233.
- [24] 马 佳, 陈善雄, 余 飞, 等. 裂土裂隙演化过程试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2203-2208.
- MA Jia, CHEN Shan-xiong, YU Fei, et al. Experimental Research on Crack Evolution Process in Fissured Clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2203-2208.
- [25] 石北啸, 王国利, 韩华强. 考虑失水率的膨胀土裂缝开展深度计算模型[J]. 水利水电技术, 2014, 45(11): 57-60.
- SHI Bei-xiao, WANG Guo-li, HAN Hua-qiang. Computation Model for Crack Developing Depth of Expansive Soil with Consideration of Water Loss Rate[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(11): 57-60.
- [26] 吴珺华, 袁俊平, 卢廷浩. 基于变湿应力概念的膨胀土初始开裂分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1631-1636.
- WU Jun-hua, YUAN Jun-ping, LU Ting-hao. Analysis of Initial Cracking Behavior of Expansive Soil Due to Moisture Change Stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1631-1636.
- [27] 赵天宇, 王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲线[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(6): 2445-2453.
- ZHAO Tian-yu, WANG Jin-fang. Soil-water Characteristic Curve for Unsaturated Loess Soil Considering Density and Wetting-drying Cycle Effects[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(6): 2445-2453.
- [28] 阎凤翔. 太原东山黄土静力与动力性质研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
- YAN Feng-xiang. Study on Static and Dynamic Properties of Taiyuan Dongshan Loess [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2004.