

变形监测技术 及应用

伊晓东 李保平 主编



黄河水利出版社

变形监测技术

及应用

——

变形监测技术及应用

伊晓东 李保平 主编

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书介绍了当今变形观测与分析技术所采用的基本理论、方法和使用的仪器设备,同时结合不同工程对象,具体分析了相关变形观测实践的方法和手段。全书共分 12 章,内容由浅入深,由普遍到具体,通俗易懂,翔实全面,结合丰富的图例和变形实例,涵盖了变形观测方法在工程安全监测中的具体应用。

本书可作为全国高校测绘专业、非测绘专业学生教材使用,也可供相关专业的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

变形监测技术及应用/伊晓东等主编. — 郑州:黄河水利出版社,2007.2

ISBN 978-7-80734-182-6

I. 变… II. 伊… III. 变形观测—高等学校—教材
IV. P227

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 025644 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940 传真:0371-66022620

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:15.75

字数:364 千字

印数:1—4 100

版次:2007 年 2 月第 1 版

印次:2007 年 2 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-80734-182-6/P·66

定价:25.00 元

前 言

变形监测是多种测量技术的综合,是监测评估建筑物安全的重要手段之一。随着测量理论和测量设备的进步,变形监测应用的领域也更加广泛。近些年,由于建筑安全保障的不规范,地表沉陷,桥梁、房屋倒塌事故时有发生,为此国际测量师联合会(FIG)专门设定了一个专业委员进行变形理论和实践的研究,而我国相关行业也颁布了各种工程安全监测的措施或规则,如建筑工程行业执行的标准《建筑变形测量规程》(JGJ/T8—97)就是国家推荐的行业标准,适用于工业与民用建筑的地基基础、上部结构及其场地的各种沉降测量和位移测量。

现代“3S”(GPS、RS、GIS)技术的发展给变形监测工作带来了更灵活、更全面的应用,尤其是GPS技术、GIS地理信息系统和现代计算机通信技术为变形监测从数据采集、管理、分析的集成和自动化提供了强大的支持。

本书对变形监测传统方法与现代方法的结合、变形监测设备的特点和应用、测量误差估算,以及成果的整理与分析等方面都尽可能多地作一介绍,力求做到理论与实践并重。在编写中,集成了变形监测从系统设计到实施以及实践与理论结合分析的需要,并结合变形监测对象分章列举了若干相应的观测实例和分析方法。

全书共分12章,其中第一章概述了变形监测的内容、目的与意义,以及变形监测理论和变形监测技术的发展。第二章介绍了变形监测技术及实施原则,包括静态变形和动态变形监测的主要方法、变形监测方案的设计等。第三章阐述了变形监测资料检核与数据筛选整理、变形数据管理等内容。第四、第五章重点介绍了基于经典平差、拟稳平差和自由网平差3种平差模式下的变形监测网数据处理的方法,以及借助平差成果和统计方法对变形监测网的稳定性分析方法。第六章介绍了在变形分析及预报中所采用的各种数学分析手段,内容不仅包括空域变形分析,还简述了频域下的变形分析手段。第七章至第十二章主要是结合具体监测分析的变形体对象,进行更深入具体的分析,如第七章是针对一般工业民用建筑物,介绍了包括建筑物垂直、水平、倾斜变形测量和挠度与裂缝监测时常用的方法等;第八章则结合基坑工程施工,介绍了相关变形监测处理手段;第九章叙述了边坡工程变形监测的特点、内容和技术手段;第十章则介绍了桥梁从施工到运营管理阶段变形观测的主要内容和方法;第十一章从几种不同坝型特点出发,叙述了大坝安全监测的理论研究和实际工作方法;第十二章说明了地下工程施工监测开展的方法。

在本书编写过程中,参阅了大量文献,主要文献在本书后面均有列出。

本书第一、第二、第六、第十、第十一章由大连理工大学伊晓东编写,第七、第八、第九章由平顶山工学院李保平编写,第三、第四、第五章由平顶山工学院朱宝训编写,第十二章由平顶山工学院毛政利编写,另外,第六章第七节由大连理工大学伊廷华编写,全书由伊晓东统稿和策划。

本书编写的内容由浅入深,具有广泛的适用性,不仅面向测量专业,也适用于非测量专业同学选用。由于时间仓促及编者水平有限,错误和不足之处在所难免,望读者给予指正。

编 者

2006年11月

目 录

前 言

第一章 变形监测概述	(1)
第一节 变形监测的对象、内容、目的与意义.....	(1)
第二节 变形监测技术发展概述	(4)
第三节 基于数理知识下的变形监测与分析理论.....	(6)
习 题	(10)
第二章 变形监测技术及实施原则	(11)
第一节 静态变形监测方法	(11)
第二节 动态变形监测方法	(21)
第三节 变形监测点方案设计	(25)
第四节 变形监测网设计	(31)
习 题	(36)
第三章 变形监测资料的检核与成果整理	(37)
第一节 监测资料检核的意义与方法	(37)
第二节 用一元线性回归进行资料的检核	(39)
第三节 工作基点位移对变形值的影响	(44)
第四节 变形监测资料整理、成果表达和解释.....	(45)
第五节 监测资料管理	(51)
习 题	(56)
第四章 变形监测网数据处理的方法	(57)
第一节 基于经典平差的变形网数据处理	(57)
第二节 基于秩亏自由网平差的变形网数据处理	(63)
第三节 基于拟稳平差的变形网数据处理	(70)
习 题	(72)
第五章 变形监测网的稳定性分析	(73)
第一节 绝对网和相对网	(73)
第二节 监测网的参考系	(74)
第三节 平均间隙法	(79)
第四节 线性假设法	(83)
第五节 相对误差椭圆法	(86)
第六节 变形测量问题的综合处理	(87)
第七节 变形检验的灵敏性	(89)
习 题	(91)

第六章 变形分析及预报	(92)
第一节 线性回归分析法	(92)
第二节 曲线拟合	(98)
第三节 模糊数学用于变形分析	(99)
第四节 灰色系统用于变形分析	(102)
第五节 变形分析中的时域法模型	(104)
第六节 变形分析中的频域分析方法	(106)
第七节 变形分析中的时频联合方法	(107)
第八节 变形分析中的确定性模型	(111)
习 题	(115)
第七章 工程建(构)筑物的变形监测	(116)
第一节 概 述	(116)
第二节 垂直变形监测仪器	(116)
第三节 高程控制网的建立及沉降监测	(118)
第四节 变形监测平面控制网	(126)
第五节 水平位移监测设备	(127)
第六节 建筑物水平位移监测方法	(131)
第七节 倾斜观测	(138)
第八节 建筑物挠度观测与裂缝观测	(142)
第九节 日照和风振变形监测	(147)
习 题	(149)
第八章 基坑工程施工监测	(150)
第一节 概 述	(150)
第二节 监测仪器和方法	(151)
第三节 监测方案设计	(158)
第四节 监测报表与监测报告	(167)
习 题	(169)
第九章 边坡工程变形监测	(170)
第一节 概 述	(170)
第二节 边坡工程监测的目的	(171)
第三节 边坡工程监测的特点、内容和技术手段	(171)
第四节 监测方案设计	(179)
第五节 监测工作实施和监测资料汇总及分析	(182)
第六节 露天开采边坡监测	(187)
习 题	(193)
第十章 桥梁变形观测	(194)
第一节 概 述	(194)
第二节 桥梁静态变形监测	(196)

第三节	桥梁运营期间健康诊断监测·····	(199)
第四节	基于 GPS 技术的大跨度斜拉桥动态变形监测·····	(204)
习 题	·····	(207)
第十一章	大坝变形监测 ·····	(209)
第一节	概 述·····	(209)
第二节	大坝垂直变形监测方案及实施·····	(210)
第三节	大坝平面变形监测及实施·····	(214)
第四节	大坝变形物理分析·····	(219)
第五节	大型船闸变形监测·····	(221)
习 题	·····	(223)
第十二章	岩体地下工程施工监测 ·····	(224)
第一节	地下工程信息化施工·····	(224)
第二节	地下工程监测·····	(225)
第三节	现场测量方案·····	(228)
第四节	测量数据的分析处理·····	(236)
第五节	盾构法和顶管施工监测·····	(237)
习 题	·····	(241)
参考文献	·····	(242)

第一章 变形监测概述

变形是自然界普遍存在的现象,各种荷载作用于变形体,使其形状、大小及位置在时间域或空间域发生变化均为变形。变形监测则是对设置在变形体上的观测点进行周期性的重复观测,求得观测点各周期相对于首期的点位或高程的变化量。

变形体的变形在一定范围内被认为是允许的,如果超出允许值,则可能引发灾害。自然界的变形危害现象很普遍,如地震、滑坡、岩崩、地表沉陷、火山爆发、溃坝、桥梁与建筑物的倒塌等。变形监测的目的就是监视变形体的安全,研究其变形过程,提供和积累可靠的资料。

第一节 变形监测的对象、内容、目的与意义

一、变形监测的对象

变形体的范畴可以大到整个地球,小到一个工程建(构)筑物的块体,它包括自然和人工的建(构)筑物。根据变形体的研究范围,可将变形监测的研究对象划分为如下3类。

全球性变形研究:如监测全球板块运动、地极运动、地球自转速率变化、地潮等。

区域性变形研究:如监测地壳形变、城市地面沉降等。

工程和局部变形研究:如监测工程建筑物的三维变形、滑坡体的滑动、地下开采所引起的地表移动和下沉等。

在精密工程测量中,最具有代表性的变形体有大坝、桥梁、矿区、高层(耸)建筑物、防护堤、边坡、隧道、地铁等。它们产生变形的原因一般有以下几点:

(1)自然条件及变化,包括建筑物地基的工程地质、水文地质、土壤的物理性质、大气温度变化影响。

(2)与建筑物本身相联系的原因,即建筑物本身的荷重、建筑物结构型式及动荷载(如风力、震动)等。

(3)勘测、设计、施工及运营管理工作做得不合理所造成的建筑结构变形。

科学、准确、及时地分析和预报工程及工程建筑物的变形情况,对工程建筑物的施工和运营管理极为重要,因此工程建筑物是变形监测的主要对象。

二、变形监测的内容

地表及各种工程建(构)筑物,由于地质、力学等原因,往往会产生变形。这种变形究竟有多大,变形的机理是什么,变形有什么规律,变形会不会导致工程灾害?由于工程建(构)筑物都允许有一定的变形而不影响其正常使用和导致灾害,因此要求能准确地估计和观测到各种移动与变形值。变形监测就是要针对这些问题进行研究与测量的一个学科

分支,主要内容包括沉降监测、位移监测、倾斜监测、裂缝监测和挠度监测等。变形监测的内容应根据变形体的性质与地基情况来确定,要求有明确的针对性,既要有重点,又要全面考虑。具体实施内容则由建筑物性质与要求、周围条件及仪器等方面决定。

(一)工业与民用建筑

工业与民用建筑主要包括基础的沉降与建筑物本身的变形观测。就基础而言,主要观测内容是建筑物的均匀沉陷与不均匀沉陷。对于建筑物本身来说,则主要是观测倾斜与裂缝。对于高层和高耸建筑物,还应对其动态变形(主要为振动的幅值、频率和扭转)进行观测。对于工业企业、科学试验设施与军事设施中的各种工艺设备、导轨等,其主要观测内容是水平位移和垂直位移。

(二)水工建筑物

对于土坝,其观测内容主要为水平位移、垂直位移、渗透及裂缝;对于混凝土坝,以混凝土重力坝为例,由于水压力、外界温度变化、坝体自重等因素的作用,其主要观测项目是垂直位移(从而可以求得基础与坝体的转动)、水平位移(从而可以求得坝体的扭曲)及伸缩缝,这些内容统称为外部变形观测。此外,为了了解混凝土坝结构内部的情况,还应对混凝土应力、钢筋应力、温度等进行观测,这些内容统称为内部观测。虽然内部观测一般不由测量人员进行,但在变形监测数据处理时,特别是对变形原因作物理解释时,则必须将内、外部观测的资料结合起来进行分析。

(三)地面沉降

对于建设在江河下游冲积层上的城市,由于工业用水大量开采地下水,从而影响地下土层的结构,导致地面发生沉降。对于地下采矿地区,由于大量的采掘,地表也会发生沉降。这种沉降现象严重的城市、地区,暴雨以后将发生大面积的积水,影响仓库的使用与居民的生活,有时甚至造成地下管线的破坏,危及建筑物的安全。因此,必须定期进行观测,掌握其沉降与回升的规律,以便采取防护措施。对于这些地区,主要应进行地表沉降观测。从大范围讲,通过地面沉降可研究地壳形变,如地震引发的大地变形等。

变形监测理论与方法包括三个方面的内容:变形信息的获取、变形信息的分析与解释及变形预报。其研究成果对预防自然灾害及理解变形机理是极为重要的。

由于变形监测涉及到测量、工程地质、水文、结构力学、地球物理、计算机科学等诸多学科的知识,因此它是一项跨学科的技术,需要测量工作者与其他学科专家的合作研究。

三、变形监测的目的

变形监测就是利用测量仪器及其他专用仪器和方法对变形体的各种变形现象进行监视、观测,并最终确定各种荷载和外力的作用下变形体的形状、大小及位置变化的空间状态和时间特征。因此,变形监测的目的可以描述如下:

(1)变形监测是工程管理运行的安全手段。

(2)通过在施工及运营期对变形体进行观测、分析、研究,可以验证地基与基础的计算方法、工程结构的设计方法,可以对不同地基与工程结构规定合理的允许沉陷与变形数值,为工程建筑物的设计、施工、维护管理和科学研究工作提供相关资料,为建筑结构安全评价提供分析数据。

(3)变形监测是人们通过变形现象获得科学知识、检验理论和假设的必要手段。

四、变形监测的意义

工程建筑物在施工和运营期间,由于受到多种主观和客观因素的影响,会产生变形,变形如果超出了规定的限度,就会影响建筑物的正常使用,严重时危及建筑物的安全,引起坍塌、滑坡、沉陷、倾斜、裂缝等灾难性后果,给社会和人民生活带来巨大的损失。现代工程建设技术的发展,不仅体现在建设的进程和速度,而且表现在建筑物的规模、造形、精密方面,因此对于安全评估的变形监测工作提出了更高的要求。

尽管工程建筑物在设计时采用了一定的安全系数,使其能安全承受所考虑的多种外荷载影响,但是由于设计或勘察时不可能对工程的地质条件、工作环境及承受能力做出完全准确的估计,施工质量也不可能完美无缺,因此国内外仍有一些工程出现事故。以大坝为例,法国 67 m 高的马尔巴塞(Malpasset)拱坝 1959 年垮坝;意大利 262 m 高的瓦依昂(Vajont)拱坝 1963 年因库岸大滑坡导致涌浪翻坝且水库淤满失效;美国 93 m 高的提堂(Teton)土坝 1976 年溃决;我国板桥和石漫滩两座土坝 1975 年洪水漫坝失事等。目前,国内外许多桥梁都存在不同程度的安全隐患,比如西方发达国家在经济腾飞时期建造的大批桥梁,目前均面临剩余寿命的评估问题,其中美国的 69 万座公路桥梁中有一半以上的使用年限已超过 50 年,1/3 以上的桥梁使用效率很低或者荒废,每年用在桥梁维修上的费用超过 50 亿美元。在国内,由于质量控制滞后于桥梁的建设速度,桥梁倒塌事故逐年增加。1996 年 12 月广东韶关特大桥梁坍塌,事故致使 32 人死亡、59 人受伤;1999 年 1 月重庆的彩虹大桥倒塌,事故导致 41 人死亡、14 人受伤;2000 年 8 月 27 日,台湾连接高雄与屏东的重要通道上的高屏大桥突然拦腰断裂,是我国发生的又一例毁桥事件,造成交通中断,16 辆汽车坠入水中,22 人受伤。另外,近几年的铁路提速,对于那些设计最大时速仅有 120 km/h 的大批铁路桥梁来说也是严峻的考验。2002 年 6 月,洪水冲垮了陇海铁路西安段的一座铁路桥梁,使得铁路停止运营数日,造成了重大的经济损失。造成这些事故的原因很复杂,抛开设计与施工方面的原因不谈,这些桥梁长期处于超负荷运营状态,致使许多构件的疲劳损伤加剧,是导致倒塌的重要原因。为了确保设计的使用安全性和耐久性达到预期的标准,保证工程建筑物安全是一个十分重要且很现实的问题,也是变形监测的首要目的。

目前,灾害的监测与防治已越来越受到全社会的普遍关注,各级政府及主管部门对此问题十分重视,诸多国际学术组织,如国际大地测量协会(IAG)、国际测量师联合会(FIG)、国际岩石力学协会(ISRM)、国际大坝委员会(ICOLD)、国际矿山测量协会(ISM)等经常定期召开专业会议进行学术交流和对策研究。经过广大测量科技工作者和工程技术人员近 30 年的努力,在变形监测领域取得了丰硕的研究成果,并发挥了实际效益。以我国为例,就有成功的预报实例:

(1)利用地球物理大地测量反演理论,于 1993 年准确地预测了 1996 年发生的丽江大地震。

(2)1985 年 6 月 12 日长江三峡新滩大滑坡的成功预报,确保灾害减小到了最低限度。它不仅使滑坡区内 457 户 1 371 人在滑坡前夕全部安全撤离,无一人伤亡,而且使正

在险区长江上、下游航行的 11 艘货轮及时避险,免遭灾难,为国家减少经济损失至少 8 700 万元,被誉为我国滑坡预报研究史上的奇迹。

(3)隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统在 1998 年长江抗洪错峰中发挥了巨大作用,确保了安全防汛,避免了荆江大堤灾难性的溃塌。

总之,变形监测的意义重点表现在两个方面:

(1)实用上的意义,主要是掌握各种工程建筑物的地质构造的稳定性,为安全诊断提供必要的信息,以便发现问题并采取措施。

(2)科学上的意义,包括更好地理解变形的机理,验证有关设计的理论和地壳运动的假说,进行反馈设计及建立有效的预报模型。

第二节 变形监测技术发展概述

一、变形监测技术

变形观测方法由监测对象的性质、监测的目的、监测精度、周围环境及观测的变形大小和速度决定。

在工程和局部静态变形监测方面,地面常规测量技术如下:

(1)垂直位移对应的观测方法,有几何水准、液体静力水准、微水准等。

(2)水平位移对应的观测方法,有基准线法、导线法、前方交会法、近景摄影法、GPS 法(大范围)、光电自动遥控监测等。

综观国内外数十年变形监测技术的发展历程,传统的变形监测方法改进主要体现在观测设备上的改进。

(1)常规大地测量方法的完善与发展,其显著进步是因为全站型仪器的广泛使用,尤其是全自动跟踪全站仪(RTS, Robotic Total Stations),有时也叫测量机器人(Georobot),为局部工程变形的自动监测或室内监测提供了一种良好的技术手段,它可以进行一定范围内无人值守、全天候、全方位的自动监测。实际工程试验表明,测量机器人监测精度可达亚 mm 级。目前,在美国加州南部的一个新水库(Diamond Valley Lake)已安装了 8 个永久性 RTS(仪器型号为 LEICA TCA1800)和一组由 218 个棱镜组成的地面自动监测系统。但是,TPS(Terrestrial Positional System)最大的缺陷是受测程限制,测站点一般都在变形区域的范围之内。

(2)地面摄影测量技术在变形监测中的应用虽然起步较早,但是由于摄影距离不能过远,加上绝对精度较低,其应用受到局限,过去仅大量应用于高塔、烟筒、古建筑、船闸、边坡体等的变形监测。近几年发展起来的数字摄影测量和实时摄影测量为地面摄影测量技术在变形监测中的深入应用开拓了非常广泛的前景。

(3)光、机、电技术的发展,促进了一些特殊和专用于变形的自动监测仪器的研制,它包括应变测量、准直测量和倾斜测量。例如,遥测垂线坐标仪,采用自动读数设备,其分辨率可达 0.01 mm;采用光纤传感器测量系统将信号测量与信号传输合二为一,具有很强的抗雷击、抗电磁干扰和抗恶劣环境的能力,便于组成遥测系统,实现在线分布式监测。

(4)3D 激光扫描技术: 三维激光扫描技术是 20 世纪 90 年代中期开始出现的一项高新技术,是继 GPS 空间定位系统之后又一项测绘技术新突破。它通过高速激光扫描测量的方法,大面积高分辨率地快速获取被测对象表面的三维坐标数据,可以快速、大量、高精度地获取空间点位及其变化信息。

(5)GPS 作为一种全新的现代空间定位技术,已逐渐在越来越多的领域取代了常规光学和电子测量仪器。自 20 世纪 80 年代以来,尤其是进入 90 年代以后,GPS 卫星定位和导航技术与现代通信技术相结合,在空间定位技术方面引起了革命性的变化。用 GPS 同时测定三维坐标的方法将测绘定位技术从陆地和近海扩展到整个海洋和外层空间,从静态扩展到动态,从单点定位扩展到局部与广域差分,从事后处理扩展到实时(准实时)定位与导航,从绝对和相对定位扩展到 m 级、cm 级乃至亚 mm 级,从而大大拓宽了它的应用范围和在各行各业中的作用。地学工作者已将 GPS 应用于地表变形监测的多个试验中,取得了丰富的理论研究成果,并逐步走向实用阶段。数据通信技术、计算机技术及以 GPS 为代表的空间定位技术的日益发展和完善,使得 GPS 法由原来的周期性观测走向高精度、实时、连续、自动监测成为可能。

在动态监测方面,传统方法一般采用加速度计、激光干涉仪等测量设备测定建筑结构的振动特性,但是,随着建筑物高度的增加,以及连续性、实时性和自动化监测程度要求的提高,常规测量技术已越来越受到限制。GPS 作为一种新方法,由于其硬件和软件的发展与完善,特别是高采样率(目前有的已高达 20 Hz)GPS 接收机的出现,在大型建(构)筑物动态特性和变形监测方面已表现出其独特的优越性。近几年来,一些大型工程建筑物已开展了卓有成效的 GPS 动态监测试验和测试工作。例如,应用 GPS 技术成功地对加拿大卡尔加里(Calgary)塔在强风作用下的结构动态变形进行了测定;国内外一些大型桥梁(尤其是大跨度悬索桥和斜拉桥,如广东虎门大桥)已尝试安装了 GPS 实时动态监测系统;深圳帝王大厦和大连世贸大厦的风力振动特性采用了 GPS 进行测量。目前,GPS 动态监测数据处理主要采用的是整周模糊度动态解算法(Ambiguity Resolution On - The - Fly,简称 OTF)。同时,GPS 变形监测单历元求解算法及其相应软件开发的研究也在发展之中。已有研究表明,对于长期监测的 GPS 系统,采用 Kalman 滤波三差法代替 RTK (Rrel - Time Kinematic)技术中的双差相位求解,可以实现 mm 级精度。令人兴奋的是,正如 Loves(1995)所言,随着 GPS 动态监测能力的进一步发展,这一技术可望成为测量结构振动的标准技术。

现代变形观测所使用的仪器种类繁多,从传统的光学类仪器发展为现代的电子仪器,变形测量已从单一的、范围受限及工作量大的作业手段发展成范围广大(可监测地壳形变)、自动化程度高、使用方法多样的新技术。当然这并不是说传统的仪器就要摒弃,而是二者的结合可以互取所长,使获得的变形数据更加可靠。

二、监测技术的发展趋势

展望变形监测技术的未来发展方向,有以下几方面值得一说。

(1)多种传感器、数字近景摄影、全自动跟踪全站仪和 GPS 的应用,将走向实时、连续、高效率、自动化、动态监测系统的发展方向。比如,某大坝变形监测系统是由测量机器

人、GPS 和特殊测量仪器所构成的最优监测方案。

(2)变形监测的时空采样率会得到大大提高,变形监测自动化可以为变形分析提供极为丰富的数据信息。

(3)高度可靠、实用、先进的监测仪器和自动化系统,要求能在恶劣环境下长期稳定、可靠地运行。

(4)远程在线实时监控在大坝、桥梁、边坡体等工程中将发挥巨大作用,网络监控是推动重大工程安全监控管理的必由之路。

第三节 基于数理知识下的变形监测与分析理论

一、变形监测系统设计

合理设计变形监测方案是变形监测的首要工作。对于周期性变形监测网设计而言,其主要内容包括确定监测网的质量标准、选择观测方法、点位的最佳布设和观测方案的最佳选择。在过去的 30 年里,变形监测方案设计和监测网优化设计的研究较为深入和全面,取得了丰富的研究成果和较好的实用效益,这一点可从众多文献中得到体现,表 1-1 是控制网优化设计分类。目前,在变形监测方案设计与变形监测系统设计方面,其主要发展是监测方案的综合设计和监测系统的数据管理及综合处理。例如,在三峡大坝的变形监测中,要综合考虑外部和内部观测设计,大地测量与特殊测量的观测量要进行综合处理与分析。

表 1-1 控制网优化设计分类

分类	固定参数	待定参数	含义
零类设计(2OD)	A, P	Q_{xx}	基准设计
一类设计(FOD)	P, Q_{xx}	A	图形结构设计
二类设计(SOD)	A, Q_{xx}	P	观测权的设计
三类设计(THOD)	Q_{xx} , 部分 A, P	部分 A, P	网的改进和加密

二、变形数据处理及分析方法

人们对自然现象的观察,总是对有变化、无规律的部分感兴趣,而对无变化、规律性很强的部分则比较平淡。如何从变化中找出规律,由规律预测未来,这是人们认识事物、认识世界的常规辩证思维过程。变化越多、反应越快,系统就越复杂,这就导致了非线性系统的产生。人们的思维实际是非线性的,而不是线性的,不是表面现象的简单反应,而是透过现象看本质,从杂乱无章中找出其内在规律,然后遵循规律办事。这就是变形分析的真正内涵。

变形分析的研究内容涉及到变形数据处理与分析、变形物理解释和变形预报的各个方面,通常可将其分为变形的几何分析和变形的物理解释两部分。变形的几何分析是对

变形体的形状和大小作几何描述,其任务是描述变形体变形的空间状态和时间特性。变形物理解释的任务是确定变形体的变形和变形原因之间的关系,解释变形的原因。

(一)变形的时空特征分析及建模方法

传统的变形几何分析主要包括参考点的稳定性分析、观测值的平差处理和质量评定及变形模型参数估计等内容。

检测点的变形信息是相对于参考点或某一基准的,如果所选基准本身不稳定或不统一,则由此获得的变形值就不能反映真正意义上的变形,因此变形的基准问题是变形检测数据处理首先必须考虑的问题。过去对参考点的稳定性分析主要局限于周期性的检测网,其方法有很多,例如 A. Chrzanowski(1981)论述了这样的 5 种方法:以方差分析进行整体检验为基础的 Hannover 法(H. Pelzer, 1971),即通常所采用的“平均间隙法”;以 B 检验法为基础的 Delft 法,即单点位移分量法;以方差分析和点的位移向量为基础的 Karlsruhe 法;考虑大地基准的 Munich 法;以位移的不变函数分析为基础的 Fredericton 法。后来又发展了稳健-S 变换法,也称逐次定权迭代法。

观测值的平差处理和质量评定非常重要,观测值的质量直接关系到变形值的精度和可靠性。在这方面,主要涉及到观测值质量、平差、基准、粗差处理、变形的可区分性等几项内容。后两项技术用于观测值的筛选,是剔除修正粗差和系统误差、保证变形数据及分析可靠的重要依据。平差技术是监测网数据处理的手段,为克服经典平差(固定基准)的缺陷,在固定基准的经典平差基础上,发展了重心基准的自由网平差和拟稳基准的拟稳平差(周江文,1980;陶本藻,1984)。在 W. Baarda(1986)提出数据探测法后,粗差探测与变形的可区分性研究成果已极为丰富,这已体现在李德仁(1988)、黄幼才(1991)、陶本藻(1992)等的著作中。

在变形分析中,传统的方法是用概率统计、检验回归分析进行诸如点的稳定性、变形因子的确定、变形预报等。近年来一些新技术如模糊数学、多元统计分析、灰色系统理论、波谱分析、有限元分析等也运用于变形分析中。

对于变形模型参数估计,陈永奇(1988)概括了两种基本的分析方法,即直接法和位移法。直接法是直接用原始的重复观测值之差计算应变分量或它们的变化率;位移法是用各测点坐标的平差值之差(位移值)计算应变分量。同时,他还提出了变形分析通用法,研制了相应的软件 DEFNAN。

1978 年 FIG 工程测量专业委员会设立了由国际测绘界 5 所权威大学组成的特别委员会“变形观测分析专门委员会”,极大地推动了变形分析方法的研究,并取得了显著成果。正如 A. Chrzanowski(1996)所评价的,变形几何分析的主要问题已经得到解决。

实质上,自 20 世纪 70 年代末至 90 年代初,对几何变形分析研究得较为完善的是用常规地面测量技术进行周期性监测的静态模型,但静态模型考虑的仅仅是变形体在不同观测时刻的空间状态,并没有很好地建立各个状态间的联系,更谈不上变形监测自动化系统的变形分析研究。事实上,变形体在不同状态之间是具有时间关联性的。为此,后来许多学者转向了对时序观测数据的动态模型研究,如变形的时间序列分析方法建模,基于数字信号处理的数字滤波技术分离时效分量、变形的卡尔曼滤波模型、用 FIR(Finite Impulse Response)滤波器研究 GPS 多路径效应等。

动态变形分析既可以在时间域进行,也可以在频率域进行。频谱分析方法是时将时域内的数据序列通过傅里叶(Fourier)级数转换到频域内进行分析,它有利于确定时间序列的准确周期并判别隐蔽性和复杂性的周期数据。有些学者应用频谱分析法研究了时序观测资料的干扰因素,以便获得真正的变形信息,并取得了一定效果。频谱分析法用于确定动态变形特征(频率和幅值),是一种常用的方法,尤其在建筑物结构振动检测方面被广为应用。但是,频谱分析法的苛刻条件是数据序列的等时间间隔要求,这给一些工程变形监测分析的实用性增加了难度,因为对于非等间隔时间序列进行插补和平滑处理必然会带入人为因素的影响。

多年来,对变形数据分析方法的研究是极为活跃的,除了传统的多元回归分析法及上述的时间序列分析法、频谱分析法和滤波技术之外,灰色系统理论、神经网络等非线性时间序列预测方法也得到了一定程度的应用。比如,应用灰色关联分析方法研究多个因变量和多个自变量变形问题;应用灰色理论建模预测深基坑事故隐患;应用人工神经网络建模进行大坝短期的变形预测。

在变形分析中,为了弥补单一方法的缺陷,多种方法的结合研究得到了一定程度的发展。例如,将模糊数学原理与灰色理论相结合,应用灰色关联聚类分析法进行多测点建模预测;将模糊数学原理与人工神经网络方法建模进行边坡和大坝的变形预报;在回归分析法中,为处理数据序列的粗差问题,提出了应用抗差估计理论对多元回归分析模型进行改进的抗差多元回归模型;还有研究认为,人工神经网络与专家系统相结合,是解决大坝安全监控专家系统开发中“瓶颈”问题的一个好办法。

由于变形体变形的错综复杂性,可以将其视为一个复杂性系统。这个复杂性系统含有许多非线性、不确定性因素,以及它们之间相互作用所形成的动力学特征。创立于 20 世纪 70 年代的非线性科学理论在变形研究中也得到了反映。例如,根据突变理论,用尖点突变模型研究大坝及岩基的稳定性;将大坝运行状态看成一种非线性动力系统,来研究大坝观测数据序列中的混沌现象。

在变形分析中,出于实用、简便上的考虑,一般应用较多的是单测点模型,同时,为了考虑监测点的整体空间分布特性,多测点变形监控模型也得到了发展。

但是,从现行的变形分析方法中,我们不难发现,大多都是离线的(事后的),不能进行即时预报与监控,无法在紧急关头为突发性灾害提供即时决策咨询,这与目前的自动化监测系统的要求很不相符。因此,研究在线实时分析与监控的方法成为技术的关键。已有研究证明,采用递推算法的贝叶斯动态模型进行大坝检测的动态分析是可行的。在隔河沿大坝 GPS 自动化监测系统中,采用递推式卡尔曼滤波模型进行全自动在线实时数据处理取得了较好效果。

在 GPS 监测系统中,数据处理的主要工作是观测资料的解算,如 GPS 差分求解、GPS 监测网平差等,以提供高精度、高可靠性的相对位置信息。而数据分析的重点则包括变形基准的确定,正确区分变形与误差,提供变形特征,并解释其变形原因。

诞生于 20 世纪 80 年代末的小波分析理论,是一种最新的时频局部化分析方法,被确认是自傅里叶分析方法后的突破性进展。应用小波方法进行时频分析,可望有效地求解变形的非线性系统问题,通过小波变换提取变形特征。但这一研究领域才刚刚起步,在变

形分析方面尚无实质性的研究成果。第 21 届 IUGG(国际大地测量与地球物理学联合会)大会“小波理论及其应用”被 IAG 确定为大地测量新理论的研究方向之一。在 1999 年召开的第 22 届 IUGG 大会上,“小波理论及其在大地测量和地球动力学中的应用”再次被 IAG 确定为 GIV(大地测量理论与方法)分会的新的研究课题。由此可见开展小波理论及其应用研究的重要性。从目前的应用研究来看,虽然小波分析要求大子样容量的时间序列数据,但是长序列数据可从 GPS、TPS 等集成的自动化系统中得到保障。小波分析为高精度变形特征提取提供了一种数学工具,可解决其他方法无法解决的难题,对非平稳信号消噪有着其他方法不可比拟的优点。小波理论在变形监测(尤其是动态变形监测)的数据分析方面将发挥巨大的作用。

(二) 变形物理解释的进展

变形物理解释的方法可分为统计分析法、确定函数法和混合模型法三类。

1. 统计分析法

统计分析法中以回归分析模型为主,通过分析所观测的变形(效应量)之间的相关性,来建立荷载与变形之间的数学模型,它具有“后验”的性质,是目前应用比较广泛的变形成因分析法。由于变形影响因子的多样性和不确定性,以及观测资料本身有限,因此回归分析建模的准确性在很大程度上受到制约。回归分析模型中包括多元回归分析模型、逐步回归分析模型、主成分回归分析模型和岭回归分析模型等。统计模型的发展包括时间序列分析模型、灰色关联分析模型、模糊聚类分析模型及动态响应分析模型等。

2. 确定函数法

确定函数法中以有限元法为主,它是在一定的假设条件下,利用变形体的力学性质和物理性质,通过应力与应变关系建立荷载与变形的函数模型,然后利用确定的函数模型预报在荷载作用下变形体可能的变形。确定性模型具有“先验”的性质,比统计模型有更明确的物理概念,但往往计算工作量较大,并对用作计算的基本资料有一定的要求。

3. 混合模型法

统计模型和确定性模型的进一步发展是混合模型和反分析方法的研究,这在大坝安全监测中得到了较好的应用。混合模型是对那些与效应量关系比较明确的原因量(比如水质分量)用有限元法(FEM, Finite Element Method)计算的数值,而对另一些与效应量关系不很明确或采用相应的物理理论计算成果难以确定它们之间函数关系的原因量,比如温度、时效,则仍用统计模式,然后用实际值进行拟合而建立的模型。例如,林兵(1998)采用混合模型分析坝体性态收到了较好的效果。反分析法是仿效系统识别理论,将正分析成果作为依据,通过一定的理论分析,借以反求建筑物及其周围的材料参数,寻找某些规律和信息,然后反馈到设计、施工和运行中去。反分析法的实际内涵包括反演分析和反馈分析,两者既有联系又有区别。

由于变形的物理解释涉及到多学科的知识,永远不是测量人员所能够独立完成的,所以需要相关学科专家的共同合作。

(三) 变形分析研究的发展趋势

回顾变形分析方面所取得的大量实践及研究成果,展望变形分析研究的未来,其发展趋势将主要体现在如下几方面: