

基于声发射技术的混凝土梁桥弯剪 受力状态下损伤试验

袁 明¹, 黄 练¹, 彭 卓¹, 颜东煌¹, 刘 昀²

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南交通职业技术学院 路桥工程学院, 湖南 长沙 410132)

摘 要:为实现使用声发射参数定量评估混凝土梁的损伤,开展了试件和构件层次的混凝土梁剪切试验研究。采用声发射技术对混凝土梁的损伤过程进行动态监测,总结基于声发射理论的混凝土损伤评估方法,并提出一种改进的损伤模型,采用三次多项式模型建立声发射参数与应力水平之间的定量关系,从而推导出混凝土梁的损伤演化方程,并计算出试件与构件对应于 3 种损伤模型的基于声发射技术的钢筋混凝土梁承载能力评估的损伤量。然后,通过与已有损伤模型的计算比较,验证损伤演化方程对混凝土梁损伤进行量化评价的有效性和准确性。试验结果表明:累计声发射数分三阶段变化,线性发展阶段的声发射信号较为活跃,相对应力水平位于 0%~40%,其与材料本身含有较多微裂隙有关;而稳定增长阶段对应的累计声发射事件数与撞击数稳步增长,此时混凝土内部微裂纹稳定且缓慢发展,相对应力水平为 40%~80%;在失稳阶段累计声发射数剧烈增加,其相对应力水平超过 80%,试件内部裂缝达到失稳扩展状态。累计声发射事件曲线较好地描述了混凝土梁损伤发展变化的全过程,改进的损伤模型计算的损伤量在初始阶段发展较快,在中期趋于平缓,应力水平超过 0.8 以后损伤量发展迅速,直至试件破坏,能较好地反映混凝土梁损伤发展的三阶段变化规律。通过各损伤模型计算损伤度发现在相对应力水平较低时,试件或构件亦存在一定的损伤。

关键词:桥梁工程;声发射技术;剪切试验;裂缝扩展;损伤评估;累计声发射事件数

中图分类号:U445.7 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.02.009

Experimental investigation of static damage of concrete beam under bending-shear based on acoustic emission technology

YUAN Ming¹, HUANG Lian¹, PENG Zhuo¹, YAN Dong-huang¹, LIU Yun²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. School of Road and Bridge Engineering, Hunan Communication Engineering Polytechnic, Changsha 410132, Hunan, China)

Abstract: An experimental of a shear test of concrete beams at the specimen and component level was applied, to quantitative evaluate the damage based on the acoustic emission (AE) parameters. The damage process of a concrete beam was dynamically monitored using the AE

收稿日期:2018-11-07

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2015CB057706);国家自然科学基金项目(51108046,51678068);

湖南省自然科学基金项目(2017JJ5029);长沙理工大学湖南省工程实验室开放基金项目(16KD02)

作者简介:袁 明(1980-),男,湖南醴陵人,副教授,工学博士,E-mail:mingyuan@csust.edu.cn。

technique. Concrete damage assessment techniques based on the characteristics of the AE theory were summarized, and an improved damage model was proposed. The quantitative relationship between the AE parameters and the stress level was established using a cubic polynomial model, and a damage evolution equation of concrete beam was developed. Then the validity and accuracy quantitative evaluation of concrete beam damage by damage evolution equation were verified, compared with the existing damage model. The results show that the AE cumulative number changes in three stages, the AE signal is active during the linear development stage, with a relative stress level of 0% to 40%, and that relate to the material contains many micro-cracks. The cumulative number of AE events and the impact number steadily increase during the stable growth phase. Further, the development of micro-cracks inside the concrete is stable and slow, with a relative stress level of 40% to 80%. The AE cumulative number drastically increases during the instability phase, where the relative stress level is over 80%, and the internal crack specimen reaches an unstable extended state. The AE cumulative event curve can better describes the entire damage process of a concrete beam, the amount of calculated damage quickly increases through the improved damage evolution model, tends to smooth at the mid-term stage, and increases rapidly when the stress level is over 0.8 until the specimen fails. The damage evolution model properly reflects the three stages of concrete damage development. The specimen or component is also damaged when the relative stress level is low, according to damage degree calculating through the damage model. 4 tabs, 12 figs, 27 refs.

Key words: bridge engineering; acoustic emission technology; shear test; crack propagation; damage assessment; cumulative acoustic emission events

0 引言

混凝土梁桥是中小跨径桥梁中最主要的结构,已得到广泛的应用和发展。在运营期内,混凝土梁桥由于超载、环境等多种不利因素影响使得梁肋经常出现不同程度的斜裂缝^[1]。梁肋斜裂缝若不能及时发现与修复,将会恶化混凝土梁桥的工作条件,对桥梁结构的正常使用、耐久性和安全性造成不利影响,因此,需要寻求一种有效的技术手段来监测混凝土梁桥的损伤过程。声发射技术是一种动态的无损检测技术,能够实时检测结构内部的裂缝缺陷变化情况,可以对裂缝进行定位,并实时监测结构的内部损伤。撞击、事件和能量等声发射参数可以用来动态监测和分析结构损伤演化过程及破坏前兆信息^[2-3]。

目前,国内外许多学者针对声发射技术开展了深入研究。其中,Ohtsu 等为进一步描述声发射活动的活跃性,通过引入速率过程理论的概念,得到了混凝土应力水平和声发射参数之间的数学表达式^[4-6]。纪洪广等通过研究混凝土材料的声发射机制,总结出混凝土损伤的声发射模式,从而建立用声发射参数表达的混凝土本构方程和损伤演化方程,

并通过试验验证了演化方程的准确性^[7-8]。张明等研究指出,基于混凝土材料声发射参数和损伤量变化的一致性,不仅能监测损伤位置,亦能用于损伤量的估计,并推导出声发射参数和损伤量的关系表达式,证明了用测量到的声发射参数量化评估混凝土损伤的可行性^[9-10]。目前关于使用声发射技术监测混凝土梁剪切受力下损伤的研究相对较少,国外一般是基于声发射技术对混凝土裂纹进行分类后,采用不同的声发射参数方法来监测裂纹的扩展,并对混凝土构件的损伤进行量化描述^[11-12]或计算其在受力状态下的损伤量^[13],且大多是基于声发射参数对弯曲受力试件进行试验分析^[14-16],加载方式多为三点或四点加载,已有的应力水平和声发射参数的表达式不能完全描述混凝土梁的剪切破坏形式,缺乏对混凝土梁剪切状态下的声发射性能方面的研究等。

基于此,为建立以声发射参数表达的混凝土梁的损伤演化方程,采用声发射技术,结合混凝土梁剪切受力特点,开展试件和构件层次的混凝土梁剪切试验研究十分必要。本文首先以声发射参数为损伤特征参数,依据声发射参数在试件试验中的变化规律,导出声发射参数与应力水平之间的关系;在试件

层次探讨声发射参数和混凝土损伤量的相关性,引入声发射速率过程理论,并建立混凝土材料的损伤演化模型;与已有损伤模型进行对比分析,并通过混凝土梁构件损伤试验进行验证,以进一步评估本文模型的适用性。

1 基于声发射理论的混凝土损伤评估方法

声发射的活跃状态与混凝土内部裂纹萌生、扩展的状况密切相关,为了具体地描述和评价声发射活动的活跃性,将速率过程理论引入到声发射活动的研究中^[4]。假设,相对应力水平从 $V(\%)$ 增加到 $V+dV$,此时材料内部由声发射事件表征的概率密度函数为 $f(V)$,它是在应力水平为 V 时声发射活动的概率密度,则有

$$f(V)dV=dN/N_0 \quad (1)$$

式中: V 为相对应力水平,是当前荷载与极限荷载比值; N 为材料从初始状态到相对应力水平 V 时的累计声发射事件数; N_0 为峰值应力水平时的累计声发射事件总数。

1.1 损伤模型 A

基于混凝土材料声发射机理分析,可获得其损伤的声发射模式^[7],即其损伤程度与声发射事件数存在如下关系

$$D_A(i)=kN(i) \quad (2)$$

式中: $N(i)$ 为第 i 次加载过程中声发射事件数; $D_A(i)$ 为第 i 次加载过程中损伤扩展量; k 为试验系数,表示试验因素(试件材料、裂隙尺寸、试验设备条件及受力情况等)对声发射参数与损伤因子之间关系的影响。

已知混凝土材料声累计发射事件数 N 与相对应力水平 V 的活性函数^[4]如下

$$N=cV^a e^{bV} \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 均为声发射试验参数。

将式(2)、式(3)代入混凝土本构方程^[16],则有

$$\sigma=\varepsilon E(1-D_A)=\varepsilon E(1-kcV^a e^{bV}) \quad (4)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; E 为混凝土弹性模量。

式(4)即为用声发射事件数表示损伤因子得到的混凝土本构方程^[8,17]。一般是将试验获得的应力应变值代入式(4),求出各测点对应的 k 值,并取其均值,从而可求得混凝土损伤量。

1.2 损伤模型 B

基于累计声发射数与损伤变量变化一致的原则,可用声发射数 Z 定义混凝土结构的损伤变量

$D^{[18-20]}$,其定义为某一给定时刻产生的累计声发射数 Z 与试件断裂时出现的累计声发射总数 Z_0 的比值,即

$$D=Z/Z_0 \quad (5)$$

声发射事件数能较好反映材料内部损伤的变化情况,故选取累计声发射事件数 N 与试件断裂时的累计声发射事件总数 N_0 之比 D_B 反映混凝土的损伤程度^[21],即

$$D_B=N/N_0 \quad (6)$$

1.3 改进的损伤模型

由于结构物理力学性能存在差异,损伤模型A中模拟的声发射活性函数曲线与混凝土梁实测的声发射累计曲线可能存在较大差异。目前,关于混凝土梁的声发射损伤研究较少,本文拟通过试验结果总结适用于混凝土梁的声发射函数模型。

根据式(1)可知: $\int_0^1 f(V)dV=1$,表明可用此模型的 $f(V)$ - V 曲线所包含的面积来定量计算混凝土的损伤量,即

$$D=\int_0^V f(V)dV \quad (7)$$

由式(1)得概率密度函数的表达式

$$f(V)=\frac{1}{N_0} \frac{dN}{dV} \quad (8)$$

借鉴声发射活性函数模型,假定混凝土材料累计声发射事件数和相对应力水平的数学模型为

$$N=p(V) \quad (9)$$

式中: $p(V)$ 为含应力水平的表达式。

则相对应力水平为 V 时,混凝土材料损伤量 D_C 的表达式为

$$D_C=\frac{1}{N_0} \int_0^V dp(V) \quad (10)$$

2 混凝土梁剪切试验

为监测混凝土梁的梁肋斜裂缝发展,首先设计了Z形试件的剪切试验模拟其梁肋剪切受力状况,采用声发射仪器动态监测,总结声发射参数随应力水平的变化规律,依据变化规律提出采用多项式模型建立声发射事件数-应力水平的数学表达式,求得概率密度函数,积分得到试件的损伤演化方程。为验证损伤演化方程在评估混凝土梁损伤方面的适用性,进一步设计了混凝土梁构件的损伤试验。

2.1 混凝土 Z 形试件损伤试验

研究表明Z形试件能得到以剪切受力为主的剪切面,可较好模拟混凝土梁在剪切受力状态下的

损伤^[22-26],试件主要在剪切面开裂,故主要考虑监测剪切面的声发射信号,同时为了减小试件缺口对声发射信号传递的影响,选择靠近剪切面布置传感器,在试件正反面各布置 3 枚声发射传感器。采用美国物理声学公司(PAC)的 Micro-II Samous 数字声发射仪进行检测,分析处理软件为 AEwin™,传感器类型为 R6I,利用专用耦合剂耦合,并用胶带固定,设置阈值为 40 dB,基本可避免测量到外界噪声。试件厚度为 10 cm。为了消除偏心受压的影响,在作动器与试件之间设置球铰支座。当荷载达到 60 kN 时,试件完全破坏。为了验证试验的重复性,制作 6 个试件进行平行测试。

试件采用 C50 混凝土,按标准养护 28 d 后进行试验。为使试件裂缝首先出现在剪切面上,通过粘贴钢板对其进行加固处理,钢板厚度为 3 mm,在试件两侧贴应变花并采用 DH5922 动态应变仪测定其应变。试验使用 PMW800-2000 型电液式脉动疲劳试验机分级施加竖向荷载,从 0 kN 开始逐级加载,直至试件破坏。经测试,该试件平均抗剪强度为 7.34 MPa,其尺寸及加载照片见图 1、图 2,试件加载破坏情况如图 3 所示。

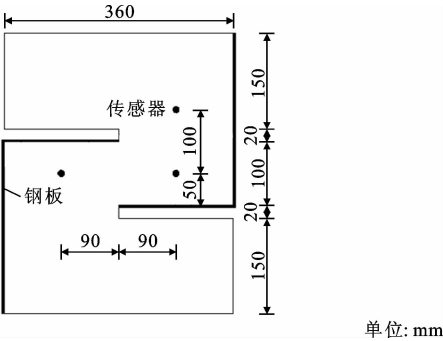


图 1 试件尺寸
Fig. 1 Specimen size

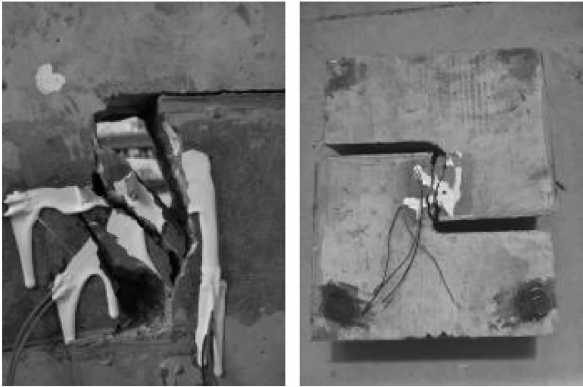
从现场加载照片可以看出,Z 形试件起裂面在剪切面剪应力最大处,随着荷载慢慢增加,试件剪切面上、下 2 条裂缝分别往与最大主拉应力垂直方向慢慢扩展,最终发生脆性破坏。

为了分析试件在荷载作用下全过程的声发射特征,绘制了累计声发射事件数和撞击数随应力水平的变化曲线,如图 4 所示。为了排除仪器开始加载时系统噪声等因素的干扰,本文提取 10% 以上相对应力水平的声发射信号。

声发射信号来源于结构内部的变化,故声发射参数的变化可以真实反映试件内部的发展情况。通过线性拟合各区域声发射曲线斜率可看出,累计声



图 2 加载照片
Fig. 2 Loading photo



(a) 剪切区破坏形貌 (b) 试件破坏全貌

图 3 加载破坏照片
Fig. 3 Loading damage photos

发射事件和撞击数的变化趋势相同,在相同应力水平时刻,累计计数直方图都存在明显的突变点,且声发射曲线斜率变化近似,说明每接收到一个事件信号也伴随着撞击数的接收,两者表现出一致性,能较好反映结构在受载过程中的内部损伤变化和声发射源的活跃性。累计声发射数的变化过程可以归纳为 3 个阶段:线性发展阶段,稳定增长阶段,失稳阶段。

(1)阶段一,线性发展阶段。

相对应力水平位于 0%~40%,在低应力水平下接收到较高的声发射信号,此阶段声发射信号较为活跃,形成了第 1 个峰值,表明材料含有较多的原生微裂隙。

(2)阶段二,稳定增长阶段。

相对应力水平位于 40%~80%,累计声发射数曲线较为平缓,拟合曲线斜率相对较小,此阶段的累计声发射事件和撞击数持续稳定增长,混凝土内部微裂纹处于相对稳定和缓慢发展阶段。

(3)阶段三,失稳阶段。

相对应力水平超过 80%以后,拟合曲线斜率呈

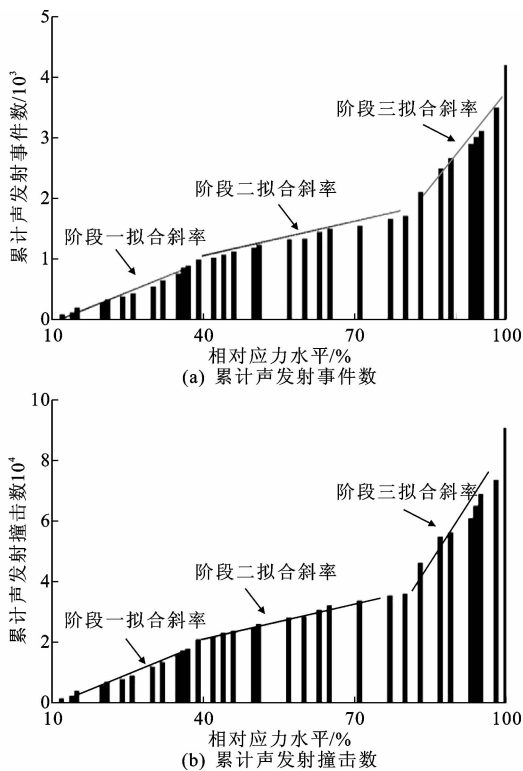


图 4 试件累计声发射计数与应力水平直方图
Fig. 4 Cumulative AE count and stress level histograms

迅速上升趋势,累计声发射数大幅增加,最终达到峰值,表明试件内部发生了剧烈变化,裂缝失稳扩展,最终试件完全破坏。

根据累计声发射数和应力水平直方图的变化特点,本文采用三阶多项式函数建立声发射事件数-应力水平的数学模型,即

$$N=p(V)=aV^3+bV^2+cV+d \quad (11)$$

式中: d 为声发射参数。

为比较声发射活性函数模型和三阶多项式模型的适用性,分别采用式(3)、式(11)统计回归处理得到累计声发射事件数和相对应力水平曲线的相关参数,如表 1、表 2 所示。可知,2 种模型的相关系数都较高,说明该模型适用性良好,对于定量评估混凝土梁损伤有较好的参考价值。

表 1 活性函数模型拟合参数

Tab. 1 Fitting parameters of active function model

声发射参数	a	b	c	相关系数
拟合结果	0.26	2.196	401.4	0.9783

表 2 三阶多项式模型拟合参数

Tab. 2 Fitting parameters of three order polynomial model

声发射参数	$a/10^4$	$b/10^4$	$c/10^4$	$d/10^4$	相关系数
拟合结果	1.299	-1.84	1.029	-0.087 5	0.985 2

通过 2 种函数模型回归处理得到了累计声发射

事件数与应力水平关系曲线,如图 5 所示。

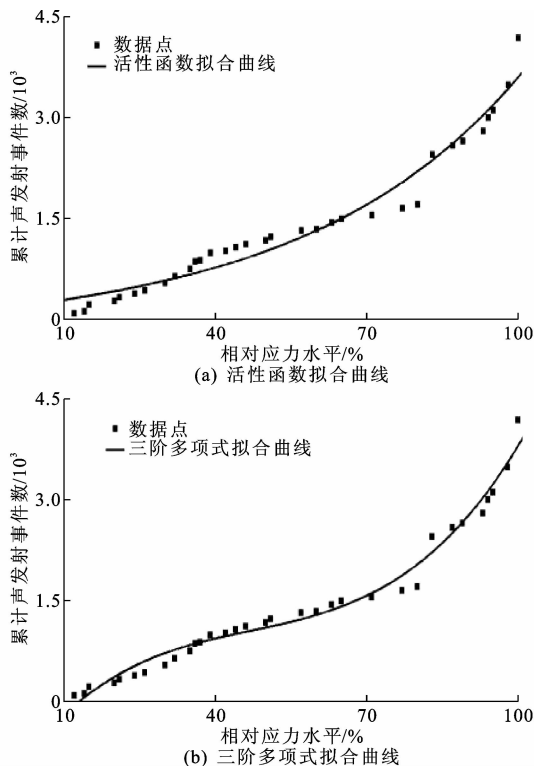


图 5 累计声发射事件数与应力水平关系曲线
Fig. 5 Cumulative AE events and stress level curve

由图 5 可知:实测数据和 2 种模型的拟合曲线都有很高的吻合度,但活性函数模型斜率处于不断增长的趋势,说明三阶多项式模型能较好反映声发射参数的三阶段变化规律。

为评估 Z 形试件的损伤状态,可通过各损伤模型定量计算出试件的损伤量。通过试验采集到声发射参数,然后对活性函数和三阶多项式函数进行统计回归处理并求得其试验系数,此时损伤因子只是与应力水平相关的函数,可计算出在不同应力水平下试件的损伤量。

损伤模型 A:将试验测得的应力应变值代入式(4),求得 $k=2.475 \times 10^{-4}$,则得到损伤模型 A 的损伤因子表达式为

$$D_A=kN=0.099\ 3V^{0.26}e^{2.196V} \quad (12)$$

损伤模型 B:采用实测声发射事件数的相对变化定义混凝土的损伤因子。实测累计声发射事件总数 $N_0=4\ 205$,故损伤模型 B 损伤因子表达式为

$$D_B=N/4\ 205 \quad (13)$$

改进的损伤模型:对三阶多项式求导代入式(8),得到概率密度函数的表达式为

$$f(V)=\frac{1}{N_0}(3aV^2+2bV+c) \quad (14)$$

对式(14)积分,得到试件的损伤演化方程为

$$D_c = \frac{aV^3 + bV^2 + cV + d'}{N_0} = \frac{N - d + d'}{N_0} \tag{15}$$

式中： d' 为对式(14)积分后的常数项。

综合比较各损伤模型的表达式可知：3 个模型表示的损伤因子都与声发射事件数成一次函数关系。对比损伤模型 B 和改进的损伤模型可知，当常数项差值相对累计事件总数很小时，改进的损伤模型也可近似看成正比例函数，即

$$D_c = \frac{N}{N_0} + \frac{d' - d}{N_0} \approx \frac{N}{N_0} = D_B \tag{16}$$

假设： $V=1$ 时，损伤量为 1，代入式(15)，可得 $d'=660$ ，得到 $D_c = N + 215/N_0$ 。采用实测声发射事件数计算的试件损伤量比经验公式 $D_B = N/N_0$ 的结果相对较大，二者相对偏差为 $215/N_0 = 5.12\%$ ，故依此式计算，在相对应力水平较低时，试件往往会对应一定的损伤度，这与实际工程情况相符。

通过理论分析可知，由声发射事件数-应力水平三阶多项式数学模型推导得到的改进的损伤模型计算精度较高，可用于定量评价试件的损伤程度。图 6、图 7 分别为改进的损伤模型表示的试件声发射概率密度函数与相对应力水平的关系曲线及拟合损伤曲线与实测损伤值对比图。

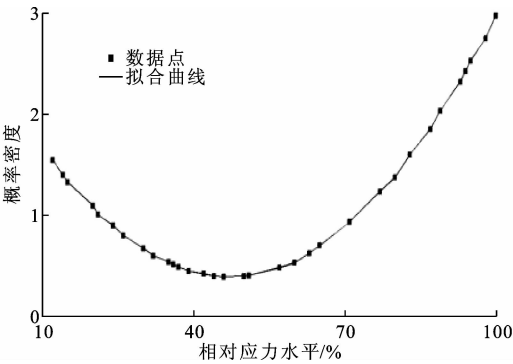


图 6 声发射概率密度函数曲线

Fig. 6 AE probability density function curve

从图 6 可看出：声发射概率密度函数为双曲线函数，试件在低应力水平下概率密度值较大，表明此刻试件声发射率较高，试件在低应力水平下存在较多的微裂缝，产生了一定的损伤；随着应力水平的提高，概率密度值变化趋于平缓，结合声发射参数的变化表明微裂缝的发展进入缓慢发展趋势。当相对应力水平大于 80% 时，试件进入失稳阶段，声发射概率密度增长速率加快，声发射率达到了较高水平，表明试件的损伤进入了快速发展阶段。

由图 7 可知：相对应力水平为 20%~60% 时，

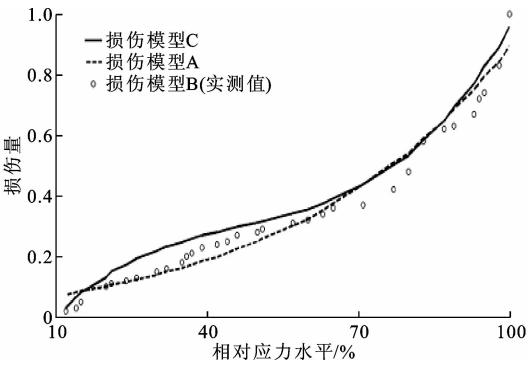


图 7 各模型计算损伤量曲线比较

Fig. 7 Comparisons of calculated damage curves of each model

各模型求得的损伤量从大到小依次为 D_c 、 D_B 、 D_A ，改进的损伤模型计算的损伤量在初始阶段发展较快，在中期趋于平缓；当相对应力水平达到 65% 时，损伤模型 A 发展较快，与改进的损伤模型求得的损伤量十分接近；相对应力水平超过 80% 以后，各损伤模型的损伤量都发展迅速，直至试件破坏。

从图 7 可知，改进的损伤模型定量评价 Z 形试件损伤量的效果较为理想。为研究改进的损伤模型量化评估混凝土梁在剪切受力状态下损伤的适用性和有效性，本文进一步设计了混凝土梁构件剪切试验。

2.2 混凝土梁剪切试验

本试验采用预应力混凝土 T 梁构件，按 30 m T 梁简支梁标准图进行缩尺模型设计^[27]，按缩尺比例 5.5 严格缩尺，梁实际长度为 5.7 m，计算跨径为 5.5 m，梁内埋置 1 根 $\Phi 15.2$ mm 无黏结的预应力钢绞线，普通钢筋为 HRB400，箍筋采用 HRB335 双肢箍，直径为 6 mm，纵向普通钢筋也采用 HRB335 钢筋，采用 C50 混凝土，14 d 立方体抗压强度为 45 MPa。加载方式为两点对称集中加载，加载装置为 MTS 液压伺服系统，剪切破坏形式为斜拉破坏。

具体截面尺寸、钢筋布置、传感器布置及试验装置如图 8~图 10 所示，配筋见表 3。本构件声发射系统采用固定阈值为 45 dB，采样频率为 2 MHz，前置放大器增益为 40 dB，峰值鉴别时间设为 250 μ s。在混凝土梁腹板正反面各布置 3 个声发射传感器（图 9 中 1#、2#、3# 传感器）接收信号。

根据式(11)对混凝土梁的声发射数据进行回归处理，得到不同应力水平下的累计声发射事件数曲线如图 11 所示，求得三阶多项式函数模型各参数如表 4 所示。为了排除仪器开始加载时的系统噪声等因素的干扰，提取 10% 以上相对应力水平的声发射

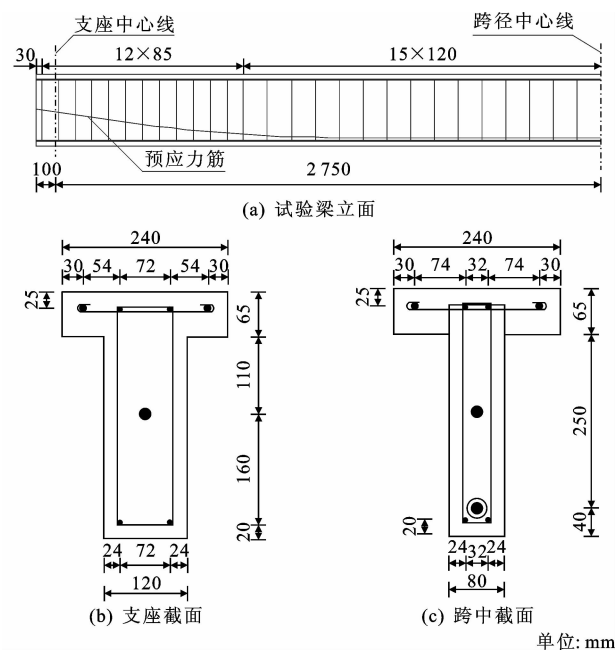


图 8 模型截面尺寸及钢筋布置
Fig. 8 Section size and reinforcements layout

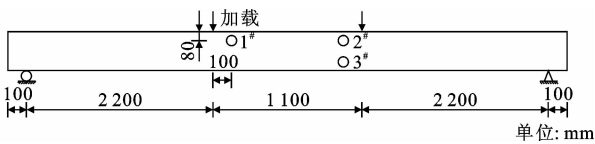


图 9 传感器布置
Fig. 9 Sensors layout

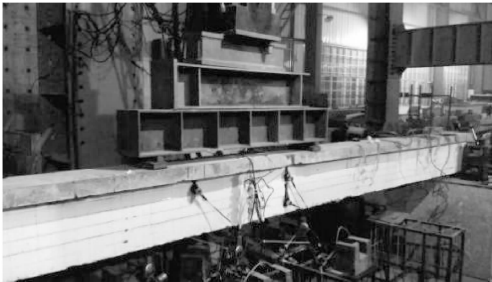


图 10 试验装置
Fig. 10 Experimental device

表 3 混凝土 T 梁配筋

Tab. 3 Reinforcement of concrete T-beam				
钢筋编号	钢筋类型	直径/mm	长度/mm	数量/根
①	HRB335	8.00	5 460	2
②	HRB335	10.00	5 460	2
③	钢绞线	15.24	6 916	1
④	HRB335	6.00	710	46
⑤	HRB335	6.00	788	8

信号。

从图 11 可知,混凝土梁实测声发射数据和三阶多项式函数曲线的吻合度较高。

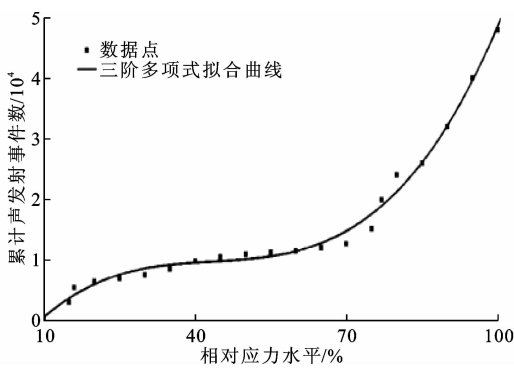


图 11 不同应力水平下累计声发射事件数曲线
Fig. 11 Cumulative number of AE events under different stress levels

表 4 三阶多项式模型拟合参数

Tab. 4 Fitting parameters of three orderpolynomial model					
声发射参数	$a/10^5$	$b/10^5$	$c/10^5$	$d/10^5$	相关系数
拟合结果	2.006	-2.622	1.192	-0.090 7	0.991 2

图 12 为用改进的损伤模型直接测得的声发射事件数表示的损伤量和用损伤量与应力水平三次函数模拟损伤量的比较。由图 12 可知,混凝土梁的损伤同样存在三阶段发展趋势。

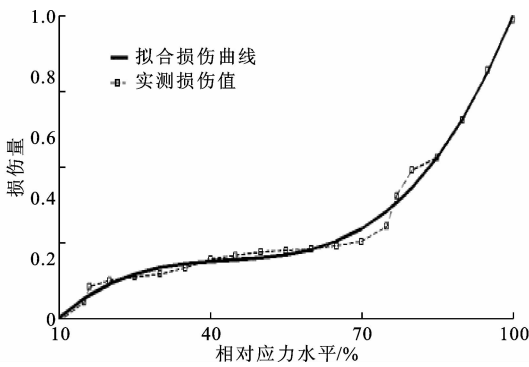


图 12 拟合损伤曲线和实测损伤值对比

Fig. 12 Comparisons of damage curves and measured damage values

(1)加载初始阶段,梁体主要产生弹性变形,较压密,并没有可见裂纹出现,因此声发射活动较弱。当相对应力水平超过 10%之后,梁进入弹性工作阶段,损伤量逐渐增加。

(2)随着荷载水平的提高,梁内初始微裂纹开始逐渐扩展。当相对应力水平达到 30%左右,梁体逐渐进入弹塑性工作阶段,在梁腹板开始出现肉眼可见的微小裂缝。

(3)当相对应力水平达到 75%,梁进入塑性工作阶段,内部裂纹急速扩展并贯通梁体,梁表裂缝逐渐扩展,集中体现在裂缝长度和宽度上,其损伤量快速增长;当增加至临界荷载时出现临界斜裂缝,将梁

沿支座和加载点斜劈成两半。

假设: $V=1$ 时, 损伤量为 1, 代入式(15), 得 $d'=-9\ 600$, 得到 $D_C=(N-530)/N_0$, 采用实测声发射事件数的试件计算损伤量比经验公式 $D_B=N/N_0$ 相对较小, 二者相对偏差为 $530/N_0=1.10\%$ 。由上可知, 改进的损伤模型计算精度较高, 可用于定量评价混凝土梁的损伤程度。

3 结 语

(1) 累计声发射数曲线随应力水平呈近似三阶段变化规律, 每个阶段对应不同的结构损伤状态; 建立的三阶多项式函数模型计算值与试验实测值吻合良好, 能较好地反映累计声发射数曲线的变化规律。

(2) 混凝土梁损伤程度与累计声发射事件数呈一次函数关系, 使用改进的损伤模型定量计算得到的损伤演化曲线与其他模型的测试结果相一致, 表明改进的损伤模型计算精度较高, 能较好地表示混凝土梁损伤量的发展趋势, 因此该模型在混凝土梁损伤程度量化评估方面有较好的应用前景。

(3) 由于混凝土的损伤破坏过程实际上是一种连续演变的过程, 其损伤程度的划分在实际情况中并不是绝对的界限分明, 因此累计声发射数的变化过程的边界指标分析还有待深入研究; 且本文主要针对受剪状态下混凝土的损伤量计算, 未对受载下裂缝扩展过程进行描述。这是由于 Z 形试件尺寸相对较小, 且一般是脆性破坏, 很难监测到其受力状态下裂纹整个扩展过程, 后续研究工作中将开展稍大型试件的相关试验研究。

参考文献:

References:

- [1] YUAN M, YAN D, ZHONG H, et al. Experimental investigation of high-cycle fatigue behavior for prestressed concrete box-girders [J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 424-437.
- [2] 纪洪广, 张月征, 金 延, 等. 二长花岗岩三轴压缩下声发射特征围压效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1162-1168.
JI Hong-guang, ZHANG Yue-zheng, JIN Yan, et al. Experimental study of confining pressure effect on acoustic emission characteristics of monzonite granite under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1162-1168.
- [3] 纪洪广, 卢 翔. 常规三轴压缩下花岗岩声发射特征

及其主破裂前兆信息研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 694-702.

- JI Hong-guang, LU Xiang. Experimental study on characteristics of acoustic emission and rock fracture precursors under conventional triaxial compression of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 694-702.
- [4] OHTSU M, ISODA T, TOMODA Y. Acoustic emission techniques standardized for concrete structure [J]. Journal of Acoustic Emission, 2007, 25: 22-32.
- [5] SUZUKI T, OHTSU M, SHIGEISHI M. Relative damage evaluation of concrete in a road bridge by AE rate-process analysis [J]. Materials and Structures, 2007, 40(2): 221-227.
- [6] SUZUKI T, OGATA H, TAKADA R, et al. Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze-thawed concrete [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12): 2347-2352.
- [7] 纪洪广, 贾立宏, 李造鼎. 混凝土损伤的声发射模式研究[J]. 声学学报, 1996, 21(4): 601-608.
JI Hong-guang, JIA Li-hong, LI Zao-ding. Study on the AE-model of concrete damage [J]. Acta Acustica, 1996, 21(4): 601-608.
- [8] 纪洪广, 张天森, 蔡美峰, 等. 混凝土材料损伤的声发射动态检测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 165-168.
JI Hong-guang, ZHANG Tian-sen, CAI Mei-feng, et al. Experimental study on concrete damage by dynamic measurement of acoustic emission [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 165-168.
- [9] 张 明, 李仲奎, 杨 强, 等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2493-2501.
ZHANG Ming, LI Zhong-kui, YANG Qiang, et al. A damage model and statistical analysis of acoustic emission for quasi-brittle materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2493-2501.
- [10] TANG C A, XU X H. Evolution and propagation of material defects and Kaiser effect function [J]. Journal of Seismological Research, 1990, 13(2): 203-213.
- [11] OHNO K, OHTSU M. Crack classification in concrete based on acoustic emission [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12): 2339-2346.
- [12] AGGELIS D G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters [J]. Me-

- chanics Research Communications, 2011, 38 (3): 153-157.
- [13] GENG J, SUN Q, ZHANG Y, et al. Studying the dynamic damage failure of concrete based on acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 9-16.
- [14] ZHANG Ya-fang, YANG Wen-long, LIU Hao. Effect of interfacial strength on bending properties of reinforced concrete beams[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2013, 28(6): 1161-1166.
- [15] PREM P R, MURTHY A R. Acoustic emission monitoring of reinforced concrete beams subjected to four-point-bending[J]. Applied Acoustics, 2017, 117: 28-38.
- [16] TOPOLAR L, KUCHARCZYKOVA B, KOCAB D, et al. The acoustic emission parameters obtained during three-point bending test on thermal-stressed concrete specimens[J]. Procedia Engineering, 2017, 190: 111-117.
- [17] 尹双增. 断裂、损伤理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- YIN Shuang-zeng. Fracture and damage theories and their application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992.
- [18] 刘保县, 黄敬林, 王泽云, 等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3234-3238.
- LIU Bao-xian, HUANG Jing-lin, WANG Ze-yun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3234-3238.
- [19] 刘娟红, 赵 力, 宋少民, 等. 混凝土硫酸盐腐蚀损伤的声波与声发射变化特征及机理[J]. 工程科学学报, 2016, 38(8): 1075-1081.
- LIU Juan-hong, ZHAO Li, SONG Shao-min, et al. Ultrasonic velocity and acoustic emission properties of concrete eroded by sulfate and its damage mechanism[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38 (8): 1075-1081.
- [20] 杨永杰, 王德超, 郭明福, 等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 98-104.
- YANG Yong-jie, WANG De-chao, GUO Ming-fu, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 98-104.
- [21] 彭 刚, 王乾峰, 陈灯红, 等. 基于声发射参数的混凝土循环加卸载动态损伤破坏特性研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2015, 37(6): 3-9.
- PENG Gang, WANG Qian-feng, CHEN Deng-hong, et al. AE-based dynamic damage failure characteristics of concrete under cyclic loading and unloading conditions[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2015, 37(6): 3-9.
- [22] 林 峰, 欧智星, 卢海霞. 截面预裂的 RC 构件直剪与斜剪承载力比较[J]. 建筑结构, 2014, 44(19): 75-91.
- LIN Feng, OU Zhi-xing, LU Hai-xia. Comparison on the ultimate bearing capacities of direct shear and oblique shear for RC members with pre-cracked sections [J]. Building Structure, 2014, 44(19): 75-91.
- [23] 赵 勇, 邹仁博, 张之璞. 配置高强钢筋的新旧混凝土结合面直剪试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增2): 346-353.
- ZHAO Yong, ZOU Ren-bo, ZHANG Zhi-pu. Experimental investigation on interface between concretes cast at different times with high strength steel bars under direct shear load[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S2): 346-353.
- [24] 李志卫, 王 婉, 肖建庄. 高温后高强混凝土剪切裂缝与拉剪箍筋销栓作用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(3): 345-351.
- LI Zhi-wei, WANG Wan, XIAO Jian-zhuang. Shear crack and tensile-shear stirrup dowel action of HSC after elevated temperatures [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(3): 345-351.
- [25] 赵永娇, 刘中宪, 徐慎春, 等. 钢纤维超高强混凝土抗剪特性直剪试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(15): 42-46.
- ZHAO Yong-jiao, LIU Zhong-xian, XU Shen-chun, et al. Direct shear experimental research on shear properties of steel fiber reinforced ultra high strength concrete[J]. Building Structure, 2016, 46(15): 42-46.
- [26] 薛建阳, 夏海伦, 李义柱, 等. 不同松动程度下古建筑透榫节点抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2017, 49(4): 463-477.
- XUE Jian-yang, XIA Hai-lun, LI Yi-zhu, et al. Experimental study on seismic behavior of penetrated mortise-tenon joints under different degree of looseness in ancient buildings[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2017, 49(4): 463-477.
- [27] 周明华. 土木工程结构试验与检测[M]. 南京: 东南大学出版社, 2002.
- ZHOU Ming-hua. Civil engineering structure testing and detection [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2002.