



The Damage Monitoring and Evaluation
for Reinforced Concrete Elements of Bridge
by Using Acoustic Emission Technology

基于声发射技术的桥梁 关键钢筋混凝土构件损伤监测与评价

李 青 杨 帆 王 春 等 编 著

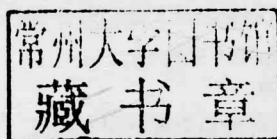


人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

The Damage Monitoring and Evaluation for Reinforced Concrete
Elements of Bridge by Using Acoustic Emission Technology

基于声发射技术的桥梁关键钢筋混凝土 构件损伤监测与评价

李 青 杨 帆 王 春 等 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书分析总结了声发射室内试验和桥梁运营监测过程中的常见噪声信号及特征并给出了相应的去噪对策。以分级加载试验数据为依据,研究了声发射凯塞效应对声发射损伤预警的干扰,论证了声发射技术应用于桥梁监测领域的技术可行性。以断铅试验数据为依据,讨论了声发射仪器的自带定位系统的优劣,并介绍了两种改进的定位算法。采用聚类算法和神经网络算法实现了混凝土梁破坏模式的识别,为声发射监测定性判断结论的得出提供了理论支持。以损伤变量为指标讨论了声发射定量分析技术的可操作性。

本书可供桥梁养护人员、科研人员、技术人员参考使用,也可供相关高等院校师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

基于声发射技术的桥梁关键钢筋混凝土构件损伤监测与评价 / 李青等编著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017.4

ISBN 978-7-114-13633-7

I. ①基… II. ①李… III. ①桥梁构件—损伤(力学)—声发射监测 ②桥梁构件—损伤(力学)—评价 IV. ①U443.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 319837 号

书 名:基于声发射技术的桥梁关键钢筋混凝土构件损伤监测与评价

著 者:李 青 杨 帆 王 春 等

责任编辑:尤 伟

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.cepress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:4.75

字 数:88 千

版 次:2017 年 4 月 第 1 版

印 次:2017 年 4 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-13633-7

定 价:30.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

《基于声发射技术的桥梁关键钢筋混凝土 构件损伤监测与评价》

编 委 会

主 编:李 青 杨 帆 王 春

副 主 编:周合宽 耿丙彦 高渐斌

编写人员:靳俊中 鲁 立 刘 剑 黄建钊 范悦让

贺 岩 刘 功 余其蔚 柴风英 张兆昌

王 宇 吴 超 郁董凯 陈书大 刘宝兵

前 言

发展基于健康监测的结构安全评定与可靠度预测理论是当今工程界的热点问题,也是保障工程结构建造和服役安全的有效手段。在结构健康监测评价的技术体系中,现代无损检测(NDT)占据着重要的地位,同时也是如今发展最快、分支最多的技术之一。

由于结构损伤与表征损伤的物理量之间并非一一对应的关系,依据被检物特点、操作条件以及预期目的,选择适宜的无损检测技术是提高检测结论可靠性的关键。考虑到大型建设工程的重要性,以工程运营全过程评价为基础的监测技术,正逐步取代以工程例检或工程突发性事件为前提的事后检测技术,这一转变已充分体现在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》之中。

声发射过程与材料自身损伤过程密切相关,声发射技术对材料损伤演化具有直观的动态捕捉能力,这是当前众多无损检测技术所不具备的优点。凭借这一特点,声发射被人们形象地称为材料病态的“听诊器”。它是当前无损检测技术实现从“损伤检测”到“损伤监测”转变的一条有效技术路径。

从无损检测所肩负的使命来看,声发射技术需要解决损伤的发现、定位、定性以及量化四个问题。通过过去几十年研究和应用,这些问题在不同工程材料领域中得到了不同程度的解答。目前,钢筋混凝土材料的声发射研究远远落后于金属材料领域的同类研究。钢筋混凝土作为当代最主要的也是最具发展前途的土木工程材料之一,其庞大的应用市场,是支持“钢筋混凝土声发射检测技术研究”的现实动力。

本书围绕声发射检测所必须面对的四个问题,结合作者在实际检测工作、研究中的一点认识进行简要的知识梳理。由于编写者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,在此热诚地欢迎广大读者提出意见和批评。

编者
2016年11月

目 录

1 绪论	1
1.1 声发射检测技术研究与应用的意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书主要内容	4
2 声发射室内试验及现场测试	5
2.1 试验方案总体设计思路	5
2.2 试验检测仪器及破坏试验	6
3 损伤预警技术	11
3.1 声发射噪声干扰与对策	11
3.2 凯塞效应对损伤预警的影响	21
3.3 声发射损伤预警	23
4 损伤定位技术	26
4.1 声发射仪定位系统的定位效果测试	26
4.2 能量辅助定位	30
4.3 变波速定位方法	34
5 损伤定性判断	42
5.1 基于数据聚类与分类的损伤模式识别	42
5.2 基于 BP 神经网络的损伤模式识别	48
6 损伤源定量判断	57
6.1 损伤变量的定义及选取方法	57
6.2 以累积事件数为基础的损伤定量分析	58
6.3 以声发射累积能量定义的损伤变量 D	62
7 结论与展望	65
参考文献	67

1 绪 论

1.1 声发射检测技术研究与应用的意义

从改革开放到“十二五”末期,经过三十多年的不懈努力,我国综合交通运输网络的“五纵五横”格局已逐渐清晰,适应于现代客运、货运的国家快速铁路网和国家高速公路网也已基本成形。在国家经济持续繁荣的宏观背景下,未来很长一段时间内,国家交通运输网络的持续扩容趋势不会改变。

由于现代交通的“时效性、直通性”特点,在交通基建规模不断刷新的同时,交通网络结构也迎来了重大调整。交通线路不断突破自然地形的约束,渡堑越峪,桥、隧比重正逐年递增。截至2015年底,我国在役公路桥梁总计77.92万座,其中特大桥梁3894座,大桥79512座。庞大的桥梁基数带来了更加艰巨的安全维护任务,为保障桥梁结构安全运营而产生的维护、加固及相关技术的市场应用前景广阔。

为避免频繁维修所带来的不便与损失,桥梁的维护与加固应以科学的损伤评价结论为依据。考虑到大型基建工程的重要性,以工程运营全过程评价为基础的监测技术正逐步取代以工程例检或工程突发性事件为前提的事后检测技术,这一转变也已充分体现在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》之中。

发展基于健康监测的结构安全评定理论是当今工程界的热点问题^[1-2],而“健康检测”和“健康监测”中对结构损伤感知这一核心技术并无本质区别,它们都隶属于无损检测(NDT)这一技术领域。由于可用于感知结构损伤的物理量较多,也由于现代高精密电子仪器、高性能计算机的出现,无损检测逐渐成为了当今发展最快、分支最多的技术之一^[3-4]。

近二十多年来,涡流检测(ECT)、射线照相检验(RT)、超声脉冲法(UT)、磁粉检测(MT)、液体渗透检测(PT)、热红外(TIR)等无损检测技术已逐渐成熟,由于技术原理的限制,这些技术很难适应结构健康监测系统的实时性要求,而声发射检测(AE)在这方面具有一定的先天优势。首先,声发射对线性缺陷极为敏感,善于捕捉正在发生的危险,其对结构损伤的描述是“进行时”,而不是“完成时”。其次,声发射信号源于结构自身能量的释放,无需辅助的信号源激励,更适用于长期无人值守的操作环境。对比目前已有的无损检测技术,声发射检测是实现从“损伤检测”到“损伤监测”转变的一条有效技术路径。



1.2 国内外研究现状

材料局域源在损伤过程中快速释放能量并产生瞬态弹性波的现象称为声发射 (Acoustic Emission, 简称 AE), 有时也可称为应力波发射。虽然绝大多数材料变形和断裂时都伴有声发射现象, 但由于信号强度微弱, 一般情况下人耳无法察觉。此时, 需要借助灵敏的电子仪器去感知, 也因此, 声发射检测仪器被人们形象地称为材料病态的“听诊器”。基于声发射仪器的探测数据, 分析并推断出声发射源损伤特性的技术则称为声发射检测。

声发射现象最早由奥伯特 (Obert) 和霍奇森 (Hodgson) 分别于 1941 年和 1942 年发现, 当时它还仅作为一种特殊的材料物理现象被研究。1950 年, 在凯塞 (Kasier) 针对金属材料的声发射试验取得成功后, 声发射技术才开始作为一门独立的损伤检测技术被业界承认。

20 世纪 70 年代初声发射技术被引入我国后, 中科院沈阳金属研究所、航天部 621 所、机械部合肥通用机械研究所、武汉大学等一些科研院所和高校相继开展了金属复合材料的声发射特性研究并取得了一定的进展。到 80 年代初期, 人们已经开始尝试压力容器检验的声发射技术应用。80 年代中期, 原劳动部锅炉压力容器检测研究中心率先从美国 PAC 公司引进了当时世界上最先进的采用 Z80 微处理计算机技术制造的 SPARTAN 声发射检测与信号处理分析系统, 并在国内一些石化和煤气公司开展了大量的试点应用。

从声发射应用领域的发展上看, 以金属材料为主要研究对象的机械、航空等领域的声发射研究始终走在前列。相比之下, 针对建筑工程材料, 特别是混凝土材料的声发射研究发展较为缓慢。作为一种多相多层次的水泥基复合材料, 混凝土内部组分的变化对声发射基本属性的影响是研究者最早关注的问题。1965 年, Robinson 研究了砂浆体及不同集料掺量、不同集料粒径的混凝土破坏时的声发射特征。1970 年, Green 按照 ASTM 标准, 对三种不同类型集料的混凝土宏观力学性能指标与声发射特征的对应关系进行了实时检测, 并证实了声发射技术用于混凝土破坏全过程监测的可行性。由于混凝土外延的不断拓展, 针对混凝土中各类分散相组分、增强组分、附加功能组分及相应的声发射特性研究至今仍在继续。

目前, 为研究混凝土构件或结构在不同受力破坏状态下的声发射信号特征而进行的具有针对性的破坏试验 (如动静拉压、动静弯曲、动静剪切试验等) 以及包括环境腐蚀、施工扰动、地震作用的现场测试已十分多见, 基于试验研究的声发射数据累积工作正在有条不紊地进行中。

随着现代信号分析分支的不断拓展, 研究者分析过程中所采用的声发射特征参数呈现出多样化的发展趋势。除了以声发射特征参数 (如幅度、振铃数、持续时间、上升时间和信号强度等) 作为表征结构损伤的特征值以外, 依赖于分形特征分析、b 值分析、CT 扫描、HHT 变换、神经网络算法、灰色关联分析、模糊分析、小波分析的声发射间接特征参数也得到了较



多的应用。

通过传感器信息反馈推断损伤源特性是发射检测的主要任务,围绕损伤位置、损伤性质、损伤程度等损伤源特性判断的定位、定性和定量技术是声发射技术研究的不变主题。除此之外,在某些操作环境下,为提高分析结论的可靠性而进行的声发射噪声处理也是一大研究热点。

按待处理信号的不同,声发射信号去噪方法可分为模拟去噪和数值去噪两类。前者以模拟信号为研究对象,主要由声发射仪器制造厂商所提供的前置放大器完成;后者以数值信号为研究对象,需使用者根据自身的研究目的,借助适当的数值分析工具来完成。

除噪声外,构件的历史应力路径往往也会干扰结构损伤的评价结论,凯塞效应^[5]是其主要因。在混凝土材料的声发射凯塞效应被首次发现后,研究者通过大量试验证明了在不同受力破坏状态下混凝土材料的声发射凯塞效应的存在性。同时,费利西蒂效应表明构件最大历史应力水平对凯塞效应有重要影响,而费利西蒂比还与构件的尺寸、内部组分、材料强度、加载方式、加载速率、空载时间以及干湿条件等诸多因素密切相关。

目前,区域定位和时差定位是最为基本的声发射损伤源定位方法。区域定位通过声发射信号到达次序或信号幅度大小作源位置区间判断,精度较低;时差定位利用声发射信号到时差和传感器间的几何关系推断损伤源位置,精度较高。衰减测量式时差定位、互相关式时差定位、干涉式时差定位也可纳入这一方法的范畴。由于声发射在材料内部传播规律十分复杂,时差定位所依赖的声发射波速预测值离散性较大是当前亟须解决的问题。另外,采用时频分析工具对声发射信号进行空间变换或其他预处理来提高声发射源定位精度的方法也很常见。

结构损伤类型识别(本书中也称损伤模式识别)是损伤定性研究的关键研究内容之一,它往往依赖于具有针对性的破坏试验。在较为复杂的受力状态下,由于结构损伤过程中的一些具有代表性的加载点(本书中也称为损伤质变点)前后存在明显的损伤模式转换,损伤模式识别也等同于损伤质变点识别。声发射损伤定性研究的首要任务是寻找对损伤质变点反应灵敏的声发射特征参数,声发射间接特征参数的多样性为这一类研究带来了无限的生机。对钢筋混凝土而言,开裂点是最为突出的损伤质变点之一。除此之外,水泥浆界面损伤识别、钢筋滑移损伤识别、增强纤维断裂损伤识别也具有重要工程意义。与之对应的具有针对性的破坏试验则包括素混凝土的轴压试验、钢筋拔出试验、增强纤维混凝土的轴拉试验等。

相较于定性分析,定量分析更为细致。粗略的定量分析可以视为结构损伤过程中所有质变点识别工作的串联。复杂的定量分析则需要依赖于构件损伤全过程的声发射特征参数曲线。目前,在建筑工程领域,此类研究成果虽已多见,但由于声发射在多相材料内部传播规律的复杂性,相关试验仪器、技术流程尚无统一规定等因素的影响,不同研究者的试验数



据仍缺乏横向可比性。研究者的试验数据成果无法有效整合,无法形成完备的声发射特征参数数据库,使得这类研究显得相对孤立,相关结论的离散性也较大。抛开数据源的问题不谈,基于损伤力学的损伤因子演化方程和本构方程仍取得了较大进步。

1.3 本书主要内容

由于对线性缺陷的敏感,声发射可以很好地预示结构正在发生的损伤或危险,“发现损伤”是声发射的核心技术优势。在发现损伤(本书中称为损伤预警)的过程中如何考虑噪声干扰以及由凯塞效应引起的声发射活性变化带来的干扰是本书重点介绍的内容之一。

在损伤预警的基础上,利用声发射损伤定位技术锁定破损部位,可为结构局部修复提供关键参考信息。目前,用于定位计算的声发射内置软件的算法中仍存在一些影响定位结果稳定性的不利因素。声发射在钢筋混凝土材料内部的传播路径和衰减过程异常复杂,加之在材料分层界面上的波形转换、在内部天生缺陷处发生的衍射、在集料表面发生的散射等一系列问题,使得基于断铅试验的波速测定结果具有很强的离散性,其离散程度已足以推翻声发射时差算法的波速恒定假设,这是声发射定位结果产生波动的症结所在。为回避或解决波速恒定假设问题,本书介绍基于声发射能量衰减曲线的能量衰减定位方法以及附加波速反演过程的时差类改进算法。

损伤类型识别是损伤定性评价的重要内容。针对某些破坏过程的质变点存在明显的破坏模式转换的特点,也可以通过质变点的识别来代替损伤模式的识别。这种处理方式不仅减少了针对不同损伤模式的破坏试验数量,也将损伤定性评价与粗略的定量评价(损伤阶段评价)画上了等号。由于梁受弯破坏在破坏过程中的质变点明显,其相应的声发射试验数据至少可以用于集料界面拉伤、混凝土开裂、钢筋滑移、混凝土压碎4类损伤的识别研究。基于波形相似假设的数据聚类和基于BP神经网络的损伤模式识别是本书重点介绍的两种损伤定性评价方法。

由于对非线性裂纹不敏感,声发射检测对缺陷的静态定量识别(如裂缝宽度、深度等)无能为力,损伤程度判断一直是声发射检测技术的短板。目前在实际检测中最为现实办法仍是利用不同检测方法进行优势互补,即利用声发射发现损伤、定位损伤后采用其他无损检测手段去量化损伤。同时,为保证声发射技术体系的完整性,本书也简要介绍了两种基于损伤变量定义的损伤程度识别方法。

本书以发现损伤、定位损伤、定性损伤、定量损伤的研究顺序排布章节,加之对声发射破坏试验的介绍,以期能够为读者提供一套完整的声发射检测技术体系作参考。

2 声发射室内试验及现场测试

2.1 试验方案总体设计思路

以试验数据为基础的现象学研究方法是声发射技术的最常见研究手段之一。自声发射技术问世以来,几乎每一次理论革新都与试验研究密切相关。在混凝土材料领域中,针对浆体、集料、钢筋以及随着混凝土功能外延拓展而出现的增强组分、附加功能组分对声发射特性影响的试验研究至今仍在进行。

从操作环境上看,声发射试验可分为室内试验和现场试验。室内试验以加载破坏试验为主,目前以声发射研究为目的的,包括拉、压、弯、剪及其组合受力状态下的破坏试验研究均有可参考案例。由于构件加载方式较多,研究者需要依据自身的研究目的或工程实际需求进行加载方式的选择。

对桥梁结构而言,其混凝土板、梁以受弯为主,立柱以压弯为主,这些受力状态与适筋梁的弯曲破坏具有一定的相似性,故三点弯曲破坏试验的声发射数据具有较强的代表性。定性、定量分析研究声发射特性随破坏过程推进的演变过程,一般采用分级加载的方式。凯塞效应研究历史加载对声发射特性的影响,一般采用分级循环加载的方式。在破坏试验之前,为保证试验数据的可靠性,需要对主要的室内噪声进行排除分析。由于桥梁等大型结构的现场加载复杂,破坏试验不可逆等原因,一般不再进行现场加载,但常见的室外噪声干扰分析仍必不可少。

声发射模拟源定位是测试定位算法效果的最直接方法,常用的模拟声发射发生源包括电火花、氦气喷射、喷砂、断铅、落球、超声发生器等,其中断铅由于无需额外试验设备辅助、可操作性强等特点而受到研究者的青睐。

本章针对研究中所涉及的试验仪器、试验方法、试件制备等问题作简要说明,相关试验目的及试验内容可见表 2-1。

试验总体安排

表 2-1

章节号	试验或测试目的	所采用试验方法
第 3 章	室内噪声干扰排除	室内噪声试验
	现场噪声干扰排除	现场噪声测试
	凯塞效应对声发射活性的影响	分级循环加载试验
	声发射预警技术的适用性	现场声发射测试

续上表

章节号	试验或测试目的	所采用试验方法
第4章	定位算法的精度和稳定性	断铅试验
第5章	声发射损伤定性研究	分级加载试验
第6章	声发射损伤定量研究	分级加载试验

2.2 试验检测仪器及破坏试验

2.2.1 试验检测仪器

自 1965 年美国的 Dunegan 公司首次推出声发射商业仪器以来,声发射的硬件技术已经历五十多年的更新发展,完成了从模拟声发射系统到全数字化声发射系统的技术革新。全数字声发射系统由 AE 传感器接收到的声发射信号,并经放大器、高速 A/D 变换器、数字信号处理或可编程逻辑器件即可获取声发射特征参数并直接用于参数分析。除信号连接电缆、外置存储和显示设备外,其主要组成模块如图 2-1 所示。其中,A/D 变换器、数字信号处理、数据传输接口均集成于数据转换及分析主机之中。



图 2-1 声发射系统主要元器件

现阶段另一个声发射仪的发展动向是全数字全波形声发射仪,其特点是硬件仅采集得到数字声发射信号波形,其他任务如参数产生,滤波甚至门槛功能均可交由用户自主完成。随着数据存储设备容量的倍增,声发射技术终将走向以波形信号分析为主时代,届时全波形声发射仪将自然成为最佳的选择。

(1) 声发射传感器

传感器是利用某些物质(如半导体、陶瓷、压电晶体、强磁性体和超导体等)的物理特性(如电阻、电容等)随着外界待测量(如应变、湿度、温度、位移、磁场等)作用而发生变化的原理制成的。不同待测量所采用的传感器原理有所不同,在声发射检测过程中,通常使用的是压电效应,相应的具有明显压电效应的材料称为压电材料。

声发射传感器一般由壳体、保护膜、压电元件、阻尼块、连接导线及高频插座组成,压电

元件是其核心,通常采用锆钛酸铅、钛酸钡和铌酸锂等材料制成。用户应根据不同的检测目的和环境采用不同结构和性能的传感器。谐振式高灵敏度传感器较为常见,若需要更大范围的频率响应则可采用宽频带传感器。

传感器与被检物表面采用耦合剂填缝,其目的是避免空腔影响声波穿透从而造成的能量损失,常用耦合剂有真空脂、硅脂、凡士林、黄油、快干胶等。传感器的固定方法主要包括机械固定、黏接固定和磁吸附固定方式。选择何种固定方式主要根据传感器的类型和待测表面情况所确定。对混凝土构件而言,常采用黏接固定方式,特殊情况下可采用机械固定方式。

(2) 声发射前置放大器

传感器输出信号的电压有时低至微伏数量级,这样微弱的信号,若经过长距离的传输,信噪比必然要降低。靠近传感器设置前置放大器,将信号提到一定程度,再经过高频同轴电缆传输给信号的处理单元。前置放大器的输入、输出均为模拟信号,采用的是模拟电路。

传感器的输出阻抗比较高,前置放大器需要具有阻抗匹配和变换的功能。有时传感器的输出信号过大,要求前置放大器具有抗电冲击的保护能力和阻塞现象的恢复能力,并且具有比较大的输出动态范围。

前置放大器的一个主要技术指标是噪声电平,一般应小于 $10\mu\text{V}$ 。有些特殊用途的前置放大器,噪声电平应小于 $2\mu\text{V}$ 。对于单端传感器要配用单端输入前置放大器,对于差动传感器要配用差动输入前置放大器,后者比前者具有一定的抗共模干扰能力。

在声发射系统中,前置放大器占有重要的地位,整个系统的噪声由前置放大器的性能所左右。前置放大器在整个系统中的作用就是要提高信噪比,要有高增益和低噪声的性能。

(3) 声发射数据转换及分析主机

声发射主机包括主放大器、A/D 数据采集卡、FPGA 可编程逻辑器件或 DSP 数字信号处理器件。其主要作用包括进一步提升信噪比、将模拟信号转换为数字信号、利用波形数据进行声发射参数提取、提供外置数据存储的交互通道等。

(4) 其他

在声发射破坏试验过程中,还需要记录试验构件的应变情况、加载信息,其主要目的是为破坏全程的声发射演变提供一个横向参照,相关试验仪器不再一一介绍。

2.2.2 试件制作与布置

由于声发射信号特征统计参数主要关联于构件受力模式和加载水平,与构件的截面尺寸并无太大关系,因此在试件制作以及试件几何尺寸选择上,均优先考虑试验室条件,对几何相似条件可不作过多考虑。试件混凝土强度等级应尽量靠近研究所服务的实际工程,配



合比设计可参考《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)。尺寸与混凝土指标确定后,严格按照适筋梁计算配筋,由于桥梁结构中预应力构件的广泛应用,也可增加部分预应力筋。

本书破坏试验中试件尺寸宽 200mm、高 250mm、长 1000mm,长度方向另预留 100mm 的设计支撑长度;试件的混凝土强度等级为 C40、C50,配合比设计见表 2-2;试件纵向受力钢筋采用 HRB335,预应力筋为钢绞线,试件配筋立面、断面如图 2-2 所示。

混凝土配合比设计 表 2-2

混凝土强度等级	配 合 比					
	水泥	砂	石子	水	减水剂	水灰比
C40	1	2.48	4.61	0.53	0.015	0.53
C50	1	1.06	1.94	0.3	0.03	0.3

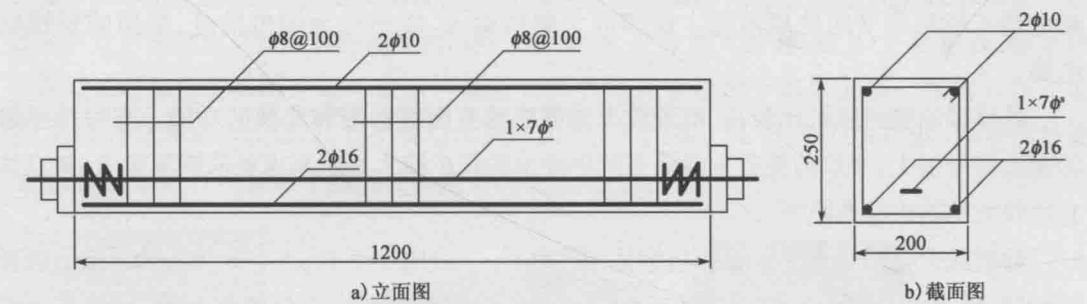


图 2-2 梁配筋示意图(尺寸单位:mm)

钢筋应变片预埋,混凝土应变片在试件养护结束后粘贴,应变片主要关注灵敏系数、应变极限、阻值等技术指标。考虑到在破坏试验过程中,应变片(特别是混凝土应变片)容易因应变超限退出工作,声发射特征演化曲线也可以加载值或加载阶段作为横坐标值。本书中试验试件所选用的钢筋应变片基本参数为灵敏系数 2.1、应变极限 2%、阻值 120Ω;混凝土应变片基本参数为灵敏系数 2.1、应变极限 2%、阻值 350Ω。

支座支撑形式应按实际构件的约束相似条件确定,对简支梁桥主梁,连续梁桥的中间跨、边跨主梁,可分别采用两端铰接、两端刚接、一端铰接一端刚接的支撑方式。由于结构破坏过程中的竖向应力重分布,破坏时支座承担负弯矩能力的不断削弱,约束相似条件不可能在加载全过程中得以满足,这也削弱了约束相似的物理意义。

试验装置过程中,应注意加载设备与试件接触区、支座区域的隔音措施,如采用隔音毡、吸音棉等材料覆盖接触区或包裹接触区垫块。加载设备依试件尺寸选择,对一般试件,可优先选择小型的电液伺服液压系统。若采用液压千斤顶的加载方式,需额外配置力传感器。利用声发射专用耦合剂填充传感器与混凝土构件的界面孔隙,传感器均匀线性分布于梁中部即可,具体布置依传感器数目、重点监测区范围、试件尺寸布置而定。本书中所采用四通

道声发射仪的传感器布置示意见图 2-3 所示。试验装置布置完成后,仪器开机进行预加载,磨合试件,并检验仪器工作状态。

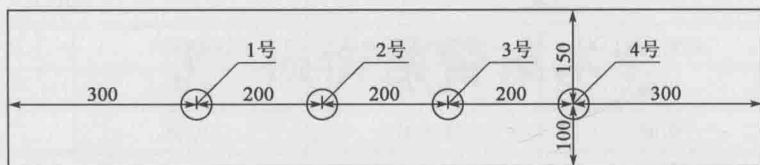


图 2-3 传感器布置图(尺寸单位:mm)

2.2.3 加载程序

(1) 分级加载试验方案

由于声发射特性与结构的破坏形态密切相关,因此荷载相似关系在试验中应特别关注,在分级加载过程中,加载的某些分级节点的物理意义应明确。除起裂点、极限破坏点具有明确的物理意义外,试件加载如何体现桥梁构件在正常通行状态下的受荷水平也是分级加载的关键问题,此时可按照底部拉应力相等的原则确定加载值。按照上文描述,大致可以计算确定出至少 3 个加载关键控制点,即正常通行荷载、起裂荷载、极限破坏荷载。

本书以我国公路桥梁中常用的三车道标准箱形截面梁为原型,其断面尺寸见图 2-4,计算跨径为 30m。由计算机软件 CAXA 求得原型惯性矩等构件截面特性,在考虑永久荷载、车道荷载、人行荷载的基本组合作用下,计算梁底拉应力,并按照底部应力相等的原则反算试验试件需施加的集中力作为荷载控制节点 1。经计算,本书中所涉及的 C40 构件的控制节点荷载 1 约为 21.49kN, C50 构件的控制节点荷载 1 约为 24.97kN。

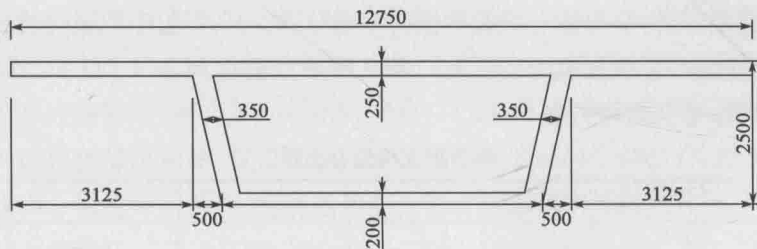


图 2-4 原型箱形截面(尺寸单位:mm)

按照试件材料和尺寸计算的试件开裂时顶部集中力荷载作为荷载控制节点 2。经计算,本书中所涉及的 C40 构件的控制节点荷载 2 约为 33.57kN, C50 构件的控制节点荷载 2 约为 38.99kN。按照试件材料和尺寸计算的试件完全破坏时顶部集中力荷载作为荷载控制节点 3。经计算,本书中所涉及的 C40 构件的控制节点荷载 3 约为 71.73kN, C50 构件的控制节点荷载 3 约为 81.00kN。得到控制节点荷载后,节点间荷载分级可以按照等间隔原则划分(依据实际情况或研究目的也可不等间隔,如对声发射重点研究的加载可加密)。按照

上述计算方法,本书中所涉及试验构件的最终加载程序见表 2-3。

分级循环加载的荷载分级方式

表 2-3

加载阶段	C40		C50	
	荷载(kN)	力传感器读数	荷载(kN)	力传感器读数
1	3.36	144.62	3.95	169.98
2	9.40	404.31	10.96	471.19
3	15.44	664.01	17.97	772.41
4(节点1)	21.49	923.71	24.97	1073.62
5	27.53	1183.40	31.98	1374.83
6(节点2)	33.57	1443.10	38.99	1676.04
7	39.61	1702.80	45.99	1977.26
8	45.65	1962.49	53.00	2278.47
9	54.34	2336.22	62.33	2679.71
10	63.04	2709.95	71.67	3080.95
11(节点3)	71.73	3083.67	81.00	3482.19

注:1. 力传感器读数由荷载值×42.99 转换得到。
2. 为保证试验安全,也因极限荷载计算可能出现的偏差,试验中加载到第 10 级荷载即可停止加载。

为保证后期数据处理过程中不致发生错乱,各阶段加载完成并待声发射数据稳定于某一较低水平后(并保证恒载时间不低于 15min),停止数据采集并存放于按加载阶段编号的文件夹之中。

(2)循环分级加载试验方案

循环分级加载试验所关注要点基本上与分级加载相同,但加载程序更为复杂,所涉及的数据储存文件更多,此时更应注意试验数据的整理分类。从理论上讲,若考虑卸载阶段的数据处理,进行 n 次循环分级加载所需要的归类文件数量会达到 $(n+1)!-1$ 个,本书中所采用的数据归类文件命名规则见表 2-4。

声发射文件储存名称

表 2-4

荷载级别	1	2	...	$n-1$	n
加载文件名称	1	2.1	...	$n.1$	$n.1$
		2.2	...	$n.2$	$n.2$
			...	...	...
				$n-1.n-2$	...
				$n-1.n-1$	$n.n-1$
					$n.n$
卸载文件名称	1.2	2.3	...	$n-1.n$	$n.n+1$