

DOI:1

氯盐腐蚀砖砌体墙的抗震性能及损伤恢复力模型研究

李楠¹,牛丽华^{1,2},郑山锁²,管俊峰¹,李列列¹,高绍华¹

(1. 华北水利水电大学 土木与交通学院,河南 郑州 450045;2. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘要:【目的】为了准确揭示沿海大气腐蚀环境下砖砌体墙抗震性能退化机理,建立了普适性强的恢复力模型。【方法】对8个砖砌体墙试件进行了室内加速腐蚀试验,后进行了低周往复荷载试验,考虑腐蚀循环次数和构造柱数量等参数。基于修正I-K模型,引入循环退化指数,考虑基本强度、峰值后强度、卸载刚度、再加载刚度等性能退化及捏缩效应,提出了腐蚀砖砌体墙恢复力模型,并将模型计算得到的滞回曲线与试验结果进行了对比分析。【结果】在往复荷载作用下,试件均经历弹性、弹塑性和破坏阶段并最终发生剪切破坏,腐蚀循环会加速裂缝的发展,导致结构的水平承载力、变形能力和耗能能力显著下降。与组合单墙片相比,组合双墙片由于构造柱的约束作用更强,其裂缝分布更为充分,滞回曲线更饱满,整体受力性能和耗能性能较为优越。【结论】建立的腐蚀砖砌体墙恢复力模型计算结果与试验得到的滞回曲线吻合度较高,能够较为准确地描述腐蚀砌体墙的受力特性和滞回性能,可用于沿海大气环境下砌体结构弹塑性分析。

关键词:砖砌体墙;氯盐腐蚀;抗震性能;损伤模型;恢复力模型

中国分类号:TU362 TU317.1

文献标志码:A **文章编号:**

收稿日期:2025-07-31

修回日期/Revised:2026-03-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1509302);国家自然科学基金项目(52378237,52179132,52479124,52309155);河南省高校科技创新团队支持计划项目(24IRTSTHN010);河南省科技攻关计划(212102310056)。

第一作者:李楠(1998—),男,硕士研究生,从事既有结构修复及新型超材料设计方面的研究。

E-mail:mroctber3@gmail.com。

通信作者:牛丽华(1991—),女,讲师,硕导,从事既有结构修复及新型超材料设计方面的研究。

E-mail:Niulihua@ncwu.edu.cn。

砌体结构具有成本低廉、施工方便等优势,被广泛应用于我国乡镇地区^[1]。沿海地区特有的高氯环境给砌体结构的耐久性造成了严峻挑战。沿海大气中的气溶胶含有丰富的盐类团簇,包括氯化物、硫酸盐和硝酸盐等^[2-4],这些气溶胶在建筑物表面沉积后,会吸收湿气并形成水溶性盐,对建筑材料造成腐蚀。

水溶性盐是导致建筑结构机械损伤的主要原因^[5-7],其渗透和结晶过程导致砖体内部产生压应力,引起裂缝、灰缝脱落、外部砖面剥落等问题,降低了砌体结构的力学与抗震性能^[8-10]。结晶过程会在砖表面积聚盐类晶体,出现“泛霜”^[11]现象,影响建筑外观。鉴于沿海地区频繁的地震活动,研究沿海环境下砌体结构的抗震性能退化规律并建立有效的恢复力模型显得尤为重要。

近年来,国内外学者广泛关注环境因素对砖砌体力学性能的影响。郑山锁等^[12]对不同腐蚀程度的砖砌体进行了力学性能试验,发现遭受氯盐侵蚀后,砂浆试块、砖块的抗压强度及轴心抗压试件的抵抗变形能力与氯盐侵蚀次数成反比。GENTILINI C 等^[13]探究了不同腐蚀循环次数下砌体墙的剪切性能劣化规律,指出砖砌体的力学性能受盐类型和腐蚀时间的影响。LAYCOCK E A^[14]分析了砌体材料在不同温湿度环境下的强度和成分变化,发现高湿度条件下的砌体结构更易发生破坏。LARBI J A^[15]揭示了硫酸盐侵蚀和盐结晶对砖砌体的破坏机制,分析了材料的组成和内部结构特征。LUBELLI B 等^[16]指出盐结晶会引起砌体结构表面结垢与剥落,进而导致力学性能退化。CASTELLAZZI G 等^[17]提出了用于预测内部应力的氯离子扩散和盐结晶的耦合多相模型,为该领域的研究提供了新的视角。郑山锁等^[18]已对冻融

环境下砖砌体墙的抗震性能进行了研究。目前,针对氯盐腐蚀环境下砌体墙抗震性能的研究尚不充分。

恢复力模型是结构弹塑性分析的基础。近年来,众多学者提出了不同的墙体构件恢复力模型,包括基于高延性混凝土加固的三折线模型^[19]、适用于配筋砌块短肢剪力墙的滞回规则^[20]、基于低周往复加载试验的复合墙体滞回模型^[21],以及针对加气混凝土砌块墙的四线性模型^[22]。目前,国内外关于沿海大气环境下腐蚀砌体构件恢复力模型的研究仍未见报道。

鉴于此,本文基于不同程度氯盐腐蚀砖砌体墙的拟静力加载试验,系统分析了氯离子侵蚀对砌体墙承载力、变形和耗能能力的退化影响。通过引入损伤指数量化构件在往复荷载下的损伤变化,并提出相应的计算方法;建立了考虑腐蚀影响的砌体墙骨架曲线模型及基于损伤退化的滞回规则,构建了氯盐腐蚀砖砌体墙的恢复力模型,模型结果与试验结果较吻合,验证了该模型的有效性。研究成果为沿海地区砌体结构的抗震性能评估提供了理论基础。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

根据《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)、《建筑抗震设计标准》(GB/T 50011—2010),设计了4个组合单墙片试件和4个组合双墙片试件,编号分别为D-1~D-4和S-1~S-4。具体设计参数见表1,试件尺寸及构造如图1所示。考虑人工气候试验室的尺寸限制,设计地梁尺寸分别为2 610 mm×400 mm×300 mm和3 100 mm×400 mm×300 mm。

表1 试件设计参数

Tab.1 Design parameters of specimens

试件编号	高宽比	构造柱	压应力 σ /MPa	氯盐腐蚀循环次数 n /次
D-1	0.56	两根	0.5	0
D-2	0.56	两根	0.5	100
D-3	0.56	两根	0.5	200
D-4	0.56	两根	0.5	300
S-1	0.43	三根	0.5	0
S-2	0.43	三根	0.5	100
S-3	0.43	三根	0.5	200
S-4	0.43	三根	0.5	300

注:D为组合单墙片试件,尺寸为1 610 mm×906 mm×120 mm;S为组合双墙片试件,尺寸为2 100 mm×906

mm×120 mm。

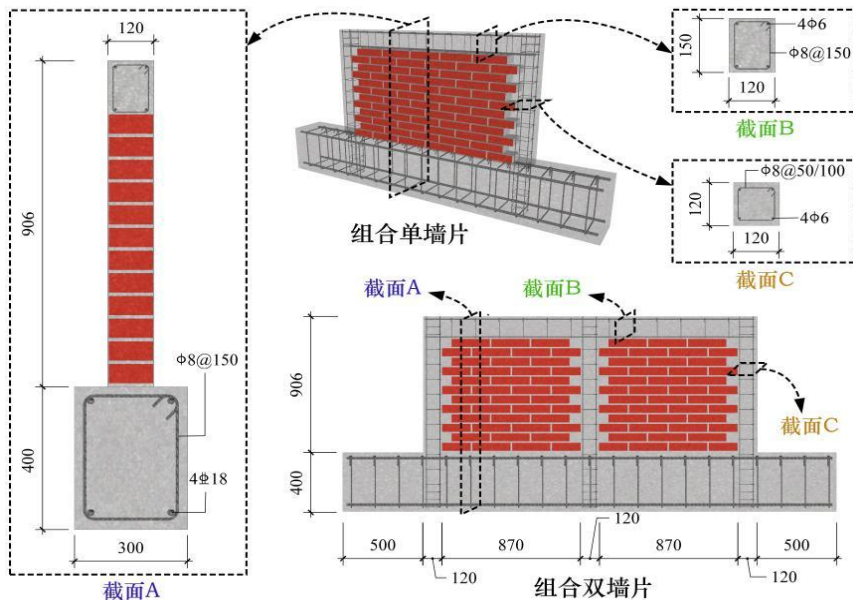


图 1 试件尺寸及构造

Fig.1 Specimen size and construction

按照设计方案,制作现浇钢筋混凝土梁,并预埋构造柱钢筋。为方便试件运输和安装,在距离地梁两端 200~300 mm 处设置直径为 60 mm 的 PC 管预留孔洞。地梁两侧边缘至构造柱边缘的距离为 500 mm,待地梁混凝土浇筑成型后进行砖砌体

砌筑工作。砖砌体砌筑严格遵循《砌体结构工程施工质量验收规范》(GB 50203—2011)的规定,使用同批次材料、由经验丰富工人砌筑,并确保灰缝密实、砂浆饱满度及连接方式符合该规范要求。

1.2 材料性能

砖块采用 MU15 级烧结普通砖,尺寸为 240 mm×115 mm×53 mm。砌筑砂浆选用强度等级为 M10 的混合砂浆,其配合比为 P.O 32.5 水泥:中砂:灰膏:水=290:1 450:90:130。地梁、圈梁和构造柱使用的钢筋型号为 HPB235,均采用强度等级为 C30 的现浇混凝土。混凝土实测立方体抗压强度和弹性模量分别为 32 MPa 和 3.0×10^4 MPa。

根据《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2012)和《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009),对经历不同氯盐腐蚀循环的砖块和砂浆试块的抗压强度进行测试,结果见表 2。按照《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)对钢筋的力学性能进行了评估,结果见表 3。

表 2 砖块和砂浆抗压强度测试结果

Tab.2 Brick and mortar compressive strength test results

氯盐腐蚀循环次数 n /次	砖块抗压强度 f_b /MPa	砂浆抗压强度 f_m /MPa
0	16.2	10.2
100	15.8	11.1
200	14.6	10.4
300	13.4	8.16

表 3 钢筋力学性能指标

Tab.3 Mechanical properties of reinforcing steel

型号	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	弹性模量 E_s /(N/mm ²)
A6	270	428	210 000
A8	310	430	210 000

A18	345	465	200 000
8#铁丝	240	420	200 000

1.3 试件加速腐蚀试验

加速腐蚀试验在 ZHT/W2300 气候模拟试验室内进行,采用中性盐雾试验模拟沿海大气环境,盐雾为 5%的 NaCl 溶液^[23]。

砖块、砂浆立方体试块与砖砌体墙试件在相同环境条件下进行加速腐蚀试验。根据现行规范和相关研究^[24-25]设计的具体腐蚀流程如下:

1)将气候模拟试验室内温度升高至 45 °C,相对湿度恒定在 90%,喷淋腐蚀溶液 3 h。

2)将试验室内温度升至 60 °C±2 °C,进行烘干处理,持续 2 h。

3)在盐雾喷淋和烘干处理之间维持 15 °C 的温差,升降速率控制在 0.5 °C/min,具体腐蚀循环过程如图 2 所示。

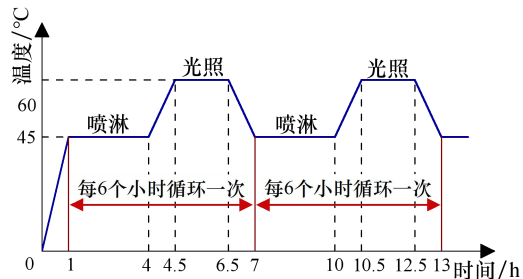


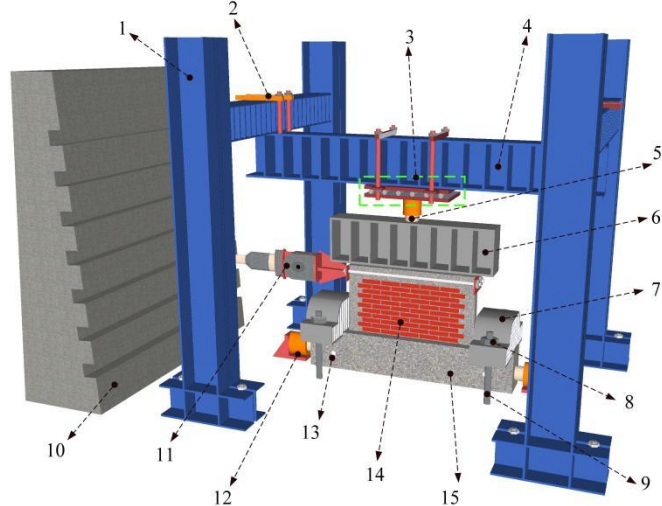
图 2 加速腐蚀过程示意图

Fig.2 Accelerated corrosion process diagram

1.4 试验加载和测量方案

试验采用悬臂梁式加载方法,对试件进行低周往复循环加载,加载装置如图 3 所示。竖向恒定荷载由量程为1 000 kN的液压千斤顶施加,作用于试件顶部钢梁上。水平往复荷载由量程为 500 kN 的水平液压作动器施加,作用在砖砌体墙上部圈梁的几何中心。加载方式采用荷载-位移混合加载控制^[26],主斜裂缝出现前由荷载控制,每级增量 20 kN,往复循环一次,主斜裂缝出现后由其对应位

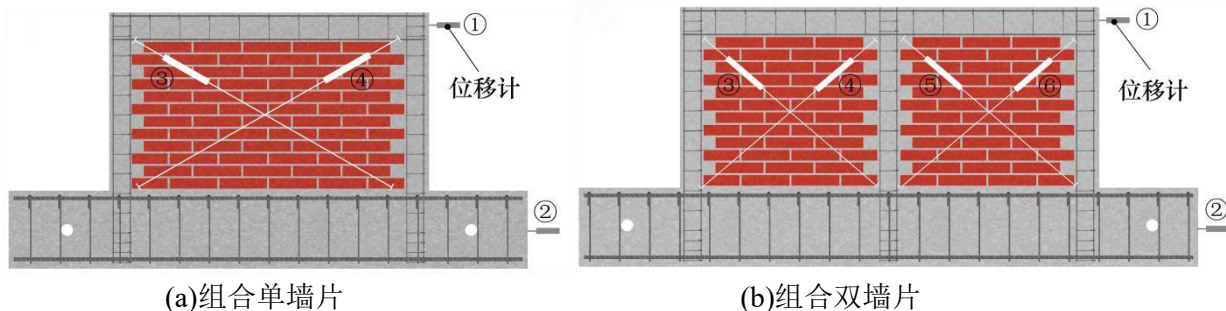
移控制,每级增量 2 mm,往复循环 3 次,当试件出现严重破坏或荷载下降至峰值荷载的 85%时停止加载。观测试件在不同腐蚀循环条件下裂缝的形成和发展情况,记录试件在加载过程中的荷载值和相应的位移。位移计布置如图 4 所示,圈梁端部采用量程为 100 mm 的位移计,地梁和墙体采用量程为 25 mm 的位移计,所有位移计精度均为 0.1 mm。位移计①和②分别测试圈梁和地梁的水平位移,两者位移差即为砖砌体墙实际水平位移,位移计③~⑥测量墙体剪切变形,试验数据采用 TSD-602 数据采集系统与观测相结合的方式收集。



1—钢架;2—可移动装置;3—滑动支座;4—反力梁;5—液压千斤顶;6—刚性分载梁;7—压梁;8—螺栓;9—锚杆;10—反力墙;11—水平作动器;12—地脚撑;13—预留孔;14—砖砌体试件;15—地梁

图 3 试件加载装置示意图

Fig.3 Diagram of test loading device



(a)组合单墙片

(b)组合双墙片

图 4 位移计布置图

Fig.4 Displacement meter layout

2 试验结果及其分析

2.1 试验现象及破坏形态

试件在往复荷载作用下的破坏过程和形态经历了弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段后,最终都发生了剪切破坏,具体现象如下:

1)组合单墙片试件在加载初期处于弹性阶段,未出现明显裂缝;随着荷载逐步增大,逐渐形成并扩展出剪切斜裂缝,裂缝宽度不断增加,最终发生剪切斜压破坏。经过腐蚀循环作用后,主裂缝扩展速度明显加快,试件更早进入破坏阶段。

2)组合双墙片因中间构造柱的存在,在裂缝形成和扩展过程中产生了多条次生裂缝,最终形成主裂缝并导致破坏;经过腐蚀循环后,砖砌体墙布满裂缝,构造柱钢筋外露,试件破坏更为显著。

最终破坏形态如图 5 所示,图中表明,组合双墙片中裂缝分布更为广泛,而单墙片试件大部分区域基本保持完整。双墙片的滑移区范围较小,约束作用更明显;单墙片滑移程度更大,整体约束效果较弱。

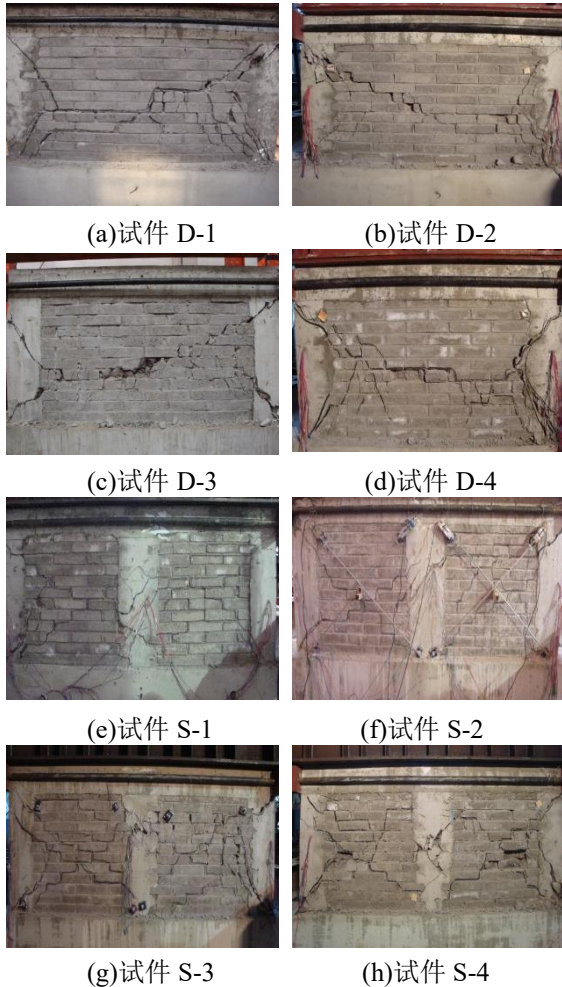
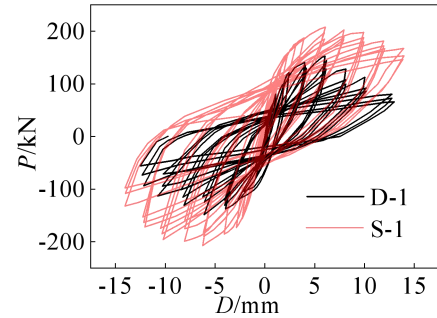


图 5 试件破坏形态

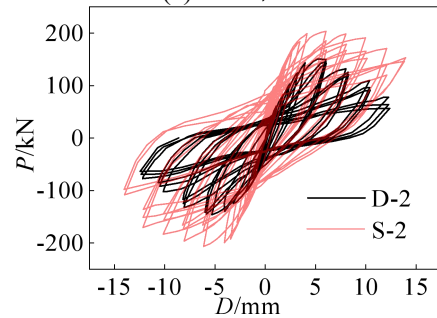
Fig.5 Specimen damage pattern

2.2 滞回曲线

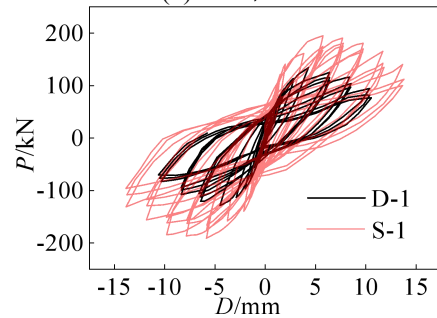
各试件在低周往复荷载作用下的水平荷载 P -位移 D 滞回曲线如图 6 所示。由图 6 可知:试件在加载的初始阶段,随着荷载水平的提升,其承载能力增长速率减缓,刚度衰减,卸载后出现明显的残余变形。随着腐蚀循环次数的增加,试件的承载能力与耗能性能均有所削弱,滞回曲线面积减小。相较于组合单墙片,组合双墙片在初始阶段表现出更好的初始刚度和能量耗散能力,性能劣化过程相对缓慢,表明其抗震性能更为优越。



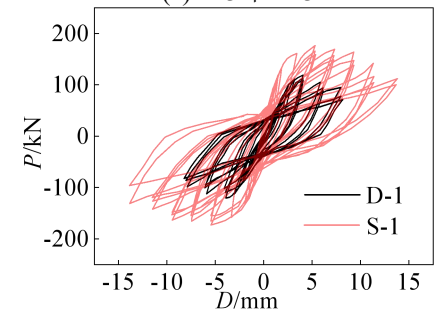
(a) D-1 和 S-1



(b) D-2 和 S-2



(c) D-3 和 S-3



(d) D-4 和 S-4

图 6 试件滞回曲线

Fig.6 Hysteric curves of specimens

2.3 骨架曲线及特征参数

各试件的骨架曲线如图 7 所示。由图 7 可知：试件受力过程可分为弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段；加载初期，曲线呈线性；随着水平荷载的增加，曲线斜率降低且出现非线性特性；达到开裂点后出现拐点，表明试件抗侧刚度降低；达到峰值点后，曲线呈下降趋势。

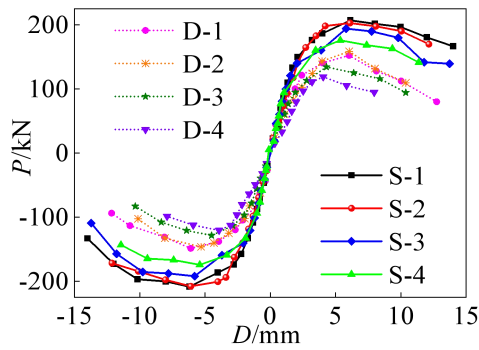


图 7 试件骨架曲线

Fig.7 Skeleton curves of specimens

在不同腐蚀程度下，各试件初始阶段的骨架曲线差异较小；随着荷载持续增大，曲线斜率随腐蚀程度加深而减小，反映出试件抗侧刚度的持续劣化。当达到峰值荷载后，曲线平直阶段明显缩短，说明试件延性下降，其承载能力与变形性能均出现退化趋势。

各试件特征点荷载与位移实测值见表 4。由表 4 可知：

1)随着腐蚀循环次数的增加，试件的开裂荷载、峰值荷载和破坏荷载均有所降低。相比于未腐蚀试件 D-1 和 S-1，腐蚀循环 300 次试件 D-4 的开裂荷载和峰值荷载分别减少了 24.8%和 20.5%，试件 S-4 的分别减少了 20.3%和 15.7%。其原因为氯盐腐蚀过程中盐结晶在砖块和砌筑砂浆的内部空隙中累积，增加了试件的内部应力，进而导致承载力的降低。

表 4 特征点荷载与位移试验值

Tab.4 Characteristic point load and displacement test values

试件编号	开裂点		峰值点		破坏点	
	开裂荷载 P_c/kN	开裂位移 Δ_c/mm	峰值荷载 P_m/kN	峰值位移 Δ_m/mm	破坏荷载 P_f/kN	破坏位移 Δ_f/mm
D-1	102.4	2.05	150.5	6.06	127.9	8.63
D-2	102.8	2.41	147.9	5.68	125.8	8.59
D-3	94.5	1.9	131.4	4.4	111.7	8.41
D-4	77.0	1.89	119.7	3.99	101.8	7.07
S-1	151.1	2.14	207.7	6.16	176.5	12.10
S-2	141.5	2.05	205.3	6.09	174.5	11.72
S-3	131.4	1.93	193.1	5.8	164.1	11.52
S-4	120.4	1.81	175.1	5.38	148.8	10.80

2)随着腐蚀循环次数的增加，试件的开裂位移、峰值位移和破坏位移大致呈现逐渐减小的趋势。相比未腐蚀试件，腐蚀后试件 D-4 的开裂位移和峰值位移分别减少 7.8%和 34.2%，试件 S-4 的分别减少 15.4%和 12.7%。其原因为氯盐腐蚀削弱了砖块与砂浆的结合强度，使得裂缝更易形成和扩展，因此，同等荷载下的位移会减小。

3)相同腐蚀循环次数下，组合单墙片试件的开裂荷载、峰值荷载和破坏荷载均低于组合双墙片试件，且随着腐蚀循环次数的增加，表现出更快的性能退化。组合双墙片试件由于更多的构造柱，能够更有效地分布荷载并吸收更多的能量。

2.4 刚度退化

试件的抗侧刚度是墙体顶部发生单位侧移所需施加的荷载大小，各试件抗侧刚度随腐蚀循环次数退化的拟合曲线如图 8 所示，其中横坐标为水平位移 D ，纵坐标为抗侧刚度。由图 8 可知：试件的初始刚度 K 较高，随荷载水平提高，刚度逐渐降低；在开裂前，内部微裂缝的扩展使刚度迅速衰减，而开裂后退化速度有所减缓，主要受宏观裂缝控制；当达到峰值荷载后，刚度变化趋于平稳，次生裂缝对其影响相对较小。

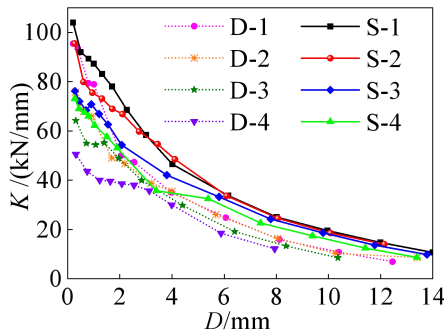


图 8 试件刚度退化曲线

Fig.8 Stiffness degradation curve of specimen

由图 8 中不同腐蚀循环条件下的刚度退化曲线可见,随着腐蚀循环次数的增加,试件整体刚度呈逐步衰减趋势,其中初始刚度的下降最为显著。经历 300 次腐蚀循环后,试件 D-4 相较未腐蚀试件 D-1 的初始刚度降低了 47.1%,而试件 S-4 相较 S-1 则下降了 29.6%。

2.5 滞回耗能

滞回曲线中试件达到某一特征点时形成的滞回环如图 9 所示。

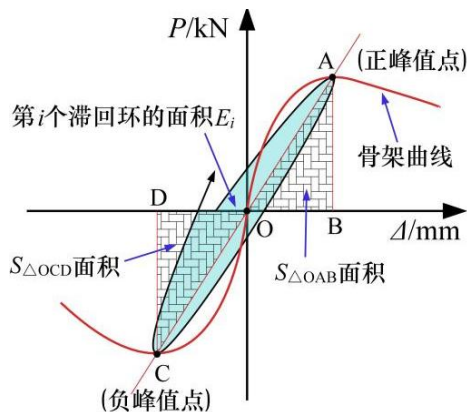


表 5 试件耗能指标

Tab.5 Energy consumption index of specimen

试件编号	开裂荷载时 h_e	峰值荷载时 h_e	破坏荷载时 h_e	总耗能/(kN·mm)
D-1	0.072	0.120	0.182	14 491.0
D-2	0.074	0.115	0.175	10 777.0
D-3	0.071	0.111	0.171	9 490.4
D-4	0.054	0.108	0.138	7 150.5
S-1	0.077	0.147	0.229	25 231.9
S-2	0.068	0.140	0.221	23 639.8
S-3	0.076	0.145	0.207	18 989.4
S-4	0.076	0.114	0.181	16 474.1

2.6 损伤发展状态

采用损伤指数 D , 描述试件在往复荷载作用

图 9 滞回环示意图

Fig.9 Schematic diagram of hysteresis loop

等效黏滞阻尼系数 h_e 的计算式如下:

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_i}{S_{\Delta OAB} + S_{\Delta OCD}} \quad (1)$$

式中: $S_{\Delta OAB}$ 为三角形 OAB 的面积; $S_{\Delta OCD}$ 为三角形 OCD 的面积; E_i 为第 i 个滞回环的面积。

试件在所有循环加载过程中形成的滞回环面积总和,反映试件的总耗能。根据表 5 中各试件分别加载至开裂荷载、峰值荷载和破坏荷载时的等效黏滞阻尼系数和总耗能数据,得到以下结论:

1) 在受力过程中,试件的等效黏滞阻尼系数逐步增大,并在达到破坏荷载时取得最大值。这表明随着位移 Δ 增大,试件的耗能能力得到逐渐发挥。

2) 经历腐蚀循环后,试件的等效黏滞阻尼系数和总耗能随腐蚀次数的增加而逐渐减小。以试件 S-1 为例,经过 300 次腐蚀循环后,等效黏滞阻尼系数降至 0.181,减少 20.9%,总耗能降至 16 474.1 kN·mm,减少 34.7%。表明氯盐腐蚀导致试件耗能能力减弱。

3) 组合双墙片总耗能大于组合单墙片。经历 300 次腐蚀循环后,组合单墙片的等效黏滞阻尼系数和总耗能降幅高于组合双墙片。以组合单墙片的试件 D-1 为例,经历 300 次腐蚀循环后,其等效黏滞阻尼系数和总耗能分别下降 24.2% 和 50.6%,下降速度明显高于组合双墙片,说明后者具有更强的耗能能力。

下的累积损伤,其表达式如下:

$$D_v = (1 - \alpha) \sum_{i=1}^{N'} \left(\frac{\delta_{i,\max} - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} \right)^c + \alpha \sum_{j=1}^N \left(\frac{E_j}{E_u} \right)^c \quad (2)$$

式中: D_v 为损伤指数; α 为权重系数; c 为常数,取值范围为2.3~2.5; N 为半循环加载次数,即载荷只在一个方向上循环施加的次数; N' 为腐蚀砌体墙首次出现非弹性峰值变形的半循环加载次数; $\delta_{i,\max}$ 为腐蚀砌体墙第*i*次半循环加载的最大位移; δ_y 为腐蚀砌体墙在单调荷载作用下的屈服位移, $\delta_{i,\max} > \delta_y$; δ_u 为腐蚀砌体墙在单调荷载作用下达到破坏荷载时的位移; E_j 为腐蚀砌体墙第*j*次半循环加载时的滞回耗能; E_u 为腐蚀砌体墙在单调荷载作用下破坏时的总耗能。

结合试验数据拟合,可得到腐蚀砌体墙在单调荷载作用下的破坏位移与总耗能。利用本文所建损伤模型分别对试件 D-1 和 D-4 进行损伤计算,以半循环加载次数 N 为横坐标,损伤指数 D_v 为纵坐标,绘制试件累积损伤曲线,如图 10 所示,曲线的斜率可反映损伤的累积速度,斜率越大,说明损伤累积过程越快。

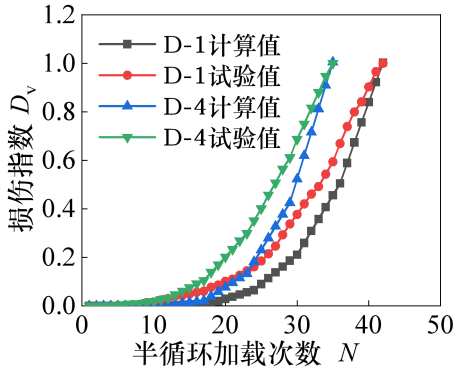


图 10 试件损伤曲线

Fig.10 Damage curves of specimens

由图 10 可知:试件在弹性阶段损伤缓慢,而弹塑性阶段损伤迅速累积。随着腐蚀的加剧,损伤指数增幅明显,反映出损伤速度加快;在相同的循环加载次数下,试件 D-4 的损伤指数大于试件 D-1 的,说明试件的损伤指数随着腐蚀程度的增加而逐渐增加;模型计算值与试验值接近,表明该损伤模型能较合理地描述地震作用下腐蚀砌体墙的损伤演化过程。

3 恢复力模型的建立

本文将砌体墙的骨架曲线简化为带下降段的三折线模型。腐蚀砌体墙的骨架曲线形状通常被认为与完好墙相似,但由于其抗震性能退化

更为严重,因此两者的模型参数存在差异。

3.1 完好砌体墙骨架曲线参数确定

3.1.1 开裂阶段

约束砌体墙开裂荷载计算式如下^[27]:

$$P_c = \frac{1}{\xi} f_{VE} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{VE}}} [1 + \eta(G_c / G_w)(2A_c / A_w)] A_w \quad (3)$$

式中: ξ 为剪应力不均匀影响系数; f_{VE} 为砖砌体抗剪强度; σ_0 为墙体截面压应力; η 为墙柱共同工作系数; G_c 为混凝土剪切模量; G_w 为砌体剪切模量; A_c 为构造柱截面面积; A_w 为墙体截面面积。

约束砌体墙初始刚度 K_0 的计算式如式(4)所示。

$$K_0 = \frac{1}{\frac{H^3}{12E_w I_z} + \frac{\xi H}{G_w A_z}} \quad (4)$$

$$I_z = n \cdot A_c \cdot \eta \cdot \frac{E_c}{E_w} \left(\frac{L - nb_c}{2} \right)^2 + \frac{t}{12} (L - nb_c)^3 \quad (5)$$

$$A_z = A_w (1 + \eta \cdot \frac{G_c}{G_w} \cdot \frac{nA_c}{A_w}) \quad (6)$$

式中: H 为墙体高度; E_w 为砖砌体墙弹性模量; E_c 为混凝土弹性模量; I_z 、 A_z 分别为墙体截面惯性矩和等效面积; n 为构造柱数量; b_c 为构造柱宽度; L 为墙体长度; t 为墙体厚度。

文献[28]中由统计 26 片砌体墙的开裂刚度与初始刚度得出砌体墙的开裂刚度 $K_c = 0.52K_0$ 。则砖砌体墙开裂荷载对应位移 Δ_c 按式(7)进行计算:

$$\Delta_c = \frac{P_c}{K_c} \quad (7)$$

3.1.2 强化阶段

砖砌体墙峰值荷载 P_m 由无筋砌体的抗剪作用、构造柱内竖向钢筋的抗剪作用及构造柱内混凝土的抗剪作用 3 部分组成^[29],可表征如下:

$$P_m = \frac{1}{0.75 + 0.5\varphi} f_{VE} A_w + 0.1 \sum f_{v,i} A_{s,i} + 0.7 \sum \psi_i f_{t,j} A_{c,j} \quad (8)$$

式中: φ 为墙体的高宽比; $f_{v,i}$ 和 $A_{s,i}$ 分别为单根竖向钢筋的抗拉屈服强度和截面面积; ψ_i 为构造柱中混凝土抗剪强度折减系数; $f_{t,j}$ 为第*j*根构造柱混凝土抗拉强度; $A_{c,j}$ 为墙中第*j*根构造柱的截面面积。

约束砌体墙的强化段刚度 K_s 按式(9)进行计算^[28],峰值位移 Δ_m 按式(10)进行计算。

$$K_s = (0.57n + 0.053)K_c \quad (9)$$

$$\Delta_m = \Delta_c + \frac{P_m - P_c}{K_s} \quad (10)$$

3.1.3 破坏阶段

约束砌体墙的破坏荷载 P_f 、破坏段刚度 K_f 、破坏位移 Δ_f 分别按下式进行计算。

$$P_f = 0.85P_m \quad (11)$$

$$K_f = (-0.26n + 0.013)K_c \quad (12)$$

$$\Delta_f = \Delta_m + \frac{P_f - P_m}{K_f} \quad (13)$$

3.2 腐蚀砌体墙骨架曲线参数确定

定义氯盐腐蚀破坏参数 T 作为量化砌体氯盐腐蚀程度的指标,其计算式如下:

$$T = 0.003632 f_m^{-0.456} \cdot n \quad (14)$$

式中: n 为氯盐腐蚀循环次数; f_m 为砂浆立方体抗压强度,其值见表 2。

假定腐蚀砖砌体墙骨架曲线特征点的腐蚀衰减系数与氯盐腐蚀破坏程度 T 和轴向压应力 σ 相

关。基于表 4 中的特征点荷载与位移试验值,对完好砌体墙骨架曲线进行多参数修正,相应的修正公式如下:

$$P'_i = f_i(T, \sigma) P_i \quad (15)$$

$$\Delta'_i = g_i(T, \sigma) \Delta_i \quad (16)$$

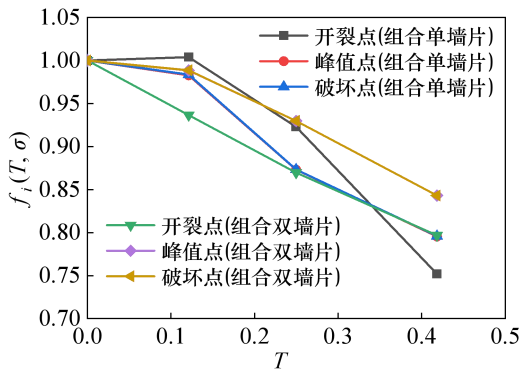
式中: P_i 和 P'_i 分别为完好试件和腐蚀试件特征点 i 处墙体顶部的水平荷载; Δ_i 和 Δ'_i 分别为 P_i 和 P'_i 对应的位移; $f_i(T, \sigma)$ 为考虑腐蚀损伤和轴向压应力的特征点 i 的荷载修正函数; $g_i(T, \sigma)$ 为相应的位移修正函数。

结合表 6 中的同类试验数据,对受损砌体墙特征点的荷载和位移进行归一化处理^[30]。荷载和位移的归一化系数随 T 和 σ 的变化趋势如图 11 所示。由图 11 可知,各特征点的荷载修正系数和位移修正系数均呈现多折线函数变化趋势。

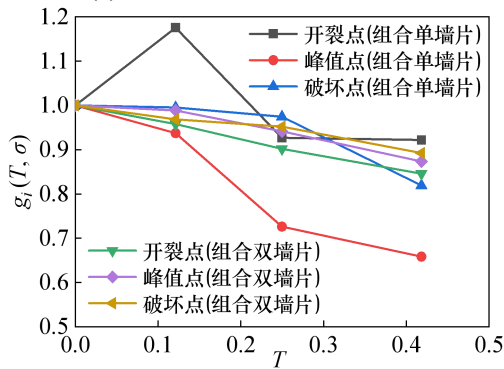
表 6 同类试验相关数据^[31]

Tab.6 Relevant data from similar experiments

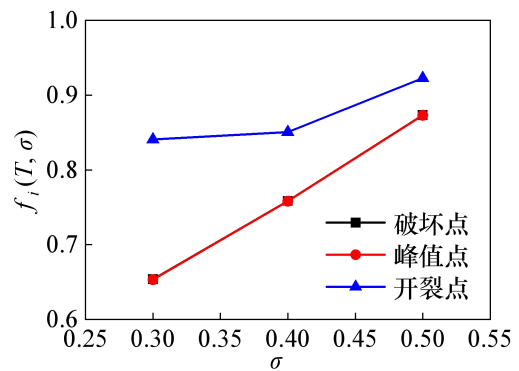
试件编号	n /次	f_m /MPa	σ /MPa	P_c /kN	Δ_c /mm	P_m /kN	Δ_m /mm	P_f /kN	Δ_f /mm
WC-5	200	10.4	0.4	87.1	1.94	114.1	4.19	97.0	8.30
WC-6	200	10.4	0.3	86.1	2.26	98.3	5.68	83.6	10.3



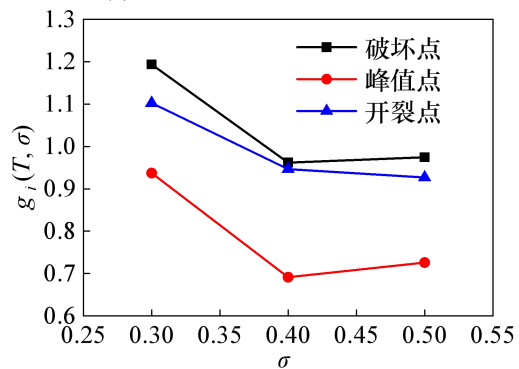
(a) T 对荷载修正系数的影响



(b) T 对位移修正系数的影响



(c) σ 对荷载修正系数的影响



(d) σ 对位移修正系数的影响

图 11 T 和 σ 对荷载和位移修正系数的影响

Fig.11 Influence of T and σ on the load and displacement correction coefficient

在此基础上,综合考虑公式的计算精度和简便性,假设荷载和位移修正函数为式(17)—式(18)所示的二次函数表达式。通过图 12 所示的非线性

曲面拟合,得出多参数拟合系数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 。

$$f_i(T, \sigma) = aT + b\sigma + cT^2 + d\sigma^2 + 1 \quad (17)$$

$$g_i(T, \sigma) = (aT^2 + bT) + (c\sigma^2 + d\sigma + e) + 1 \quad (18)$$

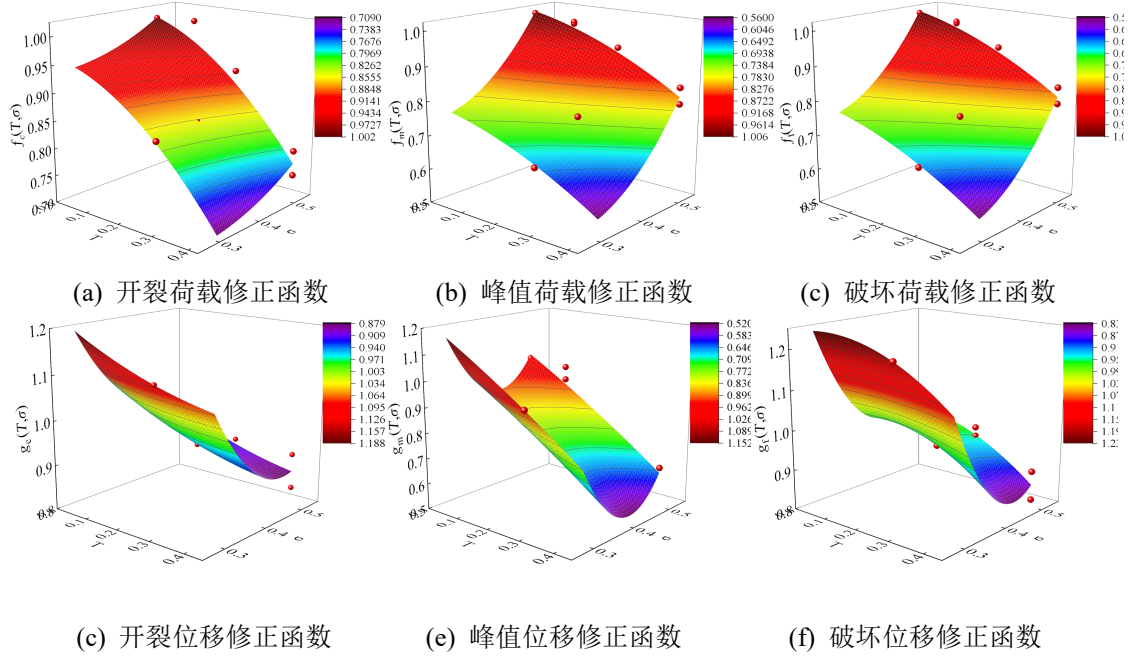


图 12 修正函数非线性曲面拟合

Fig.12 Nonlinear surface fitting with correction functions

通过非线性曲面拟合(图 12),最终建立氯盐腐蚀砌体墙骨架曲线各特征点荷载和位移随 T 和 σ 退化规律的数学表征见式(19)—式(24)。

1)开裂荷载和相应位移的修正公式分别如下:

$$P_c' = (-0.205T - 0.519\sigma - 0.815T^2 + 1.046\sigma^2 + 1)P_c \quad (R^2=0.93) \quad (19)$$

$$\Delta_c' = [(0.350T^2 - 0.427T) + (6.287\sigma^2 - 5.962\sigma + 1.410) + 1]\Delta_c \quad (R^2=0.92) \quad (20)$$

2)峰值荷载及相应位移的修正公式分别如下:

$$P_m' = (-0.221T - 2.094\sigma - 0.558T^2 + 4.211\sigma^2 + 1)P_m \quad (R^2=0.96) \quad (21)$$

$$\Delta_m' = [(-0.298T^2 - 0.779T) + (17.894\sigma^2 - 14.9851\sigma + 3.102) + 1]\Delta_m \quad (R^2=0.92) \quad (22)$$

3)开裂荷载及相应位移的修正公式分别如下:

$$P_f' = (-0.219T - 2.093\sigma - 0.561T^2 + 4.209\sigma^2 + 1)P_f \quad (R^2=0.97) \quad (23)$$

$$\Delta_f' = [(-0.979T^2 + 0.784T) + (11.252\sigma^2 - 10.194\sigma + 2.100) + 1]\Delta_f \quad (R^2=0.95) \quad (24)$$

3.3 滞回规则

基于修正的 Ibarra-Medina-Krawinkler 滞回模型,针对不同腐蚀程度的构件,考虑恢复力模型的滞回规则,提出循环退化规则,具体如下。

3.3.1 循环退化指数

IBARRA L F 等^[32]定义构件在往复荷载作用下第 i 个循环的循环退化指数 β_i 为:

$$\beta_i = \left(\frac{\Delta D_i}{\Sigma D - D_{i-1}} \right)^\varphi \quad (25)$$

式中: ΔD_i 为第 i 次循环加载的损伤增量值; ΣD 为加载结束时的累积损伤; D_{i-1} 为第 i 次循环加载前的损伤累积值;参数 φ 用来控制循环退化速率,其取值范围为 1~2。

3.3.2 强度退化规则

构件在加载和卸载过程中会经历强度、刚度和耗能等方面的退化,主要体现在以下 4 个方面。

1)基本强度退化。试件的开裂荷载和强化段刚度由式(26)计算,

$$P_{c,i}^\pm = (1 - \beta_i)P_{c,i-1}^\pm \quad (26)$$

$$K_{s,i}^\pm = (1 - \beta_i)K_{s,i-1}^\pm \quad (27)$$

式中: $P_{c,i}^{\pm}$ 、 $K_{s,i}^{\pm}$ 分别为第 i 次循环加载后试件的开裂荷载和强化段刚度; $P_{c,i-1}^{\pm}$ 、 $K_{s,i-1}^{\pm}$ 分别为第 i 次循环加载前试件的开裂荷载和强化段刚度; 上标“ \pm ”为加载方向, 其中“ $+$ ”为正向加载, “ $-$ ”为反向加载, 下文表示相同。

2) 峰值后强度退化。试件峰值后强度计算公式如下:

$$P_{\text{ref},i}^{\pm} = (1 - \beta_i) P_{\text{ref},i-1}^{\pm} \quad (28)$$

式中 $P_{\text{ref},i}^{\pm}$ 、 $P_{\text{ref},i-1}^{\pm}$ 分别为第 i 次循环加载后和第 i 次循环加载前, 破坏段反向延长线与纵坐标的交点。

3) 卸载刚度退化。试件卸载刚度退化规则如式(29)所示:

$$K_{u,i} = (1 - \beta_i) K_{u,i-1} \quad (29)$$

式中 $K_{u,i}$ 、 $K_{u,i-1}$ 分别为第 i 次循环加载后与第 i 次循环加载之前发生性能退化的卸载刚度。

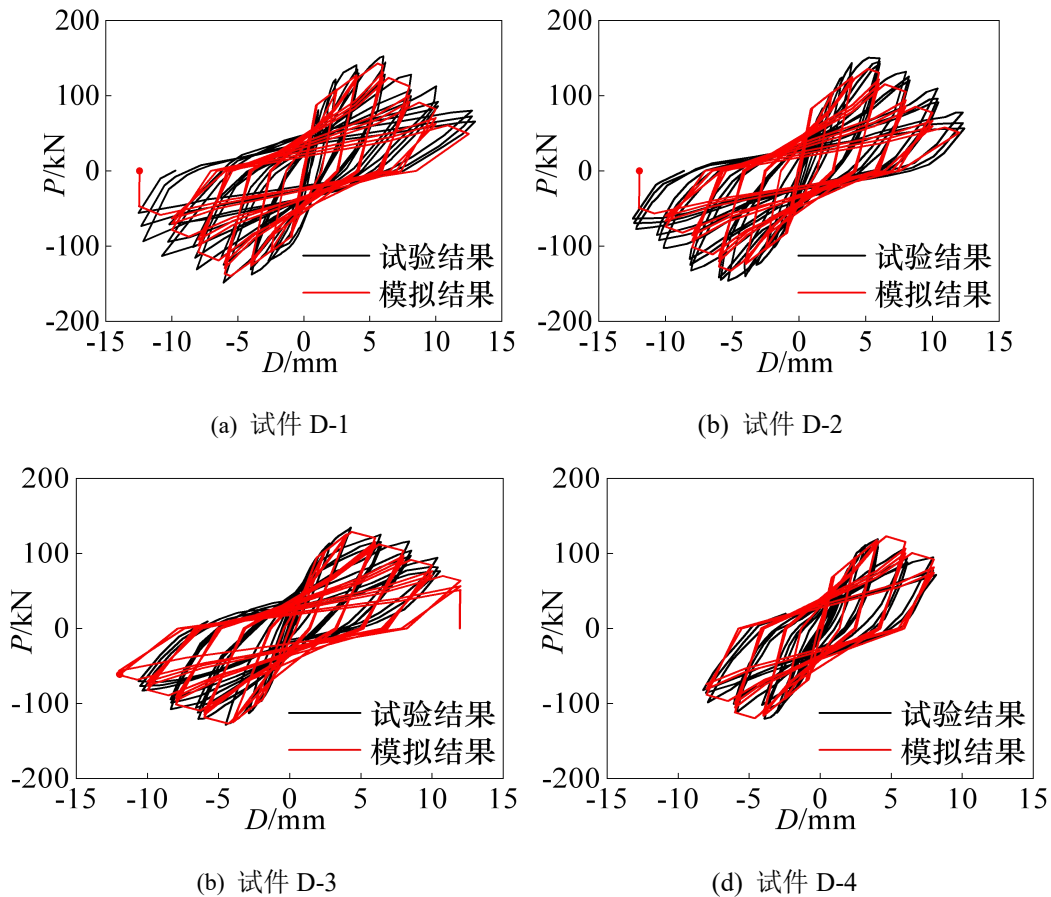
4) 再加载刚度退化。该退化模式依据文献[32]和[33]引入目标位移, 目标位移计算公式如下:

$$\Delta_i^{\pm} = (1 + \beta_i) \Delta_{i-1}^{\pm} \quad (30)$$

式中 Δ_i^{\pm} 、 Δ_{i-1}^{\pm} 分别为第 i 和 $i-1$ 次循环时的目标位移。

4 恢复力模型验证

在所建立的恢复力模型基础上, 分别构建了完好砖砌体墙与腐蚀砖砌体墙数值分析模型, 并施加低周往复荷载进行模拟分析。其中, 骨架曲线形态由各特征点计算参数加以控制。将计算分析结果与本文试验数据及相关文献试验结果进行对比, 如图 13 所示。由图 13 可知, 计算滞回曲线与试验滞回曲线在承载能力、刚度和耗能方面均有较高的吻合度, 证实了模型的有效性, 说明该恢复力模型能够准确地反映腐蚀砌体墙的力学性能与抗震性能。



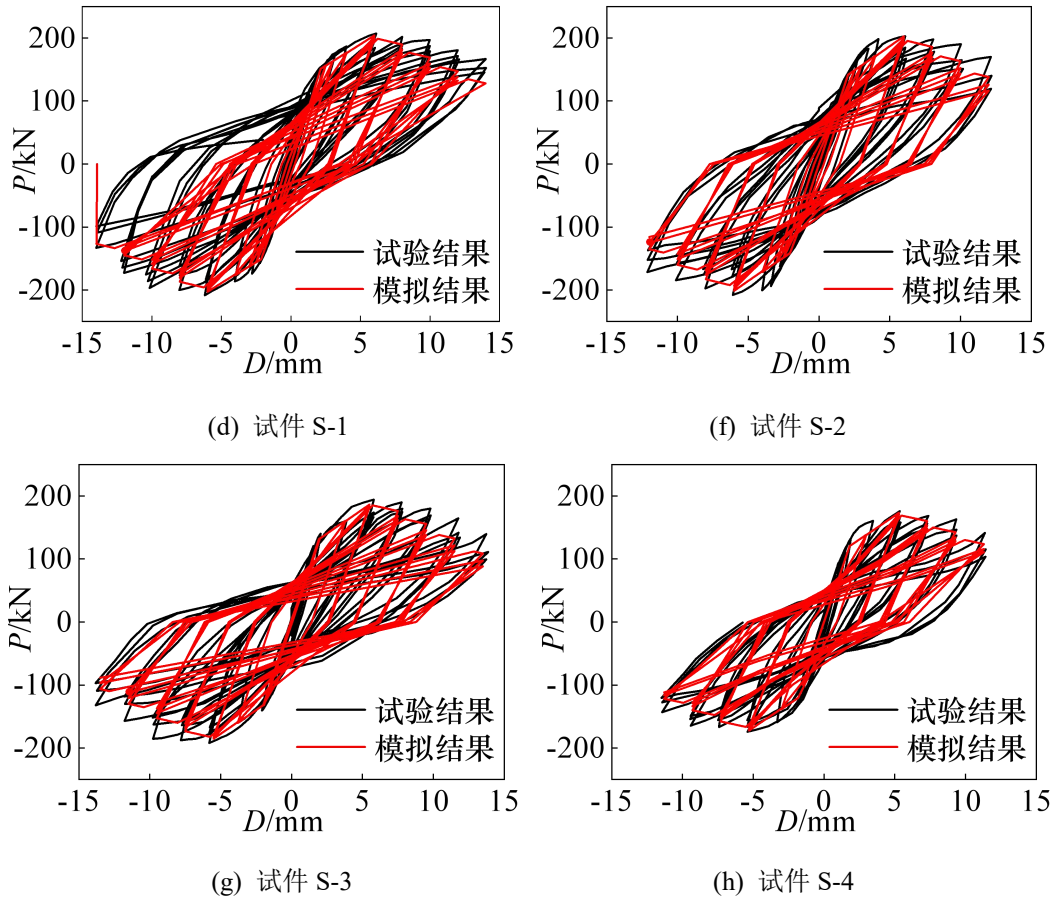


图 13 计算滞回曲线与试验滞回曲线对比

Fig.13 Comparisons of calculated and experimental hysteretic curves

5 结论

文中选取 8 个砖砌体墙试件作为研究对象,通过中性盐雾试验模拟沿海大气环境。以腐蚀循环次数作为变量,分析了经过氯盐腐蚀处理后砌体墙的滞回曲线和骨架曲线特性。在此基础上,基于改进的 I-K 模型,构建了考虑腐蚀循环次数影响的砌体墙恢复力模型,并进行验证。通过试验和理论分析得到如下结论:

1)各试件经历了弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段后均发生了剪切破坏。经过氯盐腐蚀循环后,组合单墙片试件主裂缝发展更快、破坏时间更短;组合双墙片由于中间构造柱的存在,使得砖砌体墙裂缝更充分,对砌体墙的约束能力更强。

2)组合砖砌体试件的承载能力、变形、耗能能力与腐蚀循环次数成反比例关系。其中,组合单墙片试件 D-4 较试件 D-1 的开裂荷载、峰值荷载、初始刚度、总耗能分别降低 24.8%、20.5%、47.1%、50.6%,组合双墙片试件 S-4 较试件 S-1 的开裂荷

载、峰值荷载、初始刚度、总耗能分别降低 20.3%、15.7%、29.6%、34.7%。

3)经历相同腐蚀循环次数后,组合单墙片试件性能退化更明显,各特征点荷载和位移、初始刚度及总耗能退化速度均比组合双墙片的快。其原因为组合双墙片因其附加的构造柱能更均匀地分散载荷,能吸收更多的能量。

4)建立的腐蚀砌体墙恢复力模型各特征点荷载和性能退化规则与试验结果一致,均反映了沿海环境下腐蚀砖砌体承载力与变形随加载循环的退化规律,为沿海地区既有砌体结构抗震性能的评估提供了理论参考。

参 考 文 献

- [1] SINGH G,TOMAR A,KANWAR V S.Performance-Based Seismic Design for Unreinforced Masonry: A Literature Review[J].Latest Trends in Engineering and Technology,2024:505-513.
- [2] XIANG L,MENG Q,REN P.Effects of environmental and architectural factors on chloride-salt deposition on coastal

- building surfaces in the Zhujiang River Estuary[J].*Building and Environment*,2023,242:110554.
- [3] ASJODI A H, SAEIDI S, DOLATSHAHI K M, et al. Quantifying hybrid failure modes of unreinforced masonry walls through experimental data analysis[J].*Journal of Structural Engineering*,2024,150(11):04024155.
- [4] ZHOU Z, MENG Q, WANG J, et al. Impact of marine atmospheric corrosion on the thermophysical properties of building coatings[J].*Journal of Building Engineering*,2024,85:108704.
- [5] MORILLAS H, MAGUREGUI M, GALLEGO-CARTAGENA E, et al. The influence of marine environment on the conservation state of Built Heritage: an overview study[J].*Science of The Total Environment*,2020,745:140899.
- [6] MANOHAR S, SANTHANAM M, CHOCKALINGAM N. Performance and microstructure of bricks with protective coatings subjected to salt weathering[J].*Construction and Building Materials*,2019,226:94-105.
- [7] 鲍玖文,庄智杰,张鹏,等.基于相似性的海洋潮汐区环境混凝土抗氯盐侵蚀性能研究进展[J].*材料导报*,2021,35(7):7087-7095.[BAO J W, ZHUANG Z J, ZHANG P, et al. Research progress of chloride salt corrosion resistance of concrete exposed to marine tidal environment based on similarity theory[J].*Materials Reports*,2021,35(7):7087-7095.]
- [8] D'ALTRI A M, DE MIRANDA S, BECK K, et al. Towards a more effective and reliable salt crystallisation test for porous building materials: Predictive modelling of sodium chloride salt distribution[J].*Construction and Building Materials*,2021,304:124436.
- [9] MORILLAS H, DE MENDONÇA FILHO F F, DERLUYN H, et al. Decay processes in buildings close to the sea induced by marine aerosol: Salt depositions inside construction materials[J].*Science of The Total Environment*,2020,721:137687.
- [10] LI Q, WANG Z, GUO H, et al. A perspective view of salt crystallization from solution in porous media: morphology, mechanism, and salt efflorescence[J].*Scientific Reports*,2024,14(1):23510.
- [11] NAZERIGIVI A, GHIASSI B, VASCONCELOS G, et al. Numerical modeling of salt crystallization in masonry: A critical review of developed numerical models[J].*Journal of Cultural Heritage*,2024,70:143-156.
- [12] 郑山锁,阮升,曹琛,等.近海大气氯离子环境下砖砌体抗压力学性能试验研究[J].*功能材料*,2018,49(1):1127-1133,1138.[ZHENG S S, RUAN S, CAO C, et al. Experimental research on compressive behavior of brick masonry in offshore chloride environment[J].*Functional Materials*,2018,49(1):1127-1133.]
- [13] GENTILINI C, FRANZONI E, BANDINI S, et al. Effect of salt crystallisation on the shear behaviour of masonry walls: an experimental study[J].*Construction and Building Materials*,2012,37(3):181-189.
- [14] LAYCOCK E A. Ten years of frost testing at Sheffield Hallam University[J].*Construction and Building Materials*,2002,16(4):195-205.
- [15] LARBI J A. Microscopy applied to the diagnosis of the deterioration of brick masonry[J].*Construction and Building Materials*,2004,18(5):299-307.
- [16] LUBELLI B, NIJLAND T G, VAN HEES R P J, et al. Effect of mixed in crystallization inhibitor on resistance of lime - cement mortar against NaCl crystallization[J].*Construction and Building Materials*,2010,24(12):2466-2472.
- [17] CASTELLAZZI G, COLLA C, DE MIRANDA S, et al. A coupled multiphase model for hygrothermal analysis of masonry structures and prediction of stress induced by salt crystallization[J].*Construction and Building Materials*,2013,41:717-731.
- [18] 郑山锁,牛丽华,郑焜,等.酸雨腐蚀砖砌体组合墙抗震性能试验及恢复力研究[J].*建筑结构学报*,2019,40(7):162-172.[ZHENG S S, NIU L H, ZHENG H, et al. Research on seismic behavior of brick composite walls under acidic atmospheric environment[J].*Journal of Building Structures*,2019,40(7):162-172.]
- [19] 寇佳亮,樊明艳,孙国兴,等.高延性混凝土加固震损古旧砌体抗震性能试验及恢复力模型研究[J].*振动与冲击*,2022,41(7):106-115,125.[KOU J L, FAN M Y, SUN G X, et al. Aseismic performance test and restoring force model of earthquake damaged ancient masonry strengthened with high ductility concrete[J].*Journal of Vibration And Shock*,2022,41(7):106-115,125.]
- [20] DAUDA J A, IUORIO O, MUHIT I B, et al. Systematic review of experimental testing of masonry walls'

- failure:Comparative analysis and future directions[J].Engineering Failure Analysis,2024,163:108571.
- [21] PAN J L,SHEN J X,ZHONG Z L,et al.Damage evolution and failure mechanism of masonry walls under in-plane cyclic loading[J].Engineering Failure Analysis,2024,161:108240.
- [22] MEFTAH S A,ALDOSARI S M,TOUNSI A,et al.Simplified homogenization technique for nonlinear finite element analysis of in-plane loaded masonry walls[J].Engineering Structures,2024,306:117822.
- [23] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.人造气氛腐蚀试验盐雾试验:GB/T 10125—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [24] ZHENG Y,ZHENG S S,YANG L,et al.Experimental study and analytical model of the bond behavior of corroded reinforcing steel bars in concrete[J].Construction and Building Materials,2022,327:126991.
- [25] SHANG Z G,ZHENG S S,ZHENG H,et al.Seismic behavior and damage evolution of corroded RC columns designed for bending failure in an artificial climate[J].Structures,2022,38:184-201.
- [26] 中华人民共和国建设部.建筑抗震试验方法规程:JGJ 101—96[S].北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [27] 孙大伟,许鑫洋,周少贇.面板-挤压墙接触面的大型单剪试验及力学特性研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(3):141-148.[SUN D W,XU X Y,ZHOU S B.Large-scale single shear test and mechanical properties study of panel-extruded wall contact interface[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2025,46(3):141-148.]
- [28] 程明超.砌体结构地震易损性研究[D].西安:西安建筑科技大学土木工程学院,2016:21-42.[CHENG M C.Research on Seismic Vulnerability of Masonry Structure[D].Shanxi:Xi'an University of Architecture and Technology,2016:21-42.]
- [29] 许冠超,谢琰,孟卓伦,等.装配式环形钢筋搭接混凝土剪力墙的抗震性能研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2020,41(3):91-96.[XU G C,XIE Y,MENG Z L,et al.Study on seismic performance of assembled annular reinforced lapped concrete shear wall[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2020,41(3):102-121.]
- [30] 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.
- [31] NIU L H,ZHENG S S,LI L.Experimental study on the seismic behavior of masonry walls under offshore environment[J].Structures,2020,28:433-445.
- [32] IBARRA L F,KRAWINKLER H.Global collapse of frame structures under seismic excitations[R].Palo Alto:Blume Earthquake Engineering Center,2005:39-49.
- [33] DAI K Y,YU X H,LU D G,et al.Fragility functions for corroded reinforced concrete columns[J].Journal of Building Engineering,2024,82:108124.

Seismic Performance and Damage Restoring Force Model of Brick Walls Corroded by Chloride Salt

LI Nan¹,NIU Lihua^{1,2},ZHENG Shansuo²,GUAN Junfeng¹,LI Lielie¹,GAO Shaohua¹

(1.North China University of Water Resources and Electric Power,Zhengzhou,450045,China; 2.Xi'an University of Architecture and Technology,Xi'an,710055,China)

Abstract:[Objective] In order to accurately reveal the degradation mechanism of seismic performance of brick masonry walls in coastal atmospheric corrosion environment,a universal restoring force model is established.**[Methods]** The indoor accelerated corrosion test of 8 brick masonry wall specimens was carried out, and then the low-cycle reciprocating load test was carried out, considering the parameters such as the number of corrosion cycles and the number of structural columns.Based on the modified I-K model,a cyclic degradation index was introduced,considering

the degradation of basic strength, post-peak strength, unloading stiffness, and re-loading stiffness, as well as the pinching effect. A resilience model for corroded brick masonry walls was proposed. The model's calculated hysteresis curves were compared and analyzed against the experimental results. **[Results]** Under the action of reciprocating loads, the specimens all undergo elastic, elastoplastic and failure stages and eventually undergo shear failure. The corrosion cycle will accelerate the development of cracks, resulting in a significant decrease in the horizontal bearing capacity, deformation capacity and energy dissipation capacity of the structure. Compared with the combined single wall piece, the combined double wall piece has stronger constraint effect of the structural columns, more complete distribution of cracks, fuller hysteresis curve, and superior overall mechanical performance and energy consumption performance. **[Conclusion]** The established resilience model for corroded brick masonry walls showed a high degree of conformity with the experimentally obtained hysteresis curves. It can accurately describe the force characteristics and hysteresis performance of corroded masonry walls, making it suitable for the elastoplastic analysis of masonry structures in coastal atmospheric environments.

Keywords: brick masonry wall; chloride-induced corrosion; seismic performance; damage model; restoring force model

(编辑: ×××)