



普通高等教育“十二五”住建部规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

抗震结构设计

(第4版)

K Z J G S J

王社良 主编



武汉理工大学出版社

WUTP



普通高等教育“十二五”住建部规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等学校土木工程专业新编系列教材

中国土木工程学会教育工作委员会 审订

抗震结构设计

(第4版)

主 编 王社良

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

【内容提要】

本书是结合《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)编写的抗震结构设计教材。内容包括地震与地震动的基本知识、场地、地基和基础的抗震设计、结构地震反应分析与抗震验算、多层及高层钢筋混凝土和钢结构房屋、砌体结构房屋、钢筋混凝土和钢结构单层厂房等的抗震设计、隔震与耗能减震房屋的设计,以及工程结构防灾减灾。书中附有例题、各章提要及小结、思考题和习题。

本书可供高等院校土木工程专业学生及教师使用,亦可供从事建筑结构抗震设计、科研人员和施工技术人员参考。

【主编简介】

王社良 男,1957年生,汉族,陕西省西安市人,工学博士,西安建筑科技大学特聘教授,教学名师,师德标兵,博士生导师,土木工程学院副院长。主要从事混凝土结构基本理论、高层建筑结构抗震与控制、工程结构健康诊断与处理、智能材料结构系统在土木工程中的应用等方面的教学和研究工作,负责《抗震结构设计》校级、省级精品课程建设,先后主持和参加国家973科研项目1项、国家自然科学基金重点项目1项、国家自然科学基金面上项目5项及省部级科研项目20余项,获省部级科技进步二、三等奖3项,厅局级科技进步一等奖9项,出版专著和教材12部,在国内外学术刊物上发表科研论文130余篇,其中50余篇被SCI、EI和ISTP收录。

通讯地址:西安建筑科技大学土木工程学院,邮编:710055

E-mail:wangsheli@yahoo.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

抗震结构设计/王社良主编. —4版. —武汉:武汉理工大学出版社,2011.12
ISBN 978-7-5629-3615-2

I. 抗… II. 王… III. 建筑结构-抗震设计-高等学校-教材 IV. TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 169993 号

项目负责人:蔡德民 刘永坚 田道全

责任编辑:高 英

责任校对:丁 冲

装帧设计:牛 力

出版发行:武汉理工大学出版社

社 址:武汉市洪山区珞狮路122号

邮 编:430070

网 址:<http://www.techbook.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉理工大印刷厂

开 本:880×1230 1/16

印 张:19.25

插 页:1

字 数:623千字

版 次:2001年9月第1版 2011年12月第4版

印 次:2011年12月第1次印刷 总第20次印刷

印 数:136501—146500册

定 价:36.00元

本社购书热线电话:027-87394412 87383695 87397097(传真)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

· 版权所有 盗版必究 ·



哈利法塔(迪拜塔)

普通高等学校土木工程专业新编系列教材编审委员会

(第4版)

学术顾问:

吕西林 李杰 罗福午 李少甫 甘绍熺 包世华 毛鹤琴
辛克贵 刘立新 李必瑜 彭少民 何铭新 吴培明 胡敏良

主任委员:

李国强 朱宏亮 田高

副主任委员:

刘伟庆 邹超英 白国良 徐礼华 雷宏刚 贾连光 朱彦鹏
张永兴 张俊平 刘殿忠 缪昇 王岚 周学军 赵明华

委员:(以姓氏笔画为序)

王林 王燕 王月明 王天稳 王社良 王泽云 袁海庆
邓铁军 王新武 王毅红 吴炎海 卢文胜 白晓红 蒋沧如
叶献国 孙俊 孙强 刘长滨 李书进 李启令 曾志兴
李怀建 刘剑飞 孙家齐 过静珺 李碧雄 张立人 窦立军
陈水生 邵旭东 陈伯望 宋固全 张国强 张科强 戴国欣
吴雪茹 吴辉琴 何培玲 周云 俞晓 饶云刚 魏瑞演
姜玉松 段兵廷 柳炳康 赵瑞斌 徐伟 秦建平 袁广林

总责任编辑:刘永坚 田道全

秘书长:蔡德民

第 4 版前言

本书按照国家土木工程专业教学指导委员会的课程大纲精神和土木工程本科专业“抗震结构设计”课程的教学大纲要求编写,内容包括地震和地震动的基本知识,场地、地基和基础等结构抗震设计的基本概念,结构地震反应分析与抗震验算方法,建筑结构抗震概念设计,多层及高层钢筋混凝土房屋抗震设计,多层砌体结构房屋抗震设计,高层及多层钢结构房屋抗震设计,钢筋混凝土柱单层厂房抗震设计,隔震与耗能减震房屋设计,以及工程结构防灾减灾等。

本书的目的是使学生通过本课程的学习,能够深刻理解地震、场地、地基和基础等与建筑结构抗震设计的内在联系,掌握建筑结构的地震反应分析原理和抗震验算方法,掌握建筑抗震概念设计的主要特点,掌握多层及高层钢筋混凝土房屋、多层砌体结构房屋、钢筋混凝土柱单层厂房的抗震设计方法及相应构造措施,了解高层及多层钢结构房屋的抗震设计方法及构造要点,了解隔震与耗能减震房屋的设计方法,了解工程结构防灾减灾的基本知识等。

本书是作者在多年教学、科研和工程实践经验的基础上,依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)等规范编写的。在符合我国高等院校土木工程专业教学要求的前提下,本书内容力求基本、实用,既注重理论上的系统性,又注意叙述时简明扼要,并且每章都附有本章提要、小结、思考题和习题等内容。

本书共分 10 章,课内总学时 42 个,学时分配建议如下:

章次	内容	
1	绪论	3
2	场地、地基和基础	3
3	结构地震反应分析与抗震验算	7
4	建筑抗震概念设计	2
5	多层及高层钢筋混凝土房屋抗震设计	6
6	多层砌体结构房屋的抗震设计	6
7	高层及多层钢结构房屋的抗震设计	3
8	钢筋混凝土柱单层厂房的抗震设计	6
9	隔震与耗能减震房屋设计	3
10	工程结构防灾减灾	3
	合计	42

本次修订主要根据我国新的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)进行,同时对第 3 版在使用中发现的一些问题和不足进行了修订,增加了一些新的内容。

本书第 1 版、第 2 版、第 3 版由王社良担任主编,并修编第 1、2、3、8 章,陈平修编第 4、5 章,周云修编第 7、9 章,赵歆冬修编第 6 章,龙帮云修编第 10 章。全书由王社良修改定稿。本书第 4 版由王社良担任主编,参加修编的有王社良、赵祥、郝润霞、龙帮云等,全书由王社良修改定稿。

限于编者水平,书中难免有误漏之处,恳请读者批评指正。

编 者
2011 年 8 月

目 录

1 绪论 (1)

 本章提要..... (1)

 1.1 地震与地震动 (1)

 1.1.1 地震及其成因 (1)

 1.1.2 地震波 (2)

 1.1.3 地震强度 (4)

 1.1.4 地震区划与地震影响 (5)

 1.1.5 常用术语 (5)

 1.2 地震活动性 (6)

 1.2.1 世界地震活动性 (6)

 1.2.2 我国地震活动性 (6)

 1.2.3 近期世界地震活动性 (7)

 1.3 地震震害 (9)

 1.3.1 概述 (9)

 1.3.2 工程地质条件对震害的影响..... (10)

 1.4 结构的抗震设防..... (11)

 1.4.1 抗震设防的目标..... (11)

 1.4.2 建筑结构抗震设计方法..... (12)

 1.4.3 抗震设计的基本要求..... (12)

 本章小结 (13)

 思考题 (14)

2 场地、地基和基础 (15)

 本章提要 (15)

 2.1 场地..... (15)

 2.1.1 场地土及场地覆盖层厚度..... (15)

 2.1.2 场地类别..... (16)

 2.2 天然地基与基础的抗震验算..... (17)

 2.2.1 不进行天然地基及基础抗震验算的建筑..... (17)

 2.2.2 天然地基在地震作用下的抗震承载力验算..... (18)

 2.3 液化土与软土地基..... (19)

 2.3.1 地基土的液化..... (19)

 2.3.2 液化的判别..... (20)

 2.3.3 可液化地基的抗震措施..... (23)

 2.3.4 软土地基的抗震措施..... (24)

 2.4 桩基的抗震设计..... (24)

 2.4.1 可不进行桩基抗震验算的条件..... (24)

 2.4.2 桩基的抗震设计..... (25)

 本章小结 (25)

 思考题 (27)

3 结构地震反应分析与抗震验算..... (28)

 本章提要 (28)

 3.1 概述..... (28)

 3.2 单自由度弹性体系的地震反应分析..... (28)

 3.2.1 计算简图..... (28)

 3.2.2 运动方程..... (29)

 3.2.3 自由振动..... (30)

 3.2.4 强迫振动..... (31)

 3.3 单自由度弹性体系的水平地震作用及其反应谱..... (32)

 3.3.1 水平地震作用的基本公式..... (32)

 3.3.2 地震反应谱..... (33)

 3.3.3 标准反应谱..... (34)

 3.3.4 设计反应谱..... (35)

 3.4 多自由度弹性体系地震反应分析的振型分解法..... (37)

 3.4.1 计算简图..... (37)

 3.4.2 运动方程..... (37)

 3.4.3 自由振动..... (38)

 3.4.4 振型分解法..... (48)

 3.5 多自由度体系的水平地震作用..... (51)

 3.5.1 振型分解反应谱法..... (51)

 3.5.2 底部剪力法..... (53)

 3.6 结构的地震扭转效应..... (57)

 3.6.1 刚心与质心..... (57)

 3.6.2 单层偏心结构的振动..... (57)

 3.6.3 多层偏心结构的振动..... (59)

 3.6.4 偏心结构的地震作用..... (61)

 3.7 地基与结构的相互作用..... (63)

 3.7.1 地基与结构的相互作用对结构地震反应的影响..... (63)

 3.7.2 考虑地基结构相互作用的抗震设计..... (64)

 3.8 竖向地震作用..... (64)

 3.8.1 高耸结构和高层建筑..... (65)

 3.8.2 屋盖结构..... (65)

 3.8.3 其他结构..... (66)

 3.9 结构地震反应的时程分析法..... (66)

 3.9.1 概述..... (66)

 3.9.2 恢复力特性曲线..... (67)

 3.9.3 结构的计算模型..... (68)

 3.9.4 地震波的选用..... (71)

 3.9.5 地震反应的数值分析法..... (72)

 3.10 建筑结构抗震验算 (74)

 3.10.1 结构抗震承载力验算 (74)

 3.10.2 结构的抗震变形验算 (76)

 本章小结 (79)

 思考题 (79)

 习题 (80)

4 建筑抗震概念设计	(81)
本章提要	(81)
4.1 场地选择	(81)
4.1.1 避开抗震危险地段	(81)
4.1.2 选择有利于抗震的场地	(82)
4.2 建筑的平立面布置	(83)
4.2.1 建筑平面布置	(83)
4.2.2 建筑立面布置	(84)
4.2.3 房屋的高度	(85)
4.2.4 房屋的高宽比	(85)
4.2.5 防震缝的合理设置	(85)
4.3 结构选型与结构布置	(86)
4.3.1 结构选型	(86)
4.3.2 结构布置的一般原则	(87)
4.4 多道抗震防线	(89)
4.4.1 多道抗震防线的必要性	(89)
4.4.2 第一道防线的构件选择	(90)
4.4.3 利用赘余构件增多抗震防线	(90)
4.5 刚度、承载力和延性的匹配	(91)
4.5.1 刚度与承载力	(91)
4.5.2 刚度与延性	(92)
4.5.3 结构不同部位的延性要求	(92)
4.5.4 改善构件延性的途径	(93)
4.6 确保结构的整体性	(94)
4.6.1 结构应具有连续性	(94)
4.6.2 构件间的可靠连接	(95)
4.7 非结构部件处理	(95)
4.7.1 考虑填充墙的影响	(95)
4.7.2 外墙板的连接	(96)
本章小结	(97)
思考题	(97)
5 多层及高层钢筋混凝土房屋抗震设计	(98)
本章提要	(98)
5.1 概述	(98)
5.2 抗震设计的一般要求	(99)
5.2.1 结构体系选择	(100)
5.2.2 结构布置	(100)
5.2.3 抗震等级	(103)
5.3 框架内力与位移计算	(104)
5.3.1 水平地震作用计算	(105)
5.3.2 水平地震作用下框架内力的计算	(105)
5.3.3 竖向荷载作用下框架内力计算	(110)
5.3.4 内力组合	(111)
5.3.5 框架结构位移验算	(112)
5.4 钢筋混凝土框架结构构件设计	(113)

5.4.1	框架梁截面设计	(113)
5.4.2	框架柱截面设计	(115)
5.4.3	框架节点抗震设计	(120)
5.5	框架结构设计例题	(123)
	本章小结	(138)
	思考题	(138)
6	多层砌体结构房屋的抗震设计	(139)
	本章提要	(139)
6.1	概述	(139)
6.2	结构方案与结构布置	(140)
6.3	多层砌体房屋抗震计算	(141)
6.3.1	计算简图	(141)
6.3.2	地震作用	(142)
6.3.3	楼层地震剪力在墙体中的分配	(143)
6.3.4	墙体抗震承载力验算	(147)
6.4	多层砌体结构房屋的抗震构造措施	(148)
6.4.1	多层砖房构造措施	(148)
6.4.2	多层砌块结构房屋的抗震构造措施	(151)
6.4.3	多层砌体结构房屋抗震设计例题	(152)
6.5	底部框架-抗震墙房屋的抗震设计要点	(156)
6.5.1	结构方案与结构布置	(156)
6.5.2	底部框架-抗震墙房屋的抗震设计要点	(156)
6.5.3	底部框架-抗震墙房屋的抗震构造措施	(158)
	本章小结	(159)
	思考题	(159)
7	高层及多层钢结构房屋的抗震设计	(160)
	本章提要	(160)
7.1	概述	(160)
7.2	高层钢结构房屋抗震设计	(161)
7.2.1	高层钢结构的体系与布置	(161)
7.2.2	高层钢结构的抗震计算	(165)
7.2.3	钢构件的抗震设计与构造措施	(166)
7.2.4	钢结构节点的抗震设计与构件措施	(171)
7.3	多层钢结构厂房抗震设计	(176)
7.3.1	多层钢结构房屋的结构体系与布置	(176)
7.3.2	多层钢结构厂房的抗震计算	(177)
7.3.3	多层钢结构厂房的抗震构造措施	(177)
	本章小结	(179)
	思考题	(180)
8	钢筋混凝土柱单层厂房的抗震设计	(181)
	本章提要	(181)
8.1	概述	(181)
8.1.1	横向地震作用下厂房主体结构的震害	(181)
8.1.2	纵向地震作用下厂房主体结构的震害	(182)
8.2	结构布置的一般原则	(183)

8.2.1	体型与抗震缝	(183)
8.2.2	屋盖体系	(183)
8.2.3	天窗架	(184)
8.2.4	柱	(184)
8.2.5	围护墙体	(184)
8.3	单层厂房的横向抗震计算	(184)
8.3.1	计算简图和重力荷载代表值的计算	(185)
8.3.2	横向自振周期计算	(186)
8.3.3	横向自振周期的调整	(187)
8.3.4	排架地震作用的计算	(188)
8.3.5	天窗架的横向水平地震作用	(189)
8.3.6	排架内力分析及组合	(189)
8.3.7	截面抗震验算	(191)
8.3.8	厂房横向抗震验算的其他问题	(191)
8.4	单层厂房的纵向抗震计算	(192)
8.4.1	修正刚度法	(192)
8.4.2	拟能量法	(195)
8.4.3	纵向柱列的刚度	(197)
8.4.4	柱间支撑的抗震验算	(200)
8.4.5	厂房纵向抗震计算的其他问题	(201)
8.5	单层钢筋混凝土柱厂房构造措施	(213)
8.5.1	无檩屋盖构件的连接与支撑布置	(213)
8.5.2	有檩屋盖构件的连接与支撑布置	(214)
8.5.3	屋架	(215)
8.5.4	柱	(215)
8.5.5	柱间支撑	(216)
8.5.6	连接节点	(217)
8.5.7	围护墙体	(217)
	本章小结	(219)
	思考题	(219)
	习题	(220)
9	隔震与耗能减震房屋设计	(221)
	本章提要	(221)
9.1	概述	(221)
9.2	隔震结构设计	(222)
9.2.1	结构隔震的原理与隔震结构的特点	(222)
9.2.2	隔震系统的组成与类型	(224)
9.2.3	隔震结构的设计要求	(226)
9.2.4	隔震结构的抗震计算	(227)
9.2.5	隔震结构的构造措施	(230)
9.3	耗能减震结构设计	(231)
9.3.1	结构耗能减震原理与耗能减震结构特点	(231)
9.3.2	耗能减震装置的类型与性能	(232)
9.3.3	耗能减震结构的设计要求	(238)
9.3.4	耗能减震结构体系的抗震计算分析	(238)

9.3.5 耗能减震结构的连接与构造 (240)

本章小结..... (241)

思考题..... (242)

10 工程结构防灾减灾..... (243)

本章提要..... (243)

10.1 灾害概述..... (243)

10.1.1 灾害的含义..... (243)

10.1.2 灾害的类型..... (243)

10.1.3 灾害的特征..... (244)

10.1.4 中国的灾害..... (244)

10.1.5 灾害的分级..... (245)

10.1.6 减灾系统工程..... (245)

10.1.7 防灾减灾对策与措施..... (246)

10.1.8 防灾减灾工程学发展简况..... (247)

10.2 地表变形灾害及防治..... (247)

10.2.1 地表变形..... (248)

10.2.2 地表变形的常见原因..... (248)

10.2.3 地表变形对建筑物的影响..... (251)

10.2.4 建筑物抗地表变形措施..... (252)

10.3 火灾..... (254)

10.3.1 火灾与燃烧..... (254)

10.3.2 燃烧种类及产物..... (255)

10.3.3 火灾分类及灭火原理..... (255)

10.3.4 建筑防火设计..... (256)

10.3.5 结构抗火设计..... (257)

10.4 爆炸灾害..... (263)

10.4.1 爆炸基础知识..... (263)

10.4.2 快速加载下材料性能..... (265)

10.4.3 建筑设计中的防爆设计..... (267)

10.4.4 结构设计中的防爆设计..... (268)

本章小结..... (278)

思考题..... (278)

附录1 中国地震烈度表 (279)

附录2 我国主要城镇抗震设防烈度、设计基本地震加速度和设计地震分组 (281)

附录3 建筑耐火等级、建筑构件耐火极限和燃烧性能 (292)

参考文献..... (293)

1 绪 论

本章提要

本章主要讲述地震与地震动的基本知识,介绍世界及我国的地震活动性以及近期的世界地震活动情况,同时还综述了地震所造成的地表破坏及其给工程结构所造成的破坏,介绍我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中的抗震设防目标、抗震设计方法以及抗震设计的基本要求等。这些都是本课程的理论基础和基本概念,学习时应认真领会并深刻理解。

1.1 地震与地震动

地震是地球内部构造运动的产物,是一种自然现象。全世界每年大约发生 500 万次地震,其中绝大多数地震都很小,只有用非常灵敏的仪器才能测量到。这样的小地震约占一年中地震总数的 99%,剩下的 1%才是人们能够感觉到的,而能够造成严重破坏的大地震,全世界平均每年大约发生 18 次。

地震给人类社会带来灾难,造成不同程度的人身伤亡和经济损失。为了减轻或避免这种损失,就需要对地震有较深入的了解。作为土木工程技术人員,其主要任务就是研究如何防止或减少建(构)筑物由于地震而造成的破坏,这就是建(构)筑物的抗震问题。本节主要介绍一些有关地震的基本知识。

1.1.1 地震及其成因

地震按其成因可划分为 4 种类型:构造地震、火山地震、陷落地震和诱发地震。由于地壳运动,推挤地壳岩层使其薄弱部位发生断裂错动而引起的地震叫构造地震。构造地震分布最广,危害最大。由于火山爆发,岩浆猛烈冲出地面而引起的地震叫火山地震。火山地震在我国很少见。由于地表或地下岩层(如石灰岩地区较大的地下溶洞或古旧矿坑等)突然发生大规模的陷落和崩塌所引起的小范围内的地面震动叫陷落地震。这种地震很少造成破坏,其震级也很小。由于水库蓄水或深井注水等引起的地面震动叫诱发地震。考虑到构造地震破坏性大,影响范围广,下面再介绍一下构造地震的发生与发展过程。

关于构造地震的成因有多种学说,这里主要介绍断层说和板块构造说。众所周知,地壳是由多种岩层构成的,并且不是静止不动的。在它的运动过程中,始终存在着巨大的能量,而组成地壳的岩层在巨大的能量作用下,也在不停地连续变动,产生变形的地应力。当作用力只能使岩层产生变形,但地应力仍然较小时,岩层尚未丧失其连续完整性,仅仅能够发生褶皱。当作用力不断加强,地壳岩层中的应力不断增加,地应力引起的应变超过某处岩层的极限应变时,则使该处的岩层产生断裂和错动(图 1.1)。而承受应变的岩层在其自身的弹性应力作用下发生回跳,迅速弹回到新的平衡位置。一般情况下,断层两侧弹性回跳的方向是相反的,岩层中原先构造变动过程中积累起来的应变能,在回弹过程中得以释放,并以弹性波的形式传至地面,从而使地面亦随之产生强烈振动,这就是地震。上述是按断层说解释构造地震的成因。

按板块构造学说,地球表面的最上层是由强度较高的岩石组成,叫做岩石层,其厚度为 70~100 km;岩石层的下面为强度较低并带有塑性性质的岩流层。一般认为,地球表面的岩石层是由美洲板块、非洲板块、欧亚板块、印澳板块、太平洋板块和南极洲板块等若干个大板块所组成。这些板块由于其下岩流层的对流运动而做刚体运动,从而使板块之间相互挤压和顶撞,致使其边缘附近岩石层脆性破裂而引发地震。本章后面所讲的地球上两个主要地震带都处于这些大板块的交界地区。因此,板块构造学说的提出,有助

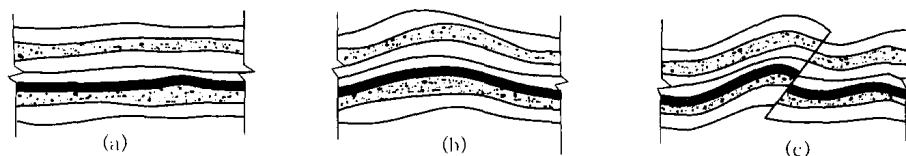


图 1.1 地壳构造变动与地震形成示意图

(a) 岩层原始状态;(b) 受力后发生褶皱变形;(c) 岩层断裂产生振动

于解释上述地震带的成因。

地下岩层断裂时,往往不是沿着一个平面发生,而是形成一个由一系列裂缝组成的破碎地带,并且这个破碎地带的所有岩层不可能同时达到新的平衡状态。因此,每次大地震的发生一般都不是孤立的。大地震前后,在发震地区总有很多次中小地震发生。在一定时间内(一般是几十天至数月)相继发生在相邻地区的一系列大小地震称为地震序列。在某一地震序列中,其中最大的一次地震叫做主震。主震之前发生的地震叫做前震,之后发生的地震叫做余震。在一个地震序列中,若主震震级很突出,其释放的能量占全序列中绝大部分的叫做主震型地震,这是破坏性地震中常见的一种类型。若主震震级不突出,主要能量是由多个震级相近的地震释放出来的叫做震群型或多发型地震。若前震和余震都很稀少,甚至没有,绝大部分能量是通过主震一次释放出来的叫做孤立型或单发型地震。地震序列的认识和判别对预报地震和防御地震都很重要。

据统计,上述 3 种类型地震中主震型地震约占 60%,震群型地震约占 30%,而单发型地震约占 10%。

地质构造运动中,在断层形成的地方大量释放能量,产生剧烈振动,此处就叫做震源。震源不是一个点,而是有一定深度和范围的。震源正上方的地面位置叫震中。

按震源的深浅不同,地震又可分为:

- ① 浅源地震 震源深度在 70 km 以内,一年中全世界所有地震释放能量的约 85%来自浅源地震;
- ② 中源地震 震源深度在 70~300 km 范围内,一年中全世界所有地震释放能量的约 12%来自中源地震;
- ③ 深源地震 震源深度超过 300 km,一年中全世界所有地震释放能量的约 3%来自深源地震。

1.1.2 地震波

地震引起的振动以波的形式从震源向各个方向传播并释放能量,这就是地震波。它包含在地球内部传播的体波和只限于在地球表面传播的面波。地震波是一种弹性波。

体波中包括纵波和横波两种。纵波是由震源向外传播的疏密波,其介质质点的振动方向与波的前进方向一致,从而使介质不断地压缩和疏松,故也称为压缩波或疏密波,如图 1.2(a)所示。如在空气中传播的声波就是一种纵波。纵波的特点是周期较短,振幅较小。

横波是由震源向外传播的剪切波,其介质质点的振动方向与波的前进方向相垂直,亦称剪切波。横波的周期较长,振幅较大(图 1.2(b))。还应指出,横波只能在固体内传播,而纵波在固体和液体内部都能传播。

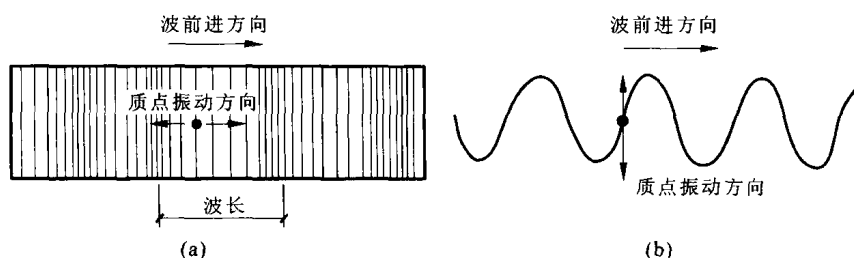


图 1.2 体波质点振动形式

(a) 压缩波;(b) 剪切波

根据弹性理论,纵波的传播速度 v_p 与横波的传播速度 v_s 可分别按下列公式计算:

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1.1)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.2)$$

式中 E ——介质的弹性模量；
 G ——介质的剪切模量；
 ρ ——介质的密度；
 μ ——介质的泊松比。

在一般情况下，当 $\mu=0.22$ 时，从式(1.1)和式(1.2)可得：

$$v_p = 1.67v_s \quad (1.3)$$

由此可见，纵波的传播速度要比横波的传播速度快，所以在仪器的观测记录纸上，纵波一般都先于横波到达。因此，通常又把纵波叫做 P 波（即初波），把横波叫做 S 波（即次波）。

研究表明，体波在地球中的传播速度将随深度的增加而加快(图 1.3)，并且由于地球的层状构造特点，体波通过分层介质时，将会在界面上反复发生反射和折射。当体波经过地层界面的多次反射和折射后投射到地面时，又激起两种仅沿地面传播的面波，即瑞雷波(R 波)和洛夫波(L 波)。瑞雷波传播时，质点在竖向平面内(xz 平面)做与波前进方向相反的椭圆形运动，而在与该平面垂直的水平方向(y 方向)没有振动，故瑞雷波在地面上呈滚动形式[图 1.4(a)]。瑞雷波具有随着距地面深度增加其振幅急剧减小的特性，这可能是地震时地下建筑物比地上建筑物受害较轻的一个原因。洛夫波传播时将使质点在地平面内做与波前进方向相垂直的水平方向(y 方向)的运动，即在地面上呈蛇形运动形式[图 1.4(b)]。洛夫波也随深度而衰减。

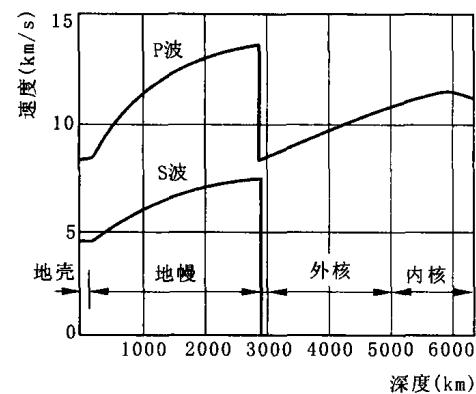


图 1.3 体波在地球内传播速度的变化

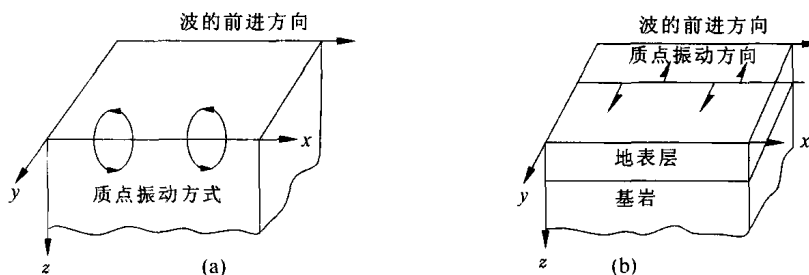


图 1.4 面波质点振动形式

(a) 瑞雷波质点振动；(b) 洛夫波质点振动

面波振幅大，周期长，只能在地表附近传播，比体波衰减慢，故能传播到很远的地方。

综上所述，地震波的传播以纵波最快，剪切波次之，面波最慢。所以在任意一地震波的记录图(图 1.5)上，纵波总是最先到达，剪切波次之，面波到达最晚。然而就振幅而言，面波却最大。从图 1.5 中还可看出，在上述 3 种波到达之间有一相对稳定区段，稳定区段的时间间隔则随由观测点至震源之间距离的减小而缩短。在震中区，由于震源机制和地面扰动的复杂性，3 种波的波列几乎是难以区分的。

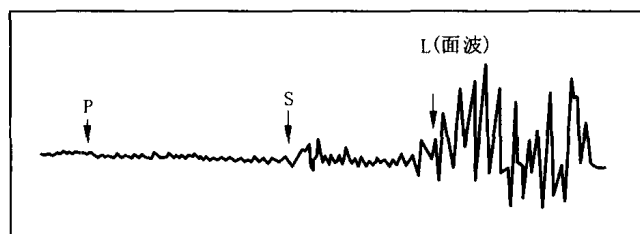


图 1.5 地震波记录图

地震现象表明,纵波使建筑物产生上下颠簸,剪切波使建筑物产生水平方向摇晃,而面波则使建筑物既产生上下颠簸又产生左右摇晃,一般是在剪切波和面波都到达时振动最为激烈。由于面波的能量要比体波的大,所以造成建筑物和地表破坏的主要是面波。

1.1.3 地震强度

1.1.3.1 震级

地震强度通常用震级和烈度等反映。震级是表示一次地震本身强弱程度和大小的尺度。目前,国际上比较通用的是里氏震级,其原始定义是在 1935 年由里克特(C. F. Richter)给出,即地震震级 M 为:

$$M = \lg A \tag{1.4}$$

式中 A ——标准地震仪(指摆的自振周期为 0.8 s,阻尼系数为 0.8,放大倍数为 2800 倍的地震仪)在距震中 100 km 处记录的以微米($1\ \mu\text{m}=10^{-6}\ \text{m}$)为单位的最大水平地动位移(单振幅)。例如,在距离震中 100 km 处地震仪记录的振幅是 1 mm,即 1000 μm ,其常用对数为 3,根据定义,这次地震就是里氏 3 级。

实际上,地震时距震中恰好 100 km 处不一定设置了地震仪,且观测点也不一定采用上述的标准地震仪。因此,对于距震中的距离不是 100 km,且采用了非标准地震仪所确定的震级,尚需进行适当的修正才是所要求的震级。

震级表示一次地震释放能量的多少,也是表示地震强度大小的指标,所以一次地震只有一个震级。各种不同的震级 M 与地震释放能量 E (尔格)之间有如下的关系:

$$\lg E = 11.8 + 1.5M \tag{1.5}$$

根据式(1.5)将各级地震所释放的能量列于表 1.1。从表 1.1 可见,震级相差一级,能量就要相差 32 倍之多。一次 6 级地震所释放的能量,相当于一个 2 万吨级的原子弹。

表 1.1 震级及其相应的能量

震级	能量(erg)	震级	能量(erg)
1	2.00×10^{13}	6	6.31×10^{20}
2	6.31×10^{11}	7	2.00×10^{22}
3	2.00×10^{16}	8	6.31×10^{23}
4	6.31×10^{17}	8.5	3.55×10^{24}
5	2.00×10^{19}		

注:1 erg= 10^{-7} J。

一般来说,小于 2 级的地震,人们是感觉不到的,只有仪器才能记录下来,因此称为微震;2~4 级地震人就能感觉到了,故叫做有感地震;5 级以上的地震就能引起不同程度的破坏,称为破坏性地震;7 级以上的地震则称为强烈地震或大震;8 级以上的地震称为特大地震。据 1935 年后所提出的震级测算方法计算,1960 年 5 月发生在智利的 9.5 级地震,是记录到的世界最大震级地震,它所释放出来的地震能量是空前的,海啸规模巨大,地面形状变化非常显著,其破坏性之大,在世界地震史上是十分罕见的。

1.1.3.2 地震烈度

地震烈度是指地震时某一地区的地面和各类建筑物遭受到一次地震影响的强弱程度。一次同样大小的地震,若震源深度、离震中的距离和土质条件等因素不同,则对地面和建筑物的破坏也不相同。这时,若仅用地震震级来表示地震动的强度,还不足以区别地面和建筑物破坏轻重的程度。虽然一次地震只有一个震级,但距离震中不同的地点,地震的影响是不一样的,即地震烈度不同。一般来说,离震中愈近,地震影响愈大,地震烈度愈高;离震中愈远,地震烈度就愈低。此外,震中烈度一般可看做是地震大小和震源深度两者的函数,但对人民生命财产影响最大且发生最多的地震,其震源深度大多都在 10~30 km 范围内,因此可近似认为震源深度不变来进行震中烈度 I_0 与震级 M 之间关系的研究。《中国地震目录》(1983 年版)给出了根据宏观资料估定震级的经验公式:

$$M = 0.58I_0 + 1.5 \tag{1.6}$$

必要时可参考地震影响面积的大小作适当调整。表 1.2 给出了震源深度为 10~30 km 时,震级 M 与震中烈度 I_0 的大致对应关系。

表 1.2 震级 M 与震中烈度 I_0 的关系

震 级 M	2	3	4	5	6	7	8	8 以上
震中烈度 I_0	I ~ II	III	IV ~ V	VI ~ VII	VII ~ VIII	IX ~ X	XI	XII

为评定地震烈度,就需要建立一个标准,这个标准就称为地震烈度表。它是以描述震害宏观现象为主的,即根据人的感觉、器物的反应、建筑物的损坏程度和地貌变化特征等方面的宏观现象进行判定和区分。然而,由于对烈度影响轻重的分段不同,以及在宏观现象和定量指标确定方面的差异,加之各国建筑情况和地表条件的不同,各国所制定的地震烈度表也就不同。现在,除了日本采用 0~7 度分成 8 等的烈度表、少数国家(如欧洲一些国家)用 10 度划分的地震烈度表外,绝大多数国家包括我国都采用分成 12 度的地震烈度表。我国 2008 年颁布实施的《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2008)详见附录 1。

1.1.4 地震区划与地震影响

地震区划是指根据历史地震、地震地质构造和地震观测等资料,在地图上按地震情况的差异划出不同的区域。我国曾采用地震基本烈度,即在 50 年期限内一般场地条件下可能遭遇超越概率为 10% 的地震烈度值进行区划,编制了《中国地震烈度区划图(1990)》。随后又按地震动参数,即地震动峰值加速度和加速度反应谱编制了《中国地震动参考区划图(2001)》,作为确定我国主要城镇抗震设防烈度、设计基本地震加速度和设计地震分组的依据。

在抗震设计时,建筑所在地区遭受的地震影响,用相应于设防烈度的设计基本地震加速度和特征周期或《建筑抗震设计规范》规定的设计地震动参数来表征。抗震设防烈度一般情况下应采用区划图中的地震基本烈度。

设计基本地震加速度为上述区划图中的地震动峰值加速度,相应于设防烈度的设计基本地震加速度见表 1.3。设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.30g 地区内的建筑,除《建筑抗震设计规范》另有规定外,应分别按抗震设防烈度 7 度和 8 度的要求进行抗震设计。

表 1.3 抗震设防烈度和设计基本地震加速度的对应关系

抗震设防烈度	6	7	8	9
设计基本地震加速度值	0.05g	0.10(0.15)g	0.20(0.30)g	0.40g

注: g 为重力加速度。

建筑的设计特征周期应根据其所在地的设计地震分组和场地类别确定。设计地震分组共分 3 组,用以体现震级和震中距的影响。我国部分主要城镇抗震设防烈度、设计基本地震加速度和设计地震分组见附录 2,详细内容见《建筑抗震设计规范》附录 A。

1.1.5 常用术语

震源深度:震中到震源的垂直距离,称为震源深度。

震中距:建筑物到震中之间的距离叫震中距。

震源距:建筑物到震源之间的距离叫震源距。

极震区:在震中附近,振动最剧烈、破坏最严重的地区叫极震区。

等震线:一次地震中,在其所波及的地区内,用烈度表可以对每一个地点评估出一个烈度,烈度相同点的外包线叫等震线。各术语解释示意如图 1.6 所示。



图 1.6 术语解释示意