

◇ 研究报告 ◇

混凝土中的声发射波速特性及其在源定位中的应用*

李冬雪^{1†} 杨 康² 何兆益¹ 周翰林²

(1 重庆交通大学交通运输学院 重庆 400074)

(2 重庆交通大学土木工程学院 重庆 400074)

摘要: 利用声发射技术监测受载混凝土裂缝发展特征的首要任务是对声发射源的准确定位。为了解混凝土中声发射波速特性,提高声发射源定位精度,该文开展了一系列室内试验,构建了考虑衰减现象的声发射波速修正模型,优化建立了基于修正波速的区域穷举定位法。结果表明:水灰比越小,基准波速越大,波速随距离的衰减越大。骨料粒径越大,基准波速越大,波速随距离的衰减越大。直线距离小于 500 mm 时,可采用对数函数描述声发射波速与距离的定量关系,以此构建的波速修正模型满足工程精度要求。采用修正波速的区域穷举定位法对单轴压缩试验产生的裂缝进行定位时,定位点比时差定位法更接近裂缝实际位置,有效提高了定位精度。

关键词: 混凝土; 声发射; 波速特性; 源定位

中图法分类号: TU112.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2021)03-0400-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2021.03.011

Acoustic emission wave velocity character in concrete and its application in source localization

LI Dongxue¹ YANG Kang² HE Zhaoyi¹ ZHOU Hanlin²

(1 Chongqing Jiaotong University, College of Traffic & Transportation, Chongqing, 400074, China)

(2 Chongqing Jiaotong University, School of Civil Engineering, Chongqing, 400074, China)

Abstract: The primary task of monitoring the development characteristics of concrete cracks under load by acoustic emission technology is to accurately locate acoustic emission sources. In order to understand the character of acoustic emission in concrete and improve the positioning accuracy of acoustic emission source, a series of laboratory tests were carried out in this paper, a wave velocity correction model of acoustic emission considering attenuation phenomenon was constructed, and a regional exhaustive positioning method based on the corrected wave velocity was optimized. The results show that the smaller the water-cement ratio is, the larger the reference wave velocity is and the larger the attenuation of the wave velocity is with the distance. The larger the aggregate particle size is, the larger the base wave velocity is and the larger the attenuation of the wave velocity is with the distance. When the linear distance is less than 500 mm, the logarithmic function can be used to describe the quantitative relationship between acoustic emission wave velocity and distance, so that the wave velocity correction model constructed can meet the requirements of engineering accuracy. The location point is closer to the actual location of the crack than the time difference method, which can effectively improve the location accuracy when using the zone exhaustion method with modified wave velocity to locate the crack.

Keywords: Concrete; Acoustic emission; Wave velocity character; Localization

2020-08-27 收稿; 2021-01-24 定稿

*国家重点研发计划项目 (2018YFB1600200)

作者简介: 李冬雪 (1983-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 道路基础设施性能感知。

†通信作者 E-mail: lidongxue@cqjtu.edu.cn

0 引言

通过各种传感器记录传播的声波信号并对其进行适当的分析,从而确定这些声波的来源,这一过程通常被称为声源定位技术。利用声发射 (Acoustic emission, AE) 无损检测技术对混凝土结构进行健康检测与监测时,对AE源进行准确定位是该项技术的主要任务之一。

近几十年来,AE定位技术得到了飞速的发展^[1-3],Kundu^[4]回顾了目前较新颖的声源定位技术,对于各向同性板的源定位技术主要包括:已知波速的三角测量技术^[5]、未知波速的三角测量技术^[6]、基于优化的未知波速的技术^[7-10]、波束形成技术^[11-12]、未知波速的应变玫瑰技术^[13-16]以及通过模态声发射进行源定位^[17-20]等6类。在对混凝土类材料进行声发射源定位研究中,以已知波速的三角测量技术和波束形成技术的研究与应用较为成熟,其中已知波速的三角测量技术被多数商用声发射检测仪所采用,而其他方法多应用于科学研究。

根据AE源定位原理可知,源定位的关键参数是到达时间和波速。对于均匀介质而言,AE在材料中的传播速度更接近于材料的固有属性,因此在源定位中采用固定值,此时通过波形降噪来提高到达时间的拾取精度,进而提高定位精度。但是对于水泥混凝土来说,情况可能有些许不同。水泥混凝土是一种由水泥、石料(5~20 mm)、砂和水经机械拌合而成的混合料,它的固有属性取决于原材料的性质,也取决于各种原材料在混合料中的排列方式,但通常这种排列方式是随机的、无序的,因此水泥混凝土不是各向同性材料(只有截面尺寸远大于石料最大粒径时可以认为是各向同性)。声波在混凝土中传播,也就是在石料、水泥石(水泥硬化后)或者水泥砂浆(水泥包裹砂粒后硬化)等多相介质中传播。传播过程中发生的散射、折射等,且水泥混凝土本身存在着大量的微观孔隙结构,这都使声波在混凝土中传播时产生声衰减。声衰减是AE在水泥混凝土中传播时的一种物理现象,主要指声波在非理想媒介中传播时传播速度和能量等的衰减^[21]。已有研究表明,混凝土的配合比、骨料的类型及其尺寸、水泥用量及水灰比等对声发射波的传播规律有显著影响^[22]。混凝土中声波振幅衰减值与传播距离正相关,传播距离越大衰减越显著^[23-24]。

因此,当采用AE技术对水泥混凝土结构进行损伤检测与定位时,明确水泥混凝土中的声衰减,特别是波速的衰减规律有利于提高声发射源定位的精度。

为此,本文采用SAEU3H数字化声发射检测仪对混凝土试件进行人工激发源AE波速试验,用于研究水灰比、砂率及骨料最大粒径对混凝土中AE波速特性,建立AE波速的修正模型,结合穷举法建立AE源的优化定位算法。开展立方体混凝土试块单轴压缩试验,加载过程中采集AE信号,并利用高清摄像机记录混凝土裂缝开展图像。最后,对比本文建立的定位法与时差定位法的定位结果,验证修正AE波速对提高定位精度的可靠性。

1 混凝土中的AE波速特性

1.1 室内试验

为掌握AE信号在水泥混凝土中传播速度的变化情况,分析不同材料组成时AE波速衰减规律,开展了3因素2~3水平的人工激发源波速测定室内模拟试验,所使用的水泥混凝土试样的水灰比(w/c)为0.3、0.33、0.36,砂率(S)为0.47、0.5、0.55,骨料最大粒径($d_{\max}$)为10 mm和20 mm,试件尺寸为100 mm × 100 mm × 1800 mm,如图1所示。声发射监测系统采用SAEU3H高速数字化声发射检测仪,试验中声发射系统前放增益设置为40 dB,阈值设置为45 dB。



图1 混凝土试样

Fig. 1 Test sample

按照美国材料与试验协会标准 (American society for testing and materials, ASTM) 推荐的铅笔断芯试验 (Pencil lead break, PLB) 进行人工激发源AE波速测量,详细试验步骤为:

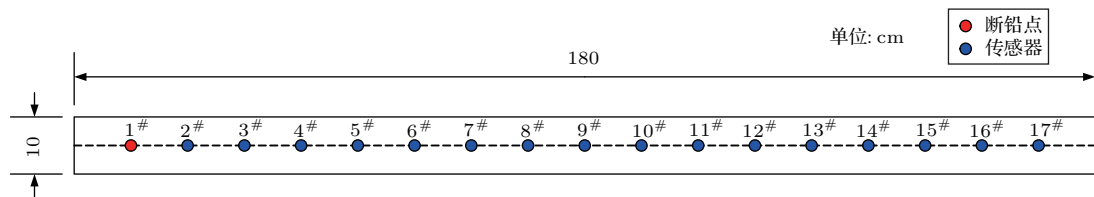


图2 人工激发源波速试验方案

Fig. 2 Test scheme for wave velocity of artificial excitation source

(1) 沿长度方向的表面等距离安装17个声发射传感器, 布置间距为10 cm, 传感器编号由1#~17#, 断铅点与传感器布设方案如图2所示。

(2) 在断铅点及传感器附近进行3次PLB试验, 验证传感器契合度。

(3) 试验开始, 在断铅点间隔2 s进行5次断铅, 1#~17#传感器分别采集信号。

(4) 分析波形, 提取传感器的信号达到时间 T 。

(5) 以1#传感器的信号达到时间为断铅信号发出时间, 2#~17#传感器的信号到达时间为接收时间, 分别计算传播距离为100 mm、200 mm、300 mm、...、1600 mm时的AE波速。

1.2 AE波速衰减规律

1.2.1 评价指标

观察AE波速随距离的衰减现象的过程中, 应选取一个恰当的基准波速(Datum acoustic emission velocity) V_d 作为比较对象。本文采用传播距离100 mm时的AE波速做为基准波速。

采用波速衰减率(Attenuation rate of acoustic emission wave velocity) R_a 来评价AE波速随距离的衰减程度。波速衰减率表示不同传播距离时的AE波速与基准波速的比值, 单位为%。

$$R_a = V_x / V_d, \quad (1)$$

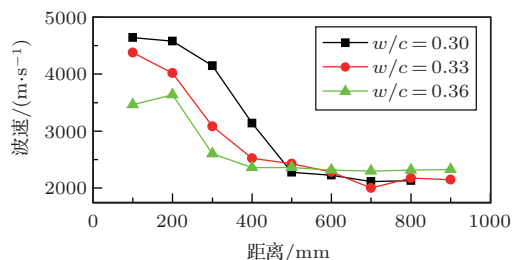
式(1)中: V_x 为AE在传播路径上不同传播距离时的波速, m/s; V_d 为基准波速, m/s。

在人工激发源AE波速试验中获取的有效试验数据为布置在1000 mm以内的传感器信号到达时间, 超过此距离时传感器未接收到信号(或未达到门槛值), 因此本文分析的AE波速衰减为1000 mm以内的波速衰减规律。

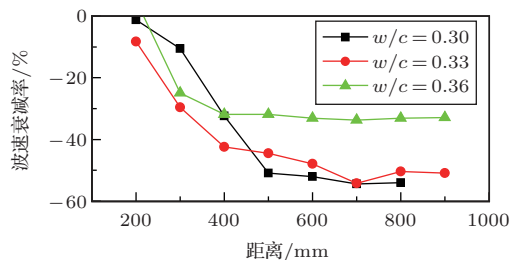
1.2.2 水灰比的影响

将相同砂率和骨料粒径、不同水灰比条件下AE波速随传播距离的变化情况绘制于图3, 结果表明: 当砂率和骨料最大粒径相同时, 水灰比越

大, 水泥混凝土中标准AE信号的基准波速越小。当水灰比为0.3、0.33和0.36时, V_d 分别为4639 m/s、4378 m/s和3465 m/s, 如图3(a)所示。水泥混凝土中标准AE波速均表现出随距离增加而衰减的趋势, 如图3(b)所示。砂率和骨料最大粒径相同时, 当水灰比为0.3、0.33和0.36时, R_a 的范围分别为-1%~-54%、-8%~-54%和5%~-34%, 变异系数分别为0.57、0.35和0.09, 即水灰比越大, AE波速随距离的衰减越少。



(a) 波速沿传播距离的变化情况



(b) 波速沿传播距离的衰减情况

图3 水灰比对波速的影响

Fig. 3 Influence of water cement ratio on wave velocity

1.2.3 砂率的影响

将相同水灰比和骨料粒径、不同砂率条件下AE波速随传播距离的变化情况绘制于图4, 结果表明: 当砂率增大时, 水泥混凝土中标准AE基准波速的变化区别不大。当砂率为0.47、0.50和0.55时, V_d 分别为4114 m/s、4639 m/s和3950 m/s, 如图4(a)所示。标准AE在不同砂率的水泥混凝土中传播时, 其波速均表现出随距离增加而衰减的趋

势,如图4(b)所示。当砂率为0.47、0.50和0.55时, R_a 的范围分别为2% ~ -43%、-1% ~ -54%和2% ~ -41%,变异系数分别为0.48、0.57和0.44。可见,砂率对波速衰减现象的影响并不显著。

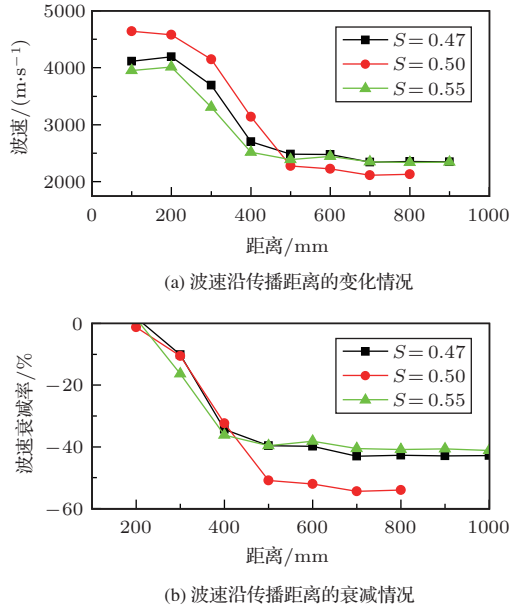


图4 砂率对波速的影响

Fig. 4 Influence of sand ratio on wave velocity

1.2.4 骨料最大粒径的影响

将相同水灰比和砂率的水泥混凝土试件在不同骨料最大粒径条件下 AE 波速随传播距离的变化情况绘制于图5,结果表明:当水灰比和砂率相同时,骨料粒径越大,水泥混凝土中标准 AE 信号的基准波速越大。当骨料最大粒径为10 mm和20 mm时, V_d 分别为3551 m/s 和4639 m/s,如图5(a)所示。不同骨料最大粒径时的水泥混凝土试件中,标准 AE 波速均表现出随距离增加而衰减的趋势,如图5(b)所示。当骨料最大粒径为10 mm和20 mm时, R_a 的范围分别为-13% ~ -34%和-1% ~ -54%,变异系数分别为0.26和0.57,即骨料粒径越大,AE 波速随距离的衰减越显著。

1.3 波速修正模型

对传感器进行激励时,通常会产生不同模式的声波。本文中(垂直)激发方式主要会激发起最低阶的弯曲波,以及具有一定幅度的扩展波。扩展波的衰减一般远大于弯曲波,加上其本来幅度就低于弯曲波,当传播距离较远后,仅有弯曲波还有一定幅度能被仪器检测到。本次波速试验中,当传播距离较短时,声速较高的扩展波首先到达,波速较高;当

直线传播距离大于500 mm时,传感器接收到的信号以弯曲波为主。为了确保定位时使用相同模态的声波,本文采用该对数函数对500 mm 以内的波速数据进行了拟合,得到了 AE 波速的修正模型如公式(2)所示:

$$V_x = a \ln x + b, \quad x \leq 500 \text{ mm},$$

$$a = -1111 + 2898.8 \left(\frac{w}{c} \right) + 255.3S - 42.6d_{\max},$$

$$b = 9691 - 18726.5 \left(\frac{w}{c} \right) - 1521.6S + 264.6d_{\max}, \quad (2)$$

式(2)中: V_x 为人工激发 AE 在传播路径上不同传播距离时的波速, m/s; x 为人工激发 AE 在传播路径上的传播距离, m。对于不同配合比的混凝土试件,模型的回归参数 a 、 b 均表示为材料组成(水灰比、砂率、最大粒径)的函数。

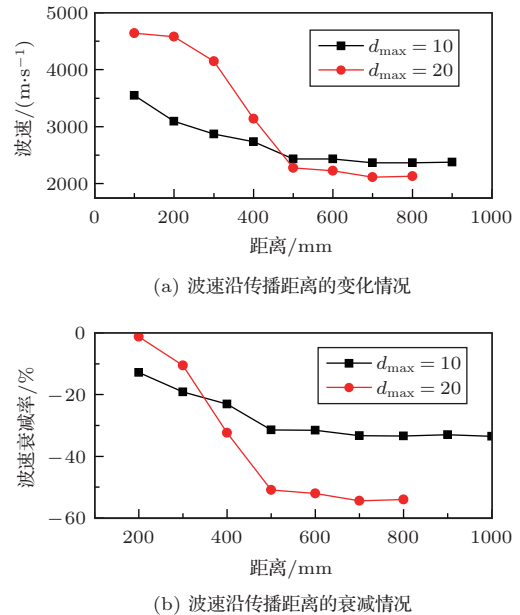


图5 骨料最大粒径对波速的影响

Fig. 5 Influence of the maximum aggregate size on wave velocity

2 基于修正波速的 AE 源定位方法

穷举法又称列举法、枚举法,通过对要解决问题的所有可能情况逐个进行检验,从中找出符合要求的答案。穷举法最大的缺点是通过牺牲时间来换取答案的全面性。在 AE 无损检测过程中,由于 AE 传感器阵列反馈的信号能量各不同,这使得初步判别声源潜在区域成为可能,此时将穷举对象局限于已缩小的待检验区域内,则可提高穷举法的定位效率。此外,穷举法的数学描述中假定波速已知且为常数,

若在调用波速时考虑传播距离的影响,则可进一步提高定位精度。基于此,本文建立了基于修正波速的区域穷举法定位 (Region exhaustive localization method based on the modified wave velocity, RELM-MV),算法主要分为6个步骤:

(1) 声源潜在区域: 根据传感器激发顺序及能量高低确定声源潜在区域。传感器与AE源的距离越近,则衰减越小,因此探测到最大幅度AE信号的探头将最靠近AE源,如果再进一步考虑接收到第二大幅度信号的传感器,可以进一步缩小AE源存在的区域,如图6所示。

(2) 节点划分: 将节点定义为待检验的假定AE源。节点间距可按试件短边的1%、2%、5%及10%选取,节点间距越小则定位精度越高,但是计算也更加耗时,如图7所示。

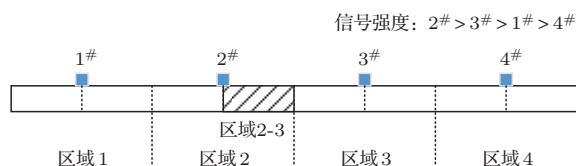


图6 基于最高和第二高输出信号的声源潜在区域
Fig. 6 The primary location area based on highest and second high output signals



图7 节点划分及其坐标
Fig. 7 Principle of node division

(3) 节点波速: 节点波速 v 表示AE由节点位置传播至传感器位置时的平均速度。每个节点波速均与其传播距离相关,该值反映了AE的衰减现象。根据前文关于AE波速衰减规律的研究结论,采用公式(2)计算经过修正后的节点波速。

(4) 节点到时: 节点到时 t 表示AE由节点位置传递至传感器间所花费的时间,按式(3)计算:

$$t = x/v, \quad (3)$$

式(3)中: x 为节点坐标与传感器间的直线距离,m; v 为节点波速,m/s。

(5) 节点到时与信号到时的时差: 时差 Δ 按式(4)计算:

$$\Delta = T - t, \quad (4)$$

式(4)中: T 为传感器的信号到达时间,实测值; t 为节点到时,计算值。

(6) 声源坐标判定: 当进行一维线定位时,由于节点数量相对较少,可计算全部节点时差,取最小值对应的节点坐标为声源坐标。当进行二维、三维定位时,则根据判定误差 δ 确定声源坐标,拟定判定误差 δ 为0.1 ms,当某节点的时差 $\Delta < \delta$ 时,则该节点即为声源。

3 加载试验AE源定位

3.1 单轴压缩试验

为了验证RELM-MV法定位的可靠性,开展了受载混凝土开裂声源进行定位试验。加载的同时利用商用AE检测设备 (SAEU3H16) 采集系统进行三维定位 (时差定位法), 导出到达时间数据后按照RELM-MV方法进行三维定位,然后对比两者定位效果。

试验采用强度等级为C30的100 mm × 100 mm × 100 mm立方体试件,水泥为42.5普通硅酸盐水泥,粗骨料为粒径5~20 mm的石灰岩碎石,配合比见表1,试件采用机械拌合,振动台振捣,标准养护室养护7 d,并进行编号1~3,成型试件如图8所示。

表1 混凝土试样配合比

Table 1 Concrete sample mix proportion

水灰比	水/ (kg·m ⁻³)	水泥/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	碎石/ (kg·m ⁻³)
0.35	180	514.29	852.86	852.86

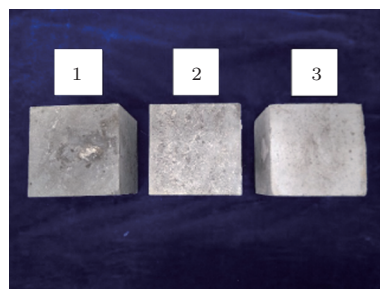


图8 混凝土试样
Fig. 8 Concrete samples

试验采用万能压力机,输出最大压力3000 kN,可实现控制恒定位移进行加载。试验保持0.2 mm/min的加载速率,试验耗时约11 min,加载系统全程记录荷载-位移曲线。AE采集参数设定

为:前置放大40 dB,参数及波形阈值45 dB,加载全程采用4通道进行声发射信号采集,传感器布设方式如图9所示。同时,采用高清摄像机记录混凝土受载全过程。

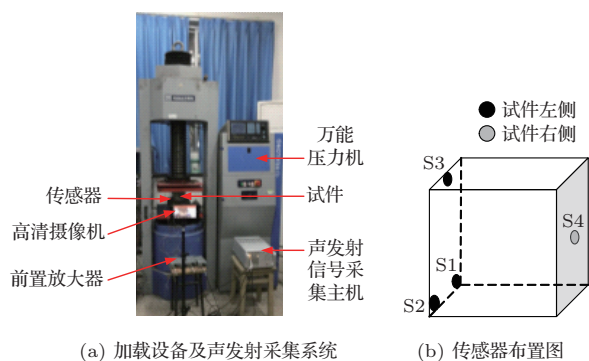


图9 试验设备

Fig. 9 Test equipments

3.2 试验结果

图10为试件在不同时间点的荷载-累计振铃计数-时程情况,在初始压密阶段,荷载较小,累计振铃计数增长较缓慢,同时累计能量曲线呈平缓上升趋势,表明试件内部产生AE活动数目较少,并且能量值均较低,试件表面无明显变化;随着荷载增大进入微裂纹萌生阶段,此阶段累计振铃计数与累计能量均无明显波动,表明此时试件内部产生的AE活动数目极少且能量极低,混凝土表面开始出现少量细微裂纹;荷载达到峰值附近时,混凝土损伤进入裂纹扩展贯通阶段,此时累计振铃计数和累计能量曲线

急剧上升,并且累积能量值存在几处突变点,表明此时试件内部AE活动较为活跃,并且高能量值的声发射事件较多,试件表面裂纹大量发展并贯通,试件表面呈现不同程度的碎片剥落,右侧表面明显向外变形隆起;试件破坏后AE信号显著减少,累积振铃计数和累积能量曲线斜率放缓,表面裂缝继续扩展延伸,裂缝宽度增大,承载力逐渐减小并丧失承载能力,试验结束。

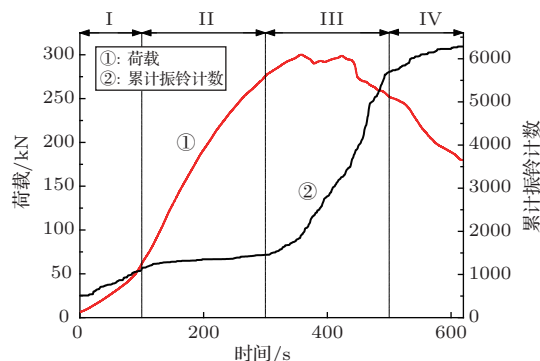
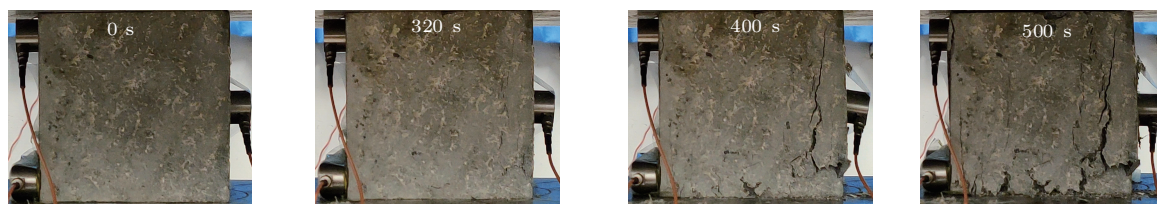


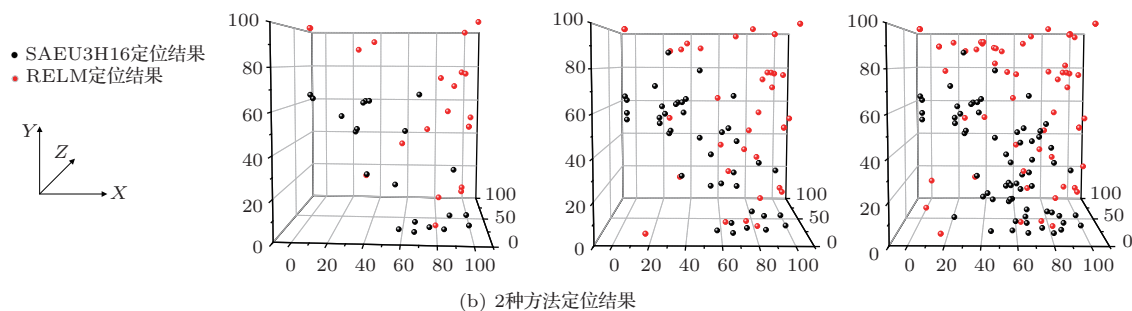
图10 荷载-累计振铃计数-时程关系曲线

Fig. 10 Load-accumulative ringing count-time history relation curve

加载试验过程中高清摄像机在0 s、320 s、400 s、500 s时混凝土X-Y平面的裂缝图像,混凝土裂缝局部化结果如图11所示。从X-Y平面投影来看,新方法的定位结果(红色圆点)更接近实际混凝土裂缝位置,这表明采用修正波速的方法来提高声源定位的精度是可靠的。



(a) X-Y平面的裂缝视频图像



(b) 2种方法定位结果

图11 AE源定位结果

Fig. 11 AE source location results

4 结论

本文对不同配合比的水泥混凝土试样施加人工激发源信号(铅笔断芯试验),计算了不同传播距离时AE波速值,分析了水灰比、砂率及骨料最大粒径对混凝土中AE波速的影响,建立了波速的距离修正模型及基于修正波速的AE源定位算法,并分析了定位效果。得到的主要结论如下:

(1) 相比砂率而言,水灰比和骨料粒径对混凝土中AE波速衰减的影响更显著。水灰比越小,基准波速越大,波速随距离的衰减越大。骨料粒径越大,基准波速越大,波速随距离的衰减越大。为了确保定位时使用相同模态的声波,对500 mm以内的AE波速采用对数函数进行了拟合,回归参数可以利用水灰比、砂率及骨料最大粒径3个材料配合比参数计算得到。

(2) 以穷举法和修正波速模型为基础建立了RELM-MV法,该方法计算流程包括6个步骤。利用单轴压缩试验AE源定位结果分析了RELM-MV法与时差定位法的定位效果,结果表明采用RELM-MV法进行定位时,定位点比时差定位法更接近实际裂缝位置,定位更可靠。

参考文献

- [1] Salinas V, Vargas Y, Ruzzante J, et al. Localization algorithm for acoustic emission[J]. *Physics Procedia*, 2010, 3(1): 863–871.
- [2] Yun H D, Choi W C, Seo S Y. Acoustic emission activities and damage evaluation of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets[J]. *NDT & E International*, 2010, 43(7): 615–628.
- [3] Marec A, Omas J H, Guerjouma R E. Damage characterization of polymer-based composite materials: multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(6): 1441–1464.
- [4] Kundu T. Acoustic source localization[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(1): 25–38.
- [5] Tobias A. Acoustic emission source location in two dimensions by an array of three sensors[J]. *Nondestructive Testing*, 1976, 9(1): 9–12.
- [6] Liang D, Yuan S, Liu M. Distributed coordination algorithm for impact location of preciseness and real-time on composite structures[J]. *Measurement*, 2013, 46(1): 527–536.
- [7] Kundu T, Das S, Martin S A, et al. Locating point of impact in anisotropic fiber reinforced composite plates[J]. *Ultrasonics*, 2008, 48(3): 193–201.
- [8] Nelder J A, Mead R. A simplex method for function minimization[J]. *Computer Journal*, 1965, 7(4): 308–315.
- [9] Barricelli N A. Symbiogenetic evolution processes realized by artificial methods[J]. *Methods*, 1957: 143–182.
- [10] Fraser A, Burnell D. *Computer models in genetics*[M]. New York: McGraw-Hill, 1970.
- [11] McLaskey G C, Glaser S D, Grosse C U. Beamforming array techniques for acoustic emission monitoring of large concrete structures[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(12): 2384–2394.
- [12] He T, Pan Q, Liu Y, et al. Near-field beamforming analysis for acoustic emission source localization[J]. *Ultrasonics*, 2012, 52(5): 587–592.
- [13] Matt H M, Lanza di Scalea F. Macro-fiber composite piezoelectric rosettes for acoustic source location in complex structures[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(4): 1489–1499.
- [14] Salamone S, Bartoli I, di Leo P, et al. High-velocity impact location on aircraft panels using macro-fiber composite piezoelectric rosettes[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(9): 887–896.
- [15] Salamone S, Bartoli I, Rhymer J, et al. Validation of the piezoelectric rosette technique for locating impacts in complex aerospace panels[C]. 18th Annual International Symposium on Smart Structures/NDE, 2011.
- [16] Betz D C, Thursby G, Culshaw B, et al. Structural damage location with fiber Bragg grating rosettes and Lamb waves[J]. *International Journal of Structural Health Monitoring*, 2007, 6(4): 299–308.
- [17] Jiao J, He C, Wu B, et al. Application of wavelet transform on modal acoustic emission source location in thin plates with one sensor[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2004, 81(5): 427–431.
- [18] Surgeon M, Wevers M. One sensor linear location of acoustic emission events using plate wave theories[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, 265(1): 254–261.
- [19] Toyama N, Koo J H, Oishi R, et al. Two-dimensional AE source location with two sensors in thin CFRP plates[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2001, 20(19): 1823–1825.
- [20] Gorman M R. AE source orientation by plate wave analysis[J]. *Journal of Acoustic Emission*, 1991, 9(4): 283–288.
- [21] 杜功焕. 声学基础[M]. 第3版. 南京: 南京大学出版社, 2012: 292–293.
- [22] Dong L, Li X, Zhou Z. Three-dimensional analytical solution of acoustic emission source location for cuboid monitoring network without pre-measured wave velocity[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(1): 293–302.
- [23] Li J, Qin L. Study on acoustic emission localization of concrete using modified velocity[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019: 6890327.
- [24] 门进杰, 郭昌灵, 王应生, 等. 钢筋混凝土板声发射波传播特性试验研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(1): 243–250, 270. Men Jinjie, Guo Changling, Wang Yingsheng, et al. Tests for AE wave propagation characteristic in RC slabs [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(1): 243–250, 270.