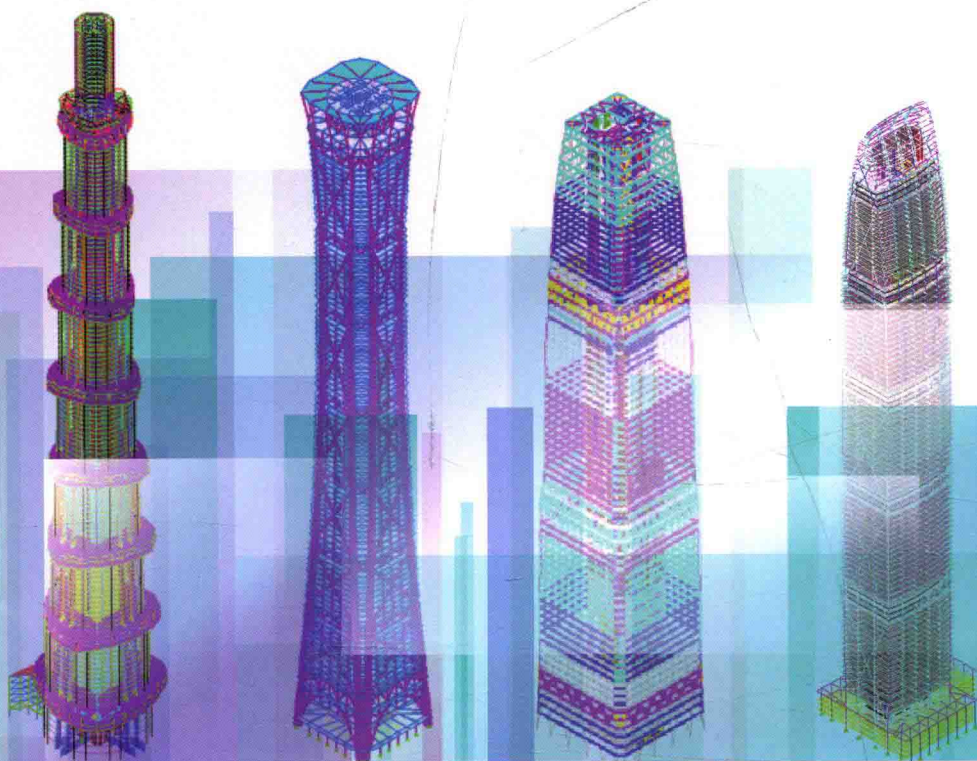


建筑抗震弹塑性分析 (第二版)

Elasto-plastic analysis of buildings against earthquake

陆新征 蒋 庆 缪志伟 潘 鹏 编著



中国建筑工业出版社

建筑抗震弹塑性分析（第二版）

Elasto-plastic analysis of buildings against earthquake

陆新征 蒋 庆 缪志伟 潘 鹏 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑抗震弹塑性分析/陆新征等编著. —2 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 10
ISBN 978-7-112-18329-6

I. ①建… II. ①陆… III. ①建筑结构-抗震结构-弹性分析-研究②建筑结构-抗震结构-塑性分析-研究
IV. ①TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 175525 号

本书系统地介绍了建筑结构抗震弹塑性分析的理论、模型、方法和典型算例。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 (Pushover 分析、静力推覆分析)、动力弹塑性分析 (弹塑性时程分析); ABAQUS、MSC. Marc、SAP2000、Perform-3D、OpenSees 等有限元软件中的地震弹塑性分析模型和算例, 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; 本书还介绍了结构抗震弹塑性分析的一些最新进展, 包括: 结构倒塌模拟及基于倒塌的结构体系安全性研究, 中美典型高层建筑抗震设计对比等内容。

本书可作为高等院校土建类专业的研究生教材, 也可供广大土建设计人员在工程计算分析中参考。

* * *

责任编辑: 李天虹
责任设计: 张 虹
责任校对: 张 颖 刘梦然

建筑抗震弹塑性分析 (第二版)

Elasto-plastic analysis of buildings against earthquake

陆新征 蒋 庆 缪志伟 潘 鹏 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

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京盈盛恒通印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 26 $\frac{1}{4}$ 字数: 652 千字

2015 年 11 月第二版 2015 年 11 月第五次印刷

定价: 66.00 元

ISBN 978-7-112-18329-6

(27591)

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)

第二版前言

自 2009 年本书第一版出版至今,作者非常欣喜地看到我国建筑抗震弹塑性分析获得了突飞猛进的发展。目前,抗震弹塑性分析已经成为我国复杂建筑工程设计中不可缺少的一环,为保障我国复杂工程抗震安全发挥了非常重要的作用。

工程抗震设计,首先必须保证其在罕遇地震下的抗倒塌安全问题,其次还需要控制其不同水准地震下的震害损失,实现性能化抗震设计。由于工程结构在设防及罕遇地震下不可避免地会出现非线性行为,因此弹塑性分析是抗倒塌设计和性能化设计所必须的工具。而近年来我国发生的地震灾害表明,我国目前的抗震设计方法,在保障结构安全及减少地震损失方面,还需要进一步完善。特别是以美国为代表的国际抗震先进国家,已经将“基于一致倒塌率的抗震设计(即:50 年内地震倒塌率不得高于 1%)”作为常规结构的抗震设计的标准写入美国土木工程师学会(ASCE)设计规范,并将地震工程的前沿从性能化设计发展到“可恢复功能的抗震设计”,代表了未来的重要发展方向。无论是通过控制倒塌率实现“基于一致倒塌率的抗震设计”,还是通过控制震害损失实现“可恢复功能的抗震设计”,都离不开弹塑性分析手段。因此,在将我国从“地震灾害大国”建设成“工程抗震强国”的奋斗过程中,弹塑性分析势必还将发挥更加重要的作用。

清华大学抗震防灾课题组近 10 年来在结构抗震弹塑性计算模型、性能化抗震设计方法、结构震害原因分析和抗倒塌措施等方面开展了系统的科学研究和工程实践。本书以上述工作为基础,对抗震弹塑性分析理论、模型、方法及软件使用加以系统介绍,并给出了一些典型算例。在内容组织上主要面向实践应用,适当照顾其理论性和前沿性。一些更加深入的理论性或前沿性内容,读者可以参阅拙作《混凝土结构有限元分析(第 2 版)》及《工程地震灾变模拟:从高层建筑到城市区域》。

本书内容可分为四大部分,第一章主要介绍了性能化设计的发展历史及现状,以及基于位移、能量和可恢复功能设计的基本概念。第二章、第三章主要介绍了抗震弹塑性分析的基本原理和常用模型。第四、五、六章结合目前最常用的 ABAQUS、MSC. Marc、SAP2000 和 Perform-3D 等通用有限元软件,以及作者课题组的有关研究成果,介绍了抗震弹塑性分析的具体实现步骤和工程算例。第七章介绍了抗震弹塑性分析的一些最新发展。

本书第二版的修订工作分工为:陆新征负责 1、3、7 章,陆新征、蒋庆负责第 2 章,潘鹏负责第 4 章,缪志伟负责第 5 章,蒋庆负责第 6 章。全书最后由陆新征统一定稿。

在本书的改版过程中,得到清华大学多位专家的支持和指导,在此深表感谢!

本书中的研究工作得到国家自然科学基金项目(51222804, 91315301, 51261120377, 51378299), 国家科技支撑计划课题(2013BAJ08B02, 2015BAK14B02, 2015BAK17B00),北京市自然科学基金(8142024)等课题的支持,特此致谢!

由于作者水平有限,结构抗震弹塑性分析的发展又非常迅速,故本书中肯定存在许多不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2015 年 7 月于清华园

第一版前言

我国是一个地震灾害极其严重的国家。随着我国社会和经济的发展,建筑规模越来越大,并不断出现很多新型结构和复杂结构。与此同时,在保障地震下人民生命安全的同时,对建筑在地震作用下的各种功能性要求也不断提高,这使得对结构分析的要求越来越高。近年来,在我国工程实践中,抗震弹塑性分析得到迅速发展。由于抗震弹塑性分析的难度要远大于以往线弹性抗震分析,对结构分析理论、分析方法、数值模型、分析软件、硬件平台都有更高的要求,目前很多工程技术人员可能尚不熟悉,或掌握起来尚有一定难度。本书以常用有限元软件平台为基础,对抗震弹塑性分析理论、模型、方法加以系统介绍,并给出了一些典型算例,供广大工程技术人员、科研人员和研究生参考。

清华大学抗震防灾课题组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。在本书编写中,力图做到既具有一定的理论性和前沿性,又比较简便易用。故安排了诸如逐步增量时程分析(IDA)、地震倒塌分析、多尺度有限元分析等当前结构抗震分析的最新进展,以及大量详细的有限元软件实践操作案例。

本书内容可分为三大部分:第1、2章主要介绍性能化抗震和抗震弹塑性分析的基本原理、方法和常用模型;第3~5章结合目前最常用的ABAQUS、MSC.MARC和SAP2000通用有限元软件,以及作者课题组的有关研究成果,介绍了抗震弹塑性分析的具体实现步骤和工程算例;第6章介绍了抗震弹塑性分析的一些最新发展。

本书编写分工为:陆新征、马千里、林旭川编写1、2、5、6章,曲哲、陆新征编写第3章,缪志伟、陆新征、林旭川编写第4章。全书最后由陆新征、叶列平统一定稿。

在本书的编写过程中,得到清华大学结构工程研究所、防灾减灾研究所以及斯坦福大学John A Blume地震研究中心多位专家的指导,在此深表感谢!

本书中的研究工作得到“国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90815025)”、“国家科技支撑计划课题(2006BAJ03A02)”、“国家科技支撑计划项目(2009BAJ28B01)”的支持,特此致谢!

由于作者水平有限,结构抗震弹塑性分析的发展又非常迅速,故本书中肯定存在许多不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2009年11月于清华园

目 录

1 绪论	1
1.1 地震灾害和抗震工程	1
1.1.1 我国的地震灾害	1
1.1.2 我国抗震工程的发展	1
1.2 性能化抗震设计	3
1.2.1 性能化抗震设计的概念	3
1.2.2 美国基于性能抗震设计规范的发展及现状	6
1.2.3 我国基于性能抗震设计规范的发展及现状	23
1.2.4 中美性能化设计方法的比较讨论	25
1.2.5 结构弹塑性分析与性能化设计的关系	25
1.3 基于位移、能量的抗震设计方法	26
1.4 基于可恢复功能的抗震设计方法	28
1.5 结构弹塑性分析的未来发展	30
2 弹塑性分析的计算模型	32
2.1 概述	32
2.2 框架结构的弹塑性有限元模型	32
2.2.1 恢复力模型概述	32
2.2.2 基于材料的模型	38
2.2.3 基于截面的模型	42
2.2.4 基于构件的模型	52
2.3 剪力墙结构的弹塑性有限元模型	54
2.3.1 微观模型(分层壳模型)	54
2.3.2 等效梁模型	61
2.3.3 等效桁架模型(宏模型1)	62
2.3.4 三垂直杆元模型(TVLEM)(宏模型2)	63
2.3.5 多垂直杆元模型(MVLEM)(宏模型3)	63
2.4 减震、隔震元件的弹塑性有限元模型	64
2.4.1 隔震支座	64
2.4.2 阻尼器	68
2.5 结构多尺度有限元计算方法	73
2.5.1 引论	73
2.5.2 多尺度模型界面连接方法与实现	74
2.5.3 界面连接方法的验证	76
2.5.4 钢-混凝土混合结构多尺度分析算例	77
2.5.5 钢框架多尺度分析算例	81

2.5.6 小结	81
2.6 地震下结构整体弹塑性分析的方法和注意事项	82
3 弹塑性分析的分析方法	84
3.1 静力弹塑性分析	84
3.1.1 静力弹塑性分析方法的提出与发展	84
3.1.2 静力弹塑性分析的基本原理	85
3.1.3 几种常见的静力弹塑性分析方法	95
3.1.4 静力弹塑性分析方法的优缺点	97
3.1.5 基于多点位移控制的推覆分析算法	98
3.2 动力弹塑性时程分析	103
3.2.1 动力弹塑性分析的基本原理	104
3.2.2 动力弹塑性分析的地震动输入选择	110
3.2.3 地震动强度指标	116
3.2.4 弹塑性时程分析结果的判断	125
3.3 逐步增量时程分析 (IDA)	127
4 弹塑性分析在 ABAQUS 上的实践	131
4.1 ABAQUS 软件简介	131
4.1.1 ABAQUS 的求解模块	131
4.1.2 ABAQUS 的建模方式	132
4.2 ABAQUS 的纤维杆件模型	133
4.2.1 ABAQUS 纤维杆件模型介绍	133
4.2.2 用户自定义材料在 ABAQUS 纤维模型中的使用实践	134
4.2.3 PQ-Fiber 提供的材料模型简介	138
4.2.4 PQ-Fiber 分析实例	142
4.3 ABAQUS 的剪力墙模型	144
4.3.1 ABAQUS 中钢筋混凝土剪力墙建模的基本方法	144
4.3.2 ABAQUS 自带的混凝土本构模型	148
4.3.3 用 ABAQUS 进行剪力墙分析的实践	152
4.4 ABAQUS 的显式和隐式计算	154
4.4.1 概述	154
4.4.2 ABAQUS/Standard 隐式直接积分算法	154
4.4.3 ABAQUS/Standard 的求解控制	154
4.4.4 ABAQUS/Explicit 显式直接积分算法	155
4.4.5 算法比较	156
4.4.6 结构地震响应时程分析	157
4.5 ABAQUS 前后处理	159
4.5.1 基于 SAP2000 模型转换的前处理	159
4.5.2 基于 C++ 后处理程序	161
4.6 工程实例介绍	164
4.6.1 工程概况	164

4.6.2	分析模型	165
4.6.3	地震波的选用	167
4.6.4	结构模型的模态	168
4.6.5	结构弹塑性响应历程分析	172
4.7	ABAQUS 建模时应注意的几个问题	175
4.7.1	梁单元类型的选择	175
4.7.2	梁单元方向和壳单元中钢筋层方向的定义	175
4.7.3	大型模型的建模	175
4.7.4	交互式与关键字式建模方式的选择	176
4.7.5	施工模拟	176
5	弹塑性分析在 MSC. Marc 上的实践	179
5.1	MSC. Marc 软件简介	179
5.2	基于 MSC. Marc 的纤维模型	179
5.2.1	THUFIBER 程序简介	179
5.2.2	THUFIBER 中的钢筋本构模型	180
5.2.3	THUFIBER 中的混凝土本构模型	183
5.2.4	THUFIBER 的模型验证及应用	188
5.2.5	THUFIBER 程序使用示例	190
5.3	基于 MSC. Marc 的分层壳模型	198
5.3.1	概述	198
5.3.2	分层壳模型中的混凝土模型	198
5.3.3	分层壳模型中的钢筋模型	198
5.3.4	分层壳模型的验证及应用	199
5.3.5	分层壳模型使用示例	204
5.4	利用 MSC. Marc 的弹簧属性模拟减隔震装置	233
5.4.1	概述	233
5.4.2	减震阻尼器的模拟	233
5.4.3	隔震支座的模拟	235
5.5	MSC. Marc 的接触与岩土模型	237
5.5.1	MSC. Marc 的接触模型	237
5.5.2	MSC. Marc 接触功能的基本流程	238
5.5.3	MSC. Marc 的岩土模型	240
5.6	基于 MSC. Marc 的地震弹塑性分析	243
5.6.1	工程应用一	243
5.6.2	工程应用二	246
5.6.3	工程应用三	250
5.6.4	工程应用四	254
5.6.5	工程应用五——某黏滞阻尼减震高层结构	256
5.6.6	工程应用六——某高层基础隔震结构	261
5.6.7	计算分析示例	270

6 基于 SAP2000 和 Perform-3D 的弹塑性计算	282
6.1 概述	282
6.2 SAP2000 的常用模型	283
6.2.1 SAP2000 中的一般塑性铰	283
6.2.2 SAP2000 的特殊塑性铰	285
6.2.3 SAP2000 塑性铰属性定义	287
6.2.4 SAP2000 分层壳单元	288
6.3 Perform-3D 的常用模型	289
6.3.1 Perform-3D 中的组件和单元	289
6.3.2 梁单元模型	289
6.3.3 柱单元模型	290
6.3.4 剪力墙单元模型	291
6.4 SAP2000 计算模型示例	292
6.5 Perform-3D 的计算模型示例	310
6.5.1 建模阶段 (Modeling phase)	310
6.5.2 分析阶段 (Analysis phase)	327
7 建筑弹塑性分析的最新进展	333
7.1 建筑结构的倒塌模拟	333
7.1.1 倒塌模拟的实现方法	334
7.1.2 框架结构倒塌模拟算例	336
7.1.3 框架核心筒结构倒塌模拟算例	338
7.1.4 砌体结构倒塌模拟算例	339
7.2 基于倒塌的结构体系安全性研究	341
7.2.1 第一代性能化抗震设计的局限和结构倒塌储备系数	342
7.2.2 CMR 分析在科研中的应用举例	343
7.2.3 CMR 分析在工程中的应用举例	347
7.2.4 基于一致倒塌率的建筑抗震设计方法	354
7.3 中美典型高层建筑抗震设计及性能对比	356
7.3.1 引言	356
7.3.2 Building 2 抗震设计及结果对比	357
7.3.3 HuYu 模型抗震设计及结果对比	362
7.3.4 中美典型 RC 框架-核心筒案例结构抗震性能评估	366
7.3.5 中美典型 RC 框架-核心筒案例地震损失评估	372
7.3.6 小结	380
7.4 基于开源有限元程序的弹塑性分析	380
7.4.1 引言	380
7.4.2 OpenSees 软件简介	381
7.4.3 建模方法	384
7.4.4 分析方法	390
7.4.5 验证算例	396
7.4.6 工程实例——某 500m 级超高层结构动力时程分析	399
参考文献	401

1 绪 论

1.1 地震灾害和抗震工程

1.1.1 我国的地震灾害

地震是对人类危害最大的自然灾害之一。根据不完全统计,近一个世纪以来,共有包括我国唐山市在内的 20 多座城市毁于地震灾害,造成了很大的人员伤亡和财产损失。我国位于环太平洋地震带西部,西南和西北处于欧亚地震带上,自古就是一个地震灾害严重的国家。大陆地区的地震区域分布较广,频繁且强烈。全国有 60% 的国土面积其地震基本烈度为 6 度,约一半的城市位于 7 度和 7 度以上地区,百万以上人口的大城市有 85.7% 位于地震区,因此,我国建筑物抗震工程的研究关系到国计民生,具有极其重大的意义。

2008 年 5 月 12 日发生的汶川 M8.0 特大地震,导致约 7 万人死亡,超过 1.5 万人失踪,30 余万人受伤,500 余万人无家可归,并对整个社会、经济造成了巨大冲击。由于这次地震的高效新闻报道,引起了全中国甚至全世界的密切关注,进而也非常有力地促进了抗震减灾知识的普及。关于我国和世界地震灾害的更多细节,本书不再赘述,有兴趣读者可参阅相关资料(江见鲸,2005;李杰,李国强,1992)。

1.1.2 我国抗震工程的发展

我国拥有长达 4000 余年的连续的地震活动记录历史,这是全世界所罕见的。中华民族漫长的历史进程中,面对地震威胁,曾经有过很多出色的结构抗震实践(陈国兴,2003)。进入 20 世纪后,随着近代科学的逐步引入,特别是新中国成立后 60 余年来持续稳定的和平建设,为我国抗震工程的发展提供了重要条件。这 60 多年来,先后颁布了 59、64、74/78、89、2001 和 2010 等 6 版抗震设计规范,对减少地震损失,保障人民生命财产安全,起到了极大的推动作用。汶川地震以确凿的事实,证明了抗震设计对降低地震风险的重要贡献(图 1.1-1)。

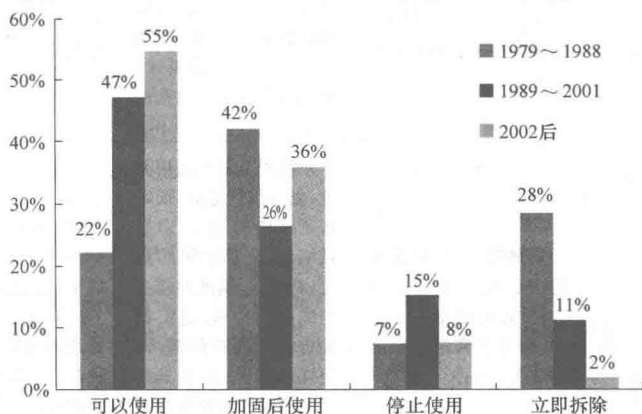


图 1.1-1 汶川地震中不同年代建造的建筑震害情况对比(清华大学等,2008)

我国抗震规范的发展不断吸纳国内外相关学科的最新进展，规范内容的简要对比参见表 1.1-1，特别是“89 规范”（GBJ 11—89，1989）明确提出了 3 水准设防（小震不坏，中震可修，大震不倒），“2001 规范”（GB 5001—2001，2001）进一步吸纳了弹塑性静力推覆分析（Pushover），隔震、消能减震等抗震技术，这都体现出了目前国际上得到极大关注的基于性能的抗震设计（Performance Based Earthquake Engineering）思想的部分关键内容。在 2010 年颁布的新版抗震规范中（GB 50011—2010，2010），在附录 M 中进一步细化了对性能化设计的要求。当然，不可否认，由于诸多原因，我国目前抗震工程实践还有着很多不足，这需要全体结构抗震工作者长期和艰苦的努力。

抗震设计规范的内容比较（清华大学等，2008）（罗开海，毋建平，2014） 表 1.1-1

		TJ 11—78 (1979)	GBJ 11—89 (1989)	GB 50011—2001 (2001)	GB 50011—2010 (2010)
概念设计 要求		非常简单	简单	较为详细	对扭转位移比、抗震缝设置等规定进一步完善
场地和 地基		简单的场地土要求； 验算地基土容许承载力； 判别是否是液化土	场地和土的类型划分； 较为详细的分类地基土承载力验算； 判别液化土的液化程度， 分别提出对应抗液化措施	增加对断裂带的要求； 对桩基的抗震要求； 其余同左	完善了对断裂带附近建筑的要求， 调整了波速分界等
地震荷 载计算		仅考虑水平方向的底部剪力和振型分解反应谱法	考虑扭转和竖向地震作用； 考虑顶部附加地震作用； 其余同左	增加对层间地震力的要求； 考虑地基与结构的相互作用， 其余同左	解决了长周期段反应谱交叉的问题
截面抗 震验算		简单的几个参数对强度作要求， 无详细规定	较为详细的强度验算， 增加了对变形的要求以及薄弱位置处的 弹塑性变形计算	同左，但是规定更为详细	增加性能化设计时截面内力验算规定
主要构造要求	砌体结构	限制抗震横墙的间距和建筑总高度； 对一定高度的建筑，选择使用构造柱； 对部分情况下的混凝土预制楼板做拉结要求	增加高宽比要求； 详细的抗剪强度计算公式； 对一定高度的建筑，要求正常情况下使用构造柱， 对教学楼、医院等横墙较少的建筑， 提高对使用构造柱的要求； 增加对多层砌块结构的要求	提高对圈梁最小纵筋要求； 增加对增设构造柱的纵筋和箍筋要求； 其他同左	降低部分结构的适用高度和适用范围。 提高楼梯间等处构造柱、芯柱的要求。 提高底部框架房屋的设计要求。 取消内框架房屋的使用
	框架结构	设置抗震缝； 要求质量中心和刚度中心重合； 设置柱的最小配筋率； 给出了详细的节点构造图	限制规范最大使用高度； 划分抗震等级； 规定规则结构的定义； 对抗震墙做较为详细的规定； 对基础、钢筋的接头与锚固作要求； 设定截面设计的地震调幅； 设定详细的梁、柱及其加密区的纵筋和箍筋间距和最小直径等要求； 限制柱的截面和轴压比	提高对抗震等级的划分； 提高截面设计的地震调幅； 对跨高比较小的连梁和剪跨比较小柱提高抗剪要求； 提高对柱截面、纵筋和箍筋的要求； 其余同左	限制单跨框架使用范围。 完善楼梯间抗震要求， 完善了强柱弱梁的设计方法， 提高了柱截面尺寸、轴压比、配筋率等要求

注：内容相同的部分，新版规范的详细程度往往高于旧版规范。

1.2 性能化抗震设计

1.2.1 性能化抗震设计的概念

早期抗震工程研究主要侧重于如何减少巨大地震下的建筑物倒塌和人员伤亡。随着人类与地震斗争经验的发展,特别是1994年美国加州北岭地震、1995年日本阪神地震、1997年土耳其地震、1999年台湾地震的几次震害表明,除了防止大震下建筑物倒塌外,中小地震导致结构正常使用功能丧失而造成的经济损失同样值得关注。特别是随着经济的发展,当建筑物内的装修、非结构构件、信息技术装备等的费用往往超过建筑物的结构费用时,这个问题变得尤其突出。这说明,基于承载力和构造保证延性的传统抗震设计方法并不完善,已不能适应现代社会对结构抗震性能的要求。由此引起了各国工程界对现有抗震设计思想和方法进行深刻的反思,迫使工程人员寻求更加完善的设计思想,使工程结构在各种可能遇到的地震作用下的反应和损伤状态控制在设计预期要求的范围内。不仅确保生命安全,而且确保经济损失最小。基于性能化的抗震设计(Performance Based Earthquake Engineering)思想就是在这一背景下提出的。

性能化抗震设计的很多主要思想其实在人们长期的抗震实践中早已在不知不觉中加以应用。20世纪60年代后,美国的C. A. Cornell, H. Krawinkler, 新西兰的T. Paulay和R. Park等人领先的研究工作,以及SEAOC (Structural Engineers Association of California, 加州土木工程师协会), ATC (Applied Technology Council, 应用技术委员会), FEMA (联邦紧急事务管理局)等组织的一系列研究计划和取得的一系列研究成果,使得人们对基于性能化的抗震设计概念逐步清晰,并逐渐趋向实用化。1995年SEAOC发表的Vision 2000报告首次对性能化抗震设计的一系列关键概念进行了系统表述,包括性能目标、性能水准、考察要素、保障措施等方面,建立了性能化设计所需的主要框架。而后,FEMA发布的FEMA 273/274 (FEMA, 1997a; FEMA, 1997b)报告给出了更具体的基于弹塑性静力推覆分析(Pushover)的性能评价方法。差不多相同的时候,ATC发布的ATC-40报告也给出了基于静力弹塑性分析和能力谱法的性能评价方法(ATC, 1996)。虽然FEMA 273/274和ATC-40所给出的弹塑性静力推覆分析在原理和流程上稍有差别,但是由于其手段简便易行,结果直观明确,因而迅速得到广泛采纳,并对国际性能化抗震设计产生了重要影响。此后,美国FEMA发布的FEMA356报告(FEMA, 2000),进一步明确了不同构件性能水准所对应的变形大小,为性能化设计奠定了关键基础。该报告随后发展为美国土木工程师学会ASCE的标准ASCE-41 (ASCE, 2006)。至此,美国第一代性能化抗震设计方法已经基本成熟并得到广泛应用。但是,美国第一代性能化设计大多是针对多层建筑的,为了进一步完善高层建筑的性能化设计,美国进一步启动了多个研究计划,陆续发布了TBI (PEER, 2010)等研究报告。针对高层建筑的特点,对结构建模、动力弹塑性分析等方面进行了详细规定,其研究成果已经写入美国部分地方标准,如高层建筑结构设计委员会颁布的洛杉矶高层建筑设计规范LATBSDC 2011 (LATBSDC, 2011)等。与此同时,针对美国之前性能化设计中存在的问题,如性能指标不便于业主理

解, 缺少非结构构件性能设计等, 美国 ATC 委员会启动了 ATC-58 研究计划, 历时 10 年, 于 2012 年颁布了 FEMA P-58 研究报告 (FEMA, 2012a; FEMA, 2012b), 不仅给出了地震下考虑各种随机特性的结构损失 (如修复或重置费用), 还包括非结构构件损失、人员伤亡、维修时间等, 代表了性能化设计的最新发展动向。

世界其他国家也在性能化设计实践上取得了很多进展, 如日本已于 2000 年 6 月采用了新的基于性能的结构抗震规范, 新西兰等国家也在其规范中加入了相关内容。我国抗震规范 2010 版也写入了性能化设计的有关内容。

对性能化设计的内涵世界各国研究者提出了不同的解释方法, 如美国 FEMA 等建议, 就是在合理的经济投入下, 使得 3D (Death, 死亡; Dollaer, 经济损失; Downtime, 停工损失) 最小。又如 H. Krawinkler 等人 (Bozorgnia & Bertero, 2004) 将性能化设计表述为以下方程的最优解:

$$\lambda(DV) = \iiint G(DV|DM)dG(DM|EDP)dG(EDP|IM)d\lambda(IM) \quad (1.2-1)$$

其中, IM 为地震烈度 (Intensity Measures); EDP 为工程需求变量 (Engineering Demand Parameters), 如层间位移, 楼面加速度; DM 为损失评价 (Damage Measures); DV 为决策变量 (Decision Variables)。积分表示相应的概率方程。

本书作者结合我国当前抗震实践和需求, 认为性能化抗震设计的核心思想包括以下三点:

(1) 多样化的抗震设防目标及其相应的成本—效益衡量手段

对于不同的建筑物, 应该根据其重要性和功能需要, 采用不同的抗震设计目标。例如我国对建筑物抗震设防分类标准分为甲乙丙丁四类, 就是这种多样化抗震设防的一个例子。性能化抗震设计所最终追求的, 是根据业主和建筑物自身的需要, 根据场地地震的发生概率、建筑物的破损概率、相关损失预测, 最后给出一个建立在最佳成本—效益核算基础上的抗震设防目标。我国目前抗震设计暴露出的一个问题就是结构设防目标局限于规范, 工程人员和业主缺乏主动性和能动性, 不能根据建筑物的实际需要加以调整。实际上, 规范给出的建筑物抗震设防标准一般是对此类建筑物的最低设防要求, 业主和工程人员应该根据自己的需求和经验, 进一步给出更为合理的设防要求。例如, 绵阳市某高层建筑, 因为其高度较高且功能重要, 设计人员主动将部分抗震设防目标提高, 因而在汶川地震中, 当绵阳遭受到超出其设防烈度 (6 度) 的地面运动时, 该高层建筑损伤极小, 在灾后很好发挥了其功能。这是一个成功的案例。

(2) 多阶段抗震设计及相应的分析手段

在明确了建筑物抗震设防的目标后, 针对不同发生概率 (不同重现期)、不同强度的地震运动, 需要进一步明确其在地震水平下的性能要求。例如我国规范中现在得到广泛认同的 3 水准设防 (小震不坏, 中震可修, 大震不倒), 就是多阶段抗震设计的重要表现。但是, 目前我国抗震设计时, 除极少数特殊结构外, 大部分结构仅进行小震计算设计, 缺少对中震和大震的定量化计算设计, 使得结构在中震、大震下的性能水准难以准确把握。震后很多中度、轻度灾区, 出现大量填充墙体破坏、室内外装修破损, 造成重大经济损失和民众心理恐慌, 就是多阶段抗震设计不足的一个重要表现 (图 1.2-1~图 1.2-3)。

由于结构在进入中震或大震后, 势必要部分进入弹塑性。这时传统的线弹性分析 (时程分析、振型组合分析等), 已经不是很适用。这就需要开发新的弹塑性分析工具和分析



图 1.2-1 墙体局部砌块脱落

谱？这是另外一个值得深入研究的问题，在本书的第3章将专门介绍本书作者有关地面运动指标的部分研究。

手段，能够较好地再现结构在进入弹塑性后的实际性能。这个问题原先一直是性能化抗震设计的一个瓶颈问题，但是随着性能化设计日益推广，目前诸多抗震分析软件都在开始增加弹塑性分析功能，故而分析工具问题有望得到有效解决，本书将着重介绍结构弹塑性分析计算的工具有关问题。此外，另一个问题是地面运动的定量化和参数化问题，我们说的小震、中震、大震都是一个概念性的描述。到底什么样的地震算小震？什么样的地震算中震或大震？是基于最大加速度？最大速度？最大反应



图 1.2-2 填充墙倾倒



图 1.2-3 墙体倒塌

(3) 多参数评价和相应判断准则

在明确了设防目标和设计方法后，需要对结构物的性能进一步提出相应的判别物理指标和判断准则。譬如，大震不倒，那什么算倒塌？是以层间位移做判据？还是以震后残余变形做判据？必须将结构物的性能和相关的物理指标相联系，才能使得性能判断客观可靠。传统的结构性能判据是以力作为判据，但是力判据不适用于结构弹塑性阶段的性能表述，而位移既可以描述线弹性阶段又可以描述弹塑性阶段，故而基于位移的抗震设计在很长的一个阶段里面成了性能化抗震设计的一个主要代表，譬如 FEMA 273/274 和 ATC-40 都是以结构的位移作为性能的一个主要标志。随着性能化设计的进一步发展，除位移外，其他物理指标，如能量、楼面加速度、残余变形等，也受到一些研究者的关注，并进行了大量的研究。例如，随着新型消能减震设备（阻尼器等）的大量涌现，从能量角度来控制地震响应成为一个研究热点，而位移显然不能很好表达能量耗散过程。于是基于能量的抗震设计方法也得到了大量研究。又比如，一些存放重要设备的建筑物对楼面加速度很关

注,或者是考虑到震后的修复成本,对震后结构物的残余变形很关注,那么这时候楼面加速度、残余变形又成为基于性能抗震设计的一个重要考察指标。

有了结构响应的物理参数后,为了将其和性能要求相关联,就必须要有相应的判断准则。比如基于位移的抗震设计,到底多大的层间位移角可以算“可修”?多大的层间位移角算“不倒”?这个问题也需要进行大量详细研究。事实上,当考虑到随机性时,结构物的性能和物理指标,都是一个连续变化的函数,而非一个离散的阶跃过程。比如在 1/50 层间位移角下,有些结构可能就会发生倒塌,而另一些结构未必会发生倒塌。因此,判别指标的选取有很多工作有待进一步开展。

此外,随着人们对抗震研究的深入,研究人员和工程人员逐渐认识到,性能化设计事实上包含着两个不同层次的内容:一方面是建立在经济活动基础上的,通过地震动概率、结构响应分析、结构损伤评价和经济损失评价,来给出基于最佳成本—效益关系抗震设计方法。这种方法的核心要素是经济问题,但是对倒塌这一特殊情况一般会要求特殊处理。另一方面,一旦结构发生倒塌,就可能会造成人员死亡,这样不仅很难给出相应的损失代价,而且也不符合“大震不倒”这一抗震设计基本的人文关怀道德。所以,近年来国内外对地震下结构的倒塌机制和抗倒塌问题,给予了更多的关注。本书 7.1 和 7.2 节对此问题进行了专门讨论。

1.2.2 美国基于性能抗震设计规范的发展及现状

1.2.2.1 SEAOC Vision 2000

1994 年北岭地震后,美国加州结构工程师协会 (SEAOC) 于 1995 年发布了第一个基于性能的抗震设计技术指导性文件 Vision 2000 “Performance-Based Seismic Engineering of Buildings” (SEAOC, 1995)。Vision 2000 建立了基于性能抗震设计方法的主要框架,对基于性能抗震设计的一系列关键概念进行了系统表述,如地震设防水准、结构性能水准、建筑性能目标、部分性能接受准则等方面。

该文件提出了完全可运行 (Fully Operational)、可运行 (Operational)、生命安全 (Life Safe) 和接近倒塌 (Near Collapse) 四个性能水准,并对每个性能水准的状态进行了描述定义,给出了各性能水准允许的最大位移角和最大残余位移角,如表 1.2-1 所示。SEAOC Vision 2000 还定义了多遇 (Frequent)、偶遇 (Occasional)、罕遇 (Rare) 和极罕遇 (Very Rare) 四级地震设防水准,并采用概率描述方法对各级地震设防水准进行了定量描述,如表 1.2-2 所示。地震设防水准和性能水准组合形成一系列性能目标,并根据建筑物的重要性层次 (一般建筑设施 (Basic Facilities)、基础和重要建筑设施 (Essential/Hazardous Facilities)、生命线及重大工程 (Safety Critical Facilities)) 确定结构最终的性能目标,如图 1.2-4 所示。

Vision 2000 的位移限值 表 1.2-1

性能水准	允许最大位移角(%)	允许残余位移角(%)
完全可运行	0.2	可忽略
可运行	0.5	可忽略
生命安全	1.5	0.5
接近倒塌	2.5	2.5

Vision 2000 的地震设防水准定量描述

表 1.2-2

地震设防水准	重现期(年)	超越概率
频遇	43	30 年超越概率 50%
偶遇	72	50 年超越概率 50%
罕遇	475	50 年超越概率 10%
极罕遇	970	100 年超越概率 10%

Vision 2000 虽提出了基于性能抗震设计中的一些重要概念,但还未形成一个完整的设计方法,尚存在一些局限性。比如,没有给出可用的结构分析评价方法来保障结构性能的可靠性;与性能水准相应的性能可接受准则不够全面和明确,很难应用于实践,并且给出的位移可接受准则是基于共识而非试验或震害调查所得;可运行和生命安全两个性能水准相差较大,可能需要增加一个中间状态。

1.2.2.2 ATC-40

美国应用技术委员会(ATC)于1996年发布了既有混凝土结构抗震评估和修复的技术指导性文件 ATC-40 “Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Concrete Buildings”,该文件采

纳了基于性能抗震设计方法的概念。ATC-40(ATC,1996)首次对非结构构件进行了系统考虑,该文件区分了结构构件和非结构构件的性能水准,结构构件共分六个性能水准:立即使用(SP-1, Immediate Occupancy)、损伤可控(SP-2, Damage Control)、生命安全(SP-3, Life Safety)、有限安全(SP-4, Limited Safety)、结构稳定(SP-5, Structural Stability)和不作考虑(SP-6, Not Considered),其中立即使用、生命安全和结构稳定是离散的损伤状态,可以在评估和修复中直接定义其技术标准,而损伤可控和有限安全是性能水准范围,以实现性能水准的连续性满足业主的需要;非结构构件共分五个性能水准:正常运行(NP-A, Operational)、立即使用(NP-B, Immediate Occupation)、生命安全(NP-C, Life Safety)、低危险性(NP-D, Hazards Reduced)和不作考虑(NP-E, Not Considered)。建筑的性能水准由结构构件的性能水准和非结构构件的性能水准组合确定,如表 1.2-3 所示,常用的建筑性能水准有 1-A 正常运行(Operational)、1-B 立即使用(Immediate Occupation)、3-C 生命安全(Life Safety)、5E 结构稳定(Structural Stability)。ATC-40 中定义了三级地震设防水准:1) 正常使用地震(the Serviceability Earthquake, SE), 50 年超越概率 50%; 2) 设计地震(the Design Earthquake, DE), 50 年超越概率 10%; 3) 最大地震(the Maximum Earthquake, ME), 50 年超越概率 5%。ATC-40 中建议性能目标可以根据建筑功能、政策或成本等进行选择,从而选定地震设防水准和相应的建筑性能水准。ATC-40 中给出的基本安全目标(Basic Safety Objective, BSO)如表 1.2-4 所示。

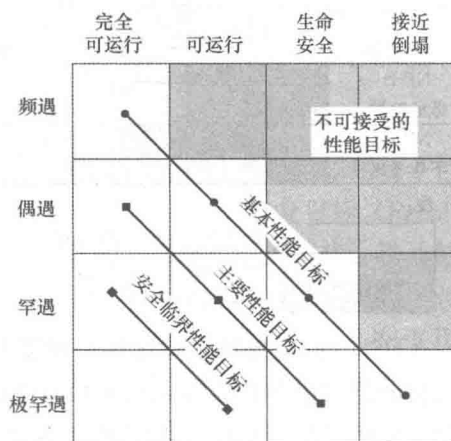


图 1.2-4 Vision 2000 中使用分类、性能水准和地震强度水准的关系图

ATC-40 结构构件和非结构构件的性能水准组合形成建筑性能水准 表 1.2-3

非结构构件 性能水准	建筑性能水准					
	结构构件性能水准					
	SP-1 立即使用	SP-2 损伤可控	SP-3 生命安全	SP-4 有限安全	SP-5 结构稳定	SP-6 不作考虑
NP-A 正常运行	1-A 立即使用	2-A	NR	NR	NR	NR
NP-B 立即使用	1-B 尚可使用	2-B	3-B	NR	NR	NR
NP-C 生命安全	1-C	2-C	3-C 生命安全	4-C	5-C	6-C
NP-D 低危险性	NR	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
NP-E 不作考虑	NR	NR	3-E	4-E	5-E 结构稳定	不可用

注：

	常用的建筑性能水准(SP-NP)
	SP-NP 的其他可能组合
NR	不推荐的 SP-NP 组合

ATC-40 的重要特色是强调采用能力谱方法进行结构分析和性能评估。能力谱方法通过结构的能力谱和地震需求谱来估算结构的弹塑性性能。能力谱的建立首先需要采用非线性静力分析（Pushover）得到力-位移曲线，由 Pushover 曲线转换得到等价单自由度体系的谱加速度和谱位移的关系曲线，即能力谱曲线。地震需求谱的建立首先需要按等效单自由度体系将地震反应谱转换成弹性需求谱，再通过考虑等效阻尼比对弹性需求谱进行折减。结构的能力谱和地震需求谱的交点称为性能点，代表建筑物能够承受的最大位移和地震强度。虽然能力谱方法简单易行，但是其理论基础和物理意义仍存在一些问题，比如 Pushover 方法仅适用于以一阶振型为主导的结构，对于受高阶振型影响较大的结构可能无法得到正确结果；且无法考虑强震持时和地震累积损伤对结构造成的影响。

ATC-40 基本安全性能目标 表 1.2-4

地震强度水准	基本安全性能目标			
	结构性能水准			
	正常运行(1-A)	立即使用(1-B)	生命安全(3-C)	结构稳定(5-E)
SE (50%/50 年)				
DE (10%/50 年)			√	
ME (5%/50 年)				√

ATC-40 从整体结构和构件两个层次给出了较详细的性能接受准则。在整体结构层次上，要求在任何性能目标下结构承受竖向荷载的能力保持完好，结构的水平承载力退化不超过峰值承载力的 20%，并给出了建筑在各性能水准下的层间位移角限值，见表 1.2-5。在构件层次上，ATC-40 根据对水平抗侧力体系的重要程度将结构构件分为主要构件（Primary Component）和次要构件（Secondary Component），主要针对主要构件给出相应的性能接受准则。对于力控制（Force-controlled）的主要构件，要求其受力需求小于等于下限强度，下限强度定义为具有 95%保证率的强度。对于位移控制（Deformation-controlled）的主要构件，要求其塑性变形在变形限值范围内，ATC-40 给出了各类构件的塑性变形限值，如框架结构中梁、柱、板的塑性转角的限值和梁柱节点总剪切角的限值，剪