

高温作用对大掺量粉煤灰混凝土力学性能影响

贾福萍^{1,2}, 崔艳莉³, 孙宜兵², 程 勇²

(1. 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室, 江苏 徐州 221008;

2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 恒久集团有限公司, 江苏 徐州 221004)

摘 要:研究了高温作用对大掺量粉煤灰混凝土(HFCC)立方体力学性能的影响,探讨了不同加热温度、不同粉煤灰掺量与 HFCC 残余强度的关系。将粉煤灰掺量 30%、40%和 50%的混凝土立方体试块加热至 250, 450, 550 和 650℃进行强度测试,并与素混凝土(不掺粉煤灰)试块进行对比。研究表明,随着温度升高, HFCC 残余抗压、劈裂抗拉强度均出现明显退化,劈裂抗拉强度退化尤为明显;随着粉煤灰的掺入,粉煤灰掺量对强度退化率的影响具有复杂性;高温后 HFCC 抗压强度退化率均低于普通混凝土强度退化率;劈裂抗拉强度退化率除粉煤灰掺量 30%外均低于普通混凝土退化率。在试验基础上建立 HFCC 高温后立方体残余抗压强度、残余劈裂抗拉强度与温度、粉煤灰掺量的定量关系,为高温后 HFCC 材料强度评估及修复提供依据。
关键词:大掺量粉煤灰混凝土(HFCC);高温作用;力学性能

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)04-0581-07

近年来,大掺量粉煤灰混凝土(High fly ash content concrete,简称 HFCC)已日趋发展成熟,并逐步在房建、桥梁、道路、水利、港口等工程得到越来越广泛的应用。目前有关常温下 HFCC 的力学性能、渗透性、抗氯离子侵蚀性、抗碳化性能等方面开展了一系列的研究工作^[1-6],揭示了粉煤灰对混凝土性能改善的机理。对于广泛应用的工程材料, HFCC 除了必须满足常温下的工作性能指标外,还必须考虑高温作用下的性能变化。美国、德国、英国从上世纪 50 年代开始成立专门研究机构进行结构、材料抗火性能试验研究^[7-10]。国内开展混凝土高温力学性能和抗火性能研究起步相对较晚,但发展很快。各大高校、研究机构主要对普通混凝土及其构件和结构在常温、高温下的各种性能进行了较为系统和详尽的研究,取得大量研究成果,并建立、完善我国混凝土材料和结构抵抗高温(火)设计规范^[11-17]。与此形成对比的是,专门针对 HFCC 高温条件下的性能研究开展较少,需要进行深入细致的研究以探明高温下 HFCC 性能变化规律。本文对 HFCC 高温后力学性能退化进行研究,主要考虑不同加热温度、不同粉煤灰掺量对 HFCC 高温后力学性能的影响,利用回归分析建立 HFCC 高温后残余强度与温度、粉煤灰掺量的定量关系。

1 试验设计

1.1 原材料与混凝土配比

(1)水泥

水泥采用徐州巨龙水泥厂生产的 P. O42. 5R 级普通硅酸盐水泥,密度为 3. 05 g/cm³,比表面积为 350 m²/kg。表 1 是试验所用水泥的技术性能检测结果。

(2)骨料

参照 GB/T14685—2001 对本试验所用碎石进行颗粒级配和物理性能测试测试,碎石颗粒级配为 5

*收稿日期:2010-04-27 修改稿日期:2011-06-25

基金项目:中国高校基本科研业务费专项基金资助(20011QNB20);中国矿业大学青年科研基金资助项目(OB090188);国家大学生创新实验计划项目资助(091029006);中国矿业大学大学生实践创新训练计划(090207)

作者简介:贾福萍(1973-),女,山西朔州人,副教授,硕士生导师,主要从事特殊环境下混凝土材料性能研究。

~16 mm,各项技术指标均满足国家标准的要求. 参照 GB/T14684—2001 对天然河砂的各项技术指标进行测试,细度模数为 2.42,为中砂.

表 1 P.O 42.5R 普通硅酸盐水泥性能指标

Tab.1 Performance of ordinary Portland cement

Strength of cement	Fineness /%	Water requirement of normal consistency/%	Setting time/min		Soundness	Compressive strength of mortar/MPa		Flexural strength of mortar/MPa	
			Initial setting	Final setting		3 d	28 d	3 d	28 d
			110	170		23.1	44.2	4.1	6.7

(3)粉煤灰

本试验采用徐州淮海水泥厂生产的粉煤灰. 粉煤灰的化学成分及粒径分布见表 2,粉煤灰烧失量为 2.6%.

表 2 粉煤灰化学成分及粉煤灰粒径分布质量百分比

Tab.2 Chemical constituents and size distribution of fly ash

Chemical Constituents	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TFe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃
Mass percent/%	0.6	31.9	54.1	1.4	2.6	4.6	0.04	1.2	0.18	0.45
Range of Size Distribution							Mass percent/%			
0.1 mm≤X							20.68			
0.075 mm≤X<0.1 mm							28.31			
0.045 mm≤X<0.075 mm							37.97			
X<0.045 mm							13.04			

(4)试块配合比

试件采用 C30 普通混凝土作为基准混凝土,粉煤灰等量替代水泥的掺量为 30%,40%和 50%. 基准配合比为 W:C:S:G=0.49:1:1.29:2.34. 制作 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试块用于抗压性能、劈裂抗拉性能的测试. 试块编号根据粉煤灰掺量不同分为 4 组,编号为 P(0%)、D(30%)、E(40%)、F(50%). 基准混凝土 28 d 立方体抗压强度为 39.2 MPa.

1.2 加热系统及方法

本次试验的试件加热设备采用 GWD-05 型专用高温加热炉,电炉的功率为 30 kW,控制温度由配套使用的温度控制柜进行控制. 经过综合考虑,本试验采用如下的加热制度:试件表面干燥置于炉内进行高温试验,试件的受火温度分别为 250、450、550、和 650℃,按 10℃/min 的加热速率加热,达到预定温度后恒温 2 h,这样可以使试件内外温度保持一致^[11],然后打开炉盖,迅速从炉内取出试块,并置于自然条件下进行冷却.

1.3 加荷系统及方法

试块高温处理 7 d 后进行立方体抗压、劈裂抗拉强度试验. 加载试验利用 PWS-500 电液伺服动静态试验机进行. 试验时施加荷载由位移控制,加压时活塞的下降速率为 0.1 mm/min,试验数据全部由 TDS303 数据采集仪自动采集,设定每 5 s 采集 1 次.

2 试验结果及分析

2.1 高温后试块外观特征

混凝土遭受火灾后,随着所受温度的不同,颜色和外观形貌将发生不同程度的变化. 通过分析颜色的变化有助于对混凝土的受损程度进行初步评估,并将其应用于火灾后结构的鉴定. 表 3 列出了 HFCC 加温时和高温冷却至常温后典型外观特征.

表 3 HFCC 高温后颜色和外观特征

Tab. 3 Color and appearance of HFCC after elevated temperatures

温度/℃	加温时现象	颜色	裂缝
250	少量水蒸气	同常温	极少
450	大量水蒸气,形成水滴	浅红	细微、少量
550	水雾消失,发生爆裂	灰白	明显、较多
650	水雾消失,发生爆裂	白色	明显

250℃高温后,混凝土试件的颜色基本与常温下混凝土相同,试件表面有少量肉眼可见裂纹,外观完好,无掉皮、缺角、爆裂、疏松等现象. 450℃高温后,试件颜色为浅红色,表面裂缝较少比较细微,外观完好,无掉皮、缺角、疏松、爆裂等现象. 550℃高温后普通混凝土试件颜色呈灰白色,表面裂纹较多. 650℃高温后,普通试件颜色为乳白色,表面裂缝宽,且相互贯通,掉皮、缺角、疏松等现象严重. 550℃之后粉煤灰混凝土均出现爆裂现象.

2.2 抗压强度试验

常温下混凝土立方体试件的受压破坏呈完整的倒角锥形,中间部分破裂,上下端面由于试验机钢垫板的约束,几乎无破坏症状,边角比较完整. 但当混凝土受高温后,其抗压破坏形态将有不同程度的变化:受 250℃高温后,立方体试件的受压破坏形态基本与常温下相似,主要差异在于试件上下端面有裂缝及边角缺损现象;450℃时,普通混凝土、粉煤灰混凝土不但颜色发生变化,而且试件受压时,上下端面边角缺损严重,中间部分脱落,非主体混凝土呈块状或片状,破坏发生在粗骨料与水泥砂浆的临界面或水泥砂浆内部,粗骨料本身很少发生破坏;550℃后,几乎所有类型的混凝土试件表面颜色发生很大变化,而且受压时试件破碎现象严重,中间部位变细,非主体混凝土主要呈粉末状,且可看到粗骨料本身发生大量破坏;650℃后,所有混凝土试件颜色发生变化,受压时试件周身脱落,中间部分变细,主体混凝土主要呈粉末状,且可看到粗骨料本身发生大量破坏.

2.3 劈裂抗拉强度试验

劈裂试验过程中多数混凝土试块的劈裂面基本上与设计劈裂面重合. 受热温度为 250℃的试块刚开始加载时没有明显裂缝出现,随着变形的增加荷载增加较快,当超过最大荷载后,在很短时间内迅速形成贯通的纵向裂缝,承载力瞬间丧失,破坏面大都发生在骨料与砂浆的结合面. 受热温度为 450℃和 550℃的试块,开始加载就出现裂缝,此后随着变形的增大裂缝逐渐扩展,整个加载程没有明显的破坏极限状态. 受热温度为 650℃的试块开始加载就出现裂缝,裂缝扩展很快,劈裂抗拉强度很小,加载过程没有明显的破坏极限状态.

3 高温后混凝土残余强度计算模型

3.1 高温后残余抗压强度计算模型

李卫、谢狄敏等人提出了普通混凝土立方体高温后抗压强度与温度之间关系的计算模型,吴波提出了基于棱柱体的高温后轴心抗压强度计算模型,阎继红考虑了高温后混凝土静置时间的影响,分别对硅质、钙质骨料混凝土提出了分段轴心抗压强度计算模型. 本文根据试验数据,主要考虑粉煤灰掺量和加热温度对力学性能的影响,对大量试验数据进行回归,建立了 HFCC 高温后残余抗压强度与温度、粉煤灰掺量的定量模型. 在此定义混凝土立方体试块高温后残余强度与高温前强度比值为残余强度比.

3.1.1 抗压残余强度比与温度的关系

在本试验过程中发现温度超过 450℃后粉煤灰混凝土试块发生较多的爆裂. 依据试验结果绘制普通混凝土和 HFCC 试块经高温后抗压残余强度比与受火温度的关系曲线. 由图 1 可看出,随着温度的升高,试块残余抗压强度均呈下降趋势.

3.1.2 抗压残余强度比与粉煤灰掺量的关系

由图 1 可知,随着粉煤灰掺量的变化,经历不同温度后 HFCC 抗压残余强度比存在明显的差异:虽

然随着粉煤灰等量置换水泥,在一定龄期内使粉煤灰混凝土的抗压强度小于普通混凝土强度,但粉煤灰的加入均不同程度改善了混凝土残余抗压强度的降低速率,其中掺量为 40% 的粉煤灰混凝土残余抗压强度下降最慢。

3.1.3 抗压残余强度比与温度、粉煤灰掺量的耦合关系

根据试验结果,对本试验试块高温后抗压残余强度比与温度、时间的耦合关系进行回归分析,拟合得出计算公式(1)。

$$\frac{f_c^T}{f_c} = \{-4 \times 10^{-8} (T-20)^2 - 0.0039 (T-20) + 1\} \times (-11.25x^2 + 8.72x - 0.617) \quad (1)$$

式中: T 为试块所受最高温度, $20 \sim 650^\circ\text{C}$; x 为粉煤灰掺量, $30\% \sim 50\%$;

使用公式(1)算出的高温后混凝土试块的残余强度与试验结果相比较的误差如表 4 所示。

由表 4 可知,拟合公式计算值与试验值误差均在 10% 以内,说明该混凝土高温后抗压残余强度与温度、时间耦合关系公式拟合效果较好。图 2 给出了根据拟合公式绘制的抗压强度与温度、粉煤灰掺量的耦合关系曲面图。

表 4 抗压残余强度拟合公式计算值与试验结果

相比较的误差/%

Tab. 4 Error analysis of fitting formula calculated values and experimental results/%

Serial number of specimen	Room Temperature	250 $^\circ\text{C}$	450 $^\circ\text{C}$
D	1.2	1.61	4.1
E	7.1	0.81	8.16
F	6.87	3.01	7.9

3.2 高温后劈裂抗拉残余强度计算模型

基于试验结果,本文对经历不同高温后的 HFCC 劈裂抗拉进行测试,并对试验结果进行回归,建立了高温后 HFCC 残余劈裂抗拉强度与温度、粉煤灰掺量的定量模型。

3.2.1 劈裂抗拉残余强度比与温度的关系

在本试验过程中发现温度超过 450°C 后粉煤灰混凝土试块发生较多的爆裂,加之普通混凝土试块在 650°C 时的劈裂抗拉强度极低,因此图 3 只列出在常温至 550°C 之间混凝土试块劈裂抗拉残余强度比与温度的关系曲线。对比图 3、图 1 可看出随着温度的升高,劈裂抗拉残余强度损失较抗压残余强度大,表明温度对混凝土抗拉强度的损伤更直接。

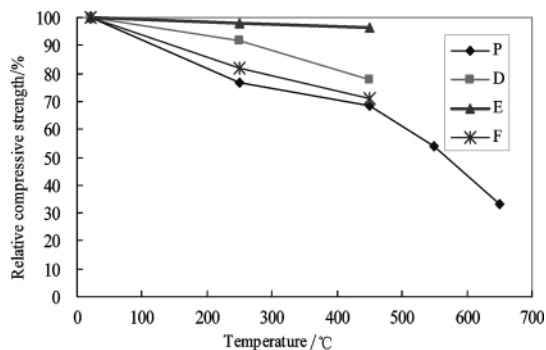


图 1 HFCC 抗压残余强度比与温度关系曲线

Fig. 1 Curve: compressive residual ratio with temperature

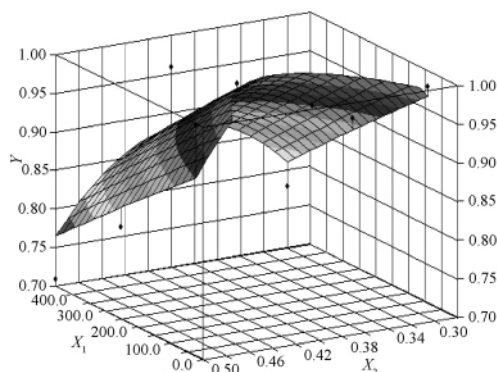


图 2 抗压残余强度与温度、粉煤灰掺量的耦合关系曲面

Fig. 2 Coupling relationship among compressive strength, temperature and fly ash content

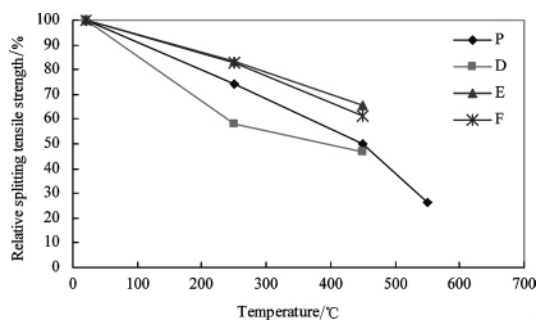


图 3 HFCC 劈裂抗拉残余强度比与温度关系曲线

Fig. 3 Curve showing splitting residual ratio and temperature

3.2.2 劈裂抗拉残余强度比与粉煤灰掺量的关系

由图 3 可看出,粉煤灰的加入对混凝土劈裂抗拉残余强度的影响有明显的差异:掺有 40%、50% 的粉煤灰混凝土劈裂抗拉残余强度比普通混凝土和掺量 30% 粉煤灰混凝土的数值高,表明前者劈裂抗拉强度随温度的升高下降速率减缓,说明掺加适量粉煤灰可调整混凝土高温后劈裂抗拉残余强度的衰减程度,但粉煤灰的加入对混凝土抗压残余强度与劈裂抗拉残余强度的影响规律不一致.

3.2.3 劈裂抗拉残余强度比与温度、粉煤灰掺量的耦合关系

对试验结果进行处理,得到试块高温后劈裂抗拉残余强度与温度、粉煤灰掺量的耦合关系计算公式如式(2).

$$\frac{f_P^T}{f_P} = \{3.90 \times 10^{-7}(T-20)^2 - 0.00114(T-20) + 1\} \times (-8.69x^2 + 7.66x - 0.622) \quad (2)$$

使用公式(2)算出的高温处理后混凝土试块的劈裂抗拉强度与试验结果相比较的误差如表 5 所示.由表 5 可知,拟合公式计算值与试验值误差几乎都在 10% 以内,说明该混凝土高温后劈裂抗拉强度与温度、时间耦合关系公式拟合效果较好.图 4 为 HFCC 试块的劈裂抗拉强度与温度、粉煤灰掺量的耦合关系曲面图.

表 5 劈裂抗拉残余强度拟合公式计算值与试验结果相比较的误差 (%)

Tab. 5 Error analysis of fitting formula calculated values and experimental results/%

Serial number of specimen	Room Temperature	250℃	450℃
D	10.5	17.0	10.9
E	5.3	4.9	5.7
F	3.67	5.24	1.05

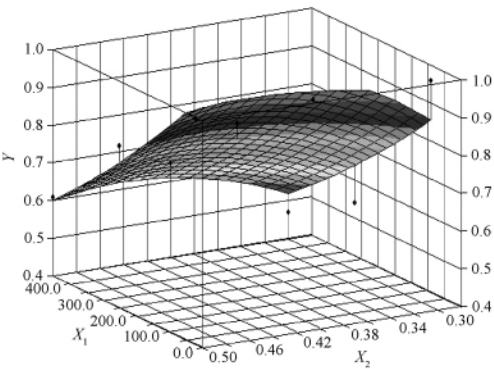


图 4 劈裂抗拉强度与温度、粉煤灰掺量的耦合关系曲面

Fig. 4 Coupling relationship among splitting strength, temperature and fly ash content

4 结 论

对 HFCC 高温经自然冷却后的抗压残余强度、劈裂抗拉残余强度进行了大量试验,得到如下结论:

- (1) HFCC 高温经自然冷却后抗压残余强度、劈裂抗拉残余强度随所受加热温度的升高逐渐降低,劈裂抗拉强度降幅较大.
- (2) 常温下 HFCC 相对普通混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度要低,但在本试验中各掺量的 HFCC (粉煤灰掺量为 30%、40%、50%) 高温后抗压强度的降低程度较普通混凝土低,掺量 40%、50% 的 HFCC 高温后劈裂抗拉强度的降低程度较普通混凝土低.
- (3) 与普通混凝土相比,同一加热温度下 HFCC 高温后残余强度比不同:抗压残余强度比由高到低依次为:粉煤灰掺量 40%、30%、50% 和普通混凝土;劈裂抗拉残余强度比由高到低依次为粉煤灰掺量 40%、50%、普通混凝土和 30% 掺量.
- (4) 掺加适量粉煤灰可调整混凝土高温后残余强度的衰减程度,但粉煤灰的加入对混凝土抗压残余强度与劈裂抗拉残余强度的影响规律不一致.
- (5) 根据试验数据进行统计分析和数值拟合,建立混凝土抗压残余强度和劈裂抗拉残余强度与受热温度、粉煤灰掺量的计算模型.

参考文献 References

- [1] 杨太文. 大掺量粉煤灰高性能混凝土的研究进展[J]. 混凝土, 2004, 179(9): 22-26.
YANG Tai-wen. Development of the research on high performance high volumn fly ash concrete[J]. Concrete, 2004, 179(9): 22-26.
- [2] 宋少民, 李红辉, 邢峰. 大掺量粉煤灰混凝土抵抗碳化和钢筋锈蚀研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(8): 38-42.
SONG Shao-min, LI Hong-hui, XING Feng. Research on carbonation resistance and steel corrosion-resistance of high volume fly ash concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(8): 38-42.
- [3] 金祖权, 孙伟, 张云升, 等. 粉煤灰混凝土的多因素寿命预测模型[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(1): 149-154.
JIN Zu-quan, SUN Wei, ZHANG Yun-sheng et al. Multi-factor service life prediction model for concrete with fly ash [J]. Journal of Southeast University : Natural Science Edition, 2005, 35(1): 149-154.
- [4] RAFAT S. Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete [J]. Cement and Concrete Research 2004, 34: 487-493.
- [5] 牛荻涛, 李春晖, 宋华. 复掺矿物掺合料混凝土碳化深度预测模型[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(4): 464-467.
NIU Di-tao, LI Chun-hui, SONG Hua. A model for predicting carbonation depth of concrete with multi-mineral admixture [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 2010, 42(4): 464-467.
- [6] BOUZOUBAA N, ZHANG M H, MALHOTRA V M. Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash [J]. Cement and Concrete Research 2001, 31: 1393-1402.
- [7] POON C S, SHUI Z H, LAM L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures [J]. Cement and Concrete Research, 2004(34): 2215-2222.
- [8] BIOLZI L, CATTANEO S, ROSATI G. Evaluating residual properties of thermally damaged concrete [J]. Cement & Concrete Composites, 2009(30): 907-916.
- [9] BEHNOOD A, ZIARI H. Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures [J]. Cement & Concrete Composites, 2008(30): 106-112.
- [10] HAN C G, HAN M C, HEO Y S. Improvement of residual compressive strength and spalling resistance of high-strength RC columns subjected to fire [J]. Construction and Building Materials, 2009(23): 107-116.
- [11] 贾福萍, 吕恒林, 崔艳莉, 等. 不同冷却方式对高温后混凝土性能退化研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(1): 25-29.
JIA Fu-ping, LV Heng-lin, CUI Yan-li, et al. Investigation on degraded behavior of concrete specimen at different heated temperature and refrigeration mode [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(1): 25-29.
- [12] 马保国, 穆松, 高英力, 等. 掺矿物掺合料盾构管片混凝土的高温性能研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(1): 125-129.
MA Bao-guo, MU Song, GAO Ying-li, et al. Study on high temperature performance of shield tunnel segment concrete containing mineral additive [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(1): 125-129.
- [13] 张焱, 徐志胜. CFRP 加固火灾损伤后钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(1): 40-45.
ZHANG Yan, XU Zhi-sheng. Research of flexural behavior of fire-damaged reinforced concrete beams strengthened with CFRP [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 2008, 40(1): 40-45.
- [14] 吴波, 梁悦欢. 高温后混凝土和钢筋强度的统计分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2008, 36(12): 13-20.

- WU Bo, LINAG Yue-huan. Statistical analysis of strength of concrete and steel bar after high-temperature treatment. [J]. Journal of South China University of Technology :Natural Science Edition, 2008, 36(12):13-20.
- [15] 阎继红,林志伸,胡云昌. 高温作用后混凝土抗压强度的试验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(5): 17-19.
YAN Ji-hong, LIN Zhi-shen, HU Yun-chang. The effects of high temperature on compressive strength of concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(5):17-19.
- [16] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. High temperature properties of reinforced concrete and its calculation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [17] 郭金纯,余江韬,陆洲导. 不同温-时影响下混凝土劈拉强度的试验研究[J]. 工业建筑,2008,38(9): 74-81.
GUO Jin-chun, YU Jiang-tao, LU Zhou-dao. Experimental research on the splitting tensile strength of concrete at different temperatures and time [J]. Industrial Construction, 2008, 38(9): 74-81.

Effects of elevated temperatures on the mechanical properties of high fly ash content concrete

JIA Fu-ping^{1,2}, CUI Yan-li³, SUN Yi-bing², CHEN Yong²

(1. Jiangsu Key Laboratory for Environmental Impact and Structural Safety in Civil Engineering, Xuzhou 221008, China;

2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

3. Permanent Co. Ltd, Xuzhou 221004, China)

Abstract: In this paper, the effects of elevated temperatures on the mechanical properties of high fly ash content concrete (HFCC) are presented. The specimens were prepared with three different replacements of cement by fly ash 30%, 40% and 50% and were tested after exposure to elevated temperature 250, 450, 550 and 650°C respectively, compared with plain Portland concrete. The results showed that as the elevated temperature increases, the residual compressive strength and the residual tensile strength both apparently decrease and the deterioration of tensile strength was much quicker than the deterioration in compressive strength. The results also showed the influence of fly ash replacement on the degraded ratio of strength is complicated. After an exposure to the elevated temperatures, the degraded ratio of compressive strength is less than plain ordinary Portland concrete (PC) and one of tensile strength, except 30% fly ash replacement, remains the same. Based on the experiments, the alternating simulation formula for determining the relationship between residual strength ratio, elevated temperature and fly ash, the replacement is developed by using regression of results, which provide the theoretical basis for the evaluation and repair of HFCC after elevated temperature.

Key words: high fly ash content concrete (HFCC); elevated temperature; mechanical properties

*Biography: JIA Fu-ping, Associate Professor, Xuzhou 221008, P. R. China, Tel: 0086-13952265676, E-mail: kdfxlove@126.com