

再生混凝土强度对筒体耐火性能的影响

董宏英, 王攀峰, 曹万林, 张建伟
(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 为进一步推动再生混凝土的应用, 对再生混凝土构件的耐火性能进行了试验研究. 设计了2个再生混凝土强度等级分别为C20和C30的全再生钢筋混凝土筒体模型, 再生粗骨料及细骨料取代率均为100%. 在试验炉内对筒体施加竖向轴力, 并按标准曲线升温, 进行了筒体模型在轴力及高温共同作用下的试验研究. 对比分析了2个模型的耐火极限、温度场、破坏特征、墙体挠度及竖向位移. 利用ABAQUS软件, 模拟分析了筒体内部温度场并与试验结果进行了对比, 两者符合较好. 研究表明, 随再生混凝土强度的提高, 筒体的耐火性能逐渐降低, 耐火极限下降, 易发生高温膨胀破坏.

关键词: 再生混凝土; 混凝土强度; 筒体; 温度场; 耐火极限

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)06-0869-06

Influence of Recycled Concrete Strength on Fire Resistant Performance of Tubular Structures

DONG Hong-ying, WANG Pan-feng, CAO Wan-lin, ZHANG Jian-wei

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The fire-resistant performance of recycled concrete member was studied to further promote the application of recycled concrete. Two concrete tubular structure models with different concrete strengths were designed and tested under both vertical load and high temperature according to the standard heating curve in the test furnace. The two models were made from recycled concrete with both the coarse and fine aggregate replacement rate of 100%. Their recycled concrete was specified as C20 and C30, respectively. The fire endurance, temperature field, failure characteristic, wall deflection and vertical displacement were comparatively analyzed. The recycled concrete temperature field of the specimens was also simulated by running ABAQUS software and they agreed well with the experimental results. Results show that with the increase of the strength of recycled concrete, fire endurance and fire resistance of the tubular structure decrease and the structure tends to fail in expansion under high temperature.

Key words: recycled concrete; concrete strength; tubular structure; temperature field; fire endurance

混凝土具有热惰性和不燃性, 热工性能好, 是一种理想的防火保护材料^[1-2]. 再生混凝土是一种新型的环保节约型建筑材料, 国内外学者对其开展了广泛的研究^[3-4]. 为推动其应用, 对其高温性能的研究

尤其是对再生钢筋混凝土构件耐火极限的试验研究有着重要的工程意义. 目前, 国内外学者对其高温性能的研究主要集中在热工参数的研究及高温性能的理论分析上. 黄运标^[5]对影响再生混凝土导

收稿日期: 2011-01-06.

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAJ08B02).

作者简介: 董宏英(1966—), 女, 博士, 副教授, 主要从事工程抗震防灾方面的研究, E-mail: donghy@bjut.edu.cn.

热系数的因素进行了分析,给出了再生混凝土热工参数随不同再生粗骨料取代率的计算方法;并采用试验和反演分析相结合的方法,计算影响日照条件下混凝土结构温度场和温度效应分析结果的热工参数.笔者^[6-7]对不同再生骨料取代率、不同再生混凝土强度的足尺再生混凝土柱耐火性能进行了试验及理论分析,研究表明:再生粗骨料混凝土柱比普通混凝土柱升温速度慢,具有相对较好的耐火性能.在总结以上研究成果的基础上,设计了2个再生混凝土强度等级分别为C20和C30的再生钢筋混凝土筒体模型,其中再生粗骨料及细骨料取代率均为100%,此处称全再生混凝土.在试验炉内对筒体施加恒定竖向轴力,并按标准曲线升温,进行了筒体模型在轴力及高温共同作用下的试验研究.对比分析了模型的耐火极限、竖向位移、墙体挠度及温度场,并对其温度场进行了数值模拟,研究了再生混凝土强度等级对全再生混凝土筒体高温性能的影响.

1 模型概况

1.1 模型设计

设计了2个全再生钢筋混凝土筒体模型RC-3和RC-4,其再生混凝土设计强度等级分别为C20和C30,实测再生混凝土立方体抗压强度分别为22.99、34.48 MPa.模型制作中,细骨料全部采用再生细砂,粗骨料全部采用再生细石骨料.

2个筒体模型几何尺寸及配筋完全相同,均为对称结构.筒体高3 640 mm,正截面为边长710 mm×710 mm的正方形;四角设截面为75 mm×75 mm的暗柱,配4Φ8钢筋;筒体墙板厚度为75 mm;筒体墙板的配筋按高规^[8]进行配置,竖向及水平分布筋配筋率均为1.1%.2个模型的配筋见图1.

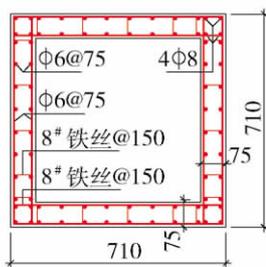


图1 再生混凝土筒体模型配筋(单位:mm)

Fig.1 Steel details of recycled concrete tubular structure models (unit:mm)

模型RC-3和RC-4的钢筋力学性能见表1.

表1 钢筋的力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel bars

规格/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ MPa	延伸率/ %
Φ8	430.0	505.0	1.98×10^5	14.4
Φ6	453.0	514.0	1.83×10^5	14.7
8#铁丝	379.6	455.5	1.96×10^5	16.1

1.2 试验装置及试验过程

本次耐火试验在公安部天津消防研究所的柱试验炉内进行.该试验炉高度为4.7 m,内部平面尺寸为3.0 m×3.0 m,可进行轴心受压构件和偏心受压构件耐火试验,最大竖向加载为15 000 kN.本试验过程中模型RC-3和RC-4轴向压力分别为3 000、4 000 kN,受火高度为3.0 m.燃烧炉内部四面墙体各设置了4个可调节的柴油喷嘴,可产生螺旋式火焰,从而使炉内温度更加均匀.在试验炉炉体四周布置了12个热电偶,以此测量炉内温度.试验装置如图2所示.

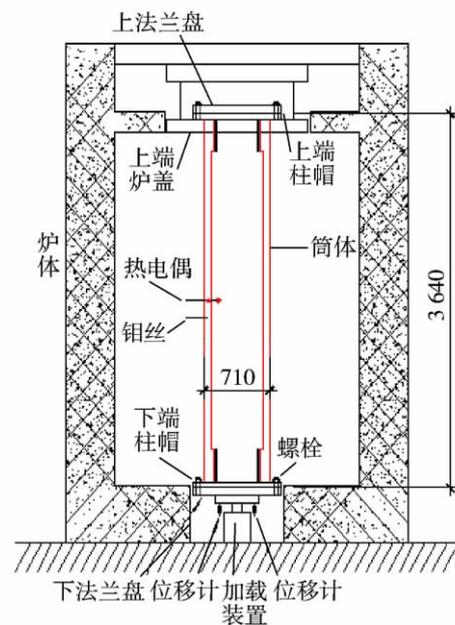


图2 试验装置(单位:mm)

Fig.2 Test set-up (unit:mm)

筒体模型的耐火试验过程如下:

1) 首先在筒体上、下端分别安装柱帽,然后将模型吊入试验炉中,将上、下柱帽分别与炉内的上、下法兰盘连接,上、下法兰盘与炉内压力机的上、下盖板铰接.

2) 将筒体模型内预埋的热电偶连接到热电偶采集装置上.

3) 施加轴向压力,由筒体下部通过法兰盘分级施加,直至设计荷载,并稳定一段时间.

4) 点火,按标准升温曲线升温.

5) 观察模型表面的受火特征,特别注意试验后期,模型的轴向变形大小及变形速度.根据《建筑构件耐火试验方法》GB/T 9978—2008^[9]对构件达到耐火极限的规定:构件轴向压缩量达 $0.01H$ (mm);或构件轴向压缩速率超过 $0.003H$ (mm/min) (H 为构件受火高度,本试验中为 3 m),即表明该构件已达其耐火极限,即停止试验.

炉中温度按国际标准组织给出的建筑构件抗火试验曲线(ISO-834)升温,升温曲线方程为

$$\theta - \theta_0 = 345 \lg(8t + 1) \quad (1)$$

式中: θ 为升温到 t 时刻的炉温($^{\circ}\text{C}$); θ_0 为炉内初始温度($^{\circ}\text{C}$); t 为试验经历的时间(min).本次试验实际炉内升温曲线与标准升温曲线非常接近,见图 3.

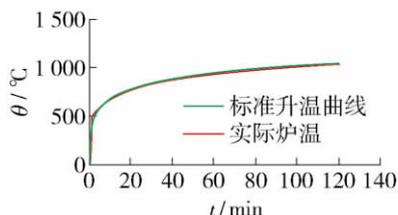


图 3 ISO-834 升温与实际炉温对比曲线

Fig. 3 Comparative heating curves

筒体为外部四面受火,其温度场通过预埋于筒体高度中部截面的 3 个铠装镍铬-镍硅热电偶采集,热电偶平面布置见图 4.筒体竖向变形采用电子位移计测量.为测量墙体侧向挠度,在墙体高度的中部埋设铅丝,将其引出炉体外部,在其端部下挂一重物,确定一个基准点进行测量.

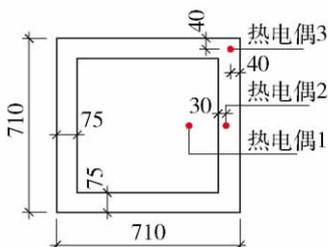


图 4 热电偶布置示意(单位:mm)

Fig. 4 Thermocouple set-up diagram (unit:mm)

2 试验结果及分析

2.1 耐火极限

模型 RC-3 和 RC-4 的耐火极限分别为 82 和

39 min. 由此可见,随着再生混凝土强度的提高,筒体耐火极限有所减短.

2.2 破坏特征

图 5 为 2 个全再生混凝土筒体模型 RC-3、RC-4 达耐火极限时的最终破坏照片.

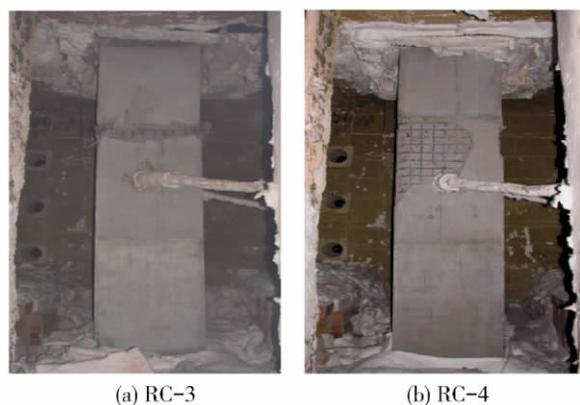


图 5 2 个筒体模型最终破坏照片

Fig. 5 Photos of the two specimens under failure

筒体 RC-3、RC-4 从试验点火到破坏,具有以下特征:

1) 模型 RC-3 在其结构上部 1/3 处发生破坏,筒体内暗柱和四面墙体在高温荷载作用下断裂,钢筋弯曲,整个筒体最终发生轴向变形破坏.模型 RC-4 的四面墙体均发生膨胀爆裂,墙体内部钢筋网外侧再生混凝土爆裂脱落,钢筋严重外露,在爆裂最严重的一面墙体发生破坏,导致模型最终破坏.

2) 模型 RC-3、RC-4 在受火初期,墙体表面均有水蒸气产生,并伴有明显的白色痕迹.这是混凝土内部的游离自由水在高温作用下向外溢出.当达到一定温度时,混凝土中化学结合水开始释放.随着温度的不断升高,白色痕迹逐渐消失,墙体变为灰色,并逐渐变为暗红色,最后变成灰白色.受火后期,墙体在高温作用下,表面有白色烧焦的颗粒产生.

3) 2 个模型在其破坏处,均有密集烧焦的白色颗粒产生,且墙体表面产生很多烧焦裂缝.

在较大竖向压力和高温的共同作用下,模型 RC-4 发生高温爆裂现象.再生混凝土强度较高时,其水灰比低,孔隙率小,内部连通比较少,结构较致密,试件受到一定程度的高温作用,更容易发生爆裂.因此,随再生混凝土强度的提高,再生混凝土构件越易发生高温爆裂现象.

2.3 温度场

图 6 为 2 个筒体模型 RC-3、RC-4 在相同位置

处通过热电偶采集的温度随升温时间变化的对比曲线. 热电偶 1 采集的是筒体内部温度, 热电偶 2 采集的是墙体中部温度, 热电偶 3 采集的是筒体角部暗柱中部温度, 其布置见图 4.

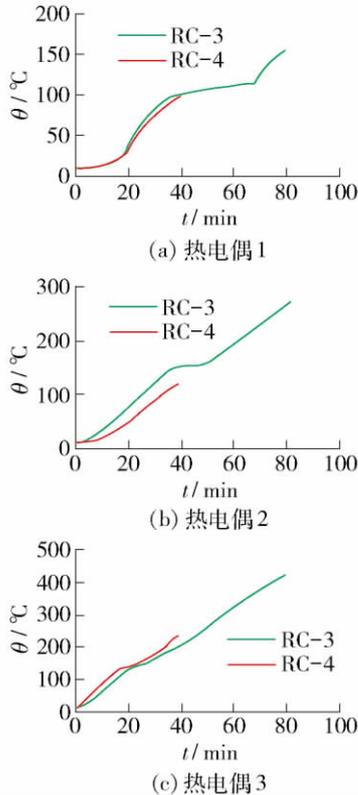


图 6 2 个模型不同位置处温度随时间变化曲线
Fig. 6 "Temperature to time" comparative curves

从图 6 可看出: 2 个模型 RC-3、RC-4 在升温过程中的温度场及温度升高的速率均相近. 温度相同时, 构件内部温度场取决于组成构件材料的热工参数. 再生混凝土的热工参数, 主要受骨料的类型、水分比例和再生混凝土的配合比等因素的影响. 2 个模型所采用的骨料类型完全一致, 只是 RC-4 的水灰比比 RC-3 的略低, 但构件内部温度场并未随混凝土强度的变化而发生明显的变化. 因此, 对于全再生混凝土筒体, 内部温度场随强度的升高, 没有明显变化. 温度升高的速率和温度高低受再生混凝土强度的影响不大.

2.4 墙体挠度

在高温及恒定轴向压力的共同作用下, 筒体墙板发生挠曲变形. 墙板挠度随升温时间的变化曲线见图 7. 从图 7 可看出, 模型 RC-4 比 RC-3 的变形速率快, 墙体挠度变形值较大. 在受火 39 min 时, RC-4 的墙体挠度是 RC-3 的 2 倍左右. 由此可知, 在高温作用下, 随着混凝土强度的提高, 再生混凝土

墙体更易发生变形, 这是由于随再生混凝土强度的提高, 其水灰比降低, 材料延性变小, 呈现较多的脆性, 更易发生高温膨胀变形.

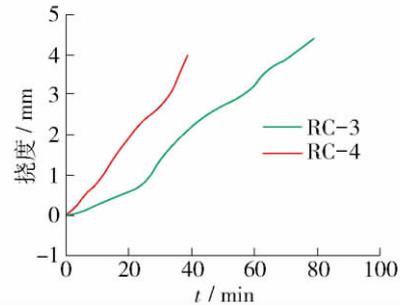


图 7 筒体墙板挠度曲线
Fig. 7 Wall deflection curves

2.5 竖向位移

模型 RC-3 和 RC-4 在高温试验过程中的筒体竖向位移变化曲线见图 8.

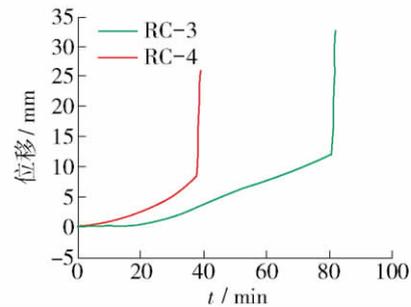


图 8 模型竖向位移曲线
Fig. 8 Vertical displacement curves

从图 8 可看出: 模型 RC-4 的变形速率大于 RC-3 的变形速率. 模型 RC-3 在受火初期, 无竖向位移; 在受火 17 min 时才开始有竖向变形, 在受火 17 ~ 30 min 内变形速率为 0.1 mm/min; 随着温度的升高, 变形速率及变形值逐渐增加, 最大变形速率为 0.3 mm/min; 在升温后期, 轴向变形急剧增大, 模型突然破坏. 模型 RC-4 在受火前 12 min, 变形速率为 0.1 mm/min; 在受火 12 ~ 25 min 时, 变形速率逐渐增大, 为 0.2 mm/min; 随着受火时间的增加, 内部温度不断升高, 在竖向荷载和高温的共同作用下, 变形速率及竖向变形逐渐增大, 后期达到 0.5 mm/min, 直至破坏.

3 筒体试件温度场有限元分析

3.1 再生混凝土的热物理指标

在火灾过程中, 高温通过热辐射、热对流和热传导 3 种方式传递, 混凝土构件内部的温度场是一个

非线性的瞬态温度场,在温度场分析中,混凝土的基本热工参数为导热系数、比热容和质量密度。而对于混凝土的另一个热工参数:热膨胀系数,由于与温度场分析无关,本文不作讨论。

考虑再生混凝土和普通混凝土的个性和共性,文献 [7]给出了再生混凝土导热系数随再生骨料取代率变化的导热系数和比热容的变化规律。

1) 导热系数 λ_c (W/(m·°C)):

当再生粗骨料取代率为 0 时,

$$\lambda_c = 1.556 - 0.24(\theta/120) + 0.012(\theta/120)^2 \quad (2)$$

当再生粗骨料取代率为 100% 时,

$$\lambda_c = 1.38 - 0.24(\theta/120) + 0.012(\theta/120)^2 \quad (3)$$

2) 比热容 c_c (J/(kg·°C)):

当再生粗骨料取代率为 0 时,

$$c_c = 892.5 + 80(\theta/120) - 4(\theta/120)^2 \quad (4)$$

当再生粗骨料取代率为 100% 时,

$$c_c = 935 + 80(\theta/120) - 4(\theta/120)^2 \quad (5)$$

其中 $20\text{ °C} \leq \theta \leq 1\ 200\text{ °C}$ 。

再生混凝土的质量密度随温度的升高而减小,但总体变化不大。因此,在进行再生混凝土结构的温度场分析时,可视其为常数。由于再生混凝土的密度低于普通混凝土的密度,且随着骨料取代率增加有所降低。本文分析中取 $2\ 200\text{ kg/m}^3$ 。

3.2 有限元分析过程

混凝土结构及构件在高温作用下的力学性能与温度场属于相互耦合的关系,除了结构外部温度条件外,结构的热工性能决定着混凝土结构与构件内部温度场的分布及变化,与材料的应力状态和力学性能无关。因此在进行结构及构件的温度场分析时,可先独立地确定构件的温度场及其随时间的变化,而后按确定的温度场进行力学行为分析^[10]。

利用 ABAQUS 软件,创建部件,定义材料的导热系数、质量密度、比热容等热工参数,并赋予界面属性。在相互作用模块中定义构件的不受火面、受火面及绝热面并对构件施加对流和辐射条件。通过预定义场定义模型的预温度场。单元类型选为 8 节点连续扩散热传导三维实体单元 DC3D8。

3.3 温度场对比分析

ABAQUS 分析构件温度变形云纹图如图 9 所示。从图 9 可看出,在高温过程中,构件温度从外到内逐渐降低,墙体外侧温度接近炉中温度。由于筒体四角暗柱为双面受火,故距墙体外侧同距离处,温度明显高于墙体温度。由于 RC-4 受火时间过短,

温度明显低于 RC-3,变形云纹图相同位置处,温度差别明显。

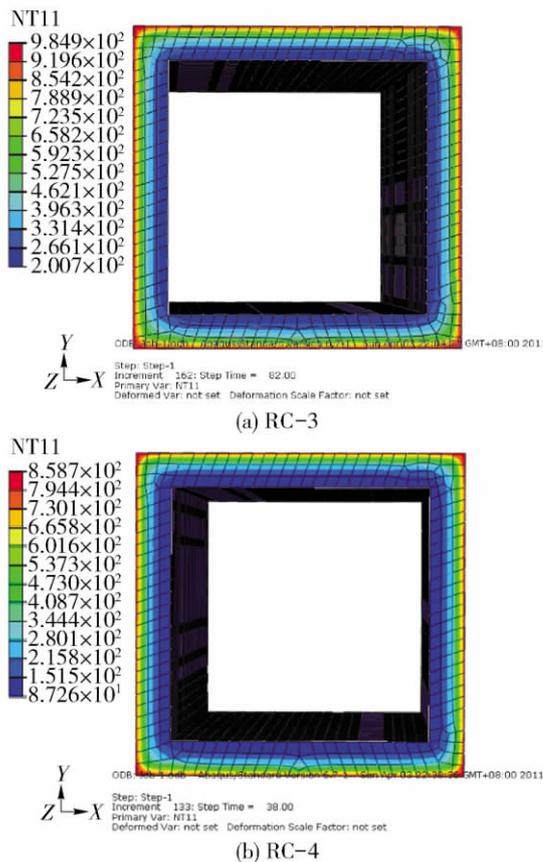


图 9 2 个模型的分析温度场

Fig. 9 Temperature field of specimens

图 10(a)、(b)分别为 RC-3、RC-4 墙体内部热电偶 2 采集的温度与 ABAQUS 分析数值对比曲线。从图 10 可看出,有限元分析结果与试验结果基本吻合,温度变化趋势基本相同。

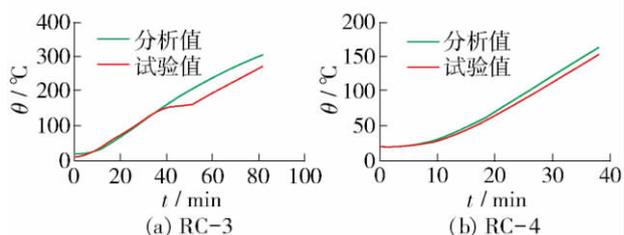


图 10 热电偶 2 处“时间-温度”分析值与试验值对比曲线

Fig. 10 “Time-Temperature” curves of analyzed and test results at thermocouple 2

图 11 为 2 个筒体模型在同一截面处(热电偶 2 采集温度处)的 ABAQUS 分析值对比曲线。从图 11 可看出,RC-3、RC-4 变化趋势基本一致,变化的速

率大致相等. 且在同一时刻、同截面处, 随着再生混凝土强度等级的增加, 截面温度的变化不大, 与试验结果比较吻合.

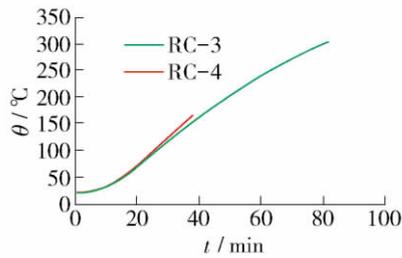


图 11 试件热电偶 2 处“时间-温度”分析值对比曲线

Fig. 11 “Time-Temperature” curves of analyzed results of specimens at thermocouple 2

4 结论

1) 再生混凝土强度的高低对全再生混凝土筒体内部温度场的影响不大. 再生混凝土强度等级不同的构件, 在高温作用下, 同时刻、同截面的温度场基本相同, 内部温度场的变化速率基本相同.

2) 随再生混凝土强度的提高, 筒体耐火性能降低, 易发生高温爆裂现象. 再生混凝土强度提高时, 其水灰比变小, 孔隙率变小, 内部结构更加致密, 混凝土内部的连通变少, 渗透性变差. 在高温作用下, 致密的结构导致混凝土内部积聚相当大的压力, 当压力超过再生混凝土抗拉强度时, 就会发生高温爆裂现象, 使构件延性变小, 耐火极限降低.

3) 随再生混凝土强度的提高, 全再生混凝土筒体的高温性能变差, 筒体的竖向位移及墙体侧向挠度均增大.

参考文献:

[1] LIE T T. Fire resistance of steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 1994, 120(5): 1489-1509.

[2] ONGAH R, MENDIS P A, SANJAYAN J G. Fire performance of high strength reinforced concrete walls [C] // *Proceedings of 17th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM17)*,

[S. l.]: A A Balkema Publishers, 2002: 199-204.

- [3] 肖建庄, 李佳彬, 兰阳. 再生混凝土技术研究最新进展与评述 [J]. *混凝土*, 2003(10): 17-20.
XIAO Jian-zhuang, LI Jia-bin, LAN Yang. Research on recycled aggregate concrete—A review [J]. *Concrete*, 2003(10): 17-20. (in Chinese)
- [4] 曹万林, 梁梦彬, 董宏英, 等. 再生混凝土冻融后基本力学性能试验研究 [J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(3): 184-190.
CAO Wan-lin, LIANG Meng-bin, DONG Hong-ying, et al. Experimental study on basic mechanical properties of recycled concrete after freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(3): 184-190. (in Chinese)
- [5] 黄运标. 再生混凝土高温性能研究 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2006.
HUANG Yun-biao. Research on the thermal properties of recycled concrete [D]. Shanghai: School of Civil Engineering, Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [6] 曹万林, 边建辉, 董宏英, 等. 再生粗骨料混凝土柱耐火性能试验与理论分析 [J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(2): 207-214.
CAO Wan-lin, BIAN Jian-hui, DONG Hong-ying, et al. Experiment and theoretical analysis of fire resistant performance of recycled coarse aggregate concrete columns [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(2): 207-214. (in Chinese)
- [7] 曹万林, 边建辉, 董宏英, 等. 不同再生骨料取代率混凝土柱耐火性能试验研究 [J]. *结构工程师*, 2012, 28(4): 115-121.
CAO Wan-lin, BIAN Jian-hui, DONG Hong-ying, et al. Experimental study on fire resistant performance of recycled concrete columns with different replacement rate of recycled aggregate [J]. *Structural Engineers*, 2012, 28(4): 115-121. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 9978—2008 建筑构件耐火试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [10] 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.

(责任编辑 吕小红)