doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.06.018

钢筋与水泥基材料粘结性能的超声波评估方法

杨 镇[1,2], 田玉滨[1,2], 陈省吾[2], 万宗帅[2], 周 鹏[2]

(1.结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学),150090 哈尔滨; 2.哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨)

摘 要: 为考虑钢筋与一种水泥基材料(HCTM 砂浆)之间粘结缺陷与力学性能的内在规律,利用超声波检测技术,考虑钢筋表面形式,粘结不良处初始缺陷程度等参数,建立了超声波参数与初始缺陷参数间的相关关系;通过静力拔出试验,分析了拔出力与锚固界面、钢筋表面等因素之间的关系;并利用三维有限元程序 ANSYS 进行了数值仿真,将分析结果与实验结果进行对比.结果表明,试验结果与理论分析结果有较强的一致性.

关键词: 钢筋;水泥基材料;粘结程度;超声波检测;拉拔试验;数值仿真

中图分类号: TU399 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2015)06-0099-04

Ultrasonic assessment methods on bonding level of rebar and cement-based material

YANG Zhen[1,2], TIAN Yubin[1,2], CHEN Shengwu[2], WAN Zongshuai[2], ZHOU Peng[2]

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, 150090 Harbin, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To study the inherent law of bonding defects and mechanical properties between steel and cement-based materials, considering parameters of the form of rebar surface, the initial bonding defect level, the relationship between ultrasonic parameters and the initial defect was established by ultrasonic detection technology. Furthermore, static pull-out test were carried out to get the relationship between pullout force and factors including anchoring interface, steel surface. Three-dimensional finite element program ANSYS were used to conduct numerical simulation. The theoretical analysis results were compared with the experimental results. The results indicate that the results of theoretical analysis and the result has good agreement.

Keywords: rebar; cement-based; material bonding degree; ultrasonic inspection; pull-out test; numerical simulation

粘结问题是一个很早就引起工程界关注的问题,材料间的良好粘结是保证不同材料共同受力与变形的基本前提.传统检测粘结性能的拉拔试验会对构件造成一定损伤,有时甚至无法进行试验.超声波无损检测 (NDT)为检测粘结性能带来了方便,目前,对于数字化超声波检测粘结性能的研究已取得了一定的研究成果.文献[1]采用超声脉冲回波法对铝合金材料的粘结性能进行了检测;文献[2-3]分别采用对侧法讨论了钢筋混凝土结构中钢筋和混凝土界面上由于腐蚀引起的粘结缺陷问题,并与腐蚀试验进行了对比;文献[4-5]考虑了碳纤维布的层数及与混凝土界面的粘结缺陷对碳纤维加固钢筋混凝土结构受弯全过程进行了声学参数分析;文献[6]根据超声波在钢筋中声学参数的变化对钢筋与混凝土的脱粘缺陷进行了研究;文献[7]对受拉作用下钢筋与混凝土在粘结失效前界面处粘结裂缝的变化对超声波振幅的影响进行了研究;文献[8]利用超声波多次衰减法研究并检测了圆筒的筒体与底座粘结强度;文献[9]对纤维-金属层板粘接质量进行了非线性超声评价研究;文献[10-11]对金属/非金多层粘结结构的粘接质量进行了检测;文献[12-13]利用超声波的声时、首波幅度、声速、接收波形及频率等声学参量分别研究了混凝土板底面砂浆层的粘结缺陷和钢管混凝土中混凝土与钢管胶结不良等缺陷,还确定出了缺陷的大小范围及严重程度;文献[14]利用首波声时法和波形识别法检测了预埋件锚板与混凝土的粘结质量,并建立了缺陷判别方法.HTCM

收稿日期: 2014-05-14.

作者简介: 杨 镇(1990—),男,硕士研究生;
田玉滨(1972—),男,副教授,硕士生导师.

通信作者: 田玉滨,tianyubin@ hit.edu.cn.

砂浆是一种新型混凝土加固修复材料,与钢筋之间的粘结缺陷研究相对较少,本文开展了超声波评估钢筋与 HTCM 砂浆粘结性能的研究.

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

为了考察不同钢筋类型和粘结初始空洞缺陷对粘结性能的影响,根据混凝土结构试验标准附录中粘结性能试验方法进行试件设计.本试验分 A,B 两组,每组 4 个,共 8 个试件,其中 A,B 分别代表圆钢 HPB235 和螺纹钢 HRB335.每组中设计 4 个试件,A-1(B-1)代表无缺陷,A-2 (B-2)代表缺陷长度为 35 mm,A-3(B-3)代表缺陷长度为 70 mm,A-4 (B-4)代表缺陷长度为 105 mm.各试件均由 HTCM 砂浆料制作,水灰比 1∶4,密度 2 000 kg/m^3,自然养护 28 d,抗压强度 62 MPa.试件尺寸150 mm×150 mm ×140 mm,所用钢筋直径均为 12 mm,长 400 mm.为了固定钢筋,使钢筋位于水泥基材料中心,做成带孔木板,在浇筑前放进模具的底部,木板厚 10 mm.钢筋与水泥基材料粘结处的脱离模选用的是多孔软泡沫,考虑到泡沫的压缩性,厚度选为 15 mm.制作时采用 150 mm×150 mm×150 mm 模具.并对每个试件选择 18 个点进行测试,共 144 个测点.各组试件通过人工干预使粘结性能有所不同.为了考察人工模拟缺陷对材料粘结性能影响,两组中均保留了完全粘结的试件做对比.最后通过拉拔试验检测了试件的力学性能.试验中所用到的具体试件见图 1(A、B 代表组号,1、2、3、4 代表该组试件编号,a、b 代表试件的两个相邻侧面),试件参数见表 1.

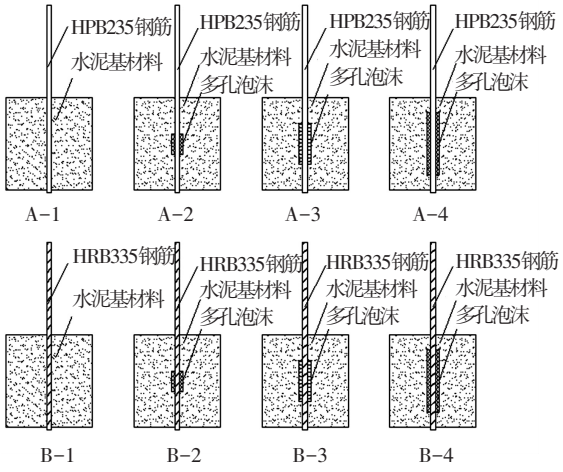


图 1 试件图

1.2 缺陷的超声测试

本试验采用非金属超声波检测仪, 根据 CECS21:2000《超声波检测混凝土缺陷技术规程》,采用对侧法进行检测,测点布置见图 2.测试时在测试区域涂上适量凡士林作为耦合剂,采用对侧法测量超声波的波速等参数.

表 1 试件参数 mm

试件编号	长×宽×高	钢筋长度	泡沫长度
A-1	150×150×140	400	0
A-2	150×150×140	400	35
A-3	150×150×140	400	70
A-4	150×150×140	400	105
B-1	150×150×140	400	0
B-2	150×150×140	400	35
B-3	150×150×140	400	70
B-4	150×150×140	400	105

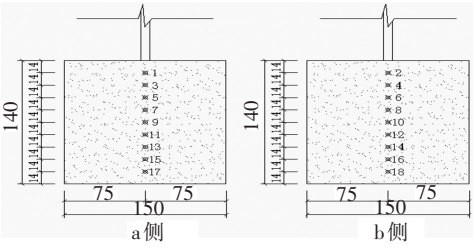


图 2 测点布置

1.3 拔出试验

在钢筋的末端焊上长 300 mm,宽 12 mm 的螺杆,将 5 t 的荷重传感器及千斤顶通过螺母固定住,千斤顶连接油泵施加力,荷重传感器外连接应变仪进行读数.拉拔试验装置见图 3.

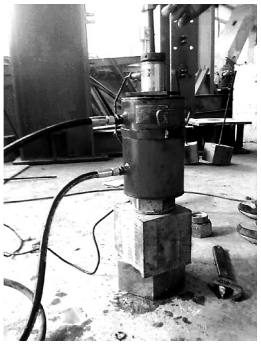


图 3 拔出试验装置

2 结果分析

根据 CECS21:2000《超声波检测混凝土缺陷技术规程》,同一侧面检测数据的统计计算及异常值判别采用概率统计的判别法进行分析.所有试件所测的超声波声学参数分析结果见表 2.根据 GB50152—92《混凝土结构试验方法标准》,钢筋粘结强度实测值为

$$\tau_u^0 = \frac{F_u^0}{\pi d l_a} \cdot \alpha. \tag{1}$$

式中:τ_u^0 表示钢筋粘结强度实测值;F_u^0 表示钢筋粘结破坏的最大荷载实测值;l_a 和 d 表示钢筋的埋人长度;α 表示混凝土抗压强度修正系数.

拉拔试验的数据分析见表 3.由表 2、3 可看出，随粘结不良区域的增大，试件粘结性能也相应降低，两者具有一定的相关性.图 4 给出了粘结不良百分比与剩余粘结力百分比关系曲线.

表 2　超声波检测数据分析

试件编号	声速平均值/(km·s^{-1})	声速标准差/(km·s^{-1})	变异系数	异常点数及位置	综合评定	
					粘结不良处及百分比	粘结缺陷长度/mm
A-1(a)	3.902	0.013 5	0.003 5	0	粘结良好	0
A-1(b)	3.895	0.020 3	0.005 2	1:底部		
A-2(a)	3.875	0.045 4	0.011 7	2:中上部	中部约 22%粘结不良	31
A-2(b)	3.871	0.046 1	0.011 9	2:中上部 1:底部		
A-3(a)	3.862	0.048 4	0.012 5	4:下部	下部约 44%粘结不良	62
A-3(b)	3.866	0.042 1	0.010 9	4:下部		
A-4(a)	3.833	0.044 3	0.011 5	7:下部	下部约 78%粘结不良	109
A-4(b)	3.834	0.047 7	0.012 4	7:下部		
B-1(a)	3.699	0.015 2	0.004 1	0	粘结良好	0
B-1(b)	3.707	0.012 9	0.003 5	0		
B-2(a)	3.699	0.023 7	0.006 4	3:中部	中部约 33%粘结不良	46
B-2(b)	3.699	0.023 6	0.006 4	3:中部		
B-3(a)	3.683	0.034 8	0.009 5	3:中部 1:上部 1:下部	中部约 44%粘结不良	62
B-3(b)	3.673	0.030 9	0.008 4	4:中部 1:下部		
B-4(a)	3.661	0.022 8	0.006 2	7:中部	中部约 78%粘结不良	109
B-4(b)	3.669	0.025 7	0.007 0	6:中部		

表 3　拉拔试验结果分析

试件编号	拉拔力/kN	粘结强度/MPa	剩余粘结力百分比/%
A-1	19.00	4.07	100.00
A-2	14.10	3.02	74.21
A-3	9.68	2.07	50.95
A-4	4.58	0.98	24.11
B-1	32.19	6.89	100.00
B-2	24.00	5.14	74.55
B-3	14.60	3.12	45.35
B-4	7.00	1.50	21.74

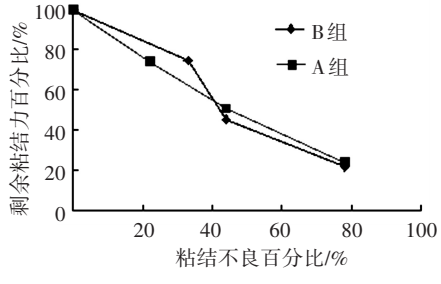


图 4　粘结剩余强度与粘结不良关系

3　有限元分析验证

3.1　模型和划分网格

采用两个模型：完好钢筋与水泥基材料模型；钢筋与 HTCM 砂浆材料模型(材料间存在粘结裂缝)；材料尺寸均为 150 mm×150 mm×140 mm，钢筋直径 12 mm，长 400 mm，粘结不良处高 70 mm，厚 5 mm.本模拟中，混凝土采用 SOLID65 单元，考虑到钢筋的变形，钢筋采用了八节点 SOLID45 实体单元.各材料性能参数见表 4.

表 4　各材料属性

材料	选用单元	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
水泥基材料	SOLID65	25	0.2	2 000
钢筋	SOLID45	200	0.3	7 850

采用从上到下的方式，通过布尔运算得到所需的模型，对模型用 GLUE 命令进行粘结.为了使波传播计算中，单元在每个步长计算时沿波传播方向的长度小于波长，并考虑计算成本，将单元的大小划分为 5 mm.为保证结果准确性，用扫掠(VSWEEP)生成六面体单元，删除钢筋周边相应单元模拟粘结裂缝.模型 2 网格划分见图 5(3/4 模型).为了使超声波激励在网格节点处并尽量与实际相符，模型中侧面加载节点选取位置见图 6(共取 9 个节点).在另一个侧面同一位置节点处接收信号.

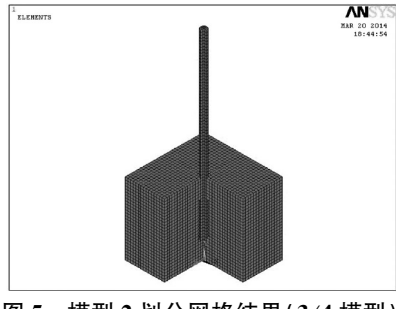


图 5　模型 2 划分网格结果(3/4 模型)

3.2　定义求解选项和施加荷载(脉冲信号)

采用完全法瞬态分析.发射波理论上应选择单音频信号，但严格的单音频信号很难产生.为避

免发射波频散现象带来的不利影响，选用 HANNING 窗调制单音频的窄带信号脉冲作为激励信号.单音频信号经汉宁窗调制后，其信号旁瓣互相抵消，高频干扰和漏能消去，主瓣高，频散现象降低，频谱中能量主要集中于单音频信号频率附近.本文仿真分析中单音频的周期数设定为 10 个，单音频信号频率选择为 0.45 MHz，振幅选为 100 μm.加载的时间步长为 0.25 μs，总加载时间为 58 μs，通过读取时间差测量出声学参数.

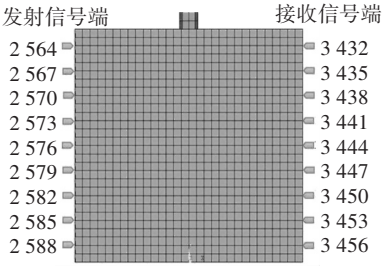


图 6 激励节点和接收节点

3.3 模拟结果分析

通过 POST1 和 POST26，可得到各模型超声波传播云图及各接收信号处接收到的波形，模型 1、2 各接收信号处所检测的具体声学参数见表 5.

表 5 模型 1、2 所测声学参数

加载节点	模型 1			模型 2		
	测距/mm	声时/μs	声速/(km·s^{-1})	测距/mm	声时/μs	声速/(km·s^{-1})
2 564	150	39.84	3.765	150	41.34	3.628
2 567	150	39.59	3.789	150	41.34	3.628
2 570	150	39.59	3.789	150	43.34	3.461
2 573	150	39.75	3.773	150	43.34	3.461
2 576	150	39.75	3.773	150	43.34	3.461
2 579	150	39.75	3.773	150	43.34	3.461
2 582	150	39.59	3.789	150	43.34	3.461
2 585	150	39.59	3.789	150	41.34	3.628
2 588	150	39.84	3.765	150	41.34	3.628

只考虑水泥基材料，利用纵波波速计算公式 $C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}}$，将弹性模量 E = 25 GPa，密度 ρ = 2 000 kg/m^3，泊松比 ν = 0.2 带入计算出纵波波速约为 3 800 m/s，与模型测试出的波速相差 0.92%.

将表中数据进行对比，说明当材料间粘结处有粘结裂缝时，超声波传播所需声速要降低，超声波检测粘结缺陷是可行的.

4 结 论

1）材料间的粘结缺陷的具体位置可以通过超声波检测超声波声速的变化得知.

2）材料间的粘结性能与粘结缺陷是存在内在规律的，通过检测材料间的粘结缺陷可以评价材料间的粘结强度等力学性能.

参考文献

[1] TATTERSALL H G. The ultrasonic pulse-echo technique as applied to adhesion testing[J]. Journal of Applied Physics, 1973,6(7): 819-832.

[2] YEIH W, HUAN R. Detection of the corrosion damage in reinforced concrete members by ultrasonic testing [J]. Cement and Concrete Research,1998,28(7):1071-1083.

[3] LI Dongsheng, ZHANG Shuaifang, YANG Wei, et al. Corrosion monitoring and evaluation of reinforced concrete structures utilizing the ultrasonic guided wave technique[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks,2014,2014: 1-9.

[4] YUN H D, CHOI W C, SEO S Y. Acoustic emission activities and damage evaluation of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets [J]. NDT&E International,2010,43 (7):615-628.

[5] LEE J K, LEE J H. Nondestructive evaluation on damage of carbon fiber sheet reinforced concrete [J]. Composite Structure,2002,58:139-147.

[6] LI Dongsheng, RUAN Tao, YUAN Junhui. Inspection of reinforced concrete interface delamination using ultrasonic guided wave non-destructive test technique [J]. Science China-Technological Ciences, 2012, 55 (10): 2893-2901.

[7] RUCKA M, WILDE K. Experimental study on ultrasonic monitoring of splitting failure in reinforced concrete[J]. Journal of Nondestructive Evalution,2013, 32:372-383.

[8] 张路根.粘结强度超声波检测技术研究[J]. 无损探伤,2010,34(2):13-17.

[9] 陆铭慧,祝婧.纤维-金属层板粘接质量的非线性超声评价研究[J].粘接,2013(11):38-42.

[10] 徐猛,李宇涛,徐彦霖,等.粘接层厚度对粘接质量超声检测的影响分析[J]. 兵器材料科学与工程,2008,31(3):62-65.

[11] 李明轩.粘接质量超声检测研究[J]. 应用声学,2002, 21(1):7-12.

[12] 童寿兴.混凝土板底面砂浆粘结质量超声波检测技术[J].建筑材料学报,1999,2(1):69-72.

[13] 林维正,秦效启,陈之毅,等.方形钢管混凝土超声波检测技术[J]. 建筑材料学报,2003,6(2):190-194.

[14] 伋雨林,李宗成,王林今.超声波法检测预埋件锚板与混凝土的粘结质量[J]. 建筑技术,2004,35(4):248-250.

[15] CECS21:2000 超声波检测混凝土缺陷技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2000:1-20.

（编辑 赵丽莹）