

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0415

基于超声波换能器的钢筋机械损伤与锈蚀损伤检测及其对比研究

汪佳宇, 陈铭刚, 布占宇*

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 超声导波检测技术有检测耗时少、覆盖范围大等优点。为检测钢筋混凝土结构中钢筋损伤, 采用超声波换能器研究不同深度和位置的机械损伤对超声导波传播的影响, 建立损伤程度与导波特征关系。通过反射系数 C 定量分析损伤程度, 并结合损伤反射回波判断损伤位置。在钢筋点锈蚀以及均匀锈蚀损伤检测中, 锈蚀程度达到最大时, L 波实际波速分别为 $4738.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $5069.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 以此区分锈蚀损伤与机械损伤, 最后基于小波变换的时频分析判断损伤状况。研究成果可为钢筋损伤检测研究提供参考。

关键词: 超声波换能器; 超声导波; 钢筋锈蚀; 损伤检测

中图分类号: TG115

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 01-0067-10

钢筋混凝土结构的整体性、可模性、耐火性等均较好, 在现代建筑领域应用广泛, 但一直受其耐久性问题的困扰^[1]。为了减少经济损失、保障人身安全, 有必要对钢筋混凝土结构中钢筋的损伤情况进行检测, 了解内部钢筋是否损伤、损伤程度以及损伤位置, 从而针对性地采取预防措施。

超声导波检测技术具有单点激励、检测耗时少且覆盖范围大、工作环境要求低等优点, 已成为目前无损检测领域的研究热点之一^[2-3]。超声导波是平行于边界传播的弹性波, 由波在介质中的不连续交界面间产生多次反射, 进一步产生复杂的干涉和几何弥散形成。超声导波检测技术通过超声导波和构件的相互作用, 由超声波换能器作为发射端, 导波在构件内部传播后, 对接收端换能器接收到的信号进行分析。若作为传播介质的构件本身存在损伤, 从发射端发出的信号经过传播介质后声波参数会发生改变, 如幅值衰减、模态变化及波速改变等, 与未损伤时的信号对比, 可以得出介质的损伤情况。

超声导波检测技术目前在土木工程领域应用广泛。Sharma 等^[4-5]、Du 等^[6]和雷鹰等^[7]将超声导波技术应用在钢筋混凝土锈蚀检测中; Zheng 等^[8]和 Sriramadasu 等^[9]通过数值模拟与试验结果对比, 验证导波检测钢筋锈蚀的可行性; Liu 等^[10]用超声导波检测钢筋在混凝土保护层厚度、水灰比以及不同种类钢筋条件下的锈蚀情况; Li 等^[11]针对由锈蚀导致的钢筋混凝土界面剥离问题, 对不同剥离长度的钢筋混凝土导波参数进行了研究; Sun 等^[12]采用高阶纵向模态检测实心、蜂窝和空洞 3 种不同钢筋混凝土界面的粘结条件; Lu 等^[13]对钢筋混凝土梁进行 4 点弯曲试验, 将导波参数作为量化混凝土结构损伤指标; 周琛等^[14]提出了基于 $L(0,2)$ 的超声导波检测方法, 对损伤管道和焊接弯管进行识别与定位; 徐阳等^[15]对埋地管道缺陷检测进行了研究; 张清华等^[16]对钢桥面板足尺模型进行了试验, 将超声导波用于检测纵肋对接焊缝疲劳裂纹。目前有关超声导波研究大都有关钢筋锈蚀和管道结构, 对钢筋不同损伤的对比研究较少。

收稿日期: 2023-04-14.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51878606); 浙江省基础公益研究计划项目(LGG22E080007); 宁波市交通运输科技项目(202116, 202207)。

第一作者: 汪佳宇, 硕士研究生, 主要研究方向: 超声导波检测技术. E-mail: 710367330@qq.com

*通信作者: 布占宇, 博士/教授, 主要研究方向: 预制拼装桥梁及桥梁抗震. E-mail: buzhanu@nbu.edu.cn

本文基于超声波换能器对钢筋损伤进行检测,从机械损伤和锈蚀损伤两方面入手,建立了损伤与超声导波特征的对应关系,并基于小波变换的时频分析方法判断钢筋的不同损伤状况。

1 理论分析

1.1 纵向模态

实心圆柱杆中存在3种超声导波模态,即纵向模态、扭转模态和弯曲模态。其中纵向模态以轴对称方式传播,具有径向和纵向位移分量,不存在环向位移分量,相比其他模态更容易激发。纵向模态传播如图1所示,式(1)为频率方程,在已知圆柱杆参数下可求出频散方程的解。

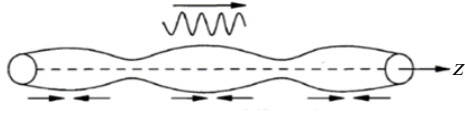


图1 实心圆柱杆纵向模态示意图

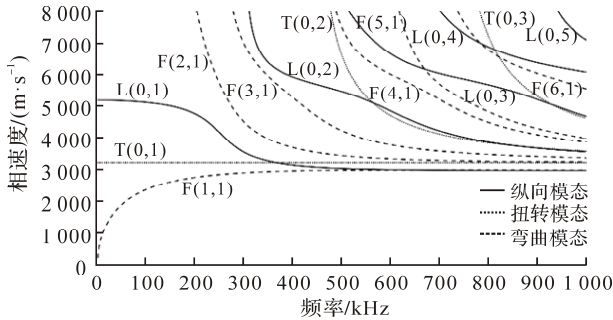
$$\frac{2\alpha}{a}(\beta^2 + k^2)J_1(\alpha a)J_1(\beta a) - (\beta^2 - k^2)^2 J_0(\alpha a)J_1(\beta a) - 4k^2\alpha\beta J_1(\alpha a)J_0(\beta a) = 0, \quad (1)$$

式中: $\alpha^2 = \omega^2 / c_L^2 - k^2$; $\beta^2 = \omega^2 / c_T^2 - k^2$; $c_L^2 = (\lambda + 2\mu) / \rho$; $c_T^2 = \mu / \rho$; ω 为圆频率; k 为波数; λ 为拉梅常数; μ 为泊松比; ρ 为密度; a 为圆柱半径。

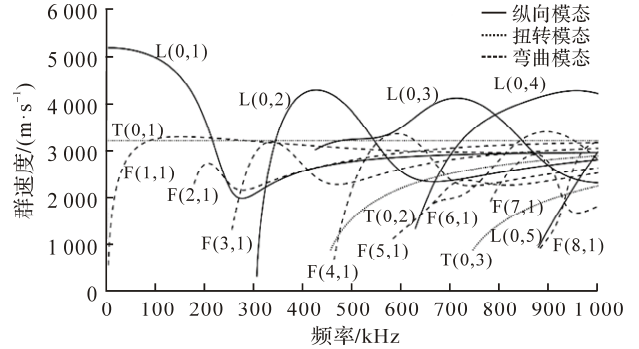
1.2 钢筋频散曲线

钢筋直径 12 mm, 弹性模量 210 GPa, 泊松比 0.3, 密度 $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 采用 MATLAB 环境下开发的 PCDISP 软件^[17], 求解频散方程的数值解, 得到各模态频散曲线, 如图2所示。

从图2可见, 超声导波模态数量随着频率增加而增加, 选择合适的激励频率可减少频散现象, 有利于检测。



(a) 各模态相速度频散曲线



(b) 各模态群速度频散曲线

图2 钢筋各模态频散曲线

本文选择频率为 100 kHz, 将超声波换能器布置在钢筋端部, 此时主要激发纵向模态, 根据 L(0,1) 模态的声波参数变化判断钢筋损伤情况。但由于钢筋两端换能器不能保证完全对称布置, 需要考虑弯曲模态 F(1,1) 存在, 下文简称 L 波和 F 波。

1.3 反射系数定义

反射系数指损伤反射回波信号与首波信号的幅值比值, 表征损伤程度对损伤回波信号幅值的影响, 通过该系数确定钢筋损伤状况, 定义为:

$$C = A_1 / A_2, \quad (2)$$

式中: C 为反射系数; A_1 为损伤反射回波信号幅值; A_2 为首波信号幅值。

2 钢筋机械损伤检测

2.1 试验平台搭建

RIGOL-DG1022Z 任意函数信号发生器和 RIGOL-DS2102A 示波器(普源精电科技股份有限公司), DYZ-300-01A 超声波换能器(福州大禹电子科技有限公司)。采用 Rigol Ultra Station 软件, 利用汉明窗函数调制 5 个周期正弦波作为激励信号, 中心频率 100 kHz、最大幅值 $\pm 5 \text{ V}$ 、波形总时长 $50 \mu\text{s}$ 、采样点 3 000 个。激励信号 u 表达式为:

$$u = U \sin(2\pi ft)(0.54 - 0.46 \cos(2\pi ft / 5)), \quad (3)$$

式中: U 为需要调制的激励信号最大幅值; f 为中心频率; t 为时间。

试验选择直径 12 mm 的 HPB300 热轧光圆钢筋, 长度 90 cm, 钢筋两端截面用砂纸打磨使其平整。AB 胶作为耦合剂将钢筋与超声波换能器固定, 粘贴过程中注意与换能器均匀接触, 最大程度降低信号泄漏。与信号发生器相连的换能器具有发

射功能, 由材料的压电效应将电信号转换为机械振动传递; 与示波器相连的换能器具有接收功能, 将机械振动转化为电信号, 由示波器接收电信号并显示波形. 每根钢筋经过多次测量得到数据, 选择波形和幅值稳定的信号研究, 以减小误差.

奈奎斯特(Nyquist)定理规定采样频率是信号最高频率的 10 倍及以上时, 采集的信号基本可以还原原始信号. 综合考虑示波器中可选择的参数, 选择采样率 10 MHz, 采样时间 1 400 μs .

2.2 不同深度机械损伤

距离钢筋发射端面 70 cm 处, 用钢锯切割宽度 1 mm, 深度分别为 1、3、5、7、9、11 mm 的损伤. 对不同损伤深度的钢筋(包括无损伤钢筋)编号 A1~A7, 机械损伤如图 3 所示.



图3 钢筋机械损伤加工

由于机械损伤的存在, 时域中会出现损伤反射回波, 主要考虑 2 条传播路径: 超声导波从发射端面发出后到达机械损伤处, 部分波被反射回发射端面, 继续反射后到达接收端面被换能器接收, 称为损伤前反射回波; 其余部分未受机械损伤影响而直接到达接收端面, 再回到损伤处后经反射回到接收端面被换能器接收, 称为损伤后反射回波. 传播路径如图 4 所示.

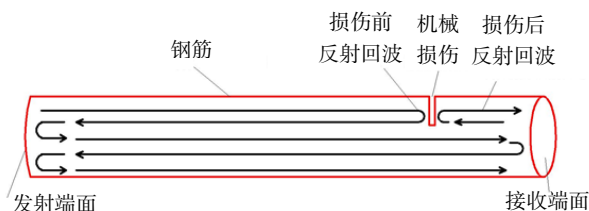


图4 钢筋在机械损伤下的超声波传播路径示意图

在 MATLAB Signal Analyzer 中使用 bandpass 函数对得到的信号进行带通滤波处理, 阻带衰减 60 dB, 陡度 0.85. 经处理后的信号解决了基线偏移现象, 使信号变得光滑. 根据钢筋各模式频散曲

线(图 2)可知, $L(0,1)$ 的理论波速大于 $F(1,1)$. 选取时域前 700 μs , 考虑损伤的存在, 因此时域中将依次出现 L 首波、F 首波、L 损伤后反射回波、F 损伤后反射回波、L 损伤前反射回波和 L 端面反射回波. 选取具有代表性的钢筋编号 A1、A4、A7 时域(图 5), 统计各波幅值与钢筋损伤深度的关系, 结果如图 6 所示.

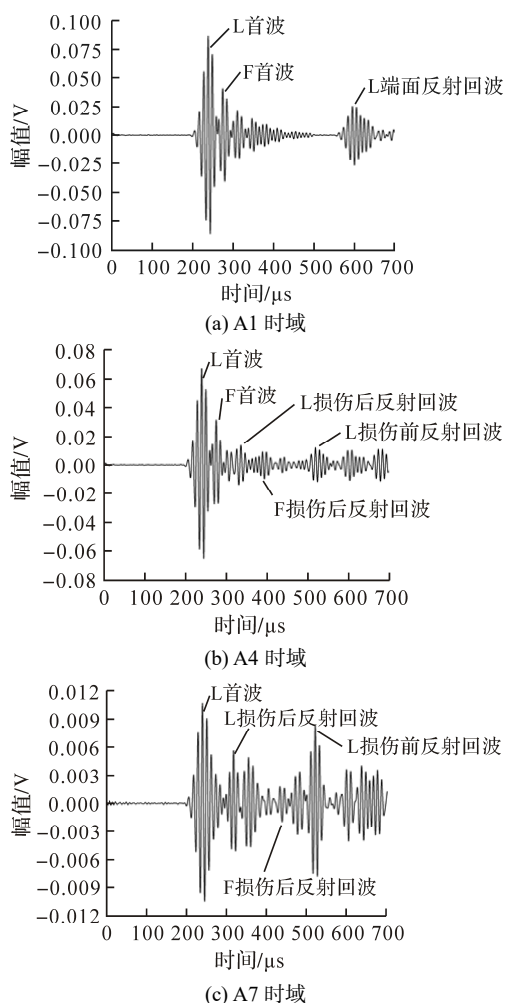


图5 钢筋不同机械损伤深度时域

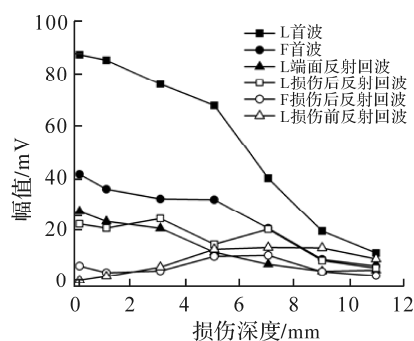


图6 机械损伤深度与信号幅值的关系

表1 不同机械损伤深度钢筋实际波速计算结果

钢筋编号	损伤深度/mm	$t_0/\mu\text{s}$	$t_1/\mu\text{s}$	$v_L/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	误差/%
A1	0	238.1	600.9	4 961.4	0.20
A2	1	239.1	602.7	4 950.5	0.02
A3	3	239.0	602.3	4 954.6	0.07
A4	5	239.7	604.7	4 931.5	0.40
A5	7	239.9	608.0	4 890.0	1.25
A6	9	239.3	602.2	4 960.0	0.18
A7	11	238.0	603.1	4 930.2	0.43

钢筋在无损伤情况下,信号在钢筋两端来回反射直至衰减,对于L和F首波后的一系列波形,推测由导波在钢筋界面的反射、折射而发生模态转换形成(图5(a)).随着损伤深度增加,L首波、F首波和L端面反射回波幅值均逐渐减小,导波受损伤干扰,时域中波形不再单一,波与波之间发生叠加,导致难以分辨.损伤深度为5 mm时,各损伤反射回波明显可见(图5(b));损伤深度达到11 mm时,超声导波在损伤处不断发生反射、折射、衍射,使能量大幅度衰减,L损伤前反射回波在时域中突显,此时F波幅值大幅度减小,以至于时域中难以观察(图5(c)).

由各模态群速度频散曲线可知,导波纵向模态在频率100 kHz下的理论传播速度为 $4\,951.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.为研究不同机械损伤深度对导波波速的影响,采用飞行时间法计算导波实际传播速度,并与理论波速进行对比.计算过程如下:

(1)时域中找到L首波和L端面反射回波的位置,并记录波峰值出现时间.

(2)假设L首波峰值出现时间为 t_0 ,L端面反射回波峰值出现时间为 t_1 ,则 t_1-t_0 就是L首波被接收端换能器接收到后信号反射回发射端,再从发射端反射到接收端所需时间,这段时间对应的路程即2倍的钢筋长度.

(3)设钢筋长度为 l ,则L波实际传播速度 v_L 为:

$$v_L = 2l / (t_1 - t_0). \quad (4)$$

不同工况下L波实际波速计算结果见表1.从表1可发现,采用飞行时间法计算得到的L波实际波速随损伤深度增加基本无变化,且与理论波速误差均在1.25%内,表明机械损伤的存在对钢筋中导波传播速度几乎无影响.未被损伤阻挡的波可

直接传播至接收端面.

L损伤前反射回波不与L波和F波发生叠加,可在时域中清晰显示.对其进一步研究发现,L损伤前反射回波理论上第一次被接收到传播路程为 $70+70+90=230\text{ cm}$,选择A5钢筋进行验证.L损伤前反射回波峰值出现时间与L首波峰值出现时间相差 $519.9-239.9=280.0\mu\text{s}$,与计算得到的L波实际波速相乘可得到L损伤前反射回波比L首波多传播的距离为 $280.0\times 4890.0=136.9\text{ cm}$.已知L首波的传播距离为钢筋长度(90 cm),由此求出L损伤前反射回波的实际传播距离为 $136.9+90=226.9\text{ cm}$,与理论路程对比,误差仅1.37%.

从图6可发现,随着机械损伤出现,L损伤前反射回波幅值先增加,损伤深度达到约钢筋直径一半时,损伤界面的存在导致波传播路径被阻断,导波能量传递效率大幅降低,首波幅值的降低不可避免导致损伤回波幅值降低.计算不同损伤深度下损伤前反射回波的反射系数,结果如图7所示.从图7可知,反射系数随损伤深度增加逐渐增大,采用MATLAB软件进行数值拟合得反射系数 C 与损伤深度 x 呈线性关系($C=0.08209x-0.15251$, $R^2=0.93927$).在检测中可以通过计算反射系数实现对损伤程度的定量分析.

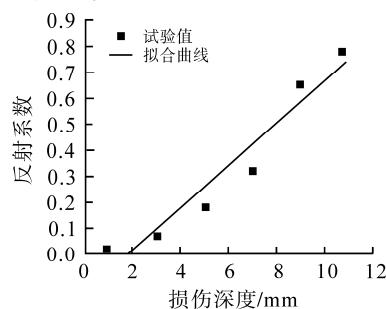


图7 机械损伤下L损伤前反射回波反射系数的计算

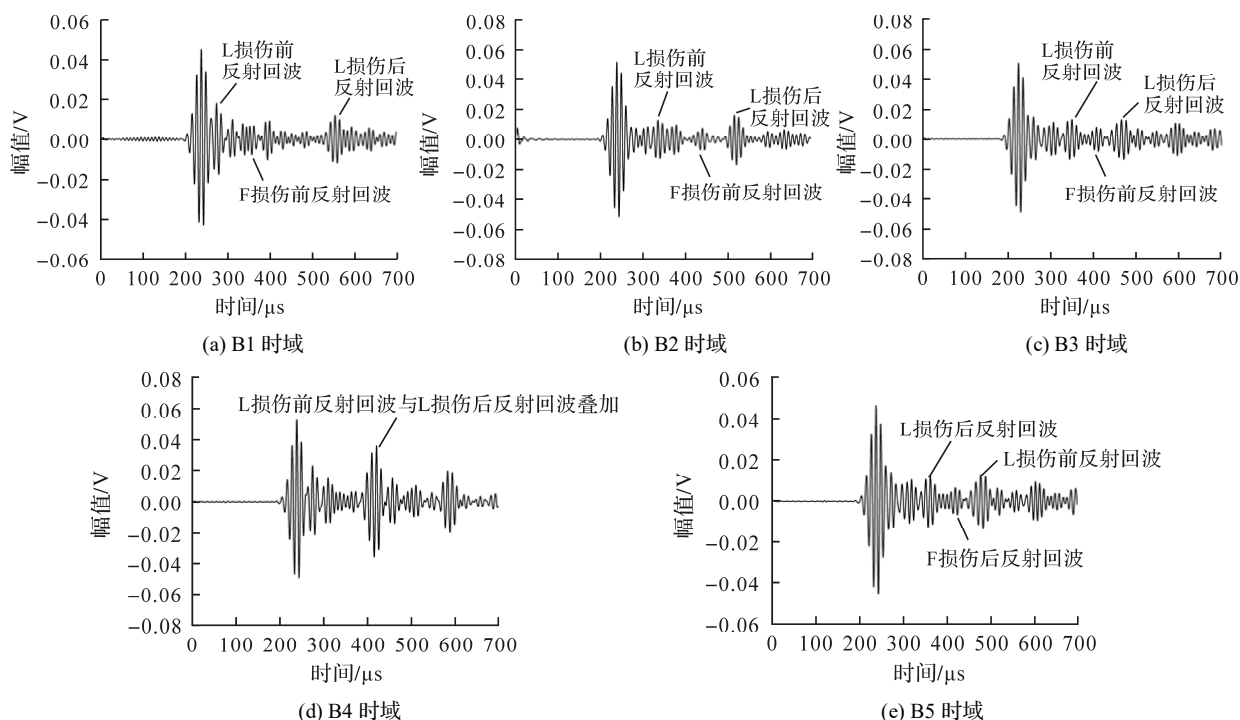


图8 钢筋不同机械损伤位置时域

2.3 不同位置机械损伤

确定钢筋一端为连接换能器后的超声导波发射端, 分别在距离发射端不同位置处用钢锯加工深度 5 mm、宽度 1 mm 的损伤, 对不同损伤位置钢筋编号为 B1~B7, 距离发射端分别为 10、20、30、45、60、70、80 cm.

试验发现, 当损伤位置关于钢筋中点对称时, 时域中波形十分相似. 因此选取有代表性的钢筋 B1~B5 时域, 结果如图 8 所示. 从图 8 可发现, 损伤位置距离钢筋中点越近, L 损伤前反射回波与 L 损伤后反射回波出现的时间越接近. B4 时域中, L 损伤前反射回波与 L 损伤后反射回波的传播路程均为 180 cm, 在同一时刻出现并发生叠加, 损伤反射回波幅值明显大于其他工况. 当损伤位置关于钢筋中点对称时(图 8(c)和图 8(e)). B3 时域中 L 损伤后反射回波和 B5 时域中 L 损伤前反射回波的传播路程均为 210 cm, 因此时域中出现位置相似. 此时在损伤位置未知时, 计算得到损伤回波传播路程后无法判断其传播路径, 因而无法准确计算出损伤位置. 选择时域图中受其余波干扰较小、时间靠后出现的 L 损伤反射回波, 计算得到反射系数如图 9 所示.

从图 9 可发现, 对于损伤位置关于中点对称的钢筋, 损伤位置距离接收端较远的反射系数比距离接收端较近的更大, 因此在实际计算损伤位置时, 需要先测一次信号, 之后将超声波换能器对调后连接, 再测一次信号, 即原本的信号发射端变成了接收端. 通过比较 L 损伤反射回波的反射系数大小可确定损伤是否远离接收端, 最后再计算传播路程, 得到损伤的具体位置.

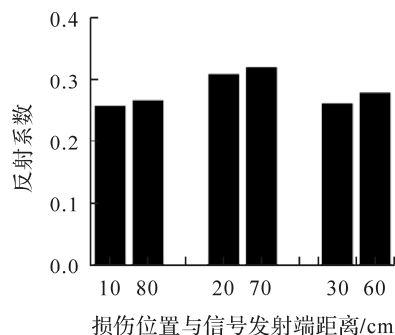


图9 钢筋中点对称损伤位置的反射系数

3 钢筋锈蚀损伤检测

3.1 点锈蚀损伤

选择直径 12 mm、长 90 cm 钢筋进行特殊处理, 在距离钢筋端部 70 cm 处套上直径 5.2 cm 的塑料杯,

接触位置涂抹 AB 胶防止溶液渗出, 将 5%NaCl 溶液倒入杯内. 采用汉普公司 HSPY-60-03 直流电源, 铜棒放入杯中并连接电源负极, 导线接在钢筋中间并连接电源正极. 接通电源后, 杯中钢筋发生加速锈蚀, 没有与溶液接触的钢筋则无变化, 以此达到点锈蚀的效果. 试验过程中及时清理塑料杯中的锈蚀物并更换 NaCl 溶液, 避免锈蚀物堆积导致锈蚀速率减小, 点锈蚀总体布局如图 10 所示. 设置直流电源电流为 500 mA, 每 12 h 停止通电并进行超声波测试.



图 10 点锈蚀试验设计

锈蚀时间 156 h 时停止试验, 钢筋损伤如图 11 所示. 点锈蚀处钢筋直径大幅减小, 存在不同宽度、深度的不规则锈坑. 而钢筋机械损伤的损伤界面较平整, 两者对导波反射有较大差别, 点锈蚀下的超声波传播路径如图 12 所示.



图 11 钢筋点锈蚀损伤

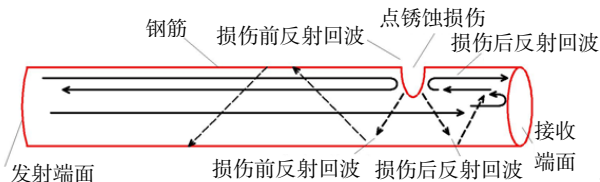
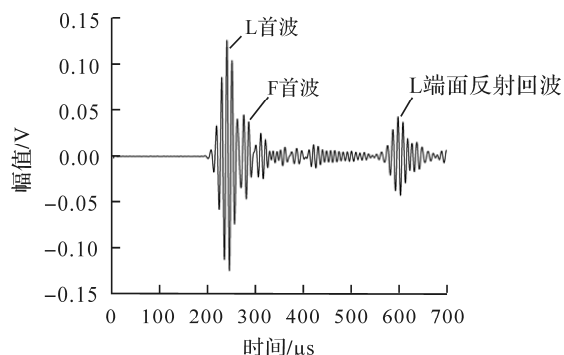


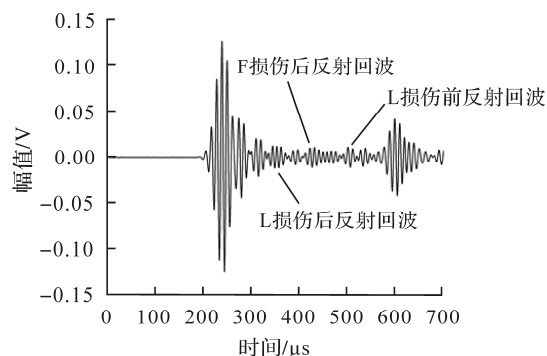
图 12 钢筋在点锈蚀下的超声波传播路径示意图

试验发现, 时域中各类反射回波幅值随锈蚀时间的变化较小, 与机械损伤相比较难观察到, 因此选择不同锈蚀阶段的时域(图 13), 锈蚀时间分别为 12、48、156 h, 统计点锈蚀时间与信号幅值关系如图 14 所示. 从图 14 可发现, 随着锈蚀时间的

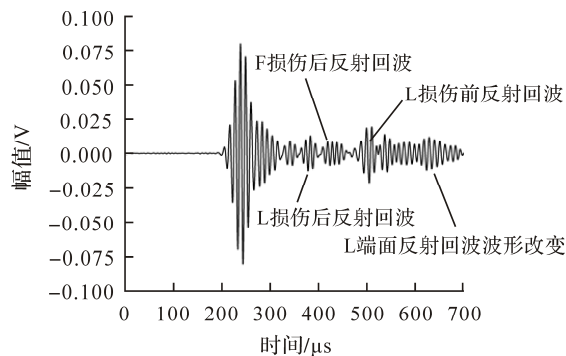
增加, L 首波幅值先小幅增加后减小, L 损伤前反射回波逐渐增大.



(a) 点锈蚀 12 h



(b) 点锈蚀 48 h



(c) 点锈蚀 156 h

图 13 钢筋点锈蚀时域

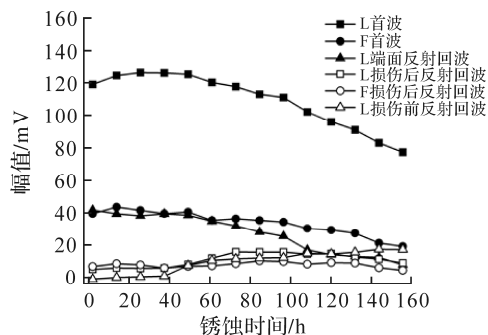


图 14 点锈蚀时间与信号幅值的关系

图 15 为点锈蚀下 L 损伤前反射回波反射系数.

从图 15 可发现, 锈蚀时间为 0~36 h 时, 反射系数增加缓慢, 此时对于宽度较大、深度小的锈坑, 导波在锈坑边界反射具有随机性, 能量向各方向衰减, 经钢筋端面反射后仅传递小部分能量; 而对宽度较小、深度大的锈坑, 经过锈坑后导波传递的能量相对较多, 因此可以在时域中显示, 如图 13(a) 时域中 400~550 μs 的杂波是由导波经深度较大的锈坑反射形成. 锈蚀时间在 36 h 后, 反射系数增速加快, 此时锈蚀导致钢筋直径减小, 对反射回波影响占主导作用, 损伤状况与机械损伤类似. 此时 L 损伤反射回波在时域中可见(图 13(b)), 其出现且幅值增大是判断钢筋发生点锈蚀的关键.

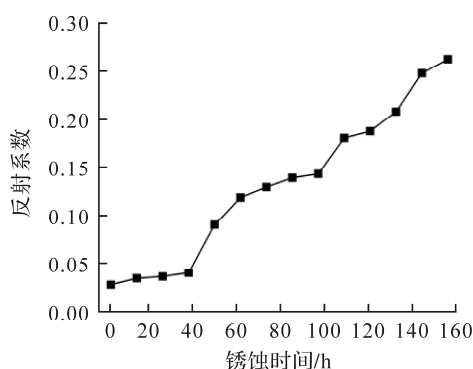


图 15 点锈蚀下 L 损伤前反射回波反射系数

对点锈蚀下波速进一步分析, 计算结果见表 2. 锈蚀时间为 0~120 h 时, L 波波速均与理论速度接近. 随着点锈蚀程度的加重, L 端面反射回波波形明显改变, 峰值出现时间滞后(图 13(c)). 锈蚀时间为 156 h 时, 波速减小至 4 738.1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 表明严重的点锈蚀对波速的影响不可忽视, 可与机械损伤工况区分. 因此在检测中可通过 L 损伤反射回波反射系数与波速的变化趋势判断点锈蚀程度.

表 2 点锈蚀下实际波速计算结果

锈蚀时间/h	L 波实际波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
12	4 998.6
48	5 002.8
72	5 004.2
96	5 005.6
120	4 864.9
156	4 738.1

3.2 均匀锈蚀损伤

对直径 12 mm(实测 11.6 mm)、长 60 cm 的光圆钢筋整体进行加速均匀锈蚀试验, 设定锈蚀率为

0%、2%、4%、6%、8%、10%, 每个试况 3 根钢筋(锈蚀 0% 设 1 根钢筋作为对照组), 钢筋编号为 C1~C16. 钢筋锈蚀速率和锈蚀量可通过设置直流电源的电流大小和通电时间控制, 锈蚀引起的钢筋理论质量损失依据法拉第定律计算:

$$\Delta m = \frac{MIt}{F|Z|}, \quad (5)$$

$$\rho = \frac{\Delta m}{m} = \frac{MIt}{mF|Z|}, \quad (6)$$

式中: Δm 为钢筋理论质量损失, g; ρ 为钢筋理论锈蚀率, %; m 为钢筋质量, g; M 为铁的摩尔质量, 取 56 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$; I 为电流强度, A; t 为通电时间, s; F 为法拉第常数, 取 96 485 $\text{C}\cdot\text{mol}^{-1}$; Z 为金属离子价数 (Fe^{2+}).

通过钢筋电流强度 I 可表示为:

$$I = is = i\pi dl, \quad (7)$$

式中: i 为钢筋表面电流密度, $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$; s 为钢筋表面面积, cm^2 ; d 为钢筋直径, cm; l 为钢筋长度, cm.

本试验通电电流密度控制在 2 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 左右, 按式(7)计算所需电流强度为 437.3 mA. 钢筋质量取平均值 499.5 g. 按式(6)计算得到钢筋不同锈蚀率所需通电时间结果见表 3.

表 3 钢筋加速均匀锈蚀时间计算结果

钢筋编号	设定锈蚀率/%	通电时间/h
C1	0	0
C2~C4	2	21.87
C5~C7	4	43.73
C8~C10	6	65.60
C11~C13	8	87.47
C14~C16	10	109.33

当钢筋锈蚀率为 10% 时, 锈蚀现象急剧加深, 钢筋表面锈坑加深且分布不均匀, 截面积明显减小, 如图 16 所示.



图 16 钢筋均匀锈蚀损伤

选取钢筋均匀锈蚀下部分时域(图 17), 从图 17 可发现, 均匀锈蚀下时域中波形无显著变化, 没

有复杂的损伤回波. 锈蚀率为 10% 时, L 波和 F 波的能量衰减相对机械损伤较小, L 波衰减率为 47.2%, F 波衰减率仅为 17.3%. 这是因为均匀锈蚀损伤不像机械损伤那样有较大的损伤缺口阻断超声导波的传播, 钢筋内部没有受到外表面锈蚀的影响, 导波能量损耗较少.

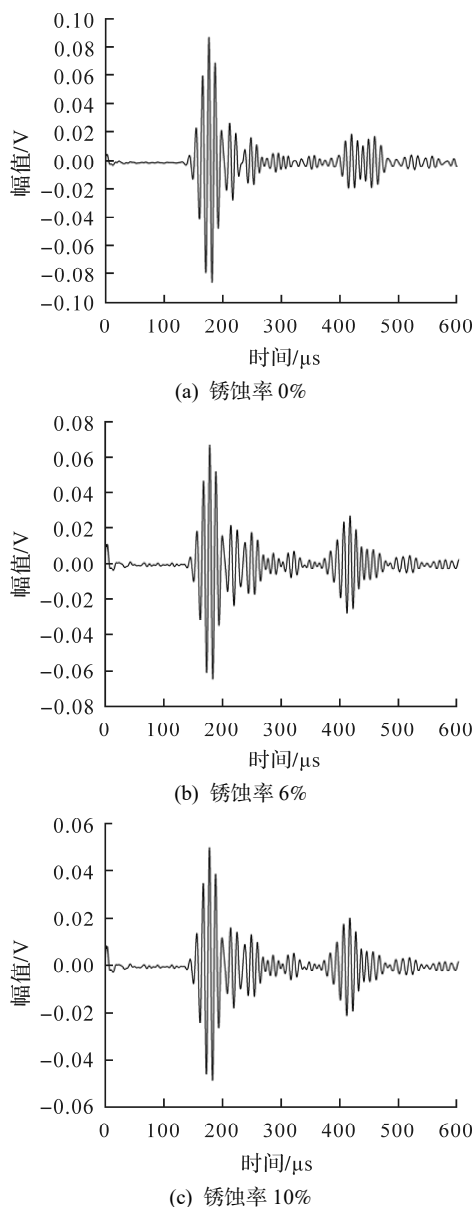


图 17 钢筋均匀锈蚀时域

对导波波速进一步计算分析结果见表 5. 随着锈蚀率增加, L 波波速逐渐增加, 推测由于锈蚀后钢筋直径减小、表面物质改变以及众多锈坑的存在影响了超声波模态, 致使波速发生改变. 因此在检测中可通过波形与波速变化作为钢筋是否发生大

面积均匀锈蚀的依据. 对于均匀锈蚀损伤的定量分析则需进一步研究.

表 5 均匀锈蚀下实际波速计算

锈蚀率/%	L 波实际波速/(m·s ⁻¹)
0	4934.2
2	4936.2
4	4924.1
6	4993.8
8	5035.7
10	5069.7

3.3 基于小波变换的钢筋损伤时频分析

小波变换在短时傅里叶变换基础上进一步发展而成, 继承了短时傅里叶变换的局部化思想, 并解决了时间窗的大小不能随信号频率的变化而变化的问题. 小波变换采用时间-尺度域, 尺度与频率成反比, 尺度越大, 采用的时间窗越大^[18]. 对任意函数 $f(t) \in L^2(R)$, 连续小波变换表达式为:

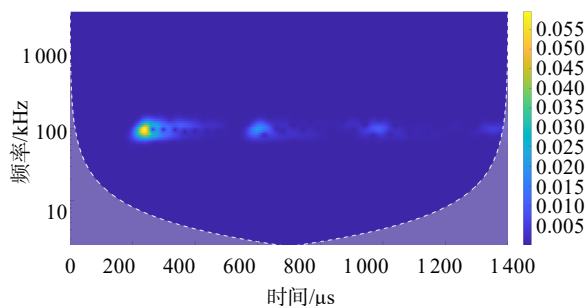
$$CWT_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt, \quad (8)$$

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi((t-b)/a), \quad (9)$$

式中: $\psi(t)$ 为母小波函数; a 为尺度因子; b 为平移参数.

对不同损伤工况下的钢筋得到的超声导波原始数据进行基于连续小波变换的时频分析. 在 MATLAB 软件中使用 `cwt()` 函数, 由此产生的时频表示也被称为 Scalogram, 表示信号的连续小波变换系数绝对值. 时频图同时表征信号的时间、频率和能量参数, 通过图谱中颜色的改变可快速得到时域中信号各部分能量大小和分布范围, 以此判断钢筋损伤程度和损伤类别.

选取无损伤钢筋、机械损伤深度 11 mm、钢筋点锈蚀时间 156 h、钢筋均匀锈蚀率 10% 共 4 组数据, 进行连续小波变换得到的时频如图 18 所示, 小波函数选择 Morse 小波, 频率以对数比例绘制.



(a) 无损伤钢筋

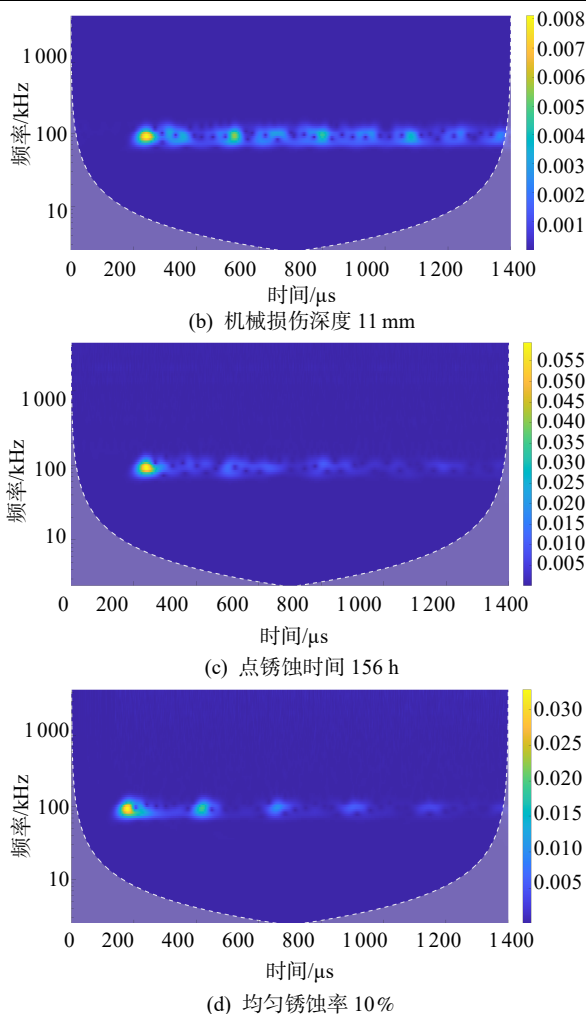


图 18 钢筋不同损伤时频分析

时频图中右侧为能量谱, 从上至下能量数值依次减小, 表征导波所含能量相对大小. 每一个波包对应一个能量包络, 信号存在的地方显示能量包络, 最明亮的色块主要集中在主频 100 kHz, 表明此处能量最大, 时域中对应 L 首波.

无损伤时频图中, 能量集中在 L 和 F 首波以及之后一系列端面反射回波中, 分布规律明显, 能量最大值 0.059. 机械损伤时频图中, 能量明显集中在 L 首波和出现时间约为 520 μs 的 L 损伤前反射回波处, 能量相比无损伤钢筋衰减明显. 复杂损伤回波的存在使色块分布极不均匀, 遍布整个时域. 点锈蚀时频图中, 除 L 首波外能量逐渐分散, 时间 300~700 μs 时可以观察到各种损伤回波的色块在横向和纵向分布, 其能量明显小于机械损伤时情况. 均匀锈蚀与钢筋无损伤时频图相似, 能量主要集中在 L 首波以及之后的端面反射波, 但能量最大

值远小于钢筋无损伤时, 仅为 0.032. 根据以上特点, 依据由连续小波变换的时频图可简单分析钢筋的损伤状况, 节省处理数据时间.

4 结论

(1) 钢筋机械损伤试验中, L 首波、F 首波、L 端面反射回波幅值随损伤深度的增加逐渐减小, 机械损伤对导波传播速度几乎无影响. 根据 L 损伤前反射回波的反射系数与损伤深度的拟合曲线可对损伤程度进行定量分析. 通过确定 L 损伤反射回波出现时间, 在已知波速情况下精确计算其传播路程. 考虑损伤位置关于钢筋中点对称, 比较 L 损伤反射回波的反射系数大小判断损伤是否远离钢筋发射端, 最终可得到具体的损伤位置.

(2) 相比机械损伤, 在钢筋锈蚀损伤试验中导波能量衰减较小. L 损伤反射回波出现且幅值逐渐增大可作为钢筋发生点锈蚀的依据, 结合反射系数与波速变化趋势判断点锈蚀程度. 均匀锈蚀中波形无显著变化, L 波波速有逐渐增加趋势, 在锈蚀率为 10% 时增加至 5 069.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 以此作为判断钢筋是否发生大面积均匀锈蚀的依据.

(3) 基于连续小波变换得到时频图, 根据图谱中各部分的能量大小和分布范围可以简单分析钢筋的损伤状况, 节省处理数据时间.

参考文献:

- [1] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性研究的回顾与展望[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(4):371-380, 403.
- [2] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8):1713-1735.
- [3] ZHENG Y X, WANG S Q, ZHANG P, et al. Application of nondestructive testing technology in quality evaluation of plain concrete and RC structures in bridge engineering: a review[J]. Buildings, 2022, 12(6):843.
- [4] SHARMA S, MUKHERJEE A. Monitoring corrosion in oxide and chloride environments using ultrasonic guided waves[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(2):207-211.
- [5] SHARMA Ashutosh, SHARMA Shruti, SHARMA Sanddeep, et al. Monitoring invisible corrosion in concrete using a combination of wave propagation techniques[J].

- Cement and Concrete Composites, 2018, 90:89-99.
- [6] DU P, XU D Y, HUANG S F, et al. Assessment of corrosion of reinforcing steel bars in concrete using embedded piezoelectric transducers based on ultrasonic wave[J]. Construction and Building Materials, 2017, 151:925-930.
- [7] 雷鹰, 郑翥鹏. 厦门翔安海底隧道钢筋腐蚀监测技术[J]. 工程力学, 2016, 33(5):1-10.
- [8] ZHENG Z P, LEI Y, XUE X. Numerical simulation of monitoring corrosion in reinforced concrete based on ultrasonic guided waves[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014:752494.
- [9] SRIRAMADASU R C, BANERJEE S, LU Y. Detection and assessment of pitting corrosion in rebars using scattering of ultrasonic guided waves[J]. NDT & E International, 2019, 101:53-61.
- [10] LIU Y Q, DING W J, ZHAO P, et al. Research on *in situ* corrosion process monitoring and evaluation of reinforced concrete via ultrasonic guided waves[J]. Construction and Building Materials, 2022, 321:126317.
- [11] LI D S, RUAN T, YUAN J H. Inspection of reinforced concrete interface delamination using ultrasonic guided wave non-destructive test technique[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(10):2893-2901.
- [12] SUN H B, ZHU J Y. Nondestructive evaluation of steel-concrete composite structure using high-frequency ultrasonic guided wave[J]. Ultrasonics, 2020, 103: 106096.
- [13] LU Y, LI J C, YE L, et al. Guided waves for damage detection in rebar-reinforced concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47:370-378.
- [14] 周琛, 何建, 胡暮平, 等. 基于 L(0, 2) 超声导波的管段结构损伤定位研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 181-191.
- [15] 徐阳, 罗明璋, 杜国锋. 基于压电陶瓷换能器的埋地管道缺陷监测研究[J]. 石油机械, 2022, 50(5):127-133.
- [16] 张清华, 张登科, 崔闯, 等. 基于超声导波的钢桥面板纵肋对接焊缝疲劳裂纹检测方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(6):101-112.
- [17] SECO F, JIMÉNEZ A R. Modelling the generation and propagation of ultrasonic signals in cylindrical waveguides[M]. Rijeka, Croatia: InTech, 2012:1-28.
- [18] SILIK A, NOORI M, ALTABEY W A, et al. Comparative analysis of wavelet transform for time-frequency analysis and transient localization in structural health monitoring[J]. Structural Durability & Health Monitoring, 2021, 15(1):1-22.

Ultrasonic transducer-based mechanical damage and rust damage detection of steel bars and comparative study

WANG Jiayu, CHEN Minggang, BU Zhanyu

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Ultrasonic guided wave inspection technology has the advantages of less detection time and wide coverage. In order to detect the damage of reinforcing steel in reinforced concrete structures, the ultrasonic transducer was used to study the effect of mechanical damage at different depths and locations on the propagation of the ultrasonic wave guide. The relationship between the degree of damage and the wave guide characteristics was established. The degree of damage was quantified by the reflection coefficient C , and the location of the damage was determined by combining the reflected echo of the damage. The actual L-wave velocities were $4\,738.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $5\,069.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ when the corrosion level reached the maximum in the spot corrosion and uniform corrosion damage detection, respectively, which could be distinguished from the mechanical damage. Finally, the wavelet transform-based time-frequency analysis was used to determine the damage condition. The results of this study can be used as a reference for rebar damage detection.

Key words: ultrasonic transducer; ultrasonic guided wave; steel corrosion; damage detection

(责任编辑 史小丽)