

混凝土受力状态下超声波传播特性研究^{*}

朱金颖 陈龙珠 严细水

(浙江大学土木系, 杭州 310027)

提 要 本文研究了混凝土在单轴向压力下超声波速、幅值及主频的变化规律。试验表明, 波速对混凝土构件中的应力变化敏感度较低, 在 70 % 的极限应力范围内, 波速基本保持稳定。因此在工程实际中利用超声波速~强度率定曲线推测混凝土承力构件的强度时, 波速无需修正。与波速相比, 超声幅值衰减量对检测裂缝开展则具有较高的灵敏度。为提高超声检测的精度, 本文采用波速、幅值、频率综合判断法, 提出了损伤系数的概念, 对混凝土的损伤程度作出定量评价。文中结果对进一步提高混凝土无损检测精度, 评估混凝土结构在受力、收缩、徐变等因素影响下的损伤程度有一定的应用价值。

关键词 混凝土, 受压, 超声检测, 衰减量, 损伤系数

一、前 言

近些年来, 结构混凝土的现场检测技术越来越受到世界各国的普遍重视, 它广泛应用于建筑结构的质量评价, 旧建筑结构损伤程度的评估, 以及混凝土施工的在线控制等方面。就检测目的而言, 结构混凝土的现场检测可分为四类: 测强度; 测缺陷; 检测受力历史及损伤程度; 以及检测混凝土的其它物理力学性能参数。常用的无损检测方法包括超声脉冲法、回弹法、振动法、声发射技术及射线法等。超声脉冲法作为一种较成熟的混凝土无损检测手段, 已得到广泛的应用, 国家规范及各地区都建立了基准测强曲线可供参考。但是我们注意到建立基准曲线时, 混凝土试件是在不受力状态下测得波速的, 而实际工程中的构件则是处于不同的受力状态, 那么推定混凝土强度时, 受力状态下测得的波速是否需经修正? 混凝土的应力应变关系是非线性的, 弹性模量 E 随应力的增长而降低, 而波速

^{*} 本文收稿日期: 1997年2月

与 E 的关系则是混凝土超声测强的基础,那么波速随应力变化的规律如何?本文对以上问题做了试验研究。

预测已建混凝土结构的使用寿命,需要对混凝土的断裂性能以及损伤程度作出判定。按混凝土强度破坏理论,混凝土的破坏过程就是混凝土中原有微裂缝在荷载作用下不断开展、延伸直至最后贯通的过程。因此,通过对混凝土中裂缝的监测可以对结构的损伤程度作出评价,从而进一步预测结构的使用寿命。检测裂缝的方法有声发射、超声脉冲法、电磁法等。声发射技术对于重要混凝土结构物的动态安全性监测、强度裂缝位置、判断损伤程度等方面有其独特的优点,但目前这方面的研究尚不够成熟,应用也不够广泛,而且对于损伤后的状态难以作出判断。超声脉冲法由于具有以下优点,在工程中得到了广泛应用。① 提供信息丰富,可探测构件内部性质;② 可在结构损伤发生后检测,尤其适用于旧建筑结构的质量评估;③ 对结构无损伤,可连续监测,成本较低。本文研究了混凝土试件在受力状况下超声波速、幅值及频率的变化规律,并定义了损伤系数 D 作为衡量结构损伤程度的指标。

二、试验设备与方法

本文对不同强度、不同龄期的混凝土试块做了轴心受压下的超声脉冲试验。

表 1 混凝土原材料及配合比

强度等级	水泥	粉煤灰	水	砂	石	龄期(天)
C15	277	—	185	767	1151	28
C20	365	—	185	648	1200	28
C30	300	80	185	654	1080	0.5,1.0,1.5,2.0,28
C45	400	120	185	654	1050	28

注: C15, C20 采用 425# 普通硅酸盐水泥; C30, C45 采用 525# 普通硅酸盐水泥

1. 试块、养护及龄期

同一龄期的每组试块包括 3 个 15cm×15cm×15cm 立方体试块及 3 个 15cm×15cm×30cm 的棱柱体试块,按标准方法自然养护。

2. 试验设备

采用扬州产 HF-D 型智能声波仪,计算机自动采集信号,采样频率 10MHz, 50 及 100kHz 换能器,万能试验机。

3. 试验步骤

将换能器垂直于加载方向

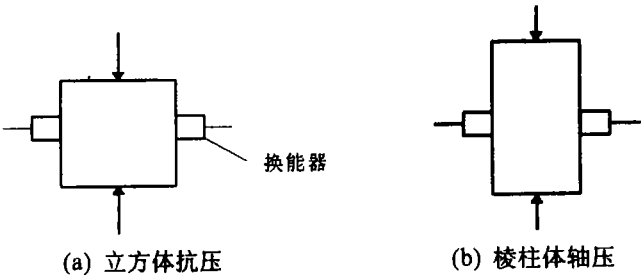


图 1 试验布置简图

对称布置,以黄油作为耦合剂,如图1所示。

采用分级加载方式,荷载间隔为50、30、10kN,直至试块破坏。

三、试验结果与分析

1. 混凝土立方体试块受力过程中超声波速及幅值变化规律

图2为28天混凝土立方体试块 $V \sim \sigma$ 、 $\bar{A} \sim \sigma$ 关系曲线, V 、 $\bar{A}$ 分别为超声波速及归一化首波幅值, $\bar{A} = A/A_0$, A_0 为加载前的幅值。根据文献^[1]中关于应力水平 $\bar{\sigma} = \sigma/\sigma_{\max}$ 与混凝土微裂缝开裂之间关系的论述,将图中曲线分为以下四个阶段来讨论。

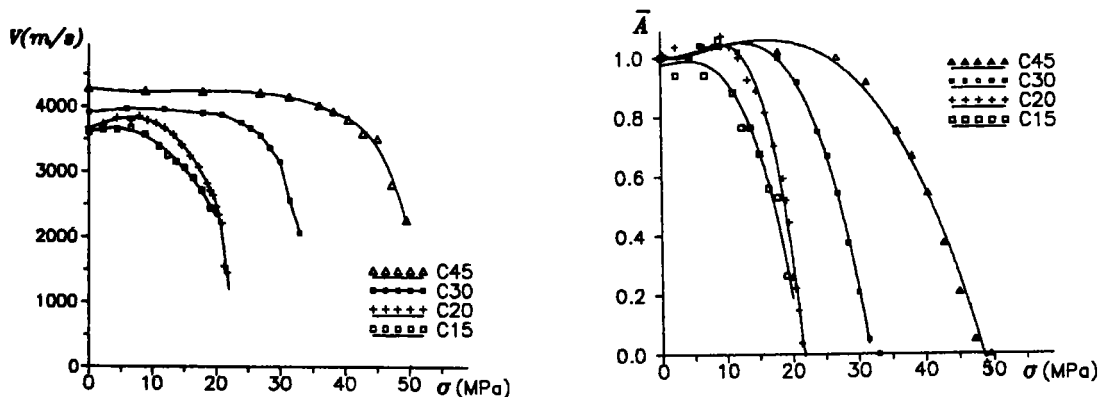


图2 28天混凝土立方体试块 $V \sim \sigma$ 、 $\bar{A} \sim \sigma$ 关系曲线

第一阶段:当 $\bar{\sigma} < 0.3$ 时,过渡区(粗骨料与水泥浆体之间的界面区域)的微裂缝保持稳定,部分垂直于加载方向的微裂缝在初始压力下闭合,试件被压实,声速与幅值基本保持稳定,而且还略有增大。

第二阶段:当 $\bar{\sigma} > 0.3$ 时,随着应力的增加,过渡区微裂缝的长度、宽度和数量都不断增大,但直到 $\bar{\sigma} = 0.5$ 左右,微裂缝的开展都是稳定的,砂浆中无明显裂缝。超声波幅值有所下降,波速也略有降低,但很不明显。

第三阶段:进一步增大应力至 $\bar{\sigma} > 0.5$,过渡区的裂缝系统变得不稳定,砂浆中裂缝开始产生、扩展。图中幅值下降速率加快,而声速则缓慢下降,这是因为裂缝是杂乱分布的,尚未贯通,超声波经绕射仍可穿透试件,只是路径变长,声时增大,使波速降低。而超声波能量衰减则较大,远比声速变化显著。

第四阶段:当 $\bar{\sigma} > 0.75$,在持续应力下,裂缝不稳定地自发扩展,可观察到在恒压过程中,波速与幅值均逐渐下降。此时破坏应力取决于加荷速率。在短期荷载下,随着应力增加,过渡区与砂浆中裂缝连接贯通,裂缝宽度显著增大,声速和幅值急剧下降,试件破坏。

2. 超声波速与幅值的变化规律比较及原因分析

为便于分析比较, 将各参数归一化后示于图 3, 其中应力水平 $\bar{\sigma} = \sigma / \sigma_{\max}$, $\sigma_{\max}$ 为极限应力, $\bar{A} = A / A_0$, $\bar{V} = V / V_0$, A_0 、 V_0 为加载前的幅值与声速。由图看出, 波速对混凝土中的应力变化敏感度较低, 而在同一应力水平下, 幅值的变化率则明显大于波速的变化率, 表明超声波幅值比波速具有更高的损伤探测灵敏度。实验还对接收波形进行了频谱分析, 考察了主频对应力变化的敏感性, 分析结果列于表 2。

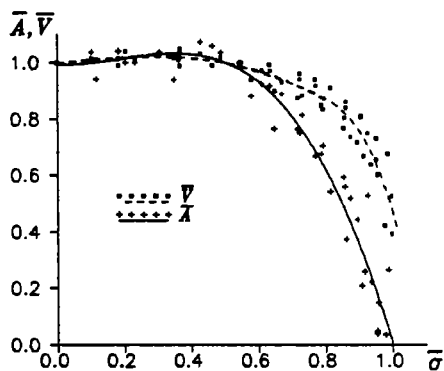


图 3 立方体试块 $\bar{V} \sim \bar{\sigma}$ 、 $\bar{A} \sim \bar{\sigma}$ 归一化曲线

表 2 波速、幅值及主频随应力的变化

设计强度 (MPa)	$\bar{\sigma} = 0.3$			$\bar{\sigma} = 0.5$			$\bar{\sigma} = 0.7$			$\bar{\sigma} = 0.9$			$\bar{\sigma} = 0.95$		
	$\bar{A}$	$\bar{V}$	$\bar{f}$	$\bar{A}$	$\bar{V}$	$\bar{f}$	$\bar{A}$	$\bar{V}$	$\bar{f}$	$\bar{A}$	$\bar{V}$	$\bar{f}$	$\bar{A}$	$\bar{V}$	$\bar{f}$
C30 以下	1.0	1.01	1.0	0.9	0.99	0.98	0.76	0.87	0.95	0.3	0.7	0.85	0.15	0.60	0.81
C30 以上	1.03	1.0	1.1	0.95	0.99	0.96	0.75	0.95	0.93	0.21	0.81	0.87	0.04	0.73	0.83

波速对应力不敏感的原因可解释如下。当 $\bar{\sigma} = 0.3$ 时, 混凝土中原有的微裂缝开展, 但是相对于超声波的波长来说, 微裂缝的尺寸非常小, 声波可不受阻碍地继续传播, 只是由于散射等原因使能量有所损失; 直至加载到极限应力的 70 % 左右时, 裂缝明显变宽变长, 阻碍了声波的传播, 才导致波速明显的下降。

3. 混凝土棱柱体试件轴压下 $\bar{V} \sim \bar{\sigma}$ 、 $\bar{A} \sim \bar{\sigma}$ 的关系曲线

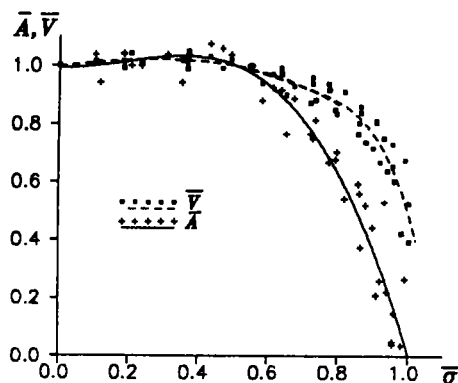


图 4 棱柱体试件 $\bar{V} \sim \bar{\sigma}$ 、 $\bar{A} \sim \bar{\sigma}$ 、 $\bar{f} \sim \bar{\sigma}$ 关系曲线

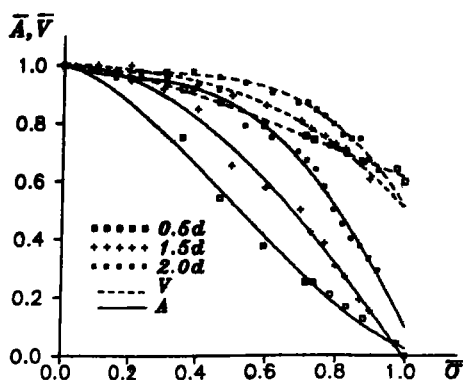


图 5 不同龄期混凝土的 $\bar{V} \sim \bar{\sigma}$ 、 $\bar{A} \sim \bar{\sigma}$ 曲线

混凝土棱柱体试件(15cm×15cm×30cm)轴心抗压试验表明, $\bar{V} \sim \bar{\sigma}$ 、 $\bar{A} \sim \bar{\sigma}$ 曲线的稳定范围大于同龄期立方体试件(图 4)。超声波速与幅值的稳定应力范围为 $\bar{\sigma} = 0 \sim 0.55$ 。当 $\bar{\sigma} > 0.75$ 时, 声速和幅值随 $\bar{\sigma}$ 增大而迅速下降, 表现出一定的脆性。因为试验时棱柱体试

件的中间区段无环箍效应,处于纯压状态,裂缝产生较晚,基本平行于压力方向。因无横向约束,裂缝一旦产生即迅速开展,导致声速和幅值急剧下降。

4. 龄期对轴压下超声稳定范围的影响

为考察早龄期混凝土的压力稳定范围,图5给出了不同养护龄期混凝土的关系曲线。可见,随着龄期的增长,超声波速与幅值的稳定范围也增大。同时声速与首波幅值也随龄期而增大。

四、混凝土结构质量评定标准

在混凝土断裂力学的研究中,对内部存在的微开裂进行定量测定的主要方法是声波检测及X射线法^[2]。由于超声检测具有简便易行及使用安全的特点,在一般的实验研究及工程测试中较为常用。该实验主要是基于测量声波穿过混凝土的表现声速、幅值及频率等参数。关于混凝土的超声频谱分析,已有一些文献报导^[3,4],表明主频对裂缝开展很不敏感,本文表2及图4中的曲线也说明了这一点。实验中还发现,高频测试的灵敏度略高于低频。采用100kHz的换能器,当 $\bar{\sigma} = 0.95$ 时, $\bar{f} = 0.75$,主频下降了

约25%;而采用50kHz的换能器,在同样的应力水平下,主频下降17%。不过需指出的是,这些实验都是使用窄带换能器超声仪进行测试的,所得到的波形信号已经过了测试系统的滤波;因为窄频带测试系统对不同频率成分的衰减不同,所谓的主频是系统频带内的主频,已不能真实完全地反映混凝土对各频率成分的吸收程度,实验中有时会出现主频随应力增加而增大的反常现象。所以要全面地进行混凝土的超声频谱分析,需采用宽频带换能器并对测试仪器做进一步改进,目前笔者正在开展这方面的研究工作。

经过以上分析,使用普通的窄带超声仪测试混凝土时,超声波幅值对检测裂缝开展有较高的灵敏度,波速次之,主频最后。幅值的灵敏度较高,但有不稳定的缺点;波速测量较稳定,但敏感性较低。为提高测试精度,采用幅值、波速、主频的综合判断法,引入损伤系数 $D^{[5]}$,可对混凝土结构的损伤程度作出定量评价。损伤系数 D 定义为

$$D = 1 - (\alpha_A \bar{A} + \alpha_V \bar{V} + \alpha_f \bar{f})$$

其中 α_A 、 α_V 、 α_f 为权因子, $\alpha_A + \alpha_V + \alpha_f = 1$ 。实际应用时,可根据测试情况调整权因子,对可靠度较高的量给予较大的权重。图6绘出了不同权因子对应的 $D \sim \bar{\sigma}$ 关系曲线。

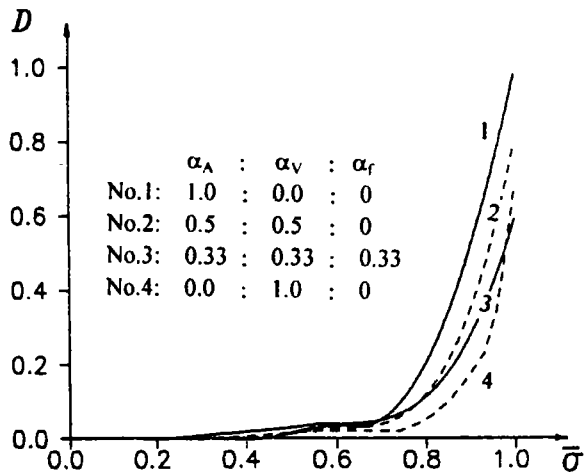


图6 损伤系数随应力水平的变化规律

D 的变化范围为 0~1.0, 对应完全密实与完全开裂试件。

因为实际工程中的构件大多处于轴压及压弯状态, 所以应根据棱柱体轴压下的超声测试数据制作实验室 $D \sim \bar{\sigma}$ 率定曲线。根据混凝土开裂理论^[2], 当压应力达到 75 % 的极限应力时, 裂缝开展将成为不稳定的, 随时间增长而最终破坏, 因此对于轴压构件, 将 $\bar{\sigma} = 0.75$ 所对应的 D 定义为混凝土破坏的标准。由图 6 看出, 本实验中 D 的临界值处于 0.02~0.15 范围内, 具体应用时应根据当地情况制作率定回归曲线, 确定 D 的临界值。

因为损伤系数直接反映了混凝土中裂缝及缺陷的开展状况, 所以不仅可用于监测结构在承载过程中的损伤程度, 还可用于评定结构由于疲劳荷载、收缩、徐变及其它环境因素影响下的损伤状况。对于一些老厂房、水工结构以及超期使用的公路、桥梁等, 它可为预估其使用寿命、确定整修方案提供依据。

五、结论和建议

1、混凝土在加载过程中, 其超声波速及幅值都随荷载增加呈下降趋势, 而幅值的变化灵敏度则明显高于声速。 $\bar{A} \sim \bar{\sigma}$ 曲线的四个阶段分别对应混凝土中裂缝发生、发展至贯通的四个阶段, 约在 $\bar{\sigma} = 0.4$ 左右, 幅值开始下降, 这与声发射监测结果基本一致。因此超声脉冲法可用来检测和分析混凝土中裂缝的开展状况。

2、波速对应力变化不敏感。当 $\bar{\sigma} > 0.7$ 时, 波速才有较明显的变化, 因此对处于正常承载状态的承力构件, 利用波速~强度率定曲线推测砼强度时无需修正。

3、引入损伤系数 $D = 1 - (\alpha_A \bar{A} + \alpha_V \bar{V} + \alpha_f \bar{f})$ 评估混凝土的损伤程度, 结合实验室率定曲线, 通过现场测试分析混凝土的安全度, 预测结构使用寿命。因为采用多参数综合判断法, 提高了测试精度及正确性。

4、为提高测试精度, 超声试验中采用几种不同的发射频率。因为各种频率对不同大小的裂缝分辨率不同, 综合不同频率的测试结果, 可对混凝土中裂缝开展有更全面的认识。

5、衰减值的测量受试验条件影响较大, 耦合不稳定是主要的误差来源。因此试验设备及方法尚有待改进, 以提高测试精度。

6、对砼超声检测信号作频谱分析, 应采用宽频带超声换能器, 才可得到较为真实全面的结果。

参 考 文 献

- 1 P Mehta. 混凝土的结构、性能与材料(祝永年等译). 上海:同济大学出版社, 1991
- 2 A Carpinteri, A R Ingraffea. 混凝土断裂力学 - 材料特性与实验(杨煜惠等译). 长沙:湖南大学出版社, 1988
- 3 李为杜, 马修麟, 童寿兴. 砼受力状态非破损测强参数研究. 施工技术, 1993;(4):9-11

- 4 李为杜, 童寿兴, 马修麟. 砼超声检测信号频谱分析. 无损检测, 1992;14(4):98-101
- 5 W Suaris, V Fernando. Ultrasonic pulse attenuation as a measure of damage growth during cyclic loading of concrete. ACI Materials Journal, 1987; 84(3):185-193
- 6 钱在兹, 陈龙珠等. 秦山核电站二期工程基岩爆破对混凝土强度与钢筋粘结力影响的研究总结报告. 浙江大学土木系, 1996

ULTRASONIC PULSES BEHAVIOR IN CONCRETE DURING COMPRESSIVE LOADING

Zhu Jinying Chen Longzhu Yan Xishui

(Dept. Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

Abstract The paper investigates the variation of ultrasonic pulse velocity, attenuation and frequency in concrete under uniaxial compressive loading. Experimental results indicate that the pulse velocity in concrete is independent of the stress level to a large extent, up to about 70% of the compressive strength. This means, in practical terms, that stresses prevailing in the concrete of a structure do not have to be taken into account when pulse velocity data are used for the evaluation of the quality of concrete. Compared with velocity, the amplitude of ultrasonic waveform has higher sensitivity to the extent of cracking. In order to improve the reliability of measurement, the paper combines velocity, amplitude and frequency to propose a damage coefficient D as an indicator of crack growth. The results proposed in this paper are useful for improving reliability of non-destructive test of concrete, and determining the extent of damage due to load, creep, shrinkage, and other environmental effects.

Key words concrete; compressive load; ultrasonic test; attenuation; damage coefficient