

Perform-3D

在建筑结构非线性分析与 性能评估中的应用

齐 麟 黄兆纬 编著

Application of Perform-3D
in Nonlinear Analysis and Performance
Evaluation of the Structure

中国建筑工业出版社

Perform-3D 在建筑结构非线性分析与性能评估中的应用

齐 麟 黄兆纬 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

Perform-3D 在建筑结构非线性分析与性能评估中的应用/齐麟等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 4

ISBN 978-7-112-17759-2

I. ①P… II. ①齐… III. ①三维-非线性结构分析-软件工具-应用-建筑结构-结构分析 IV. ①TU31-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 029442 号

Perform-3D 是国际上著名的三维建筑结构非线性分析与性能评估软件。本书系统介绍了 Perform-3D 基于组件组装法的建模思路, 以及基于界限状态使用率的性能状态评价方法; 阐述了软件在建模阶段与分析阶段各模块中的建模过程与操作步骤, 同时对相关的结构工程概念与涉及的专业基础知识进行了具体讲解。本书立足于工程应用, 以实际工程为背景详细介绍了 Perform-3D 在复杂工程非线性分析与性能评估中的应用, 其成果得到国内审查专家的认可, 对读者从事相关的设计与研究工作具有一定的示范作用。

本书主要面向设计院与科研院所中从事结构工程设计与研究的人员, 可作为建筑设计人员的参考用书, 也可作为高等学校结构工程专业师生的教学用书。

责任编辑: 刘婷婷 刘文昕

责任设计: 董建平

责任校对: 李美娜 刘梦然

Perform-3D 在建筑结构非线性分析与性能评估中的应用

齐 麟 黄兆纬 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

北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17 字数: 420 千字

2015 年 4 月第一版 2015 年 4 月第一次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-17759-2

(27015)

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

20 世纪 90 年代初，在世界各地由于地震造成严重的生命与财产损失的大背景下，美国学者提出了基于性能的结构设计思想，即根据一系列性能目标来确定设计准则，性能目标可以通过结构响应相对于极限值的使用率来量化，通过结构层面的层间位移、构件层面的受力与变形等性能指标对结构进行评估，使设计出的结构在未来地震发生时能够实现预期的性能水平，将结构的损坏控制在可接受的范围内。基于性能的设计方法强调实现结构性能目标的深入分析与论证过程，有利于实现结构设计的创新，业主可为结构设定“个性化”的性能目标，设计人员也拥有了自由发挥的空间。

国外对结构性能评估与设计方法开展了多年的研究，其成果已写入相关技术文件。美国加州结构工程师协会（Structural Engineers Association of California, SEAOC）于 1995 年颁布了《基于性能的建筑抗震设计框架》（A Framework for Performance-Based Seismic Engineering of Buildings），提出了针对新建结构的性能化抗震设计框架。1996 年美国应用技术委员会（Applied Technology Council）颁布的《混凝土建筑抗震加固与改造标准》（Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC40）中提出混凝土结构性能的概念。1997 年美国联邦应急管理署（Federal Emergency Management Agency, FEMA）颁布了《建筑抗震加固导则》（NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 273）及相应的说明文件《建筑抗震加固导则条文说明》（NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 274），明确提出了基于性能的结构设计方法。之后由 FEMA 颁布的《建筑抗震加固导则及条文说明》（Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356）与美国土木工程师协会（American Society of Civil Engineers）颁布的《既有建筑抗震加固标准》（Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, ASCE 41-06）在 FEMA 273 的基础上对构件性能水平及设防目标等内容进行了修订与完善。2003 年美国国际规范委员会（International Code Council）正式发布了《建筑物与设施性能设计规范》（Performance Code for Buildings and Facilities, ICC2003），对性能设计方法的重要准则作了明确规定。日本建筑研究院（Building Research Institute, BRI）于 1995 年开始进行“建筑结构的新设计框

架开发”研究，并于2000年开始施行新的基于性能的建筑基准法（Building Standard Law）。由欧洲混凝土学会（CEB）与国际预应力学会（FIP）合并成立的国际结构混凝土联合会（FIB）于2003年出版了研究报告《基于位移的钢筋混凝土结构抗震设计》（Displacement-Based Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings），标志着欧洲开始采用性能设计方法进行混凝土结构设计。澳大利亚将抗震性能设计与防火性能设计的研究成果写入了《澳大利亚建筑设计规范》（Building Code of Australia, BCA1996）。

我国设计规范中的“小震不坏，中震可修，大震不倒”也可认为是一种性能目标，基于我国现行规范进行设计即以此标准作为结构设计的统一性能目标，尚未实现基于业主意愿的结构性能目标“个性化”。目前我国尚未以规范规定的形式明确给出基于性能的结构设计方法，但工程界与学术界已逐渐认识到了性能设计的优越性，基于性能的设计思想被认为是未来结构防震减灾设计的主要发展方向。

随着我国经济建设与社会文化的快速发展，近年来全国各地陆续出现各种形式的高层、超高层及体型复杂的超限建筑，很多建筑超出了设计规范与规程的适用范围。我国经济的高速发展驱动着工程设计的快速创新，不断出现的体型特别复杂、规模特别巨大的特殊建筑在一定程度上超出了当前结构工程领域的研究与应用水平，导致技术规范与行政法规的修订工作滞后于工程实践。随着国务院《建筑工程质量管理条例》与《建筑工程勘察设计管理条例》的施行，原建设部发布了《超限高层建筑工程抗震设防管理规定》、《全国超限高层建筑工程抗震设防审查专家委员会抗震设防专项审查办法》与《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》等重要文件，并成立了全国与各省市的超限高层建筑工程抗震设防审查专家委员会，对超限高层建筑工程进行抗震专项审查。

对于复杂结构与超限结构，由于在设计中有很多技术问题尚无规范依据可循，采用基于性能的结构设计方法，实现结构在各种水平地震作用下的多重抗震性能目标，确保其安全性与功能性，便成为设计人员的不二选择。采用基于性能的设计方法对复杂结构与超限结构进行设计时，正确确定地震作用下结构的变形需求及精确的非线性分析是其关键。性能设计的实质是要正确地预测结构在各种地震作用下的工作性能，与传统方法的不同之处在于结构屈服后的非线性分析，这对设计人员的结构概念与分析能力提出了更高的要求。“工欲善其事，必先利其器”，由于结构分析的复杂性，设计人员必须依据一套性能可靠、认可度高、兼具精确性与高效性的性能化设计软件才有可能完成对复杂结构与超限结构的性能评估与非线性分析。我国建筑结构工程领域的设计实践对基于性能的结构设计方法与分析手段具有迫切的需求。由美国加州大学伯克利分校的Graham H. Powell教授开发的Perform-3D是一款国际著名的三维建筑

结构非线性分析与性能评估软件。Perform-3D 以结构工程的基本概念为基础,以结构构件的力学性能设定为前提,通过结构分析手段来得到整体结构的性能评估,符合工程师对结构性能的理解,在美国 FEMA 系列技术文件的制定过程中发挥了举足轻重的作用。Perform-3D 根据 FEMA356 与 ASCE41-06 等技术文件对结构性能进行自动评价,以确定结构在地震作用下的性能水平,判断结构是否满足预先设定的抗震性能,为基于性能的结构设计提供了强大的分析工具。美国加州大学伯克利分校的土木工程系在全美排名第一,Perform-3D 的开发者 Powell 作为该系的资深教授在世界结构工程领域享有盛名,具有一定的影响力。Perform-3D 运用了独特的力学思路与建模方式,可解决结构工程领域的多种科研问题。因此 Perform-3D 已成为工程界与科研界认可度与接受度较高的高端分析软件之一。每年由金土木公司与筑信达公司举办的 Perform-3D 应用研讨班均吸引了来自国内科研院所与设计行业的大量参会人员,也从侧面证明了 Perform-3D 在我国的影响力。

Perform-3D 是一款设计独特的软件,其建模思路较为特殊。齐麟博士与黄兆纬总工在 Perform-3D 的操作应用以及结构设计参数与性能设计标准的结合方面做了大量的工作,在工程实践中不断对该软件的建模思路、操作技巧与分析方法进行学习与总结,并将相关体会与经验进行编辑整理著成本书。该书立足于工程实践,结合软件应用介绍结构性能分析的相关理论与方法,介绍各种方法在 Perform-3D 软件中的实现过程,以及各种参数的选取方法。该书实例部分结合了天津市建筑设计院建筑结构技术咨询研发中心多年来在超高层设计和咨询中积累的工程经验,直接节选自超限审查报告,经过了国内相关专家的审查与认可,对读者从事相关的设计与科研工作具有良好的示范性。

相信本书的出版对读者掌握 Perform-3D 的操作方法、了解结构性能设计方法大有裨益!



全国勘察设计大师 林 桐

2015 年 2 月

前 言

Perform-3D 是一款国际著名的三维建筑结构非线性分析与性能评估软件，由美国加州大学伯克利分校的 Graham H. Powell 教授开发，由美国著名结构分析软件公司 CSI (Computer & Structure Inc.) 负责发行与维护。Perform-3D 是以结构非线性分析与性能评估为核心的高端软件平台，在基于性能的结构设计过程中起着重要的作用。Perform-3D 根据 FEMA-356 (Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings) 与 ASCE-41 (Seismic Rehabilitation of Existing Buildings) 等技术文件对结构性能进行自动评价，确定结构在各种工况下的性能水平，判断结构是否满足预先设定的性能目标，是实现结构性能设计的重要手段。Perform-3D 具有丰富的结构单元模型、高效的非线性分析能力、完善的结构性能指标、完整的结构性能评估体系，为工程师深入、全面地对结构进行非线性分析与性能评估提供了强大的数值工具。

Perform-3D 以结构工程的基本概念为基础，以结构构件的力学性能设定为前提，通过结构分析手段对结构的整体性能进行评估，符合工程师对结构性能的理解，便于工程师采用结构概念与试验数据对分析结果进行验证，因而在美国工程界得到了广泛的认可。同时，Perform-3D 也是美国科研机构与高校进行结构非线性分析与性能评估的主要工具，在 FEMA 系列规范的制定过程中发挥了举足轻重的作用。

近年来，我国建筑结构工程领域的设计实践与技术发展对基于性能的结构设计方法与分析手段具有迫切的需求。随着工程复杂性的增加，越来越多的建筑结构需要进行非线性分析与性能评估。目前我国的建筑结构规范体系中没有系统的结构性能评价指标，在进行超限审查时均以 FEMA-356 或 ASCE-41 等美国技术文件为依据进行结构性能分析，而 Perform-3D 正是以上述标准为基础开发的，程序可自动应用以上技术文件中的指标分析结构性能，因此国内大量超限结构工程均采用 Perform-3D 进行非线性分析与性能评估。Perform-3D 的建模思路与后处理输出均以结构概念为基础，可以明确判断结构与构件所处的性能状态，该软件因此得到了国内超限工程审查专家的广泛认可。加州大学

伯克利分校土木工程系的科研实力在美国排名第一, Graham H. Powell 作为该系的资深教授在世界结构工程界享有盛名, 由其开发的 Perform-3D 运用了独特的分析思路与建模方式, 可解决结构工程研究领域的多种问题, 成为我国科研界认可度与接受度较高的高端分析软件之一。

由于 Perform-3D 为英文软件, 且采用了十分独特的建模思路, 其自带的英文帮助文件又涉及大量的力学、数学及结构工程相关概念与专业知识, 导致设计院的一般设计人员与初学的科研工作者很难在短时间内掌握其操作方法。许多设计师与研究人员反映 Perform-3D 学习困难, 缺少中文资料, 难以掌握。为解决以上问题, 笔者从 Perform-3D 的操作方法、相关结构工程基础知识以及工程实践应用三方面入手编写了本书, 为帮助读者快速理解 Perform-3D 的建模思路, 了解其分析步骤与基于结构概念的性能分析与评价过程, 并通过本书提供的工程实例, 掌握该软件在复杂结构非线性分析与性能评估中的应用方法贡献微薄之力。

本书具有以下特点:

(1) 内容完整。对程序的所有模块、所有功能均进行了详细介绍。编写过程中力求做到使读者看过本书后便能全面掌握 Perform-3D 的所有功能, 读者根据本书对各模块操作步骤的介绍可轻松建立结构模型, 并在程序后处理中输出需要的计算结果。

(2) 具有一定的专业性。在介绍软件操作过程时穿插介绍相关结构工程专业理论知识, 重点介绍结构非线性计算与性能评估方面的相关基础知识, 各种分析计算方法在 Perform-3D 软件中的实现过程, 以及相关参数的适用情况与选取方法, 以使读者在应用软件时对相关的结构概念与力学知识有所了解, 掌握各种单元类型与分析方法的使用范围与适用工况, 做到“知其然且知其所以然”。

(3) 立足于工程应用。本书编者曾主持或参与多项地标性大型重点工程的方案设计与咨询, 与多家设计单位及科研院所保持良好合作, 且在工作中对多种结构工程设计与有限元分析软件均有涉猎, 尤其对 Perform-3D 独特的建模思路与功能特点具有深刻的理解。在本书的算例部分, 分别引用了天津市建委科技项目“隔震技术在天津中小学中的应用研究”中的隔震框架结构教学楼、天津津湾广场 9 号楼 300m 钢框架-混凝土核心筒超限高层结构、天津中信城市广场 R1 号楼 180m 剪力墙超限高层结构, 以及苏州新闻大厦 160m 框架-核心筒超限高层结构。这些实例均有典型性, 代表了不同的结构形式, 便于读

者快速掌握不同类型的结构在 Perform-3D 中的建模方式。同时, 这些算例均为实际工程, 且均取自超限工程审查报告或课题结题报告, 其成果得到了国内审查专家的认可, 对读者从事相关的设计与研究工作具有一定的示范作用。

本书共 21 章, 其中第 1 章~第 4 章, 第 8 章~第 11 章, 第 16 章~第 20 章由齐麟编写; 第 5 章~第 7 章由胡雪瀛, 齐麟编写; 第 12 章~第 15 章由黄兆纬编写; 第 21 章由杨律磊、朱寻焱编写。全书由齐麟统稿, 由天津市建筑设计院王俊霞教授级高级工程师与宋彻教授级高级工程师审定。

本书编者采用 Perform-3D 进行建模分析与工程计算时, Powell 教授曾亲自发来电子邮件进行指导。Powell 教授严谨的作风, 敬业的精神与亲和的态度令编者大为感动, 在此谨向 Powell 教授表达感激之情!

本书在编写过程中得到了全国勘察设计大师林桐教授级高级工程师的悉心指点, 以及天津市建筑设计院副院长张津奕正高级建筑师的大力支持, 在此表示衷心感谢! 本书在编写过程中结合了天津市建筑设计院建筑结构技术咨询研发中心多年来在超高层设计和咨询中积累的工程经验, 工程算例部分的编写得到了研发中心黄信博士、朱旭东博士、刘涛高级工程师、赵宇欣高级工程师以及苏州工业园区设计院江苏省生态建筑与复杂结构工程技术研究中心领导与同仁的大力帮助, 在此一并表示感谢!

由于编者水平有限, 书中难免有错漏之处, 恳请广大读者批评指正! 如有指教请发电子邮件至 qilin1208@163.com。

编 者

2015 年 2 月

目 录

第 1 章 基本介绍	1
1.1 概述	1
1.2 程序界面	2
1.2.1 程序窗口	2
1.2.2 分析模型与阶段	2
1.2.3 视角定义	4
1.3 模型文件	5
1.3.1 程序与模型存储文件夹	5
1.3.2 移动或复制结构模型文件	5
1.3.3 用户文件夹	6
1.3.4 Records 文件夹	6
1.3.5 RecordsF 文件夹	6
1.3.6 Spectra 文件夹	6
1.3.7 ECHO FILE 存储路径	6
1.3.8 打印与保存结果	7
第 2 章 定义节点信息与框架	8
2.1 定义节点与支座	8
2.2 质量	9
2.3 节点约束	9
2.3.1 刚性楼板	10
2.3.2 刚体约束	10
2.3.3 偏心连接	10
2.3.4 等位移约束	11
2.4 框架	11
第 3 章 组件	13
3.1 单元与组件	13
3.2 定义组件	14
3.2.1 梁柱截面组件	14
3.2.2 墙纤维截面	15
3.2.3 框架纤维截面	17
3.2.4 基本组件定义	17
3.2.5 绘制滞回曲线	18
3.2.6 强度截面	18
3.2.7 框架复合组件	19

3.2.8	剪力墙复合组件	20
3.2.9	通用墙复合组件	20
3.2.10	黏滞阻尼杆与 BRB（屈曲约束支撑）复合组件	21
3.3	组件属性管理	21
3.4	<i>F-D</i> 曲线	22
3.4.1	理想弹塑性与双线性关系	23
3.4.2	附加平行刚度	23
3.4.3	强度损失	23
3.4.4	考虑强度损失所带来的问题	25
3.5	考虑轴力影响的柱构件属性	28
3.5.1	轴力的影响	28
3.5.2	柱的屈服后转角	29
3.5.3	Perform-3D 不同屈服极限的应用	30
3.5.4	步骤	31
3.6	变形与强度能力	31
3.6.1	需求与能力	31
3.6.2	组件变形	32
3.6.3	结构水平位移角	32
3.6.4	组件强度	32
3.6.5	界限状态与使用率概述	33
3.7	考虑塑性铰转动影响的梁柱构件剪切强度	34
3.8	滞回曲线	36
3.8.1	滞回性能	36
3.8.2	滞回曲线的形式	38
3.8.3	卸载刚度系数的定义	39
3.9	截面	39
3.9.1	作用	39
3.9.2	梁与柱截面	40
3.9.3	梁柱纤维截面	41
3.9.4	墙纤维截面	41
3.9.5	使用截面尺寸	41
3.9.6	梁翼缘削弱的梁柱刚性节点模拟	41
3.9.7	曲率型塑性铰的附属长度	42
3.10	“自动”类型组件	42
3.10.1	梁柱自动端部区	42
3.10.2	钢框架自动节点板域	43
3.10.3	节点板域的界限状态	44
3.11	上限与下限	44
3.11.1	概述	44
3.11.2	定义步骤	44
第 4 章	单元与荷载	46
4.1	单元类型	46

4.1.1 杆单元	46
4.1.2 梁单元	46
4.1.3 柱单元	47
4.1.4 “支撑/其他框架”单元	47
4.1.5 剪力墙单元	48
4.1.6 通用墙单元	48
4.1.7 填充板单元	48
4.1.8 连接板域单元	48
4.1.9 屈曲约束支撑单元	48
4.1.10 黏滞杆单元	49
4.1.11 隔震单元	49
4.1.12 板/壳单元	49
4.1.13 支座弹簧单元	49
4.1.14 变形测量单元	50
4.2 指定单元	50
4.2.1 单元组	50
4.2.2 步骤	51
4.2.3 建立新单元组	51
4.2.4 添加与删除单元	51
4.3 单元方向	52
4.4 单元属性	54
4.5 组间移动单元	54
4.6 $P-\Delta$ 效应、 $P-\delta$ 效应与大位移效应	54
4.6.1 $P-\Delta$ 效应与大位移	55
4.6.2 $P-\delta$ 效应	56
4.6.3 何时考虑 $P-\delta$ 效应	57
4.6.4 弯曲变形引起的轴向缩短	57
4.6.5 几何非线性可选项	58
4.7 荷载形式	58
4.7.1 节点荷载	59
4.7.2 单元荷载	59
4.7.3 自重荷载	60
第5章 输出设置	61
5.1 位移角	61
5.1.1 水平位移角	61
5.1.2 扭曲位移角	61
5.1.3 定义步骤	62
5.1.4 参考位移角	62
5.2 挠度	62
5.3 结构剖面	63
5.3.1 结构剖面的作用	63
5.3.2 定义单元截断	63

5.3.3 墙结构剖面的剪切强度	64
5.3.4 剖面组与强度界限状态	65
5.3.5 剪力墙的弯矩、剪力与需求能力比曲线	66
5.4 界限状态	66
5.4.1 界限状态的类型	67
5.4.2 变形界限状态	67
5.4.3 强度界限状态	68
5.4.4 位移角界限状态	68
5.4.5 挠度界限状态	69
5.4.6 结构剖面界限状态	69
5.4.7 界限状态组	69
第6章 生死单元	71
6.1 生死单元	71
6.2 步骤	71
第7章 模型数据的导入与导出	72
7.1 导入模型数据	72
7.1.1 文本文件	72
7.1.2 单元信息文件	72
7.1.3 节点信息文件	73
7.1.4 节点质量信息文件	74
7.1.5 节点荷载信息文件	74
7.2 注意事项	75
7.3 导入与导出操作	75
7.3.1 导入操作	75
7.3.2 导出操作	76
7.4 导入与导出组件属性	76
7.4.1 概述	76
7.4.2 操作步骤	76
第8章 荷载工况	78
8.1 竖向荷载工况	78
8.1.1 概述	78
8.1.2 定义步骤	78
8.2 静力推覆荷载工况	80
8.2.1 推覆荷载	80
8.2.2 线性分析选项	81
8.2.3 定义步骤	81
8.2.4 控制信息	82
8.2.5 注意事项	84
8.3 地震荷载工况	86
8.3.1 地震记录	86
8.3.2 总时间	88

8.3.3 增量步时长	88
8.3.4 最大“事件”数	89
8.3.5 保存间隔	89
8.3.6 停机条件	90
8.3.7 参考位移角	90
8.3.8 Q1 作用方向	90
8.4 动力荷载工况	90
8.4.1 定义动力荷载	90
8.4.2 定义动力荷载工况	92
8.4.3 多点地震激励分析	93
8.5 反应谱分析工况	95
8.6 Unload Push-Over 工况	96
第 9 章 分析设置	98
9.1 分析序列	98
9.1.1 概述	98
9.1.2 定义步骤	98
9.2 标准与通用加载顺序	100
9.3 力超越容差	100
9.4 阻尼	101
9.4.1 概述	101
9.4.2 线性分析中的阻尼	102
9.4.3 非线性分析中的阻尼	104
9.4.4 混凝土纤维的阻尼	104
9.4.5 Base Isolation 类型的 αM 阻尼	105
9.5 上限与下限	106
9.6 Quick'n'Dirty	107
9.7 分析步	107
第 10 章 振型与反应谱分析	109
10.1 显示振型	109
10.2 反应谱分析结果	109
第 11 章 能量分析	110
11.1 能量类型	110
11.1.1 动力分析	110
11.1.2 静力分析	110
11.2 能量显示	111
11.2.1 全结构能量显示	111
11.2.2 单元组的非弹性耗能	111
11.2.3 单元组中的 βK 阻尼耗能	111
11.3 近似阻尼比	111
11.3.1 概述	111
11.3.2 计算方法	112

11.3.3 近似阻尼比的显示	112
第 12 章 结构变形图	113
12.1 结构变形图	113
12.2 操作步骤	114
12.2.1 仅绘制变形图	114
12.2.2 显示变形云图	114
12.2.3 将使用率保存至文本文件	115
第 13 章 绘制时程曲线	116
13.1 单节点时程曲线	116
13.1.1 时程曲线的类型	116
13.1.2 绘制与保存单节点时程曲线	116
13.2 保存多个节点的时程曲线	117
13.3 绘制与保存单元时程曲线	117
13.4 保存多个单元的时程曲线	117
13.5 位移角与挠度时程曲线	118
13.6 结构剖面力时程曲线	118
13.7 绘制多个荷载工况下的结构剖面力	118
13.7.1 概述	118
13.7.2 步骤	119
第 14 章 绘制滞回曲线	120
14.1 概述	120
14.2 操作步骤	120
14.3 滞回曲线倒角	121
14.4 保存至文本文件	121
第 15 章 弯矩图与剪力图	122
15.1 单个单元的计算结果	122
15.1.1 选择单个单元	122
15.1.2 显示单元上的竖向荷载	122
15.1.3 单元上弯矩与剪力的包络图	122
15.1.4 单元弯矩与剪力的时程图	123
15.1.5 单元变形图	123
15.2 同一直线上多个单元的弯矩图与剪力图	124
15.3 结构剖面上的弯矩与剪力图	124
第 16 章 推覆分析	125
16.1 推覆分析法分类	125
16.2 能力谱方法	125
16.2.1 概述	125
16.2.2 等效单自由度系统的转换	126
16.2.3 能力谱	127
16.2.4 需求谱	128

16.2.5 计算性能点	130
16.3 目标位移法	130
16.4 FEMA440 等效线性化方法	132
16.5 FEMA440 位移修正法	133
16.6 静力推覆分析方法的一般步骤	133
16.7 定义反应谱	134
16.7.1 反应谱类型	134
16.7.2 增加或编辑反应谱	134
16.7.3 复制反应谱	134
16.8 通用推覆分析模块	135
16.8.1 绘制能力曲线	135
16.8.2 定义试算点	136
16.8.3 选择分析方法	137
16.8.4 性能评估	137
16.9 目标位移法推覆分析模块	138
16.9.1 概述	138
16.9.2 操作步骤	138
第 17 章 绘制使用率	140
17.1 单工况使用率	140
17.2 荷载工况组合的使用率	141
17.2.1 定义步骤	141
17.2.2 荷载工况组合	142
17.2.3 结构的使用率	143
17.2.4 单元的使用率	143
第 18 章 算例 1: 隔震框架结构	145
18.1 结构分析模型	145
18.1.1 工程概况	145
18.1.2 橡胶隔震支座	145
18.1.3 结构计算模型	145
18.2 性能指标	146
18.2.1 构件力学行为的描述	146
18.2.2 构件性能水准	147
18.2.3 结构抗震性能水准	147
18.3 结构静力抗震性能分析	147
18.4 动力时程分析	155
18.5 结论	159
第 19 章 算例 2: 津湾广场 9 号楼	160
19.1 工程概况	160
19.2 分析目的	161
19.3 计算模型	161
19.3.1 材料本构模型	162

19.3.2 单元模型	162
19.4 结构抗震性能水准	165
19.5 分析步	166
19.6 计算结果分析	167
19.6.1 振型	167
19.6.2 层间位移角	169
19.6.3 基底剪力	170
19.6.4 能量耗散	172
19.6.5 结构顶点位移	174
19.6.6 构件性能状态	175
19.7 结论	189
第 20 章 算例 3: 中信城市广场 R1 号楼	190
20.1 工程概况	190
20.2 分析目的	190
20.3 结构模型	191
20.3.1 材料本构	191
20.3.2 构件模型	192
20.4 性能目标	192
20.5 分析步	193
20.6 计算结果分析	195
20.6.1 振型	195
20.6.2 层间位移角	196
20.6.3 基底剪力	197
20.6.4 结构顶点位移	197
20.6.5 构件性能状态	199
20.7 结构抗震性能评价	214
20.8 计算精度与效率的讨论	214
20.8.1 计算时长	214
20.8.2 层间位移角	214
20.8.3 楼层剪力	216
20.8.4 顶点位移	218
20.9 结论	219
第 21 章 算例 4: 苏州新闻大厦	221
21.1 工程概况	221
21.2 分析目的	222
21.3 结构模型	222
21.3.1 材料模型	223
21.3.2 剪力墙模型	223
21.3.3 梁构件的模拟	224
21.3.4 柱构件的模拟	224
21.4 性能目标	224