

# 混凝土预制桩打桩监控试验理论与实践

韩 亮

(天津市地质工程勘察院 300191)

**【摘 要】** 阐述了混凝土预制桩打桩监控技术的试验内容及其基本理论,并通过近年来的工程实例,提出一套预制桩施工与监测相结合的新检测程序,以达到最大限度地提高施工质量、缩短工期和减少基桩检测费用的目的。

**【关键词】** 打桩监控 混凝土预制桩 新检测程序

## Theory and Practice of Piling Monitoring Test for the Precast Pile

Han Liang

(Tianjin geological engineering investigation institute 300191)

**Abstract** This paper expatiates the testing content and basis theory on piling monitoring technology of the concrete precast pile. A set of new testing process to the precast pile with the combination of constructing and monitoring is given forward to improve the construction quality, shorten the working duration and reduce the test cost by a maximal limitation.

**Keyword** Piling monitoring Concrete precast pile New testing process

在天津地区目前大规模的经济建设中,重型工业厂房、桥梁及高层建筑的基础普遍采用混凝土预制桩,它具有桩身结构坚固耐久,单桩竖向承载力大,且不受地下水和潮湿变化影响等优点。对混凝土预制桩的检测多年来始终遵循着传统的检测方式和检测方法,即在桩打入地下,待满足规范规定的地基土休止期后,用动测或静测的手段检测基桩的成桩质量和承载能力。然而,在实际的检测中,常常发现由于锤击压应力过大引起桩顶破损,沉桩过程中进入软弱界面时产生强烈的拉伸应力引起接桩位置焊接开裂等现象,不仅基桩完整性下降,而且会出现沉降过大、承载力不足等问题,严重的整个基础报废,给工程造成巨大的经济损失。

如何克服检测滞后性与施工盲目性之间的矛盾,解决上述出现的种种问题呢?近年来,我院根据预制桩本身的特点及天津地区地质条件并结合

国外先进的理论和仪器的应用,开展了混凝土预制桩打桩监控试验的研究工作,并在实践中提出一套施工与监测相结合的检测程序。

### 1 打桩监控试验基本理论

打桩监控试验使用两个应力传感器和两个加速度传感器对称固定在桩顶附近或钢铸替打上,随连续锤击沉桩过程,记录每一锤作用下检测截面  $M$  的应力  $F(t)$  和速度  $V(t)$  与阻抗  $Z$  的变化,然后利用一系列波动理论计算方法,从中可以获取大量的重要信息和分析结果,比如冲击次数、冲击频率、最大打击力、冲击能量、进桩总阻力、侧摩阻力、桩尖阻力、最大加速度、最大速度、残余位移、上行波形及下行波形等参数。

对上述参数实行监控概括起来可以得到以下三个方面的结果:(1)基桩的可打性分析,即通过桩身锤击应力监测和锤击能量监测,评判打桩机能否适应场地工程地质条件将桩有效地打入设计深

度;(2)桩身结构完整性;(3)基桩竖向极限承载力。

### 1.1 桩身最大锤击应力监测

在混凝土预制桩的低应变动力检测中常常发现桩身某处严重破损或接桩处焊接开裂等工程质量问题,这是由于桩端从软土层突然进入较大阻力的硬土层时使桩身锤击压应力增大,或桩端穿过硬土层突然进入软夹层时使桩身锤击拉应力增大所致。因此,桩身最大锤击应力监测包括桩身锤击压应力和锤击拉应力两部分。

根据波动理论推导,桩身最大锤击拉应力可按式计算:

$$\sigma_t = \frac{1}{2A} \left[ ZV(t_1 + \frac{2L}{c}) - F(t_1 + \frac{2L}{c}) - ZV(t_1 + \frac{2L-2X}{c}) - F(t_1 + \frac{2L-2X}{c}) \right] \quad (1)$$

式中:  $\sigma$ ——桩身最大锤击拉应力, kPa;

$X$ ——计算点与测点之间的距离, m。

桩身最大锤击压应力可按式计算:

$$\sigma_p = \frac{F_{\max}}{A} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_p$ ——桩身最大锤击压应力, kPa;

$F_{\max}$ ——实测最大打击力, kPa。

根据中华人民共和国行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94)的规定,混凝土预制桩桩身最大锤击压应力  $\sigma_p$  应小于桩材轴心抗压强度设计值,桩身最大锤击拉应力  $\sigma_t$  应在(0.25~0.33)  $\sigma_p$  之间。

### 1.2 锤击能量监测

桩锤实际传递给桩的能量可按式计算:

$$E_n = \int_0^T FV dt \quad (3)$$

式中:  $E_n$ ——桩锤实际传递给桩的能量, kJ;

$T$ ——采样结束的时刻。

天津地区打入混凝土预制桩通常使用单动的柴油锤,桩锤实际传递给桩的能量  $E_n$  与已知柴油锤额定能量之比值被称为桩锤效率,根据中华人民共和国行业标准《基桩高应变动力检测规程》(JGJ 106-97),一般应介于0.20~0.30之间。

### 1.3 桩身结构完整性监测

混凝土预制桩在连续的锤击作用下常常会引起桩身缺陷或接桩开焊,发现和计算缺陷位置和缺陷大小尤为重要。打桩监控试验可以观察连续锤击下缺陷的位置和缺陷逐步扩大或逐步闭合全

过程的变化情况。在监测过程中一般情况下是首先对力和速度(或上行波)曲线作定性分析,及时发现缺陷和位置并注意观察。由于混凝土预制桩属于等截面桩,桩身规则且材质均匀,桩身截面力学阻抗相同,因此桩顶以下第一个缺陷可以采用结构完整性系数  $\beta$  法进行准定量计算:

$$\beta = \frac{\frac{1}{2} [F(t_1) + ZV(t_1)] - \Delta R + \frac{1}{2} [F(t_1) - ZV(t_1)]}{\frac{1}{2} [F(t_1) + ZV(t_1)] - \frac{1}{2} [F(t_x) - ZV(t_x)]} \quad (4)$$

式中:  $\beta$ ——桩身结构完整性系数;

$t_1$ ——速度第一峰所对应的时刻, ms;

$t_x$ ——缺陷反射峰所对应的时刻, ms;

$\Delta R$ ——缺陷以上部位土阻力的估计值,等于缺陷反射起始点的锤击力与速度乘以桩身截面力学阻抗之差值。

桩身缺陷位置可按式计算:

$$X = \frac{1}{2} c(t_x - t_1) \quad (5)$$

式中:  $X$ ——缺陷位置与桩顶之间的距离, m;

$c$ ——桩身平均弹性波速, m/s。

### 1.4 单桩竖向极限承载力监测

在连续的锤击作用下,桩身不断下沉,桩周土和桩端土阻力不断地被发挥出来,土阻力产生的阻力波使得实测曲线  $F(t)$ 、 $V(t)$  上下分离,应用一维波动方程和桩—土体系的数学模型确定单桩竖向极限承载力。桩打入地下设计标高时所测到的桩侧和桩端静土阻力值之和称为初打承载力,如果经过复打试验获得桩在地基土中的时间效应系数,就可以根据二者的乘积推算出不同龄期单桩竖向承载力值。

一般情况下,对混凝土预制桩单桩竖向极限承载力监测分为两个阶段:一是现场进行CASE法分析;二是室内进行实测波形拟合(CAPWAP)法计算。

CASE法是在一些理想假设基础上提出的,是一种半经验算法,比如它要求桩呈一维弹性体且桩身阻抗相等;应力波在传播过程中,桩侧没有动阻尼,动阻尼主要集中在桩端;桩—土体系满足质量—弹簧—阻尼系统等。CASE在现场能粗略地提供桩承载力结果,常用以下公式进行计算:

$$R_c = \frac{1-J_c}{2} [F(t_1) + ZV(t_1)] + \frac{1-J_c}{2} [F(t_1 + \frac{2L}{c}) - ZV(t_1 + \frac{2L}{c})] \quad (6)$$

式中:  $R_c$ ——单桩竖向极限承载力, kN;

$J_c$ ——CASE 阻尼系数;

$t_1$ ——速度峰值对应的时刻, ms;

$Z$ ——桩身截面力学阻抗,  $\text{kN} \cdot \text{s/m}$ ;

$L$ ——测点以下桩长, m。

从式(6)中不难看出,影响计算结果的主要参数是带有经验性的  $J_c$  值。回到室内采用实测波形拟合(CAPWAP)法计算可以大大提高测试精度。CAPWAP 法与 CASE 法相比是截然不同的两种思路,它是利用实测波形中的一条曲线( $F$ 、 $V$ 或上下行波)通过设定桩土参数进行波动方程拟合计算,得到另一条曲线的计算值,与实测曲线相比较,如不符合,重新调整桩土参数,再重新迭代计算,重复上述过程。经过多次循环直到获得满意的拟合结果为止,最终确定出符合实际桩土体系的所有参数值,得到桩身摩阻力、桩端土阻力、桩身分段土阻力和总阻力,其计算过程如图 1 所示。

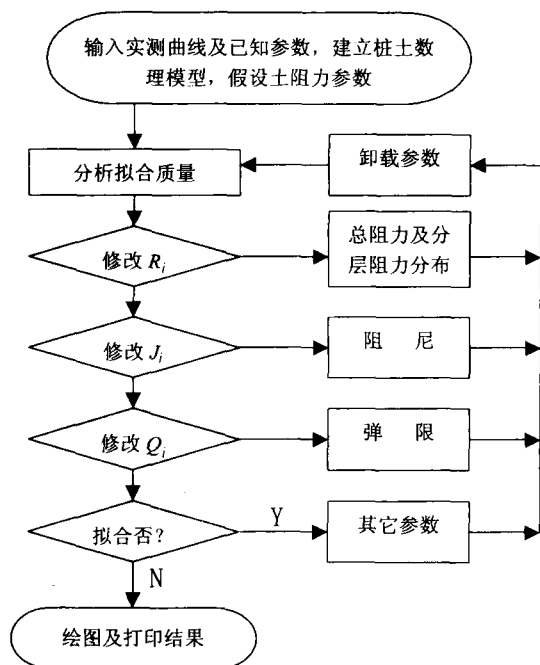


图 1 CAPWAP 波形拟合法计算流程

## 2 工程实例分析

某大型工业厂房属国家重点工程,采用截面为  $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$  的钢筋混凝土预制方桩基础,桩长  $18.0\text{ m}$ ,分为上下两节( $9.0\text{ m} + 9.0\text{ m}$ ),接桩处使用角钢焊接,角钢规格为  $340\text{ mm} \times 63\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ,单桩设计极限承载力为  $1\,400\text{ kN}$ 。由于当时缺乏混凝土预制桩施工经验及检测资料,

为确保工程质量,决定对前期 6 根试桩实施全程打桩监控试验。在沉桩过程中进行实时桩身内应力监测、桩身结构完整性变化监测及打桩锤效监测确定打桩机类型、锤重、落高和锤垫厚度等施工参数;同时获得初打终锤时单桩极限承载力,结合桩土休止期后进行复打试验,得到最终极限承载力数值和地基土时间效应恢复系数,实现推算工程桩单桩极限承载力的目的。本场地工程地质见表 1。

表 1 场地内各土层分布

层 号	土 名	深 度 (m)	厚 度 (m)	状 态	备 注
1	杂填土	0.8~4.0	0.8~4.0		
2	耕填土	1.8~5.0	1.0		
3	3-1 粉质粘土	2.8~6.0	11.0~13.0	流塑~软塑	
	3-2 粉土	13.5~19.0	0.5~1.5	中密	
	3-3 淤泥质粘土	14.0~20.5	0.5~1.0	流塑	
	3-4 粘土	14.5~21.5	0.5~1.0	流塑~软塑	
	3-5 粉质粘土	15.0~22.5	2.0~3.5	可塑	
4	粉土	17.0~26.0	8.0~12.0	稍密~中密,饱和	持力层
5	粘土	25.0~	5.0~8.0	软塑	未穿透

检测设备使用美国产 PAL 型打桩分析仪。如图 2 为一试桩实测  $F-V$  曲线。从中可以看出,  $F$  和  $V$  曲线在作用开始的上升段基本重合,桩端土体由于受到冲击扰动,产生很大且长时间的拉伸反射,使得  $V$  曲线上升幅度高而宽缓,且能明显看到速度曲线的二次反射,说明初打时桩侧土和桩端土受到强烈冲击使桩端形成明显的自由端。图 3 为该桩 28 d 后的复打曲线,和初打曲线相比,桩端速度曲线上升幅度明显变低而窄陡,另外最大打击力显著增加。

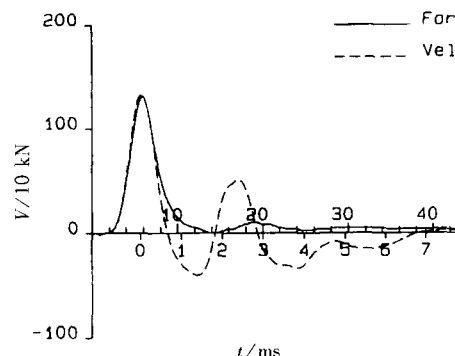


图 2 初打实测曲线

对初打曲线进行 CASE 法和 CAPWAP 法计算,得到桩身最大拉应力曲线,桩身最大压应力曲

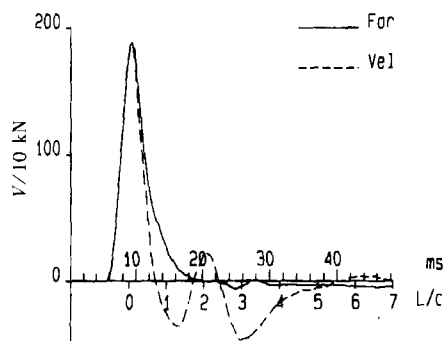


图3 30d后复打曲线

线和最大转换能量曲线,如图4所示,结合桩身完整性指数,最终选定使用D35/32型柴油打桩机作为本工程的施工设备,并确定桩锤质量3.2t,落距2.0m,额定能量114kJ,锤垫厚度适当加厚等技术参数。

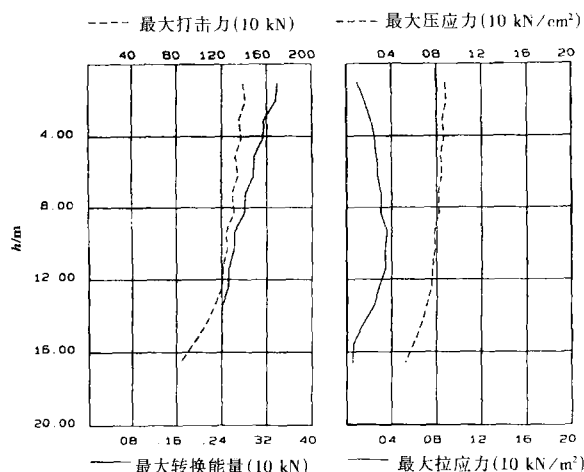


图4 桩身最大压、拉应力及传递能量曲线

经过分别对6根试桩初打曲线和复打曲线进行CAPWAP法拟合计算,得到初打承载力标准值960kN和复打承载力标准值1450kN,地基土时间效应恢复系数1.51。图5为某桩初打、复打试验土阻力分布的计算结果,可见桩侧土阻力和桩端土阻力在初打后30d均有不同程度的提高,桩端的复打土阻力明显高于初打土阻力,这与地基土恢复有关,可以预见随着时间的延长土阻力还会略有增长。

### 3 新的检测程序

对混凝土预制桩的检测长期以来一直是在桩打入地下28d以后,采用低应变动力试验进行桩身完整性检测和静力载荷试验或高应变动力试验

确定单桩极限承载力。然而,通过检测我们发现,混凝土预制桩桩身质量问题主要出现在接桩处的焊口开裂,承载力问题主要出现在焊口开裂过大造成上下两节桩闭合过程中需要很大的沉降,或者是桩尖没有落到持力层上使承载力降低。归纳起来,这些问题都是出在施工过程中,虽然可以通过成桩后的动力检测发现问题,但往往为时已晚,采取进一步补救措施是相当困难的。因此笔者认为这种检测程序应该更新。

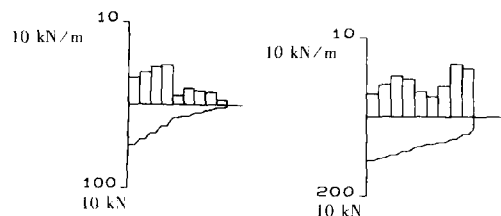


图5 初打、复打试验土阻力分布计算结果

有了上文介绍的预制桩打桩监控试验不仅可以有效地解决上述问题,同时也使我们对混凝土预制桩进行测试时提出新的检测程序,即在打桩过程中根据场地工程地质条件选择有代表性的基桩进行打桩监控试验,及时发现问题指导施工,避免桩身破损或焊口开裂,并且根据初打承载力和地基土时间效应系数准确地推算出不同休止期单桩极限承载力。这样打桩完毕后就不必进行多余的基桩检测工作,即可提高工程质量又可缩短工期,减少检测费用。

### 4 结语

打桩监控试验在混凝土预制桩打桩过程中进行实时监测,根据现场实测数据可以及时准确地发现问题,指导施工,保证桩身完整性,并通过对实测数据进行CASE法和CAPWAP波形拟合法计算得到的初打承载力推算出不同休止期的单桩极限承载力。

但是,打桩监控试验在天津地区毕竟还是一种新手段,至今尚未得到推广应用。利用打桩监控试验监测混凝土预制桩还存在一些经验问题,比如不同桩型不同工程地质条件下的地基土时间效应系数等问题,还需作大量的静力试验和复打试验。

#### 参考文献

- 1 JGJ 94-94 建筑桩基技术规范
- 2 JGJ 106-97 基桩高应变动力检测规程