

上海市地面沉降监测技术

陈华文

(上海市地质调查研究院, 上海 200072)

[摘要] 近年来,通过引进自动化监测、GPS、GIS 等技术,上海地面沉降监测技术有了显著的提高。在分析基岩标、分层标的长期运行资料基础上,优化了其设计与施工技术;通过多期的 GPS 复测研究,总结了《地面沉降 GPS 测量技术规程》。针对不断变化的社会需求优化地面沉降监测方案,加强了地铁、防汛、桥梁、高架道路等重要城市基础设施的沉降监测,积极参与城市建设与管理,为城市建设与管理解决具体问题。

[关键词] 上海市 地面沉降 基岩标 分层标

1 上海地面沉降监测工作发展

20 世纪 60 年代初,由于上海市区大规模集中开采地下水,造成了严重的地面沉降灾害。1961 年上海市地质勘察局工程地质大队利用已有的深水井建立了初期的地下水动态观测网,1962 年开始埋设基岩标、分层标组,开展市区范围的面积水准测量,监测市区地面沉降及其时、空变形规律。在 20 世纪 70、80 年代分别对地面沉降监测设施进行完善与补充。截止 1985 年在市区及近郊区已先后埋设了基岩标 21 座、深式分层标 17 组、地面水准点 752 座及孔隙水压力测头 20 组,全市地下水动态监测网共布设了地下水位监测井 650 口,形成上海市地面沉降动态监测网。

1985 年后由于受大规模城市建设影响,地面沉降监测网络受到了较大的影响。上海市政府、市建委非常关注地面沉降监测网面临的问题,在专家论证基础上批准了原上海市地质矿产局上报的《上海市地面沉降监测网络修建规划(1995~2000)》的工作方案,1996 年上海市人民政府出台了《上海市地面沉降监测设施管理办法》。目前,上海市地面沉降监测范围从原来的市区和近郊区扩大到了全市,形成了由地面沉降监测站(基岩标分层标组)、地下水动态监测网、精密水准监测网、GPS 地面沉降监测网组成的地面沉降监测网络(表 1)。

表 1 上海市地面沉降监测网络情况表

设施名称		单位	数量		备注
			1995 年	2000 年	
地面沉降动态监测网	基岩标	座	8	32	地面沉降监测站共 25 座
	分层标组	组	17	25	
	水准监测网	Km ²	300	650	
	自动化监测系统		/	8	
地下水动态	地下水动态观测孔	口	492	588	

监测网	孔隙水水位观测孔	组	48	84	
	自计水位仪	套		30	
GPS 地面沉降监测网	基准站/一级网/二级网	座		2/34/130	高精度 GPS 仪器 6 台套
地面沉降科普馆		座		1	2001 年投资建设

2 常规地面沉降监测技术在城市化地区仍起到重要作用

2.1 通过面积水准测量全面了解地面沉降发展动态

目前，常规监测技术在上海市地面沉降监测与研究工作中仍起着重要的作用。区域地面沉降动态监测为面积水准测量，以基岩标构成一等精密水准网络，以二等水准测量路线组成地面沉降监测线路，在年度地下水开采高峰期结束后施测。通过制定年度、阶段地面沉降等值线图，可以较为全面地了解监测区地面沉降的动态发展规律，对地面沉降发展趋势、防治措施有较为准确的把握（图 1）。



图 1 上海市中心城区地面沉降等值线图（1996-2000）

2.2 分层标测量掌握地面沉降规律，确定针对性的地面沉降控制方案

土层分层沉降监测以分布于全市的 31 座地面沉降监测站为主体，其中 25 座位于中心城区内。地面沉降监测站以基岩标为基准，由根据水文地质、工程地质条件设置于不同深度土层的分层测量标志、各含水层地下水监测孔、孔隙水压力孔组成。所取得的地下水—土层变

形资料，是对定量分析地下水位、土层变形的规律、影响因素及机理的基础（图 2）。通过对各含水层地下水位变化、土层变形动态规律的分析，可以确定影响地面沉降的主要因素及其权重，提出具体的地面沉降防治方案。

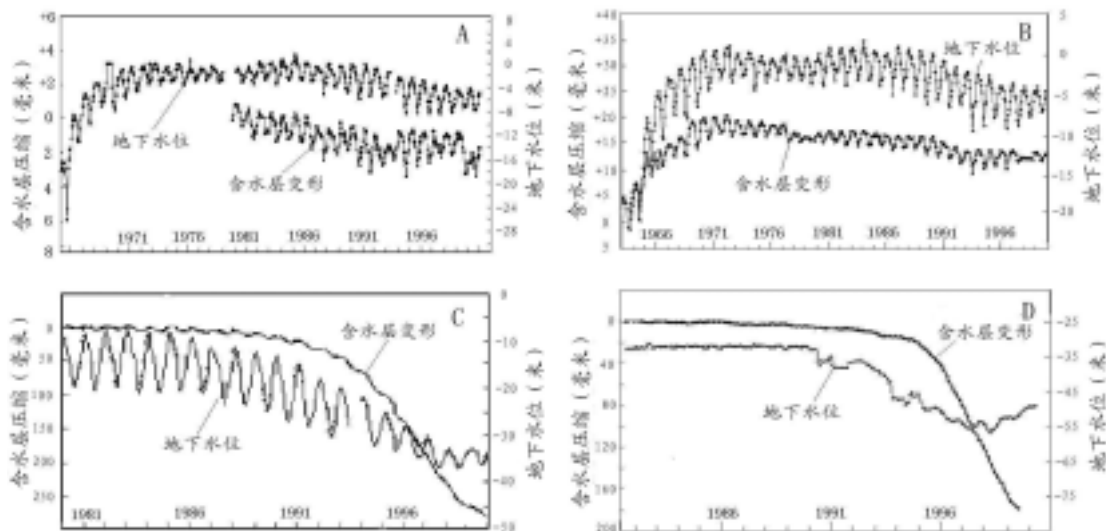


图 2 上海中心城区承压含水层地下水位、土层变化特征

（A、B、C 分别为劳动公园第二、三、四承压含水层，D 为华漕第五承压含水层）

如 20 世纪 90 年代，上海中心城区地面沉降速率呈现不断增大的态势，当时各方面对地面沉降因素存在不同的看法。地面沉降分层标资料的分析，清楚地表明，80 年代中心城区第四含水层地下水位在 -15.0~ -26.0m 之间，沉降量为 3.0mm/a；90 年代随着地下水位下降至 35 米的过程中，变形速率逐渐增大至 11.21mm/a，第四含水层对中心城区地面沉降的影响权重由 32.3% 上升到 49.27%；与此同时，全市地下水开采量由 1.2 亿增加到 1.5 亿立方米，其中第四含水层开采量占 65%。显然，影响地面沉降速率增大的主要因素为地下水开采量增大。针对此主要影响因素，重点压缩第四含水层的地下水开采量，2000~2003 年中心城区平均地面沉降由 12.27 mm/a 下降至 9.60 mm/a。

3 新技术方法在地面沉降监测中的应用

3.1 GPS 技术在区域地面沉降监测中的应用

上海自 1998 年开始进行应用 GPS 技术监测地面沉降的可行性研究，2000~2003 年先后完成了上海市的地面沉降 GPS 监测一级网建设、地面沉降监测网规划及平差计算研究、地面沉降 GPS 一级网监测试验总结等多项工作。上海市地面沉降 GPS 监测一级网已进行了 6 次复测，在多次复测中不断摸索经验，规范操作规程。目前，上海地面沉降 GPS 一级网共有 36 个监测点组，投入 6~10 台 Ashtech Z-Surveyor GPS 接收机，测量时段长 12 小时，采用 GAMIT 专用处理软件计算，利用 GPS 技术监测地面沉降的研究取得一定的进展（图 3）。

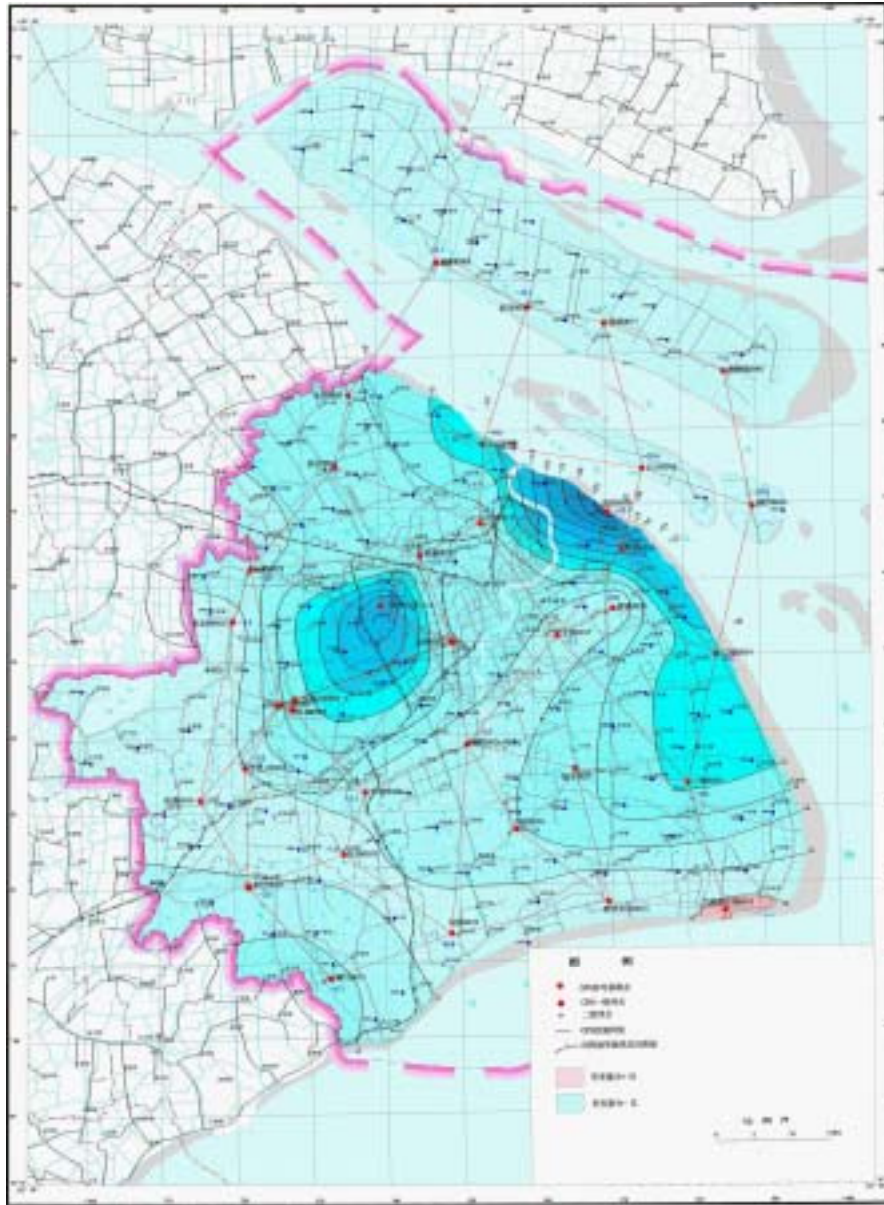


图 3 上海市地面沉降 GPS 测量累计变形量等值线图 (2001.1-2003.11)

地面沉降 GPS 监测结果，与全市水准点复测得到的地面沉降等值线图的趋势基本相同，反映 GPS 技术监测大范围地面沉降的可行性。为了验证 GPS 观测结果的准确性，选择了华漕、桃浦、外高桥、北蔡、顾路、唐镇、华亭、嘉定、白鹤、朱泾等 10 处其近旁置有 GPS 观测墩的基岩标作为基准点，以一等精密水准测量对比 GPS 监测点 相同监测点的 GPS、一等精密水准结果，最大差值为 2.1cm，其余各点之差值均在 1cm 以内。六次观测得到的五次变形量，GPS 测量与精密水准本次变形相比较，计算的总标准偏差为 $\pm 1.3\text{cm}$ ；对比统计数据表明，获得的 GPS 大地高的准确度与天津市用 7 年资料计算获得的 $\pm 1.2\text{cm}$ 相近。

通过 GPS 测量监测点大地高变化，监测地面沉降的精度目前可以达到 1cm，适用于

沉降速率较大或一定时间间隔的大范围地面沉降监测。从 GPS 监测点大地高变化情况看(图 4), GPS 地面沉降监测对于捕获较大的变形量比较适宜:对于大于 3σ 的变形量能够很准确的捕获,但接近或等于 1σ (标准差)的变形量则难以准确捕获。相似结果在美国休斯顿 Harris-Galveston 地区、台湾地面沉降 GPS 测量结果基本一致。

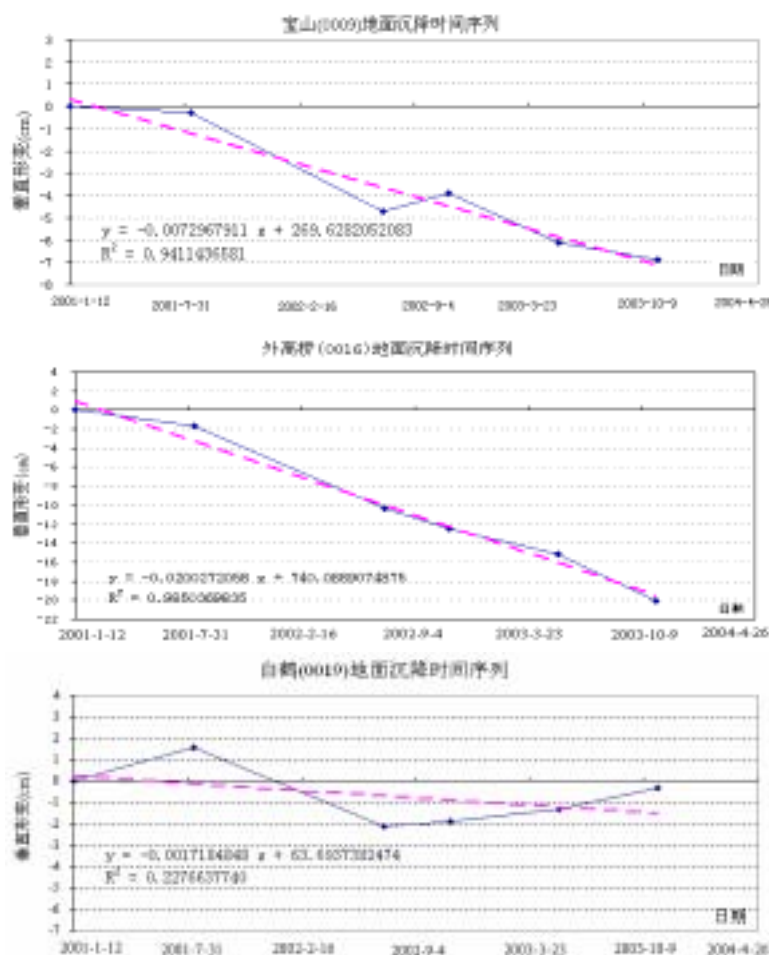


图 4 地面沉降 GPS 一级网部分监测点大地高变化

3.2 自动化监测技术在实时地面沉降监测中的作用

在中国地质调查局、上海市房地资源局支持下,自 2000 年开始逐步引进自动化监测技术,目前已完成 8 座地面沉降监测站的自动化改造。地面沉降自动监测系统主要采用联通管原理,测量分层标体沉降导致的液面变化,精确测量土层分层沉降变形(图 5)。

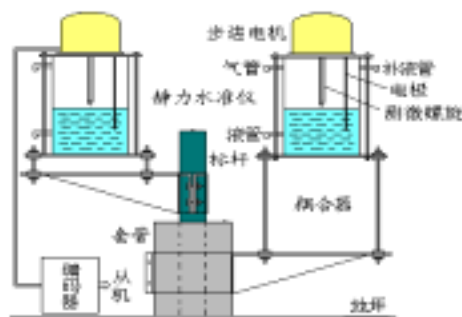


图 5 测点与仪器组成结构示意图

从目前已投入运行的 8 座地面沉降自动化监测系统的情况看,精度与运行效率可以满足地面沉降研究的需要(图 6、7)。

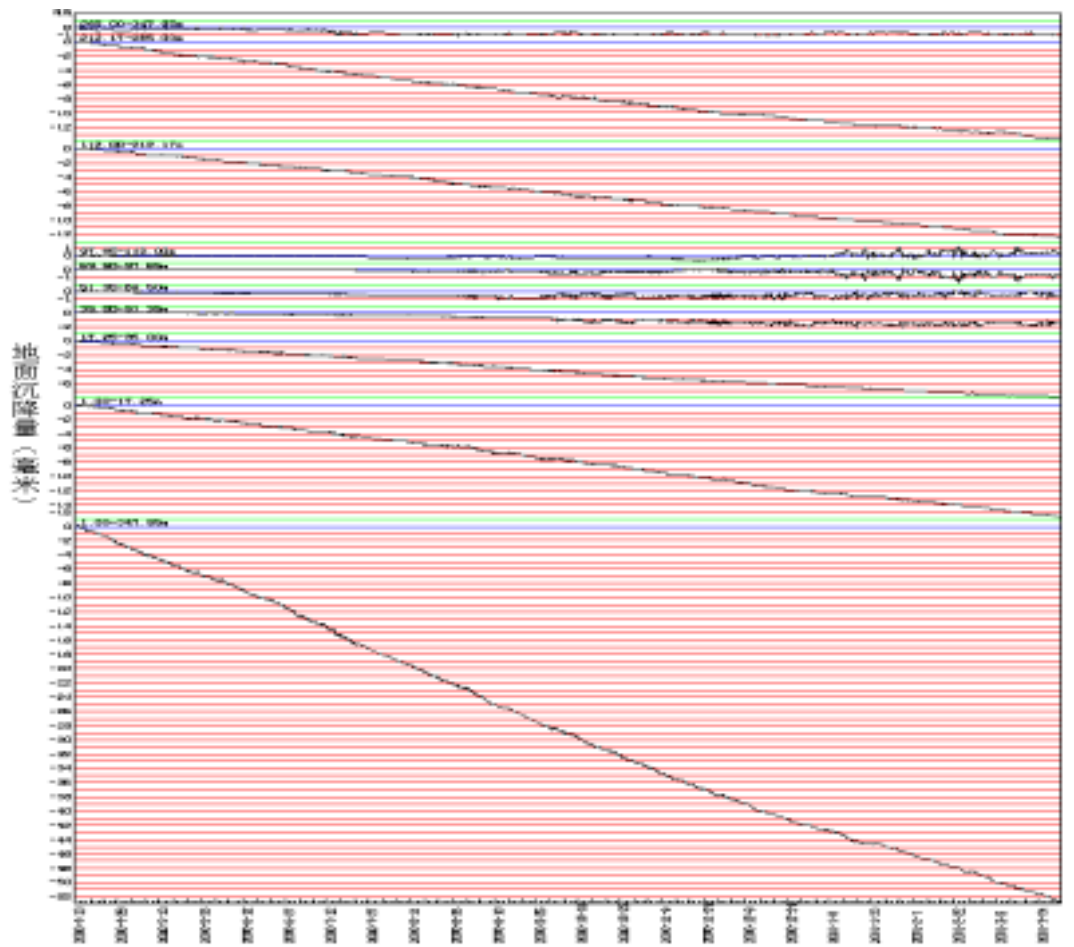


图6 华漕地面沉降自动化监测站各土层沉降历时曲线

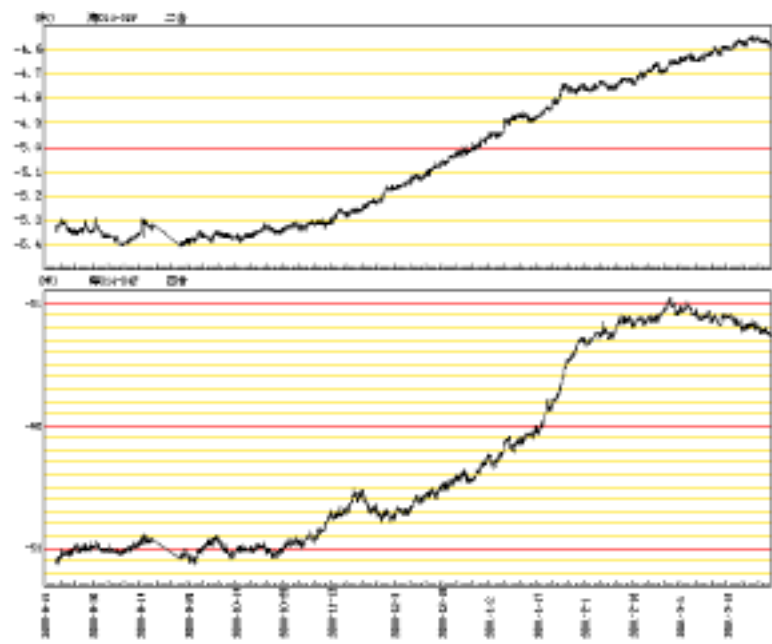


图7 华漕地面沉降监测站地下水位变化曲线

4 地面沉降监测工作服务于上海城市发展

4.1 积极参与城市建设与管理，努力把握城市发展对地面沉降监测与研究工作的需求

地质环境是城市发展所依存的自然空间，而地质灾害则是自然与人类活动共同作用的综合表现。通过积极参与上海城市建设与管理，我院较为准确地把握了上海向现代化城市发展过程中地质环境所表现出新的特征与趋势，及时调整了地质环境监测工作的重点。近年来，先后参与了地铁交通网、浦东国际机场、磁悬浮列车、洋山深水港及高速公路网的建设。

地面沉降灾害降低防汛墙、海塘等防汛设施的防御能力，不均匀沉降对轨道交通线产生明显的影响，有关建设与管理部门十分希望地质环境监测能够提供有益的帮助。近年来，将地质环境监测重点调整到具有较大影响的轨道交通、大桥、城市防汛等方面，努力将地质环境保护与地质灾害防治纳入到上海城市规划范畴。2001年我院与上海市城市规划设计研究院共同完成了“城市地面沉降对规划制定与实施的影响研究”，该项目获2002年度上海市科技进步二等奖，目前正进行将地质环境指标纳入城市规划体系的定量化研究工作。

4.2 及时调整地面沉降监测工作方向，解决城市建设与管理中的具体地质问题

针对城市建设与管理中的具体地质问题开展了专题调查与研究。在上海市建设委员会与上海市房地资源局支持下，先后开展了“地铁一、二号线地下空间开发与地质环境相互作用研究”、“地面沉降对城市防汛（涝）影响的调查研究”，围绕地质环境变化对城市生命线工程的影响进行了调查与评价，提出了在地铁、防汛规划与设计避免地质灾害影响的对策措施。这些地质环境监测与研究成果，已在地铁建设、新一轮黄浦江两岸规划防汛标准制定等工作中得到实际应用，进一步提高了城市地质工作的认知度。

4.3 扎实工作，努力做好政府地质灾害防治决策的技术支撑。

提高地质环境监测效率，制定合理的地下水开采与人工回灌计划是防治地面沉降的根本保证。为合理地开发地下水资源，在地面沉降与地下水动态监测与研究基础上，根据上海市房地资源局要求定时报送“地面沉降动态简报”（季、年报）；通过地面沉降趋势研究与预测，在每年末编制下一年度的“地下水开采、回灌实施方案”，报上海市政府批准实施。

为进一步发挥地质环境监测与研究成果的效用，加强地质灾害防治，我院积极参与了建设用地的地质灾害评估工作，做好政府决策的技术支撑。在上海市房地资源局指导下，完成了《上海市地质灾害区划研究》、《建设用地地质灾害危险性评估技术标准》的研究工作，使此项工作更加规范化、合理化。近年来，我院完成了二十余项市重点工程的“建设用地地质灾害危险性评估”工作，有力地保障了工程建设的顺利进行。