



建筑结构 与核电站抗震设计

侯钢领 主编

Seismic Design of Building
Structure and Nuclear Power Station



科学出版社

建筑结构与核电站抗震设计

侯钢领 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是依据土木工程专业本科教学大纲,结合核电站、石油化工等特殊行业需求,基于结构抗震基本理论和相关规范编写的建筑结构与核电站抗震设计教材。本书主要介绍了普通结构和特种结构抗震设计的基本理论、基本概念和基本方法,内容涵盖地震的基本知识、抗震设计原则与设计方法,场地的地震灾害、场地分类与基础抗震设计,地震作用与结构地震响应分析,结构概念设计和抗震基本原则,单层、多层结构的抗震设计,核电站结构抗震、隔震与减震设计。为了便于学生理解与学习,各章均配有例题和习题,所有章节的课件、MATLAB 程序和 ANSYS 命令流详见 www.npsed3h.org。

本书可供高等院校土木工程专业本科生和研究生使用,也可供从事建筑结构和核电站等特种结构抗震设计的工程技术人员、科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构与核电站抗震设计/侯钢领主编. —北京:科学出版社, 2019.4
ISBN 978-7-03-059173-9

I. ①建… II. ①侯… III. ①建筑结构-教材 ②核电站-防震设计-教材 IV. ①TU3 ②TM623

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 242999 号

责任编辑:狄源硕 / 责任校对:韩 杨
责任印制:吴兆东 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019 年 4 月第一次印刷 印张:14

字数:330 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《建筑结构与核电站抗震设计》 编辑委员会

主 编：侯钢领

副 主 编：徐 斌 张建华

参编人员：王 刚 韩玉来 孙晓丹

前 言

结构抗震是土木工程专业的核心课程之一，也是建筑结构科技发展的源动力之一。结构抗震的教材对大学生结构概念的建立、知识体系的完善和创新能力的培养等发挥着重要作用。

目前，大多数结构抗震教材针对的是普通建筑结构，很少涉及核电站、液化天然气储罐等特殊行业结构。其根本原因是以前核电站、液化天然气储罐等建设量小。随着能源需求的增加和环境保护日益受到重视，清洁高效的核能发电已经成为世界各国发展的重点。当前，中国运行核电机组数量位于世界第四，在建核电机组数量位于世界第一，中国核电行业需要具有核电站知识的土木工程人才。

作为教材，本书包括普通建筑结构抗震的基本知识，也包括以核电站为代表的特殊行业结构抗震的设计方法和内容。本书满足学生掌握普通建筑结构抗震设计的要求，也满足核电站、石油化工等特殊行业结构抗震需求。

作为教材，本书力图培养学生的创新能力。众所周知，核电站事故会造成严重的环境污染、惨重的经济损失和严峻的社会问题。在某种意义上，核电站不允许出现地震事故。核电站特殊的抗震需求必然激发学生创新的兴趣。为培养学生的创新能力，本书提供了 MATLAB 程序和 ANSYS 命令流等资料，详见 www.npsed3h.org。

本书共分 10 章：第 1 章是地震基本知识、抗震设计原则与要求；第 2 章是场地的地震灾害、场地分类与基础抗震；第 3 章是结构地震响应分析；第 4 章是结构抗震概念设计；第 5 章是单层工业厂房抗震设计；第 6 章是多层砌体结构抗震设计；第 7 章是多高层钢筋混凝土结构抗震设计；第 8 章是多高层钢结构抗震设计；第 9 章是核电站抗震设计；第 10 章是普通建筑与核电站的隔震和消能减震设计。为了便于学生学习，各章均配有例题和习题。本书第 1 章由韩玉来执笔，第 2、7 章由徐斌执笔，第 3、4 章由王刚执笔，第 5、8 章由张建华执笔，第 6 章由孙晓丹执笔，第 9、10 章由侯钢领执笔。全书的 MATLAB 程序由王刚编写，ANSYS 命令流由侯钢领编写。全书由侯钢领统稿，哈尔滨工程大学宋天舒教授主审。

哈尔滨工程大学“三海一核”的特色办学，为本书提供了很好的成长土壤。欧进萍院士对核电站抗震研究的支持是本书编写的源动力；感谢王振及研究生杨波、赵灿、王晓东、王炳媛完成的本书网站建设工作；感谢杨美月女士为本书所做的初稿排版等工作。感谢国家科技重大专项（2018ZX06005002）项目的资助。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

侯钢领

2018 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 地震与抗震设计	1
1.1 地震与地震波	1
1.1.1 地震及其分类	1
1.1.2 地震波	2
1.2 地震震级、地震烈度与抗震设防烈度	3
1.2.1 地震引发的破坏	3
1.2.2 地震震级与地震烈度	5
1.2.3 抗震设防烈度	7
1.3 建筑结构抗震设计的总体要求	9
1.3.1 建筑结构抗震设防标准和抗震设计方法	9
1.3.2 建筑抗震设防分类	9
习题	10
参考文献	10
第 2 章 场地、地基和基础	12
2.1 场地类别与场地区划	12
2.1.1 场地类别	12
2.1.2 场地区划	14
2.2 天然地基与地基抗震验算	15
2.2.1 地基抗震的基本规定	15
2.2.2 地基抗震承载力	15
2.2.3 地基抗震验算	16
2.3 液化土及其防治	16
2.3.1 液化现象及危害	16
2.3.2 液化的判别	17
2.3.3 液化地基的抗震措施	21
习题	22
参考文献	23
第 3 章 结构地震响应分析	24
3.1 地震作用与结构计算简图	24
3.2 单自由度体系地震响应	25
3.2.1 自由振动方程	25

3.2.2	简谐激励下单自由度体系的动力响应	26
3.2.3	冲击强迫振动	27
3.2.4	地震地面运动激励	27
3.2.5	单自由度响应分析状态方程	28
3.3	单自由度体系的地震响应谱与设计反应谱	29
3.3.1	单自由度体系地震响应的最大值	29
3.3.2	地震响应谱与 MATLAB 模拟	30
3.3.3	设计反应谱与地震响应计算	32
3.4	多自由度弹性体系的地震响应	34
3.4.1	多自由度弹性体系的运动方程	34
3.4.2	结构振型及振型的正交性	35
3.4.3	多自由度分析方法 1——振型分解法	37
3.4.4	多自由度分析方法 2——振型分解反应谱法	39
3.4.5	多自由度分析方法 3——底部剪力法	44
3.4.6	多自由度分析方法 4——时程分析法	47
3.5	扭转耦联地震响应分析	51
3.5.1	平扭耦合体系的运动方程	51
3.5.2	平扭耦合体系的地震作用	55
3.6	多自由度结构周期和振型的近似计算	57
3.6.1	Rayleigh 法	57
3.6.2	顶点位移法	58
3.6.3	基本周期的修正	59
3.7	结构抗震验算	60
3.7.1	结构抗震验算内容	60
3.7.2	结构分析方法的适用范围	63
3.7.3	不规则结构及最低水平地震剪力要求	64
3.7.4	地基-结构相互作用	64
	习题	65
	参考文献	66
第 4 章	结构抗震概念设计	67
4.1	场地与地基的概念设计	67
4.1.1	选择有利地段、避开危险地段	68
4.1.2	选择合适的地基和基础设计	71
4.2	地震能量输入的减小	71
4.2.1	场地卓越周期	71
4.2.2	场地土与地震动	71
4.2.3	建筑结构避开场地卓越周期	73
4.2.4	隔震减震技术减小地震响应	74
4.3	建筑体型的规则性	74
4.3.1	建筑平面体型的规则性	74

4.3.2 建筑竖向体型的规则性	76
4.3.3 抗震缝将建筑体型的规则化	78
4.4 结构整体的延性破坏	79
4.4.1 建筑材料和施工	79
4.4.2 防止结构构件发生脆性破坏	80
4.4.3 合理的构件连接节点	81
4.4.4 多道抗震设防的结构体系	82
4.5 非结构构件	85
4.5.1 填充墙的影响	85
4.5.2 外墙板的连接	86
4.5.3 附属构件或装饰物	86
习题	86
参考文献	87
第 5 章 单层工业厂房抗震设计	88
5.1 门式刚架结构的震害与抗震概念设计	88
5.1.1 门式刚架结构震害现象	88
5.1.2 门式刚架结构抗震概念设计	89
5.2 门式刚架结构的横向抗震计算	90
5.2.1 厂房横向地震响应的特点	90
5.2.2 计算简图和计算方法	90
5.2.3 横向自振周期计算	92
5.2.4 横向地震作用下结构响应分析	92
5.3 门式刚架结构的纵向抗震计算	93
5.3.1 计算简图	93
5.3.2 柱列纵向基本周期	94
5.3.3 水平地震作用效应	94
5.4 门式刚架厂房的抗震构造措施	95
5.4.1 构件长细比	95
5.4.2 梁柱截面	95
5.4.3 柱脚	95
5.4.4 刚架节点	96
5.4.5 柱间支撑	96
5.4.6 檩条与墙梁	97
习题	97
参考文献	98
第 6 章 多层砌体结构抗震设计	99
6.1 砌体结构的震害与抗震概念设计	99
6.1.1 砌体结构震害现象	99

6.1.2 砌体结构的抗震概念设计	101
6.2 多层砌体结构抗震计算	104
6.2.1 计算简图	104
6.2.2 水平地震作用	105
6.2.3 楼层地震剪力及其在各墙体上的分配	105
6.2.4 墙体截面抗震承载力验算	107
6.3 砌体结构抗震构造措施	109
6.3.1 钢筋混凝土构造柱	109
6.3.2 钢筋混凝土圈梁	110
6.3.3 其他抗震构造措施	111
习题	111
参考文献	112
第7章 多高层钢筋混凝土结构抗震设计	113
7.1 钢筋混凝土结构震害与抗震概念设计	113
7.1.1 钢筋混凝土结构房屋的震害	114
7.1.2 多高层钢筋混凝土结构的概念设计	116
7.1.3 抗震等级的划分	119
7.2 框架结构的抗震计算	120
7.2.1 框架结构水平地震作用	120
7.2.2 水平地震作用下框架内力的计算	120
7.2.3 竖向荷载作用下框架内力计算	128
7.2.4 框架结构位移验算	129
7.3 框架结构的抗震设计	129
7.3.1 地震作用效应的调整	129
7.3.2 截面抗震验算	131
7.3.3 抗震构造措施	133
7.4 框架-抗震墙结构的抗震计算	138
7.4.1 地震作用的计算	138
7.4.2 内力计算	138
7.5 框架-抗震墙结构抗震设计	144
7.5.1 框架-抗震墙结构中框架内力的调整	144
7.5.2 框架-抗震墙结构的抗震构造措施	145
7.6 框架结构抗震例题	146
7.6.1 工程概况	146
7.6.2 计算地震作用	146
7.6.3 框架结构截面抗震承载力验算	149
7.6.4 框架变形验算	157
习题	160
参考文献	160

第 8 章 多高层钢结构抗震设计	161
8.1 多高层钢结构震害现象与抗震性能	161
8.1.1 多高层钢结构的主要震害	161
8.1.2 多高层钢结构的抗震性能分析	163
8.2 多高层房屋钢结构抗震概念设计	165
8.2.1 多高层房屋钢结构体系选型	165
8.2.2 多高层房屋钢结构抗震要求	166
8.3 多高层钢结构的抗震计算	167
8.3.1 多高层钢结构计算分析要点	167
8.3.2 多高层钢结构地震作用分析	168
8.3.3 钢柱和钢梁的强度与稳定验算	169
8.3.4 节点设计	170
8.4 多高层钢结构的抗震构造措施	172
8.4.1 钢框架结构的抗震构造措施	172
8.4.2 钢框架-中心支撑结构的抗震构造措施	174
习题	174
参考文献	175
第 9 章 核电站抗震设计	176
9.1 核电站抗震安全与设计要求	176
9.1.1 核电站的安全要求	177
9.1.2 核电站抗震的设计要求	179
9.2 核电站基础抗震验算	181
9.2.1 核电站厂址选择要求	181
9.2.2 核电站地基的一般规定	181
9.2.3 天然地基的承载力验算	181
9.3 核电站地震作用分析	183
9.3.1 核电站反应谱分析	183
9.3.2 核电站时程分析	184
9.4 核电站抗震验算	186
9.4.1 核反应堆厂房的计算模型	186
9.4.2 核反应堆厂房的荷载效应组合分析	191
9.4.3 核反应堆厂房的抗力计算	192
习题	193
参考文献	193
第 10 章 普通建筑与核电站的隔震和消能减震设计	195
10.1 基础隔震原理	195
10.2 普通建筑隔震结构	197

10.2.1 隔震设计的一般要求..... 197

10.2.2 隔震设计的基本过程..... 197

10.3 核电站隔震结构 202

10.3.1 核电站隔震的特点 202

10.3.2 核电站隔震设计特殊要求 203

10.4 消能减震结构 205

10.4.1 消能减震原理 205

10.4.2 主要消能减震装置的类型与性能..... 206

10.4.3 耗能器的恢复力模型..... 208

10.4.4 消能减震结构的设计要求 209

习题.....211

参考文献.....211

第 1 章 地震与抗震设计

地震是危及人民生命及财产安全的主要自然灾害之一。地震发生地点、时间和大小具有突发性和不可预测性，并时常引发强大的破坏力，会造成人员伤亡和财产损失。

统计分析表明，全球地震主要集中在两大地震带范围内，一个是环太平洋地震带，另一个是位于北纬 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 的大陆地震带。这两个地震带集中了全球大陆地震数量的 85% 以上。

我国位于世界两大地震构造系的交汇区域，是地震多发国家之一。1900~2013 年，我国发生 6 级以上强震约 900 次，8 级以上地震 10 次，地震中总伤亡人数约 155 万人，占全球地震伤亡人数的一半。为了减小地震灾害，我国建筑科技工作者进行了大量的研究工作，取得了显著的成果，增强了抵御自然灾害的能力。

采取合理的抗震设计方法和建造技术，可以提高结构抗震性能。当然，不合理的建筑结构，则会加重地震灾害。例如，1972 年尼加拉瓜马那瓜发生 6.6 级地震，该震区有美洲银行大厦和中央银行大厦两栋高层建筑。中央银行大厦地震破坏严重，震后拆除；而美洲银行大厦地震损伤轻微，修复后继续使用。2008 年 5 月 12 日汶川地震震害分析表明：严格按照我国抗震规范建造的房屋，抗震性能稳定，可以有效地保护人民生命和财产的安全^[1]。

1.1 地震与地震波

1.1.1 地震及其分类

根据地震产生的原因，地震可以分为诱发地震和天然地震两大类。

诱发地震是由人工爆破、矿山开采、水库储水、深井注水等原因所引发的地震。这种地震强度一般较小，影响范围也相对较小。

天然地震包括火山地震和构造地震。火山地震是由火山爆发、岩浆猛烈冲击地面引起的地震。构造地震是由于地壳构造运动，深部岩石的应变超过容许值，岩层发生断裂、错动而引起的地面振动。构造地震占发生地震总数的 90% 以上。目前，一般讲的地震就是构造地震。

到目前为止，科研工作者研究地震成因仅有 100 多年历史。早期的地震成因倾向于断层理论学说，即地下某处薄弱岩层突然破裂，在原有累积的弹性应力作用下，断层两侧发生回跳而引起振动。而近期的观点倾向于板块构造理论学说，即地球板块互相挤压、冲撞引起岩石振动，并以波的形式将岩层振动传至地面而引起地面的剧烈颠簸和摇晃。板块构造学说可以较为合理地解释世界地震分布现象。

地震工程学是将地球物理学、地质学、地震学、工程力学（材料力学、结构静力学、结构动力学）、结构工程学（钢筋混凝土结构学、钢结构学、地基与基础）、施工

技术等多学科理论进行综合,以建筑物在地震作用下抗震安全为目标,而产生的一门科学体系^[2]。

根据地震工程学相关定义,地球内部发生地震的地方称为震源,震源在地球表面的投影称为震中,地球表面上某一点到震中的距离称为震中距,震中附近地球表面区域,称为震中区,破坏最严重的地区称为极震区,震源到震中的垂直距离称为震源深度,如图 1-1 所示。



图 1-1 地震特征描述示意图

根据震源的深度,地震可以分为浅源地震、中源地震和深源地震。浅源地震的震源深度在 60km 以内,约占地震总数的 70%;中源地震的震源深度在 60~300km,占地震总数的 25%左右;深源地震的震源深度在 300km 以上,占地震总数的 5%左右。目前有记录的最深震源约 720km。

一般情况下,同等震级下,浅源地震影响范围小,但破坏力大;深源地震影响范围大,但破坏力小。例如,2002 年 6 月 29 日发生于吉林省汪清县的 7.2 级地震,震源深度为 540km,没有建筑破坏和人员伤亡。而 1960 年 2 月 29 日发生于摩洛哥阿加迪尔的 5.8 级地震,震源深度为 3km,震中区破坏极为严重,但破坏范围仅局限在震中距 8km 以内,其他地方破坏则较少。

1.1.2 地震波

当地震震源岩层发生断裂、错动时,岩层所积累的能量突然释放,并以波的形式从震源向四周传播,这种波称为地震波。根据地震波在地壳中传播位置的不同,地震波可以分为体波和面波。

体波是由震源振动直接产生在地球内部传播的地震波。体波有纵波和横波两种形式。纵波是由震源向外传递的压缩波,它的特点是介质质点的运动方向与波的前进方向一致,引发地面上下颠簸运动。纵波一般周期较短、振幅较小、波速快,波速为 5.5~7km/s。横波是由震源向外传递的剪切波,它的特点是质点的运动方向与波的前进方向相垂直,引起地面水平方向的运动。横波一般周期较长、振幅较大、波速慢,波速为 3.2~4.0km/s。

当纵波和横波到达地球的自由面,或位于层状地质构造的界面时,在一定条件下会

产生其他类型的地表地震波，简称面波。面波指地震波在地表传播。面波比体波衰减慢、振幅大、周期长。由于面波比体波衰减地慢，因而能传播到很远的地方。建筑物破坏主要是由面波造成的。

面波分为瑞利波和勒夫波两种形式。瑞利波传播时，质点在波的前进方向与地表法向组成的平面内做逆向的椭圆运动，岩石质点向前、向上、向后和向下运动。这种运动形式被认为是形成地面晃动的主要原因。勒夫波传播时，质点在与波的前进方向相垂直的水平方向运动，在地面表现为蛇形运动，在水平面内从一边到另一边。

根据地震波的不同波速，可以从地震监测站的地震监测数据推断地震发生的位置、震级和频谱特征。

1.2 地震震级、地震烈度与抗震设防烈度

由地面波传播所引起的地面振动，称为地震动。地震动在空间上具有 3 个平动方向的分量和 3 个转动方向的分量。但由于地震动转动分量测量困难，并且它们对建筑结构影响较小，可以忽略不计。

在震中区附近的地震动，称为近场地震动。对于近场地震动，一般通过记录地面运动的加速度来了解地震动的特征。对加速度记录进行时间积分，就可以得到地面运动的速度和位移地震记录。地震动的峰值（最大振幅）、频谱和持续时间，通常称为地震动的三要素。工程结构的地震破坏与地震动三要素密切相关。本节主要讲述地震动峰值对建筑物的破坏。

1.2.1 地震引发的破坏

地震导致地面振动，引发的破坏现象主要有三种形式：地表破坏、建筑物的破坏和次生灾害。

1. 地表破坏

地震引发的地表破坏主要体现为地裂缝、地面塌陷、喷砂冒水和滑坡等。

地裂缝是地表岩层、土体在地震作用下，产生开裂，并在地面形成一定长度和宽度的裂缝的地表破坏现象。这种地质灾害可以分为重力地裂缝和构造地裂缝，详见表 1-1。当地裂缝穿过建筑物时，或造成建筑结构开裂，引发结构破坏。

表 1-1 地裂缝分类

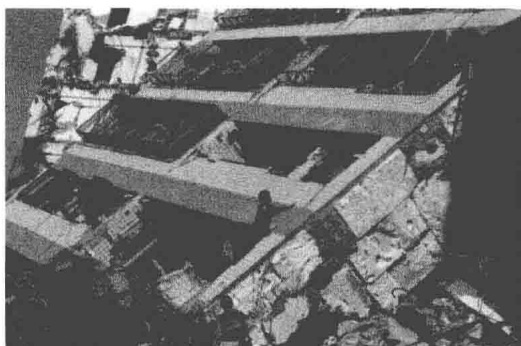
类 别	产生原因	特征
重力地裂缝	地震作用超过土的抗剪强度	裂缝长度几米到几千米，深度最多 1~2m
构造地裂缝	地壳深层错动延伸至地面裂缝	规模比重力地裂缝小

地面塌陷，或称地面震陷，是指地面发生震陷，使建筑物由于基础塌陷而引发破坏。河岸、陡坡滑坡是指地震作用下引起河岸、陡坡土体出现滑坡，造成滑坡上建筑物

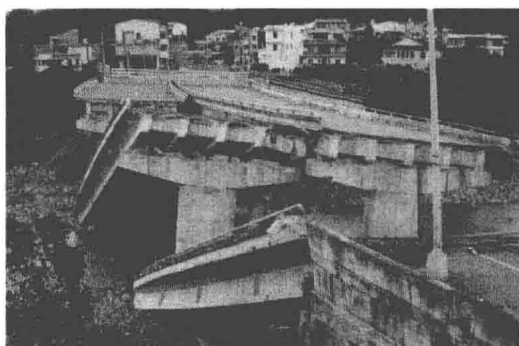
破坏，或引发公路堵塞、河流改道。

2. 建筑物的破坏

地震导致建筑物振动响应，引发结构破坏。研究结构的动力特性、减小结构地震响应、提高结构抗震性能是本书讲述的主线。在此列出地震引发建筑破坏现象，如房屋倒塌、桥梁断落、铁轨变形、水坝开裂、核电站破坏等，详见图 1-2。



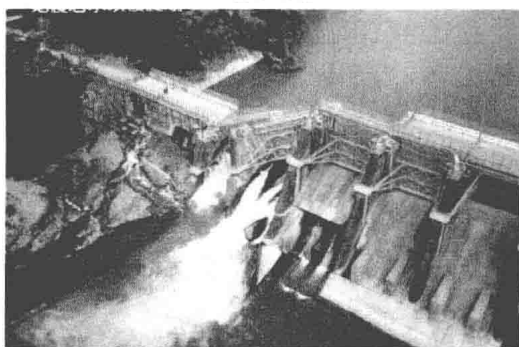
(a) 房屋倒塌



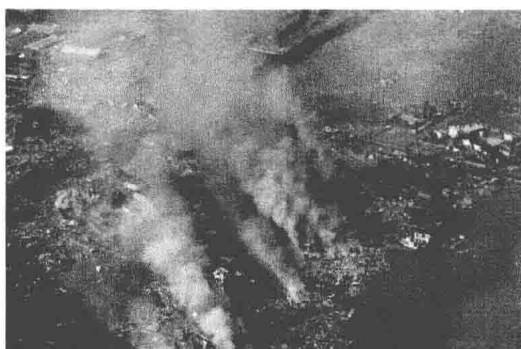
(b) 桥梁断落



(c) 铁轨变形



(d) 水坝开裂



(e) 核电站破坏 I



(f) 核电站破坏 II

图 1-2 建筑物地震破坏

3. 次生灾害

次生灾害主要有火灾、瘟疫、空气污染等。有时，次生灾害所造成的伤亡和损失

比直接灾害还严重。例如, 1923 年日本关东地震引发东京市内 227 处起火, 造成市区烧毁约 50%, 见图 1-3。2011 年 3 月 11 日, 在日本东北部海域发生里氏 9.0 级地震, 并引发海啸, 造成大量人员伤亡和重大财产损失, 并造成日本福岛核电站机组发生核泄漏事故。



图 1-3 地震引发火灾

1.2.2 地震震级与地震烈度

1. 地震震级

地震震级是从能量的角度度量地震的大小。1935 年 Richter 首次给出了震级的定义。震级的大小是采用标准地震仪 (周期为 0.8s、阻尼系数为 0.8、放大倍数为 2800 的地震仪), 在距离震中 100km 处, 记录到的以微米为单位的最大水平地面位移 A 的常用对数值, 即

$$M = \log A + R(\Delta) \quad (1-1)$$

式中, A 为记录图上以 “ μm ” 为单位的最大水平位移; $R(\Delta)$ 为依震中距 Δ 而变化的起算函数; M 为震级, 也称为里氏震级, 与震源释放能量 E (单位为 erg, $1\text{erg}=10^{-7}\text{J}$) 之间的关系为

$$\log E = 1.5M + 11.8 \quad (1-2)$$

根据式 (1-2) 可知, 震级每相差一级, 振幅相差 10 倍, 则能量相差 32 倍。地震释放的能量很大, 一个 6 级地震相当于一颗两万吨级的原子弹释放的能量。

2. 地震烈度

地震烈度是指某一区域内的地表和各类建筑物遭受一次地震影响的平均强弱程度。烈度的大小是根据人的感觉、地面房屋受破坏程度等综合因素进行评定的。

地震烈度是表示地震影响程度的一个尺度, 因此需要一个评定烈度的标准。这个标准就是地震烈度表, 不同国家所规定的地震烈度表有所不同。目前, 我国《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2008) [3] 采用的是 12 度的烈度表, 详见表 1-2。

表 1-2 我国地震烈度分类表

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)
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	室内多数人有感觉,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	室内普遍有感觉,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,抹灰微细裂纹	—	不稳定器皿翻倒	0.31 (0.22~0.44)	0.03 (0.02~0.04)
VI	多数人站不稳,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	家居和物品移动,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,饱和砂层常见喷砂冒水,松软土地上地裂缝较多;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	多数严重破坏和/或中等破坏	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			