

HRBF500 级钢筋混凝土简支梁抗火性能试验*

王全凤¹, 霍喆赟¹, 徐玉野¹, 王凌云²

(1 华侨大学土木工程学院, 泉州 362021; 2 上海应用技术学院土木建筑与安全工程学院, 上海 201418)

[摘要] 通过 5 根配置 HRBF500 级钢筋的混凝土简支梁的三面受火试验, 探讨了混凝土保护层厚度、荷载比、试件配筋率等因素对 HRBF500 级钢筋混凝土简支梁耐火性能的影响。试验结果表明: 各试件截面温度场分布接近; 混凝土保护层厚度和荷载比对试件耐火极限时间影响较大, 试件配筋率对耐火极限影响不明显。混凝土保护层厚度、配筋率越大, 耐火极限时间越长; 荷载比越大, 耐火极限时间越短。

[关键词] HRBF500; 简支梁; 耐火极限

中图分类号: TU375.1, TU317.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013)01-0076-05

Experimental research on fire-resistant performance of HRBF500 reinforced concrete simple beams

Wang Quanfeng¹, Huo Zheyun¹, Xu Yuye¹, Wang Lingyun²

(1 College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2 College of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Three-side fire tests of five HRBF500 reinforced concrete simple beams were carried out to reveal the influences of such factors as thickness of concrete cover, load ratio and reinforcement ratio on the fire resistance of HRBF500 reinforced concrete simple beams. Test results show that the temperature field of each beam is similar; factors as thickness of concrete cover and load ratio have significant effect on fire resistance of HRBF500 reinforced concrete simple beams. The reinforcement ratio affects on the fire resistance of beams non-significant. It can be found that the fire endurance of HRBF500 reinforced concrete simple beams increases with the increasing of the thickness of concrete cover and reinforcement ratio, and decreases with the increasing of the load ratio.

Keywords: HRBF500; simple beam; fire endurance

0 概述

与传统的通过添加微合金元素达到高强度的钢材不同, 细晶钢在提高强度的同时, 又保证了钢材的塑性和韧性^[1]。HRBF500 钢筋是通过细化晶粒的方法来达到提高强度目的的一种新型高强钢筋, 2008 年颁布的《钢筋混凝土用钢 第 2 部分: 热轧带肋钢筋》(GB 1499.2—2007)^[2] 新加入该牌号钢材作为新型建筑用钢。为推动 HRBF500 级钢筋在混凝土结构工程中的使用, 目前已经有对该牌号钢材的常温及高温力学性能和混凝土构件的常温及高温性能^[3-8] 的研究。结构抗火设计在 911 事件之后越来越受到重视, HRBF500 级钢筋混凝土构件高温下抗火性能研究对于指导混凝土构件抗火设计和其在建筑工程中的推广使用有重要意义。

1 试验概况

1.1 试验材料

混凝土采用中铁十一局泉厦高速扩建项目部提供的罐送混凝土。试验前混凝土立方体试块实测抗压强度为 42.8 MPa。简支梁纵向受拉钢筋和箍筋分别是直径 20mm 和 8mm 的 HRBF500 级钢筋, 架立筋采用直径 16mm 的 HRB400 级钢筋。钢筋常温下

钢筋常温下力学性能

表 1

钢筋牌号	钢筋直径/mm	f_y /MPa	f_u /MPa	E_s /MPa
HRBF500	20	518	651	2.07×10^5
HRBF500	8	560	720	2.00×10^5
HRB400	16	453	580	1.86×10^5

力学性能见表 1。

1.2 试件设计

本试验共制作了 5 个配置 HRBF500 级钢筋的混凝土简支梁试件, 各个试件参数设置见表 2。5 个试件混凝土强度等级完全相同 (C30), 所有试件和混凝土立方体试块均是由同一批罐送混凝土统一浇筑的。试件几何尺寸一致, 试件截面 ($b \times h$) 为 250mm \times 400mm, 简支梁全长为 5 000mm。试件计算跨度为 4 500mm, 设计受火长度为 4 000mm。各试件配筋情况见图 1。

1.3 试验装置及试验过程

试验使用的大型水平火灾试验炉炉内尺寸为: 长 \times 宽 \times 高 = 4m \times 3m \times 1.5m。炉内设置 8 个燃气喷口, 延炉壁长边方向布置探测炉温变化的热电偶。

* 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2007AA03Z550), 福建省青年科技人才创新项目 (2007F3064)。作者简介: 王全凤, 博士, 教授, 博导, Email: qfwang@hqu.edu.cn。

反力架可承受最大 500kN 试验荷载。试验过程中通过微机控制燃气喷口进气量控制炉内温度,使炉温按规定的时间-温度关系升温。试验装置见图 2。

表 2 试件参数设置

试件编号	混凝土保护层厚度/mm	配筋率/%	荷载比
HL-1	25	1.05	0.7
HL-2	25	1.05	0.5
HL-3	25	1.05	0.6
HL-4	25	0.70	0.6
HL-5	35	1.05	0.6

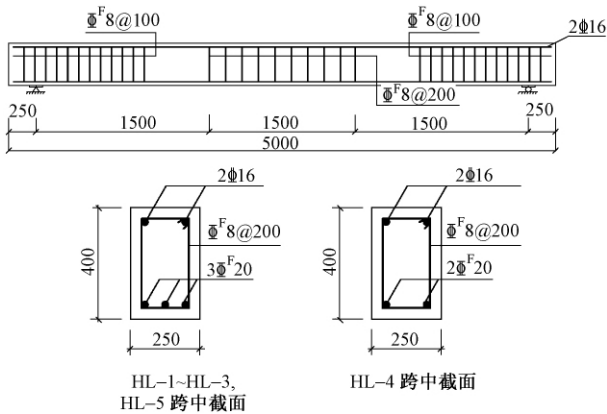


图 1 试件尺寸及配筋情况

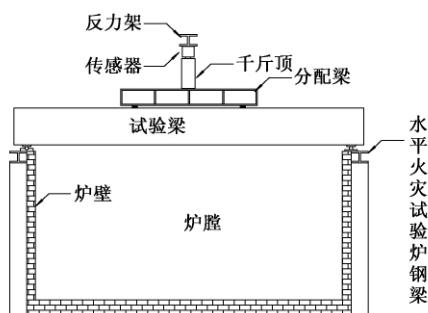


图 2 试验炉示意图

试验中试件的受火方式是三面受火,升温过程中受火长度为4 000mm。采用恒载升温方式进行试验。炉内温度按照 ISO834 标准升温曲线进行升高。试验过程如下:

(1) 将试件吊装到位,完成试件定位,各仪表安装就绪。

(2) 按三分点加载的方式对试件施加 20% 预定荷载,压实石棉。卸载后记录位移数据,然后正式开始加载到预定荷载值。加载时每级加载为破坏荷载的 15%,每级加载后持续 10min。加载到试件设定的荷载比后不再加荷,将试件上荷载稳定在该点。

(3) 试件荷载稳定 15min 以后开始按 ISO834 标准升温曲线加热试验炉。在火灾试验过程中荷载误差不超过确定值的 ±5%。电脑每分钟自动采集

温度及位移数据一次并保存。

(4) 试件达到耐火极限标准,停止加热,卸去上部荷载,试验结束。根据《建筑构件耐火试验方法》(GB/T 9978—2008)^[9],试件的挠度达到 $L/20 = 225\text{mm}$,或是无法持荷的情况下,即认为试件达到了耐火极限。

1.4 试验量测

(1) 荷载

加载时通过分配梁将千斤顶的压力分配到试件计算跨度三分点处,通过量程为 300kN 的传感器接入 DH-3816 静态自动数据采集箱监测和控制荷载。加载简图见图 3。

(2) 挠度

共设置 5 个位移测点,以测量试验过程中试件的竖向位移。位移计 1、位移计 5 分别布置在两端支座处。位移计 2、位移计 4 布置在左右距离跨中截面 1 125mm 处。位移计 3 布置在跨中。具体布置情况见图 4。

(3) 截面温度

测试截面温度的热电偶采用 WRNK-101 型铠装热电偶。分度号 K,允差等级 II,产品规格 2m。在试件 HL-1 跨中截面埋置 5 个热电偶,试件 HL-2 跨中截面埋置 4 个热电偶,试件 HL-3 ~ HL-5 跨中截面均埋置 3 个热电偶。在混凝土浇筑前热电偶实际位置如图 5 所示。

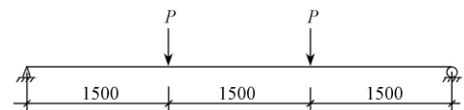


图 3 试件加载简图

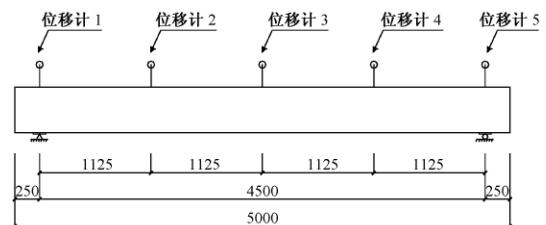


图 4 试件位移计布置

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

开始加热约 10min,试验炉开始冒出白色水汽。试验开始后 10 ~ 40min 这段时间,在试件的两端面可以明显看到混凝土有结晶水析出,端面混凝土出现潮湿的区域,见图 6。

加热过程中试件挠度变化速度呈现递增状态。在开始阶段试件挠度基本没有变化或变化非常细

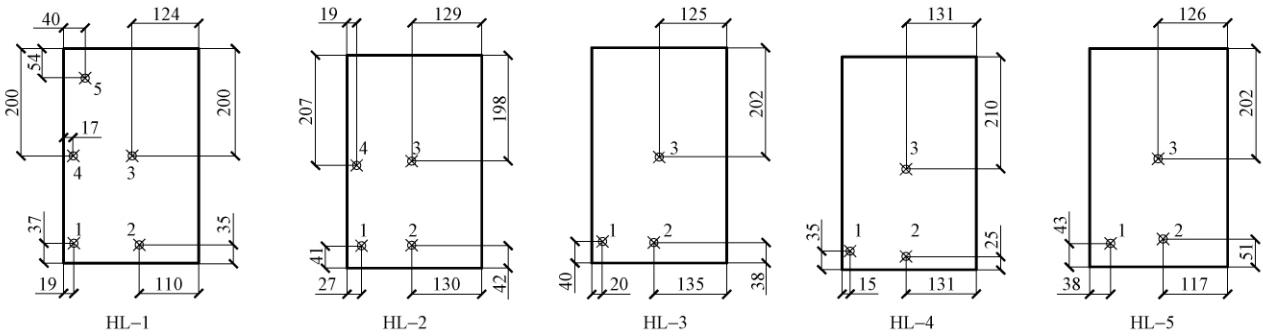


图5 各试件热电偶布置情况

微。到第二阶段试件挠度开始均匀增加,但速度很慢。在这个阶段试件的跨中挠度变化维持在每分钟增加1~2mm。第三阶段,试件挠度开始明显增加,挠度增加速度基本不再保持匀速,而是呈现剧烈递增态势。这个阶段出现在试件破坏前的10min以内。在这个阶段,由于试件的挠度过大,试件和炉盖之间产生较大的间隙,炉内高温气体从缝间冒出。



图6 加热过程中的现象

5个试件破坏形态基本上符合受弯破坏形态,典型受弯破坏形态见图7,试件的纯弯段有间距均匀的竖向裂缝出现。裂缝间距大约跟试件纯弯段箍筋间距相吻合。多条竖向裂缝从试件底面直接贯通到试件顶面。除试件HL-2在加载点外侧出现若干明显斜裂缝外,其他试件裂缝均以贯通的竖向裂缝为主,没有明显的斜裂缝出现。试件的顶面混凝土有不同程度的压碎情况出现,见图8。

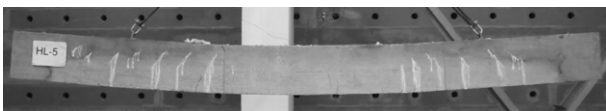


图7 试件HL-5破坏形态

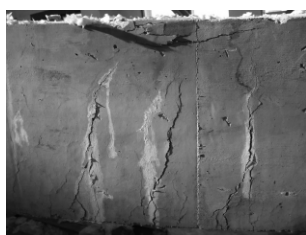


图8 试件顶部混凝土被压碎

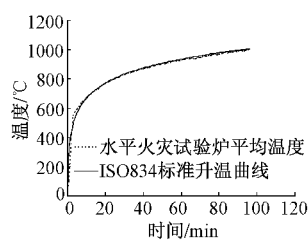


图9 实际炉温与ISO834标准升温曲线对比

和ISO834标准升温曲线的对比来看(图9),在火灾试验过程中,炉内试件周围空气的温度略低于试验方案所要求的ISO834标准升温曲线相对应的值,但差距不大,两者的吻合程度很好。

2.2.2 各测点温度

各试件各测点的温度曲线见图10,在试验过程中,由于试件HL-2的1号测点热电偶损坏,未能测得该点温度变化。靠近底边角部的测点温度变化趋势比较平稳,波动不大。离开边缘较远的各测点温度曲线斜率有明显阶段性变化。在加热开始阶段基本处于水平状态,这是因为热量从边缘传递到试件内部需要一段时间,之后才进入明显的升温阶段。各测点温度达到100℃时,曲线出现一个明显的转折,温度上升的斜率骤然变小,温度在此后的一段时间内维持在100℃左右。从各试件测点温度曲线看到,越靠近边缘的测点在100℃左右的维持时间越短。位于角部的1号热电偶测到的温度曲线在达到100℃的时候曲线斜率有减小现象,但很快测点温度上升速度又开始增加,基本上看不到在100℃存在一个平台。而略靠里的其他测点在100℃产生明显的平台。基本上测点离开受火面越远,这个平台持续的时间就越长。位于截面中心的测点直到试验结束时维持在100℃以上的不多,这表明越靠近边缘水汽蒸发得越快。

2.2.3 试件挠度

各试件挠度-时间曲线见图11。从图11可以看出,试件在加载后开始升温的初期挠度变化不明显。反映在挠度-时间曲线上,即曲线斜率很小,略高于水平。而挠度在试验开始加热后很长一段时间都处于这种平缓的上升状态,直到试件接近耐火极限时挠度才突然骤增。而这个挠度骤增的过程很短暂,基本上发生在试验最后10~15min这段时间内。因此试件的挠度变形全过程可以分成两个阶段:第一阶段是平稳上升阶段,第二阶段是急剧上升阶段。各试件第一阶段结束进入第二阶段除了时间上的特

2.2 试验结果分析

2.2.1 炉内升温曲线

从5个试件的试验所得的5条炉平均温度曲线

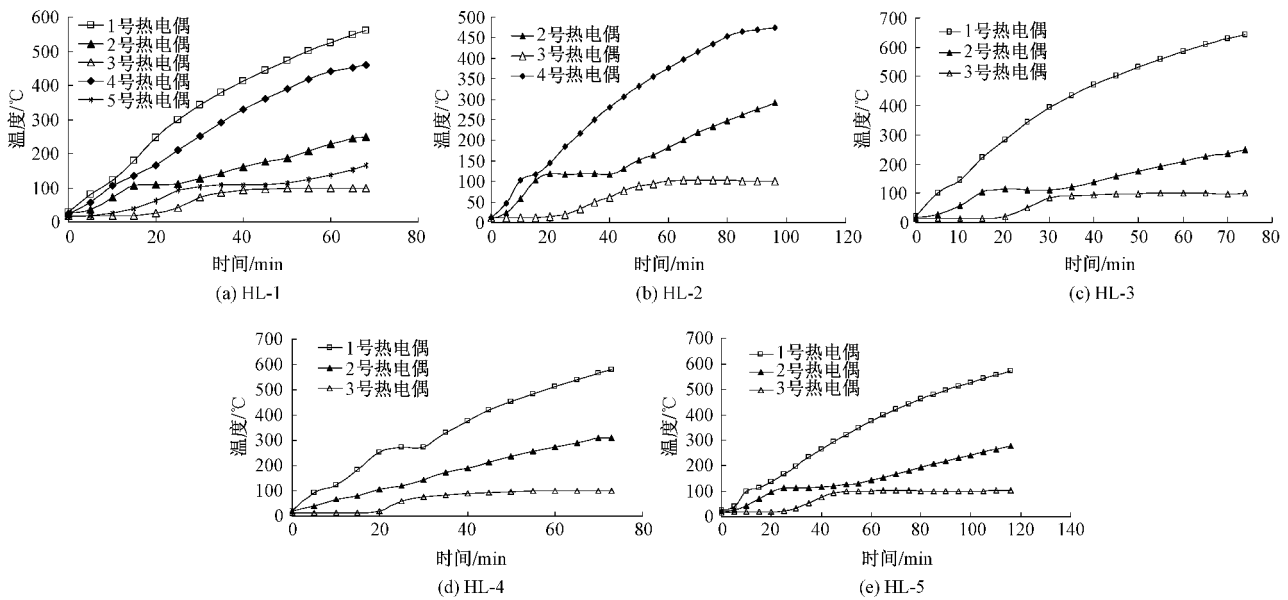


图 10 各试件实测温度-时间关系

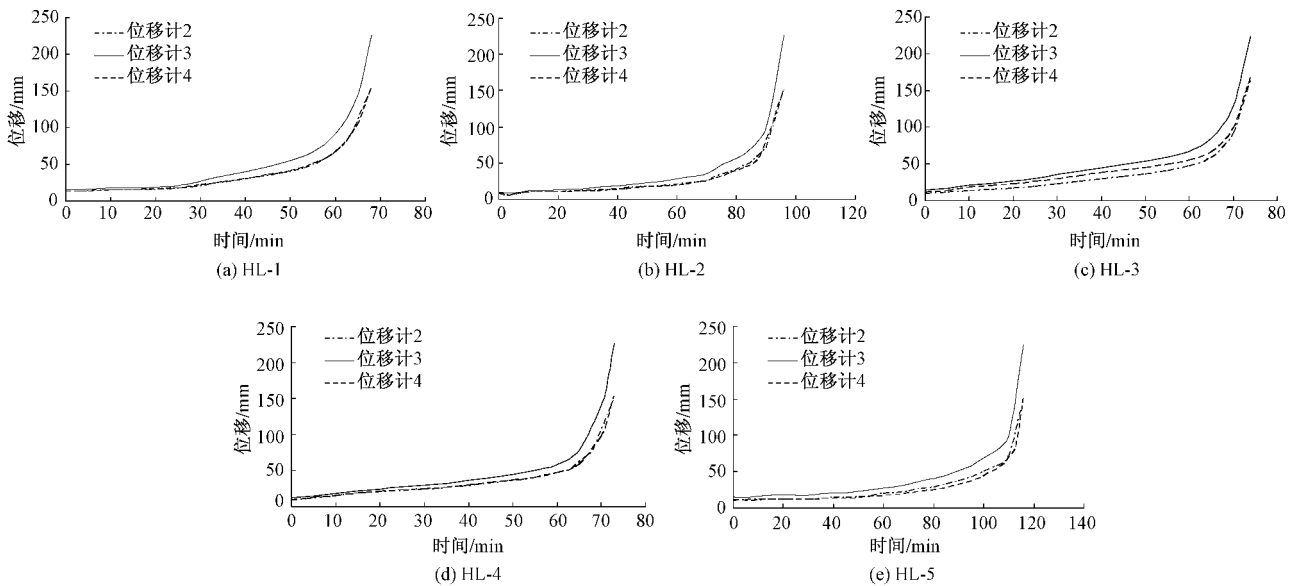


图 11 各试件挠度-时间曲线

征外,从挠度上看也有特征。一般试件跨中挠度达到大约 60mm 以后,试件的挠度变化速度就进入快速递增的阶段。开始从每分钟均匀增加 1~2mm 阶段过渡到更加高速,且每分钟挠度增量呈递增的阶段。

2.2.4 耐火极限

试验加热过程中试件混凝土及钢筋随着温度的上升,材料的力学性能开始逐渐退化。导致承受荷载的试件挠度不断增大,达到《建筑构件耐火试验方法》(GB/T 9978—2008)^[9]规定的耐火极限标准。

本试验设计了 3 组参数,并通过试验分别考察其对试件的耐火极限的影响。试件的耐火极限情况见表 3。分析可得:

(1) 试件 HL-1 荷载比为 0.7,HL-2 荷载比为 0.5,HL-3 荷载比为 0.6。这三个试件除荷载比不同外,其他各参数均一致。对比试件 HL-1,HL-2,HL-3 试验结果可以看出,初始荷载的荷载比越高耐火极限时间越短。试件 HL-2 耐火极限比试件 HL-3 大 29.7%。试件 HL-3 耐火极限比试件 HL-1 大 8.8%。初始荷载的荷载比对耐火极限的影响比较明显。

各试件耐火极限 表 3

试件编号	HL-1	HL-2	HL-3	HL-4	HL-5
耐火极限 /min	68	96	74	73	116

(2) 试件 HL-3 的初始荷载比和混凝土保护层厚度与试件 HL-4 的相同。受拉区纵向钢筋配筋率: HL-3 为 1.05% ,HL-4 为 0.7%。从试验取得的结果来看两者的耐火极限非常接近,因此,受拉区纵向钢筋配筋率对耐火极限的影响不显著。

(3) 试件 HL-3 与试件 HL-5 仅混凝土保护层厚度不同。该组试件对比主要考察混凝土保护层厚度对试件耐火极限的影响。从理论上讲混凝土保护层厚度越大,试件受拉区纵向钢筋的温度上升相对就越慢,试件的耐火极限就应该相应较大。通过试验得到混凝土保护层厚度对耐火极限的影响也很明显。试件 HL-3 的混凝土保护层厚度为 25mm,试件 HL-5 的混凝土保护层厚度为 35mm,后者耐火极限大于前者耐火极限值较多。

3 结论

(1) 各试件截面温度场变化情况相近,钢筋对截面温度场分布影响不大。符合钢筋混凝土试件截面温度场一般变化规律。在试件截面温度场计算中可以忽略 HRBF500 钢筋对截面温度的影响。

(2) 试件破坏形式属于混凝土弯曲破坏。整个挠度变化过程可以划分 2 个阶段。第一阶段挠度缓慢均匀增加;第二阶段挠度急剧加速增加,导致试件迅速破坏。

(3) 从试验结果得到:混凝土保护层厚度及荷载比对试件耐火极限影响较大。随着保护层厚度的

增加,试件耐火极限时间相应增加。在其他条件相同的情况下,荷载比越大,试件的耐火极限时间就越短;配筋率对试件耐火极限影响不明显。

参 考 文 献

- [1] 赵志华,杜秀林,胡燕慧,等. 400MPa 级超细晶粒钢的力学性能[J]. 机械工程材料, 2004, 28(10): 35-40.
- [2] GB 1499.2—2007 钢筋混凝土用钢 第 2 部分: 热轧带肋钢筋[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 1-14.
- [3] 肖建庄,代媛媛,赵勇,等. 500MPa 细晶粒钢筋高温下的应力-应变关系[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(3): 276-282.
- [4] 吴红翠,王全凤,徐玉野,等. HRBF500 钢筋高温后力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(11): 5-8.
- [5] 胡玲,杨勇新,王全凤,等. HRBF500 钢筋粘结锚固性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(11): 13-16, 44.
- [6] 赵进阶,张钦喜,杨勇新,等. HRBF500 钢筋混凝土梁受弯承载力试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(3): 52-55.
- [7] 王全凤,邱毅,徐玉野,等. HRBF500 级钢筋混凝土梁受火后力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 50-55.
- [8] 牛向阳,王全凤,杨勇新,等. 高温后普通混凝土与细晶粒钢筋粘结性能试验研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(3): 116-118, 32.
- [9] 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.
- [6] 王学民. 锈蚀钢筋混凝土构件抗震性能试验与恢复力模型研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- [7] RODRIGUEZ J, ORTEGA L M, CASAL J. Load bearing capacity of concrete columns with corroded reinforcement [C]//Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. London: Ove Arup and Partners, 1996: 220-230.
- [8] 史庆轩,李小健,牛荻涛. 钢筋锈蚀前后混凝土偏心受压构件承载力试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 1999, 31(3): 218-221.
- [9] 阎培渝,游秩,崔路,等. 高含氯混凝土中钢筋宏电池腐蚀速率控制因素[J]. 工业建筑, 2005, 30(5): 6-9.
- [10] TAMER A, KHALED A. Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(1): 41-47.
- [11] CHRISTOPHER HIGGINS, WILLIAM C FARROW III. Tests of reinforced concrete beams with corrosion damaged stirrups[J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(1): 133-141.
- [12] 宋华,牛荻涛. 电化学快速锈蚀与自然环境钢筋锈蚀的相似性分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(4): 508-511.

(上接第 68 页)

显,混凝土试件的破坏形式从延性破坏向脆性破坏转变。

(3) 锈蚀产物在混凝土保护层与核心区混凝土之间的界面上的“堆积”,导致混凝土保护层与核心区混凝土的粘结性能部分或完全丧失,使其对整个试件承载力的贡献大大减弱,从而降低了试件的承载能力。

参 考 文 献

- [1] 刘西拉. 重大土木与水利工程安全性及耐久性的基础性研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 1-4.
- [2] 惠云玲,林志伸,李荣. 锈蚀钢筋性能试验研究分析[J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 10-13, 33.
- [3] 张伟平,商登峰,顾祥林. 锈蚀钢筋应力-应变关系研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5): 106-242.
- [4] 杨亚东. 钢筋腐蚀混凝土构件的性能退化与可靠性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2000.
- [5] 颜桂云. 锈蚀钢筋混凝土压弯构件恢复力性能的试验研究与承载力的理论分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2001.