

基于冲击弹性波 CT 的桥墩缺陷无损检测

张育斌

(山西省公路局,太原 030006)

摘 要:文章阐述基于冲击弹性波的弹性波层析成像技术(简称 CT)的原理及检测方法。通过实例,证明该项技术在对工程结构检测中有较显著的优点,弹性波(P 波)速度分布能作为混凝土的物理性能(弹性模量、强度)定量指标,对提高混凝土结构施工质量起到过程控制的目的,弹性波 CT 技术在我国无损检测行业具有很好的推广和应用前景。

关键词:冲击弹性波;CT;混凝土无损检测

中图分类号:TB125

文献标志码:A

引 言

混凝土是结构工程中最重要材料之一,它的施工质量直接关系到结构物的安全。1967 年,英国工程师 Godfrey N H 在 THORN EMI Central Research Laboratories 开始了他的想法,并于 1972 年正式发表第一个商业化的 X 射线计算机断层成像系统^[1]。近年来,人们对混凝土的损伤特性研究越来越关注^[2],成像技术也引用到混凝土检测中。由此发展的弹性波层析成像技术是根据射线扫描,对所得到的信息进行反演计算,以“图像”的形态反映层析面上的混凝土内部质量,从而判断混凝土的结构施工质量^[3-4]。

根据混凝土的弹性波速与物理有关的力学参数有相关性的特点,弹性波层析成像技术(Computerized Tomography,简称 CT)在不破坏“混凝土结构”的情况下,利用弹性波在检测断面上的传播速度,结合 CT 技术进行反演成像,生成物体内部结构特征的二维、三维图像,以实现质量检测的目的^[5]。近年来,该技术被用于混凝土的无损检测,尤其是大体积混凝土(如大坝、桥墩和混凝土灌注桩等)的质量检测中,由于成像结果能精确直观地显示混凝土内部的质量状况,所以适用于混

土精细检测^[6]。

1 检测原理

1.1 基本原理

在测试领域中,存在软弱或者缺陷时,该区域当中传播的弹性波波速会降低。因此,利用 CT 技术反算测试领域的波速,即可检测结构内部缺陷。其原理依据“走时成像原理”将速度函数信号为投影数据,利用反演算法如“同时迭代重建技术(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique;SIRT)和约束最小二乘类算(Iterative Least Square Technique;ILST)求出速度的分布,通过断面上弹性波(P 波)的速度分布从而评价混凝土的质量和内部可能存在的缺陷^[7-8]。

弹性波(P 波)在穿过混凝土时,其速度与混凝土的密度、强度和弹性模量有关,密度大、强度高及模量大的波速高、衰减慢;而当疏松、破碎的混凝土则波速低、衰减快。波速可作为混凝土强度和缺陷评价的定量指标^[9]。

弹性波 CT 技术适用于研究工程介质力学强度的分布,因具有可靠性好、图像直观和分辨率高的特点,在工程检测中常用于工程结构检测以及工程病害诊断^[10]。

收稿日期:2015-07-08

基金项目:桥梁无损检测与工程计算四川省高校重点实验室项目(2013QZY02)

作者简介:张育斌(1968-),男,山西太原人,工程师,主要从事公路养护工程管理方向的研究,(E-mail)549664424@qq.com

1.2 P波波速与混凝土强度的关系

弹性波 CT 技术是通过断面上弹性波(P波)速度的分布评价混凝土的质量,假设混凝土为理想弹性体,那么 P 波波速与混凝土的弹性模量间存在关系:

当物体的 3 维尺寸大于 P 波波长时,P 波速度为 3 维速度:

$$V_{P3} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

其中, E 为混凝土的动弹性模量, μ 为动泊松比, ρ 为密度。

由于混凝土的动弹性模量不仅能够反映混凝土的刚性,而且与抗压强度之间也有很好的相关关系。因此,可以用 P 波波速评价检测断面内混凝土的质量情况。

表 2 CT 参考弹性波波速

强度等级	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
E_c (GPa)	25.5	28.0	30.0	31.5	32.5	33.5	34.5	35.5	36.0
E (GPa)	30.72	33.73	36.14	37.95	39.16	40.36	41.57	42.77	43.37
素混凝土	3771	3952	4091	4192	4258	4323	4387	4450	4481
钢筋混凝土	3847	4031	4172	4276	4343	4409	4474	4539	4571

当检测得到的 P 波波速小于表 2 6% 以上(即 2 倍标准偏差,2 倍标准偏差为各检测数据偏离真实值的距离平方的平均数经开方后的 2 倍值。)时,混凝土中存在缺陷的可能性就较大。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}{n}} \quad (2)$$

1.3 检测设备与方法

1.3.1 检测设备

检测采用四川升拓检测技术有限责任公司研制的混凝土多功能检测仪(SCE_MATS)。

该仪器整个技术体系采用冲击弹性波作为测试媒介,可对较小的混凝土试样(10 cm)和长达 150 m 的桥梁、大坝等结构进行检测,如混凝土材质(弹性模量、强度)、厚度、结构尺寸、缺陷(内部空洞、剥离、表面劣化)、裂缝位置和裂缝深度等。

1.3.2 检测方法

根据混凝土的结构在一面进行布点,在结构的对立面或者侧面布置激振点(冲击锤激振),在结构的另一面布置受信点(高灵敏度加速传感器接收),首先在第一个激振点上用冲击锤进行激振,产生冲击弹性波,在混凝土结构的另一侧所有的受信点上,依次接收经由混凝土内部传播的弹性波信号,对剩下所有的激振点再进行以上测试步骤,最终形成检测断面内弹性波测线的交叉布置形式图。

早在 1949 年 Leslie 和 Cheeseman 就提出了利用弹性波 P 波波速检测混凝土质量的评定标准(表 1)。

表 1 P 波波速评定混凝土质量参考标准

P 波波速/(m/s)	混凝土质量
>4500	优良
3600 ~ 4500	较好
3000 ~ 3600	一般(可能有问题)
2100 ~ 3000	差
<2100	很差

为了更好地分析混凝土的质量,利用现场钻取混凝土芯样的抗压强度对 P 波波速进行率定,建立 P 波波速和混凝土强度之间的相关关系是很有意义的。此外,根据研究成果,对于普通钢筋混凝土,CT 得到的弹性波 P 波波速与混凝土强度等级之间的关系见表 2。

根据混凝土结构的空位置分布,常见的测线布置方式有三种(图 1)。图 1 中白色空心圆点为接收点,黑色实心圆点为激发点。图 1(a)为一边接受,对边激发,图 1(b)为一边接受,两边激发,图 1(c)为一边接受,三边激发。

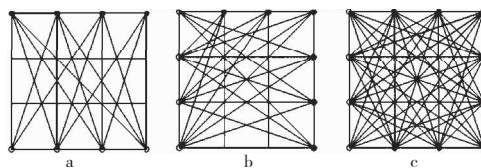


图 1 CT 测线布置图

不同的测线布置得到的反演结果图的效果不一样,总体而言,测线越密,分辨力越高。此外,对于垂直于测线的缺陷分辨率高,而平行于测线的分辨率则较弱。因此,测线还应保持一定的正交性。所以根据混凝土结构空间位置,采用合适的测线布置方法是必要的。

2 工程实例

2.1 某铁路客运专线某墩检测

2.1.1 工程概况

某铁路客运专线某桥墩位于白沙河边。桥墩采用混凝土结构,混凝土设计强度为 C50,桥墩左右幅长度共计 9.0 m、宽 3.0 m。

本次检测根据现场实际考察,特对桥墩共设 3 个水平测试面:分别为 A 测试面、C 测试面、E 测试面(图 2)。

其中 A 测试面距离底板 15 cm、C 测试面距离底板 55 cm、E 测试面距离底板 95 cm。共生成弹性波二维断面 CT 扫描等值线图 3 幅、弹性波波速检测共计 42 个测点。

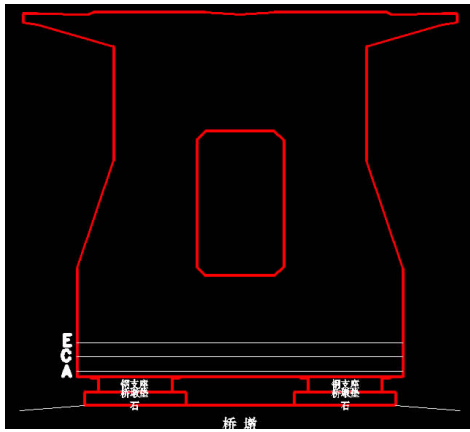


图 2 测试示意图

2.1.2 检测结果

检测时根据图 2 所示布置的测线和测点,先在左幅桥墩面上布置接收传感器(S31SC),然后在右幅桥墩面上 1#~14#依次利用冲击锤(朗斯公司 LC0408T 压电加速度传感器 + PB50 冲击锤)进行敲击。完成后将左侧接收传感器移至下一个测点,重复以上测试,直到所有左侧测点完成测试,得到走时测线图(图 3),经解析可得到断面弹性波 CT 测试波形图(图 4)。

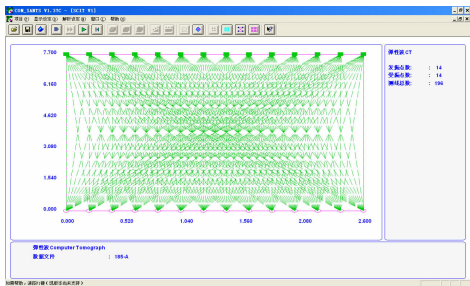
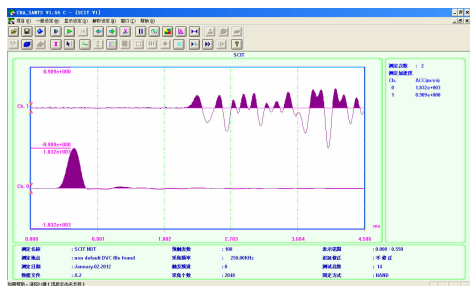


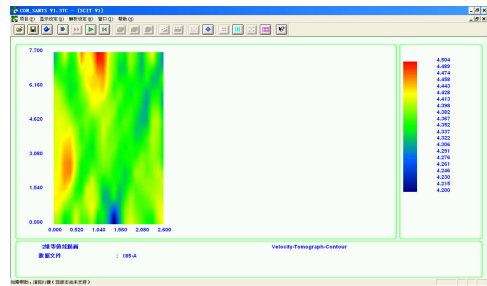
图 3 断面走时测线示意图



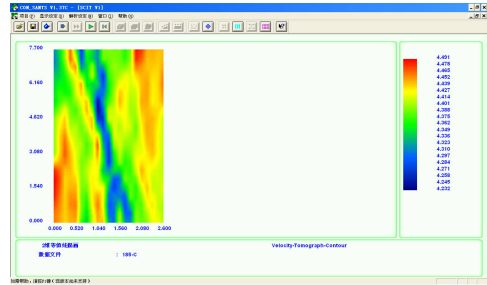
注:(Ch0 激发脉冲信号,Ch1 为接收波信号)

图 4 断面弹性波 CT 测试波形图

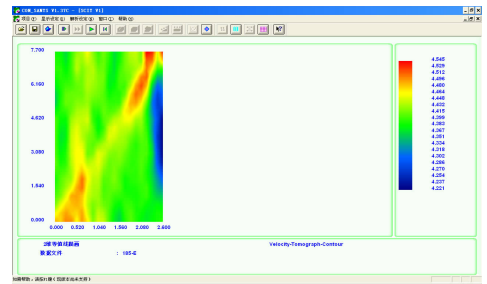
再将各条测线上 P 波所用的时间带入,即可得到断面的 P 波波速等值线图(图 5)。



(a) A断面



(b) C断面



(c) E断面

图 5 波速比例扫描等值线图

2.1.3 检测结论

桥墩混凝土强度为 C50,此强度下采用 CT 透过法测得的正常波速应在 4.3 ~ 4.5 km/s,若波速大幅低于这个范围,那么就可判断此混凝土浇筑质量较差。

由弹性波层析扫描法对桥墩底部混凝土结构进行检测的结果分析,3 个检测断面的弹性波(P 波)波速范围基本在 4.3 ~ 4.5 km/s 之间,C 断面中部有一条贯穿的低速区,E 断面右幅中部出现低速区,此两处混凝土质量较差,后期通过钻芯取样证实,测试结果与实际情况相符。

2.2 某大桥桥墩检测

2.2.1 工程概况

某大桥全长 618 m,主墩桩 32 根,主桥墩高约 73 m。其中 6#桥墩位于河北岸,紧邻岸边,桥墩宽 10 m、厚度 2.7 m。因其在拆卸混凝土模板后,在混凝土表面出现部分蜂窝区域,为了解 6#桥墩混凝土内部的质量分布情况,判断桥墩内部是否存在类似表层的混凝土振捣不密实现象,特对该桥墩进行冲击弹性波 CT 检测,并圈定出内部缺陷的范围。

根据现场实际情况,对6#桥墩墩面约距地面0.6~2.8 m区域内进行详细检测,共布置12个水平断面,每个断面之间间距0.2 m,每条断面横向分为上、中、下游三部分,共长8.4 m,其每条断面每部分详细布点如图6所示。

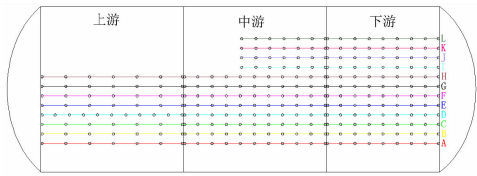


图6 检测布点示意图

2.2.2 测点布置

(1) 点距影响

激振点与受信点的布置对探测的精度有很大的关系,在同一个测试面长度范围内,测点间距越小,即测点布置就越多,其测试精度越高。(图7)。

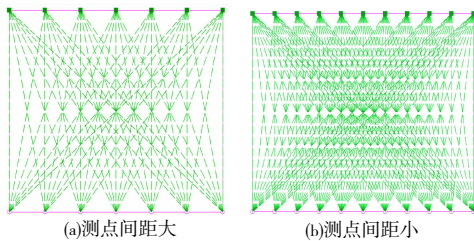


图7 点距影响

考虑到混凝土表面出现蜂窝区域多集中在中下游,所以A~C、E~H的上游区域采用0.5 m的测点间距进行检测,而A~L中下游全部采用0.3 m的点距进行的检测,将重点检测部位放在中下游,有效的提高工作效率。

(2) 角度影响

冲击弹性波CT技术是通过断面上弹性波(P波)速度的分布评价混凝土的质量,在受信点主要接收成分为P波才能很好反应混凝土的内部情况,但当激振点到受信点的方向与激振点到正对面的受信点的角度大于45°时(图8),受信点接收到的信号中P波成分减少,波速下降,对测试结果影响较大。

因上述影响的存在,加之被检测桥墩厚度为2.7 m,所以本次布点时将一个断面分为上、中、下游三段进行数据保存,上游、中游检测宽度为3 m,下游检测宽度为2.4 m,最后再将三段数据进行合成,使之成为一个断面图,这样就能有效的避免因角度过大而造成波速降低的影响。

2.2.3 检测结果

将断面上、中、下游三个数据合并在一起,得到断面走

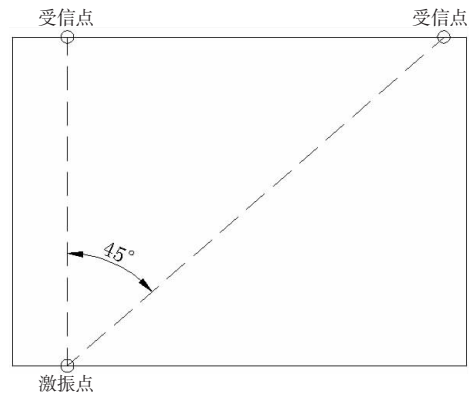


图8 角度影响

时测线图如图9所示。再将各条测线上P波所用的时间带入,得到断面的P波波速等值线图,如图10所示。

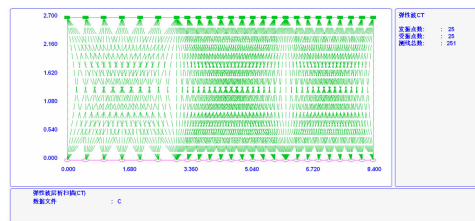


图9 合成后断面走时测线示意图

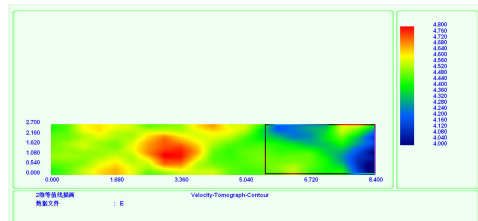


图10 断面波速比例扫描等值线图

本次检测一共进行了12个断面的弹性波层析扫描,通过走时反演,得到该桥墩混凝土内部12个断面的P波波速等值线图,其中波速低于4.24 km/s的区域多集中在桥墩宽度6~8.4 m,高度0.8~1.8 m范围内(图11)。

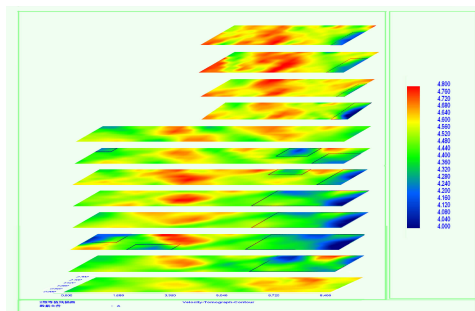


图11 断面切片波速比例扫描等值线图

2.2.4 检测结论

(1) 该桥墩混凝土均匀性一般

综合所有断面检测结果显示,6#桥墩混凝土均匀性一般,波速大于 4.6 km/s 区域多集中在宽度方向 1.5 ~ 5 m 范围内,该区域内混凝土质量较高,波速低于 4.24 km/s 的区域多集中在桥墩宽度 6 ~ 8.4 m,高度 0.8 ~ 1.8 m 范围内,该区域内混凝土质量较差。

(2) 部分断面存在相对较差区域

根据检测结果显示,在所检测的断面中,部分断面的混凝土质量存在相对较差区域,且整体相对集中在下游区域,在桥墩宽度 6 ~ 8.4 m,高度 0.8 ~ 1.8 m 范围内。

通过钻心取样和表层破开,得到的结果与测试结果保持高度的一致,这说明基于冲击弹性波的 CT 检测能够很好的反应桥墩中的缺陷,也即适用于大型混凝土结构的探伤。

3 结束语

混凝土 CT 技术发展的历史虽然不长,但已取得了较多的成果,该技术测试结果直观、现场适用性强,且适用于大体积的混凝土结构,这是许多传统的方法所不能比拟的。其中,基于冲击弹性波的混凝土 CT 无损检测技术测试距离长、作业较为方便,无疑具有很好的推广和应用前景。

参考文献:

- [1] 郝景宏.CT 技术在混凝土中的应用[J].新技术新产品,2010,14(8):62-63.
- [2] 吕小彬,孙其臣,鲁一暉,等.基于冲击弹性波的 CT 技术的原理及在水工混凝土结构无损检测中的应用[J].水利水电技术,2013,44(10):107-108.
- [3] 孙锐,赵建发,李艳,等.声波 CT 在混凝土结构检测中的运用 [EB/OL]. http://blog.sina.com.cn/s/blog_55fdfb8c0100v07t.html,2011-08-05/2015-06-21.
- [4] 张吉,师学明,陈晓玲.超声波 CT 技术在混凝土无损检测中的应用现状及发展趋势[J].工程地球物理学报,2008(5):596-601.
- [5] 王振宇,刘国华.土木工程的层析成像与广义反演研究[D].杭州:浙江大学,2003.
- [6] 王和文,张璐,康世海.超声波 CT 技术在某大桥桩基检测中的应用[J].物探化探计算技术,2008,30(4):322-326.
- [7] 吴佳晔,安雪暉,田北平.混凝土无损检测技术的现状和进展[J].四川理工学院学报:自然科学版,2009,22(4):4-7.
- [8] 吴新璇.混凝土无损检测技术手册[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [9] SL713-2015,水工混凝土结构缺陷技术规程[S].
- [10] 申永利,孙永波.基于超声波 CT 技术的混凝土内部缺陷探测[J].工程地球物理学报,2013,10(4):560-565.

A Nondestructive Inspection of Pier Defect Based on Impact Elastic Wave CT

ZHANG Yubin

(The Highways Agency of Shanxi Province, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The principle and detection method of elastic wave tomography technology (CT) based on the impact elastic wave are illustrated. By the example it is proved that the technology detection has more significant advantages in engineering structure detection. Elastic wave (P wave) velocity distribution can be used as the quantitative indicators of concrete physical properties (elastic modulus and strength), which has process control effect on improving the quality of concrete structure construction. The elastic wave CT technique in nondestructive testing industry of China has a very good promotion and application prospect.

Key words: impact elastic-wave; elastic-wave tomography technology; concrete nondestructive testing