

文章编号:1674-2974(2010)11-0024-07

普通混凝土和橡胶混凝土弯曲损伤过程的声发射研究*

张亚梅^{1†}, 王超^{1,2}, 路宜¹, 马爱斌²

(1. 东南大学 江苏省土木工程材料重点实验室, 江苏 南京 211189;

2. 河海大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:研究了不同强度的普通混凝土及橡胶混凝土在静态弯曲加载条件下的抗弯性能及其破坏过程的声发射性能. 力学性能测试结果表明, 橡胶混凝土的抗折强度高于同等抗压强度的普通混凝土. 采用声发射系统对加载全程进行了信号采集. 结果表明, 随着普通混凝土强度的提高, 弯曲过程中的声发射信号的活度减小, 而信号的强度增大. 橡胶混凝土的声发射信号的活度和强度均小于普通混凝土. 对声发射信号的强度和活度的分析表明, 在相同加载条件下, 橡胶混凝土的损伤程度比相同抗压强度的普通混凝土小, 这与两种混凝土反映出的宏观性能的差异是一致的. 应用声发射信号定位研究了混凝土的损伤区域, 定位分析结果与实际观察结果一致.

关键词:橡胶混凝土; 声发射; 损伤

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Investigation of the Damage Process of Ordinary Concrete and Rubberized Concrete Under Bending Load by AE

ZHANG Ya-mei^{1†}, WANG Chao^{1,2}, LU Yi¹ MA Ai-bin²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, Southeast Univ, Nanjing, Jiangsu 211189, China;

2. School of Material Science and Engineering, Hohai Univ, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The bending performances of different ordinary concretes and rubberized concrete by AE technology were investigated. Acoustic emission signals were also collected to analyze the damage process under bending test. The rupturing strength of rubberized concrete was found to be greater than that of the ordinary concrete with the same compressive strength. The AE result shows that the activity of AE signals is weaker for higher strength ordinary concrete, but the intensity is higher. It is also found that both the activity and the intensity of rubberized concrete are lower than the ordinary concrete, which demonstrates that the damage degree in rubberized concrete is lighter than in the ordinary concrete under static bending load, and this may account for the higher bending strength of rubberized concrete. The results of AE location analysis corresponds well with the actual damage area observed during the test.

Key words: rubberized concrete; acoustic emission; damage

* 收稿日期:2009-12-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50778039);国家 973 项目资助(2009CB623200)

作者简介:张亚梅(1968-),女,江苏如皋人,东南大学教授

† 通讯联系人, E-mail: ymzhang@seu.edu.cn

声发射技术灵敏度高、可动态实时监测材料内部微观结构变化,作为一种成熟的无损检测方法已被广泛应用于航空航天、石油化工、材料试验等领域,是一种颇具活力和发展前景的新方法,对材料及其结构性能的研究具有很大的促进作用。

20 世纪 50 年代,德国科学家 Kaiser 根据前人的工程经验将声发射和材料的力学过程联系起来^[1]。1970 年,Green 首次明确指出声发射与混凝土的破坏全过程是相关联的^[2]。1991 年 Ohtsu 研究了混凝土破坏机理,并取得了较好的效果^[3]。1995 年,董毓利^[4]建立了混凝土受压损伤本构模型,并用反映声发射特性的损伤能确定了模型中的损伤因子。之后又有不少研究者将声发射运用到混凝土损伤因子的测定,从而确立了声发射在混凝土研究领域的重要地位。1999 年,陈兵^[5]等得出了集料尺寸影响混凝土断裂性能的结论。2001 年 Keru Wu^[6]以及 2006 年 Bing Chen^[7]得出了集料尺寸与混凝土断裂韧度的相关关系。2002 年,Ohtsu 等根据声发射数据提出了一种评估损伤的方法^[8]。2006 年,Thummen 等得到了不同疲劳阶段的声发射特征^[9]。到目前为止,声发射技术的研究对象已从由金属为主扩展到岩石、混凝土、复合材料、陶瓷、木材等几乎所有的固体材料。

橡胶混凝土是在普通混凝土中加入了橡胶颗粒的混凝土。与普通混凝土相比,橡胶混凝土具有优异的抗裂性、抗冻性和疲劳性能等^[10-13]。美国等已将橡胶混凝土用于铺设试验路段路面,取得了很好的效果。然而,关于橡胶混凝土的损伤破坏机理方面的研究还很少。本文采用声发射技术研究不同强度的普通混凝土及橡胶混凝土在弯曲荷载下的损伤破坏过程,并对损伤区域进行定位研究,以期掌握不同混凝土损伤破坏过程的声发射特性,为运用声发射技术研究混凝土的损伤破坏过程提供理论支撑。

1 试验原材料、配合比及试验设计

1.1 原材料

水泥:南京江南水泥厂生产的“金宁羊”牌 P·II 42.5R 硅酸盐水泥;石子:粒径为 5~20 mm 连续级配的玄武岩碎石;砂:普通黄砂,中砂,细度模数 2.4;橡胶颗粒:南通某公司生产的 10~14 目废弃轮胎橡胶颗粒;外加剂:江苏省建科院生产的 JM-PCA 聚羧酸系高效减水剂。

1.2 配合比及成型养护

试验以设计抗压强度为 C50、C60 和 C70 等级的普通混凝土计算配合比,同时配制了 C50 强度等级的橡胶混凝土,每种混凝土各成型 3 个立方体试样(用于测试抗压强度)和 3 个长方体试样(用于弯曲试验)。橡胶混凝土是以 C50 的普通混凝土为基准,用 10~14 目的橡胶颗粒取代砂,1 m³ 混凝土中橡胶混凝土的掺量为 63 kg。为了比较同等抗压强度的橡胶混凝土与普通混凝土的弯曲损伤过程,橡胶混凝土采用了较低的水灰比。混凝土中加入了适量的 JM-PCA 减水剂改善新拌混凝土流动性,混凝土的坍落度控制在 160~200 mm 之间。各组混凝土的配合比见表 1,其中 KB 表示基准普通混凝土,RC 表示橡胶混凝土,R 表示橡胶颗粒。

弯曲试验所用混凝土试件采用 100 mm×100 mm×400 mm 的长方体试块,成型后的试样经 24 h 标准养护后脱模,并送往标准养护室中养护 28 d。

表 1 混凝土配合比及抗压强度
Tab. 1 Mix proportion of raw materials

| 试件 | W/C | C/(kg·m ⁻³) | W/(kg·m ⁻³) | S/(kg·m ⁻³) | G/(kg·m ⁻³) | R/(kg·m ⁻³) | 抗压强度/MPa |
|--------|------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| KB C50 | 0.53 | 377 | 200 | 729 | 1 094 | 0 | 50.5 |
| RC C50 | 0.34 | 470 | 160 | 452 | 1 168 | 63 | 50.6 |
| KB C60 | 0.40 | 425 | 170 | 614 | 1 191 | 0 | 64.3 |
| KB C70 | 0.31 | 484 | 150 | 706 | 1 060 | 0 | 71.0 |

1.3 试验方法及主要参数

弯曲试验在 MTS810 上进行。在弯曲加载过程中同步采用 PCI-2 AE 声发射系统对试验过程中的声发射信号进行实时采集。声发射信号采集时采用 6 个传感器(为以后进行定位分析),固定于试件上下表面,由于 4 点弯曲的损伤主要产生于中间 100 mm 段,故将传感器分布于试件中截面两侧 100 mm 处,如图 1 所示。传感器选用 R6 型,其中心频率为 60 kHz。

根据文献^[3,8,14]和以往试验经验,声发射仪的固定门槛值设为 40 dB,前放增益设置为 40 dB,滤波设置为 20~400 kHz,定时参数为峰值鉴别事件(PDT,为确定 Hit 信号的上升时间而设置的新最大峰等待时间间隔):50 μs;波击鉴别事件(HDT,为确定 Hit 信号的终点而设置的等待时间间隔):200 μs;波击闭锁事件(HLT,为避免反射波或迟到达的干扰而设置的关闭测量电路的时间间隔):300 μs。使用凡士林作为耦合剂,将声发射传感器黏贴于打磨光滑的试样表面。试验前,通过断铅试验检查声发射探头和试样的耦合情况。经过预实验,发现这些

设置和措施可有效地排除外部的撞击、摩擦等机械噪声,只接收断裂区附近产生的声发射信号。



图1 声发射信号采集用传感器分布图

Fig. 1 The location of the sensors for AE test

试验加载方式为先载荷控制,加载速度为 1 kN/min;当力达到峰值荷载后采用位移控制,加载速度为 0.05 mm/min,通过这样的加载方式可以在峰值前提高加载速率,峰值后为减小数据的离散性而放慢加载速率.试验采用 4 点弯曲的加载方式.试验过程中同步采用日本产 TMR-7200 动态数字采集仪采集应变,应变片黏贴于试件底部中间位置。

2 试验结果及分析

2.1 抗折强度和峰值应变

若试件下边缘断裂位置处于两个集中荷载作用线之间,则试件的抗折强度 f_t (MPa) 可按标准计算得出.由于试验中采用 100 mm×100 mm×400 mm 试件,所以应将测得的强度值乘以尺寸换算系数 0.85.试验结果平均值见表 2.试验测得的各个试件的典型弯曲荷载-应变曲线如图 2 所示。

试验结果表明,混凝土强度等级提高,抗折强度也相应地提高.分析比较 KB C50 和 RC C50 混凝土可知,同样抗压强度的橡胶混凝土比普通混凝土的抗折强度有所增大,增大幅度超过 20%,另外橡胶混凝土的平均峰值应变比普通混凝土增大 50%.这是由于掺入了橡胶颗粒的混凝土塑性明显增强,在受载过程中通过微裂纹的应力集中减小,因此断裂韧性提高,可承受的抗折荷载比普通混凝土大.同时,掺入橡胶可以有效地吸收裂纹起裂和扩展时释放的能量,起到了增韧减脆的作用。

表 2 混凝土弯曲试验结果平均值
Tab. 2 Bending test results of concretes

| 试件 | 峰值荷载 /kN | 峰值应变/ (10^{-6} mm·mm $^{-1}$) | 抗折强度 /MPa |
|--------|----------|--------------------------------------|-----------|
| KB C50 | 13.9 | 225 | 3.5 |
| RC C50 | 16.2 | 369 | 4.3 |
| KB C60 | 15.5 | 293 | 3.9 |
| KB C70 | 21.2 | 229 | 5.4 |

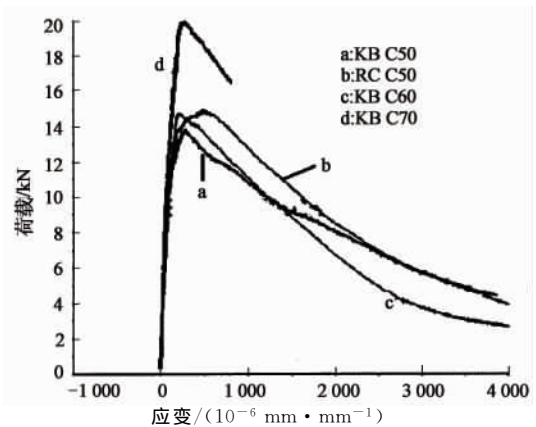


图 2 混凝土试件的弯曲荷载-应变曲线

Fig. 2 Load-strain curve of concretes under bending load

从图 2 可以看出,橡胶混凝土荷载-应变曲线峰值附近比较圆润,而普通混凝土的峰值附近曲线比较尖锐,这是因为橡胶颗粒的存在缓解了裂纹尖端的应力集中,裂纹的汇聚和扩展较缓慢.普通混凝土因其脆性较大,峰值荷载之前通过微裂纹汇聚迅速形成主裂纹,达到峰值荷载后由于宏观裂纹的迅速扩展而导致承载力迅速下降.在与其他混凝土相同的加载速率的条件下,KB C70 混凝土在极限荷载之后很快断裂.因此,同种混凝土的强度等级越高,表现出的脆性越明显。

2.2 声发射测试结果与分析

经比较发现,不同种类混凝土的声发射信号有明显差异,而同种混凝土的声发射信号则相类似.故在以下试验中只取较为典型的信号进行分析。

2.2.1 声发射信号活跃度

声发射一个通道上所探测到的声发射信号数量称为撞击数,常用于评价声发射活动性,可分为撞击总数和撞击率,分别反映声发射活动的总量和频度。

图 3 所示为各组试件的撞击总数及弯曲荷载随试件底面中部应变的代表性变化曲线。

从图 3 中可以看出,各组试件的声发射撞击总数随应变的变化规律与弯曲荷载的变化曲线有很大的相关性.在加载初期至峰值荷载前,随着荷载的增加,混凝土内部由于微裂纹的产生,声发射的撞击数迅速增长.当荷载增加到接近峰值荷载时,撞击数增长速率开始下降,峰值荷载后曲线迅速趋于平缓.这表明,在峰值附近混凝土内部的微裂纹汇聚形成宏观裂纹,损伤源只集中在局部区域,撞击累计总数也不再有明显的增加。

比较各强度普通混凝土的撞击数随应变的变化可以发现,随着普通混凝土强度的升高,撞击累计总数减小.这说明高强度普通混凝土在弯曲折断过程

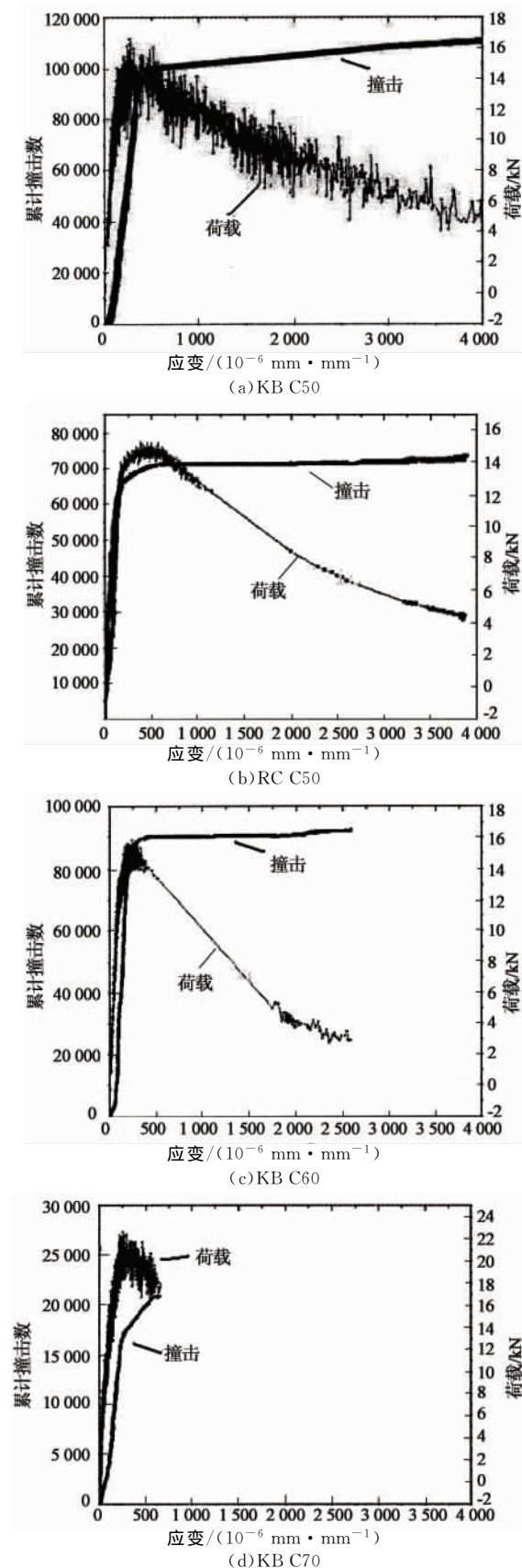


图 3 撞击总数、弯曲荷载-应变曲线

Fig. 3 Accumulative hit number, bending load-strain curve

中表现出明显的脆性断裂的可能性增大, 裂纹一旦

形成, 便迅速沿着一个主要路径扩展, 达到峰值荷载时便瞬间破坏, 延伸性小, 撞击累计总数也因此得不到连续增长, 所以撞击总数少. 比较 C50 普通混凝土与橡胶混凝土可以发现, 普通混凝土的声发射信号活跃度大于橡胶混凝土. 在荷载峰值附近, RC 混凝土的撞击累计总数曲线斜率是缓慢变化的. 因此, 从弯曲过程中撞击累计总数增长的趋势及破坏程度方面均能说明: 掺入橡胶颗粒有效地降低了混凝土的损伤程度, 而且在峰值荷载到来之前, 损伤的演变速率明显比普通混凝土慢, 混凝土抵抗破坏的能力增强, 这对提高混凝土结构的安全性是有利的.

2.2.2 声发射信号强度

幅度是指声发射事件信号波形的最大振幅值, 与事件的大小有直接的关系, 是表征信号源强弱的特征参数. 不同类型的波源产生的信号幅度范围也不同, 因此可以用幅度来鉴别波源的类型、强度及衰减情况.

图 4 所示为各组试件的幅度值随弯曲应变的分布关系图. 图中应变所取的范围为 $0 \sim 500 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$, 主要是考虑峰值荷载过后形成了宏观裂纹, 此时位于试件底面中部的应变片的测量会存在误差, 另外对于 C70 这样的高强度的混凝土来说, 峰值过后迅速形成了宏观裂纹, 在 $500 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$ 处即折断.

从图中可以看出: 普通混凝土在加载到峰值荷载之前, 随着应变的增长, 幅值分布很密集. 普通混凝土强度越高, 幅值在加载过程中分布越密集, 幅值的范围也越宽. 对于高强度的混凝土来说, 在损伤发展的初期幅值就很高, 出现了一些大于 80 dB 的高幅值信号, 且高幅值信号贯穿整个测试过程. 这表明, 混凝土的强度越高, 脆性越大, 裂纹在荷载的驱动下迅速开裂扩展而产生高幅值的声发射信号, 损伤程度大, 速度快. 比较普通混凝土和橡胶混凝土声发射信号可以看出, 橡胶混凝土声发射信号的幅值总体要小于普通混凝土, 而且加载的中间阶段分布较稀疏, 这可能是因为微裂纹发展至橡胶颗粒后扩展受阻. 接近峰值荷载时, 声发射信号分布重新变得密集, 说明裂纹越过橡胶颗粒, 损伤有明显的增长. 且高幅值信号在峰值荷载后产生, 说明橡胶混凝土尽管在峰值荷载后承载能力下降, 但混凝土内部的损伤程度此时并没有达到最大.

图 5 所示为各组混凝土试件弯曲折断过程的撞击数与信号幅度之间的关系图. 从图中可以看出: 普通混凝土及橡胶混凝土在弯曲加载过程中撞击数均随幅度的增大而减小, 70 dB 以上的高幅度信号较少.

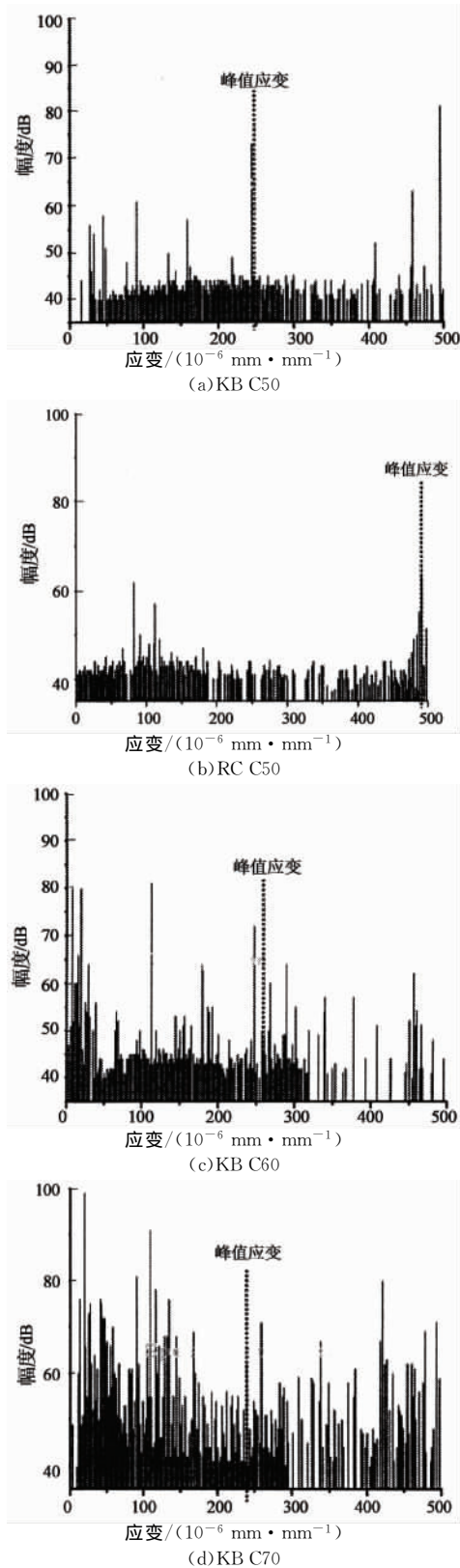


图 4 声发射信号幅度-应变曲线
Fig. 4 Amplitude of acoustic emission-strain curve

由图 4 中的幅度随应变的分布可知,这些高幅度信号主要集中在峰值荷载附近及高强混凝土的全过程.高幅度信号的产生主要源于混凝土内部高强度损伤的

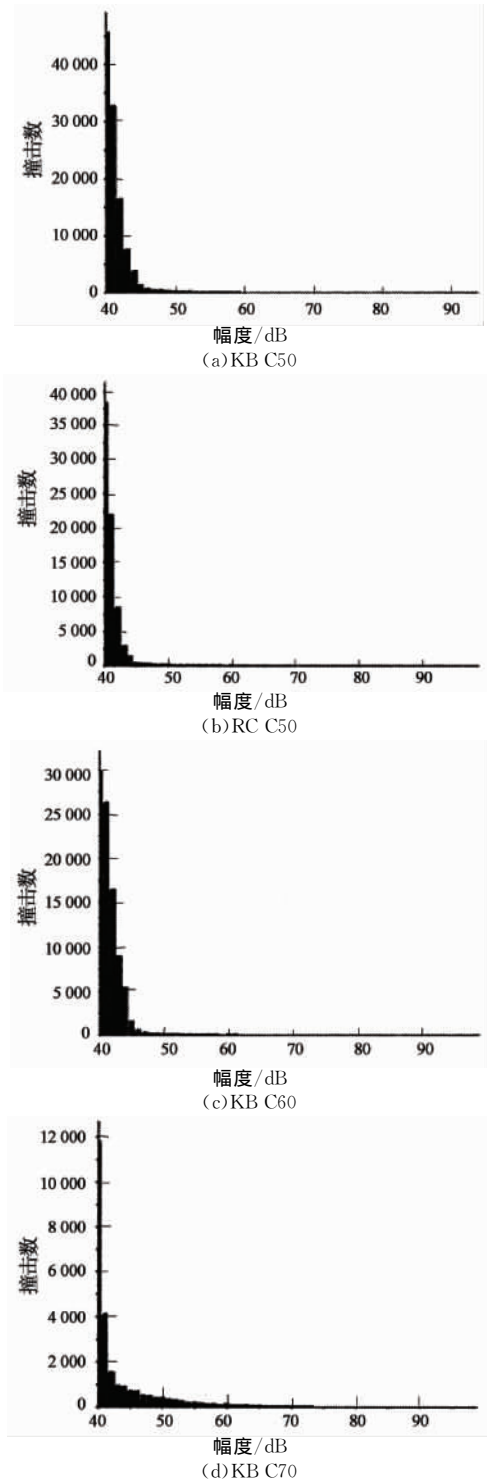


图 5 撞击数-幅度曲线
Fig. 5 Hit number-amplitude curve

迅速发展,40~60 dB 低强度信号所占比例较大,并且低幅值信号出现的撞击数也较多.对于普通混凝土,随着强度的升高,低幅度值信号所占比例减少而高幅度值信号增多,说明脆性增大.比较普通混凝土与橡胶混凝土声发射信号的幅值可以发现,橡胶混凝土的低幅值信号撞击数及高幅值信号撞击数均少于普通

混凝土,45 dB 以上的声发射信号很少。

2.2.3 声发射信号定位

声发射定位计算的基础理论与地震定位一样,是通过声速 v 及传感器收到信号的时差 Δt 的相关计算,确定其声源位置。经断铅试验,测得普通混凝土的声速为 4 600 m/s,而橡胶混凝土的声速为 4 500 m/s。

由图 6 对信号定位的空间分布可以看出,声发射信号的定位大部分集中在试件中部的纯弯段(虽

然 RC 和 C70 大部分集中在旁侧,但这也与实际抗折试验中的破坏形态相对应,见图 6 中的试样照片)。所以可以认为声发射信号主要集中在断裂面附近,定位是准确的。

比较普通混凝土时可以发现,随着强度的升高,声发射事件是逐渐减少的,这也与前文所分析的抗折试验声发射的信号活度随着强度的升高而降低是相符合的。而与相同抗压强度的普通混凝土相比,橡胶混凝土的声发射信号则较为集中。

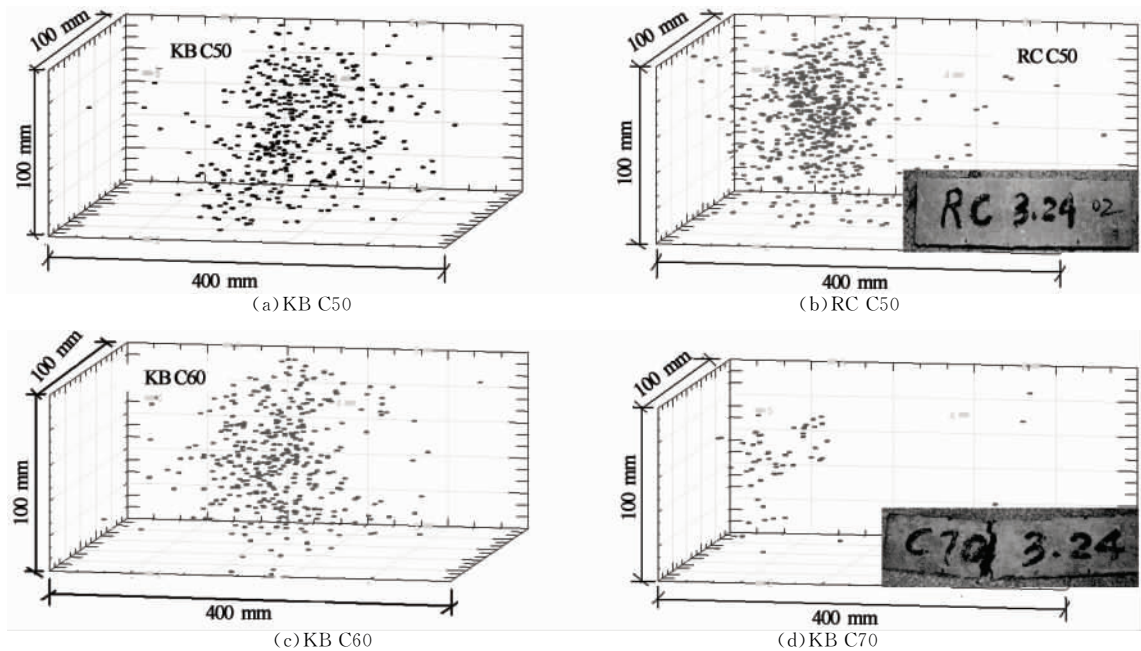


图 6 抗折试验的声发射信号定位

Fig. 6 AE location in bending tests

3 结果分析

混凝土是一种多相非均质的复合材料,水泥砂浆与集料界面是结构内部的薄弱环节,存在着微裂纹等缺陷。当试件开始承载时,原有缺陷会产生很高的应力集中,并导致微裂纹的萌生和扩展。由于加载初期试件承受荷载较小,且该阶段微裂纹的发生和发展是在亚微观和微观层次的最薄弱区域,裂纹扩展过程中不会被较大的阻力所抑制而在尖端积累大量能量,也就不会有较大的能量释放而产生强的声发射信号^[13-14]。但混凝土基体强度越高,裂纹在形成及扩展过程中在尖端积累的能量越大,声发射信

号的强度也越大。而由于应变能的集中释放,导致了高强混凝土的累计声发射信号较少。

比较普通混凝土及橡胶混凝土,从声发射信号产生的源头分析,一方面,橡胶的吸声性能使得声发射信号经过橡胶后发生衰减,信号的强度有所降低;另一方面,由于橡胶颗粒的加入使得橡胶混凝土塑性增强,在弯曲加载过程中具有较好的变形能力,通过橡胶颗粒的变形消耗部分弯曲荷载产生的能量,起到能量耗散的作用,有效地缓解了裂纹尖端的应力集中现象,抑制了裂纹的扩展,降低了混凝土的弯曲破坏损伤程度和损伤演化的速率,延迟了破坏损伤的时间。因此,与普通混凝土相比,橡胶混凝土在弯曲静载过程中产生的声发射信号总体上表现为撞

击数减少,幅值范围较小且随应变过程的分布松散,能量值较低,说明橡胶混凝土内部损伤程度低,抗折性能大幅度提高.通过声发射的定位可以看出,声发射信号主要集中在断裂面附近,这是因为断裂面附近的损伤发展较为剧烈.因此声发射定位可以很好地判断损伤发生的位置.对比橡胶混凝土和普通混凝土发现,橡胶混凝土的声发射信号较为集中,这是因为橡胶颗粒的存在阻止了微裂纹的横向扩展,使损伤区域变小.

4 结 论

本文研究了不同强度的普通混凝土及橡胶混凝土在弯曲试验过程中的声发射信号特性,并借助声发射信号的活度和强度变化规律分析了混凝土的损伤过程,得到如下主要结论:

1) 在混凝土中掺加橡胶颗粒后,混凝土的抗折强度比同等级抗压强度的普通混凝土提高了约20%,极限荷载时的应变提高了近50%.

2) 声发射结果分析表明,在相同的加载速率下,随着普通混凝土强度的提高,混凝土脆性增大,损伤演变加快,裂纹迅速汇聚成宏观裂缝并开裂,声发射源较少,声发射活度降低;同时,混凝土基体强度越高,伴随损伤的发展产生信号的幅值总体上也就越高,声发射强度升高,损伤程度也越大.

3) 在相同的加载速率下,橡胶混凝土的声发射活度和强度均小于相同抗压强度的普通混凝土,表明加载过程中橡胶混凝土内部的损伤累积缓慢且程度小,因此,抗折强度高.

4) 声发射定位可以有效地监测混凝土的损伤区域,橡胶混凝土中的声发射信号较为集中,说明了橡胶颗粒的存在限制了裂纹的扩展.

参考文献

- [1] KAISER J. An investigation into the occurrence of noises in tensile tests, or a study of acoustic phenomena in tensile tests [D]. Munich, Germany: Technische Hochschule Münschen, 1950.
- [2] GREEN A T. Stress wave emission and fracture of prestressed concrete reactor vessel material [C]//Proceedings of the 2nd Inter-American Conference on Materials Technology. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1970:635—649.
- [3] OHTSU M. Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of acoustic emission source application to in situ hydrofracturing test [J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(4): 6211—6221.
- [4] 董毓利,谢和平. 砼受压全过程声发射特性及其损伤本构模型 [J]. 力学与实践, 1995, 17(4): 25—28.
DONG Yu-li, XIE He-ping. The AE characteristic and damage model of concrete compression [J]. Mechanics and Practice, 1995, 17(4): 25—28. (In Chinese)
- [5] 陈兵,张东. 用 AE 技术研究集料尺寸对混凝土断裂性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 1999, 2(4): 303—307.
CHEN Bing, ZHANG Dong. Study of the influence of aggregate size on fracture properties of concrete by acoustic emission technique [J]. Journal of Building Materials, 1999, 2(4): 303—307. (In Chinese)
- [6] WU Ke-ru, CHEN Bing, WU Yao. Study of the influence of aggregate size distribution on mechanical properties of concrete by acoustic emission technique [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(6): 919—923.
- [7] CHEN Bing, LIU Juan-yu. Investigation of effects of aggregate size on the fracture behavior of high performance concrete by acoustic emission [J]. Construction and Building Materials, 2006, 21(8): 1696—1701.
- [8] OHTSU M, UCHIDA M, OKAMOTO T, *et al.* Damage assessment of reinforced concrete beams qualified by acoustic emission [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(4): 411—417.
- [9] THUMMEN F, OLAGNON C, GODIN C. Cyclic fatigue and lifetime of a concrete refractory [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 26: 3357—3363.
- [10] TOPCU I B. The properties of rubberized concretes [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(2): 304—310.
- [11] 胡鹏,朱涵. 橡胶集料混凝土渗透性能的研究 [J]. 天津理工大学学报, 2006, 22(4): 8—12.
HU Peng, ZHU Han. Experimental study on permeability of crumb rubber concrete [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2006, 22(4): 8—12.
- [12] PAINE K A, DHIR R K, KOPASAKIS. Use of crumb rubber to achieve freeze thaw resisting concrete [C]//Proceedings of the International Conference on Concrete for Extreme Conditions. London, United Kingdom: Thomas Telford Services Ltd, 2002:468—498.
- [13] 王立燕. 弹性橡胶混凝土的疲劳损伤性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2009.
WANG Li-yan. Research on fatigue damage property of rubberized concrete [D]. Nanjing: Southeast University, 2009. (In Chinese)
- [14] 张顺祥. 混凝土轴心受拉声发射 Kaiser 效应试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.
ZHANG Shun-xiang. Research on Kaiser effect of acoustic emission in concrete under axis tension [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (In Chinese)
- [15] 刘乃亮, 齐晷华, 周文英, 等. 吸声功能橡胶研究进展 [J]. 特种橡胶制品, 2008, 29(4): 45—50.
LIU Nai-liang, QI Shu-hua, ZHOU Wen-yin. Progress in research of sound absorption functional rubber [J]. Special Purpose Rubber Products, 2008, 29(4): 45—50. (In Chinese)