

混凝土无损检测中的层析成像技术

董清华

(五邑大学 土木工程系, 广东江门 529020)

摘 要:层析成像技术正在混凝土无损检测中得到推广应用。论述了混凝土无损检测领域中超声波(声波)层析成像、电磁波层析成像及电阻率层析成像的基本原理,分析了三种技术的应用难点,介绍了其应用近况,并对今后的发展提出了建议。

关键词:超声波检测;电磁波检测;电阻率检测;混凝土;层析成像

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)01-0031-03

Tomographic Techniques for Nondestructive Testing of Concrete

DONG Qing-hua

(Department of Civil Engineering, Wuyi University, Jiangmen Guangdong 529020, China)

Abstract: Tomography is being used in nondestructive testing of concrete. The basic principles of ultrasonic, electromagnetic and resistivity tomographic techniques for concrete were described, including their application status and the difficulties in their application. The suggestions on the future development of tomography for concrete were given.

Keywords: Ultrasonic testing; Electromagnetic testing; Resistivity testing; Concrete; Computerized tomography

1917年奥地利数学家J Radon提出了由投影重建图像的Radon变换^[1],给出了图像重建的数学基础。1972年,第一台医用X射线CT(Computerized Tomography)装置面世。此后,层析成像技术迅速推广到工业检测和地球物理勘探等领域,所用场源也由X射线扩展到超声波(声波)、电磁波及稳定电流场^[2]等。近年来,层析成像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)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,非常适用于混凝土精细检测。目前用于混凝土检测的层析成像技术有超声波(声波)及电磁波层析成像,以稳定电流场为场源的电阻率层析成像也正在研究之中。

1 混凝土层析成像基本原理

用于混凝土无损检测的超声波(声波)、电磁波及电阻率层析成像的成像原理与观测系统大致相同(图1)。首先将成像区域划分为诸多矩形单元,然

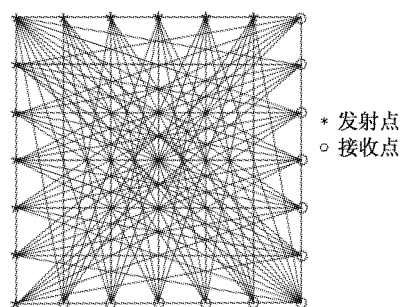


图1 混凝土层析成像观测系统示意图

后在一边设置诸多发射点(发射超声波、电磁波或供入稳定电流),在其对边设置诸多接收点,对发射点逐点发射,当每一发射点发射时所有接收点均接收,将接收数据输入计算机层析成像软件进行计算,所得图像可准确直观地显示混凝土内部质量状况。

工程中被测混凝土往往不具备图1所示的四个观测面,由于混凝土层析成像为透射成像,故要求被检测混凝土至少应有两个观测面。混凝土层析成像可以认为是从地球物理层析成像推广而来,但其要求的成像精度(观测点距多为0.1~0.2 m)高于地

球物理成像精度(观测点距多为 1~2 m 甚至更大)。

1.1 超声波(声波)层析成像

混凝土是一种由砂子、石子和水泥等组成的各向异性复合材料,且有钢筋,富含孔隙。混凝土超声波检测中所用超声波频率多 $<200\text{ kHz}$ ^[3],其波长为数厘米至数十厘米,超声波在其中传播要发生复杂的散射与衍射,因此,混凝土超声波层析成像中必须考虑超声波的衍射(即超声波在混凝土中的传播路径并非直线,而是按 Fermat 原理的最小声时路径传播),加之观测方位的限制,使得混凝土层析成像具有很大的难度。试验表明,当超声波穿过混凝土内部的裂缝区域时,其振幅的变化比声时的变化更为明显,为衰减成像奠定了良好的物理基础,该衰减成像目前尚处于研究试用阶段。由于混凝土对超声波具有很强的吸收作用(尤其对高频超声波),要得到较大穿透深度,就须降低超声波频率,但频率降低又影响成像分辨率。实际工作中,应在保证具有足够穿透能量的前提下,尽量使用较高频率超声波。

1.2 电磁波层析成像

电磁波层析成像是根据混凝土内部缺陷与正常混凝土之间的电/磁性质差异来进行工作的。当电磁波穿过待检混凝土时,缺陷与正常混凝土对电磁波的吸收作用不同,其吸收系数 β 为

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1} \quad (1)$$

式中 ω ——发射天线角频率

μ ——磁导率

ϵ ——介电常数

σ ——电导率

由此可见,电磁波吸收系数是介质电导率、磁导率、介电常数及工作频率的复杂函数。当电磁波穿过被检混凝土时,其内部裂缝、疏松层及空洞等缺陷与周围混凝土电/磁参数不同,必使吸收系数产生异常变化。以吸收系数为参数进行成像,可显示混凝土断面的质量状况。

由电磁波理论可知,对混凝土检测中所用的半波偶极天线及发射/接收系统,其接收点的电磁波场强 E 可表示为^[4]

$$E = \frac{E_0 f_s(\theta_s) f_r(\theta_r) \exp\left(-\int_L \beta dl\right)}{R} \quad (2)$$

式中 E_0 ——初始辐射常数

$f_s(\theta_s), f_r(\theta_r)$ ——发射、接收天线的方向分布函数

θ ——天线辐射角度

L ——射线路径

dl ——积分单元

R ——发射点与接收点的距离

由式(2)可得

$$\ln \frac{E_0 f_s(\theta_s) f_r(\theta_r)}{ER} = \int_L \beta dl \quad (3)$$

对于确定的场源及发射/接收系统,式(3)左端 $E_0, f_s(\theta_s), f_r(\theta_r)$ 和 R 均为已知, E 为测得的场强值,将上式右端线积分沿射线路径离散化,对所有的观测射线,可得方程

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{Y}$ ——与观测场强值有关的列向量

$\mathbf{A}$ ——由射线参数组成的 Jacobi 矩阵

$\mathbf{X}$ ——待求的各单元吸收系数向量

求解式(4)即可得到电磁波吸收系数分布结果。

但是,若混凝土内钢筋较密,对电磁波具有屏蔽作用,则难以进行电磁波层析成像。

1.3 电阻率层析成像

对图 1 所示发射点逐点供以直流电,在所有观测点测得电位值,再根据装置系数算出其视电阻率。视电阻率观测值 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ 与待检混凝土各单元电阻率向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 可表示成如下非线性函数^[5]

$$\mathbf{Y} = F(\mathbf{X}) \quad (5)$$

设成像计算电阻率初始模型为 $\mathbf{X}^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)^T$,将式(5)在 $\mathbf{X}^0$ 点作泰勒展开并略去高次项可得

$$\mathbf{A}\Delta\mathbf{X} = \Delta\mathbf{Y} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{A}$ —— $m \times n$ 阶 Jacobi 矩阵

$\Delta\mathbf{X}$ —— n 维列向量,初始模型修改量

$\Delta\mathbf{Y}$ —— m 维列向量,视电阻率观测值与初始模型计算值之差

由式(6)求得 $\Delta\mathbf{X}$ 后代入下式进行修正

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \Delta\mathbf{X} \quad (7)$$

式(7) k 为迭代次数。由式(6)和(7)进行迭代计算,使其逐渐逼近真解。

电阻率层析成像是根据介质电性差异来工作的,混凝土内部空洞和疏松层等缺陷与正常混凝土之间电学性质不同,当电流场通过时,在观测点会测得电位异常,其成像结果显示测试断面上介质的电学性质变化。一般混凝土由于电阻率很高,使得直流电的供入非常困难,又由于位场具有平滑作用,使得电阻率层析成像的分辨率不如前两者高。

2 混凝土层析成像应用近况

尽管混凝土层析成像具有较大的难度,但近年来,该方向研究也取得了一定的进展。梁国钱等^[6]采用大功率、高频震源及高灵敏度传感器,用超声波层析成像对拱坝细石混凝土块石砌层作了检测,并结合钻孔资料,查明了拱坝的施工质量,取得了满意的效果;周黎明等^[7]用跨孔超声波层析成像技术对三峡大坝某区段混凝土进行了检测,划定了缺陷范围,又经过单孔波速测试与钻孔录像对检测结果作了验证,证明了该方法的有效性;张震夏等^[8]自行开发出 ST-2000 混凝土坝体声波层析成像检测系统,采用高频电火花震源,产生 $>1\text{ kHz}$ 的声波,其穿透距离可达 100m,该系统各项指标均优于日本 OYO 的层析检测系统;Bond 等^[9]用声波传播时间成像对混凝土坝体质量作了研究;Karastathis 等^[10]用单面折射波成像方法对混凝土大坝动力特性作了研究;杨文采等^[11]采用带阻尼的 LSQR 迭代算法进行反演成像,将声波层析成像技术用于首都机场高速公路某钢筋混凝土桥台的质量检测,取得了良好的效果;王五平等用声波层析成像方法检测了混凝土灌注桩的质量;何良军^[12]用弹性波层析成像检测了混凝土桥墩灌浆加固情况;赵明阶^[13]用超声波层析成像方法对混凝土损伤情况进行了研究;刘国华等^[14]将声波 CT 用于检测某商住楼混凝土柱的强度缺陷,取得了较好的效果;黄政宇等^[15]采用超声波衰减层析成像技术对混凝土模型进行了试验研究,获得的吸收系数分布图像表明,衰减成像不但能正确反映混凝土内部缺陷状况,而且比声时成像对缺陷的反应更为灵敏;李才明等将电磁波层析成像用于检测钻孔灌注桩质量^[4],并经钻探验证,其具有较高的检测精度;宋显辉等^[16]用电阻率层析成像技术对机敏混凝土进行了试验检测,取得了较满意的效果,其中机敏混凝土是在普通混凝土中添加少量碳纤维,使混凝土电阻率由 $10^4 \sim 10^7\ \Omega \cdot \text{m}$ 降低到 $10^{-3} \sim 10^2\ \Omega \cdot \text{m}$,以便于向混凝土供电。

随着科学技术的进步与计算机技术的发展,混凝土层析成像技术的研究将会更加深入。

3 结论与建议

(1) 由于混凝土电阻率很高,给电阻率成像带来较大困难;电磁波层析成像易受钢筋的影响,其应用受到一定限制;超声波层析成像具有受钢筋影响

小、穿透深度大、成像精度高和操作简便等优点,应加强该方向的研究,尤其是衰减成像方面的研究,用双参数或多参数进行成像,进一步提高其检测精度。

(2) 三种成像方法均为物理方法,有时难于准确确定缺陷的性质。在实际工程中,应结合其它检测方法(钻芯法等)以取得更好的检测效果。

参考文献:

- [1] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法[M]. 北京:地质出版社,1997.
- [2] 董清华. 井间地球物理成像与工程勘察[J]. 工程勘察, 1999, (4): 64—66.
- [3] 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.
- [4] 李才明,王良书,钟 锴. 电磁波层析成像在钻孔灌注桩质量检测中的应用[J]. 高校地质学报,2003,9(3): 467—473.
- [5] 董清华,朱介寿. 井间电阻率层析成像及其应用[J]. 计算物理,1999,16(5):474—480.
- [6] 梁国钱,苏 全,王文双,等. 层析成像技术在拱坝质量检测中的应用[J]. 水力发电,2002, (5): 20—21.
- [7] 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—519.
- [8] 张震夏,张进平,李 平,等. 混凝土大坝声波层析检测系统[J]. 大坝与安全,2003, (2): 39—43.
- [9] Bond LJ, Kepler WF, Frangopol DM. Improved assessment of mass concrete dams using acoustic travel time tomography[J]. Construction & Building Materials,2000,14(3):133—156.
- [10] Karastathis VK, Karmis RN, Drakatos G, et al. Assessment of the dynamic properties of highly saturated concrete using one-side acoustic tomography: application in the Marathon dam[J]. Construction & Building Materials,2002,16(5):261—270.
- [11] 杨文采,杜剑渊. 层析成像新算法及其在工程检测上的应用[J]. 地球物理学报,1994,37(2):239—244.
- [12] 何良军. 层析成像技术在桥墩灌浆加固质量检测中的应用[J]. 岩土工程界,2001,4(10):55—57.
- [13] 赵明阶. 结构混凝土损伤的超声成像模型研究[J]. 重庆交通学院学报,2001,20(增刊):87—99.
- [14] 刘国华,王振宇,孙 坚. 弹性波层析成像及其在土木工程中的应用[J]. 土木工程学报,2003,36(5):76.
- [15] 黄政宇,黄 靓,缪 仑. 混凝土超声波幅值衰减层析成像研究[J]. 铁道科学与工程学报,2004,1(2):36.
- [16] 宋显辉,吕 泳,徐东亮,等. 机敏混凝土电阻率层析成像的试验研究[J]. 测控技术,2005,24(1):11—13.