

# Analysis of Progressive Collapse Analysis Procedure of Structures

Zongxin Zhao<sup>1</sup> Fanzhen Zhang<sup>1\*</sup> Qigao Hu<sup>2</sup>

1.College of Aerospace Science, Nation University of Defense Technology, Changsha, Hunan, 410072, China

2.College of Military Basic Education, Nation University of Defense Technology, Changsha, Hunan, 410073, China

## Abstract

Since the collapse of the U.S. World Trade Center building in 2001, China and the international upsurge in the study of the continuous collapse resistance of building structures has not formed a complete, orderly and accurate design and analysis method so far. Firstly, the application building codes and design methods of progressive collapse resistance are briefly introduced; Then, the four progressive collapse analysis procedure of linear static, nonlinear static, linear dynamic and nonlinear dynamic are compared and analyzed based on SAP2000 structural analysis software; Finally, it is concluded that the results obtained by dynamic analysis procedure are more accurate, and a progressive analysis method is summarized.

## Keywords

structural failures; progressive collapse; dynamic analysis; nonlinear analysis; comparative studies

## 建筑结构连续倒塌分析方法简析

赵宗鑫<sup>1</sup> 张凡榛<sup>1\*</sup> 胡其高<sup>2</sup>

1. 国防科技大学空天科学学院, 中国·湖南长沙 410072

2. 国防科技大学军事基础教育学院, 中国·湖南长沙 410073

## 摘要

自2001年美国世贸中心大楼倒塌之后, 中国和国际上掀起了对建筑结构抗连续倒塌性能研究的热潮, 但截至目前并没有形成一套完整、有序、准确的设计和分析方法。首先, 对抗连续倒塌的应用规范、设计方法进行简单介绍; 其次, 基于SAP2000结构分析软件对线性静力、非线性静力、线性动力和非线性动力四种连续倒塌分析程序进行比较分析; 最后, 得出结论表明动态分析程序得到的结果更为准确, 并总结提出一种渐进分析方法。

## 关键词

结构破坏; 连续倒塌; 动态分析; 非线性分析; 对比研究

## 1 引言

Ellingwood<sup>[1]</sup>对结构连续倒塌的定义为: 由于遭受偶然荷载(爆炸、火灾、撞击等)导致结构局部破坏或部分子结构损伤, 并引发连锁反应导致破坏向结构其他部分扩散, 最终造成结构的大范围坍塌。一般来说, 如果结构的最终破坏与初始破坏不成比例, 即可称之为连续倒塌。J.E.Breen<sup>[2]</sup>指出连续倒塌的共性有以下三点。

- (1) 引起原因为主要承重构件或子结构失效。
- (2) 破坏发展以局部破坏为中心向四周扩展。
- (3) “连续性”及“不成比例性”的破坏<sup>[3]</sup>。

连续倒塌是一个动态和非线性过程, 一般发生在短短几秒内, 一旦发生将造成灾难性的人员和财产损失。因此, 建筑结构抗连续倒塌的设计和分析方法必须可靠并易于执行。论文对基于SAP2000大型结构分析软件, 对比分析了线性静力、非线性静力、线性动力和非线性动力四种连续倒塌分析程序的步骤、优缺点及适用范围, 找出最佳分析方法。

## 2 设计规范

目前, 针对建筑结构抗连续倒塌设计, 中国和国际上广

**【作者简介】**赵宗鑫(1995-), 男, 中国山东济南人, 就读国防科技大学空天科学学院建筑与土木工程专业, 研究生学历, 从事土木工程建设与管理研究。

**【通讯作者】**张凡榛(1982-), 男, 博士, 副教授, 现任职于国防科技大学空天科学学院, 从事结构防连续倒塌的研究。

泛参考的两部设计规范分别为美国公共事务管理局 (General Services Administration, 简称 GSA) 的《连续倒塌分析与设计指南》(Progressive collapse analysis and design guidelines) 和美国国防部 (Department of Defense, 简称 DoD) 颁布的 UFC 4-023-03《建筑结构防止连续倒塌设计》(Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, 简称 UFC 4-023-03), 二者在荷载准则和分析要求方面存在差异<sup>[4]</sup>。

对于 GSA 设计指南, 其荷载组合如下:

$$\text{静力分析: } Load=2(DL+0.25LL) \quad (1)$$

$$\text{动力分析: } Load=DL+0.25LL \quad (2)$$

其中,  $DL$  为恒荷载标准值,  $LL$  为活荷载标准值, 2 为动力放大系数。该指南采用需求能力比值 (DCR, Demand Capacity Ratios) 作为线弹性分析的破坏准则, 而非线性分析方法则采用塑性铰的转动与位移延性比值来衡量的。

而对于 DoD 规范, 其荷载组合如下:

$$\text{动力分析: } Load=(0.9 \text{ 或 } 1.2)DL+(0.5LL \ 0.2S)+0.2W \quad (3)$$

$$\text{静力分析: } Load=2[(0.9 \text{ 或 } 1.2)DL+(0.5LL \ 0.2S)]+0.2W \quad (4)$$

其中,  $DL$  为恒荷载标准值,  $LL$  为活荷载标准值,  $S$  为雪荷载标准值,  $W$  为风荷载标准值, 静力分析的荷载组合将动力分析的荷载组合乘以动力放大系数 2。

### 3 设计方法

目前, 比较常用建筑结构连续倒塌分析的方法可以分为两类, 直接模拟法和替代传力路径法。直接模拟法直接对偶然荷载作用下建筑结构的动力响应、损伤破坏及连续倒塌的全过程进行模拟。然而, 该方法需要建立详细的结构模型, 计算模型复杂且计算效率低。

替代传力路径法, 在中国 CECS 392: 2014《建筑结构抗倒塌设计规范》中为拆除构件法, 此方法分析结构关键构件失效移除后结构的传力路径变化及可能发生的连续倒塌过程, 可考虑引入周围构件可能产生的初始损伤和非零初始条件。该方法的优点是独立于初始荷载, 计算效率高, 适用于构件破坏失效的多种情况。

### 4 分析程序对比

论文对线性静力、非线性静力、线性动力和非线性动力分析程序在优缺点、局限性及评估标准等方面做如下对比分析。

#### 4.1 线性静力分析

连续倒塌分析最基本和最简单的方法, 结构失效构件被静力移除, 分析过程中施加较为保守的荷载条件, 导致分析结果高度保守。其优点是程序简单易于执行, 可较为简便的苹果和验证结果; 其缺点为不考虑结构动力效应和材料非线性, 不能对复杂结构进行可靠性评估, 仅限于具有可预测行为的简单结构选用。

#### 4.2 非线性静力分析

广泛应用于分析建筑结构遭受横向荷载时的响应, 也称为“推覆分析”。分析过程中逐步施加荷载至最大值, 该方法可用于确定结构在侧向荷载作用下的延性, 即最大位移与屈服位移之比, 并考虑构件和材料的非线性行为; 但对于连续倒塌分析, 即竖向的“推覆分析”, 只涉及少数构件, 而远离初始损伤位置的构件可能不会发生屈服, 此外竖向承重构件的失效会导致横向构件的失效, 从而导致过于保守的结果。因此, 非线性静力分析不能有效地用于连续倒塌分析。

#### 4.3 线性动力分析 (时间历程分析)

考虑结构动态行为, 包括动力放大系数、惯性及阻尼力, 比等效静态方法更为准确。其缺点是不考虑材料非线性行为, 对于大型模型来说计算更耗时, 需要附加计算获取内力结果; 且对于具有较大塑性变形的结构, 可能会错误地计算动力放大、惯性和阻尼力, 导致结果过于保守。因此, 先行动力分析仅限于不表现出大塑性变形的结构。

#### 4.4 非线性动力分析

非线性动力分析考虑结构动态行为和材料非线性行为, 可以提供最真实可靠的结果。其缺点是计算耗时较长, 复杂性较高, 其分析过程需执行结构稳定性分析和非线性时程分析; 在大多数情况下, 其分析结果必须进行独立验证, 以确认结果的有效性。

如上所述, 更复杂和全面的分析程序将提供更准确可靠的分析结果, 计算耗时也将随之大大增加, 但无论哪种分析程序, 最后都需要对结果进行验证和确认。以上四种分析程序最重要的相似之处是都需要建立合理的计算模型并进行静态稳定性分析。基于此, 考虑高效利用工程资源, 我们提出一种渐进分析方法: 先进行以上所有分析程序中重合步骤最多、信息量最大的部分, 并且可以作为结果的验证, 之后由

简到繁,即由简单的线性静力分析逐渐转入复杂的非线性动力时程分析,得到最终结果。每一步分析的评估标准越来越不保守,以此来测试建筑结构抗连续倒塌的性能。

## 5 结语

建筑结构的连续倒塌是不可逆的破坏过程,论文对连续倒塌的设计方法、设计规范和程序进行对比分析,发现最详尽准确的是非线性动力时程分析,更复杂的分析程序结果相对真实但更耗时,更简单的分析程序结果较为保守但易执行。

为了高效评估结构的连续倒塌性能,我们提出渐进分析方法,其具有两个显著特点:一是继承了线性静力分析的简易性和进阶分析的稳健性,包含所有分析程序的步骤;二是

从简单到复杂,从保守到不保守,每一步分析结果可以相互验证。

## 参考文献

- [1] Usmani, A. S. Stability of the World Trade Center Twin Towers Structural Frame in Multiple Floor Fires[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2005,131(6):654-657.
- [2] Breen J E. Summary of IABSE Colloquium on Structural Concrete[J]. *Pci Journal*, 1991,36(6):60-63.
- [3] 邢甫庆. 混凝土结构抗连续性倒塌机理及其设计方法研究 [D]. 合肥:合肥工业大学,2010.
- [4] 陈蕾.RC 框架结构抗连续倒塌性能分析与可靠度评估 [D]. 长沙:湖南大学,2013.