

· 施工技术 ·



锤击偏心对钢管桩高应变检测结果的 影响分析

李志豪¹, 何金海¹, 李建军¹, 孙益振², 白玉新²

(1. 盐田港东区国际集装箱码头有限公司, 广东 深圳 518083;

2. 大连理工现代工程检测有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘要: 针对在高应变检测中经常出现的力信号偏心问题, 在结果分析中通常是通过平均两个力信号抵消偏心的影响, 但若偏心过大或信号失真, 仍会对测试效果和分析结果造成明显影响。对钢管桩高应变检测中锤击偏心产生的原因进行具体分析, 提出现场相应的处理建议, 即根据锤击偏心产生的根源和对检测结果的影响程度, 有针对性地调整传感器安装位置、微调桩架等。

关键词: 钢管桩; 高应变检测; 锤击偏心

中图分类号: U655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0248-05

Analysis of effect of hammering eccentricity on high-strain test results of steel pipe pile

LI Zhihao¹, HE Jinhai¹, LI Jianjun¹, SUN Yizhen², BAI Yuxin²

(1. Yantian East Port International Container Terminals Limited, Shenzhen 518083, China;

2. Modern Engineering Test Co., Ltd., Dalian University of Technology, Dalian 116023, China))

Abstract: In response to the problem of eccentricity of force signals that often occurs in high strain dynamic testing, the effect of eccentricity can be partially eliminated by averaging the two force signals in results analysis. However, if the deviation is too large or the signal distortion, it will still significantly affect the test and analysis results. We analyze causes of the eccentricity of hammering in the high strain detection of steel pipe pile, and put forward the corresponding on-site treatment suggestions, such as the targeted adjustment of the installation position of the sensor and the fine-adjusting of the pile frame according causes of the eccentricity of hammering and its influence on test results.

Keywords: steel pipe pile; high-strain test; hammering eccentricity

钢管桩具有生产工艺成熟、接桩容易、桩径选择灵活、施工效率高、沉桩快速方便且承载力高等优点, 在强风化岩作为桩基持力层的地质条件时, 钢管桩能很好地进入持力层, 更容易适应各种复杂的地形。因此, 近年来随着大量大型工程建设需要, 钢管桩不仅在深海及沿海软土层厚、持力层深的地区, 同时在持力层相对较浅的近岸码头中也得到广泛的使用^[1-2]。钢管桩在施工过程中桩长可控, 承载力达到设计要求并满足规范安全系数规定时即

可停止沉桩, 还可达到节约工程成本的目的。

为了确定钢管桩的承载力是否达到设计要求, 海上钢管桩的承载力检测一般采用高应变检测, 高应变打桩分析仪在现场采集信号后即可进行实时分析, 并得出桩的静阻力、锤击力、桩身损伤程度等数据。高应变检测是一种经济、实用的快速检测方法, 并且 CAPWAP 拟合计算结果可提供桩的桩端阻力、桩侧阻力、总承载力极限值和模拟静载试验的 $Q-s$ (荷载-沉降) 曲线等, 因此在工

收稿日期: 2024-09-27

作者简介: 李志豪 (1976—), 男, 硕士, 英国土木工程师协会注册工程师、香港及英国注册工程师, 从事港口工程管理。

程检测中得到广泛应用^[3]。

1 高应变检测过程及要点

高应变检测时,首先在桩身两侧沿桩轴线对称安装2个力传感器和2个加速度传感器,再对桩顶施加足够能量的锤击力,当桩土之间产生一定的相对位移时,测量锤击过程中作用在桩上的力波 $F(t)$ 和加速度波 $a(t)$ (经积分后得到速度波 $v(t)$),通过高应变打桩分析仪得到高应变检测结果,试验过程见图1。

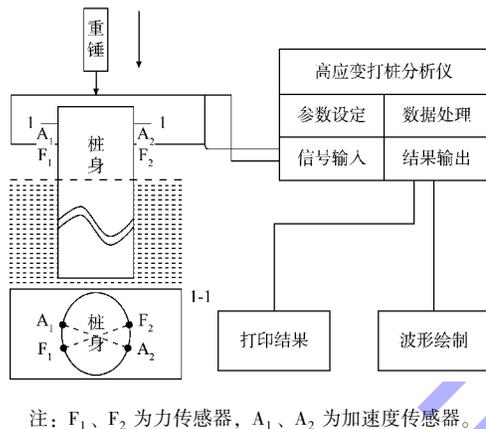


图1 高应变检测
Fig. 1 High strain detection

高应变试验成功的关键是信号质量以及信号中的信息是否充分。根据每锤信号质量以及动位移、贯入度和大致的土阻力情况,初步判别采集到的信号是否满足检测要求。在实际检测应用中现场情况复杂,为确保采集到的数据可靠,检测人员应能正确判断波形质量、识别干扰,熟练诊断测量系统的各类故障,应检查混凝土桩锤击拉、压应力和缺陷程度大小,以决定是否进一步锤击,以免桩头或桩身受损。

为获得高质量的检测信号,根据 JTS 240—2020《水运工程基桩试验检测技术规范》^[4] 和 JGJ 106—2014《建筑基桩检测技术规范》^[5] 传感器安装应满足下列要求: 1) 桩身两侧沿桩轴线对称安装的2个加速度传感器和2个力传感器的中心处于同一横截面上,见图2,传感器与桩顶间的垂直距离 l , 桩径 d 大于1 m 的桩,一般不小于1倍桩径,其他桩一般不小于2倍桩径或桩宽; 2) 安

装传感器的桩身表面平整,其周围无缺陷或截面突变; 3) 传感器的安装采用螺栓固定,螺栓孔与桩侧面垂直,安装后的力传感器和加速度传感器紧贴桩身; 4) 水上检测时,采取措施预防传感器或导线接头进水; 5) 锤击时,将传感器电缆线固定在桩身上,预防振动受损。

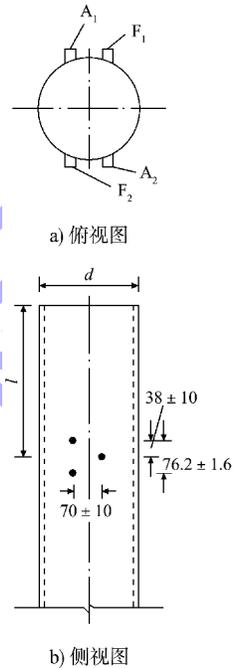


图2 测点处传感器安装 (单位: mm)

Fig. 2 Installation of sensor at measuring points (unit: mm)

2 问题及解决方案

高质量的信号是得出可靠分析结果的基础,有问题的检测信号不能用于分析。在行业规范 JTS 240—2020《水运工程基桩试验检测技术规范》的正文和条文说明中对高应变法试验检测数据的选取原则有明确规定和解释,对检测中应及时检查、调整或停止检测的情况均有相应的规定,从中可以找到原因和解决方案。高应变检测中比较重要的环节是传感器安装、桩顶平整度、锤击系统。本文仅从钢管桩高应变现场检测中遇到的问题出发,探讨相关问题的解决方案。

传感器的安装质量在规范和设备使用说明中有明确的要求,桩顶平整度和锤击系统的设备选型也会对高应变检测结果产生影响。

高应变测试结果是锤击激发和桩土反应的综

合结果，现场采集的信号质量是后续拟合分析的基础，质量好的信号可以如实反映试验桩的侧阻和端阻信息，拟合出的结果更符合实际；而比较差的信号会导致拟合结果质量低、甚至无法得到拟合结果，即使拟合出结果可信度也较低，在多数情况会低估承载力实际值。

力信号偏差较大是检测时常出现的问题^[6-9]，多是由于锤击偏心导致。尽管对两个力信号取平均可以部分消除偏心的影响，但是如果偏差过大，一侧力信号严重偏低，平均后拉低的力的峰值导致波形失真， $F-v$ 曲线比例失调，导致无法拟合出合理的检测结果。

造成锤击偏心可能有以下 3 个原因：1) 打桩锤系统误差，在桩架导轨垂直的状态下，锤底面水平角度存在系统误差；2) 锤垫在使用一段时间后变得不平整；3) 桩顶倾斜。对于前两种原因，在检测过程中通常会连续出现锤击偏心导致的信号，定期对打桩锤进行检查、维护和调整即可。对于第 3 种原因则需要对桩顶倾斜的原因进行具体分析后确定，首先在出厂前检查管端平整度和桩顶倾斜偏差在规范允许偏差之内，如果出厂合格但在钢管桩施工过程中存在桩顶倾斜的问题，则需要结合吊装方式、施工过程中桩身垂直度控制、土层分布情况综合分析。

JTS 257—2008《水运工程质量检验标准》^[10]对钢管桩制作的允许偏差有参考标准，管端平整度允许偏差 2 mm、桩顶倾斜允许偏差 $5 d/1\ 000$ 且不大于 5 mm。现场检测时如果桩顶倾斜偏差过大时则会导致桩顶高出的一侧受力集中，容易出现屈服变形，且高应变检测力信号偏心严重。桩顶局部卷曲变形的工程桩见图 3，利用水平仪测量施工后的桩顶倾斜偏差最大值为 30 mm，大于要求的 5 mm。由图 3 可以看出，锤击力集中于很小的区域时会导致钢管桩顶部局部变形、卷曲，对侧虚击区域锤击痕迹不明显，锈迹在打桩后还存在。该桩的高应变实测力曲线见图 4。可以看出，2 条力曲线信号明显不一致，在 A 点下的传感器(F_3)只有 1 个峰值，C 点下的传感器(F_2)出现了 2 个峰值，显然是锤击 A 点触发传感器采集到 1 个峰值，此时由于桩顶倾斜 C 点处没有与打桩锤实际

接触，锤击 A 点后，在惯性作用下 C 点受到锤击力作用，导致 C 点下的传感器再次出现峰值，但是 C 点下的传感器的峰值都小于 A 点下打桩锤实击产生的力峰值，拉低了平均后的力曲线，因此导致未入土范围平均后的力曲线在速度曲线之下。

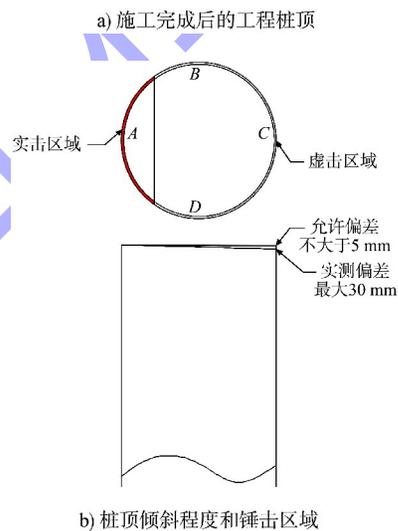
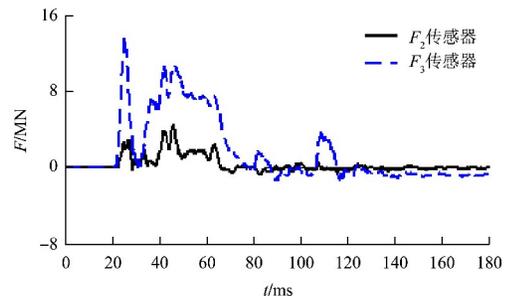


图 3 桩顶倾斜、局部卷曲变形的工程桩

Fig. 3 Engineering piles with inclined pile tops and partial crimping deformations



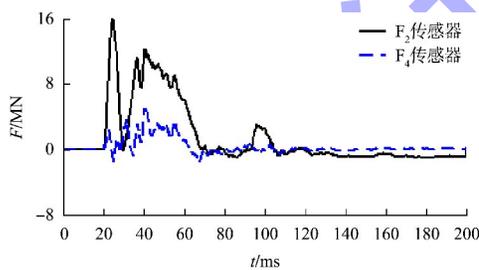
注：拟合长度为 $19 L/c$ ，其中 L 为测点以下桩长， c 为桩身波速。

图 4 桩顶倾斜、局部卷曲变形的工程桩高应变实测力曲线
Fig. 4 Measured force curves of high-strain for engineering piles with inclined pile tops and partial crimping deformations

由于无法处理桩顶倾斜的问题,为获取更准确的承载力检测结果,对于由锤击偏心导致的高应变检测承载力偏低的钢管桩,可在垂直方向或根据桩顶锤击偏心情况重新钻孔安装传感器进行试验。实践证明,重新钻孔后的力信号检测结果一致性有所改善,见图5。可以看出,钢管桩直径1.0 m,桩顶倾斜最大处为20 mm,其中1个传感器原安装在距桩顶2.0 m处,2个通道的力信号明显不一致,对侧的力传感器甚至没有出现相应的峰值。在垂直方向上重新钻孔安装传感器后,再次进行高应变检测,2个通道的力信号一致性很好。

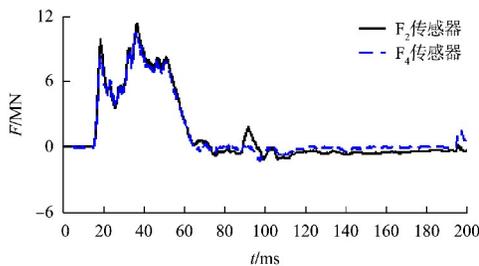


a) 锤击偏心重新钻孔前、后位置



注:拟合长度为 $11.2 L/c_0$ 。

b) 原位置



注:拟合长度为 $11.2 L/c_0$ 。

c) 重新钻孔安装传感器后

图5 锤击偏心重新钻孔前、后的工程桩高应变实测曲线
Fig. 5 Measured curves for high-strain for engineering piles before and after re-drilling due to hammering eccentricity

根据现场检测结果,重新钻孔安装传感器后的高应变检测承载力大部分可提高10%~30%,偶尔也存在重新钻孔后没有提高的情况,主要是因为偏心位置和偏心程度不同,桩身应力在桩周分布上非线性变化,如果传感器安装点在虚击区域以下,2个力信号都小于平均的力信号,进而导致平均后力曲线在速度曲线之下,与实际的力速度曲线形态不符,结果将会低估桩的极限承载力。如果桩顶高出的部分是在图3b)的AB之间,即使在BD位置重新钻孔安装传感器也无法得到信号一致的力曲线。

如果具备传感器安装位置向下调整空间,可以尝试在远离桩顶位置安装传感器,以达到力传感器的信号一致性和提高整个断面平均值的目;如果能够明确桩顶倾斜方向和倾斜程度,可根据倾斜方向和角度微调桩架,在一定程度上也可改善力信号采集效果,避免重新开孔影响施工效率。

3 结论

1) 桩顶平整度和锤击系统引起的锤击偏心属于钢管桩施工环节和设备选型的问题,可通过钢管桩出厂质量控制、定期对打桩系统进行检查、维护和调整进行解决。

2) 对于由于桩顶倾斜原因锤击偏心导致高应变检测承载力偏低的钢管桩,可在垂直方向或根据桩顶锤击偏心情况重新钻孔安装传感器进行试验。

3) 对于重新钻孔安装传感器后检测承载力没有提高的情况,主要是因为偏心位置和偏心程度不同,桩身应力在桩周分布上非线性变化,导致平均后力曲线在速度曲线之下,与实际的力速度曲线形态不符,结果将会低估桩的极限承载力。

4) 对于具备传感器安装位置向下调整空间的情况,可尝试在远离桩顶位置安装传感器,力传

传感器的信号一致性和接近整个断面的平均值程度会有所提高。

5) 对于能够明确桩顶倾斜方向和倾斜程度的情况, 可根据倾斜方向和角度微调桩架, 在一定程度上也可改善力信号采集效果, 避免重新开孔影响施工效率。

参考文献:

- [1] 刘长健. 洋山三期大型钢管桩试桩及大型钢管桩承载力研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
LIU C J. Pile testing of large steel pile of Yangshan Port and study on bearing capacity of large steel pile [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [2] 周厚林. 海上风电基础大直径钢管桩竖向承载特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
ZHOU H L. Study on bearing properties of steel pipe piles with large-diameter of offshore wind farms foundation under vertical load [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [3] 陈凡, 陈久照, 徐天平, 等. 基桩质量检测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
CHEN F, CHEN J Z, XU T P, et al. Quality detection technology of foundation pile [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [4] 中交四航工程研究院有限公司, 广州港湾工程质量检测有限公司. 水运工程基桩试验检测技术规范: JTS 240—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou Port Engineering Quality Testing Co., Ltd. Technical code for testing and inspection of waterway engineering foundation piles: JTS 240-2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [5] 中国建筑科学研究院. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
China Academy of Building Research. Technical code for Testing of building foundation piles: JGJ 106-2014[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2014.
- [6] 梁朝书, 张建强, 赵迪. 影响基桩高应变动力检测实测信号的因素[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(5): 119-121.
LIANG Z S, ZHANG J Q, ZHAO D. Influence factors on measured signals in high-strain dynamic pile tests [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2011, 32(5): 119-121.
- [7] 张吾渝, 王雪峰, 甘轶, 等. 偏心敲击对高应变信号的影响[J]. 工业建筑, 2010, 40(8): 95-98, 60.
ZHANG W Y, WANG X F, GAN Y, et al. The influence of off-center hitting on the signals in high strain dynamic test [J]. Industrial construction. 2010, 40(8): 95-98, 60.
- [8] 侯传相. 基于高应变检测下桩的动态响应性能分析研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
HOU C X. Research on dynamic response performance of pile based on high strain dynamic test [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [9] 阳亮. 高应变检测锤上测力的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
YANG L. Study on the application of high strain measuring force on the hammer [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [10] 中交第一航务工程局有限公司, 福建省交通基本建设工程质量监督检测站. 水运工程质量检验标准: JTS 257—2008[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2008.
CCCC First Harbor Engineering Company Ltd., Fujian Provincial Quality Supervision and Testing Station for Transportation Infrastructure Construction. Standard for quality inspection of port and waterway engineering construction: JTS 257-2008 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2008.

(本文编辑 王璁)