

膨胀土干湿循环胀缩裂隙的定量分析

胡东旭, 李 贤, 周超云, 薛 乐, 刘洪伏, 汪时机

(西南大学 工程技术学院, 重庆 400715)

摘 要: 为研究膨胀土在降雨与蒸发过程中的胀缩裂隙演化规律, 对原状膨胀土进行干湿循环的 CT 扫描试验。利用 Matlab 软件编写程序对土体 CT 图进行三维重建以及裂隙信息的提取, 从定性与定量的维度研究土体三维空间裂隙与干湿循环之间的关系。定性研究发现, 裂隙发育开始于土体内部初始孔洞与微纹裂等薄弱处, 并扩展延伸, 形成裂隙面、裂隙体, 最后形成复杂的三维裂隙网络; 随着干湿循环的进行, 裂隙面积和体积逐渐增加, 最后趋于稳定。定量研究发现, 裂隙面积沿试样轴向的分布具有明显的周期性规律, 随着干湿循环的进行, 周期逐渐减小, 振幅 A 先增加后减小; 裂隙开展分为 3 个阶段, 即裂隙酝酿期、裂隙快速发育期和裂隙平稳发展期, 而裂隙发育主要发生在裂隙快速发育期。得出了试样径向裂隙面积、轴向高度与累计干缩体变之间的近似关系, 以裂隙体积定义了符合 Logistic 函数变化规律的扰动函数, 可以预测裂隙在试样局部的发展及分布情况, 为裂隙膨胀土的渗透特性以及整体与局部的应力、应变研究提供参考。

关 键 词: 膨胀土; 干湿循环; 裂隙; 定量分析

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 增 1-0318-07

Quantitative analysis of swelling and shrinkage cracks in expansive soil

HU Dong-xu, LI Xian, ZHOU Chao-yun, XUE Le, LIU Hong-fu, WANG Shi-ji

(College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing, 400715, China)

Abstract: To study swell-shrink fissure evolution rule of expansive soil in the natural rainfall and evaporation process, wetting-drying cycles tests, and CT scanning tests have been done. The three-dimensional reconstruction of soil CT images and the extraction of fracture information are carried out using Matlab software. The relationship between three-dimensional space cracks and wetting and drying cycles is studied from qualitative and quantitative dimensions. The relationship between soil's fracture in three dimensional space and d wetting-drying cycles are studied from the qualitative and quantitative dimensions. Qualitative studies have found that the development of fractures begins at the weak spots such as initial pores and microcracks within the soil; and thus extends to form fracture surfaces and fissure bodies; and finally forms a complex three-dimensional fracture network. As the wetting-drying cycles progresses, the area and volume of the fracture gradually increase; and finally tend to stability. Quantitative studies have found that the distribution of fracture area along the axial direction of the sample has obvious periodicity. As the wetting-drying cycle proceeds, the period gradually decreases, and the amplitude A increases first and then decreases. The development of fissure is divided into three stages: i.e, fissure gestation period, fissure rapid development period and fissure steady development period; and fissure development mainly occurs during fissure development period. The approximate relationship between radial fracture area, axial height, and cumulative dry shrinkage volume change is obtained. The fracture volume is defined as a function of the Logistic function. It can predict the development and distribution of fissures in the sample, and can provide references for the permeability characteristics of fissured expansive soil and the study of the overall and local stress and strain.

Keywords: expansive soil; wetting-drying cycle; fissure; quantitative analysis

1 引 言

在自然条件的干湿交替作用下膨胀土体积发生

显著膨胀收缩, 产生裂隙, 导致强度剧烈衰减, 变形增大, 成为影响膨胀土边坡稳定的主要因素, 系统定量地研究膨胀土的胀缩裂隙对于研究膨胀土边

收稿日期: 2017-12-7

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 11572262); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No. XDJK2018AB003)。

This work was supported by the National Science Foundation of China(11572262) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (XDJK2018AB003).

第一作者简介: 胡东旭, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 主要从事非饱和土理论方面的研究。E-mail: 742394258@qq.com

通讯作者: 汪时机, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学方面的教学和研究。E-mail: shijwang@swu.edu.cn

坡稳定性显得尤为重要^[1-3]。

易顺民等^[4]依据分形理论研究了膨胀土表面裂隙、孔隙结构的分形特征,结果表明膨胀土的表面裂隙网络和裂隙形态特征具有很好的统计自相似性,并与膨胀土的抗剪强度指标有很好的相关性。Tang 等^[5]控制温度使膨胀土产生裂隙,定义了不同含水率下的裂隙网络,获得了膨胀土试样表面裂隙率。袁俊平等^[6-7]利用远距光学显微镜对膨胀土试样表面裂隙发展进行动态、定量地观测,计算了裂隙图像的灰度熵,认为裂隙图像的灰度熵可以较好地表征裂隙的发育程度。张家俊等^[8]利用矢量图技术对土体表面裂隙照片进行矢量化处理,以裂隙面积率、裂隙长度比与土块平均面积比等定义裂隙度。黎伟等^[9]对湿干循环作用下压实膨胀土表面的裂隙率、条数、长度、宽度和方向的变化规律进行了研究。韦秉旭等^[10]采用计算机图像处理技术,研究发现裂隙的节点个数、块区个数、裂隙率和裂隙平均长度是描述其形态结构和几何特征的基本指标,可以用来描述裂隙的发育程度。

虽然目前在裂隙特征的研究上取得了多方面进展,但主要集中在土体表面二维图像或者局部某些切面,无法准确地反映试样内部三维裂隙开展及分布的真实情况。CT 技术能够动态、定量、无损地检测出物质结构的内部信息,被广泛应用于膨胀土的研究^[6, 11-13],对土体进行薄层扫描获得的大量 CT 图,不仅可以观测到二维平面裂隙开展情况,还可以进行较为准确的三维重建,定量地研究试样内部三维空间裂隙发展与分布情况。

2 试验方法

2.1 试样制备

试验用土为取自安徽合肥滨湖新区的原状膨胀土,取土深度为 2.5 m,制成直径为 39.1 mm、高 80 mm 的圆柱体试样,土的基本物理性能指标见表 1。

表 1 膨胀土基本物理性能指标

Table 1 Basic physical properties of expansive soil index

参数	量值	参数	量值
天然含水率 ω / %	24.200	土粒相对密度 G_s	2.750
饱和含水率 ω' / %	25.200	自由膨胀率 δ_{ef} / %	51.000
天然密度 ρ / (g/cm ³)	2.020	饱和度 S_r / %	96.200
孔隙比 e	0.693	缩限 ω_s / %	9.700

2.2 试验方案

2.2.1 干湿循环试验

当膨胀土含水率在接近缩限变化时土体不再产

生明显的变形,裂隙也不再开展,在自然降雨与蒸发的过程中膨胀土含水率在饱和含水率以下变化,故本次试验干湿循环含水率变化范围设为 $\omega \in [10.0\%, 25.0\%]$ 。脱湿过程采用可控制鼓风与否的控温干燥箱,温度设定为 35 °C,不鼓风,脱湿到目标含水率 $\omega = 10.0\%$ 。为了不影响土体的原结构,采用水膜转移法增湿,将试样置于精度为 0.01 g 的电子天平上,在贴于试样表面上的滤纸上用滴管均匀缓慢的滴入预定的水量,然后将试样置于封闭保湿缸内养护 2 d,使水分在水膜压力作用下逐渐转移,均匀分布于土体内。干湿循环次数为 0、1、3、5 次的 4 组试样分别进行试验,试验后土样见图 1。

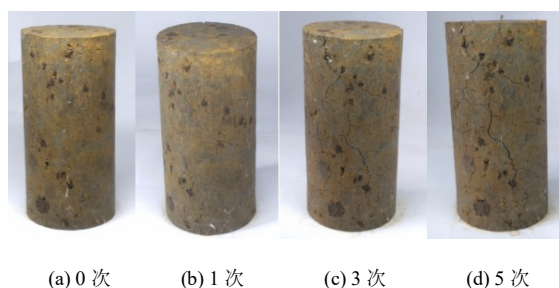


图 1 干湿循环后试样

Fig.1 Soil samples after drying-wetting cycles

2.2.2 CT 扫描试验

为得到清晰的裂隙图像,CT 扫描时将试样含水率均脱湿到 $\omega = 18\%$ 。本试验采用德国西门子子公司的 SOMATOM Sensation 40 CT 机进行薄层扫描(见图 2),扫描步长为每层 0.63 mm,可较为真实准确地反映整个试样的内部情况,而不同于以往仅选取几个特征截面^[12]。其他扫描参数见表 2,选择合适的窗位窗宽,得到 CT 图如图 3 所示。



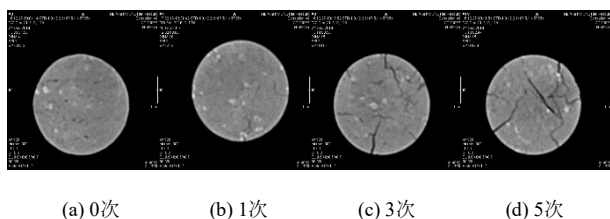
图 2 Sensation 40 CT 机及 CT 重建图像

Fig.2 Sensation 40 CT and CT reconstructed image

表 2 CT 机扫描参数

Table 2 Scanning parameters of CT apparatus

电压 /kV	电流 /mA	扫描步长 /mm	空间分辨率 /mm	重建矩阵 /像素×像素	显示野(DFOV) /mm
120	300	0.63	0.29	512×512	60



(a) 0次 (b) 1次 (c) 3次 (d) 5次

图3 不同干湿循环次数下的 CT 图

Fig.3 CT under different drying-wetting cycles

3 裂隙三维重建

3.1 CT 图的预处理和三维重建

为准确地从 CT 断层图像中准确提取裂隙信息,需要对原始图像进行预处理,以提高图像质量,然后将每个试样的所有 CT 图像构造为三维数据矩阵,进行体重建。土体表面经过透明度处理后可直观地观察土体内部裂隙的分布情况,重建效果如图4所示。图中, x 、 y 为矩阵尺寸 (512 像素×512 像素); z 为 CT 图对应的层数,每层厚度均为 0.6 mm。

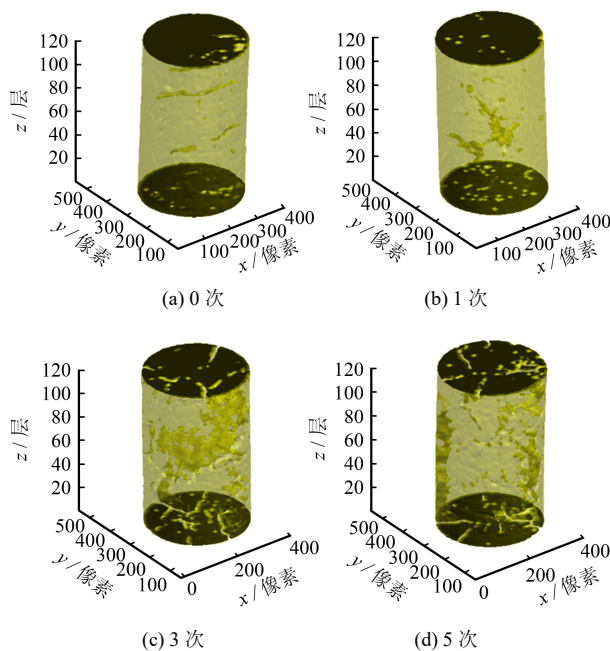


图4 土体裂隙 CT 图三维重建

Fig.4 3D reconstruction of soil fissure CT

3.2 土体裂隙演化定性分析

扫描后得到原始 CT 图 (见图3), 通过 Matlab 对 CT 图进行三维重建后如图4所示。由图中可知, 试样在干湿循环之前存在一些细观上的微裂纹和宏观上的孔洞、裂隙等初始损伤, 随着干湿循环的进行, 多数裂隙从初始损伤处开始扩展、延伸, 形成宏观裂隙, 点状孔洞逐渐连通为线 (条) 状裂隙, 随即贯通发展为裂隙面, 裂隙面连通进而演化为裂隙体, 最后形成复杂的三维裂隙网络, 在此过程中

裂隙面积、体积等逐步累计。

4 裂隙定量研究

4.1 裂隙体积变化分析

由原始的CT图和三维重建图对裂隙只能进行定性的分析,无法量化研究,通过编制Matlab程序对裂隙信息定量提取,处理流程如图5所示。

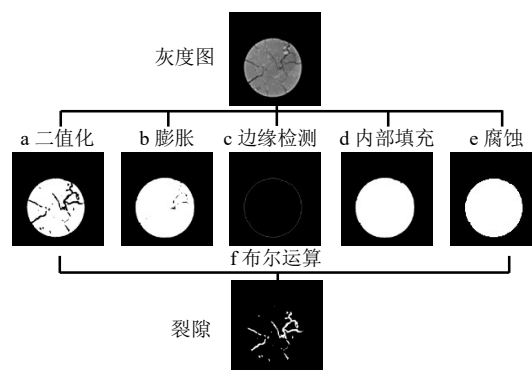


图5 裂隙提取流程图

Fig.5 Flowchart of fissure extracting

二值化参数的确定需要通过不断的试探,采用当二值化后的裂隙与CT灰度图中的裂隙在视觉感受上接近时的参数,然后对其他试样采用同样的参数进行二值化处理。定量统计出裂隙信息,其中每层裂隙面积 A_i (mm^2), 试样裂隙总体积 V (mm^3) 为

$$A_i = A_{i0}\beta \quad (1)$$

$$V = \int_0^H A_i \approx \sum_{i=1}^N V_i = \sum_{i=1}^N A_i d \quad (2)$$

式中: A_{i0} 为每层裂隙的像素值 (像素²); β 为CT图像像素大小与试样尺寸之间的换算系数,研究发现其值等于CT图重建矩阵的维数与CT图DFOV (为显示CT术语中“显示野”,表示图像在CT图中显示的大小) 大小的比值; H 为试样高度; N 为扫描总层数; d 为扫描步长; CV 为离散系数; 裂隙体积 V 与裂隙度 DF (DF 为裂隙体积/试样总体积) 见表3。

表3 裂隙相关指标

指标	循环次数 N /次			
	0	1	3	5
裂隙体积 V/mm^3	480.060	748.430	1 945.810	1 951.460
裂隙度 $DF/\%$	0.558	0.870	2.263	2.269
离散系数 CV	0.875	0.873	0.568	0.421

以裂隙面积均值和标准差为基础,提出离散系数来衡量干湿循环过程中裂隙沿轴向分布的离散程

度。离散系数又叫变异系数 (CV), 是标准差与平均数的比值, 是衡量各观测值变异程度的一个统计量, 当多组数据平均值不同进行离散程度的比较时需用离散系数来比较。

如图 6 所示, 在第 0、1 次干湿循环后裂隙逐渐萌生和发育, 裂隙体积逐渐增大, 标准差离散系数较大, 说明裂隙沿试样轴向分布较离散, 主要存在试样局部区域 (见图 4); 在第 3 干湿循环后裂隙体积增长明显, 标准差离散系数明显减小, 说明裂隙在整个试样中分布逐渐均匀, 离散程度减小; 第 5 次干湿循环后裂隙几乎没有增加, 但标准差离散系数继续减小, 说明试样部分裂隙宽度收缩, 部分细观裂纹继续发育, 发展为宏观裂隙, 裂隙总体分布更加均匀。

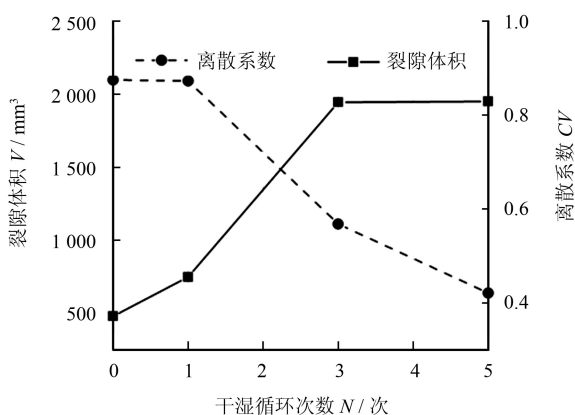


图 6 干湿循环次数后离散系数和裂隙体积关系
Fig.6 Discrete coefficients and fissure volume after drying-wetting cycles

由于考虑到膨胀土的胀缩裂隙主要是在干缩过程中产生, 故干湿循环对裂隙演化的影响可通过累计的干缩体积变化来反映^[11]。累计干缩体变是指每次干燥时的体积收缩变化的累计, 通过直接测量试样干燥前后的体积变化获得, 试样裂隙体积与累计干缩体变关系如图 7 所示。

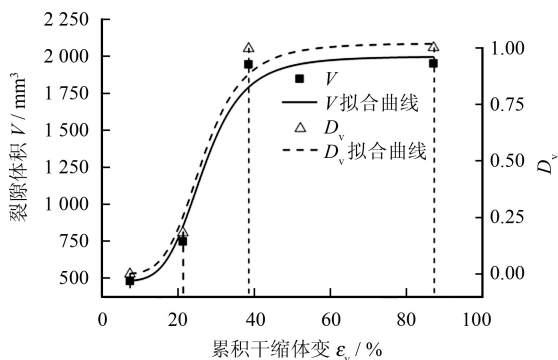


图 7 裂隙体积及其扰动函数与累计干缩体变
Fig.7 Relationships among soil fissure volume, its disturbance function and cumulative volumetric strain

湿胀干缩对土体实际上是一种显著的扰动^[14-15], 在该扰动过程中裂隙逐渐萌生、发育及稳定, 由裂隙体积和累计干缩体变定义的扰动函数 D_v , 符合 Logistic 函数变化规律:

$$D_v = \frac{V_i - V_0}{V_f - V_0} = D_f + \frac{D_0 - D_f}{1 + (\varepsilon_v / \varepsilon_{v0})^n} = 1 - \frac{1}{1 + (\varepsilon_v / \varepsilon_{v0})^n} \quad (3)$$

式中: V_0 为初始裂隙体积; V_f 为最大裂隙体积; V 为干湿循环过程中的裂隙体积; D_0 为 D_v 的初始值; D_f 为其终值, 介于 0~1 之间; ε_v 为累计干缩体变; ε_{v0} 为 D_v 中值所对应的累计干缩体变, 称为特征累计干缩体变值, 反映土体膨胀性强弱, 膨胀性越小, 其值越大; n 为曲线的形状系数。

4.2 裂隙轴向分布规律分析

裂隙面积沿试样轴向分布如图 8 所示。

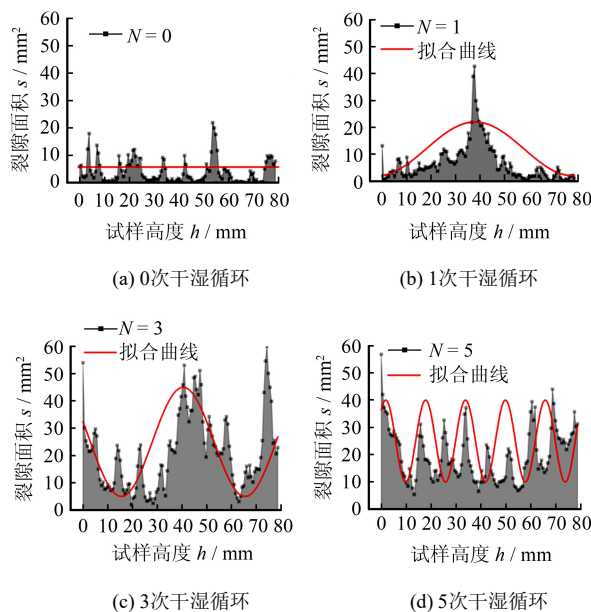


图 8 裂隙分布规律

Fig.8 Regularities of fissure distribution

在试样轴向上裂隙分布呈现明显的波动性和周期性规律, 可用下面周期函数近似表示:

$$s = s_{\min} + A \left\{ \sin \left[\pi (h - h_0) / w \right] \right\}^2 \quad (4)$$

式中: $A = s_{\max} - s_{\min}$ (5)

$$w = H \exp \left(\frac{-\varepsilon_v}{t} \right) \quad (6)$$

式中: s 为裂隙面积; $s_{\max}$ 、 $s_{\min}$ 分别为波峰、波谷对应的裂隙面积平均值; h 为试样的轴向位置, h_0 为

与位置有关的常数； A 为振幅； H 为试样高度； w 为随累计干缩体变变化； t 为衰变常数，如图 9 所示。

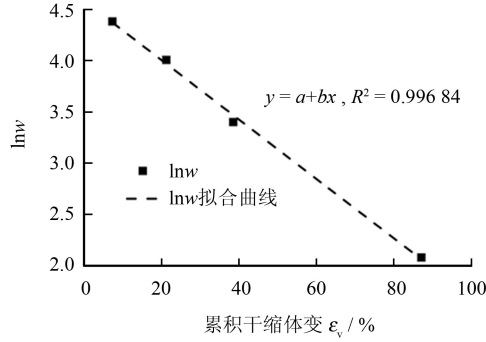


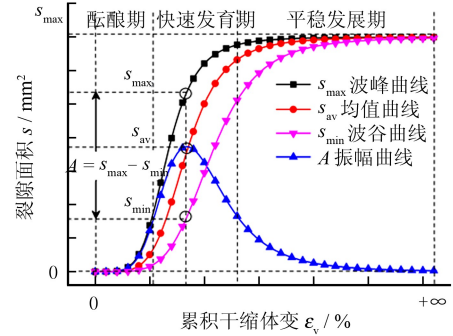
图9 $\ln w$ 变化规律
Fig.9 Regularities of $\ln w$

干湿循环之前 ($N = 0$)，试样内部存在着少量的原生裂隙，在自然作用下形成的裂隙已处于较稳定的状态，故裂隙分布较均匀，本次试验在扫描时含水率脱湿到 18%，土体失水收缩，又产生少量裂隙。图 8(a)中，不均匀性增大，所以 0 次干湿循环试样存在少量不均匀分布的裂隙，但裂隙面积沿试样轴向分布仍可近似看成为一常数。干湿循环次数 $N = 1$ 时，原生裂隙发育、次生裂隙萌生，裂隙主要为局部的孤立裂隙，沿试样轴向分布极不均匀，差异性明显。图 8(b)中，裂隙面积分布函数 s 的周期较大，裂隙分布出现较大的波动，是由于干缩时的抗拉应力主要集中在试样的局部位置释放，故产生的裂隙数较少。随着干湿扰动作用的持续， $N = 3$ 时，沿试样高度方向上裂隙逐渐增加，多处裂隙面积增长明显，分析认为原先裂隙开展过的地方，土体结构已被破坏，土体抗拉应力就只有在土体结构尚完整的地方得到释放，故在土样新的位置产生明显的裂隙。裂隙面积分布函数 s 的周期减小，振幅 A 进一步增加； $N = 5$ 时，裂隙面积分布函数 s 的周期继续减小，振幅 A 开始减小，裂隙分布逐渐均匀。此时的土体已经十分破碎，整个试样的主要抗拉应力基本得到释放，土颗粒只发生微小的位置调整，裂隙变化较小，故裂隙分布比较均匀且逐渐趋于稳定，见式 (7)。

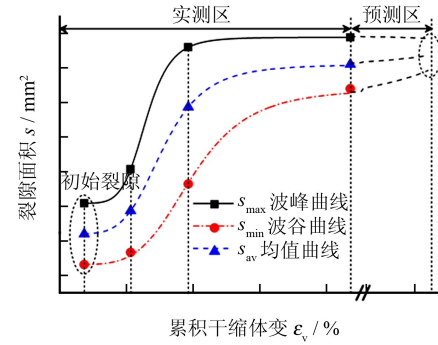
$$\Gamma = \begin{cases} s_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{n}, & (s_i < s_{av}, n \in N) \\ s_{av}, & (s_i = s_{av}) \\ s_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^m s_i}{m}, & (s_i > s_{av}, m \in N) \end{cases} \quad (7)$$

式中： Γ 为裂隙面积曲线，可以统一3条曲线面积

$s_{\min}$ 、 s_{av} 、 $s_{\max}$ ， s_{av} 为试样裂隙面积平均值；理论和试验的 Γ 与累计干缩体变之间关系分别如图10所示。



(a) 理论值



(b) 试验值

图10 Γ 与累计干缩体变
Fig.10 Γ and cumulative volumetric strain

裂隙面积波峰曲线 $s_{\max}$ 先达到稳定，式 (4) 中 s 的振幅 A 先增加后减小，且周期在一直减小。裂隙发展大致可分为 3 个阶段（见图 10(a)）：（1）裂隙酝酿期，干湿循环前期，细观微裂纹萌生，开始产生少量的裂隙，为后期裂隙的大量发育铺垫，面积曲线较平缓；（2）裂隙快速发育期， A 达到最大值，对应裂隙快速发育期，大量裂隙连通、贯穿形成裂隙体，裂隙面积曲线陡增；（3）裂隙平稳发展期，干湿循环后期部分未充分发育的微裂隙继续发育，抗拉势能持续释放，土块体积越来越小，此过程中会出现部分裂隙的宽度、面积减小的情况，裂隙体积总体不再增加，裂隙分布逐渐均匀，裂隙面积曲线逐渐变得平缓。假设最终 $A \approx 0$ ，则 $s_{\max} \approx s_{\min} \approx s_{av}$ ，且 Γ 符合下列函数关系：

$$\Gamma = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (\varepsilon_v / \varepsilon_{v0})^n} \quad (8)$$

假设土体初始状态不存在任何裂隙且裂隙充分发育后每一截面的裂隙面积相等，则3条面积曲线的

起点与终点相同,故参数 A_1 、 A_2 、 n 均应相同,且 $s_{\max}$ 曲线对应的特征 ε_{v0} 最小, $s_{\min}$ 曲线对应的特征 ε_{v0} 最大,如图10(a)所示。

由式(4)~(7)可知,在 s - h - ε_v 三维空间中试样径向裂隙面积、试样高度与累计干缩体变之间的关系如图11所示,可以同时反映试样截面整体裂隙以及沿试样高度方向上局部裂隙的发育和分布情况。裂隙的开展主要在累计干缩体变40%之前,在此之后随累计干缩体变裂隙体积逐渐稳定,沿试样轴向分布也更均匀,裂隙面积曲线的振幅减小并趋于0。

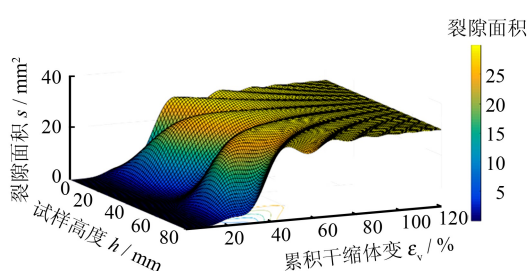


图11 s - ε_v - h 空间裂隙分布(单位: mm^2)

Fig.11 Distribution of fractures in s - ε_v - h space (unit: mm^2)

5 结 论

(1) 裂隙发育开始于土体内部初始孔洞和微纹裂等薄弱处,并由此扩展延伸,形成裂隙面、裂隙体,最后形成复杂的三维裂隙网络。

(2) 其随干湿循环扰动作用符合Logistic函数变化规律。裂隙面积沿试样轴向分布具有明显的波动性与周期性,振幅 A 先增加后减小,裂隙开展分为裂隙酝酿期、裂隙快速发育期、裂隙平稳发展期3个阶段,裂隙发育主要发生在裂隙快速发育期。

(3) 试样径向裂隙面积、轴向高度与累计干缩体变之间的近似关系可预测随着干湿循环的进行裂隙在试样局部的发展及分布情况,可为裂隙膨胀土的渗透特性以及整体与局部的应力-应变研究提供参考。

参 考 文 献

[1] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定性的影响[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.

[2] 陈铁林, 邓刚, 陈生水, 等. 裂隙对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 210—215.

CHEN Tie-lin, DENG Gang, CHEN Sheng-shui, et al. Effects of fissures on stability of unsaturated soil slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(2): 210—215.

[3] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1—15.

BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 1—15

[4] 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): 38—42.

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): 38—42.

[5] TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG Anh Minh, et al. Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils[J]. *Engineering Geology*, 2010, 114(3-4): 261—266.

[6] 袁俊平, 杨国俊, 王敏. 干湿循环下膨胀土裂隙 CT 试验研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(12): 3509—3519.

YUANG Jun-ping, YANG Guo-jun, WANG Min. CT study on the fissures of expansive soil during drying and wetting cycles[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(12): 3509—3519.

[7] 袁俊平, 殷宗泽. 膨胀土裂隙的量化指标与强度性质研究[J]. 水利学报, 2004, 19(6): 108—113.

YUAN Jun-ping, YIN Zong-ze. Quantitative index of fissure and strength characteristics of fissured expansive soils[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 19(6): 108—113.

[8] 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.
- [9] 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.
- [10] 韦秉旭, 刘斌, 刘雄. 膨胀土裂隙定量基本指标研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 84—89.
- WEI Bing-xu, LIU Bin, LIU Xiong. Research on the quantitative basic index of expansive soil cracks[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2015, 42(5): 84—89.
- [11] 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.
- [12] 汪时机, 韩毅, 李贤, 等. 圆柱孔破损膨胀土强度和变形特性的CT-三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2764—2809.
- WANG Shi-ji, HAN Yi, LI Xian, et al. Study of strength and deformation of cylindrical hole damaged expansive soil by CT-triaxial test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(10): 2764—2809.
- [13] 党发宁. 岩土破损演化理论(I): 破损空间[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 513—519.
- DANG Fa-ning. Damage-fracture evolution theory of rock and soil(I): Damage-fracture space[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 513—519.
- [14] CHANDRAKANT S D. Mechanics of materials and interfaces[M]. Boca Raton: CRC, 2001.
- [15] CHANDRAKANT S Desai. Constitutive modeling of materials and contacts using the disturbed state concept. part 1. Background and analysis[J]. **Computers & Structures**, 2015, 146: 214—233.

半刚性基层沥青路面抗裂土工布应力吸收层设计与施工

著译者: 付伟 冯振中 颜玉进 版次: 第一版 出版时间: 2017-11

出版单位: 中国建筑工业出版社 标准书号: 978-7-112-20964-4

【内容简介】本书针对防治半刚性基层沥青路面反射裂缝的工程需求, 围绕土工布应力吸收层的应用关键技术, 系统阐述了半刚性基层沥青路面土工布应力吸收层的设计与施工的方法及工程实践。主要内容有: 绪论、聚丙烯抗裂土工布基本材料性能研究、聚丙烯抗裂土工布材料耐久性研究、半刚性基层沥青路面抗裂土工布应力吸收层的适用性研究、半刚性基层沥青路面抗裂土工布应力吸收层设计、半刚性基层沥青路面抗裂土工布应力吸收层施工、工程实例、附录。

本书可供从事公路沥青路面设计、施工、科研和养护管理工作的技术人员参考, 也可作为相关专业大专院校师生学习用书。

【读者对象】本书可供从事公路沥青路面设计、施工、科研和养护管理工作的技术人员参考, 也可作为相关专业大专院校师生学习用书。

【目 录】第 1 章 绪论 第 2 章 聚丙烯抗裂土工布基本材料性能研究 第 3 章 聚丙烯抗裂土工布材料耐久性研究 第 4 章 半刚性基层沥青路面抗裂土工布应力吸收层的适用研究 第 5 章 半刚性基层沥青路面抗裂土工布应力吸收层设计 第 6 章 半刚性基层沥青路面抗裂土工布应力吸收层施工 第 7 章 工程实例 附录 参考文献

(信息来源: 中国建筑书店网站)