



21世纪

高等学校精品规划教材

地震荷载动力分析 与工程结构可靠度 设计原理

主 编 马文英 周玉娟
副主编 袁吉栋 路 明 史红伟



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



21世纪

高等学校精品规划教材

地震荷载动力分析 与工程结构可靠度 设计原理

主 编 马文英 周玉娟
副主编 袁吉栋 路 明 史红伟



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为高等院校水利水电工程建筑专业本科专业基础课教材，主要内容有作用类型及地震荷载动力分析，荷载的统计分析，结构抗力的统计分析，结构及结构体系可靠度分析的原理、方法及例题分析，结构概率可靠度设计方法及例题分析，思考题及附录（变量统计参数表与计算常用数表）。

本书是按照水利水电工程建筑专业本科目标培养要求编写的，也可作为相关本科专业（如土木工程、农业水利工程、水资源工程）的专业基础课用书和供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地震荷载动力分析与工程结构可靠度设计原理/马文英, 周玉娟主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2009
21 世纪高等学校精品规划教材
ISBN 978 - 7 - 5084 - 6626 - 2

I. 地… II. ①马…②周… III. ①工程结构-结构荷载-地震反应分析-高等学校-教材②工程结构-结构可靠性-结构设计-高等学校-教材 IV. TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 116052 号

审图号: GS (2009) 55 号

书 名	21 世纪高等学校精品规划教材 地震荷载动力分析与工程结构可靠度设计原理
作 者	主 编 马文英 周玉娟 副主编 袁吉栋 路 明 史红伟
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E - mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 9.5 印张 225 千字
版 次	2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	20.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

随着结构可靠性设计理论的应用和发展，目前世界各国相继制定了以可靠度理论为基础的结构设计标准或规范。我国第一层次的 GB 50153—92《工程结构可靠度设计统一标准》，第二层次的行业性结构可靠度设计标准如 GBJ 68—84《建筑结构可靠度设计统一标准》、GB 50158—92《港口工程结构可靠度设计统一标准》、GB 50199—94《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》、GB 50216—94《铁路工程结构可靠度设计统一标准》、GB/T 50283—99《公路工程结构可靠度设计统一标准》均已颁布应用数年，第三层次的行业性结构设计规范如《混凝土结构设计规范》、《钢结构设计规范》、《水工混凝土结构设计规范》等，有的已经颁布实施，有的正在加紧编制中。为了适应 21 世纪工程结构可靠度设计方法的普遍应用，自 2004 年起我校水工专业本科生开设了“工程结构可靠度设计原理”课程。由于水工专业本课程的教材缺乏，先后采用了土木工程专业的《工程结构荷载与可靠度设计原理》（李国强等编著）一书的第 2 版和第 3 版。研究使用该教材使我们受益匪浅，但由于培养目标、专业计划、课程设置的差异，也表现出在不少内容上存在重叠和不相适宜。为使所用教材更适合于水工专业，我们编写了本教材。本书中突出了地震荷载的动力分析、结构和结构体系可靠度设计原理及其分析实例，引入了蒙特卡洛方法及其抽样方法，还引入了结构可靠度设计常见变量的统计参数值表和计算常用数表。

参加本书编写工作的人员为：马文英完成第 1、第 2 章和全书思考题，周玉娟完成第 3 章和附录 II、附录 III，袁吉栋完成第 5 章，路明完成第 6 章，史红伟完成第 7 章和附录 I，刘亚敏完成第 4 章第 1、2、3、4 节，马秋娟完成第 4 章第 5 节和全书插图，全书由马文英统筹全稿。河北工程大学刘建中教授担任主审，并对全书大纲拟定提出了许多宝贵意见。

在本书成稿之际，对向本书初稿提出宝贵意见和建议的水工专业本科学

生及有关硕士研究生一并表示感谢，是他们的有益建议使本书更符合专业培养要求。

由于我们水平所限，本书不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2009年4月

目录

前言

第 1 章 作用及其类型	1
1.1 荷载与作用	1
1.2 作用分类	1
思考题	2
第 2 章 地震作用动力分析	3
2.1 地震基本知识	3
2.2 单质点体系的地震作用	12
2.3 多质点体系的地震作用	18
思考题	31
第 3 章 荷载的统计分析	33
3.1 荷载的概率模型	33
3.2 荷载的各种代表值	41
3.3 荷载效应及其荷载效应组合	43
思考题	45
第 4 章 结构抗力的统计分析	46
4.1 概述	46
4.2 结构构件材料性能的不定性	47
4.3 结构构件几何参数的不定性	48
4.4 结构构件计算模式的不定性	50
4.5 结构构件抗力的统计特征	52
思考题	55
第 5 章 结构可靠度分析	56
5.1 我国工程结构可靠度设计标准和规范的编制概况	56
5.2 结构可靠度基本概念	57
5.3 结构可靠度分析的实用方法	62
5.4 随机变量间的相关性对结构可靠度的影响	75

5.5 结构体系的可靠度	79
思考题	89
第 6 章 结构概率可靠度设计法	91
6.1 结构设计的目标	91
6.2 结构概率可靠度的直接设计法	92
6.3 结构概率可靠度设计的实用表达式	97
思考题	117
第 7 章 蒙特卡罗法	119
7.1 基本原理	119
7.2 伪随机数产生和随机变量抽样	120
思考题	125
附录 I 工程结构可靠度分析常用数表	126
附录 II 常用概率分布数表	128
附录 III 国内外结构可靠度设计规范 (或标准) 中有关参数取值表	137
参考文献	144

第1章 作用及其类型

1.1 荷载与作用

在施工、运行期间引起工程结构内力和变形的既可能是各种荷载，也可能是其他非荷载因素。工程上把荷载与非荷载因素统称为作用。因此，严格说来，作用分为直接作用和间接作用两类。直接作用是指以力的形式作用于结构上的荷载，如结构自重、水压力、土压力、波浪压力、风压力、车辆制动力与冲击力、离心力、惯性力等。间接作用不是作用力，但同样引起结构内力和变形，如超静定结构支座不均匀沉陷、温度变化及构件焊接等。作用使结构产生的内力和变形称为作用效应，习惯上也称荷载效应。

1.2 作用分类

为了便于工程结构设计，对结构承受的各种作用一般分为如下几类。

1. 按作用随时间的变异分类

(1) 永久作用：在结构设计基准期内量值不随时间变化，或量值变化与其平均值相比可以忽略不计。例如结构自重、土压力、闸坝正常运用情况的水压力、预加力、支座沉陷产生的作用力、混凝土收缩或焊接变形产生的作用力等。

(2) 可变作用：在结构设计基准期内量值随时间变化，且量值变化与其平均值相比不可忽略。例如楼面活荷载、风（雪）荷载、闸坝水位变化的水压力、波浪荷载、温度变化等。

(3) 偶然作用：在结构设计基准期内不一定出现，而一旦出现其量值很大且持续时间很短。例如地震、爆炸、撞击、龙卷风等引起的作用。

2. 按作用随空间位置的变异分类

(1) 固定作用：在结构的空间位置上具有固定的分布。例如结构自重、结构上固定设备重等。

(2) 可动作用：在结构空间位置上的一定范围内可以任意分布。例如室内人群荷载、桥梁上的车辆荷载、闸坝上的活动式启闭机、厂房内的吊车重等。

3. 按作用使结构产生的反应分类

(1) 静态作用：对结构不产生加速度或加速度量值可以忽略不计。例如结构自重、土压力、温度变化等。

(2) 动态作用：对结构产生不可忽略的加速度。例如地震、风载、冲击、爆炸等作用。

工程上，不同的作用对结构产生的效应性质和重要性不同，设计取值及处理方法也不同：

(1) 可变作用的变异性比永久作用的变异性大，因此可变作用的相对取值（设计值与平均值之比）应比永久作用的相对取值大。偶然作用出现概率小，设计时结构抵抗偶然作用的可靠度可比抵抗永久作用和可变作用的可靠度低些。

(2) 可动作用可以任意分布，结构设计时应按其在结构内产生最不利效应（内力、变形、裂缝等）的最不利位置布置。

(3) 对于动态作用，必须考虑结构的动力效应，按动力学方法进行结构动力分析，或将动态作用转换成静态作用，再按静力学方法进行结构静力分析。

思 考 题

1. 在概念上，作用与荷载有何不同？
2. 作用（或荷载）有哪些类型？
3. 何谓永久作用、可变作用和偶然作用？区分的意义是什么？
4. 何谓固定作用和可动作用？区分的意义是什么？
5. 何谓静态作用和动态作用？区分的意义是什么？

第2章 地震作用动力分析

工程中，地震作用有两种计算方法：拟静力法和动力分析法，前者在有关专业课程中介绍，本章讨论后者。

2.1 地震基本知识

2.1.1 地震的类型及成因

地震按其产生的成因可分为火山地震、陷落地震和构造地震。由火山爆发引发的地震叫火山地震；由于地下空洞突然塌陷引起的地震叫陷落地震；而因地质构造运动引起的地震称构造地震。一般火山地震和陷落地震强度低，影响范围小；构造地震释放的能量大，影响范围广，危害严重。工程结构设计时主要考虑对构造地震的设防。

引起构造地震的地质运动与地球的构造、运动有关，地球平均半径 6400km，通常认为其内部分为三层，如图 2-1 所示。表面一层称地壳，平均厚度 30~40km，除表层土外，地壳为由沉积岩、岩浆岩和变质岩等构成的岩层；地壳以下为地幔，厚度约 2900km，也由岩石构成；最里面的称地核，半径约 3500km，物质成分主要为铁、镍等，因地核温度高达 4000~5000℃，外核可能处于液态。

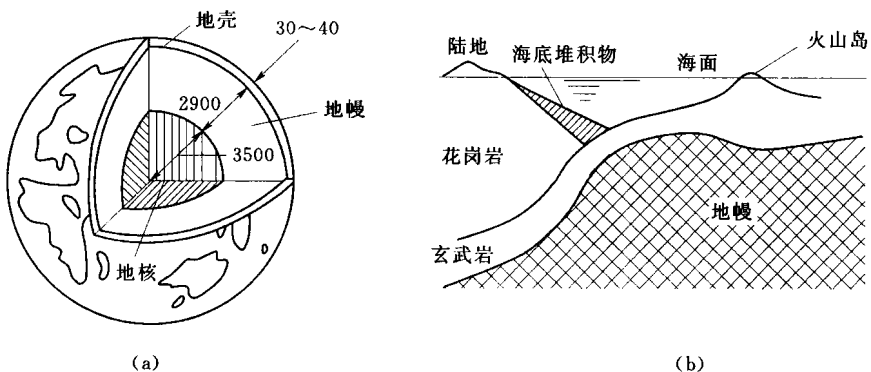


图 2-1 地球的构造

由地质勘探知，地表以下越深处温度越高。推算得知，地壳以下地幔上部温度可大于 1000℃。在此高温下，地幔物质将具有流动性，又由于地幔越深处温度越高，由此构成地幔热对流，这将引起地壳岩层的地质运动。此外，地球的自转与公转、月球和太阳的

引力影响等也会引起地球地质运动。但目前普遍认为，地幔热对流是引起地球地质运动的主要原因。

地质运动引发地震的过程见图 2-2。地幔热对流引起的地质运动会使地壳岩层变形而产生应力，岩层变形的不断积累会使岩层内应力增大，当岩层应力大于岩层强度时，岩层会发生突然破裂，并以振动的方式释放能量，产生地震波，地震波到达地面而引起地面运动，即所谓“地震”。

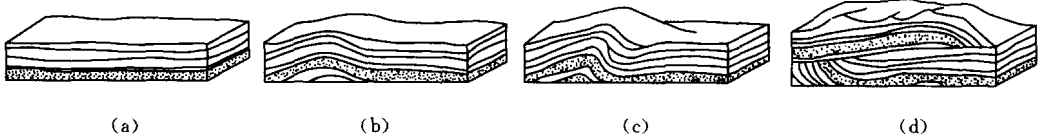


图 2-2 地质运动引发地震的过程示意图

有关地震的几个术语如图 2-3 所示。震源即岩层断裂处。震源正上方的地面地点称震中。震中至震源的距离称震源深度。地面某处到震中的距离称震中距。

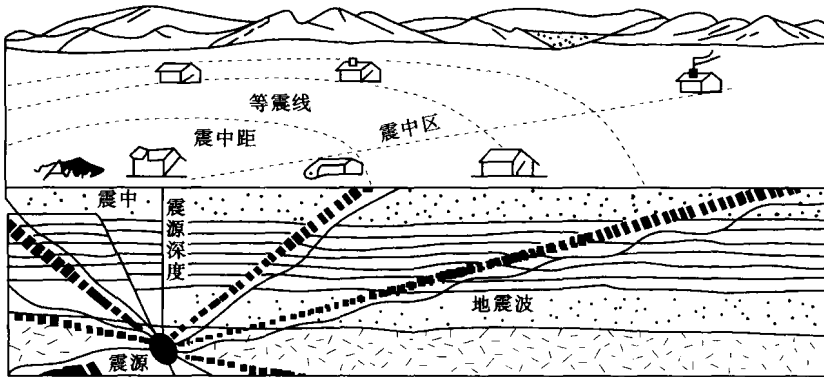


图 2-3 地震术语示意图

按震源深浅，地震还可分为：浅源地震（震源深度小于 60km）、中源地震（震源深度 60~300km）和深源地震（震源深度大于 300km）。其中浅源地震发生的数量最多（约占世界地震总数的 85%），造成的危害也最大。当震源深度超过 100km 时，地震释放的能量在传播到地面的过程中大部分被损失掉，通常不会在地面上造成危害。我国发生的地震绝大部分是浅源地震，震源深度一般为 5~50km。

2.1.2 地震分布

由于构造地震是因地壳岩层应力积累造成岩层破裂引起的，所以地震震源总是在岩层最薄弱处。一般在地壳岩层的断层处，抵抗应力的能力比非断层处要低，故地震一般多发生在岩层断层处。事实上，将历史上发生的地震位置标注在地图上，可以发现，世界上的地震分布集中在两个带状区域上：环绕太平洋的环太平洋地震带和横贯欧亚大陆的欧亚地震带。统计结果显示，全球 75% 左右的地震发生在环太平洋地震带上，其余大部分发生在欧亚地震带上。

全球地震的带状分布证明了地球地质学上的板块构造理论。该理论认为，地球地壳岩

2.1 地震基本知识

层分为六大板块：欧亚板块、太平洋板块、美洲板块、非洲板块、印澳板块和南极洲板块。各大板块之间还可划分为较小的板块，如图 2-4 所示。板块之间的结合部有海沟、海岭、转换地层及缝合线等。

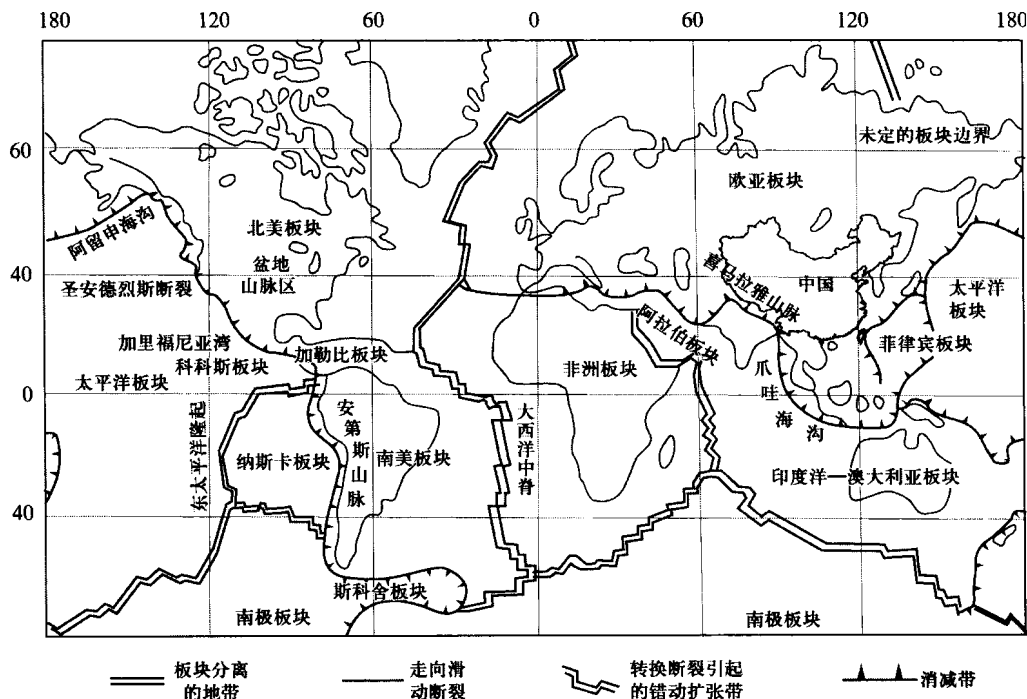


图 2-4 全球大、小板块构造划分

板块与板块之间可认为是大的断层，板块在地幔热对流的作用下发生缓慢漂移，当两个板块相遇时，其中一个板块会俯冲至另一板块之下，在板块俯冲过程中，会引起板块交汇处岩层应力增加，造成岩层脆断破坏而发生地震，或者上下板块层面间摩擦力超过其极限摩擦力而造成剧烈滑动引发地震。上述两大地震带，正是板块与板块之间由于挤压碰撞或骤然滑动而在板块边缘上发生的地震分布。据统计，全世界 85% 左右的地震发生在板块边界带上，仅 15% 左右的地震发生在板块内部，例如，1960 年 5 月 21 日 15 时发生在智利的 8.9 级地震就是环太平洋地震带上的板边地震，它是目前世界最高震级的地震。

我国属于欧亚板块，且位于世界两大地震带的交汇处，东面受太平洋板块挤压，南面受印澳板块挤压，因此地震发生频繁，是世界上少数多震国家之一。尤其印澳板块挤压欧亚板块形成的喜马拉雅山脉现仍以每年数毫米速度上升，造成我国西部地震、大震多发。据统计，每年震级在 6 级以下地震发生多次，1976 年松潘地震、2008 年 5 月 12 日汶川地震均达到 8 级，2001 年青藏 8.1 级地震，地面最大水平位移达 6m。我国地震活动区分布如图 2-5 所示。我国境内大致有 6 个地震活动区：①台湾地区；②喜马拉雅山地区；③东南沿海地区；④天山地区；⑤华北地区；⑥西北地区。其中①、②、③为板边地震，属环太平洋地震带，④、⑤、⑥为板内地震。

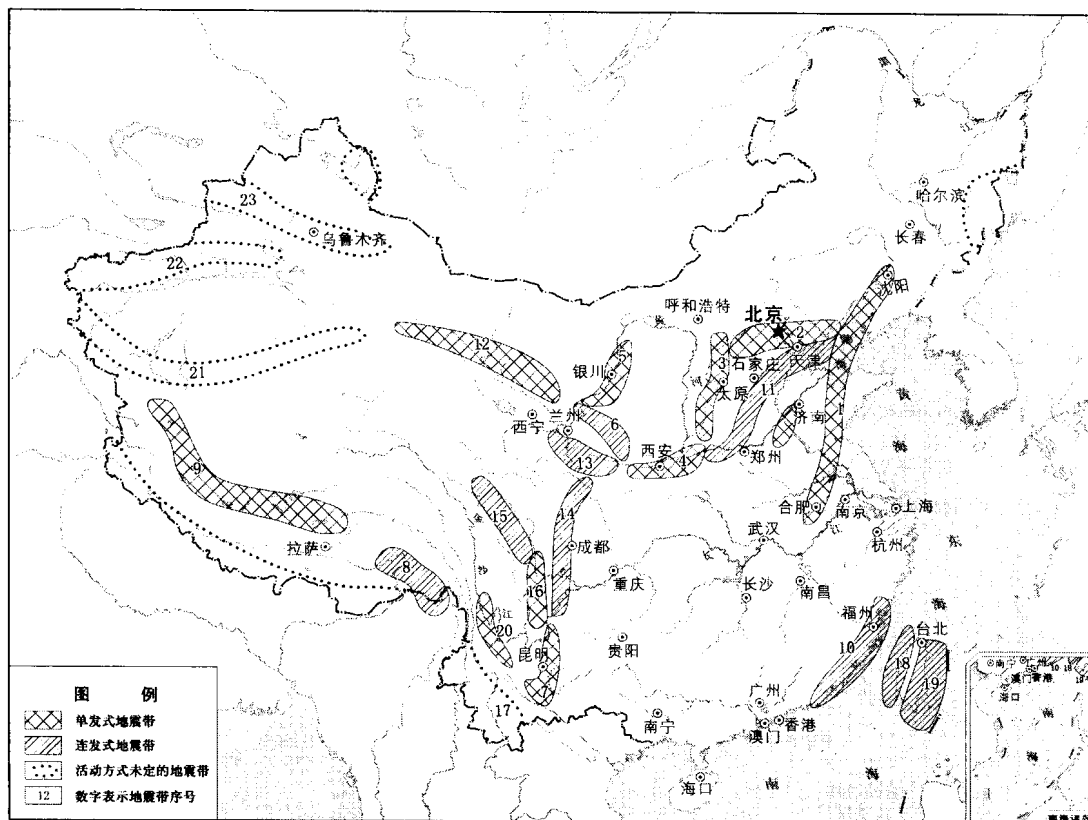


图 2-5 中国地震活动区分布图

2.1.3 震级与烈度

1. 震级

震级是衡量一次地震规模大小的数量等级，表示方法很多。目前国际上常用的是里氏震级，其定义最早由里克特（Richter）于1935年给出，即

$$M = \lg A \quad (2-1)$$

式中 M ——里氏地震等级；

A ——用标准地震仪（周期为0.8s，阻尼比为0.8，放大倍数为2800）在距震中100km处记录的以 μm （ 10^{-6}m ）为单位的最大水平地面位移。

由式（2-1）可见，震级增大1级，地面振幅增大10倍。对于 $M < 2$ 的地震（ $A < 10^2 \mu\text{m}$ ），一般人体感觉不到，只能由仪器记录得到，称无感地震或微震；对于 $M = 2 \sim 4$ 的地震（ $A = 10^2 \sim 10^4 \mu\text{m}$ ），人体有所感觉，称有感地震；对于 $M > 5$ 的地震（ $A > 0.1\text{m}$ ），会引起地面工程破坏，称破坏性地震；对于 $M > 7$ 的地震习惯称大地震，而 $M > 8$ 的地震称为特大地震。地震造成的灾难是巨大的，1976年7月28日在我国唐山发生的7.8级地震，造成24万多人死亡，16万多人受伤。2008年5月12日14时28分在我国汶川发生的属龙门山断裂带地震，震级达到8级，造成6.9万多人遇难，17万多人受伤。1960年5月21日15时智利南部的8.9级地震，使数座湖泊消失不见，两座小山不翼而飞，还使6座火山再次喷发，又形成了3座新火山。1985年9月19日7

时 19 分墨西哥 8.1 级地震，远离震中约 370km 的墨西哥城 700 多幢大楼倒塌，8000 多幢楼房受损，地震造成 3.5 万人死亡，4 万人受伤，数十万人无家可归。

须指出，式 (2-1) 实际上仅适于 $M < 6$ 级地震的直接定义，当 $M \geq 6$ 时该式结果将与实际不符。由于当地面运动振幅较大时，表土将产生黏滞塑性变形，消耗地面振动能量，抑制地面振幅，使震级与地面振幅不再满足式 (2-1) 关系。因此对 $M \geq 6$ 的情况，一般需通过其他方式定义震级。

此外，对震中距不一定恰好为 100km 和非标准地震仪情况，应将地面位移记录值修正为满足式 (2-1) 条件的标准位移，才能按式 (2-1) 确定地震震级。

2. 地震能量

地震是因岩层断裂释放能量引起的，一次地震所释放的能量称地震能量，记为 E 。一次地震释放的地震能量是一定的，据统计分析，地震能量 E 与其震级 M 之间存在下列关系

$$\lg E = 11.8 + 1.5M \quad (\text{尔格}) \quad (2-2)$$

式中，1 尔格 = 10^{-7} 焦耳。

由式 (2-2) 知，震级增大 1 级时，地震能量约增大 32 倍，震级增大 2 级时，地震能量约增大 1000 倍。一个 8 级地震，约相当于 960 枚 2 万 t TNT 炸药的原子弹所释放的能量，可见其释放的能量是巨大的，造成的破坏也是毁灭性的。

3. 地震烈度

工程上，将某一地区遭受一次地震影响的地面运动强弱程度定义为地震烈度，记为 I ，它与建筑物破坏有关。一次地震只有一个震级，而不同地点却会有不同的地震烈度，震中附近受地震影响最大，地震烈度也最大，而随着震中距的增大，地震的影响逐渐减小，地震烈度也逐渐减小。

在不同的国家，地震烈度的划分等级不同。日本采用 0~7 的 8 个等级，我国和世界绝大多数国家采用 1~12 的等级划分，地震烈度值的划分，一般根据人的感觉、器物的反应、地貌及建筑物的破坏特征等宏观现象综合评定。表 2-1 是我国 1980 年制定的地震烈度表。

表 2-1 中国地震烈度表

烈度	人的感觉	一般房屋		其他现象	参考物理指标	
		大多数房屋 侵害程度	平均震害 指数		水平加速度 (cm/s^2)	水平速度 (cm/s)
1	无感					
2	室内个别静止中 的人感觉					
3	室内少数静止中 的人感觉	门、窗轻微 作响		悬挂物微动		
4	室内多数人感觉。 室外少数人感觉。 少数人梦中惊醒	门、窗作响		悬挂物明显摆动， 器皿作响		
5	室内普遍感觉。 室外多数人感觉。 多数人梦中惊醒	门、窗、屋顶、 屋架颤动作响， 灰土掉落，抹灰 出现微细裂缝		不稳定物翻倒	31 (22~44)	3 (2~4)

续表

烈度	人的感觉	一般房屋		其他现象	参考物理指标	
		大多数房屋 侵害程度	平均震害 指数		水平加速度 (cm/s ²)	水平速度 (cm/s)
6	惊慌失措, 仓皇 逃出	损坏——个 别砖瓦掉落、 墙体微细裂缝	0~0.1	河岸和松软土上 出现裂缝。饱和砂 层出现喷砂冒水。 地面上有的砖烟囱 轻度裂缝、掉头	63 (45~89)	6 (5~9)
7	大多数人仓皇 出逃	轻度破坏 ——局部破坏、 开裂, 但不妨 碍使用	0.11~0.30	河岸出现塌方。 饱和砂层常见喷砂 冒水。松软土地 裂缝较多。大多数 砖烟囱中等破坏	125 (90~177)	13 (10~18)
8	摇晃颠簸, 行走 困难	中等破坏 ——结构受损, 需要修理	0.31~0.50	干硬土上亦有裂 缝。大多数烟囱严 重破坏	250 (178~353)	25 (19~35)
9	坐立不稳, 行动 的人可能摔跤	严重破坏 ——墙体龟裂、 局部倒塌, 复 修困难	0.51~0.70	干硬土上有许多 地方出现裂缝, 基 岩上可能出现裂缝。 滑坡、坍方常见。 砖烟囱出现倒塌	500 (354~707)	50 (36~71)
10	骑自行车的人会 摔倒。处不稳状态 的人会摔出几尺远。 有抛出感	倒塌——大 部倒塌, 不堪 修复	0.71~0.90	山崩和地震断裂 出现。基岩上的拱 桥破坏。大多数砖 烟囱从根部破坏或 倒塌	1000 (708~1414)	100 (72~141)
11		毁灭	0.91~1.00	地震断裂延续很 长。山崩常见。基 岩上拱桥毁坏		
12				地面剧烈变化、 山河改观		

4. 地震烈度与震级的关系

一次地震发生, 震级是一定的, 对于确定地点的地震烈度也是一定的。震中一般是一次地震烈度最大的地区, 其烈度与震级和震源深度有关。在环境条件基本相同的情况下, 震级愈大, 震源深度愈小, 则震中烈度愈高。根据我国的地震资料, 对于发生最多的浅源地震, 可以得到震中烈度 I_0 与震级 M 间的近似关系为

$$M = 1 + \frac{2}{3} I_0 \tag{2-3}$$

对于非震中地区, 利用烈度随震中距衰减的关系, 可建立其烈度与震级的关系为

$$I = I_0 - C \lg \left(\frac{\Delta}{h} + 1 \right) \tag{2-4}$$

式中 Δ ——震中距, km;

h ——震源深度，km；

I ——震中距为 Δ 处的地震烈度；

C ——烈度衰减参数，与地貌、震级等因素有关，平原地区 C 值大于山区，震级愈大 C 值愈大。

将式 (2-4) 代入式 (2-3)，得任意地点地震烈度与震级的关系为

$$M = 1 + \frac{2}{3}I + \frac{2}{3}C \lg\left(\frac{\Delta}{h} + 1\right) \quad (2-5)$$

式中符号意义同前。

2.1.4 地震波与地面运动

1. 地震波

震源处岩层断裂时，引起周围介质振动，以波的形式向各个方向传播并释放能量，这种传播地震能量的波称地震波。地震波分为在地球内部传播的体波和在地面附近传播的面波。

体波有两种，一种为纵波（也称 P 波），另一种为横波（也称 S 波）。纵波为压缩波，激发的质点振动方向与波的行进方向一致，如图 2-6 (a) 所示。纵波可在固体与流体（液体或气体）中传播，如声音就是在空气中传播的一种纵波。横波为剪切波，激发的质点振动方向与波的行进方向垂直，如图 2-6 (b) 所示。因流体不能承受剪力，故横波只能在固体中传播。遇到液体后，被传输的横波很少，液体对横波具有隔振作用，因此工程中也用横波探查地下水和油矿等。

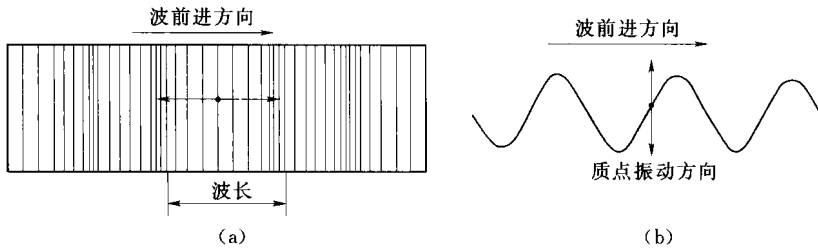


图 2-6 体波质点的振动方向
(a) 纵波（压缩波）；(b) 横波（剪切波）

根据弹性波动理论，纵波和横波的传播速度可由下式计算

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2-6)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-7)$$

式中 E 、 G 、 ν ——介质的弹性模量、剪切弹性模量、泊松比；
 ρ ——介质的密度。

对于一般地表土层，可近似取 $\nu=1/4$ ，于是得到

$$V_p = \sqrt{3} V_s \quad (2-8)$$

可见纵波传播速度比横波要快。表 2-2 列出了横波在一些介质中的传播速度值。

表 2-2

不同介质中的 V_s 值

单位: m/s

介质	传播速度	介质	传播速度	介质	传播速度	介质	传播速度
砂	60	含砂砾石	300~400	粉质黏土	100~200	砾石	600
人工填土	100	饱和砂土	340	黏土	250	第三纪岩层	>1000

面波也有两种,一种为瑞雷波(也称R波),另一种为洛夫波(也称L波)。瑞雷波传播时,质点在与地面成垂直的平面内沿波行进的方向做椭圆运动,如图2-7(a)所示。洛夫波传播时,质点在地平面内做与波行进方向相垂直的振动,如图2-7(b)所示。

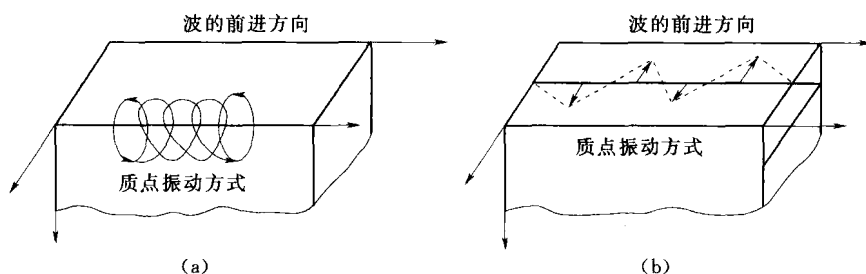


图 2-7 面波质点的运动

(a) 瑞雷波质点的运动; (b) 洛夫波质点的运动

据观测资料分析,面波传播速度只有S波传播速度的92%。由于波传播速度愈快,频率愈高,振动周期和振幅愈小,由此可知:纵波传播快,周期短,振幅小;面波传播慢,周期长,振幅大,横波居中。

2. 地震地面运动

当地震体波或面波达到地面上某一点时,就会引起该点往复运动,即地震地面运动。考虑到波在不同介质中传播会发生折射,地震体波由较坚硬土层向较软土层传播(地壳表层一般是深处坚硬、表层风化松软)时,也会产生这种折射现象。如图2-8所示。由于

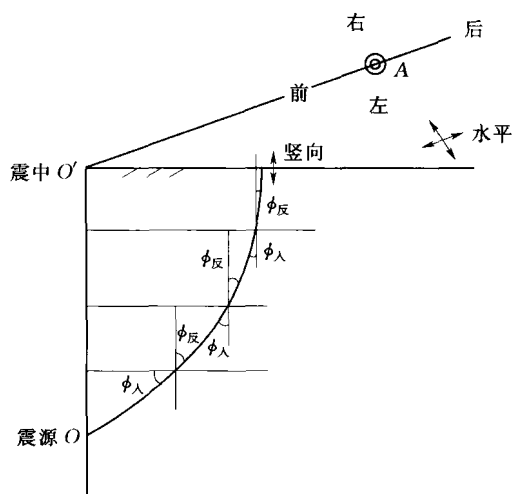


图 2-8 体波的折射

体波经过下硬上软的岩层层面时,反射角小于入射角(波进方向与层面法线的夹角)。因此经过不断的折射,体波传播至地面时,行进方向将近似与地面垂直。假设地面任一点处有一观测点,观测点处的人面对震中,定义观测点与震中连线的方向为前后方向,与该连线垂直的方向为左右方向,垂直于地面的方向为上下方向。由上述地震波传播的特点可知,P波主要引起地面上下运动;S波主要引起地面前后、左右运动;R波主要引起地面上下、前后运动;L波主要引起地面左右运动。

由上可见地震引起的地面运动是三维的,