

DOI:10.11918/201903002

钢筋混凝土板裂缝对声发射波传播特征影响

门进杰^{1,2}, 郭琳颖¹, 兰涛^{1,3}, 魏蓉蓉¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 结构工程与抗震教育部重点实验室
(西安建筑科技大学), 西安 710055; 3. 中国船舶重工集团国际工程有限公司, 北京 100021)

摘要: 目前利用声发射技术对混凝土结构进行裂缝定位或损伤检测时, 并没有考虑已存在裂缝对声发射波传播特征的影响, 这往往会使检测结果产生较大的偏差. 为了探究裂缝参数对声发射波传播特征的影响, 对3个不同保护层厚度的钢筋混凝土板试件进行了四点静力加载破坏试验和声发射测试, 研究了裂缝深度、宽度、数量对钢筋混凝土板声发射波速和振幅衰减等传播特征的影响规律. 试验和分析结果表明: 裂缝深度对声发射传播特征的影响显著, 声发射振幅衰减随裂缝深度增大而增大, 声发射波速随裂缝深度增大而减小; 声发射波速和振幅衰减几乎不随裂缝数量、宽度两参数变化而变化. 在此基础上, 提出考虑裂缝影响的修正波速时差定位法, 进一步探讨了与采用传统时差定位法相比对钢筋混凝土损伤定位的影响, 结果显示, 基于修正波速的时差定位法对钢筋混凝土板进行损伤定位精度更高.

关键词: 钢筋混凝土结构; 声发射; 波速; 振幅衰减; 裂缝深度; 时差定位法

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)08-0088-08

Influence of cracks in RC slabs on propagation properties of acoustic emission

MEN Jinjie^{1,2}, GUO Linying¹, LAN Tao^{1,3}, WEI Rongrong¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance (Xi'an University of Architecture and Technology),
Ministry of Education, Xi'an 710055, China; 3. CSIC International Engineering Co. Ltd., Beijing 100021, China)

Abstract: The influence of existing cracks on acoustic emission (AE) wave propagation characteristics is not taken into account when using AE technology to locate cracks or detect damages in concrete structures, which often leads to large deviations in detection results. To explore the influence of crack parameters on the velocity and amplitude attenuation of AE wave in reinforced concrete (RC) slabs, four-point static loading test and AE test were carried out on three RC specimens with different protective layer thicknesses, and the influences of crack depth, crack width, and crack amount on the propagation properties of AE wave were analyzed. Tests and analysis results show that crack width and crack amount both had little effect on the velocity and amplitude attenuation of AE wave, while crack depth had significant effect. With the increase of the crack depth, the amplitude attenuation increased, and the velocity decreased. Then, a time-of-arrival location method based on variable velocity was proposed considering the effects of cracks, which was compared with traditional method in detecting crack locations. Results indicate that the proposed method had higher accuracy in detecting crack locations in RC structures.

Keywords: reinforced concrete structure; acoustic emission; wave velocity; amplitude attenuation; crack depth; time-of-arrival location

声发射是材料在变形、裂缝产生及扩展过程中由于能量瞬间释放而产生短暂的压缩波的伴生现象^[1]. 声发射检测技术具有实时动态、灵敏度高、对被检测对象的接近程度要求不高等优点, 已成为无损检测领域最具发展前景的检测技术之一. 在工程领域, 声发射现象被用来作为一种动态无损检测技术, 通过检测加载过程中结构缺陷释放的声发射信号来确定缺陷源的位置、损伤程度等特性, 对工程的

安全性评价具有重要作用^[2].

目前, 在混凝土结构方面, 声发射检测技术主要用于研究裂缝定位方法以及声发射参数和混凝土材料损伤变量之间关系的建立. 张黎明等^[3]在大理岩常规三轴试验中得到的理论起裂点与采用声发射损伤定位得到的起裂位置较吻合, 验证了采用声发射技术进行裂缝定位的有效性; 朱宏平等^[4]提出了混凝土声发射特征参数与损伤演化的关系式, 实现了采用声发射特征参数量化评估混凝土的损伤大小; 吴胜兴等^[5]指出幅度、振铃、持续时间、声发射信号能量、绝对能量、信号强度这些参数能够较好体现混凝土轴拉损伤过程的阶段性特征; 王士民等^[6]利用

收稿日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(51878542);

陕西省教育厅重点实验室项目(17JS062)

作者简介: 门进杰(1979—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 门进杰, men2009@163.com

声发射测试对盾构隧道管片结构的裂缝位置和损伤破坏过程进行了测试和分析;苏怀智等^[7]指出混凝土裂缝产生的范围与声发射事件均随加载速率变化而变化;Sagar 等^[8-9]、Reginald 等^[10]通过研究混凝土材料基本特性与声发射特征参数之间的关系,揭示混凝土裂缝产生、扩展和断裂的损伤演化规律和结构破坏机理;Tetsuya 等^[11]通过研究声发射参数与混凝土冻融循环之间的关系,得出了声发射传播速率与混凝土弹性模量相关的结论;Goszczynska 等^[12]通过研究钢筋混凝土梁裂缝不断生长过程中声发射信号参数特征的变化,总结出钢筋混凝土结构基于耐久性的损伤评价标准;门进杰等^[13]通过对钢筋混凝土梁进行四点加载试验,基于声发射参数计算得到了构件开裂与屈服时的裂缝位置,与试验吻合较好。

研究表明,在钢筋混凝土构件开裂之前,声发射波的波速、振幅等特性主要和混凝土强度、配筋情况、构件尺寸等有关,然而,当混凝土开裂之后,由于声发射波在裂缝界面会发生一定程度的折射、反射等现象,其传播特征会发生变化。当波速和振幅的变化较大时,会影响传感器所采集数据的准确性,进而影响传感器的有效工作范围。而目前在利用声发射参数对裂缝进行定位等研究时,均没有考虑已存在裂缝对声发射波传播特征的影响,这往往会导致定位误差太大,很难直接得到令人满意的结果。本文通过静力加载和声发射检测试验,研究钢筋混凝土裂

缝宽度、数量、深度对声发射波波速、振幅衰减情况的影响,并对损伤定位中采用固定波速和考虑裂缝影响的修正波速精度问题做深入的探讨,为推进声发射检测技术在结构工程的广泛应用提供技术支撑。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计了 3 个钢筋混凝土板试件 (B_1 、 B_2 、 B_3),试件尺寸均为 1 500 mm × 250 mm × 150 mm,为探究裂缝参数对声发射传播特征的影响,3 个试件保护层厚度取不同值,分别为 10、20 和 40 mm。试件尺寸及配筋情况见图 1,采用 HPB300 级钢筋(实测屈服强度为 324 N/mm²)、C30 级混凝土(实测抗压强度为 35.7 N/mm²)制作。试件制作、加载和声发射测试均在西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室完成。

1.2 静力试验加载装置和加载制度

静力试验时,采用四点弯曲加载装置,见图 2。加载装置由试验台座、分配梁、反力架、千斤顶、荷载传感器等 5 部分组成。千斤顶施加的竖向荷载通过分配梁传递到板上;采用荷载传感器测试荷载;在板支座两端和跨中布置电子位移计测试相应位移。使用手动千斤顶循环加载,首级加载至 10 kN,然后卸载,之后每级均以 7 kN 为增量进行加载,并卸载,直到试件达到破坏状态。采用 TDS602 数据采集仪采集所有数据。

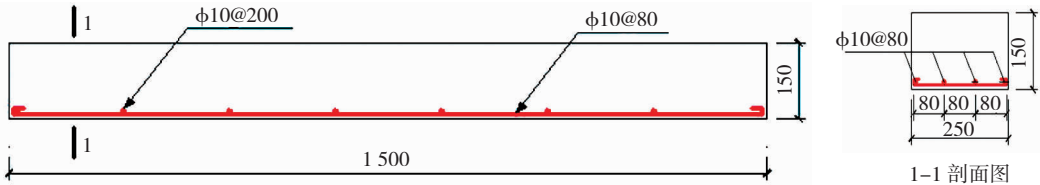
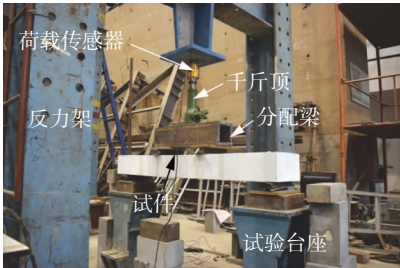
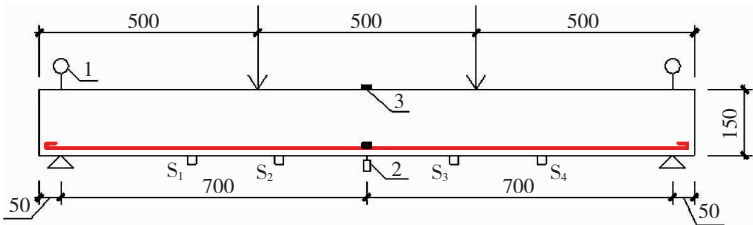


图 1 钢筋混凝土板试件配筋图 (mm)
Fig. 1 Reinforcement of RC slab (mm)



(a) 加载装置照片



(b) 加载和测量位置示意

图 2 试验加载装置 (mm)

Fig. 2 Test equipments (mm)

1.3 声发射测试方案

声发射测试仪器采用北京声华兴业科技有限公司的 SAEU2S 数字声发射系统。

1.3.1 降噪方案和传感器布置

1) 降噪方案。在进行声发射测试过程中,无法避免实验室噪声的存在。为了降低试验场地周围噪

声对所采集声发射信号的影响,需要通过设置合适的阈值剔除大部分噪声信号.首先在实验室用声发射仪器采集噪声,时间为 30 min,为达到滤噪目的,阈值的幅值需大于噪声的振幅值.重设不同阈值,采用同样方法收集噪声信号,以收集不到噪声信号的阈值为最终阈值.通过不断测试,当阈值提高到 40 dB 时,仪器收集不到噪声,阈值低于 40 dB 时,仪器收集到少量噪声,故设阈值为 40 dB 是合理的.

2) 传感器布置.为了研究裂缝参数对声发射传播特征的影响,合理的传感器布置能保证加载过程中裂缝产生的声发射信号在有效范围内被传感器接收到.试验时设置 4 个传感器 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 ,并沿试件纵向中心线对称布置于试件底部,见图 3“○”标记.

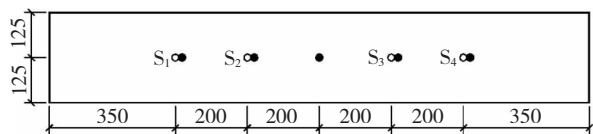


图 3 传感器和断铅位置示意 (mm)

Fig. 3 Sensor placement and lead broken position (mm)

1.3.2 断铅试验

在静力加载开始前需要进行一次断铅测试,利用断铅产生的声发射信号,设置声发射仪器的时间采集参数;静力试验开始后,在每级静力加、卸载后需再次进行断铅试验,利用断铅产生的声发射信号研究裂缝参数对声发射传播特征的影响.

1) 时间参数的设置.尽管有关文献^[14]给出了不同类型材料的时间参数取值范围,声发射信号的传播特征在不同材料中却差别很大.对于钢筋混凝土构件,混凝土强度、配合比、配筋率等因素均对其传播特征有影响,无法直接使用文献给出的时间参数值,需进行断铅试验来确定具体的声发射时间参数.

静力试验加载开始前,在试件底部进行原位断铅试验确定声发射时间参数.原位断铅试验根据 GB/T 18182—2012^[15]推荐的方法模拟声发射信号,断铅试验时采用标准的 0.5 mm 粗的 HB 铅芯,铅芯伸出长度为 2.5 mm,断铅时需保持断铅角度均为 30°,在传感器 S_1 位置附近进行 10 次原位断铅,以此模拟脉冲声发射信号.传感器 S_2 接收到 10 次模拟脉冲声发射信号,取断铅信号上升时间的平均值确定时间参数.通常把撞击鉴别时间设置为峰值定义时间的 2 倍,撞击闭锁时间比撞击定义时间略大.本文通过原位断铅试验,得到的峰值定义时间、撞击鉴别时间和撞击闭锁时间分别为 50、100 和 250 μ s.

2) 裂缝影响的研究方案.每级加、卸载后观察并记录裂缝 3 个参数所对应的数据.为了研究 3 个裂缝参数对声发射传播特征的影响,在加载前以及

每级加载后、卸载后,均要在图 3 所示 5 个断铅位置分别进行三次原位断铅试验,图 3“●”代表断铅的位置,利用声发射仪采集裂缝不同发展时期所对应的断铅信号.分析声发射信号数据并计算信号传播距离为 200 mm (传感器 $S_1 - S_2$ 、 $S_3 - S_4$ 间距)、400 mm (传感器 $S_2 - S_3$ 间距)、600 mm (传感器 $S_1 - S_3$ 、 $S_2 - S_4$ 间距)、800 mm (传感器 $S_1 - S_4$ 间距) 的波速和振幅衰减,在断铅点断铅三次,波速和振幅衰减取平均值.根据裂缝参数状态和声发射波速和振幅衰减值为依据,研究裂缝参数对声发射传播特征的影响.另外在每级开始加载至加载结束和开始卸载至卸载结束过程中,采集裂缝不断生长的声发射信号,为后面进行裂缝定位做准备.本文在定位计算时,选取出现频率较高位置处的 10 个声发射数据作为定位计算的依据.

1.4 试验现象和裂缝测试结果

在加载过程中,板的挠度随荷载的增加呈线性增长趋势.对于 3 个试件,当加载到 24 kN 左右时,在板的侧面均出现竖直微裂缝;随着荷载的增大,板侧裂缝数量、宽度、深度随之增长,卸载后裂缝闭合.当加载至第 4、5 级,裂缝增长迅速,逐渐向跨中发展.随后加载,裂缝发展缓慢,裂缝宽度明显增大.当荷载分别达到 73、66、59 kN 左右时,3 个试件的原有裂缝已经延伸到靠近板顶受压区,此时再无新裂缝产生,认为试件破坏,停止加载.卸载后,裂缝深度几乎保持不变,无法再闭合.由于试件 B_1 、 B_2 、 B_3 的保护层厚度不同,导致其有效高度不同,因此 3 个试件的极限承载力不同.

对于受弯构件,其主要受力裂缝往往出现在侧面.因此,本文以板的侧面裂缝为研究对象,在每级加、卸载后,对试件产生的裂缝数量、最大宽度和最大深度进行测量.测量时,将板侧面裂缝高度近似认为是裂缝深度,采用游标卡尺测量其宽度和深度,取所对应加载级别下原有裂缝和新产生裂缝的最大值作为最终结果,得到的数据见表 1.表中 $S_1 - S_2$ 、 $S_2 - S_3$ 、 $S_3 - S_4$ 分别表示相应传感器位置之间的裂缝情况.

2 裂缝对声发射波传播特征的影响分析

2.1 裂缝对声发射波传播特征的总体影响

2.1.1 裂缝对波速影响的总体特征

在不同加载等级下,3 个试件的波速变化曲线见图 4.随着荷载的增大,波速呈整体下降的趋势,其下降程度大致可以划分为 3 个阶段.例如,对于试件 B_1 在加载等级 1~3 之间波速的减小程度很小,在加载等级 3~5 之间的波速减小程度较大,约为

18%;之后,波速的减小程度又变得有所缓和,直到变化时的荷载等级和减小程度有不同. 加载结束. 试件 B₂ 和 B₃ 的变化规律是一致的,只是

表 1 试件的裂缝发展情况
Tab.1 Development of cracks in specimens

加载等级	裂缝数量 m /条			裂缝最大宽度 $w_{\max}$ /mm			裂缝最大深度 $d_{\max}$ /mm		
	S_1-S_2	S_2-S_3	S_3-S_4	S_1-S_2	S_2-S_3	S_3-S_4	S_1-S_2	S_2-S_3	S_3-S_4
+2	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0
-2	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0
+3	1,1,1	1,2,3	0,0,1	0.5,0.5,0.2	0.5,0.5,0.2	0,0,0.2	15,40,20	5,40,50	0,0,30
-3	1,1,1	1,2,3	0,0,1	0,0,0	0,0,0	0,0,0	15,40,20	5,40,50	0,0,30
+4	1,2,1	4,4,3	1,0,1	0.6,1,0.5	0.6,1.5,0.5	0.5,0,0.5	15,40,90	45,62.5,90	35,0,90
-4	1,2,1	4,4,3	1,0,1	0.1,0,0	0.1,0,0	0.1,0,0	15,40,90	45,62.5,90	35,0,90
+5	2,2,2	4,4,3	1,1,1	0.8,2,0.7	0.8,1.5,1	0.8,1.5,0.7	45,90,105	90,95,100	100,85,105
-5	2,2,2	4,4,3	1,1,1	0.2,0.5,0	0.2,0.5,0.2	0.2,0.5,0	45,90,105	90,95,100	100,85,105
+6	2,2,2	4,4,3	1,1,2	1,2,1.5	1,2.5,2	1,2.5,1	70,90,125	100,100,110	100,100,110
-6	2,2,2	4,4,3	1,1,2	0.3,0.5,0.5	0.3,0.5,0.5	0.3,0.5,0	70,90,125	100,100,110	100,100,110
+7	2,3,2	5,4,3	1,1,2	1.5,3.5,2.5	1.5,4.5,2.5	1.5,3.5,1.5	100,105,130	105,120,125	110,135,120
-7	2,3,2	5,4,3	1,1,2	0.4,1,1	0.4,1,1	0.4,1.5,0.5	100,105,130	105,120,125	110,135,120
+8	2,3,2	5,4,3	1,1,2	2,6,5.5	2,6.5,7.5	2,7,2.5	115,125,140	110,135,130	120,140,125
-8	2,3,2	5,4,2	1,1,2	0.5,2,4	0.5,5,2.5	1,5,1	115,125,140	110,135,130	120,140,125
+9	2,—,—	5,—,—	1,—,—	2.5,—,—	3,—,—	3,—,—	125,—,—	120,—,—	130,—,—
-9	2,—,—	5,—,—	1,—,—	1,—,—	1,—,—	1.5,—,—	125,—,—	120,—,—	130,—,—
+10	2,—,—	6,—,—	1,—,—	6.5,—,—	6.5,—,—	9.5,—,—	145,—,—	130,—,—	135,—,—
-10	2,—,—	6,—,—	1,—,—	4,—,—	4,—,—	6.5,—,—	145,—,—	130,—,—	135,—,—

注:加载等级前“+”表示加载,“-”表示卸载;每个单元格中的3个数据分别代表试件 B₁、B₂、B₃ 的测量结果,其中“—”表示无此项.

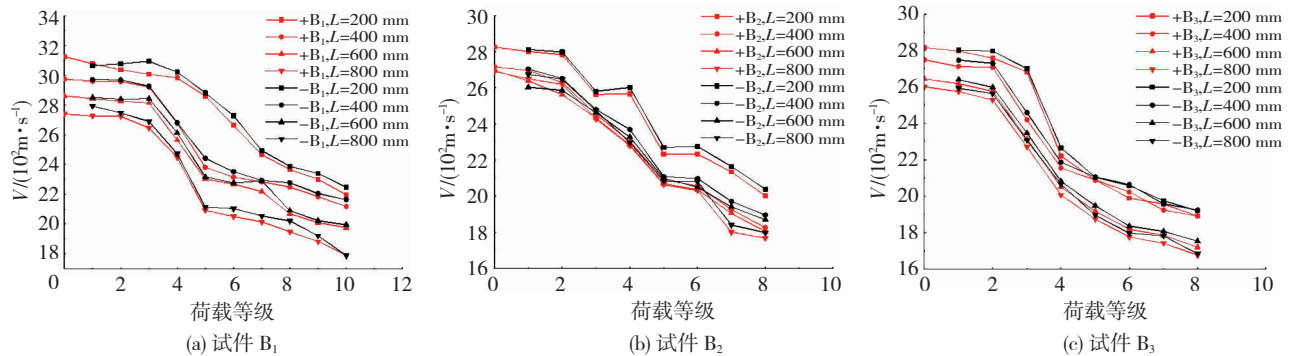


图 4 荷载-波速曲线

Fig. 4 Load-velocity curve

分析其原因,在前三级加载过程中,板基本处于弹性阶段,只有个别的细观裂缝产生,因此对波速的阻碍作用很小;而当加载等级达到 3 级时,3 个试件均开始产生宏观裂缝,并逐渐进入裂缝发展的快速期,该阶段的裂缝数量多、长度大、宽度大,且卸载后不能完全闭合,导致对波速的阻碍作用很大;之后,已开裂的裂缝逐渐趋于稳定,且新裂缝的数量逐渐变少,使波速的减小程度又趋于缓和. 从图 4 还可看出,在整体上试件 B₁ 的波速最大,试件 B₂ 次之,而试件 B₃ 的波速最小,分析原因主要是受混凝土保护

层厚度的影响,保护层厚度越大,受拉裂缝产生的越早、发展的也较为充分,进而影响波的传播,波速就越小. 而对同一试件,传播距离较大时,测得的波速相对较小,分析原因是较大传播距离内所受裂缝的综合影响更为严重,导致波速减小程度增大. 此外,从表 1 和图 4 还可看出,对于同一试件,在加载和卸载阶段,其波速变化规律是一致的,且相差很小. 而在加载、卸载阶段,裂缝的开、闭对应的裂缝宽度是不同的. 因此,可以说裂缝宽度对声发射波速的影响是很小的,几乎可以忽略.

2.1.2 裂缝对振幅衰减影响的总体特征

图 5 所示是在不同加载等级下,3 个试件的振幅衰减曲线,从图 5 可看出,随荷载等级增加,振幅衰减呈整体增大的趋势,增大趋势大致划分为两个阶段.在前两级加载时,与未加载时相比,振幅衰减程度相差很小,试件 B₁、B₂ 和 B₃ 的振幅衰减分别约为 26、22、20 dB.当荷载等级达到第 3 级后,振幅的衰减程度不断增大,有成比例增加的趋势,直到加载结束.分析原因,在前两级加载过程中,仅板内部有个别细观裂缝产生,对振幅衰减的影响很小.而当加载等级达到第 3 级时,由表 1 可知,3 个试件均开始产生宏观裂缝,随着加载等级的增加,裂缝数量、长度、宽度均进入快速增长阶段,卸载后裂缝不能完全

闭合,并逐步进入裂缝发展的快速期,裂缝数量、长度、宽度的增长使得振幅衰减呈快速增长趋势,此快速增长趋势持续到加载结束.从图 5 还可看出,试件 B₁ 振幅衰减最大,B₂ 次之,B₃ 衰减最小,分析其原因,3 个试件仅有保护层厚度不同,受其影响混凝土有效高度依次减小,混凝土的损伤程度必不相同.对 3 个试件分别分析,传播距离越大,振幅衰减越大,分析原因主要是随着传播距离的增加,其间包含的裂缝较多,对声发射波的阻碍较大,振幅衰减随之增大.此外,从表 1 和图 5 还可看出,对于同一试件,在加载和卸载阶段,其振幅衰减规律是一致的,且相差很小.同样可以说明裂缝宽度对振幅衰减的影响是很小的.

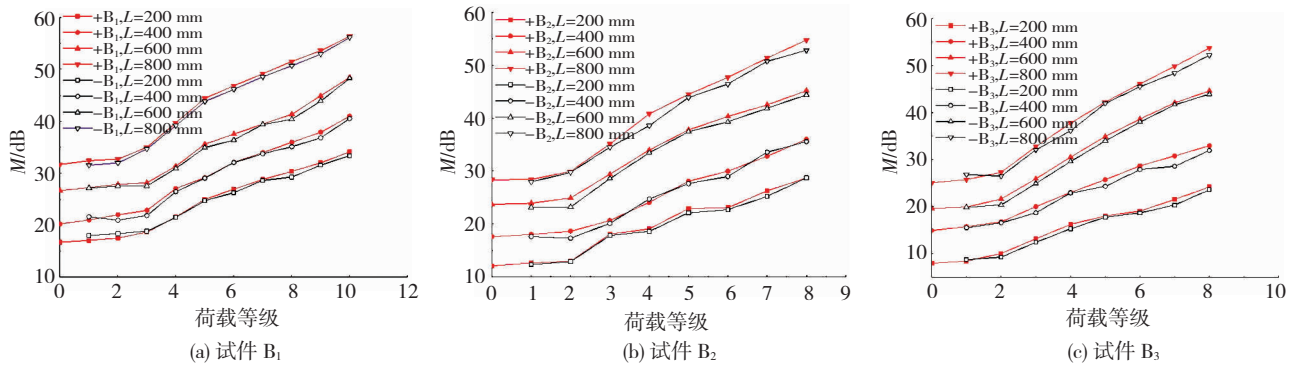


图 5 荷载 - 振幅衰减曲线
Fig. 5 Load-amplitude attenuation curve

2.2 裂缝数量对声发射传播特征的影响

由 2.1 节可知,裂缝宽度对声发射传播特征几乎没有影响,因而在分析裂缝数量这一参数影响时,只需保证裂缝深度一致而裂缝数量不同即可,故在表 1 中选择相同裂缝深度时的裂缝数量和对应的波速和振幅衰减情况进行分析.例如,对于试件 B₂,当加载到 3 步时,S₁ - S₃ 范围内和 S₂ - S₄ 范围内(间距均为 600 mm)的裂缝最大深度均为 40 mm,而对应范围内的裂缝数量分别为 3 条和 2 条,如表 2 所示,相应范围内测得的波速和振幅衰减值也见表 2.可以看出,裂缝数量由 2 条变化到 3 条时,相应的波速和振幅衰减值的变化分别为 0.4% 和 2%,基本没有变化.表 2 还给出了试件 B₂ 和 B₃ 在加载步为 4 和 5 时,S₁ - S₃ 范围内和 S₂ - S₄ 范围内的裂缝数量和相应的波速和振幅衰减情况.同样可以看出,裂缝数量对声发射波速和振幅衰减的影响很小,其变化范围均在 5% 以内.而 3 个试件在其他范围内、其他加载等级和加卸载时的影响规律是一致的.

2.3 裂缝深度对声发射波传播特征的影响

为了考虑更多裂缝的深度情况对声发射传播特征的影响,对于 3 个试件,均选取 600 mm 范围内的

裂缝进行分析.得到的裂缝最大深度 - 波速关系曲线和裂缝最大深度 - 振幅衰减曲线分别见图 6、7.

表 2 裂缝数量及对应的波速和振幅衰减值
Tab. 2 Number of cracks and corresponding wave velocity and amplitude attenuation

试件	加载等级	裂缝范围 (L = 600 mm)	m/条	d _{max} /mm	V/ (m·s ⁻¹)	M/ dB
B ₂	+3	S ₁ - S ₃	3	40	2 431.54	29.40
		S ₂ - S ₄	2	40	2 441.46	28.77
	+4	S ₁ - S ₃	6	95	2 283.81	33.97
		S ₂ - S ₄	4	95	2 292.75	33.80
	+5	S ₁ - S ₃	6	100	2 097.64	37.77
		S ₂ - S ₄	5	100	2 078.65	37.83
B ₃	+3	S ₁ - S ₃	3	50	2 313.84	25.93
		S ₂ - S ₄	2	50	2 349.57	26.80
	+4	S ₁ - S ₃	6	90	2 049.83	30.52
		S ₂ - S ₄	4	90	2 085.94	31.23
	+5	S ₁ - S ₃	6	105	1 917.48	34.90
		S ₂ - S ₄	5	105	1 986.27	35.40

从图 6 可知,随着裂缝深度的增大,波速逐渐减小,两者之间基本呈线性关系变化.分析波速减小的

原因,主要是当混凝土开裂之后,随着裂缝深度的增大,声发射波在混凝土内部传播时发生折射、反射的裂缝界面面积增大,这导致裂缝对声发射波传播的阻碍作用增大,进而造成波速的减小.由图 7 可知,裂缝深度增大,振幅衰减随之增大,两者之间的关系也基本呈线性变化.分析振幅衰减增大的主要原因,也是裂缝截面的增大对声发射波阻碍增大,导致振幅衰减更快更大.

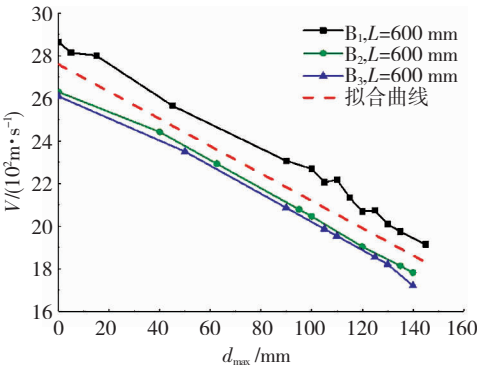


图 6 裂缝最大深度 - 波速曲线

Fig. 6 Maximum depth-velocity curve

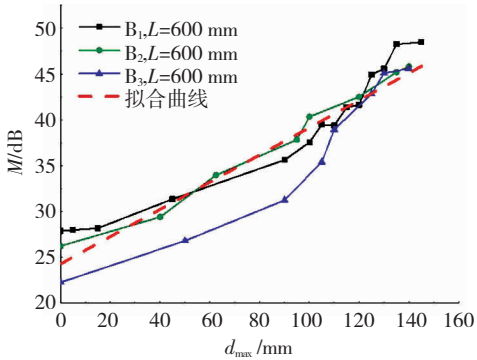


图 7 裂缝最大深度 - 振幅衰减曲线

Fig. 7 Maximum depth-samplitude attenuation curve

对图 6、7 的曲线变化规律进行线性拟合,则可分别得到裂缝最大深度 $d_{\max}$ 与波速 V ,与振幅衰减值 M 的关系式:

$$V = 2\,795.06 - 6.41d_{\max}, \tag{1}$$

$$M = 24.27 + 0.15d_{\max}. \tag{2}$$

上述两式拟合的相关系数 R^2 均为 0.89,拟合精度较高,得到的拟合曲线见图 6、7 中的红色虚线.上述两式可作为声发射波速和振幅衰减情况的修正公式,供钢筋混凝土构件声发射检测时参考.

3 基于修正波速的声发射裂缝源定位分析

3.1 基于修正波速的时差定位法的提出

3.1.1 时差定位法的基本原理

传统的时差定位方法,其基本原理见图 8.设传感器 S_1 和 S_2 之间有一声发射源,声发射信号传到

S_1 、 S_2 的时间分别为 t_1 、 t_2 ,时间差 $\Delta t = t_1 - t_2$,设 S_1 和 S_2 间距为 D ,则根据声发射波传播波速 v 即可确定源点位置 d .即

$$d = \frac{1}{2}(D - \Delta t \cdot v). \tag{3}$$

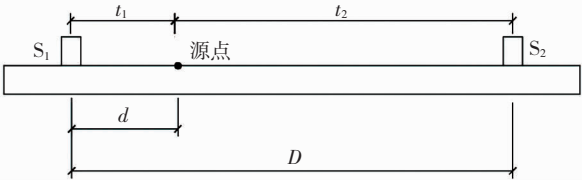


图 8 声发射时差定位图

Fig. 8 AE time difference positioning map

3.1.2 基于修正波速的时差定位法的提出

研究表明,对于钢筋混凝土构件,在利用传统时差定位法对裂缝位置进行定位时,在构件的受力初期,其裂缝定位结果比较准确.但当裂缝随着荷载的增大而扩展到某一地步时,采用传统方法定位得出的裂缝位置与其实际位置差异较大.这主要是因为没有考虑裂缝发展对声发射波速的影响,采用弹性阶段固定不变的波速造成的.

为了减小时差定位法的误差,基于上述研究结果,本文提出在利用时差定位法对钢筋混凝土构件的裂缝位置进行定位时,需要考虑最大裂缝深度对声发射波速的影响,即在构件的不同受力阶段,把测试得到的最大裂缝深度代入式(1),得到考虑裂缝影响的等效波速,或称修正波速.然后把修正波速代入式(3),从而得到钢筋混凝土构件在不同受力阶段的裂缝定位情况.将上述方法称之为基于修正波速的时差定位法.

3.2 裂缝定位结果的对比分析

声发射仪自带软件(USBAE),可以利用时差定位法根据固定波速直接给出裂缝定位结果.且以裂缝可能出现地方的事件频数表示分析得出的裂缝定位位置.以试件 B_2 、 B_3 为例,基于固定波速计算得到的裂缝定位图分别见图 9(b)和图 10(b),图中的数字①~⑥表示裂缝的编号,其对应的裂缝来自试验结果,即图 9(a)和图 10(a).图中的数字 3、4 和 5 表示荷载加载等级.利用本文提出的基于修正波速的时差定位法,也可以计算得到试件 B_2 、 B_3 的裂缝定位图分别见图 9(c)和图 10(c),同样是以事件频数表示裂缝位置.

从图 9、10 可看出,两种方法得到的裂缝数量与试验结果均是吻合的,即试件 B_2 、 B_3 的裂缝数量分别为 6 条(4 级加载后)和 4 条(5 级加载后).而两种方法对裂缝位置的定位结果显著不同,基于修正波速的裂缝定位结果不仅在整体上与试验结果符合程度更好,而且每一条裂缝的定位精度均很高.两种

方法定位结果的误差见表 3。

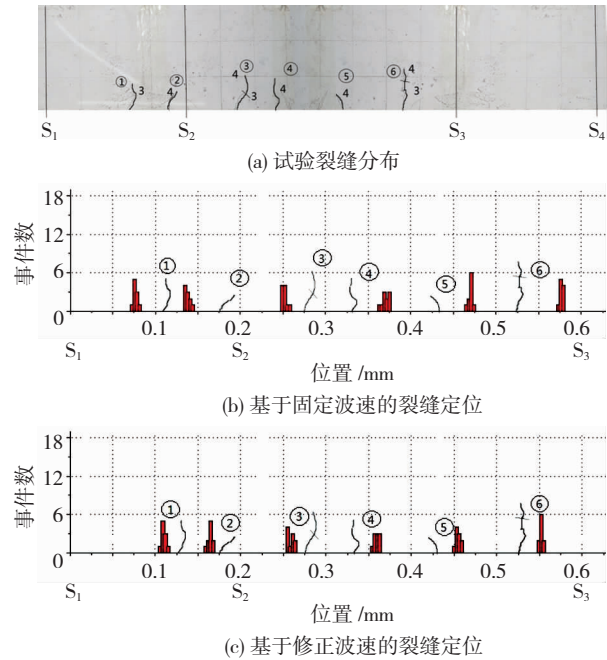


图 9 试件 B₂ 的裂缝定位结果对比

Fig. 9 Comparison of crack location results of B₂

表 3 两种方法的定位误差

Tab. 3 Positioning errors of the two methods

试件	定位方法	V/(m·s ⁻¹)	定位误差/%					
			①	②	③	④	⑤	⑥
B ₂ (n=4)	固定波速	2 695.74	4.0	3.8	2.4	3.8	4.9	5.0
	修正波速	2 283.81	1.0	1.4	1.6	3.0	2.6	2.7
B ₃ (n=5)	固定波速	2 643.44	11.5	5.9	3.9	10.4	—	—
	修正波速	1 917.48	1.0	1.5	1.9	1.3	—	—

定波速的定位方法误差相对较大,对于试件 B₂ 和 B₃ 其最大误差可达 5% 和 11.5%. 而随着加载等级的增大,试件裂缝的发展,该误差也越来越大,由于篇幅所限,本文未能列出其他荷载等级时的结果. 分析原因主要是后者没有考虑已出现的裂缝会影响声发射传播速度. 从表 3 还可看出,对于试件 B₂ 的裂缝②、⑥,试件 B₃ 的裂缝①、②、④,基于修正波速定位方法的精度更高,而此处正好靠近传感器的位置,说明离传感器越近的裂缝,利用修正波速方法的优势更加明显。

4 结 论

对钢筋混凝土板进行四点静力加载破坏试验和声发射检测,得到以下主要结论:

1) 通过加、卸载试验和声发射测试,得到了波速和振幅衰减随不同等级加、卸载荷载的变化关系. 加卸载对波速和振幅衰减的影响很小,同时表明裂缝宽度对声发射传播特征的影响很小;混凝土保护层厚度增大,波速、振幅衰减均减小。

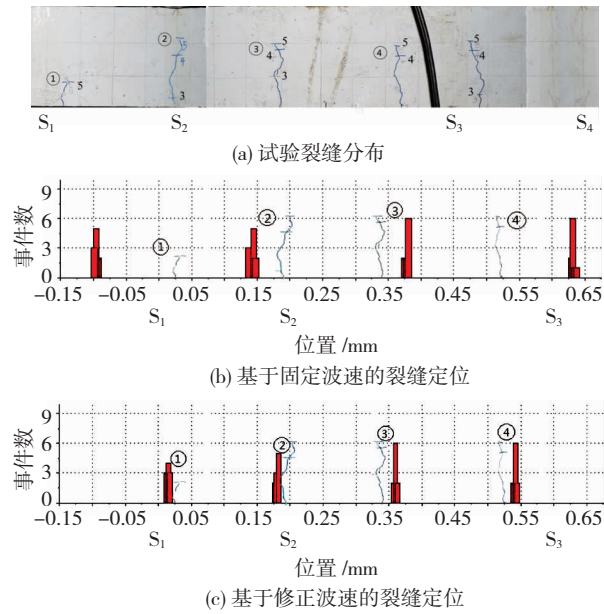


图 10 试件 B₃ 的裂缝定位结果对比

Fig. 10 Comparison of crack location results of B₃

由表 3 可知,基于修正波速定位方法的误差较小,对每条裂缝来说,误差均在 3% 以下;而基于固

2) 通过分析声发射波速、振幅衰减和裂缝在不同发展阶段对应关系,认为裂缝深度对声发射传播特征有显著影响. 得到了裂缝最大深度-波速、裂缝最大深度-振幅衰减关系式,此关系式可供钢筋混凝土声发射检测、修正波速和确定传感器的有效工作范围时参考。

3) 提出基于修正波速的时差定位法用于钢筋混凝土构件的裂缝定位. 算例分析结果表明,采用此方法定位得到的裂缝位置与试验结果吻合较好,定位误差在 3% 以内。

参考文献

[1] 纪洪广,王基才,单晓云,等. 混凝土材料声发射过程分形特征及其在断裂分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 801

Ji Hongguang, WANG Jicai, SHAN Xiaoyun, et al. Fractal characteristics of process of concrete material and application to the fracture analysis[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2001, 20(6): 801. DOI: 10.3321/j. issn:1000 -

6915. 2001. 06. 010

[2] FAN Xiangqian, HU Shaowei, LU Jun, et al. Acoustic emission properties of concrete on dynamic tensile test[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114 (1): 66. DOI: 10. 1016/j. constrbuildmat. 2016. 03. 065

[3] 张黎明,高速,任明远,等. 大理岩破坏起裂应力及断裂能特征试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(4): 69
ZHANG Liming, GAO Su, REN Mingyuan, et al. Experimental analysis on crack initiation stress and rupture energy of marble failure [J]. Journal of Civil, Architecture & Environmental Engineering, 2014, 36(4): 69. DOI: 10. 11835/j. issn. 1674 – 4764. 2014. 04. 011

[4] 朱宏平,徐文胜,陈晓强,等. 利用声发射信号与速率过程理论对混凝土损伤进行定量评估[J]. 工程力学, 2008, 25:186
ZHU Hongping, XU Wensheng, CHEN Xiaoqiang, et al. Quantitative concrete-damage evaluation by acoustic [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25: 186

[5] 吴胜兴,王岩,李佳,等. 混凝土静态轴拉声发射试验相关参数研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 196
WU Shengxing, WANG Yan, LI Jia, et al. Parameters of acoustic emission test of concrete under static uniaxial tension[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30 (5): 196. DOI: 10. 13465/j. cnki. jvs. 2011. 05. 016

[6] 王士民,于清洋,彭博,等. 封顶块位置对盾构隧道管片结构力学特征与破坏形态的影响分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49 (6): 123
WANG Shimin, YU Qingyang, PENG Bo, et al. Analysis of mechanical characteristics and failure pattern of shield tunnel segment with different position of key block [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (6): 123. DOI: 10. 15951/j. tmgcxb. 2016. 06. 014

[7] SU Huaizhi, HU Jiang, TONG Jianjie, et al. Rate effect on mechanical properties of hydraulic concrete flexural-tensile specimens under low loading rates using acoustic emission technique [J]. Ultrasonics, 2012, 52 (7): 890. DOI: 10. 1016/j. ultras. 2012. 02. 011

[8] SAGAR R V, PRASAD B K R. An experimental study on acoustic emission energy as a quantitative measure of size independent specific fracture energy of concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25 (11): 2349. DOI: 10. 1016/j. constrbuildmat. 2010. 11. 033

[9] SAGAR R V. Acoustic emission characteristics of reinforced concrete beams with varying percentage of tension steel reinforcement under flexural loading [J]. Case Studies in Construction Materials, 2017, 6 (6): 162. DOI: 10. 1016/j. cscm. 2017. 01. 002

[10] REGINALD B K, SRINATH R L, ZACHARY C G, et al. Correlation between thermal deformation and microcracking in concrete during cryogenic cooling [J]. NDT & E International, 2016, 77(1): 1. DOI: 10. 1016/j. ndteint. 2015. 09. 002

[11] TETSUYA S, HIDEHIKO O, RYUICHI T. Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze-thawed concrete [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 2347. DOI: 10. 1016/j. constrbuildmat. 2010. 05. 005

[12] GOSZCZYNSKA B, SWIT G, TRAMPCZYNSKI W. Analysis of the microcracking process with the Acoustic Emission method with respect to the service life of reinforced concrete structures with the example of the RC beams[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2015, 63(1): 55

[13] 门进杰,朱乐,李欢,等. 钢筋混凝土梁声发射检测参数设置和受力特征试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(6): 793
MEN Jinjie, ZHU Le, LI Huan, et al. Experimental research on the acoustic emission detecting parameters and mechanical behaviors for reinforced concrete structure[J]. Journal of Xi’ an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2015, 47 (6): 793. DOI:10. 15986/j. 1006 – 7930. 2015. 06. 005

[14] 杨明伟. 声发射检测[M]. 北京:机械工业出版社,2005:55
YANG Mingwei. Acoustic emission detection [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005: 55

[15] 金属压力容器声发射检测及结果评价方法; GB/T 18182—2012 [S]. 北京:中国标准出版社, 2012: 3
Acoustic emission examination and evaluation of metallic pressure vessels: GB/T 18182—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012: 3

(编辑 赵丽莹)