

大直径旋挖钻孔灌注桩应用实例

张建英 邢心魁 姚克俭

(机械工业勘察设计研究院, 西安 710043)

【摘要】 通过西安地区锅锥旋挖钻孔灌注桩应用实例, 简述了该桩基设计应用过程, 总结了有关经验。

【关键词】 旋挖工艺; 桩基; 黄土

【中图分类号】 TU 473.1

An Engineering case of Large Diameter Bored Pile by Churning Drive

【Abstract】 By an engineering case of large diameter bored pile by churning drive in Xi'an area of China, the process of design and application of pile foundation is brief introduced. The experiences about application of pile foundation are summarized and disclosed in order to put the churning drive technique into use widely in loess area. The current existing problems are pointed out combining with practice.

【Key words】 churning drive; pile foundation; loess

0 引言

如何能采用一种投入低成本的桩基方案, 成为建筑师们高层建筑基础方案论证中的课题。在西安地区, 锅锥旋挖钻孔灌注桩作为一种经济实惠桩型发展起来。锅锥旋挖工艺钻孔泥皮薄、孔壁粗糙, 桩土作用咬合力强, 单桩承载力高, 房屋建筑使用安全。

1 工程概况

西安某高层住宅楼地上 19 层, 地下 1 层, 高 58.65 m, 剪力墙结构, 桩筏基础, 基础埋深 -6.9 m, 基底压力 350 kPa, 工程建筑安全及岩土工程勘察等级为 I 级。场地地基土的分布及有关性质指标见表 1。

2 地基基础方案论证

据勘察资料: 当基础埋深为 6.9 m, 相应高程为 400.77 m 时, 基础底面处在黄土②层中, 其承载力特征值(设计值)可达 260 kPa, 天然地基方案不成功; 但地基土的工程性质随深

度增加逐渐趋好, 深部土层中含有钙质结核, 高程 369.8~369.2 m 分布一层密实的中砂层。场地各层土的性质均较好, 不存在软弱下卧层, 采用桩基础方案是适宜的。

预制桩动力打入法被否决, 最后确定采用锅锥旋挖工艺的钻孔灌注桩。

3 桩基验算

3.1 桩基承载力演算

据基础埋深及桩身穿越土层、桩端土的物理力学指标与承载力参数之间的经验关系, 确定大直径桩($d \geq 800$ mm)单桩竖向极限承载力标准值 Q_{uk} 时, 可按下式确定:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = \mu \sum \Psi_{si} q_{sik} L_{si} + \Psi_p q_{pk} A_p = 5700 \text{ kN} \quad (1)$$

式中: Q_{sik} 、 Q_{pk} 为桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值、桩端土层的极限端阻力标准值; A_p 为桩端面积; Ψ_{si} 、 Ψ_p 为大直径桩侧阻、端阻尺寸效应系数, 查相应规范确定; 据西安地区

表1 桩长范围内地层结构及土的物理力学性质指标

地层	层厚/m	层底高度/m	岩性描述	物理力学性质指标	地层柱状图
② 黄土 Q_3^{ol}	2.4	397.61	黄褐色,硬塑,有针孔,偶见蜗牛壳碎片,具轻微湿陷性,属中等压缩性土	$w=21.5\%$ $r=17.0\text{ kN/m}^3$ $e=0.952$ $I_L=0.36$ $a_{1-2}=0.23\text{ MPa}^{-1}$	
	5.5	398.10			
③ 黄土 Q_3^{ol}	3.2	394.01	黄褐色,可塑,湿~饱和,有针孔,含少量白色钙纹,具轻微湿陷性,属中等压缩性土	$w=26\%$ $r=17.7\text{ kN/m}^3$ $e=0.920$ $I_L=0.49$ $a_{1-2}=0.34\text{ MPa}^{-1}$	
	3.8	394.70			
④ 古土壤 Q_3^f	3.2	390.71	红褐色,可塑,早团粒状结构,可见少量孔隙,含白色钙纹及少量钙质结核,底部结核富集成薄层,属中等压缩性土	$w=23.9\%$ $r=19.6\text{ kN/m}^3$ $e=0.718$ $I_L=0.36$ $a_{1-2}=0.21\text{ MPa}^{-1}$	
	3.9	391.10			
⑤ 黄土 Q_2^f	4.2	386.10	褐黄色,可塑,含少量钙质结核,属中等压缩性	$w=25.5\%$ $r=19.8\text{ kN/m}^3$ $e=0.724$ $I_L=0.51$ $a_{1-2}=0.19\text{ MPa}^{-1}$	
	4.7	386.90			
⑥ 黄土 Q_2^f	6.7	379.27	黄褐色,可塑,含少量钙质结核,局部钙核含量较多,属中等压缩性土	$w=23.7\%$ $r=19.9\text{ kN/m}^3$ $e=0.700$ $I_L=0.31$ $a_{1-2}=0.16\text{ MPa}^{-1}$	
	7.3	379.60			
⑦ 古土壤 Q_2^f	2.8	376.40	红褐色~褐红色,可塑,含少量铁锰质斑点及较多小钙质结核,属中等压缩性土	$w=25.1\%$ $r=19.9\text{ kN/m}^3$ $e=0.714$ $I_L=0.40$ $a_{1-2}=0.19\text{ MPa}^{-1}$	
	3.0	376.60			
⑧ 粉质粘土 Q_2^f	6.8	368.97	黄褐色,可塑,可见铁锰质斑点及少量小钙质结核,属中等压缩性土	$w=23.9\%$ $r=20.0\text{ kN/m}^3$ $e=0.683$ $I_L=0.36$ $a_{1-2}=0.16\text{ MPa}^{-1}$	
	7.5	368.80			
⑨ 中砂 Q_2^{al}	1.3	366.60	灰黄色,密实,砂砾纯净,以石英、长石为主	$N_{63.5}>50$ 击	
	3.2	368.11			

已有试桩经验此单桩承载力比计算值可提高10%~30%。

按桩身材料控制基桩竖向承载力设计值

$$R_1 = A f_c \Psi_c = 3\ 591 \sim 4\ 189\text{ kN} > 3\ 450\text{ kN} \quad (2)$$

式中: f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; Ψ_c 、 A 为工作条件系数、桩身截面面积;灌注桩 Ψ_c 取0.6~0.7(水下灌注桩或长桩时用低值)。

按静载试验及式(1)确定基桩竖向承载力设计值时,可按下式估算。

$$R_2 = Q_{uk} / \gamma_{sp} = 3\ 454 \sim 3\ 695\text{ kN} > 3\ 450\text{ kN} \quad (3)$$

式中: γ_{sp} 为桩侧阻端阻综合阻抗力分项系数(静载试验法求取 Q_{uk} 时取1.60,非静载试验法求取时按经验取值为1.65)。一般情况下单桩极限承载力 Q_{uk} 宜按现场静载试验确定。

已知轴心竖向力作用下,总竖向荷载值

($F_k + G_k$)578 900 kN(未计入底板重),确定荷载效应标准组合轴心竖向力采用值 $Q_k = 2\ 850\text{ kN}$ 。桩数 $n = (F_k + G_k) / Q_k = 203.12$ 根,考虑到地震作用、风荷载组合作用等,实际布桩数达248根。

本设计因桩顶以下存在5.2 m厚的I级非自重湿陷性黄土,考虑上部桩周土可能增湿下陷负面影响,其桩间土承载作用未计入。地下室兼做设备层,地下室底板兼做桩基承台板,为此桩顶上统一作一筏式基础,梁式筏板厚度1.80 m。

确定单桩水平承载力设计值时,直接采用现场静载试验确定设计参数。

对于正常固结粘性土与砂类土; m 法所求取水平地基反力系数应随深度而增加。常以10 mm作为允许水平位移,可基本保证桩身不裂,桩前土有较小的塑性变形区。

3.2 桩基沉降演算

据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94)第5.3节有关规定,分别对不同桩型、不同桩长的群桩利用电算进行等效作用分层综合法沉降估算。据估算结果并结合西安地区桩基工程实测沉降结果,群桩基础的沉降约在40~60 mm内,在规范要求200 mm内。

采用桩顶高程为400.77 m,桩长31.00 m,桩径800 mm,桩身混凝土强度等级为C25的大直径旋挖灌注桩,长径比38.8,摩擦桩型,桩身全断面配筋率0.75%,网格状均匀布桩,桩间距2.9~3.5 D ,工程桩总数248根。单桩竖向承载力设计值不小于3 450 kN,预估单桩竖向承载力标准值不小于5 700 kN,设计要求试验确定工程桩施工参数,提供桩顶水平位移10 mm所对应的水平荷载值。若试桩结果与设计不符,将重新调整工程桩桩位。

4 试桩与检测结果

试桩数量3根,位置具有代表性,编号为S₁、S₂、S₃。

4.1 试验桩基本参数

试验桩桩顶标高均为-6.90 m (±0.00

为绝对高程 407.67 m), 桩身砼强度为 C25, 用锅锥旋挖钻机成孔。试桩参数见表 2。

表 2 竖向及水平静载试验参数表

桩号	试验坑底面高程/m	桩底高程/m	桩头出露高度/m	入土桩长/m	水平推力高程/m	充盈系数	间歇时间/d	桩身情况	混凝土纵波波速/(m·s ⁻¹)
S ₁	400.85	368.80	0.60	32.05	400.77	1.10	30	基本完整, 桩顶下 6.0 m 处轻度缩径	3 600
S ₂	400.77	369.24	0.50	31.53	400.77	1.10	33	完整	3 800
S ₃	400.77	369.20	0.74	31.57	400.77	1.07	38	完整	3 500

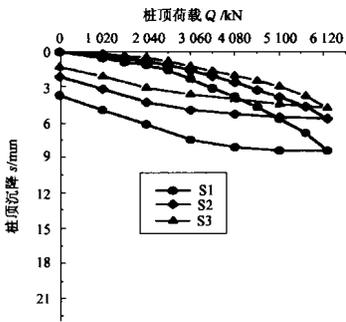
4.2 试验情况说明

采用慢速维持荷载法和桩顶无约束单向多循环加卸载法分别进行三组单桩的竖向抗压静载试验及其水平静载试验。竖向试验时考虑到黄土湿陷性承载力需修正问题最大加载至 6 210 kN。水平静载试验时严格按试验

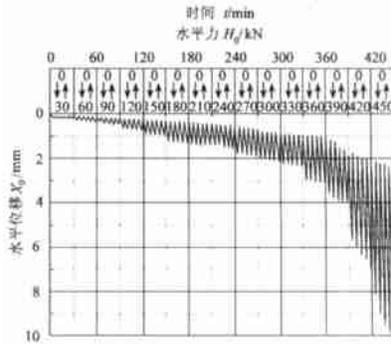
要求进行。

4.3 单桩竖向抗压及水平静载试验结果

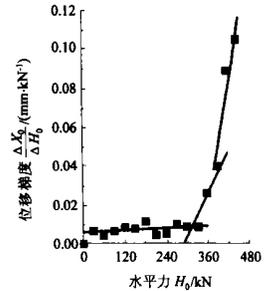
单桩竖向及典型水平静载试验成果见图 1。单桩竖向极限承载力 Q_u 及水平临界荷载 H_{cr} 和 10 mm 特征值取值见表 3。



(a) $Q-s$ 曲线



(b) H_0-T-X_0 曲线



(c) $H_0-\Delta X_0/\Delta H_0$ 曲线

图 1 单桩竖向及典型水平静载试验成果图

表 3 单桩竖向极限承载力 Q_u 及水平临界荷载 H_{cr} 和 10 mm 特征值表

桩号	取值方法/kN		综合判定 Q_u/kN	对应桩顶沉降 s/mm	水平临界荷载 H_{cr}/kN			对应水平位移 X_{cr}/mm	相应转角 $\theta/(\circ)$	水平位移约 10 mm 时	
	$Q-s$ 曲线陡降法	$s-lgt$ 曲线弯曲法			H_0-T-x_0 法	$H_0-\Delta X_0/\Delta H_0$ 法	综合取值			水平荷载值/kN	实测位移/mm
S ₁	$\geq 6\ 210$	$\geq 6\ 210$	$\geq 6\ 210$	8.53	330	300	300	1.14	0.116	450	10.05
S ₂	$> 6\ 210$	$> 6\ 210$	$> 6\ 210$	5.80	390	300	300	0.75	0.103	450	8.60(m)
S ₃	$> 6\ 210$	$> 6\ 210$	$> 6\ 210$	4.91	330	300	300	2.15	0.132	450	10.13

* 450 kN 荷载时水平位移急剧增大不能施加下一级荷载

试桩结论当桩顶高程为 400.77 m、桩径 800 mm, 桩长不小于 31.50 m, 桩身混凝土强度为 C25、在采用锅锥旋挖成孔、水下灌注混凝土条件下, 在上部桩周土折减至饱和情况下的单桩极限承载力为 5 912 kN。综合考虑试

桩代表性、筏板自重等其它因素外, 本场地单桩极限承载力满足设计值 3 450 kN 要求。原设计不变。

4.4 工程桩检测

按试桩结论组织桩基施工, 对施工完工程

桩进行低应变检测,使用美国桩基动力公司生产的 P·I·T 桩身完整性测试仪,检测方法为反

射波法。检测桩数共 112 根。抽检率为45.3%,满足规范要求。低应变检测结果见表 4。

表 4 低应变检测结果

类别	根数	占低应变检测桩数百分比/%	桩身完整特征	混凝土质量评价
I类	100	89.3	桩身完整	
II类	11	9.8	桩身有轻微缩径,承载力极限状态下不会因桩身破坏而丧失结构承载力	1. 检测桩混凝土纵波波速值介于 2 500~4 200 m/s,平均值 3 665 m/s
III类	1	0.89	桩身有明显缺陷,判定为中度缩径对桩身结构承载力有影响	2. 依据混凝土纵波波速值与混凝土强度有关对应关系,场地各桩混凝土质量良好
VI类	0	0	桩身存在严重缺陷	3. 试桩平均波速 3 633 m/s,检测情况与试桩基本相同。可认为本工程桩总体良好

从 S₁ 试桩可看出对于 II 类桩不存在竖向及水平承载力应用问题,对于一根中等缩径桩(125#)采用了在其旁对称位置补桩 2 根处理,经低应变动力检测完全满足设计要求。

高应变检测采用美国桩基动力公司生产的 PDA 打桩分析仪,分析方法采用实测曲线拟合法。试验结果见表 5,检测所用锤重为 60 kN,抽检率为 3.23%,符合规范要求。

表 5 高应变承载力试验结果

桩号	桩侧摩阻力/kN	桩端阻力/kN	实测极限承载力/kN	端阻力发挥度/%	评价
29	5 730	500	6 230	8.03	1. 桩的极限侧摩阻力标准值 72.3 (68.5) kPa 比按规范计算值 70.9 (63.5) kPa 高 2 (7.9)%;提高不大; 2. 桩的极限端阻力 925.1 kPa 低于规范值 1 800 kPa 48.61%。
40	5 720	360	6 080	5.92	
67	5 774	526	6 300	8.35	
114	5 693	516	6 209	8.31	
120	5 684	422	6 106	6.91	
124	5 703	389	6 092	6.39	
215	5 752	456	6 208	7.35	
229	5 701	482	6 183	7.80	
平均值	5 720(5 422)	456	6 176(5 878)	7.38(7.91)	

* 括号内数字系经修正至桩身上部桩周土饱和和状态下参数值

4.5 沉降观测

布置沉降观测点 8 个在结构施工期间,每增加一层观测一次;封顶后第一年,每三个月观测一次共观测 4 次,封顶后第二年,每半年观测一次,共观测 2 次。

自 1999 年 5 月开始,至 2001 年 11 月观测工作结束,历时两年半,共观测 26 次。

本工程沉降观测成果分最大沉降量累计值(6#) 15.1 mm、最小沉降量累计值(3#) 8.1 mm;整体倾斜度最大值 0.000 15,低于规范要求 0.003(即低 20 倍);平均沉降量累计

值随时间关系曲线见图 2。平均沉降量累计值 10.1 mm,更低于规范容许值 200 mm。

该建筑物封顶后 3 个月沉降速率就已达到

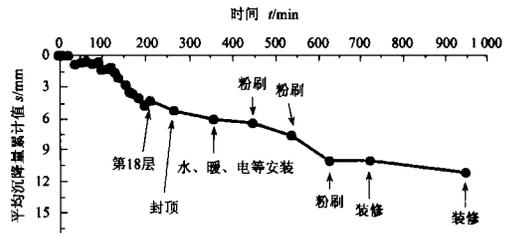


图 2 沉降与时间关系曲线图

稳定指标,且随时间的不断推移,没有反弹迹象,说明该住宅楼已达到稳定状态。

5 施工技术问题

西安地区锅锥旋挖钻孔桩是一种利用锅形钻头低动力回转,靠钻杆和锅自重加载钻进的小型钻探成孔机械。它成孔时泥皮较薄,有利于桩基侧阻力发挥。该钻机重量轻、占地较少、可适于简单和复杂场地转点作业,一次可投入多台设备、可大大缩短周期,本工程投入钻机 12 台,历时 20 d 完成 233 根桩施工,比大吨位静压预制方桩节约 137 万元。

用水下导管法灌注成桩,首批灌料必须采用大体积混凝土方量冲击灌注法。混凝土灌注实践表明当冲力大于其阻力 3 倍以上时可完全冲开桩底沉渣和沉淤。

有关计算如下:

假定:①混凝土料同桩底原岩发生连续正碰转换,冲击时原有的水或混凝土体被顶升(新浇筑混凝土体发生流动并趋于稳定);②忽略混凝土沿程阻力及凝滞力;③类于半刚体运动。

$$(N - mg)\Delta t = mv \quad (4)$$

$$N\Delta t = Mv' \quad (5)$$

$$F - Mg = Mv' / \Delta t \quad (6)$$

$$v'^2 = 2gs \quad (7)$$

式中: N 为相互作用平均冲力大小, N 可通过式(4)直接导出; m 为混凝土质量, kg , 通过测量测定; v 为混凝土(沿导管)从高差 $h(m)$ 下落到罐入面高度时速度(m/s), 通过自由落体运动学公式 $h = gt^2/2$ 求取, g 为重力加速度, 取 $10 m/s^2$; Δt 为混凝土落体作用时间(可按实际假定为 $0.5 \sim 3 s$); M 为钻孔中水或已罐入混凝土料质量 kg , 通过测量或灌注方量计算可知; v' 为 m 质量物体返浆速度, 可通过式(4)、(5)联立解出; F 为冲力所产生的返浆顶升力, N , 可通过式(6)直接导出; S 为返浆顶升位移度, m 可通过式(7)导出。

应特别注意观察(测)首批罐料后相应返

浆速度及返浆量大小, 由于有理论计算指导保证了首次灌料一次成功。以后可直接借助料车将混凝土倒入导管中, 保持灌注连续性即中途不得停歇, 拔管速度不得过猛或拔出。需要注意的是(1)在灌注过程中确保导管插入混凝土深度不小于 $0.80 m$; (2)灌注近孔口时应注意管内混凝土落差; 注重查阅灌注桩施工记录并综合充盈系数变异情况判定扩径、缩径等桩的缺陷情况。

6 结论与建议

1) 锅锥旋挖钻孔灌注桩在西安地区黄土地基高层建筑应用是可行的;

2) 锅锥旋挖钻孔灌注桩在西安地区应用较为成熟, 桩基质量保证率高、工期短, 基础沉降小, 是西安地区经济桩型, 值得推广。

3) 比较重要建筑物或比较复杂场地除验算桩基承载力及桩基础沉降外, 还应进行试桩和基础沉降观测, 以验证设计是否正确合理。

4) 此桩型应用存在以下不足: ①试桩最终加载偏于保守。桩基静载试验最终沉降量大于 $60 mm$ 的工程实例不多(本工程为 $4.91 \sim 8.53 mm$); ②锅锥旋挖工艺动力较小、不能液压加载钻进、无泥浆护壁设备。这是局限应用于 30 层以下高层建筑地基基础原因。

参 考 文 献

- 1 张炜, 茹伯勋. 西安地区旋挖钻孔灌注桩竖向承载力特性的试验研究. 岩土工程技术. 1999(4): 39~43.
- 2 邢心魁, 张炜, 张顺强. 桩的荷载传递法在西安地区旋挖钻孔灌注桩的应用. 岩土工程技术. 2001(1): 18~22.
- 3 米祥友, 彭安宁. 基础工程 400 例 技术经济观点 (下册) 北京: 地震出版社, 1999. 3~295.
- 4 GB 50007-2002 建筑地基基础设计规范
- 5 JGJ 106-2003 建筑工程基桩检测技术规范

收稿日期: 2003-03-31