

完全碳化混凝土单轴受压力学性能试验研究

徐善华, 孔德亮, 李安邦, 朱文治

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为研究完全碳化混凝土力学性能变化规律, 本文开展了 C20、C30 以及 C40 三批次混凝土实验室快速碳化以及单调加载试验. 试验结果表明, 完全碳化混凝土脆性增加, 峰值应力提高, 其峰值应力提高增幅随混凝土强度增加而减小; 完全碳化混凝土峰值应变减小幅度在 10% 左右, 且不随混凝土强度增加而发生明显变化; 完全碳化混凝土极限应变随混凝土强度增加而逐渐减小, 减小幅度随混凝土强度增加而增加, 当混凝土强度从 C20 变化到 C40 情况下, 试件极限应变减小幅度为 10%~30%. 本文研究成果可为既有混凝土结构安全评估及抗震性能分析提供技术依据.

关键词: 碳化; 应力-应变关系; 峰值应变; 峰值应力; 极限应变

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)02-0187-04

Study on mechanical property of carbonized concrete under monotonic loading

XU Shanhua, KONG Deliang, LI Anbang, ZHU Wenzhi

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The purpose of this study is to investigate the effect of full carbonization on the mechanical property of concrete. Three batches of specimens with concrete strength grade of C20, C30, C40 were cast, and accelerated carbonation tests and monotonic loading tests were carried out. It shows that the material brittleness of concrete and the peak strength increased after carbonization; the strain at peak compressive stress decreased about 10% and the effect of concrete strength on the decreasing amplitude was not significant; the ultimate strain decreased and the decreasing amplitude were obviously impacted by the concrete strength grade, and the decreasing amplitude increased from 10% to 30% as the grade changed from C20 to C40. This study can provide the seismic performance evaluation on the existing concrete structure.

Key words: carbonation; stress-strain relation; peak strain; peak stress; ultimate strain

一般大气环境下混凝土碳化是既有混凝土结构劣化的主要因素, 碳化改变了混凝土内部化学组分及孔隙结构, 造成碳化混凝土力学性能与未碳化混凝土存在明显差异^[1-3]. 文献[4-7]通过部分碳化试件研究发现, 随着试件碳化深度增加, 试件抗压强度明显提高, 延性明显降低. 文献[8-9]通过对碳化混凝土受压本构关系研究发现, 混凝土峰值应力随着碳化深度增加而提高, 增幅达 15%; 峰值压应变随碳化深度增加而减小, 降幅可达 50%. 上述结论是通过部分碳化混凝土加载试验得到的, 碳化混凝土强度、延性变化规律与混凝土碳化深度有很强的相关性. 本文通过 C20、C30、C40 三种混凝土强度等级完全碳化混凝土试件, 研究单调荷载作用下碳化混凝土峰值应力、峰值应变、极限应变等特征参数变化规律, 分析碳化对混凝土力学性能的影响, 为既有混凝土结构安全评估及其抗震性能分析提供技术依据.

1 试验方案

1.1 试件设计

试验采用秦岭牌普通硅酸盐水泥(42.5R), 粗骨料为连续粒级碎石, 最大粒径 12 mm, 细骨料采用连续级配中砂, 其含泥量不大于 2%, 拌和水为自来水. 试件混凝土强度设计等级为 C20、C30、C40, 每立方米混凝土材料用量见表 1, 试件制作和养护按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2002)执行. 试验共制作了 48 个试件, 其中 39 个为直径 100 mm、高度为 200 mm 的圆柱体试件(中间留有 50 mm 直径的圆孔), 9 个用于测定 28 d 混凝土立方体抗压强度的 100 mm 立方体伴随试块.

表 1 混凝土试件配合比

Tab.1 The mix proportion of concrete					
强度等级	水灰比	水/kg·m ⁻³	水泥/kg·m ⁻³	砂子/kg·m ⁻³	石子/kg·m ⁻³
C20	0.65	220	340	957	883
C30	0.60	210	350	920	920
C40	0.50	190	380	824	1006

收稿日期: 2014-02-26 修改稿日期: 2015-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51078307); 教育部长江学者和创新团队发展计划项目 (IRT13089)

作者简介: 徐善华 (1963-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事工程结构可靠性及耐久性研究. E-mail: xushanhua@163.com

1.2 快速碳化试验方案

试件养护至规定龄期后,放入温度为 60℃ 的烘箱干燥 48 h,然后用石蜡对试块端面进行密封.按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T50082-2009)规定的方法,将试件放入碳化箱进行快速碳化,快速碳化环境参数为:温度 20℃±3℃、相对湿度 70%±5%、CO₂ 浓度 20%±3%,碳化过程各试件间保持 50 mm 以上间距.快速碳化期间,间隔一定时间用切割机切开碳化测试试件,并用酚酞试剂测定其碳化深度.当 1%酚酞酒精试剂喷洒切开表面不再呈现红色,表明试件混凝土已完全碳化(如图 1 所示).



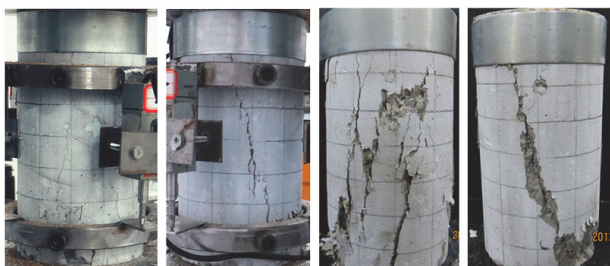
图 1 试件碳化程度测试

Fig.1 Test of carbonation depth

2 试验结果及分析

2.1 破坏现象

对于未碳化的圆柱体混凝土试件,加载初期($\sigma < 0.4f_c$),应力-应变曲线近似成比例增长,试件处于线弹性阶段.继续加大荷载,应变增长速度加快,应力-应变曲线斜率减少,曲线成上凸状,试件逐渐进入弹塑性阶段,此时试件内部薄弱部位会有微裂缝出现,但试件表面仍未出现可见的裂缝.随着荷载的增加,应力-应变曲线的斜率逐渐趋于零,试件达到了其极限抗压强度,应力-应变曲线也相继进入下降段.此时在试件侧面上下部位出现大致平行受力方向细而短的微裂缝,继续加大荷载,这些上下不连续的短裂缝也同时慢慢形成一条或多条贯通整个试件的主裂缝,沿着这条主裂缝形成多个扩展裂缝.试验得到贯通主裂缝与荷载作用线的



(a) 未碳化试件

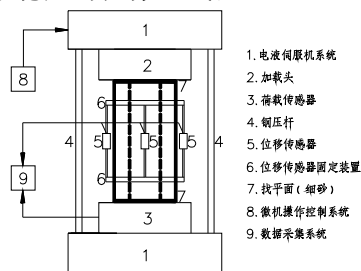
1.3 加载试验方案

采用改进的 WAW 系列微机控制电液伺服万能试验机(100 t)进行单调加载与重复加载试验;采用位移计和应变计并借助于 TDS-602 动态数据采集仪测试试件应变,试验装置如图 2 所示.加载制度如下:首先对试件进行预加载,预加载至荷载为 5 kN 时,观察四个位移计读数差值是否超过 5%;若其读数差值超过 5%,则停止加载,并对试件重新进行物理对中;然后再次进行预加载,直至四个位移计读数差值达到 5%以下.预加载完成对中后采用 0.1 mm/min 加载速率的等位移单调加载,直至试件最大承受荷载降低至峰值荷载的 30%以下或荷载-位移曲线趋于稳定时,停止试验.



图 2 试验装置

Fig.2 The equipment set-up for the loading test



夹角 $\theta = 0^\circ \sim 30^\circ$. 随着应变继续增加,裂缝开展趋于稳定,应力下降变缓,最后出现平缓段,破坏现象如图 3 (a) 所示.

对于完全碳化混凝土试件,加载初期试件表面形态与未碳化混凝土并无太大区别,只是应力-应变曲线形状比未碳化混凝土试件更陡些.当进入加载后期,试件应力接近其峰值应力时,试件上下部位开始出现较多的竖向或斜向裂缝,并伴随着混凝土开裂的响声.荷载越过峰值后迅速下降,比未碳化混凝土下降更快.试件侧面裂缝开展并互相贯通,并伴有混凝土块脱落现象,破坏现象比未碳化试件更严重,这是碳化后混凝土脆性增加的原因.试件的贯通主裂缝夹角与未碳化试件基本一致.图 3 (b) 给出了完全碳化混凝土圆柱体试件在单调压荷载作用下的破坏现象.



(b) 完全碳化试件

图 3 碳化混凝土试件在单调压荷载作用下的破坏现象

Fig.3 Failure mode of the carbonated concrete under compression loading

2.2 应力-应变全曲线

图 4 给出了 C20、C30、C40 各组混凝土完全碳化前后的应力-应变曲线对比情况. 由图 4 可以发现, 碳化前后混凝土受压应力-应变曲线的基本形式

没有发生变化, 但碳化后混凝土峰值应变减小、峰值应力提高, 应力-应变曲线上升段曲线变凸、下降段曲线变陡趋势明显.

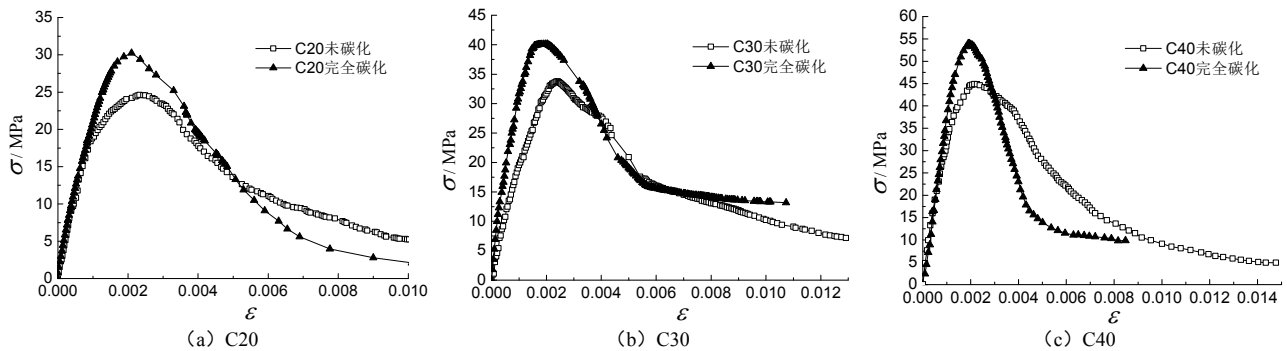


图 4 碳化前后混凝土应力-应变曲线对比

Fig.4 Before and after carbonation concrete stress - strain curve comparison

2.3 试验结果特征值分析

表 3 给出了碳化前后各试件峰值应变、峰值应力以及极限应变值, 其中极限应变应力降低至峰值应力 85%时所对应应变值.

由表 3 可以看出同组三个试件的峰值应力、峰值应变及极限应变均有波动, 但波动幅度不大, 说明混凝土材料本身具有一定的离散性, 因浇筑良好其离散程度不大, 满足试验要求. 通过比较同种强度等级未碳化混凝土试件与碳化混凝土试件的峰值应变、峰值应力及极限应变可以发现: 1) 混凝土碳化后延性降低, 脆性增加尤其下降段, 表现于峰值应变、极限应变普遍减小; 2) 混凝土碳化后变得更密实, 表现于峰值应力增加; 3) 每种强度试件混凝土碳化后峰值应变、峰值应力、极限应变的变化幅度各不相同.

将每种强度等级混凝土试件应力-应变全曲线

特征值及其碳化后变化幅度列于表 4.

2.3.1 峰值应变

从表 4 可发现, C20、C30、C40 三种强度等级混凝土试件碳化后其峰值应变较未碳化混凝土试件减小均为 10%左右, 其减小量不随混凝土强度的增加而变化. 这与刘小微^[10]得出两种强度等级混凝土试件碳化后 (75%左右截面积碳化) 峰值应变减小量均在 20%~30%的结论有出入, 但都得到混凝土试件碳化后峰值应变减小, 且其减小量与混凝土强度无关的结论. 考虑到两批试件的材料选用, 配合比, 试件形状及其浇筑方法的差异, 这种混凝土碳化后峰值应变减小量的差别是可接受的. 所以本试验得出: 混凝土试件在单调压荷载作用下, 碳化后试件峰值应变较未碳化试件减小, 减小幅度均在 10%左右, 且减小幅度与混凝土强度大小无关.

表 3 主要试验结果特征值

Tab.3 The characteristic parameters of concrete under compression loading

组别	编号	峰值应变 /10 ⁻³	峰值应力 /MPa	极限应变 /10 ⁻³	组别	编号	峰值应变 /10 ⁻³	峰值应力 /MPa	极限应变 /10 ⁻³
C20 未碳化	201	2.329	24.629	3.40	C20 完全碳化	211	2.100	33.264	3.34
	202	2.406	23.825	3.85		212	2.203	34.916	3.23
	203	2.417	24.505	3.92		213	2.089	31.247	3.37
C30 未碳化	301	2.287	32.863	3.67	C30 完全碳化	311	2.033	40.138	2.94
	302	2.417	33.783	3.58		312	2.207	44.496	3.14
	303	2.333	35.636	4.22		313	2.106	43.231	3.28
C40 未碳化	401	2.208	47.198	3.68	C40 完全碳化	411	2.127	52.864	2.81
	402	2.114	46.322	3.55		412	1.805	47.764	2.58
	403	2.250	44.885	3.81		413	1.904	53.915	2.76

表 4 混凝土试件单调压荷载作用下平均特征值及其碳化后变化幅度

Tab.4 The average value of characteristic parameters and the degree of variability after carbonation

组别	峰值应变			峰值应力			极限应变		
	ε_{pp}	ε_{pc}	$a / \%$	σ_{pp}	σ_{pc}	$b / \%$	$\varepsilon_{0.85p}$	$\varepsilon_{0.85c}$	$c / \%$
C20	2.384	2.131	10.61	24.320	33.142	36.28	3.723	3.313	11.01
C30	2.346	2.115	9.85	34.094	42.622	25.01	3.823	3.12	18.39
C40	2.191	1.945	11.23	46.135	51.514	11.66	3.680	2.717	26.17

注: 表中 ε_{pp} 、 σ_{pp} 、 $\varepsilon_{0.85p}$ 分别为未碳化混凝土峰值应变、峰值应力、极限应力; ε_{pc} 、 σ_{pc} 、 $\varepsilon_{0.85c}$ 分别为碳化混凝土峰值应变、峰值应力、极限应变; a 、 b 、 c 分别为混凝土碳化后峰值应变降低幅度、峰值应力提高幅度、极限应变降低幅度.

2.3.2 峰值应力

通过比较表 4 中三种强度等级混凝土试件的峰值应力可以看出: 每种强度等级混凝土试件碳化后其峰值应力较未碳化试件都有相应的增加, 但不同强度等级试件增加的幅度不一样. 这与刘小微^[10]从第二批试件中得出的混凝土随碳化深度增加其峰值应力增加的结论相符, 且增加的幅度也大致相同: 刘小微的第二批试件强度为 C30, 未碳化混凝土试件平均峰值应力为 34.153 MPa, 当平均碳化深度达到 24.13 mm 时 (即碳化面积达到 73.23%) 试件平均峰值应力为 42.88 MPa, 较未碳化试件增加 25.55%. 但刘小微并没有得出混凝土试件碳化后峰值应力增加的幅度与混凝土强度的关系. 从表 4 中可以看出, 本试验 C20 强度混凝土试件碳化后峰值应力增加 36.28%, C30 强度混凝土试件增加 25.01%, 而 C40 强度混凝土试件仅仅增加 11.66%, 可见碳化后峰值应力增加的幅度随着混凝土强度的增加而减小. 图 5 给出了由试验得出的在单调压荷载作用下混凝土碳化后峰值应力增加的幅度与混凝土强度的关系.

由于本试验只做了三种强度等级混凝土试件在单调压荷载作用下的应力-应变关系试验, 缺少

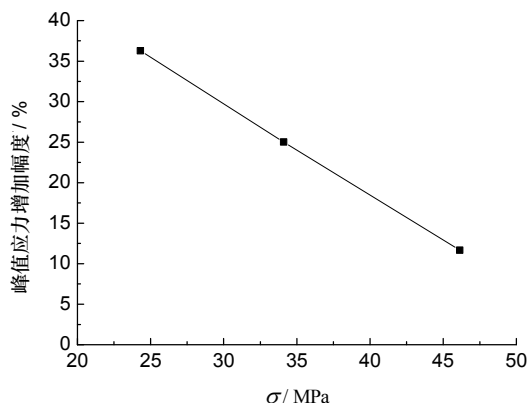


图 5 碳化后混凝土峰值应力增幅与混凝土强度的关系

Fig.5 The relationship between variation of peak stress and concrete strength after carbonation

3 结论

通过开展碳化及未碳化混凝土圆柱体试件在单调压荷载作用下的力学性能试验, 分别得出了碳化及未碳化混凝土圆柱体试件在单调压荷载作用下的破坏形态、应力-应变曲线, 通过研究分析得出以下主要结论:

(1) 混凝土碳化后脆性增加, 裂缝较未碳化试件发展的迅速, 加载后期试件表面有混凝土块脱落现象, 破坏现象较未碳化的严重; 无论是碳化或未

足够的试验数据, 以致无法准确地拟合出混凝土碳化后峰值应力增加的幅度与混凝土强度的数学表达式, 从图 5 可发现这种减小对于 C20 到 C40 强度之间的混凝土大致呈直线下降规律. 然而强度高于 C40 且强度低于 C20 的混凝土试件, 由于缺少试验数据无法得到其变化规律, 但可以推测出强度高于 C40 混凝土试件不可能继续按直线下降. 若继续按直线下降则 C60 或更高强度混凝土试件碳化后峰值应力增加幅度将为负值, 这不符合实际结果. 再高强度混凝土试件在水化过程中其内部也会出现孔隙, 即混凝土碳化后产生的固体碳酸钙也会填充其内部孔隙使得混凝土更致密, 从而增加混凝土的抗压强度, 只是强度越高增加的幅度越小而已.

2.3.3 极限应变

由表 4 中极限应变可以看出, 混凝土碳化后极限应变均减小, 且减小的幅度随混凝土强度增加而增加, 从 C20 强度的 11% 增加到 C40 强度的 30%. 将其增加幅度与混凝土强度的关系绘于图 6, 可看出这种增加模式是以曲线的形式增加的, 且曲线的斜率逐渐减小, 即当混凝土强度达到一定值时, 混凝土碳化后极限应变降低的幅度将保持在一个特定的值而不再随混凝土强度的增加而继续增加.

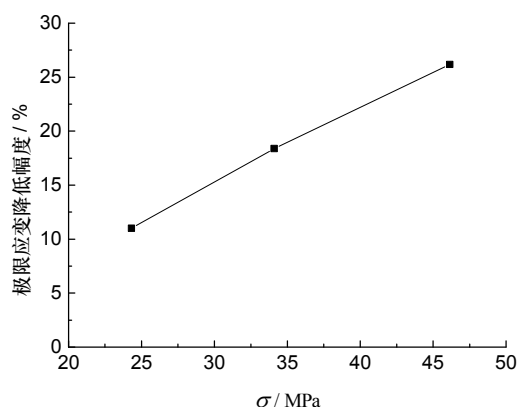


图 6 碳化后混凝土极限应变降幅与混凝土强度的关系

Fig.6 The relationship between variation of ultimate strain and concrete strength after carbonation

碳化, 混凝土试件在单调压荷载作用下的最后破坏主裂缝与荷载作用线的夹角为 $\theta = 0^\circ \sim 30^\circ$.

(2) 混凝土碳化后峰值应力增加, 增幅随着混凝土强度的增加而减小, 从 C20 强度混凝土的 40% 左右降到 C40 的 15% 左右.

(3) 混凝土碳化后峰值应变减小, 减小幅度在 10% 左右, 且其不随混凝土强度的增减而变化.

(4) 混凝土试件碳化后极限应变减小, 减小幅度随混凝土强度增加而增加, 从 C20 强度到 C40 强度混凝土试件极限应变减小幅度为 10%~30% 不等.

参考文献 References

- [1] 元成方, 牛获涛, 陈娜, 等. 碳化对混凝土微观结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(4): 687-707.
YUAN Chengfang, NIU Ditao, CHENG Na, et al. Influence of Carbonation on the Microstructure of Concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(4): 687-707.
- [2] 赵冰华, 费正岳, 赵宇, 等. 碳化对混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(6): 1641-1644.
ZHAO Binhua, FEI Zhengyue, ZHAO Yu, et al. Effect of carbonation on the performance of concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(6): 1641-1644.
- [3] CHI J M, HUANG Ran, YANG C C. Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method[J]. Journal of marine science and technology, 2002, 10(1): 14-20.
- [4] 李检保. 混凝土碳化及其碳化后力学性能试验与分析[D]. 上海: 同济大学, 1997.
LI Jianbao. Test and analysis of carbonation of concrete and its mechanical properties after carbonization[D]. Shanghai: Tongji University, 1997.
- [5] 范子彦. 碳化混凝土的抗压强度[D]. 上海: 同济大学, 1997.
FAN Ziyuan. The compressive strength of carbonated concrete[D]. Shanghai: Tongji University, 1997.
- [6] 朱伯龙, 肖建庄. 碳化混凝土的结构性能[J]. 工业建筑, 1998, 28(9): 41-44.
- ZHU Bolong, XIAO Jianzhuang. The structural behavior of carbonized concrete[J]. Industrial Construction, 1998, 28(9): 41-44.
- [7] XIAO J Jianzhuang, LI Jie, ZHU Bolong, et al. Experimental study on strength and ductility of carbonated concrete elements[J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(3): 187-192.
- [8] 姜英波, 徐亦冬. 碳化混凝土受压本构关系试验研究[J]. 新型建筑材料, 2007, 34(10): 27-28.
JIANG Yingbo, XU Yidong. Study on stress-strain curves under uniaxial compression of concrete after carbonation[J]. New Building Materials, 2007, 34(10): 27-28.
- [9] 耿欧, 袁广林. 碳化混凝土全应力-应变关系及梁受弯承载性能研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(1): 44-46.
GENG Ou, YUAN Guang-lin. Study on the stress strain relationship of carbonation concrete and the flexural performance of the carbonized reinforced concrete beam[J]. Industrial Construction, 2006, 36(1): 44-46.
- [10] 刘小微. 单调与重复荷载作用下碳化混凝土应力-应变关系试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
LIU Xiaowei. Experimental study on stress-strain relationship of concrete carbonization in uniaxial and repeated load[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.

(本文编辑 桂智刚)

(上接第164页)

- [9] 姜洪斌, 陈再现, 张家齐, 等. 预制钢筋混凝土剪力墙结构拟静力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 34-40.
JIANG Hongbin, CHEN Zaixian, ZHANG Jia-qi. Quasi-static test of precast reinforced concrete shear wall structure [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 34-40.
- [10] 钱稼茹, 彭媛媛, 张景明, 等. 竖向钢筋套筒浆锚连接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 1-6.
QIAN Jiaru, PENG Yuanyuan, ZHANG Jingming, et al. Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with vertical reinforcements spliced by grout sleeves[J]. Building Structure, 2011, 41(2): 1-6.
- [11] 孙巍巍, 孟少平, 蔡小宁. 后张无粘结预应力装配式短肢剪力墙拟静力试验研究[J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(3): 422-426.
SUN Weiwei, MENG Shaoping, CAI Xiaoning. Quasi static Test Research of Unbonded Post-tensioned Assembly Short-limb Shear Wall[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(3): 422-426.
- [12] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 133-140.
GUO Zhenhai. The principle of reinforced concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 133-140.
- [13] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50010-2010 Code for design of concrete structure[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010

(本文编辑 吴海西)