

DOI:10.11918/202312068

# 面向抗震韧性评价的型钢混凝土柱易损性函数

李磊<sup>1,2</sup>, 王菲菲<sup>1</sup>, 代旷宇<sup>3</sup>, 于晓辉<sup>4</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 西部绿色建筑国家重点实验室(西安建筑科技大学), 西安 710055;  
3. 郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001; 4. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 为满足型钢混凝土(steel reinforced concrete, SRC)结构地震损失评估及抗震韧性评价的需求, 建立 SRC 柱构件的地震易损性函数十分关键。本文首先基于文献调研, 结合 JGJ 138—2016《组合结构设计规范》, 从国内外文献中筛选了 227 根拟静力循环加载的 SRC 柱, 建立标准化的 SRC 柱试验数据库。其次, 考虑失效模式的差异性, 将构件分为延性 SRC 柱和脆性 SRC 柱, 并给出了不同类别的构件损伤等级划分标准及对应的修复方法。然后, 以位移角为工程需求参数, 分别提取了各构件对应不同损伤等级的位移角限值, 采用 FEMA P-58 方法, 建立了不同类别的 SRC 柱在各损伤等级下的易损性函数。最后, 给出了与 GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》相容的易损性函数参数表, 并分析了抗震等级和轴压比对 SRC 柱易损性函数参数及易损性曲线的影响。最终, 通过分析一幢型钢混凝土框架结构办公楼的抗震韧性, 说明了所提出的易损性函数在抗震韧性评价中的作用。

**关键词:** 型钢混凝土柱; 试验数据库; 损伤状态; 易损性函数; 抗震韧性评价标准

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)01-0024-11

## Fragility functions of steel reinforced concrete column for seismic resilience assessment

LI Lei<sup>1,2</sup>, WANG Feifei<sup>1</sup>, DAI Kuangyu<sup>3</sup>, YU Xiaohui<sup>4</sup>

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

2. State Key Lab of Green Building in Western (Xi'an University of Architecture and Technology), Xi'an 710055, China;

3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001, China;

4. School of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

**Abstract:** To meet the needs of earthquake losses and structural seismic resilience evaluation, it is key to establish the seismic fragility functions. A database containing 227 SRC columns under repeated cyclic loads is established based on the existed experiments in this study. All the SRC columns satisfy the requirements of the Chinese 'code for design of composite structures' (JGJ 138—2016). Considering the difference in failure model, the components are divided into ductile SRC columns and brittle SRC columns. The damage state classification criteria and corresponding repair methods for different groups are given. Then, the drift is taken as the engineering demand parameter (EDP), the drift limits of each column corresponding to different damage states are extracted based on the hysteresis information. After that, the fragility functions of SRC columns under different groups and damage states are developed using FEMA P-58 method. Finally, the table of fragility function parameters that compatible with the 'standard for seismic resilience assessment of buildings' (GB/T 38591—2020) is given. The effects of seismic grade and axial load ratio on the fragility function parameters and fragility curve of SRC columns are compared. The role of the proposed fragility function in seismic resilience evaluation is demonstrated, by analyzing the seismic resilience of an SRC frame structure office building.

**Keywords:** SRC column; test database; damage state; fragility function; standard for seismic resilience assessment

近年来的震害调查结果表明, 基于中国规范设计的建筑物具有较高的抗倒塌安全储备, 在地震中

鲜有倒塌, 但仍有重度破坏风险, 破坏严重者整体结构需拆除重建<sup>[1]</sup>。上述问题造成了极高的经济损

收稿日期: 2023-12-25; 录用日期: 2024-03-04; 网络首发日期: 2024-06-20

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240619.1053.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52278531, 52278492); 陕西省科技计划一般项目(2024SF-YBXM-672); 中国博士后基金面上项目(2023M733247)

作者简介: 李磊(1982—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 代旷宇, daikuangyu@zzu.edu.cn

失,严重影响社会的可持续发展。因此,针对建筑结构的抗震性能评价不仅需关注其安全性,亦需关注其抗震韧性。

中国于 2020 年颁布的 GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》<sup>[2]</sup>给出了针对既有建筑的抗震韧性评价流程。其中,构件易损性函数描述了构件在地震中处于不同损伤状态的可能性,是计算结构震后直接经济损失和间接经济损失的重要依据。此前,国内外关于易损性函数研究已取得一些相关研究成果。如 FEMA P-58 项目研究期间, Brown 等<sup>[3]</sup>结合 106 榀钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)构件建立了满足不同抗震构造措施的 RC 框架柱易损性函数;Goksu<sup>[4]</sup>采用 33 榀 RC 框架及框架柱的试验数据建立了再生混凝土柱构件的易损性函数,并与普通混凝土柱试件进行了对比,表明在高损伤状态下再生混凝土柱的损伤超越概率高于普通柱;Cardone<sup>[5]</sup>基于 18 榀 RC 柱构件的拟静力试验数据,建立了满足 20 世纪 70 年代前非抗震构造 RC 柱构件的易损性函数;Yurdakul 等<sup>[6]</sup>构建了 FRP 加固的钢筋混凝土梁柱节点的易损性函数。国内,《建筑抗震韧性评价标准》<sup>[2]</sup>给出压弯破坏的 RC 柱对应各极限状态的位移角取值及对数标准差;谢贤鑫等<sup>[7]</sup>建立了不同类型砌体填充墙对应于不同损伤状态的易损性曲线,分析了砌体填充墙的破坏特征和变形能力;纪晓东等<sup>[8]</sup>分别采用位移角和连梁转角为指标参量,建立了 RC 剪力墙和连梁的易损性曲线;代旷宇等<sup>[9-11]</sup>建立了满足中国现有规范的未锈蚀及锈蚀的 RC 框架柱构件易损性函数,结果表明高锈蚀损伤会造成试件位移能力的明显下降,并会降低易损性曲线的不确定性。值得说明的是,虽然上述研究给出了各类 RC 柱构件的易损性函数,但既有的 RC 柱构件的易损性函数并不适用于建筑结构中的 SRC 柱,这限制了《建筑抗震韧性评价标准》<sup>[2]</sup>在实际工程中的应用。此外,由于 SRC 柱承载能力高及抗震性能良好,其被广泛用于高烈度区,故建立 SRC 柱易损性函数十分必要。

鉴于此,本文主要研究 SRC 柱的易损性函数。首先建立了含有 227 榀 SRC 柱的拟静力试验数据库。其次,以位移角为工程需求参数,提取了不同损伤等级下 SRC 柱位移角限值。基于 FEMA P-58 方法建立了 SRC 柱的易损性函数,并完成了拟合优度检验。然后,讨论了抗震等级及轴压比对 SRC 柱易损性曲线的影响。最后,结合一个型钢混凝土组合框架的分析案例,阐述了 SRC 柱的易损性函数在型钢混凝土组合结构抗震韧性分析中的作用。

## 1 SRC 柱试验数据库的建立

目前,国内外在往复荷载作用下 SRC 结构抗震性能方面已积累了大量的试验资料<sup>[1,12-36]</sup>,这为建立 SRC 柱的易损性函数提供了数据基础。为满足中国 SRC 结构抗震韧性评价的实际需要,参考《组合结构设计规范》<sup>[37]</sup>,考虑构件的含钢率  $\rho_{ss}$ 、纵筋配筋率  $\rho_l$ 、体积配箍率  $\rho_{sv}$ 、设计轴压比  $n_d$ 、翼缘宽厚比  $b_f/t_f$ 、腹板宽厚比  $h_w/t_w$  及箍筋间距  $s$  等构造要求对 SRC 柱进行筛选。规范中对各参数的构造要求及参数计算公式见表 1。

表 1 SRC 柱筛选准则

Tab. 1 The criteria of selecting the SRC columns

参数	计算公式	构造要求
含钢率	$\rho_{ss} = A_{ss}/A_g$	$4\% \leq \rho_{ss} \leq 15\%$
纵筋配筋率	$\rho_l = A_l/A_g$	$\rho_l \geq 0.8\%$
体积配箍率	$\rho_{sv} = \sum_{i=1}^n n_l A_{svi} / (A_{cor} \times s)$	当 $\lambda_s \leq 2$ 时, $\rho_{sv} \geq 1.2\%$
设计轴压比	$n_d = N_d / (f_{ck} A_c / \gamma_m + f_{ysk} A_{ss} / \gamma_s)$	$n_d \leq 0.95$
翼缘宽厚比	$b_f/t_f$	$b_f/t_f \leq 23$
腹板宽厚比	$h_w/t_w$	$h_w/t_w \leq 96$
箍筋间距		$s \leq 15d$

注:  $A_{ss}$ 、 $A_c$ 、 $A_g$ 、 $A_l$ 、 $A_{cor}$  分别为型钢截面面积、混凝土截面面积、柱截面面积、纵筋截面面积、核心区混凝土面积;  $f_{ck}$ 、 $f_{ysk}$  为混凝土轴心抗压强度标准值、型钢屈服强度标准值;  $\gamma_m$ 、 $\gamma_s$  为混凝土和型钢的分项系数,参照 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》,分别取值为 1.4、1.1;  $N_d = \gamma_C \times N_{Gk} + \gamma_Q \times N_{Qk}$ ,  $\gamma_C$  为永久荷载的分项系数,  $\gamma_Q$  为可变荷载的分项系数,参照 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》,分别取值 1.2、1.4;  $N_{Gk}$ 、 $N_{Qk}$  分别为永久荷载和可变荷载;  $b_f$ 、 $t_f$ 、 $h_w$ 、 $t_w$  分别为型钢翼缘宽度和厚度、腹板高度和厚度。

根据表 1 最终筛选出满足规范要求的 SRC 柱试件 227 榀,其设计轴压比  $n_d$ 、剪跨比  $\lambda_s$  (柱有效高度  $L$  与横截面高度  $h$  之比) 等设计参数的分布情况见图 1。值得说明的是,根据数据库中试件加载时的边界条件,其可分为悬臂式和建研式加载,试验加载装置及构件受力简图见图 2。其中悬臂式加载由竖向布置的千斤顶与滚轴与试件连接,用于施加恒定的轴向力,水平布置一只制动器与试件铰接,用于施加水平力(图 2(a));建研式加载装置主要由 L 形大梁、平行四连杆和水平制动器等组成(图 2(b))。平行四连杆使 L 形大梁在竖向和水平方向自由移动,但不发生转动,从而使柱顶为嵌固端。另外,为统一对比,需对数据进行归一化处理。本文将所有构件的数据转换为假定试件为悬臂柱加载时的力-转角数据。

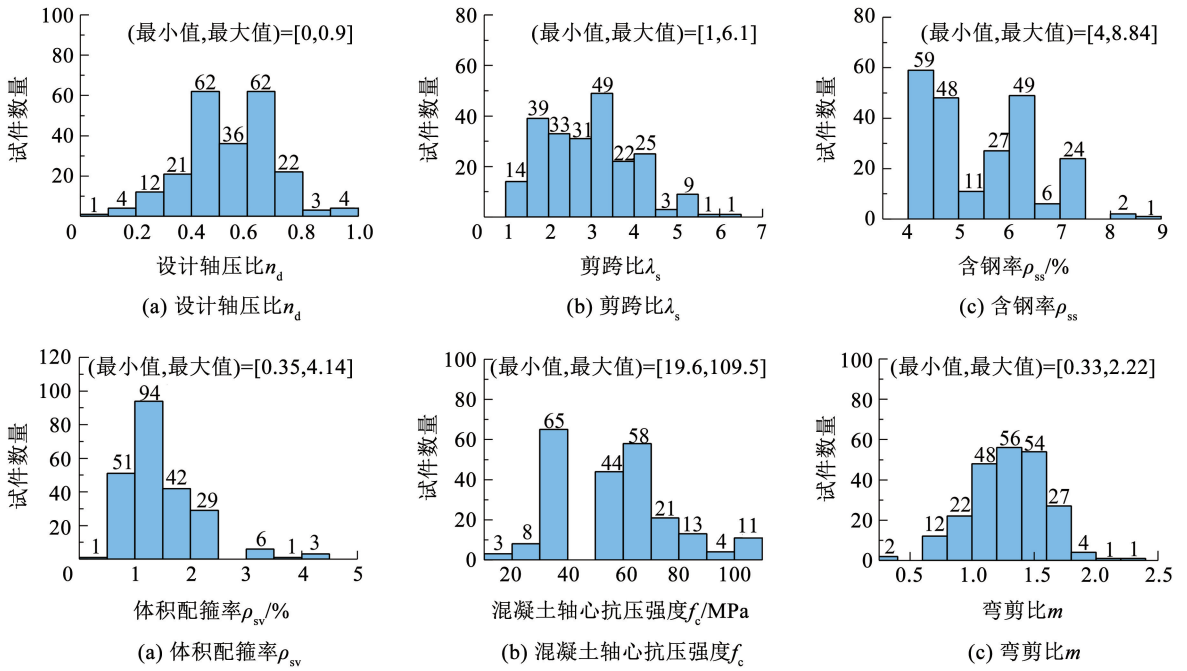


图 1 各设计参数分布直方图

Fig. 1 The distribution of the design parameters of the SRC columns

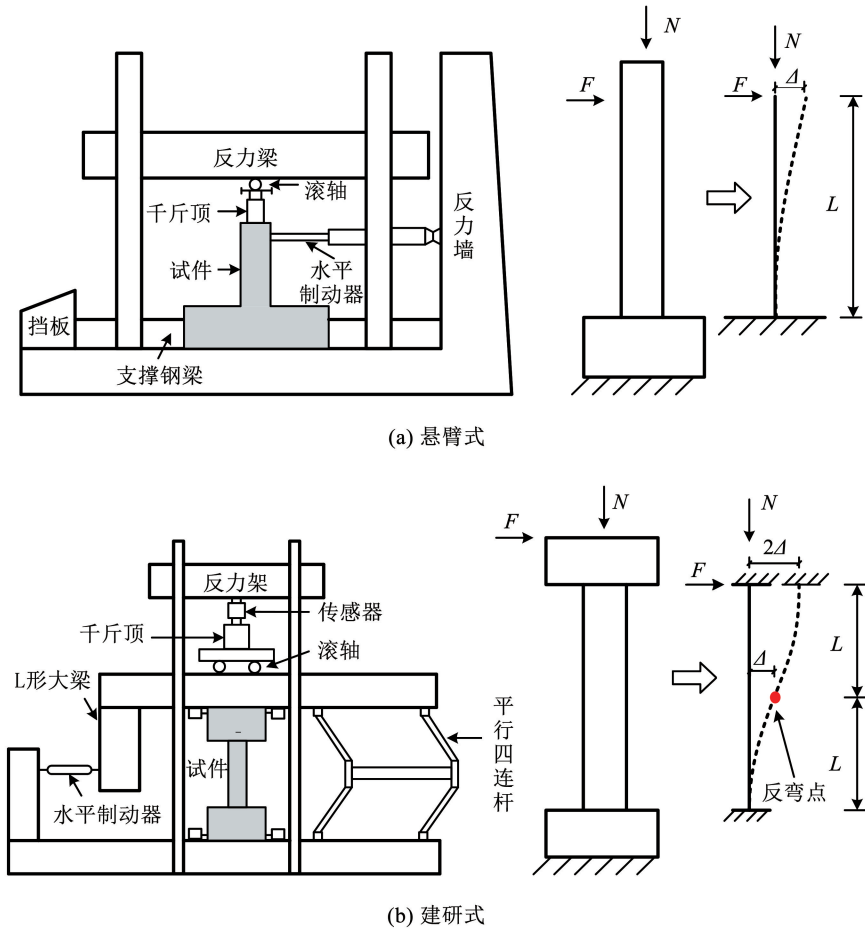


图 2 试验加载装置及受力分析模型

Fig. 2 Test setup and force analysis model

## 2 SRC 柱损伤等级划分及数据提取

### 2.1 SRC 柱损伤等级划分及修复方法

由于试件来自不同文献,其在截面尺寸、失效模式等方面有所不同,为考虑这些差异性,更加精确的构建 SRC 柱的易损性函数,需对构件加以区分。Yao 等<sup>[38]</sup>的研究表明,剪跨比  $\lambda_s$  和弯剪比  $m$  (柱抗弯承载力  $M_u$  与抗剪承载力  $V_u$  之比) 是影响构件失效的关键因素,故根据  $\lambda_s$  和  $m$  将 SRC 柱分为延性柱和偏脆性柱。延性柱极限承载力由抗弯承载力  $M_u$  控制,此类试件一般发生弯曲破坏,其破坏特征见图 3(a)。偏脆性柱极限承载力由抗剪承载力  $V_u$  控制,此类试件一般发生剪切破坏,其破坏特征见图 3(b)。对于 SRC 柱,  $M_u$  及  $V_u$  可根据《组合结构设计规范》<sup>[37]</sup> 中提供的公式计算。具体划分准则为:若文献中明确给出试件的破坏模式且为弯曲破坏时,则将其归类为延性柱,否则为偏脆性柱;若文献中没有给出破坏模式,则通过  $\lambda_s$  和  $m$  划分,当

$\lambda_s \leq 2$  时,为偏脆性柱;当  $\lambda_s \geq 3$  时,为延性柱;当  $2 < \lambda_s < 3$  时,若  $m < 1$ ,则为延性柱,否则为偏脆性柱。在所筛选的 227 榀构件中,延性 SRC 柱和偏脆性 SRC 柱的数量分别为 96 榀和 131 榀。

一般而言,延性 SRC 柱变形能力相对较好,不同损伤等级之间破坏特征的差别较为显著,因此本文参考季静等<sup>[39-41]</sup>的研究将延性 SRC 柱的损伤状态分为 5 个等级(DS1 ~ DS5),分别对应基本完好、轻微、中度、比较严重、严重。偏脆性 SRC 柱变形能力较差,屈服点的位移角与峰值点的位移角相距较近,承载力超过峰值点后迅速下降。因此本文将其损伤状态分为 3 个等级(DS1 ~ DS3),分别对应基本完好、中度、严重。不同类别 SRC 柱各损伤等级对应的典型破坏特征见图 3。此外,根据结构韧性评价要求,为确定震后构件的修复费用,需确定构件各损伤等级对应的修复方法。参考 FEMA P-58<sup>[42]</sup> 及蒋欢军等<sup>[43]</sup>的研究,结合文献中各试件试验现象特征,确定不同损伤等级下试件的损伤现象及对应的修复方法,见表 2。

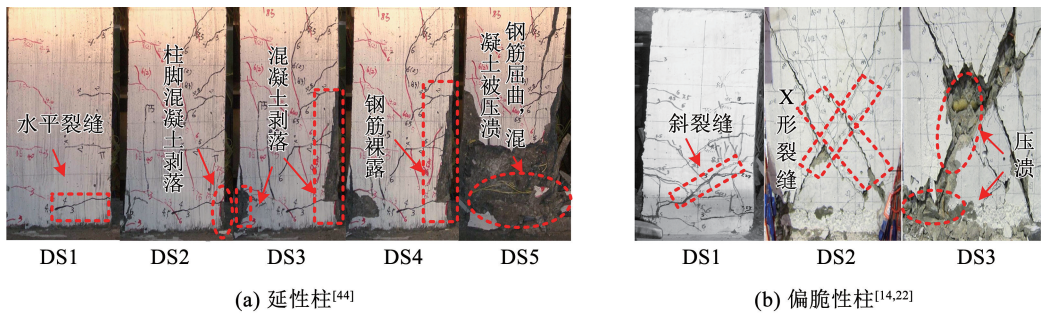


图 3 SRC 柱不同损伤等级对应的破坏特征

Fig. 3 Failure characteristics of SRC columns with different damage states

表 2 损伤等级划分及修复方法

Tab. 2 Damage classification and corresponding methods of repair for SRC columns

损伤等级	试验现象	修复方法
DS1	塑性铰区出现水平裂缝,最大宽度不超过 0.5 mm	注射环氧树脂修复裂缝
DS2	柱角混凝土出现剥落,型钢受压翼缘开始屈服,荷载接近峰值承载力	用环氧树脂修复裂缝,高强砂浆修复保护层
延性柱 DS3	裂缝宽度 > 2 mm,钢筋外部的混凝土保护层开始剥落	更换受损混凝土
DS4	混凝土大面积剥落,纵筋和箍筋屈服并暴露在外,柱根部破坏较严重	更换受损混凝土和受损钢筋
DS5	混凝土保护层几乎完全脱落,纵筋屈曲严重,箍筋被拉开,型钢外露	拆除
DS1	柱腹部出现斜裂缝,纵筋屈服	注射环氧树脂修复裂缝,并采取措施,提高延性
偏脆性柱 DS2	形成“X”形交叉斜裂缝,型钢腹板及部分箍筋屈服	更换受损混凝土和受损钢筋,并采取措施,提高延性
DS3	斜压小柱体被压溃,纵筋鼓曲,部分箍筋断裂	拆除

### 2.2 SRC 柱各损伤等级的数据提取

考虑 SRC 柱损伤等级与位移变形的强相关性,以位移角作为 SRC 柱的工程需求参数,并构建易损性函数。参考季静等<sup>[39]</sup>的研究,采用图 4 所示的特征点定义方法确定 SRC 柱在各损伤状态对应的位移角。图 4(a)为延性 SRC 柱的试验骨架曲线,其中 A 点为采用 Park 法确定的屈服点, B 点为峰值

点, C、D、E 点分别为承载力下降至 90%、80%、70% 峰值荷载时对应的点。A ~ E 点对应的  $\theta_1 \sim \theta_5$  分别为 DS1 ~ DS5 状态对应的位移角。图 4(b)为偏脆性 SRC 柱的试验骨架曲线,采用  $\theta_1$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_5$  分别作为 DS1 ~ DS3 状态对应的位移角限值,分别对应屈服点、承载力下降至 90% 及 70% 时的点。本文提取了数据库中 SRC 柱在各损伤等级下的位移角数据。

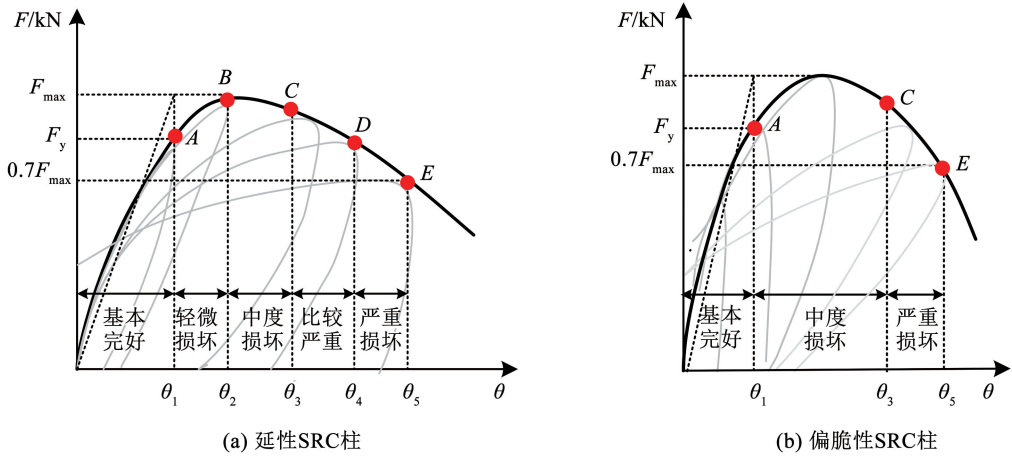


图 4 SRC 柱损伤等级划分

Fig. 4 Damage states of SRC columns

### 3 SRC 柱易损性函数的建立

#### 3.1 易损性函数的定义

构件的易损性函数代表在给定需求参数下,其达到各损伤等级的超越概率,既有研究往往假定构件的易损性函数服从对数正态分布<sup>[5]</sup>。SRC 柱第  $i$  个损伤等级的超越概率  $P_i(d)$  可表达为

$$p_i(d) = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_i} \ln \left( \frac{d}{\bar{\theta}_i} \right) \right] \quad (1)$$

式中:  $\Phi$  为标准正态累积分布函数,  $d$  为工程需求参数,  $\bar{\theta}_i$  为第  $i$  个损伤等级下 SRC 柱位移角的中位值,  $\beta_i$  为第  $i$  个损伤等级下的对数标准差。

#### 3.2 易损性函数的参数计算

本文基于对数正态分布计算 SRC 柱各损伤等级的超越概率,参考 FEMA P-58<sup>[42]</sup>, SRC 柱第  $i$  个损伤等级对应的位移角限值的中位值  $\bar{\theta}_i$  按下式计算:

$$\bar{\theta}_i = \exp \left( \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^{M_i} \ln \theta_{ij} \right) \quad (2)$$

式中:  $\theta_{ij}$  为第  $j$  个样本在第  $i$  个损伤等级对应的位移角限值,  $M_i$  为第  $i$  个损伤等级下剔除离群值后的试

验样本数,离群值可采用 Peirce 准则确定<sup>[45]</sup>。对数标准差  $\beta_i$  反映了 SRC 数据集中第  $i$  个损伤等级对应位移角的离散程度。按下式计算:

$$\beta_i = \sqrt{\beta_{r,i}^2 + \beta_{u,i}^2} \quad (3)$$

式中  $\beta_i$  源自两部分相互独立的标准偏差,分别是本质不确定性引起对数标准差  $\beta_{r,i}$  及主观不确定性导致的离散性  $\beta_{u,i}$ 。对于  $\beta_{u,i}$  可参考 FEMA P-58 建议取值为 0.1。  $\beta_{r,i}$  可由下式计算:

$$\beta_{r,i} = \sqrt{\frac{1}{M_i - 1} \sum_{j=1}^{M_i} \left( \ln \frac{\theta_{ij}}{\bar{\theta}_i} \right)^2} \quad (4)$$

此外,在建立易损性函数时,有可能遇到两条曲线交叉的情况,而对于这种情况则需采用式(5)~(6)对对数中位值和标准差进行修正:

$$\beta'_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i \quad (5)$$

$$\bar{\theta}'_i = \exp(1.28(\beta'_i - \beta_i) + \ln \bar{\theta}_i) \quad (6)$$

式中:  $N$  为交叉易损性曲线的数量,  $\beta'_i$  为修正后对数标准差,  $\bar{\theta}'_i$  为修正后位移角限值的中位值。根据式(2)~(6),可求得 SRC 柱各损伤状态对应的易损性函数参数值,见表 3。

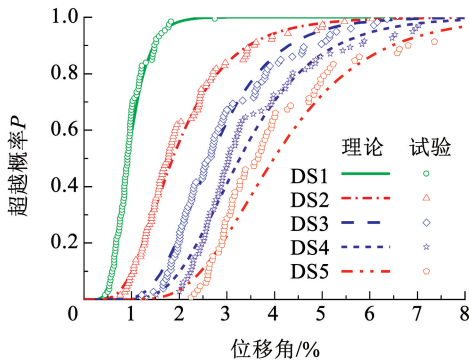
表 3 SRC 柱易损性函数参数及拟合优度检验结果

Tab. 3 Fragility function parameters and Kolmogorov-Smirnov test results of SRC columns

损伤等级	样本数	$\bar{\theta}_i/\%$	$\beta_{r,i}$	$\beta_{u,i}$	$\beta_i$	$H$	$H_{cri}$	检验结果	
延性柱	DS1	96	0.92	0.34	0.1	0.36	0.088	0.138	通过
	DS2	96	1.86	0.47	0.1	0.48	0.082	0.138	通过
	DS3	96	2.65	0.45	0.1	0.38	0.098	0.138	通过
	DS4	89	3.27	0.37	0.1	0.38	0.130	0.144	通过
	DS5	69	3.99	0.30	0.1	0.38	0.087	0.163	通过
脆性柱	DS1	131	0.69	0.57	0.1	0.58	0.059	0.119	通过
	DS2	130	1.81	0.48	0.1	0.46	0.079	0.119	通过
	DS3	105	2.30	0.42	0.1	0.46	0.077	0.133	通过

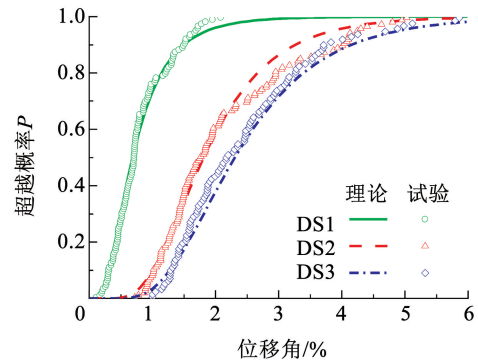
### 3.3 SRC 柱易损性曲线

图 5 为 SRC 柱各损伤等级下的试验样本点及利用式(1)计算得到的易损性曲线。由图 5 可知, SRC 柱对应的各损伤等级易损性曲线与试验数据的累积频数分布较为吻合, 各损伤等级的试验数据基本符合对数正态分布的假设。由图 5(a)可看出延性 SRC 柱在 DS4 ~ DS5 状态之间的差异性相较于其



(a) 延性SRC柱易损性曲线

余相邻损伤等级间的差异性较小, 这是由于 SRC 试件在 DS4 状态之后处于加载阶段末期, 试件承载力处于较快下降阶段, 使得 DS4 与 DS5 对应的位移角接近所导致。此外, 对比相同损伤等级下延性和偏脆性试件的易损性曲线, 可发现在相同的位移角下偏脆性试件的超越概率要远高于延性试件, 这是由偏脆性试件的变形能力普遍低于延性试件所导致的。



(b) 偏脆性SRC柱易损性曲线

图 5 SRC 柱的易损性曲线

Fig. 5 Fragility curves of SRC columns

### 3.4 拟合优度检验

为验证易损性函数服从对数正态分布的假设, 利用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验<sup>[46]</sup>, 通过计算拟合曲线的累积概率分布和试验样本计算的频数分布二者的最大差值  $H$  并与显著性水平取 5% 时对应的限值  $H_{crit}$  比较, 结果见表 3。由表 3 可知, 在 5% 显著水平下, 延性 SRC 柱和偏脆性 SRC 柱各损伤等级均通过检验, 表明本文构建的易损性函数均服从对数正态分布。

### 3.5 与 RC 柱易损性函数的对比

将本文建立的延性 SRC 柱易损性函数与文献[10]中以弯曲破坏为主建立的 RC 柱易损性函数对比, 结果见表 4。不难发现, 除 DS5 外, SRC 柱易损性函数的中位值整体上高于 RC 柱, 说明 SRC 柱的变形能力要高于 RC 柱。然而 DS5 状态下 SRC 位移角中值略小于 RC 柱, 其原因是本文的试验样本中设计轴压比大于 0.5 的试件约占 60% 左右, 而增加轴压比会显著降低构件的极限变形能力。此外, 对比二者的对数标准差, 发现文献[10]结果普遍小于本文研究结果, 这可能是由其设计参数的变异程度比本文小所导致的。

需说明的是, 本文的易损性函数是基于 JGJ 138—2016《组合结构设计规范》<sup>[37]</sup> 筛选试验数据建立的, 满足既有工程中绝大部分 SRC 柱评估需求。然而, 当 SRC 柱设计参数超出表 1 范围时, 则不宜未加论证而直接采用。

表 4 延性 SRC 柱与 RC 柱易损性函数参数对比

Tab. 4 Comparison of fragility function parameters between ductile SRC columns and RC columns

损伤等级	易损性函数参数			
	SRC 柱		RC 柱 <sup>[10]</sup>	
	$\bar{\theta}_i / \%$	$\beta_i$	$\bar{\theta}_i / \%$	$\beta_i$
DS1	0.92	0.36	0.76	0.34
DS2	1.86	0.48	1.41	0.39
DS3	2.65	0.38	2.04	0.43
DS4	3.27	0.38	3.08	0.38
DS5	3.99	0.38	4.11	0.37

## 4 影响因素分析

参考《建筑抗震韧性评价标准》<sup>[2]</sup>, 以抗震等级及设计轴压比为关键因素, 进行易损性分组。依据《组合结构设计规范》<sup>[37]</sup>, 根据配箍特征值及轴压比限值划分试件抗震等级, 分别为一级、二级和三、四级三类。考虑《组合结构设计规范》中规定 SRC 柱的最大设计轴压比为 0.95, 本文将  $n_d \leq 0.5$  的试件定义为低轴压比试件,  $n_d > 0.5$  的试件定义为高轴压比试件。然后, 引入超越概率之差  $\Delta P_i$  这一概念, 以便更加直观地分析不同因素对 SRC 柱地震易损性曲线的影响, 其定义为在相同的损伤状态下两条易损性曲线超越概率的差值, 计算公式为

$$\Delta P_i = P_{n1} - P_{n2} \quad (7)$$

式中  $P_{n1}$ 、 $P_{n2}$  为不同因素下 SRC 柱两条易损性曲线

的超越概率。 $\Delta P_f$ 越大,该因素对构件易损性曲线的影响越显著。

### 4.1 抗震等级的影响

表 5 为不同抗震等级 SRC 柱易损性函数参数值 $\bar{\theta}_i$ 和 $\beta_i$ 。可以看出,在相同轴压比分组下,抗震等级越高 $\bar{\theta}_i$ 越大。在相同的损伤状态及抗震等级下,低轴压比试件的易损性函数中位值 $\bar{\theta}_i$ 总是高于高轴压比试件。需要指出,抗震等级一级与二级的 SRC 柱各损伤状态对应的易损性函数中位值及对数标准

差相差不大。因此,本文重点对比了三、四级和一级 SRC 柱易损性曲线上超越概率的差值  $\Delta P_f$ , 见图 6。由图 6 可看出三、四级框架柱的超越概率高于一级框架柱,说明三、四级框架柱的抗震能力较差。此外,在低轴压比及相同损伤状态下,偏脆性 SRC 柱的  $\Delta P_{f,max}$  (27% ~ 40%) 要明显高于延性 SRC 柱 (18% ~ 25%)。而在高轴压比下,除偏脆性构件的 DS1 状态外,抗震等级对 SRC 柱  $\Delta P_{f,max}$  的影响并不显著,其范围为 4% ~ 22%。

表 5 不同抗震等级下 SRC 柱易损性参数计算结果

Tab. 5 The results of fragility parameters of SRC columns under different seismic grades

抗震等级	轴压比 $n_d$	延性 SRC 柱										偏脆性 SRC 柱					
		DS1		DS2		DS3		DS4		DS5		DS1		DS2		DS3	
		$\bar{\theta}_i/\%$	$\beta_i$	$\bar{\theta}_i/\%$	$\beta_i$	$\bar{\theta}_i/\%$	$\beta_i$	$\bar{\theta}_i/\%$	$\beta_i$	$\bar{\theta}_i/\%$	$\beta_i$	$\bar{\theta}_i/\%$	$\beta_i$	$\bar{\theta}_i/\%$	$\beta_i$	$\bar{\theta}_i/\%$	$\beta_i$
一	$n_d \leq 0.5$	1.18	0.26	2.77	0.41	4.55	0.39	5.41	0.36	5.52	0.32	1.10	0.48	3.11	0.36	3.96	0.35
	$n_d > 0.5$	0.82	0.30	1.73	0.32	2.59	0.29	3.11	0.25	3.51	0.24	0.85	0.66	1.85	0.52	2.28	0.45
二	$n_d \leq 0.5$	1.15	0.39	2.55	0.49	4.20	0.44	4.68	0.39	5.03	0.32	0.99	0.46	2.78	0.43	3.79	0.32
	$n_d > 0.5$	0.82	0.28	1.70	0.31	2.52	0.30	3.00	0.26	3.43	0.26	0.71	0.64	1.83	0.50	2.25	0.43
三、四	$n_d \leq 0.5$	1.10	0.37	2.28	0.50	3.71	0.49	4.23	0.48	4.29	0.35	0.81	0.47	2.11	0.49	2.67	0.45
	$n_d > 0.5$	0.81	0.29	1.57	0.39	2.44	0.22	2.89	0.23	3.27	0.23	0.61	0.60	1.69	0.45	2.09	0.42

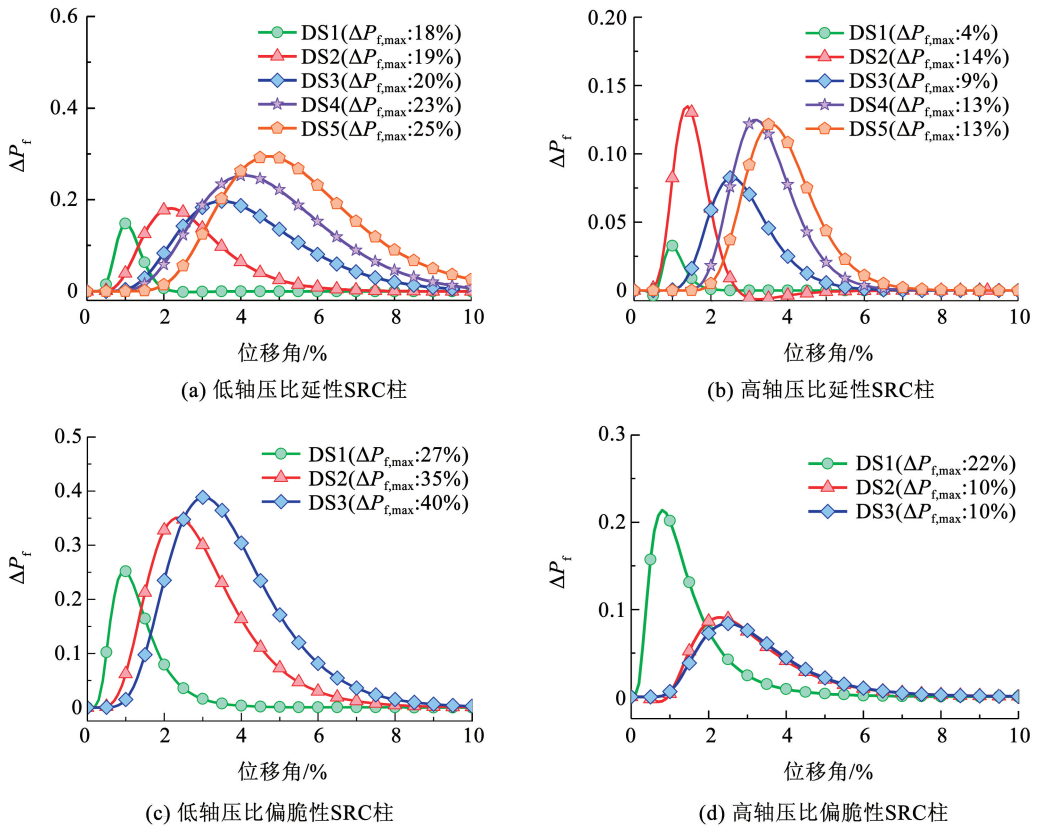


图 6 三、四级框架柱和一级框架柱的  $\Delta P_f$

Fig. 6  $\Delta P_f$  between SRC columns with first and third/fourth

### 4.2 轴压比的影响

图 7 为延性及偏脆性一级、二级及三、四级框架

柱在高/低轴压比工况下各损伤等级超越概率差值  $\Delta P_f$ 的结果。由图 7 可知,轴压比对延性构件各损

伤等级下  $\Delta P_{f,max}$  的影响范围为 38% ~ 63% ;对偏脆性构件  $\Delta P_{f,max}$  影响范围为 20% ~ 54%。此外,在不同抗震等级下,延性构件各损伤等级对应的  $\Delta P_{f,max}$  大部分情况下高于偏脆性构件,说明轴压比对延性构件各损伤等级下易损性曲线超越概率的影响更显著。此外,随着抗震等级降低,延性 SRC 柱在高/低轴压比工况下的  $\Delta P_{f,max}$  逐渐降低。对于延性一级框架柱,其在高/低轴压比下各损伤等级对应的  $\Delta P_{f,max}$

均在 45% 以上,最大为 63% ;对于三、四级框架,其  $\Delta P_{f,max}$  介于 38% ~ 48%。对于偏脆性一级框架柱,其在高/低轴压比下各损伤等级的  $\Delta P_{f,max}$  介于 21% ~ 45% ;对于三、四级框架,其  $\Delta P_{f,max}$  介于 20% ~ 23% ;偏脆性二级框架柱  $\Delta P_{f,max}$  介于一级和三、四级之间。偏脆性 SRC 柱在高/低轴压比工况下的  $\Delta P_{f,max}$  总体上亦随抗震等级的降低而减小,但其受轴压比影响不如延性 SRC 柱明显。

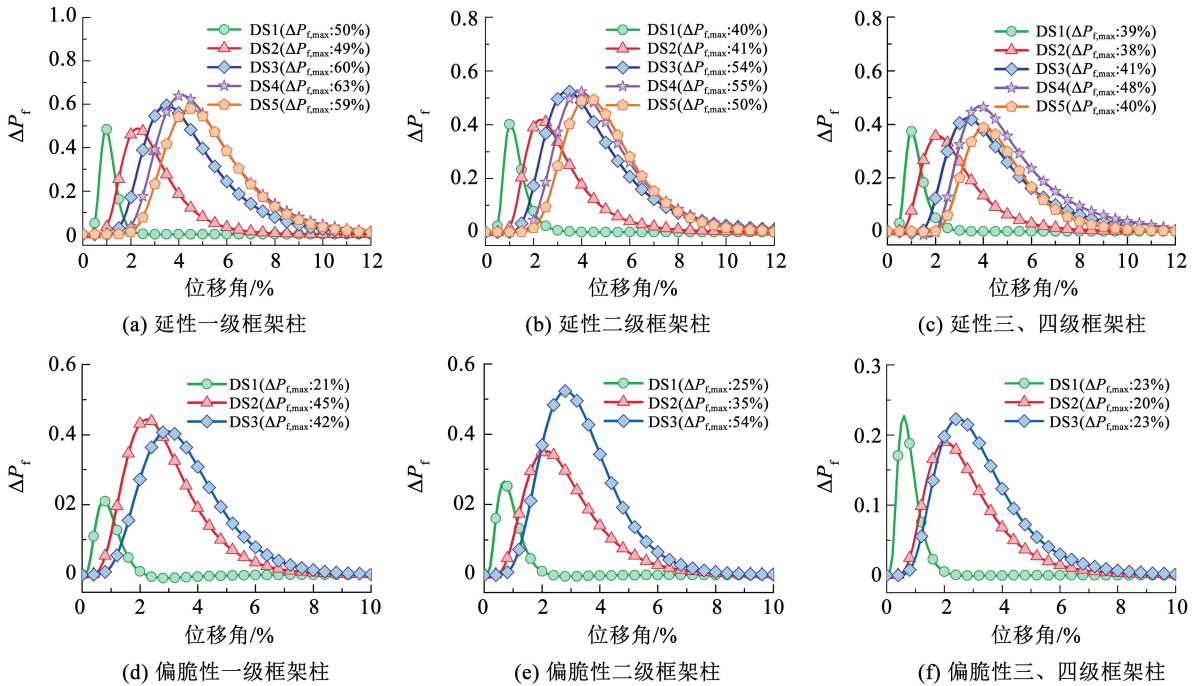


图 7 高/低轴压比下 SRC 柱的  $\Delta P_f$

Fig. 7  $\Delta P_f$  between SRC columns with high and low axial load ratio

### 5 基于易损性函数的抗震韧性评价

为说明 SRC 柱地震易损性函数在结构抗震韧性评价中的作用。依据《建筑抗震韧性评价标准》<sup>[2]</sup> 提供的抗震韧性评价框架(图 8),以一个型钢混凝土框架为例,分析结构韧性。

### 5.1 建筑信息

目标建筑为按照现行中国规范设计的一幢 12 层型钢混凝土框架办公楼,标准层层高 3.9 m,跨度 7.2 m,总高度 47.1 m,总面积 7 776 m<sup>2</sup>,抗震设防烈度 8 度,场地类别为 II 类,地震分组为第一组。结构典型楼层截面配筋图见图 9。

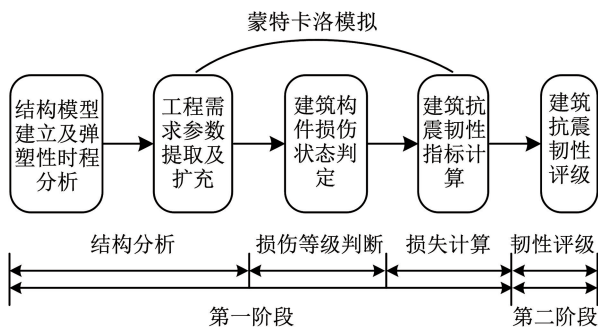


图 8 建筑抗震韧性评价基本流程

Fig. 8 Fundamental assessment process of seismic resilience for buildings

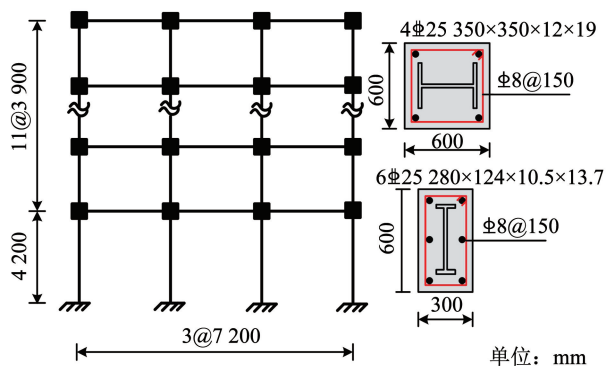


图 9 型钢混凝土框架几何尺寸及配筋信息

Fig. 9 The geometric dimensions and reinforcement information of the SRC frame

### 5.2 损失评估

损失评估是韧性评级的重要依据,其关键在于建筑损伤等级的判定,而损伤等级的判定依赖于构件易损性函数。主要步骤如下:

步骤一:结构分析。利用 OpenSEES 建立算例框架数值模型,并以 FEMA P695 推荐的 22 条地震动记录为基本地震输入,采用地面峰值加速度 (PGA) 调幅至多遇及罕遇地震水平下进行动力分析。结构工程需求参数均值见图 10。

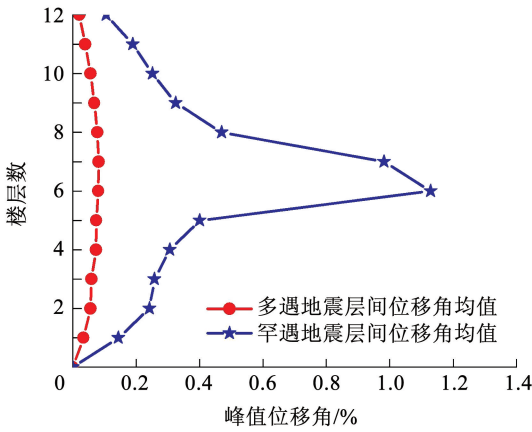


图 10 多遇和罕遇地震下结构的层间位移角

Fig. 10 Inter-story drift under frequent and maximum considered earthquakes

步骤二:损伤等级判断。《建筑抗震韧性评价标准》<sup>[2]</sup> 采用蒙特卡洛模拟方法对工程需求参数矩阵进行扩充,扩充的过程相当于对结构进行模拟弹塑性分析。以每次蒙特卡洛模拟得到的工程需求参数,结合构件易损性函数确定其各级损伤状态的发生概率,并采用生成随机数  $R$  的方法确定最终损伤状态。在本算例分析中,由工程需求参数结合 3.3 节提出的易损性曲线可得多遇及罕遇地震下 SRC 柱各损伤等级的概率,见表 6。由表 6 可知,在多遇地震下,层间位移角较小, SRC 柱未发生损伤;在罕遇地震下,仅 5 ~ 8 层发生损伤且仅出现了 DS1 ~ DS2 两种损伤等级。其中第 6 层的层间位移角最大为 1.13%。此时,当  $0.71 \leq R \leq 1$  时,未发生损伤;当  $0.14 \leq R < 0.71$  时,损伤等级为 DS1;当  $0 \leq R < 0.14$  时,损伤等级为 DS2。

表 6 多遇及罕遇地震下 SRC 柱达到各损伤状态的概率  
Tab. 6 The probability of SRC columns reaching various damage states under frequent and maximum considered earthquakes

楼层数	层间位移角 $\theta$ /%		$P(DS1 \theta)$		$P(DS2 \theta)$	
	多遇	罕遇	多遇	罕遇	多遇	罕遇
1	0.034	0.140	0	0	0	0
2	0.056	0.240	0	0	0	0
3	0.059	0.260	0	0	0	0
4	0.073	0.310	0	0	0	0
5	0.058	0.400	0	0.010	0	0
6	0.080	1.130	0	0.710	0	0.140
7	0.082	0.980	0	0.570	0	0.087
8	0.077	0.470	0	0.033	0	0.003
9	0.069	0.320	0	0	0	0
10	0.056	0.250	0	0	0	0
11	0.040	0.190	0	0	0	0
12	0.021	0.110	0	0	0	0

步骤三:损失计算。主要包括 3 个方面,即修复费用、修复时间及人员伤亡。计算结果取决于由步骤二判定的建筑损伤等级,详细计算方法见文献<sup>[2]</sup>的第 6 ~ 8 章,本算例结构计算结果见表 7。

### 5.3 韧性评价

抗震韧性的评级方法主要依据建筑修复费用、建筑修复时间和人员伤亡 3 个指标。3 个评价指标均采用星级制进行评级,星级划分见《建筑抗震韧性评价标准》<sup>[2]</sup>。最终建筑的抗震韧性等级应综合考虑修复费用、修复时间和人员伤亡 3 项指标的等级进行评价,并取 3 项评价指标的最低等级作为该建筑的抗震韧性等级。本算例的评级结果见表 7,由表 7 可知,该型钢混凝土框架结构的韧性等级为三星。值得注意的是,本案例分析仅为了说明 SRC 柱易损性函数在结构抗震韧性评价中的作用,因此在评价过程中仅考虑了柱损伤产生的影响,并未考虑其他非结构构件损坏造成的地震损失。

表 7 8 度设防下 SRC 框架结构抗震韧性等级评价

Tab. 7 Resilience ratings of SRC frame structures with fortification level of 8

地震水准	抗震韧性指标				综合评级
	修复费用 $\kappa$ /%	修复时间 $T_{int}$ /d	人员伤亡		
			受伤率 $\gamma_H$ /%	死亡率 $\gamma_D$ /%	
多遇地震	0	0	0	0	三星
罕遇地震	1.45	1.47	$1.25 \times 10^{-5}$	0	三星

## 6 结论

1) 延性 SRC 柱对应损伤等级 DS1 ~ DS5 的易损性函数的中位值分别为 0.92%、1.86%、2.65%、3.27%、3.99%，对数标准差分别为 0.36、0.48、0.38、0.38、0.38；偏脆性 SRC 柱对应损伤等级 DS1 ~ DS3 的易损性函数中位值分别为 0.69%、1.81%、2.30%，对数标准差分别为 0.58、0.46、0.46。

2) 相同损伤等级下延性构件的位移角中位值总是高于偏脆性构件，且随着损伤程度的增大，两者差距更加明显。而偏脆性构件的  $\beta_i$  均高于延性构件，是因为其脆性破坏特点提高了易损性曲线的离散度。

3) 在相同的轴压比分组下，三、四级框架柱的易损性曲线超越概率高于一、二级框架柱，说明三、四级框架柱的抗震能力较差。在低轴压比工况下，相同损伤等级偏脆性 SRC 柱的  $\Delta P_{f,max}$  要明显高于延性 SRC 柱。而在高轴压比工况下，抗震等级对延性和偏脆性 SRC 柱的  $\Delta P_{f,max}$  影响并不显著。

4) 相同抗震等级下，轴压比对延性构件易损性曲线的影响更显著。其对延性构件各损伤等级下  $\Delta P_{f,max}$  的影响介于 38% ~ 63%，而对偏脆性构件则为 20% ~ 54%。轴压比对一级框架柱各损伤等级下破坏概率的影响高于其他等级框架柱。对于延性一级框架柱，其  $\Delta P_{f,max}$  最大可达 63%。对于偏脆性构件，轴压比对一、二级框架柱的影响 (21% ~ 54%) 高于三、四级框架柱 (20% ~ 23%)。

5) 建立的 SRC 柱易损性函数与《建筑抗震韧性评价标准》相容，为 SRC 结构的抗震韧性评估提供支持。

## 参考文献

[1] HASSAN W M, FARAG M. Seismic performance of steel-reinforced concrete composite columns in existing and modern construction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 151: 106945. DOI: 10.1016/J.SOILDYN.2021.106945

[2] 建筑抗震韧性评价标准: GB/T 38591—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020

[3] BROWN P C, LOWES L N. Fragility functions for modern reinforced-concrete beam-column joints[J]. Earthquake Spectra, 2012, 23(2): 263. DOI:10.1193/1.2723150

[4] GOKSU C. Fragility functions for reinforced concrete columns incorporating recycled aggregates[J]. Engineering Structures, 2021, 233: 111908. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.111908

[5] CARDONE D. Fragility curves and loss functions for RC structural components with smooth rebars[J]. Earthquakes and Structures, 2016, 10(5): 1181. DOI: 10.12989/eas.2016.10.5.1181

[6] YURDAKUL Ö, VECCHIO C D, LUDOVICO M D, et al. Fragility functions for fiber-reinforced polymers strengthened reinforced concrete beam-column joints[J]. Engineering Structures, 2023, 279: 115570. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2022.115570

[7] 谢贤鑫, 张令心, 曲哲. 基于修复性的砌体填充墙易损性研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(12): 159  
XIE Xianxin, ZHANG Lingxin, QU Zhe. Repairability-based fragility analysis of masonry infills in buildings[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(12): 159. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.12.019

[8] 纪晓东, 徐梦超, 庄赞城, 等. 钢筋混凝土剪力墙和连梁易损性曲线研究[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 205  
JI Xiaodong, XU Mengchao, ZHUANG Yuncheng, et al. Fragility curves of reinforced concrete shear walls and coupling beams[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 205

[9] 代旷宇. 锈蚀钢筋混凝土柱及框架结构抗震性能与地震易损性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021  
DAI Kuangyu. Seismic performance and fragility analysis of corroded reinforced concrete columns and frame structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021

[10] 代旷宇, 于晓辉, 吕大刚. 钢筋混凝土柱的易损性函数研究[J]. 工程力学, 2024, 41(1): 219  
DAI Kuangyu, YU Xiaohui, LYU Dagang. Fragility functions for reinforced concrete columns[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(1): 219

[11] DAI Kuangyu, YU Xiaohui, LYU Dagang, et al. Fragility functions for corroded reinforced concrete columns[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 82: 108124. DOI: 10.1016/J.JOBE.2023.108124

[12] CHEN Caihua, WANG Cuikun, SUN Huizhong. Experimental study on seismic behavior of full encased steel-concrete composite columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(6): 04014024. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000951

[13] CHEN C C, CHEN C C, SHEN J H. Effects of steel-to-member depth ratio and axial load on flexural ductility of concrete-encased steel composite columns[J]. Engineering Structures, 2018, 115: 159. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.11.036

[14] MA Hui, XUE Jianyang, ZHANG Xicheng, et al. Seismic performance of steel-reinforced recycled concrete columns under low cyclic loads[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 231. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.019

[15] MA Hui, XUE Jianyang, LIU Yunhe, et al. Cyclic loading tests and shear strength of steel reinforced recycled concrete short columns[J]. Engineering Structure, 2015, 92: 57. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.009

[16] NAITO H, AKIYAMA M, SUZUKI M. Ductility evaluation of concrete-encased steel bridge piers subjected to lateral cyclic loading[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(1): 73. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000120

[17] 李向民, 陈宗梁. 钢骨高强混凝土柱的轴压比限值[J]. 建筑结构, 1999(7): 10  
LI Xiangmin, CHEN Zongliang. The limited values of steel reinforced high strength concrete column[J]. Journal of Building Structures, 1999(7): 10. DOI: 10.19701/j.jzjg.1999.07.003

[18] 马翔. 配箍率对有栓钉的型钢高强混凝土柱受力性能影响的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009  
MA Xiang. Experimental research on the effects of stirrup ratios on bearing performance of SRHC columns with studs[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009

[19] 陈子静. 型钢高强混凝土柱合理含钢量的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007  
CHEN Zijing. Experimental study on proper ratio of steel skeleton of steel reinforced high-strength concrete columns[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007

[20] 贾金青. 钢骨高强混凝土短柱及高强混凝土短柱力学性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2000  
JIA Jinqing. The research of SRHC short columns and high strength concrete short columns on mechanism performance[D]. Dalian:

- Dalian University of Technology, 2000
- [21] HSU H L, JAN F J, JUANG J L. Performance of composite members subjected to axial load and bi-axial bending[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(4): 870. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.04.006
- [22] 王秋维, 史庆轩, 姜维山, 等. 新型截面型钢混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(11): 125  
WANG Qiuwei, SHI Qingxuan, JIANG Weishan, et al. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced concrete columns with new-type cross sections[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(11): 125. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.11.017
- [23] 张志伟. SRC 柱变形性能及恢复力特性试验研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2007  
ZHANG Zhiwei. Experiment study on deformation performance and hysteretic characteristic of SRC columns[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2007
- [24] 陈小刚, 牟在根, 张举兵, 等. 型钢混凝土柱抗震性能实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(12): 1517  
CHEN Xiaogang, MU Zaigen, ZHANG Jubing, et al. Experimental study on the seismic behavior of steel reinforced concrete columns [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(12): 1517. DOI: 10.13374/j.issn1001-053x.2009.12.021
- [25] 蒋东红. 钢管高强混凝土框架柱的受力与抗震性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2001  
JIANG Donghong. Study on mechanical performance and seismic performance of steel reinforced high-strength concrete frame column [D]. Shenyang: Northeastern University, 2001
- [26] 李俊华, 王新堂, 薛建阳, 等. 低周反复荷载下型钢高强混凝土柱受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7): 12  
LI Junhua, WANG Xintang, XUE Jianyang, et al. Experimental study on the performance of steel reinforced high-strength concrete columns under low cyclic reversed loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(7): 12
- [27] 郑山锁, 张亮, 李磊, 等. 型钢高强混凝土框架柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(5): 125  
ZHENG Shansuo, ZHANG Liang, LI Lei, et al. Experimental research on seismic behavior of steel reinforced high strength concrete frame columns[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(5): 125. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.05.016
- [28] 厚童. 钢管超高强混凝土构件力学性能的试验研究[D]. 大连理工大学, 2005  
HOU Tong. The experiment research of steel reinforced super-high-strength concrete columns on mechanics performance[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005
- [29] 彭春华. 型钢高强高性能混凝土柱轴压比限值试验研究与理论分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008  
PENG Chunhua. Experimental study and theory analysis on limit value of axial compression for SRHSHPC columns [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008
- [30] WANG Bing, HUO Guang, SUN Yongfeng, et al. Hysteretic behavior of steel reinforced concrete columns based on damage analysis[J]. Applied Sciences, 2019, 9(4): 689. DOI: 10.3390/app9040687
- [31] 陈宗平, 柯晓军, 陈宇良. 配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(7): 42  
CHEN Zongping, KE Xiaojun, CHEN Yuliang. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced high-strength concrete columns confined by square spiral stirrups [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(7): 42. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2015.07.005
- [32] 冯宏. 型钢高强混凝土框架柱抗震性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014  
FENG Hong. Study on seismic behavior of HSRC frame column [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014
- [33] 郝贵强, 杜永山, 齐建伟. 钢筋混凝土超短柱与型钢混凝土超短柱滞回性能试验研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(10): 34  
HAO Guiqiang, DU Yongshan, QI Jianwei. An experimental study on hysteretic behavior of reinforced concrete ultrashort columns and steel reinforced concrete ultrashort columns [J]. Industrial Construction, 2008, 38(10): 34. DOI: 10.13204/j.gjz2008.10.011
- [34] RICLES J M, PABOOJIAN S D. Seismic performance of steel-encased composite columns[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(8): 2475. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:8(2474)
- [35] ZHU Weiqing, JIA Jinqing, GAO Juncheng, et al. Experimental study on steel reinforced high-strength concrete columns under cyclic lateral force and constant axial load[J]. Engineering Structures, 2016, 125: 193. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.07.018
- [36] XUE Jianyang, ZHANG Xin, KE Xiaojun, et al. Seismic resistance capacity of steel reinforced high-strength concrete columns with rectangular spiral stirrups [J]. Construction and Building Materials, 2019, 229: 116880. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116880
- [37] 组合结构设计规范: JGJ 138—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016
- [38] YAO Guangfeng, LI Bingyi, XIONG Xueyu. Deformation capacity of flexural-controlled SRC columns under lateral cyclic load [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 169: 107902. DOI: 10.1016/J.SOILDYN.2023.107902
- [39] 季静, 刘寒, 陈彬彬. 基于试验的型钢混凝土柱抗震性能指标限值研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 3  
JI Jing, LIU Han, CHEN Binbin. Research on deformation limits of SRC columns based on experimental data [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 3. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2017.06.001
- [40] 马腾. 型钢混凝土柱性能变形指标限值研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014  
MA Teng. Research on deformation limits of SRC column [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014
- [41] 符东龙. 基于试验数据库的型钢混凝土构件变形性能指标限值研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019  
FU Donglong. Research on deformation index limits of SRC members based on experimental database [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019
- [42] AGENCY F E M, HAMBURGER R, BACHMAN R, et al. Seismic performance assessment of buildings, volume 1, methodology[R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2012
- [43] 蒋欢军, 李莹辉, 王鹏. 型钢混凝土柱基于变形的性能指标限值研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 105  
JIANG Huanjun, LI Yinghui, WANG Peng. Study on deformation-based performance index limits of steel reinforced concrete columns [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 105. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.05.011
- [44] 刘伟. 型钢高强混凝土柱轴压比限值的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007  
LIU Wei. Study on limited value of axial compression ratio of steel reinforced high strength concrete column [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007
- [45] ROSS S M. Peirce's criterion for the elimination of suspect experimental data[J]. Journal of Engineering Technology, 2003, 20(2): 41
- [46] LILLIEFORS H W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown [J]. Journal of the American Statistical Association, 1967, 62(318): 400