

全装配式混凝土结构抗连续倒塌动载试验 数值模拟

*周云^{1,2}, 胡翔², 裴熠麟², 陈太平², 易伟建²

(1.工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南 长沙 410082; 2.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 建筑结构的连续倒塌本质上属于复杂的动力非线性过程。现有的研究主要集中于现浇结构, 对全装配式结构的讨论相对较少。本文依托某全装配式混凝土大型框架子结构抗连续倒塌动载试验, 针对某牛腿-插梢杆-角型钢板节点连接形式的装配式构件(PC), 在大型有限元软件 ABAQUS/Explicit 中建立了相应的精细化有限元模型, 并建立对应的现浇模型(RC)进行对比分析。根据结构未损伤前的位移响应试验数据对两类模型进行了参数校验, 利用校验后的有限元模型对现场试验进行了全过程模拟。计算结果显示, 动力荷载作用下 RC 模型的极限荷载约为 PC 模型的 1.29 倍, 峰值位移和对应的结构自振周期分别为 PC 模型的 0.89 和 1.22 倍, 表明现浇混凝土结构相较全装配式结构具有较高的承载力和竖向刚度。同时在相同荷载作用下, PC 模型更易产生较大损伤。

关键词: 全装配式混凝土结构; 抗连续倒塌; 快速移除; 动载试验; 数值模拟

NUMERICAL RESEARCH OF THE PROGRESSIVE COLLAPSE RESISTANCE UNDER DYNAMIC LOAD TEST FOR THE FULLY ASSEMBLED CONCRETE FRAMES STRUCTURES

*ZHOU Yun^{1,2}, HU Xiang², PEI Yi-lin², CHEN Tai-ping², YI Wei-jian²

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Damage Detection, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: The structural progressive collapse behavior is a complex dynamic nonlinear process which has verified by many reinforced concrete (RC) structures, while few researches were conducted for the fully assembled precast concrete (PC) structures. Based on a certain dynamic load test on progressive collapse of fully assembled concrete frame structures, the finite element (FE) models of the RC specimen and PC specimen with screw rod-steel plate connected joint were built in ABAQUS/Explicit respectively, which were calibrated by the tested displacement response results. The global loading process of the tests were simulated by the calibrated FE model, and the parameters analysis were conducted correspondingly. The calculation results showed that the ultimate loading capacity of RC model under dynamic action was 1.29 times as the PC model, and the peak displacement and natural period was 0.89 and 1.22 times respectively. It was revealed that the higher loading capacity and vertical stiffness was presented in the RC structures, while the PC structures were more easily for damage accumulation.

Keywords: Fully assembled concrete structure; Progressive collapse resistance; Fast removal; Dynamic load test; Numerical simulation

引言

建筑结构的局部破坏往往是由煤气爆炸、炸弹冲击、车辆撞击等偶然动力荷载引起的^[1]。自从英国伦敦 Ronan Point 公寓煤气爆炸事故发生以来, 混凝土框架结构抗连续倒塌研究已经发展了几十年, 但主要集中在现浇结构和小比例尺的静力荷载试验上。考虑到动力试验的高额成本以及全装配式结构并未完全普及, 关于大比例尺全装配式混凝土框架结构的动力抗连续倒塌试验方面的研究相对较少^[2]。

湖南大学土木工程结构健康监测研究团队(www.hnutest.com)设计了一栋纵横向均为四跨的七层预制装

基金项目: 国家重点研发计划专项项目(2016YFC0701400,2016YFC0701308);湖南省科技计划项目(2017SK2220);长沙市科技计划项目(kq1706019)

通讯作者: 周云(1979—), 男, 湖南人, 副教授, 博士, 主要从事结构健康监测及动力识别的研究(E-mail: zhouyun05@hnu.edu.cn)

配式混凝土框架结构，并从中选取出包含梁柱节点在内的框架子结构，按照 1/2 缩尺比例设计了相应的全装配式构件，其中梁柱节点处采用牛腿-插梢杆-角型钢板的连接方式。同时设计了一组几何尺寸、配筋情况相同的现浇构件作为对照组。针对上述两类构件，分别进行了中柱失效情况下的快速移除抗连续倒塌试验。本文通过采用大型有限元计算软件 ABAQUS/Explicit 模块，对该动载试验进行了全过程模拟。

1 有限元建模方法

根据现场试验信息，在 ABAQUS 中分别建立了现浇结构和装配式结构的精细化有限元模型，如图 1、2 所示。其中混凝土采用八节点的减缩积分实体单元 C3D8R，网格尺寸为 50mm。钢筋采用两节点的桁架单元 T3D2，网格尺寸为 50mm。采用嵌入约束来模拟钢筋和混凝土之间的锚固关系，并且不考虑二者之间的相对滑移。试件边柱柱头的约束支座和梁身施加的重物采用 C3D8R 单元，且均被设置为刚体单元以提高计算效率。同时将水平方向的边柱约束支座设置为接地弹簧，并根据试验结果设置刚度为 10kN/mm。试验过程中地梁处未发生移动，因此模型边界采用完全固支约束。支座及梁身加载重物与混凝土的相互作用采用 ABAQUS/Explicit 中的通用接触，其中法线方向采用硬接触保证双方不能发生嵌入和穿透现象，切线方向采用罚函数来模拟混凝土与部件之间的摩擦，且摩擦系数取 0.4^[3]。为简化结构模型，梁身的重物采用等效质量的钢部件进行模拟，其密度值等于梁身重物与钢部件体积的比值。

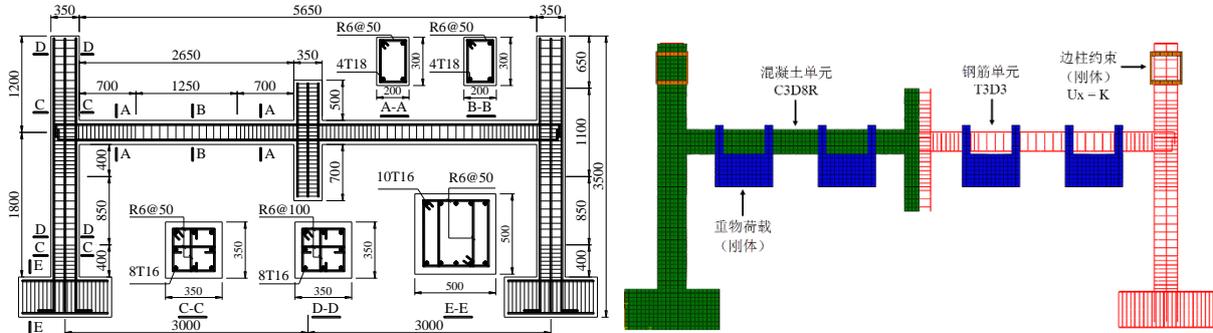
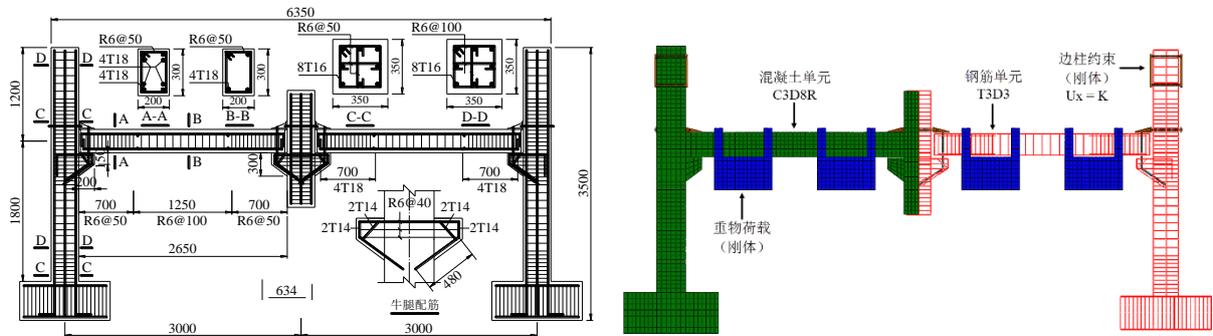
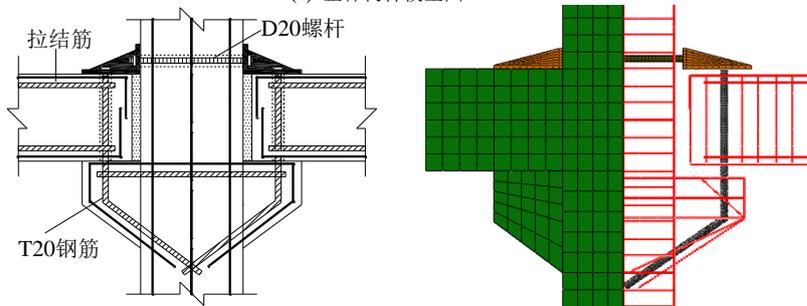


图 1 RC 试件有限元模型图



(a) 整体构件模型图



(b) 节点模型详图

图 2 PC 试件有限元模型图

1.1 混凝土模型

模型中混凝土构件采用 ABAQUS 中的 CDP (concrete damaged plasticity) 材料模型，如图 3 所示。该模

型可以模拟混凝土在低静水压力时，受到冲击荷载作用时的力学行为。材料的屈服面和塑性流动法则等相关参数可按表 1 进行选取^[4]。按照《混凝土设计规范》(GB50010-2010)^[5]建议，混凝土本构选取单轴受拉受压模型，并以试验测试的混凝土抗压强度作为模型强度代表值；同时泊松比取 0.2，密度取 2500kg/m³。

表 1 CDP 模型参数

φ (°)	ε	σ_{b0}/σ_{c0}	K_c	μ
38	0.1	1.16	0.6667	0.0005

注： φ 为膨胀角， ε 为流动势偏移量， σ_{b0}/σ_{c0} 为双轴极限抗压强度与单轴受压极限强度之比， K_c 为拉伸子午面上与压缩子午面上的第二应力不变量之比， μ 为粘性系数。

1.2 钢筋模型

钢筋采用等向弹塑性模型，其单轴应力-应变曲线采用三折线强化模型^[6]，并考虑钢筋屈服之后的强化段和下降段，如图 4 所示。其中弹性模量取为 2×10^5 N/mm²，泊松比取 0.3，密度取 7800kg/m²。钢筋屈服应力和极限强度均按照实际测试结果进行选取。

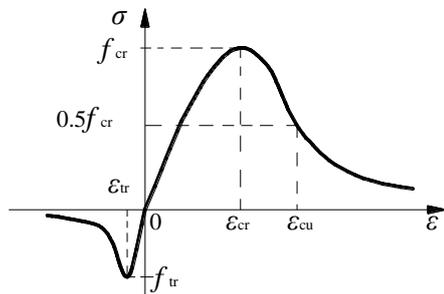


图 3 混凝土应力应变曲线

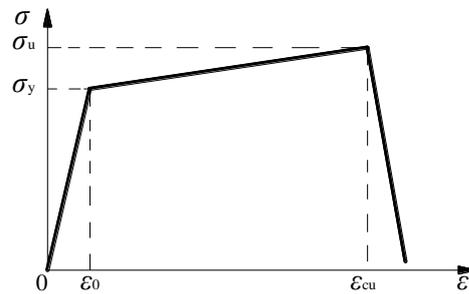


图 4 钢筋应力应变曲线

1.3 其他材料本构模型

对于用于连接的高强螺杆和锚固板等构件，为简化计算均采用二折线线性强化模型。其中弹性模量取为 2×10^5 N/mm²，泊松比取为 0.3，密度为 7800kg/m³。

2 加载过程模拟

现场试验加载过程分成两步。第一步通过在梁身缓慢施加重物，模拟工程结构未发生破坏前的受力状态；第二步为重物荷载加载完毕后，通过脱钩装置迅速释放掉中柱轴力，模拟结构在受到极端荷载的突发破坏。根据现场试验结果，脱钩装置不能瞬时中将中柱内的轴力完全释放（实际释放时间约在 0.02s 左右）。由于 ABAQUS 软件中设置的约束只能瞬时移除，无法模拟试验中在有限时长内释放内力这一过程。为使模拟结果更加符合实际情况，通过将力荷载按照一定的时间-幅值曲线进行释放，来模拟实际试验中内力释放过程。具体实施过程如下^[7]：

(1) 在中柱下表面添加一个竖向约束，缓慢施加重力场。取光滑的加载幅值曲线，并尽可能地延长加载时间以减小荷载冲击造成的影响。其中加载幅值曲线如图 5 所示，其特点是在加载开始和结束时曲线斜率均为 0。同时获取约束处的结构竖向反力。

(2) 移除第 (1) 步中角柱底面的竖向约束，将得到的中柱约束反力反向施加到中柱底面，同时施加第 (1) 步中的重力场，以此来等效上一步骤中的静力加载过程。若该过程中出现较大的动能变化，则说明第 (1) 步中提取约束反力的时间间隔过大，需减小时间间隔并重新提取约束反力值，直至模型整体的动能变化处于可接受范围之内。

(3) 待重力场施加完毕并保持不变后，将施加在中柱底面的约束反力在试验记录的释放时长范围内迅速减小到零，以此模拟试验过程中的快速释放过程。

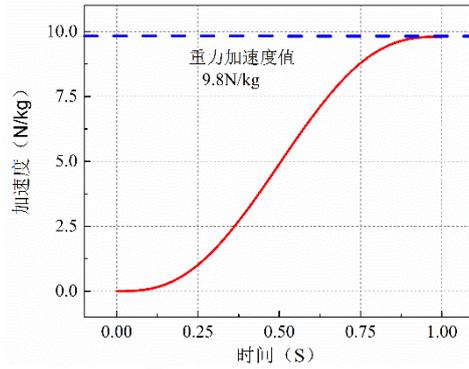


图5 加载幅值曲线

3 模拟与试验结果对比

现场试验中对同一个试件进行了多级加载。由于每级加载均会对试件产生不可逆转的损伤效果，且该损伤累计效应难以在有限元中模拟实现。为简化该问题，本文采用如下思路：利用未产生损伤前的加载试验数据来校验有限元模型，利用校验好的模型模拟结构已产生损伤后的加载，通过定义相同荷载情况下，柱峰值位移试验值与模拟值之比，来综合反映结构的损伤累计状况。

3.1 模型校验

3.1.1 RC 模型

由于 RC 试件在第一级加载过程中产生的竖向位移较小，梁身荷载未能激发有效的振动数据；同时该级加载仅产生 3 条微小裂缝，所测钢筋应变均处于弹性阶段，可以认为该级荷载产生的结构损伤可忽略不计，因此采用第二级加载的试验数据对有限元模型进行参数校验。校验后的 RC 试件中柱位移曲线如图 6 所示。

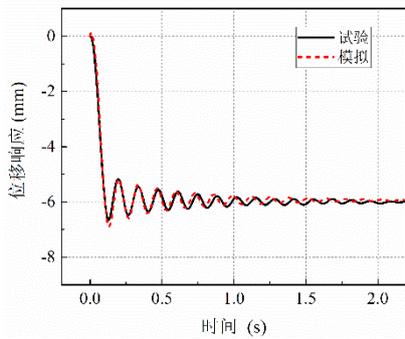


图6 RC 模型中柱位移曲线对比

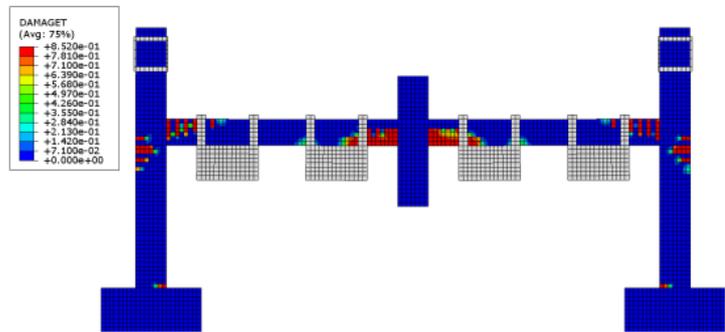


图7 RC 模型受拉损伤图

从图中可以看出模拟曲线与试验曲线吻合良好，变化趋势相同，其中位移峰值误差为 3.8%，平均周期误差为 4.5%。第二级加载结束模型受拉损伤情况如图 7 所示。可以看出，边节点端梁上部和中节点端梁下部均受到不同程度的受拉破坏，且模型计算结果与试验结果吻合良好。

3.1.2 PC 模型

采用第一级加载的试验数据对 PC 试件有限元模型进行校验，计算所得的中柱位移响应曲线如图 8 所示。从图中可知模型曲线与试验结果吻合较好，且变化趋势相同。其中位移峰值误差为 2.0%，平均周期误差为 7.1%。第二级加载结束模型受拉损伤情况如图 9 所示。

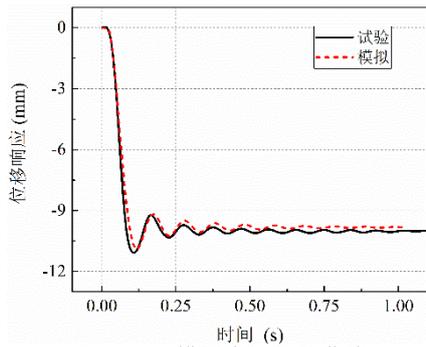


图 8 PC 模型中柱位移曲线对比

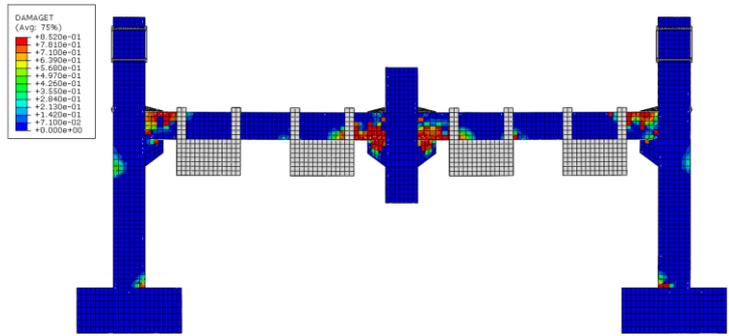


图 9 RC 模型受拉损伤图

ABAQUS 塑性损伤模型受拉损伤反映的是材料在受拉过程中刚度的折损，虽然不能直接代表结构裂缝的产生和发展，但是能够在一定程度上反映结构破坏的位置和程度。从图 9 中可以看出，模拟结果显示节点处插销附近的混凝土受到较大的受拉损伤，与现场试验情况吻合良好。

3.2 参数分析

3.2.1 RC 模型

利用校验好的有限元模型对现场试件的加载过程进行了模拟。由于该计算模拟过程中的每级加载对象均为未损伤的试件模型，因此每一级加载所得的位移响应曲线计算值均小于对应试验值。通过定义曲线峰值位移实测与模拟结果的比值作为结构损伤评估参数。不同加载工况下 RC 试件的位移响应曲线如图 10 所示，位移曲线特征值如表 2 所示。

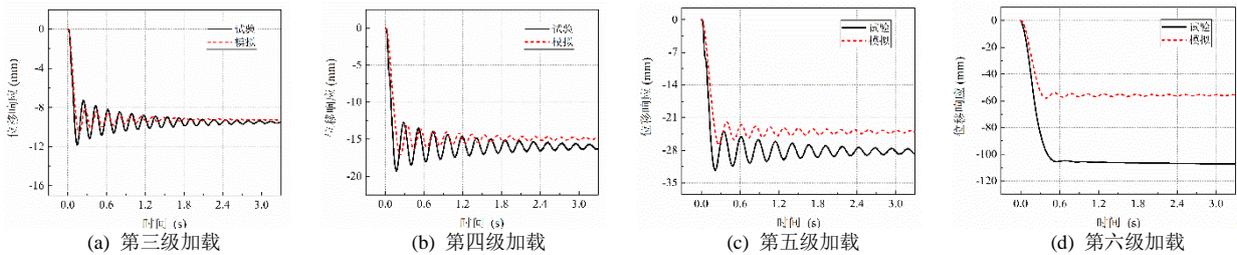


图 10 不同级别加载试验与模拟位移响应曲线对比

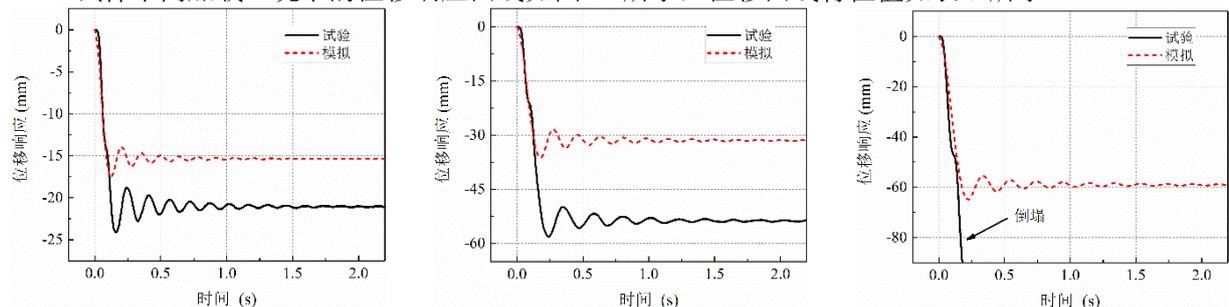
表 2 不同加载工况试验与模型位移响应曲线特征值

荷载等级	峰值位移		试验/模拟	自振周期		试验/模拟
	试验值(mm)	模拟值(mm)		试验值(s)	模拟值(s)	
第二级	-6.6	-6.9	1.04	0.144	0.138	1.04
第三级	-11.8	-10.7	1.10	0.192	0.181	1.06
第四级	-19.3	-17.2	1.12	0.230	0.210	1.10
第五级	-32.3	-26.8	1.21	0.267	0.240	1.11
第六级	-105.5	-58.0	1.82	0.303	0.263	1.15

随着加载级数的增大，试验与模拟的位移响应曲线差异逐渐增大，峰值位移试验结果与模拟结果的比值由初始的 1.04 增大到了 1.82，自振周期的比值由初始的 1.04 增大到了 1.15，说明试验过程中的多级连续加载对现浇结构的竖向刚度产生了一定损伤影响。

3.2.2 PC 模型

PC 试件不同加载工况下的位移响应曲线如图 11 所示，位移曲线特征值如表 3 所示。



(a) 第二级加载

(b) 第三级加载

(c) 第四级加载

图 11 不同级别加载试验与模拟位移响应曲线对比

表 3 不同加载工况试验与模型位移响应曲线特征值

荷载等级	峰值位移		试验/模拟	试验值(s)	自振周期	
	试验值(mm)	模拟值(mm)			模拟值(s)	试验/模拟
第一级	-11.1	10.9	1.02	0.119	0.110	1.07
第二级	-24.1	-17.5	1.38	0.167	0.148	1.13
第三级	-58.1	-36.3	1.60	0.239	0.185	1.29
第四级	--	-64.9	--	--	0.215	--

从中可知, 试验与模拟的位移响应曲线差异随加载等级逐渐增大。在 PC 试件倒塌前, 试验峰值位移与模拟结果的比值由初始的 1.02 增大到了 1.60, 自振周期比值由初始的 1.07 增大到了 1.29, 说明试验过程中的多级连续加载对装配式结构的竖向刚度产生了较大损伤。

结论:

本文利用大型有限元软件 ABAQUS/Explicit, 对某全装配式混凝土大型框架子结构抗连续倒塌动载试验过程进行了有限元模拟。依据现场试验信息, 分别建立了现浇构件和装配式构件的精细化模型, 并根据结构未损伤前的位移响应试验数据对有限元模型进行了参数校验。利用校验后的模型对该动载试验进行了全过程模拟, 并对分析计算结果与试验结果。主要结论如下:

(1) RC 试件在第六级轴力释放过程中发生了倒塌, 而 PC 构件在第四级加载过程中发生了倒塌。表明现浇混凝土结构相较于全装配式结构具有较高的承载力。

(2) RC 试件模拟计算所得的竖向峰值位移为 58mm, 倒塌加载阶段的结构自振周期为 0.263s; PC 构件计算所得的竖向峰值位移为 64.9mm, 对应的结构自振周期为 0.215s。计算结果均表明相较于现浇结构, 全装配式结构的竖向刚度相对不足。

(3) 随着加载次数的增加, RC 构件峰值位移试验与模拟结果的比值由 1.04 增加至 1.82, 自振周期的比值由 1.04 增加至 1.15; 而 PC 构件中峰值位移由 1.02 增大至 1.60, 自振周期由 1.07 增加至 1.29。计算结果表明, 在相同荷载作用下全装配式结构更易产生较大损伤。

参考文献:

- [1] 陆新征, 李易, 叶列平. 混凝土结构防连续倒塌理论与设计方法研究. 中国建筑工业出版社, 2011, 3-50
- [2] Pham A T, Tan K H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading. *Engineering Structures*, 2017, 139:31-45
- [3] Othman H, Marzouk H. Finite-element analysis of reinforced concrete plates subjected to repeated impact loads. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(9): 1-12
- [4] 曾翔. 冲击和快速加载作用下钢筋混凝土梁柱构件性能试验与数值模拟研究:[湖南大学博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2014, 3-35
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010, 34-87
- [6] 张皓. 材料应变率效应对钢筋混凝土框-剪结构地震反应的影响:[大连理工大学博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2012, 2-20
- [7] Mashhadi J, Saffari H. Effects of Postelastic Stiffness Ratio on Dynamic Increase Factor in Progressive Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017, 31(6):1-7