

引用本文:何庆锋,聂玉莲,邓颖婷.地震作用下损伤 RC 框架抗竖向倒塌分析[J].建筑科学与工程学报,2020,37(6):64-72.

HE Qing-feng, NIE Yu-lian, DENG Ying-ting. Analysis of Vertical Collapse Resistance of Damaged RC Frame Structure Under Seismic Action[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(6): 64-72.

DOI:10.19815/j.jace.2019.06022

地震作用下损伤 RC 框架抗竖向倒塌分析

何庆锋^{1,2}, 聂玉莲¹, 邓颖婷¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:为了研究存在损伤支撑构件的钢筋混凝土框架结构在地震作用下的竖向连续倒塌性能,从美国太平洋地震工程研究中心(PEER)数据库中选取了 3 条远场地震波、4 条近场地震波以及 1 条人工地震波作为地震输入,利用等效轴力变化模拟损伤柱失效过程,基于 OpenSees 有限元分析平台,采用时程分析法对中柱在地震作用下逐渐失效的平面框架结构的抗竖向倒塌性能进行了分析。结果表明:在 8 度罕遇地震(加速度峰值为 $0.4g$, g 为重力加速度)作用下,损伤柱快速失效,在相同的失效时间下,竖向加速度峰值与地震波总能量竖向分量能显著增加结构竖向响应,从而加大结构的竖向倒塌风险;相对于不考虑地震作用时,考虑地震作用的中柱竖向位移峰值和中柱相邻梁端受拉钢筋应变峰值都明显增大;随着中柱失效时间的增大,动力效应的影响逐渐减弱,地震作用对剩余结构的影响逐渐减小。

关键词:抗竖向倒塌性能;时程分析法;损伤框架结构;竖向地震作用;失效过程;OpenSees

中图分类号:TU311.41

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)06-0064-09

Analysis of Vertical Collapse Resistance of Damaged RC Frame Structure Under Seismic Action

HE Qing-feng^{1,2}, NIE Yu-lian¹, DENG Ying-ting¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory on Damage Diagnosis for Engineering Structures, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: In order to study the vertical continuous collapse performance of reinforced concrete frame structures with damaged supporting members under seismic action, three far-field seismic waves, four near-field seismic waves and one artificial seismic wave were selected from database of Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) as seismic inputs. The failure process of the damaged column was simulated by using the equivalent axial force variation. Based on the OpenSees platform, the vertical collapse resistance of plane frame structures whose columns gradually failed under seismic action was analyzed by time history analysis method. The results show that under the influence of 8 degree rare earthquake (peak acceleration is $0.4g$, g is gravitational acceleration), the damaged column fails rapidly; under the same failure time, the

收稿日期:2019-12-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0701308)

作者简介:何庆锋(1979-),男,湖北黄冈人,高级工程师,工学博士,E-mail:sammyhqf@163.com。

vertical peak acceleration and the vertical component of seismic total energy can significantly increase the vertical response of structures, thus increasing the risk of vertical collapse of the structure; compared with the case without considering seismic action, the peak vertical displacement of the middle column and the peak strain of tensioned steel bar at the end of adjacent beam of middle column increase significantly; with the increase of failure time of the middle column, the influence of dynamic effect is gradually weakened, and the influence of seismic action on the residual structure is gradually reduced.

Key words: vertical collapse resistance; time history analysis method; damaged frame structure; vertical seismic action; failure process; OpenSees

0 引言

由于设计建造过程中的人为失误或者撞击、爆炸、火灾等意外事件,建筑结构中会存在一些具有初始损伤的支撑构件,若未及时处理,一旦地震来临,存在损伤的支撑构件易先发生屈服进而丧失承载能力,若此时结构不具备有效的备用荷载传力路径,将引发连锁反应,最终将导致结构的整体倒塌。相关震害调查^[1-3]表明:建筑结构在地震中大多出现由于底部薄弱层破坏而引起的倒塌破坏,其中框架柱的大量破坏导致结构倒塌是框架结构一种最常见的倒塌模式。

近年来,对于移柱后的钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能,国内外学者做了大量的试验研究和数值分析,相关结果表明^[4-6],在规范设计荷载作用下,经抗震设计的框架结构移柱后不易发生连续倒塌,结构整体抗倒塌性能较好。对于存在损伤支撑构件的框架结构来说,水平与竖向地震荷载共同作用会加剧柱的损伤程度甚至导致其完全失效,且竖向地震作用还能显著增加失柱后框架结构的竖向动力效应,从而增加竖向发生连续倒塌风险。目前大多研究均为直接移除框架柱,未考虑柱子的失效过程^[5-8],而实际上,损伤支撑构件会有一定的剩余承载力,瞬间只有柱子完全失效的概率很小,因此,考虑水平与竖向地震荷载的共同作用,对损伤构件逐渐失效的钢筋混凝土结构的抗竖向倒塌性能进行深入研究是有意义的。

1 数值计算模型

1.1 OpenSees 建模

2007年易伟建等^[8]利用拟静力试验方法对底层中柱失效的一榀钢筋混凝土平面框架进行了倒塌试验,图1为试验框架计算简图,其设计制作依据《混凝土结构设计规范》^[9]和《建筑抗震设计规

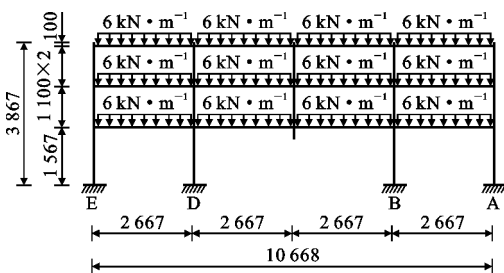


图1 模型试验框架计算简图(单位:mm)

Fig. 1 Calculation Diagram of Model Test Frame(Unit:mm)

范》^[10],抗震设防烈度为6度,设计活荷载为6 kN,具体配筋信息和材料性能参数见文献^[8]。

本文选用该试验框架作为研究对象,采用地震工程模拟的开放体系 OpenSees 进行建模,对结构进行非线性动力时程分析。混凝土材料选用考虑受拉软化的 Concrete02 材料,考虑箍筋作用。钢筋选用基于 Pinto 钢筋本构模型的 Steel02 材料。采用梁柱节点单元^[11]对框架节点进行模拟,以考虑节点区的非线性特征。对于梁柱节点单元,已有许多国内外学者对其非线性特性进行了研究与验证^[12-14]。本文采用增量迭代法对动力时程方程进行求解分析,迭代收敛准则选用能量准则。

1.2 失效过程模拟分析方法

为了考虑支撑构件的失效过程及水平与竖向地震共同作用,采用如图2所示的计算模型进行分析,其中, N 为中柱柱底反力, G 为竖向地震作用力, F_{ex} 为水平力, F_{ez} 为竖向力。模拟分析步骤如下:①对设计荷载作用下的完整结构进行静力计算;②根据移除柱的初始轴力计算出等效力 N ,并将其应用于移除柱的顶部,如图2所示。为考虑中柱损伤的失效过程,假定中柱柱底反力 N 随时间 t 的变化如图3所示,数学表达式如式(1)所示;③同时施加竖向与水平地震荷载,进行动力时程分析。

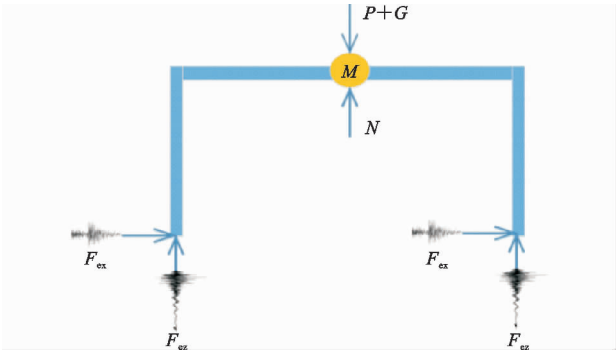


图 2 地震作用下损伤框架计算模型

Fig. 2 Calculation Model of Damage
Frame Under Seismic Action

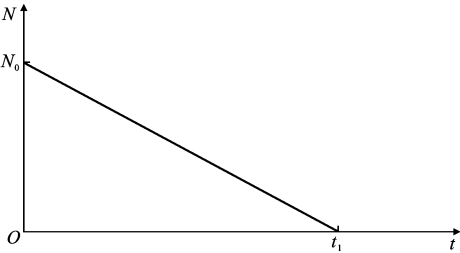


图 3 失效过程中柱底反力变化

Fig. 3 Variation of Column Bottom Reaction
Force in Failure Process

$$N(t)=\begin{cases} N_0(1-\frac{t}{t_1}) & t\leq t_1 \\ 0 & t>t_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中： N_0 为未发生地震时的柱底反力； t_1 为中柱在地震作用下的失效时间。

本文底层中柱柱底反力为 54.20 kN，各地震波使底层中柱失效的时间取值范围如表 1 所示。

1.3 算例验证

采用本文提出的模拟方法对文献[15]的试验结果进行数值模拟，其中柱顶集中荷载为 274 N，阻尼比取为 0.05，图 4 为验证算例的计算结果。由图 4 可见，模拟计算所得的不同失效时间下的中柱位移时程曲线与试验结果曲线变化趋势基本一致，特别是峰值位移、振动主频等吻合较好，其后计算曲线衰减略慢于试验结果，这主要是由于框架梁开裂导致结构的阻尼增加引起的，但本文没有考虑阻尼的变化。因此可认为采用本文提出的失效过程模拟分析方法能有效地对结构的动力过程进行模拟。

2 地震作用下考虑损伤构件失效过程的抗倒塌分析

2.1 地震波参数

结合《建筑抗震设计规范》[10]中的相关规定、双频段选波法[16]以及本文的研究目的，剪切波速取 260~510 m·s⁻¹，特别考虑竖向地震波对竖向倒塌的显著增强，且从美国太平洋地震工程研究中心 (PEER) 数据库中选取了震级不小于 6.5 级的 8 条地震波用于计算分析，具体信息见表 2。

基于 Stockwell 等[17]提出的 S 变换理论，参考文献[18]中的分析方法，应用 MATLAB 编程，得到 8 条地震波的加速度时程图、功率谱图和时变谱图，本文中只给出地震波总能量水平与竖向分量都较大的 Borrego Mtn 波、Northridge-01 波和人工波的加速度时程图，如图 5 所示。将各地震波总能量按水平与竖向分别记录在表 3 中，能量集中分布的频率

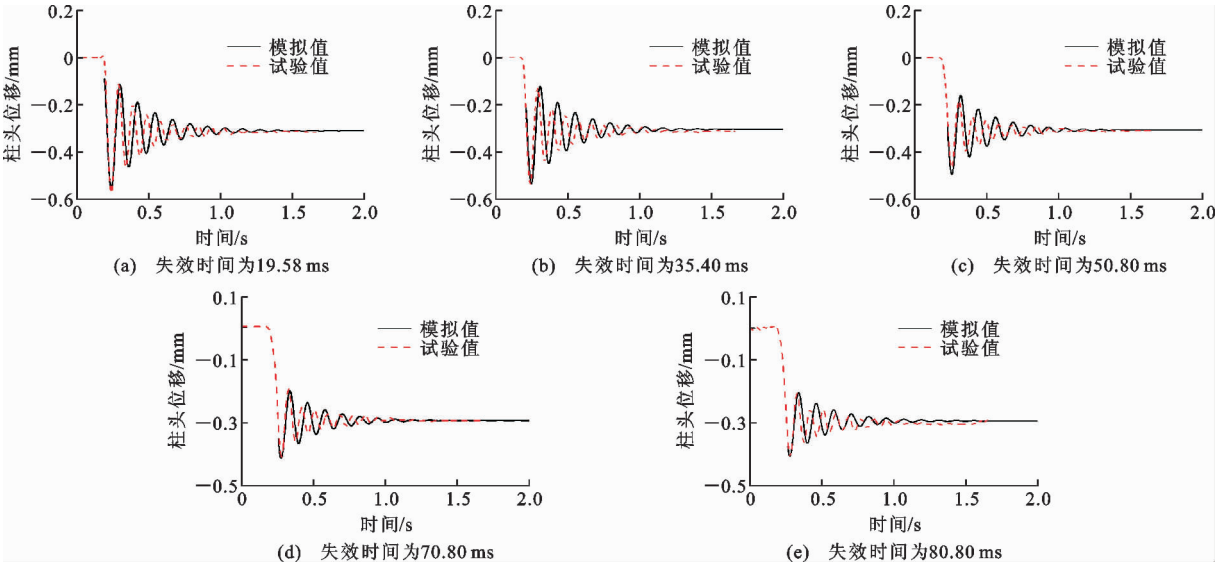


图 4 验证算例的计算结果

Fig. 4 Calculation Results of Validation Example

表 1 地震波持时
Tab. 1 Seismic Wave Duration

地震波	宁河波	El Centro 波	Kocaeli_Turkey 波	Taft 波	Imperial Valley-06 波	Borrego Mtn 波	Northridge-01 波	人工波
地震波持时/s	19	53	35	54	39	45	29	40
计算失效时间/s	[0,19]	[0,53]	[0,35]	[0,54]	[0,39]	[0,45]	[0,29]	[0,40]

表 2 地震波参数
Tab. 2 Parameters of Seismic Wave

序号	地震波	台站名称	地震特征	断层距/km	$A_{g,v}$	$A_{g,H}$	$A_{g,v}/A_{g,H}$
1	Borrego Mtn 波	San Onofre-So Cal Edison	远场	129.11	0.038 5g	0.041 3g	0.93
2	Taft 波		远场		0.105 0g	0.155 8g	0.67
3	El Centro 波		远场		0.210 1g	0.341 7g	0.61
4	宁河波		近场		0.074 6g	0.147 9g	0.50
5	Imperial Valley-06 波	Parachute Test Site	近场	12.69	0.161 8g	0.112 7g	1.44
6	Northridge-01 波	Sunland-Mt Gleason Ave	近场	13.35	0.203 4g	0.133 0g	1.53
7	Kocaeli_Turkey 波	Yarimca	近场	4.83	0.241 6g	0.321 8g	0.75
8	人工波				0.082 9g	0.127 6g	0.65

注: $A_{g,v}$ 为竖向加速度峰值; $A_{g,H}$ 为水平加速度峰值。

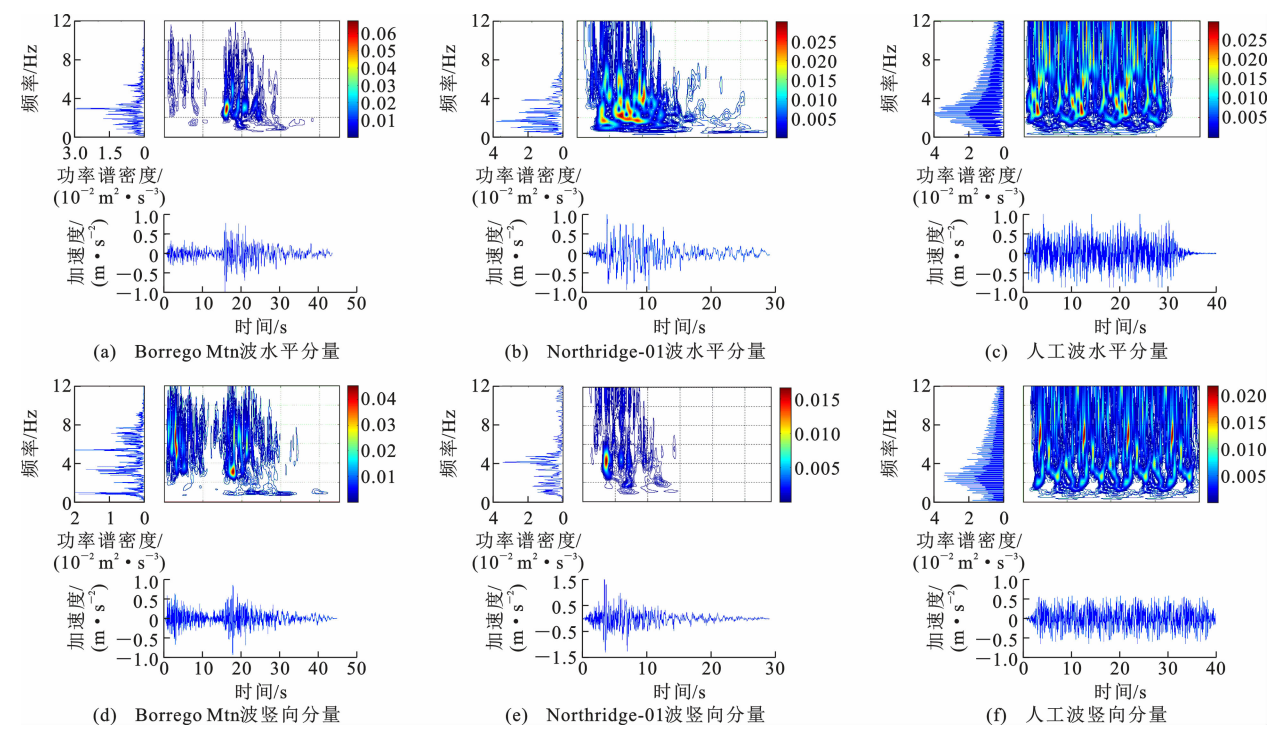


图 5 地震波加速度时程曲线
Fig. 5 Acceleration Time History Curves of Seismic Waves

表 3 地震波总能量
Tab. 3 Seismic Wave Total Energy

地震波	宁河波	El Centro 波	Kocaeli_Turkey 波	Taft 波	Imperial Valley-06 波	Borrego Mtn 波	Northridge-01 波	人工波
能量水平分量/J	0.877	0.973	0.829	1.459	1.057	1.038	1.308	3.194
能量竖向分量/J	0.153	0.267	0.656	0.707	0.938	1.046	1.249	1.945

范围统计如表 4 所示。同时考虑水平与竖向地震作用的倒塌分析时,按 8 度罕遇地震作用(水平地震加速度峰值为 0.4g,g 为重加速度)进行计算。

2.2 计算结果

2.2.1 竖向位移峰值

图6为中柱竖向位移峰值时程计算曲线,计算

表 4 能量集中分布频率范围

Tab. 4 Energy Concentration Frequency Range

地震波	宁河波	El Centro 波	Kocaeli_Turkey 波	Taft 波	Imperial Valley-06 波	Borrego Mtn 波	Northridge-01 波	人工波
频率水平分量/Hz	[0.5,3]	[1,5]	[0.5,5.5]	[1,6.5]	[4,8]	[2,3.5]	[1.5,7]	[1.5,12]
频率竖向分量/Hz	[6.5,10]	[8,10]	[3,10]	[1.5,8]	[4.5,6]	[2.5,9]	[3.5,5]	[1.5,12]

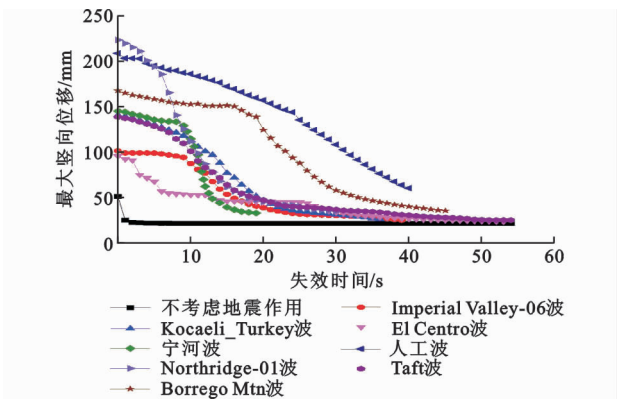


图 6 竖向位移峰值时程曲线

Fig. 6 Peak Vertical Displacement Time History Curves

工况分考虑与不考虑地震作用 2 种,其中考虑地震作用时采用表 2 中的 8 条典型地震波。计算结果表明:相对于不考虑地震作用时,考虑地震作用的中柱竖向位移峰值都明显增大,且随着中柱失效时间的增加而快速减小,其中 Northridge-01 波作用下的中柱竖向位移峰值随失效时间下降最快但其在前 5 s 失效时间内为最大值;考虑人工波作用工况的结构竖向位移峰值在同一失效时间基本上均大于其他工况;当失效时间大于 40 s 时,各条地震波与不考虑地震作用时的峰值计算位移都趋近于 25 mm。

2.2.2 钢筋应变峰值

图 7 为钢筋应变峰值时程曲线,计算工况按考虑与不考虑地震作用 2 种,各条地震波作用下的钢筋拉应变峰值出现在中柱相邻梁端,计算结果表明:相对于不考虑地震作用时,考虑地震作用的钢筋拉应变峰值都明显增大,且随着中柱失效时间的增加而快速减小;前 5 s 失效时间内 Northridge-01 波作用下的钢筋应变峰值为最大值,而人工波作用下的钢筋应变峰值在大部分失效时间均为最大值。这与图 6 所示中柱竖向位移峰值计算结果的变化趋势基本一致。结合表 1,2 以及图 6 计算结果可以看出,结构竖向位移响应峰值与竖向加速度峰值、竖向与水平加速度峰值比值、地震波总能量水平与竖向分量以及柱的失效时间均有关。在相同的失效时间下,竖向加速度峰值与地震波总能量竖向分量能显著增加结构竖向响应,从而加大结构的竖向倒塌风险。

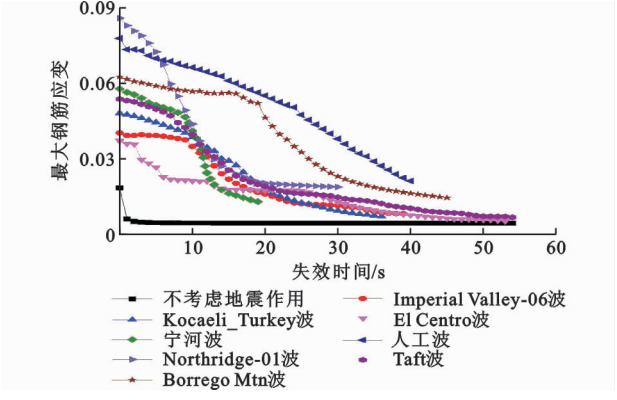


图 7 钢筋应变峰值时程曲线

Fig. 7 Peak Reinforcement Strain Time History Curves

2.2.3 地震波影响分析

为分析竖向与水平加速度峰值比值对结构的影响,提取 0~19 s 间失效时间对应的中柱竖向位移峰值计算结果,如图 8 所示。图 8 中显示,同一失效时间下各地震波的中柱竖向位移峰值并未呈现出与竖向和水平加速度峰值比值明显的对应关系,这表明,竖向和水平加速度峰值比值对中柱竖向位移峰值的影响不占主导,可能还受其他因素影响。

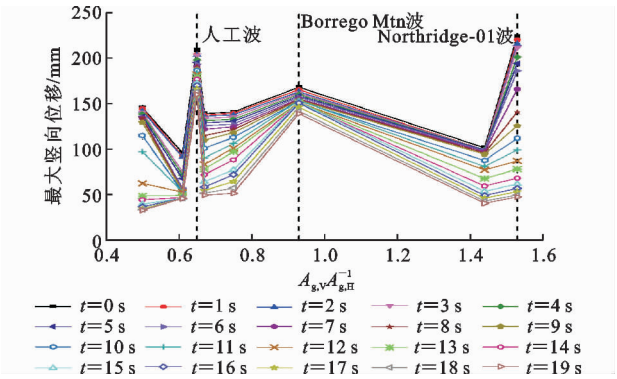


图 8 竖向位移峰值计算结果对比

Fig. 8 Comparison of Calculation Results of Peak Vertical Displacements

图 8 结果对比中有 3 处较为突出,即人工波、Borrego Mtn 波以及 Northridge-01 波对应的计算结果,因此进一步结合图 5 地震时频特性进行分析。人工波地震总能量水平与竖向分量均为最大值,且能量分布均匀,这可能是造成人工波作用工况下结构竖向位移峰值在同一失效时间基本上均大于其他工况的原因;Northridge-01 波总能量水平与竖向分

量小于人工波,结构弹性阶段竖向自振频率为 3.63 Hz,与其能量密度集中分布的频率范围最为接近,在前 5 s 失效时间范围内其计算结果为最大值;Borregge Mtn 波总能量水平与竖向分量也均较大,仅次于人工波和 Northridge-01 波,其结构响应也仅次于人工波和 Northridge-01 波。结构竖向加速度峰值较低,说明结构响应与竖向加速度峰值、地震波总能量水平与竖向分量均有关,且地震的竖向效应对结构竖向响应的影响不可忽略。

2.3 抗倒塌性能分析

计算结果表明,人工波作用下结构的竖向反应较为显著,因此,拟选取人工波作用下的计算结果,对结构进行抗倒塌分析。

2.3.1 中柱竖向位移

图 9 给出人工波作用下,不同中柱失效时间对应的中柱竖向位移时程曲线(部分工况)。结果表明:当失效时间为 0 s 时[图 9(a)],失效瞬间中柱竖向位移有一大幅度增大,约 2.5 s 后又大幅度增大,剩余结构有明显的竖向动力反应;当失效时间为 1 s 时,中柱失效后,中柱竖向位移短时间内也有明显增大,但相比中柱瞬间失效所需时间稍长;当失效时间为 40 s 时,动力效应的影响已不明显,中柱竖向位移峰值仅为 0 s 失效时间工况下的 28.93%。由图 9 的变化可知,随着中柱失效时间的增大,动力效应的影响逐渐减小,即地震作用对剩余结构的影响减小,故中柱失效时间越长越有利于结构抗竖向倒塌。

将图 2 中中柱柱底反力 N 与竖向地震作用力

G 的叠加称为等效作用力,图 10 为人工波作用下不同中柱失效时间的等效作用力时程曲线。可以看出:当失效时间为 0 s 和 1 s 时[图 10(a),(b)],等效作用力都有一明显瞬间跌落,之后呈波动状;随着失效时间的增大,中柱失效前的等效作用力由瞬间大幅度减小逐渐演变为缓慢波动减小,这表明动力效应的影响得到了减缓,且中柱失效时间越长,失效柱轴力对结构抗倒塌越有利,地震作用对剩余结构的影响越小,这与图 9 分析结果一致。

2.3.2 梁端受拉钢筋应变

图 11 为人工波作用下不同中柱失效时间对应的梁端受拉钢筋应变时程曲线(部分工况)。结果表明:当失效时间为 0 s 时[图 11(a)],失效瞬间梁端受拉钢筋应变大幅度增大,约 2.5 s 后又大幅度增大,剩余结构有明显的动力反应。由图 11 的变化可知,随着中柱失效时间的增大,梁端受拉钢筋应变峰值在不断减小,动力效应的影响逐渐减弱;当失效时间为 40 s 时,动力效应的影响已不明显,梁端受拉钢筋应变峰值仅为 0 s 失效时间工况下的 27.24%。这说明地震作用对剩余结构的影响随中柱失效时间的变长而减小,中柱失效时间越长越有利于结构抗倒塌。

2.3.3 中柱加速度

图 12 为人工波作用下中柱峰值加速度-失效时间曲线,图 12 中正值方向为上,负值方向为下。结果表明:0~7 s 失效时间内,正向加速度峰值变化不大,约稳定在 0.5g 水平线上;7~15 s 间正向加速度峰值开始略微增大;15 s 后,加速度峰值稳定在

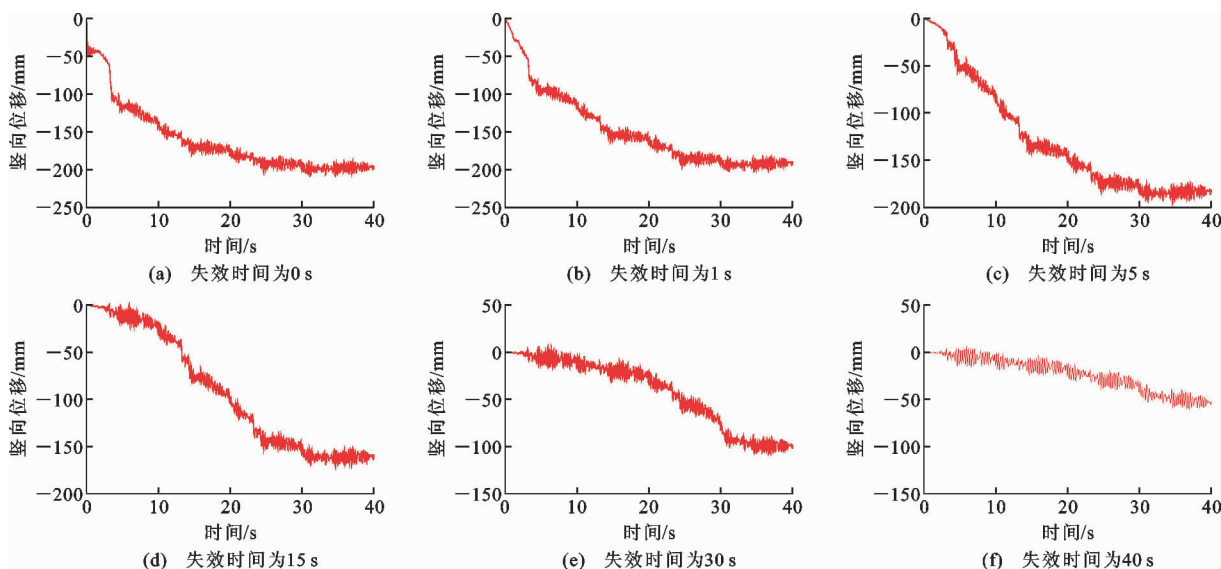


图 9 中柱竖向位移时程曲线

Fig. 9 Vertical Displacement Time History Curves of Middle Column

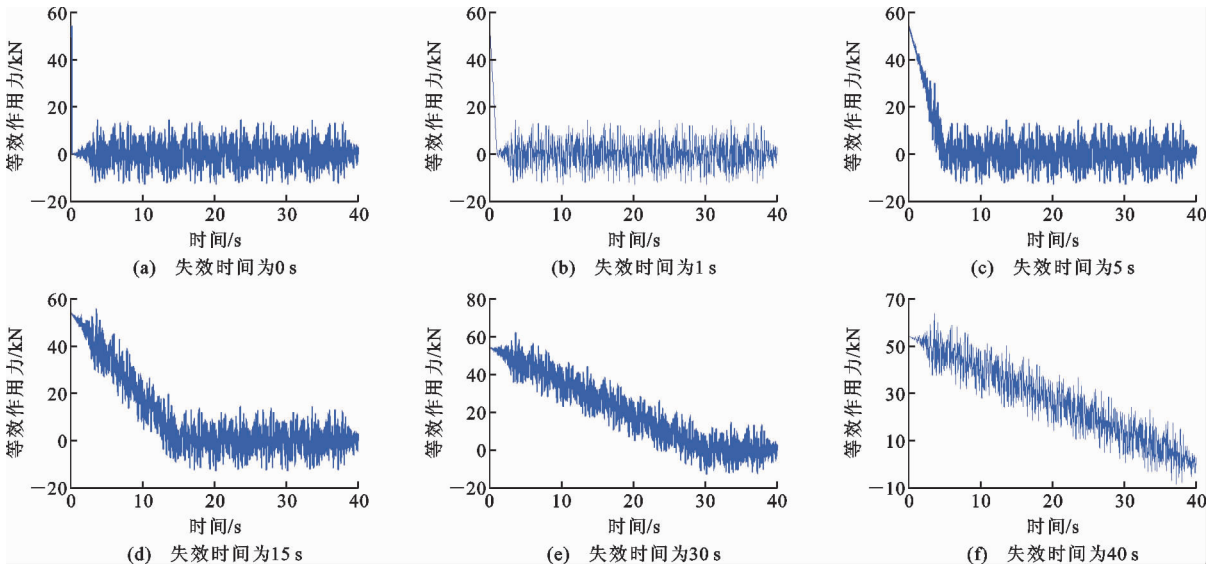


图 10 等效作用力时程曲线
Fig. 10 Equivalent Force Time History Curves

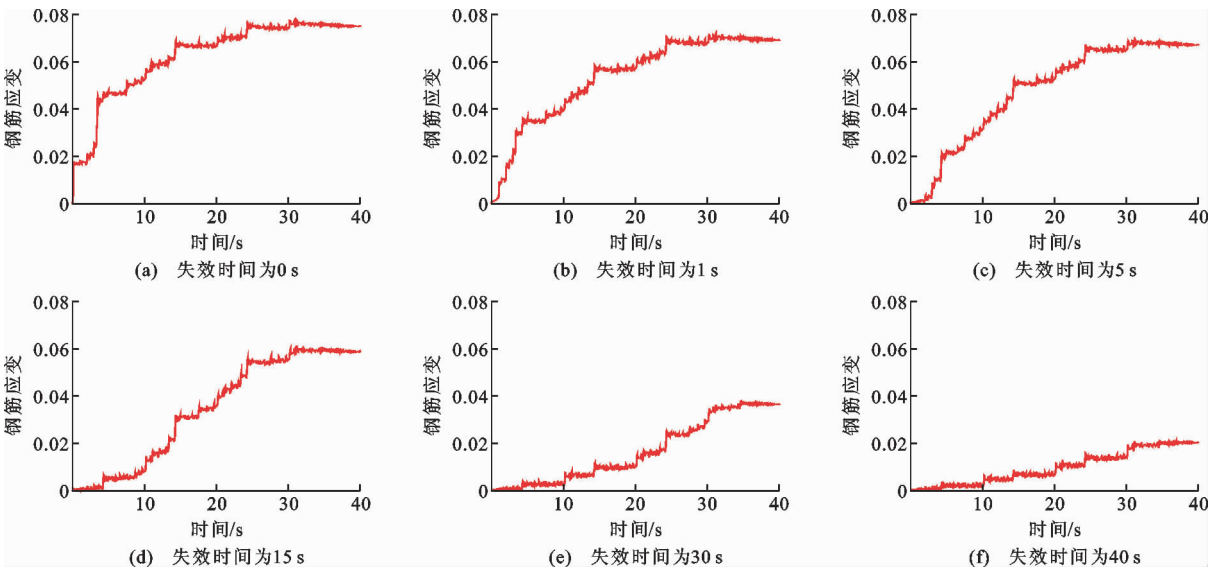


图 11 梁端受拉钢筋应变时程曲线
Fig. 11 Strain Time History Curve of Tensile Steel Bar at Beam End

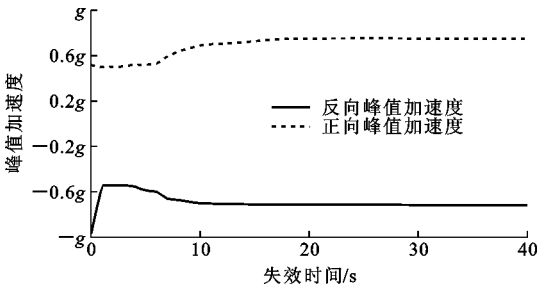


图 12 中柱峰值加速度-失效时间曲线
Fig. 12 Peak Acceleration-failure Time Curves of Middle Column

0.749g 左右。反向加速度峰值在中柱失效时间 0 s 时为 $-0.965g$ ，约等于重力加速度；失效时间增加到 1 s，反向加速度峰值迅速下降，仅为 0 s 失效时间的 57%；之后随失效时间的增加，反向加速度峰值略微增大，15 s 后稳定在 $-0.720g$ 左右。图 13 给出了不同中柱失效时间对应的加速度时程曲线（部分工况），从图 13 可以看出，仅在失效时间为 0 s 时，即中柱瞬间失效工况下，加速度在极短的时间内有骤降现象，这说明中柱瞬间失效会对结构造成很大的动力效应，不利于结构的抗倒塌，应避免结构中损伤柱的瞬间失效。

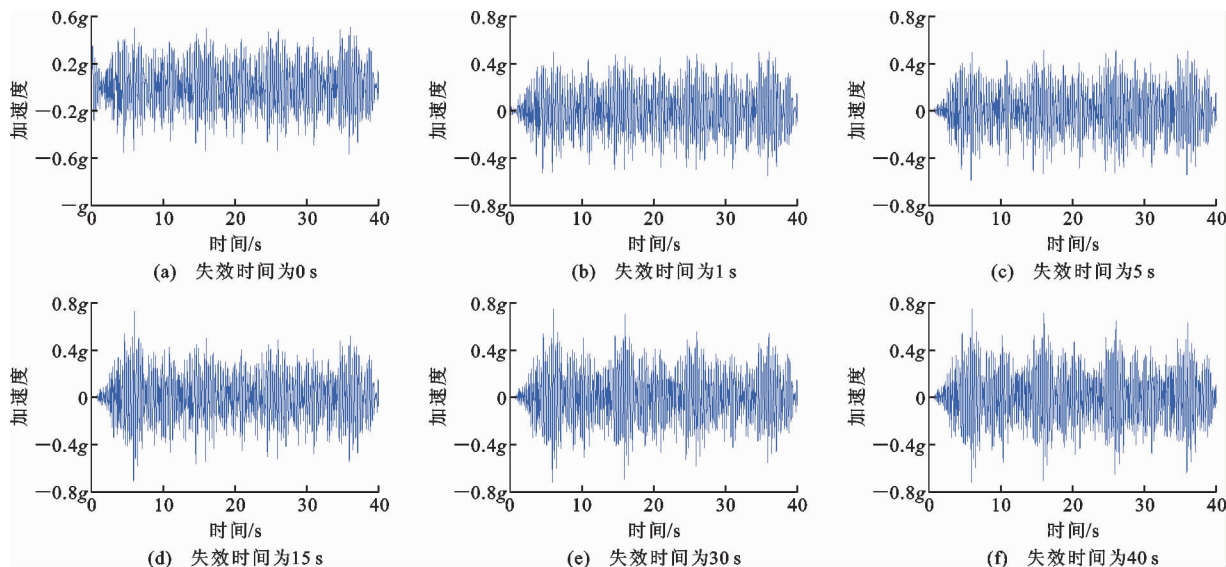


图 13 中柱加速度时程曲线

Fig. 13 Acceleration Time History Curves of Middle Column

3 结 语

(1)为考虑存在损伤的框架柱在地震作用下的失效过程及倒塌性能,采用等效轴力变化模拟损伤柱的失效过程,基于轴力与竖向地震荷载共同作用进行动力非线性时程分析的计算模型和方法是可行的。

(2)存在损伤的支撑柱在水平与竖向地震作用下会发生失效破坏,竖向地震作用会明显增加中柱竖向位移反应及相邻梁端钢筋应变反应,因此竖向地震作用能大幅降低结构的抗竖向连续倒塌能力。

(3)损伤结构竖向动力反应与竖向加速度峰值、地震波总能量水平与竖向分量以及中柱失效时间等有关,且在相同的失效时间下,竖向加速度峰值与地震波总能量竖向分量会显著增加损伤结构竖向响应,从而加大结构发生竖向连续倒塌的风险。

(4)在相同地震荷载作用下,损伤结构动力效应随着中柱失效时间的增大而逐渐减弱。为提高损伤结构在地震作用下的抗连续倒塌能力,应确保支撑柱具有足够的延性以及竖向承载能力,防止其发生脆性破坏。

参考文献:

References:

- [1] 张鑫,徐向东.汶川大地震钢筋混凝土框架结构震害调查[J].山东建筑大学学报,2008,23(6):547-550.
ZHANG Xin,XU Xiang-dong. A Report on Damages of RC Frame Structures in Great Wenchuan Earth-

quake[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2008,23(6):547-550.

- [2] 熊立红,兰日清,王玉梅,等.芦山7.0级强烈地震建筑结构震害调查[J].地震工程与工程振动,2013,33(4):35-43.

XIONG Li-hong,LAN Ri-qing,WANG Yu-mei,et al. Earthquake Damage Investigation of Structures in 7.0 Lushan Strong Earthquake[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2013,33(4):35-43.

- [3] 付成祥.RC框架结构典型地震倒塌模式研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2014.

FU Cheng-xiang. Study on Typical Seismic Collapse Pattern of RC Frame Structure[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration,2014.

- [4] 何庆锋,易伟建.考虑悬索作用钢筋混凝土梁柱子结构抗倒塌性能试验研究[J].土木工程学报,2011,44(4):52-59.

HE Qing-feng,YI Wei-jian. Experimental Study of the Collapse-resistant Behavior of RC Beam-column Sub-structures Considering Catenary Action [J]. China Civil Engineering Journal,2011,44(4):52-59.

- [5] SU Y,TIAN Y,SONG X. Progressive Collapse Resistance of Axially-restrained Frame Beams[J]. ACI Structural Journal,2009,106(5):600-607.

- [6] KAEWKULCHAI G,WILIAMSON E B. Dynamic Behavior of Planar Frames During Progressive Collapse[C]//ASCE. Proceedings of the 16th ASCE Engineering Mechanics Conference. Seattle: Washington University,2003:16-18.

- [7] 何庆锋,邓颖婷.地震作用下 RC 框架结构抗连续倒塌数值分析[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2018,33(3):22-30.
HE Qing-feng,DENG Ying-ting. Numerical Analysis of Collapse-resistant Performance for RC Frame Structure Under Earthquake[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology:Natural Science Edition,2018,33(3):22-30.
- [8] 易伟建,何庆锋,肖岩.钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能的试验研究[J].建筑结构学报,2007,28(5):104-109,117.
YI Wei-jian,HE Qing-feng,XIAO Yan. Collapse Performance of RC Frame Structure[J]. Journal of Building Structures,2007,28(5):104-109,117.
- [9] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010,Code for Design of Concrete Structures[S].
- [10] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010,Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [11] LOWES L N, MITRA N, ALTOONTASH A. A Beam-column Joint Model for Simulating the Earthquake Response of Reinforced Concrete Frames[M]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, 2003.
- [12] BAO Y. Macromodel-based Progressive Collapse Simulation of Reinforced Concrete Structures[J]. Dissertations & Theses-gradworks, 2008, 134(7): 1079-1091.
- [13] 吴健秋.基于 OpenSees 的梁-柱节点单元的适用性和定参方法研究[D].重庆:重庆大学,2007.
WU Jian-qiu. A Study on the Applicability and Parameter Defining Method of the Beam-column Model in OpenSees[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [14] 解琳琳,叶献国,种迅,等. OpenSees 中混凝土框架结构节点模型关键问题的研究与验证[J].工程力学,2014,31(3):116-121,151.
XIE Lin-lin, YE Xian-guo, CHONG Xun, et al. Research and Verification on Joint Model of RC Frame Structure in OpenSees[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 116-121, 151.
- [15] 蒋曲翀.钢筋混凝土框架结构倒塌过程中动力效应试验研究[D].长沙:湖南大学,2014.
JIANG Qu-chong. Experimental Study on the Dynamic Effect for RC Frame Structures to Resist Progressive Collapse[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [16] 杨溥,李英民,赖明.结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J].土木工程学报,2000,33(6):33-37.
YANG Pu, LI Ying-min, LAI Ming. A New Method for Selecting Inputting Waves for Time-history Analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 33-37.
- [17] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWER P. Localization of the Complex Spectrum; The S Transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.
- [18] 樊剑,吕超,张辉.地震波时频特征及与结构地震响应的关系[J].工程力学,2010,27(6):98-105,126.
FAN Jian, LU Chao, ZHANG Hui. Relation Between Time-frequency Characteristic of Earthquake Ground Motions and Structural Earthquake Responses[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(6): 98-105, 126.