

考虑损伤效应的弯曲破坏型腐蚀 RC 柱 恢复力模型

尚志刚^{1,2}, 郑山锁^{1,2}, 郑 昊³, 姜叶子⁴, 董晋琦^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部
重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 火箭军工程大学作战保障学院, 陕西 西安 710025;
4. 中国启源工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 出于氯盐腐蚀钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)结构弹塑性分析的需要, 对 6 根 RC 框架柱试件进行加速腐蚀试验, 而后进行拟静力试验, 观察人工气候环境下锈蚀钢筋的表观损伤, 并分析不同腐蚀程度和轴压比对 RC 框架柱破坏形态和抗震性能的影响。在此基础上, 引入双参数损伤模型, 确定模型参数取值, 进而定量化揭示腐蚀 RC 框架柱损伤发展规律。此外, 通过理论分析与试验回归相结合的方法, 建立考虑腐蚀与轴压比影响的 RC 框架柱骨架曲线模型。引入基于损伤的循环退化指数, 提出能够反映加载、卸载、再加载、下降四阶段性能退化的滞回规则, 进而建立弯曲破坏型腐蚀 RC 框架柱恢复力模型, 并验证其有效性。结果表明, 骨架曲线计算值与试验值误差总体在 10% 以内, 累积耗能计算值与试验值误差总体不超过 20%; 由于计算再加载曲线线性特征, 再加载阶段与试验结果存在一定误差, 但滞回曲线整体上吻合较好、误差较小, 说明建立的恢复力模型能够较为准确地反映弯曲破坏型腐蚀 RC 框架柱抗震性能。

关键词: 钢筋混凝土框架柱; 抗震性能; 损伤模型; 氯盐腐蚀; 恢复力模型

中图分类号: TU375.3; TU317⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)02-0369-10
DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.02.008

引 言

氯离子侵蚀是造成沿海地区钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)结构抗震性能劣化的重要原因^[1]。目前, 国内外学者基于腐蚀试验与拟静力试验, 对氯离子侵蚀下 RC 构件的抗震性能进行了大量研究, 如郑山锁等^[1]、孙祯等^[2]、秦卿等^[3]采用人工气候法或干湿循环法, 并结合低周往复加载试验, 揭示了腐蚀程度对 RC 框架梁、RC 框架边节点及 RC 剪力墙抗震性能的影响。王光远^[4]指出, 结构或构件的抗震性能本质上是其损伤能力。因此, 上述抗震研究只是通过结构破坏过程和滞回性能在一定程度上揭示了腐蚀 RC 构件的抗震能力, 未能进一步直接定量化表征其在往复荷载作用下的损伤情况。

恢复力模型是结构弹塑性分析的基础^[5]。迄今为止, 国内外学者对锈蚀结构或构件的滞回特性做了大量研究, 并陆续提出了多种锈蚀 RC 构件的恢复力模型建立方法。郑山锁等^[6]基于拟静力试验结果, 回归得到了酸雨腐蚀 RC 剪力墙的骨架曲线计算公式, 进

而建立了基于耗能退化指数的滞回模型。贡金鑫等^[7]考虑了锈蚀钢筋截面面积减小和粘结性能劣化的影响, 修正了腐蚀 RC 压弯构件的骨架曲线, 进而建立相应的恢复力模型。构件在往复荷载作用下的性能退化本质上就是其损伤不断发展所导致, 然而上述模型均未能将循环退化过程与损伤发展相联系。

鉴于此, 本文对 6 根氯盐腐蚀 RC 框架柱试件进行了拟静力试验, 揭示了受氯离子侵蚀后 RC 柱的破坏形态与抗震性能。在此基础上, 引入损伤指数用以量化构件在往复荷载作用下的损伤发展情况, 并给出了该参数的具体计算方法。同时, 建立了考虑腐蚀与轴压比影响的 RC 框架柱骨架曲线模型, 提出了基于损伤退化指数的滞回规则, 进而构建了弯曲破坏型腐蚀 RC 框架柱恢复力模型, 并对其有效性进行了验证。

1 试验概况

1.1 试件设计

为了揭示氯盐腐蚀 RC 框架柱抗震性能, 课题

收稿日期: 2021-05-27; 修订日期: 2021-07-23

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1509302); 陕西省重点研发计划资助项目(2021ZDLSF06-10); 西安市科技计划资助项目(2019113813CXSF016SF026)。

组以腐蚀程度和轴压比为变化参数,制作了6根腐蚀RC框架柱试件,并对其进行了低周往复加载试验。试件由柱身和底梁2部分组成,柱身高度为1100 mm,截面尺寸为200 mm×200 mm,剪跨比为5。截面采用对称配筋,每侧配置3 Φ 16,配筋率为3.02%。箍筋配筋形式为 Φ 6@60,体积配箍率为0.87%。在柱顶端200 mm范围内进行了箍筋加密布置,间距为30 mm,以防止加载处局压破坏。底梁尺寸为1000 mm×400 mm×400 mm,其在柱身腐蚀试验结束后进行二次浇筑,以满足人工气候实验室的尺寸限制要求。试件混凝土保护层厚度为10 mm,所用混凝土实测得立方体抗压强度 f_{cu} 和弹性模量 E_c 分别为24.6 MPa, 2.85×10^4 MPa;纵筋采用HRB335钢筋,实测得屈服强度 f_{yi} 、极限强度 f_{ui} 、弹性模量 E_{si} 分别为373 MPa, 537 MPa, 2.0×10^5 MPa;箍筋采用HPB300钢筋,实测得屈服强度 f_{yv} 、极限强度 f_{uv} 、弹性模量 E_{sv} 分别为305 MPa, 402 MPa, 2.1×10^5 MPa。由于钢筋锈蚀造成的锈胀裂缝宽度易于测量,且其与钢筋锈蚀率近似呈线性关系^[8],因此本文试件的腐蚀程度由沿纵筋方向的平均锈胀裂缝宽度控制。试件主要设计变化参数见表1,几何与配筋形式如图1所示。

表 1 试件设计变化参数

Tab. 1 Variable parameters of specimens

试件编号	轴压比 n	锈胀裂缝宽度 w/mm	纵筋锈蚀率 $\eta_{si}/\%$	箍筋锈蚀率 $\eta_{sv}/\%$
Z-1	0.2	0.0	0.00	0.00
Z-2	0.2	0.5	2.36	3.94
Z-3	0.2	1.2	5.23	7.72
Z-4	0.2	1.5	5.97	9.43
Z-5	0.4	1.5	6.20	9.60
Z-6	0.6	1.5	6.43	10.80

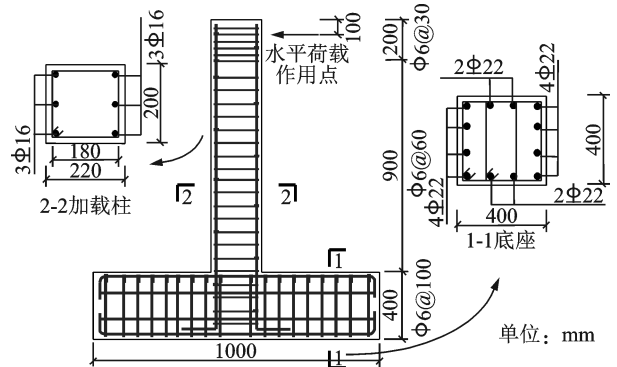


图1 试件尺寸及配筋

Fig. 1 Dimensions and reinforcements of specimens

按文献[9]中所述方法计算完好试件Z-1的抗弯承载力 V_p 与抗剪承载力 V_s ,而后根据Setzler等^[10]

的破坏形态划分标准可知,未腐蚀试件Z-1的剪弯比 V_s/V_p (约1.62)大于1.4,因此,本文RC框架柱试件的设计破坏模式是弯曲破坏。

1.2 氯盐腐蚀方案

相对于传统电化学腐蚀,人工气候腐蚀能模拟自然环境气候过程,使混凝土内部钢筋锈蚀具有与自然环境相同的电化学机理,并达到加速锈蚀目的^[11]。因此,本文采用人工气候环境法模拟氯盐环境,并在浇筑腐蚀试件的混凝土中内掺水泥质量5%的NaCl以加速钢筋锈蚀^[12]。图2为人工气候实验室。



图2 人工气候实验室

Fig. 2 Climate laboratory

试验时,采用间断喷洒盐雾的方法来模拟实际干湿循环环境中氯离子侵蚀,即控制气候实验室内温度、湿度及顶部喷洒装置的喷淋时长等,具体环境参数设置^[13]如图3所示。其中,喷洒的盐雾为NaCl溶液,其质量分数为5%,pH值为6~7。喷淋淡水是为了防止结晶盐阻塞喷嘴。

腐蚀过程中,定期观测实验室内试件表面锈胀裂缝发展状况,当各试件表面锈胀裂缝宽度量测值达到表1中的设定值时,停止腐蚀试验,此时试件Z-1~Z-6的腐蚀循环次数分别为0,322,693,848,852,852。

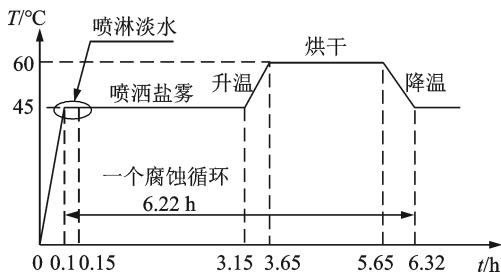


图3 环境参数设置

Fig. 3 Environmental parameters

1.3 拟静力加载方案

如图4所示,采用悬臂式加载方法对试件进行拟静力试验,并分别通过千斤顶及作动器处的传感器控制柱端荷载与位移。此外,采用荷载-变形双控制的加载方法,加载制度如图5所示。

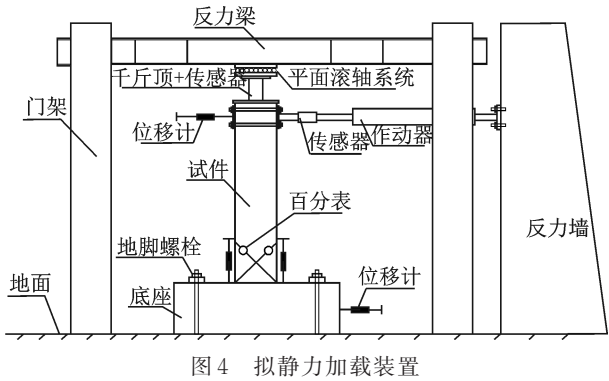


图 4 Quasi-static test loading device

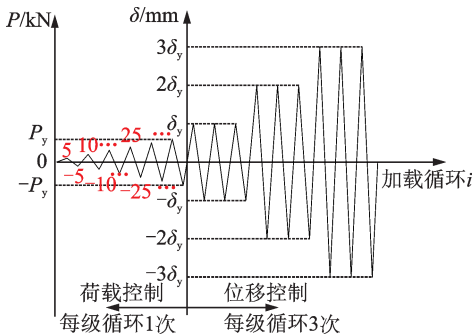


图 5 试验加载制度

2 试验结果

2.1 锈蚀钢筋表观损伤

加载试验完成后,敲碎试件塑性铰区混凝土,并截取该区域内钢筋,观察其锈蚀后表观损伤,如图 6 所示。图 6(a)~(b)中钢筋从上到下分别对应试件 Z-1,Z-2,Z-3,Z-4。从图 6 中可以看出,人工气候腐蚀后的钢筋表面锈蚀产物颜色为“红褐色”,与电化学腐蚀钢筋的“黑色”锈蚀产物不同。同时,呈现距保护层较近的外侧锈蚀严重的特征,这与自然环境下钢筋锈蚀损伤相符。上述现象表明,通过人工气候加速腐蚀的钢筋具有典型的氯离子侵蚀特征,能够得到与自然环境下相似的锈蚀损伤效果^[11]。

观察完截取的锈蚀钢筋表观损伤后,对其进行酸洗除锈,并按下式计算钢筋锈蚀率 η_s :

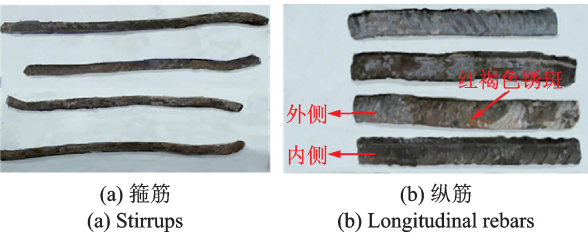


图 6 锈蚀钢筋表观损伤

Fig. 6 Corrosion morphology of steel bars

$$\eta_s = \frac{g_0 - g_1}{g_0} \tag{1}$$

式中 g_0 和 g_1 分别为锈蚀前后钢筋的重量。

按上式计算的各试件箍筋与纵筋锈蚀率见表 1。可以看出,在相同腐蚀程度下,箍筋锈蚀比纵筋严重,这是由于箍筋距混凝土外表面较近,且其直径较小所致。

2.2 破坏过程

如图 7 所示,在往复荷载作用下,各试件的柱脚部混凝土均受压破碎,且试件表面无明显的斜裂缝,表明所有试件均发生弯曲破坏。具体破坏过程与特征如下:加载过程中,柱底部 300 mm 范围内的塑性铰区最先出现水平裂缝;随着水平荷载的增大,该区域水平裂缝数量与宽度不断增多、增大;随着加载的进行,柱受拉钢筋屈服,加载模式由力控制模式切换至位移控制模式,此时水平荷载为 40~50 kN。而后,水平裂缝数量不再增加,但宽度仍不断增大;当水平位移达到 15~25 mm 时,柱底受压区出现竖向

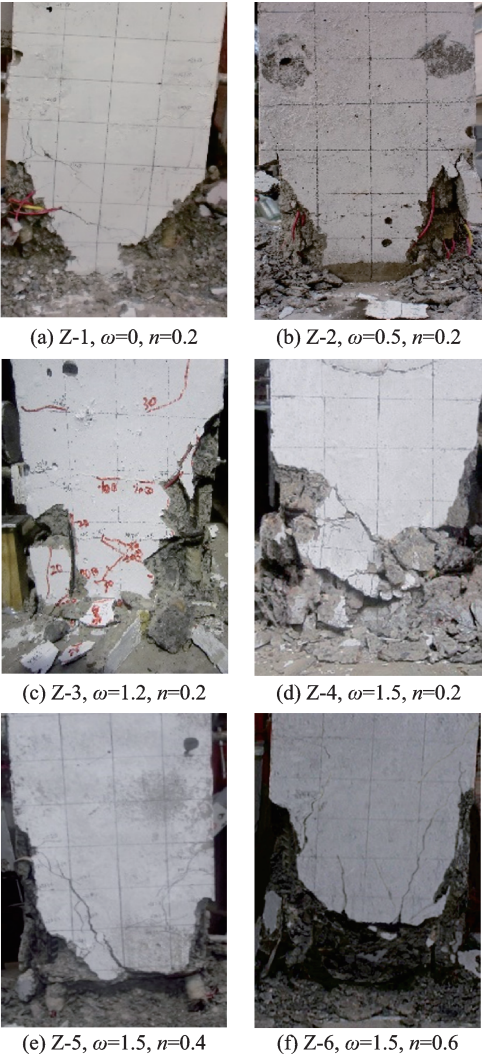


图 7 试件破坏形态

Fig. 7 Failure patterns of specimens

裂缝,随后施加在柱顶部的水平荷载开始逐渐减小;随着水平位移的进一步增大,竖向受压裂缝不断向上延伸,造成受压区的混凝土被压碎并大面积剥落;最后由于柱截面明显削弱以及部分试件的纵筋发生屈曲,柱顶水平荷载显著降低,试件破坏。

此外,轴压比相同时,随着腐蚀程度的增加,试件开裂时的水平荷载较小,开裂后的水平裂缝数量逐渐减少,但裂缝间距与宽度不断增加。其原因为加载裂缝主要是原有锈胀裂缝延伸发展而来的^[14]。因此,腐蚀越严重的试件,其原有锈胀裂缝的宽度越宽,则加载裂缝越容易形成,从而开裂荷载越小。同时,加载裂缝的迅速形成会导致裂纹点集中,从而减少了明显的裂缝数量^[14]。此外,钢筋的腐蚀削弱了钢筋与其周围混凝土之间的粘结性能,导致所需的传力路径长度增加,从而增加了裂缝间距^[6],而由于裂缝宽度与裂缝间距成正比^[15],因此,裂缝宽度也随之增加。在破坏阶段,随着腐蚀程度的增加,试件混凝土保护层的剥落提前,当试件达到破坏状态时,极限水平位移减小。这种现象可能是由于试件腐蚀越严重,钢筋腐蚀产物越多,从而对其周围混凝土的挤压力越大,导致保护层提前剥落。并且,腐蚀还会引起钢筋力学性能的恶化,造成纵向钢筋过早屈曲。最终共同导致腐蚀试样的极限水平位移小于未腐蚀试样。

腐蚀程度相同时,随着轴压比的增加,试件开裂时的水平荷载较大,而开裂后的水平裂缝数量较少。这主要是由于轴压力产生的压应变部分抵消了混凝土受拉区的拉应变,使混凝土达到极限拉应变(即开裂)所对应的水平荷载增加,并抑制了后续的裂缝发展。

2.3 滞回性能

图8为试件Z-1~Z-6的水平荷载 P 与位移 Δ 滞回曲线。从图8中可以看出,纵筋屈服前,各试件滞回曲线近似呈直线;屈服后,加、卸载刚度逐渐退化,滞回环面积和残余变形不断增大,滞回曲线形状向梭形发展;达到峰值荷载后,承载力开始下降,残余变形持续增大,此时滞回曲线仍较为饱满,呈现梭形,试件仍具有较好的耗能能力。

对比试件Z-1~Z-4可知,轴压比相同时,腐蚀程度越大的试件,其承载力、滞回环面积及破坏时水平位移越小,表明随着腐蚀程度的增加,试件的承载能力、变形能力和耗能能力均逐渐变差。上述腐蚀试件抗震能力降低的原因为,①氯离子侵蚀导致钢筋力学性能劣化;②钢筋锈蚀产物不断累积,引起混凝土保护层开裂,使得钢筋与混凝土间的粘结性能发生劣化,同时还进一步加速了氯离子侵蚀速率,导致

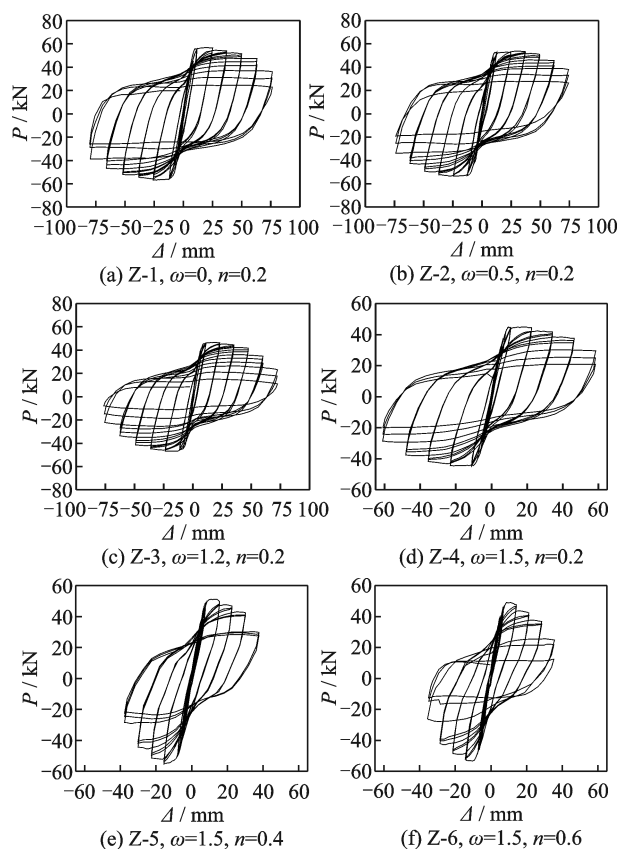


图8 试件滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curves of specimens

钢筋锈蚀加快,构件抗震能力退化加剧。

对比试件Z-4~Z-6可知,腐蚀程度相同时,轴压比较大的试件,其滞回环面积较小,下降段较陡,破坏时水平位移较小。试件Z-4~Z-6的峰值荷载分别为44.83, 52.52, 50.28 kN,即承载力并未随轴压比的增大而持续增大,而是随轴压比的增大呈现先增大后减小的趋势,分析原因为大轴压比的试件Z-6发生了小偏心受压破坏,在该破坏模式下,受弯承载力随轴压比的增大而减小。其中,峰值点为骨架曲线荷载最大点。

2.4 损伤发展状况

采用损伤指数 D 描述构件在往复荷载作用下的累积损伤,其表达式为^[16]:

$$D = (1 - \beta) \sum_{i=1}^M \left(\frac{\delta_{\max,i} - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} \right)^c + \beta \sum_{j=1}^M \left(\frac{E_j}{2E_u} \right)^c \quad (2)$$

$$\delta_{\max,i} = \begin{cases} |\delta_{\max,i}|, & |\delta_{\max,i}| > \delta_y \\ \delta_y, & |\delta_{\max,i}| \leq \delta_y \end{cases} \quad (3)$$

式中 β 和 c 分别为权重系数和试验参数; M 为总循环次数; $\delta_{\max,i}$ 为第 i 次加载循环的最大位移; δ_y 和 δ_u 分别为单调荷载作用下达到屈服荷载和极限荷载时的位移; E_j 为第 j 次加载循环时的滞回耗能; E_u 为单调荷载作用下达到极限荷载时的耗能。

此外,当构件第 $i+1$ 次加载循环的最大位移不大于前 i 次循环过程中的最大位移时,不考虑此次加载循环的位移损伤,仅考虑耗能损伤。

由试验结果(图 8)可以看出,达到峰值荷载前,试件损伤较小,表现为强度、刚度退化不明显,因此认为单调加载下各试件屈服点、峰值点约等于往复加载下的。其中,往复加载下试件的屈服点按能量等值法^[15]确定。

对于极限点,往复加载下极限荷载仍取峰值荷载的 85%,而极限位移则按下式计算^[17]:

$$\delta_u = 0.02541 \times 0.3^n \times \left[\frac{\max(0.01, \omega)}{\max(0.01, \omega')} f_c \right]^{0.2} \times (L/h)^{0.425} \times 25^{\alpha \cdot \rho_{sx} \cdot f_y / f_c} \times L \quad (4)$$

式中 ω' 、 ω 分别为拉、压钢筋配筋特征值; ρ_{sx} 为平行于加载方向的面积配箍率; f_c 为混凝土强度; L/h 为构件剪跨比,其中, L 为构件高度, h 为构件截面有效高度; α 为箍筋约束系数,按下式计算:

$$\alpha = \left(1 - \frac{s}{2b_{cor}}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2h_{cor}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\sum b_s^2}{6b_{cor}h_{cor}}\right) \quad (5)$$

式中 b_{cor} 和 h_{cor} 分别为箍筋包围的核心区截面宽度和高度; b_s 为相邻纵筋间距; s 为箍筋间距。

构件单调荷载作用下达到极限荷载时的耗能 E_u 按下式近似计算:

$$E_u = 0.5p_y\delta_y + 0.5(p_y + p_m) \cdot (\delta_m - \delta_y) + 0.5(p_m + p_u) \cdot (\delta_u - \delta_m) \quad (6)$$

式中 p_y 、 p_m 和 p_u 分别为构件在单调加载时的屈服荷载、峰值荷载和极限荷载; δ_m 为构件在单调荷载作用下达到峰值荷载时的位移。

考虑到腐蚀试件抗震性能劣化受到诸多因素影响,通过理论方法计算腐蚀试件在单调加载下的极限位移难以实现^[18]。因此,本文假定在单调加载和往复加载下,随着腐蚀程度和轴压比的增大,试件极限位移变化规律一致。则结合试验数据拟合,可得腐蚀试件在单调加载下的极限位移与耗能,如表 2 所示。

表 2 损伤模型参数

Tab. 2 Parameters of damage model

试件编号	极限位移/mm	极限耗能/(kN·mm)	试验参数 c
Z-1	78.67	3873.98	4.13
Z-2	77.42	3599.01	3.37
Z-3	62.38	2532.13	5.06
Z-4	56.10	2171.83	3.00
Z-5	32.59	1409.84	3.32
Z-6	27.18	1107.12	3.44

参考文献[19],针对钢筋混凝土构件,本文权重系数 β 取 0.25。则试验参数 c 可通过试件破坏时,损伤指数 $D=1$ 反推得出,如表 2 所示。以功比系数 $I_w^{[20]}$ 为横坐标,损伤指数 D 为纵坐标,绘制出各试件累积损伤曲线,如图 9 所示。从图 9 中可以看出:

1)加载初期,各试件损伤接近于 0;达到峰值荷载后($I_w > 10$),开始逐渐产生较明显损伤,并形成具有一定斜率的加载级“平台”。随着加载进一步进行,各试件损伤发展速率越来越快,表现为“平台”斜率越来越大,同时相邻“平台”间的损伤指数差值亦呈增大趋势。

2)腐蚀对试件损伤发展有较为明显影响。随着腐蚀程度的增大,试件损伤越严重,发展速率越快。表现为腐蚀越严重的试件,其同一加载级下的损伤指数越大,“平台”段越陡,相邻“平台”间的损伤指数差值越大。其中,由于加载制度的影响,Z-1~Z-3 试件间的损伤指数差异较小,而与 Z-4 相差明显。具体来说,腐蚀造成试件 Z-1~Z-4 的极限位移逐渐减小,但由于本文加载级间的级差较大,致使 Z-1~Z-3 试件的极限位移都处于屈服后的第 5 个加载级,而锈蚀最严重的 Z-4 试件的极限位移则处于屈服后的第 4 个加载级,因而相较于其他 3 个试件,Z-4 明显提前破坏,因此损伤指数显著增大。

3)在同一加载级下,具有较大轴压比的试件,其损伤指数、“平台”段斜率及相邻“平台”间的损伤指数差值均大于轴压比较小的试件,说明了随着轴压比的增大,试件损伤发展越快、破坏越早。

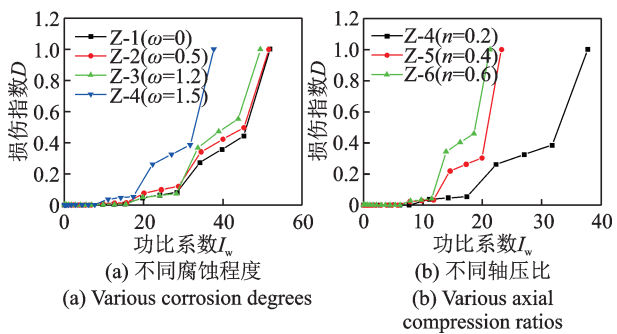


图 9 试件损伤曲线

Fig. 9 Damage curves of specimens

3 恢复力模型

3.1 骨架曲线

图 10 为试件 Z-1~Z-6 的骨架曲线。从图 10 中可以看出,各试件骨架曲线形状基本相似,只是由于受到腐蚀和轴压比影响,使得相较于未腐蚀完好试件 Z-1,腐蚀试件 Z-2~Z-6 骨架曲线特征点发生变

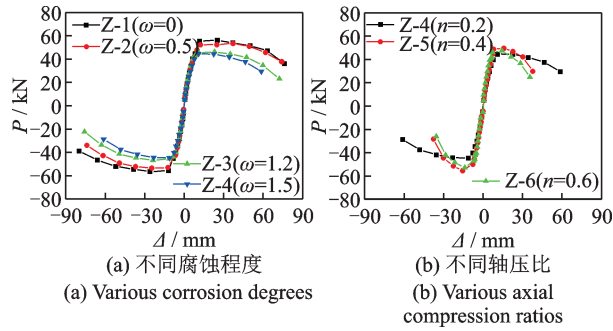


图10 试件骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curves of specimens

化。因此,本文将RC框架柱骨架曲线简化为正、反对称且具有下降段的三折线模型,并通过修正特征参数来考虑氯盐腐蚀和轴压比的影响。以下为未腐蚀试件特征点的计算方法:

1) 屈服荷载 $P_y = (M_y - N \cdot \Delta_y) / L$, 其中, N 为轴压力, 屈服弯矩 M_y 的计算式如下^[21]:

$$M_y = 0.97bh^3\phi_y \left\{ E_c \frac{k_y^2}{2} \left[0.5 \left(1 + \frac{a_s}{h} \right) - \frac{k_y}{3} \right] + \frac{E_{sl}}{2} \left[(1 - k_y)\rho + \left(k_y - \frac{a_s}{h} \right) \rho' \right] \left(1 - \frac{a_s}{h} \right) \right\} \quad (7)$$

式中 ϕ_y 为屈服曲率^[21]; k_y 为屈服时受压区高度^[21]; ρ' , ρ 分别为受拉、受压钢筋配筋率; b 为截面宽度; a_s 为受压区边缘到受压钢筋合力点的距离。

2) 屈服位移 Δ_y 计算式如下^[22-23]:

$$\Delta_y = \frac{1}{3} \phi_y L^2 + \frac{P_y L}{k_v G_c A_g} + \frac{d_b f_{yl} \phi_y L}{8\mu_e} \quad (8)$$

式中 k_v 为形状系数^[23]; G_c 为混凝土剪切模量^[5]; d_b 为纵筋直径; μ_e 为弹性粘结强度均值^[24]; A_g 为构件截面面积。

3) 峰值荷载 P_m 计算式如下^[25]:

$$P_m = (1.24 - 0.075\rho' \frac{f_{yl}}{f_c} - 0.5n) P_y \quad (9)$$

4) 峰值位移 Δ_m 计算式如下:

$$\Delta_m = \Delta_y + (\phi_b - \phi_y) \cdot L_p (L - L_p/2) \quad (10)$$

$$\phi_b = \frac{\epsilon_b}{\xi_u h_0} \quad (11)$$

式中 ϕ_b 为峰值曲率; L_p 为塑性铰长度^[26]; ϵ_b 为非约束混凝土极限压应变, 本文取 $\epsilon_b = 0.005$; ξ_u 为截面相对受压区高度^[27]; h_0 为截面有效高度。

5) 极限荷载 $P_u = 0.85P_m$ 。

6) 极限位移 $\Delta_u = 1.5\Delta'_u - 0.5\Delta_m$, 其中 Δ'_u 的计算式如下^[25]:

$$\Delta'_u = \frac{\sqrt{1 + 30\alpha_v \lambda_v}}{0.045 + 1.75n} \Delta_y \quad (12)$$

式中 Δ'_u 为承载力下降10%的位移; α_v 为配箍特征值修正系数, 取 $\alpha_v = 1$; λ_v 为配箍特征值。

定义特征参数修正系数 $f(\eta_{sl}, n)$ 以考虑纵筋锈蚀率 η_{sl} 以及轴压比 n 对完好RC框架柱抗震性能的影响, 则腐蚀RC框架柱骨架曲线特征参数为 $C' = f(\eta_{sl}, n)C$ 。式中, C , C' 分别为完好和腐蚀RC框架柱骨架曲线特征参数。

基于试验结果, 将试件Z-1~Z-6的特征参数除以完好试件Z-1的相应特征参数, 得到各试件的特征参数修正系数。而后, 通过多参数拟合, 并考虑边界条件, 建立了考虑纵筋锈蚀率和轴压比的腐蚀RC框架柱的骨架曲线模型, 如下式所示:

$$P'_y/P_y = (-0.11\eta_{sl}^2 - 0.41\eta_{sl})(0.48n^2 - 0.44n + 0.10) + 1 \quad (13)$$

$$\Delta'_y/\Delta_y = (-0.16\eta_{sl}^2 + 0.33\eta_{sl})(0.36n^2 - 0.30n + 0.09) + 1 \quad (14)$$

$$P'_m/P_m = (-0.04\eta_{sl}^2 - 0.22\eta_{sl})(0.82n^2 - 0.76n + 0.20) + 1 \quad (15)$$

$$\Delta'_m/\Delta_m = (0.04\eta_{sl}^2 + 0.55\eta_{sl})(0.58n^2 - 0.62n + 0.08) + 1 \quad (16)$$

$$\Delta'_u/\Delta_u = (0.26\eta_{sl}^2 - 0.46\eta_{sl})(0.45n^2 - 0.46n + 0.03) + 1 \quad (17)$$

式中 P'_k 和 Δ'_k 分别为腐蚀构件特征点 k 的荷载值和位移值; P_k 和 Δ_k 分别为未腐蚀构件特征点 k 的荷载值和位移值, 其中, $k=y, m, u$ 。

基于上述公式, 计算不同氯盐腐蚀程度和轴压比RC框架柱骨架曲线特征参数, 如图11所示。由图11可知, 各特征点荷载的计算值 P_c 与试验值 P_t 最大误差为4.99%, 位移计算值 Δ_c 与试验值 Δ_t 最大误差为12.35%, 误差总体在10%以内, 表明本文提出的腐蚀试件骨架曲线计算方法能较为准确地反映氯盐腐蚀RC框架柱的实际受力与变形。

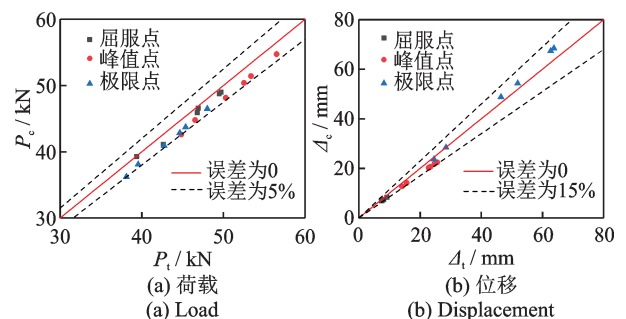


图11 特征参数计算值与试验值对比

Fig. 11 Comparison of calculated and tested characteristic parameters

3.2 滞回规则

构件在往复荷载作用下, 其损伤不断发展, 致使强度、刚度发生不同程度退化, 因此引入基于损伤的循环退化指数 β_i , 用以表征构件在加载、卸载、再加

载、下降四阶段的性能退化,退化规则如图12所示。

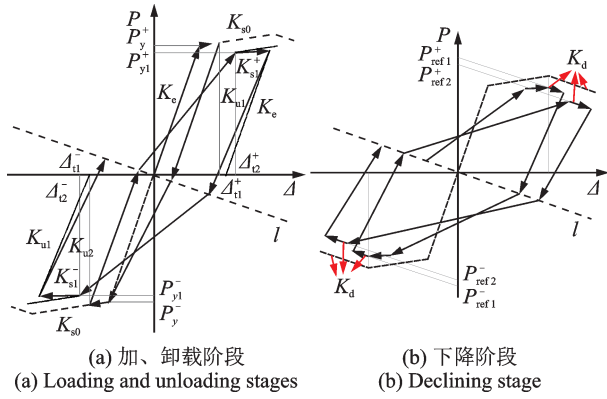


图12 循环退化规则

Fig. 12 Cyclic degradation rules

1) 基于损伤的循环退化指数:

$$\beta_i = [\Delta D_i / (\sum D - D_{i-1})]^\varphi \quad (18)$$

式中 ΔD_i 为第 i 次加载循环的损伤增量值; $\sum D$ 为加载结束时的累积损伤; D_{i-1} 为第 i 次加载循环前的损伤累积值; φ 为控制循环退化速率的参数, 取 1~2。

根据前文损伤分析, 随着腐蚀程度的加重, 试件损伤发展越快。基于此, 结合式(18)可知, 不同腐蚀程度构件的循环退化指数将不一致, 其在往复荷载作用下的性能退化亦将随之不同。因此, 采用该退化指数表征的滞回规则考虑了腐蚀影响。

2) 加载阶段:

$$P_{yi}^\pm = (1 - \beta_i) P_{y(i-1)}^\pm \quad (19)$$

$$K_{si}^\pm = (1 - \beta_i) K_{s(i-1)}^\pm \quad (20)$$

式中 i 为加载循环次数; P_y 和 K_s 分别为屈服荷载和强化刚度; “+”和“-”分别代表正向加载和反向加载。

3) 卸载阶段:

$$K_{ui} = (1 - \beta_i) K_{u(i-1)} \quad (21)$$

式中 K_u 为卸载刚度。

4) 再加载阶段:

$$\Delta_{ui}^\pm = (1 + \beta_i) \Delta_{i(i-1)}^\pm \quad (22)$$

式中 Δ_i 为目标位移。

5) 下降阶段:

$$P_{refi}^\pm = (1 - \beta_i) P_{ref(i-1)}^\pm \quad (23)$$

式中 P_{ref} 为下降段强度。

6) 再加载点:

由试验结果(图8)可知, 纵筋屈服后, 各循环的再加载点(亦是卸载结束点)没有位于 x 轴上, 因此, 对各循环的再加载点试验数据进行归一化拟合(图13), 可得其均位于一条直线 l 上, 该直线方程为:

$$\frac{P}{P_m} = 0.05 - 0.10 \frac{\Delta}{\Delta_m}, R^2 = 0.90 \quad (24)$$

式中 R^2 为拟合优度。

图14为弯曲破坏型腐蚀RC框架柱的滞回规则示意图。其具体步骤如下:

1) 构件达到屈服前, 沿骨架曲线弹性段1-2进行往复加载; 构件达到屈服后、峰值前, 首次加载路径为0-1-5-6-2-7-8, 其中正向卸载刚度同弹性段刚度, 负向卸载刚度考虑循环退化; 之后, 重复弹塑性阶段第1圈的加、卸载过程, 并考虑加载、卸载、再加载阶段性能退化。

2) 构件达到峰值位移后, 处于破坏阶段, 沿路径9-10-11-12-13-14-15-16-17进行正、反向加卸载, 并考虑加载、卸载、再加载阶段性能退化; 之后, 重复破坏阶段第1圈的加、卸载过程, 但此时需考虑下降段的性能退化。

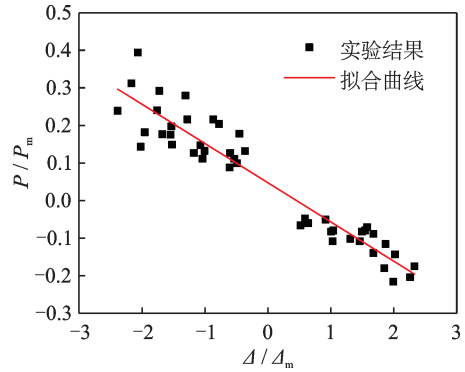


图13 再加载点

Fig. 13 Reloading points

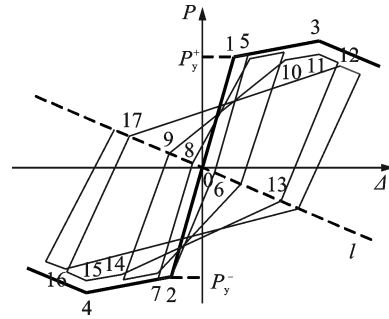


图14 滞回规则

Fig. 14 Hysteresis rules

4 模型验证

以本文2根RC柱和文献[28]中2根弯曲破坏型RC柱为例, 根据建立的腐蚀RC框架柱骨架曲线与滞回规则, 绘制出计算滞回曲线, 并与试验滞回曲线进行对比, 如图15所示。其中, 由于在最后一个加载位移级时, 根据式(18)计算出的 β_i 接近于1, 因此其强度、刚度退化至接近于0, 故未对比最后一个

加载级的滞回曲线。

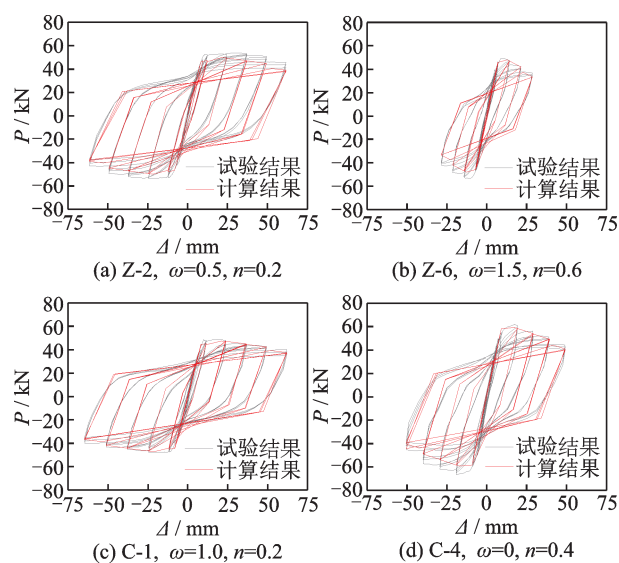


图15 计算与试验滞回曲线对比

Fig. 15 Comparison of calculated and tested hysteretic curves

由图15可以看出,两者在承载力、变形、滞回面积、刚度退化等方面均吻合较好,其误差相对较小,而在再加载阶段则存在明显误差,这是由于计算滞回曲线的再加载阶段为顶点指向型的直线,而试验滞回曲线的再加载阶段为外凸形的曲线。

此外,为了进一步验证模型的准确性,给出了本文6根RC柱与文献[28]中2根RC柱的累积耗能计算值 E_c 与试验值 E_t 对比结果,如图16所示。由图16可以看出,由于计算滞回曲线再加载阶段线性特征以及计算骨架曲线荷载值偏小,致使累积耗能计算值较试验值整体偏小,但误差总体仍不超过20%,处于可接受范围内,表明本文建立的恢复力模型能够较好地反映弯曲破坏型腐蚀RC框架柱抗震性能。

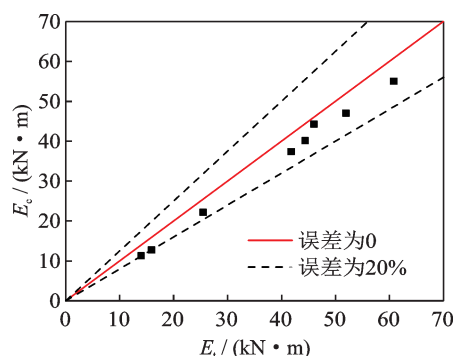


图16 计算与试验累积耗能误差分析

Fig. 16 Error analysis of calculated and tested cumulative energy dissipation

5 结论

(1)人工气候腐蚀钢筋的表现损伤与自然环境

下相近。随着腐蚀程度的增加,RC柱的开裂荷载和水平裂缝数量逐渐减少,而水平裂缝间距和宽度不断增大。具有较大轴压比的试件,其开裂荷载越大,而水平裂缝数量越少。

(2)随着腐蚀程度的增大,试件抗震能力退化越来越严重,损伤发展速率逐渐加快;随着轴压比的增大,试件变形能力和耗能能力均逐渐减小,承载能力先增大后减小,损伤发展速率不断加快。

(3)建立了腐蚀RC框架柱骨架曲线特征参数计算模型,提出了基于损伤退化指数的滞回规则,进而构建了适用于弯曲破坏型腐蚀RC框架柱的恢复力模型,并与试验滞回曲线对比后发现,两者在承载力、变形、滞回环面积与刚度退化等方面误差相对较小,但是由于计算再加载曲线的线性特征,致使再加载阶段存在一定明显误差。

(4)由于计算滞回曲线再加载阶段线性特征及计算与试验骨架曲线误差,累积耗能计算值整体小于试验值,但误差总体不超过20%,处于可接受范围内,表明建立的恢复力模型能够较好地反映弯曲破坏型腐蚀RC框架柱的抗震性能。

参考文献:

- [1] 郑山锁,刘巍,左河山,等.近海大气环境下考虑锈蚀的不同剪跨比RC框架梁抗震性能试验[J].工程力学,2018,35(4):78-86.
Zheng Shansuo, Liu Wei, Zuo Heshan, et al. Aseismic performance test of RC frame beams considering corrosion with different shear span ratio in the coastal atmosphere[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(4): 78-86.
- [2] 孙祯,郑建岚.氯盐环境下再生混凝土框架边节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(4):82-91.
Sun Zhen, Zheng Jianlan. Seismic testing of exterior recycled concrete joints under chloride [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(4): 82-91.
- [3] 秦卿,郑山锁,丁莎.盐雾环境下一字型短肢RC剪力墙抗震性能试验[J].工程力学,2020,37(6):79-91.
Qin Qing, Zheng Shansuo, Ding Sha. Experimental study on aseismic behavior of short-pier RC shear walls in salt-fog environment [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(6): 79-91.
- [4] 王光远.工程结构与系统抗震优化设计的实用方法[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
Wang Guangyuan. Practical Methods of Optimum Aseismic Design for Engineering Structures and Systems[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999.
- [5] 郑山锁,荣先亮,张艺欣,等.冻融损伤钢筋混凝土剪力墙恢复力模型研究[J].华中科技大学学报(自然科学)

- 学版), 2019, 47(6): 109-114.
- Zheng Shansuo, Rong Xianliang, Zhang Yixin, et al. Restoring force model of freeze-thaw injury reinforced concrete shear walls[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(6): 109-114.
- [6] 郑山锁, 郑跃, 董立国, 等. 酸雨环境下锈蚀RC剪力墙恢复力模型研究[J]. 工程力学, 2019, 36(10): 75-85.
- Zheng Shansuo, Zheng Yue, Dong Ligu, et al. A restoring force model of RC shear walls in a simulated acid environment[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10): 75-85.
- [7] 贡金鑫, 李金波, 赵国藩. 受腐蚀钢筋混凝土构件的恢复力模型[J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 38-44.
- Gong Jinxin, Li Jinbo, Zhao Guofan. Restoring force model of corroded reinforced concrete elements[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 38-44.
- [8] 吴锋, 张章, 龚景海. 基于锈胀裂缝的锈蚀梁钢筋锈蚀率计算[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 144-150.
- Wu Feng, Zhang Zhang, Gong Jinghai. Calculation of steel corrosion rate based on corrosive crack of beams[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10): 144-150.
- [9] Zhang Y X, Zheng S S, Rong X L, et al. Seismic performance of reinforced concrete short columns subjected to freeze-thaw cycles [J]. Applied Sciences, 2019, 9(13): 2708.
- [10] Setzler E J, Sezen H. Model for the lateral behavior of reinforced concrete columns including shear deformations[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(2): 493-511.
- [11] 袁迎曙, 章鑫森, 姬永生. 人工气候与恒电流通电法加速锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能比较研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 42-46.
- Yuan Yingshu, Zhang Xinsen, Ji Yongsheng. A comparative study on structural behavior of deteriorated reinforced concrete beam under two different environments [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 42-46.
- [12] 金伟良, 袁迎曙, 卫军, 等. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- Jin Weiliang, Yuan Yingshu, Wei Jun, et al. Durability Theory and Design Method of Concrete Structure in Chloride Salt Environment[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [13] 郑山锁, 杨威, 赵彦堂, 等. 人工气候环境下锈蚀RC弯剪破坏框架梁抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(11): 27-35.
- Zheng Shansuo, Yang Wei, Zhao Yantang, et al. Experimental research on the seismic behaviors of corroded RC frame beams failed in flexure-shear mode under the artificial climate [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(11): 27-35.
- [14] 罗小勇, 程俊峰, 龙昊, 等. 锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(4): 69-79.
- Luo Xiaoyong, Cheng Junfeng, Long Hao, et al. Experimental study on seismic behavior of RC columns with corroded reinforcing bars [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(4): 69-79.
- [15] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- Guo Zhenhai. Principle of Reinforced Concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [16] 王斌, 郑山锁, 国贤发, 等. 型钢高强高性能混凝土框架柱地震损伤分析[J]. 工程力学, 2012, 29(2): 61-68.
- Wang Bin, Zheng Shansuo, Guo Xianfa, et al. Seismic damage analysis for SRHSHPC frame columns[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(2): 61-68.
- [17] 陈宗平, 徐金俊, 薛建阳, 等. 基于变形和能量双重准则的型钢混凝土异形柱地震损伤行为研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(8): 29-37.
- Chen Zongping, Xu Jinjun, Xue Jianyang, et al. Deformation and energy-based seismic damage behavior of SRC specially shaped columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(8): 29-37.
- [18] Rong X L, Zheng S S, Zhang Y X, et al. Experimental study on the seismic behavior of RC shear walls after freeze-thaw damage [J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110101.
- [19] 党争, 梁兴文, 代洁, 等. 考虑损伤的纤维增强混凝土剪力墙恢复力模型研究[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 124-133.
- Dang Zheng, Liang Xingwen, Dai Jie, et al. Study on restoring force model of fiber reinforced concrete shear wall considering damage index[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 124-133.
- [20] 陈宗平, 徐金俊, 陈宇良, 等. 基于修正Park-Ang模型的型钢混凝土异形柱框架节点地震损伤研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(8): 90-98.
- Chen Zongping, Xu Jinjun, Chen Yuliang, et al. Seismic damage of SRC special shaped column frame joints based on modified Park-Ang model[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(8): 90-98.
- [21] Panagiotakos T B, Fardis M N. Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(2): 135-148.
- [22] 郑罡, 李贵乾. 钢筋混凝土桥墩有效刚度[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 44-52.
- Zheng Gang, Li Guiqian. Effective stiffness of reinforced concrete bridge piers[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 44-52.
- [23] 李贵乾. 钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究及数值分

- 析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- Li Guiqian. Experimental study and numerical analysis on seismic performance of reinforced concrete bridge columns[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [24] 成虎. 氯离子侵蚀钢筋混凝土桥墩地震易损性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- Cheng Hu. Seismic fragility analyses of reinforced concrete bridge piers under chloride-induced corrosion[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [25] 欧进萍, 何政, 吴斌, 等. 钢筋混凝土结构基于地震损伤性能的设计[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(1): 21-30.
- Ou Jinping, He Zheng, Wu Bin, et al. Seismic damage performance-based design of reinforced concrete structures[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(1): 21-30.
- [26] Paulay T, Priestley M J N. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings [M]. New York: John Wiley and Sons, 1992.
- [27] 蒋欢军, 吕西林. 钢筋混凝土柱对应于各地震损伤状态的侧向变形计算[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(2): 44-50.
- Jiang Huanjun, Lü Xilin. Lateral displacement estimation for RC columns in different seismic damage states [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(2): 44-50.
- [28] 郑山锁, 董立国, 左河山, 等. 人工气候环境下锈蚀 RC 框架柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(4): 28-36.
- Zheng Shansuo, Dong Ligu, Zuo Heshan, et al. Experimental investigation on seismic behaviors of corroded RC frame columns in artificial climate[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(4): 28-36.

Restoring force model of corroded RC columns with bending failure considering damage effects

SHANG Zhi-gang^{1,2}, ZHENG Shan-suo^{1,2}, ZHENG Hao³, JIANG Ye-zhi⁴, DONG Jin-qi^{1,2}

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

2.Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education (XAUAT), Xi'an 710055, China;

3.School of Combat Support, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

4.China Qiyuan Engineering Corporation, Xi'an 710018, China)

Abstract: To meet the needs of elastic-plastic analysis of reinforced concrete (RC) structures induced by chloride erosion, an accelerated corrosion test is conduct on six RC frame column specimens. Then, quasi-static tests are carried out. The apparent damage of corroded steel bars is observed under artificial climate environment. The influence of corrosion level and axial compression ratio on failure pattern and seismic behavior of the specimens is analyzed. Based on the test results, a double parameter damage model is used, and the value of the model parameters is defined. Then, the damage development law of corroded RC frame columns is quantitatively disclosed. Furthermore, a skeleton curve model of the RC frame columns is established by combining theoretical analysis with experimental regression. The model considered the influence of corrosion and axial compression ratio. The cyclic degradation index based on damage is introduced. The hysteresis rules reflecting the performance degradation in four stages of loading, unloading, reloading and declining are proposed. Then a restoring force model of corroded RC frame columns with bending failure is established and the accuracy is verified. The error of the calculated skeleton curve and the test skeleton curve is less than 10%, and the error of the calculated and test energy dissipation is within 20%. Since the linear characteristic of the calculated reloading curve, there is an obvious error of the reloading stage. However, the calculated hysteretic curves are in good agreement and have small errors on the whole with the experimental results, indicating that the established restoring force model can accurately reflect the seismic behavior of corroded RC frame column with bending failure.

Key words: RC frame column; seismic behavior; damage model; chloride erosion; restoring force model

作者简介: 尚志刚(1994—),男,博士研究生。电话: 15706035169; E-mail: 312629255@qq.com。

通讯作者: 郑山锁(1960—),男,博士,教授。电话: 13991835628; E-mail: zhenshansuo@263.net。