

选择夯扩桩桩端持力层的新突破

高玉国 魏章和

(机械工业部第三勘察研究院 武汉市 430030)

【摘要】针对我院1993年完成的汉正街某夯扩桩工程中利用 P_{s} 仅1.1MPa的粉土与淤泥质粉质粘土互层作为桩端持力层的成功实例,突破了桩基规范上对桩端持力层的要求,扩大了桩基的应用领域。本文目的在于引起同行在处理软弱地基中采用桩基础时,对桩端持力层及桩型的选择一定要慎重和供以后建筑桩基规范修订时参考。

【Abstract】 The requirements for the bearing stratum at the pile tip in the standard of pile foundation are broken through and the applying region is expended by the successful practice. The aim of this paper is to emphasize the important of the selection of the bearing stratum at the pile tip and the pile type during the processing of the soft foundation and to provide inference for the revision of the standard of the structure pile foundation.

1 工程概况

武汉市汉华房地产开发建筑有限公司在汉口汉正街万安片改造工程中兴建B、C两栋综合楼,占地面积6000m²,总建筑面积37059m²,框架结构。为节约工程造价,建设、设计、施工单位经多次论证,决定将原拟采用的预制钢筋砼静压桩改为夯扩砼灌注桩,并委托我院施工。

本项目设计采用 $\phi 426$ mm直径夯扩桩,桩端持力层选在(2—2)层粉土与淤泥质粉质粘土互层中,有效桩长16.0m,桩总数为1536根(包括试桩14根),单桩承载力标准值 $R_k = 550$ kN。施工时间从1992年11月9日开始,至1993年1月14日全部结束,实际有效工作日50天,由四台HDJ40型夯扩桩机完成。

2 场区土层特征

根据场区工程地质勘察报告,场区土层特征及主要物理力学指标详见表1和表2。其中表1中土层柱状图是具有完整土层分布的C18号孔为例。

场地地下水埋深0.90~1.30m,据水质分析结果,地下水对砼无侵蚀性。

3 桩端持力层的选择和夯扩桩基础设计与施工

3.1 桩端持力层的选择

根据表1和表2,场地天然地基不能满足九层综合楼的荷载要求,采用桩基础是合适的。桩端持力层选在密实、 $p_s = 8.0$ MPa的(3)粉细砂层中,当然最为理想。但此层埋深在30m左右,无论采用何种桩基,工程造价对于九层综合楼而言都是较高的。若能采用埋深15m左右的(2—2)层粉土与淤泥质粉质粘土互层作为夯扩桩桩端持力层,则工程造价可大大降低。但此层土前人从未作过桩端持力层。《建筑桩基技术规范》(1993年3月)中对软土地区的桩基,“宜选择中、低压缩性的粘性土、粉土、中密和密实的砂类土以及碎石类土作为桩端持力层”;《武汉市夯扩桩设计施工技术规定》(WBJ1—10—93)中要求桩端持力层为:“稍密~密实砂土与粉土、可塑~硬塑粘性土及砂土与粘性土交互层”。显然本场地中(2—2)层粉土与淤泥质粉质粘土互层不符合上述要求,但通过对勘察资料的详细分析,(2—2)层粉土与淤泥质粉质粘土互层中粉土呈稍密状

表 1 场 地 土 层 特 征

层 号	土 名	柱状图	厚 度 (m)	土 层 特 征
(1-1)	杂 填 土		2.7	杂色，由砖瓦块、生活垃圾、粘性土等组成。
(1-2)	素 填 土		3.8	以粘性土为主，夹粉土及有机质残渣， $p_s=0.8\text{MPa}$ 。
(2-1)	淤 泥 质 粉 质 粘 土		8.5	褐灰色、流塑夹薄层粉土含云母片及有机质残渣，高压缩性。
(2-2)	粉 土 与 淤 泥 质 粉 质 粘 土 互 层		3.0	褐灰色，粉土呈稍密状态含云母片，中压缩性；淤泥质粉质粘土呈软~流塑状态，中压缩性。
(2-3)	粉 土		5.6	褐灰色，稍密；夹薄层粉质粘土，高压缩性，部分地段缺失。
(2-4)	淤 泥 质 粘 土		10.4	褐灰色，流塑；局部夹粉土薄层，高压缩性。
(3)	粉 细 砂		未穿透	青灰色，密实、饱和，局部地段夹中砂 $p_s=8.0\text{MPa}$ 。

表 2 土 层 主 要 物 理 力 学 指 标 汇 总 表

统计均值 土 层	指 标	天 然 含 水 量	比 重	孔 隙 比	饱 和 度	液 限	塑 限	塑 性 指 数	液 性 指 数	压 缩 系 数	压 缩 模 量	静 力 触 探 比 贯 入 阻 力	桩 周 摩 阻 力	桩 端 承 载 力
		w (%)	G	e	S_r (%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p	I_L	a_{1-2} (MPa)	E_s (MPa)	p_s (kPa)	q_s (kPa)	q_p (kPa)
(2-1) 淤泥质粉质粉土		42.5	2.72	1.25	92	39.6	26.5	13	1.22	0.71	3.2	0.6	8	
(2-2) 粉土与淤泥质粉质粘土互层	粉 土	32.0	2.70	0.92	94	29.6	19.6	10	1.23	0.43	4.7	1.4	12	850
	淤 泥 质 粉 质 粘 土	32.7	2.72	1.09	94	35.4	21.2	14	1.17	0.49	4.4	0.8	9	360
(2-3) 粉 土		34.1	2.70	0.97	95	30.8	21.0	10	1.34	0.40	8.7	2.0	19	1000
(2-4) 淤泥质粘土		40.6	2.74	1.21	92	40.3	21.6	19	1.02	0.76	5.6	1.3	13	

(2-2)层中粉土、淤泥质粉质粘土的 q 值是根据《武汉市夯扩桩设计施工技术规定》(WBJ1-10-93)中第31页中 q 的计算公式计算所得。

态、中等压缩性。若以此层作为夯扩桩的桩端持力层，夯扩桩夯扩过程中对其具有夯实、挤密作用，对此层土尤其是对其中的软~流塑状淤泥质粉质粘土具有改良作用，而且土的互层结构更有利于这种改良作用。另一方面此层土的相对软弱性也有利于夯扩头的成型、扩大。因为夯扩桩施工中，桩周土的挤密，柴油打桩锤的锤击振动，使得桩周

端排水性能比较好的粉土中孔隙水压力不断排泄，土层不断挤密，土的结构比例将发生改变，甚至有可能将淤泥质粉质粘土改良为粉质粘土。故桩端持力层的承载力将大幅度的增长。根据我们以往在施工中所做的夯扩桩施工前后土层的静力触探对比资料的分析，结合本工程桩端持力层的特点，我们认为其桩端土的 p_s 值在夯扩后将会提高80%~

100%。端承力 q_p 在夯扩后会提高20%以上。故此,我们将武汉市汉华房地产开发建筑有限公司在汉正街万安片的B、C两栋原拟采用的以(3)层粉细砂作为桩端持力层的静压桩改为以(2-2)层粉土与淤泥质粉质粘土互层作桩端持力层的夯扩桩。

3.2 夯扩桩基础设计、计算与夯扩工艺

3.2.1 夯扩桩基础设计

B、C两栋九层综合楼基础均设计为夯扩桩,桩距1.3m,独立承台,桩径 $\phi 426\text{mm}$ 、有效桩长16.0m;钢筋笼:主筋 $5\phi 12 \times 6000$ (5500+500)、加劲箍 $\phi 12 @ 2000$ 、螺旋箍 $\phi 6 @ 250$;试桩14根,工程桩1522根,单桩承载力标准值550kN;以(2-2)层粉土与淤泥质粉质粘土互层作为桩端持力层,成桩深度必须满足进入此层不少于 0.85m ($2d$ 、 d 为桩径)。沉管深度控制以贯入度为主,桩长控制为辅,同一承台桩长相差不超过0.5m。根据试桩施打情况,沉管最后10击贯入度 $G > 60\text{cm}$ 时,进行三次夯扩; $G \leq 60\text{cm}$ 时,则进行二次夯扩。夯扩参数详见下表3。

表3 夯扩参数表

夯扩参数 夯扩次数	H (m)	h (m)	C (m)
第一次夯扩	3.0~3.5	0.8~1.0	0.2
第二次夯扩	3.0~3.5	0.8~1.0	0.2
第三次夯扩	3.0~3.5	0.8~1.0	0.2

表中:H——夯扩时外管中灌注砼高度;

h——夯扩时外管的上拔高度;

C——设计桩底与双管同步夯入深度差值。

3.2.2 夯扩桩单桩承载力标准值 R_t 的计算

(1) 夯扩大头直径的计算

二次夯扩

$$D_2 = a \cdot d_c \cdot \sqrt{\frac{H_1 + H_2 + h_2 - C_2}{h_2}}$$

$$= 0.81 \times 0.4 \sqrt{\frac{3.0 + 3.0 + 1.0 - 0.2}{1.0}}$$

$$= 0.84\text{m}$$

三次夯扩:

$$D_3 = a \cdot d_c \cdot \sqrt{\frac{H_1 + H_2 + H_3 + h_3 - C_3}{h_3}}$$

$$= 0.73 \times 0.4 \sqrt{\frac{3.0 + 3.0 + 3.0 + 1.0 - 0.2}{1.0}}$$

$$= 0.91\text{m}$$

其中 d_0 ——外管内径、 $\phi 426\text{mm}$ 外管的内径为0.4m;

a ——夯扩头直径计算修正系数,本工程一次夯扩取0.9,夯扩次数折减按《武汉市夯扩桩设计施工技术规定》为0.9,则二次夯扩 a 为 $0.9 \times 0.9 = 0.81$,三次夯扩 a 改为 $0.9 \times 0.9 \times 0.9 = 0.73$ 。

(2) 单桩承载力标准值 R_t 计算

根据《武汉市夯扩桩设计施工技术规定》(WBJ1-10-93)条文说明中第二节“夯扩桩计算”,粉土中桩端承载力计算公式为: $q_p = 627.3 + 0.163 P_s$,将(2-2)层 $\bar{P}_s = 1.1\text{MPa}$ 代入得 $q_p = 807\text{kPa}$;素填土中 q_s 取 9kPa ,将表1、表2中有关数据代入公式 $R_t = \pi/4 D^2 q_p + \pi \cdot d \sum q_s l_i$,得

二次夯扩:

$$R_t = 3.14/4 \times 0.84^2 \times 807 + 3.14$$

$$\times 0.426 \times (9 \times 3.8 + 8 \times 8.5)$$

$$= 584\text{kN}$$

三次夯扩:

$$R_t = 3.14/4 \times 0.91^2 \times 807 + 3.14$$

$$\times 0.426 \times (9 \times 3.8 + 8 \times 8.5)$$

$$= 661\text{kN}$$

需要说明的是以上计算所得 R_t 值是根据土的平均物理力学指标计算所得的计算值。

3.2.3 夯扩工艺

传统的夯扩桩夯扩工艺是直接在外管内灌注设计标号要求的砼,用内夯管借助柴油锤的爆发力夯扩。但在本项目夯扩桩施工过程中,因为持力层的 \bar{P}_s 仅 1.1MPa ,相对较软,直接灌C20的砼于外管内,夯扩时柴油

锤根本爆发不起来,而且内夯管夯扩时反弹。不仅夯扩速度慢,影响施工进度,而且投料夯扩也不充分。为此,经过多次试验,改变以往传统的夯扩工艺,在进行夯扩投料前先投入50~100cm的同标号干砂,再投入夯扩投料,然后进行夯扩时,则夯扩效果很好。不仅柴油锤能连续爆发,而且内夯管也不反弹。既提高了施工进度,也保证了夯扩头的充分夯扩成型。

4 施工检验

4.1 单桩垂直静载荷试验

本工程施打工程桩前因场地限制只在C区打了6根试桩(试1~试6),试桩试压结果均满足设计要求后再施打工程桩。另8根B区试桩(试7~试14)随工程桩一并施工,试压也满足设计要求。试压结果详见下表4。

表4 单桩垂直静载荷试验结果汇总表

试桩编号	最大试验荷载 p (kN)	最大试验荷载下的沉降量 s (mm)	破坏荷载 (kN)	极限承载力 p_c (kN)	极限承载力对应的沉降量 s_c (mm)	承载力标准值 R_k (kN)	承载力标准值对应的沉降量 s_s (mm)	最后10击贯入度(cm)	夯扩次数(次)
试1	1500	14.76				750	3.57	45	2
试2	1400	35.64	1400	1300	12.05	650	4.02	60	2
试3	1300	42.25	1300	1200	14.46	600	3.63	90	3
试4	1300	44.35	1300	1200	16.86	600	4.58	50	2
试5	1300	33.46	1300	1200	15.96	600	3.86	55	2
试6	1500	16.06				750	4.90	47	2
试7	1300	43.17	1300	1200	25.49	600	10.10	115	3
试8	1300	31.23	1300	1200	13.36	600	3.43	90	3
试9	1300	43.33	1300	1200	22.13	600	6.08	95	3
试10	1200	43.17	1200	1100	20.60	550	5.05	87	3
试11	1500	12.46				750	3.69	50	2
试12	1300	42.08	1300	1200	15.52	600	5.00	93	3
试13	1500	43.22	1500	1400	26.33	700	9.00	85	3
试14	1450	15.54				725	5.51	65	3

根据试压结果分别选取B、C区各两根具有代表性试桩的 $Q-s$ 曲线见图1及图2。

从 $Q-s$ 曲线、表4中有关数据和 R_k 计算结果,本工程夯扩桩具有以下特点:

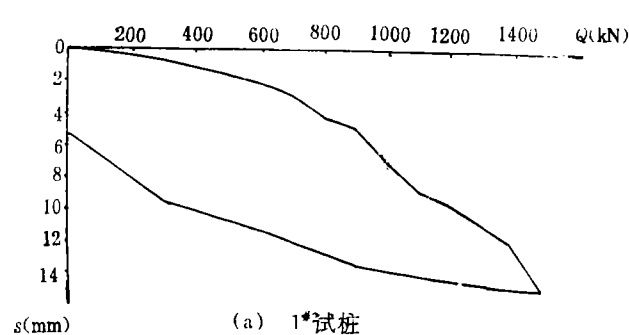
(1) 决定夯扩桩单桩承载力的主要因素是沉管的最后10击贯入度值,亦即桩端持力层的性状。

(2) 同一夯扩桩工程中,并非夯扩次数越多单桩承载力就越高。试10的 R_k 值为550kN,是本次14根试桩中最低值,而它是三次夯扩,试1、试11的 R_k 值为750kN,是本次14根试桩中最高值,而它却是二次夯扩。这表明今后在夯扩桩工程中利用场地土的平均物理力学指标计算所得的 R_k 值只能供

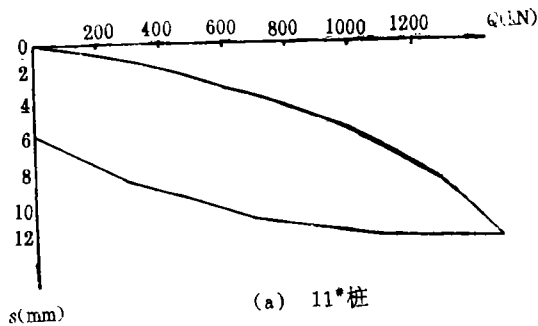
设计时参考。

(3) 本工程夯扩桩14根试桩的最后10击贯入度为45cm~115cm,说明本场地作桩端持力层的(2-2)层粉土与淤泥质粉质粘土互层的物理力学性状变化很大,这主要由此层土中粉土与淤泥质粉质粘土含量比例关系决定。同时也证明我们在本工程施工中利用沉管最后10击贯入度值来控制夯扩次数是合理的。

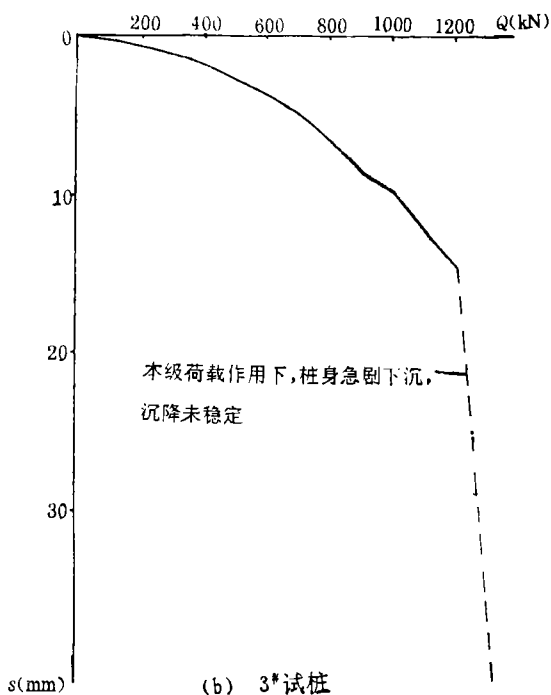
(4) 由于本夯扩桩工程桩端持力层(2-2)之上为填土和淤泥质粉质粘土,从 R_k 值计算中知本夯扩桩桩周摩阻力只占 R_k 值的20.7%(三次夯扩)和23.4%(二次夯扩),低于一般夯扩桩工程的1/3。



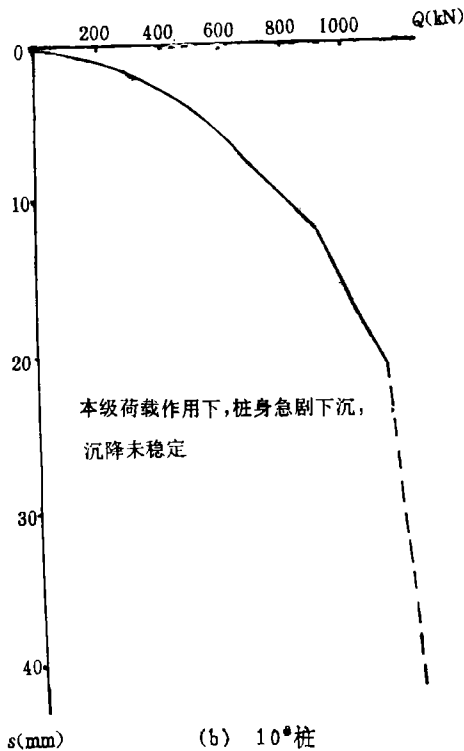
(a) 1*试桩



(a) 11*桩



(b) 3*试桩



(b) 10*桩

图 1 汉正街万安片旧城改造 (C区) Q-s曲线

图 2 汉正街万安片旧城改造 (B区) Q-s曲线

4.2 动测试验

本工程夯扩桩全部施工完毕后, 由设计人员从1522根工程桩中随机抽样68根桩作动测试验。检测方法: 锤击应用波法检测桩身完整性和桩身砼强度, 用动力参数法评估单桩极限承载力。测试结果: 桩身完整性除4根桩属Ⅱ类桩外, 其余64根均属Ⅰ类桩; 桩身砼抗压强度均在C20以上; 单桩极限承载力均超过1100kN。

4.3 沉降观测

本工程夯扩桩全部施工完毕后, 即建议

甲方委托有关单位进行沉降观测, 遗憾的是因各种原因未能及时从开始加荷(即开始进行上部结构施工)时开始这项工作, 仅在楼房施工到6层时才开始进行沉降观测, 缺乏完整的沉降观测资料。沉降观测结果: 该区各观测点间最大沉降差为37.44mm, 各观测点相邻点间最大沉降差为19.67mm, 沉降情况完全符合规范要求。到目前为止, B、C两栋九层综合楼住户已全部搬入并超过一年半时间, 未发现任何因沉降不均而出现的开裂现象。

5 经济分析

武汉市汉华房地产开发建筑有限公司在汉口汉正街万安片同一场地同时开发A、B、C三栋九层综合楼，A栋采用静压桩，B、C两栋将原拟采用的静压桩改为夯扩桩，通过经济分析对比（详见表5），采用夯扩桩每

m^2 建筑面积桩基造价（56.7元/ m^2 ）是采用静压桩每 m^2 建筑面积桩基造价（114.1元/ m^2 ）的49.7%，仅此一项，就为甲方节省210余万元人民币的工程投资，取得了较大的经济效益。

表5 不同桩型经济分析与对比表

楼号	桩型	桩数	平均桩长(m)	桩径(mm)	单桩承载力标准值 R_k (kN)	建筑面积(m^2)	造价(万元)	每 m^2 建筑面积造价(元/ m^2)
B+C	夯扩桩	1522	16.0	426	550	37059	210	56.7
B+C	静压桩	1047	29.0	350×350	800	37059	423	114.1
A	静压桩	652	29.0	350×350	800	21385	244	114.1

6 结论

1.本工程夯扩桩成功地利用了 $\bar{p}_s = 1.1MPa$ 的(2-2)层粉土与淤泥质粉质粘土互层作为夯扩桩的桩端持力层，突破了桩基规范对桩端持力层的要求，扩大了夯扩桩的应用领域。

2.夯扩桩利用粉土与淤泥质粉质粘土互

层作为桩端持力层的成功，为今后全国桩基规范的修订提供了依据。

3.夯扩桩在处理软弱地层中的工艺改进，可提高生产效率、延长机器寿命、提高夯扩效果。

4.利用夯扩桩处理软弱地层的成果，具有重大的经济效益和推广意义。

（上接第6页）

1.场地的地震效应和工程抗震特性最好以场地指数作为连续型定量指标表达。场地指数可按(3)式计算，其中土层平均剪切波速 $v_{s,m}$ 可按(2)式计算，计算的深度范围为20m而不必考虑场地覆盖层厚度，在此深度范围内土层剪切波速 $v_{s,i} > 500m/s$ 时按 $v_{s,i} = 500m/s$ 参加计算。

2.用不同场地的不同特征周期来表征场地的反应谱特性。特征周期可按(4)式根据场地指数计算而得。在需要考虑远震影响、软弱夹层或工程结构的不同阻尼比的影响时，反应谱的形状参数可按有关规范作适当调整。

3.场地按平均剪切波速 $v_{s,m}$ 及覆盖层厚度 $d_{w,0}$ 或场地指数 μ 分级定性确定场地类别，仅是为了在应用现行规范中有关条文规定时叙述的方便，其划分方法建议参考图7。最好不再用查表法进行场地分类。

4.场地勘察应分别提供场地指数和场地类别，而以场地指数为先。

参 考 文 献

- 1 《建筑抗震设计规范》GBJ11—89及其条文说明，1989
- 2 《构筑物抗震设计规范》GB150191—93及其条文说明，1993
- 3 《工程抗震场地划分等级标准》（征求意见稿）及其条文说明，1995