

中国防震减灾百科全书

地震工程学

地震出版社



中国防震减灾百科全书

地震工程学

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震工程学/中国防震减灾百科全书总编辑委员会《地震工程学》编辑委员会编.

—北京:地震出版社,2014.9

(中国防震减灾百科全书)

ISBN 978-7-5028-3699-3

I. 地… II. ①中… III. ①地震工程—百科全书 IV. ①P315.9-61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 264967 号

地震版 XM2643

中国防震减灾百科全书·地震工程学

中国防震减灾百科全书总编辑委员会《地震工程学》编辑委员会 编

出版发行:地震出版社

北京市海淀区民族大学南路9号

发行部:68423031 68467993

门市部:68467991

总编室:68462709 68423029

http://www.dzpress.com.cn

E-mail:68462709@163.com

邮编:100081

传真:88421706

传真:68467991

传真:68455221

经销:全国各地新华书店

印刷:北京鑫丰华彩印有限公司

版(印)次:2014年9月第一版 2014年9月第一次印刷

开本:889×1194 1/16

字数:1545千字

印张:35.75

书号:ISBN 978-7-5028-3699-3/P(4319)

定价:480.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

ISBN 978-7-5028-3699-3



9 787502 836993 >

《中国防震减灾百科全书》总编辑委员会

主 编 宋瑞祥 陈建民 丁国瑜

副主编 赵和平 牛之俊

顾 问 (以姓氏笔画为序)

方樟顺 李 珩 陈章立 曾融生

编 委 (以姓氏笔画为序)

丁国瑜	马 瑾	马宗晋	王延祜	王自法	王椿镛
车用太	牛之俊	方韶东	邓起东	卢寿德	朱世龙
任利生	任金卫	庄灿涛	刘玉辰	刘启元	汤 泉
许忠淮	许绍燮	孙建中	孙柏涛	孙福梁	阴朝民
杜 玮	杜振民	李 克	李 强	李友博	李清河
李强华	吴卫民	吴宁远	吴忠良	吴建春	吴耀强
何永年	何振德	邹其嘉	汪一鹏	汪成民	宋炳忠
宋瑞祥	张 宏	张友民	张先康	张宏卫	张国民
张培震	张敏政	陈 颀	陈运泰	陈英方	陈非比
陈建民	陈鑫连	罗灼礼	岳明生	金 严	金 星
赵 明	赵和平	赵振东	胡聿贤	胡春峰	修济刚
姚清林	夏敬谦	钱家栋	徐德诗	高荣胜	唐 豹
唐荣余	黄建发	梅世蓉	蒋克训	程仁泉	谢礼立
谢富仁	廖振鹏	潘怀文			

《中国防震减灾百科全书》总编辑委员会

执行编委会

(以姓氏笔画为序)

丁国瑜	王延祜	王自法	车用太	牛之俊	方韶东	卢寿德
朱世龙	任利生	任金卫	许忠淮	孙柏涛	孙福梁	阴朝民
杜 玮	杜振民	李 克	李强华	吴卫民	吴宁远	吴忠良
吴建春	何振德	邹其嘉	汪一鹏	汪成民	宋瑞祥	张 宏
张友民	张宏卫	张国民	张培震	张敏政	陈建民	金 严
赵 明	赵和平	赵振东	胡春峰	修济刚	姚清林	夏敬谦
钱家栋	徐德诗	高荣胜	唐 豹	唐荣余	黄建发	谢礼立
谢富仁	潘怀文					

组织协调办公室

主 任 张 宏

副主任 吴宁远 李 玲

成 员 (以姓氏笔画为序)

杜 玮	何振德	宋炳忠	张宏卫	张雪洁	陈非比
周伟新	唐 豹	董 青	蒋克训	程仁泉	樊 钰
潘怀文					

《中国防震减灾百科全书·地震工程学》

编辑委员会

主 编 谢礼立 张敏政 夏敬谦

副主编 袁一凡

顾 问 胡聿贤

编 委 (以姓氏笔画为序)

王前信	尹之潜	刘曾武	孙景江	李小军	李山有
杨学山	张令心	张克绪	张敏政	金 波	金 星
袁一凡	袁晓铭	夏敬谦	高光伊	郭 迅	郭恩栋
陶夏新	崔 杰	谢礼立	薄景山		

撰 稿 人

(以姓氏笔画为序)

于海英	王进廷	王君杰	尹之潜	田启文	刘曾武	齐霄斋
孙景江	杜修力	李 惠	李山有	杨学山	张令心	张克绪
张敏政	周正华	周雍年	胡聿贤	钟南萍	袁一凡	袁晓铭
夏敬谦	郭 迅	郭恩栋	温瑞智	谢礼立	戴君武	

本卷编委会依托单位：中国地震局工程力学研究所

总 序

地震，总是以它不期而至的巨大威力吞噬地球生灵，毁灭人类文明。21世纪刚刚走过十几个年头，全球罹难于地震灾害者已逾数十万之众，经济损失数千亿美元。2004年印度洋地震海啸，夺去30万人的生命，成为人类挥之不去的心灵阴影。

中国是世界上蒙受地震灾害最为深重的国家之一，约四分之三的国土面积和二分之一的大中城市处于地震烈度Ⅵ度或Ⅵ度以上地区，各省、自治区、直辖市历史上都发生过5级以上破坏性地震。在全球死亡20万人以上的8次大地震中，中国则占有4次。1976年河北唐山地震、2008年四川汶川地震，令山河改观，使生命涂炭；灾情的惨烈，抗灾的悲壮，可谓惊天地、泣鬼神。

在抗御地震灾害的斗争中，先人们为我们留下大量的珍贵史料，从震前、震时现象，防震、避灾经验，灾情、救灾情况到地震成因的思考，内容所及极其广泛。公元132年，东汉科学家张衡发明了地动仪，开创了人类利用仪器记录地震的先河，并意识到地震从震源向外传播振动的道理。中国丰富而久远的地震史料为世界各国所瞩目，不仅是中华民族历史文明的见证，也是对世界地震科学的重大贡献。

19世纪中期以后，正当西方近代地震学在科技进步和工业革命大潮中大踏步前进的时候，半封建、半殖民地的中国积贫积弱，地震科学几乎处于被窒息的状态，直到20世纪30年代才有了中国人自己设计建立的第一个地震台。此后至1949年新中国建立的20年间，寥寥数人的地震工作者，矢志祖国的地震事业，在烽火遍地、颠沛流离、经费窘迫的境况中，苦苦支撑着处于襁褓中的中国地震科学。

中华人民共和国成立带来了科学的春天。稚弱的中国地震科学和防震减灾事业在经济恢复和社会主义建设中起步，在1966年河北邢台地震开始的10年地震活动高潮期成长，在20世纪80年代改革开放大潮中反思、总结和提高，在90年代以后深化改革、经济腾飞的热浪中发展壮大。经过半个多世纪坚持不懈的努力，地震监测能力得到明显改善，台站布局网络化、观测技术现代化已经成为台网基础设施建设的基本要求；数以千计的各类台站、测点，各类观测方法为地震和地球科学研究积累了大量的观测数据。在世界性科学难题地震预测预报的探索中取得了丰富的观测资料和宝贵的实践经验，初步形成了具有中国特色的地震预测科学思路，在国际地震预测研究中产生了重要影响。地震灾害防御技术得到全面推广，为国土利用、城市规划、工程抗震设防和国防安全等提供了科学技术支撑。建立健全了地震应急预案体系和地震应急指挥体系，发展了地震灾害损失评估理论和实践，地震应急救援能力显著提高，在国内外地震应急救援行动中发挥了重要作用。

经过几代人的努力，中国防震减灾事业已从初期单一学科的纯学术研究和对地震的探索性预测，进入到对地震灾害进行工程性和非工程性防御，不仅在工作深度和广度上不断拓展，在事业规模、科学水平、社会管理和服务等方面也取得了长足进步；并在实践中逐步形成了以减轻地震灾害为宗旨，以防震减灾法律法规为依据，以科学技术为支撑，推进地震监测预报、震害防御、应急救援三大工作体系建设，使防震减灾与经济社会发展相适应、相协调的融合式防震减灾工作思路，在保障国民经济建设、保障社会安全与稳定等方面作出了重要贡献。

当前，科技创新、体制创新、管理创新已经成为我们这个时代的特征，也是社会经济发展的不竭动力。新技术、新成果、新知识、新经验的不断涌现，各学科之间的相互渗透和融合，要求防震减灾工作队伍在更新观念、更新知识的同时，更要不断拓展自己的知识领域，以适应科技发展的时代脉搏，更好地担负起防震减灾事业的重任。防震减灾是一项社会公益事业，其监测、研究、预测、预防、应急、救灾等各个环节都离不开政府和社会公众的支持和参与。事实上，任何一种科学技术只有从科学殿堂走向社会，为社会公众所认识、理解和掌握，才能变成改造客观世界的现实生产力。因此，向社会公众特别是各级管理干部宣传地震和防震减灾的相关知识，是提高减灾实效的重要环节。这正是编纂、出版本书的目的。

《中国防震减灾百科全书》作为防震减灾领域的第一部百科全书，力求全面反映我国地震科学和防震减灾事业发展的艰辛历程和当前水平，融汇国内外先进科技成果，努力实现科学性、普及性和工具性的结合，使之既具有系统阅读功能又具有知识检索功能。希望本书在传播地震科学知识，增强民众防震减灾意识，提高全社会防御和减轻地震灾害能力等方面起到积极作用。

《中国防震减灾百科全书》

总编辑委员会

2014年8月

前 言

《中国防震减灾百科全书》是中国防震减灾领域第一部专业百科全书，是为贯彻《中华人民共和国防震减灾法》的需要和实现国务院提出的“到2020年全国基本实现抗御6级左右地震”的目标而实施的一项宣传教育系统工程，旨在提高各级政府和全民族的防震减灾意识，增强全社会抗御地震灾害的能力，为社会主义现代化建设的安全发展提供一个方面的保障。

《中国防震减灾百科全书》力求涵盖各相关学科和工作领域的基本知识，吸纳国内外的最新科技成果，反映中国防震减灾事业的历史足迹、工作思路和发展现状；力求实现科学性、普及性和工具性的统一，争取中等以上、相当大学文化程度的读者能够读懂其基本内容。

为实现上述编纂目标，在经过一年多时间的调研、酝酿、规划、论证和各项组织准备之后，从2005年起分期分批启动编写。防震减灾涉及的学科或工作领域跨度很大，发展水平也不平衡，有的领域还具有很强的探索性，其编写难度不一，难以齐头并进；所以只能暂按学科体系或工作领域的性质分头编纂，成熟一卷，出版一卷，不列卷次，只标明学科或工作领域名称。这样做将不可避免地带来某些缺憾，例如不能统编全书的参见系统，由此可能因照顾各卷自身结构体系的完整性而造成少数条目的卷间重复或削弱参见系统耦合辞条、扩展知识的功能。同样原因，全书第一版尚不可能统编索引，而只能分卷（册）给出索引。

编纂出版工作是在总编委会领导下进行的；总编委会内设执行编委会，负责审定各卷条目提纲等工作。组织协调办公室为总编委会的办事机构，承办编纂出版过程中的各项具体事务。分卷编委会承担撰稿、统稿和定稿任务，依托单位对所属分卷编委会提供组织管理和部分条件保障。包括两院院士在内的各学科、各工作领域的专家学者共300余人参与了本书的编纂。中国地震局对本项目十分重视，在组织领导、编纂经费等方面给予了空前支持。项目被列入“国家重点图书”十一五出版规划，并通过国家出版基金委员会给予出版经费资助。

《中国防震减灾百科全书》各卷（册）按各学科的知识体系分层次设置条目，每个条目都力求简明、扼要、准确地介绍相关的基本知识。为增强可读性，当遇有某些条目的科学内容不得不以数理公式表述时，只给出关键性的结果，而不作过程性的推演。

为便于读者寻检所需知识，《中国防震减灾百科全书》各卷（册）分别设置了条目标题汉字笔画索引、汉语拼音索引，条目外文标题索引和内容索引。读者还可通过条目标分类目录和书眉进行检索。

由于主管政府部门和相关科研院所的大力支持，由于相关学科和工作领域专家、学者的积极参与，《中国防震减灾百科全书》的编纂出版工作才得以进行，在此谨致谢忱。

编纂出版《中国防震减灾百科全书》是一项浩繁的系统工程，难免存在不足之处，诚请读者批评指正。

《中国防震减灾百科全书》
总编辑委员会组织协调办公室
2014年8月

凡 例

(一) 条目及其编排

1. 本书按学科分类或工作内容分卷出版。
2. 本书以条目作为基本知识单元和寻检单元；条目是全书的主体，一般由条目标题、释文（含相应的插图、表格）、推荐书目等组成。
3. 各分卷条目均按学科体系或工作内容编排，并视需要划分为相应的若干部分。
4. 各分卷列有该卷全部条目的分类目录，以便读者了解全卷内容的知识体系并便于查寻。条目分类目录中，被参见条目的标题加“见”字用圆括号括起；加方括号者为条目分类标题。例如：

结构抗震试验	157
[试验方法]	
现场试验	157
人工地震试验	158
脉动试验	158
模型试验	158
量纲分析	159
相似模型	160
足尺模型（见模型试验）	160（158）
缩尺模型（见模型试验）	160（158）

5. 各分卷在条目分类目录之前都有一篇介绍本卷内容的概述性文章，也称作特长条。

(二) 条目标题

6. 条目标题一般由汉语标题、与汉语标题相对应的汉语拼音和外文三部分组成。例如：

dizhen liedu
地震烈度 (seismic intensity)

7. 中国人名条目的外文标题一般同汉语拼音，不再另附外文。

(三) 释 文

8. 释文一般依次由定义或定性叙述、简史、基本内容、研究状况等构成，视条目性质和知识内容的实际状况有所增减或调整；例如参见条目只给出简单的定性叙述。

9. 释文较长的条目设置层次标题，并用不同的字体表示。

10. 一个条目的内容涉及他条或需由他条释文补充的，采用“参见”的方式。所参见条目的标题在释文中出现的用楷体字显示，例如“强烈地震动还能引起地基失效”；所参见条目的标题未在释文中出现的，另加“见”字用楷体字显示，例如“坚硬场地上的建筑多数震害较轻（见场地效应）”。

11. 释文中的插图、表格附有名称等相关说明。

(四) 推荐书目

12. 必要时在条目释文后附有推荐书目，便于读者进一步了解相关内容时选读。

(五) 附 录

13. 各卷条目正文后视需要辑有与本卷有关的附录，如相关的大事记等。

(六) 索 引

14. 本书各卷均附有该卷的条目标题汉字笔画索引、条目标题汉语拼音索引、条目外文标题索引和内容索引以及有关的附件等。

15. 内容索引收录的内容包括：全部条目标题，条目释文内有检索价值的层次标题，条目、特长条及附录中其他有价值的知识主题等。

(七) 其 他

16. 本书所用汉字以国务院 2013 年 6 月 5 日国发〔2013〕23 号文批准公布的《通用规范汉字表》为准。

17. 本书所用专业技术术语，一般以本行业有关部门或专家审定的为准。

18. 本书一般使用公元纪年，年代以 0~9 作为起讫。述及历史上使用的旧纪年时，在其后注明公元纪年。

19. 本书所用数字原则上执行国家标准《出版物上数字用法的规定》(GB/T 15835—1995)。

20. 本书量和单位的使用一般遵照国家标准《有关量、单位和符号的一般原则》(GB 3101—93) 和本行业有关标准执行。

地震工程学

地震工程学研究工程结构、尤其是土木工程在遭遇强地震动时的安全问题，是防震减灾事业最重要的知识和技术基础。尽可能减少地震引起的人员伤亡和经济损失，保障社会经济的正常运行和发展，是地震工程学的根本目标。地震工程学的研究和应用涉及自然科学、工程技术和社会经济等广泛领域，尤其关注工程结构的地震作用计算和抗震设计。

地震工程学的研究领域和特点

地震工程学首先要评价工程结构所在的地震环境，估计工程结构在使用期内可能遭遇的地震作用；其次要发展结构抗震的理论与方法，设计能抗御地震作用各类工程设施。前者属于工程地震范畴，即以工程建设的安全为目标研究地震；后者属于工程抗震范畴，即探讨地震环境下工程结构的抗震性能和抗震技术。工程地震和工程抗震相互关联不可分割，地震工程学是两者的统称。

地震工程学的研究与实践并不局限于地震环境下工程设施自身的安全，还延伸涉及地震人员伤亡和财产损失，涉及地震次生灾害以及地震对社会经济和公共安全的影响。地震工程的研究成果在震害预测、地震损失评估、城市规划、土地利用、地震应急、地震保险等领域也具有现实或潜在的应用价值。

工程地震与工程抗震 工程地震研究探索强地震动的特性及其影响因素，并对其未来发生的可能性作出估计。强地震动模拟和强地震动预测是实现工程地震研究目标的基础理论和方法。利用潜在震源区、地震活动性、强地震动特性和地震场地效应等知识进行地震危险性分析，估计某一地点的强地震动及发生概率，选择特定概率的地震动强度和地震动频谱等参数编制地震区划或地震小区划图，最终可得出抗震设计所需的地震动输入。

工程抗震根据工程地震的研究成果，探索地震作用理论和抗震技术方法，在国家经济政策指导下，兼顾经济与安全，合理规定工程建设的抗震设防目标、抗震设防标准和抗震设计要求，也规定已有工程的抗震鉴定加固要求。工程抗震研究成果最终体现于抗震技术标准并据此实施抗震设计。

地震工程学的特殊性 与其他多数工程科学相比，地震工程学的特殊性源自地震事件的罕遇、强烈和不确定性，其主要表现如下。①由于强烈地震的罕遇性，使确定地震活动性参数、获取强震动加速度记录，进而研究地震动特性及其影响因素十分困难，通过现场考察总结工程结构震害经验和分析结构震害机理的实践机会也十分有限。②地震源自地球内部运动，其能量之大可令山河改观；以人工地震试验和脉动试验进行抗震研究显然只能达到有限的目标；地震模拟振动台试验、伪动力试验也只能在极小范围内模拟地震动和结构地震反应。不能进行大型复杂结构的足尺试验且难以重现土-结相互作用效应，制约了地震工程研究的迅速进展。③强烈地震可以引发数米的地面断错和接近两倍重力加速度的地震动，这是一般结构难以抗御的；即使将结构地震反应限制在弹性范围内在技术上可行，在经济上也是难以接受的。因此，目前的抗震设计允许一般结构发生损伤、进入非线性阶段，但又要保持一定功能，这是抗震设计区别于其他工程设计的特点和难点。④地震动影响因素十分复杂、极不确定，乃至远非随机振动理论可以准确描述，加之土木工程的庞大及其构件和材料特性的离散，致使设计地震动和工程结构的抗震可靠性均有很大的不确定性，这一缺憾不是短时期内可以改善的。

考虑上述因素，抗震防灾对策只能是在资料并不充分且经验有限条件下的风险决策，目前并没有可供遵循的完善的理论体系。

地震工程学的实践性 地震工程学作为土木工程的一个特殊分支，同样具有很强的实践性。地震工程学既不是单纯理论推演的结果，也不以对客观事物的解释为最终目标，其产生和发展源自地震引发的社会灾难并服务于防震减灾的现实和长远需求。

地震工程学借鉴地学、材料与工程科学、数学与力学等学科的研究成果形成现代意义的技术科学，但震害经验在地震工程学的建立和发展中无疑具有不可替代的重要性。总结工程设施在地震环境下保持安全的成功经验，尤其是吸取工程设施遭受震害的经验教训，乃是地震工程研究的基本途径。由于地震动和工

程设施极其复杂,地震工程研究成果的评价不能仅仅凭借理论分析、数值模拟和简单试验,最根本的检验来自地震现场。迄今为止的抗震设计基本上仍是经验行为,抗震概念设计原则和行之有效的抗震措施都是长期经验的总结。

随着人类社会经济的持续发展,基础设施建设亦将不断完善,保障基础设施的适用性和安全性,减少地震损失和人员伤亡与地震工程学直接相关。新的结构类型和新的结构材料的采用对抗震理论和技术不断提出新的要求,地震工程学面对社会经济发展和防震减灾事业的更高要求,必须在实践中发展和完善。

考虑抗震设防实施抗震设计的工程结构提高了抗震安全性,发挥了防震减灾效能,这是历经多次破坏性地震检验后得出的结论。更完善的地震工程理论体系的建立和更有效的抗震技术方法的开发,还有赖于更多的实践。

地震工程学的知识来源和研究途径

地震工程学自身的特殊知识源自震害考察、强震动观测和结构抗震试验。地震工程学的研究内容源自地震破坏现象:地震地质破坏如地面破裂、液化破坏、软土震陷,建筑结构破坏如房屋墙体开裂、混凝土构件的塑性铰、钢结构构件的屈曲等。通过震害考察,可以引导人们去探讨工程结构破坏机理和防御措施,一些行之有效的抗震构造措施,如圈梁、构造柱和箍筋加密等,都是受现场调查的启发总结得出的。震害现场考察是获取和检验抗震知识的不可替代的、最有说服力的途径。强震动观测使人类获得对强地震动时间过程的定量认识,是地震工程学建立的重要基础;强震动记录的积累逐步推进了人类对地震动特性及其影响因素的了解,在此基础上总结地震动衰减规律和建立地震反应谱,使结构抗震设计得以采用适当的地震动输入。结构抗震试验可在人为控制下获得有关结构材料、结构构件和结构体系力学特性的知识,是建立结构动力学模型、评价工程结构抗震能力、发展和检验抗震理论和技术方法的重要手段。

地学、工程与材料科学为地震工程学的建立和发展提供了不可或缺的基础知识。首先,含地震学、地震地质学和地球物理学等在内的地学知识,显然与工程地震学有直接的联系。历史地震、地震烈度、地震活动构造等是开展工程地震研究、进行地震危险性分析和实施地震区划的必要知识,数字地震学和波动理论为强地震动模拟和强地震动预测提供了理论和方法。就此而言,地学是地震工程学的知识基础之一,强震动研究是地学与地震工程学的交叉点。地震工程学以防止和减轻工程结构震害为目标,更为关注对工程结构有影响的近场地震动(即强震动),一般更为关注周期不超过 10 s 的地震波成分,这是工程地震学研究区别于地学研究的特点。其次,地震工程学作为土木工程特殊分支,必然沿用结构工程有关结构受力、变形、强度以及动力分析的基本知识,结构动力学、土动力学提供了进行结构抗震分析的理论与方法;随机振动理论、可靠性分析理论、数值计算方法、试验检测技术等土木工程中的应用,也必然扩展于地震工程研究。

地震工程学研究结合采用理论分析、数值模拟和结构抗震试验(含试点工程建设)三种基本途径。理论分析是建立抗震结构分析模型并确定结构体系地震作用的基础;利用计算机技术和数值方法进行结构地震反应分析,计算地震作用效应并估计结构抗震能力,是结构抗震研究的最便捷的手段;鉴于理论分析的不完善和结构地震反应极其复杂,地震工程的应用技术必须由结构抗震试验予以检验,并经试点工程建设取得经验、确认其可行和有效后方可付诸实施。

现代科学技术的发展呈现交叉综合的特点,每个学科的进步都得益于其他学科的研究成果。除地学、材料与工程科学之外,计算机与信息技术、传感和测量技术、数学、人工智能与结构振动控制理论等对地震工程学的发展亦起到了重大推动作用。

地震工程学的起源和发展

地震灾害已有数千年的史料记载,但地震工程学却仅有百年的研究历史。历尽时代沧桑和地震灾难而存留于世的古代建筑,常使我们惊叹古人卓越的建筑智慧,但是时近 20 世纪才有了关于建筑抗震的文献描述。19 世纪的地震考察和地震烈度表的编制,孕育着地震工程学的萌芽;19 世纪末和 20 世纪初,在英国、意大利和日本出现的关于建筑抗震和隔震的设想预示着工程抗震的发端。工程地震和工程抗震知识的逐步积累和现代力学及工程技术的发展,最终催生了地震工程学。

地震工程学的三个发展阶段 20 世纪初至 30 年代可称为地震工程学发展的静力学阶段。当时,人们

认识到地震动是剧烈的往复运动,地震动加速度在地面结构上产生的惯性作用是导致建筑结构破坏的原因。在尚未取得强震动记录的情况下,人们利用个别地震记录和房屋的破坏状态推算地震动加速度,并视经济和技术能力取某个固定量值的加速度作用在地面结构上;在将地面结构视为刚体的假定下,计算作用在结构上的水平地震作用并进行抗震设计。日本抗震设计的“震度法”是这一发展阶段的代表。这一时期,基于有关隔震、消能和能量设计的设想,出现了探讨结构变形能力及其对抗震性能影响的“刚柔之争”;但囿于知识的缺乏,当时并未发展出新的理论和技术方法。20世纪30年代,苏联依据历史地震和地震地质资料开始了地震烈度区划研究,并首先提出了“工程地震”这一名词,标志着直接与工程建设相联系的工程地震学科的建立。

20世纪30年代,美国和日本获得了最初一批强震动加速度记录,进一步认识到地震动是包含多种频率成分的复杂运动;此后在获得更多关于结构破坏的宏观经验的同时,固体的弹性振动理论也被土木工程界所掌握。在此基础上,美国研究者计算了地震反应谱并将之用于结构抗震设计;其后,这一方法在国际范围被广泛接受,标志着地震工程学进入反应谱理论阶段。1951年,日本依据丰富的历史地震资料利用统计分析方法编制了地震动区划图;1952年,苏联利用烈度调整的概念开展了城市小区划工作;1956年,在美国旧金山召开了第一届世界地震工程会议,地震工程学成为工程学科的一个分支。60年代末,美国研究者提出了地震危险性分析的概率方法,并广泛用于地震区划图的编制。这一时期地震工程学迅速发展,结构的非线性地震反应分析开始引起研究者的兴趣,延性作为与抗震性能相关的重要概念被提出;认识到地震动的复杂性和不确定性,随机振动理论被引入地震工程研究;同时,地震动的场地效应也引起了人们的广泛关注。

20世纪70年代以后,电子计算机的应用逐步普及,新的抗震试验方法和试验设施被相继开发;随着社会经济发展和技术进步,大坝、大型桥梁、核电站和海洋平台等大量兴建。社会发展对工程设施的抗震安全提出了更高的要求,推动地震工程学进入了动力理论阶段。反应谱方法可以得出对结构最大地震反应的近似估计,却不能展现地震反应的时间过程,无从考虑地震动持续时间对结构的影响;进行地震作用下工程结构的动力反应时程分析成为新阶段的重要特点。除针对一般建筑的抗震研究之外,特殊、重大工程的抗震安全性引起了人们的特别关注,生命线抗震工程的出现就是典型的一例。为了实现更可靠的结构抗震设计,地震工程学知识在全方位被深入探索;其中包括地震动时间过程及其空间相关性,结构和构件的非线性、非弹性本构关系,结构地震反应的变形和能量,地基和基础的抗震,地震环境下结构的极限状态和相应的可靠度分析等。这一时期,结构振动控制也成为地震工程学的前沿领域。

中国的地震工程研究与实践 中国的地震工程研究始于中华人民共和国的建立。1949—1955年是中国国民经济恢复和第一个五年计划实施时期,这一时期若干基本建设项目的兴建,要求有地震资料作为工程设计的依据。当时整理了追溯至3000年前的地震历史资料,编制了历史地震目录,形成了工程地震研究的重要基础;另外,对部分重大工程建设场址进行了地震危险性评估,采用基本烈度表示可能遭遇的最大地震影响。

1956—1965年是中国地震工程学全面发展的奠基时期。1955年中国科学院确定的十大研究课题包括了地震灾害防御的内容。在国家《十二年科学技术发展规划》中,列入了“中国地震活动性及其防御”项目,其中包括地震观测台网、地震区划、地震预报和工程抗震等子项。在1960年重新编制的十年科技发展规划中,仍包含了地震和抗震的内容。中国科学院下属部分研究所和高等院校开展了工程地震和工程抗震研究,内容包括:新的中国地震烈度表和地震烈度区划图的编制,结构弹性地震反应分析、现有建筑动力特性实测及结构模型的动力试验,综合性抗震设计规范草案的编制,强震动仪的研制、强震动观测台站的布设以及地震小区划的尝试。

1966—1976年,中国发生了一系列破坏性地震。1966年河北邢台地震和1970年云南通海地震导致重大人员伤亡,1975年辽宁海城地震建筑破坏严重,1976年河北唐山地震则造成空前的惨剧。地震灾害引起政府和民众的广泛关注。中央地震工作领导小组、国家地震局和国家建委抗震办公室相继成立或筹建;新的地震工程研究机构纷纷建立,更多的部委和高等院校开始介入抗震研究;大批科技人员深入地震现场进行考察,积累了一批用生命和鲜血换来的宝贵经验。此期,台湾地区开始了地震小区划研究并实施建筑的抗震设计,强震观测台网开始建设并陆续得到大量数据。

1977—1987年,中国地震工程学研究开展了大量卓有成效的工作。其中包括:震害经验的深入总结,地震烈度表和地震区划图的修编,结构非线性地震反应分析研究,砖结构抗震性能研究,震害预测与抗震鉴定加固技术的开发和应用,地震危险性分析概率方法的研究和应用,城市小区划和抗震防灾规划的编

制, 强震动特性的研究, 场地效应和砂土液化研究, 各行业抗震技术标准的编制, 强震动观测台网的扩充建设, 抗震试验设备的研制和引进; 与此同时, 优化设计和模糊数学、人工智能等新的知识和方法也被引入地震工程学的研究领域。1984年, 第一届全国地震工程会议在上海召开, 标志中国地震工程的研究与实践开始步入国际先进行列。

20世纪80年代以后, 中国进入经济持续高速发展时期, 大量基础设施的兴建、新的社会经济发展规划的编制、城市化进程以及当代科学技术的日新月异, 既对地震工程学提出了更高的要求, 也为抗震科技进步提供了新的知识和技术支撑。在国家高度重视防灾减灾和社会安全的背景下, 抗震防灾相关立法工作逐步完善和加强。香港1997年回归祖国后, 开展了抗震设防和地震工程研究。大量抗震建筑在2008年四川汶川地震中经受检验, 减少了地震人员伤亡; 在震后恢复重建中, 地震工程成果获得广泛应用。地震工程工作者在更广阔的领域中, 跟踪国际科技动态进行了新的探索和实践。

研究动向和前景展望

地震工程学研究历经百年取得了长足进展, 地震区划图和抗震技术标准作为最重要的技术成果, 已在世界各国广泛应用并在实际地震中获得检验。然而, 人类距最大限度减少地震人员伤亡和经济损失这一最终目标仍有很大距离; 地震工程学在经历20世纪中叶以来的快速发展之后, 在进一步的深入研究中面临若干重大科学难题。

近年的震害经验表明, 以强度验算为主的抗震设计在可以明显减轻人员伤亡的同时, 却难以实现人们对工程设施使用功能的期望, 地震经济损失居高不下。在这一背景下, 20世纪末提出了基于结构性能(或后果)进行抗震设计的思想。从概念上讲, 性能抗震设计这一设想并非新创, 其实质在于要对结构经受地震后的功能保障作更深入的探索。新的探索除涉及地震动和结构主体之外, 更要全面考虑地基基础以及建筑附属构件和设施; 应基于功能保障对抗震结构的性能作更为细密的划分, 并开发相应的性能抗震设计方法; 性能抗震设计应建立与社会经济技术发展相适应的优化抗震设防目标和抗震设防标准, 并可适应不同用户的需求实现个性化设计。结构性能抗震设计的思想明确了地震工程学的未来发展方向。

考虑到传统抗震结构的阻尼耗能能力不强和结构振动频率难以避开地震卓越成分, 结构振动控制技术的应用引起了地震工程界的关注。20世纪80年代以后, 地震工程研究人员就地震环境下的主动控制、半主动控制、被动控制和混合控制的理论与技术进行了广泛研究; 基底隔震技术已获得较为广泛的应用, 少数隔震建筑已经受了地震的检验; 主动控制工程也有少量试点。鉴于土木工程的复杂和庞大, 适用的主动控制理论和技术尚有待发展和完善; 基于新材料和新装置的开发, 被动控制和半主动控制技术显示了应用前景。

长期以来, 工程结构的抗震鉴定和震害预测主要采用经验方法, 这些方法主要依赖于专家的经验判断。在传统的结构无损检测技术基础上, 土木工程健康监测技术系统受到工程界的广泛关注。这种通过在线测量自动评价结构性能的技术在地震工程领域也有应用价值, 它既可利用工程结构的强震观测系统及时判断结构损伤并预期未来寿命, 又可与应急反应设施相联系, 直接发挥防震减灾效果。在大型、重要工程设施上建设具有综合防灾功能的健康监测和应急处置技术系统, 可能是提高基础设施抗震安全的又一保障措施。

多学科理论技术的融合与交叉, 是现代科技发展的重要特点, 借鉴其他学科的先进成果将推进地震工程学达到新的高度。

本卷主要编辑、出版人员

编辑组	李玲	陈非比	蒋乃芳	张敏政	袁一凡
	李珺	樊钰			
顾问	宋炳忠				
责任编辑	陈非比	李玲			
特约编辑	张敏政	袁一凡			
技术编辑	李珺	樊钰			
图片编辑	李玲	陈非比	邢秀芬		
资料核对	陈非比	李玲			
索引	李玲	陈非比	王伟		
装帧设计	董松	胡玥			
图件清绘	胡玥	凌樱	刘丽	李燕	
校对	李珺	樊钰	宋玉	庞亚萍	孙铁磊
	张晓梅	郭京平			
排版	凌樱	刘丽	李燕	连小力	
责任印制	胡勤民				

目 录

总序	
前言	
凡例	
地震工程学	1
条目分类目录	5
正文	
工程地震	1
工程结构震害	107
工程抗震	155
地震工程中的现代方法	429
学者·机构·书刊	443
附录	
地震工程大事记	469
索引	
条目标题汉字笔画索引	475
条题简化字与繁体字对照表	483
条目标题汉语拼音索引	484
条目外文标题索引	492
内容索引	504
地震简表	522
外国人名译名对照表	524
地震烈度表	526