

# 软土深基坑开挖地表沉降评估方法研究

聂宗泉<sup>1,2</sup>, 张尚根<sup>3</sup>, 孟少平<sup>1</sup>

(1. 东南大学, 江苏 南京 210096; 2. 中铁四局集团, 安徽 合肥 230023; 3. 解放军理工大学, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 在已有研究成果和对大量实测资料分析处理的基础上, 就柔性支护软土深基坑坑周地表位移场的大小及分布规律进行了进一步研究。根据上海地区深基坑施工实践, 给出了软土深基坑柔性围护墙后偏态分布的地表竖向位移表达式, 并通过若干基坑工程实例分析, 证明提出的墙后偏态分布地表沉降表达式的有效性和实用性。

**关键词:** 深基坑; 偏态分布; 地表沉降; 评估方法

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)08-1218-06

**作者简介:** 聂宗泉(1965-), 男, 安徽合肥人, 博士, 高级工程师, 主要从事地下结构工程研究。E-mail: nzq1965@sohu.com。

## Surface settlement of deep foundation pits by excavation

NIE Zong-quan<sup>1,2</sup>, ZHANG Shang-gen<sup>3</sup>, MENG Shao-ping<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. No.4 Chinese Railway Bureau Group Co., Ltd., Hefei 230023, China; 3. PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Based on a great deal of monitored data of surface settlement for deep foundation pits, a new fitting curve of surface settlement according to the decentration distribution density function was presented, and the formula of surface settlement which might result in deformation of braced structures and settlement of foundation pits in the course of excavation was deduced. It might be helpful for the settlement prediction of practical projects on soft foundation pits.

**Key words:** deep foundation pit; decentration distribution; surface settlement; evaluation method

## 0 引言

随着城市发展, 在密集建筑群与管线纵横交错的复杂的环境中进行地铁、人防、高层建筑地下室等地下工程施工的情形越来越普遍, 而深基坑施工必然会对已有邻近基坑建筑物与市政管线等设施产生不良影响, 深基坑开挖引起的周围地表沉降问题<sup>[1-2]</sup>已越来越受到重视。变形控制及环境保护已成为在建筑物及市政设施密集地区进行深基坑施工时所必须考虑的主要方面之一。为了保护临近基坑的建筑物、市政管线等设施, 需要进一步探索因深基坑开挖引起的周边地层移动规律, 以便更为准确地预测建筑物等所产生的差异沉降, 从而预测深基坑开挖对建筑物等的影响程度。因此确定由于基坑开挖所引起的地表沉降具有重要的现实意义, 它是制定挡墙水平位移控制指标和复核建筑物等安全度的一个关键环节。

目前基坑开挖地面沉降估算方法大致可分为经验法和半理论半经验法。

(1) 经验法中, Peck 曲线法影响比较大, 应用也比较广。目前, 我国现行基坑设计规范基本采用这种方法。该曲线是 Peck 根据芝加哥、挪威奥斯陆等地

现场沉降观测资料提出的在不同土层中地表沉降与距离之间的经验关系曲线, 如图 1 所示。并建议沉降影响范围为 2~4 倍基坑开挖深度。如果沉降很小, 属于图中 I 区, 则在墙后 2 倍开挖深度距离内可以觉察到位移; 如果沉降大到属于 II 区, 则该距离可以增加到大约 4 倍开挖深度。该曲线基本上能反映不同开挖深度下的地面沉降。但在反映不同土质的沉降大小上(仅将土分为 3 类) 就略显粗糙。

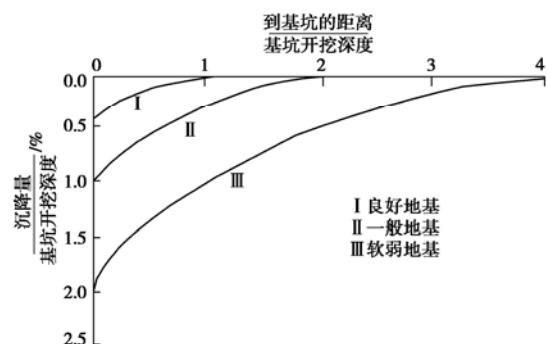


图 1 坑周地表沉降 Peck 曲线

Fig. 1 Peck curves of surface settlement

(2) 半理论半经验法中, 以“日本道路工程规范”方法最具代表性, 该方法假定支护结构的变形前后所围成的面积  $S_p$  与地面沉降曲线与原地面所围成的面积  $S_w$  相等 ( $\varphi'$  为土体的内摩擦角,  $\delta$  为地表最大沉降), 再根据支护结构的变形值, 来推求地面沉降大小, 如图 2。但由于各种因素影响,  $S_p$  与  $S_w$  在很多情况下并不相等, 甚至还相差很大。

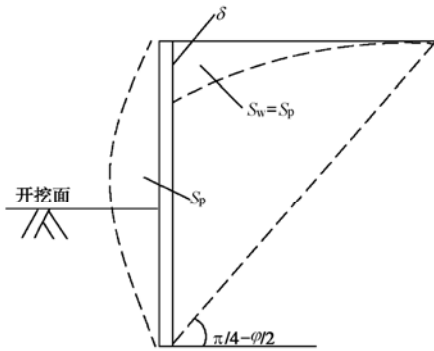


图 2 “日本道路工程规范”地表沉降计算示意

Fig. 2 Settlement calculation according to “Japanese code for highway engineering”

侯学渊等<sup>[3]</sup>在长期的科研与工程实践中, 参照盾构法隧道地面沉降 Peck 和 Schmidt 公式, 借鉴三角形沉降公式的思路提出了基坑地层损失法概念。地层损失法依据墙体位移和地面沉降二者的地层移动面积相关的原理, 求出地面垂直位移即地面沉降。根据实践经验提出 3 条假设。

(1) 对于柔性板桩墙, 插入深度较浅, 插入比  $h_d/h < 0.5$  ( $h_d$  为插入深度,  $h$  为开挖深度) 最大地表沉降量要比最大墙体位移量大。

(2) 对于地下连续墙、插入较深的 ( $h_d/h > 0.5$ ) 柱列式灌注桩墙等, 墙体水平位移  $\delta_{hmax}$  约为墙后地表沉降  $\delta_{vmax}$  的 1.4 倍, 即  $\delta_{hmax} \approx 1.4\delta_{vmax}$ 。

(3) 地表沉降影响范围为基坑开挖深度的 1.0~3.0 倍。并根据上海地区基坑工程实测资料分析, 提出墙后地面沉降曲线可表示为

$$\delta(x) = a \left[ 1 - \exp\left(\frac{x+x_m}{x_0} - 1\right) \right] \quad (1)$$

式中,  $x_0$  为地表沉降影响范围,  $x_m$  为墙后最大沉降点至基坑边沿距离。

然而, 先前的许多经验、半经验公式都是基于早先的基坑支护结构 (如各式板桩或柱列式桩加横隔板围护) 及施工工艺总结得到的。但是, 随着施工技术的进步及新型围护结构的发展, 现阶段软土深基坑中常采用刚度相对较大的挡土结构 (如地下连续墙、灌注桩或钻孔咬合桩等), 而且坑底常常采取注浆加固以

及对支撑施加预应力等措施, 相对而言其墙后地表沉降较小。因此, 基于目前基坑围护结构及施工现状的地表沉降规律研究具有理论及现实意义。

在前人研究的基础上, 笔者在对上海、南京、天津等多个深基坑沉降实测资料整理、分析的基础上, 结合数理统计原理, 提出了按偏态分布<sup>[4]</sup>密度函数拟合基坑周围地表沉降曲线的方法, 并导出了软土地区深基坑开挖引起地表沉降的估算公式。通过若干基坑工程实例计算与实测地表沉降的比较分析, 验证了本文方法的有效性。

## 1 基坑开挖地表沉降评估方法

### 1.1 沉降计算模型建立

为了能够估算和预测基坑开挖引起的周围地表沉降, 根据对上海、天津等多个深基坑开挖引起地表沉降实测曲线的拟合分析, 并借用地层损失法的概念建立地表沉降计算模型。图 3 为计算模型简图。计算模型假定以下 3 点。

(1) 地表沉降曲线为偏态分布

$$v(x) = \frac{S_w}{\sqrt{2\pi wx}} e^{-\frac{\left[\ln \frac{x}{2x_m}\right]^2}{2w^2}} \quad (2)$$

式中  $v$  为墙后任一点地表沉降量 (mm);  $x$  为待求沉降点距坑边距离 (m);  $x_m$  为最大沉降点距坑边距离 (m), 对于坑周无超载软土基坑可取  $0.5 \sim 0.7h$ ;  $S_w$  为沉降曲线包络面积 ( $m \cdot mm$ ), 可取 (0.8~1.2) 倍支护结构侧移曲线包络面积;  $w$  为经验系数, 软土基坑可取  $0.60 \sim 0.70$ 。

(2) 最大沉降点位置确定

假定最大沉降点位置和基坑开挖深度成比例关系, 即

$$x_m = \alpha h \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为比例系数。根据经验, 当插入比  $h_d/h \leq 0.5$  时,  $\alpha$  可取  $0.5 \sim 0.6$ ; 当插入比  $h_d/h > 0.5$  时,  $\alpha$  可取  $0.6 \sim 0.7$ 。

(3) 沉降曲线包络面积  $S_w$  与支护结构变位曲线包络面积  $S_p$  之比<sup>[5]</sup>

设  $S_w$  和  $S_p$  存在:

$$S_w = \beta S_p \quad (4)$$

式中,  $\beta$  为比例系数。根据统计分析结果及经验, 当插入比  $h_d/h \leq 0.5$  时,  $\beta$  可取  $1.0 \sim 1.2$ ; 当插入比  $h_d/h > 0.5$  时,  $\beta$  可取  $0.8 \sim 1.0$ 。

### 1.2 计算方法

(1) 支护结构变位曲线包络面积  $S_p$  计算

支护结构变位可采用弹性支点法计算或通过实测

得到, 在计算支护结构变位曲线包络面积  $S_p$  之前, 必须先对这些计算或实测点位移数据进行拟合。一般情况下, 任何函数在一定区域内都可用多项式任意逼近, 且在因变量与自变量之间函数关系不明确时, 采用多项式逼近常可得到较好的结果。

设支护结构沿基坑深度方向若干计算或实测位移点坐标为  $z, u$ , 则支护结构的侧向位移拟合曲线可表示为

$$u(z) = a_0 + a_1z + a_2z^2 + \dots + a_nz^n \quad (5)$$

式中,  $n$  为阶数,  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  为待定系数。通常情况下,  $n \leq 5$  时, 即可对位移曲线进行较好的拟合。

根据最小二乘原理, 可获得求解  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  多项式系数的  $n+1$  个方程组:

$$\begin{bmatrix} m & \sum_{i=1}^m z_i & \dots & \sum_{i=1}^m z_i^n \\ \sum_{i=1}^m z_i & \sum_{i=1}^m z_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^m z_i^{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^m z_i^n & \sum_{i=1}^m z_i^{n+1} & \dots & \sum_{i=1}^m z_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m u_i \\ \sum_{i=1}^m z_i u_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^m z_i^n u_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $z_i$  为第  $i$  点深度坐标,  $u_i$  为第  $i$  点侧向位移计算值或实测值,  $m$  为单元节点个数。将其代入式 (6) 即可求得系数  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  的值。

已有的研究表明, 支护结构侧向位移的分布规律可按抛物线来考虑, 即

$$u(z) = a_0 + a_1z + a_2z^2 \quad (7)$$

若已知支护结构顶点坐标  $(0, a_0)$  和极值点  $(z_m, u_m)$ , 则由式 (7) 可得

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= -\frac{2(a_0 - u_m)}{z_m} \\ a_2 &= \frac{a_0 - u_m}{z_m^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

支护结构侧向位移曲线围成的面积为

$$S_p = \int_0^H u(z) dz = H \left( a_0 + \frac{1}{2} a_1 H + \frac{1}{3} a_2 H^2 \right) \quad (9)$$

式中,  $H$  为支护结构高度, 将式 (8) 代入式 (9) 即可求得支护结构侧向位移曲线包络面积。

(2) 地表沉降估算

将式 (3)、(4) 代入式 (2) 可得

$$v(x) = \frac{\beta S_p}{\sqrt{2\pi wx}} e^{-\frac{[\ln \frac{x}{2\alpha h}]^2}{2w^2}} \quad (10)$$

已知  $h$ , 由插入比确定系数  $\alpha, \beta$ , 再根据支护结构计算或实测位移曲线求得的  $S_p$ , 由式 (10) 即可求得基坑周围地表任一点  $x$  处的沉降量  $v(x)$ 。

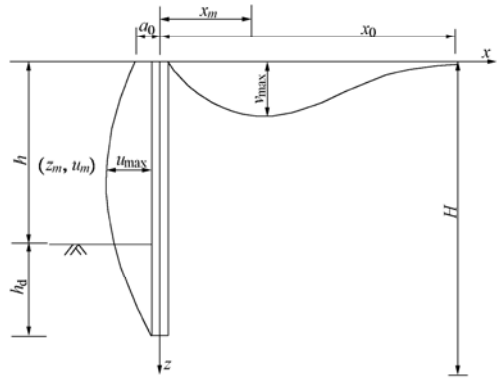


图3 基坑开挖引起地表沉降计算简图

Fig. 3 Calculation of surface settlement induced by deep excavation

## 2 基坑开挖地表沉降实例分析

### 2.1 实例分析1

上海地铁 M8 线延吉中路站位于上海市杨浦区, 车站外轮廓尺寸为  $472.9 \text{ m} \times 18.8 \text{ m}$ , 车站标准段为双层单柱双跨箱型钢筋混凝土结构。车站中心覆土厚约  $2.5 \text{ m}$ , 标准段底板埋深  $14.72 \text{ m}$ 。围护结构采用  $0.8 \text{ m}$  厚地下连续墙, 兼作使用阶段的主体结构侧墙。C28-1 测点附近标准段基坑开挖深度  $h=15.3 \text{ m}$ , 沿深度方向设 4 道钢管支撑; 其中第一道为  $\Phi 580 (t=12 \text{ mm})$  钢管支撑, 其余三道为  $\Phi 609 (t=16 \text{ mm})$  钢管支撑。连续墙总高度  $H=27 \text{ m}$ , 其中入土深度  $h_d=11.7 \text{ m}$ , 插入比  $h_d/h=0.76$ , 表 1 为 C28-1 测点连续墙实测水平位移, 其中墙顶实测位移  $a_0=0.14 \text{ mm}$ , 该处连续墙最大水平位移点为  $(z_m=15.0 \text{ m}, u_m=55.71 \text{ mm})$ 。

将已知的  $a_0, z_m, u_m$  代入式 (8) 可解得:  $a_1=7.409, a_2=-0.247$ 。

将  $a_0, a_1, a_2$  代入式 (9) 求得  $S_p=1083.8 \text{ mm} \cdot \text{m}$ 。

根据连续墙插入比取  $\alpha=0.65, \beta=0.9$ , 按经验取  $w=0.65$ , 将各参数代入式 (10) 可得

$$v(x) = \frac{1500.6}{\sqrt{2\pi x}} e^{-\frac{[\ln \frac{x}{19.89}]^2}{0.845}} \quad (11)$$

表2给出了基坑周边地表若干点实测沉降量和按式 (11) 计算沉降量; 表3则给出了相同地表范围计算沉降曲线包络面积和实测沉降曲线包络面积以及计算与实测最大沉降量的比较; 图4为实例1计算与实测地表沉降曲线比较。表3表明, 计算沉降和实测沉降有一定差异, 计算沉降曲线包络面积约比实测沉降曲线包络面积小24.2%, 最大计算沉降量也比最大实测沉降量约小19.3%。因为该测点附近为钢筋加工区, 地面堆载、车辆碾压等现场施工因素可能是引起这种差异的一个原因。但图4表明, 计算和实测曲线最大沉降点

表 1 C28-1 测点处连续墙实测水平位移

Table 1 Lateral displacement of retaining wall at C28-1

<i>z</i> /m	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	15.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0
<i>u</i> /mm	0.14	5.29	10.58	16.65	24.81	35.35	45.84	54.10	55.71	55.23	50.54	39.56	28.50	15.26

表 2 实例分析 1 计算与实测沉降量

Table 2 Calculated and monitored settlements of project No. 1

<i>x</i> /m	0.5	6.0	11.8	13.0	15.0	17.8	23.8	29.8	35.8	38.0	42.0	50.0	55.0	60.0
计算值/mm	0.0	18.3	36.6	37.2	36.3	33.2	24.2	16.6	11.1	9.5	7.4	4.4	3.2	2.3
实测值/mm	—	29.5	43.1	—	—	37.6	26.7	18.8	10.2	—	—	—	—	—

表 3 实例分析 1 地表最大沉降量及沉降曲线包络面积计算值与实测值比较

Table 3 Maximum settlement and comparison between calculated and monitored values of project No. 1

$S_s$ /(m·mm)	$S_j$ /(m·mm)	$(S_j-S_s)/S_s$	$v_s$ /(mm)	$v_j$ /(mm)	$(v_j-v_s)/v_s$
876.3	759.9	-13.3%	43.1	37.2	-13.7%

注:  $S_s$  为实测沉降曲线包络面积,  $S_j$  为计算沉降曲线包络面积,  $v_s$  为实测最大沉降量,  $v_j$  为计算最大沉降量。

位置基本一致, 从整体上看, 计算和实测沉降曲线形态类似。

积和实测沉降曲线包络面积以及计算与实测最大沉降量的比较。

由表 5 可以看出, 实例 2 中计算沉降和实测沉降符合得很好, 计算沉降曲线包络面积仅比实测沉降曲线包络面积小 0.7%, 计算最大沉降量也只比实测最大沉降量大 2.9%。图 5 表明, 计算和实测曲线基本吻合。

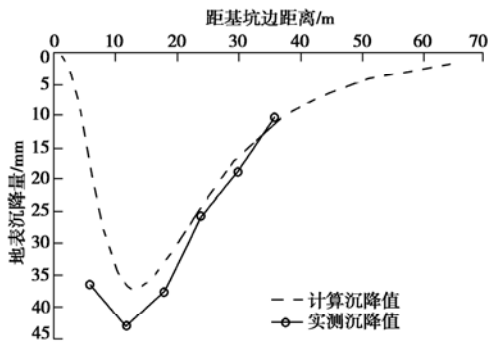


图 4 实例分析 1 计算与实测沉降比较

Fig. 4 Comparison between calculated and monitored settlements of project No. 1

2.2 实例分析 2<sup>[6]</sup>

江苏淮阴市淮海广场人防工程为两层地下室, 基坑开挖深度  $h=9.8$  m, 基坑围护结构采用直径 900 mm 间距 1.4 m 的钻孔灌注桩, 竖向两道环形梁作为支撑。灌注桩桩长  $H=14.8$  m, 其中入土深度  $h_d=5$  m, 插入比  $h_d/h=0.51$ , 桩顶实测位移  $a_0=22.4$  mm, 围护桩最大水平位移点为 ( $z_m=9.0$  m,  $u_m=28.5$  mm)。

将已知的  $a_0, z_m, u_m$  代入式 (8) 可解得:  $a_1=1.356$ ,  $a_2=-0.075$ 。

将  $a_0, a_1, a_2$  代入式 (9) 求得  $S_p=399.0$  mm·m。

根据围护桩插入比取  $\alpha=0.60$ ,  $\beta=0.9$ , 按经验取  $w=0.65$ , 将各参数代入式 (10) 可得

$$v(x) = \frac{552.43}{\sqrt{2\pi x}} e^{-\frac{\left[\ln \frac{x}{11.76}\right]^2}{0.845}} \quad (12)$$

表 4 给出了若干点实测和按式 (12) 计算的沉降量; 表 5 则给出了相同地表范围计算沉降曲线包络面

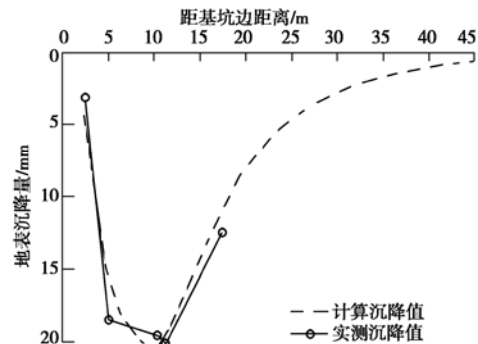


图 5 实例分析 2 计算与实测沉降比较

Fig. 5 Comparison between calculated and monitored settlements of project No. 2

2.3 实例分析 3<sup>[7]</sup>

南京军区南京总医院新门诊大楼地下部分为二层地下室, 基础施工时基坑开挖深度  $h=10.5$  m, 基坑围护结构采用直径 900 mm 间距 1.0 m 的钻孔灌注桩, 竖向设置两道钢筋混凝土支撑。灌注桩桩长  $H=17.4$  m, 其中入土深度  $h_d=6.9$  m, 插入比  $h_d/h=0.65$ , 测点 CX14 处桩顶实测位移  $a_0=48.6$  mm, 围护桩最大水平位移点为 ( $z_m=10.0$  m,  $u_m=89.7$  mm)。

将已知的  $a_0, z_m, u_m$  代入式 (8) 可解得:  $a_1=8.22$ ,  $a_2=-0.41$ 。

将  $a_0, a_1, a_2$  代入式 (9) 求得  $S_p=1370.0$  mm·m。

根据围护桩插入比取  $\alpha=0.70$ ,  $\beta=0.9$ , 按经验取  $w=0.65$ , 将各参数代入式 (10) 可得

表4 实例分析2 计算与实测沉降量

Table 4 Calculated and monitored settlements of project No. 2

<i>x</i> /m	2.4	5.0	10.4	11.2	17.4	20.0	23.0	26.0	30.0	35.0	40.0
计算值/mm	4.6	18.6	20.8	19.7	10.6	7.9	5.6	4.1	2.6	1.5	0.9
实测值/mm	3.1	18.5	19.6	20.2	12.5	—	—	—	—	—	—

表5 实例分析2 地表最大沉降量及沉降曲线包络面积计算值与实测值比较

Table 5 Maximum settlement and comparison between calculated and monitored values of project No. 2

$S_s$ /(m·mm)	$S_j$ /(m·mm)	$(S_j-S_s)/S_s$	$v_s$ /mm	$v_j$ /mm	$(v_j-v_s)/v_s$
248.2	246.5	-0.7%	20.2	20.8	2.9%

表6 实例分析3 计算与实测沉降量

Table 6 Calculated and monitored settlements of No. 3 project

<i>x</i> /m	2.7	5.4	7.3	9.1	10.0	11.5	14.6	21.9	25.0	30.0	40.0
计算值/mm	23.1	62.5	71.0	69.3	66.5	60.6	47.1	23.5	17.4	10.9	4.5
实测值/mm	21.8	42.5	56.0	57.1	59.0	64.4	56.1	32.3	—	—	—

表7 实例分析3 地表最大沉降量及沉降曲线包络面积计算值与实测值比较

Table 7 Maximum settlement and comparison between calculated and monitored values of project No. 3

$S_s$ /(m·mm)	$S_j$ /(m·mm)	$(S_j-S_s)/S_s$	$v_s$ /(mm)	$v_j$ /(mm)	$(v_j-v_s)/v_s$
936.1	950.0	1.5%	64.4	71.0	10.2%

$$v(x) = \frac{1896.92}{\sqrt{2\pi x}} e^{-\frac{\left[\ln \frac{x}{13.72}\right]^2}{0.845}} \quad (13)$$

表6为实测和按式(13)计算的沉降量;表7则给出了相同地表范围计算沉降曲线包络面积和实测沉降曲线包络面积以及计算与实测最大沉降量的比较。

实例3中实测沉降与计算沉降也符合较好,虽然计算最大沉降量比实测最大沉降量大10.2%,但计算沉降曲线包络面积仅比实测沉降曲线包络面积大1.5%;图6也表明,计算和实测曲线吻合得较好。

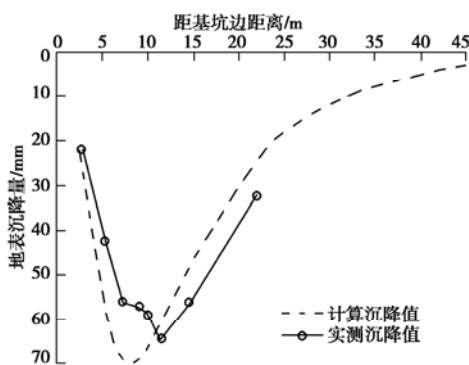


图6 实例分析3 计算与实测沉降比较

Fig. 6 Comparison between calculated and monitored settlements of project No. 3

2.4 实例分析4

天津地铁华苑站位于迎水道与桂苑路交口处,为二柱三跨双层地下岛式站台,标准段基坑开挖深度  $h=16.72$  m,基坑围护结构采用直径1000 mm 间距750 mm 的钻孔咬合灌注桩,竖向设置四道钢管支撑。灌

注桩桩长  $H=28.32$  m,其中入土深度  $h_d=11.6$  m,插入比  $h_d/h=0.69$ ,测点C17处桩顶实测位移  $a_0=7.6$  mm,最大水平位移点为 ( $z_m=15.8$  m,  $u_m=58.6$  mm)。

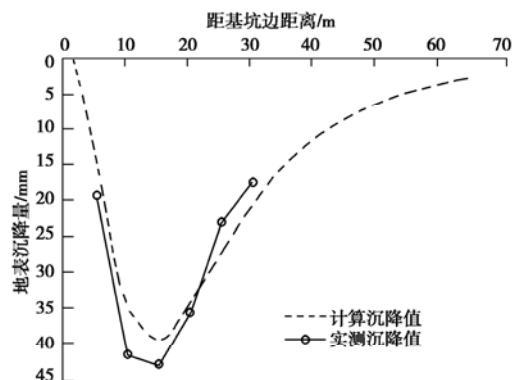


图7 实例分析4 计算与实测沉降比较

Fig. 7 Comparison between calculated and monitored settlements of project No. 4

将已知的  $a_0, z_m, u_m$  代入式(8)可解得:  $a_1=6.45, a_2=-0.20$ 。

将  $a_0, a_1, a_2$  代入式(9)求得  $S_p=1287.5$  mm·m。

根据围护桩插入比取  $\alpha=0.65, \beta=0.9$ ,按经验取  $w=0.65$ ,将各参数代入式(10)可得

$$v(x) = \frac{1782.7}{\sqrt{2\pi x}} e^{-\frac{\left[\ln \frac{x}{21.74}\right]^2}{0.845}} \quad (14)$$

表8给出了若干点实测和按式(14)计算的沉降量;表9则给出了相同地表范围计算沉降曲线包络面积和

表 8 实例分析 4 计算与实测沉降量

Table 8 Calculated and monitored settlements of project No. 4

x/m	2.0	5.5	8.0	10.5	13.0	15.5	17.0	20.5	23.0	25.5	30.5	40.0	50.0	60.0
计算值/mm	0.4	13.8	27.3	36.2	40.0	40.1	38.9	34.6	30.8	27.1	20.4	11.5	6.3	3.4
实测值/mm	—	19.3	—	41.7	—	43.1	—	35.6	—	23.2	17.4	—	—	—

表 9 实例分析 4 地表最大沉降量及沉降曲线包络面积计算值与实测值比较

Table 9 Maximum settlement and comparison between calculated and monitored values of project No. 4

$S_s/(m \cdot mm)$	$S_j/(m \cdot mm)$	$(S_j - S_s)/S_s$	$v_s/mm$	$v_j/mm$	$(v_j - v_s)/v_s$
808.9	782.0	-3.3%	43.1	40.1	-6.9%

实测沉降曲线包络面积以及计算与实测最大沉降量的比较。

表 9 表明, 实例 4 中计算沉降和实测沉降也十分相近, 计算沉降曲线包络面积仅比实测沉降曲线包络面积小 3.3%, 计算最大沉降量也比实测最大沉降量小 6.9%; 图 7 表明, 计算和实测曲线基本吻合。

### 3 结 语

在已有研究成果和对大量实测资料分析处理的基础上, 本文就柔性支护软土深基坑坑周地表位移场的大小及分布规律进行了进一步研究, 根据上海地区深基坑施工实践, 给出了软土深基坑柔性围护墙后偏态分布的地表竖向位移表达式。

通过对上海地铁延吉中车站、淮阴市淮海广场人防工程、南京军区总医院门诊楼和天津地铁华苑站等基坑工程实例分析及与现场实测值的对比研究, 证明了本文提出的墙后偏态分布地表位移场表达式对地表沉降预报的有效性和实用性, 为环境保护要求等级高的基坑提供了较为可靠的地表沉降估算方法, 对于保护基坑周边环境有重要意义。

坑周地层移动贯穿于深基坑施工的始终, 除了开挖引起的沉降外, 还有如基坑降水、地下连续墙成槽、基坑加固、后期固结沉降等因素。有关这些因素引起的坑周地表沉降实用表达式还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 唐业清, 李启民. 基础工程事故分析与处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (TANG Ye-qing, LI Qi-min. Analysis and treatment of foundation engineering accidents[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese))
- [2] 曾宪明, 易平. 基坑与边坡事故警示录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (ZENG Xian-ming, YI Ping. Warnings from excavation and slope accidents[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese))
- [3] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese))
- [4] 盛 骤, 谢式千. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. (SHENG Zhou, XIE Shi-qian. Probability theory and mathematical statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese))
- [5] 彭振斌. 深基坑开挖与支护工程设计计算与施工[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997. (PENG Zhen-bin. Design and construction of excavation engineering[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997. (in Chinese))
- [6] 张尚根. 深基坑支护结构设计计算方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2003. (ZHANG Shang-gen. Study for design and calculating method of retaining structure of foundation pit[D]. Nanjing: Southeast University, 2003. (in Chinese))
- [7] 戴佑斌. 深基坑工程支护方案优选及支护结构变形分析研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2006. (DAI You-bin. Study on braced project optimization and braced structure deformation analysis of deep excavation pit engineering[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2006. (in Chinese))