

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.020

盐渍土环境中 RC 桥墩柱地震损伤试验研究与计算分析*

赵建军¹, 闫长旺^{1,2}, 刘曙光^{1,2}, 张菊², 牛鹏凯¹

(1. 内蒙古工业大学土木工程学院, 内蒙古呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学矿业学院, 内蒙古呼和浩特 010051)

摘要: 为了研究盐渍土环境中 RC 桥墩柱的地震损伤, 设计制作了 10 根 RC 桥墩柱, 对其进行了电化学快速锈蚀试验及低周反复加载试验。试验中的主要设计参数为轴压比和锈蚀率。观察和记录了试件的开裂过程及破坏形态, 通过实测数据绘制了构件的荷载—位移滞回曲线。在已有基础上提出了锈蚀 RC 桥墩柱在低周反复荷载作用下的双参数损伤模型, 并对其进行了对比分析。试验结果表明: 锈蚀率越大, 滞回曲线捏缩现象越明显, 滞回环面积逐渐减小, 峰值荷载和极限位移也逐渐减小, 试件耗能能力和延性明显降低, 其损伤越来越严重; 轴压比越大时, 试件极限变形越差, 耗能能力越低, 其损伤越严重。通过与 McCabe 损伤模型及 Park-Ang 损伤模型进行比较分析, 得知该损伤模型更能准确反应构件的实际破坏程度, 可为盐渍土环境中 RC 构件的损伤评估提供参考依据。

关键词: 盐渍土环境; RC 桥墩柱; 滞回曲线; 轴压比; 锈蚀率; 双参数损伤模型

中图分类号: TU398⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)03-0467-09

Experimental Study and Calculation Analysis on Seismic Damage of RC Bridge Pier Column under Saline Soil Environment

ZHAO Jianjun¹, YAN Changwang^{1,2}, LIU Shuguang^{1,2}, ZHANG Ju², NIU Pengkai¹

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. School of Mining Technology, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: In order to study the seismic damage of RC bridge pier columns under saline soil environment, 10 RC bridge pier columns were designed and fabricated, and the electrochemical rapid rust test and the low cycle repeated loading test was performed. The main design parameters are axial load ratio and corrosion rate in the test. The cracking process and failure form of the specimen are observed and recorded. The load-displacement hysteretic curve of the component is drawn with measured data. A two-parameter damage model of rusted RC bridge pier columns under low cycle repeated loads is proposed and analyzed. The test results show that the higher the corrosion rate, the more obvious the shrinkage of hysteresis curve, the decrease of hysteresis ring area, the reduction of peak load and limit displacement and the decrease of energy dissipation and ductility of test parts. The higher the axial

* 收稿日期: 2018-07-13; 修回日期: 2018-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(51368040)、内蒙古自然科学基金(2015MS0505)、内蒙古高等学校“青年科技英才计划”(NJYT-14-B08)资助

作者简介: 赵建军(1991-), 男, 硕士研究生。主要从事混凝土结构抗震与耐久性研究。Email: 1607920891@qq.com

load ratio, the worse the limit deformation, the lower the energy dissipation, the more serious the damage. Through comparing with Banon damage model and Park-Ang damage model, it is found that this damage model can more accurately reflect the actual damage degree of components and can provide a reference for damage assessment of the RC member in the saline soil environment.

Keywords: saline soil environment; RC bridge pier columns; hysteretic curve; axial load ratio; corrosion rate; two-parameters damage model

引言

西北地区是我国盐渍土分布最广泛的地区,盐渍土含有大量能影响建筑寿命的钾、钠、钙、镁的氯化物、硫酸盐、重碳酸盐等,对混凝土结构的耐久性问题影响较为严重,严重阻碍了当地的经济发展^[1-3]。腐蚀性离子对混凝土的腐蚀是造成混凝土结构耐久性劣化的主要原因之一,因为随着各种盐类对混凝土结构的长时间作用,混凝土结构内部钢筋极易被锈蚀,从而导致其性能下降。孙红尧等^[4]通过对西部盐渍土环境下各类RC结构调查,发现该地区结构腐蚀破坏程度比海洋环境更严重,因为相比海洋环境,盐渍土环境所含氯离子浓度更高^[5]。所以对盐渍土地区混凝土结构损伤的研究具有十分重要的意义。

混凝土类材料与结构的破坏失效是以材料内部裂纹萌生、扩展,并最终导致结构断裂破坏失去承载能力为特征的。固体力学弹塑性与损伤耦合模型是目前较为常用的处理上述问题的理论工具^[6],所以损伤模型的建立尤为重要,很多学者对此提出了不同的损伤模型。M. S. L. Roufaiel等^[7]提出了刚度修正地震损伤模型。2005年,A. Colombo等^[8]提出了基于强度退化的损伤模型。P. Fajfar^[9]利用累积滞回耗能定义了构件的损伤。1985年,Y. J. Park等^[10-11]基于大量混凝土梁柱试验,提出了考虑最大位移和滞回耗能的双参数线性损伤模型,该模型由于具有较好的试验基础,而且计算简单,因此被广泛应用于工程界。这些研究结果为结构或构件损伤分析奠定了很好的理论基础和研究背景。

由于处于盐渍土环境中的RC桥墩柱长期遭受腐蚀性离子的腐蚀,因此,会导致其强度、刚度、延性和耗能能力下降。通过对本文试件进行研究发现,锈蚀率和轴压比是影响构件损伤的主要因素,轴压比一定时,锈蚀率越大,试件损伤越严重;且结合已有的研究^[12-14]发现,轴压比在一定范围内,轴压

比越大,试件损伤越严重。基于此,本文通过对Park-Ang损伤模型进行修正,建立了以锈蚀率和轴压比为主要研究参数的新的双参数损伤模型。通过与Mccabe损伤模型及Park-Ang损伤模型进行比较分析,得知本文所建损伤模型更能体现出盐渍土环境中桥墩柱的实际破坏情况,所以本文所提出的损伤模型可为盐渍土环境中RC桥墩柱损伤评估提供参考依据。

1 试件与加载

试件截面尺寸为400 mm×400 mm,墩纵筋采用直径为25 mm的三级螺纹钢,柱纵筋采用直径为16 mm的三级螺纹钢。箍筋均采用直径为8 mm的三级螺纹钢。实测混凝土立方体抗压强度为32 MPa。保护层厚度为20 mm。试件截面尺寸及配筋如图1所示,试件主要设计参数见表1。

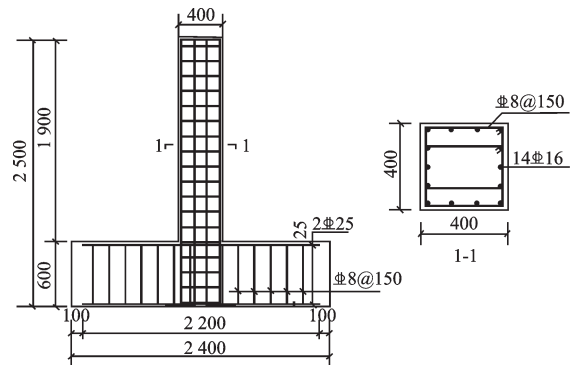


图1 试件截面尺寸及配筋

Fig.1 Section dimension and reinforcement of specimen

表1中锈蚀率为理论折减锈蚀率。根据文献^[15]可知,按法拉第定律预测出来的锈蚀率与实测锈蚀率比值为 $[0.74, 2.67]$,离散性较大。比值小于1的情况,主要是试验误差所致,比值大于1的情况,主要是“差数效应”以及铁离子化合价的取值^[15]所造成。除此之外,保护层的锈蚀会损失一定的电流,所以通过综合考虑,本文取折减系数为1.5。

表1 试件主要设计参数

Table 1 Main parameters of specimens

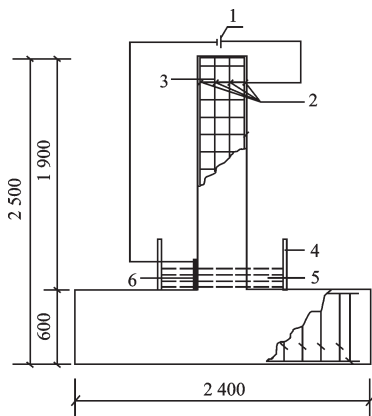
试件编号	配筋率 $\rho_s/\%$	研究参数		
		试验轴压比 n	锈蚀率 $\omega/\%$	锈蚀时间 t/h
S-0.12-0	1.76	0.12	0	0
S-0.12-1	1.76	0.12	5.5	312
S-0.12-2	1.76	0.12	11	636
S-0.12-3	1.76	0.12	13.5	776
S-0.12-4	1.76	0.12	15.5	912
S-0.36-0	1.76	0.36	0	0
S-0.36-1	1.76	0.36	5.5	312
S-0.36-2	1.76	0.36	11	636
S-0.36-3	1.76	0.36	13.5	776
S-0.36-4	1.76	0.36	15.5	912

由于盐渍土环境含有大量关于钾、钠、镁的氯化物及硫酸盐,硫酸根的存在可以为氯离子开辟通道,所以会加快氯离子对桥墩柱内部钢筋的锈蚀。根据盐渍土环境的腐蚀特征,本文配制了表2所示的腐蚀溶液,并进行了电化学快速腐蚀试验,试件腐蚀示意如图2所示。

表2 腐蚀溶液浓度配比

Table 2 Chemical composition content in corrosion solution

溶液化学成分	NaCl	Na ₂ SO ₄	NaHCO ₃	MgCl ₂	KCl	MgSO ₄
浓度%	15	3	0.5	2	0.5	0.5



1-直流稳压电流;2-导线与纵筋接点;3-纵筋;4-腐蚀容器;5-腐蚀溶液;6-不锈钢板

图2 试件腐蚀示意

Fig.2 Corrosion diagram of specimen

采用低周反复荷载对试件进行加载,竖向荷载通过液压千斤顶施加,水平荷载通过反力墙上的千斤顶施加。水平荷载采用位移控制,第一次作为试加载,控制位移设定为2 mm,一个循环后,控制位移变为5 mm,此后控制位移每级按5 mm的幅度增加,每级循环3次(即2 mm,1 Δ =5 mm,2 Δ =10 mm,3 Δ =15 mm,...),直至试件严重破坏无法继续加载,取峰值荷载的85%作为本试件的极限荷载。试验加载装置如图3所示。试验加载制度如图4所示。

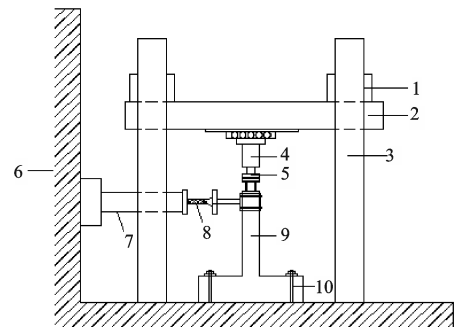


图3 试件加载装置

Fig.3 Specimen loading device

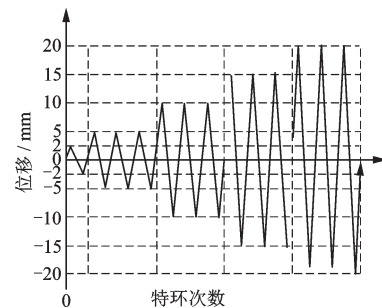


图4 试验加载制度

Fig.4 Test loading program

2 试验结果及分析

2.1 地震损伤形态及分析

本文以轴压比及锈蚀率作为主要设计参数共研究了10根RC桥墩柱,并观察记录了每个试件的损伤过程。本文针对盐渍土环境中的试件损伤过程进行了划分。通过观察其破坏过程,总结了试件损伤等级与破坏程度的关系,见表3。图5为试件S-0.12-1的破坏过程,图6为试件S-0.12-4的破坏过程。

表3 试件损伤等级与破坏程度关系

Table 3 Relationship between damage degree and destruction level of specimen

损伤等级	破坏程度	
	$0\% \leq \omega \leq 10\%$	$10\% \leq \omega \leq 20\%$
微小损伤	塑性铰区域内出现少量水平裂缝和竖向裂缝	塑性铰区域内出现少量水平裂缝与竖向裂缝
轻度损伤	裂缝向上扩展,柱底水平裂缝贯通	裂缝增多增宽,裂缝宽度小于1 mm
中度损伤	混凝土保护层裂缝宽度为1~2 mm	混凝土保护层小面积剥落
严重损伤	混凝土保护层大面积剥落,钢筋外露	混凝土保护彻底剥落,纵筋外露、拉断
倒塌极限	纵筋屈曲,核心区混凝土压碎	纵筋屈曲,箍筋被锈断,核心区混凝土压碎

从图5可以看出,控制位移为 1Δ 时,试件在塑性铰区域内出现了一些水平裂缝和竖向裂缝,随着控制位移的增加,两侧水平裂缝逐渐贯通,且不断向上延伸扩展。当控制位移为 5Δ 时,试件底部裂缝逐渐变宽,试件已达到中度损伤。随着控制位移继续增大,试件的损伤程度也越来越严重,在控制位移为 8Δ 时,试件塑性铰区域内混凝土保护层大面积剥落、落钢筋外露。当控制位移为 12Δ 时,试件塑性铰区域内两侧混凝土保护层完全脱落,核心区混凝土已被压碎,且纵筋已明显屈曲,此时,试件已达到倒

塌极限状态。

从图6可以看出,试件在控制位移为 1Δ 时,试件底部不仅有水平裂缝,还有沿纵筋方向的竖向裂缝,其侧面塑性铰区域内的混凝土保护层有脱落现象。当控制位移为 3Δ 时,试件裂缝逐渐向上扩展,中下部斜裂缝出现交叉现象。控制位移为 7Δ 时,试件塑性铰区域内的混凝土保护层成片脱落,部分纵筋已被锈断或拉断。当控制位移继续增大到 8Δ 时,试件塑性铰区域的混凝土保护层全部脱落,且核心区混凝土被压碎,纵筋已明显屈曲,试件宣告破坏。

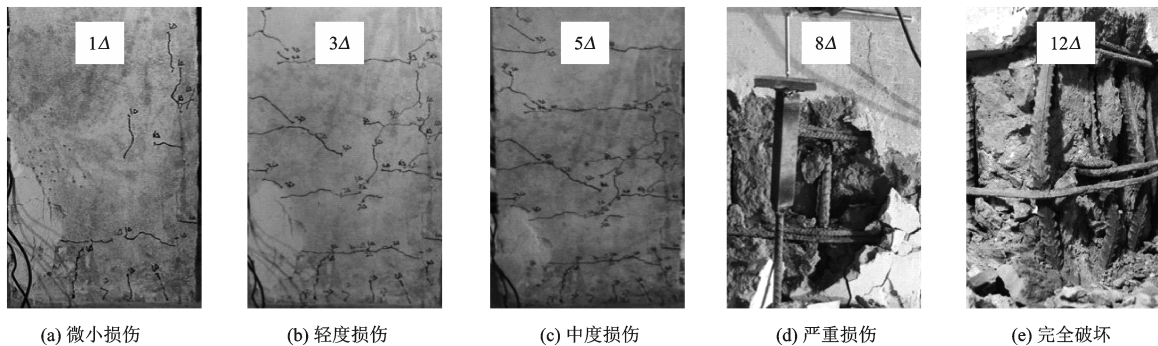


图5 试件S-0.12-1破坏过程

Fig.5 Damage process of S-0.12-1 specimen

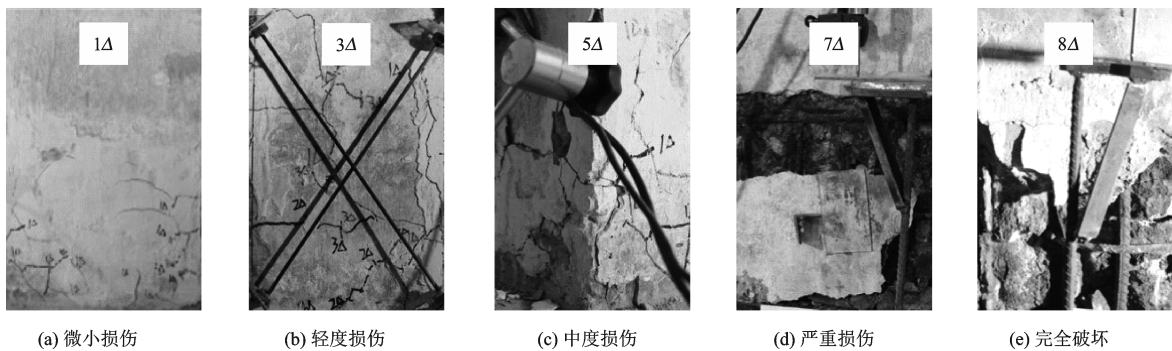


图6 试件S-0.12-4破坏过程

Fig.6 Damage process of S-0.12-4 specimen

由图5、图6试件破坏形态可知,试件主要属于弯曲延性破坏,因为在整个破坏过程中,几乎无剪切裂缝,且试件的破坏区域都集中在塑性铰区域。但是对于不同锈蚀率的试件,试件的破坏程度不同,而且极限位移也有所不同。锈蚀率越大,试件的损伤程度越严重,而且极限位移明显减小。

2.2 滞回特征分析

滞回曲线是指结构或构件在低周反复荷载作用下荷载—位移的关系曲线,由面积不同的滞回环组成,能够反映出试件在受力过程中的开裂、屈服、耗能能力、刚度和强度衰减等特性。滞回曲线形状越饱满,所围面积越大,构件的强度衰减与刚度退化越缓慢,耗能能力越强,抗震性能越强,损伤程度越小。RC桥墩柱在低周反复荷载作用下的力学特性变化规律能够在一定程度上反映构件地震损伤变化,这是因为构件的力学性能及变形的劣化就是损伤的微观表现,所以为研究钢筋混凝土桥墩柱在地震作用下的损伤演化规律,对反复荷载作用下桥墩柱的滞回曲线进行对比分析是必不可少的,部分试件的荷载—位移滞回曲线如图7所示。

从图7可以看出,轴压比相等的情况下,锈蚀率越大,试件的损伤越大。主要表现为锈蚀率越大,试件滞回曲线捏缩现象愈明显,滞回环面积越来越小,而且滞回环圈数也逐渐减少,极限位移也随之减小。主要是因为随着锈蚀时间的增加,钢筋截面逐渐减小,锈蚀产物体积逐渐膨胀,对保护层产生锈胀力,导致钢筋混凝土的黏结性能逐渐劣化,导致结构整体性能劣化。同时可以看出,在锈蚀率相同的条件下,轴压比越大,其峰值荷载越大,但极限变形较小,损伤越大。

3 地震损伤计算与分析

3.1 损伤模型的建立

通过对本文试件破坏过程进行分析,可知结构在地震中的破坏是由首次超越破坏和累积损伤共同造成的,王斌等^[16]对Park-Ang双参数损伤模型进行了总结分析,发现Park-Ang损伤模型仍存在一些缺陷与不足。基于此,本文提出了更能有效反映盐渍土环境中桥墩柱损伤评估的计算模型,根据对本

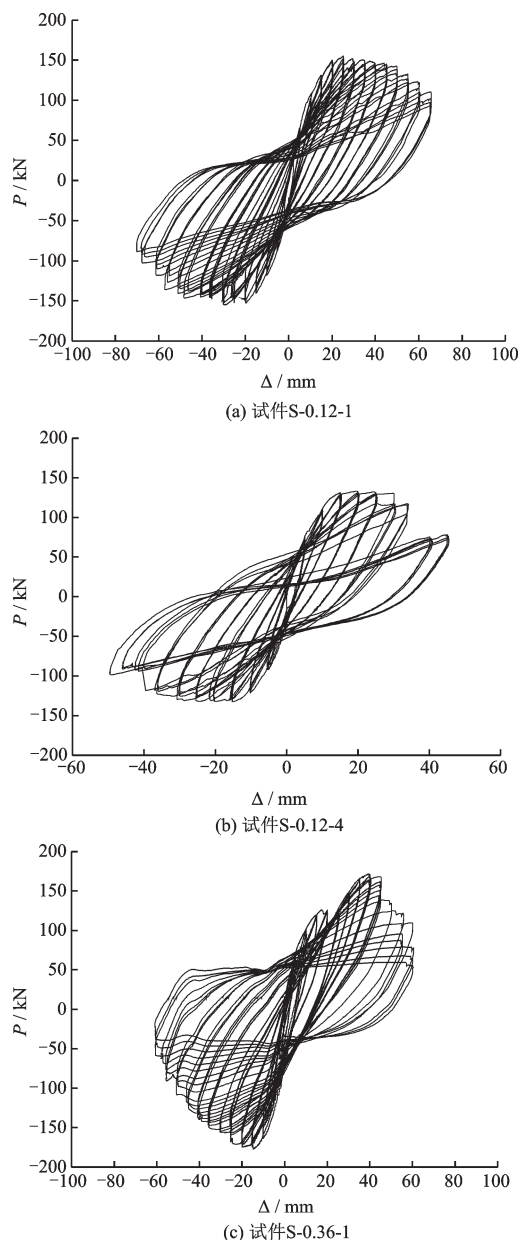


图7 试件的荷载—位移滞回曲线

Fig.7 Load-displacement hysteresis curve of specimens

文所研究试件进行回归分析,得知其规格化累积耗能与规格化位移呈指数关系,为了使模型计算简单准确。本文所建损伤模型为:

$$D = (1 - \beta) \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \left(\frac{\int d\epsilon}{F_y \delta_u} \right)^\eta \quad (1)$$

式中, δ_m 为地震荷载作用下结构或构件的最大变形; δ_u 为单调荷载作用下结构或构件的极限变形; $\int d\epsilon$ 为累积滞回耗能; F_y 为构件的屈服荷载; β 为变形与能量相互影响的组合参数,即两者对损伤的贡献程度,本文取 β 为0.18($\beta=0.18$ 时, η 离散型最小); η

为考虑锈蚀率和轴压比的修正系数,可由试验数据进行回归得到。

单调荷载作用下结构或构件的极限变形 δ_u 的表达式为:

$$\delta_u = \theta_u H \quad (2)$$

式中, θ_u 为单调加载下试件极限旋转角; H 为桥墩柱有效计算高度。

经结构混凝土国际联合会对 1 282 根 RC 构件进行回归分析, 得出了单调加载下构件极限旋转角 θ_u 相关表达式, 且具有较高的精度^[17]。

$$\theta_u = 0.025 \cdot 41 \times 0.3^{n_0} \left(\frac{\max(0.01, \mu')}{\max(0.01, \mu)} f_c' \right)^{0.2} \cdot \lambda^{0.425} \cdot 25^{\alpha \rho_{sx}} \frac{f_{yw}}{f_c'} \quad (3)$$

式中, λ 为剪跨比; $n_0 = N/f_c' A_g$, 其中 N 为轴向力, f_c' 为混凝土圆柱体单轴抗压强度, A_g 为试件截面面积; $\mu = f_y A_s / (f_c' A_g)$ 为纵向受拉钢筋配筋特征值(包括在截面中部布置的纵向钢筋); $\mu' = f_y' A_s' / (f_c' A_g)$ 为纵向受压钢筋配筋特征值; ρ_{sx} 为平行于加载方向的横向钢筋配箍率; f_{yw} 为横向钢筋屈服强度; α 为有效约束系数。

S. A. Sheikh 等^[18] 给出了有效约束系数 α 的表达式:

$$\alpha = \left(1 - \frac{S_h}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{S_h}{2h_c} \right) \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6b_c h_c} \right) \quad (4)$$

式中, b_c 和 h_c 分别为箍筋的中心线所包围截面约束核心的宽度和高度; b_i 则为箍筋折角或 135° 弯钩约束的纵向钢筋间距; S_h 为箍筋间距。

考虑到锈蚀对钢筋的影响, 钢筋的实际截面面积会有一定的损失, 令锈蚀钢筋截面损失率 $\omega = \Delta A_s / A_s$, 所以锈蚀后钢筋的截面面积可表示为:

$$A_{as} = A_s \times (1 - \omega) \quad (5)$$

3.2 损伤模型的对比分析

本文分别利用 S. L. McCabe 等^[19] 提出的单参数损伤模型、Park-Ang 双参数模型以及本文提出的双参数损伤模型对本文所研究试件进行了计算。计算结果见表 4。对于 Park-Ang 模型, 组合参数 β 取 0.05。其中 D_1 、 D_2 、 D_3 分别为控制位移 1 Δ 、2 Δ 、3 Δ 所对应的损伤指数, 以此类推, 直至试件荷载降为峰

值荷载的 0.85 倍。

通过损伤指数计算结果对比表 4 可知, McCabe 模型是仅以累积耗能为损伤参数的单参数损伤模型, 所以造成损伤指数增长速率呈现一定的突变性, 表现为前期增长缓慢, 中后期增长迅速的特点。主要是由于本模型未考虑前期耗能和最大变形对损伤的影响, 所以试件在进行损伤计算时, 前期会出现 $D=0$ 或接近 0 的情况, 后期出现 $D \gg 1$ 的情况, 通过与试件实际破坏过程对比可知, 其不符合实际损伤程度。而 Park-Ang 模型与本文所建模型整体上均能较好的反应试件的破坏过程, 但是 Park-Ang 模型计算结果部分存在不收敛现象, 部分损伤指数大于 1, 而且与本文试件实际破坏程度略有不符。经过与试件实际破坏过程进行比较得知, 本文所建损伤模型能够更好的反应试件实际破坏程度, 所以本文所建损伤模型较 McCabe 模型、Park-Ang 模型更能反映盐渍土环境中 RC 桥墩柱损伤程度。

3.3 试验轴压比对地震损伤的影响

本文通过对不同轴压比试件损伤指数进行计算, 得出了不同轴压比作用下 RC 桥墩柱损伤指数与试件加载位移之间的关系, 如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 轴压比在一定范围内, 随着轴压比的增加, 试件损伤指数基本上逐渐增大, 同时可以看出, 轴压比越大, 试件越早达到破坏状态, 在相同位移幅值下, 试件损伤指数越大。因为轴压比越大, 试件所承受的竖向力及水平力越大, 所以造成的破坏程度越严重。而锈蚀率为 15.5% 的试件呈现出随轴压比的增大损伤指数减小的现象, 造成此现象主要是由于钢筋的实测屈服强度有所不同、试件的制作误差(主要是保护层厚度)以及锈蚀不均匀性所导致。

3.4 锈蚀率对地震损伤的影响

图 9 为不同锈蚀率下 RC 混凝土桥墩柱损伤指数与试件加载位移之间的关系。从图中可以明显看出, 当轴压比一定时, 在相同加载位移下, 试件的损伤指数整体上随锈蚀率的增大而增大, 表明锈蚀率越大, 试件损伤越严重。而且锈蚀率越大的试件

表4 试件损伤指数计算结果对比

Table 4 Comparison table of calculation results of damage index of specimen

试件 编号	损伤 模型	损伤指数											
		D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}
S-0.12-0	Mccabe	0	0	0	0.01	0.03	0.08	0.18	0.41	0.82	1.61	2.61	4.00
	Park-Ang	0.05	0.11	0.16	0.22	0.28	0.35	0.42	0.51	0.60	0.70	0.80	0.91
	本文	0.06	0.12	0.19	0.26	0.33	0.41	0.50	0.59	0.70	0.81	0.91	1.00
S-0.12-1	Mccabe	0	0	0.01	0.02	0.07	0.17	0.40	0.81	1.52	2.59	3.52	3.99
	Park-Ang	0.06	0.12	0.19	0.26	0.34	0.42	0.52	0.63	0.75	0.88	1.02	-
	本文	0.08	0.15	0.22	0.31	0.40	0.49	0.59	0.69	0.80	0.90	0.95	1.00
S-0.12-2	Mccabe	0	0	0.02	0.10	0.33	0.88	1.93	3.62	4.16	-	-	-
	Park-Ang	0.10	0.20	0.29	0.40	0.53	0.65	0.78	0.91	0.96	-	-	-
	本文	0.09	0.19	0.29	0.40	0.52	0.65	0.78	0.91	0.96	-	-	-
S-0.12-3	Mccabe	0.10	0.20	0.29	0.40	0.53	0.65	0.78	0.91	0.96	-	-	-
	Park-Ang	0.10	0.21	0.32	0.43	0.55	0.68	0.80	0.93	0.96	-	-	-
	本文	0.10	0.21	0.32	0.43	0.55	0.68	0.80	0.93	0.96	-	-	-
S-0.12-4	Mccabe	0	0.01	0.05	0.21	0.63	1.58	3.20	4.01	-	-	-	-
	Park-Ang	0.13	0.25	0.37	0.51	0.65	0.79	0.93	0.98	-	-	-	-
	本文	0.13	0.25	0.37	0.51	0.65	0.79	0.93	0.98	-	-	-	-
S-0.36-0	Mccabe	0	0.01	0.04	0.11	0.26	0.57	1.08	1.93	3.39	4.00	-	-
	Park-Ang	0.07	0.15	0.23	0.32	0.42	0.53	0.66	0.79	0.94	1.04	-	-
	本文	0.10	0.19	0.28	0.37	0.47	0.57	0.68	0.79	0.91	0.98	-	-
S-0.36-1	Mccabe	0	0	0.02	0.07	0.21	0.48	1.05	2.06	3.70	4.00	-	-
	Park-Ang	0.07	0.15	0.23	0.32	0.42	0.53	0.67	0.80	0.95	1.00	-	-
	本文	0.08	0.17	0.27	0.37	0.47	0.58	0.71	0.83	0.96	0.99	-	-
S-0.36-2	Mccabe	0	0.01	0.07	0.22	0.63	1.52	3.22	4.00	-	-	-	-
	Park-Ang	0.10	0.20	0.31	0.43	0.58	0.73	0.91	1.00	-	-	-	-
	本文	0.11	0.22	0.33	0.46	0.59	0.73	0.87	0.95	-	-	-	-
S-0.36-3	Mccabe	0	0.01	0.06	0.20	0.61	1.58	3.45	3.95	-	-	-	-
	Park-Ang	0.10	0.20	0.31	0.44	0.58	0.74	0.92	0.98	-	-	-	-
	本文	0.11	0.23	0.35	0.48	0.62	0.76	0.92	0.96	-	-	-	-
S-0.36-4	Mccabe	0	0.01	0.03	0.15	0.49	1.32	3.11	4.01	-	-	-	-
	Park-Ang	0.10	0.21	0.32	0.45	0.58	0.74	0.92	0.98	-	-	-	-
	本文	0.12	0.23	0.36	0.49	0.63	0.78	0.93	0.97	-	-	-	-

极限位移越小。因为锈蚀会使钢筋性能逐渐劣化，锈蚀越严重，钢筋损伤程度越严重，而且随着锈蚀

产物的增加，钢筋与混凝土的黏结性能逐渐变差，所以试件损伤程度越严重。

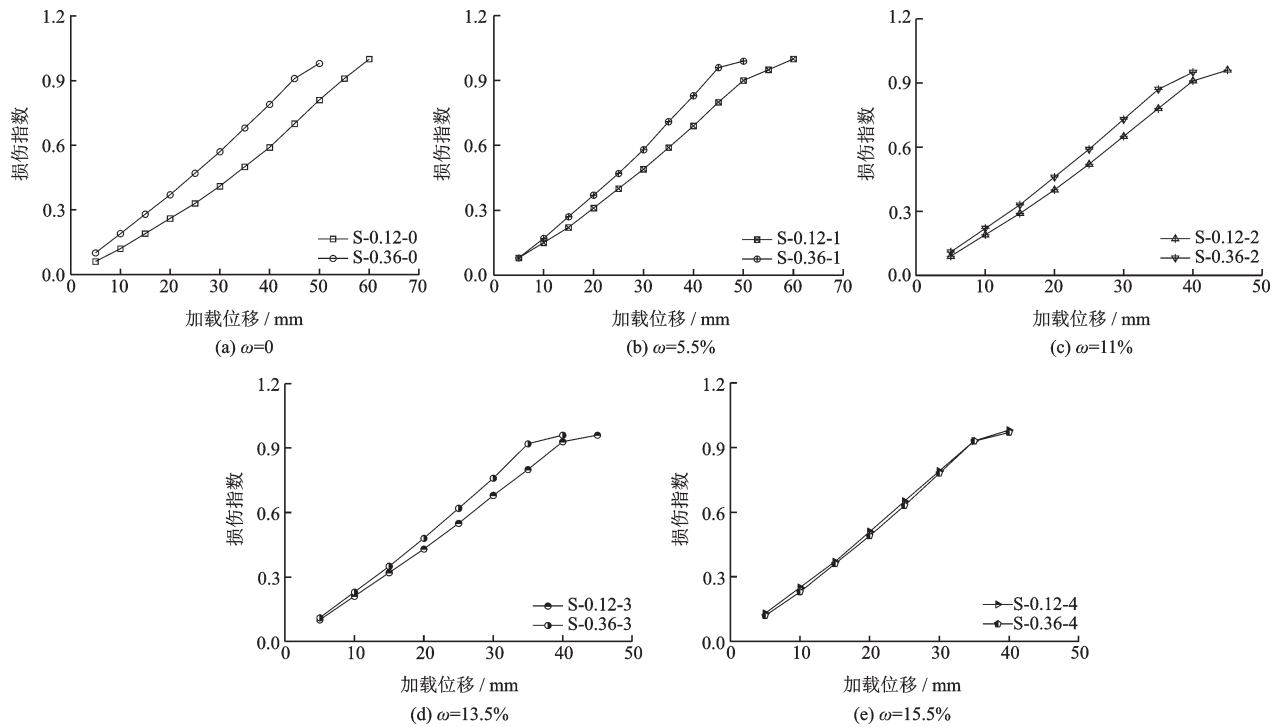


图8 轴压比与损伤指数关系

Fig.8 Relationship between axial load ratio and damage index

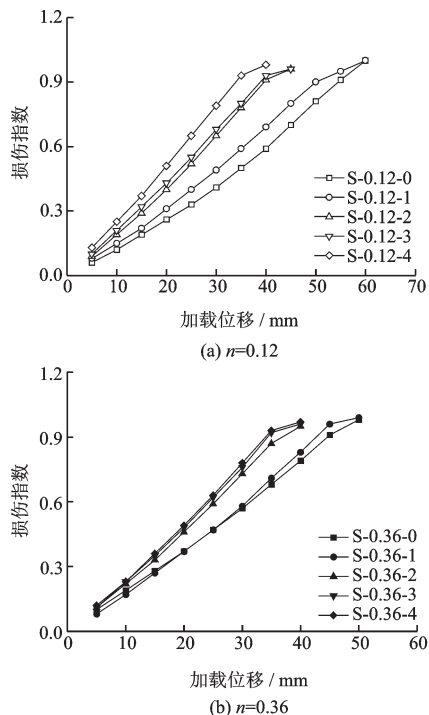


图9 锈蚀率与损伤指数关系

Fig.9 Relationship between corrosion rate and damage index

4 结论

(1)通过对 Park-Ang 双参数损伤模型进行修正,建立了更符合盐渍土环境中 RC 桥墩柱损伤模

型。并基于试验结果,考虑了与锈蚀率和轴压比相关的组合参数以及修正系数。得出了修正系数与轴压比以及锈蚀率之间的近似关系式。

(2)轴压比及锈蚀率是影响 RC 桥墩柱损伤的重要因素。锈蚀率一定时,在一定范围内,轴压比越大,试件峰值荷载越大,当试件达到峰值荷载之后,荷载瞬间下降,延性变差,损伤程度越严重,因为轴压比越大,试件承受的竖向荷载及水平荷载越大,导致试件的极限位移减小。轴压比一定时,锈蚀率越大,试件内部纵筋腐蚀越严重,承载力越低,所以损伤程度越大。

(3)从试件滞回曲线可以看出,锈蚀率越大,试件滞回曲线饱满程度越低,捏缩现象愈明显,滞回环圈数越少,所围面积越小,试件耗能及承载力越低,而且其极限位移越小。轴压比的增大,一定程度上可提高试件的峰值荷载,但极限位移越来越小,与较小轴压比的试件相比,滞回曲线环数明显减少。

(4)通过将本文所建损伤模型与 McCabe 模型以及 Park-Ang 模型进行对比分析,得知本文所建损伤模型能够更好的反映出盐渍土环境中 RC 桥墩柱试件的地震损伤程度,所以该模型可为盐渍土环境中 RC 桥墩柱地震损伤评估提供参考依据。

参考文献:

- [1] 谢宇晨,翁兴中,张俊,等.盐渍土地区道面混凝土盐冻侵蚀研究[J].公路交通科技,2017,34(4):25-31.
Xie Y Ch, Weng X Zh, Zhang J, et al. Study on salt-frost erosion of pavement concrete in salty soil area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(4): 25-31. (in Chinese)
- [2] 乔宏霞,王鹏辉,巩位,等.基于EIS研究镁水泥混凝土中涂层钢筋的耐腐蚀性[J].材料科学与工程学报,2017,35(6):987-992.
Qiao H X, Wang P H, Gong W, et al. Corrosion resistance of coated steel bars in magnesium cement concrete based on EIS [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2017, 35(6): 987-992. (in Chinese)
- [3] 乔宏霞,朱彬荣,陈丁山.西宁盐渍土地区混凝土劣化机理试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(4):805-815.
Qiao H X, Zhu B R, Chen D Sh. Experimental study of the deterioration mechanism of concrete in Xining saline soil area [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(4): 805-815. (in Chinese)
- [4] 孙红尧,傅宇方,陆采荣,等.处于盐渍土和盐湖环境下建筑物的腐蚀与防护现状[J].腐蚀与防护,2012,33(8):652-657.
Sun H Y, Fu Y F, Lu C R, et al. Present situation of corrosion and protection of buildings in saline soil and salt lake environments [J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(8): 652-657. (in Chinese)
- [5] Xu C, Shi K. Corrosion resistance of X80 pipeline steel in simulated solution of Geermu soil [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009, 60(6): 1 513-1 518.
- [6] 沈新普,冯金龙,杨璐,等.混凝土结构损伤过程区几何特性数值研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增1):3 261-3 273.
Shen X P, Feng J L, Yang L, et al. Numerical investigation on size of damage process zone of concrete structures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup 1): 3 261-3 273. (in Chinese)
- [7] Roufaiel M S L, Meyer C. Analytical modeling of hysteretic behavior of R/C frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(3): 429-444.
- [8] Colombo A, Negro P. A damage index of generalised applicability [J]. Engineering Structures, 2005, 27(8): 1 164-1 174.
- [9] Fajfar P. Equivalent ductility factors, taking into account low-cycle fatigue [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1992, 21(10): 837-848.
- [10] Park Y J, Ang H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722-739.
- [11] Park Y J, Ang H S. Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 740-757.
- [12] 吴孙武,张震.低周反复荷载下方钢管再生混凝土框架柱损伤试验研究[J].长江大学学报(自然科学版),2016,13(10):42-46.
Wu S W, Zhang Zh. Experimental study on the damage of recycled aggregate concrete filled square steel tube frame columns under cyclic reversed loading [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(10): 42-46. (in Chinese)
- [13] 郑山锁,王斌,侯丕吉,等.低周反复荷载作用下型钢高强高性能混凝土框架柱损伤试验研究[J].土木工程学报,2011,44(9):1-10.
Zheng Sh S, Wang B, Hou P J, et al. Experimental study of the damage of SRHSHPC frame columns under low cycle reversed loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9): 1-10. (in Chinese)
- [14] 石宇翔,李碧雄,雷涛,等.基于损伤和能量耗散的钢筋混凝土柱抗震性能研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2014,38(1):134-138.
Shi Y X, Li B X, Lei T, et al. Study on seismic behavior reinforced concrete columns based on damage and energy dissipation [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014, 38(1): 134-138. (in Chinese)
- [15] 欧阳平.混凝土中锈蚀钢筋力学性能及粘结性能的研究[D].南京:东南大学,2005.
Ouyang P. Study on mechanical properties and bonding properties of rusted reinforced steel in concrete [D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese)
- [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 B, Zheng Sh S, Guo X F, et al. Seismic damage analysis for srhshpc frame columns [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(2): 61-68. (in Chinese)
- [17] FIB. Displacement-based seismic design of reinforced concrete buildings [R]. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2003.
- [18] Sheikh S A, Uzumeri S M. Analytical model for concrete confinement in tied columns [J]. Journal of the Structural Division, 1982, 108(ST12), 2 703.
- [19] McCabe S L, Hall W J. Assessment of seismic structural damage [J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(9): 2 166-2 183.

(本文责编:池营营)