

DOI: 10.11779/CJGE20230123

基于颗粒特征与预设变形的人工砂土变形图像生成方法及应用

王永志^{1,2}, 段雪峰^{1,2}, 陈 苏³, 汤兆光^{1,2}, 刘荟达⁴, 袁晓铭^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124; 4. 中国建设基础设施有限公司, 北京 100044)

摘要: 图像变形分析方法是当前土力学与岩土工程领域的一种重要变形测试技术, 散斑图像作为其发展、应用和可靠性评价的常用工具, 是否反映真实土体图像特征和变形分析可靠性尚有待解答。以福建标准砂为样本, 基于土体图像特征分析及与散斑图像对比, 提出了一种描述砂土图像和变形特征的人工图像生成方法, 利用建立的 4 种变形坐标解析公式和生成序列变形图像, 对国际代表性 RG-DIC 和 PIVlab 法可靠性进行评价。结果表明: 散斑图像与真实砂土图像在纹理、圆度、色值等方面存在显著差异, 提出的人工图像生成方法能有效控制土颗粒组分、圆度、色值等分布参数, 反映了真实土体图像特征; 生成的序列变形图像增加了时间变量和任意变形函数功能, 为动态和复杂变形分析可靠性评价建立条件。散斑图像明显低估了 RG-DIC 和 PIVlab 法对土体变形的分析误差, 原因为黑色背景、白色亮斑构成的纹理特征更具辨识度; RG-DIC 法的分析准确性与稳定性明显优于 PIVlab 法, 而不同变形条件下两种方法分析误差呈一致趋势, 当剪应变 $\leq 10^{-3}$ 时误差快速上升。研究方法与成果, 为土体图像变形分析方法发展、应用和可靠性评价提供了重要支撑和参考。

关键词: 图像变形分析方法; 砂土变形; 人工图像; 参考基准; 可靠性评价

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)05-1047-10

作者简介: 王永志(1984—), 男, 研究员, 从事动力离心试验、地基基础抗震等方面理论与方法研究的工作。E-mail: yong5893741@163.com。

An approach for synthetic images of sand deformation based on grain features and prescribed traces and its application

WANG Yongzhi^{1,2}, DUAN Xuefeng^{1,2}, CHEN Su³, TANG Zhaoguang^{1,2}, LIU Huida⁴, YUAN Xiaoming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China; 3. College of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 4. China Construction Infrastructure Corp., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: The image-based deformation analysis method (IDA) is currently an important deformation testing technology in the field of soil mechanics and geotechnical engineering. The speckle images are a common tool for the development, application and reliability evaluation of the IDA; whether they represent the characteristics of actual soil particles and are suited to assess the reliability of the IDA or not remains to be answered. By choosing the Fujian standard sand as a sample, a generation method for synthetic images describing the image and deformation characteristics of actual sands is addressed through the analysis of characteristics of sand images as well as their comparison to speckle images. Using the proposed method, four types of sequential deformation images with analytical formulas of the coordinates are generated to evaluate the reliability of two representative RG-DIC and PIVlab approaches. The results show that the speckle images have remarkable differences compared to the actual sand ones in texture, roundness and color values. The proposed generation method for synthetic images is capable of modifying the distribution parameters of particle size, roundness and color value, reflecting the characteristics of the actual soil images. By introducing time variable and arbitrary deformation functions, the generated sequential

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目 (2023B08); 国家自然科学基金项目 (51609218); 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2023E019)
收稿日期: 2023-02-14

deformation images enable the reliability evaluation of IDA on dynamic and complex deformation. The speckle images apparently underestimate the analysis error of both the RG-DIC and the PIVlab methods, due to the black background and white circular spots with higher degree of recognition than the texture and particle features of the actual sand images. The deformation analysis in accuracy and stability from the RG-DIC exhibits more preferable than that from the PIVlab. The trends of analysis error under various deformation conditions using the two methods are in good agreement, and while the shear strain is smaller than 10^{-3} , the analysis error increases rapidly. The proposed method and results provide important supports and references for the development, application and reliability evaluation of soil image-based deformation analysis methods.

Key words: image-based deformation analysis method; sand deformation; synthetic image; benchmark; reliability analysis

0 引言

图像变形分析方法是目前土力学与岩土工程领域快速兴起的一种重要变形测试技术。其具有非接触、无干扰、局域化、矢量性等优点,实现了由点到面任意方向、变形信息的获取^[1-6]。当前主要的图像变形分析方法有 PIV(Particle Image Velocimetry)法和 DIC(Digital Image Correlation)法及二者衍生的一系列方法^[2-10]。PIV 和 DIC 法本质上,分别为研究流体介质的流动扩散/冲蚀和连续固体介质的屈曲/断裂等两类问题而开发,二者在适用对象和分析目标上差别显著,分别常以示踪粒子和散斑图像为信息载体^[3-5,7-12]。

土体作为一种多孔、离散的多相耦合材料,其变形机制和方式与流体、连续固体材料截然不同,难以人工设置示踪粒子和散斑图像。为使 PIV 法和 DIC 法适于岩土工程的变形认识与理论发展需要,在学者们的不懈努力下,先后以 PIV 和 DIC 为基础开发了 GeoPIV(Geotechnical PIV)、PIVlab(PIV laboratory)、GeoPIV-RG(GeoPIV Reliability-Guided)、RG-DIC(Reliability-Guided DIC)等图像变形分析方法^[4-8],但是这些方法的可靠性与准确性尚缺乏对比研究。

散斑图像与图像变形分析方法的发展息息相关,是可靠性和影响因素研究的一种常用工具^[2-10,12-14],用作准确性提升和改善方法的参考。下面对土体图像变形分析方法发展的重要历程、代表成果及散斑图像对可靠性评价的应用,作简要回顾和总结。利用图像获取土体运动、变形的基本思想由 1970 年 Butterfield 等率先提出,并通过图像记录成功获取了砂土一维、二维的平移运动轨迹^[1]。但是受计算机和图像观测技术发展水平限制,之后长期处于停滞状态,直至 2003 年 White 等^[2]采用移动槽内装填砂土和散斑图像两种方式,对 PIV 法分析颗粒体平移运动的可靠性作了验证,指出人工散斑图像能为图像变形分析可靠性评价提供基准和便利。此后, Bornert 等^[3]利用人工散斑图像探讨了 DIC 法的影响因素,给出了子集尺寸、灰度插值、形函数等对正弦运动位移分析误差的影响特征和机制。Pan^[4]和 Stanier 等^[5]分别介绍了二次开发的 RG-DIC、GeoPIV-RG 图像变形分析方法,并借助人

工散斑图像,证明二者提高了颗粒体材料运动变形的分析精度。Stanier 等^[6]利用散斑图像针对颗粒材料图像变形分析时常见“蠕虫应变”的假象问题,提出了修正“假象”误差的子像素插值算法。王志勇等^[7]探讨了散斑图像对 DIC 法分析精度的影响,提出了以最优位移精度为目标的最优散斑尺寸和灰度的图像生成方法。Lee 等^[8]基于人工散斑图像和电阻式应变片,评价了 DIC 法分析二维应变精度和影响因素,优化了子像素插值算法和最佳子集尺寸。Stanier 等^[9]为满足砂土图像变形分析的可靠性评价需求,提出了平移、旋转、压缩、剪应变等表达 4 种变形的散斑图像生成方法,并对比了 GeoPIV-RG 法、GeoPIV 法的分析精度。苏勇等^[10]针对图像变形分析方法的科研、工程、教学等应用需求,开发了一种自由开源的散斑及变形图生成软件。陈苏等^[11]基于振动台单圆点的图像分析和位移计测试结果对比,评价了振动台试验中图像变形分析方法的可靠性。一些学者还在物理试验中开展了掺入彩砂^[5,12]、埋置彩砂桩^[13-14]、置换透明土^[15]等试验研究,提升了图像变形分析方法的应用范围和分析精度。另外,一些学者还发展了基于 X 射线扫描的 CT 三维土体图像变形观测技术,其优点能同时得到土体试样的表面和内部变形信息^[16-17],但缺点难以获得变形过程的连续观测,其试验环境和条件要求也相对较高。综上,散斑图像对土体图像变形分析方法的发展起到了重要支撑作用,但是对于散斑图像的适用性尚缺乏探讨,以往散斑图像主要用于土体颗粒平移运动、静态变形的可靠性评价,对于动态变形尤其应变分析的可靠性评价缺少研究。

为满足土体图像变形分析方法发展和可靠性评价需求,选取福建标准砂为样本,对实际土体图像和人工散斑图像的特征进行比较,提出了反映实际砂土图像特征的人工图像生成方法;结合典型土体变形模式与机制,建立了表达 4 种变形的颗粒坐标解析公式和生成序列变形图像,对国际代表性 RG-DIC 法和 PIVlab 法可靠性进行评价。研究成果为土体图像变形分析方法的发展与应用,提供重要支撑和指导借鉴。

1 图像变形分析方法与散斑图像特征

1.1 图像变形分析方法

目前已发展了 10 余种图像变形分析方法, 也被称之为可视化或视觉变形测量方法^[5-9,11-19], 而这些方法的主要原理和步骤大致相同, 如图 1 所示。下面将从主要步骤和影响因素, 分为 4 个方面简要介绍。

(1) 摄像设备与采集参数, 根据观测对象和目标, 宜选取合适摄像和光源设备, 以给定像素、帧率、视角、观测面捕获一系列图像, 主要影响因素包含观测尺寸、摄像帧率、畸变系数、光照强度、分辨率等。

(2) 拾取特征与搜寻路径, 利用色值特征拾取和划分适宜大小像素子集, 追踪不同图像之间一致像素特征和比较变化坐标, 求取像素特征的运动轨迹, 主要影响因素包含子集大小、相关函数、子像素插值算法、形状函数、搜索算法、亚像素定位算法等。

(3) 坐标变换与异常矫正, 根据观测面的实际物理尺寸和参考系, 将像素特征的运动轨迹变换为实际的物理空间运动轨迹, 并考虑摄像视角、平移运动、镜头畸变等误差因素, 对运动轨迹进行矫正, 主要影响因素包含变换比尺、异常识别、剔补平滑、离面运动、矫正算法等。

(4) 变形量与变形场解析, 基于位移、速度、加速度、剪应变等变形关系, 将获得运动轨迹按物理空

间几何关系、力学关系进行求解, 计算获得所需变形量、变形场及变形过程信息, 主要影响因素包含变形范围、误差校正、平滑插值、基准算法等。

由上可知, 图像变形分析方法的可靠性和适用性受繁多而复杂因素影响, 目前尚未形成公认一致的评价方法, 而人工散斑图像主要对上述 (2), (3) 部分的影响因素与可靠性开展研究。

1.2 散斑图像与标准砂图像特征对比

散斑图像即由不同直径、灰(亮)度的离散斑点组合而成的图像, 其一般由计算机程序或在试件表面喷洒油漆的方式生成^[7,9-10]。由于计算机生成的高斯分布散斑图像与油漆自然喷洒形成的图像特征十分相似, 其被广泛用作图像变形分析标识物和可靠性的评价工具, 典型的高斯散斑图像^[2-10]如图 2 (a) 所示, 从图 2 的局部放大, 易于发现散斑图像纹理是由黑色背景和不同亮度的斑点交错而成, 其灰度分布呈自由度为 0.1 的 χ^2 分布, 原因为散斑实际是黑色背景上填充的一系列不同亮度圆点。

为使分析结果具有代表性, 选取福建标准砂为样本^[20-21], 利用具有 3D 形态重构、图像分析功能的超景深显微镜 (Leica DVM 6s) 进行图像拍摄和特征分析, 获得砂土图像及纹理特征和色值分布如图 2 (b) 所示。容易发现, 无论纹理特征还是色值分布, 实际土体图像和散斑图像均具有显著差异, 土体图像的红、

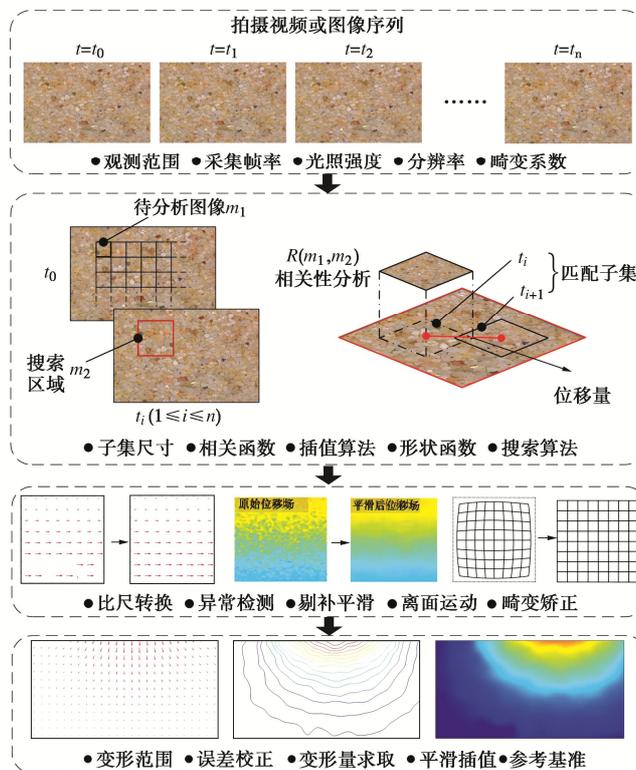
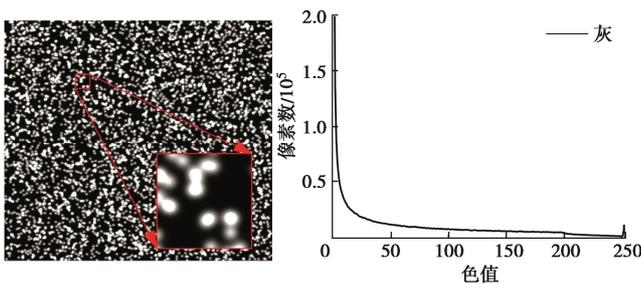


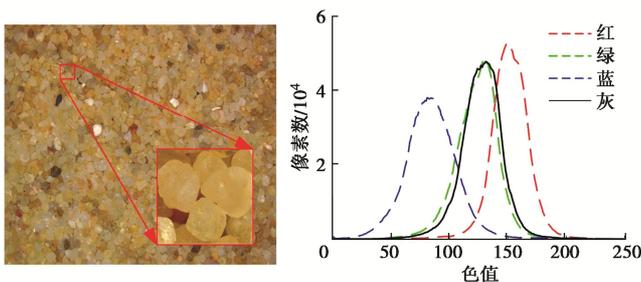
图 1 图像变形分析方法的基本原理与处理步骤

Fig.1 Basic principle and processing steps of image-based deformation analysis method

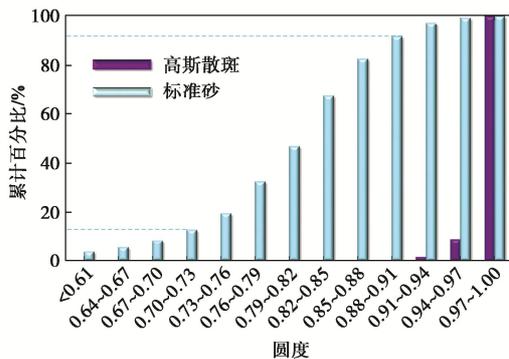
蓝、绿色值均服从正态分布，若采用灰度处理，得到灰度值与绿色值分布基本一致，与散斑图像的灰度 χ^2 分布明显不同，而这些纹理和色值特征决定了图像变形分析的信息载体。此外，图 2 (c) 还给出了散斑图像斑点和土体图像颗粒的圆度分布对比（圆度计算公式为 $4\pi S/C$ ， S 为图像中颗粒面积， C 为周长），可以发现前者圆度约为 1.0，而后者圆度集中于 0.7~0.9。这些特征差异，必然会对砂土图像变形分析方法的可靠性评价产生不利影响。



(a) 高斯散斑图像及纹理特征(局部放大10倍)和灰度分布



(b) 福建标准砂图像及纹理特征(局部放大10倍)和色值分布



(c) 高斯散斑图像和标准砂图像的圆度对比

图 2 散斑图像和标准砂图像纹理特征和色值分布及圆度对比

Fig. 2 Comparison between image characteristics of digital Gaussian brightness speckles and actual granular soils

2 人工标准砂图像与预设变形

针对散斑图像与福建标准砂图像的差异特征和典型土体变形模式及机制^[18-25]，笔者开发了一种能描述实际砂土图像特征和预设典型土体变形的计算机人工标准砂图像生成方法。

2.1 人工标准砂图像生成方法

砂土的颗粒形态、色值分布、交错纹理作为图像变形分析的信息基本载体，如何准确复现这些特征是建立人工图像生成方法的关键所在^[2-10]。基于超景深显微镜对福建标准砂的细观特征分析，将分别从颗粒形态、粒组成分、位姿角、填充颜色等方面，进行数字化土颗粒建模，并采用 MATLAB 软件编制程序生成相应图像，本文方法主要分为 3 个步骤。

(1) 数字化颗粒，是本文人工图像生成方法的核心和对比散斑图像的首要创新，以颗粒大小、半径比、位姿角、填充颜色等为变量对土颗粒进行建模，如图 3 所示，其中， R 为短轴半径，表示颗粒大小与分布； e 为正交长/短轴半径之比，表示颗粒圆度与分布； θ 为长轴与水平向夹角，表示位姿状态与分布； $C(r, g, b)$ 为填充颜色，表示色值与分布； n 为编号第 n 个颗粒； x^n, y^n 分别为第 n 个颗粒的形心坐标，表示颗粒所处位置。

(2) 给定空间填充，参考散斑图像生成方法^[9]，在给定二维空间内填充颗粒，本文与散斑图像不同，颗粒尺寸和色值分布均采用实际砂土的物理特征参数，并引入半径比 e 、位姿角 θ 两个变量，以考虑颗粒圆度和位姿角的变化，更为真实地再现实际土体图像特征，其中圆度采用图 2 (c) 分析结果，位姿角采用 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 均匀分布，填充颗粒总数量 N 参考散斑图像，按下式计算：

$$N = \frac{24LW\bar{e}}{\pi d_{50}^2} \quad (1)$$

式中： L, W 为给定空间的长和宽，本文均取 100 mm； \bar{e} 为半径比均值，由图 2 (c) 圆度分布均值换算所得为 1.7； d_{50} 为平均粒径，福建标准砂为 0.16 mm。

(3) 栅格化图像，该步骤与散斑图像的生成方法一致^[9]，以给定分辨率或像素大小，对步骤 (2) 空间进行栅格化处理生成图像，并可施加不同的光照强度 j ，以探讨 j 对图像变形分析的可靠性影响。

图 3 给出了人工砂土图像数字化生成过程的基本流程和主要控制变量及分布函数，也可根据需要，采用相应的砂土物理特征生成所需人工图像。本文生成的福建标准砂人工图像及纹理特征和色值、圆度分布对比结果见图 4，其中图 4 (a) 给出了平均粒径与像素（单位：pixel）之比 d_{50}/p 为 8，32 分辨率下的生成图像，对应分辨率为 5000 pixel \times 5000 pixel 和 20000 pixel \times 20000 pixel。通过观察发现，人工图像与图 2 (b) 实际标准砂图像十分相似，有效再现了颗粒之间颜色、大小的不均匀分布和相互交错的纹理特征。图 4 (b) 给出了人工土体图像与实际土体图像的色值、圆度分布等对比，可以发现二者在色值、圆度分布等方面特

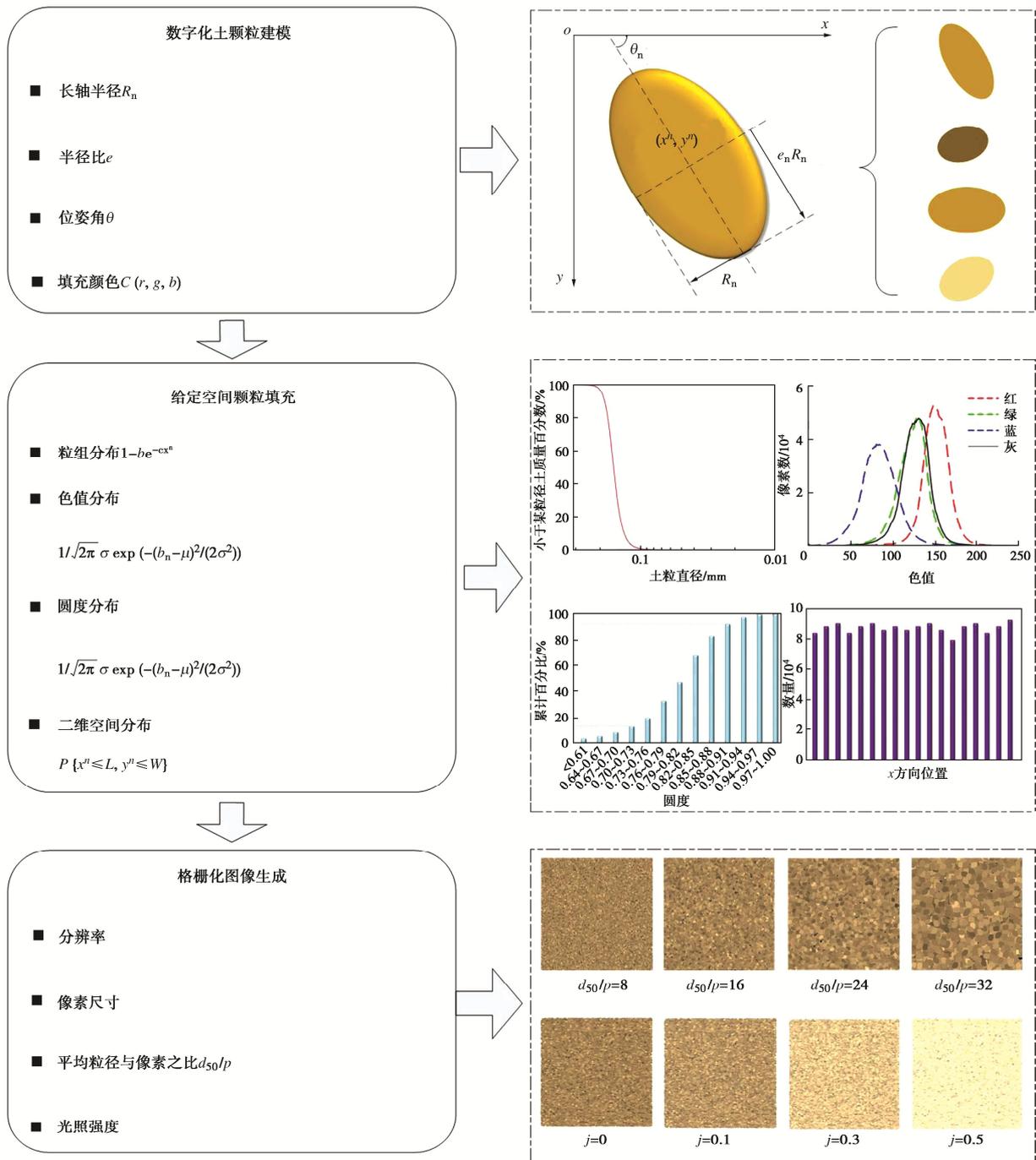
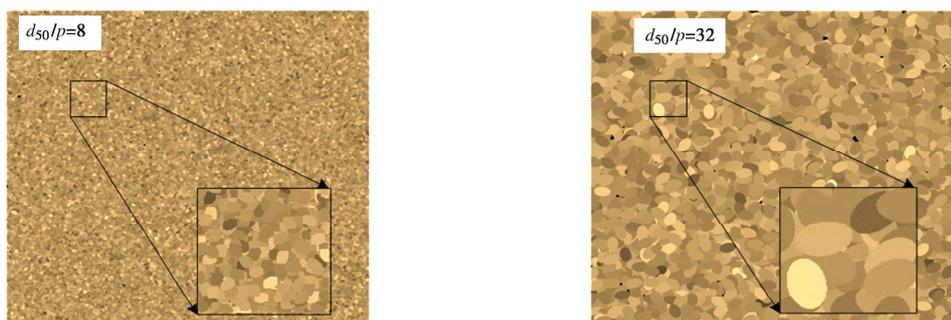
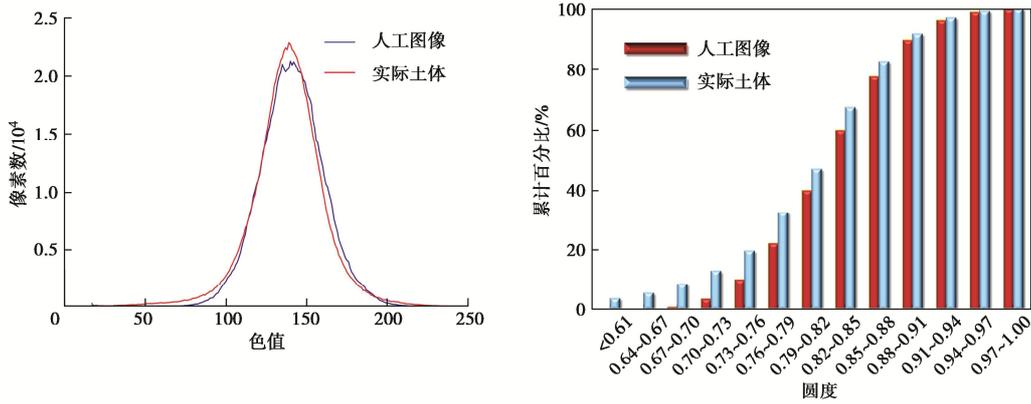


图 3 人工标准砂图像生成方法数字化过程和主要变量

Fig. 3 Digitalizing process and major variables of generation method for synthetic image of standard sand



(a) 人工土体图像纹理特征及局部放大



(b) 人工土体和实际土体图像的色值、圆度分布对比

图4 人工土体与实际土体图像特征及色值、圆度分布对比

Fig. 4 Comparison of image characteristics, color value and roundness distribution between synthetic and actual sands

征高度吻合, 累计误差分别为 1.13% 和 4.4%。综上, 本文提出的人工图像生成方法能有效反映实际砂土图像特征, 准确控制了颗粒圆度、色值、尺寸等分布参数, 证明了数字化土颗粒过程及选取分布函数的合理性。

2.2 颗粒运动解析公式与预设变形图像

建立具有颗粒运动解析坐标和反映真实土体变形的序列图像, 为图像变形分析方法可靠性评价提供参考基准, 是开发人工土体图像的根本目标。首先假定: ①土颗粒为刚体, 在变形过程中形状、体积保持不变; ②土体变形由土颗粒之间相互错动、平移、旋转等产生; ③忽略镜头畸变、光照等观测环境因素。其次, 根据上述假定以图 4(a) 各颗粒初始位置为基准坐标, 结合典型土体变形模式与机制, 构建对应平移、旋转、压缩、剪切等 4 种变形的颗粒运动坐标解析公式, 生成的以时间 t 为变量的序列变形图像见图 5 所示。

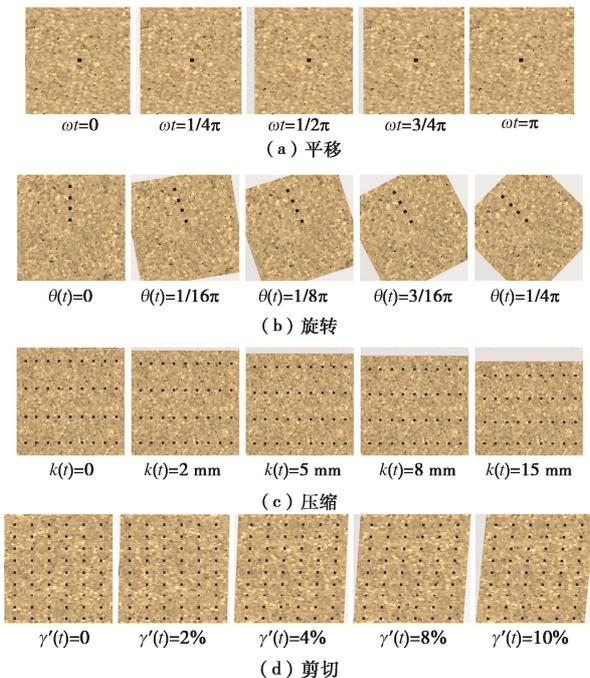


图5 平移、旋转、压缩、剪切等 4 种序列变形图像

Fig. 5 Four types of synthetic sequential deformation images of translation, rotation, compression and shearing

(1) 平移运动

令 (x_0^n, y_0^n) 为图 4(a) 中各颗粒的初始坐标, $n=1, \dots, N$; (x_t^n, y_t^n) 为 t 时刻第 n 个颗粒所在位置, 设各颗粒沿 x 和 y 向的平移运动函数, 分别为 $u(t)$, $v(t)$, 则 t 时刻各颗粒位置为

$$\begin{bmatrix} x_t^n \\ y_t^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & u(t) \\ 0 & 1 & v(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0^n \\ y_0^n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式 (2) 可知, 任意时刻任意颗粒的平移量和轨迹相同, 与 n 无关。若令所有颗粒仅在 x 向平移且 $u(t)=A\sin(\omega t)$, 其中 A 为位移幅值, ω 为角频率, 取 $A=0.1 \text{ mm}$, $\omega t=0 \sim \pi$, 对应生成的平移变形序列图像如图 5(a) 所示。根据 $u(t)$, $v(t)$ 的不同函数形式, 式 (2) 可用于描述局部滑坡、泥石流、振动台试验等复杂移动变形与过程。

(2) 旋转变形

设变形为各颗粒绕 O 点的平面旋转运动 (如图 6 所示), 旋转运动的角函数为 $\theta(t)$, 取 O 点坐标为 (x_c, y_c) , 则可得各颗粒 t 时刻坐标:

$$\begin{bmatrix} x_t^n \\ y_t^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta(t) & -\sin\theta(t) & x_c \\ \sin\theta(t) & \cos\theta(t) & y_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0^n - x_c \\ y_0^n - y_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 每一颗粒的移动量和轨迹, 均与 O 点的半径距离相关, 半径越大, 移动量越大。假定 O 点为图 4(a) 中心点, 设 $\theta(t)=0 \sim \pi/4$, 对应生成的旋转变形序列图像如图 5(b) 所示。根据 $\theta(t)$ 的不同函数形式, 式 (3) 可用于描述建筑物、坝体等地基倾覆和边坡溜滑的局部旋转运动。

(3) 压缩变形

基于软土地基固结变形的沉降特点, 以图 4(a) 上、下边界分别表示均匀软土层的地表和卧基岩, 设土层厚度为 h_y , 地表总沉降为 $k(t)$, 可得 t 时刻各颗粒的位置坐标:

$$\begin{bmatrix} x_t^n \\ y_t^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{k(t)}{h_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0^n \\ y_0^n \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 各颗粒仅在竖向下移, 移动量与总沉降、距下边界高度成比例, 距下边越近, 移动量越小。假定 $k(t)$ 由 0 变化到 15 mm, 对应生成的压缩变形序列图像如图 5 (c) 所示。根据 $k(t)$ 的不同函数形式, 式 (4) 可用于描述均质和非均质软土地基固结沉降。

(4) 剪切变形

假定水平动荷载下地基变形符合一维剪切梁模型^[22, 25], 同样以图 4 (a) 上、下边界分别表示均匀土层的地表和卧基岩, 设各颗粒均处于长 Δl 、高 Δh 的变形单元中心 (图 7), 设变形单元的水平运动函数为 $p(t, y_0^n)$, 剪应变函数为 $\gamma(t, y_0^n)$, 即颗粒运动由变形单元的整体运动和单元剪切变形的相对运动两部分组成, 则 t 时刻各颗粒坐标:

$$\begin{bmatrix} x_t^n \\ y_t^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \gamma(t, y_0^n) \frac{\Delta h}{2} + p(t, y_0^n) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0^n \\ y_0^n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

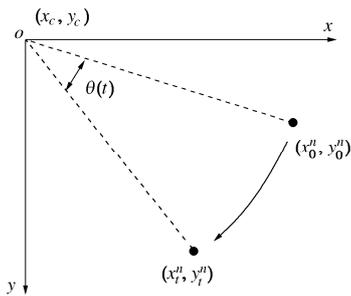


图 6 旋转变形示意图

Fig. 6 Schematic diagram of rotary deformation

若图 7 (a) 土层沿深度各处剪应变相等, 且剪应变函数为 $\gamma'(t)$, 即 $\gamma(t, y_0^n) = \gamma'(t)$, 与高度无关, 则 $p(t, y_0^n) = \gamma'(t)(y_0^n - \Delta h/2)$, 取 $\gamma'(t) = 0 \sim 10\%$, 对应生成的剪切变形序列图像如图 5 (d) 所示。根据 $\gamma(t, y_0^n)$ 和 $p(t, y_0^n)$ 的不同函数形式, 式 (5) 可用于描述水平静力、循环动力荷载下的复杂地基静、动力剪切变形。

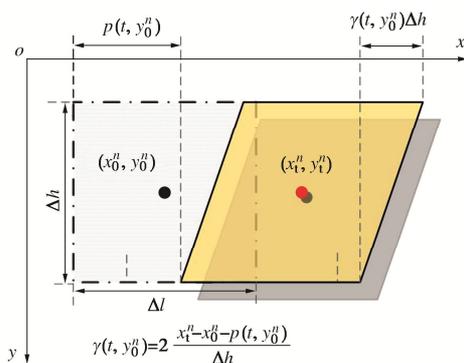


图 7 剪切变形示意图

Fig. 7 Schematic diagram of shear deformation

值得说明, 与 Stanier 等^[9]提出的平移、旋转、压缩、剪切等散斑变形图像方法相比, 本文方法引入了时间变量 t 和任意变形函数功能, 为动态和复杂变形图像分析的可靠性评价建立支撑。

2.3 本文序列变形图像的优势

本文建立的序列变形图像作为参考基准, 用于图像变形分析方法的可靠性评价, 主要优势有 4 点。

(1) 精准变形信息, 实际土体变形中缺乏已知颗粒运动轨迹和变形量, 而人工变形图像为图像变形分析方法可靠性评价提供了精准变形信息。

(2) 任意变形函数, 有效复现了典型土体变形中颗粒之间相互错动、平移和旋转等过程, 复杂变形轨迹可通过组合式 (2) ~ (5) 生成所需序列变形图像。

(3) 砂土参数影响, 能有效控制土体的颗粒组分、色值、圆度、位姿等分布参数, 还能利用颗粒之间相互错动控制孔隙比, 为探讨土体参数与纹理特征对图像变形分析的可靠性影响提供条件。

(4) 环境参数影响, 能添加光照强度、光照不均匀、镜头畸变、测试噪声等因素影响, 为探讨观测环境条件对图像变形分析的可靠性影响提供研究条件。

3 代表方法可靠性评价

为认识土体图像变形分析的可靠性和准确性, 比较散斑图像与本文人工图像的评价结果差异, 选取国际代表性 RG-DIC 和 PIVlab^[4, 9]两种方法进行探讨。为使结果具有可比性, 两种方法均采用 SSD 互相关函数、一阶形函数、子集大小设置为 $31 \times 31 \text{ pixel}$ 和采用全量计算, 不同的是位移分析时, PIVlab 采用粗细搜索算法, 而 RG-DIC 为可靠度优化算法。散斑变形图像采用式 (2) ~ (5) 替代 Stanier 等^[9]的方法生成, 以使两种图像具有相同的运动轨迹和变形基准。

3.1 平移运动

以图 5 (a) 图像中心点为参考, 设频率为 1 Hz, RG-DIC 法和 PIVlab 法分析获得动力时程和误差变化如图 8 所示。图 8 (a) 给出了幅值 A 为 0.05, 0.1, 1.0 mm 时, 两种方法分析获得动力时程与实际时程对比结果, 可发现幅值 A 为 0.1, 1.0 mm 时, 两种方法均能准确、有效获得动力时程, 仅 $A=0.05 \text{ mm}$ 时 PIVlab 法出现较明显误差。图 8 (b) 给出了不同方法分析误差随位移幅值的变化规律及与散斑图像评价的对比结果, 可发现散斑图像和本文人工图像评价结果相一致, RG-DIC 法和 PIVlab 法分析误差均随位移幅值增大而减小, 但是散斑图像评价获得分析误差显著小于本文人工图像, 其明显低估了分析误差, 原因为黑色背景、白色亮斑构成的纹理特征更具辨识度。因此, 相比散斑图像, 本文建立的数字化砂土变形图像更适合作为

参考基准, 评价和发展土体图像变形分析方法。

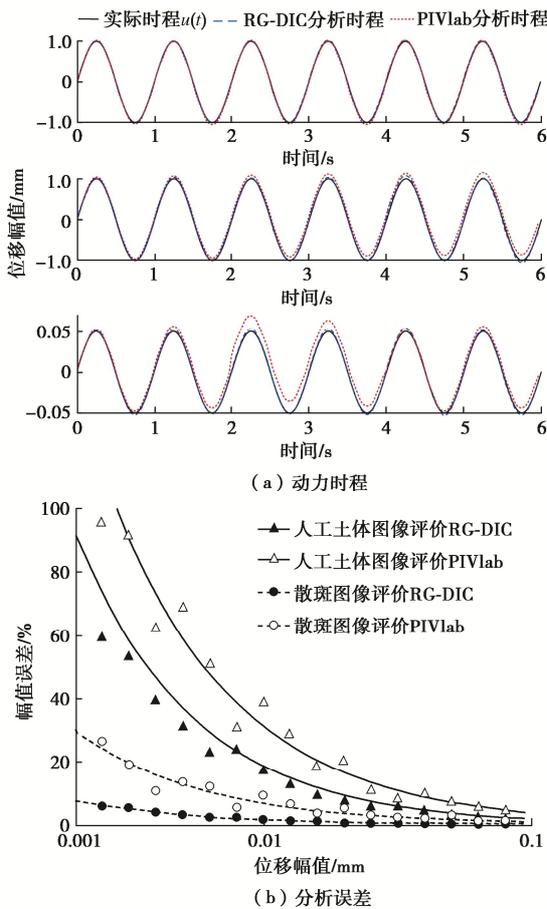


图8 平移运动图像分析获得动力时程和分析误差

Fig. 8 Dynamic time series and displacement accuracies obtained by translation motion image analysis

3.2 旋转变形

以图 5 (b) 图像上同圆心、不同半径的 4 个点为参考, RG-DIC、PIVlab 法分析获得位移场云图和误差关系如图 9 所示。图 9 (a) 给出了 $\theta(t)=\pi/36$ 时, 两种方法分析获得位移云图, 不难发现 RG-DIC 法位移云图为边界分明的一系列同心圆, 而 PIVlab 法虽有同心圆特征, 但边界模糊且不规则, 并随半径增大而愈加失真, 表明 RG-DIC 法分析精度和稳定性明显优于 PIVlab 法, 原因为 RG-DIC 法对形函数和初始位移估计算法进行了优化^[4, 9]。图 9 (b) 给出了两种方法对 4 个参考点的分析误差与角位移关系及与散斑图像评价的对比结果, 两种图像变形分析方法一致表现为误差随角位移、半径增大而增大; 且相比角位移, 误差对半径更加敏感, 原因为颗粒旋转运动改变了纹理特征。图 9 (b) 散斑图像和本文人工图像评价结果再次一致表明, RG-DIC 法相比 PIVlab 法具有更好的准确性和稳定性, 后者分析误差比前者高约 20%。与平移运动的对比结果一致。同时, 图 9 (b) 再次证明了散斑图像评价结果将明显低估 RG-DIC 法和 PIVlab 法的分析误差。

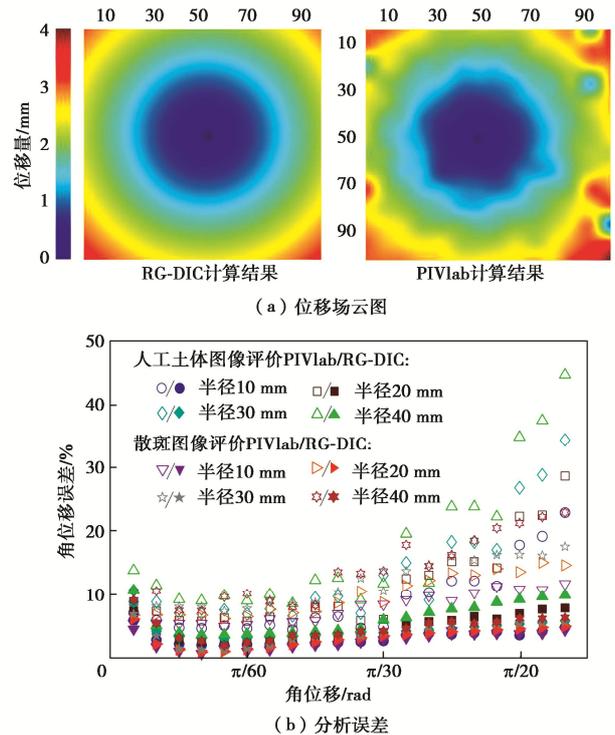
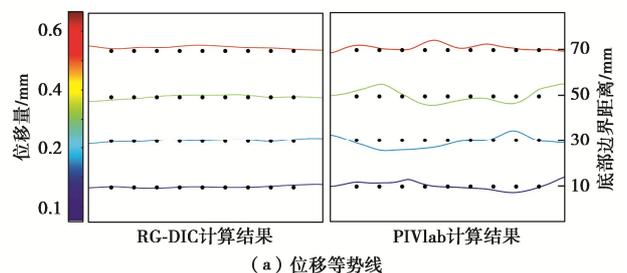


图9 旋转变形图像分析获得位移场云图和分析误差

Fig. 9 Displacement nephograms and accuracies of angular displacement obtained by rotating deformation image analysis

3.3 压缩变形

以图 5 (c) 图像上距底边不同高度均布 4×9 个阵列点为参考, 两种图像分析方法获得位移场等势线和误差规律如图 10 所示。图 10 (a) 给出了压缩量 $k(t)=1.0\%h_y$ 时, 两种分析方法获得位移等势线, 由式 (4) 可知真实等势线应为若干等距水平直线, 观察可发现 RG-DIC 法获得等势线基本为等距水平直线, 随距底边高度的增加, 虽出现一定幅度扭曲但可以忽略; 而 PIVlab 法获得等势线出现了明显不规则扭曲, 又一次证明 RG-DIC 法的准确性和稳定性更优。图 10 (b) 给出了 $k(t)=(0 \sim 9\%)h_y$ 范围, 两种方法对每一行参考点的平均分析误差随压缩位移量的变化特征, 可以发现 RG-DIC、PIVlab 法呈现一致的规律, 每一行参考点平均误差随压缩位移量增加, 均表现为先减小再增大的趋势, 且距底边高度越大, 误差越大。原因为小变形时, 受分辨率约束而造成分析误差增大, 而大变形时, 颗粒之间相互错动改变了纹理特征而使分析误差升高。这一现象带来的重要启示: 采用图像变形分析方法时, 应首先明确适用的观测变形范围。



(a) 位移等势线

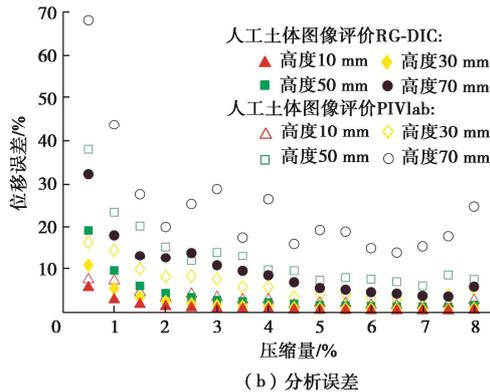


图 10 压缩变形图像分析获得位移等势线和分析误差
Fig. 10 Equipotential lines and accuracies of displacement obtained by compressed deformation image analysis

3.4 剪切变形

以图 5 (d) 图像上与左边不同距离 9×6 个阵列点为参考, RG-DIC、PIVlab 法获得剪切位移梁和误差特征如图 11 所示。

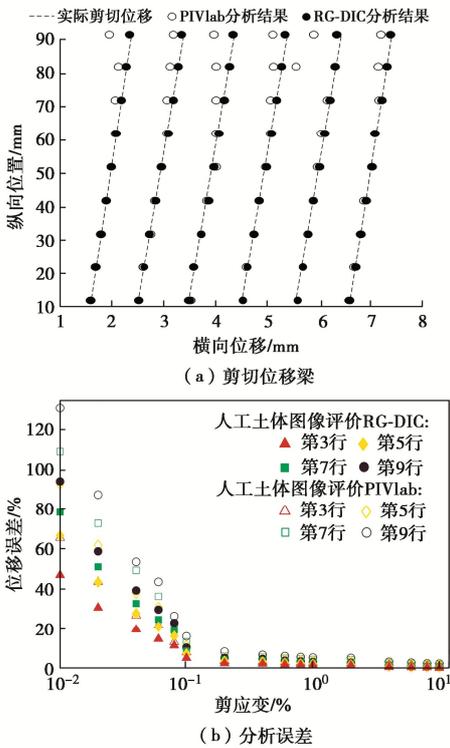


图 11 剪切变形图像分析获得剪切位移梁和分析误差
Fig. 11 Shear displacement beams and displacement accuracies obtained by shear deformation image analysis

图 11 (a) 给出了剪应变 $\gamma(t) = 1.5 \times 10^{-2}$ 时, 每一列参考点位移形成的剪切梁, 由一维剪切梁假定^[22]可知图 5 (d) 各列参考点位移形成相互平行的斜直梁, 可观察发现 RG-DIC 法各参考点位移均较好落于平行斜直梁, 而 PIVlab 法各参考点位移随距离底边高度增加, 逐渐偏离斜直梁并呈明显离散, 获得两种分析方法的可靠性对比结果与前述一致。图 11 (b) 给出了距底边起第 3、第 5、第 7、第 9 行, 两种方法对每一行参考点的平均分析误差随剪应变的变化特征,

可发现 $\gamma(t) \geq 10^{-3}$ 时平均误差随剪应变增大而逐渐下降, 平均误差 $\leq 10\%$; 而当 $\gamma(t) \leq 10^{-3}$ 时, 平均误差随剪应变减小而快速上升, 在 $\gamma(t) \leq 10^{-4}$ 时, 平均误差达 100%, 原因为受图像分辨率约束, 不能满足分析精度的需要。因此, 两种代表性图像变形分析方法均不适于 $\gamma(t) \leq 10^{-3}$ 的剪应变分析。

4 结 论

(1) 散斑图像与真实标准砂图像相比, 无论在直观图像纹理, 还是颗粒圆度、色值分布上均具有明显差异。

(2) 提出的人工图像生成方法, 能有效控制颗粒组分、圆度、色值等分布参数, 反映了真实土体图像特征; 生成的序列变形图像, 有效模拟颗粒之间相互错动、平移、旋转等过程, 充分描述了土体变形模式与机制, 并增加时间变量和任意变形函数功能, 为动态和复杂变形分析的可靠性评价建立条件。

(3) 与本文人工图像的评价结果相比, 散斑图像评价结果显著低估了 RG-DIC 法和 PIVlab 法的分析误差, 原因为黑色背景、白色亮斑构成的纹理特征更为清晰和更具辨识度。相比散斑图像, 本文建立的数字化砂土变形图像更适合作为参考基准, 评价和发展土体图像变形分析方法。

(4) RG-DIC 法分析准确性和稳定性明显优于 PIVlab 法, 后者误差比前者高约 20%。同时, 不同变形条件下两种方法分析误差呈现一致发展趋势, 分析误差随变形量而增大, 在平移、旋转、压缩、剪切等变形条件下, 分别呈减小、增大、先减后增、减小等趋势, 且在剪应变 $\leq 10^{-3}$ 时误差快速上升。

本文提出的人工砂土变形图像生成方法基于二维颗粒形态和运动建立, 也可结合 3D 土体颗粒形态和运动重构将其拓展至三维空间, 为三维土体变形图像分析方法的发展提供有力支撑。

参考文献:

[1] BUTTERFIELD R, HARKNESS R M ANDREWS K Z. A stereo-photogrammetric method for measuring displacement fields[J]. Géotechnique, 1970, 20(3): 308-314.
 [2] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 619-631.
 [3] BORNERT M, BRÉMAND F, DOUMALIN P, et al. Assessment of digital image correlation measurement errors: methodology and results[J]. Experimental Mechanics, 2009, 49(3): 353-370.
 [4] PAN B. Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement[J]. Applied Optics, 2009, 48(8):

- 1535-1542.
- [5] STANIER S A, WHITE D J. Improved image-based deformation measurement in the centrifuge environment[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2013, **36**(6): 915-928.
- [6] STANIER S A, DIJKSTRA J, LENIEWSKA D, et al. Vermiculate artefacts in image analysis of granular materials[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, **72**: 100-113.
- [7] 王志勇, 王磊, 郭伟, 等. 数字图像相关方法最优散斑尺寸[J]. *天津大学学报*, 2010, **43**(8): 674-678. (WANG Zhiyong, WANG Lei, GUO Wei, et al. Optimal size of speckle spot in digital image correlation method[J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, **43**(8): 674-678. (in Chinese))
- [8] LEE C, TAKE W A, HOULT N A. Optimum accuracy of two-dimensional strain measurements using digital image correlation[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2012, **26**(6): 795-803.
- [9] STANIER S A, BLABER J, TAKE W A, et al. Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, **53**(5): 727-739.
- [10] 苏勇, 高越, 郜泽仁, 等. 光绘: 自由开源的数字散斑图像生成和评价软件[J]. *实验力学*, 2021, **36**(1): 17-28. (SU Yong, GAO Yue, GAO Zeren, et al. Glare: a free and open source software for generation and assessment of digital speckle pattern[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2021, **36**(1): 17-28. (in Chinese))
- [11] 陈苏, 陈国兴, 韩晓健, 等. 基于计算机视觉的位移测试方法研究与实现[J]. *振动与冲击*, 2015, **34**(18): 73-78, 99. (CHEN Su, CHEN Guoxing, HAN Xiaojian, et al. Development of vision-based displacement test method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, **34**(18): 73-78, 99. (in Chinese))
- [12] STANIER S A, RAGNI R, BIENEN B, et al. Observing the effects of sustained loading on spudcan footings in clay[J]. *Géotechnique*, 2014, **64**(11): 918-926.
- [13] KIRKWOOD P, DASHTI S. Influence of prefabricated vertical drains on the seismic performance of similar neighbouring structures founded on liquefiable deposits[J]. *Géotechnique*, 2019, **69**(11): 971-985.
- [14] BADANAGKI M, DASHTI S, KIRKWOOD P. Influence of dense granular columns on the performance of level and gently sloping liquefiable sites[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, **144**(9): 04018065.
- [15] 王忠涛, 罗光宇, 孔纲强, 等. 倾斜拉拔荷载下锚桩承载性能及桩周位移场可视化离心模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(1): 189-195. (WANG Zhongtao, LUO Guangyu, KONG Gangqiang, et al. Visual centrifugal model tests on capacity of anchor piles and displacement field around piles under oblique pull-out loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(1): 189-195. (in Chinese))
- [16] ZHOU B, WANG J, WANG H. A novel particle tracking method for granular sands based on spherical harmonic rotational invariants[J]. *Géotechnique*, 2018, **68**(12): 1116-1123.
- [17] CHENG Z, WANG J F. An investigation of the breakage behaviour of a pre-crushed carbonate sand under shear using X-ray micro-tomography[J]. *Engineering Geology*, 2021, **293**: 106286.
- [18] TAKE W A. Thirty-Sixth Canadian Geotechnical Colloquium: advances in visualization of geotechnical processes through digital image correlation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, **52**(9): 1199-1220.
- [19] SU Y, GAO Z R, FANG Z, et al. Theoretical analysis on performance of digital speckle pattern: uniqueness, accuracy, precision, and spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(16): 22439-22474.
- [20] ROUSE P C, FANNIN R J, SHUTTLE D A. Influence of roundness on the void ratio and strength of uniform sand[J]. *Géotechnique*, 2008, **58**(3): 227-231.
- [21] 付茹, 胡新丽, 周博, 等. 砂土颗粒三维形态的定量表征方法[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(2): 483-490. (FU Ru, HU Xinli, ZHOU Bo, et al. A quantitative characterization method of 3D morphology of sand particles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(2): 483-490. (in Chinese))
- [22] 王永志, 王体强, 袁晓铭, 等. 动力离心试验反演分析砂土模量阻尼比特征与可靠性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, **41**(8): 1717-1727. (WANG Yongzhi, WANG Tiqiang, YUAN Xiaoming, et al. Inverse analysis of characteristics and reliability of sand shear modulus and damping ratio through dynamic centrifuge tests[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, **41**(8): 1717-1727. (in Chinese))
- [23] ZHENG J, HRYCIW R D. Traditional soil particle sphericity, roundness and surface roughness by computational geometry[J]. *Géotechnique*, 2015, **65**(6): 494-506.
- [24] 刘君, 刘福海, 孔宪京, 等. PIV技术在大型振动台模型试验中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(3): 368-374. (LIU Jun, LIU Fuhai, KONG Xianjing, et al. Application of PIV in large-scale shaking table model tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(3): 368-374. (in Chinese))
- [25] CHEN Z C, LI K G, OMIDVAR M, et al. Guidelines for DIC in geotechnical engineering research[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2017, **17**(1): 3-22.