

# 夯扩桩在高层建筑软土地基中的应用

霍凯成

(武汉工业大学设计院, 武汉 430070)

**【摘要】** 以建在软土地基上的高层建筑采用夯扩桩为实例, 对该桩型在设计、施工方面的一些问题作了分析、研究, 并与类似地基上倾斜过大而被爆破拆除的 18 层高层建筑的桩基进行了对比。

**【关键词】** 夯扩桩; 软土地基; 单桩承载力

**【中图分类号】** TU472.31

## Application of Ram Expand Piles used in High-rise Buildings with Soft Soil Foundation

**【Abstract】** Based on a practical project of ram-expanded piles used in a high-rise building with soft soil foundation, some problems concerning design and construction of such kind of piles are analyzed and studied. A comparison with the foundation piles used in another eighteen-layer high-rise building with the same foundation, which is exploded because of its large inclination, is given.

**【Key words】** ram-expanded pile; soft soil foundation; bearing capacity of single pile

### 1 工程概况

某综合大楼位于武汉市香港路, 建筑面积 18 950 m<sup>2</sup>。主楼地上 16 层, 地下 1 层, 裙楼地上 5 层, 高度为 57.75 m, 结构型式为框架-剪力墙。

建筑场地现为工厂厂区, 原为湖塘地带, 后经改造填平, 现地形平坦, 场地内各土层分布及主要物理力学指标详见表 1。地下水稳定水位在地表下 0.9 m 左右。场地土属软弱场地土, 建筑场地类别为 III 类。

表 1 各土层分布及主要物理力学指标表

序号	土层名称	层厚/m	深度范围/m	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	地基承载力 标准值 $f_k/\text{kPa}$	比贯入阻力 $p_s/\text{MPa}$
①	填土	2.2~4.0	0.0~4.0	18	3.5	60	
②	淤泥质土	4.0~7.2	2.2~4.0	17.2	2.8	65	0.4~0.5
③ <sub>1</sub>	淤泥质土夹薄层粉砂	3.6~16.5	7.8~10.0	17.3	4.0	100	0.7~1.0
③ <sub>2</sub>	粉砂夹薄层淤泥质土	0.0~7.9	13.2~17.2	17.9	9.0	120	1.5~3.0
③ <sub>3</sub>	淤泥质土	0.0~2.9	17.2~24.0	16.9	4.3	110	0.7~1.9
④ <sub>1</sub>	粉砂	0.0~7.8	18.2~27.0	18.5	13.0	200	6.2~8.1
④ <sub>2</sub>	粉细砂	6.0~14.6	26.0~28.6		18.0	240	7.0~8.3
④ <sub>3</sub>	中粗砂	3.0~10.0	34.6~41.0		19.0	280	
⑤	泥岩、砾岩互层	未钻穿	43~45				

### 2 夯扩桩的成桩过程及承载机理

#### 2.1 成桩过程

汉口地区属长江 I 级阶地软土地区, 工程

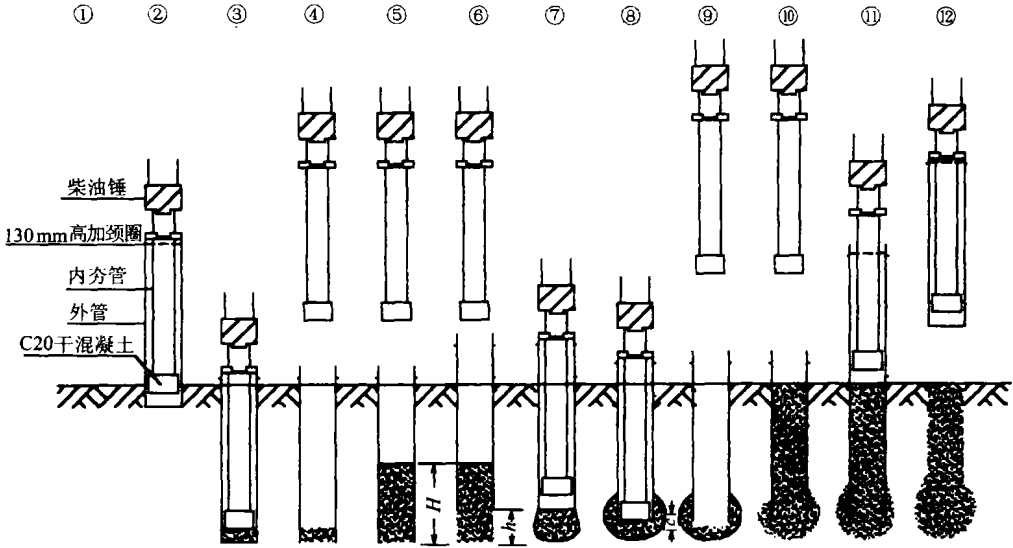
地质状况较差, 故大部分高层建筑采用持力层为中、微风化岩层的钻孔灌注桩, 少部分采用桩端持力层为中、粗、细砂的静压预制钢筋混

**作者简介:** 霍凯成, 1950 年生, 男, 汉族, 湖北鄂州人, 研究生, 总工程师, 高级工程师。现主要从事建筑结构设计与桩基研究工作。

凝土方桩、沉管灌注桩及夯扩桩等。

根据上部荷载及地质状况,本工程曾对钻孔灌注桩、静压钢筋混凝土预制桩等桩型进行了分析比较。当采用钻孔灌注桩时桩径大,桩身长,而单桩竖向承载力并不高。其原因在于,自然地面以下 24 m 范围内土质软弱,桩的侧摩阻力较低,理论计算难以满足上部荷载对

桩的承载力较高的要求。经多方案比较后,决定本工程采用夯扩桩。桩身直径为 480 mm,扩大头直径为 900 mm,桩身混凝土强度等级为 C25,有效桩长为 24 m,桩尖进入第④<sub>1</sub>层粉砂层,单桩竖向极限承载力标准值为 2 000 kN。成桩步骤详见图 1。



- ①在地表桩位上放置干混凝土;
- ②在外管内放入内夯管,对准桩位;
- ③锤击外管、内夯管沉管入土至设计深度;
- ④内夯管从外管内提升至外管上空,提升高度以能灌注混凝土即可,卸去外管上端的加颈圈;
- ⑤灌注夯扩头设计所需混凝土量;
- ⑥外管上拔设计规定高度  $hm$ ;
- ⑦放下内夯管进入外管内,锤击内夯管先把外管内混凝土夯出管外(如外管跟下,须用钢丝绳将外管吊住,不让其跟下);
- ⑧外管内混凝土夯出后,在锤击作用下,外管、内夯管同步下沉到设计规定深度  $(h-c)m$ ;
- ⑨拔出内夯管,提升至外管上空;
- ⑩在外管上端放上加颈圈,灌注桩身部分所需混凝土量;
- ⑪将内夯管平底压在外管内的混凝土面上,边拔外管、边加压,同时内夯管进入外管内,并控制内夯管的加压深度;
- ⑫外管拔出地面移位后,再打另一根桩。如设计采用二次夯扩,先进行①~⑨工序,然后重复⑤~⑫工序,如采用钢筋笼全长配筋,则在⑨工序后放入钢筋笼,再灌注桩身混凝土量;如采用桩身插筋,⑫工序完成后,立即将钢筋插入现浇混凝土中。

图 1 夯扩桩施工工序示意图

## 2.2 承载机理

夯扩桩(即无桩靴夯扩桩)是在扩底桩与价廉的沉管灌注桩基础上发展起来的。桩身全部采用现浇混凝土,桩端夯击成平底扩大头

的同时,对桩端地基土强制夯击挤密,现浇混凝土桩身又可借助内夯管加压成型,桩施工进度快。由于桩端的夯扩、扩大端承面积和挤密地基土,因端承力与半径成平方关系,半径扩

大一倍,面积增加四倍,从而大大提高了桩的端承力。在沉桩过程中,挤密了桩周土,提高了桩周摩阻力,即提高了桩周土的侧摩阻力 $q_s$ 值。桩亦可加压,提高了桩身质量,克服了沉管灌注桩承载力低、桩身易缩颈、断桩等弊病,是一种主要承受竖向力、新颖廉价的桩型。在适当的工程地质条件下,用它代替沉管灌注桩、钢筋混凝土预制桩、钻孔灌注桩均能取得显著的经济效益和大大加快工程进度。所以目前在一些地区得到了广泛应用。

### 3 桩基设计与计算

#### 3.1 地基勘察要求

该桩型在施工过程中,积累了一套经验,摸索出 $q_s$ 、 $q_p$ 与土层比贯入阻力 $p_s$ 值的对应

关系,各土层的比贯入阻力 $p_s$ 值成为施工的重要参数。因此勘察报告应提供静力触探比贯入阻力 $p_s$ 沿深度的变化曲线及各土层的 $p_s$ 值平均值。

#### 3.2 桩端持力层的确定

根据本工程场地地质状况及桩基施工能力,选定比贯入阻力 $p_s$ 值为6 MPa的粉砂层作为持力层,桩入土深度为24 m。

#### 3.3 单桩承载力的确定

按规范要求,本工程选定4根桩进行单桩竖向静载试验,试验采用堆载反力法,加荷采用慢速维持荷载法,试验结果详见图2。试桩前对单桩竖向承载力进行了试算。

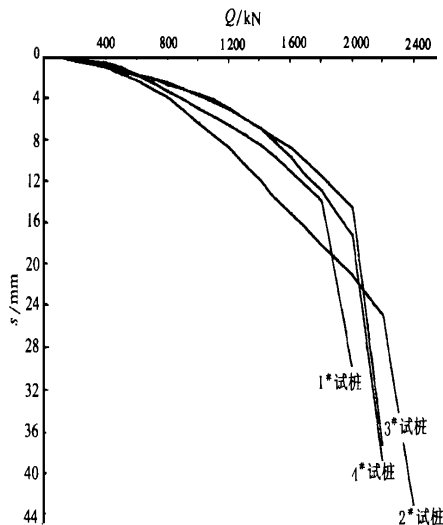


图2 试桩 $Q-s$ 曲线

#### 1) 桩计算几何参数

- a. 桩直径取 $\phi 480$  mm。
- b. 桩有效长度24 m。

#### 2) 单桩竖向承载力试算

按文献[1]有关参数计算:

单桩竖向极限承载力标准值:

$$Q_{uk} = u \sum q_{sik} l_i + q_p A_p = 1492, \text{ kN} \quad (1)$$

单桩竖向承载力设计值:

$$R = 1492 / 1.75 = 853, \text{ kN}$$

#### 3.4 桩身强度验算及配筋

竖向荷载作用下桩身承载力应满足下式要求:

$$\gamma_0 R \leq 0.8 f_c A + f_y A_s \quad (2)$$

式中: $\gamma_0$ 为结构重要性系数,本工程桩基安全等级为二级, $\gamma_0 = 1.0$ 。

按构造配8 $\Phi 16$ 主筋,则有 $0.8 f_c A + f_y A_s = 2148 \text{ kN} > R = 853 \text{ kN}$ ,可满足(2)式要求,箍筋采用 $\phi 6 @ 200$ 。

### 3.5 布桩方式及桩距

电梯井筒处采用密布群桩, 其余柱下采用 3~9 根桩。

鉴于本桩型属打入式挤土桩, 且场地存在深厚淤泥质土层, 为避免施工中出現缩颈断桩现象, 设计中桩距取  $3.75 d = 1.8 \text{ m}$  ( $d$  为桩径)。

## 4 施工要求

### 4.1 打桩质量控制

由于本工程桩较长, 超出规定长度 4 m, 桩的有效桩长是施工中应注意的一个重要指标。与其它打入式桩一样, 贯入度是施工中决定收锤的一个重要指标。施工前先进行试成孔试成桩, 摸索本工程桩的收锤标准, 以最后 2 阵 10 击贯入度 250 mm 为标准。施工时采用双控, 以桩深控制为主, 贯入度控制为辅。本工程除了对桩有贯入度控制要求外, 同时对扩大头也提出了贯入度控制要求。

### 4.2 桩身混凝土质量的控制

夯扩桩由于桩直径较小 ( $\phi 325 \sim \phi 530$ ), 常出現缩颈、断桩等现象, 特别是在深厚的淤泥中尤为严重, 原因在于在沉桩过程中桩周土层受挤压和扰动引起饱和土层中的超孔隙水压力, 致地表隆起, 使桩受到水平推力, 若邻桩的桩身混凝土尚未初凝或虽已初凝但强度较低时, 在水平推力作用下, 极易引起桩身缩颈乃至断桩。邻近本工程 500 m 远处原有一座高 18 层的住宅大楼在 1995 年 12 月下旬曾因桩基事故导致大楼顶端偏移 2 884 mm 而被迫拆除, 更应慎重从事。为此本工程在施工中采取了以下措施:

1) 设计桩径取直径  $\phi 480 \text{ mm}$ , 纵筋混凝土保护层为 50 mm。

2) 桩顶 2 m 范围内箍筋间距加密至  $\phi 6 @ 150$ 。

3) 为最大限度减少施工过程中桩相互间的影响, 对于桩数多于 8 根的同—承台中的相邻桩必须采取隔桩跳打。

4) 检查止淤封底质量的控制。当锤击双

管沉管至设计深度后, 抽出内夯管必须检查内夯管下端是否干燥, 外管内有無进水, 如失败, 应采取有效措施。

5) 配制混凝土的原材料, 即水泥、砂子、石子强度及级配应合格。混凝土的配合比、坍落度、充盈系数应符合设计要求。

6) 安放钢筋笼的质量控制, 应将钢筋笼缓慢地下放到桩管内, 并检查筋笼是否下到底、且位置应居中才可浇灌桩身混凝土。

7) 内夯管底面应压在桩身现浇混凝土的顶面, 边加压边拔外管, 拔管速度控制在  $1 \sim 2 \text{ m/min}$  以内。内夯管底应控制均速加压与钢筋上端不得小于 0.5 m 的距离, 以确保钢筋笼不被压弯。

8) 对单桩承载力要求较高及大片密集夯扩桩工程宜进行地基土孔隙水压力、土体水平和垂直位移等项监测工作, 在老城区或周边条件较复杂的地区宜采取有效的隔震和减震措施, 必要时可进行震动影响监测工作。

9) 对具有深基坑的高承载力夯扩桩工程, 应认真做好基坑支护开挖施工, 并考虑基坑开挖时边坡土体的侧移及坑底的稳定对工程桩的影响; 土体开挖时应按分层开挖的原则进行, 避免使桩身两侧出現较大的土压力差。

10) 基坑开挖当采用机械挖土时必须确保基坑内的桩体不受损坏, 基坑回填土应分层夯实, 对称进行。

## 5 试桩结果及分析

### 5.1 试桩概况

本工程对 4 根试桩进行了单桩竖向静载试验, 采用堆载加载方式。对 4 根桩进行破坏性试验。试桩  $Q-s$  曲线详见图 2。试桩结果见表 2。

为检验桩身混凝土质量, 对该工程 492 根桩全部进行了低应变检测, 采用反射波法对桩身质量进行无损检测, 检测结果: I 类桩 360 根, 占 73%; II 类桩 80 根, 占 17%; III 类桩 40 根, 占 8%; IV 类桩 12 根, 占 2%。对 III 类、IV 类桩全部进行补桩处理。

表2 静载试桩成果表

试桩编号	桩入土深度/m	桩顶最大加载/kN 相应桩顶沉降/mm	极限承载力标准值 对应的沉降/mm	单桩竖向极限承载力 标准值/kN
1	24	$\frac{2\ 200}{36.68}$	16.80	2 000
2	24	$\frac{2\ 400}{42.48}$	24.67	2 200
3	24	$\frac{2\ 200}{38.53}$	17.12	2 000
4	24	$\frac{2\ 000}{23.31}$	13.72	2 800

## 5.2 试桩结果分析

4根试桩加载至最大荷载时其沉降均小于42.5 mm。根据文献[1]附录C.0.11条规定,实测极限承载力平均值  $Q_{um}=2\ 000\text{ kN}$ ,其标准差  $S_n=0.08$ ,单桩竖向极限承载力标准值  $Q_{uk}=Q_{um}=2\ 000\text{ kN}$ 。单桩竖向承载力设计值  $R=Q_{uk}/1.7=1\ 176\text{ kN}$ ,其结果大于理论计算值  $R=853\text{ kN}$ 。说明夯扩桩的  $q_s$ 、 $q_p$  值尚具有潜力。

## 6 与某18层建筑夯扩桩的比较

某被迫拆除的18层楼距本工程场地约500 m远,为一幢点式住宅楼,平面呈十字型,基底占地面面积约800 m<sup>2</sup>,地上18层,地下1层,总建筑面积1.46万 m<sup>2</sup>,高度为56.6 m,钢筋混凝土剪力墙结构,基础采用桩基,桩型为夯扩桩,桩直径为 $\phi 480$ ,单桩竖向承载力设计值为1 000 kN,桩长16.0~20.0 m,桩端持

力层为粉细砂层,桩端进入持力层内0.8 m,详见表3。这幢18层住宅由于设计与施工中多个环节失误造成其群桩整体失稳而严重倾斜被迫拆除。本工程场地距某18层住宅如此之近,且地质状况非常接近,同样的桩型,结果完全不同,本工程取得了成功,而某18层住宅楼被迫拆除,关键在于本工程设计和施工方面采取了保证工程质量的相应措施。本工程1998年10月结构封顶,目前已竣工,沉降仅18 mm,表明本工程采用的桩基设计方案以及施工达到了规范<sup>[1]</sup>规定的要求,其质量是可靠的。本工程桩基克服了某18层住宅楼夯扩桩桩基的几个失误点:①基坑支护;②接桩;③基坑开挖高差控制;④对桩身存在严重缺陷Ⅲ类桩的处理及桩位偏差超过规范规定的允许偏差值的处理。所以,本工程能够取得成功。

表3 地基土层主要物理力学指标表

层号	土名	层厚/m	值称	含水量 $w/\%$	重度 $r/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 $e$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	比贯入阻力 $p_s/\text{MPa}$
②	淤泥	9.4~14.4	范围值	45.1~78.1	15.0~17.7	1.25~2.30	1.2~2.3	0.20~0.50
			平均值	58.0	16.8	1.63	2.0	0.34
③	淤泥质粘土	2.2~2.4	范围值	39.0~55.6	15.7~17.8	1.11~1.65	1.9~3.7	0.70~1.50
			平均值	47.7	17.0	1.30	2.6	0.94
④ <sub>1</sub>	粉细砂(稍密)	5.6~7.2	范围值					4.00~7.00
			平均值					5.3
④ <sub>2</sub>	粉细砂(稍密)	13.8~19.6	范围值					7.00~9.50
			平均值					8.50

## 7 结 语

1) 工程实践表明: 采用夯扩桩作为高层建筑软土地基中的桩基础只要设计和施工处理得当, 同样是安全可靠的, 且具有明显的经济效益。

2) 为避免夯扩桩易产生断桩、缩颈等质量问题, 保证桩身混凝土质量可靠, 在施工时应采取有效措施。

(上接第 68 页)

但当  $t/H \geq \alpha$  (近于 1 的常数) 时, 增加入土深度对变形控制效果不显著。

6) 给出了计算支护桩弹性模量、抗拉强度、抗压强度、粘聚力、内摩擦角的公式和求土体的抗拉强度、抗压强度的公式。

## 参 考 文 献

- 1 李云安. 深基坑工程变形控制优化设计及其有限元数值模拟系统研究: [学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2000
- 2 李云安, 钟玉芳, 张鸿昌. 影响基坑变形实质性状态分析. 地质与勘探, 2000, 6(2): 49~52
- 3 刘建航, 侯学渊主编. 基坑工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 75~321
- 4 黄强. 基坑土体稳定性无量纲分析. 见: 潘家铮等主编. 岩土工程青年专家学术论坛文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 182~189
- 5 侯学渊, 杨敏主编. 软土地基变形控制设计理论和工程实践. 上海: 同济大学出版社, 1996. 64~217

## 参 考 文 献

- 1 中国建筑科学研究院. JGJ94-94. 建筑桩基技术规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995
- 2 杨家丽. 夯扩桩的施工与质量控制. 见: 刘金砺主编. 桩基工程设计与施工技术. 北京: 中国建材工业出版社, 1994

收稿日期: 2000-11-13

- 6 朱合华, 杨林德, 桥本正. 深基坑工程动态施工反演分析与变形预报. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 30~35
- 7 潘别桐, 黄润秋主编. 工程地质数值法. 北京: 地质出版社, 1994. 23~123
- 8 Chang Yu - ou, Associate Member, ASCE, et al. Threedemensional Finite Element Analysis of Deep Excavations. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(5): 337~345
- 9 N. Markris, G. Gazetas, Delis. Dynamic Soil - file Foundation Structure Interaction; Records and Predictions. Geotechnique, 1996, 46(1): 33~50
- 10 Charles W. W. Ng, B. Simpson, M. L. Ling, D. F. T. Nash. Numerical Analysis of a Multipropped Excavation in Stiff Clay. Candian Geotechnical Journal, 1998, 35: 115~130
- 11 H. G. Poulos, Fellow, ASCE, L. T. Chen. Pile Response due to Excavation - Induced Lateral Soil Movement. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(2): 94~99

收稿日期: 2001-01-09