

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 审定

# 抗震结构设计

K Z J G S J

丰定国 王社良 主编

2.1

WUTP

武汉工业大学出版社

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 审定

# 抗震结构设计

主编 丰定国 王社良

武汉工业大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

抗震结构设计/丰定国,王社良主编. —武汉:武汉工业大学出版社,2001.9

ISBN 7-5629-1561-X

I. 抗… II. ①丰… ②王… III. 抗震结构-高等学校-教材 IV. TU201

### 内容提要

本书是结合我国最新的《建筑抗震设计规范》(GB50011)送审稿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,结构地基反应分析与抗震验算,多、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,以及隔震与消能减震房屋的设计。书中附有计算例题、各章提要及小结、思考题和习题。

本书可供大专院校土木工程专业学生及教师的教学使用,亦可供从事建筑结构抗震设计、科研和施工技术人员参考。

出版者:武汉工业大学出版社(武汉市:武昌珞狮路122号 邮政编码:430070)

印刷者:武汉工业大学出版社印刷厂

发行者:各地新华书店

开本:880×1230<sup>1/16</sup>

印张:16.5

字数:547千字

版次:2001年9月第1版

印次:2001年9月第1次印刷

书号:ISBN 7-5629-1561-X/TU·147

印数:1~10 000册

定价:23.00元

(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

# 普通高等学校土木工程专业新编系列教材 编 审 委 员 会

顾 问:成文山 滕智明 罗福午 魏明钟 李少甫  
甘绍熺 施楚贤 白绍良 彭少民 范令惠  
主 任:江见鲸 吕西林 高鸣涵  
副主任:朱宏亮 辛克贵 袁海庆 吴培明 李世蓉  
苏三庆 刘立新 赵明华 孙成林

委 员:(按姓氏笔画顺序排列)

于书翰	丰定国	毛鹤琴	甘绍熺	白绍良
白晓红	包世华	田道全	成文山	江见鲸
吕西林	刘立新	刘长滨	刘永坚	刘伟庆
朱宏亮	朱彦鹏	孙家齐	孙成林	过静君
李少甫	李世蓉	李必瑜	吴培明	吴炎海
辛克贵	苏三庆	何铭新	汤康民	陈志源
罗福午	周 云	赵明华	赵均海	尚守平
施楚贤	柳炳康	姚甫昌	胡敏良	俞 晓
桂国庆	顾敏煜	徐茂波	袁海庆	高鸣涵
蒋沧如	谢用九	彭少民	覃仁辉	蔡德明
燕柳斌	魏明钟			

总责任编辑:刘永坚 田道全

秘 书 长:蔡德明

## 出版说明

1998年7月,教育部颁布了新的普通高等学校本科专业目录,1999年全国高等学校都已按新的专业目录招生。新的土木工程专业专业面大大拓宽,相应的专业业务培养目标、业务培养要求、主干学科、主要课程、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化。原有的教材已经不能适应新专业的培养目标和教学要求,组织一套新的土木工程专业系列教材成为众多院校的翘首之盼。武汉工业大学出版社在中国土木工程学会教育工作委员会的指导和帮助下,经过大量的调研,组织国内29所大学的土木工程学科的教授共同编写了这套系列教材。

本套教材的主、参编人员及编委会顾问遵照1998年1月建设部全国土木建筑工程专业教学指导委员会昆明会议和1998年5月上海的全国土木工程专业系主任会议的精神,经过充分研讨,决定首批编写出版29种主干课程的教材,以尽快满足全国众多院校的教学需要,以后再根据专业方向的需要逐步增补。中国土木工程学会教育工作委员会组织专家审查了本套教材的编写大纲,决定将其作为“中国土木工程学会教育工作委员会审定教材”出版。作为一套全新的系列教材,本套教材的“新”体现在以下几点:

**体系新**——本套教材从“大土木”的专业要求出发,从整体上考虑专业的课程设置和各门课程的内容安排,按照教学改革方向要求的学时统一协调与整合,组成一套完整的、各门课程有机联系的系列。整套教材的编写除正文外,大多增加了本章提要、本章重点、例题详解、思考题、习题等,以使教材既适合教学需要,又便于学生自学。

**内容新**——本套教材中各门课程教材的主、参编人员特别注意了教材内容的更新和吸收各校教学改革的阶段性成果,以适应21世纪土木工程人才的培育要求。

**规范新**——本套教材中凡涉及土木工程规范的全部采用国家颁布的最新规范。

本套教材是新专业目录颁布实施后的第一套土木工程专业系列教材,是面向新世纪、适应新专业的一套全新的教材。能为新世纪土木工程专业的教材建设贡献微薄之力,自是我们应尽的责任和义务,我们感到十分欣慰。然而,正因其为第一套教材,尽管我们的编审者、编辑出版者夙兴夜寐、尽心竭力,不敢稍有懈怠,它仍然还会存在缺点和不足。嚶其鸣矣,求其友声,我们诚恳地希望选用本套教材的广大师生在使用过程中给我们多提意见和建议,以便我们不断修改、完善全套教材,共同为教育事业的发展作出贡献。

武汉工业大学出版社

2000.2

## 前 言

地震是一种自然灾害,强烈地震在瞬息间就可对地面建筑物造成严重破坏。我国是多地震国家,地震区分布广大,历次大地震使人民生命财产遭受巨大损失。

为了防御地震灾害,减轻地震损失,20世纪初一些国家对地震预报、工程抗震、地震控制等方面进行了一系列研究,其中工程抗震认为是一项切实有效的措施,其目的是寻求最合理的抗震设计,使在地震时能够保证结构物的安全。

我国自1976年唐山大地震后,结构抗震问题得到了普遍重视,科学研究部门大力开展结构抗震理论与试验研究,高等学校也相继开设了“抗震结构设计”这门课程。

工程抗震是一门多科性的学科,它将涉及地球物理学、地质学、地震学、结构动力学、工程结构学等多方面的知识,这是一门较新的学科,而且将随震害经验的不断积累、抗震研究的不断深入而迅速发展。

本教材主要阐述建筑结构抗震设计的原理及方法,内容紧密结合我国最新的《建筑抗震设计规范》(GB50011),其中反映了当前国内外的研究成果,使学生通过学习,掌握结构抗震的基本理论与实践,从而不但能遵循规范而且能高于规范进行结构的抗震设计。

本教材共分9章,每章教学时数分配建议如下:

章次	内 容	学时
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	4
8	钢筋混凝土柱单层厂房抗震设计	6
9	隔震与消能减震房屋设计	3
	合 计	40

本教材第1~6、8章由王社良、陈平、苏三庆、赵歆冬、丰定国编写,第7、9章由周云编写。全书由丰定国、王社良主编。

限于编者水平有限,加以新的《建筑抗震设计规范》(GB50011)定稿较晚,编写仓促,书中难免有遗漏之处,恳请读者批评指正。

编 者  
2001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	(6)
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	(7)
1.2.3 近期世界地震活动性	(8)
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	(14)
思考题	(15)
2 场地、地基和基础	(16)
本章提要	(16)
2.1 场 地	(16)
2.1.1 场地土及场地覆盖层厚度	(16)
2.1.2 场地类别	(17)
2.2 天然地基与基础的抗震验算	(18)
2.2.1 不进行天然地基及基础抗震验算的建筑	(18)
2.2.2 天然地基在地震作用下的抗震承载力验算	(19)
2.3 液化土与软土地基	(20)
2.3.1 地基土的液化	(20)
2.3.2 液化的判别	(22)
2.3.3 可液化地基的抗震措施	(24)
2.3.4 软土地基的抗震措施	(25)
2.4 桩基的抗震设计	(26)
2.4.1 可不进行桩基抗震验算的条件	(26)
2.4.2 桩基的抗震设计	(26)
本章小结	(27)
思考题	(28)
3 结构地震反应分析与抗震验算	(29)

本章提要 .....	(29)
3.1 概 述 .....	(29)
3.2 单自由度弹性体系的地震反应分析 .....	(29)
3.2.1 计算简图 .....	(29)
3.2.2 运动方程 .....	(30)
3.2.3 自由振动 .....	(31)
3.2.4 强迫振动 .....	(32)
3.3 单自由度弹性体系的水平地震作用及其反应谱 .....	(33)
3.3.1 水平地震作用的基本公式 .....	(33)
3.3.2 地震反应谱 .....	(34)
3.3.3 标准反应谱 .....	(35)
3.3.4 设计反应谱 .....	(36)
3.4 多自由度弹性体系地震反应分析的振型分解法 .....	(38)
3.4.1 计算简图 .....	(38)
3.4.2 运动方程 .....	(38)
3.4.3 自由振动 .....	(39)
3.4.4 振型分解法 .....	(49)
3.5 多自由度体系的水平地震作用 .....	(52)
3.5.1 振型分解反应谱法 .....	(52)
3.5.2 底部剪力法 .....	(53)
3.6 结构的扭转效应 .....	(57)
3.6.1 刚心与质心 .....	(58)
3.6.2 单层偏心结构的振动 .....	(58)
3.6.3 多层偏心结构的振动 .....	(60)
3.6.4 偏心结构的地震作用 .....	(62)
3.7 地基与结构的相互作用 .....	(64)
3.7.1 地基与结构的相互作用对结构地震反应的影响 .....	(64)
3.7.2 考虑地基结构相互作用的抗震设计 .....	(65)
3.8 竖向地震作用 .....	(65)
3.8.1 高耸结构 .....	(65)
3.8.2 屋盖结构 .....	(66)
3.8.3 其他结构 .....	(67)
3.9 结构地震反应的时程分析法 .....	(67)
3.9.1 概述 .....	(67)
3.9.2 恢复力特性曲线 .....	(68)
3.9.3 结构的计算模型 .....	(69)
3.9.4 地震波的选用 .....	(72)
3.9.5 地震反应的数值分析法 .....	(73)
3.10 建筑结构抗震验算 .....	(75)
3.10.1 结构抗震承载力验算 .....	(75)
3.10.2 结构的抗震变形验算 .....	(76)
本章小结 .....	(80)
思考题 .....	(81)
习题 .....	(81)
4 建筑抗震概念设计 .....	(82)



本章提要 .....	(82)
4.1 场地选择 .....	(82)
4.1.1 避开地震危险地段 .....	(82)
4.1.2 选择有利于抗震的场地 .....	(83)
4.2 建筑的平立面布置 .....	(84)
4.2.1 建筑平面布置 .....	(84)
4.2.2 建筑立面布置 .....	(85)
4.2.3 房屋的高度 .....	(85)
4.2.4 房屋的高宽比 .....	(86)
4.2.5 防震缝的合理设置 .....	(86)
4.3 结构选型与结构布置 .....	(87)
4.3.1 结构选型 .....	(87)
4.3.2 结构布置的一般原则 .....	(88)
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 .....	(96)
4.7.2 外墙板的连接 .....	(96)
本章小结 .....	(97)
思考题 .....	(97)
<b>5 多层及高层钢筋混凝土房屋抗震设计</b> .....	<b>(98)</b>
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 .....	(99)
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 .....	(104)
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 .....	(110)
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 .....	(115)
5.4.1 框架梁截面设计 .....	(115)

5.4.2	框架柱截面设计 .....	(117)
5.4.3	框架节点抗震设计 .....	(122)
5.5	框架结构设计例题 .....	(126)
	本章小结 .....	(141)
	思考题 .....	(141)
<b>6</b>	<b>多层砌体结构房屋的抗震设计 .....</b>	<b>(142)</b>
	本章提要 .....	(142)
6.1	概 述 .....	(142)
6.2	结构方案与结构布置 .....	(143)
6.3	多层砌体房屋抗震计算 .....	(144)
6.3.1	计算简图 .....	(144)
6.3.2	地震作用 .....	(145)
6.3.3	楼层地震剪力在墙体中的分配 .....	(145)
6.3.4	墙体抗震承载力验算 .....	(150)
6.4	多层砌体结构房屋的抗震构造措施 .....	(151)
6.4.1	多层砖房构造措施 .....	(151)
6.4.2	多层砌块结构房屋的抗震构造措施 .....	(154)
6.4.3	多层砌体结构房屋抗震设计例题 .....	(155)
6.5	底部框架-抗震墙房屋的抗震设计要点 .....	(159)
6.5.1	结构方案与结构布置 .....	(159)
6.5.2	底部框架-抗震墙房屋的抗震设计要点 .....	(159)
6.5.3	底部框架-抗震墙房屋的抗震构造措施 .....	(161)
6.6	内框架房屋的抗震设计要点 .....	(162)
6.6.1	结构方案与结构布置 .....	(162)
6.6.2	内框架砖房的抗震设计要点 .....	(162)
6.6.3	内框架砖房的抗震构造措施 .....	(163)
	本章小结 .....	(163)
	思考题 .....	(164)
<b>7</b>	<b>高层及多层钢结构房屋的抗震设计 .....</b>	<b>(165)</b>
	本章提要 .....	(165)
7.1	概 述 .....	(165)
7.2	高层钢结构房屋抗震设计 .....	(166)
7.2.1	高层钢结构的体系与布置 .....	(166)
7.2.2	高层钢结构的抗震计算 .....	(170)
7.2.3	钢构件的抗震设计与构造措施 .....	(171)
7.2.4	钢结构节点的抗震设计与构造措施 .....	(176)
7.3	多层钢结构房屋抗震设计 .....	(181)
7.3.1	多层钢结构房屋的结构体系与布置 .....	(181)
7.3.2	多层钢结构的抗震计算 .....	(181)
7.3.3	多层钢结构房屋的抗震构造措施 .....	(182)
	本章小结 .....	(183)
	思考题 .....	(184)
<b>8</b>	<b>单层钢筋混凝土柱厂房的抗震设计 .....</b>	<b>(185)</b>
	本章提要 .....	(185)
8.1	概 述 .....	(185)

8.1.1	横向地震作用下厂房主体结构的震害	(185)
8.1.2	纵向地震作用下厂房主体结构的震害	(186)
8.2	结构布置的一般原则	(188)
8.2.1	体型与抗震缝	(188)
8.2.2	屋盖体系	(188)
8.2.3	天窗架	(188)
8.2.4	柱	(189)
8.2.5	围护墙体	(189)
8.3	单层厂房的横向抗震计算	(189)
8.3.1	计算简图和重力荷载代表值的计算	(189)
8.3.2	横向自振周期计算	(191)
8.3.3	横向自振周期的调整	(192)
8.3.4	排架地震作用的计算	(192)
8.3.5	天窗架的横向水平地震作用	(193)
8.3.6	排架内力分析及组合	(193)
8.3.7	截面抗震验算	(195)
8.3.8	厂房横向抗震验算的其他问题	(195)
8.4	单层厂房的纵向抗震计算	(196)
8.4.1	修正刚度法	(196)
8.4.2	拟能量法	(199)
8.4.3	纵向柱列的刚度	(201)
8.4.4	柱间支撑的抗震验算	(203)
8.4.5	厂房纵向抗震计算的其他问题	(204)
8.5	单层钢筋混凝土柱厂房构造措施	(217)
8.5.1	无檩屋盖构件的连接与支撑布置	(217)
8.5.2	有檩屋盖构件的连接与支撑布置	(218)
8.5.3	屋架	(218)
8.5.4	柱	(219)
8.5.5	柱间支撑	(220)
8.5.6	连接节点	(221)
8.5.7	围护墙体	(221)
	本章小结	(222)
	思考题	(223)
9	隔震与耗能减震房屋设计	(224)
	本章提要	(224)
9.1	概述	(224)
9.2	隔震结构设计	(225)
9.2.1	结构隔震的原理与隔震结构的特点	(225)
9.2.2	隔震系统的组成与类型	(227)
9.2.3	隔震结构的设计要求	(229)
9.2.4	隔震结构的抗震计算	(229)
9.2.5	隔震结构的构造措施	(232)
9.3	耗能减震结构设计	(234)
9.3.1	结构耗能减震原理与耗能减震结构特点	(234)
9.3.2	耗能减震装置的类型与性能	(235)

9.3.3 耗能减震结构的设计要求 .....	(239)
本章小结 .....	(240)
思考题 .....	(241)
附录 1 .....	(242)
附录 2 .....	(243)
参考文献 .....	(248)

# 1 绪 论

## 本章提要

本章主要讲述了地震与地震动的基本知识,介绍了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,介绍了我国《建筑抗震设计规范》(GB50011)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员,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时所引起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,其厚度约为 70~100km;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作刚体运动,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,有助于解释上述地震带的成因。

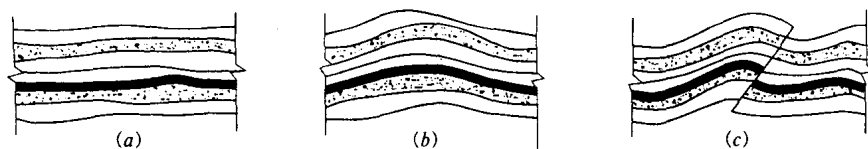


图 1.1 地壳构造变动与地震形成示意图

(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

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,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地震释放出来的叫做震群型或多发型。若前震和余震都很稀少,甚至没有,绝大部分能量基本上是通过主震一次释放出来的叫做孤立型或单发型。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 70km 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 70~300km 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 300km,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。

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)。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。

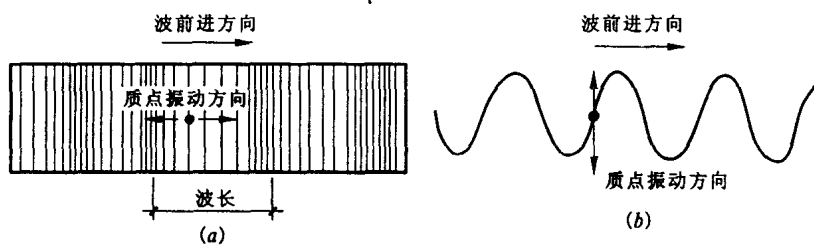


图 1.2 体波质点振动形式

(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:

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

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

式中  $E$ ——介质的弹性模量；  
 $G$ ——介质的剪切模量；  
 $\rho$ ——介质的密度；  
 $\mu$ ——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1.4(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。

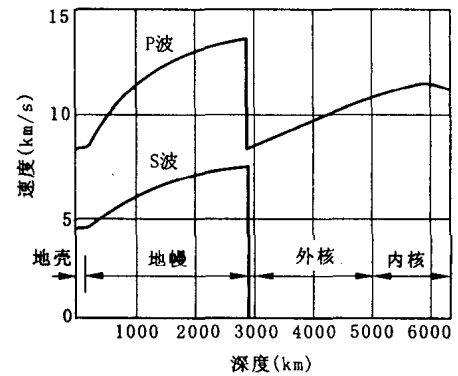


图1.3 体波在地球内传播速度的变化

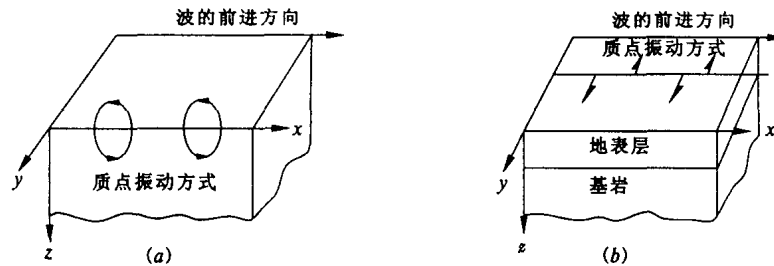


图1.4 面波质点振动形式

(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，后者却最大。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。

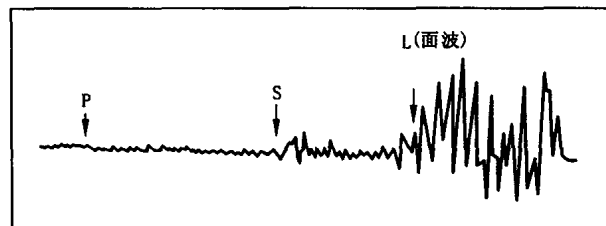


图1.5 地震波记录图

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的破坏主要以面波为主。

### 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:

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

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)。例如,在距离震中100km处地震仪记录的振幅是1mm,即1000 $\mu\text{m}$ ,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:

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

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t级的原子弹。

震级及其相应的能量

表 1.1

震 级	能量(尔格)	震 级	能量(尔格)
1	$2.00 \times 10^{13}$	6	$6.31 \times 10^{20}$
2	$6.31 \times 10^{14}$	7	$2.00 \times 10^{22}$
3	$2.00 \times 10^{16}$	8	$6.31 \times 10^{23}$
4	$6.31 \times 10^{17}$	8.5	$3.55 \times 10^{24}$
5	$2.00 \times 10^{19}$		

注:1尔格= $10^{-7}\text{J}$ 。

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。

#### 1.1.3.2 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,震中烈度一般可看作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10~30km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。根据全国范围内既有宏观资料,又有仪器测定震级的35次地震资料,《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:

$$M = 0.58I_0 + 1.5 \quad (1.6)$$

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10~30km时,震级  $M$  与震中烈度  $I_0$  的大致对应关系。



震级  $M$  与震中烈度  $I_0$  的关系

表 1.2

震级 $M$	2	3	4	5	6	7	8	8 以上
震中烈度 $I_0$	1~2	3	4~5	6~7	7~8	9~10	11	12

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 1980 年公布的地震烈度表见附录 1。

#### 1.1.4 地震区划与地震影响

原抗震规范(TJ11—78)中规定,一个地区的基本烈度,是指该地区未来 100 年内一般场地条件下可能遭遇的最大地震烈度。中国国家地震局于 1972 年开始组织编制并于 1978 年颁布过的原《中国地震烈度区划图(1977)》曾经是确定一个地区基本烈度的依据。该图的编制是先进行地震的危险区划,然后再完成地震烈度区划。其编制原则为:

- ①根据区域地震活动和地震地质条件的特征,对地震区进行划分,作为进一步研究的基本单元;
- ②分析各地震区地震活动的发展过程,对各地震区未来百年内的地震活动趋势、最大震级和各级地震的次数作出评估;
- ③分析地震区域内发生不同强度地震的地质构造条件,总结出发震的构造标志;
- ④综合地震活动性和地震地质条件的研究成果,判定各区域未来百年内可能发展的地点,勾划出各级地震危险区;
- ⑤依据历史地震震级与震中烈度的关系,将危险区的震级换算为相应的震中烈度;
- ⑥根据所在地震区的烈度衰减规律圈定地震影响的烈度及其分布范围。

根据上述地震烈度区划图,全国地震烈度分布的面积数量情况如表 1.3 所示。由表 1.3 可见,不低于 7 度区的面积占全国总面积的 32.5%,而不低于 6 度区的面积约占全国总面积的 60%。该地震烈度区划图反映了 20 世纪 70 年代我国地震烈度区划的科学水平。

全国地震烈度分布的面积数量

表 1.3

地震基本烈度分布	面积( $\times 10^4 \text{km}^2$ )	百分比(%)
5 度及其以下地区	384.5	40.1
6 度区	263.5	27.4
7 度区	206.5	21.55
8 度区	71.3	7.37
9 度区	23.6	2.46
10 度区及其以上地区	10.7	1.12
小 计	960.0	100.0

近 10 年来,我国地震烈度区划的研究工作取得了很大进展,积累了大量的新资料和研究成果。现有的观测事实和研究结果均表明,地震的发生和地震动的特性都具有一定的随机性。因此,地震烈度区划图的编制须采用地震危险性分析概率方法,并对烈度赋予有限时间区限和概率水平的含义。我国新的《中国地震烈度区划图(1990)》(以下简称新地震烈度区划图)已经国务院批准,由国家地震局和建设部于 1992 年 5 月 22 日正式发布施行。新地震烈度区划图上所标示的地震烈度,系指在 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。该烈度称为地震基本烈度。

编制新地震烈度区划图时,考虑到我国地震活动强、分布广、复发周期长、地震构造复杂、区域性差异大等特点,充分吸收了以前地震烈度区划工作的经验和近 10 余年来中长期地震预测方面的成果,并采用了地震危险性分析的概率方法。为了能够正确地反映地震活动强度和频度的空间非均匀性,根据我国大区域地震