

清华大学土木工程系列教材

住房和城乡建设部“十四五”规划教材

建筑结构抗震设计 理论与方法

第2版

潘鹏 张耀庭 王涛 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书详细讲解建筑结构抗震设计的基础理论,全面介绍建筑结构抗震设计方法的发展与前沿。第1~8章首先介绍地震学和结构振动分析的基础知识,然后讲解单自由度体系的地震响应规律和反应谱,接下来讲解多自由度体系的分析模型、分析方法和地震响应规律,最后从能量的角度分析结构地震响应和地震损伤。第9~18章则首先介绍建筑结构抗震设计方法和相关规范,并介绍基于性能的抗震设计及其在规范中的体现,然后讲解地基基础、砌体结构、钢筋混凝土结构和钢结构的抗震设计,接下来讲解隔震和消能减震结构设计,最后介绍震后功能可恢复结构的概念和实现方法,以及非结构构件的抗震设计。

本书可作为土木工程相关专业高年级本科生和研究生的教材,也可供从事建筑结构抗震相关工作的科研人员和工程设计人员参考使用。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构抗震设计理论与方法:第2版/潘鹏,张耀庭,王涛编著.—北京:清华大学出版社,2023.11
清华大学土木工程系列教材
ISBN 978-7-302-63403-4

I. ①建… II. ①潘… ②张… ③王… III. ①建筑结构—防震设计—高等学校—教材 IV. ①TU352.104

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 068740 号

责任编辑:秦娜 赵从楠
封面设计:陈国熙
责任校对:欧洋
责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-83470000

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 装 者:三河市科茂嘉荣印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:39

字 数:949千字

版 次:2023年11月第1版

印 次:2023年11月第1次印刷

定 价:128.00元

产品编号:100807-01

前 言

地震工程学发展至今已有 100 余年的历史,地震工程和结构工程界对地震作用和结构抗震设计方法进行了大量的研究,基本上掌握了结构抗震的一般原理与方法。大量的震害实例及工程实践经验表明,对工程结构进行科学的抗震设计是消除或减轻地震灾害最积极有效的措施。与此同时,也发现很多结构在地震中的表现和所预期的结果并不一致。地震所导致的工程结构破坏依然是地震灾害的主要破坏形式。因此,结构工程师责任重大,有必要投入更多精力深入地研究和掌握地震作用的基本规律和结构抗震设计的原理和方法。

“建筑抗震设计”是我国高校土木工程专业核心专业课程之一。当前,市面上关于建筑抗震设计方面的教材,大多数以我国抗震规范的章节为蓝本,基于对抗震规范条文内容的介绍和解释而编写,较严重地受到规范章节及条文内容的束缚与限制;从学生学习的角度来看,现有教材的普遍特点是内容多而庞杂,未能形成相对系统、完整的地震工程学的理论框架,缺少经典教科书,应该深入重点学习的知识没有介绍,应该粗略了解的知识又讲得过多且模棱两可,并且在新理论与新技术方面涉及较少。因此,合适的建筑结构抗震书籍,无论是土木工程专业本科高年级学生或研究生用的教材,还是结构工程技术人员参考书,都十分缺乏。编写一本相对系统地介绍建筑抗震设计的基础理论、方法、应用及发展趋势,适应不同层次的教学与科研人员需求,且具有鲜明特点的建筑抗震设计教科书很有必要。在此背景下,编者历经 3 年时间完成了本书的编写。

本书总计 18 章,分别是:绪论;地震学基础知识;结构振动分析基础;单自由度结构的地震响应;多自由度结构弹性分析模型;多自由度结构弹塑性分析方法;多自由度结构的地震响应;地震能量和损伤分析方法;结构抗震设计方法和规范;基于性能/位移结构抗震设计方法;地基与基础抗震设计;砌体结构的抗震性能与设计;钢筋混凝土结构的抗震性能与设计;钢结构的抗震性能与设计;消能减震结构设计;隔震结构设计;震后功能可恢复的新型抗震体系;非结构构件抗震设计。其中,第 1~10 章及第 15~17 章由潘鹏编写,第 11~14 章由张耀庭编写,第 18 章由王涛编写。王涛补充完善了部分章节,全书由叶列平审核。

在本书的编写过程中,清华大学的邓开来、吴守君、张东彬、潘恒毅、李伟和韩仲琪等承担了大量的文字编辑工作。本书被用作清华大学研究生课程“结构抗震与减震原理”2016—2022 年的教学参考文档,选修这门课的同学们对本书稿提出了宝贵的修改意见和建议。在此一并表示衷心的感谢。

本书受国家重点研发计划(2019YFC1509303)资助,特此致谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不当甚至错误之处,敬请读者批评指正。

编者
2023 年 2 月

清华大学出版社

目 录

第1章 绪论	1
1.1 建筑结构抗震的任务和内容	1
1.2 建筑结构抗震设计的特点	1
1.3 本书的主要内容	3
第2章 地震学基础知识	4
2.1 有关地震的一些基本概念	4
2.2 地震的成因和机制	5
2.3 地震波概述	8
2.3.1 地震波的特性	8
2.3.2 地震波的传播机制	9
2.4 地震震级	12
2.4.1 里氏震级	12
2.4.2 面波震级	13
2.4.3 体波震级	13
2.4.4 持时震级	13
2.4.5 矩震级	14
2.4.6 震级计算	14
2.4.7 震级和能量	15
2.4.8 震级和频度	15
2.4.9 震级和断层	15
2.5 地震震害	16
2.6 地震烈度	17
2.7 地震动	20
2.7.1 地震动观测	20
2.7.2 地震动的类型	23
2.7.3 地震动的频率特征	24
2.7.4 地震持时	26
2.7.5 地震三要素综合影响实例	28
2.7.6 地震动的衰减规律	32
习题	34
参考文献	34

第3章 结构振动分析基础	35
3.1 结构动力分析模型	35
3.2 结构振动方程	37
3.2.1 振动体系的自由度	37
3.2.2 单自由度体系的动力方程	37
3.2.3 多自由度体系的振动方程	40
3.3 单自由度体系的振动分析	42
3.3.1 无阻尼自由振动	42
3.3.2 有阻尼自由振动	43
3.3.3 强迫振动	46
3.3.4 Duhamel 积分	50
3.4 多自由度体系的振动分析	53
3.4.1 振型分析	53
3.4.2 无阻尼体系的自由振动	55
3.4.3 有阻尼体系的自由振动	56
3.4.4 强迫振动	58
3.4.5 特征值和特征向量计算	59
3.5 动力分析的数值方法	61
3.5.1 线性加速度法	61
3.5.2 平均加速度法	64
3.5.3 Newmark- β 法	65
3.5.4 多自由度体系 Newmark- β 法	67
3.6 频域分析方法	69
3.6.1 对周期性荷载的反应	69
3.6.2 频域分析	70
3.6.3 时域和频域转换函数之间的关系	72
3.7 随机振动理论	72
3.7.1 随机过程的基础知识	72
3.7.2 线性单自由度体系的平稳随机反应	76
3.7.3 线性单自由度体系的非平稳随机反应	77
习题	79
参考文献	80
第4章 单自由度结构的地震响应	81
4.1 单自由度结构的受震位移响应	81
4.2 反应谱的概念	82
4.3 弹性反应谱	85
4.3.1 反应谱之间的关系	85
4.3.2 反应谱的特征	87

4.3.3 反应谱的标准化与设计反应谱	89
4.3.4 傅里叶谱与反应谱	92
4.3.5 弹性反应谱的不足	95
4.4 结构恢复力模型	95
4.5 单自由度结构的弹塑性地震响应	101
4.5.1 承载力和延性对地震响应的影响	101
4.5.2 滞回模型对弹塑性地震响应的影响	107
4.6 弹塑性反应谱	108
习题	113
参考文献	113
第 5 章 多自由度结构弹塑性分析模型	114
5.1 概述	114
5.2 层模型	115
5.2.1 剪切型层模型	115
5.2.2 弯曲型层模型	122
5.2.3 弯剪型层模型	123
5.3 杆单元模型	127
5.3.1 两端简支杆单元	127
5.3.2 两端自由杆单元	128
5.3.3 两端有刚域杆单元	129
5.3.4 杆端弹塑性弹簧杆模型	131
5.3.5 其他弹塑性杆模型	135
5.3.6 多弹簧杆模型	139
5.3.7 基于纤维模型的杆单元	140
5.4 剪力墙模型	143
5.4.1 柱模型	143
5.4.2 支撑桁架模型	144
5.4.3 边柱+中柱复合模型	144
5.4.4 分层壳模型	145
5.5 上部结构与基础共同工作	146
5.5.1 子结构法	147
5.5.2 集中参数法	148
5.5.3 直接法	150
习题	152
参考文献	152
第 6 章 多自由度结构弹塑性分析方法	153
6.1 动力弹塑性时程分析法	153
6.1.1 简述	153

6.1.2	动力弹塑性时程分析基本原理	153
6.1.3	动力弹塑性时程分析地震波选择	157
6.1.4	人工模拟地震动加速度时程生成方法	160
6.2	静力弹塑性分析方法	162
6.2.1	简述	162
6.2.2	加载模式	163
6.2.3	等效单自由度及其位移模式	168
6.2.4	目标位移	170
6.2.5	静力弹塑性分析的适用条件	177
6.2.6	不规则结构的适用性	178
6.2.7	振型推覆分析方法	179
6.3	等价线性化方法	182
6.3.1	单自由度结构的等价线性化方法	182
6.3.2	多自由度结构的等价线性化方法	187
	习题	190
	参考文献	192
第7章	多自由度结构的地震响应	194
7.1	动力方程	194
7.2	线弹性多自由度体系的振动分析	195
7.3	振型分解反应谱法	199
7.4	复振型分解法和复振型分解反应谱法	202
7.4.1	复振型分解方法	202
7.4.2	复振型分解反应谱法	206
7.5	结构弹塑性地震响应	208
7.5.1	剪切层模型结构	208
7.5.2	双重结构层模型	221
	习题	227
	参考文献	228
第8章	地震能量和损伤分析方法	229
8.1	单自由度地震能量分析	229
8.1.1	振动能量方程	229
8.1.2	地震输入能量谱	235
8.1.3	最大弹塑性位移	240
8.2	多自由度体系的能量分析	244
8.2.1	弹性多自由度体系	244
8.2.2	弹塑性多自由度体系	247
8.2.3	最大层间位移	248

8.3 结构地震损伤分析	252
8.3.1 损伤的概念和损伤指标	252
8.3.2 单参数损伤模型	253
8.3.3 双参数损伤模型	255
8.3.4 等效极限延性系数	257
8.3.5 损伤程度评价	259
习题	260
参考文献	260
第9章 结构抗震设计方法和规范	262
9.1 结构抗震设计方法的发展	262
9.1.1 基于承载力设计方法	262
9.1.2 基于承载力和构造保证延性设计方法	263
9.1.3 基于损伤和能量设计方法	264
9.1.4 能力设计方法	264
9.1.5 基于性能/位移设计方法	265
9.2 结构抗震能力和性能指标	266
9.2.1 结构的性能指标	266
9.2.2 抗震设防水准与抗震性能需求	269
9.3 我国建筑结构抗震设计方法	270
9.3.1 我国结构抗震发展概况	270
9.3.2 三水准设防目标与二阶段设计	271
9.3.3 地震作用计算	272
9.3.4 结构抗震设计方法	283
9.4 美国抗震规范介绍	288
9.4.1 简述	288
9.4.2 抗震设防目标	290
9.4.3 反应谱	290
9.4.4 地震作用计算	292
9.4.5 抗震设计	293
9.4.6 结构体系	293
9.5 日本抗震规范介绍	295
9.5.1 简述	295
9.5.2 地震作用计算	296
9.5.3 第二阶段设计	299
习题	304
参考文献	304
第10章 基于性能/位移结构抗震设计方法	305
10.1 概述	305

10.2	结构抗震性能水准和目标	308
10.3	基于位移性能的设计方法	311
10.3.1	简述	311
10.3.2	结构抗震体系与结构性能控制	312
10.3.3	直接基于位移设计方法	314
10.4	基于性能的地震工程	318
10.4.1	简述	318
10.4.2	理论框架	319
10.5	基于韧性的地震工程	320
10.5.1	简述	320
10.5.2	国际相关建筑抗震韧性评价标准	321
10.5.3	我国《建筑抗震韧性评价标准》概述	321
10.5.4	建筑抗震韧性评价算例分析	326
	习题	330
	参考文献	330
第 11 章	地基与基础抗震设计	332
11.1	概述	332
11.2	场地	333
11.2.1	建筑场地类别	333
11.2.2	建筑场地评价及有关规定	336
11.3	地震时的地面运动特性	337
11.3.1	场地土对地震波的作用与土的卓越周期	337
11.3.2	强震时的地面运动	344
11.4	天然地基与基础	345
11.4.1	可不进行天然地基与基础抗震承载力验算的范围	345
11.4.2	天然地基抗震承载力验算	345
11.5	地基土的液化与防治	347
11.5.1	液化的概念	347
11.5.2	影响地基土液化的主要因素	348
11.5.3	液化的判别	350
11.5.4	液化地基的评价	352
11.5.5	地基抗液化措施	353
11.6	桩基的抗震验算	354
11.6.1	桩基不需进行验算的范围	355
11.6.2	低承台桩基的抗震验算	355
11.7	软弱黏性土地基	357
	习题	357
	参考文献	358

第 12 章 砌体结构的抗震性能与设计	359
12.1 砌体结构的震害	359
12.1.1 一般砌体结构的震害特点	359
12.1.2 底部框架-抗震墙砌体房屋震害特点	362
12.1.3 砌体结构震害规律	363
12.2 多层砌体结构布置与选型	363
12.2.1 房屋层数和总高度的限制	363
12.2.2 房屋高宽比的限制	364
12.2.3 砌体抗震横墙的间距	365
12.2.4 房屋局部尺寸限值	365
12.2.5 多层砌体房屋的建筑布置和结构体系	365
12.2.6 防震缝设置	366
12.3 多层砌体结构的抗震设计	366
12.3.1 水平地震作用计算简图	366
12.3.2 楼层水平地震剪力的分配	368
12.3.3 墙体抗震承载力验算	370
12.4 多层砌体结构房屋的抗震构造措施	372
12.4.1 多层砖砌体房屋的抗震构造措施	373
12.4.2 多层小砌块房屋的抗震构造措施	377
12.5 底部框架-抗震墙砌体房屋的抗震设计	379
12.5.1 底部框架-抗震墙砌体房屋的结构布置	379
12.5.2 底部框架-抗震墙砌体房屋的抗震计算	379
12.5.3 底部框架-抗震墙砌体房屋抗震构造措施	382
12.6 砌体结构抗震加固	384
12.6.1 扶壁柱加固技术	384
12.6.2 钢筋网水泥砂浆面层加固技术	385
12.6.3 外套整体式加固技术	387
12.6.4 预应力钢板带加固技术	388
12.6.5 高强钢绞线-聚合物砂浆面层加固技术	389
12.6.6 滑移隔震层加固技术	391
习题	393
参考文献	394
第 13 章 钢筋混凝土结构的抗震性能与设计	395
13.1 多层和高层钢筋混凝土结构的震害	395
13.1.1 场地引起的震害	395
13.1.2 结构布置引起的震害	395
13.1.3 钢筋混凝土框架结构的震害	397
13.1.4 剪力墙结构的震害	401

13.2	多高层钢筋混凝土结构选型、结构布置和设计原则	402
13.2.1	结构选型	402
13.2.2	结构布置	403
13.2.3	钢筋混凝土结构房屋的抗震等级	408
13.2.4	钢筋混凝土结构房屋的延性和屈服机制	410
13.2.5	材料及连接	411
13.2.6	楼梯间	412
13.2.7	基础结构	412
13.3	钢筋混凝土框架结构的抗震设计	413
13.3.1	水平地震作用计算	413
13.3.2	框架结构内力及水平位移计算	414
13.3.3	内力组合及最不利内力	425
13.3.4	框架结构截面设计	426
13.3.5	框架结构构造措施	432
13.3.6	预应力混凝土框架的抗震设计要求	437
13.4	抗震墙结构的抗震分析	439
13.4.1	抗震墙结构的设计要点	439
13.4.2	地震作用的计算	439
13.4.3	地震作用在各剪力墙之间的分配及内力计算	443
13.4.4	截面设计和构造	444
13.5	框架-抗震墙结构的抗震设计	447
13.5.1	框架-抗震墙结构的设计要点	447
13.5.2	地震作用的计算方法	447
13.5.3	结构内力计算	447
13.5.4	截面设计和配筋构造	456
13.6	混凝土结构抗震加固	456
13.6.1	扩大截面法	457
13.6.2	粘贴钢板加固法	458
13.6.3	碳纤维加固法	460
13.6.4	附加子结构加固法	462
13.6.5	消能减震加固法	464
13.6.6	隔震加固法	466
	习题	467
	参考文献	469

第14章 钢结构的抗震性能与设计 471

14.1	多层和高层钢结构房屋的主要震害特征	471
14.1.1	梁柱节点连接的破坏	472
14.1.2	梁、柱、支撑等构件破坏	474
14.1.3	结构倒塌	475

14.2	多层和高层钢结构的选型与结构布置	475
14.2.1	多层和高层钢结构体系的选型	475
14.2.2	多层和高层钢结构房屋的平面布置原则	477
14.2.3	多层和高层钢结构房屋的竖向布置原则	478
14.2.4	多层和高层钢结构布置的其他要求	479
14.3	多层和高层钢结构房屋的抗震概念设计	479
14.3.1	结构方案的选择	480
14.3.2	多道防线的设置	480
14.3.3	强节点弱构件的设计	480
14.3.4	强柱弱梁的设计	482
14.3.5	偏心支撑框架的弱消能梁段要求	483
14.3.6	其他抗震设计要求	484
14.4	多层和高层钢结构房屋的抗震计算	486
14.4.1	结构计算模型	486
14.4.2	地震作用的计算	487
14.4.3	计算要求	487
14.5	多层和高层钢框架结构房屋的抗震构造措施	488
14.5.1	纯框架结构抗震构造措施	488
14.5.2	钢框架-中心支撑结构的抗震构造措施	492
14.5.3	钢框架-偏心支撑结构的抗震构造措施	494
14.6	钢结构抗震加固	496
14.6.1	钢结构抗震加固原则	496
14.6.2	改变结构体系加固法	496
14.6.3	增大截面加固法	497
14.6.4	粘贴钢板加固法	498
14.6.5	外包钢筋混凝土加固法	499
14.6.6	连接与节点的加固	500
	习题	503
	参考文献	504
第 15 章	消能减震结构设计	505
15.1	概述	505
15.1.1	基本概念	505
15.1.2	消能减震结构的发展与应用	506
15.2	阻尼器	507
15.2.1	速度相关型阻尼器	508
15.2.2	位移相关型阻尼器	510
15.3	消能减震结构的设计要点	512
15.3.1	消能减震结构的设防水准	512

15.3.2	消能减震结构方案	513
15.3.3	消能减震结构的设计计算方法	513
15.4	消能减震结构设计实例	515
15.4.1	项目背景	515
15.4.2	结构概况	516
15.4.3	结构模型	517
15.4.4	输入地震动评价	519
15.4.5	分析流程概述	520
15.4.6	基于能量法的减震效果评价	520
15.4.7	基于时程分析法的减震效果评价	522
15.5	其他结构减振(震)控制方法	525
	习题	526
	参考文献	526
第16章	隔震结构设计	527
16.1	概述	527
16.1.1	基本概念	527
16.1.2	隔震结构的发展与应用	528
16.2	隔震支座	530
16.2.1	叠层橡胶隔震支座	530
16.2.2	摩擦摆隔震支座	532
16.2.3	其他隔震支座	533
16.3	隔震的基本原理	534
16.4	隔震结构的设计要点	538
16.4.1	隔震结构基本要求	538
16.4.2	隔震结构方案设计	539
16.4.3	隔震结构的设计计算方法	540
16.5	新建隔震结构的设计实例	542
16.5.1	结构概况	542
16.5.2	结构模型	543
16.5.3	输入地震动评价	544
16.5.4	设计流程概述	546
16.6	隔震加固结构的设计实例	547
16.6.1	项目背景	547
16.6.2	结构概况	547
16.6.3	结构模型	549
16.6.4	输入地震动评价	549
16.6.5	设计流程概述	551

16.7 高层结构隔震设计	551
习题	552
参考文献	552
第 17 章 震后功能可恢复的新型抗震体系	553
17.1 功能可恢复的概念	553
17.2 自复位框架结构	554
17.2.1 自复位钢框架梁柱节点	554
17.2.2 自复位钢支撑	558
17.3 自复位摇摆墙	560
17.3.1 结构体系概述	560
17.3.2 工程应用实例	562
17.3.3 摇摆墙刚度需求	566
17.3.4 框架-墙连接形式探究	569
17.3.5 填充墙作为摇摆墙	574
17.4 可更换连梁高层剪力墙结构	577
17.4.1 组装式自复位连梁	580
17.4.2 开槽式楼板	584
习题	590
参考文献	590
第 18 章 非结构构件抗震设计	592
18.1 概述	592
18.2 非结构构件震害	592
18.2.1 建筑非结构构件	592
18.2.2 机械、电气和管道 (MEP) 构件	594
18.2.3 建筑内部家具	596
18.3 非结构构件抗震设计方法	596
18.3.1 美国统一建筑规范	596
18.3.2 美国 FEMA 273/356 规范	597
18.3.3 欧洲 BSEN 1998-1-2004 规范	597
18.3.4 中国 GB 50011—2010 (2016) 规范	597
18.3.5 其他国家规范	597
18.3.6 各国关于非结构构件水平地震作用计算公式的比较	598
18.4 填充墙	598
18.4.1 填充墙的受力特点与震害特征	598
18.4.2 砌体填充墙面内抗震性能研究	601
18.4.3 砌体填充墙平面内外耦合作用研究	601

18.5	吊顶	602
18.5.1	影响吊顶抗震性能的因素	602
18.5.2	吊顶抗震加固措施	603
18.6	管线	604
18.6.1	管线系统的震害特征	604
18.6.2	管线系统的抗震设计及验算	605
18.7	非结构构件抗震检测方法	606
习题		608
参考文献		608

清华大学出版社

第1章 绪 论

1.1 建筑结构抗震的任务和内容

建筑结构在地震中的破坏和倒塌是造成地震灾害的主要原因之一。建筑结构抗震是利用工程的手段解决地震灾害的一门学科，也是研究地震对建筑结构的影响以及如何使结构免受地震破坏的学科。

建筑结构是最典型的工程结构。建筑结构抗震问题属于典型的工程结构抗震问题。被称为“中国地震工程之父”的刘恢先先生在为《中国工程抗震研究四十年（1949—1989）》一书写的序言中形象地阐述了工程抗震所包含的内容和它们之间的相互关系。刘先生将工程抗震比喻为一栋摩天大厦，大厦由基础、支柱和各楼层组成。

大厦的基础是地震危险性预测，即地震区域划分，简称地震区划。对工程抗震而言，地震危险性预测是基础性的研究工作，具体包括以下三个方面的内容：①地震活动性区划，即不同地区未来一段时间内可能出现的最小地震的震级分布；②地震动区划，即地震烈度区划和地震动参数区划；③地震灾害区划，包括地震引起各类震害的分布。

支撑大厦的四根柱子是进行工程抗震所必需的手段和方法，具体包括以下四个方面：①地震震害调查，即总结抗震经验，了解结构动力性能并指导结构模型化；②抗震试验，包括拟静力试验、拟动力试验、地震模拟振动台试验以及其他动力试验；③强震观测，即通过强震观测研究地震动特性，进行地震危险性分析，并观测结构的地震响应特性；④动力学，包括结构动力学、土动力学、波动理论和随机振动理论等。

大厦的楼层是工程抗震所包含的内容。大厦包括多个楼层：一层是地震小区划和工程场地安全性评定；二层是一般建筑结构的抗震设计，如《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）（以下简称《抗规》）中的内容就属于这一层，它给出了一般建筑结构抗震设计应该遵守的规范条款；三层是特种结构的抗震设计，如超高层结构的抗震设计；四层是建筑结构的抗震加固，当建筑结构使用了一定周期后，在根据新规范或标准需提高抗震等级或在地震后结构发生了损伤等情况下，需对其进行加固。

1.2 建筑结构抗震设计的特点

地震是一种自然现象，有其自然规律。工程结构在地震作用下的破坏也有其内在规律。正确掌握和运用这些规律，建造能够抵御地震作用的工程结构，是结构工程师的重要任务。

地震对建筑结构的影响与那些在建筑使用期间长期作用或经常作用的一般重力荷载和

其他作用(温度、沉降、徐变等)的最大不同在于:地震是一种突发性自然灾害,具有极大的随机性和不确定性,且持续时间很短(通常只有数十秒)。尤其是那些不可预见的罕遇地震,其作用荷载量值通常远超过结构设计所考虑的长期荷载,而重现期可能达数百年甚至数千年。因此,如果按罕遇地震作用量值进行结构设计,则对于在建筑物正常寿命期限内不出现罕遇地震的情况,势必会造成结构设计过于浪费。然而,如果不考虑可能会出现罕遇地震影响,一旦罕遇地震发生,则将会对建筑物造成极大的破坏,并由此造成重大的生命财产损失。因此,建筑结构的抗震设计应采取与结构抵抗一般正常荷载作用不同的理念,使得结构在不同强度地震作用下按预期发生可接受的损坏。这一设计准则已成为目前各国制定建筑抗震设计规范的基础,并逐步得到细化和完善,形成了当前流行的基于性能抗震的设计思想。

相比于一般长期荷载作用效应与结构物动力特性基本无关的特征,地震对结构物的作用效应与结构物动力特性显著相关,这不仅表现在作用效应量值方面,也表现在作用分布方面。尤其是在强烈地震作用下,结构产生损伤,进入弹塑性阶段后,随着结构物的损伤和弹塑性程度的发展,结构的动力特性会不断发生变化,使得地震作用效应的量值和分布也不断发生变化。而对于这种不断变化着的地震作用效应,目前还难以给出一种简便的方法予以确定,这种变化也使得一般的结构工程师很难准确把握建筑结构抗震设计的实质。因此,在结构抗震设计中,在充分理解结构抗震原理的基础上进行抗震概念设计和整体结构体系的抗震性能设计,往往比结构构件的计算设计更为重要。

迄今为止,人们虽然已经针对地震作用和结构抗震设计方法进行了很多研究,也基本掌握了结构抗震原理,然而很多结构在不断出现的地震中的表现往往并非像所预料的那样,因地震导致的结构破坏依然是地震灾害的主要问题。这令结构工程师需要更进一步继续深入研究和掌握地震作用规律与结构抗震设计原理。

对于像地震这样对结构具有极大不确定性和不可预见性的作用(撞击和爆炸也是如此),结构的冗余度就变得十分重要。冗余度不能简单地看作超静定次数。冗余构件在正常设计条件下不起作用或仅起很小作用,但若需要,它们就能够承受荷载。冗余构件可以看作偶然作用时的自动保险。冗余构件的失效不会影响到整个结构的完整性。虽然冗余构件的采用可能违背工程的经济性与简洁性原则,但作为一种特殊的安全储备,对于结构抵御不可预测的偶然作用非常重要,也能够体现结构工程师对工程可能遭遇的各种不确定性作用和非荷载作用影响的掌握与预计水平。

就目前来说,人们还无法准确预测未来地震作用的大小。为避免过于浪费,结构抗震设计的一个原则就是容许在罕遇地震作用时结构中的某些部位或部分构件(最好是冗余构件)产生破坏,但这些部位和构件的破坏不应该影响结构的整体安全性能。地震有“识别结构薄弱部位”的特性,即总是在结构薄弱部位产生破坏。因此应合理利用地震作用的这种特性,人为设定结构的薄弱部位并在薄弱部位设置冗余构件,并使得这些薄弱部位的破坏不会导致整体结构成为几何可变体系,不会使结构丧失整体性,从而避免整体结构在大震作用时发生倒塌。结构在地震作用下的响应以及结构中各个部位的抗震承载力需求均与地震动特性和结构自身动力特性密切相关。因此,要基于对结构抗震性能的充分理解,人为设定结构中的薄弱部位才能达到预期目标。

1.3 本书的主要内容

地震是一种自然现象，有其自然规律性。结构在地震作用下的破坏也有其自然规律。只要是自然规律，人们总是可以设法掌握。正确运用这些规律，设计能够抵御地震作用的工程结构是结构工程师的重要任务。应该先从自然的地震灾害中寻找结构的震害规律，继而从理论上探寻建筑结构抗震的基本原理。本书以地震学的基础知识、结构抗震设计的基本理论与方法、工程结构的抗震三部分内容为主线，对结构抗震设防的基本知识、地震作用和效应、结构抗震设计的基本原理和方法等进行了全面的介绍；同时，对结构非线性地震响应分析的力学基础、数值建模方法、材料本构关系与单元类型选择、地震动的选择与调整等关键技术进行了全面的分析与介绍；另外，本书吸收了近年来各国在工程抗震领域的最新研究成果，包括结构地震能量和损伤分析方法、基于性能的抗震设计方法、消能减震与隔震结构以及震后功能可恢复的新型抗震结构体系等内容。希望读者能够先寻找结构震害规律，掌握建筑结构抗震的基本原理，再了解建筑结构抗震的方法及相关规范，从而对建筑结构抗震设计有更深刻的认识，并在工程设计中灵活运用。

第2章 地震学基础知识

工程抗震设计的主要目的是增强建筑结构抵抗地震作用的能力。了解地震学的基础知识可提高设计人员的专业技术水平。本章主要介绍地震学的基本知识，并简要介绍地震动与结构响应之间的关系。

2.1 有关地震的一些基本概念

地震是地壳快速释放能量过程中产生的地面运动。图2.1.1给出了与地震相关的重要概念。

震源：地壳中岩石发生断裂、错动的地方，即地震时的应变能释放区。

震中：震源在地表的投影点。

震中距：从震中到地面上任意一点的距离。

震源距：从震源到地面上任意一点的距离。

能量中心：能量释放的中心，一般是断层破裂面的几何中心。

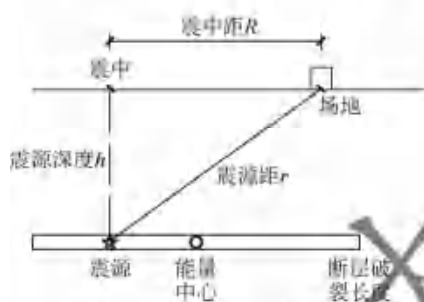
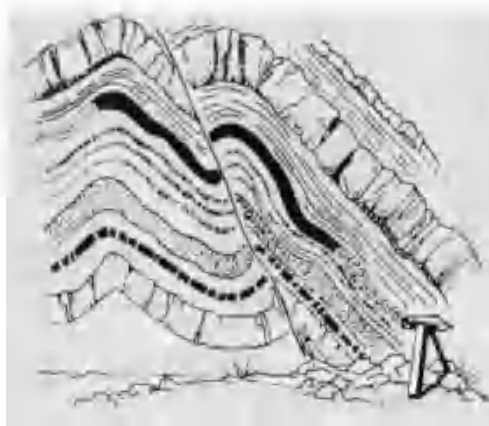


图 2.1.1 地震概念示意图

图 2.1.2 (a) 示出了世界上最大的陆地断裂带——东非大裂谷，其绵延 6000km，最深处达 2km。地震的能量中心一般在发生地震的断层几何中心，如图 2.1.2 (b) 所示为东非大裂谷的断层示意图。对于较小的地震，能量中心一般与震源重合；对于较大的地震，能量中心则多与震源不重合。



(a) 东非大裂谷



(b) 断层示意图

图 2.1.2 裂谷与断层

地震的三要素为时间、空间、强度。描述一场地震时,应该说明地震发生的时间,震源的经纬度、深度以及本次地震的强度。在地震预报中预报一次地震也需要确定这三个要素。对已发生的地震,实际的震中、震源位置的确定通常会有几公里到几十公里的误差,极个别的可能存在百公里的误差。地震预报很难,人们几乎不可能给出准确预报。世界上最成功的范例是1975年我国地震工程学者对海城地震做出的预报。

地震强度一般用震级来描述,是以地震仪测定的每次地震活动释放的能量多少来确定的。中国目前使用的震级标准是国际上通用的里氏分级表,共分9个等级。在实际测量中,震级则是根据地震仪对地震波所做的记录计算出来的。地震越大,震级的数字也越大;震级每差一级,通过地震释放的能量约差32倍。需要注意的是,某次特定的地震只能有一个震级,震级与后面介绍的地震烈度是不同的概念。地震烈度不但和地震能量有关,而且和震中距离、震源深度、地质条件等因素有关。

根据震源位置的深浅,地震可分为浅源地震、中源地震和深源地震。浅源地震的震源深度一般不超过70km,唐山地震以及El Centro地震均为浅源地震。浅源地震约占总地震次数的72.5%。震源深度为70~300km的地震称为中源地震,中源地震约占总地震次数的23.5%。中源地震在南美洲、日本海、印度尼西亚以及中国北部地区较为常见。深源地震的震源深度超过300km,深源地震约占全球总地震次数的4%。深源地震的峰值加速度小,卓越频率一般为0.2~3Hz,由于岩石和土壤的作用,传递至地面时,地震动中大部分高频分量已被过滤掉。

大地震前后,在震源附近总会有一系列小地震发生,将其按发震时间排列起来(包括本次大地震)称为地震序列。某一地震序列中最强烈的一次地震称为主震,主震前的地震称为前震,一般主震之后还伴随有数次余震。根据地震序列的特征不同,地震可分为以下几种类型。

(1) 单发型:有突出的主震,余震次数少、强度低;主震所释放的能量占全序列的99%以上;主震震级和最大余震相差2.4级以上。此类地震约占总地震次数的10%。

(2) 主震型:主震非常突出,余震十分丰富;最大地震所释放的能量占全序列的80%以上;主震震级和最大余震相差0.7~2.4级。海城地震和唐山地震均属于此类型。此类地震约占总地震次数的60%。

(3) 群震型:有两个及两个以上大小相近的主震,余震十分丰富;主要能量通过多次震级相近的地震释放,最大地震所释放的能量占全序列的80%以下;主震震级和最大余震相差0.7级以下。较为典型的群震型地震于1960年发生在智利,从5月21日到6月22日发生三次超过8级的地震。此类地震约占总地震次数的30%。

2.2 地震的成因和机制

1. 地震的成因

根据地震的成因,可将地震分为以下几类:

(1) 构造地震:主要由于岩层断裂,发生变形和错动,在地质构造上发生巨大变化而

产生的地震,也叫断裂地震。此类地震占总地震次数的90%以上,破坏性地震多属于构造地震。

(2) 火山地震:火山爆发时所引起的能量冲击产生的地壳振动。火山地震有时也相当强烈,但这种地震所波及的地区通常只限于火山附近几十公里远的范围,而且发生次数较少,只占地震总次数的7%左右,所造成的危害较轻。

(3) 陷落地震:地层陷落引起的地震。这种地震发生的次数更少,只占地震总次数的3%左右,震级不大,影响范围有限,破坏也较小;我国近70年来仅于1954年和1965年在四川自贡发生过两次。

(4) 诱发地震:在特定的地区因某种地壳外界因素诱发(如陨石坠落、水库蓄水、深井注水)而引起的地震。

(5) 人工地震:如地下核爆炸、工业爆破等人为活动引起的地面振动。

板块运动目前被公认为诱发构造地震的宏观原因,板块构造学说认为地球表面的岩石圈分为几大板块,均漂浮在其下面的软流圈上;软流圈的物质较轻、较软,部分呈熔融状态,为板块运动提供了条件。

板块构造理论中将地球分为6大板块,分别为亚欧板块、非洲板块、美洲板块、印度板块(或称印度洋板块、澳大利亚板块)、南极洲板块和太平洋板块,板块厚80~200km。有人将美洲板块分为北美板块和南美板块,认为全球有7大板块。根据地震带的分布及其他标志,人们进一步划出纳斯卡板块、科科斯板块、加勒比板块、菲律宾海板块等次一级不定型板块。板块的划分并不遵循海陆界线,也不一定与大陆地壳、大洋地壳之间的分界有关。大多数板块包括大陆和洋底两部分,太平洋板块是唯一基本上由洋底岩石圈构成的大板块。

板块边缘是指一个板块的边缘,板块边界是地质活动带。根据板块的相对运动状态,边界可分为四类:①分离型板块边界;②汇聚型板块边界;③转换型板块边界;④不定型板块边界。震源机制表明,前三类边界的主导应力状态分别是引张、挤压和剪切。板块间相对运动会导致能量在板块边界累积。

板块运动引起岩层变形累积,达到一定程度突然破裂,释放的巨大能量以波的形式向外传播,引起地面运动,迫使结构振动,产生破坏。在大板块边缘地震最多,这些地震称为板缘地震,一般属于浅源地震。图2.2.1所示为世界地震分布图,从图中可以看到两条大地震带:环太平洋地震带,该地区地震占世界地震总数的75%以上;亚欧地震带,在印度东部与环太平洋地震带相遇,其上发生的地震占地震总数的22%。环太平洋地震带属于典型的板缘地震带,大小板块边缘都是地震集中处。

有些地震不是发生在板块边缘,而是在板块内,称为板内地震,约占地震总数的15%。板块内部地震的分布零散,危害性大,机制复杂,如唐山地震。

中国位于亚欧板块东南端,东为太平洋板块,南为印度洋板块,亚欧板块向东、太平洋板块向西、印度洋板块向北挤压中国大陆,因此中国是地震多发国家。

2. 地震的形成机制

弹性回跳理论是目前最流行和最有说服力的解释地震机制的理论。这一理论是由里德(H. F. Reid)在1911年根据1906年旧金山8.3级大地震前后的观测结果提出的,其示意图如图2.2.2所示。其主要论点如下:

- (1) 地壳是由弹性的有断层的岩石组成的。
- (2) 地壳运动产生的能量以弹性应变能的形式在断层及其附近的岩层中长期累积。
- (3) 当弹性应变能累积及岩层变形达到一定程度时，断层上某点（应力超过强度极限）两侧的岩体向相反方向突然滑动，断层上长期累积的弹性应变能突然释放，地震因之产生。

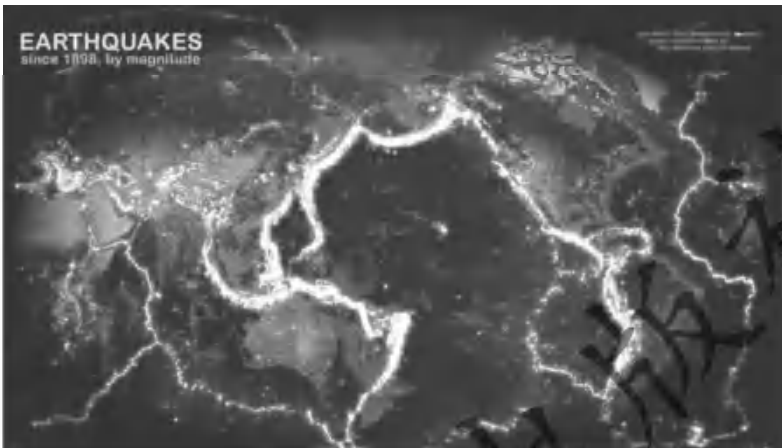


图 2.2.1 世界地震分布图



图 2.2.2 弹性回跳理论示意图

弹性回跳理论没有讲地壳如何运动，弹性能量怎样得以累积，而板块构造运动理论弥补了弹性回跳理论的不足。

断层是地震学中的一个重点研究对象。根据断层两侧岩体滑动的形式，可分为以下两种断层，如图 2.2.3 所示。

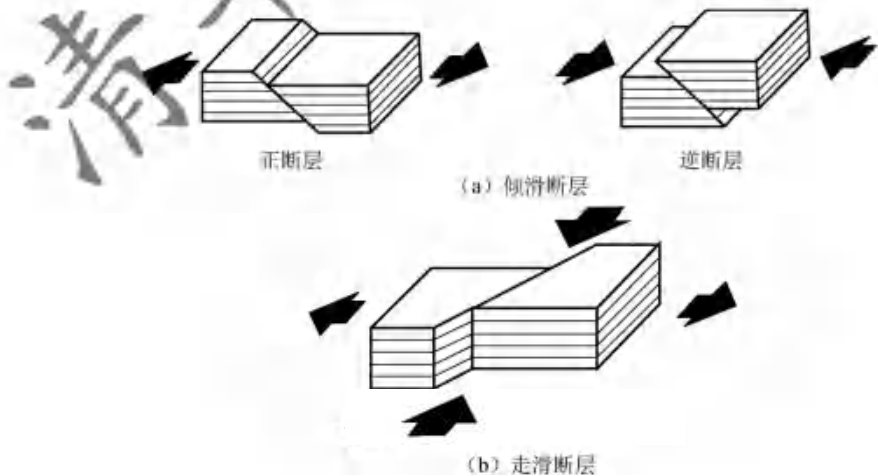


图 2.2.3 断层变形机制

(1) 倾滑断层:分为正断层和逆断层,通常产生的地震较小。

(2) 走滑断层:分为左旋断层和右旋断层,可产生大地震。

实际地震可能出现两种变形模式均存在的情况。1995年日本阪神地震是走滑断层,震中地表倾滑达1m,地震机制与唐山地震基本一致;2001年11月14日发生在昆仑山口西的大地震的地表倾滑最大达6m。

2.3 地震波概述

2.3.1 地震波的特性

地震发生时,震源释放的能量以波的形式从震源向周围地球介质传播,这种波称为地震波。地震波使地面产生运动,导致建筑结构的破坏。地震波是地震产生的后果,也是导致结构物地震破坏的直接原因。地震波是研究震源和地球构造的基础,是地震学的理论基础。

地震波可用来研究地震机制、地球介质的结构,以及确定地球内部较大的界面。同时,合理分析地震波也有利于地质勘探工作的开展。

对于建筑结构来说,地震波是引起结构破坏的原因。对地震波特性的了解是正确估计结构地震响应的基础。在大型复杂结构抗震问题研究中,常常需要进行结构多点输入和多维输入的地震响应分析,当计算分析方法合理可靠时,地震动空间分布的特性确定是正确的,决定了分析结果是否可靠。地震动空间分布特性是地震工程中一个十分重要的研究课题。小波变换方法常用于地震波动特性的分析,利用小波变换可以研究波动频率成分随时间的改变,而频率的改变有时会对已出现损伤的结构反应产生重要影响。

关于地震波的特性,首先需要强调几点:

(1) 波动是能量的传播,而不是介质物质的传播。

(2) 固体介质中的波可以是弹性波、非线性波、弹塑性波。

(3) 在震源处,介质的变形是非线性的,而离开震源一定距离后,介质的变形则表现为线弹性。在线弹性介质中传播的波称为弹性波,地震波理论一般都是弹性波理论。

在弹性波理论中,最简单的是—维波动理论。在一维波动问题中,仅用一个空间坐标就能确定波场的空间分布。求解—维波动方程可以避免多维空间造成的数学困难,有利于阐明波动过程的物理概念。同时,在结构地震响应分析中,常采用—维介质模型考虑土层场地的影响,对于构造规则的多层结构,也有研究人员采用—维剪切型结构进行研究,所以—维波动分析在波动理论研究及实际应用两方面都有重要作用。式(2.3.1)为一维弹性波动方程,其中 $c=\sqrt{G/\rho}$ 表示应力波速,是描述波动的重要参数。对于波动方程,可以直接求解偏微分方程,此时该方法称为时域解法;也可以通过积分变换将其转化至频域的范围再求解,此时该方法称为频域解法。

$$\frac{\partial^2 u(t,x)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u(t,x)}{\partial x^2} \quad (2.3.1)$$

2.3.2 地震波的传播机制

地球介质中的地震波类型较多,主要为面波和体波。面波沿着地球表面或者介质界面传播,体波可以在地球内部传播。

体波又分为 P (primary) 波和 S (secondary) 波。P 波也可称为纵波或压缩波,可在固体、液体以及气体介质中传播。P 波的质点振动方向与波动的传播方向一致,例如杆中纵波、空气中声波。P 波的周期短、振幅小。P 波的波速按照式 (2.3.2) 计算,其中 E 、 ν 、 ρ 分别为介质的弹性模量、泊松比及密度。

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.3.2)$$

P 波在岩石中的传播速度为 5000~7000m/s, 在土壤中的传播速度为 200~1400m/s。

S 波一般称为横波,其主要特点在于质点振动方向与波动的传播方向垂直,只能在固体中传播。与 P 波相比,S 波的周期较长,振幅较大。S 波的波速按照式 (2.3.3) 计算,S 波在岩石中的传播速度为 3000~4000m/s, 在土壤中的传播速度为 100~800m/s。

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2.3.3)$$

P 波与 S 波的波速之比为

$$\frac{c_p}{c_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (2.3.4)$$

一般来说,岩石的泊松比为 0.25,P 波的波速约为 S 波的 1.73 倍。一般弹性介质的泊松比为正值,且不超过 0.5,所以 P 波的波速通常大于 S 波;人们通常先感知到 P 波后感知到 S 波,这也是 P 波和 S 波名字的由来。

假若介质是均匀无限空间,则只能存在体波,且各种体波可以独立存在。如果介质存在界面,界面两侧介质的性质不同,则体波在界面上将产生反射和折射。除产生反射和折射的体波外,也会产生其他类型的波。面波即离开震中一定距离后,由体波入射到地面或介质界面时产生的转换波。面波的特点是其能量局限在地表面或界面附近的区域,波的能量沿地表面或界面传播,振幅随深度的增加而减小。地球介质中的 S 波又分为 SH 波和 SV 波。SH 波为平面外波动,SV 波为平面内波动。需要注意的是,地震后引起结构破坏的主要是 S 波。

在地球介质的交界面上,地震波的入射,反射和折射遵循 Snell 定律。图 2.3.1 示出了 P 波和 S 波的入射、反射和折射规律。P 波和 S 波经过反射和折射,可以形成不同类型的地震波。以下分别介绍 Rayleigh 波和 Love 波。

Rayleigh 波是由 SV 波以超临界角入射到弹性半空间表面时干涉产生的转换波,可以存在于弹性半空间及成层弹性半空间中。在震中区一般不出现 Rayleigh 波。Rayleigh 波的存在条件为:震中距 R 满足式 (2.3.5)。其中, h 为震源深度, c_R 为 Rayleigh 波波速, c_p 为 P 波波速。

$$R > \frac{c_R h}{\sqrt{c_p^2 - c_R^2}} \quad (2.3.5)$$

在弹性半空间中, Rayleigh 波是一种沿着自由表面传播的波,地球-空气界面可以看作自由

界面,如图 2.3.2 所示。从理论上说, Rayleigh 波只能沿着均匀半空间自由表面和均匀介质自由界面传播。Rayleigh 波沿二维自由表面扩展,在距波源较远处,其破坏力比沿空间各方向扩展的纵波和横波大得多,因而它是地震学中的主要研究对象。地滚波是 Rayleigh 波中一种特殊的波,它沿着地表传播,传播过程中作逆椭圆运动,其特征是低速、低频和强振幅。

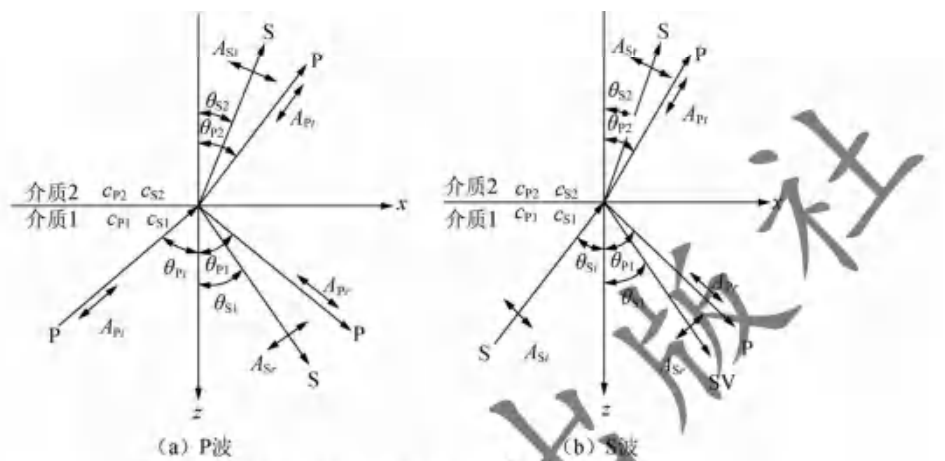


图 2.3.1 地震波的入射、反射和折射

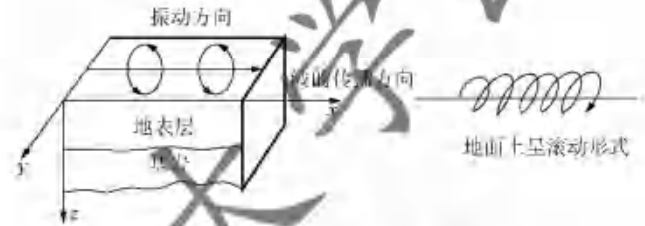


图 2.3.2 Rayleigh 波示意图

Love 波是另外一种重要的地震波,其首先在实际地震观测中被发现,后来由 Love 从理论上证明其存在。Love 波的存在条件为:弹性半空间上存在一软弱水平覆盖层,覆盖层的剪切波速 $c_{s1} < c_{s2}$,如图 2.3.3 所示。Love 波是一种由 SH 波产生的面波。Love 波的传播类似于蛇行运动,即质点作与传播方向垂直的水平运动,无竖向运动分量,如图 2.3.4 所示。

Love 波的传播速度 c_L 介于两种介质的横波波速之间,即 $c_{s1} < c_L < c_{s2}$ 。与 Rayleigh 波不同,Love 波仅有一个水平分量。

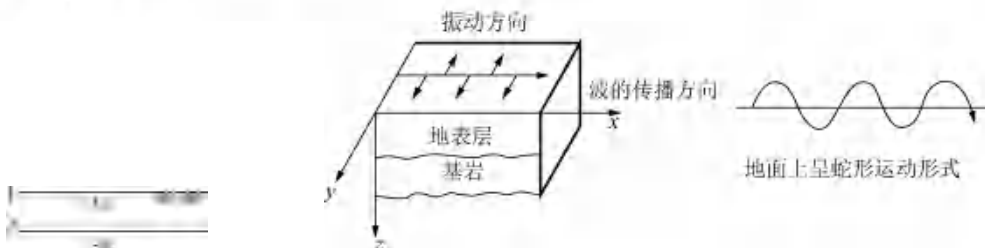


图 2.3.3 Love 波的存在条件

图 2.3.4 Love 波传播俯视图

实际由震源发出的地震波是由点源射向三维空间的体波，即体波是一个球面波。当这个波射到地球介质的界面时可能产生面波，面波将以柱面波的形式向外传播。随着传播距离的增加，波动的能量密度会减小，波动位移的幅值也随之变小，这就是所谓波动的几何衰减，如图 2.3.5 所示。

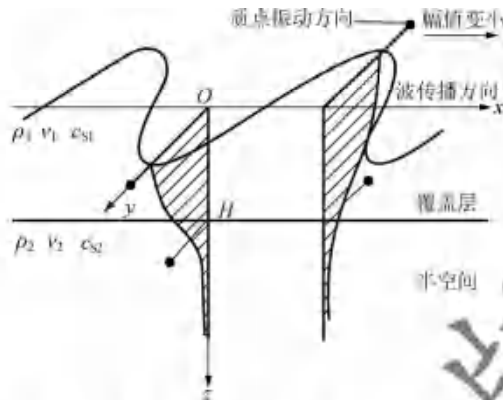


图 2.3.5 Love 波传播及几何衰减

下面根据球面波和柱面波振幅随传播距离变化的特点来定性说明地震波的几何衰减规律。对于体波，其波动振幅的平方与地震能量密度成正比，而地震能量密度与震中距的平方成反比，体波的振幅与震中距成反比关系，如式 (2.3.6) 所示。

$$A^2 \propto E_p \propto 1/R^2 \Rightarrow A \propto 1/R \quad (2.3.6)$$

而对于面波，其波动振幅的平方与地震能量密度成正比，而地震能量密度与震中距成反比，面波的振幅与震中距的平方根成反比关系，如式 (2.3.7) 所示。由此可见，面波的衰减比体波慢得多。

$$A^2 \propto E_s \propto 1/R \Rightarrow A \propto 1/\sqrt{R} \quad (2.3.7)$$

三维空间中体波和面波的传播也叫辐射传播。由于波动辐射传播引起的波动振幅衰减的效应称为辐射阻尼。引起地震波振幅衰减的另一个原因是介质的非弹性，即存在介质阻尼。

以上介绍了地震波的主要类型和特点。实际地震波的类型很多，但一般都可由前面介绍的基本波表示。在震中区，地震动以体波为主；在远离震中的区域将出现面波成分；当震中距较大时，地震动分量中面波的振幅可能大于体波。图 2.3.6 显示了不同地震波在空间分布的先后顺序和质点振动特点。P 波传播速度最快，然后是 S 波，S 波之后一般是 Love 波，Rayleigh 波传播速度最慢。

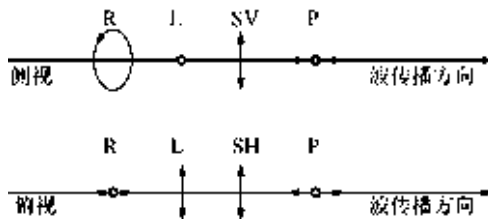


图 2.3.6 地震波在空间分布的先后次序和质点振动的特点

各种地震波的传播特性不同,导致近场地震和远场地震的加速度时程曲线区别较大。近场地震的地面运动在很短时间内达到峰值,地震波中短周期成分较多,地面震动的持续时间不长,衰减较快。在远离震中的地区,地面运动开始较晚,但震动幅度较大,长周期成分较多,衰减较慢。图 2.3.7 给出了典型的近场地震与远场地震的时程曲线。

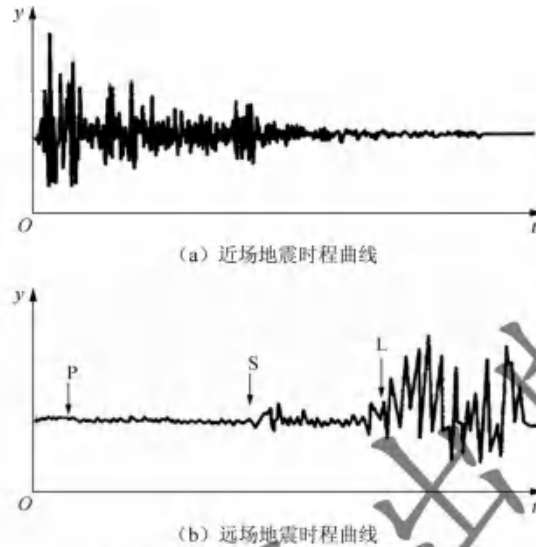


图 2.3.7 近场地震与远场地震时程曲线

在工程场地中, P 波首先到达, 然后 S 波到达, 最后面波出现。由于大部分地震台站离震中较远, 因此所得记录一般为远震记录, 在这些记录中面波的振幅往往大于体波的振幅, 在早期的记录中明显显示了这一特征。但这一结论对强震记录一般不成立, 一是由于强震记录以近震为主; 二是强震记录为加速度, 高频成分影响大于低频成分, 而面波以中低频为主。

根据地震记录的初动持续时间 T_{sp} , 可以确定震源距。初动持续时间 T_{sp} 定义为

$$T_{sp} = t_s - t_p = \frac{r}{c_s} - \frac{r}{c_p} \quad (2.3.8)$$

由此可以得到震源距为

$$r = \frac{c_s c_p}{c_p - c_s} T_{sp} \quad (2.3.9)$$

如果 3 个及以上不同台站记录到了地震, 则可以确定震中的位置, 再用作图法可以定出震源深度。

2.4 地震震级

2.4.1 里氏震级

我国采用国际惯用的里氏震级 (Richter magnitude) 来表示地震的大小, 如图 2.4.1 所示。

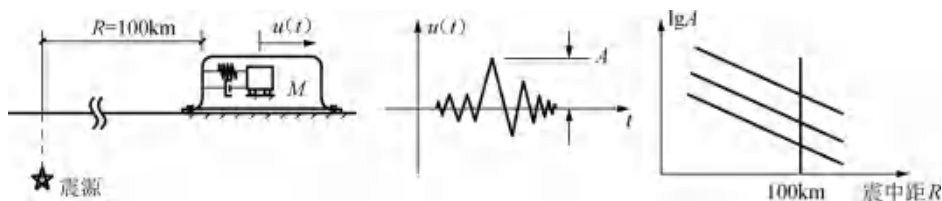


图 2.4.1 里氏震级的确定

用标准地震仪（自振周期为 0.8s、阻尼比为 0.8、放大系数为 2800 的地震仪）在距震中 100km 处以微米（ μm ）为单位记录地面的最大水平位移时程 A ，则地震的震级可用下式表示：

$$M_L = \lg A \quad (2.4.1)$$

当观测点与震中的距离不是 100km 时，里氏震级的换算公式见式（2.4.2），其中 A 为记录到的两个水平分量最大振幅的平均值； $\lg A_0(R)$ 为随震中距 R 变化的起算函数，由当地经验确定，当 $R=100\text{km}$ 时， $A_0(R)=1$ 。

$$M_L = \lg A - \lg A_0(R) \quad (2.4.2)$$

$$A = (\max |u_x| + \max |u_y|) / 2 \quad (2.4.3)$$

里氏震级的适用范围： $R < 600\text{km}$ ，2~6 级地震标度，近场地震的测量精度较高。里氏震级是目前应用最广泛的震级单位，不但在科学研究和工程中得到使用，而且在发布地震预报和公告已发生地震的级别时也经常采用。

2.4.2 面波震级

面波震级定义为

$$M_S = \lg A - \lg A_0 \quad (2.4.4)$$

式中， A 为面波最大地面位移，以 μm 为单位，取两水平分量最大振幅的矢量和，表示为

$$A = \max \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \quad (2.4.5)$$

$\lg A_0$ 为起算函数。当地震波卓越周期为 3~20s 时，适合用面波震级来描述地震强度。同时，当震中距超过 2000km 时，地震记录中主要是面波，因此面波震级适合描述远场地震。面波震级适用于较大地震的标度，在 4~8 级范围内具有较好的适用性。

2.4.3 体波震级

对于深源地震，地震记录中的面波成分很小，需要用 P 波振幅来量度。体波震级 M_b 适用的地震波周期在 1s 左右，可用于量度较大的地震。

2.4.4 持时震级

持时震级可用于量度震级 $M \leq 3$ 的小地震，为地震学专用震级单位。

2.4.5 矩震级

为了更好地表征大地震,人们从反映地震断层错动的一个力学量地震矩 M_0 出发,提出了一种新的震级指标——矩震级 M_w 。

矩震级直接与地震释放的能量建立定量联系,即 M_w 与地震矩 M_0 有关:

$$M_w = \lg M_0 / 1.5 - 10.7 \quad (2.4.6)$$

其中 M_0 表示地震能量的大小,其单位为达因·厘米 ($\text{dyn} \cdot \text{cm}$, $1 \text{ dyn} = 1 \times 10^{-5} \text{ N}$)。矩震级在理论地震学研究中得到了较多的应用。

矩震级的测量可用宏观的方法,直接从野外测量断层的平均位错、破裂长度和岩石的硬度,根据等震线的衰减或余震推断震源深度,从而估计断层面积。也可用微观的方法,由地震波记录反演计算这些量。矩震级表示震源所释放的能量,而地震对地面的破坏性也取决于震源的深度。

2.4.6 震级计算

在给出的震级定义中,里氏震级和面波震级应用得最为广泛,其中里氏震级适用于量度震中距较小的地震,而面波震级可以量度震中距很大的大地震。

我国使用的计算地震震级的公式与前文介绍的里氏震级和面波震级的计算公式略有不同,主要考虑了我国使用的仪器和地震动的特点。

根据我国现有仪器特点,计算近震(震中距 $\Delta < 1000 \text{ km}$)震级的公式为

$$M_L = \lg A_m + R(\Delta) \quad (2.4.7)$$

式中, M_L 为近震体波震级; A_m 为水平向最大振幅, μm ; $R(\Delta)$ 为随震中距 Δ 变化的起算函数。

计算远震(震中距 $\Delta > 1000 \text{ km}$)震级的公式为

$$M_S = \lg \frac{A_m}{T} + \sigma(\Delta) \quad (2.4.8)$$

式中, M_S 为远震面波震级; A_m 为水平向最大振幅, μm ; T 为与 A_m 相应的周期; $\sigma(\Delta)$ 为面波震级的量规函数; Δ 为震中距。

震级的测定并不十分准确,对于同一次地震在不同地点测得的结果有时可相差 0.5 级,最大可相差 1 级,这是因为一个特定地点地震地面运动不但受震级大小和距震中远近的影响,而且受传播途径和局部场地条件的影响。虽然可以通过台站站址的选择有效地消除局部场地的影响,但传播路径的影响很难消除。

一般来说,小于 2.5 级的地震人感觉不到,为无感地震,也称为微震;震级大于 2.5 级的地震人可以感觉到,称为有感地震;而大于 5 级的地震可以造成破坏,称为破坏性地震,如图 2.4.2 所示。

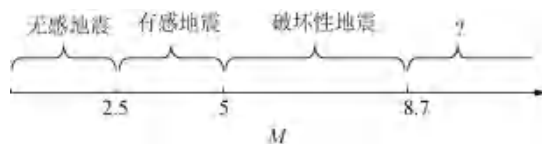


图 2.4.2 震级与震感