

新世纪土木工程专业系列教材  
国家级精品课程教材

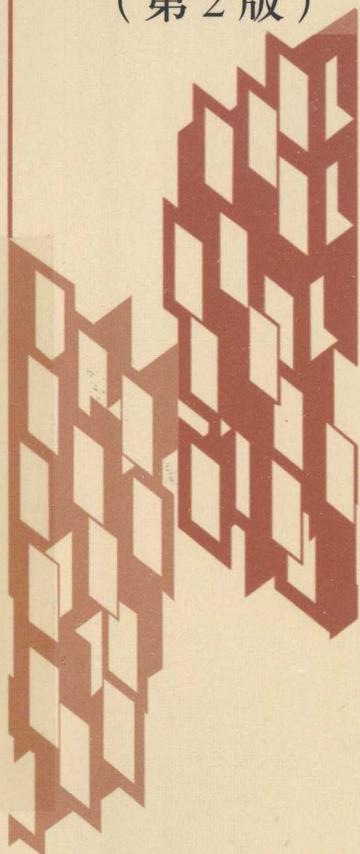


# 工程结构抗震与防灾

GONGCHENG JIEGOU KANGZHEN YU FANGZAI

(第2版)

李爱群  
高振世 主编  
张志强



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

新世纪土木工程专业系列教材

# 工程结构抗震与防灾

(第2版)

李爱群 高振世 张志强 主编

东南大学出版社

## 内 容 提 要

本书根据土木工程本科教学要求,并结合《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)等国家新规范进行编写。

本书以结构抗震为主,同时介绍了结构抗风和抗火等方面的内容。主要内容包括:结构抗震基本知识、结构抗震概念设计、结构抗震计算、混凝土结构房屋抗震设计、砌体结构房屋抗震设计、钢结构房屋抗震设计、结构隔震和消能减震设计、桥梁结构抗震设计、结构抗风计算与设计、结构抗火计算与设计等。

本书可用作土木工程专业本科教材或教学参考书,也可供研究生和有关技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程结构抗震与防灾/李爱群,高振世,张志强主编.

—2版. —南京:东南大学出版社,2012.8

(新世纪土木工程专业系列教材)

ISBN 978-7-5641-3687-1

I. ①工… II. ①李…②高…③张… III. ①工程结构—抗震设计—高等学校—教材②工程结构—防护结构—结构设计—高等学校—教材 IV. ①TU352.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 171003 号

东南大学出版社出版发行

(南京市四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:江建中

江苏省新华书店经销 常州市武进第三印刷有限公司印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:19.5 字数:487千字

2003年8月第1版 2012年8月第2版 第1次印刷

ISBN 978-7-5641-3687-1

印数:1~3000册 定价:37.00元

(凡因印装质量问题,可直接向营销部调换。电话:025—83791830)

# 新世纪土木工程专业系列教材编委会

顾问 丁大钧 容柏生 沙庆林

主任 吕志涛

副主任 蒋永生 陈荣生 邱洪兴 黄晓明

委员 (以姓氏笔画为序)

丁大钧 王 炜 冯 健 叶见曙 石名磊 刘松玉 吕志涛

成 虎 李峻利 李爱群 沈 杰 沙庆林 邱洪兴 陆可人

舒赣平 陈荣生 单 建 周明华 胡伍生 唐人卫 郭正兴

钱培舒 曹双寅 黄晓明 龚维明 程建川 容柏生 蒋永生

# 序

东南大学是教育部直属重点高等学校,在 20 世纪 90 年代后期,作为主持单位开展了国家级“20 世纪土建类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”课题的研究,提出了由土木工程专业指导委员会采纳的“土木工程专业人才培养的知识结构和能力结构”的建议。在此基础上,根据土木工程专业指导委员会提出的“土木工程专业本科(四年制)培养方案”,修订了土木工程专业教学计划,确立了新的课程体系,明确了教学内容,开展了教学实践,组织了教材编写。这一改革成果,获得了 2000 年教学成果国家级二等奖。

这套新世纪土木工程专业系列教材的编写和出版是教学改革的继续和深化,编写的宗旨是:根据土木工程专业知识结构中关于学科和专业基础知识、专业知识以及相邻学科知识的要求,实现课程体系的整体优化;拓宽专业口径,实现学科和专业基础课程的通用化;将专业课程作为一种载体,使学生获得工程训练和能力的培养。

新世纪土木工程专业系列教材具有下列特色:

## 1. 符合新世纪对土木工程专业的要求

土木工程专业毕业生应能在房屋建筑、隧道与地下建筑、公路与城市道路、铁道工程、交通工程、桥梁、矿山建筑等的设计、施工、管理、研究、教育、投资和开发部门从事技术或管理工作,这是新世纪对土木工程专业的要求。面对如此宽广的领域,只能从终身教育观念出发,把对学生未来发展起重要作用的基础知识作为优先选择的内容。因此,本系列的专业基础课教材,既打通了工程类各学科基础,又打通了力学、土木工程、交通运输工程、水利工程等大类学科基础,以基本原理为主,实现了通用化、综合化。例如工程结构设计原理教材,既整合了建筑结构和桥梁结构等内容,又将混凝土、钢、砌体等不同材料结构有机地综合在一起。

## 2. 专业课程教材分为建筑工程类、交通土建类、地下工程类三个系列

由于各校原有基础和条件的不同,按土木工程要求开设专业课程的困难较大。本系列专业课教材从实际出发,与设课群组相结合,将专业课程教材分为建筑工程类、交通土建类、地下工程类三个系列。每一系列包括有工程项目的规划、选型或选线设计、结构设计、施工、检测或试验等专业课系列,使自然科学、工程技术、管理、人文学科乃至艺术交叉综合,并强调了工程综合训练。不同课群组可以交叉选课。专业系列课程十分强调贯彻理论联系实际的教学原则,融知识和能力为一体,避免成为职业的界定,而主要成为能力培养的载体。

## 3. 教材内容具有现代性,用整合方法大力精减

对本系列教材的内容,本编委会特别要求不仅具有原理性、基础性,还要求具有现代性,纳入最新知识及发展趋向。例如,现代施工技术教材包括了当代最先进的施工技术。

在土木工程专业教学计划中,专业基础课(平台课)及专业课的学时较少。对此,除了少而精的方法外,本系列教材通过整合的方法有效地进行了精减。整合的面较宽,包括了土木工程

各领域共性内容的整合,不同材料在结构、施工等教材中的整合,还包括课堂教学内容与实践环节的整合,可以认为其整合力度在国内是最大的。这样做,不只是为了精减学时,更主要的是可淡化细节了解,强化学习概念和综合思维,有助于知识与能力的协调发展。

#### 4. 发挥东南大学的办学优势

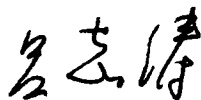
东南大学原有的建筑工程、交通土建专业具有 80 年的历史,有一批国内外著名的专家、教授。他们一贯严谨治学,代代相传。按土木工程专业办学,有土木工程和交通运输工程两个一级学科博士点、土木工程学科博士后流动站及教育部重点实验室的支撑。近十年已编写出版教材及参考书 40 余本,其中 9 本教材获国家和部、省级奖,4 门课程列为江苏省一类优秀课程,5 本教材被列为全国推荐教材。在本系列教材编写过程中,实行了老中青相结合,老教师主要担任主审,有丰富教学经验的中青年教授、教学骨干担任主编,从而保证了原有优势的发挥,继承和发扬了东南大学原有的办学传统。

新世纪土木工程专业系列教材肩负着“教育要面向现代化,面向世界,面向未来”的重任。因此,为了出精品,一方面对整合力度大的教材坚持经过试用修改后出版,另一方面希望大家在积极选用本系列教材中,提出宝贵的意见和建议。

愿广大读者与我们一起把握时代的脉搏,使本系列教材不断充实、更新并适应形势的发展,为培养新世纪土木工程高级专门人才作出贡献。

最后,在这里特别指出,这套系列教材,在编写出版过程中,得到了其他高校教师的大力支持,还受到作为本系列教材顾问的专家、院士的指点。在此,我们向他们一并致以深深的谢意。同时,对东南大学出版社所作出的努力表示感谢。

中国工程院院士



2001 年 9 月

## 第 2 版修订说明

由我校编写、东南大学出版社出版的《工程结构抗震与防灾》于 2003 年 8 月出版发行,迄今已 9 年。期间,教材所涉及的《建筑抗震设计规范》、《混凝土结构设计规范》等国家规范已做了修订,为此本教材编写组结合上述新规范对原教材进行了相应的修订,以适应形势并满足土木工程本科专业的教学要求。

本书的修订工作由李爱群教授和张志强副教授负责。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)对该书进行修订的部分由张志强具体编写,李爱群审定。

修订过程中,研究生齐曼亦协助做了编写工作,在此深表谢意。

敬请读者继续就书中的疏漏和不妥之处给予批评指正。

编者于东南大学

2012. 5. 20

## 前 言

本书是在东南大学编著的高等学校推荐教材《建筑结构抗震设计》基础上,为适应土木工程本科专业的教学要求而组织编写的。本书的编写突出了以下特点:

(1) 由通常的“建筑结构抗震设计”拓展至“工程结构抗震与防灾”,新增了结构隔震和消能减振、桥梁结构抗震、结构抗风和结构抗火等内容,较大程度地拓宽了知识的广度和深度,以更好地满足土木工程本科专业的教学需要;

(2) 以各类结构抗震为重点,同时介绍结构抗风和抗火等方面的内容;

(3) 按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)等国家新规范进行编写;

(4) 注重基本概念、基本理论和基本方法,注重内容的系统性和先进性,注重理论和工程实践的结合,注重学生启发性和创造性思维的培养与训练。

本书在编写过程中,学习和参考了大量兄弟院校和科研院所出版的教材和论著,在此谨向原编著者致以诚挚的谢意。

本书由李爱群教授、高振世教授主编,李爱群教授、高振世教授、梁书亭教授、王修信教授、陈忠范教授、叶继红教授、刘钊副教授等共同编著。具体分工如下:

第1章(除§1-5)、第3章§3-1和§3-2、第4章、第7章由李爱群编写,第1章§1-5由高振世编写,第2章(除§2-6)、第3章§3-3由梁书亭编写,第2章§2-6由王修信编写,第6章由陈忠范编写,第3章§3-4由叶继红编写,第5章由刘钊、王修信、徐文平编写。全书由李爱群负责统稿。

编写过程中,博士生毛利军、叶正强和硕士生丁幼亮等协助做了大量工作,在此深表谢意。限于时间和水平,书中的疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者于东南大学土木工程学院

2003. 7



# 目 录

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| <b>第 1 章 结构抗震基本知识</b> .....        | (1)   |
| § 1-1 地震基本知识 .....                 | (1)   |
| § 1-2 地震的基本术语 .....                | (4)   |
| § 1-3 地震动特性 .....                  | (6)   |
| § 1-4 工程结构的抗震设防 .....              | (7)   |
| § 1-5 建筑场地 .....                   | (11)  |
| 复习思考题 .....                        | (17)  |
| <b>第 2 章 结构抗震计算</b> .....          | (18)  |
| § 2-1 计算原则 .....                   | (18)  |
| § 2-2 地震作用 .....                   | (22)  |
| § 2-3 设计反应谱 .....                  | (30)  |
| § 2-4 振型分解反应谱法 .....               | (35)  |
| § 2-5 底部剪力法 .....                  | (53)  |
| § 2-6 时程分析法 .....                  | (57)  |
| § 2-7 结构竖向地震作用 .....               | (77)  |
| § 2-8 结构抗震验算 .....                 | (80)  |
| 复习思考题 .....                        | (85)  |
| <b>第 3 章 建筑结构抗震设计</b> .....        | (87)  |
| § 3-1 结构抗震概念设计 .....               | (87)  |
| § 3-2 混凝土结构房屋抗震设计 .....            | (97)  |
| § 3-3 砌体结构房屋抗震设计 .....             | (144) |
| § 3-4 钢结构房屋抗震设计 .....              | (162) |
| 复习思考题 .....                        | (185) |
| <b>第 4 章 建筑结构基础隔震和消能减震设计</b> ..... | (189) |
| § 4-1 建筑结构基础隔震设计 .....             | (189) |
| § 4-2 建筑结构消能减震设计 .....             | (207) |
| 复习思考题 .....                        | (217) |
| <b>第 5 章 桥梁结构抗震设计</b> .....        | (218) |
| § 5-1 桥梁震害及其分析 .....               | (218) |
| § 5-2 桥梁按反应谱理论的计算方法 .....          | (221) |
| § 5-3 桥梁结构地震响应分析 .....             | (229) |
| § 5-4 桥梁抗震延性设计 .....               | (235) |
| 复习思考题 .....                        | (241) |
| <b>第 6 章 建筑结构抗风设计</b> .....        | (243) |
| § 6-1 风灾及其成因 .....                 | (243) |
| § 6-2 风荷载计算 .....                  | (246) |
| § 6-3 结构顺风向抗风设计 .....              | (262) |

|                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| § 6-4 结构横风向风振计算 .....       | (263)        |
| 复习思考题 .....                 | (267)        |
| <b>第 7 章 建筑结构抗火设计 .....</b> | <b>(268)</b> |
| § 7-1 火灾及其成因 .....          | (268)        |
| § 7-2 结构抗火设计的一般原则和方法 .....  | (271)        |
| § 7-3 建筑材料的高温性能 .....       | (276)        |
| § 7-4 结构构件的耐火性能 .....       | (285)        |
| § 7-5 钢筋混凝土构件抗火计算与设计 .....  | (291)        |
| § 7-6 钢结构构件抗火计算与设计 .....    | (293)        |
| 复习思考题 .....                 | (297)        |
| <b>参考文献 .....</b>           | <b>(298)</b> |

# 第 1 章 结构抗震基本知识

**学习目的:**了解地震的主要类型及其成因;了解地震波的运动规律;掌握震级、地震烈度、基本烈度等术语;了解地震动的三大特性及其规律;了解地震动的竖向分量、扭转分量及其震害现象;掌握建筑抗震设防分类、抗震设防目标和两阶段抗震设计方法;了解多遇地震烈度和罕遇地震烈度的确定方法;了解基于性能的抗震设计的基本思想;掌握建筑场地类别划分方法;掌握场地液化的判别方法并了解抗液化措施。

**教学要求:**通过地震及其成因、地震波运动规律、地震动三大特性、“三水准两阶段”设计方法、若干地震工程术语、建筑场地类别和场地液化等的介绍和分析,建立结构抗震的基本概念,提高对工程结构抗震重要性的认识。

## § 1-1 地震基本知识

### 一、地球的构造

地球是一个平均半径约 6 400 km 的椭圆球体。由外到内可分为 3 层:最表面的一层是很薄的地壳,平均厚度约为 30 km;中间很厚的一层是地幔,厚度约为 2 900 km;最里面的为地核,其半径约为 3 500 km。

地壳由各种岩层构成。除地面的沉积层外,陆地下面的地壳通常由上部的花岗岩层和下部的玄武岩层构成;海洋下面的地壳一般只有玄武岩层。地壳各处厚薄不一,为 5~40 km。世界上绝大部分地震都发生在这一薄薄的地壳内。

地幔主要由质地坚硬的橄榄岩组成。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 20 km 到地下 700 km,其温度由大约 600℃ 上升到 2 000℃。在这一范围内的地幔中存在着一个厚约几百公里的软流层。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 900 MPa,地幔中间则达 370 000 MPa。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 700 km 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 2 100 km)和内核,其主要构成物质是镍和铁。据推测,外核可能处于液态,而内核可能是固态。

### 二、地震的类型与成因

地震按其成因主要分为火山地震、陷落地震和构造地震。

由于火山爆发而引起的地震叫火山地震;由于地表或地下岩层突然大规模陷落和崩塌而造

成的地震叫陷落地震；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。火山地震和陷落地震的影响范围和破坏程度相对较小，而构造地震的分布范围广、破坏作用大，因而对构造地震应予以重点考虑。就构造地震的成因，仅介绍断层说和板块构造说。

### 1. 断层说

构造地震是由于地球内部在不断运动的过程中，始终存在着巨大的能量，造成地壳岩层不停地连续变动，不断地发生变形，产生地应力。当地应力产生的应变超过某处岩层的极限应变时，岩层就会发生突然断裂和错动。而承受应变的岩层在其自身的弹性应力作用下发生回弹，迅速弹回到新的平衡位置。这样，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释放，并以弹性波的形式传至地面，从而引起振动，形成地震(图 1—1)。构造地震与地质构造密切相关，这种地震往往发生在地应力比较集中、构造比较脆弱的地段，即原有断层的端点或转折处、不同断层的交会处。

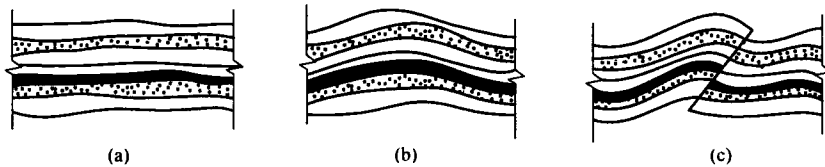


图 1—1 构造地震的形成

(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

### 2. 板块构造说

板块构造学说认为，地球表面的岩石层不是一块整体，而是由六大板块和若干小板块组成，这六大板块即欧亚板块、美洲板块、非洲板块、太平洋板块、澳洲板块和南极板块。由于地幔的对流，这些板块在地幔软流层上异常缓慢而又持久地相互运动着。由于它们的边界是相互制约的，因而板块之间处于拉张、挤压和剪切状态，从而产生了地应力。当应力产生的变形过大时致使其边缘附近岩石层脆性破裂而产生地震。地球上的主要地震带就位于这些大板块的交界地区。

## 三、世界的地震活动

据统计，地球上平均每年发生震级为 8 级以上、震中烈度 11 度以上的毁灭性地震 2 次；震级为 7 级以上、震中烈度在 9 度以上的大地震不到 20 次；震级在 2.5 级以上的有感地震在 15 万次以上。

在宏观地震资料调查和地震台观测数据研究的基础上，可以得到世界范围内的两主要地震带：一是环太平洋地震带，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。全球约 80% 浅源地震和 90% 的中源、深源地震，以及几乎所有的深源地震都集中在这一地带。二是欧亚地震带，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带衔接。除分布在环太平洋地震活动带的中源、深源地震以外，几乎所有其他中源、深源地震和一些大的浅源地震都发生在这一活动带。

此外，在大西洋、太平洋和印度洋中也有呈条形分布的地震带。

## 四、我国的地震活动

我国东临环太平洋地震带，南接欧亚地震带，是世界上多地震国家之一，地震分布相当广

泛。我国主要地震带有两条：一是南北地震带，它北起贺兰山，向南经六盘山，穿越秦岭沿川西至云南省东北，纵贯南北。二是东西地震带，主要的东西构造带有两条，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，自帕米尔高原起经昆仑山、秦岭，直到大别山区。

据此，我国大致可划分成6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东南沿海地震活动区。

据统计，全国除个别省份（例如浙江、江西）外，绝大部分地区都发生过较强的破坏性地震，有不少地区现在地震活动还相当强烈，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。

### 五、近期世界地震活动

近半个世纪以来，国内外发生的大地震如表1-1所示。

表1-1 近期世界地震情况

| 时间         | 地点      | 震级  | 死亡人数(备注)  | 时间         | 地点       | 震级  | 死亡人数(备注)        |
|------------|---------|-----|-----------|------------|----------|-----|-----------------|
| 1960.5.22  | 智利南部    | 8.5 | 1 200 人   | 1997.5.10  | 伊朗东北部    | 6.1 | 1 560 多人        |
| 1964.3.27  | 美国阿拉斯加  | 8.4 | 130 人     | 1998.2.4   | 阿富汗塔哈尔省  | 6.1 | 4 500 多人        |
| 1964.6.27  | 日本新泻    | 7.5 |           | 1998.5.30  | 阿富汗塔哈尔省  |     | 3 000 多人        |
| 1968.5.16  | 日本十胜冲   | 7.5 |           | 1999.1.25  | 哥伦比亚     | 6.2 | 1 200 多人        |
| 1970.1.5   | 中国通海    | 7.7 | 15 621 人  | 1999.8.17  | 土耳其西部    | 7.4 | 1.3 万人          |
| 1970.5.31  | 秘鲁北部    | 7.6 | 66 794 人  | 1999.9.21  | 中国台湾     | 7.6 | 2 300 多人        |
| 1973.2.6   | 中国甘孜    | 7.9 | 2 199 人   | 1999.9.30  | 墨西哥      | 7.5 |                 |
| 1975.2.4   | 中国海城    | 7.3 | 1 300 多人  | 1999.11.12 | 土耳其博鲁省   | 7.2 | 约 1 000 人       |
| 1976.2.4   | 危地马拉    | 7.5 | 22 778 人  | 2000.1.13  | 萨尔瓦多     | 7.6 | 约 1 000 人       |
| 1976.7.28  | 中国唐山    | 7.8 | 242 769 人 | 2000.6.4   | 印度明古鲁省   | 7.9 |                 |
| 1980.10.10 | 阿尔及利亚   | 7.3 | 2 500 多人  | 2001.1.26  | 印度西部     | 7.9 | 2 000 多人        |
| 1980.11.23 | 那不勒斯市   | 7.2 | 2 735 人   | 2001.6.24  | 秘鲁       | 7.9 |                 |
| 1981.6.11  | 伊朗克尔曼省  | 6.8 | 3 000 多人  | 2001.10.31 | 中国云南省永胜县 | 6.0 |                 |
| 1981.7.28  | 伊朗克尔曼省  | 7.3 | 1 500 多人  | 2001.10.31 | 巴布亚新几内亚  | 7.0 |                 |
| 1982.12.12 | 也门扎马尔省  | 6.0 | 3 000 多人  | 2001.11.14 | 新疆青海交界   | 8.1 |                 |
| 1983.10.23 | 土耳其     | 6.0 | 1 300 多人  | 2002.3.3   | 阿富汗      | 7.1 |                 |
| 1985.9.19  | 墨西哥城    | 8.1 | 6 000 多人  | 2002.3.6   | 菲律宾      | 7.1 |                 |
| 1986.10.10 | 萨尔瓦多    | 7.5 | 1 500 多人  | 2002.6.27  | 苏门答腊西南   | 7.4 |                 |
| 1987.3.5   | 厄瓜多尔    | 7.0 | 1 000 多人  | 2002.6.29  | 中国吉林汪清   | 7.2 | 深源无损伤           |
| 1988.12.7  | 亚美尼亚    | 6.9 | 2.5 万人    | 2003.2.24  | 中国新疆巴楚伽师 | 6.8 | 260 多人          |
| 1990.6.21  | 伊朗里海地区  | 7.7 | 3.5 万人    | 2004.12.26 | 苏门答腊岛北部  | 8.7 | 约 30 万人         |
| 1990.7.16  | 菲律宾     | 7.7 | 3.5 万人    | 2005.3.28  | 苏门答腊岛    | 8.7 | 近 2 000 人       |
| 1991.2.1   | 巴基斯坦    | 6.8 | 1 200 多人  | 2008.5.12  | 中国四川汶川   | 8.0 | 死亡及失踪<br>9 万余人  |
| 1992.12.12 | 印度尼西亚   | 6.8 | 2 200 多人  | 2010.1.12  | 海地       | 7.3 | 约 30 万人         |
| 1993.9.30  | 印度      | 6.4 | 2.2 万人    | 2010.2.27  | 智利       | 8.8 | 800 多人          |
| 1994.6.6   | 哥伦比亚    |     | 1 000 多人  | 2010.4.14  | 中国青海玉树   | 7.1 | 近 2 700 人       |
| 1995.1.17  | 日本神户    | 7.2 | 6 500 多人  | 2011.2.22  | 新西兰      | 6.3 | 约 170 人         |
| 1995.5.28  | 俄罗斯远东地区 | 7.5 | 2 000 多人  | 2011.3.11  | 日本东北地区   | 9.0 | 死亡及失踪<br>2.7 万人 |
| 1997.2.28  | 伊朗西北部   | 7.5 | 1 000 多人  |            |          |     |                 |

这些大地震不但造成了大量的人员伤亡和巨大的经济损失,还给人类在精神上以重创,因此人类一直在探求防御和减轻地震灾害的有效途径。

## § 1-2 地震的基本术语

### 一、震源和震中

地层构造运动中,在地下岩层产生剧烈相对运动的部位,产生剧烈振动,造成地震发生的地方叫做震源,震源正上方的地面位置叫震中。震中附近的地面振动最剧烈,也是破坏最严重的地区,叫震中区或极震区。地面某处至震中的水平距离叫做震中距。把地面上破坏程度相同或相近的点连成的曲线叫做等震线。震源至地面的垂直距离叫做震源深度,见图 1-2。按震源的深浅,地震又可分为 3 类:一是浅源地震,震源深度在 70 km 以内;二是中源地震,震源深度在 70~300 km 范围;三是深源地震,震源深度超过 300 km。浅源、中源和深源地震所释放的能量分别约占所有地震释放能量的 85%、12%和 3%。据了解,至今世界上震源深度最深的地震是 1934 年 6 月 9 日发生在印尼苏拉西岛东的地震,震源深度达 720 km;而最浅的震源深度不足 5 km。

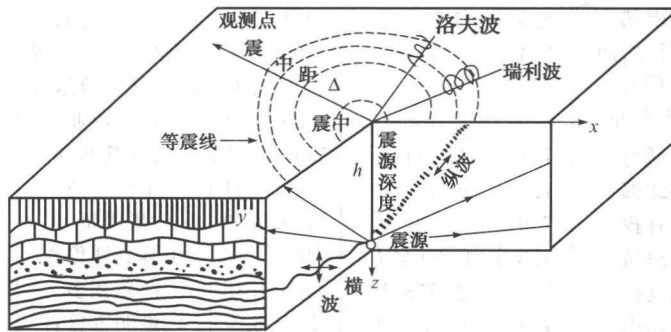


图 1-2 地震波传播示意图

### 二、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面附近传播的面波。

体波又包括两种形式的波,即纵波与横波。

在纵波的传播过程中,其介质质点的振动方向与波的前进方向一致,故又称为压缩波或疏密波;纵波的特点是周期较短、振幅较小。在横波的传播过程中,其介质质点的振动方向与波的前进方向垂直,故又称为剪切波;横波的周期较长、振幅较大,见图 1-3。体波在地球内部的传播速度随深度的增加而增大。

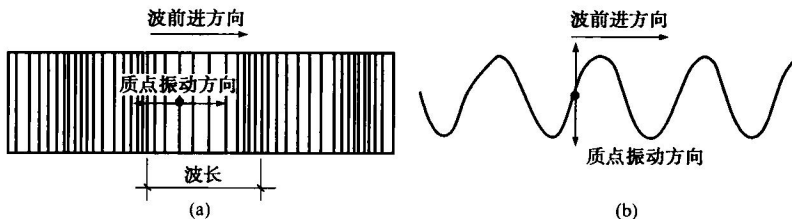


图 1-3 体波质点振动形式

(a) 压缩波; (b) 剪切波

观测表明,土层土质由软至硬,在其中传播的剪切波速由小到大。剪切波速度不仅与地基土的强度、变形特性等因素有密切关系,而且可采用较简便的仪器测得,故在地基土动力性质评价中占有重要地位。

由弹性理论计算的纵波与横波的传播速度可知,纵波比横波传播速度快。在仪器的观测记录纸上,纵波先于横波到达,故也可称纵波为初波(或称 P 波),称横波为次波(或称 S 波)。

面波是体波经地层界面多次反射、折射后形成的次生波,它包括两种形式的波,即瑞利波(R 波)和洛夫波(L 波)。瑞利波传播时,质点在波的传播方向和地面法线组成的平面内(xz 平面)作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,质点在地面上呈滚动形式(图 1-4a)。洛夫波传播时,质点只是在与传播方向相垂直的水平方向(y 方向)运动,在地面上呈蛇形运动形式(图 1-4b)。

面波振幅大、周期长,只在地表附近传播,比体波衰减慢,故能传播到很远的地方。

图 1-5 为某次地震所记录的地震波示意图。首先到达的是 P 波,继而是 S 波,面波到达的最晚。一般情况是,当横波或面波到达时,其振幅大,地面振动最猛烈,造成的危害也最大。

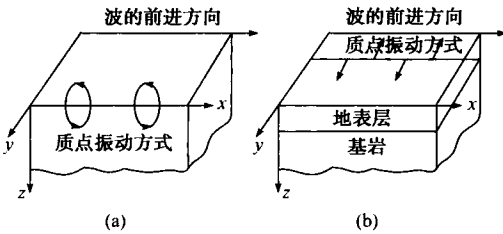


图 1-4 面波质点振动形式  
(a) 瑞利波质点振动;(b) 洛夫波质点振动

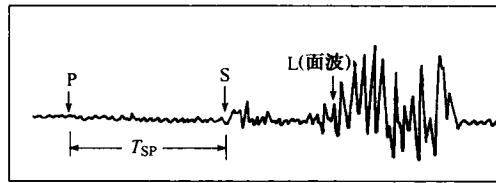


图 1-5 地震波记录图

### 三、震级

震级是表示地震本身大小的尺度,是按一次地震本身强弱程度而定的等级。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 C. F. Richter 给出,其地震震级 M 为

$$M = \lg A \quad (1-1)$$

式中,A 是标准地震仪(指摆的自振周期 0.8 s,阻尼系数 0.8,放大倍数 2 800 倍的地震仪)在距震中 100 km 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(即振幅)。例如,在距震中 100 km 处地震仪记录的振幅是 100 mm,即 100 000  $\mu\text{m}$ ,则  $M = \lg 100\,000 = 5$ 。

震级表示一次地震释放能量的多少,也是表示地震规模的指标,所以一次地震只有一个震级。震级每差一级,地震释放的能量将差 32 倍。

一般认为,小于 2 级的地震,人们感觉不到,只有仪器才能记录下来,称为微震;2~4 级地震,人可以感觉到,称为有感地震;5 级以上地震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。20 世纪以来,由仪器记录到的最大震级是 9.0 级,为 2011 年 3 月 11 日发生的日本东北地区太平洋近海地震。

#### 四、地震烈度

地震烈度表示地震时一定地点地面振动强弱程度的尺度。对于一次地震,表示地震大小的震级只有一个,但它对不同地点的影响是不一样的。一般来说,随距离震中的远近不同,烈度有所差异。距震中愈远,地震影响愈小,烈度就愈低;反之,距震中愈近,烈度就愈高。此外,地震烈度还与地震大小、震源深度、地震传播介质、表土性质、建筑物动力特性等许多因素有关。

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,即根据建筑物的损坏程度、地貌变化特征、地震时人的感觉、家具反应等方面进行区分。另以地面加速度峰值和速度峰值为烈度的参考物理指标,作为地区性直观烈度标志的共同校正标准,以开辟确定烈度的新途径。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有差异,加之各国建筑情况及地表条件的不同,各国所制定的烈度表也就不同。现在,除了日本采用从 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。

一般来说,震中烈度是地震大小和震源深度两者的函数。对于大量的震源深度在 10~30 km 的地震,其震中烈度  $I_0$  与震级  $M$  的对应关系见表 1-2。

表 1-2 震中烈度与震级的大致对应关系

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

### § 1-3 地震动特性

地震动是非常复杂的,具有很强的随机性,甚至同一地点、每一次地震都各不相同。但多年来地震工程研究者们根据地面运动的宏观现象和强震观测资料的分析得出,地震动的主要特性可以通过 3 个基本要素来描述,即地震动的幅值、频谱和持时(即持续时间)。

#### 一、地震动幅值特性

地震动幅值可以是地面运动的加速度、速度或位移的某种最大值或某种意义下的有效值。目前采用最多的地震动幅值是地面运动最大加速度幅值,它可描述地面震动的强弱程度,且与震害有着密切关系,可作为地震烈度的参考物理指标。例如,1940 年 EL-Centro 地震加速度记录的最大值为  $341.7 \text{ cm/s}^2$ 。

地震动幅值的大小受震级、震源机制、传播途径、震中距、局部场地条件等因素的影响。一般来说,在近场内,基岩上的加速度峰值大于软弱场地上的加速度峰值,而在远场则相反。

#### 二、地震动频谱特性

所谓地震动频谱特性是指地震动对具有不同自振周期的结构的反应特性,通常可以用反应谱、功率谱和傅里叶谱来表示。反应谱是工程中最常用的形式,现已成为工程结构抗震设计的基础。功率谱和傅里叶谱在数学上具有更明确的意义,工程上也具有一定的实用价值,常用



来分析地震动的频谱特性。

震级、震中距和场地条件对地震动的频谱特性有重要影响,震级越大、震中距越远,地震动记录的长周期分量就越显著。硬土且地层薄的地基上的地震动记录包含较丰富的高频成分,而软土且地层厚的地基上的地震动记录卓越周期偏向长周期。另外,震源机制也对地震动的频谱特性有着重要影响。

### 三、地震动持时特性

地震动持时对结构的破坏程度有着较大的影响。在相同的地面运动最大加速度作用下,当强震的持续时间长,则该地点的地震烈度高,结构物的地震破坏就重;反之,当强震的持续时间短,则该地点的地震烈度低,结构物的破坏就轻。例如,EL-Centro地震的强震持续时间为30 s,该地点的地震烈度为8度,结构物破坏较严重;而1966年的日本松代地震,其地面运动最大加速度略高于EL-Centro地震,但其强震持续时间仅为4 s,则该地的地震烈度仅为5度,未发现明显的结构物破坏。

实际上,地震动强震持时对地震反应的影响主要表现在非线性反应阶段。从结构地震破坏的机理上分析,结构从局部破坏(非线性开始)到完全倒塌一般需要一个过程,往往要经历一段时间的往复振动过程。塑性变形的不可恢复性需要耗散能量,因此在这一振动过程中即使结构最大变形反应没有达到静力试验条件下的最大变形,结构也可能因储存能量能力的耗损达到某一限值而发生倒塌破坏。持时的重要意义同时存在于非线性体系的最大反应和能量耗散累积两种反应之中。

## § 1-4 工程结构的抗震设防

### 一、基本术语

**抗震设防烈度:**按国家规定的权限批准作为一个地区抗震设防依据的地震烈度。一般情况下,取50年内超越概率10%的地震烈度。

**抗震设防标准:**衡量抗震设防要求高低的尺度,由抗震设防烈度或设计地震动参数及建筑抗震设防类别确定。

**地震作用:**由地震动引起的结构动态作用,包括水平地震作用和竖向地震作用。

**设计地震动参数:**抗震设计用的加速度(速度、位移)时程曲线、加速度反应谱和峰值加速度。

**设计基本加速度:**50年设计基准期超越概率10%的地震加速度的设计取值。

**设计特征周期:**抗震设计用的地震影响系数曲线中,反映地震震级、震中距和场地类别等因素的下降段起始点对应的周期值,简称特征周期。

**场地:**工程群体所在地,具有相似的反应谱特征。其范围相当于厂区、居民小区和自然村或不小于 $1.0\text{ km}^2$ 的平面面积。

**抗震措施:**除地震作用计算和抗力计算以外的抗震设计内容,包括抗震构造措施。

**抗震构造措施:**根据抗震概念设计原则,一般不需计算而对结构和非结构各部分必须采取的各种细部要求。