

# 软土地基锤击预应力管桩竖向承载力及施工影响

徐新跃

(浙江省温州市建设工程质量监督站, 浙江 温州 325000)

**摘要:** 锤击预应力管桩是近年来广泛应用的一种桩基形式, 本文通过 100 余根锤击预应力管桩的静载荷试验结果, 分析了锤击预应力管桩的打桩机理, 研究其在软土地基中的荷载传递性状和极限承载力的特性, 并就施工中的若干问题提出了意见和建议。

**关键词:** 预应力管桩; 荷载传递; 极限承载力; 软土地基; 施工影响

## Vertical Bearing Capacity of Prestressed Tubular Pile with the Hammering and the Influences of Construction in Soft Foundation

XU Xin-yue

**Abstract:** The prestressed pipe pile with hammering is widely adopted in recent years. By analyzing the results of static load test of over 100 such piles, this paper analyzes the bearing mechanism of this pile. And the behaviour of load transferring and the character of ultimate bearing capacity of this pile in soft foundation and some problem in construction aspect etc. are discussed herein also.

**Keywords:** prestressed tubular pile; load transferring; ultimate bearing capacity; soft foundation; influences of construction

### 1 概述

预应力管桩是采用先张法预应力工艺和离心成型法制成的一种空心体细长混凝土预制构件, 它具有: ①单桩承载力高。由于管桩桩身混凝土强度高, 可打入密实的砂层及强风化岩层, 桩尖进入强风化岩层或密实的砂层后, 经过剧烈的挤压, 桩尖附近的强风化岩层或密实的砂层的承载力可比原状提高。②设计选用范围广。由于管桩外径规格多, 单桩承载力幅度范围大, 因而它既适用于多层建筑, 也适用于高层建筑; 在同一建筑物中, 采用不同直径的管桩, 容易解决布桩问题, 也可充分发挥每根桩的承载能力, 使桩基沉降均匀。③对桩端持力层起伏变化大的地质条件适应性强。④成桩长度不受施工机械的限制。⑤施工速度快、工效高、工期短。⑥桩身耐打, 穿透力强。由于管桩桩身强度高, 有一定的预压应力, 桩身可承受成百上千次锤击而不破裂, 而且可穿透 5~6m 厚的密实砂夹层。⑦良好的抗弯性能。由于预应力混凝土强度高, 加之选用低松弛预应力混凝土专用钢筋, 使桩身具有较高的有效预应力, 因此, 与其它混凝土桩相比, 预应力管桩有相当大的抗弯能力, 这就提高了桩基础在水平荷载作用下的抗弯能力。由于预应力的存在, 有效地抵消了

打桩时由于瞬时桩身压缩的反弹所产生的拉应力。⑧成桩质量可靠、现场文明及制作方便、施工速度快。由于具有这些优点, 预应力混凝土管桩近年来广泛应用于工程实践中。

### 2 试验概况及场地地基土性质

试验按照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94) 中的有关规定, 采用慢速维持荷载法, 对桩基进行静载试验, 以确定单桩竖向极限承载力及检验桩基的施工质量。

场地地貌单元属于冲海积平原区, 地形较平坦。场地地基在勘察深度范围内可描述为: ①粘土——灰黄色、黄褐色, 湿, 软塑~可塑状, 具中~高压缩性; 层厚 0.90~1.65m。②淤泥——青灰色、灰色, 饱和, 流塑状, 高灵敏度, 高压缩性; 层顶埋深 0.90~14.7m, 层厚 12.80~19.10m。③粘土——灰黄色、浅灰褐色,

收稿日期: 2002-05-08, 2002-12-10 修回

作者简介: 徐新跃, 男, 1960 年生, 浙江省温州市建设工程质量监督站高级工程师, 工业与民用建筑专业, 本科, 工学学士, 从事岩土工程的施工管理与质量检测工作。

湿~很湿,软塑~可塑状,中~高压压缩性;含铁锰质斑块与结核,夹有少量粉细砂;层顶埋深 18.00~31.20m,层厚 0.70~7.44m。④砾石——灰色、灰白色,饱和,松散~中密状;主要由砾石组成,磨圆度中等,呈次棱角~次圆状,砾石含量占 40%~70%,粒径以 0.3~1.5cm 为主,卵石含量占 10%~30%,砂占 10%~40%,粘性土少量,局部夹有卵石;该层局部分布,层顶埋深 31.90~33.05m,层厚 0.20~1.90。⑤淤泥质粘土——灰色、深灰色,饱和,软塑状,高压压缩性;具发育的细鳞片状构造,夹少量粉细砂,偶见贝壳碎屑及炭化植物碎屑;层顶埋深 22.10~34.10m,层厚 2.20~18.00m。⑥卵石——灰~灰白色,饱和,中密状;成份由卵石、砾石、砂及粘性土组成,卵石粒径一般 2~5cm,大者达 10cm 以上,含量占 50%~70%,砾石占 10%~30%,砂占 10%~30%,粘性土约占 10%,砾卵石磨圆度中等,以次圆状为主;该层局部夹有淤泥质粘土,饱和,软塑状,高压压缩性;层顶埋深 35.80~40.10m,层厚 0.20~7.20m。⑦淤泥质粘土——灰色、深灰色,饱和,软塑~软可塑状,高缩性;具细密鳞片状构造,夹少量细砂,偶见贝壳碎屑;层顶埋深 38.45~42.80m,层厚 0.80~4.35m。⑧粉质粘土——灰色、深灰色,饱和,软塑~软可塑状,中~高压压缩性;粉粒感较强,上部夹有少量粉细砂和砾砂,局部渐变为粘土;层顶埋深 40.00~45.05m,层厚 1.00~6.15m。⑨砾石——灰色、灰白色,饱和,松散~稍密状;主要由砾石、砂及粘性土组成,磨圆度中等,呈次棱角~次圆状,砾石含量占 40%~60%,卵石占 10%~30%,砂含量占 20%~30%,粘性土 10%~30%;层顶埋深 45.25~47.15m,层厚 0.30~2.10m。⑩粘土——浅灰绿色、兰灰色,湿,软可塑~可塑状,中压缩性;含少量薄层状粉细砂及炭化物,偶见棕褐色铁锰质斑点及灰白色的粘土团块,局部渐变为粉质粘土;层顶埋深 45.00~48.00m,揭露厚度 1.30~9.30m。

### 3 试验结果整理及分析

#### 3.1 桩的竖向承载性能

桩基在竖向荷载作用下,上部桩身首先受到压缩,一部分荷载往下部桩身传递;另一部分,则在桩与桩周土之间形成摩阻力。当桩顶荷载逐渐加大时,桩身上部受到压缩而产生相对于土的向下位移。同时,桩周表而受到土的向上摩阻力,桩身荷载经过桩周摩阻力传递到桩周土层中,使桩身荷载和桩身压缩变形随深度递减。随着荷载的加大桩身压缩量和位移量增加,桩身下部的摩阻力随之进一步发挥出来,当桩周摩阻力全部发挥达到极限时,再增加荷载,由桩端承担的荷

载量迅速增加,沉降量也随着增加,直至达到或超过允许的极限变形而破坏。

桩静力荷载试验的荷载~沉降( $Q-s$ )曲线是桩土体系荷载传递、侧阻和端阻发挥性状的综合反应。 $Q-s$ 曲线线型随桩侧土层分布与性质、桩端持力层性质、桩径、桩长、长径比、成桩质量等诸多因素而变化。由于桩侧阻力一般先于桩端阻力发挥。因此  $Q-s$  曲线的前段主要受侧阻力制约,而后段则主要受端阻力制约。图 1 为预应力管桩的  $Q-s$  曲线。从图中可见:①  $Q-s$  曲线前段比较平缓,当荷载超过某一数值后曲线变陡,  $Q-s$  曲线总体上属于陡降型,桩的破坏特征点十分明显。②在极限承载力对应的桩顶沉降量为 0.03~0.12D。③在确定预应力管桩极限承载力时,宜采用  $Q-s$  曲线明显陡降起点法确定。

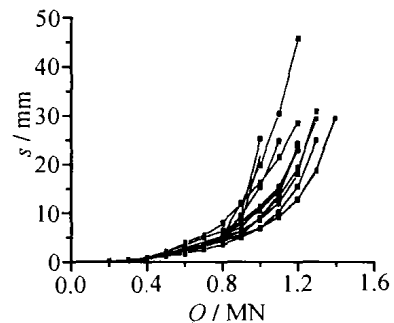


图 1 桩的  $Q-s$  曲线

#### 3.2 桩竖向极限承载力发挥特征

为进一步探讨软土地基此桩型极限承载力的发挥特征,根据不同长径比的桩静荷载试验的结果,绘出桩极限承载力  $Q_u$  与长径比  $L/D$  的关系图(图 2)。从图可见:①当长径比  $L/D \leq 80$  时,桩的极限承载力  $Q_u$  随长径比的增大而增大,但在增加速度上表现为非线性,  $L/D \leq 80$  时,随着桩长径比增加,极限承载力增加较快,当  $L/D \geq 80$  时,桩的极限承载力随长径比的增加速率减缓。这说明桩的承载力发挥有一定的长度效应,当桩的长径比  $L/D \geq 80$  时,桩下部的承载力发挥已不够充分,通过增大长径比来提高桩的承载力并非十分有效。②利用土的物理力学指标,按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94)计算的极限承载力与桩长呈线增加的关系,而桩的荷载试验结果并非如此,说明理论本身具有一定的局限性。

#### 3.3 桩侧摩阻力分析

极限桩侧摩阻力随桩顶荷载增加而发生、发展和变化的规律,是桩土相互作用的体现,它不仅取决于软土地基不同性质的土层分布和埋深,而且还与软土的工程性质有着密切的关系。

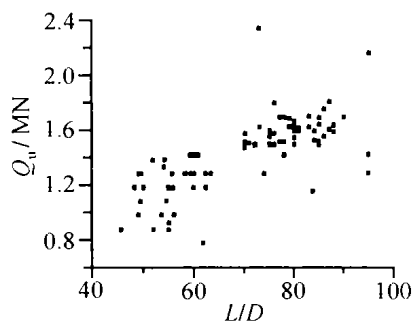


图 2  $Q_u \sim L/D$  关系曲线

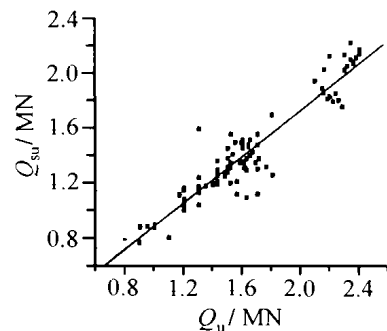


图 3  $Q_u - Q_{su}$  关系曲线

图 3 为桩的极限桩侧摩阻力  $Q_{su}$  与桩的极限承载力  $Q_u$  之间的关系曲线。从图可见,桩极限桩侧摩阻力  $Q_{su}$  在极限承载力  $Q_u$  中所占的比率达到 80% ~ 95%。这说明软土地基的预应力管桩,其桩土作用效应显著,在荷载作用下桩侧摩阻力充分发挥,而端阻力的发挥则十分有限,因而从桩的荷载传递机理看管桩为摩擦桩。影响桩侧摩阻力的主要因素有:桩顶作用荷载的大小、长径比(桩长、桩径)等。

图 4 为桩的长径比  $L/D$  与桩侧摩阻力  $Q_{su}$  相互之间的关系图。由图可知,桩侧摩阻力随桩的极限荷载的增大而逐渐增大;同时桩侧摩阻力随着长径比的增大存在递增的趋势,在增长速度上表现为非线性。

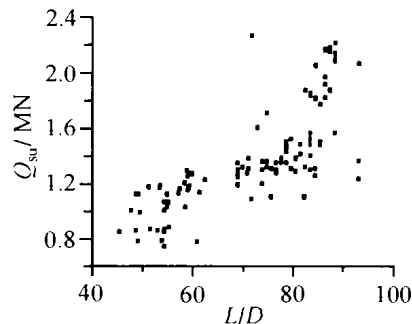


图 4  $L/D - Q_{su}$  关系曲线

### 3.4 桩顶沉降、桩底沉降及桩身变形

表 1、图 5 为管桩静载荷试验所测得的各级荷载作用下的桩顶与桩底沉降、桩身变形<sup>[1]</sup>及相关曲线。

## 4 施工因素的影响

### 4.1 管桩的挤土影响

管桩打入土中使桩身附近土孔隙减少,由于是瞬时作用,被排挤的土体不可能完全填充土的孔隙,首先造成土体上涌,而桩周土体上涌则带动桩向上运动。随着施工的继续,原来土体对桩的部分水平挤压力逐渐转化为向上的负摩擦力。桩尖越近持力层桩向上运动越明显,有时桩土之间的负摩擦力甚至可使桩尖

预应力管桩在各级荷载作用下的桩顶、桩底沉降及桩身变形 表 1

序号	荷载 /kN	S <sub>11</sub>			S <sub>12</sub>			S <sub>13</sub>		
		s/mm	Δs/mm	L/mm	s/mm	Δs/mm	L/mm	s/mm	Δs/mm	L/mm
1	800	4.78	0.63	4.15	2.96	0.49	2.44	3.25	0.31	2.94
2	1200	6.85	1.16	5.69	5.49	1.66	3.83	5.40	0.61	4.79
3	1600	7.05	1.21	5.84	8.45	3.22	5.23	7.36	0.99	6.37
4	2000	9.45	2.10	7.35	11.52	4.82	6.70	10.59	2.33	8.26
5	2400	13.31	4.46	8.85	15.10	7.40	7.70	12.76	2.85	9.91
6	2800	17.89	7.20	10.69	18.58	8.85	9.73	15.78	3.93	11.85
7	3200	22.92	10.34	12.58	22.18	10.84	11.34	18.41	5.07	13.34
8	3600	26.67	12.72	13.95	25.60	13.00	12.60	21.66	6.48	15.18
9	4000	31.10	15.54	15.56	30.55	15.42	15.13	25.10	8.44	16.66
10	3200	30.51	15.41	15.10	29.50	15.33	14.17	24.32	7.91	16.41
11	2400	29.68	15.17	14.51	26.52	14.72	11.80	21.64	7.89	13.75
12	1600	27.39	15.09	12.30	22.79	14.10	8.69	18.57	7.55	11.02
13	800	24.13	14.67	9.46	18.36	13.01	5.35	14.84	7.21	7.63
14	0	16.7	14.02	2.69	12.20	9.63	2.57	8.72	6.56	2.16

注: S<sub>11</sub> 桩为已静载试验后再复打再静载试验、s 为桩顶沉降、Δs 为桩底沉降、L 为桩身变形。

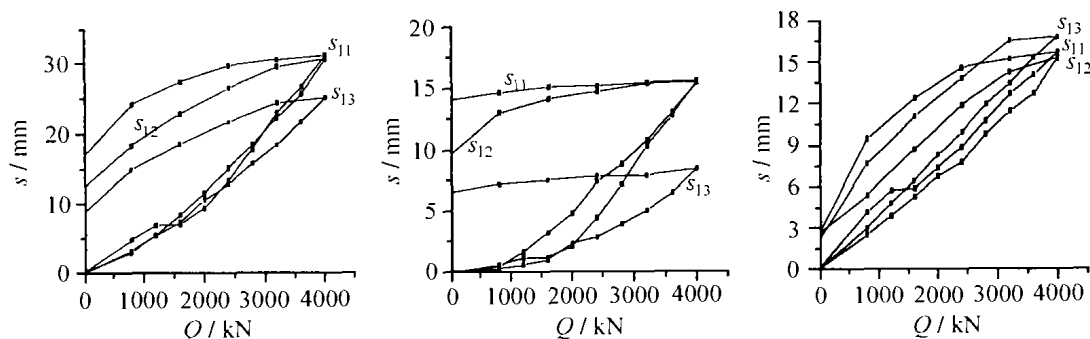


图5 荷载与桩顶沉降、桩底沉降、桩身变形曲线

与持力层“脱离,造成桩底空虚,导致桩周阻力减少,荷载作用在桩顶后要先将桩压“实”才能发挥桩端持力层的作用。若设计采用群桩布置时,其挤土与桩底“悬桩”现象就更加严重。因此,在软土地基进行群桩施工时,应采用合理的技术措施:①设计时应合理选择桩型,尽可能采用高承载力的长桩以扩大桩距、减少桩数,从而降低沉桩引起的超静孔隙水压力值和地基变位值,缩小其影响范围。②采用掘削、水冲、预钻孔辅助沉桩法来减少桩的排土量以减少沉桩对地基土体的挤土影响程度,并达到降低超静孔隙水压力的目的。③合理安排沉桩施工顺序、进度。④降低地基中地下水位或改善地基土的排水特性,减少和加快消散沉桩引起的超孔隙水压力,提高邻近地基土体的强度以增大其对地基变位的约束作用,从而减少地基变位及其影响范围。⑤设置防渗防挤壁、防挤土槽、防挤孔等措施,以减少地基浅层土体的侧向位移和隆起范围,适当控制超孔隙水压力的影响范围。

## 4.2 施工的扰动效应

管桩的打入施工对软土地基的扰动主要表现在:一是沉桩施工破坏了土的天然结构,二是桩周土受到急剧挤压,致使孔隙水压力迅速上升,有效应力减小。这两种作用促使桩周及桩端土的强度大为降低,此时桩的承载力最低。但随着时间的推移,土的强度逐渐恢复,甚至于超过原来的强度。其原因有:①软土具有触变性,受扰动后损失的强度可以逐渐恢复。在现场埋深条件下,静止几天后可以恢复原始强度的40%~50%。②随着桩周土中水分的逐渐排出,孔隙水压力逐渐消散,土体重新固结,有效应力相应增大,桩周土强度得以恢复。这种变化机理表明,软粘土层中桩的承载力与桩周土和桩端土的扰动、压密和固结作用密切相关,承载力变化随土体内孔隙水压力的增大和消

散以及有效应力的减小和增大而定,成桩后,承载力随时间的增长而增大。

## 4.3 预应力管桩的“土塞”效应

管桩在沉桩过程中,桩端土一部分进入管内形成“土塞”,一部分被挤向桩周,进入管内的土塞在沉桩过程受到管内壁摩阻力作用将产生一定压缩。因此土塞的高度及其闭塞效果与土性、管径、壁厚、桩入土深度及进入持力层的深度等诸多因素有关,而桩端土的闭塞度又直接影响端阻发挥与破坏性及桩的承载力,此现象称为“闭塞效应”。

管内土塞侧阻力的发挥性状不同于管外侧阻力,后者随桩顶受荷、沉降出现自上而下发挥,前者则只有当荷载传递到桩端并产生桩端沉降才开始由下而上逐渐发挥。由于荷载较小时管内土塞连同桩管同步下沉,只有当土塞底部受到足够大的反力,土塞才产生相对于管壁的向上位移而使侧阻力逐渐发挥出来。土塞的模量越低,土塞的高度越大,全部充分发挥土塞侧阻力所需的沉降也越大。

## 5 结束语

软土地基锤击预应力管桩在极限荷载作用下,桩侧摩阻力发挥程度比较充分,而端阻力的发挥则十分有限,影响桩侧摩阻力发挥的主要因素有:桩顶作用荷载的大小、长径比(桩长、桩径)、桩土相互作用的程度及桩的“土塞”效应。

## 参考文献

- [1] 陈勇,杨晓淞. 预应力混凝土管桩在竖向荷载作用下的沉降特性分析. 岩土工程界, 2000, (12).