

酸雨侵蚀箍筋约束混凝土本构模型研究

郑跃^{1,2}, 郑山锁^{1,2†}, 明铭^{1,2}, 阮升^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安, 710055;

2. 结构工程与抗震教育部重点实验室(西安建筑科技大学), 陕西 西安, 710055)

摘要:采用人工气候环境模拟技术模拟酸雨环境,对 15 组箍筋约束混凝土棱柱体试件进行加速腐蚀,进而进行轴压试验,研究了箍筋锈蚀对约束混凝土破坏形态、峰值应力、峰值应变、极限应变和应力-应变曲线形状的影响.基于 Mander 模型及现有研究成果,确定了未腐蚀试件本构模型峰值应力、峰值应变、极限应变和形状系数等参数的计算公式,并通过对试验结果的回归分析,得到了考虑箍筋锈蚀率影响的形状系数和各特征点参数修正系数拟合公式,最终建立了酸雨侵蚀箍筋约束混凝土本构模型.与试验结果对比发现,采用该模型计算得到的各试件峰值应力、峰值应变、极限应变及应力-应变曲线形状均与试验结果符合较好,表明所建立的本构模型能较为准确地反映遭受酸雨侵蚀箍筋约束混凝土力学性能,可用于该环境下 RC 结构剩余承载力及抗震性能评估.

关键词:约束混凝土;应力-应变曲线;酸雨侵蚀;锈蚀箍筋;轴压试验;Mander 模型

中图分类号:TU365;TU317.1

文献标志码:A

Research on Constitutive Model of Confined Concrete with Stirrups by Acid Rain Erosion

ZHENG Yue^{1,2}, ZHENG Shansuo^{1,2†}, MING Ming^{1,2}, RUAN Sheng^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education

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

Abstract: In order to study the influence of stirrup corrosion level on the failure modes, peak stress, peak strain, ultimate strain and shape of stress-strain curve of the confined concrete, 15 reinforced concrete prism specimens are subjected to acid rain erosion in the acid environment modeled by artificial climate simulation technique followed by axial compression tests. Based on the Mander's model and the existing research results, the calculation formulas for the peak stress, peak strain, ultimate strain and shape factor of the uncorroded specimens are determined. The factor calculation formulas for peak stress, peak strain, ultimate strain and shape factor of corroded specimens are developed by regression analysis of test data, respectively, and then the constitutive model of confined concrete by acid rain erosion is established. By comparing the simulation results with the experimental data, it can be found that all the peak

* 收稿日期:2019-09-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1509302), National Key R&D Program of China(2019YFC1509302);国家自然科学基金资助项目(51678475), National Natural Science Foundation of China(51678475);西安市科技计划项目(2019113813CXSF016SF026), Science and Technology Program of Xi'an(2019113813CXSF016SF026);陕西省教育厅产业化项目(18JC020), Industrialization Projects of the Education Department of Shaanxi Province(18JC020)

作者简介:郑跃(1993—),男,河北保定人,西安建筑科技大学博士研究生

† 通信联系人, E-mail: zhengshansuo@263.net

stress, peak strain, ultimate strain and stress-strain curves shape of the specimens obtained by proposed method are in good agreement with the experimental data. Thus, the constitutive mode for confined concrete established in this paper can accurately reflect the mechanical performance of RC prism specimen by acid rain erosion, indicating its adaptiveness for estimating the residual bearing capacity and the seismic performance of RC structure under the acid rain environment.

Key words: confined concrete; stress-strain curves; acid rain erosion; corroded stirrups; axial compression test; Mander's model

酸雨侵蚀引起的混凝土碳化和钢筋锈蚀是导致RC结构抗震性能劣化的主要原因之一^[1-3]. RC构件中配置的箍筋能约束混凝土横向变形,使其处于三向应力状态,从而提高约束区混凝土的承载能力和变形能力.研究表明^[4-9],箍筋锈蚀会显著降低其对约束区混凝土的约束作用,使得构件承载力、延性等发生不同程度退化.因此有必要研究酸雨侵蚀引发的箍筋锈蚀对RC结构力学及抗震性能的影响.

酸雨侵蚀箍筋约束混凝土本构模型是酸雨环境下在役RC结构弹性分析、剩余承载力和抗震性能研究的基础.近年来,国内外进行了大量箍筋约束混凝土轴压试验研究^[10-13],但对于考虑箍筋锈蚀影响的约束混凝土本构模型研究则较少,如:李强^[14]、郑山锁^[15]等分别对锈蚀箍筋约束混凝土棱柱体试件进行了轴压试验,但仅分析了试件受压应力-应变曲线各特征点退化规律,并未提出相关本构模型. V_u ^[16]、刘磊^[17]等采用电化学方法对RC棱柱体试件进行腐蚀,基于轴压试验结果建立了考虑箍筋锈蚀影响的约束混凝土本构模型,因电化学腐蚀与自然环境腐蚀的差异,所提本构模型能否适用于酸雨环境下RC结构有待验证.

鉴于此,为更贴近实际且便于应用,本文采用人工气候环境加速腐蚀技术模拟酸雨环境,对15组RC棱柱体试件进行加速腐蚀,进而对腐蚀后试件进行轴压试验,研究不同设计参数下试件力学性能退化规律,建立了酸雨侵蚀箍筋约束混凝土本构模型,以为酸雨环境下RC结构的剩余承载力及抗震性能评估提供理论支撑.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验中以箍筋锈蚀程度和体积配箍率为主要变

化参数,共设计制作了15组RC棱柱体试件.试件设计参数如下:试件尺寸为150 mm×150 mm×450 mm,混凝土保护层厚度均为12 mm,纵筋采用HRB335钢筋,箍筋采用HPB300钢筋,配箍形式分别为 $\phi 6@80$ 、 $\phi 6@60$ 、 $\phi 8@80$,试件几何尺寸及配筋如图1所示,其余设计参数见表1.其中,箍筋锈蚀程度通过酸雨侵蚀喷淋循环次数控制.

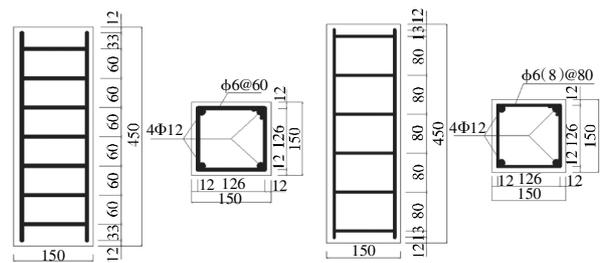


图1 试件几何尺寸及配筋(单位:mm)

Fig.1 Dimensions and reinforcements of specimens(unit:mm)

表1 试件设计参数

Tab.1 Test parameters of specimens

试件编号	混凝土强度	箍筋	配箍率/%	腐蚀循环次数/次	箍筋锈蚀率/%	纵筋锈蚀率/%
L1	C40	$\phi 6@80$	1.12	0	0	0
L2	C40	$\phi 6@80$	1.12	120	4.3	0
L3	C40	$\phi 6@80$	1.12	240	9.4	4.1
L4	C40	$\phi 6@80$	1.12	320	16.7	6.4
L5	C40	$\phi 6@80$	1.12	360	18.6	7.2
L6	C40	$\phi 6@60$	1.50	0	0	0
L7	C40	$\phi 6@60$	1.50	120	4.2	0
L8	C40	$\phi 6@60$	1.50	240	8.8	4.0
L9	C40	$\phi 6@60$	1.50	320	16.0	6.2
L10	C40	$\phi 6@60$	1.50	360	18.7	7.2
L11	C40	$\phi 8@80$	1.99	0	0	0
L12	C40	$\phi 8@80$	1.99	120	3.2	0
L13	C40	$\phi 8@80$	1.99	240	8.6	3.9
L14	C40	$\phi 8@80$	1.99	320	15.5	5.9
L15	C40	$\phi 8@80$	1.99	360	18.3	7.0

采用 P.O 42.5R 水泥配制 C40 混凝土, 配合比(质量比)为:水泥:水:天然中砂:碎石 = 390:120:885:890. 用于制作 RC 棱柱体试件, 通过材料性能试验, 测得混凝土立方体抗压强度 $f_{cu} = 42.2$ MPa, 轴心抗压强度 $f_c = 32.1$ MPa, 弹性模量 $E_c = 3.25 \times 10^4$ MPa. 钢材材性试验结果见表 2.

表 2 钢筋力学性能

Tab.2 Mechanical properties of reinforcements

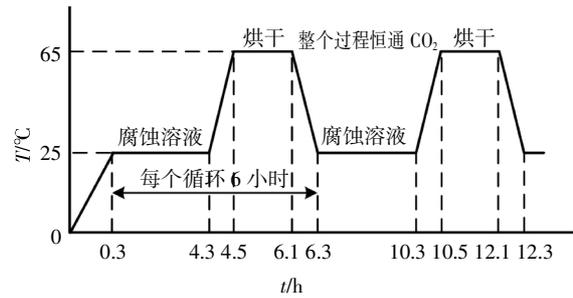
钢筋直径	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E_s / $\times 10^5$ MPa
$\phi 6$	319	420	2.1
$\phi 8$	313	418	2.1
$\phi 12$	350	458	2.0

1.2 试验方案

人工气候实验室能够模拟自然环境下气候作用过程, 使试件的腐蚀效果与自然环境相同, 且能够达到加速试件腐蚀的目的, 因此, 试验中通过设定人工气候实验室参数模拟酸雨环境. 本文参考文献[18]中所采用的周期喷淋腐蚀试验方案对 RC 棱柱体进行加速腐蚀, 并恒通 CO_2 以模拟实际环境中混凝土碳化. 其中, 腐蚀溶液的配制方案为: 为了反应我国硫酸型酸雨的特点, 首先在水中添加质量浓度 $\rho = 1.84$ g/cm³ 的硫酸 (H_2SO_4) 溶液至硫酸根离子浓度达到 0.06 mol/L; 然后腐蚀溶液中添加质量浓度 $\rho = 1.42$ g/cm³ 的硝酸(HNO_3)溶液, 以调节腐蚀溶液的 pH 值为 3.0. 试件的具体腐蚀流程为: 1) 将实验室温度调整至 (25 ± 5) °C, 喷淋腐蚀溶液 240 min; 2) 将实验室升温至 (65 ± 5) °C, 以加速腐蚀介质的侵蚀速率; 3) 降温至 (25 ± 5) °C, 开始下一腐蚀循环. 单个腐蚀循环周期时长为 6 h, 加速腐蚀模拟试验及循环过程如图 2 所示.



(a)人工气候实验室



(b)加速腐蚀过程示意图

图 2 加速腐蚀模拟试验

Fig.2 Accelerate corrosion simulation test

腐蚀试验完成后, 采用微机控制电液伺服压力试验机对棱柱体试件进行轴压试验, 试验装置如图 3 所示. 加载之前, 在试件两侧各安装 1 个千分表, 其标距为 200 mm, 将千分表和箍筋应变片导线与数据采集仪连接, 以便记录试验数据. 本次试验采用等速位移控制加载方式, 位移速率为 0.3 mm/min, 当棱柱体试件破坏明显而不能继续承受轴向荷载时停止试验.

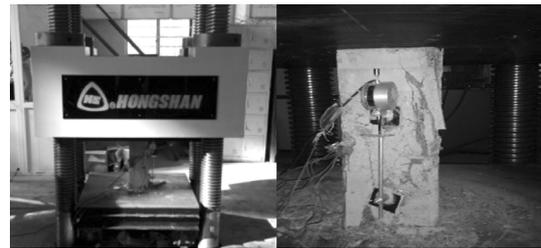


图 3 轴压试验装置

Fig.3 Device of axial compression test

轴压试验完成后, 将混凝土敲碎, 取出其中所有钢筋, 参照文献[17]所述方法计算质量损失率, 以反应钢筋实际锈蚀情况, 其表达式为:

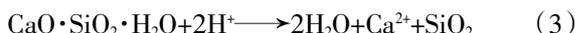
$$\eta_s = (m_0 - m_1) / m_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: η_s 为以质量损失率表示的钢筋实际锈蚀率; m_0 为未锈蚀钢筋的质量; m_1 为按规范《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/T 50082—2009)^[19]除锈后钢筋的质量. 所测得各试件纵筋和箍筋实际锈蚀率结果见表 1.

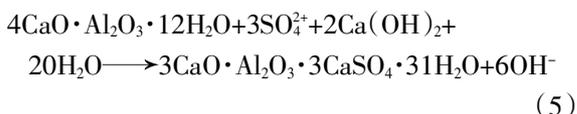
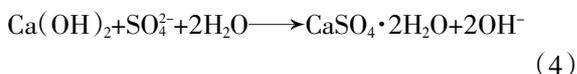
2 试验结果及其分析

2.1 腐蚀过程及现象

酸雨导致的混凝土破坏有两类: 溶蚀性破坏和膨胀性破坏^[20]. 溶蚀性破坏主要是由于水泥水化物中的碱性物质与酸雨中的 H^+ 发生了中和反应, 反应式如下:



膨胀性破坏主要是由于酸雨中的硫酸盐与混凝土水化产物发生化学反应,所生成的膨胀性产物对混凝土产生膨胀破坏作用,反应式如下:



经历上述侵蚀作用后,混凝土会溶解以及生成体积膨胀性物质,产生表面应力和内部应力,致使其内部形成微小孔洞,进一步加快 H^+ 和 SO_4^{2-} 的侵蚀作用. 酸雨侵蚀最终会导致混凝土内部结构发生改变,产生侵蚀孔洞,改变材料孔隙率,同时随着酸雨侵蚀程度增加,内部钢筋发生锈蚀,从而劣化核心区约束混凝土的力学性能.

不同腐蚀循环次数 RC 棱柱体试件的典型表观腐蚀现象如图 4 所示. 可以看出,轻微腐蚀试件(120 次)表面出现大量白色泡沫,但试件表观颜色并未发生明显变化,清除试件表面泡沫,可观察到少许侵蚀孔洞;轻度腐蚀试件(240 次)表面发黄、起砂,混凝土变酥并伴有白色晶体(包括析出的 Na_2SO_4 和膨胀性物质 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)出现,清除试件表面腐蚀产物,可观察到明显侵蚀孔洞;中等腐蚀试件(320 次)表面粗糙不平,开始出现蜂窝麻面、坑洼等现象,白色结晶物增厚且表面颜色加深,试件表面侵蚀孔洞增多增大,混凝土腐蚀程度明显加重;严重腐蚀试件(360 次)表面出现的起皮、坑洼现象更加严重,混凝土骨料外露,试件表面腐蚀覆盖物继续增厚,表面形成蜂窝状孔洞.

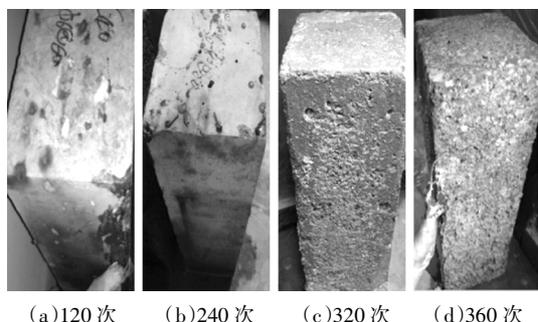


图 4 腐蚀试件表观现象

Fig.4 Apparent phenomena of corroded specimens

2.2 加载破坏现象

在整个加载过程中,不同设计参数下各试件的破坏过程相似,均经历了内部裂缝产生、裂缝发展与

贯通、混凝土保护层脱落以及破坏斜面形成直至核心区混凝土压碎等过程,各试件最终破坏形态如图 5 所示. 由于试件腐蚀程度和体积配箍率的不同,其破坏形态又有以下特点.

对于未腐蚀试件,加载初期,试件表面未见明显裂缝,当轴向荷载达到峰值荷载的 80% 左右时,试件表面开始出现竖向裂缝,但其发展速度缓慢;当轴向荷载超过峰值荷载后,试件表面裂缝迅速发展,宽度不断加宽;进一步加载,混凝土保护层开始片状剥离后脱落,继续加载,试件中部逐渐形成破坏斜面,纵向钢筋逐渐受压屈曲,最终核心区约束混凝土压碎,试件随即宣告破坏.

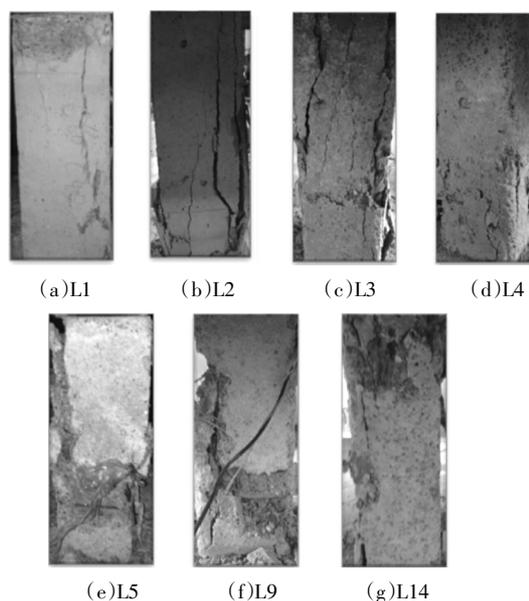


图 5 试件轴压破坏形态

Fig.5 Axial failure patterns of specimens

对于腐蚀试件,在承受轴向荷载之前,由于腐蚀产物的膨胀作用已使试件内部产生微裂缝,因此在整个受压过程中,试件的破坏主要以原有微裂缝持续发展为主,最后受压破坏时的斜面基本是在原有微裂缝的基础上发展形成,且随腐蚀程度的增加,该破坏特征越明显. 此外,由于钢筋锈蚀后截面面积削弱以及应力集中现象影响,腐蚀程度较重试件在加载后期,出现了箍筋角部拉断现象,此时,试件破坏较为突然,破坏斜面更加明显,最终破坏时核心区混凝土的压碎程度更大,表明试件的脆性破坏特征加剧.

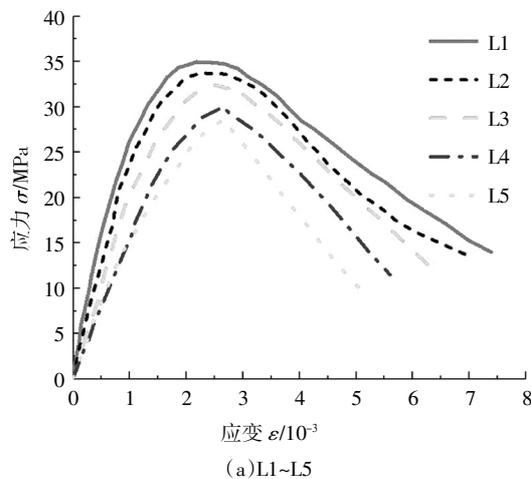
此外,试件的破坏特征也随体积配箍率不同而发生改变. 对于体积配箍率较大的试件,在加载过程中混凝土保护层脱落现象更加明显,且最终破坏环

象多为纵向钢筋屈曲,核心区混凝土被压碎,破坏过程较缓慢;而体积配箍率较小试件最终破坏现象多为箍筋被拉断,导致试件承载能力迅速下降,且破坏较为突然.

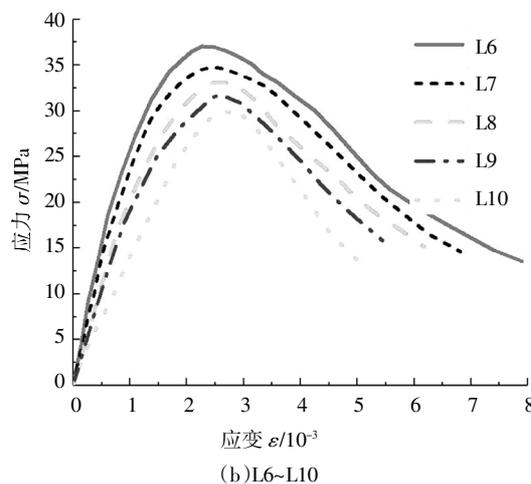
2.3 试验应力-应变曲线

压力试验机测得的试件轴向承载力可看作是纵筋、保护层无约束混凝土和核心区约束混凝土三部分承载力之和,为得到约束混凝土应力,需减去纵筋和保护层混凝土的贡献.基于拉伸试验可确定纵筋承担荷载,保护层混凝土所承担荷载可近似通过未约束混凝土轴心抗压强度 f_{c0} 乘以保护层面积计算得到.

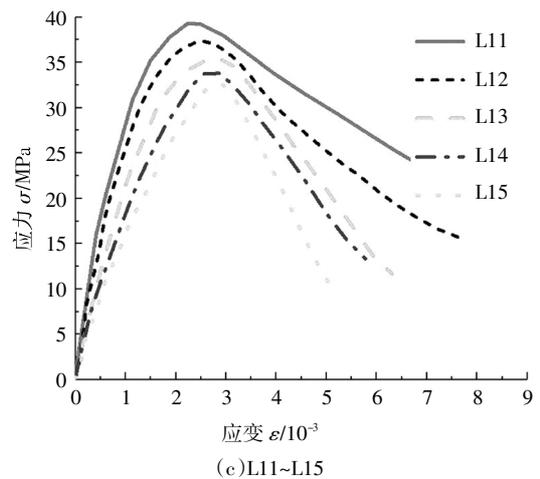
不同腐蚀程度试件的试验应力-应变曲线如图6所示.可以看出,腐蚀程度对试件应力-应变曲线形状影响较大,对于腐蚀程度较轻试件,如试件 L2、L7、L12,其应力-应变曲线上段几乎平行于未腐蚀试件,下降段也较平缓,试件的刚度和延性未见明显降低;随着腐蚀程度的持续增加,试件初始刚度逐渐减小,应力-应变曲线峰值点逐渐向右下方偏移,峰值应力显著降低,与未腐蚀试件 L1 相比,试件 L2、



(a) L1~L5



(b) L6~L10



(c) L11~L15

图 6 试件应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain of specimens

L3、L4、L5 的峰值应力分别降低约 3.68%、5.68%、12.88%、22.54%,由于箍筋轻微锈蚀后,箍筋和混凝土之间的孔隙被锈蚀产物填充,从而提高了箍筋与混凝土间约束效应,略微提高了试件的变形性能,故峰值应变略有增加.此外,随箍筋锈蚀率增大,试件应力-应变曲线的下降段逐渐变陡,极限应变逐渐减小,下降段的水平延伸段逐渐缩短,说明试件的延性随着箍筋锈蚀率的增大而变差.

3 本构模型

常见的箍筋约束混凝土本构模型有 Mander 模型^[21]、过-张模型^[22]、Park 模型^[23]、Saatcioglu 模型^[24]等,其中 Mander 模型本质上考虑了有效约束混凝土面积的相对大小、体积配箍率、箍筋间距及箍筋屈服强度等因素对约束混凝土力学性能的影响,且其骨架曲线可用单个多项式函数表示,应用较为广泛^[25].故本文基于 Mander 模型建立酸雨侵蚀箍筋约束混凝土本构模型.

3.1 模型建立

Mander 模型采用统一的上升段与下降段曲线方程,模型参数包括形状系数 r 、峰值应力与峰值应变,表达式如下:

$$f_c = (f'_{c0} \cdot x \cdot r) / (r - 1 + x^r) \tag{6}$$

$$x = \varepsilon_c / \varepsilon'_{c0} \tag{7}$$

式中: f_c 和 ε_c 分别为约束混凝土的应力与应变; f'_{c0} 和 ε'_{c0} 分别为约束混凝土的峰值应力与峰值应变; r 为模型的形状系数.

对于腐蚀 RC 棱柱体试件,由于其力学性能的

劣化受到钢筋截面面积减小、弹性模量降低、钢筋与混凝土间黏结性能退化等多因素影响,通过理论方法建立其本构模型不现实,因此为综合考虑上述各种因素的影响,采用试验拟合方法.本文首先对试验应力-应变曲线进行归一化处理,采用1stopt软件对每条曲线进行拟合,得到各试件试验应力-应变曲线的形状系数 r ,进而考虑箍筋锈蚀程度影响,得到形状系数 r 的修正公式,并对未腐蚀试件形状系数 r 进行修正;基于试验结果建立考虑箍筋锈蚀程度影响的约束混凝土应力-应变曲线峰值应力、峰值应变和极限应变计算公式,最终建立酸雨侵蚀箍筋约束混凝土本构模型.

3.1.1 形状系数 r 的确定

考虑箍筋锈蚀对约束混凝土本构模型形状系数的影响,定义形状系数修正函数 $h(\eta_s)$,则锈蚀箍筋约束混凝土形状系数 r_c 计算公式为:

$$r_c = h(\eta_s) \cdot r \tag{8}$$

式中: r 为未腐蚀试件形状系数,其计算公式见式(9)~式(11).

$$r = E_c / (E_c - E_{sec}) \tag{9}$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f_{c0}} \tag{10}$$

$$E_{sec} = f'_{cc0} / \varepsilon_{cc0} \tag{11}$$

式中: E_c 为混凝土切线弹性模量; E_{sec} 为混凝土割线弹性模量; f_{c0} 为未约束混凝土抗压强度; f'_{cc0} 、 ε_{cc0} 分别为未腐蚀试件峰值应力与峰值应变.

将各组试件的试验形状系数 r 分别除以各组试件中未腐蚀试件的试验形状系数得到相应修正系数.以箍筋锈蚀率 η_s 为横坐标,以修正系数为纵坐标,得到该修正系数随箍筋锈蚀率 η_s 的变化规律,如图7所示.

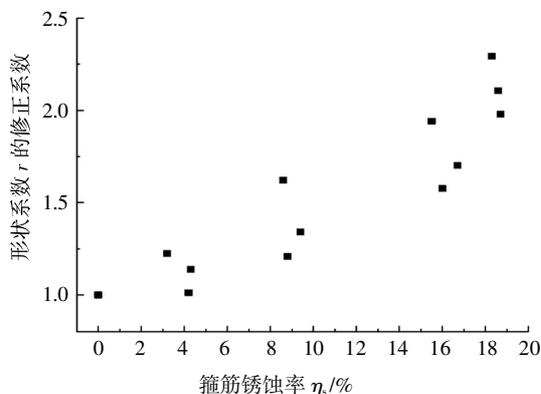


图7 形状系数 r 的修正系数随箍筋锈蚀率的变化规律

Fig.7 The variation of shape factor r correction ratio with stirrup corrosion rates

由图7可知,随着箍筋锈蚀率的增大,腐蚀试件本构模型形状系数 r 的修正系数不断增大,且近似呈二次抛物线变化趋势,故本文将形状系数修正函数 $h(\eta_s)$ 假定为关于箍筋锈蚀率 η_s 的二次函数形式,并考虑边界条件,得到形状系数修正函数的表达式为:

$$h(\eta_s) = a\eta_s^2 + b\eta_s + 1 \tag{12}$$

式中: a 、 b 均为拟合参数.本文通过1stopt软件对形状系数修正函数进行拟合,得到其计算公式及决定系数 R^2 见式(13).

$$h(\eta_s) = 0.002\eta_s^2 + 0.024\eta_s + 1, R^2 = 0.85 \tag{13}$$

3.1.2 峰值应力 f'_{cc} 与峰值应变 ε_{cc} 的确定

考虑箍筋锈蚀对约束混凝土峰值应力与峰值应变的影响,分别定义峰值应力折减函数 $f(\eta_s)$ 和峰值应变折减函数 $g(\eta_s)$,则锈蚀箍筋约束混凝土峰值应力及峰值应变计算公式为:

$$f'_{cc} = f(\eta_s) \cdot f'_{cc0} \tag{14}$$

$$\varepsilon_{cc} = g(\eta_s) \cdot \varepsilon_{cc0} \tag{15}$$

式中: f'_{cc0} 、 ε_{cc0} 分别为未腐蚀试件峰值应力与峰值应变,其计算公式见式(16)~式(19).

$$f'_{cc0} = f'_{c0} \cdot (-1.254 + 2.254 \times \sqrt{1 + 7.94 f'_1 / f'_{c0}} - 2 f'_1 / f'_{c0}) \tag{16}$$

$$f'_1 = \rho \cdot f_{yh} \cdot k_e \tag{17}$$

$$\rho = A_{sv} / (s \cdot b) \tag{18}$$

$$\varepsilon_{c0} = (1 + \lambda_1) \cdot \varepsilon_{c0} \tag{19}$$

式中: f'_{c0} 为未约束混凝土抗压强度; f'_1 为有效侧向围压; ρ 为配箍率; A_{sv} 为箍筋面积; s 为核心区混凝土边长; b 为箍筋间距; f_{yh} 为箍筋屈服强度; k_e 为有效约束系数,其计算公式见参考文献[21]; λ_1 为配箍特征值; ε_{c0} 为未约束混凝土峰值应变,可按经验取0.002.

将各组试件的试验峰值应力与试验峰值应变值分别除以各组试件中未腐蚀试件的峰值应力与峰值应变得到相应的修正系数.以箍筋锈蚀率 η_s 为横坐标,以修正系数为纵坐标,分别得到峰值应力与峰值应变修正系数随箍筋锈蚀率 η_s 的变化规律,如图8所示.

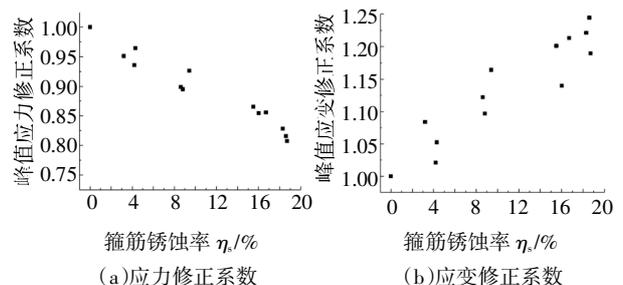


图8 峰值应力和应变修正系数随箍筋锈蚀率的变化规律

Fig.8 The variation of peak stress and strain correction ratio with stirrup corrosion rates

由图 8 可知,随着箍筋锈蚀率的增大,腐蚀试件的约束混凝土本构模型峰值应力修正系数不断减小,峰值应变修正系数不断增大,且均近似呈线性变化趋势.为保证拟合结果具有较高精度且便于在数值模拟中应用,本文将峰值应力折减函数 $f(\eta_s)$ 与峰值应变折减函数 $g(\eta_s)$ 均假定为关于箍筋锈蚀率 η_s 的一次函数形式,并考虑边界条件,得到峰值应力与峰值应变修正函数的表达式为:

$$f(\eta_s) = 1 + k_1\eta_s \quad (20)$$

$$g(\eta_s) = 1 + k_2\eta_s \quad (21)$$

式中: k_1, k_2 均为拟合参数. 本文通过 1stopt 软件对峰值应力与峰值应变修正函数进行拟合, 得到其计算公式及决定系数 R^2 见式(22)~式(23).

$$f(\eta_s) = 1 - 0.0096\eta_s, R^2 = 0.96 \quad (22)$$

$$g(\eta_s) = 1 + 0.012\eta_s, R^2 = 0.90 \quad (23)$$

3.1.3 极限应变 ε_{cu} 的确定

王南等^[20]通过对大量箍筋约束混凝土轴压试验数据进行统计分析, 提出了箍筋约束混凝土极限应变计算公式.

$$\varepsilon_{cu0} = 0.0033 \times \left[1 + 166 \times \left(\frac{k_c \cdot \rho_s \cdot f_y}{f_c'} \right)^{1.65} \right] \quad (24)$$

式中: ρ_s 为体积配箍率; f_y 为箍筋屈服强度.

本文基于公式(24)计算未腐蚀试件的极限应变,并考虑箍筋锈蚀对约束混凝土极限应变的影响,定义极限应变修正函数 $l(\eta_s)$,则锈蚀箍筋约束混凝土极限应变计算公式为:

$$\varepsilon_{cu} = l(\eta_s) \cdot \varepsilon_{cu0} \quad (25)$$

将各组试件的极限应变值分别除以各组试件中未腐蚀试件的极限应变得到相应的修正系数.以箍筋锈蚀率 η_s 为横坐标,以修正系数为纵坐标,得到极限应变修正系数随箍筋锈蚀率 η_s 的变化规律,如图 9 所示.

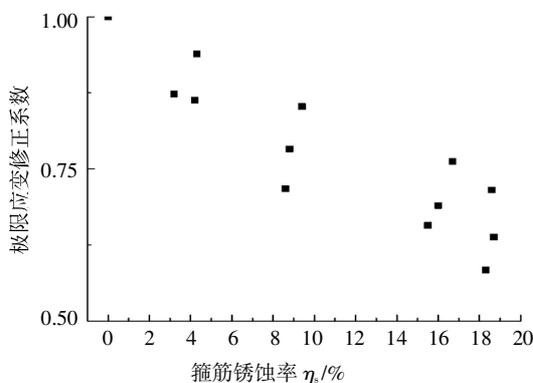


图 9 极限应变修正系数随箍筋锈蚀率的变化规律

Fig.9 The ultimate strain correction ratio with stirrup corrosion rates

由图 9 可知,随箍筋锈蚀率增大,各试件极限应变不断减小,且近似呈线性变化趋势,故本文将极限应变修正函数 $l(\eta_s)$ 定义为关于箍筋锈蚀率 η_s 的一次函数形式,并考虑边界条件,得到极限应变修正函数计算公式为:

$$l(\eta_s) = 1 + b\eta_s \quad (26)$$

式中: b 为拟合参数. 本文通过 1stopt 软件对形状系数修正函数进行拟合, 得到其计算公式及决定系数 R^2 见式(27).

$$l(\eta_s) = 1 - 0.02\eta_s, R^2 = 0.81 \quad (27)$$

3.2 模型验证

为验证本文所提酸雨侵蚀箍筋约束混凝土本构模型的准确性, 采用上述本构模型计算方法对本文部分试件进行模拟分析, 所得计算结果与试验结果的对比如图 10 所示.

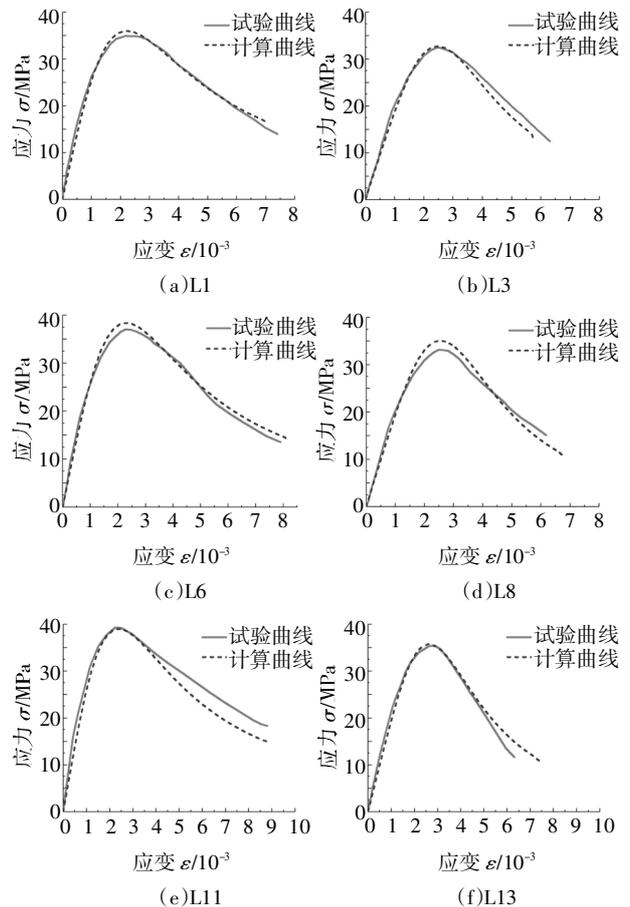


图 10 计算曲线与试验曲线对比

Fig.10 The comparison of constitutive curve between calculation and test

由图 10 可以看出,试件的计算骨架曲线与试验骨架曲线在形状、峰值应力、峰值应变和极限应变方面均吻合较好,说明本模型的计算精度较高.同时,

采用计算误差 E_i 表示上述各对比试件试验曲线与模拟曲线的误差,计算公式如下:

$$E_i = \frac{1}{\max_{i=1,2,\dots,N}(|\sigma_i|)} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_i - \sigma_i')^2} \quad (28)$$

式中: E_i 为计算误差,下标 i 表示第 i 个数据点, N 表示数据点总数; σ_i 和 σ_i' 分别表示第 i 个数据点的应力试验值与计算值. 试件 L1、L3、L6、L8、L11、L13 的计算误差 E_i 分别为 3.22%、3.96%、3.00%、4.18%、6.42%、3.82%,误差大都小于 5%,说明计算精度良好.

4 结论

出于酸雨环境下腐蚀 RC 结构剩余承载力及抗震性能评估需要,本文对酸雨侵蚀箍筋约束混凝土本构模型进行了研究,结论如下:

1)随着酸雨侵蚀程度增加,RC 棱柱体试件峰值应力下降明显,峰值应变略有增加,应力-应变曲线初始段弹性模量和极限应变逐渐减小,破坏较为突然,表明试件延性逐渐变差.

2)基于 Mander 模型以及现有研究成果,确定了未腐蚀 RC 棱柱体试件应力-应变曲线形状系数和峰值应力、峰值应变、极限应变等特征点计算公式,并通过对试验数据的分析拟合,提出了考虑箍筋锈蚀程度影响的形状系数与各特征点修正系数计算公式,最终建立了酸雨侵蚀箍筋约束混凝土本构模型.

3)建立的酸雨侵蚀箍筋约束混凝土本构模型计算结果与试验结果吻合较好,说明该模型可较好地反映酸雨环境下箍筋约束混凝土的力学性能与变形性能,可用于该环境下在役 RC 结构剩余承载力及抗震性能评估.

参考文献

- [1] 胡晓波. 酸雨侵蚀混凝土的试验模拟分析 [J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(S1): 147—152.
HU X B. Analysis for simulation test on acid rain attacking concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(S1): 147—152. (In Chinese)
- [2] 卫军, 张萌, 董荣珍, 等. 钢筋锈蚀对混凝土梁破坏模式影响的试验研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(10): 15—21.
WEI J, ZHANG M, DONG R Z, et al. Experimental research on the failure mode of concrete beam due to steel corrosion [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(10): 15—21. (In Chinese)
- [3] 梁岩, 陈淮, 罗小勇. 一般大气环境下钢筋混凝土构件抗震性能时变特征 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 104—112.
LIANG Y, CHEN H, LUO X Y. Time-dependent seismic performance of reinforced concrete member under common atmosphere environment [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(3): 104—112. (In Chinese)
- [4] CHRISTOPHER H, WILLIAM C. Tests of reinforced concrete beams with corrosion-damaged stirrups [J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(1): 133—141.
- [5] SUFFERN C, EL-SAYED A, SOUDKI K. Shear strength of disturbed regions with corroded stirrups in reinforced concrete beams [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2010, 37(8): 1045—1056.
- [6] LI Q, NIU D T, XIAO Q H, et al. Experimental study on seismic behaviors of concrete columns confined by corroded stirrups and lateral strength prediction [J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 704—713.
- [7] LU Z H, OU Y B, ZHAO Y G, et al. Investigation of corrosion of steel stirrups in reinforced concrete structures [J]. Construction and Building Materials, 2016, 127: 293—305.
- [8] 杨成, 薛昕, 张瀚引, 等. 箍筋弯曲端部锈断分布对钢筋混凝土梁受剪性能影响的模拟研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(7): 146—153.
YANG C, XUE X, ZHANG H Y, et al. Shear behavior of RC beams with spatial distribution of corrosion-induced fractured stirrups by finite element analysis [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(7): 146—153. (In Chinese)
- [9] 郑山锁, 王萌, 胡义. 箍筋锈蚀对 RC 框架柱耗能能力影响研究 [J]. 建筑结构, 2014, 44(5): 40—44.
ZHENG S S, WANG M, HU Y. Study on influence of stirrups corrosion on energy dissipation capacity of RC frame column [J]. Building Structure, 2014, 44(5): 40—44. (In Chinese)
- [10] 史庆轩, 王朋, 田园, 等. 高强箍筋约束高强混凝土短柱抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(8): 1—8.
SHI Q X, WANG P, TIAN Y, et al. Experimental study on seismic behavior of high-strength concrete short columns confined with high-strength stirrups [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(8): 1—8. (In Chinese)
- [11] 阎石, 肖潇, 张曰果, 等. 高强钢筋约束混凝土矩形柱的抗震性能试验研究 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006, 22(1): 7—10.
YAN S, XIAO X, ZHANG Y G, et al. Seismic performances of square HSC columns confined with high-strength PC rebar [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2006, 22(1): 7—10. (In Chinese)
- [12] 钱稼茹, 程丽荣, 周栋梁. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(10): 1369—1373.

- QIAN J R, CHENG L R, ZHOU D L. Behavior of axially loaded concrete columns confined with ordinary hoops [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42 (10): 1369—1373. (In Chinese)
- [13] ABADI H A, PATON-COLE V, PATEL V I, *et al.* Axial strength and elastic stiffness behaviour of partially confined concrete columns [J]. Construction and Building Materials, 2019, 196: 727—741.
- [14] 李强, 牛荻涛, 刘磊, 等. 箍筋锈蚀混凝土棱柱体试件轴心受压试验研究 [J]. 建筑结构, 2013, 43(1): 65—68.
LI Q, NIU D T, LIU L, *et al.* Experimental study on reinforced concrete prism specimens confined by corroded stirrups [J]. Building Structure, 2013, 43(1): 65—68. (In Chinese)
- [15] 郑山锁, 关永莹, 黄莺歌, 等. 酸雨环境下约束混凝土本构关系试验 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 237—241.
ZHENG S S, GUAN Y Y, HUANG Y G, *et al.* Experiment on the constitutive relation of confined concrete under acid rain environment erosion [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 237—241. (In Chinese)
- [16] VU N S, YU B, LI B. Stress-strain model for confined concrete with corroded transverse reinforcement [J]. Engineering Structures, 2017, 151(15): 472—487.
- [17] 刘磊, 牛荻涛, 李强, 等. 锈蚀箍筋约束混凝土应力-应变本构关系模型 [J]. 建筑材料学报, 2018, 21(5): 811—816.
LIU L, NIU D T, LI Q, *et al.* Stress-strain constitutive relation model of corroded stirrups confined concrete [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(5): 811—816. (In Chinese)
- [18] 郑山锁, 张艺欣, 黄莺歌, 等. 酸雨环境下钢筋混凝土框架梁抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(9): 20—27.
ZHENG S S, ZHANG Y X, HUANG Y G, *et al.* Experimental study on seismic behaviors of reinforced concrete frame beams in simulated acid environment [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(9): 20—27. (In Chinese)
- [19] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法: GB/T 50082—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 64—67.
Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 64—67. (In Chinese)
- [20] 周飞鹏. 混凝土的酸雨腐蚀模型研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005: 1—10.
ZHOU F P. Study on acid rain corrosion model of concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005: 1—10. (In Chinese)
- [21] 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.
- [22] 过镇海, 张秀琴, 张达成, 等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 1982, 3(1): 1—12.
GUO Z H, ZHANG X Q, ZHANG D C, *et al.* Experimental investigation of the complete stress-strain curve of concrete [J]. Journal of Building Structures, 1982, 3(1): 1—12. (In Chinese)
- [23] PARK R, PRIESTLEY M J N, GILL W D. Ductility of square-confined concrete columns [J]. Journal of the Structural Division, 1982, 108(4): 929—950.
- [24] SAATCIOGLU M, RAZVI S R. Strength and ductility of confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(6): 1590—1607.
- [25] 周文峰, 黄宗明, 白绍良. 约束混凝土几种有代表性应力-应变模型及其比较 [J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(4): 121—127.
ZHOU W F, HUANG Z M, BAI S L. Introduction and comparison of several representative confinement models for concrete [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25(4): 121—127. (In Chinese)
- [26] 王南, 史庆轩, 张伟, 等. 箍筋约束混凝土轴压本构模型研究 [J]. 建筑材料学报, 2019, 22(6): 933—940.
WANG N, SHI Q X, ZHANG W, *et al.* A uniaxial compressive model for concrete confined with stirrups [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(6): 933—940. (In Chinese)