

郑山锁,左英,张晓辉,等.基于IDA的多龄期钢排架结构地震易损性分析[J].地震工程学报,2018,40(4):698-704.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.698

ZHENG Shansuo, ZUO Ying, ZHANG Xiaohui, et al. Seismic Vulnerability Analysis of Multi-age Steel Bent Frame Structures Based on IDA Method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(4): 698-704. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.698

# 基于IDA的多龄期钢排架结构地震易损性分析

郑山锁, 左英, 张晓辉, 石磊, 黄威曾, 郑捷

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**针对钢材锈蚀导致结构抗震性能退化的现象,需对多龄期结构进行抗震性能评估。基于酸性大气环境下不同锈蚀程度钢材材性试验结果,以SAP2000为平台建立不同服役龄期(30年、40年、50年、60年)钢排架结构数值模型。选取PGA为地震动强度指标,最大层间位移角为地震需求参数对模型进行增量动力分析(IDA),建立结构地震需求模型,基于地震需求模型建立多龄期钢排架结构厂房地震易损性曲线和震害矩阵。研究成果可为城市多龄期建筑地震风险评估提供依据。

**关键词:**钢排架;多龄期;增量动力分析;最大层间位移角;地震易损性

中图分类号:TU391;TU317.1

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2018)04-0698-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.698

## Seismic Vulnerability Analysis of Multi-age Steel Bent Frame Structures Based on IDA Method

ZHENG Shansuo, ZUO Ying, ZHANG Xiaohui, SHI Lei, HUANG Weizeng, ZHENG Jie

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

**Abstract:** Steel Structure is widely used for industrial architecture because of its advantages of being light weight, higher strength, and better plasticity and toughness. Unfortunately, the poor performance that resists corrosion has been gradually found recently with the steel widely used. The seismic performance of structures in different service times is necessary to be evaluated since the corrosion of steel directly lead to the deterioration of seismic performance and stiffness of structure. In order to study the impact of corrosion on steel mechanical properties in the acidic atmospheric environment and then analysis the seismic vulnerability of multi-age steel structures, 105 standard steel material specimens corroded by artificial climate accelerated corrosion test technique were carried out under tensile test. Based on tensile test data, the linear regression relationship between the steel mechanical properties (yield strength, ultimate strength, elongation, elastic modulus) and weightlessness rate was established. At the same time, the corrosion rate and the initial corrosion time of steel bent frame structure were accounted for by using findings from related research. Based on the result of material performance of different corrosive steel in acidic atmospheric environment and combined with corrosion rate and the initial corrosion time,

收稿日期:2016-04-08

基金项目:国家科技支撑计划(2013BAJ08B03);国家自然科学基金计划(51678475);陕西省重点研发计划(2017ZDXM-SF-093);陕西省教育厅产业化项目

第一作者简介:郑山锁(1960-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事结构工程抗震研究。E-mail:zhengshansuo@263.net。

the analysis platform SAP2000 was employed to build numerical models of steel bent frame structures with different service times (30 years, 40 years, 50 years, 60 years). In order to eliminate the influence of uncertainty of seismic record, 24 seismic records had been chosen in this paper. The incremental dynamic analysis (IDA) was carried out on the models with *PGA* as the earthquake intensity index and maximum inter-story drift as the seismic demand index. The relationship of probabilistic seismic demand was obtained by IDA analysis for multi-age steel bent frame structures. The statistical parameters of the probabilistic seismic capacity model were evaluated using existing research. Consequently, seismic vulnerability curves of multi-age steel bent frame structures were established in accordance with seismic demand model and seismic capacity model. Furtherly, earthquake damage matrixes were obtained by seismic vulnerability curves. The results of this research provide support for seismic risk assessment of multi-age structures.

**Keywords:** steel bent frame; multi-age; incremental dynamic analysis; maximum inter-story drift; seismic vulnerability

## 0 引言

钢结构因其轻质高强、塑性韧性好等优点被广泛应用于工业建筑中的钢厂房建造,但在应用过程中发现钢结构耐腐蚀性差的问题不容小觑。腐蚀使得钢材力学性能显著降低,导致结构在地震作用下容易发生脆性破坏。近几十年国内外地震灾害频繁发生,例如 2008 年的汶川地震中,许多工业厂房受损甚至倒塌,造成了严重的财产损失和人员伤亡<sup>[1]</sup>。因此探究地震易损性影响因素,寻找地震易损性分析方法,对工业厂房进行地震易损性分析十分必要。朱健等<sup>[2]</sup>专门对单层厂房进行地震易损性研究,但忽略了腐蚀的影响。考虑到工业厂房的内、外界环境的不确定性,钢材均会发生不同程度的锈蚀,因此对不同服役龄期的钢排架厂房进行地震易损性分析显得尤为重要。

增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis,简称 IDA)是将单一的非线性动力时程分析扩展到增量的动力时程分析,从而得到不同强度地震作用下结构动力响应的方法。IDA 方法得到的结果可以精确地反映结构体系随地震强度改变而发生的变化,较真实地模拟地震作用下结构的动力响应<sup>[3]</sup>。鉴于此,本文利用 IDA 方法对单层单跨钢排架厂房进行概率地震易损性分析,并根据分析结果建立易损性曲线,以此来研究不同服役龄期钢排架厂房地震易损性。研究结论可为在役钢厂房乃至钢结构的性能评估、地震危险性及地震损失评估提供参考依据。

## 1 钢材腐蚀规律

### 1.1 材性试验

考虑到室外暴露试验周期长且外界干扰较大,

为缩短试验时间并较真实地模拟酸性大气环境,本试验在西安建筑科技大学耐久性试验室采用室内加速腐蚀方法进行。依据 GB/T24195-2009《金属和合金的腐蚀酸性盐雾、“干燥”和“湿润”条件下的循环加速试验》<sup>[4]</sup>配制酸性盐雾溶液,用以模拟酸性大气环境中的酸溶液腐蚀。试验条件见表 1。

表 1 试验条件

Table 1 Test conditions

内容	试验条件
酸性盐雾条件	(35±1) °C
“干燥”条件	温度:(60±1) °C;湿度:<30%RH
“湿润”条件	温度:(50±1) °C;湿度:>95%RH
单循环时间和具体内容	总试验时间 8 h;酸性盐雾 2 h;“干燥”条件 4 h;“湿润”条件 2 h
试验状态转换时间间隔	盐雾-干燥:<30 min;干燥-湿润:<15 min;湿润-盐雾:<30 min

为了定量地表示钢材试件的锈蚀程度,以失重率为参数建立钢材力学性能随失重率增加的退化规律,失重率的计算如公式(1)所示:

$$D_w = (W_0 - W_1) / W_0 \quad (1)$$

式中: $W_0$ 和 $W_1$ 分别为腐蚀前和腐蚀后钢片的质量,单位为 g。

钢材材性试验包括失重率的测定和拉伸试验,以确定钢材的抗拉强度、屈服点、伸长率等力学性能指标随失重率增大而退化的规律,并为有限元模型计算提供所需的材性参数。本文选取 5 种厚度(6 mm、6.5 mm、8 mm、9 mm 和 14 mm)的标准材性试件,每种厚度各 21 个,材性试件尺寸如图 1 所示。每隔 240 h 将每种厚度试件取出 3 片,得到 7 种不同锈蚀程度的试件。对锈蚀钢材用稀释盐酸溶液浸泡除锈后烘干称重,算得各试件的失重率。

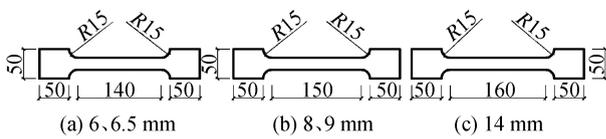


图1 不同厚度钢材材性试件

Fig.1 The steel specimens with different thickness

采用  $10 \text{ (N/mm}^2\text{)}/\text{s}$  的应力速率对每种厚度的试件进行拉伸试验,3个为一组,拉伸仪器采用 30T 万能试验机,应变采集器采用 DH3818 静态应变仪<sup>[5]</sup>。为减小误差,保证试验的合理性,最终试验结果取 3 次试验结果的平均值。对最终结果进行线性拟合,得到随失重率增大钢材力学性能的退化规律,如图 2 和式(2)所示:

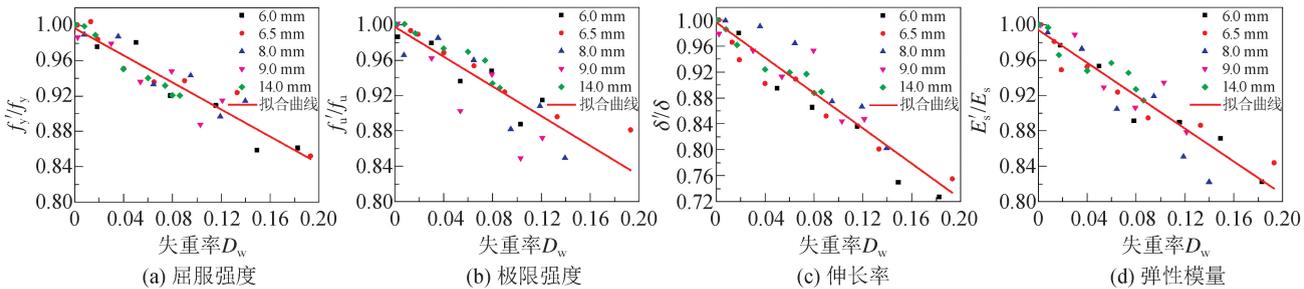


图2 钢材力学性能随失重率的变化

Fig.2 Changes in mechanical properties of steel with weightlessness rate index

## 1.2 钢材的起锈时间和腐蚀速率

钢结构在建造初期会做防腐涂层,但随着服役龄期的增加,涂层因受外界环境的侵蚀而逐渐失去保护功能。防腐涂层保护时间的长短与外部环境类型、防腐涂层的特性以及厚度有关,依据相关规范<sup>[6]</sup>以及课题多年的实测结果,从均值意义上确定钢结构防腐涂层的使用年限是 30 年,即确定钢材的起锈时间为 30 年。

结合文献<sup>[7]</sup>以及国际标准化组织 ISO 在 1998 年推出的 ISO 12944,设定 Q235 碳素结构钢在城市酸性大气环境中的平均腐蚀速率为  $0.02 \text{ mm/a}$ 。

## 1.3 构件失重率和龄期的关系

为获得钢材失重率和服役龄期的关系,特作两个基本假定:(1)钢材均匀腐蚀且腐蚀前后钢材密度不变,即  $\rho_0 = \rho_t$ ; (2) 构件腐蚀前后长度不变,即  $L_0 = L_t$ 。则式(1)改写为:

$$D_w = \frac{\rho_0 A_0 L_0 - \rho_t A_t L_t}{\rho_0 A_0 L_0} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \quad (4)$$

式中: $D_w$  为构件失重率; $\rho_0$ 、 $\rho_t$  分别为钢材腐蚀前、后的密度; $L_0$ 、 $L_t$  分别为构件腐蚀前、后的长度; $A_0$

$$\begin{cases} f'_y/f_y = 1 - 0.767D_w \\ f'_u/f_u = 1 - 0.842D_w \\ \delta'/\delta = 1 - 1.363D_w \\ E'_s/E_s = 1 - 0.932D_w \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f_y$ 、 $f'_y$  分别为钢材锈蚀前、后的屈服强度; $f_u$ 、 $f'_u$  分别为钢材锈蚀前、后的极限强度; $\delta$ 、 $\delta'$  分别为钢材锈蚀前、后的伸长率; $E_s$ 、 $E'_s$  分别为钢材锈蚀前、后的弹性模量; $D_w$  为钢材失重率。其中  $f'_y$  和  $f'_u$  的计算式为:

$$\begin{cases} f'_y = F'_y/A \\ f'_u = F'_u/A \end{cases} \quad (3)$$

式中: $F'_y$ 、 $F'_u$  分别为腐蚀钢材屈服、极限时的拉力; $A$  为钢材材性试件腐蚀前的截面积。

为构件设计截面积; $A_t$  为服役  $t$  年后构件截面积。

以工字型截面为例,设钢结构服役  $t$  年的平均锈蚀厚度为  $y_t$ ,则  $y_t$ 、 $A_0$ 、 $A_t$  计算如下:

$$y_t = 0.02(t - 30) \quad (5)$$

$$A_0 = 2bt_a + ht_w v - 2t_w t_a \quad (6)$$

$$A_t = 2y_t t_w + 2bt_a - 4by_t + ht_w - 2y_t h - 2t_a t_w + 4y_t^2 \quad (7)$$

将式(5)、(6)(7)代入式(4)中,得到构件失重率和服役龄期的关系,见式(8):

$$D_w = \frac{0.01(t - 30) \cdot (8b - 4t_w + 4h - 0.16t + 4.8)}{2bt_a + ht_w - 2t_w t_a} \quad (8)$$

将式(8)代入式(2)中,得到不同龄期钢材力学性能的退化,用于后续的有限元分析。

## 2 算例分析

### 2.1 典型结构的选取

本文以某初轧厂均热炉车间厂房作为原型,设计单层单跨的钢排架厂房,跨度为 33 m,柱距为 6 m,高 23.1 m,其中下柱高 13.8 m,上柱高 9.3 m,

内部设置1台30 t重级工作制软钩桥式吊车。抗震设防烈度为Ⅷ(0.2g)度,抗震等级为三级,Ⅱ类场地条件,设计地震分组为第二组。恒载为2.9 kN/m<sup>2</sup>,活载为0.5 kN/m<sup>2</sup>,雪载为0.3 kN/m<sup>2</sup>,基本风压为0.40 kN/m<sup>2</sup>,地面粗糙度为B类,所有模型材料均采用Q235B钢材,截面尺寸如表2所列。

表2 结构构件截面尺寸

Table 2 The size of models

烈度	上柱/mm	下柱/mm	屋架/mm
Ⅷ (0.2g)	H700×500×20×26	H700×500×26×26	L200×26 (弦杆)
		2L200×24	
		—550×20	L140×20 (支撑)
		L100×12(横缀条) L140×14(斜缀条)	

## 2.2 地震动记录的选取

文献[8]指出,地震波的随机性和不确定性将在一定程度上影响结构地震易损性分析的合理性,因此需要对结构施加一系列有代表性的地震动,并进行统计分析。本文采用ATC-63<sup>[9]</sup>中的选波原则,在PEER地震动记录数据库和中国地震台网数据库,分别选取了22条ATC-63报告中的建议地震动记录和2条汶川地震动记录,见表3。

表3 所选地震动记录

Table 3 Seismic records in this paper

编号	名称	PGA/g
1	Northridge	0.52
2	Northridge	0.48
3	Duzce, Turkey	0.82
4	Hector Mine	0.34
5	Imperial, Valley	0.35
6	Imperial, Valley	0.38
7	Kobe, Japan	0.51
8	Kobe, Japan	0.24
9	Kocaeli, Turkey	0.36
10	Kocaeli, Turkey	0.22
11	Landers	0.24
12	Landers	0.42
13	LomaPrieta	0.53
14	LomaPrieta	0.56
15	Manjil, Iran	0.51
16	Superstition Hills	0.36
17	Superstition Hills	0.45
18	Cape Mendocino	0.55
19	Chi-Chi, Taiwan	0.44
20	Chi-Chi, Taiwan	0.51
21	San Fernando	0.21
22	Friuli, Italy	0.35
23	汶川	0.56
24	汶川	0.46

依据Vamvatasikos<sup>[10]</sup>提出Hunt&Fill准则,采用不等步原则对所选地震动进行调幅,弹性阶段

采用较大步长增量,弹塑性阶段采用较小步长增量,在不忽略结构变形发展过程中重要转折点的前提下,尽可能的提高计算效率,保证IDA方法计算效率和计算精度之间的平衡。文中PGA统一调整为:0.07g、0.215g、0.4g、0.62g、0.8g、0.9g、1.0g。

## 2.3 有限元模型的建立

近几十年国内外大量地震震害表明,工业厂房横向抗震能力弱于纵向,故选取一榀钢排架结构进行分析。采用SAP2000建立分析模型,梁、柱以及桁架均采用线单元中的框架单元来模拟,桁架体系、屋架与上柱柱顶连接点均通过释放杆端弯矩设置为理想铰接,下柱底端通过节点约束设置为固定端。对结构进行网格划分,取网格尺寸为0.1 m,以保证分析效率和精度之间的平衡。为较真实地模拟结构在地震作用下的非线性性能,给排架柱布置P-M2-M3塑性铰,给桁架布置轴力P塑性铰,考虑到阻尼值会直接影响结构动力分析结果的可靠性,在对结构进行非线性动力时程分析之前需先进行模态分析,以确定结构的前两阶周期,从而确定结构的阻尼系数。

## 3 地震易损性分析

### 3.1 概率地震需求分析

结构的地震需求(Seismic Demand)是结构在地震作用下维持其安全性、适用性而具备的最小能力,即地震作用在结构上激起的最大响应<sup>[11]</sup>。可以通过概率地震需求分析建立结构地震需求参数(Seismic Demand Parameter, SDP)与地震动强度指标(Intensity Measure, IM)之间的关系,根据文献[8],本文选取最大层间位移角 $\theta_{max}$ 作为SDP,IM选用峰值加速度PGA。

文献[11]指出,地震需求D的中位值 $m_D$ 和地震动强度IM之间一般服从幂指数回归关系且结构的地震需求D服从对数正态分布:

$$m_{D/IM} = \alpha (IM)^\beta \quad (9)$$

对式(9)两边分别取对数:

$$\ln m_{D/IM} = a + b \ln(IM) \quad (10)$$

式中: $a = \ln \alpha$ 、 $b = \beta$ 、 $a$ 、 $b$ 均通过对结构IDA结果数据回归分析得到。

结构的地震需求D用对数正态分布函数表示,其对数标准差为:

$$\beta_{D/IM} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (\ln D_i - \ln m_{D/IM})^2} \quad (11)$$

依据式(8)和式(2)得到的不同服役龄期钢材的力学性能,对钢排架厂房进行增量动力分析,并对

地震动强度指标  $PGA$  和结构地震响应  $\theta_{\max}$  分别取对数后绘成散点图,按式(10)对 IDA 结果进行线性回归分析,得到 VIII 度设防下结构服役龄期分别为 30 年、40 年、50 年、60 年的钢排架结构厂房概率地震需求模型,如图 3 和式(12)所示。

$$\begin{cases} \ln[m_D(30)] = -3.3536 + 0.9371 \ln(PGA) \\ \ln[m_D(40)] = -3.1129 + 0.9122 \ln(PGA) \\ \ln[m_D(50)] = -2.9907 + 0.8949 \ln(PGA) \\ \ln[m_D(60)] = -2.8401 + 0.8788 \ln(PGA) \end{cases} \quad (12)$$

根据 IDA 结果,由式(11)计算得到不同龄期所

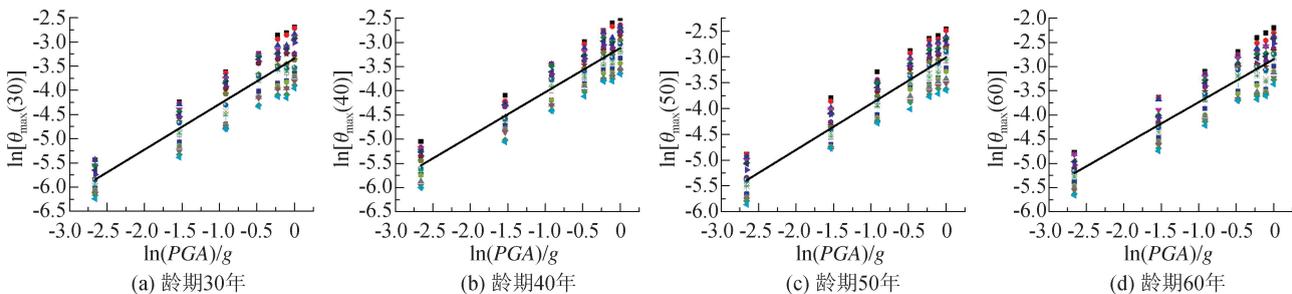


图 3 不同龄期结构最大层间位移角回归分析

Fig.3 Regressive analysis of structural maximum lateral displacement angles of different ages

邻破坏状态的界限状态定义为极限状态,结构的极限状态被划分为:轻微破坏  $LS_1$ 、中等破坏  $LS_2$ 、严重破坏  $LS_3$  和倒塌  $LS_4$ 。依据 HAZUS 技术手册确定钢排架结构厂房各性能水平对应的层间位移角限值,并对各极限状态层间位移角限值进行修正以考虑结构不同服役龄期的影响(表 5)。

表 5 各性能水平的层间位移角限值

Table 5 Limit value of story drift coded

服役龄期	轻微破坏 ( $LS_1$ )	中等破坏 ( $LS_2$ )	严重破坏 ( $LS_3$ )	倒塌 ( $LS_4$ )
30 年	0.005	0.01	0.025	0.0667
40 年	0.005	0.01	0.02475	0.0664
50 年	0.005	0.01	0.024	0.06267
60 年	0.005	0.01	0.02313	0.06

### 3.3 结构地震易损性分析

结构地震易损性是一个概率量,是指结构在不同强度水平地震作用下达到或超越某一极限状态的概率值<sup>[8,15]</sup>。结构特定阶段的失效概率  $P_f$  为:

$$P_f(PGA) = P[D \geq C] = \Phi \left[ \frac{\ln(m_{D/IM}) - \ln(m_C)}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{D/IM}^2 + \beta_M^2}} \right] \quad (13)$$

式中: $m_{D/IM}$  为结构地震需求  $D$  的中位值; $m_C$  为结构概率抗震能力均值,按表 5 对应取值; $\beta_M$  与结构破坏状态限定值的不确定性有关,取为 0.4<sup>[12]</sup>; $\beta_C$  为结构概率抗震能力的对数标准差,当以层间位移角

对应的对数标准差见表 4。

表 4 不同龄期所对应的对数标准差

Table 4 Different ages of the logarithm standard deviation

对数标准差	服役龄期			
	30 年	40 年	50 年	60 年
$\beta_{D/IM}$	0.267	0.285	0.257	0.293

### 3.2 结构极限状态的定义

参考 HAZUS<sup>[12]</sup> 和 GB/T17742-2008《中国地震烈度表》<sup>[13]</sup>,将结构在地震作用下的破坏状态分为基本完好  $DS_1$ 、轻微破坏  $DS_2$ 、中等破坏  $DS_3$ 、严重破坏  $DS_4$  和倒塌  $DS_5$  五个等级。文献[14]将相

为需求指标时,取 0.399<sup>[16]</sup>; $\beta_{D/IM}$  由概率地震需求分析结果给出,见表 4。

### 3.4 地震易损性曲线的建立

结构易损性常用的地震易损性曲线表示,是以地震动强度指标  $PGA$  为自变量,结构破坏超越某极限状态的概率为因变量的曲线<sup>[17]</sup>。

将式(12)代入式(13)中,得到钢排架结构不同服役龄期的地震易损性曲线,见图 4。

对比图 4 中 VIII 度设防烈度下结构不同服役龄期(30 年、40 年、50 年、60 年)的地震易损性曲线可以发现:

(1) 随着服役龄期的增加,结构在同一地震动强度下超越某一极限状态的概率增大,这是因为锈蚀使得钢材力学性能降低,导致构件承载能力下降,抗震性能减弱,结构更容易发生损坏。

(2) 对比结构服役龄期为 30 年和 60 年的超越概率,结构在基本完好、轻微破坏的最大降幅约分别为 39.6%、32.2%,严重破坏和倒塌最大增幅约分别为 11.0%、33.3%。可见服役龄期的增加使得结构的抗震能力大大减弱,因此在对结构进行抗震分析时考虑腐蚀对结构抗震性能的影响十分必要。

### 3.5 震害矩阵

由钢排架结构不同服役龄期下的地震易损性曲线,计算得到相应的震害矩阵,见表 6。

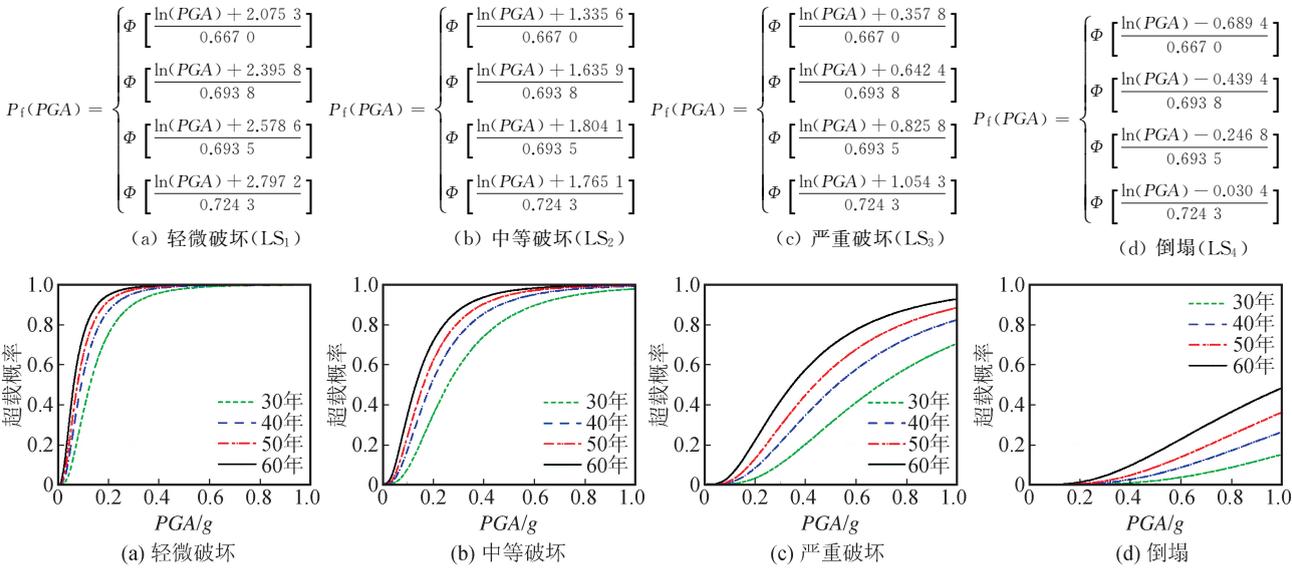


图 4 不同服役龄期钢排架结构地震易损性曲线

Fig.4 Seismic vulnerability curves of steel bent frame structure of different ages

表 6 不同服役龄期钢排架结构的震害矩阵

Table 6 Earthquake damage matrix of steel bent frame structure of different ages

服役 龄期/年	震害 矩阵	地震烈度				
		Ⅵ度	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度	X度
		0.05g	0.1g	0.2g	0.4g	0.8g
30	P[DS <sub>1</sub> ]	0.916	0.633	0.243	0.097	0.041
	P[DS <sub>2</sub> ]	0.078	0.293	0.417	0.326	0.224
	P[DS <sub>3</sub> ]	0.006	0.072	0.310	0.475	0.534
	P[DS <sub>4</sub> ]	0.000	0.002	0.030	0.100	0.193
	P[DS <sub>5</sub> ]	0.000	0.000	0.000	0.002	0.008
40	P[DS <sub>1</sub> ]	0.806	0.447	0.129	0.017	0.001
	P[DS <sub>2</sub> ]	0.169	0.385	0.354	0.133	0.020
	P[DS <sub>3</sub> ]	0.025	0.160	0.435	0.504	0.252
	P[DS <sub>4</sub> ]	0.000	0.008	0.080	0.321	0.557
	P[DS <sub>5</sub> ]	0.0000	0.0000	0.002	0.025	0.170
50	P[DS <sub>1</sub> ]	0.726	0.345	0.081	0.008	0.000
	P[DS <sub>2</sub> ]	0.231	0.419	0.308	0.092	0.011
	P[DS <sub>3</sub> ]	0.042	0.220	0.481	0.452	0.181
	P[DS <sub>4</sub> ]	0.001	0.016	0.126	0.401	0.559
	P[DS <sub>5</sub> ]	0.000	0.000	0.004	0.047	0.249
60	P[DS <sub>1</sub> ]	0.608	0.247	0.050	0.005	0.000
	P[DS <sub>2</sub> ]	0.306	0.410	0.240	0.061	0.007
	P[DS <sub>3</sub> ]	0.082	0.300	0.488	0.359	0.119
	P[DS <sub>4</sub> ]	0.004	0.042	0.210	0.480	0.511
	P[DS <sub>5</sub> ]	0.000	0.001	0.012	0.095	0.363

分析表 6 的震害矩阵,可以得到:

(1) 对于服役龄期为 30 年即基本未锈蚀的结构,在遭受低于设防烈度的多遇地震影响时,结构以基本完好为主,较少发生轻微破坏,其中基本完好大约占到 80.9%,轻微破坏占 16.7%,无倒塌现象。当结构遭受设计地震影响时,结构以轻微破坏为主,轻微破坏占 41.7%,基本完好和中等破坏分别占

24.3%和 31.0%,严重破坏仅占 3.0%,几乎无倒塌现象。当结构遭受高于设防烈度的罕遇地震影响时,结构以中等破坏为主,中等破坏占 47.5%,轻微破坏、严重破坏和基本完好分别占 32.6%、10%和 9.7%,倒塌仅占 0.2%。表明结构满足“小震不坏,中震可修,大震不倒”的抗震设计基本准则。

(2) Ⅷ度设防烈度下分别服役 30 年、40 年、50 年和 60 年的钢排架结构,当遭受低于设防烈度的多遇地震影响时,结构基本完好的概率分别为 80.9%、64.8%、54.6%和 42.5%;当遭受高于设防烈度的罕遇地震影响时,结构发生严重破坏的概率分别为 10%、32.1%、40.1%和 48%,结构倒塌的概率分别为 0.2%、2.5%、4.7%和 9.5%,可见,随着锈蚀程度的不断加剧,结构抗震性能退化呈现先快后慢趋势,可能是钢材锈层隔绝了钢材与外界环境的联系造成的。

## 4 结论

基于钢材材性试验得到的锈蚀钢材力学性能退化模型,以 PGA 为地震动强度指标,以层间位移角为需求参数,对结构进行 IDA 分析,建立了结构的地震需求模型,进而得到钢排架厂房在服役龄期分别为 30 年、40 年、50 年、60 年的地震易损性曲线和震害矩阵,通过分析得到以下几个结论:

(1) 通过室内加速腐蚀试验模拟酸性大气环境下钢材的腐蚀,得到腐蚀钢材的各项力学性能指标随锈蚀程度增加而退化的规律,退化规律表明各性能指标与失重率基本呈线性关系。其中屈服强度、极限强度、伸长率和弹性模量的最大下降幅度达到

了 14.8%、15.2%、28.3% 和 17.8%。

(2) 基于钢材材性试验得到的锈蚀钢材力学性能退化规律,引入时间参数,建立结构服役龄期与钢材力学性能的关系。

(3) 增量动力分析方法不但可以较真实地模拟结构在不同地震波作用下的弹塑性反应,而且通过对地震波的调幅,可以得到在不同峰值地震加速度下结构的破坏状态。

(4) 随着结构服役龄期的增加,腐蚀造成了材料力学性能的退化,使得构件承载力降低,在同一震动强度下结构发生某一破坏状态的概率增大,表明腐蚀使得结构的抗震性能降低且龄期对结构失效概率的影响随破坏程度的加剧而逐渐显著。

## 参考文献(References)

- [1] 王威,郑山锁.工业厂房在 2008 汶川大地震中的震害分析及启示[J].地震工程与工程振动,2011,31(1):130-141.  
WANG Wei,ZHENG Shansuo.Seismic Damage Analysis of Industrial Buildings in 2008 Wenchuan Earthquake[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2011,31(1):130-141.
- [2] 朱健,谭平,周福霖.基于位移的钢筋混凝土结构单层厂房易损性分析[J].振动与冲击,2010,29(1):207-213.  
ZHU Jian,TAN Ping,ZHOU Fulin.Fragility Analysis of Single Storey Workshop of Reinforced Concrete Structure Based on displacement[J].Journal of Vibration and Shock,2010,29(1):207-213.
- [3] 李磊,郑山锁,李谦.基于 IDA 的型钢混凝土框架的地震易损性分析[J].广西大学学报:自然科学版,2012,36(4):535-541.  
LI Lei,ZHENG Shansuo,LI Qian.Seismic Fragility Analysis of SRC Structures Based on IDA Method[J].Journal of Guang xi University:NatSci Ed,2012,36(4):535-541.
- [4] 金属和合金的腐蚀酸性盐雾、“干燥”和“湿润”条件下的循环加速试验:GB/T 24195-2009[S].北京:中国标准出版社,2009.  
Corrosion of Metals and Alloys—Accelerated Cyclic Tests with Exposure to Acidified Salt Spray,“Dry” and “Wet” Conditions:GB/T 24195-2009[S].Beijing:Standards Press of China,2009.
- [5] 金属材料室温拉伸试验方法:GB228-2002[S].北京:中国标准出版社,2002.  
Metallic Materials Tensile Testing Method of Test at Ambient Temperature:GB228-2002[S].Beijing:Standards Press of China,2002.
- [6] 工业建筑防腐蚀设计规范:GB50046-2008[S].北京:中国计划出版社,2008.  
Code for Anticorrosion Design of Industrial Constructions:GB50046-2008[S].Beijing:Planning Press of China,2008.
- [7] 杨熙珍.金属腐蚀电化学热力学[M].北京:化学工业出版社,

1991.

YANG Xizhen.Electrochemistry and Thermodynamics on Metal-corrosion[M].Beijin:Chemical Industry Press,1991.

- [8] 梁丹,梁兴文.按现行规范设计的Ⅷ度区 RC 框架结构的倒塌性能评估[J].地震工程学报,2015,37(4):1060-1065.  
LIANG Dan,LIANG Xingwen.Collapse Performance Evaluation of Reinforced Concrete Frame Structures in Seismic-intensity-8 Zone Designed Using Current Codes[J].China Earthquake Engineering Journal,2015,37(4):1060-1065.
- [9] ATC-63,Quantification of Building Seismic Performance Factors[S].FEMA P695,2008.
- [10] VAMVATSIKOS D,CORNELL C A.Incremental Dynamic Analysis[J].Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2002,31(3):491-514.
- [11] 王丹.钢框架结构的地震易损性及概率风险分析[D].哈尔滨工业大学,2006.  
WANG Dan.Seismic Fragility Analysis and Probabilistic Risk Analysis of Steel Frame Structures[D].Harbin:Harbin Institute of Technology University,2006.
- [12] FEMA.Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model,HAZUS-MH MR4 Technical Manual[Z].Washington,D.C,2003.
- [13] 中国地震烈度表:GB/T 17742-2008[S].北京:中国标准出版社,2008.  
The Chinese Seismic Intensity Scale:GB/T 17742-2008[S].Beijing:Standards Press of China,2008.
- [14] 吕大刚,于晓辉,宋鹏彦,等.抗震结构最优设防水平决策与全寿命优化设计的简化易损性分析方法[J].地震工程与工程振动,2009,29(4):23-32.  
LÜ Dagang,YU Xiaohui,Song Pengyan,et al.Simplified Fragility Analysis Methods for Optimal Protection Level Decision-making and Minimum Lifecycle Cost Design of Aseismic Structures[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2009,29(4):23-32.
- [15] 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 Shansuo,TIAN Jin,HAN Yanzhao,et al.Seismic Fragility Analysis of Steel Structure Considering Steel Corrosion[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(1):1-6.
- [16] 李刚,程耿东.基于性能的抗震设计——理论、方法与应用[M].北京:科学出版社,2004.  
LI Gang,CHENG Gengdong.Performance-based Seismic Design—Theory,Method and Application[M].Beijing:Science Press,2004.
- [17] 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 Longhe,SHAN Xu,LI Zhongxian.Vulnerability Analysis and Optimization Design for Steel Frame Structure Under Strong Earthquakes[J].Engineering Mechanics,2013(1):175-179.