

# 超声-回弹综合法在受火灾 砼结构检测中的应用\*

陈 治 平

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

**摘要** 利用回弹-超声和砼碳化测定等综合方法来评估受火灾砼结构的损伤情况. 以未受损砼结构构件上测得的检测参数为基准点, 通过回弹比和超声比来评估砼表面温度, 推定灾后砼强度等级; 并按 4 个层次来评估结构砼的受损情况.

**关键词** 损伤评估, 砼结构, 超声, 回弹, 碳化, 火灾

**分类号** TU 413

对受火灾后砼结构的评估国外早已研究, 而我国还处于初期研究阶段. 由于火灾的突发性和复杂性, 目前还很难用某种单一的检测方法来确切地测定砼的实际强度, 但将综合评估法作为一种评定手段仍是可取的. 本文在一系列高温试验的基础上, 通过比较正常状态下砼和灾后砼的超声速比和回弹比来探讨砼的受损情况, 并对砼的破坏状态作出评估.

## 1 试验方案简述

试件材料: “岩城”牌 425 R 早强型普通硅酸盐水泥; 泉州新桥中细砂 ( $M_x = 2.20$ ); 花岗岩碎石粒径为 5~40 mm, 砼配制强度为  $C_{30} \sim C_{50}$ ; 自然养护 3 个月后进行试验.

### 1.1 室温试验

在正常室温下, 根据文[1], 利用专用测强曲线对试件进行超声(声速值为  $V_0$ )和回弹(回弹值为  $R_0$ )综合检测<sup>[1]</sup>.

### 1.2 高温试验

把试件分为 5 个不同的温度组分别在 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C 和 800 °C 条件下恒温 1 h, 在空气中冷却后对试件进行超声(声速值为  $V_1$ )和回弹(回弹值为  $R_1$ )综合检测. 实验设备均为上海实验电炉厂制造, 其名称如下: (1) SG<sub>2</sub>-7.5-12 坩埚电阻炉; (2) KSW-12-16 电阻炉温度控制器, (3) WRP-120 型热电偶(LB-3 型铂铑铂材料), 用以测定砼表面温度.

检测仪器为 CTS-25 型非金属超声波探测仪和 HT-225 型回弹仪.

\* 本文 1995-07-02 收到

## 2 实验结果与分析

### 2.1 砵的温度特性

砵的内部结构是由各种材料组成的,它比单纯的水泥石要松散得多. 常温砵中的 C-S-H 凝胶的网状结构密实,CH 与 AF 等晶型完整,界面结构也很密实,连结点多,孔缝较少. 但温度到 200~300 °C 后水化物开始脱水,晶型严重变形,并出现孔缝. 特别是由于水泥石与粗骨料的热变形不相容,形成大量界面裂缝,严重削弱了界面粘结力(但砵抗压强度尚未明显受到影响). 从 400 °C 以后,这种变化随着温度的升高而逐渐加剧;当砵表面温度达到 800 °C 后,砵内部主筋处温度已达 600 °C,钢筋与砵的粘结力严重受损,承载能力显著下降. 所以,本实验在 400~800 °C 范围内分 5 个温度组进行.

### 2.2 砵的极限抗压强度

当砵表面温度未达到 400 °C 时,虽然砵的极限抗压强度未受到明显的影响,但相对于常温砵来说,测试参数  $R_t$  及  $V_t$  的相对值  $R_t/R_0$  及  $V_t/V_0$  已开始变化,尤以  $V_t/V_0$  的变化为最大. 从附表可以看到,当温度从 400 °C 变化至 700 °C,实测  $R_t/R_0$  从 99.4 % 变化至 77.1 %,

附表 高温后试件超声回弹实验结果

试件 编号	$t/^\circ\text{C}$	$R_t \cdot R_0^{-1}/(\%)$	$V_t \cdot V_0^{-1}/(\%)$	$t_r$	$t_v$	$t_f$	$f_{cu,0}/\text{MPa}$	$f_{cu,t}/\text{MPa}$	$\Phi$
A-1	400	99.4	61.5	368	390	385	52.4	47.7	0.91
A-2	400	94.0	60.3	433	398	406	33.0	30.7	0.93
A-3	400	97.3	55.0	394	432	423	45.0	41.9	0.93
A-4	400	98.6	60.9	378	394	390	50.2	47.2	0.94
A-5	400	96.5	58.7	403	408	407	44.6	41.0	0.92
A-6	500	90.2	47.5	479	481	480	51.2	44.0	0.86
A-7	500	84.7	45.9	545	491	504	31.1	26.4	0.85
A-8	500	86.4	39.5	525	533	531	50.8	42.2	0.83
A-9	500	83.2	51.4	563	455	480	36.4	30.6	0.84
A-10	500	83.3	41.4	566	520	531	44.6	38.8	0.87
A-11	600	77.6	24.4	631	631	631	38.5	24.6	0.64
A-12	600	83.1	29.1	565	600	592	51.2	31.7	0.62
A-13	600	82.9	23.9	567	634	619	49.8	29.4	0.59
A-14	700	77.3	16.6	635	681	671	31.2	14.7	0.47
A-15	700	71.2	17.3	708	677	684	37.2	19.6	0.53
A-16	700	77.1	17.1	637	678	669	44.2	23.6	0.53
A-17	800	61.3	—	827	—	—	36.8	8.4	0.23
A-18	800	59.8	—	845	—	—	37.3	9.6	0.26

$V_t/V_0$  从 61.5 % 变化至 16.6 %, 相对于  $R_t/R_0$ ,  $V_t/V_0$  的变化范围大、衰减快. 当温度达 800 °C 时, 回弹值  $R_t$  仍可测读, 但超声波的首波已经无法判读了. 因此, 不可把高温下砵实测  $R_t$  及  $V_t$  代入常温下砵专用测强曲线中进行计算. 但从表 1 可以看出砵的极限抗压强度是随着温度的上升而有规律地降低的, 可用  $\Phi_c$  来表示砵的降低程度, 即  $\Phi_c = f_{cu,t}/f_{cu,0}$ , 其中  $f_{cu,0}$  为普通环境温度下砵极限抗压强度;  $f_{cu,t}$  为当温度为  $t$  时的砵极限抗压强度. 砵试件经不同阶段温度后, 强度与温度的相关方程式为<sup>[2]</sup>

$$\Phi_c = 1.535\,79 - 0.001\,465\,8\,t, \tag{1}$$

其相关系数  $\gamma=0.972$

### 3 砼表面温度 $t_f$ 的确定

研究火灾时结构构件的表面温度是十分重要的。它既是评估砼灾后承载力的依据,又可与灾后砼碳化试验互为佐证。砼试件在火烧温度  $t_f$  后,超声比  $V_i/V_0$  及回弹比  $R_i/R_0$  与  $t_f$  的关系由回归分析可得如下方程(图 1),即  $t_f=1\,566-1\,205\,R_i/R_0$ , 剩余标准差  $S_r=42.5\,^{\circ}\text{C}$ ;  $t_f=789-649\,V_i/V_0$ ,  $S_r=23.2\,^{\circ}\text{C}$ 。

可以看出,评估温度  $t_f$  时,超声法的精度要比回弹法高。利用超声法与回弹法评估温度  $t_f$  各有利弊,两者综合可以减少某些影响(如砼的碳化和含水率等),且两者的影响刚好相反。将这两种方法按平面回归分析可求得其曲线(图 2)的表达式为

$$t_f = 993 - 506.5\,V_i/V_0 - 303.5\,R_i/R_0, \tag{2}$$

$\gamma=0.98$ ,  $S_r=21.4\,^{\circ}\text{C}$ 。不难看出,它比只按超声或回弹评估法进行评估的精度高。

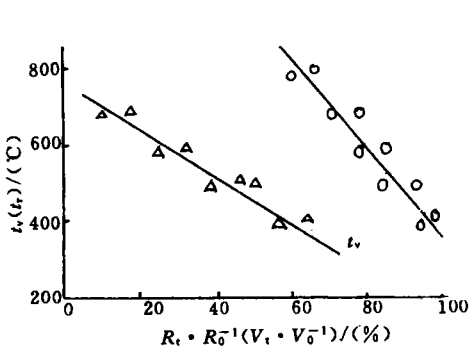


图 1 回弹比  $R_i/R_0$  及超声比  $V_i/V_0$  与温度  $t_f$  的关系曲线

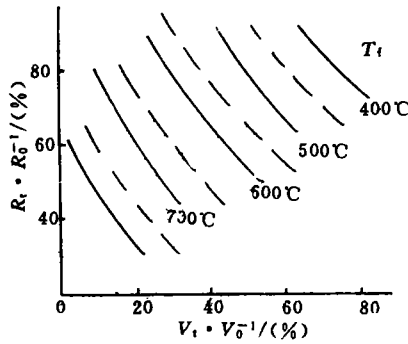


图 2 回弹-超声与温度关系的平面回归曲线

### 4 火灾后砼结构损伤的综合评估

#### 4.1 基准点的选择

大多数遭受火灾的建筑在灾前已经过使用阶段的考验,证明灾前结构的功能是正常的。对施工质量正常的结构物或者它的某个局部来说,其砼平均质量水平可合理地用其砼设计强度等级来表征。利用回弹-超声综合法对灾后砼结构检测时,可选择结构上未受火灾损害的构件。把与砼强度等级  $C$  相匹配的检测参数平均值作为基准点,即  $V_0=\bar{V}, R_0=\bar{R}, f_{cu,0}=C$ 。

基准点的取样范围可根据设计、施工资料和外观检查,选择那些水泥品种、骨料品种及砼设计强度等级  $C$  均相同并且外观质量正常的结构构件来组成取样空间;并应有足够的样本数量,以保证统计结果的稳定性和代表性。

#### 4.2 受灾结构砼强度的评估

把实测的超声比  $V_i/V_0$  及回弹比  $R_i/R_0$  代入平面回归公式(2)中便可确定出砼表面温度,

再由公式(1)判定灾后砼强度的降低程度. 由于在基准点处的强度指标采用了砼强度等级, 因此导得的在受灾砼检测点的强度也是强度等级意义上的强度  $C_p$ , 而不是该点的实际强度  $f_{ci}$ , 它与实际强度的关系为  $C_p = f_{ci} - \sigma_{fci}$ , 式中  $C_p$  为检测点处点强度等级,  $f_{ci}$  为检测点处实际强度,  $\sigma_{fci}$  为受灾结构砼强度的标准差.

从火灾时砼结构表面温度分布及受灾状态的连续性角度来理解, 灾后砼强度的下降与正常砼结构中出现个别、局部的施工缺陷(如漏震、空洞等), 导致砼强度下降是有所区别的, 故可以把所有灾后结构某检测面(或某检测构件)上各检测点的点强度等级给予算术平均, 并定义为该检测面乃至该构件的强度等级, 即  $C_A = \sum_{i=1}^n C_{pi} / n$ , 式中  $C_A$  为某检测面的强度等级  $C_{pi}$  为第  $i$  个检测点处的点强度等级,  $n$  为该检测面的取样数. 因此, 以  $C_A$  定义灾后构件强度等级与按照文[1]中对砼强度推定的规定是有所区别的.

#### 4.3 砼损伤层的检测

当结构砼损伤层厚度较小时, 可采用超声波“表面法”进行检测(图3). 根据测出的损伤层砼声速值  $V_1$ 、未损伤层砼声速值  $V_2$  和声时突变时的距离  $L$  这三个参数来估算损伤层厚度  $d_1$ <sup>[3]</sup>.

但当砼 500℃ 的损伤深度线超过 3 cm 以上, 超声波的首波很难判读. 因此, 这种变测距求拐点的方法无法继续应用. 水泥水化后的水泥石 pH 值一般为 12~13, 呈碱性. 它可保护钢筋在砼内免遭腐蚀. 当砼温度达到 500~600℃ 时, 砼中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  分解, 使砼呈中性, 使用酚酞试剂可查出砼碳化深度及估计其经历的火灾温度. 试剂滴在经处理干净的砼表面上, 若砼呈红色, 说明此处砼未碳化, 到达此处的温度低于 500℃; 若砼不变颜色, 说明砼已碳化, 此处温度已达 500℃ 以上. 故利用砼的碳化测定, 既可与超声波“表面法”和“对测法”分别佐证砼损伤层的深度及砼的表面温度, 又可预示何时何部位的钢筋可能遭到腐蚀. 实际检测时, 要注意区分灾前砼的正常碳化与火灾引起的碳化, 以便修正.

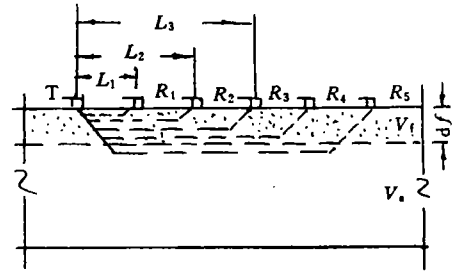


图3 损伤层检测的换能器布置

$T$  为发射换能器;  $R$  为接收换能器

#### 4.4 灾后结构砼的处理

对灾后结构砼的处理大体上可以分为以下4个层次来考虑.

4.4.1 轻度损伤 当砼表面温度低于 400℃ 时, 砼表面轻微受损, 承载能力基本不受影响, 一般只要重做装修层即可.

4.4.2 中度损伤 当砼表面温度到 500~600℃ 以上, 砼开始中性化, 致使钢筋保护层范围内砼受损. 砼与钢筋之间粘结力受损较轻, 但结构承载能力已有所下降. 除了应该去除损伤层进行表面处理外, 对损伤较严重的部位应采取局部补强加固的措施.

4.4.3 重度损伤 当砼表面温度达 800℃ 时, 主筋处温度达 600℃ 左右, 砼与钢筋之间的粘结力破坏严重. 此时超声波首波判断非常吃力, 要采用综合法评估已十分困难了, 但可以借助砼碳化测定及砼表面观察判断. 此时构件装修层已完全脱落, 梁有数毫米宽裂缝, 棱角处砼龟裂, 爆裂严重, 并有少量露筋. 在这种情况下, 结构承载力受到严重削弱. 应去除砼破坏层, 使主筋露出, 按等强加固的原则, 配置加固钢筋, 并重打砼至规定厚度.

4.4.4 严重破坏 砼表面温度大于  $800^{\circ}\text{C}$ , 构件砼损伤严重, 挠度变形超过规范规定的变形容许值. 砼大范围爆裂, 梁多处露筋, 主筋压屈. 对这类严重破坏的结构构件, 一般应予以拆除, 重新修建, 以恢复设计状态.

## 5 结束语

火灾后结构砼的损伤状态极为复杂, 要准确地定量评估其损伤程度将是十分困难的. 本文通过超声-回弹等综合检测的方法进行评估:

(1) 首先选择在未受火灾损伤的同类构件上得到的与砼设计强度等级相匹配的检测参数平均值作为基准点;

(2) 通过受损与未受损同等砼构件参数比值(即回弹比和超声比), 确定出受灾砼表面温度, 并按温度与强度的相关方程式判别灾后砼强度的降低程度, 并将构件上各检测面的强度等级平均值定义为该构件的强度等级;

(3) 通过超声波表面法及砼碳化测定被检测砼的损伤层;

(4) 根据砼表面实测温度、评估的砼强度等级、砼损伤层以及构件的外观调查, 将受损状态分为轻度损伤、中度损伤、重度损伤和严重破坏 4 个层次. 事实上, 进入严重破坏这个层次时, 已经无法应用非破损法进行检测了. 这种情况主要是通过外观变形、破损程度和碳化测定等方面来综合检测与评估.

## 参 考 文 献

- 1 中国工程建设标准化协会. 超声回弹综合法检测砼强度技术规程. 北京: 中国计划出版社, 1988. 13~15
- 2 蔡正咏, 王足献, 李秀英. 数理统计在砼试验中的应用. 北京: 中国铁道出版社, 1988. 100~140
- 3 中国工程建设标准化协会. 超声法检测砼缺陷技术规程. 北京: 中国计划出版社, 1992. 17~19

## Application of Ultrasonic Flaw-Resilience Method to the Detection of Concrete Structure Damaged by Fire

Chen Zhiping

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** Based on high temperature experiments, a comprehensive method of ultrasonic flaw-resilience and concrete carbonisation determination is applied to evaluate fire damage of concrete structure. With detecting parameters obtained from undamaged members of concrete structure as datum marks, the author evaluates surface temperature of concrete by resilience ratio and ultrasonic ratio; and infers strength grade of concrete after fire; and evaluates the damage in four levels. These may serve as a reference for detecting concrete structure damaged by fire.

**Keywords** evaluation of damage, concrete structure, ultrasonic flaw, resilience, carbonisation, fire