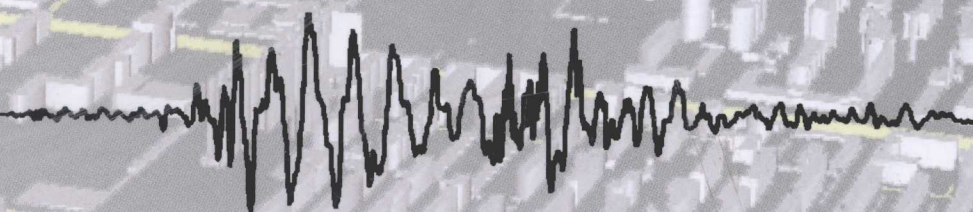
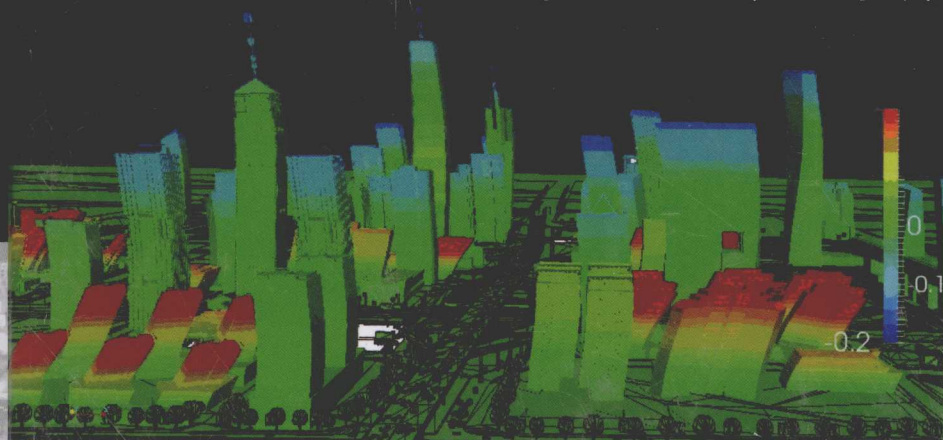


Earthquake Disaster Simulation of Civil Infrastructures:
from Tall Buildings to Urban Areas

工程地震灾变模拟

——从高层建筑到城市区域

陆新征 著



科学出版社

工程地震灾变模拟 ——从高层建筑到城市区域

陆新征 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

我国是世界上地震灾害最为严重的国家之一。与此同时,我国也是世界上高层建筑数量最多、城市化进程最快的国家。准确模拟高层建筑及城市区域建筑群的地震灾变行为,深入揭示灾变倒塌机理,科学预测地震损失并采取安全可靠的工程对策,对减轻我国地震灾害具有重要意义。

本书介绍了作者近十余年来在高层建筑和城市区域建筑群地震灾变模拟方面的相关研究工作,全书共分十三章,主要内容包括:高层建筑地震灾变模拟的精细模型、高性能求解及可视化方法,高层建筑地震灾变模拟的案例,高层建筑地震灾变模拟的简化模型,高层建筑地震灾变模拟的工程应用,中美典型高层建筑抗震设计对比及性能化评价,城市区域建筑群震害模拟的精细化建模、高真实感可视化、数据获取和高性能计算方法,典型城市区域震害的精细化模拟和地震损失的精细化预测等。

本书可供广大土木工程专业、地震工程专业人员在工程地震灾变模拟研究和工程设计中参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程地震灾变模拟:从高层建筑到城市区域/陆新征著. —北京:科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-045687-8

I. ①工… II. ①陆… III. ①工程地震-地震模拟试验-研究 IV. ①P315.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 218621 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:王万红

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 9 月第一次印刷 印张:24 1/4

字数:557 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<中科>)

销售部部长:010-62134988 编辑部电话:010-62137026 (HA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

我国是世界上地震灾害最为严重的国家之一，深入开展地震工程研究，切实提高建筑和城市的抗震防灾能力，是保障我国人民生命财产安全的重大问题。由于我国工程建设和城市化发展非常迅速，再加上地震的偶发性，特别是我国中、东部人口密集的大城市自唐山地震后已经有近 40 年未曾经历过重大地震灾害，现有的震害调查经验显然已难以满足工程建设和城市发展的需要。考虑到试验能力的局限，发展数值模拟技术，科学模拟工程结构和城市区域的地震场景和地震破坏，深入揭示灾变机理并提出安全可靠的抗震对策，对提升我国工程抗灾能力和应急救援能力都具有非常重要的价值。

近十余年来，本书作者在工程结构地震灾变模拟方面开展了很多的研究工作。特别是在 2008 年汶川地震后，相关研究工作得到了国家自然科学基金委员会、科技部等机构的大力支持，在高层建筑和城市区域建筑群的灾变模拟方面承担了多项重要科研项目。为了向广大的研究人员和设计人员介绍相关研究成果，特撰写本书。全书共 13 章，主要介绍了高层建筑和城市区域建筑群地震灾变模拟的新型数值模型、高性能计算方法、高真实感可视化方法、性能化设计与损失评价方法以及典型工程应用等相关方面的工作。由于工程地震灾变模拟内容很丰富，国内外很多研究者都做出了许多杰出的研究工作，限于篇幅所限，本书主要介绍作者及其合作者在相关领域开展的工作，读者可以参阅相关文献了解其他研究者的工作。

本书的主要内容源于以下科研项目的部分成果：国家自然科学基金优秀青年科学基金项目（编号：51222804），国家自然科学基金重大研究计划重点项目（编号：90815025）和集成项目（编号：91315301），国家自然科学基金重大国际（地区）合作研究项目（编号：51261120377），国家自然科学基金面上项目（编号：51178249，51378299，51578320），国家科技支撑计划课题（编号：2006BAJ03A02，2009BAJ28B01，2012BAJ07B012，2013BAJ08B02，2015BAK17B00），北京市自然科学基金项目（编号：8142024），教育部新世纪优秀人才支持计划（编号：NCET-10-0528），霍英东教育基金会第十三届高等院校青年教师基金（编号：131071），中国地震局地球物理研究所基本科研专项（编号：DQJB14C01），清华大学自主研究项目（编号：2010THZ02-1）等。

本书的成果是作者与国内外合作者及研究生共同完成的，主要包括：清华大学叶列平、任爱珠、岑松教授，澳大利亚 Griffith University H. Guan 教授，日本 University of Tokyo M. Hori 教授，美国 Stanford University K. H. Law 教授，中国

地震局工程力学研究所林旭川博士，北京建筑设计研究院齐五辉、杨蔚彪、甄伟教授，Arup 公司的黄羽立博士，以及课题组的研究生汪训流、缪志伟、马千里、曲哲、许镇、卢啸、施炜、熊琛、解琳琳、曾翔、林楷奇、田源、张万开、韩博、李梦珂、王丽莎、刘斌、杨哲飏等。此外，感谢清华大学钱稼茹、刘晶波、赵作周、潘鹏、纪晓东、冯鹏教授，美国 Ohio State University 的 H. Sezen 教授，加拿大 University of British Columbia 的 T. Yang 教授，美国 University of North Texas 的 C. Yu 教授等在相关研究中提出的很多宝贵建议。同时感谢中国建筑科学研究院、北京建筑设计研究院、中国地震局工程力学研究所、中国地震局地球物理研究所、西安建筑科技大学等单位的大力协助和支持。

本书的计算分析工作和试验研究工作得到清华大学的力学计算与仿真实验室和土木工程安全与耐久教育部重点实验室的大力支持，也在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，本书内容只是相关领域诸多研究成果中的沧海一粟，一定存在很多不足之处，衷心希望有关专家和读者批评指正。

作 者

2015 年 7 月

北京清华园

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的背景	1
1.2 工程地震灾变模拟的内涵和意义	2
1.3 本书的研究思路和主要研究内容	3
第 2 章 高层建筑地震灾变模拟的精细模型	5
2.1 概述	5
2.2 纤维模型	5
2.2.1 纤维梁模型的基本原理	5
2.2.2 混凝土本构模型	6
2.2.3 钢筋本构模型	10
2.2.4 钢筋混凝土构件验证	13
2.2.5 组合构件中的材料模型	15
2.3 分层壳模型	17
2.3.1 分层壳模型的基本原理	17
2.3.2 高性能壳单元 NLDKGQ	19
2.3.3 混凝土和钢筋的本构模型	31
2.3.4 分层壳单元在 OpenSees 中的实现	32
2.3.5 算例及验证	33
2.4 基于构件和截面的模型	39
2.4.1 引言	39
2.4.2 十参数滞回模型	39
2.4.3 钢支撑滞回模型	44
2.5 多尺度建模方法	47
2.5.1 引言	47
2.5.2 多尺度模型界面连接方法与实现	48
2.5.3 界面连接方法的验证	50
2.5.4 钢-混凝土混合结构多尺度分析算例	52
2.5.5 钢框架多尺度分析算例	54
2.6 单元生死算法与倒塌模拟	55
2.6.1 构件失效的单元生死算法	55
2.6.2 失效后单元的离散元模型	56
2.6.3 采用物理引擎模拟失效后的单元	59

第 3 章 高层建筑地震灾变模拟的高性能求解及可视化	63
3.1 概述	63
3.2 GPU 高性能矩阵求解器	63
3.2.1 通用 GPU 计算的基本概念	63
3.2.2 GPU 高性能矩阵求解	64
3.2.3 算例及比较	69
3.3 地震灾变模拟的高性能可视化	70
3.3.1 引言	70
3.3.2 整体框架	71
3.3.3 关键帧提取	72
3.3.4 并行帧插值	75
3.3.5 GPU 内存的数据访问模型	77
3.3.6 算例与讨论	78
第 4 章 高层建筑地震灾变模拟案例	80
4.1 概述	80
4.2 某巨柱-核心筒-伸臂超高层建筑地震灾变模拟	80
4.2.1 工程简介	80
4.2.2 建模方法	80
4.2.3 地震灾变倒塌模拟	88
4.2.4 土-结相互作用对倒塌的影响	97
4.3 某巨柱-核心筒-巨型支撑超高层建筑地震灾变模拟	102
4.3.1 工程简介	102
4.3.2 建模方法	105
4.3.3 半支撑结构地震灾变倒塌模拟	108
4.3.4 全支撑结构地震灾变倒塌模拟	114
4.3.5 结构方案比较	123
第 5 章 高层建筑地震灾变模拟的简化模型	127
5.1 概述	127
5.2 弯剪耦合模型	127
5.2.1 弯剪耦合模型的基本概念	127
5.2.2 弯剪耦合模型的算例	128
5.3 鱼骨模型	131
5.3.1 鱼骨模型的基本概念	131
5.3.2 某巨柱-核心筒-伸臂超高层建筑的鱼骨模型	131
5.3.3 某巨型框架-核心筒-巨型支撑超高层建筑的鱼骨模型	147

第 6 章 高层建筑地震灾变模拟的工程应用	159
6.1 概述	159
6.2 地震动强度指标	159
6.2.1 引言	159
6.2.2 常用地震动强度指标简介	159
6.2.3 适用于超高层建筑的改进地震动强度指标	161
6.2.4 现有地震动强度指标适用性比较	164
6.2.5 基于 IDA 倒塌分析对各地震动强度指标合理性的检验	170
6.3 超高层建筑最小剪力系数研究	171
6.3.1 引言	171
6.3.2 国内外规范对最小地震剪力系数规定的综述	172
6.3.3 8 度区的某假想超高层案例对比分析	175
6.3.4 8 度区的某真实超高层案例对比分析	192
6.3.5 小结	200
6.4 剪力墙内支撑布置方案比选	200
6.4.1 方案介绍	200
6.4.2 基本动力特性对比	202
6.4.3 弹塑性分析对比	202
6.4.4 抗地震倒塌能力对比	203
6.4.5 小结	205
第 7 章 中美典型高层建筑抗震设计对比及性能化评价	206
7.1 概述	206
7.1.1 性能化抗震设计方法	206
7.1.2 中美高层建筑抗震设计对比的意义	207
7.2 中美典型高层建筑抗震设计对比	208
7.2.1 中美典型高层建筑抗震设计对比案例	208
7.2.2 Building 2 抗震设计及结果对比	208
7.2.3 HuYu 模型抗震设计及结果对比	213
7.3 中美典型高层建筑抗震性能对比	217
7.3.1 弹塑性时程分析评估	217
7.3.2 地震损失评估	225
7.4 本章小结	238
第 8 章 城市区域建筑震害模拟的精细化建模	239
8.1 概述	239
8.1.1 基于易损性矩阵的区域震害模拟	240
8.1.2 基于能力-需求分析的区域震害模拟	240
8.1.3 基于精细化模型和时程分析的震害模拟	241

8.2 多层建筑剪切层模型	242
8.2.1 引言	242
8.2.2 多自由度集中质量剪切层模型	242
8.2.3 适用于中国多层建筑的骨架线参数标定方法	243
8.2.4 基于 HAZUS 的骨架线参数标定方法	250
8.2.5 滞回参数标定方法	252
8.2.6 结构损伤限值	252
8.2.7 参数标定方法的验证	255
8.2.8 小结	257
8.3 高层建筑弯剪耦合模型	257
8.3.1 引言	257
8.3.2 非线性弯剪耦合模型	258
8.3.3 根据宏观建筑信息确定模型参数	260
8.3.4 基于单体结构的模型应用和验证	265
8.3.5 非线性弯剪耦合模型在城市区域震害预测中的应用	270
8.3.6 小结	272
第 9 章 城市地震灾变模拟的可视化和数据获取	273
9.1 概述	273
9.2 城市建筑群震害场景的 2.5D 模型	273
9.3 城市建筑群震害场景的 3D-GIS 模型	275
9.3.1 引言	275
9.3.2 整体技术框架	276
9.3.3 城市 3D-GIS 数据的获取	278
9.3.4 基于城市 3D 多边形模型的震害场景可视化	280
9.3.5 数据流程	282
9.3.6 案例分析	283
9.4 基于物理引擎的城市建筑群震害倒塌模拟	287
9.4.1 引言	287
9.4.2 基于物理引擎的倒塌模拟	287
9.4.3 集成的模拟系统	288
9.4.4 案例展示	289
第 10 章 城市区域震害模拟的高性能计算方法	292
10.1 概述	292
10.2 基于 GPU 粗颗粒度并行的城市区域震害模拟	292
10.2.1 引言	292
10.2.2 程序架构与并行思路	292
10.2.3 程序性能测试	296

10.3 基于云计算的城市区域震害模拟	300
10.3.1 引言	300
10.3.2 测试软件与算例模型设定	301
10.3.3 云计算环境配置	302
10.3.4 云计算性能测试	306
10.3.5 小结	307
10.4 多尺度区域建筑震害模拟的分布式计算	308
10.4.1 引言	308
10.4.2 计算框架	308
10.4.3 计算方法	309
10.4.4 案例研究	312
10.4.5 小结	316
第 11 章 典型区域建筑群的震害情景模拟	317
11.1 概述	317
11.2 鲁甸地震极震区震害场景再现	317
11.2.1 鲁甸极震区震害情况	317
11.2.2 与实际震害对比	319
11.2.3 与易损性方法对比	320
11.2.4 震害结果的可视化	321
11.3 清华校园建筑震害预测与讨论	323
11.3.1 震害模拟平台框架	323
11.3.2 建筑数据收集	323
11.3.3 前处理与震害分析计算	325
11.3.4 震害结果显示	328
11.4 我国某中等城市的震害模拟	330
11.4.1 案例介绍	330
11.4.2 震害模拟的并行计算	331
11.4.3 震害模拟结果的讨论	332
11.5 我国特大城市建筑群震害模拟	334
11.5.1 案例介绍	334
11.5.2 A 城市某区域算例分析	334
11.5.3 B 城市的震害结果可视化	338
第 12 章 典型城市区域地震损失的精细化预测	340
12.1 概述	340
12.2 基于新一代性能化设计的城市区域地震损失预测	340
12.2.1 引言	340
12.2.2 损失预测方法	341
12.2.3 案例研究：清华大学校园区域建筑地震损失预测	345

12.2.4	损失预测结果及讨论	348
12.2.5	小结	351
12.3	碎片坠落次生灾害及应急区域规划	352
12.3.1	引言	352
12.3.2	整体架构	354
12.3.3	分析方法	354
12.3.4	算例	357
12.3.5	小结	360
第 13 章	结论和展望	361
13.1	结论	361
13.2	展望	361
参考文献		363

第 1 章 绪 论

1.1 研究的背景

我国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带的交汇部位，是世界上地震灾害最严重的国家之一。我国 660 个大中型城市中，位于地震区的占 74.5%，约有 50% 位于基本烈度 7 度及以上地区。118 个百万以上人口的大城市中，有 85.7% 位于地震区，近 2/3 位于基本烈度 7 度及以上地区（江见鲸，2005）。我国历史上曾经发生过多重大地震灾害，造成了非常严重的人员伤亡和经济财产损失。历次地震灾害均表明，土木工程结构是地震灾害的主要承灾体，也是造成人员伤亡和经济损失的最主要原因。深入研究工程结构的灾变演化机理，进而提出科学有效的抗震减灾对策，是减轻地震灾害很重要的手段之一。

世界地震工程经过一百余年的努力，在工程结构抗震方面已经取得了很多重要的研究成果。近年来几次重大地震灾害表明，当实际地震作用没有显著超出设防罕遇地震水准时，经过科学抗震设计的常规工程结构基本都能成功避免倒塌破坏，防止出现重大人员伤亡。这是地震工程界非常了不起的成就。但是，由于地震的复杂性以及社会的发展，地震工程仍面临许多重要的挑战，包括：

1) 新型工程结构的抗震防灾问题

目前，各国规范所采用的抗震设计方法有很多内容是历史上大量震害经验的积累。地震是一个天然的试验场，经过实际地震考验的抗震设计是最可靠的。但是，由于地震的偶发性和土木工程的迅速发展，工程建设不可能等到实际强烈地震考验后再开展。例如，近年来非常突出的一个问题就是超高层建筑的抗震防灾问题。世界各国都在建或建成了很多超高层建筑，但是很少有超高层建筑真正经历过实际强烈地震的考验。这些建设在地震区的 400m、500m 甚至 600m 级超高层建筑，其地震响应究竟如何？会是怎样的一个破坏模式？抗震措施效果到底怎样？这些问题都亟待深入展开研究。

2) 城市区域的综合抗震防灾问题

抗震设计方法的进步不能完全解决城市区域的综合抗震防灾问题，因为就像谚语所说：“罗马不是一天建成的”。每个城市都有漫长的历史。城市里面有大量不同历史时期遗留下来的工程结构。特别是对于中国，由于近代地震工程开始较晚，加上我国是从落后、不发达阶段逐步发展过来的，过去因为经济、科技水平的限制而遗留了大量低抗灾能力的基础工程设施和房屋建筑，是我国现代城市防灾能力的重要软肋。按照现在城市建筑物的更新换代速度，在未来很长一段时间内，一旦地震发生在人口密集的城市区域，仍然不可避免地会造成很大的破坏和损失。如果不能科学、准确的预测城市区域的地震灾害并采取科学的防灾预案和应急对策，则抢险救灾既不可能及时，也不可能高效。灾后的重建，生产和生活的恢复也更加困难。

3) 超出设防水准的极罕遇地震作用问题

虽然我国的地震区划已经经历了四五次重大修订，对地震风险的认识一直在不断加深，

但是由于地震的复杂性,超出设防水准的极罕遇地震作用在历史上多次出现,且未来也难以完全避免。类似这样的极端灾害事件,一旦发生,往往后果极其严重,因此必须给予必要的考虑。对极罕遇地震的抗震设计,显然不能依照常规的抗震设计方法来进行。它需要将一个工程结构,或者一个城市区域,视为一个系统,通过科学的体系能力设计,充分发挥系统中每个零件的作用,实现整体大于局部之和,以求得防灾投入和抗灾能力之间的平衡。这是对现行工程结构设计方法的重要发展,国内外很多学者在此领域开展了大量的研究(叶列平等, 2008a, 2008b; 王亚勇等, 2010; 姚攀峰, 2011),但还有很多工作有待进一步开展。

1.2 工程地震灾变模拟的内涵和意义

由于土木工程结构自身体量庞大、造价高昂、结构复杂,加上地震作用的“突发性、区域性和毁灭性”的特点。完全依赖物理试验手段研究其地震灾变过程难度很大。即使采用缩比模型,也依然存在尺寸效应、相似比设计等诸多困难。与此同时,土木工程也是城市功能的主要载体,当工程结构的灾变研究从单体发展到城市区域规模时,采用物理实验手段更是无能为力。因此,计算机数值模拟作为一种重要的科学研究手段,在工程结构抗震防灾领域得到日益广泛的应用。

工程结构计算机数值模拟的核心工作,是将工程结构的各种复杂行为(力学、热学等),建立相应的数学方程,而后通过计算机对这些方程进行求解,以预测相应的工程结构响应。工程结构数值模拟包括三个主要的构成部分:

- (1) 工程结构的数值计算模型。
- (2) 数学方程的求解算法。
- (3) 完成工程结构数值模拟所需的计算机硬件平台。

上述高性能的硬件平台是基础,高效的求解算法是重要手段,而工程结构的数值计算模型是核心研究内容。

土木工程结构自身体量的庞大和行为的复杂使得准确描述其复杂非线性受力行为的数值模型的计算量非常大。例如,虽然研究早已发现,实体单元是描述三维物体受力行为最合适的单元类型,但是基于实体单元的建筑结构非线性计算,即便是利用当前最先进的计算平台,也只能完成一些简单得多、高层单体结构的非线性分析。例如, Yamashita 等(2011)利用实体单元建立了一座高 129.7m 的规则高层钢结构的计算模型,单元总数超过了 1600 万,这样的计算量,即便是对 E-simulator 这样的超级计算机,也是一个非常有挑战性的工作。计算机有限的计算能力与工程结构数值模拟几乎无限的计算量需求,构成了工程结构数值模拟的一个主要矛盾,同时也成为工程结构数值模拟不断进步的一个重要源动力。

实际上,科学研究/工程应用的需求与试验能力(包括物理试验和数值模拟试验)的限制之间的矛盾,无论是对物理试验还是对数值模拟试验都同样存在。然而,计算机技术日新月异的发展,为突破数值模拟计算能力限制不断提供新的手段。与此相对的,物理试验能力的发展却遇到了巨大的困难。例如,以振动台试验为例,目前世界上最大的振动台为建于 1995 年的日本 E-Defense 振动台。此后近 20 年,振动台试验能力都很难进一步得到提高。而世界上最快的超级计算机的头衔,几乎每年都在变化。甚至家家户户使用的桌面电脑的速度,已经可以和 15 年前世界上最快的超级计算机相媲美。日趋庞大而廉价的计算机数值计

算能力,正沿着摩尔定律飞快发展,并不断为工程结构的数值模拟提供强有力的推动力。2009年,我国住房和城乡建设部、美国国家科学基金会(NSF)和日本文部省组织中美日三国50余位地震工程和结构工程知名专家在广州举行“中美日建筑结构抗震减灾研讨会”,探讨未来结构工程和地震工程的发展方向。与会专家一致认定:“基于超大规模计算的区域综合震害预测是未来地震工程领域具有重大价值的研究方向”。

1.3 本书的研究思路和主要研究内容

针对前文所述目前工程抗震防灾领域比较突出的问题:高层建筑和城市区域的抗震防灾问题,本书主要通过数值模拟手段,研究高层建筑和城市区域的灾变演化机理,特别是在极罕遇地震作用下的倒塌行为,进而提出相应的防震减灾对策。全书的研究思路和各章的主要内容简要介绍如下:

本书第1章为绪论,第2章到第7章主要介绍高层建筑的地震灾变模拟问题。

由于高层建筑体量庞大,结构复杂,提出合理准确的计算模型是研究其灾变机理的基础,因此,本书第2章首先介绍以纤维梁单元和分层壳单元为基础的高层建筑地震灾变模拟的精细有限元模型;并通过一系列构件试验的模拟,验证了所提出模型的准确性和可靠性。

采用纤维梁单元和分层壳单元等精细有限元模型带来的一个新的挑战就是模型规模和计算量急剧增加,因此,本书第3章提出基于图形处理器(GPU)的高性能矩阵求解策略和灾变模拟结果可视化策略。通过使用新的软硬件工具,满足精细化灾变模拟对计算能力的需求。

基于第2章的精细化有限元模型和第3章的高性能计算方法,本书第4章通过两个比较有代表性的超高层建筑地震灾变模拟,研究了新型超高层结构的倒塌过程和破坏机理,并提出相应的工程设计建议。

利用精细化有限元模型实现结构地震响应分析虽然精度高,但是毕竟代价较大,不便于在工程设计初期使用。因此,本书第5章提出高层建筑地震灾变模拟的简化模型,从而可以以非常小的计算代价取得和精细化有限元模型相近的计算结果,为工程前期设计和方案比选提供参考。

基于上述高层建筑精细化有限元模型及简化计算模型,本书第6章选取了高层建筑设计中几个比较受关注的问题,包括地震动强度指标的选取、最小地震剪力系数的规定、剪力墙抗震措施设计等,说明地震灾变模拟在工程设计中的具体应用。

前几章高层建筑地震灾变研究主要偏重于其结构性能。而国际上最新的性能化设计方法除了对结构性能提出要求外,还关注非结构构件破坏,以及相应的经济损失和修复时间等。因此,本书第7章利用所提出的灾变演化模型,通过两个典型中美高层建筑对比,介绍了新一代性能化设计方法,并研究了案例中美高层建筑的綜合抗震性能。

本书第8章到第12章主要介绍城市区域的地震灾变模拟问题。

针对目前城市区域建筑群地震灾害模拟存在的不足,本书第8章提出利用多自由度层模型和 nonlinear 时程分析来实现城市区域建筑群的精细化地震灾变模拟,并给出了多层砌体、多层混凝土框架和高层框架一剪力墙/核心筒结构的计算模型和参数确定方法。

由于城市建筑群地震灾变模拟的用户将不仅仅是土木工程专业人员,因此高真实感的灾

变场景可视化模拟对非土木工程专业人员非常重要。本书第 9 章基于第 8 章城市区域建筑群精细化地震灾变模拟的结果, 结合 2D 城市 GIS 模型或者 3D 城市多边形模型, 实现城市区域建筑群震害模拟的高真实感可视化, 以及基于物理引擎的区域建筑倒塌灾变行为的模拟。

精细化的城市区域震害模拟带来的同样是计算量过大的问题。因此本书第 10 章分别介绍通过 GPU 并行计算、云计算及多尺度分布式计算来实现城市区域建筑群震害高性能计算模拟。

基于第 8~10 章提供的方法, 本书第 11 章分别讨论五个典型的区域建筑群震害分析案例, 其建筑数量, 从几十、到几百、到几千、再到几万。通过这些案例对比, 说明本书建议方法的优点。

本书前几章的模拟主要是针对城市建筑群的结构震害。本书第 12 章进一步讨论基于精细化城市区域震害模拟和新一代性能化设计方法来预测区域地震损失。以及利用精细化城市建筑群非线性时程分析来预测碎片坠落次生灾害及应急区域规划方法。

最后, 本书第 13 章对相关研究工作进行了总结, 并对灾变模拟未来的发展提出展望。

第2章 高层建筑地震灾变模拟的精细模型

2.1 概 述

高层建筑构件数量众多,受力形式复杂,提出准确而高效的计算模型,是开展高层建筑地震灾变模拟的前提。经过长期的研究和对比,目前科研界和工程界都比较接受采用纤维梁模型来模拟框架梁柱构件,采用分层壳模型来模拟剪力墙构件。本书作者在这两类模型上也开展了相应的研究,将在本章 2.2 节和 2.3 节加以介绍。而对于某些特殊构件,纤维梁或分层壳单元模拟效果不是很好,这时可以采用一些专门的模型加以建模。本章 2.4 节介绍作者提出的一些专用的基于截面或构件的分析模型。另外,对于某些复杂受力部位,梁单元或者壳单元由于单元自身的性能限制,无法加以准确模拟,而整个结构都采用实体单元建模又工作量太大,因此本书作者建议可以采用多尺度建模方法,详见本章 2.5 节。在结构地震灾变倒塌过程中,构件会断裂破碎形成碎片,可以采用生死单元法来模拟这样的构件断裂过程。本章 2.6 节介绍构件断裂生死单元法的实现方法,以及被杀死后单元的一些模拟技术,供读者参考。

2.2 纤维模型

2.2.1 纤维梁模型的基本原理

对于钢筋混凝土框架构件,如梁、柱等,由于其长细比较大,正截面受力时一般可以保持平截面假定,因此纤维梁模型成为此类构件最常用的分析模型。纤维梁单元将构件截面划分成很多的小“区块”,每个小区块称为一根“纤维”,服从预设的一维应力-应变关系。不同的纤维之间根据平截面假定协调工作。结构分析时主程序计算得到纤维梁单元节点的平动和转动变形,而后纤维梁单元根据节点位移和单元的位移形函数,计算得到不同截面的轴向应变和曲率。再根据平截面假定,计算得到不同纤维的轴向应变。之后根据纤维一维本构关系,得到每个纤维的轴向应力和轴力。全截面积分得到截面的总轴力和总弯矩。最后得到单元的节点反力及单元的刚度矩阵。其具体公式为

$$\varepsilon_{ic} = \varepsilon^{\text{sect}} + \phi_x^{\text{sect}} y_{ic} - \phi_y^{\text{sect}} x_{ic} \quad (2.2-1)$$

$$\varepsilon_{is} = \varepsilon^{\text{sect}} + \phi_x^{\text{sect}} y_{is} - \phi_y^{\text{sect}} x_{is} \quad (2.2-2)$$

$$N = \sum_{ic=1}^{nc} \sigma_{ic} A_{ic} + \sum_{is=1}^{ns} \sigma_{is} A_{is} \quad (2.2-3a)$$

$$M_x = \sum_{ic=1}^{nc} \sigma_{ic} A_{ic} y_{ic} + \sum_{is=1}^{ns} \sigma_{is} A_{is} y_{is} \quad (2.2-3b)$$

$$M_y = \sum_{ic=1}^{nc} \sigma_{ic} A_{ic} (-x_{is}) + \sum_{is=1}^{ns} \sigma_{is} A_{is} (-x_{is}) \quad (2.2-3c)$$

式中: $\varepsilon^{\text{sect}}$ 、 ϕ_x^{sect} 、 ϕ_y^{sect} 分别为截面轴向应变及绕 x 轴、 y 轴的曲率; N 为截面的轴向力;

M_x 、 M_y 分别为截面绕 x 、 y 轴（见图 2.2-1）的弯矩； n 为截面纤维总数；其他符号意义见表 2.2-1。

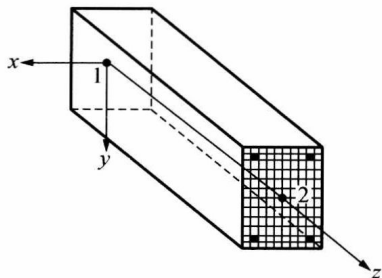


图 2.2-1 纤维梁单元

表 2.2-1 符号意义

纤维类型	纤维编号	数量	纤维在截面上的坐标	面积	应变	应力	切线模量
混凝土	ic	nc	x_{ic}, y_{ic}	A_{ic}	ε_{ic}	σ_{ic}	E'_{ic}
钢筋	is	ns	x_{is}, y_{is}	A_{is}	ε_{is}	σ_{is}	E'_{is}

截面刚度 K^{sect} 为

$$K^{\text{sect}} = \begin{bmatrix} \sum_{ic=1}^{nc} E'_{ic} A_{ic} + \sum_{is=1}^{ns} E'_{is} A_{is} & \sum_{ic=1}^{nc} E'_{ic} A_{ic} y_{ic} + \sum_{is=1}^{ns} E'_{is} A_{is} y_{is} & -\sum_{ic=1}^{nc} E'_{ic} A_{ic} x_{ic} - \sum_{is=1}^{ns} E'_{is} A_{is} x_{is} \\ \sum_{ic=1}^{nc} E'_{ic} A_{ic} y_{ic} + \sum_{is=1}^{ns} E'_{is} A_{is} y_{is} & \sum_{ic=1}^{nc} E'_{ic} A_{ic} y_{ic}^2 + \sum_{is=1}^{ns} E'_{is} A_{is} y_{is}^2 & -\sum_{ic=1}^{nc} E'_{ic} A_{ic} x_{ic} y_{ic} - \sum_{is=1}^{ns} E'_{is} A_{is} x_{is} y_{is} \\ -\sum_{ic=1}^{nc} E'_{ic} A_{ic} x_{ic} - \sum_{is=1}^{ns} E'_{is} A_{is} x_{is} & -\sum_{ic=1}^{nc} E'_{ic} A_{ic} x_{ic} y_{ic} - \sum_{is=1}^{ns} E'_{is} A_{is} x_{is} y_{is} & \sum_{ic=1}^{nc} E'_{ic} A_{ic} x_{ic}^2 + \sum_{is=1}^{ns} E'_{is} A_{is} x_{is}^2 \end{bmatrix} \quad (2.2-4)$$

由混凝土纤维应变 ε_{ic} 和钢筋纤维应变 ε_{is} 计算相应的混凝土纤维应力 σ_{ic} 和钢筋纤维应力 σ_{is} 是纤维模型中比较关键的一个问题，本章 2.2.2 节和 2.2.3 节将结合作者做的一些工作加以介绍。此外，国内外很多学者也提出了不同的单轴混凝土和钢筋模型，读者也可以参考。

纤维模型计算正截面受力的效果已经得到很多验证。但是纤维模型在计算斜截面受力（受剪或受扭）时，还有很多困难。很多研究者都提出了不同的纤维模型斜截面计算模型。需要说明的是，由于混凝土斜截面受力存在复杂的轴力-弯矩-剪力-扭矩耦合作用，精确计算斜截面滞回受力行为是非常复杂的。考虑到混凝土构件斜截面破坏一般是脆性破坏，所以本书作者建议采用简化的处理方法，即当斜截面的剪力/扭矩大于构件的设计抗剪或抗扭强度时，认为构件已经发生破坏退出工作。

2.2.2 混凝土本构模型

为了更加合理反映受压混凝土的约束效应、循环往复荷载下的滞回行为（包括刚度和强度退化）以及受拉混凝土的“受拉刚化效应”，本书作者与清华大学叶列平教授、研究生汪训流等（2007）开发了一种新的单轴混凝土本构关系。该混凝土本构的受压单调加载包络线选取 Légeron-Paultre 模型（Légeron and Paultre, 2003），可同时考虑构件中纵、横向配筋对混凝土约束效应的影响（见图 2.2-2）。为反映反复荷载下混凝土的滞回行为，采用二次抛物线模拟混凝土卸载及再加载路径，并考虑反复受力过程中材料的刚度和强度退化（Mander et al., 1988）。为模拟混凝土裂缝闭合带来的裂面效应，在混凝土受拉、受压过渡区，采用