

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211119001

# 基于IDA的西安站改东配楼结构地震易损性分析\*

郭宏超<sup>1</sup>, 张思嘉<sup>1</sup>, 雷天奇<sup>2</sup>, 王洪臣<sup>3</sup>, 杨迪雄<sup>1,4</sup>

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714099;  
3. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西 西安 710048; 4. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室,  
辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为评估复杂连体结构在地震作用下的抗震性能, 通过增量动力分析法对结构整体的抗震性能进行易损性分析。分别将最大层间位移角, 扭转角和损伤参数作为DM值, 获取结构易损性曲线, 根据超越概率密度函数得到了各部件和整体结构的易损性矩阵。结果表明: 在不同工况的PGA输入下, 连体结构各部分均能满足抗震规范所规定的8度罕遇地震的要求, 大跨桁架始终满足抗震性能要求; 随着整体结构破坏程度的不断加大, 角钢预埋件的破坏随着大跨桁架在强震作用下扭转的增大而逐渐增大, 各水准的超越概率均大于其它部分的超越概率, 因而大跨桁架支座端的角钢预埋件1和2是决定连体结构整体抗震性能的关键。

**关键词:** 复杂连体结构; 大跨桁架; 地震易损性分析; 地震概率需求模型; DM参数

**中图分类号:** TU317.1; TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0721-11

## IDA-based Seismic Vulnerability Analysis of the Structure of the Modified East Side Building of Xi'an Railway Station

GUO Hongchao<sup>1</sup>, ZHANG Sijia<sup>1</sup>, LEI Tianqi<sup>2</sup>, WANG Hongchen<sup>3</sup>, YANG Dixiong<sup>1,4</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714099, China; 3. China Northwest Building Design & Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710048, China; 4. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In order to evaluate the seismic performance of complex conjoined structures under earthquake action, the vulnerability analysis of the seismic performance of the whole structure was carried out by means of incremental dynamic analysis. Taking the maximum inter-story drift angle, torsion angle and damage parameters as DM values, respectively, the structural fragility curve was obtained, and the fragility matrix of each component and the whole structure was obtained according to the transcendental probability density function. The results show that: under the input of PGA in different working conditions, every part of the conjoined structure can meet the requirements of the 8 degree rare earthquake stipulated in the seismic code, and the long-span truss always meets the seismic performance requirements; the damage of the angle steel embedded parts gradually increases with the increase of the torsion of the large-span truss under the action of the strong earthquake, and the exceed-

\* 收稿日期: 2021-11-19; 修回日期: 2022-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978571)、陕西省杰出青年基金项目(2021JC-41)、陕西省重点研发计划项目(2022SF-199, 2022SF-121)、陕西铁路工程职业技术学院科研基金项目(KY2021-53)资助

作者简介: 郭宏超(1981—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事钢结构、组合结构方面的研究。E-mail: ghc-1209@163.com

ing probability of each level is greater than that of other parts. Embedded parts 1 and 2 are the key to determining the overall seismic performance of the connected structure.

**Keywords:** complex connected structure; large span truss ; earthquake vulnerability analysis ; earthquake probability demand model; DM parameters

## 0 引言

随着经济的高速发展和科技水平日益提升,人们对建筑物的使用要求也在不断地提高,因此在进行工程结构设计时,不仅要考虑建筑物美观要求,更需考虑建筑结构的多样性<sup>[1]</sup>。连体结构造型独特,除了可以满足人们对建筑的审美要求,此类建筑还可以提供绝佳的采光和广阔的视野<sup>[2]</sup>;在地震作用下,连体结构不仅要考虑动力响应和协同工作要求,还应考虑结构连接区域对结构整体的影响,以免在强震作用下发生较大破坏。

王世振等<sup>[3]</sup>将 15 条近断层滑冲型地震动作用于按现行规范所设计的框剪高层结构上进行 IDA 计算,结果表明,结构能够满足规范中小震不坏的要求,但不能满足大震不倒的设防要求;苏宁粉等<sup>[4]</sup>通过 ABAQUS 软件进行了高层结构 IDA 分析,并与振动台试验进行对比,得出实测数据偏于保守;陈嘉佳等<sup>[5]</sup>以结构的层间位移角为结构损伤指标,采用 ABAQUS 软件,对装配式 RC 框架进行了地震易损性分析;石长征等<sup>[6]</sup>对钢筋混凝土框剪结构进行基于 IDA 分析,以结构层间位移角和材料损伤为参数进行结构的易损性分析,结果表明材料损伤相比层间位移角更能反应结构的破坏过程;王海良等<sup>[7]</sup>基于 IDA 分析法,选取相关地震波,并结合 OpenSees 有限元软件和破坏概率建立桥梁结构各部位的易损性曲线,结果表明桥梁的拱形结构在一定程度上可以起到抗震作用;吴轶等<sup>[8]</sup>对型钢混凝土框支剪力墙进行基于 IDA 的地震易损性分析,并对结构建立地震动强度与破坏程度之间的关系,以此来分析结构的破坏概率;K.Pasticier 等<sup>[9]</sup>利用 SAP2000 中的塑性铰模型,对砌体结构进行了地震易损性分析;此外,为了研究梁贯通式支撑钢框的节点刚度与承载力,王伟等<sup>[10]</sup>进行了基于 IDA 的地震易损性分析,研究表明,结构承载力以及刚度的差别对结构的抗震性能影响不大,均满足抗震规范中的“大震不倒”的设防要求。

近几年,国内外学者对于复杂连体结构的抗震性能大多采用有限元软件来进行分析,而仅有部分学者采用简化建筑模型对其进行振动台试验,最终与有限元计算结果进行对比,以此来得到有关连体结构的抗震性能和破坏模式。对连体结构进行地震易损性分析不仅要确定其在地震动作用下的破坏水准,还要确定结构内部各部件的 DM 参数及其量化指标,以便准确反映连体结构在地震作用下的位移响应和连接处的受力状态。

以西安站改扩建东配楼为工程背景,对不规则复杂连体结构进行了抗震性能评估,给出了抗震设计构件措施<sup>[11]</sup>。其中,文中首先通过 ABAQUS 建立不规则复杂连体结构的有限元模型,基于 IDA 获得连体结构在不同地震强度等级下的动力响应数据,利用实测数据对连体结构进行了易损性分析,最终从概率角度评估了整体结构的抗震性能。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 工程概况

基于 IDA 分析方法,研究了西安火车站改东配楼复杂连体结构模型的地震易损性。试验结构模型如图 1 所示。



图 1 试验模型结构

Fig.1 Test model structure

### 1.2 模型建立与材性选取

首先采用有限元分析软件——ABAQUS 来建立连体结构的模型,如图 2 所示。其中,连体结构

中的梁、柱和墙采用实体单元；承重楼板、桁架和连廊采用壳单元；钢筋采用桁架单元。结构中各构件之间采用的连接方式见表1。通过采用CDP模型来定义混凝土材料的塑性损伤；结构模型中的钢筋本构则选用双折线模型，并取  $E' = 0.01E_s$ ，如图3所示。

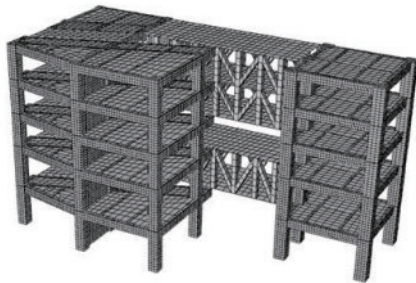
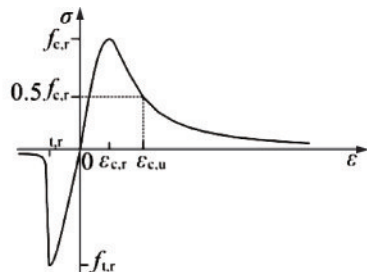


图2 ABAQUS有限元模型  
Fig.2 ABAQUS finite element model

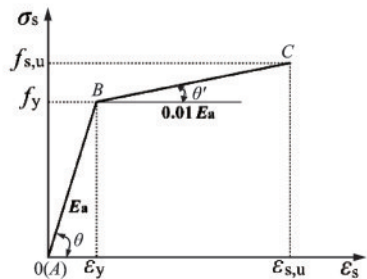
表1 模型结构各部分连接方式

Table 1 Connection mode of each part of the model structure

连接类型	连接部位
Merge	柱与梁、次梁与主梁之间
Shell to Solid Coupling	楼板与框架、剪力墙与楼板之间
Embedded	钢筋与梁、柱之间
MPC约束—铰接	小三角区与桁架、连廊
MPC约束—链接	大三角区与桁架、大区与桁架



(a) 混凝土单轴应力-应变曲线



(b) 钢筋双折线曲线

图3 材料本构模型

Fig.3 Material constitutive model

### 1.3 与振动台试验模型对比

在进行ABAQUS模拟时，通过改变连体结构各层的楼板密度来模拟振动台试验时各楼层所增加的配重，模拟与试验重量对比见表2。模拟各楼层总质量与振动台试验质量（结构自重+配重块）的误差均小于4%。

表2 连体结构模型质量对比

Table 2 Quality comparison of connected structure model

层数	试验模型		ABAQUS模型 / t	误差 / %
	自重 / t	配重 / t		
1	0.65	1.571	2.26	1.73
2	0.69	1.548	2.26	0.97
3	0.62	1.393	2.09	3.68
4	0.62	1.395	2.09	3.59
5	0.63	1.397	2.09	3.01
合计	3.21	7.340	10.79	2.22

注：误差=(ABAQUS模型-试验模型)/ABAQUS模型

通过对有限元模型施加振动台试验所用的地震波如图4所示，以此来得到结构在不同地震动强度作用下的结构动力响应。现选取典型工况下的试验所得结构动力响应和模拟计算结果进行对比，如图5所示。通过图5可以得知有限元弹塑性时程分析的结果与振动台试验结果基本一致。来证明本文的有限元模拟具有一定的可靠性。

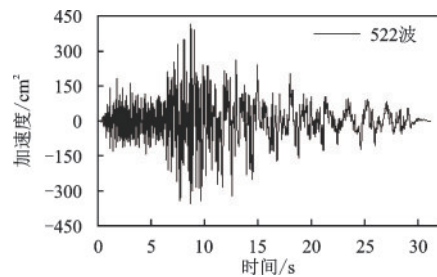


图4 输入地震波时程

Fig.4 Input seismic wave time history

## 2 动量增量分析

### 2.1 参数选取

连体结构主要分为由RC框架（大三角区、小三角区和大区），大跨桁架以及连廊组成。

通常将最大层间位移角、最大顶点位移角、基底剪力、基底剪重比等作为RC框架的DM参数。

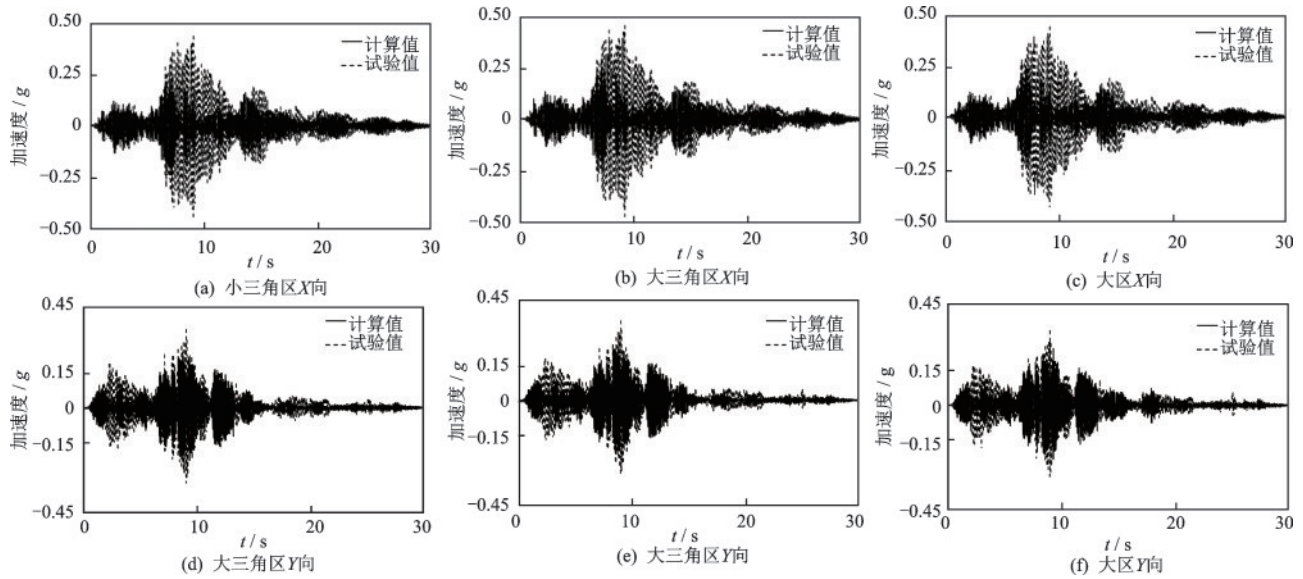


图5 8度多遇地震下各区域加速度时程曲线(522波)

Fig.5 Acceleration time history curve (522 waves) in each area under 8 degree frequent earthquakes

由于结构的最大层间位移角可以较好地反映出其位移延性<sup>[12]</sup>,故选用最大层间位移角 $\theta_{max}$ 作为连体结构各RC框架地震反应参数。

在连体结构中用大跨桁架来连接小三角区与大区。在罕遇地震作用下大跨桁架的扭转效应最为明显,且和其他参数相比,大跨桁架的扭转角不仅直观且简单,还和建筑规范有良好的契合度,因此选用扭转角 $\theta_r$ 来作为大跨桁架的DM参数。

由于大跨桁架一端与小三角区采用铰接相连,另一端与大区采用滑动支座相连,角钢预埋件所受弯矩较小。当支座预埋件放置在牛腿上受力为压弯剪,放置在框架梁上受力为拉弯剪,这两种情况的破坏模式较为相似,均可分为弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段<sup>[13]</sup>。因此选取损伤参数 $d$ 作为连体结构角钢预埋件的DM参数<sup>[14]</sup>。

## 2.2 极限状态准则

通常有基于地震动强度参数准则和基于工程需求参数准则两种方法来定义IDA分析的极限状态:

(1)基于地震动强度参数准则:在IDA曲线中,将曲线处于弹性阶段时的切线斜率定义为弹性刚度 $K_e$ 。当IDA曲线中的切线斜率达到 $0.2K_e$ 时,此时所对应的工程需求参数值则被称为结构倒塌极限值。

(2)基于工程需求参数准则:当工程需求参数超过某一极限状态限值时,则认为结构已处于对应的极限状态。对于RC框架结构,当 $\theta_{max}=0.05$ 时,则认为结构达到倒塌极限状态。

因此本文最终选取两种准则的较小值作为连体结构RC框架部分IDA分析的终点。

## 2.3 地震波的选择与调幅

地震本身具有很强的不确定性和随机性,以至于地震动的随机性也导致结构抗震性能的各不相同。通常将地震动的三要素(频谱、峰值加速度和持时)作为控制指标;同时为了避免不同地震波所造成的计算结果离散的现象,因而尽可能选择多的地震波,以此来减小计算误差。

根据场地条件,参考相关的选波规则,根据美国太平洋地震研究中心PEER数据库<sup>[15]</sup>,选取10条地震波,详情见表3,地震波设计反应谱如图6所示。

表3 选取地震动详细信息

Table3 Detailed information of ground motion			
编号	地震名称	年份	震级 $M$
1	Northwest Calif-02	1941	6.6
2	Borrego	1942	6.5
3	Northwest Calif-03	1951	7.36
4	Kern County	1952	7.36
5	Kern County	1952	6.0
6	El Alamo"	1956	6.8
7	Hollister-02	1960	6.7
8	Borrego Mtn	1971	6.61
9	San Fernando	1971	6.61
10	Managua_Nicaragua-01	1972	6.64

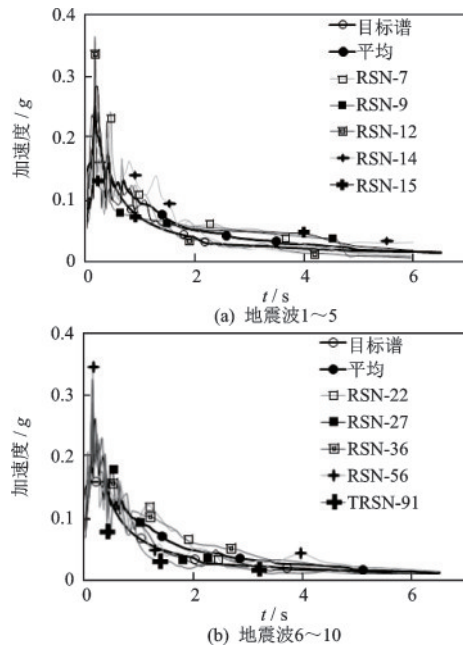


图6 地震波加速度反应谱与规范设计谱对比

Fig.6 Comparison of seismic wave acceleration response spectrum with standard design spectrum

## 2.4 IDA 曲线分析

对地震波采用变步长调幅的方法进行调幅以后,将PGA作为IM参数分别对连体结构各部分进

行多次弹塑性时程分析,并根据计算结果绘制IDA曲线簇,如图7所示。

由图7可知,RC框架结构的IDA曲线的整体收敛性较好。当地震动为RSN-91时,对结构各RC框架的最大层间位移角的影响最显著;地震动RSN-7对结构的最大层间位移角的影响最小。地震动强度较小时,各IDA曲线分布较为集中,此时RC框架的各部分处于弹性阶段。随着PGA的增加,结构逐渐进入弹塑性变形阶段,IDA曲线的斜率逐渐减小并出现一定的离散。不同地震波对结构响应的影响逐渐增大,此时图中大部分曲线的切线斜率逐渐降低,少部分出现了斜率增大或不规则的变化规律,这主要是受到了结构类型、地震动选择、加载方式等因素影响。PGA为1.20g时,RC框架各部分均未出现最大层间位移角超过0.05 rad的情况。

其中,从图7(d)中可以看出,当地震动输入较小时,大跨桁架处于弹性变形阶段,图形呈直线上升,之后随着地震动作用的不断增大,结构逐渐进入弹塑性阶段,与此同时IDA曲线斜率逐渐减小,直至最后结构发生倒塌破坏。

根据IDA分析结果,提取大跨桁架在不同PGA作用下的支座反力,将所得的 $V_{u0}$ 和 $N_{u0}$ 代入式(1)和(2)计算损伤因子 $d$ ,得到大跨桁架支座预埋件的

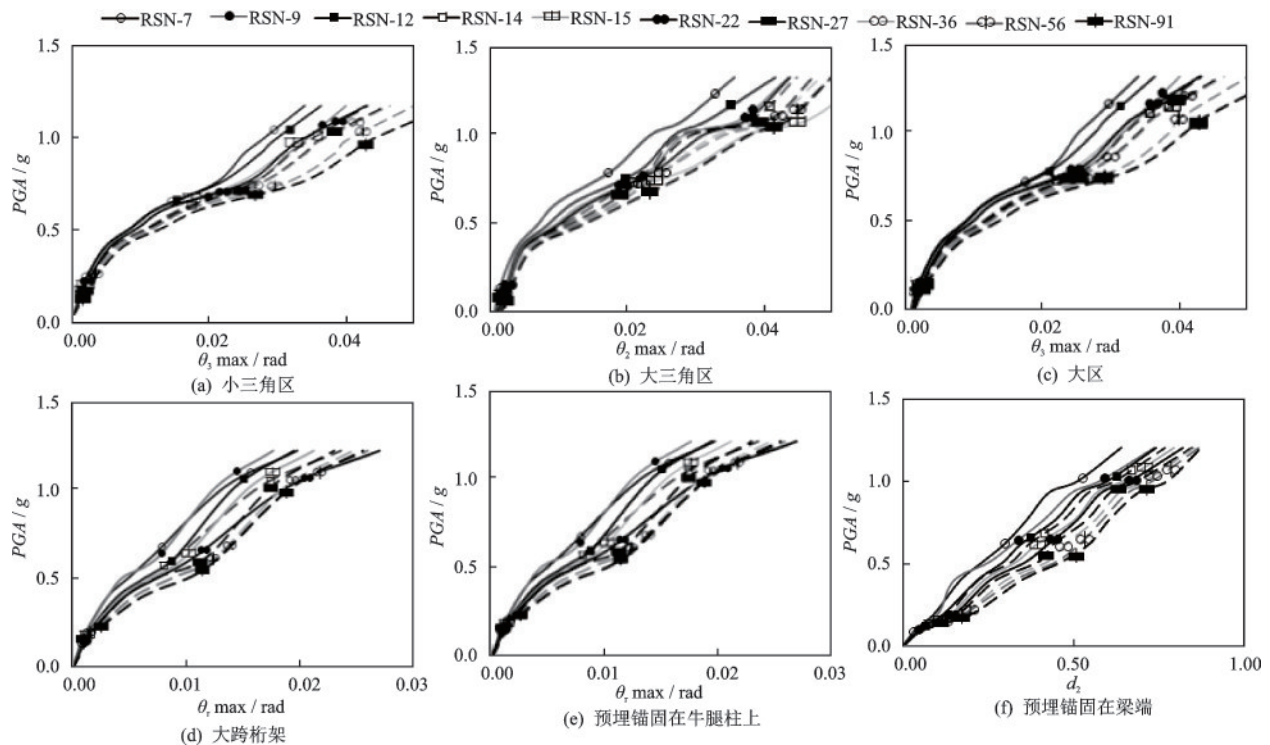


图7 连体结构各部件IDA曲线簇

Fig.7 The IDA curve clusters of each RC frame of the Siamese structure

IDA曲线簇,如图7(e)、(f)所示。当PGA较小时,预埋件IDA曲线分布比较集中,不同地震波引起的结构响应差异较小,此时预埋件处于线弹性状态。

随着PGA值增加,角钢预埋件进入弹塑性阶段,IDA曲线的斜率逐渐减小,数据存在较大离散性。

$$d = \frac{N}{N_{u0}} + \frac{M}{0.5N_{u0}\alpha_r z} \quad (1)$$

$$d = \frac{V}{V_{u0}} + \frac{N}{N_{u0}} + \frac{M}{1.67N_{u0}\alpha_r z} \quad (2)$$

式中, $V_{u0}$ 表示预埋件的纯剪强度; $N_{u0}$ 表示预埋件的纯拉强度, $N_{u0} = \min\{N_{u1}, N_{u2}, N_{u3}\}$ ;  $z$ 表示排锚筋中心线的距离; $\alpha_r$ 表示角钢锚筋排数的影响系数。

### 2.5 IDA曲线统计分析

本文采用DM统计法来对IDA曲线进行统计分析。首先统计出50%分位曲线,假定IDA曲线服从正态分布,通过求得在不同PGA作用下最大层间位移角 $\theta_{max}$ 的均值 $\mu_{DM}$ 和对数标准差 $\delta_{DM}$ ;再将不同PGA作用下的 $(\mu_{DM}, IM)$ 依次连接,就可以得到单条波作用下的50%分位曲线;结构的16%和84%分位曲线,则先计算不同PGA作用下 $\mu_{DM}e^{-\delta_{DM}}$ 和 $\mu_{DM}e^{+\delta_{DM}}$ 值,并将求得相应的 $(\mu_{DM}e^{-\delta_{DM}}, IM)$ 、 $(\mu_{DM}e^{+\delta_{DM}}, IM)$ 连接,即可得到结构的16%分位曲线和84%分位曲线。结构各部分百分位曲线如图8

所示。由图8可得,随着PGA输入的增大,连体结构各RC框架的16%、50%、84%分位线曲线的偏差逐渐增大,说明RC框架各部分的离散性也随之增加;在相同的PGA输入时,连体结构小三角区的最大层间位移角 $\theta_1$ 普遍大于 $\theta_2$ 和 $\theta_3$ ;由图9中的50%分位曲线可以看出,连体结构各RC框架满足轻微破坏水准的PGA分别为0.115g、0.125g、0.131g,大区RC框架所承受的PGA值最大,小三角区最小,说明小三角区在相同地震动的作用下更容易发生破坏,率先达到轻微破坏水准的极限点。各RC框架满足防止倒塌水准的PGA分别为0.543g、0.610g、0.649g,均超过了0.4g,满足抗震规范规定的8度罕遇地震要求。

大跨桁架预埋件的百分位曲线如图8(e)、(f)所示。当地震动输入较小时,支座预埋件的各百分位曲线差别较小,IDA曲线簇的离散性较小,说明此阶段大跨桁架的支座预埋件在不同地震动作用下的受力比较稳定;随着PGA的增大,大跨桁架的扭转愈来愈剧烈,支座预埋件的受力逐渐增大,损伤因子 $d$ 增幅明显。由图10可得,预埋件1在各水准下的极限状态所承受的PGA均大于预埋件2;由50%分位线曲线可得,预埋件1与预埋件2在轻微破坏、中等破坏、严重破坏和防止倒塌时的PGA值分别为0.447g、0.864g、1.050g、1.20g、0.303g、0.766g、0.984g、1.20g,发现锚固在两端的角钢比锚

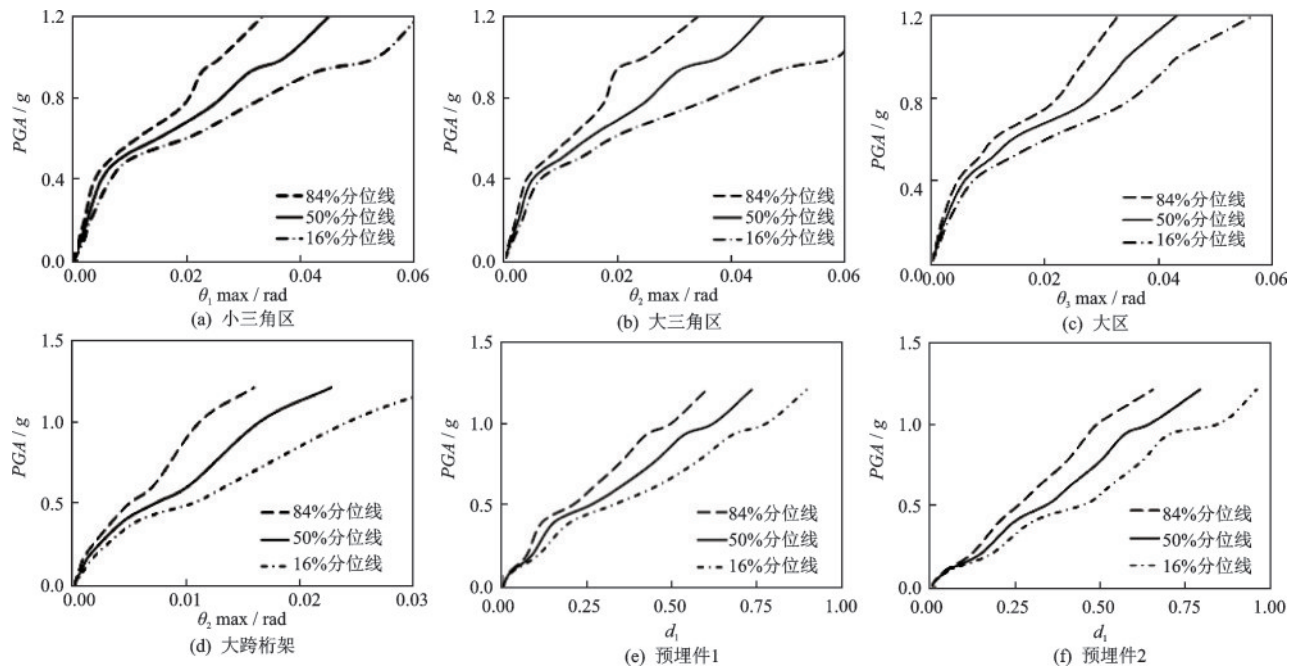


图8 连体结构各部件的百分位曲线

Fig. 8 Percentile curve of each part of the conjoined structure

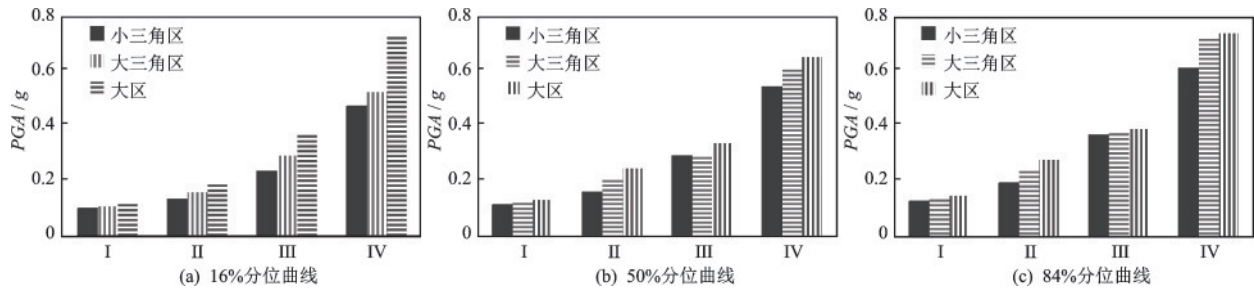


图9 连体结构各RC框架不同分位线下各极限状态点

Fig.9 Each limit state point under the different quantile lines of each RC frame of the conjoined structure

注: I 为轻微破坏、II 为中等破坏、III 为严重破坏、IV 为防止倒塌

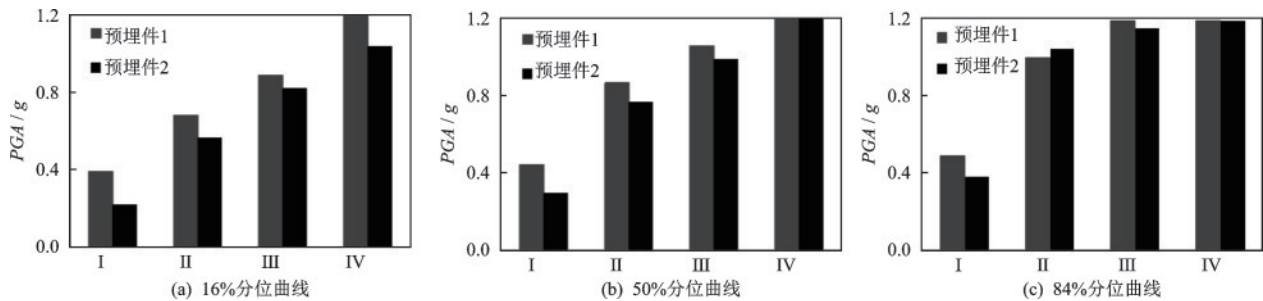


图10 不同百分位线下支座预埋件的各极限状态点

Fig.10 The limit state points of the embedded parts of the bearing under different percentile lines

固在牛腿柱上的角钢更容易发生破坏,因而重点关注锚固在梁端的角钢。

连体结构中的大跨桁架在各极限状态下的扭转角见表4,表5给出结构性能水平与IDA曲线斜率变化的关系。在8度多遇地震作用下,大跨桁架在16%,50%以及84%分位曲线下的扭转角分别为1/1559、1/2095和1/2518,此时大跨桁架的扭转情况尚不明显;随着结构受到的地震波峰值加速度的不断增加,大跨桁架在地震作用下产生的扭转角也在不断增加,在9度罕遇地震作用下,大跨桁架在16%,50%以及84%分位曲线下的扭转角分别达到了1/176、1/225和1/287;当PGA为1.2g作用时,大跨桁架仍未达到防止倒塌,即IDA的曲线斜率下降未达到0.8Ke,此时扭转角已经达到了1/31、1/44和1/62。

表4 不同地震作用下大跨桁架的扭转角

Table 4 Torsion angle of the long-span truss under different earthquakes 单位:  $\theta_r$

百分位曲线	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	防止倒塌
16%	1/1559	1/176	1/72	1/31
50%	1/2095	1/225	1/96	1/44
84%	1/2518	1/287	1/138	1/62

表5 在不同性能水平下IDA曲线斜率变化

Table 5 The slope change of IDA curve under different performance levels

结构性能状态	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	防止倒塌
IDA曲线斜率下降程度	10%	20%	50%	80%

### 3 结构易损性分析

#### 3.1 地震概率需求模型

通过线性回归分析,建立地震动强度与结构需求之间的概率关系来得到地震概率需求模型。结构性能指标DM与地震动强度参数IM满足公式(3),将本文所选取的指标代入,并两边取对数可得到公式(4)。

$$DM = \alpha (IM)^\beta \quad (3)$$

$$\ln D = a + b \ln(PGA) \quad (4)$$

式中,  $a = \ln \alpha$ ;  $b = \beta$ 。  $a, b$  为线性拟合曲线的回归系数。

在同一地震强度下不同地震波输入得到结构的动力响应服从对数正态分布,结构地震需求  $D$  的概率密度函数可以用公式(5)~(8)表示。

$$C = \ln(u_{\ln D}, \beta_{\ln D}) \quad (5)$$

$$u_{\ln D} = \ln \bar{D} \quad (6)$$

$$\beta_{\ln D} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=2}^N \ln D - \ln \bar{D}} \quad (7)$$

$$C = \ln(u_{\ln C}, \beta_{\ln C}) \quad (8)$$

式中,  $u_{\ln D}$ 、 $\beta_{\ln D}$  和  $u_{\ln C}$ 、 $\beta_{\ln C}$  分别为结构需求和结构抗震能力的对数均值和对数标准差。

根据式(4), 取地震动强度指标  $PGA$  的对数为概率需求模型的自变量, 结构各部分损伤指标 ( $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_r$ 、 $d_1$  和  $d_2$ ) 的对数为因变量, 在坐标里绘制散点图, 并进行线性拟合后得到结构各部分的概率需求模型, 如图 11 所示。

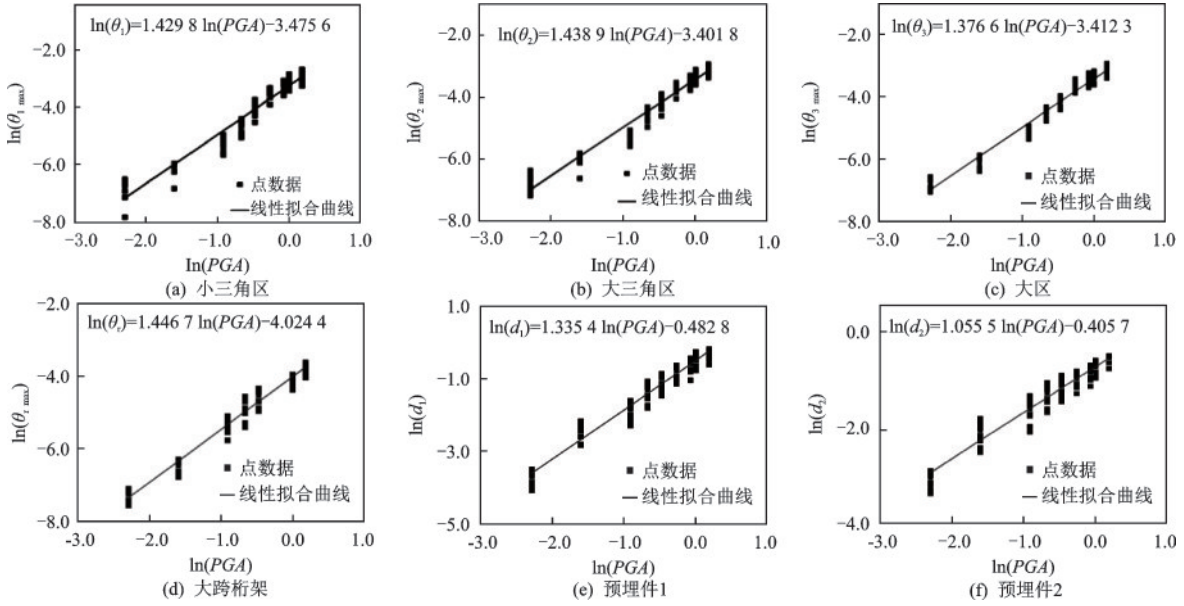


图 11 连体结构各部分的地震概率需求模型

Fig.11 Seismic probability demand model of each part of the conjoined structure

### 3.2 局部结构的易损性曲线

将计算得出的地震概率需求参数  $\alpha$ 、 $\beta$  代入式(9)中, 得到连体结构各部分在不同地震作用下各性能水准下的超越概率  $P_f$ , 所得数据汇总于图 12。图 12 给出了结构各部分的地震易损性曲线。

$$P_f = \phi \left[ \frac{\ln(\alpha(PGA)^{\beta} / \hat{C})}{\sqrt{\delta_c^2 + \delta_D^2}} \right] \quad (9)$$

式中,  $\hat{C}$  和  $\hat{D}$  为结构抗震能力中位值和地震需求中位值;  $\delta_c$  和  $\delta_D$  为结构抗震能力的标准差和地震需求的标准差; 文献[16]中规定当地震易损性曲线自变量为  $S_a$  和  $PGA$  时,  $(\delta_c^2 + \delta_D^2)^{1/2}$  取值为 0.4 和 0.5。

由图 12 可以看出, 结构各部分的超越概率, 随着  $PGA$  的增大而增大。连体结构各部分在轻微破坏水准下的易损性曲线最为陡峭, 说明结构发生轻微破坏非常迅速, 此阶段结构对地震动强度的改变表现得较为敏感; 随着  $PGA$  的增大, 连体结构各部分的破坏程度逐渐加深, 各部分的破坏水准超越概率曲线的增长趋势也逐渐变缓, 说明各部分由弹性阶段逐渐进入塑性阶段。其中大跨桁架支座处的预埋件

1 和 2 是结构整体最容易破坏的区域。连体结构在各个性能水准下的超越概率依次分别为预埋件 2 最大, 预埋件 1 其次, 大区最小。随着结构破坏水准增大时, 连体结构各部分超越概率差值也有所上升, 且增幅逐渐变缓。而在防止倒塌水准下, 当  $PGA$  小于  $0.4g$  时, 连体结构各部分超越概率均为零, 当  $PGA$  大于  $0.4g$  时开始增长, 增长趋势一致且接近。

根据地震易损性的有关概念, 得出连体结构各部分在不同震级下发生破坏的概率, 如图 13 所示。在 8 度多遇地震作用下, 连体结构各部分处于完好状态的概率均高于 94%, 发生轻微破坏的概率较小, 满足抗震规范规定的“小震不坏”设防要求; 8 度设防地震作用下, 结构基本完好状态的概率明显要低于 8 度多遇地震作用, 且轻微破坏的发生最大概率 33.84%, 此阶段结构会发生一定程度的轻微破坏; 8 度罕遇地震时, 连体结构各部分发生中等破坏的最大概率 42.32%, 但整体未发生坍塌, 满足“大震不倒”抗震设防要求; 9 度罕遇地震作用下, 结构各部分处于完好的状态几乎为 0, 严重破坏状态的发生概率明显增大, 预埋件 1、2 最为明显, 分别为 62.13% 和 69.40%, 倒塌概率分别为 7.34% 和 9.61%。

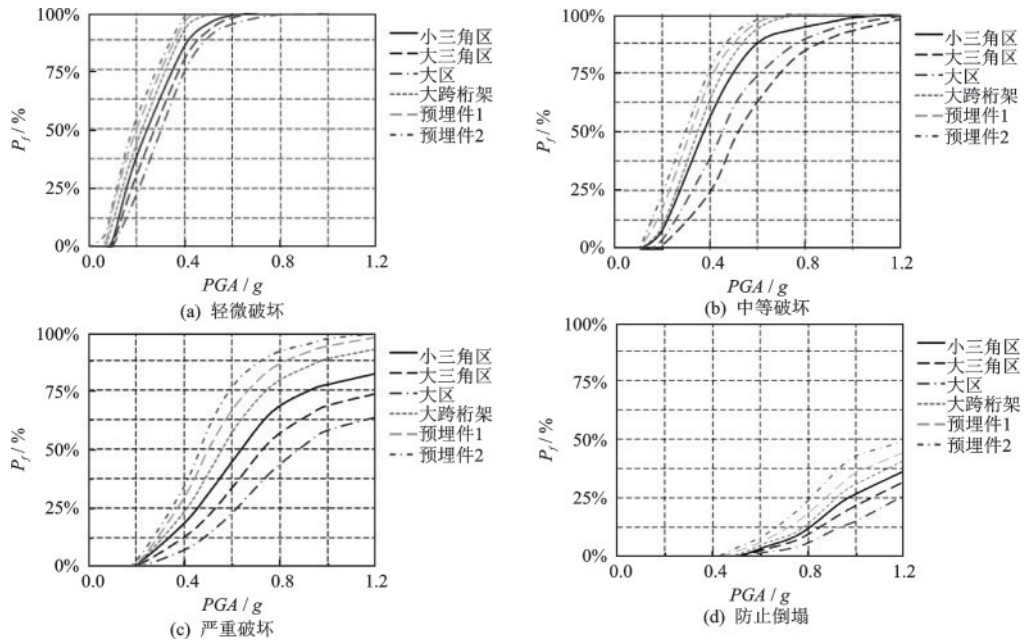


图12 不同破坏水准下连体结构各部分的易损性曲线对比

Fig.12 Comparison of vulnerability curves of each part of Siamese structure under different damage levels

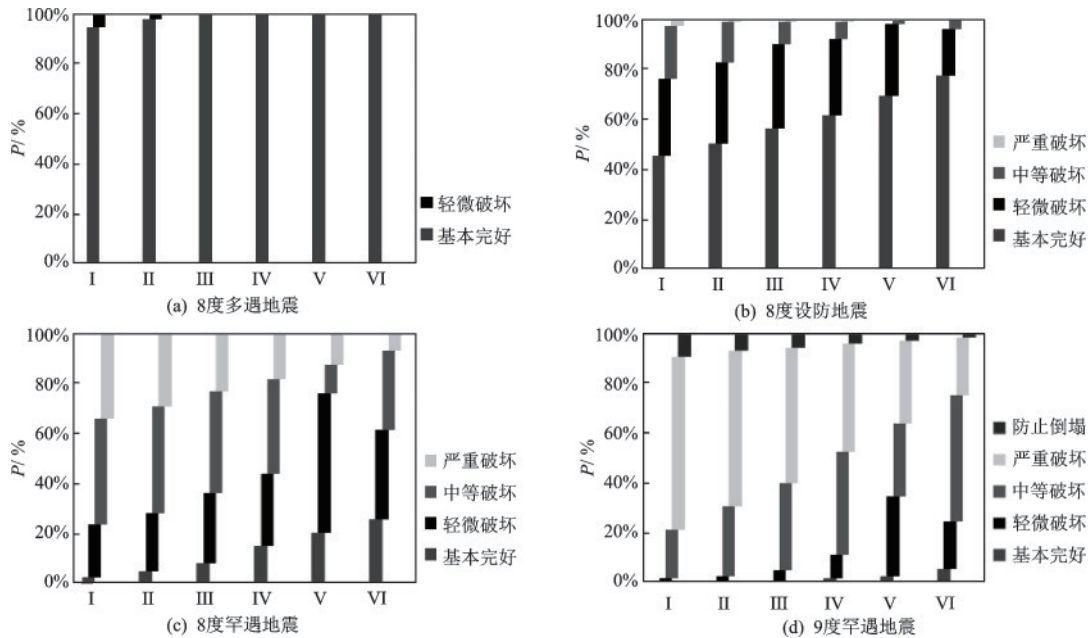


图13 连体结构各部分不同震级时发生各水准破坏的概率

Fig.13 Probability of failure at different levels under different earthquake magnitudes for each part of the connected structure  
注：I、II、III、IV、V、VI分别表示预埋件2、预埋件1、大跨桁架、小三角区、大三角区、大区

### 3.3 连体结构整体的易损性曲线

当地震需求表现分别为完全相关和完全不相关时,此时结构整体的地震易损性,可分别按式(10)和式(11)进行计算。图14为复杂连体结构整体地震易损性曲线。

$$P_{is} = \max_{i=1}^m [P_i] \quad (10)$$

$$P_{is} = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i] \quad (11)$$

式中, $P_{is}$ 为连体结构整体的易损性; $P_i$ 为局部构件各自的易损性; $m$ 为整体结构的部件总数。

由于结构整体的地震易损性曲线下限与预埋件2的易损性曲线重合,所以预埋件2是决定结构整体抗震性能的关键。复杂连体结构在轻微破坏水准下的上下限最为接近,这是由于大跨桁架支座端的角

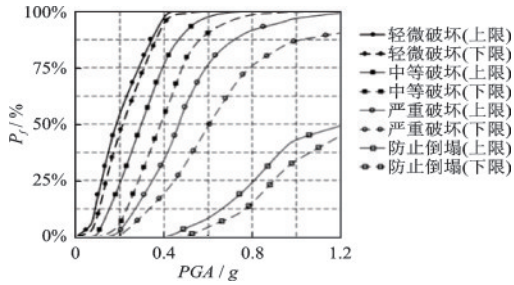


图 14 连体结构整体的地震易损性曲线

Fig.14 Seismic vulnerability curve of the whole conjoined structure

钢预埋件受力较小,结构尚处于弹性阶段;随着结构整体破坏程度的加深,地震易损性曲线上、下限的间距逐渐增大。这是由于大跨桁架在强震下发生扭转从而使角钢预埋件的破坏明显加深,其各水准超越概率均大于整体结构其它部分,更易发生破坏,角钢预埋件是影响结构抗震性能的关键因素。

连体结构整体的地震易损性矩阵见表 6。由表 6 可得,在 8 度多遇地震下,连体结构处于基本完好状态的概率为 94.24%~97.24%,发生轻微破坏和中等破坏的概率均小于 6%,不会发生严重破坏和倒塌破坏。在 8 度设防地震作用下,连体结构处于基本完好状态的概率下降到 45.37%~53.61%,处于轻微和中等破坏的概率进一步增加,分别为 30.80%~40.19% 和 5.44%~20.93%,处于严重破坏状态的概率较小,不会发生倒塌;在 8 度罕遇地震下,结构整体的破坏程度进一步加深,发生中等和严重破坏状态的概率明显增加,分别为 34.44%~42.32% 和 19.37%~34.24%,但发生倒塌破坏概率的几乎为零。在 9 度罕遇地震下,连体结构发生严重破坏状态的发生概率上升至 47.07%~69.40%,而发生倒塌的概率仅为 5.31%~9.61%,说明此时结构发生严重破坏,但不会发生倒塌。

表 6 连体结构整体在不同水准地震作用下的易损性矩阵

Table 6 Vulnerability matrix of the connected structure as a whole under different levels of earthquakes 单位: %

破坏等级	8 度多遇	8 度设防	8 度罕遇	9 度罕遇
基本完好	94.24~97.24	45.37~53.61	2.66~5.24	0.00~0.13
轻微破坏	2.53~5.63	30.80~40.19	20.68~40.95	1.90~8.23
中等破坏	0.13~0.23	20.93~5.44	34.44~42.32	19.08~39.27
严重破坏	0.00	0.76~2.85	19.37~34.24	47.07~69.40
倒塌	0.00	0.00~0.05	0.00~0.09	5.31~9.61

## 4 结 论

以西安站改扩建东配楼为工程背景,采用有限元软件对东配楼简化的不规则复杂连体结构建立有限元模型,选用增量动力分析法得到复杂连体结构在地震作用下的响应数据,进一步对连体结构进行地震易损性分析,主要得出以下结论:

(1) 在相同的 PGA 输入时,连体结构小三角区的最大层间位移角  $\theta_1$  普遍大于大三角区和大区的最大层间位移角  $\theta_2$  和  $\theta_3$ ;由 50% 分位曲线可知,连体结构各 RC 框架满足轻微破坏水准的 PGA 分别为 0.115g、0.125g、0.131g,RC 框架所承受的 PGA 值由大到小分别为大区、大三角区和小三角区,表明小三角区在地震作用下更容易发生破坏,率先达到轻微破坏水准的极限点。

(2) 当 PGA 较小时,预埋件 1 和 2 的 IDA 曲线分布较集中,此时预埋件受力较小,部件尚处于弹性阶段。随着 PGA 的增加,大跨桁架的支座反力逐

渐增大,角钢预埋件逐渐进入弹塑性阶段,锚固在梁端上的角钢更容易发生破坏。

(3) 在 8 度多遇地震时,结构的 RC 框架发生轻微破坏的超越概率较小;在 8 度罕遇作用下,结构各部分会发生一定程度的中等破坏和严重破坏,但不会发生倒塌破坏;在 9 度罕遇地震作用下,连体结构各 RC 框架发生倒塌的超越概率较小,不会引起倒塌破坏,但大跨桁架明显的扭转效应,使其支座角钢预埋件发生破坏的概率增大,尤其是锚固在梁端的预埋件大于锚固在牛腿处。

(4) 在不同的抗震性能水准下,连体结构各部分的超越概率由大到小依次为:预埋件 2、预埋件 1、大跨桁架、小三角区、大三角区、大区。随着破坏程度的加大,角钢预埋件的破坏随大跨桁架在强震作用下的扭转逐渐增大,其各水准的超越概率均大于其它部分的超越概率,使得大跨桁架支座端的角钢预埋件 1、2 成为连体结构薄弱部位,因此要重点关注结构大跨桁架支座端的角钢预埋件。

## 参考文献:

- [1] 陈尚鸿, 祁皓, 王素襄, 等. 多维多点输入下大跨度连体高层结构地震反应振动台阵试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 212-217.  
Chen S H, Qi A, Wang S G, et al. Experimental study of long-span connected structure under multi-dimensional and multi-supported earthquake excitations[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(6): 212-217. (in Chinese)
- [2] 吴晓涵, 韦晓栋, 钱江, 等. 双塔连体结构弹塑性时程分析[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(3): 51-58.  
Wu X H, Wei X D, Q J, et al. Elasto plastic time history analysis of a double tower connected structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2011, 31(3): 51-58. (in Chinese)
- [3] 王世振, 白国良. 近断层滑冲型地震动作用下框架-剪力墙高层结构的 IDA 研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(3): 437-444.  
Wang S Z, Bai G L. Study on IDA of high-rise frame-shear wall structure under near-fault fling-step-type ground motion[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(3): 437-444. (in Chinese)
- [4] 苏宁粉, 信卓, 白国良, 等. 基于振动台试验的高层剪力墙结构增量动力分析研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(7): 76-83, 94.  
Su N F, Xin Z, Bai G L, et al. Incremental dynamic analysis of high rise shear wall structure based on shaking table test [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(7): 76-83, 94. (in Chinese)
- [5] 陈嘉佳, 赵桂峰, 马玉宏, 等. 装配式 RC 框架黏滞阻尼器凸轮式响应放大消能体系的地震易损性分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增 2): 109-116.  
Chen J J, Zhao G F, Ma Y H, et al. Seismic fragility analysis of the energy-dissipative prefabricated concrete frame structure with a new cam-type response amplification device of viscous damper [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Sup 2): 109-116. (in Chinese)
- [6] 石长征, 伍鹤皋, 高晓峰, 等. 基于材料损伤的水电站厂房上部结构地震易损性分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(1): 264-270.  
Shi C Z, Wu H G, Gao X F, et al. Seismic vulnerability analysis of hydropower house superstructure based on material damage [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(1): 264-270. (in Chinese)
- [7] 王海良, 张铎, 刘中宪. 基于 IDA 钢管混凝土桁架连续曲线桥抗震易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 39-48.  
Wang H L, Zhang D, Liu Z X. Evaluation of seismic vulnerability of CFST and continuous curved bridge using IDA [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1): 39-48. (in Chinese)
- [8] 吴轶, 林柱帆, 杨春, 等. 型钢混凝土框支剪力墙结构地震易损性分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(增 2): 345-350.  
Wu Y, Lin Z F, Yang C, et al. Seismic fragility analysis of SRC frame-supported shear wall structure [J]. Building Structure, 2017, 47(Sup 2): 345-350. (in Chinese)
- [9] Ptilakis K, Kaynia A, Syner-GCH. Typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk[M]. Dordrecht: Springer Press, 2014: 259-297.
- [10] 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 W, Hu S L, Zou C. Seismic fragility analysis of beam-through steel braced frames based on IDA method [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(4): 42-49 (in Chinese)
- [11] 郭宏超, 张博明, 李晓蕾, 等. 西安火车站东配楼复杂连体结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(6): 155-164.  
Guo H C, Zhang B M, Li X L, et al. Shaking table test study on complex connected structure of affiliated building of Xi'an Railway Station [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(6): 155-164. (in Chinese)
- [12] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [13] 陈家坤, 武贞和. 角钢预埋件受力性能和设计方法的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1992, 13(5): 39-50.  
Chen J K, Wu Z H. Experimental research on mechanical properties and design method of angle steel embedded parts. [J]. Journal of Building Structures, 1992, 13(5): 39-50. (in Chinese)
- [14] 潘毅, 胡思远, 赵崇锦, 等. 基于试验的大跨异形钢连廊连体结构地震易损性分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(2): 12-22, 61.  
Pan Y, Hu S Y, Zhao C J, et al. Test-based seismic fragility analysis of connected structure with large span special-shaped steel corridor [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(2): 12-22, 61. (in Chinese)
- [15] Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER strong motion database [DB/OL]. (2005) [2010-12-01]. <https://peer.berkeley.edu>.
- [16] Hyungjun K. Structural reliability analysis and prediction-second edition [J]. Magazine and Journal of Korean Society of Steel Construction, 2017, 29(5): 80.

(本文编辑: 苏泽云)