

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.064



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压性能研究进展

张欣¹, 郑山锁¹, 阮升¹, 袁佳伟¹, 胡锦华¹, 王喜臣²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院; 结构工程与抗震教育部重点实验室, 西安 710055;

2. 中建八局第二建设有限公司, 济南 250014)

摘要: 锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压性能是对多龄期钢筋混凝土(RC)结构进行弹塑性分析与抗震性能研究的基础, 准确研究其劣化规律, 对于多龄期RC结构耐久性能评估、剩余抗震能力预测和数值模拟等具有重要作用。从试验方法、抗压强度和应力-应变本构关系等方面综述锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压性能研究现状; 详细介绍不同的试验方法, 并系统分析其优缺点和适用性; 归纳总结锈蚀箍筋约束混凝土单轴抗压性能的影响因素、退化模型和单轴应力-应变本构关系模型; 分析当前锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压性能研究中存在的不足及研究趋势。既有研究成果表明, 现阶段关于重复荷载作用下锈蚀箍筋约束混凝土单轴应力-应变本构关系的研究十分有限。最后, 对现有研究中存在的不足及研究趋势进行了讨论。

关键词: 锈蚀箍筋; 箍筋约束混凝土; 试验方法; 单轴受压性能; 本构模型; 文献综述

中图分类号: TU375.3 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2025)06-0133-18

Research progress on uniaxial compression performance of concrete restrained by rusted stirrup

ZHANG Xin¹, ZHENG Shansuo¹, RUAN Sheng¹, YUAN Jiawei¹, HU Jinhua¹,
WANG Xichen²

(1. School of Civil Engineering; Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China; 2. China Construction Eighth Bureau Second Construction Co., LTD, Jinan 250014, P. R. China)

Abstract: The uniaxial compression performance of rusted hoop-restrained concrete serves as the foundation for the elastoplastic analysis and seismic performance research of multi-age reinforced concrete (RC) structures. The precise study of its deterioration rule is of great importance for durability evaluation, residual seismic capability prediction and numerical simulation of multi-age RC structures. In this paper, the research status of uniaxial compression behavior of concrete restrained by rusted stirrup is reviewed from the aspects of test method, compressive strength and stress-strain constitutive relation. Different test methods are introduced in detail, and their

收稿日期: 2024-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(52278530); 陕西省重点研发计划(2021ZDLSF06-10)

作者简介: 张欣(1997-), 男, 博士生, 主要从事工程结构抗震和耐久性研究, E-mail: zhangxin35710@163.com。

郑山锁(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhengshansuo@263.net。

Received: 2024-04-24

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52278530); Key R & D Project of Shaanxi Province (No.2021ZDLSF06-10).

Author brief: ZHANG Xin (1997-), PhD candidate, main research interests: seismic resistance and durability of engineering structures, E-mail: zhangxin35710@163.com.

ZHENG Shansuo (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhengshansuo@263.net.

advantages, disadvantages, and applicabilities are analyzed systematically. The factors affecting the uniaxial compressive performance of rusted stirrup confined concrete, the uniaxial compressive performance degradation model and the uniaxial stress-strain constitutive relationship model are summarized. The shortcomings and trends of current research on the uniaxial compression performance of concrete restrained by rusted stirrups are analyzed. A summary of existing research results shows that the current research on the uniaxial stress-strain constitutive relationship of rusted stirrup confined concrete under repeated loads is very limited. Finally, the shortcomings and research trends of existing studies are discussed.

Keywords: corroded stirrup; stirrup-confined concrete; test method; axial compression performance; constitutive model; literature review

随着服役龄期的增长,钢筋混凝土(RC)结构将面临包括钢筋锈蚀、混凝土碳化、冻融破坏、碱集料反应等一系列材料方面的耐久性问题^[1]。Mehta^[2]更是直言,钢筋腐蚀是导致RC结构耐久性损伤的第一要素。氯盐侵蚀或酸性环境均会造成RC结构锈蚀^[3-4]。中国海岸线漫长,内陆地区环境多样,且建筑总面积超过了500亿m²^[5],每年有大量在役RC结构由于耐久性不足而提前失效,达不到预定的使用年限。据统计,早在2014年中国全行业腐蚀成本就高达2.1万亿元人民币,约占全国生产总值(GDP)的3.34%;2018年,仅青岛市的腐蚀损失就达400多亿元人民币^[6]。在美国,每年因钢筋腐蚀造成的损失及对其进行修复的成本就超过了1500亿美元。在澳大利亚,每年腐蚀损失更占到该国GDP的4.2%^[7]。由此可见,中国乃至世界各国普遍面临着由于钢筋锈蚀引起的RC结构耐久性问题,并由此带来巨大的经济损失。

箍筋约束效应对混凝土的增益作用在于^[8]:1)提高了核心区混凝土的单轴抗压强度;2)增大了核心区混凝土的峰值点应变;3)使核心区混凝土破坏更加平缓。箍筋约束混凝土由于其优异性能而被广泛应用于建筑、桥梁等RC结构。然而,在服役多年后,箍筋约束混凝土同样面临内部钢筋锈蚀引起的时变力学性能劣化问题。如图1所示,锈蚀不仅会使钢筋净截面积减小,锈蚀产物的堆积和体积

膨胀还会造成混凝土锈胀开裂、剥落。由此引发的钢筋力学性能退化和混凝土截面损伤等将导致箍筋约束作用、纵筋抗屈曲能力和锈裂混凝土的力学性能显著降低,从而严重劣化箍筋约束混凝土的力学性能。既有研究表明,锈蚀引起的箍筋约束混凝土力学性能劣化将使建筑结构在地震时更易发生倒塌^[9-10]。

对于锈蚀箍筋约束混凝土而言,单轴受压强度和应力-应变曲线反映了其最基本的力学性能,是对多龄期RC结构进行弹塑性分析与抗震性能研究的基础。而当前,中国正逐步进入存量建筑和基础设施时代^[11]。与此同时,早期建造的RC结构在恶劣环境中使用了数十年,其力学性能已出现不同程度退化。鉴于此,准确研究锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压性能,对于多龄期RC结构耐久性能评估、剩余抗震能力预测和数值模拟等具有重要意义和实用价值。

近年来,涌现出较多关于锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压性能的研究成果,但既有研究并不充分,且无统一的试验方法,亟待进一步研究和系统性深化。鉴于此,笔者收集了现有研究成果,并从锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压性能试验方法、单轴抗压性能和应力-应变本构关系等方面进行总结和讨论,指出既有研究中存在的问题,并对其发展趋势进行展望。

1 试验方法

1.1 锈蚀试验方法

在单轴受压试验前,需获取锈蚀箍筋约束混凝土试件,而不同的锈蚀试验方法与自然锈蚀之间存在差异,会显著影响单轴受压结果的可靠性。因此,优选锈蚀效果贴近于真实的加速锈蚀方法是准确研究锈蚀箍筋约束混凝土力学性能的前提。目前常用于RC试件的加速锈蚀方法包括自然锈蚀法、人工气候模拟法和通电加速锈蚀法等。

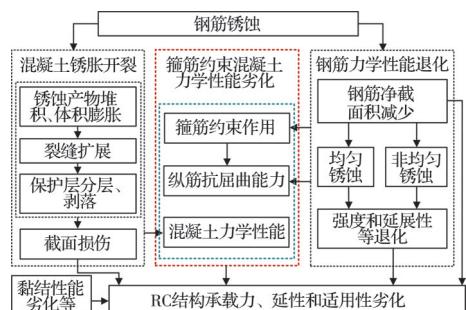


图1 锈蚀对箍筋约束混凝土及RC结构的影响

Fig. 1 Influence of corrosion on stirrup-confined concrete and RC structure

1.1.1 自然锈蚀法

自然锈蚀法^[12]的优点在于接近真实的锈蚀效果,但缺点同样显著,无法在短时间内获取锈蚀率较大的试件是该试验方法面临的最大难题。

1.1.2 人工气候模拟法

人工气候模拟法的锈蚀效果仅次于自然锈蚀法^[13],但人工气候模拟实验室造价昂贵,运行费用较高,且试验周期相对较长。因此,现阶段通过人工气候模拟来研究箍筋约束混凝土锈蚀问题的成果相对有限(统计结果见表1)。

表1 不同研究者采用的试件截面形状和试件尺寸

Table 1 Cross-section shapes and sizes of specimens adopted by different researchers

截面形状	试件尺寸	研究学者
方形	150 mm×150 mm×300 mm	Zhang等 ^[23]
	150 mm×150 mm×450 mm	李强等 ^[24] 、刘磊等 ^[25] 、郑山锁等 ^[26] 、郑跃等 ^[27] 、曹琛 ^[28] 、Joshi等 ^[29]
	200 mm×200 mm×600 mm	陶伯雄 ^[30] 、余波等 ^[31] 、Zhang等 ^[32] 、Vu等 ^[21]
	250 mm×250 mm×500 mm	Zhang等 ^[23]
	250 mm×250 mm×750 mm	Zhang等 ^[23]
	200 mm×200 mm×320 mm	Goharrokhi等 ^[33]
圆形	125 mm×125 mm×600 mm	Aminulai等 ^[34]
	200 mm×600 mm	陶伯雄 ^[30] 、余波等 ^[31] 、Vu等 ^[21]
	250 mm×600 mm	潘丽娜 ^[35]
	150 mm×450 mm	尚志刚 ^[22]
	150 mm×300 mm	Ahmadi等 ^[36]
	200 mm×600 mm	Zhou等 ^[37]
矩形	500 mm×1 500 mm	Andisheh等 ^[38]
	125 mm×600 mm	Aminulai等 ^[34]
	200 mm×400 mm×600 mm	余磊 ^[39] 、王银辉等 ^[40] 、Ma等 ^[41]
	200 mm×600 mm×600 mm	余磊 ^[39] 、王银辉等 ^[40] 、Ma等 ^[41]

1.1.3 电化学法

通电加速锈蚀法在锈蚀试验中应用广泛,主要分为全浸泡外加电流法、半浸泡外加电流法、贴面外加电流法和预设辅助电极外加电流法等^[14]。

全浸泡外加电流法锈蚀效率较高,并通过法拉第定律计算电流密度和通电时长。但锈蚀钢筋通常表现为内外侧一致的均匀锈蚀,与自然锈蚀存在差异。且近年来研究成果表明,采用法拉第定律计算的钢筋锈蚀率理论值与试验值存在误差^[15-17]。

半浸泡外加电流法锈蚀效果较全浸泡法更加贴近自然锈蚀^[14],但不能满足内部待锈钢筋呈立体分布的RC试件加速锈蚀,仅能用于研究局部锈蚀的试验。

贴面外加电流法锈蚀效果与全浸泡法相似。为了改进其锈蚀效果,有学者增加了干湿循环过程,提出贴面外加电流-干湿循环法^[18]。该方法锈蚀效果较好,且操作简单,但缺点是电解质溶液消耗量大。

预设辅助电极外加电流干湿循环法^[19]不仅能使钢筋形成近似自然的不均匀锈蚀,还可分别计算电渗和通电时长,能更加准确地控制试件锈蚀程度。

综上所述,将自然锈蚀法应用于箍筋约束混凝土锈蚀问题的研究中最富实际意义,但时间成本使其难以满足大量的试验需求;人工气候模拟法的锈蚀效果非常贴近自然锈蚀,随着该技术逐渐普及,有望在箍筋约束混凝土锈蚀问题的研究中得到广泛应用;现阶段,由于RC试件耐久性研究量大、面广、需求迫切,大量锈蚀试验仍需通过电化学法进行加速锈蚀。其中,贴面外加电流-干湿循环法和预设辅助电极外加电流法均能达到近似自然的锈蚀效果,应用前景较好;而全浸泡电化学法的锈蚀效果与自然锈蚀存在较大差异,因此不建议采用。

1.2 单轴受压试验方法

锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压试验的典型加载装置如图2所示,通过向试件施加单轴轴心荷载获取其应力-应变数据。

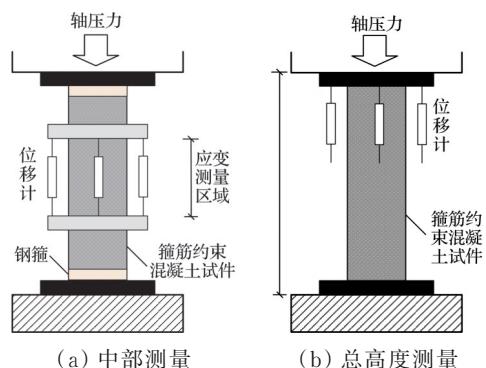


图2 锈蚀箍筋约束混凝土柱典型单轴受压试验装置

Fig. 2 Typical axial compression test devices for concrete columns confined by rusted stirrups

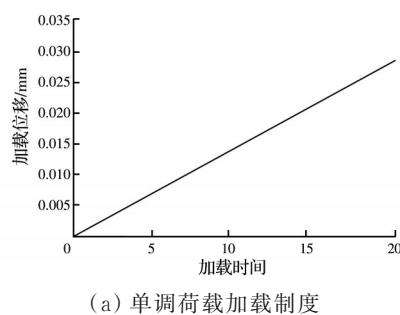
1.2.1 数据提取方法

在试验中,轴压力通过压力传感器采集,准确性较高,但学者们对应变测量区域仍存在争议。Mander等^[20]研究发现,对于未锈蚀试件,其破坏大多集中于试件中部1/3处,并推荐该区域为应变测量区。一些学者在锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压试验中沿用了此方法,如图2(a)所示,Vu等^[21]在试件中部悬挂位移计来测量其应变数据。有学者指出^[22],由于锈蚀的随机性,单轴受压柱的破坏可能

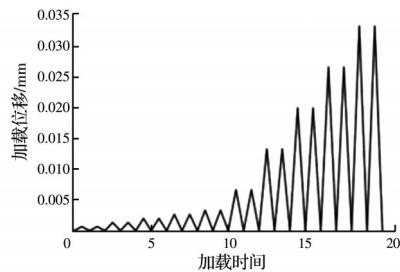
发生在试件任意位置,并且在加载过程中保护层混凝土的脱落会使试件表面仪器不再牢靠。因此,采用试件总高度来测量应变数据,如图 2(b)所示,然而,总高度测量法的应变测量区域大于中部测量法,因此其计算应变更小。

1.2.2 加载制度

锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压试验的荷载分为单调轴压荷载和重复轴压荷载,不同荷载的典型加载制度分别如图 3(a)、(b)所示。单调加载从零开始直至试件破坏,而重复加载会经历卸载和再加载过程,可较好地反映地震时锈蚀箍筋约束混凝土的加卸载路径和累积损伤效应。



(a) 单调荷载加载制度



(b) 重复荷载加载制度

图 3 不同形式荷载的典型加载制度

Fig. 3 Typical loading systems of different types of loads

1.2.3 试件形状和尺寸

为了与实际工程结构对应,学者们研究了不同截面形状锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压性能,常见的截面形状有方形、圆形和长方形等。对现有研究中试件形状和尺寸的统计结果见表 1。

如表 1 所示,不同研究者采用的试件截面尺寸有所差异,国外学者采用的截面尺寸普遍大于中国学者,尺寸效应对其单轴抗压性能的影响更小。同时,国外学者采用的试件长细比存在较大差异,中国学者则较为一致。试件长细比过小会增大环箍效应对锈蚀箍筋约束混凝土单轴抗压性能的影响。长细比过大又不利于试件在单轴受压下的稳定,进而导致其单轴受压性能的变化。故不同学者采用的试件长细比(高厚比)多为 3:1(见表 1)。由于锈蚀箍筋约束混凝土试件截面尺寸和长细比差异会

显著影响其单轴受压性能,因此,在后续研究中建议保持试件外形参数的统一。

2 锈蚀箍筋约束混凝土单轴抗压性能

2.1 单轴抗压性能影响因素

影响锈蚀箍筋约束混凝土单轴抗压性能的主要因素有:箍筋锈蚀水平、纵筋和箍筋是否共同锈蚀、箍筋配置水平、约束混凝土截面形状和截面尺寸、配箍形式和混凝土强度等级等。

2.1.1 箍筋锈蚀水平

刘磊等^[25]和李强等^[42]通过试验研究了箍筋锈蚀量对约束混凝土应力-应变曲线的影响,发现箍筋锈蚀会使曲线初始段上凹。当箍筋轻微锈蚀时,试件刚度变化不大,随着锈蚀量的增加,试件强度、刚度降低的幅度增大,延性变差,脆性破坏特征增强;郑山锁等^[26]、潘丽娜^[35]同样基于试验结果验证了箍筋锈蚀对约束混凝土强度、延性的影响规律,还发现箍筋轻微锈蚀对试件受压后期的变形性能有一定提升。Joshi 等^[29]通过试验发现,箍筋锈蚀对约束混凝土应变的影响大于对强度的影响。Vu 等^[21]也发现,箍筋锈蚀对约束混凝土极限应力、极限应变的影响比对强度的影响更大。Zhang 等^[32]、曹琛^[28]、Ma 等^[41]、Li 等^[43]、Goharrokhi 等^[33]、吕耀鹏^[44]、苏昊等^[45]、Radhi 等^[46]、Revathy 等^[47]、Andisheh 等^[38]、尚志刚^[22]、Zhang 等^[23]也分别通过试验发现箍筋锈蚀率增大会使约束混凝土强度、刚度或延性降低的结论。潘丽娜^[35]、李强等^[24]、Zhou 等^[37]则通过试验发现,箍筋锈蚀程度较大时会对约束混凝土抗压性能产生负面影响,但轻微锈蚀却能增强试件的初始刚度和承载能力。

2.1.2 纵筋和箍筋是否共同锈蚀

锈蚀不仅会降低箍筋约束作用,还会减小纵筋的抗屈曲能力^[48]。近年来,学者们大多聚焦于箍筋锈蚀对约束混凝土单轴抗压性能的影响,但在真实结构中,纵筋和箍筋均会发生锈蚀。李强等^[24]、Li 等^[49]、刘俊杰^[50]、Zhang 等^[23]均通过对比试验发现,箍筋与纵筋共同锈蚀试件相较单一种类钢筋锈蚀试件,其抗压强度更低,延性也更差。

2.1.3 箍筋配置水平

配箍特征值、体积配箍率和箍筋间距均能一定程度反映箍筋的配置水平。郑山锁等^[26]通过试验发现,随着配箍率特征值的增加,锈蚀箍筋约束混凝土的峰值应力和峰值应变逐渐增大,延性逐渐增强,锈蚀对其抗压性能的影响逐渐减小。潘丽娜^[35]、曹琛^[28]和李强等^[24]的研究也发现了与上述相同的规律。尚志刚^[22]指出,配箍率对锈蚀箍筋约束混凝土

的初始刚度影响不大。Goharrokhi等^[33]通过试验得出了锈蚀箍筋约束混凝土抗压强度随箍筋间距增大而减小的结论。Vu等^[21]、余波等^[31]的试验结果表明,体积配箍率仅对锈蚀箍筋约束混凝土的峰值应力、极限应变和下降段斜率有显著影响,且体积配箍率越小,锈蚀对其峰值应力和极限应变的影响越显著。Ma等^[41]、Zhang等^[23]的研究发现,体积配箍率的降低将导致锈蚀箍筋约束混凝土峰值应力、峰值应变和极限应变的减小。而Andisheh等^[38]的研究表明,由于点蚀效应的影响,相较于体积配箍率,锈蚀箍筋约束混凝土的特征点更加依赖于锈蚀箍筋的有效力学性能。

2.1.4 约束混凝土截面形状和截面尺寸

约束混凝土截面形状的不同使得围压沿其核心区周长的分布也有较大差异。Vu等^[21]、Aminulai等^[34]通过试验发现,当其他因素相似时,圆形截面锈蚀箍筋约束混凝土试件较方形截面试件(图4(a)、(b))的承载力更强,峰值应力后的延性更好。Zhang等^[23]对比研究了不同尺寸系数的方形锈蚀箍筋约束混凝土(图4(c)),并指出截面尺寸不仅影响其承载力,还会改变其应力-应变曲线下降段的形状。余磊^[39]和Ma等^[41]的研究表明,对于矩形截面锈蚀箍筋约束混凝土(图4(d)),长宽比的增大虽能增加有效约束面积,从而提高约束混凝土的峰值强度和延性,但对峰值强度的提升小于对有效约束面积的提升,使得约束混凝土的峰值应力有所降低。刘俊杰^[50]则对L形截面锈蚀箍筋约束混凝土试件开展了单轴受压试验,但未进行截面形状对比研究。

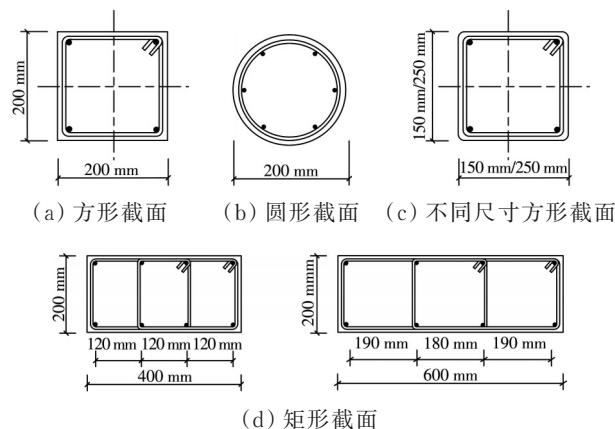


图4 不同约束混凝土截面形状

Fig. 4 Different confined concrete section shapes

2.1.5 配箍形式

Vu等^[21]通过试验研究了不同配箍形式(图5(a)、(b))对方形锈蚀箍筋约束混凝土抗压强度的影响,发现当锈蚀程度、体积配箍率相近时,双周箍筋试件的抗压性能优于单周箍筋试件。Ma等^[41]研究

了矩形锈蚀箍筋约束混凝土不同配箍形式(图5(c)、(d))的影响,指出四肢配箍试件的强度和延性较双肢配箍试件有较大提升。吕耀鹏^[44]则对比研究了锈蚀复合螺旋配箍和复合普通配箍约束混凝土(图5(e)、5(f))之间的差异,发现复合螺旋配箍试件各特征值降低幅度均小于复合普通配箍试件。

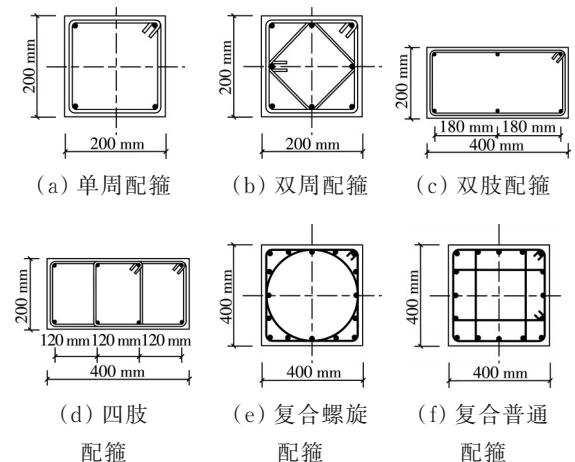


图5 不同箍筋配置形式

Fig. 5 Different stirrup configurations

2.1.6 混凝土强度等级

对于箍筋约束混凝土而言,混凝土强度越高,则需更强的约束,才能使其充分发挥作用^[51],当箍筋锈蚀水平和其他因素相当时,不同强度等级锈蚀箍筋约束混凝土的单轴抗压性能退化规律存在差异。郑山锁等^[26]通过试验研究发现,随着混凝土强度(C25、C30和C40)的提高,锈蚀箍筋约束混凝土的峰值应力逐渐增大,延性增强,并且混凝土强度越高,锈蚀对其峰值应力减小和峰值应变增大的程度越小。Zhou等^[52]的研究表明,混凝土强度等级(C20、C25和C30)越低,锈蚀箍筋约束混凝土的峰值应力和应变退化越严重,但裂缝宽度和总长越小。尚志刚^[22]的研究表明,随着混凝土强度(C30、C40和C50)的增大,锈蚀箍筋约束混凝土的刚度明显提升,但锈胀裂缝数量和宽度更小,峰值应变和极限应变逐渐减小,试件破坏时的变形能力更差。

此外,Goharrokhi等^[33]和Ahmadi等^[36]研究了箍筋直径的影响,指出减小箍筋直径能降低约束混凝土抗压性能劣化对锈蚀的敏感性,并建议在锈蚀环境中使用直径较小的箍筋;而Ahmadi等^[36]的研究表明,保护层厚度的增加虽然延缓了钢筋的起始锈蚀时间,但却使混凝土有效约束面积减小。在以锈蚀率作为变量时,保护层厚度的增加将使混凝土初始强度折减幅度增大;Li等^[43]则研究了不同接线方式的通电加速锈蚀对箍筋约束混凝土腐蚀特性和单轴抗压强度的影响,结果并无显著区别。

综上所述,影响锈蚀箍筋约束混凝土单轴抗压性能的因素众多,但现有研究不够全面,且主要集中于锈蚀率和箍筋配置水平等方面。对于截面形状的研究以圆形和矩形为主,而对工程中常见的其他截面形状(T形、L形和十字形等)的相关研究鲜少;关于尺寸效应,现阶段只研究了方形和长矩形截面,缺乏对其他截面形状的研究,如圆形截面应用十分广泛,对其尺寸效应的研究较为迫切;对于不同的配箍水平和配箍形式,则主要集中于普通锈蚀箍筋,而高强箍筋在实际工程中也有广泛使用,配箍水平和配箍形式对锈蚀高强箍筋约束混凝土抗压性能劣化规律影响的研究也十分必要;现有研究对于混凝土强度等级的影响规律尚无统一结论,且覆盖的范围非常有限,仍需继续扩展并深化;最后应当指出的是,在实际工程中,纵筋与箍筋均会发生锈蚀,研究纵筋与箍筋共同锈蚀下的箍筋约束混凝土抗压性能更具实际意义。

2.2 腐蚀环境对单轴抗压性能的影响

腐蚀环境分为自然锈蚀、人工气候模拟和通电加速锈蚀。如图6所示,不同腐蚀环境主要通过影响锈蚀钢筋力学性能及混凝土截面损伤状况等,从而影响锈蚀箍筋约束混凝土的力学性能退化规律。

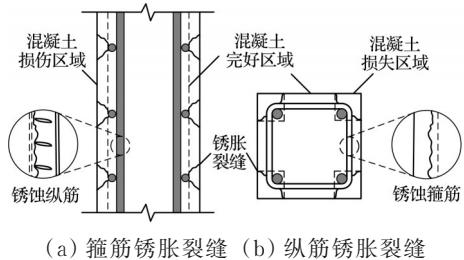


图6 锈蚀箍筋约束混凝土损伤示意

Fig. 6 Corrosion stirrup-confined concrete damage schematic

2.2.1 锈蚀钢筋(箍筋、纵筋)力学性能

锈蚀不仅会使钢筋净截面积减小,非均匀锈蚀和锈坑还会引起钢筋应力集中现象,造成锈蚀钢筋的力学性能劣化。而不同腐蚀环境下锈蚀钢筋的形貌特征存在差异,使得其力学性能退化规律不同。吴庆等^[53]通过对比试验发现,恒电流加速法获取的锈蚀钢筋始终为均匀锈蚀,而人工气候模拟下锈蚀钢筋坑蚀现象逐渐显著。Yuan等^[54]、Zhang等^[55]均通过试验发现,通电加速锈蚀法以均匀锈蚀为主、自然锈蚀(或人工气候模拟法)以坑蚀(不均匀锈蚀)为主。袁迎曙等^[56]通过现场采样、恒电流加速锈蚀、机械雕刻获取锈蚀钢筋,发现坑蚀对钢筋力学性能退化有显著影响。郭超^[57]、马江萍^[58]分别通过对比试验发现,相较于通电加速锈蚀(浸泡法),人工气候模拟下锈蚀钢筋力学性能的降幅更大。

2.2.2 混凝土截面损伤状况

不同腐蚀环境会影响锈胀裂缝的开展,使得混凝土截面损伤程度不同。Li等^[43]指出,通电加速锈蚀(浸泡法)使试件长期处于液体环境,会增大锈蚀产物的渗出量,导致锈胀力降低,从而抑制裂缝的扩展。Moyo等^[59]认为,自然锈蚀和通电锈蚀的产物类型不同,并且不同加速锈蚀方法和电流密度对裂缝扩展也有显著影响。Abosrra等^[60]、Ma等^[61]也表示,在通电加速锈蚀(浸泡法)时,由于溶液中氧气含量不足,锈蚀产物主要由黑色的 Fe(OH)_2 组成,体积小于红棕色的自然锈蚀产物,且更易溶解。而Chen等^[62]的研究表明,采用贴面外加电流-干湿循环法可解决通电加速锈蚀(浸泡法)的溢锈问题。Xia等^[63]、Juarez等^[64]、Caré等^[65]将通电法和干湿循环过程结合,以改善通电加速锈蚀因氧气不足而导致锈蚀产物不完全氧化的缺点。El Maaddawy等^[66]研究发现,当电流密度过大时,锈胀裂缝宽度会显著增大,故建议将腐蚀电流密度控制在 $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下。

综上所述,不同腐蚀环境下锈蚀材料力学性能劣化程度存在差异,将对锈蚀箍筋约束混凝土的单轴抗压性能退化规律产生影响。全浸泡电化学腐蚀下钢筋以均匀锈蚀为主,应力集中现象较自然锈蚀(或人工气候模拟)轻微,力学性能劣化更小,使得锈蚀箍筋约束作用和锈蚀纵筋抗屈曲能力更强,从而降低了锈蚀箍筋约束混凝土的单轴抗压性能退化;在全浸泡电化学腐蚀下,溢锈问题使得锈胀裂缝的扩展也更加轻微,会过小模拟锈蚀箍筋约束混凝土的截面损伤,同样会减小其单轴受压性能退化。因此,为了减小试验误差,当采用电化学法加速箍筋约束混凝土试件锈蚀时,应当结合干湿循环过程并合理控制外加电流密度,从而获得更加真实的锈蚀效果。

2.3 单轴抗压性能退化模型

针对钢筋锈蚀引起的箍筋约束混凝土单轴抗压性能退化问题,已有大量研究。学者们通过理论推导,或基于试验、模拟结果的回归拟合,建立了不同的单轴抗压性能退化模型,对常用锈蚀箍筋约束混凝土单轴抗压性能退化模型进行归纳整理,结果如表2所示。

依据模型建立方式的不同,可将其分为理论模型、半理论半经验模型和经验模型3种。

1) 理论模型

理论模型基于现有研究成果对锈蚀材料的力学性能进行修正,并考虑锈蚀对钢筋净截面积折减,从而得到锈蚀箍筋对核心区混凝土的有效侧向约束力或有效约束指标,再将其带入完好箍筋约束

混凝土抗压性能计算公式,进而推导出锈蚀箍筋约束混凝土抗压性能退化模型。理论模型力学概念清晰,但锈蚀箍筋约束混凝土的力学性能受腐蚀条件、弹性模量降低、钢筋截面积减小和黏结性能退

化等诸多因素影响,仅靠理论推导难以精确描述其完整的抗压性能退化。目前仅有赵瑞华^[68]、曹琛^[28]、Andisheh等^[38]和王银辉等^[40]的模型是基于理论推导得出。

表2 常用锈蚀箍筋约束混凝土单轴抗压性能退化模型

Table 2 Commonly used degradation models of uniaxial compressive properties of concrete confined by rusted stirrups

提出学者	截面形状	锈蚀方法	考虑变量	是否考虑纵筋锈蚀	模型计算式	公式编号
曹琛 ^[28]	方形	人工盐雾 气候模拟	锈蚀率	否	$f_{cc}/f_{c0} = 1 + 1.13(b/a)^{0.08}(1 - \eta)^{0.7}(1 - 1.24\eta)^{0.7}\lambda_t^{0.7}$	(1)
郑山锁等 ^[67]	方形	人工盐雾 气候模拟	混凝土强度、配箍特征值、箍筋锈蚀率	否	$f'_{cc} = (1 - 0.017\eta_s)f'_{c0}$ $\epsilon'_{cc} = (1 + 0.01\eta_s)\epsilon'_{c0}$	(2) (3)
郑跃等 ^[27]	方形	人工酸雨 气候模拟	箍筋锈蚀率、体积配箍率	否	$f'_{cc} = (1 - 0.0096\eta_s)f'_{c0}$ $\epsilon'_{cc} = (1 + 0.012\eta_s)\epsilon'_{c0}$ $\epsilon_{cu} = (1 - 0.02\eta_s)\epsilon_{cu0}$	(4) (5) (6)
尚志刚 ^[22]	圆形	干湿循环 电化学法	混凝土强度、锈蚀率和配箍率	否	$\sigma'_{cc} = (1 - 0.008\eta_{sv})\sigma_{c0}$ $\epsilon'_{cc} = (1 - 0.01\eta_{sv})\epsilon_{c0}$	(7) (8)
李强等 ^[24]	方形	全浸泡电 化学法	箍筋锈蚀率、配箍特征值、纵筋是否锈蚀	均有	$\sigma_c = (-0.15\delta_s - 0.88\delta_y + 0.64\lambda + 1.32)\sigma_0$ $\epsilon_c = (0.86\delta_s^2 + 18.27\delta_y^2 - 5.84\lambda^2 + 62.88\lambda\delta_y - 86.99\delta_s\delta_y\lambda - 12.17\delta_s\lambda + 4.69\delta_s - 15.03\delta_y + 1.35)\epsilon_0$ $0 \leq \delta_s \leq 72.18\%$ $0 \leq \delta_y \leq 42.96\%$	(9)
余波等 ^[31]	方形和圆形	全浸泡电 化学法	箍筋锈蚀率、配箍形式(方形箍、菱形箍、螺旋箍)	是	$f'_{cc} = f'_{c0} \left(-5.19 + 6.20 \sqrt{1 + \frac{2.25f'_l}{f'_{c0}} - 2\frac{f'_l}{f'_{c0}}} \right)$ $\epsilon'_{cc} = (1 - 1.915X_{corr})\epsilon_{c0} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right) \right]$ $\epsilon_{cu} = 0.004 + (1 - X_{corr}) \frac{1.4\rho_{sc}f_{yhc}\epsilon_{sm}}{f'_{cc}}$	(10) (11) (12)
王银辉等 ^[40]	长矩形	全浸泡电 化学法	截面形状、箍筋布置、体积配箍率和锈蚀程度	是	$f'_{cc} = f'_c \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f'_c}{f'_c} - 2\frac{f'_c}{f'_c}} \right)$	(13)
余磊 ^[39]	长矩形	全浸泡电 化学法	截面形状、箍筋布置、体积配箍率和锈蚀程度	是	$f'_{cc} = f'_{c0} \left(-1.6 + 2.6 \sqrt{1 + 10 \frac{f'_{lc}}{f'_{c0}} - 2\frac{f'_{lc}}{f'_{c0}}} \right)$ $\epsilon'_{cc} = 1.133\beta_{xy}\epsilon_{c0} \left[1 + 0.429 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right) \right]$ $\epsilon_{cu} = 0.004 + (1 - 0.559X_{corr}) \frac{0.216\beta_{xy}\rho_{sc}f_{yhc}\epsilon_{sm}}{f'_{cc}}$	(14) (15) (16)
Ma等 ^[41]	长矩形	全浸泡电 化学法	截面形状、箍筋布置、体积配箍率和锈蚀程度	是	$f'_{cc} = f'_{c0} \left(-1.6 + 2.6 \sqrt{1 + 10 \frac{f'_{lc}}{f'_{c0}} - 2\frac{f'_{lc}}{f'_{c0}}} \right)$ $\epsilon'_{cc} = 1.133\beta_{xy}\epsilon_{c0} \left[1 + 0.429 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right) \right]$ $\epsilon_{cu} = 0.004 + (1 - 0.559X_{corr}) \frac{0.216\beta_{xy}\rho_{sc}f_{yhc}\epsilon_{sm}}{f'_{cc}}$	(17) (18) (19)
潘丽娜 ^[35]	圆形	全浸泡电 化学法	箍筋锈蚀率、体积配箍率	否	$f'_{cc} = f'_{c0} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 3.97k_e \cdot (1 - \eta_s) \cdot (1 - 1.007\eta_s) \cdot \lambda} - k_e \cdot (1 - \eta_s) \cdot (1 - 1.007\eta_s) \cdot \lambda \right)$ $\epsilon'_{cc} = (0.995 + 0.0044\eta_s)\epsilon_{c0} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right) \right]$	(20) (21)
陶伯熊 ^[30]	方形和圆形	全浸泡电 化学法	箍筋锈蚀率、配箍形式(方形箍、菱形箍、螺旋箍)	是	$f'_{cc} = (1 - \alpha X_{corr})f'_{c0} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_l}{f'_{c0}} - 2\frac{f'_l}{f'_{c0}}} \right)$ $\epsilon'_{cc} = (1 - \beta X_{corr})\epsilon_{c0} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right) \right]$	(22) (23)

续表 2

提出学者	截面形状	锈蚀方法	考虑变量	是否考虑纵筋锈蚀	模型计算式	公式编号
					$\epsilon_{cu} = 0.004 + (1 - X_{corr}) \frac{1.4\rho_{sc} f_{yh}^c \epsilon_{sm}^c}{f_{cc}'}$	(24)
Ahmadi 等 ^[36]	圆形	全浸泡电化学法	锈蚀率、箍筋直径、保护层厚度	未布置纵筋	$f_{cc-corr} = (1 - \lambda) f_{cc}$	(25)
Goharrrokh 等 ^[33]	方形	全浸泡电化学法	锈蚀率、箍筋直径和箍筋间距	否	$f_{cc-corr} = (1 - \lambda) f_{cc}$	(26)
					$f_{cc}' = f_{c0}' \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_{l1}^c}{f_{c0}'}} - 2 \frac{f_{l1}^c}{f_{c0}'} - 1.254 \right)$	(27)
Andisheh 等 ^[38]	圆形	全浸泡电化学法	箍筋间距、锈蚀程度	否	$\epsilon_{cc}^c = 0.002 \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}^c}{f_{c0}'} - 1 \right) \right]$	(28)
					$\epsilon_{cu}^c = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yh} \epsilon_{su}^c}{f_{cc}'}$	(29)
Zhang 等 ^[32]	方形	全浸泡电化学法	箍筋锈蚀率	是	$f_{cc}' = f_{c0}' \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 \alpha_s f_{l1}^c}{f_{c0}'}} - 2 \alpha_s \frac{f_{l1}^c}{f_{c0}'} \right)$	(30)
					$\epsilon_{ccr} = \epsilon_{c0} \left[1 + 5 \zeta \left(\frac{f_{ccr}'}{f_{c0}'} - 1 \right) \right]$	(31)
					$f_{cc}' = (1 - \alpha X_{corr}) f_{c0}' \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_{l1}'}{f_{c0}'} - 2 \frac{f_{l1}'}{f_{c0}'} \right)$	(32)
Vu 等 ^[21]	方形和圆形	全浸泡电化学法	箍筋锈蚀率、配箍形式(方形箍、菱形箍、螺旋箍)	是	$\epsilon_{cc} = (1 - \beta X_{corr}) \epsilon_{c0} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}'}{f_{c0}'} - 1 \right) \right]$	(33)
					$\epsilon_{cu} = 0.004 + (1 - X_{corr}) \frac{1.4\rho_{sc} f_{yh}^c \epsilon_{sm}^c}{f_{cc}'}$	(34)
Zhang 等 ^[23]	方形	全浸泡电化学法	箍筋锈蚀率、尺寸效应、箍筋配置、纵筋是否锈蚀	均有	$f_{cc}' = f(\eta_s^t, \eta_s^l, \lambda_v, \beta) f_{c0}' + f_{c0}'$	(35)
					$\epsilon_{cc} = f^*(\eta_s^t, \eta_s^l, \lambda_v, \beta) \epsilon_{c0} + \epsilon_{c0}$	(36)
					$f_{cc}' = \left[1 - \left(12.88 \frac{f_{l1}^c}{f_{c0}'} \right)^{2.7} \eta_s \right] f_{c0}' \cdot$	(37)
Zhou 等 ^[52]	圆形	全浸泡电化学法	锈蚀率、混凝土强度	是	$\left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_{l1}^c}{f_{c0}'} - 2 \frac{f_{l1}^c}{f_{c0}'} \right)$	
					$\epsilon_{cc} = \left[1 - \left(18.67 \frac{f_{l1}^c}{f_{c0}'} \right)^{-3.14} \eta_s \right] \epsilon_{c0} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}^c}{f_{c0}'} - 1 \right) \right]$	(38)

注:由于不同退化模型参数众多,难以详细描述,其具体含义参考引用文献。

2) 半理论半经验模型

鉴于理论模型的局限性,学者们在理论推导的基础上引入修正系数,通过试验数据和修正系数的回归拟合,进而得到锈蚀箍筋约束混凝土的半理论半经验退化模型,目前绝大多数退化模型均通过此方法推导出。张雯等^[69]的退化模型基于理论推导和数值模拟结果的回归分析,但其未经试验验证,因此准确性有待进一步考证;Zhang 等^[32]最早基于理论分析和试验拟合推导出了适用于方形截面的半理论半经验退化模型;而后陶伯雄等^[30]、Vu 等^[21]、余波等^[31]在此基础上还考虑了截面形状和配箍形式的影响;余磊^[39]、Ma 等^[41]则考虑了尺寸效应和配箍形式的影响,推导出了适用于长矩形截面的退

化模型;Zhang 等^[23]也考虑尺寸效应,推导出了适合于方形截面的退化模型;王斌等^[70]则在 Vu 等^[21]模型的基础上,将考虑点蚀效应的锈蚀钢筋时变损伤模型 $D(t)$ 替换 Vu 等^[21]式中的锈蚀率 X_{corr} ,从而得到考虑点蚀效应的锈蚀箍筋约束混凝土抗压性能时变退化模型,点蚀效应如图 7 所示, $D(t)$ 计算式为

$$D(t) = m_c(t) / m_0 \quad (39)$$

式中: $m_c(t) = m_{un}(t) + m_p(t)$, $m_c(t)$ 为任意时刻钢筋

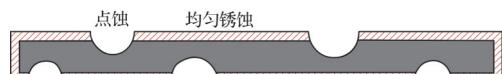


图 7 钢筋非均匀锈蚀形态

Fig. 7 Non-uniform corrosion pattern of steel bars

锈蚀造成质量损失; $m_p(t)$ 为任意时刻点锈蚀造成质量损失; $m_{un}(t)$ 为任意时刻均匀锈蚀造成质量损失。计算过程见文献[70]。

3) 经验模型

经验模型直接基于试验结果对各影响参数进行回归拟合。目前,经验模型主要分为两种,一种以郑山锁等^[67]、郑跃等^[27]和尚志刚^[22]为代表,通过对完好抗压性能计算公式点乘修正函数,并将试验结果与修正函数进行回归拟合,以反映各参数对锈蚀箍筋约束混凝土单轴抗压性能的影响;另一种以李强等^[24]、Goharrokhi等^[33]、Ahmadi等^[36]为代表,其不再引入完好抗压性能计算公式,而是基于试验结果对峰值点参数进行回归分析,拟合出抗压性能回归退化模型,但Goharrokhi等^[33]、Ahmadi等^[36]的退化模型仅是对特定条件下试验数据的拟合,不具有普适性。

考虑锈蚀率、纵筋锈蚀等参数,以文献[21]中方

形试件AL0~AS3共12榀作为算例,采用表2中不同退化模型对其峰值强度、峰值应变和极限应变进行计算,以比较不同模型的差异,计算结果如图8所示。可以看出,Vu模型^[21]、余波模型^[31]和陶伯熊模型^[30]计算值与试验值符合程度最好,其均基于该试验结果拟合得出。而郑山锁模型^[67]、Zhang模型^[32]和曹琛模型^[28]虽与自己的试验结果吻合较好,但与算例的差异较为明显,原因在于他们采用的试验方法、是否考虑了纵筋锈蚀等方面存在差异。

综上所述,半理论半经验模型和经验模型由于拟合了试验结果,因此准确性较好。但不同腐蚀环境对试验结果会产生显著影响,目前仅有郑山锁等^[67]、郑跃等^[27]少量学者采用人工气候模拟法对试件进行加速锈蚀,而在电化学法加速锈蚀中,仅尚志刚^[22]增加了干湿循环过程。因此,在后续的研究中,应将目光更多聚焦于优选试验方法,以降低试验误差。

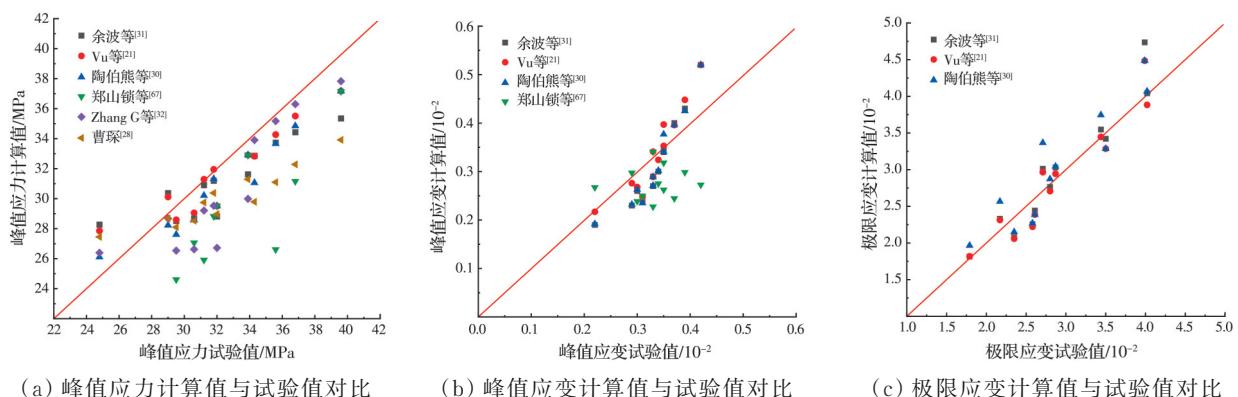


图8 不同退化模型特征参数计算值和试验值对比

Fig. 8 Comparison of calculated and experimental values of characteristic parameters of different degradation models

3 单轴受压应力-应变本构模型

锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压应力-应变本构模型是对多龄期RC结构进行弹塑性分析与抗震性能研究的基础。依据其加载制度不同,可分为单调轴压荷载作用下和重复轴压荷载作用下锈蚀箍筋约束混凝土本构模型。

3.1 单调荷载作用下应力-应变本构关系

学者们对于锈蚀箍筋约束混凝土应力-应变本构关系的研究普遍基于对完好本构模型的修正。常见的完好箍筋约束混凝土本构模型主要有:Kent-Scott-Park模型^[71]、Mander模型^[20]、Saatcioglu模型^[72]、钱稼茹模型^[73]、过镇海模型^[74]和Soliman模型^[75]等,表达形式有多项式、有理分式、指数函数、三角函数等。有理分式由于形式直观紧凑,且便于增加分子、分母次数以满足更多边界特征的需要,因

此使用较为广泛^[76]。

赵瑞华^[68]基于Soliman模型^[75]和过镇海模型^[74],建立起综合考虑箍筋锈蚀和保护层锈损的应力-应变全曲线模型。曹琛^[28]基于过镇海模型^[74]对试验应力-应变全曲线进行拟合,得到了方形锈蚀箍筋约束混凝土本构模型。基于过镇海模型^[74],张雯等^[69]将曲线控制参数与模拟结果进行拟合,建立了方形锈蚀箍筋约束混凝土本构模型,表达式为

$$\begin{cases} y = \alpha x + (3 - 2\alpha)x^2 + (\alpha - 2)x^3, & x \leq 1 \\ y = \frac{x}{\beta(x - 1)^2 + x}, & x \geq 1 \end{cases} \quad (40)$$

式中: α 、 β 分别为上升段和下降段控制参数,通过拟合得出 $\alpha/\alpha_0 = 2.6704\lambda_v + 0.466$; $\beta/\beta_0 = 301.43e^{-\frac{\lambda_v}{0.01784}} + 1.207$; $x = \varepsilon/\varepsilon_{ec}$; $\varepsilon_{ec} =$

$$\begin{aligned} \epsilon_{c0} & \left(1.1384 + \frac{2.21576\lambda_v}{1 - 1.077\eta_s} \right); \quad y = \sigma/f_{cc}; \quad f_{cc} = \\ & f_{c0} \left(0.7408 + \frac{3.315\lambda_v}{1 - 1.077\eta_s} \right); \end{aligned}$$

α_0, β_0 分别为完好本构的上升段和下降段形状参数; λ_v 为配箍率特征值; η_s 为箍筋锈蚀率; f_{c0}, ϵ_{c0} 分别为素混凝土轴心抗压强度和峰值应变; f_{cc}, ϵ_{cc} 分别为锈蚀箍筋约束混凝土抗压强度和峰值应变 σ, ϵ 分别为锈蚀箍筋约束混凝土应力和应变。

李强等^[24]通过对比确定了上升段采用 Sargin 方程^[77], 下降段采用过镇海方程的本构模型, 并引入修正系数对形状控制参数和峰值点参数进行回归分析和修正, 建立的本构模型表达式为

$$\begin{cases} y = \frac{Ax - x^2}{1 + (A - 2)x}, 0 \leq x \leq 1 \\ y = \frac{x}{a(x - 1)^2 + x}, x \geq 1 \end{cases} \quad (41)$$

式中: $y = \sigma/\sigma_0, x = \epsilon/\epsilon_0$; σ, ϵ 分别为锈蚀箍筋约束混凝土的应力、应变; σ_0, ϵ_0 分别为未锈蚀箍筋约束混凝土的峰值应力和峰值应变, 计算方法见式(9); A, a 分别为上升与下降段形状控制参数, $a = 0.7\delta_s + 0.1226 (0 \leq \delta_s \leq 70.38\%)$; $A = -2.413\delta_s + 0.046\lambda + 2.948 (0 \leq \delta_s \leq 62.26\%)$, δ_s 为箍筋锈蚀最大质量损失率; λ 为配箍率特征值。

基于 Mander 模型(图 9), Zhang 等^[32]从理论层面面对峰值点应力、峰值点应变和形状系数表达式进行拟合修正, 提出了矩形锈蚀箍筋约束混凝土本构模型。陶伯熊^[30]、Vu 等^[21]和余波等^[31]在 Zhang 等^[32]的基础上考虑截面形状和配箍形式的影响, 提出了适用于方形和圆形的锈蚀箍筋约束混凝土本构模型。余磊^[39]和 Ma 等^[41]考虑尺寸效应, 提出了矩形锈蚀箍筋约束混凝土本构模型, 潘丽娜^[35]提出了圆形锈蚀箍筋约束混凝土本构, Andisheh 等^[38]提出了适合于圆形、方形和矩形截面的锈蚀箍筋约束混凝土本构模型, 表达式为

$$f_c = \frac{f'_{cc}xr}{r - 1 + x^r} \quad (42)$$

$$x = \epsilon_c/\epsilon_{cc} \quad (43)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (44)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f'_{c0}} \quad (45)$$

$$E_{sec} = f'_{cc}/\epsilon_{cc} \quad (46)$$

式中: f_c 为应力; ϵ_c 为应变; f'_{cc} 为峰值应力; ϵ'_{cc} 为峰值点应变; f'_{c0} 为素混凝土抗压强度; E_c 为素混凝土初始弹性模量; E'_{sec} 为锈蚀箍筋约束混凝土的割线模

量。以上学者提出的本构模型峰值点应力、应变计算方法分别依次见式(30)和式(31)、式(22)和式(23)、式(32)和式(33)、式(10)和式(11)、式(14)和式(15)、式(17)和式(18)、式(20)和式(21)、式(27)和式(28)。

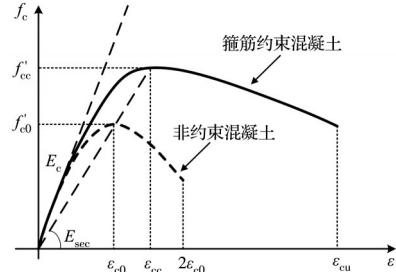


图 9 Mander 模型图示

Fig. 9 Mander model illustration

不同于 Vu 等^[21], 郑山锁等^[67]、郑跃等^[27]、尚志刚^[22]直接基于试验结果对 Mander 模型的峰值点参数和形状系数进行拟合修正, 分别提出了近海环境下、酸雨环境下和恒电流干湿循环加速锈蚀下方形、圆形锈蚀箍筋约束混凝土本构模型, 表达式均为

$$\begin{cases} f_{cd} = \frac{f'_{cc}xr}{r - 1 + x^r} \\ x = \epsilon_{cc}/\epsilon'_{cc} \end{cases} \quad (47)$$

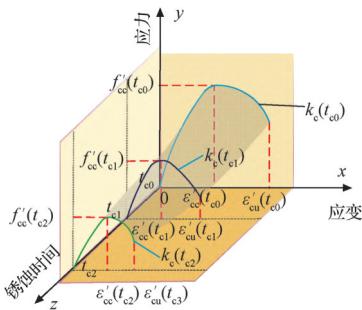
式中: f'_{cc}, ϵ'_{cc} 按照式(6)~式(12)计算; 在近海环境下, $r = -17.91 + 0.92f_c - 0.0125f_c^2 + 5.5\mu_t - 1.8\mu_t^2 + 25.51\eta_s$; 在一般大气环境下, $r = (0.002\eta_s^2 + 0.024\eta_s + 1)r_0$; 恒电流-干湿循环下, $r = 0.0428\eta_s - 0.8329\rho_v + 0.0299f_c + 2.3037$ 。 f_c 为素混凝土轴心抗压强度; μ_t 为配箍率; η_s 为箍筋锈蚀率; r 为未锈蚀试件形状系数; ρ_v 为配箍率。

需要注意的是, 以上模型大多基于钢筋均匀锈蚀假定。王斌等^[70]基于考虑点蚀效应的锈蚀钢筋时变损伤模型, 对 Vu 等^[21]的本构模型特征点进行修正, 建立了考虑点蚀效应的锈蚀箍筋约束混凝土时变应力-应变曲线斜率计算式

$$k_c(t) = \frac{f'_{cc}E_{ra}}{\epsilon'_{cc}[E_{ra} - 1 + (\epsilon_c/\epsilon'_{cc})]} \quad (48)$$

式中: E_{ra} 为控制形状相关参数, 计算式与 Vu 模型^[21]中的 r 相同; 其余参数含义也与 Vu 模型^[21]相同。依据式(48)可得到不同时刻下核心区混凝土的应力-应变曲线斜率, 进而得到各应变所对应的应力值, 所建时变本构模型如图 10 所示。可以看出, 随着锈蚀时间的增加, 应力-应变曲线各特征点不断降低, 下降段斜率逐渐增大。

不同学者提出的锈蚀箍筋约束混凝土单轴本

图 10 锈蚀箍筋约束混凝土时变应力-应变模型^[70]Fig. 10 Time-varying stress-strain model of concrete confined by stirrups^[70]

构模型特征点参数均依据表2中相应的单轴抗压性能退化模型进行计算。选取特征点参数差异较大的郑山锁模型^[67]、余波模型^[31]、Vu模型^[21]和陶伯熊模型^[30],对文献[67]中试件L1~L4和文献[21]中试件AL0~AL3共8榀单轴受压试件的应力-应变曲线进行计算,进一步比较不同模型之间的差异。不同本构模型单轴受压应力-应变曲线算例对比结果如图11所示。由图11可以看出,不同本构模型在应

力-应变曲线特征点和下降段均存在不同程度差异。其中郑山锁模型^[67]的下降段斜率和峰值强度退化速率远大于其他模型,峰值应力和峰值应变也较小,但随着锈蚀程度的增加,其峰值应变逐渐增大。此外,当锈蚀水平较轻时,不同本构模型特征点和下降段之间的差异相对较小,但随着锈蚀程度的增加,差异则更加显著。然而,不同模型应力-应变曲线普遍与自身试验结果吻合较好,与其他学者的试验结果存在较大差异,这与特征点算例对比的结果一致。

目前,学者们已提出较多适用于单调荷载作用下锈蚀箍筋约束混凝土的数学本构模型,但各学者建立的本构模型考虑因素不够全面,难以涵盖全部影响参数。

3.2 重复荷载作用下应力-应变本构关系

在使用期间RC结构往往经历多次重复加卸载过程,特别是在地震荷载作用下,结构会产生一系列非线性性能反应,造成内力、变形和裂缝等周期性往复变化。为了便于分析地震作用下RC结构的

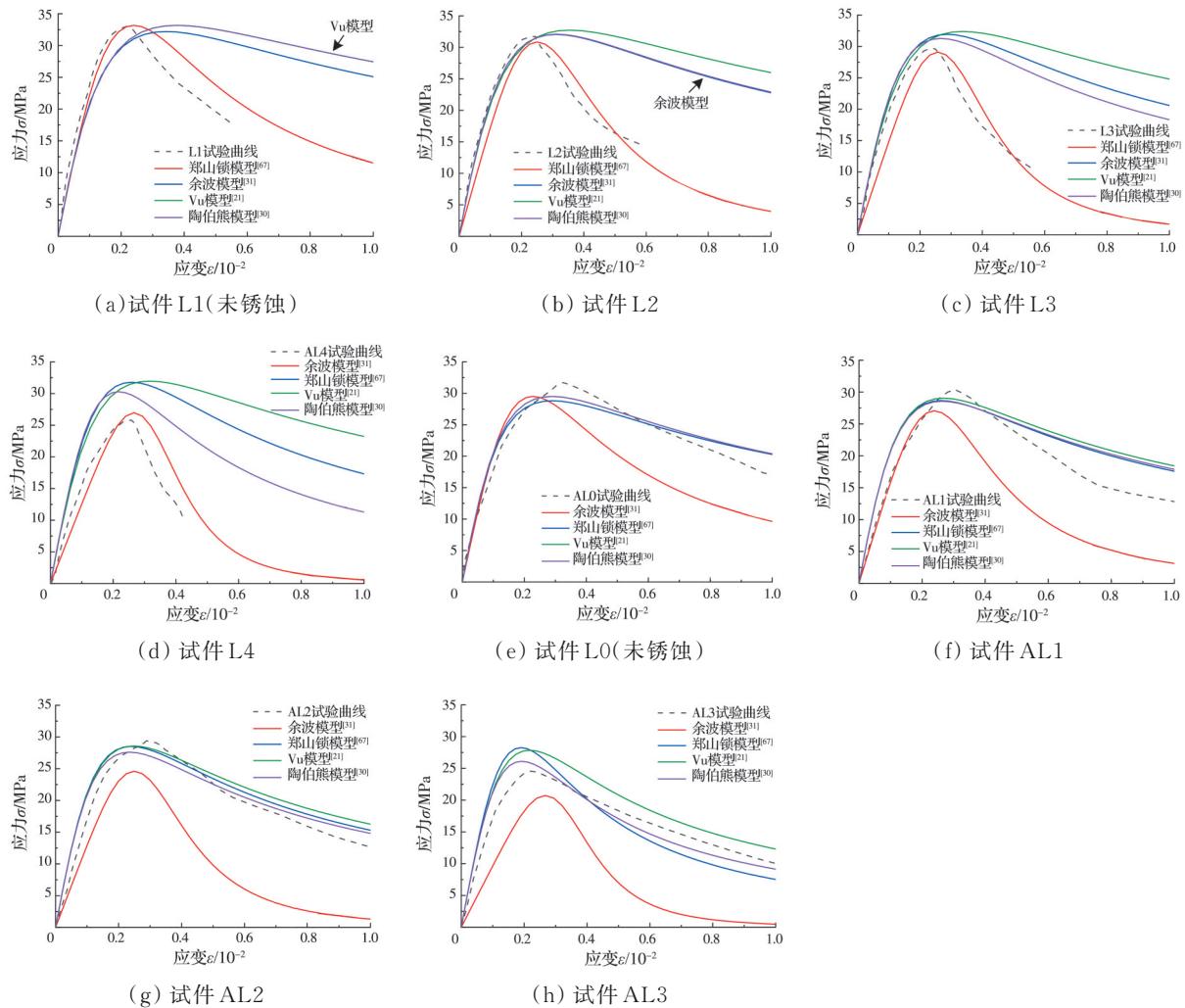


图 11 不同本构模型单轴受压应力-应变曲线算例对比

Fig. 11 Comparison of stress-strain curves under uniaxial compression with different constitutive models

非线性动力特性,学者们建立了重复荷载作用下完好箍筋约束混凝土的单轴本构关系,即重复荷载作用下的加卸载准则^[20, 78-81]。但很少有学者对锈蚀与重复加卸载耦合作用下箍筋约束混凝土的单轴抗压性能劣化规律进行研究。邱璐璐等^[82]通过试验发现,重复加卸载会加重混凝土损伤、增加微裂缝数量,使混凝土破裂更严重。刘晓媛^[83]的试验表明,混凝土腐蚀损伤越严重,重复荷载对其削弱作用越强。Cheng 等^[84]对于酸性环境下腐蚀混凝土的研究表明,由于重复荷载的累积损伤效应,其应力-应变曲线的下降段退化率远大于单调荷载;梁岩等^[85]通过对比试验发现,重复荷载作用下锈蚀钢筋的力学性能退化比单调荷载作用下更明显。从材料层面来看,重复荷载会加重锈蚀箍筋约束混凝土在单轴受压下的损伤,导致锈蚀箍筋约束混凝土应力-应变曲线、卸载和再加载路径与完好箍筋约束混凝土不同。目前仅 Aminulai 等^[34]对方形和圆形锈蚀箍筋约束混凝土试件进行了重复单轴受压试验,得到了重复荷载作用下的应力-应变曲线,如图 12 所示。然而,相关研究非常有限,对于重复荷载作用下锈蚀箍筋约束混凝土单轴数学本构模型的研究尚属空白。应对此开展更多研究,为重复荷载作用下锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压本构模型的开发提供参考。

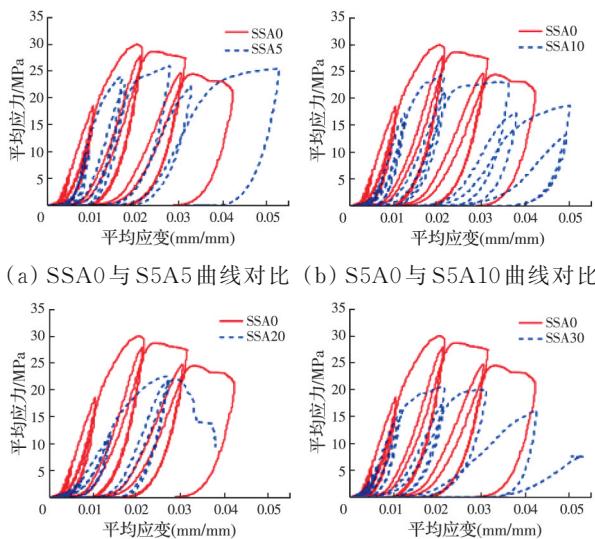


图 12 重复荷载下锈蚀箍筋约束混凝土应力-应变曲线^[34]

Fig. 12 Stress-strain curves of concrete confined by rusted stirrups under repeated loads^[34]

4 算例分析

4.1 锈蚀箍筋约束混凝土单轴本构算例分析

锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压本构模型在多龄期 RC 结构/构件的数值模拟中有着广泛应用,因

此,不同学者建立的本构模型应该能反映多龄期 RC 结构/构件在复杂受力条件下的非线性行为。选取特征点参数差异较大的郑山锁模型^[67]、余波模型^[31]、Vu 模型^[21]和陶伯熊模型^[30],对文献[86]中锈蚀 RC 柱核心区混凝土的应力-应变曲线进行计算和对比。不同本构模型的计算曲线如图 13 示。可以看出,不同模型均能反映箍筋锈蚀后核心区混凝土单轴受压性能的降低。其中,余波模型^[31]、Vu 模型^[21]和陶伯熊模型^[30]与 Mander 完好本构模型^[20]的曲线形状较为接近。而郑山锁模型^[67]的下降段则与 Mander 模型^[20]存在较大差异,这是因为郑山锁模型^[67]还考虑了箍筋锈蚀对形状系数的影响,并依据锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压试验结果,对形状系数也进行了修正。

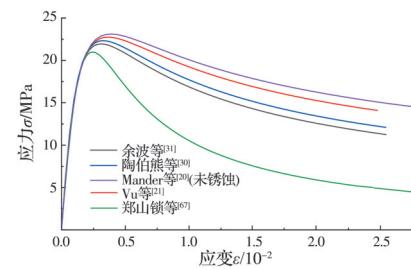


图 13 不同应力-应变本构模型曲线对比

Fig. 13 Comparison of curves of different stress-strain constitutive models

4.2 锈蚀箍筋约束混凝土柱抗震性能分析

为进一步比较不同单轴应力-应变本构模型差异对构件弹塑性分析的影响,采用应力-应变曲线差异较大的郑山锁模型^[67]、Vu 模型^[21]和余波模型^[31],利用 OpenSees 有限元平台建立文献[86]中锈蚀 RC 柱的数值分析模型,以对比不同本构模型下锈蚀箍筋约束混凝土柱的抗震性能。其中钢筋使用 Menegotto-Pinto 本构模型模拟,并以零长度单元模拟黏结-滑移效应,模型建立流程如图 14 所示。试验滞回曲线和模拟滞回曲线对比如图 15 所示。

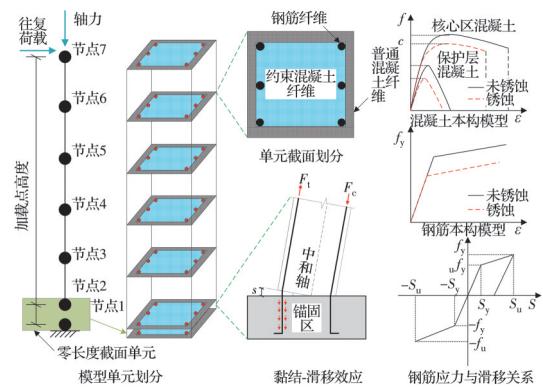


图 14 锈蚀 RC 柱建模流程示意

Fig. 14 Schematic diagram of the modeling process for corroded RC column

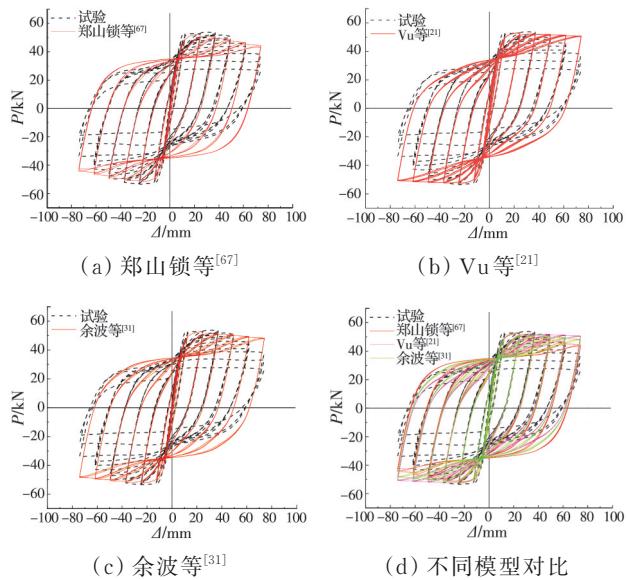


图 15 不同模型算例对比

Fig. 15 Comparison of calculation examples of different models

由图 15 可见,不同学者提出的锈蚀箍筋约束混凝土本构模型^[21,31,67]能较准确地模拟锈蚀 RC 柱的非线性行为,对于锈蚀 RC 柱水平承载力的模拟均有较好精度,但不同模型滞回曲线峰值点后的下降段则与试验滞回曲线有较大差异,均存在不同程度误差。

5 总结与展望

从箍筋约束混凝土构件加速锈蚀方法、锈蚀箍筋约束混凝土抗压强度、锈蚀箍筋约束混凝土应力-应变本构模型 3 个方面出发,对锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压性能的研究进展进行综述和相关讨论,得出以下结论与展望。

1) 在 RC 构件加速锈蚀方法中,人工气候模拟法能很好地还原自然锈蚀且效率较高,而电化学加速锈蚀与自然锈蚀之间存在显著差异,可通过增加干湿循环过程并合理控制电流密度来进行改善。

2) 目前对于锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压性能影响因素的研究还不充分,且主要集中于锈蚀率和箍筋配置水平等方面,对于截面形状的研究则以圆形和方形为主。因此,还应在更多截面形状(T 形、L 形和十字形等)、混凝土强度、配箍形式、尺寸效应、箍筋配置水平等方面开展更多研究。

3) 锈蚀不仅会劣化箍筋的力学性能,还会降低纵筋的抗屈曲能力,而现有研究大多聚焦于箍筋锈蚀对约束混凝土抗压性能的影响,忽略了纵筋锈蚀带来的影响,在后续的研究中,还应开展更多关于纵筋与箍筋共同锈蚀对箍筋约束混凝土抗压性能

的影响研究。

4) 现有的锈蚀箍筋约束混凝土本构模型多基于钢筋均匀锈蚀假设,且试验采用的加速锈蚀方法以全浸泡外加电流法(锈蚀效果为均匀锈蚀)为主,而实际工程中钢筋通常发生非均匀锈蚀及点蚀。因此,钢筋发生非均匀锈蚀及点蚀下的单轴受压性能应该成为研究重点,且应选用锈蚀效果更加真实的加速锈蚀方法(人工气候模拟法、电化学法结合干湿循环过程等)。

5) 目前对于单调荷载作用下锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压性能和本构模型的研究较多,而对于重复荷载作用下锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压性能的研究则十分有限,相应的本构模型研究也尚属空白,有待进一步开发。

参考文献

- [1] 张誉,蒋利学,张伟平,等.混凝土结构耐久性概论[M].上海:上海科学技术出版社,2003.
- [2] ZHANG Y. Durability of concrete structures [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2003. (in Chinese)
- [3] MEHTA P K. Concrete durability fifty years progress [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Durability. Canada, Montreal, QC, 1991, 49: 132.
- [4] 俞小彤,常西栋,周文涛,等.氯盐与硫酸盐复合侵蚀下钢筋混凝土锈裂行为[J].哈尔滨工业大学学报,2024, 56(2): 151-160.
- [5] YU X T, CHANG X D, ZHOU W T, et al. Corrosion-induced cover cracking of reinforced concrete under combined chloride and sulfate attack [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(2): 151-160. (in Chinese)
- [6] 任青阳,靳红华,肖宋强,等.模拟酸雨侵蚀环境下钢筋混凝土结构长期性能研究综述[J].交通运输工程学报,2022, 22(5): 41-72.
- [7] REN Q Y, JIN H H, XIAO S Q, et al. Review on long-term performance of reinforced concrete structures under simulated acid rain erosion environments [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(5): 41-72. (in Chinese)
- [8] 国务院第七次全国人口普查领导小组办公室. 中国人口普查年鉴-2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [9] Office of the Seventh National Census Leading Group of the State Council. China census yearbook-2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021. (in Chinese)

- [6] 侯保荣. 腐蚀成本与经济发展[J]. 中国科技产业, 2020(2): 21-22.
HOU B R. Corrosion cost and economic development [J]. Science & Technology Industry of China, 2020(2): 21-22. (in Chinese)
- [7] 洪乃丰. 建筑腐蚀可持续发展[J]. 工业建筑, 2006, 36(3): 76-79.
HONG N F. Architectural corrosion and sustainable development [J]. Industrial Construction, 2006, 36(3): 76-79. (in Chinese)
- [8] 徐秀凤, 孔子昂, 王洪宝. 受约束混凝土的应力应变模型研究综述[J]. 山西建筑, 2022, 48(8): 62-65.
XU X F, KONG Z A, WANG H B. A review of stress-strain models of confined concrete [J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(8): 62-65. (in Chinese)
- [9] TAMAI H, SONODA Y, BOLANDER J E. Impact resistance of RC beams with reinforcement corrosion: Experimental observations [J]. Construction and Building Materials, 2020, 263: 120638.
- [10] YANG S Y, SONG X B, JIA H X, et al. Experimental research on hysteretic behaviors of corroded reinforced concrete columns with different maximum amounts of corrosion of rebar [J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 319-327.
- [11] 莫正玺, 叶强, 赵垚. 我国存量建设空间利用的政策、理论与实践演进脉络[J]. 经济地理, 2022, 42(6): 156-167.
MO Z X, YE Q, ZHAO Y. The evolutionary of policies, theories and practices for the utilization of stock construction space in China [J]. Economic Geography, 2022, 42(6): 156-167. (in Chinese)
- [12] 金立兵, 金伟良, 陈涛, 等. 沿海混凝土结构的现场暴露试验站设计[J]. 水运工程, 2008(2): 14-18.
JIN L B, JIN W L, CHEN T, et al. Design of field exposure station on coastal concrete structures [J]. Port & Waterway Engineering, 2008(2): 14-18. (in Chinese)
- [13] 卢振永, 金伟良, 王海龙, 等. 人工气候模拟加速试验的相似性设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(6): 1071-1076.
LU Z Y, JIN W L, WANG H L, et al. Similar design on accelerated test of artificial climate simulation [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(6): 1071-1076. (in Chinese)
- [14] 干伟忠, 金伟良, 高明赞. 混凝土中钢筋加速锈蚀试验适用性研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 41-47.
GAN W Z, JIN W L, GAO M Z. Applicability study on accelerated corrosion methods of steel bars in concrete structure [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 41-47. (in Chinese)
- [15] VAN NGUYEN C, LAMBERT P. Effect of current density on accelerated corrosion of reinforcing steel bars in concrete [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2018, 14(11): 1535-1546.
- [16] APOSTOLOPOULOS C, DRAKAKAKI A. Correlation between the electrochemical corrosion parameters and the corrosion damage, on B500c dual-phase steel [J]. Innovations in Corrosion and Materials Science (Formerly Recent Patents on Corrosion Science), 2018, 8(1): 42-52.
- [17] SUN Y, QIAO G F. Influence of constant current accelerated corrosion on the bond properties of reinforced concrete [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2019, 14(5): 4580-4594.
- [18] 金伟良, 夏晋, 王海龙. 外置电极模拟混凝土中钢筋非均匀锈蚀的加速试验方法: CN101782500B [P]. 2011-11-02.
JIN W L, XIA J, WANG H L. Accelerated test method of non-uniform corrosion of steel bars in simulated concrete with external electrode: CN101782500B [P]. 2011-11-02. (in Chinese)
- [19] 金伟良, 夏晋, 王海龙. 内置电极模拟混凝土中钢筋非均匀锈蚀的加速试验方法: CN101762453B [P]. 2011-09-14.
JIN W L, XIA J, WANG H L. Accelerated test method for simulating non-uniform corrosion of steel bars in concrete with built-in electrode: CN101762453B [P]. 2011-09-14. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] VU N S, YU B, LI B. Stress-strain model for confined concrete with corroded transverse reinforcement [J]. Engineering Structures, 2017, 151: 472-487.
- [22] 尚志刚. 腐蚀 RC 简支梁桥抗震性能及道桥网络抗震可靠性评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
SHANG Z G. Seismic performance of corroded RC simple supported beam bridge and seismic reliability assessment of road bridge network [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023. (in Chinese)
- [23] ZHANG Q, ZHENG N H, GU X L, et al. Study of the confinement performance and stress-strain response of RC columns with corroded stirrups [J]. Engineering Structures, 2022, 266: 114476.
- [24] 李强, 常迪文, 贺胜, 等. 锈蚀箍筋约束混凝土本构模型修正研究[J]. 材料导报, 2022, 36(72): 22060049.
LI Q, CHANG D W, HE S, et al. Modification of the constitutive model of concrete confined by corroded stirrups [J]. Materials Reports, 2022, 36(72): 22060049.

- (in Chinese)
- [25] 刘磊,牛荻涛,李强.锈蚀箍筋约束混凝土短柱轴心受压性能试验研究[J].建筑结构,2011,41(增刊2):159-161.
LIU L, NIU D T, LI Q. Experimental study on axial compression performance of corroded stirrups confined columns [J]. Building Structure, 2011, 41(Sup 2): 159-161. (in Chinese)
- [26] 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):737-741,757.
ZHENG S 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, 757. (in Chinese)
- [27] 郑跃,郑山锁,明铭,等.酸雨侵蚀箍筋约束混凝土本构模型研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(1):135-143.
ZHENG Y, ZHENG S S, MING M, et al. Research on constitutive model of confined concrete with stirrups by acid rain erosion [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(1): 135-143. (in Chinese)
- [28] 曹琛.氯盐侵蚀下约束混凝土力学性能试验研究[J].建筑结构,2019,49(12):103-108.
CAO C. Experimental study on mechanical properties of confined concrete under chloride salt erosion [J]. Building Structure, 2019, 49(12): 103-108. (in Chinese)
- [29] JOSHI J, ARORA H C, SHARMA U K. Structural performance of differently confined and strengthened corroding reinforced concrete columns [J]. Construction and Building Materials, 2015, 82: 287-295.
- [30] 陶伯雄.混凝土的单轴受压随机本构关系模型研究[D].南宁:广西大学,2017.
TAO B X. Study on stochastic constitutive relation model of concrete under uniaxial compression [D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (in Chinese)
- [31] 余波,秦成辉,陶伯雄.锈蚀箍筋约束混凝土的单轴受压试验与本构关系模型[J].防灾减灾工程学报,2021,41(3):511-519,548.
YU B, QIN C H, TAO B X. Uniaxial compression experiment and constitutive model for concrete confined by corroded hoops [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 511-519, 548. (in Chinese)
- [32] ZHANG G H, CAO X H, FU Q N. Experimental study on residual strength of concrete confined with corroded stirrups [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2016, 43(6): 583-590.
- [33] GOHARROKHI A, AHMADI J, SHAYANFAR MALI, et al. Effect of transverse reinforcement corrosion on compressive strength reduction of stirrup-confined concrete: An experimental study [J]. Sadhanā, 2020, 45(1): 49.
- [34] AMINULAI H O, ROBINSON A F, FERGUSON N S, et al. Nonlinear behaviour of corrosion damaged low-strength short reinforced concrete columns under compressive axial cyclic loading [J]. Engineering Structures, 2023, 289: 116245.
- [35] 潘丽娜.锈蚀RC圆形墩柱的本构关系与地震响应分析[D].福州:福州大学,2020.
PAN L N. Constitutive relation and seismic response analysis of corroded RC circular pier [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2020. (in Chinese)
- [36] AHMADI J, SHAYANFAR MALI, GHANOONI-BAGHA M, et al. An experimental investigation into the effect of transverse reinforcement corrosion on compressive strength reduction in spirally confined concrete [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2020, 44(1): 265-275.
- [37] ZHOU H J, XU Y N, PENG Y R, et al. Partially corroded reinforced concrete piers under axial compression and cyclic loading: An experimental study [J]. Engineering Structures, 2020, 203: 109880.
- [38] ANDISHEH K, SCOTT A, PALERMO A. Effects of corrosion on stress-strain behavior of confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(7): 04021087.
- [39] 余磊.箍筋锈蚀矩形柱内约束混凝土应力应变关系研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.
YU L. Study on stress-strain relationship of confined concrete in rectangular columns corroded by stirrups [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [40] 王银辉,余磊,余波,等.锈蚀箍筋矩形柱单轴受压承载力试验及理论研究[J].工程力学,2024,41(9):123-133.
WANG Y H, YU L, YU B, et al. Experimental and theoretical studies on axial compression Capacity of rectangular columns with corroded stirrups [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(9): 123-133. (in Chinese)
- [41] MA J X, YU L, LI B, et al. Stress-strain model for confined concrete in rectangular columns with corroded transverse reinforcement [J]. Engineering Structures, 2022, 267: 114710.
- [42] 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):65-68,80.

- 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, 80. (in Chinese)
- [43] LI Q, JIN X Y, YAN D M, et al. Study of wiring method on accelerated corrosion of steel bars in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 269: 121286.
- [44] 吕耀鹏. 锈蚀复合螺旋箍筋的钢筋混凝土方柱力学性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- LV Y P. Experimental research on mechanical properties of corroded reinforced concrete square columns with circular compound spiral stirrup [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [45] 苏昊, 杨俊, 周建庭, 等. 基于 DIC 的 UHPC 加固锈蚀钢筋混凝土柱轴心受压性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(72): 194-199.
- SU H, YANG J, ZHOU J T, et al. Research on axial compression performance of corroded RC columns strengthened with UHPC based on DIC [J]. Materials Reports, 2021, 35(72): 194-199. (in Chinese)
- [46] RADHI M, HASSAN M S, GORGIS I. Compressive performance of corroded reinforced concrete columns [J]. Engineering and Technology Journal, 2020, 38(11): 1618-1628.
- [47] REVATHY J, SUGUNA K, RAGHUNATH P N. Effect of corrosion damage on the ductility performance of concrete columns [J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2009, 2(2): 324-327.
- [48] LUO X Y, CHENG J F, XIANG P, et al. Seismic behavior of corroded reinforced concrete column joints under low-cyclic repeated loading [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20(2): 40.
- [49] LI N, LI W P, LU Y Y, et al. Corroded reinforced concrete columns strengthened with basalt fibre reinforced ECC under axial compression [J]. Composite Structures, 2023, 303: 116328.
- [50] 刘俊杰. L形锈蚀钢筋混凝土柱轴压及偏压承载力试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- LIU J J. Experimental study on axial compression and eccentric compression bearing capacity of L-shaped corroded reinforced concrete columns [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [51] 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.
- [52] ZHOU H J, ZHONG Z H, LIU J, et al. Experimental and theoretical study on the mechanical behavior of concrete confined by corroded stirrups [J]. Materials and Structures, 2022, 55(3): 108.
- [53] 吴庆, 袁迎曙. 锈蚀钢筋力学性能退化规律试验研究 [J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 42-47.
- WU Q, YUAN Y S. Experimental study on the deterioration of mechanical properties of corroded steel bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 42-47. (in Chinese)
- [54] YUAN Y S, JI Y S, SHAH S P. Comparison of two accelerated corrosion techniques for concrete structures [J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(3): 344-347.
- [55] ZHANG W Y, ZHANG R Y, XI L J. Corrosion of reinforced concrete in accelerated tests [J]. Advanced Materials Research, 2012, 610-613: 485-489.
- [56] 袁迎曙, 贾福萍, 蔡跃. 锈蚀钢筋的力学性能退化研究 [J]. 工业建筑, 2000, 30(1): 43-46.
- YUAN Y S, JIA F P, CAI Y. Deterioration of mechanical behavior of corroded steel bar [J]. Industrial Construction, 2000, 30(1): 43-46. (in Chinese)
- [57] 郭超. 两种锈蚀方法对锈后钢筋力学性能的影响研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015.
- GUO C. Study on the influence of two corrosion methods on the mechanical properties of corroded steel bars [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [58] 马江萍. 不同锈蚀方法下锈蚀程度对钢筋力学性能的影响[J]. 建筑与预算, 2017(5): 33-35.
- MA J P. Effect of corrosion degree on mechanical properties of steel bars under different corrosion methods [J]. Construction and Budget, 2017(5): 33-35. (in Chinese)
- [59] MOYO P, MALUMBELA G, ALEXANDER M. A step towards standardizing accelerated corrosion tests on laboratory reinforced concrete specimens [J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2012, 54(2): 78-85.
- [60] ABOSRRA L, ASHOUR A F, YOUSEFFI M. Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(10): 3915-3925.
- [61] MA Y, CHE Y, GONG J X. Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading [J]. Construction and Building Materials, 2012, 29: 548-556.
- [62] CHEN J W, FU C Q, YE H L, et al. Corrosion of steel embedded in mortar and concrete under different electrolytic accelerated corrosion methods [J]. Construction and Building Materials, 2020, 241: 117971.
- [63] XIA J, JIN W L, LI L Y. Shear performance of

- reinforced concrete beams with corroded stirrups in chloride environment [J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(5): 1794-1805.
- [64] JUAREZ C A, GUEVARA B, FAJARDO G, et al. Ultimate and nominal shear strength in reinforced concrete beams deteriorated by corrosion [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(12): 3189-3196.
- [65] CARÉ S, RAHARINAIVO A. Influence of impressed current on the initiation of damage in reinforced mortar due to corrosion of embedded steel [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(12): 1598-1612.
- [66] MAADDAWY T AEL, SOUDKI K 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.
- [67] 郑山锁, 郑跃, 董立国, 等. 近海环境下锈蚀箍筋约束混凝土本构模型[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(1): 48-55, 72.
ZHENG S S, ZHENG Y, DONG L G, et al. Constitutive model of confined concrete by corroded stirrups in coastal environment [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2020, 54(1): 48-55, 72. (in Chinese)
- [68] 赵瑞华. 箍筋锈蚀对约束混凝土应力-应变关系的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
ZHAO R H. Study on the influence of stirrup corrosion on the stress-strain relationship of confined concrete [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese)
- [69] 张雯, 牛荻涛, 李强. 箍筋锈蚀约束混凝土力学性能退化数值模拟[J]. *四川建筑科学研究*, 2013, 39(5): 94-97, 111.
ZHANG W, NIU D T, LI Q. Stirrups corrosion of concrete column with axial compression for numerical simulation [J]. *Sichuan Building Science*, 2013, 39(5): 94-97, 111. (in Chinese)
- [70] 王斌, 冯博强, 孙勇峰, 等. 考虑点蚀效应的箍筋约束混凝土时变应力-应变模型[J]. *工业建筑*, 2021, 51(9): 106-112, 155.
WANG B, FENG B Q, SUN Y F, et al. A time-varying stress-strain model of stirrups confined concrete considering the effect of pitting corrosion [J]. *Industrial Construction*, 2021, 51(9): 106-112, 155. (in Chinese)
- [71] BUNNI N G, SCOTT B D, PARK R, et al. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1982, 79(1): 13-27.
- [72] SAATCIOGLU M, RAZVI S R. Strength and ductility of confined concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(6): 1590-1607.
- [73] 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)
- [74] 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)
- [75] SOLIMAN M T M, YU C W. The flexural stress-strain relationship of concrete confined by rectangular transverse reinforcement [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1967, 19(61): 223-238.
- [76] 李强, 牛荻涛, 肖前慧, 等. 锈蚀箍筋约束混凝土本构模型研究[J]. *建筑结构*, 2018, 48(增刊1): 530-535.
LI Q, NIU D T, XIAO Q H, et al. Research on the constitutive model of confined concrete by corroded stirrups [J]. *Building Structures*, 2018, 48(Sup 1): 530-535. (in Chinese)
- [77] SARGIN M. Stress-strain relationship for concrete and the analysis of structural concrete sections [M]. Waterloo, ON, Canada: University of Waterloo, 1971.
- [78] PARK R, KENT D C, SAMPSON R A. Reinforced concrete members with cyclic loading [J]. *Journal of the Structural Division*, 1972, 98(7): 1341-1360.
- [79] MARTÍNEZ-RUEDA J E, ELNASHAI A S. Confined concrete model under cyclic load [J]. *Materials and Structures*, 1997, 30(3): 139-147.
- [80] SAKAI J, KAWASHIMA K. Unloading and reloading stress-strain model for confined concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(1): 112-122.
- [81] 张秀琴, 过镇海, 王传志. 反复荷载下箍筋约束混凝土的应力-应变全曲线方程[J]. *工业建筑*, 1985(12): 16-20.
ZHANG X Q, GUO Z H, WANG C Z. Full stress-strain curve equation of concrete restrained by stirrup under repeated loads [J]. *Industrial Building*, 1985(12): 16-20. (in Chinese)
- [82] 邱璐璐, 刘晓斐, 周鑫, 等. 多级循环加载混凝土损伤特征及声学研究[J]. *建筑科学与工程学报*, 2023, 40(5): 43-51.
QIU L L, LIU X F, ZHOU X, et al. Research on damage characteristics and acoustics of concrete under multi-stage cyclic loading and unloading [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2023, 40(5): 43-51. (in Chinese)

- [83] 刘晓媛. 腐蚀环境下混凝土力学性能与微观特性研究 [D]. 安徽淮南: 安徽理工大学, 2020.
- LIU X Y. Study on mechanical properties and microscopic characteristics of concrete in corrosive environment [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2020. (in Chinese)
- [84] CHENG L X, SHI L, YI L, et al. Study on mechanical properties and constitutive relationship of concrete corroded by hydrochloric acid under cyclic load [J]. Sustainability, 2022, 14(22): 14692.
- [85] 梁岩, 班亚云, 罗小勇, 等. 不同荷载模式下锈蚀钢筋力学性能研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(4): 22-30.
- LIANG Y, BAN Y Y, LUO X Y, et al. Study on mechanical performance of corroded reinforcement bar under different loading modes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(4): 22-30. (in Chinese)
- [86] 郑山锁, 董立国, 郑跃, 等. 近海大气环境下钢筋混凝土结构抗震性能试验研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- ZHENG S S, DONG L G, ZHENG Y. Experimental study on seismic performance of reinforced concrete structures in offshore atmospheric environment [M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)