

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.05.014

岩土模型试验中土体变形的数字图像测量

陈亚东^{1,2}, 王旭东², 余跃心¹

(1. 淮阴工学院 建筑工程学院, 江苏 淮安 223001; 2. 南京工业大学 交通学院, 南京 210009)

摘要:变形量测分析在岩土模型试验研究中占据十分重要的地位。利用四边形等参单元概念, 给出基于位移模式的土体剪应变计算方法, 采用互相关的图像匹配技术, 编制相应的数字图像相关变形分析程序, 实例验证结果表明该程序具有可靠的精度。利用该技术对方形基础室内模型试验中的土体变形进行测量, 结果表明基于数字图像的测量系统能够实现岩土模型试验中土体位移场及剪应变场发展直至破坏的全过程定量测量, 为土体细观力学特性与全场变形特性定性定量研究提供了有力的工具。

关键词:土力学; 模型试验; 数字图像; 位移; 应变

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)05-0092-05

Image-Based Soil Deformation Measurement in Geotechnical Model Test

CHEN Yadong^{1,2}, WANG Xudong², SHE Yuexin¹

(1. Faculty of Architecture and Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223001, P. R. China;

2. College of Transportation Science & Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, P. R. China)

Abstract: Deformation measurement and analysis play an important role in geotechnical model tests. Using the concept of quadrilateral isoperimetric element, the strain field was achieved from the calculation method based on displacement modes, and the verification results show that this measurement technique has a reliable precision. The soil deformation in model test of square shallow foundation was measured by using this technique, and the results show that the measurement system based on digital image correlation method can realize the whole process quantitative measurement of soil displacement field and shear strain field. This deformation measurement technique provides a tool for the qualitative and quantitative analysis of soil micromechanics characteristics.

Key words: soil mechanics; model test; digital image; displacement; strain

在岩土模型试验中, 变形量测对于理论建模和应用研究都十分重要。传统的变形测量主要采用标点法和网格法^[1-2], 这些方法适应大变形量测, 测点数量有限, 变形的量测是局部的、粗糙的, 不能满足土体渐进性变形全过程和细观力学变形特性定性定量研究的要求。

近年来, 高分辨率数码照相机和图像处理技术的广泛应用以及计算机运行速度的高速发展, 为基于数字图像的土体位移场量测系统的开发与应用开

辟了新的途径。Yamamoto 等^[3]利用铝棒来模拟土体, 进行了一系列加筋地基的模型试验, 应用数字照相变形量测技术研究了加筋地基的变形破坏机理; 宰金珉等^[4]在群桩模型试验中利用数码成像技术结合 AutoCAD 软件对土体位移场进行测试, 获得了不同桩距群桩承台下土体的位移场; 李元海等^[5]通过在模型观测面上设置嵌入式彩色标点, 然后应用数字图像处理技术, 实现了板下土体变形测量; 为了提高测量精度, White 等^[6-7]将流体力学中常用的颗

收稿日期: 2012-03-30

基金项目: 江苏省六大人才高峰基金(09-F1-004); 淮安市科技支撑计划(工业项目)(HAG2012049)

作者简介: 陈亚东(1981-), 男, 博士, 主要从事图像技术在岩土工程中的应用研究, (E-mail)chenyundong2004@163.com。

粒图像测速技术应用到土体变形测量中,根据土颗粒组成的特征实现了土体破坏前的小变形测量。

笔者以互相关的图像匹配技术为基础,建立了一套基于数字图像的位移场非接触测量系统,并利用四边形等参单元的概念和基于位移模式的应变计算方法,进一步获得土体剪应变场分布。在此基础上将该测量系统应用于方形浅基础室内模型试验中,测量了试验过程中土体位移场及剪应变场的渐进性发展变化过程。

1 数字图像相关技术的基本原理^[8]

所谓数字图像相关变形测量技术,就是将土体变形前后拍摄的散斑(灰度)图像分割成许多网格,每一网格称之为子区域(Interrogation)。将变形前任一子区域与变形后散斑图像进行全场匹配或相关运算,根据峰值相关系数确定该子区域在变形后的位置,由此可以得到该子区域的位移^[9],对变形前所有子区域进行类似运算,就可以得到整个位移场,数字图像相关技术基本原理如图1所示。

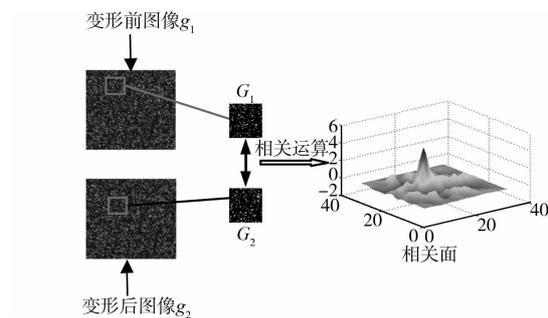


图1 数字图像相关技术原理图^[6]

匹配块之间的归一化相关函数 C , 可由式(1)、(2)给出。

$$C(\Delta u, \Delta v) = \iint g_1(i, j) g_2(i + \Delta u, j + \Delta v) \quad (1)$$

$$C(\Delta u, \Delta v) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} g_1(i, j) g_2(i + \Delta u, j + \Delta v) \quad (2)$$

式(2)为式(1)的离散形式。式中, g_1 和 g_2 分别是2帧图像的灰度集度; M 和 N 是 Interrogation 块的像素尺寸; $(\Delta u, \Delta v)$ 是2个匹配块之间的相对位置。

利用相关函数来进行相关搜索时窗口的平移只能以整像素为单位来进行, 这样通过此法获得的位移是像素的整数倍, 因此上述方法称为整像素相关运算。若想获得亚像素的位移精度, 在整像素相关运算的基础上, 需进行进一步的计算, 即通过曲面拟合、

二维拉格朗日插值等方法来获得亚像素位移^[10]。

2 土体变形的数字图像测量实现

2.1 位移计算

实验照片序列中2幅图像 g_i 、 g_j 上, 图像 g_i 中某一测点的对应点 $P_i(u_i, v_i)$, 通过图像匹配计算, 在图像 g_j 中找到与点 $P_i(u_i, v_i)$ 相关系数最大值点 $P_j(u_j, v_j)$, 那么 x 、 y 方向上的位移 Δu 、 Δv 和总位移 Δs 计算公式如下式(3):

$$\begin{cases} \Delta u = u_j - u_i \\ \Delta v = v_j - v_i \\ \Delta s = \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 应变计算

将数字图像相关方法测得的相邻4个像素块的位移作为四边形单元的4个节点, 然后采用有限单元法中常用的四边形等参单元的概念和基于位移模式的应变计算公式^[11], 可计算出单元中心点的应变值, 从而得到应变场的分布。

在四边形单元上, 取4个角点作为节点, 用 i 、 j 、 m 、 p 表示, 如图2所示。

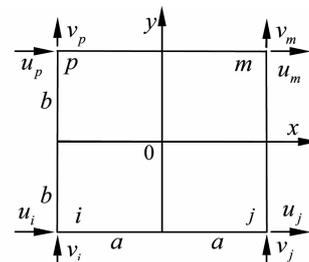


图2 四边形单元

以平行于两相邻边的2个中心轴为 x 轴及 y 轴, 该矩形沿着 x 及 y 方向的边长分别用 $2a$ 及 $2b$ 表示。位移模式取为:

$$\begin{cases} u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy \\ v = \alpha_5 + \alpha_6 x + \alpha_7 y + \alpha_8 xy \end{cases} \quad (4)$$

在 i 、 j 、 m 、 p 4个节点, 有

$$\begin{cases} u_i = \alpha_1 - a\alpha_2 - b\alpha_3 + ab\alpha_4 \\ u_j = \alpha_1 + a\alpha_2 - b\alpha_3 - ab\alpha_4 \\ u_m = \alpha_1 + a\alpha_2 + b\alpha_3 + ab\alpha_4 \\ u_p = \alpha_1 - a\alpha_2 + b\alpha_3 - ab\alpha_4 \\ v_i = \alpha_5 - a\alpha_6 - b\alpha_7 + ab\alpha_8 \\ v_j = \alpha_5 + a\alpha_6 - b\alpha_7 - ab\alpha_8 \\ v_m = \alpha_5 + a\alpha_6 + b\alpha_7 + ab\alpha_8 \\ v_p = \alpha_5 - a\alpha_6 + b\alpha_7 - ab\alpha_8 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)解出 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 , 由式(6)解出 α_5 、 α_6 、 α_7 、 α_8 , 一并代入式(4)得:

$$\left. \begin{aligned} u &= N_i u_i + N_j u_j + N_m u_m + N_p u_p \\ v &= N_i v_i + N_j v_j + N_m v_m + N_p v_p \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} N_i &= \frac{1}{4} \left(1 - \frac{x}{a}\right) \left(1 - \frac{y}{b}\right) \\ N_j &= \frac{1}{4} \left(1 + \frac{x}{a}\right) \left(1 - \frac{y}{b}\right) \\ N_m &= \frac{1}{4} \left(1 + \frac{x}{a}\right) \left(1 + \frac{y}{b}\right) \\ N_p &= \frac{1}{4} \left(1 - \frac{x}{a}\right) \left(1 + \frac{y}{b}\right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

采用 Green 应变方程^[12]来计算应变(以受压为正):

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (10)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (11)$$

式中: u, v 为 x 及 y 方向的位移分量; ϵ_x, ϵ_y 为 x 及 y 方向的应变分量; γ_{xy} 为剪应变。

在小应变条件下, 可以不考虑应变表达式中的二次项, 则与节点位移相关的单元中心应变表达式为:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \sum \frac{\partial N_k}{\partial X} u_k, k = i, j, m, p \quad (12)$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \sum \frac{\partial N_k}{\partial Y} v_k, k = i, j, m, p \quad (13)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \sum \frac{\partial N_k}{\partial Y} u_k + \sum \frac{\partial N_k}{\partial X} v_k, k = i, j, m, p \quad (14)$$

最大剪应变 γ_{\max} 为式(15)。

$$\gamma_{\max} = \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (15)$$

2.3 土体变形数字图像量测程序

数字图像相关法的变形测量程序基于 MATLAB 的图像处理工具箱来实现^[13]。变形测量程序主要分为 3 大模块: 图像预处理、主程序以及数据的后处理和图形显示。其中主程序中相关系数算法采用基于傅立叶变换的算法, 计算速度大大加快。采用高斯插值计算方法实现亚像素位移计算。

为验证程序的可靠性和精度, 将模型试验现场拍摄的砂土照片作为初始图像, 借助 Photoshop 将初始图像分别在 x, y 方向上偏移 3 个像素 (0.852 0 mm) 得到另一幅图像, 利用上述变形测量程序来计算初始图像及偏移后图像之间的位移场。225 个位移矢量统计分析表明 x, y 方向上的平均位移分别为 0.851 0、0.850 6 mm, 计算结果与真值匹配较好。图 3 为 y 方向上位移矢量的直方图。从直方图可以看出, y

方向上的位移在 0.824 0~0.880 0 mm 之间变动, 其中 88% 以上的矢量在 0.838 0~0.866 0 mm 之间变动, 分析结果表明基于数字图像的变形测量程序具有可靠的精度^[14]。

基于数字图像的变形测量方法与传统方法(如标点法)相比具有不干扰测量对象、试验工作量小、可以实现多点同时测量、无需预先确定测点位置以及测量结果稳定性好等优点。

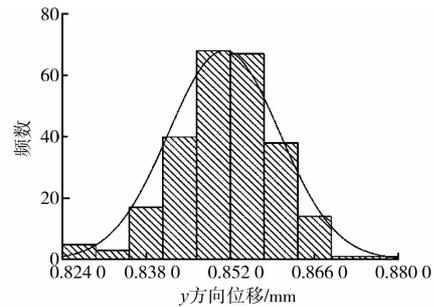


图 3 y 向位移直方图

3 应用实例

基于图像的土体变形测量系统可以用于各种岩土模型试验, 笔者以竖向荷载作用下方形浅基础模型试验作为应用实例简单说明该系统的应用效果。

3.1 试验概述

参考相关文献^[15-16], 试验模型槽结构尺寸(内径)为长 1.0 m, 宽 1.0 m, 深 1.0 m; 模型槽长度方向的一面用钢化玻璃(厚度 2.0 cm)代替, 以方便摄取试验现场图像, 其它 3 面及底板用钢板焊接而成, 如图 4 所示。

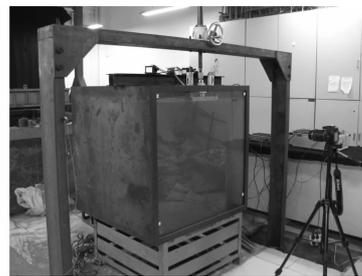


图 4 模型箱及反力架照片

方形基础材料为钢板, 半模尺寸长宽厚为 90 mm × 45 mm × 40 mm, 如图 5 所示。

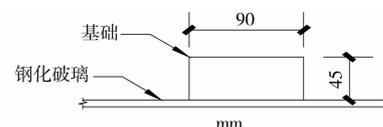


图 5 方形基础平面布置图

方形基础模型利用反力架系统和一小型丝杆升降机加载,按初步计算的极限承载力确定加载分级。基础所受竖向荷载通过 CLBSZ 型柱拉压传感器测量;基础沉降采用位移计测量,2 只位移计对角布置,取其平均值为基础沉降值。

模型土料为细砂,密度为 1.65 g/cm^3 ,内摩擦角为 32.5° ,平均含水率为 5.03% ,相对密度为 0.81 。试验时分层摊铺,控制每层重量,多遍夯击,直至砂土面达到设计高度^[17]。

土体变形测量系统包括:高像素单反数码相机、计算机及照明设备等。采用数码相机拍摄每级荷载下土体变形后图像,并进行数字化处理,利用自行编制的基于数字图像相关法变形场测量程序分析土体位移场及剪应变场。

3.2 测量结果

3.2.1 位移场 图 6 为方形基础下土体在不同荷载阶段的位移场分布图,图中 S 为基础沉降, Q 不同沉降条件下基础竖向荷载, Q_U 为基础极限荷载。由图 6 可知,基础边缘处的土体首先出现侧向变形,发生剪切破坏,而直接在基底中心下的部分土体始终保持垂直向下的压缩变形,确实存在一类似倒三角形的“弹性核”;在极限荷载条件下,剪切破坏区(或称塑性变形区)进一步扩大,最终在地基中形成一连续的滑动面,基础急剧下沉,同时基础周围的土体隆起,地基发生整体剪切破坏。

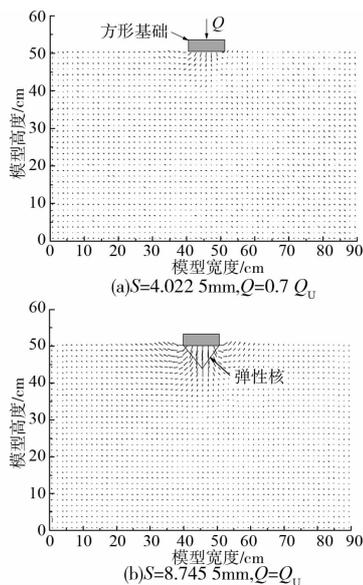


图 6 方形基础下土体位移场

图 7 为方形基础在极限荷载阶段 ($Q = Q_U$) 的水平位移及竖向位移等值线图,水平位移以向右为正,竖向位移以向下正。综合水平及竖向位移等值线分布情况来看,水平位移影响范围约为 2 倍基础

宽度,位于基础正下方的土体竖向位移等值线相互平行,说明该部分土体处于弹性压缩状态。

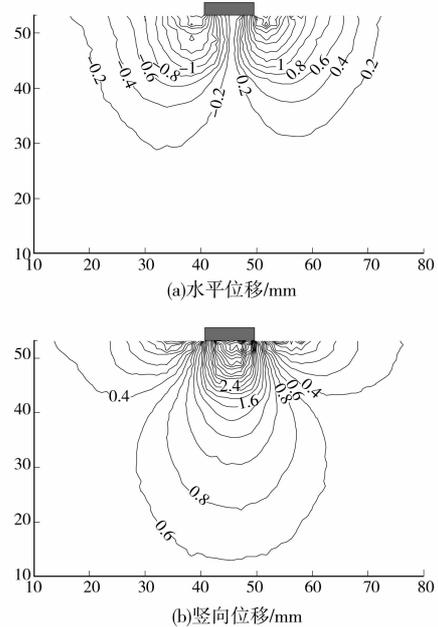


图 7 方形基础下土体位移等值线

3.2.2 最大剪应变场 图 8 为方形基础在不同荷载阶段土体最大剪应变场,最大剪应变间隔为 0.5% 。由图可知,在加载初期,首先在基础边缘处出现剪应变泡;随着荷载的增加,剪应变泡逐步扩大,并向基础中心及土体深度方向方向发展,极限荷载阶段最大剪应变主要集中于基础正下方土体中,且最大剪应变在地表处趋于收敛。

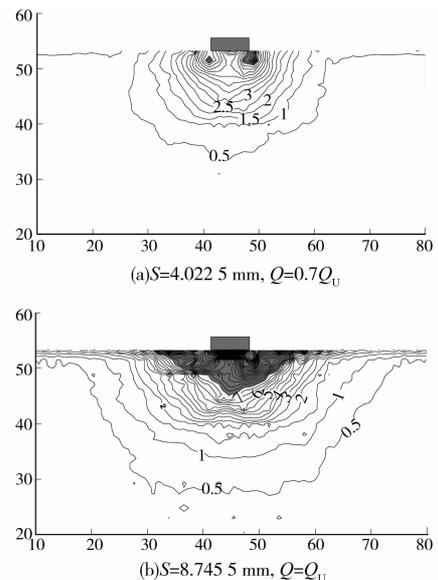


图 8 方形基础下土体最大剪应变场 (%)

以上方形基础模型试验结果表明,基于数字图像的变形测量系统可以获得模型土体在不同荷载条件下的位移场及剪应变场变化情况,试验结果规律

性好,适用于岩土模型试验中土体变形发展过程的定性与定量测量。

4 结 论

应用四边形等参单元的概念,给出了基于位移模式的应变计算方法,建立了基于数字图像相关技术的变形测量系统。该系统具有多点同时测量、非接触不干扰测量对象及工作量小等优点。

应用结果表明,该系统实现了方形浅基础下土体位移场发展直至破坏的全过程定量测量;基础下土体最大剪应变首先出现在基础边缘处,随后向基础中心及土体深度方向发展,最大剪应变在地表处趋于收敛,基础最终呈整体剪切破坏模式。

基于数字图像技术的变形测量系统为土体细观力学特性与全场变形特性定性与定量研究提供了有力的工具,在岩土工程试验研究中具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 张武,高文生. 变刚度布桩复合地基模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(6):905-910.
ZHANG Wu,GAO Wensheng. Experimental study on composite piled raft foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2009,31(6):905-910.
- [2] 闫芙蓉,范文,王勇,等. 条形基础砂土地基的破坏模型试验[J]. 防灾减灾工程学报,2010,30(2):159-164.
YAN Furong,FAN Wen,WANG Yong, et al. Model test on disruptive mode of strip sandy soil foundation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2010,30(2):159-164.
- [3] Yamamoto K, Kusuda K. Failure mechanisms and bearing capacities of reinforced foundations [J]. Geotextiles and Geomembranes,2001,19(3): 127-162.
- [4] 宰金珉,蒋刚,王旭东,等. 极限荷载下桩筏基础共同作用性状的室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(11):1597-1603.
ZAI Jinmin,JIANG Gang,WANG Xudong, et al. Model test on pile-raft foundation interaction under ultimate load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007,29(11):1597-1603.
- [5] 李元海,朱合华,上野胜利,等. 基于图像分析的实验模型变形场量测标点法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2003,31(10):1141-1145.
LI Yuanhai,ZHU Hehua, Katsutoshi U, et al. Application of image-based measuring deformation method using target markers in physical model test [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2003,31(10):1141-1145.
- [6] White D J, Take W A, Bolton M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry [J]. Geotechnique,2003,53(7): 619-631.
- [7] White D J, Take W A, Bolton M D. Measuring soil deformation in geotechnical models using digital images and PIV analysis [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. Tucson: 2001:997-1002.
- [8] Zhao H H, Louis G. Camera calibration using neural network for image-based soil deformation measurement systems [J]. Geotechnical Testing Journal,2008,31(2):1-6.
- [9] Stephen A H, David M W, Ibrahim E, et al. Localised deformation patterning in 2D granular materials revealed by digital image correlation [J]. Granular Matter,2010,12(1):1-14.
- [10] Zhou P, Kenneth E G. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image speckle correlation [J]. Optical Engineering,2001,40(8):1613-1620.
- [11] 华东水利学院. 弹性力学问题的有限单元法[M]. 北京: 水利电力出版社,1978.
- [12] Bathe K J. Finite element procedures [M]. New York: Prentice-Hall,1996.
- [13] Subhash G, Liu Q, Moore D F. Concentration dependence of tensile behavior in agarose gel using digital image correlation [J]. Experimental Mechanics, 2011,51:255-262.
- [14] 陈亚东,宰金珉,余跃心,等. 基于 DIC 技术的桩-土-承台共同作用性状的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28 (Sup. 1):3001-3007.
CHEN Yadong,ZAI Jinmin,SHE Yuexin, et al. Model tests of pile-soil-cap of interaction based on digital image correlation method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28 (Sup. 1): 3001-3007.
- [15] Ni Q, Hird C, Guymen I. Physical modeling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry [J]. Geotechnique,2010,60(2):121-132.
- [16] Knappett J A, Haigh S K, Madabhushi S P G. Mechanisms of failure for shallow foundations under earthquake loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2006,26: 91-102.
- [17] 王浩,周健,邓志辉. 桩-土-承台共同作用的模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(10):1253-1258.
WANG Hao,ZHOU Jian,DENG Zhihui. Model tests on pile-soil-cap interaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(10):1253-1258.