

■ 高等学校建筑工程专业系列教材

建筑结构抗震

张玉敏	葛 楠	韩建强	主编
陈海彬	初建宇	尤志国	副主编
苏幼坡	主审		



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑结构抗震 / 张玉敏, 葛楠, 韩建强主编. - 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.6
(高等学校建筑工程专业系列教材)

ISBN 978-7-112-14488-4

I. ①建… II. ①张… ②葛… ③韩… 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 153155 号

本书是按照高等院校建筑工程专业的《建筑结构抗震》课程教学大纲要求, 并依据国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 及相关参考文献编写, 全书共分 9 章, 主要内容为: 第 1 章 地震基础知识与建筑抗震设防; 第 2 章 场地、地基与基础; 第 3 章 结构地震反应分析与抗震验算; 第 4 章 多层及高层钢筋混凝土房屋抗震设计; 第 5 章 多层砌体结构房屋的抗震设计; 第 6 章 单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计; 第 7 章 多高层建筑钢结构抗震设计; 第 8 章 隔震与消能减震及非结构构件抗震设计; 第 9 章 建筑抗震性能化设计等。

本书可作为高等院校建筑工程及相关专业的教材, 也可供建筑工程设计及施工技术人员参考使用。

* * *

责任编辑: 杨 杰

责任设计: 张 虹

责任校对: 张 颖 赵 颖

高等学校建筑工程专业系列教材

建筑结构抗震

张玉敏 葛楠 韩建强 主 编

陈海彬 初建宇 尤志国 副主编

苏幼坡 主 审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

文道思发展有限责任公司制版

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16³/₄ 字数: 403 千字

2012 年 6 月第一版 2012 年 6 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-14488-4
(22564)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本书是根据教育部对建筑工程专业的培养要求,结合作者多年的教学实践经验,参考中华人民共和国国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)及相关参考文献编写,内容包括抗震概念设计、场地、地基和基础、各类工业与民用建筑的抗震设计的理论和方法,以及非结构抗震、隔震与消能减震,建筑性能化设计等。

本书简明扼要、讲求实用,既重视基本概念的阐述,又强调抗震理论的应用。本书分为9章,前3章为基本理论部分,后6章为专题部分。考虑到钢结构应用日益广泛,本书增加了钢结构抗震的章节,还讨论了隔震与消能减震和非结构抗震等前沿性的课题,并将建筑性能化设计单独作为一章讲述。

本书由苏幼坡教授主审,张玉敏教授、葛楠副教授、韩建强副教授担任主编,陈海彬副教授、初建宇副教授、尤志国副教授担任副主编。书中第1、2、8章由张玉敏编写;第3章由葛楠编写;第4、5、6章由韩建强编写;第7章由陈海彬编写;第9章由初建宇、尤志国编写。

在本书编写过程中,参考了大量国内外近年来出版的建筑结构抗震设计方面的教材、规范和手册等文献,在此对相关作者表示感谢。

因编写作者水平有限,时间仓促,对新规范的深入理解和使用经验等方面多有欠缺,书中难免有遗漏和不足之处,热切希望广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 地震基础知识与建筑抗震设防	1
1.1 地震震害的启示	1
1.2 地震与地震动	2
1.2.1 地球的构造	2
1.2.2 地震类型与成因	2
1.2.3 地震波	4
1.2.4 地震强度	6
1.2.5 常用术语	10
1.3 地震活动与地震分布	11
1.3.1 世界地震活动性	11
1.3.2 我国地震活动	12
1.3.3 我国严重的地震灾害	12
1.4 地震的破坏作用	14
1.4.1 地表的破坏现象	14
1.4.2 建筑物的破坏	14
1.4.3 次生灾害	15
1.5 建筑结构的抗震设防	16
1.5.1 抗震设防依据	16
1.5.2 建筑抗震设防要求	18
1.5.3 建筑抗震设防分类及设防标准	20
1.6 建筑结构抗震概念设计	21
1.6.1 场地、地基和基础的要求	21
1.6.2 建筑结构的规则性	22
1.6.3 抗震结构体系	23
1.6.4 结构构件	23
1.6.5 非结构构件	24
思考题	24

第2章 场地、地基与基础	25
2.1 概述	25
2.2 场地分类	26
2.2.1 场地条件对震害的影响	26
2.2.2 覆盖层厚度	27
2.2.3 场地土类型	27
2.2.4 场地类别划分	28
2.3 天然地基与基础	29
2.3.1 地基抗震设计原则	29
2.3.2 地基土抗震承载力	29
2.3.3 地基抗震验算	30
2.4 液化土地基	30
2.4.1 地基土液化及其影响因素	30
2.4.2 液化的判别	31
2.4.3 液化地基的评价	33
2.4.4 液化地基的抗震措施	34
2.5 桩基的抗震验算	35
2.5.1 非液化土中桩基抗震验算	35
2.5.2 液化土中桩基抗震验算	36
思考题	37
第3章 结构地震反应分析与抗震验算	38
3.1 概述	38
3.2 单自由度弹性体系的地震反应分析	38
3.2.1 计算简图	38
3.2.2 运动方程	38
3.2.3 自由振动	40
3.2.4 强迫振动	42
3.3 单自由度弹性体系的水平地震作用及其反应谱	44
3.3.1 水平地震作用的基本公式	44
3.3.2 地震反应谱	44
3.3.3 标准反应谱	46
3.3.4 设计反应谱	47
3.4 多自由度弹性体系的地震反应分析的振型分解法	49
3.4.1 计算简图	49
3.4.2 运动方程	50
3.4.3 自由振动	52
3.4.4 振型分解法	66
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	70
3.5.2 底部剪力法	72

3.6	结构的地震扭转效应	77
3.6.1	刚心与质心	77
3.6.2	单层偏心结构的振动	78
3.6.3	多层偏心结构的振动	81
3.6.4	偏心结构的地震作用	83
3.7	地基与结构的相互作用	87
3.7.1	地基与结构的相互作用对结构地震反应的影响	87
3.7.2	考虑地基结构相互作用的抗震设计	88
3.8	竖向地震作用	88
3.8.1	高耸结构和高层建筑	88
3.8.2	屋盖结构	90
3.8.3	其他结构	90
3.9	结构地震反应的时程分析法	90
3.9.1	概述	90
3.9.2	恢复力特性曲线	91
3.9.3	结构的计算模型	93
3.9.4	地震波的选用	97
3.9.5	地震反应的数值分析法	98
3.10	建筑结构抗震验算	101
3.10.1	结构抗震承载力验算	101
3.10.2	结构的抗震变形验算	103
	思考题	107
第4章	多层及高层钢筋混凝土房屋抗震设计	108
4.1	概述	108
4.2	抗震设计的一般要求	110
4.2.1	结构体系选择	110
4.2.2	结构布置	111
4.2.3	抗震等级	115
4.3	框架内力与位移计算	116
4.3.1	水平地震作用计算	118
4.3.2	水平地震作用下框架内力的计算	118
4.3.3	竖向荷载作用下框架内力计算	118
4.3.4	竖向荷载下的梁端弯矩调幅	119
4.3.5	竖向活荷载的最不利布置	119
4.3.6	内力组合	119
4.3.7	框架结构位移验算	121
4.4	钢筋混凝土框架结构构件设计	122
4.4.1	框架梁截面设计	122
4.4.2	框架柱截面设计	126
4.4.3	框架节点抗震设计	131

4.5	抗震墙结构的基本抗震构造措施	135
4.5.1	抗震墙的厚度及墙肢长度	135
4.5.2	抗震墙的分布钢筋	135
4.5.3	轴压比限值	136
4.5.4	边缘构件	136
4.5.5	连梁	138
4.6	框架—抗震墙结构抗震构造措施	138
4.7	多层框架结构抗震设计	139
4.7.1	工程概况	139
4.7.2	设计依据	139
4.7.3	截面尺寸初步估计	140
4.7.4	荷载计算	141
4.7.5	梁、柱刚度计算	143
4.7.6	水平地震作用计算及侧移验算	145
4.7.7	内力计算	146
4.7.8	荷载组合及调整	146
4.7.9	框架梁配筋计算	150
4.7.10	框架柱配筋计算	151
	思考题	154
第5章	多层砌体结构房屋的抗震设计	155
5.1	概述	155
5.2	震害及其分析	155
5.2.1	墙体的破坏	156
5.2.2	墙体转角处的破坏	156
5.2.3	楼梯间的破坏	156
5.2.4	内外墙连接处的破坏	156
5.2.5	屋盖的破坏	156
5.2.6	突出屋面的屋顶间等附属结构的破坏	156
5.3	结构方案与结构布置	156
5.3.1	结构方案与结构布置	156
5.3.2	房屋总高度和层数限值	156
5.3.3	房屋最大高宽比	157
5.3.4	房屋抗震横墙最大间距	158
5.3.5	房屋局部尺寸	158
5.4	多层砌体房屋抗震计算	158
5.4.1	计算简图	159
5.4.2	地震作用	159
5.4.3	楼层地震剪力在墙体中的分配	160
5.4.4	墙体抗震承载力验算	166
5.5	多层砌体结构房屋的抗震构造措施	167

5.5.1	多层砖房构造措施	168
5.5.2	多层砌块结构房屋的抗震构造措施	171
思考题		172
第6章	单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计	173
6.1	震害及分析	173
6.1.1	屋盖系统	173
6.1.2	柱	175
6.1.3	山墙和围护墙	176
6.1.4	披屋的震害	176
6.2	抗震设计基本要求	177
6.3	钢筋混凝土柱厂房抗震计算	179
6.3.1	不作内力分析和抗震验算的范围	179
6.3.2	单层厂房空间结构分析简介	179
6.3.3	横向抗震计算	180
6.3.4	纵向计算	188
6.3.5	截面抗震验算	190
6.4	抗震构造措施	193
6.4.1	屋盖系统的抗震构造	193
6.4.2	排架柱的抗震构造	196
6.4.3	柱间支撑的构造及其连接	197
6.4.4	厂房结构构件的连接节点构造	198
思考题		198
第7章	多高层建筑钢结构抗震设计	199
7.1	多高层钢结构的主要震害特征	199
7.1.1	节点连接破坏	199
7.1.2	构件破坏	201
7.1.3	结构倒塌	202
7.2	多高层钢结构的选型与结构布置	203
7.2.1	结构选型	203
7.2.2	钢结构抗震等级	204
7.2.3	结构平面布置	204
7.2.4	结构竖向布置	206
7.2.5	结构布置的其他要求	206
7.3	多高层钢结构的抗震概念设计	207
7.3.1	优先采用延性好的结构方案	207
7.3.2	多道结构防线要求	207
7.3.3	强节点弱构件要求	207
7.3.4	强柱弱梁要求	210
7.3.5	偏心支撑框架弱消能梁段要求	210
7.3.6	其他抗震特殊要求	211

7.4	多高层钢结构的抗震计算要求	213
7.4.1	计算模型	213
7.4.2	阻尼比	215
7.4.3	计算有关要求	215
7.5	多高层钢结构抗震构造要求	215
7.5.1	纯框架结构抗震构造措施	215
7.5.2	中心支撑框架抗震构造措施	219
7.5.3	偏心支撑框架抗震构造措施	220
	思考题	222
第8章	隔震与消能减震及非结构构件抗震设计	223
8.1	概述	223
8.2	隔震结构房屋设计	223
8.2.1	结构隔震原理	223
8.2.2	隔震系统的构成	224
8.2.3	隔震结构的设计要点	224
8.3	消能减震结构设计	230
8.3.1	消能减震部件及其布置	230
8.3.2	消能减震设计计算要点	230
8.3.3	消能部件附加给结构的有效阻尼比和有效刚度确定	230
8.3.4	支承构件刚度或恢复力滞回模型的要求	231
8.3.5	消能器的性能检验	232
8.3.6	消能部件的连接	232
8.4	非结构构件抗震设计规定	232
8.4.1	一般要求	232
8.4.2	基本计算要求	232
8.4.3	建筑非结构构件的基本抗震措施	233
8.4.4	建筑附属机电设备支架的基本抗震措施	235
	思考题	236
第9章	建筑抗震性能化设计	237
9.1	概述	237
9.2	抗震设防目标	238
9.3	结构性能目标选择	238
9.4	性能设计指标的选定及设计方法	239
9.5	不同抗震性能水准位移控制目标	241
9.6	结构抗震性能设计对弹塑性计算分析的要求	242
	思考题	242
附录	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	243

第 1 章 地震基础知识与建筑抗震设防

1.1 地震震害的启示

地震是一种灾害性自然现象。全世界每年大约发生 500 万次地震，其中绝大多数地震是人感觉不到的微小地震，只有灵敏的仪器才能监测到它们的活动。人能够感觉到的地震（有感地震）每年发生约 5 万次，其中 5 级以上破坏性地震约有 1000 余次，能够造成严重破坏的强烈地震平均每年发生约 18 次。我国是世界上多地震国家之一，20 世纪共发生破坏性地震 3000 余次，其中 6 级以上地震近 800 次，8 级以上特大地震 9 次。

由于地震时产生的巨大能量，往往造成各类建筑物和设施的破坏，甚至倒塌，并由此引起各种次生灾害的发生以及人员的伤亡。提高建筑物和各类设施防御地震破坏能力，防止地震时人员伤亡，减少地震所造成的经济损失，是地震工程和抗震工程学的重要任务。国内外大量震害都表明，采用科学合理抗震设防标准、抗震设计方法和抗震构造措施，是当前减轻地震灾害的最有效途径。1976 年 7 月 28 日在我国一个拥有 150 万人口的唐山市，遭遇 7.8 级地震的袭击，顷刻间整座城市化为一片瓦砾，人员死亡高达近 24.2 万人，经济损失超过百亿元。可是，1985 年一个拥有 100 余万人口的智利瓦尔帕莱索市虽遭受了同样 7.8 级地震的袭击，人员伤亡却只有 150 人，而且，不到一周时间，整个城市就恢复原样。同样大小的地震，城市人口也差不多相同，却产生了如此不同的后果，只是因为瓦尔帕莱索市的建筑物和设施曾进行了有效抗震设防。

对各类建筑物和设施进行抗震设防，免不了要增加工程的造价和投资，因此如何合理地采用设防标准，既能有效地减轻工程的地震破坏、避免人员伤亡、减少经济损失，又能合理地使用有限的资金，是当前工程抗震防灾中迫切需要解决的关键问题。由于制定的设防标准不同，各类建筑物和设施在地震中的表现会截然不同，因而地震时造成的损失也会有巨大的差别。例如，日本东京是国际著名大城市，历史上曾发生过 8 级以上大地震，日本政府以及各界一向对此十分关心和重视，长期以来一直致力于将东京建成一个能抗御 8 级大地震的城市。1986 年一次 6.2 级地震发生在东京城底下，一座上千万人口的城市仅死亡 2 人，整个城市几乎未遭受到破坏。可是一向认为没有发生大地震危险的日本第二大港神户市对工程抗震设防就不那么重视。在 1995 年 1 月 17 日的一次 6.9 级（JMA 震级为 7.2）的地震中，导致了近十万栋房屋毁坏，5500 人死亡和约 1000 亿美元的经济损失。又一个典型事例，1988 年 12 月 7 日前苏联的阿美尼亚共和国发生一次 6.8 级地震，位于震中的斯皮塔克城全城变为废墟，距震中 40 公里的列宁纳坎市约有 80% 建筑物毁坏，更远的基洛伐克市也有将近 50% 的建筑物严重破坏或倒塌，地震死亡人数达 4~5 万人。该地区历史上曾发生过数次 6~7 级大地震，在地震区划图上也被划在 MSK 烈度表的 9 度地区。但前苏联政府，特别是城市规划和建设部门，鉴于城市居住建筑严重短缺，又缺乏资

金，便在 70 年代初期对大量新建的多层房屋建筑降低设防标准，一律从 9 度降低到 7 度，而恰恰正是这些房屋建筑在该次地震中大量倒塌，造成了众多的人员伤亡。

从上述的震例不难看出，工程抗震是减轻地震灾害和损失的十分有效的措施，工程抗震的成效很大程度上取决于所采用的工程设防标准，而制定恰当、合理的设防标准不仅需要可靠的科学和技术依据，并同时要受到社会经济、政治等条件的制约。那么是不是对工程建筑物和设施的设防标准越高越好呢？当然不是这样。最佳的或者说可行、合理的设防标准的确定，特别是可接受的最低设防标准的制定，需要在保证地震作用下的工程安全性与优化的经济效益和社会影响之间取得平衡。

1.2 地震与地震动

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。

1.2.1 地球的构造

地球是一个略呈椭圆的球体，它的平均半径约为 6400km。研究表明，地球是由性质不同的三个层次构成：最外层是薄薄的地壳，中间层是很厚的地幔，最里层是地核（图 1.1）。

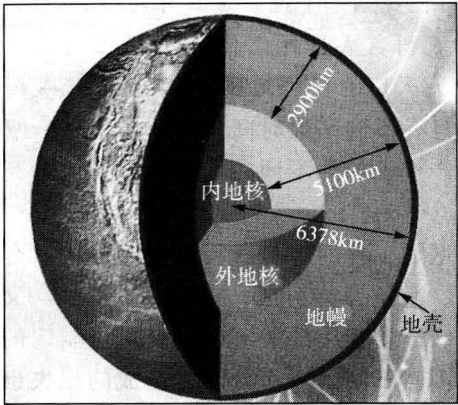


图 1.1 地球的构造

地壳是由各种结构不均匀、厚薄不一的岩层组成。在陆地上，除表面的沉积层外，陆地地壳主要有两大层：上部花岗岩层和下部玄武岩层，平均厚度约为 30~40km。在海洋中，海洋地壳一般只有玄武岩层，平均厚度约为 5~8km。地球上绝大部分地震都发生在这一层薄薄的地壳内。

地幔主要是由质地非常坚硬，结构比较均匀的橄榄岩组成。地壳与地幔的分界面叫莫霍面，莫霍面以下 40~70km 内是一层岩石层，它与地壳共同组成岩石圈。岩石层以下存在一个厚度几百公里的软流层，该层物质呈塑性状态并具有粘弹性质。岩石层与软流层合称上地幔。上地幔之下为下地幔，其物质成分与结构和上地幔差别不大，但物质密度较大。

地核是个半径为 3500km 的球体，可分为外核和内核。对地核的成分和状态目前尚不清楚，据推测外核厚度约为 2100km，处于液态；内核半径约为 1400km，处于固态。地核构成物质主要是镍和铁。

1.2.2 地震类型与成因

地震按照其成因可分为三种主要类型：火山地震、塌陷地震和构造地震。

伴随火山喷发或由于地下岩浆迅猛冲出地面引起的地面运动称为火山地震。这类地震一般强度不大，影响范围和造成的破坏程度均比较小，主要分布于环太平洋、地中海以及东非等地带，其数量约占全球地震的 7% 左右。

地表或地下岩层由于某种原因陷落和崩塌引起的地面运动称为塌陷地震。这类地震的发生主要由重力引起，地震释放的能量与波及的范围均很小，主要发生在具有地下溶洞或古旧矿坑地质条件的地区，其数量约占全球地震的 3% 左右。

由于地壳构造运动造成地下岩层断裂或错动引起的地面振动称为构造地震。这类地震破坏性大、影响面广，而且发生频繁，几乎所有的强震均属构造地震。构造地震为数最多，约占全球地震的 90% 以上。构造地震一直是人们的主要研究对象，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。

构造地震成因的局部机制可以用地壳构造运动来说明，地球内部处于不断运动之中，地幔物质发生对流释放能量，使得地壳岩石层处在强大的地应力作用之下。在漫长的地质年代中，原始水平状的岩层在地应力作用下发生形变：当地应力只能使岩层产生弯曲而未丧失其连续性时，岩层发生褶皱；当岩层变形积累的应力超过本身强度极限时，岩层就发生突然断裂和猛烈错动，岩层中原先积累的应变能全部释放，并以弹性波的形式传到地面，地面随之振动，形成地震（图 1.2）。

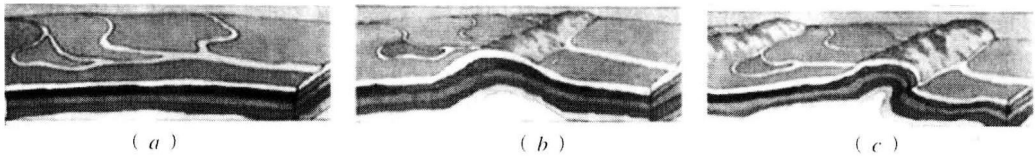


图 1.2 构造运动与地震形成示意图
(a) 岩层原始状态；(b) 褶皱变形；(c) 断裂错动

构造地震成因的宏观背景可以借助板块构造学说来解释。板块构造学说认为，地壳和地幔顶部厚约 70~100km 的岩石组成了全球岩石圈，岩石圈由大大小小的板块组成，类似于一个破裂后仍连在一起的蛋壳，板块下面是塑性物质构成的软流层。软流层中的地幔物质以岩浆活动的形式涌出海岭，推动软流层上的大洋板块在水平方向移动，并在海沟附近向大陆板块之下俯冲，返回软流层。这样在海岭和海沟之间便形成地幔对流，海岭形成于对流上升区，海沟形成于对流下降区（图 1.3）。

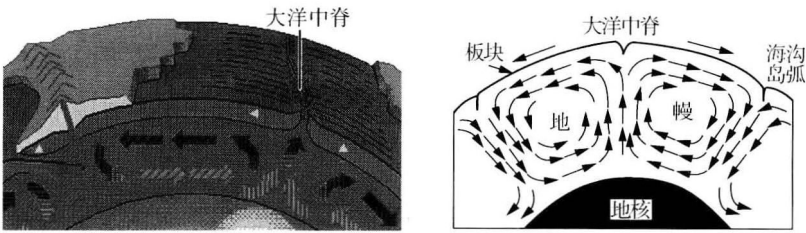


图 1.3 板块运动

全球岩石圈可以分为六大板块，即欧亚板块、太平洋板块、美洲板块、非洲板块、印度洋板块和南极板块（图 1.4）。各板块由于地幔对流而互相挤压、碰撞，地球上的主要地震带就分布在这些大板块的交界地区及附近，仅有 15% 左右发生于板块内部。

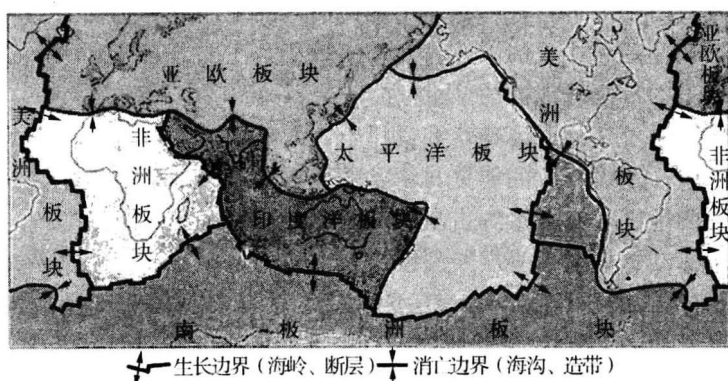


图 1.4 全球大板块划分示意图

1.2.3 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，故也称压缩波或疏密波。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，传播速度快，在地壳内它的速度一般为 $200 \sim 1400 \text{ m/s}$ 。

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，传播速度较慢，在地壳内它的速度一般为 $100 \sim 800 \text{ m/s}$ (图 1.5)。还应指出，横波只能在固体内传播，而纵波在固体和液体内都能传播。

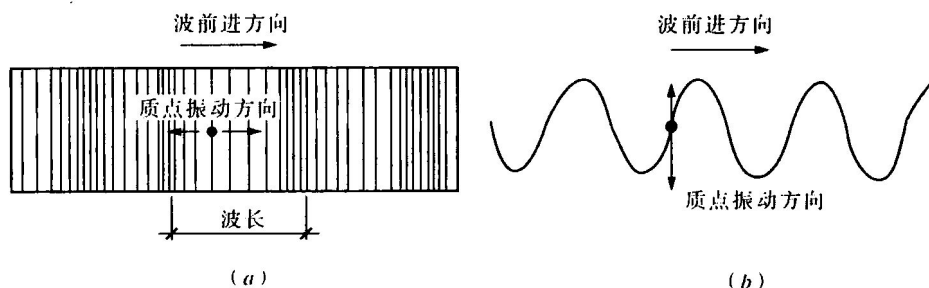


图 1.5 体系质点振动形式

(a) 纵波; (b) 横波

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 可分别按下列式 (1.1) 和式 (1.2) 计算：

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

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

式中 E ——介质的弹性模量；

G ——介质的剪度模量；

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：

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

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）。根据 P 波和 S 波的到达的时间差，可确定震源的距离。

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 1.6），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，质点在波的传播方向和地面法向所组成的平面内（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 1.7(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作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 1.7(b)]。洛夫波也随深度而衰减。

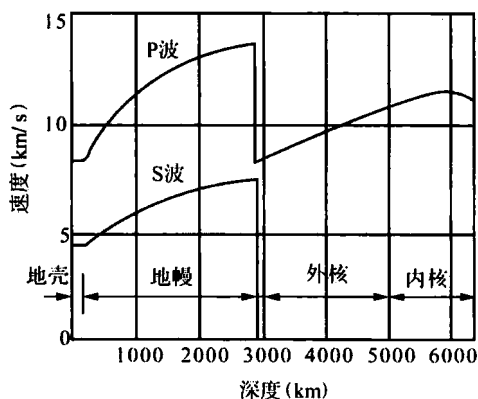


图 1.6 体波在地球内传播速度的变化

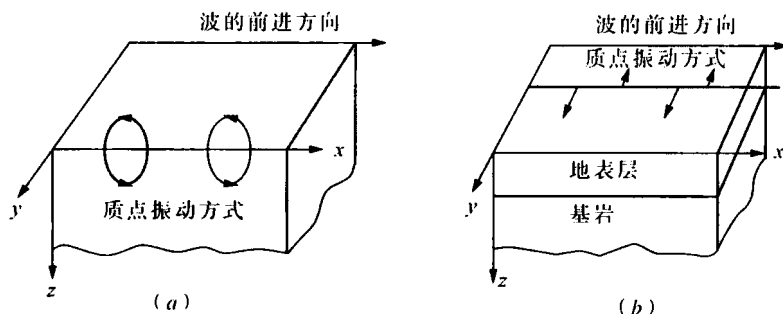


图 1.7 面波质点振动形式

(a) 瑞雷波；(b) 洛夫波

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 1.8）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，后者却最大。由于面波的能量要比体波大，所以造成建筑物和地表破坏的主要以面波

为主。大量震害调查表明，一般建筑物的震害主要是由水平振动引起，因此，由体波和面波共同引起的水平地震作用通常是最主要的地震作用。从图 1.8 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。

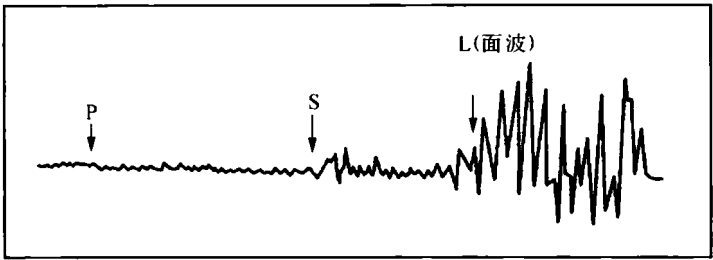


图 1.8 地震波记录图

1.2.4 地震强度

1.2.4.1 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：

$$M = \lg A \quad (1.4)$$

式中 A ——标准地震仪（指摆的自振周期为 0.8s，阻尼系数为 0.8，放大倍数为 2800 倍的地震仪）在距震中 100km 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）。实际上，地震时距震中恰好 100km 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 100km，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：

$$\lg E = 11.8 + 1.5M \quad (1.5)$$

由式 (1.5) 计算得知，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。

一般地说，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 8.5 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。

1.2.4.2 地震烈度和地震烈度表

(1) 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，离震中越近，地震影响越大，地震烈度越高；离震中越远，地震烈度就越低。

(2) 地震烈度表

用什么尺度衡量地震烈度？在没有仪器观测的年代，只能由地震宏观现象，如人的感觉、器物的反应、地表和建筑物的影响和破坏程度等，总结出宏观烈度表来评定地震烈度。我国早期的《新中国地震烈度表》（1957）就属于这种宏观烈度表。由于宏观烈度表未能提供定量指标，因此不能直接用于工程抗震设计。随着科学技术的发展，强震仪的问世，使人们有可能记录到地面运动参数，如地面运动加速度峰值、速度峰值来定义地震烈度，从而出现了含有物理指标的定量烈度表。由于不可能随处取得地震仪记录，因此，用定量烈度表评定地震现场的地震烈度还有一定困难。比较好的方法是将两种烈度表结合起来，使之兼有两种功能，以便工程应用。

1999 年由国家地震局颁布实施的《中国地震烈度表》（GB/T 17742—1999），就属于将宏观烈度与地面运动参数建立起联系的地震烈度表。所以，该烈度表既有定性的宏观标志，又有定量的物理标志，兼有宏观烈度表和定量烈度表的功能。《中国地震烈度表》（GB/T 17742—1999）自发布实施以来，在地震烈度评定中发挥了重要作用。由于国家经济发展，城乡房屋结构发生了很大变化，抗震设防的建筑比例增加。因此，由中国地震局对《中国地震烈度表》（GB/T 17742—1999）进行了修订，并由国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会联合发布了新的《中国地震烈度表》（GB/T 17742—2008），参见表 1.1。

中国地震烈度表 表 1.1

地震 烈度	人的感觉	房屋震害			其 他 震 害 现象	水平向地震动参数	
		类型	震害程度	平均震 害指数		峰值加速度 (m/s ²)	峰值速度 (m/s)
I	无感	-	-	-			
II	室内个别静止中 的人有感觉						
III	室内少数静止中 的人有感觉		门、窗轻微 作响		悬挂物微动		
IV	室内多数人、室 外少数人有感觉， 少数人梦中惊醒	-	门、窗作响	-	悬挂物明显摆 动，器皿作响		
V	室内绝大多数、 室外多数人有感 觉，多数人梦中 惊醒		门窗、屋顶、 屋架颤动作响， 灰土掉落，个别 房屋墙体抹灰出 现细微裂缝，个 别屋顶烟囱掉砖		悬挂物大 幅度晃动， 不稳定器物 摇动或翻倒	0.31 (0.22~0.44)	0.03 (0.02~0.04)

续表

地震 烈度	人的感觉	房屋震害			其他震害现象	水平向地震动参数	
		类型	震害程度	平均震害指数		峰值加速度 (m/s ²)	峰值速度 (m/s)
Ⅵ	多数人站立不稳, 少数人惊逃户外	A	少数中等破坏, 多数轻微破坏和/ 或基本完好	0.00~0.11	家具和物 品移动;河 岸和松软土 出现裂缝, 饱和砂层出 现喷砂冒水; 个别独立砖 烟囱轻度裂 缝	0.63 (0.45~0.89)	0.06 (0.05~0.09)
		B	个别中等破坏, 少数轻微破坏, 多数基本完好				
		C	个别轻微破坏, 大多数基本完好	0.00~0.08			
Ⅶ	大多数人惊逃户 外,骑自行车的人 有感觉,行驶中的 汽车驾乘人员有 感觉	A	少数毁坏和/或 严重破坏,多数 中等破坏和/或轻 微破坏	0.09~0.31	物体从架 子上掉落; 河岸出现塌 方,饱和砂 层常见喷水 冒砂,松软 土地地裂 缝较多;大 多数独立砖 烟囱中等破 坏	1.25 (0.90~1.77)	0.13 (0.10~0.18)
		B	少数中等破坏, 多数轻微破坏和/ 或基本完好				
		C	少数中等和/或 轻微破坏,多数 基本完好	0.07~0.22			
Ⅷ	多数人摇晃颠簸, 行走困难	A	少数毁坏,多 数严重和/或中等 破坏	0.29~0.51	干硬土上 亦出现裂缝, 饱和砂层绝 大多数喷砂 冒水;大多 数独立砖烟 囱严重破坏	2.50 (1.78~3.53)	0.25 (0.19~0.35)
		B	个别毁坏,少 数严重破坏,多 数中等和/或轻微 破坏				
		C	少数严重和/或 中等破坏,多数 轻微破坏	0.20~0.40			
Ⅸ	行动的人摔倒	A	多数严重破坏 或/和毁坏	0.49~0.71	干硬土上 多处出现裂 缝,可见基 岩裂缝、错 动、滑坡、 塌方常见; 独立砖烟囱 多数倒塌	5.00 (3.54~7.07)	0.50 (0.36~0.71)
		B	少数毁坏,多 数严重和/或中等 破坏				
		C	少数毁坏和/或 严重破坏,多数 中等和/或轻微 破坏	0.38~0.60			
Ⅹ	骑自行车的人会 摔倒,处不稳状态 的人会摔离原地, 有抛起感	A	绝大多数毁坏	0.69~0.91	山崩和地 震断裂出现, 基岩上拱桥 破坏;大多 数独立砖烟 囱从根部破 坏或倒毁	10.00 (7.08~14.14)	1.00 (0.72~1.41)
		B	大多数毁坏				
		C	多数毁坏和/或 严重破坏	0.58~0.80			