

# 基于预设序列变形图像的DIC和PIV方法 可靠性研究\*

蔡克伟<sup>1,2</sup>, 段雪锋<sup>3</sup>, 汤兆光<sup>1,2†</sup>, 王体强<sup>1,2</sup>, 陶然<sup>1,2</sup>, 王永志<sup>1,2</sup>

(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. 石家庄铁道大学河北省大型结构健康诊断与控制实验室, 河北石家庄 050043)

**摘要:** 图像变形分析技术是水利、地震等领域物理科研试验的一种重要手段,以DIC(Digital Image Correlation)和PIV(Particle Image Velocimetry)方法应用最为广泛。但现有研究缺乏在统一基准下对2种方法性能的系统对比,导致其在岩土复杂变形分析中的适用性选择缺乏依据。故本文构建了旋转、压缩、剪切3种土体典型静态变形及一维平移、平移剪切、动态大变形3类动态序列图像作为预设评价基准,对比分析DIC与PIV的位移分析精度、可识别粒子变形范围及分析稳定性。结果表明:(1)在分析精度与变形范围上,DIC得益于其高阶形函数,在旋转和剪切变形中的误差范围(4%~15%,4%~40%)显著小于PIV(8%~60%,11%~63%),其处理非均匀变形的能力更强;(2)在分析稳定性上,DIC采用的全量计算模式可有效避免误差累积,其动态时程曲线与参考基准线吻合度更高,PIV的增量计算模式则导致结果出现漂移;(3)在应变场反演上,DIC通过形函数直接求解应变,优于PIV的数值微分后处理,其在砂质边坡模型试验中能更精准捕捉到应变局部化现象,数据丢失率较PIV降低4.9%。

**关键词:** 图像变形分析;预设图像;参考基准;动态时程;可靠性评价

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2025.03.24.0003

**中图分类号:** TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2026)01-0070-012

**引文格式:** 蔡克伟,段雪锋,汤兆光,王体强,陶然,王永志. 基于预设序列变形图像的DIC和PIV方法可靠性研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文),2026,43(1):70-81.

**英文引文格式:** Cai Kewei, Duan Xuefeng, Tang Zhaoguang, Wang Tiqiang, Tao Ran, Wang Yongzhi. Research on the reliability comparison of DIC and PIV methods for soil body image deformation analysis based on preset sequence deformation[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2026, 43(1): 70-81.

## Research on the Reliability Comparison of DIC and PIV Methods for Soil Body Image Deformation Analysis Based on Preset Sequence Deformation

Cai Kewei<sup>1,2</sup>, Duan Xuefeng<sup>3</sup>, Tang Zhaoguang<sup>1,2</sup>, Wang Tiqiang<sup>1,2</sup>, Tao Ran<sup>1,2</sup>, Wang Yongzhi<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin Heilongjiang 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin Heilongjiang 150080, China; 3. Key Laboratory for Health Monitoring and Control of Large Structures in Hebei Province, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China)

**Abstract:** Image deformation analysis technology is an important means of scientific research and physical experiments in fields such as water conservancy and seismology. DIC (Digital Image Correlation) and PIV (Particle Image Velocimetry) are the most widely used methods. However, existing research lacks a systematic comparison of the performance of the two meth-

\* 收稿日期: 2025-03-24; 修回日期: 2026-01-04; 录用日期: 2026-01-04.

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“北京东六环盾构隧道多灾害智能感知关键技术与示范研究”(2023B08); 黑龙江省自然科学基金“动力离心试验场地变形和强度破坏反演分析方法研究”(LH2023E019).

作者简介: 蔡克伟(2000—),男,硕士生,从事离心试验量测技术的研究,E-mail: 15238465741@163.com.

† 通信作者: 汤兆光(1993—),男,博士,助理研究员,主要从事多灾害智慧感知与监测预警、动力离心机试验量测技术的研究,E-mail: tzg158135@163.com.

ods under a unified benchmark, which leads to insufficient basis for selecting their applicability in analyzing complex deformation of rock and soil. Therefore, this paper establishes three types of typical static deformation images rotation, compression and shear, and three types of dynamic sequence images one-dimensional translation, translational shear and dynamic large deformation as preset evaluation criteria. The displacement analysis accuracy, identifiable particle deformation range, and analysis stability of DIC and PIV are compared and analyzed. The results show that: (1) In terms of analysis accuracy and deformation range, DIC benefits from its high-order shape function. Its error ranges in rotation and shear deformation (4%-15%, 4%-40%) are significantly smaller than those of PIV (8%-60%, 11%-63%), indicating that DIC has a stronger ability to handle non-uniform deformation. (2) In terms of analysis stability, the full calculation mode adopted by DIC effectively avoids error accumulation, and its dynamic time history curve is more consistent with the reference datum line. The incremental calculation mode of PIV leads to drift of the results. (3) In strain field inversion, DIC directly solves strain through the shape function, which is superior to the numerical differentiation post-processing used in PIV. In a model test of a sandy slope, DIC captured strain localization phenomena more accurately, with a data loss rate 4.9% lower than that of PIV.

**Key words:** image deformation analysis; preset images; reference benchmarks; dynamic time history; reliability evaluation

## 0 引言

图像变形分析方法已成为物理科研试验分析土体变形的重要手段。随着研究的深入,多种图像分析算法应运而生,并在土石坝、防护堤、边坡等模型试验中得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。目前,岩土工程领域应用最为广泛的图像变形分析方法为PIV(Particle Image Velocimetry)和DIC(Digital Image Correlation)粒子图像测速法<sup>[4-5]</sup>。PIV以示踪粒子为信息载体,是一种流场定量分析技术。White等<sup>[4]</sup>通过PIV和近距离摄影测量技术,开展平面土壤变形捕捉测量的系列验证试验,证明该方法可有效提高精度、准确度和分辨率;Take<sup>[5]</sup>系统总结PIV在土体变形可视化中的进展,强调其在流场与颗粒运动追踪中的优势;刘兵等<sup>[6]</sup>则进一步分析PIV测量精度的影响因素,提出成像优化与粒子布置的具体建议。最新的研究致力于通过先进算法提升PIV的性能,如将物理信息神经网络与光场层析技术结合,以显著提升三维流场的空间分辨率与测量精度<sup>[7]</sup>。DIC以散斑图像为信息载体,是一种测量材料变形的鲁棒性非接触技术。Pan<sup>[8]</sup>综述了DIC技术的发展历程与误差控制策略;Das<sup>[9]</sup>将DIC方法应用于砂土基脚破坏模型试验,利用对基脚下开发的破坏楔与DIC分析结果比较,发现DIC方法可很好描述边坡基脚实际破坏机制。Chen等<sup>[10]</sup>提出了DIC在岩土工程中的应用指南,强调图像预处理与后处理对结果可靠性的影响。DIC算法的进步聚焦于解决复杂变形场的测量,如有研究提出“零误差点”等新算法,以有效抑制因形函数不匹配导致的系统误差,从而提升DIC在非均匀变形场中的测量精度<sup>[11]</sup>。

综上,尽管PIV与DIC均在持续发展并在岩土工程中得到应用,但现有研究存在一个关键空白:缺乏在一个统一、可控且标准化的基准下,对2种方法的综合可靠性进行系统化对比。当前研究多为单一方法的参数优化或特定案例应用,无法解决“在何种变形模式下应优先选择何种方法”这一工程实践问题。这种系统性对比标准的缺失,导致方法选择常依赖经验,而非客观性能数据。

为填补这一空白,本文的核心是建立一套基于预设变形序列图像的标准化可靠性评价基准。首先,构建旋转、压缩、剪切3类典型静态变形及一维平移、平移剪切、动态大变形3类动态序列图像作为标准测试集。其次,系统化对比DIC与PIV在位移分析精度、可识别变形范围、分析稳定性及应变场反演能力4个维度的性能差异。研究旨在为岩土工程中的图像变形分析方法选择提供试验依据与理论支持,推动该领域从经验性应用向标准化、量化评价发展。

## 1 典型图像变形分析方法

### 1.1 图像变形分析方法简介

图像变形分析技术特别适合于岩土工程破坏过程的可视化,如浅基础的塑性坍塌或物理模型滑坡中的破坏演变。图像分析方法原理、分析结果及应用场景<sup>[12-14]</sup>如图1所示。

现有图像分析方法分为图像预处理、变形评估、数据后处理等过程<sup>[10]</sup>,在此扼要阐述分析方法的主要特点与关键技术。(1)图像预处理。旨在提升原始图像质量,为后续精确分析奠定基础。在岩土实验中,核心任务在于抑制因非均匀光照、镜头畸变及图像噪声所引入的误差,同时通过对比度增强等手段,确保土体颗粒或散斑图案的特征清晰可辨。(2)变形评估。此为方法核心,该阶段通过建立图像子区之间的互相关函数来精确

量化位移. 关键在于选择或构建合适的形函数以描述子区内的真实变形(如平移、旋转或剪切), 并采用迭代算法达到亚像素级的匹配精度. 评估策略(如计算路径、窗口/子集尺寸)的设计直接决定位移场的可靠性、计算效率及对复杂变形的适应能力. (3)数据后处理. 旨在优化初始计算得到的位移场, 并导出有物理意义的力学参量. 包括剔除粗大误差(如异常值滤波)、对位移场进行平滑以降低噪声影响, 以及最为关键的应变场计算. 应变场的精度直接依赖位移场的质量及应变计算方法.

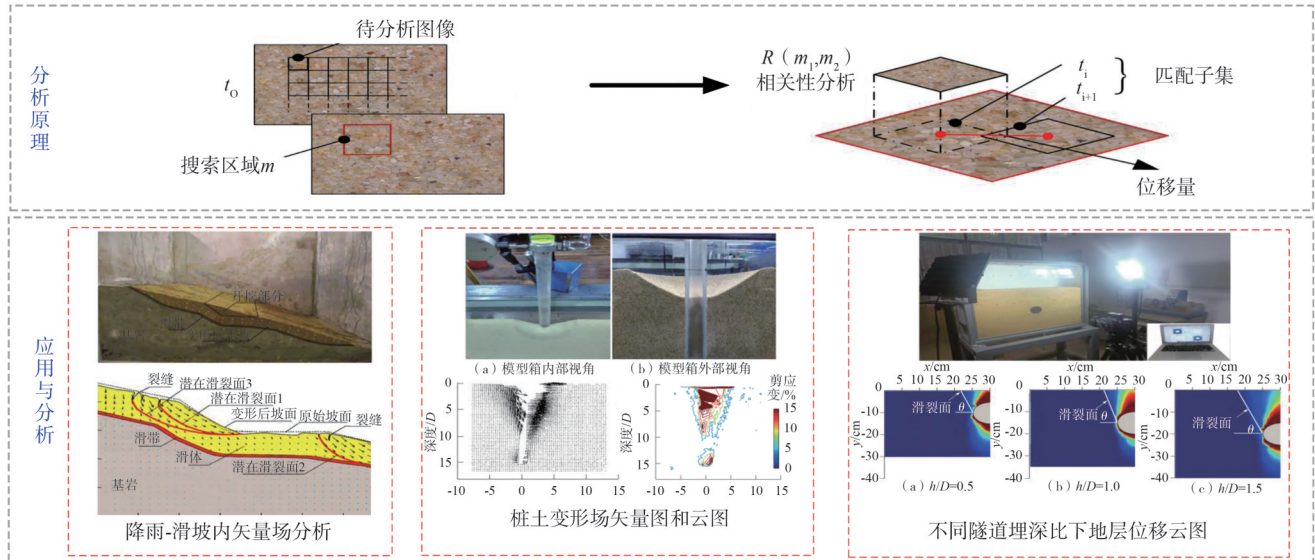


图 1 图像变形分析方法的基本原理、应用场景、分析结果

Figure 1 Fundamentals of image deformation analysis methods, application scenarios, analysis results

## 1.2 2种典型图像变形分析方法对比

PIV 基于 GUI 开源工具开发<sup>[15]</sup>, DIC 基于现代子集的开源 2D DIC 开发<sup>[16]</sup>. 二者虽同属图像变形分析技术, 但理论基础与算法内核存在根本差异, 这直接决定了各自的适用场景与性能边界. PIV 源于流体力学测量, 其核心是追踪示踪粒子群的平移运动以获取速度场; 而 DIC 植根于固体力学, 其核心是测量材料表面的全场变形(位移、应变). 这一根本目标的不同, 衍生出一系列算法上的核心区别(表 1).

首先, 最关键的差异在于形函数, 即算法如何描述查询窗口(或子区)内的运动. PIV 传统上采用简单的平移或仿射形函数, 基本假设是询问窗口内的变形是均匀的; DIC 则内置了高阶形函数, 能够精确描述子区内的平移、旋转、正应变和剪应变等复杂变形模式. 这是 DIC 在处理固体非均匀变形时精度和鲁棒性远高于 PIV 的根本原因. 其次, 二者的计算策略不同. 在窗口/子集策略上, PIV 采用多网格迭代, 从大窗口开始逐步缩小以兼顾大位移捕捉与局部精度; DIC 则更依赖在固定或自适应子集上进行形函数迭代以直接求解复杂变形. 在计算路径上, 现代高性能 PIV 与 DIC 均已摒弃简单的逐行/列扫描, 普遍采用可靠性引导的种子点传播策略并结合 GPU 并行计算, 从而高效、可靠地生成全场数据. 最后, 二者的输出模式与应变求解方式存在本质区别. PIV 输出的是增量位移场, 并通过数值微分后处理间接获取应变, 精度易受噪声影响. 而 DIC 输出的是全场/全量位移场, 应变是在形函数迭代过程中直接求解出的核心结果, 故精度和可靠性更高.

表 1 所列核心理论差异, 直接决定了 PIV 与 DIC 在应对不同变形模式时可能表现出不同的可靠性水平. 如 DIC 的高阶形函数理论上更擅长处理非均匀变形, 而 PIV 的增量计算模式可能在长期序列分析中产生误差累积. 但这些理论差异在典型岩土变形场景下的具体量化表现, 尚未有研究在同一基准下给出明确答案. 故本文将基于预设的变形序列图像, 对这些关键差异所导致的性能差距进行实证检验与系统评价.

## 2 预设变形序列图像评价基准

### 2.1 预设变形序列图像工作原理

在图像变形分析方法的可靠性评价中, 人工散斑图像常被用作参考基准. 王永志等<sup>[17]</sup>通过对比散斑图像

与福建标准砂的真实土体图像,发现两者在纹理、圆度及色值分布上存在显著差异,但通过人工砂土变形图像生成方法(如控制颗粒组分、圆度及变形函数),可生成具有预设变形坐标的序列图像。研究表明,在缺乏真实土体高分辨率图像的场景下,散斑图像可通过参数优化(如子集尺寸、灰度分布)近似表征土体宏观变形规律。这一结论为本文提供了理论支持,以人工生成的变形序列图像集作为2种图像分析方法的可靠性评价参考基准,能够准确反映2种图像变形分析方法的分析精度、变形范围、稳定性等。预设典型土体图像变形前,假定:(1)土颗粒形状、体积保持不变;(2)土体发生变形由土颗粒间错动导致;(3)忽略非均匀光照、摄像畸变等不可控因素。根据上述假定,以各序列第一张图像中各颗粒位置为初始坐标,结合土体典型变形模式与机制,建立对应旋转、压缩、剪切3种变形的颗粒运动坐标解析公式,生成序列变形图像,如图2所示。

表1 2种图像分析方法对比  
Table 1 Comparison of two types of image analysis methods

分析步骤	PIV	DIC	核心差异阐释
理论基础	基于流场测速。核心是追踪示踪粒子群的平移运动。	基于固体力学。核心是测量材料表面的全场变形(位移、应变)。	根本目标:PIV测速度场,关注“运动”;DIC测位移/应变场,关注“变形”。
形函数	通常假设询问窗口内为纯平移或仿射变形。	内置高阶形函数,可描述子区内的平移、旋转、正应变、剪应变等复杂变形模式。	DIC的形函数使其在处理固体非均匀变形时精度和鲁棒性远高于PIV。
窗口/子集策略	多网格迭代:从大尺寸询问窗口开始,逐步减小窗口尺寸并进行迭代计算,以兼顾大位移捕捉与局部精度。	固定或自适应子集:通常采用固定大小的子集,通过形函数迭代收敛。部分先进算法支持子集自适应分裂。	策略导向:PIV通过缩小窗口精化位移;DIC通过迭代形函数求解复杂变形。
相关性判据	常用归一化平方差和(NSSD)或归一化互相关(NCC),结合快速傅里叶变换(FFT)加速全局搜索。	普遍采用零均值归一化平方差和(ZNSSD),对光照波动不敏感,是当前主流和最优选择。	现代先进PIV也采用ZNSSD,二者在此区别逐渐缩小。关键在于与形函数的耦合求解方式。
计算路径	采用多遍网格变形或可靠性引导算法,优先从高信噪比区域开始计算,并将可靠结果作为邻域初值,避免逐行扫描。	普遍采用可靠性引导的种子点传播策略,路径由图像质量(相关系数)动态决定,并行计算(如GPU加速)为标配。	现代高性能PIV与DIC均已摒弃简单的逐行/列计算,转向由数据质量驱动的智能计算路径。
位移输出	增量位移场:通常计算相邻2帧图像间的瞬时速度/位移场。	全场/全量位移场:通常计算所有图像相对于初始参考图像的累积位移场。	输出模式不同:PIV为增量式,适合流场;DIC为全量式,适合固体累积变形分析。
应变输出	间接获取:需对位移场进行数值微分(后处理),精度较低,易受噪声影响。	直接输出:作为核心结果之一,在形函数迭代中直接求解得出,精度和可靠性高。	应变分析是DIC的优势,而PIV并非为此设计。

对旋转、压缩、剪切3种变形的颗粒运动变形及序列变形图像生成过程作简要说明。(1)旋转变形。由图3(a)可知,粒子位移与时间 $t$ 密切相关,还与距离中心点 $O$ 距离有关(距离中心越远,位移越大);每次绕图像中心 $O$ 点旋转 $0.5^\circ$ 连续生成20组旋转变形序列图像(图2(a)),其中 $\theta$ 表示对应图像的旋转度数。(2)压缩变形。由图3(c)可知,粒子的竖向位移不仅与时间 $t$ 有关,还与粒子距下边界距离有关(距下边越近,移动量越小);设置每张图片压缩量为1%,从0%开始连续生成20组压缩变形序列图,最大压缩量为 $k=20\%$ (图2(b)),其中 $k$ 表示对应图像的压缩百分比。(3)剪切变形。由图3(b)可知,土体发生剪切变形时,包含各颗粒变形单元发生的剪应变 $\gamma(t, y_n)$ 与粒子所在位置无关,且各点应变相同; $n$ 表示图像的序号,剪切序列图形计算分析时,可根据图2(c)剪切图像的序号 $n$ 进行校验对比;设置 $n$ 取0时图片对应的剪应变角度为0.009,每次增加0.001,当 $n$ 取至12后从0.02依次增加0.01的剪应变角度,当 $n$ 取20时对应的剪应变角度为0.1。

## 2.2 预设变形序列图像主要优势

本文基于相同条件将预设变形序列图像作为试验主体,对2种方法进行评价,主要优势如下。(1)标准化

比较. 预设变形序列图像提供了已知变形模式,对比较框架进行标准化处理,可有效消除2种图像分析方法受输入数据差异影响而造成的偏差,更准确地评估2种方法. (2)客观及全面性. 采用相同预设变形序列图像且预设变形包络多种变形,可客观比较2种方法在处理相似数据集时的性能差异,认识各种复杂条件下2种方法的性能表现. (3)可重复性及可读性. 预先定义预设变形序列图像,可实现不同时间点或试验条件下的重复评估,且通过对相同预设变形序列图像应用2种不同的分析方法以验证结果的一致性和稳定性,可了解2种方法的特点及不同变形情况下的适用性.

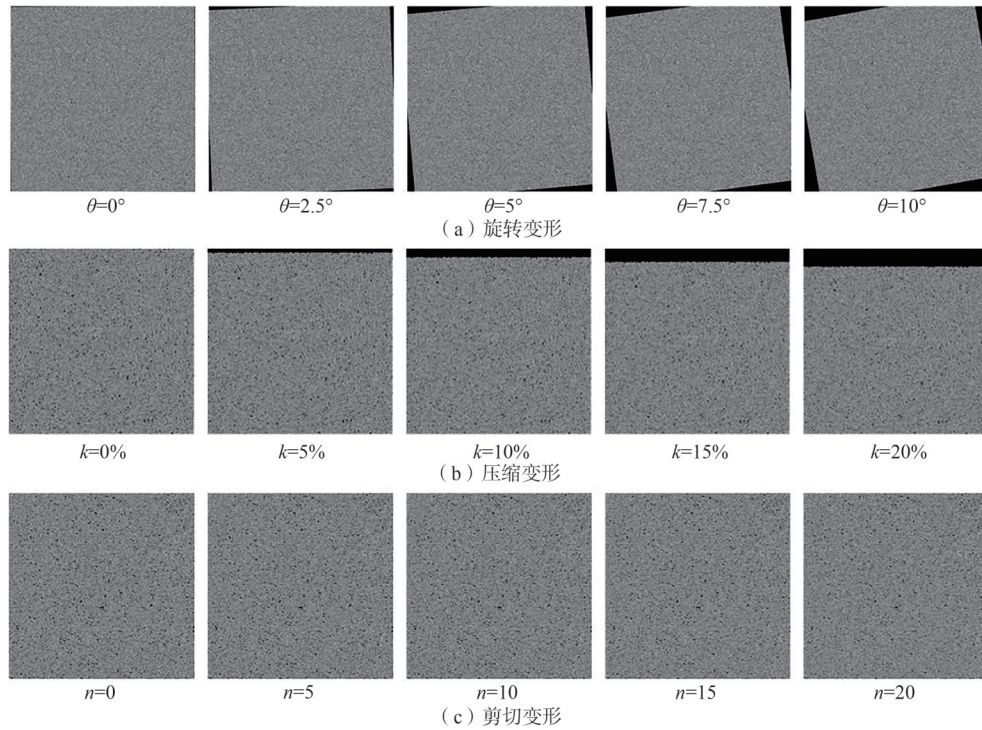


图 2 旋转、压缩、剪切3种序列变形图像

Figure 2 Rotation, compression, shear three types of sequence deformation images

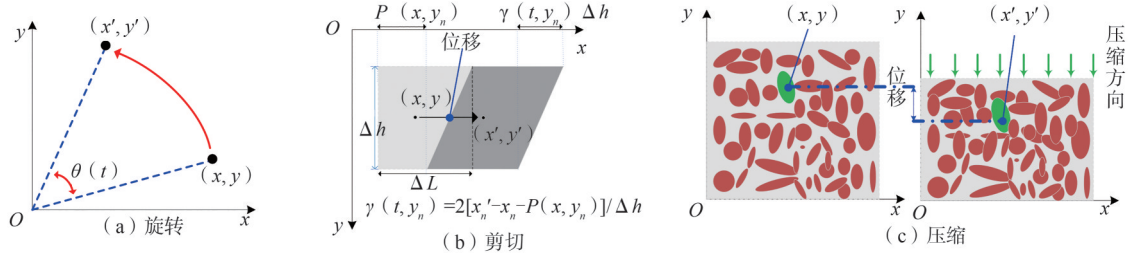


图 3 变形原理图

Figure 3 Deformation principle diagram

### 3 典型土体变形分析方法可靠性评价

#### 3.1 旋转变形

以图2(a)序列图像为分析对象,探究2种方法的误差演变规律,本文对整个旋转序列进行系统分析. 当旋转度达到6°时,PIV的误差开始显著增大;至6.5°时,2种方法的分析结果出现较大偏差. 故选取这2个角度的位移矢量场和误差进行分析,能有效揭示PIV的性能边界. 旋转误差的计算以图像中心为原点,通过对比各点理论位移矢量与2种方法的分析结果比较得出(计算解析图像见图3(a)). 由图4(a)可知,在6.5°旋转时,PIV的位移矢量场在图像左下角和右下角均出现明显偏差. 图4(b)的误差分析曲线进一步表明,DIC的误差曲线始终位于PIV下方,证明DIC能够识别更大程度的图像变形,且计算结果更加可靠.

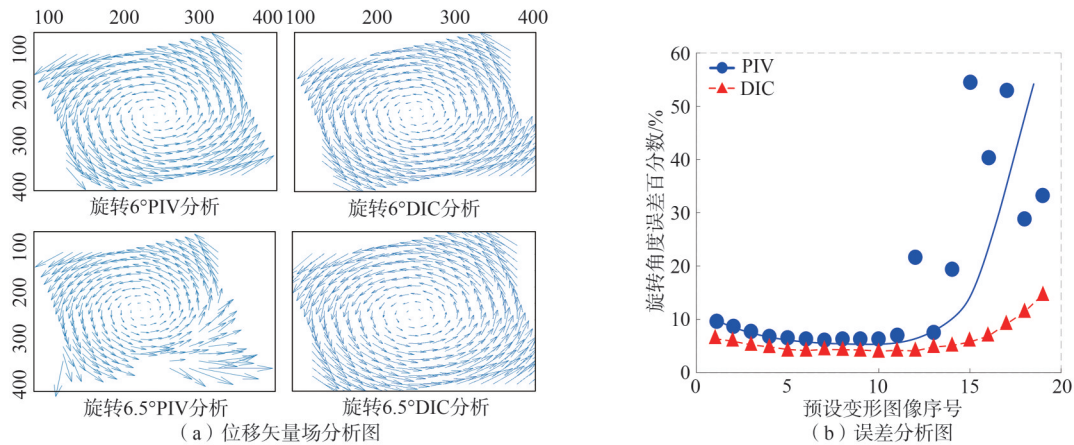


图 4 旋转变形图像分析获得位移矢量场和误差分析

Figure 4 Rotational deformation image analysis to obtain displacement vector field analysis map and error analysis map

产生上述现象的根本原因在于2种算法的形函数不同. 在旋转变形中, 图像子区内的粒子不仅发生平移, 更发生明显的相对运动. PIV采用的简单平移或仿射形函数难以准确描述这种复杂局部转动, 导致在变形较大的边角区域出现显著匹配误差. 而DIC内置的高阶形函数(通常包含旋转和剪切分量)能够更精确描述子区的实际变形状态, 故在整个过程中保持了更高的分析精度和可靠性.

### 3.2 压缩变形

对于竖向压缩变形, 图像中粒子仅存在竖向位移, 以图2(b)序列图像为分析对象. 为系统对比2种方法在不同压缩阶段呈现的位移场形态, 本文选取压缩量6%(代表小变形阶段)和16%(代表大变形阶段)的预设变形图像进行分析. 压缩误差通过对比图像中各点的理论竖向位移与2种方法的分析结果计算得出(计算解析图像见图3(c)). 由图5(a)可知, 尽管在此类简单位移场中2种方法的计算误差相差不大(图5(b)), 但其位移场的形态却存在显著差异: PIV计算得到的等势线过于平滑, DIC的结果则呈现与土颗粒错动机制相符的波状起伏. 表明DIC在还原土体真实变形模式方面具有明显优势.

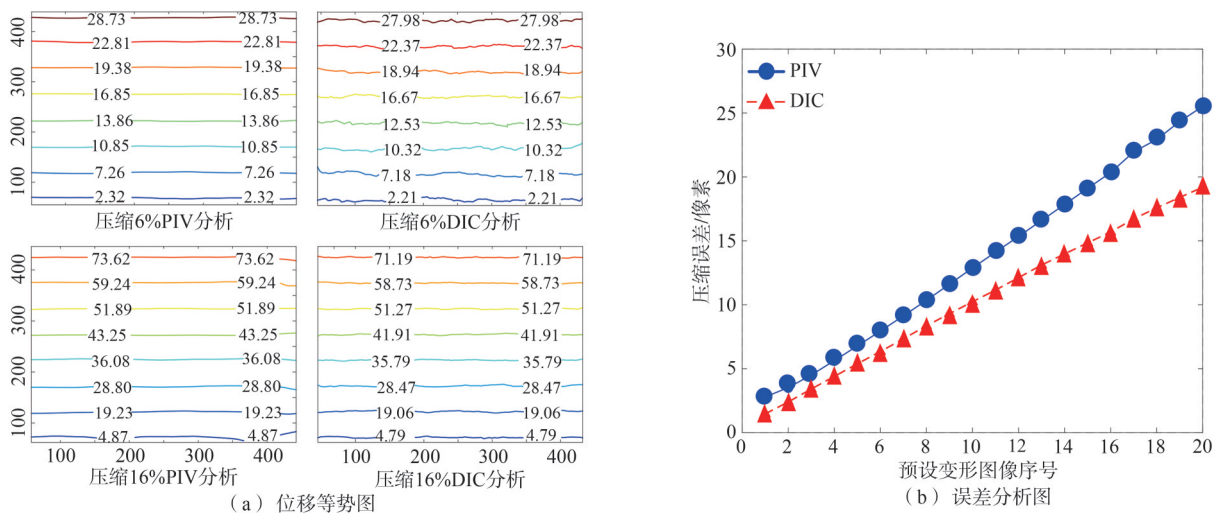


图 5 压缩变形图像分析获得位移矢量场和误差分析

Figure 5 Compression deformation image analysis to obtain displacement vector field analysis map and error analysis map

该现象揭示了2种方法在处理非均匀变形细节时的灵敏度差异. 尽管压缩变形在宏观上表现为简单的竖向位移, 但土体内部变形实为颗粒间相对滑移导致的非连续、非均匀过程. PIV因较大的固定询问窗口及相对简单的形函数, 计算时对窗口内的位移进行了平均化或平滑化处理, 从而模糊了局部细节. 而DIC对局部灰度

变化更为敏感,基于子区的迭代算法能够更好捕捉由颗粒运动引起的非均匀位移场,故其分析的波状等势线更符合土体实际变形机理.

### 3.3 剪切变形

以图2(c)剪切变形序列图像为分析对象,为揭示2种方法在计算均匀剪切场时的可靠性差异,本文对整个剪切序列进行分析(序号1~12应变角递增值为0.001,13~20应变角递增值为0.01).当剪切变形应变角由0.02( $n=12$ )增大至0.03( $n=13$ )时,PIV计算的剪应变云图在物理场本应均匀相同的区域(图6(a)顶部)出现了大面积的浅色高应变区,与理论不符,故选取这2组结果进行对比.剪切误差通过对比各点的理论剪应变值与2种方法的分析结果得出(计算解析图像见图3(b)).由图6(a)可知,PIV的剪应变云图顶端出现大范围浅色区域,表明其计算结果存在较严重偏差;DIC云图则在整个区域呈现较为均匀的应变分布.图6(b)误差分析曲线再次证实,DIC的误差曲线始终在PIV下方.

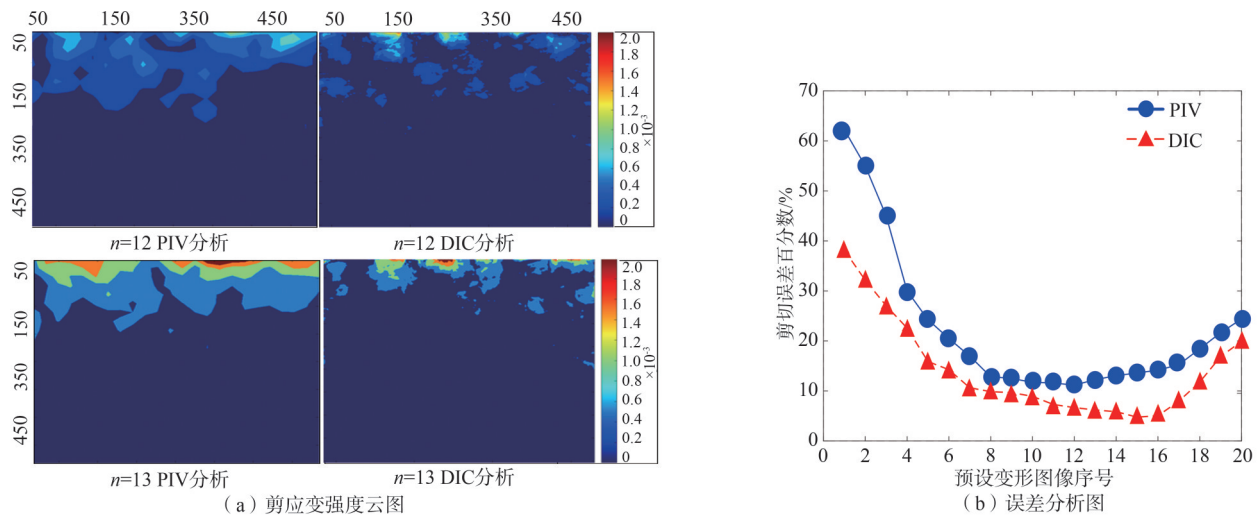


图6 剪切变形图像分析获得剪应变强度和误差分析

Figure 6 Shear deformation image analysis to obtain shear strain intensity and error analysis map

剪切变形分析凸显了2种方法在应变计算上的本质差异.在本应均匀的剪切场中,PIV需要通过数值微分后处理从离散的位移矢量场中间接求解应变,该过程放大位移匹配中的微小误差,并在位移不连续或信噪比较低的区域(图6(a)顶部边缘)产生严重的平滑效应,从而导致非物理的应变分布. DIC的核心优势在于,形函数本身内嵌了应变项,应变是在子区匹配过程中直接、同步求解出的基本变量,无需额外的数值微分.这种直接法使其对均匀变形的描述更为精确和鲁棒,计算结果更能真实反映物理场的实际情况.

## 4 动态变形时程代表方法可靠性评价

可靠性评价采用的动态变形序列图像,均依据本文第2节提出的预设变形图像生成方法(基于颗粒特征与预设变形函数)自行构建.所有图像的真实位移场与应变场均由其生成函数预先定义,为后续方法对比提供参考基准.本文设计3种具有代表性的动态变形模式:简单的一维平移、更复杂的平移剪切复合变形以及包含多种变形机制的动态大变形,以全面检验DIC与PIV在动态时程分析中的性能.

### 4.1 一维平移变形

一维平移变形仅需考虑图像中各粒子的横向位移.在此简单变形模式下,2种方法的分析结果与真实预设位移的总体吻合度均较高.然而,通过图7所示的时程曲线细节,仍可观察到两者在动态响应和累积误差方面的系统性差异.(1)动态峰值响应.在位移曲线的多个峰值处,PIV结果出现最大值(即削峰)的次数明显多于DIC,表明在动态变化的极值点,PIV对位移的瞬时捕捉能力略逊于DIC.(2)累积误差效应.在图像变形结束后(约50s后),PIV的位移时程曲线未能如DIC和真实位移曲线一样回归至零位移基准线.这一现象揭示了PIV采用增量计算(当前图像与上一张图像对比)的固有限制:分析连续变形图像时,每一帧的微小误差会逐步累积,导致最终的整体位移出现偏差.尽管在简单的一维平移中两者精度相当,但上述差

异表明,DIC以第一张图像为固定参考基准的全量计算方式,在长期动态测量中具有更优的稳定性和抗误差累积能力。

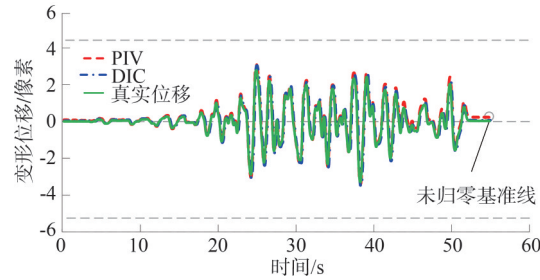


图7 一维平移变形时程曲线对比

Figure 7 Comparison of 1D translational deformation time course curves

#### 4.2 平移剪切复合变形

平移剪切复合变形中的粒子运动形式较为复杂。由图8可知,在此复合变形模式下,2种图像分析方法的计算结果均与真实预设位移存在较大误差,表现为两者计算曲线的峰值均小于真实位移曲线的峰值。尽管两者均低估了位移峰值,但DIC曲线的峰值整体高于PIV曲线的峰值,表明DIC在复杂变形场中对位移极值的估计更接近真实情况。与4.1节的现象一致,动态变形结束后,PIV的位移时程曲线未能回归至零位移基准线,而DIC的曲线则与真实曲线一同归零。上述现象与2种方法处理复杂变形的机制不同有关。在平移剪切复合变形中,粒子运动同时包含了平移和局部剪切,导致图像子区发生旋转和畸变。PIV采用相对简单的形函数(如纯平移或仿射变换)难以精确描述复合运动,从而在相关计算中引入更大的误差。DIC凭借高阶形函数能够更好逼近子区的实际变形,故对位移峰值的估计更为准确。同时DIC采用全量计算方式避免了误差累积,使其在变形结束后能准确回归基准线。综上,在复合变形条件下,DIC在峰值估计的准确性和长期稳定性方面均优于PIV。

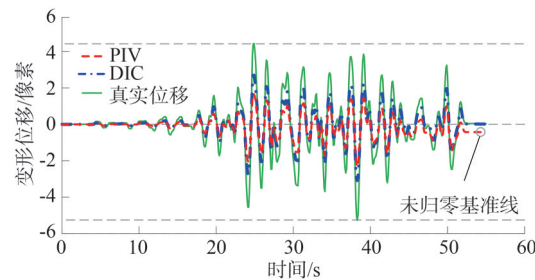


图8 平移剪切变形时程曲线对比

Figure 8 Comparison of translational shear deformation time course curves

#### 4.3 动态大变形

动态大变形场景对图像分析方法的鲁棒性提出极高要求。图9展示了从左到右变形梯度依次增大(最大变形量为1像素)的动态序列中2种方法计算得到的位移云图。PIV位移云图中出现较多超出理论最大变形量(1像素)的红色区域,且位移强度的空间分布与真实的线性渐变规律不符。表明PIV在处理大变形梯度时,出现显著误匹配。DIC位移云图呈现平滑且连续的位移梯度,与预设的真实变形模式高度一致,有效边界清晰,未出现PIV中的异常高值区域。

在此动态大变形场中,图像子区同时经历了位移、旋转和拉伸。PIV采用的简单形函数(如纯平移或仿射变换)难以精确描述复杂的非均匀变形,导致在相关计算中失配,产生物理上不合理的位移值。而DIC的高阶形函数能够更好逼近子区的实际复杂变形状态,从而保证匹配的准确性。DIC普遍采用的可靠性引导计算路径与灰度场连续性约束,能有效防止变形剧烈区域的错误计算向外传播,保证整个位移场的协调性。尽管PIV也采用了现代优化策略,但其在应对由形函数不匹配引起的根本性失准时,显得力不从心。故在动态大变形条件下,DIC凭借其更优的形函数和抗误差传播机制,在计算精度和结果合理性方面均显著优于PIV。



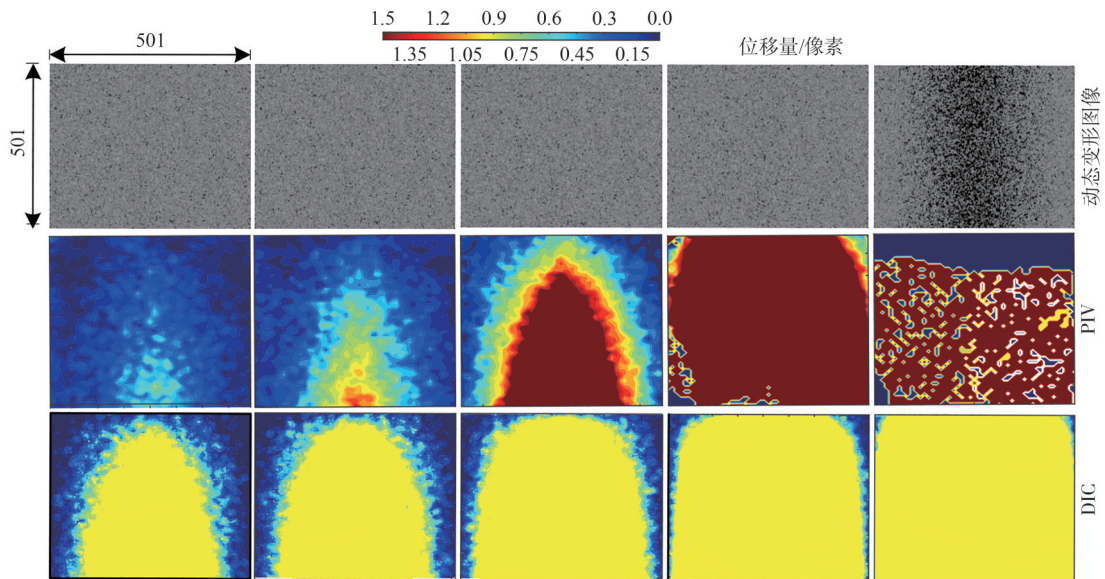


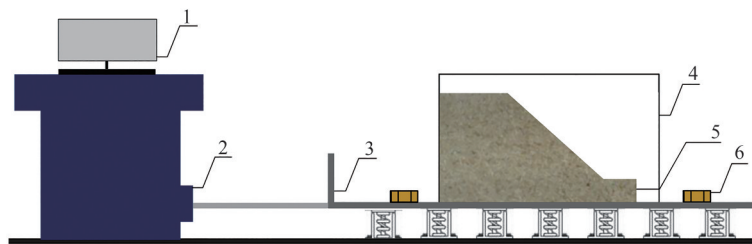
图 9 动态大变形位移量云图

Figure 9 Dynamic large deformation displacement nephogram cloud map

## 5 砂质边坡模型试验

### 5.1 试验模型

为获得高分辨率的变形图片,试验模型箱体采用全透明的亚克力板.箱体尺寸为 $600\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),通过螺栓固定在振动台上,确保不因振动发生晃动.振动台为工程力学研究所小型振动台设备,主要由控制系统、动力系统、振动台面组成,如图10所示.



1. 控制系统 2. 动力系统 3. 振动台面 4. 模型箱 5. 坡体 6. 螺栓

图 10 小型振动台示意图

Figure 10 Schematic diagram of a small vibration table

### 5.2 试验设计

砂质边坡模型采用颗粒粒径为 $1\text{ mm}$ 的福建标准砂,最大干密度为 $1.94\text{ g/cm}^3$ ,最小干密度为 $1.51\text{ g/cm}^3$ ,颗粒比重为 $2.60$ .设计坡角 $50^\circ$ 的粗砂干砂坡体,砂土边坡采用砂雨法制模.以 $0.3g$ 等幅正弦波为输入荷载,频率为 $2\text{ Hz}$ ,持时 $10\text{ s}$ ,对应地震烈度约为VIII度.使用大恒ME2P-U3相机进行试验过程中模型图像的采集,作为一款通用小型相机,其具有设备简易、大靶面、高分辨率的特点,最高分辨率达 $4\text{ 096}\text{ 像素}\times 3\text{ 000}\text{ 像素}$ .本试验观测范围内可分辨细砂颗粒特征,无需额外布置示踪颗粒,即可满足图像变形测量要求.摄像机布设位置如图11所示,摄像机设定 $10\text{ Hz}$ 频率采集连续变形图像.

### 5.3 试验图像处理

为将前述预设图像下的可靠性结论拓展至真实物理试验,本节基于砂质边坡振动台试验图像,定量对比DIC与PIV在真实复杂变形场中的性能.选取边坡从开始到失稳的关键帧序列,分别应用2种方法进行全场位移分析,如图12所示.(1)数据完整率.在整个分析区域内,DIC成功计算位移的点位比例为 $98.2\%$ ,而PIV为 $93.3\%$ .PIV因在局部大梯度变形区发生粒子失配,导致数据丢失率高达 $6.7\%$ ,是DIC( $1.8\%$ )的 $3.7$ 倍.验证了

DIC在高阶形函数和灰度连续性约束下,对复杂非连续变形的更强鲁棒性。(2)应变局部化捕捉精度.针对最终形成的破坏区域,统计该区域内计算出的最大剪应变值. DIC得到的峰值应变为0.152,而PIV的结果为0.138.结合高速摄像观察到的剧烈颗粒重排现象,DIC的结果更符合该区域发生高度应变集中的物理预期. PIV的结果偏低,可能与位移场平滑及数值微分过程对峰值应变的削峰效应有关。(3)计算稳定性. DIC曲线在整个振动过程中平滑连续,且在输入荷载停止后位移趋于稳定. PIV曲线在破坏阶段(第25~35帧)出现数次异常跳跃(单帧位移突变超过相邻帧平均值的200%),表明其在变形剧变时发生了瞬时误匹配.这与4.3节动态大变形测试中PIV云图出现异常高值区的结论相互印证.

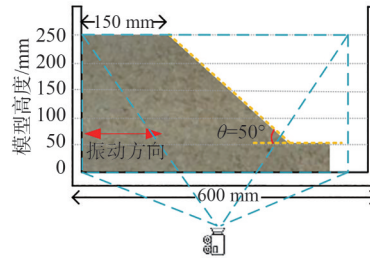


图11 摄像机位置布设

Figure 11 Camera position layout diagram

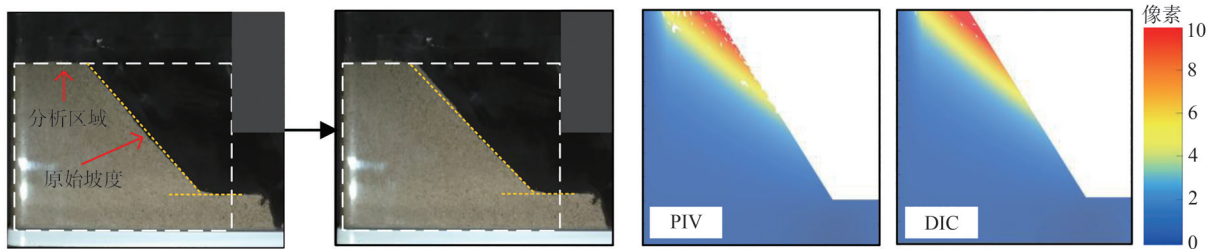


图12 边坡试验和边坡破坏强度云图

Figure 12 Slope test and slope failure strength cloud map

#### 5.4 试验结果分析与讨论

综合预设图像测试(第3、4节)与砂质边坡模型试验(第5节)的结果,对DIC与PIV在岩土变形分析中的可靠性差异进行深入讨论。(1)可靠性结论的普适性验证.边坡试验的定量结果(如数据完整率差异、应变峰值差异)与预设图像测试中观察到的趋势高度一致.表明基于预设序列图像这一标准化基准所得出的性能对比结论,能够有效预测和解释2种方法在真实复杂岩土试验中的表现.预设图像方法作为一种高效的前期标定与筛选工具,其价值得到实证。(2)误差根源的物理机制阐释.在边坡破坏的剪切带内,PIV表现出的数据丢失和应变低估,可追溯到其方法内核. PIV的固定窗口与简单形函数在剧烈、非均匀颗粒流滑区域难以实现有效匹配,导致失配(数据丢失).同时通过数值微分从离散位移场求解应变的过程,不仅引入平滑误差,更在位移场本身不可靠的区域放大误差,导致无法准确捕捉应变局部化。(3)工程方法选择的指导意义.本文系统对比为工程应用提供了清晰的选择依据:在位移/应变场精度、复杂非均匀变形分析、长期稳定性要求较高的岩土模型试验(如边坡破坏、地基失稳全过程监测)中,应优先选用DIC;而对于变形相对均匀、以获取平均速度场为主要目的的流动类问题,PIV仍是高效可靠的选项。(4)预设图像方法的局限与展望.本文采用的预设图像虽能精准控制变形模式,但其颗粒纹理与相互作用相比真实土体仍显简化.后续研究可致力于开发融合更复杂颗粒形状、粒间接触力学的生成算法,使预设图像在微观力学响应上更逼近真实土体,从而进一步提升可靠性评价的细致度与权威性.

## 6 结论

(1)在分析精度与变形识别范围上,DIC展现出全面优势.在旋转变形(大于 $6^\circ$ )与剪切变形中,PIV的误差范围(8%~60%、11%~63%)显著大于DIC(4%~15%、4%~40%).根本原因在于,DIC采用的高阶形函数能够

精确描述子区的复杂变形(如旋转与剪切),而PIV基于均匀平移或简单仿射的形函数假设在非均匀变形场中迅速失效,限制了其可识别的变形范围。

(2)在动态变形分析中,DIC具有更优的长期稳定性。对于连续序列图像,DIC以全量计算方式(始终以第1帧为参考)有效避免了误差累积,其位移时程曲线在动态过程结束后能准确回归基准线;而PIV的增量计算方式(当前帧与前帧对比)导致误差随分析帧数增加而累积,致使最终结果产生漂移。表明在长期、连续的变形监测中,DIC是更可靠的选择。

(3)在应变场反演能力上,DIC的直接法相比PIV的间接法具备原理性优势。DIC的形函数内嵌应变项,应变在计算过程中直接求解,结果能真实反映应变局部化现象(如剪切带)。PIV则需对位移场进行数值微分后处理,此过程放大噪声并产生平滑效应,导致其对均匀应变场的计算出现错误,对局部高应变区的捕捉能力不足。

(4)综合性能与适用性评价表明,DIC更适用于岩土体复杂变形分析。砂质边坡模型试验证实,在动态大变形场景下,DIC凭借亚像素匹配与灰度场连续性约束,数据丢失率相比PIV降低4.9%,再现了预设图像测试中的稳健性。本文验证了以预设序列变形图像作为标准化评价基准的有效性,为岩土工程领域依据具体变形模式选择最适宜的图像分析方法提供了参考。

## 参考文献:

- [1] 孔宪京,刘福海,刘君. 地震作用下面板堆石坝面板错台模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(2): 258-267.  
Kong X J, Liu F H, Liu J. Shaking table model tests on face-slab dislocation of concrete faced rock-fill dams under earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 258-267. (in Chinese)
- [2] 喻文昭,朱鸿鹄,王德洋,等. 荷载作用下砂土边坡-管道相互作用试验研究[J]. 岩土力学,2024,45(5): 1309-1320.  
Yu W Z, Zhu H H, Wang D Y, et al. Experimental study of sandy slope-pipe interaction under loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(5): 1309-1320. (in Chinese)
- [3] 史旦达,毛逸瑶,杨勇,等. 基于DIC技术的砂土中圆形锚板上拔土体变形特性试验研究[J]. 岩土力学,2020,41(10): 3201-3213.  
Shi D D, Mao Y Y, Yang Y, et al. Experimental study on the deformation characteristics of soils around uplift circular plate anchors using digital image correlation technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3201-3213. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 刘兵,崔骊水,李小亭,等. 粒子图像测速技术测量精度影响因素分析[J]. 计量学报,2021,42(3): 346-351.  
Liu B, Cui L S, Li X T, et al. Analysis of influencing factors on measurement accuracy of particle image velocimetry technology[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(3): 346-351. (in Chinese)
- [7] 吴旗,朱效宇,许传龙. 基于物理方程的高分辨率光场层析粒子图像测速技术[J]. 光学学报,2025,45(1): 0112007.  
Wu Q, Zhu X Y, Xu C L. High-resolution light field chromatography particle image velocimetry based on physical equation[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(1): 0112007. (in Chinese)
- [8] Pan B. Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29: 082001.
- [9] Das S. Application of digital image correlation technique in geotechnical engineering[M]//Sreekeshava K S, Kolathayar S, Me-non N V C. Civil engineering for multi-hazard risk reduction. Singapore: Springer, 2024: 143-151.
- [10] Chen Z B, 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.
- [11] Hu J, Miao H, Xu J, et al. Advanced algorithms of mitigating undermatched systematic error in DIC[EB/OL]. (2025-11-04) [2025-12-25]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11340-025-01238-2#citeas>.
- [12] 潘皇宗,李天斌,仵拨云,等. 降雨条件下折线型滑面的大型滑坡稳定性离心模型试验[J]. 岩土工程学报,2016,38(4): 696-704.

- Pan H S, Li T B, Wu B Y, et al. Centrifugal model tests on large-scale landslide with broken-line slip surface under rainfall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 696-704. (in Chinese)
- [13] 方焘, 梁连, 颜建伟. 不同埋深下盾构隧道施工引起的地层变形试验[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(3): 85-92.  
Fang T, Liang L, Yan J W. Experimental study on stratum deformation caused by shield tunnelling at different buried depths[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(3): 85-92. (in Chinese)
- [14] 杨晓峰, 李伟, 姚兆明. 基于PIV技术的冲刷条件下桩-土水平变形机制[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(2): 102-108.  
Yang X F, Li W, Yao Z M. PIV-based research on horizontal deformation mechanism of pile-soil under scour condition[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(2): 102-108. (in Chinese)
- [15] Thielicke W, Stamhuis E J. PIVlab: Towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB[J]. Journal of Open Research Software, 2014, 2: e30.
- [16] Blaber J, Adair B, Antoniou A. Ncorr: Open-source 2D digital image correlation Matlab software[J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(6): 1105-1122.
- [17] 王永志, 段雪锋, 陈苏, 等. 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[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(5): 1047-1056.  
Wang Y Z, Duan X F, Chen S, et al. An approach for synthetic images of sand deformation based on grain features and prescribed traces and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(5): 1047-1056. (in Chinese)

责任编辑: 岳荣强