

高等教育“十二五”规划教材

变形监测及 沉陷工程学

Bianxing Jiance Ji Chenxian Gongchengxue

邓喀中 谭志祥 姜岩 戴华阳 师芸 徐良骥 编

中国矿业大学出版社



高等教育“十二五”规划教材

变形监测及沉陷工程学

邓喀中 谭志祥 姜 岩 编
戴华阳 师 芸 徐良骥

中国矿业大学出版社

内容提要

本书分为两篇。第一篇为工业与民用建(构)筑物变形监测及控制技术,包括工业与民用建(构)筑物变形规律、变形监测控制网设计及监测方法、变形监测数据处理及变形控制技术。第二篇为矿山开采沉陷及控制技术,包括矿山开采沉陷规律及观测站设计、矿山开采沉陷预计、开采沉陷的数值模拟与物理模拟法、建(构)筑物保护煤柱设计及损害评定方法、建(构)筑物下采煤技术、水体下(上)采煤技术、开采沉陷对环境的影响及其治理等。

本书为高等院校测绘工程专业本科生教材,也可供有关专业研究生、生产技术人员、设计人员和科学研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

变形监测及沉陷工程学 / 邓喀中等编. — 徐州:

中国矿业大学出版社, 2014. 9(2015. 9 重印)

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2457 - 6

I. ①变… II. ①邓… III. ①变形观测—高等学校—教材
②矿山开采—沉陷性—高等学校—教材
IV. ①P227②TD327

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 202810 号

书 名 变形监测及沉陷工程学
编 者 邓喀中 谭志祥 姜 岩 戴华阳 师 芸 徐良骥
责任编辑 潘俊成
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 22.75 字数 582 千字
版次印次 2014 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 2 次印刷
定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

具有矿业特色高校的测绘工程专业大都开设“变形监测与沉陷工程学”课程,原来使用的教材为1991年何国清等编写的《矿山开采沉陷学》,现已不能满足教学大纲的要求。本书是在该教材的基础上,为适应教学改革、学科发展需要,删减、合并了部分内容,并增加了工业与民用建筑物的变形监测网设计、变形监测方法和数据处理、变形控制技术等内容。

本书涉及面较广,学生在学习本课程前,一般应先学习数字测绘技术、高等数学、普通物理、线性代数、概率论与数理统计、矿井地质、煤矿开采、矿山测量、卫星导航及定位技术、弹性力学、误差理论与测量平差等课程。

全书主要内容包括两篇:第一篇为工业与民用建(构)筑物变形监测及控制,包括变形体的变形规律、变形监测方法及变形监测网设计、变形监测数据处理与预报、工程变形控制;第二篇为矿山开采沉陷及控制技术,包括矿山开采沉陷规律及观测站设计、矿山开采沉陷预计、开采沉陷的数值模拟与物理模拟法、建(构)筑物保护煤柱设计及损害评定方法、建(构)筑物下采煤技术、水体下(上)采煤技术、开采沉陷对环境的影响及其治理,在教学过程中可根据实际教学要求适当取舍。

本书由邓喀中主编。具体参加编写的有:邓喀中(前言、第一章、第八章),谭志祥(第五章、第九章、第十章、第十一章),姜岩(第七章),戴华阳(第二章、第六章),师芸(第三章、第四章),徐良骥(第十二章)。

本书部分图表取自所列参考文献,在此向原作者致谢。

由于编者水平所限,书中存在谬误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2014年8月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 变形及变形监测	1
1.2 变形监测及沉陷工程研究的对象及特点	4
1.3 变形监测与邻近学科的关系	6
1.4 变形监测和矿山开采沉陷研究现状	8
复习思考题	16
第一篇 工业与民用建(构)筑物变形监测及控制	
第 2 章 变形体的变形规律	19
2.1 岩石的物理力学性质	19
2.2 工民用建筑物变形规律及影响因素	27
2.3 大坝变形规律及影响因素	30
2.4 地下水开采引起的地表变形规律及影响因素	35
复习思考题	38
第 3 章 变形监测方法及变形监测网设计	39
3.1 变形监测的意义和内容	39
3.2 变形监测的周期及其精度要求	40
3.3 变形监测方法及仪器	45
3.4 变形监测网设计	56
3.5 变形监测实例	65
复习思考题	77
第 4 章 变形监测数据处理与预报	78
4.1 基本理论	78
4.2 基准变换	85
4.3 监测网的稳定性分析与位移值的计算	94
4.4 变形模型及其分析	97
4.5 观测资料整理分析	103
4.6 工程变形机理分析及预报	108
复习思考题	113

第 5 章 工程变形控制	114
5.1 工民用建筑物沉降控制	114
5.2 大坝变形控制	120
5.3 地下水开采引起的地表沉降控制	124
5.4 滑坡防治	127
复习思考题	132

第二篇 矿山开采沉陷及控制技术

第 6 章 矿山开采沉陷规律及观测站设计	135
6.1 地下开采引起的岩层移动特征	135
6.2 地下开采引起的地表移动特征	139
6.3 矿山开采沉陷观测站设计	145
6.4 矿山开采地表沉陷的一般规律	160
6.5 矿山开采沉陷的主要影响因素	173
复习思考题	182

第 7 章 矿山开采沉陷预计	183
7.1 概述	183
7.2 矿山开采沉陷预计方法分类	183
7.3 最大下沉及最大水平移动预计	184
7.4 典型曲线法	187
7.5 剖面函数法	189
7.6 概率积分法	194
7.7 开采沉陷预计的特殊问题	226
复习思考题	233

第 8 章 开采沉陷的数值模拟与物理模拟法	234
8.1 概述	234
8.2 有限单元法	235
8.3 边界单元法	239
8.4 离散单元法	241
8.5 相似材料模拟试验法	243
复习思考题	255

第 9 章 建(构)筑物保护煤柱设计及损害评定方法	256
9.1 保护煤柱设计	256
9.2 采动区建筑物变形及损害评定方法	270
复习思考题	284

第 10 章 建(构)筑物下采煤技术	285
10.1 建筑物下采煤技术	285
10.2 线性构筑物下采煤技术	300
10.3 井筒煤柱开采技术	308
10.4 建(构)筑物下采煤实施步骤	315
复习思考题	316
第 11 章 水体下(上)采煤技术	317
11.1 水体下采煤技术	317
11.2 水体(承压水)上采煤技术	329
复习思考题	332
第 12 章 开采沉陷对环境的影响及其治理	333
12.1 开采沉陷对土地与生态环境的影响	333
10.2 矿区土地复垦与生态修复	337
10.3 矿区土地复垦与生态重建评价	344
复习思考题	350
参考文献	351

第1章 概 述

1.1 变形及变形监测

1.1.1 变形及变形监测的概念和意义

变形是变形体在外力作用或者内力平衡受到破坏条件下,物体在形状、大小、空间位置等方面变化的空间状态和时间特征。变形体的变形可分为两类:变形体自身的形变和变形体的刚体位移。自身形变包括伸缩、错动、弯曲和扭转四种变形;而刚体位移则含整体平移、整体转动、整体升降和整体倾斜四种变形。

引起物体变形的原因很多,不同外力引起的变形不同。变形的主要原因可归结为自然的和人为的。自然引起的变形如地震、构造运动、新沉积地层、风、雪载荷等;人为因素引起的变形有矿山开采、地下工程开挖、地下水抽汲、油气开采、深基坑开挖、各种建筑工程等(图1-1)。这些变形对人类造成了巨大的危害,人们一直在研究控制这些灾害的方法。本书主要讲述建筑物变形、大坝变形、地下水抽汲沉陷、矿山开采沉陷等相关变形监测的理论、方法及变形规律、控制技术。

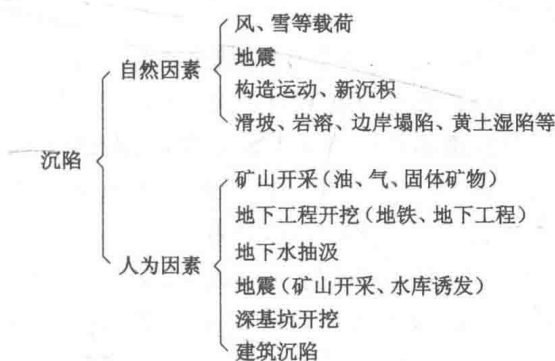


图 1-1 引起变形的原因

变形监测(也称变形观测)是指对各类工程及其地基、建筑基坑或一定范围内的岩体及土体的位移、沉降、倾斜、挠度、裂缝进行监测,并对相关影响因素(如地下水、温度、应力应变等)进行监测,提供变形分析预报的过程。

由于变形原因复杂,目前难以用理论的方法分析解决,只能通过实地观测的手段,获得不同外在条件下的变形数据,结合相关理论方法,研究不同变形与导致变形因素之间的关系,为地震预报、工程安全评估、设计理论提供指导。变形监测的主要意义体现在两方面:

① 科学意义:通过变形观测数据分析处理,认识变形机理,验证有关理论和假说,建立

正确的预测预报理论和方法。

② 实用意义:通过变形监测及数据处理,掌握不同时期各类工程和地质构造的稳定性,及时发现问题,以便采取措施,保障各类工程的安全。

1.1.2 沉陷及变形的危害

下面主要从建(构)筑物变形、矿山沉陷、地下水抽汲地面沉陷三方面介绍沉陷及变形的危害。

1.1.2.1 工程变形危害

任何工程都将改变原有的受力状态,从而导致变形体变形。当变形在允许范围内时,工程是安全的,不会给工程使用带来安全隐患。当变形超过一定范围后,轻者导致建(构)筑物出现倾斜、裂缝,严重的将使建筑物倒塌,造成严重的人员伤亡和财产损失。国内外这样的事例很多,下面介绍一些典型事例。

苏州虎丘塔始建于公元 959 年,塔高 47.7 m,迄今已有 1 000 多年的历史。从明朝起,虎丘塔即已开始倾斜,至今,塔身最大倾角为 $3^{\circ}59'$,被称为“中国第一斜塔”。1961 年虎丘塔作为苏州最古老的建筑物被列为国家级保护文物,出于保护的考虑,从 1975 年开始,虎丘塔便不再允许游客进入。

上海展览中心馆位于上海市区延安中路北侧,展览馆中央大厅为框架结构,箱型基础,展览馆两翼采用条形基础。箱型基础为两层,埋深 7.27 m。箱型基础顶面至中央大厅上面塔尖,总高 96.63 m。地基为淤泥质软土,压缩性大。展览馆于 1954 年 5 月开工建设,当年年底实测基础平均沉降 60 cm。1957 年 6 月,展览中心大厅四角的沉降量最大达到 146.55 cm,最小沉降量为 122.80 cm。1979 年 9 月测量时,展览馆中央大厅累计平均沉降量为 160 cm,并逐渐趋于稳定,工程使用良好。

长春市新世纪广场工程主楼 42 层,高 160 m,地下室深 16 m,占地 $7\,800\text{ m}^2$ 。1994 年 2 月 17 日当深基坑开挖到 16 m 时,由于支护设计不当,导致大面积塌方。

南京进香河农贸市场大楼,南临珠江路小学教学楼,西距进香河路 4.5 m,基坑深 7 m。部分土方开挖后发现道路开裂,小学教学楼向北移动 90 mm,垂直沉降 110 mm,引起小学教学楼南侧台阶隆起、墙体开裂,地面多道裂缝,缝宽 150 mm,周围平房也因不均匀沉降而损害,住户被迫疏散,房屋拆除,究其原因是地面荷载大、支护不合理。

随着城市高层建筑的增多,建筑物损坏事故越来越多,必须加强基坑开挖时的变形监测,防止此类事故发生。

我国目前各城市都在进行地铁建设,由于地铁开挖导致的地面塌陷事故时有发生。2008 年 11 月 15 日下午 3 时 15 分,正在施工的杭州地铁湘湖站北 2 基坑现场发生大面积坍塌事故,造成 21 人死亡,24 人受伤,直接经济损失 4 961 万元。上海、北京、南京等地铁在施工中都出现地面塌陷事故,导致严重的人员伤亡和财产损失,因此加强地铁施工中的岩体内部及地表变形监测是必需的。

大坝作为防洪、蓄洪、发电等设施,为人类带来了巨大的社会效益,但如果不能保证大坝的安全,也会给人类带来严重的灾害。1959 年法国 66 m 高的马尔巴塞(Malpasset)拱坝,水库蓄水 $3 \times 10^7\text{ m}^3$,在溃坝时形成的洪水,以 35 km/h 的速度下泻,导致 400 人死亡。1963 年意大利 266 m 高的维昂特(Vajont)拱坝,库岸发生大的滑坡,滑体以 25~30 m/s 的

速度滑向水库,在30~60 s内共滑下 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的土石方,使库中5 000万 m^3 的水被挤出,掀起250 m高的巨大水浪,洪水淹没坝顶100 m高,在下游1.6 km处仍有60 m高的巨浪。7 min内毁灭了一座城市和几个小镇,死亡3 000人。1975年8月8日凌晨,我国河南板桥水库垮坝,导致24万人死亡。根据国际大坝委员会的统计,截止到1965年,高度超过15 m的大坝失事的有290次以上,仅1959~1973年间,至少有22座水坝失事。

坚持长期的变形观测对于预防这些事故具有重要的意义。瑞士的泽乌齐尔(Zeuzier)拱坝,高156 m,在完工20多年里,1978年突然发现异常,坝顶下沉10 cm,拱座间距离缩短了9 cm,拱冠顶向上游移动9 cm,超出变形值一倍以上,发现异常后泄放了90%的水,发现坝体已经出现裂缝。仔细分析原因,是由于在距大坝1 400 m、比坝低300 m的地方正在开挖一条公路隧道造成的。

地震对人类的危害巨大。1976年唐山地震,死亡24万余人,重伤16万人,整个唐山市夷为平地。2008年5月12日的汶川地震,导致8万多人死亡。由于地震产生的原因非常复杂,目前对地震的预测、预报难以准确进行,必须通过对断裂带的变形监测,结合其他一些观测资料进行分析,寻求规律,建立可靠的预测预报理论。1973年我国地震工作者根据小震、地壳变形、地磁和海平面等异常资料,成功预报了1975年2月4日的海城7.3级地震,使100多万人在地震前半天离开了房屋和工作地点,大大减轻了这一灾害造成的损失和人员伤亡。

以上事例表明,坚持长期的变形监测,可以及时发现问题,采取相应的措施,防止变形灾害的发生。

1.1.2.2 矿山开采沉陷危害

矿山开采导致地面沉降,使位于沉陷区的建(构)筑物、铁路、公路、桥梁、隧道、堤坝、输电线路等人工建(构)筑物损害、倒塌,影响人民的生命财产安全和交通运输安全;使含水层水位下降,地面河流、水库干涸,使水进入井下,淹没矿井;在岩溶发育区,地下开采使地面出现大量塌陷坑、塌陷漏斗,等等。沉陷灾害有时会导致严重的人员伤亡和财产损失。

1895年德国柏克留城下采煤,使31栋房屋倒塌,严重损害的达35栋。1993年9月22日凌晨,甘肃窑街矿务局发生大面积地面沉陷,使几十人丧身,塌陷坑深达几十米,其原因是小煤窑乱采所致。

地下开采还破坏含水层,使水进入井下,威胁矿井安全。1916年日本在海下采煤时水溃入井下,两小时淹没矿井,致使237人死亡。1984年开滦矿务局范各庄矿开采导致断层导水,矿井最大涌水量达到 $2\,053 \text{ m}^3/\text{min}$,为世界矿井涌水量之最。整个矿井淹没,设备全部报废,堵水费用超过亿元。2010年3月28日13时40分左右,王家岭煤矿发生重大透水事故,造成153人被困,经全力抢险,115人获救,38人死亡。据不完全统计,我国煤矿在1990~1996年间一次突水死亡10人以上的重大事故共发生56次,死亡人数达1 062人。国有重点煤矿平均每年发生突水事故125次,经济损失15亿元。地方和乡镇煤矿每年因突水造成的经济损失是国有重点煤矿的2~3倍。

矿山开采引起矿区局部地震,震级一般为2~3级,引起当地居民的巨大恐慌。我国部分矿区,如兖州、开滦、抚顺等相继出现了局部地震。国外德国鲁尔矿区开采导致的最大地震达到5.6级。南非金矿地震达到5.2级(开采深度3 000~4 000 m);波兰在上西里西亚(Silesia)城下采煤时,曾发生一次大的矿震,致使400多间房屋损害,开采诱发的最大地震为4.3级。

随着开采深度的增加,地震发生的频率、震级均将增大,其对地面的危害也将增大。

矿山开采沉陷使地面标高降低,耕地淹没、盐渍化、沙漠化;在山区引起坡体滑移。据不完全统计,我国煤矿开采沉陷塌陷土地大约 70 万 hm^2 ,每年仍以 6 万~7 万 hm^2 的速度增加,复垦土地不到塌陷地的 20%。位于华东平原的兖州、徐州、两淮等矿区,由于潜水位高,地面沉陷导致地面大面积积水,使破坏土地难以通过复垦恢复。据徐州矿区统计,塌陷积水或者潜水位升高,不能耕种的土地占塌陷土地的 44.8%;淮北矿区积水绝产面积约占 35%,最大积水深度为 10 m,34%为季节性积水或盐渍荒芜,仍可耕种的占 30%,塌陷后复垦可恢复的土地不到 50%。

要控制矿山开采沉陷,必须在矿山开采沉陷实测基础上,研究地下开采与覆岩破坏、地面沉陷及建(构)筑物损害之间的机理和规律,寻求减轻和控制覆岩破坏、地面沉陷的措施和技术方法,达到在合理开采矿产资源的基础上,防止地下、地面水进入井下工作面,有效保护地面建(构)筑物。因此,进行矿山开采沉陷监测及规律研究具有重要的理论和实用价值,也是矿山测量工作者一直在努力的方向。

1.1.2.3 地下水抽汲的地面沉降危害

随着城市人口的增加及工业的快速发展,城市用水量越来越大,过量抽汲地开水,使含水层水位下降,降低了孔隙压力,破坏了地层中的应力平衡,含水层在上覆岩层重量作用下产生压缩变形,从而导致岩层及地表下沉。据统计,目前世界上已有 60 多个国家和地区发生了地面沉降。文献[3]指出,自 1891 年墨西哥城出现最早的地面沉降记录以来,该市最大累计下沉已超过 15 m;日本的新潟于 1898 年发生地面沉降,至 1958 年地面沉降速率达 530 mm/a ;1922 年美国在加州萨克拉门托首次发现地表沉降,到 1995 年时,美国 50 个州均有地面沉降发生;我国自 1921 年上海市区最早发现地面沉降以来,至今已有 50 多个城市和地区发生了不同程度的地面沉降,全国累计地面沉降量超过 200 mm 的地区达到 7.9 万 km^2 ,并有进一步扩大趋势。地面沉降的主要危害为:① 地面建(构)筑物裂缝、倒塌。② 管线损害。③ 港口设施失效。美国长滩市由于地表沉陷,使码头全部失去效用;上海市海轮停靠的码头原标高 +5.2 m,1964 年标高降至 +3.0 m,高潮时码头淹没,无法使用等。④ 桥墩下沉,净空减小,水上交通受阻。上海苏州河原每天通行 2 000 条船,航运量 100 万~120 万 t。现大船不能通行,中小船只也只能部分时间通航。⑤ 滨海城市受海水侵蚀。上海由于地面下沉,海水经常上岸,威胁人民的生产和生活,1956 年修筑防洪墙,1959~1970 年加高四次,投资超过 4 亿元。

要控制地下水抽汲导致的地面沉降危害,目前大多在地面沉降实测基础上,结合地下含水层水位变化、地层性质等,研究地下水抽汲量与地面沉降的关系,在此基础上寻求地下水的合理抽汲量或采取适当的措施,控制地下水抽汲的地面沉降。

从上面三种变形危害分析可以看出,由于岩土性质的复杂性,目前难以用现代力学理论建立这些沉陷及变形的预测、预报理论,必须通过实测资料,结合工程地质、覆岩特性等,分析变形机理,研究沉陷规律及预测、预报理论,以便采取合理的措施减轻和控制这些变形和沉陷的危害,保障各种工程、人民生命财产的安全,这是本书的重点内容。

1.2 变形监测及沉陷工程研究的对象及特点

根据研究对象不同,变形监测可以分为全球性的变形监测、区域性的变形监测及局部性

的变形监测。

众所周知,地球自西向东旋转,地球在旋转过程中,其旋转轴和旋转速度将发生变化,研究表明,地球平极位置(地球旋转轴拟合瞬时极位置的圆弧中心)与地震有关系。1960年智利大地震使地球平极变化50 cm,1964年的阿拉斯加8.4级地震使地球平极变化30 cm。另外地壳分为六大板块(太平洋板块、印度洋板块、亚欧板块、非洲板块、美洲板块和南极洲板块),各板块目前以每年1~6 cm速度在运动中,板块运动对地球气候、地震发生频率等造成影响,从而影响人类的生活、生产,因此进行全球性的变形监测是十分必要的。全球性变形监测主要包括:①地极移动;②地球旋转速度变化;③地壳板块运动。通过全球性的变形监测,掌握地球运动变化状态,以便采取相应的措施,防止重大灾害对人类的影响。

区域性变形监测只针对某一地区进行的变形监测,可以是一个国家、一个地区内进行的变形监测。区域性变形监测主要研究:①地壳板块范围内的变形状态;②板块交界处地壳的相对运动;③区域抽汲地下水沉降等。如通过这些监测研究青藏高原隆起的速度、变化状态;研究板块交界处板块相对运动状态及与地震活动的关系等,从而为研究地震发生机理、预测预报提供基础数据。目前,我国由中国地震局牵头,会同总参测绘局、中国科学院和国家测绘地理信息局共同建立了中国地壳运动观测网,该网主要包括基准网、基本网、区域网和数据传输与分析处理系统四大部分,分别由27个GPS连续观测站、55个定期复测GPS站、1000个不定期复测GPS站及数据中心与3个共享子系统组成整个网络工程。该工程可对基准站之间年变化2 mm的位移进行高精度监测,同时也可对网络覆盖区域1000 km内3 mm的距离变化实时监测,从而通过对地表位移的监测科学地判断地震活动趋势。在抽汲地下水沉降监测方面,我国上海、天津、苏锡常等地区均建立了相应的变形监测网,为研究这些地区地下水抽汲引起的地表沉降规律提供了基础。

局部性的变形监测主要针对某一特殊工程的移动变形状态,如建筑物沉降观测、大坝变形观测、山体滑移状态观测、开采沉陷观测等,这些监测的范围较小,一般在几百平方米到几平方公里范围内,但监测精度要求高。

变形监测与一般测绘既有联系,又有自身的特点,变形监测的特点主要体现在以下几方面:

(1) 精度要求变化大

由于变形体范围、变形量及安全性要求等差别大,从而使变形监测的精度变化大,从高精度的变形监测到低精度的均有。如高能加速器的变形监测误差要求小于0.1 mm;滑坡变形监测误差要求在10~50 mm;岩基混凝土坝变形监测误差应小于1 mm;开采沉陷监测点位误差应小于10 mm等。如何确定精度是一个不易回答的问题,国内外学者对此作过多次讨论,普遍的观点是:应采用所能获得的最好的测量仪器和技术,达到其最高精度,变形测量的精度愈高愈好,但也要考虑费用。

(2) 重复观测周期变化大

变形监测是通过两次以上的测绘计算出变形量。重复观测时间长短对研究变形体的动态过程、移动特征有影响。观测周期长,可能无法获得变形体的典型变形特征;观测周期太短,工作量大,一个周期内变形量小,可能与测量误差难以区分,达不到监测的目的。同时,变形体变形与外在环境影响有关,当外力增加时,变形速度增加,应提高观测频率。如建筑物在建设过程中,随着建筑物高度增加,应力增大,地基及建筑物变形增大,应增加观测频

率;当建筑物建成几年后,变形趋于稳定,可减小监测次数。对于大坝变形监测,随着蓄水高度的增加,变形增大,因此在洪水期应增加大变形监测的频率,而在平常时期,可以减少变形观测的频率。对于观测频率的确定,一般应根据变形体受力特征、变形速度、费用等综合确定。

(3) 综合运用各种观测方法

变形观测有全球性的、区域性的和局部性的。对于全球性变形监测,由于监测范围大,一般测绘仪器难以满足要求,因此对全球性变形监测一般采用空间测量技术,包括甚长基线干涉测量(VLBI)和卫星激光测距技术;对于区域性的变形监测,一般采用GPS、摄影测量、InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar,合成孔径雷达差分技术)等;对于局部性的变形监测,一般采用常规地面测量技术,包括水准仪、全站仪、GPS、准直测量、数字近景摄影测量、三维激光扫描仪等;对于变形体应力、应变及岩体内部移动等特殊测量,一般采用倾斜仪、伸长仪、应变测量等技术。在进行变形监测时,一般集成多种测量方法,以发挥各种方法的优势。如GPS监测精度高,但只能进行点线监测,无法进行面上监测,而摄影测量、三维激光扫描、InSAR等技术能进行面上监测,但精度相对低,通过两者集成和数据融合,充分发挥各自的优势,达到高精度面上监测目的。再如进行滑坡变形监测时,为了寻求滑移面,不但要监测滑坡表面的移动,同时也要监测岩体内部的移动,此时可以同时采用GPS、三维激光扫描、倾斜仪等集成技术,达到既监测滑坡面上移动又监测岩体内部移动的目的。

(4) 数据处理要求高

由于变形体的变形有时很小,与观测误差处于同一数量级,难以正确区分是观测误差,还是变形体的变形,需要一些特殊的数据处理方法,如小波变换、Kalman滤波、频谱分析等现代数据处理方法。同时,在建立变形预测预报模型时,涉及多元非线性回归分析、灰色模型、人工神经网络模型、支持向量机(SVM)等。

(5) 多学科的配合

对于变形的机理和规律的分析必须结合多学科知识。如建筑物变形机理的分析,需要结合岩土力学和土木工程的知识;对矿山开采沉陷的分析,必须结合采矿、岩石力学等方面的知识;对地下水开采沉降必须结合水文地质和工程地质的知识等。

1.3 变形监测与邻近学科的关系

变形监测及沉陷工程学涉及的内容较广,在变形监测方面,涉及测绘的基础理论及数据处理理论;在变形机理分析和变形控制方面,需要结合土木工程、建筑结构、地质学、工程地质、水文地质、工程力学、岩土力学、计算方法、采矿工程学、地震、环境保护学、相似理论等,它是一门多学科结合的边缘性学科。

1.3.1 与测绘学科之间的关系

变形监测是测绘学科重要的研究方向,是国际测量师联合会(International Federation of Surveyors, FIG)第六委员会(工程测量)重要的工作内容;矿山开采沉陷为国际矿山测量协会(International Society for Mine Surveying, ISM)第四专业委员会的工作内容。变形监测与一般测绘既有联系也有区别。在区域性变形监测方面,将采用大地测量、摄影测量、遥

感的相关理论与技术;在局部性变形监测方面,将用到常规的大地测量方法,同时也用到一些特殊的测量仪器和方法,如大坝变形监测采用准直仪、静力水准仪;在建(构)筑物、边坡、大坝应力、应变监测方面将使用应力、应变仪;在岩体内部变形监测方面将用到伸长仪、测斜仪等;在变形监测网设计、数据处理方面,将用到测绘数据处理的相关理论和方法;在变形分析、预测、预报方面将通过测绘数据处理理论,结合小波变换、灰色系统、人工神经网络等非线性理论进行。上述表明,变形监测是测绘学科在理论、应用等方面的进一步扩展,是测绘学科重要的研究方向之一。

1.3.2 与地质学、工程地质学、水文地质学之间的关系

地质学是研究人类的生存环境——地球(特别是地壳)的组成、演变和发展的一门科学,而工程地质学和水文地质学均为地质科学的分支。工程地质学是研究与工程规划、设计、施工和运营有关的地质问题的科学;水文地质学是研究地下水的形成及运动、分布规律的科学。

各种建筑工程地基、基础、矿山开采等都是在岩土体内进行,岩体的岩石和矿物成分、形成环境、岩体的结构面特性、岩土的水文地质和工程地质特征必将对建筑物结构变形、开采沉陷等产生影响。因此,需要应用土力学、地质学、工程地质学、水文地质学的有关理论与方法来分析岩石、岩相和岩层的特征,分析岩体的结构,了解工程地质环境因素,解释变形机理,寻求控制变形的技术措施。

1.3.3 与岩土力学之间的关系

各种建设工程的稳定性、安全及矿山开采沉陷问题都属于岩土力学研究的问题之一,即属于岩土工程的分支学科。这样,岩土力学中有关岩体的应力、位移、应变的测试技术和计算理论可以结合建筑工程、矿山开采的特点,应用于建筑工程、矿山开采沉陷学科之中。

1.3.4 与采矿工程学之间的关系

矿山开采沉陷研究的主要问题是开采沉陷的预计理论及其“三下一上”(建筑物下、水体下、铁路下及承压水上)采煤。要经济合理地回采受护对象下及附近的呆滞煤量,需要应用采矿工程学的基本理论,特别是采取特殊的采矿方法,如充填开采、条带开采、多工作面协调开采等。

1.3.5 与建筑工程学之间的关系

同样工程地质环境条件下,不同建(构)筑物产生的变形不同,对建(构)筑物的影响不同,如高度大、底面积小的构筑物对倾斜敏感,长度大的建筑物抗曲率、水平变形的能力差等。掌握建筑工程学相关理论,对于分析变形机理,寻求控制变形措施具有重要意义。在矿山开采沉陷研究方面,进行建(构)筑物下采矿时,为确保受护物安全正常使用,需对建(构)筑物的结构稳定性进行分析,有时需要在开采前和采后对建(构)筑物采取加固和维修措施。这必将涉及建筑结构的理论与方法。

1.3.6 与环境保护学之间的关系

环境保护学是研究人类的生产、生活对自然环境产生影响的一门科学,它的涉及面较广。矿山开采沉陷将使位于沉陷区的地面标高降低,从而诱发严重的生态环境问题:① 地面标高降低使耕地淹没、盐渍化、沙漠化;在山区引起坡体滑移;② 使位于沉陷区的建(构)筑物、铁路、公路、桥梁、隧道、堤坝、输电线路等损害、倒塌,影响人民的生命财产安全和交通运输安全;③ 地下矿藏开采使含水层水位下降,地面河流、水库干涸,使水进入井下,淹没矿井;④ 在岩溶发育区,地下开采使地面出现大量塌陷坑、塌陷漏斗等等。为减轻、恢复和治理这些生态环境灾害,需要结合生态环境学的相关理论和方法进行研究和评价。

1.4 变形监测和矿山开采沉陷研究现状

变形监测和矿山开采沉陷经历了不同的发展阶段,下面分别介绍。

1.4.1 变形监测研究现状

变形监测起源于工程事故,上世纪随着高层建筑增多及重大工程出现,地基事故、大坝事故越来越多,变形监测是检测设计理论和工程安全的基础,受到了国内外学者的重视,对变形监测的方法、数据处理和预测预报理论进行了系统的研究。在变形观测网建立、观测方法和观测技术、数据处理技术方面取得了丰硕的成果,已经形成了系统的理论和方法,特别是在开采沉陷的预测、预报及控制研究方面,取得了骄人的成果。

近代测绘技术的发展也促进了变形监测技术手段的更新换代。以测量机器人、地面三维激光扫描为代表的现代地面测量技术,改变了经纬仪、全站仪等人工观测技术,实现了测量自动化。以测斜仪、伸长仪、应变计等为代表的岩体内部变形观测技术,实现了监测的数字化、自动化、网络化。以 GPS 技术、合成孔径雷达干涉差分技术和机载激光雷达技术为代表的空间对地观测技术,正逐步得到发展和应用。同时,有线网络通讯、无线移动通讯、卫星通讯等多种通讯网络技术的发展,为工程变形监测信息的实时远程传输、系统集成提供了可靠的通讯保障,现代变形监测正逐步实现多层次、多视角、多技术、自动化的立体监测体系。

传统地面观测主要以经纬仪、全站仪、水准仪等大地测量技术为主,不易实现自动化,测量效率低。近年来,测量机器人和三维激光扫描技术的出现,改变了人工观测方式,实现了测量的自动化,具有较高的测量效率。测量机器人实际上是自动全站仪 RTS (Robotic Total Station) 的俗称,可以自动寻找目标,不需要人工瞄准目标。测量机器人已在上海磁悬浮工程、三峡大坝、库区滑坡、新疆三屯河水库大坝、广州地铁等得到了很好的应用,其监测精度可达到毫米及亚毫米级。但测量机器人的目标自动识别的最远距离一般为 1 km 左右,监测范围小,测量速度也决定了用于高频率的振动测量比较困难。

三维激光扫描系统根据承载平台不同,分为机载型、车载型、站载型,其中车载型和站载型属于地面三维激光扫描。三维激光扫描主要特点体现在数据采集的高密度、高速度和无合作目标测量。用户可以设置测点间隔密度为 0.1~2.0 m,以每秒几十点、几千点乃至几十万点的速度测量,具有很强的数字空间模型信息获取能力。地面三维激光扫描仪在测程上,根据仪器种类不同,可以从几米到 2 km 以上。10 m 以内测程为超短程,0~100 m 为短

程,100 m~300 m 为中程,300 m 以上为远程。由于三维激光扫描测量受步进器的测角精度、仪器测时精度、激光信号的信噪比、激光信号反射率、回波信号强度、背景辐射噪声强度、激光脉冲接收器灵敏度、测量距离、仪器与被测目标面所形成的角度等方面的影响,一般中远程三维激光扫描仪的单点测量精度在几毫米到数厘米之间,模型的精度要远高于单点精度,可达 2~3 mm。

三维激光扫描技术能快速准确地生成监测对象的三维数据模型,已开始桥梁、文物、滑坡体、泥石流、火山、矿山开采沉陷等领域快速、面域监测中得到了应用。美国佛罗里达州运输部利用 ILRIS-3D 对佛罗里达州 I10 出口的 30 号桥梁进行桥梁加载变形监测试验,以分析该桥梁结构承受能力,通过与传统监测手段在外界所需条件、测量精度、测量时间、需要人员、测量总点数、成果输出等方面的比较,认为三维激光扫描技术在变形监测方面是可行的。机载激光雷达(三维激光扫描仪),以小型飞机或直升机搭载为主,与 GPS、陀螺、惯性测量系统(MU)、大面阵数码相机(DC)结合,可以在很短时间内获取大范围详细的三维地形数据。在精度上,Z 方向的精度优于 XY 方向,最好可达 10~15 cm,最差 0.5 m,XY 方向上的精度为 15 cm~1 m。机载型的三维激光扫描系统测量范围大、速度快,但精度较差,而且价格昂贵,用于变形监测还有相当难度。

激光扫描系统得到的是海量数据,点云具有一定的散乱性,没有实体特征参数,直接利用三维激光扫描数据比较困难,必须建立针对三维激光扫描技术的整体变形监测概念,研究与之相适应的变形监测理论及数据处理方法。现有的基于监测点的变形监测模式不适用于三维激光扫描仪的变形监测,必须探讨无监测点的监测对象测量方法;要研究监测对象三维模型的建立和模型的匹配,研究基于三维监测对象模型的变形分析理论及方法,建立基于激光三维扫描技术的监测数据和模型精度的评价体系等。

InSAR 是上世纪末出现的空间测量新技术,它是无线电波为媒介的主动微波遥感工具。通过合成孔径雷达,探测目标物的后向散射系数特征,通过双天线系统或重复轨道法可以由相位和振幅观测值实现干涉雷达测量。利用同一地区的两幅干涉图像,其中一幅是通过形变事件前的两幅 SAR 获取的干涉图像,另一幅将两幅干涉图差分处理(除去地球曲面、地形起伏影响),可获取地表微量形变,因此,D-InSAR 可以用来监测地表面水平和垂直位移、大型工程的形变等。

早期的 InSAR 技术主要用于地形图测绘。自 1989 年盖伯瑞尔(A. K. Gabriel)等人首次论证了 D-InSAR 技术可探测厘米级的地表形变以来,各国科学家在地面沉降监测方面开展了大量的研究工作,取得了一些令人瞩目的成果。由于 D-InSAR 自身成像条件较为苛刻(空间、时间失相关,大气影响等),使得利用 D-InSAR 监测地表沉降受到一定的限制,很可能造成大量数据无法形成干涉条纹。为解决这一问题,1999 年费拉提(A. Ferretti)等人提出永久散射体干涉测量(Permanent Scatters DInSAR,PS-DInSAR)技术,并利用 34 幅 ERS SAR 数据对意大利安科拉(Ancona)地区的沉降进行探测,得出该地区的地表形变,并分析说明了利用 PS-InSAR 技术所探测到的 PS 点的形变精度可以小于 1 mm/a。目前该技术在城市失水沉降、火山、地震等变形监测中得到了广泛的应用。

D-InSAR 监测技术具有全天候、无接触、低成本等特点,可以在大面积范围内(100 km × 100 km)监测地面的微小形变,不需要测量人员进入灾害地区,而且 D-InSAR 一幅图像就可以提供控制空间分辨率达 5 m × 20 m 的 1×10^4 km² 的地表形变数据,具有其他大地测

量方法所不能比拟的优势。但 InSAR 数据质量受多种因素的影响,造成了 D-InSAR 技术应用时存在许多实际困难,精度受到一定的限制。另外,InSAR 卫星具有的固有运行周期,不能满足时间域上的高分辨率,不适合高动态的变形监测。为了解决时间长、干涉相干大大降低问题,国际上开始采用多个卫星串行方式。欧洲空间局的 ERS-1 和 ERS-2 两颗卫星构成串行星对,对同一地面访问时间差为一天,使得两次取得的 SAR 数据之间的相干性得到一定保障。20 世纪 90 年代后期,随着小卫星技术的发展,利用编队卫星技术进行干涉测量成为星载 InSAR 发展的趋势,典型方案有法国的干涉车轮(Cartwheel)和德国的 Tandem-X 任务。同时为解决工作区域的相干性较弱问题,在预先设定的地面监测点上安装具有高精度坐标的人工角反射器,当 SAR 成像时将会强烈反射过来电磁波,在影像上出现明显特征点。或者在测区找到类似于角反射器的永久性散射体,比如裸露的岩石、高楼、灯塔等。随着 SAR 分辨率及卫星编队技术的实现,相信 InSAR 用于大范围沉降变形监测将越来越多。

GPS 在变形监测方面,可以提供点位基于全球坐标系统的变化,不受局部变形的影响,可以监测全球范围或区域范围内的地球板块运动,为地震监测提供了手段。目前,我国利用 GPS 已建立中国地壳运动观测网络。在工程变形监测方面,可用在大型滑坡体、露天矿边坡、海上勘探平台沉陷、城市地面沉陷等大范围监测;利用 GPS RTK 技术,可进行高耸建筑物的风振监测、桥梁的振动监测等。

GPS 用于变形监测的作业模式可概括为周期性和连续性两种。周期性模式一般采用静态相对定位测量方法,如三峡库区滑坡、李家峡水电站滑坡,龙羊峡水库近岸滑坡等监测工程中均采用该模式。连续性监测模式适用于对自动化要求高、数据采集周期短的监测项目,在数据处理方法上,可选择静态相对定位和动态相对定位两种方法。在一些桥梁、高层建筑等工程的动态监测中,GPS 连续监测模式正逐渐取代加速度计、激光干涉仪等动态监测设备,如香港青马大桥、广东虎门大桥、深圳帝王大厦等外部变形监测。该模式实现了 24 小时的连续观测,使监测、监控、决策实现远距离控制,但该模式要求 GPS 接收设备必须永久固定在变形体上,成本较高。为解决这一问题,目前大多采用若干 GPS 天线和具有若干通道的微波开关,相应的微波开关控制电路及 1 台 GPS 接收机组成一机多天线系统。最新系统将控制电路板、GPS 接收机(OEM)板集成在工业控制计算机中。目前,一机多天线已应用在东江大坝、小湾电站边坡等监测工程中。静态监测平面精度可达到毫米级,高程精度可达到厘米级;对于动态监测,如果距离近,基准点与监测点有 5 颗以上共视 GPS 卫星时,精度可达 1~2 cm。

GPS 技术用于变形监测存在以下不足:GPS 接收机在高山峡谷、地下、建筑物密集地区和密林深处,由于卫星信号被遮挡及多路径效应的影响,其监测精度和可靠性不高或无法进行监测;GPS 用于动态变形监测时,由于 GPS 动态测量的精度只能达到厘米级,对微变形测量,GPS 测量误差成为强噪声,从受强噪声干扰的序列观测数据中提取微弱的变形信息,是 GPS 动态监测应解决的一个关键技术问题;GPS 与一般全站仪、测斜仪等监测设备相比,设备成本较高,一般要 3 台以上 GPS 接收机;与传统大地测量手段相比,GPS 定位结果和观测值之间的函数关系复杂,误差源多,数据处理过程中任一环节处理不好都将影响最终的监测精度。

在变形观测数据处理方面,发展了测量误差剔除的各种方法,如卡尔曼滤波、粗差探测等。在变形数据分析方面,提出了回归模型、小波变换理论、灰色预测、神经网络等方法,其