

引用本文:钟炜辉,张 驰,邱帅子,等.地震作用下钢框架结构抗竖向连续倒塌可靠度分析[J].建筑科学与工程学报,2022,39(3):55-63.
ZHONG Wei-hui,ZHANG Chi,QIU Shuai-zi,et al. Vertical Anti-progressive Collapse Reliability Analysis of Steel Frame Under Seismic Action[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2022,39(3):55-63.

DOI:10.19815/j.jace.2021.09110

地震作用下钢框架结构抗竖向连续倒塌可靠度分析

钟炜辉^{1,2},张 驰¹,邱帅子¹,谭 政¹

(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 结构工程与抗震教育部重点实验室,陕西 西安 710055)

摘要:为了对偶然荷载作用下结构的抗连续性倒塌进行可靠度研究,采用 OpenSEES 软件建立钢框架连续倒塌分析数值模型,考虑到钢框架结构材料和荷载的不确定性,使用拉丁超立方抽样方法生成钢框架结构随机样本,并采用随机 Pushover 算法对钢框架结构进行分析,计算得到 X、Y 两个方向不同地震水平下各钢柱承载能力及变形能力的可靠度指标,根据抗震可靠度相关理论确定目标可靠度指标,通过比较各柱的可靠度指标和目标可靠度,对结构在地震作用下最可能失效构件进行识别。基于所识别的最可能失效构件,结合所生成的 100 组钢框架结构随机样本,采用拆除构件法对钢框架结构在单柱失效和多柱失效等工况下进行抗连续倒塌 IDA 分析,得到随机 IDA 分析曲线。通过结构连续倒塌极限状态方程,计算得到损伤结构发生连续倒塌的概率及连续倒塌条件可靠度指标。采用基于风险的结构连续倒塌概率表达式,分析地震作用下钢框架结构发生局部破坏后的连续倒塌全概率可靠度,为准确评价钢框架结构在地震作用下的抗连续倒塌能力提供依据。

关键词:钢框架结构;抗连续倒塌;拉丁超立方抽样;失效构件;拆除构件法;抗连续倒塌可靠度

中图分类号:TU973.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)03-0055-09

Vertical Anti-progressive Collapse Reliability Analysis of Steel Frame Under Seismic Action

ZHONG Wei-hui^{1,2}, ZHANG Chi¹, QIU Shuai-zi¹, TAN Zheng¹

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

2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance of Ministry of Education,

Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the reliability of anti-progressive collapse of structures under accidental loads, the numerical model of steel frame progressive collapse analysis was established by OpenSees software. Considering the uncertainty of materials and loads of steel frames, Latin hypercube sampling method was used to generate random samples of steel frames, and random Pushover algorithm was used to analyze steel frames. The reliability indexes of load capacity and deformation capacity of each steel column under different seismic action levels in X and Y directions were calculated, and the target reliability indexes were determined according to the seismic reliability theory. By comparing the reliability indexes and target reliability of each

收稿日期:2021-09-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51678476);陕西省自然科学基金研究计划项目(2020JQ-660);

陕西省教育厅专项科研计划项目(20JK0713)

作者简介:钟炜辉(1980-),男,广东佛山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:zhongweihui1980@163.com。

column, the most probable failure members of the structure under seismic action were identified. Based on the identified most probable failure members and 100 groups of steel frame structure random samples, IDA analysis of steel frame structures under various working conditions such as single-column failure and multi-column failure was carried out by the alternative path method, and the random IDA analysis curves were obtained. Through the limit state equation of progressive collapse, the probability of progressive collapse of damaged structures and the conditional reliability index of progressive collapse were calculated. The full probability reliability of progressive collapse of steel frame structure after local damage under seismic action was analyzed through the probability expression of structure progressive collapse at risk, which can provide a basis for accurately evaluating the anti-progressive collapse ability of steel frame structure under seismic action.

Key words: steel frame structure; anti-progressive collapse; Latin hypercube sampling; failure component; alternative path method; anti-progressive collapse reliability

0 引言

连续倒塌是指建筑结构在小范围初始损伤向大范围不成比例或整体倒塌演变的过程。从 2001 年美国世贸中心“9·11”飞机撞击事件以来,结构的抗倒塌性能和设计方法受到了广泛的重视。2021 年发生的“7·17”美国佛罗里达州住宅楼倒塌事故,再次警醒人们建筑连续倒塌会给人们的生命安全造成巨大的威胁,因此对已有建筑结构的抗倒塌能力可靠度评估是抗连续倒塌的重要研究内容。

中国众多学者如张望喜等^[1]、黄华等^[2-3]、钟炜辉等^[4-5]均对混凝土框架或组合框架梁柱子结构的抗连续倒塌性能进行了试验研究。除了对子结构进行抗倒塌性能分析之外,研究人员 Ellingwood^[6]、易伟建等^[7]、杜永峰等^[8]针对建筑整体的抗震可靠度评估或抗连续倒塌能力的可靠度评估做了相关研究,但没有将两者之间的联系进行全过程分析研究。此外,对于整体结构在偶然事件发生情况下,因多柱失效而发生连续倒塌的全过程分析较少。目前大部分学者包括 Li 等^[9]、Ren 等^[10]均对混凝土结构在一根柱失效工况下的抗连续倒塌性能进行了研究,而对多柱失效工况下的结构抗倒塌性能的探究亟待补充。钱凯等^[11]对 RC 框架结构底部相邻两柱失效的情况进行分析,研究表明多柱失效概率低、风险大,且较单根柱失效更为严重,故多柱失效工况不能忽略。

本文以钢框架结构为研究对象,仅将地震作用作为结构构件破坏的原因,在底层柱发生破坏后只考虑在自重荷载作用下发生竖向连续倒塌的情形,以可靠度理论为基础,计算得到结构竖向连续倒塌

条件可靠度和竖向连续倒塌全概率可靠度,为准确评价钢框架结构在地震作用下的抗连续倒塌能力提供参考。

1 钢框架结构建模与参数

1.1 钢框架结构的设计与建模

为使模型能够真实反映框架结构在连续倒塌工况下的结构响应,参照相关规范^[12-13],设计了 1 栋位于西安的抗弯框架结构,底层层高 3.9 m,其他楼层层高 3.6 m,平面及立面如图 1 所示。

梁柱截面分别采用 H 型钢和方钢管,梁截面尺寸为 HN350×175×7×11,柱截面尺寸为 □400×400×12。混凝土楼板的强度等级为 C30,板厚为 120 mm。板内钢筋采用 HRB400 级钢筋,纵筋直径为 8 mm,间距为 150 mm。结构设计主要参数包括楼面永久荷载 4.5 kPa、可变荷载 2.0 kPa、屋面永久荷载 7.5 kPa、可变荷载 0.5 kPa、基本风压 0.45 kPa。场地类型为 II 类场地,地表粗糙度为 C 类。

设计地震分组为第一组,抗震设防烈度为 7 度(0.10g, g 为重力加速度),查询相关规范^[13]可知在此烈度下所对应的地震影响系数最大值 α_{\max} 为:小震作用下 $\alpha_{\max}=0.08$,中震作用下 $\alpha_{\max}=0.23$,大震作用下 $\alpha_{\max}=0.5$ 。通过底部剪力法计算地震力的大小,并采用倒三角加载模式来模拟水平地震力。计算得到 3 种地震水平下 X、Y 两个方向的地震力,如表 1、2 所示。

采用 OpenSEES 建立的钢框架结构数值模型如图 2 所示,对模型进行地震水平作用分析。梁柱采用 Q345 钢,钢材本构和楼板钢筋本构均选用双线性强化 Steel02 本构模型,混凝土本构选用 Con-

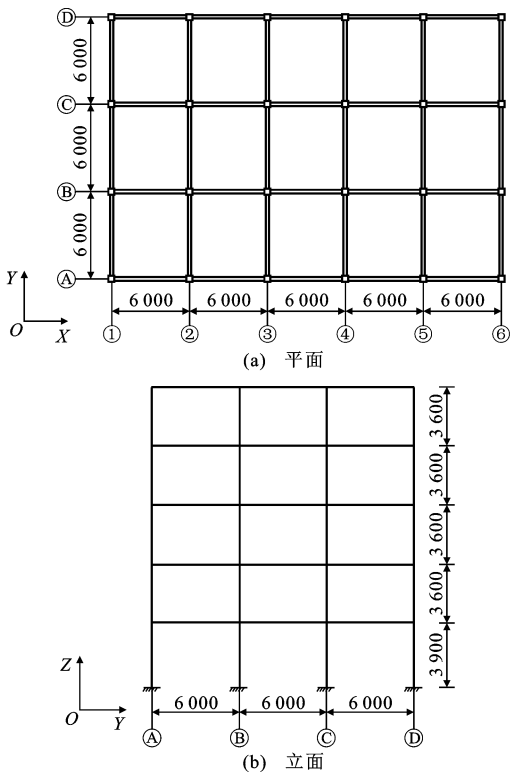


图 1 钢框架结构布置(单位:mm)
Fig. 1 Structural Layout of Steel Frame (Unit:mm)

表 1 X 方向地震力

Table 1 X-direction Seismic Force

楼层	地震力/kN		
	小震	中震	大震
5	227.62	654.41	1 486.99
4	88.60	254.72	670.81
3	66.90	192.34	506.53
2	45.20	129.96	342.25
1	23.53	67.65	178.16

表 2 Y 方向地震力

Table 2 Y-direction Seismic Force

楼层	地震力/kN		
	小震	中震	大震
5	225.15	647.30	1 471.08
4	87.25	250.86	660.72
3	65.89	189.42	498.91
2	44.52	127.99	337.10
1	23.17	66.63	175.49

crete02 本构模型,Concrete02 是考虑了混凝土受拉性能的单轴混凝土材料。梁柱采用非线性梁柱单元 Nonlinear Beam-Column 进行模拟。对于结构的连续倒塌分析,由于梁会发生大变形,故采用协同变换 Corotational 来模拟其几何非线性行为。混凝土楼

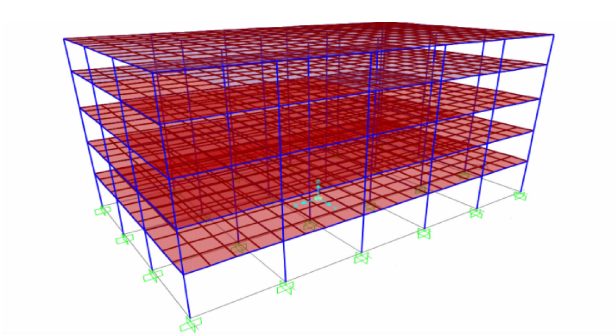


图 2 钢框架结构模型

Fig. 2 Model of Steel Frame Structure

板则采用非线性分层壳单元 ShellDKGQ 进行模拟。

1.2 结构不确定性因素样本生成

结构抗连续倒塌能力受结构材料参数、荷载作用、施工质量等多种不确定性因素的影响,本文共选择了 10 个不确定性参数,如表 3 所示。

表 3 不确定性参数信息

Table 3 Information of Uncertain Parameters

随机变量	标准值	变异系数	相关性系数	分布类型
E_s	2.06×10^5 MPa	0.06	0.3	对数正态
f_y	345 MPa	0.10		对数正态
E_0	2.06×10^5 MPa	0.06	0.4	对数正态
f_{y0}	400 MPa	0.10		对数正态
f_{c0}	20.1 MPa	0.20	0.3	对数正态
ϵ_{c0}	1.47×10^{-3}	0.20		对数正态
f_{cu}	10.05 MPa	0.20		对数正态
ϵ_{cu}	4.41×10^{-3}	0.20		对数正态
D_L	4.5/7.5 kPa	0.10		正态
L_L	2.0/0.5 kPa	0.45		正态

注: E_s 为钢材弹性模量; f_y 为钢材屈服强度; E_0 为钢筋弹性模量; f_{y0} 为钢筋屈服强度; f_{c0} 为混凝土峰值压应力; ϵ_{c0} 为混凝土峰值压应变; f_{cu} 为混凝土极限压应力; ϵ_{cu} 为混凝土极限压应变; D_L 为楼面恒载或屋面恒载; L_L 为楼面活载或屋面活载。

在结构可靠度分析中,采用拉丁超立方抽样方法^[14]将每个随机变量进行随机组合,生成均匀的随机样本。根据表 3 中的不确定性参数及其分布特征,生成 100 组结构随机样本。

2 钢框架结构抗震可靠度分析

结构可靠度是通过概率层面度量可靠性的指标,即结构在规定时间内及条件下完成预定功能的概率。结构可靠度指标通常用概率来表示,它与失效概率有一一对应关系,可靠度指标越大,则结构的失效概率越小,两者存在反比关系。

将拉丁超立方抽样与 Pushover 相结合,考虑结构可靠度计算的精度以及计算的效率,采用一次可靠度方法(FORM 法)^[15]进行结构可靠度计算。FORM 法的基本思想是将非线性功能函数展开成 Taylor 级数,仅保留线性项,利用基本随机变量 $x_i(i=1,2,\cdots,n)$ 的一阶矩、二阶矩计算结构功能函数 Z 的均值和标准差,从而获得结构的可靠度指标及失效概率,具体流程如图 3 所示。

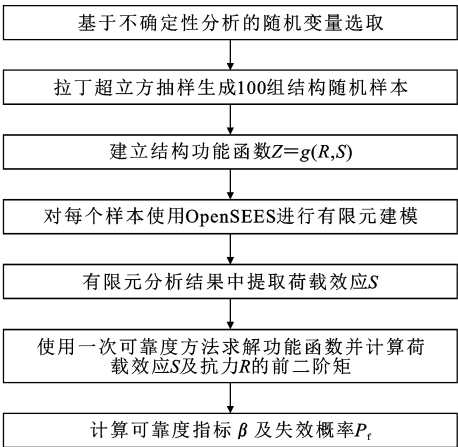


图 3 可靠度分析流程

Fig. 3 Flow Chart of Reliability Analysis

2.1 构件承载能力可靠度分析

根据上述方法,对每一个样本模型进行 X 方向和 Y 方向的 Pushover 分析。X 方向结构标准层柱编号如图 4 所示。

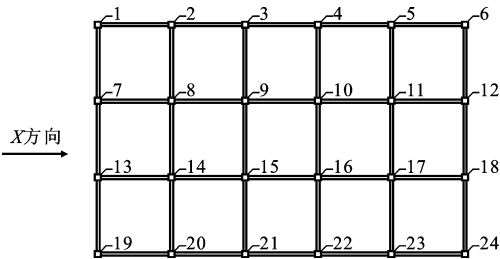


图 4 X 方向柱编号

Fig. 4 Column Numbering in X Direction

由于 X、Y 方向都为对称结构,故仅取一半的柱进行分析,以柱的上下截面为控制截面,提取相应的荷载效应,最终计算 X、Y 方向 3 种地震作用下各柱

的可靠度指标,如图 5、6 所示。可以看出,在小震作用下,结构整体处于线弹性状态,随着地震力的逐渐增大,可靠度指标迅速下降,结构进入弹塑性状态,底层部分柱承载能力达到极限,结构的抗倒塌能力降低,构件发生失效的可能性增大。

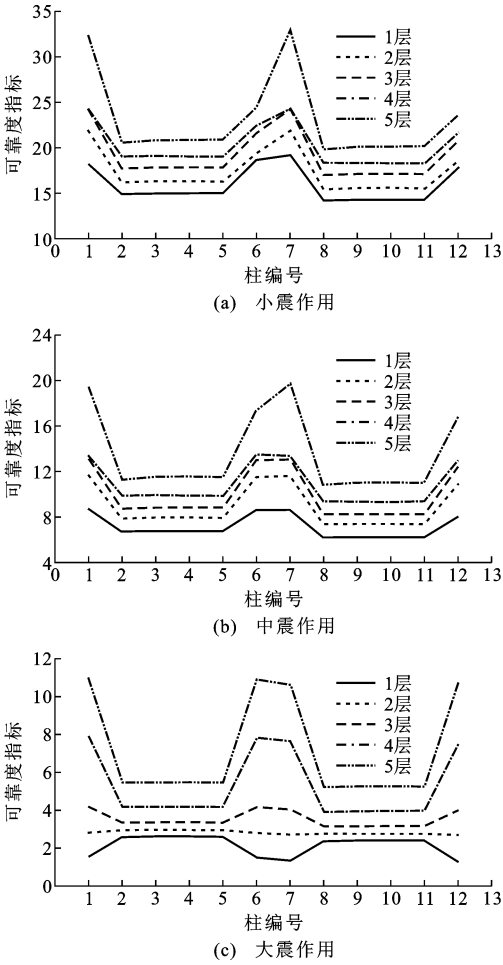


图 5 X 方向 3 种地震水平下底层柱可靠度指标

Fig. 5 Reliability Indexes of Bottom Column Under Three Seismic Action Levels in X Direction

2.2 结构变形能力抗震可靠度分析

通过对结构样本进行 X 方向和 Y 方向的随机 Pushover 分析,采用一次可靠度方法计算 3 种地震水平下的层间位移可靠度指标,结果如表 4、5 所示。

由表 4、5 可知,在 3 种地震水平下,结构的变形可靠度变化规律基本一致,顶层的层间位移可靠度最大,2 层变形可靠度指标接近整个结构的最低水平,结构上部与下部相比,层间位移响应有所减轻,故可以通过对结构最底层构件进行承载能力可靠度分析来识别最有可能失效构件。

2.3 基于抗震可靠度的失效构件识别

结构的倒塌破坏通常是始于结构中最薄弱的构件,如梁、柱构件或者节点,但在连续倒塌的分析研

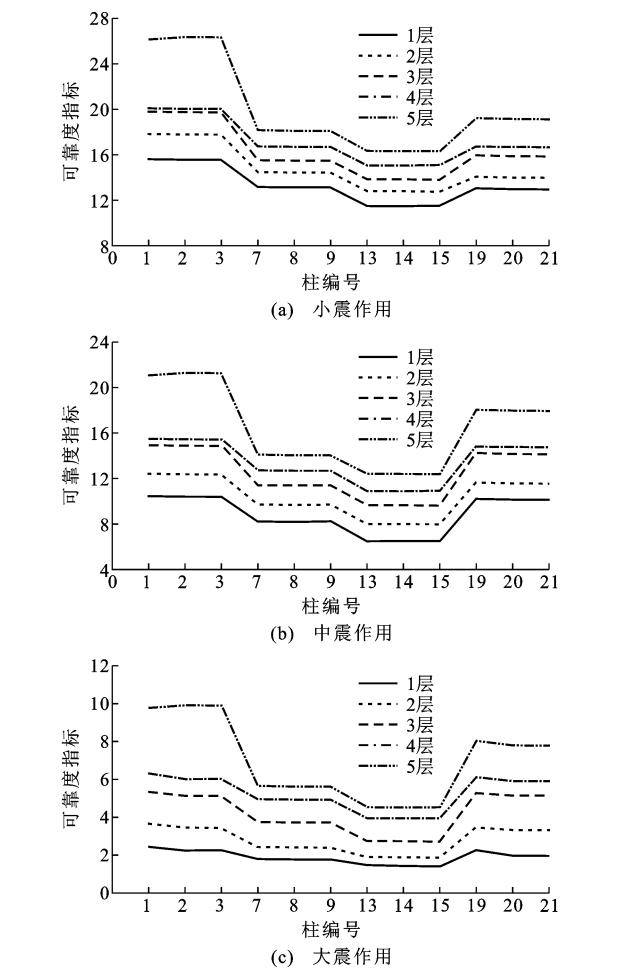


图 6 Y 方向 3 种地震水平下底层柱可靠度指标
Fig. 6 Reliability Indexes of Bottom Column Under Three Seismic Action Levels in Y Direction

表 4 X 方向 3 种地震水平下层间位移可靠度指标
Table 4 Reliability Indexes of Interlayer Displacement Under Three Seismic Action Levels in X Direction

楼层	层间位移可靠度指标		
	小震	中震	大震
1	2.039 3	1.821 8	1.484 6
2	1.865 3	1.647 9	1.393 9
3	1.863 9	1.645 2	1.391 0
4	1.914 4	1.699 1	1.467 5
5	2.013 4	1.797 5	1.612 0

究中多以后两者为重点。本文选择柱进行研究,结构柱的位置不同,发生破坏的概率也不同,通过可靠度分析的结果来确定结构最有可能失效的构件。大震作用下的可靠度指标最低,失效概率最大,破坏风险最高,故选择大震作用下失效概率大的柱进行拆柱分析,进一步研究结构的抗连续倒塌条件概率及全概率指标。

表 5 Y 方向 3 种地震水平下层间位移可靠度指标
Table 5 Reliability Indexes of Interlayer Displacement Under Three Seismic Action Levels in Y Direction

楼层	层间位移可靠度指标		
	小震	中震	大震
1	2.081 8	1.870 5	1.423 5
2	1.913 4	1.676 9	1.366 9
3	1.915 0	1.672 2	1.394 1
4	1.967 8	1.748 4	1.458 4
5	2.071 8	1.878 1	1.562 6

基于构件承载能力可靠度计算结果,对 X 方向和 Y 方向大震作用下柱的可靠度指标进行综合排序分析,选取构件可靠度指标低于目标可靠度指标 $[\beta]=1.50^{[16]}$ 的柱作为失效构件。由于角柱所受约束较弱,当角柱发生破坏后结构发生连续倒塌的可能性较大,故将角柱也作为失效构件。最终确定 X、Y 方向大震作用下最可能失效构件的位置及失效概率,如表 6、7 所示。

表 6 X 方向最可能失效构件
Table 6 Most Probable Failure Components in X Direction

柱编号	1(19)	6(24)	7(13)	12(18)
可靠度指标	1.503 1	1.497 7	1.327 9	1.259 4
失效概率	0.066 41	0.067 10	0.092 11	0.103 95

表 7 Y 方向最可能失效构件
Table 7 Most Probable Failure Components in Y Direction

柱编号	13(18)	14(17)	15(16)
可靠度指标	1.488 8	1.408 6	1.407 4
失效概率	0.068 27	0.079 47	0.079 65

3 结构抗连续倒塌可靠度分析

3.1 结构抗连续倒塌条件可靠度分析

在对钢框架进行抗连续倒塌分析时,根据 UFC 4-023-03^[17] 中的规定,当剩余结构的变形超过承重构件的变形能力极限时,结构即发生竖向连续倒塌。通过对样本模型的变形承载能力可靠度分析可知,结构底层柱最容易发生破坏,且有可能造成多根柱失效。通过大量数值模拟分析可知,失效柱只在一定区域内会相互影响。为简化分析,本节分析多柱失效时仅考虑相邻柱失效的情形。通过有限元分析可知,当相邻失效柱数量多于 4 根时,钢框架结构发生倒塌概率为 1,故本文只考虑失效柱数量为 4 根及以下的情形,所有的拆柱工况如表 8 所示。由于结构关于 X、Y 轴对称,故对于结构对称且结果相同的情形只取一种情况进行拆除。

表 8 拆柱工况

Table 8 Column Removal Working Conditions			
工况编号	失效工况	作用方向	拆柱编号
1	单柱失效	X、Y	1
2		X、Y	7
3		Y	14
4		Y	15
5	双柱失效	X	1、7
6		X	7、13
7		Y	13、14
8		Y	14、15
9	三柱失效	Y	15、16
10		Y	14、19
11		X	1、7、13
12		Y	13、14、15
13	四柱失效	Y	13、14、19
14		Y	14、15、16
15		X	1、7、13、19
16		Y	13、14、15、16
17		Y	14、15、16、17

基于最有可能失效构件,结合所抽取的 100 组结构随机样本对所有工况进行拆柱分析,采用拆除构件法中的竖向 IDA 分析方法对所有工况进行分析,通过绘制 IDA 曲线,对结构的抗倒塌性能进行评估。选取有代表性的 5 个工况的随机 IDA 分析结果,其曲线图以及拆柱位置如图 7 所示,其中横坐标都为失效柱顶端处的竖向位移。

损伤结构在地震作用下部分柱破坏后竖向荷载作用下的连续倒塌极限状态函数 Z_r 为

$$Z_r=V_r-(D_L+L_L)$$
 (1)

式中: V_r 为损伤结构的竖向承载力。

通过竖向 IDA 分析中的荷载系数 α 来反映结构的抗倒塌能力值,结构的极限承载力可以表示为荷载系数 α 关于基本随机变量 x 的非线性隐式函数,则受损结构的极限承载力函数 V_r 为

$$V_r=g_r(x)=\alpha(x)_r(D_L+0.25L_L)$$
 (2)

式中: $\alpha(x)_r$ 为受损结构的荷载系数。

根据式(1)和式(2)可以得到受损结构的连续倒塌极限状态方程为

$$Z_r=\alpha(x)_r(D_L+0.25L_L)-(D_L+L_L)$$
 (3)

基于结构连续倒塌极限状态方程,可计算得到损伤结构发生连续倒塌的概率及连续倒塌条件可靠度指标,结果如表 9 所示。

根据表 9 连续倒塌条件可靠度计算结果可知,双柱失效工况下,2 根边柱失效的连续倒塌条件可靠度最低,且低于其任意单柱失效的可靠度指标。

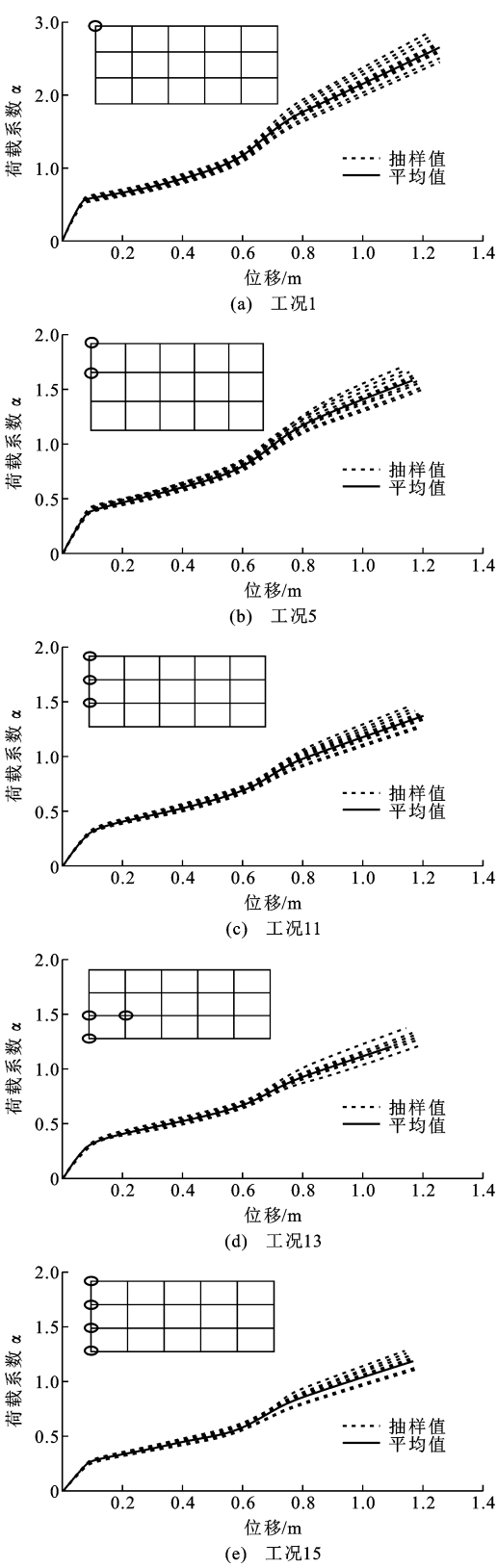


图 7 不同工况的随机 IDA 分析曲线

Fig. 7 Stochastic IDA Analysis Curves Under Different Working Conditions

对比三柱失效工况可知,相比于失效柱在同一轴线上的情形,当 X、Y 方向都存在失效柱时,周边约束

表 9 结构连续倒塌条件可靠度计算结果

Table 9 Conditional Reliability Calculation Results of Structural Progressive Collapse

失效工况	可靠度指标	失效概率
工况 1	3.164 6	$7.764\ 4\times 10^{-4}$
工况 2	5.610 2	$1.010\ 5\times 10^{-8}$
工况 3	5.971 5	$1.175\ 6\times 10^{-9}$
工况 4	6.953 6	$1.780\ 9\times 10^{-12}$
工况 5	-0.030 9	$5.123\ 3\times 10^{-1}$
工况 6	2.574 8	$5.015\ 1\times 10^{-3}$
工况 7	2.745 9	$3.017\ 6\times 10^{-3}$
工况 8	3.557 5	$1.871\ 8\times 10^{-4}$
工况 9	4.029 6	$2.794\ 0\times 10^{-5}$
工况 10	3.164 6	$7.764\ 4\times 10^{-4}$
工况 11	-0.853 2	$8.032\ 2\times 10^{-1}$
工况 12	1.900 5	$2.868\ 2\times 10^{-2}$
工况 13	-0.995 4	$8.402\ 2\times 10^{-1}$
工况 14	2.402 3	$8.145\ 9\times 10^{-3}$
工况 15	-1.373 8	$9.152\ 5\times 10^{-1}$
工况 16	0.644 9	$2.594\ 9\times 10^{-1}$
工况 17	0.868 0	$1.927\ 0\times 10^{-1}$

严重不足,更容易发生倒塌。由表 9 可知,工况 15 的可靠度指标 $\beta=-1.373\ 8$,为四柱失效下的工况,其可靠度指标最低,失效后发生倒塌风险最大。

3.2 地震作用下结构连续倒塌全概率可靠度分析

在地震作用下,定义某一工况导致结构发生连续倒塌为一种失效模式。由于 X、Y 地震作用下各柱的失效概率是不同的,故 X 方向共考虑 12 种失效模式,Y 方向共考虑 14 种失效模式。根据 Ellingwood^[6]提出的基于风险的结构连续倒塌概率表达式,可以得到结构在发生灾害风险的情形下发生连续倒塌的概率 $P_{[\text{Collapse}]}$ 为

$$P_{[\text{Collapse}]}=P_{[\text{Collapse}|\text{D}]}P_{[\text{D}|\text{H}]}P_{[\text{H}]}$$

(4)

式中: $P_{[\text{Collapse}|\text{D}]}$ 为结构在出现局部破坏 D 的条件下发生连续倒塌的概率; $P_{[\text{H}]}$ 为结构所遭受的偶然事件 H 的发生概率; $P_{[\text{D}|\text{H}]}$ 为在偶然灾害事件 H 发生的条件下结构发生局部破坏 D 的概率。

结合构件可靠度分析结果以及结构连续倒塌条件可靠度分析结果,计算得到各种工况下 X 方向和 Y 方向地震作用下结构连续倒塌全概率可靠度指标及失效概率,如表 10、11 所示。

根据表 10 可知,X 方向地震作用下的单柱失效情形中,结构的连续倒塌全概率可靠度指标从大到小排序为拆除柱 7、拆除柱 12、拆除柱 1、拆除柱 6,拆除 6 号柱时,结构可靠度最低,可靠度指标为

表 10 X 方向不同失效模式下连续倒塌全概率可靠度

Table 10 Full Probability Reliability of Progressive Collapse Under Different Failure Modes in X Direction

失效模式编号	拆柱编号	可靠度指标	失效概率
X-1	1	5.483 6	$2.083\ 2\times 10^{-8}$
X-2	6	5.481 8	$2.104\ 8\times 10^{-8}$
X-3	7	7.169 6	$3.760\ 3\times 10^{-13}$
X-4	12	7.153 0	$4.243\ 7\times 10^{-13}$
X-5	1、7	4.705 5	$1.266\ 1\times 10^{-6}$
X-6	6、12	4.678 7	$1.443\ 7\times 10^{-6}$
X-7	7、13	5.517 5	$1.719\ 0\times 10^{-8}$
X-8	12、18	5.474 9	$2.189\ 3\times 10^{-8}$
X-9	1、7、13	5.086 0	$1.828\ 4\times 10^{-7}$
X-10	6、12、18	5.037 9	$2.352\ 8\times 10^{-7}$
X-11	1、7、13、19	5.555 6	$1.383\ 6\times 10^{-8}$
X-12	6、12、18、24	5.509 5	$1.798\ 9\times 10^{-8}$

表 11 Y 方向不同失效模式下连续倒塌全概率可靠度

Table 11 Full Probability Reliability of Progressive Collapse Under Different Failure Modes in Y Direction

失效模式编号	拆柱编号	可靠度指标	失效概率
Y-1	1	5.858 2	$2.340\ 1\times 10^{-9}$
Y-2	13	7.210 5	$2.787\ 1\times 10^{-13}$
Y-3	14	7.478 0	$3.774\ 2\times 10^{-14}$
Y-4	15	8.288 6	$5.730\ 6\times 10^{-17}$
Y-5	19	5.779 5	$3.745\ 4\times 10^{-9}$
Y-6	13、14	5.683 1	$6.614\ 1\times 10^{-9}$
Y-7	14、15	6.116 4	$4.786\ 7\times 10^{-10}$
Y-8	14、19	6.191 7	$2.976\ 4\times 10^{-10}$
Y-9	15、16	6.412 4	$7.161\ 1\times 10^{-11}$
Y-10	13、14、15	5.730 5	$5.007\ 4\times 10^{-9}$
Y-11	13、14、19	5.474 1	$2.198\ 9\times 10^{-8}$
Y-12	14、15、16	5.915 0	$1.659\ 2\times 10^{-9}$
Y-13	13、14、15、16	5.785 8	$3.608\ 4\times 10^{-9}$
Y-14	14、15、16、17	5.810 2	$3.119\ 1\times 10^{-9}$

5.481 8。所有的失效模式中,6、12 柱双柱失效时,结构的可靠度最低,可靠度指标为 4.678 7,失效概率最高。

根据表 11 可知,Y 方向地震作用下的单柱失效情形中,结构的连续倒塌全概率可靠度指标从大到小排序为拆除柱 15、拆除柱 14、拆除柱 13、拆除柱 1、拆除柱 19,19 号柱失效时,结构可靠度最低,可靠度指标为 5.779 5。所有的失效模式中,13、14、19 柱三柱失效时,结构可靠度最低,可靠度指标为 5.474 1,失效概率最高。

X 方向地震作用下可靠度指标最小值要小于 Y 方向地震作用下可靠度指标最小值,并且无论单柱

失效还是多柱失效的情况下, X 方向地震作用下全概率可靠度指标都小于所对应情况下 Y 方向地震作用下全概率可靠度指标, 说明结构 Y 方向发生连续倒塌概率高, 风险大。

姜丽娜等^[18]基于《建筑结构抗倒塌设计规范》(CECS 392—2014)^[19]建议的可接受大震倒塌概率计算得到建筑年均倒塌概率可接受最大值的区间范围为 $1.06 \times 10^{-4} \sim 1.39 \times 10^{-4}$, 相对应的可靠度指标为 3.635 0~3.704 3; FEMA P-750^[20]建议的年均倒塌概率可接受值为 2.0×10^{-4} , 相对应的可靠度指标为 3.540 1。中国现行的可靠度规范^[21]规定结构承载能力极限状态可靠度指标在安全等级为一级时延性破坏可靠度指标为 3.7, 在安全等级为一级时脆性破坏可靠度指标为 4.2, 基于结构可靠度计算公式, 最终可以计算得到结构在大震作用下发生连续倒塌的总概率 $P_f = 6.905 2 \times 10^{-6}$, 其相应的可靠度指标 $\beta = 4.345 3$, 均大于上述可靠度指标, 说明本文所设计的钢框架结构抗连续倒塌性能良好。

4 结 语

(1) 通过拆除构件法, 获得单柱和多柱等失效工况下结构的抗连续倒塌可靠度, 通过对比发现四柱失效工况下剩余结构可靠度最低, 即该工况下结构发生倒塌风险最大。拆柱后剩余结构的抗连续倒塌能力从大到小依次为拆除内部中柱、拆除边柱、拆除角柱。

(2) 通过对比地震作用下钢框架结构的各失效模式, 角柱破坏后剩余结构的可靠度最低, 结构处于最不利状态。原因在于角柱周边仅有 2 根框架梁连接, 缺少周边拉结约束, 失效后缺少贯通框架梁而不能发挥悬链线机制的作用。因此在进行结构设计时, 为了加强结构的安全性, 可以对角柱进行适当加强, 以降低其在地震作用下发生连续倒塌的风险。

(3) 分析结构在地震作用下连续倒塌全概率可靠度可知, 按照中国现行规范设计的钢框架结构抗连续倒塌性能良好, 可为结构在地震作用下的抗连续倒塌能力评估提供理论依据。

参考文献:

References:

[1] 张望喜, 曹亚栋. 装配式混凝土框架结构防连续倒塌研究中的几个问题[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 101-112.
ZHANG Wang-xi, CAO Ya-dong. Several Problems in Research on Progressive Collapse of Precast Concrete

Frame Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5): 101-112.

[2] 黄 华, 黄 敏, 郭洁娜, 等. RC 框架结构连续倒塌影响因素与破坏机制的研究现状[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(6): 29-40.

HUANG Hua, HUANG Min, GUO Jie-na, et al. Research Status on Influencing Factors and Failure Mechanism for RC Frame Structural Progressive Collapse[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(6): 29-40.

[3] 黄 华, 刘伯权, 张彬彬, 等. 钢筋混凝土抗震框架连续倒塌行为分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(4): 35-44.

HUANG Hua, LIU Bo-quan, ZHANG Bin-bin, et al. Analysis of Progressive Collapse Behavior of Earthquake-resistant Reinforced Concrete Frame[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4): 35-44.

[4] 钟炜辉, 谭 政, 宋晓燕, 等. 不对称跨度下钢框架组合梁柱子结构抗倒塌能力分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 260-266.

ZHONG Wei-hui, TAN Zheng, SONG Xiao-yan, et al. Anti-collapse Capacity Analysis for a Steel Frame Composite Beam-column Substructure with Asymmetric Span [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(13): 260-266.

[5] ZHONG W H, TAN Z, TIAN L M, et al. Collapse Resistance of Composite Beam-column Assemblies with Unequal Spans Under an Internal Column-removal Scenario [J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110143.

[6] ELLINGWOOD B R. Strategies for Mitigating Risk to Buildings from Abnormal Load Events[J]. International Journal of Risk Assessment and Management, 2007, 7(6/7): 828.

[7] 易伟建, 水 淼. 基于节点冲切破坏的板柱结构连续倒塌可靠性分析[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 149-155, 175.

YI Wei-jian, SHUI Miao. Reliability Analysis for Progressive Collapse of Slab-column Structure Based on the Punching Failure of the Connection[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 149-155, 175.

[8] 杜永峰, 黄小宁, 李 慧. 基于性能的基础隔震钢筋混凝土框剪结构的倒塌可靠度分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(5): 879-882, 896.

DU Yong-feng, HUANG Xiao-ning, LI Hui. Performance-based Collapse Reliability Analysis of Base-isolated Frame-wall Structures[J]. China Earthquake En-

- gineering Journal, 2018, 40(5): 879-882, 896.
- [9] LI Y, LU X Z, GUAN H, et al. An Improved Tie Force Method for Progressive Collapse Resistance Design of Reinforced Concrete Frame Structures[J]. Engineering Structures, 2011, 33(10): 2931-2942.
- [10] REN P Q, LI Y, GUAN H, et al. Progressive Collapse Resistance of Two Typical High-rise RC Frame Shear Wall Structures[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(3): 04014087.
- [11] 钱凯, 罗达, 贺盛, 等. 钢筋混凝土框架结构底部相邻两柱失效的抗连续倒塌性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(1): 61-68.
QIAN Kai, LUO Da, HE Sheng, et al. Progressive Collapse Performance of Reinforced Concrete Frame Structures Subjected to Ground Two-column Removal Scenario[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(1): 61-68.
- [12] 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Standard for Design of Steel Structures; GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [13] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for Seismic Design of Buildings; GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [14] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code[J]. Technometrics, 2000, 42(1): 55-61.
- [15] 张琴. 全装配式混凝土框架结构抗连续倒塌鲁棒性及可靠度分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
ZHANG Qin. Research on Robustness and Reliability of Fully-assembled Concrete Frame Structure Against Progressive Collapse[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [16] 欧进萍, 段宇博. 高层建筑结构的抗震可靠度分析与优化设计[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(1): 1-13.
OU Jin-ping, DUAN Yu-bo. Seismic Reliability Analysis and Optimum Design of Tall Buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(1): 1-13.
- [17] Design of Buildings to Resist Progressive Collapse; UFC 4-023-03[S]. Washington DC: Department of Defense, 2010.
- [18] 姜丽娜, 何政, 张延泰. 考虑年均倒塌概率的结构倒塌安全储备可接受值[J]. 工程力学, 2017, 34(4): 88-100.
XIAN Li-na, HE Zheng, ZHANG Yan-tai. Acceptable Structural Collapse Safety Margin Ratios Based on Annual Collapse Probability[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(4): 88-100.
- [19] 建筑结构抗倒塌设计规范: CECS 392—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Code for Anti-collapse Design of Building Structures; CECS 392—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [20] NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures; FEMA P-750[S]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [21] 建筑结构可靠度设计统一标准: GB 50068—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Unified Standard Reliability Design of Building Structures; GB 50068—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.