

## 静动法试桩技术对比

时闽生<sup>1</sup>, 郭灵华<sup>2</sup>, 史炳峰<sup>3</sup>

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222;

2. 中交一航局第一工程有限公司, 天津 300461; 3. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

**摘要:** 用对比分析的方法研究静动法桩基试验新技术的各种特性, 分类描述静动法的试验原理和常用分析手段。依据境外水工试桩的试验数据, 对比高应变(CASE法)与静动法试验的过程特征, 验证静动法的可靠性; 对比静动法(卸载点法)与高应变(CAPWAP法)的试桩试验结果, 分析静动法的准确性及限制条件。引入传递能量的概念作为判别静动法试验效果的参考因素, 分析多种桩型静动法试验的应力波传递效应及其影响程度。讨论静动法试桩技术引入国内水工桩基试验领域的适用性、限制因素和经济指标。为国内开展类似试验技术提供实践层面的参考。

**关键词:** 静动法; 高应变法; 卸载点法; 桩基检测

**中图分类号:** TU 317

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2014)10-0169-05

### Comparison of STATNAMIC pile testing technology

SHI Min-sheng<sup>1</sup>, GUO Ling-hua<sup>2</sup>, SHI Bing-feng<sup>3</sup>

(1. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China;

2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 3. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

**Abstract:** The characteristics of new STATNAMIC load test are studied by comparison, and the theory and usual analysis methods of STATNAMIC are described. Based on the test data of trial piling abroad, we carry out a comparison of the process natural of STATNAMIC and the dynamic load test (CASE method) to identify the reliability of STATNAMIC. To analyze the accuracy and limited conditions on STATNAMIC, we compare the results of STATNAMIC (unloading point method) and the dynamic load test (CAPWAP method). Introducing the transfer energy measurement as a parameter, we evaluate the efficiency of STATNAMIC. The impact of strain wave phenomenon on different types of piles during STATNAMIC test is studied. STATNAMIC's applicability and economy in marine testing field in China are discussed to offer a reference for similar technology used in China in the future.

**Keywords:** STATNAMIC; high strain dynamic load test; unloading point method; pile test

静动法(STATNAMIC)桩基荷载试验是一种压缩力脉冲测试方法, 于1988年由Birmingham教授发展成为一种新的桩基荷载试验雏形, 历经20余年完善, 迄今静动法已广泛应用于英国、美国、日本、东南亚、中国台湾等诸多国家和地区的深基础检测工程中。并且, 该方法于2008年获得美国材料与试验协会的肯定, 并推出了试验规程

ASTM D7383<sup>[1]</sup>, 此举进一步确立静动法的公信力, 为新世纪静动法在世界范围内逐步推广奠定了基础。但是, 受到国内规范体系等因素的限制, 至今静动法在国内尚无实践应用记录。本文依据境外水工项目静载试验、高应变、静动法试验的实践数据, 从对比分析的角度对静动法进行研究, 为该法引进应用提供可行性和适用性方面的参考。

**收稿日期:** 2014-04-08

**作者简介:** 时闽生(1981—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为结构工程、港工建筑物实体、基础检测等。

## 1 静动法原理

静动法基于经典牛顿力学原理第二、三定律,即力等于加速度与物体质量的乘积 ( $F = ma$ ) 以及作用力与反作用力相等原理。操作方法是:在试桩桩顶安装配重块,在配重块和试桩桩顶之间预先安装燃爆气缸,通过燃爆气缸内的固体燃料,产生瞬间高压气体,推动配重块跳起,同时借助反力给试桩施加垂直向下的平缓增减的脉冲荷载,以达到驱动桩体向下的目的。脉冲荷载持续时间最多可达到或接近 0.5 s。依照牛顿第二定律加速度公式,若重力加速度为  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ,如果配重块的加速度达到  $20g$  以上,那么在桩顶将会有一个相当于 20 倍配重块重力的反力产生。因此,通常情况下试验配重只需相当于桩承载力的 5% ( $\geq 20g$ ) 至 10% 的重力,即可达到试验目的。

在实际试验过程中,通过一个激光光电传感器测试桩顶位移的实时变化,通过一个荷载传感器单元测量桩顶的动态荷载,通过一个加速度计测量桩顶加速度变化。采用便携计算机系统集中采集和记录所有的试验测试数据,后期进一步分析。试验装置见图 1。

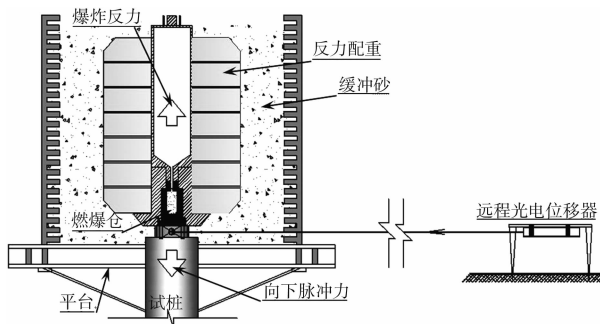


图 1 静动法试验原理

## 2 常用分析方法

### 2.1 计算模型

假设试桩在静动法试验中产生刚体运动,静动法荷载响应可以被描述成力平衡方程 (1):

$$F_{sm}(t) = F_u(t) + F_v(t) + F_a(t) \quad (1)$$

式中:  $F_{sm}(t)$  是试验过程中的桩顶荷载,通过桩顶处安装的测力传感器实时测得;  $F_u(t)$  是由土体提供的静土阻力,对应于试验桩抗压承载力;

$F_v(t)$  是桩体运动阻尼力;  $F_a(t)$  是加载和卸载阶段中的惯性力。

### 2.2 卸载点法

对于桩静土阻力  $F_u(t)$  的计算方法有多种,目前广被接受的分析方法是卸载点法 (Unloading Point Method, UPM),由 Nishimura 在 1995 发明,该方法是一种改进的平衡点法,假设阻尼是线性的,在整个试验过程中阻尼系数  $C$  是常数。则由式 (1) 推导出桩静土阻力如下<sup>[2]</sup>:

$$F_u(t) = F_{sm}(t) - Cv(t) - Ma(t) \quad (2)$$

式中:  $v(t)$  是桩顶的速度,通过加速度积分或桩顶位移微分得到;  $a(t)$  是桩顶的实测加速度值;  $M$  是试桩的质量;  $C$  是假设的桩土体系的总阻尼系数;  $u(t)$  是桩顶向下位移量变化值,使用光电位移传感器测量得到。

桩体脉冲加载过程中,桩顶向下运动至位移量  $u(t)$  最大时,桩顶速度  $v(t) = 0$ 、阻尼力  $F_v(t) = 0$  时达到桩体荷载的卸载平衡点,在卸载点处的土静阻力达到最大值,依据卸载点平衡关系计算出阻尼系数  $C$ 。

凭借阻尼系数  $C$ ,依据方程 (2) 计算静土阻力  $F_u(t)$ ,可以获得完整的荷载沉降曲线。卸载点法建立在大量的试验基础上,理论性和易用性方面均较完善,被迅速推广成为静动法分析的标准工具。本次对比试验的结果分析全部基于卸载点法计算结果。

### 2.3 其他改进方法

1) 改进卸载点 (modified unloading point method, MUP)。即在桩底安装加速度传感器,同步测试桩底响应,再在卸载点法的基础上去除桩身变形影响,由此获得准确的结果。该方法可解决超长桩试验过程中桩身弹性压缩量大从而影响结果精度的问题。

2) 分段卸载点法 (segmental unloading point method, SUP)。在长桩体内不同深度安装应变计测量瞬时桩截面应变,按照测试截面将桩体划分为有限个独立单元桩体,建立单元体的阻尼 ( $C_i$ )、速度 ( $V_i$ )、质量 ( $M_i$ ) 等参量,分段后汇总计算出

桩体的总静土阻力。该方法理论精度高, 但实际测试中测量参数相对独立且数量繁多, 测量的同步性要求极高, 测试难度较大。且因为桩体不均匀性和传感器安装误差等因素影响, 导致多变量数据组合准确度无法保证, 技术应用较困难。

#### 2.4 对比试验方法

1) 高应变试验方法。在沉桩后经过一定的休止期, 对试桩进行二次锤击和高应变复打试验, 测试时分别使用 2 个力传感器和 2 个加速度传感器测量桩顶物理参数变化, 使用 CASE 法分析打击性能; 使用 CAPWAP 法进行单元拟合分析, 确定试桩复打承载力、完整性。

2) 单桩轴向静载荷抗压试验, 采用慢速维持荷载法<sup>[3]</sup>, 锚桩提供反力, 液压千斤顶加载, 桩顶位移计量测沉降。分 2 个加卸载循环, 分别加载至 2 倍设计值和承载力极限破坏。

### 3 实践对比

#### 3.1 试桩概况

工程中, 分别打设了水工工程中常用的 PHC 桩、钢管桩和灌注桩试桩群, 每组试桩的长短差不大于 2 m, 主要试桩和地质参数见表 1。试桩组分别进行了静动法、高应变法和静载抗压试验 (其中 T3 组未进行高应变动测)。

表 1 水工试验桩组参数

试桩编号	桩型	直径/mm	桩长/m	桩侧土体	桩端土层
T1 组	开口 PHC 桩	1 000	61	淤泥、黏土、沉积砂层	中密砂
T2 组	开口钢管桩	1 600	87	淤泥、黏土、沉积砂层	中密砂
T3 组	钻孔灌注桩	1 500	90	淤泥、黏土、沉积砂层、强风化页岩	强、中风化页岩

#### 3.2 试验过程对比

在静动法试验过程中采用光电位移计直接测量动态的桩顶向下位移, 使用桩顶压力测量单元量测动态脉冲荷载, 将两参量直接绘制成荷载-位移 ( $F-S$ ) 曲线, 3 组试桩的曲线见图 2, 可以发现静动法响应曲线与静载试验曲线 ( $Q-s$  曲线) 接近, 具有直观分析的价值。相比而言, 通过高应变法桩基试验并不能获得直接的荷载沉降曲线, 不能直观分析, 需要通过后期算法模拟得到沉降结果。

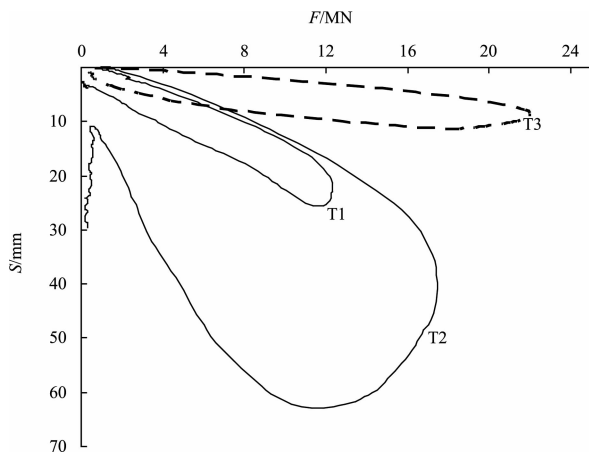


图 2 静动法荷载-位移曲线

通过现场试验获得了 T1 和 T2 试桩组的静动法和高应变数据, 汇总绘制出力的时程曲线对比图 (图 3)。根据高应变速度曲线中反映的力波传递时间属性, 取应力波在混凝土中的传递速度为 4 000 m/s, 在钢桩中的传递波速为 5 000 m/s。用桩长  $l$  除以应力波速  $c$ , 计算可得波在桩中传递需要的时间。T1 组预应力管桩中, 应力波自桩顶传递至桩尾需要 15.3 ms, 之后力波再经过 15.3 ms 后反射回桩顶, 完成一个应力波传递循环。同理, T2 组钢管桩的单向传递时长 17.4 ms, 往返传递时长 34.8 ms。

T1 组试桩静动法的力持续时间约 116 ms, 高应变持续 45 ms, 相差约 1.4 倍。其中, 测试施加的外力峰值持续时间静动法为 116 ms, 高应变却仅为约 13 ms。且应力波沿桩轴向单次传递耗时约 15.3 ms, 由  $13 \text{ ms} < 15.3 \text{ ms} \ll 116 \text{ ms}$  可以确定 T1 组静动法的力脉冲持续时间远大于高应变。在 T2 组钢管桩的高应变和静动法试验中, 情况与 T1 基本相同。测试数据表明, 高应变桩体的受力维持时间短暂, 桩体存在明显的一维应力波传递效应, 导致土阻力激发前后分段和不同步现象, 与

静载状态的土阻力分布情况区别明显。而静动法因持续时间较长，应力充分传递后桩体运动趋近于刚体运动，激发的土阻力整体同步性好，更为接近静载性状<sup>[4]</sup>。因此，从原理上静动法的测试效果更可靠。

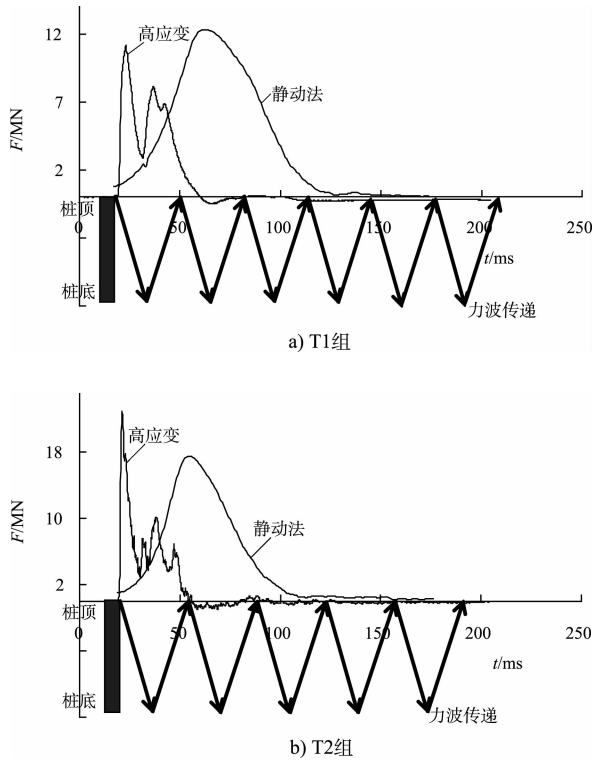


图3 高应变和静动法力时程曲线

### 3.3 静动法、高应变法结果偏差对比

以静载试验结果为基准，计算的静动法（UPM法）、高应变法（CAPWAP法）测试承载力结果偏差见表2。

表2 静动法（UPM法）结果偏差

方法	项目	休止期/d	承载力/MN	偏差率/%
高应变	T1组	7	10.80	-3.2
	T2组	79	16.19	-10.2
	T3组			
静动法	T1组	105	12.16	9.0
	T2组	118	16.34	-9.4
	T3组	36	21.52	75.1

对比以上结果表明，在本批次 T1 和 T2 组试验中，静动法和高应变法的误差均在 10% 左右，能够满足工程应用需求。T3 组静动法偏差较大，测试不准。

## 4 结果分析

### 4.1 能量分析

从能量的角度看，无论静动法还是高应变法都是通过力脉冲对试桩做功来激发桩土阻力，适度的试验传递能量是试验准确性的保障。可以引入能量积分公式计算静动法传递能量<sup>[5]</sup>，计算公式如下：

$$E_T = \int_0^t F_{sm} v dt \quad (3)$$

式中： $E_T$ 为试验传递能量（kJ）； $v$ 为瞬时桩顶波速（m/s）。计算发现，对于 PHC 桩 T1 组，静动法传递能量为 213.8 kJ，PDA（高应变）传递能量 127.0 kJ，静动法能量高于高应变法 68.3%；对于钢桩 T2 组，静动法传递能量 729.7 kJ，高应变传递能量 349.0 kJ，静动法能量高于高应变法 109%，同一试桩组下静动法能量明显高于高应变法，冲击力传递给桩的能量大小一定程度上可以反映测试结果的可靠性，更高的能量意味着桩土阻力激发更充分。但是对于灌注桩 T3 组，静动法传递能量仅 162.3 kJ，能量偏小，影响了测试结果的可靠性，最终造成误差过大。

### 4.2 静动法刚体效应研究

静动法中的桩顶脉冲力维持效应可以用波倍数  $N_w$  来描述：

$$N_w = \frac{ct}{l} \quad (4)$$

式中： $N_w$ 为波倍数； $c$ 为应力波波速； $t$ 为脉冲力维持时间长度。 $N_w$ 反映了在应力脉冲维持的时间长度内，应力波可以在桩体内往返传递的最大次数。波速倍数用来表述桩体应力波传递时，较高的  $N_w$  意味着桩体的运动更趋近于刚体。根据试桩实际桩长计算的波倍数和试验误差关系见表3。

表3 静动法波倍数  $N_w$  值

桩型	维持时间 $t$ /ms	波速 $c$ /(m·s <sup>-1</sup> )	波速倍数 $N_w$	误差率/%
T1组	116	4 000	7.6	9.0
T2组	98	5 000	6.1	-9.4
T3组	130	4 000	5.7	75.1

3 组试桩的  $N_w$  均接近或大于 6, 其中 T1 和 T2 组误差率小于 10%, 符合 Middendorp 关于  $N_w > 6$  情况下统计误差率 17% 的论断<sup>[6]</sup>, 已经可以满足工程应用的要求。T3 组试验偏差, 并不是因为试验波数  $N_w$  值过低造成的, 而是因为混凝土桩体缺陷、传递能量小、灌注桩端部静水压力现象综合造成的。

## 5 经济和性能对比

基于常规试验经验, 静动法的结果偏差一般可以控制在 10% 以内, 其测试结果直接性好, 且准确度高于单纯的高应变测试 (误差率在 15% ~ 20%)。而与静载抗压试验相比, 在水工试验领

域, 静动法具有明显的费用和效率优势。具体表现在: 静动法不需要打设反力锚桩; 不需要安装海上平台; 不需要安装焊接反力设备系统; 无需液电加载设备; 费用支出约为静载的 30%。并且静动法试验周期短, 可将常规静载的 4 d 缩短为 1 d, 能够明显节省大量经济成本和时间成本。静动法试验受到的空间限制也较小, 只要具备起重条件, 可以在群桩或排架中的任意位置进行试验, 便于实现问题桩检验或随机抽检; 相比之下, 静载试验受限于锚桩桩位, 高应变复打受限于打桩船二次就位, 均不能在多排架中部或大型群桩内部位置进行随机试验。归纳水工静动法与常规试验方法的对比性能见表 4。

表 4 水工桩基承载力试验方法比较

试验方法	数据直观性	结果准确性	国内规范	试验周期	费用支出	桩完整性测试	试验条件	试验灵活性	辅助条件
静动法	较好	较好	无	短	中	无	起重	高	中等
静载	好	好	有	长	高	无	起重、锚桩、基准桩	差	复杂
高应变	差	一般	有	短	低	有	打桩设备	中	一般

## 6 结论

1) 静动法测试中, 测量最大冲击力的同时也应考虑传递能量大小。适度的传递能量是静动法准确性的保障。采用力和速度积分的方法计算传递能量简单易行, 不需增加费用投入。

2) 在静动法试验中, 应将波速倍数  $N_w$  严格控制在 6 以上, 以减低应力波效应影响。常规设备下对于长度小于 90 m 的桩, 反力配重达到 5% 预估承载力即可确保  $N_w > 6$ 。

3) 静动法的可靠性高, 且成本较低, 使其很适合在水工打入桩施工中替代传统方法进行承载力验证, 实现了经济效益和可靠性的平衡, 在国内具有发展推广的前景。但受到经验和规范的限制, 静动法试桩的国内推广工作需要大量可靠的静载对比试验作为基础。

## 参考文献:

- [1] ASTM D7383-10, Standard Test Methods for Axial Compressive Force Pulse (Rapid) Testing of Deep Foundations [S].
- [2] Mullins G, Lewis C, Justason M. Advancements in statnamic data regression techniques [J]. Deep Foundations, 2002, 116: 915-930.
- [3] JTJ 255—2002 港口工程基桩静载荷试验规程[S].
- [4] Middendorp P, Ginneken G J J, Foeken R J. The advantages and disadvantages of dynamic load testing and statnamic load testing[C] //Sao Paulo, Brazil: Proceeding of 6th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, 2000.
- [5] JTJ 249—2001 港口工程桩基动力检测规程[S].
- [6] Middendorp P, Daniels B. The influence of stress wave phenomena during statnamic load testing [C] //Orlando, Florida: Proceeding of fifth International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, 1996.

(本文编辑 武亚庆)