

# 深基坑支护桩周边建筑物沉降分析\*

朱瑞钧<sup>1,2</sup>, 高谦<sup>1,2</sup>, 齐干<sup>3</sup>

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 3. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:**运用基坑周边土层沉降计算法对扬州某基坑周边建筑沉降进行理论计算,并将计算和实测沉降值进行分析比较,指出了计算与沉降值存在偏差的原因。在对建筑物沉降监测数据进行深入研究的基础上,总结出影响基坑周边建筑沉降的因素。最后,结合沉降监测数据和影响因素,详尽的分析其影响基坑周边建筑物沉降。由此得出一些有实际工程意义的结论,对合理的基坑支护设计具有现实指导意义。

**关键词:**深基坑; 沉降; 支护桩

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1006-7329(2006)02-0052-04

## Settlement Analysis on Building near Retaining Pile of Deep Foundation Pit

ZHU Rui-jun<sup>1,2</sup>, GAO Qian<sup>1,2</sup>, QI Gan<sup>3</sup>

(1. The Key Laboratory of the Ministry of Education for High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, P. R. China; 2. Civil and Environmental Engineering School, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 3. Mechanics and Civil Engineering School, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, P. R. China)

**Abstract:** The building settlement near a foundation pit project in Yanzhou is calculated by using calculation method related to settlement of the soil near a foundation pit. Comparing and analyzing calculated settlement values with measured settlement, the reason for the gap between theoretically calculated values and measured settlement values is pointed out. On the foundation of careful research and analysis of the measured building settlement values, the factors influencing the settlement of building near the foundation pit are summarized. Finally, according to practical measured values and influencing factors, how the settlement of building near the foundation pit is influenced was carefully analyzed. A conclusion that has practical role in Engineering is presented, which can serve reasonably for instructing foundation pit retaining design.

**Keywords:** deep foundation pit; settlement; retaining pile

城市市区中进行建筑施工时,建筑物及地下管线密集并紧邻基坑,施工时必须确保居民住宅、地下管线及周边交通干线的安全,因而对基坑开挖和支护方案提出了较为严格的要求<sup>[1]</sup>。基坑开挖后周边土体处于临空状态,土体中原有应力开始释放,土体将向坑内一侧缓慢滑移,直接影响到周边土体的整体稳定性和支护结构的变形,有时甚至会带来灾难性的影响。由于开挖过程土体受到不同程度的扰动,土体变得松软压缩性增大,进而引起周边建筑物新的沉降。若基坑开挖过程布置有井点降水,因地下水位降低孔隙水压力消散,导致原有土层有效应力增加,进而引起周边建筑物新的沉降。特别是在淤泥类软弱土分布较厚地区,由于土体较软弱流变性强,基坑开挖很容易影响到

周边建筑的安全稳定。因此基坑施工过程要同时保证基坑本身和周边建筑物的安全与稳定。支护结构的设计不仅要满足强度控制要求,基坑内外变形也要得到严格控制。基坑开挖的场地地质条件相当复杂,基坑工程是涉及诸如场地环境因素、施工技术因素、岩土性状的力学因素在内的一项系统工程。合理的设计方案既可缩短工期,又可提高工程质量<sup>[2]</sup>。下面结合工程实例进行具体分析。

### 1 深基坑周边土层沉降原理及计算方法

基坑开挖卸荷,使应力场发生变化,引起基坑周边地面沉降。基坑开挖降水措施引起的地下水渗流,形成渗流场<sup>[3]</sup>。基坑施工涉及到基坑开挖和布置井点

\* 收稿日期: 2005-11-15

作者简介: 朱瑞钧(1976-),男,广西桂林人,博士生,主要从事岩土工程研究。

降水。两者均会对周边建筑物沉降造成影响,因此沉降计算主要包括基坑开挖后引起的沉降和井点降水造成的周边土层沉降。

### 1.1 深基坑开挖引起周边土层沉降

深基坑开挖过程,周边土体的滑动剪切破坏将导致土层沉陷。地面的沉降与支撑模式、支护材料及周边土性质等因素有关,可采用土体损失理论来计算周边建筑物的沉降<sup>[4]</sup>。基坑周边土层沉降如图1所示。

假定支护桩后某一部位  $x$  的沉降量为:

$$S = S_{\max} e^{-(x/\sqrt{2}a)^2} \quad (1)$$

式中:  $S_{\max}$  为地面最大沉降量;  $a$  为沉降槽特征宽度,  $a = H / \left[ \sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \right]$ ;  $\varphi$  为土体内摩擦角;  $H$  为基坑开挖深度;  $x$  为桩后某点与支护桩的距离。

$$S_{\max} = V_0 \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) / H \quad (2)$$

式中:  $V_0$  为支护桩后土体损失。

$V_0$  包括支护变形引起土体损失  $S_{w1}$  和坑底土体隆起引起土体损失  $S_{w2}$  两部分。

$$S_{w1} = AH^3/3 + BH^2/2 + CH \quad (3)$$

$$S_{w2} = B_j(0.5H + 0.04H^2)/300 \quad (4)$$

式中:  $B_j$  为基坑宽度;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为回归系数,可按式计算:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n z_i & \sum_{i=1}^n z_i^2 \\ \sum_{i=1}^n z_i & \sum_{i=1}^n z_i^2 & \sum_{i=1}^n z_i^3 \\ \sum_{i=1}^n z_i^2 & \sum_{i=1}^n z_i^3 & \sum_{i=1}^n z_i^4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n z_i \\ \sum_{i=1}^n z_i y_i \\ \sum_{i=1}^n z_i^2 y_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $n$  为计算点数;  $z_i$  为第  $i$  点到地面的距离;  $y_i$  为第  $i$  点的位移,可按弹性地基杆系有限元法计算。

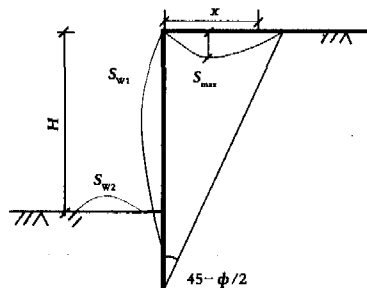


图1 基坑开挖后引起周边土层沉降

### 1.2 深基坑井点降水引起周边土层沉降

基坑降水引起基坑周边地下水位下降,形成以抽水井点为中心的降水漏斗,由于基坑周边土层地下水位降低,土体中的孔隙水压力消散,直接导致土体中有效应力增加,在原有土层中产生新的沉降,可按式进

行沉降计算。

$$S_i = \Delta\delta_i h_i / E_i \quad (6)$$

式中:  $S_i$  为基础下第  $i$  层土的沉降;  $h_i$  为基础下第  $i$  层土的厚度;  $E_i$  为基础下第  $i$  层土的压缩模量;  $\Delta\delta_i$  为基础下第  $i$  层土的有效应力增量。

$$\Delta\delta_i = r_w (h_1 - h_2) / 4 \quad (7)$$

式中:  $h_1$  为降水前土体的水头高度;  $h_2$  为降水后土体的水头高度。

若基础面以下有  $n$  个含水层受降水影响时,则地基因降水引起的总沉降为:

$$s = \sum_{i=1}^n s_i \quad (8)$$

## 2 压密注浆在深层搅拌桩支护中的应用

工程地下水位为  $-1.5$  m,埋深较浅,开挖土层含水量大、渗透性强。为确保基坑施工开挖顺利进行,要求支护桩具有良好的防渗止水效果,为此在桩间进行了压密注浆处理。在高压喷射作用下水泥浆液劈裂并渗入周围土粒,并与周围土粒发生一系列物化固结反应。通过压密注浆支护桩体搭接更牢固防渗更严密,周围土体得到固结稳定性增强,避免开挖过程周边建筑产生过多沉降变形。同时压密注浆还具有防渗隔水作用,经压密注浆土体的抗渗透性大大增强,可有效减小因降水土层中有效应力大幅度增加而导致周边建筑过多沉降。本工程压密注浆的具体设计要求为:

- 1) 注浆液采用高压注浆机喷射,注浆长度同桩长,注浆压力不小于  $0.6$  MPa,注浆孔径设计为  $200$ 。
- 2) 注浆浆液固化剂采用  $425\#$  的普硅,水灰比为  $0.6$ 。水泥掺入比分别为北侧采用  $a_w = 15\%$ ,南侧和东侧采用  $a_w = 12\%$ 。

3) 工程因地下水埋深浅,土体含水量大,施工中优先考虑采用四搅喷工艺。

4) 为确保成型后桩的搭接长度大于  $20$  cm,及保证止水帷幕的严密性,搅拌下沉速度控制在小于  $1$  m/min,提升速度为  $0.6 \sim 0.7$  m/min,同时要多次重复搅拌。

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

扬州某办公楼位于城南区,建筑面积  $4\ 800$  m<sup>2</sup>,上部设计  $10$  层,下设  $1$  层地下室,建筑下部采用板筏基础,基坑开挖深度为  $6.3$  m。基坑开挖深度范围内主要分布有杂填土和粉土,土体的物理力学指标见表1。本工程地下水位为地面以下  $1.5$  m,埋深较浅,紧邻基坑四周分布有建筑物。设计单位经综合考虑,此基坑围护采用深层搅拌桩支护方案。桩径设计为  $\varnothing 600$ ,桩

的入土深度 10.0 m。基坑北侧采用双排桩布置,桩间搭接 20 cm。南侧和东侧采用单排桩布置,桩间搭接 20 cm。为确保支护桩体止水严密,在成桩间进行了压密注浆处理,注浆液中掺入的固化剂采用 425# 普硅,水泥掺入比分别为北侧采用  $a_w = 15\%$ ,南侧和东侧采用  $a_w = 12\%$ 。基坑开挖前在周围布置了井点降水以确保基坑施工开挖顺利进行。

表1 土体的物理力学指标

层号	地层名称	土层厚度 /m	密度 $\rho$ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	内聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	含水量 $w$ /%
1	杂填土	2.85	19.0	3	5	21.6
2	粉土	3.62	18.5	12.2	24	31.1
3	粉砂	3.79	18.6	11.7	22.8	30.5
4	粉质粘土	1.78	18.4	11.5	21.7	34.7
5	粉砂	7.65	18.5	14.2	23.5	29.8
6	粉砂夹粉土	11.5	18.7	6.9	22.3	32.2

### 3.2 周边建筑沉降数据监测

实际工程中,加强沉降监测十分必要。通过实测数据,可验证计算方法及计算参数选取的可靠性,为完善设计理论提供宝贵资料<sup>[5]</sup>。为全程了解基坑周边建筑物的沉降情况,在基坑开挖施工前后对周侧楼房进行了为期 4 个月的沉降观测,每隔 15 d 进行一次外业数据观测。表2 为工程详细沉降观测数据。

表2 基坑周边建筑物累积沉降观测值/cm

观测时间	点号							
	7	8	A	C	23	24	5	10
15 d	1.11	1.59	0.41	0.33	1.18	0.40	3.35	2.75
30 d	1.41	1.80	0.74	0.74	1.33	0.43	3.82	3.32
45 d	1.50	1.85	0.66	0.68	1.82	0.85	3.90	3.36
60 d	1.85	2.25	0.84	1.04	2.57	1.74	3.94	3.88
75 d	2.34	2.69	1.16	1.35	3.49	2.84	4.13	4.29
90 d	3.08	3.46	1.49	1.88	4.18	3.77	4.23	4.65
105 d	3.13	3.97	1.70	2.06	4.73	4.81	4.32	4.73
120 d	3.55	4.33	1.80	2.35	5.04	5.13	4.38	4.96

### 3.3 基坑周边建筑物沉降计算

运用上述基坑周边土层沉降计算方法对基坑周边建筑物进行沉降计算,并将计算值与实测沉降值进行对比,两者数值比较见表3。

表3 计算值与沉降观测值比较

部位	7	8	A	C	23	24
计算沉降值/cm	4.17	4.17	4.31	4.31	7.67	7.67
观测沉降值/cm	3.55	4.33	1.80	2.35	5.04	5.13
偏差值/cm	0.62	-0.16	2.51	1.96	2.63	2.54

### 3.4 实测和计算沉降值偏差分析

由表3 可见,周边建筑物实际沉降比计算沉降值普遍偏小,结合工程实践发现,有以下几方面因素造成这一结果。首先计算所取用的水位下降值,是以降水井为中心的漏斗状理想水位下降值。而工程中进行了桩间压密注浆处理,水泥浆液在高压喷射作用下劈裂

并渗入周围土体,使周边土体得到固结抗渗性增强,有效阻止了地下水位下降,因此引起的沉降小于理论计算值。其次压密注浆使周边土体得到较好的保护,经压密注浆周边土体得到固化支护桩后土体的整体稳定性得到增强,基坑开挖后土体损失将比未采取压密注浆明显减小,由此引起的周边建筑物沉降要小得多。表3 比较表明,工程所采取的压密注浆措施起到了很好的工程实际效果。

## 4 基坑周边建筑沉降分析

结合工程实践,对基坑周边建筑沉降监测数据进行分析发现,影响基坑周边建筑物沉降诸因素中,距基坑远近、支护桩布置情况、时间效应、压密注浆影响最为明显。以下结合实测数据对其进行具体的分析。

### 4.1 基坑不同距离处建筑物沉降分析

基坑开挖后周边土体出现临空状态,紧靠基坑侧土体将向临空方向缓慢滑移,直接引起土体发生剪切破坏,土体变得松软压缩性增大,地基在原有荷载作用下产生新沉降。距基坑越远土体受扰动程度越轻,土体将保持相对较好的整体稳定性。再者降水井靠近基坑布置,距基坑越近地下水位下降越多,有效应力增加越大,因此紧邻基坑建筑容易产生更大沉降。图2 中,A、C 测点距基坑 7.50 m,最大沉降量 2.35 cm。23、24 测点距基坑 3.0 m,最大沉降量 5.13 cm,24 测点沉降量是 C 测点的 2 倍多,可见,距基坑不同距离处建筑物沉降差别很明显。图2 可见,距基坑越近沉降增长越快,45~120 d 内 24 测点沉降量增加了 4.28 cm,而 A 测点沉降量只增加了 1.14 cm,相对要慢得多。可见距基坑远近是影响周边建筑物沉降的重要因素。

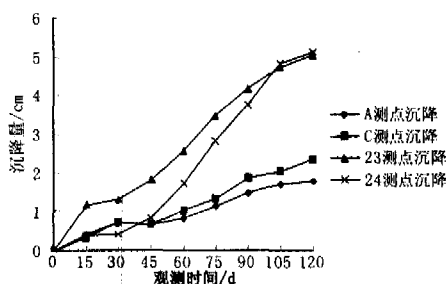


图2 不同距离处建筑物沉降曲线

### 4.2 时间效应影响周边建筑物沉降分析

沉降监测资料表明,支护墙体和周围软土地层的变形随时间发生变化,具有明显的时效性<sup>[6]</sup>。图3 可见,前 45 d 周边建筑物沉降很缓慢,45~120 d 沉降明显加快并逐渐达到稳定状态,这主要是基坑开挖时间内还没有立刻影响到周边土体,土体的滑移蠕变和剪切破坏有个滞后期。基坑开挖后土体出现临空状态,土体中的应力开始释放裂隙逐步扩张,之后土体缓慢

的发生滑动剪切破坏,这些变化都有个时间过程。C测点前45 d沉降量仅为0.68 cm,45~120 d内沉降量增加了1.67 cm,而24测点更为明显,45~120 d内沉降量增加了5倍多。由此可见基坑周边建筑物沉降过程具有明显的时效性。

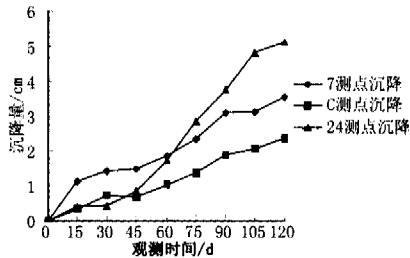


图3 不同时间建筑物沉降曲线

#### 4.3 支护桩不同布置周边建筑物沉降分析

支护结构本身是很好的挡土止水屏障,可以确保邻近建筑与周围地下管网的安全使用<sup>[7]</sup>。支护桩主要起到稳定周边土体作用,有效控制周边土层沉降的关键是合理布置支护桩。工程中,7、8点侧布设的是单排桩,7、8点的最大沉降分别为3.55 cm、4.33 cm, A、C测点沉降量小增长也较平缓,最大沉降分别为1.80 cm、2.35 cm。由于A、C点侧布设的是双排桩,周边土体受保护效果比单排桩好,因此引起的沉降比7、8点侧小。图4可见,前30 d内7、8测点沉降明显快于A、C测点,主要是开挖阶段双排支护桩保护周边土体效果比单排桩更好。支护桩不同布置周边建筑沉降差别很明显的表现出来。

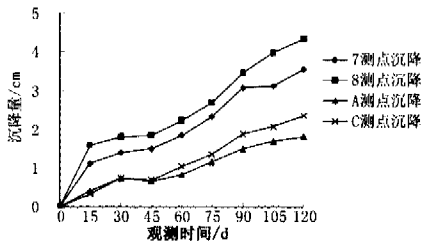


图4 支护桩不同布置建筑物沉降曲线

#### 4.4 压密注浆影响周边建筑物沉降分析

为保证支护桩间搭接牢固与防渗严密,本工程进行了桩间压密注浆处理。通过高压喷射,水泥浆液与周边土粒产生一系列物理化学固化反应<sup>[8]</sup>。经过压密注浆,土体得到固结抗渗性能提高,周边土体的稳定性得到加强。同时,压密注浆的防渗隔水作用,有效地减小了因降水土层中有效应力过多增长而导致的沉降。工程中固化剂采用425#普硅,水灰比为0.6。A、C点侧采用水泥掺入比 $a_w = 15%$ ,5、10点侧采用水泥掺入比 $a_w = 12%$ ,它们距基坑距离很接近,但沉降量差别较大。图5中,10测点最大沉降量为4.96 cm,而A测点最大沉降量仅为1.80 cm。图5可见,采用同一

水泥掺入比的两组曲线沉降量很接近,表明采用同一水泥掺入比防渗隔水及加固效果大致相同。5、10测点前15 d沉降增长很快并达到稳定状态沉降的近50%,而A、C测点要缓慢得多。由此可见,不同的水泥浆液配置对周边建筑物沉降有较大的影响。

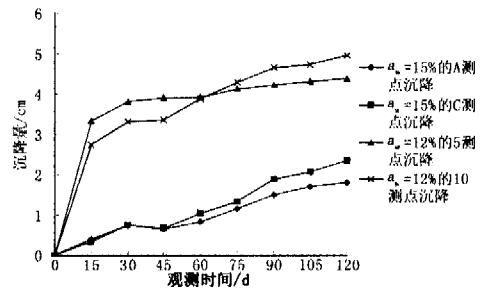


图5 压密注浆液不同配置建筑物沉降曲线

## 5 结论

1) 基坑开挖过程必然要扰动周边土体,土体的性状及整体稳定性发生变化,直接影响到基坑的稳定,进行合理的基坑支护设计显得尤为重要。

2) 基坑周边建筑物沉降实测数据收集是很重要的,其为合理的基坑支护设计及准确的预测分析周边建筑沉降提供数值依据。

3) 通过对周边建筑物实测沉降数据分析比较可知,支护桩布置情况、距基坑距离、时间效应、压密注浆是影响基坑周边建筑物沉降的重要因素,基坑支护设计中一定要合理把握,以期达到更好的支护效果。

## 参考文献:

- [1] 孙凯,许振刚,刘庭金,等.深基坑的施工监测及其数值模拟分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(2):293-298.
- [2] 张信贵,吴恒,易念平,等.深基坑支护工程方案推理机制与优化设计[J].岩石力学与工程学报,2004,23(5):871-876.
- [3] 何世秀,胡其志,庄心善.渗流对基坑周边沉降的影响[J].岩石力学与工程学报,2003,22(9):1551-1554.
- [4] 蒋国盛,李红民,管典志,等.基坑工程[M].武汉:中国地质大学出版社,2000.
- [5] 陆培毅,顾晓鲁,钱征.天津港务局综合业务楼深基坑支护与监测[J].岩土工程学报,1999,21(3):323-327.
- [6] 夏冰,夏明耀.上海地区饱和软土的流变特性研究及基坑工程的流变时效分析[J].地下工程与隧道,1997,17(3):11-18.
- [7] 恩锋,孙友宏,许振华,等.深层水泥土搅拌桩在基坑支护中的应用[J].岩土力学,2003,24(S1):90-93.
- [8] 陈立人,孙健.某深基坑支护工程止水失效及其对策[J].江苏建筑,1994,(2):18-20.