

教育部科学技术重点项目资助 (项目编号106085)

数字照相量测技术 及其在 岩土工程实验中的应用

李元海 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

教育部科学技术重点项目资助(项目编号 106085)

数字照相量测技术及其在 岩土工程实验中的应用

李元海 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是著者对近8年(2001~2009)来在数字照相量测技术研究与应用工作成果的一个总结。主要内容
包括:数字照相量测的基本原理与方法、基于数字图像分析的材料破坏模式识别、实用软件系统研制与功能
说明以及数字照相量测技术在砂土、黏土、岩石、混凝土、相似材料实验以及工程现场方面的研究与应用。

本书可供大专院校与科研院所从事实验力学研究的本科生、研究生与科研人员使用,也可供相关设计、
施工单位从事相关研究与应用工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字照相量测技术及其在岩土工程实验中的应用/李元海

著. —徐州:中国矿业大学出版社,2009.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0518 - 6

I. 数… II. 李… III. 数字摄影测量—应用—岩土工程

IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 201841 号

书 名 数字照相量测技术及其在岩土工程实验中的应用

著 者 李元海

责任编辑 褚建萍

责任校对 徐 玮

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 10.75 彩插 4 字数 275 千字

版次印次 2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

定 价 42.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本书是著者对 2001~2009 年来在数字照相量测技术方面的研究、开发与应用工作的总结,希望向高校的研究生、本科生及科研院所的研究人员和相关工程技术人员介绍这一具有广阔应用空间和很大发展潜力的现代实验力学量测新技术。

本书的研究工作源于我攻读同济大学博士学位时论文选题的改变。当初博士论文选题是三维 GIS 相关研究,也是我的导师同济大学朱合华教授的一个新的开拓领域。恰好 2001 年,日本平和中岛财团在中国选拔博士生去日本留学,朱合华教授推荐了我。通过在中国和日本的两次选拔,我有幸获得了平和中岛财团提供全额奖学金去日本做博士论文研究的机会。尽管原定题目因日方没有合适的指导老师而不得不放弃,但导师还是毅然派我去了日本德岛大学,改变选题而继续深造。至此,也开始了我的数字照相量测研究工作与难忘的留学生活。回想起来,我能够介入该项研究工作并取得一定成果,是与朱合华教授的远见卓识和宽厚博爱分不开的。

作为一名计算机应用爱好者,我对数字照相量测,特别是数字散斑相关方法对于局部化变形特征明显普遍的岩土材料是否有效,起初持怀疑态度,而留学期间一个偶然的机,让心中的疑虑打消了。一次,在我供职的德岛大学望月秋利教授研究室的上野胜利副教授给我展示了一个实验图像变形分析结果,是他用 Fortran 自编的程序分析的,当我看到模型地基表面清晰的位移矢量分布图时,才感受到图像变形相关分析方法的奥妙之所在。但是,在实际应用过程中,却又感到上野胜利副教授的 Fortran 程序因缺少图形界面使用起来较为复杂。于是,就有了自编一套简单易用的软件系统的想法。当望月秋利教授得知我的想法时,谈到花费大量时间即使程序编制出来恐怕也谈不上创新,使我感受到一定的压力,因为博士论文研究成果是要有创新点的。但是,我觉得编制出一套现在还没有的而且好用的软件系统本身,也不失为创新吧,如果没有研制出属于自己的软件,就称不上真正掌握这项技术,所以就下定决心独立研制、开发。而且,对于一个实验研究者来说,前期多花一些时间,我相信后续的大量实验图像分析借助于自己研制的高效率的软件分析与处理系统,一定可以节省很多时间。基于此,我开始了虽辛苦却充满乐趣的软件开发与应用研究工作。

经过半年多的日夜工作,我终于成功编制出了两个应用程序,实现了图像分析和结果后处理等基本功能,提出并编程实现了剪切带识别分析算法,望月秋利教授高兴地连同程序称之为“李君方法”。特别兴奋的是,当时同属研究室的一个柬埔寨留学生竟然用我的后处理程序,绘制出了一个基于四边形单元的三维井筒,用来作为他有限元建模的几何网格显示工具,这让我有一种追寻过后的成就感,也增强了我深入研究的信心和决心,艰辛的研究工作终于有了可喜的成果。

2003 年 9 月留学期满,我从日本回到同济大学后,偶遇中国矿业大学的靖洪文教授,他对该项研究工作产生了浓厚的兴趣,很希望我到矿大开展相关的合作研究工作。基于多种

考虑,我从工作近一年的上海城市建设设计研究院正式进入中国矿业大学建筑工程学院靖洪文教授课题组。在课题组进行研究的几年期间,我承担了一个大型隧道实验系统设计工作和几个相关基金项目研究工作,这些都与数字照相量测的应用研究紧密相关,正是在持续不断的实验应用研究中,促进了数字照相相关分析方法与软件系统的改进和完善。多年来,我在该项研究工作中所取得的成绩离不开靖洪文教授提供的无私帮助和全力支持。

数字照相量测软件系统包括图像分析软件 PhotoInfor 和结果后处理软件 PostViewer,自 2002 年在日本德岛大学研制成功以来,又在随后持续不断的实验应用过程中,历经多年的修改与完善,如今已成为一套功能强大且简单易用的实用软件系统,现有中、英文两种版本。目前,有日本德岛大学、同济大学、山东大学、上海海事大学、河南理工大学、上海交通大学、华南理工大学、福州大学、中国矿业大学、中国建筑科学研究院、中冶集团建筑研究总院、煤矿瓦斯治理国家工程研究中心、重庆交通科研设计院以及日本西松建设株式会社和日本工营株式会社等国内外多家高校与研究院所使用,主要用于他们所承担的国家科技支撑计划、国家 973 和 863 项目、国家自然科学基金(重点)基金项目、企业技术研发项目、研究生学位论文研究以及大学生创新训练计划的实验研究项目中。衷心感谢上述单位和相关研究人员对 PhotoInfor 软件系统的信赖和大力支持!

感谢同济大学朱合华教授、日本德岛大学望月秋利教授和上野胜利副教授、中国矿业大学靖洪文教授等专家学者及相关研究人员在该项研究中提供的大量宝贵意见和有力支持。感谢日本平和中岛财团无偿提供了我在日本两年留学期间的学习与生活资助。感谢中国矿业大学建筑工程学院和深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的同仁以及在实验中付出辛勤劳动的研究生。

本书由深部岩土力学与地下工程国家重点实验室资助出版,在此谨表感谢!

最后,特别感谢家人多年来的理解、关爱和支持!

鉴于著者水平的局限性,书中错误疏漏在所难免,敬请广大读者批评指正。

李元海

二〇〇九年十月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数字照相量测方法发展现状	1
1.1.1 数字照相量测的特点	1
1.1.2 数字照相量测方法分类	1
1.1.3 数字照相量测方法发展	2
1.2 数字照相变形量测关键技术	2
1.3 数字照相量测方法应用现状	4
1.3.1 室内实验应用研究	4
1.3.2 工程现场应用研究	7
1.4 本书主要内容	9
第 2 章 数字照相量测基本原理与方法	10
2.1 数字照相量测基础方法	10
2.1.1 数字图像处理基础	10
2.1.2 坐标变换与图像校准	14
2.1.3 应变场计算方法	17
2.2 数字照相量测散斑相关法	19
2.2.1 基本原理	19
2.2.2 图像校准	23
2.2.3 三步搜索法	23
2.2.4 变形计算	23
2.2.5 量测精度检验	23
2.3 数字照相量测标点质心法	26
2.3.1 基本原理	26
2.3.2 软件研制	28
2.3.3 精度检验	28
2.3.4 应用实例	30
2.4 两种量测方法的适用条件	31
2.5 数字图像分析流程	32

第3章 数字照相量测实用软件系统	33
3.1 数字散斑相关变形量测软件研制	33
3.1.1 功能需求分析	33
3.1.2 图像分析软件研制	33
3.1.3 后处理软件研制	35
3.1.4 系统运行环境	37
3.2 图像分析准备工作	38
3.2.1 序列图像格式转换	38
3.2.2 坐标控制基准点文件创建	38
3.3 PhotoInfor 主要功能	39
3.4 PostViewer 主要功能	44
3.5 两个关键应用问题	47
3.5.1 图像采集质量问题	47
3.5.2 位移量测精度问题	48
第4章 数字照相量测在地基离心机实验中的应用	49
4.1 离心机模型实验原理	49
4.1.1 实验原理	49
4.1.2 离心机实验系统	50
4.2 模型材料与制备	51
4.2.1 模型材料选择	51
4.2.2 模型制备过程	52
4.3 实验过程	52
4.4 实验结果与分析	52
4.4.1 地基承载力	53
4.4.2 地基位移场	54
4.4.3 地基应变场	54
4.4.4 分叉现象	60
4.4.5 地基变形区域与滑动面	60
4.4.6 地基渐进破坏过程量化分析	60
4.4.7 砂土地基总体变形演变特点	67
4.5 小结	68
第5章 数字照相量测在土体大型剪切实验中的应用	69
5.1 实验材料基础特性	69
5.1.1 材料物理特性	69
5.1.2 材料强度特性	70
5.2 实验装置设计及实验系统	70
5.2.1 实验装置	70

5.2.2 量测元件	71
5.2.3 系统布置	72
5.3 实验设计、模型制作及实验过程	73
5.3.1 实验设计	73
5.3.2 模型制作	74
5.3.3 实验过程	75
5.4 实验结果	75
5.4.1 砂的剪切特性	76
5.4.2 变形模式与变形产生、发展与演化过程	78
5.4.3 变形发展过程的定量分析	86
5.5 剪切带识别方法	89
5.5.1 剪切带识别	89
5.5.2 剪切带变形定量分析	91
5.5.3 剪切带厚度	91
5.6 小结	95
第6章 数字照相量测在隧道相似模型实验中的应用	96
6.1 隧道围岩破裂带识别方法	96
6.2 断续解理岩体隧道的围岩变形过程观测	97
6.2.1 实验系统	97
6.2.2 实验材料与模型制作	97
6.2.3 实验过程	98
6.2.4 围岩变形场分析结果	98
6.2.5 围岩破裂带分析结果	99
6.2.6 实验结论	104
6.3 沿空动压巷道围岩变形破裂过程实验观测	104
6.3.1 实验系统	104
6.3.2 实验相似比	105
6.3.3 相似材料选取	107
6.3.4 模型制作	109
6.3.5 实验结果	110
6.3.6 实验结论	118
6.4 小结	118
第7章 数字照相量测在岩石与混凝土实验中的应用	119
7.1 岩石试件的变形演变过程观测	119
7.1.1 实验仪器	119
7.1.2 实验材料	120
7.1.3 实验过程	120

7.1.4	实验结果	120
7.2	混凝土试件变形演变过程观测	126
7.2.1	实验材料	126
7.2.2	实验结果	126
7.3	脆性材料裂隙动态识别法	129
7.3.1	改进基础搜索算法	129
7.3.2	基于图像二值化的识别法	130
7.3.3	基于图像相关分析的裂隙识别法	131
7.3.4	动态识别校验	132
7.3.5	动态识别应用	133
7.4	小结	135
第 8 章	数字照相实时变形监测与全景钻孔摄像应用研究	136
8.1	数字照相实时变形监测技术	136
8.1.1	硬件系统	136
8.1.2	软件系统	137
8.1.3	初步应用	143
8.2	基于全景钻孔摄像的围岩松动圈测试技术	143
8.2.1	围岩钻孔数字照相基本原理	144
8.2.2	围岩松动圈识别软件系统	146
8.2.3	应用实例	151
8.3	小结	154
第 9 章	展望	155
	参考文献	157

第1章 绪 论

数字照相量测的概念可理解为是利用数码相机、数码摄像机、CCD 摄像机、CT 扫描、激光照相等图像采集手段,获得观测目标的数字图像后,再利用计算机数字图像处理与分析技术,对观测目标进行变形或特征识别分析的一种通用性很强的现代量测新技术。数字照相量测由于在包括岩土在内的材料变形演变过程的全程观测与细观力学特性等研究上都具有突出的优越性,近年来,在岩土工程、结构工程、桥梁与隧道工程、建筑工程、材料工程、机械工程、采矿工程、林业工程以及医学工程等多学科的实验力学研究领域中,发展十分迅速而且应用日渐广泛。

1.1 数字照相量测方法发展现状

1.1.1 数字照相量测的特点

数字照相量测是著者的一种提法,根据观测目标上是否布置人工物理量测标志点,数字照相变形量测法可简单划分为“标点法”和“无标点法”两大类。数字散斑相关(DSCM)、数字图像相关(DIC)和测量流速场的 PIV 等相关方法与之既有联系又有区别。其中,“无标点法”和 DSCM、DIC 和 PIV 方法基本原理相同,都是以散斑图像相关分析为基本原理,区别主要体现在数字照相量测中的图像采集手段明确。事实上,这一点也许并不重要,因为这种方法处理的是数字图像,不管用什么手段采集的图像,只要符合数字图像分析的要求即可。数字照相量测与 DSCM、DIC 或 PIV 等方法的主要区别在以下两个方面:一是 DSCM 等方法主要以图像相关分析为核心算法,而数字照相量测除了图像相关分析外(无标点法用),还包括图像质心计算分析(标点法用);二是 DSCM 等方法主要用于变形量测分析,而数字照相量测不仅包含变形量测,还包括观测目标的特征识别分析,如利用钻孔摄像对围岩裂隙的观测等。应该说,数字照相量测的概念内涵更为丰富。

1.1.2 数字照相量测方法分类

数字照相量测方法中,最早出现的是著者称为的“标点法”,其次是 20 世纪 80 年初出现的数字散斑相关法或“无标点法”。

所谓“标点法”,即在观测目标上设置人工标志点或描画网格,位移量测计算既可采用质心法(要求标志点表面颜色单一),也可用图像相关法(要求标志点具有纹理特征)。其中,质心法对于图像之间的相关性、光照的变化和相机位置的固定没有太严格的要求,当然,如果光照稳定、相机固定不动、图像相关性较好,有利于自动连续的图像分析和标志点的位移计算。此外,“标点法”更适合大变形量测,例如,相似材料、混凝土或岩石等脆性材料的突然断

裂等。所谓“无标点法”,即在观测目标上不使用任何人工标志点,而利用目标的自然或人工纹理在图像上形成的数字散斑来进行相关分析。显然,这种方法实验操作比较简单,利用图像上的像素点作为测点,数量没有限制,可以进行精细变形分析,但对图像的采集环境和相关性要求较高。

1.1.3 数字照相量测方法发展

数字照相用于岩土力学实验量测可以追溯到1929年Gerber首次使用X光量测土体模型的内部位移。1963年,Roscoe等在尺寸较大的砂土模型和剪切设备中应用X光检测了模型增量应变模式,在大比例模型(如 $2.0\text{ m}\times 0.5\text{ m}$)上可以获得0.1%精度的剪应变和体积应变。1976年,Hakuju、Yamaguchi在研究地基渐进破坏问题时,在一系列考虑细致的离心场和重力场模型实验中,通过在模型上设置光学量测标点,利用电视摄像、影像记录仪和电视追踪设备采集图像,来观测标点位置变化和量测模型变形,并在模型内部布置铅珠,利用X射线装置观测到了最终滑动面的位置和形状。1984年,望月秋利等在边坡地基离心机模型实验中,利用专门设计的标点坐标读取装置来量测模型上标点的位移,并且考虑了标点空间坐标的校正,可以看做是“标点法”的较早应用研究之一。1987年,有一些研究者开始将激光辅助层析照相技术(LAT)用于研究土样内部土粒子的运动特点,如Allesma开发了一种使用激光的光弹性技术,用于观测由玻璃粒子做成的试样内部结构。1992年,Konagai将LAT技术用于小比例模型实验中,如动态边坡稳定和地基承载力实验。近年来,基于全息摄影和散斑方法的干涉成像技术开始在岩土实验中得以应用。1997年,Pierre在文献中介绍了用全息摄影干涉技术在实验室的一些应用,如量测砂质土的微小变形、混凝土的收缩、建筑材料泊松比和弹性模量等。2000年,上野胜利等对基于图像相关分析的砂土变形量测,开发了一种称为“CCIP”的照相量测方法,图像采集采用的是135胶卷相机。

2000年以来,数码相机的发展和计算机硬件性能的提高,使得用数码相机直接进行数字图像采集成为可能,基于图像相关分析或数字散斑相关的“无标点法”开始大量应用在岩土力学与工程实验中,如D. J. White等(2001)将流体力学中测量流体速度的粒子图像速度(PIV)技术引用到岩土变形量测中,上野胜利等(2002)利用数码相机,对砂土地基模型实验变形场量测进行了一些研究。国内也有不少学者在这方面做了大量卓有成效的基础与应用研究工作,如金观昌、芮嘉白、洪宝宁、高建新、武建军、孙一翎、潘一山等。近几年,数字照相量测在岩土工程实验中的应用发展非常迅速,已逐渐成为现代实验力学中一项重要的量测新技术。

1.2 数字照相变形量测关键技术

数字照相变形量测精度的大小和是否满足应用要求,是大多数使用者首先会提出的一个核心问题,随着其应用范围的越来越广,一些应用(比如材料的细观特性研究)对精细变形观测会有更高的要求。此外,伴随着高分辨率数字相机采集的大尺寸图像和大量图片的集中分析处理,对图像分析的速度也提出了较高的要求。因此,衡量数字照相变形量测技术应用效果的两个最重要的指标可以归结为量测精度和分析速度,其中,量测精度主要与图像采集质量、图像畸变校正、图像校准、相关搜索方法、变形解释算法有关,而分析速度,撇开计算

机硬件性能,则主要与图像分析方法有关,其中相关搜索算法是影响分析速度的重要因素之一。

(1) 高质量图像采集技术

高清晰和满足分析要求的数字图像是决定图像分析成败与精度高低的最重要因素。无论图像处理与分析算法如何改进,图像采集质量若不能保证,量测精度则无从谈起,在应用中尤其要注意相机位置、光照变化、控制基准点的布置及其坐标量取对图像采集与图像分析的影响。例如,对于“无标点法”来说,一般要求在调整好相机拍摄清晰度的前提下,相机位置始终固定不动,控制点不动,光照均匀且亮度变化小。此外,一个与精度直接相关的是图像比例大小,它取决于观测目标范围的大小与相机拍摄图片长宽的分辨率的比值。绝对精度以“像素”为单位说明,与该比值无关,而相对精度(以 mm 或 μm 等单位表示)则要考虑这一比值。

(2) 图像相关搜索算法

图像相关搜索算法与相关计算公式有关,不同的相关公式在计算精度和分析速度上有一定的差别,但不应该很大,否则不能作为相关公式使用,金观昌等(2006)对 10 种公式进行了深入细致的对比研究。

(3) 图像校准或坐标变换

图像校准可以理解为图像空间坐标向观测目标所在空间(如实验中的模型空间)坐标的转换过程,它包含了对因相机光学镜头成像固有机理引起的图像畸变,以及相机镜头与观测目标表面的相对位置引起的平移与旋转刚体或偏斜变形的校准。

图像校准一般利用控制基准点实现。一般来说,小范围观测的图像校准尽量布置较少的控制点,如可采用简单的四边形等参单元变换方法来实现图像校准或坐标转换,根据观测目标范围的大小,可以选择布置一组或多组四边形控制点,以适应不同量测范围的精度要求,这种方法能够消除刚体位移和相机镜头与观测面不垂直产生的偏斜变形。而大范围的观测,则应当考虑在观测目标区域适当布置多个控制点,不过,虽然控制点多在理论上校准效果好,但控制点真实坐标的准确量测必须要有足够的保证,否则过多过密的控制点本身的不准确定位反而会影响图像分析精度。

(4) 亚像元插值算法

像素是图像最小组成单位,要想将其细分为 1 个像素以下(即亚像元),必须采取插值方法。金观昌等(2006)对基于 3 点、5 点和 7 点等几种多项式插值方法进行了比较分析。实际应用中,插值点越多精度可能越高,但计算量亦会增大。在多数情况下,双线性插值是一种简单快速的有效方法,精度检验实验结果表明(李元海,2004),此法对小变形识别,精度较高。

(5) 材料局部化变形识别

局部化变形是岩土材料或其他类似材料变形的一个基本特征,尽管岩土材料局部化变形模式多种多样而且十分复杂,但从图像分析角度,可以简化为“平移”和“转动”两种形式的组合,因此,在进行图像相关性分析时,在一般进行“平移相关搜索”的基础上,增加“转动相关搜索”,可称之为“旋转搜索法”(李元海,2004)。这种方法对实验模型上由于剪切破坏产生的局部化变形分析,显然是有利的,但插值计算与相关搜索计算量大大增加,因此,以目前个人计算机的速度,并不适用于全部测点的分析,但可对个别局部化变形点选择使用。

(6) 应变场解释方法

岩土工程实验中,对于岩土材料的变形与破坏分析,除位移外,更多的是关注应变及应变场的变化规律,而数字照相量测的直接结果是位移,因此,需要进行应变场计算。而应变场的解释方法并不是唯一的,其中一个方法是采用有限元中常用的四边形等参单元变换方法,即已知四边形4个顶点的位移,利用基于位移模式的应变计算公式来计算四边形中心点的应变。这种方法计算简单,概念和理论依据明确,同时便于应变场等值线与云图绘制等可视化后处理与分析的计算机编程实现。

1.3 数字照相量测方法应用现状

1.3.1 室内实验应用研究

数字照相量测在实验力学领域应用日渐广泛,除了诸如土体单轴与三轴压缩、土体剪切实验、岩石试件压缩等基本力学实验外,还包括地基基础实验、混凝土结构模型实验、隧道模拟、矿山采场相似模拟等岩土工程实验。下面按所使用的岩土材料来分类介绍数字照相量测在实验室中的应用情况。

(1) 砂土与黏土

砂土属于黏聚力低的离散体,在压力的缓慢作用下,其变形具有一定的连续性和渐进性,因此,比较适合于图像相关性分析。同时,相关研究在国内外也相对较多,主要包括土体基本力学性质实验和各种工程作用条件下的土体变形特征的工程模型实验。

土体基本力学性质实验主要有三轴压缩实验(D. J. White 等,2002)、土的平面应变压缩实验(Drescher 等,1990;Vardoulakis,1991;Takashi Matsushima,2002;Khalid A.,1999)、平面剪切实验(上野胜利,2000;李元海,2006,2007),主要用来量测土体压缩与剪切变形模式以及应力与应变关系。

工程模型实验主要有大坝离心机实验(Henderikus G. B. Allersma、D. J. White 等,2002)、贯入桩实验(D. J. White 等,2002)、地基承载力实验(上野胜利等,2002;Charrier Jean 等,1997)、桩基模型实验、浅埋隧道(Charrier Jean 等,1997)等。国内相关研究主要有砂土受均布荷载下的位移场分布(孔宪宾等,2000)、利用常规土工三轴实验仪和 CCD 摄像头加长距离显微镜对土的微细颗粒的位移进行量测研究(刘敬辉等,2003)以及地基承载力实验(李元海等,2003,2004,2006)和受荷桩模型实验与土体抗拔实验(周健,2007,2009)等。

关于黏土实验应用研究相对较少,如,李元海等(2004)对含孔洞的黏土地基的变形破坏过程进行了照相观测研究。

(2) 天然岩石

相对于砂土,天然岩石的脆性特征比较明显,其局部化变形的出现往往具有突发性,发生时间短暂,因此,在照相量测图像采集时,要注意在破坏前后采集到尽可能多的照片。而数码相机图片一般尺寸较大,存储需要一定时间,相对而言,CCD 摄像机虽然拍摄的图片分辨率较低,但是在相同时间内,能够采集并存储更多的图片,适合岩石变形破坏过程的快速捕捉。

潘一山等(2002)利用 CCD 摄像机,对 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的煤岩试件的变形局部化做

了定量观测研究,为了增强试件表面的纹理特征,将粒度为 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 的玻璃微珠漆喷涂在岩石试件的表面形成人工散斑场。此外,马少鹏等(2008)对岩石材料基于天然散斑场的变形观测方法进行了一系列的研究,赵永红等(2004)利用扫描电镜作为图像采集装置,研究了预制裂纹的平板状砂岩试件中微破裂的萌生、扩展、集结和连通以及宏观破裂的形成过程,陈俊达等(2005)对雁列断层结构的破坏过程进行了实验研究,通过对变形破坏过程中的变形场进行统计分析发现,一种描述变形局部化特征的统计指标 C_v 值可作为一个雁列断层破坏的前兆指标。

相对砂土而言,天然岩石方面的照相观测实验研究相对较少。

(3) 混凝土

混凝土是岩土结构中常用的一种工程材料,它的特点是容易发生脆性断裂,而这种断裂往往要经历微裂纹的萌生、扩展、交汇成宏观裂纹直到断裂的过程。因此,探索其微细观裂纹及其附近区域的变形演变特点具有比较重要的理论意义和工程应用价值。

王怀文等(2006)将 DSCM 与扫描电镜(SEM)结合起来,对混凝土试件在 SEM 下的断裂行为进行了研究,得到了混凝土试件表面随着载荷的变化而变化的表面细观变形场。为了细致地研究混凝土中裂纹的起裂、扩展以及最终失效的过程,设计了带 V 形切口的三点弯曲试件,最终外形尺寸定为 $l\times h\times b=25\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ 。研究表明,数字散斑相关法具有非接触、全场实时测量、避免条纹处理等特点,适合于扫描电镜下混凝土材料断裂过程中微细裂纹研究。此外,夏黎等(2007)同样将 DSCM 与显微技术应用于混凝土构件的微小位移的测量中。

刘宝会等(2006)利用数字散斑错位术对混凝土结构纤维增强塑料(CFRP)加固界面黏接质量进行了无损检测研究。结果表明,该技术可以迅速地进行现场检测和评价。刘宁等(2004)通过对碳纤维布加固混凝土梁的照相观测实验,研究了碳纤维布加固混凝土梁的承载力及变形行为,所用试件尺寸为 $200\ \text{mm}\times 450\ \text{mm}\times 2\ 400\ \text{mm}$,实际照相观测范围为梁中央局部区域。

(4) 相似材料

在矿山采场和隧道相似模拟实验中,一般采用砂子、石膏、水泥、水、石蜡、硼砂、云母粉等作为岩体及其岩层间弱面的相似模拟材料,这些材料的脆性特征介于砂土与天然岩石之间。为进行照相观测,在模型上描画网格是一种常用方法,如白义如(2000)使用这种“网格法”对金山店铁矿地下采矿引起地表沉降问题进行了相似模拟研究,逼真地模拟了地下不同开采水平引起的地表变形和围岩移动过程,分析了该矿地表变形在开采过程中的变化规律、围岩的破坏特征和破坏机理。方新秋等(2000)通过在模型上布置较大密度的网格标志点,对采场多裂隙直接顶破坏过程中的位移和变形进行了量测分析。近年来,“无标点法”开始逐渐用于相似材料变形观测,如王怀文、周宏伟等(2006)在煤层开采的相似模拟实验中,利用数字散斑相关法对深部开采下的上覆岩层移动与开采沉陷规律进行了研究,得到了不同推进速度下的上覆岩层下沉量的等高线分布。此外,陈荣华等(2007)和刘刚等(2008)利用著者研制的数字照相量测系统对矿山采场上覆围岩变形规律和解理岩体隧道的稳定性进行了一些相关实验研究。

相似材料模型实验一般观测目标范围较大,可将“标点法”与“无标点法”结合起来使用。因为,“标点法”能够适应模型宏观大变形甚至断裂变形破坏过程观测,而“无标点法”由于基

于图像相关性分析,不能很好地适应材料断裂破碎区域的变形观测,但对于相关性较好的区域,由于测点密度可以很大,因此适合精细应变场的量测。所以,将两种方法结合起来,能够更好地对相似材料模型进行宏观、细观变形的同时观测与全面分析。

(5) 金属材料

金属材料(如钢材与钢筋等)也是岩土工程中常用的材料,数字照相量测在金属材料的变形量测中也有不少应用。例如,潘兵等(2005)对低碳钢试件(A3 钢)弹塑性边界的白光相关检测,提出了一种用白光作为照明光源来检测低碳钢试件弹塑性边界的无损检测方法,并定义一种光强相关系数作为判断试件各点是否进入塑性屈服的依据。该方法将数字图像相关和金属表面弹塑性变形前后对光强的反射特性结合起来以判断试件各点是否进入塑性变形阶段。

王言磊等(2006)利用图像相关数字技术对以钢结构为主的海洋平台结构模型振动位移进行了测量,采用 MATLAB 编写的数据处理程序,通过任一测点的位移时程曲线,将位移时程数据再作傅立叶变换,得到了相应的频谱曲线。陈思颖等(2004)在 SHTB(霍普金森拉伸装置)加载装置上利用数字化高速摄影系统,实现了硬铝材料的位移和变形场的光学测量。实验中利用 Imacon-790 高速摄影机以 105 幅/s 的速度分别拍摄了两组试件的动态拉伸情况(一维平板拉伸试样和含对称缺口的拉伸试样)图片,然后运用数字散斑相关方法,对不同时时刻的图像进行分析和处理,得到了试样在各个时间点的位移场。

(6) 木材

木材可以说是土木工程最早使用的原始建筑材料,现在依然在广泛使用。传统木材力学测试一般多采用电阻应变测试法,这种电测法虽然很成熟,但是该方法以点测量为基础,不能获得全场的变形信息,在木材力学测试领域中具有一定的局限性。而数字照相量测可突破传统量测的局限性,它在木材压缩、拉伸、弯曲等常规力学测试,木材裂纹演化与增长等断裂测试,木材微观力学测试,以及木质复合材料的力学特性研究中,都具有广阔的应用前景(江泽慧,2003;孙艳玲,2009)。

(7) 复合材料

王冬梅等(1999)利用数字图像相关法,对改性高分子材料(如改性聚乙烯 PE)的断裂行为进行了实验观测,得到了预置双边裂纹 PE 试件在一定载荷下的位移和应变。数字散斑相关法在高聚物领域中亦有广泛应用,如高聚物的断裂、共混、结晶和高聚物基复合材料的无损检测等(马世虎,2003)。

刘颢文等(2007)利用高速数字摄像系统(1 000 帧/s),对 Al_2Cu 合金试件在拉伸实验中产生的间断传播的 B 型波特文-勒夏特利埃剪切带的瞬态成核过程进行了捕捉,通过结合 DSCM 得到的面内变形定量结果和数字散斑干涉法得到的表现面变形的条纹图,再现了剪切变形带成核和传播瞬间的三维变形过程。

作为新材料,形状记忆合金(SMA)不仅在空间飞行器、核反应堆中有应用,同时亦逐步应用于建筑、桥梁、海洋平台等结构中,其形状记忆效应(SME)和超弹性(SE)是 SMA 的两个基本特性。王强等(2007)对超弹性 NiTi 合金裂纹尖端应变场进行了照相量测,旨在准确有效描述 NiTi 合金(SE)裂纹尖端的应力、应变场和裂纹的扩展过程,得到相应的力学参量。

此外,余进等(2009)应用数字散斑相关技术,研究了耐热合金试件在 450 °C 环境中缺口

根部的弹塑性变形及其与疲劳循环次数的相关性。张怀清等(2009)用数字散斑相关方法,对有机玻璃梁试件三点弯曲中心挠度进行了一些相关测量研究。

当然,上述相关研究只是数字照相量测在岩土工程及其相关领域室内实验中最常见的几个方面,其实际应用范围可能更大。若从实验室内走向工程现场,其应用范围将进一步扩大,实用价值将得到进一步体现。

1.3.2 工程现场应用研究

在工程现场数字照相量测中,摄影经纬仪、专用量测摄影机等传统近景摄影测量系统虽然精度高,但价格贵,专业性强,操作复杂。由于数码相机经济、操作简单,现在基于数码相机和计算机图像处理技术的工程建(构)筑物变形安全监测技术的研究与开发日渐受到关注,并将得到迅速发展。

目前,工程现场数字照相测量应用研究主要有土坝变形、沉井施工过程监测、矿山地表沉陷测量、隧道塌方监测、隧道围岩收敛、桥梁裂缝及桥梁结构位移、钢结构变形观测、水电工程坝基、水电站边坡断层与弱面以及建筑物变形监测的一些实验研究等。下面按工程类别进行说明。

(1) 水利工程

Henderikus G. B. Allersma 等(1997)对一个易受洪水影响的土坝进行了变形量测实验,土坝边坡长度约 10 m。为量测土坝变形,在土坝边坡上事先布置量测标记点,照相机在距测点 30 m 以外进行拍照。实验过程中,每 3 s 在计算机硬盘上存储一幅图像,利用图像相减算法处理,可以实时显示 5 mm 位移变形。Henderikus G. B. Allersma 等发现土坝破坏从表面开始,与传统的始于深部剪切带的认识有所不同,说明数字照相量测技术可以给岩土工程研究与实践提供新的知识。

中国地震局地壳研究所研制的以 CCD 为核心部件的光电型观测仪器(王建军,2004),用在跨断层形变的自动化观测,以实现地震前兆、地质灾害监测及断层现今活动进行监测,及时掌握它们对重大工程安全的影响。王建军利用这一系统在小湾水电站、湖南东江溪水电站和五强水电站的断层监测中进行了一些应用研究。河海大学研发了基于普通数码相机的 DTM 数据快速采集系统(杨彪,2003),可应用于建设项目水土保持监测中,利用该系统可以监测弃土弃渣体积、坡面侵蚀量等指标。监测方法是先对普通数码相机进行检校,得到相机参数,然后用相机对开挖面、弃土弃渣体进行拍照,在计算机上依次进行照片处理、像对定向、DTM 采集、等高线生成、三维透视图生成、计算土石方量、成果输出等。

(2) 地下工程

变形状况是地下围岩整体力学性态变化和稳定状态最直接和最可靠的反映,因而,在隧道及地下工程安全监测中始终是一项必测内容。而传统隧道位移观测方法常采用机械式收敛计量测,虽能取得较高的量测精度,但测点较少,不能反映整个隧道监测断面的位移情况,并且与施工相互干扰。于是,秋本圭一等(2001)基于数字照相量测技术研究开发了精密变形量测法,并在日本某一铁路隧道的内空形状量测中进行了现场实验。其基本原理是对同一个观测点从不同方向拍摄多幅照片,然后,根据实际量测点、照相机镜头中心和图像上测点共线条件建立观测方程式,另外,考虑照相机的位置和旋转角度以及照相机本身的校正参数,建立联立方程式,再利用最小二乘法求解。实验证明,照相量测技术可以应用于地下工

程结构的现场变形量测。在隧道衬砌裂缝照相检测方面,日本山形設計株式会社开发了 CrackDraw21 系统,在工程现场进行了一些应用。

深基坑作为地下工程一种常见形式,它的开挖势必会对与之相邻的建筑物、地下管网、地面设施等造成影响,因此,对支护结构进行变形监测必不可少。王国辉等(2001)利用普通相机,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),开发了深基坑支护结构位移近景摄影测量技术,三维位移监测误差达到了 $\pm 3\text{ mm}$,该技术曾先后在石家庄两基坑(局部)支护结构的位移监测中进行过应用,测出的各期三维位移与实测的垂直位移相吻合。

(3) 矿山工程

地表塌陷是矿山工程中一个重要的环境问题,进行安全监测十分必要。寇新建等(2001)对铜陵市的狮子山铜矿大型塌陷区进行了现场摄影观测,塌陷区内不仅地形复杂,而且正处于岩体移动活跃期,采用常规大地测量方法难以测量这些危险区域内的形状和体积。实际观测中,在塌陷区外围共布设控制点 17 个,用 P31 摄影仪摄像 108 张,将相片数字化处理后,量测及解算在微机上进行。盛业华等(2003)利用非量测照相机+CCD 数码后背,对矿山地表塌陷区进行了摄影观测,实际应用中,在塌陷区周边布置 7 个红白块相间的标志牌,作为控制基准点,用以解算像点二维坐标与地面点三维坐标的解析关系式,方形标志牌长宽约为 $0.5\sim 1.0\text{ m}$,控制点坐标由全站仪测定,量测结果使用 ArcView GIS 软件进行处理分析。

(4) 桥梁工程

裂缝是桥梁工程结构中最常见的安全隐患之一,当前裂缝监视通常采用电测法,即在梁的可能开裂区段上连续布置相当数量的应变计,在测试过程中,某处应变计的示值跳跃式增长,这就表示梁体混凝土在该处发生开裂,与此同时,相邻应变计示值往往会下降。测量全裂缝的长度采用普通米尺,测量裂缝的宽度则用刻度放大镜。由于电测法是点测量,在观测裂缝及附近区域的变形时会遇到困难,而刻度放大镜在变形极微小时也难以满足精度要求。数字照相量测方法的出现有望产生新的量测途径,例如,王静等(2003)利用 DSCM 在桥梁裂缝变形监测中进行了一些应用研究,实验地点取自位于天津塘沽的某桥靠近桥台的连续梁底部,数码相机的视场范围为 $102\text{ mm}\times 82\text{ mm}$,图像比例的标定结果为 0.08 mm/pixel 。

(5) 建筑工程

如何进行测点的三维坐标计算是建筑结构变形观测中的关键点。直接线性变换(DLT)解法是建立观测点像方空间坐标和同名点物方空间坐标之间直接线性关系的算法,这方面的研究有很多,如于承新等(2002)在钢结构变形实验中使用数码相机进行监测,测量数据利用 DLT 法处理,有效地减弱了数码相机内、外方位元素的不稳定以及外界环境条件的影响,分析精度达到 2% 。张建霞等(2004)基于非量测数字相机的近景摄影测量方法,通过 DLT 解算观测点的空间三维坐标,并结合应用于建筑物变形观测的实例进行了分析。赵卿等(2006)通过使用普通数码相机,并应用二维 DLT 进行了建筑物变形监测的实验研究,结果表明,使用普通数码相机代替常规测量方法能够满足建筑结构变形监测三等精度要求。

(6) 道路工程

数字照相量测在道路工程中的应用主要体现在路面裂缝检测中。目前,检测裂缝宽度