

监测深基坑支护结构位移的新技术^{*}

王国辉 马莉 杨腾峰

(石家庄铁道学院交通工程系 石家庄 050043)

曾卓乔

(中南大学资源环境与建筑工程学院 长沙 410083)

摘要 介绍了用普通相机、不设固定摄站、不设控制点(在坑内或坑边放置基准杆和定长杆),监测深基坑支护结构位移的近景摄影测量新技术,该技术不受施工现场条件限制,三维位移的监测中误差达到了 ± 3 mm,为基础施工和相邻建筑物的安全提供了可靠信息。

关键词 深基坑支护结构,位移监测,近景摄影测量

分类号 TU 431

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2001)02-0252-04

1 前言

深基坑的开挖势必对与之相邻的建筑物、地下管网、地面设施等造成影响。在基坑开挖前、后需要对坑壁加固支护。即使如此,还时有倒塌事故发生,造成重大经济损失(例如天津塘沽广联商城深基坑支护工程倒塌事故^[1])和人员伤亡。因此,在深基坑开挖和基础施工期间,必须对支护结构进行位移监测,以确保周围建筑物和施工的安全,也是优化支护结构设计的需要。

目前,深基坑支护结构的位移监测,国内外常采用常规的测量方法(例如天津晚报大厦深基坑支护体系的变形监测^[2]),除垂直位移容易测量外,水平位移测量外业观测时间长,对施工影响大,还需要有较好的观测条件,施工现场往往难以实现。而采取常用的近景摄影测量^[3]方法,应用有困难。由于这些原因,许多深基坑支护结构无法监测,常需强化基坑支护结构,使工程成本大幅度提高。

监测深基坑支护结构位移的新技术,不需专用设备,用普通相机(如海鸥300型)和计算机即可,不需设固定摄站,不需进行控制测量,不受施工现场条件的限制,野外作业的时间比较短,对施工干扰小,能及时有效地监测基坑支护结构的位移状态,为优化支护结构的设计和安全施工提供了可靠、翔实的

信息。

2 监测深基坑支护结构位移新技术的系统组成及核心理论

2.1 新技术的工艺流程

深基坑支护结构位移监测新技术,实质上就是一种采用手持普通相机数字化近景摄影测量系统。首先在支护结构上布设测点标志,放置基准杆(可竖直可水平)和定长杆(任意放置);手持普通相机在不同位置对其进行拍照,冲洗相片后(用数码相机可免去此过程),用扫描仪扫描相片输入计算机;用鼠标量测象点坐标,启用程序计算各点的物空间坐标,并对两期的三维坐标进行位移分析,其工艺流程如图1所示。

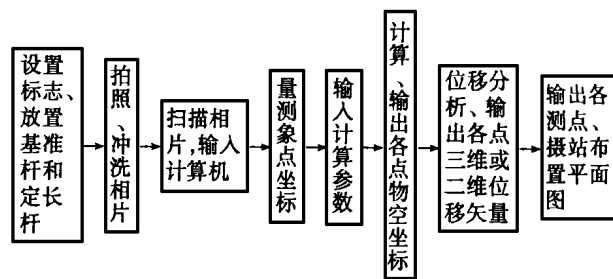


图1 工艺流程

Fig. 1 Technology process

2000年3月10日收到初稿,2000年5月16日收到修改稿。

* 1998年河北省科学技术研究计划项目。

作者 王国辉 简介:男,45岁,1981年毕业于中南工业大学矿山工程系工程测量专业,现任副教授,主要从事土木工程变形观测与预测的新理论、新技术方面的研究工作。

2.2 系统组成与核心理论

新技术由图象处理、立体重建计算、位移分析和绘图 4 个软件系统构成。

图象处理系统的功能是：在计算机屏幕上，对每张照片用鼠标量测象点，系统自动计算出每张照片上象点的象平面坐标 x, y 值，并存入数据文件。该系统采用 VC++ 6.0 语言编程。

立体重建计算系统用改进后的 P-H 算法，用 Fortran 语言编程。由图 2 可知，目标点(控制点和待定点)在象空间坐标系和物空间坐标系之间的关系为^[4]

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \\ y = -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \end{cases} \quad (1)$$

式中： x, y 为象点坐标； f 为摄影机主距； X, Y, Z 为目标点在物空间坐标系 $O - XYZ$ 中的坐标； X_S, Y_S, Z_S 为摄站点 S 的物空间坐标； a_i, b_i, c_i 为两轴系的方向余弦。

式(1)还可表达为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{bmatrix} \quad (2)$$

为了求出目标点的物空坐标，需要测定一些控制点的坐标或测定外方位元素(摄站坐标和两轴系旋角)，外业复杂，计算往往还不能收敛。文[5]提出了用代数参数代替式(2)中方向余弦的理论，Hinsken 使这一理论达到了实用化(简称 P-H 算法)。

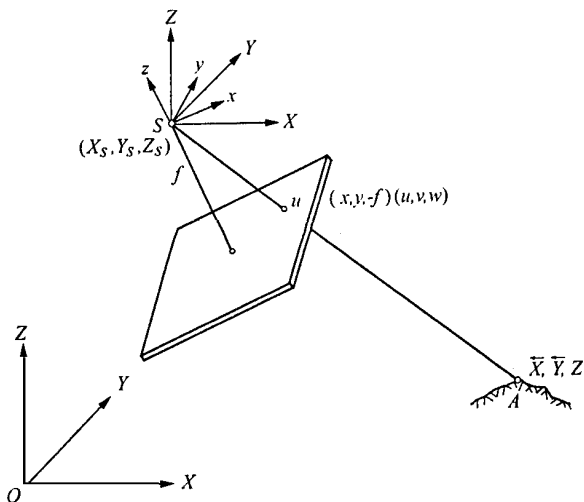


图 2 监测原理

Fig. 2 Monitoring principle

P-H 算法的共线条件方程为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = SR \begin{bmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： S 为比例因子； R 为旋转矩阵。

$$R = \begin{bmatrix} d^2 + a^2 - b^2 - c^2 & 2(ab + cd) & 2(ac - bd) \\ 2(ab - cd) & d^2 - a^2 + b^2 - c^2 & 2(bc + ad) \\ 2(ac + bd) & 2(bc - ad) & d^2 - a^2 - b^2 + c^2 \end{bmatrix}$$

式中： $d = \sqrt{1 - a^2 - b^2 - c^2}$

P-H 算法避免了方向余弦的多值性，具有较强的收敛能力，但仍需设置三个以上的控制点。在此基础上，作者对 P-H 算法进行了改进。在改进后的计算中，以基准杆上的一个标志点为物空坐标系的坐标原点；基准杆长度方向的两标志点所构成的直线为一物空坐标轴；该两标志点的长度和其他已知边用来确定比例因子；在立体重建过程中，自动形成独立的相片对立体模型，然后依次将各个独立模型进行变换，联合成统一模型。为了提高量测精度，还在计算中加入镜头畸变改正和焦距误差改正，使象点量测精度大大提高。

位移分析系统，其基础理论是附有已知条件的自由网平差和拟稳平差，用 Fortran 语言编程。当各象点的两期物空坐标计算出来后，利用该系统解算出各测点的三维位移量或二维位移量(垂直位移 Z 和指向基坑方向的水平位移 X)。

绘图系统将计算系统算出的各点和各摄站的三维物空坐标调入 AutoCAD 程序，可绘出在 $X - Y, X - Z$ 和 $Y - Z$ 平面的测点、摄站布置图。图 3 为 $X - Y$ 测点布置平面图。

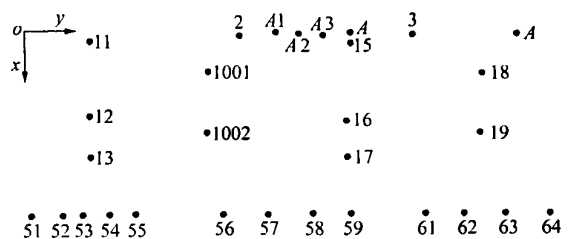


图 3 测点位置示意图

Fig. 3 Location of monitoring points

3 硬件配置和软件环境

3.1 硬件配置

(1) 586 以上微机一台，内存 16M 以上，硬盘 540M 以上，主频 100M 以上。

(2) TVGA 显示卡, 需要设置在 800 ×600 点 256 色高分辨率模式。

(3) 彩色扫描仪, 至少为 600DPI, A4(用数码相机可免去扫描仪)。

(4) 焦距为 50 mm 或 35 mm 普通照相机(如海鸥 300 型, 还可用数码相机)一架。

(5) 基准杆一根, 定长杆两根(长 2 ~ 3 m), 标志若干。

3.2 软件环境

Windows 95 以上, Auto CAD 14 版。

4 试验与应用

该技术在研究过程中, 进行了多次室外模拟试验, 虚拟支护结构的布设长度分别为 12 m 和 24 m, 标志点间隔 1 m 左右。标志点、基准杆放在测图平板上(某次试验布点(部分)如图 3 所示), 整平后用水准仪、钢板尺、铅笔标测出标志点的初始位置, 定长杆任意放置; 用海鸥 135 相机在不同位置对虚拟现场拍照; 然后移动标志点, 测定移动量(视为已知值, 精确到 0.5 mm); 再次拍照。图(3)中 51 ~ 64 点为变形点, 1001 和 1002 点为基准杆, 12 点和 13 点、16 点和 17 点、18 点和 19 点分别为定长杆, 其他点为相邻建筑物的墙上点, 测点位置按比例绘出。象

片量测及计算完毕后进行位移分析, 求出各点的位移值, 并与已知值进行比较求得差值, 将其视为真误差, 再求出各方向位移矢量在量测中的误差。现将某次试验的三维位移结果列于表 1, 各点的三维位移矢量的测算误差均 < ±3.0 mm。

该技术曾先后在石家庄两基坑(局部)支护结构(一桩结构、一喷锚结构)的位移监测中进行过应用, 测出各期三维位移与实测垂直位移相吻合。例如某饭店(东邻一大型商场, 西邻一大饭店, 北邻繁华的中山路, 南为仓库)基坑深 12 m, 开挖 10 m 后邻商场处约有 10 m 护坡桩发生显著位移, 工程被迫停工, 准备加固后再施工。与此同时, 施工单位邀请我们进行监测。由于场地狭窄, 用 S₁ 水准仪监测垂直位移, 用海鸥 300 型相机监测三维位移(该现场无法用常规测量方法测水平位移), 在 12 个桩顶做立尺点, 桩身坑壁一侧贴上标志(同心圆), 每根桩上下两个, 间隔 1 m, 上标志距桩顶约 8 m, 基准杆竖自由悬挂在坑壁处, 3 根定长杆放在坑底的三个凳子上, 杆长与坑壁垂直(不需整平), 在距坑壁约 6 m 的不同位置, 手持相机对标志和各杆连续拍照。经两周监测(每天一次, 各杆的位置可以不同)确定护坡桩已经稳定, 水准仪和相机测得的垂直位移分别为 h 和 Z , 列于表 2。因篇幅所限, 仅列部分以作比较。

表 1 试验结果

Table 1 Experimented result

点号	量测值/mm			实际值/mm			差值/mm			备注
	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	
41	51.7	9.3	7.3	50.0	8.0	8.0	1.7	1.3	-0.7	
42	26.7	5.6	8.7	30.2	8.0	8.0	-3.5	-2.4	0.7	
43	9.4	9.8	9.5	12.5	8.0	8.0	-3.1	1.8	1.5	
44	-2.7	8.4	6.3	0	8.0	8.0	-2.7	0.4	-1.7	
45	39.1	-40.7	5.0	40.0	-40.0	4.0	-0.9	-0.7	1.0	
46	21.1	-40.9	3.1	24.0	-40.0	4.0	-2.8	-0.9	-0.9	
47	8.5	-38.4	3.6	10.0	-40.0	4.0	-1.5	+1.6	-0.4	
48	-5.8	-41.3	2.3	-5.0	-40.0	4.0	-0.8	-1.3	-1.7	
51	39.4	-22.1	-5.4	40.0	-20.0	-4.0	-0.6	-2.1	-1.4	
52	42.1	-23.0	-2.6	40.0	-20.0	-4.0	2.1	-3.0	1.4	$m_x = \pm 2.6 \text{ mm}$
53	39.3	-21.0	-1.4	40.0	-20.0	-4.0	-0.7	-1.0	2.6	$m_y = \pm 1.8 \text{ mm}$
54	42.4	-21.5	-2.4	40.0	-20.0	-4.0	2.4	-1.5	1.6	$m_z = \pm 1.7 \text{ mm}$
55	44.5	-22.5	-1.1	40.0	-20.0	-4.0	4.5	-2.5	2.9	
56	34.3	-0.2	-0.7	30.0	0	0	4.3	-0.2	-0.7	
57	31.9	-0.6	-1.9	30.0	0	0	1.9	-0.6	-1.9	
58	33.7	-0.1	-1.5	30.0	0	0	3.7	-0.1	-1.5	
59	27.1	-0.2	-0.3	30.0	0	0	-2.9	-0.2	-0.3	
61	27.5	-6.8	-2.3	25.0	-4.0	0	2.5	-2.8	-2.3	
62	19.2	-3.1	-1.8	16.5	-4.0	0	2.7	0.9	-1.8	
63	3.2	-1.7	0.4	7.0	-4.0	0	3.8	2.3	0.4	
64	0.2	-7.6	-3.4	0	-4.0	0	0.2	-3.6	3.4	

表 2 垂直位移对比

Table 2 Comparison of the vertical deformations

mm

点号	第 2 期		第 3 期		第 4 期		第 5 期		第 6 期		第 7 期	
	<i>h</i>	<i>Z</i>	<i>h</i>	<i>Z</i>	<i>h</i>	<i>Z</i>	<i>h</i>	<i>Z</i>	<i>h</i>	<i>Z</i>	<i>h</i>	<i>Z</i>
1	0.2	0.3	- 0.1	0.2	0.2	- 0.2	0.1	- 0.2	- 0.2	- 0.3	- 0.2	- 0.2
2	- 0.3	- 0.2	- 0.4	- 0.2	- 0.5	- 0.6	- 0.6	- 0.5	- 0.6	- 0.7	- 0.5	- 0.6
3	- 0.8	- 1.2	- 1.8	- 1.5	- 2.2	- 2.0	- 2.8	- 2.5	- 3.2	- 3.3	- 3.5	- 3.3
4	- 1.6	- 1.9	- 2.4	- 2.2	- 3.1	- 3.7	- 4.0	- 4.2	- 4.5	- 4.4	- 4.6	- 4.4
5	- 2.5	3.0	- 3.4	- 3.7	- 4.2	- 4.5	- 5.1	- 4.9	- 5.7	- 5.3	- 6.2	- 5.6
6	- 3.1	- 3.6	- 4.7	- 5.1	- 5.9	- 6.3	- 6.8	- 6.9	- 7.5	- 7.8	- 8.1	- 8.3
7	- 3.0	- 3.4	- 3.9	- 4.2	- 5.3	- 5.8	- 6.2	- 6.6	- 6.9	- 7.1	- 7.5	- 7.7
8	- 2.8	- 2.5	- 3.9	- 4.3	- 4.5	- 4.8	- 5.2	- 5.5	- 6.0	- 5.7	- 6.6	- 6.1
9	- 2.4	- 2.3	- 3.1	- 3.3	- 4.0	- 4.5	- 4.6	- 5.2	- 5.0	- 5.8	- 5.5	- 6.0
10	- 1.8	- 1.5	- 2.4	- 2.8	- 3.1	- 3.7	- 3.7	- 3.9	- 4.2	- 4.5	- 4.8	- 4.7
11	- 1.0	- 0.3	- 1.5	- 1.0	- 2.0	- 1.5	- 2.5	- 2.4	- 2.9	- 2.5	- 3.4	- 2.9
12	- 0.4	0.2	- 0.3	- 0.2	- 0.6	0.4	- 0.7	- 0.2	- 0.9	- 0.3	- 0.8	- 0.4

注:表中垂直位移值均为累计量,负号为下沉;1~12点均为上标志点。

5 结 论

通过试验和应用可以看出,监测基坑支护结构位移的新技术,不受场地条件限制,外业工作快捷、简便,对施工干扰小,有利于提高工程进度。内业量测不需专用设备,造价低廉,所用设备可兼做它用,可测出支护结构的三维位移量,其中误差均可达到 ± 3 mm,能满足基坑支护结构位移监测的精度要求,为基坑的稳定性判别和支护结构的优化设计提供可靠的研究资料,在保证工程质量和降低工程造价方面具有一定的实用价值和应用前景。

参 考 文 献

- 1 李兴亚,熊 乾. 天津塘沽广联商城深基坑支护工程事故分析及处理[J]. 铁道建筑技术, 1999, (6): 30~32
- 2 黄立人,姚忠杰,王若柏. 深基坑施工中的变形监测[J]. 测绘工程, 1997, 6(1): 7~13
- 3 魏永华. 三峡高边坡变形监测摄影测量技术[J]. 河海大学学报, 1997, (3): 61~66
- 4 柴 敬. 相似模拟实验中近景摄影测量的应用[J]. 西安矿业学院学报, 1996, (1): 5~6
- 5 曾卓乔. 一种不测定初始值的近景摄影测量微机程序[J]. 测绘学报, 1990, 19(4): 298~306

A NEW METHOD OF DEFORMATION MONITORING FOR SUPPORT STRUCTURE OF DEEP EXCAVATION

Wang Guohui¹, Ma Li¹, Yang Tengfeng¹, Zeng Zhuoqiao²

⁽¹⁾ Department of Jiaotong Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043 China

⁽²⁾ College of Resources, Environment and Civil Engineering,

Central South University of Technology, Changsha 410083 China

Abstract A new method is presented for monitoring the support structure of deep excavation by using digital close-range photogrammetry. It only uses an amateur camera(non-metric camera) with no need for fixed exposure stations and survey control points. The method is not restricted by site conditions. The mean square error of 3-D monitoring deformation is about ± 3 mm, which can supply reliable information for the safety of foundation construction and adjacent buildings.

Key words support structure of deep excavation, deformation monitoring, close range photogrammetry