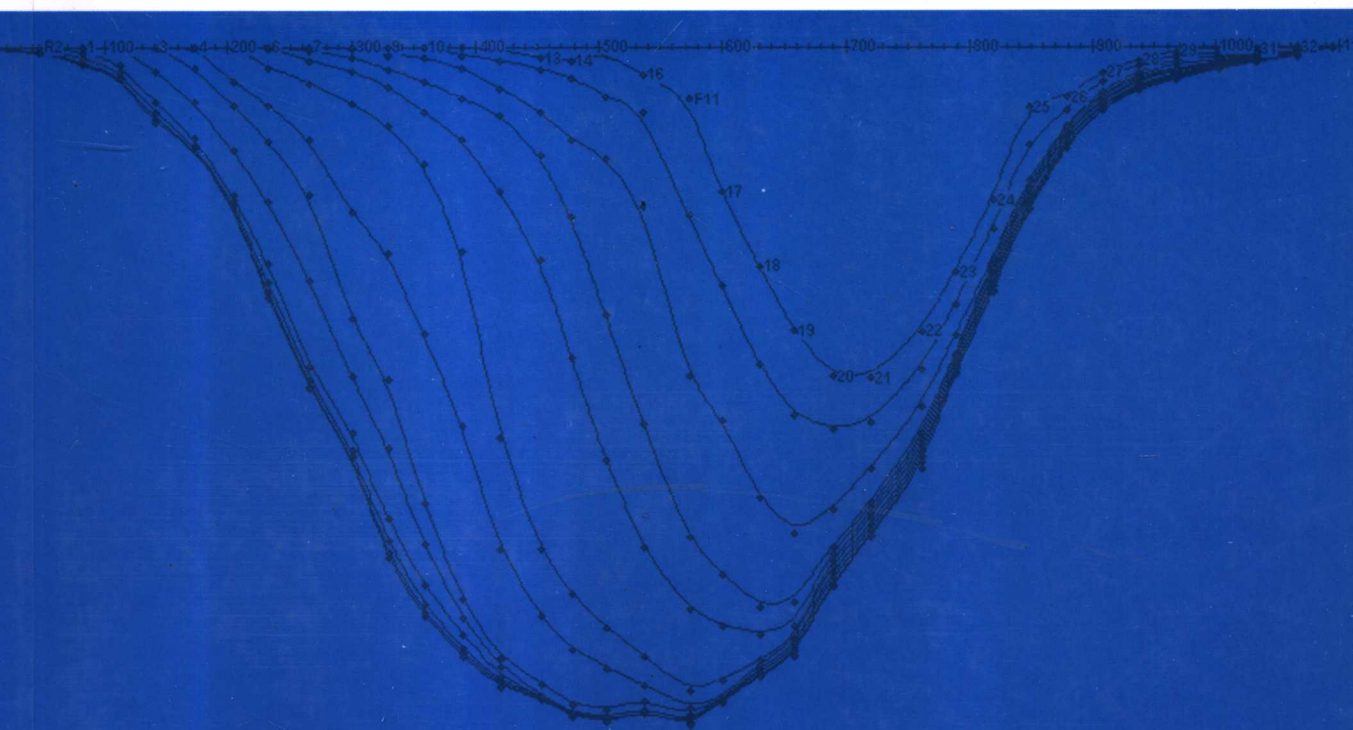


动态变形观测与预报

Dynamic Deformation Observation and Forecast

栾元重 吕法奎 班训海 编著



中国农业科学技术出版社

动态变形观测与预报

栾元重 吕法奎 班训海 编著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

动态变形观测与预报/栾元重,吕法奎,班训海编著.
—北京:中国农业科学技术出版社,2007.2
ISBN 978-7-80233-138-9

I. 动... II. ①栾...②吕...③班... III. 变形观测—预报
IV. P227 TU196

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 020557 号

责任编辑 李 芸
责任校对 贾晓红

出 版 者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街 12 号 邮编:100081
电 话 (010)68919704(发行部)(010)62121118(编辑室)
(010)68919703(读者服务部)
传 真 (010)68919709
网 址 <http://www.castp.cn>
经 销 者 新华书店北京发行所
印 刷 者 泰安农大印刷有限公司
开 本 787mm×1 092mm 1/16
印 张 16.375
字 数 358 千字
版 次 2007 年 2 月第 1 版 2007 年 2 月第 1 次印刷
印 数 1~3 100 册
定 价 26.00 元

版权所有·翻印必究



栾元重，男，1963年5月生，博士，博士后，现为山东科技大学测绘科学与技术学科博士生导师、教授。

栾元重同志1985年7月毕业于山东矿业学院（山东科技大学）矿山测量专业，后又在中南工业大学（中南大学）硕士研究生毕业，同济大学博士研究生毕业，并且完成了博士后科研工作已出站。主要从事基于“3S”灾害监测与控制理论与方法的教学和科研工作，先后出版了《采动损害观测技术》、《变形观测与动态预报》两部著作，在国内外刊物上发表论文60余篇。获得山东省、国家测绘局、国家安监总局多项科技奖励、主持完成了多项纵横向课题，为企业创造了巨大的经济效益。



吕法奎，男，1958年11月生，山东省微山县人，大学文化，中共党员，微山县政协委员，高级工程师。历任微山县欢城煤矿生产技术科副科长、地测科科长、微山县煤炭开发指挥部主任、微山县纪委监委、监察局副局长、微山县煤炭工业局局长。2004年12月至今，任微山崔庄煤矿有限责任公司总经理。2005年度被评为全国煤炭工业“优秀矿长”，被山东煤矿安全监察局评为“安全优秀矿长”、被山东省煤炭工业局评为“优秀矿长”，并被评为“优秀企业家”、“功勋企业家”等称号。



班训海，男，1965年12月生，中共党员，大学文化，高级工程师，1989年7月毕业于阜新矿业学院地测系，被分配到欢城煤矿生产技术科测量组工作，1992年4月调入崔庄煤矿，先后在崔庄煤矿技术科、地测科工作。历任测量技术员、副科长、科长等职，现任微山崔庄煤矿有限责任公司地测科科长，2006年度被微山县人民政府评为首批中青年专家。

内 容 提 要

本书分为变形观测与变形预报两大部分。第一章至第四章比较系统地阐述变形观测的基本方法，突出了有关GPS、工业测量、InSAR技术、测地机器人在变形观测中的应用，专门介绍了桥梁、大坝、建筑物及矿山地表变形观测方法与相关理论和技术。第五章、第六章介绍变形分析软件、变形分析与预报数学模型，对变形体的趋势项、周期项、随机项进行了分类建模及叠合建模。

本书可作为高等院校测绘工程专业硕士研究生和本科生教材，亦可供采矿、地质、水电、城建、土木等相关专业的科技人员参考和使用。

前 言

石油、天然气、煤炭等资源的开发,引起了土地的塌陷,道路和建筑的破坏;现代大型建(构)筑物(如大坝等)的施工与运营,会产生变形。当变形超过一定限度时,危及建(构)筑物的安全;沿海城市地表下沉;海水面的上升危及沿海城市的生存;同时,泥石流及地震的频繁发生,给社会和人民生命财产带来了巨大的损失。实现灾害预报和防治的基础工作是开展变形观测和变形分析。随着科学技术的进步和新技术、新手段、新仪器的不断出现,如卫星遥感技术、InSAR 技术、传感技术、各类电子测量仪器及测地机器人等技术广泛地应用于变形监测工程;新兴的数学理论和计算机技术、数据库技术、GIS 理论已成功地应用于变形分析与变形预报。人类在征服自然灾害和地质灾害的斗争中,及时研究和分析实践中存在的问题,及时总结其中的经验和教训,于变形观测、变形分析、变形预报及灾害控制理论和技术的不断进步和完善大有裨益。基于此,作者编写了此书。

本书分为变形观测与变形预报两大部分,侧重于变形观测方法和变形分析技术的论述。变形观测的主要内容包括:变形观测的基本方法和桥梁、大坝、建筑物及矿山地表变形观测技术。论述了变形监测网的布设方法,垂直位移与水平位移的监测方法, GPS、测地机器人、InSAR、工业测量、三维激光扫描仪的变形观测方法。变形预报主要内容包括:变形数据管理系统软件与变形预报数学模型,给出了基准转换模型和相对变形分析方法。对变形体的趋势项、周期项、随机项分类进行了建模,并实现了叠合建模技术。在本书编撰过程中,笔者尽可能吸收了该领域的最新研究成果。文字叙述尽量深入浅出,并尽可能结合实例,以便于参阅者使用。

本书共分六章。第一、二、五、六章由山东科技大学博士生导师栾元重教授编写,第四章由微山崔庄煤矿矿长高级工程师吕法奎编写,第三章由微山崔庄煤矿高级工程师班训海编写。另山东科技大学王永老师参加编写了第四章的部分内容,韩李涛老师参加编写了第六章部分内容,山东交通学院范玉红老师参加编写了第三章的部分内容,泉上煤矿王君良工程师参加编写了第二章部分内容,全书由栾元重负责统稿。高建、崔永胜、夏大文、王倩等同志帮助做了一些具体工作。

在本书编写过程中,突出了多年来作者们在微山崔庄煤矿开展地表与煤层顶板变形观测的研究成果。

在本书编写过程中得到了俄罗斯外籍院士、山东科技大学博士生导师靳奉祥教授的热情指导和帮助,在此,表示诚挚的感谢。

该书的出版得到了山东省博士后科研项目专项经费资助。

笔者希望本书的出版,能够对测绘类、采矿类、地质类博士生、硕士生、本科生和工程技术人员在拓宽变形测量知识面,促进变形观测与灾害预报方面起到推动作用。变形观测与变形预报涉及学科广泛,作者不可能面面俱到地深入研究,书中无疑存在缺点和不足,诚恳专家、学者批评指正。

作者

2007 年 1 月 18 日

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 灾害的表现形式	(1)
第二节 变形观测的基本内容	(4)
第三节 变形观测的基本方法	(7)
第四节 变形分析的发展与应用	(12)
第二章 变形观测技术	(23)
第一节 变形观测内容、精度与周期	(23)
第二节 观测点的结构与埋设	(28)
第三节 基坑回弹观测	(34)
第四节 水平位移观测	(36)
第五节 水平移动的准直测量方法	(36)
第六节 倾斜观测	(44)
第七节 流体静力水准测量简介	(47)
第八节 挠度观测与裂缝观测	(48)
第九节 GPS 变形观测技术	(50)
第十节 变形监测机器人(工业测量)简介	(55)
第十一节 InSAR 在地表变形监测中的应用	(59)
第三章 建(构)筑物变形观测与变形分析	(65)
第一节 工业与民用建筑物变形观测	(65)
第二节 大坝变形观测	(69)
第三节 桥梁变形观测	(75)
第四节 监测网数据处理	(83)
第五节 回归分析	(95)
第六节 位移量显著性检验及其估计	(116)

第七节	位移与应变	(120)
第八节	由边长变化量求地应变	(123)
第九节	监测网基准转换	(126)
第十节	基准点稳定性分析与变形参数计算	(137)
第十一节	不稳定点变形位移参数计算	(140)
第四章	矿山地表与岩层移动观测	(142)
第一节	矿山岩层移动的基本概念	(142)
第二节	地表岩移观测站设计与观测方法	(158)
第三节	基于 GIS 岩移观测数据处理与可视化系统	(162)
第四节	崔庄煤矿 23 _上 01 与 23 _上 03 工作面地表移动规律	(170)
第五节	地表移动概率积分法参数的确定方法	(182)
第六节	开采沉陷预计概率积分法基本原理	(189)
第七节	覆岩导水裂缝带高度观测技术	(201)
第五章	地表移动多层递阶周期预测	(217)
第一节	地表移动多层递阶预测	(217)
第二节	时变参数预计方法	(224)
第三节	多层递阶周期分析	(225)
第六章	变形监测数据叠合模型	(237)
第一节	地表移动趋势项分析	(237)
第二节	监测数据周期运动分析	(244)
第三节	地表移动随机项预测模型	(247)
第四节	鲁西煤矿监测数据模型叠合分析	(249)
参考文献		(253)

第一章 绪 论

第一节 灾害的表现形式

一、灾害的表现形式

一切物体都具有自己的几何形状,由于某种原因改变了原几何形状可称为变形。大到宇宙中的星球,小到我们生活的地球及其某个地区、城市、矿区,一个具体的建筑物甚至于某个构件都存在变形,如全球性的地极移动,地壳的板块运动及区域性的地震,城市地表下沉,矿区采空区的地表沉陷,山体、河岸及矿坑边帮的滑坡,建筑物基础下沉、倾斜,建筑物墙体的裂缝及构件挠曲等都是变形的表现形式。

(一)城市地表塌陷概况

1. 天津市的地面沉降

天津市在 1930 年首先发现水准点下沉,1959 年开始出现区域性沉降,1966 年形成了地面沉降漏斗区,至今最大累计沉降量大于 2m 的沉降中心有大直沽北站、河北大街等。塘沽区地面沉降近几年发展较快,沉降量大于 1.9m 的范围已有人民公园、上海道、永久街等处。产生沉降主要原因是大量开采地下水。目前,沉降范围还在逐年扩大。

2. 山东泰安市的地面塌陷

泰安市地下面的第四系土层厚 10 ~ 20m,最厚达 30m,大致可分为 4 层。最上层为亚砂土,第二层为中粗砂,第三层为含泥卵砾石,底层为含黏性土的碎块石。基岩为岩溶发育的灰岩层。经水源勘探评价指出,灰岩水的开采资源为 $12.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,20 世纪 80 年代后,最大开采量达 $20.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,过量开采地下水,致使地下水水位大幅度下降达 50 ~ 75m,比第四系水位低 30m 左右,最大者低 50m,地下水降落漏斗面积达 40 ~ 50km²,岩溶浅部含水层被疏干。随之,断断续续出现了一系列地面塌陷。据统计,从火车站至泮河桥间两铁路三角地带,自 1976 年以来就发生 20 多处塌陷,影响到津浦线的安全,迫使列车在该段减速行驶。泮灌庄水源地附近塌陷 20 多处。在塌陷区的观测孔中,可观测到喷气、吸气现象。

3. 湖北应城汤池温泉疗养院地面塌陷

热水赋存于奥陶系灰岩中,由于各单位无计划争相打热水井并开展温水养殖,使地下热水过量开采,水位下降幅度近 20m。1980 年在某宾馆出现了一个直径约 40m,深 4m 左右的陷坑,使北面的宾馆老房严重开裂,南面新盖的大楼西北角房基被拉裂。现汤池地区已发现地面塌陷 16 处。

4. 郴州市地面岩移

郴州市位于湘南京广线上,地处湘、赣、粤交界处,是一个正处于迅速发展中的以轻纺和旅游业为主的新型城市。该市地表水缺乏,生产和生活用水全靠地下水。20 世纪 70 年代末至 80 年代初,随着生产的发展和人口的增加,地下水的开采量也日益增多,地下水位大幅度下

降,局部范围已发生地面变形,造成泉水枯竭,楼房、围墙、道路、地下水管等破坏,湖水倒灌,地下水遭受污染,迫使水厂停产进行处理,甚至被迫关闭,给国民经济的发展和人民生活带来了不利影响。如不立即采取措施防患于未然,则地面变形还会继续发展,造成更严重的后果。

根据调查,郴州市共发生 69 处地面变形,其中除 13 处为天然塌陷外,其余 56 处均为开采地下水所引起的地面变形。

5. 六盘水市的地面塌陷

六盘水市是贵州省西部一个新兴的钢铁和煤炭工业城市,位于岩溶盆地之中。土层厚 10~30m,基岩为岩溶发育的碳酸岩地层。由于钢铁厂生产和城市供水需要,在盆地中开凿了大量钻孔,抽取岩溶地下水。抽水后地下水位下降,引起地面塌陷,塌陷坑已达 805 处,塌陷毁坏农田、道路多处;房屋倒塌 89 座,电杆倾倒引起供电中断,自来水管破裂,污水倒灌,严重影响和污染了地下水源,直接经济损失约 130 万元。

6. 贵阳市的地面塌陷

贵阳市位于岩溶盆地之中,盆地底部为三叠系白云岩,土层为较薄的红黏土及河流沉积物,盆地中地下水丰富,且埋藏浅,由于大量抽取地下水,使地下水位下降 7~10m,导致产生了多处塌陷。造成数百万元的直接经济损失。其中较大的灾害事件有如下数起:

①省博物馆塌陷是由深井抽水引起的,建筑物一角开裂下沉,已闭馆 6 年,地基处理费耗资 40 万元。

②油榨街塌陷,使正在进行钻进的钻机沉入陷坑。

③喷水池工商银行塌陷,使原建筑物完全毁坏,不得不拆除重建,采用深管柱基础,耗资 50 万元。

④贵阳火车站西 1km 湘雅村铁路路基塌陷,出现多个陷坑,仅 5 号陷坑体积就达 1 000m³,使路基下沉,交通中断,总填方 3 000m³,工料费 7.2 万元。

(二) 大坝损害实例

国内外大坝损害实例有很多,如:法国 67m 高的马尔巴塞(Malpasset)拱坝 1959 年垮坝;意大利 262m 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 93m 高的提堂(Teton)土坝 1976 年溃决。我国有板桥和石漫滩两座土坝因 1975 年洪水漫坝失事等。可见,保证工程建筑物安全是一个十分重要且很现实的问题。

(三) 煤炭开采损害

在我国,以煤炭开采引起的地质灾害非常严重。开采导致的地表移动和塌陷造成矿区各项设施破坏严重,整体功能运转失灵,对国民经济和人民生活产生重大影响,使建筑和基础设施以及农田均受到严重破坏,区域内居民环境安全受到威胁。我国采空塌陷目前可以划分为 6 个区,包括东北、华北、华东、中南、西北和西南采空塌陷区。仅在山西省各类矿山采空区已达 20 000km²,以全省 15.6×10^4 km² 的土地面积计算,山西有近 1/7 的地面已经成为“悬空区”,使大面积土地塌陷,因此土地压力非常大,受到农业耕地、煤炭产业及城市发展的多重压力。

图 1-1 和图 1-2 为新华网报道的某矿区地面沉降造成房屋危害的实例。

因而,变形监测研究在国内外受到了广泛的重视,推动着变形监测理论和技术的迅速发展。目前,变形监测正向多门学科交叉联合的边缘学科方向发展,成为相关学科的研究人员合作研究的领域。已有的研究工作涉及到地壳、山体、大坝、桥梁、隧道、高层建筑及结构工程变形等。

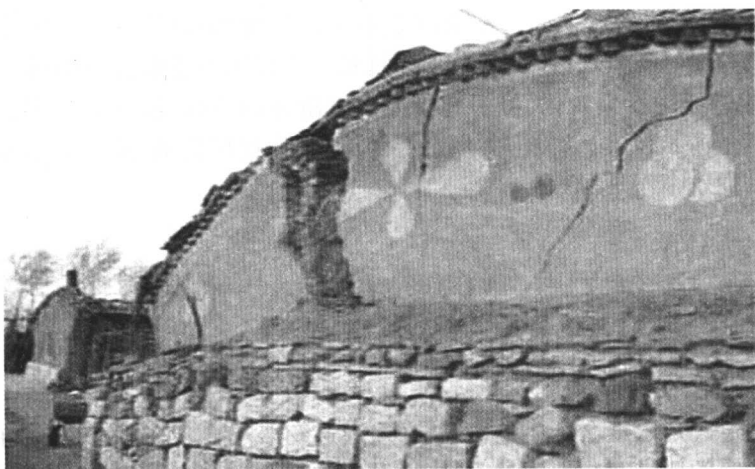


图 1-1 不均匀沉降导致的墙体裂缝



图 1-2 塌陷区村庄被水淹没

二、产生变形的原因

(1) 地下水影响: 地下水升降可对地表升降产生影响。上海、苏州等城市使用的地下水得不到充分补充而导致地表下沉, 因为地下水定向流动可产生塌帮。地下水对建筑物基础的钢筋或混凝土有侵蚀性, 长期侵蚀导致基础毁坏。

(2) 地下开采影响: 地下开采形成采空区, 地表失去支撑而产生塌陷, 地面上的建筑物轻则倾斜裂缝, 重则倒塌。

(3) 地震影响: 地震可导致地球表面大面积升降和平移。这在我国邢台、海城、唐山等地震中得到证实。

(4) 建筑物的荷重: 众所周知, 建筑物的荷重大, 对地基的压力也大。当建筑物建造在具有一定压缩性的地基上时, 从施工开始, 随建筑物荷重增加, 而地基逐渐被压缩以至于下沉, 而引起建筑物沉降。

(5) 其他作用的影响: 机械振动(如锻压车间锻锤的工作)会引起建筑物局部下沉。建筑物附近增加新建筑物时, 由于新建筑物修建对建筑物基础的扰动可引起原建筑物地基产生新

的不均匀沉降;打桩可使附近地面隆起引起上面建筑物变形;高耸建筑物由于风震可产生摆动;日照及气温昼夜及季节变化将使单柱形建筑物产生扭转等变形;江河中水流大小变化会使拦江(河)大坝坝基压力发生变化,可引起坝体向下游方向位移、滚动等变形;水利枢纽修建,拦江大坝截流后上游水位升高,浸泡大坝上游两岸,会使堤岸滑坡;露天矿遇连续降雨会使不稳定的露天坑帮向坑下滑坡导致停产等。

第二节 变形观测的基本内容

一、变形观测的基本概念

既然变形超过一定限度会产生危害,就必须通过变形观测方法了解变形,在变形影响范围以外区域设置稳定的测量基准点,在变形体上设置被观测的测量标志(称为变形观测点,可简称为观测点),从基准点出发,定期地测量观测点相对于基准点的变化量,从历次观测结果比较中了解变形随时间发展的情况。这个过程就是所谓的变形观测。

变形观测的任务是确定在各种荷载和外力作用下,变形体的形状、大小及位置变化的空间状态和时间特征。变形观测工作是人们通过变形现象获得科学认识、检验理论和假设的必要手段。

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,包括自然和人工的构筑物。根据变形体的研究范围,可将变形观测研究对象划分为3类:

- ①全球性变形研究,如监测全球板块运动、地极移动、地球自转速率变化、地潮等。
- ②区域性变形研究,如地壳形变监测、城市地面沉降等。
- ③工程和局部性变形研究,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、地表沉降等。

二、变形观测的目的与内容

(一)变形观测目的

变形观测的一个重要目的在于实际应用,即检查各种工程建筑物和地质构造的稳定性,对变形进行几何分析,掌握规律,预测、预报变形,达到安全运营之目的。据有关资料介绍,长江三峡地区曾进行了大面积的变形观测。1984年,根据观测结果,对可能发生的滑坡做了正确的预报,使滑体上万余居民在滑体滑坡发生前一周撤离,避免了一场灾难的发生。变形观测的另一个重要目的是科学研究,对变形进行物理解释,验证工程建筑物的设计理论以及地壳运动的假说,改进工程建筑物设计,建立正确的预报变形的理论和方法。像地震的监测既要在断层附近建立监测网,测定长期应变累积形式和速率,以及地震前两个星期至半年的变化。也要设置跨越断层的固定的连续监测系统,以便发现地震前短期征兆(震前几分钟至几天内)。关于这方面研究,我国已积累了许多经验。又如矿山采空区地表移动观测工作,可以根据开采范围、开采深度、开采方法以及地质构造,预测地表沉陷范围、深度、时间和对建筑物的破坏程度,以便在沉陷发生前采取相应措施,避免和减少损失。矿山开采地表沉陷的研究取得的许多成果,在矿山生产方面起到了积极的作用。

根据变形观测的目的,变形观测的具体工作可概括为三部分:一是根据不同观测对象、目

的设置基准点及观测点;二是进行多周期的重复观测(平面或高程,或是三维观测);三是进行数据整理、统计分析及预报。

不同的观测对象和变形观测目的,变形观测方法也不同。

当观测目的是为了知道地表下沉、建筑物基础下沉或倾斜,多采用高程测量方法,也称为垂直位移观测。

想知道被观测体水平位移情况,可采用观测点的平面位置坐标的方法,或建立稳定不动的基准线,观测被测目标相对于基准线的位移量,可称为水平位移观测。

对裂缝大小的测量可称为裂缝观测;想了解建筑物(或构件)弯曲程度的测量,称为挠度观测;对于滑体的观测,也称为滑坡观测,常采用三维观测,既观测其平面位移,也测定垂直位移。

随着现代化建筑和科学的发展,变形观测的工作愈来愈重要。我国的变形观测工作虽然较经济发达国家起步晚,但也积累了许多成功的经验并研究出实用的理论。像上海地表沉陷监测与治理、葛洲坝水利枢纽变形监测、核电站等变形监测都为安全生产和科研提供了宝贵的资料。

(二) 变形观测的内容

变形监测的内容,应根据变形体的性质与地基情况来定。要求有明确的针对性,既要有重点,又要作全面考虑,以便能正确地反映出变形体的变化情况,达到监视变形体的安全、了解其变形规律的目的。例如:

1. 工业与民用建筑物

主要包括基础的沉陷观测与建筑物本身的变形观测。就其基础而言,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。

2. 水工建筑物

对于土坝,其观测项目主要为水平位移、垂直位移、渗透以及裂缝观测;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,其观测项目主要为垂直位移(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)以及伸缩缝的观测,这些内容通常称为外部变形观测。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,这些内容通常称为内部观测。虽然内部观测一般不由测量人员进行,但在进行变形监测数据处理时,特别是对变形原因作物理解释时,必须将内、外部观测的资料结合起来进行分析。

3. 地下水开采引起的地表沉降

对于建立在江河下游冲积层上的城市,由于工业用水需要大量地开采地下水,而影响地下土层的结构,将使地面发生沉降现象。在这种沉降现象严重的城市和地区,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。

4. 矿山开采沉陷工程

采矿工程,由于其具有规模大、深度大、地质条件复杂等特点,不仅存在自身稳定性问题,

而且存在对其周围岩土体的影响问题。采矿工程大面积开采引起的岩土体位形的变化(产生位移和变形),不仅可能对矿山工程本身造成影响和危害,还可能对其他岩土工程及含水层和地面的工程和耕地造成影响及危害。

经过近百年特别是近 20 多年的研究,该类问题已逐渐发展成为采矿和岩体力学学科中一个相对独立的分支学科。其研究内容、基本理论和技术方法即被概括为矿山开采沉陷工程。其研究和服务的对象较广,包括建(构)筑物下采矿与保护,水体下和近水体采矿与水体保护,铁路、公路下采矿与保护,巷道附近采矿及井巷保护,采矿区山体崩塌和滑坡的原因分析与防治,开采沉陷区新建建(构)筑物的可行性分析,矿山各类、各级受护物的安全矿柱设计,矿体的最佳开采顺序,矿山开采沉陷与土地保护、利用与治理等。

矿山开采沉陷工程学的研究内容主要有:采矿引起岩土体位移与变形的机理和规律,减小岩土体位移与变形的采矿技术,采动区建(构)筑物变形的机理与规律及其保护加固措施,受采动影响的岩土体及建(构)筑物变形的监测与预计技术,受护建(构)筑物保护矿柱设计技术,矿区与开采沉陷有关的环境影响评价与保护技术以及矿区建设规划等。

5. 油气开采引起的地表沉降

石油、天然气的大面积开采,不仅引起地表沉降,如是沿海地区还会引起海平面的变化,严重危及沿海城市的安全。

变形观测所研究的理论和方法主要涉及到这样 3 个方面的内容:变形信息的获取、变形信息的分析与解释以及变形预报。其研究成果对预防自然灾害及了解变形机理是极为重要的。对于工程建筑物,变形观测除了作为判断其安全的耳目之外,还是检验设计和施工的重要手段。

变形观测工作的意义重点表现在两方面:首先是实用上的意义,主要是掌握各种建筑物和地质构造的稳定性,为安全性诊断提供必要的信息,以便及时发现问题并采取措施;其次是科学上的意义,包括更好地理解变形的机理,验证有关工程设计的理论和地壳运动的假说,进行反馈设计以及建立有效的变形预报模型。

三、变形观测的特点

(1)精度要求高:与其他测量工作相比,变形观测要求的精度高。用于实用目的,一般要求达到 1mm 的精度。这对于垂直变形还是比较容易达到,对于水平位移变形,有点偏高。用于科研目的可能还要高些。这个精度比地形测图以及一般工程放样都要高。

(2)重复观测:众所周知,一般城市测量控制网,改造或补充一些点时,一般不再重复观测。而用于变形监测的网则必须相隔一定时间进行重复观测。只有重复观测,才能从坐标或高程值的变经中发现变形。

(3)严密地进行数据处理:一些变形体的变形大都较小,有的与测量误差有相同的数量级,故要采取一些方法从含有观测误差的观测值中分离出变形信息。

(4)多学科的配合:变形测量工作不仅需要测绘学,尚需要土木工程和土力学及岩石力学等方面的知识。

(5)责任重大:变形观测责任重大,它需要一丝不苟地认真工作。由于变形量都是微观变化,更应从带有观测误差的观测值中,找出变形规律的蛛丝马迹,及时正确预报危害变形,使人们避免灾害,减少损失。

第三节 变形观测的基本方法

一、变形观测的主要技术方法

变形观测的方法与变形对象、特征,变形的大小、变形的速度以及观测精度有关。变形观测包含对变形监测网及变形观测点的平面或高程的观测。可概括为如下几种方法。

1. 常规地面测量方法

常规地面测量方法是指通过测定高程、角度和边长或坐标来测定变形的的方法。常规地面测量方法也叫大地测量方法,一直是变形观测的主要方法,仪器工具比较普及,各种精度级别的仪器工具都有,直观性好,容易选择到合适的观测精度和相应的仪器工具。

(1)精密高程测量:国家三等以上的高程测量都看作是精密高程测量,主要用精密水准仪进行观测。精密水准测量也一直是垂直位移观测的主要方法,具有精度高,稳定可靠,技术成熟等优点,但劳动强度大,速度慢,山区系统误差大。由于光电测距仪的发展,国内外测量工作者大量实验光电测距三角高程,以求代替精密水准,提高速度和减轻测量工作者的劳动强度。一些实验表明,每公里偶然中误差可达到 $\pm 1\text{mm}$ 的精度,这是很理想的结果。但它附有一些条件,具有不稳定性。所以尚不能推广,仍在研究试验中,所以一般情况下,还不能单独将光电测距三角高程应用于需精密测量的垂直变形观测中。从目前情况来看,用于四等及以下的高程测量较容易实现。

(2)角度测量:角度测量的主要工具是经纬仪,主要用于水平位移观测,如三角网形式的水平变形监测或三角测量方法测定变形体变形。例如混凝土坝水平位移等用测小角法,用活动觇牌法时需用 J_1 级以上经纬仪测角。不容易到达的地点(如烟筒中心线垂直度观测)的平面位置观测,常利用经纬仪,采用测角前方交会法观测等。

出现了光电测距仪,特别是全站型速测仪后,监测网观测可用边角网方法。全站仪使记录和计算及数据处理变得简单,容易实现变形观测自动化。

(3)精密距离测量:早期精密测距工具为因瓦基线尺,目前因瓦基线尺仍是有效的精密测距工具。丈量距离远,地表起伏不平或跨越深沟时,因瓦尺量距不但劳动强度大,而且也不方便。而精密光电测距仪使精密量距变得极为便利。如 Mekometer ME3000,测程 2.5km ,标称精度为 $\pm 0.3\text{mm} \pm 10^{-6}\text{D}$;改进型的 ME5000,测程 5km ,标称精度为 $\pm 0.2\text{mm} \pm (0.2 \sim 1) \times 10^{-6}\text{D}$;双色激光测距仪,测程 20km ,标称精度为 $\pm 0.1\text{mm} \pm 0.1 \times 10^{-6}\text{D}$ 。这三种仪器完全可代替因瓦基线尺作高精度测距,常被用于精密边角网的测距工作中。

普通的光电测距仪用于一般精度的测距极为方便。像矿区地表沉陷观测,用普通光电测距导线即能满足精度要求。

2. 全球定位系统的应用

变形监测网要多次重复观测,像城市地表沉陷观测面积大,用常规方法一次观测时间长,但又希望一次观测时间越短越好,以减小时间差给沉陷成果带来的不利影响。

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。自从 20 世纪 80 年代以来,尤其是进入 90 年代后,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,绝对和相对精度扩展到米级、厘米级乃至亚毫米级,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 应用于地表变形观测的多个试验中,取得了丰富的理论研究成果,并逐步走向了实用阶段。数据通讯技术、计算机技术和以 GPS 为代表的空间定位技术的日益发展和完善,使得 GPS 方法由原来的周期性观测走向高精度、实时、连续、自动观测成为可能。

GPS 用于变形观测的作业方式可划分为周期性和连续性(Episodic and Continuous Mode)两种模式。

GPS 定位技术应用于地面变形测量。通常的做法是,在监测区域内布设一个 GPS 网,每隔一段时间观测一期,每期数据独立平差得到各点的三维坐标,比较各点各期坐标的变化,得到水平位移和沉降量。

为了提高 GPS 观测精度,应从 GPS 变形观测网基准点的影响、观测误差与形变信息的分离、周跳的探测与修复、整周模糊度的确定这几个方面进行更深入与详尽的研究。

GPS-RTK 技术用于矿区地表沉陷区的点、线、面及 3 维空间监测,以及建立动态变形区的高程变化模型。有学者建议,利用统计假设检验法进行数据的空间分析及空间内插处理。此外,GPS 技术在露天矿边坡移动监测及稳定性分析评价中也发挥了重要的作用。

3. InSAR 技术应用于地表变形观测

合成孔径雷达干涉测量 InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)技术在国外已开始应用于地表沉降监测,Wegmuller(1999)利用 1992 年 8 月至 1996 年 5 月间的欧洲航天局雷达卫星数据监测意大利 Bologna 城的沉降情况,取得了与常规测量一致的效果;同时,日本的 Nakagawa 等(2000)利用 JERS1 波段的合成孔径雷达 SAR 研究 Kanto 北部平原的地面沉降,发现 L 波段比 C 波段的 SAR 数据更适合平原地区的地面沉降研究;中国科学院遥感研究所选取处于沉降区的苏州市,利用 InSAR 技术进行了城市地表沉降监测,与常规水准测量相比,两者相关度达 0.943。这些都说明 InSAR 测量值与水准测量保持很高的一致性,进一步统计分析表明,样本对的差异均值为 4.47mm,差均值为 0.17mm。

4. GPS-InSAR 集成技术

差分 GPS(DGPS)可用来监测地表形变、开采沉陷等,但它只能对有限数目的离散点进行监测,且 GPS 测量在垂直分量上的精度一直较低。对于典型的一幅 SAR 图像,覆盖范围可达 $100\text{km} \times 100\text{km}$,如果 GPS 测点的平均密度为 $20\text{m} \times 20\text{m}$,则大约需要 2.5×10^7 台 GPS 接收机作业,这无疑是不可能实施的。

利用差分干涉雷达(D-InSAR)方法来监测地表的沉降和变化,其精度可达到亚厘米、甚至毫米量级。但 InSAR 技术对于大气传输误差、卫星轨道误差、地表状况和时态不相关等误差很敏感。其中,地表状况和时态不相关引起的误差只能通过仔细选择雷达波段和雷达影像对才能减少或避免,而大气传输误差和卫星轨道误差则可以通过 GPS 测量数据进行校正和消除。因 SAR 卫星有一定的运行周期,只能提供一定周期的图像。GPS-InSAR 集成技术是一种取长补短的可行的技术方案。

5. 三维激光扫描技术应用于变形观测

三维激光扫描技术用于地面和地下空间断面测量及三维建模。目前商品化的产品有德国 Callidus 公司的 GmbH 型和 Leica Geosystems 公司的 Cyrax 2500 型扫描仪等。这种仪器不需要反射器,采用脉冲测距的方式按极坐标原理对目标进行扫描测量,类似于数字摄影测量法,可获得目标物的点云(Cloud of points)数据。GmbH 型仪器一次扫描可获得 1750 个点数据。这

类仪器的最大测距范围为150m,最佳范围是1.5m~50m,点位精度为 $\pm 1\text{mm}$,表面形体建模精度为 $\pm 2\text{mm}$ 左右。将点云测量数据输入数据处理系统后可生成测量目标的断面图、等值线图和三维建模。这种技术已在地下硐室测量,巷(隧)道受围岩压力(应力)作用产生收缩的状况监测中得到成功的应用。

6. 机载三维激光扫描与成像技术(LIDAR)应用于变形观测

所谓LIDAR技术系统是“Light Detection and Ranging”的缩写,被称为机载三维激光扫描与成像系统,又称激光雷达系统。它是传统雷达技术与现代激光技术相结合的产物,是将扫描激光测距仪、惯性测量系统(IMU)、GPS和数码三维成像仪严密地结合起来,集成安装在小型飞机或直升飞机上,实现对地表的测距扫描成像和处理,以快速生成数字地面模型(DTM)、数字表面模型(DSM)、数字城市模型(DCM)和地形测图。这种技术系统与传统的测量方法相比,具有外业成本和数据后处理成本低、数据点密集、速度快、精度高的优点,是一种有发展前途的高新技术。由于LIDAR系统是一种主动式激光扫描测距系统,可以不依赖于太阳光照,全天时获取地面三维数据,其功能强大的后处理能力可以把地面及其上的植被、建筑物图像信息分离开来,在地形测图、数字地球、数字城市、森林监测、变形观测等领域很具应用前景。

该系统的基本工作原理是:利用GPS测定三维成像仪在空中的精确三维位置;利用IMU测定三维成像仪在空中的姿态参数;扫描激光测距仪用以测定三维成像仪到地面点的距离,而数码扫描成像仪则同步获取地面的遥感图像。由于扫描成像仪与扫描激光测距仪在硬件上共用一套光学系统,组成扫描激光测距——成像组合传感器,并且这四个仪器系统精确安装、同步操作,以保证地面上的激光测距点和图像上的像元点严格匹配。在数据后处理中,这些具有三维位置的激光像元点作为“控制点”来精确纠正所获得的遥感图像,从而快速获得地面的正射影像。此外,激光测距点也可以作为“种子点”来生成DTM等。

如果测图卫星或InSAR卫星上同时装载激光测高系统,将大大提高三维地形模型的高程精度。

7. 摄影测量方法

摄影测量方法包括航空摄影、遥感和地面摄影测量法三种。局部变形观测采用地面摄影测量法,简便易行。地面摄影变形观测的主要工具为地面摄影机和坐标量测仪,这样的设备不为大多数测绘单位所具备,应用不普及,并且还需根据不同设备认真研究其达到的精度。虽然如此,该方法对某些特殊的观测对象(如储煤气罐等球状物)进行变形观测具有独特优越性和特点:

①像片信息量丰富,可同时获得变形体上大批目标的三维变形信息,完整记录了变形体在不同时间的状态,便于对成果的比较与分析。

②外业工作量小,劳动强度低。

③观测时不需接触被摄物体,可观测人不易达到的地方。

用地面摄影测量进行变形观测有两种基本方法:

(1)固定摄影站的时间基线法:固定摄影站的时间基线法(或称伪视差法),是把两个不同时刻所摄的像片作为立体像对,量测同一像点的左右和上下视差,这些视差乘上像片比例尺即为目标点的位移。由该法基本原理可知,这种方法仅能测定变形体的二维变形,而不能得到像点沿摄影机主光轴方向的位移。所以,该法只适用二维变形的变形观测。

(2)数字摄影测量:数字摄影测量,一方面继承传统的摄影测量学,另一方面又借鉴影像处理与计算机视觉中的概念和方法,正成为有特色的新兴学科。近年来,各种数字摄影测量工