

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.001

楼板对 RC 框架结构抗连续倒塌性能的影响

周长泉

(长安大学 建筑工程学院, 西安 710061)

摘要:楼板作为框架结构的重要组成构件,在结构抗连续倒塌中有重要作用。采用有限元 ABAQUS 非线性拟静力分析法,模拟两层 2×1 跨框架结构长边中柱失效以后结构连续倒塌的反应,对比分析考虑与不考虑楼板作用时,RC 框架结构连续倒塌的情形,研究楼板对 RC 框架结构连续倒塌的影响。结果表明:楼板可以显著改善结构的刚度,提高结构的整体性,并延缓梁的铰链出现,提高结构的抗连续倒塌性能。

关键词:连续倒塌;框架结构;拆除构件法;楼板;ABAQUS 有限元

中图分类号:TU973.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S1-0001-05

Effect of floor slab on the progressive collapse resistance of RC frame structures

Zhou Changquan

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, P. R. China)

Abstract: Floor slab, as main components of structure, has a great influence for progressive collapse. Therefore, in the research of progressive collapse, it is necessary to consider the role of the floor. we use the finite element program of ABAQUS, and simulate the failure of center pillar along long side about the frame structure with two layers. Contrast progressive collapse cases of RC frame structure for considering and not considering floor effect, summed up the floor impact on continuous collapse of RC frame structure. The results show that the floor can greatly improve the resistance and stiffness of the structure, increase structural integrity, and postpone the beam hinge appearing to improve the performance of the structure resisting progressive collapse.

Key words: continuous collapse; frame structure; remove component method; floor; ABAQUS finite element

结构连续倒塌是指建筑结构在偶然荷载的作用下,结构的某个构件发生失效,进而使破坏构件相邻的构件发生连续破坏,最终造成比初始破坏范围更大的倒塌破坏^[1-2]。从 1968 年的英国公寓“Ronan Point”^[3]发生煤气爆炸引起连续倒塌破坏以来,结构的连续倒塌的问题就受到广泛的关注。对于结构设计来说,都是基于正常荷载作用下的安全设计,而

不考虑偶然荷载的作用。结构的连续倒塌是建筑结构在偶然荷载作用下发生倒塌的一种主要形式^[4]。而保证结构安全是结构设计最重要的任务。因此,防止结构发生连续倒塌是结构能否安全使用的重要保障。已经发生的很多重大倒塌事件,不但给社会造成了重大的经济损失,也带来很大的人员伤亡,同时造成了极其恶劣的社会影响。学者们已经对连续

收稿日期:2015-11-10

基金项目:国家自然科学基金(51308065)

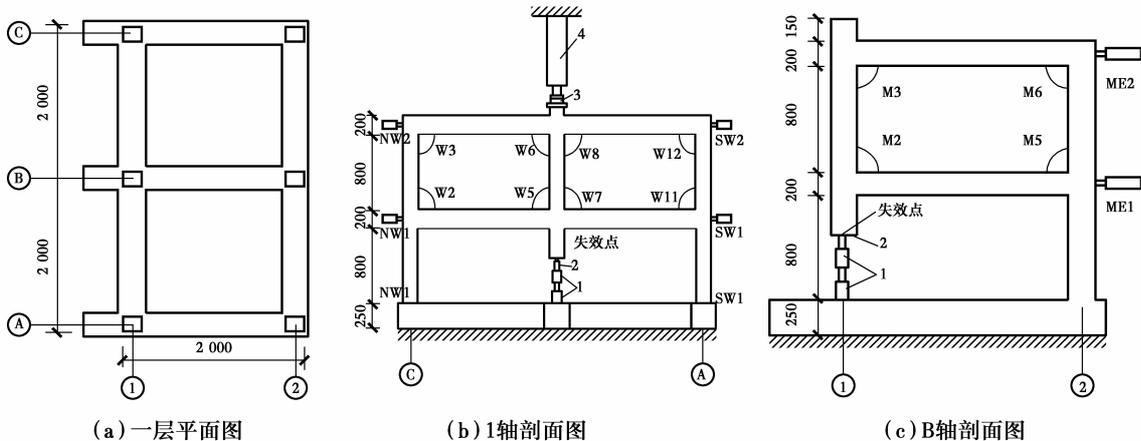
作者简介:周长泉(1989-),男,硕士生,主要从事钢筋混凝土结构抗震与加固研究,(E-mail)15249264712 @163.com。

倒塌研究了 40 多年,随着许多重大连续倒塌事件的发生,研究发展也逐渐成熟,并开展了大量关于连续倒塌破坏机理以及抗连续倒塌设计方法研究。随着中国经济快速发展,建设项目也大幅增加,对一些安全等级较高的重要建筑,除应进行常规设计外,还应该进行结构抗连续倒塌设计。而中国在抗连续倒塌方面的研究较晚,现行结构设计规范与标准^[5]仅给出了抗连续倒塌的设计原则。但并没有给出设计方法、流程及其参数(破坏准则、荷载组合等)。在以往抗连续倒塌研究中,为了简化问题仅考虑梁柱对倒塌的贡献^[6],往往忽略了楼板的影响与作用,计算结果和设计往往偏于保守。楼板是 RC 框架结构主要的承载构件及传力构件,对结构的抗倒塌性能有非常重要的作用。笔者在已有试验的基础上采用 ABAQUS 有限元程序建立有限元模型。研究不同的工况下,即考虑楼板和不考虑楼板的框架结构,拆除底层长边中柱后的结构抗连续倒塌性能对

比,进一步明确楼板在空间框架结构连续倒塌中的作用。

1 试验概况

准确模拟钢筋混凝土框架结构的倒塌过程,不仅有助于分析结构的倒塌机制,还为确定结构倒塌时的抗力研究做好铺垫。模型选自王少杰^[7]的 RC 空间框架倒塌试验模型。原型结构为 12 层的钢筋混凝土框架结构,采用 1:4 缩尺比例,选取一个两层两跨钢筋混凝土空间框架模型,地梁截面尺寸为 250 mm×300 mm,柱子截面尺寸为 200 mm×200 mm,梁截面尺寸为 100 mm×200 mm;模型一层不带板,二层带板,板厚 40 mm,梁柱混凝土强度等级为 C20,纵向钢筋选用 HRB400,箍筋选用 HPB235,板的配筋选用 HPB235。主要研究底层中柱失效后的倒塌过程,模型的几何尺寸及配筋信息如图 1 和 2 所示。



注1: 1.千斤顶; 2.百分表; 3.球形支座; 4.加载千斤顶。

图 1 模型几何尺寸

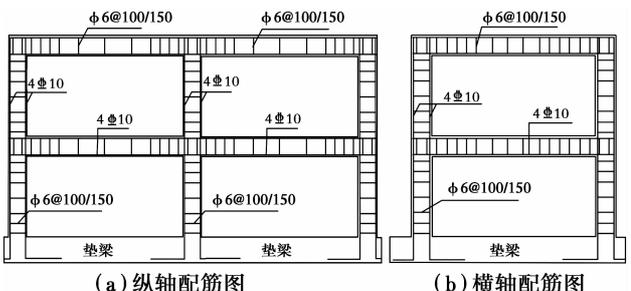


图 2 试验框架配筋信息

2 模型验证

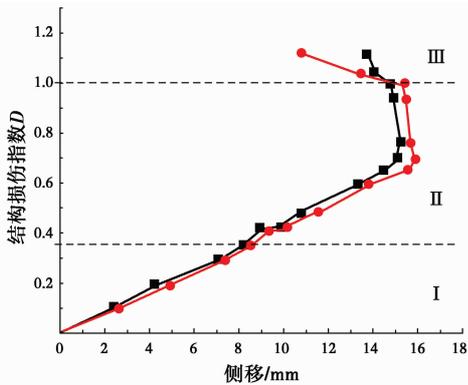
2.1 模型建立

ABAQUS 的单元库中有非常多单元类型,并且

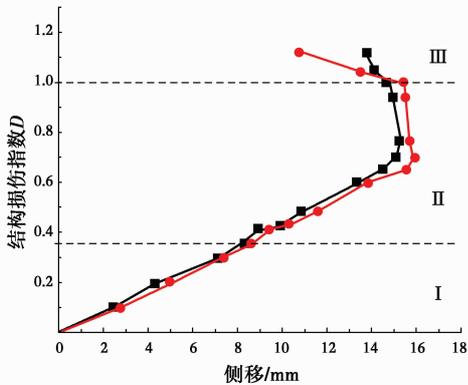
材料模型库也非常强大,选 ABAQUS 作为模拟研究的工具^[8-9]。在模型中不考虑钢筋与混凝土之间的粘结滑移,采用分离式模型分析结构的连续倒塌问题。混凝土单元选择三维实体 C3D8R 单元,钢筋单元选择空间二节点桁架单元 T3D2,钢筋单元通过嵌入(Embedded)到混凝土实体单元,来模拟钢筋和混凝土的相互作用。混凝土材料选取以 Lubliner 等^[10]、Lee 等^[11]的模型为背景建立的混凝土塑性损伤模型,本构关系采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的附录中的应力-应变本构关系。将梁、柱、板通过装配(Assembly)形成模型整体,其中,梁、柱、板的接触部分使用粘结(Tie)作用进行组装。

2.2 试验验证

试验模型和数值模型的最终破坏形态相似,均在失效中柱的周围梁端出现塑性铰,梁内钢筋屈服,外层混凝土被压碎。这些梁的远端也出现塑性铰,柱底也出现塑性铰。数值模型与试验模型的框架侧移如图 3 所示。通过对比分析发现,数值模拟结果与试验得出结果的变化规律基本相同,与测试结果吻合度较高。结论表明:有限元软件 ABAQUS 和此建模方法能够准确模拟框架结构倒塌过程。



(a) ME1 侧移对比图



(b) ME2 侧移对比图

注: ■— 试验结果 ●— 模拟结果。

图 3 数值模拟与试验结果对比图

3 建立空间框架模型

3.1 带楼板与不带楼板 RC 框架结构抗连续倒塌性能的数值模拟及分析

模拟的第一个模型是以王少杰的 RC 框架结构为基础的两层纯框架结构模型,梁的截面尺寸 100 mm×200 mm,柱子的截面尺寸 200 mm×200 mm。第二个模型也是以王少杰的 RC 框架结构为基础的两层均有楼板的框架结构模型,板厚度为 40 mm,在空间框架结构模型中按实际情况建立楼板。梁、柱的截面尺寸与第一个模型的相同。位移的测点位置

也与王少杰的模型相同。分别在不带楼板的框架和有楼板的框架中考虑拆除底层的长边中柱,来模拟空间框架结构发生连续倒塌的静力效应,分析空间框架结构抗连续倒塌的性能。按照美国 UFC4—023—03 标准^[12]与 GSA 标准^[13]的规定,框架结构可以承受的倒塌范围为:对外柱的破坏程度限定为位于失效柱上相邻的开间内以及楼板的破坏面积不大于 75 m² 与楼层破坏面积不大于 15% 中的较小值。对于该模型来说,在关键柱失效之后,相邻开间内的构件相继失效,结构倒塌的范围超出了以上美国标准的规定,这时可以断定框架结构已经发生了连续倒塌破坏,如图 4 所示。

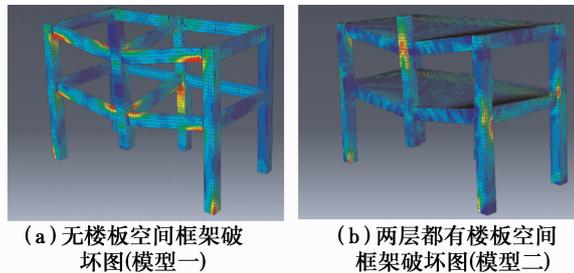


图 4 数值模拟结果对比图

3.2 参数分析

3.2.1 楼板对 RC 框架结构的破坏过程的影响分析 由图 5 可以看出:无论考虑楼板与不考虑楼板的影响时,底层长边中柱失效后失效柱的荷载位移关系都分为 4 个阶段^[14-15](图中只标出底层有板的情况),即弹性工作阶段(OA 段)、弹塑性工作阶段(AB 段)、塑性铰发展阶段(BC 段)、复合机制作用阶段(CD 段即结构的受力机制由梁机制转变为梁机制与悬链线机制共同作用;有板时,还应有板的薄膜机制)。

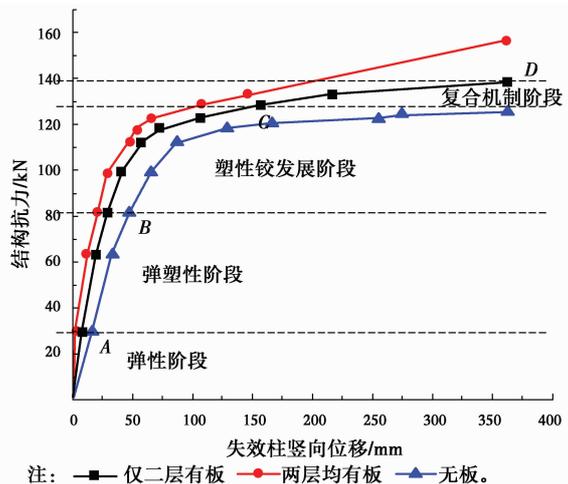


图 5 底层长边中柱失效时失效柱的荷载位移曲线

分析发现,长边中柱失效后,考虑楼板影响的结
构失效柱的最大竖向荷载大约是不考虑楼板影响的
1.24 倍,表明 RC 框架结构在考虑楼板影响之后,结
构承载能力得到了 20% 的提高,继而提高了结构的
抗连续倒塌能力。

3.2.2 楼板对结构的水平位移的影响 楼板对框
架结构水平位移的影响如图 6 所示。图 6 是在 RC
框架结构底层长边中柱失效的情况下,考虑楼板的
影响与不考虑楼板的影响结构柱的结构损伤指数 D
与水平位移的关系曲线对比图。

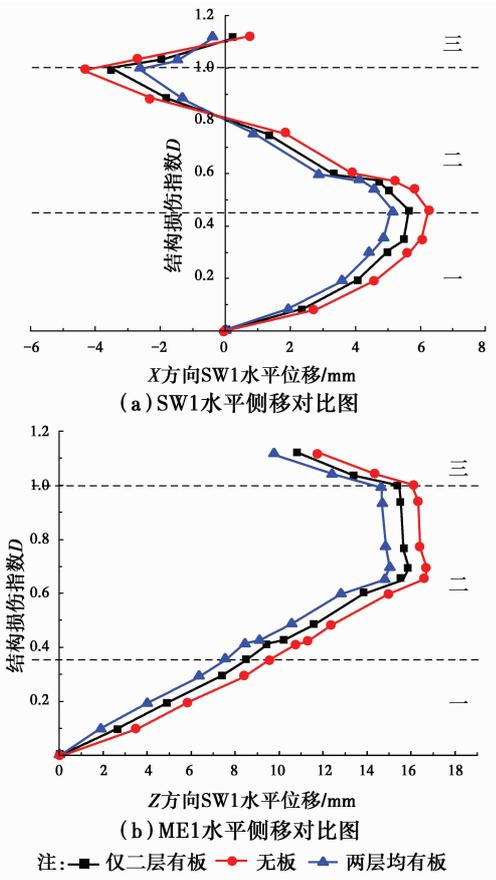


图 6 水平位移曲线对比图

随着失效柱竖向位移的继续增加,与其相邻的
框架柱逐渐向内侧移动,最终达到破坏 SW1 的无楼
板内收最大位移为 -4.3 mm ,与无楼板时相比减小
了 37.2%。表明楼板在框架结构连续倒塌中会影
响结构的水平位移,且会减小结构的沿结构纵向水
平位移的幅度为 20% 左右。通过以上数据发现,横
向框架柱 ME1 测点只有外推过程而没有内收过程,
这是由于一层的横向框架梁在结构的整个受力过程
中与悬挑梁类似,只存在塑性铰机制,而无悬链线机
制作用。

3.2.3 楼板对梁柱转角的影响 图 7 为梁柱转角

随着失效柱竖向位移的发展情况。

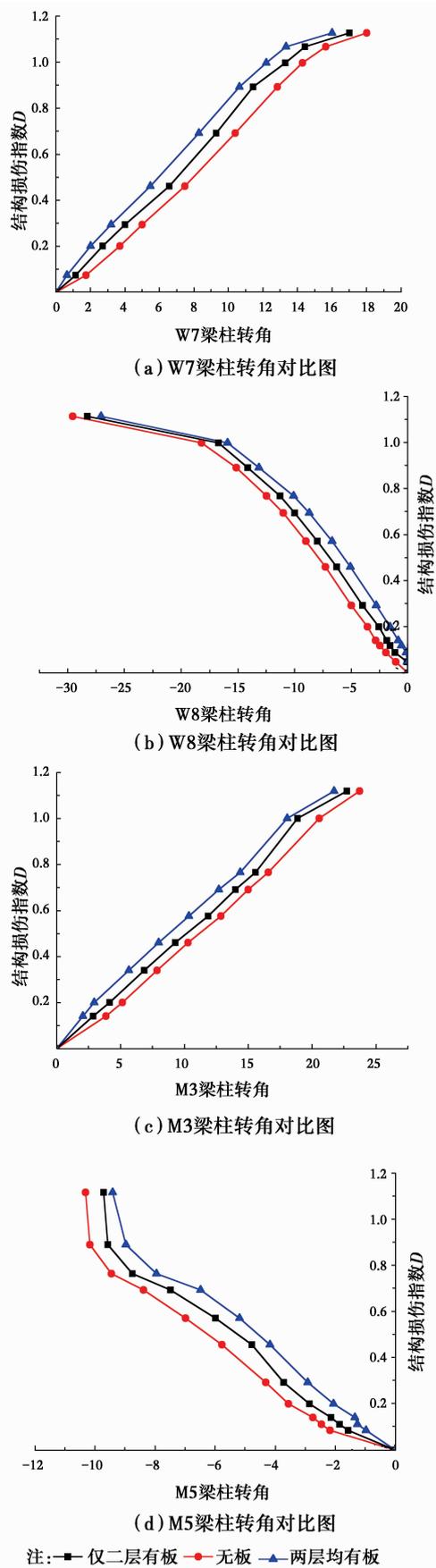


图 7 塑性铰对比图

图7表明:不考虑楼板作用时,斜率(包括负斜率)比较小,梁柱转角的发展比较迅速;只考虑二层楼板作用时,斜率居中,梁柱转角发展比不考虑楼板作用时缓慢;考虑两层都有板时,斜率最大,塑性铰发展最缓慢。趋势为先是与失效柱相邻的纵向框架梁靠近失效柱一端的底部钢筋达到屈服,其次是与失效柱相邻的横向框架梁靠近失效柱一端的底部钢筋达到屈服,然后是与失效柱相邻的纵向框架梁远离失效柱一端的顶部钢筋达到屈服。最后是与失效柱相邻的横向框架梁远离失效柱一端的顶部钢筋达到屈服。1、2层梁钢筋基本上是同一时间达到屈服。

由模拟结果可以看出,现浇楼板的存在可以推迟梁铰的出现,具体与现浇楼板对梁的约束大小有关。这说明现浇楼板可以增强结构的整体性,对结构的抗连续倒塌是有利的。

4 结 论

1)通过对结构的破坏过程的对比分析,得出有楼板参与的框架结构在弹性、弹塑性阶段增加结构的抗力比较小,进入塑性铰发展阶段之后楼板的作用开始加强,随着竖向位移的增大,结构进入复合机制阶段时,楼板的薄膜机制充分地体现出来(两层均有板结构的抗力比纯框架结构的抗力最大值至少增加了20%)。

2)当考虑楼板作用时,失效柱在同样加载情况下达到同样竖向位移的抗力明显增大,与失效柱相邻的纵向框架柱外推与内收的水平位移都减小很多。因此,楼板可以大大提高结构的抗力与刚度,增加结构的整体性,提高了结构的抗连续倒塌的能力。

3)考虑楼板作用时,梁柱的转角明显要比同一时间测点不考虑楼板作用的转角小。这说明,现浇楼板的存在可以推迟梁铰的出现,改善结构的抗连续倒塌性能。

参考文献:

[1] 熊进刚,赵强,何以农. 钢筋混凝土空间框架结构连续倒塌性能的试验研究[J]. 南昌大学学报,2012,34(3): 229-238.

[2] Sasani M, Bazan M, Sagioglu S. Experimental and analytical progressive collapse evaluation of an actual

RC structural [J]. Structural Journal, 2007, 104(6): 731-739.

- [3] Pearsonl C, Delatte N. Ronan point apartment tower collapse and its effect on building codes [J]. Journal of Performance Constructed Facilities, 2005, 19(2): 172-177.
- [4] Astaneh-Asl A. Progressive collapse prevention in new and existing buildings [C] // Proceeding of the 9th Arab Structural Engineering Conference, Abu Dhabi, UAE, Nov, 2003.
- [5] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [6] 梁益,陆新征,缪志伟,等. 结构的连续倒塌:规范介绍和比较[C]//第六届全国工程结构安全防护学术会议论文集,洛阳,2007:195-200.
- [7] 王少杰. RC空间框架结构竖向倒塌机制试验研究与分析[D]. 山东泰安:山东农业大学,2012.
- [8] 张劲,王庆扬,胡守营,等. ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构,2008(8):127-130.
- [9] Bao Y H, Kunnath S K. Macromodel-based simulation of progressive collapse: RC frame structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(7): 1079-1091.
- [10] Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids & Structures, 1989, 25(89):299-326.
- [11] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8):892-900.
- [12] DoD UFC4-023-03 Design of structures to resist progressive collapse [S]. Washington DC: Department of Defence, 2002.
- [13] GSA2005, Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization project [S]. Washington DC: the General Services Administration, 2005.
- [14] 易伟建,何庆峰,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.
- [15] 易伟建,张凡榛. 钢筋混凝土板柱结构抗倒塌性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(6):35-41.

(编辑 胡英奎)