

# 考虑初始静力荷载效应的框架结构部分底层柱失效时的瞬时动力分析

张云鹏 剧锦三 蒋秀根

(中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

**摘要** 为研究高层建筑结构整体性问题中连续倒塌问题,采用有限元方法模拟高层结构底层边柱突然失效时的瞬时动力响应。从计算结果可以看出,动力分析的水平位移比静力作用的最大水平位移大很多并以静力位移为中心上下波动,并在阻尼作用下收敛到静力位移。初始静力荷载效应使瞬时动力响应的振幅比无初始静力荷载效应的结构的水平和竖向位移振幅小。初始静力效应对结构瞬态响应的影响与刚度、质量、阻尼等因素有关,刚度越小,质量、阻尼越大时,初始静力荷载效应对结构最大位移影响越小。在对底层边柱突然失效的高层结构进行分析时,必须计算结构的瞬时动力响应。建议以较为简单的无初始静力荷载效应时的瞬时动力响应作为结构设计依据,其结果趋于安全。

**关键词** 框架结构;瞬时动力分析;初始静力荷载效应;失效;连续倒塌

**中图分类号** TU 312.3

**文章编号** 1007-4333(2007)04-0090-05

**文献标识码** A

## Instantaneous dynamic analysis of frame structure at the moment of ground column failure with consideration of static load effect

Zhang Yunpeng, Ju Jinsan, Jiang Xiugen

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** The finite element method is used to simulate the instantaneous response of a high-rise building with a sudden invalidation of side columns of the ground floor. Conclusions can be drawn from the calculation results that the instantaneous horizontal displacement of the structure fluctuates around the static result and converge to the static displacement because of the influence of damp. The biggest displacement of the instantaneous response is much bigger than that of the static one. The effect of initial static load on the instantaneous response makes the amplitude of vibration of horizontal and vertical displacement bigger than that without the effect. The effect of initial static load on the instantaneous response is related to the stiffness, mass and damp. The smaller the stiffness and the bigger the mass and the damp is, the smaller the effect of static load on the maximum displacement is.

**Key words** frame structure; instantaneous dynamic analysis; initial static load effect; invalidation; progressive collapse

美国“9·11”事件中纽约世贸大楼倒塌导致数千人死亡的严重灾难,使高层建筑结构整体性问题成为工程界共同关注的焦点。结构局部构件由于偶然事件失效而引起结构的大部分甚至整体连续倒塌的问题(progressive collapse problem)在“9·11”事件之前就出现过,如1995年美国奥克拉荷马城 Alfred P. Murrah 楼由于底层部分柱子彻底损坏导致大部分结构的倒塌<sup>[1]</sup>,以及近年来在我国发生的由于爆

炸造成构件失效而引起的结构整体坍塌等。由于结构整体性问题的复杂性,对其研究还处于起步阶段。由于精确计算难度很大,所以有关结构整体性问题的研究大部分只是定性的讨论,对结构倒塌机理较深入的、可为建筑设计提出建议的研究报道较少。其中有的研究把因部分构件失效而导致的结构连续倒塌问题与地震、海啸等问题归为一类,而 Partin 则认为两者有很大不同<sup>[1]</sup>;日本学者提出“关

收稿日期:2006-11-10

基金项目:“十一五”科技支撑计划课题(2006BAK04A03);中国农业大学科研启动基金(2006022)

作者简介:张云鹏,硕士研究生;剧锦三,博士,副教授,主要从事防灾减灾研究,E-mail:jujinsan@tsinghua.edu.cn

关键构件”(key element)概念,将失效之后可能导致结构连锁坍塌的构件称为关键构件,如角柱就是最重要的关键构件<sup>[2]</sup>;Hamburger 和 Whittaker 模拟单层结构中 1 根或多根柱失效时的结构响应,在撤掉柱子后对结构施加瞬时动载<sup>[3]</sup>,其结果表明动态分析下结构的最大竖向位移为静态分析下的 2 倍。但是针对高层结构的关键构件(如柱)失效之前的初始静力效应对结构整体性影响的研究尚未见报道<sup>[4-9]</sup>。结构受到瞬时动力作用前,通常已有恒载作用下的变形,这个变形对结构瞬时动力响应的影响即为初始静力荷载效应,它对高层结构的整体性有何影响、程度如何,这一问题迄今尚未得到解答。

笔者运用有限元方法模拟高层结构考虑静力荷载效应后部分底层边柱(包含角柱)失效时整体结构的瞬时动力响应(简称瞬态响应),并与不考虑静力效应时的瞬态响应和静态响应进行比较,旨在总结其中规律,以期为高层结构整体性问题中连续倒塌问题的研究提供参考。

## 1 计算与分析

### 1.1 不考虑静力荷载效应时的瞬时动力分析

计算模型为混凝土楼板钢框架结构,沿  $x$ 、 $y$  轴方向均为 3 跨,跨度 6 m;共 20 层,层高 4 m。梁、柱截面均为工字形,上下翼缘宽度 1 m,翼缘及腹板厚度均为 0.1 m,高度 1 m,所用钢材的弹性模量为

$2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,泊松比 0.3,密度  $7800 \text{ kg/m}^3$ 。楼板采用标号 C30 混凝土,其弹性模量  $3.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,泊松比 0.2,密度  $2700 \text{ kg/m}^3$ ,厚度 0.2 m。

1.1.1 结构瞬态响应的计算与分析 为了研究侧向刚度对高层结构瞬态响应的影响,模拟质量相同、刚度不同的 2 个结构(抽掉单排和双排柱)在静力状态下和考虑瞬时动力荷载效应的瞬时动力作用下的结构响应,其变形结果见图 1。

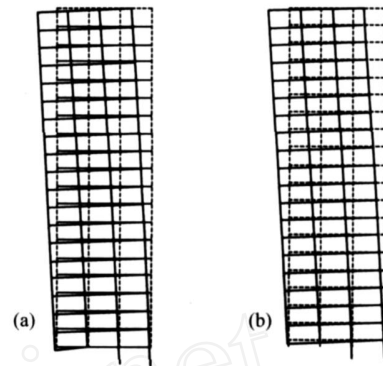


图 1 抽掉底层单排柱(a)和双排柱(b)时框架结构的变形

Fig. 1 Structural deformation of frame without one row of columns(a) and two rows of columns (b)

不考虑阻尼影响时结构顶点水平位移随时间的变化见图 2。可以看出,静力作用下该结构被抽掉双排柱时顶点最大水平振幅(0.222 m)比抽掉单排柱时(0.031 m)大很多,为后者的 7 倍。这说明刚度对结构瞬态响应的影响非常大。

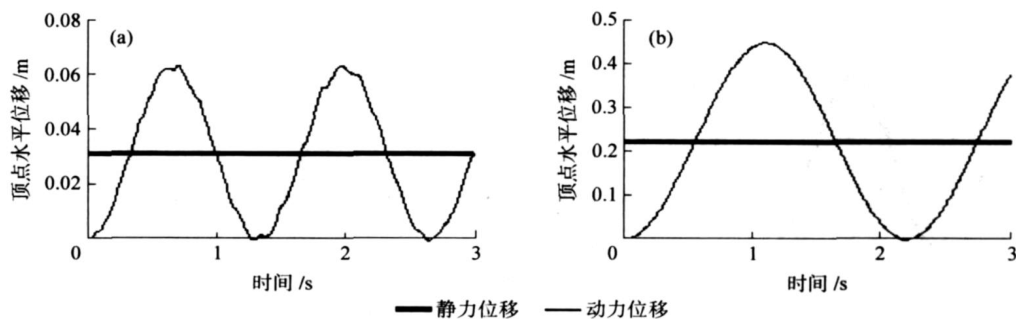


图 2 不考虑阻尼影响抽掉单排柱(a)和双排柱(b)时结构顶点的水平位移

Fig. 2 Horizontal displacement of frame vertex without damp when one row (a) and two rows (b) of columns were removed

由于不考虑阻尼影响,结构在振动过程中处于自由振动状态——顶点水平振幅总是以抽掉柱子后结构在静力作用下的水平位移为中心波动,结构瞬态响应的最大位移约为静态响应的 2 倍。这说明高层结构柱突然失效后产生的瞬时动力效应使结构产生的水平位移比静力效应下的大得多,因此在对底层边柱突然失效的高层结构进行分析时应该考虑瞬

时动力效应。

1.1.2 阻尼对结构瞬态响应的影响 阻尼的影响会使振动能量损失。图 3 示出考虑阻尼影响时结构顶点的位移,取 Rayleigh 阻尼系数  $\gamma = 0.1$ ,  $\delta = 0.1$ 。可以看出,不同刚度的结构在阻尼作用下分别静止于各自的静力响应状态。最初几个振动周期瞬时动力对结构的影响非常大,这就是引起结构倒塌的关

键时间。

阻尼能够减小瞬时动力作用时结构的水平位移

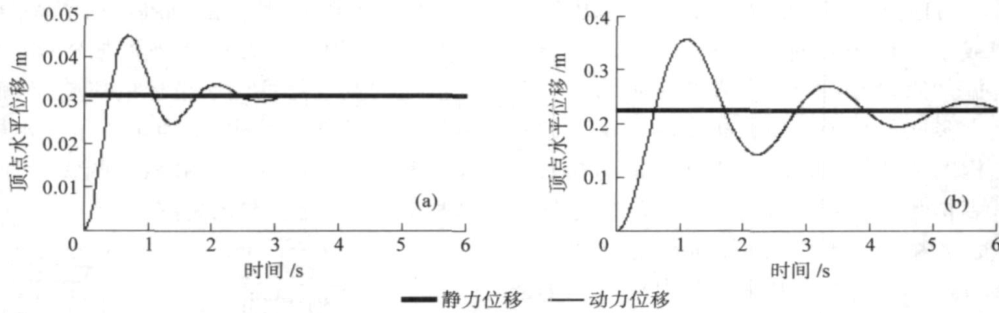


图3 考虑阻尼影响抽掉单排柱(a)和双排柱(b)时结构顶点的水平位移

Fig. 3 Horizontal displacement of frame vertex with damp considered, when one row (a) and two rows (b) of columns were removed

### 1.2 考虑静力荷载效应时的瞬时动力分析

通常结构在施加瞬时动力前已经发生静力变形,考虑初始静力荷载效应对瞬时动力响应的影响后,结构的振幅与无初始静力荷载效应时不同。

1.2.1 不同刚度结构对顶点位移的影响 图4示出不同刚度、无阻尼条件下,结构有无初始静力效应2种情况下抽掉单排和双排柱时,结构顶点的水平位移和竖向位移。可以看出,抽掉单排柱无初始静力效应时,结构顶点最大水平位移比考虑初始静力效应时大6%(图4(a)),而最大竖向位移大27.59%(图4(b))。抽掉双排柱无初始静力效应时,结构顶点的最大水平位移比考虑初始静力效应

振幅。考虑阻尼影响抽掉单排柱时结构顶点最大水平位移减小28.6%,抽掉双排柱时减小20.4%。

时大2%,最大竖向位移大4.45%。可见考虑初始静力效应时,最大水平位移和竖向位移均比不考虑初始静力效应时小;且刚度越大,初始静力效应对结构瞬态响应的影响越大。

1.2.2 不同质量对结构顶点位移的影响 结构质量增大5倍、无初始静力效应时,结构顶点的最大水平位移比考虑初始静力效应时大5.35%(图5(a)),最大竖向位移大28.38%(图5(b));结构质量增大10倍、无初始静力效应时,结构顶点的最大水平位移比考虑初始静力效应时大3.14%(图5(c)),最大竖向位移大27.57%(图5(d))。可见结构质量越大,初始静力效应对结构瞬态响应的影响越小。

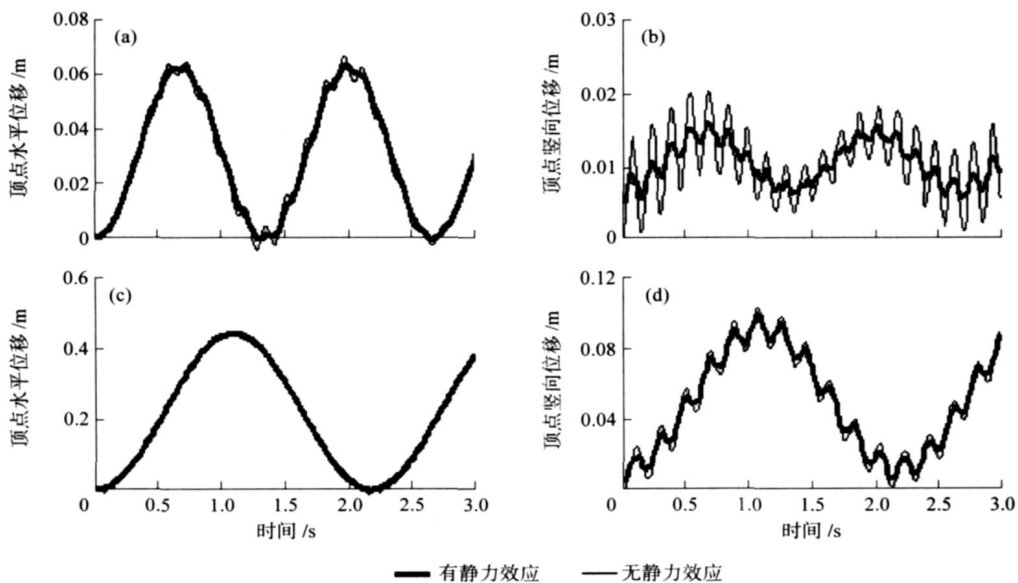


图4 不考虑阻尼影响时不同刚度结构顶点的位移:(a)(b)抽掉单排柱;(c)(d)抽掉双排柱

Fig. 4 Displacement of frame vertex with damp ignored, when one row (a) (b) and two rows (c) (d) of columns were removed

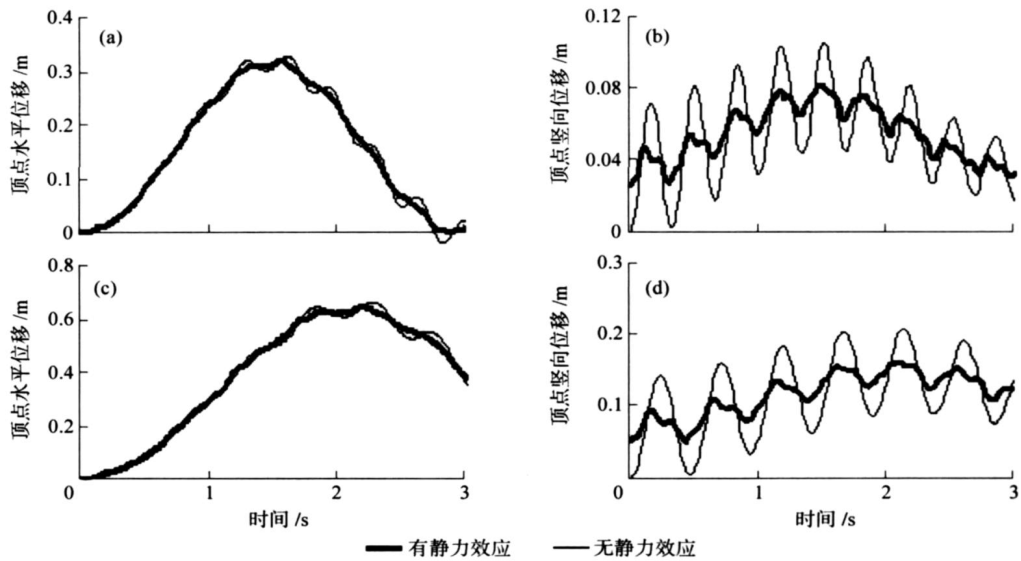


图 5 结构质量不同时不同刚度结构顶点的位移：(a) (b) 5 倍结构质量，抽掉单排柱；  
(c) (d) 10 倍结构质量，抽掉双排柱

Fig. 5 Displacement of frame vertex with different structural masses: (a) (b) with one row of columns removed, 5 times structural mass; (c) (d) with two rows of columns removed, 10 times structural mass

1.2.3 不同阻尼系数对结构顶点位移的影响 由图 6(a)和 (b)可见，阻尼系数 0.01、无初始静力效应时结构顶点的最大水平位移与考虑初始静力效应时十分接近。由图 6(c)和 (d)可见，阻尼系数 0.1、无初始静力效应时顶点的最大水平位移比考虑初始

静力效应时大 7.39%，最大竖向位移大 0.1%。

比较图 4(c)、图 6(a)与 (c)，图 4(b)、图 6(b)与 (d)可以看出，无初始静力效应时结构顶点的水平和竖向最大位移均比考虑初始静力效应时大，并且阻尼越大初始静力效应对结构瞬态响应的影响越小。

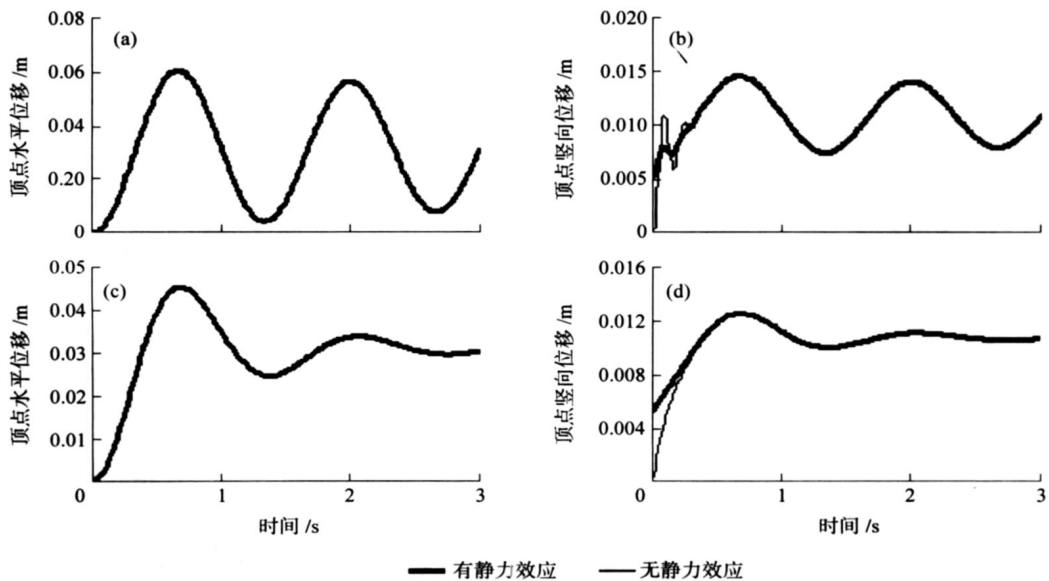


图 6 阻尼系数不同时结构顶点的位移：(a) (b) 阻尼系数 = 0.01；(c) (d) 阻尼系数 = 0.1  
Fig. 6 Displacement of frame vertex with different damp coefficients: (a) (b) damp coefficient = 0.01, (c) (d) damp coefficient = 0.1

## 2 结 论

1) 突然抽掉底层边柱的高层结构, 考虑瞬时动力效应的水平位移以静力作用下的位移为中心上下波动, 并在阻尼作用下收敛到静力位移。

2) 结构瞬时动力响应的最大位移比静力作用下大很多。

3) 计算结构瞬时动力响应时, 考虑初始静力荷载效应的结构其水平和竖向位移振幅比忽略初始静力荷载效应时小。

4) 计算结构瞬时动力响应时, 初始静力效应对结构瞬态响应的影响与结构的刚度、质量、阻尼等因素有关, 且刚度越小, 质量、阻尼越大时, 初始静力荷载效应对结构瞬态响应的最大位移影响越小。

5) 在对底层边柱突然失效的高层结构进行分析时, 必须计算结构的瞬时动力响应。建议以较为简单的无初始静力荷载效应时的瞬时动力响应作为结构设计依据, 其结果趋于安全。

### 参 考 文 献

- [1] Partin B K. Bomb damage analysis of the Alfred Murrah Federal Building[C]. Shanker N. Proceedings of Steel Building Symposium, 2003. New York: AISC, 2003: 21-25
- [2] Klemencic R, Akira W. Design of high-rise steel buildings with high redundancy—the collapse control design method—three-part series(1)[J]. Steel Construction Today & Tomorrow, 2005, 12(12): 15-18
- [3] Hamburger R, Andrew W. Design of steel structure for blast-related progressive collapse resistance[C]. Shanker N. Proceedings of Steel Building Symposium, 2003. New York: AISC, 2003: 28-32
- [4] Karagiozova D, Norman J. Dynamic effects on buckling and energy absorption of cylindrical shells under axial impact[J]. Thin-Walled Structures, 2001, 39(3): 583-610
- [5] Shanki N. Progressive Collapse Basics[C]. Shanker N. Proceedings of Steel Building Symposium, 2003. New York: AISC, 2003: 89-96
- [6] Anatol L, Wiss J. Blast Basics[C]. Shanker N. Proceedings of Steel Building Symposium, 2003. New York: AISC, 2003, 108-119
- [7] Robert J, McNamara S. Conventional Design Buildings: Blast and Progressive Collapse Resistance[C]. Shanker N. Proceedings of Steel Building Symposium, 2003. New York: AISC, 2003: 210-216
- [8] 陈肇元. 地下防护结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982
- [9] Karagiozova D, Jones N. Influence of stress waves on the dynamic progressive and dynamic plastic buckling of cylindrical shells[J]. International Journal of Solid Structure, in press.