

李君君, 吴佳晔, 张远军, 等. 弹性波法测试火灾后混凝土动弹性模量应用研究[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 77–82. [LI Junjun, WU Jiaye, ZHANG Yuanjun, et al. Application of Elastic Wave Method in Testing Dynamic Elastic Modulus of Concrete after Fire[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(1): 77–82. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.01.014.]

弹性波法测试火灾后混凝土动弹性模量应用研究^{*}

李君君¹, 吴佳晔^{2,3}, 张远军³, 邓立³

(1. 石家庄铁路职业技术学院, 河北 石家庄 050041, 2. 西南石油大学, 四川 成都 610500,
3. 四川升拓检测技术股份有限公司, 四川 自贡 643000)

摘要: 混凝土动弹性模量是混凝土构件在动荷载作用下应力与应变的比值, 是混凝土建筑物承受动荷载(包括地震荷载、冲击、爆炸)作用及灾害影响(火灾、酸雨侵蚀等)后, 分析结构力学特性的一个重要参数, 同时也是评价混凝土耐久性安全性的一个关键指标。该文对比介绍了基于冲击弹性波的动弹性模量测试方法、原理, 并给出相关验证实例及对比材料。通过对比研究表明基于冲击弹性波的混凝土弹性模量测试具有较高的测试精度, 可推广运用于火灾影响后混凝土实体结构动弹性模量检测。

关键词: 动弹性模量; 冲击弹性波; 形状修正系数; 共振法

中图分类号: TB115 ; X4; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2022)01-0077-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.01.014

混凝土结构是当今最重要的土木建筑结构, 在基础设施中占据举足轻重的地位。在使用过程中, 不可避免地出现各种老化、劣化现象, 同时难免可能会经历火灾(高温)灾害影响(图1), 如果混凝土质量再得不到保证, 将会严重降低结构的耐久性安全性, 缩短结构使用寿命。



图1 火灾灾害后混凝土结构

评价灾后混凝土质量指标有很多, 如抗压强度和弹性模量指标等。混凝土强度现场检测包括回弹法、超声回弹综合法、钻芯法等^[1]成熟的方法, 不同的检测方法各有其适用范围和适用条件, 如乔宏霞等^[2]超声波在混凝土中的传播速率可以衡量混凝土内部密实度及强度发展, 张兴斌等^[3]对于复杂的大体积混凝土构件, 由于测距过长, 超声波信号衰减过大, 无法测得有效数据来为分析混凝土内部密

实性提供支持, 需要对测试方法改进。

抗压强度反映混凝土材料最大抗压能力, 同为混凝土力学性能的弹性模量则决定了结构的变形特性^[4], 反映了结构的力学性能指标^[5]。针对火灾后混凝土材料的老化往往先从弹性模量的降低开始, 精确测试弹性模量对评价混凝土结构的物理力学性能、长期性能和耐久性能具有重要意义, 同时, 马辉^[6]研究认为可对解决实际灾后混凝土在不同灾害条件下的力学性能研究提供理论依据和技术指导。

《GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准》^[7]《GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[8]等试验规程分别规定了采用棱柱体试件做静力受压弹性模量试验和动弹性模量试验的方法, 两种方法均局限于棱柱体试件的测试, 难以用于混凝土实体结构弹性模量的检测。实体取的圆柱体芯样弹性模量的检测, 目前主要用于静弹性模量检测, 如《SL 352 水工混凝土试验规程》^[9]“静力抗压弹性模量试验”, 张玉婷等^[10]一种通过对圆柱体侧向压缩力-位移关系的非线性拟合, 同时得到材料弹性模量和泊松比的方法。另外一般认为混凝土结构(如预应力混凝土桥梁)的动弹性模量更能真实反映运营过程中的结构力学特性。

针对火灾后的混凝土弹性模量检测, 本文通过动弹性模量的测试方法研究, 认为冲击弹性波

* 收稿日期: 2021-08-10 修回日期: 2021-10-12

基金项目: 国家自然基金面上项目(51974273); 四川省科技厅重点研发项目(2018GZ0046); 中国制造2025项目(2018RC013)

第一作者简介: 李君君(1982-), 男, 汉族, 河北涿州人, 副教授, 主要从事工程结构施工安全控制及检测加固技术研究.

E-mail: 117464529@qq.com

测试火灾后混凝土动弹性模量, 原理清楚, 测试方法明确, 通过引入形状修正系数, 与共振法检测动态弹性模量对比, 具有较高的准确性和可靠性, 基于冲击弹性波的混凝土动弹性模量检测能够应用于火灾等灾害影响后混凝土实体结构动弹性模量的检测。

1 火灾后混凝土动弹性模量作用

火灾后弹性模量是混凝土的重要力学性能, 是计算混凝土结构变形裂缝开展和温度应力所必需的参数之一。

根据项凯^[11]等人的研究, 火灾(高温)后混凝土弹性模量的变化有以下特点: ①随着温度升高混凝土的弹性模量呈下降趋势; ②混凝土强度等级对火灾后弹性模量的降幅影响不大; ③火灾后弹性模量的降幅硅质骨料的混凝土要高于钙质骨料的混凝土; ④火灾后混凝土弹性模量的降幅高于混凝土抗拉强度和抗压强度的降幅。

随着火灾期间温度的增加, 混凝土不同的力学性能降低幅度不同, 其中抗压强度的降幅最小, 抗拉强度降幅略大, 而弹性模量的降幅最大。因此针对火灾后的混凝土结构, 测试其结构弹性模量的变化作用就很有意义, 可更精确反映材料火灾后的力学性能变化情况。

2 动弹性模量测试方法

弹性模量测试一般分为静态法、动态法和波传播法三类, 其中静态法测试得材料的静弹性模量, 如静力受压弹性模量试验, 针对火灾后的混凝土不具有适用性, 本文不做具体讨论; 动态法和波传播法测试得材料的动弹性模量, 如共振法测定混凝土的动弹性模量, 超声波法测试混凝土动弹性模量等^[12-13]。

2.1 共振法

共振法主要包括横向共振法、纵向共振法和扭转共振法^[14], 国内相关规程以横向共振法为主, 对混凝土棱柱体试件施加强迫振动, 测定自振频率, 横向共振法各部件连接和相对位置如图2所示。

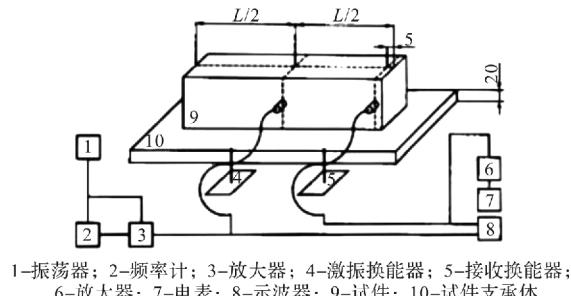


图2 共振仪法设备连接及示意图

共振法测试混凝土的动弹性模量普适性的计算公式可写为:

$$E_d = Cmf^2 \quad (1)$$

式中: E_d 为混凝土动弹性模量(MPa); C 为形状

计算参数(kg/m^2); m 为试件的质量(kg); f 为试件自振频率(Hz)。

C 为形状计算系数, 与试件的尺寸及泊松比等有关, 《GB/T 50082-2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》《SL 352 水工混凝土试验规程》中根据各自试件要求及泊松比取值都给出了具体的 C 值, 但由于泊松比取值差异, 其系数差异较大, 对于横向自振频率计算的动态弹性模量两个规程相差 9% 左右。即泊松比对共振法测试结果影响较大, 当混凝土质量较差时, 该影响会更加显著。

显然共振法仅仅适用于室内试验, 无法用于实体结构, 同时由于火灾影响后混凝土表面不平整, 不利于耦合, 对于目前备受关注的通过弹性模量来分析混凝土实体结构耐久性劣化问题, 无法实施。

2.2 波传播法

波传播法主要是基于弹性波在物体里的传播速度与弹性模量的关系来测量弹性模量。根据测试弹性波的不同, 可分为超声波法和冲击弹性波法等。超声波法又分横波法、纵波法和横波纵波法, 但常用相对简单的纵波法。

超声纵波法, 一般采用透射的方式来测试试件的纵波传播波速, 利用波速和弹性模量间的关系, 即可计算出试件的动弹性模量^[15]:

$$E_{d,u} = \rho v_p^2 \quad (2)$$

式中: $E_{d,u}$ 为超声纵波法测量的动弹性模量(GPa); ρ 为试件密度(g/cm^3); v_p 为超声波纵波速度(km/s)。

可见超声波法用于检测试件的动弹性模量相对于共振法要简单的多, 其适用范围也要大一些, 但由于测距过长, 超声波信号衰减过大, 难以适应大体积混凝土构件的检测, 同时超声波为大于 20 kHz 的高频信号, 其混凝土中传播的波速受水、钢筋、甚至骨料直径影响较大, 针对火灾后混凝土的表面耦合接触也存在较大困扰, 因此即使如今非金属超声波技术较为成熟, 波速测试简单, 超声波仍然鲜见于实体弹性模量检测, 特别是用于火灾后的混凝土实体弹性模量检测。

3 冲击弹性波法

3.1 冲击弹性波

冲击弹性波指在冲击作用下的质点以波动形式传播在弹性范围内产生的运动, 亦称应力波^[16], 属于弹性波范畴。弹性波与常见电磁波、射线等最大的区别之一在于其能反映材料的力学特性, 而弹性模量正是材料的最重要的力学性能之一, 因此弹性波用于检测混凝土构件的弹性模量正当其用。同时相较于超声波, 冲击弹性波具有频率低, 波长长, 能量强等特点, 受水、钢筋、骨料直径、表面影响小, 因此冲击弹性波非常适合大体积混凝土构件弹性模量的检测, 且冲击弹性波具有多种测试手段, 如透射法、冲击回波法、面波法、平测法等^[17], 对构件的适应能力较强。

3.2 测试原理

冲击弹性波法测试火灾(高温)影响后混凝土动弹性模量, 主要是通过测试波速计算 E_d , 可用纵波波速, 也可用面波波速。

根据波动理论^[17]对于一维杆件波动方程整理可得到:

$$E_d = \rho V_{p1}^2 \quad (3)$$

式中: E_d 为混凝土动弹性模量(GPa); ρ 为试件密度(g/cm³); V_{p1} 为维纵波速度(km/s)。

同样根据波动理论有:

$$2\text{维 } E_d = \rho(1-\mu^2)V_{p2}^2; \quad (4)$$

$$3\text{维 } E_d = \frac{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)}V_{p3}^2. \quad (5)$$

式中: μ 为泊松比; V_{p2} 为 2 维纵波速度(km/s); V_{p3} 为 3 维纵波速度(km/s)。

而对于表面波法, 动弹性模量计算可以表示为:

$$E_d = 2\rho V_R^2 \frac{(1+\mu)^3}{(0.87+1.12\mu)^2}. \quad (6)$$

式中: V_R 为面波速度(km/s)。

3.3 影响因素

由冲击弹性波测试混凝土动弹性模量原理可见: 一维杆件动弹性模量计算与一般超声纵波法一致, 仅与结构的密度有关, 相对简单, 而实际检测结构往往并不是杆式构件。对于板式构件, 需通过二维波速计算弹性模量, 对于三维立方体构件, 需通过三维波速计算弹性模量, 也可能间于某两种结构形状之间, 结合式(4)、式(5)和式(6)可见动弹性模量不仅与泊松比有关, 还与构件形状有关。

非杆式构件动弹性模量的计算若仅考虑泊松比的影响, 可以很方便地得到各种波速的相对系数, 如表 1 给出了两种典型泊松比下各种波速的相对关系。

表 1 不同波速的相对关系

动泊松比 μ	V_{p3}/V_{p1}	V_{p2}/V_{p1}	V_R/V_{p1}	V_{p3}/V_R
0.20	1.05	1.02	0.588	1.78
0.25	1.10	1.03	0.581	1.89

3.4 解决方法

对于构件形状的影响我们在此引入了形状修正系数 β , 其与测试的位置、激振波长、结构横截面的厚(H)宽(b)比 η ($\eta = H/b$)等有关。

当厚宽比 η 小于 0.5 或者大于 2 时, 构件趋于板式结构或杆式结构, 我们的研究结果与《ASTM C1383 - 98: Standard Test Method for Measuring the P - Wave Speed and the Thickness of Concrete Plate Using Impact - Echo Method》^[18] 等一致, β 可取 0.96。同时, 我们试验发现, 测点的位置对 β 值有一定影响, 但影响并不大。如我们采用图 3 所示的混凝土作为试验构件, 其尺寸为 1 000 mm × 1 000 mm × 500 mm, 厚宽比为 0.5 进行试验, 分析得到表 2 所示结果。



图 3 混凝土试验构件

表 2 测试位置对 β 的影响

试样 编号	测试 P 波波速/(km/s)		IE(角点)/IE(中心)/ 单面平测		IE(角点)/IE(中心)/ 单面平测	
	单面平测	IE(角点)	IE(中心)	单面平测	单面平测	
1	4.625	4.486	4.466	0.970	0.966	
2	4.482	4.312	4.295	0.962	0.958	
3	4.293	4.158	4.128	0.969	0.962	
4	4.142	3.973	3.945	0.959	0.952	
平均	/	/	/	0.965	0.959	

试验结果表明在试块的角点的测试值略快于中点的测试值, 其原因在于在角点激发的弹性波扩散度要低于在中点的激发, 而形状修正系数 β 变化仍在 0.96 左右, 变化不大, 对波速的最大影响在 0.5% 左右。

当厚宽比 η 在 0.5 ~ 2 区间时, β 有较大浮动, 其最低值可到 0.85 附近, 对波速的影响达 10% 以上, 应予以重视。我们认为, 其原因在于结构四周边界条件的影响。如图 4 所示, 冲击弹性波在结构中不仅有 P 波的重复反射, 而且还有 S 波和 R 波的重复反射。当这几种成分的弹性波互相混杂时, 不可避免地对波速测试结果产生影响。

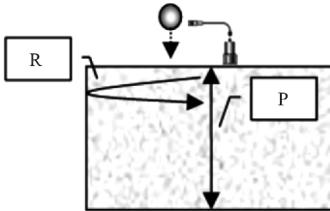


图 4 冲击回波法中的各种成分

由于加速度传感器存在主轴灵敏度, 因此我们主要考虑 R 波影响, 当结构为正方体, 在中心激振, R 波反射周期 T_R 为 $b/V_R \sim \sqrt{2}b/V_R$, 根据表 1 取泊松比为 0.25, T_R 范围用一维纵波波速可以表示为:

$$T_R = (1.72 \sim 2.43) \frac{b}{V_{p1}}. \quad (7)$$

而对于冲击回波法中的纵波, 其反射周期 T_P 可以表示为:

$$T_P = \frac{2\eta b}{0.96V_{p1}} = \frac{2.08\eta b}{V_{p1}}. \quad (8)$$

当 T_P 在 T_R 的范围之内时, 两种成份波会互相影响, 则 $0.83 < \eta < 1.17$ 。

当 $T_P > T_R$ 时, R 波的影响大大降低, 设当 $\eta = 0.83$ 时, η 为最低值 0.85。采用双曲线拟合后, β 与 η 有如下关系:

$\eta < 0.83$ 时:

$$\beta = 0.76 + \frac{0.2}{1 + e^{4.28(1.17 - 1/\eta)}}, \quad (9)$$

渐近线为 0.96。

$\eta \geq 0.83$ 时:

$$\beta = 0.75 + \frac{0.217}{1 + e^{4.28(0.83 - \eta)}}, \quad (10)$$

渐近线为 0.966。

式中: $\eta = 1$ (立方体)时, $\beta = 0.896$ 。

综上述几何形状系数 β 与厚宽比 η 的关系如图 5 所示, 即当厚宽比 η 大于 2 小于 0.5 时几何形状系数 β 取 0.96; 当厚宽比 η 小于 2 大于 0.5 时几何形状系数 β 应根据式(9)或式(10)计算获取。

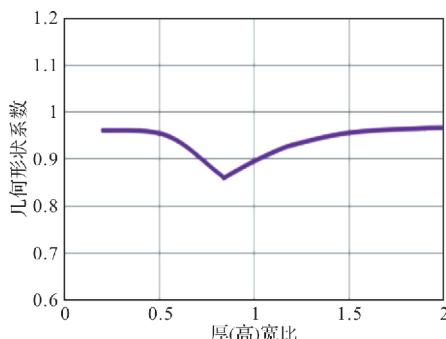


图 5 几何形状系数 - 厚宽比的关系

3.5 试件弹性模量测试

弹性模量测试试件可以是标准试件 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 或 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 、棱柱体试件 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 以及圆柱体试件。为了更好的与共振法测试进行对比，应采用棱柱体试件，由于其尺寸较小测试时优先采用冲击回波法(IE 法)，且原则上在试件的长轴方向激振和测试(图 6)。



图 6 测试方向

激振时尽量采用硬质小锤激振，以免诱发试件体振动。IE 法由激振装置在固体表面冲击而产生的弹性波(图 7)，利用弹性波在被测体中的多次反射，通过频谱分析来获取弹性波波速 V_{ref} (图 8)。

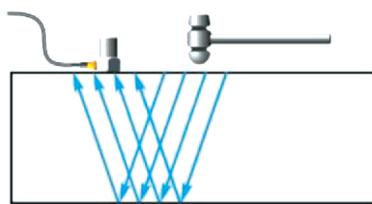


图 7 冲击回波法检测示意图

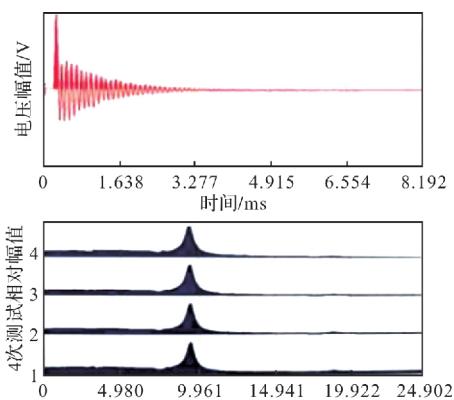


图 8 冲击回波法频谱分析图

棱柱体试件厚宽比 η 为 4, 因此几何形状系数 β 取 0.96, 即:

$$E_d = \rho (V_{ref}/0.96)^2 = 1.085 \rho V_{ref}^2 \quad (11)$$

4 对比验证

4.1 金属模量测试

对于金属材料，其材质均匀，动、静弹性模量基本一致，如低碳钢的弹性模量在 200 GPa ~ 210 GPa 之间，平均为 206 GPa。因此，利用冲击弹性波对金属材料弹性模量进行测定，可以验证测试方法的准确性和可靠性。

该对比验证采用反射法、透射法两种测试方法, 对不同长度(500 mm ~ 5 500 mm)的钢筋弹性模量进行测试。

对比验证试验可见(图9)，对于钢筋长度大于1 m时，各种测试方法均能够很好的测试；而当钢筋长度较短(如小于1 m)，由于波到达时刻的读取误差，使得用透过法测得的误差较大，此时采用反射法(冲击回波法)测试。

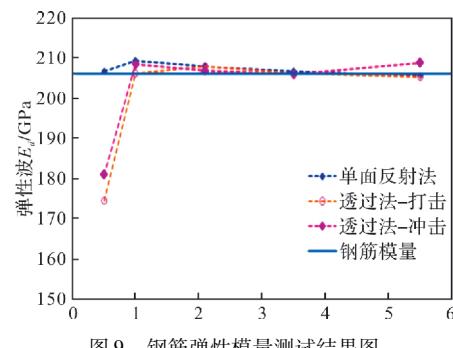


图9 钢筋弹性模量测试结果图

图 10 为对一短钢筋(长度为 0.429 m)采用反射法(冲击回波法)测试的频谱图, 其中反射时间 T_r 为 0.166 ms; 通过计算得到其弹性模量为 208.4 GPa, 与其他方法测试结果基本一致。

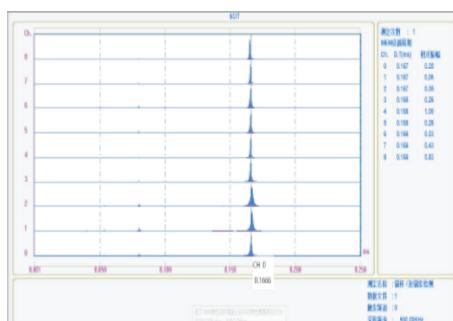


图 10 0.429 m 钢筋弹性波频谱分析结果图

充分说明了冲击弹性波法对材料弹性模量测试的准确性和可靠性。

4.2 共振法对比验证

本验证采用共振法与冲击弹性波法对火烧处理过的棱柱体试件进行混凝土动弹性模量对比验证。

考虑到骨料对混凝土的变形性能影响最大, 试验中采用了三种不同骨料配制的三组混凝土: 片岩(S组)、灰岩(L组)和天然骨料(N组)。片岩和灰岩骨料选自我国南方两个大型水电工程的人工骨料, 片岩材质相对较软, 平均饱和弹性模量46.2 GPa;

灰岩材质相对较硬, 平均饱和弹性模量 68.6 GPa, 比片岩高约 50%, 最大值 73.9 GPa。天然骨料为我国北方某水利工程取自天然河床的河砂和河卵石。骨料为二级配。水泥采用 425#中热水泥, 一级粉煤灰掺量均为 20%。每组混凝土配合比有三个不同的水胶比: 0.45、0.50 和 0.55, 分含气和不含气两类, 共计 18 个不同配比。以上所有试件均在试验前采用大火进行火烧处理, 本文主要对比共振法与冲击弹性波法的测试结果相关性, 因此本文对具体的各配合比在此不予详述。

在 28 d 龄期时, 对以上三组试件分别采用冲击回波法与常规横向自振频率法对棱柱体试件动弹性模量进行测试, 通过结果对比分别如下表 3—表 5 及图 11 所示。

表 3 S 组棱柱体试件与共振法的对比(单位 GPa)

试件编号	冲击弹性波法		共振法		相对误差/%
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	
S-NA4520	37.9	0.33	37.3	0.11	1.5
S-NA5020	37.5	0.55	36.9	0.69	1.7
S-NA5520	36.0	1.15	35.8	0.87	0.6
S-A4520	37.1	0.54	36.5	0.48	1.6
S-A5020	34.6	0.62	33.8	0.80	2.3
S-A5520	35.4	0.73	35.6	1.74	0.5
平均值					1.2

表 4 L 组棱柱体试件与共振法的对比(单位 GPa)

试件编号	弹性波法		共振法		相对误差/%
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	
L-NA4520	47.1	0.31	46.4	0.28	1.3
L-NA5020	46.4	1.10	46.3	0.06	0.1
L-NA5520	45.1	1.03	44.9	0.96	0.3
L-A4520	45.1	0.59	43.8	0.25	2.9
L-A5020	43.1	0.57	42.3	0.88	1.9
L-A5520	41.3	0.56	40.6	0.66	1.8
平均值					1.4

表 5 N 组棱柱体试件与共振法的对比(单位 GPa)

试件编号	弹性波法		共振法		相对误差/%
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	
N-NA4520	34.5	0.65	34.8	0.91	0.8
N-NA5020	34.9	0.44	34.7	0.45	0.7
N-NA5520	33.3	1.33	32.8	0.84	1.7
N-A4520	34.0	0.43	33.7	0.41	0.8
N-A5020	32.4	0.48	32.3	0.00	0.4
N-A5520	33.3	0.50	33.0	0.68	0.9
平均值					0.6

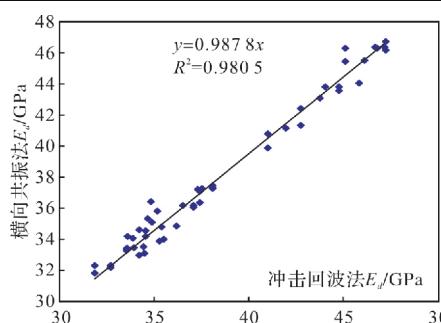


图 11 100 mm × 100 mm × 400 mm 棱柱体试件动弹性模量比较

对比验证结果表明, 两种方法得到的动弹性模量结果非常一致, 平均相对误差为 1.1%, 最大相对误差仅 2.9%。说明利用冲击弹性波(IE 法)测试混凝土试件 P 波速度来计算混凝土动弹性模量的方法是非常有效和可靠的。

4.3 实体结构弹性模量对比验证

本验证采用静力受压弹性模量测试与冲击弹性法(IE 法)对河南省某制梁场预制梁混凝土实体结构进行结构静弹性模量测试对比验证, 其中: 静力受压弹性模量测试参考《GB/T50081—2019 普通混凝土力学性能试验方法标准》进行静力受压弹性模量测试, IE 法模量根据吴佳晔等人的动静弹性模关系研究结论, 采用 $E_c = 9.0e^{0.033E_d}$ 计算静弹模。

该测试对标养试件(3 组同批次同养护), 并同时经过相同试件的火烧处理后分别送往河南省三家不同的甲级试验机构, 对比结果如表 6 所示。

表 6 IE 法与传统静力受压弹性模量对比(单位: GPa)

编号	养护类型	龄期	单位	静力受压值	IE 法值	差值/%
1	同养	7D	A 单位	52.5	43.1	21.64
2	同养	7D	B 单位	44.3	43.2	2.52
3	同养	7D	C 单位	49.4	43.3	14.05

对比显示冲击弹性波法测试混凝土 P 波速度来计算混凝土弹性模量的结果平均为 43.2 GPa, 且相比传统静力受压法测试结果是很稳定的, 证明该方法是非常有效和可靠的。

根据对标养试件的测试结果, 我们对上节测试的梁体进行了基于冲击弹性波的 IE 法测试, 该试验对该梁体结构选择了 7 处位置进行测试对比, 对比采用冲击回波法、双面透过法、表面波法、单面传播法四种方法分别进行了测试。

测试前, 首先采用冲击回波法(IE 法)对该结构 7 处位置进行测试分析, 其测试静弹性模量平均值为 41.2 GPa, 具体数值如表 7 所示。

表 7 IE 法测试混凝土结构弹性模量结果表(单位: GPa)

编号	龄期	设计强度	计算密度/(kg/m³)	测试值 Ec	平均值
1#	7d	C60	2 450	41.3	41.2
2#	7d	C60	2 450	41.9	
3#	7d	C60	2 450	41.1	
4#	7d	C60	2 450	41.2	
5#	7d	C60	2 450	41.1	
6#	7d	C60	2 450	40.6	

可见, 采用 IE 法测试结构静弹性模量十分稳定, 且与上述标养试件结果值基本吻合。

另外, 采用基于冲击弹性波的双面透过法、表面波法、单面传播法测试的结果对比如表 8 所示。

表 8 混凝土结构静弹性模量对比表(单位: GPa)

编号	双面透射法		单面平测法		面波法	
	测值	相对误差/%	测值	相对误差/%	测值	相对误差/%
1#	41.5	0.72	43.0	4.35	40.2	-2.47
2#	41.6	0.83	39.0	-5.33	41.2	0.02
3#	40.5	-1.86	41.1	-0.32	41.7	1.06
4#	40.9	-0.77	40.0	-3.03	40.8	-1.03
5#	40.7	-1.14	43.2	4.79	40.9	-0.68
6#	42.1	2.18	40.2	-2.49	41.3	0.34

可以看出,对于混凝土实体结构静弹性模量测试时,各种测试方法均能够很好的测试,充分说明了本技术测试的可靠性和精度。另由于采用单面平测法,其测试时两传感器之间距离相对透射法时更小,由于波的到达时刻的读取误差,使得采用单面平测法测得的误差较大,对此可采用透射法/面波法测试。

5 结论

针对火灾后的混凝土性能研究分析,混凝土的弹性模量决定了结构的变形特性,是更反映火灾后混凝土物理力学性能、长期性能和耐久性能的重要指标,精确测试弹性模量对评价火灾(高温)影响后的混凝土结构的质量具有非常重要意义。然而相关规程规定的检测方法仅仅局限于试件的测试,难以用于混凝土实体结构。通过基于冲击弹性波的混凝土模量检测与共振法检测的对比研究,我们可以得出以下结论。

(1) 共振法适用于尺寸规格的试件测试,不能用于混凝土实体结构动弹性模量的检测;更是由于针对火灾(高温)混凝土表面无法耦合,无法检测。

(2) 弹性波用于动弹性模量的检测具有明确可靠的理论基础,也是波传播法测试动弹性模量的一种方法,受火灾对混凝土采集信号的影响小。

(3) 基于冲击弹性波的混凝土试件模量检测结果与共振法测试结果的相关性高达 0.99,最大相对偏差小于 3%,平均相对偏差约为 1.1%;不同组别最大的变异系数小于 4%,平均变异系数小于 2%;基于冲击弹性波测试混凝土动弹性模量具有相当的精度,测试结果稳定性可靠性高;

(4) 弹性波对火灾后混凝土检测动弹性模量实质为弹性波波速测试,波速测试方式多样,均能够快速应用于混凝土实体结构检测。

由此,可见冲击弹性波用于检测火灾影响后混凝土动弹性模量理论明确、结果可靠、适用性广,可以推广到火灾影响后混凝土实体结构动弹性模量检测。

参考文献:

- [1] 侯高峰. 混凝土抗压强度现场检测技术方法研究现状及发展方向[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(4): 76–80.
- [2] 乔宏霞, 路承功, 焦晓光, 等. 兰州地区泵送混凝土测强曲线及无损检测方法适用性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(12): 74–78.
- [3] 张兴斌, 张行毅, 房夏. 一种新型混凝土缺陷测试方法[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(11): 77–80.
- [4] 闫东明, 林皋. 混凝土动态性能试验研究现状及展望[J]. 水科学与工程技术, 2006(4): 1–5.
- [5] 项凯, 王国辉, 张晓颖, 等. 火灾后混凝土的力学性能[J]. 消防科学与技术, 2009, 28(12): 885–885.
- [6] 马辉. 火灾后混凝土力学性能的影响因素[J]. 四川水泥, 2017(10): 74, 295.
- [7] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [8] GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工程出版社, 2009.
- [9] SL 352—2006 水工混凝土试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [10] 张玉婷, 丁榕, 左泽宇, 等. 一种由圆柱体试件的侧向压缩力位移关系 - 同时测量材料弹性模量和泊松比的新方法[J]. 实验力学, 2019(3): 365–372.
- [11] 项凯, 王国辉, 张晓颖, 等. 火灾后混凝土的力学性能[J]. 消防科学与技术, 2009, 28(12): 885–885.
- [12] 张玉敏, 王忠海. 混凝土抗压强度和弹性模量与其超声波速之间关系的试验研究[J]. 混凝土, 2002(12): 40–42, 52.
- [13] 孙丛涛, 刘荻涛, 元成方, 等. 混凝土动弹性模量与超声波声速及抗压强度的关系研究[J]. 混凝土, 2010(4): 14–16.
- [14] ASTM – C215: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens[S]. Annual Book of ASTM Standards, ASTM; 2020.
- [15] 齐永峰, 徐华东, 王立海. 四种方法测木质材料动弹性模量的对比研究[J]. 森林工程, 2011(1): 19–22.
- [16] JCJT411—2017 冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [17] 吕小彬, 吴佳晔. 冲击弹性波理论与应用[M]: 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [18] ASTM C1383 – 98: Standard Test Method for Measuring the P – Wave Speed and the Thickness of Concrete Plate Using Impact – Echo Method[S]. 1998.

Application of Elastic Wave Method in Testing Dynamic Elastic Modulus of Concrete after Fire

LI Junjun¹, WU Jiaye^{2,3}, ZHANG Yuanjun³ and DENG Li³

(1. Shijiazhuang Institute Of Railway Technology, Shijiazhuang 050041, China; 2. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. Sichuan Central Inspection Technology Inc., Zigong 643000, China)

Abstract: The dynamic elastic modulus of concrete is the ratio of stress and strain of concrete component under dynamic load. It is an important parameter to analyze the characteristics of structural mechanics after concrete building bears dynamic load (including earthquake load, impact, explosion) and disaster (fire, flood, geological disaster, etc.), It is also a key index to evaluate the durability and safety of concrete. This paper introduces the testing method and principle of dynamic elastic modulus based on shock elastic wave, and gives the relevant verification examples and comparative materials. The comparative study shows that the test of concrete elastic modulus based on shock elastic wave has high test accuracy, and can be applied to the dynamic elastic modulus test of concrete solid structure after disaster.

Key words: dynamic elastic modulus; impact elastic wave; shape correction factor; resonance method