

抗震工程学

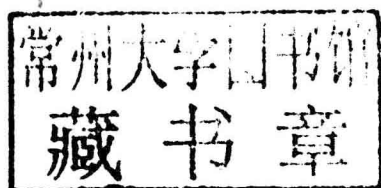
——理论与实践

扶长生 著

中国建筑工业出版社

抗震工程学——理论与实践

扶长生 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

抗震工程学——理论与实践/扶长生著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013

ISBN 978-7-112-15258-2

I. ①抗… II. ①扶… III. ①抗震结构-结构工程-工程力学 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 052329 号

责任编辑: 刘瑞霞 辛海丽

责任设计: 董建平

责任校对: 姜小莲 刘梦然

抗震工程学——理论与实践

扶长生 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

北京红光制版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21 $\frac{3}{4}$ 字数: 540 千字

2013 年 6 月第一版 2013 年 6 月第一次印刷

定价: 128.00 元

ISBN 978-7-112-15258-2

(23358)

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)



扶长生，教授级高级工程师，日本土工学会会员，英国结构工程师学会会员。香港工程师学会会员。毕业于同济大学，师从俞载道教授，硕士学位。

曾在国内外高等院校和研究机构长期从事教学与科研工作，在建筑设计院长期担任结构专业负责人，创办了上海长福工程结构设计事务所，完成了大量的结构设计。

先后担任或担任过中国砌体结构标准技术委员会副主任，中国高层建筑抗震专业委员会委员，上海市超限高层建筑抗震审查委员会委员。

序

本书作者扶长生教授要我为本书作序，我感到有点难以胜任。我通读了本书，又请我的几位学有造诣的同事和朋友阅读了此书，共同的结论是能为本书作序是一种荣幸和快乐。

本书共四篇。第一篇地震工程学较全面地讲述了地震作用和抗震设防标准的相关内容，其中归纳和介绍的中国抗震设计理论框架，中国地震区划图和地震危险性分析等，对于从事抗震设计的结构工程师们都是必读的基础知识。第二篇结构动力学，作者撰写时重视给出相关的数学背景和物理意义，这对加深读者理解是重要的。如在运动方程求解中，着重说明单位脉冲函数、脉冲响应函数、复指数函数、传递函数之间的内在联系以及它们与系统动力反应之间的关系，对于 Duhamel 积分公式给出了卷积在抗震分析中具有把脉冲响应函数作为时间的窗口扫描地震波、不断地把能量传递至建筑物的物理意义。又如在有限单元法中，着重介绍泛函、变分与能量、最小势能原理，表示能量的积分表达式与运动微分方程式之间的对应关系等。在抗震分析方法中，作者论述了某一个周期点的反应谱值综合反映了结构地震反应的工程特征，从整体上反应谱曲线包含了震源机制、传播途径及场地特性等地震工程学的重要信息的观点。对于反应谱理论，作者重点介绍它的随机振动数学模型及其统计平均意义，由此精辟指出反应谱的杰出贡献在于巧妙地结合了随机理论和确定性分析方法，把地震波的峰值加速度、频谱特性与结构自振特性及地震作用和效应三者有机联系在一起，从而为抗震设计提供了一条切实可行的途径。第三篇抗震分析和设计，主要讲述结构抗震设计的理论和方法，作者对抗震设计，强调建筑物抗震的基本机理，强度、延性和耗能，又很好地结合实际对现行抗震设计规范中的抗震等级、内力调整系数等作了实事求是的评价。对基于性能的抗震设计方法，正确指出罕遇地震分析中评估结构性能目标的物理量是非线性变形及其可接受准则。书中系统地阐述了静力弹塑性推覆分析的原理、研究现状、高振型的影响等，指出推覆分析是反应谱理论在非线形分析中的延伸，性能点位移符合统计意义上的平均，论述了用确定性分析方法求解随机振动的唯一方法只能是求取其统计平均值的抗震设计哲理，在此基础上，建立了推覆分析的输入地震动加速度核定准则。这些对抗震设计向基于性能的抗震设计方法过渡是具有现实意义的。第四篇专题讨论，主要介绍作者在工程实践方面既尊重规范又结合实践需要勇于创新的一些做法和案例。例如，在楼板的抗震设计方面，制订了柱支承双向板、转换板的设计及薄弱连接板，小震混凝土核心层不裂、中震极限状态承载力设计、大震继续能承受竖向荷载与传递水平剪力的抗震设防标准，认为带周边框架梁的板柱-抗震墙结构体系实质上仍应归类于框架-剪力墙结构体系。在抗扭设计方面，指出扭转不规则的本质是结构动力特性的不规则，提出了平动周期为第一周期规定的局限性以及结构自振特性参数要计入及控制平动振型中扭转方向因子等学术观点。这些对于推动抗震设计理论的进步和抗震设计水平的提高都有较重要的贡献。

综上所述，本书是一本较为全面地讲述地震工程和建筑抗震设计的优秀著作，也是一本较有特色的理论与实践结合较好的抗震设计专著，还是一本具有不少作者创新见地的著作，是值得广大结构工程师们花点时间阅读和学习的。

魏 璉

2013年1月29日

前 言

抗震设计理论涉及地震学、地震工程学、结构动力学和土木工程学等领域，已经发展成一门独立的学科，抗震工程学。地震工程学与抗震工程学存在交叉的研究领域，但侧重点不同。地震工程学侧重于地震区划、地震作用及设防标准，抗震工程学侧重于抗震分析、性能评估及结构设计。本书从结构工程师的角度，对这些领域的基础理论作一个综合性介绍。在编写中，强调数学背景，物理意义以及工程实践中的应用。

20 世纪 90 年代，作者正式踏进设计领域。我国的抗震设计也进入了一个飞跃发展的时代。一方面，抗震设计规范从 89 版升为 2001 版及 2010 版；另一方面，随着计算机硬件的快速发展，计算机辅助设计已经得到了普及，开发了一批有影响力的计算机软件。与此同时，国外的设计公司和国际通用软件纷纷进入中国，国外的研究成果和抗震理论也开始影响到国内设计市场。由于各种历史原因，中国现行规范尚不能完全反映结构的抗震机理。作者组建上海长福工程结构设计事务所以来，一直在尝试通过典型工程开展一些力所能及的应用性研究，希望能在设计院和高等院校之间、实践和理论之间架起一座桥梁。若本书能对工作在第一线的结构工程师在理解规范条文和计算机程序技术条件等方面，对结构专业的高年级学生、研究生及教师们在增加结构抗震设计的工程经验等方面有所帮助，实属万幸。

全书分为四篇十章。第一章和第二章编为第一篇，地震工程学。结构工程师对地震工程学的内容可能比较陌生，但是它们是抗震设计的基础性资料，是编制烈度区划、地震动区划，抗震设计规范和制订抗震设计标准的背景知识和依据。随着弹性和弹塑性时程分析的推广和逐步普及，选择合适的地震动加速度记录作为系统的输入时，这方面的知识显得尤为重要。

第三章～第五章编为第二篇，结构动力学。它们是抗震设计的专业基础内容。第三章依次讲述了单自由度系统、多自由度系统、无限自由度系统的线性动力分析。对单自由度系统，着重于单位脉冲函数、脉冲响应函数、复指数函数、传递函数之间的内在联系以及它们与系统动力反应之间的关系。对多自由度系统和无限自由度系统，着重讲述振型正交、振型分解、振型叠加、振型参与的收敛以及高振型的性质等。第四章讲述有限单元法。有限单元法是由力学工程师，物理学家和数学家共同发展起来的一种数值分析技术，在工程中得到了最广泛的应用。有限单元法内容广泛、论文丰富。这里仅仅涉及有限单元法的基础知识，着重于数学物理背景与核心概念，如泛函与能量、变分与最小势能原理、形函数与单元的力学性能等，其次介绍实用单元，对有限元增加一些感性认识。第五章在回顾了金属材料的塑性理论，简述了混凝土的非线性材料特性的基础上，主要讲述在时间域中求解非线性方程的最通用的方法，步步积分法和荷载转移法。结构动力学内容丰富，本书仅仅是纲要性地涉及与抗震设计最为密切的内容。当前，最有影响力的结构动力学专著是 Clough R. 的 *Dynamics of Structures* 和 Chopra A. K. 的 *Dynamics of Structures*；

Theory and Applications to Earthquake Engineering。有兴趣的读者可以从这两本书中获取全面知识。

第三篇抗震设计和分析是本书的重点,由第六章~第八章组成。第六章讲述当前抗震设计中的主流方法,振型分解反应谱法。它是一种结合经验系数的极限承载力+延性措施保证的设计方法。主要内容涉及反应谱理论的数学模型,反应谱曲线的形状以及振型的SRSS和CQC组合,并且根据作者的设计经验和理论水平,应用能力设计原理及 $R-\mu-T$ 准则对抗震等级做了一些梳理。第七章讲述钢筋混凝土构件的非线性性能和分析模型。它们是把线性模型改造为非线性模型进行非线性分析的基础知识。尤其是分层壳单元和PERFORM-3D的复合墙单元,替代了粗糙的等代柱模型,在剪力墙结构和框架-剪力墙结构的非线性分析中起到了重要的作用。当前的热门话题,基于性能的抗震设计方法,编排在第八章。性能设计不是简单地加强,而是应用非线性分析,通过塑性变形和可接受准则对构件和结构的抗震性能做全面的评估,用最节约的投资得到最合理的设计。当结构体系或构件类型超出了规范的常规范畴,采用性能设计法设计时,与按规范规定设计方法设计的同类结构比较,要求结构具有至少相等的抗震性能。推覆分析是性能设计的重要分析手段。书中,对推覆分析作了系统的论述,突破了推覆分析只能考虑第一振型影响的传统概念,并指出性能点位移的统计平均意义。由于非线性动力分析的离散性,推广推覆分析具有现实的工程意义。这部分内容国内的研究和实践尚属起步阶段。尽管目前已经在复杂高层建筑的抗震设计中有所应用,但是有待于完善。作者借助于美国的研究成果和ASCE 41的可接受准则,已经成功地应用性能设计方法完成了多项结构设计。

第四篇编排了两个专题讨论。第九章讨论楼板的抗震设计。有关这方面的内容,规范没有明确的规定。它们是在作者研究成果的基础上,整理、扩充而成的,涉及柱支承双向板、转换厚板和薄弱连接板等的抗震设计标准和设计方法。板柱-抗震墙结构与楼板的抗震设计有密切的联系。根据结构的基本力学性质,按规范构造要求设置周边框架梁的板柱-抗震墙结构似乎更应该归类于带板柱节点的框架-剪力墙结构。这部分研究成果,作者已经成功地应用于结构设计中。第十章讨论结构的抗扭设计。2000系列规范颁布以来,位移比、周期比几乎是每个工程都要面临的问题。抗震专项审查时,也作为一个判别结构抗震性能的控制性指标。目前在设计领域中,对它们的认识尚有一些误区。作者汇编了国内外有代表性的研究成果,给出了单自由度、单偏心模型的自由振动和平扭耦联地震反应的解析解及其图表。对耦联系统的特性参数,偏心率、周期比、位移比进行了详细讨论,明确指出扭转不规则的本质是结构动力特性的不规则,结构抗侧力构件布置不妥当引起过大的偏心以及抗侧刚度与抗扭刚度的不匹配是影响扭转不规则的主要原因。这些论述为正确理解和执行规范条文,提供了背景材料和理论依据。

抗震设计博大精深,作者理论水平与工程实践经验有限。本书讲述的内容,难免有所偏见、疏忽与谬误,望不吝指正。

目 录

第一篇 地 震 工 程 学

第一章 地震动及地震作用	3
第一节 地震和地震地质	4
一、地震的成因	4
二、地震带和断层	4
三、中国地震地质	8
第二节 震源	10
一、断层的种类	10
二、震源特性参数	12
第三节 震级和烈度	13
一、震级	13
二、烈度	15
第四节 传播途径	16
第五节 场地地质条件	17
一、放大作用	17
二、滤波作用	18
三、震害实例	19
第六节 地震波	19
一、波动方程及体波	20
二、平面波的反射和折射	21
三、面波	22
四、强震观测记录	25
第七节 地震动的工程特性	26
一、峰值加速度	26
二、频谱特性	26
三、持续时间	30
第二章 抗震设防标准	32
第一节 设防与设计	32
一、抗震设防若干概念	32
二、中国抗震设计理论框架	34
第二节 地震区划图	35

一、中国地震区划图	36
二、美国地震区划图	38
第三节 地震危险性分析	40
一、概述	40
二、Poisson 分布	41
三、地震活动性	42
四、地震动衰减关系	43
五、概率分析计算	44
六、地震安全性评价	45
参考文献	48

第二篇 结 构 动 力 学

第三章 线性动力分析	53
第一节 单自由度系统	53
一、运动方程	53
二、自由振动	55
三、时间域中求解系统的地震反应	56
四、阻尼	61
五、频率域中求解系统的地震反应——频谱分析法	63
第二节 多自由度系统	67
一、运动方程	67
二、振型	72
三、阻尼	74
四、振型分解直接动力法	76
第三节 无限自由度系统	79
一、弹性理论基本公式	80
二、杆的自由振动	82
三、杆的地震反应	84
第四章 有限单元法基础知识	86
第一节 数学物理背景	86
一、变分和弹性势能	86
二、Hamilton 原理和 Lagrange 运动方程	90
第二节 单元和形函数	91
一、概述	91
二、单元及单元刚度矩阵	92
三、形函数	96
第三节 实用单元	100
一、膜单元	100

二、板壳基本理论	102
三、平板的弯曲问题	105
四、壳单元概述	108
第五章 非线性动力分析	110
第一节 金属材料的塑性性能	110
一、应力状态	110
二、应变状态	113
三、屈服条件	114
四、弹塑性本构关系	118
第二节 混凝土的材料性能	121
一、非线性本构关系	121
二、破坏准则	123
第三节 非线性方程的求解	125
一、Newmark β 法	126
二、Wilson θ 法	128
三、荷载转移法	129
四、非线性地震反应分析实例	132
参考文献	133

第三篇 抗震分析和设计

第六章 极限承载力设计	137
第一节 抗震设计理论体系	137
一、抗震设计的极限状态	137
二、小震设防设计法	137
三、中震设防设计法	138
第二节 反应谱理论	140
一、反应谱曲线的形状特征	140
二、设计反应谱	141
三、振型分解反应谱法	148
四、反应谱理论的数学模型	153
第三节 层间变形	153
一、层间变形参数	154
二、层间位移角限值	155
第四节 构件设计基本原理	157
一、动力特性参数	158
二、能力设计思想	160
三、荷载组合	163
四、抗震等级	166

第七章 钢筋混凝土构件的非线性性能和模型	171
第一节 滞回曲线	172
一、骨架曲线与形状参数	172
二、钢筋混凝土杆件滞回曲线和程序的实现	174
第二节 特征截面非线性的模拟	176
一、弯矩塑性铰	176
二、柱的 $P-M$ 相互作用	177
三、纤维截面	181
第三节 框架型构件的非线性模型	183
一、非线性复合梁	183
二、非线性复合柱	185
第四节 剪力墙非线性模型	186
一、剪力墙受力特征及分类	186
二、复合墙单元	188
三、分层壳单元	194
第八章 基于性能的抗震设计	196
第一节 法定设计法和性能设计法	196
一、美国抗震设计方法的发展轨迹	196
二、基于规范和基于性能的抗震设计方法	198
第二节 设计性能目标	200
一、性能水准和可接受准则	200
二、性能目标和目标性能	201
第三节 推覆分析	203
一、基本原理	205
二、弹塑性需求谱和目标位移	207
三、局限性	216
四、实施要点	220
五、基于推覆分析的输入地震动加速度记录核定准则	222
第四节 典型工程实例	225
一、工程简介	225
二、输入地震动	226
三、设计准则	232
四、线弹性分析	234
五、5 号楼抗震性能评估	236
六、7 号楼 C 座抗震性能评估	240
参考文献	249

第四篇 专 题 讨 论

第九章 楼板的抗震设计	255
第一节 综述	255
一、楼板在地震中的作用	255
二、分类及模型	256
三、楼板不规则类型	259
四、不规则楼板对抗震性能的影响——工程实例 1 和工程实例 2	261
第二节 楼板应力分析	265
一、平面内应力	265
二、横向剪力	267
第三节 楼板的抗震设防目标	270
一、小震设防	270
二、中震设防	271
三、大震设防	271
第四节 薄弱连接板的抗震设计	272
一、连接板的受力特征	272
二、工程实例 3	273
三、工程实例 4	275
第五节 板柱节点及柱支承双向板	278
一、柱支承双向板的受力特征和分析模型	278
二、横向抗冲切元件	280
三、板柱节点的非线性性能	284
第六节 转换厚板的抗震设计	287
一、结构转换层	287
二、工程实例 5	289
三、工程实例 6	294
第七节 板柱-抗震墙结构抗震设计	300
一、概述	300
二、工程实例 7	300
第十章 结构抗扭设计	306
第一节 结构的对称性及规则性	306
一、结构对称性和规则性的定义	306
二、不规则结构的震害实例	307
第二节 平扭耦联系统	309
一、系统的动力特性	309
二、质心和刚心	315
三、动力规则性	317

第三节 特性参数的讨论.....	319
一、几何偏心率和偶然偏心距.....	319
二、周期比.....	320
三、位移比.....	325
第四节 构件的抗扭验算.....	327
一、层扭转差和构件扭矩.....	327
二、截面验算和配筋计算.....	329
三、减少扭转效应的措施.....	330
参考文献.....	332

第一篇 地震工程学

第一章 地震动及地震作用

地震动是一个以时间为横坐标的非平稳随机过程。一次地震动是过程中的一个样本函数。至今，仍然无法有把握地确定下一次发生的地震动是一个什么样的时间函数。目前抗震设计中的时程分析法，是从结构的嵌固端（基础顶面或首层楼板）输入一条假想的地震动曲线，一般是自由场地地面运动加速度记录，进行确定性分析。结构的地震反应，不但与结构的动力特性有关，而且与地震动特性参数，地面运动加速度幅值、频谱特性及持续时间等都有密切的关系。地震学和地震工程学的研究表明，这些地震动特性参数取决于地震的震源特性、震源到场地传播途径中的衰减规律以及场地地质条件三个要素。它们之间关系的建立，是制订抗震规范中地震作用和设防标准等条文的重要依据。目前我国在这方面的研究，主要是通过对历史上的震害及观测到的数量还不是很多的强震记录，应用统计和概率分析的手段来进行的，具有相当的不确定性和复杂性。

地震工程学是近年发展起来的一门介于地震学和土木/结构工程学之间的边缘科学。胡聿贤把地震工程学的研究领域分为地震危险性分析与地震区划、抗震规范、抗震设计、抗震鉴定加固和抗震救灾五个部分^[10]。图 1.0.1 示意了它们各自研究领域的大致粗框图。图中，把抗震规范和抗震设计及抗震鉴定加固合并成一个方框，称为抗震设计。地震危险性分析与地震区划是地震学和地震工程学的交叉领域。但是两者的侧重点不一样。地震学通过震害调查和地震动观测及分析等手段，了解震源特性、衰减特性、地球介质特性等，研究地震的时间和空间分布规律，对今后可能发生的强震做出预报。地震工程学的研究目的主要是在概率分析的基础上确定对应于某一个地震区划或特定场地的自由场地面运动。例如，确定基准周期 50 年、超越概率 10% 的地震动所对应的自由场地面运动基本特性，

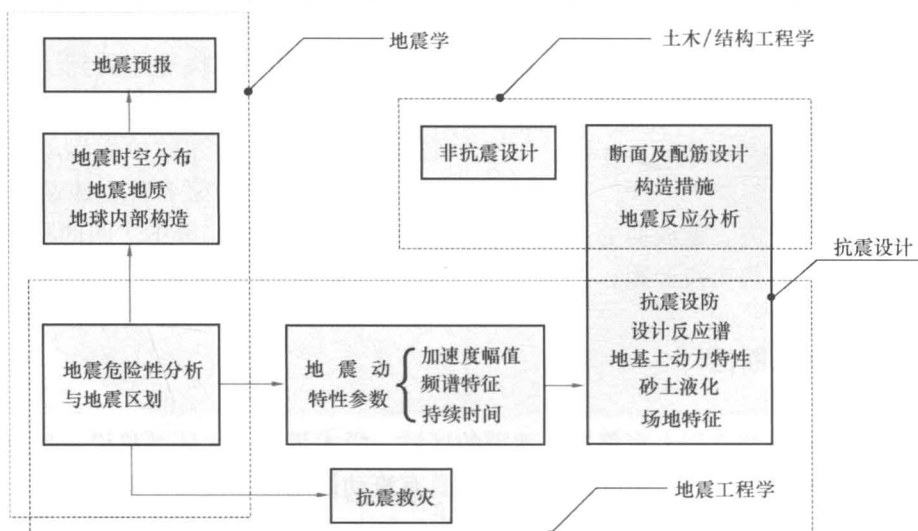


图 1.0.1 地震学、地震工程学和土木/结构工程学研究领域粗框图