

文章编号: 1008-2786-(2015)2-227-06

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000029

植被发育斜坡土体干缩裂缝发育规律的实验研究

徐宗恒^{1,2}, 徐则民^{1,*}, 裴银鸽¹, 李凌旭³

(1. 昆明理工大学土木系, 云南 昆明 650500; 2. 云南师范大学旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500;

3. 云南大学滇池学院, 云南 昆明 650228)

摘 要: 为了得到斜坡非饱和带土体失水过程中干缩裂缝的发育规律, 实验室条件下, 将不同粒度组成的四组植被发育斜坡非饱和带土样饱和以后恒温失水, 获取裂缝形成和发展过程中形态特征, 并计算分析其裂隙率和裂缝盒维数的变化规律; 基于 ImageJ 软件计算裂缝发育稳定时被裂缝切割形成的块区个数和各块区面积。研究结果表明: 在裂缝发育过程中, 土样的裂隙率和盒维数呈上升的趋势, 且两者呈显著正相关关系, 裂隙率总体上符合三阶段变化规律; 颗粒组分越粗, 裂缝发育越缓慢, 其盒维数越小, 裂缝形态相对规则; 裂缝发展稳定时裂缝块区面积分布范围越广, 块区面积越不均匀, 裂缝切割土样形成块区个数越少。本文仅主要考虑了土样颗粒组成对裂缝发育的影响, 其他影响因素有待进一步试验分析。

关键词: 植被发育斜坡; 干缩裂缝; 发育规律; 盒维数; 裂隙率

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

在降雨条件下, 植被发育斜坡非饱和带土体中, 包括土体干缩形成的裂缝在内的大孔隙能显著的影响斜坡地下水的补给条件。作为降雨转化为地下水的必经环节, 非饱和带水分入渗问题一直是研究的热点问题, 而发育于非饱和带中的土体干缩裂缝作为优先渗透路径之一^[1-2], 其规模(数量、单体开度和裂隙率等)随季节交替而波动, 可大幅影响土体的渗透性能, 因此对非饱和带土体干缩裂缝及其发育规律进行研究具有重要的现实意义。

目前, 土体干缩裂缝的研究得到了越来越多学者的重视, 已取得若干进展, 但是这些进展是不均衡的, 已有研究主要以黏粒含量较多的传统意义的细粒土(如农田土、湖泊沉积土等)为研究对象, 对其他土体(如草地、植被发育斜坡土体)的研究还鲜有报道。在笔者的研究调查中发现, 植被发育斜坡土

体中大孔隙除了植被根系通道、动物通道、土-石接触带孔隙外, 还包括大量的干缩裂缝。由于其黏粒含量较小, 主要以粉粒与砂粒为主, 并且由于斜坡土体形成环境条件的差异, 其干缩裂缝的发育规律势必与细粒土不同。已有研究主要集中于不同温度、干湿循环次数、土层厚度和土质成分对干缩裂缝形态学的影响, 由不同粒度组成的土体及其干缩裂缝的发育规律还未见报道^[3-6]。针对这一问题, 本文在实验室条件下, 以不同粒度组成的植被发育斜坡非饱和带土体为研究对象, 将其饱和以后恒温失水研究土样干缩裂缝的发育规律。

1 取样点及试验过程

用于本次试验的供试土体来自云南省昆明市呈

收稿日期(Received date): 2014-05-10; 修回日期(Accepted): 2014-08-11。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金-云南联合基金重点项目(U1033601)和高等学校博士学科点专项科研基金(20135314110005)。[The National Natural Science Foundation of China-Yunnan Joint Fund and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education.]

作者简介(Biography): 徐宗恒(1987-), 男, 云南永胜人, 博士, 讲师, 主要从事斜坡地质灾害研究工作。[Xu Zongheng(1987-), male, doctoral candidate, majoring in slope geological disaster research.] E-mail: xuzh2008@163.com; Tel: 0871-65915299

通信作者(Corresponding author): 徐则民(1963-), 教授, 博士生导师, E-mail: abc5100@188.com

贡新区段家营马卡山[图 1(a)],其最高峰海拔 2 085 m,坡脚海拔 2 002 m,坡高 83 m,取样点地理位置为 102°52′16.87″E、24°51′57.74″N。图 1(b)为取样点环境,取样点发育有长势较好的天然森林植被,周围植被主要为滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucooides* Schott.) 和云南松(*Pinus yunnanensis* Franch.),取样时首先去除斜坡表层 3 ~ 10 cm 厚的枯枝落叶及腐殖质覆盖层,其下 10 cm 范围内土体为试验所用土样。图 1(c)为取样点外围区域表层土体发育的干缩裂缝,从图中可以看出,视域范围内土体被粗糙的裂缝迹线切割,被分割形成的块区面积大小不一,裂缝开度不等,有的已被土体颗粒所堵塞,各单条裂迹线相互串联形成网状结构。



图 1 取样点地理位置、取样环境及斜坡土体干缩裂缝
Fig.1 Sampling location , environment and shrinkage cracks

为了研究不同粒度组成对土体干缩裂缝发育规律的影响,将取回的土样分别经过孔径为 0.075 mm、0.25 mm、0.5 mm 的振动筛分离, <0.075 mm 颗粒用 LS 13320 激光粒度仪进行分析,共设计 4 组试验,各组试样的颗粒组成如表 1 所示,1[#]土样中除了 >0.075 mm 粒径的颗粒,其余类同,4[#]样为原位取回未经筛分的样品。试验开始时,将各组试样加适量水制作成均匀饱和泥浆置于定制的长方体玻璃缸内(尺寸为 35 cm×35 cm×10 cm),然后放入 40℃ 的烘箱中使其恒温失水,期间不定期拍照获取裂缝的发育情况,并称重以计算此时土样的质量含水率。需要说明的是,在采用高分辨率数码相机拍摄过程中,相机需与土样保持固定的距离,并统一焦距,使得图像分辨率(即单像素所代表的实际长度)保持一致。在失水过程中当土样重量 2 h 内无变化时,则认为裂缝形态趋于稳定^[3,7]。为试验结果的准确性,每组样品均进行 3 组试验,且保证同一试样的初始含水率相同,计算结果取 3 组平均值。

表 1 供试土样的颗粒组成					
Table 1 The grain composition of soil samples					
颗粒组成(编号)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$
<0.075 mm(1 [#])	9.609	90.011	0.380	5.440	28.570
<0.25 mm(2 [#])	9.404	63.332	27.264	5.821	43.535
<0.5 mm(3 [#])	6.823	44.117	49.060	10.220	74.340
未经筛分土样(4 [#])	5.231	38.079	43.084	>11.610	>78.073

2 图像处理及结果分析

图 2(a)为 1[#]土样裂缝发育稳定以后的最终形态,为了消除边界效应对处理结果的影响,去除周边 5 cm 范围内区域,选取 30 cm×30 cm 的中间区域作为研究对象(图 2(b))。利用 MATLAB R2009b 图形图像处理功能进行编程对所选区域裂缝图像进行降噪、滤波和二值化处理,即将图像黑白化,其中黑色部分为裂缝,白色部分为块区;经二值化处理后,图片上会因土样中含有杂质而存在的独立小黑点,利用 Photoshop 软件对二值化图像进行增灰及去杂点操作(图 2(c))。



(a) 1[#]土样裂缝发育的最终形态 (b) 选取 30 cm×30 cm 区域 (c) 二值化图像
图 2 图像处理过程中不同阶段的土样裂缝图片
Fig.2 The soil samples images during different stages of picture processing

对于裂缝形态定量化描述,可以由裂隙率及裂缝分形维数来表征,前者定义为二值化图像中黑色像素数目(代表裂缝面积)与土体的总像素数目(代表土体总面积)的比值,其值可以作为裂缝发育程度的一种度量;后者可以定量地描述裂缝发育过程中的规则程度,其计算依据为土体干缩裂缝形态虽然不严格遵循自相似,但符合统计意义上的自相似性,对其研究可以计算其盒计数维数(盒维数)来研究,计算原理如下^[8]:

设 A 是 R^n 空间的任意非空子集,对于任意的一个 $r>0$, $N_r(A)$ 表示用来覆盖 A 所需边长为 r 的 n 为立方体(盒子)的最小数目。如果存在一个数 D ,使得 $r\rightarrow 0$ 时,有

$$N_r(A) \propto 1/r^D$$

那么称 D 为 A 的盒计数维数(简称盒维数)。在本文实际计算过程中,可以采用“数格子”法进行分形维数的计算,即用一系列的边长为 r 的正方形网格作为盒子覆盖于图像上,计算网格中有裂缝的个数 $N_r(A)$,然后以不同的 $\ln r$ 和对应的 $\ln [N_r(A)]$ 在直角坐标中拟合出直线,用最小二乘法计算出来的直线斜率的相反数即为所求的盒维数 D 。图3为各供试土样裂缝发育的稳定状态及其盒维数计算,从中可以看出,两者的决定系数 R^2 均在 0.99 以上,说明裂缝分布具有自相似性,可以用分形来表述。经过计算,各供试土样的裂隙率和裂缝盒维数随着土样质量含水率降低的变化曲线如图4和图5。可以看出,随着含水率的降低,试样的裂隙率和盒维数均呈上升的趋势,且将裂隙率与盒维数两者进行相关性分析可知,两者呈显著正相关关系,说明土体干缩裂缝发育的过程中,随着裂隙开度的扩张以及单裂隙的延伸和派生,裂隙表现得越来越不规则。从图4中可以看出,裂隙率的增加总体上遵循三阶段的变

化规律^[6]:以4#样来说,试样从初始含水率降至39.886%,裂缝发展很缓慢;当含水率降至37.892%,裂缝发展很快,曲线斜率陡峭;当降至27.92%时,曲线斜率平缓,这表明裂缝虽有发展,但增幅缓慢。从整体发育趋势上看,粒度组分较粗(土样粗细程度可以由特征粒径 d_{50} 表征,表1)的4#裂隙率增长幅度最慢,1#样最快,说明颗粒组分越粗,裂缝发育程度越缓慢。特别的,2#样的含水率为33.51%~18.52%时裂隙率比1#样对应含水率时的要小,究其原因,观察表1可知,两者的黏粒含量相差不大,而粉粒与砂粒含量相差较大,可能是由于颗粒组成的差异造成的,但影响土体干缩裂缝的发育规律的因素不仅有颗粒组成,还有土质成分等因素^[6],具体原因还需进一步试验分析。由图5可以看出各组土样在不同失水阶段干缩裂缝形态规则性的变化规律。同样的,在相同含水率情况下,4#样盒维数最小,1#样最大,2#样和3#样则表现出近乎相同的变化规律,说明颗粒组分越细,裂缝的盒维数越大,产生的裂缝形态越不规则。

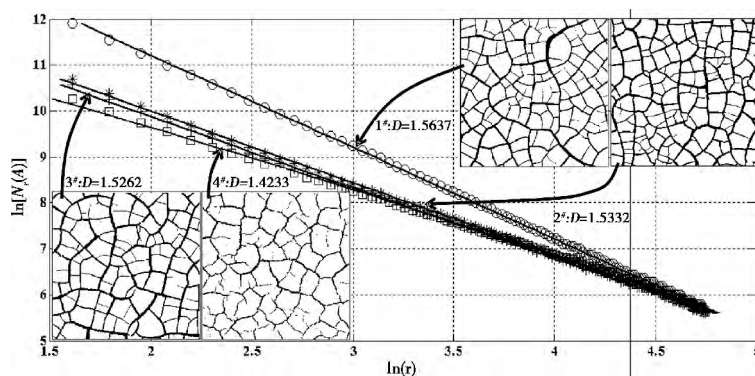


图3 各土样裂缝发育稳定状态及其盒维数计算

Fig. 3 Shrinkage crack final condition and Calculation for box-counting dimension

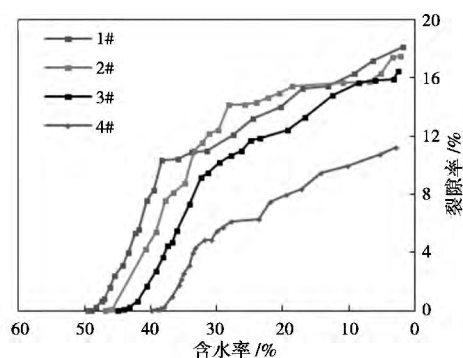


图4 裂缝发育过程中裂隙率随含水率的变化

Fig. 4 Changing process between crack rates and moisture content

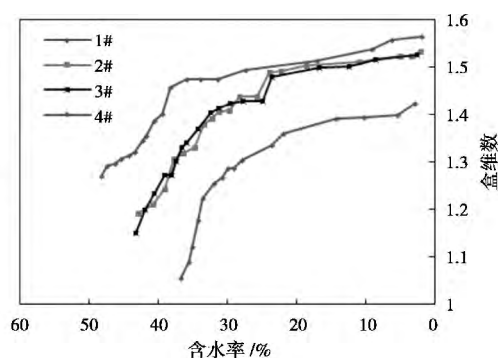


图5 裂缝发育过程中盒维数随含水率的变化

Fig. 5 Changing process between box-counting dimension and moisture content

表 2 所示为各组土样裂缝初次出现时(初现时)试样含水率、裂缝发育稳定时含水率以及对应的裂隙率和盒维数,可以看出,不同粒度组成的土样裂缝发育稳定时土样含水率相差不大,但粒度组分越粗,土样裂缝初现时的含水率越小,稳定时裂隙率越小且盒维数越低,说明土样在失水收缩过程中,颗粒组分越细,土体越不稳定,越容易产生裂缝,而且产生的裂缝面积越大,形状越不规则。

表 2 各组土样裂缝初现时含水率以及稳定时含水率、裂隙率、盒维数

Table 2 The initial and final moisture content of soil shrinkage crack, crack rate and box-counting dimension

土样编号	裂缝初现时 含水率/%	裂缝稳定时 含水率/%	稳定时裂 隙率/%	稳定时盒 维数
1 [#]	49.441	1.917	18.09	1.563 7
2 [#]	46.853	2.116	17.49	1.533 2
3 [#]	44.872	2.493	16.45	1.526 2
4 [#]	39.886	2.849	11.22	1.423 3

根据唐朝生等研究^[6],测量块区面积大小和描述面积分布是土样干缩裂缝表面结构定量研究的一个重要方面。此处利用 Image J 软件中颗粒分析功能对图 2 中得到的各土样裂缝稳定以后的二值图像中裂迹线切割形成的块区进行计算,得到块区面积最小的出现在 3[#]土样中,为 21.05 mm²,最大出现在 4[#]土样中,为 2 239.37 mm²。为了方便比较分析,统一以 100 mm² 为间隔,将块区面积从 20 ~ 2 320 mm² 划分为 23 个区间,计算各土样各块区面积范围内块区的个数和块区面积之和,如图 6 和图 7 所示。从图 6 中可以看出,1[#]、2[#]和 3[#]土样的块区个数主要集中于块区面积为 20 ~ 900 mm² 内,占据 123/139、141/151 和 93/117 比例的总块区个数(分母为总块区个数),而 4[#]土样则在各区间范围内相对均匀,变化较为平缓,在上述范围内所占比例为 47/84,在最大块区范围内仅有 4[#]样有分布。从总块区数目来看,2[#]样 > 1[#]样 > 3[#]样 > 4[#]样。图 7 中横坐标块区面积数值“70”和“170”mm² 代表块区面积范围“20 ~ 120”和“120 ~ 220”mm²,其他类同。从图中可以看出,1[#]样和 3[#]样在 620 ~ 720 mm² 以及 2[#]和 4[#]样在 520 ~ 620 mm² 和 720 ~ 820 mm² 范围内块区面积和最大,且块区面积多集中于该相邻范围内,所不同的是 4[#]样在块区面积较大范围内均有较多分布,而另三者分布较少。总体说来,颗粒组分越粗,得到的裂

缝块区面积分布范围越广,块区面积越不均匀,裂缝切割土样形成块区个数越少。

3 裂缝发展规律

在试验中发现以及前节分析可知,不同颗粒组成的土样裂缝的发育过程差别很大,限于篇幅,此处图 8 和图 9 仅列出了 1[#]和 4[#]土样在失水直至稳定过程中干缩裂缝的发育过程,可以看出,4[#]土样裂缝的形成和发展整体上符合 Horgan et al.^[9]所发现的 3 个阶段,即新生裂缝的发育(随机发展)→已有裂缝上新裂缝的发育(裂缝吸引)→块区分裂。首先,土体表面逐渐发育有孤立的数条裂缝,这些裂缝彼此有交叉,但并未立刻实现对土体切割形成块区,而是在主裂缝尖端引导下生长的同时分叉产生多级次级裂缝,当主裂缝发育稳定以后,次级裂缝的生长开始形成块区,当裂缝稳定时,还存在有很多开度较小的派生裂缝并没有实现“完全互相吸引”对块区进行“切割”;裂缝稳定时裂缝之间的夹角以 120°或 60°为主,次生裂缝的多为 90°,块区形状以四边形及五边形居多^[6]。而 1[#]土样并不严格遵守上述裂缝发育规律,首先是新生裂缝的发育-裂缝吸引,而后新生裂缝发育-裂缝吸引-块区分裂之间同步随机进行,发展过程无规律可寻,受边界条件的影响,主裂缝发育一般从边壁处开始,而且在新生裂缝产生之前,已有单体主裂缝之间能迅速实现“吸引”相交从而形成初步大块区,然后在主裂缝拓展的同时伴随次生裂缝的生长,一般最多在形成有 3 级次级裂缝以后整体裂缝网络发展稳定,而且次级裂缝基本能全部实现“相互吸引”而形成块区,块区形成的面积较为均匀。发展稳定以后裂缝之间夹角多为 90°,块区形状大多数为四边形。

从图 8 ~ 9 中还可以看出,1[#]土样的轮廓迹线较为光滑,主裂缝的生长迹线一般呈弧形,次级裂缝则是直线和弧线的结合,而 4[#]土样的轮廓迹线较为粗糙,主裂缝和次级裂缝生长迹线均较为平缓,且前者裂缝的开度及裂化深度在很多位置均大于后者。结合 2[#]和 3[#]土样裂缝发育过程可知,土体颗粒组分越粗,裂缝的生长轨迹越平缓,轮廓迹线越粗糙。4[#]土样稳定的裂缝形态符合网状裂缝^[10]的基本形态,与图 1(c) 取样现场发现的干缩裂缝表现一致;就生长过程而言,1[#]土样的裂缝与分岔型裂缝^[11]的发展过程类似。

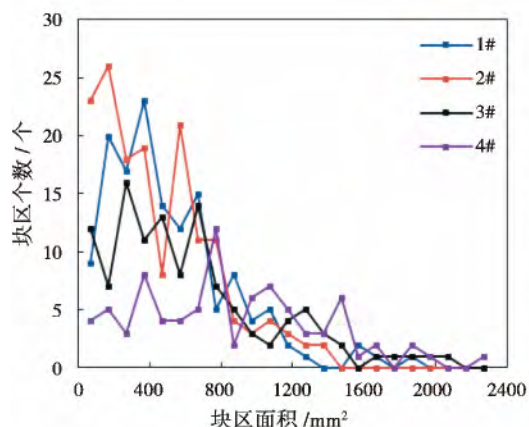


图6 各块区面积范围内块区个数

Fig. 6 Blocks Number within specific block area

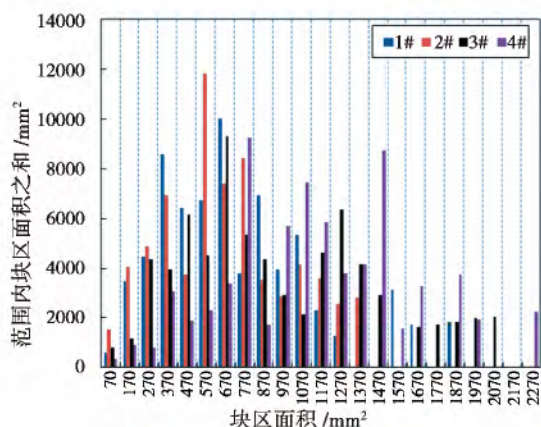


图7 各块区面积范围内块区面积之和

Fig. 7 Sum of block area within specific block area

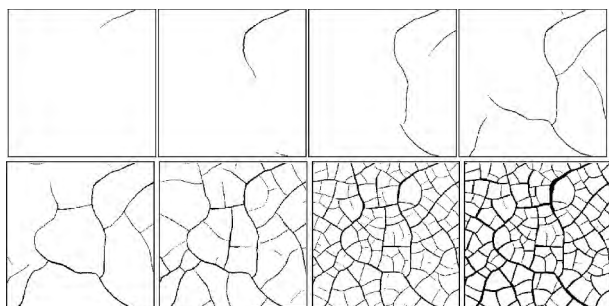


图8 1#土样裂缝的形成发展过程

Fig. 8 The shrinkage crack evolution of 1# soil sample

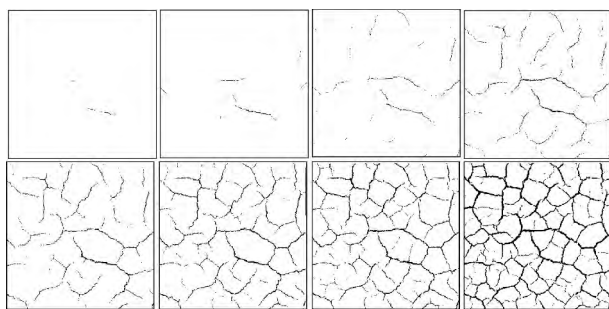


图9 4#土样裂缝的形成发展过程

Fig. 9 The shrinkage crack evolution of 4# soil sample

4 结论

通过对不同颗粒组成的4组土样加水饱和,在实验室40℃条件下恒温失水观察其裂缝发生发展的情况,将采集到的不同时刻裂缝发育图片进行处理,计算分析裂隙率及裂缝盒维数随含水率变化的情况,以及裂缝稳定时土样形成的块区个数以及各块区面积,最后定性描述了裂缝的发育规律,取得的主要结论有:

1. 在土样失水过程中,随着含水率的降低,各土样的裂隙率和盒维数呈上升趋势,且裂隙率与盒维数呈显著正相关关系,说明土体裂缝发育的过程中,随着裂隙开度的扩张以及单裂隙的延伸和派生,裂缝表现得越来越不规则;裂隙率的增加遵循三阶段变化规律;总体上,颗粒组分越细,裂缝发育速度越快,盒维数越大,产生的裂缝形态越不规则。

2. 各土样裂缝发育稳定时土样含水率相差不大,但粒度组分越细,裂缝初现时土样含水率越大,说明土体粒度组分越细,土体越不稳定,越容易产生干缩裂缝,且产生的裂缝面积较大,形状越不规则。

3. 裂缝稳定时形成的各块区面积范围内块区个数以及对应的面积之和表明,土体颗粒组分越粗,得到的裂缝块区面积分布范围越广,块区分割不稳定,面积越不均匀,裂缝切割土样形成块区个数越少。

4. 1#和4#土样在失水直至稳定过程中裂缝形态的发育过程表明,颗粒组分较粗的4#土样裂缝的形成和发展基本上符合:新生裂缝的发育(随机发展)→已有裂缝上新裂缝的发育(裂缝吸引)→块区分裂的3个发展阶段,但细粒组分较多的1#土样裂缝则不严格遵守上述裂缝发育规律,发展过程无规律可寻。前者的轮廓迹线较为粗糙,主裂缝和次级裂缝生长迹线均较为平缓,而后者轮廓迹线均较平滑,生长迹线多呈弧线形。

5. 在本文中主要考虑了颗粒组成对裂缝发育的影响,实际上还有许多因素制约着裂缝的发生和发展,如矿物成分、土质成分等,具体还需进一步试验分析。

参考文献(References)

- [1] Xu Zemin. Vegetation and macropores in vadose zones of hill slopes [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 134–142 [徐则民. 植被与斜坡非饱和带大孔隙[J]. *地学前缘*, 2007, 14(6): 134–142]
- [2] Zhang Jiaming, Xu Zemin, Pei Yingge. Macropores in vadose zone of well vegetated slopes [J]. *Mountain Research*, 2012, 30(4): 439–449 [张天明, 徐则民, 裴银鸽. 植被发育斜坡非饱和带大孔隙[J]. *山地学报* 2012, 30(4): 439–449]
- [3] Yang Heping, Liu Yanqiang, Li Hanfeng. The development of cracks of compacted expansive soil under dry-wet cycling [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2012, 28(1): 1–5 [杨和平, 刘艳强, 李晗峰. 干湿循环条件下碾压膨胀土的裂隙发展规律[J]. *交通科学与工程*, 2012, 28(1): 1–5]
- [4] Liu Ping. Desiccation and cracking on the surface of ancient earthen architectures [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009. [刘平. 土建筑遗址表面干缩开裂机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.]
- [5] Tang Chaosheng, Shi Bin, Liu Chun, et al. Developing law and morphological analysis of shrinkage cracks of clayey soil under different temperatures [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(5): 743–749 [唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 黏性土在不同温度下干缩裂缝的发展规律及形态学定量分析[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(5): 743–749]
- [6] Tang Chaosheng, Shi Bin, Liu Chun, et al. Factors affecting the surface cracking in clay due to drying shrinkage [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(10): 1186–1193 [唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 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]
- [7] Zou Fei, Xia Yi. Fractal characteristics of plane crack propagation of red clay [J]. *Yangtze River*, 2011, 42(15): 58–62 [邹飞, 夏怡. 红黏土平面裂纹扩展的分形特征[J]. *人民长江*, 2011, 42(15): 58–62]
- [8] Zhu Hua, Ji Cuicui. *Fractal Theory and its applications* [M]. Beijing: Science Press, 2011: 37–38 [朱华, 姬翠翠. 分形理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社 2011: 37–38]
- [9] Horgan G W, Young I M. An empirical stochastic model for the geometry of two-dimensional crack growth in soil (with discussion) [J]. *Geoderma*, 2000, 92: 263–276
- [10] Chen Shangxing. Soil fissure network research based on fractal theory [D]. Nanjing: Hohai University, 2009. [陈尚星. 基于分形理论的土体裂隙网络研究[D]. 南京: 河海大学, 2009.]
- [11] Yi Shunmin, Li Zhiheng, Zhang Yanzhong. The fractal characteristics of fractures in expansion soil and its significance [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(3): 294–298 [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]

Experimental Study about Development Regularity of Vegetated Slope Soil Shrinkage Crack

XU Zongheng^{1 2}, XU Zemin¹, PEI Yingge¹, LI Lingxu³

(1. Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. School of Tourism and Geographic Science Yunnan Normal University Kunming 650500, China;

3. Dianchi College of Yunnan University, Kunming 650228, China)

Abstract: For the research on development regularity of vegetated slope soil shrinkage crack, four soil samples of different particle composition were saturated and then lost water with constant temperature under laboratory conditions. We calculated the crack ratio, box-counting dimension and the changing process between two former and moisture content by means of images acquisition in the process of shrinkage crack development. Furthermore, we calculated the block quantity and block area formed by crack trace based on Image J software. The results showed that the crack ratios, box-counting dimensions were increased and there are positively correlated with each other. Moreover, the increase pattern of crack ratios could be divided into three stages. In addition, the development velocity of shrinkage crack is slower and the value of box-counting dimension is smaller when the content of coarse grain component is higher, and then there a more wide range of block area which means block size more heterogeneous and the sum of block area is lesser according to the block quantity and block area analysis. Finally, it's necessary to note that in this paper we just consider the influence of grain composition. The others will be analyzed in further study.

Key words: vegetated slope; soil shrinkage crack; development regularity; box-counting dimension; crack ratio