

文章编号: 1001-4888(2010)02-0136-07

弹性波 CT 在混凝土靶体冲击损伤实验中的应用^{*}

吝曼卿¹, 郭学彬¹, 肖正学¹, 陈星明¹, 张继春², 高航¹

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川绵阳 621010; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川成都 610031)

摘要: 介绍了弹性波 CT 技术的原理、方法和优点。在弹丸冲击混凝土靶体实验中, 应用弹性波 CT 技术对冲击前后的混凝土靶体进行 CT 成像分析, 并根据成像剖面上冲击前后对应位置的速度对比情况, 分析其在弹丸冲击作用下的宏观破坏和内部损伤。CT 成像分析结论与实际观测结果有较好的一致性, 这表明利用弹性波 CT 成像能很好地反映混凝土靶体冲击前的结构特征、冲击后的破坏状况和损伤情况。

关键词: 弹性波; CT; 冲击损伤; 声波测试

中图分类号: TU45

文献标识码: A

0 引言

随着钻地弹的出现, 人们越来越关注混凝土和岩石等介质在弹丸冲击作用下的损伤机理和损伤特性研究^[1], 为此进行了各种弹丸冲击混凝土或岩石的实验, 分析其靶体在弹丸冲击作用下的穿孔深度和弹坑形态^[2-4]。但对于混凝土和岩石等具有脆性的介质, 在弹丸作用下形成穿孔, 产生弹坑等宏观破坏的同时, 还会产生不同程度的内部损伤, 从而改变岩石或混凝土的内部结构, 降低其强度。因此在分析弹丸穿孔和弹坑破坏的同时, 研究混凝土或岩石在冲击作用下的内部损伤同样重要。

声波技术用于混凝土内部的探伤研究工作直到 20 世纪 50 年代才逐步开始^[5]。近年来, 在混凝土声波检测中引入的计算机层析成像技术(CT), 以“图像”的方式完整地反映层析面上混凝土内部质量。弹性波层析成像(Computerized Tomography, 简称 CT)技术根据检测对象的弹性波速与其物理力学参数有较好的相关性^[6], 在不损伤“检测对象”的情况下, 利用检测剖面上的弹性波速度, 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。目前 CT 技术的应用已经拓展到科学和工程等诸多领域, 特别是在工程地质勘探、混凝土构件和坝堤防渗墙的质量检测、地基处理和加固的效果评价等方面得到了广泛的应用。弹性波 CT 成像具有探测结果直观、可靠性高等优点, 在无损检测中具有广阔的应用前景^[7]。

本文介绍了利用一级轻气炮进行弹丸冲击混凝土靶体的实验中, 应用弹性波 CT 技术对冲击前后的混凝土靶体进行 CT 成像, 分析混凝土靶体在弹丸冲击载荷作用下的破坏范围和损伤程度, 为进一步研究混凝土靶体在冲击条件下的损伤机理提供依据。

1 弹性波 CT 成像的基本原理

弹性波 CT 技术在混凝土质量无损检测中的应用, 是基于完整结构混凝土和存在缺陷的混凝土之间存在明显的弹性纵波波速差异; 通过走时数据(t_i)的拾取和计算机反演成像技术来重建介质的波速

^{*} 收稿日期: 2009-10-13; 修订日期: 2010-01-15

基金项目: 西南科技大学国防预研项目(07zx6101); 西南科技大学创新基金项目(SWUST-CX09014)

通讯作者: 肖正学(1956—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: zxxiao@swust.edu.cn

分布图像,进而直观地再现介质的内部结构^[8]。

假设测区共有 m 条测线通过,测区划分为 $n=r \times l$ 个网格, L_i 为第 i 条射线(发射换能器 R 和接收换能器 S 之间)的直线距离(如图 1 所示)。用慢度(速度的倒数)描述测区介质,波的走时为慢度沿射线路径的线积分。当弹性波在介质中传播时,波的射线走时是速度分布 $v(x, y)$ 和 L_i 的函数,对于第 i 条射线的直观走时 t_i ,则可以表示为:

$$t_i = \int_{L_i} \frac{dl}{V_j(x, y)} = \int_{L_i} x_j dl \quad (1)$$

上式为曲线积分,其中 dl 是弧长微元。式(1)中除了直观走时 t_i 外,第 j 个单元格的慢度 x_j 和射线 L_i 都未知,因此为非线性参数识别问题。假定通过射线追踪来确定射线 L ,使反演参数只剩下慢度 x_j 。把待测区介质用 n 个单元离散化,设每个单元内的慢度为 $x_1, x_2, x_3 \cdots x_n$ 。这时射线追踪问题转化为求射线通过的单元、坐标、射线长度及走时。对第 i 条射线的时间表示为:

$$y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \quad (2)$$

式中 a_{ij} 是第 i 条射线通过第 j 个单元的路径长度; y_i 是第 i 条射线的走时值。通过求解大型矩阵方程来重建发射点和接收点之间的速度分布图像,根据速度分布图像可以直观准确地判定缺陷的存在、位置及大小^[8]。当成像剖面内共测有 m 条射线时,首先根据测试精度把剖面分为 n 个单元(网格),以射线理论为基础的成像方法归结为求解如下方程:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdots \\ y_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过求解式(3),可以得到离散慢度 x_j 的分布(即相应的离散速度分布),从而实现了测区的速度场层析成像。

由于系数矩阵 a_{ij} 是极其稀疏的,因为它的每一行有 n 个元素,而每条射线只通过其中的部分网格,因此该矩阵中的大部分元素为 0。根据稀疏矩阵的特点,只能应用数值近似解法。大多采用的迭代方法如,代数重建技术(ART),联合迭代重建技术(SIRT)和反投影技术(BPT)等^[9]。本文采用反投影技术 BPT 和联合迭代重建技术(SIRT)来解方程组(3),因 BPT 方法重建图像比较粗糙,分辨率较低,但计算简单快速,可将其重建结果作为 SIRT 方法迭代初值,再采用优化的 SIRT 方法不断地修正各单元慢度值,直至误差满足精度要求为止。

2 冲击损伤实验

2.1 实验系统

采用西南交通大学高压物理实验室炮管直径为 57mm 的一级轻气炮作为弹丸冲击混凝土靶的冲击加载装置。轻气炮气室中的高压气体突然释放,推动弹托及装配在弹托上的弹丸在真空炮管内高速运动。

实验系统如图 2 所示。由一级轻气炮装置、磁探针测速系统、高速摄影系统和混凝土靶体等组成。当弹丸通过磁探针时,磁探针输出电信号,由示波器显示测速波形。

2.2 实验参数

弹丸头部为卵形(弹形系数 $CRH=3$),长 120mm,直径 20mm,重 0.250kg。靶体为高 600mm,直径 590mm 的混凝土圆柱体,抗压强度为 76.6MPa,冲击试验时用弧形钢板紧箍靶体。

利用磁探针测速系统测得冲击实验时弹丸碰靶前的飞行速度为 213m/s。

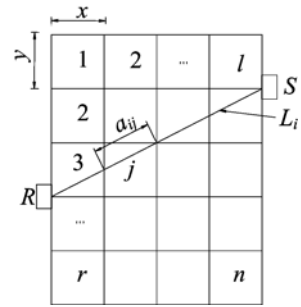


图1 弹性波 CT 测试原理

Fig. 1 Principle of elastic wave CT

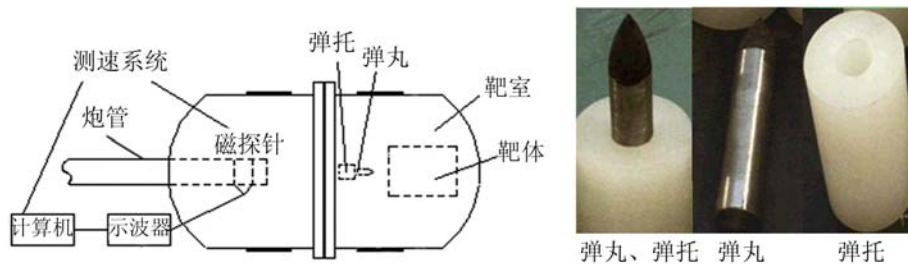


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Sketch map of experimental system

2.3 冲击破坏情况

混凝土靶体冲击后产生的宏观破坏情况如图 3 和图 4 所示。

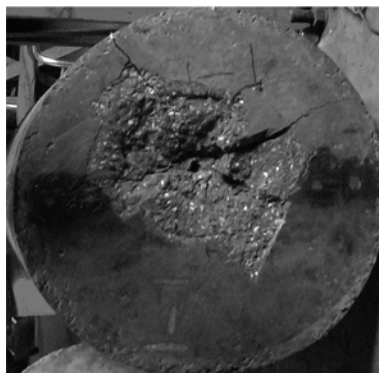


图 3 混凝土靶体冲击面

Fig. 3 The impact surface of concrete target

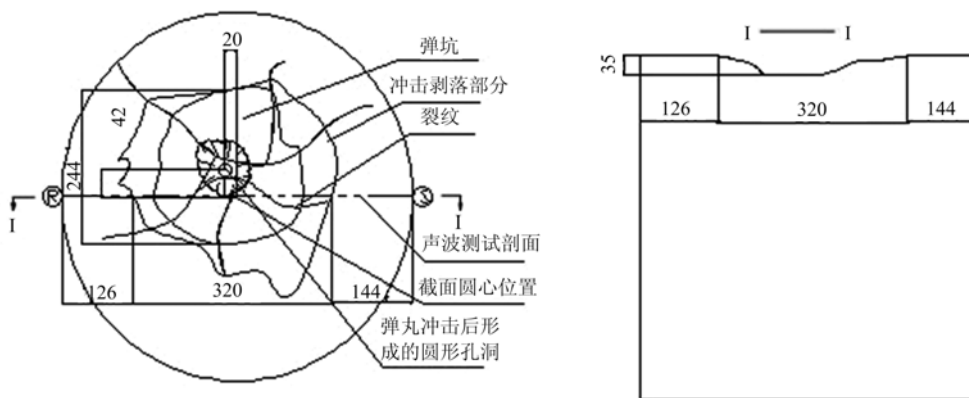


图 4 混凝土靶体冲击后冲击面示意图及声波测试剖面图(单位:mm)

Fig. 4 Sketch map of the impact surface of concrete target after impact and the sonic test profiles (unit: mm)

弹丸冲击混凝土靶体后冲击面方向的破坏情况如图 3 所示,靶体背面未见宏观破坏。弹丸冲击混凝土靶后,对靶体产生侵彻作用,形成 59mm 深的侵彻孔。在弹丸对靶体的侵彻过程中,对周围的混凝土还会产生径向压缩和切向拉伸等作用,形成径向裂隙;由于冲击面的存在,还会产生斜向剪切作用,形成漏斗状破坏。漏斗底部平均直径 244mm,漏斗深度 35mm,见图 4。漏斗状破坏后余下的侵彻孔深度为 24mm。

由图 3 和图 4 可见,弹丸冲击位置位于靶体轴心附近,与声波测试剖面相距 42mm。测试剖面虽然没有通过冲击位置和弹丸的侵彻孔,但通过了冲击破坏的主要漏斗区,能较好地反映混凝土靶体的宏观破坏和内部损伤情况。剖面上的漏斗底部宽度为 320mm,最大深度为 35mm,漏斗底部和侧面不很规则。

3 弹性波 CT 成像与分析

弹性波 CT 成像需要给成像软件输入成像对象各测点的弹性波(即声波)走时数据,因此在 CT 成像前要进行声波测试。

3.1 声波测试与成像方法

(1) 测试仪器

声波测试采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RSM-SY5 型智能声波检测仪和 SK 型 30kHz 换能器。声波检测仪的最小采样间隔 $0.1\mu\text{s}$, 12 位 A/D 转换,定点或浮点增益范围 $1\sim 10000$ 。弹性波 CT 成像采用 RSM-CT2008 软件。

(2) 测点布置

因为 CT 成像是按剖面进行成像的,因此需要在成像剖面上选择作为声波发射和接收的若干测点,然后测试各发射点至各接收点之间的声波走时,使所有测点的声波测试路径能控制成像剖面。弹丸冲击靶体的位置在冲击面圆心或其附近,形成一定深度的破坏与损伤范围。为了很好地分析混凝土靶体的冲击损伤情况,应选择通过圆柱形靶体轴心的纵剖面为声波测试剖面,即成像剖面。如图 5 所示,在声波测试剖面上的靶体两侧各布置 10 个测点,左侧为发射点,以 R1~R10 序号表示,右侧为接收点,以 S1~S10 序号表示,同一侧测点间距均为 60mm。

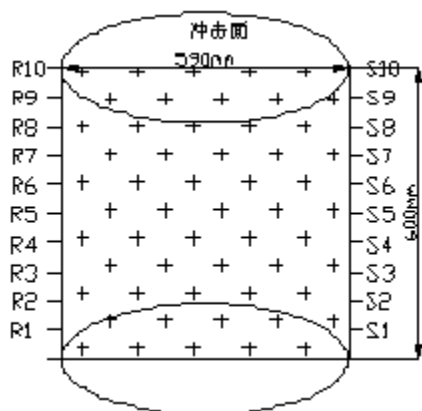


图 5 介质的测试截面(纵截面)

Fig. 5 Test section of media (by longitudinal section)

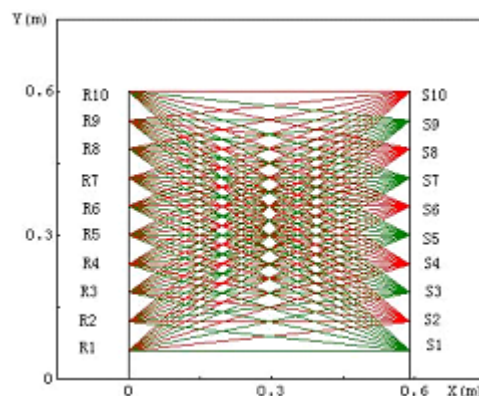


图 6 观测系统图

Fig. 6 The layout of elastic wave tomography

(3) 声波测试与成像方法

平面换能器与圆柱形试件的接触面为线形,影响换能器的能量转换,所以采用黄油耦合,且每次改变测点时都重新涂黄油,以便改善换能器与试件的耦合条件。测试时首先将发射换能器安放在 R1 测点,再使接收换能器按测点 S1、S2、S3...S10 的位置逐点进行声波测试。然后,再将发射换能器安放在 R2 测点,逐点改变接收换能器的位置重复前面的测试步骤,直到发射点 R10 至接收点 S10 的测试完毕为止,这样就完成了整个剖面上所有测点的测试,如图 6 所示。采集经不同路径传播的声波信号,记录其声波走时数据。最后建立各测点的空间坐标系,将空间坐标和声波走时数据导入 RSM-CT2008 软件中进行弹性波 CT 成像,可获得测试剖面的声波速度分布图像。

冲击实验前,进行混凝土靶体的声波测试与 CT 成像,分析混凝土靶体的结构情况。冲击实验时,将混凝土靶体安放在轻气炮回收室内,使靶体轴心与发射管中心线在同一条直线上。弹丸在高压气体作用下沿炮管高速运动,最后以 213m/s 的速度冲击到混凝土靶体正面的圆心附近,使其产生破坏和损伤,然后再对冲击损伤后的混凝土靶体进行声波测试和 CT 成像,分析混凝土靶体的冲击破坏和内部损伤情况。为保证混凝土靶体冲击前后成像结果有很好的对比性,要求两次测试的所有测点位置相同,测试方法一样。

3.2 成像结果与分析

将声波测试的走时数据导入 RSM-CT2008 软件中,可以生成表示声波速度分布的 CT 成像。

冲击前后的声波 CT 成像如图 7 所示,图中从紫到蓝渐变的颜色表示波速从低到高的变化情况(注:可到实验力学网站上查看彩色图片),因为试件的声波的传播速度能反映混凝土的质量,因此冲击前的声波 CT 成像图中的色区分布就形象生动地向我们展示了混凝土试件过轴心的纵剖面上的质量变化情况^[10,11]。

冲击前的声波 CT 成像如图 7(a)所示,由图可见,成像剖面上除了上部左右两角和右下角等局部范围的颜色差异较明显外,其余色差变化不太大,可见混凝土靶体的总体质量较好。图中存在的颜色差异主要与混凝土搅拌的均匀程度和浇筑时振动捣实等加工工艺有关。

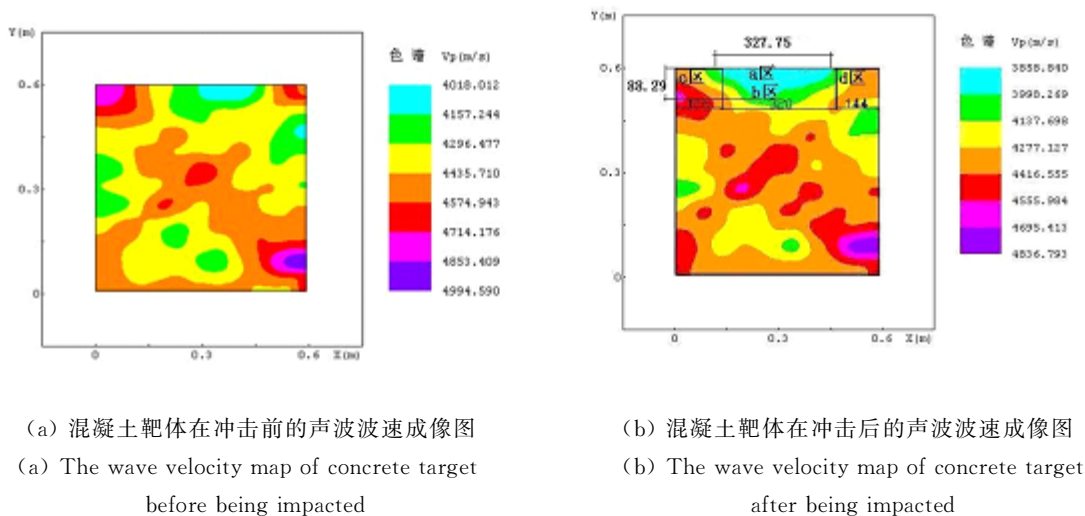


图 7 声波波速成像图

Fig. 7 The imaging map of wave velocity

冲击后混凝土靶的声波 CT 成像如图 7(b)所示。冲击后在剖面上部的中央位置,即弹丸碰靶处附近出现了声波速度为 3858m/s ~ 3998m/s 的蓝色区域,即图中的 a 区。该区域呈漏斗状,漏斗上底宽 327.75mm,深 88.29mm。在冲击前的声波成像图上,该区域声波速度为 4018m/s ~ 4435m/s,波速降低 160m/s ~ 437m/s,说明该区域混凝土经过弹丸冲击后混凝土结构发生了较大的变化。冲击后混凝土 CT 成像的 a 区与宏观破坏形状和范围(见图 3 和图 4)基本一致,所以该区域表示冲击破坏的区域。因为图 7(b)中 a 区为中上部为弹坑区,在对冲击后的混凝土靶体进行声波测试时,弹性波在混凝土中遇到漏斗状弹坑时并非直线传播,而是绕行曲线,增加了两换能器间接收的声波走时,从而使得声波速度从 4157m/s 降低到 3858m/s,速度降低 9.28%。在蓝色区域外围是绿色区域,即图中的 b 区。该区域的声波速度为 3998m/s ~ 4137m/s。在冲击前的声波成像图上,该区域的声波速度为 4296m/s ~ 4714m/s,冲击后波速降低 298m/s ~ 577m/s,声波速度降低 12.24%,说明经过弹丸冲击后该区域混凝土结构也发生了较大的变化。对比图 3 和图 4 冲击后的裂隙发展情况,从弹坑向左侧发展的一条裂隙正好通过声波测试剖面的左上角内侧,以致该处声波速度降低达 577m/s,该区域的其他位置虽然没有可见的宏观破坏,但声波成像图中速度降低较大,是由于冲击造成混凝土结构内部损伤,产生了微裂纹所致,应属于损伤范围。

在 a 区和 b 区的侧面至自由面处,分别是 c 区和 d 区,该区在冲击前后的声波速度变化也比较明显,由冲击前的声波速度为 4574m/s ~ 4853m/s,冲击后为 4277m/s ~ 4555m/s,声波速度降低了 298m/s ~ 300m/s,说明弹丸冲击混凝土靶体瞬间产生的冲击波在混凝土柱体的侧向自由面产生反射拉伸作用,由于混凝土的抗拉强度远低于抗压强度,从而使混凝土靶体在该区域产生一定程度的损伤。而其余部分冲击前后的声波速度分布形状基本一致,声波速度变化不大,相对误差只有 3.59%,说明其余部分基本上没有受到损伤^[6]。这种相对误差主要是冲击前后的声波测点不能精确地重合、换能器与靶体

呈线形接触造成的能量损失使波形衰减引起读数误差、采用 SIRT 法迭代成像等原因产生的声波测试与成像误差所造成的。

实验证明:弹性波 CT 技术应用在混凝土靶体冲击损伤实验中是可行的,通过弹性波 CT 成像不仅能表示混凝土靶体在冲击前后的宏观破坏范围,而且能反映内部的分布形态及冲击损伤范围。

4 结论

利用一级轻气炮进行弹丸冲击混凝土靶体实验,应用弹性波 CT 技术对冲击前后的靶体进行声波测试剖面的 CT 成像分析,对比冲击前后弹性波 CT 成像图上的波速分布情况,确定了弹丸冲击作用下混凝土靶体的漏斗形破坏区,该区形状和范围与冲击后的宏观破坏形状和范围有较好的一致性;同时对冲击造成混凝土结构内部损伤范围进行了分析。冲击损伤是由冲击产生的靶体内部微裂纹,裂隙向靶体内部发展等原因造成的,肉眼无法观察,但是对混凝土内部结构及其强度有很大的影响,而采用弹性波 CT 成像能获得混凝土靶体内部波速分布的图像,直观地反映混凝土靶体在冲击前后的内部形态。实验说明采用弹性波 CT 技术研究混凝土靶体冲击破坏与损伤情况不仅是可行的,而且是有意义的。

根据混凝土靶体冲击损伤实验的声波 CT 成像图能够判断冲击形成的裂缝影响范围,但还不能对裂缝进行更好的量化的判断,这有待于今后进一步的研究。

参考文献:

- [1] 高文学,刘运通,杨军. 脆性岩石冲击损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(2):153—156 (GAO Wenxue,LIU Yuntong,YANG Jun. A Study of Shock Damage Model of Brittle Rock. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2000,19(2):153—156 (in Chinese))
- [2] 齐爱东,刘荣忠,陈太林等. 刚性弹丸对混凝土靶体的垂直侵彻研究[J]. 弹道学报,2003,15(4):43—46 (QI Aidong,LIU Rongzhong,CHEN Tailin, et al. Normal Penetration of a Rigid Projectile into Concrete Target. Journal of Ballistics,2003,15(4):43—46 (in Chinese))
- [3] 顾晓辉,王晓鸣,陈惠武等. 动能侵彻体垂直侵彻半无限厚混凝土靶的试验研究[J]. 实验力学,2004,19(1):103—108 (GU Xiaohui, WANG Xiaoming, CHEN Huiwu, et al. Experimental Study On The Kinetic Energy Penetrations Against Semi-infinite Concrete Targets at Normal Incidence[J]. Journal of Experiment Mechanics, 2004,19(1):103—108 (in Chinese))
- [4] 李永池,袁福平,胡秀章等. 卵形头部弹丸对混凝土靶板侵彻的二维数值模拟[J]. 弹道学报,2002,14(1):14—19 (LI Yongchi,YUAN Fuping,HU Xiuzhang, et al. The 2-D Numerical Simulation on Penetrations of an Oval headed Projectile into Concrete Targets[J]. Journal of Ballistics,2002,14(1):14—19 (in Chinese))
- [5] Leonard J B, William F K, Dan M F. Improved Assessment of Mass Concrete Dams Using Acoustic Travel Time Tomography [J]. Construction and Building Materials, 2000, (14):133—146.
- [6] 王振宇,刘国华. 土木工程的层析成像与广义反演研究[D]. 浙江大学建筑工程学院,2003 (WANG Zhenyu,LIU Guohua. Study on the Computer Tomography and Generalized Inversion of Civil Engineering,2003 (in Chinese))
- [7] 宋先海,黄荣荣. 弹性波 CT 在大体积混凝土无损检测中的应用[J]. 人民长江,2003,34 (11):23—25 (SONG Xianhai,HUANG Rongrong. Application of Elastic Wave CT in Nondestructive Detection of Large Volume Concrete[J]. Yangtze River,2003,34 (11):23—25 (in Chinese))
- [8] 潘伟,周黎明,阎贫. 某面板堆石坝混凝土质量无损检测技术研究[J]. 混凝土,2004,(12):77—78 (PAN Wei, ZHOU Liming,YAN Pin. Study on Nondestructive Detection for Concrete Quality of TGP. Concrete,2004,(12):77—78 (in Chinese))
- [9] 李卓球,肖敏芳,宋显辉等. 基于混凝土超声探伤的 CT 图像分析[J]. 武汉理工大学学报,2006,28(3):72—75 (LI Zhouqiu,XIAO Minfang,SONG Xianhui, et al. CT Images Analysis for Concrete Detection Based on Ultrasonic Pulse Velocity Measurement[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2006,28(3):72—75 (in Chinese))
- [10] Joseph Moysan, Gilles Comeloup, Thierry Sollier. Adapting an ultrasonic image threshold method to eddy current images and defining a validation domain of the thresholding method [J]. NDT&E International, 1999(32):79—84.
- [11] Martinez O, Mostafa Akhnak, Luis G. Ullat, F. Montero de Espinosa. A small ZD ultrasonic array for NDT applications[J]. NDT&E International, 2003, (36): 57—63.

Application of Elastic Wave CT to Impacting Damage Experiment of Concrete Targets

LIN Man-qing¹, GUO Xue-bin¹, XIAO Zheng-xue¹,
CHEN Xing-ming¹, ZHANG Ji-chun², GAO Hang¹

(1. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 620000, Sichuan, China)

Abstract: Principle, method and advantage of the elastic wave CT technology are introduced in this paper. In impacting experiment of energetic projectile into a concrete target, the application of elastic wave CT technology to analyses the CT tomography taken before and after the impacting experiment of an energetic projectile into a concrete target. Based on the comparison of the elastic wave speed of corresponding positions on the imaging profile corresponding positions taken before and after impact, the macro broken status and inside damage of the concrete target under impact of energetic projectile was analyzed. The conclusion of CT tomography has a good consistency with the actual observation results, which indicates that the elastic wave CT can reflect perfectly the structure characteristics of a concrete target before impact, broken and damage status after impact.

Keywords: elastic wave; computer tomography (CT); impact damage; ultrasonic testing