

文章编号: 1000-7598-(2000)01-0088-04

锚杆静压桩施工产生的附加沉降问题初探

刘万兴, 张 璞

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 根据锚杆静压桩沉桩时桩周土体的受力模式, 对附加沉降产生的原因进行了分析, 提出了附加沉降的计算公式, 并进行了实例计算与分析。

关键词: 锚杆静压桩, 附加沉降, 挤土效应

中图分类号: TU 413.4; TU 433 **文献标识码:** A

作者简介: 刘万兴, 男, 25岁, 博士生, 主要从事地基加固、建筑物纠偏及基坑工程方面的研究。

Preliminary discussion of additional settlement due to static driving pile using anchored piles

Liu Wanxing, Zhang Pu

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract According to the mechanics model of soils around pile while static driving pile, the cause of additional settlement is approached from different angles in this paper. Relevant calculation formulae are also presented. In addition, an example is calculated by them and the results are proved to be reliable and reasonable compared with the practical case history.

Key Words anchoring pressure pile, additional settlement, extruding effect

1 前言

锚杆静压桩用于地基加固或纠偏时, 与一般的桩不同, 它是在上部荷载作用下进行沉桩的, 因此在沉桩过程中往往会产生大于正常固结变形的地基沉降, 称之为附加沉降。在软土地区, 对采用天然地基的六层或六层以上建筑物, 附加沉降问题非常突出。

一般软土地区如果没有采取特殊的防范措施, 使用锚杆静压桩对软土地基上的既有建筑物进行纠偏或地基加固时, 附加沉降可以达到5~10 cm, 以致建筑物的总体沉降增加, 引起原有上、下水管道产生过大变形, 甚至断裂, 影响正常的生活或生产。另外, 压桩时产生的土体附加沉降只在桩周附近存在, 由此引起上部结构的沉降往往是不均匀的, 易产生拉应力, 从而使屋顶和墙体形成较大的裂缝, 造成漏雨、漏水, 影响正常使用。因此, 有必要对附加沉降产生的原因进行分析, 据此找出适当的措施加以控制。锚杆静压桩施工过程中产生的附加沉降问题在工程实践中已被广泛重视, 但是目前还较少有人对其进行分析总结。

2 附加沉降的机理分析与计算

压桩是一个动态过程, 随着桩入土深度的变化, 桩

周及桩端以下土体的物理力学性质和受力状态都随之发生变化, 因此, 附加沉降产生的机理非常复杂。压桩时, 桩周及桩端以下土体的受力情况如图1所示。

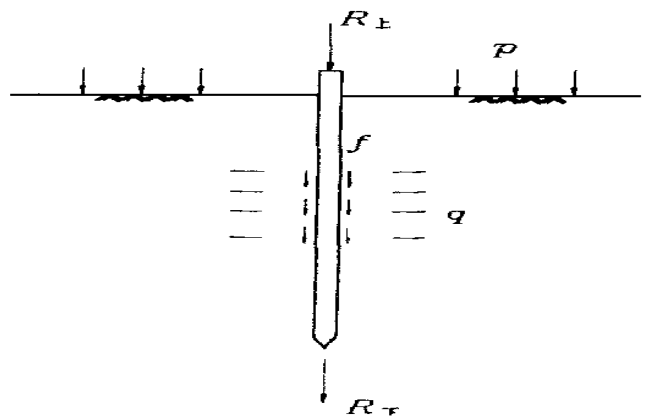


图1 压桩时桩周土体的受力模式

Fig. 1 Mechanics model of soil around pile while static driving pile

产生附加沉降的原因主要可归结为以下三方面: 一是压桩时桩端阻力及桩侧摩阻力产生的沉降; 二是压桩时桩体侧向挤土引起的隆起或由于土体挤密引起的沉降; 三是压桩时在桩周产生塑性区使得土体强度降低, 从而在竖向荷载不变的情况下产生的沉降。

收稿日期: 1999-02-12。

2.1 桩端阻力及桩侧摩阻力产生的沉降

锚杆静压桩沉桩过程中受到的阻力主要是桩侧摩阻力和桩端阻力。通过桩端埋设的传感器测出压桩过程中桩端阻力变化的全过程,如图 2 所示^[1]。从图 2 可以看出,桩顶压力与桩端阻力的两条曲线十分接近,说明压桩过程中桩侧摩阻力较小,忽略不计对计算结果不会造成太大的影响。

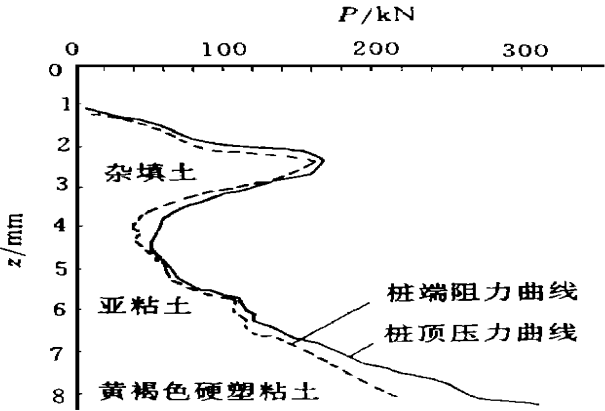


图 2 桩端阻力曲线
Fig. 2 Resistance curve of pile point

桩端阻力产生的土体变形可采用 Mindlin 解进行计算。Mindlin 解假定土体是弹性体,而本模型桩周和桩端土体是塑性的,桩端土体的塑性区相对很小,可忽略不计,即桩端以下土层的沉降,可以先根据 Mindlin 公式求解出土体中的应力分布,然后采用分层总和法进行计算。由 Mindlin 公式可知:

$$\sigma_z = \frac{P}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{(1-2\nu)m}{(r^2+m^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{(1-2\nu)n}{(r^2+n^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{2(1-2\nu)c}{(r^2+n^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{3m^3}{(r^2+m^2)^{\frac{5}{2}}} + \frac{3(3-4\nu)n^3}{(r^2+n^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{3(3-4\nu)cn^2}{(r^2+n^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{15cn^2}{(r^2+n^2)^{\frac{5}{2}}} + \frac{18c^2n}{(r^2+n^2)^{\frac{7}{2}}} - \frac{30c^2n^3}{(r^2+n^2)^{\frac{7}{2}}} \right] \quad (1)$$

式中 $m = z - c$; $n = z + c$; $r^2 = x^2 + y^2$; c 为集中力的深度。

荷载 P 作用于长度为 L 的桩的顶端,离桩轴 r 处,压缩模量为 E_s 、厚度为 z 的土层的变形如图 3 所示。桩周土体的变形为

$$\delta = \frac{1}{E_s} \int_{z_1}^{z_2} \sigma_z dz \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)并进行积分得

$$\delta = \frac{P}{8\pi E_s(1-\nu)} w_p \quad (3)$$

其中

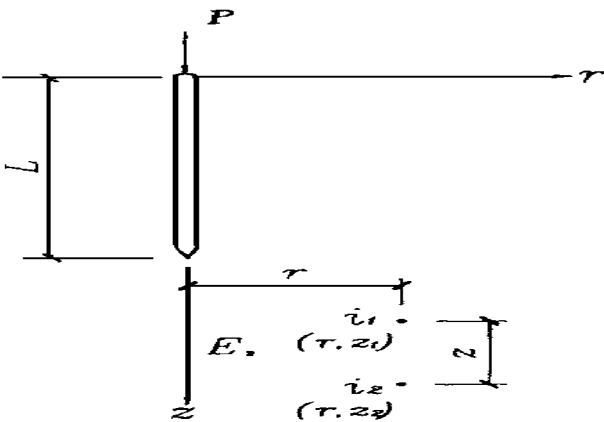


图 3 桩顶受力时土层的变形
Fig. 3 Soil deformation while loading on pile

$$w_p = \left[\frac{-(1-2\nu)}{\sqrt{r^2+m^2}} + \frac{r^2}{(r^2+m^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{3}{\sqrt{r^2+m^2}} \right]_m + \left[\frac{1-2\nu}{\sqrt{r^2+n^2}} + \frac{2n(1-2\nu)c}{r^2\sqrt{r^2+n^2}} + \frac{(3-4\nu)r^2}{(r^2+n^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{3(3-4\nu)r^2}{\sqrt{r^2+n^2}} - \frac{(3-4\nu)cn^3}{r^2(r^2+n^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{5cn^3}{r^2(r^2+n^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{6c^2}{(r^2+n^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{6cn^5}{5r^2(n^2+r^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{6c^2r^2}{(r^2+n^2)^{\frac{5}{2}}} + \frac{10c^2}{(r^2+n^2)^{\frac{3}{2}}} \right]_n$$

通过式(3)可以计算荷载作用于桩顶时土体产生的变形,由于压桩时桩侧摩阻力较小,可以忽略它对计算结果的影响。但在较硬的粉土层和粘土层中,桩侧摩阻力相对较大,采用式(3)会有一定的误差,应根据压桩时桩端阻力变化曲线及以往经验对计算结果进行适当折减。

2.2 侧向挤土产生的沉降

(1) 粘性土(如图 4 所示) 当桩压入土中深度为 L 时,桩排开土的体积为

$$V = \pi r_0^2 L$$

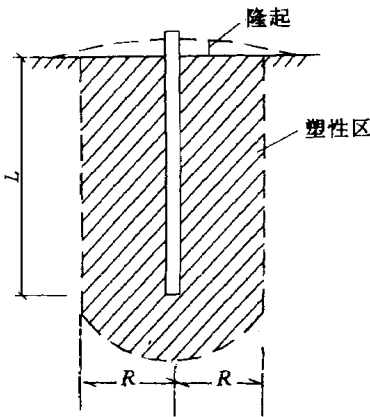


图 4 粘性土中压桩挤土引起的隆起

Fig. 4 Raised soil while static driving pile in clay

桩周土体受到挤压产生弹塑性变形, 塑性区体积应变为 ϵ_{v1} , 弹性区体积应变为 ϵ_{v2} , 总的体积应变 $\epsilon_v = \epsilon_{v1} + \epsilon_{v2}$ 。由于产生的塑性区范围相对于桩径很大, 桩的径向挤土效应扩散到弹性区时已经变得很小, 所产生的弹性应变相对塑性应变而言, 可忽略不计, 因此可近似认为总的体积应变 $\epsilon_v = \epsilon_{v1}$ 。

桩周土体受到径向挤压, 使得土体向土体表面挤出, 土体的侧向挤出主要是由于土体塑性流动产生的, 因此我们可以近似认为桩周土体由于受到挤压而产生的隆起发生在塑性区范围内。

根据以上的假定, 桩体挤土引起的土体隆起近似计算公式为

$$w = \frac{r_0^2 L (1 - \epsilon_v)}{R^2}$$

(4)

式中 r_0 为桩体半径; R 为桩周塑性区半径。

(2) 非粘性土(如图 5 所示) 桩周土体受到挤压以后, 除了产生弹塑性变形, 同时对土体还有挤密作用, 由挤密作用产生的体积应变为 ϵ_{ve} 。由于挤密作用的存在, 桩周土体受到挤压产生的竖向变形不同于粘性土, 它有可能隆起也可能沉降。桩周土体的竖向变形可以近似按下式计算:

$$w = \frac{r_0^2 L (1 - \epsilon_v - \epsilon_{ve})}{R^2}$$

(5)

式(4)和式(5)中 R 及 ϵ_v 的详细计算可以参见文献[2, 3], 而 ϵ_{ve} 可以进行室内实验加以确定。

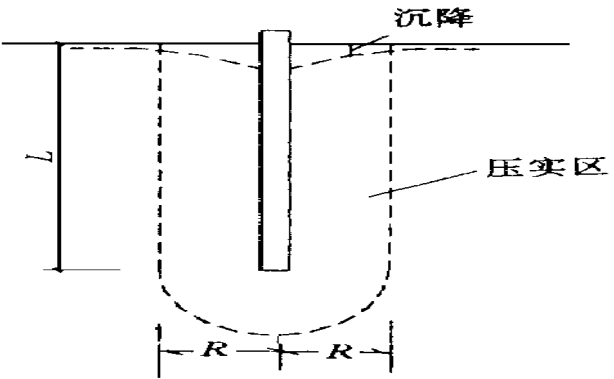


图 5 非粘性土中压桩挤土引起的沉降

Fig. 5 Settlement while static driving pile in non-cohesive soil

2.3 桩周土体强度降低引起的附加沉降

由于沉桩时对桩周土体的挤土效应, 在桩周一定范围内产生塑性区, 使得塑性区中土体的各项强度指标大幅降低, 应力-应变曲线接近水平, 即在一定荷载作用下, 变形增加较大, 使得原有地基的平均压缩模量也相应降低。使用锚杆静压桩施工的工程, 都是在既有荷载作用下进行的, 即荷载是不变的或是增加的, 因此会产生较大的变形。

施工前地基的沉降计算公式可表示为

$$s_1 = \frac{\sigma_1}{E_{s1}} L$$

(6)

式中 s_1 为地基沉降; σ_1 为上部荷载在地基中产生的应力; E_{s1} 为施工前地基的平均压缩模量; L 为桩长。

沉桩时, 由于挤土效应, 地基的沉降计算公式为

$$s_2 = \frac{\sigma_2}{E_{s2}} L$$

(7)

式中 s_2 为沉桩时的地基沉降; σ_2 为上部荷载在地基中产生的应力; E_{s2} 为施工后地基的平均压缩模量。

两者的沉降差即为附加沉降 Δs :

$$\Delta s = s_1 - s_2$$

(8)

沉桩过程中前述三种附加沉降并不是单独产生互不影响的, 而是同时发生并且相互作用的。在分析附加沉降产生的原因时必须充分考虑这三方面的关系。

另外, 锚杆静压桩施工必须先先在底板上开孔, 而在软土地区地下水位较高, 有时不抽水无法施工, 如果抽取过多的地下水, 会引起地基产生压缩变形, 进而引起上部结构产生一定量的附加沉降。但由于抽水只是为了开孔压桩才进行的, 抽取的大部分地下水都位于基础底板以上, 而附加沉降是由底板以下土体变形引起的, 所以施工时只要稍加注意, 抽水是不会引起上部结构产生较大附加沉降的。因此, 文中对抽水造成的附加沉降没有进行详细阐述。

3 计算与分析实例

某建筑物发生倾斜, 采用锚杆静压桩进行纠偏。该建筑物长 46 m, 宽 13 m, 基础埋深 1 m, 基底处平均压力为 80 kPa。锚杆静压桩截面为 250 mm×250 mm, 桩长 25 m, 终止压桩力为 500 kPa, 计算施工过程中距桩中心线 0.6 m 处土体表面的沉降。现场土层参数如表 1 所示。

表 1 土层性质指标

Table 1 Character index of soil layers

土层名称	厚度 / m	压缩模量 E_s / MPa	土的承载力 f_0 / kPa	容重 r / kN·m ⁻³
① 杂填土	1.0			
② 褐黄色粉质粘土	1.2	4.55	95	18.9
③ 灰色淤泥质粉质粘土	5.7	4.43	68	18.1
④ 灰色淤泥质粘土	11.0	2.63	65	17.4
⑤ 灰色粉质粘土	4.6	5.72	105	19.0
⑥ ₁ 灰色淤泥质粉质粘土	3.2	7.73	205	20.3
⑥ ₂ 暗绿色粉质粘土	2.5	10.65		20.1
⑦ ₁ 草黄色粉质粘土	12.0	15.0		19.1
⑦ ₂ 黄色砂质粉土	15.5	19.2		19.7

从前面的论述可知, 由土体扰动和桩侧向挤土引起的附加沉降主要发生在桩端以上土体中, 而桩端阻力引起的附加沉降主要发生在桩端以下土层中。下面分别计算各部分产生的附加沉降。

3.1 桩端力产生的附加沉降

根据已知的压桩力和土体参数, 可以通过式(3)求得桩端力产生的附加沉降。计算结果如表 2 所示。

表 2 压缩时桩端力产生的附加沉降计算
Table 2 Calculation of additional sttlement due to loading on pile

层 号	厚 度 /m	压缩模量 E_s /MPa	沉降量 s_2 /mm
⑥ ₁	3.2	5.80	30.0
⑥ ₂	2.5	8.19	53.9
⑦ ₁	12.0	10.74	142.9
⑦ ₂	15.5	15.78	92.3
合 计			319.1

由于桩侧摩阻力的存在, 将计算结果根据土层性质进行适当折减, 本实例取计算总沉降量的 85%, 即沉降值为 271.2 mm。

3.2 土体扰动引起的附加沉降

根据布西奈斯克解可以求得桩周每层土的平均附加应力。根据文献[4]提出的方法求出塑性区半径, 为简化计算, 假定塑性区内压缩模量是线性变化的, 即桩外表面处最小, 弹塑性区交界处最大。根据重塑土的性质, 可以求得扰动后计算点处的压缩模量。利用式(6), (7), (8)可以求出因土体强度降低而产生的附加沉降, 如表 3 所示。

表 3 土体扰动附加沉降计算
Table 3 Calculation of additional sttlement due to disturbing soilmass

层号	厚度 m	压缩模量 E_s /MPa	压缩模量改变量 ΔE_s /MPa	平均附加应力 σ /MPa	沉降量 s /mm
②	1.2	4.55	1.14	15.0	1.32
③	5.7	4.43	1.10	14.5	6.27
④	11.0	2.63	0.66	12.2	17.00
⑤	4.6	5.72	1.43	9.5	2.50
⑥ ₁	3.2	7.73	1.93	8.3	1.15
合计					28.24

3.3 桩排土引起的土体隆起

已知桩长 $L = 25\text{ m}$, 桩的尺寸为 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$, 换算成圆半径 r_0 为 140 mm , 取 $\epsilon_v = 0.01$, 根据桩周塑性区的计算, 塑性区半径与桩半径之比的平均值为 10, 将它们代入式(4)得

$$w = \frac{\pi r_0^2 L (1 - \epsilon_v)}{\pi R^2} = 248\text{ mm}$$

综合上述三方面的沉降计算, 可以得到沉桩时距桩中心 0.6 m 处土体的沉降为

$$s = 28.2 + 271.2 - 248 = 51.4\text{ mm}$$

根据工程实践经验, 本例所得计算结果基本符合实际情况。从前述的分析可知附加沉降产生的主要原因, 因此在考虑减小附加沉降的措施时, 应该从前述原因着手。常用的措施有以下几种。

(1) 预加轴力方法 预加轴力主要是防止桩体回弹引起附加沉降。

(2) 合理安排施工流程 由于压桩顺序会影响上部结构与土体的应力转移, 因此在压桩过程中合理安排施工流程是十分重要的。如先压应力集中的部位, 是为了弥补相对不足的地基承载力, 对整个建筑物起到平衡调节作用, 一般情况是先在中部压桩, 然后向两侧大间距进行跳压。

(3) 控制沉降速率 控制沉降速率是为了防止桩周孔隙水压力和桩端阻力过大, 避免桩周土体强度降低过多以及桩端以下土层产生较大变形。从计算结果可以看出, 附加沉降主要是由桩端阻力引起的, 所以应对施工时压桩力以及沉桩速率给予足够的重视, 最好进行现场实时监控。

(4) 预钻孔方法 为了减小沉桩对土体的扰动往往采用预钻孔方法, 上海地区桩位预钻孔取土, 孔径一般小于桩边长 5 ~ 10 cm, 取土深度一般为 6 ~ 15 m。由于预钻孔施工不方便, 一般较少使用。

4 结 论

(1) 锚杆静压桩施工过程中产生的附加沉降由三部分组成: 桩端阻力及桩侧摩阻力产生的沉降; 桩体侧向挤土引起的隆起或由于土体挤密引起的沉降; 桩周产生塑性区造成土体强度降低引起的沉降。

(2) 分别从三个方面推导出了附加沉降的计算公式。通过实例计算证明文中对附加沉降的分析与计算是比较合理的, 具有实际意义。

(3) 就常用控制附加沉降的措施, 根据前述理论分析对它们的作用进行了解释。

需要指出, 本文只是对附加沉降问题进行了初步探讨, 实际上附加沉降产生的原因非常复杂, 要完全弄清其原因需要进一步深入研究。

参 考 文 献

1 冶金工业部建筑研究总院. 锚杆静压桩技术规范 YBJ227-91 [S]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
2 胡中雄. 土力学与环境土工学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
3 郑大同. 地基极限承载力的计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979.
4 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.