

全国高等院校土木工程类系列教材

# 建筑结构抗震设计

白国良 马建勋 主编



科学出版社

013032566

TU352.104-43  
23

全国高等院校土木工程类系列教材

# 建筑结构抗震设计

白国良 马建勋 主编



科学出版社

北京

TU352.104-43  
23



北航

C1640579

01303282

## 内 容 简 介

本书根据全国高等学校土木工程专业指导委员会对土木工程专业的培养要求和结构抗震设计课程教学大纲,依据我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)编写。内容主要包括绪论、建筑场地、地基和基础,结构地震反应分析与抗震验算,建筑结构抗震概念设计,混凝土结构房屋抗震设计,多层砌体和底部框架-抗震墙砌体房屋抗震设计,钢结构房屋抗震设计,单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计,以及建筑结构隔震与消能减震设计。为便于学习,各章后均给出了复习思考题。

本书可作为高等院校土木工程专业的本科教材或参考书,也可供土木工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

建筑结构抗震设计/白国良,马建勋主编. —北京:科学出版社,2012  
(全国高等院校土木工程类系列教材)

ISBN 978-7-03-036179-0

I. ①建… II. ①白…②马… III. ①建筑结构-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 (2012) 第 296744 号

责任编辑:任加林 童安齐/责任校对:马英菊

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>

北京世知印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2013年1月第一次印刷 印张:23

字数:417 600

定价:42.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<世知>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (HB08)

版权所有,侵权必究

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

# 全国高等院校土木工程类系列教材 编委会

主 任 白国良

副 主 任 (以姓氏笔画为序)

马建勋 刘伯权 何明胜 邵生俊 陈宗平

杨 勇 童安齐

秘 书 长 贾凤云

副 秘 书 长 任加林 陈 迅

委 员 (以姓氏笔画为序)

马 斌 马建勋 王士川 王志骞 王泽军

史庆轩 白国良 冯志焱 任加林 刘伯权

苏明周 杜高潮 李 进 李青宁 李建峰

李惠民 余梁蜀 何明胜 何廷树 邵生俊

张 荫 张 倩 张志政 陈 迅 陈宗平

杨 勇 赵 平 赵树德 赵鸿铁 姚继涛

贾凤云 徐 雷 袁伟宁 郭成喜 梁兴文

韩晓雷 童安齐 曾 珂 廖红建 熊仲明

薛建阳

## 前 言

地震是一种突发性的自然灾害，给人民的生命和财产造成巨大损失。为尽量减小地震造成的损失，一个有效的措施就是工程结构的抗震。我国作为地震多发国家之一，大多数地区的抗震设防烈度都在 $6^{\circ}$ 以上，建筑结构抗震减灾任务严峻。

结构抗震设计是一门综合性很强的学科，涉及地球物理学、地质学、地震学、结构动力学等，十分复杂。随着结构抗震理论与试验研究成果的不断丰富及国内外大地震经验教训的积累总结，结构抗震方法与措施也处于不断发展完善当中。本书结合《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)，阐述了建筑结构抗震设计的原理与方法，对常见结构的抗震设计方法进行了详细介绍，并给出了具体的设计实例；同时，介绍了隔震与消能减震结构设计，并概述了基于性能抗震设计方法的一般思想。

全书共分为9章，包括：绪论，建筑场地、地基和基础，结构地震反应分析及抗震验算，建筑结构抗震概念设计，混凝土结构房屋抗震设计，多层砌体和底部框架-抗震墙砌体房屋抗震设计，钢结构房屋抗震设计，单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计，建筑结构隔震与消能减震设计。附录列出了我国主要城镇的抗震设防烈度、设计基本地震加速度和设计地震分组。

参加本书编写工作的有：西安建筑科技大学白国良（第一、四、五章）、西安交通大学马建勋（第三、六章）、西安交通大学张玲玲（第二、七章）、西安科技大学张淑云（第八章）、西安建筑科技大学朱丽华（第九章）。全书由白国良教授统稿。书中绘图与例题校对工作由研究生王博、陆文斌、余青、祁星星、郭秀芹等完成，作者在此深表感谢。

希望本书能为读者提供帮助。限于编者水平，书中可能存在疏漏和不妥之处，诚恳欢迎读者批评指正。

编 者

2012年3月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 地震的基本知识 .....	1
1.1.1 地球的构造 .....	1
1.1.2 地震类型及成因 .....	2
1.1.3 地震带 .....	3
1.1.4 常用术语 .....	5
1.2 地震动 .....	6
1.2.1 地震波 .....	6
1.2.2 震级与烈度 .....	7
1.2.3 地震动的量测 .....	11
1.2.4 强地震动特性 .....	13
1.2.5 地震区划 .....	14
1.3 地震震害 .....	14
1.3.1 地表破坏 .....	14
1.3.2 工程结构的破坏 .....	15
1.3.3 次生灾害 .....	16
1.4 建筑结构抗震设防 .....	17
1.4.1 建筑结构抗震设防目标与设计方法 .....	17
1.4.2 建筑物重要性分类与设防标准 .....	19
1.5 结构抗震设计方法的演变 .....	20
1.5.1 基于力的抗震设计方法 .....	20
1.5.2 基于性能的抗震设计方法 .....	22
复习思考题 .....	23
<b>第二章 建筑场地、地基和基础</b> .....	24
2.1 概述 .....	24
2.2 场地 .....	25
2.2.1 场地条件对震害的影响 .....	25
2.2.2 场地选择 .....	26
2.2.3 场地区划 .....	31

2.3	天然地基与基础的抗震验算 .....	31
2.3.1	天然地基及基础的抗震验算的一般规定 .....	31
2.3.2	地基土抗震承载力 .....	32
2.3.3	天然地基的抗震验算 .....	33
2.4	地基土的液化与抗液化措施 .....	34
2.4.1	地基土液化及其危害 .....	34
2.4.2	液化的判别 .....	37
2.4.3	液化地基的评价 .....	39
2.4.4	地基的抗液化措施 .....	40
2.5	桩基抗震验算 .....	42
2.5.1	非液化地基上桩基抗震承载力验算 .....	42
2.5.2	液化地基上桩基抗震承载力验算 .....	43
	复习思考题 .....	44
<b>第三章</b>	<b>结构地震反应分析及抗震验算</b> .....	<b>46</b>
3.1	概述 .....	46
3.2	单自由度体系的水平地震反应分析 .....	47
3.2.1	计算简图及运动方程 .....	47
3.2.2	运动方程的解答 .....	48
3.3	单自由度体系的水平地震作用 .....	50
3.3.1	水平地震作用的基本公式 .....	50
3.3.2	加速度反应谱法 .....	52
3.4	多自由度体系的水平地震反应分析 .....	58
3.4.1	计算简图与运动方程 .....	58
3.4.2	自振频率及振型 .....	59
3.4.3	振型分解法求解多自由度体系的地震反应 .....	68
3.5	多自由度体系的水平地震作用 .....	70
3.5.1	振型分解反应谱法 .....	71
3.5.2	底部剪力法 .....	73
3.6	结构的地震扭转效应 .....	78
3.6.1	简述 .....	78
3.6.2	偏心结构在水平地震作用下的运动方程 .....	79
3.6.3	振型分解反应谱法计算偏心结构的地震作用 .....	81
3.7	结构竖向地震作用 .....	84
3.7.1	简述 .....	84
3.7.2	反应谱法 .....	84

3.7.3 静力法 .....	86
3.8 时程分析法 .....	87
3.8.1 简述 .....	87
3.8.2 结构计算模型 .....	87
3.8.3 结构和构件的恢复力特性 .....	88
3.8.4 运动方程 .....	93
3.8.5 地震波的选择 .....	93
3.8.6 逐步积分法 .....	94
3.8.7 时程分析计算结果的使用原则 .....	96
3.9 结构静力弹塑性分析 .....	96
3.9.1 简述 .....	96
3.9.2 水平加载模式 .....	97
3.9.3 建立荷载-位移曲线 .....	99
3.9.4 结构抗震能力评估 .....	100
3.9.5 推覆分析法技术要点 .....	101
3.10 地基与结构的相互作用 .....	102
3.10.1 简述 .....	102
3.10.2 地基与结构相互作用效应的简化计算 .....	102
3.11 地震作用计算的一般规定 .....	103
3.12 结构抗震验算 .....	105
3.12.1 简述 .....	105
3.12.2 结构抗震承载力验算 .....	105
3.12.3 结构抗震变形验算 .....	107
复习思考题 .....	111
<b>第四章 建筑结构抗震概念设计</b> .....	<b>112</b>
4.1 概述 .....	112
4.2 合理选择建筑场地 .....	112
4.3 建筑形体选择与构件布置 .....	115
4.3.1 房屋的高度及高宽比限制 .....	115
4.3.2 优先选择规则结构 .....	115
4.3.3 防震缝的设置 .....	117
4.4 结构体系与材料的选择 .....	118
4.4.1 结构体系 .....	118
4.4.2 结构材料 .....	119
4.5 确保结构的整体性 .....	120



---

4.6	设置多道抗震防线	121
4.6.1	简述	121
4.6.2	结构体系的多道设防	122
4.6.3	第一道防线的构件选择	122
4.7	提高结构的延性	123
4.7.1	结构的延性	123
4.7.2	提高结构延性的基本原则	123
4.7.3	提高构件延性的措施	124
4.8	减轻房屋自重和非结构构件的处理	125
4.8.1	减轻房屋自重	125
4.8.2	妥善处理非结构构件	125
	复习思考题	126
<b>第五章</b>	<b>混凝土结构房屋抗震设计</b>	<b>128</b>
5.1	概述	128
5.2	混凝土结构房屋震害现象及其分析	128
5.2.1	框架的震害	128
5.2.2	抗震墙的震害	130
5.2.3	填充墙的震害	131
5.2.4	楼梯的震害	131
5.3	混凝土结构房屋抗震设计的一般规定	132
5.3.1	适用最大高度	132
5.3.2	抗震等级的确定	132
5.3.3	结构布置	134
5.3.4	防震缝设置	137
5.4	框架结构的抗震设计	138
5.4.1	框架结构的内力和位移计算	139
5.4.2	框架结构构件的截面抗震设计	151
5.4.3	框架结构的抗震构造措施	158
5.4.4	框架结构的抗震设计算例	164
5.5	抗震墙结构的抗震设计要点	170
5.5.1	抗震墙结构构件的截面抗震设计要点	170
5.5.2	抗震墙结构的抗震构造措施	178
5.6	框架-抗震墙结构的抗震设计要点	183
5.6.1	框架-抗震墙结构构件的截面抗震设计要点	183
5.6.2	框架-抗震墙结构的抗震构造措施	184

复习思考题 .....	185
<b>第六章 多层砌体和底部框架-抗震墙砌体房屋抗震设计</b> .....	186
6.1 概述 .....	186
6.2 多层砌体和底部框架-抗震墙砌体房屋震害现象及其分析 .....	186
6.2.1 多层砌体房屋的震害 .....	186
6.2.2 底部框架-抗震墙房屋的震害 .....	189
6.3 多层砌体和底部框架-砌体房屋抗震设计的一般规定 .....	191
6.3.1 结构布置 .....	191
6.3.2 总高度、层数、层高及高宽比限制 .....	193
6.3.3 房屋抗震横墙间距的限制 .....	195
6.3.4 房屋的局部尺寸限制 .....	195
6.4 多层砌体房屋的抗震计算和构造措施 .....	196
6.4.1 简述 .....	196
6.4.2 多层砌体房屋的抗震计算 .....	197
6.4.3 多层砖砌体房屋的抗震构造措施 .....	206
6.4.4 多层砌块砌体房屋的抗震构造措施 .....	211
6.4.5 多层砌体房屋的抗震设计算例 .....	213
6.5 底部框架-抗震墙房屋的抗震计算和构造措施 .....	222
6.5.1 简述 .....	222
6.5.2 底部框架-抗震墙房屋的抗震计算 .....	222
6.5.3 底部框架-抗震墙房屋的抗震构造措施 .....	225
6.5.4 底部框架-抗震墙房屋的抗震设计算例 .....	229
复习思考题 .....	232
<b>第七章 钢结构房屋抗震设计</b> .....	234
7.1 概述 .....	234
7.2 钢结构房屋震害现象及其分析 .....	235
7.2.1 结构倒塌 .....	235
7.2.2 构件破坏 .....	235
7.2.3 节点破坏 .....	236
7.3 多、高层钢结构房屋抗震设计 .....	238
7.3.1 多、高层钢结构体系 .....	238
7.3.2 多、高层钢结构房屋抗震设计的一般规定 .....	243
7.3.3 多、高层钢结构房屋的抗震计算 .....	247
7.3.4 钢构件的抗震设计与构造措施 .....	250
7.3.5 构件连接的抗震计算与构造措施 .....	258

7.4	单层钢结构厂房抗震设计	262
7.4.1	单层钢结构厂房抗震设计的一般规定	263
7.4.2	单层钢结构厂房的抗震计算	263
7.4.3	单层钢结构厂房的抗震构造措施	266
7.5	多层钢结构厂房抗震设计	269
7.5.1	多层钢结构厂房抗震设计的一般规定	269
7.5.2	多层钢结构厂房的抗震计算	270
7.5.3	多层钢结构厂房的抗震构造措施	271
	复习思考题	271
<b>第八章</b>	<b>单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计</b>	<b>273</b>
8.1	概述	273
8.2	单层钢筋混凝土柱厂房震害现象及其分析	273
8.2.1	屋盖系统	273
8.2.2	排架柱	275
8.2.3	支撑系统	276
8.2.4	墙体	277
8.3	单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计的一般规定	278
8.3.1	结构布置	278
8.3.2	天窗架	279
8.3.3	屋架	280
8.3.4	柱	281
8.3.5	围护结构	281
8.4	单层钢筋混凝土柱厂房横向抗震计算	281
8.4.1	计算简图和重力荷载代表值的计算	282
8.4.2	横向自振周期计算	284
8.4.3	横向自振周期的调整	286
8.4.4	排架的横向水平地震作用计算	286
8.4.5	天窗架的横向水平地震作用计算	287
8.4.6	排架内力分析及组合	288
8.4.7	截面抗震验算	291
8.4.8	厂房横向抗震验算的其他问题	291
8.5	单层钢筋混凝土柱厂房纵向抗震计算	297
8.5.1	修正刚度法	298
8.5.2	突出屋面天窗架纵向抗震计算	306
8.5.3	截面抗震验算	306

---

8.6 单层钢筋混凝土柱厂房抗震构造措施 .....	310
8.6.1 屋盖系统的构造措施 .....	310
8.6.2 柱与柱间支撑的构造措施 .....	313
8.6.3 连接节点的构造措施 .....	317
复习思考题 .....	318
<b>第九章 建筑结构隔震与消能减震设计 .....</b>	<b>319</b>
9.1 概述 .....	319
9.2 隔振结构设计 .....	319
9.2.1 建筑结构隔震原理 .....	319
9.2.2 隔震系统的构成 .....	320
9.2.3 基础隔震设计要点 .....	321
9.2.4 隔震设计简化计算 .....	325
9.2.5 砌体结构的隔震措施 .....	327
9.3 消能减震结构设计 .....	329
9.3.1 建筑结构消能减震原理 .....	329
9.3.2 消能器的类型与性能检验 .....	330
9.3.3 消能减震体系的类型 .....	330
9.3.4 消能减震设计要点 .....	332
复习思考题 .....	334
<b>附录 我国主要城镇的抗震设防烈度、设计基本地震加速度和设计地震         分组 .....</b>	<b>335</b>
<b>主要参考文献 .....</b>	<b>351</b>

# 第一章 绪 论

## 1.1 地震的基本知识

### 1.1.1 地球的构造

地球是一个平均半径约 6400km 的椭圆球体，由三层不同的物质构成。最表面的一层是很薄的地壳，平均厚度为 30~40km；中间很厚的一层是地幔，厚度约为 2900km；最里面的称为地核，其半径约为 3500km [图 1.1 (a)]。

地壳由各种不均匀的岩石组成，除地面的沉积层外，陆地下面的地壳，其上部为花岗岩层，下部为玄武岩层；海洋下面的地壳一般只有玄武岩层。地壳各处厚薄不一，世界上绝大部分地震都发生在薄的地壳内 [图 1.1 (b)]。

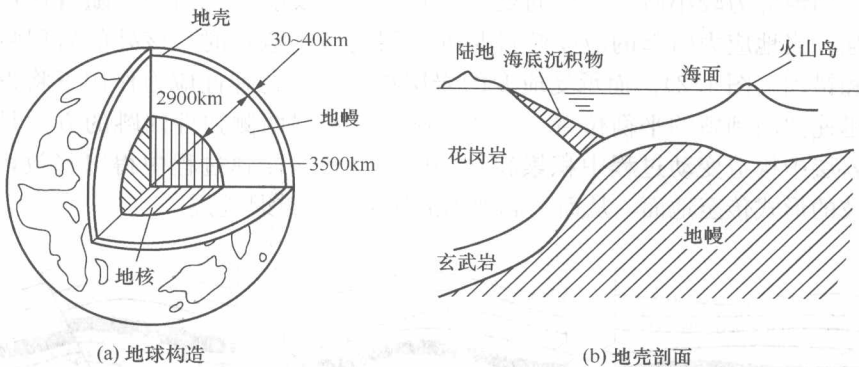


图 1.1 地球构造与地壳剖面

地幔主要由质地坚硬的橄榄岩组成，这种物质具有黏弹性。由于地球内部放射性物质不断释放热量，地球内部的温度也随深度的增加而升高。从地下 20km 到地下 700km，其温度从大约 600℃ 上升到 2000℃，在这一范围内的地幔中存在着一个厚约几百千米的软流层。由于温度分布不均匀，就发生了地幔内部物质的对流。另外，地球内部的压力也是不均衡的，在地幔上部约为 900MPa，地幔中间则达 370 000MPa，地幔内部物质就是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，所观测到的最深的地震发生在地下 700km 左右处，可见地震仅发生在地球的地壳和地幔上部。

地核是地球的核心部分，可分为外核（厚 2100km）和内核，其主要构成物质是镍和铁。由于地核温度高达 4000~5000℃，故推测外核可能处于液态，而内核可能是固态。

### 1.1.2 地震类型及成因

地震按其成因可分为：构造地震、火山地震、陷落地震和诱发地震。其中，构造地震主要是由于地壳运动，挤压地壳岩层使其薄弱部位发生断裂错动而引起；火山地震是由火山爆发引起；陷落地震是由于地表或地下岩层突然发生大规模的陷落和崩塌引起；诱发地震是由水库蓄水或深井注水等引起。在这四种类型的地震中，构造地震分布最广，危害最大，占地震总量的 90% 以上；虽然火山地震造成的破坏性也较大，但在我国不常见；其他两种类型的地震一般震级较小，破坏性也不大。

用来解释构造地震成因的最主要学说是断层说和板块构造说。

断层说认为，组成地壳的岩层时刻处于变动状态，产生的地应力也在不停变化。当地应力较小时，岩层尚处于完整状态，仅能发生褶皱。随着作用力不断增强，当地应力引起的应变超过某处岩层的极限应变时，该处的岩层将产生断裂和错动（图 1.2）。而承受应变的岩层在其自身的弹性应力作用下将发生回跳，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，从而引起地面的振动，这就是地震。

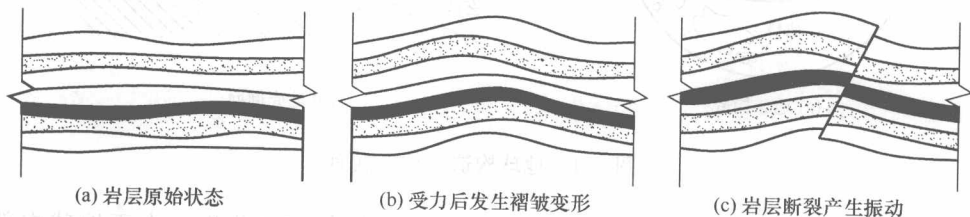


图 1.2 地壳构造变动与地震形成示意图

板块构造学说认为，地球的表面岩层是由六大板块构成，即美洲板块、太平洋板块、澳洲板块、南极板块、欧亚板块和非洲板块（图 1.3）。这些板块在相对缓慢地运动着，在边界处相互挤压和顶撞，从而致使板块边缘附近岩石层脆性断裂而引发地震。地球上大多数地震就发生在这些板块的交界处，从而使地震在空间分布上表现出一定的规律，即形成地震带。

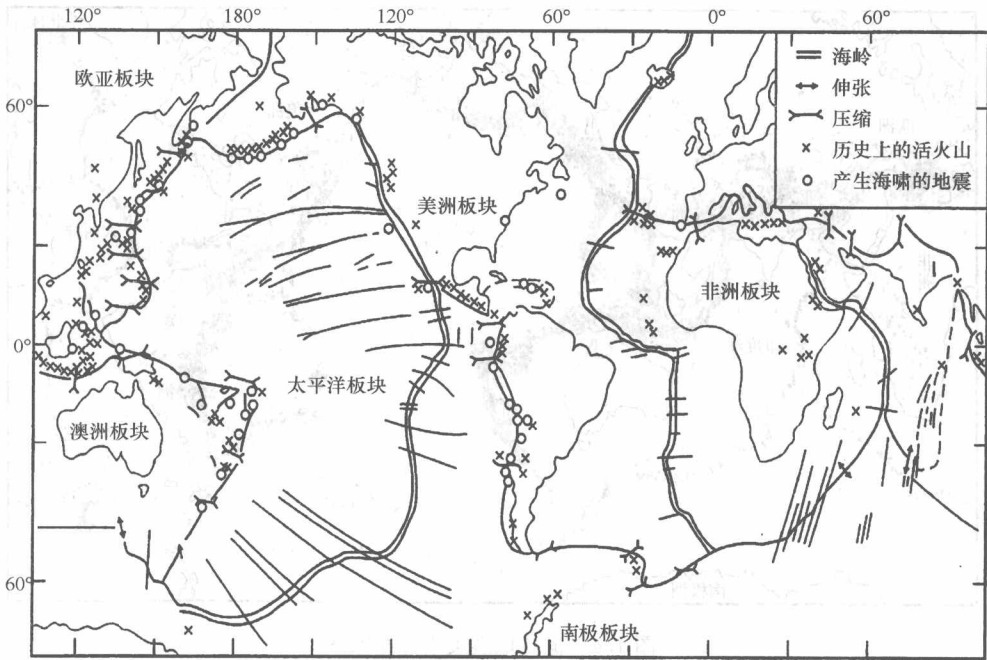


图 1.3 板块分布

### 1.1.3 地震带

#### 1. 世界地震带

20 世纪初，科学家们在遍访各大洲、进行宏观地震资料调查的基础上，编制了世界地震活动图。随后，又根据各地震台的观测数据编出了较精确的世界地震分布图。从这些图中可以清楚地看到，小地震几乎到处都有，大地震则主要发生在某些地区，即地球上的四个主要地震带（图 1.4）。

1) 环太平洋地震带：全球约 80% 的浅源地震和 90% 的中深源地震，以及几乎所有的深源地震都集中在这一地带。它沿南北美洲西海岸、阿留申群岛，转向西南到日本列岛，再经我国台湾省，达菲律宾、新几内亚和新西兰。

2) 欧亚地震带：除分布在环太平洋地震活动带的中深源地震以外，几乎所有其他中深源地震和一些大的浅源地震都发生在这一地震活动带，这一活动带内的震中分布大致与山脉的走向一致。它西起大西洋的亚速岛，经意大利、土耳其、伊朗、印度北部、我国西部和西南地区，过缅甸至印度尼西亚与上述环太平洋地震带相衔接。

3) 沿北冰洋、大西洋和印度洋中主要山脉的狭窄浅震活动带：北冰洋、大

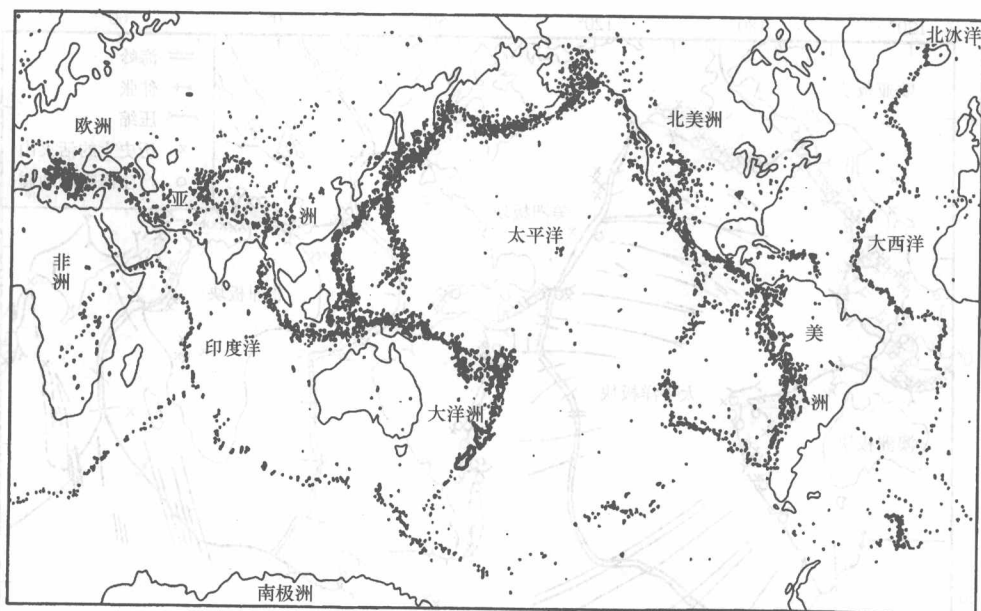


图 1.4 世界地震震中分布略图

西洋地震带是从勒拿河口地震较稀少的地区开始，经过一系列海底山脉和冰岛，然后顺着大西洋底的隆起带延伸。印度洋地震带始于阿拉伯之南，沿海底隆起延伸，以后朝南走向南极。

4) 地震相当活跃的断裂谷：如东非洲和夏威夷群岛等。

其中，前两者为世界地震的主要活动地带。

## 2. 我国地震带

我国东邻环太平洋地震带，南接欧亚地震带，地震分布相当广泛。图 1.5 为我国境内 6 级和 6 级以上地震震中分布及其主要地震带。可以看出，我国的主要地震带有以下两条：

1) 南北地震带：北起贺兰山，向南经六盘山，穿越秦岭沿川西至云南省东北，纵贯南北。地震带宽度各处不一，大致在数十至百余千米，分界线是由一系列规模很大的断裂带和断陷盆地组成，构造相当复杂。

2) 东西地震带：主要的东西构造带主要有两条，北面的一条沿陕西、山西、河北北部向东延伸，直至辽宁北部的千山一带；南面的一条自帕米尔起，经昆仑山、秦岭，直到大别山区。

据此，我国大致可划分成六个地震活动区：①台湾及其附近海域；②喜马拉雅山脉活动区；③南北地震带；④天山地震活动区；⑤华北地震活动区；⑥东



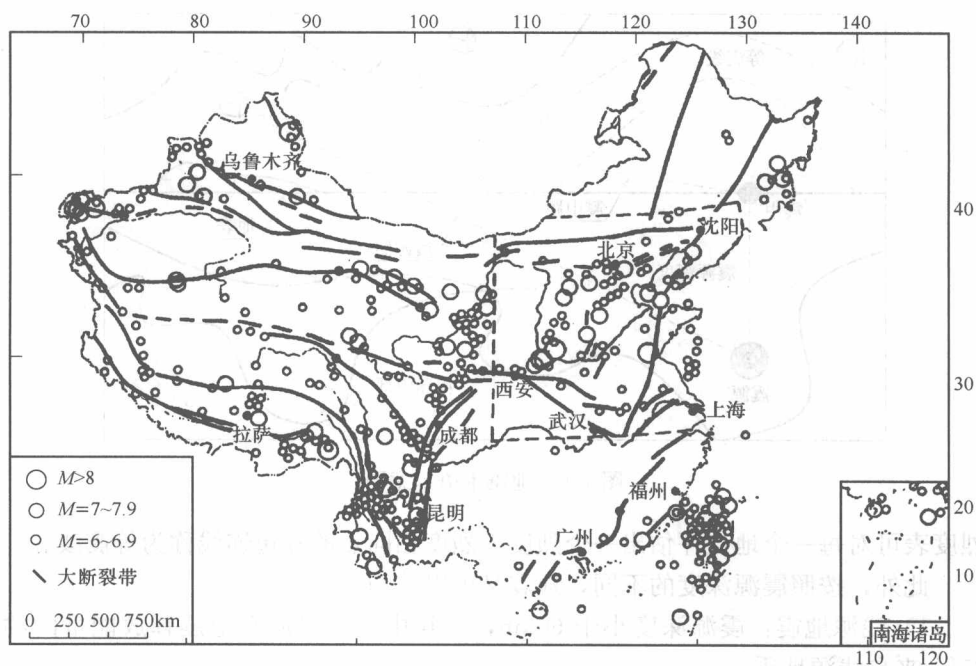


图 1.5 我国境内震级大于或等于 6 的震中分布

南沿海地震活动区。

从历史上的地震情况来看，我国除个别省份（如浙江）外，绝大部分地区都发生过较强烈的破坏性地震，并且有不少地区的现代地震活动还相当严重，如我国台湾省大地震最多，新疆、西藏次之，西南、西北、华北和东南沿海地区也是破坏性地震较多的地区。

#### 1.1.4 常用术语

地震学中的常用术语主要有震源、震中、震源深度、震中距、震源距和等震线等，如图 1.6 所示。

**震源：**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，此处就是震源，它不是一个点，而是有一定深度和范围的。

**震中：**震源正上方的地面位置称为震中。

**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称为震中距。

**震源距：**建筑物到震源之间的距离称为震源距。

**等震线：**一次地震中，在其所涉及的地区内，根据地面破坏情况利用地震