

# 世界贸易中心飞机撞击后倒塌过程的仿真分析

陆新征 江见鲸

(清华大学)

**摘 要** 利用动力有限元程序 LS-DYNA, 对纽约世界贸易中心受飞机撞击后的倒塌, 进行了力学分析和仿真, 并根据计算结果进行了参数讨论。仿真计算的结果与真实倒塌过程非常接近, 说明通过适当的选取计算参数和计算模型, 可以对这种特殊的复杂破坏过程进行模拟分析和仿真。计算结果说明, 世界贸易中心倒塌的直接原因, 是火灾导致的钢材软化和楼板塌落冲击荷载引起的连锁反应。如果能够提高结构的抗火能力或者提高结构的延性, 将有可能避免结构倒塌, 避免惨剧再次发生。

**关键词** 动力有限元 世界贸易中心 倒塌

中图分类号: TB115; O241.82 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2001) 06-0008-03

## 1 引 言

2001 年 9 月 11 日, 美国纽约的世界贸易中心双塔陆续受到飞机撞击, 导致世界贸易中心南北两塔完全倒塌, 造成 5 千余人死亡和重大财产损失。该惨剧受到世界结构工程界的密切关注。很多人对双塔的倒塌原因、倒塌模式提出了各种各样的见解。一般公认的原因是大厦由于火灾和堆载而导致倒塌, 同时也有一些专家提出了包括二次破坏、燃爆等可能性。由于大厦倒塌的过程十分复杂, 而且很难试验重现, 因此目前的分析都是定性的, 还没有一个定量的结论。然而, 现代计算机技术的发展为我们提供了一个在计算机上重现整个倒塌过程的可能, 并可以根据计算结果来讨论结构倒塌的原因及如何防止结构的类似倒塌。

## 2 计算模型

本文采用美国 Livemore 软件公司开发的 LS-DYNA 动力有限元分析软件进行动力仿真分析。

由于纽约世界贸易中心为典型的筒中筒结构。其外筒为密柱深梁结构, 钢柱的宽度达到 476.25mm, 而间距仅有 558.8mm。且深梁的高度有 1219.2mm。为了简化计算模型并降低自由度数量, 在计算中将外侧的密柱深梁筒体和内侧的钢桁架筒体都用板单元近似, 板单元厚度设定的原则是按等截面积方法代替。这种近似筒体的整体弯曲和轴向变形与实际情况吻

合, 而构件的局部弯曲则与真实情况不尽符合, 考虑到筒中筒结构的主要变形是整体弯曲变形和轴向压缩变形, 所以用这种方法近似是合理的。

计算模型中, 内、外筒材料设定为钢材, 本构关系选用 LS-DYNA 中的材料 Material 3, Plastic Kinematic 模型, 材料密度为  $7800\text{kg/m}^3$ , 弹性模量为 200GPa, 泊松比为 0.27, 强度参考美国 A440 钢材设定其屈服强度为 310MPa, 屈服后强化模量为 2GPa, 由于涉及到断裂分析, 所以断裂失效塑性变形分别设定为 0.5%、1%、5% 作为讨论参数。

计算模型的楼板设定为是钢筋混凝土材料, 本构关系依然使用 Material 3, Plastic Kinematic 模型, 材料密度为  $2500\text{kg/m}^3$ , 弹性模量为 30GPa, 泊松比为 0.2, 屈服强度为 30MPa, 屈服后强化模量为 0, 所有断裂失效塑性变形设定为混凝土最大受压变形, 即 0.38%。

由于钢材耐火性差, 在撞击后飞机燃油燃烧, 造成高温对钢材强度有显著影响, 为此设定了火灾后钢材材料, 其他参数均和普通钢材相同, 只是其弹性模量和强度都被降低到基本值的 1/20, 即约相当于 700 时钢材的性能。

由于倒塌分析本身非常复杂, 因此, 计算中选用了 LS-DYNA 提供的 Single Face Erosion 接触计算模型。该接触计算模型可以自动搜索接触面, 判断接触, 并可以处理侵蚀、断裂等复杂边界变化情况。材料的摩擦系数统一设定为 0.25。

由于 LS-DYNA 是动力计算软件, 在施加重力荷载后, 结构会上下震动一段时间, 这和实际情况是不相符合的。因此, 整个计算需要分为两个阶段: 第一个阶段, 大厦尚未受到撞击, 施加重力加速度, 同时

收稿日期: 2001-10-16

国家自然科学基金资助项目 (项目号: 59938180)

给模型一个比较大的阻尼（这里计算设定阻尼为 10%），计算直至大厦在重力作用下达到稳定，然后进行第二个阶段计算。在第二个阶段的计算中，在大厦上“杀死”部分单元，来表示飞机撞击留下的孔洞，同时改变部分单元的材料性质，来表示火灾削弱的结构部件。

### 3 计算结果

#### 3.1 北塔倒塌模拟

北塔撞击的部位在大厦的中部，倒塌也基本上是垂直倒塌，其计算结果如图 1、2 所示。



图 1 北塔倒塌过程——透视图

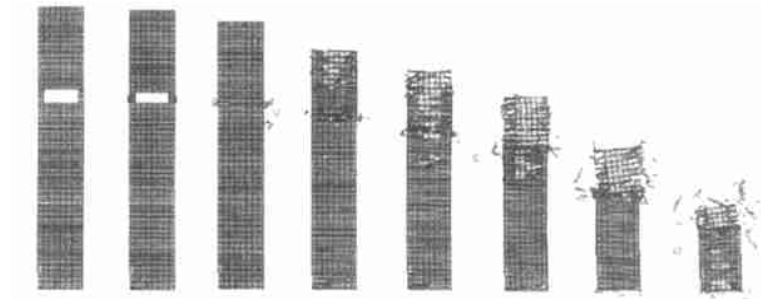


图 2 北塔倒塌过程——侧视图

#### 3.2 南塔倒塌模拟

南塔撞击的部位偏向于大厦的角部，倒塌为侧向倾斜倒塌，其计算结果如图 3、4 所示。

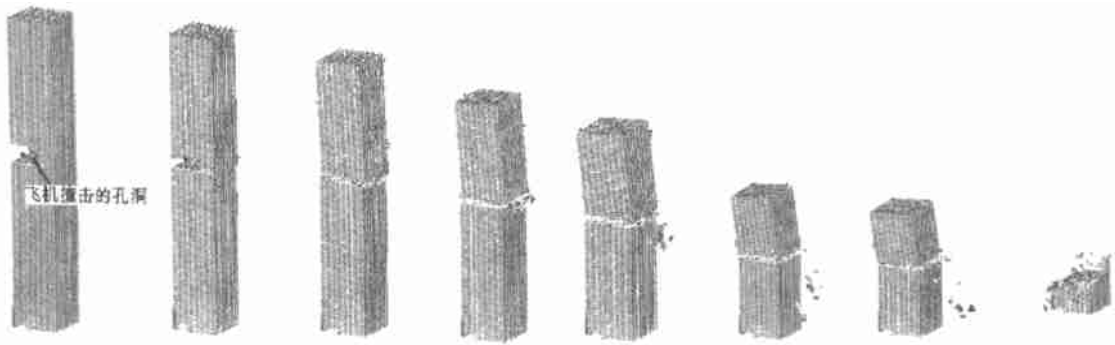


图 3 南塔倒塌过程——透视图



图 4 南塔倒塌过程——侧视图

## 4 结 论

根据计算结果,有以下几点结论:

(1) 结构发生彻底的连锁倒塌是因为火灾削弱结构构件和上部结构塌落冲击共同作用的结果。根据计算结果,在撞击破坏后,塔楼并没有立刻倒塌,北塔仍然可以继续维持,南塔由于破坏不对称,变形很大,但也没有倒塌。这与实际情况下,两座塔楼在撞击后仍然维持了一至两个小时的情况基本相同。

(2) 提高结构抗火能力或限制火灾的影响范围,将有效的防止或迟滞结构的倒塌。我们通过改变材料属性来模拟火灾影响。根据最后计算结果,即使结构已经受到严重的撞击损伤,只要火灾影响范围能控制在残余截面 20%~25% 以内的话,仍然可以避免倒塌。只有当撞击区残余结构有超过 30~50% 结构因火灾丧失承载力以后,结构才开始进入倒塌阶段。

(3) 结构进入倒塌阶段后,非撞击区的连续破坏主要是因为撞击区以上结构塌落的冲量作用。且其冲击作用力远大于堆载影响。此外,在倒塌过程中,撞击区以上和撞击区以下的结构不断接触碰撞,导致大

量结构碎片从结构上散落,很难形成大量的局部堆载,所以,堆载并不是结构连续倒塌的主要原因。

(4) 提高构件的延性是防止连锁倒塌发生的有效措施。以上分析中,若均取钢结构部分断裂的塑性变形能力为 0.5%,将发生彻底的连续倒塌。如果断裂塑性变形能力达到 1%,则冲击能量不断被结构吸收,连锁倒塌不会进行到底,将在撞击区以下 80~100m 左右停止,而当塑性变形能力达到 5% 的时候,仅仅只有撞击区附近的部分结构会倒塌破坏,不会发生连锁反应。所以,如果结构具有足够的延性,可以吸收上部结构塌落的冲击荷载的话,就可以将连锁倒塌限制在一定的范围以内。即使考虑堆载影响,结构仍然有较大的生存可能性,避免连续倒塌的惨剧发生。

### 参 考 文 献

- 1 王国周,瞿履谦主编. 钢结构——原理与设计,北京:清华大学出版社,1993
- 2 包世华,方鄂华. 高层建筑结构设计,北京:清华大学出版社,1994
- 3 江见鲸,龚晓南,王元清,崔京浩,建筑工程事故分析与处理,北京:中国建筑工业出版社,1998
- 4 ANSYS/LS-DYNA 培训手册,ANSYS 司中国代理,1999

## DYNAMIC FINITE ELEMENT SIMULATION FOR THE COLLAPSE OF WORLD TRADE CENTER

Lu Xinzheng Jiang Jianjing

(Tsinghua University)

### Abstract

Simulation for the Collapse of World Trade Center is processed in this paper with the finite element software of LS-DYNA. The parameters used in the simulation are discussed with the numerical results. The simulation is very close to the real conditions, which means that using proper numerical model can simulate such complex problems as the collapse of large building. The numerical results also show that the softening of steel under fire and impact load of top floors are the two main reasons for the collapse. If improving the steel fire-resistant ability or enhancing the ductility of the structure, the collapse can be avoided.

**Key words:** dynamic finite element, world trade center, collapse of tall building

陆新征 博士生。研究方向:结构分析非线性分析及仿真。通讯地址:100084 北京清华大学土木工程系

江见鲸 博士生导师。研究方向:结构工程,防灾减灾与防护工程。