

城市地面沉降监控技术研究进展

岳建平,方露

(河海大学 土木工程学院,江苏 南京 210098)

Research Advances of Monitoring and Controlling Technology for Urban Land Subsidence

YUE Jian-ping, FANG Lu

摘要: 阐述地面沉降监控理论与技术研究的目的与意义,分析地面沉降监测技术及其应用特点,介绍沉降监控数学模型的研究现状,总结监测成果信息管理和利用的现状和特点,展望地面沉降监控理论和技术的发展趋势。

关键词: 地面沉降;监控技术;研究进展;发展趋势

一、引言

城市地面沉降是一种普遍而又日趋显著的地质现象。从广义上来讲,它是区域性地面高程下降的一种环境地质变化,也是永久性的不可补偿的环境和资源的损失。目前,世界上发生地面沉降比较严重的国家主要有美国、日本、墨西哥、意大利和中国。

据有关文献资料记载,1891年,中美洲的墨西哥城最早发生地面沉降,现在该城市已形成世界上罕见的大面积沉降区,城市地面大约下陷9 m。美国路易斯安那州的新奥尔良,自1978年以来,地面下沉4.5 m,是全美下降速度最快的地方,被称为“下陷之城”^[1]。近几十年来,中国的城市地面沉降现象日趋严重,沉降城市及面积都在不断地扩大,迄今为止已有96个城市和地区发生不同程度的地面沉降,这种情况在我国的天津、上海和西安等城市显得尤为突出和严重。例如,上海是我国最早发现地面沉降的城市,沉降面积已达1 000 km²。

城市地面沉降将对沉降区的生态环境、基础设施等产生严重的影响。例如,地面下沉的不均匀性容易使地表建筑物倾斜、墙壁开裂,甚至引起建筑物的倒塌;地面沉降易造成路基变形下沉、地裂缝,使城市地下设施、公路、铁路遭受不同程度的破坏,影响城市间的交通运输;地面沉降会使城镇排水系统的排水口处的标高低于河水位,失去排水功能,易使地面标高降低地区在雨天常常积水;地面沉降会使沿海城市的防汛堤墙高程降低,海平面相对抬升,容易造成海水入侵,大大降低沿海城市的防汛能力。由此可见,加强城市地面沉降监控理论和技术的研究,

不仅对保障国家和人民生命财产的安全有着重要的作用,而且对国民经济的可持续发展以及人类的生存发展都有着重要的现实意义。

二、地面沉降监测技术研究进展

1. 水准测量

水准测量是传统的沉降监测技术,具有测量精度高、成果可靠、操作简便、仪器设备普通便宜等特点,但该方法的作业效率低、劳动强度大、难以实现自动化观测^[2]。另外,由于布设的沉降监测点数量有限,只能从宏观上掌握地面沉降的特征,沉降的整体分布特征难以精确掌握。随着电子水准仪的普及应用,水准测量的劳动强度得到较大的降低,数据处理也更为方便快捷,特别是该仪器对操作技能的要求大大降低,有效地提高了成果的精度和可靠性。

2. 三角高程测量

三角高程测量是一种间接测高法,是通过观测两点间的水平距离和天顶距(或高度角)测定两点间高差的一种方法。该观测方法简单,受地形条件限制小,施测速度快,是高程测量的基本方法。该法在测定天顶距时,由于受大气折光的影响,天顶距的测量精度将受到很大的影响,从而使高程测量的精度也受到很大的影响。大气折光的影响复杂多变,目前还很难用数学模型进行精确的模拟和改正,因此,三角高程测量的精度在很多场合受到限制,同时也影响了其应用的范围。

3. 数字摄影测量

数字摄影测量即利用摄像技术,实现真正的数字化测图。与模拟、解析摄影测量的最大区别在于,

数字摄影测量处理的原始信息,不仅可以是像片,更主要的是数字影像或数字化影像,它最终是以计算机视觉代替人眼的立体观测。数字摄影测量的实质是通过获取的数字影像,利用计算机软件生成数字地面模型(DTM)与正射影像图。通过DTM的比对,可以分析出各地区的沉降情况。用此法进行变形监测时,其操作程序较常规大地测量方法复杂,设备也相对昂贵,其精度不仅与摄影测量的精度有关,而且与DTM的建模精度有关。

4. GPS 变形监测技术

GPS具有全天候、自动化观测的优点,而且,其测量精度高,成果稳定可靠,在控制测量、施工测量、变形监测等领域中取得了很好的成果,并具有广阔的应用前景。但GPS由于设备比较昂贵,一般难以进行大规模的布网监测。同时,GPS在高程测量方面的精度也低于平面测量的精度,这在某种程度上影响了其在沉降监测方面的推广应用。目前,由于GPS设备的大幅降价,以及一机多天线技术的推广应用,GPS监测网的建立成本得到了很大的降低,这对GPS在变形监测中的推广应用起到了很好的促进作用。

5. InSAR 技术

20世纪60年代末出现的新兴交叉学科合成孔径雷达干涉技术InSAR,是合成孔径雷达SAR与射电天文学干涉测量技术的完美结合,该技术在大面积滑坡、塌陷、泥石流以及地裂缝、地面沉降等地质灾害的监测中得到了成功的应用,且其精度高,通常可以达到毫米级,是一项快速、经济的空间探测新技术^[3]。合成孔径雷达差分干涉测量(D-InSAR)是InSAR技术应用的一个扩展,它是利用复雷达图像的相位差信息来提取地面变形信息的技术,主要用于对DEM修测和精化、地壳形变监测、地面沉降监测及滑坡监测等,监测精度可达到厘米级甚至到毫米级。但该技术对大气误差、卫星轨道误差、地表状况以及时态不相关等因素非常敏感,影响了成果的精度和可靠性,这也成为该技术进一步推广应用的瓶颈。

6. GPS/InSAR 数据融合技术

GPS和InSAR两项技术是当今进行大范围地表沉降监测的主要手段,技术上互有优势和不足。GPS测点布设的空间分辨率较低,不足以满足高空分辨率形变监测的需求,但其在时间域的分辨率可以达到数分钟甚至更高到几十秒级,从而可以提供时间分辨率很高的观测数据。而InSAR提供的是整个区域面上的连续信息,其空间分辨率甚至可

以达到 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,但SAR卫星的重复周期通常为35天左右,很难提供足够的时间分辨率。由此可见,采用某种单一的手段和方法对一定区域进行大范围的地面沉降监测是存在不足的,而把这两种技术相结合才是解决问题的有效手段。另外,国内外大量研究成果表明,GPS与InSAR的数据融合不仅可以改正InSAR数据本身难以消除的大气延迟误差以及卫星轨道误差等,而且可以更好地把GPS的高时间分辨率和高平面位置精度与InSAR技术的高空间分辨率和较好的高程变形精度完美地统一起来,更好地应用于大范围的地面沉降监测^[4]。

三、地面沉降监控模型研究进展

地面沉降的过程包含了影响其变化的各种确定性因素和随机性因素的信息。目前,对于地面沉降监控数学模型的研究主要有:基于土力学理论的确定性模型研究,基于统计理论的统计模型研究,以及基于人工智能的其他数学模型的研究。

1. 确定性模型

地面沉降是土和水相互作用、内部应力发生变化的外在表现。它与土的变形特性以及水的渗流情况密切相关。因此,地面沉降的确定性模型应包括渗流模型和土体变形模型两部分。根据渗流模型和土体模型的不同结合方式,又可以分为两步计算模型、部分耦合计算模型和完全耦合模型三类。

1. 渗流模型:又可分为相关模型、准三维流模型和三维流模型。相关模型方法简洁、直观、计算方便,但需要大量的水位水量的资料;准三维流模型考虑有越流产生,并在有黏土释水补给含水层的条件下,建立准三维地下水多层含水层系统的水流模型,实际使用效果也较好;三维流模型方程比较复杂,并考虑各层土的非均质性,比较多的是采用有限差分法、有限单元法来计算水位的变化。

2. 土体变形模型:主要有线弹性模型、非线性弹性模型和流变模型。线弹性模型在考虑土体的三维变形时,不论是含水组还是黏土、亚黏土层,几乎都作为线弹性体看待,以减小计算工作量,但与实际情况会存在很大差距;非线性弹性模型在计算土体变形时,按土体的前期固结应力的大小,需要进行分段处理;流变模型考虑了地层压缩过程中的次固结作用,为补充和扩展弹性地面沉降理论提供了可行性途径。

2. 随机统计模型

从宏观角度来讲,地面沉降包含了各种各样的自然因素和人为因素,这些错综复杂的因素决定了

地面沉降的动态过程具有周期性、趋势性和随机性等特点。统计模型就是利用统计分析原理,建立沉降与引起沉降的诸因素之间的关系。目前,建立统计模型的主要方法有:回归分析、时间序列分析、灰色系统理论等^[5]。其中,回归分析方法是实际工作中使用最为普遍的方法,并在实际应用中取得了良好的效果。然而,这种方法的不足之处是,需要收集较多的观测资料,预测准确度与样本的含量有关。

3. 人工智能模型

近年来,模糊理论、人工神经网络、遗传算法等作为人工智能的新方法受到了人们广泛的重视。这些新的理论和方法将从新的角度和新的视点对沉降监测资料进行分析和解释,这不仅为沉降监测资料分析提供了新的理论和方法,而且对完善该研究领域的理论体系有着十分重要的意义。目前,这些理论的应用研究已经取得了一定的成果,而且能更好地解释沉降的成因及机理。同时,这些方法的有机结合,不仅可以提高模型的精度,而且可以提高模型的可靠性和稳定性^[6]。因此,将人工智能模型应用于地面沉降监控方面将有很广阔的发展空间和前景。

目前,用于构建人工智能模型的方法主要有神经网络、遗传算法等。神经网络(Artificial Neural Networks)是以计算机网络系统模拟生物神经网络的智能计算系统。它具有强大的非线性逼近能力,同时也具有良好的自适应性、自组织性以及较强的学习、联想、容错和抗干扰能力,将其用于地面沉降监测领域有很好的预测效果^[7,8]。遗传算法(Genetic Algorithm)是一类借鉴生物界的进化规律(适者生存、优胜劣汰遗传机制)演化而来的随机化搜索方法,该算法的主要步骤为:编码、初始群体的生成、适应性值评估检测、选择、交换、变异,其在变形监测的建模中得到了初步的研究和应用^[9]。

四、地面沉降监测资料的管理和应用研究

随着计算机技术、网络技术等先进技术的发展,目前的监测资料管理基本上都实现了计算机的数据库管理,即将监测数据储存在数据库中,同时,建立一套数据库管理系统,能够方便地对监测数据进行查询、分析等。为了更有效地发挥监测数据的作用,许多部门进行辅助决策系统的研究,该研究融合GIS技术、人工智能技术、虚拟现实等技术,建立一套综合性的计算机信息管理系统,及时快速地分析地面沉降与地下水位变化、地面荷载、地下空间开挖等因素之间的规律,提出处理措施。例如:文献^[10]建立

的基于GIS的城市地面沉降与地下水动态监测信息管理系统,已在西安市近20年所获得的监测数据和成果的管理应用中,显示出了其优越性;文献^[11]建立的基于MapInfo的地面沉降管理系统在实际应用中也显示出了极大的可靠性。

除此之外,GPS,RS,ES均可与GIS进行融合,这为以GIS为基础,形成功能更强大、可视化技术更逼真的地面沉降管理系统创造了有利条件。此外,各种确定性模型、随机模型或人工智能模型与GIS的集成与耦合,构建智能化管理系统,不仅给其可视化研究注入了新的活力,而且将带来更大的便利。

五、发展展望

纵观地面沉降监控的发展历程,不难发现,该项研究将在以下几个方面得到进一步的发展:

1. 监测系统的布设将更加科学、全面。这一方面体现在观测项目的增多,在监测区域内将根据监测对象的特点,合理设置监测项目,如地表沉降、地下水位、深层位移、地表荷载等,改变了原来单一地表位移测点布设的形式,使监测资料的成因分析更为科学合理;另一方面,监测系统的优化设计理论和技术将得到进一步的深入研究,这主要是由于地面沉降监测的理论体系还很不完善,且其特点明显,研究一整套适合于地面沉降监测系统优化设计的理论和方法将有着重要的理论和现实意义。

2. 卫星监测技术将得到进一步的推广应用。传统的水准测量技术虽然具有精度高、成果可靠等优点,但测量的速度慢、周期长、劳动强度高,特别是不能实现自动化观测。而GPS测量技术有效地弥补了上述不足,能很好地实现全天候自动观测,但GPS测量技术仍没有克服测点稀少的缺陷。现代InSAR技术的应用,能全面监测测区内各点的沉降情况,信息全面,且能达到较高的精度,因此,该技术在地表沉降监测中有着广泛的应用前景。特别是GPS与InSAR进行合理的数据融合,将会使测量精度得到进一步的提高,实际应用价值会更大。

3. 监控模型的建立理论和技术将更为完善。传统的单测点数学模型在成果的综合分析中存在明显的不足,因此,整体性分布模型的研究将更为迫切。随着对地面沉降的内在机理和发展过程的深入研究,确定性模型和统计模型将不再立足于单个测点,而将向二维乃至空间三维模型方向发展。因此,构建地面沉降多维模型的理论和方法的研究将是今后一个重要的研究方向。另外,在建模方法研究中,新兴的数学理论和方法将得到研究和应用,如:人工

神经网络理论、小波分析理论、遗传规划等,这些理论和方法将有效地弥补传统监控模型的不足,完善监控模型建立的理论体系,同时,它们与传统建模理论结合将进一步推动地面沉降监控模型向更高层次的方向发展。

4. 地面沉降监测资料的管理和应用将更为科学合理。数据库技术和网络技术的结合将使成果的管理和查询更为可靠和便捷,可视化技术的应用将使成果的表述更为丰富和直观,人工智能技术的应用将使监测资料的综合分析向自动化方向发展,进一步提高监测资料的利用率,为管理部门的决策提供有力的依据。

参考文献:

- [1] 鲍 鲋. 城市地面沉降浅析[J]. 防灾博览, 2007, (1): 8-10.
- [2] 岳建平, 田林亚. 变形监测技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

- [3] 王 超, 张 红, 刘 智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 陈基伟. 利用 GPS-InSAR 合成方法进行地面沉降研究的现状与展望[J]. 测绘科学, 2003, 28(4): 69-71.
- [5] 黄声享, 尹 晖, 蒋 征. 变形监测数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [6] 李陶深. 人工智能[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002.
- [7] 武建强, 余 勤. 神经网络在地面沉降区划中的应用研究[J]. 江苏地质, 2003, 27(3): 171-174.
- [8] 金爱善, 等. 采用神经网络模型对天津滨海新区地面沉降预测的研究[J]. 现代地质, 2000, 14(4): 475-478.
- [9] 金菊良, 丁 晶. 遗传算法及其在水科学中的应用[M]. 成都: 四川大学出版社, 2000.
- [10] 张周平, 吴创奇. 城市地面沉降与地下水动态监测信息管理系统建立与研究[J]. 四川测绘, 2003, 26(14): 166-169.
- [11] 周 卫. 基于 MapInfo 的地面沉降信息系统[J]. 测绘通报, 2001, (3): 27-28.

《信息化测绘论文集》出版

[本刊讯] 由国家测绘局国土测绘司和中国测绘学会选编的《信息化测绘论文集》近日由测绘出版社出版。该书收录整理了测绘界著名院士、专家和活跃在科研一线的中青年学术带头人等关于信息化测绘概念内涵、构成、测绘高新技术发展的前沿动态、未来趋势以及社会应用等方面的研究成果和学术见解,并从多角度探讨了发展信息化测绘的战略思路和政策建议。全书分综合篇和专题篇两部分,综合篇思考了我国信息化测绘的发展战略、本质和创新方向,分析了信息化测绘体系建设的目标与任务等,对如何构建信息化测绘服务体系,其面临的机遇与挑战作了初步的探讨。专题篇针对如何实现测绘信息化、如何在实际中应用等问题进行了研究,如信息化地图学的特征和理论、动态更新技术体系、信息服务的特点以及信息网络的构建、数据标准化等。

该书有助于国家决策层、各级管理人员、测绘工作者以及广大社会公众及时了解信息化测绘的发展动态和方向,并从战略的高度上认识和把握信息化测绘的未来,对于今后政府部门和学术界研究制定信息化测绘实施战略等都有积极的参考意义。

该书为 16 开本, 350 千字, 定价 36.00 元。

(本刊编辑部)

