

· 水工结构 ·



VSP 与 CT 技术对在役高桩码头 结构损伤的检测与应用

苏林王¹, 赵冉¹, 赵永贵², 刘培鸽¹

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室, 广东 广州 510230;
2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100093)

摘要: 在役高桩码头结构检测时由于结构形式复杂、需水上作业等因素, 采用传统方法难以对其进行全面损伤检测。本研究在自主研发相关仪器设备的基础上, 综合采用 VSP 基桩测试设备与混凝土结构内部损伤 CT 扫描设备, 对船舶撞击后的某油田钻井平台码头进行检测与评判。检测结果发现, 采用 VSP 与 CT 联合检测技术, 能对在役高桩码头上部结构及基桩的损伤进行准确检测, 并可根据检测结果对码头上部结构与基桩的损伤程度做出科学的评价, 较好地解决了在役高桩码头结构损伤全面检测的技术难题, 可作为一种新型的在役码头检测手段进行应用推广。

关键词: VSP 技术; CT 技术; 在役钻井平台码头; 结构损伤检测; 结构损伤评价

中图分类号: TU 473. 1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0140-05

Structural damage detection of in-service high-pile wharf using VSP and CT technology

SU Lin-wang¹, ZHAO Ran¹, ZHAO Yong-gui², LIU Pei-ge¹

(1. Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Durability Technology, Ministry of Communications, CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: The comprehensive damage detection of in-service high-pile wharfs is difficult because the structural type is complex and water operations are needed. Based on the independent research and development equipment, we adopt the pile integrity test equipment named VSP and concrete internal damage CT equipment to carry out detection and assessment on an oil drilling platform wharf after ship collision. The results show that the upper structure and piles can be detected accurately using VSP and engineering CT, and the degree of damage of upper structure and piles can be evaluated scientifically according to the results. It can be promoted as a new detection method of in-service high-pile wharves.

Keywords: vertical sonic profile technology; computed tomography technology; drilling platform wharf; structural damage detection; structural damage evaluation

我国目前有众多的港口码头。随着港口运行时间的增长, 在役工程结构使用过程中存在不同程度的材料劣化、损伤及功能降低的现象, 安全隐患不容忽视。目前在在役高桩码头结构检测领域, 除了外观调查之外, 对上部结构损伤的检测

方法有回弹法、超声法、声发射法等, 对下部基桩的测试一般采用低应变法、超声波法、取芯法等, 这些方法操作方便、准确性较高, 在结构检测领域应用非常广泛。但对在役码头结构来讲, 现有的检测手段还难以对其实现全面检测, 如回

收稿日期: 2014-06-24

作者简介: 苏林王 (1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水工结构检测工作。

弹方法只能提供混凝土表面的强度分布, 不能对结构内部损伤实现检测, 且对结构有使用年限的限制; 地质雷达可以探测混凝土内的脱空区, 但是不能对微观裂隙及混凝土力学性状的变化做出评价; 采用低应变法对在役码头结构基桩检测时, 由于低应变法是基于—维弹性波理论的方法, 码头上部桩帽、梁板等结构的存在, 使得—维弹性波假定不适用于在役基桩。在役码头基桩的检测成为了一个难题。

在混凝土结构检测技术方面, 随着科技的进步, 出现了 CT 扫描检测技术。文献[1-5]基于不同原理研究了 CT 成像技术及应用, 文献[1]成果仅在试验室内进行测试, 无法用于工程现场, 文献[3-5]成果尚处于理论阶段, 没设备成品问世, 而文献[2]采用联合迭代重建 (SIRT) 的声波层析成像技术在三峡工程混凝土质量检测中取得了良好的效果, 但该套设备无用于码头混凝土内部结构检测的相关报道。本文基于声波发射理论, 通过波速和衰减系数分布来构建内部图像, 基于研发了声波 CT 系统与设备, 可在码头现场对混凝土内部结构进行损伤检测。

在役码头基桩检测技术方面, 目前有 2 个主要研究方向: 一是低应变的改进方法^[6], 二是新型的基桩检测技术^[7]。低应变改进的检测技术, 由于低应变理论本身的限制, 这些改进方法还难以完全滤除基桩上部结构的多个反射面影响。在新型基桩检测技术研究方面, 文献[7]研究导波技术在墩柱检测中应用的可能性, 但对如何消除上部结构的影响还没有进行研究。本文研发了采用声波散射偏移成像技术的 VSP 基桩测试系统, 采用 1 点激发 16/32 道接收, 并开发出配套的硬件与专业处理软件, 从理论和实践上解决了上部结构影响的问题。

本文首先介绍 VSP 与结构声波 CT 的原理, 以及所研发的相关系统及设备, 然后以一个遭受船舶撞击的在役石油平台码头为例, 综合采用 VSP 基桩检测设备与声波 CT 设备对其进行损伤检测, 其中码头基桩采用 VSP 与 CT 综合测试, 上部梁板

结构用 CT 进行测试, 根据两者的结果综合判定码头损伤情况, 以验证综合测试法的实用性。

1 VSP 与 CT 工作原理及简介

1.1 VSP 基桩检测技术与设备

VSP (vertical sonic profile) 为垂直声波剖面成像技术, 是基于声波散射偏移理论的基桩检测技术, 是专为具有上部结构的基桩检测开发的。对于在役高桩码头来说, 上部结构的存在使得基桩中波的传播变得复杂。在上部进行激振后, 在多个反射与透射面的影响下, 基桩中形成了下行波场和上行波场。2 个波场在空间叠加, 靠单点的记录对它们难以区分。VSP 基桩检测技术沿桩侧面布置多道检波器, 根据记录波场中上行波、下行波走时同向轴斜率的差异, 通过方向滤波技术将它们分离开来, 分别偏移成像到发生反射的位置, 进而确定结构与缺陷。该技术能有效地实现桩身长度、混凝土强度、桩体结构、缺陷与桩基基础的检测, 用于评价桩体质量和损伤程度。

VSP 采用 FK 方法进行上下行波场分离 (图 1), 然后基于散射偏移成像理论的检测方法, 散射波遵从波动方程, 弹性波遇到波阻抗变化界面时发生散射, 散射波返回到接收点时被记录下来。弹性波的散射发生在介质波阻抗分布不均的部位, 假定用 $\alpha(r)$ 表示均匀介质中局部平方波速的百分比异常, 百分比异常的分布表征了弹性体的主要特征。TD-VSP 检测系统由 VSP 采集系统和 VSP 分析系统两大部分组成 (图 2)。

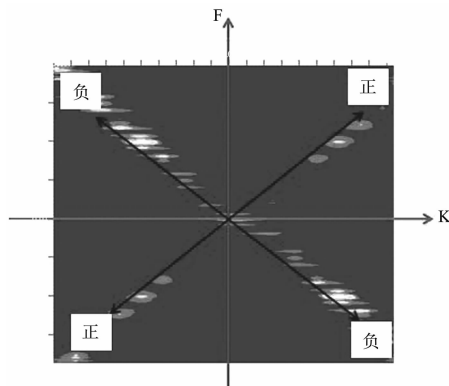


图 1 FK 滤波示意



图2 VSP采集与分析系统

1.2 结构声波 CT 检测技术与设备

声波 CT 是针对混凝土码头结构开发的 CT 成像系统。它工作原理与医学 CT 类似，数学基础都是 Rodan 变换，不同的是医学中使用的是 X 射线，工程中使用的是声波。利用声波穿透混凝土梁体的构件，通过全方位的声波走时的观测，重建码头混凝土结构内部波速分布的图像。混凝土波速的大小与弹性模量相关，它可以作为评价混凝土密实程度、力学强度的定量指标。密实的混凝土波速高，受损的混凝土波速降低。现已积累大量的实验数据，建立了 C30-C60 各个标号混凝土强度与波速的对应关系，作为混凝土力学性状评价的依据（表1）。CT 技术通过对混凝土弹性波速的成像，可以了解混凝土结构的完整性、密实性和强度分布，用于混凝土品质和损伤程度的评价。该方法分辨率高、可靠性好、图像直观，特别适合工程应用，图3为本研究团队开发的声波 CT 设备系统。

表1 混凝土强度等级与波速的对应关系

| 混凝土强度等级 | C30 | C40 | C50 | C60 |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| 纵波波速/(km·s ⁻¹) | 2.5~3.0 | 3.5~3.8 | 4.0~4.5 | 5.0~5.5 |

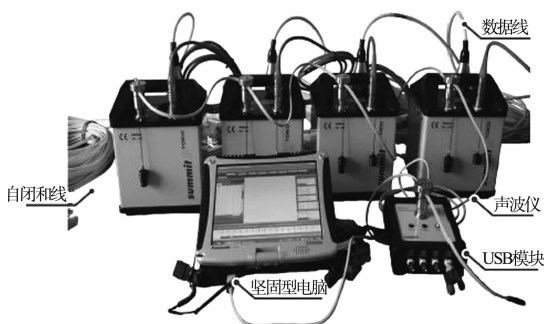


图3 声波 CT 测试仪

2 工程背景

本研究以某油田钻井平台码头引桥为背景，

该引桥于 2011 年和 2012 年曾遭货船撞击，部分上部梁构件与基桩受到损伤。为确保码头出入道路的通畅与安全，需要对引桥受损部位进行检测与评价，以便进行合理的加固处理。

引桥下部一榀有 3 根基桩，基桩上部有梁板连接。引桥被撞部位多集中在梁右端，相关的基桩一起受损。外观调查已发现 58、59、210 等三排结构损伤比较严重，出现宏观裂缝，尤以 210 排破损最为严重。检测对象是这 3 排梁和 210 排梁下的 3 根基桩。梁长 9 m，宽 1.8 m，高 1.3 m，跨距 12 m，C50 混凝土浇筑。基桩原为预制空心桩，壁厚 12.5 cm，外径 120 cm，C50 混凝土。预制桩经强压贯入地基，贯入后用 C50 混凝土将空心注实。梁受损情况见图 4。



图4 典型梁与基桩受损情况

3 现场检测及数据处理

3.1 基桩检测的布置

检测时水面距桩顶 2 m，将检波器电缆紧贴基桩垂入水中，电缆底端配有重物，上部固定，使检波电缆尽量靠近桩身。检波器电缆 16 道，道间距 25 cm，敲击点在检波器电缆上方，

距第 1 个检波器 25 cm，距桩顶 65 cm。数据采集使用本研究团队研发的 VSP 检测仪，16 通道，AD 转换 24 bit，采样频率 192 ksp/s。观测布置见图 5。

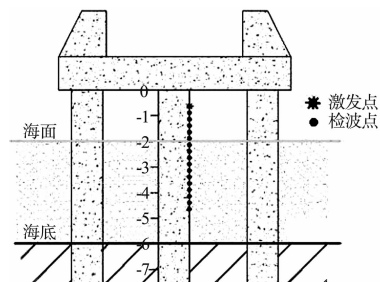


图5 激发与接收点布置

3.2 梁 CT 检测的布置

上部梁构件采用 CT 检测时将接收检波电缆布

置在梁上表面及两端, 敲击点布置在梁下表面边缘及两端, 实现对梁竖直断面的 CT 成像。检波器间距与敲击点距均为 25 cm, 一点敲击 32 点接收。32 道检波器一次布置长度为 8 m, 不能完全覆盖梁, 需要 2 个排列相互衔接。为保证射线的密度与正交性, 在梁的两端检波器与敲击点位置需要相互重叠。2 个排列的总接收点数 46 个, 每个排列敲击 72 个点, 获得走时数据 2 304 个。数据采集使用本研究团队开发的声波 CT 系统, 32 通道, AD 转换 16 bit, 采样频率 1.25 Msps。观测布置见图 6。

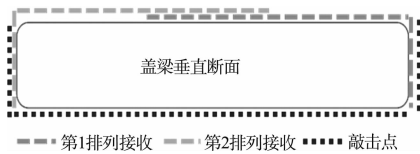


图 6 混凝土梁的 CT 检测布置

3.3 基桩截面 CT 检测布置

VSP 检测中发现 210 排中间位置的基桩受到损伤, 损伤部位距桩顶 3 m, 埋入水下深度 1 m。为进一步了解损伤的程度, 在损伤部位进行了截面 CT 检测。32 个检波器围绕桩身外周均匀布置, 间距 12.5 cm; 在每两个检波器正中间进行敲击, 敲击点 32 个, 获得走时数据 1 024 个。接收点与激发点布置见图 7。

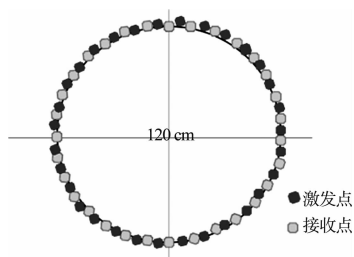


图 7 基桩截面 CT 检测布置

3.4 数据处理

VSP 的数据处理流程主要包括 a) 方向滤波: 对上行波与下行波进行分离; b) 速度扫描: 确定桩体混凝土波速; c) 偏移成像: 根据记录数据确定桩体结构损伤位置及大小。CT 数据处理的主要流程包括观测几何坐标编辑、声波走时读取、混凝土波速反演、波速成像等步骤获得波速分布图像, 根据图像确定缺陷损伤位置及大小。

4 检测结果与损伤评价

4.1 VSP 成基桩检测结果

VSP 检测第 210 排梁下的 3 根桩, 按位置命名为左、中、右桩, 结果见图 8。结果表明基桩海水中长度 6 m, 水面上 2 m。3 根桩的水面、海底、桩基地层的反射界面清楚一致。海底下 6 m 之内地层分 3 层清楚, 物性差异大, 向下逐渐变得密实。海底之上 3 根桩的反射界面出现了差异。右端桩身并未见损伤, 水面上下都没有破损界面; 中间的桩身在距桩顶 3 m 处、水下 1 m 出现明显的反射界面, 推断为撞击造成的损伤; 左端的基桩在水面下和接近海底位置有 2 处较弱的反射界面, 推断为轻微受损, 受损程度较中间桩相对轻微。

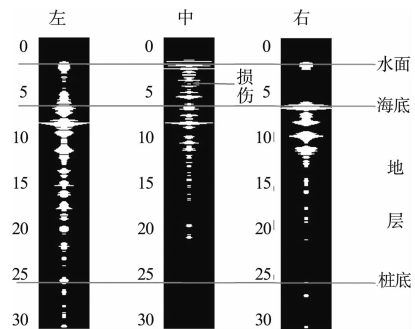


图 8 210 排基桩 VSP 检测结果

4.2 上部梁结构 CT 的检测结果

共检测 3 条梁构件, 分别位于 58 排、59 排, 210 排。按照外观受损的严重程度排序, 210 排被船撞最严重, 59 排船撞次之, 两者均可见宏观破损, 58 排外观无明显损坏。3 条梁的波速 CT 图像依次表示在图 9 中。其中 59 排因外观破损检测长度短了 1 m。

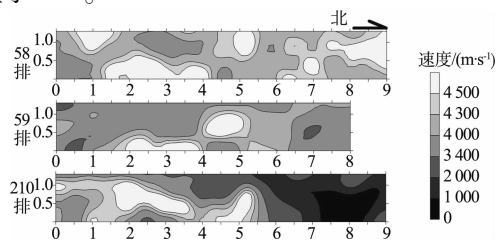


图 9 58、59、210 排梁构件 CT 检测结果

梁结构 CT 图像反映混凝土波速的分布。图像中浅色为中、高波速区, 混凝土密实, 完整, 强度达到 C50 标准, 未受撞击影响。深色区为中等波速区, 混凝土标号近于 C40, 未受撞击影响;

黑色区域为低波速区,强度低于 C30;波速低于 2 000 m/s 区域,为损伤的区域,混凝土松散,微裂隙发育。其中波速低于 1 000 m/s 的区域为破坏区,大量宏观裂缝分布。3 幅图像表明,58 排梁图像以浅色为主,波速高于 4 000 m/s,达到 C50 等级,未受撞击伤害;59 排梁图像以深色为主,波速偏低,C40 等级混凝土为主,但没有撞击损伤区,只是梁混凝土强度不高。

210 排的 CT 图像反映混凝土结构变得极不均匀。梁体左部 5.5 m 范围内,混凝土强度较高,完整性好,波速 4 000 m/s 以上,没有损伤痕迹;梁体右端 3.5 m 范围内,波速低于 2 000 m/s,说明混凝土受到损伤,内微裂隙发育,结构已经松散;特别是右下角 1.5 m 范围内,波速低于 1 000 m/s,反映了强烈撞击的损伤影响,对应宏观裂缝发育区。梁体撞击损伤的影响区约占梁体长度的 40%,建议对该梁进行加固维修或置换。

4.3 桩基截面 CT 检测结果

210 排中间位置桩体截面的 CT 位置距桩顶 2.5 m,截面 CT 图像见图 10。从该图像中可以清楚地看到,桩体边缘混凝土的波速在 4 000 m/s 以上,达到了 C50 标准。桩体中心区的波速比边缘低,在 2 800 ~ 3 500 m/s 范围。桩体北方(撞击方向)和东南方向存在低速区,波速低于 2 800 m/s,表明桩体的外壳已遭到损伤,微裂隙发育,与 VSP 检测发现的损伤部位一致。

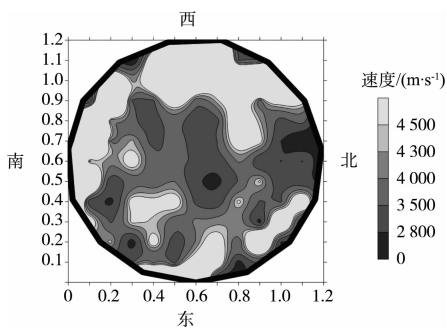


图 10 210 排中间桩截面 CT 波速图像

4.4 梁与桩基撞击损伤的评价

通过对 58、59、210 三排梁和 210 排 3 根基桩的检测,发现 210 排梁的损伤较为严重,影响长度达到 3.6 m,其中端部 2.0 m 尤为严重,其它两

排梁损伤轻微。3 根基桩中,中间部位的桩基受到了较明显的损伤,损伤部位距顶端 3 m,截面内北和东南方向混凝土微裂隙发育。建议对受损梁和桩基进行加固处理。

5 结论

1) 在役高桩码头结构的综合检测时,下部桩基检测采用 VSP 联合 CT 进行检测,上部结构采用 CT 技术检测,可有效地对在役高桩码头结构进行整体无损检测。2) VSP 技术作为一种新型的桩基检测设备,采用方向滤波与偏移成像技术,具有可有效滤除上部结构影响的特点,可带上部结构的在役码头桩基实现无损检测。3) 声波 CT 技术根据混凝土内波速的变化,建立结构内部波速图像,可有效判定混凝土内部的结构损伤,可用于码头上部结构及桩基的水上部分损伤检测。4) 目前在役码头结构的损伤检测采用传统的检测方法还存在一定的困难,VSP 与 CT 综合检测法,可作为一种新型的检测技术加以推广。

参考文献:

- [1] 赵亮,李昌华,党发宁,等. X 射线混凝土 CT 图像处理方法分析研究[J]. 武汉理工大学学报,2011,33(3):596-601.
- [2] 周黎明,王法刚,肖国强,等. 超声波层析成像技术在三峡工程混凝土质量检测中的应用[J]. 无损检测,2004,26(10):517-522.
- [3] 赵明阶,徐蓉. 超声波 CT 成像技术及其在大型桥梁桩基无损检测中的应用[J]. 重庆交通学院学报,2001,20(2):73-86.
- [4] Iversen E, Tygel M. Image-ray tracing for joint 3D seismic velocity estimation and time-to-depth conversion [J]. Geophysics, 2008, 73(3): 99-114.
- [5] Arvanitis M S. Finsler geometry applied on ray-tracing for seismic tomography [C]//Society of Petroleum Engineers, 68th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition, 2006: 2 247-2 251.
- [6] 张强,孙熙平,王元战,等. 高桩码头桩基完整性检测技术研究[J]. 港工技术,2010,47(6):52-56.
- [7] 李学军. 在役桩基病害导波无损检测的数值模拟与实验研究[D]. 北京:中国地质大学,2003.

(本文编辑 郭雪珍)