

长江漫滩地面 沉降监测与应用

——以南京河西地区为例

储征伟 岳建平 张涛 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

长江漫滩地面 沉降监测与应用

——以南京河西地区为例

储征伟 岳建平 张涛 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

长江漫滩地面沉降监测与应用:以南京河西地区为例/储征伟,岳建平,张涛著. —武汉:武汉大学出版社,2015.9

ISBN 978-7-307-16390-4

I. 长… II. ①储… ②岳… ③张… III. 长江—河漫滩—地面沉降—监测—南京市 IV. P931.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 166678 号

责任编辑:李汉保 王金龙

责任校对:汪欣怡

版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:chs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:黄石市华光彩色印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:11 字数:255千字 插页:1

版次:2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷

ISBN 978-7-307-16390-4

定价:30.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

近年来,随着大规模的工程建设,长江漫滩地面承受的荷载不断增加,大量抽取地下水导致地下水位变化明显,地面有明显下沉趋势。建筑物不均匀沉降、路面开裂等现象时有发生。长江漫滩地面沉降自产生以来,一直就是困扰该地区的环境地质灾害,已经对该地区人民生活和社会经济的可持续发展造成了严重影响。

不同于别的地区地面沉降,无论从沉降过程还是沉降形态特征上看,长江漫滩地面沉降都具有自身的特殊性。因此,针对长江漫滩这种地质条件,必须对其地面沉降状况进行动态监测,以期能及时发现地面沉降变化情况,并对可能发生的地面沉陷等地质灾害问题进行及时预测,为城市测绘部门的监测和管理工作提供指导依据以及为城市防灾、减灾部门提供决策依据,确保城市的可持续发展。

本书在总结长江漫滩地面沉降监控的发展过程、存在问题及发展趋势的基础上,结合长江漫滩沉降历史演变的特点,对长江漫滩沉降机理与特征进行了全面深入的研究,借助模型试验探讨了建筑荷载对漫滩地面沉降的影响,介绍了 SAR 监测技术及其在漫滩地面沉降监测中的应用,对地面沉降监控数学模型进行了深入的研究和分析,综合阐述了地面沉降控制技术,重点对地面沉降危害进行了分析与评估。书中介绍了一套长江漫滩地面沉降信息管理系统,该系统的先进性、实用性、可靠性、界面友好、便于操作和能够扩充等先进特征,可以为我国的城市建设提供科学决策依据和技术指导。

本书是作者及其科研团队多年来集体研究成果的总结。在课题的研究以及本书撰写的过程中,参阅了大量的参考文献,在此,对这些文献的作者表示衷心的感谢!

由于作者理论和技术水平有限,书中疏漏之处在所难免,恳请专家和读者不吝批评指正。

作 者

2014 年 6 月于南京

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究的目的与意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.3 主要研究内容和技术路线	14
第2章 南京城市化发展及河西漫滩的发展与利用	16
2.1 研究区概况	16
2.2 南京古代城市化进展	17
2.3 南京近代城市化进展	19
2.4 河西漫滩的发展与城市化	22
2.5 城市化对河西漫滩的利用与影响	26
2.6 本章小结	30
第3章 长江漫滩沉降机理与特征	31
3.1 地质特征分析	31
3.2 地面沉降分析	35
3.3 地面沉降过程与特征	40
3.4 本章小结	43
第4章 模型试验与分析	44
4.1 物理模型试验	44
4.2 物理模型试验数据分析	47
4.3 数学模型试验	49
4.4 数学模型试验结果分析	52
4.5 物理模型试验与数学模型对比分析	60
4.6 本章小结	61
第5章 InSAR 监测技术及其应用	62
5.1 星载 InSAR 监测技术	62
5.2 InSAR/GPS 融合监测技术	68
5.3 GBInSAR 监测技术	72

5.4 本章小结	79
第6章 地面沉降监控数学模型	81
6.1 最小二乘支持向量机模型	81
6.2 Kriging 插值模型	85
6.3 小波神经网络模型	91
6.4 生命旋回模型	96
6.5 阿尔蒙分布模型	100
6.6 本章小结	103
第7章 地面沉降监控指标研究与控制	105
7.1 监控指标体系的建立	105
7.2 地面沉降监控指标分级研究	108
7.3 地面沉降系统控制	116
7.4 本章小结	120
第8章 地面沉降危害分析与评估	121
8.1 地面沉降对地下管线的危害	121
8.2 地面沉降对地面建筑的危害	122
8.3 地面沉降对交通设施的危害	123
8.4 熵值法及其在地面沉降危害评估中的应用	123
8.5 基于 GIS 的地面沉降综合分析与评估	128
8.6 本章小结	136
第9章 漫滩沉降监测与评判辅助决策系统	138
9.1 概述	138
9.2 系统主要功能模块设计与开发	144
9.3 本章小结	157
第10章 总结与展望	158
10.1 总结	158
10.2 展望	159
参考文献	161

第1章 绪 论

1.1 研究的目的与意义

长江三角洲位于我国沿海经济带与长江经济带的交汇处, 背靠内陆, 面向世界, 是我国经济最为发达的地区之一, 其城市化程度也较高。随着地区经济建设的快速发展, 地下水资源的大量开发利用, 开采程度和深度也逐步提高。近年来, 以地面沉降为主要表现形式的地质灾害现象在该地区内不断发展, 并且部分地区伴生地裂缝、岩溶塌陷等地质灾害问题, 给长江三角洲地区的生产生活与防洪带来了严重的威胁, 也给社会经济的可持续发展造成严重影响。

根据国务院 2010 年批准的《长江三角洲地区区域规划》, 长江三角洲包括上海市、江苏省和浙江省, 区域面积 21.07 万平方公里, 占国土面积的 2.19%。其中陆地面积 18.68 万平方公里、水面面积 2.39 万平方公里, 是我国经济最为发达, 人口最为密集的地区之一。然而, 本地区资源相对贫乏, 土地的开发利用程度较高, 因而引起了一系列的环境地质问题。在 20 世纪 20 年代初上海因开采地下水导致地面沉降, 并于 20 世纪 50—60 年代造成严重的灾害, 20 世纪 80 年代, 江苏苏、锡、常地区、浙江杭嘉湖地区地面沉降日趋严重。20 世纪 70 年代以前, 城市地区的纺织业发达, 但能源紧缺, 故大量开采地下水用于纺织厂的空调降温, 导致严重的城市地区地面沉降。20 世纪 80 年代以来, 随着改革开放城市周边的乡镇企业兴起, 不仅其本身大量开采利用地下水, 并且对污染防治普遍重视不够, 引起长江三角洲地下水网受到污染, 地区地表水质量普遍下降, 使得整个区域成为水质型缺水地区, 加剧了广大农村地区居民用水困难, 促使地下水的开采量急剧增加, 产生区域性的水位降落漏斗, 由此诱发的地面沉降已成为以城市为中心的区域性地质灾害。至 20 世纪 90 年代末, 有面积近 1 万平方公里的范围累计沉降量已超过 200mm, 并在区域上已经基本连成一片, 最大累计沉降超过 2500mm。

同时, 随着长江三角洲城市化的发展, 产生了新的沉降因子, 即在软土地区进行大规模、高密度的城市建设及工程活动, 又进一步加剧了地面沉降。目前地面沉降是本地区规模最大、持续影响时间最长、也是国内最早发现的同类地质灾害。地面沉降使得原来就以地势低洼为特点的太湖水网地区以及滨江临海地区地势更加低洼, 使 20 世纪 50 年代大规模兴建的防洪排涝等水利工程严重失效, 使本已遏制的洪涝灾害又趋严重, 由于地面不均匀沉降, 导致构筑物受损, 市政基础设施破坏, 造成巨大经济损失。

据相关文献资料记载, 长江三角洲地区为长江口附近的上海市及毗邻的江苏、浙江二省沿海, 北起灌河口, 南抵钱塘江口, 包括江南的太湖下游和江北的里下河两个地面高程

在高潮位以下的洼地。该地区位于我国南黄海和北东海的西岸,为全新世以来由长江入海泥沙沉积而成,平均海拔高度为3m左右。沿海全线建有挡潮海堤,海岸类型均为粉砂淤泥质平原海岸,发育有广阔而典型的潮滩。全区滩涂超过5000km²,其中潮间带面积占滩涂总面积的40%以上,在潮间带上分布着约1000km²的海岸湿地。据地质勘查报告显示,在中国经济占据极其重要位置的长江三角洲,漫滩相对十分发育,其形成的软土,地层软弱,工程地质条件复杂。地区典型的流塑状淤泥质粉质黏土含水量高,空隙比大,土质极其软弱,在长期荷载作用下,呈现蠕变性、高压缩性和变形延续时间长等特点,地面沉降需要经历一个长期的过程。

漫滩地层比较突出的特点是上部黏土层为软土层和硬土层呈互层结构,在软土层中夹有粉细砂层透镜体,下部砂层的厚度较大(3~40m),为承压含水层,施工过程中容易出现流沙、管涌等现象。区域内的水文地质情况按地下水贮存条件、水理性质及水力特征可以分为松散岩类孔隙水和碎屑岩类裂隙水两大类。漫滩地面沉降往往使得建于其上的建筑物或构筑物因沉降过大或不均匀而发生开裂甚至破坏,严重影响着建筑物、公路、城市地铁、地下管线等公共基础设施的安全运营,成为制约城市可持续发展的一个不可忽视的因素。因此,研究长江漫滩地面沉降迫在眉睫。

综上所述,对于长江漫滩地面沉降的研究主要有以下几个方面的意义:

(1)对于城市地面沉降相关理论的研究,可以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,对于实施地面沉降监控具有重要的现实意义。

(2)对于长江漫滩地区地面沉降的研究,可以帮助人们更加深入地认识长江漫滩地质条件下地面沉降发生的特点,促进人们对具有相同地质条件的城市地面沉降的研究。

(3)利用现代计算机技术、网络技术等,结合已有的监测系统,可以建立智能化的地面沉降信息管理系统,对区域内监测点的属性信息进行空间管理和智能分析,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。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 沉降机理研究

太沙基(Terzaghi)的土体固结理论于1925年提出后,就被用来解释地层的压缩而导致地面沉降。一般情况下,由于含水地层中水被抽取而产生的地面沉降有两部分,一部分是含水层在水被抽取后,土体体积压缩而引起的;另一部分是由隔水层(相对不透水层)的固结而引起的,固结的附加应力来源于地下水抽取后所引起的地下水位下降或承压水头的降低。

地面沉降的主要成因为抽取地下水(或石油和天然气)。随着地下水从沉积含水层组中,尤其在那些厚层的半固结淤泥、黏土层(弱含水层)组中排出,含水层的孔隙体积和总体蓄水能力大幅度减少,并且不能完全恢复,于是就会形成地面沉降。这一类地面沉降的成因有两种机理:有效应力原理与水动力固结理论。这两个原理将含水层的压实分为两个过程,前者解释了含水层在抽水过程中的压实引发的地面沉降,后者解释了抽水以后的

残余压实引发的地面沉降。根据有效应力理论，抽水以前上覆土层和水的重力由孔隙水压力和颗粒间的有效压力共同平衡；抽水后总压力不变，孔隙水压力降低，有效压力增加，这样颗粒骨架所受压力增加，土层被压缩，微观上表现为颗粒之间的孔隙度降低，宏观上表现为含水层变薄。抽水结束后，地面沉降并未停止，这可以用水动力固结理论来解释：在抽水过程中透水层的放水速度比弱透水层快，因此水位下降也快，停止抽水后，由于两类含水层之间水位高度不同，存在水位差，而表现为弱透水层向透水层渗水，弱透水层因而继续有压实作用，仍有沉降发生。

同时，不少地基为弱超固结，这种超固结可能是由于老化或颗粒胶结而形成的。正常固结和超固结土体的压缩曲线如图 1-1 和图 1-2 所示，图中， p 为各向等压的固结压力或竖向固结压力， e 为孔隙比， C_c 为压缩指数， C_s 为回弹指数，且一般地 $C_c = (5 \sim 10)C_s$ 。对超固结土而言，压力小于前期固结压力时，土体沿曲线 CD 压缩；压力大于前期固结压力后，土体将沿着曲线 DE 压缩。如果地下水位变化引起的附加应力使得土层的应力大于前期固结压力，土层将会产生较大压缩。对正常固结土，土层在受到地下水位变化引起的附加应力之后，土体沿图 1-1 中的曲线 AB 压缩。尽管图 1-1 和图 1-2 的直线或折线关系是假定或近似的，但还是在某种程度上反映出正常固结、超固结土的压缩性变化情况。因此，对正常固结或弱固结土，如果附加应力增大，就可能产生较大的沉降。对于较强的超固结土，由于首先沿曲线 CD 压缩，产生的压缩量应该是不大的，除非总应力超过前期固结应力。因此，不少学者认为，土层存在一个临界水位，当水位低于该临界水位时，土层就超过前期固结应力，从而产生较大沉降。因此，临界水位可以作为控制地下水开采量。

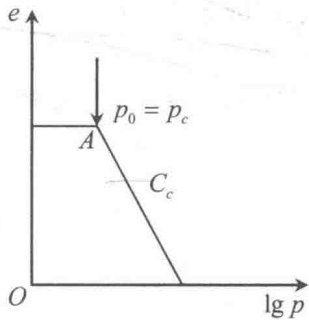


图 1-1 正常固结土的压缩曲线

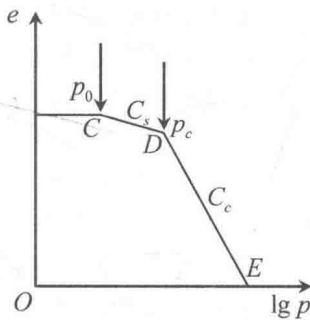


图 1-2 超固结土的压缩曲线

然而，Janbu 则认为，超固结土在其加载初期(应力达到前期固结应力之前)，随着应力的增加，土体在前期固结应力下形成的结构会渐渐破坏，土体的体积变形模量要显著减小。而只有当应力超过前期固结应力之后，体积模量才会缓慢增加。如果是这样，土层就不一定在应力超过前期固结应力后才会产生显著沉降，亦即，应力小于前期固结应力时，也有可能产生较大的沉降，对此应予以充分注意。

1.2.2 室内模型试验与分析

20 世纪 50 年代，日本学者村山朔郎通过大比例尺模型试验，研究了含水层中抽取地

下水与地表沉降的关系。有一组试验所用的土层是由一层黏土放在一层砂含水层上组成的；另一组试验中，两层黏土和两层砂交替地填在钢槽中。土层顶面充满具有自由表面的水，主要模拟由于含水层中的承压水头的降低和恢复所引起的地面活动，得出了承压水头降低与恢复情况下的孔隙水压力变化规律；含水层中承压水头的反复变化所引起的地面沉降，得出了砂层的变形与承压水头压力变化同步，但黏土层的变形则有些时间滞后及黏土层回弹比其固结快。

麦钦特(Merchant)则认为土体沉降中的次固结现象是由于土颗粒的内部摩擦阻力延滞所致，土骨架压缩的大小是时间和有效应力的函数，同时还假定孔隙比和有效应力为线性关系，并且与时间无关。他还认识到在施加荷载后，主固结和次固结是同时发生的。在Terzaghi土体固结理论的基础上，他引入了次固结的作用，建立了由Hooke弹性体和Kelvin模型串联而成的Merchant流变模型，提出了新的考虑流变的固结理论，即著名的Merchant流变模型。Gibson和Lo(1961)根据Merchant模型推导出固结方程的精确解。

同济大学唐益群教授通过室内模型试验，研究了上海地区典型地质条件下高层建筑群工程环境效应对地面沉降的影响，探讨了在高层建筑群工程环境效应作用下不同土层的变形特点、相邻建筑物之间的相互影响状况、高层建筑群对中心及周边区域地面沉降的影响以及沉降影响范围、土层中应力(包括土压力、孔隙水压力)的变化规律等。试验研究结果表明，上海软土层是地面沉降的主要组成部分；高层建筑群工程环境效应造成的城区地面沉降的特点是距建筑物1倍基础宽度范围内的地面沉降大于建筑本身的沉降，尤以相邻建筑之间中心区域地表的沉降量最大；密集高层建筑群之间地表变形存在明显的沉降叠加效应，并使沉降量超过容许值，从而带来不稳定因素。

成都理工学院工程地质研究所课题组与陕西省地质环境监测总站联合开展了西安市区地面沉降与地裂活动的量化模拟研究，采用地质力学模拟技术，定量与半定量研究重力扩展所引起的地面沉降及地裂活动，模型试验主要通过侧面扩张与地界隆起条件引起的地裂缝破裂特征及地面沉降活动，但没有包含抽水等其他因素引起的沉降错动或地面沉降；课题组采用物理、机制模拟及监测资料等方法，提出了西安市地面沉降机制是土体松动在压密、土层失水压密和砂层排砂多种作用机制的联合产物，其中土体松动在压密中占主导地位；论证了抽水沉降与地裂活动的关系，得出了西安市的地面沉降其根本原因是地裂缝的活动，即地裂缝活动引起的架空、松动是造成地面沉降的物质基础，过量抽取地下水只是诱发且部分叠加了地面沉降过程，异常的地面沉降又加剧了地裂缝的活动强度，造成了地裂缝附近土层的再松动和架空，从而又为进一步沉降提供了新的物质基础。

河海大学学者周志芳在现有成果的基础上，设计、研制地面沉降室内试验装置，并改进试样的饱和方法。使用该装置模拟释水引起的地面沉降，从地面沉降对水位变化的响应和地面沉降过程中的孔隙水压力变化两方面研究地面沉降的滞后性。分析结果得出：①承压含水砂层和黏土层的变形均表现出滞后现象；②相同试验条件下，黏土层变形的滞后时间随着土层厚度的增大而增加。地面沉降试验完成后，分别从黏土层的底部和顶部取出试样进行室内常规压缩固结试验，试验结果表明：抽水引起的地面沉降在垂直层面方向上是不均匀的，距离抽水含水层越近的部分其压缩程度越大。

何俊、肖树芳从软土的微观结构入手，主要研究结合水、结合水中的黏滞系数对固

结、流变性质的影响,说明软土的变形和强度性质与时间有明显相关性的其中原因之一就是受含量较多的结合水的影响。在固结模型中仅考虑软土的流变性是不够的,还要考虑黏滞系数是压力、结合水厚度的函数。

1.2.3 地面沉降监测技术

对于地面沉降监测技术的研究是地面沉降监测的一个重要内容。随着科学技术的进步,地面沉降监测所用到的技术、仪器、方法都在不断地更新、进步。就沉降监测技术的发展历程而言,共有以下几个方面:

1. 水准测量

水准测量作为传统的沉降监测技术,其既具有高性能、价格低、操作简单的特点,同时也有外业时间长、生产效率低、工作成果比较滞后等缺点,而且无法对测量区域实现实时、自动化监测。另外,由于地面沉降监测所布置的控制点数量有限,仅仅能够从整体上对所测量的区域进行概况性的分析,无法精确地把握沉降的整体分布特征以及发展趋势。电子水准仪的崛起在一定程度上改变了传统水准测量的劳动强度大、数据解算繁琐的缺点,提高了工作效率。

2. 三角高程测量

三角高程测量是通过观测两点之间的水平距离和天顶距,从而求得两点之间的高差。由于该方法相对简单,虽然精度低于水准测量,但不受地面高差的限制,而且作业效率较高,因此应用范围较广。

3. 数字摄影测量

随着摄影测量技术自动化的实践,使得数字摄影测量技术得到了长足的发展。这项技术是将计算机技术和摄影测量技术有机地结合起来,最后实现自动化测量。这与传统的模拟、解析摄影测量技术完全不同,数字摄影测量技术的原始信息来源,不仅可以是照片,更重要的是数字影像,亦即通过数字图像的采集和相应的计算机软件生成数字地面模型和正射影像图。

4. GPS 测量

GPS 作为一种全天候、全覆盖的综合性观测技术,经过 20 余年的发展,测量的精度已达到亚毫米级,已经在相当多的领域代替了常规的测量仪器。GPS 技术能够把测量定位技术从静态扩展到动态,而且无需测站之间的通视,因此可以简化观测方案的设计。随着计算机、数字通信等技术的不断进步,GPS 技术从开始的周期性观测逐渐向高精度、自动化以及持续性的观测发展,从而使得地面沉降的监测工作变得更加快捷和经济。

5. 合成孔径雷达干涉测量

合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)利用微波主动成像技术,通过记录地表反射回来的幅度和相位信息,将同一地区的两幅相干 SAR 影像进行干涉处理,来生成该地区的数字高程模型或者地表形变图。理论上,该技术的精度可以达到亚厘米级,能够满足许多变形监测的要求,比如地震、火山、地面沉降及滑坡等。

6. 地基合成孔径雷达干涉测量

地基合成孔径雷达干涉测量技术(GBInSAR)采用微波主动成像技术来获取目标区域

的二维 SAR 图像, 将步进频率连续波技术和干涉测量技术相结合, 在雷达影像方位向和距离向获取方面具有高空间分辨率的采样点, 解决了星载雷达受时空失相干影响严重和低空间分辨率的缺点, 可以实现毫米级的变形监测。GBInSAR 技术具有精度高、成本低、空间近连续性和遥感探测等优点, 已经广泛应用于滑坡、冰川和大坝变形监测, 并取得了令人满意的成果。

7. GPS/InSAR 融合测量

目前, GPS 技术和 InSAR 技术是进行大面积地面沉降监测的主要技术手段, 两者在技术上都具有各自的优点和缺点。GPS 技术具有较高的时间分辨率, 且相对定位精度可以达到亚毫米级, 但是其空间分辨率相对较低。而另一方面, InSAR 技术的空间分辨率可以达到 $20\text{m} \times 20\text{m}$, 而且可以获取整个区域上的连续信息, 但是 InSAR 技术卫星的观测周期为 35 天, 应用于地表变形监测的时间分辨率较低。由此可以看出, GPS 和 InSAR 的融合技术可以很好地将 GPS 技术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高程精度统一起来, 同时还能改正 InSAR 技术中的大气延迟误差和卫星轨道误差。

1.2.4 监控模型研究

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。从在日本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, 常用的地面沉降监控数学模型主要有三类: 基于土力学理论的确切性模型、基于统计理论的随机统计模型和人工智能模型。然而, 随着研究的深入, 人们发现任何一种单一的监控模型都存在一定的局限性, 需要相应的适用条件, 才可以满足实际监控的需要, 往往会呈现出通用性差, 计算效率低等缺点。许多学者在致力于监控模型研究时, 都将目光聚集在组合监控模型上, 特别是基于人工智能算法的组合模型, 希望借助于人工智能算法能有效地解决传统监控模型的适用性问题和模型缺陷, 这也是近年来地面沉降监控模型研究的一个重要发展趋势。

1. 确定性组合模型

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, 是土和水相互作用、内部应力发生变化的外在表现。因此, 地面沉降与土的变形特性及水的渗流情况密切相关。确定性组合模型目前主要有确定性自耦模型和确定性与统计耦合模型。

(1) 确定性自耦模型

确定性自耦模型是根据确定性模型中渗流模型和土体模型的结合方式不同形成的耦合模型。例如美国休斯顿地面沉降模型, 意大利拉温纳模型, 以及我国济宁模型的两步计算模型, 其水流模型和土体模型相互独立, 通过计算含水层和弱透水层的有效应力变化以及各土层的变形量来计算地面沉降量; 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模型属于部分耦合模型,模型中水位和变形既分布又相互影响,利用渗透系数与孔隙率之间的关系实现了渗流与土体模型的部分耦合;魏加华在济宁市建立的地下水与地面沉降三维有限元模拟模型也属于这种模型;1978年 R. W. Lewis 等学者在威尼斯地面沉降计算中将土的变形和地下水流统一于相同的物理空间,建立了完全耦合模型,计算结果表明该模型具有更好的稳定性。

(2) 确定性与随机耦合模型

确定性与随机耦合模型将监测模型分解为确定部分和统计部分,组合成混合模型。确定性模型借助于有限元等数值计算,对变形期地下水流或土体变形分量进行有限元弹性计算,然后对时效分量采用统计模型形式,最终以统计方法统一求解参数而得到。2004年黄铭等学者提出了基于遗传蠕变理论的沉降监测混合模型,取得了较好的预测效果。

2. 随机统计组合模型

随机统计组合模型是统计模型和其他模型组合形成的新的监控模型,是在建立白化模型比较困难、单纯的统计模型又难以反映地面沉降的整体变化且无法体现各监测量的综合作用的情况下普遍采用的一种预测方法。

随机统计组合模型大致可以分为以下几类:

(1) 回归分析-人工智能组合模型

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。回归分析法可以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。然而,解决多元线性回归分析问题的重点是多个参数的估计,传统的最小二乘算法计算过程复杂,而且程序结构不具有通用性。混沌蚁群算法是将混沌搜索和蚁群算法相结合,先用蚁群算法进行粗搜索,初步定位最优点位置,再在其附近利用混沌进行细搜索,具有较好的鲁棒性和种群寻优能力,对回归分析的多参数最优估计有着不可替代的优势。例如,吴新杰等学者提出的基于混沌蚁群算法的多元线性回归模型,模型能够有效地解决回归分析问题,同时还具有计算速度快、预测精度高、可靠性强等特点。

(2) 时间序列-人工智能组合模型

时间序列分析是 20 世纪 20 年代后期开始出现的一种现代动态数据处理方法,是系统辨识与系统分析的重要方法之一,其应用范围包括自然、工程以及生物医学等众多领域。其特点在于:逐次的观测值通常是不独立的,且分析必须考虑到观测资料的时间顺序,当逐次观测值相关时,未来数值可以由过去观测资料来预测,可以利用观测数据之间的自相关性建立相应的数学模型来描述客观现象的动态特征。时间序列分析与人工智能模型相结合,形成一种新的非线性时间序列建模及预测方法。例如,白斌飞建立了基于神经网络理论的时间序列预测模型,对变形观测数据进行处理、分析和预测,取得了较好的预报效果。王君采用自组织特征映射网络与其他神经网络相结合的方法建立了时间序列模型,模型将数据先分类,然后再建立局部预测模型,对于时间序列,尤其是大量数据的预测,有更高的预测精度。郝大海提出了基于遗传算法和粒子群算法的时间序列建模方法,也取得

了较好的预测效果。

(3) 泊松生命回旋-人工智能组合模型

泊松生命回旋模型描述单个事物从发生、发展、成熟到极限的整个过程,而且是个收敛模型,能很好地对事物总量有限体系的发展、消亡过程进行描述和预测。模型解算过程中通过使预测值与实测数值之间的均方差最小,求定模型最优系数,绘制拟合曲线,并进行预测外推,从而得到以后相当长时间内的地面沉降量。然而泊松模型仅能描述历史统计数据中的线性规律,却不能描述历史统计数据中的非线性规律,而BP神经网络是一种非线性的、动态的网络优化算法,可以很好地解决这一问题。例如,梁娜提出的基于反向传播的神经网络和泊松模型的组合模型,组合模型通过信息的集成,分散单个预测特有的不确定性和减少总体不确定性,提高了预测精度。

3. 人工智能自耦合模型

人工智能自耦合模型一般是不同人工智能模型相互耦合形成的新的模型。例如:将处理人类的含糊性和灵活性的模糊理论和模拟人类脑神经系统学习机能的神经网络组合形成的模糊神经网络,将对生物的生命进化进行模拟的遗传算法和人工神经网络组合形成的遗传神经网络,将对鸟群觅食过程进行模拟的粒子群算法和对蚁群觅食过程进行模拟的蚁群算法组合成粒子群-蚁群模型等。这些方法相辅相成,利用相互融合的方法,可以达到易使用、鲁棒性和低成本,同时在精确度和可靠性方面达到一定要求。

(1) 人工神经网络组合模型

诞生于20世纪80年代的人工神经网络(ANN)是一种非线性模型,克服了传统的基于逻辑符号的人工智能在处理直觉、非结构化信息方面的缺陷,具有强大的逼近能力、良好的自适应性和自组织性和较强的学习、联想、容错和抗干扰能力,在地面沉降监测领域有着较好的应用。然而,模型同时也表现出鲁棒性差、收敛速度慢和易陷入极小值等缺点,人工智能模型之间相互耦合可以很好地解决这个问题。例如,钟珞等学者在复合地基沉降量预测中建立的模糊神经网络,模型考虑了沉降变化过程有较大的随机性和模糊性,直接将样本数据进行模糊化,所得的模糊数代表了样本点集与控制点集中各分量之间的相关度,并依此建立模糊BP神经网络进行学习和估算。结果表明,该方法对地面沉降进行预测是可行和有效的;岑翼刚等学者建立了基于粒子群优化的小波神经网络模型,利用粒子群算法对小波神经网络中的参数进行优化,取代了传统的梯度下降法,实验结果显示,组合模型的性能、迭代次数、逼近效果均取得了显著的提高;倪前月等学者提出了基于遗传算法和BP算法的混合算法,该算法既解决了遗传算法收敛性慢,又克服了BP算法不能收敛到全局最优解的缺陷,实验结果表明,该算法显著优于遗传算法和BP算法。

(2) 粒子群-蚁群组合模型

粒子群算法是一种高效的并行搜索算法,适应于连续领域的优化。算法初始化为一群随机粒子,然后粒子追随当前的最优粒子在解空间中搜索,通过迭代找到最优解。蚁群算法基于对自然界真实蚁群的集体觅食行为的研究,模拟真实的蚁群协作过程。算法由若干个蚂蚁共同构造解路径,通过在解路径上遗留并交换信息素提高解的质量,进而达到优化的目的。粒子群-蚁群组合模型克服了各自算法的缺点,在时间效率上优于蚁群算法,在求解精度上优于粒子群算法。例如,黄少荣提出了粒子群算法和蚁群算法的融合策略,模

型首先利用粒子群较强的全局搜索能力,将经过一定迭代次数得到的次优解调整蚁群算法中的信息素的初始分布,然后利用蚁群算法的正反馈机制快速地求定问题的精确解,让蚂蚁也具有了粒子的特性,在每一次的遍历中都充分利用局部最优解和全局最优解来调整路径,以产生性能更优的下一代群体。

(3) 模拟退火法-遗传算法组合模型

模拟退火法-遗传算法组合模型是将模拟退火法与遗传算法进行联合,实现的非线性优化算法。模拟退火法是一种基于随机搜索的近似算法,理论上能将解空间收敛到全局最优,而在实际应用中最优解的精度是难以确定的,该算法受到计算时间的限制,一般只能给出一个近似解。为了获得更为准确的近似解,一般选择多次重复执行模拟退火法,选择最好的解作为全局最优解,同时,模拟退火法从过去搜索的结果中得到关于整个搜索空间的一些信息以指导搜索过程。例如,张绍红等学者在地震波阻抗反演解释中建立的模拟退火法和遗传算法联合优化技术,在传统模拟退火法中引进了群体概念,把每次搜索得到的关于解空间的知识,反映在所求得的近似解中,以指导解空间的进一步搜索,具有避免陷入局部极值、加快收敛速度的优点,实验结果表明,模型具有较高的精度和可靠性。

1.2.5 地质灾害风险评价

国内外对地质灾害的探索历史久远,但有关地质灾害风险评估与管理方面的研究目前仍是一个较新的领域,迄今尚未形成完整的科学体系。尽管如此,随着人类对地质灾害风险认识的逐渐深入以及联合国开展“国际减灾十年”活动以来,地质灾害风险评价研究得到了长足的发展和进步,不但在防灾、减灾中发挥了重要作用,而且为地质灾害风险评价逐渐走向成熟奠定了基础,具有指导政府决策和城市建设的现实意义。

回顾国内外地质灾害风险评价的发展历程,大致可以分为以下几个阶段:

(1)20 世纪 60 年代前,地质灾害工作具有浓厚的工程地质色彩,研究的重点限于灾害形成机理、分布规律及趋势预测以及调查分析灾害形成的过程和活动规律。相关的灾害评价以宏观定性分析为主,难以检测地质灾害风险评价所达到的水平,这种状况既阻碍了评价成果的应用,又妨碍了地质灾害评价理论和方法的发展。

(2)20 世纪 70 年代至 80 年代中后期,地质灾害破坏损失的急剧增加促使人类把防灾、减灾工作提高到前所未有的程度。一些发达国家,如美国、瑞士、日本等首先拓宽了灾害研究领域,在继续深入研究灾害机理的同时,开始进行系统的灾害风险评估研究。在此期间,美国地质调查局对地震频发的洛杉矶的地震、滑坡、水灾等的风险度进行了全面的评价,并编制了相应的灾害风险图;在瑞士沃州,早在 1979 年政府就颁布了土地管理法,规定“受自然灾害,如雪崩、滑坡、崩塌、洪水威胁的土地,在未得到专家评估、充分论证或危险排除之前,禁止在灾害危险区进行任何建筑活动”;20 世纪 80 年代,日本学者春山(Haruyama H)和川上(Kawakami H)(1984)利用数理统计理论对日本活火山地区降雨引起的滑坡灾害进行了危险度评价,其评价结果为降低灾害损失发挥了重要作用。我国地质灾害风险评价研究在时间上明显晚于国外,20 世纪 80 年代以前,一直停留在铁路、公路沿线以及其他工程建设区崩塌、滑坡和泥石流灾害危险性定性分析阶段,尚未形成系统研究。

(3) 20 世纪 80 年代后期至 90 年代中后期, 为了加强各国在地质灾害相关领域的研究和交流, 联合国于 1987 年开展了“国际减灾十年”活动。随着计算机技术、GIS 技术、数学模型分析方法的飞速进步, 促进了各国对地质灾害风险评价研究水平的普遍提高。其中, 20 世纪 90 年代初, Gupta 等学者将地理信息系统技术应用在喜马拉雅山麓 Rumgana 流域滑坡灾害危险性评价中, 将滑坡灾害风险分为低、中、高三个等级, 通过地理信息系统的叠加, 勾绘了滑坡危险性分区图, 从而奠定了基于地理信息系统技术的滑坡灾害危险性定量评价的基础。我国在这个时期也相继开展了区域性地质灾害危险性评价研究工作, 并建立了各类地质灾害危险性评价模型。其中, 张业成等学者(1993) 针对我国崩塌、滑坡、泥石流等灾害, 建立了地质灾害危险性指数评价模型和危险性评价分析模型, 并研绘了地质灾害强度分布图和区划图; 雷明堂、蒋小珍等学者(1994) 运用 GIS 技术于岩溶塌陷评价中, 根据塌陷影响因素, 利用 GIS 的距离分析、叠加分析、分组分析等功能, 完成了研究区塌陷危险性评价及分区。

(4) 20 世纪 90 年代后期至今, 地质灾害风险评价理论不断提高, 研究内容不断丰富。地质灾害风险评价方法逐渐形成了比较完善和规范的体系, 尤其是数学模型和 GIS 技术的应用得到了快速发展; 在评价内容方面, 也不仅仅局限于崩、滑、流灾害, 其中也包括地面沉降、地裂缝、采空区塌陷等。近年来, 我国对地质灾害风险评价的研究越来越重视, 国家国土资源部相继发布了《地质灾害防治管理办法》、《关于实行建设用地地质灾害危险性评估的通知》等文件, 并编写了《建设用地地质灾害危险性评估技术要求(试行)》、《地质灾害危险性评估规范》以指导和规范地质灾害危险性评估工作, 确保将灾害损失降到最低。

1.2.6 综合分析评判理论与方法

经过数十年的探索和研究, 地质灾害风险评价理论不断发展, 其评价方法也逐渐由定性分析走向定量评价。根据地质灾害风险评价过程中所采用手段的不同, 评价方法可以分为: 统计分析法、层次分析法、模糊综合评判、人工神经网络、灰色关联分析和 GIS 分析技术。

1. 统计分析法

统计分析法是运用数理统计理论, 通过统计地质灾害的活动规模、频次、密度以及地质灾害的主要影响因素, 分析历史地质灾害的形成条件、活动状况和周期性规律, 并依此建立地质灾害活动的数学模型。统计分析法中最常用的是判别分析和回归分析, 前者更适合于连续变量, 后者可以应用于含有定性变量的分析。刘希林等学者通过搜集大量资料, 分析建立了判断泥石流危险性程度和评价泥石流泛滥堆积范围的统计模型, 并对云南省和四川省泥石流灾害风险进行了评价; 殷坤龙、晏同珍等学者通过对滑坡灾害危险性和斜坡不稳定性的研究建立了定量评价的信息分析模型、多因素回归分析模型和判别分析模型等, 并应用于秦巴山区和三峡库区滑坡灾害防治, 取得了较好的效果; 邢秋菊、赵纯勇等学者采用数理统计方法中的逻辑回归分析和信息量法, 结合 GIS 技术对万州滑坡危险性进行了评价。

2. 层次分析法

20 世纪 70 年代初,层次分析法(AHP)由美国著名运筹学家 T. J. Satay 首先提出,层次分析法在地质灾害风险评价中的基本原理是通过影响地质灾害的多个因素进行分析,划分出各因素相互联系的有序层次;再请专家对每一层次各因素进行客观的判断后,给出相对重要性的定量表示,建立数学模型,计算出每一层次全部因素的相对重要性的权数并加以排序;最后根据排序结果进行地质灾害的风险评价。层次分析法由于模型简单,计算量小,近年来得到了广泛运用。滕继东等学者将互反型判断矩阵改为模糊一致性判断矩阵,并把行归一法或方根法与特征向量法结合使用,提出了改进的模糊层次分析法,最后以浙江省青田县地质灾害危险性评价为例,验证了该方法在求解评价指标权重时更为合理。王哲、易发成运用 AHP 方法建立了绵阳市滑坡、崩塌、泥石流三种灾害的单灾种地质灾害易发性评价模型,对整个区域地质灾害的易发性进行评价,将区域地质灾害易发性综合评价结果与实际发生的地质灾害发育区进行对比,拟合率大于 90%。刘会平、王艳丽在 GIS 技术和基础地理信息数据库的支持下,建立专家打分赋权指标体系的层次分析模型,对广州市地面沉降危险性进行了评价,并绘制出了广州市主城区地面沉降危险性等级分布图。

3. 模糊综合评判

模糊综合评判又称为多元决策,对灰色系统判别具有良好的效果。所谓模糊综合评判,就是对受多种因素影响的现象或事物进行总的评价,即根据所给条件,对评判对象的全体,每个都赋予一个评判指标,然后择优选择。地质灾害是多因素综合作用的结果,引发地质灾害的各种因素间相互影响,出现了模糊性。采用模糊综合评判法可以使得指标分级界限发生模糊,这恰好体现了地质灾害中各影响因子的非线性关系。李伟等学者在分析沧州市地面沉降成因的基础上,以黏性土层累积厚度、地下水开采强度、地下水水位埋深、油气热水水资源开采、建筑容积度、累计沉降量等环境地质因素作为评判指标因子,应用模糊评判原理和方法,通过评价指标的隶属度计算和 MAPGIS 的应用,得出沧州市地面沉降危险性综合评价结果。王新民、段瑜选取地质、水文、环境、采空区集合参数等 4 个方面的 14 项因素作为评价因子,采用模糊综合评判法对地下采空区灾害危险度进行综合评价与划分,确定了危险源及其危险度等级,为采空区的治理与安全生产提供了重要的理论依据和指导。

4. 人工神经网络分析

神经网络法是模拟人的智能的一种方法,该方法通过把大量的神经元连接成一个复杂的网络,并利用已知样本对该网络进行训练,让网络存储变量间的非线性关系,然后用所存储的网络信息对未知样本进行分类或预测。曹丽文等学者探讨了 GIS 支持下利用人工神经网络技术进行开采沉陷定量预测的方法,完成了影响因素的选取、数据处理、开采沉陷初始模型的建立及验证;叶先进利用 GIS 将参与评价的因子按神经网络模型中的因素选取确定后,以地图图层的形式输入 GIS 系统中,进而将图元区域的各项因素指标值写入中间数据库,供人工神经网络评价模型直接调用,实现了 GIS 数据与评价分析模型的无缝连接。