

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0239

土体拉伸破坏过程微细结构变化 测试系统研发与应用

崔 猛^{1,2}, 刘 洁³, 韩尚宇⁴, 洪宝宁²

(1. 南昌工程学院 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330099; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 南昌工程学院 外国语学院, 江西 南昌 330099; 4. 南昌航空大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330063)

摘 要: 针对目前土体拉伸测试水平的不足, 研发了一套土体拉伸破坏过程微细结构变化测试系统, 主要由拉伸加载装置、图像采集装置、图像处理程序 3 部分组成。拉伸加载装置为测试系统提供均匀、稳定的外部荷载和观测面; 图像采集装置可利用跟踪平台连续拍摄拉伸过程中不同应力状态下的微细结构图像, 并利用基于数字散斑相关法的相对位移场计算, 通过预拉伸可确定断裂带演化区域, 即观测区域; 图像处理程序可对所拍摄图像进行增强、融合、拼接、分割处理, 并对图像中孔隙与颗粒的量化特征参数进行提取。基于所研发的测试系统开展了黏性土拉伸破坏的微细观试验, 研究结果表明: 黏性土在整个拉伸破坏过程中, 颗粒结构调整在先, 孔隙演化在后, 孔隙的形成与贯通将最终导致试样的拉伸破坏; 孔隙度与孔隙分布分维随拉伸变形量的增加而增长, 颗粒分布分维随拉伸变形量的增加而降低, 但均表现有相似的阶段性, 据此可将整个拉伸破坏过程划分为孔隙的萌生、发展、贯通 3 个阶段。

关 键 词: 土体拉伸; 微细结构; 测试系统; 图像处理; 量化特征参数

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)11-4278-09

Development and application of microstructure change test system for soil tensile failure process

CUI Meng^{1,2}, LIU Jie³, HAN Shang-yu⁴, HONG Bao-ning²

(1. College of Civil and Structure Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330099, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
3. College of Foreign Language, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330099, China;
4. College of Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China)

Abstract: To improve the level of soil tensile testing, a set of microstructure change test system for soil tensile failure process is developed. The system consists of soil tensile loading device, image acquisition device and image processing program. Tension loading device provides uniform and stable external force and observation surface. Image acquisition device can continuously take the microscopic structure images under different stress states during the entire stretching process by the use of tracking platform, and determine the evolution area of tensile fracture zone (i.e., the observation area) using relative displacement field calculation based on the digital speckle correlation method. Image processing program includes enhancement, fusion, splicing and segmentation of the captured images, as well as the extraction of quantitative feature parameters of soil particles and pores. Based on the developed test system, the tensile failure test of clay is carried out. The results show that the particle structure changes first, and then the pores evolves during the whole process of tensile failure. The formation and penetration of the pores eventually lead to tensile failure of the sample. The porosity and fractal dimension distribution of pores increase with the amount of tensile deformation, and the fractal dimension distribution of particles decreases with the increase of tensile deformation, both can be divided into different stages. To be specific, the entire process of tensile failure can be divided into three stages: initiation, development and breakthrough of the fracture zone.

Keywords: soil tensile; microstructure; test system; image processing; quantitative feature parameters

收稿日期: 2018-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51609114); 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放基金项目 (No.2016001); 江西省教育厅基金项目 (No. GJJ161101)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51609114), the Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University (2016001) and the Education Department of Jiangxi Province (GJJ161101).

第一作者简介: 崔猛, 男, 1986 年生, 博士, 讲师, 主要从事土体拉伸损伤与微细观测试技术等方面的工作。E-mail: cmyfwy@126.com

1 引言

近些年来,随着地下空间工程的广泛建设,出现了一些由于土体拉伸破坏而引发的工程问题,如施工期出现的地面塌陷、基坑降水开挖中出现的沉降盆或沉降漏斗等。除此之外,由于土体拉伸破坏而引起的病害也存在于其他工程中,如土坡坡顶的拉伸裂缝、土石坝心墙的张拉裂缝等,该类问题日益凸显,使得土体拉伸特性方面的研究得到了越来越多国内外学者的关注。

目前,国内外学者多从测试装置的研发与改进着手,开展土体拉伸特性的试验与理论研究,并取得了系列研究成果^[1]。Lu 等^[2]设计了一套由圆柱形模具、安装板、可调节角度的试验台、数字探针等组成的拉伸装置,用于测定砂土的抗拉强度。Satoshi 等^[3]研制了一套单轴拉伸试验装置,通过温控设施的辅助来研究冻土的抗拉强度。Mesbah 等^[4]制作了一个模具用于测定纤维加筋土的抗拉强度,在试样上开口,形成预裂面。Nahlawi 等^[5]研制了一套应变式拉伸试验仪,采用方形夹持模具,在内部设置锚固构件改善夹持效果。Tang 等^[6]研发了一套应变式竖向拉伸试验仪,测试了不同含水率试样的抗拉强度。吕海波等^[7]研制了一台简易土工单轴拉伸仪,荷载通过砝码逐级施加。路立娜等^[8]在直剪仪的基础上研制了电动式单轴拉伸仪,开展了分散性土的抗拉特性试验研究。Tang 等^[9]通过黏合剂将试样上下两表面黏贴在两半圆筒形模具中,模具中间预留间隙作为设定破坏面,通过外力张拉用于测试土体的抗拉强度。崔猛等^[10-11]研制了一套新型土工单轴拉伸试验装置及制样装置,并基于此对不同初始条件下黏性土的宏观力学特性进行了较全面研究。另外,还有一些学者^[12-14]利用间接测试手段对土体的抗拉强度进行了测试。

分析已有研究成果可以发现,现阶段测试技术水平的发展是限制相关研究全面开展的关键,目前的测试手段基本都停留在宏观层面上,微观层面的研究还鲜有报道,而若要对土体拉伸特性、破坏机制等有更为深入、全面的认识,还需结合微观层面的研究。基于以上分析,笔者在自主研发的新型土工单轴拉伸试验装置的基础上,通过设备改造、平台搭建、程序开发等,研发了一套土体拉伸破坏过程微细结构变化测试系统,并基于该测试系统开展了黏性土拉伸破坏的微观观试验,探讨了拉伸破坏过程中断裂带演化区域内量化特征参数的变化规律。

2 微细结构变化测试系统的研发

2.1 拉伸加载装置

土体拉伸破坏过程微细结构变化测试系统中的拉伸加载装置需要为拉伸试样提供一个慢速、均匀、稳定的拉应力,以使图像采集装置能够采集到整个拉伸过程中不同阶段的微细结构形态。笔者在土体宏观拉伸特性研究过程中,自主研制了一台新型土工单轴拉伸试验装置,最低加载速率可达 0.001 mm/min ,该拉伸装置可以满足上述要求。拉伸试样形式采用哑铃状试样,具体构造及尺寸详见文献^[11]。另外,通过一系列前期试验发现,拉伸试样侧表面由于在制样过程中受模具挤压扰动较大,不能很好地反映土体的内部结构,而试样上表面经过适当处理能够较好地反映土体的内部结构,因此观测面选取为试样上表面。基于此,需对加载装置进行适当改造以使图像采集装置能够拍摄到试样上表面结构形态。

根据上述加载装置的改造要求,设计了一个与加载装置尺寸对应的固定支架,利用该固定支架可以将加载装置旋转 90° ,改造后的加载装置主体结构如图 1 所示。另外,为避免拉伸试样自身重力的影响,试验过程中在试样拉伸段下方设置一块铝合金材料的垫块,上表面光滑,高度与试样底端齐平,长度略小于试样拉伸段长度,用于平衡试样自重。

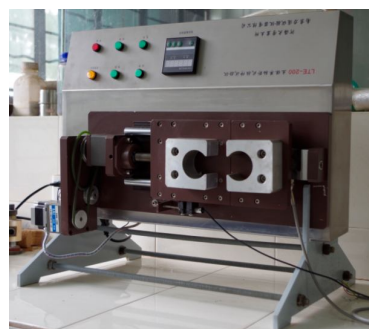


图 1 拉伸加载装置
Fig.1 Tensile loading device

2.2 图像采集装置

图像采集装置用于拍摄不同拉伸状态下的土体微细结构形态,并将其存储到计算机内,用于后期的图像处理分析,主要包括长距离远心显微镜、图像跟踪平台、CCD 摄像头、图像采集卡、冷光源、放大倍数控制器等硬件设备及与之配套的控制程序。

2.2.1 长距离远心显微镜

显微镜是图像采集装置中的核心构件,其质量

高低直接影响所拍摄图像的优劣与后期图像处理的效果。土颗粒的存在使得试样表面凹凸不平,导致景深的存在,选用长距离远心显微镜可以在改变焦距的情况下,不改变所成图像的边界条件,这样通过某一视野下的多次拍摄,可以获取一组每个区域均有清晰体现的图像,为后期图像融合的效果奠定基础。显微镜采用美国 THALES OPTEM 公司生产的 RS232E-IRIS Zoom T100 镜头,该镜头可 10 倍变焦,拍摄过程中图像周边不发生几何畸变,工作范围为 15~35 cm,镜头与试样可保持一定的距离,15 cm 位置处的分辨率可达到 1.1 μm 。

2.2.2 图像跟踪平台

采集土体微细结构图像时,所要采集图像区域,即观测区域是由多个显微镜视野组成,这需要显微镜能够在观测平面上进行上下、左右移动;同时,显微镜调焦过程也需要其能够进行前后移动。因此,需要为显微镜配置可以进行三维调节的图像跟踪平台。

图像跟踪平台由三维控制台、控制台驱动器、控制卡、计算机在内的硬件与控制程序组成。三维控制台在 X 、 Y 、 Z 3 个方向上分别设有驱动,通过联轴器将步进电机与控制台丝杆连接在一起,可以驱动载有显微镜的三维控制台沿 3 个方向进行正反移动,3 个方向的调节精度均为 0.01 mm,最大移动范围均为正反各 25 mm。控制台驱动器用来接收计算机驱动程序发出的信号,然后将其传递给三维控制台上相应方向的步进电机,使步进电机运转,步进电机驱动器通过 3 条 S 端子连接线分别与 3 个方向的步进电机对应连接。控制卡则是驱动信号的发出者,通过 15 芯 D 型连接线与控制台驱动器连接。图像跟踪平台各组成构件的相互关系参见图 2。

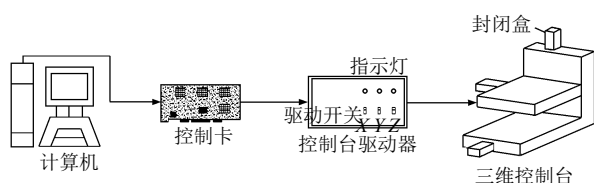


图 2 图像跟踪平台各构件关系

Fig.2 Image tracking platform components

2.2.3 CCD 摄像头、图像采集卡、冷光源

CCD 摄像头安装在长距离远心显微镜尾部,用于拍摄显微镜视野内土体的微细结构形态,图像采集卡用于接收 CCD 摄像头所采集的信号,通过控制程序显示在电脑屏幕上,并完成图像的采集与存储。为保证图像分辨率满足试验要求,采用 TS-1000

型 CCD 摄像头,分辨率为 1 280×1 024,信号传递接口采用 USB 形式。另外,土体颜色较暗,反光性能差,在不借助外光源的条件下无法拍摄清晰图像,因此需配置一个外在冷光源,使光束集中投射到观测区域内,这里采用 LG-III 型冷光源。

各构件相互衔接,共同完成土体微细结构图像的采集,图像信号的传递路径参见图 3。

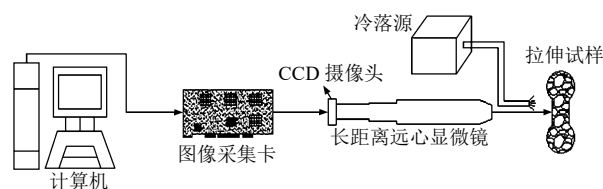


图 3 图像信号的传递路径

Fig.3 Transmission path of image signal

2.2.4 观测区域的确定

土体拉伸破坏的最终形式是断裂带贯通整个试样,断裂带以外区域的土体并未发生拉伸破坏,断裂带演化区域能够反映拉伸破坏的全过程,是主要的观测范围。由于显微镜的视野范围非常小,若进行全断面观测则效率太低,无法满足试验要求。因此,如何实现断裂带演化区域的预判,进而确定观测区域就成为了试验的关键。

本文将基于数字散斑相关法^[15],利用相对位移场计算确定变形较大的区域,进而对断裂带进行预判。变形前后子区进行匹配时采用的相关系数计算公式^[16]为

$$C = \frac{\{\sum \sum [(f - \langle f \rangle) \cdot (g - \langle g \rangle)]\}^2}{\sum \sum (f - \langle f \rangle)^2 \cdot \sum \sum (g - \langle g \rangle)^2} \quad (1)$$

式中: C 为相关系数; f 与 g 分别为变形前后子区的灰度分布函数; $\langle f \rangle$ 与 $\langle g \rangle$ 为对应函数的平均灰度值。当 $C=1$ 时表示两个子区完全相关,当 $C=0$ 时表示两个子区不相关。

计算面积选取试样的拉伸段范围,拉伸段整体图像采集装置包括镜头、CCD 摄像头、图像采集卡及支架,其中镜头为远心镜头,CCD 摄像头采用 UM-201 型摄像头,分辨率为 768×567,图像采集卡采用 Matrox Meteor II/Standard 型采集卡,支架为普通三脚架,用于固定镜头和摄像头。经多次试验,计算模板大小为 15×15 像素,计算步长取 10 像素。图 4 为一组计算实例,该方法可以通过较小的位移量对断裂带演化区域进行预判。

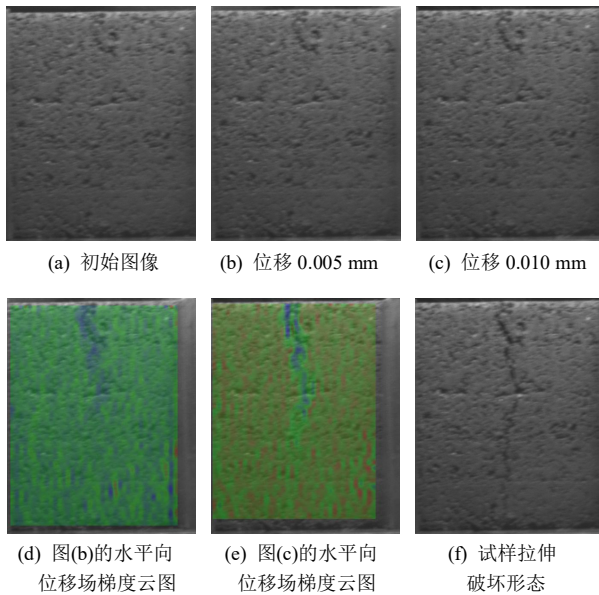


图 4 位移场计算实例

Fig.4 Example of displacement field calculation

基于以上装置的研制与整体设计,土体拉伸破坏过程中微细结构变化测试系统的整体硬件设备如图 5 所示。本测试系统可以实现连续荷载作用下不同应力-应变状态的跟踪观测,加载设备可以更换,且测试系统成本低。相对于市场上的商业化仪器具有技术与成本优势,商业化仪器多针对某一个状态的微细观结构进行测试,如压汞法、SEM 法等,或者虽有加载设备,但其加载设备多为配套,不能随意更换,且价格昂贵,如 CT、核磁共振等。



图 5 测试系统硬件设备整体图

Fig.5 Whole testing system hardware

2.3 图像处理程序

由于外界条件的变化以及景深问题的存在,导致通过图像采集系统所采集的参考图像存在部分信息失准、丢失及缺损的现象。因此,需要结合试验要求对原始图像进行处理,以提高土体微细结构图像质量,进而为后期量化参数提取的准确性提供保证。

2.3.1 图像增强

结合图像本身特点及处理程序适用条件,本文

将基于拉普拉斯算子建立各向同性的锐化空间滤波器。从图像锐化效果及复原背景信息效果出发,采用下式表示经拉普拉斯变换得到的新图像:

$$F_{hb}(x,y) = \begin{cases} AF(x,y) - \nabla^2 F(x,y) & \text{中心系数为负} \\ AF(x,y) + \nabla^2 F(x,y) & \text{中心系数为正} \end{cases} \quad (2)$$

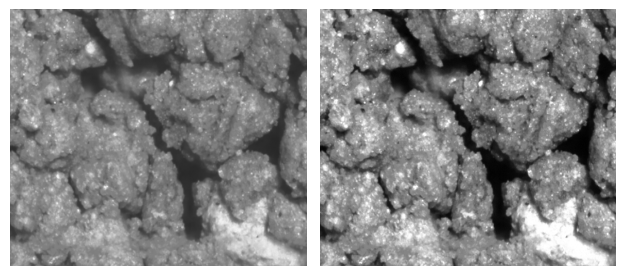
式中: $F_{hb}(x,y)$ 为处理后的图像函数; $F(x,y)$ 为原始二维图像函数; A 为 $F(x,y)$ 系数; $\nabla^2 F(x,y)$ 为 $F(x,y)$ 的离散拉普拉斯变换函数。

式(2)可通过图 6 中的复合掩模得以实现。复合掩模中 A 值的选取是关键,当 $A=1.0$ 时,提升滤波处理即为标准的拉普拉斯变换。这里,基于所拍摄土体微细结构图像的自身特点,通过多组赋值对比发现,当 $A=1.7$ 时,土体微细结构图像的增强效果最为理想。图 7 为两组土体微细结构图像(放大 140 倍)增强前后的对比图,其中图 7(a)、7(c)为原始图像,图 7(b)、7(d)分别为图 7(a)、7(c)增强后的图像。

-1	-1	-1
-1	$A+8$	-1
-1	-1	-1

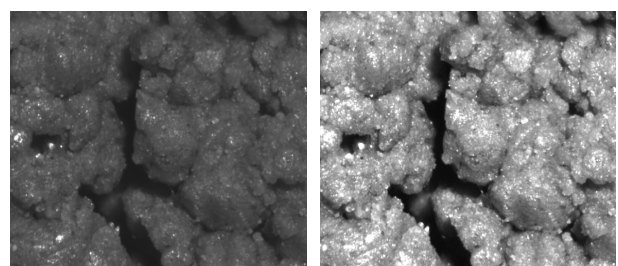
图 6 拉普拉斯变换掩模

Fig.6 Laplace transform mask



(a) 原始图像 1

(b) 图像 1 增强后



(c) 原始图像 2

(d) 图像 2 增强后

图 7 土体图像增强效果

Fig.7 Soil image enhancement effect

2.3.2 图像融合

采用基于小波变换的多分辨率融合技术对土体微细结构图像进行图像融合处理,以解决景深问题,具体步骤如下:

(1) 将初始图像进行二维小波变换分解(分解层数为3),得到图像的低频逼近部分和高频细节部分^[17]如图8所示。其中, C_3 为图像的低频逼近部分,对应图像的整体信息, $D_j^k (j=1,2,3; k=h,v,d)$ 为图像高频细节部分中水平、垂直与对角分量,对应图像的细节信息。

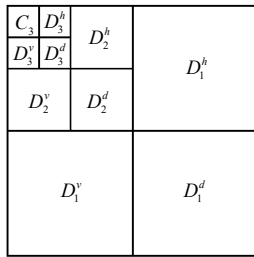


图8 小波分解示意图(3层)

Fig.8 Wavelet decomposition diagram (3 layers)

(2) 在两幅图像中的小波变换域内,分别对每一分量在不同分解尺度上的高频系数进行比较,并把对应领域内绝对值较大的系数作为重要小波系数,并将其保存下来,如下式:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}^1, \text{abs}(w_{j,k}^1) > \text{abs}(w_{j,k}^2) \\ w_{j,k}^2, \text{abs}(w_{j,k}^1) \leq \text{abs}(w_{j,k}^2) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $w_{j,k}^1$ 与 $w_{j,k}^2$ 分别为两幅图像在分量 k 和尺度 j 上的小波系数, $\text{abs}(w_{j,k}^1)$ 与 $\text{abs}(w_{j,k}^2)$ 分别为对应小波系数的绝对值。

(3) 图像融合后逼近系数 \hat{C}_3 的选取。图像中由于景深问题带来的模糊部分表征图像的高频信息(或细节信息)丢失较多,而低频信息(或整体信息)保持较好。同时,结合土体微细观结构研究主要是针对整幅图像的特点,在两幅图像经小波变换的逼近系数 \hat{C}_3^1 和 \hat{C}_3^2 之间选取整体信息保持最好的(最大值)作为两幅图像融合之后的逼近系数 \hat{C}_3 (见式(4)),保证加强细节信息的同时,也不会丢失整体信息。

$$\hat{C}_3 = \begin{cases} \hat{C}_3^1, & \hat{C}_3^1 > \hat{C}_3^2 \\ \hat{C}_3^2, & \hat{C}_3^1 \leq \hat{C}_3^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: \hat{C}_3^1 与 \hat{C}_3^2 分别为两幅图像经小波变换的逼近系数; \hat{C}_3 为图像融合后逼近系数。

(4) 将通过式(3)得到的全部小波系数 $\hat{w}_{j,k}$ 与式(4)得到的逼近系数 \hat{C}_3 进行二维小波反变换,即可得到融合后的图像。

图9(a)、9(b)、9(c)分别为同一视野下通过变焦获取的土体微细结构图像,每张图像红色区域内为清晰部分,通过小波变换融合处理后得到图9(d),可以看出图9(d)集中了图9(a)、9(b)、9(c)中的清晰部分。

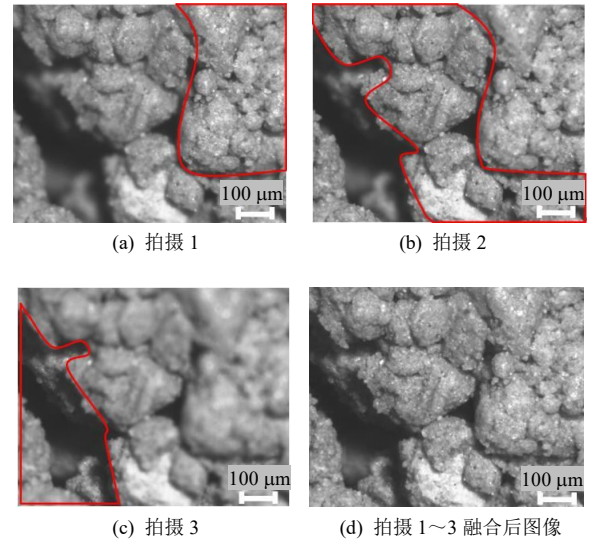


图9 图像融合效果

Fig.9 Image fusion effect

另外,含水率会影响原图质量,进而影响融合后的图像质量,针对这一问题主要从以下3个方面加以控制:一是图像采集的外部环境控制,本文的试验环境为遮光环境,避免自然光线的射入,这在很大程度上控制了水的反射;二是光源控制,本文采用的是亮度可以调节的冷光源,针对不同含水率试样,通过改变光的强度来控制成像质量;三是试样控制,当含水率太高时,试样表面会形成一层水膜,成像质量不佳,所以试样的含水率不能过高

2.3.3 图像拼接

图像拼接处理是在放大倍数不变的前提下,为扩大分析范围,将数张不同视野下的图像拼接成一张图像。图像拼接步骤主要包括图像的采集及预处理、图像特征信息提取、图像特征信息配准与图像融合4大部分,其中图像特征信息选取区域特征,图像特征信息配准为基于灰度信息的图像配准方法,图像融合采用小波变换多分辨率融合方法。

(1) 特征模板组

设 $f_1(x,y)$ 为参考图像, $f_2(x,y)$ 为待拼接图像,二者的大小均为 $m \times n$,选用3个小特征模板进

行配准，如图 10 所示。

其中，对于上下方向的图像拼接，特征模板选定为参考图像下方的 1/4 区域，如图 10(a)所示；对于左右方向的图像拼接，特征模板选定为参考图像右侧 1/4 区域，如图 10(b)所示。

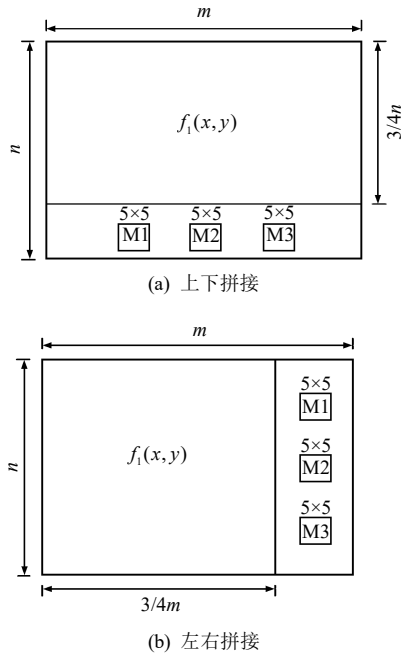


图 10 特征模板组设定区域

Fig.10 Setting area of feature template group

(2) 搜索方式

由于图像采集是只进行上下、左右平移，图像不存在旋转，因此，搜索方式选用线性搜索即可。

(3) 配准公式

配准公式基于最小均方误差公式，设参考图像中 3 个 5×5 的模板分别为 M1、M2、M3，待拼接图像中搜索区域内 3 个模板所覆盖的区域分别为 F1、F2、F3，大小与模板相同，均为 5×5，则配准公式为

$$MSE = \min \left\{ \frac{1}{3} \times \left[\frac{1}{25} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 (M1_{ij} - F1_{ij})^2 + \frac{1}{25} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 (M2_{ij} - F2_{ij})^2 + \frac{1}{25} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 (M3_{ij} - F3_{ij})^2 \right] \right\} \quad (5)$$

式中： MSE （Mean-Square Error）为最小均方误差， $M1_{ij}$ 、 $M2_{ij}$ 、 $M3_{ij}$ 分别为参考图像中拼接模板上第 i 行第 j 列像素点的像素值， $F1_{ij}$ 、 $F2_{ij}$ 、 $F3_{ij}$ 分别为上述 3 个拼接模板在待拼接图像覆盖区域内第 i 行第 j 列像素点的像素值。

图 11 为利用上述方法进行图像拼接的实例，可见，拼接后图像的重叠部分过渡平滑，未存在拼接缝，拼接效果理想。

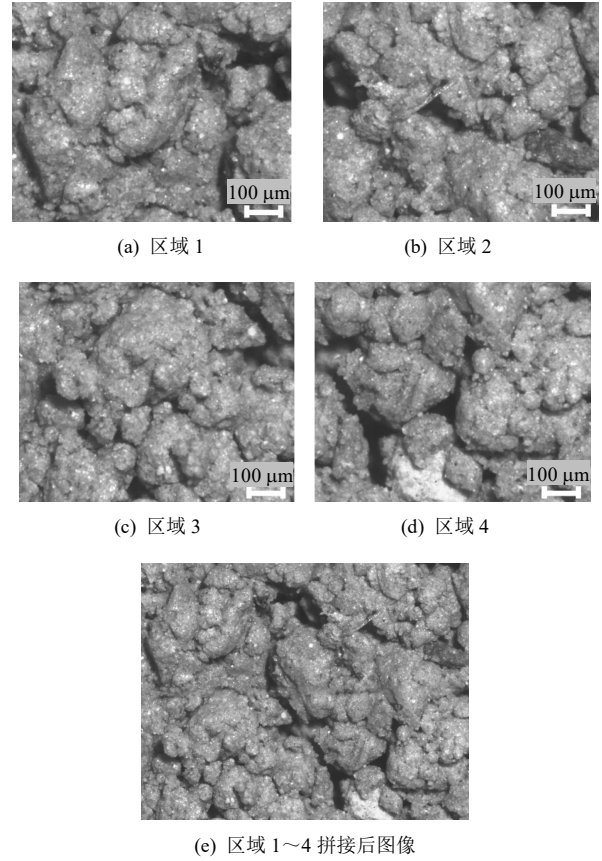


图 11 图像拼接效果

Fig.11 Image mosaic effect

2.3.4 图像分割

图像分割主要是根据像素灰度值大小和分布的不同，将图像中的颗粒与孔隙分割开来，以便于能够分别对颗粒与孔隙的量化参数进行提取。阈值的选取是图像分割效果的关键^[8]，通过多组试验发现，随阈值的变化，颗粒与孔隙所占面积比例单调变化：阈值越大，孔隙面积越大且相互连接贯通为一体；阈值越小，孔隙所占的面积就越小，且孔隙被分割开。中间灰度值法获取的阈值对图像进行分割，较为接近土体微细结构的原始图像，具体阈值的选取还需结合土体微细结构图像中颗粒与孔隙所占面积比例来确定。

3 黏性土拉伸破坏微细试验研究

基于所研发的土体拉伸破坏过程微细结构变化测试系统，以某城市化改造工程的黏性土为研究对象开展试验研究，黏性土的相对密度为 2.76，液限为 38.3%，塑限为 21.6%，最大干密度 1.749 g/cm³，

最优含水率为 19.5%，为低液限黏土。

3.1 试验方案

通过宏观拉伸试验可知，不同初始条件试样的力学特性存在差异，但拉伸破坏形式存在共性。这里将对不同初始条件的试样进行拉伸试验，以寻求土体在拉伸破坏过程中微细观结构特征参数的变化规律。结合土体自身的物理指标及装置结构，所选用 6 组试样的详细参数见表 1，每组试样均开展一个平行试验，取其平均值进行数据分析。

在放大倍数的确定方面，通过前期 120、140、180、200 倍的观测试验发现，140 倍既能满足试验要求也能满足图像清晰度要求，因此针对所选用黏性土的放大倍数设定为 140 倍。

表 1 试样参数表

Table 1 Table of sample parameters

试样 编号	最大干密度 /(g/cm ³)	压实度 /%	含水率 /%	拉伸速率 /(mm/min)	试样质量 /g
1	1.749	85	15.5	0.01	329.68
2	1.749	100	15.5	0.01	387.86
3	1.749	90	17.5	0.01	355.12
4	1.749	95	17.5	0.01	374.85
5	1.749	95	19.5	0.01	381.23
6	1.749	100	21.5	0.01	408.01

另外，还需结合土体的宏观力学特性确定加载步长。这里，加载初始阶段，根据试样初始条件加载步长确定为 0.02~0.05 mm，当应力接近峰值应力（抗拉强度）时加载步长均缩短为 0.01 mm，且规定一组试验需分级施加 15 次以上荷载，以避免试验数据的离散性。

3.2 试验结果

3.2.1 孔隙度

孔隙度用来表征拉伸过程中孔隙的发育水平，定义为孔隙面积与总面积的比值。土体微细结构图像通过设定阈值进行分割后，灰度值为 0 的区域面积为孔隙面积，灰度值为 1 的区域面积为颗粒面积。6 个试样拉伸破坏过程中断裂带演化区域内孔隙度与拉伸位移的关系曲线如图 12 所示。

通过图 12 可以看出，整个拉伸过程中孔隙度呈递增趋势，且表现有较明显的规律性，整体上可将其划分为 3 阶段。第 1 个阶段内，孔隙度基本维持在同一水平，孔隙基本不发育；第 2 个阶段内，孔隙度骤增，大致呈线性增长，孔隙发育明显且集中；第 3 个阶段内，孔隙相互贯通，形成断裂带，孔隙度达到最大值，试样拉伸破坏。

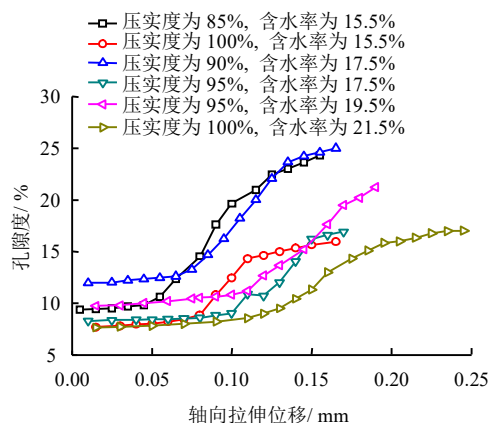


图 12 孔隙度-拉伸位移关系曲线

Fig.12 Curves of porosity and tension displacement

3.2.2 孔隙分布分维

孔隙分布分维用来表征孔隙的分布特征，其概念是基于分形理论，利用分形理论中的计盒维数来描述孔隙的分布特征。图 13 为 6 个试样拉伸破坏过程中断裂带演化区域内孔隙分布分维与拉伸位移关系曲线。

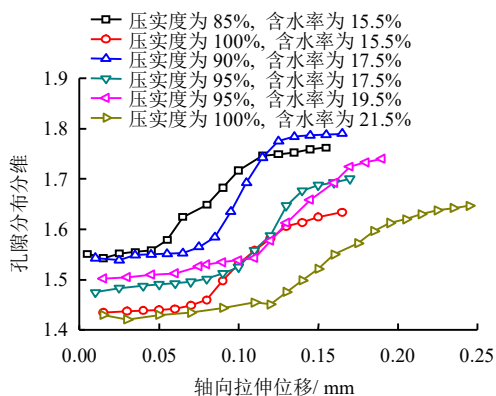


图 13 孔隙分布分维-拉伸位移关系曲线

Fig.13 Curves of fractal dimension distribution of pores and tension displacement

通过图 13 与图 12 的对比分析可以发现，孔隙分布分维的变化规律与孔隙度大致相同，也表现为 3 个阶段。第 1 个阶段内，拉应力作用下孔隙分布分维随拉伸位移的增加而略有增大，但变化幅度很小；第 2 个阶段内，孔隙迅速发育，孔隙分布分维快速增长，孔隙集团化程度明显增强；第 3 个阶段内，裂缝逐步贯通整个试样，随着拉应力的迅速降低孔隙分布分维的增速明显下降，在试样拉伸破坏时达到最大值。

3.2.3 颗粒分布分维

颗粒分布分维与孔隙分布分维的定义基本相同，用来描述颗粒的分布特征，大小与颗粒的密集

程度相关, 分布分维越大, 颗粒分布越分散, 集团化程度越低。6 个试样在拉伸破坏过程中断裂带演化区域内颗粒分布分维与拉伸位移的关系曲线如图 14 所示。

通过图 14 可以发现, 颗粒分布分维随着拉伸变形量的增大逐步减小, 也呈现出 3 个不同的变化阶段, 先是小幅减小, 后是快速降低, 最后趋于稳定。

基于对断裂带演化区域内孔隙特征参数与颗粒特征参数的对比分析不难发现, 二者是相互对应、相互关联的, 共同表征拉伸破坏过程中土体微细结构的变化规律。而且, 颗粒结构调整在先, 孔隙演化在后, 孔隙的形成与演化将最终导致试样的拉伸破坏, 孔隙的演化包括孔隙的萌生、发展、贯通 3 个阶段。

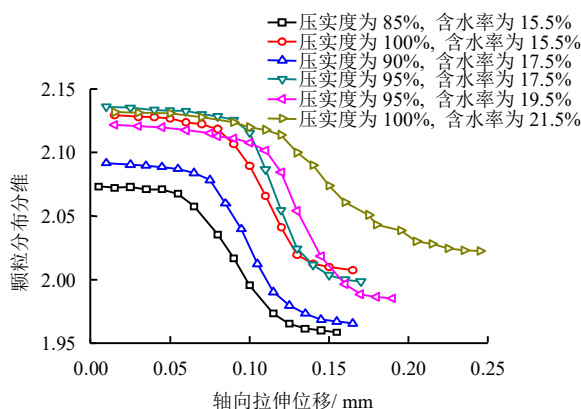


图 14 颗粒分布分维-拉伸位移关系曲线

Fig.14 Curves of fractal dimension distribution of particles and tension displacement

4 结 论

(1) 针对目前在土体拉伸特性方面测试水平的不足, 在已有宏观拉伸装置的基础上, 研发了一套土体拉伸破坏过程微细结构变化测试系统, 包括拉伸加载装置、图像采集装置、图像处理程序 3 部分。该测试系统可开展土体、加筋土、轻质土等土工材料拉伸破坏的微细观试验; 可通过预加载对断裂带演化区域进行预判; 可连续跟踪观测不同拉伸应力状态下材料的微细观结构形态, 并进行图像采集; 可对采集图像进行增强、融合、拼接与分割处理, 并提取微细结构特征量化参数。

(2) 黏性土拉伸破坏过程中, 断裂带演化区域内孔隙度与孔隙分布分维的变化规律基本相同, 整体呈增长态势。具体表现为 3 个阶段: 拉伸初始阶段, 由于试样自身结构性的存在, 变化幅度不大; 然后随拉伸位移量的增大而快速增加, 大致呈线性

增长, 拐点处位移量由试样的初始条件决定, 随压实度与含水率的提高而增大; 最后趋于稳定, 达到最大值, 此时孔隙完全贯通, 形成拉伸断裂带, 试样破坏。据此可将试样的整个拉伸破坏过程归纳为孔隙的萌生、发展、贯通 3 个阶段。

(3) 黏性土拉伸破坏过程中, 断裂带演化区域内颗粒分布分维呈递减趋势, 先小幅变化, 后快速变化, 最后趋于稳定, 达到极值。颗粒与孔隙变化相互关联, 颗粒结构调整在先, 孔隙演化在后, 孔隙的形成与贯通最终导致试样发生拉伸破坏。

参 考 文 献

- [1] 李昊达, 唐朝生, 徐其良, 等. 土体抗拉强度试验研究方法的进展[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2):175—186.
LI Hao-da, TANG Chao-sheng, XU Qi-liang, et al. Advances in experimental testing methods of soil tensile strength[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Supp.2): 175—186.
- [2] LU N, WU B, TAN C P. Tensile strength characteristics of unsaturated sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(2): 144—154.
- [3] SATOSHI A, KOHEI N. Tensile strength of frozen soil in the temperature range of the frozen fringe[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 57(1): 13—22.
- [4] MESBAH A, MOREL J C, WALKER P, et al. Development of a direct tensile test for compacted earth blocks reinforced with natural fibers[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, 16(1): 95—98.
- [5] NAHLAWI H, CHAKRABARTI S, KODIKARA J. A direct tensile strength testing method for unsaturated geomaterials[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2004, 27(4): 1—6.
- [6] TANG C, PEI X, WANG D, et al. Tensile strength of compacted clayey soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(4): 1—8.
- [7] 吕海波, 曾召田, 葛若东, 等. 胀缩性土抗拉强度试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 615—620.
LÜ Hai-bo, ZENG Zhao-tian, GE Ruo-dong, et al. Experimental study of tensile strength of swell-shrink soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(3): 615—620.
- [8] 路立娜, 樊恒辉, 陈华, 等. 分散性土单轴抗拉强度影响因素试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1160—1166.
LU Li-na, FAN Heng-hui, CHEN Hua, et al. Influencing

- factors for uniaxial tensile strength of dispersive soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(6): 1160—1166.
- [9] TANG G X, GRAHAM J. A method for testing tensile strength in unsaturated soils[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2000, 23(3): 377—382.
- [10] 崔猛, 韩尚宇, 洪宝宁. 新型土工单轴拉伸试验装置的研制及应用[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1832—1840.
- CUI Meng, HAN Shang-yu, HONG Bao-ning. Development and application of a new geotechnical device for direct tension test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1832—1840.
- [11] 崔猛, 洪宝宁, 刘洁. 新型单轴拉伸试样制备装置的研制及试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(1): 64—69.
- CUI Meng, HONG Baoning, LIU Jie. Development and experimental research of sample preparation device for new uniaxial tensile specimen[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2016, 48(1): 64—69.
- [12] PRANSHOO SOLANKI, MUSHARRAF ZAMAN. Characterization of lime- and fly ash-stabilized soil by indirect tensile testing[C]//Proceedings of Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering. Dallas, USA: [s. n.], 2011: 4438—4448.
- [13] HUANG Sheng, XIA Kai-wen, YAN Fei, et al. An experimental study of the rate dependence of tensile strength softening of Longyou sandstone[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2010, 43(6): 677—683.
- [14] AZMATCH T F, SEGO D C, ARENSON L U, et al. Tensile strength and stress-strain behavior of Devon silt under frozen fringe conditions[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2011, 68(1/2): 85—90.
- [15] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. **Optical Engineering**, 1982, 21(3): 427—431.
- [16] ZHOU P, GOODSON K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC)[J]. **Optical Engineering**, 2001, 40(8): 1613—1620.
- [17] 何锦平. 基于小波多分辨分析的图像增强及其应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- HE Jin-ping. Research on image enhancement and application based on wavelet multiresolution analysis[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
- [18] 王强, 马利庄. 图像二值化时图像特征的保留[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(10): 746—750.
- WANG Qiang, MA Li-zhuang. Binary-conversion of image with feature preserving[J]. **Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics**, 2000, 12(10): 746—750.
- [24] 杨艳, 常晓林, 周伟, 等. 裂隙岩体水力劈裂的颗粒离散元数值模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(5): 78—85.
- YANG Yan, CHANG Xiao-lin, ZHOU Wei, et al. Simulation of hydraulic fracturing of fractured rock mass by PFC^{2D}[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2012, 44(5): 78—85.
- [25] 李晓锋, 李海波, 夏祥, 等. 类节理岩石直剪试验力学特性的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 583—591.
- LI Xiao-feng, LI Hai-bo, XIA Xiang, et al. Numerical simulation of mechanical characteristics of jointed rock in direct shear test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 583—591.
- [26] 孟庆民, 张士诚, 郭先敏, 等. 砂砾岩水力裂缝扩展规律初探[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(4): 119—123.
- MENG Qing-min, ZHANG Shi-cheng, GUO Xian-min, et al. A primary investigation on propagation mechanism for hydraulic fracture in glutenite formation[J]. **Journal of Oil and Gas Technology**, 2010, 32(4): 119—123.
- [27] 衡帅, 杨春和, 曾义金, 等. 页岩水力压裂裂缝形态的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1243—1251.
- HENG Shuai, YANG Chun-he, ZENG Yi-jin, et al. Experimental study on hydraulic fracture geometry of shale[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(7): 1243—1251.

上接第 4277 页