

密集高层建筑群的工程环境效应 引起地面沉降初步研究

唐益群^{1,2}, 崔振东^{1,2}, 王兴汉¹, 卢辰¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:地面沉降是常见的地质灾害之一。进入 20 世纪 90 年代以来, 工程环境效应诱发的地面沉降已经成为上海地面沉降的新趋势。本文对密集高层建筑群诱发的地面沉降叠加效应及其施工对周围环境的影响展开初步研究, 为控制密集高层建筑群诱发的地面沉降提供依据。

关键词: 高层建筑群; 工程环境效应; 地面沉降; 上海

中图分类号: P642.26; TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2007)02-0105-04

Preliminary Research on the Land Subsidence Induced by the Engineering Environmental Effect of Dense High-rise Building Group

TANG Yi-qun^{1,2}, CUI Zhen-dong^{1,2}, WANG Xing-han¹, LU Chen¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Land subsidence is one of typical geological disasters at present. From 1990's, the land subsidence induced by engineering environmental effect has become a new cause in Shanghai city. The replicating effect of land subsidence induced by the dense high-rise building group and the effect of building high-rise buildings on the environment near the site are preliminarily researched in this paper, which can offer reference to control the land subsidence induced by the dense high-rise building group.

Key words: High-rise building group; Engineering environmental effect; Land subsidence; Shanghai

0 引言

密集高层建筑群的工程环境效应引起地面沉降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, 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^[1-2]。

1 高层密集建筑群的地面沉降叠加效应

进入 20 世纪 90 年代, 上海以浦东开发开放为契机, 城市进入大规模发展建设时期。以浦东陆家嘴地区为例, 1990—1998 年共建成 114 栋高层, 总

收稿日期: 2007-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40372124)

作者简介: 唐益群(1952—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质、环境地质方面的教学与研究。

面积达 347 万 m^2 , 表 1 为部分高层建筑统计资料。在该地区 7.37 km^2 面积内, 高层建筑密度大, 建筑容积率。根据有关监测资料^[3-4], 同期的地面沉降量较 70 年代增长 40 倍, 较 80 年代增长 4 倍, 因此由高层建筑群引起的地面沉降效应明显。

表 1 陆家嘴地区部分高层建筑资料统计

建筑名称	建成 时间	高度 /m	层数	建筑面积 /万 m^2	桩基 持力层
金茂大厦	1998	420	88	29	⑨
第一八佰伴	1995	99	21	14.5	
上海证券大厦	1997	121	27	11.5	
国际金融大厦	2000	230	53	12	⑨
招商大厦	1994	186	39	7.5	⑦
上海国际航运大厦	1998	203.6	52	12	
上海浦东发展银行大厦	1996	150	7		
上海信息大楼	2002	288	41	10.3	⑨
上海中商大厦	1998	136.6	36	5.4	⑦
新上海国际大厦	1996	168	39	8	⑦

建筑物基底的附加应力不仅发生在基础之下, 而且会在基础以外相当大范围内扩散分布, 因此当建筑物相距较近时, 附加应力的叠加效应就十分明显, 与单一建筑引起的地面沉降相比, 密集建筑群周边的地面沉降也存在叠加效应。

1.1 附加应力的叠加计算

上海地区高层建筑以桩基础为主, 且大多采用长桩或超长桩, 以满足建筑的允许沉降量。根据明德林应力公式法, 在多个相邻建筑桩基础的共同作用下, 土层中(包括桩周土与桩底土)任意一点的竖向附加应力为各个建筑桩基础中每根桩的摩阻力和基底作用在桩间土的压力在该点处产生竖向附加应力的总和, 即

$$\Delta\sigma_a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^g Q_p(r, z) f_{pj} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^g Q_b(r, z) f_{bj} + \sum_{i=1}^n Q_s(r, z) p_{si} \quad (1)$$

式中 n 为相邻建筑的个数; g 为单个建筑桩基础的桩数(每个桩基础的桩数不一定相同); f_{pj} 表示第 j 根桩的侧阻力, f_{bj} 表示第 j 根桩的桩端阻力, p_{si} 表示基底作用在桩间土的压力; $Q_p(r, z)$ 为单位侧阻力在该点产生的附加应力; $Q_b(r, z)$ 为单位端阻力在该点产生的附加应力; $Q_s(r, z)$ 为单位地表荷载在该点产生的附加应力; z 为该点的埋深; r 为该点离桩身轴线的水平距离。

通过式(1)可以看出, 应力叠加的大小主要与以下因素有关: ①建筑群的密集程度, 相邻建筑的数量越多, 叠加效应越明显, 土层中应力越大; ②距建筑

群的水平距离, 离建筑群近的点, 叠加效应明显; ③建筑的荷重, 建筑群总的荷重大, 桩数多, 土层中的应力也大。根据土层中应力就可求得该处的地面沉降。沉降量除了与应力大小有关外还与土层的性质有关, 但是在相同土层条件下, 由于建筑群的应力叠加效应土层中的应力大于仅在单个建筑作用下的应力, 因此其沉降量也相应增大。

1.2 叠加效应影响范围

根据弹性半空间理论, 弹性体内的任一集中荷载, 其影响范围在理论上是无限的, 桩基础对周围土的影响范围理论上也是无限的。

Cooke^[5]根据单桩原位模型试验观测结果认为最大影响范围 $r_m = 10d$, 其中 d 为桩径。Randolph^[6]则建议单桩的影响范围 $r_m = 2.5L\rho_m(1-\nu)$, 式中 L 为桩长, ν 为土的泊松比, $\rho_m = G_{L/2}/G_L$, $G_{L/2}$ 、 G_L 分别为别为桩身中点和桩底处土的剪切模量。对于群桩基础的影响范围, 推测 $r_m = 2.5L\rho_m(1-\nu) + r_g$, r_g 相当于群桩基础等效圆面积的半径($r_g = \sqrt{A/\pi}$), 这公式表明群桩基础的影响范围与基础面积有关。楼晓明、刘建航等^[7]根据实测结果推算, 密集群桩的影响范围大致相当于 $r_m = L + r_g$ 。

根据剪切位移理论, 桩周土的剪切位移与桩中心距离 r 的自然对数成反比, 而桩端平面下土的变形与 r 成反比, 因此桩端以下土对桩端以上土的变形有约束作用, 使 r_m 值减小。群桩基础由于叠加效应, 桩端以下土的这种径向衰减将变得平缓, 因而上述约束作用减小, 影响范围 r_m 增大。而且在工作荷载下群桩基础的绝对变形值要比单桩大, 即使衰减曲率相同群桩基础的影响范围也要比单桩大。

同样对于密集的高层建筑群, 由于多个建筑的叠加效应, 其影响范围要比单个建筑群桩基础的影响范围要大。如果密集高层建筑群组成的区域面积为, 那么地面沉降的影响范围可写为

$$r_{mq} = L + r_{gq} \quad (2)$$

式中 $r_{gq} = \sqrt{A_q/\pi}$; L 为桩长。

1.3 工程实例分析

工程实例采用陆家嘴某大厦监测资料进行沉降影响分析。通过在距其 3、7、12、20、30、60 m 处布设专门的水准点, 进行了历时 15 个月的监测, 监测结果如 1 所示, 图 2 为该大厦 $s-t$ 曲线。

该大厦周边高层密集, 因而其周围地面沉降并非按距离等比例沉降, 而是存在明显突变(30 m 处的沉降反而较 20 m、40 m 处沉降小得多); 从影响

范围分析,其影响范围超过了2倍桩长,反映出高层建筑群对地面沉降影响的存在着叠加作用;从沉降趋势来看,沉降还在进一步发展,未见收敛趋势。

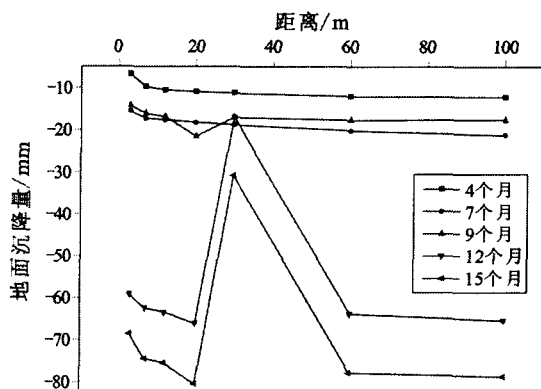


图1 大厦周围地面沉降曲线

Fig. 1 Ground settlement curves near a certain high-rise building.

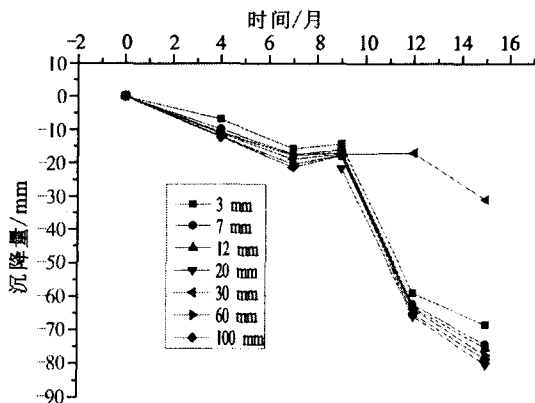


图2 大厦s-t曲线

Fig. 2 s-t curve of a certain high-rise building.

2 高层密集建筑基础施工对周边环境的影响

高层建筑基础施工包括桩基施工、深基坑施工及井点降水,对于密集的高层建筑群,基础施工不仅会对周围的地面造成影响,还会影响到邻近的建筑、管线。当多个建筑同时施工时,由于叠加效应,还会造成变形过大,诱发工程事故。

2.1 桩基施工的影响

由于打桩造成周围土体的移动,桩的种类不同,土质上的差异,打桩所造成的影响也有较大区别,同时与打桩方法、桩的间距、沉桩顺序有关。在软土中打桩,桩周土体中的原有水平平衡遭到破坏,产生非常高的超静孔隙水压力,且饱和粘土层的渗透系数很小,超静孔隙水压力消散较慢。当这种压力消散时

会使土产生沉降,危及相邻建筑物。软土中的长桩在水平方向上的影响有时可达到20~30 m以上^[8]。

打桩时的冲击所产生的振动,尤其一次一次地重复冲击,会使土体产生瞬时移动,使土体和建筑物产生共振反应,由此产生的动应力可以很大,从而导致邻近建筑物的损坏。

不同类型的桩排土量不同。排土量越大水平位移就越大,如管桩的排土量就大大小于实心桩,因而对相邻建筑物的影响也就小。

桩的平均密度的影响也很明显,单位面积上的桩越少,打桩时使相邻建筑物产生的移动也越小。

打桩顺序对打桩引起的移动的影响也是有区别的。由于打桩的挤密作用造成地基土的垂向隆起与水平位移较大,同时该处土变得更加密实坚硬,使后来打桩所产生的位移在各个方向上不尽相同。由于先打入的桩的保护作用较大的位移出现在尚未打桩的一侧,因此为尽可能减小相邻建筑物的移动应先打紧靠相邻建筑物的桩然后再打远离要保护建筑物处的桩。

2.2 深基坑施工的影响

高层建筑的地下部分开挖面积大、深度也大。根据统计,上海高层的基坑深度一般在10 m左右,个别会达到20~30 m,因而其影响的范围也大。开挖时,基坑周围土的总应力的降低,使土向开挖方向内移动,基坑底部土体向上移动。随着这些移动的产生基坑附近的土体产生侧移和沉降,因而影响其上方建、构筑物的安全。对于高压缩性软土上述情况就要严重得多,由于开挖所产生的最大位移和沉降通常为开挖深度的1%~2%,如失去底部的稳定性,则位移更大,会造成开挖深度2~3倍远的地方产生很大的沉降。

对于深开挖引起的地表沉降,设基坑宽度为 B ,开挖深度为 h ,挡土墙深度为 H ,如图3所示。经过大量现场实测和统计分析,有支撑挡土墙侧向位移曲线可用抛物线拟合^[9]。基坑开挖产生的地表沉降通常在距坑边一定距离 l 处达到最大下沉值 S_l 。地表沉降范围 L 可用(3)式表示:

$$L = H \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (3)$$

沉降曲线形态可用正态分布密度函数来描述。以最大下沉点 O 为坐标原点,则沉降可用式(4)表示:

$$S(x) = S_l e^{-\pi \frac{x^2}{r^2}} \quad (4)$$

式中 S_l 最大下沉值(mm); r 为下沉盆地主要影响半

径(m), $r = \eta(L - l)$; η 为主要影响半径系数, 一般当 $\varphi \leq 10^\circ$ 取 1.1, $\varphi > 10^\circ$ 取 1.2。

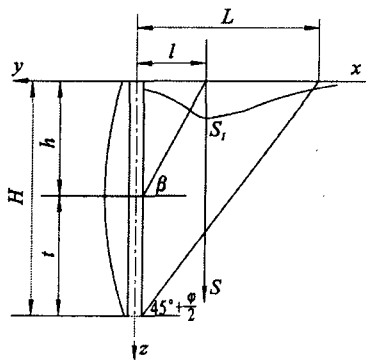


图3 深开挖引起的地表沉降

Fig. 3 Ground settlement induced by deeply digging.

当地下水位高时在水中开挖基坑十分困难, 必须降低地下水位。在软弱土层中降水, 由于地下水位的下降, 使土体中的含水量减少, 浮托力减小, 等于增加了附加荷载, 使土产生固结、压缩, 并在抽水影响半径范围内引起地面沉降, 影响邻近建筑、管线等。在该范围内土体中水平方向上不同部位孔压不同所产生的固结沉降、次固结沉降是不同的, 表现在地面垂向位移是不均匀的, 使建筑物基础和地面发生不均匀沉降, 有时是大量沉降, 使邻近建筑物产生倾斜。在降水过程中基坑边界处的平衡孔隙水压力产生了变化, 从而导致相邻土的移动, 严重时出现塌方, 流砂和管涌等。

降水漏斗的半径通常用库萨金的公式进行估算^[10]:

$$R = 2S_K \sqrt{Kh_0} \quad (5)$$

式中 R 为降水漏斗半径; S_K 为降水漏斗深度; K 为土层渗透系数; h_0 为初始地下水的深度。

在地下井点降水无大量细颗粒被地下水带走的情况下, 周边地面产生的沉降量可用分层总和法进行计算^[11]:

$$S_\infty = \sum_{i=1}^n \frac{a_{i(1-2)}}{1 + e_{0i}} \Delta P_i \Delta h_i \quad (6)$$

式中 S_∞ 为地面最终沉降量; $a_{i(1-2)}$ 为各土层的压缩系数; e_{0i} 为各土层的初始孔隙比; ΔP_i 为各土层因降水产生的附加应力; Δh_i 为各土层的厚度。

3 结论

上海城市基础设施建设迅猛发展, 旧区改造、新居住区成片开发, 大量高层、超高层建筑不断兴建, 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。高层建筑群造成的城区地面沉降的特点是距建筑物 1 倍基础宽度范围内的地面沉降速率大于建筑物本身的沉降速率, 尤以相邻建筑之间中心城区地表的沉降量最大。密集高层建筑群之间地表存在明显的应力叠加效应, 并使沉降量超过容许值, 从而带来不稳定因素。文中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作了初步研究, 为控制由密集高层建筑群引起地面沉降提供参考。

[参考文献]

- [1] 张阿根, 魏子新. 上海地面沉降研究的过去、现在与未来[J]. 水文地质工程地质, 2002, (5): 72-75.
- [2] 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.
- [3] 严学新, 龚士良等. 上海城区建筑密度与地面沉降的关系[J]. 水文地质工程地质, 2002, (6): 21-25.
- [4] 王兴汉. 软土地区高层建筑群的工程环境效应分析及地面沉降数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [5] Cooke R W. The settlement of friction pile foundations[J]. Foundation and Soil Technology BRE Building Research series 3, 1976.
- [6] Randolph M F, Wroth C P. An analysis of the vertical deformation of pile groups[J]. Geotechnique, 1979, 29(4).
- [7] 楼晓明, 刘建航, 等. 两个相邻高层建筑桩箱基础的共同作用分析[J]. 土木工程学报, 2002, 35(3): 55-60.
- [8] 周瀚, 徐春燕, 等. 基础施工对相邻建筑物的影响[J]. 建筑与预算, 2003, (3): 45-46.
- [9] 唐孟雄, 赵锡宏. 深基坑周围地表沉降及变形分析[J]. 建筑科学, 1996, (4): 31-35.
- [10] 李国维, 刘汉东, 等. 深基坑开挖引发的环境工程地质问题及其防治措施[J]. 华北水利水电学院学报, 1998, 19(4): 46-48.