



全国普通高等院校土木工程类
实用创新型系列规划教材

土木工程抗震设计

(第三版)

周云 张文芳 宗兰 等 编著



科学出版社

中国科学院教材建设专家委员会教材建设立项项目
全国普通高等院校土木工程类实用创新型系列规划教材



土木工程抗震设计

(第三版)

周 云 张文芳 宗 兰 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是《全国普通高等院校土木工程类实用创新型系列规划教材》之一。本书根据土木工程专业本科教学大纲要求,并结合《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)等有关国家现行规范和规程编写。

全书共10章,包括概论、场地与地基基础抗震设计、结构地震反应分析与抗震极限状态计算、砌体结构抗震设计、混凝土结构抗震设计、钢结构抗震设计、构筑物抗震设计、桥梁抗震设计、地下空间结构抗震设计和隔震与耗能减震结构设计等内容。章后附有思考题或习题。

本书可作为高等学校全日制土木工程专业的结构抗震设计课程教材和成人教育、自学考试有关土建类专业的教材,也可作为有关土建类研究生的教学参考书,并可供从事土木工程抗震与减震研究、设计和施工等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程抗震设计/周云等编著. —3版. —北京:科学出版社,2013
(全国普通高等院校土木工程类实用创新型系列规划教材)
ISBN 978-7-03-036770-9

I. ①土… II. ①周… III. ①土木工程-防震设计-高等学校-教材
IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 036340 号

责任编辑:任加林/责任校对:耿 耘
责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年5月第 二 版 印张:26

2013年3月第 三 版 字数:558 000

2013年3月第七次印刷

定价:46.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新科>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

全国普通高等院校土木工程类实用创新型
系列规划教材编委会

主 任 霍 达

副主任 (按姓氏笔画排序)

周 云 阎兴华 童安齐

秘书长 张志清

委 员 (按姓氏笔画排序)

白晓红	石振武	刘继明	任加林	何浙浙
何舒民	张文福	张延庆	张志清	周 云
周亦唐	宗 兰	徐向荣	阎兴华	翁维素
傅传国	程赫明	韩建平	童安齐	雷宏刚
霍 达				

第三版前言

本书第一版自 2005 年 9 月出版以来,得到广大教师和学生的欢迎。本版主要根据《构筑物抗震设计规范》(GB50191—2012)对相关内容进行修订,对其他方面内容进行了少量的完善,风格保持不变。

全书共十章,第一章、第九章由广州大学周云教授修订,第二章由南京工程学院宗兰教授修订,第三章由太原理工大学张文芳教授修订,第四章由广州大学吴从晓博士修订,第五章由兰州理工大学韩建平教授修订,第六章由北京建筑工程学院韩森教授修订,第七章由昆明理工大学高琼仙副教授修订,第八章由广州大学朱文正副教授修订,第十章由广州大学邓雪松副教授修订。

由于水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,热切希望读者批评指正。

周 云

2012 年 12 月 12 日于 广州

第二版前言

本书第一版于2005年9月出版,自出版以来,得到广大教师和学生的欢迎。第二版主要根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)和《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB02—01—2008)等新规范和规程进行修订,但依然保持原作编写思想、特点和风格。

全书共十章,第一、九章由广州大学周云教授修订,第二章由南京工程学院宗兰教授修订,第三章由太原理工大学张文芳教授修订,第四章由广州大学吴从晓博士修订,第五章由兰州理工大学韩建平教授修订,第六章由北京建筑工程学院韩森教授修订,第七章由昆明理工大学高琼仙副教授修订,第八章由广州大学朱文正副教授修订,第十章由广州大学邓雪松副教授修订。

广州大学徐忠根教授、陈原副教授、刘爱荣教授分别审阅了本书部分章节,在此表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,热切希望读者批评指正。

周 云

2010年12月12日于广州

第一版前言

本教材以“拓宽专业面、加强基础、强化概念、参照规范、反应当代研究成果、应用与创新并重”为编写思想。主要特色如下:

1. 本书除了包含传统的房屋建筑结构抗震设计的内容外,增加了高层钢结构、构筑物、桥梁、地下结构抗震设计的内容,基本包括了土木工程中的重要结构的抗震设计的内容;增加了静力弹塑性分析、工程结构减震设计等新的内容。

2. 突出概念设计,强化基本理论,将各类结构的一般规定的内容纳入抗震概念设计中,从抗震概念的角度阐述这些规定。用较大篇幅详细介绍了结构地震反应分析与抗震计算的内容,而且对该部分内容进行了较大的调整和增补,注意从基本概念入手进行阐述,恰当地处理了手算与机算,原理与例题的关系。

3. 为适应采取启发式教学和培养学生主动思考积极创新的教学模式,每章后增加了“思考题与习题”的内容;同时为了适应双语教学,对有关名词、术语加注了英文。

4. 参考最新规范、规程,所用图片尽量采用近年来一些地震中的典型照片,结构图、模型图尽量采用空间立体图,恰当处理了与相关课程的关系,突出抗震设计中的本质内容。

本书由广州大学周云制定编写大纲和统稿,广州大学周福霖院士主审。

全书共十章,第一、九章由广州大学周云撰写,第二、四章由南京工程学院宗兰撰写,第三章由太原理工大学张文芳撰写,第五章由兰州理工大学韩建平撰写,第六章由北京建筑工程学院韩森撰写,第七章由昆明理工大学高琼仙撰写,第八章由广州大学朱文正撰写,第十章由广州大学邓雪松撰写。

广州大学陈麟、吴珊瑚、吴轶等老师分别审阅了本书部分章节,研究生吴从晓、汤统壁、聂一恒、廖红伟、丁鲲、郭永恒加注了关键词英文单词,校核书中的例题,并做了大量文字处理工作,在此表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中难免有缺点和错误,热切希望读者批评指正。

目 录

第三版前言

第二版前言

第一版前言

第一章 概论	1
1.1 地震成因及类型	1
1.1.1 地球构造	1
1.1.2 地震的类型	2
1.1.3 地震的分布	4
1.2 地震的破坏作用	6
1.2.1 直接灾害	7
1.2.2 次生灾害	10
1.3 地震波、震级与烈度	10
1.3.1 常用术语	10
1.3.2 地震波	11
1.3.3 震级	13
1.3.4 烈度	14
1.4 工程抗震设防的概念	17
1.4.1 抗震设防标准	17
1.4.2 两阶段抗震设计方法	19
1.5 抗震概念设计总则	20
1.5.1 选择有利于抗震的场地	20
1.5.2 选择有利于抗震的地基和基础	20
1.5.3 选择对抗震有利的建筑平面和立面形式	21
1.5.4 选择合理的抗震结构体系	23
1.5.5 选择合理的结构构件	24
1.5.6 处理好非结构构件和主体结构的关系	24
1.5.7 注意材料的选用和施工质量	24
1.5.8 采用结构控制新技术	25
思考题	25
第二章 场地与地基基础抗震设计	26
2.1 概述	26
2.2 场地	26
2.2.1 场地与地震动作用	26
2.2.2 场地土覆盖层厚度	27

2.2.3 场地的类别	29
2.3 地基与基础的抗震验算	31
2.3.1 地基抗震设计原则	31
2.3.2 天然地基在地震作用下的抗震承载力验算	32
2.4 地基土液化及抗震措施	33
2.4.1 地基土液化的概念	33
2.4.2 影响地基土液化的因素	34
2.4.3 液化土的判别与评价	35
2.4.4 液化地基抗震措施的选择	39
2.5 桩基抗震验算	41
2.5.1 可不进行桩基验算的条件	41
2.5.2 低承台桩基础抗震验算	41
思考题	42
习题	42
第三章 结构地震反应分析与抗震验算	44
3.1 概述	44
3.1.1 结构抗震计算内容	44
3.1.2 地震的作用、作用效应特点及分析方法	44
3.2 单自由度弹性体系的地震反应分析与抗震设计反应谱	46
3.2.1 结构的质量模型及节点运动自由度	46
3.2.2 单自由度弹性体系的地震反应分析——理论解析法	47
3.2.3 单自由度弹性体系的地震反应分析——数值时程分析法	52
3.2.4 水平与竖向地震动的反应谱	55
3.2.5 水平抗震设计反应谱——水平多遇及罕遇地震的地震影响系数	58
3.2.6 竖向抗震设计反应谱——竖向地震影响系数	61
3.2.7 单自由度体系地震作用标准值计算——反应谱法及重力荷载代表值	61
3.3 多自由度弹性体系的地震反应分析	64
3.3.1 集中质量多自由度弹性体系的动力计算模型	64
3.3.2 单向地震作用下多自由度弹性体系的运动方程	65
3.3.3 多自由度弹性体系的有关概念及其地震反应分析法——振型分解解析法	68
3.3.4 振型有效质量	77
3.3.5 多自由度弹性体系地震反应分析——时程分析法	78
3.4 平动多自由度体系水平地震作用及效应计算的反应谱方法	79
3.4.1 平动多自由度体系的振型分解反应谱法	79
3.4.2 底部剪力法——按基本振型并考虑高振型影响求等效侧力	82
3.4.3 底部剪力法——按基本振型和第二振型求等效侧力	86
3.5 考虑扭转耦联、地基与结构相互作用时水平地震作用计算	87
3.5.1 考虑平动-扭转耦联振动的水平地震作用弹性效应分析	87
3.5.2 水平地震作用下考虑地基与结构动力相互作用的地震作用效应修正	93
3.6 多自由度体系自振周期和振型的计算	95

3.6.1 能量法(或瑞利法).....	95
3.6.2 顶点位移法计算基本周期及其适用范围.....	97
3.6.3 等效单质点法计算基本自振周期及其适用情况.....	98
3.6.4 向量迭代法	101
3.7 水平地震下的位移变形分析	102
3.7.1 水平多遇地震下结构的弹性侧移反应分析	102
3.7.2 水平罕遇地震下结构的弹塑性变形反应分析——弹塑性静力分析法	104
3.7.3 水平罕遇地震下弹塑性变形反应分析——混凝土框架结构的简化算法	109
3.8 结构竖向地震作用效应计算	112
3.8.1 竖向地震及其作用特点	112
3.8.2 高层建筑与高耸构筑物竖向地震作用计算的简化反应谱法	115
3.8.3 大跨度和长悬臂结构的等效静力法	117
3.9 结构抗震设计验算及地震作用的一般规定	118
3.9.1 地震作用的一般规定	118
3.9.2 结构抗震设计验算	120
3.10 建筑抗震性能化设计	125
3.10.1 抗震性能化设计的概念.....	125
3.10.2 抗震性能化设计的主要内容.....	126
3.10.3 性能目标的确定方法.....	127
3.10.4 性能化抗震设计方法.....	129
思考题	129
习题	130
第四章 砌体结构抗震设计.....	133
4.1 震害现象及其分析	133
4.1.1 震害现象及其分析	133
4.1.2 震害规律	136
4.2 砌体结构的抗震概念设计	136
4.2.1 结构布置	136
4.2.2 房屋适用层高、层数、总高度和总宽度	138
4.2.3 抗震墙	139
4.2.4 混凝土构件抗震等级	140
4.3 多层砌体结构抗震计算	140
4.3.1 多层砌体结构抗震计算分析	140
4.3.2 底部框架-抗震墙砌体结构房屋抗震计算分析.....	148
4.4 构造措施	152
4.4.1 多层砌体结构的抗震构造措施	152
4.4.2 底层框架-抗震墙砌体房屋.....	157
4.5 算例	159
4.5.1 多层砌体结构抗震设计实例	159
4.5.2 底层框架-抗震墙房屋.....	165

思考题	169
习题	169
第五章 混凝土结构抗震设计	171
5.1 震害现象及其分析	172
5.1.1 结构布置不当引起的震害	172
5.1.2 框架的震害	173
5.1.3 填充墙的震害	175
5.1.4 抗震墙的震害	175
5.1.5 单层钢筋混凝土柱厂房的震害	176
5.2 混凝土结构的抗震概念设计	177
5.2.1 结构体系选择及最大适用高度	177
5.2.2 抗震等级	178
5.2.3 防震缝的设置	180
5.2.4 结构布置	181
5.3 框架结构的抗震设计	183
5.3.1 抗震设计步骤与地震作用计算	183
5.3.2 水平荷载作用下框架内力计算	184
5.3.3 控制截面及其内力不利组合	189
5.3.4 框架结构水平位移验算	193
5.3.5 框架结构截面抗震设计	196
5.3.6 框架结构抗震构造措施	203
5.3.7 框架结构抗震设计算例	209
5.4 框架-抗震墙结构的抗震设计	222
5.4.1 框架-抗震墙结构的受力特点	222
5.4.2 框架-抗震墙结构计算的基本假定及计算简图	223
5.4.3 框架-抗震墙结构简化计算要点	224
5.4.4 框架-抗震墙结构截面设计	227
5.4.5 抗震墙结构抗震构造措施	229
5.4.6 框架-抗震墙结构抗震构造措施	231
5.5 单层钢筋混凝土工业厂房抗震设计	231
5.5.1 单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计的一般规定	232
5.5.2 单层钢筋混凝土柱厂房抗震计算	233
5.5.3 单层钢筋混凝土柱厂房的抗震构造措施	243
思考题	249
习题	249
第六章 钢结构抗震设计	250
6.1 震害现象及其分析	250
6.1.1 结构倒塌	250
6.1.2 构件的破坏	250
6.1.3 节点破坏	251

6.1.4 基础锚固破坏	252
6.2 钢结构的抗震概念设计	252
6.2.1 钢结构房屋的结构体系及其抗震性能	252
6.2.2 钢结构房屋抗震设计的一般规定	255
6.3 多层和高层钢结构抗震设计	258
6.3.1 计算模型	258
6.3.2 变形验算	259
6.3.3 地震作用下的内力调整	259
6.3.4 抗震承载力和稳定性验算	260
6.3.5 抗震构造要求	265
6.4 多层与单层钢结构厂房的抗震设计	271
6.4.1 多层钢结构厂房的抗震设计	271
6.4.2 单层钢结构厂房的抗震设计	274
6.5 网架结构抗震设计	279
6.5.1 抗震设计一般规定	280
6.5.2 网架抗震设计要点	281
6.5.3 网架抗震措施	284
思考题	286
第七章 构筑物抗震设计	287
7.1 震害现象及其分析	287
7.1.1 烟囱的震害	287
7.1.2 塔架的震害	289
7.1.3 水池的震害	291
7.1.4 筒仓的震害	292
7.2 构筑物的抗震概念设计	292
7.2.1 烟囱的抗震设计原则	292
7.2.2 塔架的抗震设计原则	293
7.2.3 筒仓的设计原则	294
7.2.4 水池的设计原则	296
7.3 烟囱的抗震设计	297
7.3.1 烟囱抗震设计一般规定	297
7.3.2 烟囱水平地震作用及其效应计算	297
7.3.3 烟囱竖向地震作用及其效应	300
7.3.4 地震作用效应组合及附加弯矩	300
7.3.5 烟囱的抗震构造措施	302
7.4 塔架的抗震设计	305
7.4.1 塔架抗震设计的一般规定	305
7.4.2 水塔的抗震计算	306
7.4.3 水塔的构造措施	308
7.5 水池的抗震设计	309

7.5.1 水池抗震设计的一般规定	310
7.5.2 水池的地震作用计算	310
7.5.3 水池的构造措施	314
7.6 筒仓的抗震设计	315
7.6.1 筒仓抗震设计的一般规定	315
7.6.2 筒仓的地震作用计算	316
7.6.3 筒仓的抗震变形验算	320
7.6.4 筒仓的抗震构造措施	321
思考题	324
第八章 桥梁抗震设计	325
8.1 桥梁震害及分析	325
8.2 桥梁抗震设计的理论和方法	328
8.2.1 桥梁抗震设计的理论	328
8.2.2 桥梁地震作用的计算	334
8.3 桥梁地震反应分析	337
8.3.1 建模原则	338
8.3.2 选择合适的地震记录和输入模式	338
8.3.3 地基与结构的相互作用	339
8.3.4 阻尼问题	340
8.3.5 桥梁动力分析中的非线性因素	340
8.3.6 桥梁支座的非线性	343
8.4 桥梁的延性设计	347
8.4.1 延性指标	347
8.4.2 考虑延性的地震作用折减	348
8.4.3 钢筋混凝土桥墩的延性设计	349
思考题	353
第九章 地下空间结构抗震设计	354
9.1 地下空间结构的震害现象及其分析	354
9.1.1 历史地震中地下结构的震害现象	354
9.1.2 地铁震害及震害分析	355
9.1.3 隧道震害及震害分析	357
9.1.4 地下空间结构震害的机理分析	359
9.2 地下空间结构的抗震设计	360
9.2.1 地下空间结构地震动力特性	360
9.2.2 地下空间结构抗震设计原则	362
9.2.3 地下空间结构的地震分析和抗震设计方法	363
9.2.4 地下空间结构抗震构造措施	368
思考题	369
第十章 隔震与耗能减震结构设计	370
10.1 减震的概述与分类	370

10.2 隔震结构设计	371
10.2.1 结构隔震的原理与隔震结构的特点	371
10.2.2 隔震系统的组成与类型	374
10.2.3 隔震结构的设计要求	376
10.2.4 隔震结构的抗震分析	377
10.2.5 上部结构的抗震设计	377
10.2.6 隔震层的设计与验算	379
10.2.7 隔震层以下结构及基础抗震设计要点	381
10.2.8 隔震结构的构造措施	382
10.3 耗能减震结构设计	383
10.3.1 结构耗能减震原理与耗能减震结构特点	383
10.3.2 耗能减震装置的类型与性能	384
10.3.3 耗能减震结构的设计要求	391
10.3.4 耗能减震结构体系的抗震计算分析	393
10.3.5 耗能减震结构的连接与构造	394
思考题	395
习题	395
主要参考文献	396

第一章 概 论

地震(earthquake)是一种和刮风、下雨一样的自然现象,是自然灾害的头号杀手。它是地球内部能量的突然释放,是地球的快速振颤。全世界每年约发生地震 500 万次,平均每天多达 13 700 次。其中 7 级以上的地震全球平均每年 18 ~19 次,5~6 级地震每年数以百次,仅中国平均每年发生的 5 级以上的地震就有 20~30 次,5 级以下的地震则数以千计。人类时刻与地震相伴,受到震灾影响。地震给人类带来巨大的灾难,造成了人类生命、财产的巨大损失。因此,为了与地震灾害作斗争,人类自古以来一直对地震和抗震进行着探索,对地震的认识也随着人类文明的进步而深入,工程抗震防灾减灾的技术和方法也在不断完善和成熟。

1.1 地震成因及类型

1.1.1 地球构造

要知道地震究竟是如何形成的就必须先了解地球的内部构造。地球是一个近似于球体的椭球体,平均半径约为 6400km。研究表明,地球从地表至核心由三种性质不同的物质构成:最外层是很薄的地壳(earth shell),平均厚度约为 30km;中间一层是地幔(earth mantle),厚度约为 2900km;最里面部分称为地核(earth core),半径约为 3500km(图 1-1)。

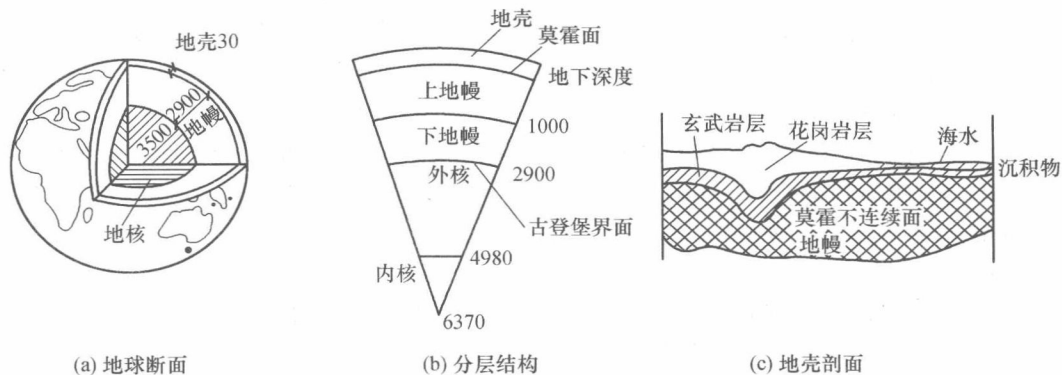


图 1-1 地球的构造(单位:km)

地壳由各种不均匀的岩石组成。地表覆盖一层薄薄的沉积岩、风化土以及疏松沉积物等。陆地下面的地壳主要为:上部是花岗岩层,下部为玄武岩层;海洋下面的地壳性质较单一,一般只有玄武岩层。地壳的下界称为莫霍界面,是一个地震波传播速度发生急剧变化的不连续面[图 1-1(c)]。地壳厚度变化很大,在海洋下面,一般仅有几公里;在大陆下面,平均厚度为 30~40km。世界上绝大部分地震都发生在地壳内。

地壳以下到深约 2895km 的古登堡界面以上的部分为地幔,据推测,其约占地球全部

体积的 5/6。地幔主要由质地坚硬、密度较大的黑色橄榄岩组成。从地下 20~700km,其温度由约 600℃上升到 2000℃。在这一范围内,存在一个厚约几百公里的软流层。由于温度分布不均匀,发生了地幔内部物质的对流;此外,地球内部的压力也是不均匀的。因此,地幔内部物质在这样的热状态下和不均衡压力作用下缓慢地运动着。这可能是地壳运动的根源。到目前为止,所观测到的最深地震发生在地下约 720km 处。可见,地震仅发生在地壳内和地幔上部。

古登堡界面以下直到地心的部分为地核,其半径约为 3500km,地核可分为外核与内核。据推测,地核主要构成物质是镍和铁,外核可能处于液态,厚度约为 2100km;内核可能处于固态,半径约为 1400km。

1.1.2 地震的类型

地震的类型划分方式有很多种,可以按震源深度、地震烈度和地震的成因等方式划分。

按照震源深度划分地震可分为以下三类。

(1) 浅源地震震源深度小于 70km。

(2) 中源地震震源深度在 70~300km 内。

(3) 深源地震震源深度大于 300km,但到目前为止,所观测到的地震震源深度最深为 720km,这可能与岩石圈板块的最深俯冲深度有关。

按照正常人在安静状态下的感觉程度划分地震可分为以下两类。

(1) 无感地震。正常人在安静状态下感觉不到,只能用地震仪器测量出来,其震级一般小于 3 级。其中震级小于 1 级的称为超微震;震级在 1~3 级的称为微震。

(2) 有感地震。正常人在安静状态下能够感觉到,其震级大于 3 级。其中震级在 3~5 级的称为小震,一般不会造成破坏;震级在 5~7 级的称为中震,可以造成不同程度的破坏;震级大于 7 级的称为大地震,常造成严重的破坏。

根据地震成因,地震类型大致分为六类:构造地震(tectonic earthquake)、火山地震(volcanic earthquake)、塌陷地震(depression earthquake)、水库地震(reservoir induced earthquake)、爆炸地震(explosion induced earthquake)和油田注水诱发地震(oil field flooding induced earthquake)。

1) 构造地震

构造地震是由地球构造运动引起的地震。地球内部在不停地运动着,在它的运动过程中,始终存在巨大的能量,而组成地壳的岩层在巨大的能量作用下,也不停地连续变动,不断地发生褶皱、断裂和错动(图 1-2),这种地壳构造状态的变动使岩层处于复杂的地应力作用之下。地壳运动使地壳某些部位的地应力不断加强,当弹性应力的积聚超过岩石的强度极限时,岩层就会发生突然断裂和猛烈错动,从而引起振动。振动以波的形式传到地面,形成地震。由于岩层的破裂往往不是沿一个平面发展的,而是形成由一系列裂缝组成的破碎地带,沿整个破碎地带的岩层不可能同时达到平衡,因此,在一次强烈地震(即主震)之后,岩层的变形还有不断的零星调整,从而形成一系列余震(after shock)。

此类地震约占地震总数的 90%,其特点是震源(earthquake focus)较浅、活动频繁、延续时间长、影响范围广、给人类带来的损失最严重。世界上许多著名的大地震都属于

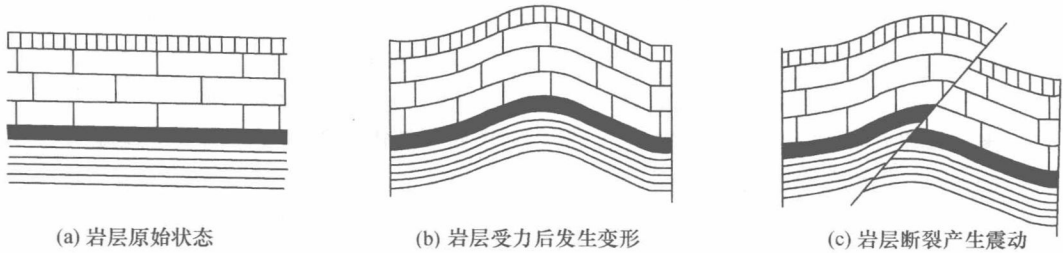


图 1-2 构造地震形成示意图

此类,如 1976 年唐山大地震,在几十秒内,将一座用了近百年时间才建设起来的工业城市几乎夷为平地。

构造地震按其地震序列可分为孤立型地震(前震,余震少而弱,地震能量几乎全部通过主震释放出来);主震型地震(前震很少或无,但余震很多,90%以上的地震能量是通过主震释放出来的);震群型地震(没有突出的主震,地震能量通过若干次震级相近的地震分批释放出来)。

2) 火山地震

火山地震是由于火山爆发,岩浆猛烈冲击地面时引起的地面振动称为火山地震。地球内部温度很高,往深处每增加 100m,温度上升 $2\sim 5^{\circ}\text{C}$,在地下 100km 深处的地温已达到 $1200\sim 1300^{\circ}\text{C}$ 。因此,在高温下岩石呈熔融状态的岩浆,在强大压力作用下,岩浆向上喷出,在其冲力作用下激起地面的振动,产生火山地震。例如,1914 年日本樱岛火山喷发产生的地震相当于 6.7 级。火山地震约占发生地震的 7%。火山地震可分为 A 型火山地震(发生在火山附近,震源深度为 $1\sim 10\text{km}$,其发生与火山喷发活动没有直接或明确的关系;但与地下岩浆或气体状态变化产生的地应力分布的变化有关);B 型火山地震(集中在活火山口附近的狭长范围内,震源深度浅于 1km ,影响范围很小);潜火山地震(在地下岩浆冲至接近地面,但未喷出地表的情况下产生的地震)。

3) 塌陷地震

塌陷地震是指天然的岩洞、溶洞以及矿区的采空区支撑不住上覆岩层,发生塌陷而形成的地震。此类地震的发生既有天然因素的一面,又有人为因素的一面。此类地震约占产生地震的 3%。在国内外曾经发现过矿山塌陷地震震级最大可达到 5 级,在我国已发生过近 4 级的矿山塌落地震。例如,1972 年在山西大同煤矿发生的采空区大面积顶板塌落,引起最大震级为 3.4 级的地震。

4) 水库地震

水库地震是由于水库大量蓄水或过多抽水而引起的地震。前者称为注水地震;后者称为抽水地震。有些地方,历史上没有或很少发生过地震,但在兴建大型水库后,地震频频发生,甚至发生强烈的破坏性地震。自从 1931 年苏联马拉松水库首次发生地震以来,已有 30 多个国家 100 多座水库发生了水库地震。我国已有 21 例水库发生诱发地震。例如,广东新丰江水库区,自 1959 年截流蓄水后,便频繁出现小数地震,于 1962 年 3 月 19 日发生了 6.1 级的强烈地震,其后余震活动不断。

5) 爆炸地震

爆炸地震是指工业大爆破或地下核爆炸所激发的地震。一次核爆炸本身就产生一