

# 动力弹塑性分析在结构设计中的理解与应用

Comprehension and Application of Dynamic Elasto-plastic Analysis on Structural Design

张 谨 杨律磊 等 编著



中国建筑工业出版社

# 动力弹塑性分析在结构设计中的 理解与应用

Comprehension and Application of Dynamic Elasto-plastic Analysis on Structural Design

张 谨 杨律磊 等 编著



中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

动力弹塑性分析在结构设计中的理解与应用/张谨, 杨律磊等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 5  
ISBN 978-7-112-19295-3

I. ①动… II. ①张…②杨… III. ①弹塑性-应用-工业设计-结构设计-研究 IV. ①TB47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 060896 号

动力弹塑性分析已成为结构性能化设计的重要手段。本书以数值仿真技术特征为切入点, 从数值模型建立、数值分析方法、分析结果解读等几方面, 全面介绍了动力弹塑性分析的背景知识、计算原理和应用方法; 对目前应用中存在的问题也进行了研究探讨, 并以实际工程为基础, 通过对比不同分析软件, 对动力弹塑性分析在工程中的设计与研究应用提供了详细的案例资料。

本书既可作为工程设计人员快速了解并掌握动力弹塑性分析基本知识的工具书, 也可供专业从事分析工作的技术人员参考。

责任编辑: 刘婷婷 刘瑞霞

责任校对: 陈晶晶 关 健

## 动力弹塑性分析在结构设计中的理解与应用

Comprehension and Application of Dynamic Elasto-plastic Analysis on Structural Design

张 谨 杨律磊 等 编著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 $\frac{3}{4}$  字数: 415 千字

2016 年 10 月第一版 2016 年 10 月第一次印刷

定价: 42.00 元

ISBN 978-7-112-19295-3

(28559)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 序一

我国《建筑抗震设计规范》GBJ 11—89 首次提出了“小震不坏、中震可修、大震不倒”的三水准抗震设防目标以及“小震作用下的截面抗震验算，大震作用下抗倒塌变形验算”两阶段抗震设计方法。同时也提出了对于特别不规则的和较高的高层建筑采用时程分析方法进行补充验算的要求。《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001 吸取了国内外重大地震，特别是 1995 年日本阪神地震和 1999 年中国台湾集集地震的建筑震害经验，并借鉴了美国 UBC (Uniform Building Code) 和 IBC (International Building Code)、日本 BSL (建筑基准法) 和欧洲 Eurocode Part 8 等国家或地区的规范，引入了大震作用下结构验算的静力非线性方法 (Push-over Method)，同时对结构弹塑性时程分析中地震动输入、计算模型及软件作了基本规定。在《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010 中进一步作了细化，并新增了建筑抗震性能化设计的原则要求和参考指标，如：地震动水准、预期破坏目标、构件承载力要求和变形控制指标、弹塑性分析模型和基本方法、层间位移角和破坏状态的对应关系等，向基于性能要求的抗震设计迈出了重要的一步。

自 20 世纪 80 年代起，我国的工程技术人员陆续引进并开发了建筑结构专用的动力弹塑性分析软件，从早期用于平面结构到后来用于多、高层建筑三维结构的程序等。近年来更是开发出一些力学模型更为精细多样和求解效率更高的结构动力弹塑性分析商业化软件，并在超高层建筑抗震设计工作中得到应用。在为我国建筑结构弹塑性分析技术及软件的快速发展和广泛应用感到欣喜的同时，也应看到不同计算软件的数值模型及结果表达具有共同点及差异性，在实际应用时应准确区分和把握。例如，在进行结构时程分析时，输入地震波数量和特征应满足一定的统计要求，还要区分是基底激励还是惯性力激励，这对动力方程中阻尼力的计算会产生一定的影响；在建立数值模型时，应了解模型假定与试验的对应关系，如集中塑性铰模型对应于构件往复加载试验，纤维模型则对应于材料的单轴应力应变试验；在对分析结果进行解读时，应判断关键构件和节点的损伤、残余变形数值大小、能量耗散比例分布、结构刚度退化程度等，从而评估结构是否达到抗震性能目标。

多年以来，中衡设计集团股份有限公司在工作中对动力弹塑性分析技术作了许多的研究，在应用不同软件的过程有许多心得体会，积累了不少经验。为了与工程界同行分享这些经验和知识，特将有关的知识框架、问题与解决办法进行了梳理，编写了本书。此书可作为动力弹塑性分析的工具书，对从事结构抗震设计与研究的结构工程师、研究人员及高校结构工程专业的研究生有较高的参考价值。

王亚勇

全国工程勘察设计大师

国家一级注册结构工程师

中国建筑科学研究院研究员

博士生导师

2016 年 9 月于北京

## 序二

建筑结构的抗震设计通常按规范方法 (Prescriptive Method) 进行。此方法融入了地震工程领域的研究成果及工程实践经验,通过制定一系列设计规则,如地震作用折减系数,限制建筑的高度、不规则性、扭转周期比、扭转位移比、剪重比和刚重比,以及双重抗侧向力结构体系中的框架剪力调整等,来实现结构抗震设计目标——减少经济损失、避免人员伤亡。其他工程领域的设计,如汽车结构的抗碰撞设计等,则多采用性能化设计方法 (Performance-Based Method)。非性能化的规范设计方法在建筑结构设计中的应用较为普遍,但是随着社会需求的提升与工程实践的发展,其局限性和缺陷也逐渐被结构工程师们认知。首先,不在规范适用范围内的建筑,如北京国贸三期主塔楼(高度超限)、中央电视台新总部大楼和深圳证券交易所新运营中心大楼(不规则性超限)、鸟巢(大跨度及非常规建筑结构)等,其抗震设计难以在规范框架内完成。其次,随着相关领域研究成果和工程实践经验的不断积累,规范逐步得到修订与改进。按旧版规范设计的现有建筑,自然会有一项或多项不满足现行规范的规定。虽然结构工程师们可以有较高信心认为满足规范各项规则的设计能够实现抗震设计目标,但是满足规范只是手段并非目的,不满足者也并非意味着不能实现抗震设计目标。因此结构工程师们需另辟蹊径,建立一个性能化的抗震设计方法体系来克服规范方法的局限性和缺陷,以便解决在规范框架内难以解决的工程问题。

1995 年加州结构工程师学会的 Vision 2000 委员会发表了著名的《建筑结构的性能化地震工程》(Performance-Based Seismic Engineering of Buildings) 研究报告,不久后 ATC-40 报告、FEMA 273 和 FEMA 356 指导文件相继发表,2010 年加州大学伯克利校区的太平洋地震工程研究中心 (PEER) 发表了《高层建筑性能化抗震设计指南》(Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings),建立了第一代建筑性能化抗震设计方法的框架。过去二十年里,性能化抗震设计方法在国外现有建筑结构的抗震鉴定、加固、新建高层和超高层建筑结构的抗震设计中得到了越来越多的应用;在国内,近十几年里超限高层与超高层建筑结构的抗震设计也越来越多地采用了性能化抗震设计方法。

非线性动力时程分析是性能化抗震设计方法的一个重要组成部分。在设防地震与罕遇地震作用下,结构的地震响应通常是非线性的,不仅结构材料进入弹塑性工作阶段出现强度和刚度退化与结构性破坏,而且侧移引起的几何非线性效应也更为显著。结构性破坏程度取决于结构整体与构件的弹塑性变形,计算结构在强震作用下的此类响应参数也就成为评定结构破坏程度即抗震性能的先决条件。传统的线性分析方法不再适用,必须采用非线性动力时程分析方法来计算与结构性破坏程度相关的结构变形响应参数,如弹塑性层间位移角、梁及柱端部和剪力墙底部的塑性铰转角、钢中心支撑与防屈曲支撑的轴向伸长与缩短等;以及避免脆性破坏所需进行的能力保护设计所需要的与构件脆性破坏相关的内力响应参数,如塑性铰区的剪力值、连接与节点的内力值等。

非线性动力时程分析以现代计算力学为理论基础,分析模型同时考虑材料与几何非线性力学行为。单元与材料的弹塑性本构关系建立在构件或材料的试验室往复静载试验、或拟动力试验、或振动台试验结果基础之上。因此,非线性动力时程分析方法有坚实的理论及试验验证基础,结构工程师们可将此方法看作一个数值虚拟试验室并用来检验所设计的建筑结构的抗震性能。从20世纪70年代初著名学者、加州大学伯克利校区 Powell 教授开始研发 DRAIN-2D 及后续系列软件到现在国际与国内广为应用的 PERFORM-3D,建筑结构的非线性动力时程分析方法及其计算软件已有四十多年的研发历史。

美国从2006年开始用了六年时间完成了 ATC-58 研究项目,建立了第二代建筑性能化抗震设计的理论与方法体系。与确定性的第一代方法不同,第二代方法是不确定性的,考虑地震动的不确定性用至少7~11组或更多组与目标反应谱一致的真实地震记录作为输入,用增量动力分析方法(Incremental Dynamic Analysis)计算8个地震动烈度作用下结构与构件的各类非线性响应参数,并用易损性函数(Fragility Function)给出结构和构件达到一系列破坏状态的概率分布。可见非线性动力时程分析方法在第二代性能化抗震设计方法中得到更广泛的应用。

笔者从20世纪80年代中期开始学习非线性动力时程分析方法并应用于硕士、博士学位论文及博士后研究员的研究工作中。1996~2011年在英国伦敦奥雅纳工程顾问公司的高技术与研究部(Advanced Technology + Research, Ove Arup & Partners)任职结构地震工程专家期间,领导结构地震工程团队主持研发了多个大型通用非线性动力有限元软件 LS-DYNA 中用于结构非线性动力时程分析的单元、材料与阻尼模型及其二次开发编程,并主持了众多奥雅纳全球工业、民用、桥梁与基础设施结构工程项目的非线性动力时程分析及性能化抗震设计,包括多个国内已建成的超限建筑项目,如国家体育场(鸟巢)、中央电视台总部大楼、深圳证券交易所运营中心等。笔者也曾在几个高层建筑项目上与国内结构工程师合作,相互验证对比用 LS-DYNA、PERFORM-3D 和 ABAQUS 独立进行非线性动力时程分析所得结果。

最近几年在与国内同行的交流过程中,很欣喜地看到中衡设计集团的结构工程师们在自己的工程项目设计实践中不仅应用非线性动力时程分析方法,而且对应用过程中碰到的一些议题还进行了细致与深入的研究与探讨,更进一步在 ABAQUS 软件平台上研发新的分析及前、后处理功能及其二次开发编程实施。现在,他们将自己数年来应用非线性动力时程分析的经验体会、研发成果及工程项目实例编著成《动力弹塑性分析在结构设计中的理解与应用》一书与国内结构工程界同行分享。本书图文并茂、深入浅出,既有分析方法的数学与力学理论背景,也有实际工程项目应用实例。介绍了构件及材料弹塑性恢复力模型及结构整体分析模型的建模过程,也讨论了非线性动力时程分析结果的理解及其在结构抗震性能评定中的应用。笔者相信此书的出版对从事结构抗震设计与研究的结构工程师、研究人员及高校结构工程专业的研究生有较好的参考价值,并将对性能化结构抗震设计及非线性动力时程分析在国内结构工程界的推广与应用起到积极的促进作用。因此,笔者毫无保留地将此书推荐给国内的结构工程师们。

段小廿 博士 英国注册结构工程师  
合伙人, 结构工程师  
福斯特及合伙人有限公司  
2015年12月于英国伦敦

## 前言

随着建筑形式的日益丰富多样,以及建筑结构在地震作用下安全性能需求的不断提升,基于性能的抗震设计受到越来越高的重视。动力弹塑性分析作为结构分析技术发展的重要成果,也是数值仿真技术在工程领域的典型应用,目前在结构性能化设计中已成为不可或缺的重要手段。对于越来越多超高、大型和复杂建筑的结构设计与研究而言,更是不可回避、亟需了解掌握的方法。但由于其涉及的理论知识、技术途径,以及软件应用均不同于传统的静力或线性分析,目前大部分工程师和技术人员很难深入了解和掌握。

笔者在某次参加由“建筑结构”杂志社组织的“动力弹塑性分析技术研讨沙龙”中了解到,不少工程师表示对“动力弹塑性分析”技术是“雾里看花,越看越花”。有人认为该技术是“无所不能”的“神器”,也有人认为其不过是为超限审查过关而算的一笔“糊涂账”。而笔者经与团队多年的工程应用与学习,认为对于动力弹塑性分析的认识不应被“神化”,更不应被“妖化”。从应用角度,它其实可被理解为基于计算力学、数值分析、材料力学、结构试验等多领域的研究深入,以及计算机软硬件技术的快速发展而形成的一种“数值仿真试验”。在设计与研究中有其独特优势,也有其不完善之处。对于应用者和软硬件有较高的要求,且正是因为这种高要求,技术掌握相对处于较封闭的状态。因此目前行业内迫切需要总结切实可行的弹塑性时程分析方法和软件应用准则,并应总结工程应用经验来供从业者相互探讨交流。

本书在参考大量文献以及多年实际工程应用的基础上,以数值仿真技术特征为切入点,从数值模型建立、数值分析方法、分析结果解读等几方面,深入浅出地介绍了动力弹塑性分析的相关知识及运用要点。书中第1章首先描述了数值仿真技术和结构分析技术方面的发展应用,介绍了对“动力弹塑性分析”基本概念的正确理解及相关应用特点,并对比了常用的几类分析软件。第2章至第4章为数值模型建立、数值分析方法及分析结果解读,全方面介绍了动力弹塑性分析的背景知识、计算原理和应用方法。其中数值模型建立方面,分别对基于构件、基于截面和基于材料的不同模型、滞回规则、几何非线性以及地震作用输入等作了较详细的介绍,并基于不同软件(ABAQUS、PERFORM-3D和MIDAS系列等)分别描述了整体数值模型的建立过程;在数值分析方法方面,书中以直接分析法为重点,详细描述并对比了隐式和显式方法的计算原理和特点;对于分析结果的解读,本书对如内力、位移和能量等指标的宏观结果,以及构件损伤等微观结果都作出了完整描述。此外,在第5章对目前应用中存在的问题进行了研究探讨,并涉及更为深入和前沿的研究进展。以中衡设计自行开发的BEAM\_FIBER和MTATB 2013等为例,对各类用户自定义材料、单元及有限元前处理、后处理程序进行了介绍。最后,在第6章以实际工程案例为基础(均已实施或已通过抗震超限审查),采用不同分析软件,对动力弹塑性分析在工程中的设计与研究应用提供了较为详细的案例资料。

本书既可作为工程设计人员快速了解并掌握动力弹塑性分析基本知识的工具书,也可

供专业从事分析工作的技术人员参考。

本书是“江苏省生态建筑与复杂结构工程技术中心”系列工作报告之一。“江苏省生态建筑与复杂结构工程技术中心”由中衡设计集团股份有限公司与国内外多个重点院校、科研机构和专家顾问团队密切合作建立，致力于从工程实际应用角度出发，对生态建筑技术、复杂结构计算分析、数字化建模与参数化设计等方面开展较深入的研究，并形成工作报告，供广大一线工程设计人员交流探讨。

参与编写本书的成员有张谨、杨律磊、谈丽华、路江龙、朱寻焱、龚敏锋和郑志刚等，分工如下：张谨策划全书内容及纲目制定；张谨、杨律磊完成主要章节编写；朱寻焱参与编写基于 MIDAS、PERFORM-3D 软件应用及第 5、6 章的部分内容；龚敏锋、郑志刚参与编写基于 ABAQUS 软件应用，第 2、5、6 章的部分内容及“主要符号”；谈丽华、路江龙参与第 6 章的工程案例资料编写；全书最终由张谨统一定稿。另第 6 章案例工程结构设计由张谨、谈丽华和路江龙主持负责。

本书在完成过程中得到了王亚勇大师和段小甘博士的悉心指导，并给出了宝贵意见，对此深表感谢！王亚勇大师是中国著名工程抗震专家，长期从事结构工程抗震和灾害学科与实践，在结构振动理论、强地面震动、现代城市防灾减灾系统工程、高层建筑结构抗震设计、软件技术等领域具有很高的学术水平。段小甘博士自 20 世纪 80 年代中期在清华大学和伦敦大学开展性能化结构设计及非线性动力时程分析研究，之后在英国伦敦奥雅纳工程顾问公司高技术与研究部（Advanced Technology + Research, Ove Arup & Partners）任职结构地震工程专家，现为英国福斯特及合伙人建筑事务所（Foster and Partners）伦敦总部合伙人。对动力弹塑性分析与性能化设计有非常深入的研究与应用，主持研发了有限元软件 LS-DYNA 中用于结构非线性动力时程分析的单元、材料与阻尼模型，并应用到包括多个国内已建成的超限建筑项目，如国家体育场（鸟巢）、中央电视台总部大楼、深圳证券交易所运营中心等，可以说是深耕于该专业领域的专家翘楚！

王亚勇大师和段小甘博士撰写了本书的序言部分，序言中对性能化设计与动力弹塑性分析方法的发展与应用作了翔实介绍，是本书的重要组成部分。而本书许多工程案例的技术也得到超限审查组如王亚勇、傅学怡、汪大绥等大师专家的指导，在此也表示诚挚感谢！本书成稿后，中国建筑工业出版社编辑刘瑞霞、刘婷婷和陈晶晶等同志以高效的工作，为本书正式出版做了细致的校审工作，在此一并表示感谢。

限于编者水平，书中难免有诸多不妥之处，敬请同行读者批评指正，也欢迎共同交流，改进提高！

张谨

中衡设计集团股份有限公司总工程师

江苏省生态建筑与复杂结构工程技术研究中心 主任

研究员级高级工程师

国家一级注册结构工程师

英国注册结构工程师

2016 年 1 月 8 日于苏州

## 主要符号

|                |               |
|----------------|---------------|
| $a$            | 加速度           |
| $A$            | 横截面面积         |
| $A_c$          | 核心混凝土横截面面积    |
| $A_s$          | 钢管横截面面积       |
| $C_d$          | 材料波速          |
| $[C]$          | 阻尼矩阵          |
| $d$            | 损伤因子          |
| $d_c$          | 受压损伤因子        |
| $d_t$          | 受拉损伤因子        |
| $D_c$          | 受压损伤演化参数      |
| $D_t$          | 受拉损伤演化参数      |
| $E$            | 弹性模量          |
| $E_c$          | 混凝土弹性模量       |
| $E_d$          | 损伤后的弹性模量      |
| $E_s$          | 钢材弹性模量        |
| $f$            | 频率            |
| $f_d$          | 阻尼力           |
| $f_s$          | 恢复力           |
| $f_y$          | 钢材屈服强度        |
| $f_I$          | 惯性力           |
| $f_{c,r}$      | 混凝土的单轴抗压强度代表值 |
| $f_{t,r}$      | 混凝土的单轴抗拉强度代表值 |
| $f_{ck}$       | 钢材轴心抗压强度标准值   |
| $[F]$          | 柔度矩阵          |
| $G$            | 剪切模量          |
| $I$            | 惯性矩           |
| $I_0$          | 初始惯性矩         |
| $k$            | 截面刚度          |
| $K_d$          | 卸载刚度          |
| $[K]$          | 刚度矩阵          |
| $K_{\alpha 3}$ | 梁单元实际剪切刚度     |
| $L$            | 长度            |

|                  |                                  |
|------------------|----------------------------------|
| $m$              | 质量                               |
| $M$              | 弯矩                               |
| $M_c$            | 开裂弯矩                             |
| $M_y$            | 屈服弯矩                             |
| $[M]$            | 质量矩阵                             |
| $P$              | 集中力                              |
| $Q$              | 剪力                               |
| $t_s$            | 稳定时间步长                           |
| $T$              | 周期                               |
| $u$              | 位移                               |
| $u_g$            | 地面的位移                            |
| $u^i$            | 绝对位移                             |
| $\{u\}$          | 位移向量                             |
| $\{\dot{u}\}$    | 速度向量                             |
| $\{\ddot{u}\}$   | 加速度向量                            |
| $W_d$            | 等效有损伤材料的弹性余能                     |
| $W_0$            | 无损伤材料的弹性余能                       |
| $\alpha$         | 质量阻尼系数                           |
| $\alpha_c$       | 混凝土单轴受压应力—应变曲线下降段的参数值            |
| $\alpha_t$       | 混凝土单轴受拉应力—应变曲线下降段的参数值            |
| $\alpha_y$       | 屈服刚度折减系数                         |
| $\beta$          | 刚度阻尼系数                           |
| $\gamma_y$       | 屈服剪应变                            |
| $\delta$         | 小变形（压弯构件自身挠曲变形）                  |
| $\delta_u$       | 虚位移                              |
| $\Delta$         | 平动位移                             |
| $\Delta_c$       | 压屈曲时轴向变形值                        |
| $\Delta_t$       | 拉屈服时轴向变形值                        |
| $\Delta_u$       | 构件的极限位移                          |
| $\Delta_y$       | 构件的屈服位移                          |
| $\Delta u_u$     | 结构的层间极限位移                        |
| $\Delta u_y$     | 结构的层间屈服位移                        |
| $\epsilon_u$     | 材料的极限应变                          |
| $\epsilon_y$     | 材料的屈服应变                          |
| $\epsilon_{c,r}$ | 与单轴抗压强度代表值 $f_{c,r}$ 相应的混凝土峰值压应变 |
| $\epsilon_{t,r}$ | 与单轴抗拉强度代表值 $f_{t,r}$ 相应的混凝土峰值拉应变 |
| $\theta$         | 转角                               |
| $\theta_c$       | 开裂转角                             |

|                   |            |
|-------------------|------------|
| $\theta^e$        | 弹性转角       |
| $\theta^p$        | 塑性转角       |
| $\theta_y$        | 屈服转角       |
| $\mu_\varepsilon$ | 材料延性系数     |
| $\mu_\Delta$      | 构件位移延性系数   |
| $\mu_{\Delta u}$  | 结构层间位移延性系数 |
| $\mu_\phi$        | 截面曲率延性系数   |
| $\xi$             | 约束效应系数     |
| $\rho$            | 材料密度       |
| $\sigma$          | 应力         |
| $\sigma_s$        | 材料屈服强度     |
| $\bar{\sigma}$    | 有效应力       |
| $\tau_y$          | 屈服剪应力      |
| $\phi$            | 曲率         |
| $\phi_u$          | 截面的极限曲率    |
| $\phi_y$          | 截面的屈服曲率    |
| $\omega$          | 圆频率        |

# 目 录

序一

序二

前言

主要符号

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 动力弹塑性分析概述 .....               | 1  |
| 1.1 数值仿真技术的应用 .....                 | 1  |
| 1.2 结构分析技术的发展 .....                 | 3  |
| 1.3 动力弹塑性分析的定义与理解 .....             | 4  |
| 1.4 常用动力弹塑性分析软件对比 .....             | 6  |
| 第 2 章 数值模型 .....                    | 7  |
| 2.1 概述 .....                        | 7  |
| 2.2 基于构件的模型 .....                   | 10 |
| 2.2.1 支撑失稳后力学模型 .....               | 10 |
| 2.2.2 铅芯橡胶支座恢复力模型 .....             | 11 |
| 2.3 基于截面的模型 .....                   | 13 |
| 2.3.1 分布塑性铰 .....                   | 13 |
| 2.3.2 集中塑性铰 .....                   | 14 |
| 2.4 基于材料的模型 .....                   | 16 |
| 2.4.1 混凝土材料本构模型 .....               | 17 |
| 2.4.2 钢材本构模型 .....                  | 19 |
| 2.5 滞回规则 .....                      | 20 |
| 2.6 几何非线性 .....                     | 20 |
| 2.6.1 分析方法 .....                    | 21 |
| 2.6.2 $P-\Delta$ 和大变形理论 .....       | 22 |
| 2.6.3 软件应用 .....                    | 24 |
| 2.7 整体数值模型建立 .....                  | 24 |
| 2.7.1 基于 MIDAS Building 的数值模型 ..... | 24 |
| 2.7.2 基于 PERFORM-3D 的数值模型 .....     | 27 |
| 2.7.3 基于 ABAQUS 的数值模型 .....         | 30 |
| 2.8 地震作用输入 .....                    | 31 |
| 2.8.1 运动方程建立方式 .....                | 31 |
| 2.8.2 地震激励下的运动方程 .....              | 33 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第3章 数值分析方法 .....               | 35  |
| 3.1 振型叠加法 .....                | 35  |
| 3.1.1 FNA 方法 .....             | 36  |
| 3.1.2 悬臂柱的动力非线性分析 .....        | 37  |
| 3.1.3 隔震系统的动力非线性分析 .....       | 40  |
| 3.1.4 FNA 方法应用案例分析 .....       | 42  |
| 3.2 直接积分法 .....                | 47  |
| 3.3 隐式方法 .....                 | 47  |
| 3.3.1 Newmark- $\beta$ 法 ..... | 48  |
| 3.3.2 多自由度表达式 .....            | 50  |
| 3.3.3 Wilson- $\theta$ 法 ..... | 51  |
| 3.4 显式方法 .....                 | 52  |
| 3.4.1 中心差分法 .....              | 52  |
| 3.4.2 方法特点对比 .....             | 53  |
| 第4章 分析结果解读 .....               | 55  |
| 4.1 宏观分析结果 .....               | 55  |
| 4.1.1 内力指标 .....               | 55  |
| 4.1.2 位移指标 .....               | 55  |
| 4.1.3 能量指标 .....               | 56  |
| 4.2 微观分析结果 .....               | 57  |
| 4.2.1 基于 ABAQUS 分析 .....       | 57  |
| 4.2.2 基于 PERFORM-3D 分析 .....   | 60  |
| 第5章 应用研究探讨 .....               | 66  |
| 5.1 构件的数值模拟探讨 .....            | 66  |
| 5.1.1 数值积分点选择 .....            | 66  |
| 5.1.2 连梁的数值模型 .....            | 71  |
| 5.1.3 楼板的数值模型 .....            | 73  |
| 5.2 基于 ABAQUS 软件的研究 .....      | 74  |
| 5.2.1 显式分析时间步长 .....           | 74  |
| 5.2.2 质量缩放 .....               | 75  |
| 5.2.3 能量平衡 .....               | 76  |
| 5.2.4 钢筋/钢管混凝土构件模拟 .....       | 77  |
| 5.3 基于 ABAQUS 软件的二次开发 .....    | 81  |
| 5.3.1 显式材料子程序 .....            | 81  |
| 5.3.2 隐式单元子程序 .....            | 87  |
| 5.3.3 前处理二次开发 .....            | 94  |
| 5.3.4 后处理二次开发 .....            | 97  |
| 5.4 一些问题的探讨 .....              | 102 |
| 5.4.1 钢支撑模拟 .....              | 102 |

|             |                           |            |
|-------------|---------------------------|------------|
| 5.4.2       | 连续倒塌模拟方法                  | 105        |
| 5.4.3       | 纤维梁应用                     | 111        |
| 5.4.4       | 结构阻尼选用                    | 113        |
| 5.4.5       | 阻尼模型的敏感性                  | 115        |
| 5.4.6       | 结构耗能能力                    | 117        |
| 5.4.7       | 延性设计与抗震性能指标               | 119        |
| <b>第6章</b>  | <b>动力弹塑性分析案例</b>          | <b>124</b> |
| 6.1         | 太原国海广场工程                  | 124        |
| 6.1.1       | 工程概况                      | 124        |
| 6.1.2       | 基于 ABAQUS 的弹塑性时程分析        | 126        |
| 6.1.3       | 基于 MIDAS Building 弹塑性时程分析 | 140        |
| 6.2         | 康力电梯测试塔工程                 | 154        |
| 6.2.1       | 工程概况                      | 154        |
| 6.2.2       | 基于 ABAQUS 的弹塑性时程分析        | 155        |
| 6.2.3       | 基于 PERFORM-3D 弹塑性时程分析     | 163        |
| 6.3         | 苏州中心广场工程                  | 177        |
| 6.3.1       | 工程概况                      | 177        |
| 6.3.2       | 基于 ABAQUS 的弹塑性时程分析        | 179        |
| 6.3.3       | 基于 PERFORM-3D 弹塑性时程分析     | 195        |
| 6.4         | 苏州现代传媒广场工程                | 210        |
| 6.4.1       | 工程概况                      | 210        |
| 6.4.2       | 基于 MIDAS Gen 的弹塑性时程分析     | 213        |
| 6.4.3       | 基于 PERFORM-3D 的弹塑性时程分析    | 231        |
| 6.5         | 框架—偏心支撑体系在高烈度区工程中的应用研究    | 237        |
| 6.5.1       | 工程概况                      | 237        |
| 6.5.2       | 结构体系选型                    | 238        |
| 6.5.3       | 性能目标                      | 241        |
| 6.5.4       | 多道抗震防线                    | 242        |
| 6.5.5       | 弹性计算整体指标汇总                | 243        |
| 6.5.6       | 地震时程分析                    | 244        |
| 6.5.7       | 消能梁段设计原则                  | 248        |
| 6.5.8       | 结论                        | 249        |
| <b>参考文献</b> |                           | <b>250</b> |

# 第 1 章 动力弹塑性分析概述

## 1.1 数值仿真技术的应用

随着计算机软、硬件的快速发展，以及工程材料、数值分析技术研究的不断深入，“数值仿真模拟”在越来越多的领域被广泛应用。在工程领域的应用中，所谓数值仿真技术是指以计算机为手段，通过对实际问题的分析建立数值模型，结合数值计算方法来获取研究结果，并且以云图、图表、动画等直观的方式展现，达到对工程问题或者物理问题进行科学研究的目的。图 1.1-1 所示为数值风洞技术在建筑物表面风压模拟中的应用。

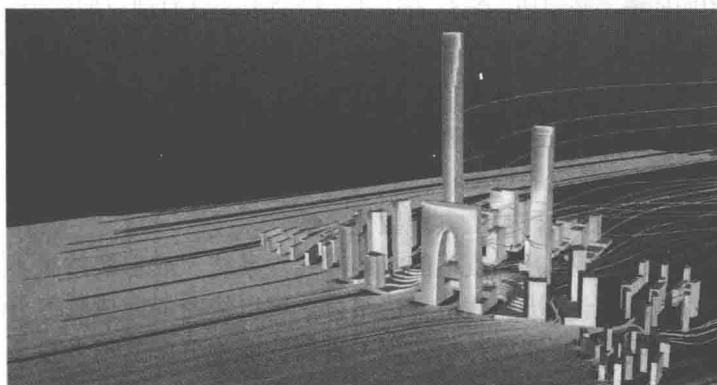


图 1.1-1 建筑物表面风压模拟

目前数值仿真技术的工程应用呈现以下特点：

### 1. 数值模型的精细化

不同于早期将复杂的工程问题归纳为简化的数学模型，数值仿真技术采用尽可能精细化的数学模型，以期获得更为精确、全面的研究成果。但是需要指出的是完全精确的模拟是难以做到的，也没有必要，对实际工程问题应用数值仿真技术一定要结合大量工程实践及分析预判。

### 2. 数值分析方法的采用

数值分析是指在数学分析问题中，采用数值近似算法的研究，如有限元法、有限体积法等。

众所周知，大多数工程问题都可以通过建立数学模型进行分析研究，通常针对特定的系统，应用相关基本定律和原理可推导出一组包含相应边界条件和初始条件的代数或微分方程组。在工程力学领域，这些起控制作用的微分方程组可以代表质量、力或者能量的平衡。对于较为简单的方程或方程组，在给定的边界条件下，通过求解这些方程组可以得到精确解，即得出系统的精确行为。如图 1.1-2 为悬臂梁自由端承受集中力作用的结构简图，根据欧

拉—伯努利梁理论 (Euler-Bernoulli Beam Theory)，可得出其自由端的挠度理论公式如下：

$$\Delta = \frac{PL^3}{3EI}$$

(1.1-1)

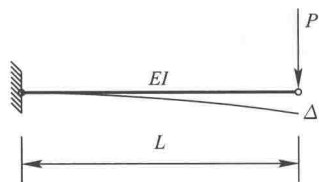


图 1.1-2 承受集中力的悬臂梁

然而在大量实际工程问题中，难以得到系统的理论解或者解析解。这主要由于复杂的工程问题所对应的数值模型方程组通常也非常复杂，边界条件及初始条件往往难以确定。为了解决这个问题，需要借助数值分析方法来求解近似解，即数值解。

解析解在系统中的任何点上都是精确的，而数值解只是在称为“节点”的离散点上才近似于解析解。因此数值解法的第一步是离散化，也就是说，要将待求解的对象细分成很多小的区域（单元）和节点。工程领域常用的数值解法包括有限差分法和有限元法。使用有限差分法时，需要针对每一节点构造微分方程，并且用差分方程代替偏微分方程，从而得到一组联立的线性方程组。而有限元法采用积分方法建立系统的代数方程组，其基本求解思想是把计算域划分为有限个互不重叠的单元，在每个单元内选择一些合适的节点作为求解函数的插值点，将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式，借助于变分原理或加权余量法，将微分方程离散求解。有限元法最早用于结构力学，后来也用于流体力学的数值模拟。

在计算机时代到来之前，工程师们经常使用以下方法对问题进行求解：

- (1) 通过解析方法得到问题的准确解；

(2) 使用图解法描述系统的特征；

(3) 采用计算器和计算尺，手工实现数值方法。

这些方法在求解复杂问题时，或不能求解非线性系统、或求解结果不准确、或求解过程极其繁琐费时。而当今计算机和数值方法结合，可以快速地完成数值分析计算，极大地增强了处理问题和求解问题的能力。也使得工程师能够将更多的精力投入在概念设计、设计问题的定义与阐释，而不是在数值求解技术上。

3. 结果的仿真呈现

传统分析手段需要技术人员在大量数据结果中归纳整理出分析对象的相应行为，而数值仿真技术应用可呈现整个分析过程，并可进行针对性数据监测和采集，其实质可以理解为采用计算机进行了数字化仿真物理实验。

目前随着数值仿真技术的日渐成熟，在建筑工程领域，已有越来越多的商业软件可以对涉及的工程问题进行仿真模拟与分析（表 1.1-1），其中也包括了动力弹塑性分析在抗震设计中的应用。

商业软件在工程领域的应用

表 1.1-1

| 结构专业    |                   | 建筑专业  |          | 设备专业   |                |
|---------|-------------------|-------|----------|--------|----------------|
| 工程问题    | 仿真软件              | 工程问题  | 仿真软件     | 工程问题   | 仿真软件           |
| 动力弹塑性分析 | ABAQUS/PERFORM-3D | 建筑能耗  | PHOENICS | 碰撞模拟   | Design Builder |
| 多尺度分析   | ANSYS/MIDAS Gen   | 声、光环境 | RAYNOISE | 室内气流环境 |                |
| 数值风洞模拟  | FLUENT/CFX        | 烟雾扩散  | FDS      |        |                |
| 连续倒塌模拟  | MSC. MARC         | 人员疏散  |          |        |                |

## 1.2 结构分析技术的发展

随着计算机分析能力的不断提升,结构分析技术也快速发展。如在早期对简单规则的多层建筑,可取平面框架单元来分析计算,也可采用如等效剪切层模型(常用于多层框架结构)和等效弯曲—剪切层模型(常用于高层结构、剪力墙结构等)。此后比分层模型更精确的是将整体模型拆分成多个构件的模型并进行组装,根据每一个构件的力学模型即可推导出整体结构的力学行为。这其中常见的有一维梁、柱构件采用的塑性铰模型(如集中塑性铰模型),二维剪力墙构件的宏模型(如等代柱模型、桁架模型)等。随着结构分析技术进一步往精细化方向发展,基于材料本构的纤维模型和分层壳模型在目前的结构分析中得到了大量应用。甚至考虑基础与上部结构整体协同分析,以及动力倒塌分析等技术也都有了一定的研究与应用。图 1.2-1 所示为结构分析技术在分析对象规模、维度、模型特征和分析性能等方面取得的进步,以及将来可能的发展方向,其中动力弹塑性分析也是结构分析技术发展的重要成果之一。

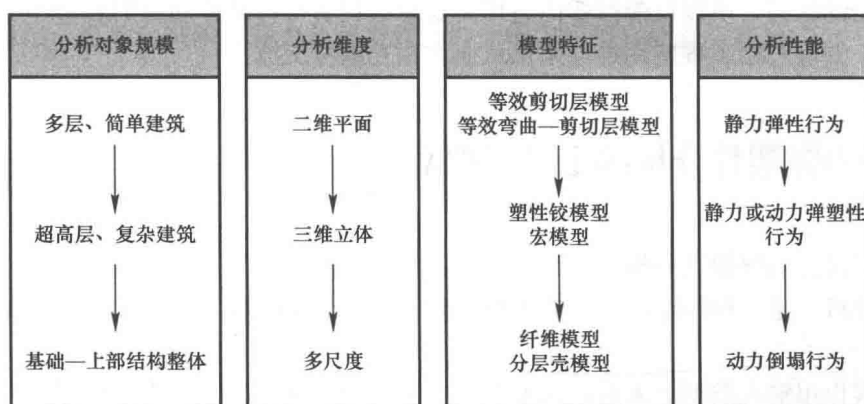


图 1.2-1 结构分析技术发展趋势

对于建筑结构的动力弹塑性分析,早期主要通过专门的结构分析软件完成:如 CSI 公司开发的 ETABS 和 SAP2000,两者皆提供基于截面和构件层次的单元,但在分析中只提供塑性铰单元和非弹性的分层壳单元,具有一定的局限性;美国加州大学伯克利分校的 Powell 教授开发了专门用于结构抗震性能分析的非线性软件 PERFORM-3D,其单元库丰富,包含梁、柱、支撑、开洞剪力墙、黏滞阻尼器和隔振器等多种类型,提供基于材料、截面和构件三种层次的有限元分析,收敛性好,计算效率高,且后处理方便,目前在国内外的高层建筑抗震性能分析中占有重要地位;另外如 MIDAS 公司开发的 Gen 和 Building 系列,也在不断根据结构抗震设计需求进行开发完善,凭借其专业针对性和易操作性等优点,成为目前较为流行的动力弹塑性分析软件。

而随着各研究中心和设计单位的引进和开发拓展,诸如 ANSYS、ABAQUS 和 LS-DYNA 等通用有限元软件也开始成为动力弹塑性分析中的主要手段。如 ABAQUS 作为基于材料的有限元通用软件,由于具有强大的非线性计算能力和可拓展的二次开发功能,在