

文章编号:1671-6833(2010)05-0078-04

高温中及冷却后高性能混凝土残余抗压强度试验

王 珍¹, 张泽江², 黄 涛¹

(1. 西南交通大学 科学与工程学院, 四川 成都 610031; 2. 公安部四川消防研究所, 四川 都江堰 611830)

摘 要: 研究了高温过程中 C40 高性能混凝土(HPC)残余抗压强度的变化规律, 对比分析了 C40HPC 在高温过程中与高温自然冷却后残余抗压强度的异同, 利用 ORIGIN 7.5 软件拟合了高温过程中与高温自然冷却后 C40HPC 残余抗压强度与温度之间的关系。研究表明: 200~300℃时, HPC 残余强度明显有所波动, 但是冷却后的 HPC 残余抗压强度没有高温中残余抗压强度上升的那么明显; 相同加热温度条件下, 高温过程中 HPC 的残余抗压强度略高于自然冷却后 HPC 的残余抗压强度。

关键词: 高温; HPC; 残余抗压强度

中图分类号: TU528.3 **文献标识码:** A

0 引言

高性能混凝土技术已经在全世界范围内被广泛地应用于高层建筑中。当前, 我国正处于大规模的高层建筑建设时期, 如果用高性能混凝土取代普通混凝土, 使技术设施的寿命延长 1~5 倍, 社会效益将不可估量。高层建筑一旦发生火灾, 建筑物的材料性能将严重劣化。清华大学和同济大学等高等院校和科研机构都对高温作用下的混凝土抗压、抗拉强度和弹性模量等进行了研究, 得出了混凝土材料性能与温度的关系, 指出温度是影响混凝土材料性能的重要因素^[1-2]。由于影响混凝土的耐热性能的因素较多, 试验设备、试验方法及混凝土材料的差异, 导致试验结果不一致, 甚至会出现相互矛盾的结论。同时在实际工程中经常遇到这样一种现象: 火灾被扑灭时, 结构未发生倒塌, 几天以后当人们进入抢救物资时却突然倒塌, 造成重大人员伤亡。这就启发我们既要研究高温过程中的高性能混凝土(HPC)的残余抗压强度, 也要研究高温冷却后高性能混凝土(HPC)的残余抗压强度。

因此, 通过试验研究影响 HPC 力学性能的因素及其规律, 科学地诊断火灾后结构的受损程度, 确定其残余承载力, 从而掌握建筑物结构遇火时坍塌的时间, 以便受灾人员安全撤离灾场, 消防人员能安全地救护伤亡人员等, 将火灾造成的损失

降到最低, 已成为各国建筑结构及材料科研人员和工程技术人员共同关注的新课题。

1 试验原材料与配合比

本试验配制高性能混凝土以公安部消防局科研项目《高性能混凝土建筑火灾烧损与修复技术研究》的原材料相关数据为依据, 优选各种原材料。

1.1 试验原材料

拉法基牌 P. O42.5R 普通硅酸盐水泥, 比表面积为 $4.168 \text{ cm}^2/\text{g}$; 5~25 mm 碎石, 粗骨料的最大粒径不大于 25 mm, 采用 15~25 mm 和 5~15 mm 两级粗骨料配合; 细骨料选用质地坚硬、级配良好的中砂, 细度模数在 2.7~3.1; 矿物掺合料为粒径不大于 $10 \mu\text{m}$ 的粉煤灰, 低钙 I 级灰, 比表面积为 $5.090 \text{ cm}^2/\text{g}$ 的矿粉; 外加剂为四川巨星新型材料有限公司生产的 JX-GBNH1/1 型聚羧酸高效减水剂。

1.2 配合比

高层建筑多以 C40 高性能混凝土 HPC 为主要建筑材料, 因此本试验主要研究 C40 高性能混凝土, 配合比如表 1 所示。

表 1 C40 高性能混凝土配合比
Tab.1 C40 high performance proportioning of concrete
kg/m³

砼等级	水泥	砂	石	水	矿粉	粉煤灰	减水剂
C40	242	722	1 130	167	88	110	5.72

收稿日期: 2010-04-09; 修订日期: 2010-06-10

项目基金: 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAK06B06); 公安部消防局科研项目(20070809)

作者简介: 王珍(1983-), 山东菏泽人, 西南交通大学博士研究生, 主要从事建筑火灾(高性能混凝土构建火灾烧损)研究, E-mail: wangzhen_119911@163.com.

2 试验仪器和设备

本次试验的高温压力试验装置为自行设计,委托湘潭仪器仪表厂加工生产。本装置专门在100 t微机控制电液伺服万能试验机的基础上设计加工高温试验炉,如图1所示。最高支持温度1100℃;误差:±2℃;混凝土试块:100 mm×100 mm×100 mm。采用微机程序运算,电液伺服闭环控制,使用高精度压力传感器、高精度电子测量放大器件和液压式夹头、高精度温度控制系统,能及时地实现数据处理和存储。此试验装置在加热到预设温度后即可实现HPC试块在高温恒温条件进行破坏试验,打开炉膛自然冷却后亦可实现HPC试块高温冷却后进行破坏试验。辅助试验装置包括:实验室用50 L混凝土搅拌机、试模、振动台、电子天平、电子台秤。

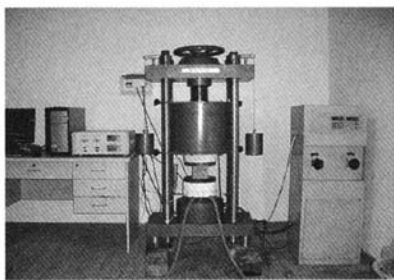


图1 高温压力试验装置图

Fig.1 Test equipment chart

3 试验方法

试验采用100 mm×100 mm×100 mm的混凝土试件,均在公安部四川消防研究所的阻燃实验室一次制作。试验前拌合物性能测试参照GB/T 50080—2002《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》^[3]的规定,采用机械搅拌,振动台振动成型,经标准养护28 d,室内静置1个月后进行试验。本试验的温度范围为20~900℃,炉膛温度可自动控制,升温方式采用正常升温5℃/s,升温设定等级取20,200,300,400,500,600,700,800,900℃共9个等级。①首先将立方体试件放入电炉内加热至预定温度,再恒温2 h后继续保持恒温,使用100 t微机控制电液伺服万能试验机进行强度测定(每组3个试块,抗压强度取算术平均值,舍去差异超过中间值15%的强度),参考GB 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[4]进行试验,如此研究高温过程中试块残余抗压强度

的变化规律;②将立方体试件放入电炉内加热至预定温度,再恒温2 h后打开炉膛,自然冷却至室温后再进行强度测定,如此研究高温冷却后试块残余抗压强度的变化规律。

4 试验结果及分析

高性能混凝土的残余抗压强度是其力学性能中最基本的一项,常常作为基本参量来确定高性能混凝土的强度等级和质量标准,并决定抗拉强度、弹性模量、极限应变等其他力学性能。笔者主要研究高温作用后HPC的残余抗压强度。

4.1 试验现象

4.1.1 外观特征

高温过程中及高温冷却后的HPC外观特征变化基本一致,100~300℃时,颜色无明显变化;400℃时,试件开始呈现灰白色,且表面有龟裂纹,开始逸出气体;600~700℃时,试件为微褐色,表面有许多细小裂纹,且裂纹长度增加,有时有贯穿裂纹,此时逸出气体量最大;800℃时,试件呈现灰褐色,裂纹宽度明显增加,逸出气体量逐渐减弱;900℃以后,试件表面为棕红色,且随温度升高,颜色变深,试件表面布满裂纹,表层已成粉末,极易脱落,此时,气体逸出较少,之后气体基本停止逸出^[5]。

4.1.2 爆裂

在加热过程中,从加热炉中传来爆裂声。加热至预定温度200,300,400℃的过程中均没有爆裂现象产生,而加热至700℃的过程中个别试件有爆破声不断传出,爆裂温度集中在600℃左右。

4.2 残余抗压强度与加热温度关系

HPC的残余抗压强度 $f_{cu,t}$ 与试验温度有很大关系,如图2所示。随着加热温度的升高,HPC的残余抗压强度总体上呈降低趋势,但是在300℃时有小幅增加,试验温度越高强度越低。

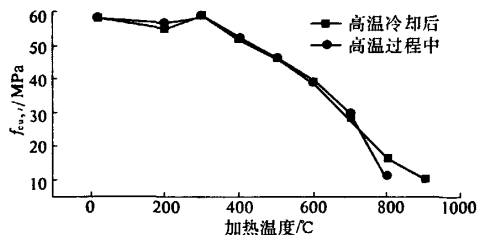


图2 高温过程中及高温冷却后HPC抗压强度与温度关系曲线

Fig.2 Temperature curve of compressive strength of HPC at high temperature and after cooling

由图2中可以明显看出:

(1)高温过程中及高温冷却后 HPC 残余抗压强度分为3个阶段:第一阶段——强度损失阶段(200℃之前),HPC 残余抗压强度均呈下降趋势,但下降均不明显.混凝土内部自由水蒸发,试件内部形成孔隙和裂缝,HPC 残余抗压强度降低.第二阶段——强度恢复阶段(200~300℃),至300℃时混凝土的抗压强度有小幅增加.这是由于当温度到达200℃后,温度提供了增进水化所需的激活能,使得在水泥浆体中未水化的水泥颗粒继续水化,水化产物继续增加,同时表面能增加,孔隙和裂纹形状的改变,加速了水泥水化的速度,水泥浆体开始失去稳定,在这个温度范围内由于水分的蒸发使得C-S-H凝胶发生脱水反应,生成短而强度高、表面能大的硅氧烷,使水泥浆体产生紧缩,化学结合力、粘结强度提高导致残余抗压强度小幅增加.第三阶段——强度永久损失阶段(300℃以后),300~400℃时,HPC 试件的残余强度 $f_{cu,t}$ 下降较缓,500℃后混凝土强度下降非常迅速.这是由于加热温度达到300℃左右时硅酸盐水泥浆体中的水化硅酸钙和水化铝酸钙开始脱水,强度逐渐下降;温度达到500℃的时候,混凝土内部凝胶开始脱水分解,此时层间水和化学结合水排除,氢氧化钙大量分解,使得原本结晶完整的片层结构破坏,强度下降明显.

但本次试验数据在700℃后大多发生爆裂,没有得出很明显的试验规律,可能是由于试验误差、操作人水平限制等原因所致.

(2)虽然高温中及冷却后 HPC 抗压强度随着温度的升高总体呈下降趋势,但200~300℃过程中混凝土冷却后的 HPC 残余强度上升趋势没有高温中抗压强度上升的那么明显.究其原因,一方面是由于在高温后静置时间内,自由水由于分解产生的局部密实状态逐渐削弱,使得强度下降;另一方面由于空气中的水分渗入试块表面的细微温度裂缝中,使得试块的湿度增大,并产生一定化学反应,这些化学反应有时发展比较缓慢,形成一些强度很低的氧化物,使 HPC 强度恶化.

(3)在相同加热温度等级条件下,高温过程中 HPC 的残余抗压强度略高于自然冷却后 HPC 的残余抗压强度.这是因为高温后的降温过程中,形成了反向温度梯度,温度内高外低,HPC 的性能进一步恶化,残余抗压强度出现了新的损失.

有关 HPC 高温后残余抗压强度与温度之间关系的计算模型,国内外很多专家学者进行了研

究.如李卫^[7]、谢狄敏^[8]等人提出了基于立方体的高温后抗压强度计算模型,其中,李卫提出的计算模型为:

$$f_{cu,t} = \frac{f_{cu}}{1 + 2.4(t - 20)^3 \times 10^{-17}} \quad (1)$$

式中: f_{cu} 为混凝土在常温下的抗压强度,MPa; $f_{cu,t}$ 为混凝土在高温 t 后的抗压强度,MPa; t 为高性能混凝土所受的温度,℃.

但是 HPC 高温过程中的残余抗压强度与温度之间关系的计算模型鲜有报道.笔者利用 Origin7.5 数据处理软件对试验结果进行线性二元回归,得出高温过程中及高温冷却后 C40HPC 抗压强度折减系数与温度之间的二元回归曲线如图3所示.

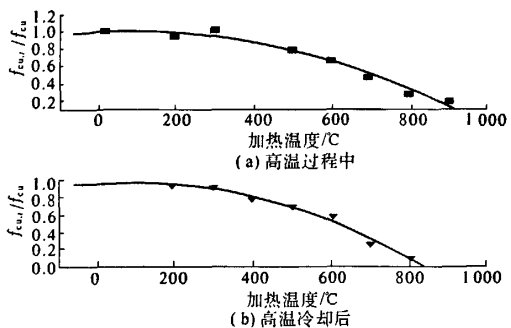


图3 高温过程中及高温冷却后 HPC 抗压强度折减系数与温度关系二元回归曲线

Fig.3 HPC compressive strength of the relationship between reduction factor and the temperature binary regression curve at high temperature and after cooling

(1)C40HPC 在高温过程中的二元回归曲线公式:

$$f_{cu,t}/f_{cu} = 0.89626 + (2.3111E-4)t - (1.32686E-6)t^2 \quad (20^\circ\text{C} \leq t \leq 900^\circ\text{C}) \quad (2)$$

(2)C40HPC 在高温自然冷却后的二元回归曲线公式:

$$f_{cu,t}/f_{cu} = 0.81693 + (2.49145E-4)t - (1.85014E-6)t^2 \quad (20^\circ\text{C} \leq t \leq 900^\circ\text{C}) \quad (3)$$

5 结论

(1)在高温过程中及高温冷却后 HPC 残余抗压强度均分为3个阶段:第一阶段——强度损失阶段,强度损失不大;第二阶段——强度恢复阶段,强度有所恢复;第三阶段——强度永久损失阶段,这一阶段高性能混凝土强度的衰减很大.

(2)相同加热温度条件下,高温过程中 HPC 的残余抗压强度略高于自然冷却后 HPC 的残余

抗压强度.这也是实际火场中火灾被扑灭后,结构未发生倒塌,几天以后当人们进入抢救物资时却突然倒塌的原因.为了保证火灾后混凝土结构鉴定和评估的结论安全、可靠,建议火灾后混凝土强度的检测应在火灾发生 14 d 后进行,否则应进行相应的折减.

(3)通过回归分析建立了高温过程中及高温冷却后 C40HPC 抗压强度折减系数与火场温度之间的二元线性回归公式.发生火灾后,可根据温度及火灾现场灭火方式迅速估计出火灾后 HPC 的强度值,用于结构可靠度评价以及高层建筑火灾后结构损伤程度的评估和修复等.

参考文献:

- [1] 李敏.高强混凝土受火损伤及其综合评价研究[D].南京:东南大学土木工程学院,2005.
- [2] 余江滔.火灾后混凝土构件损伤评估的试验及理论研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2007.
- [3] 中国建筑科学研究院. GB/T 50080—2002 普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [4] 中国建筑科学研究院. GB 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社.
- [5] SAAD M, ABOEIENEIN S A, Effect of temperature on physical and mechanical properties of concrete containing silica fume[J]. Cem Concr Res, 1996, 26(5): 669 - 675.
- [6] 李卫,过镇海.高温下混凝土的强度和变形性能试验研究[J].建筑结构学报,1993,14(1):8 - 16.
- [7] 谢狄敏,钱在兹.高温(明火)作用后混凝土强度与变形试验研究[J].工程力学,1996(增刊):54 - 57.

Experimental Study on Residual Compressive Strength of C40 HPC at High Temperature and after Cooling

WANG Zhen¹, ZHANG Ze - jiang², HUANG Tao¹

(1. School of Environment Science and Engineering Southwest Jiao Tong University, Chengdu 610031, China; 2. Sichuan Fire Research Institute of Ministry of Public Security, Dujiangyan 611830, China)

Abstract: The variation of residual compressive strength in the process of high - temperature of C40 high - performance concrete (HPC) was studied in the paper. Compared with the variation after natural cooling, the differences were found and analyzed. The relationship of them were fitted by using the ORIGIN 7.5 software, and the results showed that HPC residual strength fluctuated significantly when the temperature was between 200 ℃ and 300 ℃, but the residual compressive strength after natural cooling rose less obviously than in the process of high - temperature. Under the same heating temperature condition, the residual compressive strength in the process of High - temperature was slightly higher than that after natural cooling.

Key words: high temperature; HPC; residual compressive strength