

防灾减灾系列教材



建筑抗震

郭晓云 主编

清华大学出版社

内 容 简 介

本书依据国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)编写,全书共 10 章。前 3 章概略介绍了与建筑抗震相关的地震、地震动、地震区划的相关内容,后 7 章主要介绍了多层砌体与底部框架砌体结构房屋、单层工业厂房、空旷房屋和大跨屋盖房屋、多层与高层钢筋混凝土房屋、土木石结构房屋、地下结构和非结构构件的震害、抗震概念原则及抗震构造措施。

本书可作为高等院校学生的教材,亦可供从事防震减灾、规划、土木工程施工、工程管理的专业人员以及对防震减灾和地震工程感兴趣的其他读者阅读。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

建筑抗震/郭晓云主编.--北京:清华大学出版社,2012.12

(防灾减灾系列教材)

ISBN 978-7-302-30411-1

I. ①建… II. ①郭… III. ①建筑结构—防震设计—教材 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 242805 号

责任编辑:朱红莲

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京世知印务有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:15.75 字 数:337 千字

版 次:2012 年 12 月第 1 版 印 次:2012 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:32.00 元

产品编号:048931-01

“防灾减灾系列教材”编审委员会

主 任：薄景山

副主任：刘春平 迟宝明

委 员（按姓氏笔画排序）：

万永革	马胜利	丰继林	王小青	王建富	王慧彦
田勤俭	申旭辉	石 峰	任靖卫	刘耀伟	孙柏涛
吴忠良	张培震	李小军	李山有	李巨文	李 忠
杨学山	杨建思	沈 军	肖专文	林均岐	洪炳星
胡顺田	徐锡伟	袁一凡	袁晓铭	贾作璋	郭子辉
郭文栋	郭 迅	郭纯生	高尔根	高孟潭	梁瑞莲
景力平	滕云田				

从 书 序

防灾减灾是亘古以来的事业。有了人类就有了防灾减灾,也就有了人类对防灾减灾的认识。人类社会的历史就是一部人与自然不断协调、适应和斗争的历史。防灾减灾又是面向未来的事业,随着我国经济社会的高速发展,我们需要更多优秀的专业人才和新生力量,为亿万人民的防灾减灾工作作出更大贡献。因此,大力发展防灾减灾教育,是发展防灾减灾事业的重要的基础性工作。

防灾科技学院是我国唯一的以防灾减灾专业人才培养为主的高等学校,拥有勘查技术与工程和地球物理学两个国家级特色专业建设点。多年来,学院立足行业、面向社会,以防灾减灾类特色专业群建设为核心,在城市防震减灾规划编制、地震前兆观测数据处理、城市震害预测及应急处理等领域取得了一系列科研成果,在汶川地震、玉树地震等国内重大地震灾害的应急处理工作中作出了应有的贡献。学院坚持科学的办学方针,在整个教学体系中既注重专业技术知识的讲授,又注重社会责任方面的教育和培养,为国家培养了一大批优秀的防灾减灾专业人才,在行业职业培训、应急科普等领域开展了大量卓有成效的工作。

为系统总结学院在重点学科建设和人才培养方面所取得的科研和教学成果,进一步深化教学改革,全面提高教学质量和科研水平,服务我国防灾减灾事业,我们组织编写了这套“防灾减灾系列教材”。系列教材覆盖了防灾减灾类特色专业群的主要专业基础课和专业课程,反映了相关领域的最新科研成果,注重理论联系实际,强调可读性和教学适用性,力求实现系统性、前沿性、实践性和可读性的有机结合。系列教材的编委和作者团队既有学院的教师,也有来自中国地震局相关科研院所的专家。他们均为相关领域的骨干专家和教师,具有较深厚的科研积累、丰富的教学经验和实际防灾减灾工作经验,保证了教材编写的质量和水平。希望本套教材的出版和发行能够为我国防灾减灾领域的专业教育、职业培训和科学普及工作发挥积极的作用。

编写防灾减灾系列教材是一项新的尝试,衷心希望业内专家学者和全社会关心防灾减灾事业的读者对本系列教材的编写工作提出有益的建议和意见,以便我们不断改进完善,逐步将其建设成为一套精品教材。清华大学出版社对本套系列教材的编写给予了大力支持,在此表示衷心的感谢。

本书编委会

2012年10月

地震工程理论的发展和完善往往离不开实际大地震的启示,也同样离不开实际大地震的检验。在地震中,特别是大地震中人们从实际建筑物和土木基础设施的抗震表现和破坏中得到启示,再经过反复的思考和研究,一方面改进过去不正确的理论、方法和技术,同时也不断地获得新的发现,形成了新的认知;并将这些新的认知变成抗震设计规范中的新理论、新方法和新技术,最终通过新建的工程体现出来,接受新一轮地震袭击的考验和验证。地震工程的理论、方法和技术就是这样不断地发展起来的。

2008年在我国四川省汶川县发生了新中国成立以来最强烈的地震灾害,给中国人民带来了巨大的灾难,却也同时对新中国成立以来发展起来的抗震设计规范提供了一个检验的绝好的机会。汶川地震后我国广大的工程抗震设计工作者、科研工作者以及教育工作者,深入地震现场,收集了大量珍贵的工程建筑的第一手震害资料,对这些资料进行整理分析和研究,并对原来的抗震设计规范进行了修订,既将汶川大地震中获得的新经验和新认识纳入了新的规范,同时也将近期世界各国新的成熟研究成果加了进来,这就是我国在2010年正式颁布的新版《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)。

汶川大地震发生后,我国各行各业乃至全国人民无不对建筑抗震问题十分关注,表现出浓厚的兴趣,比如,什么房子抗震,怎样设防合理,怎样可使学校和医院的建筑更抗震,灾区应该怎样重建,等等。《建筑抗震》就是面对这样的需要,结合刚刚颁布的新的抗震设计规范内容编写的,希望此书既能对土木专业的广大工程设计人员、科研人员,特别是大学本科学子正确、全面理解和掌握规范的内容有所帮助,同时也对希望了解工程抗震知识的其他各行各业的专业人员有所帮助。为了实现这个目标,编撰者独具匠心,在编写过程中既防止将本书写成一本难于啃懂的理论书籍,又防止将其写成科普读物,力图将它写成深入浅出,能清晰介绍有关工程抗震专业知识及其背景的、实用的书籍;这是一次新的、也是十分宝贵的尝试。

值《建筑抗震》付梓之际,谨以此简短序言祝愿本书的出版能对我国的防震减灾实践和教育的发展有所贡献。

许江

2012年8月15日

涉及结构抗震的教材和论述结构抗震的著作已有很多种了,本书的编撰主要出于以下几点考虑。

其一,四川汶川大地震后,在吸取新的震害经验和地震工程抗震研究新成果的基础上,《建筑抗震设计规范》和《建筑抗震鉴定标准》都作了修订;本书编撰基于上述规范修订后的内容,旨在使读者尽快对新的建筑抗震技术标准有所了解。

其二,纵观以往有关建筑抗震的教材和著述,其内容大多偏重结构动力学的基础理论和各类结构的抗震计算方法,这对于结构工程专业的大学生自然是必要和适当的。然而,对那些更大范围的建筑学、建筑经济、城市规划、建筑施工、工程管理等专业的学生,他们希望了解有关结构抗震的基础知识,但并不专注于结构的力学分析。对这些学生而言,本书省略了大量数学物理方程和结构计算公式,着重表述震害、抗震概念设计原则、抗震措施,更便于阅读。

其三,本书也概略介绍了与建筑抗震相关的地震、地震动、地震区划的相关内容,意在向读者提供概略但系统的防震减灾基础知识。

基于以上考虑,本书编撰力图通俗易懂,较多利用照片、示例图和示意图等直观形象的材料,以便引起读者兴趣,加深对基本概念和方法的理解。希望本书除可作为高等院校学生的教材之外,亦可供从事防震减灾、规划、施工、管理的专业人员以及对防震减灾和地震工程感兴趣的其他读者阅读。

本书由中国地震局工程力学研究所和防灾科技学院联合编写,书中所采用的地震震害照片未注明出处的均为中国地震局工程力学研究所和防灾科技学院的工作人员在震害现场拍摄。本书参编的人员包括:张敏政、郭晓云(第1、2、3章),郭晓云(第4章),张艳敏(第5章),王素莉(第6章),朱绪平(第7章),李巧燕(第8章),孙有为(第9章),杜敏(第10章)。

最后,感谢对本书出版提供各种帮助的同志,特别感谢中国工程院院士谢礼立为本书作序。

由于编者水平有限,本书缺点和错误在所难免,望广大读者不吝赐教。

编者

2012年9月

第 1 章 绪论	1
1.1 地震灾害和建筑	1
1.2 建筑抗震的起源与发展	4
1.2.1 建筑抗震理论的沿革.....	5
1.2.2 我国建筑抗震的研究与实践.....	5
1.3 建筑抗震的研究途径	7
1.3.1 建筑抗震的知识来源.....	7
1.3.2 多学科知识的综合运用.....	8
1.3.3 建筑抗震设计的特点.....	9
思考题	10
第 2 章 地震和强地震动	11
2.1 地球和地震.....	11
2.1.1 地球内部结构	11
2.1.2 地震成因	12
2.1.3 地震分布和地震分类	14
2.1.4 地震三要素	17
2.2 地震烈度.....	18
2.2.1 地震烈度和烈度表	19
2.2.2 地震烈度的特点	21
2.2.3 地震等震线图	21
2.2.4 烈度的应用	23
2.3 强地震动.....	24
2.3.1 强震动观测	24
2.3.2 强地震动参数	25
2.3.3 强地震动的影响因素	29

2.4 地震危险性分析	30
2.4.1 地震危险性分析方法	30
2.4.2 地震区划	32
2.4.3 人工模拟加速度时程曲线	34
思考题	36
第3章 抗震设防基本规定	37
3.1 抗震设防标准	37
3.1.1 建筑抗震设防目标	38
3.1.2 建筑抗震设防分类和抗震设防标准	38
3.2 抗震概念设计	40
3.2.1 工程建设地段的选择	40
3.2.2 结构的规则性	42
3.2.3 合理的结构体系	44
3.2.4 非结构构件、材料与施工	47
3.2.5 地震作用和地震作用效应的调整	47
3.3 场地、地基和基础	48
3.3.1 场地抗震类别	48
3.3.2 地基基础的抗震承载力验算	50
3.3.3 液化土和软土地基的评价和处理	51
3.4 地震作用计算和抗震验算	56
3.4.1 设计地震动	56
3.4.2 地震作用计算	58
3.4.3 抗震验算	62
3.5 性能化抗震设计	65
思考题	67
第4章 多层砌体房屋和底部框架砌体房屋抗震设计	68
4.1 概述	68
4.1.1 多层砌体房屋及震害	68
4.1.2 底部框架砌体房屋及震害	74
4.2 抗震设计一般规定	75
4.2.1 多层砌体房屋抗震设计一般规定	75
4.2.2 底部框架砌体房屋抗震设计一般规定	79
4.3 抗震设计计算要点	80

4.3.1 多层砌体房屋的计算要点	80
4.3.2 底部框架-抗震墙砌体房屋的计算要点	81
4.4 多层砖房的抗震构造措施	82
4.4.1 构造柱的设置	82
4.4.2 圈梁的设置	84
4.4.3 楼、屋盖	86
4.4.4 墙体的拉结和楼梯间	89
4.4.5 其他措施	90
4.5 多层砌块房屋的抗震构造措施	91
4.6 底部框架-抗震墙砌体房屋的抗震构造措施	93
4.6.1 构造柱的设置	93
4.6.2 过渡层	94
4.6.3 底部抗震墙	96
4.7 抗震鉴定与加固	96
4.7.1 多层砌体结构的抗震鉴定	97
4.7.2 多层砌体结构的加固	102
思考题	104

第5章 单层工业厂房抗震设计

106

5.1 单层钢筋混凝土柱厂房	106
5.1.1 概述	106
5.1.2 抗震一般规定	109
5.1.3 抗震计算要点	110
5.1.4 抗震构造措施	111
5.1.5 抗震鉴定与加固	116
5.2 单层钢结构厂房	117
5.2.1 概述	117
5.2.2 抗震一般规定	119
5.2.3 抗震计算要点	119
5.2.4 抗震构造措施	120
5.2.5 抗震鉴定与加固	123
5.3 单层砖柱厂房	124
5.3.1 概述	124
5.3.2 抗震一般规定	125
5.3.3 抗震计算要求	125

5.3.4 抗震构造措施	126
5.3.5 抗震鉴定加固要点	127
思考题	129
第6章 空旷房屋和大跨屋盖建筑抗震设计	130
6.1 空旷房屋建筑	130
6.1.1 概述	130
6.1.2 抗震设计一般规定	133
6.1.3 空旷房屋的计算要点	134
6.1.4 单层空旷房屋抗震构造措施	135
6.2 大跨度屋盖建筑	139
6.2.1 概述	139
6.2.2 一般抗震规定	144
6.2.3 计算要点	146
6.2.4 抗震构造措施	147
6.3 抗震鉴定和加固	148
6.3.1 抗震鉴定	149
6.3.2 抗震加固	150
思考题	151
第7章 多层与高层钢筋混凝土房屋抗震设计	152
7.1 概述	152
7.1.1 框架结构震害	152
7.1.2 框架-抗震墙结构震害	155
7.2 抗震设计的一般要求	156
7.2.1 抗震设计的若干重要概念	156
7.2.2 钢筋混凝土房屋的最大高度和高宽比	157
7.2.3 现浇钢筋混凝土房屋的抗震等级	158
7.2.4 防震缝与抗撞墙	160
7.2.5 楼盖及屋盖	161
7.2.6 框架和抗震墙	162
7.2.7 基础及地下室	163
7.2.8 楼梯间的抗震要求	165
7.3 计算要点	165
7.4 抗震构造措施	167

7.4.1	框架的抗震构造措施	167
7.4.2	抗震墙结构的基本抗震构造措施	172
7.4.3	框架-抗震墙结构的基本抗震构造措施	174
7.4.4	板柱-抗震墙结构的基本抗震措施	175
7.4.5	筒体结构的抗震构造措施	175
7.4.6	高强度混凝土结构的抗震措施	178
7.5	钢筋混凝土建筑的抗震鉴定与加固	178
7.5.1	抗震鉴定	178
7.5.2	抗震加固	186
	思考题	188
第8章	土、木、石结构房屋抗震设计	190
8.1	概述	190
8.1.1	生土结构房屋	190
8.1.2	木结构房屋	193
8.1.3	石结构房屋	194
8.2	抗震设计的一般要求	195
8.2.1	场地、地基和基础	196
8.2.2	房屋的结构布置	196
8.2.3	房屋的高度和层数限制	197
8.2.4	承重横墙布置	197
8.2.5	建筑材料	198
8.3	抗震构造措施	198
8.3.1	生土房屋的抗震构造措施	199
8.3.2	木结构房屋的抗震构造措施	200
8.3.3	石结构房屋抗震构造措施	200
8.4	抗震鉴定与加固	201
8.4.1	乡镇建筑加固	201
8.4.2	古建筑加固	201
	思考题	203
第9章	地下建筑抗震设计	204
9.1	概述	204
9.1.1	地下建筑的分类和应用	204
9.1.2	动力特性和震害	206

9.2 一般规定和计算要点	211
9.2.1 抗震设计一般规定	211
9.2.2 计算要点	213
9.3 抗震措施和鉴定加固	214
9.3.1 抗震构造措施	214
9.3.2 抗液化措施和地基处理措施	217
9.3.3 抗震鉴定与加固	218
思考题	219
第 10 章 非结构构件抗震设计	220
10.1 概述	220
10.1.1 非结构构件的分类	220
10.1.2 非结构构件震害	220
10.2 一般抗震要求	224
10.2.1 抗震设防目标和抗震设防标准	224
10.2.2 抗震验算的范围	225
10.3 抗震计算要点	225
10.3.1 非结构构件对整体计算的影响	225
10.3.2 非结构构件自身的计算要求	226
10.3.3 抗震计算方法	226
10.4 非结构构件的抗震措施	228
10.4.1 建筑非结构构件的基本抗震措施	228
10.4.2 建筑附属设备支架的基本抗震措施	231
10.5 非结构构件的抗震鉴定与加固	232
10.5.1 抗震鉴定	232
10.5.2 抗震加固	233
思考题	234
参考文献	235

绪 论

地震以不期而至的巨大威力毁灭文明、吞噬生灵。人类社会进入 21 世纪仅 10 年,全球的地震罹难者已超过 80 万人,经济损失达千亿美元。最大限度减少地震带来的经济损失和人员伤亡是人类面临的长期任务。

1.1 地震灾害和建筑

地震是一种自然现象,强烈地震不但可能引发地裂、滑坡、山崩、海啸、湖震、泥石流等灾害,改变人类赖以生存的自然环境;而且还将大量摧毁人工设施,并导致火灾、水灾、有毒有害及放射性物质泄漏、疫病等次生灾害(图 1.1.1,图 1.1.2)。灾难性地震将造成重大人员伤亡和经济损失,扰乱人类正常的社会发展。



图 1.1.1 2011 年日本东部海域地震海啸摧毁岩手县陆前高田市

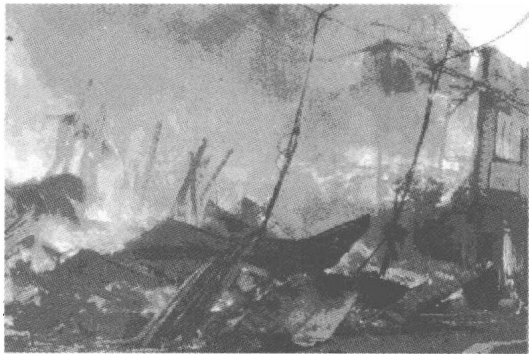


图 1.1.2 1995 年日本阪神中神户市地震火灾

中国古代不乏有关地震灾害的文字记载。例如,《明嘉靖实录》对 1556 年陕西关中大地震的记载为:“嘉靖三十四年十二月壬寅,是日山西、陕西、河南同时地震,声如雷,鸡犬鸣吠。陕西渭南、华州、朝邑、三原等处和山西蒲州等处尤甚,或裂泉涌、中有鱼物,或城郭房屋陷于地中,或平地灾成山阜,或一日连震数次,或累日震不止。河渭泛涨,华岳、终南山鸣,河壅数日。压死官吏军民奏报有名者十二万有余,其不知名未经奏报者不可数计。”

1976 年 7 月 28 日凌晨,中国唐山丰南一带发生 7.8 级大地震。百万人口的工业城市唐山瞬间成为一片废墟,占全部民用建筑 96% 的 656 136 间房屋倒塌或严重破坏(图 1.1.3)。北方工业重镇天津市遭受重创,远在 100 公里以外的首都北京震感强烈。从渤海湾到宁夏,从黑龙江到长江以北,华夏大地一片惊惧。地震共导致 242 769 人死亡,435 556 人受伤;直接经济损失约 100 亿元。



图 1.1.3 1976 年唐山地震后的唐山市

2008 年 5 月 12 日的四川汶川 8.0 级大地震引起我国 30 个省、直辖市、自治区和东南亚地区的强烈震感,四川、甘肃、陕西三省灾害严重。发震断层出露延伸 200 余公里,巨大滑坡掩埋了村镇,切断了河流、道路,形成堰塞湖 30 余处;15 945 928 间乡村民居倒塌或严重破坏,众多现代建筑和设施受损;川西的青山绿水一时满目疮痍。图 1.1.4 为震后的北川县城。地震共造成 69 227 人遇难、17 923 人失踪,374 643 人受伤;直接经济损失达 6000 亿元之巨。



图 1.1.4 2008 年四川汶川地震后的北川县城

表 1.1.1 和表 1.1.2 列出了国内外近现代重大地震灾害。

表 1.1.1 中国近现代的重大地震灾害

年份	地 震	震级	死 亡 人 数	经济损失/亿元人民币
1902	新疆阿图什	8.25	500	
1920	宁夏海原	8.5	200 000	
1923	四川炉霍、道孚	7.25	3000	
1927	甘肃古浪	8	4000	
1931	新疆富蕴	8	10 000	
1933	四川叠溪	7.25	6800	
1935	台湾新竹、台中	7	3 200	
1937	山东菏泽	7	390	
1941	台湾嘉义	7	300	
1948	四川理塘	7.25	800	
1966	河北邢台	6.8、7.2	8000	
1975	辽宁海城	7.3	1328	
1976	河北唐山	7.8	240 000	100
1988	云南澜沧-耿马	7.6	748	
1990	青海共和-兴海	7.0	119	
1996	云南丽江	7.0	309	
1999	台湾集集	7.2	2333	
2003	新疆伽师-巴楚	6.8	268	14
2008	四川汶川	8.0	87 150(含失踪)	6000
2010	青海玉树	7.1	2968(含失踪)	125

表 1.1.2 国外近现代重大地震灾害

年份	地 震	震级	死 亡 人 数	经济损失/亿美元
1891	日本浓尾	7.9	7273	
1896	日本三陆	7.1	27 122	
1905	克什米尔	8.6	19 000	
1906	美国旧金山	8.3	1000	5
1908	意大利墨西拿	7.5	83 000	
1923	日本关东	7.8	142 807	
1927	日本北丹后	7.5	2925	
1933	日本三陆	8.3	3008	
1935	巴基斯坦	7.5	30 000	
1939	智利	8.3	30 000	
1939	土耳其	7.9	23 000	
1946	日本南海	8.1	1000	

续表

年份	地 震	震级	死 亡 人 数	经济损失/亿美元
1948	日本福井	7.3	3895	
1960	摩洛哥	5.6	12 000	
1960	智利	8.3	120	
1964	美国阿拉斯加	7.9	130	
1970	秘鲁	7.7	40 000	
1972	伊朗	7.0	17 000	
1972	马拉瓜	6.5	10 000	
1978	伊朗	7.7	25 000	
1988	墨西哥	8.1	9500	
1988	苏联亚美尼亚	6.9	25 000	
1994	美国北岭	6.7	55	400
1995	日本阪神	7.3	6348	1000
1999	土耳其伊兹米特	7.4	14 000	200
2001	印度古吉拉特	7.7	14 000	45
2003	伊朗巴姆	6.5	41 000	
2004	印尼苏门答腊	8.9	300 000	
2005	印巴交界	7.6	88 000	
2010	海地	7.3	316 300	19
2010	智利	8.8	802	150
2011	新西兰	6.3	220	110
2011	日本东部海域	9.0	27 794(含失踪)	3000

房屋建筑是地球上数量最多的人工结构,地震灾害的共同特点是大量房屋建筑毁坏或受损,房屋倒塌及其导致的人员伤亡和经济损失是地震成灾最重要的原因。地震灾区最触目惊心的是倒塌的房屋及压埋人员的抢救,地震应急和灾区正常秩序的恢复也有赖于不同使用功能的房屋。因此,房屋作为地震灾害的重要载体和地震应急、震后重建不可或缺的人工结构,在防震减灾事业中具有举足轻重的作用;房屋建筑抗震是地震工程研究与实践最早涉及,并贯彻始终的重要的领域。

1.2 建筑抗震的起源与发展

地震灾害已有数千年的史料记载,但包含建筑抗震在内的地震工程学却仅有大约百年的历史。历经时代沧桑和地震等自然灾害留存于世的古代建筑,常使我们惊叹古人卓越的建筑智慧,但时近 20 世纪才有了关于建筑抗震的文字表述。基于现代力学和工程学的发展,建筑抗震逐渐成为土木工程的重要内容。

1.2.1 建筑抗震理论的沿革

20 世纪初到 30 年代可称为建筑抗震的静力学阶段。当时,人们认识到地震动是剧烈的往复运动,在将地面结构视为刚体的假定下,地面建筑将承受与地面相同的加速度;基于牛顿力学的第二定律,该加速度与建筑质量的乘积即为作用在结构上的地震惯性作用。日本抗震设计的“震度法”是这一发展阶段的代表;如取水平地震震度为 0.1(即水平向地震加速度为 $0.10g$),再乘以结构质量即可得到作用于结构的等效水平力;按照这一方法设计的抗震建筑在关东大地震中经受住了考验。1924 年日本颁布的世界上最早的建筑抗震设计规范《市街地建筑法》,是采用静力设计理论的典型代表。这一时期,也曾出现有关隔震、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计算方法。

20 世纪 30 年代,美国和日本获得了最初一批强震加速度记录,认识到地震动是包含多种频率成分的复杂运动;同时,固体的弹性振动理论也被土木工程界所掌握。20 世纪 40 年代开始利用小型振动台进行谐波和随机波作用下结构模型的弹性动力反应试验。在此基础上,美国研究者计算了自振周期不同的若干单自由度弹性体系在实测地震加速度作用下的反应,做成了地震反应谱并将之用于结构抗震设计。反应谱方法考虑了结构的弹性变形、体现了动力分析的概念,但这种计算方法只能得出对结构最大地震反应的估计,地震作用仍以等效静力方式作用于结构。20 世纪 50 年代,这一方法在国际范围被广泛接受,标志着建筑抗震进入反应谱理论阶段。

20 世纪 60 年代,采用低周循环加载方式的伪静力试验技术获得广泛应用,同期日本和美国先后研制了可以进行结构抗震试验的大型地震模拟振动台。70 年代末最早的伪动力试验装置在日本建成。70 年代以后,电子计算机的应用逐步普及,使复杂结构的地震反应时程分析成为可能。同时,有关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,结构和地基的相互作用,多向地震动作用和非均一地震作用的研究日趋深入,包含隔震和消能减振在内的结构振动控制也成为建筑抗震的前沿领域。建筑抗震的理论和方法进入更为深入、缤纷多彩的动力阶段。

1.2.2 我国建筑抗震的研究与实践

我国的建筑抗震研究始于中华人民共和国的建立。在 1949—1955 年的第一个五年计划时期,整理了追溯至三千年前的历史地震资料,编制了历史地震目录,并开始对部分重大工程建设场址进行地震烈度评定,从工程地震角度为建筑抗震的实施奠定了基础。1955 年苏联《地震区建筑规范》(ncn-101—51)在中国翻译出版,中国少数重要建筑参照该规范按静力理论进行了抗震设计。