

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.10.023

高强混凝土框架结构中节点抗震性能

魏春明¹, 尹景耀¹, 赵星海², 赵强¹, 陈建华¹

(1. 东北电力大学 建筑工程学院, 132012 吉林 吉林; 2. 东北电力大学 能源与动力工程学院, 132012 吉林 吉林)

摘要: 为研究高强混凝土框架结构中节点的抗震性能, 对 10 根留有施工缝的高强混凝土框架结构中节点进行了低周反复抗震性能试验. 研究了轴压比、节点核心区混凝土的强度等级、柱中混凝土在梁中的延伸长度等对梁柱中节点抗震性能的影响, 对构件的破坏特征、承载能力、延性性能、滞回曲线进行了对比分析. 研究表明: 所有试验构件均为梁端受弯破坏; 柱中混凝土在梁中的延伸长度对滞回曲线的形态、屈服荷载和最大荷载都没有显著影响, 但是对节点的延性性能影响比较大. 根据试验结果和分析, 并考虑到实际施工因素, 取用 $1.5h$ 为柱中高强混凝土延伸到梁中的最佳延伸长度.

关键词: 高强混凝土; 中节点; 抗震性能

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)10-0124-05

Seismic behavior of interior joints of high-strength concrete frame structure

WEI Chunming¹, YIN Jingyao¹, ZHAO Xinghai², ZHAO Qiang¹, CHEN Jianhua¹

(1. School of Architectural and Civil Engineering, Northeast Dianli University, 132012 Jilin, Jilin, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Northeast Dianli University, 132012 Jilin, Jilin, China)

Abstract: To study the seismic behavior of interior joints of high-strength concrete frame structure, 10 interior joints with construction joints of high-strength concrete frame structure are carried out based on the low-cycle loadings test. The influences of the axial compression ratio, concrete strength grade of core area of interior joints, and the length of high-strength concrete in columns and joints extends to beams are studied. Failure characteristics, bearing capacity, displacement ductility and hysteretic curves are also analyzed deeply. Test results show that all of the interior joints are damaged at the end of beam by bending. The lengths of high-strength concrete in columns and joints extension to beams have little effect on yield load, peak load and hysteretic curves as well. While the length of high-strength concrete in columns and joints extensions to beams have significant effect on displacement ductility. On the basis of the test results analysis and construction factors, it is shown that $1.5h$ is the optimal length of high-strength concrete in columns and joints extension to beams.

Keywords: high-strength concrete; interior joints; seismic behavior

随着中国高层、超高层建筑、大跨度桥梁等工程建设项目的增多, C60 级以上高强混凝土的用量不断增加. 目前, 国内外学者对高强、超高强混凝土节点的研究主要集中在梁柱节点混凝土强度等级相同^[1-5], 或者节点核心区采用梁混凝土浇筑的情况^[6-7], 忽略了当梁、柱混凝土强度等级相差过大时, 必须采用柱混凝土浇筑节点核心区的情况. 由于梁柱节点不同混凝土交汇处, 也是留设施工缝^[8-9]

的地方, 已有试验研究并没有将节点核心区混凝土的浇筑, 同施工缝的留设有效结合起来, 也没有考虑柱中的高强混凝土在梁中的延伸长度(即柱和节点区的高强混凝土在梁中的延伸浇筑长度, 以下简称延伸长度)等问题. 因此, 本文以混凝土强度等级不同的高强混凝土框架结构中节点为研究对象, 采用低周反复抗震性能试验方法, 研究梁柱节点核心区混凝土强度等级、施工缝留设位置、延伸长度等对中节点抗震性能的影响, 为高强混凝土框架结构节点的设计和工程施工提供借鉴.

1 试验构件设计和制作

试验采用“十字形”试件, 为有效保证试件的浇

收稿日期: 2014-07-18.

基金项目: 国家自然科学基金(51478094); 吉林省教育厅“十二五”科学技术研究资助(2013109).

作者简介: 魏春明(1977—), 女, 博士, 副教授

通信作者: 魏春明, chunming@mail.nedu.edu.cn.

筑质量和垂直度, 全部试件均采用钢模板立模浇筑。试验共包括 10 根中节点试件, 试验构件概况如表 1 所示, 试件编号中, J 和 G 分别代表柱混凝土设计强度为 C80 和 C100; Z1、Z2、Z3 分别代表设计轴压比为 0.3、0.5、0.7; Y1、Y2、Y3 分别代表延伸长度为 0.5h、1.0h、1.5h, 其中 h 为梁的高度。试件 JZ1 的节点区混凝土强度等级与梁相同, 浇筑时分别在梁上和梁下留设 2 道施工缝; 其余试件的节点区混凝土强度等级与柱相同, 浇筑时只在梁上部留设 1 道施工缝; 施工缝的浇筑时间间隔为 48 h。试件的尺寸和配筋如图 1 所示。梁和柱中的纵向受力钢筋采用

HRB400 级, 箍筋采用 HPB235 级。

表 1 试验构件概况

试件编号	梁-柱砼设计强度等级	节点砼设计强度等级	设计轴压比	延伸长度/mm	施工缝
JZ1Y1	C60-C80	C80	0.3	0.5h	1 道
JZ1Y2	C60-C80	C80	0.3	1.0h	1 道
JZ1Y3	C60-C80	C80	0.3	1.5h	1 道
JZ1	C70-C80	C70	0.3	-	2 道
GZ1Y1	C70-C100	C100	0.3	0.5h	1 道
JZ2Y1	C60-C80	C80	0.5	0.5h	1 道
JZ2Y2	C60-C80	C80	0.5	1.0h	1 道
JZ2Y3	C60-C80	C80	0.5	1.5h	1 道
JZ3Y1	C60-C80	C80	0.7	0.5h	1 道
GZ2Y1	C70-C100	C100	0.5	0.5h	1 道

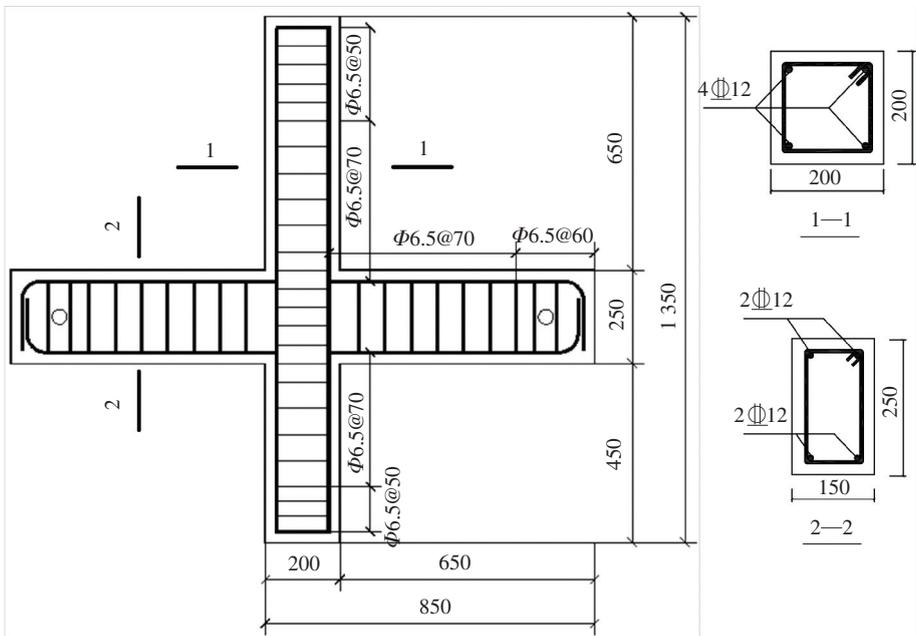


图 1 构件尺寸和配筋 (mm)

2 试验

本次试验采用低周反复试验方法研究中节点的抗震性能, 试验采用柱端加载的方式^[10], 加载制度采用力-位移混合控制加载, 在开始加载到构件屈服前采用力控制, 每个力控制点循环 1 次; 构件屈服后, 改用屈服位移的整数倍作为再载控制点, 每一位移级差下循环 3 次。

试验在东北电力大学结构试验室进行, 试验加载采用美国 MTS 公司生产的 MTS 伺服加载系统, 数据采集采用 MTS 动态数据采集系统。试验自行设计了加载装置, 竖向加载装置由反力架和 1 000 kN 数控电动液压伺服作动器组成, 水平加载装置由反力墙和 500 kN 数控电动液压伺服作动器组成。试件垂直安放, 为了保证柱的上、下两端为理想的球铰, 在柱端设置了带有滚动轴的垫板, 垫板上部为带有球铰的油压千斤顶, 柱下端为固定铰支座; 梁端由刚性连杆与地面铰支座相连, 保证梁端可以水平移动但

不能垂直移动。试验加载装置示意如图 2 所示。

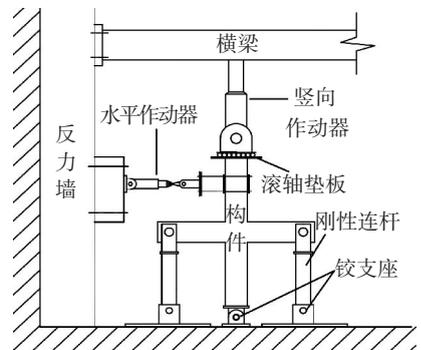


图 2 试验加载装置

3 结果与分析

3.1 试验破坏现象

构件 JZ1 的破坏图片如图 3 所示。构件初始裂缝出现在梁端第 1 道箍筋处, 正、反向水平开裂荷载均为 15 kN, 构件开裂后, 裂缝扩展速度较快, 裂缝区域主要集中在梁端部范围内; 当水平荷载达到 45 kN

时,在节点核心区出现了少量的剪切斜裂缝,但直到构件破坏,节点都没有出现主裂缝.从破坏形态上看,构件在梁端形成塑性铰,为梁端受弯破坏,塑性铰发展充分;在节点和下柱相交的施工缝处出现了水平裂缝和混凝土剥落的现象.

构件 JZ1Y1 的破坏图片如图 4 所示,正、反向水平开裂荷载分别为 13.4、14.0 kN;裂缝扩展速度比较快,裂缝区域集中在梁高 $1.0h$ 范围内;荷载达到 30 kN



图 3 JZ1 破坏图片



图 4 JZ1Y1 破坏图片



图 5 JZ1Y3 破坏图片

构件 JZ2Y1 的破坏图片如图 6 所示,正、反向水平开裂荷载均为 15 kN,构件最后在梁端形成塑性铰,混凝土剥落比较严重.构件 JZ2Y2 破坏图片如图 7 所示,正、反向水平开裂荷载分别为 25、15 kN;构件破坏主裂缝出现在距离梁端第 1 道箍筋处,梁根部没有出现裂缝;构件最后在梁端形成塑性铰,混凝土剥落比较严重.构件 JZ2Y3 的破坏图片如图 8

时,出现贯通梁高的裂缝,构件破坏的主裂缝靠近柱的边缘,混凝土剥落严重;构件最后在梁端形成塑性铰.构件 JZ1Y2 的破坏过程和破坏现象与构件 JZ1Y1 类似,梁端的裂缝范围大于延伸长度为 $0.5h$ 的 JZ1Y1 构件.构件 JZ1Y3 的破坏图片如图 5 所示,正、反向水平开裂荷载分别为 17.8、17.9 kN,梁端的裂缝范围也大于延伸长度为 $0.5h$ 的 JZ1Y1 构件,构件破坏时在梁端和梁根部形成多条主裂缝.

所示,梁根部出现了破坏主裂缝,正、反向水平开裂荷载分别为 20、15 kN.构件 JZ3Y1 的破坏特征与构件 JZ1Y1 和 JZ2Y1 类似,破坏图片如图 9 所示.

构件 GZ1Y1 和 GZ2Y1 的破坏形态如图 10、11 所示,破坏主裂缝出现在梁的根部,梁中裂缝很少,没有在梁端形成有效的塑性铰,而是依靠钢筋在节点和梁端的滑移来消耗地震能量,构件的耗能能力很差.



图 6 JZ2Y1 破坏图片



图 7 JZ2Y2 破坏图片



图 8 JZ2Y3 破坏图片



图 9 JZ3Y1 破坏图片



图 10 GZ1Y1 破坏图片



图 11 GZ2Y1 破坏图片

3.2 试验破坏现象分析

从裂缝开展情况来看,随着延伸长度的增加,梁

中出现裂缝的范围也增大.延伸长度为 $1.5h$ 的构件 JZ1Y3 和 JZ2Y3,在加载过程中,梁根部均出现了破

坏主裂缝,这是因为,高强混凝土在梁中的延伸长度较长,充分保证了钢筋的有效粘结,梁端局部锚固粘结强度较大,使得梁柱交接的部分成为了薄弱部位.从开裂荷载上看,延伸长度为 $0.5h$ 构件的开裂荷载相对较小,延伸长度为 $1.0h$ 、 $1.5h$ 构件的开裂荷载相对较大;开裂荷载随着轴压比的增加而增大.

从构件的破坏形态上可以看出,与延伸长度为 $1.0h$ 和 $1.5h$ 的构件相比较,延伸长度为 $0.5h$ 的构件破坏更严重,塑性铰长度也最小(约为 $0.5h$),这可能是由于梁、柱不同强度等级混凝土在梁端 $0.5h$ 处相交导致的.所有节点区混凝土强度等级与柱相同的构件,节点核心区均未产生明显的破坏,这一方面是由于试验构件均采用了“强节点,弱构件”的设计原则,对节点核心区的箍筋做了加密处理;另一方面是由于在节点区采用了强度等级较高的柱混凝土进行浇筑,有效保证了节点核心区的承载能力.

从试验现象上可以看出,当梁、柱混凝土强度等级相差较大时,节点核心区采用强度等级较高的柱混凝土进行浇筑,可以使节点具有更好的抵抗低周反复荷载的能力.但是,随着梁柱混凝土强度的提

高,节点承载力提高,钢筋在节点处的滑移量增大,节点的耗能能力降低.

3.3 滞回曲线分析

构件的滞回曲线如图 12 所示,构件 JZ1 的滞回曲线出现了捏缩现象,表明梁中纵向受力钢筋存在一定的滑移量.构件开裂后,随着水平荷载的增大,构件刚度退化明显,进入屈服阶段后,梁中纵向受力钢筋有较大的滑移,试验构件的卸载刚度和再加载刚度随着位移幅值的增加而快速退化.其余具有不同延伸长度构件的滞回曲线形状都比较饱满,反映出节点构件的塑性变形能力比较强,高强混凝土节点能够较好地吸收低周反复荷载的能量.延伸长度对滞回曲线的形状没有显著影响.由构件 GZ1Y1 和 GZ2Y1 的滞回曲线可以看出:滞回曲线的形状不饱满,呈倒 S 形,说明梁筋在节点内产生了严重的滑移,滞回曲线在经过一段距离的滑移段后,承载能力才有上升,曲线的下降段也很陡峭,说明节点构件的耗能能力较差.在低周反复荷载作用下,随着梁柱混凝土强度的增大,节点承载力提高,梁筋的黏结退化明显加重,这也与节点构件采用 HRB400 级高强钢筋有一定的关系^[11].

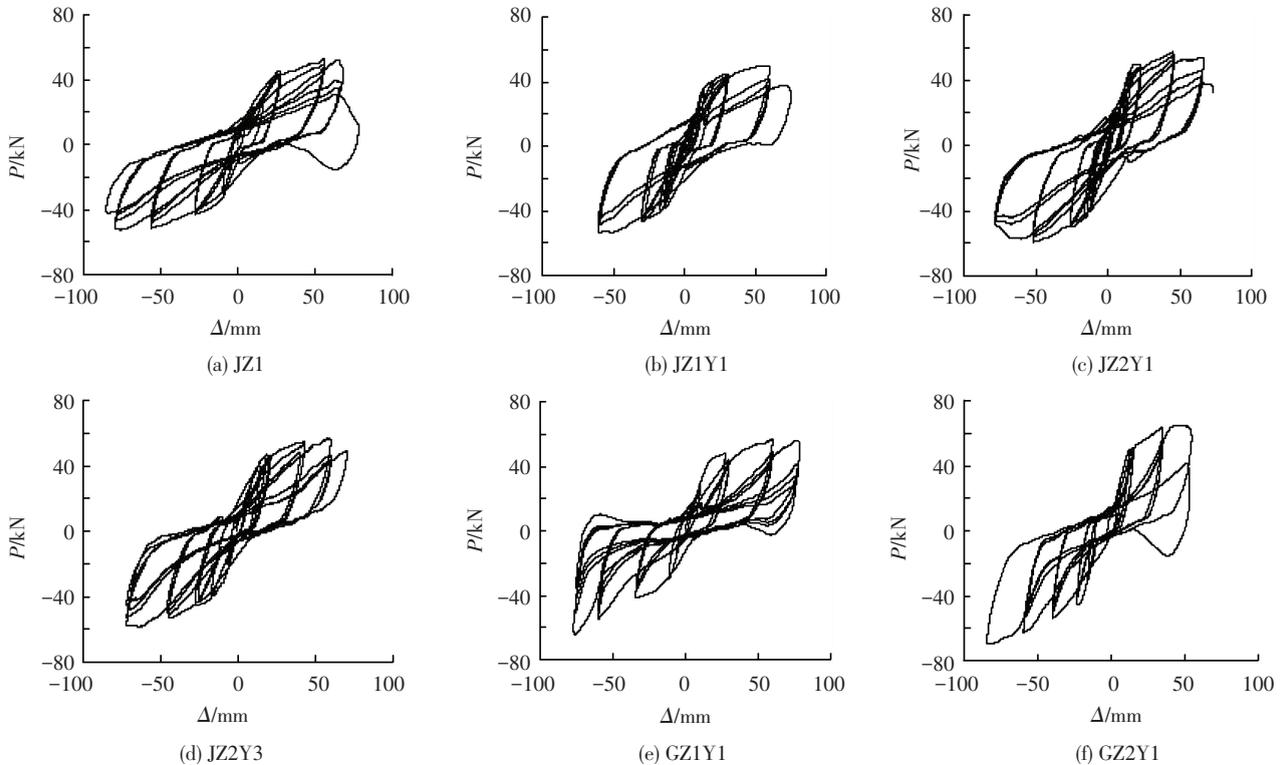


图 12 构件的滞回曲线

3.4 承载力和延性性能分析

0.3 轴压比下构件的承载能力和延性系数如表 2 所示,延性系数取用构件在最大水平荷载下所对应的水平位移(即最大位移)与屈服位移的比值,屈服位移由图解法确定.由表 2 可见,构件 GZ1Y1 的延性系数为 2.32,构件 JZ1Y1 的延性系数为 2.58,即随着梁、柱

混凝土强度等级的增加,构件的延性系数降低.延伸长度对构件的屈服荷载和最大荷载没有显著影响.延伸长度为 $0.5h$ 和 $1.5h$ 构件的延性性能都比较好,延伸长度为 $1.0h$ 的构件 JZ1Y2 的延性系数最小.

0.5 和 0.7 轴压比下构件的试验结果如表 3 所示,当延伸长度为 $0.5h$ 时,构件 GZ2Y1 的屈服荷载

和最大荷载值最大,与轴压比为 0.3 的中节点构件类似,当延伸长度为 1.0h 时,节点构件的延性性能最差,延伸长度为 0.5h 和 1.5h 构件的延性性能都较好.构件 GZ2Y1 的延性系数为 2.49,构件 JZ2Y1 的延性系数为 2.74,即随着梁、柱混凝土强度等级的增加,构件的延性性能降低.

表 2 0.3 轴压比下构件的试验结果

试件编号	延伸长度/mm	梁柱混凝土实测强度/MPa	屈服荷载/kN	最大荷载/kN	延性系数
JZ1Y1	0.5h	62 / 82	42.17	51.64	2.58
JZ1Y2	1.0h	62 / 82	41.85	50.52	1.98
JZ1Y3	1.5h	62 / 82	41.98	50.22	2.39
JZ1	-	70 / 82	42.09	52.90	2.55
GZ1Y1	0.5h	75 / 95	46.33	60.46	2.32

表 3 0.5 和 0.7 轴压比下构件的试验结果

试件编号	延伸长度/mm	梁柱混凝土实测强度/MPa	屈服荷载/kN	最大荷载/kN	延性系数
JZ2Y1	0.5h	62 / 82	47.13	58.34	2.74
JZ2Y2	1.0h	62 / 82	46.08	56.54	2.33
JZ2Y3	1.5h	62 / 82	46.76	57.62	2.54
JZ3Y1	0.5h	62 / 82	52.46	62.77	2.82
GZ2Y1	0.5h	75 / 95	52.88	67.42	2.49

3.5 柱中高强混凝土延伸到梁中的最佳延伸长度

从中节点构件的试验结果可以看出,在 0.3 和 0.5 轴压比下,延伸长度 0.5h 的构件延性最好,延伸长度 1.5h 的构件延性稍差,延伸长度 1.0h 的构件延性最小.延伸长度为 1.0h 的构件延性系数最小,可能是由于梁塑性铰的有效区段长度约为一个梁高的长度 1.0h,而梁中高、低强混凝土相接的部位,正好是一个梁高的长度 1.0h,由于在此处混凝土存在较大的强度差,导致混凝土不能够有效传递剪力,从而引起延性系数的降低.另一方面,对于中节点而言,虽然延伸长度 0.5h 的构件延性最好,但是,由于 0.5h 距离节点的位置比较近,在浇筑混凝土的过程中,如果处理不好,在撤出封堵模板时,容易导致梁中混凝土向节点流淌,不能有效保证节点的浇筑强度;同时,从试验现象也能够看出,延伸长度为 0.5h 的构件,达到极限强度时混凝土破坏也最严重.

因此,综合本次试验中节点试件的研究结果,认为取用延伸长度为 1.5h 作为柱中高强混凝土延伸到梁中的最佳延伸长度比较合理.因此建议柱中高强混凝土在梁中的延伸长度优选 1.5h.以上结论,对于梁高比较大的建筑,会出现延伸长度过大的情况,由于试验样本有限,因此该结论不适用于深梁和楼板上布置有大型设备的工业建筑梁.

4 结 论

1) 从试验现象上看,试验构件的破坏均为梁端

受弯破坏.当梁、柱混凝土强度等级相差较大时,节点核心区采用强度等级较高的柱混凝土进行浇筑,可以使节点具有更好的抵抗低周反复荷载的能力.

2) 随着梁柱混凝土强度的增大,节点承载力提高,梁筋的黏结退化明显加重,耗能能力变差,构件的滞回曲线捏缩效应明显.

3) 随着延伸长度的增加,梁中出现裂缝的范围也增大.延伸长度对滞回曲线、屈服荷载和最大荷载都没有显著影响.

4) 延伸长度为 0.5h 的构件延性系数最大,延伸长度为 1.0h 的构件延性系数最小,延伸长度为 1.5h 的构件延性系数介于两者之间.

参考文献

- [1] 傅剑平,张川,陈滔,等.钢筋混凝土抗震框架节点受力机理及轴压比影响的试验研究[J].建筑结构学报,2006,27(3):67-77.
- [2] ATTAA E,TAHER S E,KHALIL A A, et al. Behaviour of reinforced high-strength concrete beam-column joint [J]. Part 1: experimental investigation. Structural Concrete, 2003,4(4):175-183,9.
- [3] ATTAA E,TAHER S E,KHALIL A A, et al. Behaviour of reinforced high-strength concrete beam-column joint [J]. Part II: numerical simulation. Structural Concrete, 2004,5(3):101-112,12.
- [4] YAPS L, LI B. Experimental investigation of reinforced concrete exterior beam-column subassemblages for progressive collapse [J]. ACI Structural Journal, 2011,108(5):542-552.
- [5] CORINALDESI V, MORICONI G. Behavior of beam-column joints made of sustainable concrete under cyclic loading [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006,18(5):650-658.
- [6] 刘建伟,李英民,杨治洪,等.空间 RC 框架夹心节点与传统节点抗震性能对比试验[J].工业建筑,2009,39(2):88-93.
- [7] 段建中,刘立兵,方高倪,等.不同强度混凝土梁柱节点承载性能研究.合肥工业大学学报,2004,27(4):396-400.
- [8] WEI Chunming, SU Hui, ZHAO Qiang, et al. Bonding Mechanism of Horizontal Construction Joints [C]//Advances in Civil Engineering and Architecture Innovation. Xi'an:Trans. Tech. Publications, 2011:1264-1267.
- [9] 魏春明.现浇钢筋混凝土框架结构施工缝抗震性能[D].大连:大连理工大学,2006.
- [10] 中华人民共和国行业标准.JGJ101-96 建筑抗震试验方法规程[S].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [11] 中华人民共和国国家标准.GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

(编辑 张 红)