箍筋锈蚀混凝土棱柱体试件轴心受压试验研究*

李 强， 牛荻涛， 刘 磊， 王庆霖
(西安建筑科技大学土木工程学院，西安 710055)

[摘要] 通过电化学方法对方形箍筋约束混凝土棱柱体试件内箍筋进行了实验室加速腐蚀试验，得到了箍筋锈蚀程度不同的锈蚀试件，并进一步开展了箍筋锈蚀混凝土棱柱体试件的轴压试验，研究了箍筋锈蚀对混凝土棱柱体试件破坏形态的影响，分析了箍筋锈蚀造成的混凝土损伤。试验结果表明：箍筋在角部锈蚀严重，混凝土保护层锈胀裂缝在角部沿竖向发展，且随着锈蚀程度的增加，裂缝宽度加大；锈蚀产物在混凝土保护层与核心区混凝土界面上的堆积，降低了混凝土保护层对构件承载力的贡献；箍筋锈蚀程度对试件的裂缝发展速度、破坏形态均有影响，箍筋锈蚀越严重，裂缝发展越迅速，核心混凝土的破坏程度愈大，斜向破坏面愈明显，混凝土试件的破坏形式从延性破坏向脆性破坏转变。

[关键词] 箍筋锈蚀；约束混凝土；轴心受压；混凝土损伤
中图分类号：TU375.3 文献标识码：A 文章编号：1002-848X(2013)01-0065-04

Experimental study on reinforced concrete prism specimens confined by corroded stirrups

Li Qiang, Niu Ditao, Liu Lei, Wang Qinglin
(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The corroded reinforced concrete prism specimens confined by the square stirrups, which were subjected to accelerated corrosion, were obtained. The axial compressive test of the corroded reinforced concrete prism specimens and contrasted uncorroded reinforced concrete prism specimens was carried further. The effect of corrosion of stirrups on the deterioration form of reinforced concrete prism specimens and the concrete damage were analyzed. The results of axial compressive test show that, the corners of stirrups are corroded very seriously and the cracks of the protective layer are developed along the vertical direction at the corner of the reinforced concrete prism specimens, cracks widthes increase with the increase of corrosion degree. The "piling up" of corrosion products between the concrete cover and the core concrete zone reduces its contribution to the capacity of reinforced concrete prism specimens. The corrosion rate of stirrups has influenced directly on the development speed of cracks and the damage mode. The growth of cracks speeds up, the damage of the core concrete is more serious, the destroy incline section is more obvious and the deterioration form of the samples shift from ductile failure to the brittle failure, as the amount of stirrups corrosion grows.

Keywords: stirrups corrosion; confined concrete; axial compression; concrete damage

0 引言

在混凝土构件中，箍筋不仅起着钢筋骨架的作用，而且能够约束构件的横向变形，抵抗沿斜剪面的滑移，从而明显改善混凝土构件的抗震性能。由于箍筋直径小且其保护层厚度小等不利条件，混凝土碳化至箍筋表面时，箍筋开始腐蚀，且最终腐蚀程度往往较纵筋严重[1]；作为箍筋的小直径光圆钢筋相对于大直径的钢筋对锈蚀更具敏感性，在轻微锈蚀情况下其力学性能降低明显[2]，锈蚀率超过 10% 以后，其应力-应变关系曲线中的屈服平台基本消失[3]。箍筋锈蚀后的截面减小和力学性能变化，使得箍筋对核心区混凝土的约束能力降低，混凝土构件的破坏形式从延性向脆性转变。由此可看出，箍筋锈蚀对钢筋混凝土构件力学性能的影响显著，其带来的后果比纵筋锈蚀更加严重。因此，研究钢筋锈蚀后构件的力学性能退化规律，除考虑纵向钢筋锈蚀的影响外，还必须研究箍筋锈蚀对混凝土构件的影响，从而建立科学合理的锈蚀钢筋混凝土构件性能退化模型。研究成果不仅可以直接应用于既有钢筋混凝土结构的评估与加固改造设计，而且对新建结构的设计亦有一定的参考价值。

文[4]~[8]对纵向钢筋锈蚀后混凝土柱的力学性能进行了研究，虽然试件破坏后，发现试件内箍筋锈蚀严重，尤其是箍筋与纵筋交接部位的箍筋甚至锈断，但在研究中未能对箍筋锈蚀的影响进行深入分析，所建立的承载力退化模型也未能考虑箍筋锈蚀的影响。目前，国内外对不同箍筋锈蚀程度情况下混凝土柱性能退化的研究尚属空白，迫切需要对箍筋锈蚀后钢筋混凝土受压构件力学性能退化进

* 国家杰出青年科学基金项目(50725824)，陕西省"13115"科技创新工程项目(2010ZDKG-55)。
作者简介：李强，博士，Email: liguanqiang2005@126.com。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

行研究。本文对 12 根箍筋锈蚀钢筋混凝土棱柱体试件和 3 根无锈蚀钢筋混凝土棱柱体对比试件进行轴心受压试验，深入分析箍筋锈蚀程度对钢筋混凝土棱柱体试件破坏过程的影响，研究受压构件的力学性能退化规律。

1 试验准备

1.1 试件制作

本试验共制作混凝土棱柱体试件 15 个，分为 5 组，每组 3 个，其中通电锈蚀试件 12 个，无锈蚀对比试件 3 个。通电锈蚀试件组按照拟达到的锈蚀量（箍筋平均重量损失率分别为 10%，20%，30%，40%）分别编号为 CA-1，CA-2，CA-3，CA-4，无锈蚀对比试件组的编号为 CA-0。为了研究箍筋锈蚀对约束混凝土应力-应变关系的影响，在试件设计时，首先对箍筋和主筋采取绝缘措施，然后用一根直径为 4mm 的铁丝将中间 5 根箍筋连接。所采用钢筋的力学性能如表 1 所示。

各试件混凝土强度设计等级均为 C25，水泥采用 P. O32. 5 级水泥，搅拌水为自来水，粗骨料为天然碎石，最大粒径尺寸为 15mm，试验用河砂为天然中砂。

钢筋力学性能 表 1

钢种	箍筋直径 /mm	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	伸长率 /%
Ⅰ级光圆钢筋	6	410	605	22
Ⅱ级螺纹钢筋	12	450	680	29

混凝土采用搅拌机拌制。为保证试件混凝土材性的均匀性，混凝土沿竖向浇筑，并于振动台上振捣密实；混凝土保护层厚度通过上、下盖板（上盖板为半盖板）上预先设定的定位孔定位纵向钢筋来保证。在试件制作的同时预留标准混凝土立方体试块，测试养护 28d 后和轴心受压试验同期（270d）的混凝土抗压强度。混凝土配合比及混凝土立方体抗压强度见表 2。试件尺寸和钢筋布置见图 1。

混凝土配合比及强度 表 2

水泥 /kg/m³	水 /kg/m³	天然中砂 /kg/m³	碎石 /kg/m³	无水氯化钠 /kg/m³	28d 强度 /MPa	270d 强度 /MPa
385	185	690	1 170	3. 85	33. 5	51. 83

1.2 混凝土棱柱体试件箍筋加速腐蚀试验

采用外加直流电对钢筋混凝土棱柱体试件箍筋进行加速腐蚀，快速锈蚀试验装置如图 2 所示。试验电源采用 2 台双通道可调式直流稳压稳流电源，可调电压范围为 0 ~ 30V，可调电流范围为 0 ~ 2A，两台直流电源均为双通道，可为两个回路提供电流。

许多学者采用电化学加速腐蚀方法加速混凝土

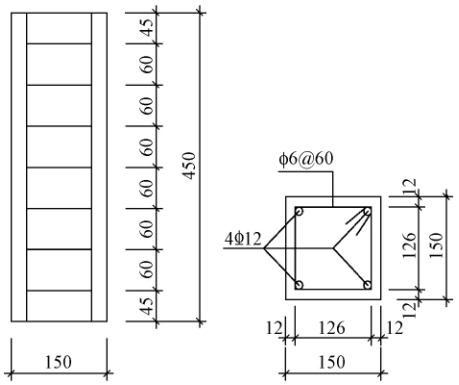


图 1 试件尺寸及配筋图

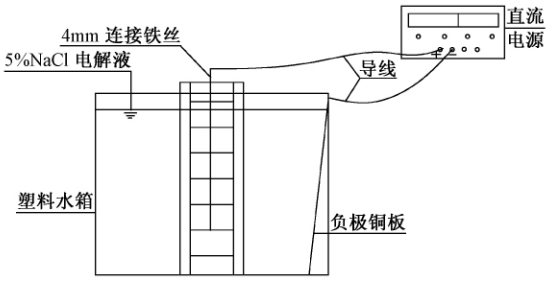


图 2 快速锈蚀试验装置

试件中钢筋的锈蚀，采用的电流密度大小各不相同，从 0. 045 ~ 3mA/cm² 不等，结果发现，相同锈蚀率下，电流密度愈大，锈蚀产物产生愈快，混凝土保护层锈胀裂缝出现得愈早。钢筋在混凝土中自然腐蚀的电流密度仅在 0. 05 ~ 0. 1mA/cm² 之间[9]，因此所选用的锈蚀电流密度不能过大。

文[10]以电流密度 0. 1 ~ 0. 5mA/cm² 在同条件下进行加速腐蚀试验，试验结果表明，实测锈蚀率与理论锈蚀率误差均在 5% 以内，电流密度的大小对钢筋锈蚀率无显著影响；文[11]在进行箍筋锈蚀梁性能试验时，选用的电流密度为 0. 6mA/cm²，结果发现，电流密度值为 0. 6mA/cm² 在保证箍筋快速锈蚀同时，其锈蚀产物与实际工程中钢筋锈蚀产物类似。

因此，为真实地模拟混凝土构件内箍筋的锈蚀，本锈蚀试验电流密度选为 0. 2 ~ 0. 5mA/cm²。各组试件的通电锈蚀方案见表 3。

通电锈蚀方案 表 3

试件组号	电流密度 /mA/cm²	通电时间 /d	试件 /个
CA-1	0. 5	30	3
	0. 2	30	
CA-2	0. 5	30	3
	0. 2	40	
CA-3	0. 5	30	3
	0. 2	50	
CA-4	0. 5	30	3
	0. 2	50	
	0. 4	10	

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.3 试件端部处理

尽管通电前对试件下表面采用环氧树脂进行了密封,但经过长时间 NaCl 溶液浸泡,试件底部混凝土仍出现了不同程度的损伤,个别试件底部混凝土局部剥落;此外,为防止轴压试验过程中试件端部提前破坏,在受压试验之前,首先对试件底部混凝土采用环氧砂浆进行修复,然后对试件上下端部各 60mm 范围内混凝土表面打磨,并粘贴 60mm 宽环向碳纤维布两层。

1.4 锈蚀试件表观损伤形态

在各组试件通电锈蚀早期,主要表现为褐绿色液态锈蚀产物透过混凝土保护层的微细孔渗出并在试件表面积聚;随着通电时间的延长,渗出的锈蚀产物逐渐增多,部分形成锈蚀片层堆积于混凝土试件表面,部分进入 NaCl 电解液并在水箱底部沉积,锈蚀产物颜色以暗绿色为主。

CA-1 组试件在整个锈蚀过程中仅表现为液态锈蚀产物的溢出,未出现锈胀裂缝;CA-2,CA-3,CA-4组试件在通电 70d 左右,较多混凝土试件中间部位的某一个或两个角部开始出现沿试件竖直方向的锈胀微裂缝,随着通电时间的延长,此锈胀裂缝自试件中部向两端部扩展,裂缝形态基本表现为中间部位宽、靠近端部窄;CA-4 组试件混凝土保护层开裂最为严重,裂缝宽度约为 4.0mm。锈蚀后混凝土构件表观损伤照片如图 3 所示。



(a) CA-1　(b) CA-2　(c) CA-3　(d) CA-4

图 3　加速试验完成时锈蚀表观损伤照片

2　箍筋锈蚀棱柱体试件轴心受压试验

2.1 试验设备及加载方案

本试验加载装置选用 YAW-5000F 微机控制液压伺服长柱压力试验机,见图 4。采用等位移速度单调加载方式,位移速度为 0.3mm/min。试验数据采集方法:荷载和竖向位移由与试验机连接的计算机自动采集,每 0.5s 自动采集一次。

2.2 箍筋锈蚀混凝土棱柱体试件的轴压破坏形态

由于受压试件包括箍筋未锈蚀试件和箍筋锈蚀试件,且箍筋锈蚀试件的箍筋锈蚀程度不同,从而导致各类试件的裂缝发展过程存在差异。



图 4　加载设备

箍筋未锈蚀试件的破坏过程经历了内部微裂缝产生、裂缝发展与贯通、保护层剥离脱落、破坏斜面形成直至最后受压破坏;当荷载达到峰值的 80% 左右时,试件表面开始出现裂缝,且裂缝发展缓慢;但当荷载超过峰值后,试件表面的裂缝迅速发展,混凝土保护层片状剥离后脱落。最终的破坏表现为混凝土保护层斜向开裂、剥离脱落,核心区混凝土未发生明显的破坏。

CA-1 组试件的箍筋锈蚀率较小(箍筋平均重量损失率为 14.0%),混凝土保护层未发生锈胀开裂,因此,其破坏过程与箍筋未锈蚀试件基本相同,但由于液态锈蚀产物将箍筋附近混凝土的微细孔填堵,使得其破坏过程所经历的时间比未锈蚀试件相对较长,裂缝发展速率相对较慢。

箍筋锈蚀严重试件的破坏过程经历了锈胀裂缝的弥合、原有锈胀裂缝发展并伴随新裂缝产生、裂缝贯通、保护层剥离脱落、破坏斜面形成直至最后试件受压破坏几个阶段。CA-2,CA-3,CA-4 组试件的箍筋锈蚀率相对较大(箍筋平均重量损失率分别为 20.79%,25.09%,33.25%),在加速腐蚀试验过程中,试件在保护层表面以及保护层与核心混凝土结合面处已经存在锈胀裂缝或间隙,在受压初始阶段,压应力发展稍慢,而竖向位移发展相对较快,说明试件原锈胀微裂缝弥合;但当荷载达到峰值的 60% 后,试件原有锈胀裂缝开始发展,并且箍筋锈蚀越严重,其裂缝开始发展的时间越早,且裂缝发展的速度越快,裂缝发展的同时试件角部出现新的竖向裂缝,混凝土保护层与核心混凝土结合面出现剥离;超过峰值荷载后,新、老裂缝迅速发展并贯通,继而保护层脱落,破坏面形成,然后箍筋在角部断裂,纵筋压曲,继而试件破坏。

从试验现象可以得出以下结论:试验过程中发现,在受压的整个过程中,新裂缝不断产生的同时原有锈蚀裂缝缓慢、持续发展,试件最后的受压破坏斜面基本是在原有锈胀裂缝的基础上发展形成的;试件的破坏特征也随着箍筋锈蚀程度不同而发生改变,随着箍筋锈蚀量的增加,核心区混凝土的破坏程

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



图 5 试件破坏形态照片



图 6 锈蚀严重试件锈蚀产物的堆积

度逐渐增大，斜向破坏面越来越明显；随着箍筋锈蚀量的增加，超过峰值荷载后的破坏过程所经历的时间逐渐缩短，即试件的延性越来越差，从延性破坏向脆性破坏转变。

图 5 为各组试件的典型破坏照片。从箍筋锈蚀形态可以看出，箍筋总体锈蚀不均匀，各转角部位因混凝土密实度差、氯离子双向渗透而锈蚀严重，各侧边直线段锈蚀稍轻且基本呈均匀锈蚀；从破坏形态可以看出，箍筋锈蚀率愈大，核心混凝土的破坏程度愈大，斜向破坏面愈明显。

试验加载过程中，当锈蚀箍筋被拉断时，荷载将出现明显下降，但试件仍具有一定的承载力。由于核心混凝土的横向膨胀，试件中间区段的破坏面两侧的混凝土有着相对的运动使锈蚀箍筋达到了极限应变。此外，由于箍筋在转角部位锈蚀严重，并且箍筋早期制作时的弯折加工使其在该部位相对薄弱，大部分锈蚀箍筋的拉断发生在其转角处。

2.3 箍筋锈蚀造成的混凝土损伤分析

在加速腐蚀试验过程中所产生的锈蚀产物氧化不充分，其体积膨胀率一般为 1.1 ~ 1.8，而自然环境下氧化充分的锈蚀产物体积膨胀率一般为 2.5 ~ 4[12]。因此，相对大气环境中混凝土构件的自然腐蚀，本试验加速腐蚀试验完成后，混凝土保护层仅在试件角部产生裂缝，且裂缝宽度一般较小。

在轴压试验过程中发现，锈蚀轻微试件的混凝土保护层裂缝的发展、脱落过程与未锈蚀构件基本一致，但锈蚀严重试件的混凝土保护层与核心区混凝土之间的界面上附着大量的红色锈蚀产物，由于锈蚀产物在截面上分布面积较大，并且形成锈蚀产物的“堆积”状态(图 6)，造成了混凝土保护层与核心区混凝土的剥离，部分或完全丧失粘结性能，致使试件承受荷载之后，混凝土保护层的剥离脱落提前，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。

3 结论

(1) 箍筋在加速腐蚀混凝土构件中发生严重的不均匀锈蚀，在转角部位附近锈蚀严重，侧边直线段部分锈蚀相对较轻且基本呈均匀锈蚀，与实际结构箍筋锈蚀状况基本一致；箍筋在转角部位的严重锈蚀导致试件角部产生锈胀裂缝，且裂缝宽度随着通电时间的延长而增大；相对自然环境腐蚀构件，加速腐蚀试件表面锈胀裂缝一般较小。

(2) 不同箍筋锈蚀程度试件的裂缝发展过程、破坏形态均存在差异，箍筋锈蚀越严重，裂缝发展越迅速，核心混凝土的破坏程度愈大，斜向破坏面愈明

(下转第 80 页)

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(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.

(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.

[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.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net