

高压物理学报

冲击作用下框架结构的连续性倒塌性能

宿华祥 易伟建 黄义谋

Continuous Collapse Behavior of Frame Structures under Impact

SU Huaxiang, YI Weijian, HUANG Yimou

引用本文:

宿华祥, 易伟建, 黄义谋. 冲击作用下框架结构的连续性倒塌性能[J]. 高压物理学报, 2020, 34(3):034201. DOI: 10.11858/gywlb.20190806

SU Huaxiang, YI Weijian, HUANG Yimou. Continuous Collapse Behavior of Frame Structures under Impact [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(3):034201. DOI: 10.11858/gywlb.20190806

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190806>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

钢筋混凝土墙抗冲击性能的数值模拟分析

Numerical Simulation Analysis of Impact Resistance of Reinforced Concrete Wall

高压物理学报. 2020, 34(1): 014201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190772>

落锤冲击下钢筋混凝土梁响应及破坏的数值模拟

Numerical Simulation of Responses and Failure Modes of Reinforced Concrete Beams under Drop-Weight Impact Loadings

高压物理学报. 2018, 32(3): 034102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170693>

近场爆炸作用下核电厂安全壳穹顶钢筋混凝土板的抗爆性能

Blast Resistance of Containment Dome Reinforced Concrete Slab in NPP under Close-in Explosion

高压物理学报. 2019, 33(2): 025101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180598>

钢纤维混凝土板在冲击与爆炸荷载下的K&C模型

K&C Model of Steel Fiber Reinforced Concrete Plate under Impact and Blast Load

高压物理学报. 2020, 34(3): 024201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190853>

不同材料弹体超声速侵彻钢筋混凝土靶的结构破坏对比实验

Comparative Experiment on Structural Damage of Supersonic Projectiles with Different Metal Materials Penetrating into Reinforced Concrete Targets

高压物理学报. 2020, 34(2): 025101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190841>

冲击作用下框架结构的连续性倒塌性能

宿华祥, 易伟建, 黄义谋

(湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 借助 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了钢筋混凝土框架的有限元模型, 研究了钢筋混凝土框架在冲击荷载作用下的连续性倒塌性能, 冲击体质量为 1 000 kg, 冲击速度为 4 m/s。通过对钢筋混凝土构件冲击试验和框架倒塌过程的验证, 保证了数值模拟的有效性。分析结果表明: 冲击中柱后结构倒塌过程中, 有“拱作用”向“悬索作用”转换的机制, 中柱顶部位移先向上后向下, 边柱顶部位移先向外后向内; 同样冲击作用下, 柱轴力越小, 则抗冲击能力越强, 不同的偏压作用对柱的抗冲击性能的影响不同; 加密柱箍筋能够增强钢筋混凝土柱的抗冲击能力, 延缓甚至避免钢筋混凝土框架结构的连续性倒塌。

关键词: 钢筋混凝土框架; 连续性倒塌; 冲击荷载作用

中图分类号: O347.3

文献标识码: A

钢筋混凝土结构自问世以来便得到了广泛应用, 对混凝土设计理论的研究也不断深入。混凝土结构在使用过程中可能受到各种冲击荷载作用, 导致构件失效, 甚至造成结构的连续性倒塌。由于结构发生倒塌的后果十分严重, 而目前对冲击荷载作用下结构的连续性倒塌响应的研究尚不够充分, 因此, 有必要对冲击荷载作用下钢筋混凝土结构的连续性倒塌性能开展更深入的研究。

迄今为止, 国内外学者对钢筋混凝土结构的动力响应及连续性倒塌性能开展的研究表明, 钢筋混凝土结构由于材料的率敏感性^[1-2]和惯性作用, 其动力响应与静力响应明显不同。Do 等^[3]用数值模拟方法对桥柱在车辆撞击作用下的动力响应和失效模式进行了研究; 刘飞等^[4]对有轴力的钢筋混凝土柱进行了数值模拟, 分析了其破坏模式及转换机理; 史先达^[5]、宿华祥等^[6]利用 LS-DYNA 软件中同样的材料模型, 分别对钢筋混凝土梁、板和墙的冲击试验进行了验证, 模拟结果与试验结果吻合良好, 说明所采用的材料模型是适用和准确的; 美国世界贸易中心受到飞机撞击倒塌后, 陆新征等^[7]利用 LS-DYNA 软件对其受撞击倒塌过程进行了数值模拟和参数讨论; 何庆锋^[8]对一榀钢筋混凝土框架进行了拟静力倒塌试验, 分析了结构失效过程中所经历的弹性、塑性和悬索作用阶段, 对结构受力机制的转换过程进行了探讨; Hou 等^[9]提出了简化计算梁柱子结构荷载-位移曲线的方法, 并开展了试验验证, 基于能量原理, 对结构的抗连续性倒塌能力进行预估; 李凤武^[10]利用钢筋混凝土框架结构开展了倒塌试验, 通过瞬时拆除中柱来研究结构的动力响应, 并对动力参数进行了分析, 发现单个构件的破坏失效不一定会引起结构的倒塌; Vaughan 等^[11]利用一栋 4 层缩尺框架结构开展了倒塌试验, 发现移除几个连续构件时结构只发生局部倒塌, 表明框架结构自身具有一定的抗连续性倒塌能力; 罗维刚等^[12]通过 ABAQUS 软件研究了考虑楼板影响时钢筋混凝土结构的连续性倒塌响应, 同时分析了拆柱时间的影响, 结果表明, 考虑楼板作用后结构的动力响应明显减小, 并且当拆柱时间短于剩余结构自振周期的 1/4 时, 时间越短, 结构动力响应越明显; Kang 等^[13]利用 LS-DYNA 软件模拟了汽车撞击钢框架的底层

* 收稿日期: 2019-07-04; 修回日期: 2019-07-22

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0701405)

作者简介: 宿华祥(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事钢筋混凝土结构抗冲击性能研究。

E-mail: 15575888135@163.com

通信作者: 易伟建(1954-), 男, 博士, 教授, 主要从事混凝土结构基本理论研究. E-mail: wjyi@hnu.edu.cn

柱,分析了撞击过后结构的连续性倒塌过程;Sasani等^[14-15]对两栋钢筋混凝土结构分别进行的爆破试验研究表明,拆除部分柱后结构未发生倒塌,破坏柱所受轴力会传递给相邻的钢筋混凝土柱。

本研究采用LS-DYNA显示动力学有限元软件,对钢筋混凝土框架在冲击荷载作用下的响应进行数值分析,通过钢筋混凝土框架在锤击作用下的有限元模拟,分析钢筋混凝土框架的抗冲击和抗连续性倒塌性能,在此基础上分析加密底层柱箍筋密度对框架抗连续性倒塌性能的影响。

1 有限元模型和材料参数

1.1 有限元模型

根据参考文献[8]中的试验框架建立模型,框架尺寸及配筋如图1所示。通过中柱顶部上端加载千斤顶和下部两个卸载千斤顶控制中柱轴力,记录不同中柱位移时钢筋和混凝土的应变,并对中柱竖向位移和各层框架柱顶的水平位移进行记录。通过试验数据和试验现象,对框架的受力过程进行分析,并对此钢筋混凝土平面框架受力机制的转换过程进行探讨。

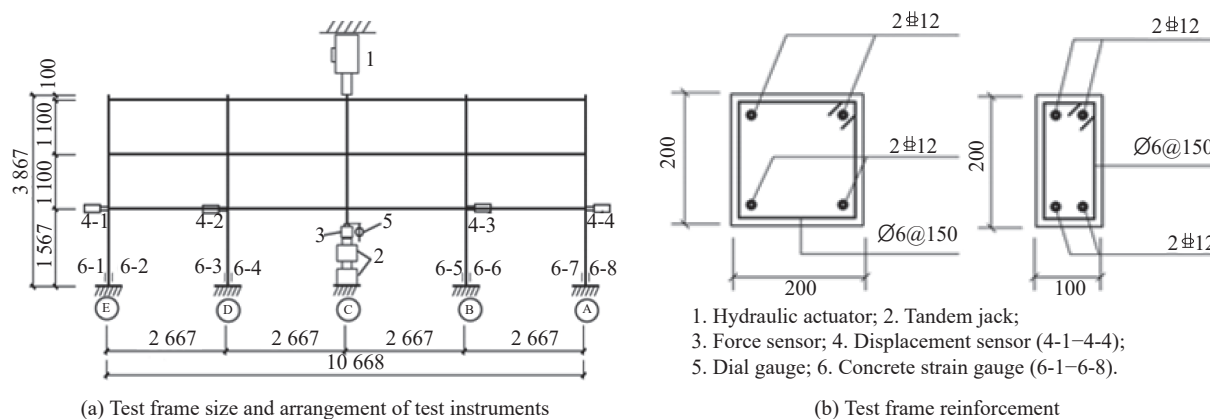


图1 试验框架尺寸、配筋与测试仪器布置(单位: mm)

Fig. 1 Detailed drawing of test frame size, reinforcement and arrangement of test instruments(Unit: mm)

该模型的原型为一栋8层钢筋混凝土框架结构的图书馆,原型抽取中柱后结构并不会发生连续性倒塌,本研究采用的单榀框架并未考虑结构空间作用的有利影响。此外,模拟中也没有考虑楼板的作用,实际结构中楼板的加入能够提高结构抗连续性倒塌的能力。

钢筋混凝土框架的有限元模型如图2所示。考虑到框架结构的对称性,采用1/2建模的方式加快计算速度,模型基于XY平面对称,且在对称面上施加对称约束;钢筋混凝土柱顶为50 mm厚的钢垫板,避免在集中荷载作用下柱顶混凝土发生局部破坏。钢筋和混凝土之间采用分离式共节点的方式建模,添加关键字*LOAD_BODY_Y对模型整体施加重力加速度。

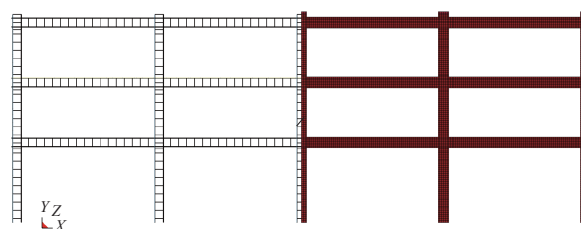


图2 钢筋混凝土框架有限元模型

Fig. 2 Finite element model of reinforced concrete frame

1.2 材料模型

LS-DYNA软件中的CSCM模型可兼顾材料的硬化、损伤及率相关性,能够很好地模拟混凝土结构在低速冲击作用下的响应^[16]。本研究中采用的混凝土材料模型为MAT_CSCM(MAT159),混凝土材料的侵蚀应变设为0.1,即混凝土应变达到0.1后单元被删除并退出计算;钢筋采用考虑应变率效应的MAT_PLASTIC_KINEMATIC(MAT3)模型。

模型中的材料参数取值参考文献[8],材料本构模型及相关参数见表1。其中, ρ 为密度, E 为弹性模量, ν 为泊松比, f_c 为混凝土抗压强度, d 为粗骨料最大粒径, f_y 为钢筋屈服强度, f_u 为钢筋极限强度。

表 1 材料本构模型及参数^[8]
Table 1 Constitutive model and material parameters^[8]

Parts	Material model	Material parameters
Hammer	*MAT_ELASTIC	$\rho = 7\,800\text{ kg/m}^3$, $E = 200\text{ GPa}$, $\nu = 0.27$
Concrete	*MAT_CSCM	$\rho = 2\,400\text{ kg/m}^3$, $f_c = 25\text{ MPa}$, $d = 20\text{ mm}$
Distributed reinforcement	*MAT_PLASTIC_KINEMATIC	$\rho = 7\,800\text{ kg/m}^3$, $E = 200\text{ GPa}$, $\nu = 0.27$, $f_y = 416\text{ MPa}$, $f_u = 526\text{ MPa}$
Stirrups	*MAT_PLASTIC_KINEMATIC	$\rho = 7\,800\text{ kg/m}^3$, $E = 210\text{ GPa}$, $\nu = 0.27$, $f_y = 370\text{ MPa}$

2 模型验证

为了保证所采用的有限元模型的正确性,对文献[17]中梁的冲击试验结果和文献[8]中框架的倒塌过程进行了数值模拟。由于本研究中数值模拟采用的材料模型与文献[17]一致,故在钢筋混凝土梁试验的有限元模拟中不再赘述,仅给出模拟和试验的对比结果。

2.1 钢筋混凝土梁试验的有限元模拟

根据文献[17]中的试验梁进行建模,在支座中心处施加竖向线约束来模拟试验中梁体的边界条件,采用 1/4 建模,并在对称面上施加对称边界条件。所有构件最大位移的试验值和模拟值列于表 2。梁 A-1 和梁 A-2 的跨中位移时程曲线和梁体损伤的对比如图 3 所示。由图 3 的对比结果可知,试验值和模拟值较接近。

表 2 梁跨中最大位移比较

Table 2 Largest displacement comparison

Beam No.	Maximum displacement/mm		Relative error/%
	Experiment	Simulation	
A-1	81.0	82.8	2.22
A-2	74.0	74.0	0
A-3	83.6	90.6	8.37
A-4	89.5	86.6	-3.24

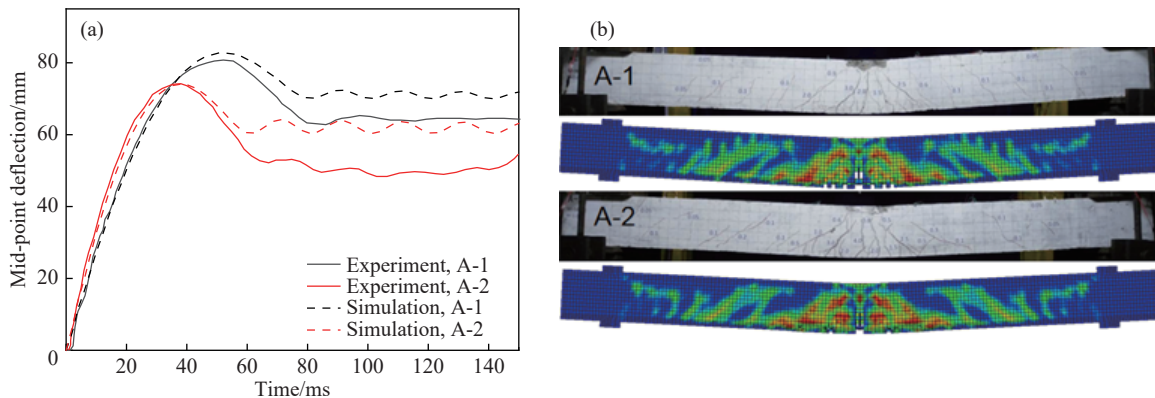


图 3 A-1、A-2 梁跨中挠度时程曲线(a)和损伤比较(b)

Fig. 3 Comparison of deflection time history curves (a) and damage (b) between A-1 and A-2 beams in midspan

2.2 钢筋混凝土框架倒塌过程模拟

采用直接在中柱柱顶施加荷载作用的方式,对试验框架进行非线性模拟分析,如图 4 所示。文献[8]对图 4 所示的冲击荷载作用时的动力系数进行了分析,计算结果表明,动力系数仅与结构的自振频率和冲击上升阶段的作用时间有关。试验框架的自振频率为 0.061 s,文献[8]中计算的动力系数 μ 与失效时间 t_1 的关系如表 3 所示,本研究在进行倒塌过程验证时,失效时间 t_1 取为 0.061 s。

图 5 给出了框架失去中柱后一层柱顶水平位移与中柱竖向位移的关系对比。由图 5 可知,试验和数值模拟结果均反映出结构受力机制的转换,即柱顶位移先向外移动,当中柱位移达到 140 mm

左右时,柱顶位移开始向内移动。另外,从图 5 可以看出,模拟曲线和试验曲线有较高的吻合度,能够反映框架在失去中柱后结构的倒塌过程。

表 3 不同失效时间对应的动力系数

Table 3 Dynamic coefficients at different failure time

t_1/s	μ	t_1/s	μ	t_1/s	μ	t_1/s	μ
0.001	2.000	0.020	1.832	0.060	1.014	0.150	1.128
0.005	1.989	0.040	1.426	0.061	1.003	∞	1.000
0.010	1.956	0.045	1.314	0.090	1.215		

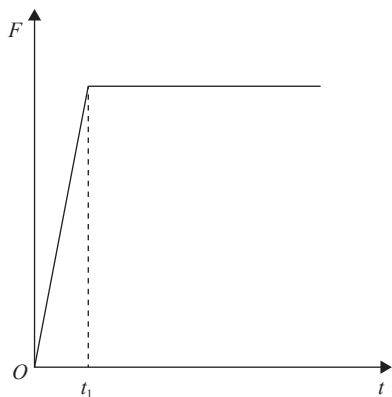


图 4 荷载曲线

Fig. 4 Load curve

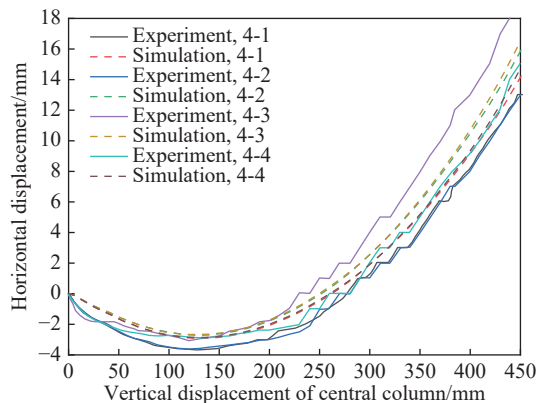


图 5 框架模拟与试验对比

Fig. 5 Frame simulation results vs. experiment

图 6 给出了框架倒塌过程中中柱竖向位移为 0、200、400、600、800、900 ms 时的损伤变形,在模型中通过释放中柱底部的固定约束模拟抽柱试验。

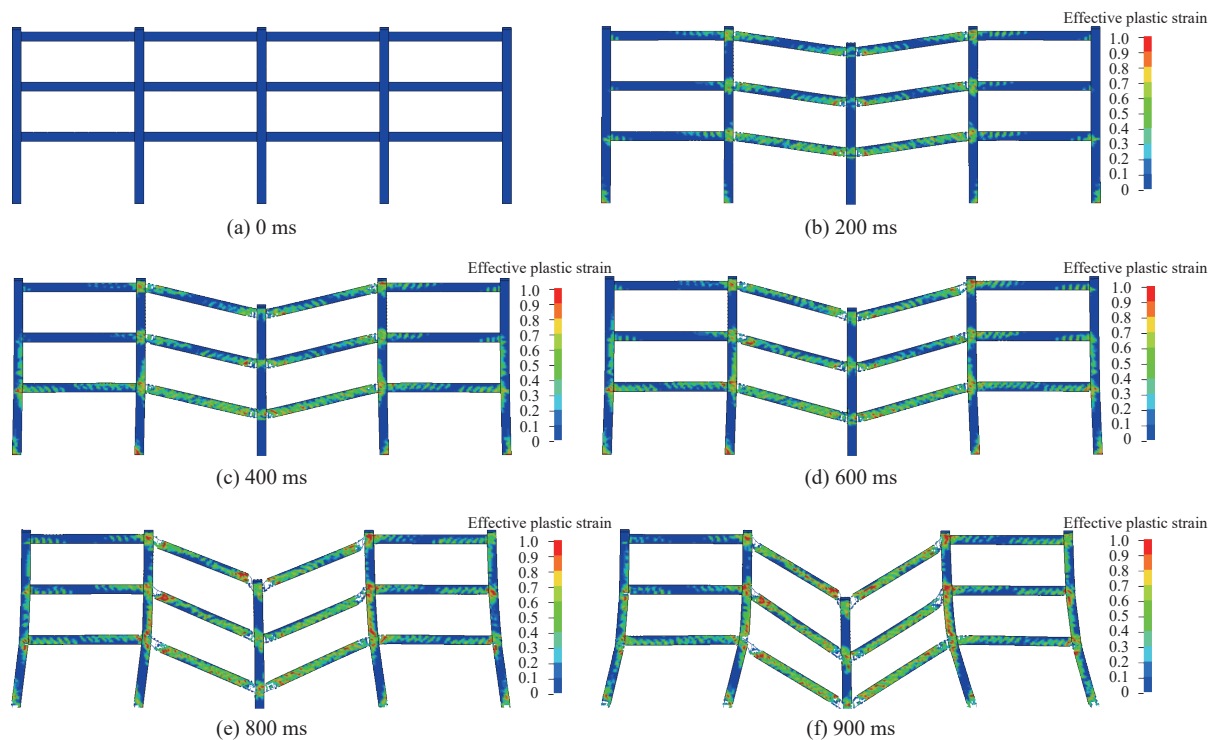


图 6 框架倒塌过程中变形损伤

Fig. 6 Damage deformation of the frame collapse

由图 6 可知: 当中柱底部的固定约束释放后, 中柱在柱顶力作用下向下移动, 与其相连的 6 根钢筋混凝土梁先出现损伤破坏; 随着中柱向下移动, 边框架柱相继出现损伤, 最终发生整体连续性倒塌。结合柱顶水平位移和中柱竖向位移的关系曲线, 本研究能够较真实地模拟结构抽柱倒塌破坏过程。

3 冲击荷载作用下框架响应分析

3.1 有限元模型

冲击荷载作用下框架的有限元模型如图 7 所示, 其中图 7(a) 为框架和锤体的示意图, 图 7(b) 为框架所受荷载作用, 即取 3 层框架时的实际受荷。锤体质量为 1 000 kg, 冲击速度为 4 m/s, 在此冲击作用下得出的结果能够较好地反映框架动力效应的差别。

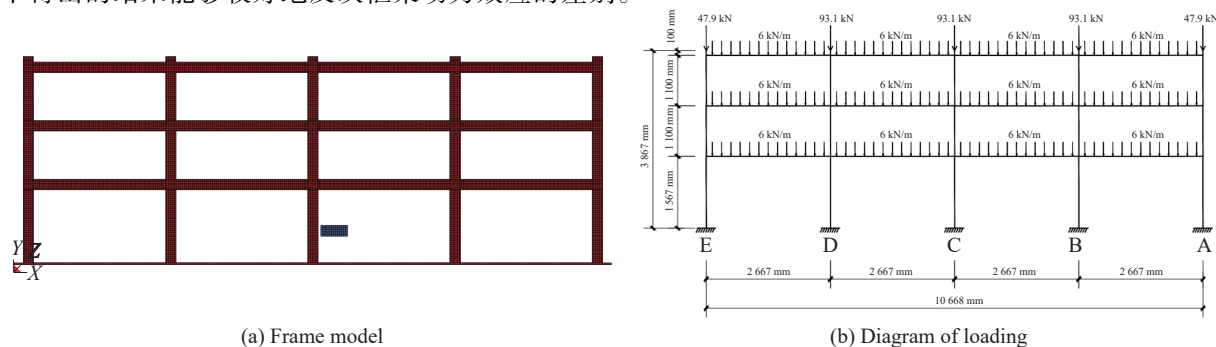


图 7 框架模型及受荷

Fig. 7 Frame model and loading

3.2 框架位移分析

对钢筋混凝土框架底层中柱受到锤击作用后的整体倒塌过程进行模拟分析。前 250 ms 中柱柱顶的竖向位移时程曲线(正值代表向上, 负值代表向下)如图 8 所示, A 柱和 E 柱柱顶水平位移时程曲线(正值代表向内, 负值代表向外)如图 9 所示。

由图 8 可知, 冲击伊始, 中柱柱顶出现向上的位移, 峰值为 5.72 mm, 与静力试验和抽柱模拟中中柱的竖向位移没有向上位移不同。此处向上的竖向位移是由“拱作用”机制导致的, 与试验框架柱顶有向外的位移及文献 [6] 中钢筋混凝土剪力墙在冲击作用下先有向上位移一致; 中柱竖向位移刚开始下降时速度较慢, 随着时间增加, 下降速度增大, 这是由于钢筋混凝土柱在受到冲击作用后虽然已不能抵抗结构上的竖向力, 但是仍有一定的残余承载力。由图 9 可知: 冲击伊始, A 柱向内、E 柱向外移动, 即两者均向冲击方向移动, 此时冲击作用对水平位移起主导作用; 作用持续一段时间后, A 柱和 E 柱均向外移动; 最终框架向内移动, 直至结构倒塌。

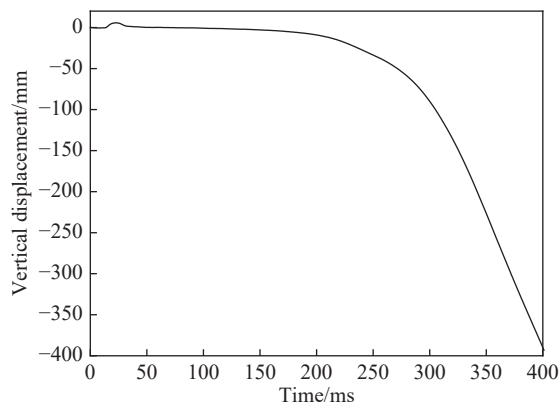


图 8 中柱柱顶竖向位移时程曲线

Fig. 8 Curve of vertical displacement vs. time at the top of central column

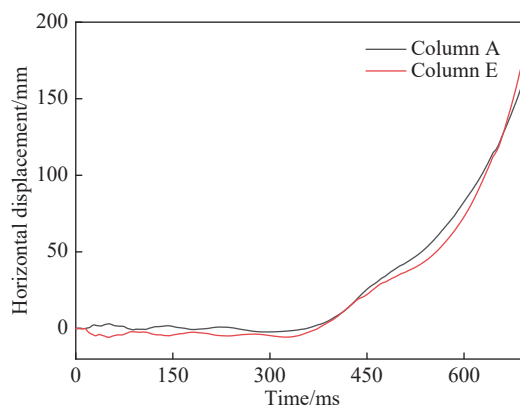


图 9 A 柱、E 柱柱顶水平位移时程曲线

Fig. 9 Curves of horizontal displacement vs. time at the top of the column A and E

图 10 给出了 A 柱和 E 柱一层柱顶水平位移平均值的时程曲线。由图 10 可知, 一层柱顶先向外后向内移动, 说明中柱受到冲击作用直至框架倒塌的过程中仍有“拱作用”。图 11 中的水平位移为一层 A 柱和 E 柱柱顶水平位移的平均值(向内为正, 向外为负)。从图 11 可以看出, 两条曲线的变化趋势基本一致, 随着中柱竖向位移的增大, 柱顶先向外后向内移动, 框架向外移动是由于出现了“拱作用”。不同之处在于, 抽柱模拟中中柱向下的竖向位移持续增大, 冲击作用后中柱柱顶的位移先向上后持续向下移动。冲击作用下得出的曲线在抽柱模拟曲线的下方, 但两者差别不大。由此可知, 采用静力试验模拟得出的试验结果与冲击作用的结果基本一致, 仅在冲击作用初始阶段不同, 采用静力试验能够模拟冲击作用下结构的倒塌过程。当然, 由于柱体在冲击作用后仍有一定承载力, 不同的冲击作用下柱体完全失去承载力所需要的时间不同。

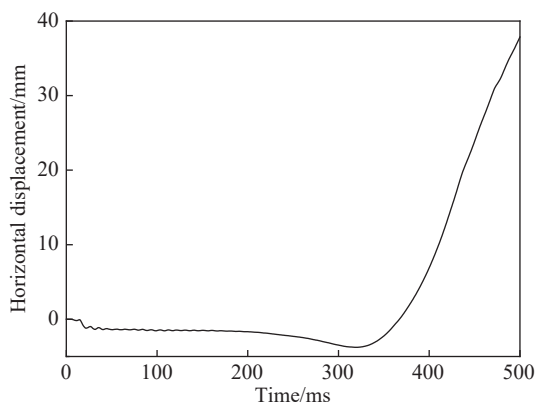


图 10 A 柱、E 柱水平位移平均值时程曲线

Fig. 10 Curve of average horizontal displacement vs. time of the column A and E

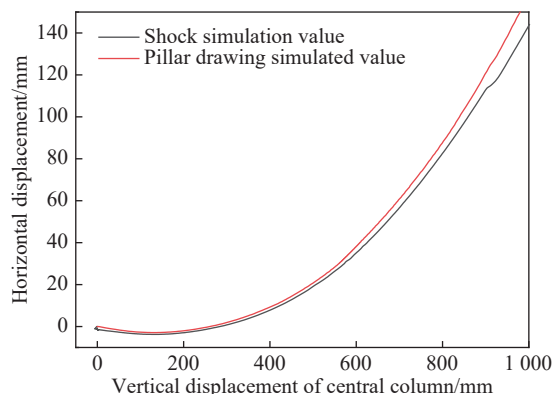


图 11 水平位移与中柱竖向位移关系曲线

Fig. 11 Relationship between horizontal displacement and vertical displacement of central column

3.3 框架倒塌过程分析

图 12 为钢筋混凝土框架受到冲击作用 50、200、300、400、600、1 000 ms 时的倒塌过程。

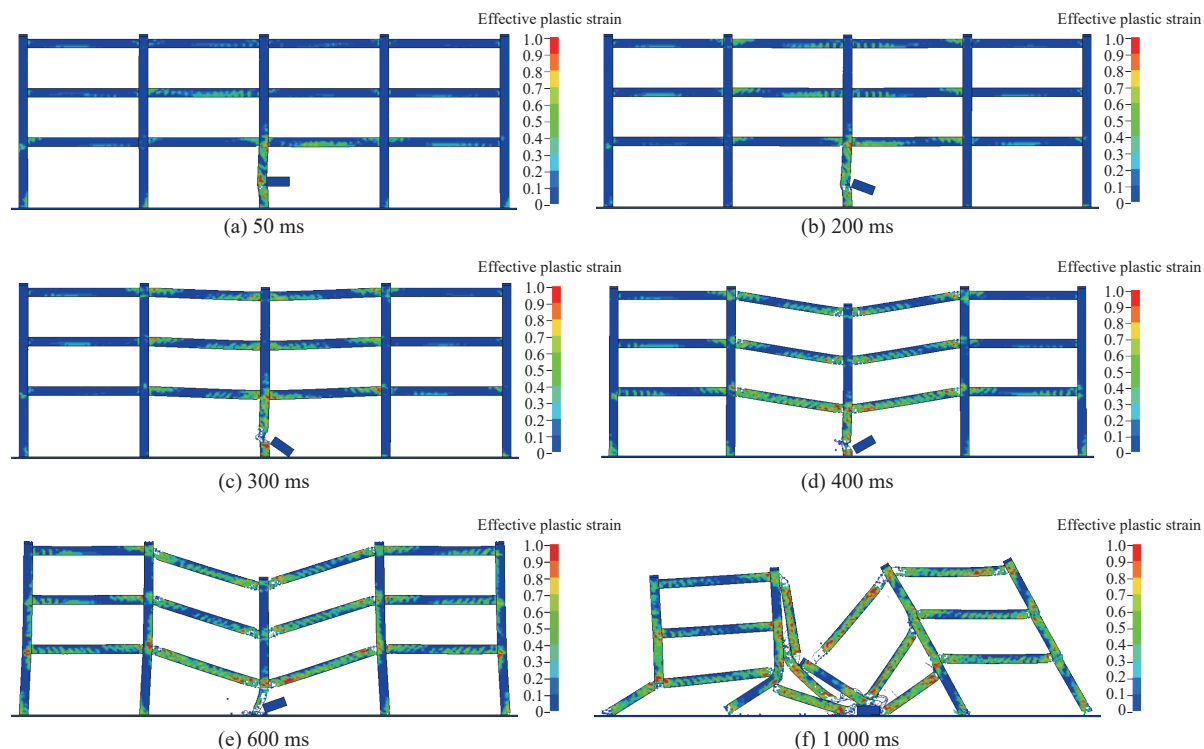


图 12 框架在冲击作用下的倒塌过程

Fig. 12 Collapse process of frame under impact

由图 12 可知: 框架一层中柱受到冲击作用后, 冲击作用点附近先发生破坏, 50 ms 时, 冲击作用尚未结束, 此时结构整体产生向左的位移, 柱底右侧的塑性应变较大; 200 ms 时, 底层中柱部分混凝土单元破坏失效, 中间两跨的梁体破坏加重; 300 ms 以后, 随着中柱不断下沉, 边框在中间跨梁拉力和梁柱上竖向力的作用下不断发生破坏; 1 000 ms 时, 结构整体破坏倒塌。

3.4 冲击不同位置柱时框架的整体响应

对一层 A、B、C、D、E 柱分别进行冲击模拟, 冲击高度、冲击方向和冲击作用区域均一致, 模拟冲击质量为 1 000 kg, 冲击速度为 4 m/s, 总冲击时间为 2 s。图 13 给出了一层各柱在受到冲击作用后整个框架的损伤情况, 其中图 13(a)、图 13(e) 分别为 A、E 柱受到冲击作用 2 s 时的损伤情况, 图 13(b)、图 13(c)、图 13(d) 分别为 B、C、D 柱破坏后柱子下沉高度为一层框架高度时的损伤破坏情况。

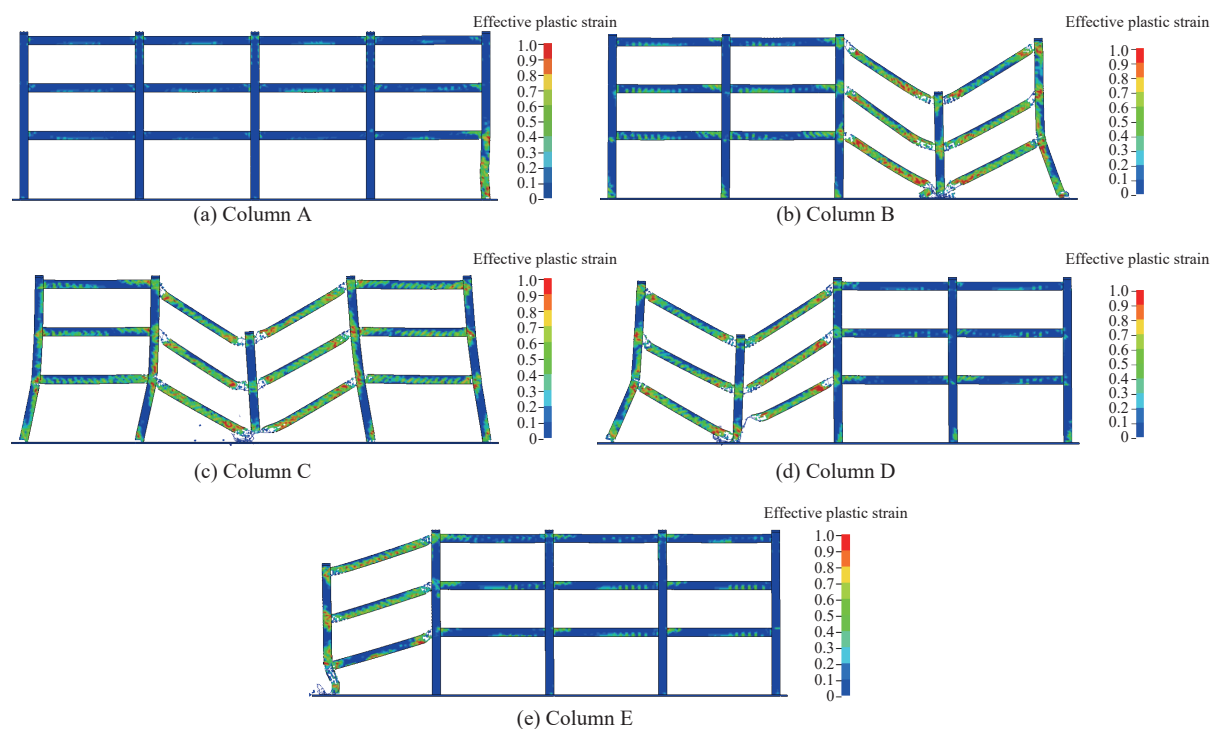


图 13 柱子受到冲击作用后的框架响应

Fig. 13 Frame response of columns under impact

表 4 给出了在受到冲击作用 2 s 时框架结构倒塌的范围。由表 4 数据可知: 中柱受冲击作用后整体框架发生倒塌, B、D 柱受到冲击作用后有两跨框架发生倒塌, E 柱受到冲击作用后仅有边跨发生倒塌, A 柱受到冲击作用后并未发生倒塌。提取 A 柱冲击作用点处的水平位移时程曲线, 如图 14 所示。由图 14 可知, A 柱受到冲击作用后的水平位移为逐渐衰减的正弦曲线, 结构不会发生倒塌。在同样的冲击作用下, 中间柱的破坏会导致结构的倒塌, E 柱受到冲击作用后虽导致边跨倒塌, 但延迟了倒塌的过程, 而 A 柱在受到冲击作用后并未发生倒塌。由图 7(b) 可知, 中间 3 根柱的轴力约为边柱轴力的 2 倍, 验证了文献 [6] 的结论, 即随着轴力的增加, 钢筋混凝土柱(墙)破坏失效所需要的冲击能减小。

在本节的框架结构中边柱与中间柱受力的不同之处在于边柱受偏心轴向压力的作用, 偏心轴压对 A 柱有利, 对 E 柱不利, 因此冲击 A 柱时没有发生倒塌, 而冲击 E 柱时发生倒塌。

表 4 框架倒塌范围汇总

Table 4 Summary of frame collapse scope

Column No.	Collapse scope
A	No collapse
B	AB span and BC span
C	All
D	CD span and DE span
E	DE span

3.5 箍筋对框架抗连续性倒塌的影响

结构的抗连续性倒塌设计方法主要有:概念设计法、关键构件法、拆除构件法和拉结强度法。关键构件法是通过结构中的关键构件进行加强来增强构件的抗冲击性能,从而降低结构发生连续性倒塌的可能性。本节在前面研究的基础上,对构件进行加强,并对加强后的结构重新进行计算分析。

受冲击作用后中柱失效导致整榀框架倒塌。把底层中柱视为关键构件进行箍筋加密,试验框架结构的中柱箍筋间距为150 mm,加密后箍筋间距为75 mm。在有限元建模过程中,可以通过对中间柱水平切分加密,再挑选出加密箍筋所在位置的线并赋予钢筋属性。钢筋混凝土柱箍筋加密后,环箍效应增强,使得冲击作用后混凝土裂缝的发展得到抑制,混凝土损伤减少,冲击后柱的残余承载力更大,从而延缓甚至避免框架倒塌。对底层中柱箍筋加密之后,施加同样的冲击作用进行计算分析,结果见图15和图16。

由图15可以看出,加密箍筋之后,在同样的冲击作用下,框架未发生倒塌。一层中柱在冲击作用下损伤最严重,但仍有承载能力;其余梁柱虽有一定损伤,但结构整体未发生较大破坏。图16为一层中柱加密箍筋后冲击作用点处X方向位移时程曲线。由图16可知,冲击作用点在X方向的位移最终在27.5 mm上下衰减振荡。

由此可见,对框架柱进行箍筋加密后,可以显著地增强框架柱的抗冲击能力,并可有效地延缓和避免结构发生倒塌。因此,在实际的框架结构中,可以通过对关键柱加密箍筋来提高钢筋混凝土柱的抗冲击能力及框架的抗倒塌能力。

4 结 论

以单榀钢筋混凝土框架的试验模型为研究对象,采用数值模拟方法,对冲击荷载作用下该框架的抗倒塌性能进行了研究,得出如下主要结论。

(1)采用ANSYS/LS-DYNA建立钢筋混凝土框架的有限元模型进行抽柱模拟,能够真实反映实际框架结构的倒塌过程,结合对单个钢筋混凝土构件试验结果开展的数值模拟验证,保证了数值模拟分析的有效性。

(2)底层中柱受到冲击作用后的响应与试验不同,在“拱作用”影响下,中柱柱顶会先出现向上的位移,当中柱失去承载力后框架发生整体连续性倒塌,倒塌过程与试验以及抽柱模拟的倒塌过程一致。

(3)冲击中柱结构倒塌过程中存在“拱作用”向“悬索作用”转换的机制,柱顶先向外移动再向内移动。虽然在冲击初始阶段,柱顶均向冲击方向移动,但总体仍向外移动。

(4)对底层各根钢筋混凝土柱施加同样的冲击作用,冲击中柱时会发生整体倒塌破坏,冲击其他柱

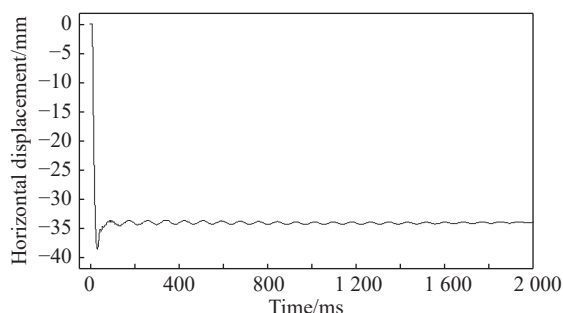


图14 A柱冲击作用点水平位移时程曲线

Fig. 14 Curve of horizontal displacement vs. time at impact point of the column A

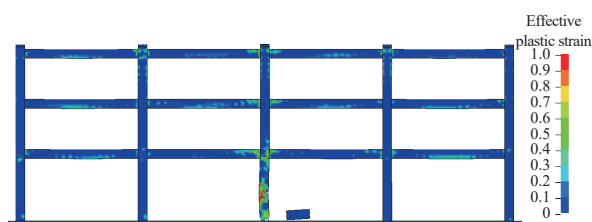


图15 加密箍筋后框架最终变形

Fig. 15 Final deformation of frame with encrypted stirrups

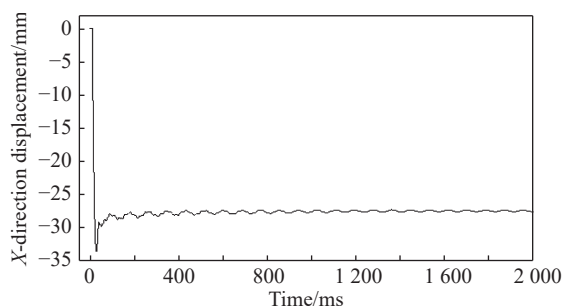


图16 加密箍筋后冲击点处X方向位移时程曲线

Fig. 16 Curve of X-direction displacement vs. time at impact point after encrypted stirrups

时破坏范围较小, 冲击边柱 A 时框架未发生倒塌。其原因有二: 一是边柱轴力比中间柱轴力小, 使柱破坏失去承载力所需的冲击能增大; 二是边柱承受偏心压力的作用, A 柱的偏心压力起有利作用。

(5) 加密柱箍筋能够增强钢筋混凝土柱的抗冲击能力, 延缓甚至避免钢筋混凝土框架结构的连续性倒塌。

参考文献:

- [1] SOROUSHIAN P, CHOI K B. Steel mechanical properties at different strain rates [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1987, 113(4): 663–672.
- [2] 李杰, 任晓丹. 混凝土静力与动力损伤本构模型研究进展述评 [J]. *力学进展*, 2010, 40(3): 284–297.
LI J, REN X D. A review on the constitutive model for static and dynamic damage of concrete [J]. *Advances in Mechanics*, 2010, 40(3): 284–297.
- [3] DO T V, PHAM T M, HAO H. Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision [J]. *Engineering Structures*, 2018, 156(1): 243–259.
- [4] 刘飞, 罗旗帜, 严波, 等. RC 柱破坏模式的数值模拟研究 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(16): 122–127.
LIU F, LUO Q Z, YAN B, et al. Numerical study on the failure of RC column subjected to lateral impact [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(16): 122–127.
- [5] 史先达. 钢筋混凝土剪力墙平面外抗冲击性能试验与数值分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
SHI X D. Experiment and numerical analysis of reinforced concrete shear wall out-of-plane impact [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [6] 宿华祥, 易伟建. 钢筋混凝土墙抗冲击性能数值模拟分析 [J]. *高压物理学报*, 2019, 34(1): 014201.
SU H X, YI W J. Numerical simulation analysis of impact resistance of reinforced concrete wall [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 34(1): 014201.
- [7] 陆新征, 江见鲸. 世界贸易中心飞机撞击后倒塌过程的仿真分析 [J]. *土木工程学报*, 2001, 34(6): 8–10.
LU X Z, JIANG J J. Dynamic finite element simulation for the collapse of world trade center [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(6): 8–10.
- [8] 何庆锋. 钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
HE Q F. Experimental study on collapse resistance of reinforced concrete frame structures [D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [9] JIAN H, ZHENG Y. Simplified models of progressive collapse response and progressive collapse-resisting capacity curve of RC beam-column substructures [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2014, 28(4): 1–7.
- [10] 李凤武. 钢筋混凝土框架柱突然失效试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
LI F W. Experimental study on sudden failure of reinforced concrete frame columns [D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [11] VAUGHAN D, MILNER D, GRAN J. New methods for progressive collapse testing and simulation [J]. *Structures Congress 2011-Proceedings of the 2011 Structures Congress*, 2011, 50(21): 2358–2369.
- [12] 罗维刚, 黑晓丹, 刘纪斌, 等. 考虑楼板影响的 RC 框架结构连续性倒塌动力响应分析 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2018, 35(4): 113–119.
LUO W G, HEI X D, LIU J B, et al. Dynamic response analysis of RC frame structures with continuous collapse considering floor effects [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2018, 35(4): 113–119.
- [13] KANG H, KIM J. Progressive collapse of steel moment frames subjected to vehicle impact [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2014, 29(6): 04014172.
- [14] SASANI M, KAZEMI A, SAGIROGLU S, et al. Progressive collapse resistance of an actual 11-story structure subjected to severe initial damage [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(9): 893–902.
- [15] SASANI M, SAGIROGLU S. Progressive collapse resistance of hotel San Diego [J]. *Journal of Structure Engineering*, 2008, 134(3): 478–488.
- [16] WU Y, CRAWFORD J E, MAGALLANES J M. Performance of LS-DYNA concrete constitutive models [C]//12th International LS-DYNA Users Conference, 2012(1): 1–14.
- [17] 赵德博, 易伟建. 钢筋混凝土梁抗冲击性能和设计方法研究 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(11): 139–145.

ZHAO D B, YI W J. Anti-impact behavior and design method for RC beams [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(11): 139–145.

Continuous Collapse Behavior of Frame Structures under Impact

SU Huaxiang, YI Weijian, HUANG Yimou

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: In order to study the continuous collapse behavior of reinforced concrete frame under impact load, the finite element model of reinforced concrete frame is established by ANSYS/LS-DYNA. The impact mass is 1 000 kg and the impact velocity is 4 m/s. The effectiveness of the numerical simulation is guaranteed by the verification of the of reinforced concrete members impact experiment and the frame collapse process. The analysis draws following conclusions: in the process of structure collapse of the mid column impacted, there is a mechanism of “arch effect” to “suspension effect”, the top of the middle column first goes up and then down, and the top of the side column first goes out and then inward; under the same impact load, the smaller the column axial force, the stronger column impact resistance and the column impact resistance is affected by different eccentric pressure. The impact resistance of reinforced concrete columns can be enhanced by infill column stirrups which can delay or even avoid the reinforced concrete frame structures continuous collapse.

Keywords: reinforced concrete frame; continuous collapse; impact load