

岩土工程数字照相量测软件系统研发与应用

李元海¹, 靖洪文¹, 曾庆有²

(1. 中国矿业大学 建筑工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 福建省交通规划设计院, 福建 福州 350004)

摘要: 为便于数字照相变形量测(DPDM)技术在岩土工程中的应用与推广, 研究开发一套完整的数字图像分析与结果可视化后处理软件包。首先, 根据观测目标上是否使用人工量测标志点, 将 DPDM 分为两大类: 标点法和无标点法, 针对岩土类材料局部化变形特性, 提出旋转加平动的图像相关分析三步搜索算法; 然后说明基于等参四边形单元的坐标转换与变形解释方法, 并介绍 DPDM 软件包的主要功能, 讨论图像采集、量测精度、适用范围等应用关键问题。软件系统可为砂土、黏土、钢筋混凝土、岩石等岩土工程常用材料的数字照相变形全程观测、演化过程以及局部化分析提供有力支持。最后, 给出一个应用实例——侧向受荷桩模型试验。

关键词: 岩土工程; 数字照相; 变形量测; 模型试验; 数字散斑; 图像分析; 软件

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 3859 - 08

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF DIGITAL PHOTOGRAMMETRY SOFTWARE PACKAGE FOR GEOTECHNICAL ENGINEERING

LI Yuanhai¹, JING Hongwen¹, ZENG Qingyou²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

2. Fujian Communication Planning and Design Institute, Fuzhou, Fujian 350004, China)

Abstract: The digital photogrammetry for deformation measurement(DPDM) in geotechnical engineering is presented together with a software package developed by the authors. First, DPDM is classified as two types according to target markers or not on the observed object. Three-step image correlation analysis algorithms were proposed specially for the geotechnical material with characteristics of apparent local deformation. Second, the algorithm for image calibration and strain calculation, based on the isoparametric quadrangle method widely used in FEM, is illustrated. Meanwhile, main functions of DPDM software package are introduced, and some key points such as image collection with high resolution, measurement accuracy, and scope of application are discussed. The DPDM technique has been proven to be a powerful tool for observing the progressive and local deformation of granular soil, rock, and concrete in geotechnical engineering. Last, a case study for laterally loaded piles is presented.

Key words: geotechnical engineering; digital photogrammetry; deformation measurement; model experiment; digital speckle; image analysis; software package

1 引言

数字照相变形量测(DPDM)以数字相机作为图

像数据采集设备, 利用图像处理技术, 实现观测目标的变形计算与分析, 它在岩土变形演变过程的全程观测与微观、细观力学特性等研究上具有突出的优越性。近年来, 在岩土工程, 尤其是试验研

收稿日期: 2006 - 02 - 26; **修回日期:** 2006 - 03 - 15

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490273); 教育部科学技术研究重点项目(106085); 中国矿业大学科技基金资助项目(2005B003)

作者简介: 李元海(1969 -), 男, 博士后, 1992 年毕业于中国矿业大学采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事数字照相量测技术和 GIS 在岩土工程中的应用以及深部地下工程围岩稳定性控制方面的研究工作。E-mail: lyhcumt@126.com

究领域,应用广泛。

图像采集和图像分析是 DPDM 的两个关键技术。早期多采用胶卷相机对观测目标进行图像采集^[1],但随着数字相机的出现与快速发展,它以其操作简单、使用经济和易于推广等特点,而将需要胶片冲洗与扫描数字化的胶卷相机迅速淘汰。与 X 光^[2]和激光层析照相^[3]、干涉成像与全息摄影^[4]等技术相比,其简单实用的优越性更加明显,而在观测目标上布置位移计或黏贴应变片等传统方法,因仪器安装空间或测点数量受限,从而具有一定的局限性。但随着计算机速度和数字相机性价比的不断提高,DPDM 已逐渐成为现代试验力学中的一项重要测试手段,尤其适合岩土材料的变形演化过程与局部化观测。

根据观测目标上是否使用人工量测标志点,DPDM 可概括为两大类:标点法和无标点法。其中,无标点法的突出优点在于能够通过追踪点的位移变化,来观测目标的细观变形、局部化变形、剪切带以及追踪变形破坏的产生、发展与演化全过程,实现对观测目标变形的定性分析与定量分析。

国内许多学者利用 DPDM 技术在岩土变形观测与力学特性分析方面做了大量的研究工作,如在岩石变形^[5]、冻土位移^[6]、砂土变形^[7]、土的三轴压缩^[8]试验观测等;同样,国外学者在离心机^[1]、平面剪切^[9]、单轴与三轴试验^[10]、基础变形^[11]等方面也作了很多应用研究,所研究的工程对象涉及隧道、边坡、地基和堤坝等。DPDM 在工程现场相对于室内试验,在测点和基准点设置、环境光线、图像采集和图像校准等方面存在诸多问题,应用研究成果相对较少,但仍然可以看到为数不多的相关探索,如秋本圭一等^[12]通过在隧道内表面布设标志点,对隧道的轮廓形状进行了照相量测;曾卓乔等^[13]则采用普通胶卷相机对隧道变形进行了观测;盛业华等^[14]采用光学相机,对矿山地表塌陷进行了监测研究。

DPDM 在岩土工程试验领域中有着广泛的应用,虽然在工程监测领域目前应用研究较少,但却有着很大的发展潜力。在 DPDM 技术中,硬件可通过市场购买,而相关商业软件极为少见,目前,相信有不少研究人员(如魏明果和胡宁杰^[15])开发了图像分析程序,以供个人或课题组使用。但一套包含结果后处理在内的完整的软件系统还未见有任何报道。而笔者在应用过程中发现:图像分析结果的后处理工作量比图像分析本身要大得多,特别是图像较多时,因此,在大量结果数据的显示、提取、评

价、统计、分析、批量输出中,一个功能强大的可视化后处理系统可以显著提高工作效率。为便于推广 DPDM 技术,笔者在应用研究^[7, 16~18]的基础上,精心开发了一套功能齐全、使用简便、能独立运行的实用软件系统。

本文将对数字照相量测的两种典型方法、基本原理、变形解释、图像采集、量测精度、适用范围等关键技术与核心问题,进行分析和讨论,对软件系统的组成、功能和特点进行说明。最后给出一个应用实例——侧向受荷桩土体变形观测试验。

2 两种数字照相变形量测法

2.1 标点法

即在观测目标的表面布置或嵌入人工量测标志点^[1, 16]或描画网格^[4],人工标志点或网格节点即为物理量测点。标点法变形量测的关键是利用图像处理中的阈值技术和质心计算公式来识别计算标点坐标^[16],通过比较不同试验阶段标点质心的变化,求出标点位移。另外,为量测模型内部变形而在其中放入铅粒^[19],使用 X 光照相采集图像进行变形分析,也可看成是标点法的一种。

理想条件下,图像上的测点与背景保持一致的对比度,人工标点可以通过编程进行全自动识别,应用一般不受测点处变形大小限制,不足之处在于嵌入式标点可能对模型产生影响,另外,因测点数量有限,不适合岩土细观变形量测。

2.2 无标点法

近年来,在观测目标上不使用任何人工标志点的无标点法得以开发和应用。它利用岩土材料本身固有的自然纹理特征^[5]或在模型表面喷洒一层彩色粉状物^[10]和绒状物^[20]进行人工制斑,然后,利用图像相关分析,进行变形量测与解释。相关文献中的数字散斑相关 DSCM^[5, 6]与 PIV 方法^[20]的图像分析的基本原理是相同的。可以说,基于图像相关分析的无标点法,现已逐渐成为适合常规及复杂条件下的非接触变形测量与分析的有力手段。

标点法和无标点法,各有一定的适用条件和范围,可根据实际需要进行选择或联合使用。两种方法优缺点如表 1 所示。

2.3 岩土变形特点及其处理方法

岩土模型试验中,岩土变形局部化特征通常比较显著,变形模式比较复杂,因此,基于图像纹理平动的相关分析具有一定的局限性,量测岩土局部

表1 两种数字照相量测方法比较

Table 1 Comparison for two types of DPDM methods

方法	优点	缺点	适用范围
无标志点法	(1) 无需人工物理量测标志点, 操作简单 (2) 测点数量与范围可灵活设置 (3) 适用变形演变过程与局部化量测	(1) 量测精度对观测区变形突变性和环境光线变化敏感 (2) 图像分析时间较长	(1) 模型试验 (2) 小范围观测
标志点法	(1) 不受观测区域变形限制 (2) 适用于大范围变形观测 (3) 图像分析速度快	(1) 物理测点布置操作有时复杂, 对模型可能有影响 (2) 测点数量受限	(1) 模型试验 (2) 现场观测

化变形, 精度未必能令人满意。笔者基于试验观察, 将复杂的岩土变形简化为平动和转动两种形式^[17]。在图像相关分析上, 提出了同时采用平动和旋转的三步搜索法^[7]。精度检验结果表明: 三步搜索法与普通方法相比, 变形量测精度显著提高。

2.4 图像校准与坐标变换

DPDM 涉及两种坐标系: 图像空间坐标系和模型空间坐标系。图像空间坐标单位一般以像素表示, 而模型空间则一般用 mm 或 μm 来表示, 测点从图像空间到模型空间的坐标转换(或称图像校准)是 DPDM 技术中的一项重要内容, 它同时包含对图像平移、旋转和几何畸变等图像变形的校正。

图像变形可划分为两种: 一种是形状不变而仅发生平移和旋转, 另一种是形状发生歪斜即几何畸变。岩土模型试验中, 通常使用控制基准点来校准图像, 因此, 控制点的数量和分布及其坐标的精确测量直接影响变形量测结果。对岩土试验模型采集数字图像时, 只要量测精度满足要求, 一般尽可能采用简单的校准方法。对于几何畸变的校正, 要求在观测面全域尽可能均匀布置控制基准点, 但对岩土试验模型来说, 控制点布置在模型中间, 会影响图像分析区域的“测点”设置, 一般将控制点布置

在观测面周围, 如图像几何畸变较为严重, 精度不能满足要求, 则需考虑复杂的校准方法。

图像校准是校准图像变形和保证精度的必要过程。校准方法一般有线性和非线性两种, 其中线性方法比较简单, 控制基准点少, 在近距离、小范围以及相机镜头中心轴线与观测面保持垂直的条件下, 可以得到理想的精度。本研究中借用 FEM 常用的四边形等参单元变换方法来实现图像校准或坐标转换。利用布置在观测区域周围的 4 个控制点, 可以将图像上任一点坐标转换为对应模型空间中的真实坐标, 原理与 FEM 中全局坐标到局部自然坐标变换方法一样, 不同之处在于要进行图像空间到自然坐标空间, 再从自然坐标空间到模型空间两次坐标转换。这一转换可同时校准因相机与模型的相对平面移动和旋转等原因产生的图像变形。

3 变形解释方法

变形的解释主要是应变的计算方法, 测点的位置可以通过不同图像上对应点坐标的变化直接求得。本系统借用 FEM 中常用的四边形等参单元的概念方法, 来实现测点应变的计算。

类似 FEM 四边形单元网格划分, 用户可利用图像分析程序对图像分析区域进行网格划分, 网格中心点可作为包含应变数据的变形量测点。以 4 个测点为顶点的矩形网格可看作四边形单元, 那么, 若 4 个顶点的坐标和位移已知, 中心点的位移与应变可利用四边形等参单元方法(见图 1)进行计算。

已知四边形单元 $ABCD$ 中 4 个节点的坐标为 $A(x_1, y_1), B(x_2, y_2), C(x_3, y_3), D(x_4, y_4)$; x, y 两个方向上的位移分量分别为 $(u_1, v_1), (u_2, v_2), (u_3, v_3), (u_4, v_4)$ 。四边形 $ABCD$ 中任一点的坐标 (x, y) (对应的模型空间点的坐标为 (X, Y))和位移 (u, v) 与正方形 $abcd$ 中对应点 (s, t) 的关系可用

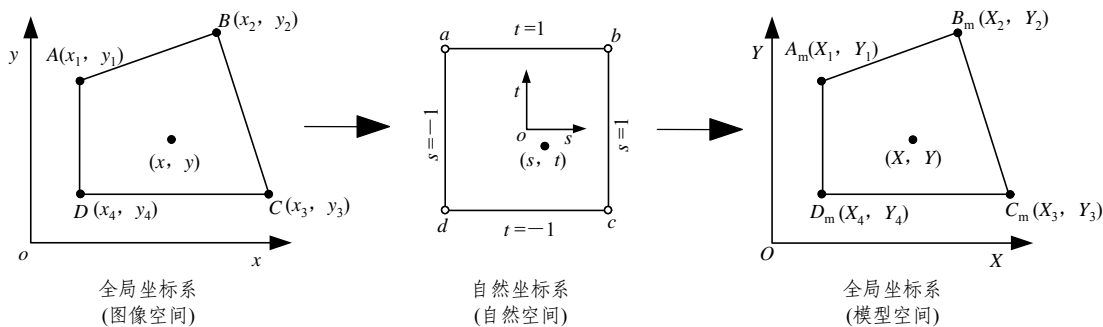


图1 四边形等参单元坐标变换原理图

Fig.1 Isoperimetric conversion of coordinates for quadrangle elements

如下插值公式来表示:

$$\left. \begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^4 x_i N_i \\ y &= \sum_{i=1}^4 y_i N_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} X &= \sum_{i=1}^4 X_i N_i \\ Y &= \sum_{i=1}^4 Y_i N_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_{i=1}^4 u_i N_i \\ v &= \sum_{i=1}^4 v_i N_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $N_i = 0.25(1 + s_i s)(1 + t_i t)$, (s_i, t_i) 为正方形 $abcd$ 中 4 个顶点的局部坐标值(见图 1), (s, t) 为点 (x, y) 对应的自然坐标值。

式(1)~(3)中的关键是计算 (s, t) , 该值可通过推导公式或数值逼近方法求得。需要强调的是图像分析最终输出结果要经两次坐标转换, 即图像空间 $(x, y) \rightarrow$ 自然坐标空间 $(s, t) \rightarrow$ 模型空间坐标 (X, Y) 。由图 1 可见及下式所示:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial X} = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial X} u_i \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial Y} = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial Y} v_i \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial Y} + \frac{\partial v}{\partial X} = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial Y} u_i + \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial X} v_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

又有

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{2} \left[\varepsilon_x + \varepsilon_y + \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \right] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{2} \left[\varepsilon_x + \varepsilon_y - \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \right] \\ \alpha &= \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{-\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \right) \\ \gamma_{\max} &= \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \\ \varepsilon_v &= \varepsilon_x + \varepsilon_y \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由式(4)可求出四边形 $ABCD$ 中任意一点 (x, y) 的应变 $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy})$, 然后, 根据式(5)可计算出该点处的主应变 $(\varepsilon_1, \varepsilon_3)$ 、主应变方向角 α 、

最大剪应变 γ_{\max} 以及体积应变 ε_v 。

4 数字照相量测软件系统

DPDM 系统主要由图像采集硬件系统与图像分析和结果后处理软件系统组成。图像采集硬件系统比较简单, 主要包括数字相机、相机固定框架、彩色监视器和照明设备等, 其中, 监视器主要用于数字相机图像放大以便于清晰度的观察和调节, 软件支持是 DPDM 技术应用与推广的关键。

DPDM 软件包包括 2 个图像分析程序: PhotoTarget, PhotoInfor 和 1 个后处理程序 PostViewer。在 DPDM 技术应用过程中, 用户只需要采集数字照片和手工准备一个简单的控制点文件, 其余全部分析处理工作, 可由软件系统完成。

4.1 标点法图像分析程序

图像分析程序 PhotoTarget(见图 2)专门用于标点法数字照片的处理分析。主要功能包括图像二值化、标点识别参数的直接拾取、质心坐标的识别、对应标点的排序、重复点的剔除、图像校准、位移计算、应变计算用四边形网格生成、应变计算等。考虑到个别标点表面可能在目标变化过程受到污染, 而使全自动识别产生局部较大误差, 因此, 程序设计在标点识别上采用全自动、半自动和手动识别等多种灵活方式。

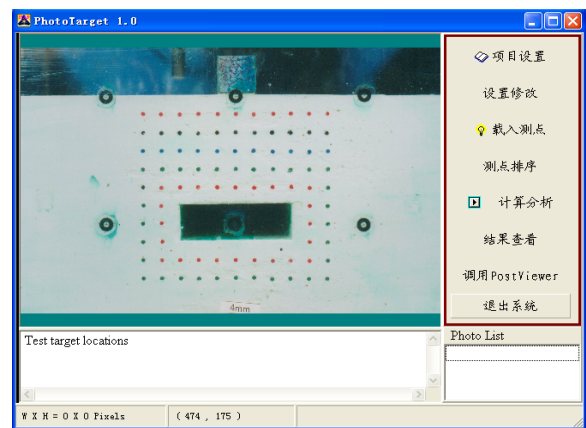


图 2 标点法图像分析程序 PhotoTarget

Fig.2 GUI of image analysis program PhotoTarget

4.2 无标点法图像分析程序

图像分析程序 PhotoInfor(见图 3)主要用于无标点法图像处理, 同时, 也可以处理标点法图像; 主要功能包括图像序列除初始图像以外的控制基准点自动匹配和对应文件生成、测点与分析参数设置、

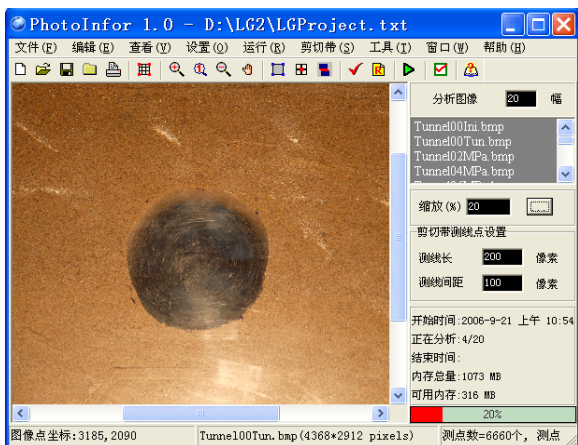


图3 无标点法图像分析程序 PhotoInfor

Fig.3 GUI of image analysis program PhotoInfor

测点网检查、结果查看、变形数据输出和图像转动误差校准；此外还包括一些实用功能，如多个图像分析项目的自动批处理、剪切带的识别、边界轮廓变形分析(如模型中的隧道)、离散测点创建和分析、无效分析区域标记等。

4.3 可视化后处理程序

PostViewer 作为图像分析结果数据的后处理程序(见图4),可生成和显示等值线、云图、变形网格、矢量图等,同时,其还具有查询、统计分析、数据提取、批量处理和输出等处理功能,如清晰的矢量图形输出,给定测点编号,可在同系列多个数据文件中,自动提取变形数据,便于进一步分析;对同一系列多个数据文件,指定图形输出范围,自动输出的 wmf, bmp, JPG 格式的图形大小、范围、比例相同,便于 Word 中多个图形的编排和 PowerPoint 动态演示文稿的制作等等。另外,程序还可以处理基于四边形或三角形单元的一般有限元计算结果数据。

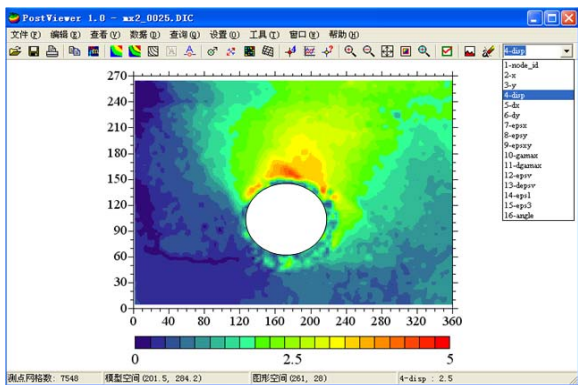


图4 照相量测可视化后处理程序 PostViewer

Fig.4 GUI of data post process program PostViewer

4.4 量测分析操作流程

在模型试验或现场观测过程中,根据时间或位移荷载等物理量的增量,确定图像采集频率。整个操作流程为:图像采集工作条件准备→图像采集→图像下载与格式转换→控制基准点的数据文件创建→图像分析程序参数设置→图像计算分析与结果输出→数据检查与校准→结果后处理与统计分析。

5 讨论

5.1 图像采集要点

数字图像质量直接关系变形量测精度,图像采集要点如下:

- (1) 光源选择和环境光线的变化是首要考虑因素,特别是历时较长的试验观测,力求光照均匀并在拍摄期间保持一致,避免对观测目标光照的干扰。
- (2) 相机位置尽量保持固定不动,以减少同一系列图像变形的差异。

(3) 建议选择可手动微调的单反数码相机,采集过程中配以监视器进行清晰度调节。

(4) 图像采用未经压缩的 raw 和 tiff 等格式,一般不用 JPG 等压缩格式。

(5) 变形观测区域四周控制基准点正确设置,基准点的坐标应设法精确测量。

上述几点注意不够或理解不深,是 DPDM 应用过程中影响图像清晰度和导致变形量测精度不理想的常见原因。

5.2 变形量测精度

变形量测精度是 DPDM 技术应用中一个经常被问及的焦点问题。人们很想知道其绝对精度到底能够达到多少 mm 或 μm 。笔者认为,DPDM 的精度容易被误解为简单的绝对精度,可这样理解,如在无标点法图像分析中,根据一个像素细分程度,可认为其理想的亚像元精度达到某个值,如 0.1 或 0.01 个像素,然后乘以图像比例(mm/像素)可以得到以 mm 为单位表示的量测精度,显然它与图像分辨率有关。某个具体试验条件下,实际精度需要通过精度校准试验来确定,相同的观测范围,采用不同分辨率的相机,或者采用相同的相机,而观测范围不同,所获得的精度是有所区别的。因此,DPDM 精度以像素为单位表示具有一定的代表性,而以 mm 或 μm 表示的精度仅具有相对意义,因为它依赖

于图像比例或者说相机分辨率、目标大小和试验条件。

5.3 适用范围问题

DPDM 技术目前在模型试验应用较多且效果较好, 适用的工程对象也比较广泛, 如隧(巷)道、基础、边坡、大坝、路面、桥梁、钢筋混凝土结构、钢结构等; 而现场的变形监测应用相对较少, 因为环境比较复杂, 特别是环境干扰和光线变化, 存在困难较多, 需要对测点与基准点布置、高清图像采集、图像校准方法等关键问题进行研究和提出解决方案, 但相对实验室应用, DPDM 在工程现场应用中具有更大的开发潜力和技术经济效益。

另外, DPDM 适用的材料也比较广泛, 岩土工程相关材料包括砂土、黏土、岩石、混凝土等; 但不同的材料应用中有不同的要求, 如砂性土中变形的连续性和可控性较好, 而岩石和混凝土材料脆性特征较为明显, 脆性破坏具有突发性, 在应力峰值点需要对变形进行快速的捕捉, 而由于相机图像存储需要一定时间, 分辨率越高, 存储时间越长, 因此, 就要在试验过程与图像采集方面, 注意在大变形发生前后, 如何采集到更多的图像; 此外, 在同一试验中, 也可以将两种照相量测方法结合使用, 以获得更多的试验数据供分析和研究。

笔者开发的应用系统在岩石和混凝土模型试验中也进行了一些适用性研究, 研究成果将另文介绍。上述相关问题的说明也正是基于研究开发与应用过程中的一些心得体会。该系统已在砂土和黏土地基重力场与离心场试验中得到成功应用^[7, 16~18], 下面再给出一个砂性土桩基试验的应用实例。

6 应用实例: 侧向受荷桩模型试验

对侧向受荷载桩的研究, 以往都把焦点集中在桩上, 模型试验以观测桩身变形和受力为主, 而侧向荷载下桩的变位与承载特性与桩周土体的性质密切相关, 研究侧向受荷桩土相互作用问题不能忽略土的变形特性, 特别是对于刚性短桩, 其在侧向荷载下的性状主要取决于桩土接触面及桩周土体的变形破坏特性。试验中, 桩周土体的变形观测采用数字照相变形量测技术, 图像分析和结果处理采用 PhotoInfor 和 PostViewer 软件包完成^[21]。

6.1 试验概况

试验材料采用福建平潭标准砂, 粒径组成特性参数为: $d_{50} = 0.34 \text{ mm}$, $C_u = 1.542$, $C_c = 1.104$, 孔隙比 e 为 0.705, 相对密度为 0.435, 密度为 1550 kg/m^3 ; 模型桩采用 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的硬木质方桩, 桩长 270 mm 。砂土试样采用空中落下法(落距 50 cm)分层装入, 铺设至一定厚度时, 安置模型桩, 并使桩体和正面的玻璃紧密接触, 用凡士林等润滑剂涂于桩体与玻璃间以防砂土渗入并减小摩擦。模型制作完成后, 静置 6 h , 以使土体应力分布均匀。

模型槽及主动桩加载装置如图 5 所示, 模型槽的正面设置 4 个十字型控制基准点, 按初步计算的极限承载力预估极限荷载, 然后按极限荷载的 $1/(10 \sim 15)$ 作为分级荷载。

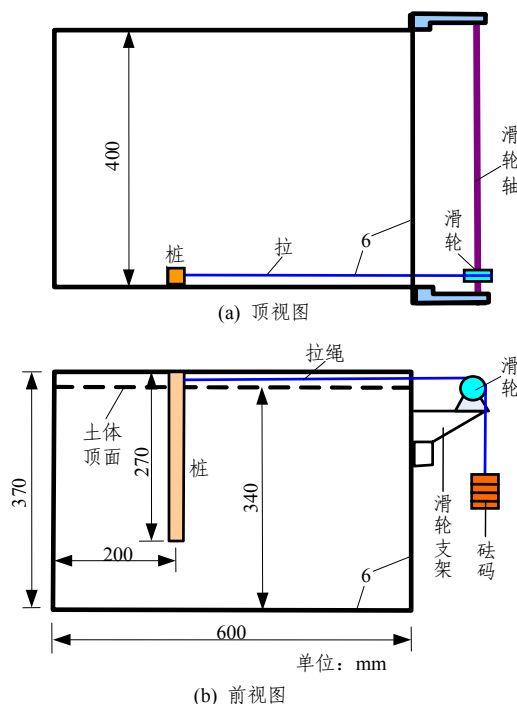


图 5 试验装置与加载方法

Fig.5 Schematic diagram of test instrument

6.2 试验结果

图 6 为荷载分别为 0 和 8 kg 时的两幅试验照片, 测点数为 3600 个。桩周土体的位移场、位移矢量分布和最大剪应变场如图 7~9 所示。

图像分析结果中, 可以获得很多有价值的信息进行进一步分析, 如从图 7 中, 可以得到桩周土体的变形区域、变形模式和大小分布; 从图 8 中, 可以清晰地看到桩周土体的运动轨迹和方向; 从图 9 中可以获得土体破坏区域(应变超过一定值)。总而言之, 数字图像分析结果一方面为研究土体力学特性提供直接数据, 同时也可对相关本构模型的建立

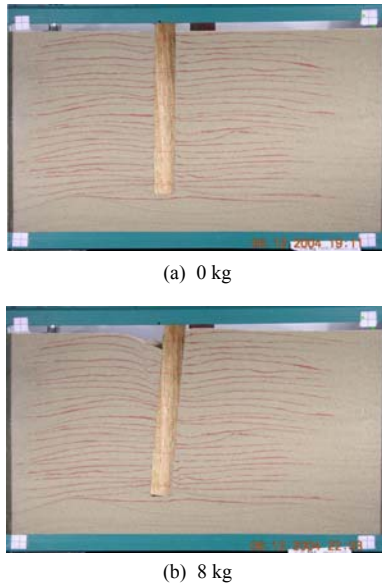


图6 侧向受荷桩试验照片
Fig.6 Test photos of laterally loaded pile

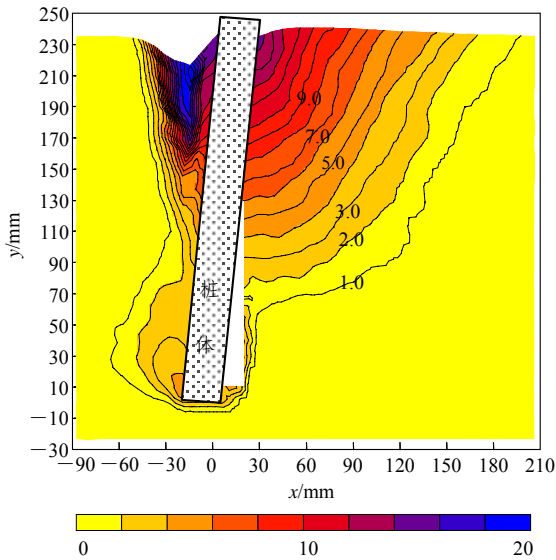


图7 桩周土体位移场
Fig.7 Displacement field of soil around pile

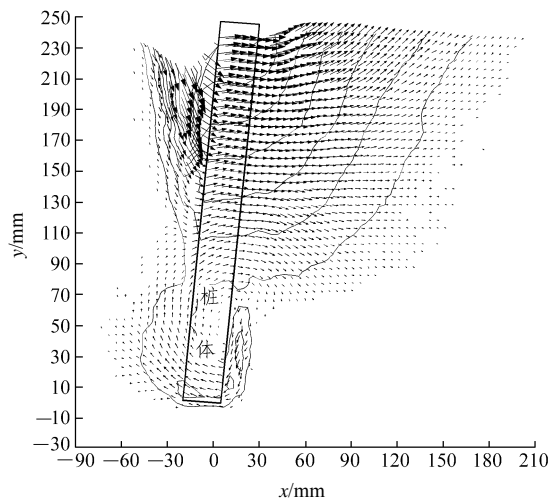


图8 桩周土体位移矢量分布
Fig.8 Displacement vectors of soil around pile

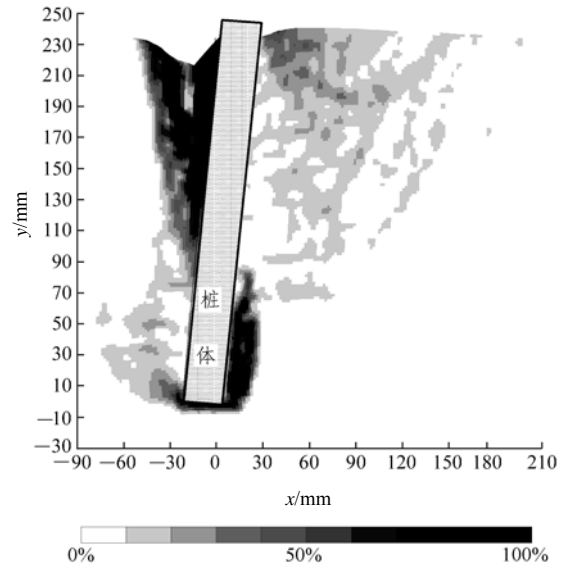


图9 桩周土体最大剪应变场
Fig.9 Maximum shear strain of soil around pile

和验证提供试验依据。

7 结 语

岩土工程数字照相变形量测技术在数据采集与变形分析方面, 与传统方法有着本质的区别, 在宏观、细观和微观结构变形量测以及变形演化全程观测中具有突出的优越性, 并且, 符合非接触变形量测的发展趋势, 同时, DPDM 操作简便、使用经济和易于推广, 是岩土与结构工程模型试验中一项先进的测试技术, 在工程现场应用中也有很大的开发潜力。笔者自行研发的软件系统目前在隧(巷)道相似模拟、砂(黏)土地基和桩基试验、钢筋混凝土结构模型试验、砂土大型剪切试验、岩石单轴压缩、混凝土抗压与劈裂等岩土工程试验中得到成功应用。进行数字照相量测技术的研究及实用软件开发, 具有重要的现实意义和良好的推广应用前景。

参考文献(References):

[1] Mochizuki A, Mikasa M. Deformation measurement of slop models in centrifuge[A]. In: Proceedings of Int. Symposium on Geotechnical Centrifuge Model Testing[C]. Tokyo: [s. n.], 1984. 139 - 148.
 [2] Jun O, Toshifumi M, Yuzo O. Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils[J]. Soils and Foundations, 2000, 40(2): 111 - 118.
 [3] Pierre J, Mauro F. Interferometric imaging using holographic and

- speckle techniques. image technologies: the techniques and applications in civil engineering[A]. In: Proceedings of the Second International Conference[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997. 235 - 254.
- [4] Takashi M, Takayuki I, Kazuo K. Observation of grain motion in the interior of a PSC test specimen by laser-aided tomography[J]. Soils and Foundations, 2002, 42(5): 27 - 36.
- [5] 马少鹏, 金观昌, 潘一山. 岩石材料基于天然散斑场的变形观测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 792 - 796.(Ma Shaopeng, Jin Guanchang, Pan Yishan. Deformation measurement method for rock materials based on natural speckle pattern[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 792 - 796.(in Chinese))
- [6] 武建军, 何丽红, 王廷栋, 等. 冻土位移的散斑照相测量[J]. 冰川冻土, 1997, 19(3): 258 - 262.(Wu Jianjun, He Lihong, Wang Tingdong, et al. Measuring frozen soil displacement with speckle photography[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(3): 258 - 262.(in Chinese))
- [7] 李元海, 朱合华, 上野胜利, 等. 基于图像相关分析砂土试验模型变形场量测[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 36 - 41.(Li Yuanhai, Zhu Hehua, Ueno K, et al. Deformation field measurement for granular soil model using image analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 36 - 41.(in Chinese))
- [8] 王靖涛, 曹红林, 丁美英, 等. 基于数字相机的土三轴试样变形的数字图像测量[J]. 华中科技大学学报, 2004, 6: 1 - 3, 15.(Wang Jingtao, Cao Honglin, Ding Meiyang, et al. Digital image measurement of specimen deformation in triaxial test based on digital camera[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2004, 6: 1 - 3, 15.(in Chinese))
- [9] Alshibli K, Batiste S N, Sture S. Strain localization in sand: plane strain versus triaxial compression[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(6): 483 - 494.
- [10] 上野胜利, 高岛伸哉, 望月秋利, 等. 画像解析による簡便な砂の変位場計測方法[A]. 见: 日本土木学会論文集(No. 666/III - 533)[C]. 東京: 日本土木学会, 2000. 339 - 344.(Ueno K, Takashima S, Mochizuki A, et al. Simple measurement of displacement field of sand by image processing[A]. In: Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers(No.666/III - 533)[C]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2000. 339 - 344.(in Japanese))
- [11] Radoslaw L, Michalowski, Lei Shi. Deformation patterns of reinforced foundation sand at failure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering(ASCE), 2003, 129(6): 439 - 449.
- [12] 秋本圭一, 服部進, 大西有三, 等. 画像計測のトンネル内形状計測への応用[A]. 见: 土木学会論文集(No. 687/III - 56)[C]. 東京: 日本土木学会, 2001. 289 - 301.(Akimoto K, Hattori S, Ohnishi Y, et al. Application of vision metrology to tunnel profile measurement[A]. In: Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers(No.687/III - 56)[C]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2001. 289 - 301.(in Japanese))
- [13] 曾卓乔, 马莉, 王国辉. 观测隧道变形的数字化近景摄影测量系统[J]. 铁路航测, 1995, (3): 33 - 34. (Zeng Zuoqiao, Ma Li, Wang Guohui. Monitoring system for tunnel deformation with digital terrestrial photogrammetry[J]. Railway Air Survey, 1995, (3): 33 - 34. (in Chinese))
- [14] 盛业华, 闰志刚, 宋金铃. 矿山地表塌陷区的数字近景摄影测量监测技术[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 411 - 415.(Sheng Yehua, Yan Zhigang, Song Jinling. Monitoring technique for mining subsidence with digital terrestrial photogrammetry[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2003, 32(4): 411 - 415.(in Chinese))
- [15] 魏明果, 胡宁杰. 基于非量测用数字相机的解析数字摄影测量软件开发[J]. 三峡大学学报, 2004, 26(1): 19 - 26.(Wei Mingguo, Hu Ningjie. Software development for all digital photogrammetry based on Matlab non-measurable digital camera[J]. J. of China Three Gorges Univ., 2004, 26(1): 19 - 26.(in Chinese))
- [16] 李元海, 朱合华, 上野胜利, 等. 基于图像分析的试验模型变形场量测标点法[J]. 同济大学学报, 2003, 31(10): 141 - 145.(Li Yuanhai, Zhu Hehua, Ueno K, et al. Application of image-based measuring deformation method using target markers in physical model test[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(10): 141 - 145.(in Chinese))
- [17] 李元海, 靖洪文, 朱合华, 等. 数字照相量测在地基离心试验中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 306 - 311.(Li Yuanhai, Jing Hongwen, Zhu Hehua, et al. Experimental investigation on the progressive deformation patterns of sand foundation in centrifuge test using digital photogrammetry[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 306 - 311.(in Chinese))
- [18] Li Y H, Zhu H H, Jing H W. Experimental observation of shear deformation patterns in sands using digital photogrammetry[J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 2006, 149: 120 - 127.
- [19] Yamakuchi H, Kimura T, Fuji N. On the influence of progressive failure on the bearing capacity of shallow foundations in dense sand[J]. Soils and Foundations, 1976, 16(4): 11 - 22.
- [20] White D J, Take W A, Bolton M D, et al. A deformation measurement system for geotechnical testing based on digital imaging, close - range photogrammetry, and PIV image analysis[A]. In: the 15th International Conference on Soil Mechanics Engineering[C]. Istanbul, Turkey: [s. n.], 2001. 539 - 542.
- [21] 曾庆有. 侧向受荷桩模型试验与颗粒流分析[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2005.(Zeng Qingyou. Model tests and PFC simulation for laterally loaded piles[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2005.(in Chinese))