

# 框架-带耗能器混合配筋剪力墙 全寿命周期抗震韧性评估

李 沛, 汪梦甫

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**在近海环境下,在役钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)结构由于氯离子的侵蚀作用,致使钢筋锈蚀,进而其抗震韧性会随着服役时间延长而逐渐降低。在此背景下,为研究可更换摩擦耗能器与纤维增强复合材料(fiber-reinforced polymer, FRP)筋对 RC 框架-剪力墙结构全寿命周期抗震韧性的影响,该文以普通 RC 框架-剪力墙(RC-frame shear wall, RCF-SW)结构与 RC 框架-带可更换摩擦耗能器的 FRP 混合配筋剪力墙(RC frame-FRP hybrid reinforced shear wall structures with replaceable friction dampers, RCF-FRSW-FD)结构作为研究对象,基于增量动力时程分析方法,讨论了 2 种结构在服役 0、35、55 a 时的地震响应。同时,依据 FEMA P-58 理论框架,对 2 种结构震后韧性指标(修复成本、修复时间和人员伤亡)进行了系统分析。研究结果表明:随着服役时间增加,结构损伤程度和修复成本明显上升,修复时间延长,整体韧性下降,且地震动强度越大,锈蚀对结构劣化影响越显著;与 RCF-SW 结构相比,剪力墙采用可更换摩擦耗能器与 FRP 筋结合的方案能显著降低框架-剪力墙结构地震响应和破坏概率,有效增强结构全寿命周期的抗震韧性。

**关键词:**抗震韧性评估;RC 框架-剪力墙结构;FRP 混合配筋;摩擦耗能器;锈蚀;全寿命;FEMA P-58  
**中图分类号:**TU398; P315.9 **文献标志码:**A

## Life-cycle seismic resilience assessment of frame-hybrid reinforced shear wall with dampers

LI Pei, WANG Mengfu

(School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Under the offshore environment, RC structures in service experience rebar corrosion due to chloride ion penetration, and their seismic resilience is progressively weakened as service time increases. To investigate the effects of replaceable friction dampers and FRP bars on the life cycle seismic resilience of RC frame-shear wall structures, this paper examines conventional RC frame-shear wall (RCF-SW) structures and RC frame-FRP hybrid reinforced shear wall structures with replaceable friction dampers (RCF-FRSW-FD). The seismic responses of these structures at 0, 35 and 55 years of service are discussed based on the incremental dynamic analysis (IDA) method. Meanwhile, post-earthquake resilience indicators (repair cost, repair time, and casualties) of the two structures are systematically analyzed using the FEMA P-58 theoretical framework. The results show that, as service time increases, structural damage and repair costs rise significantly, repair time is prolonged, and overall resilience declines. Furthermore, the greater the ground shaking intensity, the more pronounced the impact of corrosion on structural deterioration. Compared with the RCF-SW structure, the shear wall employing the replaceable friction dampers and FRP bars can significantly reduce the seismic response and damage probability of the frame-shear wall

收稿日期: 2024-11-30; 修回日期: 2025-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078203)

作者简介: 李 沛(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事结构抗震研究。E-mail: lipei123@hnu.edu.cn

通信作者: 汪梦甫(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事结构抗震研究。E-mail: wangmengfu@hnu.edu.cn

structure. This combination also effectively enhances the seismic resilience of the structure throughout its life cycle.

**Key words:** seismic resilience assessment; RC frame-shear wall; FRP hybrid reinforcement; friction damper; corrosion; life cycle; FEMA P-58

## 0 引言

随着我国建筑结构的抗震设计水平不断提高,抗震韧性已经成为评估建筑结构性能的重要指标<sup>[1]</sup>。抗震韧性是指建筑结构在遭受地震等灾害作用后维持或迅速恢复其正常功能的能力<sup>[2]</sup>。在地震灾害发生时,具有较强抗震韧性的结构能够有效控制损伤并快速恢复至使用状态,极大减少经济损失和社会影响。因此,提升建筑结构的抗震韧性是地震防灾减灾的核心任务之一。

在我国地震频发区域,钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)框架-剪力墙结构体系广泛应用于重要公共建筑,如办公楼、学校和医院等,其抗震韧性对于城市安全与灾后恢复至关重要<sup>[3]</sup>。剪力墙作为主要抗侧力构件,通常设计为弯曲破坏模式,墙脚部位常发生塑性破坏,导致修复困难。因此,国内外众多学者对墙脚可更换部件展开了研究。例如:OZAKI等<sup>[4]</sup>设计了由蝶形钢板和U型槽钢组成的可更换阻尼器;吕西林等<sup>[5-6]</sup>提出了由叠层橡胶垫和软钢板组成的拉压减震支座作为可更换部件;刘其舟等<sup>[7]</sup>将类似屈曲约束支撑构造的拉压消能部件作为可更换部件;汪梦甫等<sup>[8-9]</sup>采用波形钢板制作的金属阻尼器和双钢板长孔螺栓式摩擦耗能器作为可更换部件;徐龙河等<sup>[10]</sup>在墙脚使用碟簧装置作为可更换部件。王浩祚等<sup>[11]</sup>提出一种由耗能部分和自复位部分并联组成的新型可更换墙脚。这些研究均表明,与传统剪力墙相比,带可更换墙脚部件的剪力墙能够将结构的损伤集中于可更换部件上,具备更强的变形和耗能能力。

然而,RC结构的抗震性能不仅受到设计和构造的影响,还与结构的服役时间密切相关。尤其是近海环境中,钢筋锈蚀成为导致结构性能退化的主要因素<sup>[12]</sup>。钢筋锈蚀不仅会降低钢筋强度和钢筋与混凝土之间黏结性能<sup>[13-14]</sup>,甚至可能导致混凝土保护层的开裂与剥落<sup>[15-16]</sup>,这些负面效应增加了结构全寿命周期内的易损性,导致抗震韧性逐渐被削弱<sup>[1,17-18]</sup>。为应对钢筋锈蚀问题,纤维增强复合材料(fiber-reinforced polymer, FRP)筋逐渐被应用于RC结构的改造中。FRP筋具有高强度、耐腐蚀和良好的力学性能<sup>[19]</sup>,研究表明,将FRP筋替代部分普通钢筋应用于混凝土剪力墙结构中,不仅可以有效防止锈蚀,提高剪力墙的耐久性,还能降低整体残余变形,从而提升结构的抗震韧性<sup>[20-21]</sup>。

基于以上研究背景,本文以普通RC框架-剪力墙和RC框架-带可更换摩擦耗能器的FRP混合配筋剪力墙为研究对象,采用增量动力时程分析法,讨论不同服役年限(0、35、55 a)下结构的地震响应。通过FEMA P-58理论框架<sup>[22-23]</sup>对震后修复费用、修复时间和人员伤亡几个关键韧性指标进行对比分析,明确了可更换摩擦耗能器与FRP筋结合对RC框架-剪力墙全寿命周期抗震韧性的影响,为此类建筑的减震加固设计及震后恢复策略提供科学依据和实用参考。

## 1 结构模型

### 1.1 结构设计

按照我国设计规范<sup>[24-26]</sup>,以近海城市广州南沙区为工程背景,在结构设计软件PKPM中设计了一个12层普通框架剪力墙(RC-frame shear wall, RCF-SW)结构。结构的抗震设防烈度为7度(0.1 g),底层层高为4.2 m,其余各层层高为3.6 m,楼板厚度为120 mm。楼板、装修、隔墙和外墙等恒载均简化为楼板恒载输入<sup>[27]</sup>。各楼层结构平面布置与配筋相同,设计基本资料见表1,结构平面布置见图1,配筋见图2。

在RCF-SW结构的基础上,根据等刚度原则计算剪力墙暗柱有效配筋率<sup>[28]</sup>,将暗柱的普通钢筋换成碳纤维增强聚合物(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)筋,并在底层墙肢两侧墙脚布置可更换摩擦耗能器<sup>[9]</sup>。根据设计思想和相关资料<sup>[29-30]</sup>,摩擦耗能器高度应大于墙底部等效塑性铰高度,采用HOULT<sup>[31]</sup>提出的经验公式,高度取800 mm;摩擦耗能器长度取暗柱的宽度乘以1.1倍放大系数,即660 mm;摩擦耗能器厚度取为墙体厚度,即250 mm。综上,摩擦耗能器的尺寸取为800 mm×660 mm×250 mm。为弥补可更换墙脚造成的墙肢削弱,墙底内置厚度为8 mm、高度为1/3底层层高的钢板,最终形成RC框架-带可更换摩擦耗

能器的 FRP 混合配筋剪力墙 (RC frame-FRP hybrid reinforced shear wall structures with replaceable friction dampers, RCF-FRSW-FD) 结构。其剪力墙的配筋和底层墙脚构造见图 3。

表 1 结构设计基本资料

Table 1 Basic information of structure design

结构设计参数	参数取值	结构设计参数	参数取值
基本风压 (50 a)/(kN/m <sup>2</sup> )	0.60	抗震设防类别	乙类
地面粗糙度	C 类	设计地震动分组	第 1 组
设计场地类别	II 类	场地特征周期/s	0.35
楼板恒载/(kN/m <sup>2</sup> )	8	楼板活载/(kN/m <sup>2</sup> )	2
钢筋等级	HRB400	混凝土等级	C40
其他保护层厚度/mm	40	剪力墙保护层厚度/mm	35

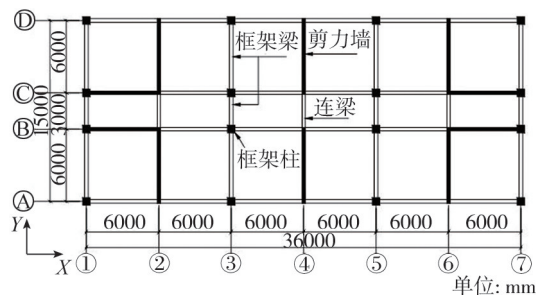


图 1 结构平面布置图

Fig. 1 Plan view of structures

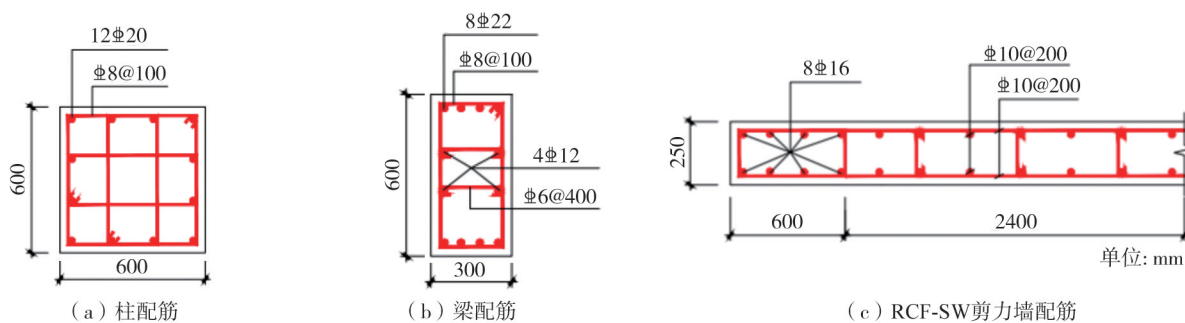


图 2 结构配筋图

Fig. 2 Reinforcement of structures

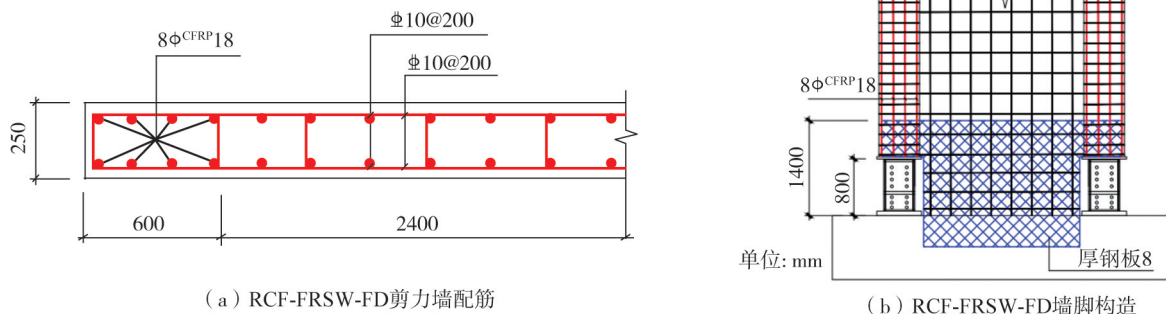


图 3 RCF-FRSW-FD 剪力墙详图

Fig. 3 Detail of the shear wall of RCF-FRSW-FD

## 1.2 有限元建模

采用缪志伟<sup>[32]</sup>的处理方法,将所设计的 2 个空间框-剪结构等效为沿 Y 轴方向的平面框-剪结构,即基于刚性楼板假定并忽略扭转效应,取图 1 中③轴的框架作为整个结构框架的代表,取④轴的联肢剪力墙作为整个结构剪力墙的代表,按照框-剪结构整体刚度特征值  $\lambda$  不变原则组装成平面框-剪结构,见图 4。

以 OpenSees 为有限元分析平台建立结构的等效模型,建模的基本原则是:①混凝土材料采用 Concrete02 材料,箍筋对混凝土的约束效应通过 MANDER 等<sup>[33]</sup>约束混凝土模型考虑;②梁柱部分采用基于位移的纤维单元,每根梁柱划分为 3 个单元;③钢筋本构关系采用 Steel02 模型,内置钢板本构关系使用 Steel01 模型;④剪力墙采用弯剪耦合的改进多垂直杆模型 (shear-flexure interaction multiple-vertical-line-element model, SFI-MVLEM);⑤FRP 筋使用 Elastic 模型并结合 MinMax 命令;⑥摩擦耗能器采用两节点单元,将其拆分为承

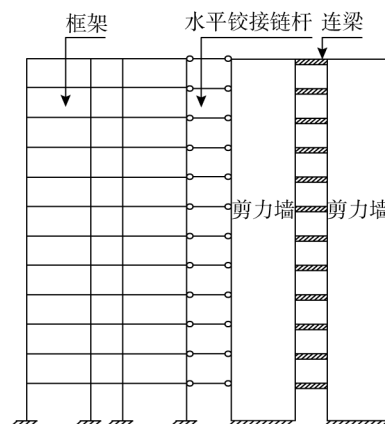


图 4 框架-剪力墙平面简化模型

Fig. 4 Equivalent plane system of frame-shear wall structure

受竖向压力的钢管混凝土部分(使用 ElasticPPGap 材料)和承受拉力的摩擦耗能部分(使用 Steel01 材料);  
 ⑦依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[24]</sup>,现浇梁柱节点、框架柱与基础连接处均可作为刚接,材料强度采用平均值。

1.2.1 剪力墙模型验证

采用上述建模方法,对 XIAO 等<sup>[34]</sup>设计的内置钢板带摩擦耗能器的 FRP 混合配筋剪力墙(试件 SW5)进行数值模拟,模拟和试验的滞回曲线见图 5。模拟曲线与试验曲线在整体趋势上表现出较好的一致性,2 条曲线的峰值点位置和峰值过后的下降趋势基本吻合,尽管模拟所得的最大承载力略高于试验值,但误差控制在 10% 以内,说明模拟结果具有较高的可靠性。

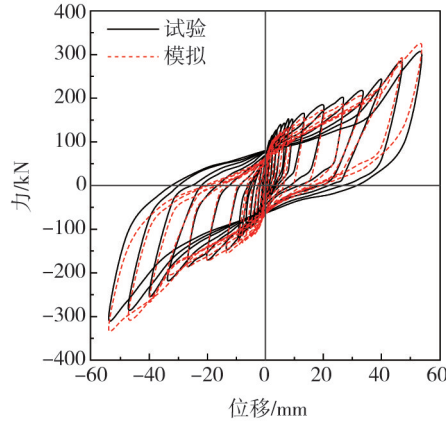


图 5 试件 SW5 滞回曲线对比

Fig. 5 Comparison of hysteresis curves of SW5 specimens

1.2.2 框架剪力墙整体结构验证

为了验证有限元模型在模拟地震作用下结构的动力响应和变形性能的准确性,以某足尺 7 层框架-剪力墙结构<sup>[35]</sup>为研究对象,按前文方法建立平面等效模型,对试验加载工况 SPD-2、工况 SPD-3、工况 SPD-4 进行模拟。有限元分析与试验得到的顶点位移见图 6,模拟曲线整体上较好地跟随了试验曲线的波动趋势,两者数值曲线基本吻合,些许偏差主要因数值模拟条件的理想化与实际试验差异导致,表明该建模方法能够较好地反馈出框架-剪力墙结构的动力特性。

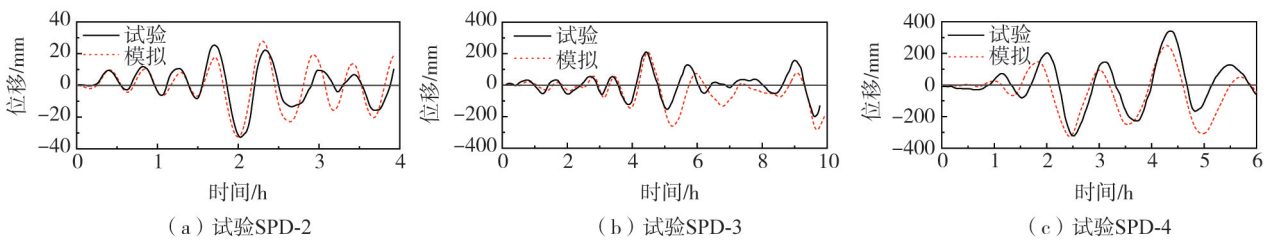


图 6 顶点位移时程对比

Fig. 6 Comparison of top displacement time histories

2 锈蚀作用下结构劣化模型

2.1 钢筋性能退化模型

材料性能退化主要体现在锈蚀的起始时间与锈蚀速率两个方面。锈蚀起始时间是指诸如氯离子等腐蚀性物质从混凝土表层渗透至内部钢筋所需的时间。一旦混凝土表层的氯离子浓度攀升至临界值,钢筋锈蚀即开始。在 RC 结构中,氯离子的扩散机制可通过 Fick 第二定律描述<sup>[36-38]</sup>,锈蚀起始时间的计算公式为

$$T_{ini} = \frac{\chi_{cc}^2}{4 D_c} \left[ \text{erf}^{-1} \left( \frac{C_0 - C_{cr}}{C_0} \right) \right]^{-2} \tag{1}$$

式中: $\chi_{cc}$ 为混凝土保护层厚度; $D_c$ 为氯离子扩散系数; $C_0$ 为混凝土表面的氯离子浓度; $C_{cr}$ 为引发钢筋锈蚀的

临界氯离子浓度;  $\text{erf}(\ )$  为高斯误差函数。

需要注意的是, 这些参数为随机变量, 遵循不同的分布规律, 且因地域差异而变化。根据前文结构设计资料及相关研究<sup>[36-37, 39]</sup>, 锈蚀模型的参数取值见表 2。基于拉丁超立方抽样法 (Latin hypercube sampling, LHS), 抽取 50 000 个侵蚀环境样本, 对箍筋及纵筋的锈蚀开始时间进行计算, 结果见图 7。

表 2 锈蚀模型参数取值

Table 2 Parameter values for corrosion model

参数	均值	变异系数
混凝土保护层厚度 $\chi_{cc}/\text{cm}$	4.000	0.2
混凝土表面氯离子浓度 $C_0/\%$	0.100	0.1
氯离子临界浓度 $C_{cr}/\%$	0.040	0.1
氯离子扩散系数 $D_c/(\text{cm}^2/\text{a})$	1.290	0.1
腐蚀速率 $r/(\text{mm}/\text{a})$	0.127	0.3

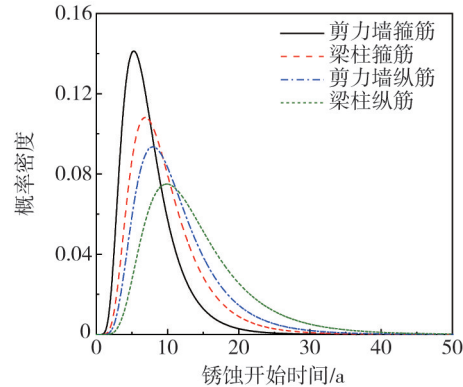


图 7 钢筋锈蚀开始时间的概率密度函数

Fig. 7 Probability density function of steel corrosion initiation time

由图 7 可知, 箍筋和纵筋的锈蚀起始时间均服从对数正态分布, 相比于纵筋, 箍筋的均值锈蚀时间更早, 这是因为纵筋的保护层混凝土更厚, 氯离子抵达纵筋表面的时间更长。本文采用均值锈蚀开始时间对结构进行研究。

锈蚀开始后, 由于钢筋表面产生锈蚀物, 钢筋的截面面积逐渐减小。钢筋截面损伤按式(2)计算:

$$\rho(t) = \begin{cases} 0, & t \leq T_0 \\ 1 - \left(1 - \frac{r(t-T_0)}{d_0}\right)^2, & T_0 < t \leq T_0 + d_0/r \\ 1, & t \geq T_0 + d_0/r \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\rho(t)$  为钢筋的截面损失率;  $r$  为腐蚀速率;  $d_0$  为未锈蚀钢筋的直径。研究表明, 锈蚀不但会导致钢筋的截面面积减少, 还会使钢筋的屈服强度、极限强度、极限应变和弹性模量降低<sup>[38, 40-41]</sup>。锈蚀后钢筋的抗拉屈服强度  $f_y(t)$ 、极限强度  $f_u(t)$ 、极限应变  $\varepsilon_u(t)$  和弹性模量  $E_{uc}(t)$  可用式(3)~式(6)表示:

$$f_y(t) = [1 - 100 \times \alpha_y \cdot \rho(t)] f_{y0} \quad (3)$$

$$f_u(t) = [1 - 100 \times \alpha_u \cdot \rho(t)] f_{u0} \quad (4)$$

$$\varepsilon_u(t) = [1 - 100 \times \alpha_1 \cdot \rho(t)] \varepsilon_{u0} \quad (5)$$

$$E_{uc}(t) = [1 - 100 \times \alpha_2 \cdot \rho(t)] E_{u0} \quad (6)$$

式中:  $f_{y0}$ 、 $f_{u0}$ 、 $\varepsilon_{u0}$ 、 $E_{u0}$  分别为未锈蚀钢筋的屈服强度、极限强度、极限应变和弹性模量;  $\alpha_y$ 、 $\alpha_u$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为经验系数, 本文分别取为 0.010 00、0.010 00、0.039 00、0.007 67<sup>[41-42]</sup>。

## 2.2 混凝土性能退化模型

钢筋锈蚀后体积膨胀, 会在混凝土保护层内产生拉应力, 当拉应力超过混凝土抗拉强度时, 保护层可能裂缝或剥落, 从而降低其抗压强度。保护层混凝土的退化可以通过式(7)表示<sup>[43]</sup>:

$$f_c(t) = \frac{f_{c0}}{1 + 0.1 \varepsilon_1(t) \varepsilon_{c0}} \quad (7)$$

式中:  $f_c(t)$  为保护层混凝土的残余抗压强度;  $\varepsilon_{c0}$  为未锈蚀混凝土峰值压应力  $f_{c0}$  处的应变;  $\varepsilon_1(t)$  为开裂后的保护层混凝土的平均抗拉应变。

由于箍筋锈蚀后性能被削弱, 使得其对核心区混凝土约束效应减弱。本文使用 MANDER 等<sup>[33]</sup> 约束混凝土模型通过调整截面钢筋性能, 来模拟钢筋锈蚀对核心区混凝土性能的影响<sup>[44]</sup>。

## 2.3 不同服役期结构建模

考虑到摩擦耗能器已进行防腐处理且可更换, 以及剪力墙底层钢板嵌入混凝土内部, 氯离子扩散至其表

面所需时间较长,因此建模时暂不考虑锈蚀对两者的劣化影响。由前文讨论可知,锈蚀对结构的影响主要体现在材料力学性能的退化上。因此,本文基于 0 a 服役期结构的有限元模型,通过调整对应服役期材料的力学性能参数,来实现不同服役期结构的建模。

### 3 结构响应分析

#### 3.1 地震动选取

以 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》<sup>[25]</sup> 规定的设计反应谱为目标谱,从 PEER 地震动数据库中挑选了 11 条地震动,其规范谱、均值谱以及地震动加速度反应谱见图 8。RCF-SW 结构和 RCF-FRSW-FD 结构里 2 个结构 Y 方向的 1 阶周期分别是:0.857 6、0.858 8 s。由图可知,均值谱与规范谱在短周期平台段与结构基本周期附近匹配较好。

本文采用与结构动力特性无关的 PGA 作为地震动强度指标,对选取的 11 条地震动的 PGA 进行调幅,使其与不同水准地震(多遇地震、设防地震、罕遇地震和极罕遇地震)反应谱相匹配。利用调整后的地震动对服役期分别为 0、35、55 a 的 RCF-SW 和 RCF-FRSW-FD 这 2 种框架-剪力墙结构进行非线性动力时程分析,并统计其地震响应特征。

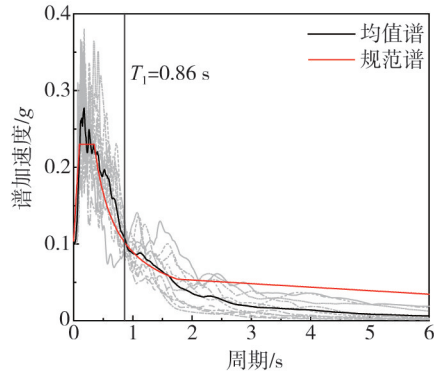


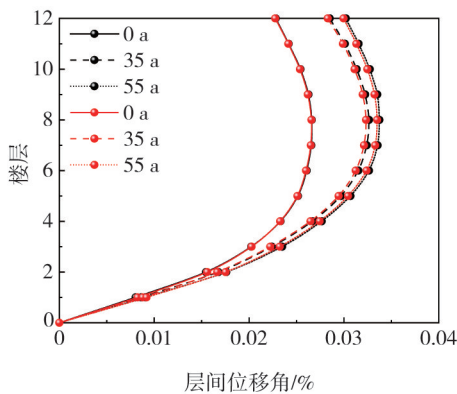
图 8 地震动加速度反应谱

Fig. 8 Response spectra of selected ground motion acceleration records

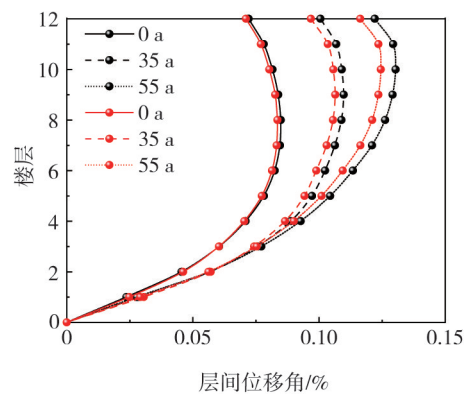
#### 3.2 结构地震响应参数分析

不同地震强度和服役年限下,2 种结构峰值层间位移角均值变化情况见图 9。分析结果表明:随着服役年限的增加,RCF-SW 结构和 RCF-FRSW-FD 结构的层间位移角均显著增大。例如,在设防地震下,RCF-SW 结构的最大层间位移角从 0 a 的 0.08% 增长到 55 a 的 0.13%,而 RCF-FRSW-FD 结构的位移角则从 0 a 的 0.07% 增加到 55 a 的 0.12%。值得注意的是,图 9 为 11 条地震动作用下的层间位移角均值,在结构服役 55 a 时,其中 3 条地震动作用下,中间楼层层间位移角显著减小,整体平均值被拉低,使得曲线形状发生变化。此时,结构已经历长期锈蚀,刚度变化较大,这 3 条地震动的频率可能接近结构的高阶频率,从而导致了该现象。

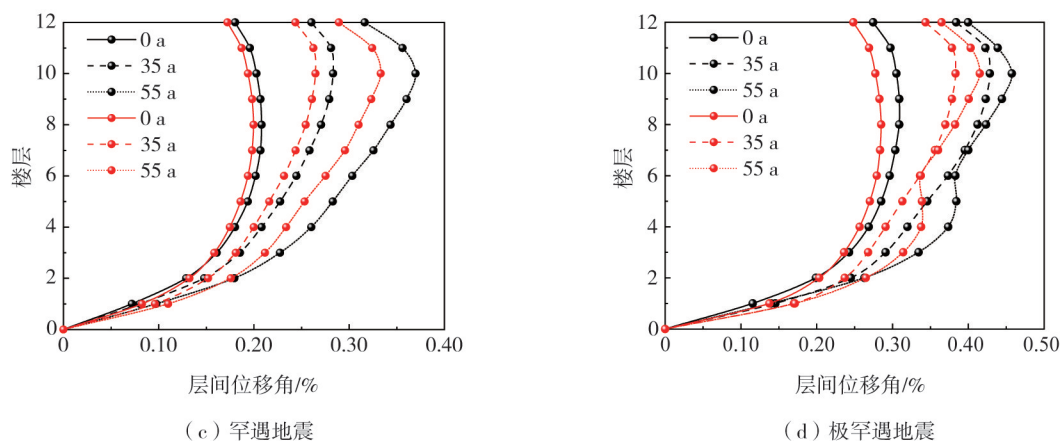
在相同的服役年限,RCF-FRSW-FD 结构显示出在高烈度地震下的抗震优势。例如,在极罕遇地震下,35 a 时 RCF-SW 结构的峰值层间位移角达到 0.43%,RCF-FRSW-FD 结构则为 0.38%,相差 0.05%。然而,在 1~2 层的低楼层中,RCF-FRSW-FD 结构的层间位移角略高于 RCF-SW 结构。这可能是摩擦阻尼器和 CFRP 筋的特性共同作用导致的。摩擦阻尼器在较大位移需求下的耗能效果更显著,而在低层位移需求较小的情况下,其作用尚未完全发挥,可能未达到最佳屈服状态。同时,CFRP 筋具有高强度但延性较低,在低层承受较大剪力时,可能导致位移角略有增加。



(a) 多遇地震



(b) 设防地震



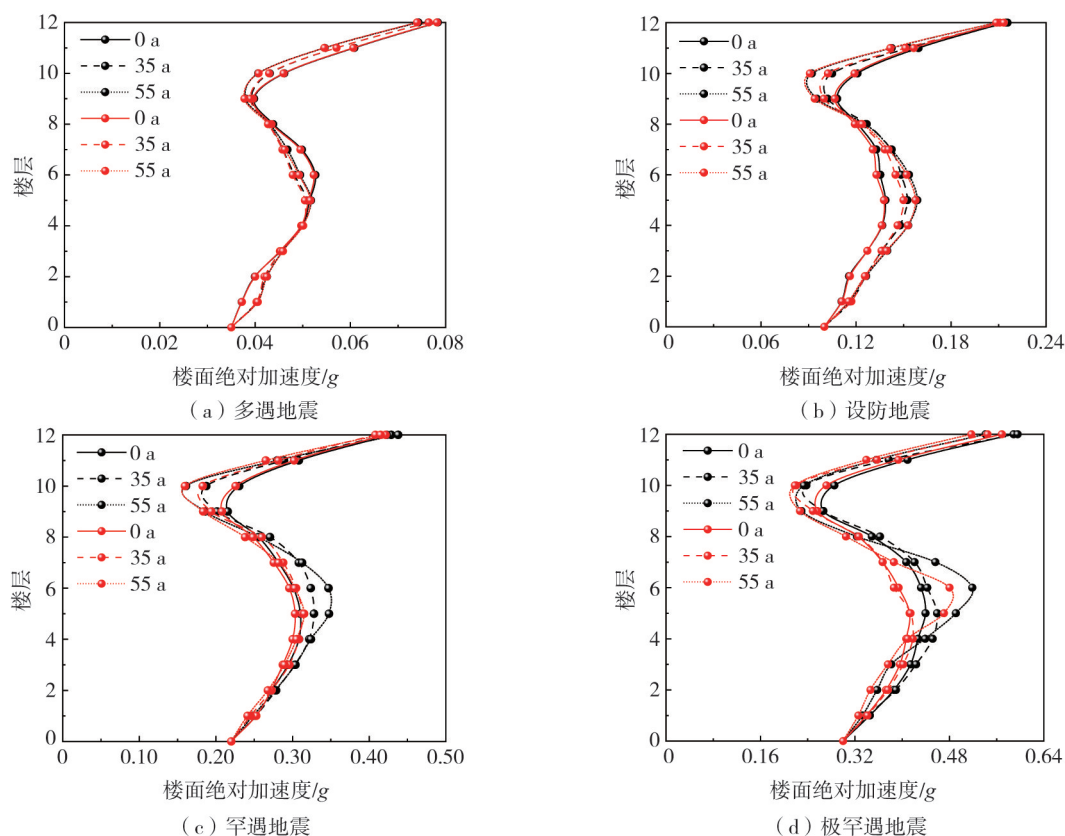
注:黑色曲线为 RCF-SW;红色曲线为 RCF-FRSW-FD。

图 9 不同服役期峰值层间位移角均值

Fig. 9 Mean value of the peak inter-story displacement angles in different service periods

不同地震强度和服役年限下,2种结构峰值楼层加速度均值变化情况,见图10。分析结果表明,随着服役年限的增加,不同楼层受到的影响程度不同。结构4~8层加速度明显增加,而其他楼层的加速度则有所降低,结构各楼层的地震响应不均匀加剧,高层与低层楼面加速度差异明显增大。这种变化会对结构的整体抗震性能产生不利影响,增加地震时的破坏风险。

在相同的服役年限,RCF-FRSW-FD结构的楼层加速度普遍要小于RCF-SW结构,尤其在罕遇地震和极罕遇地震作用下的中间楼层这种优势更为显著。例如,罕遇地震作用下,服役时间55a的RCF-FRSW-FD结构第6层加速度相较于RCF-SW结构降幅达到了15%。



注:黑色曲线为 RCF-SW;红色曲线为 RCF-FRSW-FD。

图 10 不同服役期峰值楼层加速度均值

Fig. 10 Mean Value of acceleration of peak floors in different service periods

## 4 抗震韧性分析

### 4.1 建筑物基本信息

2012 年美国实施了 FEMA P-58<sup>[22-23]</sup> 抗震性能评估理论。在此基础上,国内外发展出一系列评估方法,如奥雅纳公司开发的建筑抗震韧性评级框架体系 REDi<sup>[45]</sup> 以及我国颁布的 GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》<sup>[46]</sup>,这些方法基本流程和理论框架与 FEMA P-58 相近。由于 FEMA-P58 应用广泛,配备了详细的指导文档、专用计算软件性能评估计算工具(performance assessment calculation tool, PACT)以及计算性能组的数量估算工具,因此本文使用 FEMA P-58 理论,采用基于强度的评估方法,利用 PACT 来建立建筑性能模型。通过在 PACT 中输入结构响应的计算结果(峰值层间位移角和峰值楼层加速度)来评估不同服役期 RCF-SW 结构和 RCF-FRSW-FD 结构抗震性能。同时,在后文对相关数据进行本地化适配调整,以更符合我国工程应用需求。

由于本文在 OpenSees 中建立的是 RC 框-剪结构的平面模型,在韧性评估时做了 2 点假设:①参考董尧<sup>[47]</sup>的处理方法,假设 X、Y 方向的刚度相等。尽管这一假设会影响计算精确度,增加结果的不确定性,但不改变损失趋势。②忽略双向地震的影响。根据李兵<sup>[48]</sup>的研究,相比于单向地震,双向地震作用会使结构的反应增加,其幅度能达到 17% 左右,虽然忽略该影响可能导致韧性评估偏于乐观,但对损失变化影响较小。

根据中国建设工程造价信息网统计数据,2023 年下半年广州的高层建安造价费是 3 120 元/m<sup>2</sup>,因此估算本文建筑建安造价为 2 022 万元,将其作为 PACT 中的“核心结构造价”<sup>[49]</sup>。根据核心结构造价占重建成本的 90%<sup>[47]</sup>,计算重建成本为 2 247 万元。按照 2023 广州美元年平均汇率换算重建成本为 319 万美元。由于 PACT 开发时采用 2011 年美国加州地区的费用参数,参考朱汉波<sup>[50]</sup>的处理方式,按照地区 GDP 水平确定广州地区成本调整系数为 0.44。本文建筑类型为办公类,以《全国统一建筑安装工程工期定额》<sup>[51]</sup>为标准估算建筑重置时间,主要土建和装修工程的工期情况见表 3。拆迁时间预计为 7 d<sup>[50]</sup>,考虑装修与安装的穿插施工,建筑物的重建总工期为 552 d。

表 3 主要土建工程工期

Table 3 Duration of the main civil works

工序名称	工期定额编号	工期/d	备注
±0.00 以下无地下室	1~8	35	框架基础(独立柱基)
±0.00 以上办公教学楼工程	1~1024	390	建筑为 12 层,面积小于 10 000 m <sup>2</sup>
装修工程其他建筑工程	2~399	120	一般装修

### 4.2 人员分布模型

人口模型主要用于估算人员损伤情况,FEMA P-58 按照美国建筑人口流动情况给出了部分人口模型,中国人口流动模型与美国在人口密度上相差较大,因此本研究在 PACT 中按照我国办公楼建筑人口流动情况新建人口流动模型。依据 GB 50189—2015《公共建筑节能设计标准》<sup>[52]</sup> 附录 B 中表 4-5,办公建筑人均占有的建筑面积为 10 m<sup>2</sup>/人,换算成 PACT 中的英制单位为 9.29 人/1 000 sf,工作日人员的逐时在室率依据附录 B 中表 4-6 取值,节假日人员的逐时在室率按 FEMA P-58 中提供的商务办公楼人员流动模型<sup>[47,49]</sup>。本文新建的我国建筑人口流动模型见图 11。

### 4.3 构件易损性组和性能组

确定建筑物的性能组是建立建筑物性能模型的重要步骤。依据本文结构设计图,参考 FEMA P-58 易损性组数据库,确定了主要结构构件的性能组分类。使用标准数量估算工具(normative quantity estimation tool),输入建筑物的类别、面积等基本数据,确定非结构构件的性能组分类及其标准数量。本文选取的性能组的类别和数量见表 4。

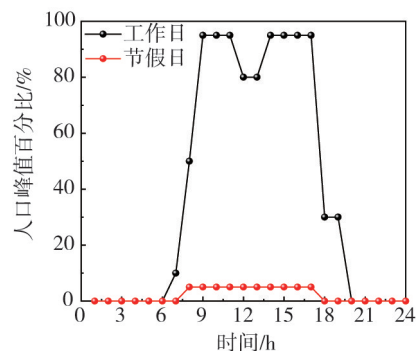


图 11 逐时人口流动模型

Fig. 11 Hourly population mobility model

表4 本文建筑物性能组详细情况

Table 4 Details the building performance group in this paper

构件类型	易损性编号	单位	各层性能集合数量		工程需求参数		
			x 方向	y 方向			
方向相关	梁柱节点单侧	B1041.001a	EA	8.00	8.00	峰值层间位移角	
	梁柱节点双侧	B1041.001b	EA	8.00	8.00		
	剪力墙	B1044.071	144 SF	1层 7.53 2层~12层 6.46	1层 11.30 2层~12层 9.69		
	建筑外幕墙	B2022.001	30 SF	1层 108.50 2层~12层 93	1层 45.21 2层~12层 38.75		
	非结构隔墙	C1011.001a	100 LF	5.81	5.81		
	隔墙饰面	C3011.001a	100 LF	0.44	0.44		
	楼梯	C2011.001b	EA	—	2		
方向不相关	混凝土瓦屋面	B3011.011	100 SF		15.70	峰值楼层加速度	
	高架通道地板	C3027.001	100 SF		43.60		
	吊顶	C3032.001a	250 SF		23.26		
	悬吊灯具	C3034.001	EA		174.40		
	冷水管	D2021.011a	1000 LF		0.24		
	暖通空调管道 1	D3041.011a	1000 LF		0.44		
	暖通空调管道 2	D3041.012a	1000 LF		0.12		峰值楼层加速度
	排气扇	D3041.031a	10 EA		5.23		
	可变风量箱	D3041.041a	10 EA		4.07		
	消防管道	D4011.021a	1000 LF		1.16		
	消防喷头	D4011.031a	100 EA		0.52		
	低压开关柜	D5012.021a	225 AP		0.01		
	牵引电梯	D1014.011	EA		4.00(仅底层)		
	冷水机组	D3031.011a	75 TN		2.65(仅顶层)		
	冷却塔	D3031.021a	75 TN		2.65(仅顶层)		
	空调箱	D3052.011a	4000 CF		12.21(仅顶层)		
	电机控制中心	D5012.013a	EA		2.79(仅顶层)		

注:LF为英尺;SF为平方英尺;CF为立方英尺;EA为个;TN为吨;AP为安培。

#### 4.4 震后韧性指标分析

##### 4.4.1 修复费用和修复时间

基于1000次蒙特卡洛模拟方法,修复费用和修复时间的中位值结果分别见图12、图13(由于多遇地震下,修复费用和修复时间均为0,所以图中未表示)。在设防地震强度作用下,2种结构的修复费用和修复时间在服役年限影响下整体变化幅度较小,但随着地震强度的增加,锈蚀对修复费用和修复时间的影响愈加明显。

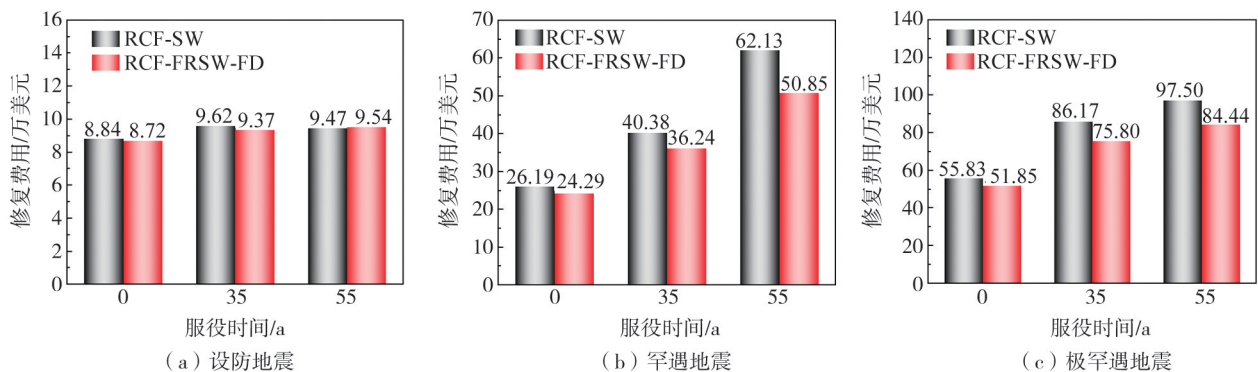


图12 修复费用

Fig. 12 Repair costs

在修复费用方面,结构的修复费用随着服役年限增加而上升,尤其在较强地震作用下,这一趋势更加明显。具体来看,罕遇地震和极罕遇地震作用下,服役 35 a RCF-SW 结构修复费用相比新建结构分别增加了 14.19 万美元和 30.34 万美元,而 RCF-FRSW-FD 结构的修复费用增加量则相对较小,分别为 11.95 万美元和 23.95 万美元。由此可见,RCF-FRSW-FD 结构在较长服役期和较大地震强度下,能够有效降低修复费用,展现出更优的修复经济性。

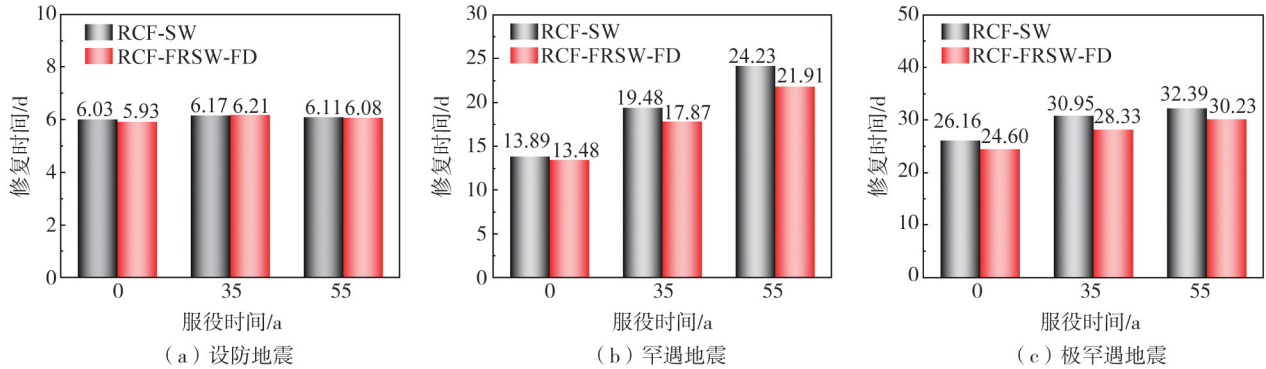


图 13 修复时间  
Fig. 13 Repair time

在修复时间方面,服役期的 2 个结构的修复时间相较于新建结构都有所增长,但 RCF-FRSW-FD 结构的修复时间增幅更小。值得注意的是,地震动响应对结构恢复时间的影响远大于锈蚀的影响。服役时间为 55 a RCF-SW 结构在罕遇地震和极罕遇地震作用下的恢复时间相比设防地震分别增加了 18.12、26.28 d,而 RCF-FRSW-FD 结构的恢复时间分别增加了 15.83、24.15 d。因此,进行有效的减振抗震设计对提升结构的抗震能力至关重要。尤其在面对高强度地震时,减振措施可以显著降低结构的震动响应,从而减少修复所需时间和相关成本。

4.4.2 伤亡人员

在各级地震作用下,2 个结构发生人员伤亡的概率很小,50%分位结果几乎都为 0,因此本文统计了 RCF-SW 结构和 RCF-FRSW-FD 结构人员损失的平均值,见表 5。由表可知,随着地震强度的增加,2 个结构的人员伤亡人数均显著增加,表明地震强度越大,造成的人员伤亡风险也越高。然而,RCF-FRSW-FD 结构在各类地震作用下的伤亡人数普遍低于 RCF-SW 结构,说明 RCF-FRSW-FD 结构在地震中的抗震表现更加优越,能够有效降低人员伤亡的风险。

表 5 伤亡人数  
Table 5 Injuries and fatalities

服役时间/a	指标	结构	地震强度			
			多遇地震	设防地震	罕遇地震	极罕遇地震
0	受伤人数/人	RCF-SW	0	4	48	71
		RCF-FRSW-FD	0	4	47	69
	死亡人数/人	RCF-SW	0	2	25	50
		RCF-FRSW-FD	0	2	24	45
35	受伤人数/人	RCF-SW	0	5	50	71
		RCF-FRSW-FD	0	5	45	67
	死亡人数/人	RCF-SW	0	2	25	50
		RCF-FRSW-FD	0	2	23	43
55	受伤人数/人	RCF-SW	0	5	51	73
		RCF-FRSW-FD	0	5	45	67
	死亡人数/人	RCF-SW	0	2	26	46
		RCF-FRSW-FD	0	2	22	42

随着服役时间的增加,2 个结构的人员伤亡人数变化相对较小,甚至在某些情况下有所减少。这一现象的出现主要与结构锈蚀对加速度的影响有关。易损构件(如吊顶、电梯等)通常是引发人员伤亡的主要因素,而这些构件大多是加速度敏感型的。当结构发生锈蚀后,其刚度下降,导致部分楼层的加速度减小,进而

降低了这些易损构件的震动响应,减轻了人员伤亡的风险。尽管服役时间较长的结构在某些情况下可能出现加速度减小的现象,但对人员伤亡的影响却相对较小。

## 5 结论

本文对服役时间为 0、35、55 a 的普通框架剪力墙(RCF-SW)结构和 RC 框架-带可更换摩擦耗能器的 FRP 混合配筋剪力墙(RCF-FRSW-FD)结构在地震作用下的峰值层间位移角和峰值楼层加速度进行了分析,并结合 FEMA P-58 抗震韧性评估方法,对 2 种结构的震后修复费用、修复时间和人员伤亡进行了对比评估,得出以下主要结论:

1) 锈蚀会导致 RC 结构层间位移角增加、楼层加速度不均匀性加剧,从而降低结构的整体抗震性能。在设防地震作用下,服役时间为 55 a 的 RCF-SW 结构和 RCF-FRSW-FD 相较于新建结构,层间位移角的增幅均超过 60%。因此,在对现有 RC 结构进行抗震性能评估时,必须充分考虑锈蚀的影响。

2) 可更换摩擦耗能器和 FRP 筋的应用显著改善了框架-剪力墙结构的地震响应和破坏概率,能有效提升抗震韧性。两者的结合使结构震后修复费用、修复时间、人员伤亡均有不同程度降低,尤其在较强地震作用下表现得更突出。在罕遇地震作用下,与 RCF-SW 结构相比,服役 55 a 的 RCF-FRSW-FD 结构修复费用、修复时间、受伤人数和死亡人数减少幅度分别为 22%、11%、13%、21%。

3) RCF-FRSW-FD 结构对韧性提升程度与地震动强度和服役时间都呈正相关,且锈蚀对 RCF-RPSCSW 结构的影响相对较小,相比 RCF-SW 结构,RCF-FRSW-FD 结构能够在全寿命周期内维持更好的抗震韧性和经济性。

## 参考文献:

- [1] LI Y M, FU Z J, TAN P, et al. Life cycle resilience assessment of RC frame structures considering multiple-hazard[J]. Structures, 2022, 44: 1844-1862.
- [2] 毕熙荣, 冀昆, 宗成才, 等. 工程抗震韧性定量评估方法研究进展综述[J]. 地震研究, 2020, 43(3): 417-430, 601.  
BI Xirong, JI Kun, ZONG Chengcai, et al. Review on advances in quantitative evaluation methods for engineering seismic resilience[J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(3): 417-430, 601. (in Chinese)
- [3] 解琳琳, 许天赐, 安楠, 等. 高烈度区某 RC 框架-剪力墙结构减震前后抗震韧性对比研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(3): 34-40.  
XIE Linlin, XU Tianci, AN Nan, et al. Comparative study on seismic resilience of a RC frame-shear wall structure before and after seismic reduction in high seismic region[J]. Building Structure, 2023, 53(3): 34-40. (in Chinese)
- [4] OZAKI F, KAWAI Y, KANNO R, et al. Damage-control systems using replaceable energy-dissipating steel fuses for cold-formed steel structures: Seismic behavior by shake table tests[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(5): 787-795.
- [5] 吕西林, 毛苑君. 带有可更换墙脚构件剪力墙的设计方法[J]. 结构工程师, 2012, 28(3): 12-17.  
LU Xilin, MAO Yuanjun. Design method for RC shear walls with replaceable foot parts[J]. Structural Engineers, 2012, 28(3): 12-17. (in Chinese)
- [6] 毛苑君, 吕西林. 带可更换墙脚构件剪力墙的低周反复加载试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6): 2029-2040.  
MAO Yuanjun, LU Xilin. Quasi-static cyclic tests of RC shear wall with replaceable foot parts[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(6): 2029-2040. (in Chinese)
- [7] 刘其舟, 蒋欢军. 新型可更换墙脚部件剪力墙设计方法及分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 37-44.  
LIU Qizhou, JIANG Huanjun. Design method of new type of reinforced concrete shear wall with replaceable corner components and its analysis[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(1): 37-44. (in Chinese)
- [8] 汪梦甫, 陈遵胜. 带可更换墙脚构件的叠合板混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(5): 54-62.  
WANG Mengfu, CHEN Zunsheng. Experimental study on seismic performance of superimposed concrete shear wall with replaceable toes[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42(5): 54-62. (in Chinese)
- [9] 汪梦甫, 曾雨薇. 带可更换摩擦耗能器组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(6): 36-46.  
WANG Mengfu, ZENG Yuwei. Experimental study on seismic performance of combined shear wall with replaceable friction dampers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(6): 36-46. (in Chinese)
- [10] 徐龙河, 陈曦, 肖水晶. 内置碟簧自复位钢筋混凝土剪力墙拟静力试验及损伤分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(7): 56-64.  
XU Longhe, CHEN Xi, XIAO Shuijing. Quasi-static test and damage analysis on self-centering reinforced concrete shear wall with disc spring devices[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(7): 56-64. (in Chinese)
- [11] 王浩祚, 蒋欢军. 带新型可更换墙脚部件剪力墙的抗震性能分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(2): 159-165.  
WANG Haozuo, JIANG Huanjun. Seismic performance analysis of earthquake resilient shear wall with new replaceable corner components[J].

- Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2023, 55(2): 159-165. (in Chinese)
- [12] 郑山锁, 孙龙飞, 刘小锐, 等. 近海大气环境下锈蚀 RC 框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(12): 63-71.  
ZHENG Shansuo, SUN Longfei, LIU Xiaorui, et al. Experimental research on seismic behaviors of beam-column joints of corroded RC frame in the coastal atmosphere[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(12): 63-71. (in Chinese)
- [13] DU Y G, CLARK L A, CHAN A H C. Residual capacity of corroded reinforcing bars[J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 57(3): 135-147.
- [14] 郑山锁, 杨建军, 郑跃, 等. 锈蚀钢筋混凝土黏结滑移性能综述[J]. 材料导报, 2020, 34(增刊 2): 1221-1226.  
ZHENG Shansuo, YANG Jianjun, ZHENG Yue, et al. Review of research on bond-slip of corroded reinforced concrete[J]. Materials Reports, 2020, 34(Sup. 2): 1221-1226. (in Chinese)
- [15] XU Y D, SONG Y F. Chemical-mechanical transformation of the expansion effect for nonuniform steel corrosion and its application in predicting the concrete cover cracking time[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 127: 104376.
- [16] ZHAO Y X, REN H Y, DAI H, et al. Composition and expansion coefficient of rust based on X-ray diffraction and thermal analysis[J]. Corrosion Science, 2011, 53(5): 1646-1658.
- [17] YU X H, DAI K Y, LI Y S, et al. Seismic resilience assessment of corroded reinforced concrete structures designed to the Chinese codes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2021, 20(2): 303-316.
- [18] 周炎. 酸性大气环境下 RC 框架剪力墙结构抗震性能与地震韧性评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.  
ZHOU Yan. Evaluation on seismic performance and earthquake resilience of RC frame-wall structures in acidic atmosphere[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021. (in Chinese)
- [19] 陈阳, 胡翔, 吴泽娟, 等. 海洋环境下 FRP 增强混凝土构件结构劣化和性能退化的研究综述[J]. 材料导报, 2023, 37(18): 83-93.  
CHEN Yang, HU Xiang, WU Zemei, et al. Review on the deterioration of FRP reinforced concrete structures subjected to marine environment[J]. Materials Reports, 2023, 37(18): 83-93. (in Chinese)
- [20] 汪梦甫, 朱旭帆. 高阻尼 ECC 及 CFRP 筋混凝土带暗支撑剪力墙抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(5): 24-34.  
WANG Mengfu, ZHU Xufan. Experimental study on seismic performance of high damping ECC and CFRP bars reinforced concrete shear wall with concealed bracing[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(5): 24-34. (in Chinese)
- [21] 李益州. 混合配筋超高性能混凝土剪力墙抗震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.  
LI Yizhou. Study on seismic behavior of hybrid reinforced ultra-high performance concrete shear walls[D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)
- [22] FEMA. Seismic performance assessment of buildings volume 1: Methodology: FEMA P-58-1[S]. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [23] FEMA. Seismic performance assessment of buildings volume 2: Implementation Guide: FEMA P-58-2[S]. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [24] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [25] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [26] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [27] 杨威. RC 框架结构地震易损性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.  
YANG Wei. Study on the seismic fragility of RC frame structures[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [28] 许家婧, 朱鹏, 屈文俊. 钢筋-GFRP 筋增强混凝土梁的疲劳力学性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(5): 2318-2328.  
XU Jiajing, ZHU Peng, QU Wenjun. Fatigue behaviors of steel bars-GFRP bars reinforced concrete beams[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2022, 39(5): 2318-2328. (in Chinese)
- [29] 曾雨薇. 带可更换摩擦耗能器组合剪力墙抗震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.  
ZENG Yuwei. Experimental study on seismic performance of combined shear wall with replaceable friction dampers[D]. Changsha: Hunan University, 2020. (in Chinese)
- [30] 徐超. 应用于耗能墙脚的摩擦阻尼器的抗震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.  
XU Chao. Study on seismic performance of friction damper installed in energy-consuming wall toe[D]. Changsha: Hunan University, 2022. (in Chinese)
- [31] HOULT R. Universal plastic hinge length for reinforced concrete walls[J]. ACI Structural Journal, 2022, 119(4): 75-83.
- [32] 缪志伟. 钢筋混凝土框架剪力墙结构基于能量抗震设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.  
MIAO Zhiwei. Study on energy-based seismic design methodology for reinforced concrete frame-shear wall structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [33] 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.

- [34] XIAO S Y, WANG M F. Experimental study on hybrid FRP-steel RC shear wall with replaceable dampers[J]. *Steel and Composite Structures*, 2024, 52(2): 217.
- [35] OTANL S, KABEYASAWA T, SHIOHARA H, et al. Analysis of the full scale seven story reinforced concrete test structure[J]. *Special Publication*, 1984, 84: 203–239.
- [36] GHOSH J, PADGETT J E. Aging considerations in the development of time-dependent seismic fragility curves[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(12): 1497–1511.
- [37] ENRIGHT M P, FRANGOPOL D M. Probabilistic analysis of resistance degradation of reinforced concrete bridge beams under corrosion[J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(11): 960–971.
- [38] DENG P, ZHANG C, PEI S L, et al. Modeling the impact of corrosion on seismic performance of multi-span simply-supported bridges[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 185: 193–205.
- [39] 李一明. 结构全寿命周期抗震韧性评估方法研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.  
LI Yiming. Methodology for assessing life-cycle seismic resilience of structures[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023. (in Chinese)
- [40] VISHWANATH B S, BANERJEE S. Life-cycle resilience of aging bridges under earthquakes[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(11): 04019106.
- [41] LI Y R, ZHENG S S, DONG L G, et al. Tensile properties test and simulation of non-uniform corroded reinforcement[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(9): 991–998.
- [42] YANG Z R, LI Y M, TAN P, et al. Framework for lifecycle resilience assessment of earthquake-damaged coastal RC structures considering non-uniform corrosion[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 310: 118692.
- [43] CORONELLI D, GAMBAROVA P. Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: Modeling guidelines[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(8): 1214–1224.
- [44] 邓鹏, 周锦鹏, 黄频. 锈蚀钢筋混凝土框架结构的抗震韧性评估[J]. *地震工程与工程振动*, 2023, 43(3): 23–34.  
DENG Peng, ZHOU Jinpeng, HUANG Pin. Evaluation of seismic resilience of corroded reinforced concrete frame structure[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2023, 43(3): 23–34. (in Chinese)
- [45] ALMUFTI I, WILLFORD M. REDi rating system: resilience-based earthquake design initiative for the next generation of buildings[R]. London: Arup Group, 2013.
- [46] GB/T 38591—2020 建筑抗震韧性评价标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.  
GB/T 38591—2020 Standard for seismic resilience assessment of buildings[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [47] 董尧. RC 框架-剪力墙结构的抗震韧性评级与一致倒塌风险决策[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
DONG Yao. Seismic resilience rating and decision-making of uniform collapse risk of RC frame-shear wall structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [48] 李兵. 钢筋混凝土框-剪结构多维非线性地震反应分析及试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
LI Bing. Nonlinear analysis of RC frame-wall structures to multiple earthquake excitations and experimental research[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [49] 崔明哲, 王翠坤, 陈才华, 等. 基于 FEMA P-58 方法的既有高层剪力墙结构抗震性能评估[J]. *工程抗震与加固改造*, 2021, 43(5): 10–17.  
CUI Mingzhe, WANG Cuikun, CHEN Caihua, et al. Seismic performance assessment of existing high-rise shear-wall structure based on FEMA P-58 methodology[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2021, 43(5): 10–17. (in Chinese)
- [50] 朱汉波. 基于全概率理论的框架-剪力墙结构抗震性能评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.  
ZHU Hanbo. Frame-shear wall structure seismic performance evaluation based on the full probability theory[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2015. (in Chinese)
- [51] 中华人民共和国建设部. 全国统一建筑安装工程工期定额[M]. 北京: 中国计划出版社, 2000.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. National uniform construction and installation engineering schedule quotas[M]. Beijing: China Planning Press, 2000. (in Chinese)
- [52] GB 50189—2015 公共建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
GB 50189—2015 Design standard for energy efficiency of public buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)