

钢框架结构的地震损伤研究^①

郑山锁¹, 代旷宇¹, 孙龙飞¹, 杨 威¹, 李文勇¹, 田 微²

(1.西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055; 2.西安建筑科技大学建筑设计研究院,陕西 西安 710055)

摘要:基于预定损伤法对钢框架构件主要设计参数进行损伤敏感度分析,研究主要设计参数与钢框架结构梁、柱损伤的关系;揭示钢框架结构梁、柱的损伤及梁、柱线刚度比、结构高宽比、柱轴压比、锈蚀率对楼层损伤的影响规律;获得楼层的损伤与整体结构损伤的关系,最终建立钢框架结构的损伤演化模型。研究成果可为建立地震激励下钢框架结构的损伤模型提供理论基础和数据支持。

关键词: 钢框架结构; 设计参数; 损伤敏感度; 损伤模型; 损伤表征

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0290-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0290

Research on the Seismic Damage of Steel Frame Structure

ZHENG Shan-suo¹, DAI Kuang-yu¹, SUN Long-fei¹, YANG Wei¹, LI Wen-yong¹, TIAN Wei²

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

2.Architectural Design and Research Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: Because of their light weight, high strength, and good seismic performance, steel structures are widely used in construction. At present, the research on the seismic performance and safety assessment of steel structures receives widespread attention at home and abroad; most of this research focuses on assessing the seismic performance of steel structures based on the performance design method, with little research on earthquake damage. Under such circumstances, the author firstly analyzed the main design parameters, such as web height, web thickness, flange width, and flange thickness, which affect the component damage evolution rule, and the author found that the most sensitive design parameters are web height and flange width, which provided a theoretical basis for the establishment of the storey damage model. Then, according to the analysis results, we obtained the damage value relationship between the frame beam, frame column, and storey damage evolution and analyzed the effect of sensitive factors on storey damage evolution, such as the stiffness ratio of column to beam, the height-width ratio of the structure, the axial-compression ratio of the frame column, and the steel corrosion rate. Finally, in order to study the influence of storey damage location and degree to the seismic damage of the steel frame structure, the author revealed the influence of storey damage on structural damage by analyzing the effect of single-storey steel frame structure damage on structural dynamic characteristics under El Centro seismic wave excitation. Inputting multiple seismic waves, the author got the relation between the damage value of structural integrity and the velocity-to-acceleration ratio of the seismic wave peak and ultimately established the damage evolution model of steel frame structures. The multi-level damage evolution model of “component-storey-structure” can provide the theoretical foundation

① 收稿日期: 2014-06-11

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAJ08B03); 国家自然科学基金(50978218, 51108376); 高等学校博士学科点专项科研基金(20136120110003); 陕西省科研项目(2012K12-03-01, 2011KTCQ03-05, 2013JC16)

作者简介: 郑山锁(1960—), 男, 陕西人, 博士生导师, 从事结构工程抗震研究。

and basic data support for establishing the storey damage model of steel frame structures under seismic excitation.

Key words: steel frame structure; design parameter; damage sensitivity; damage model; damage characterization

0 前言

建筑结构的倒塌破坏是造成地震灾害的主要因素,因导致结构丧失其使用性和安全性引起巨大的人员伤亡和经济损失。震害资料研究表明^[1-2],建筑结构往往因地震作用造成结构损伤,并且其损伤会随地震动力荷载的增加而逐渐累积。建筑材料与结构的力学性能因其损伤累积而不断退化,当建筑结构的损伤达到一定程度时,结构将无法继续承受外部荷载,最终会发生整体或局部倒塌。

钢结构因其质轻、高强、抗震性能好等诸多优点,被广泛应用于大型商场、学校、工厂等建筑物中。目前关于钢结构抗震性能和安全评估的研究得到了国内外的广泛关注,但更多地集中于基于性能的设计方法对钢结构进行抗震性能评估^[3-4],而针对钢结构的地震损伤研究比较少。徐龙河等^[1]提出了基于等效塑性应变和比能双控的损伤模型,可以很好地评估强震下钢结构竖向构件及层的损伤发展过程;杨清平等^[3]采用弹塑性损伤模型对钢结构在地震作用下的损伤进行了量化评估;文献^[5]建立了考虑结构地震反应滞回变形幅值对累积耗能损伤影响的双参数损伤模型,并提出了基于易损性分析评估钢结构在地震作用下损伤程度的方法。

本文基于理论计算与数值模拟,对钢框架结构主要设计参数进行损伤敏感度分析,采用构件损伤-楼层损伤-结构损伤的研究思路,以期获得钢框架结构的损伤演化模型,从而更好地对结构进行抗震性能评估。

1 计算模型

工程采用钢框架结构体系,平面尺寸 24.0 m×19.2 m,跨度和柱距均为 4.8 m,共 5 层,底层层高 3.3 m,标准层层高均为 3.0 m,结构平面布置见图 1。钢框架梁的截面尺寸为 H550 mm×300 mm×25 mm×30 mm,钢框架柱的截面尺寸为 H550 mm×450 mm×30 mm×45 mm,钢材采用 Q235B。楼面荷载为 3.5 kN/m²,屋面荷载为 2.0 kN/m²,恒荷载为 8 kN/m²;地面粗糙类别为 B 类,基本风压为 0.35 kN/m²,基本雪压为 0.25 kN/m²。设计分组为一组;场地土类别为 II 类;框架抗震等级

为二级;抗震设防按Ⅷ度考虑;结构阻尼比取为 0.05。

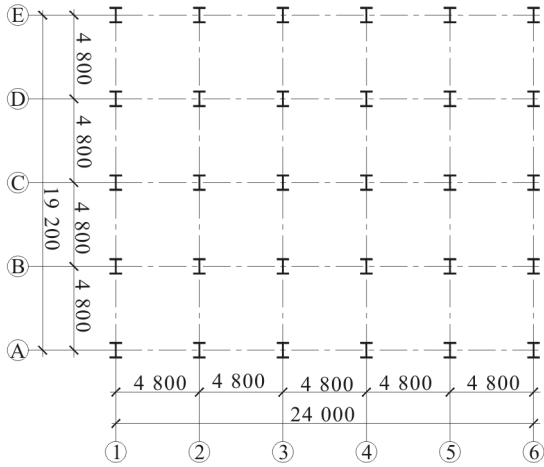


图 1 结构平面图
Fig.1 Structure plan

2 构件损伤研究

2.1 构件损伤的表征

2.1.1 钢框架梁损伤表征

钢框架梁是结构的主要受力构件之一,主要用于竖向荷载的承担和整体结构鲁棒性(Robustness)的维持。根据钢框架梁的重要性和受力性能,本文选用损伤前后钢框架梁的抗弯刚度作为指标来描述其损伤,如

$$D_b = 1 - \frac{B_{b,w}}{B_{b,o}}$$

(1)

式中, D_b 为钢框架梁的损伤值; $B_{b,o}$ 和 $B_{b,w}$ 分别为损伤前后构件的抗弯刚度值。

2.1.2 钢框架柱损伤表征

2.2 设计参数的损伤敏感度分析

为了对往复荷载作用下构件或结构损伤传递规律进行研究,采用文献[6]提出的“预定损伤法”,通过对型钢腹板高度、腹板厚度、翼缘宽度、翼缘厚度等参数进行损伤敏感度分析,得到影响构件损伤最为敏感的设计参数,为楼层损伤模型的建立提供理论基础。

2.2.1 钢框架梁损伤敏感度分析

调整型钢截面,如腹板高度、腹板厚度、翼缘宽度、翼缘厚度来模拟钢框架梁的初始损伤,得到各主要设计参数对型钢梁损伤演化的影响规律(表 1)。

表 1 各设计参数对钢框架梁损伤的影响

Table 1 The effects of design parameters on steel frame beam damage

编号	影响因素	型钢截面尺寸	抗弯刚度 ($\times 10^4$)	损伤值
B ₀	-	H 550×300×25×30	3.014 4	0
B ₁	腹板高度	H 500×300×25×30	2.416 2	0.198
B ₂		H 450×300×25×30	1.892 6	0.372
B ₃		H 350×300×25×30	1.056 7	0.649
B ₄		H 300×300×25×30	0.737 9	0.755
B ₅	翼缘宽度	H 550×250×25×30	2.596 0	0.139
B ₆		H 550×200×25×30	2.177 8	0.278
B ₇		H 550×150×25×30	1.759 6	0.416
B ₈		H 550×120×25×30	1.508 7	0.499
B ₉	腹板厚度	H 550×300×22×30	2.953 7	0.020
B ₁₀		H 550×300×20×30	2.913 3	0.034
B ₁₁		H 550×300×18×30	2.872 9	0.047
B ₁₂		H 550×300×15×30	2.812 3	0.067
B ₁₃	翼缘厚度	H 550×300×25×28	2.877 2	0.045
B ₁₄		H 550×300×25×25	2.667 3	0.115
B ₁₅		H 550×300×25×22	2.452 3	0.186
B ₁₆		H 550×300×25×20	2.306 1	0.235

注:(1)B₀ 为原形结构构件;(2)表中基本单位为 mm。

为消除量纲上的差异,引入各设计参数损伤前的原始值,得到钢框架梁无量纲设计参数与损伤值之间的关系曲线(图 2)。由图可知,腹板厚度及翼缘厚度的无量纲关系曲线基本呈线性;腹板高度及翼缘宽度的无量纲关系曲线相似,当损伤前后翼缘宽度比 $b_0/b=2.5$ 时,框架梁损伤值 $D_b=0.499$,关系曲线趋于平缓;随损伤前后腹板高度比值的增大,框架梁的损伤变化速度最快,即钢框架梁损伤对腹板高度最为敏感,翼缘宽度次之,腹板厚度最不敏感;综合考虑,为实现初始预定损伤,优先调整钢框架梁的腹板高度和翼缘宽度。

2.2.2 钢框架柱

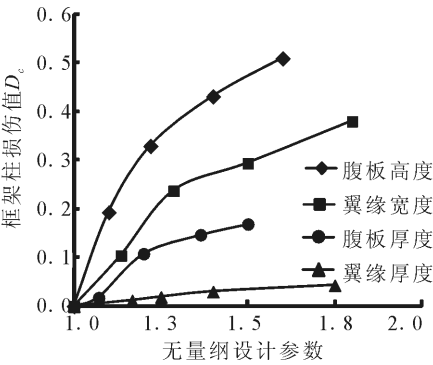


图 3 钢框架柱的损伤关系曲线

Fig.3 Damage curve of steel frame column

3 楼层损伤研究

3.1 楼层损伤的表征

本文钢框架模型的整体变形是剪切型,可视楼层为整个钢框架结构的一个单独子结构,即其层间位移是相互独立的,此时层间位移角由梁、柱及其节点的弹塑性变形构成。因此选取层间最大位移角作为往复荷载作用下的楼层损伤表征量。基于国内外相关研究成果,给出适用于钢框架结构楼层损伤的表征函数:

$$D_s = 1 - \frac{\theta_{\max,w}}{\theta_{\max,o}} \tag{3}$$

式中, $\theta_{\max,o}$ 为楼层损伤前的最大层间位移角; $\theta_{\max,w}$ 为楼层损伤后的最大层间位移角。

3.2 钢框架梁、柱损伤对楼层损伤的影响

3.2.1 初始损伤的实现

为明确钢框架梁、柱损伤对其结构楼层损伤的影响,根据构件主要设计参数的损伤敏感度分析结果,通过调整型钢的腹板高度及翼缘宽度等设计参数来对钢框架梁、柱的初始损伤进行数值模拟。其中,损伤评估标准采用文献[7]确定的钢框架结构在不同损伤程度下的震害指数范围。经反复调试,确定钢框架梁、柱在发生轻度、中度、及重度损伤时型钢的截面尺寸情况,见表 3。

3.2.2 楼层损伤分析

采用 ABAQUS 软件对钢框架结构楼层在往复荷载作用下的动力响应进行模拟分析,揭示一类和多类构件在发生不同程度的损伤时对结构楼层损伤的影响规律,分析结果见表 4。

图 4 为单类与多类构件损伤与楼层损伤的关系曲线图。由图可知,梁、柱构件发生相同损伤时,框架柱的损伤对楼层损伤的影响比框架梁更为显著;与单类构件相比,梁、柱同时发生损伤时楼层的损伤

更加突出。

表 3 钢框架构件设计参数

Table 3 Design parameters of steel frame member					
编号	类型	型钢截面尺寸	损伤值	损伤程度	
B ₁	钢框架梁	H550×300×25×30	0.141	轻度	
B ₂		H450×300×25×30	0.374	中度Ⅰ	
B ₃		H400×300×25×30	0.526	中度Ⅱ	
B ₄		H350×300×25×30	0.652	重度	
C ₁	钢框架柱	H500×450×30×35	0.133	轻度	
C ₂		H450×450×30×35	0.329	中度Ⅰ	
C ₃		H400×450×30×35	0.		

建立各因素与楼层损伤的关系曲线,如图 5 所示,并分别得到各敏感因素与楼层损伤的函数关系式:

$$D_s = -2.428\ 1s^2 + 1.200\ 9s + 0.054\ 1 \quad (6)$$

$$D_s = 0.498\ 3\zeta - 0.40 \quad (7)$$

$$D_s = 1.940\ 7\lambda - 1.140\ 1 \quad (8)$$

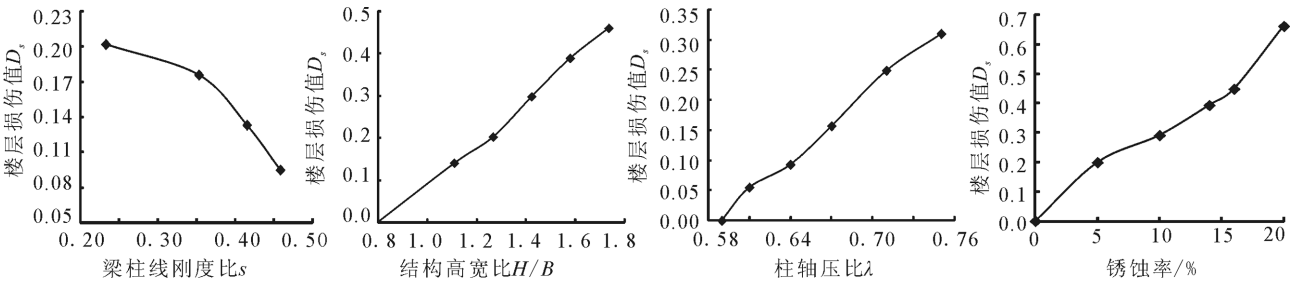


图 5 敏感因素与楼层损伤的关系曲线

Fig.5 The relationship between sensitive factors and storey damage

表 5 梁柱线刚度比对楼层损伤的影响
Table 5 The impact of linear stiffness ratio of column to beam on storey damage

编号	截面尺寸	线刚度比	楼层损伤值
B1	$H550\times300\times25\times30$	0.485	0.095
C1	$H500\times450\times30\times35$		
B2	$H450\times300\times25\times30$	0.415	0.133
C2	$H450\times450\times30\times35$		
B3	$H400\times300\times25\times30$	0.353	0.176
C3	$H400\times450\times30\times35$		
B4	$H350\times300\times25\times30$	0.233	0.202
C4	$H400\times350\times30\times35$		

表 6 结构高宽比对楼层损伤的影响
Table 6 The impact of height-width ratio of structure on storey damage

编号	高宽比	楼层损伤值	编号	高宽比	楼层损伤值
1	0.796	0	4	1.422	0.298
2	1.109	0.141	5	1.578	0.389
3	1.266	0.203	6	1.734	0.460

表 7 柱轴压比对楼层损伤的影响
Table 7 The impact of axial compression ratio of column on storey damage

编号	截面尺寸	轴压比	楼层损伤值
1	$H550\times450\times30\times45$	0.59	0
2	$H550\times400\times25\times45$	0.61	0.555
3	$H550\times450\times30\times40$	0.64	0.093
4	$H550\times450\times25\times40$	0.67	0.157
5	$H550\times450\times25\times35$	0.71	0.249
6	$H550\times450\times20\times35$	0.7	

式中, $E_{H,i}$ 为第 i 个楼层的滞回耗能; E_H 为整体结构的总耗能, $E_H = \sum E_{H,i}$, $\sum \varphi_i = 1$ 。基于广义力做功理论, 采用力矩 M 与转角 θ 的乘积表示诸楼层的滞回耗能, 表达式为:

$$E_{H,i} = \sum_{i=1}^n M_{H,i} \theta_i \tag{15}$$

式中, $M_{H,i}$ 为楼层第 i 列柱端的弯矩; θ_i 为第 i 个楼层的层间位移转角, 其中柱端弯矩与楼层层间位移角均通过软件 ETABS 求得, 因此结构损伤表征量可表达为:

$$D_H = \sum_{i=1}^n \varphi_i D_{s,i} \tag{16}$$

式中, D_H 为结构损伤值; $D_{s,i}$ 为第 i 个楼层的损伤值, $D_{s,i} = 1 - E_{H,i,w}/E_{H,i,o}$, $E_{H,i,o}$ 和 $E_{H,i,w}$ 分别为损伤前后楼层的滞回耗能。

4.2 楼层损伤对结构损伤的影响

4.2.1 初始损伤的实现

为研究地震作用下楼层损伤对结构损伤的影响, 基于上述研究成果, 预先赋予指定楼层初始损伤, 研究损伤楼层数量、位置及损伤程度对结构损伤的影响。经反复调试, 确定楼层在发生不同程度损伤时对应的构件情况, 见表 9。

表 9 楼层设计参数

Table 9 Storey design parameters

损伤类别	构件类别	型钢截面尺寸
轻度损伤	框架梁	$H550 \times 300 \times 25 \times 30$
	框架柱	$H500 \times 450 \times 30 \times 35$
中度损伤 I	框架梁	$H450 \times 300 \times 25 \times 30$
	框架柱	$H450 \times 450 \times 30 \times 35$
中度损伤 II	框架梁	$H400 \times 300 \times 25 \times 30$
	框架柱	$H400 \times 450 \times 30 \times 35$
重度损伤	框架梁	$H350 \times 300 \times 25 \times 30$
	框架柱	$H400 \times 350 \times 30 \times 35$

4.2.2 结构整体损伤分析

为研究楼层损伤位置及程度对钢框架结构地震损伤的影响规律, 研究钢框架结构在 El-Centro 地震波激励下单个楼层损伤对结构动力特性的影响, 揭示楼层损伤对结构损伤的影响规律, 见表 10。

表 10 楼层发生不同程度损伤时整体结构的损伤值
Table 10 The influence of storey damage of different degree on overall structure damage

损伤楼层号	轻度损伤	中度损伤 I	中度损伤 II	重度损伤
1	0.144 5	0.185 0	0.253 1	0.352 4
2	0.113 9	0.154 1	0.210 4	0.288 6
3	0.097 1	0.128 4	0.169 2	0.249 8
4	0.086 2	0.113 2	0.139 2	0.213 8
5	0.082 6	0.097 9	0.127 9	0.201 9

位置。

鉴于楼层发生中度损伤时 H_i/H 与整体结构损伤的关系曲线具有一定的普遍性,本文以中度损伤为例建立结构地震损伤模型,首先引入楼层损伤权值系数:

$$\omega_i = D_{H,i} / \sum_{i=1}^n D_{H,i} = \frac{-0.075 \ln(H_i/H) + 0.1088}{\sum_{i=1}^n (-0.075 \ln(H_i/H) + 0.1088)} \quad (23)$$

式中, $D_{H,i}$ 为楼层发生中度损伤时第 i 个楼层损伤所引起的结构损伤量。结合式(21)~(23)获得多个楼层发生不同程度损伤时,整体结构地震损伤量的计算公式:

$$D_H = \sum_{i=1}^n \omega_i D_{H,i} = \sum_{i=1}^n \frac{D_{H,i}^m}{\sum_{i=1}^n D_{H,i}^m} \times D_{H,i} = \sum_{i=1}^n \frac{-0.075 \ln(H_i/H) + 0.1088}{\sum_{i=1}^n (-0.075 \ln(H_i/H) + 0.1088)} \times [(-0.13 D_{s,i}^2 + 0.29 D_{s,i} - 0.27) \times \ln(H_i/H) + (0.17 D_{s,i}^2 - 0.28 D_{s,i} + 0.32)] \quad (24)$$

4.3 地震波特性对结构地震损伤的影响

为研究地震波峰值速度与峰值加速度比值 Ψ 对框架结构损伤破坏的影响,在对钢框架结构进行弹塑性地震反应分析时,向结构分别输入 16 条地震波,具体参数见表 11。分析 16 条地震波作用下结构的动力响应,计算出整体结构的地震损伤值,获得地震波峰值速度与峰值加速度比值对框架结构损伤破坏的影响。为更直观地研究地震波峰值速度与峰值加速度之比对结构地震损伤的影响规律,将结果进行拟合分析,如图 7 所示。

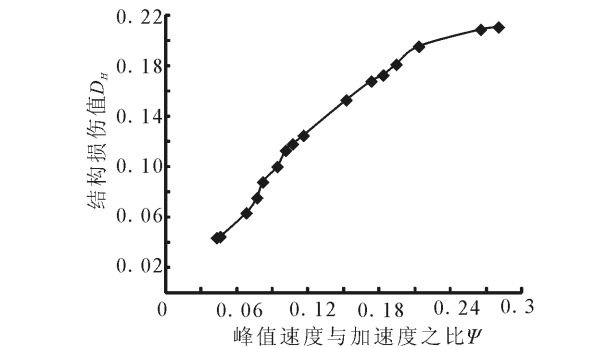


图 7 Ψ 值与整体结构地震损伤值之间的关系曲线
Fig. 7 The relationship between value Ψ and seismic damage value of overall structure

对结果进行回归分析,建立 D 与 Ψ 之间的数学关系式:

$$D = -0.9617 \Psi^3 - 2.0852 \Psi^2 + 1.483 \Psi - 0.0199 \quad (25)$$

式中, D 为整体结构损伤值; Ψ 为地震波峰值速度与峰值加速度比值。

4.4 适用于钢框架结构的地震损伤模型

鉴于国内外关于结构地震损伤模型的研究成果^[9-10],建立整体结构地震损伤模型,该模型由地震波属性和损伤发生的位置及程度两部分组成:

表 11 地震波特性一览表

Table 11 List of seismic wave characteristics		记录台站	地震波特性		
			PGV	PGA	Ψ
编号	地震名称				
1	Parkfield	Cholame,Shandon	12.32	280	0.044
2	Parkfield	Cholame,Shandon	11.28	240	0.047
3	Northridge	Santa Monica	25.53	370	0.069
4	Loma prieta	Capitola-Fire ST	36.66	380	0.096
5	Loma prieta	G			

缘宽度。

(2) 基于构件损伤,对楼层的损伤敏感性进行分析。结果表明:梁、柱构件发生相同损伤时,框架柱的损伤对楼层损伤的影响更为显著;与单类构件损伤相比,梁、柱同时发生损伤时楼层的损伤更加严重。

(3) 本文所建立的结构地震损伤演化模型考虑了结构设计参数和其他影响因素,具有较高的适用性,可为钢框架结构的倒塌评估提供理论支持。

参考文献(References)

- [1] 徐龙河,杨冬玲,李忠献.基于应变和比能双控的钢结构损伤模型[J].振动与冲击,2011,30(7):218-222.
XU Long-He, YANG Dong-ling, LI Zhong-xian. Strain and Energy Ratio-based Damage Model of a Steel Structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7): 218-222. (in Chinese)
- [2] 郑山锁,田进,韩言召,等.考虑锈蚀的钢结构地震易损性分析[J].地震工程学报,2014,36(1):1-6.
ZHENG Shan-suo, TIAN Jin, HAN Yan-zhao, et al. Steel Structure Seismic Vulnerability Analysis Considering Steel Corrosion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(1): 1-6. (in Chinese)
- [3] 杨清平,袁旭东,孙丽.基于塑性变形的钢结构地震损伤量化[J].沈阳建筑大学学报,2011,27(5):886-890.
YANG Qing-ping, YUAN Xu-Dong, SUN Li. The Steel Structure Seismic Damage Quantitative Research Based on Plastic Deformation[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2011, 27(5): 886-890. (in Chinese)
- [4] Federal Emergency Management Agency. FEMA273. Guide-

- lines for Seismic Rehabilitation of Buildings[S]. Washington, DC: 1997.
- [5] 徐龙河,单旭,李忠献.强震下钢框架结构易损性分析及优化设计[J].工程力学,2013,30(1):175-179.
XU Long-he, SHAN Xu, LI Zhong-xian. Vulnerability Analysis and Optimization Design for Steel Frame Structure Under Strong Earthquakes[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 175-179. (in Chinese)
- [6] 陶清林.地震激励下 SRC 框架-RC 核心筒混合结构损伤模型研究[D].西安:西安建筑科技大学,2011
TAO Qing-lin. Research on the Damage Model of SRC Frame-RC Core Wall Hybrid Structure under Seismic Excitation[D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese)
- [7] 欧进萍,牛荻涛,王光远.多层非线性抗震钢结构的模糊动力可靠分析与设计[J].地震工程与工程振动,1990,10(4):27-37.
OU Jin-ping, NIU Di-tao, WANG Guang-yuan. Fuzzy Dynamical Reliability Analysis and Design of Multi-storey Nonlinear Aseismic Steel Structures[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1990, 10(4): 27-37. (in Chinese)
- [8] Young-Ji Park, Alfredo H-S Ang, Yi Kwen Wen. Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985, 111(4): 740-757.
- [9] David V Rosowsky, Bruce R. Performance-Based Engineering of Wood Frame Housing: Fragility Analysis Methodology[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(1): 32-38.
- [10] Sivia L Dimova, Anaxagoras Elenas. Seismic Intensity Parameters for Fragility Analysis of Structures with Energy Dissipating Devices[J]. Structural Safety, 2002(24): 1-28.