

灾害荷载下结构倒塌机制研究

(申请清华大学工学博士学位论文)

培养单位: 清华大学土木工程系

专 业: 结构工程

研 究 生: 张雷明

指导教师: 刘西拉 教授

一九九九年九月

**Researches on the Collapse Mechanism of Structures
under Disastrous Loading**

Dissertation Submitted to
Tsinghua University
in partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Doctor of Engineering

by
Zhang Leiming
(Structural Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Liu Xila

September 1999

摘 要

多次地震震害调查表明,强震中建筑物倒塌已成为人员伤亡和财产损失的主要根源,因此如何保证“大震不倒”已成为抗震工程的重要课题。要防止和控制结构倒塌,必须首先对各种结构的倒塌现象作系统的机理性解释,然后才能提出措施和建议。本文即开始这样的尝试,研究对象暂时限于钢筋混凝土平面框架结构。

结构倒塌分析主要有三个难点:倒塌过程中不连续位移场的描述、接触碰撞分析以及大位移和大转动问题。本文利用广义函数在表示突变量上的优势建立杆单元混合铰模型,它可以描述杆件单元纵向、横向及转角位移的不连续,而且将这种不连续特性嵌合到杆件单元内部,在整体分析时与普通单元无异,应用非常方便。针对接触碰撞问题,本文首先建立碰撞对速度的突加约束条件,然后引入拉格朗日乘子,应用哈密顿原理导出考虑碰撞的结构动力方程,最后归结到求解冲量形式的动力方程,并对采用 Newmark 差分格式求解时的数值特性进行了讨论。本文采用当前无应力构形作为参照建立总体方程,较好的解决了结构倒塌过程中的累积大位移和大转动问题。因为分步计算时当前无应力构形未知,因此需迭代求解,文中对迭代的收敛性也作了讨论。各章的算例表明,模型的应用都比较成功。

本文最后将建立的结构倒塌分析方法应用于若干算例分析,包括块体连续碰撞、相邻建筑物碰撞以及在强烈地震和爆炸荷载作用下的结构倒塌模拟计算,并初步得出一些有意义的结论。

关键词: 倒塌分析, 广义函数, 混合铰模型, 碰撞分析, 当前无应力构形

Abstract

It has been proved by many damage investigations into devastating earthquakes that, the genesis of great property losses and casualties lies in the collapses of structures. So how to assure "No collapse during strong earthquakes" has been promoted to an important and imperative topic in seismic engineering. In order to avoid and control collapses, actions and suggestions have only to be brought forward after systematical explanation of the collapse mechanisms of typical structures. Such an attempt is made in this paper which is limited to planar reinforced concrete frames temporarily.

There are three major difficulties in structural collapse analysis: the description of discontinuous displacements, contact-collision analysis and problem arisen from large displacement and large rotation in collapse process. Based on generalized functions that possess great advantages in describing sharp changes, a model for members called mixed hinge model is introduced to depict the discontinuity of axial and lateral displacements, as well as the rotary components. The discontinuity is embedded inside the member so that it is consistent with conventional procedures in global analysis, which makes it more convenient to be applied in structural analysis. As for contact and collision problems, constraint conditions on velocity imposed by collisions are established first, and then they are incorporated into the Hamilton's Principle after introducing a Lagrangian Multiplier, from which equations of motion considering collisions can be formulated. After integration over time interval, it results in solving the equations of motion in impulse in the final analysis. And the numerical properties employing Newmark difference formula are also discussed in this paper. The current unstressed configuration is adopted as reference in global analysis, which is better to solve the problem of accumulated large displacement and large rotation during collapse. Since the current configuration is still unknown in the step-by-step procedure, the calculation must be performed by iteration starting from the latest balanced configuration. And the convergence of iteration is also discussed. It is illustrated by numerical examples in the end of each chapter that models

presented can be employed successfully.

In the end of this paper, many cases are analyzed by the collapse analysis procedure, including the successive colliding of blocks and adjacent buildings, as well the collapse simulation of frames and elevated expressway collapsed during disastrous earthquakes and imaginary nuclear explosion. And some preliminary conclusions are drawn for dynamic analysis involving collision effects.

Key words: Collapse analysis, Generalized function, Mixed hinge model, Collision analysis, Current unstressed configuration

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得清华大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名：張雷明 日 期：1999.10.8

关于论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

签 名：張雷明 导师签名：刘西拉 日 期：1999.10.10

目 录

摘 要	I
Abstract	II
绪 论	1
第 1 章 基于广义函数的平面杆单元混合铰模型	11
1.1 概述	11
1.2 广义函数的简单介绍	12
1.3 突变物理量到分布量的转换	13
1.3.1 集中力偶	13
1.3.2 截面相对转角	15
1.3.3 横向集中力	15
1.3.4 截面横向相对错动	15
1.3.5 纵向集中力	15
1.3.6 纵向相对滑移	16
1.4 平面杆单元混合铰模型	16
1.4.1 混合铰模型之一：考虑相对转动和横向相对错动	17
1.4.2 混合铰模型之二：考虑纵向相对滑移	21
1.4.3 混合铰杆单元模型	22
1.5 考虑累积相对大转动的混合铰模型	25
1.6 模型验证	27
第 2 章 倒塌破坏分析中的接触碰撞	31
2.1 概述	31
2.2 基于接触-碰撞的动力控制方程	32
2.2.1 碰撞突加约束条件	32
2.2.2 动力控制方程	36
2.3 动力控制方程的求解	37
2.3.1 在碰撞持续时间 Δt_r 上的积分	38

2.3.2	在常规时间步长 Δt 上的积分	39
2.3.3	碰撞引起的加速度突变	40
2.3.4	Newmark- β 法求解冲量形式动力方程的数值特性	43
2.4	接触-碰撞力的求取	48
2.4.1	接触点力的平衡	48
2.4.2	接触碰撞对总体平衡方程	50
2.5	接触碰撞分析中恢复系数的取值	51
2.6	模型验证	51
第3章	杆系结构倒塌破坏分析中的非线性问题	56
3.1	概述	56
3.2	材料非线性	56
3.2.1	考虑分布塑性铰区的杆单元模型	57
3.2.2	考虑混合铰塑性本构关系的杆单元模型	58
3.3	几何非线性	60
3.3.1	以当前无应力构形作为参照的动力方程	60
3.3.2	单元局部变形	62
3.3.3	与拉格朗日列式的比较	67
3.4	控制方程的迭代求解	67
3.4.1	初值选取	68
3.4.2	迭代格式	68
3.4.3	收敛性证明	70
3.5	倒塌破坏中的其它问题	71
3.5.1	结构内力重分布	72
3.5.2	脆性破坏的承载力下降	73
3.5.3	考虑下降段的迭代算法	75
3.5.4	关于阻尼的取值	78
3.6	算例分析	78
第4章	杆系结构倒塌破坏分析的程序实现	80
4.1	概述	80
4.2	接触碰撞关系判断	80

目 录

4.2.1 概念及定义	81
4.2.2 接触关系判断	85
4.3 接触脱离判断	86
4.4 单元状态转换	87
4.4.1 单元破坏判断标准	88
4.4.2 单元错位脱离	88
4.5 倒塌过程的动态显示	89
4.6 程序流程图	89
4.7 程序验证	90
第 5 章 算 例	92
5.1 概述	92
5.2 连续碰撞	92
5.3 相邻建筑物的碰撞	93
5.4 地震中的框架倒塌	94
5.5 核爆炸冲击下的框架倒塌	95
5.6 阪神高架路的倒塌	96
第 6 章 结论与建议	123
参考文献	125
附录 A	132
致 谢	134

绪 论

0.1 选题背景

我国是一个多地震国家，也是世界上遭受地震灾害最为严重的国家之一。世界地震史上死亡人数最多的一次地震是公元 1556 年我国陕西华县发生的 8 级地震，死亡 83 万人。世界近代地震史中死亡人数最多的一次，则是 1976 年 7 月 28 日我国河北唐山发生的 7.8 级强烈地震，死亡逾 24 万，重伤逾 16.4 万。本世纪七十年代是全球地震灾害最为严重的十年，死亡总人数达 42.2 万，其中我国占 62%，伤残 38.8 万，我国占 50%。与此同时，日本 14 次地震死亡 129 人，美国 12 次地震死亡 65 人，其中差距可见一斑。据建国以来十一次 7 级以上地震的不完全统计，各类房屋倒塌逾一亿平方米，直接经济损失达数百亿元人民币^{[10][28][51][56][80]}。

地震给我国造成深重灾难，究其原因，一方面是因为她地处两个最活跃的地震带之间，东部为环太平洋地震带，西部和西南部地区有地中海—南亚地震带穿越而过，因而地震震级大，重现期长，而且活动范围广，难以集中采取防范措施。造成我国地震灾害特别严重的另一个原因，是长期以来经济不发达，建筑材料及结构性能较差，加以大批建筑工程没有考虑抗震设防，特别是城市的大部分老旧建筑、广大农村的土砖石结构房屋和南方的空斗墙房屋，抗震能力更差，难以抵御强震袭击而极易严重破坏甚至倒塌。

此外，从五十年发展的经验看，由于受科学技术水平限制，地震基本烈度的确定也不够准确（表 0-1）。在传统认为地震危险性较小的地区，绝大部分建筑物按重力荷载设计，没有专门的抗震构造设计，变形能力很差，所考虑的风荷载也常常不足以替代强震袭击，一旦发生强烈地震，其后果不堪设想。美国现在已经开始讨论中部和东部等地震低危险性地区，考虑遭受潜在高烈度地震时建筑物的抗震性能评价方法和加固措施^{[82][83]}。唐山在 1976 年大地震前基本烈度是 6 度，所有建筑物都没有考虑抗震设防，大震时市区大部陷入地震烈度高达 XI 度的极震区，各类建筑物普遍倒塌，其惨烈情景触目惊心^[28]。1985 年墨西哥 8.1 级地震，仅墨西哥城就有 300 余栋建筑完全倒塌，四层以上几乎全部

倒塌或拦腰截断, 伤亡和失踪各有 2 万余人。1989 年美国旧金山 7.1 级地震, 仅有个别建筑物倒塌, 但是高架路破坏严重, 某些路段倒塌, 上层路面压在下层路面上, 造成惨重伤亡^[66]。最近一次震惊世界的灾难性地震, 是 1995 年 1 月 17 日发生在日本兵库县的 7.2 级神户大地震, 总计损失 967 亿美元, 铁路桥及高架路、公路桥塌落计 30 余处, 死亡 5 千余人, 其中 85% 以上是被倒塌的建筑物压死的^[60]。

表 0-1 6 度地区发生强震实例^[51]

序 号	时 间	地 点	震 级	震中烈度
1	1966.3.8	河北邢台	6.5	8
2	1966.3.22	河北邢台	7.2	9~10
3	1975.2.4	辽宁海城	7.3	9
4	1976.7.28	河北唐山	7.8	11
5	1979.7.9	江苏溧阳	6.0	8

结构的倒塌破坏已成为遭遇强震袭击时造成人员伤亡和设备损毁的主要根源^{[10][20][62][60][102][103]}, 因此如何防止建筑物在遭受意外高烈度地震时倒塌已逐渐引起人们的重视。我国在唐山地震后开始加强对钢筋混凝土结构抗震性能的研究, 并提出“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”的抗震设计目标^[41]。这样的三水准设计目标是合理的, 也是经济的, 在罕遇地震作用下, 只要结构不倒塌, 便可有效地保护人员生命和财产安全, 退一步讲, 即使发生不可避免的极端情况, 如果能选择某种“合理”倒塌形式, 尽量拓展人员的生存空间, 以减少人员生命和财产损失, 对震后救灾和家园重建无疑也有重要意义。至此如何保证“大震不倒”就成为关键问题, 它也是当前的研究热点之一。结构设计时要采取措施避免建筑物倒塌, 对大量现存老旧建筑物, 也要采取相应措施防止和控制其破坏倒塌, 方法措施的选用必须是基于对结构倒塌破坏过程更深刻的认识, 这样才可能以最小的附加投资保证强震时结构不倒塌。

显然, 为达到上述目的, 只对达到倒塌状态前的情形进行动力反应分析是远远不够的, 还必须开展结构倒塌机制研究, 进行包括倒塌破坏在内的结构动力反应全过程分析, 对不同结构系统的倒塌基本现象作出机理性的解释, 并在结构倒塌过程中发现薄弱环节。这项研究对确定结构物在正常使用阶段的生存概率, 进行结构可靠度分析和诊断决策、抗震加固工作, 以及改进现有的抗震

设计以避免倒塌,都具有重要的现实意义。它还可以预测结构物在罕遇灾害作用下的倒塌过程,或者人工选择极端情况下“满意”的倒塌方式,以最大限度的减轻生命财产损失。

从结构动力反应分析数十年的研究成果看,对结构构件单元的弹性、开裂和屈服等各阶段的研究较多,对结构负刚度段反应和倒塌破坏的研究相对较少。涉及倒塌破坏的,一般是到判定结构进入倒塌状态为止,其界定通常以结构形成机构并丧失运动稳定性作为依据。有学者用结构损伤指数作为定性判断指标,但它只能定性判断结构是否倒塌,不能区分结构是整体倒塌还是局部倒塌,至于倒塌的起因、过程及结果,仍然是未知数。

钢筋混凝土框架结构的倒塌分析多以最终形成塑性(机械)铰机构为准,但在历次震害调查中,框架结构的倒塌鲜见有形成铰机构的,恰恰相反,它总是伴随着某些梁柱构件的溃断乃至错位崩塌。建筑物的倒塌远非形成一个机构那么简单,一般情况下它总是伴有结构构件的脆性破坏。脆性破坏往往会导致结构内力重分布,某些构件卸载,某些构件过载、破坏,最终形成连锁反应,结构整体或局部坍塌破坏,可称为渐进式倒塌(Progressive Collapse)。这一过程通常不可逆,同时并发剧烈的质量重分布以及撞击引起的动量和能量转移,即使荷载迅速衰减甚至反向作用,也不能扭转结构变形迅速增大最终倒塌破坏的命运。结构倒塌破坏中的位移场和质量分布不连续现象,用现有的结构分析模型很难描述,源于岩体开挖、边坡稳定分析的块体理论、离散元和结点元等方法亦难以胜任,须另辟蹊径。

0.2 文献综述

结构的地震反应取决于地面运动特性和结构物动力特性,结构地震反应分析,以及随之发展起来的结构地震倒塌破坏分析,随着人们对上述两方面认识的持续深入而发展。下面就结构倒塌破坏分析的几个主要方面作一简要评述。

0.2.1 结构和单元模型

经过三十余年的发展,钢筋混凝土结构的三种主要形式,框架、剪力墙和框架-剪力墙体系,尤以框架结构为最,积累了丰富的单元和结构试验资料,也有较多的结构单元分析模型。结构分析模型主要有层模型和杆模型两种。

层模型包括剪切模型、弯曲模型和弯剪模型三种。剪切模型忽略结构的弯曲变形,适用于侧向位移以层间剪切变形为主的结构,如高宽比较小或强梁弱柱型的框架,其刚度矩阵为三对角对称矩阵,节省存储空间,计算也比较方便。克拉夫(Clough)、林家浩等曾利用这种模型研究过钢筋混凝土框架结构的弹塑性地震反应^{[5][12]}。弯曲模型则忽略结构的层间剪切变形,将结构简化为以弯曲变形为主的悬臂杆,适用于以弯曲变形为主的结构,如纯剪力墙或由实腹筒组成的结构。弯剪模型能较好的反映结构动力反应中的弯曲成分,特别是对框架-剪力墙或强柱弱梁型框架等弯曲变形不能忽略的结构。层模型的计算,主要检验结构是否有薄弱层,通常不能得到各构件的变形和内力。朱锦心提出过一种“层间多构件剪切模型”,能解决同一层构件具有不同恢复力特性时结构地震反应的计算问题^[92]。孙业扬等人曾将杆系模型和层模型综合起来,提出一种用于高层建筑弹塑性地震反应分析的杆系-层间模型^[16]。它实质是一种子结构方法,采用吉伯森(Giberson)单分量模型描述杆件的弹塑性状态,由每片抗侧力结构(框架、剪力墙则简化为壁式框架)凝聚得到以层位移为未知量的总体刚度矩阵,最后反求杆件的变形和内力,可认为是朱锦心“层间多构件剪切模型”的推广。

为尽可能真实地表现框架和框架-剪力墙体系在地震作用下的行为,杆模型得到更为广泛的研究。就框架结构来讲,梁柱单元模型总体上可分为塑性铰(机械铰)模型和分布塑性铰区模型,类型相当丰富,并得到成功的工程应用,强震下的结构倒塌破坏分析模型业已从塑性铰机构发展到机械铰机构。

文献[43]清楚地阐述了钢筋混凝土杆模型的发展历程。按照描述钢筋混凝土弹塑性特性的不同手段,杆单元模型经历了双分量、三分量和单分量等三个阶段,其中单分量杆单元模型的应用最为广泛,其后出现了若干改进模型。杆模型的主要困难在于杆件非弹性段往往分布于一个区段,由于混凝土的开裂和钢筋的屈服,杆件刚度也随加载历史持续变化。目前的研究多集中在充分考虑钢筋混凝土的开裂和屈服特性,对杆件单元的刚度分布作不同假设而得到多种改进模型。苏科(M. Suko)和亚当斯(P.F. Adams)利用弹性段反弯点的位置确定非线性弹簧的刚度^[7],奥特尼(S. Otani)则在双分量模型的杆两端再加上非线性弹簧,并在确定单元刚度矩阵时考虑反弯点位置随加载历史的变化^[8]。潘士顿、许哲明曾提出考虑塑性铰区分布长度的“分段变刚度”杆件模型^[16],汪梦甫等人提出过五区段变刚度模型,其杆件中部为弹性段,两端分别为开裂区域和塑

性区域^[90]。

在计算分析中一般不考虑剪切变形, 如果需要, 通常是将剪切刚度处理为一定比例的弯曲刚度。康纳斯(S.K. Kunnath)等人曾在杆件两端附设非线性弯-剪弹簧以考虑剪切变形的影响^{[43][60]}。轴向变形, 一般均不作考虑, 但必须注意到在强烈地震作用下, 由于框架柱核心区混凝土压溃而引起的附加轴向变形, 有可能引发显著的内力重分布而造成结构倒塌破坏。有研究表明^{[9][19][63][76]}, 轴向荷载对节点区抗剪承载力有很大影响, 因此当结构中有较大倾覆弯矩时, 需要注意轴向拉压变化对节点承载力的不利影响, 尤其对高层建筑或高耸结构, 当竖向地震占相对优势时, 更要考虑地面运动竖向分量的影响。

结构倒塌破坏分析, 还涉及到结构构件的大位移和大转动。除了将非线性有限元技术应用于钢筋混凝土结构外, 人们发展了一些简化方法描述框架结构几何非线性特性。

其一是在建立单元模型时考虑弯矩和轴力耦合引起的附加弯矩, 笹川和郎有专著^[64], 理查德(Richard Liew)等人也作过探讨^[73], 其主要思想是考虑压弯联合作用得到杆件的有效刚度。孙纯煥利用级数考虑压弯联合作用对杆件刚度的影响, 但他采用的是预先计算的轴力, 不能考虑轴力的变化^[11]。伽奥迪(R. Gaiotti)等人曾给出附加弯矩最大不超过 $P-\Delta$ 效应的20%, 一般可不作考虑^[40]。其二即为考虑 $P-\Delta$ 效应, 一般处理为等效几何刚度矩阵, 也不能考虑轴力的变化。众多的研究表明^{[27][40][66]}, 对弹性或刚进入弹塑性阶段的框架, $P-\Delta$ 效应影响很小, 但随着结构反应非线性程度加深, $P-\Delta$ 效应的影响越来越显著, 最后将成为结构倒塌的直接原因。不考虑 $P-\Delta$ 效应, 对结构倒塌破坏状态就能作出错误评价, 结构最终也“倒”不下来。

0.2.2 结构倒塌破坏的评判

在地震作用下, 结构常常进入非线性状态并出现不同程度的破坏, 甚至完全倒塌。由于地面运动和结构动力特性的不确定性, 结构的地震破坏形式复杂多样, 如何判定结构整体和局部(构件)破坏并对破坏程度进行定量描述, 一直是地震工程理论中的重要课题。大量的震害调查及试验研究表明, 结构地震破坏形式可归结为两种类型, 即首次超越破坏和累积损伤破坏。结构最大反应和累积损伤的破坏界限相互影响, 随着结构累积损伤的增加, 结构最大反应破坏

的控制界限不断降低, 同样, 结构最大反应的增加将导致结构累积损伤破坏的控制界限持续下降^[56]。

最早出现的是强度破坏准则, 它认为最大应力或内力达到容许值时结构就破坏。强度准则没有考虑结构的塑性变形能力, 因此更适用于脆性材料, 也只能反映结构从弹性状态进入塑性状态。按强度准则设计的结构很不经济, 于是出现了基于结构极限变形能力的破坏准则, 即最大变形达到或超过极限变形能力时, 结构破坏。在我国当前的两阶段抗震设计方法中, 校核大震作用下的结构弹塑性变形, 就是采用了这个准则。很明显, 变形准则比强度准则进了一步, 但它仍然没有反映结构在地震持续时间内损伤累积的影响。

为反映最大变形和应力反复循环的综合影响, 六十年代出现了能量破坏准则, 即结构累积的变形能超过它的耗能能力时, 就认为结构破坏。辛德尼(A.G. Sidney)等人认为结构耗能集中在少数杰出塑性铰(Dominant Plastic Hinges)上, 并根据潜在塑性铰(Latent Plastic Hinges)的发展确定结构的倒塌过程^[32]。能量准则在钢结构中的应用较为成功, 但在钢筋混凝土结构中的应用受到限制, 因为钢筋混凝土材料能量关系的确定和计算都十分困难。尽管如此, 自 1977 年戈赛恩(N.K. Gosain)等人首先引入基于能量的判断指标研究钢筋混凝土构件抗剪承载力后^[9], 出现了许多基于能量原则的地震损伤评估模型。达尔温(D. Darwin)和纳麦(C.K. Nmai)引入能量耗散指数(Energy dissipation index)作为标准, 考察钢筋混凝土梁在循环荷载作用下的动力反应^[31]。帕克(Y.J. Park)等人建议用最大变形和能量耗散的线性组合确定破坏指标, 并对破坏指标进行了标定, 在它大于等于 1.0 时认为结构倒塌^{[25][26]}。但是破坏指标的确定没有足够的理论依据, 物理概念也不甚明确, 对不同的结构形式和结构材料均采用同一形式, 显然也不太合适。

对倒塌状态的界定多与结构的运动稳定性有关, 很多学者将丧失运动稳定性作为评判结构倒塌的标准, 把结构处于运动失稳时刻所处的状态定义为倒塌临界状态。冯世平在结构处于不稳定状态且其中至少一个柱端最大曲率值已达到极限曲率值的一定倍数时, 认为结构倒塌^[27]。刘春明则在引进机械铰概念的基础上, 通过考察是否形成机械铰机构来判断结构的倒塌^[35]。秦文欣把结构在第一个运动不稳定时段所处的状态定义为倒塌临界状态, 利用模糊数学的综合评判方法, 考虑影响结构倒塌破坏的主要因素(内力、变形、能量耗散等), 提出结构地震破坏多重模糊评估方法^{[37][77]}。用量化指数来判断结构是否倒塌, 不

能区分结构是整体倒塌还是局部坍塌,倒塌的起因、过程及结果也属未知。结构倒塌最终必然表现为运动稳定性的丧失,即运动稳定性的丧失是结构倒塌的必要条件,但它并不是充分条件。即使在某个时刻结构丧失了运动稳定性,由于地震荷载方向的变化和结构材料的弹塑性特性,结构极有可能恢复运动稳定性,在只考虑结构构件延性破坏时更是如此。例如框架形成塑性铰机构丧失运动稳定性后,如果发生卸载则塑性铰恢复,结构几乎完全恢复原状,说它将要倒塌岂不冤枉。实际震害调查中亦罕见有建筑物因形成运动铰机构而倒塌的。如果考虑地震持续时间对结构倒塌破坏的影响,运动稳定性分析可以帮助解释为什么主震时没有倒塌的建筑物余震时却发生倒塌,因为此时结构运动方程的解不稳定,遇有外界干扰时强烈发散,表现为建筑物倒塌。

从另一个角度说,结构倒塌可称为突变论意义下的突变,它使得结构继续“生存”,而不是通常情况下的消失,只是改变了正常的存在状态。应用精确的定量规律提供正规的突变论模型,只要方法得当,原则上就能进行精确的定量计算,从而保证模型具有预测能力,但是突变论发展至今,一直着力于数学基础的建设以及对突变现象的解释,而预测和控制突变的难度较大^[36]。本文即尝试对结构的倒塌过程进行“精确的定量计算”,从而进行跟踪预测和控制。

0.2.3 有关不连续问题的专门介绍

结构的倒塌破坏分析,涉及到不连续位移场,如何给以恰当的数学描述,又要便于数值计算,是当前的研究难点之一。

最自然的想法是对有限元方法进行改进,在错动面上定义有一定特性的结点,并通过它们的产生、移动和消失预测结构的破坏,因此又称结点元方法(Distinct Element Method or Jointed Element Method)。该方法在静力接触问题中应用较多,缺点是方法复杂,编程困难,在大位移、动力问题上的应用受到一定限制。为弥补有限元方法在处理不连续问题上的不足,人们提出了很多特殊单元,如界面单元、节理单元及奇异等参单元等等。高培正利用过渡元实现刚体元和等参元的连接,从而建立刚体界面元和有限元耦合的数值计算方法,并较成功的应用于坑道头部裂隙岩体和结构的动力响应分析^[92]。

离散元方法(Discrete Element Method)将系统离散为一个一个以弹簧相连的块体,并应用刚体软表面假设求取接触力,从而描述块体运动^[42]。它能较为准确

的模拟岩体从开裂直至塌落的全过程,可用于分析裂隙块状岩体的稳定性,在岩土工程中有较为广泛的应用。注意到混凝土结构倒塌后也形成一堆块体,浩克纳(M. Hakuno)等人将离散元方法应用到钢筋混凝土结构倒塌分析中,取混凝土骨料为圆形单元,其间设描述粘结物理特性的空隙弹簧(pore spring),以模拟混凝土的开裂过程^[72]。由于单元参数确定困难,庞大的单元数量又将引起大规模计算,应用于实际工程还要做很多工作。此外钢筋混凝土结构倒塌后结构构件大致能保持原有形态,与圆形块体假设也不尽吻合。

从岩土工程中发展起来的块体理论是离散元应用于不连续问题研究的一个重要方面。它假设块体为均匀应力状态,块体之间互不嵌入,通过迭代求得块体运动的全过程。但与实际情形有较大的出入,因为单个块体远不是均匀应力状态,块体运动过程中的相互浸彻磨损也不可避免。因此郑西涛提出接触损耗量化模型,并一次求解由变形控制的接触力,然后考虑力作用下的块体运动,必需的大规模计算通过并行方案解决^[79]。但他对块体系统整体运动的描述,仍然是基于块体的刚体假设,而且对小尺寸块体求取内部应力并预测其进一步开裂已没有实际意义。

另一个不可忽视的方法是石根华提出的流形法(Manifold Method)^[96],它包括数学覆盖(mathematical covers)和物理网格(physical mesh),前者定义位移函数,后者定义积分域,两者构成物理覆盖(physical covers),在其上定义权函数后得到总位移场,物理覆盖的共同部分构成流形法中的单元。数学覆盖和物理网格相互独立,数学覆盖可以通过物理网格的变化模拟材料节理裂隙、开裂、边界移动等等,也可以求解大位移问题。有限元方法(FEM)、DDA方法均为它的特殊情形。但是他开裂后接触的处理,仍然囿于刚体软表面假设,即通过表面法向变形系数和侵入距离的乘积确定接触力,没有任何进展。

钢筋混凝土是一种非均匀材料,将上述方法应用于钢筋混凝土结构的倒塌分析,要确定可靠的参数非常困难,除了可靠的试验数据外,还要求计算者有丰富的实践经验和扎实的理论基础,否则计算结果的可信程度会大打折扣。

0.2.4 结构分析中的接触-碰撞研究

结构物倒塌,伴随着结构刚度和质量的剧烈重分布,不可避免发生接触-碰撞,甚至因此产生附加破坏和连锁反应,导致结构塌毁。但在当前文献中,