

基于非线性超声技术损伤钢筋混凝土 无损检测的适用性研究

田玉滨^{1,2}, 莫青城^{1,2}, 杜文森^{1,2}, 马云飞^{1,2}, 陈再现³

(1. 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

3. 哈尔滨工业大学(威海)土木系, 山东 威海 264200)

摘要: 以 27 个钢筋混凝土试件拉拔试验和 1 个立方体试块分级加载试验为基础, 利用 ZBL-U520 非金属超声检测仪对试件进行无损检测, 分析了接收器频率、发射电压对激发二次谐波的影响, 以确定仪器最佳设置参数。在此基础上利用非线性超声技术, 对不同荷载水平下的试件损伤进行了无损检测, 研究了考虑锈蚀率以及荷载损伤的二次谐波和非线性系数变化关系, 验证了非线性超声技术在钢筋混凝土无损检测中的适用性。结果表明: 接收换能器频率为发射换能器 2 倍时, 激发二次谐波效果更佳; 对比不同发射电压(65 V、125 V、250 V、500 V、1 000 V)的频谱图, 发现随着发射电压增加二次谐波幅值也增加, 因此在仪器允许范围内要获得较为精确的非线性超声特征参数, 选取发射电压 1 000 V。随着试件锈蚀率和拉拔力增加, 二次谐波幅值和非线性系数呈非线性变大趋势; 配箍率和保护层厚度增加, 试件二次谐波和非线性系数增加缓慢, 反之二次谐波和非线性系数增加较快。试验分析表明: 利用非线性超声技术对钢筋混凝土检测得到的非线性超声特征参数去表征试件损伤程度是较为准确和合适的。

关键词: 非线性超声技术; 发射电压; 二次谐波; 非线性系数; 无损检测; 锈蚀钢筋混凝土

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)02-0192-08

Research of applicability of non-destructive testing for damaged reinforced concrete based on nonlinear ultrasonic technology

TIAN Yubin^{1,2}, MO Qingcheng^{1,2}, DU Wenmiao^{1,2}, MA Yunfei^{1,2}, CHEN Zaixian³

(1. Key Lab of Structures Dynamics Behavior and Control (Harbin Institute of Technology),

Ministry of Education, Harbin 150090, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

3. Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264200, China)

Abstract: Based on the test results of 27 RC pullout test specimens and a cube block of step loading, the specimens with ZBL-U520 non-metallic ultrasonic detector were non-destructively tested. The effects that the second harmonic was excited by receiver frequency and transmitter voltage were analyzed so as to determine the suitable test parameters. On the basis of the analysis, the specimens of different corrosion rates with nonlinear ultrasonic technology were non-destructively tested and non corroded specimens graded injury were non-destructively tested under a pullout test. The relationship of nonlinear ultrasonic characteristic parameters (the second harmonic and nonlinear coefficients) and different corrosion rates, different load damage were studied, applicability of nonlinear ultrasonic technology applied RC Non-destructive testing was verified. The results show that the receiving transducer frequency equals the transmitting transducer 2 times more than the second harmonic. Compared with the with spectrums of different voltage (65 V, 125 V, 250 V, 500 V, 1 000 V), it can be found that with the increase of transmitting voltage, the amplitude of the second harmonic also increased. So the emitter voltage is positioned 1 000 V to obtain more accurate nonlinear ultrasonic characteristic parameters within the limits permitted by the instrument. The second harmonic amplitude and nonlinear coefficient increases nonlinearly with the increase of corrosion rating and pulling force, The second harmonic amplitude and nonlinear coefficients of the specimens increased slowly under higher stirrup ratio and while thicker protective layer. In contrast, Increased rapidly, Tests showed that it's accurate and suitable to characterize the damage degree of reinforced concrete by using nonlinear ultrasonic technology to measure nonlinear ultrasonic characteristic parameters.

收稿日期: 2016-06-25

修改稿日期: 2017-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678199)

作者简介: 田玉滨(1972—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构实验技术、检测技术和土木工程结构整治技术. E-mail: tianyubin@hit.edu.cn

Key words: nonlinear ultrasonic technology; mitter voltage; second harmonic; nonlinear coefficientsthe; NDT; corroded RC

在无损检测评估领域,使用声、光、电磁等手段探测材料内部结构是很常见手段。早在20世纪30年代国外就对混凝土无损检测评估技术进行研究应用。其中,无损检测中的超声波无损检测技术因其造价低廉、操作简便、灵敏度高等优点,在过去几十年里已经成为混凝土无损评价研究热点^[1],如冲击回波和脉冲回波常被用于混凝土结构损伤评估^[2]。然而,混凝土内部结构复杂,波速或幅值等线性声学参数的变化在材料损伤较小时并不灵敏^[3]。因此,利用材料损伤后所表现出的非线性超声特征,运用非线性理论实现对材料损伤的早期探测,引起国内外学者关注。

SOLODOV I Y^[4]和NA J K等^[5]研究表明非线性超声技术对于损伤检测的灵敏度远远高于线性检测方法,MAEV和SOLODOV^[6]指出可以利用二阶谐波幅值与基频谐波幅值平方比值的变化来表征脆性材料的损伤。而JHANG等^[7]的疲劳加载试验表明,随着循环次数的增加,二阶谐波幅值以及非线性系数(二阶谐波幅值与基波幅值的平方的比值)都有明显的变化,可通过非线性系数的变化来对结构材料的疲劳损伤程度进行描述和评估。在最近的研究中利用非线性超声技术检测混凝土损伤的方法被证明非常合适的^[8],如STAUFFER^[9]和陈小佳^[10]的研究表明,采用非线性声学方法可以较好的分析混凝土的早期损伤。周正干等人^[11]对非线性无损检测技术的研究、应用和发展做了详细阐述,指出非线性无损检测和评价方法弥补了传统线性超声检测的不足。而陈小佳^[10]通过非线性超声高阶谐波和非线性超声调制试验探讨混凝土材料中微裂缝的形成、扩展、到连通等不同发展阶段的非线性超声特征的变化规律;利用非线性参数和相对非线性参数实现了材料退化的描述和识别。陈小佳利用非线性超声技术研究混凝土微裂缝的试验,表明非线性超声技术有检测混凝土损伤的潜在力。

近年来,钢筋混凝土结构锈蚀问题越来越受到人们的重视,研究表明,钢筋锈蚀不仅影响其的力学性能、截面面积变化,还会严重影响钢筋与混凝土之间的粘结滑移性能,造成结构力学性能退化。二十世纪,在各种无损测试技术的发展下,钢筋混凝土损伤评估得到了广泛的研究。但大部分都集中在定性的对钢筋混凝土材料性能以及结构损伤的评估,且评估方法的优劣各不相同,没有一个统一的评判标准。而关于无损测试技术

对钢筋混凝土锈蚀后粘结性能的定性定量研究和评估,更多的研究是运用声发射技术量化钢筋锈蚀以及定性讨论锈蚀界面剥离现象^[13-15]。国内外学者尽管做了大量研究,但对于非线性超声波技术检测方法研究以及利用非线性超声波对钢筋混凝土锈蚀后损伤的检测评估研究却较少涉及。

因此,本文通过选择不同换能器频率和超声发射电压进行对比试验,研究了仪器最佳设置参数以及应用非线性超声技术对钢筋混凝土试件锈蚀损伤和荷载损伤进行检测以研究该技术实际应用的可行性。

1 试验简介

1.1 试验仪器

试验主要利用非金属超声波检测仪进行损伤检测。试验选用ZBL-U520非金属超声检测仪,如图1,满足《超声法检测混凝土缺陷技术规程》^[12]中的相关规定,

其功能主要有测强、测缺、测桩、测缝,本文采用超声法检测混凝土缺陷功能。该仪器主要性能指标:放大器宽带10~250 kHz,发射电压有65 V、125 V、250 V、500 V、1 000 V,采样周期一般采用0.8 μ s,幅度分辨率3.9‰。



图1 ZBL-U520非金属超声检测仪及换能器

Fig.1 Non-metallic ultrasonic detector and transducer

1.2 试验设计

试验设计了27个钢筋混凝土拉拔试件,考虑锈蚀率、箍筋间距和保护层3个变量对试件损伤程度的影响,每个变量有3个值,每一个试件对应1种锈蚀率、箍筋间距和保护层厚度,设计参数如表1,试件尺寸为160 mm×160 mm×250 mm,混凝土自拌,28 d实测强度等级为C30,纵筋采用HRB400月牙纹纵筋埋置于试件钢筋设计位置处(试件设计图见图2),锚固长度 $l_a=10d$, $d=200$ mm,同时将边长为80 mm×90 mm的直径为10 mm的HRB400的箍筋与纵筋相连,箍筋间距 s 参照《混凝土结构设计规范》中构件的构造要求,取150 mm、100 mm以及配置单根箍筋(本文称为间

距 0 mm); 混凝土保护层厚度同样参照规范中常用值取 35 mm、45 mm、55 mm; 将长为 50 mm 的硬质 PVC 套管设置在加载端, 这样便形成了钢筋与混凝土间的无粘结段, 消除了承压钢板对试件端部局部挤压效应, 防止试件粘结锚固强度偏高造成的失真影响。

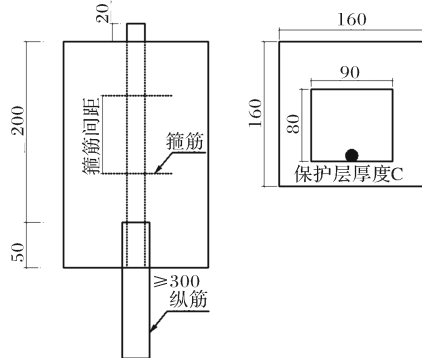


图 2 标准试件设计图

Fig. 2 Design of standard specimen

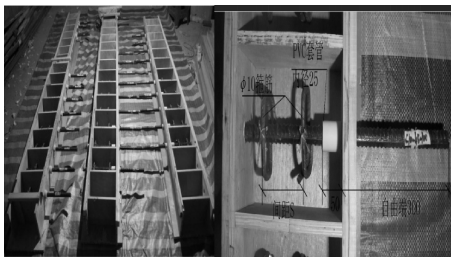


图 3 试件内部结构

Fig. 3 The internal structure of the specimen

试件内部结构如图 3 所示, 试验试件锈蚀采用实验室恒定电流加速方法锈蚀原理。待锈蚀完成后采用自制钢框架加载装置并结合 100 t 电液伺服万能试验机对试件进行拉拔试验。试验采用荷载-位移混合控制的加载制度进行加载, 参照 GB50152-1992 版规范中规定的力控制方式加载速度为 80 N/s, 位移控制方式加载速度为 0.2 mm/min, 加载示意图如图 4 所示。

选择一个换能器频率, 试验得到非线性超声特征参数, 之后更换换能器频率进行对比检测。试件拉拔试验过程中, 每隔 30 kN 进行一次超声检测, 同时在极限拉拔力测得非线性超声特征参数。

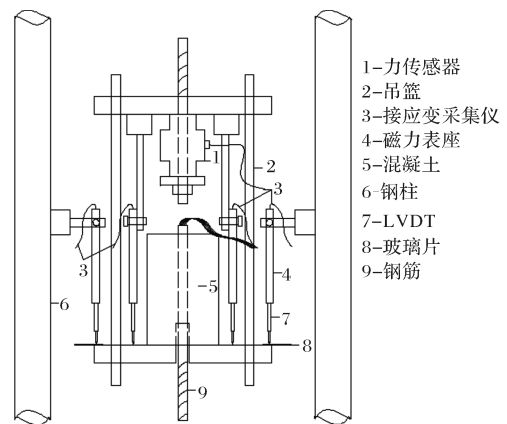


图 4 拉拔试验示意图

Fig. 4 Schematic of drawing test

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens

试件编号	试件尺寸/mm	纵筋配筋(HRB400)	箍筋配筋(HRB400)	钢筋锈蚀率 $\omega/\%$	保护层厚度 d/mm
C ω -d-0	60×160×250	1 Φ 20	Φ 10@0	$\omega=0, 10, 20$	$d=35, 45, 55$
C ω -d-100	60×160×250	1 Φ 20	Φ 10@100	$\omega=0, 10, 20$	$d=35, 45, 55$
C ω -d-150	60×160×250	1 Φ 20	Φ 10@150	$\omega=0, 10, 20$	$d=35, 45, 55$

1.3 测试方案

对试件锈蚀前后进行超声检测测点布置, 参照规范《超声法检测混凝土缺陷技术规程》中不密实区和空洞检测规定和测试方法, 被测部位选择一对相互平行的测试面, 采用对测法方法, 沿钢筋纵向每 50 mm 取一个测点, 所测值取平均值。如图 5 对测法测点布置图。

2 非线性超声换能器频率确定

超声波测试试验采用的是实验室配备的压电式纵波平面声波换能器, 声波发射换能器频率为 50 kHz, 为更清晰接收测试时所产生的高阶谐波信号, 同时参照《超声法检测混凝土缺陷技术规

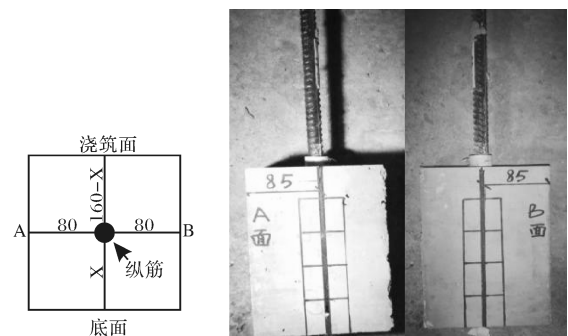


图 5 对测法测点布置图

Fig. 5 Measuring points distribution of the opposite measurement method

程》中换能器技术要求, 接收端换能器分别采用 50

kHz 和 100 kHz 的接收频率, 对本试验未锈蚀拉拔试件进行了检测, 得到了试验数据。通过采用 Matlab 对时域图进行快速傅里叶转换, 获得功率谱, 找出二次谐波幅值进行对比, 其目的在于选用更能激发出非线性超声二次谐波的换能器频率, 探索出非线性超声检测技术在混凝土损伤检测中的仪器设置参数。

当选用不同接收频率时, 二次谐波幅值对比, 如图 6(图例中以 A、B 开头的为接收换能器频率分别是 100 kHz、50 kHz; 坐标 X 轴上编号 N1-N9 分别代表 9 个未锈蚀试件)。

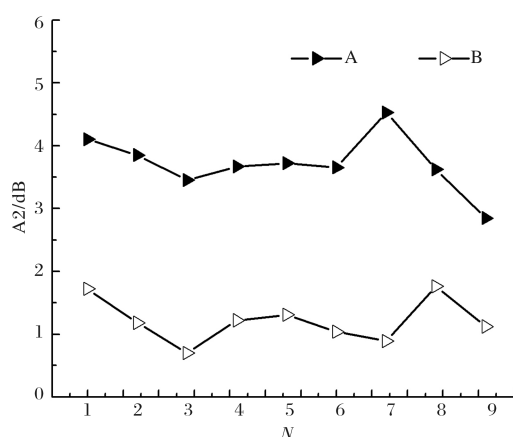


图 6 二次谐波幅值对比

Fig. 6 Comparison of the second harmonic amplitude

从图 6 中可以看出, 换能器接收频率为 100 kHz 的二次谐波功率谱幅值明显大于 50 kHz 的换能器, 是 50 kHz 时幅值的 2 倍多。在频谱图中效果如图 7 所示(数据来自试件 C0-45-150), 在频率 f 为 100 kHz 时接收频率为 100 kHz 的换能器激发二次谐波效果更为明显, 因此接收换能器选用频率为 100 kHz 更合适。同时可以看出在材料没有损伤或没有发生新的损伤前, 二次谐波幅值大小与换能器频率选择很大关系。

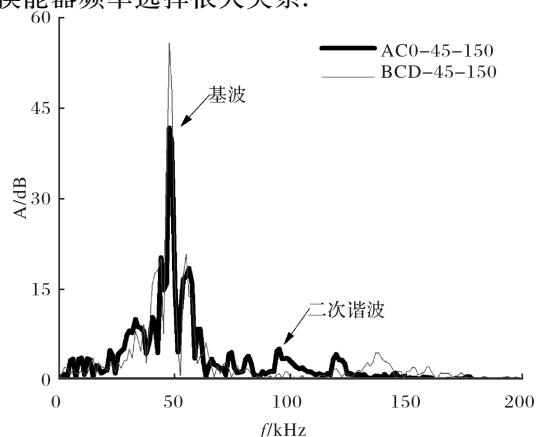


图 7 功率谱图对比

Fig. 7 Comparison of the power spectrum

3 非线性超声发射电压确定

发射电压的大小直接影响超声波接收信号的强弱, 从而影响非线性超声高阶谐波(如二次谐波)的产生以及功率谱幅值的激发程度, 而非线性系数(二阶谐波功率谱幅值和基波功率谱幅值的平方的比值)直接反应了试件损伤的程度。考虑试件在损伤初期发展过程中, 谐波幅值会更加清晰, 因此为确定本试验发射电压, 选取了 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的立方体试块, 测得其立方体抗压强度后, 在同批次中选取一个试块在 200 t 压力机上对其进行分级加载(取抗压强度的 0%、20%、40%、60% 并分别用 A、B、C、D 表示, 如 A1000 表示荷载为抗压强度的 0%, 发射电压为 1 000 V), 测其不同荷载时, 不同发射电压(65 V、125 V、250 V、500 V、1 000 V)下波形时域信号, 如图 8 为分级加载测试图和接收换能器获得的部分典型波形时域信号。



图 8 (a) 分级加载

Fig. 8 (a) Step loading

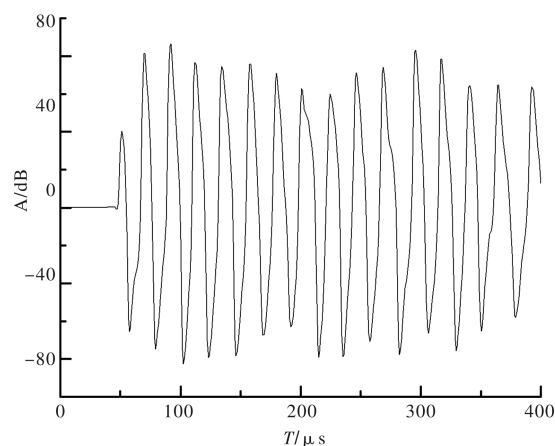


图 8 (b) 时域信号

Fig. 8 (b) Time domain signal

对不同时域信号用 Matlab 进行快速傅里叶转换, 得到不同荷载下频谱图, 如图 9 所示。从图中可看出二次谐波功率谱幅值(A2)随着荷载增大而增大, 且发射电压为 1 000 V 时, 超声波所激发出的二次谐波功率谱幅值更大, 但是在荷载为抗压强度的 20% 时, 所激发出的 A2 都不明显, 因为在此时的荷载水平下, 原本充满孔隙的混凝土块压的更密实, 导致非线性特征不明显。

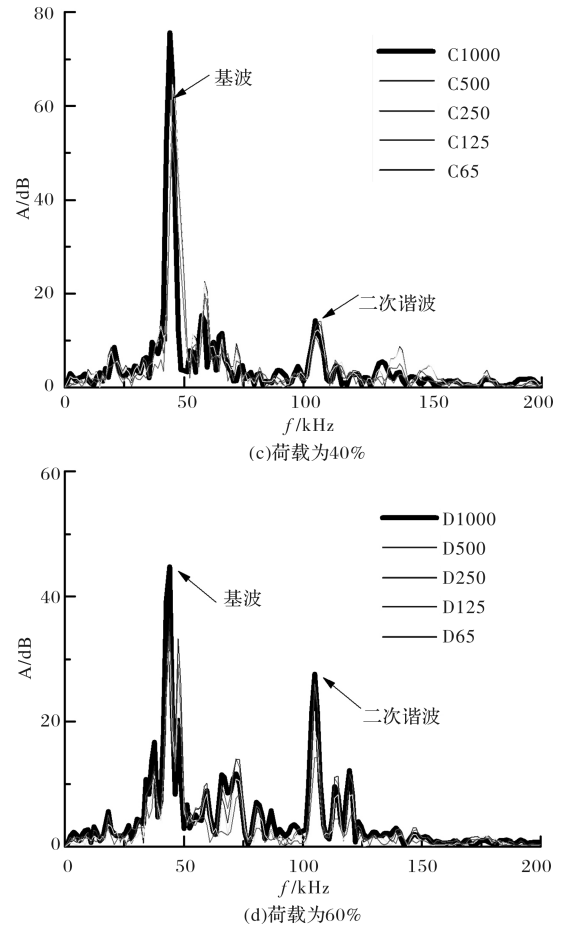
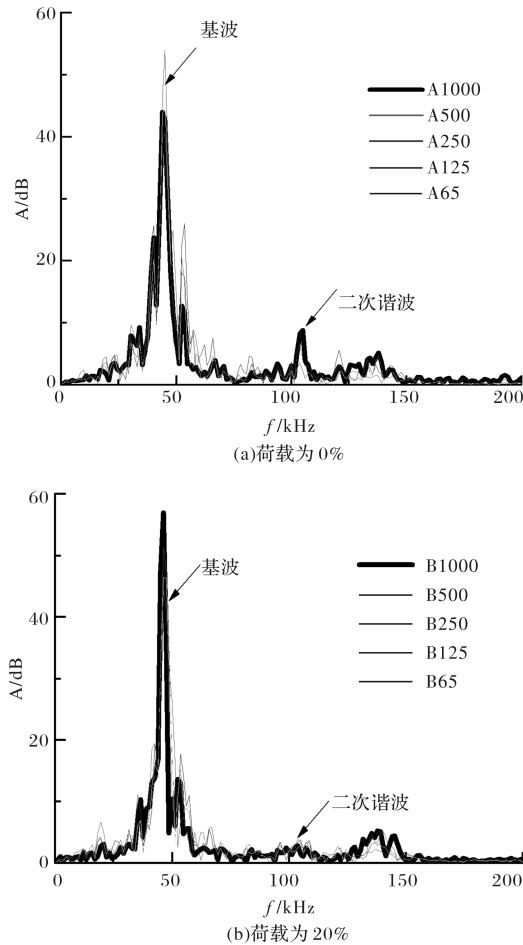


图 9 不同荷载和发射电压对 A2 影响

Fig. 9 Effects of different loads and transmit voltage on the A2

当荷载继续增大, 混凝土逐渐出现微裂纹, 混凝土块的表现出的非线性特征逐渐明显, 在荷载 60% 时达到最大, 而后裂纹贯通, 形成较大裂缝, 混凝土破碎, 此时无法测量。

经以上分析要获得精确、清晰的非线性超声特征参数发射电压选用 1 000 V 更为合适。

表 2 锈蚀前后非线性超声特征参数

Tab. 2 Nonlinear ultrasonic characteristic parameters of corrosion before and after

锈蚀率		$\omega=0\%$			$\omega=10\%(7\%)$			$\omega=20\%(15\%)$		
编号	试件名称	A1	A2	β	A1	A2	β	A1	A2	β
N1	C ω -35-0	37.19	4.10	2.96E-03	48.43	6.35	3.41E-03	36.73	7.00	5.19E-03
N2	C ω -35-150	39.24	3.45	2.24E-03	36.71	5.59	4.15E-03	37.33	6.47	4.64E-03
N3	C ω -35-100	37.77	3.85	2.70E-03	35.63	5.62	4.42E-03	42.59	7.75	4.27E-03
N4	C ω -45-0	39.16	3.67	2.39E-03	43.91	5.49	2.85E-03	40.77	6.65	4.00E-03
N5	C ω -45-150	44.47	3.66	1.85E-03	39.79	6.26	3.95E-03	35.95	7.21	5.58E-03
N6	C ω -45-100	44.65	3.73	1.87E-03	36.52	5.56	4.17E-03	36.76	6.80	5.03E-03
N7	C ω -55-0	39.87	4.19	2.64E-03	37.58	6.00	4.25E-03	38.18	7.27	4.85E-03
N8	C ω -55-150	42.74	3.40	1.86E-03	44.21	5.63	2.88E-03	43.26	6.52	3.49E-03
N9	C ω -55-100	37.40	3.62	2.59E-03	42.49	6.01	3.33E-03	39.18	6.40	4.17E-03

注: ω 为试件锈蚀率; A1 为基波幅值平均值; A2 为二次谐波幅值平均值; 非线性系数; $\omega=7\%$ 和 $\omega=15\%$ 为试件实际锈蚀率。

4 基于非线性超声技术的锈蚀钢筋混凝土损伤检测

对拉拔试件在锈蚀前和锈蚀后进行超声波检测,得到锈蚀前和锈蚀后超声波时域图,进行快速FFT转换得到功率谱幅值图,从中提取基波幅值和二次谐波幅值,每个试件上的点测量值取平均值得到数据如表2,计算出非线性系数 β ,对不同锈蚀率下试件二次谐波幅值 A_2 进行对比,如图10所示。从图中可以看出随着锈蚀 ω 增加,二次谐波幅值 A_2 随之增大, $\omega=0\%$ 时幅值平均值为3.74, $\omega=7\%$ 时幅值平均值为5.83, $\omega=15\%$ 时幅值平均值为6.90,可以看出幅值并非线性增长,因为钢筋锈蚀后会在钢筋表面产生锈蚀产物,随着锈蚀产物的累积,体积大于钢筋锈蚀减小的体积,造成钢筋和混凝土粘结界面出现微小裂缝,随着锈蚀程度加深,裂缝逐渐向试件表面发展,直到贯通,在这个过程,由于裂缝的发展,试件的损伤加重,非线性超声特征也越发明显,直到裂缝贯通,锈蚀产物从裂缝析出,试件裂缝宽度发展得以缓解,而且随着裂缝增大,超声波信号能量损伤也逐渐增加,因此二次谐波的增加速度减缓。

对不同锈蚀率下非线性超声系数进行分析,如图11所示,规律与图10相似,由此可知,随着锈蚀率增加,基波幅值并没有发生较大变化。本文结合试验规律,将不同锈蚀率对非线性系数影响关系进行非线性曲线拟合,得到拟合公式:

$$\beta = e^{(-0.00243\omega^2 + 0.08256\omega - 6.0549)} \quad (1)$$

其中: β 为非线性系数; ω 为锈蚀率($\omega \leq 15\%$)。

从损伤力学的概念出发,将Loland损伤模型与非线性系数结合推导出非线性系数和损伤变量的关系式^[10]:

$$\beta = D/\epsilon \quad (2)$$

式中: D 为损伤变量, ϵ 为材料应变。

从公式可见看出非线性系数反映了损伤变量随应变增长的速率,利用材料的非线性超声特征,可以实现不同锈蚀程度对试件损伤发展趋势的评价。

5 基于非线性超声技术的钢筋混凝土拉拔试验损伤检测

在对钢筋混凝土试件进行拉拔试验时,每隔30 kN利用U520非金属超声检测仪进行超声检测,直到极限荷载时停止检测,所测数据同以上

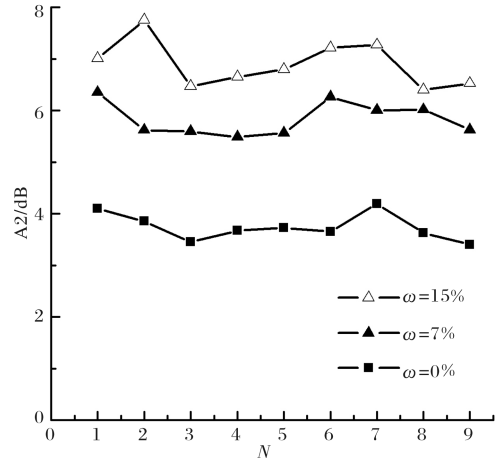


图10 不同锈蚀率对 A_2 影响

Fig. 10 Effects of different rates corrosion on the A_2

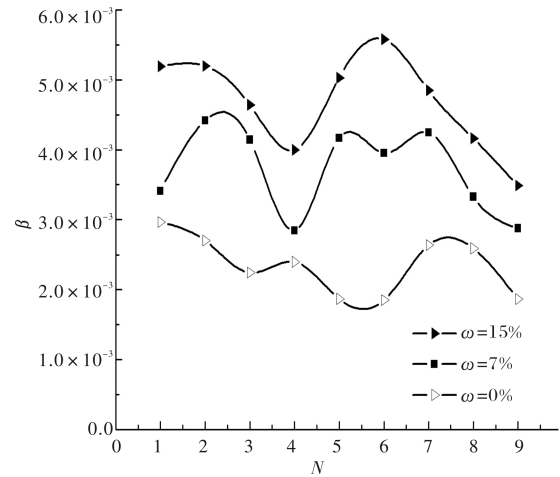


图11 不同锈蚀率对 β 影响

Fig. 11 Effects of different rates corrosion on the β

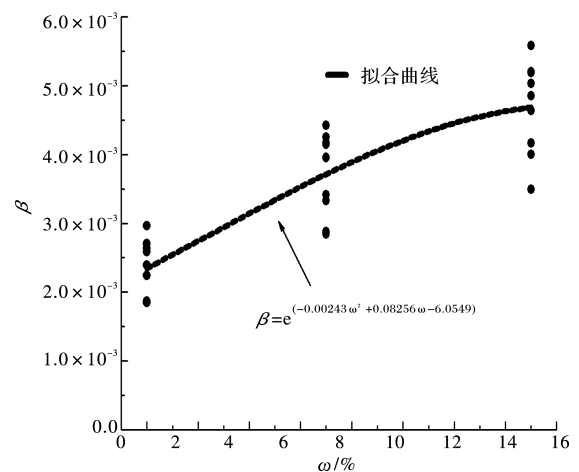
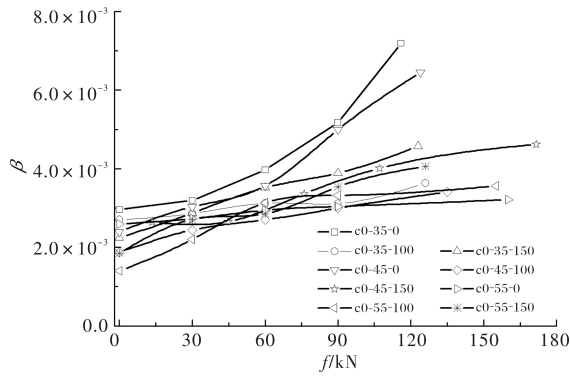


图12 参数拟合

Fig. 12 Parameters fitting

方法相同进行整理。本节仅将未锈蚀试件拉拔试验下所得数据进行整理,如图13所示,不同荷载作用下试件损伤对非线性系数 β 的影响。

从图中可以看出,随着试件所承受拉拔力的

图 13 不同荷载作用下损伤对 β 影响Fig. 13 The influence of different loads on the β

增加,非线性系数也逐渐增大,且大致呈线性增大。理论研究表明,当拉拔试件在受拉拔力时,钢筋和混凝土粘结表面粘结应力便产生,当拉拔力逐渐增大时,钢筋和混凝土粘结表面逐渐产生粘结滑移,随着滑移量增大,粘结表面受到剪切力而产生裂缝,试件损伤开始出现,拉拔力不断增加,裂缝不断增加,贯通,试件损伤逐渐增加;当达到试件极限拉拔力时,试件发生拉拔破坏或劈裂破坏,因此随着损伤的增加,在此过程中表征试件损伤的非线性系数 β 应逐渐增大,试验所测数据与理论相吻合。

如图 14 和 15 所示,分别为不同荷载作用下的损伤下对二次谐波幅值 A_2 影响和不同荷载作用下的损伤对非线性系数 β 影响。

图(13)和图(14)中横坐标上编号 N1—N9 依次代表 C0-d-0、C0-d-150、C0-d-100 试件,其中 d 分别为 35、45、55。从图中可以看出不同试件在相同拉拔力作用下二次谐波和非线性系数是不同的,试件 N1、N2、N3,二次谐波 A_2 和非线性系数 β 逐渐减小,试件 N4、N5、N6 和试件 N7、N8、N9 具有相同的规律。同样主要由于 N1、N2、N3 配箍率越来越大,箍筋有效延缓试件在拉拔过程中钢筋滑移造成的裂缝发展,同时产生的约束力还能提高试件抗拔力,因此可知,箍筋越密对拉拔产生的裂缝的约束效果越强,试件的损伤越小,因此二次谐波幅值、非线性系数就越小。

同时从图中可以看出, N1、N4、N7, N2、N5、N8 和 N3、N6、N9 试件的二次谐波和非线性系数也呈下降趋势,主要原因为保护层由 35 mm、45 mm 增加到 55 mm,随着保护层的增加,

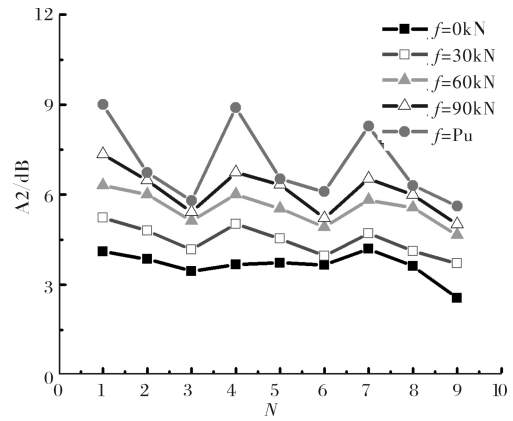
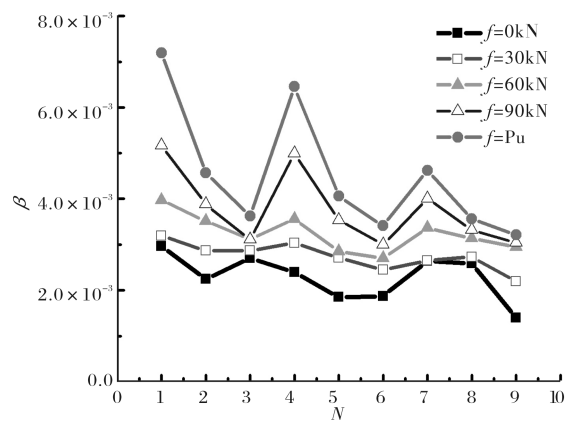
图 14 不同荷载作用下的损伤对 A_2 影响Fig. 14 The influence of different loads on the A_2 图 15 不同荷载作用损伤对 β 影响

Fig. 15 Damage compared of specimens under different load

对钢筋拉拔力和混凝土约束能力也有所提高,与试验中所测极限拉拔力相吻合,因此,通过非线性超声技术对钢筋混凝土拉拔试验损伤检测得到非线性超声特征参数去表征试件损伤程度是比较准确且合适的。

6 结论

(1)材料没有损伤或没有发生新的损伤前,二次谐波幅值大小与换能器频率选择很大关系,接收换能器频率选择为发射换能器频率 2 倍时更能有效激发高阶谐波产生。

(2)损伤不变时,在一定电压范围内,超声波发射电压越高越能激发高阶谐波的产生。

(3)随着箍筋间距的减小、保护层厚度的增加,对钢筋拉拔力和混凝土的约束能力提高,钢筋混凝土非线性系数减小。

(4)在荷载增大的过程中出现了二次谐波幅值先减小后增大的情况,原因是试件在分级加载过

程中先受压变密实,此时试件的非线性特征不明显。

(5)随着钢筋混凝土锈蚀率的增加,试件损伤加剧,试件非线性超声特征-二次谐波和非线性系数呈非线性增加,试验证明:非线性超声技术检测试验与现有理论相吻合,非线性超声检测技术对于检测钢筋混凝土锈蚀损伤是合适的。

(6)非线性超声技术能够对钢筋混凝土粘结滑移破坏造成的损伤进行精确的检测,试验证明非线性超声技术能够较好的应用于钢筋粘结滑移损伤检测中。

参考文献 References

- [1] SELLECK S F, LANDIS E N, PETERSON M L, et al. Ultrasonic Investigation of Concrete with Distributed Damage[J]. *Aci Materials Journal*, 1998, 95(1): 27-36.
- [2] WILLAM K J, NOGUEIRA C L. Ultrasonic testing of damage in concrete under uniaxial compression[J]. *Aci Materials Journal*, 2001, 98(3): 265-275.
- [3] JHANG K Y. Applications of nonlinear ultrasonics to the NDE of material degradation[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2000, 47(3): 540-548.
- [4] SOLODOV I Y. Ultrasonics of non-linear contacts; propagation, reflection and NDE-applications[J]. *Ultrasonics*, 1998, 36(1): 383-390.
- [5] NA J K, Cantrell J H, Yost W T. Linear and nonlinear ultrasonic properties of fatigued 410Cb stainless steel[M]// *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. US: Springer 1996: 1347-1352.
- [6] MAEV R G, SOLODOV I Y. Acoustic reflectivity enhancement using higher-order nonlinear reflection mode[J]. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 1998; 1: 707-710.
- [7] JHANG K Y. Applications of nonlinear ultrasonics to the NDE of material degradation[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2000, 47(3): 540-548.
- [8] ROE S E, WOODWARD C, CRAMER M J. Nonlinear ultrasonic testing on a laboratory concrete bridge deck [J]. *Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval.*, 2007, 894(1): 1429-1434.
- [9] Woodward C B, Stauffer J D. Nonlinear ultrasonic testing with resonant and pulse velocity parameters for early damage in concrete[J]. *Aci Materials Journal*, 2005, 102(2): 118-121.
- [10] 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 Xiaojia. Study on initial damage detection and evaluation of concrete based on nonlinear acoustic features[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [11] 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 Zhenggan, LIU Siming. Nonlinear nondestructive testing technology, application and development[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(8): 2-11.
- [12] 中国工程建设标准化协会批准. 超声法检测混凝土缺陷技术规程: CECS, 21: 2000[M]. 北京: 中国计划出版社, 2000.
China Engineering Construction Standardization Association authorized. Technical specification for inspection of concrete defects by ultrasonic method, CECS: 21: 2000[M]. Beijing: China Planning Press, 2000.
- [13] YEIH W, HUANG R. Detection of the corrosion damage in reinforced concrete members by ultrasonic testing[J]. *Cement & Concrete Research*, 1998, 28(7): 1071-1083.
- [14] MILLER T H, YANAGITA T, KUNDU T, et al. Nondestructive inspection of reinforced concrete structures[J]. *Proc Spie*, 2009, 7295: 1-12.
- [15] 王巧平, 吴胜兴. 无损检测技术在锈蚀混凝土结构中的应用探讨[J]. *混凝土*, 2003(6): 23-25.
WANG Qiaoping, WU Shengxing. Application of nondestructive testing technology in corroded concrete structures[J]. *Concrete*, 2003(6): 23-25.

(编辑 沈波)