



上海现代建筑设计(集团)有限公司技术中心
编著

动力弹塑性时程分析 技术在建筑结构抗震设计 中的应用

上海科学技术出版社



上海现代建筑设计(集团)有限公司技术中心
编著

动力弹塑性时程分析 技术在建筑结构抗震设计 中的应用

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

动力弹塑性时程分析技术在建筑结构抗震设计中的应用/上海现代建筑设计(集团)有限公司技术中心编著. —上海:上海科学技术出版社,2013. 11

ISBN 978 - 7 - 5478 - 1985 - 2

I. ①动… II. ①华… III. ①弹塑性—应用—建筑结构—防震设计—研究 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 216193 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

常熟市兴达印刷有限公司印刷

开本 787 × 1092 1/16 印张:16.25

字数:300 千字

2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5478 - 1985 - 2/TU · 186

定价:55.00 元



内容提要

本书将系统介绍建筑结构弹塑性时程分析的理论、模型、方法和典型案例。主要内容包括：性能化抗震设计的基本概念；框架结构和剪力墙结构的常用弹塑性分析模型；静力弹塑性分析、动力弹塑性时程分析、逐步增量弹塑性时程分析的基本原理、方法和精度分析；动力弹塑性时程分析在 ABAQUS 软件中的模型和算例，以及作者在上述软件中开发的适用于抗震弹塑性分析的数值模型。本书还将介绍一些结构抗震弹塑性分析的最新研究进展，包括：结构多尺度有限元计算方法、结构倒塌模拟，以及基于倒塌的结构体系安全性研究。

华东建筑设计研究院有限公司技术中心近年来在建筑结构抗震弹塑性分析模型、性能化抗震设计方法、结构震害分析和抗倒塌措施等方面开展了一系列的研究和工程实践。本书是在上述研究工作的基础上，结合结构抗震基本理论和近年来的发展编写的。在本书的编写过程中，力图做到既具有一定的理论性和前沿性，又注重工程应用，故在书中安排了大量详细的工程实践案例。

本书的主要读者对象为专业的建筑设计师、施工人员及高校相关专业的师生。



序

目前,基于性能的抗震设计理论是各国学术界广泛关注的课题,各国也投入了大量人力、财力进行相关研究,并取得大量成果。我国新版抗震规范和高层规范都增加了性能设计的专门章节,进一步明确了性能设计的基本要求、性能目标的选择方法以及基于不同性能水准的构件设计与验算方法。

随着建筑高度的迅速增长,复杂程度日益提高,从计算分析方法来看,完全采用弹性理论进行分析计算已经很难满足需求,弹塑性分析方法显得日趋重要。2010年发布的《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》规定:“对于结构的弹塑性分析,高度超过200 m应采用动力弹塑性分析;高度超过300 m应做两个独立的动力弹塑性分析。计算应以构件的实际承载力为基础,着重于发现薄弱部位和提出相应加强措施。”人们对弹塑性分析认识程度的不断加深,加上规范和审查要求的客观推动,使得动力弹塑性分析的需求不断提高,另外计算机软硬件发展速度迅猛,也给动力弹塑性分析带来了更大的发展空间。目前国内很多高校、一些大的设计院以及一些专业的咨询公司都在大力开展动力弹塑性分析的研究工作。高校的研究偏重于理论,设计单位则更侧重于方法的工程应用。可以说,动力弹塑性分析方法的应用正趋于广泛,它为设计人员了解建筑结构在罕遇地震作用下的性能提供了量化依据。

这几年,与国外相比,国内动力弹塑性分析手段应用得更为广泛。几乎大多数的超限高层,甚至一些复杂的大跨空间结构也都在采用这种分析方法。尽管如此,动力弹塑性分析方法的发展仍不够完善,主要的欠缺有:弹塑性时程分析的理论研究与实际设计应用脱节;对实用的软件、地震波的选取、建模方法及对本构关系的认识,没有成熟一致的套路,对分析结果的分析评价缺乏统一标准,市场上出现了多种弹塑性时程分析软件,一般工程师对动力时程分析的理论 and 经验不足,容易产生混乱以致安全隐患。

本书作者是国内较早开展动力弹塑性时程分析方法工程实用研究的团队之一,近些年来完成了大量的超限工程实用分析,并在这些实际工程中不断地对动力弹塑性分析方法技术进行改进,可以说积累了相对丰富的经验。本书汇聚了他们在弹塑性分析技术方面的一些观点、经验和研究成果,很多方面都介绍得很细,并且大多都是从工程实用的角度出发,可操作性很强。本书很适合工程人员去读,高校研究生和专门从事抗震分析的研究者也可以从中获得很好的借鉴。

汪大绥

2013年10月7日

目 录

1 绪论 001

- 1.1 钢筋混凝土结构有限元分析发展概况 002
- 1.2 高层建筑结构弹塑性抗震设计、分析方法 003
 - 1.2.1 结构动力计算模型 004
 - 1.2.2 单元模型 004
 - 1.2.3 结构和构件的恢复力模型 005
 - 1.2.4 弹塑性时程分析与弹塑性静力分析 008

2 混凝土和钢材的本构关系 011

- 2.1 混凝土单轴受力本构关系 012
 - 2.1.1 单轴受拉 012
 - 2.1.2 单轴受压 014
 - 2.1.3 重复荷载作用下混凝土应力-应变关系 017
 - 2.1.4 反复荷载作用下混凝土应力-应变关系 019

2.2 混凝土损伤模型建立	023
2.2.1 混凝土损伤模型概述	023
2.2.2 混凝土损伤及刚度退化	024
2.3 建议采用的混凝土本构模型	027
2.3.1 单轴受拉混凝土应力-应变关系	027
2.3.2 单轴受压混凝土应力-应变关系	028
2.3.3 混凝土拉压损伤系数	028
2.3.4 拉压刚度恢复	029
2.4 混凝土本构模型在 ABAQUS 程序中的实现	029
2.4.1 ABAQUS 用户材料子程序的结构和接口	029
2.4.2 ABAQUS 用户混凝土材料子程序的连接与应用	032
2.5 反复荷载下钢筋本构关系	033
2.6 钢管混凝土本构的基本理论	033
2.6.1 蔡绍怀理论	033
2.6.2 钟善桐理论	034
2.6.3 周绪红和 Mander 理论	036
2.6.4 韩林海理论	036
2.7 小结	038

3 基于截面纤维模型的梁柱单元弹塑性分析

039

3.1 梁单元	040
3.1.1 截面纤维单元模型基本假定	040
3.1.2 截面纤维单元模型的特点	041
3.1.3 截面纤维单元模型的建立	042
3.1.4 计算实例验证	049
3.2 二维墙板单元	055
3.2.1 分层壳单元基本介绍	055
3.2.2 剪力墙算例(计算模拟与试验对比)	056
3.3 小结	059

4 低周反复加载下平面框架受力分析 061

4.1 平面框架试验研究	062
4.1.1 试验概况	062
4.1.2 试验过程及现象	064
4.1.3 试验结果分析	065
4.2 结构模型非线性数值分析	070
4.2.1 数值计算模型建立	070
4.2.2 单向水平荷载下结构的反应	071
4.2.3 反复荷载下结构的反应	076
4.3 小结	078

5 ABAQUS 动力时程分析方法 079

5.1 动力学问题基本方程	080
5.2 时间积分方法	080
5.2.1 Newmark 时间积分方法	081
5.2.2 显式 Newmark 时间积分方法	083
5.2.3 隐式 Newmark 法	085
5.3 自动时间步长控制方法	086
5.3.1 自动时间步长控制方法的运用	086
5.3.2 自动时间步长控制原理	086
5.4 隐式算法中自动时间步长运用	087
5.5 临界稳定步长法探讨	088
5.6 隐式算法与显式算法动力学分析特点	088
5.7 地震波	089
5.7.1 输入地震波的选择	089
5.7.2 人工地震波合成原理	091
5.8 阻尼	092

5.8.1 阻尼矩阵	093
5.8.2 阻尼比	094
5.8.3 阻尼比取值	096
5.9 小结	096

6 动力弹塑性分析影响因素分析

099

6.1 材料本构的影响	100
6.1.1 钢管混凝土材料程序的开发	100
6.1.2 基于不同理论的对比	100
6.1.3 基本构件算例试验对比	101
6.1.4 黏结滑移的探讨和程序实现	105
6.1.5 某钢筋混凝土悬臂柱的算例对比	105
6.2 模型对计算结果的影响	107
6.2.1 单元类型对计算结果的影响	107
6.2.2 单元尺寸对计算分析的影响	114
6.2.3 次梁简化对计算结果的影响	118
6.2.4 连梁模拟方法对计算结果及性能评估的影响	123
6.2.5 楼板考虑方式的影响分析	128
6.2.6 钢筋的模拟方式讨论	134
6.3 阻尼的考虑方式对计算结果的影响	135
6.3.1 大震下阻尼耗能与材料弹塑性耗能的对比	135
6.3.2 一种新的阻尼考虑方式	144
6.3.3 阻尼考虑的建议	152
6.4 不同积分方法的影响	153
6.4.1 采用显式算法需要处理的几个问题	153
6.4.2 算例比较	154
6.4.3 积分方法选用建议	155
6.5 施工过程模拟的影响	155
6.5.1 施工过程模拟概述	155

6.5.2 施工过程分析原理及特点	156
6.5.3 ABAQUS 中的施工顺序模拟	160
6.5.4 超高层结构施工过程的弹塑性分析实例	161
6.6 小结	169

7 结构抗震性能评价 **171**

7.1 总体性能评价	172
7.1.1 弹塑性位移评价	172
7.1.2 薄弱环节判断	179
7.1.3 破坏形式和破坏顺序	180
7.1.4 框架分担地震力的比例	180
7.1.5 倒塌判断	182
7.2 构件性能评价	184
7.2.1 规范中关于性能设计的规定、理解及存在的问题	184
7.2.2 梁柱构件性能评价	187
7.2.3 墙板构件性能评价	194
7.2.4 杆件受压失稳在整体分析中的描述方法	198
7.3 小结	204

8 央视新台址结构弹塑性时程分析实例 **205**

8.1 央视新台址结构弹塑性时程分析概述	206
8.2 整体计算模型的建立	208
8.2.1 计算模型的转换	208
8.2.2 钢筋混凝土梁、柱截面	210
8.2.3 钢梁、柱和斜撑截面	211
8.2.4 型钢混凝土柱截面	211
8.3 施工过程模拟	211
8.4 结构动力特性	213

8.5 结构弹塑性时程分析	215
8.5.1 整体坐标轴约定	215
8.5.2 地震波	215
8.5.3 结构的变形	218
8.5.4 基底反力时程	222
8.5.5 最大层间位移角曲线	222
8.5.6 角部支撑点 z 向反力时程	224
8.5.7 结构构件的塑性变形	226
8.6 关于结构弹塑性变形的进一步探讨	237
8.6.1 算例 1——钢筋混凝土平面框架	237
8.6.2 算例 2——带钢斜撑钢筋混凝土平面框架	238
8.7 小结	240
参考文献	241



1

绪 论

1.1 钢筋混凝土结构有限元分析发展概况

钢筋混凝土结构有限元的历史可以追溯到 20 世纪 60 年代,1967 年美国学者 Ngo 和 Scordelis 在 ACI 杂志上发表了一篇有关这一内容的论文^[1]。在他们的研究中,将钢筋和混凝土划分为三角形单元,按平面应力问题和线弹性理论分析混凝土和钢筋的应力,研究主要还是基于线弹性理论,但是他们根据试验观察结果,在混凝土梁中预先设置了裂缝,并且用无几何尺寸的弹簧来模拟钢筋和混凝土之间的黏结关系。这一研究获得了很大的成功,引起了很大的反响。自此以后,许多学者在这一领域进行研究,发表了大量研究成果及专著。

1968 年 Nilsson 发展了 Ngo 等人的工作^[2],将钢筋混凝土之间的非线性黏结关系和混凝土本身的非线性应力应变关系引入有限元分析,当钢筋混凝土开裂后就重新划分网格,把裂缝置于单元边界上。Franklin 于 1970 年首先引入“弥散裂缝”的方法^[3],可自动跟踪裂缝的发展。这一方法为有限元分析实际钢筋混凝土结构提供了有力的工具,获得了广泛的应用。20 世纪 70 年代初期,Zienkiewicz 领导的有限元研究小组将等参单元用于钢筋和混凝土的组合单元中,并提出了一个适合于混凝土的屈服准则,在塑性增量理论基础上提出了一个本构关系模型,并对核电站的钢筋混凝土安全壳进行了分析^[4]。1969 年已有学者用分层法来建立钢筋混凝土梁的弯曲单元,稍后 Lin 和 Scordelis 将分层法用于板壳单元等弯曲构件^[5]。这一方法至今还广泛用于梁、钢架、拱等杆系结构中。Pecknold 和 Darwin 建议了正交异性的本构关系,分析了剪力墙在反复荷载下的反应^[6]。美国加利福尼亚伯克利分校的地震研究中心对钢筋混凝土框架结构发表了一系列动力分析的研究报告。美国土木工程师学会混凝土与土工结构分会于 1982 年组织许多学者编写了关于“钢筋混凝土有限元分析”的技术现状报告,可以说是对 1982 年以前所取得成果的一次大总结。自此以后,各国学者除了在混凝土本构关系的表述和试验研究方面继续进行更深入的研究之外,钢筋混凝土结构非线性有限元分析进一步向实用方向发展,研究领域也进一步扩大,如:结构动力荷载作用下的非线性研究;高强混凝土和受约束混凝土结构的非线性有限元分析;材料非线性、几何非线性及时间因素的综合影响以及钢筋混凝土结构的非线性分析等。目前已经有一些国际规范开始引入非线性有限元分析。

我国是应用钢筋混凝土结构最广泛的国家,自 20 世纪 70 年代开始对钢筋混凝土的有限元分析进行了广泛而深入的研究,我国虽然没有专门召开过钢筋混凝土非线性有限元分析方面的会议,但这方面的研究工作在计算力学、结构工程、地震工程等全国性的学术会议中都有所反映,也出版了钢筋混凝土结构非线性有限元分析方面的专著^[7-9],取得

了许多重要成果。

尽管钢筋混凝土有限元分析得到了深入的研究和广泛的应用,但仍有许多问题需要进一步研究。例如:

(1) 混凝土的本构关系。在复杂应力状态下的破坏准则和应力-应变关系,以及钢筋与混凝土之间的黏结关系,虽然已进行了不少试验和理论研究工作,但还是不够完善,数量较多的还局限于单向和双向荷载。在复杂应力状态下的试验数据还很不充分^[10-13]。近十年来,许多学者提出了不少破坏模式和应力-应变关系的计算公式^[14-16],但是由于试验方法不同,加上混凝土材料变异性很大,所得结果往往不大一致。许多问题还需要进一步探讨。

(2) 理论框架。从理论方面来看,尽管有了很多理论可供应用,但对于像钢筋混凝土这样具有复杂本构关系的结构,尚需进一步研究。例如,混凝土的受压或受拉全过程曲线,都反映有下降阶段。用弹塑性理论分析时,如何处理这一“软化”现象仍是一个困难的问题。又如断裂力学对于处理已经存在的单个裂缝的扩展,是相当有效的,但对于经常有成批裂缝存在的钢筋混凝土结构又该如何处理也是需要深入研究的问题。近年来,有许多学者将损伤力学用于混凝土结构分析,这方面的课题确实吸引了不少学者,研究工作相当活跃,也有了一些成果^[17-26]。

(3) 数值方法的计算精度。在混凝土结构的有限元分析中,由于非线性因素很多,为了考虑这些非线性因素往往要引入许多参数,这些参数还可能相互影响,有的还很难由试验直接测定,再加上混凝土材料本身的复杂性和离散性,有些断裂和破坏的机理还不完全清楚,所以对结构的非线性分析结果往往呈现出较大的变化幅度,这也是在今后一段时间内需要重点研究和改进的问题^[22]。

1.2 高层建筑结构弹塑性抗震设计、分析方法

在强烈地震作用下,建筑结构的破坏和倒塌是造成人员伤亡和经济损失的直接原因,因此如何防止结构物在强震时的倒塌是抗震设计研究的重点。结构的弹塑性地震反应数值模拟法为这方面的研究工作提供了强有力的手段。它不仅能够预测震害结果和对实际震害结果进行计算分析,而且能够详细了解结构在地震环境下反应的全过程,寻找到不利反应的薄弱环节,而且由于地震反应的复杂性,这一方法还可以避免试验时一些不明确干扰因素的影响,并且可以反复改变各种参数,而在较短时间内得到结果。

高层建筑结构的弹塑性抗震分析是一项技术性很强的工作,从结构动力计算模型的简化、单元模型和恢复力模型的确定、地震波的选用、计算方法的选择以及计算结果的分

析,都需要仔细加以研究^[27-30]。

1.2.1 结构动力计算模型

钢筋混凝土弹塑性地震反应的力学模型大致可以分为以下三类,即层模型、平面杆系模型、空间有限元模型^[31-33]。

层模型又可分为平动模型及平扭模型,平动模型认为结构各楼层仅在两正交水平方向有位线位移产生,不考虑结构的整体扭转,该模型主要用于分析无质量偏心的高层结构动力反应。这种计算模型在早期的结构动力分析模型中常可以见到,它是以结构层为计算单元,忽略梁的轴向变形,结构的变形主要是层之间的错动,且这种错动可视为层间变位的结果,因此,可将各层所有的抗侧力构件等效为一个总的层间抗剪构件来进行计算。R. W. Clough、尹之潜、林家浩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^[34-36]。在强烈地震作用下,结构各层间刚度或杆件刚度不断变化,因此结构各楼层刚度中心也不断变化,刚度中心与质量中心总是不同的,这表明结构的整体扭转不可避免。尤其是高宽比较大的结构,扭转的影响可占结构总反应幅值的20%。为此研究者发展了平扭模型。平扭模型仍采用刚性楼板假设。沈聚敏应用该模型进行了非线性地震反应计算^[37]。这种计算模型的缺点显而易见,它仅适用于以剪切变形为主的规则结构,并且采用这种计算方法只能得到结构在地震作用下的宏观反应,如只能给出结构薄弱层,无法提供具体构件的内力和变形以及由地震作用引起的竖向荷载变化对构件屈服的影响。

平面杆系模型是由可带刚域的杆件组成的平面框架结构,它克服了层模型的诸多弊端,杆件可同时考虑轴向、弯曲和剪切变形,框架节点有水平位移、竖向位移和转动三个自由度,杆件恢复力特征曲线有弯曲屈服型和压弯屈服型两种。计算中可得到各杆件在地震作用下的内力和变形全过程,判断每根杆件的开裂和屈服与否,以及各杆件屈服的先后顺序,从而了解整个结构的破坏形态。

空间有限元模型是近年来发展起来的一种计算模型,这种模型能为结构设计提供比较确切的设计依据^[38],却没有在实际工程中得到广泛应用,原因是该模型计算工作量太大,在微机上实现有困难。但随着计算机技术的飞速发展,计算机的计算速度及容量均有很大的提高,这为空间有限元模型用于实际工程设计逐步扫清障碍。目前,已有很多学者对空间有限元模型进行了弹塑性性能研究^[39-42]。

1.2.2 单元模型

当对结构进行弹塑性动力反应分析时,有了力学模型后,就要建立动力方程的整体刚度矩阵。对串联多自由度的剪切型、弯剪型模型而言,只要知道各层间的滞回曲线或各层

剪切弯曲构件滞回曲线的特征参数,就容易确定各个变形阶段的单刚,进而集成总刚。但对杆系模型来说,问题就复杂多了。在杆系模型中对构件单元力学模型的模拟主要存在两个难点:① 构件截面非弹性刚度随受力历史而变化;② 构件沿杆长的刚度分布应与内力分布一致。

Wen 和 Janssen 曾经提出过一种将构件沿长度分为数段,每段弯矩的曲率关系为双线型的模拟模型。显然这种模型对复杂模型是不便于应用的。Clough、Benuska 和 Wilson 建议了一种双分量模型,用两个平行的单元来模拟构件,一种是表示屈服特性的弹塑性单元,一种是表示硬化特性的完全弹性单元。但这一模型的主要缺点是适用范围受到限制,它不能模拟连续变化的刚度,不能考虑刚度退化,只适用于双线型模型。Giberson 提出了一种单分量模型,只利用一个杆端塑性转角就刻画了杆件的弹塑性性能,杆件两端的弹塑性特征参数是互相独立的。恢复力模型可以是折线型,也可以是曲线型,适用范围较广。戴国莹、钟益村推导了不同约束条件下和不同弹塑性状态下统一的单分量模型的刚度矩阵。Suko 和 Adams 依据初始弹性阶段反弯点的位置定义了力的分布,确定弯矩-转角的弹性刚度。大多数文献中则是定义反弯点在构件中的中点,依此来确定弯矩转角关系。事实上在弹塑性反应过程中,反弯点的位置是变化的,上述方法只是一种近似处理。Takizawa 假定弯曲刚度沿杆长的分布是杆端受弯的函数,提出了一种更适用于墙构件的多弹簧模型^[43]。Otonani 和 Sozen 认为构件的刚度是构件受力和弯曲折点位置的函数,提出了几种弹簧模型。潘士劫、许哲明、沈聚敏、张桐生也曾用“变刚度”的分布塑性铰区模型研究过结构的弹塑性反应。孙焕纯用取平均刚度值的方法来模拟构件的力学特性。这一方法没有考虑刚度沿杆长的变化。近来,人们提出了一种纤维模型,每个截面被分成许多层或纤维,并根据钢筋混凝土的本构规律确定截面的弯矩曲率关系,然后,沿杆长积分即可求得杆件的刚度。由于建立各杆件的刚度矩阵要在每一个时间步长中进行大量计算,所以这一方法在过去被人们认为是不经济的。

综上所述,构建单元的力学模型可主要分为四类:分布塑性铰模拟、集中塑性铰模拟、不考虑刚度沿杆长分布的平均值模拟以及按截面的应力-应变本构关系确定杆件刚度。这四类方法各有优缺点。第一、第四类方法虽然计算较繁,但精度高,且能模拟塑性铰区发展情况,第二、第三类计算简单,但精度稍差。

1.2.3 结构和构件的恢复力模型

恢复力是指结构或构件在外荷载作用下抵抗变形的能力。这反映了结构或构件受荷和变形之间的关系。实际问题中的荷载变形曲线是非常复杂的,为了对结构进行弹塑性反应分析,对实际的恢复力特性进行了大量的简化处理,成为一定的恢复力曲线模型。这