

弹性波 CT 技术在大体积混凝土结构无损检测中的应用

郭秀芹¹, 杨森², 张远军²

(1. 山东公路技师学院, 济南 250104; 2. 四川升拓检测技术股份有限公司, 成都 610045)

摘要:混凝土结构在基础建设中无处不在,而大体积混凝土往往作为重要结构部件存在,其施工难度、水化热难以控制等,使其质量难以保证,因此,进行必要的检测就显得十分重要。弹性波作为低频波,被认为是非常适合大体积混凝土检测的媒介。弹性波 CT 技术是弹性波应用于大体积混凝土结构检测的典型代表。由 CT 检测技术的理论基础出发,分析工程 CT 技术与医学 CT 的区别,进而分析弹性波 CT 的基本检测原理及解析方法,结合实践应用,证明工程 CT 对结构的适应能力,并从技术上分析,实现工程 CT 三维成像的可能。

关键词:冲击弹性波;弹性波 CT;大体积混凝土;无损检测

中图分类号:TB115

文献标志码:A

引言

在施工过程中,混凝土内部很容易形成蜂窝、不密实、离析甚至空洞等缺陷^[1],尤其是大体积的混凝土结构(比如桥墩)更容易出现这样的问题。因此采取有效的检测方法对这些缺陷进行查明,并及时处理,就显得尤为重要^[2,4]。然而诸如超声波、电磁波等由于频率高、能量小、衰减快^[5-6]等特征,使其测试范围很有限,不能应用于大体积混凝土结构的无损检测。冲击弹性波频率低、能量强且集中^[7]的是应用于大体积混凝土结构检测的有效媒介。

弹性波层析扫描(CT)技术就是基于冲击弹性波发展起来的一种新的无损检测方法^[8]。该方法主要是根据弹性波在被测结构中的传播速度与其物理力学参数有较好的相关性,利用被测结构中的弹性波速,结合 CT 技术进行反演成像,以图形的方式反映测试断面中的内部特征,从而达到质量检测的目的。目前,其应用领

域包括工程地质勘探^[9]、混凝土结构工程质量检测等方面。

作为新的工程检测技术,其结构适应能力如何,同为“CT”,工程 CT 能否实现像医学 CT 那样的三维成像。带着这样的疑问,从 CT 检测技术的理论基础出发,分析工程 CT 技术与医学 CT 的区别,进而分析弹性波 CT 的基本检测原理及解析方法,结合实践应用,证明工程 CT 的对结构的适应能力,并从理论技术上分析,实现工程 CT 三维成像不再遥远。

1 CT 理论基础

CT 的理论基础在于投影定理,图 1 为目的函数 $f(x, y)$ 及其投影波形 $g(s, \theta)$ 的概念图。目的函数可认为是 $x - y$ 平面上某一物理量的分布,如 X-CT 可认为是组织对 X 射线的吸收(阻射率),弹性波波速 CT 可认为是某一区域的波速(或者其倒数波慢)。

投影波形 $g(s, \theta)$ 可表示为:

收稿日期:2017-05-16

作者简介:郭秀芹(1966-),女,山东德州人,副教授,主要从事公路试验检测、安全生产与管理技术方面的研究,(E-mail) qkfbzy201610@

163.com

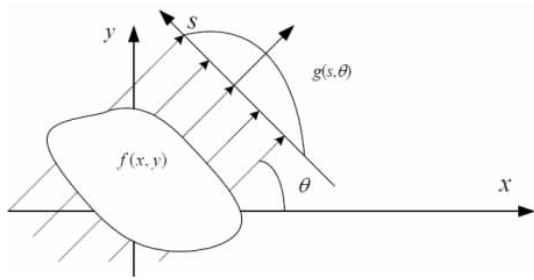


图 1 层析成像的投影法

$$g(s, \theta) = \int_L f(x, y) dL \quad (1)$$

考虑到 $L = x \cos \theta + y \sin \theta$, 以及对对象外侧并不影响 $g(s, \theta)$ 的值, 因此可以将积分范围扩张到 $-\infty \sim +\infty$, 因而有:

$$g(s, \theta) = \iint_{-\infty \rightarrow +\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - s) dx dy \quad (2)$$

其中 δ 为的德尔夫塔函数, 表示仅在 $L = s$ 时有非零值。

对 $g(s, \theta)$ 进行傅利叶变换, 有:

$$G_\theta(k_s) = \int_{-\infty}^{\infty} g(s, \theta) e^{-ik_s s} ds \quad (3)$$

其中, k_s 表示 s 方向的波线, 考虑到 $\delta(x \cos \theta + y \sin \theta - s)$ 的傅里叶变换为 $e^{-ik_s(x \cos \theta + y \sin \theta)}$, 有:

$$G_\theta(k_s) = \iint_{-\infty \rightarrow +\infty} f(x, y) e^{-ik_s(x \cos \theta + y \sin \theta)} dx dy \quad (4)$$

k_s 在 x 和 y 轴的投影为 $k_x = k_s \cos \theta$ 和 $k_y = k_s \sin \theta$, 因此, 式(4)又可以改写为:

$$G_\theta(k_s) = \iint_{-\infty \rightarrow +\infty} f(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (5)$$

另一方面, 目的函数 $f(x, y)$ 的空间傅里叶变换 $F(k_x, k_y)$ 则可以表示为:

$$F(k_x, k_y) = \iint_{-\infty \rightarrow +\infty} f(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (6)$$

即

$$F(k_x, k_y) = G_\theta(s) \quad (7)$$

因此, 将所有的 (s, θ) 的 $g(s, \theta)$ 采集后, 按照波线 s 进行傅里叶变换后, 即可求出 $F(k_x, k_y)$, 再利用 2 维傅里叶逆变换, 即可求出目的函数 $f(x, y)$ 。

2 弹性波层析扫描(CT)技术

2.1 弹性波 CT 与超声波 CT 的区别

X 射线计算机断层扫描成像(简称 X-CT)是工程无损检测 CT 的基础, 它是一种利用数位几何处理后重建的三维放射线医学影像。该技术主要通过单一轴面的 X 射线旋转照射人体, 由于不同的组织对 X 射线的吸收能力(或称阻射率)不同, 可以用电脑的三维技术反演

并重建出断层面影像。将断层影像层层堆栈, 即可形成立体影像。

而在工业、结构领域中, 超声波、冲击弹性波常被用作检测媒介^[10-11], 但与 X 射线相比, 超声波或者弹性波的直进性差, 信号接收的稳定性也差^[12]。因此, 在超声波、弹性波 CT 中, 虽然也可以用其衰减特性(与 X 射线类似), 但更多地采用其波速特性, 这是与 X-CT 的最大区别。

但是, 在实际应用中, 由于激振以及受信结构上存在差异, 超声波 CT 和冲击弹性波 CT 之间也存在一些差别, 主要体现在以下:

(1) 频率、能量: 超声波主要是通过压电晶体在短时间内伸缩产生短的脉冲^[13], 因此, 超声波的频率较高(一般 20 kHz ~ 250 kHz)、能量相对较小^[14]。而冲击弹性波一般是通过激振锤进行激振产生, 其能量远大于超声波, 频率较低。根据吕小彬等人的研究^[12], 如采用直径为 5 cm 的 D50 钢质圆形激振锤在 0.6 m 高度落到 C50 混凝土上, 其产生的冲击弹性波的频率为 5.48 kHz。

(2) 受信信号的频率特性: 超声波的探头在保持高灵敏度的同时, 其频率响应特性一般较差, 不利于频率分析和振幅分析; 而冲击弹性波测试一般采用加速度传感器, 传感器在各种固定方式下, 其频响曲线都有较长平坦部分, 有利于频谱分析和能量分析。

如上所述, 超声波的频率高、能量小, 因此其在传播过程中衰减非常快, 而且高频波容易受到测试结构内其他波的影响, 测试范围受到限制; 但冲击弹性波的能量大且集中, 频率相对较低不易受其他杂波的影响^[15], 因此, 对于大体积混凝土结构的测试, 相比超声波而言, 用冲击弹性波 CT 进行测试显得更合适、合理^[16]。

2.2 弹性波 CT 的解析方法

弹性波 CT 技术的测试媒介即测线源为弹性波(主要是 P 波), 测试时, 通过对被检对象进行逐点扫描, 在测试过程中混凝土结构存在软弱区域或者缺陷时, 则在该区域中传播的弹性波波速会降低, 即弹性波在该区域的波速和正常混凝土区域的传播速度存在差异。因此, 通过传播时间的拾取和计算机层析技术反算测试区域的波速, 即可检测出结构内部缺陷。

但若采用傅里叶变换的方式反算各波线的波速, 其计算量十分庞大, 因此采用近似方法求 $f(x, y)$ 是普遍的

做法,其中,最常用的方法是拟投影法(Back Projection Technique,简称BPT法)。

令波线的数目为N,单元的数目为M。如图2所示,将测试对象分成若干小块(网格),目的是求出每个网格内的波速。

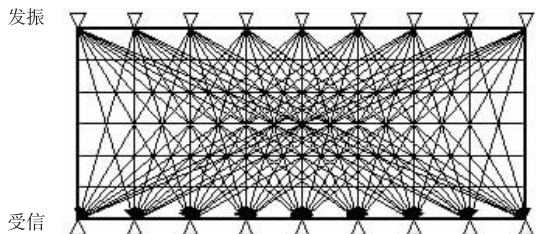


图2 测试对象的CT断层扫描示意图

BPT法的目的就是将各波线的平均速度分配到各个网格中。该方法的原理是依据“走时成像原理”将速度函数信号作为投影数据,在有网格计算的数学模型下,利用同时迭代重建技术(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique:SIRT)和约束最小二乘类算法(Iterative Least Square Technique:ILST)等反演算法求解方程以计算速度的分布,即实现CT断层扫描成像^[17]。若测试区域内有空洞或软弱不密实区等缺陷,则弹性波的传播时间会增长,通过测线的距离反演的速度会降低。不经过缺陷测线的速度几乎不变。测线越多,CT解析精度和分辨率越高。实际工程可根据现场实际情况,选择适量测线条数即可。

3 应用实例

3.1 特大桥桥墩检测

某特大桥的某一在建6#桥墩在承台上已浇筑高度达3 m、宽度10 m、整体厚度2.7 m,强度等级C50。因其在拆除混凝土模板后,在桥墩墩身下部的混凝土表面出现大面积的蜂窝区域(疑为振捣不密实造成),为其质量考虑,特做全面检测。

3.1.1 测试方法及技术

6#桥墩已浇筑区域属于钢筋较密的大体积混凝土结构,且具备采用冲击弹性波层析扫描(CT)技术检测的条件,因此,本项目根据现场实际情况采用冲击弹性波层析扫描(CT)技术对其进行检测,检测主要针对墩面距承台面0.6~2.4 m高的区域内进行详细检测,由下至上共布置12个水平断面(水平断面编号A-L),每个断面间距0.2 m;其中断面A-断面H共计8个断面

中各断面测试宽度均为8.4 m,横向分成上、中、下三部分(图3)。断面I-断面L共计4个断面中各断面测试宽度为4.2 m(只测试中下游区域)(图4)。

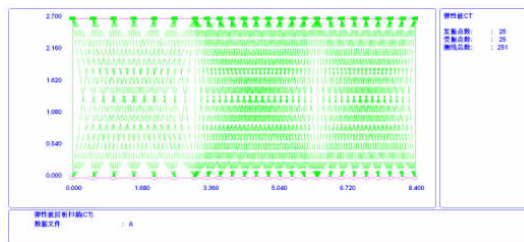


图3 断面A-G测点(测线)示意图

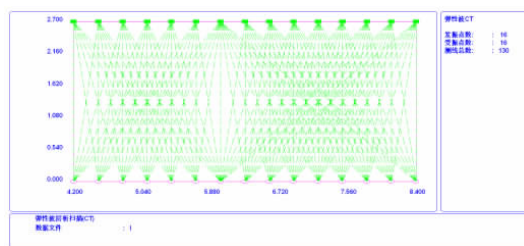


图4 断面I-L测点(测线)示意图

激振侧和接收侧各布置数量相同的测点,每条断面详细布点情况见表1和图5。

表1 测点布置一览表

| 断面编号 | | A-H | I-L |
|------|--------|-----|-----|
| 上 | 测点数 | 7 | — |
| | 测点间距/m | 0.5 | — |
| | 测试长度/m | 3 | — |
| 中 | 测点数 | 11 | 7 |
| | 测点间距/m | 0.3 | 0.3 |
| | 测试长度/m | 3 | 1.8 |
| 下 | 测点数 | 9 | 9 |
| | 测点间距/m | 0.3 | 2.4 |
| | 测试长度/m | 2.4 | 2.4 |

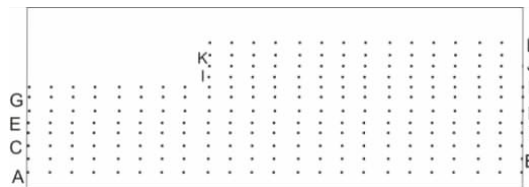


图5 检测整体布点示意图

现场利用SCE-MATS混凝土多功能无损测试仪进行CT数据采集,再利用SCE-MATS分析软件进行反演计算并绘制各交叉测点速度变化的等值线图像。

3.1.2 弹性波CT检测结果

由于我国目前还没有制定相关测试混凝土弹性波(P波)速度的规范,所以一般借鉴美国ASTM试验方

法。目前工程界仍广泛地使用 Leslie 和 Cheeseman 于 1949 年提出的弹性波 (P 波) 波速检测混凝土质量评定标准^[18](表 2)。

表 2 常用弹性波 (P 波) 波速评定混凝土质量参考标准

| 混凝土状况 | P 波波速 |
|-----------|---------------------|
| 优良 | >4500 m/s |
| 好 | 3600 m/s ~ 4500 m/s |
| 一般(可能有问题) | 3000 m/s ~ 3600 m/s |
| 差 | 2100 m/s ~ 3000 m/s |
| 很差 | <2100 m/s |

该评定标准一般只用于定性判断混凝土质量的优劣,因为对于不同情况下的混凝土,其 P 波波速和强度之间的关系是不同的,影响因素包括骨料、配比、龄期、钢筋的数量和走向等。但对于同一种混凝土,它作为一条总的比较性评价原则还是可行的。同时,本次测试现场利用与桥墩混凝土同配比(混凝土强度 50 MPa)的 4 组标准混凝土试块进行弹性波波速测定,测试结果显示波速达到 4350 m/s。因此,本次测试利用弹性波 P 波波速是否超过 4350 m/s 来定性的评价桥墩混凝土质量情况。

对桥墩进行 12 个水平断面检测,并通过弹性波 CT 的解析方法进行分析,可获得各断面内部各测线区域、节点上混凝土的弹性波波速度分布等值线图,即 CT 检测结果图。本次检测结果显示,在 12 个 CT 检测断面中只有 6 个断面(断面 B-G)的所有测试节点、测线区域的弹性波波速的最小值超过了 4350 m/s,因此,根据上述评定方法,评定这些测试断面内部混凝土较为密实;但整体波速分布不均,部分区域存在较高的波速(红色区域),疑为骨料相对较为集中的区域,故混凝土浇筑均匀性一般(图 6)。

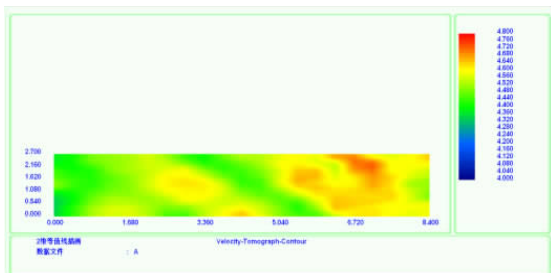


图 6 混凝土密实区域测试结果等值线图

另外,仍有 6 个断面(断面 A、断面 H-断面 L)部分区域发现有弹性波波速明显低于 4350 m/s 的低速区,尤

其是断面 B-断面 G 的下游部分更为集中,因此,判定这些区域为混凝土不密实区域,且这些断面的混凝土浇筑均匀性一般(图 7)。

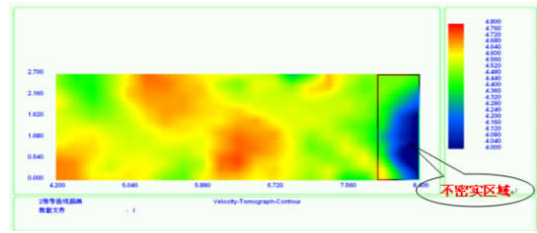


图 7 混凝土存在缺陷区域测试结果等值线图

3.1.3 检测结论

(1)6#桥墩墩身检测布置的 12 个弹性波 CT 水平断面中,断面 A、断面 H-、断面 L 的 6 个断面内部均未发现明显低速区,最低波速均超过 4350 m/s,故判断这些断面内的混凝土密实性较好,但混凝土均匀性一般。

(2)6#桥墩墩底部实体段布置断面 B-G 6 个 CT 断面的表层局部区域出现较为明显的弹性波低速区,表明这些区域的混凝土质量存在不密实的情况,且混凝土均匀性一般。

施工方根据本次检测结果,进行了桥墩混凝土修复。在砸除不密实区域及修复过程中,发现报告中的不密实区域,正好为蜂窝比较集中的位置,确实存在混凝土不密实现象;且发现除了报告中显示的不密实区域外墩身内部混凝土质量较好,未发现其他不密实区域,其检测结果和现场实际情况较为一致,这充分体现了弹性波 CT 检测大体积混凝土质量的准确性和可靠性。

3.2 定子基础混凝土结构检测

3.2.1 测试方法及技术

某电站在甩负荷试验中由于机组设备出现事故,导致 1#、2#机组定子基础等部位的混凝土受到破坏,在进行修复之前,首先应通过现场检测查清混凝土结构、构件等的实际损伤情况,以便确定修复处理的混凝土范围及处理方案。该基础呈圆筒状混凝土结构,混凝土设计强度 C25,该部位混凝土结构直径为 4.05 m,高约 1.7 m,内壁为 1 cm 厚钢板,且内部钢筋十分密集。对于这种厚度大、钢筋密集的测试结构无法利用其他常规无损检测进行检测,因此,本次检测利用频率低、能量大的冲击弹性波 CT 技术。

现场断面测点布置如图 8 所示,在高度 1.7 m 区域内共布置 8 个测试断面,每断面间距 0.2 m。

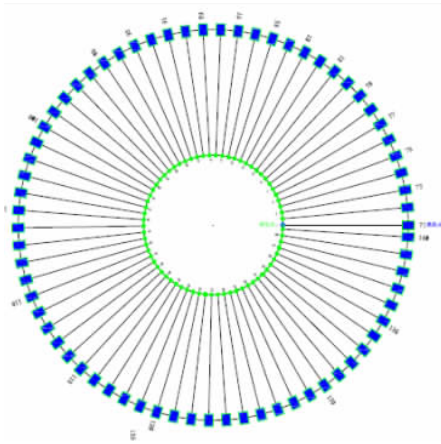


图8 测点俯视图

3.2.2 弹性波 CT 检测结果及结论

现场作业完毕,测试结果评价借鉴美国 ASTM 试验方法,在 8 个测试断面中,部分断面中存在弹性波低速区(低于 3600 m/s),表明这些区域的混凝土质量相对较差(图 9)。这为电站后期维护、安全评估提供了科学依据。

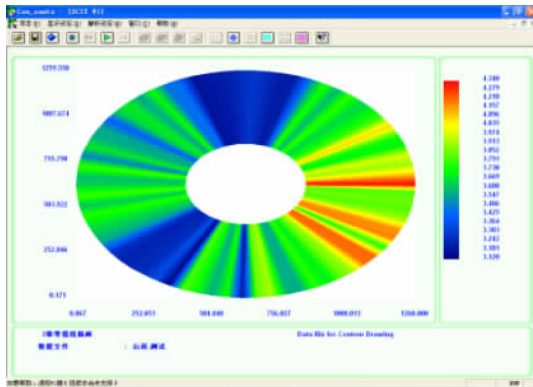


图9 “牛腿”测试结果图

4 弹性波 CT 检测技术展望

目前,利用冲击弹性波 CT 检测,其测试结果一般是断面水平结果,即采用二维显示,这对结构整体结果的显示不直观。因此,利用冲击弹性波 CT 检测技术和电脑的三维技术反演并重建断面测试影像,使其形成立体图像,如根据此方式将上述两个应用案例的测试断面进行弹性波三维显示,则结果将更加直观(图 10、图 11),届时大体积混凝土结构无损检测技术将得到更广的应用。

5 结束语

通过应用实践表明,一方面弹性波 CT 技术是一种

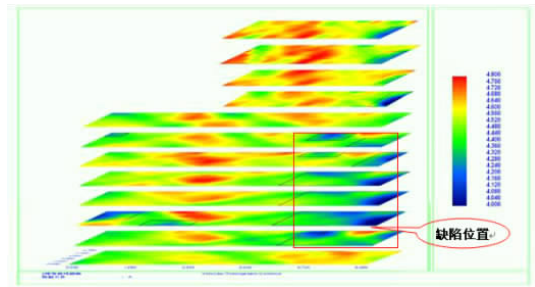


图10 6#桥墩混凝土浇筑质量结果三维展望图

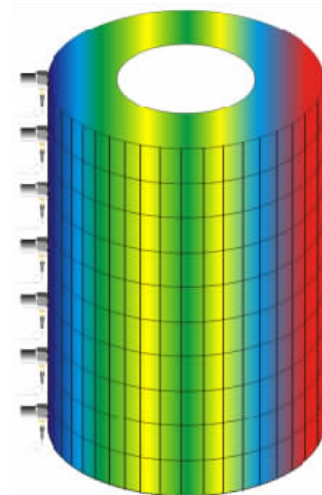


图11 “牛腿”测试结果三维展望图

适用性非常强的能可靠、准确反映被测结构内部质量的快速检测技术手段,其检测理论简单明了、检测结果准确、适用范围广,尤其是针对其他方法不能检测的大体积混凝土结构,弹性波 CT 技术具有极大的优势。另一方面无论测试结构是矩形、圆形或者其他形状,均可采用弹性波 CT 法进行检测,弹性波 CT 技术具有较强的结构适应能力。

弹性波 CT 技术目前以平面成像为主,将大量平面成像数据进行叠加,反演等,实现工程 CT 三维可视化将不再遥远,将会应用于结构质量的综合评价。

参考文献:

- [1] CECS21:2000,超声法检测混凝土缺陷技术规程[S].
- [2] JTJ/T 272-99,港口工程混凝土非破损检测技术规程[S].
- [3] DL/T5150-2001,水工混凝土试验规程[S].
- [4] SL352-2006,水工混凝土试验规程[S].
- [5] 吴佳晔.土木工程检测与测试[M].北京:高等教育出版社,2015.
- [6] 王强.在役基桩完整性检测技术影响因素分析[J].

- 四川理工学院学报:自然科学版,2016,29(5):73-77.
- [7] 吕小彬,孙其臣,鲁一晖,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.
- [8] 刘力博.弹性波CT技术在混凝土无损检测中的应用[J].天津建设科技,2017,7(1):51-52.
- [9] 余志雄,薛贵玉.大坝CT技术研究概况与进展[J].岩石力学与工程学报,2004,23(8):1394-1397.
- [10] 范明坤,张启洲,夏宪友,等.声波CT在混凝土结构检测中的运用[J].建筑科学,2011,28:74-75.
- [11] 王五平,宋人心,傅翔,等.声波cT测试系统及其在大坝混凝土质量探测中的应用[J].水利水电技术,2004,35(10):56-57.
- [12] 吕小彬,吴佳晔.冲击弹性波理论与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2016.
- [13] 杨江华,林凤仙.超声波CT在桥梁T型梁质量检测中的应用[J].云南大学学报:自然科学版,2012,34(s2):248-251.
- [14] 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.
- [15] 王文德,赵炯,胡继武,等.弹性波CT技术及应用[J].煤炭地质与勘探,1996,24(5):27-61.
- [16] 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.
- [17] 袁野,黄晓寒,王仲刚,等.基于矩阵预处理和BPT-SIRT非线性加权反演成像法[J].CT理论与应用研究,2017,26(1):53-62.
- [18] ASTM C597-97,Standard test method for pulse velocity through concrete[S].

Elastic Wave CT Technology in Mass Concrete Structure Application of Nondestructive Testing

GUO Xiuqin¹, YANG Sen², ZHANG Yuanjun²

(1. Shandong Highway Engineering Institute, Jinan 250104, China; 2. Sichuan Central Inspection Technology Inc., Chengdu 610045, China)

Abstract: Concrete structures are ubiquitous in infrastructure, and mass concrete tends to exist as an important structural component. However, the construction is difficult and the hydration heat is difficult to control, making its quality is difficult to guarantee. Therefore, it is necessary to carry out the necessary tests. Elastic waves as low frequency waves are considered to be very suitable for medium mass concrete testing. Elastic wave CT technique is a typical representative of elastic wave applied to mass concrete structure testing. The difference between engineering CT technology and medical CT is analyzed from the theoretical basis of CT detection technology, then the elastic wave CT basic detection principle and analytical method are analyzed. Combined with practical application, the adaptability of engineering CT to the structure is proven, and possibility to achieve three-dimensional CT imaging is analyzed from the technical analysis.

Key words: impact elastic wave; elastic wave computerized tomography (CT); mass concrete; nondestructive testing