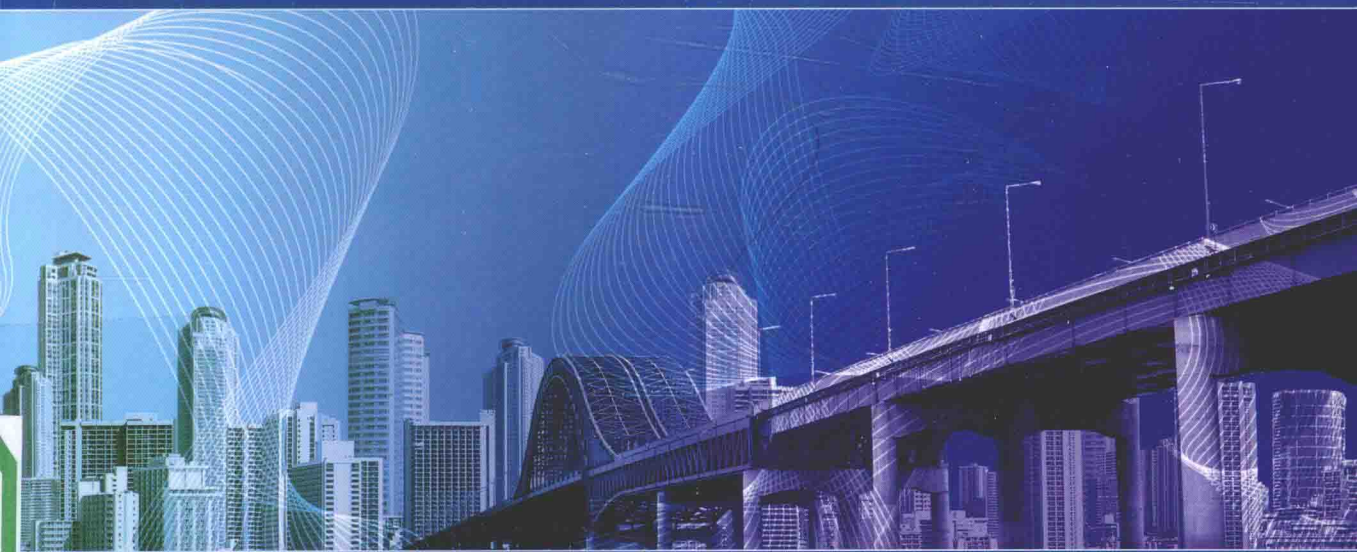


变形监测技术与 工程应用

Deformation Monitoring Technology and
Engineering Application

邱冬炜 丁克良 黄鹤 陈秀忠 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

TU196

TU196/1

2016

变形监测技术与 工程应用

**Deformation Monitoring Technology and
Engineering Application**

邱冬炜 丁克良 黄鹤 陈秀忠 编著

北方工业大学图书馆



C00468708



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

变形监测技术与工程应用/邱冬炜等编著. —武汉: 武汉大学出版社,
2016. 5

ISBN 978-7-307-17807-6

I. 变… II. 邱… III. 建筑工程—变形观测 IV. TU196

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 087628 号

责任编辑:胡 艳 责任校对:李孟潇 版式设计:马 佳

出版发行: **武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:湖北省荆州市今印印务有限公司

开本: 787 × 1092 1/16 印张:12 字数:301 千字 插页:1

版次:2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-17897-6 定价:28.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

城市是我国经济、政治、文化、社会等方面活动的中心，是各类要素资源和经济社会活动最集中的地方。我国经历了世界历史上规模最大、速度最快的城镇化进程，城市发展波澜壮阔，取得了举世瞩目的成就。城市发展带动了整个经济社会发展，城市建设成为现代化建设的重要引擎。在城市建设工程的整个生命周期内，变形监测是验证和调整设计、分析和指导施工、评价和监控运营的重要技术环节。变形监测技术是保证城市建设工程施工与运营安全、全面反馈与监控设计和施工质量的一项关键技术手段。

变形监测技术是工程测量学的重要研究内容之一。伴随着测绘科学与技术的发展，变形监测技术已逐渐发展成为以精密定位技术、空间信息技术、电子技术和动态测控技术为主要特征的多种测量技术的综合集成，应用领域极其广泛。

本书结合变形监测技术的最新发展和工程应用实践，系统阐述了城市建设工程领域变形监测技术的理论和技术体系，由北京建筑大学、北京交通大学、铁道第三勘察设计院集团有限公司、北京城建勘测设计研究院有限责任公司、中国科学院高能物理研究所等科研院所的学者、教师和行业专家共同撰写，由北京建筑大学朱光教授主审。本书的作者如下：

北京建筑大学 邱冬炜、丁克良、黄鹤、陈秀忠

北京交通大学 杨松林、冯海涛

铁道第三勘察设计院集团有限公司 张冠军、王兵海

北京城建勘测设计研究院有限责任公司 王思锴

中国科学院高能物理研究所 董岚、李涛

本书由北京建筑大学学术著作出版基金、住房和城乡建设部科学技术项目（No. 2015-K8-050）、北京建筑大学科学研究基金项目（No. 00331614027）资助。

在本书的编写过程中引用和借鉴了大量相关书籍和文章，在此向原作者致谢。另外，特向曾经参与和支持过著作写作和项目研究工作的有关专家和工程技术人员表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不当之处，恳请同行和读者批评指正。

目 录

第1章 概述	1
1.1 变形监测的概念	1
1.1.1 变形监测对象与内容	2
1.1.2 变形监测常用术语	3
1.2 变形监测的作用和应用	4
1.2.1 变形监测的作用	5
1.2.2 变形监测的应用	5
1.3 变形监测技术的发展	6
第2章 技术与方法	8
2.1 概述	8
2.2 沉降监测技术	8
2.2.1 精密水准测量	9
2.2.2 精密三角高程测量	9
2.2.3 液体静力水准测量	11
2.2.4 重力场变化监测技术	14
2.3 水平位移监测技术	17
2.3.1 基准线法	17
2.3.2 精密导线法	20
2.3.3 交会法	26
2.3.4 倾斜监测	26
2.4 传感器监测技术	28
2.4.1 光纤传感器	29
2.4.2 光纤传感原理与应用	30
2.4.3 位移计	33
2.4.4 测斜仪	34
2.4.5 孔隙水压计	34
2.4.6 土压力计	36
2.4.7 收敛计	36
2.5 D-InSAR 监测技术	38
2.5.1 D-InSAR 测量原理	39
2.5.2 D-InSAR 监测技术优势及发展	40
2.5.3 地基 InSAR 在高速铁路桥梁监测的应用	42

2.6	地面三维激光扫描监测技术	44
2.6.1	地面三维激光扫描测量原理	45
2.6.2	变形监测中的应用	48
2.7	GNSS 监测技术	54
2.7.1	GNSS 变形监测方法	54
2.7.2	GNSS 技术在变形监测中的应用	59
第3章	监测数据处理	65
3.1	变形监测基准网数据处理	65
3.1.1	秩亏自由网平差基准与求解	65
3.1.2	拟稳平差	67
3.1.3	经典自由网平差	67
3.1.4	GNSS 监测网分析案例	68
3.1.5	控制点稳定性分析方法	68
3.2	线性回归模型	71
3.2.1	一元线性回归	71
3.2.2	多元线性回归分析	72
3.2.3	回归方程的显著性检验	73
3.3	时间序列分析模型	75
3.3.1	时间序列基本概念	75
3.3.2	时间序列的随机线性模型	76
3.3.3	模型参数最小二乘估计	78
3.3.4	ARMA 预测	80
第4章	变形监测项目管理	82
4.1	项目合同	82
4.1.1	变形监测项目的合同订立	82
4.1.2	成本预算	84
4.2	项目技术设计与组织	85
4.2.1	变形监测项目技术设计	85
4.2.2	变形监测项目组织	88
4.3	成果质量检查验收	88
4.3.1	检查验收的基本概念	88
4.3.2	检查验收的基本要求及工作流程	89
4.3.3	变形监测质量元素及评分方法	91
4.4	项目技术总结	93
4.4.1	变形监测技术总结的基本规定	93
4.4.2	变形监测技术总结的主要内容	94

第5章 基坑工程监测	96
5.1 监测技术与方法	96
5.1.1 基坑工程监测技术设计	97
5.1.2 监测项目	98
5.1.3 监测点布设	98
5.1.4 监测方法及精度	100
5.1.5 监测频率及监测报警	102
5.1.6 监测数据处理与信息反馈	102
5.2 基坑工程变形监测系统	103
5.3 基坑工程监测案例	105
5.3.1 工程概况	105
5.3.2 基坑工程监测的实施	105
5.3.3 监测成果分析	107
第6章 建筑物工程监测	111
6.1 监测技术与方法	111
6.1.1 建筑物工程监测技术设计	111
6.1.2 沉降监测	113
6.1.3 水平位移监测	117
6.1.4 倾斜监测	117
6.1.5 挠度监测	117
6.1.6 裂缝监测	118
6.1.7 日照监测	118
6.1.8 风振监测	119
6.1.9 监测成果提交	119
6.2 超高层建筑变形监测系统	119
6.3 建筑工程监测案例	121
6.3.1 工程概况	121
6.3.2 监测的实施	121
6.3.3 监测成果分析	122
第7章 公路工程监测	123
7.1 公路工程监测概述	123
7.2 公路工程监测项目及方法	124
7.2.1 软土路基沉降监测	125
7.2.2 路基水平位移监测	128
7.2.3 监测成果提交	128
7.3 路面病害监测	129
7.3.1 路面病害监测概述	129
7.3.2 移动道路测量系统路面监测	130

7.4	高速公路软土地基监测案例	132
7.4.1	工程概况	132
7.4.2	监测的实施	132
7.4.3	监测成果提交	137
第8章	高速铁路工程监测	138
8.1	高速铁路监测网	139
8.1.1	变形监测点的分类与布设	139
8.1.2	变形监测基准网	139
8.2	路基变形监测	141
8.2.1	沉降监测断面和监测点的设置	141
8.2.2	沉降监测技术要求	142
8.3	桥涵工程变形监测	142
8.3.1	沉降监测标设置	142
8.3.2	沉降监测技术与方法	143
8.4	隧道工程变形监测	144
8.4.1	沉降监测点设置	144
8.4.2	沉降监测方法	144
8.4.3	隧道基础沉降监测频次	145
8.5	基于静力水准技术的自动监测	145
8.5.1	静力水准仪安装	146
8.5.2	数据采集仪安装	146
8.5.3	监测周期设置	147
8.6	轨道变形监测	147
8.6.1	轨顶标高监测	147
8.6.2	轨检小车监测	147
8.7	INSAR 技术在高速铁路工程监测中的应用	148
8.7.1	概述	148
8.7.2	InSAR 技术在京沪高速铁路区域监测中的应用	148
第9章	城市轨道交通工程监测	151
9.1	监测技术与方法	152
9.1.1	监测技术设计	152
9.1.2	监测项目及方法	154
9.1.3	监测点布设	155
9.1.4	监测频率及监测预警	157
9.1.5	监测成果提交	158
9.2	地铁隧道工程监测案例	158
9.2.1	工程概况	158
9.2.2	监测的实施	158

第 10 章 粒子加速器监测	162
10.1 粒子加速器简介	162
10.2 粒子加速器的测量工作	164
10.2.1 工程设计阶段	164
10.2.2 工程施工阶段	164
10.2.3 设备安装阶段	164
10.2.4 设备服役阶段	164
10.3 粒子加速器的测量控制网	165
10.3.1 一级网控制点的布设及结构	165
10.3.2 二级网控制点的布设及结构	165
10.4 粒子加速器监测仪器	167
10.4.1 激光跟踪仪	167
10.4.2 关节臂式坐标测量机	171
10.4.3 自动测量系统	171
10.5 粒子加速器监测方法	172
10.5.1 监测方法	172
10.5.2 数据的计算与分析	173
10.6 粒子加速器的设备调整	176
10.6.1 整体拟合调整	176
10.6.2 局部拟合调整	178
附录 变形监测技术规范标准汇总	180
参考文献	182

第1章 概 述

在城市建设工程的全生命周期内，建(构)筑物的空间位置、形态和性态是建设工程的核心内容。此类空间位置、形态和性态的改变统称为变形，变形的性质和大小直接影响建(构)筑物的质量和安全。

变形(deformation)是指物体在外来因素作用下产生的形状、大小或者位置的改变。引起变形的因素主要包括外加力(applied force)和温度(temperature)。外加力常常造成物体产生位移、拉伸、压缩、剪切、弯曲、扭转等变化；温度会造成物体内分子间平均动能的改变，从而引起物体结构的变化。变形是自然界的一种必然现象，伴随着建设工程的始终。如果变形超过一定的限度，则会导致建(构)筑物的损坏，甚至引发危害，给工程建设及人民生命财产造成巨大损失，更有甚者将带来毁灭性的灾难。变形危害现象在城市建设工程中屡见不鲜，例如建筑物的倾覆、道路桥梁的沉陷、工程边坡的倒塌等，如图1-1所示。预防变形危害的方法是在城市建设工程施工和运营期间，对建(构)筑物的变形进行监视观测，从而掌握变形程度、揭示变形原因、总结变形规律、控制变形发展、防止变形危害。



图 1-1 变形危害现象示例

1.1 变形监测的概念

变形监测(deformation monitoring)，又称为变形测量(deformation surveying, deformation measurement)、变形观测(deformation observation)、变形监控量测(deformation monitoring measurement)，是指对物体的变形进行监视与测量。变形监测是一项用各种测量仪器设备对所监测物体在荷载和环境变化作用下产生的变形，进行数据采集、数据计算处理、变形分析与预报的测量工作。

1.1.1 变形监测对象与内容

在城市建设领域内，变形监测的对象有建(构)筑物及其地基、建筑基坑、一定范围内的岩体及土体，以及工程设施，等等。变形监测的对象常简称为监测体或变形体。

变形监测的工作内容就是对监测体的形态、位移、倾斜、挠度、裂缝、振动和相关影响因素(如地下水、温度、风、日照、压力、应力应变等)进行监测，并实施变形分析与变形预报。变形监测的内容，应根据监测体的特性、地基条件和影响因素情况来综合确定。对于不同类型的监测体，其监测的内容和方法具有差异性。

1. 形态监测

形态监测是对建(构)筑物的点、线、面、体的形态变化进行监测。点监测主要对端点、节点等特征点的空间位置进行监测；线由直线和曲线构成，线的监测包括长度、方向、曲率、挠率和空间位置等要素的监测；面的种类可分为几何形、有机形和偶然形三类，面的监测包括空间位置、法向量、大小等要素的监测；体监测主要包括体积、重量、容量、空间位置等要素的监测。

2. 位移监测

位移监测分为沉降监测和水平位移监测两类。监测体的空间位置在高程方向上的变化，称为垂直位移(或竖向位移)，通常简称为沉降。沉降是由竖向荷载作用下产生的竖向移动，包括下沉和上升两种形式，其下沉值或上升值称为沉降量。

监测体在水平面上发生的移动称为水平位移。有时也将非沉降监测直接简称为位移监测。

3. 倾斜监测

监测体的竖向中心线在不同高度的点对其相应底部点的偏移现象，称为倾斜。有时也将倾斜监测称为垂直度监测。

4. 挠度监测

弯曲变形时横截面形状中心沿与轴线垂直方向的线位移，称为挠度。挠度监测是对建筑的基础、上部结构或构件等在弯矩作用下因挠曲引起的垂直于轴线的线位移的监测。挠度与荷载大小、构件截面尺寸以及构件的材料物理性能有关。

5. 裂缝监测

裂缝是监测体在荷载作用下产生的缝隙，是监测体各部分形变不均匀导致的。裂缝监测主要对裂缝的分布位置、走向、长度、宽度、深度及其变化情况实施监测。

6. 振动监测

物体的往复运动，称为振动。振动可分为确定性振动和随机振动两大类。振动监测也称为动态变形监测，是对监测体在动荷载作用下产生的变形进行监测。振动监测主要测定监测体的振幅、相位、位移、速度、加速度等内容。

7. 影响因素监测

影响因素变形主要是指监测体在外界环境作用下产生的变形。影响因素监测通常包括地下水、温度、风、日照、应力应变的监测。影响因素监测一般采用传感器监测的方法。

地下水监测主要测定地下水的水位、孔隙压力、渗透性等。温度监测主要测定监测体的温度和一定范围内的大气温度。

对高层建筑物、大跨径桥梁在强风作用下产生的变形进行监测，称为风振监测。风振

监测主要测定监测体所受的风力、风速、风向，以及产生的位移、振幅等。

监测体受阳光照射受热不均而产生的变形，称为日照变形。日照变形监测主要测定太阳光照强度、监测体向阳面与背阳面的温差、监测体的形态变化等。

应力应变是应力与应变的统称。物体由于外因(受力、湿度、温度场变化等)而变形时，在物体内部各部分之间产生相互作用的内力，以抵抗这种外因的作用，并试图使物体从变形后的位置恢复到变形前的位置。在所监测的截面上单位面积的内力，称为应力。同截面垂直的应力称为正应力或法向应力，同截面相切的应力称为剪应力或切应力。应变是指在外力和非均匀温度场等因素作用下物体局部的相对变形。应力应变监测主要包括混凝土应力应变监测、桩基高(低)应变监测、锚杆(索)应力监测、钢筋应力监测、钢板应力监测、轴力监测等。

1.1.2 变形监测常用术语

变形监测对象和内容很多，涉及监测体的形状特征(形态)、性质状态(性态)、结构类型、构造特点、所用材料、荷载状况，以及外部环境等，因此变形监测已经成为以测绘学为核心，地球物理学、地质学、数学、力学、材料学、信息学、土木工程学等多学科、多专业的交叉科学技术。变形监测技术人员需要具备多学科的专业知识，才能完成变形监测的技术设计、测量监控、数据处理、变形分析、质量评定、安全评价等主要技术工作。变形监测工作常用名词术语总结如下：

1. 变形允许值(allowable deformation value)

建(构)筑物能承受而不至于产生损害或影响正常使用所允许的变形值。

2. 变形速率(rate of deformation)

单位时间的变形量。

3. 监测周期(time interval of monitoring)

前后两次监测的时间间隔。

4. 监测频次(times of monitoring)

单位时间内的监测次数。

5. 监测报警值(alarming value for monitoring)

为保证工程结构质量和安全，以及周边环境安全，对监测对象可能出现的异常和危险所设定的警戒值。

6. 建筑变形(deformation of building and structure)

建筑的地基、基础、上部结构及其场地受荷载和环境影响作用而产生的形状或位置变化现象。

7. 地基(foundation soils, subgrade)

支承基础的土体或岩体。

8. 基础(foundation)

将结构所承受的各种作用力传递到地基上的结构组成部分。

9. 基坑(foundation pit)

为进行建(构)筑物基础、地下建(构)筑物施工所开挖形成的地面以下空间。

10. 沉降差(differential settlement)

同一建(构)筑物的不同部分在同一时间段的沉降量差值，也称为差异沉降。

11. 基准点(benchmark, reference point)

为进行变形监测而布设的稳定的、需长期保存的测量控制点。

12. 工作基点(working reference point)

为直接观测监测点而在现场布设的相对稳定的测量控制点。

13. 监测点(deformation monitoring point)

直接或间接布设在监测体敏感位置上能反映其变形特征的测量点, 又称为变形观测点、变形点。

14. 结构监测(structural monitoring)

频繁、连续观察或量测结构的状态。

15. 监测系统(monitors system)

由监测设备组成, 实现一定监测功能的软件及硬件集成。

16. 传感器(transducer, sensor)

能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置, 通常由敏感元件和转换元件组成。

17. 传感器频响范围(sensor frequency range)

传感器在此频率范围内, 输入信号频率的变化不会引起其灵敏度和相位发生超出限值的变化。

18. 结构分析模型修正(structural analyzing model updating)

通过识别或修正分析模型中的参数, 使模型计算分析结果与实际量测值尽可能接近的过程。

19. 近接施工(approaching construction, crossing construction)

新建工程临近或穿越既有建(构)筑物结构的施工过程。

20. 基坑支护结构(bracing and retaining structure of foundation pit)

为保证基坑开挖和地下结构的施工安全以及保护基坑周边环境, 对基坑侧壁进行临时支挡、加固的一种结构体系。包括围护墙和支撑(或拉锚)体系。

21. 建筑边坡(building slope)

在建筑场地及其周边, 由于建设工程开挖或填筑施工所形成的人工边坡和对建(构)筑物安全或稳定有不利影响的自然斜坡。

22. 锚杆(anchor)

将拉力传至稳定岩土层的构件(或系统)。当采用钢绞线或高强钢丝束并施加一定的预拉应力时, 称为锚索。

23. 建筑工程质量(quality of building engineering)

反映建筑工程满足相关规定或合同约定的要求, 包括其在安全、使用功能及耐久性、环境保护等方面所有明显和隐含能力的特定总和。

1.2 变形监测的作用和应用

城市建设工程的全生命周期一般可分为设计、施工、运营三个阶段。变形监测是验证和调整设计、分析和指导施工、评价和监控运营的重要技术环节。变形监测技术是保证城市建设工程施工与运营安全, 全面反馈与监控设计和施工质量的一项关键技术手段。

1.2.1 变形监测的作用

变形监测的作用主要体现在安全、质量、科学三个方面。

1. 安全保障

建设工程的施工安全和运营安全是建设工程的第一要务。由于城市建设工程受地质条件、施工工艺、建设材料、外界环境变化等众多因素的复杂影响，建(构)筑物在施工和运营期间的形态和性态持续变化，无法准确获知或评价。变形监测能够准确发现建(构)筑物的隐患和风险，分析和评价安全状态，以便及时采取措施，防止危害的发生。

2. 质量监控

工程质量综合反映建(构)筑物的使用功能和耐久性能，是建设工程成败的关键。在设计 and 施工期间，由于存在设计和施工人员在经验、技术水平、能力等方面的局限性，施工环境的不确定性和难以预见性，以及施工技术和材料的制约性，工程质量难免存在缺陷。变形监测可以获得监测体的空间状态和时间特性，并据此验证和调整设计参数，优化和改进施工技术，从而指导施工，确保工程质量。

3. 科学研究

通过变形监测积累的数据资料，能够总结建设工程的变形规律和变形特点，为工程设计理论、变形分析理论、工程施工理论提供科学服务，为相关领域的科学研究提供技术资料。

1.2.2 变形监测的应用

变形监测已广泛应用于各种城市建设工程，如在建筑物施工过程的沉降监测，基坑工程施工过程中的围护结构位移、倾斜和应力监测，高速铁路的轨道板、道床结构变形监测，地铁区间隧道施工监测和穿越工程既有地铁变形监测，用测量机器人、地面摄影测量、地面激光雷达对超高层建筑的变形监测，等等，如图 1-2 所示。变形监测的应用范围越来越广，应用深度也逐级深入。在重大城市建设工程中，变形监测已成为强制性开展的工作任务。

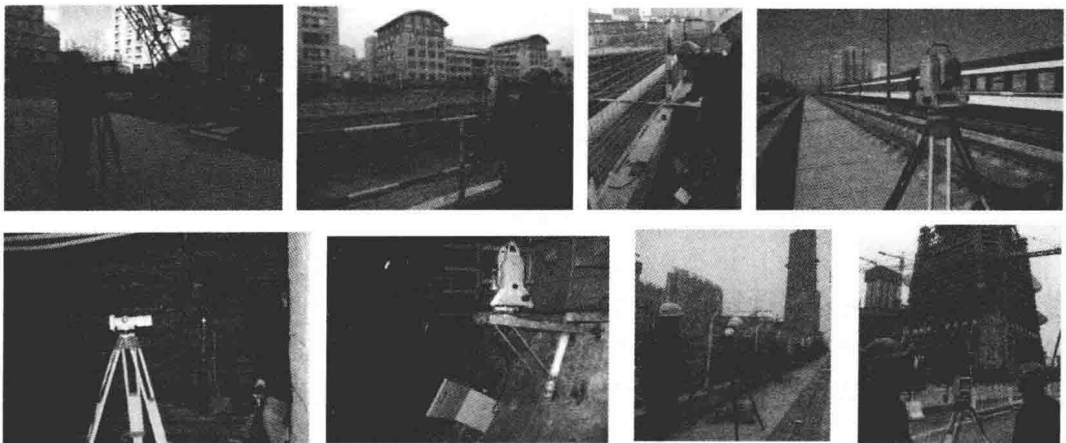


图 1-2 城市建设工程变形监测应用

1.3 变形监测技术的发展

变形监测技术是 20 世纪 50 年代发展起来的新兴学科方向，最早应用于大坝和地下工程的安全监测。由于建设工程直接关系到人的生命和财产安全，国际社会对建设工程的变形问题日益关注，推动了变形监测技术的快速发展。国际大地测量协会(IAG)、国际测量师联合会(FIG)、国际矿山测量协会(ISM)、国际岩石力学协会(ISRM)、国际大坝委员会(ICOLD)等诸多国际学术组织对变形监测技术的研究给予了高度关注。国际测量师联合会第十三届工作会议上提出：如果变形观测是为了使变形值不超过某一允许的数值，以确保建筑物的安全，则其观测的误差应小于允许变形值的 $1/10 \sim 1/20$ ；如果是为了研究变形的过程，则其误差应比这个数值小得多，甚至应采用目前测量手段和仪器所能达到的最高精度。

我国从 20 世纪 80 年代初逐渐开展变形监测技术的研究与应用。陈永奇教授在 1988 年出版的著作《变形观测数据处理》中系统地论述了变形监测技术的理论和数据处理方法；吴子安教授于 1989 年出版了《工程建筑物变形观测数据处理》；1993 年发布的 GB 50026—93《工程测量规范》中首次加入了变形测量的内容。时至今日，涉及变形监测的规范标准达数十个。

在城市建设领域内，变形监测的数据获取方法和技术手段发展迅速，依次经历光学机械监测、数字自动监测和微变信息监测三个阶段。(1)20 世纪 90 年代前，是以光学水准仪、经纬仪、螺旋测微器、正倒垂线、引张线、土压力盒等光学机械式测绘仪器为代表的光学机械监测阶段；(2)20 世纪 90 年代，进入了以全站仪、GNSS、近景摄影测量、振弦式传感器等技术为代表的数字自动监测阶段；(3)21 世纪以来，发展成为以测量机器人、激光跟踪仪、三维激光扫描、地基合成孔径雷达(GbInSAR)、微电子机械系统(MEMS)、电式磁式和光纤光栅式传感器等技术为基础，以互联网、云计算、大数据、专家系统等信息技术为代表的微变信息监测阶段。变形监测的技术手段向精密化、动态化、智能化、网络化的方向纵深发展。

变形分析是变形监测中最为关键的环节之一。大量的监测数据如果不进行整理、分析、解释和反馈，就无法实现对工程的监控和变形危害的报警。变形分析是在对监测数据进行粗差探测与消除、数据格式化等数据处理后，提取监测体在变形过程中的变形量、变形幅度、变形速度、变形加速度等信息，然后结合监测体结构的特点，研究荷载和变形之间的关系，从而建立变形分析模型，确定变形规律，实现对监测体的安全性、稳定性的科学判断，并对变形的发展做出预测。

变形分析工作主要集中在监测网的性态分析、变形特征分析、变形预测等方面。监测网的性态分析主要包括进行基准点的稳定性分析，监测点的状态变化分析，监测网的精度、灵敏度、可靠性的分析和监测网优化。变形特征分析主要包括进行监测数据误差处理和精度评定、数据质量检测和评估、变形矢量的确定等，最终实现用适合的数学模型来表达变形特征。变形预测主要包括进行变形模型的算法研究、变形趋势预测以及安全性评估等。

国外对变形分析的研究起步很早。Fanelli 和 Rocha(1955)应用回归分析法统计了大坝的测量数据，研究了大坝变形和环境因素的数学分析模型，对大坝水平位移进行拟合预

报。Fanelli(1977)提出监测数据和有限元分析计算值相联系的数学模型。S. Sakurai(1979)提出用监测数据反算岩土介质物理力学参数,并开发了地下隧道的监测数据反馈分析系统,可以评估隧道开挖的安全稳定状态。随着系统科学、计算数学、测量学、信息学等技术的发展,时序分析模型、灰色系统模型、神经网络模型、频谱分析模型、智能进化算法模型等逐渐应用于变形分析中,美国、意大利、法国和奥地利等国家在变形分析的研究和变形分析系统的研究与应用处于国际领先水平。

我国对变形分析的研究最早起源于对大坝安全监测的资料分析工作。最初以定性分析为主,通过对实测过程曲线和统计特征值进行简单分析,以评估大坝的运行状况。陈久宇(1980,1986)提出用非线性参数估计法分析混凝土坝原体的时效变形,并建立最优回归方程对刘家峡主坝廊道水平位移观测资料进行分析和解释。近年来,系统论、控制论、信息论等系统科学的理论逐渐引入到变形分析的研究中,研究人员和工程技术人员提出了许多变形监测数据分析和预报模型,几种应用较多的变形分析模型有:曲线拟合分析法、多元线性回归法、灰色系统分析法、时间序列分析法、支持向量机法等。

总而言之,伴随着测绘理论、测绘方法和测绘仪器的发展,变形监测技术已逐渐发展成为以精密定位技术、空间信息技术、电子技术和动态测控技术为主要特征的多种测量技术的综合集成。变形监测技术的发展非常迅速,日渐成熟,现代变形监测技术正逐步从光学机械化、数字自动化和微变信息化发展成为动态高精度、全景多层次、智能多技术的全方位立体监测体系,应用领域极其广泛。

☞ 思考题

1. 变形监测技术在城市建设中的作用和意义是什么?
2. 变形、变形监测的概念分别是什么?
3. 变形监测的主要内容有哪些?
4. 什么是基准点、工作基点和监测点?
5. 当前,城市建设工程变形监测的技术手段有哪些?
6. 简述变形分析的工作内容和主要作用。

第2章 技术与方法

2.1 概述

变形监测是借助测量仪器设备,利用测量技术方法,对监测对象的空间位置、形态及性态进行观测、计算、分析和变形预报,以保证城市建设工程的施工与运营安全。

变形监测技术与方法大致分为以下四类:

(1)常规大地测量技术。常规大地测量技术是指通过测角、量边、水准测量等技术,来测定建(构)筑物的位置和形态变形。常规大地测量技术测量精度高、应用灵活,适用于不同变形体和不同的工作环境,但不容易进行连续动态测量。

(2)传感器测量技术。传感器测量技术是基于几何或物理方法,利用传感器对监测体的形态或性态进行监测。常见的技术方法有:液体静力水准测量、准直测量、光纤光栅和加速度计传感器测量等。传感器测量技术不仅可以监测位移、沉降、倾斜、裂缝、挠曲等,还可以进行应力应变监测。这些方法可实现连续自动监测和遥测,且相对精度高,但测程不大,便于提供局部变形信息,适用于特殊环境。

(3)空间测量技术。用于变形监测的空间测量技术有全球导航卫星系统(GNSS)测量技术和合成孔径干涉雷达(InSAR)测量技术。空间测量技术可以实现大范围的监测工作,适用于动态监测、滑坡监测、城市沉降监测、大范围地壳形变监测等。

(4)影像测量技术。这类技术用于变形监测的显著特点是不需接触被监测物体,常见的技术方法有近景摄影测量技术和三维激光扫描技术。近景摄影测量的信息量大、外业工作量小、观测时间短、可获取快速变形过程,便于测定工程建筑物整体变形。激光扫描技术是利用扫描仪获取监测体的“点云”数据,“点云”数据包含空间信息、颜色信息和反射率信息,该方法获取的数据量大、信息量大。

建(构)筑物的变形监测重点是沉降监测和水平位移监测。通过水平位移和沉降监测,也可以间接得到建(构)筑物的倾斜和挠曲等变形。变形监测技术和方法的选取,应以技术上可实现、精度满足工程要求为原则。随着测绘新技术的相继出现、监测新设备的不断问世、监测对象和要求的多样化,要求监测技术人员不断学习新技术,不断创新技术应用。当采用新技术新方法时,应进行精度分析和实验验证。

2.2 沉降监测技术

沉降监测是测定物体在垂直方向上的位移,即是通过重复测定埋设在变形体上的监测点(观测点)相对于基准点的高差变化量,经过数据处理和变形分析,得到沉降量及变化趋势的。沉降监测常采用的方法有:精密水准测量、精密三角高程测量、液体静力水准测