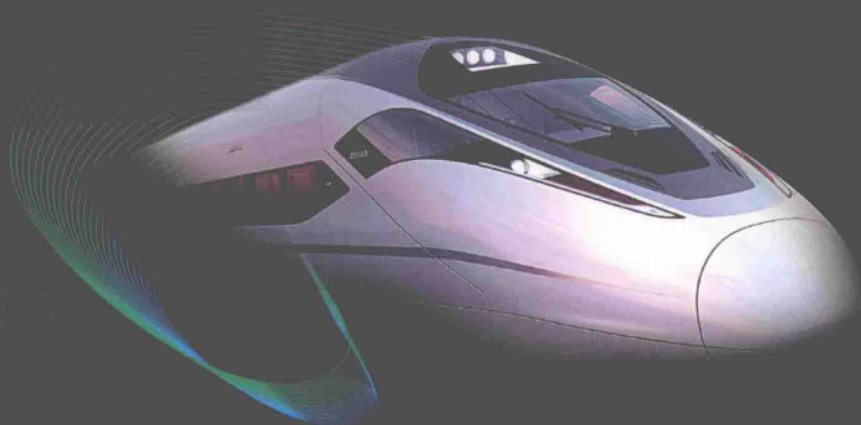


“十三五”国家重点出版物出版规划项目
高速铁路线路工程关键技术丛书



地面沉降与 高速铁路

*GROUND SUBSIDENCE AND ITS INFLUENCE
ON HIGH-SPEED RAILWAY*

孟庆文 蔡德钧 张千里 著



西南交通大学出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

地面沉降与高速铁路 / 孟庆文, 蔡德钧, 张千里著
—成都: 西南交通大学出版社, 2020.1
(高速铁路线路工程关键技术丛书)
“十三五”国家重点出版物出版规划项目
ISBN 978-7-5643-7258-3

I. ①地… II. ①孟… ②蔡… ③张… III. ①高速铁路—地面沉降—研究 IV. ①U238

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 272325 号

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

高速铁路线路工程关键技术丛书

Dimian Chenjiang yu Gaosu Tielu

地面沉降与高速铁路

孟庆文 蔡德钧 张千里 著

*

出版人 王建琼

责任编辑 杨勇

封面设计 原谋书装

西南交通大学出版社出版发行

四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼

邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564

<http://www.xnjdcbs.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 240 mm 印张: 9.5

字数: 151 千

2020 年 1 月第 1 版 2020 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-7258-3

定价: 68.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

地面沉降是由于地下土层发生压缩变形而使区域性地面标高缓慢下降的一种环境地质现象，是一种不可补偿的永久性资源与环境损失。地面沉降具有累进性和不可逆性，一般情况下，地面沉降将逐步积累，并产生长期影响，因此地面沉降是一种缓变型的地质灾害。影响地面沉降的因素可归纳为两大类：一是自然因素，包括地震活动、地壳的升降运动以及地层自然压密产生的沉降；二是人为因素，包括开采地下水、地下热水、油气、地下工程施工以及地表各类荷载的施加等。一般来说，地面沉降发生发展规律与超量抽汲地下水和地层岩性及其结构特征密切相关。

过去国内外学者主要研究地面沉降对城市建筑物或某个区域的危害，很少考虑研究区域地面沉降对线状工程的影响。但是随着高速铁路的建设和运营，地面沉降对高速铁路工程的影响也越来越大。因为高速铁路对路基、桥梁的稳定性、变形程度及轨道的平顺性有更严格的要求，所以地面沉降对高速铁路的影响就成为需要我们面对的现实问题。

为了研究地面沉降对高速铁路的影响，在京津城际铁路勘察设计期间，经铁道部科技司批准，由铁道第三勘察设计院牵头，组织北京市水文地质大队、天津市环境地质研究所、中国铁道科学研究院以及中国国土资源航空物探遥感中心专业技术人员，开展了“区域地面沉降对京津城际轨道交通工程的影响及对策研究”（2005G015-A）科研工作。课题组采用 InSAR 测量技术，结合区域调查和监测资料对京津城际铁路沿线及周边的地面沉降情况进行了分析研究，总结了地面沉降发生发展规律和特点，对地面沉降的危害性进行了评价，分析了地面沉降对线路、路基、桥梁及轨道工程的影响，并提出了相应处理对策和工程措施。研究成果有力地促进了京津城际铁路的建设，对京沪高速铁路、津秦客运专线等项目建设也起到了一定的指导作用。

在编写本书的过程中，编者除了利用“区域地面沉降对京津城际轨道交通工程的影响及对策研究”(2005G015-A)科研成果外，还利用了中国铁道科学研究院、西南交通大学、北京交通大学等单位的相关科研成果，参阅了第九届国际地面沉降学术研讨会部分内容以及近期地面沉降对高速铁路影响的其他工作成果。

本书的具体编写人员和编写情况如下：绪论，由孟庆文、张千里、答治华编写；1 国内外地面沉降现状，由王春雷编写；2 地面沉降成因和机理分析，由孟庆文、董亮、马明正编写；3 InSAR 技术监测地面沉降试验研究，由葛大庆编写；4 地面沉降的勘察，由孟庆文编写；5 地面沉降对高速铁路的影响分析，由蔡德钧、陈锋、董亮、李中国、肖宏、刘钰编写；6 地面沉降防治措施，由张千里、孟庆文、马明正编写。全书由孟庆文统编。

在编写本书的过程中，编者得到了中国铁道科学研究院、中国铁路设计集团有限公司、西南交通大学、北京交通大学、北京市水文地质大队、天津市环境地质研究所等单位专家教授和专业技术人员的指导，受益匪浅，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，本书不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2019年10月10日

目 录

0 绪 论	1
0.1 国内外地面沉降研究现状	2
0.2 地面沉降引起的工程问题	14
0.3 地面沉降对高速铁路的影响	16
1 国内外地面沉降现状	21
1.1 国外地面沉降现状	21
1.2 国内地面沉降现状	27
2 地面沉降成因和机理分析	33
2.1 地面沉降成因分析	33
2.2 地面沉降机理分析	36
2.3 地下水开采影响半径分析	38
3 InSAR 技术监测地面沉降试验研究	48
3.1 InSAR 监测地面沉降的基本原理与方法	48
3.2 InSAR 数据分析整理方法	55
4 地面沉降的勘察	58
5 地面沉降对高速铁路的影响分析	65
5.1 地面沉降对高速铁路路基工程的影响	65
5.2 开采地下水对高速铁路桥梁工程的影响	99
5.3 地面沉降对高速铁路线路和轨道工程的影响	113
6 地面沉降防治措施	140
6.1 工程防治措施	140
6.2 地面沉降综合防治措施	144

0 绪 论

地面沉降是在自然界和人为因素下,由于地表松散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,是地质环境系统破坏所导致的恶果。随着工业化和城市化进程的加快,地面沉降已经遍布全球。目前,世界上已有 50 多个国家和地区发生了地面沉降,代表性的国家和地区有墨西哥城,美国的长滩、休斯敦,意大利的波河三角洲,英国的伦敦、柴郡,德国的北部沿海地区,匈牙利的德布勒森,委内瑞拉的马拉开波湖周围地区,俄罗斯的莫斯科,泰国的曼谷,新西兰的怀拉基,越南的河内,印度尼西亚的雅加达,澳大利亚的特拉罗布谷,日本的东京、大阪、新潟等。

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、经济发展、城市建设和人民生活构成威胁的地质灾害,长期以来对城市建设和地区的可持续发展产生了巨大的危害。

据文献资料记载,中美洲墨西哥城于 1891 年最早发现地面沉降现象,但当时沉降量微小,危害性未显现,且将其归结于地壳板块运动等自然因素,没能引起足够重视。但现在该城市已经形成大面积区域性沉降区,平均沉降量达到 0.3 cm/a,最大累计沉降量超过 7.5 m。之后,日本于 1898 年在新潟发生因人为因素引起的地面沉降,至 1958 年地面沉降速率已达到 530 mm/a。20 世纪 50 年代后,随着城市化进程的加快,地面沉降在世界范围内普遍发生,到 1995 年美国 50 个州均发生地面沉降,年均控制成本达 4 亿美元。我国上海和天津在 20 世纪 20 年代发现地面沉降,60 年代沉降加剧,其原因是过量开采地下水。苏锡常地区地面沉降始于 20 世纪 50 年代末,到 60 年代末、70 年代,苏州、无锡和常州三中心城市区地面沉降加剧,80 年代扩散到整个地区,并形成严重的区域性地面沉降,沉降量大于 200 mm 的范围超过 5 000 km²,最大沉降量超过 2 m,

其原因也是长期过量开采地下水。此外，泰国曼谷、意大利拉文纳、伊朗伊斯法罕、印度尼西亚雅加达等全球 60 多个国家和地区都饱受地面沉降带来的危害和困扰。

地面沉降给人们的生产和生活造成了极大的不便，并引发了一系列资源、环境、经济以及社会问题。迫于地面沉降问题的严重性，各个国家的政府和学者都积极开展包括成因机理、沉降量监测、沉降发展过程模拟预测等地面沉降科学研究。联合国教科文组织（UNESCO）还专门成立了地面沉降工作组，并联合国际水文科学协会（IAHS）以及其他一些组织机构分别于 1969 年、1976 年、1984 年、1991 年、1996 年、2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年在日本东京、美国阿那纳海姆、意大利威尼斯、美国休斯敦、荷兰海牙、意大利拉韦纳、中国上海、墨西哥克雷塔罗及日本名古屋召开了九届地面沉降国际学术研讨会，对许多国家或地区的地面沉降监测、研究和防治产生了深远的影响。

总之，开展广泛而深入的地面沉降研究，对政府及相关机构及时发现潜在隐患、拟定合理的防治措施、保障经济社会与生态环境可持续发展方面具有重要意义。

0.1 国内外地面沉降研究现状

现有文献资料记载显示，最早记录地面沉降现象的是 1891 年的墨西哥城，当时由于地面沉降量不大、危害并不明显而未受到人们的重视。直到 20 世纪 30 年代，墨西哥的 J. A. Guevas 发表了《墨西哥城的地面沉降问题》、英国的 Longfield T. E. 发表了《伦敦地面沉降》之后，地面沉降问题开始受到国际社会的广泛关注。第二次世界大战之后，由于对地下水和油气资源的开采量快速增加，国际上许多大城市出现的地面沉降趋于严重。如日本的东京、美国的长滩等，地面沉降十分严重，经常遭受到风暴潮的袭击，造成了巨大的经济损失，从而迫使人们开始对地面沉降进行分析和研究。随着工业化的需要，不断地大量开采地下水资源，使得地下水位持续大幅度下降，产生了大范围地面沉降，遍及世界各地，从而迫使各个国家对地面沉降问题日益重视。

目前，世界上开展地面沉降研究的国家主要有美国、中国、日本、

英国、墨西哥、意大利、荷兰、德国、泰国、新西兰、澳大利亚和南非等。国内外地面沉降研究主要集中在地面沉降的成因机制、地面沉降监测技术、地面沉降模拟及趋势预测、地面沉降治理及减缓措施等方面。

0.1.1 地面沉降的成因机制

地面沉降发育是受多重因素综合影响的复杂过程。如上海市城市建设的沉降影响约占地面沉降总量的 30%，是上海地面沉降另一重要制约因素。天津地区的构造沉降基本年速率为 1.3 ~ 2.0 mm，是一个背景性的长期性的过程。人们将这种受自然因素和人为因素共同作用的地面沉降称为广义地面沉降，但考虑到自然沉降在沉降总量中的微弱比重，实际研究中多只分析人为地面沉降。

1. 开采地下水引起的地面沉降

世界上广泛存在因超量开采地下水资源而引发的地面沉降现象。据调查，美国 80%以上已确定的地面沉降是人类抽取地下水的结果，我国因抽水而导致的地面沉降已遍及 17 个省区市，总沉降面积达 7 万平方千米。开采地下水导致地面沉降的机理，普遍采用有效应力原理进行解释。长期大量开采承压地下水，引起地下水降低，相邻各黏土层孔隙水向含水层释水，孔隙水压力降低，有效应力增大，黏性土被压缩；水体流动、渗透力作用及重力场变化，使黏性土颗粒重新排列、结构变形或破坏，造成土层压密；抽水作用使含水砂层颗粒排列紧密，间隙减小。上述三者共同作用，造成地面沉降。

监测显示地面沉降量与地下水位下降幅度呈高度正相关，地面沉降分布范围与地下水位降落漏斗基本吻合，而且地面沉降发育和生长的过程与地下水的开采过程基本保持一致或滞后一个时段。一般而言，地面沉降的发展都经历过缓慢沉降、显著沉降、急剧沉降等几个阶段，与同期地下水少量、大量、超量开采几个阶段相对应。在开展压缩开采量、人工回灌等治理措施之后，随着地下水位逐步恢复，沉降速率减小。特别是人工回灌地下水，可能引起地面在一段时间内回弹。

地面沉降是渗流场变化和地层应力重分布的过程。过量开采地下水会引起松散地层大量释水，造成含水层水位下降，孔隙水压力减小，同

时含水层水位的下降也会影响相邻弱透水层水场的稳定,引起弱透水层水位下降,从而弱透水层孔隙水压力也减小。根据太沙基的有效应力原理,在土体总应力不变的情况下,这部分减少的孔隙水压力必然转化成土骨架承担的有效应力。故最终有效应力增加,引起土层压密,表现出地面沉降。

地面沉降量主要来源于弱透水层(黏性土层)压缩变形和含水砂层压缩变形,对弱透水层和含水砂层变形特征的研究是抽水地面沉降机理研究的重要内容。黏性土的变形具有塑性变形和蠕变的特点,而砂性土的变形特征较为复杂。薛禹群等试验表明,不同的砂性土在不同的应力条件下会有不同的表现,有的表现为弹性变形,有的表现为非线性变形,压缩变形以塑性变形为主并包含有蠕变是它变形的基本特点。所以砂土层变形也可能存在迟后效应。

发生地面沉降的地区一般都是由岩性不同的多种土层(如砂土层、黏质土层等)组成,各土层的沉降量不仅与土层自身特性(如压缩性)有关,还与土层的厚度以及地下水的采灌格局有关。压缩性小的砂性土层如果厚度大,也会引起较大的沉降。抽采和回灌水的状况影响地下水位的变化,导致土层经历不同的应力路径和应力历史,进而使土层表现不同的变形特征。薛禹群等研究了上海土层在5种地下水位变化模式下的变形特征。

对于大面积区域性地面沉降,由于水文地质背景复杂,各土层的变形特征不可一概而论。

研究区域性地面沉降的成因需要将不同的水文地质单元分离出来分别研究。试验证明,由于地下水位的不同,相同的水文地质单元在不同的时期也可能表现出不同的变形特征。

为分析开采浅层地下水引起的地面沉降对线状工程——高标准轨道交通工程的影响,孟庆文等人(2006)依据浅层地下水的性质和特点,阐述了抽水引起的地面沉降机理和计算方法,估算了由于抽取浅层地下水引起的地面沉降和影响范围,初步分析了这种地面沉降对客运专线路基、桥梁、轨道工程的影响。李国和等人(2009)分析了华北平原地面沉降对高速铁路桥梁工程的影响,提出在抽水井附近及地面沉降的中心区域,不均匀沉降较为严重,对桥梁结构变形影响较大,对不同结构形式的桥梁影响有所不同;在地面沉降的扩展区域内,表现为桥梁与地基

一同下沉,对高速铁路桥梁工程影响不大。需采取适宜的对策和措施进行防治。孟庆文(2016)阐述了京津冀地区地面沉降状况和原因,分析了开采地下水引起的地面沉降对高标准轨道工程的影响,提出了地面沉降地区高标准轨道交通工程地质选线原则和综合防护措施。

2. 地面建筑荷载引起的地面沉降

近20年来,城市建筑物高层化和密集化趋势明显,地面荷载急剧增大,逐渐成为城市地面沉降新的重要制约因素。研究发现,大规模城市建设使上海在1989至1995年间的平均沉降率比在1972至1988年间的平均沉降率增长了3倍。城市建设的规模及其增长速度直接导致工程性地面沉降的同步增长,且建筑密度越大,容积率越高,地面沉降越明显。

在地面建筑荷载的作用下,土体产生附加应力,导致持力土层变形并伴随瞬时沉降,这一般在施工阶段瞬时完成。之后运营期间,土体的超静水压力迫使土中水产生流动的渗流(形成了水头差),土的孔隙比改变。随着时间推移,土的应力应变关系不断改变,土的固结逐渐趋于稳定。故饱和土体在外荷载作用下的沉降过程包含有瞬时沉降和固结沉降。

通常,单体建筑荷载引起的基础变形是浅部的和局部的,历时较短,危害性也有限。

但对于高群体集中建筑物荷载,由于在基底一定深度处产生附加应力的叠加,其对地面沉降的影响也表现出相邻建筑的单体基础变形的相互叠加,因此在一定的地质条件下,可能诱发大面积区域性地面沉降。

针对上海城市建设对地面沉降的影响,沈国平、王莉(2003)通过对典型地区调查研究认为地面沉降与建筑规模、建筑容积率、集中建设或分散建设、新增建筑等均存在关联关系。

介玉新等(2007)提出了等效影响荷载的概念,并据此较好地分析和解释了上海大面积建筑荷载引起的地面沉降的现象。唐益群等(2007)对密集高层建筑物群诱发的地面沉降叠加效应及其影响范围展开了初步研究,为防治因密集建筑荷载引发地面沉降提供了有益的参考。

3. 构造运动引起的地面沉降

2011年在东北太平洋海岸发生地震后,发生了许多严重的地面沉降和塌陷,日本学者K. Yasuhara针对东北和关东地区,对比分析了地震前

后地面沉降变化情况，是一种持续的、长时间的地面沉降，提出了这种持续的沉降情况主要是由地震构造运动引起的，其次是液化作用的影响。

0.1.2 地面沉降监测技术

长期、连续地进行地面沉降监测是准确把握地面沉降生长趋势及时空分布规律的前提与根本。常规地面沉降监测主要依靠重复水准测量，同时设置基岩标、分层标以掌握不同深度地层的变形情况。常规方法测量精度高，且实施灵活，在范围较小（<8 km）的城市地面沉降监测中十分受用，但在进行大面积区域性地面沉降监测时，因作业周期长、实时性差、资源耗费大等固有缺陷而显得效率低下。

随着空间测量技术的发展，地面沉降监测手段日益先进，使得准确、迅速、大面积监测地面沉降成为可能。

1. 全球定位系统（Global Positioning System, GPS）

GPS 测量技术具有高精度、全天候、自动化监测的优势。自 20 世纪 80 年代末开始，各国都相继开展了利用 GPS 大地高程变化量反映地面沉降的研究，得克萨斯州休斯敦是 1980 年代末开始采用高精度 GPS 技术进行地面沉降监测的地区之一。目前，在休斯敦城区有超过 170 个永久性 GPS 站（图 0.1-1），监测了过去 10 年（2005—2014 年）平均地面沉降和地下水水平的变化。

美国于 1992 年在加利福尼亚州莫哈韦沙漠的 Antelope 山谷建立第一个地面沉降 GPS 监测网，用以确定水准桩标的沉降变形。伊朗也于 1998 年开始运用 GPS 技术对 Rafsanjan 平原抽水引起的地面沉降状况进行评估。早期的地面沉降 GPS 监测多用来快速、粗略地确定沉降地区，以方便后续精确的连续测量。

随着 GPS 数据处理方法研究的加深以及相关软硬件的升级，GPS 高程分量精度已大幅度提升至毫米级。实验表明，在技术适当的条件下，GPS 测定的大地高程的精度可稳定在 ± 2 mm 左右，对地面沉降的分辨率可以达到 3 mm。这证明了 GPS 监测地面沉降的可行性与可靠性。目前 GPS 精密定位技术已经逐步取代区域性水准测量而得到普遍应用，是区域性地面沉降监测网络的重要组成部分，为世界各沉降区域（如墨西哥

Aguascalientes、意大利 Venice、印度尼西亚 Jakarta 和中国上海、天津、西安等) 的地面沉降研究工作积累了大量具有高精度高时间分辨力特征的基础数据资料。

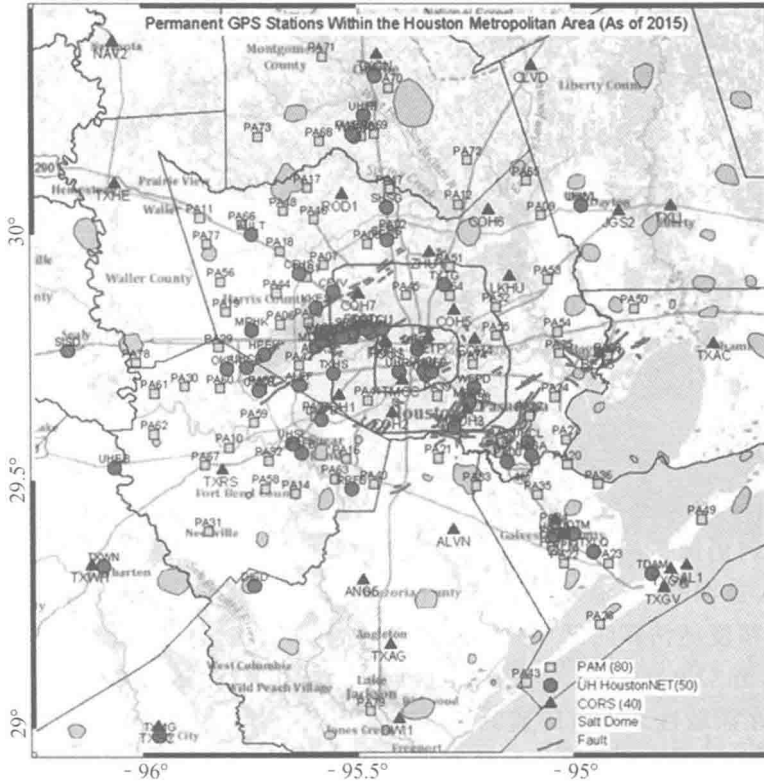


图 0.1-1 休斯敦城区内当前永久性 GPS 监测站位置

2. 合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)

InSAR 技术具有全天候、高精度和一定的对地穿透力等特性, 且具有极高的空间分辨力, 能获取连续地表位移的详尽空间信息。另外, InSAR 作为一种空基遥感探测技术, 无需布设地面观测站, 是一种低成本、高效率的全新对地观测方法。InSAR 技术以传统监测手段无可比拟的优越性迅速获得各国地面沉降学者的广泛青睐。

基于 InSAR 而发展起来的差分干涉测量 (Differential InSAR, D-InSAR) 主要是利用发生地面沉降前后的两景 (或多景) 重复轨道 SAR 复数图像来提取仅与地面形变有关的差分相位信息, 在消除干涉相位的地形因素影响后, 理论上可以监测毫米量级的地面沉降。目前, 基于 D-InSAR 的地面沉降监测已取得许多成功应用: Jin Baek 等运用 JERS-1 卫星在 1992—1998 年间获取的 23 景干涉图像对韩国 Samchuk 煤矿地面沉降进行了分析, 显示该地区发生了显著地面沉降, 最大沉降量为 22 cm; V.Akbari 等对 ENVISAT 卫星 2004—2007 年间伊朗 Mashhad 山谷的 17 景 SAR 影像数据进行差分干涉测量处理, 获取了该地区地面沉降的时间演化信息; 此外, 我国上海、苏州、天津、西安等地也都相继开展了地面沉降 D-InSAR 监测技术的研究与应用。

由于 D-InSAR 方法受时间去相关和空间基线去相关导致的干涉相位噪声以及大气延迟等因素的干扰会造成干涉质量下降, 为弥补其不足并提高精度, 近几年又发展起来了一种高级 D-InSAR 方法——基于永久散射体的雷达差分干涉测量 (D-InSAR Based on Permanent Scatters, PS-InSAR)。其基本思想是在一组时间序列的 SAR 图像上识别出在长时间间隔内仍保持高相关性的 PS 点, 这些离散的 PS 点可构成一个“天然的 GPS 监测网”, 经过消除大气干扰和 DEM 误差影响后可以在这些 PS 点上高精度地估算时间序列的地表形变量。

PS-InSAR 的发展与应用是大面积、高精度监测地面微弱变形的技术革命, 在区域性地面沉降监测中具有广阔的应用前景和不可替代的优势。当前我国在这一方面的研究已取得一定的进展。

目前, 地面沉降监测手段呈现多极化综合发展的趋势, 各种监测方法相互补充、相互检核, 保证监测成果丰富、可靠。

美国地质调查局通过 InSAR、CGPS (Continuous Global Positioning System) 及观测水井 (图 0.1-2), 对加利福尼亚圣约魁谷的地下水位和地面沉降同时进行了长期监测, 较好地掌握了土地利用、地下水位、地面沉降及预防沉降处理措施之间的相互关系和规律, 这些数据也为加州针对地下水开采造成地面沉降而引起损失等问题进行立法提供了有力的依据。

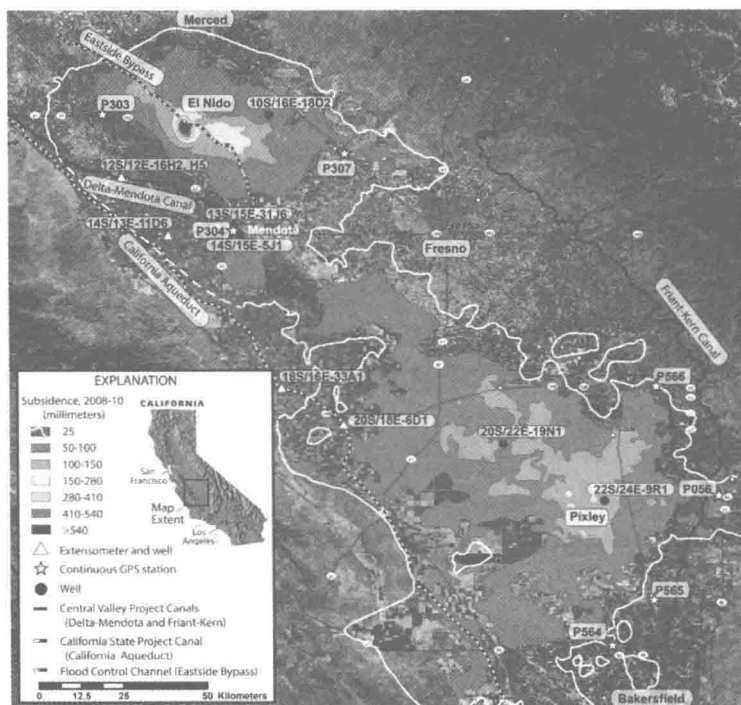


图 0.1-2 基于 INSAR、CGPS 及观测水井数据源的加利福尼亚圣约魁谷区域沉降图 (2008—2010)

1992—2013 年,我国台湾的赤水河冲积扇因抽取地下水,造成了大规模的地面沉降,下沉已危及台湾高速铁路的运行。台湾学者通过综合传感器监测系统,包括 GPS (全球定位系统)、PSI (持续散射干涉仪)、平级和多层压实监测,研究了其在岩体中的沉降程度及其机理,这些传感器在空间和时间分辨率上相互补充。

我国长江三角洲以及华北平原等区域都已布设区域地面沉降监测网络,包括地面沉降监测水准网、地面沉降 GPS 监测网以及地下水位(水量)动态监测网。当然 InSAR 作为一种重要监测方法已经进入实用阶段。这些丰富的监测手段提供了大量的多源观测数据,为进一步研究和掌握区域地面沉降成因机理以及时空演化规律提供有力可靠的数据支持。GPS/InSAR 融合技术,由于综合了二者优良性能,前景诱人。

从 2005 年开始,葛大庆等人率先在华北平原开展大范围地面沉降 InSAR (雷达干涉测量)监测技术研究与应用示范,至 2008 年,完成了

关键技术研发,建立了基本的工作流程,获得了北京、天津、沧州、德州等典型地面沉降区的监测成果,经过与地面精密水准测量数据的对比,取得了年沉降速率 $3\sim 5\text{ mm}$ 的比较精度,奠定了InSAR技术大规模应用的技术基础;至2010年年底,经过多年的技术研究与应用实践,区域性地面沉降InSAR监测技术基本成熟,工程化监测能力得到检验,监测应用效果显著,引领了InSAR技术在地面沉降、矿区塌陷、高铁路基变形、油田地表下沉等领域的技术发展。

0.1.3 地面沉降模拟及趋势预测

地面沉降模型是地面沉降研究的重要内容,抽水引起地面沉降的过程模拟及趋势预测是当前模型研究的重要方面。国内外很多学者针对不同的水文地质条件及地下水采灌状况,提出了许多不同的地面沉降模拟预测方法,概略分类为:确定性模型、随机统计模型、人工智能模型。

1. 确定性模型

确定性模型基于抽水引起地面沉降的成因机制,描述水的渗流情况(渗流场模型)、土的变形特性(应力场模型)以及土与水的相互作用(二者耦合)。通常确定性模型又称为土水模型。

(1) 渗流场模型:要求有再现地下水系统的能力,能真实刻画实际地下水系统中发生的物理过程。该模型主要分为经验模型、二维模型、准三维模型、三维模型。其中准三维模型将含水层的地下水作水平渗流处理,黏土层、亚黏土层中的水流作一维垂向渗流处理。我国上海和天津早期所建立的地面沉降模型均为此类模型。

三维模型由于将含水层和弱透水层中的地下水均作三维渗流处理,可较好地刻画地下水流动的真实状态,但数据参数要求高。

(2) 应力场模型:根据土层的固结特征,应力场模型简单分为线弹性模型、非线性弹性模型和流变模型。线弹性模型简单认为土层的应力应变关系符合胡克定律,计算量较小,应用较多。非线性弹性模型和流变模型分别考虑到了土层固结的非线性及蠕变特性,较符合实际土体非线性、非弹性及各向异性特征。

在土层的固结过程中,流固耦合效应会导致土中孔隙比变化及渗透

系数变化,进而影响地下水的渗流和土体的固结,所以地面沉降数值模拟必须考虑渗流场和应力场间的耦合模式。

按照渗流场和应力场结合方式,地面沉降模型可分为:两步计算模型、部分耦合模型和完全耦合模型。

(1) 两步计算模型:先由渗流场模型求出水位或水压,作为应力场模型的边界条件,再进行沉降计算。两步模型计算原理简单,所需参数少,但它只限于计算一维垂向变形,且不考虑抽水过程中土层渗透性和贮水性的改变。我国上海、天津建立的地面沉降模型都采用此耦合方式。

(2) 部分耦合模型:在两步基础上,考虑到土体的固结导致土中孔隙比、土的压缩性及透水性的动态变化。如冉启全和顾小芸 1998 年建立的三维渗流与一维固结部分耦合地面沉降模型。

(3) 完全耦合模型:该模型基于著名的比奥(Biot)固结理论,考虑孔隙水压力的变化对土体变形的影响以及土体变形对孔隙水压力的影响,将渗流场模型和应力场模型统一于相同的物理空间。该模型的地下水流和土体变形既可以是一维的,也可以是二维、三维的,不仅反映地面沉降,也能反映土层的水平位移。如骆祖江等建立的吴江市浅层地下水开采与地面沉降控制三维全耦合模型,还有上海学者建立的上海市三维地下水渗流场和三维地质力学耦合模型(图 0.1-3),通过不同边界条件,重演了 1979 年至 1995 年期间上海地面沉降情况。完全耦合模型涉及的参数复杂,计算量大,目前在大面积区域性地面沉降数值模拟和预测中的研究还需要进一步加强。

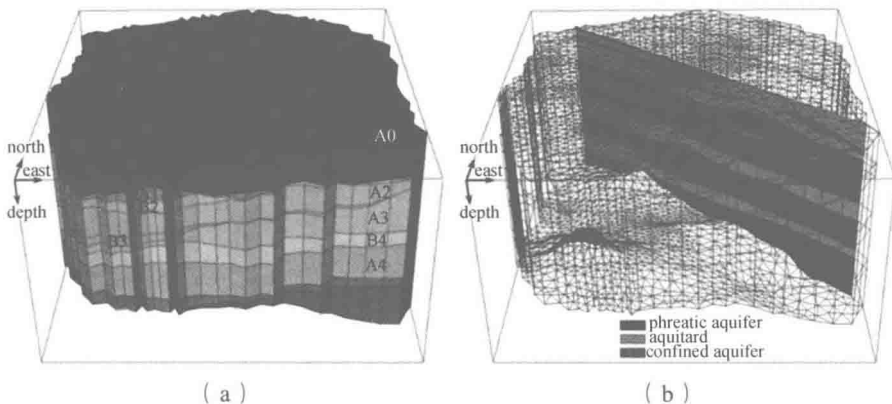


图 0.1-3 上海市中心区域三维有限元模型

2. 随机统计模型

地面沉降是多因素影响下松散土层压缩固结的结果，其发育生长亦表现出随机性、趋势性及周期性。当确定性模型难以准确建立时，构建基于大量监测数据的随机统计模型也是行之有效的方法之一。常用的随机统计模型有回归分析模型、时间序列模型和灰色模型。

回归分析模型采用拟合数学关系式表达输出变量与（多个）输入因子间的相关关系，其拟合和预测精度与样本容量大小有关。Mizumura 和 Kazumasa 运用回归方程模型研究了地面沉降量与历史沉降量、地面水位及降雪量间的关系，并对日本强降雪地区未来 1—2 月的地面沉降生长趋势进行预测，取得了良好效果；潘云等建立了天津市区地下水开采量-沉降量、地下水位-沉降量的线性回归方程，并预测了以后 9 年的地面沉降发展情况，结果显示可靠。回归分析模型计算简单，无须确定沉降区域的水文地质参数，但该模型的准确建立需要立足于大量监测数据之上，且所建模型不能反映地下岩土介质的本构关系。

时间序列分析通过时间序列的历史数据揭示现象随时间变化的规律，并将这种规律用数学模型加以表达，通过模型将这种规律延伸到未来，从而对对象的未来状态作出预测。Xia Linyuan 等研究显示运用 ARMA 模型模拟和预测工程引起的地面蠕变具有较好的适用性。

焉建国等利用自回归模型对上海地面沉降进行了拟合和推估，结果显示 AR(4) 模型能较好地反映上海地面沉降的变形趋势。

灰色模型提供了贫信息情况下解决系统问题的新途径。它根据各因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素间的关联程度，无须太多样本量和典型的分布规律。该模型已经运用于上海、天津、台湾、苏州、洛阳等地的地面沉降预测当中。

3. 人工智能模型

广义上讲，人工智能（Artificial Intelligence, AI）就是用计算机模拟和再现人类的某些智能行为。20 世纪 90 年代以来，人工智能模型随着计算机技术的飞速发展而取得重大突破，并在处理大规模复杂系统中出现的组合爆炸、非线性、高维、多峰值、不连续、非凸性及带噪声等难解问题时，表现出常规统计模型无可比拟的通用、稳健、简单、并行处