



测·绘·科·学·与·技·术 著作系列

城市地面沉降监控 理论与技术

岳建平 方 露 著



科学出版社

测绘科学与技术著作系列

城市地面沉降监控理论与技术

岳建平 方 露 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在总结城市地面沉降监控的研究历史、存在问题及发展趋势的基础上,对引起地面沉降的主要因素进行深入、全面的分析研究,综合阐述目前常用的地面沉降监测技术,探讨监测系统布设的方法和监测数据预处理的基本理论,重点对沉降监控的统计模型、确定性模型、神经网络模型和 Kriging 插值模型进行深入的研究和分析。书中介绍了一套适用于城市地面沉降监控的信息管理系统,该系统适应监测信息现代化管理和分析的要求,可为我国的城市建设和可持续发展提供技术支撑。

本书可作为测绘工程专业本科生及研究生的专业参考书,也可作为该行业专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

城市地面沉降监控理论与技术/岳建平,方露著. —北京:科学出版社, 2012

(测绘科学与技术著作系列)

ISBN 978-7-03-033774-0

I. ①城… II. ①岳… ②方… III. ①城市-地面沉降-监控系统
IV. ①P642.26

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 039951 号

责任编辑:童安齐 王 钰 / 责任校对:王万红
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年3月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012年3月第一次印刷 印张: 13 3/4

字数: 260 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序

城市地面沉降是一种普遍而又日趋明显的地质现象，具有生成缓慢、危害面广、破坏严重等特点。世界上已有 50 多个地区发生了地面沉降，引起了科学界的广泛关注。在我国的长三角及华北平原等地区，由于大量抽取地下水和城市基础设施建设等原因，地面沉降情况日趋严重，已严重影响到城市基础设施的安全，同时也影响了当地居民的正常生活，成为城市可持续发展的一大障碍。为此，对城市地面沉降情况实施分析和监控，对保障城市的现代化进程有着重要的科学与现实意义。

该书紧紧围绕城市地面沉降监控这个主题，对该领域的理论、技术和方法等进行了全面、深入的总结和研究，内容丰硕、方法先进、结构合理，是测绘工程领域首部关于“城市地面沉降监控”方面的论著，对测绘工程专业的学生、教师及相关技术人员都是一本很好的参考书。

该书的完成得益于作者及其研究团队多年来在此领域的辛勤努力，反映了该团队与时俱进、开拓创新的科研精神。希望该书的出版能为城市地面沉降研究做出贡献，并进一步推动这方面的监控理论与技术的应用和发展。

中国工程院院士
河海大学教授

吴中如
2011.9.2

前 言

城市地面沉降是区域性地面高程下降的一种环境地质现象，大多发生在人口密集、工业发达的城市，其危害面广，破坏严重。目前，世界上已有 50 多个地区发生了地面沉降，引起科学界的广泛关注，并对此进行了深入的研究，已将此提升到世界性地质灾害的高度。随着我国城市规模的不断扩大，地面沉降的危害也日渐凸现，引起了地方政府的广泛关注。

城市地面沉降的特点决定了它对沉降区的生态环境、基础设施将产生严重的影响。因此，在城市发展的同时，必须对其地面沉降状况进行实时监控，及时掌握第一手资料，并对观测资料进行科学的分析，制定合理安全的防治措施，以确保城市的现代化进程。

本书在总结城市地面沉降监控的研究历史、存在问题及发展趋势的基础上，对引起地面沉降的主要因素进行了深入、全面的分析研究，综合阐述目前常用的地面沉降监测技术，探讨了监测系统布设的方法和监测数据预处理的基本理论，在分析城市地面沉降机理的基础上，结合土力学、小波分析和神经网络等理论，对监控模型进行了深入研究和分析，并结合现代计算机技术和 GIS 技术，对监测数据进行管理和分析，有效地提高了工作的效率，可为我国的城市建设和可持续发展提供技术支撑。

本书是本课题组全体同志集体研究的成果总结。在课题的研究过程中，以及撰写本书时，参阅了大量的技术文献，在此，对这些文献的作者表示衷心的感谢。

限于作者理论和技术水平，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2011.9

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的目的与意义	1
1.2 地面沉降监测技术研究进展	3
1.3 地面沉降监控模型研究进展	5
1.4 地质灾害风险评价研究进展	9
1.5 沉降监测信息管理系统研究进展	13
1.6 存在的主要问题及解决方案	14
第 2 章 地面沉降影响因素及机理分析	18
2.1 地面沉降主要影响因素	18
2.1.1 地面沉降的自然因素	18
2.1.2 地面沉降的人为因素	19
2.2 地下水位变化对地面沉降的影响	21
2.2.1 引起地下水位变化的原因及其对地面沉降影响分析	21
2.2.2 地下水位变化引起的地面沉降的计算方法	24
2.3 地面荷载变化对地面沉降的影响	29
2.3.1 单个集中荷载竖向作用力下的地面沉降计算	30
2.3.2 多个集中荷载竖向作用力下的地面沉降计算	33
2.4 小结	36
第 3 章 地面沉降监测技术	37
3.1 水准测量技术	37
3.1.1 地面沉降水准监测网的布设	37
3.1.2 地面沉降水准监测内容及要求	40
3.2 三角高程测量技术	42
3.3 GPS 测量技术	44
3.3.1 地面沉降 GPS 网的布设及要求	45
3.3.2 地面沉降 GPS 网的数据处理	47
3.3.3 GPS 测量的优点	47
3.4 InSAR 监测技术	48

3.5	GPS 与 InSAR 联合监测技术	50
3.6	分层沉降监测技术	51
3.6.1	分层沉降监测系统	51
3.6.2	分层标的埋设	52
3.6.3	分层标钻探要求	52
3.6.4	分层标测试要求	53
3.7	地下水位监测技术	53
3.7.1	地下水位监测系统	53
3.7.2	地下水位监测孔的埋设	54
3.7.3	地下水位监测孔的测试要求	54
3.8	孔隙水压力监测技术	54
3.8.1	孔隙水压力监测原理及平面布设	55
3.8.2	孔隙水压力计的埋设	55
3.8.3	孔隙水压力计的测试	56
3.9	监测系统的布设与优化	56
3.9.1	监测项目的设置	56
3.9.2	监测点的布设	56
3.9.3	沉降监测数据处理	57
3.10	小结	58
第4章	监测数据的可靠性分析	59
4.1	概述	59
4.2	基准点稳定性分析	60
4.2.1	平均间隙法	60
4.2.2	拟稳平差法	62
4.2.3	t 检验法	64
4.3	监测数据粗差探测	66
4.3.1	粗差探测常用方法	66
4.3.2	基于小波神经网络的粗差探测	68
4.4	系统误差检验	71
4.4.1	U 检验法	72
4.4.2	均方连差检验法	72
4.5	小结	73
第5章	地面沉降监控的统计模型	74
5.1	统计模型建立的基本原理	74
5.1.1	引言	74

5.1.2 多元线性回归分析原理	75
5.1.3 逐步回归分析原理	76
5.2 基于地下水位变化的统计模型	78
5.2.1 地下水位变化与地面沉降的关系	78
5.2.2 软土固结与地面沉降的关系	80
5.2.3 实例分析	81
5.3 基于孔隙水压力变化的统计模型	83
5.3.1 孔隙水压力变化与地面沉降的关系	83
5.3.2 实例分析	84
5.4 基于地面荷载变化的统计模型	85
5.4.1 地面荷载变化与地面沉降的关系	86
5.4.2 应用分析	87
5.5 基于多项式的地面沉降分布模型	88
5.5.1 多项式曲面拟合的基本原理	88
5.5.2 基于多项式的分布模型	89
5.5.3 应用实例	90
5.6 基于多面函数的地面沉降分布模型	96
5.6.1 多面函数拟合法基本原理	96
5.6.2 多面函数拟合法的模型	97
5.6.3 应用实例	98
5.7 小结	100
第6章 地面沉降监控的确定性模型	101
6.1 概述	101
6.1.1 有限元分析基本原理	101
6.1.2 有限元软件 ANSYS 介绍	106
6.2 基于地下水位变化的确定性模型	107
6.2.1 模型的建立	107
6.2.2 工程应用实例	108
6.3 基于地面荷载变化的确定性模型	110
6.3.1 模型的建立	110
6.3.2 应用分析	111
6.4 综合因素作用下的确定性模型	113
6.4.1 模型的建立	113
6.4.2 工程应用实例	113
6.5 小结	115

第 7 章 基于人工神经网络的沉降监控模型	116
7.1 人工神经网络基本原理	116
7.1.1 人工神经网络模型	117
7.1.2 BP 神经网络	118
7.2 基于人工神经网络的监控模型	121
7.2.1 正向建模	121
7.2.2 逆向建模	122
7.2.3 单测点模型研究	122
7.2.4 多测点模型研究	127
7.3 小波分析基本原理	130
7.3.1 小波神经网络的结构形式	130
7.3.2 小波神经网络的分类	131
7.4 基于小波神经网络的监控模型	133
7.4.1 单测点模型研究	133
7.4.2 多测点模型研究	137
7.5 小结	139
第 8 章 基于 Kriging 插值的监控模型	140
8.1 Kriging 插值基本原理	140
8.1.1 前提假设	140
8.1.2 区域化变量	142
8.1.3 变异分析	142
8.1.4 变异函数分析	143
8.1.5 变异函数的拟合	144
8.1.6 Kriging 插值的单测点模型	145
8.2 基于 Kriging 法的时域插值及应用	147
8.3 基于 Kriging 法的空间域插值及应用	150
8.4 基于粒子群算法的 Kriging 空间插值及其应用	153
8.4.1 变异函数的优化	153
8.4.2 变异函数拟合模型的粒子群优化	153
8.4.3 应用实例	155
8.5 小结	156
第 9 章 沉降监测数据综合分析理论研究	158
9.1 概述	158
9.2 地面沉降对地面设施的影响分析	159
9.2.1 地面沉降对建筑物的影响	159

9.2.2 地面沉降对地下管线的影响	161
9.2.3 地面沉降对公路的影响	162
9.3 地面沉降监控指标研究	163
9.3.1 地面沉降监控指标体系	163
9.3.2 地面沉降分级监控指标	164
9.4 基于 GIS 的地面沉降危害评价	167
9.4.1 基于 GIS 的沉降危害性评价模型	168
9.4.2 地面沉降危害性评价指标提取	168
9.5 层次分析法及其在沉降危害评价中的应用	172
9.5.1 层次分析法基本原理	172
9.5.2 层次分析法在沉降危害评价中的应用	175
9.6 小结	179
第 10 章 地面沉降监测可视化信息管理系统	180
10.1 概述	180
10.1.1 系统开发目标	180
10.1.2 系统开发环境	180
10.1.3 系统总体结构	181
10.1.4 功能概要	182
10.2 系统主要功能模块设计与开发	183
10.2.1 数据库管理模块设计	183
10.2.2 模型库管理模块设计	187
10.2.3 数据分析模块设计	192
10.3 系统实现的主要理论和关键技术	193
10.3.1 可视化技术的应用研究	193
10.3.2 预警机制的研究与建立	198
10.4 小结	199
第 11 章 总结与展望	200
11.1 总结	200
11.2 主要技术创新点	202
11.3 需进一步研究的问题	202
主要参考文献	204

第 1 章 绪 论

1.1 研究的目的是与意义

随着经济全球化及可持续发展战略的进一步实施,城市地面沉降问题也日渐突出。地面沉降涉及经济、环境、资源和社会等多个方面,已成为 21 世纪国内外发展中城市的主要地质灾害,也是目前亟待解决的问题之一。

据有关文献资料记载,1891 年,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 9m。美国路易斯安那州的新奥尔良,自 1978 年以来,地面下沉 4.5m,是全美下降速度最快的地方,被称为“下陷之城”。日本的地表沉降面积约 8450km²,占全国陆地总面积的 2.23%。目前,世界上已有 50 多个国家和地区发生不同程度的地面沉降。近年来,中国的城市地面沉降现象也日趋严重,沉降城市和面积都在不断扩大,迄今为止,我国已有 96 个城市和地区发生不同程度的地面沉降,并且主要分布在我国经济比较发达的东部地区。例如,上海是我国最早发现地面沉降的城市,沉降面积已达 1000km²;长三角区域由于长期超采地下水,引起区域性地面沉降和地裂缝等地质灾害。目前,许多城市地面沉降的面积正在不断扩大,速度继续加快,同时其危害也不断增大。

为了提高地面沉降监控的理论和管理水平,加强区域地面沉降研究领域的协作,我国已在上海和天津召开了七届全国性地面沉降学术研讨会,共同探讨,总结经验,以推动我国城市地面沉降研究及防治工作的深入发展。随着世界各国政府对地面沉降现象的日趋重视,在寻求社会、环境、自然协调发展的契机中,在构建和谐社会的进程中,进一步加强各国人民的环境忧患意识,可有效地促进可持续发展 and 经济结构的战略性调整。

另外,随着经济全球化的深入发展,科技进步的日新月异,以及各国综合国力的增强,该研究领域的理论和技术得到很大的发展。第一,地面沉降监测的方法、手段和技术逐步成熟,从以往的传统水准测量到后来的 GPS 测量,再到今天较先进的 InSAR 技术,甚至是有广泛应用前景的 GPS 和 InSAR 的融合技术,基本上实现了监测过程的自动化,推动了监测技术向更高层次的发展;第二,对地面沉降分析理论和方法的研究在广度和深度上不断扩展,对它的认识和剖析更加系统化和全面化,不仅研究自然因素所造成的地面沉降,而且更加深入地对人

为因素进行透彻的分析；第三，科技进步的同时也为我们解决实际问题提供了新的模式，使对地面沉降机理的分析更加精细，除了对城市抽取地下水因素的认识更全面外，对其他因素和机制带来的不可忽略的影响也进行了客观和主观上的深入研究，而且针对不同土层的特点也进行了一定程度上的剖析；第四，地面沉降的模型和预测系统也日臻优化和完善，模型的构设使对地面沉降的刻画更加逼近真实，且模拟计算和预测的精度也有了进一步的提高，为下一步指导和检验地面沉降工作提供了很好的平台；第五，地面沉降的防治工作也趋于系统化，对其所带来的危害以及长远的影响有了更深刻的认识，灾害的预防不仅是知识层面的应用，也是管理层次及决策系统的有效运营，只有把两者完美结合起来，才能使经济、社会、环境协调发展，使地面沉降管理决策的功能更加凸显，使其成果更加推陈出新。

城市地面沉降是一种普遍而又日趋明显的地质现象。从广义上讲，它是区域性地面高程下降的一种环境地质变化，也是永久性不可补偿的环境和资源损失。城市地面沉降大多发生在人口密集、工业发达的城市，其危害面广，破坏严重。地面沉降的破坏性主要有两个特征：一是发生缓慢，难以明显察觉（不同于矿山开采引起的地面塌陷）；二是一旦发生沉降，即使消除了产生沉降的因素，沉降地面也不可能完全复原。目前世界上已有 50 多个地区发生了地面沉降，比较严重的国家有美国、日本、墨西哥和意大利。100 多年以来，科学界对地面沉降进行了深入的研究，并将地面沉降提升到世界性地质灾害的议题上。随着城市规模的不断扩大，地面沉降的危害也逐渐凸现，它严重影响了城市基础设施的建设，同时也严重影响了当地居民的正常生活，成为城市可持续发展的一大障碍，引起了地方政府的广泛关注。

城市地面沉降的特点决定了它对沉降区域的生态环境、基础设施将产生严重的影响。例如，建筑物基底地面的不均匀沉降易使其墙壁倾斜、开裂，甚至引起建筑物的倒塌；路基地面的下沉变形会引起大量地裂缝，对城市地下设施、公路、铁路造成不同程度的破坏，严重影响了城市间交通运输的安全；城镇排水系统的排水口标高因地面沉降低于河水位，失去排水功能，尤其是在雨季，甚至引起河水倒灌，形成内涝；沿海城市的防汛堤墙标高也因地面沉降相对于海平面降低，造成海水入侵，降低沿海城市的防汛能力。

不可否认，在之后国民经济的快速进程中，地下资源的开发将是不可阻挡的趋势，由此可见，加强城市地面沉降监控理论与技术的研究，对人类的生存和发展将有重要的现实意义。然而，以往我国对地面沉降问题的研究大多集中在上海、天津等沿海大城市，研究成果基本上实现了“水要取、地微沉”的优化目标。在其他沉降地区，还没有给予足够的重视。由于地面沉降是一个缓慢而又容易被忽视的过程，且必须有当地政府组织协调，颁布政策性法规，才能保证城市

的可持续发展,否则,就有可能产生难以弥补的后果。

可见,如何科学、准确、及时地分析和预测地面沉降状况,对一个城市的可持续发展显得尤为重要,而建立一套快速有效的监控系统也已成为迫在眉睫的重要任务。城市地面沉降监测是保护人民生命财产、减少经济损失的重要手段,对监测资料的分析处理是判断一个城市环境地质优劣的科学依据。因此,在城市发展的同时,必须对其地面沉降状况进行监控,及时掌握第一手资料,并对观测资料进行科学的分析,及时发现可能存在的隐患,从而制定合理的防治措施,以确保城市的现代化进程。

综上所述,对城市地面沉降监控的相关理论和技术进行深入的分析和研究,主要有以下几个方面的意义:

(1) 由于我国发生地面沉降的地区日益增多,且诱发因素不断向综合性方向发展,通过对地面沉降监测资料的分析和处理,不仅可以发现异常现象,而且可以预测地面沉降的发展趋势,防止灾害的发生,对城市规划和城市建设具有重要的指导作用。

(2) 对城市地面沉降相关理论的研究,可进一步丰富和完善该研究领域的方法和理论体系,探求更为合理有效的新理论、新方法和新技术,对实施城市地面沉降监控具有重要的现实意义。

(3) 对地面沉降监测资料的分析和处理,可以验证和反馈城市化工程地质建设的规范性以及地下资源利用的合理性,从而改进和提高城市施工建设以及地下资源开采的技术水平,为防治环境地质灾害及实现地下资源的可持续利用提供理论依据。

(4) 利用现代计算机技术、网络技术等,结合监测系统,可以建立智能化的地面沉降信息管理系统,对区域内监测网络各点的属性信息进行空间管理与智能分析,从而实现监测、分析、控制的一体化,为城市规划、管理和决策提供快速有效的依据,同时,也为城市的可持续发展提供保障。

1.2 地面沉降监测技术研究进展

监测技术的研究是城市地面沉降监测的又一重要内容。随着科学技术的飞速进步和发展,各种监测仪器、监测方法、监测技术也在不断地更新换代。地面沉降监测主要是监测地面点的下沉和变形,即监测地面点位的变化,以此来分析和研究地面的沉降变形状况。就目前的监测技术而言,主要有水准测量、三角高程测量、数字摄影测量、GPS 测量、InSAR 测量技术,以及 GPS 和 InSAR 融合技术。

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、设备便宜等特点,但该方法的作业效率低、劳动强度大、难以实现自动化观测。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,通过观测两点间的水平距离和天顶距(或高度角)求得两点间高差的方法。它观测方法简单,不受地形条件限制,施测速度快,是测定大地控制点高程的基本方法。李继东等提出一种新的三角高程测量法,相对于传统方法,其精度更高,施测速度更快。

3. 数字测量技术

数字测量技术的发展起源于数字摄影测量自动化的实践,利用摄像技术,实现真正的自动化测图。与模拟、解析测量的最大区别在于,数字摄影测量原理的原始信息,不仅可以是相片,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。其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(DEM)与正射影像图。它可以与其他测量方法相结合,实现地面沉降的变形监测。但用此方法进行变形监测比常规大地测量方法操作复杂,设备也相对昂贵。

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 设备的大幅度降价,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, 该技术在大规模滑坡、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。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, 不能满足高空间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。

1.3 地面沉降监控模型研究进展

地面沉降模型是地面沉降研究内容的重要组成部分, 计算与预测的正确与否, 将直接关系到地面沉降的防治工作, 甚至影响到整个城市的安全运营和经济的可持续发展。从在东京举行的第一届地面沉降国际会议开始, 经过多年的不懈努力, 人们已对地面沉降的内在机理和发展过程分析得尤为透彻, 新的理论方法、新的预测模型层出不穷, 迄今为止, 各种理论和成果已相当丰富, 人们对其的认识与理解也相当普遍。地面沉降的过程包含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

从地面沉降的研究机理来看,地面沉降是土层中孔隙水承担的孔隙水压力和土骨架承担的有效应力发生变化的结果。其是土和水相互作用、内部应力发生变化的外在表现。因此,它与土的变形特性及水的渗流情况密切相关。

1) 水流模型

水流模型大致可以分为以下三类。

(1) 相关模型。即根据多年累积的水位水量资料,建立地面沉降量与某种密切相关因素之间的相关关系。其优点是直观且计算方便,但这种方法需要大量的水位水量资料。例如,姜晨光等根据多年城市地表沉降及地下水位监测的实测资料,建立了城市地表沉降量与地下水水位变化之间的相关性数学模型,系统地分析了地下水水位变化与城市地表沉降的关系,且具有较高的准确性。

(2) 准三维流模型。由于理论假设与实际相差较远,20世纪90年代以来,模型考虑有越流产生,并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。目前普遍采用的渗流模型都是准三维的,如上海市1999年建立的地面沉降预测模型、宫辉力等建立的郑州地下水数值模拟在地面沉降预报方面均取得了较好的应用效果。

(3) 三维流模型。水位模型正倾向于采用三维流模型,由于方程比较复杂,并考虑各层土的非均质性,比较多地采用了有限差分法、有限单元法来计算水位的变化,其中,美国联邦地质调查局开发的MODFLOW数学模型是模拟地下水三维运动的数学模型,经过不断完善,使得其含有较为丰富的模块。在国内,骆祖江等建立的盐城城市地下水资源数值模型也属此类。

2) 土体变形模型

土体是松散的多孔介质,其组成特点和结构形式决定了它具有不同于一般固体材料的特性,其变形具有显著的非线性、非弹性及各向异性特征。根据土体的应力-应变关系,地面沉降计算中土体变形模型主要有以下三种。

(1) 线弹性模型。即认为土的应力-应变关系符合胡克定律,土层厚度的变化与有效应力的变化成正比。在考虑土体的三维变形时,不论是含水组,还是黏土或亚黏土层,几乎都作为线弹性体看待,以减小计算工作量。

(2) 非线性弹性模型。即考虑到土体变形的非弹性特性,当地下水位恢复时,土体要产生回弹,但不可能完全恢复,且恢复的程度与土质条件、土体所处的应力状态有关。因此,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。土体变形随时间变化的理论较有代表性的是太沙基的一维固结理论和比奥(三维)固结理论。

(3) 流变模型。流变学理论考虑了地层压缩过程中的次固结作用,即认为在

土体骨架应力作用下,土体表面所吸附的水的黏滞性、土体颗粒的重新排列和骨架体的错动将具有明显的时间效应。D. C. Helm 假设饱和黏性土为理想的黏性材料,得出当上下相邻含水层孔隙水压力变化时黏土层一维固结方程解析解。顾小芸等提出考虑流变的土体流固耦合计算模型。

根据渗流模型和土体模型的不同结合方式,又可以分为以下三类沉降计算模型。

(1) 两步计算模型。水流模型和土体模型都各自独立,根据含水层和弱透水层的水头变化,计算有效应力变化,从而计算各土层的变形量。这些变形量之和即为地面沉降量。美国休斯顿地面沉降模型、意大利拉温纳模型,以及我国济宁模型均为两步计算模型。

(2) 部分耦合模型。此类模型也就是两步模型的耦合模型,其特征是水位和变形既分步又相互影响,地下水流模型和土体变形模型中的参数在沉降过程中是相互变化的,而它们之间的耦合体现在参数随沉降的变化中。部分耦合模型的一个典型实例是冉启全、顾小芸建立的三维渗流模型和一维次固结流变模型相结合的地面沉降计算模型,它利用渗透系数与孔隙率之间的关系,实现了渗流模型与土体变形模型的部分耦合。魏加华在济宁市地下水与地面沉降三维有限元模拟研究中应用的也是这种模型。

(3) 完全耦合模型。此模型的理论基础是比奥的固结理论。它考虑了土体的变形和地下水运动的相互作用,将土的变形模型和地下水流动模型统一于相同的物理空间,孔隙水压力和变形同时算出,且地下水流和变形可以是一维、二维或三维的。1978年 R. W. Lewis 等提出了完全耦合模型,并将其运用于威尼斯的地面沉降计算中。结果表明,此模型比两步计算较易趋于稳定。

2. 随机统计模型

随机统计模型是在建立白化模型比较困难的情况下普遍采用的一种预测方法。从宏观角度来讲,地面沉降包含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。

随机统计模型大致可以分为以下三类。

(1) 回归模型。回归分析方法是数理统计学的重要分支,其自身理论体系相当完善,广泛地应用于社会经济、城市规划及环境等重要领域中。回归分析法可分为多元线性回归和逐步回归分析。多元线性回归分析法是研究一个变量(因变量)与多个因子(自变量)之间非确定关系(相关关系)的最基本方法;逐步回归分析法是建立在 F 检验基础上的逐个接纳显著因子进入回归方程,直到得到所需的最佳回归方程的分析方法。回归分析法的优点是可以把对复杂对象的预测转化成对相对简单因素的预测,且可考虑多方面影响因素,使模型具有较为灵活的