

新世纪土木工程系列教材

结构抗震设计

尚守平 主编
周福霖 副主编

高等教育出版社

内容提要

本教材是新世纪土木工程系列教材之一,是根据教育部关于拓宽专业面,教材要面向 21 世纪的要求编写的,适用于土建类土木工程专业。本教材根据拓宽专业面、加强基础的思想,参照我国最新的规范编写,涵盖了建筑结构和桥梁结构两大方面,并适当拓宽至地下结构和其他构筑物的抗震。

本书共十章,包括绪论,场地、地基和基础,地震作用和结构抗震验算,结构隔震、消能和减震控制,混凝土房屋结构抗震设计,钢结构房屋的抗震设计,多层砌体及底层框架抗震,构筑物抗震设计,梁桥结构抗震设计,地下工程结构抗震设计等。各章后附有相应的思考题。

本书既可作为土木工程专业以及相关专业的结构抗震设计课程教材,也可供从事土木工程研究、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

结构抗震设计/尚守平主编. —北京:高等教育出版社,2003

ISBN 7-04-011601-4

I. 结... II. 尚... III. 工程结构-抗震设计
IV. TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 099180 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号
邮政编码 100009
传 真 010-64014048

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京机工印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 19.25
字 数 440 000

版 次 2003 年 1 月第 1 版
印 次 2003 年 1 月第 1 次印刷
定 价 24.20 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

教育部高等教育出版社土建类系列教材

编辑委员会委员名单

主任委员：沈蒲生(湖南大学)

副主任委员：(按姓氏笔画排序)

白国良(西安建筑科技大学)

邹超英(哈尔滨工业大学)

周绪红(长安大学)

强士中(西南交通大学)

委 员：(按姓氏笔画排序)

卫 军(华中科技大学)

王清湘(大连理工大学)

江见鲸(清华大学)

刘 明(沈阳建筑工程学院)

张印阁(东北林业大学)

吴胜兴(河海大学)

尚守平(湖南大学)

胡长顺(长安大学)

梁兴文(西安建筑科技大学)

焦兆平(广州大学)

霍 达(北京工业大学)

王 健(北京建筑工程学院)

叶志明(上海大学)

关宝树(西南交通大学)

朱彦鹏(甘肃工业大学)

张家良(辽宁工学院)

杨和礼(武汉大学)

周 云(广州大学)

赵明华(湖南大学)

黄醒春(上海交通大学)

廖红建(西安交通大学)

出版者的话

新世纪土木工程系列教材是我社组织编写出版的“大土木”范畴的专业系列教材。1998年教育部颁布了新修订的《普通高等学校本科专业目录和专业介绍》，新专业目录中土建类土木工程专业覆盖了原来建筑工程和交通土建工程等8个专业。1999年各高校已按新的专业目录招生。开设土木工程专业的各院校把近年来在教育思想与教学观念、教学内容与课程体系、教学方法与教学手段等方面取得的改革成果固化到教学计划和人才培养过程中，设计了从教学思想到教学模式等一系列教学改革方案。大家在教学实践中体会到：专业、课程教学改革必然引起相应的教材改革。我社从1999年开始进行土木工程专业系列教材的策划工作，并于2000年成立了“教育部高等教育出版社土建类系列教材编委会”。

我们编辑出版土木工程系列教材的指导思想是：

1. 紧密结合人才培养模式改革，根据拓宽专业基础、提高综合素质、增强创新能力的要求，调整学生的知识结构。

2. 从各院校调整土建类各专业教学计划出发，加强基础课程到专业课程的有机沟通，用系统的观点和方法建立新的课程体系结构，包括对课程的整合与集成，组织和建设专业核心课程，成套成系列地推出土木工程系列教材。

3. 各门课程教材要具有与本门学科发展相适应的学科水平，以科技进步和社会发展的最新成果充实、更新教材内容，贯彻理论联系实际的原则。

4. 要正确处理继承、借鉴和创新的关系，不能简单地以传统和现代划线，决定取舍，而应根据教学要求进行取舍。继承、借鉴历史和国外的经验，注意研究结合我国的现实情况，择善而从，消化创新。

5. 随着高新技术、特别是数字化和网络化技术的发展，在土木工程系列教材建设中，要充分考虑文字教材与音像、电子、网络教材的综合发展，发挥综合媒体在教学中的优势，提高教学效率。在开发研制教学软件的同时，要注意使文字教材与先进的软件接轨，明确不同形式教材之间的关系是相辅相成、相互补充的。

6. 坚持质量第一。图书是特殊的商品，教材是特殊的图书。教材质量的优劣直接影响教学质量和教学秩序，最终影响学校人才培养的质量。教材不仅具有传播知识、服务教育、积累文化的功能，也是沟通作者、编辑、读者的桥梁，一定程度上还代表着国家学术文化或学校教学、科研水平。因此，遴选作者、审订教材、贯彻国家标准和规范等方面需严格把关。

为了实现本套教材的指导思想，我们组建了由有丰富的教学经验、有较高的学术水平和学术声望的教师组成的编委会，由编委会研究提出土木工程系列教材的选题及其基本内容与编审原则，并推荐作者。

我们出版本系列教材，旨在为新世纪的土木工程专业学生提供一套经过整合优化的比较系统的专业系列教材，以期为我国的土木工程专业教材建设贡献自己的一份力量。

本系列教材的编写大纲和初稿都经过了编委会的审阅,以求教材质量更臻完善。如有疏漏之处,请读者批评指正!

2002年11月

前 言

本书根据拓宽专业面、加强基础的思想,参照我国最新的规范编写。

长期以来,我国的结构抗震教材多偏重于房屋建筑抗震,介绍其他结构抗震设计的教材很少。随着我国土木工程专业教育与国际接轨的发展趋势,拓宽专业面,加强基础的大土木思想迫切要求结构抗震教材覆盖更宽的面。为此,本教材本着大土木的观念,主要涵盖了建筑结构和桥梁结构两大方面,并适当拓宽至地下结构抗震和其他构筑物的抗震。

近十年来,“减震控制”(包括隔震、消能、被动和主动控制等)作为一种新的理论和技术,已逐渐成为新的发展趋势,本教材把这一内容也纳入其中。另外,我们在教材的写法上也作了相应的改革,主要考虑了采用启发式教学和培养学生主动思考、积极创新的教学模式,教材有些内容是留给学生自己去看去主动思维。本书主要特色:按最新规范(如 GB 50011—2001《建筑抗震设计规范》等)编写;适当拓宽了专业面(但不包括港口、小区结构的抗震);拓宽了结构类型(增加了钢结构抗震设计);增加了“概念设计”这一重要内容;按最新建筑抗震规范增加了隔震和消能减震的内容;为更好地利用多媒体手段将配套相应的电子教案。

本教材的第1,3章由湖南大学尚守平编写,第2章由湖南大学李刚编写,第4章由广州大学周福霖编写,第5章由广州大学冼巧玲编写,第6章由广州大学周云编写,第7章由广州大学徐忠根编写,第8,10章由西南交通大学王明年编写,第9章由湖南大学郭玉荣编写。西南交通大学关宝树教授对第8,10章的编写给予了精心指导。全书由尚守平、周福霖主编。美国南加州大学肖岩教授、北京工业大学曹资教授于百忙中审阅了全部书稿,在此表示衷心感谢。

限于水平,书中可能尚有疏漏之处,欢迎广大读者批评指正。

编者

2002年11月

目 录

第1章 绪论	1	第4章 结构隔震、消能和减震控制	85
1.1 地球的构造及地震的成因	1	4.1 结构隔震、消能和减震控制总论	86
1.2 地震的破坏作用	2	4.2 结构隔震	90
1.3 地震波、震级和烈度	7	4.3 结构消能减震	105
1.4 抗震设计的基本要求	11	4.4 结构主动减震控制简介	113
1.5 隔震和消能减震设计的概念和设防 目标	19	思考题	119
1.6 抗震结构的材料与施工	20	第5章 混凝土房屋结构抗震设计	120
思考题	21	5.1 震害及其分析	121
第2章 场地、地基和基础	22	5.2 多层和高层钢筋混凝土房屋抗震 设计的一般规定	126
2.1 场地	22	5.3 框架结构的抗震计算与构造要点	132
2.2 天然地基和基础抗震验算	25	5.4 框架-抗震墙结构的抗震计算与 构造要点	147
2.3 液化地基的判别与处理	26	5.5 单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计	156
2.4 地基的抗震加固	32	思考题	172
2.5 桩基抗震	33	第6章 钢结构房屋的抗震设计	173
2.6 地震引起的地面运动特性	35	6.1 多层和高层钢结构房屋抗震设计	173
思考题	38	6.2 多层钢结构厂房抗震设计	190
第3章 地震作用和结构抗震验算	39	6.3 单层钢结构厂房的抗震设计	193
3.1 单质点弹性体系的水平地震反应	40	思考题	195
3.2 加速度反应谱法	43	第7章 多层砌体及底层框架抗震 设计	197
3.3 多质点弹性体系的水平地震反应	48	7.1 震害及分析	197
3.4 多质点弹性体系水平地震作用的 确定	59	7.2 多层砌体及底层框架砌体结构抗 震设计	199
3.5 多质点弹性体系水平地震作用的 近似算法——底部剪力法	63	7.3 构造措施	211
3.6 考虑地基与结构动力相互作用的 楼层地震剪力调整	65	思考题	214
3.7 竖向地震作用的计算	66	第8章 构筑物抗震设计	216
3.8 结构自振频率的近似计算	68		
3.9 地震作用计算的一般规定	80		
3.10 结构抗震验算	81		
思考题	84		

8.1 构筑物震害及其分析·····	216	9.4 桥梁结构抗震设计验算与抗震措施·····	269
8.2 典型构筑物抗震设计·····	222	思考题·····	273
8.3 构筑物抗震构造措施·····	244	第10章 地下工程结构抗震设计 ·····	274
思考题·····	252	10.1 震害及其分析·····	274
第9章 梁桥结构抗震设计 ·····	253	10.2 典型地下结构的抗震设计·····	277
9.1 桥梁抗震概述·····	253	10.3 地下结构抗震构造措施·····	288
9.2 桥梁抗震设计的基本规定·····	255	思考题·····	293
9.3 桥梁抗震设计的地震荷载计算·····	258	参考文献 ·····	294

第1章

绪论

地震和刮风下雨一样,是一种自然现象,它对人们的生命和财产造成巨大损失。据统计,地球上每年大约发生 500 万次地震,其中有感地震(里氏 2~4 级)大约有 15 万次,造成严重破坏的地震(里氏 5 级以上)近 20 次,毁灭性的地震约 2 次。

20 世纪全世界发生过 20 多次 7 级以上的大地震,死亡 100 多万人,我国占有其中 3 次,死亡 44 万多人(1920 年海原 8.5 级地震死亡 20 万人,1976 年唐山 7.6 级地震死亡 24 万人,1999 年台湾 7.3 级地震死亡 2 500 多人)。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、华县等地区都发生过比较严重的地震。

为了尽量减少地震对人类带来的损失,一个很重要的方面就是工程结构的抗震,它包括建筑物、构筑物、桥梁、地下结构的抗震。本章主要就地震的基本知识做一简单介绍。

1.1 地球的构造及地震的成因

地球是一个椭圆球体,平均半径约 6 400 km,它主要由三层不同的物质构成(图 1.1):

第一层为地壳,厚约 5~40 km,主要由海水、风化土、花岗岩和玄武岩组成,厚薄不均。绝大多数地震均发生在这一层。

第二层为地幔,厚约 2 900 km,主要由橄榄岩组成,相对密度约 3.9~5.1。由于地球内部压力随深度而增大,内部放射性物质不断释放热量,地球内部的温度也随深度而增高。在地幔的上部(地下 700 km 深处)的温度已达 2 000 °C。地幔在高温高压作用下处于一种软流塑状态。由于地幔内部温度的不均匀以及地球自转速度的不均匀产生加速度,地幔中的物质不断在产生缓慢的对流运动,导致内部不平衡压应力的产生。

第三层为地核,厚约 3 500 km,其主要物质为铁和镍。地核又可分为外核和内核,外核厚约 2 100 km,据推测为液态,内核则可能为固态。

由地球的构造可以看到,地壳如同浮在水面上的筏板。当地球的转速不均匀或底下的地幔软流体产生运动时,都将对地壳的板块产生力的作用。当这种力集聚到一定程度后,将使地壳的

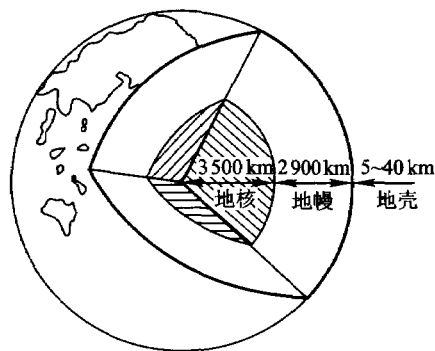


图 1.1 地球的构造

薄弱岩层产生褶皱和弯曲,最终产生断裂破碎(图 1.2)。

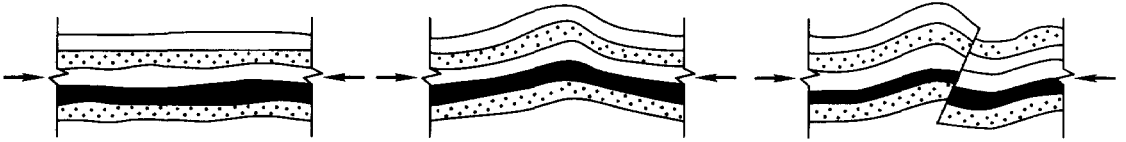


图 1.2 岩层的断裂

地壳的板块构造学说认为,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。这些板块在相对缓慢地运动着,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。因此在世界范围形成了环太平洋地震带(沿南北美洲西海岸、阿留申群岛转向到日本列岛,再经我国的东海岸到达菲律宾、新几内亚和新西兰),欧亚地震带(从大西洋的亚速岛,经过意大利、土耳其、伊朗、印度的北部到我国的西部及西南地区、再过缅甸至印度尼西亚)这两大主要地震活动地带。

上述地震是由于地球内部岩层构造产生错动而产生的,称为构造地震。地球上 90% 以上的地震属于构造地震。

除了构造地震外,还有由于火山喷发引发的火山地震;岩层坍塌引发的坍塌地震(如大面积的矿山采空区坍塌);抽水注水引发的地震和爆破、山崩引发的地震。这些地震发生的频率较低,影响区域也相对较小。

1.2 地震的破坏作用

近一个世纪,全世界发生了几十次大地震,主要情况如表 1.1。

表 1.1 近百年世界主要大地震情况表

时 间	地 点	震 级	死亡人数
1906 年	美国洛杉矶	8.3	3 000
1920 年	中国甘肃	8.5	200 000
1923 年	日本东京	8.3	142 800
1950 年	印度阿萨姆	8.4	
1960 年	智利	8.9	
1964 年	日本新潟	7.5	
1976 年	中国唐山	7.6	240 000
1980 年	阿尔及利亚	7.3	

续表

时 间	地 点	震 级	死亡人数
1980 年	意大利	7.2	2 735
1981 年 6 月	伊朗	6.8	3 000
1981 年 7 月	伊朗	7.3	1 500
1985 年 9 月	墨西哥	8.1	12 000
1986 年 10 月	萨尔瓦多	7.5	1 500
1987 年 3 月	厄瓜多尔	7.0	1 000 余
1988 年 12 月	苏联西部	6.9	25 000
1990 年	伊朗(2 次地震)	7.7	75 000
1990 年 7 月	菲律宾吕宋	7.7	1 621
1991 年 2 月	巴基斯坦	6.8	200
1991 年 2 月	阿富汗	6.8	1 000
1992 年 12 月	印度尼西亚	7.5	2 500
1993 年 7 月	日本北海道	7.8	248
1993 年 2 月	印度尼西亚	7.0	217
1994 年 6 月	哥伦比亚	6.8	1 000
1995 年 1 月	日本神户	7.2	6 300
1995 年 5 月	俄罗斯库页岛	7.5	2 700
1995 年 10 月	印度尼西亚	7.0	100 余
1996 年 2 月	中国云南	7.0	322
1996 年 2 月	印度尼西亚	8.0	145
1997 年 3 月	巴基斯坦	7.3	1 000 余
1998 年	阿富汗(2 次地震)	7.1	5 000
1999 年 1 月	哥伦比亚	7.1	1 200
1999 年 9 月	中国台湾集集	7.3,7.8	2 500
2001 年 1 月	印度	7.9	2 000 余
2001 年 2 月	美国西雅图	6.8	
2001 年 2 月	加拿大温哥华	7.0	

1.2.1 地表和道路的破坏

大地震使地表发生大的改变,造成地陷、地裂、山崩、滑坡、地表隆起及喷砂冒水等现象,使房屋的地基、道路、地下结构等发生破坏,造成灾害(图 1.3 和图 1.4)。

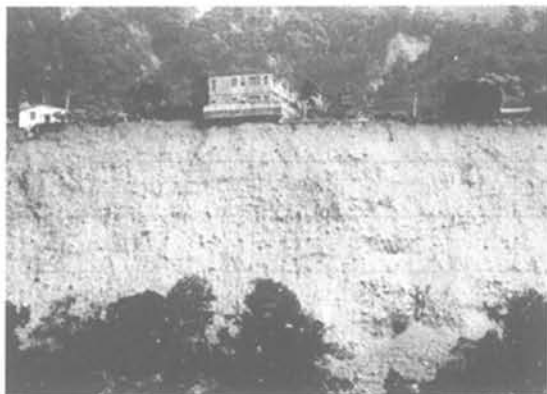


图 1.3 地震引起山体滑坡



图 1.4 道路裂缝

1.2.2 桥梁结构的破坏

在水平地震作用和竖向地震作用下,沿桥的纵向和横向在上下部结构上均产生严重的破坏,如:基础的破坏(基础整体翻转,见图 1.5);桥墩的破坏(在地震剪力作用下出现典型斜裂缝,见图 1.6)。



图 1.5 桥梁基础整体翻转



图 1.6 桥墩斜裂缝



图 1.7 桥梁滑落

1.2.4 桥梁支座的破坏(图 1.8,图 1.9)

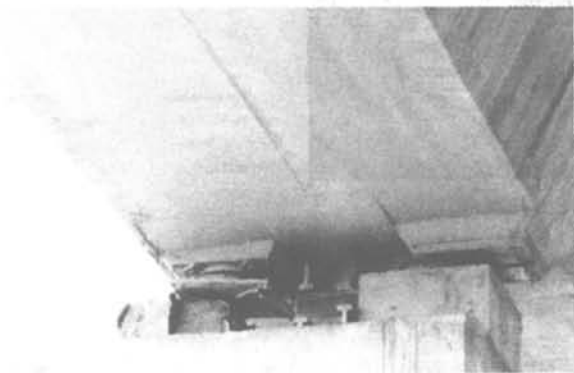


图 1.8 桥梁支座滑移



图 1.9 桥梁支座压碎

1.2.5 房屋结构的破坏

结构部件强度不足,在剪力、弯矩、轴力和扭矩共同作用下由构件的破坏导致结构丧失稳定性,连接部件和锚固失效导致结构丧失整体性(图 1.10)。

结构节点强度不足而引起节点破坏(图 1.11)。

地基失效而引起房屋基础及房屋破坏(图 1.12)。



图 1.10 建筑物倒塌



图 1.11 梁柱接头破坏



图 1.12 地基隆起导致建筑物破坏

1.2.6 次生灾害

次生灾害有火灾(图 1.13)、水灾、毒气污染、山崩、泥石流、海啸等。例如 1995 年日本阪神大地震(死亡 5 200 多人,伤 26 800 多人),10 万栋房屋遭到破坏,但大部分并不是震坏,而是被大火烧毁。大地震发生 12 h 后,仍有大片地区陷在火海中。火灾主要是由于震后煤气泄漏而产生的。又例如,1906 年美国旧金山大地震,共烧毁房屋 28 000 栋;1923 年日本关东大地震,被震倒的房屋有 13 万栋,但是被烧毁的却达 45 万栋之多。另外,海啸也是会造成巨大灾害的次生灾

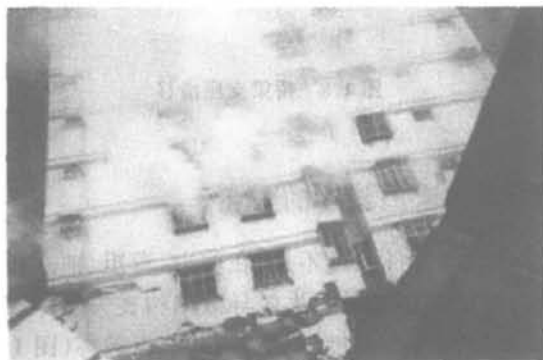


图 1.13 地震引起火灾

害。1960年智利沿海发生大地震,远在17 000 km以外的日本本州和北海道等太平洋沿岸地区却遭到了海啸袭击,海浪高达4 m,在地震发生22 h后以640 km/h的速度扫荡了沿岸码头建筑和巨型船只。1970年秘鲁发生大地震,瓦斯长兰山的泥石流以320 km/h的速度从3 750 m的高峰倾泻而下,摧毁了山下的村镇和建筑,使地形地貌大为改变。

1.3 地震波、震级和烈度

1.3.1 地震波

当岩层断裂错动或者其他原因引发地震时,地下积蓄的变形能量以波的形式释放,从震源向四周传播,这就是地震波。

地震波是一种体波,它主要有两种成分:

(1) 压缩波(P波),又称纵波或疏密波。它使得质点的振动方向与波的前进方向一致,可在固体或液体中传播。其特点是周期短、振幅小。

从物理学可知,压缩波的波速为:

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

式中: E 为介质的弹性模量; ρ 为介质密度; μ 为介质的泊松比。

(2) 剪切波(S波),又称横波或等容波。它使得介质的震动方向与波的前进方向垂直,仅能在固体中传播。其特点是周期较长、振幅大。

从物理学可知,剪切波的波速为:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.2)$$

式中: $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$,称为介质的切变模量。

若取 $\mu = 0.25$,由上式有 $v_p = \sqrt{3}v_s$ 。可见,压缩波比剪切波的传播速度高。

当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,它主要有两种成分:(1)瑞利波(R波);(2)乐甫波(L波)。

如图1.14所示乐甫波主要使地面产生水平的摆动,质点振动方向垂直于波的方向;瑞利波

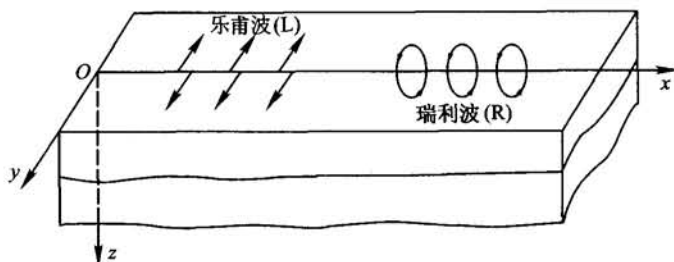


图 1.14 面波的振动形式

(R 波)不仅使地面产生水平方向的摆动,还使地面向上下颠簸振动。

面波的波速比体波低,且具有随土层深度增加而急剧减小的趋势。

根据记录的地震波曲线(图 1.15)可看到,压缩波最先到达,然后是剪切波,再后是面波(L 波和 R 波)到达。

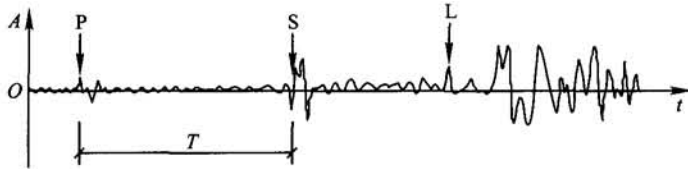


图 1.15 地震波曲线

利用 P 波与 S 波到达测量仪位置的时间差 T 可得到震源距 A 。

$$\text{由于} \quad T = \frac{A}{v_s} - \frac{A}{v_p} = \frac{A}{\frac{v_p v_s}{v_p - v_s}} = \frac{A}{v} \quad (1.3)$$

$$\text{故有} \quad A = T \cdot v \quad (1.4)$$

式中: $v = \frac{v_p v_s}{v_p - v_s}$, 称为虚波波速。

根据测量仪附近的地质情况可事先求得虚波波速 v , 一般情况下可取 $v \approx 8 \text{ km/s}$ 。

1.3.2 地震震级

地震的震级一般采用里氏震级,它是由里克特(C.F.Richter)在 1935 年首先提出的,即在离震中 100 km 处由 Wood-Anderson 式标准地震仪(摆的自振周期为 0.8 s, 阻尼系数 0.8, 放大倍数为 2 800)所记录到的最大水平位移 A (单振幅, 单位为 10^{-3} mm)的常用对数 M :

$$M = \lg A \quad (1.5)$$

此处 M 即为里氏震级。当震中距不是 100 km 时, 则需按修正公式进行计算:

$$M = \lg A - \lg A_0 \quad (1.6)$$

式中: A_0 为被选为标准的某一特定地震的最大振幅。

地震震级与地震释放的能量有如下经验关系式:

$$\lg E = 1.5M + 11.8 \quad (1.7)$$

式中: E 为地震释放的能量, 单位为 erg。

一个 6 级地震释放的能量相当于一个 2 万吨级的原子弹。 M 每增加一级释放的能量将增加 32 倍。地震的震级是衡量一次地震释放能量大小的尺度。一次地震对地面的影响程度与许多因素有关, 除了震级以外, 还与震源深度、震中距等因素有关(图 1.16)。

当震源深度小于 60 km 时, 称为浅源地震; 60 ~ 300 km 称为中源地震; 大于 300 km 时称为深源地震。我国大部分地区的地震都属于浅源地震, 在台湾、西藏、新疆有中源地震; 东北地区有 400 ~ 600 km 的深源地震。目前世界上观测到的最大震源深度是 720 km。浅源地震由于震源距地面很近, 故对地面的影响很大。近几年在中国台湾集集镇发生的地震(1999 年)震源深度只有

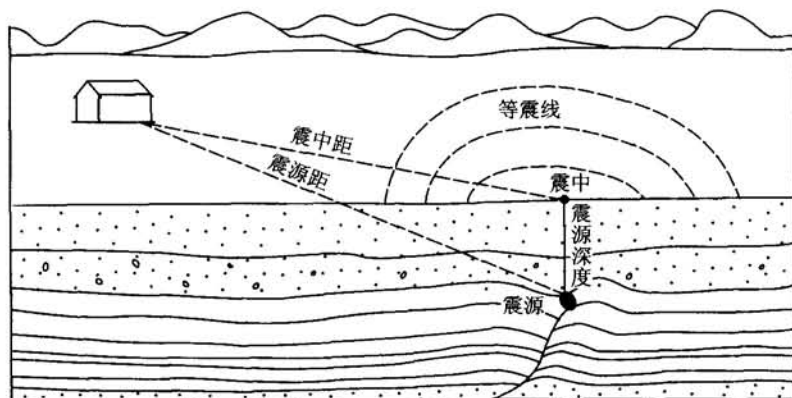


图 1.16 地震术语示意图

7 km,在日本神户发生的地震(1995年)震源深度为 20 km,对地面上的地形、建筑物均造成了巨大的损毁。

1.3.3 烈度

1. 地震烈度

一次地震只有一个震级,但由于各地区距震中的远近不同、地质情况和建筑物状况也不同,故各地区所遭受到的地震影响程度也不同。因此一次地震对于不同的地区有多个烈度,即地震烈度。

地震烈度是指某一个地区、地面及房屋建筑等工程结构遭受到一次地震影响的强烈程度。

我国根据房屋建筑震害指数、地表破坏程度及地面运动加速度指标将地震烈度分为 12 度,制定了《中国地震烈度表》(表 1.2)。

表 1.2 中国地震烈度表(1999)

烈度	在地面上人的感觉	房屋震害程度		其他现象	物理参量	
		震害现象	平均震害指数		峰值加速度 $I/(m/s^2)$	峰值速度 $I/(m/s)$
1	无感					
2	室内个别静止中的人有感觉					
3	室内少数静止中的人有感觉	门、窗轻微作响		悬挂物微动		
4	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		