

文章编号: 1000-7598(2011)增刊 1-0578-05

上海市城市化进程引起的地面沉降因素分析

许烨霜, 马 磊, 沈水龙

(上海交通大学 土木工程系, 国家海洋工程重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 20 世纪 90 年代上海中心城区的地面沉降在地下水开采量没有增加的情况下出现了新一轮的增长。与此同时, 上海进行了大规模的城市化建设。通过对中心城区地面沉降量与工程建设进行相关性分析发现, 近年来中心城区的地面沉降量与工程建设具有相关性。目前城市化建设引起地面沉降的现象已受到关注, 但尚缺乏对城市化进程引起地面沉降机制的系统研究。针对上海市城市化进程引起地面沉降的因素进行分析探讨, 城市化进程引起的沉降包括建筑物荷载及交通荷载等外荷载引起的沉降, 基坑开挖、降水及隧道施工等工程施工引起的土体压缩, 以及隧道渗漏, 周边地区对地下水补给量的减小, 地下构筑物挡水效应等引起的地下水位持续下降而诱发的沉降。

关 键 词: 地面沉降; 地下水开采; 影响因素; 城市化

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

Influential factors on development of land subsidence with process of urbanization in Shanghai

XU Ye-shuang, MA Lei, SHEN Shui-long

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Since 1990s, land subsidence accelerated again although net withdrawal volume of groundwater did not increase in urban center of Shanghai. Net withdrawal volume of groundwater in urban center, however, is not the crucial factor controlling the land subsidence. At the same time, more and more infrastructures, such as high and super-high rise buildings, deep building foundations, underground structures, subway tunnels, underground path structures, were constructed in the multi-aquifer-aquitard system (MAAS) in Shanghai. Land subsidence in Shanghai is correlated with activities of urban construction according to correlation analysis of land subsidence and urban construction. Investigation on urban construction induced land subsidence is now receiving a great concern. However, mechanism of how urban construction affects the acceleration of land subsidence in Shanghai has not been well addressed. This study was undertaken to evaluate the influential factors on the development of land subsidence with the process of urbanization in Shanghai. The influential factors include additional load consisting of static load and dynamic load during and after structures construction, underground structures construction involving foundation engineering and construction of tunnel, drawdown of groundwater level due to leakage of underground structures, decrease of recharged volume of groundwater from surroundings, and cut-off or partially cut-off effect of underground structures in aquifers.

Key words: land subsidence; groundwater withdrawal; influential factors; urbanization

1 前 言

自 20 世纪 60 年代中期开始, 上海市通过实施减少地下水开采量、调整开采层次、以及进行地下水人工补给等综合措施, 沉降得到了有效地控制。然而, 在中心城区地下水采灌格局未有大的变化的

情况下, 20 世纪 90 年代开始, 中心城区地面沉降较前期有显著增加。与此同时, 上海进行了大规模的城市建设, 至 2009 年底, 轨交运营线路长度从 1996 年的 15.21 km 增至 355 km, 全市 8 层以上房屋建筑面积从 1990 年的 $9.59 \times 10^6 \text{ m}^2$ 增长至 $2.04 \times 10^8 \text{ m}^2$ ^[1]。现有的水流及沉降模型虽然模拟了

收稿日期: 2010-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41072209); 上海市重点学科建设项目资助 (No. B208); 海洋工程国家重点实验室自主研究课题资助项目 (No. GKZD010051)。

第一作者简介: 许烨霜, 女, 1978 年生, 博士, 助理研究员。主要从事地下工程中地下水控制与地面沉降的研究。E-mail: xuyeshuang@sjtu.edu.cn

地下流体资源开采引起的变形, 但尚不能解释上述现象。近年来的研究认为, 地下水开采已经不是目前地面沉降的主要原因, 大规模的城市建设是沉降加剧的重要原因, 工程性沉降约占地面沉降总量的 30%^[2]。

目前研究普遍认为城市化建设的影响主要体现在以下几个方面^[2-4]: ①基坑开挖产生的土体变形; ②基坑降水引起的水位变化; ③盾构隧道施工产生的地表变形; ④施工动荷载及冲击荷载引起的地面沉降; ⑤建筑物荷载带来的附加应力。实际上地面沉降的发生机制更为复杂, 除了上述因素外, 城市发展使地下水补给条件发生变化, 由此影响地面沉降的现象也应引起关注, 如伴随城市建设而来的深入含水层中的地下构筑物对地下水补给的阻挡, 周围区域向中心区补给量的减小等。

2 上海地区建筑物基础层与工程水文地质概况

上海地区的水文地质系统为 1 个潜水、1 个微承压含水层、5 个承压含水层和 6 个隔水层交互堆积而成^[5]。建筑物基础持力层与水文工程地质的相关性如图 1 所示。上海地区与工程建设有关的地层深度约为 75 m^[6]。密集高层建筑普遍采用桩基, 持力层大多为第⑦工程层(第 I 含水层)和第⑨工程层(第 II 含水层); 上海地区的市政工程如高架桥、地铁、隧道等, 主要穿越第 1 软土层和第 2 软土层^[5-6]。图 2 为上海地区浅层地层物理力学参数^[5]。

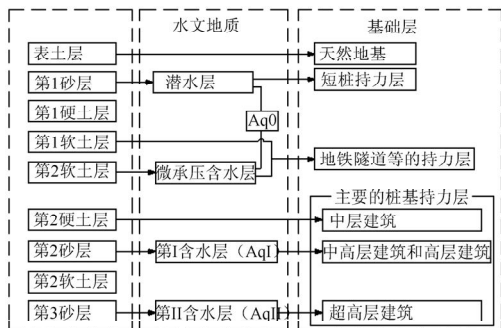


图 1 上海地区建筑物基础层与工程水文地质的相关图
Fig.1 Relationship among engineering geology, hydrogeology and foundation bearing strata in Shanghai

3 地面沉降与工程建设相关性分析

上海市高层建筑分布如图 3 所示。随着城市化建设的发展, 水平方向上建筑物分布越来越密,

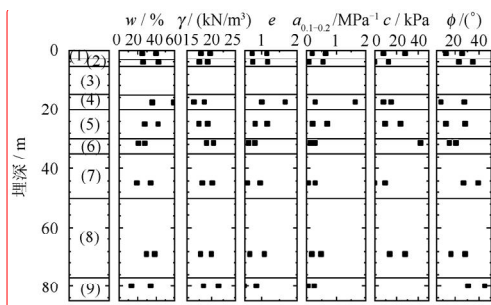


图 2 上海地区浅层地层物理力学参数
Fig.2 Properties of the subsoil within 100m in Shanghai

垂直方向上建筑物越来越高。图 4 为中心城区累积地面沉降量与全市 8 层以上建筑物的建筑面积之间的关系图。从沉降量与建筑面积之间的关系来看, 建筑物的数量与地面沉降量具有一定的相关性。图 5 为累积沉降量与累积建筑面积的相关分析图, 累积沉降量与建筑面积之间可以采用指数曲线进行拟合, 其相关系数大于 0.99, 累积沉降量随建筑面积的增加而增加。上述分析说明上海的城市化建设与地面沉降之间存在一定的关系, 严学新等^[7]也证实了上海工程建设与地面沉降存在同步增长的关系。

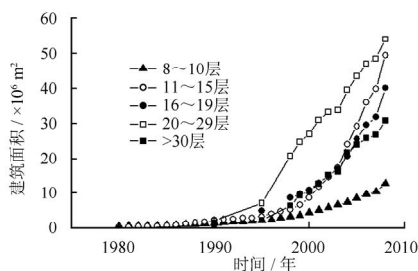


图 3 上海全市房屋建筑统计图(数据来源于文献[1])
Fig.3 Statistical data of buildings in Shanghai

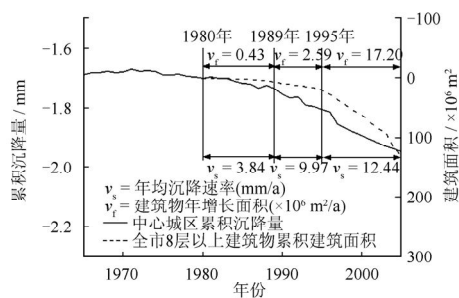
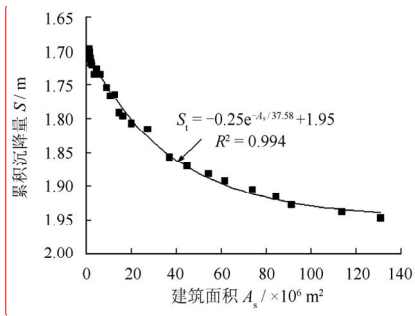


图 4 累积地面沉降量与累积建筑面积关系图
Fig.4 Relationship between accumulated settlements and area of structures

批注 [x1]: 注: 此图少了部分内容, 原图下方还有对图中字母代号的解释



批注 [x2]: 此图右侧纵坐标应为“累积地面沉降量 S_i ”

图5 累积沉降量与建筑面积相关分析图
Fig.5 Regression analysis of accumulated land subsidences and areas of structures

4 城市化进程中引起地面沉降的因素分析

上海城市化进程中地面沉降的原因如表 1 所示。城市化进程引起的附加地面沉降是多种因素共同作用下逐渐累积起来的,引起沉降的原因包括附加荷载作用引起的沉降、工程施工引起的固结压缩、地下水位持续下降引起的沉降。

4.1 外荷载引起的沉降

4.1.1 建筑物荷载

随着城市建筑高层化、密集化的趋势日益明显,建筑物荷载的强度和规模都越来越大,对土层的应

批注 [x3]: 注: 此处作者调整过高

表 1 上海城市化进程中地面沉降的原因
Table 1 Influence factors resulting in land subsidence during urban development in Shanghai

	种类	机理	主要作用土层	作用时间
外荷载	建筑物荷载	改变浅层地基土应力状态	第⑨层土以上	长期
	动荷载	对一定范围内土体造成扰动,引起孔隙水压力的消散和土体固结;还可能造成砂土液化	涉及地铁隧道及桩基持力层	长期
施工期间	基坑开挖	基坑周围产生较大的塑性区	开挖深度超过 40m	短期
	盾构隧道施工	引起地层损失	第 1、2 软土层	短期
	基坑降水	地下水位下降,土层有效应力增大;造成土颗粒流失	微承压含水层、第 I 含水层	短期
地下水位持续下降	地铁渗漏	造成地下水及土颗粒的流失	第 1、2 软土层	长期
	周边地区补给减少	近郊区的开采增加导致周围地区向市区的补给减小	第 II、III、IV、V 含水层	长期
	构筑物挡水效应	构筑物的存在减少开采区得到的补给量	微承压含水层、第 I、II 含水层	长期

力状态的改变也越强。Tang 等^[3]认为,距建筑物 1 倍基础宽度范围内的地面沉降大于建筑物本身的沉降,密集高层建筑群之间地表变形存在明显的沉降叠加效应。介玉新等^[4]提出了等效影响荷载的概念,研究认为,建筑密度越大,建筑容积率越高,地面沉降越显著。此外,除了建筑物荷载外,城市路面的铺设、填土等荷载对城市沉降的影响都应当考虑。

4.1.2 动荷载

动荷载包括施工时沉桩的冲击及交通等循环荷载等。土体在循环荷载作用下的永久变形取决于冲击或循环荷载的能量。沉桩施工产生的振动影响范围一般在 50 m 左右的地方达到环境振动标准的要求^[8]。凌建明等^[9]得到外环线某路口运营 2 年后的路面残余变形为 90~100 mm;刘明等^[10]提出地铁振动影响的压缩层大约在 10 m 范围内。

4.2 工程施工引起的土体固结压缩

4.2.1 基坑开挖

上海的深基坑工程最大开挖深度已超过 40 m^[11]。相关资料表明,上海地基基坑开挖引起的沉降主要集中在开挖深度 1~2 倍的平面范围内^[11]。对于放坡开挖,边坡土体蠕变量较大,开挖深度为

13 m 的基坑,垂直蠕变量达 300 mm^[2]。

4.2.2 盾构隧道施工

盾构施工引起的沉降与地质条件和盾构施工工艺相关^[12]。采用全闭胸挤压盾构推进时,盾构过后地面出现的凹坑可达 1 m 左右;采用气压盾构或局部挤压盾构,地表沉降可控制在 50 mm 左右;从横向变形看,盾构施工引起地表变形接近土体的破坏棱体,下沉影响范围为 60~75 m^[13]。

4.2.3 基坑降水

目前也有很多研究针对上海基坑降水诱发的沉降问题进行了分析^[14-15]。根据土质条件及井点水位下降程度,基坑降水对沉降的影响范围也不相同。依据上海井点降水施工经验,影响范围可达到 30~80 m。水位降深 3.5 m 左右时,地面沉降为 20~30 mm^[13]。

4.3 地下水位持续下降引起的沉降

4.3.1 地铁隧道渗漏引起的沉降

随着隧道沉降的发展,部分区段可能会出现不均匀沉降,使得隧道产生弯曲变形,导致隧道接缝张开,渗漏加剧。有学者^[16-17]分析了隧道均匀渗漏状态引起的长期固结作用。郑永来等^[17]认为,当隧

道渗漏速度为 $0.15 \text{ L/m}^2/\text{d}$ 时,隧道最大沉降可达 220 mm ,而且渗漏引起沉降可能需要很长一段时间才能趋于稳定。

4.3.2 周边地区补给减少

70 年代以前,上海市区还可获得周边地下水的补给。1949 年中心城区净开采量与郊区的开采比例约为 $8:1$,中心城区的净开采量远大于郊区;1964 年为 $1:0.98$,基本持平;而 1970 年变为 $1:70.7$,郊区成为主要的地下水开采区域。尽管市区的净开采量减小了,但近郊区的开采量增加导致周围地区向市区的补给量减小。

4.3.3 地下构筑物的挡水效应

相对而言,地下工程施工期间对地下水渗流产生的影响是局部范围的,在一个较长时间内能得到缓解。而地下工程建成后对地下水的影响范围大、时间长,这种影响具有累积效应^[18]。地下构筑物的存在对地下水的影响体现在地下水位、地下水流速和地下水渗流方向的变化以及多层含水层间的越流效应。上述变化是缓慢的,可是一旦出现就会是长期的,且在短时间内难以恢复。笔者等的计算结果表明,工程建设中的地下构筑物的长期挡水作用会引起地下水位下降,继而对上海市地面沉降的时空分布有一定的影响。地下构筑物的挡水效应使得大面积范围内的平均地面沉降量呈增长趋势^[19]。外环内第 II、I 及微承压含水层中构筑物含量每增加 10% ,中心城区年均沉降量分别增长 31.7% 、 2.98% 及 2.82% ^[19]。

5 结 论

(1) 通过对上海市中心城区地面沉降量与建设工程进行相关性分析发现,上海市区地面沉降的加速现象与城市化建设具有相关性;

(2) 上海城市化进程引起的附加沉降是多种因素共同作用下逐渐累积起来的,引起沉降的原因包括外荷载作用、工程施工以及地下水位持续下降;

(3) 外荷载包括建筑物的静荷载以及城市交通荷载等。外荷载作用可能改变地基土的应力状态,继而引起沉降;

(4) 基坑开挖、盾构隧道施工以及基坑降水等地下工程施工期间可能对土体造成扰动,从而诱发沉降;

(5) 城市发展使地下水补给条件发生变化,由此影响地面沉降的现象也应引起关注,如隧道长期渗漏引起水土流失,郊区开采量的增加使得中心

区的补给量减小,深入含水层中的地下构筑物对地下水补给的阻挡等。

参 考 文 献

- [1] 上海统计网. 上海 2010 年统计年鉴 M/OL. [2010-12-30]. <http://www.stats-sh.gov.cn>[OL]. 2010.
- [2] 施伟华. 建设工程与水资源开发对地面沉降影响分析[J]. 上海地质, 1999, (4): 50—54.
SHI Wei-hua. Analysis for the effects construction engineering and water resources development on Shanghai land subsidence[J]. *Shanghai Geology*, 1999, (4): 50—54.
- [3] TANG Y Q, CUI Z D, WANG J X, et al. Application of grey theory-based model to prediction of land subsidence due to engineering environment in Shanghai[J]. *Environment Geology*, 2008, 55(3): 583—593.
- [4] 介玉新, 高燕, 李广信. 城市建设对地面沉降影响的原因分析[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(2): 78—82.
JIE Yu-xin X, GAO Yan, LI Guang-xin. Analysis of the land subsidence induced by city construction[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2007, 21(2): 78—82.
- [5] 《上海市地质环境图集》编纂委员会. 上海市地质环境图集[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [6] GONG S L, LI C, YANG S L. The microscopic characteristics of Shanghai soft clay and its effect on soil body deformation and land subsidence[J]. *Environmental Geology*, 2009, 56(6): 1051—1056.
- [7] 严学新, 龚士良, 曾正强, 等. 上海城区建筑密度与地面沉降关系分析[J]. 水文地质工程地质, 2002, (6): 21—25.
YAN Xue-xin, GONG Shi-liang, ZENG Zheng-qiang, et al. Relationship between building density and land subsidence in Shanghai urban zone[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2002, (6): 21—25.
- [8] JONGMANS D. Prediction of ground vibrations caused by pile driving: A new methodology[J]. *Engineering Geology*, 1996, 42(1): 25—36.
- [9] 凌建明, 王伟, 郭洪波. 行车荷载作用下湿软路基残余变形的研究[J]. 同济大学学报, 2002, 30(11): 1315—1320.
LING Jian-ming, WANG Wei, WU Hong-bo. On residual

- deformation of saturated clay subgrade under vehicle load[J]. **Journal of Tongji University**, 2002, 30(11): 1315—1320.
- [10] 刘明, 黄茂松, 李进军. 地铁荷载作用复饱和软黏土的长期沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(5): 813—817.
- LIU Ming, HUANG Mao-song, LI Jin-jun. Long-term settlement of saturated soft clay under subway loading[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2006, 2(5): 813—817.
- [11] 龚士良, 叶为民, 陈洪胜, 等. 上海市深基坑工程地面沉降评估理论与方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(4): 55—60.
- GONG Shi-liang, YE Wei-min, CHEN Hong-sheng, et al. Theory and methodology on assessment of land subsidence caused by excavation engineering for deep foundation pit in Shanghai[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2008, 19(4): 55—60.
- [12] 沈培良, 张海波, 殷宗泽. 上海地区地铁隧道盾构施工地面沉降分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 556—559.
- SHEN Pei-liang, ZHANG Hai-bo, YIN Zong-ze. Ground settlement due to shield construction in Shanghai metro tunnel project[J]. **Journal of Hohai University (Natural Science)**, 2003, 31(5): 556—559.
- [13] 黄绍铭, 高大钊. 软土地基与地下工程(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [14] 骆祖江, 李朗, 姚天强, 等. 松散承压含水层地区深基坑降水三维渗流与地面沉降耦合模型[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1947—1951.
- LUO Zu-jiang, LI Liang, YAO Tian-qiang, et al. Coupling model of three dimensional seepage and land-subsidence for dewatering of deep foundation pit in loose confined aquifers[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(11): 1947—1951.
- [15] 王建秀, 吴林高, 朱雁飞, 等. 地铁车站深基坑降水诱发沉降机制及计算方法[J]. 岩土工程学报, 2009, 28(11): 1947—1951.
- WANG Jian-xiu, WU Lin-gao, ZHU Yan-fei, et al. Mechanism of dewatering-induced ground subsidence in deep subway station pit and calculation method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 28(11): 1947—1951.
- [16] 张冬梅, 黄宏伟, 杨峻. 衬砌局部渗流对软土隧道地表长期沉降的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1430—1436.
- ZHANG Dong-mei, HUANG Hong-wei, YANG Jun. Influence of partial drainage of lining on long-term surface settlement over tunnels in soft soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(12): 1430—1436.
- [17] 郑永来, 李美利, 王明洋, 等. 软土隧道渗漏及地面沉降影响研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 243—247.
- ZHENG Yong-lai, LI Mei-li, WANG Ming-yang, et al. Study on influence of seepage of metro tunnels in soft soil on the settlements of tunnels and ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(2): 243—247.
- [18] 许劼, 王国权, 李晓昭. 城市地下空间开发对地下水环境影响的初步研究[J]. 工程地质学报, 1999, 7(1): 15—19.
- XU Jie, WANG Guo-quan, LI Xiao-zhao. A preliminary research on potential effect of underground engineering on groundwater environment[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1999, 7(1): 15—19.
- [19] 许焯霜. 考虑地下构筑物对地下水渗流阻挡效应的地面沉降性状研究[博士学位论文 D]. 上海: 上海交通大学, 2010.