

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2025.03.009

# 面向钢筋混凝土构件损伤的应力波无损检测技术

何晓彦

(中铁十八局集团第五工程有限公司, 天津 300450)

**摘要:**为提高钢筋混凝土构件的结构安全性与耐久性,实现早期损伤识别与预防,采用应力波无损检测技术对其内部损伤进行检测具有重要意义。通过水泥等原料制备钢筋混凝土箱涵试件,在试验样品上模拟不同程度的落锤撞击与裂缝损伤,利用多模态应力波检测仪采集应力波传播信号,并通过调整方向角分析应力波的传播特性。试验结果表明,钢筋混凝土箱涵构件未损伤时,应力波传播稳定,无反射波产生;轻微损伤时,构件出现局部反射波,与实际破损位置吻合;严重损伤时,应力波信号明显扩散,与破坏区域一致。构件裂缝分布与应力波检测结果高度对应,说明应力波无损检测技术可高效识别钢筋混凝土构件的内部损伤值。

**关键词:**钢筋混凝土;构件损伤;应力波;无损检测;撞击破损;裂缝破损

**中图分类号:**TU528.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2025)03-0074-08

## Nondestructive Testing Technology of Stress Wave for Reinforced Concrete Member Damage

HE Xiaoyan

(Fifth Engineering Co., LTD. of China Railway 18th Bureau Group, Tianjin 300450, China)

**Abstract:** It is of great significance to use stress wave nondestructive testing technology to detect internal damage in reinforced concrete components in order to improve their structural safety and durability, achieve early damage identification and prevention. Reinforced concrete box culvert specimens was prepared using cement and other raw materials, different degrees of hammer impact and crack damage were simulated on the test samples, stress wave propagation signals were collected by using a multimodal stress wave detector, and the propagation characteristics of stress waves were analyzed by adjusting the direction angle. The test results showed that when the reinforced concrete box culvert components were not damaged, the propagation of stress waves was stable and no reflected waves were generated; Slight damage to the component resulted in local reflection waves, which matched the actual location of the damage; When severely damaged, the stress wave signal spreaded significantly, consistent with the damaged area; The distribution of cracks in the components highly corresponded to the results of stress wave testing, indicating that non-destructive testing technology of stress wave can efficiently identify the internal damage values of reinforced concrete components.

**Keywords:** reinforced concrete; component damage; stress wave; non-destructive testing; damage by impact; crack failure

收稿日期:2025-05-10

作者简介:何晓彦(1982—),男,山东菏泽人,工程师,学士,主要研究方向为桥隧工程、道路工程、工程试验检测。E-mail: hhh5239@126.com。

## 0 引言

钢筋混凝土构件的损伤是一个复杂且重要的问题,常见的损伤类型包括压力损伤、弯曲损伤、剪切损伤和腐蚀损伤<sup>[1]</sup>。压力损伤主要由构件在承受压力过程中受到的挤压导致,墙体挤压和地基沉降,会使构件上方受到挤压,下方出现裂缝。弯曲损伤则是构件在承受弯曲力矩时发生弯曲,常见于房屋的梁和柱子,特征为构件弯曲并出现裂缝。剪切损伤是在承受剪切力时发生,竖向荷载或地震引发的拉力和剪力,表现为构件剪切破坏,外观有倾斜裂缝<sup>[2]</sup>。腐蚀损伤主要由湿气、水分等环境因素引起,导致构件表面生锈、锈胀,并随时间推移产生裂缝及脱落。除了上述类型,设计和施工质量问题、长期使用和维护不当、恶劣的自然环境、外力作用等因素也会导致钢筋混凝土构件的损伤。钢筋混凝土构件的损伤多种多样,每种损伤都有其特定的原因和特征<sup>[3-4]</sup>。为了确保结构的安全性和延长使用寿命,需要及时检测和维护钢筋混凝土构件,并采取必要的措施进行修复。应力波是应力在介质中以一定速度传播的一种波动形式,在钢筋混凝土构件中,当应力波遇到损伤或缺陷时,会发生反射、折射等现象,改变其传播路径和波形,通过分析应力波的传播特性,可以推断出构件内部的损伤情况<sup>[5]</sup>。应力波无损检测技术具有高效、准确、非破坏性等优点,能够在不破坏构件的前提下,快速准确地检测出内部的损伤情况。该技术还具有适应性强、操作简便等特点,适用于复杂环境下的钢筋混凝土构件损伤检测<sup>[6]</sup>。

邹晨阳等<sup>[7]</sup>针对混凝土防渗面的无损检测进行研究,使用冲击回波法与超声波平测法相结合,通过电磁波场响应结果分析混凝土的损伤情况。但是超声波平测法受到混凝土内部结构的干扰,而冲击回波法则受到表面条件的影响,导致检测结果稳

定性较差。王忠铨等<sup>[8]</sup>将木材作为研究对象,使用多测点无损检测法分析材料的力学性能,确定自变量和测点数量都会影响检测结果。多测点无损检测法需要在研究对象上布置多个测点,并进行多次测量,这使得检测过程相对繁琐。同时,为了获得准确的检测结果,还需要对测量数据进行复杂的处理和分析,因此检测成本较高,同时耗费大量人力,因此实际应用还需要进一步研究。Scherr等<sup>[9]</sup>使用激光烧蚀冲击回波技术检测混凝土的脱氨情况,实现混凝土表面缺陷的检测,但是激光烧蚀冲击回波技术在检测混凝土板中的缺陷时,受到检测深度和分辨率的限制,对于较深的缺陷或较小的缺陷,难以准确检测或定位。蒋俟等<sup>[10]</sup>使用冲击回波和超声断面成像技术检测混凝土缺陷,确定使用该方法能够实现准确检测。虽然冲击回波法和超声断面成像法能够检测混凝土叠合构件的结合面缺陷,但对于特别复杂或深层的缺陷,其检测效果不够理想。

本文使用应力波无损检测技术检测钢筋混凝土构件的损伤情况,为混凝土的发展和技术改进提供新思路。

## 1 钢筋混凝土构件损伤的应力波无损检测

### 1.1 钢筋混凝土的应用工程概况

本文所研究的钢筋混凝土应用在天津市某工程的涵洞中。该工程建设涵洞数量为21道,其中箱涵14道,圆管涵6道,通道1道,均为钢筋混凝土结构。本工程场地地层较为均匀,主要为黏性土和砂土、亚砂土。表层为新近沉积的坑底淤泥,厚度为0.20~2.20 m,力学性能差,桥头填土部位应予以清除。在标高-12.00~-15.00 m普遍存在一层亚砂土薄层,含有较多碎贝壳,处于密实状态。正是由于这种较为脆弱的地质条件,涵洞建设时需要大量使用钢筋混凝土。

## 1.2 钢筋混凝土构件制备

### 1.2.1 材料与设备

本研究所用材料如表 1 所示。

本研究所用仪器设备如表 2 所示。

### 1.2.2 构件制备

本研究以工程中的钢筋混凝土作为试验对象,制备等比例大小的箱涵试验样品,完成制备后,在试验样品上施加不同等级的破坏损伤,再使用应力波无损检测技术对提前制备的试验样品检测,获得检测效果。

将粉煤灰、粗骨料、细骨料及水泥等干料倒入搅拌机中,先干拌 5 min,再将水和减水剂倒入搅拌机之中搅拌 10 min。混凝土制备过程中各个材料的用量参考国家标准《通用硅酸盐水泥》(GB175—2023)。

在已完成箍筋的钢筋上浇筑混凝土,制成钢筋

混凝土箱涵。按照图纸中工程设计要求布置箍筋,箍筋安装之前先使用角磨机处理钢筋表面,使得钢筋的接头更加光滑,将脱模剂涂抹在钢筋表面。完成钢筋预处理之后,测量放线,再通过焊接、扎绑等技术手段实现箍筋的布置<sup>[11-12]</sup>,再将上文制备的混凝土浇筑在箍筋上。

为了保证试验样品的质量,分 3 次浇筑混凝土:第 1 次浇筑至箱涵底部位置,振捣排出混凝土中的空气;第 2 次浇筑至箱涵两侧的顶端,再次振捣<sup>[13]</sup>;第 3 次浇筑直至箱涵的顶部,浇筑后最后振捣一次,振捣过程中需要注意不能触碰到箍筋。完成浇筑后置于标准养护箱中养护 28 d,取出后磨平并收浆处理。

本研究共制备了 4 组相同的构件样品,尺寸均为 2 000 mm×1 000 mm×2 000 mm。其中 1 组备份,对另外 3 组构件做出不同损伤处理(撞击破坏、裂缝破坏),以便试验分析。

表 1 本研究所用材料

材料名称	厂家	备注
水泥	巩义市盛隆耐火材料有限公司	导热系数 0.08~0.3 W/(m·K),抗压强度 42.5 MPa(28 d 标准值)
粗骨料	郑州旭泰耐火材料有限公司	磨损率 0.1%,导热系数 1.58 W/(m·K),抗压强度 50 MPa,拉伸强度 3 MPa
细骨料	孝义市馨科岩耐磨材料有限公司	耐火度 1 450 °C,防冻系数 20,竖向膨胀率 0.02%
减水剂	山东腾源化工科技有限公司	pH 值 6~8,含水率小于 5%,减水率 14%
粉煤灰	南京宏乾环保工程有限公司	抗弯强度 2 MPa,粒度 325 目,硬度 7 HB
钢筋	河北科麟紧固件制造有限公司	抗拉强度 370 MPa,材质 Q235b,A 级质量
脱模剂	河南欣之源化工产品有限公司	工业级,pH 值 8.5~10

表 2 本研究所用仪器设备

设备名称	厂家	型号	详情
搅拌机	郑州市华龙建筑机械有限公司	JZC350	搅拌功率 7.5 W,转速 30 r/min,最大骨料粒径 70 μm,最大出口压力 1.2 MPa
标准养护箱	沧州华恒试验仪器有限公司	SHBY-40B	控温精度 ±0.1 °C,加热功率 600 W,箱内温差 ±2 °C
应力波检测仪	深圳市泰立仪器仪表有限公司	MINI-MAX	电压 3 V,搭载 10 个传感器
落锤试验机	深圳市源科仪器设备有限公司	HD-1400	空载提升速度 60 mm/s,高度定位误差小于 ±2 mm
万能试验机	苏州皖仪实验仪器有限公司	WY-600GA	最大负荷 600 kN,精度 0.5%,拉伸空间 700 mm

### 1.3 应用应力波技术检测钢筋混凝土构件损伤

应力波无损检测是一种非破坏性的检测技术,其利用应力波在材料中传播的特性来检测材料内部的缺陷或应力状态。相比于普通检测方法,本文使用的应力波无损检测只需要极短的时间就能完成检测对象的无损检测。由于本文所研究对象是钢筋混凝土箱梁构件,体积较大,弯曲面较少,为了获得较为准确的研究结果,沿着该钢筋混凝土的纵向中心线方向布置多个检测点,通过应力波无损检测的方式能够直观地确定钢筋混凝土构件中的裂纹和破损所在位置,并可在相同时间检测出多处裂纹、破损。

然而,由于钢筋混凝土构件的种类和形状多种多样,如梁、板、柱等,不同的构件在受力时产生的应力波特性也不同。传统的应力波无损检测技术主要依赖于单一模态进行检测。为了更全面地评估钢筋混凝土构件的损伤情况,本研究开发多模态应力波检测技术,即同时发射和接收纵波、横波及表面波,将3者检测结果进行融合,通过综合分析不同模态应力波的传播特性和反射特性,可以更准确地判断损伤的位置、类型和严重程度,形成更全面的损伤评估。

#### 1.3.1 多模态应力波检测准备

使用应力波检测仪开展检测试验,仪器的参数设置如表3所示。

表3 应力波检测仪参数

采样率/MHz	采样字节长度/Byte	脉冲电压/V	脉冲宽度/ $\mu$ s
0.1	8 192	250	5

在设置设备参数后,在构件与检测仪接触的位置上涂抹耦合剂(凡士林甘油)。凡士林甘油在该过程中发挥耦合作用<sup>[14]</sup>,以提高检测的准确性。

#### 1.3.2 应力波无损检测技术流程设计

使用多模态应力波无损检测技术,在提前破损设计的钢筋混凝土构件上开展无损检测,详细检测

流程如图1所示。

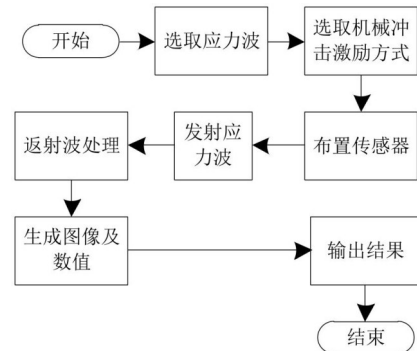


图1 应力波无损检测技术流程

按照表3调整应力波检测仪上的各个检测参数,检测时选择机械冲击激励方式。把连接应力波检测仪的传感器布置在钢筋混凝土构件上,向构件发射多种模态的应力波(纵波、横波、表面波),这些应力波将在构件内部传播并在遇到损伤时产生反射、折射等现象。接收并记录反射回来的应力波信号,获取构件内部损伤的信息。应力波检测仪上会生成检测结果的图像和各项检测数值,将图像导出,并详细记录各数值,完成钢筋混凝土构件的应力波无损检测。

#### 1.3.3 钢筋混凝土构件中应力波的传播规律

多模态应力波检测涉及波动方程的不同解,包括纵波、横波和表面波的波动方程。

1)纵波是压缩波,其传播方向与质点振动方向一致。纵波的波动方程如式(1)所示。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_1^2 \nabla^2 u \quad (1)$$

式中: $u$ 为质点的位移场; $\nabla^2$ 为拉普拉斯算子; $v_1$ 为纵波波速,其计算公式如式(2)所示。

$$v_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为第一拉梅常数, $\mu$ 为第二拉梅常数,即剪切模量, $\rho$ 为材料的密度。

2)横波是剪切波,其传播方向与质点振动方向垂直。横波的波动方程如式(3)所示。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_2^2 \nabla^2 u \quad (3)$$

式中: $v_2$ 表示横波波速,其计算公式如式(4)所示。

$$v_2 = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho}} \quad (4)$$

式中: $\gamma$ 表示剪切模量。

3)表面波是沿材料表面传播的波,其质点运动轨迹为椭圆。表面波的波动方程如式(5)所示。

$$\left(2 - \frac{v_3^2}{v_2^2}\right)^2 - 4\sqrt{1 - \frac{v_3^2}{v_1^2}}\sqrt{1 - \frac{v_3^2}{v_2^2}} = 0 \quad (5)$$

波的位移场如式(6)所示。

$$u(x, z, t) = Ae^{-kz} \cos(k_R zx - \omega t) \quad (6)$$

式中: $A$ 为振幅, $k_R$ 为表面波的波数, $\omega$ 为角频率, $z$ 为垂直于表面的深度, $x$ 为沿表面的距离。

使用应力波检测仪对本文制备的钢筋混凝土构件开展无损检测时,可以明确试样样品内部在瞬间扰动作用下,出现的应力波扰动。根据应力波传播规律,通过同时分析和处理上述3种波的信号,可以更全面地评估材料的损伤状态。

受扰动时,使用应力波检测仪向钢筋混凝土构件发射应力波,钢筋混凝土构件介质点会出现振动。这种振动会以应力波的形式向钢筋混凝土构件底部传递,相同介质中,应力波传播时的速度不会出现变化,但是当介质发生改变后,应力波从一种介质向另一种介质传播时会出现应力波阻抗变化。该变化会导致应力波出现能量重新分配的情况,一部分应力波穿过新介质继续传播,这部分应力波为透射波;另一部分应力波向原介质反射成为反射波,一般透射波不能被捕捉,反射波反映出的信息能够表示出钢筋混凝土构件的损伤情况<sup>[15]</sup>。使用反射系数反映出应力波检测钢筋混凝土构件时,发现损伤后反射波重新分配能量的问题,计算公式如式(7)所示。

$$R = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (7)$$

式中: $R$ 表示反射系数, $\sigma_1$ 与 $\sigma_2$ 分别表示应力波从试验样品左侧向右侧传播的反射比能量及入射波能量。

在此基础上,针对应力波无损检测技术中不同方向角下应力波传播速度的波动问题,本研究提出一种方向角补偿修正方法,即通过构建“方向角-波速”标定曲线,动态修正检测数据,消除因传感器角度偏差导致的误差。这一过程中,传统方法通常仅在 $0\sim 90^\circ$ 范围内标定,本研究考虑钢筋混凝土构件实际检测中可能出现的所有传感器布置角度,设置了 $-90\sim +90^\circ$ 的全角度标定范围。

通过测量不同方向角 $\theta$ 下应力波的传播速度 $v$ ,构建“方向角-波速”标定曲线。该曲线反映了波速随方向角的变化规律。标定曲线可通过多项式拟合实现,公式如式(8)所示。

$$v(\theta) = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + \dots + a_n\theta^n \quad (8)$$

式中: $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ 表示拟合系数。

相比线性或二次拟合,式(8)所示的多项式拟合方式能够更精确地捕捉波速随角度变化的非线性特征,确保曲线与实际数据的吻合度。

在实际检测中,根据传感器实测方向角 $\theta$ ,利用标定曲线计算修正后的波速 $v^*$ ,公式如式(9)所示。

$$v^* = v_t \times \frac{v_{\text{ref}}}{v(\theta)} \quad (9)$$

式中: $v_t$ 表示实测波速, $v_{\text{ref}}$ 表示参考波速( $\theta = 0$ 时的波速)。

通过动态修正,消除因传感器角度偏差导致的波速误差,进一步提高检测数据的准确性和可靠性。

## 2 检测内容与结果分析

应用上述应力波无损检测流程完成检测,检测内容包括撞击破损检测、裂缝破坏检测,并针对应力波传播速度展开分析。

### 2.1 检测内容

使用人工破坏的方式在所制备的钢筋混凝土箱涵试件上制造破损,使用该技术对试验样品损伤区域开展检测,将实际破损与检测结果对比,确定检测效果。

### 2.1.1 撞击破损检测

撞击破损检测是通过模拟外部冲击对钢筋混凝土构件的影响,评估其损伤程度。

在某学校的结构工程实验室中,使用HTM-100型号的落锤冲击试验机,通过调整锤头的质量和下落高度模拟不同能量等级的撞击,在构件的关键部位(跨中附近)进行撞击,得到未经落锤破坏的钢筋混凝土试验样品、轻微破损钢筋混凝土试验样品、严重破损钢筋混凝土试验样品。记录撞击能量和位置,使用应力波检测仪检测撞击破损后的试验样品,判断检测效果。

### 2.1.2 裂缝破坏检测

裂缝破坏检测是通过施加荷载诱发裂缝,评估构件的裂缝扩展和破坏模式。

在某材料力学实验室中,使用型号为MTS-500的液压伺服加载系统或万能试验机,对构件施加荷载。试验机的最大荷载为500 kN,位移控制精度为 $\pm 0.01$  mm,加载速率范围0.01~10.00 mm/min。通过轴向压缩试验,诱发构件产生严重的裂缝,使用应力波检测仪检测试验样品。

将钢筋混凝土箱涵试件竖直安装于加载平台,底部通过刚性支座固定,顶部与加载头接触,确保轴向对中。在试件跨中底部预先切割一条长度为100 mm、深度为20 mm的V型缺口,以引导裂缝沿预定路径扩展。初始荷载为10 kN(预加载),稳定后以0.10 mm/min速率分级加载,每级增加20 kN,持荷5 min,直至裂缝萌生;裂缝出现后切换为位移控制模式,以0.50 mm/min速率持续加载,直至裂缝贯穿构件或荷载下降至峰值荷载的80%。

### 2.1.3 检测方向角与应用波传播速度之间的关系

本研究还针对应力波传播速度展开分析,从不同方向角测量钢筋混凝土构件无损检测时的应力波传播速度,得到应力波传播速度和方向角之间的关系。在试验样品上选取一个纵截面,把设备布置在该纵截面的顶端,调整应力波检测仪进入试验样

品的方向角,在试验样品上连接一个上位机,获取不同方向角下样品中应力波的传递速度。

## 2.2 结果分析

### 2.2.1 撞击破损检测结果

使用落锤试验机在钢筋混凝土试验样品上创造出不同程度破损,使用本文方法检测各个钢筋混凝土试验样品的破损情况,结果如图2~4所示。

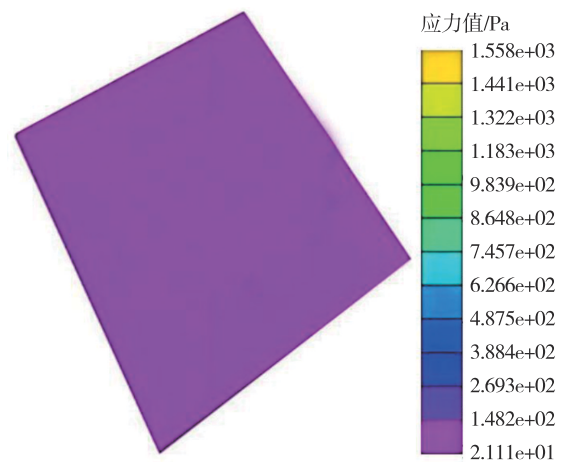


图2 未经破坏试验样品应力波检测

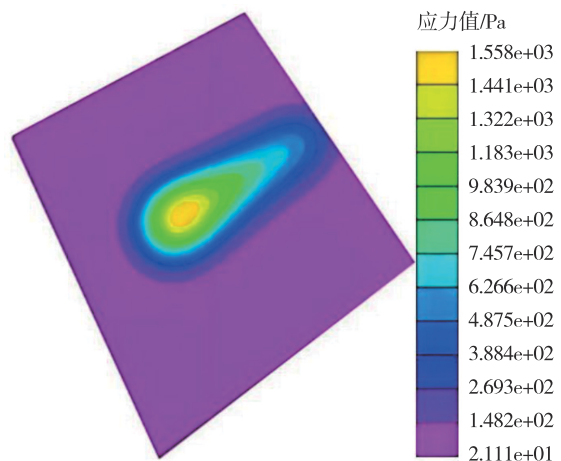


图3 轻微破损试验样品应力波检测

由图2可以看出,当所检测的试验样品未发生损伤时,应力波检测的结果中未出现明显应力变化,这是由于应力波在同一介质中正常传播,未出现反射波波,因此该检测结果没有显著变化。

由图3可以看出,本文制备的钢筋混凝土箱涵试验样品发生轻微破损后,试验样品表面的混凝土发生破碎脱落,应力波检测结果出现明显反射波波

动,且该波动范围与实际破损图像相对应。但是由于该破损为轻微破损,因此检测结果显示破损周围区域并没有发生明显变化,该钢筋混凝土试验样品中的钢筋结构未出现破坏。

由图4可以看出,试验样品在落锤作用下发生严重破坏,内部钢筋暴露并出现变形,应力波检测结果与该实际破损结果一致。由于试验样品破坏较为严重,内部结构发生严重变形,因此应力波检测结果显示以破坏处为中心,应力变化向周围扩散。由此可以看出,应力波无损检测技术能够检测出试验样品的内部变化。

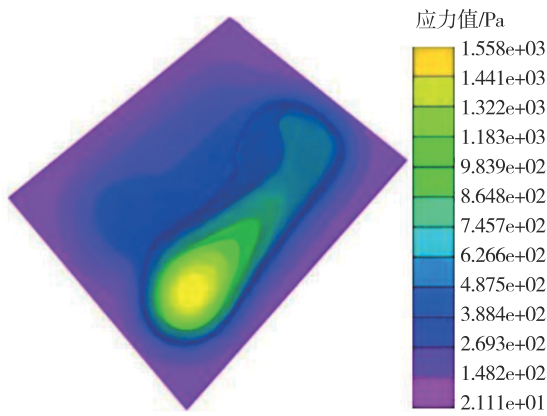
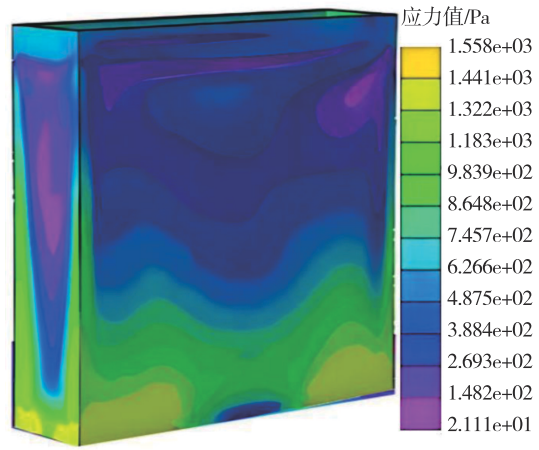


图4 严重破损试验样品应力波检测



(a)钢筋混凝土裂缝破损



(b)构件裂缝破损无损检测

图5 钢筋混凝土构件裂缝破损无损检测

### 2.2.2 裂缝破损检测结果

使用万能试验机向试验样品施加荷载,使得钢筋混凝土出现严重裂缝,再进行应力波无损检测,结果如图5所示。

由图5可以看出,钢筋混凝土箱涵试验样品受到外部荷载影响出现严重裂缝,尤其在该构件的底部,裂缝分布较为密集,说明受到外部荷载时,试验样品局部出现应力集中。图5(b)的应力波无损检测结果基本与图5(a)中的裂缝分布情况一致,在试验样品出现应力集中位置应力波检测出现较高应力值。且从图5(b)的整体来看,应力波检测能够获得试验样品内部的受损情况,说明应力波在试验样品内部传递,遇到异常介质时出现反射波,通过该反射波可以了解钢筋混凝土构件内部出现的异常

变化。

### 2.2.3 方向角与应力波传播速度之间的关系

应力波在试验样品中快速传播能够提升钢筋混凝土试件的无损检测速度,分别针对有破损钢筋混凝土试验样品和无破损钢筋混凝土试验样品开展试验。方向角与应力波传播速度之间的关系如表4所示。

由表4可知,尽管方向角发生变化,但是对没有损伤的钢筋混凝土试验样品开展无损检测后,应力波传播速度并没有发生明显波动,说明使用该无损检测方法检测正常钢筋混凝土构件时检测准确性较高,且检测效率较高。检测存在破损的钢筋混凝土构件时,应力波传播速度波动较大,该波动区域与钢

表4 方向角与应力波传播速度关系

方向角/(°)	钢筋混凝土试验样品应力波传播速度/(m·s <sup>-1</sup> )	
	有破损	无破损
-90	1 750	1 645
-60	1 759	1 647
-30	1 650	1 642
0	1 550	1 648
30	1 402	1 652
60	1 705	1 658
90	1 780	1 730

筋混凝土试验样品中破损区域位置相对应,由此也能确定使用该应力波无损检测方法的准确性较高。

### 3 结束语

使用应力波无损检测技术检测钢筋混凝土箱涵试验样品的内部损伤过程中,当试验样品未发生

损伤时,应力波在同一介质中正常传播,未出现反射波波动,因此检测结果没有显著变化;当试验样品发生轻微破损后,表面的混凝土破碎脱落,应力波检测结果出现反射波波动,且波动范围与实际破损图像相对应;在试验样品受到严重破坏时,内部钢筋暴露并变形,应力波检测结果与实际破损结果一致,且显示以破坏处为中心,应力变化向周围扩散。当试验样品受到外部荷载影响出现严重裂缝时,应力波无损检测结果与裂缝分布情况一致,并在应力集中位置出现较高应力值;对未损伤的钢筋混凝土试验样品进行无损检测时,应力波传播速度稳定,表明该方法检测正常构件的准确性较高。检测存在破损的构件时,应力波传播速度波动较大,波动区域与破损区域位置相对应,进一步验证了该无损检测方法的准确性。

### 参考文献:

- [1] 何赞泽,刘松源,白芸,等.基于声发射的Cascode型GaN HEMT器件机械应力波检测与分析[J].中国电机工程学报,2023(2):750-761.
- [2] 叶琦,管成,张厚江,等.辐射松层板抗弯性能的指接参数优化及无损检测研究[J].北京林业大学学报,2022(3):148-160.
- [3] 李旭锋,赵毅.基于盒维数与锚杆无损检测技术的杆体应力波特性的研究[J].煤炭工程,2024(3):130-135.
- [4] 尚新想,谢友均,马昆林,等.基于应力波的混凝土抗压强度无损检测试验研究[J].铁道科学与工程学报,2022(8):2305-2312.
- [5] 付兰凌,杨金水,刘志达,等.复合材料激光超声波传播特性及缺陷损伤检测[J].哈尔滨工程大学学报,2022(10):1454-1461.
- [6] 胡少兵,罗明璋,程峰,等.基于应力波频谱图的护栏金属立柱埋深检测法[J].公路,2022(6):336-341.
- [7] 邹晨阳,张双喜,陈芳.混凝土防渗面板裂缝综合无损检测技术研究[J].水利水电科技进展,2023(2):89-95.
- [8] 王忠铨,杨娜.多测点无损检测法评估古建木材抗弯强度[J].湖南大学学报(自然科学版),2022(1):78-84.
- [9] SCHERR J F, KOLLOFRATH J, POPOVICS J S, et al. Grosse. detection of delaminations in concrete plates using a laser ablation impact echo technique[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2023, 42(1):1-14.
- [10] 蒋保,魏晓斌,孙正华,等.装配式混凝土叠合构件缺陷无损检测技术研究[J].建筑结构,2022,52(S1):2144-2149.
- [11] 都方竹,杨栋,李冬生.钢-混凝土组合梁栓钉损伤无线波动检测试验研究[J].建筑结构,2023,53(S2):1732-1738.
- [12] 钱鲁斌,高春翔,胡婧宜,等.混凝土分层缺陷的超声检测方法研究[J].声学技术,2023(2):219-223.
- [13] 武麒麟,杜红秀,王聪聪.自密实混凝土钢管柱超声检测内部缺陷研究[J].太原理工大学学报,2023(6):1144-1152.
- [14] 张家松,胡涛,肖戈.天线极化模式对钢筋混凝土结构探测效果研究[J].公路工程,2022(6):205-209.
- [15] 蔡秋香,王陶.超声波法测试受压混凝土应力的试验研究[J].公路交通科技,2023(5):50-57.

责任编辑:李远辉