

钱永梅 王若竹 主 编
钟春玲 付秀华 副主编

建筑结构 抗震设计



化学工业出版社

钱永梅 王若竹 主 编 ●
钟春玲 付秀华 副主编 ●
尹新生 主 审 ●

建筑结构 抗震设计



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是按照最新发布的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)(2008 版)及《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223—2008)编写的,注重设计的基本原理和抗震设计规范的应用。书中主要介绍了建筑结构在地震作用下动力反应新的计算方法以及建筑结构抗震设计原理、设计方法及规范相关规定。本书主要内容包括:地震有关基本知识及抗震设计要求、场地与地基的抗震设计、结构作用与结构抗震验算、多高层钢结构抗震设计、多层砌体结构抗震设计、底部框架-抗震墙、多层内框架砖砌房屋抗震设计、单层厂房抗震设计以及隔震、减震与结构控制初步等。

本书适合作为高等学校土木工程专业教材,也可供各类工程结构设计与施工的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构抗震设计/钱永梅,王若竹主编. —北京:化学工业出版社,2009. 8
ISBN 978-7-122-06191-1

I. 建… II. ①钱…②王… III. 建筑结构-抗震设计
IV. TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 110139 号

责任编辑:董琳 邹宁

装帧设计:刘丽华

责任校对:宋玮

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷:北京市振南印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14¼ 字数 381 千字 2009 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

近年来，土木工程界技术人员对建筑结构抗震设计越来越重视。从2002年1月1日开始实施的新版《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)，是在调查总结近年来国内外大地震的经验教训，考虑我国当前的经济条件和已有的工程实践，采纳地震工程的新科研成果的基础上进行修订的。我国2008年5·12汶川大地震发生后，国家组织相关科研技术人员进行了大量的现场震害调查，并对《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)进行了局部修订，颁布了《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)(2008版)，在2001版抗震规范调整的基础上，又相应变更了灾区的设防烈度，并拟增加部分条文的修订，主要包括材料性能按产品标准修改。修订涉及设防分类和建筑方案设计；关于隔震、减震适用范围限制的规定；新增涉及结构构件基本要求、预制装配式楼盖、山区场地、非结构构件、楼梯间、专门的施工要求；修改涉及坡地、单跨框架、土木石民居构造措施以及楼梯参与整体计算等。同时公布了新的《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223—2008)。为了配合新规范和新标准的颁布执行和适应建筑抗震设计思想与方法的不断发展，我们结合多年的建筑抗震设计与工程抗震方面的教学与科研实践，按新规范编写了本书。

本书共分9章，主要内容包括：地震有关基本知识及抗震设计要求、场地与地基的抗震设计、结构作用与结构抗震验算、多高层钢筋混凝土结构抗震设计、多高层钢结构抗震设计、多层砌体结构抗震设计、底部框架-抗震墙、单层厂房抗震设计以及隔震、减震与结构控制初步等。为了便于理解与学习使用，配有相应的例题。本书由钱永梅、王若竹主编，钟春玲、付秀华任副主编，金玉杰、田伟参编，全书由尹新生教授主审。

随着技术的进步和时代的发展，土木工程不断注入新鲜血液，显示出勃勃生机。本书编写时突出了概念设计，突出实用性原则，全面地体现新规范、新规程的要求，并补充国内外最新的信息和最新的科研成果。本书注重逻辑性、条理性、实用性和可读性等，其读者对象是比较广泛的，除可作为高等院校教材使用外，更是土木工程专业人员的参考读物。由于作者水平有限，且时间仓促，本书难免存在疏漏与不足之处，敬请读者批评指正。

编 者
2009年6月

目录

第1章 绪 论

1.1 地震的破坏作用	1
1.2 地球的构造及地震的成因	8
1.3 地震波、震级和烈度	10
1.4 建筑抗震设防分类、设防标准和设防目标	15
1.5 抗震设计基本要求	18

第2章 场地、地基与基础

2.1 场地	22
2.2 天然地基与基础	25
2.3 场地土的液化	27
2.4 桩基的抗震验算	36

第3章 地震作用与结构抗震验算

3.1 概述	38
3.2 单质点弹性体系的水平地震反应分析	38
3.3 单自由度弹性体系的水平地震作用及其反应谱	42
3.4 多质点弹性体系的水平地震反应分析	47
3.5 多质点体系水平地震作用和地震效应	55
3.6 考虑水平地震作用扭转影响的计算	61
3.7 竖向地震作用的计算	62
3.8 结构自振周期和振型的近似计算	65
3.9 地震作用计算的一般规定	75
3.10 建筑结构抗震验算	76

第4章 多高层钢筋混凝土结构抗震设计

4.1 震害及其分析	80
4.2 抗震设计的一般要求	84
4.3 框架结构的抗震设计	88
4.4 抗震墙结构的抗震设计	104
4.5 框架-抗震墙结构的抗震设计	115

第5章 多高层钢结构抗震设计

5.1 震害及其分析	125
------------------	-----

5.2	抗震设计的一般要求	127
5.3	钢结构房屋的抗震计算	132
5.4	钢结构房屋的抗震构造要求	137



第6章 多层砌体结构

6.1	概述	143
6.2	震害及其分析	143
6.3	抗震设计一般规定	145
6.4	多层砌体房屋抗震验算	147
6.5	抗震构造措施	155



第7章 底部框架-抗震墙房屋抗震设计

7.1	震害及其分析	162
7.2	抗震设计一般规定	162
7.3	房屋抗震验算	163
7.4	抗震构造措施	171



第8章 单层厂房抗震设计

8.1	震害及其分析	173
8.2	单层钢筋混凝土柱厂房	175
8.3	单层钢结构厂房	188



第9章 隔震、减震与结构控制初步

9.1	结构抗震设计思想的演化与发展	191
9.2	隔震原理与方法	192
9.3	减震原理与方法	195
9.4	结构主动控制初步	200



附录

附录 A	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	202
附录 B	约束弯矩分布系数 φ_i	213
附录 C	ψ_a 值表	214
附录 D	倒三角形荷载下的 Φ_1 值	215



参考文献

第1章

绪论

地震是一种危及人民生命财产安全、破坏性极大的突发性自然灾害。强烈地震在瞬息之间就可以对地面上的建筑物造成严重破坏。据统计，地球上每年大约发生 500 万次地震，其中造成严重破坏的近 20 次，毁灭性的地震约 2 次。我国是一个多地震的国家，历史上在邢台、唐山、通海、昭通、甘孜、海城、台湾、海原、华县、丽江等地区都发生过比较严重的地震。尤其是 2008 年 5 月 12 日发生的汶川特大地震给人们留下了难以磨灭的记忆。

现代科技的发展，虽能对地震的发生进行预测，但准确地预报何时、何地 will 发生何种强度的地震目前是很困难的。为了尽量减少地震对人类带来的损失，世界各国进行了一系列针对减轻震害的研究，其中工程结构抗震被认为是一项最有效的减轻震害的措施。

1.1 地震的破坏作用

一个世纪以来，世界大地震不但造成了大量的人员伤亡，还使大量建筑遭到毁坏，交通、生产中断，水、火、疾病等次生灾害发生，给人类带来了不可估量的损失。一次大地震可令一座繁荣、美丽的城市在数十秒钟内变成一片废墟（图 1-1）。近百年世界主要大地震情况如表 1-1。



图 1-1 5·12 汶川地震后的北川县城

我国处于两大地震带的中间，东临环太平洋地震带，西处地中海-喜马拉雅地震带，是世界上地震较多的国家之一。我国境内的地震分布也具有分区条带的特征，主要有东北深震带、台湾-闽粤沿海地震带、华北地震区、新疆地震带和川滇藏青地震区等，其中，华北地震区包括郯城-庐江带、燕山带、山西带、渭河平原带、银川带、六盘山带和河北平原带等，如图 1-2 所示。台湾省位于环太平洋地震带上，这些地区是我国地震最多、最强烈的地区。另外，河北、山东、山西、陕西、甘肃、宁夏等省也是地震活动比较强烈的地区。地震发生的地区在地貌上大多表现为盆地，如宁夏盆地（宁夏）、渭河盆地（陕西）、临汾盆地和太原盆地（山西）等。而贵州、广西、江苏、浙江、江西、湖南、湖北等省历史上记载的地震次数较少，也不强烈。

表 1-1 近百年世界主要大地震情况表（7.5 级以上）

时 间	地 点	震 级	死亡人数(约数)	时 间	地 点	震 级	死亡人数(约数)
1906	美国洛杉矶	8.3	3000	1976	危地马拉	7.5	22800
1906	智利	8.6	20000	1976	菲律宾	7.8	8000
1908	意大利	7.5	38000	1978	伊朗	7.7	25000
1915	意大利	7.5	30000	1985	墨西哥	8.1	12000
1920	中国甘肃	8.5	200000	1990	伊朗	7.7	75000
1923	日本东京	8.3	142800	1990	土耳其	7.7	27000
1927	中国	8.3	20000	1990.07	菲律宾吕宋	7.7	1621
1934	印度	8.4	11000	1992.12	印度尼西亚	7.5	2500
1935	印度	7.5	30000	1993.07	日本北海道	7.8	250
1939	智利	8.3	28000	1995.05	俄罗斯库页岛	7.5	2700
1939	土耳其	7.9	33000	1996.02	印度尼西亚	8.0	145
1960	智利	8.9	5000	1999.09	中国台湾集集	7.8	2500
1964	日本新潟	7.5	5100	2001.01	印度	7.9	2000
1970	秘鲁	7.7	66800	2008.05	中国汶川	8.0	68000
1976	中国唐山	7.6	240000				

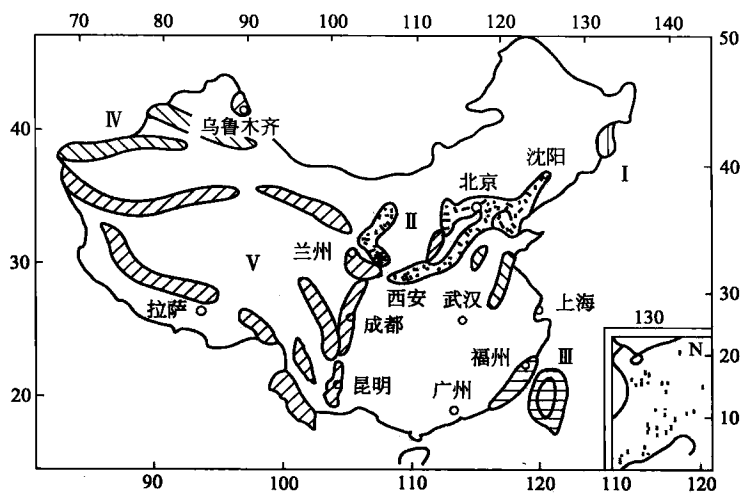


图 1-2 我国主要地震带

在强烈地震发生时，地面受到地震波的冲击产生的强烈运动、断层运动及地壳变形等，出

现各种破坏现象。

1.1.1 地表破坏现象

(1) 地面的断裂错动和地裂缝

强烈地震时，地下断层面直达地表，地貌随之改变。显著的垂直位移造成断崖峭壁；过大的水平位移产生地形、地物的错位；挤压、扭曲造成地面的波状起伏和水平错动。

由于这些断裂错位，使道路中断、铁路扭曲（图 1-3）、桥面断裂、房屋破坏，严重的可使河流改道，水坝受损（图 1-4），直接造成灾害。



图 1-3 地震中铁路扭曲

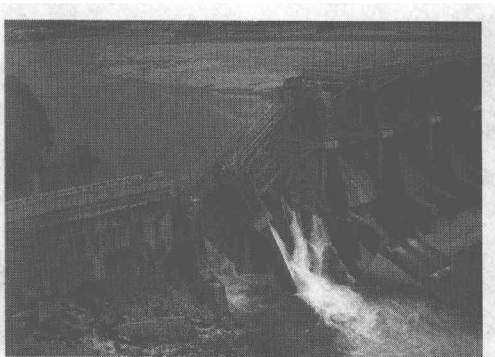


图 1-4 水坝局部垮塌

地裂缝是地震时最常见的现象，主要有两种类型。一种是强烈地震时由于地下断层错动延伸至地表而形成的裂缝，称为构造地裂缝。这种裂缝与地下断裂带的走向一致，其形成与断裂带的受力性质有关，一般规模较大，形状比较规则，通常呈带状出现（由数条地裂缝组成），裂缝带长度可达几千米甚至几万米，裂缝带宽度可达几米甚至几十米。另一种地裂缝是在古河道、湖河岸边、陡坡等土质松软地方产生的地表交错裂缝，其大小形状不一，规模也较前一种小。地裂缝穿过道路、结构时通常会使它们遭受破坏（图 1-5）。



图 1-5 丽江地震中柏油路面震裂

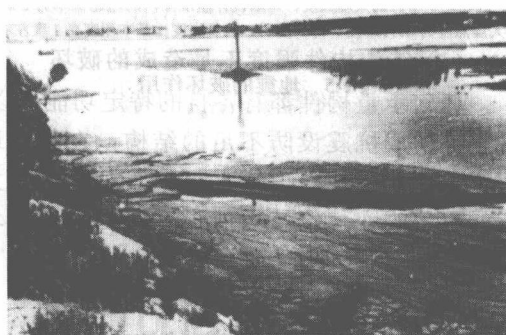


图 1-6 唐山地震中地面喷砂冒水

(2) 喷砂、冒水

地震时出现喷砂冒水现象非常少见。在地下水位较高、砂层埋深较浅的平原地区，地震时地震波的强烈振动使地下水压力急剧增高，地下水经地裂缝或土质较软的地方冒出地面，当地表土层为砂层或粉土层时，则夹带着砂土或粉土一起喷出地表，形成喷砂冒水现象（图 1-6）。

喷砂冒水现象一般要持续很长时间，严重的地方可造成房屋不均匀下沉或上部结构开裂。

(3) 地面下沉（震陷）

地震造成的局部地面下陷的事件是多种多样的（图 1-7）。在石灰岩分布地区，地下溶洞十分发育，在矿区由于人类的生产活动也会存在空洞，在地震时都可能被震塌，地面的土石层也随之下沉，造成大面积陷落；在喷砂冒水严重的地方，也使地下出现洞穴。造成土地下沉，形成洼地。土地陷落的地方，当湖、海、河或地下水流入时，即可成灾。唐山地震时，天津市郊一村庄沉陷 2.6m，池水流入，水深可行船。



图 1-7 日本神户地震中操场地面沉陷



图 1-8 丽江地震时山体滑坡

(4) 河岸、陡坡滑坡

在河岸、陡坡等处，强烈的地震作用往往造成土体失稳，从而形成塌方和滑坡。有时会造成破坏道路、掩埋村庄、堵河成湖、房屋倒塌等严重震害（图 1-8）。

1.1.2 建筑物的破坏

在强烈地震作用下，各类建筑物发生严重破坏，按其破坏的形态及直接原因，可分为几类。

(1) 结构构件强度不足造成的破坏

任何承重构件都有各自的特定功能，以适用于承受一定的外力作用。对于设计时没有考虑抗震设防或抗震设防不足的结构，在强烈地震作用下，不仅构件内力增大很多，而且其受力性质往往也将改变，致使构件强度不足而被破坏（图 1-9）。

(2) 结构丧失整体性而造成的破坏

房屋建筑都是由许多构件组成的，在强烈地震作用下，构件连接不牢，支撑长度不够和支撑失效等都会使结构丧失整体性而破坏（图 1-10、图 1-11）。

(3) 地基失效

当建筑物地基内含饱和砂层、粉土层时，在



图 1-9 构件强度不足使局部层破坏



图 1-10 汶川地震中房屋倒塌



图 1-11 日本地震中房屋整体倒塌

强烈地面运动影响下，土中孔隙水压力急剧增高，致使地基土发生液化，地基承载力下降，甚至完全丧失，从而导致上部结构破坏（图 1-12）。

1.1.3 设施的破坏

地震还会造成公路、铁路、桥梁、水坝、构筑物、地下结构、码头及河岸堤防等设施的破坏（图 1-13～图 1-15）。



图 1-12 由于地基失效北川中学五层教学楼仅剩三层

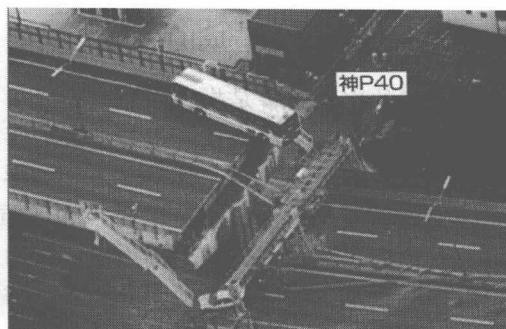


图 1-13 高速路路面震断



图 1-14 桥面坠毁



图 1-15 地下柱破坏导致路面下陷

城市街道和交通公路震害特征基本相同，常见的破坏现象有：路基路面开裂、断裂、隆起或凹陷、道路喷水冒砂、道路两旁滑坡或堆积物阻塞或冲毁路面等。

铁路分为地面铁路和地下铁路两部分。震后，由于轨道、路基、桥梁等工程遭到不同程度的破坏，同时因房屋倒塌砸坏通信、电力、供水、机务等辅助设施和设备，常常使铁路瘫痪。轨道震害表现在平面和纵断面上的严重变形上，呈“蛇曲”或“波浪形”（图 1-3）。路基震害主要是下沉、开裂、边坡塌落和塌陷等。

地下铁路破坏一般较轻微，相对安全。如 1995 年墨西哥大地震中，地表破坏十分严重，而地下铁路路基基本完好。1989 年美国洛马普里埃塔 7.1 级地震，担负着旧金山和奥克兰之间的重要交通运输任务的地铁没有遭到破坏，只是由于地震后电力暂时中断和震害检查而无法立刻使用。

桥梁是铁路和公路交通的关键，桥梁（特别是重要交通干线上的桥梁）在地震时遭受破坏，将严重影响交通运输，甚至导致交通瘫痪。桥梁的震害现象主要包括：上部结构坠毁、支承连接件破坏、桥台桥墩破坏、基础破坏等。

另外，构筑物（如烟囱、水塔等）、地下结构、码头及河岸堤防等也会在地震中受到不同程度的破坏。在中等烈度下，烟囱震害主要集中发生在中、上部，且破坏的部位随烈度的增加而下移；水塔主要由水柜、支撑结构及基础组成，震害主要发生在支撑上，很少有水柜和基础发生破坏的震害实例；地下结构，尤其是浅埋的地下结构震害的主要形式包括地层的破坏导致地下结构受剪断裂或严重破坏，地基土液化引起地下结构破坏、下沉或上浮，地下结构接头部位产生裂缝等；地震中码头及河岸堤防会出现崩塌、开裂、陷落甚至全部坍塌或滑落到海水中，破坏导致水运系统的瘫痪。

1.1.4 次生灾害造成的破坏

地震的次生灾害是指在强烈地震以后，以地震直接灾害为导因引起的一系列其他灾害以及虽与震动破坏无直接联系，但与地震的存在有关的灾害，如防震棚火灾，因避震移居室外造成冻害等。地震次生灾害的种类很多，可形成灾害链（图 1-16），表现为持续发生的特点。不同地区发生地震，发生灾害链的重点也不同。在城市及人口稠密、经济发达地区，以建筑物倒塌、人员伤亡、火灾等灾害链为主。在山区以泥石流、火灾、水灾等次生灾害链突出。当地震发生在沿海及海底时，必须十分注意海啸灾害的影响。

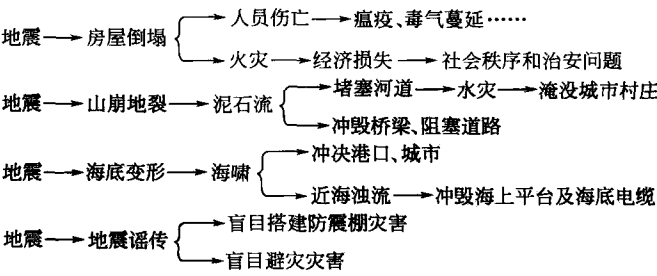


图 1-16 地震灾害链

(1) 火灾

在多种次生灾害中，火灾是最常见、造成损失最大的次生灾害。在城市地震灾害中，以火灾为首的次生灾害有时并不亚于直接灾害造成的损失（图 1-17），美国旧金山地震、日本关东地震和智利大地震等都出现城市地震次生灾害的损失超过直接灾害的震例。1906 年旧金山发生 8.3 级地震，全市有 50 多处起火，由于自来水管和消防站被震坏，水源断绝，大火连烧三

昼夜, 约 10km^2 的城区被烧毁, 火灾造成的损失高出直接破坏损失的 3 倍。1923 年日本关东发生 8.2 级地震, 距震中 60km 的横滨市有 1/5 的房屋倒塌, 208 处几乎同时起火, 因为消防设备和水管被破坏, 无法灭火, 城市几乎全部烧光; 距震中 90km 的东京, 房屋被震塌近 13 万幢, 损坏 12.6 万幢。由于震后未及时切断电源、关闭煤气, 全市有 200 多处起火, 又因水管破坏、水源断绝、街道狭窄、道路堵塞等, 无法及时灭火, 全市大火烧毁房屋 44.7 万幢。据统计, 在死亡的 10 多万人中, 90% 以上是被烧死的, 在一处空地上聚集了 4 万多人, 就有 3.8 万人在四面大火的包围中无路可走, 拥挤枕藉而死。在我国, 从邢台地震到唐山地震, 也都有火灾发生, 火灾中很突出的是防震棚火灾, 海城地震时次生火灾仅 60 起, 防震棚火灾有 3142 起, 烧死 424 人, 烧伤 651 人, 唐山地震时, 天津发生火灾 36 起, 而防震棚火灾有 452 起, 烧死 52 人, 烧伤 56 人, 造成经济损失上百万元。



图 1-17 地震引发大火

(2) 地震滑坡和泥石流灾害

在山区, 地震时一般都伴有不同程度的坍塌、滑坡、泥石流灾害 (图 1-18、图 1-19)。1970 年秘鲁 7.7 级地震时, 泥石流以 $80\sim 90\text{m/s}$ 的速度, 流动了 160km, 5000 万立方米的泥土石块使 1.8 万人葬身其中, 是世界上最大的地震泥石流灾害。滑坡、泥石流进入江河会堵塞河道, 造成地震水灾。1933 年四川迭溪发生 7.5 级地震, 使千年古城迭溪被地震滑坡毁灭, 附近岷江两岸山体崩塌滑坡堆积成三座高达 100m 左右的天然石坝, 将岷江截断, 堵塞成 4 个堰塞湖, 震后 45 天, 坝体决口, 酿成下游空前的大水灾, 洪水纵横泛滥近千公里, 淹没人口 2 万以上, 冲毁农田约 3000 多平方千米。而且地震滑坡、泥石流灾害, 也如地震余震活动那样, 持续时间长, 反复性大, 可从地震开始一直延续到次年乃至数年。

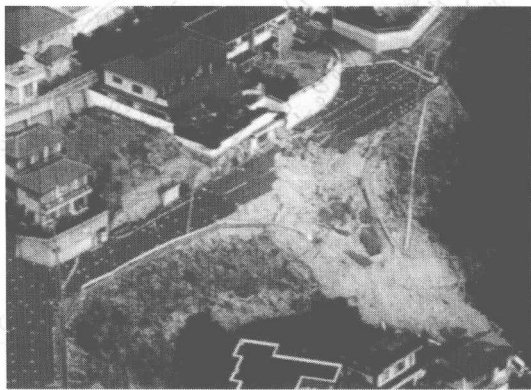


图 1-18 山体滑坡

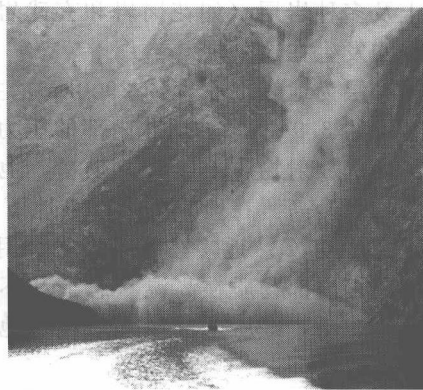


图 1-19 汶川地震山体滑坡形成堰塞湖

(3) 地震海啸

地震海啸灾害是沿海地区极为严重的地震次生灾害。1960 年 5 月智利 8.9 级地震引起世界著名的海啸, 浪高 6m, 浪头高达 30m, 席卷了沿岸的码头、仓库及其他建筑。海浪以 $600\sim 700\text{km/h}$ 的速度横渡太平洋, 5h 后袭击夏威夷群岛, 将护岸的重约 10t 的巨大石块抛到百米以外, 扫荡了沿岸的各类建筑物。又过 6h 后, 抵达远离智利 1.7 万千米的日本海岸, 浪高仍

有 3~4m，将 1000 多所住宅冲走，将一艘巨大的船只推上陆地 40~50m，压在民房之上。海啸

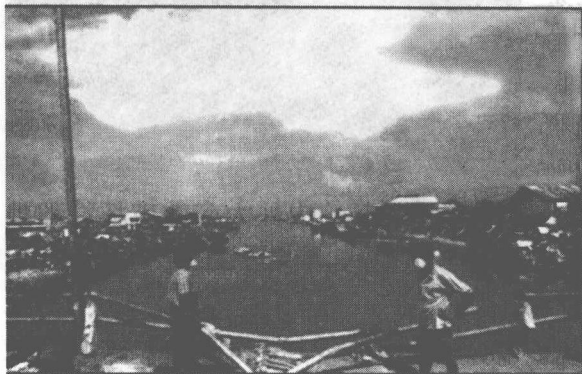


图 1-20 印度洋海啸

波的波高大，波长更长，在广阔的洋面上，不会造成船只的事故，但它临近海岸时，巨浪骤然形成“水墙”，汹涌地冲向海岸，可使堤岸溃决，海水入侵，造成沿海地区的破坏，可使海上建筑物被摧毁，造成重大的损失。1998 年 7 月西南太平洋发生两次 7.0 级以上地震，引发了浪高 10m 的海啸，卷了巴布亚新几内亚北部沿海的 7 个村庄，约有 3000 人遇难，是西南太平洋 20 世纪最惨重的一次海啸灾难。2004 年 12 月 26 日，印度尼西亚苏门答腊附近海域发生强烈地震（中国地震台网测定震级为里

氏 8.7 级，美国地震监网测定震级为里氏 9 级），并引发海啸（图 1-20），影响到印度尼西亚、泰国、缅甸、马来西亚、孟加拉国、印度、斯里兰卡、马尔代夫、索马里、塞舍尔、肯尼亚、东南亚、南亚和东非国家，造成重大人员伤亡和财产损失。这次灾难造成 11 个国家 17.8 万人死亡，另有 5 万人至今下落不明。

1.2 地球的构造及地震的成因

1.2.1 地球的构造

地球是一个椭圆球体，平均半径约 6400km，它主要由三层不同的物质构成（图 1-21）。

第一层为地壳，厚度不均，约 5~70km，主要由海水、风化土及多种岩层（如花岗岩和玄武岩）组成。绝大多数的地震均发生在这一层。

第二层为地幔，厚度约 2900km，主要由橄榄岩组成，相对密度约 3.9~5.1。地球内部的压力随深度增加而增大压力，内部放射物质不断释放热量，地球内部的温度也随深度增加而升高。在地幔的上部（地下 700km 深处）的温度已达到 2000℃。地幔在高温高压作用下处于一种软流塑状态。地幔内部物质在高温状态下和不均衡压力作用下产生缓慢的运动，即所谓的地幔对流。地幔对流是地壳运动的主要根源。

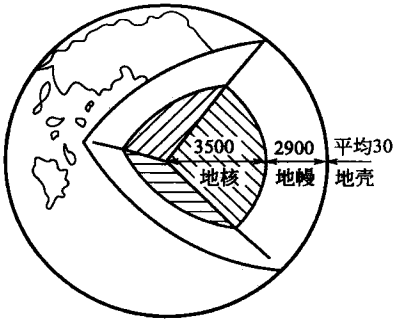


图 1-21 地球的构造（单位：km）

第三层为地核，厚约 3500km，是地球的核心部分，其主要物质为铁和镍。地核又分为外核和内核，外核厚约 2100km，据推测为液态，内核则可能为固态。

1.2.2 地震类型及成因

地震主要有构造地震、火山地震、陷落地震以及诱发地震。构造地震发生频率高（占地震发生总数约 90%）、影响面广、破坏性大，是工程抗震的主要研究对象。

构造地震是由于地壳构造运动使深部岩石的应变超过允许值，岩层发生断裂、错动而引起的。关于构造地震的成因有多种假说，主要是断层假说和板块构造假说。

(1) 断层假说

由地球的构造可以看出，地壳如同浮在水面上的筏板。在地幔对流等因素产生的巨大能量作用下，使地壳和地幔上部的岩石层发生皱褶变形，当积聚的地应力超过岩石的极限强度时，岩石层便发生脆性断裂，猛烈回弹错动，从而引起振动，以波的形式向地面传播，形成地震（图 1-22）。

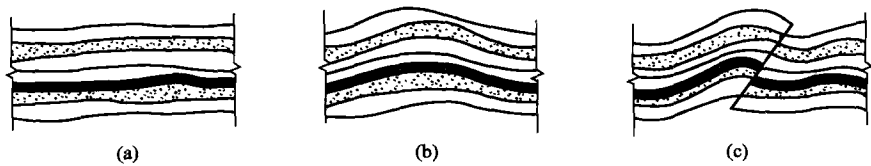


图 1-22 岩层的断裂

(2) 板块构造假说

板块构造学说认为，地球的表面岩层是由六大板块构成（图 1-23、图 1-24），即美洲板块、非洲板块、欧亚板块、印澳板块、太平洋板块和南极洲板块。这些板块在相对运动着，在它们的边界处产生挤压、拉伸和剪切，甚至有些板块呈现插入另一板块之下欲使其翘起的趋势。地球上大多数地震就发生在这些板块的交界之处。

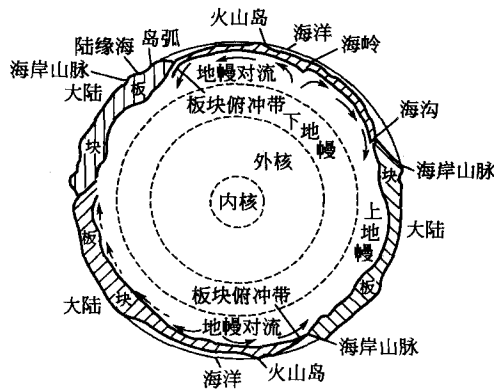


图 1-23 地球剖面图

1.2.3 地震常用术语

地壳深处发生岩层断裂、错动，产生剧烈振动的地方称为震源。震源至地面的垂直距离称为震源深度。震源正上方的地面位置称为震中。地面上某点至震源的距离称为震源距。地面某点至震中的距离称为震中距（图 1-25）。

一般把震源深度<60km 的地震称为浅源地震；60~300km 的称为中源地震；大于 300km 的称为深源地震。我国发生的绝大部分地震属浅源地震；一般深度为 5~40km。例如 1976 年 7 月 28 日的唐山大地震，震源深度为 11km；1999 年 9 月 21 日的台湾大地震，震源深度仅为 1.1km；2008 年 5 月 12 日的汶川特大地震，震源深度为 14km。我国深源地震分布十分有限，仅在个别地区发生过深源地震，其深度一般为 400~600km。由于深源地震所释放出的能量在

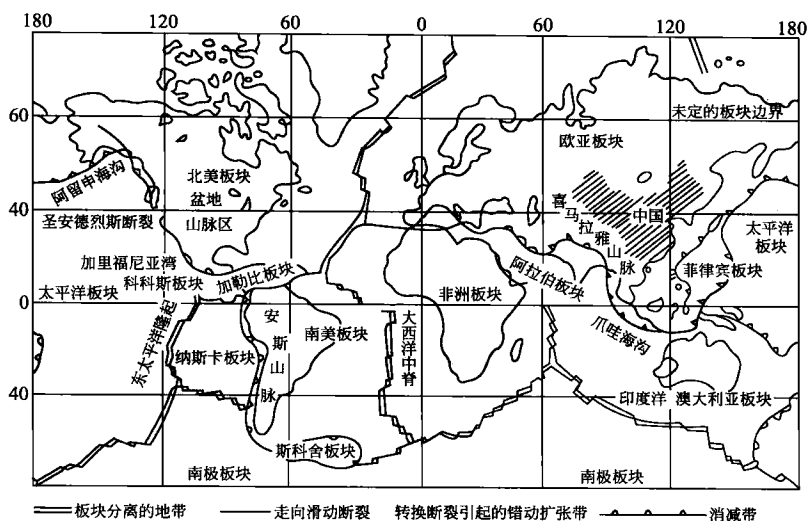


图 1-24 板块分布图

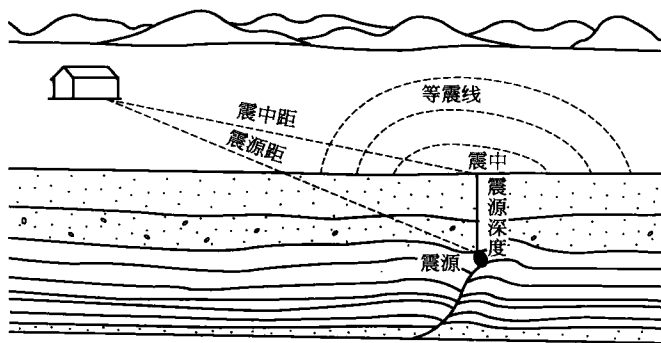


图 1-25 地震术语示意图

长距离传播中大部分损失掉，所以对地面上的建筑物影响很小。

1.3 地震波、震级和烈度

1.3.1 地震波

当震源岩层发生断裂、错动时，岩层所积累的变形能突然释放，它以波的形式从震源向四周传播，这种波就称为地震波。地震波按其在地壳传播的位置不同，分为体波和面波。

(1) 体波

体波是在地球内部传播的地震波。体波又分为纵波和横波。

纵波是由震源向外传播的拉压波或疏密波，又称 P 波。它使得介质质点振动向与波的传播方向一致。这种波周期短，振幅小、速度快，引起地面垂直方向振动（图 1-26）。在地壳内它的速度一般为 200~1400m/s。从物理学可知，纵波的波速可按下式计算：

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

式中, E 为介质的弹性模量; μ 为介质的泊松比; ρ 为介质的密度。

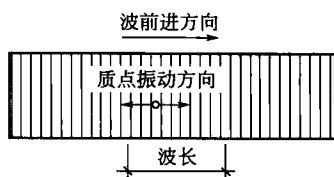


图 1-26 纵波的振动形式

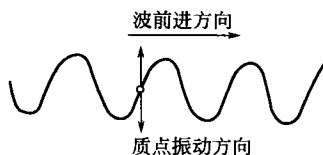


图 1-27 横波的振动形式

横波是由震源向四周传播的剪切波或等容波, 又称 S 波。它使得介质质点的振动方向与波的传播方向垂直。这种波周期长, 振幅大, 速度慢, 引起地面水平方向振动 (图 1-27)。在地壳内它的速度一般为 $100 \sim 800 \text{ m/s}$ 。从物理学可知, 横波的波速可按式计算:

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

式中, G 为介质的剪切模量。

当取 $\mu = 1/4$ 时, 由上面两式可知: $v_p = \sqrt{3}v_s$ 。可见, P 波比 S 波速度快。

(2) 面波

面波是体波从基岩传播到上层土时, 经分层地质界面的多次反射和折射, 在地表面形成一种次生波。面波又分为瑞利波 (R 波) 和洛夫波 (L 波)。

瑞利波 (R 波) 传播时, 质点在波的传播方向和自由面 (即地面) 法线所组成的平面内作椭圆运动 (图 1-28); 而与该平面垂直的水平方向 (y 方向) 没有振动, 在地面上呈滚动形式。

洛夫波 (L 波) 传播时, 质点只在与传播方向垂直的水平方向振动 (图 1-29), 在地面上呈蛇形运动。

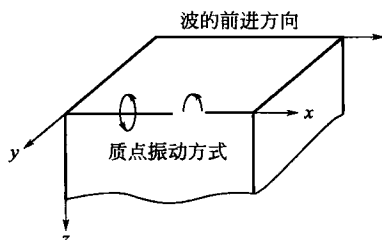


图 1-28 R 波的振动形式

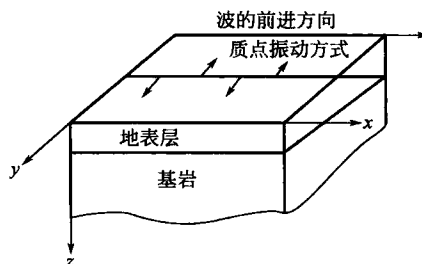


图 1-29 L 波的振动形式

面波周期长、振幅大; 速度为剪切波速的 0.9。面波只能在地面附近传播, 使建筑物既竖向振动又水平摇晃; 面波衰减慢, 能传播到很远的地方; 面波的波速比体波低, 且具有随着地面深度增加而急剧减小的趋势。

纵波使建筑物上下颠簸, 横波使建筑物产生水平方向摇晃, 面波则使建筑物既产生竖向颠簸又产生水平方向摇晃。横波和面波都到达时建筑物振动最为剧烈。但面波的能量比体波的大, 所以造成建筑物和地表的破坏主要以面波为主。

总之, 从地震波的传播速度看: 纵波最大, 横波次之, 面波最小。因此从地震记录图 (图 1-30) 中可以看出, 纵波首先到达, 横波次之, 面波最后到达。

根据地震波曲线, 利用 P 波和 S 波到达测量仪位置的时间差 T 可以得到震源距 R 。

由于

$$T = \frac{R}{v_p} - \frac{R}{v_s} = \frac{R}{\frac{v_p v_s}{v_p - v_s}} = \frac{R}{v} \quad (1-3)$$