

◇ 研究报告 ◇

# 双横波声速法检测单向受压混凝土构件永存应力<sup>\*</sup>

郑康琳<sup>†</sup> 张劲泉 王陶 赵尚传 樊平 王磊 李萍

(交通运输部公路科学研究所 北京 100088)

**摘要:** 该文力求寻找一种高效准确检测混凝土构件永存应力的方法。基于声弹性理论提出了一种双横波声速法检测单向受压混凝土构件永存应力的方法,该方法通过测试受力构件第一波速和第二波速,以第一波速和第二波速的平方差为基础构建综合声学参数来检测单向受压混凝土构件永存应力。所述第一波速为声波传播方向与应力方向垂直、质点振动方向与应力方向平行的横波波速,第二波速为声波传播方向及质点振动方向均与应力方向垂直的横波波速。实验结果显示,该声学参数用于检测混凝土单向受压构件永存应力的效果与使用单一声速参数相比,对应力的敏感性有所提高,受混凝土黏滞性及材质离散性的影响更小,并且测试结果基本不受温度和湿度变化影响。

**关键词:** 横波;双声速;声弹性理论;单向受压;混凝土构件;永存应力

**中图法分类号:** U446 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2021)03-0367-09

**DOI:** 10.11684/j.issn.1000-310X.2021.03.007

## Study on the method of double shear wave velocity to detect the permanent stress of concrete members under uniaxial compression

ZHENG Kanglin ZHANG Jinqun WANG Tao ZHAO Shangchuan FAN Ping WANG Lei LI Ping

(Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** This paper tries to find an efficient and accurate method to detect the permanent stress of concrete members. Based on the acoustoelastic theory, a method of detecting the permanent stress of concrete members under uniaxial compression by using the double shear wave sound velocity method is proposed. The method detects the permanent stress of concrete members under uniaxial compression by testing the first and second wave velocities, and constructs a comprehensive acoustic parameter based on the square difference of the first and second wave velocities. The first wave velocity is the shear wave velocity in which the sound wave propagation direction is perpendicular to the stress direction and the particle vibration direction is parallel to the stress direction, and the second wave velocity is the shear wave velocity in which both the sound wave propagation direction and the particle vibration direction are perpendicular to the stress direction. The experimental results show that the effect of the acoustic parameter used to detect the permanent stress of concrete members under uniaxial compression is better than that of using a single sound velocity parameter, which is less affected by the concrete viscosity and material dispersion, and the test results are basically not affected by the changes of temperature and humidity.

**Keywords:** Shear wave; Double sound velocity; Acoustoelastic theory; Uniaxial compression; Concrete member; Permanent stress

2020-07-31 收稿; 2021-02-21 定稿

<sup>\*</sup>中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2018-9023)

作者简介: 郑康琳(1979-), 男, 陕西商洛人, 高级工程师, 研究方向: 桥梁安全及无损检测。

<sup>†</sup>通信作者 E-mail: 7605261@qq.com

## 0 引言

永存应力是指由结构自重及其他恒载效应产生的结构内部持续稳定的应力,应力超限会导致结构破坏并影响结构安全,因此对结构永存应力的检测十分必要。目前检测混凝土构件永存应力的方法分为有损检测和无损检测两类,其中超声检测是无损检测中最主要的方法之一,其理论基础为声弹性理论,利用声波在构件中传播的波速、波频、振幅等声学参数与应力的相关性来检测结构永存应力。虽然早在1953年Hughes和Kelly就已经提出了声弹性理论<sup>[1]</sup>,但直到现在应用声弹性理论检测混凝土构件永存应力的研究仍处于探索阶段。1998年,朱金颖等<sup>[2]</sup>通过实验得出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。2005年,陈立新等<sup>[3]</sup>通过实验得出声学参数与混凝土应力较为敏感时的骨料粒径、骨料种类(卵石)、水灰比和砂率等因素之间的关系。同年,林军志等<sup>[4]</sup>研究混凝土应力与超声波波速、首波振幅、最大振幅等声学参数的相关性。2007年,雷正伟等<sup>[5]</sup>通过实验得出温度对声速的影响量级与应力的影响量级接近,进行应力定量计算需考虑温差因素。2010年,Lillamand等<sup>[6]</sup>研究混凝土材料在轴向压力作用下的声弹性效应,得出与应力水平敏感性最大的是沿加载方向偏振的纵波和横波的结论,并成功得到混凝土试件的声弹性系数。2012年,刘新建等<sup>[7]</sup>基于模型实验,详细分析不同种声学参数与应力的相关性,并通过实验着重研究超声波信号加权瞬时振幅峰值、加权边际谱面积、加权瞬时能量谱面积随应力的变化情况。2017年,刘宏翔等<sup>[8]</sup>通过实验测试不同龄期不同应力状态下混凝土试块的声速值,分析了超声波波速随混凝土龄期的变化规律,并建立了超声波波速与应力之间的回归曲线。

纵观该领域的研究现状,目前对超声检测混凝土构件永存应力的研究主要集中在各种单项声学参数(声速、振幅、直达波频率等)与应力相关性上。但在实际应用中这些声学参数对应力的变化不够敏感,检测结果容易受到诸多外界因素(温度、湿度、混凝土的配比等)的干扰,这些因素引起的声学参数的变化常常远大于结构应力所引起的变化,“应力效应”常被“噪声效应”所淹没。因此目前以单项声学参数检测混凝土结构永存应力的方法仅为理论的可能性,远未达到实用的程度。

本文提出了一种超声检测单向受力混凝土构件永存应力的方法,该方法采用测试结构受载后的第一波速 $V_1$ (传播方向与应力 $\sigma$ 方向垂直,质点振动方向与应力 $\sigma$ 方向平行的横波波速)和第二波速 $V_2$ (传播方向及质点振动方向均与应力 $\sigma$ 方向垂直的横波波速),以 $V_1$ 、 $V_2$ 构建组合声学参数“ $(V_1^2 - V_2^2)/K$ ”(K为材料常数)来检测单向混凝土受力构件的永存应力 $\sigma$ 。该声学参数用于检测混凝土单向受压构件永存应力的效果与使用单一声速参数相比,对应力的敏感性有所提高,受混凝土黏滞性及材质离散性的影响更小,并且测试结果基本不受温度和湿度变化的影响,以下对该方法的原理及实验验证情况进行详尽阐述。

## 1 方法原理

根据声弹性理论<sup>[9]</sup>,各向同性固体介质在单向应力 $\sigma$ 作用下,介质中声速变化情况不仅与介质应力大小和方向有关,还与声波传播方向、声波质点振动方向有关。对于横波来说,声波传播方向垂直于介质应力 $\sigma$ 方向、质点振动方向平行于应力方向的横波波速 $V_1$ 及声波传播方向和质点振动方向都垂直于介质应力方向的横波波速 $V_2$ 与介质应力 $\sigma$ 的关系式为

$$\rho_0 V_1^2 = \mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left[ \frac{\lambda n}{4\mu} + \lambda + 2\mu + m \right], \quad (1)$$

$$\rho_0 V_2^2 = \mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left[ m - \frac{\lambda + \mu}{2\mu} n - 2\lambda \right], \quad (2)$$

其中: $\rho_0$ 为零应力下介质材料的密度; $\sigma$ 为介质应力; $\lambda$ 、 $\mu$ 分别为介质材料Lame常数; $m$ 、 $n$ 分别为介质材料的Murnaghan三阶弹性常数。

从式(1)、式(2)可以看出:在应力 $\sigma = 0$ 的情况下,横波声速 $V_1$ 、 $V_2$ 均为 $\sqrt{\mu/\rho_0}$ ;在应力 $\sigma \neq 0$ 的情况下,不同传播方向及不同偏正方向的声速表现出不同程度的差异。由公式(1)~(2)可以得到:

$$V_1^2 - V_2^2 = \left[ \frac{(n/4\mu)(3\lambda + 2\mu) + 3\lambda + 2\mu}{\rho_0(3\lambda + \mu)} \right] \sigma. \quad (3)$$

令:

$$K = \left[ \frac{(n/4\mu)(3\lambda + 2\mu) + 3\lambda + 2\mu}{\rho_0(3\lambda + \mu)} \right], \quad (4)$$

则:

$$\sigma = (V_1^2 - V_2^2)/K. \quad (5)$$

因K为与材质特性有关的常数,依据式(5),通过测量波速 $V_1$ 、 $V_2$ ,即可算出应力 $\sigma$ 。设 $t_1$ 、 $t_2$

分别为横波  $V_1$ 、 $V_2$  在被测构件中的传播时间, 设  $\Delta t = t_2 - t_1$  为  $V_1$ 、 $V_2$  传播的时间差, 在测量  $V_1$ 、 $V_2$  时因入射波探头和接收探头位置相同, 所以  $V_1$ 、 $V_2$  的传播距离及路径相同, 设声波传播距离为  $l$ , 因  $V_1$ 、 $V_2$  为间接测量量,  $t_1$ 、 $t_2$  为直接测量量, 采用参数 “ $\Delta t$ ” 代替 “ $(V_1^2 - V_2^2)$ ”。以下为推导过程:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{V_1^2 - V_2^2}{K} = \frac{(l/t_1)^2 - (l/t_2)^2}{K} \\ &= \frac{l^2}{K} \cdot \frac{t_2^2 - t_1^2}{t_2^2 t_1^2} = \frac{l^2}{K} \frac{(t_2 + t_1)(t_2 - t_1)}{t_2^2 t_1^2} \\ &= \frac{l^2}{K} \frac{(t_2 + t_1)}{t_2^2 t_1^2} \Delta t.\end{aligned}\quad (6)$$

因  $t_1$ 、 $t_2$  相对变化都较小, 故  $t_2 \approx t_1 \approx (t_2 + t_1)/2 = t_0$ , 所以由公式 (6) 得

$$\sigma = \frac{l^2}{K} \cdot \frac{(t_2 + t_1)}{t_2^2 t_1^2} \Delta t \approx \frac{1}{K} \cdot \frac{2l^2}{t_0^3} \Delta t.\quad (7)$$

对一个确定的测试构件,  $K$ 、 $l$  都是常数,  $t_0$  的相对变化值很小, 近似为常数, 所以结构永存应力  $\sigma$  大小取决于  $\Delta t$ 。依据公式推导的前提条件可知本检测方法适用条件如下:

- (1) 测试对象为单向受力构件, 且应力的方向已知;
- (2) 测试对象在在无应力情况下声波在各个方向的传播速度相同;
- (3) 测试对象应力值处在材料弹性范围内, 结构不能出现裂缝及过大的非线性形变等现象。

与使用单一声学参数相比本方法具有以下优点:

(1) 理论上参数  $\Delta t$  零应力值为零, 易于标定。当  $\sigma = 0$  时, 对于各向同性介质  $t_1 = t_2 = t_0$ , 则  $\Delta t = t_2 - t_1 = 0$ 。而其他单一声学参数零应力值一般不为零, 检测时则需要标定零应力值, 标定过程中会产生误差。

(2) 参数  $\Delta t$  对应力  $\sigma$  有更高的敏感性。  $\Delta t = t_2 - t_1 = (t_2 - t_1) - (t_0 - t_0) = (t_2 - t_0) - (t_1 - t_0) = \Delta t_2 - \Delta t_1$ , 依据声弹性理论, 当  $\sigma$  增加时,  $t_1$  减小、 $t_2$  增加, 即  $\Delta t_1$  与  $\Delta t_2$  反号, 在相同的应力变化情况下,  $|\Delta t| = |\Delta t_1| + |\Delta t_2|$ , 由此得出  $\Delta t$  较单一参数  $t_1$ 、 $t_2$  对应力有更好的敏感性。

(3) 参数  $\Delta t$  能够消除温度、湿度等环境因素对测试结果的影响。环境因素 (温度、湿度等) 会显著影响声学参数的变化, 但这种影响是各向同性的, 即对  $t_2$ 、 $t_1$  影响基本相同, 这种影响在参数  $\Delta t = t_2 - t_1$  做差值的时候即可消除。

(4) 横波双声速法测量时全程无需改变探头位置, 可避免探头移动产生的测试误差。理论上双声速法检测永存应力既可采用纵波也可采用横波, 采用纵波法分别测量  $V_1$ 、 $V_2$  时需要改变入射探头和接收探头的位置, 由于混凝土材质的离散性, 这个过程会产生较大不可预知的误差; 采用横波法时测量全程无需改变探头位置, 只需转动探头的角度, 这避免了移动探头所带来的巨大误差, 这也是双横波声速法最大优势, 所以本文采用双横波声速法。以下通过实验对本方法进行验证。

## 2 实验过程与结果讨论

### 2.1 实验方法

本实验中制作混凝土立方体试件作为实验对象, 试件尺寸为  $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ , 共计 17 个, 依次标记为 1# ~ 17#, 分别制作 C30、C40、C50 三种标号的试件, 1# ~ 6#、12# 试件混凝土标号为 C50, 7# ~ 9#、14#、17# 试件混凝土标号为 C40, 10#、11#、13#、15#、16# 试件混凝土标号为 C30。超声波测试设备采用 RITEC RAM-5000 SNAP 非线性高能超声测试系统, 数据采集采用 MSO4104B-L 示波器, 探头采用奥林巴斯 V150-RM 横波探头 (中心频率为 0.25 MHz)。本次研究进行了 3 个方面验证实验:

实验一 应力效应实验。共进行 11 组, 试件编号为 1# ~ 11#, 实验目的是验证试件应力与声学参数之间的关系 (公式 (7))。本实验中, 在试件顶底面用液压设备均匀施加均布压力  $F$ , 设试件横截面为  $S$ , 则试件内部压应力为  $\sigma = F/S$ , 在实验的过程中通过调节均布力  $F$  的大小来改变构件内部应力  $\sigma$ , 如图 1 所示。探头布置采用对测法, S 和 R 分别横波发射探头和接收探头, S 与 R 连线方向与应力  $\sigma$  方向垂直 (如图 1 所示)。每次测试时, 先把横波发射探头和接收探头声波质点振动方向调整为与应力平行方向, 测得声速  $V_1$  在构件中传播的时间  $t_1$ , 然后保持探头中心点位置不变, 把发射探头和接收探头同方向旋转  $90^\circ$  再同法测试, 可得声速  $V_2$  在构件中传播的时间  $t_2$ 。改变均布力  $F$  的大小, 重复上述步骤, 就可以测出不同应力  $\sigma$  状态下的  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $V_1$ 、 $V_2$  及  $\Delta t$ 。然后依据实验数据归纳总结出  $\Delta t$  与应力  $\sigma$  之间关系曲线。在应力加载过程中, 试件的温度、湿度均保持不变。实验中入射波为 1 周期的正弦波 (如图 2 所示), 频率为 0.15 MHz, 接收波信号采用连续

采样,采用频率为100 MHz。 $t_1$ 、 $t_2$ 的取值方法分别为 $V_1$ 及 $V_2$ 的接收波首波零点与发射波首波零点之间的时间差,如图2所示。

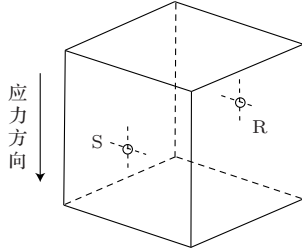


图1 试件加载及声速测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test piece loading and sound speed test

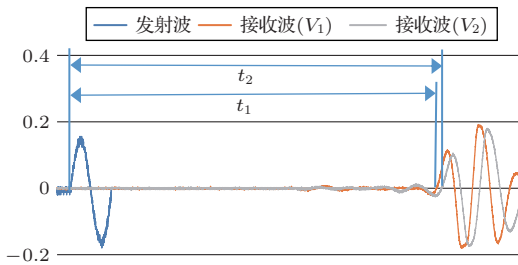
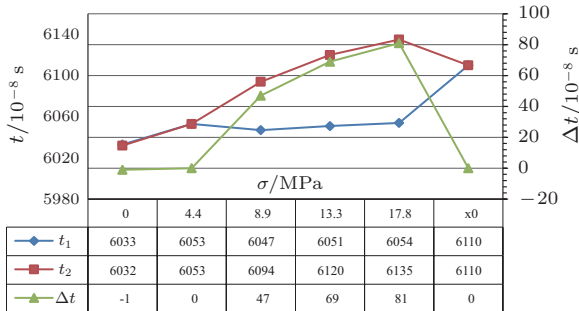
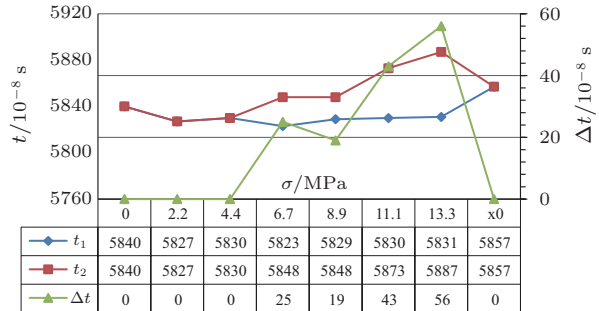


图2 实验中 $t_1$ 、 $t_2$ 取值方法示意图

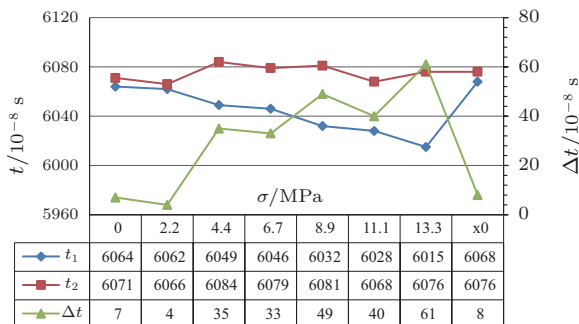
Fig. 2 Schematic diagram of short-cut process method of  $t_1$  and  $t_2$  in the experiment



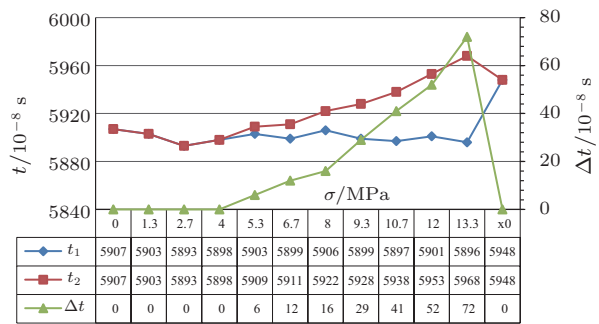
(a) 1#试件 (C50)



(b) 2#试件 (C50)



(c) 3#试件 (C50)



(d) 4#试件 (C50)

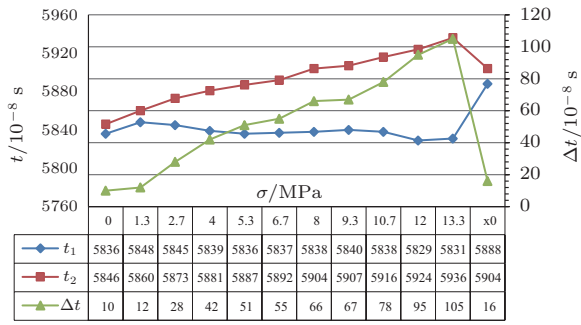
实验二 温度效应实验。共进行3组,试件编号为12# ~ 14#,实验目的是验证试件温度对声学参数的影响。实验中保持试件为零应力、干燥状态,初始温度为室温(27℃),按实验一的方法测出构件初始温度下 $t_1$ 、 $t_2$ ,然后把试件放入加热箱内,均匀加热到60℃后取出,同法测出试件60℃状态下 $t_1$ 、 $t_2$ 。对比试件加热前后两种不同温度状态下声学参数的变化,分析温度因素对声学参数影响。

实验三 湿度(含水率)效应实验。共进行3组,试件编号为15# ~ 17#,实验目的是验证试件湿度(含水率)对声学参数的影响。实验中保持试件为零应力、室温(27℃)的状况下,初始状态为干燥状态,按实验一的方法测出 $t_1$ 、 $t_2$ 的值,同时测量出干燥状态下试件重量 $m_0$ ,然后把试件放入水中浸泡24 h后取出,测出浸泡后的质量 $m$ ,由 $m_0$ 与 $m$ 推算出试件的含水率 $(m - m_0)/m \times 100\%$ ,最后测出试件含水时 $t_1$ 、 $t_2$ 的值。通过对比试件干燥与含水两种状态下声学参数的变化,分析湿度(含水率)因素对声学参数的影响。

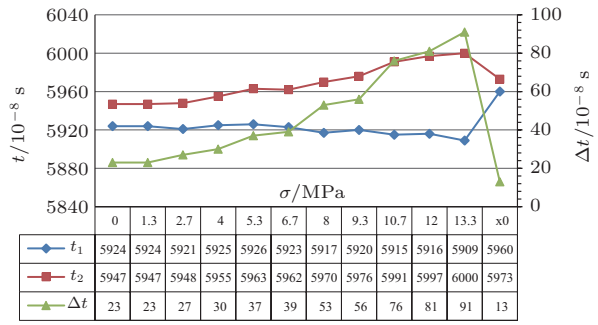
## 2.2 实验结果及讨论

### 2.2.1 应力效应实验结果及讨论

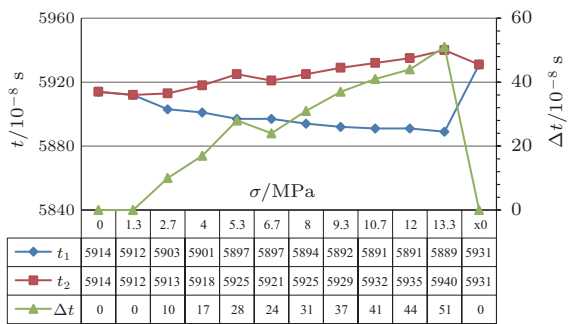
图3为本次实验各试件应力与声学参数关系实测结果。



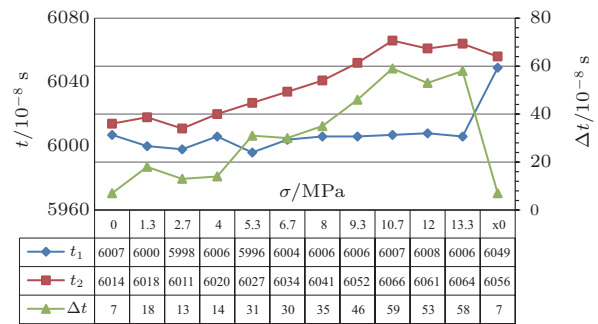
(e) 5#试件 (C50)



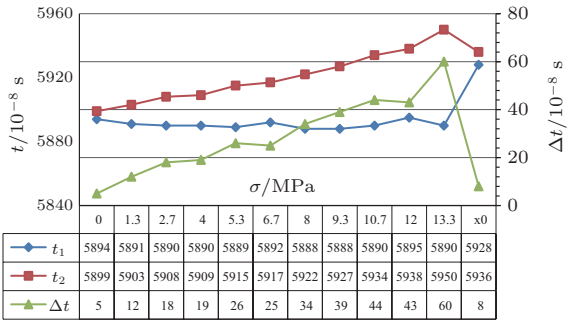
(f) 6#试件 (C50)



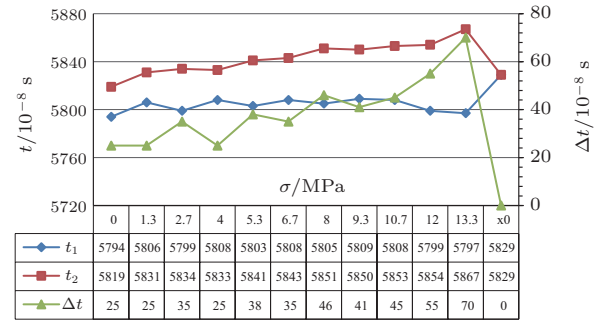
(g) 7#试件 (C40)



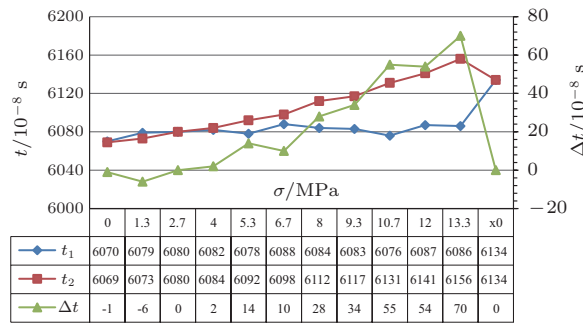
(h) 8#试件 (C40)



(i) 9#试件 (C40)



(j) 10#试件 (C30)



(k) 11#试件 (C30)

图3 应力效应实验试件  $\sigma$ - $t_1$ - $t_2$ - $\Delta t$  受载历程曲线

Fig. 3 Loading history curve of  $\sigma$ - $t_1$ - $t_2$ - $\Delta t$  of stress effect test specimen

根据以上实验结果对以下6个问题进行讨论:

(1) 关于 $\sigma$ - $\Delta t$ 线性相关性问题

引入线性相关系数

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})(\Delta t_i - \bar{\Delta t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2 \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \bar{\Delta t})^2}}, \quad (8)$$

式(8)中, $R$ 为参数 $\sigma$ 、 $\Delta t$ 之间的线性相关系数; $\sigma_i$ 、 $\Delta t_i$ 分别为参数 $\sigma$ 、 $\Delta t$ 的样本值; $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\Delta t}$ 分别为参数 $\sigma$ 、 $\Delta t$ 的样本值平均值。

参数 $R$ 反映统计参数 $\sigma$ 、 $\Delta t$ 之间的线性相关性, $R$ 值越接近1,则参数之间线性相关性越好,参数图形越接近直线。表1列出了实验中应力 $\sigma$ 值与对应声学参数 $\Delta t$ 实验值之间的线性相关系数。

从表1中可以看出,实验中所有试件 $\sigma$ - $\Delta t$ 之间线性相关系数的平均值为0.953,非常接近1,说明整体上参数 $\sigma$ 、 $\Delta t$ 实验值之间具有很好线性关系。实验结果还显示,在低应力阶段所有试件 $\sigma$ - $\Delta t$ 之间线性相关系数的平均值为0.755,这说明在低应力阶段 $\sigma$ - $\Delta t$ 之线性符合性较差;在高应力阶段时,所有试件 $\sigma$ - $\Delta t$ 之间线性相关系数的平均值为0.945, $\sigma$ - $\Delta t$ 之间线性符合性较好。推测出现这种现象的可能原因:混凝土是一种混合物结构,内部存在较多气孔及其他微小蓬松结构,在较低应力阶段由于这些蓬松结构尚未被“压实”会出现较明显的“非线性”,这种“非线性”的过程会导致结构的实际特性与理论预测出现较大差异。以上分析只是基于一种可能

性的推测,产生这种现象的确切原因还需要后续研究进行进一步的探索及验证。

(2) 关于零应力下参数的初值问题

对于各向同性介质,声学参数 $\Delta t$ 在零应力状态下的值为零,但实际中的介质并非完全各向同性,因此 $\Delta t$ 在零应力状态下测试值并不严格为0。本实验中未加载情况下的试件参数 $\Delta t$ 初值介于 $-1 \sim 25 \times 10^{-8}$  s(如表2所示),与满载应力状态下的参数比值平均为9%。可见用本方法检测结构永存应力时该因素会导致测试结果产生一定的误差,当测量较小应力时其导致相对误差会较大,当测试应力增大时,其导致相对误差会减少。

(3) 加载卸零后参数的残值问题

在本实验中随着试件压应力 $\sigma$ 增加, $t_1$ 呈减小趋势, $t_2$ 呈增加趋势,即随着压应力 $\sigma$ 增加, $V_1$ 增大、 $V_2$ 减小,这与声弹性理论模型基本符合。但应力卸零后, $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$ 仍有较大的“残留值”(如表3所示),其中 $\Delta t_1$ 相对残留平均值为-458%, $\Delta t_2$ 相对残留平均值为60%。而 $\Delta t$ 在应力卸零后基本恢复到零(如表3所示),相对残余平均仅为-2.9%。实验中参数在加载后卸零的残值现象说明双横波声速组合参数( $(V_1^2 - V_2^2)/K$ 或 $\Delta t$ )与应力 $\sigma$ 之间有更强的相关性,用其作为声学参数测量单向受压混凝土构件永存应力较单一声速参数更具可行性。采用单一声速( $V_1$ 或 $V_2$ )变化值来检测混凝土构件永存应力的方法是不具可行性。

表1 应力效应实验混凝土试件应力 $\sigma$ 与声学参数 $\Delta t$ 实验值之间线性相关系数

Table 1 Linear correlation coefficient between stress  $\sigma$  and acoustic parameter  $\Delta t$  of concrete specimen in stress effect test

构件编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	均值
低应力 $R$ 值	0.878	0.781	0.819	0.702	0.965	0.951	0.952	0.445	0.961	0.270	0.577	0.755
高应力 $R$ 值	0.985	0.893	0.808	0.975	0.980	0.985	0.973	0.947	0.961	0.912	0.976	0.945
全程应力 $R$ 值	0.964	0.935	0.917	0.924	0.990	0.967	0.984	0.962	0.978	0.903	0.957	0.953

说明:表1中试件低应力与高应力状态划分为:1#试件:0~8.9 MPa~17.8 MPa、2#试件:0~6.7 MPa~13.3 MPa、3#试件:0~4.4 MPa~13.3 MPa、4#试件:0~5.3 MPa~13.3 MPa、5#~11#试件:0~4 MPa~13.3 MPa。

表2 应力效应实验混凝土试件加载前零应力状态下参数 $\Delta t$ 初值

Table 2 Initial value of parameter  $\Delta t$  under zero stress state of concrete specimen in stress effect test before loading

初值类别	$\Delta t$ 加载前零应力状态下参数 $\Delta t$ 初值											
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	均值
初值/ $10^{-8}$ s	-1	0	7	0	10	23	0	7	5	25	-1	6.8
与满载比值/%	-1.2	0	11.5	0	9.5	25.3	0	12.1	8.3	35.7	-1.4	9.1

表3 应力效应实验混凝土试件加载后应力卸零后参数  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$ 、 $\Delta t$  相对残余值

Table 3 Relative residual values of parameters  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  and  $\Delta t$  after stress unloading of concrete specimen in stress effect test

参数	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	均值
$\Delta t_1/\%$	367	-189	-8	-373	-1040	-240	-68	-4200	-850	1167	400	-458
$\Delta t_2/\%$	76	36	100	67	64	49	65	84	73	21	75	60
$\Delta t/\%$	1	0	2	0	6	-11	0	0	5	-36	1	-2.9

注：表3中“相对残余值”分别为参数  $\Delta t$ 、 $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  (卸零状态下测试值 - 未加载初值)/最大应力状态下测试值的比值  $\times 100\%$ 。

(4) 参数对应力的敏感性问题

在本实验应力作用下，应力  $\sigma$  与时程差  $\Delta t$  近似成正比关系，应力  $\sigma$  与  $\Delta t$  之间有较强敏感性， $\sigma/\Delta t$  的值在实验最大应力状态下介于  $0.13 \sim 0.26 \text{ MPa}/10^{-8} \text{ s}$  之间， $\Delta t$  在 100 MHz 的采样频率下对应力  $\sigma$  具有较好的敏感性。

(5) 材料参数 K 的离散问题

试件的材料常数  $K$  的计算采用公式(7)变换得到：

$$K = \left( \frac{\Delta t}{\sigma} \right) \cdot \frac{2l^2}{t_0^3}, \quad (9)$$

式(9)中， $2l^2/t_0^3$  均为常数，取值与公式(7)相同， $(\Delta t/\sigma)$  取值时看作一个整体，其取值为试件  $\sigma$ - $\Delta t$  实验值线性回归趋势线的斜率倒数。另外引入统计参数相对标准差：

$$\text{RSD} = \frac{1}{\bar{K}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2}{n - 1}} \times 100\%, \quad (10)$$

式(10)中，RSD (Relative standard deviation) 为材料常数  $K$  样本值的相对标准差，其反映参数样本值的相对离散性； $K_i$  为材料常数  $K$  样本值，由公式(9)计算可以得到； $\bar{K}$  为材料常数  $K$  样本平均值。

试件材料参数  $K$  计算结果如表4所列。从表4中可以看出实验中实测 C50 试件材料常数  $K$  样本

均值为 0.0112，相对标准差为 22.8%；C40 试件材料常数  $K$  样本均值为 0.0083，相对标准差为 4.2%；C30 试件材料常数  $K$  样本均值为 0.0083，相对标准差为 52.9%；全部试件材料常数  $K$  样本均值为 0.0099，相对标准差为 27.8%。总体来看，实验中试件的材质常数  $K$  样本值离散性较大。从试件混凝土标号对材料常数影响来看，实验中材料常数  $K$  样本均值有随试件混凝土标号降低而减小的趋势。

(6) 实验值总体的离散问题

图4(a)~(c)为按强度等级 C50、C40、C30 把试件为 3 组，分别对每组试件  $\sigma$ - $\Delta t$  实验数据进行线性回归分析的结果。图4(d)为在不区分试件混凝土标号情况下对全部试件  $\sigma$ - $\Delta t$  实验数据进行线性回归分析的结果。

从分析结果看，不同试件间的实验数据具有较大的离散性。在应力大于 10 MPa 的情况下，试件实际实验值与回归曲线值相对误差范围 C50 组混凝土介于  $-34\% \sim 51\%$ ，C40 组误差介于  $-13\% \sim 34\%$ ，C30 组误差范围介于  $-9\% \sim 16\%$ ，不区分混凝土标号全部试件组误差范围介于  $-27\% \sim 67\%$ 。从实验结果看在现在的实验条件下，实验数据的离散性较大，实验结果离实际应用仍有较大差距。

表4 应力效应实验混凝土试件材料常数 K 测试值

Table 4 Test value of material constant  $K$  of concrete specimen in stress effect test

参数	C50 试件						C40 试件			C30 试件	
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#
$K_i$	0.0107	0.0099	0.0080	0.0113	0.0157	0.0115	0.0084	0.0085	0.0079	0.0052	0.0115
$\bar{K}$ (分试件标号)	0.0112						0.0083			0.0083	
$\bar{K}$ (全部)							0.0099				
RSD (分试件标号)	22.8%						4.2%			52.9%	
RSD (全部)							27.8%				

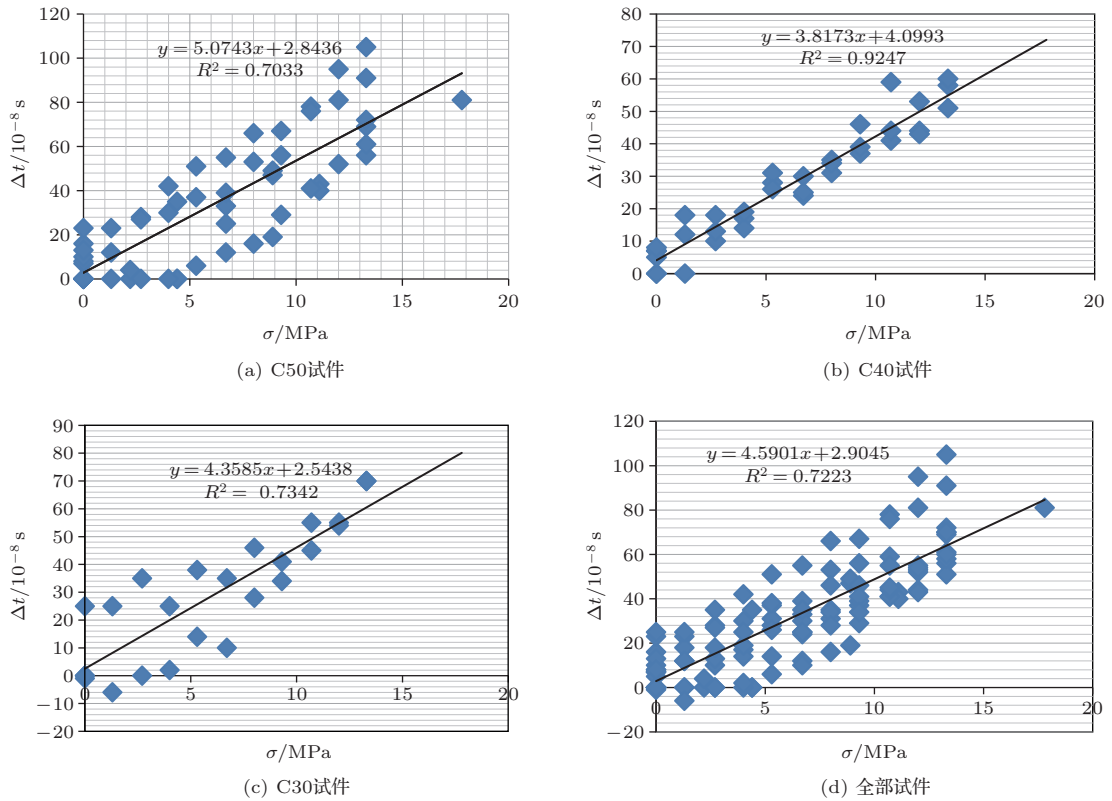


图4 试件 $\sigma$ - $\Delta t$ 实测值线性回归趋势

Fig. 4 Linear regression trend line of specimen

2.2.2 温度效应实验结果及讨论

表5为构件温度与声学参数关系实验结果。

表5 温度与声学参数关系实验结果

Table 5 Experimental results of relationship between temperature and acoustic parameters

试件编号	试件温度/ $^{\circ}\text{C}$	$t_1/10^{-8}$ s	$t_2/10^{-8}$ s	$\Delta t_1/10^{-8}$ s	$\Delta t_2/10^{-8}$ s	$\Delta t/10^{-8}$ s
12# 构件 (C50)	27	5660	5662	0	0	-2
	60	5767	5773	107	111	-6
13# 构件 (C30)	27	5745	5751	0	0	-6
	60	5894	5899	149	148	-5
14# 构件 (C40)	27	5826	5819	0	0	7
	60	5961	5953	135	134	8

从以上实验结果可以看出:

(1) 试件温度变化显著引起了声波传导时间 $t_1$ 、 $t_2$ 的变化, $t_1$ 、 $t_2$ 的变化主要由声速 $V_1$ 、 $V_2$ 变化引起(经测算实验中温度引起试件长度的变化可以忽略不计)。经测算,实验二中每 $1^{\circ}\text{C}$ 的温变引起的超声传播时间 $t$ 变化值约 $4 \times 10^{-8}$  s,这与实验一中 $1$  MPa应力效应大约相当。可见温度是超声检测永存应力中的一个不可忽视的因素。

(2) 虽然试件温度的变化会显著引起 $t_1$ 、 $t_2$ 的变化,但 $t_1$ 与 $t_2$ 为同向变化, $\Delta t = t_2 - t_1$ 做差值时消除了温度引起的变化,因此声学参数 $\Delta t$ 的基本不受温度变化的影响。所以用声学参数 $\Delta t$ 检测结构永存应力可“剔除”温度因素的影响。

2.2.3 湿度(含水率)效应实验结果及讨论

表6为构件湿度(含水率)与声学参数关系实验结果。



表6 试件湿度(含水率)与声学参数关系实验结果

Table 6 Experimental results of relationship between moisture content and acoustic parameters

试件编号	状态	质量/kg	含水率/%	$t_1/10^{-8}$ s	$t_2/10^{-8}$ s	$\Delta t_1/10^{-8}$ s	$\Delta t_2/10^{-8}$ s	$\Delta t/10^{-8}$ s
15# 构件(C30)	干燥	8.095	0.000	5745	5747	0	0	-2
	含水	8.190	1.174	5752	5755	-7	-8	-3
16# 构件(C30)	干燥	8.102	0.000	5713	5713	0	0	0
	含水	8.213	1.370	5715	5715	-2	-2	0
17# 构件(C40)	干燥	7.905	0.000	5821	5818	0	0	3
	含水	7.999	1.189	5824	5824	-3	-6	0

从实验结果可以看出,试件含水率的变化未引起 $t_1$ 、 $t_2$ 显著变化,亦不会引起 $\Delta t$ 的变化。

### 3 结论

本文所提方法具有参数零值易于确定、参数对应力的敏感性更高、能够剔除温度等环境干扰因素的影响、能够排除混凝土黏滞性对参数的影响、测定双声速时无需移动测试探头等优点。但同时也存在实验中试件实测材料常数 $K$ 的离散性大、部分试件零应力下参数 $\Delta t$ 不为零等问题,这些不利因素致使目前尚不能制定出普遍适用的混凝土构件 $\sigma$ - $\Delta t$ 关系曲线,因此该方法距离实际应用还有较长的一段路要走。针对目前存在的问题,下一步研究需要努力寻找产生问题的原因,找出消除不利因素的可行方法。

### 参 考 文 献

- [1] 庄晨旭, 张劲泉, 蒋含莞. 混凝土应力检测技术研究综述[J]. 公路交通科技, 2016, 33(3): 43-51.  
Zhuang Chenxu, Zhang Jinquan, Jiang Hanwan. Review of concrete stress testing technologies[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(3): 43-51.
- [2] 朱金颖, 陈龙珠, 严细水. 混凝土受力状态下超声波传播特性研究[J]. 工程力学, 1998, 15(3): 111-117.  
Zhu Jinying, Chen Longzhu, Yan Xishui. Ultrasonic pulses behavior in concrete during compressive loading[J]. Engineering Mechanics, 1998, 15(3): 111-117.
- [3] 陈立新, 许锡宾, 赵明阶, 等. 混凝土声-应力相关性影响因素分析[J]. 中国港湾建设, 2005(4): 6-8, 12.  
Chen Lixin, Xu Xibin, Zhao Mingjie, et al. Analysis of factors influencing correlativity of ultrasound and stress in concrete[J]. China Harbour Engineering, 2005(4): 6-8, 12.
- [4] 林军志, 赵明阶, 许锡宾, 等. 混凝土声学参数与应力相关性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S1): 4989-4996.  
Lin Junzhi, Zhao Mingjie, Xu Xibin, et al. An experimental research on the correlation of acoustic parameters and stress of concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 4989-4996.
- [5] 雷正伟, 米东, 徐章遂, 等. 超声应力检测中的温度和应变影响分析[J]. 仪表技术, 2007(6): 33-35.  
Lei Zhengwei, Mi Dong, Xu Zhangsui, et al. Temperature and strain effects analysis of ultrasonic stress detecting[J]. Instrument Technology, 2007(6): 33-35.
- [6] Lillamand I, Chaix J F, Ploix M A, et al. Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading[J]. NDT & E International, 2010, 43(8): 655-660.
- [7] 刘新健. 基于HHT的混凝土声学特性试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [8] 刘宏翔, 杜二霞. 超声波检测混凝土应力的试验分析[J]. 山西建筑, 2017, 43(13): 47-49.  
Liu Hongxiang, Du Erxia. Experimental analysis of the ultrasonic testing for concrete stress[J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(13): 47-49.
- [9] 徐春广, 宋文涛, 李骁, 等. 残余应力的超声波检测与校准[C]. 电子机械与微波结构工艺学术会议论文集, 2014, 8: 280-290.