

中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金 (SKLGDEK1005)
国家自然科学基金 (51208503、40872178)
江苏省自然科学基金 (BK2012133)

软土地区密集高层建筑群 引起地面沉降研究

崔振东 著

Ruantu Diqu Miji Gaoceng Jianzhuqun Yinqi Dimian Chenjiang Yanjiu



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金
(SKLGDUEK1005)

国家自然科学基金(51208503、40872178)

江苏省自然科学基金(BK2012133)

软土地地区密集高层建筑群 引起地面沉降研究

崔振东 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以上海软土地区密集高层建筑群为研究对象,通过现场实测、室内一般模型试验和离心模型试验,结合环境扫描电镜试验和压汞试验,运用非等时距灰色理论模型和自适应模糊神经推理系统,对上海软土地区密集高层建筑群作用下的地面沉降机理、地面沉降预测和建筑容积率进行了研究。研究成果可以为工程性地面沉降的防治和预测提供理论依据和参考,降低地面沉降造成的经济损失。

本书可供岩土工程、地质工程等领域的科研、教学、施工及设计人员参考,也可作为高等学校相关专业高年级本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

软土地区密集高层建筑群引起地面沉降研究/崔振东著. —徐州:中国矿业大学出版社,2012.10

ISBN 978 -7 -5646 -1626 -7

I. ①软… II. ①崔… III. ①软土地区—高层建筑—地面沉降—研究 IV. ①TU478

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 223616 号

书 名 软土地区密集高层建筑群引起地面沉降研究
著 者 崔振东
责任编辑 时应征 章 毅
责任校对 周俊平
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 江苏徐州新华印刷厂
开 本 787×960 1/16 印张 11.25 字数 211 千字
版次印次 2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷
定 价 50.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

地面沉降是在自然和人为因素作用下,由于地壳表层土体压缩而导致区域性地面标高降低的一种环境地质现象,是一种不可补偿的永久性环境和资源损失。地面沉降具有生成缓慢、持续时间长、影响范围广、成因机制复杂和防治难度大等特点,是一种对资源利用、环境保护、经济发展、城市建设和人民生活构成威胁的地质灾害。地面沉降是我国乃至世界范围较为普遍的地质灾害,对社会的可持续发展影响巨大。

目前世界上已有 150 多个国家和地区发生地面沉降,如美国、中国、日本、墨西哥、意大利、泰国、英国、俄罗斯、委内瑞拉、荷兰、越南、匈牙利、德国、印度尼西亚、新西兰、比利时、南非等。

自 1921 年上海市区最早发现地面沉降以来,至今中国已有 90 多个城市或地区发生不同程度的地面沉降。代表性地区有上海,天津,北京,浙江的宁波、嘉兴,江苏的苏州、无锡、常州,河北的沧州、唐山、衡水、保定、任丘、南宫,山东的菏泽、济宁、德州,安徽的阜阳,山西的临汾、太原、大同,河南的安阳、开封、洛阳、许昌、郑州,陕西的西安和松辽平原等。在这些地区中,最为突出的是以苏锡常和上海为代表的长江三角洲,以及以天津为代表的环渤海区等地。

上海是中国最早发现区域性地面沉降的城市。最新研究报告显示,地面沉降已经造成长三角中心地区损失近 3 500 亿元,其中上海损失约为 2 900 亿元。上海自 20 世纪 20 年代初发现沉降以来至 1965 年,市区地面平均下沉 1.76 m,最大沉降量达 2.63 m。这主要是由于不合理开采地下水所致。60 年代中期开始,经采取压缩地下水开采量,调整地下水开采层次及人工回灌等措施,实现了地面沉降的有效控制。1966~1990 年地面年平均沉降量仅为 2.5 mm。但是近一时期,上海的地面又呈现加速沉降现象,尤其是 1991~1996 年间,中心城区累计平均沉降 61.2 mm,年均沉降达 10.2 mm,这 6 年的沉降量接近于前 25 年沉降量的总和,同时工程环境效应已经成为地面沉降的主要影响因素。

目前国内外学者对地面沉降的研究主要集中在抽取地下水方面,建筑荷载诱发的地面沉降也仅限于单栋建筑物,对密集高层建筑群引起地面沉降的研究相对较少。笔者在同济大学学习期间,有幸全面地参与了工程环境效应引起地面沉降课题的研究,取得了较为丰富的研究成果,并在此期间完成了博士学位论

文。本书即是对该期间取得成果的总结。

全书共分为9章。第1章回顾了国内外地面沉降的研究现状、土工离心模型试验研究现状,介绍了本书的主要研究内容及创新点。第2章对开采地下水及大规模的工程建设引起的地面沉降机理进行了分析。第3章对密集高层建筑群的应力叠加效应、影响范围及其施工对周围环境的影响做了初步研究。第4章通过室内一般模型试验,对上海软土地区密集高层建筑群作用下的地面沉降机理和特点进行了初步研究。第5章通过离心模型试验,进一步探讨密集高层建筑群引起地面沉降的机理。第6章对离心模型试验前后土体的微观结构分别进行了定性分析和定量分析。第7章应用灰色理论建立非等时距模型,对上海陆家嘴地区某高层建筑群的沉降进行预测。第8章针对陆家嘴、徐家汇、中原和长桥四个典型地区不同地质结构及沉降控制要求,应用自适应模糊神经推理系统输出建筑容积率。第9章是全书的主要研究结论。

本书的主要研究成果是在同济大学土木工程学院地下建筑工程系唐益群教授的精心指导下完成的,并在研究过程中得到周念清教授、王建秀副教授以及上海市地质调查研究院严学新教授级高工、王寒梅高工的大力帮助。同时部分试验是在硕士研究生卢辰、张墨丹的帮助下完成的,在此向他们表示诚挚的感谢!

本书的出版得到了中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金“白垩系深部地层人工冻土的力学特性研究”(编号:SKLGDUEK1005)的大力资助;本书的研究课题得到了国家自然科学基金项目“基于地下水位变化高层建筑群引起土体分层沉降机理研究”(编号:51208503)、“软土地区密集建筑群工程环境效应与地面沉降机理研究”(编号:40872178)和江苏省自然科学基金项目(编号:BK2012133)的资助,在此表示感谢!

笔者由于认识能力和理论水平的限制,书中相当一部分问题的研究尚不够系统与深入,不足、疏漏甚至谬误之处在所难免,敬请专家与读者批评指正。

笔者

2012年6月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 地面沉降研究现状	2
1.3 土工离心模型试验研究现状	7
1.4 主要研究内容与创新点	9
2 软土地面沉降的机理与理论分析	11
2.1 软土地面沉降机理	11
2.2 软土地面沉降的理论分析	12
2.3 软土地面沉降的数值计算	22
2.4 本章小结	31
3 密集高层建筑群的工程环境效应	32
3.1 密集建筑群的地面沉降叠加效应	33
3.2 密集高层建筑基础施工对周边环境的影响	38
3.3 本章小结	40
4 密集高层建筑群引起地面沉降的室内一般模型试验	42
4.1 试验材料	42
4.2 试验设计	43
4.3 试验方法	45
4.4 试验结果分析	45
4.5 本章小结	51
5 密集高层建筑群引起地面沉降的离心模型试验	53
5.1 土工离心机原理	53
5.2 离心模型试验设备介绍	56
5.3 离心模型试验方案设计与实施	60

5.4	试验结果与分析	67
5.5	本章小结	80
6	密集高层建筑群作用下软土的微观结构特征	81
6.1	引言	81
6.2	扫描电镜试验	82
6.3	压汞试验	90
6.4	本章小结	115
7	密集高层建筑群引起地面沉降的预测	117
7.1	灰色预测模型	118
7.2	地面沉降预测方法	121
7.3	地面沉降现场预测	122
7.4	地面沉降室内一般模型试验预测	127
7.5	本章小结	129
8	沉降因素影响下建筑容积率的 ANFIS 模型	131
8.1	地面沉降影响因素	131
8.2	自适应模糊神经推理系统	139
8.3	典型区域建筑容积率	154
8.4	本章小结	156
9	结论与展望	157
9.1	结论	157
9.2	进一步工作的方向	159
	参考文献	160

1 绪 论

1.1 引 言

地面沉降是在自然和人为因素作用下,由于地壳表层土体压缩而导致区域性地面标高降低的一种环境地质现象,是一种不可补偿的永久性环境和资源损失。地面沉降具有生成缓慢、持续时间长、影响范围广、成因机制复杂和防治难度大等特点,是一种对资源利用、环境保护、经济发展、城市建设和人民生活构成威胁的地质灾害。地面沉降是我国乃至世界范围较为普遍的地质灾害,对经济社会的可持续发展影响巨大。

上海是中国最早发现区域性地面沉降的城市。最新研究报告显示,地面沉降已经造成长三角中心地区损失近 3 500 亿元,其中上海损失约为 2 900 多亿元。上海自 20 世纪 20 年代初发现沉降以来至 1965 年,市区地面平均下沉 1.76 m,最大沉降量达 2.63 m。这主要是由于不合理开采地下水所致。60 年代中期开始,经采取压缩地下水开采量,调整地下水开采层次及人工回灌等措施,实现了地面沉降的有效控制。1966~1990 年地面年平均沉降量仅为 2.5 mm。但是近一时期,上海的地面又呈现加速沉降现象,尤其是 1991~1996 年间,中心城区累计平均沉降 61.2 mm,年均沉降达 10.2 mm,这 6 年的沉降量接近于前 25 年沉降量的总和,同时工程环境效应已经成为地面沉降的主要影响因素。

地面沉降问题是上海市十一五规划重点内容,地面沉降已成为制约城市发展的主要因素。上海市域面积 6 340 km²,人口 1 313 万。上海市下属 18 个区和 1 个县,外环线以内为中心城区,包括:黄浦、卢湾、静安、闸北、虹口、杨浦等区的全部和长宁、普陀、徐汇、浦东新区的大部分以及闵行、嘉定和南汇的部分地区。解放初,上海市区面积约 84 km²,人口 419 万,各类房屋建筑约 4 680 万 m²,其中住宅建筑约 2 360 万 m²;新中国成立后至 70 年代末,上海市区面积约 141 km²,人口 588 万,各类房屋建筑约 8 000 万 m²,其中住宅建筑约 4 400 万 m²。80 年代以来,上海的各项建设事业得到持续快速的发展,自 1990 年 4 月党中央国务院正式宣布开发开放浦东新区以来,上海开展了大规模的城市建设,中心城区内的建设用地约达 450 km²,各类房屋建筑约达 25 000 万 m²,其中住宅

建筑约 15 000 万 m^2 。

目前国内外学者对地面沉降的研究主要集中在抽取地下水方面,建筑荷载诱发的地面沉降也仅限于单栋建筑物,对密集高层建筑群引起地面沉降的研究相对较少。本书以上海地区典型地质条件为背景,对软土地区密集高层建筑群引起的地面沉降进行研究。研究成果可以为工程性地面沉降的防治和预测提供理论依据和参考,降低地面沉降造成的经济损失。

1.2 地面沉降研究现状

1.2.1 国外现状

现有文献资料表明,1891 年墨西哥城最早记录地面沉降现象,但当时由于地面沉降量不大,危害也不明显,所以没有引起人们的重视。目前墨西哥平均沉降量达到 0.3 cm/a,最大累计沉降量超过 7.5 m,有的地区甚至超过 15 m。

日本于 1898 年在新潟最早发生地面沉降,至 1958 年地面沉降速率达 530 mm/a,1952~1956 年新潟是日本地面沉降最严重的地区,产生严重地面沉降的城市或地区还有东京、大阪和佐贺县平原,其他地区还有名古屋、川崎、山口、尼崎及西宫等。

20 世纪意大利的 Ravenna 地区发生了大面积的地面沉降。起初沉降不大,每年数毫米;第二次世界大战后,由于过度抽取地下水,以每年 110 mm 的沉降量剧增。

美国于 1922 年最早在加州萨克拉门托 San Joaquin 流域发现沉降,1920~1969 年地下水位下降达 137 m,累积地面沉降达 2.6 m,影响范围 9 100 km^2 。至 20 世纪 70 年代初期,美国已有 37 个州因开采地下流体而产生不同程度的地面沉降现象;至 1995 年,美国 50 个州均有地面沉降发生。

据统计,目前世界上已有 150 多个国家和地区发生地面沉降,如美国、中国、日本、墨西哥、意大利、泰国、英国、俄罗斯、委内瑞拉、荷兰、越南、匈牙利、德国、印度尼西亚、新西兰、比利时、南非等。

1.2.2 国内现状

20 世纪 20 年代初,中国最早在上海和天津市区发现地面沉降,至 60 年代两地地面沉降灾害已十分严重。70 年代,长江三角洲主要城市及平原区、天津市平原区、华北平原东部地区相继产生地面沉降;80 年代以来,中小城市和农村地区地下水开采利用量大幅度增加,地面沉降范围也由此从城市向农村扩展,在城市上连片发展。同时,地面沉降地区伴生的地裂缝,加剧了地面沉降灾害。

自 1921 年上海市区最早发现地面沉降以来,至今中国已有 90 多个城市或

地区发生不同程度的地面沉降,到 2003 年沉降面积达 $93\,885\text{ km}^2$ 。代表性地区有上海、天津、北京、浙江的宁波、嘉兴,江苏的苏州、无锡、常州,河北的沧州、唐山、衡水、保定、任丘、南宫,山东的菏泽、济宁、德州,安徽的阜阳,山西的临汾、太原、大同,河南的安阳、开封、洛阳、许昌、郑州,陕西的西安和松辽平原等。在这些地区中,最为突出的是以苏锡常和上海为代表的长江三角洲,以及以天津为代表的环渤海区等地。

1.2.3 地面沉降产生的原因

地面沉降是自然因素或(和)人为因素作用下形成的地面标高损失。自然因素包括构造下沉、地震、火山活动、气候变化、地应力变化及土体自然固结等。人为因素主要包括开发利用地下流体资源(地下水、石油、天然气等)、开采固体矿产、岩溶塌陷、软土地区与工程建设有关的固结沉降等。

(1) 开发利用地下流体资源

由于抽取地下水,在许多国家和地区产生了地面沉降。美国加利福尼亚州 San Joaquin 峡谷开采地下水,产生了达 9 m 的地面沉降。德克萨斯州等地由于碳氢化合物的开采诱发地面沉降。20 世纪 20 年代,上海、天津在市区集中开采地下水的地区发生地面沉降。华北平原地下水降落漏斗和地面沉降引起了广泛关注。胜利油田开采区的平均沉降量为 10 mm/a 左右,现河采油厂的耿家井附近 15 年下沉量为 378 mm ,平均沉降 25.2 mm/a ;80 年代中期大庆油田为了增加原油产量,采取了注水采油的方法,从而产生区域性地面沉降,大庆地区 1978~1991 年期间累计地面沉降量达 1.5 m ;进入 90 年代以来,昆明市地下热水的开采规模扩大,1999 年达 $22\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 以上,累计开采量已超过 1 亿 m^3 ,发生了较严重的地面沉降。在台湾由于抽取地下水引起的地面沉降总面积达 $1\,890\text{ km}^2$ 。

(2) 岩溶塌陷

中国可溶岩分布面积达 365 万 km^2 ,占国土面积的 $1/3$ 以上,是世界上岩溶最发育的国家之一。近年来,随着岩溶地区国民经济的飞速发展,岩溶区土地资源、水资源和矿产资源开发的不断增强,由此引发的岩溶塌陷问题日益突出,已成为岩溶地区主要地质灾害问题,仅广西、云南、贵州、四川和重庆等五个西南省区就已发生岩溶塌陷 859 次,占全国岩溶塌陷总数的 78%。

(3) 开采固体矿产

矿山塌陷多分布在矿山的采空区,以采煤塌陷最为突出。南斯拉夫吐斯拉城岩盐矿经过近百年的开采,盐水层水压力下降,地面最大沉降量达 10 m ;波兰最大铜矿莱格纳卡产生超越开采区的巨大沉降槽,地面最大沉降量达 0.8 m ;中国有 20 个省区共发生采空塌陷 180 处以上,塌陷面积大于 $1\,150\text{ km}^2$,以黑龙江、山西、安徽、山东、河南等省最为严重。

(4) 工程环境效应

密集高层建筑群等工程环境效应是近年来新的沉降制约因素,在地区城市化进程中不断显露,在部分地区的大规模城市改造建设中地面沉降效应明显。

上海城区大规模的工程建设,特别是重大市政工程和高层建筑物的建设对中心城区的地面沉降带来了严重影响,城市工程建设引起的沉降约占近期总体沉降的30%。根据近年来市区地下水采灌量及土层变形分层监测统计结果,地下水开采造成的土层变形主要集中在70 m以深土层,而70 m以浅土层的变形主要是城市工程建设引起的。在城区严格控制地下水开采的情况下,城区产生过大地面沉降量(年均10 mm以上)与大规模的工程建设、过大的建筑容积率有关。

进入20世纪90年代,随着社会经济的发展,上海市各种基础市政工程及高层建筑开始大规模建设。而在同一时期,上海地面又明显出现加速沉降现象,中心城区年均沉降量是前一时期的4倍多。由于上海中心城区地下水的开采得到严格控制,而且回灌量一直大于开采量,地下水动态历年来基本保持稳定,并在区域与层次上的分布也较为均衡,在抽灌地下水引发地面沉降的发展过程,中心城区较为平缓。在此背景下,上海中心城区大规模城市建设诱发的工程环境效应引起密切关注。对于密集高层建筑群等工程环境效应引起的地面沉降,国内外研究很少。

1.2.4 地面沉降机理研究

Terzaghi在1925年提出了有效应力原理,并于1943年运用有效应力原理解释地面沉降机理,认为地下水头压力的降低导致有效应力的增大是含水层压密的原因。Biot提出了固结理论,他从土的应力—应变关系上推导沉降问题,认为土的压缩量等于水体排出量。Helm从地下抽取液体而引起土体应力变化为出发点研究由于应力变化而引起的地面沉降问题,从液体运动方面考虑的较多,一般都要求荷载的变化率为常数。许多学者从抽水引起含水层压密的机理上研究地面沉降问题。

地面沉降的微观机理也是研究的热点。在外界环境条件影响下,土层所表现出的各种特性,都是其内在微观结构发生变化的外在反应,故微观结构对土的性质的变化有着重要的决定作用。Djeran-Maigre和Anandarajah等通过黏土的微观结构来研究宏观的力学性质(如压缩),表明微观结构同宏观性质之间有着密切的联系。龚士良对上海软土层的微观特性进行了研究,认为导致上海软黏土高压缩、低强度等不良工程特性的原因与其微观特性密切相关,包括孔隙及其结构形态、孔隙溶液的化学成分等物理化学诸方面因素。

土的结构性是指土体颗粒和孔隙的性状、排列形式及其连接方式和类型,是指土结构的力学效应,即受力时土的结构对其力学行为的影响。天然正常压密

土、超压密土、欠压密土都具有结构性。土的多相性和结构性是区别其他工程材料的主要特征,绝大多数的天然沉积土都具有一定程度的结构性。土的结构性对土的力学行为有明显影响,主要表现在:结构性土的压缩曲线上有明显的结构屈服应力,土的压缩特性在屈服应力前后有明显差异,结构性引起的低压密土与应力历史引起的超压密土区别在于,在同一应力状态下,前者的孔隙比大于后者;结构性土的应力—应变关系和应力水平密切相关,当固结压力低于结构屈服应力时,应力—应变关系呈“应变软化型”,当固结压力高于结构屈服应力时,应力—应变关系呈“应变硬化型”;在固结不排水剪切试验中,孔隙水压力的变化规律因结构屈服应力和固结压力两者之间的大小关系不同而不同,会出现 Skempton 系数大于 1 的情况;结构性对土固结系数及渗透性影响甚大,在结构破坏以前,固结系数基本为一常数,结构破坏后,固结系数急剧下降,原状结构性土的渗透系数比重塑土大 5~10 倍;结构性土的强度包络线呈折线型,在土体结构屈服强度处有明显的转折。由此可见,土的结构性是软土的一个重要特性,对其物理力学性质有较大的影响,特别是对动力荷载下的土压缩性的影响。土的结构性同时也为微观研究土体变形的机制提供了理论支持。

纵观国际上黏性土微观结构的研究历史,黏性土微观结构研究的盛行时期是在 20 世纪六七十年代,1973 年在瑞士召开了第一次土的微观结构国际会议。从 20 世纪 70 年代后期起,国际上微观结构研究热开始冷了下来,有关微观结构方面的论文也相对较少。然而,与此同时,Tovey 和 Osipov 的课题组在对黏性土微观结构形貌计算机定量处理方面取得了重要进展,Bazant 的研究小组在建立黏性土微观力学方面有了新的突破。

我国开展黏性土微观结构的工作要比国际上晚几十年。除了 1957 年陈宗基提出黏性土三维网格模型和 20 世纪 60 年代末张宗祜、林崇义、朱海之等对黄土微观结构开展一些工作外,一直到 70 年代末,我国对黏性土微观结构的研究工作才真正开展起来。特别是随着国内扫描电镜的普及,利用电镜进行微观结构特征研究的人越来越多,在 80 年代中期达到高潮。虽然起步较晚,但研究的技术手段起点较高,许多研究者均利用了国际上最先进的电子显微镜测试手段开展工作,从这一点来说已经赶上了世界先进水平。

在土的微观结构研究中,纯粹的结构形态分析较少,而结合黏性土,尤其一些特殊土(如黄土、膨胀土、软土等)工程性质的定性研究较多,应用微观结构在解释一些土的特殊工程性质方面取得了较大进展。微观结构备样技术有了重大进展,吴义祥成功研制了冷冻真空升华干燥仪,填补了我国微观结构备样技术的空白。

微观结构的定量研究已开始起步,谭罗荣利用 X 光衍射仪对黏性土中扁平

黏土矿物颗粒定向排列进行了定量测定;吴义祥,施斌应用了计算机图像处理技术对微观结构形貌进行了定量研究,取得了相应成果。

施斌等学者通过自己发表的论文介绍了工程黏性土微观结构研究方面的一些新技术、新成果和新发展,主要包括供扫描电镜(SEM)分析用的处理高含水量土样的冷冻刀切干燥法、定量评价黏性土微观结构的图像处理技术、测定黏性土粒间胶结物化学成分的EDX技术和无损伤探测土体内部结构的CT技术。龚士良对软黏土的颗粒及集合体成分、孔径分布、微结构、孔隙溶液与阳离子交换性做了分析,对固结前后的孔径变化与人工回灌对土体性质可能带来的影响做了研究,从物理化学角度阐述了软黏土微观特性对土体固结变形及地面沉降的影响。梁双华等将地理信息系统软件Mapinfo和图形处理软件Photoshop等应用软件结合在一起进行数据提取的新技术,提出了有关描述黏性土微观结构的扫描图片信息提取和定量分析的M—P法。唐益群等通过扫描电镜试验对饱和软黏土颗粒的微观性状进行了研究,从土的微结构基本单元的形状和大小、基本单元体的接触状态、基本单元体间的联结形式、孔隙的形状和大小以及土体变形3个阶段的力学特性等方面进行较深入的研究。另外,将原状土和循环三轴试验破坏后两种状态的土样做了对比,从微观的角度解释了土体的变形机理。

1.2.5 地面沉降监测与预测

地面沉降的监测技术日益先进,全球定位系统(GPS)已经逐渐取代区域性水准测量,得到广泛的应用。在美国加州萨克拉门托,GPS测量已经取代了区域性的地面标高的水准测量,1986年在该区建了38个GPS监测站,1989年后达到了68个,采用最严格的测量程序,其大地高程的精度可达到毫米级;Hiroshi利用GPS技术量测了新潟的地面沉降,绘制了沉降变化图;上海建立了长江三角洲统一的地面沉降GPS监测网、地面沉降信息系统(LSIS),采用分层标和基岩标对上海地区的地面沉降进行监测;美国研制出用于探测地面沉降的干涉合成孔径雷达(InSAR)监测技术,应用GPS和InSAR技术对西班牙特内里费火山岛的地面沉降进行了监测。

国内外有关地面沉降的预测方法很多,主要有模糊神经网络、灰色理论等。Y. Q. Tang和Z. D. Cui运用灰色理论,建立非等时距GM(1,1)模型,对上海陆家嘴地区因工程环境效应因素引起的地面沉降进行了预测,并和实测数据进行了比较,预测值与实测结果基本相符,具有较好的精度;李涛等在分析天津市区地面沉降特点的基础上,结合人工神经网络原理,预测了2010年天津市区地面沉降的情况。当沉降均匀平稳时,宜采用灰色预测,当沉降波动较大时,宜采用人工神经网络预测。沉降是一个受多方面因素影响的复杂过程,其影响因素与沉降之间存在复杂的非线性关系。正确选择预测方法和建立相应的模型,对于

精确的预测沉降和防止事故的发生显得尤为重要。

1.3 土工离心模型试验研究现状

1.3.1 土工离心模型试验国外研究现状

根据弹性体的平衡微分方程,1869年法国人 E. Philips 推导出模型和原型之间具有相同性状的相似关系。在这些平衡微分方程中,当重力为主要因素时,E. Philips 建议用离心机来增加模型的重力以达到这种相似性,明确提出了设计离心机的一般原理,并建议将它的设想对横跨英吉利海峡的大钢桥进行可行性研究,由于当时条件的限制,没有得到应用。

直到 20 世纪 30 年代,这一概念才在美国和前苏联重新提出并开始进行试验工作。1931 年,哥伦比亚大学的 Bucky 将此技术用于矿山模型试验,所用的离心机半径仅 25 cm,因机器过小,难以进行定量观测模型变化,没有继续进行下去。1932 年,前苏联的 Pokrovsky 和 Fedorov 又重新提出使用此技术,在此后的 20 多年间先后建置了半径 1 m 左右的小离心机 8 台,60 年代后期建置的离心机规模稍大,半径达到 2~2.5 m,并于 1974 年在巴库建成前苏联最大的离心机,半径 5.5 m,容量达到 1 500gt(g 为重力加速度, t 为吨),但由于结构形式较为单一,并且测量设备比较简单,因而没有得到广泛应用。

20 世纪 60 年代后期,继美国和前苏联之后,日本和英国又开始了离心模型试验的研究工作。日本从 1965 年在 M. Mikasa 的领导下建立了第一台离心机到 1980 年建成容量 300gt 的大型土工离心机,经过近 20 年的发展在不同研究机构建成了容量不等、数量众多的离心机,初步形成了一定的规模。其中日本大阪市立大学离心机用安装在模型箱底部的水箱来控制模型中的水位,运转过程中并可使模型箱在 $\pm 16.7^\circ$ 范围内倾斜来模拟水平向地震力的作用。同时英国也在 Schofield 等的领导下建立了近 10 台离心机,并形成了剑桥大学、曼彻斯特大学和利物浦大学三个离心模型试验中心。这一时期离心机性能开始有显著提高,如剑桥大学 108gt 离心机采用可控硅恒速装置,使调速精度优于 1%,吊篮形式也由过去习惯采用的固定式改为摆动式,并首先配备了一种称为 Bumpy Road 式的激振装置进行动力离心模型试验。

20 世纪 80 年代以后,离心模型在美国、德国、法国、荷兰、意大利等国相继开始得到不同程度的发展,使国际上离心机不仅在数量上有了显著的增长,而且在容量上也有了长足的进步。其中美国由原宇航试验中心离心机改装成的国家离心机,半径 9.2 m,容量达到 1 080gt,这一时期离心机的加速度也开始加大,如意大利 1987 年建成的试验模型与结构研究所(ISMES)离心机最大设计加速

度达 600g,但由于实现设计的运行条件较难,该机在建成后仅在较低加速度下运行。

近年来,随着离心模型试验研究的深入,国际上离心机的建置逐渐开始向专业化方向发展。如东京技术学院为进行土—水结构的界面问题的研究,于 1998 年建造了直径 2.2 m 的鼓式离心机,并进行了相关问题的研究;加拿大皇后大学矿业工程系为研究与矿山有关的问题建造了一台容量 30gt 的离心机,该机的主要设备均为矿山问题研究专门设计,可以进行岩爆、冻土工程、尾矿坝等问题的研究;美国国家工程和环境试验室为进行环境问题的研究建造了一台容量 50gt 的离心机,该机的数据采集系统采用光纤传输,并配备了一系列设备使之可以进行诸如水文和生物岩土工程等与环境有关的研究工作。此外,适应大型工程研究的需要,大型离心机的数量持续发展,如日本大林株式会社技术研究院于 2000 年建造了一台容量 700gt 的大型离心机,并配备有最大加速度 50g 的振动台,该机能在运转中自行调节 20gt 的不平衡配重。

早期的离心模型材料主要采用通过适当缩尺方法后的土石等原型材料为主,但随着岩土工程问题的复杂化,在进行离心模型试验的过程中经常遇到诸如面板堆石坝中的混凝土面板、防渗墙、挡土墙、加固中的土工织物、混凝土管等,这些结构由于本身较薄,原型结构按模型率缩尺后用原型材料很难制作,这样就需要根据所要研究的主要问题按一定要求用代用材料来近似模拟。如混凝土防渗墙、混凝土面板等是一种承受压弯作用的复杂受力构件,由几何尺寸来看更符合弹性薄板的变形条件,此时根据板的受弯和面内轴向受力的条件,采用抗弯刚度相同的替代材料如合金铝板进行模拟,又如土工合成材料加筋的模拟,对于砂井等一般可用透水性很强的粗化纤毛线或纸质排水芯来模拟,对于以排水为主的土工织物垫层也可用透水性较好的纸质替代物,而对以加筋为主(如加筋挡墙)的土工合成材料的模拟则可按强度相似的原则选择替代物。

在早期的离心模型试验中,边坡稳定性的研究占有明显的优势,如在 20 世纪 30 年代,离心模型这一概念在前苏联和美国被提出的时候,首先考虑将它应用到当时的主要工程——矿山和边坡工程当中。

近年来,离心模型试验除在传统工程领域,如大坝、边坡及挡土墙、地基基础和隧洞、地基处理、爆炸模拟、土工合成材料加筋挡墙、土层沉降等方面的研究外,在环境岩土工程、地震工程等新的研究领域也取得了很大进展。

1.3.2 土工离心模型试验国内研究现状

我国在 20 世纪 50 年代注意到了离心模型试验在模拟土工建筑物性状方面所具有的优点,并开始进行离心机建造方面的可行性研究。50 年代末在前苏联专家的协助下准备建造一台容量 400gt 的离心机,但最终未能实现。到 60 年代

后,为研究核能和航空航天技术,有关部门设计制造了几台大尺寸离心机,但都为训练飞行人员和检验设备使用。直到 70 年代,国内一些岩土研究单位才开始筹建土工离心机,开展土工离心模型试验。70 年代末,长江科学院建成一台容量 150gt 的较大型离心机,并于 1983 年正式运行。80 年代上海铁道学院、成都科学技术大学、南京水利科学研究所、河海大学也分别建造了容量 20~100gt 的中小型土工离心机。这些离心机在岩土工程基本理论研究、解决实际工程问题及人才培养方面发挥了重要作用。1990 年中国水利水电科学研究院建造了最大加速度 300g、容量 450gt 的大型土工离心机,1991 年正式投入使用;南京水利水电科学院也同时建造了一台最大加速度 200g、容量 400gt 的大型土工离心机。1993 年清华大学水利水电工程系建成最大加速度 250g、容量 50gt 的土工离心机。2005 年同济大学地下建筑与工程系建成最大加速度 200g、容量 150gt 的土工离心机,并于 2006 年开始投入使用。

翁效林等通过离心模型试验,研究了不同边界条件下高填方涵洞垂直土压力随填土高度变化的规律以及涵洞周围填土位移场的变化情况;杨庆华等采用砂堆模型离心试验的崩塌性态来概化和模拟地震作用下松散体斜坡崩塌的动力学特性;唐茂颖等通过离心模型试验,研究了多级边坡的水平变形与水平虚拟力之间的关系以及含水量对这种关系的影响规律;蔡荣等应用离心模型试验模拟了煤层开采;于玉贞等研究了砂土边坡的地震响应规律,在 50g 加速度条件下进行了边坡的动力离心模型试验;吴庆勇通过离心模型试验分别对单桩和群桩在竖向荷载作用下的受力性状进行了研究;荆建营对面板堆石坝、岩质边坡、洋山深水港码头工程以及航道整治工程等方面进行了离心模型试验。

1.4 主要研究内容与创新点

本书通过现场实测、室内模型试验、离心模型试验、环境扫描电镜试验以及压汞试验对密集高层建筑群引起软土地区地面沉降的机理进行了研究;通过非等时距 GM(1,1)模型对密集高层建筑群引起地面沉降进行了预测;通过 ANFIS 输出建筑容积率指标建立了区域性地面沉降的评价体系。研究成果对软土地区密集高层建筑群等工程环境效应引起的工程性地面沉降探讨具有重要的理论价值和实际意义。

1.4.1 主要研究内容

工程建设的地面沉降效应逐渐凸显,成为上海近年来新的沉降制约因素之一,对上海陆家嘴地区某些大厦及周围区域进行沉降监测,探讨密集高层建筑群的沉降叠加效应。

基于软黏土的固结特性、固结理论、蠕变特性及黏弹塑性理论,对开采地下水及大规模的工程建设引起的地面沉降机理进行分析。

对大量的高层建筑进行现场沉降长期监测具有较大的难度,而且现场环境随着时间的延长往往变化很大,现场的土层条件和水文地质条件往往很复杂,影响量测结果的因素较多,室内一般模型试验可根据需要控制条件,研究密集高层建筑群引起地面沉降的机理和特点。

室内一般模型试验远远达不到与实际原型相符的应力水平,离心模型试验将原型按一定比例制成模型,置于由离心机生成的离心场中,通过放大土体的体积力,使模型达到与原型相等的应力状态,从而使模型和原型相应点达到应力应变相同、变形相似、破坏机理相同。通过离心模型试验,进一步探讨密集高层建筑群引起地面沉降的机理并与室内一般模型试验结论做比较。

土的工程性状很大程度上受到微观结构的系统状态或整体行为的控制,通过环境扫描电镜对土体微观结构做定性分析;通过压汞试验对土体微观结构做定量分析,来探讨土体微观结构的变化对宏观地面沉降的反应。

针对上海中心城区高层建筑群诱发的地面沉降,运用灰色理论初步建立地面沉降的非等时距的 $GM(1,1)$ 预测模型。

地面建筑地质环境容量主要由地面沉降控制,其输出指标为建筑容积率。对上海市软土地区工程地质水文地质条件、地面沉降灾害发育程度分区、建筑容积率和建筑密度对地面沉降的影响以及地下水的开采利用情况进行了全面分析,建立地面建筑地质环境容量的评价体系。应用自适应模糊神经推理系统输出建筑容积率,为城市的规划制定提供参考。

1.4.2 创新点

(1) 首次利用土工离心机对上海软土地区密集高层建筑群引起的地面沉降进行模拟,研究了密集高层建筑群引起地面沉降的机理及特点。

(2) 提出离心模型试验土体比降概念,成为分析软土地区宏观地面沉降与土体微观结构研究的纽带。

(3) 研究得到黏性土具有四段不同的分形维数;粉砂土由于孔隙比黏性土大,退化为三段不同的分形维数。

(4) 提出软土地区地面建筑地质环境容量概念,运用自适应模糊神经推理系统输出建筑容积率,建立地面建筑地质环境容量的评价体系,为城市的规划制定提供参考。