

· 港口 ·



IES 测试法在港工结构混凝土 缺陷检测中的应用

吉同元, 李鹏飞, 徐亮, 秦网根

(江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏省水运技术研究中心, 江苏南京 210014)

摘要: 通过模型试验和工程应用, 研究了 IES 测试法在港工结构混凝土缺陷检测中的应用技术。通过模型试验研究了该方法的参数设置、操作步骤以及缺陷尺寸、缺陷深度、墩柱状构件对应力响应的影响。得到如下结论: 1) 缺陷判断方法以主频偏差为主, 频域曲线出现次峰为辅, 阈值可定为 5%。2) 缺陷尺寸与主频偏差成正比关系, 缺陷深度效应存在阈值, 深度较浅对主频偏差影响较小, 超过阈值则成正比关系。3) IES 系统不适用于墩柱状构件, 其有效检测深度应小于 1 m。在此基础上将该方法应用于某高桩码头预制混凝土构件的检测中, 通过检测厚度云图, 直观快捷地识别出了混凝土内部缺陷。

关键词: IES; 港工检测; 混凝土缺陷

中图分类号: TV 92; U 653

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)07-0040-06

Application of IES test method in detection of concrete defects existing in port structure

Ji Tong-yuan, Li Peng-fei, Xu Liang, Qin Wang-gen

(Aquatic Transportation Center of Jiangsu Province,

Jiangsu Province Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: Through model test and engineering application, the paper studied the application technology of IES test method in the detection of concrete defects existing in the port structure. It studied the influences of parameter setting, operation steps, defect size, defect depth, and columnar components in this method on the stress response through model test and got the following conclusions: 1) The defect judging method is mainly based on the deviation of main frequency and supplemented by that the frequency-domain curve appears secondary peak; the threshold value can be fixed as 5%. 2) Defect size is positively correlated with the deviation of main frequency; defect depth has a threshold value; shallow depth produces small influence on the deviation of main frequency, and when the depth exceeds the threshold value, the defect depth is in direct proportion to the deviation of main frequency. 3) As the effective detecting depth of IES system shall be less than 1 m, so it doesn't apply to the columnar member. On this basis, this method was applied in the detection of precast concrete unit at a high-pile wharf. The defect inside the concrete could be recognized intuitively and quickly by detecting the thickness cloud picture.

Keywords: IES; port detection; concrete defect

港工结构混凝土常因施工控制不严、环境腐蚀、外荷载作用等原因, 产生不同形式的缺陷, 如裂缝、空洞、表面损伤等, 威胁结构安全。目前, 针对港工结构混凝土缺陷, 常采用取芯法和超声法进行检测。取芯法为破损方法, 虽然直观

可靠, 但耗费大量人力物力, 且检测位置涵盖面较小; 超声法为无损检测法, 是目前最常用的混凝土缺陷检测方法, 且有明确的技术规范。但在港工结构检测中, 超声法具有较大的局限性: 双面操作, 港工检测条件较难满足; 检测前准备工

收稿日期: 2016-03-07

作者简介: 吉同元 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事基础工程、港口工程的检测评估工作。

作多,步骤繁琐;缺陷判断需大量数据、且逐点检测,效率较低。

除超声法外,IES 测试法(扫描式冲击回波法)作为一种新兴的混凝土缺陷无损检测方法,凭借单面操作、可连续扫描等优势,在道路、桥梁、隧道等领域得到越来越广泛的应用^[1-5]。本文将 IES 测试法引入港工结构混凝土缺陷检测,并从检测原理分析、模型试验研究和工程应用 3 方面,对 IES 测试法进行研究,促进该方法在港工领域的推广应用。

1 IES 检测原理分析

IES 测试法以应力波的反射共振为基础,其研究起源于 20 世纪 80 年代,1989 年南京水利科学研究院将该项技术引入国内,随后研发了首套现场测试系统(IES-A)^[6]。IES 测试法检测时首先通过机械冲击在混凝土表面激发瞬态低频的应力波(应力波包括纵波、横波和面波,此处特指纵波)。应力波在混凝土中传播时,一旦遇到缺陷或边界,由于两种介质的声阻抗率不同,应力波将发生反射,从而形成瞬时的类谐振^[7]。利用传感器采集激振点附近的表面位移响应,进一步处理得到该点的时域信号(时间-位移曲线)。基本原理见图 1。

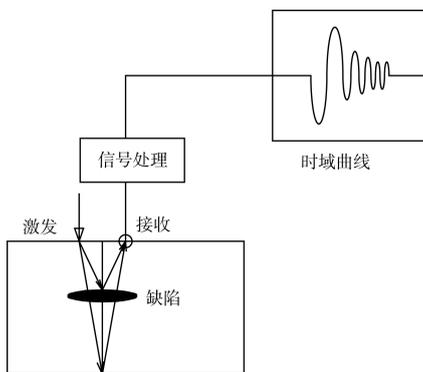


图 1 IES 检测原理

对时域信号进行快速傅里叶变换(FFT)得到对应的频域信号,即各频率成分的振幅分布图。傅里叶变换公式如下:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

无缺陷混凝土的频域曲线往往成单峰状,最高峰正是由于应力波在顶部与界面间来回反射形成的振幅加强所致,对应的信号主频频率则是构件的厚度频率。信号主频与构件厚度之间满足以下关系:

$$f = \frac{c}{2h} \quad (2)$$

当混凝土内部有缺陷时,应力波在缺陷处和构件边界处,多处反射共振,对应的频谱图也会发生明显改变,通常有两种情况:1) 频谱图呈单峰形态,实测主频明显小于构件厚度的计算频率,这是由于应力波绕过缺陷传播,路径增大,反射共振频率减小;2) 频谱图呈双峰或多峰形态,其中信号主频向低频漂移,次峰频率与缺陷深度的计算频率相近,这是由于缺陷尺寸较大,应力波在缺陷处形成明显的反射共振^[8]。

2 模型试验研究

通过物理模型试验研究不同缺陷尺寸、不同缺陷深度以及墩柱状构件下 IES 测试法的应力响应情况,初步掌握 IES 测试法的参数设置、操作步骤和数据处理方法。

2.1 模型设计

1[#]模型(不同缺陷尺寸)见图 2。模型尺寸为 2 m×1.5 m×0.4 m,单面配筋,钢筋直径 20 mm、间距 200 mm,保护层厚度为 50 mm。模型设置 3 个管状缺陷,缺陷直径分别为 50、100、200 mm,缺陷中心距离表面深度为 200 mm,长度为 1 500 mm。



图 2 1[#]模型

2#模型(不同缺陷深度)见图3。2#模型尺寸、配筋与1#相同。模型设置3个管状缺陷,缺陷直径均为100 mm,圆管中心距离表面深度分别为100、200、300 mm,长度为1 500 mm。



图3 2#模型

3#墩柱状模型见图4。模型尺寸为1 m×1 m×1 m,无配筋,共两个管状缺陷,缺陷直径分别为100、200 mm,缺陷中心距离表面深度分别为350、600 mm,长度为1 000 mm。



图4 3#模型

2.2 试验仪器

试验采用美国 Olson 公司的 IES 系统,系统包括:便携数据电脑、脉冲模块、输入模块、扫描探头等,扫描探头利用滚动传感器技术和自动冲击技术,可实现最快 24 个测点/s 的连续式扫描检测,大大提高了测试效率。

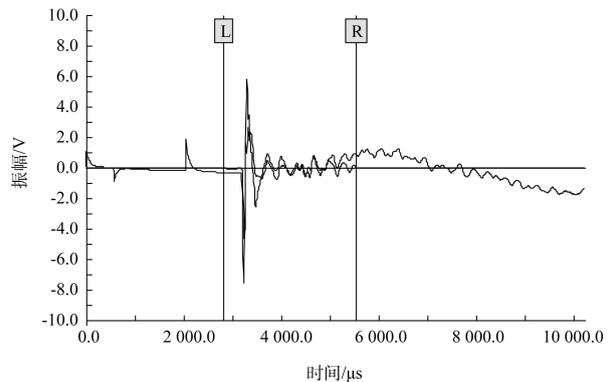
2.3 试验流程

试验流程包括:1) 测线布置。测线垂直于缺陷方向布置,1#、2#模型布置 4 条测线,间距 300 mm,3#模型布置 3 条测线,间距 250 mm。

2) 测试面粗糙处打磨光滑。3) IES 系统硬件连接。4) 设置采样参数,根据测试厚度,系统参数设置见表 1。5) 混凝土波速测试,对同批次已知厚度的试件进行冲击回波测试,测得主频,并根据式(2)反算混凝土波速。6) 测试采样,对采样数据进行滤波处理。滤波分两步:首先选取时域信号中的有效成份,排除滚动噪音和面波干扰,见图 5, L 线和 R 线中间的时域信号为完整的纵波反射信号。其次,对 FFT 结果进行带通滤波,高通滤波用来消除低频滚动噪声影响,一般设置在 1 000~3 000 Hz,低通滤波则用来消除高频电磁干扰影响,一般设置在 2 万~3 万 Hz。

表 1 系统参数设置

模型厚度/mm	采样率/ μ s	采样点数	增益	冲击模式
400	10	1 024	200	轻锤
1 000	20	2 048	500	重锤



注:通道4 G×200。

图5 时域曲线滤波

2.4 试验结果分析

2.4.1 模型 1(不同缺陷大小)

选取正常测点以及 3 个缺陷正上方测点的频域曲线进行分析。正常测点的频域曲线见图 6,图中曲线呈明显的单峰状,实测主频(4 590 Hz)与理论主频(4 571 Hz)十分接近,误差小于 1%。大缺陷($D=200$ mm)对应的频域曲线见图 7,图中曲线呈明显的双峰状,实测主频(3 027 Hz)与理论主频偏差约为 33%;次频对应的深度为 255 mm,与缺陷深度不重合,这是由于缺陷为圆柱状、缺陷各点深度不一致。中等缺陷($D=100$ mm)对应

的频域曲线见图 8, 虽然曲线单峰状较为明显, 但其他频段能量分布比较均匀, 这与前两种图形均有差异, 中等缺陷的主频值(3 809 Hz)与理论主频偏差约为 17%。小缺陷($D=50$ mm)的频域曲线与中等缺陷的类似, 但主频值与理论主频偏差约为 10%。

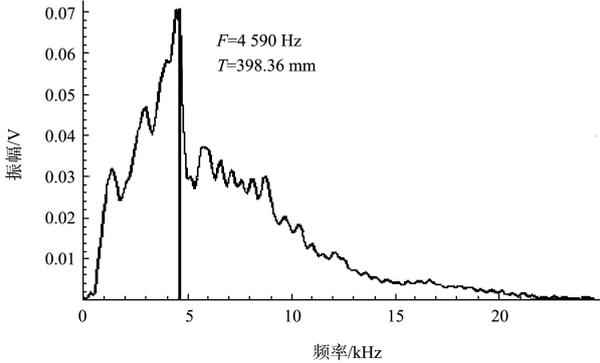


图 6 正常测点典型频域

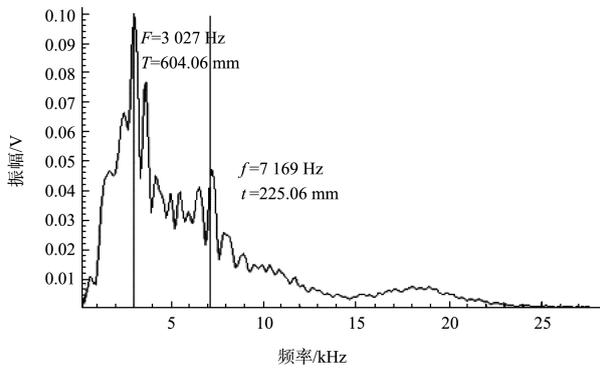


图 7 大缺陷测点典型频域($D=200$ mm)

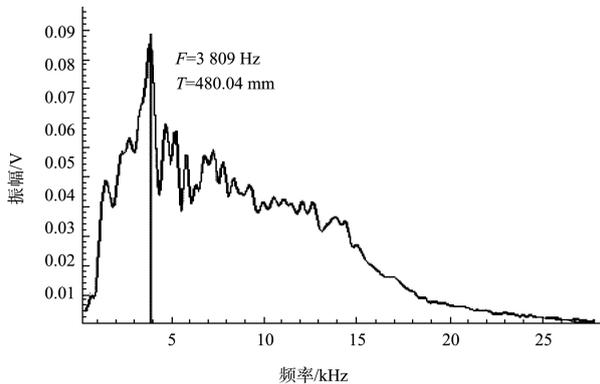


图 8 中等缺陷测点典型频域($D=100$ mm)

将所有测点的厚度数据绘制成如图 9 所示的 3D 图, 图中 Z 轴坐标代表 IES 检测厚度, 另外两个坐标与模型长宽对应。由图 9 可直观看出管状缺陷的位置, 并且缺陷尺寸越大对应的

检测厚度越大、影响范围也越大。直径为 5 cm 的缺陷在检测系统以及模型自身随机性影响下判断较为困难, 需充分对比观测。

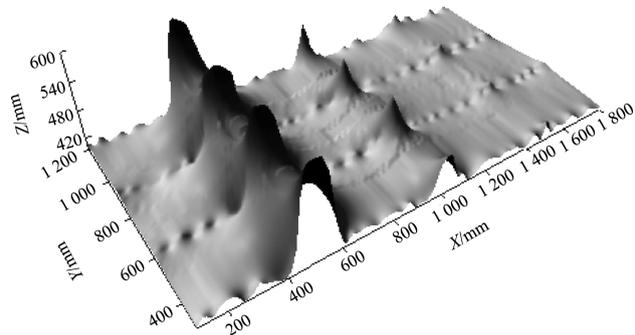


图 9 模型 1 检测厚度

2.4.2 模型 2(不同缺陷深度)

模型 2 中 3 种缺陷的频域曲线与图 8 类似, 曲线呈单峰状, 其他各频段能量分布比较均匀, 频域曲线的趋势与缺陷深度关系较小。除此, 在主频上, 浅层($H=100$ mm)和中层($H=200$ mm)缺陷的主频值与理论频率偏差约为 17%, 深层缺陷偏差约为 10%。由此可见, 主频偏差与缺陷深度并不满足简单的线性关系, 缺陷深度在小于某一特定值时, 主频偏差变化很小, 超过某一特定值时, 主频偏差迅速减小。

所有测点的厚度数据对应的 3D 图见图 10。图 10 较为直观地反映出缺陷位置, 浅层($H=100$ mm)和中层($H=200$ mm)缺陷反映出的检测厚度都显著大于实际板厚且两个缺陷之间无明显变化, 深层($H=300$ mm)缺陷反映出的检测厚度与前两个缺陷相比明显减小, 但仍明显大于实际板厚。

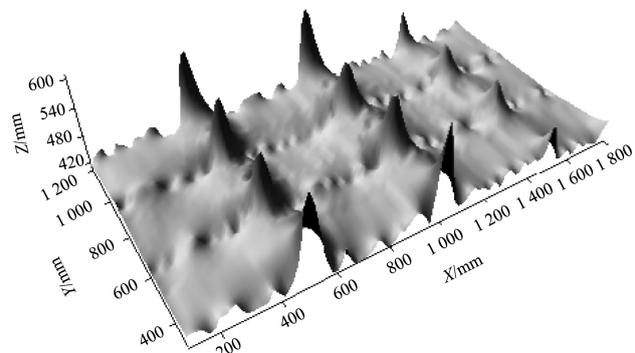


图 10 模型 2 检测厚度

2.4.3 模型 3(墩柱状构件)

墩柱状构件的典型频谱曲线见图 11, 由图 11 可知, 对于厚度为 1 m 的墩柱状构件, 应力波在构件中传递时能量耗散严重, 接收到的回波频率成份复杂, 不能很好地检测出构件的厚度频率以及缺陷造成的变化频率。因此 IES 法不适用于厚度为 1 m 的墩柱状构件。

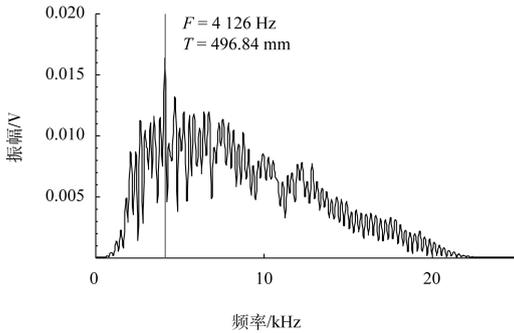


图 11 墩柱状构件典型频域

2.4.4 小结

由上述分析可知: IES 系统对构件冲击回波的时程曲线进行 FFT 变化, 得到构件频域曲线, 根据频域曲线判断构件的内部是否存在缺陷。若内部存在缺陷, 则主频发生明显偏差, 根据模型试验经验, 一般混凝土主频的随机偏差约为 5%, 超过 5% 则应判定为怀疑区。除主频判断外, 在一定条件下 (缺陷尺寸较大、构件尺寸较小、混凝土均匀性较好等), 频域曲线会出现次峰。在具体缺陷的判断时应以“次峰状”为辅助判断方法, 主频偏差为首要判断方法。混凝土内部缺陷尺寸与主频偏差成正比关系, 缺陷深度与主频关系较为复杂, 在深度较浅时缺陷深度对主频偏差影响较小, 超过一定深度时则主频偏差变小。IES 系统不适用于墩柱状构件, 其有效检测深度应小于 1 m。

3 工程应用

3.1 工程概况

某码头总长 392 m、宽 28 m, 码头面顶高程 7.30 m, 结构形式为高桩板式结构, 码头排架间距为 8 m, 桩基采用 $\phi 1\ 000$ mmPHC 桩, 上部结

构为现浇横梁、预应力轨道梁、预制纵向梁系、叠合面板。本次检测主要针对各预制构件, 下文以预制边梁为例进行分析。预制边梁总长 6 950 mm、宽 600 mm、高 1 900 mm, 上部 500 mm 范围内为牛腿, 下部为矩形截面, 底部主筋直径 28 mm, 侧面腹筋直径 18 mm, 其他构造钢筋直径基本都 ≤ 18 mm, 断面见图 12。

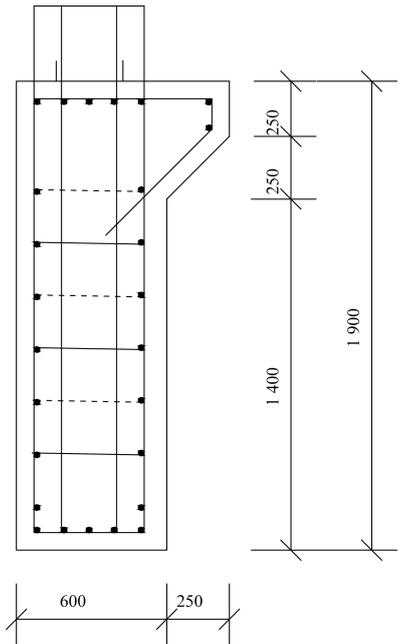


图 12 预制边梁结构断面 (单位: mm)

3.2 检测结果分析

正常测点的频域波形见图 13, 其信号主频为 3 662 Hz, 预制边梁厚度对应的理论主频为 3 650 Hz, 正常测点主频与构件计算得到的理论主频非常相近。由图 13 可知, 除主频外, 其他频段均存在较大的信号幅值, 对缺陷判断造成一定影响, 这与多种因素有关: 1) 边梁厚度较大, 冲击能量衰减较多, 不利于信号识别。2) 混凝土为非均质材料, 内部存在着固有的微型孔洞或缝隙, 再加上内部密布的钢筋, 因而会产生很多干扰信号。3) 选用的重型激振器虽然能够增加信号的穿透范围, 但同时会降低振幅谱的分辨率。4) 由于 IES 系统是不间断扫描检测, 所以在采集数据的同时, 会继续向前滚动并进行下个点的激振, 所以滚动噪声以及相邻测点的激振信号都有可能影响信号的采集。

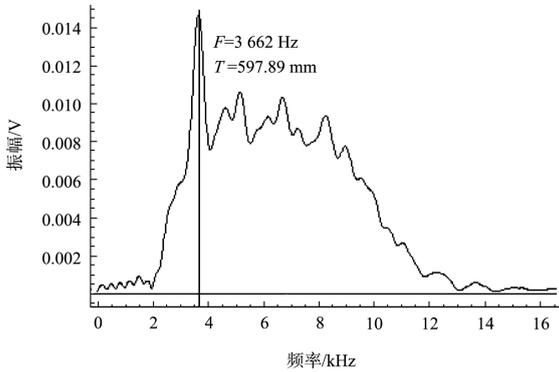


图 13 预制边梁频域 (正常测点)

异常测点图形趋势与图 13 十分接近,但主频有明显偏差,由于测点数量众多,为方便研究,将所有主频对应的计算厚度绘制成厚度云图,见图 14。

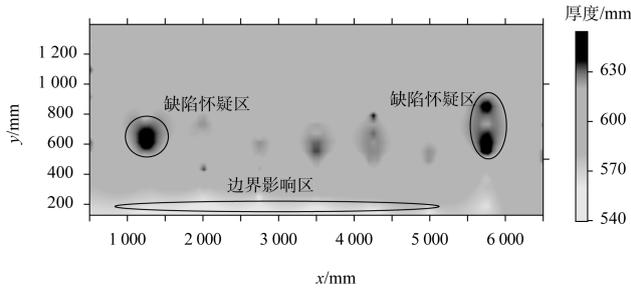


图 14 预制边梁厚度云图

由图 14 可知,预制边梁 I 的整体检测厚度在 540~660 mm 渐变,且大部分区域均为 600 mm 左右,基本反映了构件厚度的真实变化。其中局部区域厚度值偏差较大,超过设计厚度的 5%,该部分区域在云图中分别显示为白色和黑色。黑色区域为厚度偏大处,很有可能存在缺陷,因为缺陷的存在增大了应力波的传递路程,使厚度检测值偏大;白色区域为厚度偏小处,基本都位于测线的起始端,该处由于距离边界较近,应力波在边界处也会形成反射共振,当强度较大时,则会掩盖真实的板厚共振频率,进而导致检测厚度偏小。

由上述分析可知,利用 IES 系统可以快捷准确地检测混凝土的内部缺陷,且检测结果可视性强、方便判别。

4 结论

1) IES 检测混凝土,判断缺陷以主频偏差为主、频域曲线出现次峰为辅,一般混凝土主频的偏差超过 5% 则应判定为怀疑区。

2) 缺陷尺寸、深度和构件形状对检测结果影响如下:缺陷尺寸越大,主频偏差越大;缺陷深度效应存在阈值,深度较浅对主频偏差影响较小,超过阈值则成正比关系;IES 系统不适用于墩柱状构件,其有效检测深度应小于 1 m。

3) 在实际工程应用中,IES 检测结果可通过厚度云图呈现,该方法便于直观快捷地识别混凝土内部缺陷。

参考文献:

- [1] 周先雁,栾健,王智丰.桥梁箱梁孔道灌浆质量检测中冲击回波法的应用[J].中南林业科技大学学报,2010,30(10):78-82.
- [2] 姚菲,苏建洪,刘可,等.冲击回波法识别盾构隧道中不同刚度注浆层的数值模拟研究[J].铁道科学与工程学报,2015(6):1420-1426.
- [3] 傅翔,罗骥先,宋人心,等.冲击回波法检测隧洞混凝土衬砌厚度[J].水力发电,2006,32(1):48-50.
- [4] 岳振民,李雅娟,成超,等.基于冲击回波理论的预应力管道压浆密实度无损检测研究[J].公路,2015(9):236-240.
- [5] 卢江波,方志.基于冲击回波厚度频率的预应力孔道注浆状态分析[J].地震工程与工程振动,2013,33(3):239-244.
- [6] 姚华.扫描式冲击回波法检测后张预应力管道内缺陷的模型试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2008.
- [7] 万利军,单炜,张宏祥,等.冲击回波在孔道灌浆缺陷识别中的频谱效应试验研究[J].施工技术,2014,43(16):52-55.
- [8] 乔瑞社,常芳芳,冯敬辉,等.利用冲击回波法检测混凝土结构缺陷的试验研究[J].南水北调与水利科技,2014(6):106-111.

(本文编辑 武亚庆)