

# 基于 3D-DIC 技术和摄影测量原理的无侧限 试样体积与变形测量方法

李 林, 沈珂任, 何世玉, 陈镇旺

(南京林业大学 土木工程学院, 南京 210037)

**摘要:**提出了一种基于 3D-DIC 技术和摄影测量原理的方法来实时测量无侧限试样的体积与全局变形,该方法采用试样表面纹理和一个由六台单反相机组成的照片拍摄系统,通过 3D-DIC 技术分析照片以生成二维点云,利用自编软件 GeoTri3D 结合摄影测量原理获取二维点云中所有点的三维位置,再对三维点云进行缝合、三角网格划分和端部截断来重建试样的全表面,并计算其体积、全局及局部变形场。基于提出的测量方法开展了一个标准钢柱、砂土和粉土试样的无侧限试验。钢柱试验表明,本文所提出的方法用于无侧限试样体积测量时的误差为 0.40%;砂土和粉土试样的无侧限试验结果表明,该方法既可测量总体积,也可实现任意时刻的全局变形测量;此外,对于试样表面任何兴趣区域,还可通过进一步加大点云密度来获取精细的局部三维变形信息。本文提出的测量方法兼顾了总体积、全局变形与局部精细变形,弥补了传统方法精度与分辨率低、测量范围小,以及结果单一的缺陷。

**关键词:**岩土工程;3D-DIC;摄影测量;全局变形;无侧限试验;体积测量

**中图分类号:**TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2024)11-3255-10

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230018

## Full-field deformation measurement on unconfined specimen based on 3D-DIC and multi-camera photogrammetry

LI Lin, SHEN Ke-ren, HE Shi-yu, CHEN Zhen-wang

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** A new method is proposed to measure real-time full-field soil deformation of an unconfined specimen by taking advantage of 3D-DIC technology and multi-camera photogrammetry. This measurement is achieved based on texture on specimen surface and a multi-camera system. Generation of 2D point clouds is made first using 3D-DIC, photogrammetric analysis is then applied to extract the 3D coordinates of each point in the 2D point clouds and follows by point cloud assembly, triangular mesh generation, end cut, surface reconstruction, and volume and deformation calculation by homemade software GeoTri3D. In order to verify the feasibility of the proposed method, unconfined tests were performed on a standard-steel cylinder, sand, and silt specimen. The unconfined compression test results on standard-steel cylinder verified that the proposed method is accurate in volume measurement and

收稿日期:2023-01-15.

基金项目:国家自然科学基金项目(51709088).

作者简介:李林(1982-)男,教授,博士.研究方向:土工测试技术及设备开发.E-mail:lli2018@njfu.edu.cn

different-time and full-field deformation of sand and silt specimens could be captured based on the natural or man-made texture on the specimen surface. In addition, for any area of interest on specimen surface, the measurement resolution can be further increased. The proposed method enables total volume, full-field deformation, and localized deformation measurement at a high resolution, overcomes the limitations associated with the other methods such as low accuracy, resolution, and limited area of interest.

**Key words:** geotechnical engineering; 3D-DIC; photogrammetry; full-field deformation; unconfined test; volume measurement

## 0 引言

无侧限试验是研究岩土体的力学和变形特性的重要手段之一。不同于三轴试验,无侧限试验仅适用于饱和土在不排水条件的强度测定,其主要原因是饱和土的不排水试验过程中可假设土体体积恒定,基于轴向应变即可计算出试样的平均应力。然而,即使是处于地下水位以下的原状土,尤其是细颗粒土(尤其是黏性)也有可能是饱和的<sup>[1]</sup>。即使是完全饱和的土样,轴向加载过程中可能伴随剪胀并诱发水的气蚀,从而使土体从饱和状态转为非饱和状态。因此,土样体积在真实无侧限试验过程中可能不是恒定不变的。此外,由于端部效应及试样本身缺陷的影响,土体在加载过程中总会伴随着不均匀变形。近年的研究表明,土体不均匀变形会显著影响其力学和变形特性<sup>[2-4]</sup>。恒定体积的假设难以反映土体的不均匀变形特性。随着科技的发展,照片拍摄设备的成本不断下降,且分辨率持续提高。因此,基于图像的方法在土工试验(尤其是三轴试验)变形/体积测量方面的研究逐渐增多。其中,具有代表性的方法有数字图像分析法<sup>[5-8]</sup>、数字图像相关方法(DIC)<sup>[9-14]</sup>和摄影测量法<sup>[15-23]</sup>等。但是,这些方法用于变形测量时可能存在测量误差大、测量范围小、分辨率低、适用性窄等缺陷。

DIC是一种用于材料变形测量的非接触式数字图像技术,最早由Yamaguchi<sup>[9]</sup>、Peters和Ranson<sup>[10]</sup>分别提出。随着数字摄影及照片处理技术的发展,DIC技术的测量分辨率越来越高。该技术从最初的双相机二维测量(即2D-DIC)<sup>[10,11]</sup>,发展到基于双目视觉原理的双相机三维测量(即3D-DIC)<sup>[12,13]</sup>,并且近年来正朝着多相机三维测量<sup>[13-15]</sup>的方向发展。范杰<sup>[24]</sup>等人利用3D-DIC技术开展不同倾角预制裂纹标准细黄砂岩样的单轴压缩试验,监测了预制裂纹岩石的裂纹扩展和损

伤变形特性。李地元等<sup>[25]</sup>借助3D-DIC技术进行了花岗岩单轴压缩试验,得出其应变演化过程。Tang等<sup>[26]</sup>利用6台摄像机及三维数字相关图像设备对煤的单轴和三轴试验过程进行测量,通过3D-DIC技术分析得出煤样裂纹演化和局部化的全过程。Cheng等<sup>[27]</sup>对复合岩石试样进行单轴压缩试验,采用声发射技术并结合3D-DIC技术研究加载过程中的轴向变形场及峰值强度前后最大变形场的演变规律,揭示了复合岩石试件单轴加载时的变形特性。上述研究中,虽然可以得到试样的三维位移场和变形场,分析裂隙的产生及演化全过程,但是所测结果仅为试样其中某个局部区域或者多个局部区域的变形场,未能实现全局变形及体积测量。3D-DIC技术的最主要优势在于可高效生成三维密集点云,但是,具体到单个点的测量精度不高。无侧限试样的变形测量也可以通过摄影测量原理实现。Zhang等<sup>[18]</sup>和Li等<sup>[19-22]</sup>所研发的多光学介质摄影测量方法可用于测量土样在三轴试验过程中的体积和全局变形。与3D-DIC技术相比,摄影测量法的精度较高,但是,存在同名点生成自动化程度和点云密度低的缺陷。

无侧限试验过程中的试样体积和变形对其强度特性有重要的意义,但是现有技术尚难以实现无侧限试样全局变形场的实时、精细测量。本文提出一种基于3D-DIC技术和多相机摄影测量技术的无侧限试样变形测量方法来测量无侧限试样的体积和全局变形。为评价与验证该方法的可行性、精度和分辨率,本文开展了一个标准钢柱、砂土和粉土试样的无侧限试验。

## 1 试验方法

本文中的钢柱试验用于验证所提出的测量方法在用于无侧限试样体积测量时的精度;砂土和粉土试样用于评价通过试样的自身纹理和人工散斑来实现全局变形的实时测量的可行性。

### 1.1 试验设备

测量所需的照片采集使用了 6 台尼康 D7500 相机及定焦镜头(AF-S Nikkor 50 mm f/1.4 G),相机图像传感器分辨率为  $5\,568 \times 3\,712$  像素,所有相机均在测量前进行了校核,校核结果见文献[20]。

### 1.2 试验材料

验证试验所用钢柱(标准圆柱体)直径为 61.77 mm,高度为 124.99 mm;砂土试样(80% 砂土+15% 黏土+5% 水泥,含水率 12%)初始直径和高度分别为 61.64 mm 和 124.89 mm;粉土试样初始直径和高度分别为 61.67 mm 和 125.20 mm。砂土试样的制作过程为:将试样使用的材料混合搅拌均匀,放入模具分层击实制成圆柱体,密封保存,常温条件下养护 24 h 后拆模;粉土试样制作过程为:将干土加 15% 水后搅拌均匀,密封保存 12 h,通过模具分层击实成样。

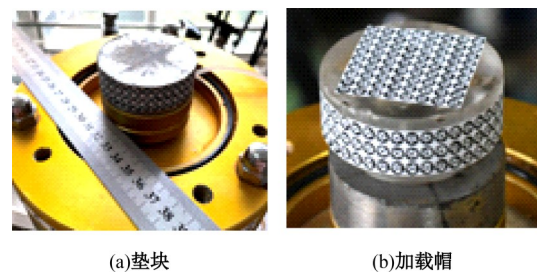
### 1.3 测量原理

使用 6 台相机同时从不同角度对试样进行照片拍摄,通过摄影测量技术反算出相机位置;对于任意兴趣区域(ROI),找出所对应的两张照片,基于 3D-DIC 技术分析生成该 ROI 在两张照片上二维点云并获取其像素位置,再结合两张照片拍摄时的相机位置和摄影测量原理分析,计算出二维点云中每个点的三维位置;通过对试样表面不同 ROI 进行类似的测量分析,以获取覆盖试样全表面的三维点云并进行缝合,综合三角网格划分、端部截断实现试样体积和变形的精确测定。

### 1.4 系统设置

为了使测量结果具有可比性,本文所有测量均在相同三维坐标系下完成。该坐标系的建立过程如下:一是在无侧限置物台底座上放置扁平圆柱形金属垫块,如图 1(a)所示,在垫块侧面布置二维码标记点(共 3 圈,每圈 40 个)如图 1(a)、(b)所示,不同的标记点代表不同的数字信息,可以被摄影测量软件自动识别。另外,放置一个量程为 150 mm 的游标卡尺。二是手持相机围绕垫块从不同的角度拍摄约 20 张照片。三是通过摄影测量分析,参照游标卡尺的真实尺寸建立一个真实三维坐标系。在该坐标系中,获取多个(大于 3 个即可)位于垫块侧面标记点三维位置,以这些点为基准,建立坐标系,在之后的所有测量均可以采用此坐标系。此外,为了测定试样的体积,还需要在垫块顶面(即试验过程中试样底面)及试样加载帽

底面(即试验过程中试样顶面)贴上标记点,以精确定位试样顶面和底面位置。由于坐标系是根据底座上的不动点建立的,试样底面位置在试验过程中保持恒定,顶面位置会随着加载过程变化。但是,其位置相对于加载帽侧面的点保持不变,因此,每次均可通过图 1(b)中加载帽侧面点的位置反算出试样顶面的位置,详细步骤可参考文献[23,28]。



(a)垫块

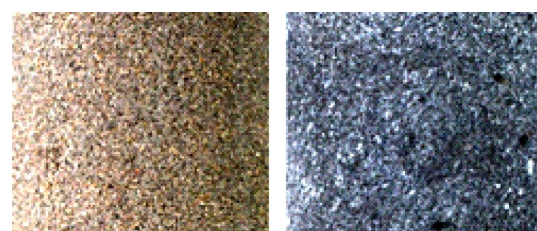
(b)加载帽

图 1 标记点布置图

Fig. 1 Layout of marking points

### 1.5 纹理设置

3D-DIC 技术分析依赖于试样表面的纹理。本研究中采用了两种纹理:天然纹理和人工散斑。砂土试样脱模后,可见表面由细砂形成的纹理,用软毛刷轻扫试样表面,使其表面纹理的区分度更明显;同时也可刷去浮砂。钢柱与粉土采用了人工散斑,先在其表面喷白漆打底,然后喷黑漆,以形成可以分析的纹理。图 2(a)为砂土天然散斑,图 2(b)是喷漆制作的粉土表面散斑。



(a)天然散斑(砂)

(b)人工散斑(粉土)

图 2 散斑设置图

Fig. 2 Texture setup

### 1.6 照片拍摄

为实现连续加载过程的变形测量,本次试验同时使用了 6 台相机,分别放置在试样周围的三脚架上,相邻相机保持约  $60^\circ$  夹角,相机距离试样的距离基本一致,所有相机与试样大约处在同一高度。为满足同步拍摄的要求,6 台相机对焦模式均设为手动,快门时间相同;相机光圈统一设置为 F11,以增加景深,使试样边缘清晰。

## 2 试验与全息变形测量过程

### 2.1 试验过程

生成纹理后的钢柱如图 3(a)所示,将钢柱置于加压设备底座的垫块上,如图 3(b)所示,通过 6 台相机同步采集其表面照片以用于摄影测量和 3D-DIC 技术分析。对于砂土和粉土试样,试样安装后,设置加载速度为 0.8 mm/min,加载开始后,6 台相机每隔 5 s 同步拍摄一组(即 6 张)照片并同时记录轴向荷载,直至试样出现明显剪切带后结束加载。

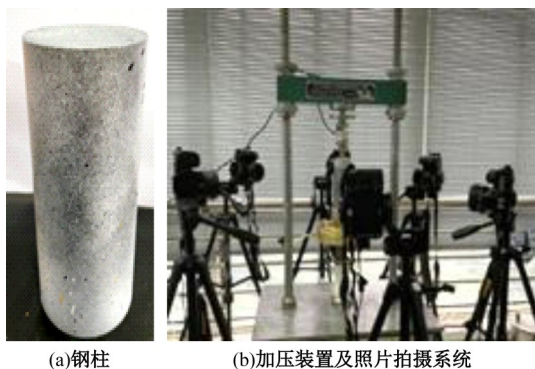


图 3 钢柱及系统布置图

Fig. 3 Steel cylinder and system layout

### 2.2 全息变形测量过程

本文提出的无侧限试样变形测量方法主要包括以下 5 个步骤。

步骤 1 将不同时刻拍摄的照片分组并进行初步的摄影测量分析,载入所建立的三维坐标系,得到底座垫块和加载帽侧面每个标记点的三维坐标及相机位置,根据底座和加载帽侧面标记点的三维坐标推算出试样两个端面位置,该端面位置通过方程  $ax+by+z=c$  表示,两个端面的参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  不同。

以钢柱试验为例,摄影测量分析一次测量所拍摄的 6 张照片,并导入所建立的坐标系可获取 6 台相机的位置和方位角,以及底座和加载帽表面标记点的三维位置,如图 4 所示,其中,红色标记为底座和加载帽上的标记点。

步骤 2 通过 6 台相机建立 6 台“相机对”(即  $Cam_{1-2}$ ,  $Cam_{2-3}$ ,  $Cam_{3-4}$ ,  $Cam_{4-5}$ ,  $Cam_{5-6}$ ,  $Cam_{6-1}$ ),一台相机对(即相邻两台相机)所拍摄的两张照片会存在试样上的重叠区域,人工选取感兴趣区域(ROI),通过 3D-DIC 技术分析该 ROI 后可提取相应的二维点云的像素位置。具体分析时,每台相机选取其中一组照片作为参考,另一组作为试

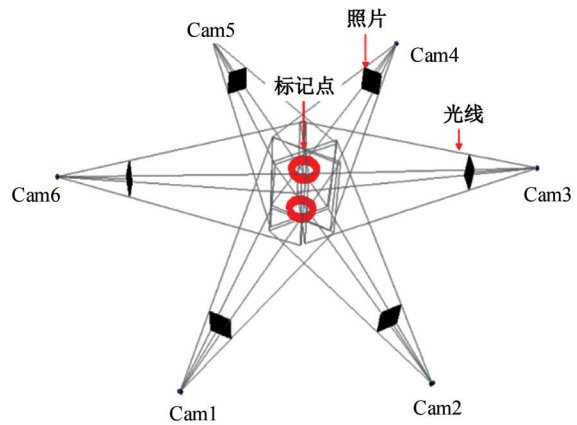


图 4 摄影测量结果

Fig. 4 Photogrammetric analysis results

样变形(由透视造成)照片;在参考第一张照片时绘制 ROI,确保该 ROI 在两组照片上都是可见的,同一变形过程中只要同一个 ROI 即可;然后进行 3D-DIC 技术所需的参数设置(包括子集半径和子集间距);选取 ROI 内两个视图都清晰可见且不太靠近边缘的点作为匹配计算初始点,再向 ROI 其他位置传播计算(选取初始点后均由软件完成),计算完成可实现 ROI 在变形照片组中的匹配,同时也可以得到两组照片的同 ROI 二维点云的像素坐标。每一台相机对重复上述操作就可以得到所有需试样表面的二维坐标。

以钢柱试验为例,表 1 列出了钢柱试验中 6 台相机对通过 3D-DIC 分析所生成的二维点云信息。为满足点云“缝合”需要,各点云的行数保持一致,每台相机对应点云的列数不同,这是由于相邻相机的角度并非精确设置为  $60^\circ$ ,具体列数由每台相机对拍摄照片绘制的 ROI 的宽度决定。本次测量中子集半径设为 60 个像素,子集间距设为 10 个像素,在钢柱表面所产生的点总数为 75 750 个(250 行,303 列)。

砂土和粉土试样在 3D-DIC 技术分析过程中与钢柱试验有所不同,钢柱试验时每台相机仅拍摄了一张照片,而砂土和粉土试样试验中拍摄加载全过程的多张照片。以粉土试样的相机对  $Cam_{3-4}$  为例,图 5(a)和图 5(b)是试样在初始状态

表 1 各相机对所生成的点云信息

Table 1 Point cloud generated six camera pairs

点云	$Cam_{1-2}$	$Cam_{2-3}$	$Cam_{3-4}$	$Cam_{4-5}$	$Cam_{5-6}$	$Cam_{6-1}$
行	250	250	250	250	250	250
列	62	46	47	56	46	46
总数	15 500	11 500	11 750	14 000	11 500	11 500

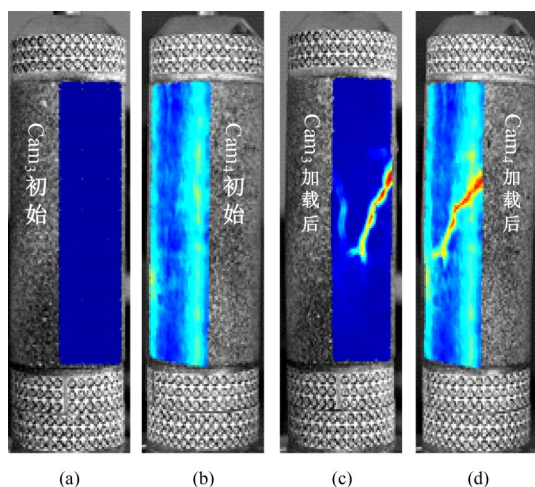


图 5 相机对  $Cam_{3,4}$  加载前后同一 ROI 所生成点云  
Fig. 5 3D point cloud generated in the same area before and after loading by camera pair  $Cam_{3,4}$

拍摄的两张照片,图 5(a)中的蓝色区域(即 ROI)是基于 3D-DIC 技术分析  $Cam_3$  拍摄照片生成的点云,图 5(b)是对应 ROI 在  $Cam_4$  拍摄照片上匹配的点云;图 5(c)和图 5(d)是加载结束时对应相同 ROI 的点云。通过照片对比,我们可以看到二维点云存在明显变形。3D-DIC 技术分析时,整体分析中子集半径设为 60 个像素,子集间距设为 10 个像素;局部精细分析时,子集半径设为 60 个像素,子集间距设为 2 个像素。

步骤 3 基于二维点云的像素坐标及对应的相机位置可建立该点的光线,其中每个点都在两张照片上可见,因此每个点都可以分别建立两条光线;根据两条光线,结合最小二乘法计算出一个点  $P_i$  的三维位置:

$$d_{total}^2 = \sum_{i=1}^2 d_i^2 \quad (1)$$

$$d_i^2 = \begin{bmatrix} x_{p_i} - x_{ii} \\ y_{p_i} - y_{ii} \\ z_{p_i} - z_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{p_i} - x_{ii} \\ y_{p_i} - y_{ii} \\ z_{p_i} - z_{ii} \end{bmatrix}^T - \left\{ \begin{bmatrix} x_{p_i} - x_{ii} \\ y_{p_i} - y_{ii} \\ z_{p_i} - z_{ii} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \alpha_{ri} \\ \beta_{ri} \\ \gamma_{ri} \end{bmatrix} \right\}^2 \quad (2)$$

式中:  $d_{total}$  为测量兴趣点与两条对应测量光线间的距离的平方和;  $d_i$  为测量兴趣点与对应测量光线间的距离;  $x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i}$  为测量兴趣点所估计的三维位置;  $x_{ii}, y_{ii}, z_{ii}$  为测量光线的起始点位置,  $\alpha_{ri}, \beta_{ri}, \gamma_{ri}$  为测量光线的方向余弦。

采用同样的方法分析六台相机对可获取 6 个 ROI 的三维点云。

步骤 4 将 6 个 ROI 的三维点云进行“缝合”,即可得覆盖整个试样表面的三维点云。进一步对

点云进行后处理(即三角网格划分、端部截断)来获取试样高度范围内覆盖试样全表的三角网格。

以钢柱试验为例,结合摄影测量及二维点云生成结果,分析计算出 6 个二维点云中每个点的三维位置,如图 6(a)所示。为便于进行后续处理所需的三角网格划分,表面重建,以及位移和应变计算,需要将 6 个点云“缝合”起来。本方法所用的相机位置均在同一个坐标系下得到,通过自编 Geotri3D 软件计算得到的三维坐标也是处在同一坐标系下的,即试样真实表面在本坐标系上三维点的映射,每一台相机对所得到的单独的三维点云均处在该坐标系下真实的角度和位置上。因此,只需将每一台相机对所得到的三维坐标放在同一个空间下,即可完成“缝合”,如图 6(b)所示,如果存在个别列有重合,可删去。

基于以上的三维位置,在 Geotri3D 软件中可以进行三角网格划分得到所建立的钢柱表面点云的初始网格。根据前期确定的试样顶面和底面的方程( $ax+by+z=c$ ),将相关参数( $a, b, c$  值)导入 Geotri3D 中,可实现钢柱三角网格在端面处的截

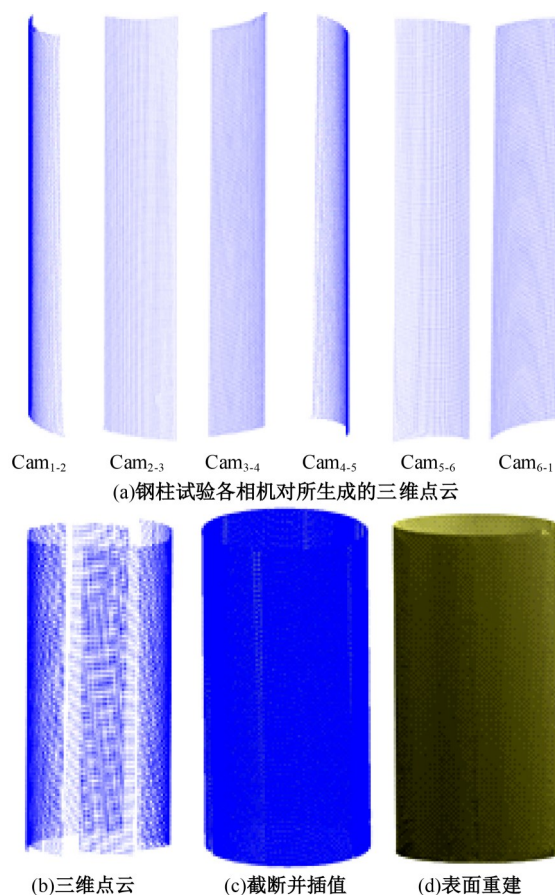


图 6 钢柱三维点云及表面重建

Fig. 6 3D point clouds and reconstructed specimen surface

断,位于端面点的位置依据最近两点所建立的直线结合端面方程计算得到。在钢柱试验中,上下面均为平面, $a$ 、 $b$ 取0, $c$ 底面取0,顶面取125。所得三维点云有部分空缺,会呈现多边形而不是和钢柱表面一致的圆形。因此,本文通过蔡阳等<sup>[23]</sup>所提出的方法对点云进行了插值以提高体积测量精度。简单而言,就是在 Geotri3D 中采用对点云的不同倍数插值以获得接近钢柱真实形状的三角网格,图 6(c)为端部阶段且插值的网格,完成插值后,可依据网格重建试样三维表面。

步骤 5 基于三角网格进行体积计算,在试样内部取任意点  $P_o$ ,连接该点与试样表面所有点,对任意一个由 3 个点( $P_{1j}$ ,  $P_{2j}$ , 和  $P_{3j}$ )所组成的三角形单元格  $j$ ,连接  $P_o$ 后形成了一个四面体  $j$ ,可通过式(3)求出试样总体积(即所有四面体体积之和)。

$$V_{\text{total}} = \sum_{j=1}^n v_j = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^n \left| \overrightarrow{P_o P_{1j}} \cdot \left( \overrightarrow{P_o P_{2j}} \times \overrightarrow{P_o P_{3j}} \right) \right| \quad (3)$$

式中: $V_{\text{total}}$ 为试样的总体积; $v_j$ 为四面体  $j$ 的体积, $\overrightarrow{P_o P_{1j}}$ 为四面体其中两个点所构成的向量。

为计算试样的应变场,需将所有试样表面点的坐标转换至柱坐标系下,该柱坐标系的  $z$ 轴方向与试样轴线方向一致,对于三角形单元格  $j$ ,可在柱坐标系的  $z$ 轴上找到一个点( $r_4$ ,  $z_4$ ,  $\theta_4$ ),其坐标见式(4):

$$\begin{cases} r_4 = 0 \\ z_4 = (z_1 + z_2 + z_3)/3 \\ \theta_4 = (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)/3 \end{cases} \quad (4)$$

该点可与三角形单元格  $j$ 的 3 个顶点构成一个四面体,该四面体内部任意一点的位移可以通过式(5)来表示:

$$u_{ji} = \alpha_{j1} + \alpha_{j2}z + \alpha_{j3}r + \alpha_{j4}\theta \quad (5)$$

式中: $u_{ji}$ 为位移; $\alpha_{j1}$ 为待定系数。

在该四面体中,4 个顶点的位移也满足式(5),因此,式(6)成立:

$$\begin{Bmatrix} u_{j1} \\ u_{j2} \\ u_{j3} \\ u_{j4} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & z_1 & r_1 & \theta_1 \\ 1 & z_2 & r_2 & \theta_2 \\ 1 & z_3 & r_3 & \theta_3 \\ 1 & z_4 & r_4 & \theta_4 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \alpha_{j1} \\ \alpha_{j2} \\ \alpha_{j3} \\ \alpha_{j4} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

基于式(6),代入四面体 4 个顶点的位移可确定待定系数  $\alpha_{j1}$ ,再结合式(7)即可获得该单元格的轴向、径向与环向应变( $\epsilon_z$ ,  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_\theta$ )。

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_z \\ \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial z} \\ \frac{\partial u_2}{\partial r} \\ \frac{u_2}{r} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha_{12} \\ \alpha_{23} \\ A \end{Bmatrix} \quad (7)$$

式中: $A = \frac{1}{r}(\alpha_{21} + \alpha_{22}z + \alpha_{23}r + \alpha_{24}\theta + \alpha_{34})$ 。

上述的计算过程均已编译在软件 Geotri3D 中,只需在其中进行相关操作,即可得到体积及应变结果。

### 3 试验结果

#### 3.1 钢柱试验结果

钢柱通过游标卡尺量测的真实体积为 374.56  $\text{cm}^3$ ,基于插值后的三角网格可以通过自编软件 Geotri3D 计算体积,通过划分原始三角网格并计算得到的体积为 372.23  $\text{cm}^3$ ,1 倍插值(即相邻两点间插入一个点)后体积为 372.49  $\text{cm}^3$ ,2 倍插值(即相邻两点间插入 2 个点)后体积为 372.55  $\text{cm}^3$ ,16 倍插值后体积为 372.59  $\text{cm}^3$ ,与游标卡尺测量结果相比,钢柱的体积测量误差约为 0.40%。

#### 3.2 砂土、粉土变形及体积测量结果

砂土试样在缝合后所获三维点总数为 71 100 个(237 行  $\times$  300 列,对应点云密度 293.1 dot/ $\text{cm}^2$ ),砂土试样点总数为 68 731 个(221 行  $\times$  311 列,对应点云密度 284.2 dot/ $\text{cm}^2$ )。图 7 以加载过程中的 4 个不同时刻为例,结合端部截断获得两个试样的三维全表面重建结果,该图直观、清晰地展示了剪切带的产生和发展过程。

图 7(a)是粉土试样的三维重建图,在 1.05 mm 轴向位移时粉土试样出现了比较明显的斜向剪切带;该剪切带随着加载逐渐延伸,并产生更多细小剪切带。图 7(b)为砂土试样的三维表面重建图,在位移为 0.96 mm 时出现了多个明显的剪切带,随着轴向位移增加,该剪切带开始逐渐发展并最终与其他剪切带汇合。

图 8~图 10 分别显示了试样在不同轴向位移水平下的轴向位移、径向应变和轴向应变云图。图 8 中的云图显示轴向位移起始与试样顶端并逐渐向下发展,在剪切带出现以后,轴向位移发展过程伴随着显著的不均匀变形;图 9 径向应变云图

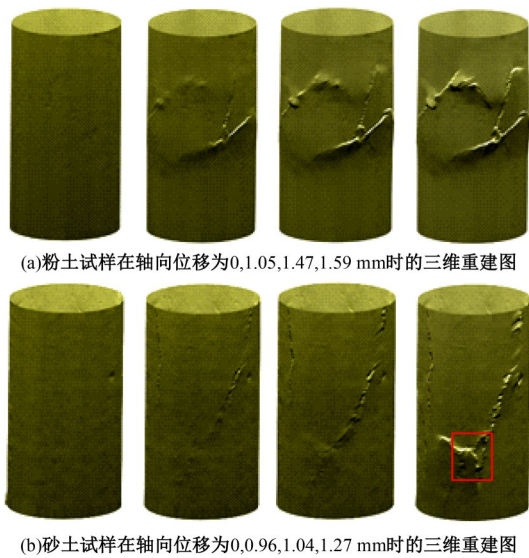


图 7 粉土试样和砂土试样的三维重建图  
Fig. 7 3D reconstruction of soil and sand samples

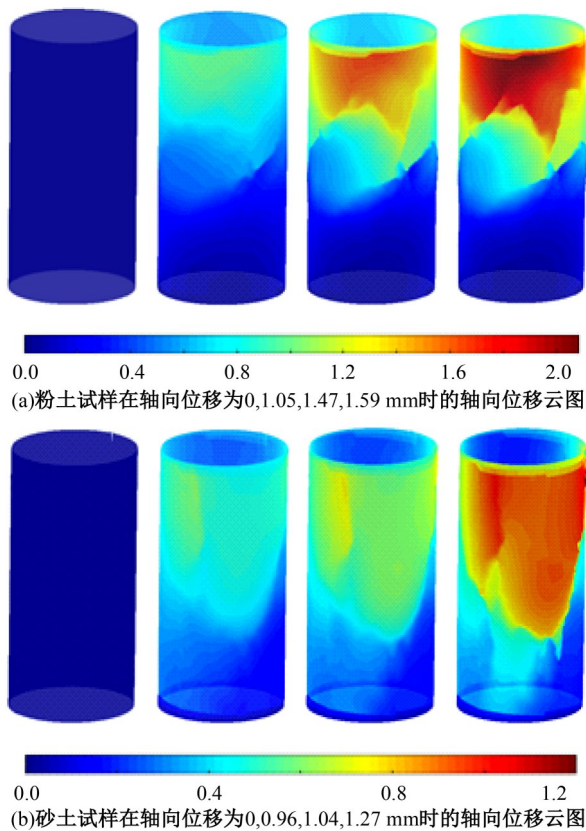


图 8 轴向位移云图  
Fig. 8 Axial displacement distribution

揭示了试样最显著径向应变集中在剪切带附近,最大应变均出现在沿剪切带边缘。由于试件与加载帽/底座之间的摩擦限制了试件两端轴向应变的发展,因此试样两端的径向应变在加载前后的变化不明显。图 10 显示了试样的轴向应变云图,

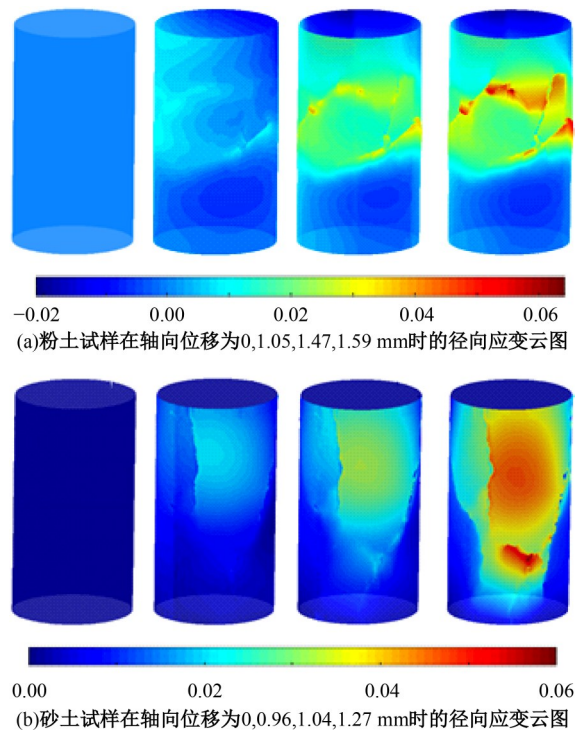


图 9 径向应变云图  
Fig. 9 Radial strain distribution

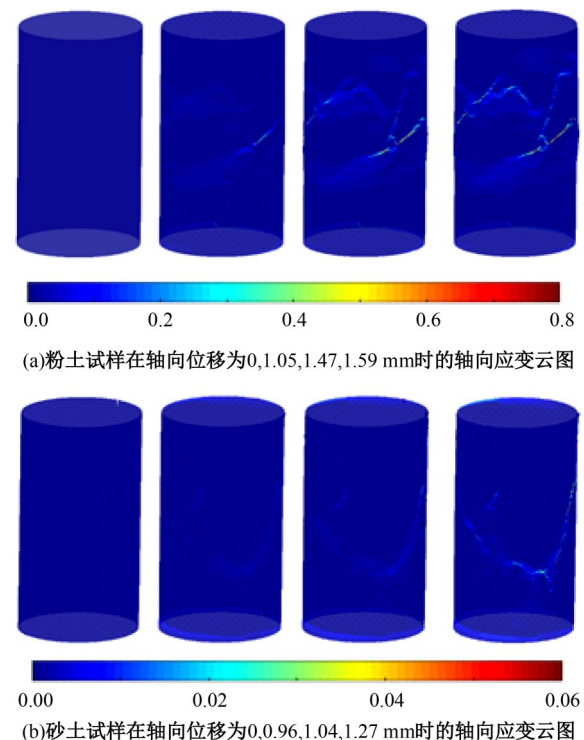


图 10 轴向应变云图  
Fig. 10 Axial strain distribution

该图清晰展示了试样剪切带的演化过程。

粉土和砂土试样在无侧限抗压强度试验中的体积变化如图 11 所示。粉土和砂土试样的体积

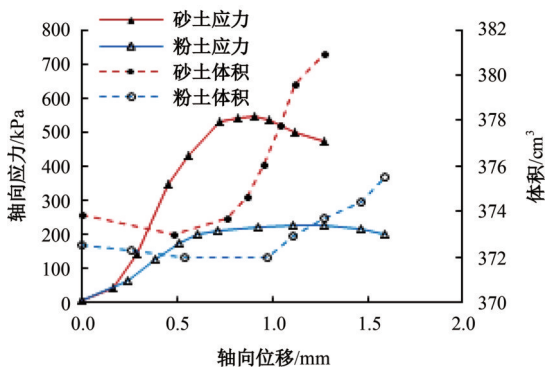


图 11 轴向应力及体积变化

Fig. 11 Axial strain and volume variations

均呈现了先剪缩后剪胀的趋势。根据试样的体积和轴向位移,以及试验过程中记录的轴向荷载,可计算出两个试样的应力-位移曲线。粉土试样在轴向位移为 1.05 mm 时达到峰值应力;砂土试样在轴向位移为 0.96 mm 时达到峰值应力。

### 3.3 局部变形精细测量

除总体积与全局变形外,本文提出的方法还可实现局部变形的精细测量。以图 7(b)所示中砂土试样标记区域(1.8×2.2 cm<sup>2</sup>)为例,选取了轴向位移为 1.04 和 1.27 mm 两个不同时刻的照片,通过 3D-DIC 技术生成了该区域的二维点云(共 23 427 个点,171 行×137 列,对应点云密度约为 5 816 dot/cm<sup>2</sup>)并进一步分析获取了对应的三维点云。图 12 中分别展示了该砂土试样局部区域在两个不同时刻的照片,以及基于三维点云分析获取的三维重建、径向应变(比例尺与图 9(b)一致)和轴向应变云图(比例尺与图 10(b)一致)。同一时刻的三维重建图和径向应变云图精细重现了试样表面局部变形;与试样照片相比,三维重建图所呈现的细节更加丰富清晰,更适于变形的可视化;同时,图 12 中轴向应变云图精细显示了裂缝、剪切带在不同时刻的分布和发展。

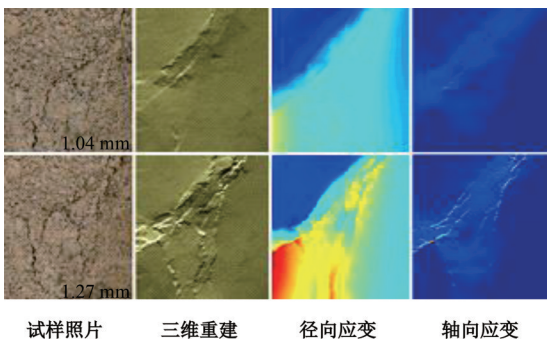


图 12 局部变形分析结果

Fig. 12 Local deformation analysis results

## 4 讨论

本文提出的变形测量方法适用于无侧限试样。文中以砂土和粉土试样为例评价了所提出方法的性能。与三轴试验相比,无侧限试样没有了橡皮膜的干扰,可以直接观测试样表面,因此,体积与变形分析结果更加精细、精确。文中局部变形分析所获细节非常丰富的三维表面重建图也很好验证了这一点。值得一提的是,在融合光线追踪技术<sup>[19-22]</sup>的前提下,本文所提出的方法也可用于三轴试验条件下试样全息变形的测量。除砂土和粉土外,该方法也适用于其他工程材料,例如混凝土裂缝扩展测量、地聚物无侧限试验变形测量、竹材裂纹测量、钢材变形测量等。

传统的 3D-DIC 技术使用两台相机拍摄试样表面某一特定区域,所测结果也仅限于该区域,无法满足整个试样全表面变形监测,也不能实现体积测量。相反,本文提出的方法能实现对试样表面的全覆盖,通过后处理既可以实现整体体积和全局变形测量,还可以对兴趣区域进一步进行分析获取局部精细变形,为深入研究土体的变形特性提供了有力支撑。

本试验使用 6 台相机对试样进行拍摄,多个单独点云在拼接过程中存在空缺,虽然可以通过插值完善,但对测量结果会有少量影响。尽管可以通过增加相机来补全试样点云的空缺部分,但试样周围会过于杂乱,后续仍需寻找补全点云空缺的最佳方案。另外,处理过程中点云个数较多、数据量较大,存在较多重复处理过程,未来可以继续完善程序,实现数据处理智能化。

## 5 结论

(1) 基于 3D-DIC 技术生成的二维点云和摄影测量结果(照片拍摄时的相机方位),可分析获取无侧限试样表面不同区域点云的三维位置;再通过对所得三维点云进行缝合、网格划分、端部截断和插值可进一步算出试样的整体体积和变形。本文所涉及的点云三维位置计算、三角网格划分、端部截断、插值,以及体积、位移和应变场的计算均可通过自编软件 GeoTri3D 高效实现。

(2) 钢柱试验的结果表明,所提的方法能够实现试样在试验过程中任意时刻体积的精确测量(误差为 0.40%),该体积测量和计算方法无需对试样形状和变形特性做任何假设。

(3)土样无侧限抗压强度试验表明,本文所提出的方法可以根据点云测量结果进一步分析重建试样的表面,并得到其在试验中的体积与全局变形云图,真实再现土样变形过程;同时,对局部区域进行分析可精细呈现裂缝、剪切带的分布和发展过程;与传统方法相比,该方法在测量精度、分辨率、覆盖区域,以及结果的丰富性方面有了全面提升。为全面、深入评价土及其他工程材料的不均匀变形特性提供了一个非常有效的工具。

#### 参考文献:

- [1] 汤连生, 张鹏程, 刘增贤, 等. 土体饱和度确定的两个问题[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(5): 1-3.  
Tang Lian-sheng, Zhang Peng-cheng, Liu Zeng-xian, et al. Discussion on degree of saturation determination of soils[J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2002, 29(5): 1-3.
- [2] Alshibli K A, Sture S, Costes N C, et al. Assessment of localized deformation in sand using X-ray computed tomography[J]. Geotechnical Testing Journal, 23(3): 274-299.
- [3] Desrues J, Viggiani G. Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereo-photogrammetry[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 28(4): 279-321.
- [4] Rechenmacher A L. Grain-scale processes governing shear band initiation and evolution in sands[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 54(1): 22-45.
- [5] Macari E, Parker J, Costes N. Measurement of volume changes in triaxial tests using digital imaging techniques[J]. Geotechnical Testing Journal, 1997, 20(1): 103-109.
- [6] Lin H, Penumadu D. Strain localization in combined axial torsional testing on Kaolin clay[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(5): 555-564.
- [7] Gachet P, Geiser F, Laloui L, et al. Automated digital image processing for volume change measurement in triaxial cells[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, 30(2): 98-103.
- [8] Uchaipichat A, Khalili N, Zargarbashi S, et al. A temperature controlled triaxial apparatus for testing unsaturated soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, 34(5): 424-432.
- [9] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge[J]. Journal of Physical E, 1981, 14: 1270-1273.
- [10] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1983, 21(3): 427-431.
- [11] Luo P, Chao Y J, Sutton M, et al. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision[J]. Experimental Mechanics, 1993, 33(2): 123-132.
- [12] Bhandari A R, Powrie W, Harkness R M. A digital image-based deformation measurement system for triaxial tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, 35(2): 209-226.
- [13] Orteu J J, Bugarin F, Harvent J, et al. Multiple-camera instrumentation of a single point incremental forming process pilot for shape and 3D displacement measurements: methodology and results[J]. Experimental Mechanics, 2011, 51(4): 625-639.
- [14] Malowany K, Malesa M, Kowaluk T, et al. Multi-camera digital image correlation method with distributed fields of view[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 98: 198-204.
- [15] Wang Y, Lava P, Coppieters S, et al. Application of a multi-camera stereo DIC set-up to assess strain fields in an erichsen test: methodology and validation [J]. Strain, 2013, 49(2): 190-198.
- [16] Salazar S E, Coffman R A. Consideration of internal board camera optics for triaxial testing applications[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(1): No. 20140163.
- [17] Salazar S E, Barnes A, Coffman R A. Development of an internal camera-based volume determination system for triaxial testing[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(4): No. 20140249.
- [18] Zhang X, Li L, Chen G, et al. A photogrammetry-based method to measure total and local volume changes of unsaturated soils during triaxial testing[J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(1): 55-82.
- [19] Li L, Zhang X, Chen G, et al. Measuring unsaturated soil deformations during triaxial testing using a photogrammetry-based method[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(3): 472-489.
- [20] Li L, Zhang X. A new triaxial testing system for unsaturated soil characterization[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(6): 823-839.
- [21] Li L, Zhang X. Factors influencing the accuracy of the photogrammetry-based deformation measurement method[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(2): 559-574.
- [22] Li L, Li P, Lu Y, et al. Visualization of non-uniform soil deformation during triaxial testing[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(4): 3439-3454.

- [23] 蔡阳, 李林, 路毅. 三轴试样绝对体积测量方法研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(12): 2300-2307.  
Cai Yang, Li Lin, Lu Yi. Study on absolute volume measurement method of triaxial specimen[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12): 2300-2307.
- [24] 范杰, 朱星, 胡桔维, 等. 3D-DIC技术在砂岩裂纹扩展及损伤监测中的试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1009-1019.  
Fan Jie, Zhu Xing, Hu Ju-wei, et al. Experimental study on 3D-DIC technology in sandstone crack propagation and damage monitoring[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 1009-1019.
- [25] 李地元, 万千荣, 朱泉企, 等. 不同加载方式下含预制裂隙岩石力学特性及破坏规律试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 1025-1035.  
Li Di-yuan, Wan Qian-rong, Zhu Quan-qi, et al. Experimental study on mechanical properties and failure law of rock with prefabricated cracks under different loading modes[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(5): 1025-1035.
- [26] Tang Y, Okubo S, Xu J, et al. Study on the progressive failure characteristics of coal in uniaxial and triaxial compression conditions using 3D-digital image correlation[J]. Energies, 2018, 11(5): en11051215.
- [27] Cheng J L, Yang S Q, Chen K, et al. Uniaxial experimental study of the acoustic emission and deformation behavior of composite rock based on 3D digital image correlation(DIC)[J]. Acta Mechanica Sinica, 2017, 33(6): 999-1021.
- [28] Fayek S, Xia X, Li L, et al. A photogrammetry-based approach to determine the absolute volume of soil specimen during triaxial testing[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(8): 206-218.