

# 节点域承载力对半刚性钢框架地震 易损性影响研究

隋伟宁,王鹏辉,黄鲁东,董 峥

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 通过考察节点域承载力变化与地震易损性曲线间的关系,获得半刚性钢框架地震易损性曲线,量化节点域屈服承载力对半刚性钢框架地震易损性的影响。  
**方法** 采用 OpenSEES 抗震分析软件建立以节点域承载力比为主要参数的半刚性钢框架模型,通过地震需求分析和抗震能力分析,绘制不同节点域屈服承载力比(0.5~1.0)对应的半刚性钢框架地震易损性曲线。  
**结果** 节点域屈服承载力比的取值为0.7时,半刚性钢框架地震易损性曲线在四种极限状态下均小于其他半刚性钢框架,且形成包络趋势。  
**结论** 在水平地震作用下,允许节点域屈服,可显著降低钢框架的失效概率,结构的抗震性能也得到了明显改善;节点域屈服承载力比取0.7时,结构抗震性改善效果最显著。

**关键词** 节点域;剪切变形;易损性分析;抗震性能;弹塑性动力时程分析

中图分类号 TU352

文献标志码 A

**引用格式** 隋伟宁,王鹏辉,黄鲁东,等.节点域承载力对半刚性钢框架地震易损性影响研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):78-85.(SUI Weining, WANG Penghui, HUANG Ludong, et al. Seismic fragility analysis of semi-rigid steel frame considering panel zone performance[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(1): 78-85.)

## Seismic Fragility Analysis of Semi-rigid Steel Frame Considering Panel Zone Performance

SUI Weining, WANG Penghui, HUANG Ludong, DONG Zheng

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The seismic fragility curve of semi-rigid steel frame is obtained by investigating the relationship between the load bearing capacity of panel zone and the seismic vulnerability curve, and the influence of the yield load bearing capacity ratio of panel zone on the semi-rigid steel frame vulnerability is quantified. OpenSEES seismic analysis software is used to establish the semi-rigid steel frame model with the load bearing capacity of panel zone as the main parameter.

收稿日期:2022-10-11

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51938009);辽宁省教育厅重点攻关项目(JYTZD2023163);沈阳市科学技术计划项目(23-407-3-18)

作者简介:隋伟宁(1979—),女,教授,博士,主要从事钢结构等方面研究。

According to the seismic demand analysis and seismic capacity analysis, the seismic vulnerability curve of the steel frame with yield load bearing capacity ratio(0.5 ~ 1.0) in different panel zone is plotted. The fragility curves of the semi-rigid steel frames with a value of 0.7 is smaller than that of the semi-rigid steel frame with other values under the four limit states, and forms an envelope trend. Under the action of horizontal seismic, allowing the yield of the panel zone can significantly reduce the failure probability, and the seismic performance of the structure has also been significantly improved. The improvement effect is most significant when the panel zone yield bearing capacity ratio is 0.7.

**Key words:** panel zone; shear deformation, fragility analysis; seismic performance; elasto-plastic dynamic time history analysis

历次的震害资料表明,由于节点区域的延性和耗能能力不足,大量的钢结构建筑物发生了严重的倒塌和破坏<sup>[1-2]</sup>,因此,在对建筑物进行抗震能力分析时,有必要考虑节点区域的影响。B. Kordbagh 等<sup>[3]</sup>考察了节点域对钢框架连续倒塌承载力的影响,设计了两种结构体系,研究表明,工字型钢柱钢框架结构体系中,考虑节点域会加剧连续倒塌,而箱型截面柱钢框架结构体系中考虑节点域对连续倒塌没有明显影响。严林飞<sup>[4]</sup>通过考察结构和地震动的随机性,对具有半刚性节点和刚性节点的钢框架分别进行了地震易损性分析,结果表明,考虑节点的半刚性后,钢框架的地震易损性会明显降低。

现有研究表明,节点区域的力学性能对钢框架的地震易损性有显著影响<sup>[5-8]</sup>,而目前对框架结构体系进行易损性分析时<sup>[9-11]</sup>,针对节点域性能的研究成果较少。基于此,笔者利用 OpenSEES 抗震分析软件,建立半刚性钢框架分析模型,并进行动力弹塑性抗震分析,然后通过绘制半刚性钢框架地震易损性曲线,考察节点域屈服承载力比对半刚性钢框架地震易损性的影响;研究表明:在水平地震作用下,允许节点域屈服,可显著降低钢框架的失效概率,结构的抗震性能也得到了明显改善,且节点域屈服承载力比取 0.7 时改善效果最显著,研究成果为半刚性钢框架结构的设计和抗震性能评估提供了参考依据。

1 节点域受力性能分析

钢框架结构体系中,节点域的受力状态复杂(见图 1),在梁端和柱端荷载的共同作用下,节点域主要承担剪力作用,以剪切变形为主(见图 2)。

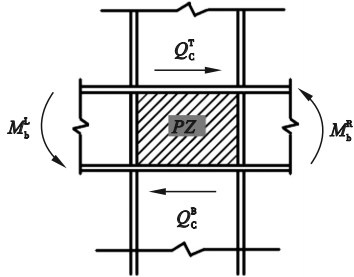


图 1 节点域受力简图

Fig. 1 The load distribution on panel zone

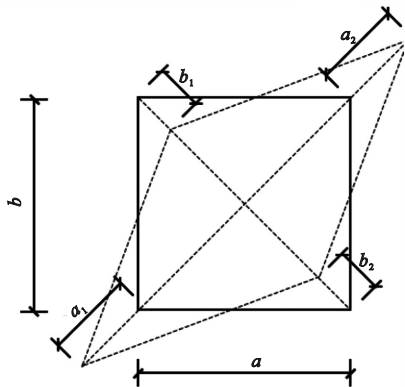


图 2 节点域变形图

Fig. 2 Deformation of panel zone

节点域处受到的剪力由式(1)进行计算:

$$V_{PZ} = \frac{M_b^L}{h_b} + \frac{M_b^R}{h_b} - \frac{Q_c^T + Q_c^B}{2}.$$

(1)

式中: $M_b^L$ 、 $M_b^R$  为作用在节点域处的左、右梁

端弯矩; $h_b$  为梁高; $Q_c^T$ 、 $Q_c^B$  为作用在节点域处的上下柱端剪力。

节点域发生剪切变形时,剪切角计算如下:

$$\gamma = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2ab}(a_1 + a_2 + b_1 + b_2). \quad (2)$$

式中: $b_1$ 、 $b_2$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  分别为节点域两个斜对角点的位移变形量; $a$  和  $b$  分别为沿梁、柱方向节点域计算长度。

2 钢框架模型

笔者以某 6 层钢框架为研究对象,利用有限元软件 OpenSEES 建立平面钢框架模型(见图 3)。抗震设防标准为 8 度,场地土按 II 类,设计地震分组为第 2 组。其中,模型选用 Q235 级钢材,弹性模量  $E = 2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\nu = 0.3$ 。梁柱截面均为 H 形钢,梁截面高度 300 mm、宽度 250 mm、腹板厚度 10 mm、翼缘厚度 14 mm;柱截面高度 300 mm、宽度 300 mm、腹板厚度 10 mm、翼缘厚度 15 mm。框架跨度 5.0 m,层高 3.5 m。梁柱单元采用基于柔度法的梁柱单元,本构模型采用 steel02 Material<sup>[12]</sup>,将梁柱的中间部分简化为弹性杆件,端部简化为非线性转动弹簧,两者串联后建立一种串联式的塑性铰模型,梁端转动弹簧采用 Bilin 模型<sup>[13]</sup>。将结构所受荷载简化为作用在梁上的线荷载,恒荷载设计值为 20 kN/m,活荷载设计值为 10 kN/m。

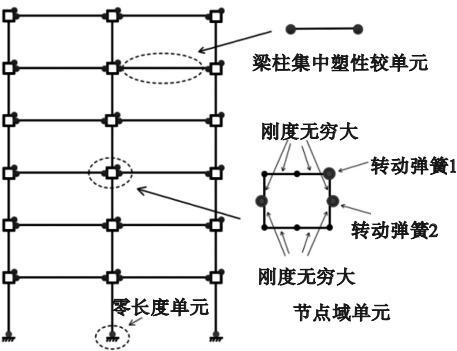


图 3 六层钢框架 OpenSEES 分析模型

Fig. 3 OpenSEES analytical model of a six-layer steel frame

图 3 中的节点域四边形模型由八根刚度无穷大的杆件组成,四边形模型的左上、左下、右下角处杆件连接方式为铰接,右上角处杆件间采用非线性转动弹簧连接,节点域的剪切变形性能仅由右上角的转动弹簧来模拟,转动弹簧本构模型采用 OpenSEES 材料库中的 Hysteretic 材料。

3 极限状态定义

《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[14]</sup>将震害分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌五个等级(见表 1)。对应四种抗震性能水平:正常使用状态(LS1)、立即使用状态(LS2)、生命安全状态(LS3)、防止倒塌状态(LS4)。

表 1 震害等级划分

Table 1 Classification of seismic damage grade	
震害等级	层间位移角 $\theta$
基本完好	小于 1/250
轻微破坏	1/250 ~ 1/100
中等破坏	1/100 ~ 1/50
严重破坏	1/50 ~ 1/25
倒塌	大于 1/25

4 地震波的选取

笔者根据结构设计反应谱,在太平洋地震工程研究中心数据库(PEER)中选取了 15 条满足需求的地震波(见表 2)。

由于选取的地震波强度大小不一,需要对其进行归一化处理。按式(3)进行调幅,使所选地震波的加速度峰值与目标加速度峰值一致:

$$a'(t) = \frac{A'_{\max}}{A_{\max}} a(t). \quad (3)$$

式中: $a'(t)$  为目标地震加速度时程曲线上任意时刻加速度; $A'_{\max}$  为目标峰值加速度; $a(t)$  为原始地震加速度时程曲线上任意时刻加速度; $A_{\max}$  为原始峰值加速度。

表 2 选取的地震波记录

Table 2 The selected seismic wave records

编号	地震波名称	震级	地震峰值 加速度/ <i>g</i>
1	Helena Montana-01	6.00	0.162 5
2	Humbolt Bay	5.80	0.375 0
3	Northwest Calif-01	5.50	0.625 0
4	Imperial Valley-02	6.95	0.250 0
5	Northwest Calif-02	6.40	0.162 5
6	Borrego	6.63	0.250 0
7	Kern County	6.36	0.875 0
8	Central Calif-01	5.30	0.375 0
9	Central Calif-02	5.00	0.412 5
10	Hollister-02	5.50	0.287 5
11	Borrego Mtn	6.63	0.250 0
12	San Fernando	6.61	0.250 0
13	Managua Nicaragua-02	6.24	0.325 0
14	Hollister-03	5.14	0.375 0
15	Northern Calif-07	5.20	0.625 0

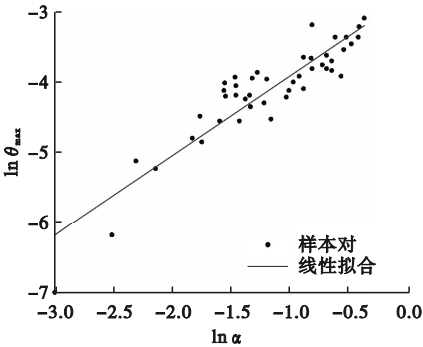


图 4 A 组样本的回归分析

Fig. 4 Regression analysis of A group

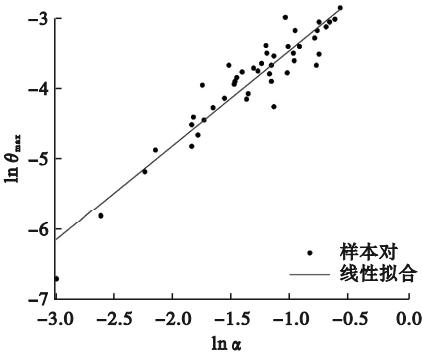


图 5 B 组样本的回归分析

Fig. 5 Regression analysis of B group

5 地震易损性分析

5.1 地震需求分析

笔者基于变形破坏准则,选用最大层间位移角  $\theta_{\max}$  作为地震需求参数,地震动峰值加速度  $\alpha$  作为地震动强度参数,同时充分考虑结构和地震动的随机性,采用分层抽样的方式生成 100 个结构-地震动样本用于易损性分析。样本分为两组:A 组为 50 个不考虑节点域剪切变形的半刚性钢框架样本;B 组为 50 个考虑节点域剪切变形的半刚性钢框架样本。

地震需求参数和地震动参数需满足式(4)的要求:

$$\ln \overline{S_d} = \beta_0 + \beta_1 \ln IM. \tag{4}$$

式中: $\overline{S_d}$ 为地震需求参数的均值; $IM$  为地震动强度参数; $\beta_0$ 、 $\beta_1$  为线性拟合求解值。

通过 OpenSEES 对上述 100 个样本对进行非线性弹塑性时程分析,对分析结果的数据  $\ln \theta_{\max}$  与  $\ln \alpha$  进行线性回归,结果见图 4 和图 5。

考虑节点域性能拟合关系式为

$$\ln \theta_{\max} = 1.28 \ln \alpha - 2.7. \tag{5}$$

不考虑节点域性能拟合关系式为

$$\ln \theta_{\max} = 1.16 \ln \alpha - 2.76. \tag{6}$$

5.2 地震易损性曲线

地震易损性曲线表示在某种强度地震作用下,结构的损伤超过某种状态的条件概率。历史震害经验表明,在进行结构地震需求分析和结构抗震能力分析时,两者服从双参数正态分布,那么易损性曲线也服从对数正态分布,即结构损伤超越某种状态的概率  $P_f$  可表示为

$$P_f = \Phi \frac{\ln(\overline{S_d} / \overline{R_L})}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}}. \tag{7}$$

式中: $\overline{R_L}$ 为结构抗震能力分析均值; $\beta_d$  为结构地震需求分析对数标准差; $\beta_c$  为结构抗震能力分析对数标准差。当自变量为  $\alpha$  时, $\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}$  可取为  $0.5^{[15]}$ 。

将考虑节点域剪切变形的半刚性钢框架线性分析代入式(7)可得:

$$P_f = \Phi \left[ \frac{0.067 \ln \alpha^{1.28} / \bar{\theta}}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}} \right]. \quad (8)$$

将不考虑节点域剪切变形的半刚性钢框架线性分析代入式(7)可得:

$$P_f = \Phi \left[ \frac{0.063 \ln \alpha^{1.16} / \bar{\theta}}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}} \right]. \quad (9)$$

以地震峰值加速度  $\alpha$  为横坐标,以式(8)、式(9)计算得出的超越概率为纵坐标,绘制 A 组和 B 组钢框架地震易损性曲线,结果如图 6 所示。

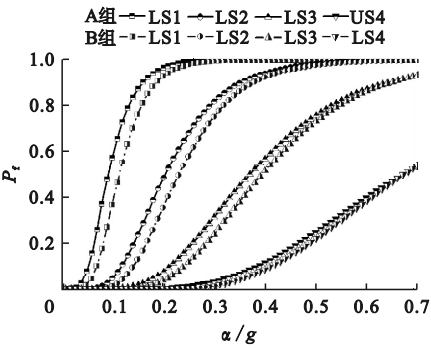


图6 两组钢框架地震易损性曲线对比图

Fig. 6 Comparative analysis of fragility curves of two kinds of steel frame

由图 6 可知,任何一种极限状态下,两组钢框架的易损性曲线变化趋势均相同;四种极限状态下,相同的地震动强度对应的 B 组考虑节点域的钢框架易损性超越概率均小于 A 组的不考虑节点域的超越概率,且形成包络之势。说明考虑节点域可以显著降低结构的易损性超越概率,这主要是由于节点域的剪切变形可以消耗地震能量,提高结构的抗震性能。

由图 6 得到各地震水准下结构的超越概率,结果见表 3。从表中可以得出,在小震 ( $\alpha = 0.07\text{ g}$ )、中震 ( $\alpha = 0.2\text{ g}$ )、大震 ( $\alpha = 0.4\text{ g}$ ) 作用下,建模时考虑节点域的钢框架超越概率均小于不考虑节点域的钢框架,说明允许节点域发生剪切变形可以改善结构的

抗震性能。在小震和中震作用下,建模时是否模拟节点域对钢框架超越概率影响较大,主要是由于在小、中震作用下,节点域的耗能占比较大;而在大震作用下,建模时是否模拟节点域,对钢框架超越概率的影响较小,因为此时更多的结构构件产生屈服耗能,此时节点域耗能占比相对减少。可见节点域的力学性能是影响半刚性钢框架地震易损性的关键因素。

表 3 各地震水准下的结构超越概率

Table 3 Structural exceedance probability under various seismic levels

地震水准	$\alpha/\text{g}$	模型分组	超越概率 / %			
			LS1	LS2	LS3	LS4
8 度多遇	0.07	A 组	25.9	0.7	0.0	0.0
		B 组	10.2	0.1	0.0	0.0
8 度设防	0.2	A 组	96.3	48.3	7.6	0.2
		B 组	92.8	35.4	3.9	0.1
8 度罕遇	0.4	A 组	100.0	94.1	57.1	11.4
		B 组	99.0	92.3	51.7	8.9

5.3 节点域屈服承载力比定义

为了考察节点域的剪切变形对半刚性钢框架地震易损性的影响,将节点域屈服承载力比  $R_{py}$  作为主要影响参数进行地震易损性分析<sup>[16-17]</sup>:

$$R_{py} = \frac{M_1}{\min[M_2, M_3, M_4]}. \quad (10)$$

$$M_1 = (4/3\sqrt{3})V \times f_y. \quad (11)$$

式中: $M_1$  为节点域屈服承载力,由式(11)进行计算; $M_2$  为第  $i$  层梁端抗弯屈服承载力,  $M_3$  为第  $i+1$  层柱脚抗弯屈服承载力;  $M_4$  为第  $i$  层柱顶抗弯屈服承载力;  $V$  为节点域的抗剪有效体积,为梁上下翼缘所夹节点域区域的面积与节点域厚度  $t$  的乘积;  $f_y$  为钢材的屈服强度。

由式(10)、式(11)可知,通过改变节点域厚度  $t$  可得到不同的节点域屈服承载力比值。将  $R_{py}$  作为结构随机性参数进行易损性



分析,  $R_{py}$  分别取 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0。由上文可知,考虑节点域的剪切变形可以明显改善结构的易损性,为进一步量化节点域屈服承载力比对结构易损性的影响,选用最大层间位移角  $\theta_{max}$  作为地震需求参数,以地震动峰值加速度  $\alpha$  作为地震动强度参数。

考虑地震动的随机性,选取表 2 中的多条地震波,通过改变  $R_{py}$  值考虑结构的随机性,生成 90 个半刚性钢框架样本,然后运用 OpenSEES 软件进行非线性弹塑性时程分析。节点域屈服承载力比取 0.5 ~ 1.0 时的线性回归分析结果如图 7 所示。

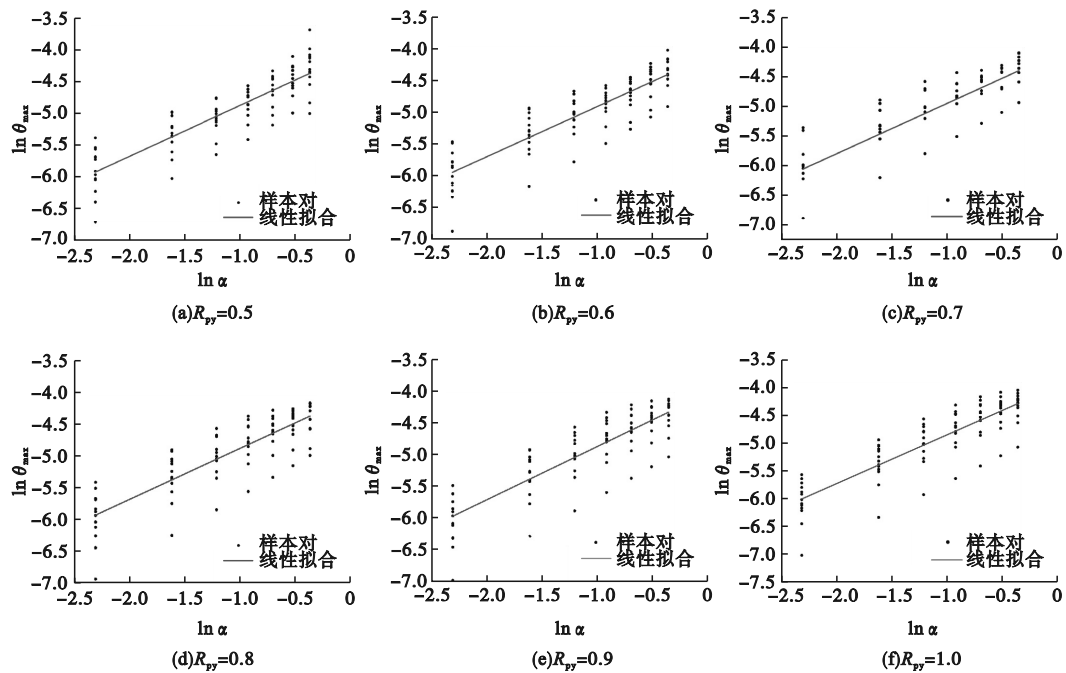


图 7 不同  $R_{py}$  时  $\theta_{max}$  的回归分析

Fig. 7 Regression analysis of  $\theta_{max}$  with different  $R_{py}$

$R_{py} = 0.5$  拟合关系式为

$$\ln \theta_{max} = 0.79 \ln \alpha - 4.1. \tag{12}$$

$R_{py} = 0.6$  拟合关系式为

$$\ln \theta_{max} = 0.78 \ln \alpha - 4.11. \tag{13}$$

$R_{py} = 0.7$  拟合关系式为

$$\ln \theta_{max} = 0.85 \ln \alpha - 4.09. \tag{14}$$

$R_{py} = 0.8$  拟合关系式为

$$\ln \theta_{max} = 0.8 \ln \alpha - 4.08. \tag{15}$$

$R_{py} = 0.9$  拟合关系式为

$$\ln \theta_{max} = 0.84 \ln \alpha - 4.03. \tag{16}$$

$R_{py} = 1.0$  拟合关系式为

$$\ln \theta_{max} = 0.87 \ln \alpha - 3.98. \tag{17}$$

将考虑不同节点域屈服承载力比的半刚性钢框架线性分析代入式(7),以  $\alpha$  为横坐

标,以  $P_f$  为纵坐标,绘制半刚性钢框架地震易损性曲线(见图 8)。由图 8 得到不同  $R_{py}$  下结构的超越概率,结果见表 4。

由图 8 和表 4 可知,在地震动峰值加速度相同的情况下,屈服承载力比值为 0.7 的模型的地震易损性超越概率在任何一种极限状态下均小于其他模型,说明在考虑结构整体破坏时,节点域并非“越强越好”。这是因为节点域屈服承载力比过大时节点域过厚,在大震时处于弹性,不能很好地参与耗能,使结构整体耗能性能降低,不利于抗震;而节点域太薄则对框架层间位移角影响过大,同样不利于抗震。

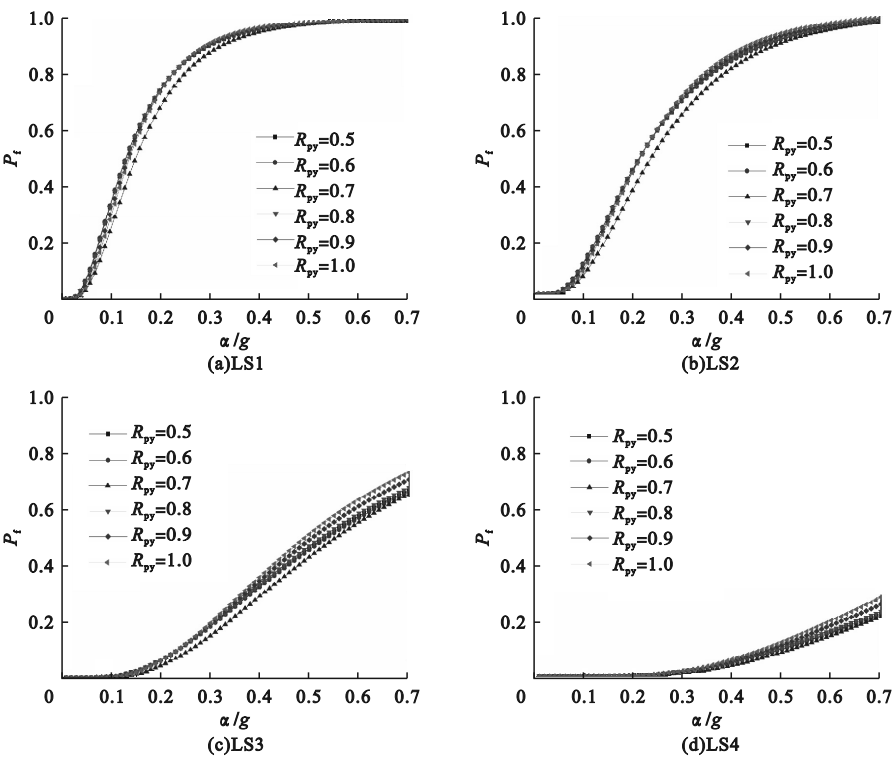


图8 不同 $R_{py}$ 时半刚性框架地震易损性曲线对比

Fig.8 Comparison of seismic fragility curves of semi-rigid frames with different  $R_{py}$

表4 不同 $R_{py}$ 下结构超越概率

Table 4 Structural exceedance probability under different  $R_{py}$

地震水准	$\alpha/g$	$R_{py}$	超越概率 / %			
			LS1	LS2	LS3	LS4
8度多遇	0.07	0.5	15.5	3.4	0.0	0.0
		0.6	16.0	3.5	0.0	0.0
		0.7	9.3	1.6	0.0	0.0
		0.8	15.2	3.3	0.0	0.0
		0.9	12.9	2.6	0.0	0.0
		1.0	11.4	2.1	0.0	0.0
8度设防	0.2	0.5	74.2	43.6	6.1	3.1
		0.6	74.3	43.7	6.1	3.0
		0.7	67.9	36.5	4.2	1.7
		0.8	74.4	43.9	6.2	3.1
		0.9	73.8	43.1	5.9	2.9
		1.0	73.5	42.8	5.8	2.8
8度罕遇	0.4	0.5	95.9	82.6	32.7	5.0
		0.6	95.9	82.4	32.5	4.9
		0.7	95.0	79.8	29.1	4.0
		0.8	96.2	83.1	33.4	5.2
		0.9	96.4	83.9	34.7	5.6
		1.0	96.7	84.8	36.1	6.0

6 结 论

(1)弹塑性时程分析结果表明,允许节点域发生剪切变形时,结构消耗了更多的地震能,结构的抗震性能明显提高,结构的易损性降低。

(2)不同地震动强度下,考虑节点域发生剪切变形的结构易损性降低程度不同;在小震作用下,钢框架结构超越概率降低效果明显;在大震作用下,钢框架结构超越概率降低不明显。

(3)节点域的屈服承载力比值对结构的能量耗散能力有明显影响,不同节点域屈服承载力比对应的半刚性钢框架地震易损性超越概率差距明显;屈服承载力比为0.7时,地震易损性超越概率最小,表明此时半刚性钢框架的抗震性能最好。

参考文献

[1] STEPHEN A M. Lessons from damage to steel

- buildings during the northridge earthquake [J]. Engineering structures, 1998, 20(4/5/6): 261–270.
- [2] 王宝峰. 在役半刚性连接钢框架结构的抗震性能评估[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.  
(WANG Baofeng. Seismic performance evaluation of existing steel frame buildings with semi-rigid connections [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.)
- [3] KORDBAGH B, MOHAMMADI M. Influence of panel zone on progressive collapse resistance of steel structures [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2018, 32(3): 04018014.
- [4] 严林飞. 半刚性节点钢框架的地震易损性分析[D]. 南京: 东南大学, 2015.  
(YAN Linfei. Seismic fragility analysis of steel frame with semi-rigid nodes [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.)
- [5] BAO C, MA X, LIM K S, et al. Seismic fragility analysis of steel moment-resisting frame structure with differential settlement [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2020, 141(11): 106526.
- [6] 杨贝贝, 王志涛, 张秀彦. 基于 IDA 方法的框架结构震害风险评估[J]. 震灾防御技术, 2020, 15(1): 21–32.  
(YANG Beibei, WANG Zhitao, ZHANG Xiuyan. Earthquake risk assessment of frame structures based on IDA method [J]. Technology for earthquake disaster prevention, 2020, 15(1): 21–32.)
- [7] 王伟, 胡书领, 邹超. 基于增量动力分析的梁贯通式支撑钢框架地震易损性研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(4): 42–49.  
(WANG Wei, HU Shuling, ZOU Chao. Seismic fragility analysis of beam-through steel braced frames based on IDA method [J]. Journal of building structures, 2021, 42(4): 42–49.)
- [8] NOURELDIN M, AHMED S, KIM J. Self-centering steel slotted friction device for seismic retrofit of beam-column joints [J]. Steel & composite structures: an international journal, 2021(1): 41.
- [9] 徐强, 郑山锁, 韩言召, 等. 基于结构整体损伤指标的钢框架地震易损性研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(11): 78–82.  
(XU Qiang, ZHENG Shansuo, HAN Yanzhao, et al. Steel frame seismic vulnerability based on a global structural damage index [J]. Journal of vibration and shock, 2014, 33(11): 78–82.)
- [10] 林天成, 陈灯红, 刘云龙, 等. 主余震作用下典型六层 RC 框架结构易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 1046–1056.  
(LIN Tiancheng, CHEN Denghong, LIU Yunlong, et al. Vulnerability analysis of typical six story RC frame structure under main shock aftershock ground motions [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2023, 43(5): 1046–1056.)
- [11] 周洲, 于晓辉, 吕大刚, 等. 钢筋锈蚀与余震对 RC 框架结构地震损伤与易损性的影响分析[J]. 工程力学, 2023, 40(9): 203–213.  
(ZHOU Zhou, YU Xiaohui, Lü Dagang, et al. Effects of corrosion and aftershock on structural damage and fragility of reinforced concrete frame structures [J]. Engineering mechanics, 2023, 40(9): 203–213.)
- [12] MENEGOTTO M, PINTO P E. Method of analysis for cyclically loaded RC plane Frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending [C]//LABSE symposium on resistance and ultimate deformability of structures acted on by well-defined repeated Loads. Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering, 1973.
- [13] LIGNOS D G, KRAWINKLER H. Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading [J]. Journal of structural engineer, 2011, 137(11): 1291–1302.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of building: GB50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016.)
- [15] MARCH I. Federal emergency management agency [J]. Policy, 1999, 1(2): 1–6.
- [16] 長谷川隆, 山内泰之. 強震時における中低層鋼構造骨組の損傷分布に基づく部材の必要塑性変形能力[C]. 日本: 日本建築学会構造系論文集, 1994.  
(HASEGAWA T. YAMANOUCHI H. Required deformation capacity of steel frames under strong earthquake ground motions [C]. Japan: Journal of Structural and Construction Engineering, 1994.)
- [17] 李易, 陆新征, 叶列平, 等. 基于 Pushdown 分析的 RC 框架抗连续倒塌承载力研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(1): 10–18.  
(LI Yi, LU Xinzhen, YE Lieping, et al. Study on progressive-collapse resistance capacity of RC frame structures based on pushdown analysis [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2011, 27(1): 10–18.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)