

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.03.008

混凝土应力检测技术研究综述

庄晨旭, 张劲泉, 蒋含莞

(交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 由于材质劣化、设计施工缺陷和结构损伤等原因, 大量在役混凝土结构都存在安全隐患, 目前主要是对混凝土结构的裂缝、空洞、内部钢筋锈蚀情况等进行检测, 以上参数并不能直接反映混凝土结构的真实受力状态。然而, 工作应力是混凝土结构可靠性的重要指标, 若能精确测量混凝土结构的工作应力, 则可以准确评估混凝土结构的受力状态。近几十年来, 科学工作者对混凝土应力检测方法进行了大量的研究, 在理论研究和实际工程应用方面都取得了不错的进展。本文分别对局部破损检测技术和无损检测技术的现状进行总结, 详细分析应力释放法、声发射技术、超声波检测技术的优点与不足, 并指出今后所需要解决的问题。

关键词: 桥梁工程; 混凝土应力; 应力释放法; 超声波检测技术; 综述

中图分类号: TU414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2016) 03-0043-09

Review of Concrete Stress Testing Technologies

ZHUANG Chen-xu, ZHANG Jin-quan, JIANG Han-wan

(Research Institute of Highway, Ministry of Transportation, Beijing 100088, China)

Abstract: Due to material quality degradation, designing and construction defect and structural damage, a large amount of concrete structures in-service are in poor condition. Recent testing methods are emphasized on detection of cracks, cavities and reinforcement corrosion, which cannot directly reflect the real stress state of concrete structures. However, working stress is a symptom of the concrete structure safety. If it can be measured accurately, the stress state of concrete structures can also be assessed precisely. In recent decades, researchers have done a lot of work on concrete stress testing methods, and made progresses both in theoretical researches and practical engineering applications. The current situation of local damage detection technology and nondestructive testing technology is summarized respectively. The advantages and disadvantages of stress release method, acoustic emission technology and ultrasonic testing technology are analyzed in detail. The problems which need to be solved in the future are also put forward.

Key words: bridge engineering; concrete stress; stress release method; ultrasonic testing technology; review

0 引言

混凝土作为当今土木工程中主要的建筑材料之一, 具有来源广泛、价格低廉和易于施工等优点, 在全世界已得到广泛的应用。但是在役混凝土结构逐渐出现了不同程度的安全问题, 比如结构开裂、倒塌等, 给社会造成了巨大的经济损失。而工作应

力正是反映混凝土结构安全与否的重要指标, 因此, 国内外研究者对混凝土工作应力的检测方法进行了大量的研究, 主要分为局部破损检测技术和无损检测技术。

局部破损检测技术主要是指应力释放法, 无损检测技术则主要包括声发射技术、声弹性应力测试技术、尾波干涉技术和非线性超声谐波技术。以下

收稿日期: 2015-10-13

基金项目: 交通运输部建设科技项目 (2013318223040)

作者简介: 庄晨旭 (1990-), 男, 浙江奉化人, 硕士. (544535215@qq.com)

分别对这两大类方法进行详细的阐述,系统总结各种方法的原理、误差来源、精度和实际工程应用情况。

1 局部破损检测技术

局部破损检测技术即应力释放法,其最初应用于钢结构中构件残余应力的测量,基本原理是利用机械加工对所测区域进行切割或钻孔,使所测区域的应力得到释放,测量应力释放前后所测区域的应变变量,再经计算得到此处的残余应力。近几十年来,科学工作者对应力释放法进行了大量的研究,并逐渐将其应用于混凝土材料。混凝土应力释放法按钻孔或切割形式的不同,分为盲孔法、环孔法和开槽法。

1.1 盲孔法

由于钻孔法在测量金属残余应力上的成功应用,因此,研究者开始将该方法应用于混凝土工作应力测量,经过不断研究形成盲孔法。试验中发现,钻孔达到一定深度后,孔附近处的工作应力就可以完全释放。至今,盲孔法已形成了一整套完整的理论,是目前工程上最常用的混凝土应力测量方法,美国ASTM协会于1981年将其纳入标准。

基本原理:若构件内存在应力场,在应力场内任意处钻一盲孔(直径为 d ,深度为 h),该处部分或全部应力将得到释放,原应力场将发生改变,此时盲孔周围将产生一定量的释放应变,测出释放的应变变量,即可得到测点的应力释放值。

应用盲孔法测量混凝土工作应力,影响因素众多,比如:盲孔直径、盲孔深度、应变花的粘贴方式、应变花的偏心等,因此近二十年来,科学工作者对各种影响因素进行了深入的分析,并提出了提高测量精度的改进措施。

Jaime F. Cardenas - Garcia^[1](2000年)和Che - Way Chang^[2](2009年)将光弹性材料应用于盲孔法中,数值模拟和试验结果表明,该方法不仅可以消除由于应变花偏心带来的误差,而且由于采用较小的钻孔深度和直径,可减小切割扰动引起的误差。2007年,付波等^[3]针对钢筋混凝土桥梁的工作应力进行研究,通过有限元分析钻孔深度与孔边应力集中系数的关系,发现钻孔深度达到孔径的1.45倍后,孔深对应力集中系数将不再产生影响。2008年,刘忠亚等^[4]利用盲孔法估算在役混凝土结构的现存预应力,通过对测点钻孔前后的应力值进行比较,发现钻孔深度达到孔径的1.2倍时,应力就可以完全释放。2011年,F. P. Zhang等^[5]研究混凝土工作

应力完全释放时的钻孔深度,当盲孔孔径为100 mm时,建议的钻孔深度为30~70 mm。2011年,赵冲久等^[6]应用盲孔法测量混凝土梁的工作应力,通过有限元数值模拟,得出合理的钻孔孔径(50 mm)、钻孔深度(50 mm)和应变片的粘贴位置(钻孔中心距梁底中心轴100 mm处)。同年,邱兆国等^[7]对预应力混凝土结构的应力释放过程进行数值模拟,研究初始应力大小、钻孔直径、钻孔间距等因素对应力释放规律的影响。

虽然盲孔法原理简单,在实际工程中又易于操作,但是盲孔法公式中的释放系数 A 和 B 是在均匀应力场下推导而来,而实际混凝土结构的应力场比较复杂,因此在应用该公式计算时,必定会产生误差。其次,在实际工程中,系数 A 和 B 由试验标定而得,标定过程中试验条件和材料与现场测试存在一定的差别,因此精确标定系数 A 和 B 相当困难。

1.2 环孔法

环孔法所测应变处和被测工作应力处在同一位置,因此环孔法精度比盲孔法高,与盲孔法的区别在于用环形孔来代替盲孔。基本原理:在混凝土构件上切割出环形孔,从而使构件的应力进行重分布,当环形孔达到一定深度时,应力将完全释放,通过应变花测量相应的应变变量,就可求出构件在该位置的工作应力。

2006年,刘永森等^[8]通过理论计算得到,当钻孔深度达到33 mm(环孔内径为100 mm)时,测点混凝土的应力就可以完全释放的结论。试验研究发现由于各种影响因素的存在,建议钻孔深度取为50 mm。试验中还观察到零点后移或零点被掩盖的现象。2009年,刘玲晶等^[9]利用环孔法对现存预应力混凝土结构的预应力进行估算,提出经验公式,试验中,理论计算结果与实测结果的误差在6%以下。2010年,C Trautner等^[10]将混凝土视为线弹性和各向均匀连续体材料,且只在平面应力状态下,采用环孔法测量在役混凝土结构的应力,计算所得与实际施加的平均应力(x , y 方向)的误差均小于3%。李新凯等^[11]在2010年利用环孔法测量水泥混凝土板表面的残余应力,通过有限元数值模拟水泥混凝土路面的应力释放过程,将计算结果与美国联邦航空管理局(FAA)机场路面试验中心(2007年)的试验结果进行对比,验证了该方法的可行性。然后在2012年^[12]对该方法进行试验验证,并对应变片长度、钻孔深度、钻孔直径等试验参数进行了研究,确定了最佳取值范围。

环孔法的关键在于确定环孔的深度。一般情况下,认为钻孔深度为 $0.7d$ (环孔直径)时,应力就能够完全释放。但是,由于应变片的标距一般都比较大,因此,环孔的孔径也就比较大,钻孔深度也随之加深,在这种情况下,该方法一般只适用大体积混凝土结构的应力测量。此外,在实际工程操作过程中,环形孔的切割难以形成,因此目前该方法在实际工程中应用较少。

1.3 开槽法

开槽法按开槽形式分为直线形开槽法和方形开槽法。基本原理:通过对混凝土结构进行开槽,使测点原有应力得到释放,通过应变花测量释放的应变变量,计算得出混凝土结构测区原有的应力值。

线形开槽法是在环孔法的基础上进行改进和创新,由于环形孔难以切割,因此在2007年,沈旭凯、王柏生等^[13-14]采取开直线形槽或方形槽来代替环形孔,发现试验结果与环孔法一致,并且发现在单向应力的情况下,方形槽与直线形槽的效果也一致;在2010年对直线形开槽法进行了深入研究,通过有限元数值模拟,确定了不同槽间距下,混凝土工作应力全部释放所需的开槽深度,并着重研究了扰动应变对试验的影响,提出对应变测量的修正方法,特别指出当工作应力较小时,扰动引起的误差相对较大,因此该方法仅适用于较大工作应力的情况,存在一定的局限性。在2010年, Daniel I. Castaneda^[15]在美国联邦航空管理局(FAA)的国家机场路面铺装测试所(NAPTF)将方形开槽法应用到机场试验道路的应力测量,试验结果表明,切槽深度与间距比为0.53时,路面工作应力将完全释放。此外,考虑室外试验条件下,研究温度变化对应力结果带来的影响。2011年,徐登云等^[16]用直线形开槽法对某桥桥墩的剩余预应力值进行推算,数值模拟结果得出,在两条横槽间距为20 cm的情况,槽深为7 cm时测区混凝土应力就能够完全释放,现场试验测得的实际钢束剩余预应力值与理论值相差小于20%,从而为同类桥梁的桥墩应力测量提供参考依据。2012年,王春芬等^[17]对某铁路空心薄壁墩现存预应力进行试验研究,用结构校验系数(实测应变值/有限元计算值)来衡量试验的效果,其值区间为0.9~1.0,证明了该方法的可靠性。

开槽法在实际工程中易于施工,尤其是在只关注单向应力问题时,只需切割两条直线形槽,对混凝土结构产生的损伤和破坏都较小。但是实际混凝土结构大多处于复杂受力状态,开槽法的测量结果

必定与混凝土结构真实受力状态存在一定的差别。该缺点限制了开槽法在实际工程中的应用。

1.4 小结

综上所述,目前国内外应力释放法的测试精度普遍在90%以下,因此无法对混凝土结构的应力状态做出准确的评价。同时,应力释放法的精度依赖测试环境,切割扰动、外界环境的温度和湿度变化等都会对测量结果造成不同程度的影响。此外,应力释放法会破坏局部混凝土结构,不适用于经常性检测,因此在加强混凝土应力释放法研究的同时,也应注重混凝土应力无损检测方法的研究。

2 无损检测技术

无损检测技术是在不损害被检测对象的前提下,利用设备探测结构的内部变化,以此来评估结构的整体性能。在混凝土应力测量方面,主要是利用声发射技术和超声波检测技术,不仅对不同混凝土结构具有通用性,而且检测成本低、速度快。

2.1 声发射技术

材料或结构在外力或内力作用下产生变形或断裂,以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射或应力波。用仪器收集、分析声发射信号并对材料或结构内部的变化进行反演的技术称为声发射技术。

虽然对声发射现象的研究和观测已有相当长的历史,但是将材料物理力学性能与声发射现象相结合是在德国科学家Kaiser在1953年在金属材料上发现凯塞效应(材料对受载历史的记忆性)之后。此后,科学家对不同材料的声发射现象进行研究,取得了大量的成果。在混凝土材料方面,1959年,Rusch首次将声发射技术应用于混凝土材料,发现混凝土材料的凯塞效应仅在极限应力的70%~85%以下的范围内存在。20世纪60年代开始,对混凝土声发射现象的研究不断深入,科学研究者包括L. Hermite, Robinson, Wells, Green, McCab, Raymond等,主要对混凝土的骨料、水灰比、强度等指标与声发射信号的关系进行研究。90年代后,得益于计算机技术的发展,对声波信号的处理和分析能力得到了显著的提高,因此,声发射技术得到了迅猛的发展。

虽然声发射技术在评估地应力状态方面已得到成功应用,但在评估混凝土结构的应力方面,至今为止,相关研究仍较少。1976年,McCab研究在各应力水平下,混凝土试件尺寸与声发射活性的关系。

2003年,纪洪广^[8]对声发射活性参数与混凝土材料应力-应变之间的耦合关系进行初步探索,证明两者确实存在着密切关系,并通过耦合的本构方程来表达。2011年,薛云亮^[19]研究岩石和混凝土材料声发射特性,推导出应力、应变与声发射数参数的耦合模型,耦合关系如图1所示。

$$\varepsilon = a \left[\ln \left(\frac{1}{1 - KN} \right) \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (1)$$

$$\sigma = Ea(1 - KN) \left[\ln \left(\frac{1}{1 - KN} \right) \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (2)$$

式中, E 为弹性模量; N 为声发射事件数; K , a , m 都是依据自由边界条件的几何特征计算取得。

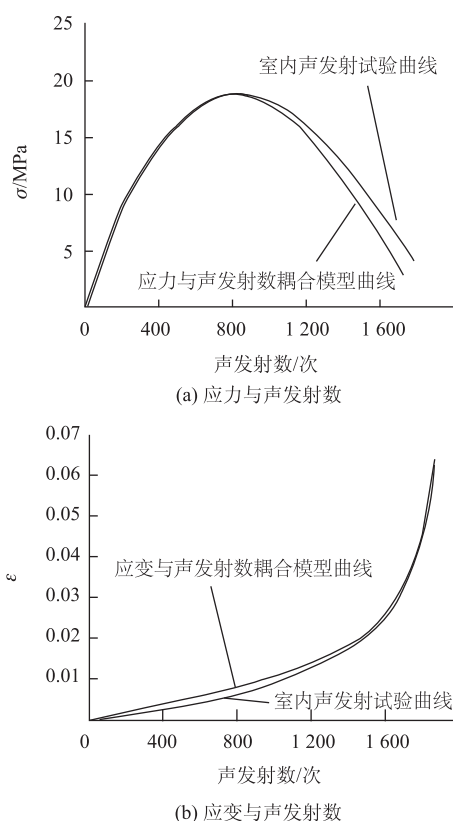


图1 混凝土声发射数 N 与应力和应变的耦合关系
Fig. 1 Coupling relation between number of acoustic emission N and stress/strain of concrete

2014年,杜庆娟等^[20]通过试验,研究声发射参数(声发射事件数及幅值)、幅值与频数的关系与应力水平的关系,并在试验中有效评估了钢筋混凝土梁的受力状态。2015年,胡伟华等^[21]对混凝土试件进行不同加载应变速率下的单轴加载,研究声发射参数与应力应变关系的同时,研究了混凝土材料的损伤演化规律。

2.2 超声波检测技术

混凝土超声波检测技术是利用超声波对混凝土材料进行探测,超声波经过混凝土材料后,其波速、首波振幅、频率等声学参数都会发生相应的变化,应用信号处理技术对这些变化进行分析,得出相应的分析结果。

1949年,加拿大的 Leslid 和英国的 Jons 等首次将超声波脉冲技术应用于混凝土材料的检测。此后国内外科学家对应用超声波技术检测混凝土结构进行了大量的研究,国内开始于20世纪50年代后期,经过多年的发展,取得了良好的技术经济效益。随着该技术的日益成熟,各个国家都制定了相应的规范,主要用于检测混凝土结构的裂缝、缺陷、厚度、强度等参数。

相关研究表明,超声波穿过混凝土材料后携带着大量有效信息,多种参数都与应力存在相关性。按照超声波技术和信息处理方式的不同主要分为声弹性应力测试技术、尾波干涉技术和非线性超声谐波技术。

2.2.1 声弹性应力测试技术

声弹性应力测试技术主要是利用材料的纵、横波速与应力的相关性建立起来的一种技术。虽然1953年 Hughes 和 Kelly 就已经提出声弹性理论,但是应用声弹性理论研究混凝土结构应力状态的工作还处于探索阶段。

2005年,陈立新等^[22]通过试验得出声学参数(波速和加权谱面积)与混凝土应力较为敏感时的骨料粒径(40 mm)、骨料种类(卵石)、水灰比(0.51)和砂率(0.31)。同年林军志等^[23]研究混凝土应力与超声波波速、首波振幅、最大振幅等声学参数的相关性。2010年, Ivan Lillamand 等^[24]研究混凝土材料在轴向压力作用下的声弹效应,得出与应力水平敏感性最大的是沿加载方向偏振的纵波和横波的结论,并成功得到试件混凝土的声弹性系数。2012年,刘新建等^[25]基于模型试验,详细分析不同种声学参数同应力的相关性,并用试验着重研究超声波信号加权瞬时振幅峰值、加权边际谱面积、加权瞬时能量谱面积随应力的变化情况。在聚合物改性混凝土材料上,2008年,杨洪武等^[26]得出对声-应力关系敏感时的聚合物组分(纯丙乳液、环氧树脂、 FeCl_3 、钢纤维、铁粉)。2009年,林军志等^[27]研究聚合物乳液对超声波波速和加权谱面积等声学参数与应力相关性的影响。2012年,林铮等^[28]研究发现丙烯酸酯对混凝土声-应力的相关性具有显著

的强化作用。

传统的超声波技术基于弹性波理论,主要的研究参数为超声波波速、声时、频率等,很难反映混凝土内部的微小变化。以上研究也只是定性地分析混凝土应力与声学参数的相关性,并未得出量化的结果。

2.2.2 尾波干涉技术

由于混凝土是非均匀各向异性复合材料,具有多孔性和黏弹塑性,超声波在其中传播会发生复杂的反射、折射与散射等现象,因此给精确测量超声波波速变化带来很大的挑战。而尾波干涉技术正好能解决这一难题,对测量尾波波速变化具有高精度和高灵敏度的特点。

尾波干涉技术是利用多次散射形成的尾波对介质进行研究,由于传播路径较长,因此携带着大量有效信息。1969年,K. Aki首次提出尾波的概念。2005年,R. Snieder对尾波干涉理论进行了系统的阐述,并成功将尾波干涉技术应用于花岗岩和铝试件上,尾波波速变化的测量精度达到0.02%。近几年,尾波干涉技术已成为研究热点。

2009年,PAYAN等^[29]通过尾波干涉技术精确测量尾波波速的变化,并计算得出三阶弹性常数,以此来评估混凝土结构的应力变化。2011年,Simon等^[30]利用尾波干涉技术来测量混凝土桥梁在节段施工时的应力变化情况,得到了理想的结果,对该技术在以后实际工程中的应用具有指导意义。国内尾波干涉技术主要应用于岩石领域,2012宋丽莉等^[31-32]首先比较水泥试件纵波、横波和尾波波速对应力变化的敏感性,试验结果表明,尾波波速变化的敏感性较强($\times 10^{-9}$ Pa);其次将尾波干涉技术应用于岩体小应力扰动下的高精度动态监测,结果表明其具有灵敏度高、稳定性好等优点;并用尾波波速变化率 dv/v 来评估岩石的应力状态的变化。

2.2.3 非线性超声谐波技术

非线性超声谐波技术主要关注高次谐波幅值的变化,在弹性介质内,单周期正弦波与介质内部的非线性散射体相互作用会导致新的谐波分量的产生。该方法最初应用于金属的微裂缝探测和损伤评估,然后逐渐应用于岩石、水泥、混凝土等非均匀材料。在应力测量上,研究非线性系数 β 与应力的相关性。非线性系数 β 是根据非线性应力-应变本构关系的二阶一维非线性弹性波的波动方程求解而得:

$$\beta = \frac{8}{k^2 x} \frac{A_2}{A_1^2}, \quad (3)$$

式中, A_1 为接收端基频的振幅; A_2 为二次谐波振

幅; k 为超声波波数; x 为传播距离。

此外,K. Aki已经证明,利用尾波干涉技术也可得到非线性系数 β ^[33]:

$$\beta = -\frac{E}{v^0} \frac{\partial v}{\partial \sigma}, \quad (4)$$

式中, E 为弹性模量; $-\frac{1}{v^0} \frac{\partial v}{\partial \sigma}$ 为波速变化与应力 σ 的斜率关系。

2007年,陈小佳等^[34]基于非线性超声谐波的幅值比对混凝土的微裂缝进行探测,试验结果表明非线性系数对微裂缝十分敏感,并在其博士论文^[35]中得出非线性高阶谐波方法和非线性超声调制方法均能表征材料内部裂缝的产生和发展的演变过程的结论。2013年,郭志伟等^[36]研究岩石超声谐波的特征,分析在单轴压力情况下,岩石超声谐波和名义非线性系数 β 与应力变化的关系。谢凡等^[37]应用超声二次谐波对水泥试样的非线性系数进行测量,并优化突出二次谐波幅值的测量方法。

研究发现,非线性超声谐波技术已被证明对混凝土内部的微结构变化比应用线性波动理论具有更高的敏感性,而且在岩石材料的应力评估上已取得初步成果,因此,可考虑将该技术应用于混凝土材料的应力测量。

2.3 小结

从理论研究和实际工程应用情况来看,混凝土应力无损检测技术具有灵敏度高、误差小、可重复性好等优点,但对测试环境要求较为苛刻,外界环境噪音对以上几种检测方法都有不同程度的影响,研究者也开始逐渐重视该方面的研究,从硬件设备和数据处理方法入手,不断降低外界噪音对测试结果的影响,现将混凝土应力无损检测技术总结如下:

表1 混凝土应力无损检测技术汇总

Tab.1 Summary of concrete stress nondestructive testing technologies

检测技术	主要的声学参数	优点	不足
声发射技术	声发射数、声发射信号强度等	不需要发射源,被动接受声发射信号	仅是定性研究
声弹性应力测试技术	超声波波速、频率、首波振幅、加权谱面积等	声学参数与应力相关性较好	对声学参数测量的精度不高
尾波干涉技术	尾波波速的相对变化率 dv/v	测量波速变化的灵敏度高、误差小	只适用于研究材料微小量级的变化
非线性超声谐波技术	非线性系数 β	谐波幅值变化的灵敏度高	谐波幅值易被噪声掩盖

3 结论

综上所述,混凝土应力检测技术主要分为局部破损检测技术和无损检测技术。应力释放法的精度均在90%以下,因此无法对混凝土结构的承载力和安全性做出准确的评价;而无损检测技术虽然对相关声学参数的测量精度较高,但都是定性地研究某些参数与应力的相关性。以下总结了目前混凝土应力检测技术存在的问题和今后所需努力的方向:

(1) 国内外研究者对应力释放法的试验参数取值并未达成统一,比如钻孔直径、钻孔深度、应变花粘贴方式、切槽间距等,因此造成测量结果的差异,试验之间的可比性不强。

(2) 针对环孔法中发现零点被掩盖或后移的现象,至今未给出合理的解释。是否在其他应力释放法中也存在同样的问题还需进一步研究,因为应力释放的完全与否将直接影响试验的结果。

(3) 混凝土结构大多为钢筋混凝土或预应力混凝土结构,若切槽或钻孔深度过深,将会影响钢筋的受力性能,因此需要确定一个合理的切割深度和位置,既能使测区混凝土应力完全释放,又不影响混凝土内部钢筋的受力性能。

(4) 大量研究集中在实验室,可以忽略外界环境对试验的影响。但是实际工程中,混凝土结构大多处于自然环境条件下,其测量结果必定与实验室结果存在较大差异,因此应加强外界环境变化对试验影响的研究。

(5) 无损检测技术的原始信号为声波信号,若想提高试验精度,则应加强以下两方面的研究:第一,提高试验仪器的采集精度和稳定性;第二,优化信号处理技术,最大限度地从原始信号中准确提取相关参数。

(6) 对混凝土应力无损检测技术的研究,主要是建立在试验基础的定性分析上,离实际工程应用还有较大差距,应加强对该方法的定量研究。

混凝土应力检测技术的发展对社会具有十分重要的意义,可以帮助工程人员对混凝土结构进行应力状态的评价,及时对存在安全隐患的结构进行修复和加固,减少不必要的经济损失。随着科学技术的发展,混凝土应力无损检测技术必将成为一种趋势,在未来的实际工程中具有更广阔的发展前景。

参考文献:

References:

- [1] CárDENAS-GARCÍA J F. The Hole Drilling Method in Photoelasticity: Application of an Optimization Approach [J]. *Strain*, 2000, 36 (1): 9-15.
- [2] CHANG C W, CHEN P H, LIEN H S. Evaluation of Residual Stress in Pre-Stressed Concrete Material by Digital Image Processing Photoelastic Coating and Hole Drilling Method [J]. *Measurement*, 2009, 42 (4): 552-558.
- [3] 付波, 向洪, 袁桐森. 钢筋混凝土桥梁工作应力测试研究 [J]. *湖南交通科技*, 2007, 33 (2): 68-71.
FU Bo, XIANG Hong, YUAN Tong-sen. Research on Testing of Reinforced Concrete Bridges Working Stress [J]. *Hunan Communication Science and Technology*, 2007, 33 (2): 68-71.
- [4] 刘忠亚, 刘丹娜, 贾巧燕. 利用钻孔法估算在役混凝土结构现存预应力 [J]. *武汉工程大学学报*, 2008, 30 (4): 62-64.
LIU Zhong-ya, LIU Dan-na, JIA Qiao-yan. Permanent Prestress Evaluation of Prestressed Concrete Bridges In-service by Hole-drilling Method [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2008, 30 (4): 62-64.
- [5] ZHANG F P, QIU Z G. Analysis of Measuring Existing Stresses in Concrete Structure by Hole Drilling Core Surface Strain Gauge Method [J]. *Material Research Innovations*, 2011, 15 (S1): 601-604.
- [6] 赵冲久, 邓雷飞, 田双珠. 钻孔法检测残余应力技术中有关参数的数值计算分析 [J]. *水道港口*, 2011, 32 (2): 122-127.
ZHAO Chong-jiu, DENG Lei-fei, TIAN Shuang-zhu. Numerical Calculation on Parameters of Residual Stresses Measuring by Hole-drilling Method [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2011, 32 (2): 122-127.
- [7] 邱兆国, 张凤鹏. 混凝土梁内现存应力钻孔释放过程数值模拟 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43 (增1): 232-236.
QIU Zhao-guo, ZHANG Feng-peng. Numerical Simulation of the Releasing Process of Existing Stress in Concrete Beam by Drilling Hole Method [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43 (S1): 232-236.
- [8] 刘永森. 环孔法测试混凝土工作应力试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
LIU Yong-miao. Experimental Research on Concrete Working Stress Measurement by Ring-hole Method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [9] 刘玲晶. 基于环孔法的在役混凝土结构现存预应力的

- 估计 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- LIU Ling-jing. Estimation of Extant Pre-stressed of Concrete Structure in Service Based on Ring-drilling Method [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [10] TRAUTNER C, MCGINNIS M, PESSIKI S. Analytical and Numerical Development of the Incremental Core Drilling Method of Non-Destructive Determination of In-Situ Stresses in Concrete Structures [J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2010, 45 (8): 647-658.
- [11] 李新凯, 马松林, 侯相深. 钻环法测量水泥路面表面残余应力的初步研究 [J]. 工程力学, 2010, 27 (2): 161-165.
- LI Xin-kai, MA Song-lin, HOU Xiang-shen. A Preliminary Research on Using Core Ring Method to Measure Residual Stress in Concrete Pavement Surface [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27 (2): 161-165.
- [12] 李新凯, 侯相深, 马松林. 钻环测量水泥混凝土板表面残余应力的试验研究 [J]. 工程力学, 2012, 29 (7): 244-249.
- LI Xin-kai, HOU Xiang-shen, MA Song-lin. The Research of Core Ring Method to Measure Residual Stress on the Surface of Cement Concrete Slab [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (7): 244-249.
- [13] 沈旭凯. 开槽法测试混凝土工作应力试验与研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- SHEN Xu-kai. Testing and Research on Concrete Working Stress Measurement by Grooving Method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [14] 王柏生, 沈旭凯, 林湘祁. 开槽法测试混凝土工作应力的试验研究 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44 (9): 1754-1759.
- WANG Bai-sheng, SHEN Xu-kai, LIN Xiang-qi. Experimental Study on Working Stress Measurement of Concrete by Grooving Method [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2010, 44 (9): 1754-1759.
- [15] CASTANEDA D I. New Field Testing Procedure for Measuring Residual Stress in Plain Concrete Pavements and Structures [D]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
- [16] 徐登云, 曹汝娟, 强亚平. 切槽法推定空心薄壁墩剩余预应力 [J]. 甘肃科技, 2011, 27 (23): 122-124.
- XU Deng-yun, CAO Ru-juan, QIANG Ya-ping. Residual Prestress Presumption of Hollow Thin-walled Piers by Grooving Method [J]. Gansu Science and Technology, 2011, 27 (23): 122-124.
- [17] 王春芬, 高以健, 钟文森. 铁路空心薄壁桥墩现存预应力测试试验研究 [J]. 铁道建筑, 2012 (3): 23-26.
- WANG Chun-fen, GAO Yi-jian, ZHONG Wen-sen. Experimental Study on Effective Prestress in Railway Hollow Thin-walled Bridge's Piers [J]. Railway Engineering, 2012 (3): 23-26.
- [18] 纪洪广, 蔡美峰. 混凝土材料声发射与应力-应变参量耦合关系及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (2): 227-231.
- Ji Hong-guang, CAI Mei-feng. Coupling Constitutive Relation between AE Parameter and Stress-strain and Its Application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (2): 227-231.
- [19] 薛云亮, 李庶林, 林峰, 等. 类岩石材料声发射参数与应力和应变耦合本构关系 [J]. 北京科技大学学报, 2011, 33 (6): 664-670.
- XUE Yun-liang, LI Shu-lin, LIN Feng, et al. Coupling Constitutive Relations of AE Parameter Versus Stress and Strain for Rock-like Materials [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33 (6): 664-670.
- [20] 杜庆娟, 路森, 石启印, 等. 不同应力水平下预应力钢筋砼梁发射特性研究 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14 (34): 65-72.
- DU Qing-juan, LU Miao, SHI Qi-yin, et al. Study on Acoustic Emission Characteristics of Prestressed Reinforced Concrete Beam under Different Stress Levels [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14 (34): 65-72.
- [21] 胡伟华, 彭刚, 黄仕超, 等. 基于声发射技术的混凝土动态损伤特性研究 [J]. 长江科学院院报, 2015, 32 (2): 123-127.
- HU Wei-hua, PENG Gang, HUANG Shi-chao, et al. Dynamic Damage Features of Concrete Based on Acoustic Emission Technology [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32 (2): 123-127.
- [22] 陈立新, 许锡宾, 赵明阶, 等. 混凝土声-应力相关性影响因素分析 [J]. 中国港湾建设, 2005 (4): 6-12.
- CHEN Li-xin, XU Xi-bin, ZHAO Ming-jie, et al. Analysis of Factors Influencing Correlativity of Ultrasound and Stress in Concrete [J]. China Harbour Engineering, 2005 (4): 6-12.
- [23] 林军志, 赵明阶, 许锡宾, 等. 混凝土声学参数与应力相关性的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (S1): 4989-4996.
- LIN Jun-zhi, ZHAO Ming-jie, XU Xi-bin, et al. An Experimental Research on the Correlation of Acoustic

- Parameters and Stress of Concrete [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (S1): 4989 - 4996.
- [24] LILLAMAND I, CHAIX J F, PLOIX M A, et al. Acoustoelastic Effect in Concrete Material under Uni-axial Compressive Loading [J]. Ndt & E International, 2010, 43 (8): 655 - 660.
- [25] 刘新健. 基于 HHT 的混凝土声学特性试验研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- LIU Xin-jian. Experimental Study on Acoustic Characteristics of Concrete Based on HHT [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [26] 杨洪武. 聚合物改性水泥混凝土声 - 应力相关性试验研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- YANG Hong-wu. Correlation of Ultrasonic and Stress of Polymer Modified Cement Concrete [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008
- [27] 林军志, 赵明阶, 杨洪武. 改性混凝土声学参数与应力相关性试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (增1): 69 - 74.
- LIN Jun-zhi, ZHAO Ming-jie, YANG Hong-wu. Experimental Research on Correlation of Acoustic Parameters and Stress of Modified Concrete [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (S1): 69 - 74.
- [28] 林铮, 刘新健. 聚合物对混凝土声学特性影响的试验研究 [J]. 现代交通技术, 2012, 9 (6): 15 - 17.
- LIN Zheng, LIU Xin-jian. Experimental Study on Correlation of Acoustic Parameters and Stress of Concrete with Different Polymers [J]. Modern Transportation Technology, 2012, 9 (6): 15 - 17.
- [29] PAYAN C, GARNIER V, MOYSAN J, et al. Determination of Nonlinear Elastic Constants and Stress Monitoring in Concrete by Coda Waves Analysis [J]. European Journal of Environmental & Civil Engineering, 2010, 3 (1): 519 - 531.
- [30] CHRISTIAN S S, CHRISTOPH S S, ERNST N. Monitoring Stress Changes in a Concrete Bridge with Coda Wave Interferometry [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129 (4): 1945 - 1952.
- [31] 宋丽莉, 葛洪魁, 郭志伟, 等. 利用多次散射波监测介质性质变化的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (4): 713 - 722.
- SONG Li-li, GE Hong-kui, GUO Zhi-wei, et al. Experimental Study of Variation of Media Properties Monitoring Using Multiple Scattering Waves [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (4): 713 - 722.
- [32] 宋丽莉, 葛洪魁, 梁天成, 等. 小应力扰动下岩石弹性波速变化的波形检测 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36 (4): 60 - 65.
- SONG Li-li, GE Hong-kui, LIANG Tian-cheng, et al. Waveform Detection of Elastic Wave Velocity Changes in Rock under Small Stress Perturbations [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2012, 36 (4): 60 - 65.
- [33] AKI K. Analysis of the Seismic Coda of Local Earthquakes as Scattered Waves [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1969, 74 (2): 615 - 631.
- [34] 陈小佳, 沈成武, JACOBS L L. 一种基于非线性超声谐波幅值比的微裂缝探测方法 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2007, 40 (6): 61 - 65.
- CHEN Xiao-jia, SHEN Cheng-wu, JACOBS L L. A Method for Microcrack Detection Based on Harmonic Amplitude Ratio of Nonlinear Ultrasonic [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40 (6): 61 - 65.
- [35] 陈小佳. 基于非线性超声特征的混凝土初始损伤识别和评价研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- CHEN Xiao-jia. Study on Initial Damage Detection and Evaluation of Concrete Based on Nonlinear Acoustic Features [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007
- [36] 郭志伟, 葛洪魁, 谢凡, 等. 岩石超声谐波特征及其随应力的变化 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37 (3): 50 - 56.
- GUO Zhi-wei, GE Hong-kui, XIE Fan, et al. Ultrasonic Harmonic Characteristic in Rock and Its Variation with Stress [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2013, 37 (3): 50 - 56.
- [37] 谢凡, 葛洪魁, 郭志伟. 利用超声二次谐波测试水泥试样的非线性系数 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (14): 9 - 15.
- XIE Fan, GE Hong-kui, GUO Zhi-wei. Measurement of Acoustic Nonlinearity Parameter Using Second Harmonics in Cement Specimens [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (14): 9 - 15.
- [38] 王标才, 黄福伟, 姚华. 在役预应力混凝土梁永存预应力测试方法研究 [J]. 山西建筑, 2008, 34 (28): 81 - 83.
- WANG Biao-cai, HUANG Fu-wei, YAO Hua. Research of Remain Forever Prestress Testing Way of Prestressed Concrete Bridge [J]. Shanxi Architecture, 2008, 34 (28): 81 - 83.
- [39] 潘立, 李志文. 确定混凝土构件实际应力技术方法的研究 [J]. 建筑结构, 2013, 43 (23): 73 - 80.
- PAN Li, LI Zhi-wen. Research on the New Polytechnic Method of Determination for Actual Stresses in Reinforced

- Concrete Members [J]. Building Structure, 2013, 43 (23): 73–80.
- [40] SICOT O, GONG X L, CHEROUAT A, et al. Influence of Experimental Parameters on Determination of Residual Stress Using the Incremental Hole-drilling Method [J]. Composites Science & Technology, 2004, 64 (2): 171–180.
- [41] 冯朝勇, 刘大洋, 禹鹏. 混凝土应力释放法研究综述 [J]. 交通标准化, 2013 (3): 24–28.
FENG Chao-yong, LIU Da-yang, YU Peng. Review of Concrete Stress Release Method [J]. Transportation Standardization, 2013 (3): 24–28.
- [42] 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 Uniaxial Tension [D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [43] 吴胜兴, 张顺祥, 沈德建. 混凝土轴心受拉声发射 Kaiser 效应试验研究 [J]. 土木工程学报, 2008, 41 (4): 31–39.
WU Sheng-xing, ZHANG Shun-xiang, SHEN De-jian. An Experimental Study on Kaiser Effect of Acoustic Emission in Concrete under Uniaxial Tension Loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41 (4): 31–39.
- [44] 纪洪广, 裴广文, 单晓云. 混凝土材料声发射技术研究综述 [J]. 应用声学, 2002, 21 (4): 1–5.
JI Hong-guang, PEI Guang-wen, SHAN Xiao-yun. Technique of Acoustic Emission for Concrete Material [J]. Applied Acoustics, 2002, 21 (4): 1–5.
- [45] 赵明阶, 吴德伦. 单轴加载条件下岩石声学参数与应力的关系研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (1): 51–55.
ZHAO Ming-jie, WU De-lun. Ultrasonic Velocity and Attenuation of Rock under Uniaxial Loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18 (1): 51–55.
- [46] 刘洋, 赵明阶. 岩石声学参数与应力相关性研究综述 [J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25 (3): 54–58.
LIU Yang, ZHAO Ming-jie. Research Overview of the Relation between Ultrasonic Parameters and Stress on Rock [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2006, 25 (3): 54–58.
- [47] ZHANG Y, ABRAHAM O, GRONDIN F, et al. Study of Stress-Induced Velocity Variation in Concrete under Direct Tensile Force and Monitoring of the Damage Level by Using Thermally-compensated Coda Wave Interferometry [J]. Ultrasonics, 2012, 52 (8): 1038–1045.
- [48] ZENG Y. Scattered Surface Wave Energy in the Seismic Coda [J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163 (2/3): 533–548.
- [49] 周正干, 刘斯明. 非线性无损检测技术的研究、应用和发展 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (8): 2–11.
ZHOU Zheng-gan, LIU Si-ming. Nonlinear Ultrasonic Techniques Used in Nondestructive Testing: A Review [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (8): 2–11.
- [50] 刘晓宙, 朱金林, 尹昌, 等. 岩石等非线性介观弹性固体材料的谐波特性的超声研究 [J]. 物理学进展, 2006, 26 (3): 386–390.
LIU Xiao-zhou, ZHU Jin-lin, YIN Chang, et al. Ultrasonic Study of Harmonic Properties of Nonlinear Mesoscopic Elastic Material [J]. Progress in Physics, 2006, 26 (3): 386–390.
- [51] 刘曙光. 混凝土退化的非线性超声特征识别研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
LIU Shu-guang. Research on Concrete Deterioration Detection Based on Nonlinear Ultrasonic Features [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [52] 蒋雨宏. 基于非线性超声特性的混凝土损伤试验研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
JIANG Yu-hong. Experimental Research on Damage of Concrete Based on Nonlinear Ultrasonic Characteristics [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.