

软土地基中咬合桩桩身下沉问题的探讨

陈 跃, 翁奔哲, 楼步新

(浙江省地质矿产工程公司, 浙江 杭州 310016)

摘 要:软土地基中咬合桩套管内灌注混凝土极易造成桩体下沉,不但影响钢笼标高,也造成混凝土超方,影响工程质量和经济效益。结合具体的工程实例,对软土地基中咬合桩桩身下沉问题进行了探讨。咬合桩桩身下沉主要由桩端虚土压缩、桩端土压缩沉降和桩身砼凝固沉降组成。在施工前可根据经验系数 K_1 值先预估桩身下沉的理论量,然后在施工中预留相同量土柱高度和相应的混凝土加灌高度,以保证在施工完成后桩身能够满足设计要求。

关键词:软土地基;咬合桩;全套管施工工法;桩身下沉;管内灌注;承载力;沉降量;经验系数

中图分类号:TU473.1⁺4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2008)09-0041-04

Discussion on Subsidence of Secant Pile in Soft Ground/CHEN Yue, WENG Ben-zhe, LOU Bu-xin (Zhejiang Geology & Mineral Resources Engineering Company, Hangzhou Zhejiang 310016, China)

Abstract: Pile subsidence often occur for cement grouting in secant pile casing, both construction quality and economic effectiveness is affected. Discussion was made on this problem with field cases, which was mainly caused by compression of residual soil and pile-end soil at the bottom end of the pile, and by cement solidification of pile body. According to K_1 value of the empirical coefficient, theoretical amount of subsidence could be predicted, which could be taken account by saving the same amount of pile height in design and grouting the same amount more of cement.

Key words: soft ground; secant pile; fully casing construction; pile subsidence; grouting in pile; bearing capacity; subsidence; empirical coefficient

1 问题的提出

咬合桩是桩与桩之间相互咬合排列的一种基坑围护结构。桩的排列方式为一个素砼桩(A桩)和一个钢筋砼桩(B桩)间隔,见图1。这种排列方式

在施工时需先施工A桩,后施工B桩,A桩砼采用超缓凝型砼,要求必须在A桩砼初凝之前完成B桩的施工,B桩施工时,利用套管钻机的切割能力切割掉相邻A桩相交部分的砼,则实现了咬合。

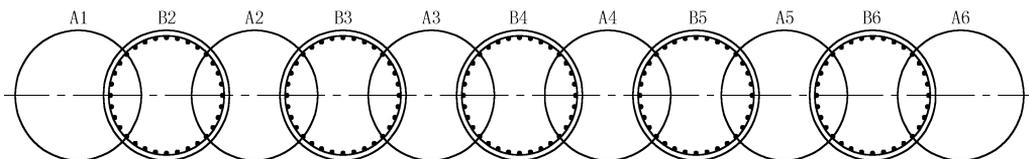


图1 施工顺序示意图

咬合桩工法利用搓管钻机(亦称磨桩机或摇管机)的摇动(或全回转套管钻机的回转)使钢套管与土层间的摩阻力大大减小,边摇动(或边回转)边压入,同时利用冲抓斗挖掘取土,直至套管下到桩端持力层为止。挖掘完毕后立即进行挖掘深度的测定,然后清除虚土。成孔后将钢筋笼放入,接着将导管竖立在钻孔中心,最后灌注混凝土成桩。采用相同的工法将灌注桩相互咬合相嵌,形成连续的排桩挡墙。

咬合桩管内灌注混凝土后,由于套管与混凝土

之间基本没有摩擦力,导致所有的重力都集中在管底的土层上,这样在软土地基中极易造成桩体下沉,不但影响钢筋笼标高,也造成混凝土超方,影响工程质量和经济效益。咬合桩桩身下沉的现象比较普遍,但对下沉原因的分析目前国内还没有涉及,本文拟就浙江慈溪市香格国际广场咬合桩工程为例进行分析探讨。

2 工程地质条件和下沉量实测值

香格国际广场咬合桩工程中的基坑尺寸为196

收稿日期:2008-05-29

作者简介:陈跃(1975-),男(汉族),浙江丽水人,浙江省地质矿产工程公司工程师,勘察工程专业,从事基坑围护设计、地基基础施工管理工作,浙江省杭州市杭海路218号,amdilove@163.com;翁奔哲(1978-),男(汉族),浙江临安人,浙江省地质矿产工程公司工程师,工程地质与水文地质专业,从事岩土工程工作,winsell78@yahoo.com.cn。

m × 105 m, 该基坑开挖深度为 9.3 m。工程采用钻孔灌注桩和钢筋混凝土内支撑做联合支护, 西侧和南侧采用咬合素砼桩作为基坑的止水帷幕, 咬合桩配筋桩为 Ø1000@1600, 桩身混凝土强度为 C30, 素砼桩为 Ø1000@1600, 桩身混凝土强度为 C15。东侧和北侧采用高压旋喷桩作为基坑的止水帷幕, 围护桩为 Ø900@1250, 桩间高压旋喷桩为 Ø900@1250。

本咬合桩工程的地基属于软土地基, 所涉及的地层情况及其主要物理力学性质指标见表 1。

表 1 各土层主要物理力学性质指标表

层号	土层名称	层底标高 /m	土层厚度 /m	容重 γ / (N·m ⁻³)	压缩系数 a_{1-2} /MPa ⁻¹	压缩模量 E_{s1-2} /MPa	地基承载力特征值 f_{ak} /kPa
①	素填土	1.7	1.7	(18.5)			
①	粉质粘土	3.4	1.7	18.89	0.38	5.0	100
②	淤泥质粉质粘土	4.8	1.4	18.04	0.49	4.2	60
③	粉土	17.8	13.0	18.53	0.24	8.0	150
④	淤泥质粉质粘土	23.7	5.9	17.71	0.72	3.0	60

在现场的实际施工中, 在取土完全按照设计桩底标高要求施工时, 发现在桩身混凝土终凝后, 咬合桩桩身发生明显下沉, 发生下沉的 4 根桩的实测数据见表 2。

表 2 桩身下沉的实测数据

桩号	位置	施工时间	与设计标高偏差
B96	C-4 轴向北 4.77 m	2006 年 5 月 26 日	下沉 2.5 m
B117	C-8 轴向北 3.16 m	2006 年 5 月 26 日	下沉 1.8 m
B115	C-8 轴位置	2006 年 5 月 28 日	下沉 1.47 m
B91	C-4 轴向南 3.23 m	2006 年 5 月 31 日	下沉 1.8 m

根据现场实测的 4 根桩的情况来看, 平均下沉实际值(s)为 1.89 m。

3 桩身下沉问题的分析计算

由于咬合桩采用的是全套管施工, 当混凝土灌注后, 混凝土和套管间的摩擦力几乎可以忽略不计, 所有的钢筋和混凝土的重力都集中在套管底部的土层上, 如果桩端底部为地基承载力很低的软土, 桩端土在上部咬合桩的自重荷载作用下发生破坏, 桩身产生很大的下沉量。

3.1 承载力验算

3.1.1 桩端土为软土时地基承载力验算

咬合桩排桩竖向受力近似于钻孔桩深基础, 本文采用灌注桩模型和本工程有关参数进行受力分析计算。

当桩端土为软弱的淤泥质粉质粘土时, 可认为是桩端土为软弱下卧层。因桩距 $s_a = 1.60 \text{ m} \leq 6d = 6.0 \text{ m}$, 按桩距 $s_a \leq 6d$ 的群桩基础验算。

按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94) 第 5.2.13.1 条, 基础尺寸计算长度取 1 根桩。采用下式验算:

$$\sigma_z + \gamma_m z \leq q_{uk}^w / \gamma_q \quad (1)$$

如果满足, 则承载力验算符合要求, 桩身不会下沉; 如不满足, 则承载力验算不符合要求, 桩身发生下沉。

3.1.1.1 桩身砼凝固前

在桩身砼凝固前, 桩身砼与桩侧壁土体摩阻力极小, 可忽略不计, q_{sik} 均取 0, 则:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= [\gamma_0(F+G) - \pi D \sum q_{sik} h_i] [(1/4)\pi(D+2t\theta)^2] \\ &= [1(0 + \gamma_t L) - \pi D \times 0] [(1/4)\pi(D+2 \times 0t\theta)^2] \\ &= 25 \times 18.5 / [(1/4)\pi \times 1.0^2] \\ &= 588.9 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\gamma_m z = \sum \gamma_i h_i / \sum h_i z = 18.5 \times 18.5 = 342.3 \text{ kPa}$$

修正后的地基承载力特征值 f_a :

$$\begin{aligned} f_a &= f_{ak} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (d-0.5) \\ &= 60 + 0 \times 18 \times (3-3) + 1.0 \times 18.5 \times \\ &\quad (18.5-0.5) = 393 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$q_{uk}^w / \gamma_q = 2f_a / 1.0 = 2 \times 393 / 1.0 = 786 \text{ kPa}$$

$$\sigma_z + \gamma_i z = 588.9 + 342.3 = 931.2 \text{ kPa}$$

$$> q_{uk}^w / \gamma_q = 786 \text{ kPa}$$

式中: σ_z ——作用于软弱下卧层顶面的附加应力; γ_0 ——建筑桩基重要性系数, 取 1.0; F ——作用于咬合桩顶面的竖向力设计值, 取 0; G ——咬合桩自重设计值, $G = \gamma_t L$; γ_t ——桩身混凝土重度, 素砼桩取 23.5 kN/m³, 钢筋砼桩取 25 kN/m³; L ——咬合桩桩长; D ——咬合桩直径; q_{sik} ——桩周第 i 层土的极限侧阻力标准值, 桩身砼凝固前, q_{sik} 取 0; t ——桩底至软弱下卧层顶面的深度; θ ——桩端硬持力层压力扩散角; γ_i ——软弱层顶面以上各层土重度; h_i ——软弱层顶面以上各层土层厚; γ_m ——软弱层顶面以上各层土重度加权平均值; z ——地面至软弱层顶面的深度; q_{uk}^w ——软弱下卧层经深度修正的地基极限承载力标准值, $q_{uk}^w = 2f_a$; γ_q ——地基承载力分项系数, 取 1.0; f_a ——修正后的地基承载力特征值; f_{ak} ——地基承载力特征值, 本工程中 $f_{ak} = 60 \text{ kPa}$; η_b 、 η_d ——基础宽度和埋深的地基承载力修正系数, $\eta_b = 0$, $\eta_d = 1.0$ 。

根据公式(1), 桩身砼凝固前, 竖向承载力验算

不符合要求,桩身下沉。

3.1.1.2 桩身砼凝固后

桩身砼凝固后,桩身砼与桩侧壁土体摩阻力得到恢复, $q_{sik} \neq 0$, 则:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= [\gamma_0(F+G) - \pi D \sum q_{sik} h_i] / [(1/4)\pi(D+2tg\theta)^2] \\ &= [1(0+\gamma_1 H) - \pi D(15 \times 1.7 + 15 \times 1.7 + 8 \times 1.4 + \\ &\quad 30 \times 13.0 + 8 \times 0.7)] / [(1/4)\pi(D+2 \times 0tg\theta)^2] \\ &= (25 \times 18.5 - \pi D \times 457.8) / [(1/4)\pi \times 1.0^2] \\ &= (462.5 - 1438.2) / 0.785 = -1242.9 < 0 \end{aligned}$$

取 $\sigma_z = 0$

此时, $\sigma_z + \gamma_1 z = 0 + 342.3 = 342.3 \text{ kPa} < q_{uk}^w / \gamma_q = 786 \text{ kPa}$ 。

满足公式(1), 因此, 桩身砼凝固后, 竖向承载力验算符合要求, 桩身不会沉降。

3.1.2 桩端土为“硬土”(地基承载力较高的土层)时地基承载力验算

在咬合桩桩端土的地基承载力较高条件下, f_{ak} 取 110 kPa , η_b 取 0.3 , η_d 取 1.6 , 则:

$$\begin{aligned} f_a &= f_{ak} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (d-0.5) \\ &= 110 + 0.3 \times 18 \times (3-3) + 1.6 \times 18.5 \times \\ &\quad (18.5-0.5) = 642.8 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$q_{uk}^w / \gamma_q = 2f_a / 1.0 = 2 \times 642.8 / 1.0 = 1285.6 \text{ kPa}$$

$$\sigma_z + \gamma_1 z = 588.9 + 342.3 = 931.2 \text{ kPa}$$

$$< q_{uk}^w / \gamma_q = 1285.6 \text{ kPa}$$

满足公式(1)。由此可见, 在咬合桩桩端土的地基承载力较高条件下, 在桩身砼凝固前, 竖向承载力验算符合要求, 桩身不会沉降。

3.1.3 临界桩长

由以上分析可看出, 当桩端为软土时, 在桩身砼凝固前, 桩身发生沉降存在一个临界桩长 L_{cr} 。当实际桩长小于临界桩长时, 桩端土地基承载力满足要求, 桩身并不发生沉降; 当实际桩长大于临界桩长时, 桩端土才会发生破坏, 桩身将发生沉降。

当 $\sigma_z + \gamma_m z = q_{uk}^w / \gamma_q$ 时, 桩长达到临界值 L_{cr} , 此时:

$$\begin{aligned} \sigma_z + \gamma_m z &= \frac{\gamma_0(F+G) - \pi D \sum q_{sik} h_i}{(1/4)\pi(D+2tg\theta)^2} + \frac{\sum \gamma_i h_i}{\sum h_i z} \\ &= \frac{\gamma_1 L}{(1/4)\pi D^2} + \frac{18.5 L q_{uk}^w}{\gamma_q} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{uk}^w / \gamma_q &= 2f_a / 1.0 \\ &= 2[f_{ak} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (d-0.5)] \\ &= 2f_{ak} + 37L - 18.5 \end{aligned}$$

即:

$$\gamma_1 L_{cr} / [(1/4)\pi D^2] + 18.5 L_{cr} = 2f_{ak} + 37L_{cr} - 18.5$$

整理后得:

$$L_{cr} = (1.571f_{ak} - 14.53) D^2 / (\gamma_1 - 14.53 D^2) \quad (2)$$

由(2)式可知, 临界桩长 L_{cr} 与地基承载力 f_{ak} 、桩径 D 和桩身混凝土重度 γ_1 有关。

在本工程中, 当 $f_{ak} = 60 \text{ kPa}$, $D = 1.0 \text{ m}$, $\gamma_1 = 25 \text{ kN/m}^3$ 时, 临界桩长 $L_{cr} = 7.62 \text{ m}$ 。

3.1.4 桩身下沉曲线

由上述计算可知, 桩端土为软土情况下, 当桩长大于临界值 L_{cr} 时, 在桩身砼凝固前, 咬合桩竖向承载力验算不符合要求, 即桩端地基土在桩身砼自重作用下将发生下沉。随着桩身混凝土逐渐凝固, 桩侧摩阻力逐渐提高, 咬合桩桩端土附加压力也逐渐减少, 桩身下沉速率相应减少。当桩端土附加压力小于桩端土地基承载力时, 桩身下沉停止。桩身下沉量、下沉速率与时间关系如图 2 所示。

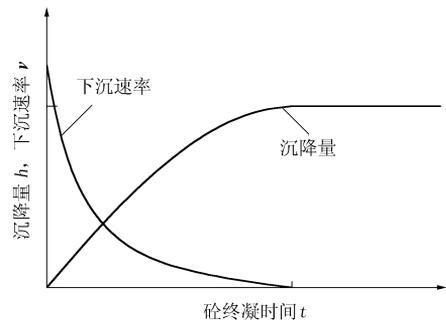


图 2 桩身下沉量、下沉速率与时间关系曲线图

3.2 桩身下沉沉降量分析

3.2.1 总沉降量计算

咬合桩桩身最终沉降量 s 可按式计算:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 \quad (3)$$

式中: s ——桩身最终沉降量, mm; s_1 ——桩端残留虚土被压实引起的桩端沉降量, mm, 一般 $50 \sim 150 \text{ mm}$, 常取 100 mm ; s_2 ——桩端土压缩或破坏引起的桩端最终沉降量, mm; s_3 ——大坍落度桩身混凝土凝固引起的桩身沉降量, mm, 取 $s_3 = H/150$ (经验值, 取自 $150 \times 150 \times 150$ 试块中混凝土终凝后, 最终试块内的混凝土面一般比试模低约 1 mm)。

按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94) 第 5.3.5 条, 在桩端土地基承载力相对较好条件下, 桩端地基仅受压缩但未发生破坏时, 桩端最终沉降量 s_2 可按式计算:

$$s_2 = \psi \psi_e s' = \psi \psi_e \sum_{j=1}^m P_{oj} \sum_{i=1}^n \frac{z_{ij} \alpha_{ij} - z_{(i-1)j} \alpha_{(i-1)j}}{E_{si}} \quad (4)$$

式中: ψ ——桩基沉降计算经验系数, 非软土地区和

软土地区桩端有良好持力层时 ψ 取 1, 软土地区且桩端无良好持力层时, 当桩长 $L \leq 25$ m 时, ψ 取 1.7, 桩长 $L > 25$ m 时, ψ 取 $(5.9L - 20)/(7L - 100)$; ψ_e ——桩基等效沉降系数; s' ——按分层总和法计算出的桩端沉降量, mm; p_{oj} ——角点法计算点对应的第 j 块底面长期效应组合的附加应力〔此处指桩身砼凝固前, 桩身砼凝固后, 从(4)式可看出, 一般情况下 $p_{oj} = 0$, 即 $s_2 = 0$ 〕; E_{si} ——等效作用底面以下第 i 层土的压缩模量, MPa; Z_{ij} 、 $Z_{(i-1)j}$ ——桩端平面第 j 块荷载至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离, m; a_{ij} 、 $a_{(i-1)j}$ ——桩端平面第 j 块荷载计算点至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面深度范围内平均附加应力系数。

在桩端为软土, 桩端地基发生破坏条件下, 桩端最终沉降量 s_2 可按下式估算:

$$s_2 = k_1 k_2 (\gamma_t - 18.5)(L - 7.62) \quad (5)$$

式中: k_1 ——桩端软土破坏时沉降经验系数; k_2 ——桩身混凝土凝固时间经验系数, 当混凝土不添加缓凝剂时(钢筋砼桩), k_2 取 1.0; 当混凝土添加缓凝剂时(素砼桩), k_2 取 1.05 ~ 1.2; γ_t ——桩身混凝土重度, 素砼桩取 23.5 kN/m^3 , 钢筋砼桩取 25 kN/m^3 ; L ——桩长, m。

3.2.2 经验系数 K_1

根据公式(3)、(5)和本工程 4 根桩平均下沉实际值 $s = 1.89$ m, 可得出经验系数 K_1 :

$$\begin{aligned} K_1 &= s_2 / [k_2 (\gamma_t - 18.5)(L - 7.62)] \\ &= (s - s_1 - s_3) / [k_2 (\gamma_t - 18.5)(L - 7.62)] \\ &= 23.57 \end{aligned}$$

4 预防软土地基咬合桩桩身下沉的措施

设计时应尽量避免咬合桩桩端落在地基承载力低的软土或高压缩性的土层上, 在施工中应尽量将桩端残留虚土清理干净也是减少总沉降量一个简单有效措施。

当咬合桩桩端为软土时, 桩身下沉的应对措施主要有:

(1) 咬合桩套管内减少取土深度, 预留一定高

度的土柱, 提高桩顶的混凝土超灌高度;

(2) 由式(4)可知, 桩端直径 D 越大, 造成桩身沉降的附加应力 p_{oj} 越小, 因此, 增大桩端面积是减少沉降的有效措施之一, 可在桩底回填块石、铺设土工布等, 以便桩端下沉后, 在桩端形成扩大头, 增大桩端受力面积, 减少沉降量;

(3) 提高桩端土地基承载力或压缩模量 E_{si} (如桩端土内可插设毛竹、上铺片石等措施), 提高桩端土压缩模量 E_{si} , 减少桩端沉降。

在地下水位较高的地层中, 当咬合桩桩端为砂土或粉土时, 因咬合桩在成孔过程中采用冲抓斗反复冲击挖掘取土, 冲击产生的震动易引起砂土或粉土液化, 降低地基承载力, 有可能引起已经浇筑混凝土的咬合桩桩身发生显著下沉, 故应对该砂土或粉土层进行液化判别, 对于判为液化的砂土或粉土层, 应采取措施消除地基液化或者采取上述应对措施。

5 结语

咬合桩桩身下沉主要由桩端虚土压缩、桩端土压缩沉降和桩身砼凝固沉降组成。当桩端土为地基承载力高的硬土层时, 桩端土压缩沉降量较小, 咬合桩桩身下沉亦较小; 当桩端土为地基承载力很低的软土(主要为淤泥和淤泥质粘土)时, 桩端土压缩沉降量很大, 咬合桩桩身下沉量非常大, 已影响到咬合桩正常使用要求, 须加以预防或避免。

在施工前可根据经验系数 K_1 值先预估桩身下沉的理论量, 然后在施工中预留相同量土柱高度和相应的混凝土加灌高度, 以保证在施工完成后桩身能够满足设计要求。

参考文献:

- [1] JGJ 94-94, 建筑桩基技术规范[S].
- [2] GB 50007-2002, 建筑地基基础设计规范[S].
- [3] 顾晓鲁, 钱鸿缙, 刘惠珊, 等. 地基与基础(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [4] 常士骝, 张苏民. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

欢迎订阅 2009 年《水利水电技术》杂志

主管: 水利部 主办: 水利部发展研究中心

《水利水电技术》月刊, 1959 年创刊, 面向国内外公开发刊, 是水利水电行业综合性技术刊物, 全国中文核心期刊、全国水利系统优秀科技期刊、中国期刊方阵双百期刊、第二届国家期刊奖百种重点期刊。它以介绍我国水利水电工程的规划、勘测、设计、施工、运行管理和科学研究等方面的技术和经验为主, 也介绍国外的先进技术和管理经验, 是国内水利水电刊物中影响最大、发行量最多的刊物之一。

每期订价 8 元, 全年 96 元, 邮发代号 2-426

订阅方法:

1、全国各地邮政局(所零售亭)联系订阅; 2、直接与杂志社联系订阅

请按要求填写征订单并寄回, 通过邮局或银行汇款:

开户银行: 交通银行北京安德里支行

户名: 水利发展杂志社

帐号: 1100 6021 1018 0024 2665 7

电话: 010-63205978, 63205987 传真: 63205978 郭春林

地址: 北京海淀玉渊潭南路 3 号 水利发展杂志社 100038