



基桩高应变检测技术的最新进展

赵德刚

(上海交通大学基建处, 上海 200240)

摘要: 目前国内广泛使用的、涉及多个交叉学科的高应变检测技术存在许多局限与不足。近年来, 国内外陆续提出了一些新的技术并应用于实际工程, 取得了较为理想的效果。通过对多个国家的广泛调查与密切跟踪, 从软件、硬件两个方面介绍全球范围内高应变检测技术的最新进展。

关键词: 承载力; 完整性; 高应变检测技术; 最近进展

中图分类号: U 655.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0153-06

Latest development of high-strain testing technique to the testing of pile

ZHAO De-gang

(Basic Construction Department, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: As a simple, cheap, and relatively accurate method, the high-strain testing technique to the testing of pile has been generally accepted and widely implemented. However, there are still many limitations and shortcomings both in hardware and in software. In order to promote the development and perfection, give better service to the construction requirements, based on a thorough analysis, this paper introduces the latest developments in technology through extensive investigation at home and abroad.

Keywords: bearing capacity; pile's integrity; high-strain testing technique; latest development

高应变法是指用重锤冲击桩顶, 实测桩顶部的速度和力的时程曲线, 通过波动理论分析, 对单桩竖向抗压承载力和桩身完整性进行判定的检测方法。同时对打桩过程进行监控是其特有的功能。通过监测预制桩打入时的桩身应力(拉、压应力)、冲击系统的能量传递率、桩身完整性变化, 为选择沉桩设备、确定合理的沉桩工艺参数、桩型、桩长和桩端持力层提供依据, 实现打桩过程的信息化施工^[1]。该方法已被我国多个行业、多个地区列入规范规程, 在工程界得到广泛的应用与普遍的认可。

但是, 高应变涉及桩基工程、岩土力学、土动力学、仪器仪表等诸多学科。作为一种综合性很强的技术, 目前高应变检测技术仍然处于不断发展过程之中。为了改进检测方法, 提高检测精度, 近年

来国内外在这一领域陆续提出了一些新的技术并应用于实际工程, 取得了较为理想的效果。

在深入剖析现有局限性与不足的基础上, 通过对多个国家的广泛调查与密切跟踪, 笔者从软件、硬件两个方面介绍了高应变检测技术的最新进展, 可为相关技术人员提供参考、开拓思路, 以期推动该项技术的完善与进一步发展, 更好地服务于工程建设。

1 软件新进展

1.1 锤击力直接测量技术

在传统的基桩高应变动力检测中, 桩顶的锤击力波和速度响应分别通过对称安装在测量截面(约距桩顶 $2D$, D 为桩的直径或边宽, 以下同)

收稿日期: 2014-02-17

作者简介: 赵德刚(1978—), 男, 硕士, 工程师, 从事高校基建管理工作。

处的 2 支环式应变计和 2 支加速度计测量, 其中环式应变计输出的应变测量值需乘以估算的桩身材料弹性模量才能换算成力值。绝大多数桩基材料为混凝土, 制桩或成桩工艺的不同导致存在不同程度的非线性和非均匀性, 使锤击力波测量出现以下问题^[2]:

1) 重锤的冲击力幅值高, 混凝土变形远远超出线弹性范围, 非线性使“弹性模量”随应变的增加而递减, 采用低应变幅值对应的弹性模量乘以实测应变值换算得到的力值偏高, 准确度低, 并导致据此分析计算得到的桩承载力数值放大, 对工程不安全。特别在锤击偏心、桩头损伤和安装部位混凝土差、混凝土均匀性差等诸多因素的耦合影响下, 检测失败的情况时有发生, 甚至变形过大造成应变计损坏。

2) 灌注桩检测一般要在安装传感器的测量截面(约距桩顶 $2D$) 以上范围内重新加固处理桩头, 费时并增加检测成本。若在未处理的桩头混凝土侧表面直接安装环式应变计, 锤击力波检测失败的几率增加且普遍存在力信号质量差的问题。

3) 高应变力传感器涉及高频动态冲击力作用下的动态响应问题, 一般校准试验室无法进行校准。采用没有校准的力传感器, 测到的信号再换算成力值, 结果的可信度存疑。

锤击力直接测量技术, 可利用兼容传统的基桩高应变动力检测方法的扩展型仪器, 通过直接测量自由落锤锤体的加速度, 对锤体的加速度信号进行低通滤波, 按牛顿第二定律分别计算得到桩顶的锤击力, 将桩顶锤击力进行惯性效应修正后得到桩顶以下测量截面处的锤击力。落锤加速度信号中的高频干扰和桩头惯性效应只分别与落锤的几何尺寸和桩头的惯性质量有关, 与混凝土的材质及应力-应变关系无关, 进而提高了混凝土桩的高应变检测的准确度(图 1)。

同时, 采用常规方法时, 每次检测前必须在桩侧表面钻 6 个孔, 其中 4 个为应变式力传感器, 2 个为加速度传感器且安装应变式力传感器时还有许多应注意的问题。采用该方法测力时, 由于已

预先在自由落锤锤体上钻孔, 检测前仅需在桩侧表面钻 2 个孔安装加速度传感器即可, 故检测操作简单快捷、可明显提高检测工作效率。



图 1 力传感器装在落锤上

1.2 打入桩的桩侧与桩端阻力实时检测技术

对于打入桩而言, 在打桩监测时可以采用 Case 法简明快速计算单桩极限承载力。但是不能将桩侧摩阻力与桩端承力分开且阻尼系数 J_c 的选用带有一定的随意性, 造成时下人们对于 Case 法毁誉参半。

不同于采用常规方法一般只在桩顶附近安装应变计与加速度计(图 2), 美国佛罗里达州交通运输部(Florida Department of Transportation, FDOT)建造师 David Sadler 提出一种在桩的顶部、底部预埋 2 组无线型应变计与加速度计, 进而在打桩时实时计算桩侧与桩端阻力的方法(Embedded Data Collector, 嵌入式数据采集器, 即 EDC 法)^[4]。

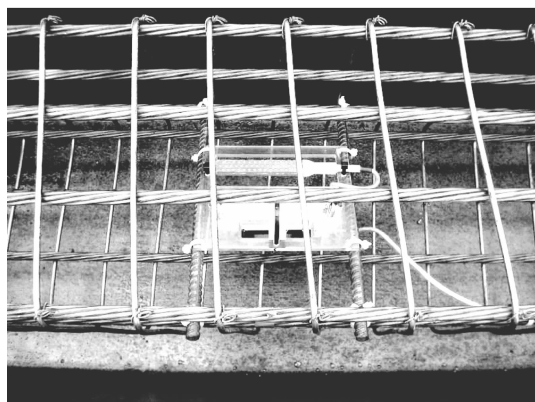


图 2 预埋应变计与加速度计

计算方法分为 4 种: 1) 静态 Case 法, 阻尼系数固定为常量, 数值则取决于检测人员的输入;

2) 动态 Case 法, 阻尼系数为一变量, 每次锤击下通过计算分析得出; 3) Paikowsky 方法, 能量-位移方法; 4) UF 法, 类似于动态 Case 法, 阻尼系数为一变量, 每次锤击下通过计算分析得出。同常规高应变方法相比, EDC 法在桩的底部附近增设一组应变计与加速度计, 显然精度更高^[5]。

1.3 动测理论新进展

基桩准动法试验 Hybridnamic 技术是采用特制弹性锤垫技术和 PSD 技术相结合的一种新型基桩动测新技术, 可以给基桩加上足够的、持续的荷载和快速获得桩顶位移变化, 并能将荷载能量传递到整个桩身, 从而可以比较精确地测得基桩的承载力^[6]。与常规动力试验相比, 它采用特制锤垫增加了荷载作用的持续时间, 从而获得理想的快速荷载试验结果。此外, 使用 PSD 摄影机精确地测定桩身位移。准动法试验获得的动测信号可以通过相对简单的解释方法进行分析, 如多循环试验卸载点法, 将每一锤击的卸载点相连, 即得到荷载-沉降曲线。准动法试验已经纳入日本岩土工程协会单桩竖向抗压静载试验标准 (JGS 1815—2002) 中^[7]。此外, 还可使用 CAPWAP (美国 PDI 公司的曲线拟合分析程序) 进行更为详细的分析。

Matsumoto 提出急速荷载试验 (SHM, Spring Hammer rapid load test Method, 弹簧锤快速负载试验方法)^[8]。通过改变弹簧单元的组合, 重锤质量以及重锤的落距, 就可以控制加载持续时间和冲击力。采用非线性阻尼方法推导出“静”荷载-沉降关系。加载持续时间可达 500 ms, 10 min 后可以在现场得到试验结果。

日本地盘试验所株式会社宫坂亨明等提出一种桩的准静载试验法 (Pseudo-Static Pile Load Test)^[9], 可在较短时间, 且经济地获得桩的承载力判断所必需的可靠性较高的数据。在该方法中, 将重锤下落到桩顶上, 根据该重锤的荷载和上述桩顶位移的关系求出桩的承载力, 其特征分阶段地将上述重锤的下落高度从低处变为高处, 根据各阶段的荷载和上述桩顶位移的关系, 求出上述桩的承载力。

2 硬件新进展

2.1 PAX 型 PDA

PAX 配备无线数据传输工具, 无线传输技术优势是显而易见的: 重力更小, 减少了仪器损坏, 更少出错, 无需电缆清洗和保养, 花费更少时间安装传感器, 对于打入桩监控试验速度更快 (无需电缆连接及事前在地面安装好传感器, 避免了攀爬导架), 消除了可能因主电缆和连接电缆损坏产生数据质量问题。

当 PAX 在现场时, 只需打一个手机电话即可快速进行试验。观测承载力如何随时间变化的复打试验可很容易完成。试验过程中, 办公室里的 PDA 工程师可看到如亲临现场一样的数据, 评价数据质量, 并实时地将分析结果和其它问题反馈给现场工程师。

2.2 二合一传感器

荷兰 TNO 公司研制出复合型传感器 (力、速度传感器二合一) (图 3)。采用常规方法时, 应变传感器与加速度传感器的安装位置位于同一截面, 但是存在一定的距离 (一般不大于 80 mm), 导致信号的一致性差。同时, 每次检测前必须在桩侧表面钻 6 个孔, 其中 4 个为应变式力传感器, 2 个为加速度传感器, 且安装应变式力传感器时还有许多应注意的问题。采用该方法测力时, 检测前仅需在桩侧表面钻 4 个孔安装传感器即可, 故检测操作简单快捷、可明显提高检测工作效率。

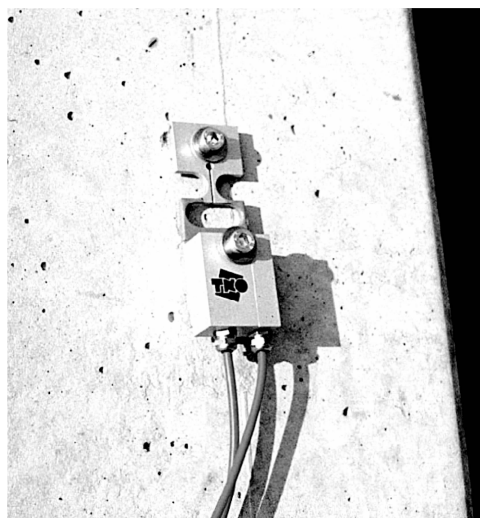


图 3 荷兰 TNO 公司复合型传感器

2.3 电阻应变计

测量应变的传统方法是在桩上钻孔插入楔形锚栓来安装机械式应变传感器（力的测量也类似），该方法的最大问题在于钻孔本身产生应力集中导致测量误差。

例如：2007 年东南沿海某大城市行业协会组织了全市 31 家具有高应变监测资质的单位进行比对试验。为了使试验条件基本一致，减少离散性及减小锤击次数对桩周土的扰动，在同一根桩上同时安装 8 个传感器，8 家单位在同一锤击作用下同时进行检测。将该批次锤击力平均值外延 $\pm 10\%$ ，落在平均值 $90\% \sim 110\%$ 区间的只占参与该桩检测单位数量的 $37.5 \sim 75.0\%$ ，5 根试桩的加权平均仅为 54.1% [10]。

在采用比较理想的桩进行试验、而且试验条件基本一致的情况下，31 家检测单位的实测锤击力离散结果还这么大，是很严重的问题。可见，现在采用的传感器安装手段亟待改进。

SIMBAT 使用 55 mm 长的箔式电阻应变计，用胶粘贴在桩身上。不仅非常方便，而且可以对桩顶在锤击时的真实应变进行更为可靠的测量。

2.4 动位移激光测量

经过多年的现场实践，检测人员发现测量锤击时，桩的位移对数据处理时的修正至关重要。例如：我国建设部行业标准 JGJ 106—2003《建筑基桩检测技术规范》规定：贯入度的计算值应与实测值接近。它不仅从加速度数据中正确推断出这种测量桩顶的速度（修正加速度数据），而且也可以完全独立地检查桩在锤击时的运动。

英国 Testconsult 公司开发出一种特殊的数字激光测量系统用于测量在锤击时桩的整个沉降过程以及永久沉降。距桩 5 m 处分辨率为 0.14 mm，最远可以放置在距离桩 10 m 的地方。图 4 为法国 VINCI 集团旗下 NOVKOL 公司 SIMBAT 箔式电阻应变计、激光瞄准靶，图 5 为英国 Testconsult 公司 SIMBAT 激光测量系统。



图 4 箔式电阻应变计、激光瞄准靶



图 5 SIMBAT 激光测量系统

2.5 导向架和脱钩装置

图 6 所示为欧洲目前广泛使用的 FonDy 试验加载设备，该设备的落锤质量 4.0 t，最大落距 2.5 m，其最大的好处是计算机控制可以精确对中，重锤的起吊和下落也很方便。



图 6 FonDy 高应变锤击装置

图 7 所示为 IDWS (Israeli Drop Weight System) 高应变锤击装置。落锤质量可以通过导向架两侧的连接螺杆进行组合，同时落距可以调整。桩垫

上有一个撞击盘。



图7 Israeli 高应变锤击装置

2.6 激振设备

李廷^[11]成功研制 20 t 特大型组合式高应变动力试桩重锤。采用外挑式螺栓联结的组合方式, 不仅组装灵活、简便, 现场操作安全、实用, 而且带来了制造技术的突破, 降低设备成本。利用该技术可陆续推出 25 t 和 30 t 组合式重锤, 检测承载力可达 25 000 kN。

2.7 特制锤垫

特制锤垫最早是由日本 Jibanshikenjo 株式会社开发的, 它是一种由钢板、气胞和橡胶复合材料组成的蜂窝结构。特制锤垫将自由落锤能量转换成快速荷载, 然后施加到桩顶。使用这个特制锤垫具有如下优点: 延长荷载作用持续时间、低斥力、可重复使用、避免桩身损坏^[12]。

按照日本岩土工程协会标准, 快速承载力试验相当于 5 倍或以上波传播所需加载时间的动力荷载试验。最大荷载作用的持续时间越长, 试验时桩身的运动就越接近静载试验时的状况。相比于常规的动力荷载试验, 快速承载力试验法延长了荷载作用的持续时间, 因为当荷载增加时, 锤垫蜂窝结构中的空气被排出。

锤垫中的气胞使自由落锤产生低斥力, 反弹小。卸载过程中, 因作用在气胞上的负压影响, 可使锤垫复原的时间延长。

锤垫中的钢板可使加载时橡胶复合材料的侧向变形得到限制。此外, 它还有助于防止材料中的负荷超过其最大应力, 即使反复使用, 也几乎没有损坏。

2.8 PSD 位移测量系统

日本 Jibanshikenjo 株式会社生产的 PSD 位置敏感传感器用于结构监测、寿命周期成本分析或动态响应分析等无损检测领域, 是超快响应速度和超高分辨率的 LED 光学位移测量装置, 可以远距离精确测量标靶的二维动态位移。

位置敏感探测器 PSD, 主要由 LED 标靶、PSD 摄像机和 PSD 控制器组成。由于设备内置硬件技术, 可自动找到物体的中心, 并能随时测得物体的固有频率, 可广泛用于结构监测、命周期成本 (LLC) 分析或动态响应分析等无损检测领域, 是超快响应速度和超高分辨率的 LED 光学位移测量装置, 可以远距离精确测量标靶的二维动态位移。

2.9 大吨位准静态测桩系统

早在 1989 年由加拿大伯明翰公司 (Berming Hammer) 和荷兰皇家科学院建工研究所 (TNO) 便联合研制成 Statnamic 法。Statnamic 是由 Static 和 Dynamic 而来, 可以称其为静动法。静动法本质上仍属于动力测试范畴, 但是其速度沿桩身变化不大, 可近似为刚体运动, 通过改变动测冲击力为平缓持续推力的特殊装置, 得到可分解的荷载试验曲线, 达到检测单桩承载力的目的。但是鉴于静动法仪器设备极其昂贵, 阻碍了该法在国内的推广和应用。

范进等^[12]在前人的基础上, 开发了大吨位准静态测桩系统。该系统以火药燃烧作为动力源, 利用系统中的反力块上升产生的反作用力将待测桩缓缓推入土中, 由力传感器和激光位移计测定桩顶的压力和位移。

3 结论与建议

作为一种简便、经济而且相对精确的检测方法, 高应变检测技术得到了广泛的应用与普遍的认可, 但是无论是仪器设备等硬件抑或是信号采

