

文章编号: 1001-1455(2013)04-0408-07

# 建筑结构倒塌破坏的数值模拟方法综述\*

颜敬, 曾亚武, 罗荣, 高睿

(武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 对建筑结构倒塌破坏的数值模拟方法进行了综述, 可归纳为预设损伤与破坏准则、隐式有限元、显式有限元、颗粒离散单元法等 4 类, 分别就其发展历史和实际应用过程中存在的若干缺陷和问题进行探讨。根据颗粒离散元法的基本原理与特点, 以某 3 跨 10 层的高层框架结构为算例, 建立颗粒流模型, 基于 PFC2D 软件编写程序, 模拟该结构在突遭水平强击作用下从构件裂纹扩展、断裂、失效、退出工作、结构局部性坍塌一直到整体倒塌的全部动态过程, 表明颗粒离散元法可对二维、三维倒塌过程中存在的大量非线性问题进行处理, 与其他方法相比较具有较大优势。

**关键词:** 爆炸力学; 结构倒塌; 颗粒离散元法; 水平冲击

**中图分类号:** O383; TU312

**国标学科代码:** 1303530

**文献标志码:** A

结构倒塌通常指承受如动力冲击、爆破、地震、地基失效等意外荷载而造成的局部性破坏, 由此诱发的一系列连锁反应将破坏向其他部位扩散, 最终使得结构主体彻底丧失承载力并出现大范围坍塌的一种工程灾害<sup>[1]</sup>, 在美国 9·11 恐怖袭击事件以后, 有关建筑物连续性倒塌机理、提高建筑结构抗倒塌能力的研究成为热点。《GB 50010-2010 混凝土结构设计规范》首次将防连续倒塌设计原则写入国家标准, 开始从概念设计的角度指导结构设计<sup>[2]</sup>。本文中首先对现有建筑结构倒塌的主流数值模拟方法进行评述并分类总结, 之后分析岩土工程中广泛使用的颗粒离散单元法的可行性与优势, 基于 PFC 软件编写程序, 模拟一幢高层框架结构在水平强击作用下从构件开裂、失效、退出工作、结构局部坍塌一直到整体倒塌的全部动态过程, 提出进一步研究的方向与建议。

## 1 模拟结构倒塌的主要方法

### 1.1 预设损伤与破坏准则

先建立结构倒塌的判断标准, 例如是否形成塑性铰或者机械铰、损伤变量是否超过阈值, 应力与塑性应变集中程度是否严重等, 一旦结构符合判断标准, 就认为结构已经进入倒塌状态<sup>[3]</sup>。叶献国<sup>[4]</sup>使用逐步积分法分析结构弹塑性动力反应, 通过计算振动时域内诸时刻结构内力与变形状态, 从而给出构件开裂和屈服的时刻和顺序, 通过观察应力和塑性变形集中出现的部位, 从而判明结构的薄弱环节及可能的破坏类型, 建立了定性的结构倒塌破坏判别方法; 顾祥林等<sup>[5]</sup>据此编制了模拟结构单元裂缝扩展过程的平面框架分析软件; 焦双健等<sup>[6]</sup>通过建立破坏单元与破坏准则, 研制了 Damage Simulation 5.0 程序, 实现了平面框架地震破坏的计算机模拟; 于海洋<sup>[7]</sup>、刘海卿等<sup>[8]</sup>建立了结构损伤指数演化方程对框架结构在地震作用下的倒塌过程进行了定量描述; Y. J. Park<sup>[9]</sup>、K. N. Li<sup>[10]</sup>通过建立结构强度与刚度退化的规则, 分别研发了 IDARC 平面程序与 CANNY 三维程序。

### 1.2 隐式有限元法

主要通过使用塑性铰的杆单元、三维实体杆单元、纤维梁单元、多弹簧模型等对框架结构梁柱的破坏开展数值模拟。F. C. William<sup>[11]</sup>对前面 3 类单元进行了理论计算与实验, 并开展了综合比较; 汪梦甫

\* 收稿日期: 2012-02-22; 修回日期: 2012-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272342); 湖北省自然科学基金重点项目(2010CDA057)

作者简介: 颜敬(1987—), 男, 硕士研究生。

等<sup>[12]</sup>研发了具有屈服面恢复力的塑性铰单元;杜宏彪等<sup>[13]</sup>、姬守中等<sup>[14]</sup>采用具有塑性铰的纤维梁单元完成了空间框架结构的弹塑性分析;李康宁等<sup>[15]</sup>则系统地研究了多弹簧模型。

### 1.3 显式有限元法

ANSYS公司研发的LS-DYNA是目前最成功的显式动力非线性有限元程序,与隐式有限元的最大不同在于显式积分求解的运动方程不耦合,无需形成总刚度矩阵进行迭代求解,在一定程度上回避了隐式积分应用于强非线性问题时出现的收敛困难,在其基础上进行结构倒塌模拟的研究也越来越多。结构一般采用支持大变形的三维实体单元,通过定义“生死单元”和“失效单元”模拟构件破坏。袁景等<sup>[16]</sup>就利用该法对框架结构在水平强震下的倒塌破坏进行了三维模拟。

### 1.4 颗粒离散单元法

适用于大变形与非连续问题的离散单元法的快速发展,为结构倒塌模拟开拓了另一条途径。L. J. Lorig等<sup>[17]</sup>将离散元引入到混凝土材料中,再植入钢筋单元,模拟了钢筋混凝土构件在静力或动力作用下的裂缝开展。M. Hakuno等<sup>[18]</sup>提出“扩展离散元”概念,将混凝土粗骨料视为圆形单元,填充其间的砂浆视为连接弹簧(包括轴向弹簧和剪力弹簧),模拟了混凝土构件受载以后从裂纹生长到断裂的整个过程,并进一步地模拟了地震作用下平面框架结构倒塌破坏的过程,从而将结构倒塌数值模拟引入一个新的研究阶段。孙利民等<sup>[19]</sup>基于他们的研究成果,提出“质点-桁架模型”,将钢筋混凝土离散成单个质点,质点之间用桁架杆(非线性弹簧)连接,再植入钢筋弹簧,通过连接弹簧的断裂进行局部破坏模拟,由此模拟了桥墩在地震作用下从局部破坏到整体倒塌的全过程。

D. H. Tagel等<sup>[20]</sup>和K. Meguro等<sup>[21]</sup>又分别提出了“AEM应用单元法”,在微元层次上,将结构离散为数量庞大的矩形微元,每2个微元体之间分布若干对弹簧,每对弹簧含有1个轴向弹簧和1个剪切弹簧。将微元体假定为刚体,把所有的变形都集中在微元间的连接弹簧上,清楚地模拟并追踪了裂缝的开展情况,在结构静力破坏和动力破坏的数值模拟试验中取得了很好的效果。李承等<sup>[22]</sup>又发明了“杆段离散元”模型,将框架结构的每根杆件都划分为若干圆形杆段,每2个杆段之间用弹簧相连,与“扩展离散元”不同的是,除了轴向、剪切弹簧以外,增加1个理想弹塑性弯曲弹簧以反映截面的弯曲变形,当杆段转角超过限值时,弯曲和剪切弹簧破坏,轴向弹簧继续保持工作,比较适应于结构整体分析。

以上各种离散元方法中单元数量庞大,为了降低计算量,受框架结构力学分析中层间模型与地震作用下相当数量框架结构“弱柱强梁型”倒塌的实况启发,宣纲等<sup>[23]</sup>提出将每1层作为1个单元,层间立柱作为连接上、下层单元的弹簧,依据条分法和截面平衡时轴力-弯矩-曲率耦合关系,并参考杆段模型给出了柱子恢复力滞回曲线,采用C++语言编制了地震作用下平面框架倒塌反应的数值模拟程序,并用算例进行了验证,发展了“层间剪切元”。近年来有限元与离散元的各种耦合算法也相继应用于该课题的研究并取得了相应成果。

### 1.5 简要评价

(1)采用预设损伤与破坏准则的研究方法,本质上是先建立结构倒塌的判断标准,而不是直接对结构倒塌的动态过程进行分析。显然仅对结构倒塌前的情况进行研究是远远不够的,还必须对包括倒塌在内的全部演化过程进行细致的分析与模拟<sup>[3]</sup>。

(2)建筑结构材料往往是非线性材料,倒塌破坏的发生实质上是剧烈大变形的后果,隐式有限元在高度几何非线性、材料非线性的条件下,难以保证其求解整体刚度矩阵方程时的收敛性,且该种分析也不是直接对结构的倒塌阶段进行分析,而是停留在倒塌前的阶段,并且需要设定算法来判断结构何时倒塌以作为停止下一步计算的条件。

(3)显式有限元虽然可以模拟框架倒塌的整个动态过程,但是不管是采用“生死单元”还是“失效单元”,在单元受力较大而被判断为失效后,该单元完全从整体结构中消失,即随着计算过程的持续,单元数目越算越少,质量出现不守恒现象,这与实际情况出入很大,一旦出现失效单元较多的情况,可能会造成结构单元或构件的莫名消失。再者结构倒塌破坏的过程中必然会存在结构与地面以及结构自身各部位之间的接触碰撞,虽然通过定义“接触对”(即接触单元)可以模拟这种现象,但是接触算法复杂,接触

参数众多且取值难以确定,接触部位又存在“相互入侵”现象,还有失效单元的接触碰撞行为根本没法反映。另外随着结构的渐进破坏,逐渐有单元被判定为失效从而使总刚度矩阵需要不断的修正与更新,难以避免结构刚度矩阵出现奇异的现象。

(4)各类离散单元法也存在其问题:扩展离散元之间仅存在法向弹簧和剪切弹簧,2个弹簧相互独立,受力过于简单,不能反映破损以后结构部位之间摩擦的现象。质点-桁架模型中非线性弹簧的参数较多且难以赋值,为了简化计算,实际运用该法时剪切弹簧往往被忽略<sup>[19]</sup>。AEM应用单元法只能做平面框架倒塌分析。杆段离散元虽然在扩展离散元的基础之上添加了弯曲弹簧,但是3个弹簧仍然相互独立互不关联,且无法反应全部弹簧破坏以后的情况。层间剪切模型将1层作为1个单元,牺牲了框架结构的一般性,只能模拟柱型破坏(即“强梁弱柱型”破坏),还不能考虑柱子本身的压碎或者折断。

## 2 颗粒离散元法简介

### 2.1 颗粒离散元的特点

P. A. Cundall 等<sup>[24]</sup>提出了适于岩石力学的离散单元法,之后又提出了适用于土力学的离散单元法,这是颗粒离散元法的雏形,后来该法得到进一步发展,形成了较为系统化的理论、模型与计算方法<sup>[25]</sup>,并在巷道支护、隧道开挖、矿山开采、边坡工程、地基基础、动载问题、冰雪力学、核废料处理、散体介质、断裂力学、自然风蚀、岩体崩塌、泥石流致灾、流体力学等诸多领域发挥着重要作用。

该方法以颗粒为基本单元,将物体离散为具有代表性的数个单元,利用颗粒流模型来构建物体的力学性质,从细观力学的角度建模并研究物体的力学响应,而无需事先确定材料的宏观本构,有着其他方法不可比拟的优势。这些颗粒满足以下的一些基本假定<sup>[25]</sup>:(1)颗粒单元为刚性体,本身不会破坏;(2)颗粒间的接触发生在很小的范围内,即点接触;(3)接触特性为柔性,接触处存在一定的“重叠”量,该量值与接触力的大小相关,并且该量值与颗粒本身大小相比很小;(4)颗粒接触处可以存在各种形式的粘结,每一种粘结形式都有其对应的粘结力计算方法与粘结失效的准则;(5)颗粒单元可以为圆盘或者球形,能分别开展二维、三维模拟。

### 2.2 颗粒离散元系统的演化规则

颗粒离散元中,每个单元的位置在时间间隔  $dt$  中逐步确定的,单元的位置与接触力决定了单元的运动,运动方程以最基本的牛顿第二运动定律为基础,运动的类型包含平动与转动:

$$\begin{cases} \mathbf{F} = m(\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{g}) \\ \mathbf{M} = I\dot{\boldsymbol{\omega}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}$ 为单元受到的合外力, $\mathbf{M}$ 为单元受到的合外力矩, $\mathbf{x}$ 为位移, $\mathbf{g}$ 为体积力加速度, $m$ 、 $I$ 分为单元质量与转动惯量。

颗粒离散元系统的演化是以时间步长  $dt$  为循环周期,利用接触力-接触位移关系与牛顿第二定律进行显式遍历计算。在这个过程中,每个单元独立应用牛顿第二定律,每个接触也单独应用接触力-接触位移关系进行计算。运动定律给出了颗粒单元在该时步内的受力状态下所产生的运动,接触力-接触位移关系计算了该时步内单元运动完成以后所产生的新的接触力分布状态。通过重复这2个环节,完成系统动态演化,并在计算循环不断推进的同时,实时监测  $\lambda_{ave}$  和  $\lambda_{max}$  这2个量的变化<sup>[25]</sup>, $\lambda_{ave}$ 为单元平均不平衡力与单元平均接触力的比值, $\lambda_{max}$ 为单元最大不平衡力与单元最大接触力的比值。当二者均小于某个值(如1%,可以人为设定)时,即认为系统运动到稳定状态,计算收敛,循环终止,整个计算过程如图1所示。

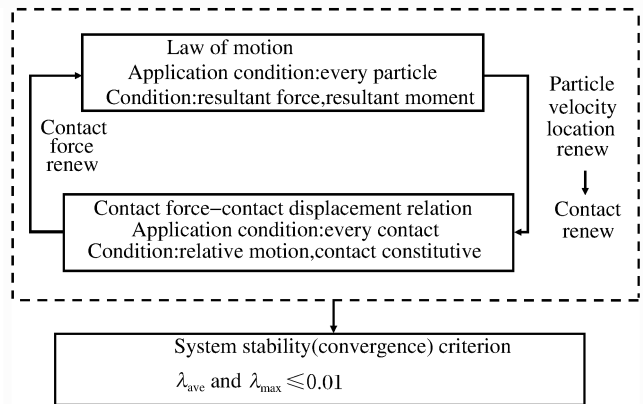


图 1 颗粒离散元法计算原理  
Fig. 1 Principle of granulometric discrete element method

### 2.3 颗粒离散元法的优点

对建筑结构倒塌开展数值模拟主要包含3个关键问题:(1)倒塌过程的非线性处理(大位移、大转动、材料非线性);(2)结构裂纹生长与构件断裂的模拟;(3)断裂构件脱离主体结构以后自身的运动情况,以及对原结构的影响(接触、摩擦、碰撞、冲击)。

颗粒离散元通过将物体离散为大量颗粒,颗粒之间可以定义各种接触与粘结(含线性、非线性),颗粒之间的摩擦滑移、挤压、位错以及颗粒本身的平动和转动均可以实现,当颗粒间受力超过粘结强度后粘结发生破坏,颗粒可以实现相互分离,从而可以克服或者回避其他方法的缺陷:(1)结构均可以离散为颗粒;(2)由于颗粒单元可为圆盘或者球形,即可以进行二维、三维倒塌分析;(3)颗粒系统基于力-位移规律和牛顿第二定律进行演化,不像隐式有限元那样会出现总刚方程不收敛的问题,也不会出现显式有限元中单元越算越少,莫名消失的问题;(4)颗粒之间发生刚性接触,避免了有限元存在“单元入侵”现象;(5)大位移、大转动、碰撞、摩擦等行为容易实现;(6)颗粒之间粘结的渐进破坏可以很好的模拟结构裂纹出现、生长以及构件损伤断裂的过程;(7)颗粒之间接触与粘结的失效可以标志物体由线性到非线性力学特性的开始,从某种程度上说,整个倒塌过程可以清晰地模拟出来。

### 3 基于颗粒离散元法的结构倒塌模拟案例

对高速运动的物体水平冲击某3跨10层的高层框架结构倒塌的全部过程进行模拟。以颗粒离散元商业软件PFC2D为平台,选用可以同时传递集中力和力矩的平行粘结颗粒组模拟框架的横梁与立柱,参照使用手册关于模拟结构单元的颗粒细观参数赋值方法<sup>[25]</sup>,建立如图2所示模型。

PFC模型中,上部框架结构采用1240个直径为0.4375m颗粒进行模拟,颗粒之间皆定义平行粘结与摩擦系数,粘结材料为弹塑性并具备粘结强度极限,细观参数的取值为:颗粒的法向刚度系数 $k_n=120$  MN/m,颗粒的切向刚度系数 $k_s=80$  MN/m,粘结的法向刚度系数 $\bar{k}_n=250$  MPa/m,粘结的切向刚度系数 $\bar{k}_s=200$  MPa/m,法向粘结(抗拉)强度 $\sigma=0.75$  MPa,切向粘结(剪切)强度 $\tau=1.8$  MPa,颗粒间的摩擦因数 $f=0.8$ 。撞击物用直径为1.75m的一个大型刚性颗粒进行模拟,初始水平速度设置为300 m/s。图3为框架在自重状态下下拉压粘结力的分布情况,图4所示为模拟倒塌动态过程中的截图。

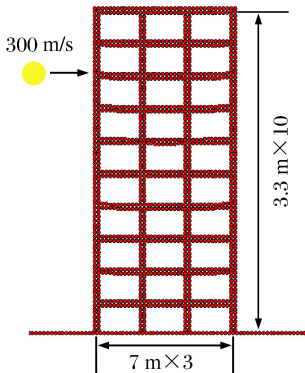


图2 计算模型

Fig. 2 Computational model

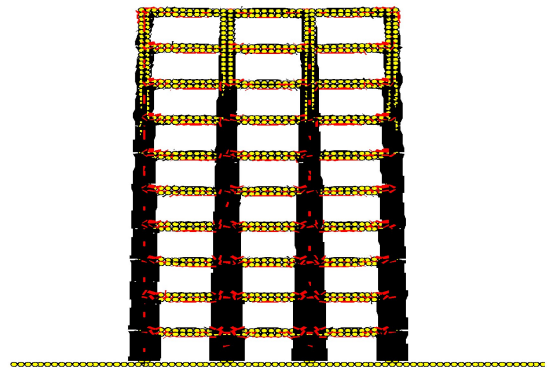


图3 自重作用下粘结力分布

Fig. 3 Distribution of bond stress under gravity

由数值模拟结果可知,框架结构的整个倒塌过程大致分为以下几个阶段:

(1)撞击体以较大的动量破墙而入,连续打断几根框架柱,致使碎裂的块体四处飞溅并与附近未发生破坏的结构构件发生碰撞、摩擦、冲击,致使这些构件在极短的时间内由弹性进入塑性进而发生大变形,裂纹出现并扩展贯通进而退出工作;

(2)撞击位置的上部结构失去支撑而开始塌落,由于破坏和冲击所引发的振动均未扩散到最底部的结构,此时底部的结构构件仍处于弹性工作状态;

(3)随着上部构件碎块的塌落,各楼层的楼板依次受到垂直冲击,又由于设计中“强柱弱梁”,梁端节点先被剪断,破坏由上而下迅速扩散,使得碎块越聚越多,塌落加快;

(4)下部结构构件最终不堪冲击与重负,节点位置发生剧烈变形,竖向承重能力逐步丧失,整个结构主体彻底破坏,发生崩解、分离、对碰,最后触地堆积。

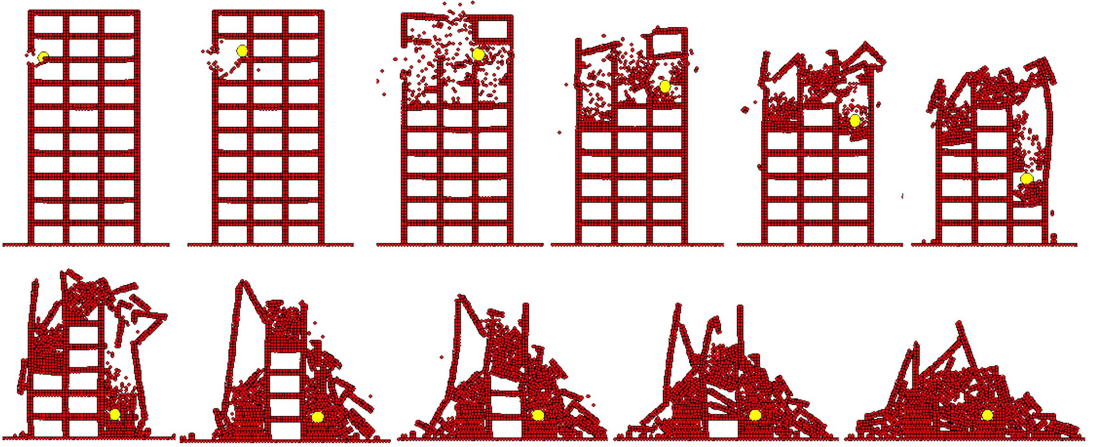


图4 高层框架结构倒塌过程

Fig. 4 Collapsing process of high-rise frame structure

## 4 结论与建议

总结了当前建筑结构倒塌数值模拟的主要方法,介绍了颗粒离散元法的基本原理和优点,以某3跨10层的高程框架结构为例,演示了该结构在水平强击下构件裂纹扩展、断裂、失效、退出工作、结构局部坍塌一直到整体倒塌的全部动态过程,模拟结果与宏观现象基本吻合。颗粒离散元法可以为研究建筑物倒塌机制、破坏模式提供参考,但仍有以下几个问题值得进一步思考:

(1)倒塌模拟结果的逼真程度与颗粒的大小数量相关,颗粒小而多可以得出比较精细的结果,但是需要耗用大量的计算资源,对计算机的要求很高,这就需要多次试验,在模拟精度与计算繁杂度中做出合理的取舍。

(2)算例中对框架的混凝土结构构件(柱、梁)的数值模拟,其主要思想是将受力钢筋弥散于素混凝土之中,可视均为均质散体介质,而忽视了混凝土与钢筋这2种建材之间的相互作用。实际上可以将这2种材料分别建模,研究构件在各种加载条件下的力学性能(变形、延性等)与破坏情况(例如裂纹的出现、生长、贯通)。

(3)基于三维离散元建立模型,模拟建筑结构倒塌的空间效应(例如受力不对称引起的扭转问题)。

(4)颗粒离散元虽然可以清晰再现结构倒塌破坏的过程,为结构破坏仿真提供一条思路,但是并没有从根本上揭示结构破坏的力学本质,仍需进一步的探索。

## 参考文献:

- [1] 刘西拉. 结构工程学科的现状与展望[M]. 北京:人民交通出版社,1997.
- [2] GB50010-2010,混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [3] 张雷明,刘西拉. 钢筋混凝土结构倒塌分析的前沿研究[J]. 地震工程与工程振动,2003,23(3):47-51.  
Zhang Lei-ming, Liu Xi-la. Forward research of collapse analysis of reinforced concrete structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003,23(3):47-51.
- [4] 叶献国. 基于非线性分析的钢筋混凝土结构地震反应与破损的数值模拟[J]. 土木工程学报,1998,31(4):3-13.  
Ye Xian-guo. Simulation of earthquake response and damage of RC structures based on the nonlinear dynamic analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 1998,31(4):3-13.

- [5] 顾祥林, 孙飞飞. 混凝土结构的计算机仿真[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [6] 焦双健, 冯启民, 付长文. 钢筋混凝土框架结构地震破坏的计算机模拟方法[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(2): 54-59.  
Jiao Shuang-jian, Feng Qi-min, Fu Chang-wen. Simulation method for earthquake damage to RC frames[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(2): 54-59.
- [7] 于海洋. 钢筋混凝土结构地震损伤模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [8] 刘海卿, 陈小波, 王学庆, 等. 基于损伤指数的框架结构损伤演化研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 29-35.  
Liu Hai-qing, Chen Xiao-bo, Wang Xue-qing, et al. Study on damage evolution of frame structure based on damage index[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(3): 29-35.
- [9] Park Y J. Inelastic damage analysis of reinforced concrete frame shall wall structures[R]. NCEER-87-0008, USA, 1987.
- [10] Li K N. Canny-C: A computer program for 3D nonlinear dynamic analysis of building structures[R]. No. CE004, National University of Singapore, 1993.
- [11] William F C. Documentation of strengths and weakness of current computer analysis methods for seismic performance of RC members[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(1): 43-48.
- [12] 汪梦甫, 沈蒲生. 钢筋混凝土空间高层框架非线性地震反应分析[J]. 湖南大学学报, 1998, 25(3): 64-69.  
Wang Meng-fu, Shen Pu-sheng. Nonlinear seismic response analysis of reinforce concrete space frame[J]. Journal of Hunan University, 1998, 25(3): 64-69.
- [13] 杜宏彪, 房营光, 沈聚敏. 空间钢筋混凝土框架结构的非线性地震反应[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(2): 81-86.  
Du Hong-biao, Fang Ying-guang, Shen Ju-ming. Nonlinear seismic response of reinforce concrete space frame[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(2): 81-86.
- [14] 姬守中, 江欢成, 吕西林. 双轴反复荷载作用下钢筋混凝土空间框架结构滞回全过程分析[J]. 力学季刊, 2002, 23(4): 455-462.  
Ji Shou-zhong, Jiang Huan-cheng, Lü Xi-lin. Full-range hysteretic analysis of RC frame structures subjected to biaxial reversed cyclic loading[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2002, 23(4): 455-462.
- [15] 李康宁, 洪亮, 叶献国. 结构三维弹塑性分析方法及其在建筑物震害研究中的应用[J]. 建筑结构, 2001, 31(3): 53-58.  
Li Kang-ning, Hong Liang, Ye Xian-guo. Nonlinear analysis of 3D models and application in research of a building damaged in earthquake[J]. Building Structure, 2001, 31(3): 53-58.
- [16] 袁景, 刘海卿, 刘东. 强震作用下钢筋混凝土框架结构倒塌破坏的三维仿真分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(增刊): 115-119.  
Yuan Jing, Liu Hai-qing, Liu Dong. Three-dimensional simulation analysis of reinforced concrete frame structure collapsed under Severe Earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(Suppl): 115-119.
- [17] Lorig L J, Cundall P A. Modeling of reinforced concrete using the distinct element method[C]//SEM-RILEM International Conference: Fracture of Concrete and Rock. New York: Springer, 1989: 276-287.
- [18] Hakuno M, Meguro K. Simulation of concrete-frame collapse due to dynamic loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(9): 1709-1723.
- [19] 孙利民, 秦东, 范立础. 扩展散体单元法在钢筋混凝土桥梁倒塌分析中的应用[J]. 土木工程学报, 2002, 35(6): 53-58.  
Sun Li-min, Qin Dong, Fan Li-chu. A new model for collapse analysis of reinforced concrete bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(6): 53-58.
- [20] Tagel D H, Meguro K. Analysis of small scale RC building subjected to shaking table test using applied element method[C]//Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
- [21] Meguro K, Tagel D H. Applied element simulation of rc structures under cyclic loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(11): 1295-1305.

- [22] 李承,顾祥林. 基于离散单元法的钢筋混凝土框架结构爆破拆除计算机仿真[D]. 上海:同济大学,2000.
- [23] 宣纲,顾祥林,吕西林. 强震作用下混凝土框架结构倒塌过程的数值分析[J]. 地震工程与工程振动,2003,23(6): 24-30.
- Xuan Gang, Gu Xiang-lin, Lü Xi-lin. Numerical analysis of collapse process for RC frame structures subjected to strong earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003,23(6):24-30.
- [24] Cundall P A, Stack D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979,29:47-65.
- [25] Itasca Consulting Group. PFC2D user's manual ver 3.0[M]. Sudbury Itasca Consulting Group Inc., 2003.

## Reviews of numerical simulations on building structure collapse\*

Yan Jing, Zeng Ya-wu, Luo Rong, Gao Rui

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

**Abstract:** The current major simulation methods for building structure collapse were summarized and these methods were grouped under four heads: pre-specified damage and failure criteria, implicit finite element method, explicit finite element method and discrete element method. The corresponding development histories were introduced, respectively. And the defects and problems were discussed which appearing in the building simulation by these methods. Based on the basic principle and characteristic of the discrete element method for particle materials, its advantages were analyzed in the simulation of structure collapse. Then by taking a 3-span, 10-floor senior frame structure under horizontal strong impact as an example, a program based on PFC2D was written and a particle flow model was developed to simulate the whole dynamic process from structural member cracking, fracture and failure to part collapse of structure and whole collapse. In the end, the directions and problems to the further study were brought forward.

**Key words:** mechanics of explosion; structural collapse; granulometric discrete element method; horizontal impact

\* Received 22 February 2012; Revised 7 May 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41272342)

Corresponding author: Zeng Ya-wu, zengyw@whu.edu.cn