

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201904062

# 锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压试验与本构关系模型\*

余波<sup>1,2</sup>, 秦成辉<sup>1</sup>, 陶伯雄<sup>1</sup>

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 2. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西南宁 530004;  
3. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西南宁 530004)

**摘要:** 为了研究揭示锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压特性, 基于36组锈蚀箍筋约束混凝土试件的单轴受压试验, 获得了不同锈蚀程度箍筋约束混凝土的应力—应变曲线试验数据, 分析了箍筋质量锈损率对约束混凝土的峰值应力、峰值点应变、极限应变以及破坏形态的影响规律, 并分别建立相应的计算模型, 进而研究提出了锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压本构关系模型。结果表明: 随着箍筋质量锈损率的增加, 约束混凝土的峰值应力、峰值点应变和极限应变逐渐降低; 箍筋体积配箍率越小, 箍筋质量锈损率对峰值应力和极限应变的影响越显著; 当箍筋质量锈损率分别超过15%、10%和30%左右时, 大部分方形箍、棱形箍和螺旋箍在试件轴压破坏位置处发生断裂; 锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压本构关系模型的计算值与试验数据吻合较好, 说明该模型能够合理描述箍筋锈蚀程度对约束混凝土单轴受压应力—应变曲线的影响规律。

**关键词:** 约束混凝土; 锈蚀箍筋; 峰值应力; 峰值点应变; 极限应变; 本构关系模型

**中图分类号:** TU311.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0511-09

## Uniaxial Compression Experiment and Constitutive Model for Concrete Confined by Corroded Hoops

YU Bo<sup>1,2</sup>, QIN Chenghui<sup>1</sup>, TAO Boxiong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Nanning 530004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In order to explore the uniaxial compression behavior of concrete specimens confined by corroded hoops, the stress-strain curve test data of uniaxial compression test for 36 sets of concrete specimens with different corrosion levels were obtained based on the uniaxial compression test of 36 sets of concrete specimens confined by corroded hoops. The influences of the mass loss ratio of hoops on the peak stress, peak strain, ultimate strain, and failure pattern of concrete specimens confined by corroded hoops were analyzed, while the computation models for the peak stress, peak strain, and ultimate strain of concrete confined by corroded hoops were developed respectively. Finally, the constitutive model of concrete confined by corroded hoops under uniaxial compression was established. The analy-

\* 收稿日期: 2019-04-22; 修回日期: 2019-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668008; 51738004)、广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA281344)资助

作者简介: 余波(1982—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事混凝土结构耐久性、结构随机分析与可靠度、工程结构抗震等方面的研究。E-mail: gxuyubo@gxu.edu.cn

sis results show that the peak stress, strain at peak stress, and ultimate strain gradually decrease as the mass loss ratio of hoops increases. The mass loss ratio of hoops affects the peak stress and ultimate strain more significantly when the volumetric ratio of hoops is lower. When the mass loss ratio of hoops exceeds 15%, 10%, and 30%, most of the square, prismatic and spiral hoops were broken at the axial compression failure position of specimens, respectively. The calculated results of the proposed uniaxial compression constitutive model of concrete confined by corroded hoops agree well with the experimental data, which indicate that it can reasonably describe the influence of corrosion degree of hoops on the uniaxial compressive stress-strain curve of confined concrete.

**Keywords:** confined concrete; corroded hoops; peak stress; strain at peak stress; ultimate strain; constitutive model

## 引 言

建立箍筋约束混凝土的单轴受压本构关系模型(即应力—应变关系模型)是开展钢筋混凝土结构非线性力学分析的关键和基础<sup>[1]</sup>。早在1902年, A. Considère<sup>[2]</sup>将螺旋箍筋应用于混凝土柱,发现箍筋约束可以明显提高混凝土柱的强度和变形性能; F. E. Richart等<sup>[3-4]</sup>研究发现处于恒定水压力作用下混凝土的抗压强度得到提高,并建立了约束混凝土的峰值应力计算模型;随后,众多研究人员<sup>[5-12]</sup>考虑混凝土强度等级、配箍形式、箍筋屈服强度等因素的影响,分别建立了统一式与分段式箍筋约束混凝土单轴受压本构关系模型; Y. S. Kim等<sup>[13]</sup>基于螺旋箍筋约束混凝土构件的单轴受压试验数据,分析了约束混凝土的轴向应变和横向应变之间的关系; F. Légeron等<sup>[14]</sup>、J. West等<sup>[15]</sup>建立了箍筋约束高强混凝土的单轴受压本构关系模型;任晓丹等<sup>[16]</sup>分析了加载速率、箍筋体积配箍率和混凝土强度等级等因素对箍筋约束混凝土应力—应变曲线的影响。但上述研究成果均未考虑箍筋锈蚀的影响。然而,当箍筋受到外界环境作用侵蚀时往往发生锈蚀<sup>[1,17]</sup>。箍筋锈蚀不仅会降低其有效承载面积和力学性能,而且会降低其对核心混凝土的约束作用,从而无法有效抑制混凝土内部裂缝的发展,进而影响混凝土的约束效应和受力机制,对箍筋约束混凝土的本构关系产生显著影响。为了揭示箍筋锈蚀对约束混凝土的应力—应变关系的影响规律,郑山锁等<sup>[18]</sup>通过加速锈蚀试验获得了锈蚀箍筋约束混凝土的应力—应变曲线;李强等<sup>[19]</sup>通过加速锈蚀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,但均未建立本构关系模型;刘磊<sup>[20]</sup>基于12个锈蚀箍筋约

束混凝土棱柱体试件的试验数据,建立了锈蚀箍筋约束混凝土本构关系模型,但是只适用于配置方形箍的方形截面,而无法应用于配置菱形箍或螺旋箍的其他截面形式,适用性有限。因此,有必要研究建立一种能够有效考虑箍筋锈蚀程度影响且适用于方形箍、菱形箍和螺旋箍约束混凝土的单轴受压本构关系模型。

鉴于此,本文开展了36组锈蚀箍筋约束混凝土试件的单轴受压试验,分析了箍筋质量锈损率对约束混凝土的峰值应力、峰值点应变、极限应变以及破坏形态的影响,进而建立了能够有效考虑箍筋锈蚀程度影响且适用于方形箍、菱形箍和螺旋箍约束混凝土的单轴受压本构关系模型。

## 1 锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压试验

单轴受压试验的36组锈蚀箍筋约束混凝土试件包括24组棱柱体试件和12组圆柱体试件。试件的高度为600 mm,保护层厚度为10 mm,棱柱体的截面宽度为200 mm,圆柱体的截面直径为200 mm。纵筋直径 $d_1=10$  mm,纵筋屈服强度 $f_y=568$  MPa,箍筋直径 $d_s=6$  mm,未锈蚀箍筋的屈服强度 $f_{yh}=360$  MPa。根据配箍形式的不同,将试件分为A系列(方形箍)、B系列(菱形箍)和C系列(螺旋箍)。根据箍筋间距的不同,每个系列进一步分为A系列(AL、AM和AS)、B系列(BL、BM和BS)和C系列(CL、CM和CS)三组,试件的尺寸和配筋如图1所示。

采用外加直流电的方式来加速箍筋锈蚀,直流电源的阳极与箍筋相连,阴极与铜板相连,外加的电流密度为 $500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。纵筋与箍筋绝缘,以避

免纵筋发生锈蚀。通电结束后对试件开展单轴受压试验,然后对混凝土试件进行破型,取出锈蚀箍筋,经过酸洗、干燥、称重等步骤,计算箍筋的质量

锈损率。36组试件的基本参数和测试数据见表1。表中, $f'_{co}$ 和 $\epsilon_{co}$ 分别为非约束混凝土试件(与箍筋约束混凝土试件具有相同尺寸但未配置纵筋和箍筋

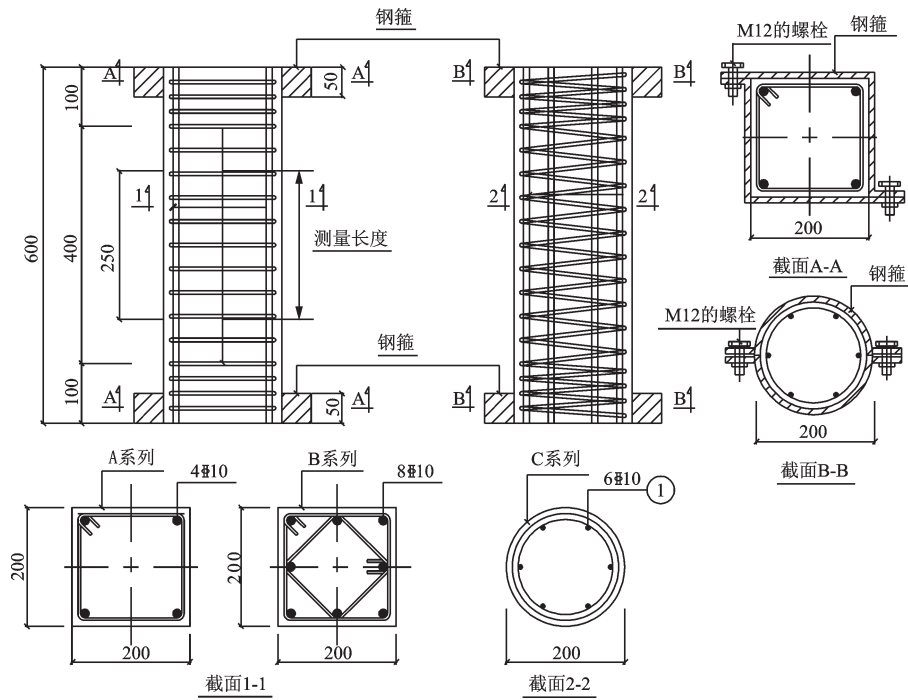


图1 试件的几何尺寸和配筋

Fig.1 Geometry and reinforcement layout of specimens

表1 36组锈蚀试件的基本参数及测试数据

Table 1 Basic parameters and tested data of 36 sets of corroded specimens

试件 编号	$f'_{co}/$ MPa	$\epsilon_{co}/$ %	$s_h/$ mm	$\rho_s/$ %	$X_{corr}/$ %	$f'_{ccc}/$ MPa	$\epsilon_{ccc}/$ %	$\epsilon_{cuc}/$ %	试件 编号	$f'_{co}/$ MPa	$\epsilon_{co}/$ %	$s_h/$ mm	$\rho_s/$ %	$X_{corr}/$ %	$f'_{ccc}/$ MPa	$\epsilon_{ccc}/$ %	$\epsilon_{cuc}/$ %
AL0	25.4	0.16	65	0.97	0	32.0	0.33	2.61	BM2	21.7	0.14	40	2.68	10	34.1	0.61	3.61
AL1	25.4	0.16	65	0.97	4.9	30.6	0.30	2.58	BM3	21.7	0.14	40	2.68	13.4	33.6	0.49	4.02
AL2	25.4	0.16	65	0.97	9.8	29.5	0.31	2.35	BS0	21.7	0.14	25	4.29	0	44.8	1.03	6.01
AL3	25.4	0.16	65	0.97	17.5	24.8	0.22	1.79	BS1	21.7	0.14	25	4.29	14.9	43.5	0.47	5.09
AM0	25.4	0.16	40	1.57	0	33.9	0.37	3.50	BS2	21.7	0.14	25	4.29	20.8	41.4	0.46	3.84
AM1	25.4	0.16	40	1.57	7.3	31.8	0.35	2.87	BS3	21.7	0.14	25	4.29	25	38.5	0.37	3.53
AM2	25.4	0.16	40	1.57	12.5	31.2	0.34	2.80	CL0	18	0.16	55	1.14	0	26.3	0.57	2.72
AM3	25.4	0.16	40	1.57	21.6	29.0	0.29	2.17	CL1	18	0.16	55	1.14	16.8	24.9	0.41	2.10
AS0	24.9	0.15	25	2.51	0	39.6	0.42	3.99	CL2	18	0.16	55	1.14	21.8	22.0	0.40	1.96
AS1	24.9	0.15	25	2.51	9.5	36.8	0.39	4.02	CL3	18	0.16	55	1.14	31.5	20.7	0.33	1.92
AS2	24.9	0.15	25	2.51	16.7	35.6	0.35	3.44	CM0	24.4	0.17	40	1.57	0	36.3	0.65	3.18
AS3	24.9	0.15	25	2.51	25	34.3	0.33	2.71	CM1	24.4	0.17	40	1.57	7.6	34.2	0.63	2.63
BL0	24.9	0.15	65	1.65	0	33.8	0.58	3.81	CM2	24.4	0.17	40	1.57	22.8	30.1	0.34	2.20
BL1	24.9	0.15	65	1.65	7.7	31.3	0.43	3.34	CM3	24.4	0.17	40	1.57	32.9	29.9	0.20	2.04
BL2	24.9	0.15	65	1.65	10.3	32.9	0.41	2.82	CS0	24.4	0.17	25	2.51	0	44.8	0.90	3.42
BL3	24.9	0.15	65	1.65	12.3	29.6	0.31	2.40	CS1	24.4	0.17	25	2.51	9.3	42.4	0.88	3.03
BM0	21.7	0.14	40	2.68	0	36.9	0.85	4.98	CS2	24.4	0.17	25	2.51	10	42.6	0.69	2.85
BM1	21.7	0.14	40	2.68	5.6	35.3	0.73	4.51	CS3	24.4	0.17	25	2.51	13.6	33.7	0.40	3.00

的试件)的轴心抗压强度与峰值点应变; $s_n$ 为箍筋间距; $\rho_s$ 为体积配箍率; $X_{corr}$ 为箍筋质量锈损率; $f'_{cc}$ 为锈蚀箍筋约束混凝土的峰值应力,定义为锈蚀试件截面强约束区混凝土的抗压强度<sup>[6]</sup>; $\epsilon_{ccc}$ 为锈蚀箍筋约束混凝土的峰值点应变,定义为强约束区混凝土达到峰值应力时试件中部250 mm长度范围内的平均压应变; $\epsilon_{cuc}$ 为锈蚀箍筋约束混凝土的极限应变,定义为第一根箍筋断裂时试件中部250 mm长度范围内的平均压应变。

3个系列部分试件的破坏形态如图2所示。由图可知,当试件发生轴压破坏时,箍筋断裂位置集中在发生在柱的轴压破坏位置,且部分纵筋发生向外弯曲。对于A系列试件,当箍筋质量锈损率小于

12.5%时,较少箍筋发生断裂,当箍筋质量锈损率大于16.7%时,大部分箍筋发生断裂;对于B系列试件,当箍筋质量锈损率小于10%时,较少箍筋发生断裂,而当箍筋质量锈损率大于10%时,大部分箍筋发生断裂,且纵筋明显的向外弯曲。对于C系列试件,根据未锈蚀箍筋试件CL0和CM0可知,当箍筋间距较大时,纵筋在不同高度位置向外弯曲,混凝土保护层剥落面积较小,当箍筋间距较小时,箍筋对核心区混凝土的约束作用较好,纵筋未明显向外弯曲;通过对比分析箍筋锈蚀试件CL2、CL3、CM3和CS3可知,当箍筋质量锈损率超过30%左右时,箍筋发生断裂,纵筋向外弯曲。

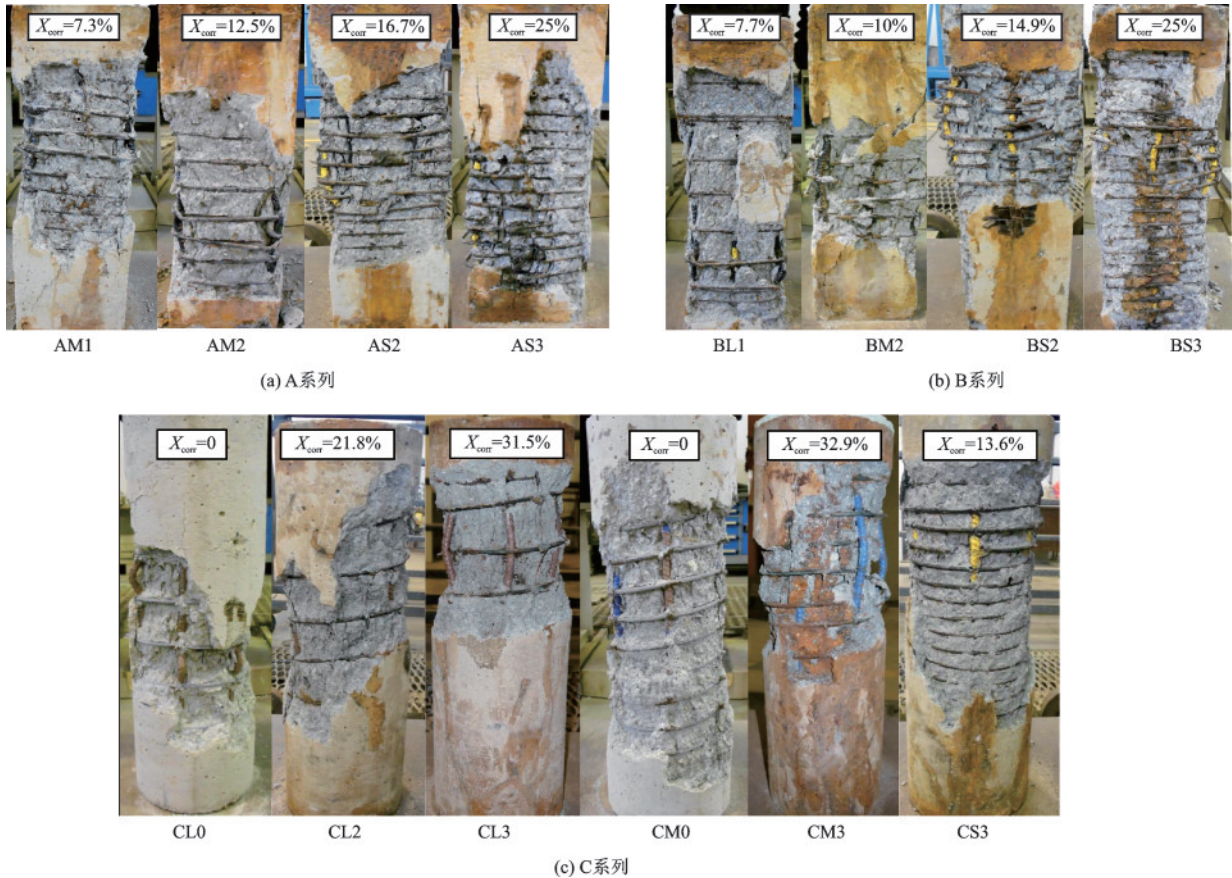


图2 三个系列锈蚀试件的破坏形态

Fig.2 Failure pattern for three types of corroded specimens

## 2 锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压本构关系模型

### 2.1 应力—应变曲线的表达式

如图3所示,基于未锈蚀箍筋约束混凝土的单

轴受压本构关系模型<sup>[6]</sup>,考虑箍筋锈蚀对峰值应力、峰值点应变和极限应变的影响,可以建立锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压本构关系模型:

$$f_c = \frac{f'_{ccc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{ccc}}; r = \frac{E_c}{E_c - E'_{sec}} \quad (2)$$

$$E_c = 5000\sqrt{f'_{co}}; E'_{sec} = \frac{f'_{ccc}}{\epsilon_{ccc}} \quad (3)$$

式中,  $f_c$  为应力;  $\epsilon_c$  为应变;  $f'_{ccc}$  为峰值应力;  $\epsilon_{ccc}$  为峰值点应变;  $f'_{co}$  为非约束混凝土抗压强度;  $E_c$  为非约束混凝土的初始弹性模量;  $E'_{sec}$  为锈蚀箍筋约束混凝土的割线模量。

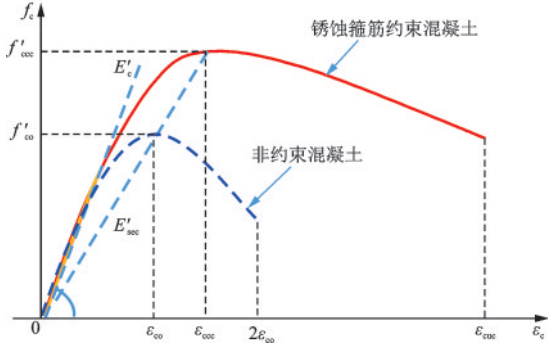


图3 锈蚀箍筋约束和非约束混凝土的应力—应变曲线  
Fig.3 Stress-strain curves of confined and unconfined concrete

结合图3和公式(1)~(3)可知,锈蚀箍筋约束混凝土的应力—应变曲线主要由峰值应力  $f'_{ccc}$ 、峰值点应变  $\epsilon_{ccc}$  和极限应变  $\epsilon_{cuc}$  等3个特征参数控制,所以需要首先建立这3个特征参数的计算模型。

## 2.2 锈蚀箍筋约束混凝土的峰值应力

根据 Willam-Warnke 五参数破坏准则,八面体平面上的压子午线的抛物线方程为<sup>[21]</sup>:

$$\bar{\tau}_{oct} = b_0 + b_1 \bar{\sigma}_{oct} + b_2 \bar{\sigma}_{oct}^2 \quad (4)$$

式中,  $b_0$ 、 $b_1$  和  $b_2$  为拟合系数;  $\bar{\sigma}_{oct}$  和  $\bar{\tau}_{oct}$  分别为八面体正应力  $\sigma_{oct}$  和八面体剪应力  $\tau_{oct}$  与  $f'_{co}$  的比值。

由于约束混凝土满足条件  $\sigma_1 = \sigma_2 = -f'_1 > \sigma_3 = -f'_{ccc}$  ( $f'_1$  为有效约束应力), 所以有:

$$\bar{\sigma}_{oct} = \frac{\sigma_{oct}}{f'_{co}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3f'_{co}} = -\frac{f'_{ccc} + 2f'_1}{3f'_{co}} \quad (5)$$

$$\bar{\tau}_{oct} = \frac{1}{3f'_{co}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \frac{\sqrt{2}}{3f'_{co}} (f'_{ccc} - f'_1) \quad (6)$$

结合式(4)~(6),可以建立关于  $f'_{ccc}$  的一元二次方程,通过求解方程可以确定锈蚀箍筋约束混凝土的峰值应力  $f'_{ccc}$  为<sup>[22]</sup>:

$$f'_{ccc} = f'_{co} \left\{ A + B \sqrt{1 + C \cdot \frac{f'_1}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_1}{f'_{co}} \right\} \quad (7)$$

式中,参数  $A$ 、 $B$  和  $C$  是关于拟合系数  $b_0$ 、 $b_1$  和  $b_2$  的函数,分别为:

$$A = \frac{3(b_1 + \sqrt{2})}{2b_2}; B = \sqrt{A^2 - \frac{9b_0}{b_2}}; C = -\frac{9\sqrt{2}}{b_2 B^2} \quad (8)$$

基于表1中的36组锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压试验数据,可以得到参数  $A$ 、 $B$  和  $C$  分别为  $-5.19$ 、 $6.20$  和  $2.25$ ,从而可以建立锈蚀箍筋约束混凝土的峰值应力模型为:

$$f'_{ccc} = f'_{co} \left( -5.19 + 6.20 \sqrt{1 + \frac{2.25f'_1}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_1}{f'_{co}} \right) \quad (9)$$

式中,  $f'_1$  为锈蚀箍筋对混凝土的有效约束应力。

基于 J. B. Mander 等<sup>[6,12]</sup>的理论推导,考虑箍筋锈蚀对体积配箍率和箍筋屈服强度的影响,有效约束应力  $f'_1$  可以定义为:

$$f'_1 = \frac{1}{2} K_e \rho_{sc} f_{yhc} \quad (10)$$

式中,  $K_e$  为有效约束系数;  $\rho_{sc}$  和  $f_{yhc}$  分别为锈蚀箍筋的体积配箍率(%)和屈服强度<sup>[23]</sup>:

$$\rho_{sc} = (1 - X_{corr}) \rho_s; f_{yhc} = (1 - \alpha_y X_{corr}) f_{yh} \quad (11)$$

式中,  $X_{corr} = (m_0 - m_c)/m_0$  为箍筋的质量锈损率;  $m_0$  是箍筋锈蚀前的质量;  $m_c$  为箍筋锈蚀后的质量;  $\alpha_y$  为锈蚀箍筋屈服强度的修正系数,可以取  $0.005$ <sup>[23]</sup>。

对于配置螺旋箍的圆形截面,  $K_e$  的计算公式为<sup>[6,22]</sup>:

$$K_e = \frac{1}{1 - \rho_{cc}} \left( 1 - \frac{s'}{2d_s} \right)^2 \quad (12)$$

式中,  $\rho_{cc}$  为纵筋配筋率;  $d_s$  为圆形截面核心区的直径;  $s'$  为箍筋净距。

对于配置方形箍筋和菱形箍筋的方形截面,  $K_e$  的计算公式为<sup>[6,22]</sup>:

$$K_e = \frac{1}{1 - \rho_{cc}} \left( 1 - \sum_{i=1}^n \frac{(\omega_i)^2}{6b_c^2} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right)^2 \quad (13)$$

式中,  $b_c$  为方形截面的核心区宽度;  $\omega_i$  为第  $i$  个相邻纵筋的水平净距(图4)。

## 2.3 锈蚀箍筋约束混凝土的峰值点应变

基于未锈蚀箍筋约束混凝土的峰值点应变计算模型<sup>[6,22]</sup>,通过引入拟合系数  $\alpha_c$  来考虑箍筋锈蚀的影响,可以建立锈蚀箍筋约束混凝土峰值点应变  $\epsilon_{ccc}$  的计算模型:

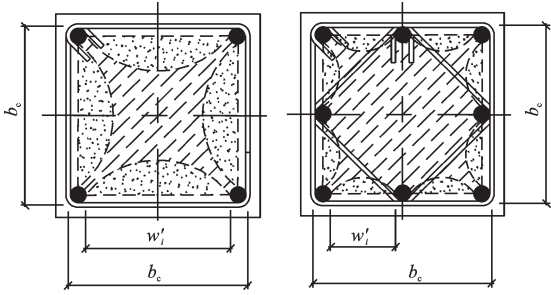


图4 棱柱体试件的核心区宽度和纵筋水平净距

Fig.4 Illustration of core area width and clear transverse spacing between longitudinal bars in a prismatic specimen

$$\epsilon_{ccc} = (1 - \alpha_c X_{corr}) \epsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{ccc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (14)$$

式中,  $\alpha_c$  为拟合系数, 其值为 1.915。

#### 2.4 锈蚀箍筋约束混凝土的极限应变

目前, 国内外学者通常偏于保守地将第一条箍筋断裂时所对应的应变值作为箍筋约束混凝土的极限应变<sup>[6, 22, 24]</sup>, 而 T. Paulay 等<sup>[24]</sup> 根据能量平衡原

理来确定未锈蚀箍筋约束混凝土的极限应变。在其研究成果基础上, 本文引入拟合系数  $\alpha_u$  来考虑箍筋锈蚀的影响, 结合 36 组锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压试验数据, 可以建立锈蚀箍筋约束混凝土的极限应变  $\epsilon_{cuc}$  的计算模型:

$$\epsilon_{cuc} = 0.004 + (1 - \alpha_u X_{corr}) \frac{1.4 \rho_{sc} f_{yhc} \epsilon_{sm}}{f'_{ccc}} \quad (15)$$

式中,  $\alpha_u$  为拟合系数, 其值为 1.0;  $\epsilon_{sm}$  为锈蚀箍筋在最大拉应力时所对应的应变值, 可以根据试验测试得到, 或近似取 0.12<sup>[24]</sup>。

### 3 对比分析与验证

#### 3.1 特征参数的对比分析

将式(9)、式(14)和式(15)所计算的峰值应力、峰值点应变和极限应变与试验值进行对比分析, 如图 5 所示。由图可知, 计算值与试验值大部分落在等值线附近, 说明所建模型的计算值与试验值吻合较好。

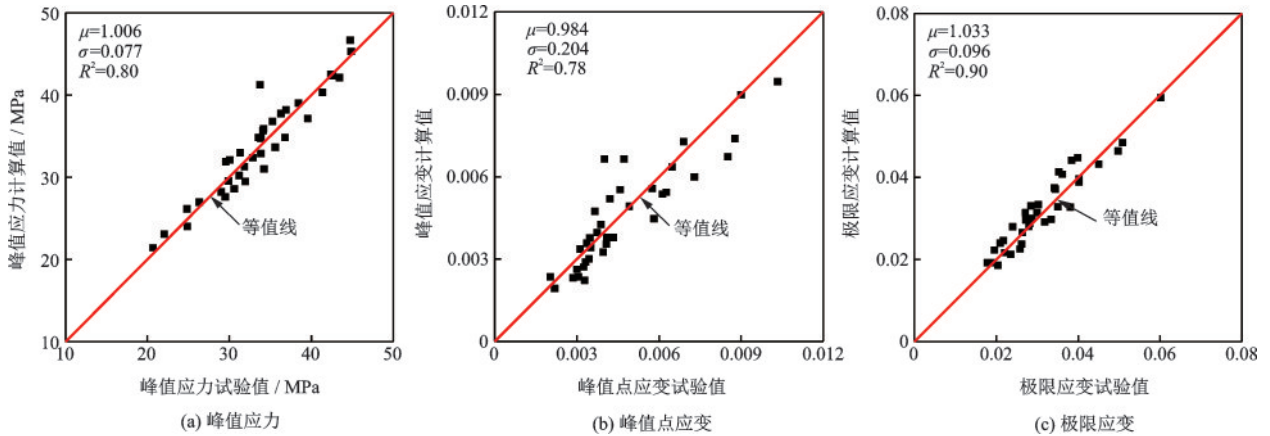


图5 特征参数的计算值和试验值的比较

Fig.5 Comparisons between experimental and calculated characteristic parameters

峰值应力  $f'_{ccc}$ 、峰值点应变  $\epsilon_{ccc}$  和极限应变  $\epsilon_{cuc}$  的试验值(分别记为  $f'^{exp}_{ccc}$ 、 $\epsilon^{exp}_{ccc}$  和  $\epsilon^{exp}_{cuc}$ )与模型计算值(分别记为  $f'^{pro}_{ccc}$ 、 $\epsilon^{pro}_{ccc}$  和  $\epsilon^{pro}_{cuc}$ )以及二者的比值见表 2。由表 2 可知, 36 组试件的峰值应力的试验值和计算值之比的平均值( $\mu$ )为 1.006, 标准差( $\sigma$ )为 0.077, 拟合优度  $R^2$  为 0.80; 36 组试件的峰值点应变的试验值和计算值之比的平均值( $\mu$ )为 0.984, 标准差( $\sigma$ )为 0.204, 拟合优度  $R^2$  为 0.78; 36 组试件的极限应变的试验值和计算值之比的平均值( $\mu$ )为 1.033, 标准差( $\sigma$ )为

0.096, 拟合优度  $R^2$  为 0.90。说明上述 3 个控制参数的模型计算值与试验值吻合较好, 且离散性较小。

#### 3.2 应力—应变曲线的对比分析

将式(9)、(14)和(15)代入式(1), 可以建立锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压本构关系模型。不同锈蚀程度的箍筋约束混凝土试件的单轴受压应力—应变曲线的实测值与模型计算值的对比分析如图 6 所示。由图 6 可知, 所建立的锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压本构关系模型与试验曲线总体吻

表2 特征参数的试验值与模型计算值的比值

Table 2 Ratios between experimental and calculated characteristic parameters

试件编号	$f_{ccc}^{exp}/$ MPa	$f_{ccc}^{pro}/$ MPa	$\frac{f_{ccc}^{exp}}{f_{ccc}^{pro}}$	$\epsilon_{ccc}^{exp}/$ ‰	$\epsilon_{ccc}^{pro}/$ ‰	$\frac{\epsilon_{ccc}^{exp}}{\epsilon_{ccc}^{pro}}$	$\epsilon_{cuc}^{exp}/$ ‰	$\epsilon_{cuc}^{pro}/$ ‰	$\frac{\epsilon_{cuc}^{exp}}{\epsilon_{cuc}^{pro}}$
AL0	31.96	28.82	0.92	0.33	0.29	0.87	2.61	2.38	0.91
AL1	30.62	28.67	0.89	0.30	0.26	0.87	2.58	2.35	0.91
AL2	29.49	28.52	0.92	0.31	0.24	0.77	2.35	2.16	0.92
AL3	24.83	28.27	1.08	0.22	0.19	0.88	1.79	1.89	1.05
AM0	33.85	31.62	0.97	0.37	0.40	1.06	3.50	3.29	0.94
AM1	31.84	31.20	0.94	0.35	0.34	0.97	2.87	3.12	1.09
AM2	31.20	30.90	0.95	0.34	0.30	0.88	2.80	2.86	1.02
AM3	29.01	30.37	1.00	0.29	0.23	0.81	2.17	2.41	1.11
AS0	39.57	35.35	0.94	0.42	0.52	1.24	3.99	4.49	1.13
AS1	36.78	34.43	0.91	0.39	0.43	1.10	4.02	4.11	1.02
AS2	35.61	33.73	0.92	0.35	0.35	1.02	3.44	3.62	1.05
AS3	34.27	32.86	0.93	0.33	0.27	0.83	2.71	3.08	1.14
BL0	33.85	32.29	1.03	0.58	0.45	0.77	3.81	3.27	0.86
BL1	31.29	31.76	1.01	0.43	0.38	0.88	3.34	3.10	0.93
BL2	32.91	31.58	0.95	0.41	0.36	0.88	2.82	2.97	1.05
BL3	29.55	31.44	1.05	0.31	0.34	1.09	2.40	2.87	1.19
BM0	36.89	34.95	1.04	0.85	0.67	0.79	4.98	4.65	0.93
BM1	35.26	34.28	1.00	0.73	0.60	0.83	4.51	4.50	1.00
BM2	34.15	33.74	1.02	0.61	0.54	0.89	3.61	4.19	1.16
BM3	33.59	33.33	1.02	0.49	0.50	1.02	4.02	3.96	0.98
BS0	44.77	43.40	1.04	1.03	0.95	0.92	6.01	5.95	0.99
BS1	43.45	40.58	0.98	0.47	0.68	1.43	5.09	4.80	0.94
BS2	41.38	39.43	1.00	0.46	0.57	1.25	3.84	4.34	1.13
BS3	38.45	38.60	1.05	0.37	0.49	1.35	3.53	4.02	1.14
CL0	26.33	26.52	1.03	0.57	0.56	0.97	2.72	2.96	1.09
CL1	24.90	25.19	0.95	0.41	0.38	0.93	2.10	2.42	1.15
CL2	22.04	24.79	1.06	0.40	0.33	0.82	1.96	2.21	1.13
CL3	20.67	24.01	1.09	0.33	0.22	0.68	1.92	1.83	0.96
CM0	36.30	36.74	1.04	0.65	0.64	0.98	3.18	2.92	0.92
CM1	34.21	35.88	1.00	0.63	0.54	0.87	2.63	2.77	1.05
CM2	30.06	34.13	1.08	0.34	0.36	1.07	2.20	2.14	0.97
CM3	29.87	32.95	1.05	0.20	0.24	1.17	2.04	1.76	0.87
CS0	44.84	44.14	1.01	0.90	0.90	1.00	3.42	3.75	1.10
CS1	42.39	42.51	0.98	0.88	0.74	0.84	3.03	3.41	1.13
CS2	42.65	42.38	0.97	0.69	0.73	1.06	2.85	3.38	1.18
CS3	33.75	41.74	1.21	0.40	0.67	1.66	3.00	3.19	1.06
均值( $\mu$ )			1.006			0.984			1.033
标准差( $\sigma$ )			0.077			0.204			0.096

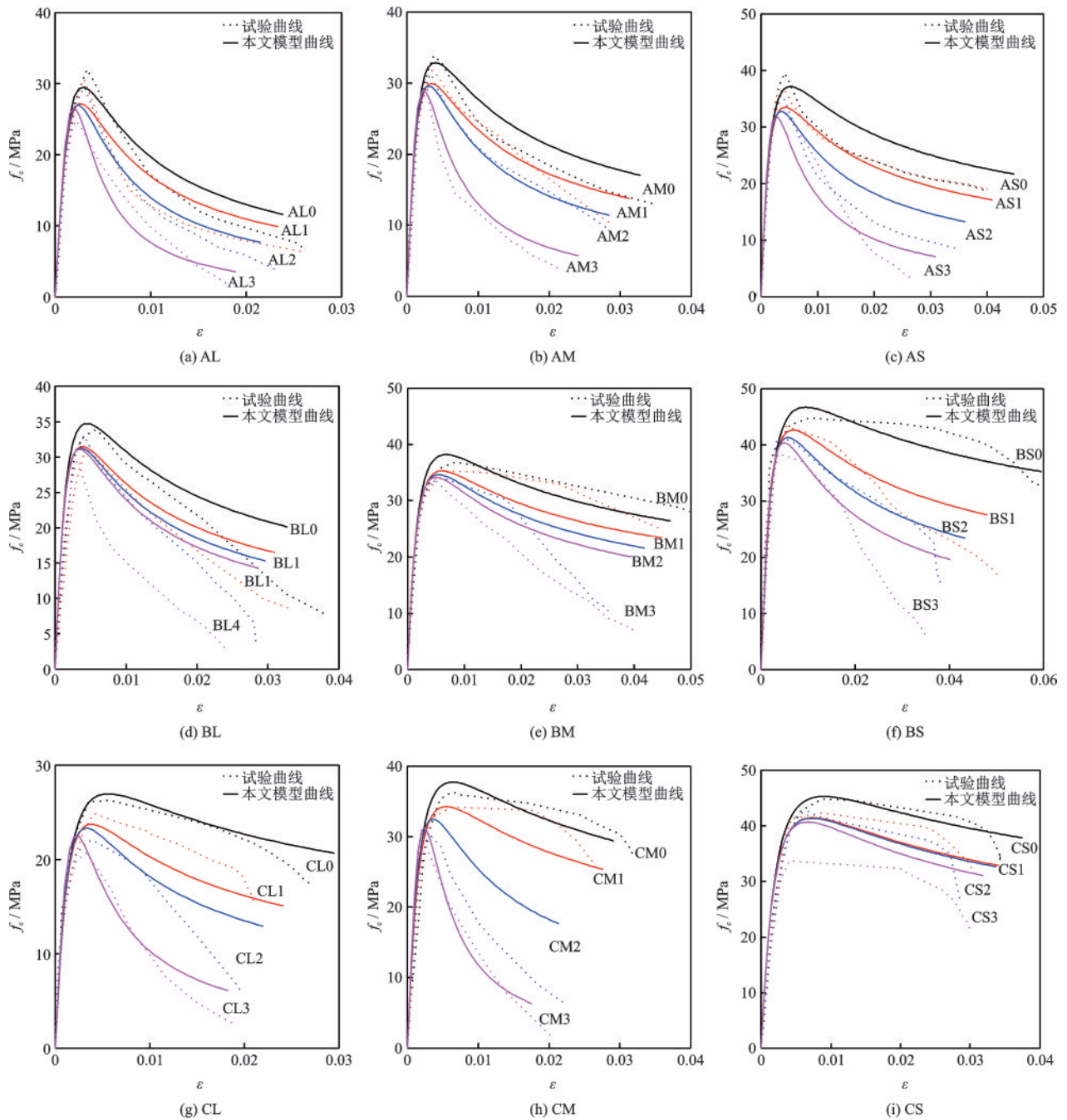


图6 应力—应变曲线的试验值和模型值对比

Fig.6 Comparison between experimental and predicted stress-strain curves

合较好。结合表1和图6可知,峰值应力、峰值点应变和极限应变随着箍筋质量锈损率的增加而逐渐减小。箍筋质量锈损率对约束混凝土的强度和延性的影响程度与箍筋质量锈损率和箍筋体积配箍率等因素有关:箍筋质量锈损率对箍筋间距较大、体积配箍率较低以及锈蚀程度较高的钢筋混凝土试件的强度和延性的影响明显较高。例如,AS2、AM3和AL3,体积配箍率分别为2.51%、1.57%和0.97%,箍筋的质量锈损率分别为16.7%、21.6%和

17.5%,与相同设计参数下的未锈蚀试件AS0、AM0和AL0相比,峰值应力分别降低10.02%、14.31%和22.31%,极限应变分别降低13.82%、38.07%和31.28%,说明体积配箍率越小,箍筋锈蚀对峰值应力和极限应变的影响越显著。

## 4 结论

(1) 锈蚀箍筋约束混凝土的峰值应力、峰值点

应变和极限应变随着箍筋质量锈损率的增加而逐渐减小;箍筋体积配箍率越小,箍筋锈损率对峰值应力和极限应变的影响越显著。

(2) 锈蚀箍筋约束混凝土的峰值应力、峰值点应变和极限应变的试验值与模型计算值的比值的均值分别为 1.006、0.984 和 1.033,标准差分别为 0.077、0.204 和 0.096,说明所建立模型的计算精度较高,且离散性较小。

(3) 在锈蚀箍筋约束混凝土试件的轴压破坏位置处,箍筋是否发生断裂与配箍形式和箍筋质量锈损率有关。当箍筋质量锈损率分别超过 15%、10% 和 30% 左右时,大部分方形箍、棱形箍和螺旋箍发生断裂。

(4) 本文建立的锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压本构关系模型能够综合考虑箍筋锈蚀程度、截面形式和配箍形式的影响,且模型计算值与试验测试数据吻合较好,具有良好的适用性。

#### 参考文献:

[1] Vu N S, Yu B, Li B. Prediction of strength and drift capacity of corroded reinforced concrete columns[J]. Construction and Building Materials, 2016, 115 (15): 304-318.

[2] Considère A. Résistance a la compression du béton armé et du béton fretté[M]. [S.l.]: Publications du journal le Genie civil, 1902.

[3] Richart F E, Brandtæg A, Brown R L. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses [R]. Illinois: University of Illinois at Urbana Champaign, 1928.

[4] Richart F E, Brandtæg A, Brown R L. Failure of plain and spirally reinforced concrete in compression [R]. Illinois: University of Illinois at Urbana Champaign, 1929.

[5] Scott B D, Park R, Priestley N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates[J]. ACI Journal, 1982, 79(1): 13-27.

[6] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.

[7] Sheikh S A, Uzumeri S M. Analytical model for concrete confinement in tied columns [J]. Journal of the Structural Division, 1982, 108(12):2703-2722.

[8] Sheikh S A, Uzumeri S M. Strength and ductility of

tied concrete columns[J]. Journal of the Structural Division, 1980,106(5): 1079-1102.

[9] Guo Z H. Principles of reinforced concrete [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, 2014.

[10] Li B, Park R, Tanaka H. Stress-strain behavior of high strength concrete confined by ultra-high and normal strength transverse reinforcements [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(3): 395-406.

[11] Saatcioglu M, Razvi S R. Strength and ductility of confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(6): 1590-1607.

[12] Chung H S, Yang K H, Lee Y H, et al. Stress-strain curve of laterally confined concrete [J]. Engineering Structures, 2002, 24(9): 1153-1163.

[13] Kim Y S, Kim S W, Lee J Y, et al. Prediction of stress-strain behavior of spirally confined concrete considering lateral expansion[J]. Construction and Building Materials, 2016, 102: 743-761.

[14] Légeron F, Paultre P. Uniaxial confinement model for normal- and high-strength concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(2): 241-252.

[15] West J, Ibrahim A, Hindi R. Analytical compressive stress-strain model for high-strength concrete confined with cross-spirals [J]. Engineering Structures, 2016, 113: 362-370.

[16] 任晓丹,刘凯,魏公涛,等.不同加载速率下箍筋约束混凝土力学性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(3): 141-150.

Ren X D, Liu K, Wei G T, et al. Experimental study on mechanical behavior of stirrups confined concrete under loadings at different rates [J]. Journal of Building Materials, 2017,38(3):141-150. (in Chinese)

[17] Yu B, Yang L F, Wu M, et al. Practical model for predicting corrosion rate of steel reinforcement in concrete structures [J]. Construction and Building Materials, 2014, 54(54): 385-401.

[18] 郑山锁,关永莹,王萌,等.人工盐雾环境下锈蚀箍筋约束混凝土本构关系[J].建筑材料学报,2016,19(4): 737-741.

Zheng Sh S, Guan Y Y, Wang M, et al. Constitutive relation of concrete confined with corroded stirrups under artificial salt mist climate environment corrosion[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(4): 737-741. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)

(下转第 548 页)