

上海地面沉降与城市防汛安全

龚士良^{1,2}, 李 采³, 杨世伦¹

(1. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062; 2. 上海市地质调查研究院, 上海 200072; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 文章根据上海黄浦江最高潮位与地面沉降的历年变化发展情况, 结合城市防汛工程的沉降现状, 分析了地面沉降对上海城市防汛安全的影响。指出地面沉降的长期危害是影响上海城市防汛安全的重要因素, 地面沉降的监测与防治是城市安全设防的重要内容。

关键词: 地面沉降; 防汛工程; 城市安全; 灾害防御; 上海

中图分类号: P642. 26

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2008)04-0096-06

上海地处长江河口, 滨江临海, 容易遭受太平洋热带气旋带来的强降水、海洋风暴潮和长江流域洪汛的多重影响, 城市面临长期的防汛压力。而上海的地面沉降问题由来已久并持续发展, 不仅使地面高程永久性损失, 形成沉降洼地, 增加洪涝灾情, 也明显降低城市防汛工程的设防标准。

本文通过对上海黄浦江历年最高潮位的变化及与地面沉降发展的关系、地面沉降在中心城区外滩防汛墙历次加高改建中的作用、典型防汛工程的沉降现状等的分析, 阐述地面沉降的灾害特性及其对城市安全设防的影响, 籍此以助于滨海城市安全防汛与地质灾害的综合防御。

1 自然地理与防汛设施

1.1 地形地貌

上海属长江三角洲冲积平原, 现辖区总面积 8 239. 01km², 其中陆域面积 6 787. 0km², 中心城区面积 688km², 海岸线长 448. 66km。地貌形态可分为西部的湖沼平原、东部的滨海平原、北部的河口沙岛三大单元(图 1)。

上海地区除西南部有零星出露的、总面积仅 2. 5km² 的侏罗系火山岩低矮残丘外, 陆域均为第四系地层覆盖。地势低平, 目前的地面高程一般为: 湖沼平

原区 2. 2 ~ 3. 5m, 滨海平原区 3. 0 ~ 4. 0m, 河口沙岛区 3. 3 ~ 4. 2m。中心城区属滨海平原地貌单元, 现地面高程在 3. 5m 左右, 部分地区低于 3m, 最低仅 2. 2m。

全市河网密布, 河网水面积约占全市陆域面积的 10. 9%, 河网与太湖流域河网相连, 形成以黄浦江为主干的水系, 是典型的感潮河网地区。



图 1 上海地貌环境分区与黄浦江验潮站位置图

Fig. 1 Geomorphic unit in Shanghai and location of gauging stations of the Huangpu River

1—湖沼平原区; 2—滨海平原区; 3—河口沙岛区; 4—验潮站; 5—中心城区

1.2 气象水文

汛期暴雨和热带气旋强降水, 是上海重要的灾害性天气之一, 严重威胁城市的防汛安全^[1]。

收稿日期: 2007-11-09; 修订日期: 2007-12-12

基金项目: 国土资源部首批百名优秀青年科技人才计划(2002-18)

作者简介: 龚士良(1965-), 男, 上海人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地面沉降研究。

E-mail: gongshiliang@sigs.com.cn

长江河口水面辽阔,流域来水丰富,进出潮量巨大。长江口几乎每年都有台风过境,中国东海的台风每年平均达6.5次,其中对长江口有影响的台风每年平均2.3次。

全市多年平均降水量为1 147.3mm,降水主要集中在春夏之交梅雨期、盛夏期热带气旋频发期、秋季汛期等暴雨季节,5~10月三个时期的暴雨占年暴雨总量的85%以上,对城市的防汛排涝带来直接影响。

上海的河网水系受海洋、气象及上游径流影响较大。黄浦江潮位在台风、暴雨、洪水、天文大潮叠加作用下,洪水下泄、潮位顶托,增水显著,水位明显超高。

1.3 防汛工程

江河堤防是上海城市防汛的重要设施。目前,中心城区黄浦江及主要支流防汛墙长度达208km;郊区江柳圩堤总长1 815.19km,黄浦江上游江堤长136.5km;滨海地带的海塘总长464.4km,其中陆域海塘170.8km、岛屿海塘293.6km^[2]。在黄浦江苏州河口建有国内首座闸桥结合的悬挂式挡潮闸,以确保苏州河沿岸安全度汛。

全市现有211个雨水排涝系统,总排水能力1 886.03m³/s,可应对40mm/h或200mm/d的暴雨降水等带来的城市积水涝灾。规划至2020年,排水系统增至365个,排水能力达4232.8m³/s。

2 地面沉降对江河高潮位的叠加影响

2.1 地面沉降发展概况

上海地面沉降主要因开采地下水导致第四系地层压缩引起。自1921年发现地面沉降以来,至2007年地面平均沉降1.975m,最大沉降量3.035m,最大沉降速率超过110mm/a(1957~1961年)。

1965年以来,采取压缩地下水开采量、调整地下水开采层次、开展地下水人工回灌等综合措施,地面沉降得到显著抑制。而20世纪80年代末期之后的10余年间,因大规模城市改造建设,工程建设的沉降效应日益突出^[3],沉降速率增至10mm/a左右。

虽然上海的地面沉降已处于有效控制阶段,但沉降累积总量仍在持续缓慢增长(图2)。

地面沉降造成中心城区地面高程损失并逐年累积,同时逐渐向外围的城郊扩展。在上海的陆域范围内普遍形成沉降区,特别是黄浦江两岸的中心城区沉降洼地更为明显,平均累积沉降已近2m。地面沉降显著改变了上海自然地理的下垫面形态与格局^[4],成为河口海岸地区环境变异的重要表现形式之一^[5]。

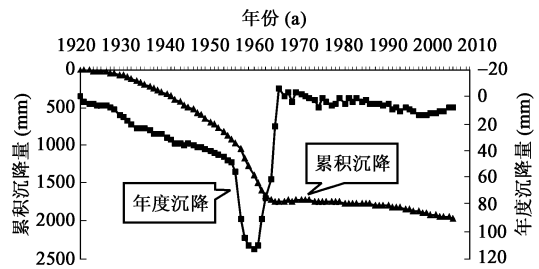


图2 上海地面沉降发展变化

Fig.2 Development of land subsidence in Shanghai

2.2 黄浦江最高潮位历年变化

上海极易受台风、暴雨、洪水、天文大潮的侵袭,风、暴、潮、汛“三碰头”甚至“四碰头”的情况出现频率很高,致使黄浦江最高潮位屡创新高^[6],潮水漫溢、城区大面积被淹曾屡屡发生,使城市防汛面临严峻压力,城市安全受到极大威胁。黄浦江警戒潮位及历史最高潮位见表1。

表1 黄浦江潮位预警值与历史最高潮位

Table 1 Tide height alarm and the highest tide of the Huangpu River

验潮站	警戒潮位(m)				史最高潮位(m)
	蓝色预警	黄色预警	橙色预警	红色预警	
吴淞	4.80	5.26	5.45	5.64	5.99
黄浦公园	4.55	4.91	5.10	5.29	5.72
米市渡	3.80	4.04	4.13	4.25	4.27

根据中心城区黄浦公园验潮站的观测资料,黄浦江高潮位有逐渐抬高的趋势,高潮位出现的频率也渐趋增多(图3)。统计结果表明,1913~2007年历年最高潮位平均为4.59m,其中建国以前平均为4.48m,20世纪50~90年代分别是4.38,4.40,4.54,4.80,4.94m,2000~2007年为4.95m。

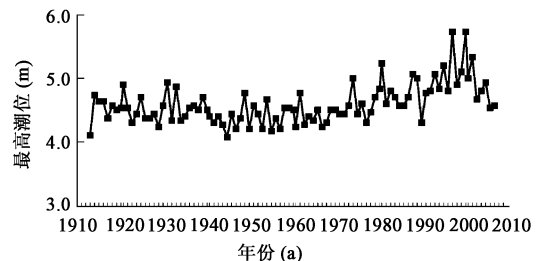


图3 外滩黄浦江历年最高潮位变化曲线

Fig.3 Change in the highest tide height of the Huangpu River in the Bund

2.3 地面沉降与潮位关系分析

利用1921~2007年中心城区平均地面沉降与黄

浦江外滩同期的年度高潮位数据资料,作了累积沉降量与高潮位两者关系的散点图(图4),并对主要时段进行了统计分析(表2)。

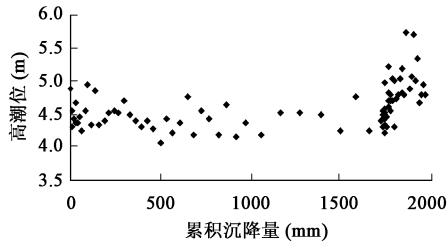


图4 累积地面沉降与黄浦江高潮位关系散点图

Fig. 4 Relationship between land subsidence and the highest tide height

表2 黄浦江高潮位与地面沉降历年数据统计分析

Table 2 Statistics of the highest tide height and land subsidence

时间段 (a)	平均高潮位 (m)	平均沉降速率 (mm/a)	期末累积 沉降量(mm)
1913~1919	4.51	—	—
1920~1929	4.48	7.28	65.5
1930~1939	4.57	23.16	296.5
1940~1949	4.38	35.20	648.5
1950~1959	4.38	62.60	1274.5
1960~1969	4.40	46.58	1740.3
1970~1979	4.54	2.11	1761.4
1980~1989	4.80	3.37	1795.1
1990~1999	4.94	9.63	1891.4
2000~2007	4.95	10.39	1974.5
平均	4.59	22.70	1974.5

由此看出,尽管黄浦江高潮位受多重因素的影响,但其与地面沉降的发展也存在一定的联系。随着累积沉降量的增加,高潮位出现的频率明显提高,潮位也有抬升的趋势。累积沉降超过1.5m后,潮位超过4.5m的出现几率大幅提高,而且年际的波动变化更为明显。特别是累积沉降达1.7m后,高潮位基本处于5m以上。

假设如果扣除1950~1964年沉降显著发展时期造成的1.076m的地面高程损失量,黄浦江通常的高潮位可能不足4.0m;如果扣除1965年以来43年间沉降有效控制时期0.251m的累积沉降量,通常的高潮位也有可能降至4.5m,将低于4.55m的警戒水位。因此,沉降迅速发展及长期缓慢累加均会对高潮位有明显的叠加作用。

2.4 城市洪涝灾情分析

城市的洪涝灾情与高潮位密切相关,上海历史上

几次主要高潮位与灾情简况见表3。

表3 上海黄浦江高潮位与洪涝灾情

Table 3 The highest tide height of the Huangpu River and conditions of flood and inundate in Shanghai

日期	最高潮位(m)	灾情概况
1933.09.03	4.80	城区部分地区积水,但仍可行车
1949.07.25	4.77	潮水漫溢,水深及腰,交通中断
1962.08.02	4.76	大半市区被淹,最大水深近2m
1974.08.20	4.98	不少地段高潮位与防汛墙顶齐平 中心城区基本无恙,郊区部分土堤
1981.09.01	5.22	防汛墙决口
1997.08.19	5.72	城市安全度汛,外围一线海塘受台风影响冲毁十余千米
2000.08.31	5.70	受“派比安”“桑美”台风影响,直接经济损失1.4亿元
2002.09.07	5.33	部分防汛设施受损,直接经济损失210万元
2005.08.07	4.94	受“麦莎”台风影响,直接经济损失17.28亿元

注:潮位为黄浦公园验潮站实测

黄浦江高潮位变化及其灾情特点,也凸显出地面沉降对高潮位的叠加作用,特别是从20世纪60年代以前几次高潮位导致的洪涝灾情来看,反映更为充分:1933年地面沉降尚较微弱,因而其灾情还不是很大;而1949及1962年的潮位比历史最高潮位还略有降低,但灾情却更为严重,这与建国后沉降迅速发展密切相关;而1966年以来地面沉降控制成效逐步显现,安全设防标准又进一步提高,使洪涝灾情得到明显遏制。

3 地面沉降对防汛工程设防标准降低的影响

3.1 外滩防汛墙加高改建与地面沉降关系分析

根据外滩黄浦江防汛墙历次加高^[7]及市区地面沉降发展历程的对比,地面沉降对市区防汛墙的影响非常直接,特别是第一次防汛墙的建设,其增加的高度几乎与地面沉降量完全一致(表4)。

外滩黄浦江防汛墙的建设与加高,以防御最高潮位为高程设计的主要依据。首次防汛墙的建筑高程,是将黄浦江历史最高潮位4.8m作为设防标准;第二次将防御的高潮位设定为“十年一遇”的高潮位5.0m;第三次则考虑“百年一遇”的高潮位5.2m;第四次提高至“千年一遇”5.86m的高潮位设防。

由此看出,前三次外滩黄浦江防汛墙的建设与加高,除对高潮位的设防外,对地面沉降可能对防汛墙设防标准的降低,基本未予考虑或重视严重不足,对地面沉降的发展预测显然未能充分把握,使防御能力未如设想的乐观,致使在1959年后的短短15年内又加高

表4 上海外滩防汛墙加高改建与同期地面沉降

Table 4 The heighten and reconstruction of the flood defence wall in the Bund of Shanghai and the land subsidence in the same time

建设序次	竣工年份	设计防御潮位 (m)	墙顶标高 (m)	防汛墙增高 (m)	地面沉降 (m)	沉降占防汛墙增幅比例 (%)
0	1920	驳岸(未设防)	3.5	—	—	—
1	1959	4.8(历史最高潮位)	4.8	1.3	1.2745	98.04
2	1962	5.0(十年一遇潮位)	5.3	0.5	0.3130	62.60
3	1974	5.2(百年一遇潮位)	5.8	0.5	0.1505	30.10
4	1993	5.86(千年一遇潮位)	6.9	1.1	0.0859	7.81

了2次。而在第四次的重新改建中则给予了充分重视,地面沉降预留量较为充足。

地面沉降使防汛墙设防能力减弱,可以防御的最高潮位降低,“百年一遇”的高潮位设防实际上已降为“十年一遇”,从而极大地提高了遭受高潮位侵袭的可能性和致灾风险。

3.2 外滩防汛墙沉降现状分析

为掌握黄浦江外滩防汛墙综合改造竣工后的沉降动态,在工程沿线设置了沉降监测点,并自1994年开始每年定期联测。外滩防汛墙工程北起苏州河口,南至十六铺。其中延安东路以北为一期工程,长1.2km;延安东路以南为二期工程,长0.6km。工程位置见图5。



图5 黄浦江外滩防汛墙工程位置示意图

Fig. 5 Location of the flood defence wall in the Bund of the Huangpu River

根据工程沿线42个监测点的沉降监测,外滩防汛墙在1994~2006年间总体沉降量在160.26~235.28mm之间,平均沉降183.87mm;沉降速率12.33~18.10mm/a,平均14.14mm/a。监测结果见表5。

此时期沿线区域地面沉降量为132.20mm,占防汛墙平均沉降总量的71.9%,变化幅度为51.9%~

97.0%。防汛墙典型监测点与沿线区域地面沉降的历时累积沉降曲线见图6。

表5 外滩防汛墙沉降监测结果(1994~2006年)

Table 5 The monitoring results of land subsidence of the flood defence wall in the Bund (from 1994 to 2006)

	监测点 (个)	最大沉 降量(mm)	最小沉 降量(mm)	平均沉 降量(mm)	平均沉降 速率(mm/a)	
一期	北京东路~ 南京东路	5	192.09	136.24	166.33	12.79
	南京东路口	5	180.40	144.21	165.32	12.72
	南京东路~ 福州路	3	178.84	150.17	160.26	12.33
	福州路口	10	189.21	142.49	164.58	12.66
二期	福州路~ 延安东路	4	221.27	163.70	189.53	14.58
	延安东路~ 金陵东路	4	248.92	159.78	205.81	15.83
	金陵东路~ 十六铺	11	254.91	204.60	235.28	18.10

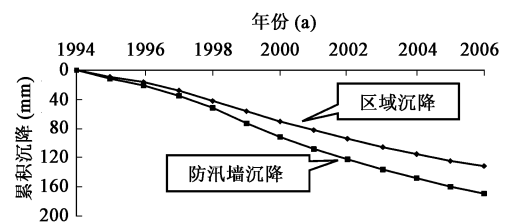


图6 外滩防汛墙近期沉降曲线

Fig. 6 Curve showing the recent subsidence of the flood defence wall in the Bund

因此,地面沉降的持续作用明显,其余则是防汛墙自身的结构沉降等因素引起^[8]。二期工程的沉降量要大于一期工程,其主要原因是该区间段内有越江隧道的施工作业,对防汛墙的沉降造成了影响。

3.3 上海石化海堤沉降状况

上海石化海堤地处杭州湾北岸,毗邻浙江省(图1),是上海设防标准最高的海堤之一。为上海石化新城发展的土地需求与安全保障,在七次大规模围海造

地的同时,构筑总长 22.91km(含横隔堤)的防洪大堤,其中临海一线海堤长 11.8km。

根据 1994 年 1 月与 2004 年 1 月对海堤所作的高程测量成果的对比分析,海堤沉降明显。10 年间,沉降量最小的为 20mm,最大达 833mm,平均沉降速率 14.2mm/a(表 6、图 7)。

表 6 上海石化海堤沉降监测结果(1994~2004 年)

Table 6 The monitoring results of land subsidence of coast embankment in the Hangzhou Bay(from 1994 to 2006)

海堤	测点数 (个)	沉降量(mm)			平均沉降 速率(mm/a)
		最大值	最小值	平均值	
二期	19	150	20	66	6.6
三、四期	16	191	92	124	12.4
五期	3	833	315	552	55.2
六期	39	346	21	155	15.5

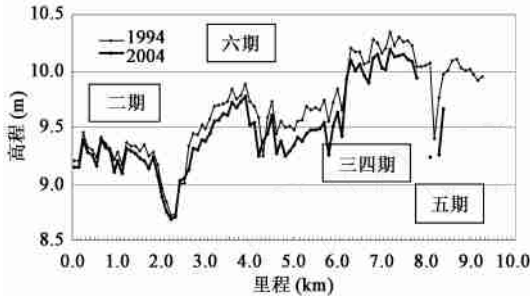


图 7 上海石化海堤沿线沉降状况

Fig. 7 Curve showing land subsidence of coast embankment in the Hangzhou Bay

由此看出,尽管上海石化海堤建设标准很高,但同样存在堤坝高程降低的现象。上海石化新城所在的金山区,地下水开采强度较低,1980~2006 年的区域地面沉降量在 50~100mm 之间。因此,上海石化海堤的沉降,虽有区域地面沉降的一定影响,可能主要还是由于围海促淤新近沉积土的自然固结及土体在坝体荷载作用下的压缩而导致的^[9~11]。

因此,对于洋山深水港临港新城、上海宝钢新城、长兴岛造船基地等长江口杭州湾海岸产业带与国家重点工程的临海一线防汛堤坝,也应加强沉降监测。

4 地面沉降与城市安全设防

4.1 地面沉降灾害特性

地面沉降具有不可逆性和累进性,因此地面沉降将逐步累积并长期产生影响。地面沉降是缓变型的城市地质灾害,通过降低地面高程,使城市遭受洪涝威胁的压力增大和成灾可能性提高而体现出灾害特点。

地面沉降显著改变了上海下垫面形态,同时导致防汛工程设防标准降低、防洪能力减弱、城市排涝困难、汛期积水严重、江河水位相对上升并强化海平面上升影响^[12~15],使城市防汛安全受到严重威胁。

地面沉降作为不易察觉的潜伏性的城市地质灾害,是在逐步积累及长期的时间效应下,借助其它显性的自然灾害的发生频率的提高及灾情的加大而显露其灾害本质。因此,地面沉降是影响防汛安全的重要因素,是城市灾害系统中的重要环节。地面沉降的叠加作用和长期危害须引起高度重视,地面沉降防治应是上海城市抗灾、减灾、防灾的重要内容。

4.2 城市安全设防

地面沉降不仅是上海重要的城市地质灾害,在滨海平原和三角洲地区城市群中也是典型和主要的环境地质问题。河口海岸带是城市化高度发达的地区,大中型城市星罗棋布。海岸带经济圈的形成与发展,自然资源的合理利用与环境地质问题的防治因此日益得到关注和重视。

而在河口海岸和滨海城市,遭受台风、暴雨、洪汛等侵袭的频率甚高。防汛工程是抵御自然灾害、确保城市安全的重要屏障。城市安全设防的防汛墙设计与建设标准,除考虑高潮位的重现期,即以百年一遇或千年一遇潮位的概率统计作为基本依据以外,还应重视和调整地面沉降的影响幅度。地面沉降是不断累加的,显然按百年或千年一遇的潮位标准设计时,其地面沉降影响则不是百年或千年的时间范围,所谓的千年一遇标准并非是千年防灾的概念。只有在地面稳定的前提下,防汛工程的设防才主要取决于风暴潮汛等引起的高潮位。

因此,应充分重视地面沉降对自然灾害的叠加作用,建立和完善地面沉降监测网络体系,提高实时监控和预警预报能力^[16],并通过行政与技术等城市管理措施实施地面沉降的系统控制^[17~18],实现对灾害的综合防御。

另外,可以借鉴国外成功经验,在吴淞口设立黄浦江挡潮闸,从根本上缓解城市防汛压力。鉴于作为前期技术实验的苏州河挡潮闸将因恢复外滩历史风貌,在外滩道路综合改造与地下通道建设中拆除,故吴淞口挡潮闸的规划论证与建设更宜尽早。

5 结语

本文结合实测数据的分析研究,初步认识如下:

- (1) 地面沉降导致上海中心城区地面高程普遍低

于黄浦江高潮位,并使江河水位相对上升,城市面临长期的防汛压力;

(2)地面沉降对防汛工程设防标准的降低作用明显,现有的城市防汛设施仍受其影响,地面沉降的长期危害应引起高度警惕;

(3)地面沉降通过增加城市遭受洪涝等自然灾害的风险性而体现其灾害本质,地面沉降是影响上海城市防汛安全的重要因素;

(4)地面沉降是上海城市灾害系统中的重要环节,地面沉降防治应是上海城市防灾、抗灾、减灾的重要内容,应切实加强防汛工程的定期监测与沉降分析。

参考文献:

- [1] 杨世伦,陈吉余. 太湖流域洪涝灾害的形成和演变[J]. 地理科学, 1995, 15(4): 307 - 314, 393.
- [2] 《上海水利志》编纂委员会. 上海水利志[M]. 上海: 上海社会科学院出版社, 1997: 65 - 70.
- [3] 龚士良. 上海城市建设对地面沉降的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 108 - 111.
- [4] 戴雪荣,师育新,俞立中,等. 上海城市地貌环境的致灾性[J]. 地理科学, 2005, 25(5): 636 - 640.
- [5] 陈吉余,陈沈良. 河口海岸环境变异和资源可持续利用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 1 - 7.
- [6] 陈满荣,王少平. 上海城市风暴潮灾害及其预测[J]. 灾害学, 2000, 13(3): 27 - 30.
- [7] 李维显. 上海外滩防汛墙的高度[J]. 上海地质, 1990(2): 35 - 41.
- [8] 陈宝,程徽丰,杨林德. 上海市外滩防汛墙结构沉降的预测研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1287 - 1292.
- [9] 龚士良,杨世伦. 长江口岸带冲淤及后备土地资源的沉降效应[J]. 水文, 2007, 27(5): 78 - 82.
- [10] 龚士良. 上海软粘土微观特性及在土体变形与地面沉降中的作用研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(4): 378 - 384.
- [11] 虞志英,劳治声,金庆祥,等. 淤泥质海岸工程建设对近岸地形和环境影响[M]. 北京: 海洋出版社, 2003: 97 - 98.
- [12] 戴雪荣,李良杰,俞立中,等. 上海城市地貌形变与防汛墙地理工程透析[J]. 地理研究, 2005, 24(6): 911 - 918.
- [13] 龚士良. 长江中下游环境地质问题及对防洪工程的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(3): 19 - 27.
- [14] 周乃晟,袁雯. 上海市暴雨地面积水的研究[J]. 地理学报, 1993, 48(3): 262 - 271.
- [15] 李永平,秦曾灏,端义宏. 上海地区海平面上升趋势的预测和研究[J]. 地理学报, 1998, 53(5): 393 - 403.
- [16] 龚士良. 地面沉降自动化测控与预警预报系统[J]. 计算机测量与控制, 2003, 11(4): 244 - 246.
- [17] 龚士良. 集对分析及在城市地面沉降研究中的应用[J]. 水文地质工程地质, 1998, 23(5): 37 - 39, 44.
- [18] 龚士良. 上海地下水资源系统开发与管理[J]. 管理工程学报, 1999, 13(1): 47 - 49.

Land subsidence and urban flood prevention safety in Shanghai

GONG Shi-liang^{1,2}, LI Cai³, YANG Shi-lun¹

- (1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;
2. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China;
3. China Institute for Geo Environmental Monitoring, Beijing 10081, China)

Abstract: Land subsidence is an important factor endangering the urban flood prevention safety. The effect of land subsidence on the urban flood prevention safety in Shanghai is analyzed based on the monitoring results of the land subsidence and the yearly highest tide height of the Huangpu River, considering the previous heighten and subsidence conditions of the flood defence wall in the Bund. The land subsidence is a key link of the urban calamity system. The monitoring and control of the land subsidence is the crucial content of the urban safety fortify.

Key words: land subsidence; flood defence engineering; urban safety; calamity control; Shanghai

责任编辑:汪美华