

高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材
(按高等学校土木工程本科指导性专业规范编写)

建筑结构抗震设计

(建筑工程专业方向适用)

李宏男 主编
林 皋 主审

中国建筑工程出版社

高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材
(按高等学校土木工程本科指导性专业规范编写)

建筑结构抗震设计

(建筑工程专业方向适用)

				李宏男	主编
				霍林生	副主编
				林 皋	主审
车	轶	国	巍	翟长海	参编
		李	爽	李 宁	

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构抗震设计/李宏男主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 1

高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材 (按高等学校土木工程本科指导性专业规范编写). (建筑工程专业方向适用)

ISBN 978-7-112-17677-9

I. ①建… II. ①李… III. ①建筑结构-抗震结构-防震设计-高等学校-教材 IV. ①TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 015894 号

本书按照高等学校土木工程学科专业指导委员会最新编制的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》编写。本书主要论述了建筑结构抗震设计的基本原理和方法, 内容包括: 地震概论及抗震设计的基本原则, 场地、地基和基础, 地震作用的计算方法和结构抗震验算方法, 常见房屋的抗震计算和构造措施, 并介绍了结构振动控制的概念和方法。

为便于读者学习和应用, 书中还附有大量例题、思考题和习题。

本书可作为大专院校土木类相关专业的教学用书, 也可作为结构设计、科研和施工技术人员

* * *

责任编辑: 王 跃 吉万旺

责任设计: 陈 旭

责任校对: 李美娜 关 健

高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材
(按高等学校土木工程本科指导性专业规范编写)

建筑结构抗震设计

(建筑工程专业方向适用)

李宏男 主编

霍林生 副主编

林 皋 主审

车 轶 国 巍 翟长海 参编
李 爽 李 宁

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京君升印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19¼ 字数: 415 千字

2015 年 4 月第一版 2015 年 4 月第一次印刷

定价: 38.00 元

ISBN 978-7-112-17677-9

(26977)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本系列教材编审委员会名单

主 任：李国强

常务副主任：何若全 沈元勤 高延伟

副 主 任：叶列平 郑健龙 高 波 魏庆朝 咸大庆

委 员：（按拼音排序）

陈昌富	陈德伟	丁南宏	高 辉	高 亮	桂 岚
何 川	黄晓明	金伟良	李 诚	李传习	李宏男
李建峰	刘建坤	刘泉声	刘伟军	罗晓辉	沈明荣
宋玉香	王 跃	王连俊	武 贵	肖 宏	许 明
许建聪	徐 蓉	徐秀丽	杨伟军	易思蓉	于安林
岳祖润	赵宪忠				

组 织 单 位：高等学校土木工程学科专业指导委员会
中国建筑工业出版社

出版说明

近年来,高等学校土木工程学科专业教学指导委员会根据其研究、指导、咨询、服务的宗旨,在全国开展了土木工程学科教育教学情况的调研。结果显示,全国土木工程教育情况在 2000 年以后发生了很大变化,主要表现在:一是教学规模不断扩大,据统计,目前我国有超过 400 余所院校开设了土木工程专业,有一半以上是 2000 年以后才开设此专业的,大众化教育面临许多新的形势和任务;二是学生的就业岗位发生了很大变化,土木工程专业本科毕业生中 90% 以上在施工、监理、管理等部门就业,在高等院校、研究设计单位工作的本科生越来越少;三是由于用人单位性质不同、规模不同、毕业生岗位不同,多样化人才的需求愈加明显。土木工程专业教指委根据教育部印发的《高等学校理工科本科指导性专业规范研制要求》,在住房和城乡建设部的统一部署下,开展了专业规范的研制工作,并于 2011 年由中国建筑工业出版社正式出版了土建学科各专业第一本专业规范——《高等学校土木工程本科指导性专业规范》。为紧密结合此次专业规范的实施,土木工程教指委组织全国优秀作者按照专业规范编写了《高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材(专业基础课)》。本套专业基础课教材共 20 本,已于 2012 年底全部出版。教材的内容满足了建筑工程、道路与桥梁工程、地下工程和铁道工程四个主要专业方向核心知识(专业基础必需知识)的基本需求,为后续专业方向的知识扩展奠定了一个很好的基础。

为更好地宣传、贯彻专业规范精神,土木工程教指委组织专家于 2012 年在全国二十多个省、市开展了专业规范宣讲活动,并组织开展了按照专业规范编写《高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材(专业课)》的工作。教指委安排了叶列平、郑健龙、高波和魏庆朝四位委员分别担任建筑工程、道路与桥梁工程、地下工程和铁道工程四个专业方向教材编写的牵头人。于 2012 年 12 月在长沙理工大学召开了本套教材的编写工作会议。会议对主编提交的编写大纲进行了充分的讨论,为与先期出版的专业基础课教材更好地衔接,要求每本教材主编充分了解前期已经出版的 20 种专业基础课教材的主要内容和特色,与之合理衔接与配套、共同反映专业规范的内涵和实质。此次共规划了四个专业方向 29 种专业课教材。为保证教材质量,系列教材编审委员会邀请了相关领域专家对每本教材进行审稿。

本系列规划教材贯彻了专业规范的有关要求,对土木工程专业教学的改革和实践具有较强的指导性。在本系列规划教材的编写过程中得到了住房和城乡建设部人事司及主编所在学校和单位的大力支持,在此一并表示感谢。希望使用本系列规划教材的广大读者提出宝贵意见和建议,以便我们在重印再版时得以改进和完善。

高等学校土木工程学科专业指导委员会
中国建筑工业出版社
2014 年 4 月

前 言

我国是一个地震多发的国家，而地震中建筑物的倒塌和破坏是造成人员伤亡和经济损失的主要原因，因此建筑结构的抗震是结构设计的主要内容。自 1976 年唐山大地震以后，结构的抗震问题在我国得到普遍重视，高等学校的土木工程专业相继开设了结构抗震设计课程，我国的《建筑抗震设计规范》也先后经历了多次修订。现行的《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010 是在以往抗震设计规范的基础上，吸取了 2008 年汶川地震震害的经验教训，并采纳了地震工程的最新科研成果编制而成。

本书紧密结合现行的《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010，主要阐述建筑结构抗震设计的原理与方法，同时也介绍了结构减振控制的研究进展，目的在于使学生掌握结构抗震的基本理论和设计方法，能够按照规范进行结构的抗震设计，并对抗震技术发展的前沿领域有所了解。

全书共分为 8 章，第 1 章由李宏男（大连理工大学）负责编写，第 2 章由翟长海和李爽（哈尔滨工业大学）负责编写，第 3 章由李宁（天津大学）负责编写，第 4 章由霍林生和李宏男（大连理工大学）负责编写，第 5 章由车轶（大连理工大学）负责编写，第 6 章由霍林生（大连理工大学）负责编写，第 7 章由国巍（中南大学）负责编写，第 8 章由霍林生和李宏男（大连理工大学）负责编写。大连理工大学林皋院士对本书进行了审阅。

本书的编写，引用了一些公开出版和发表的文献，谨向这些作者一并表示谢意。由于作者水平所限，书中必有疏漏及错误之处，敬请读者批评指正。

为配合本书的使用和相关课程的教学，开设微信服务平台，可以在微信公众号中搜索“建筑结构抗震”或扫描下面的二维码图片加入。如果大家在使用本书过程中有任何疑问，欢迎通过微信平台讨论。



目 录

第 1 章 地震概论及抗震设计的基本

原则 1

本章知识点 1

1.1 地震成因 1

1.1.1 地球内部构造 1

1.1.2 地震类型 2

1.1.3 地震成因 2

1.2 地震名词解释 3

1.2.1 震源 3

1.2.2 震中 3

1.2.3 震级 3

1.2.4 地震烈度与基本烈度 4

1.2.5 地震烈度表 5

1.3 等震线和烈度区划图 8

1.4 地震地面运动 9

1.4.1 地震波 9

1.4.2 地震记录 11

1.5 地震的破坏现象 12

1.5.1 地表破坏 12

1.5.2 建筑物的破坏 13

1.5.3 次生灾害 13

1.6 工程抗震设防的标准 13

1.7 抗震设计方法 15

1.8 抗震概念设计 16

小结及学习指导 19

思考题与习题 19

第 2 章 场地和地基 20

本章知识点 20

2.1 震害现象 20

2.2 场地 20

2.2.1 剪切波速 21

2.2.2 覆盖土层厚度 22

2.2.3 建筑场地类别 22

2.2.4 断裂和地形影响 23

2.3 天然地基和基础 23

2.3.1 地基抗震设计的一般原则 23

2.3.2 地基抗震验算 24

2.4 液化土和软土地基 25

2.4.1 液化现象及其危害 25

2.4.2 液化地基的判别 25

2.4.3 液化的评价和措施 26

2.5 震陷土的判别 28

小结及学习指导 29

思考题与习题 29

第 3 章 地震作用与抗震验算 30

本章知识点 30

3.1 概述 30

3.2 单质点弹性体系地震反应

分析 31

3.2.1 运动方程 31

3.2.2 自由振动 32

3.2.3 强迫振动 33

3.3 单质点弹性体系水平地震作用及其

反应谱 33

3.3.1 水平地震作用定义 33

3.3.2 地震反应谱 34

3.3.3 标准反应谱 35

3.3.4 抗震设计反应谱 36

3.4 多质点弹性体系的地震反应

分析 38

3.4.1 运动方程 38

3.4.2 自由振动 39

3.4.3 振型分解法求解运动方程 40

3.5 多质点弹性体系的水平地震

作用 42

3.5.1 振型分解反应谱法 42

3.5.2 底部剪力法	44
3.5.3 结构基本周期的近似计算	47
3.6 考虑结构扭转效应的计算	49
3.6.1 一般规定	50
3.6.2 结构的平扭耦联地震反应 计算	50
3.7 竖向地震作用的计算	52
3.7.1 高层建筑和高耸结构的竖向地震 作用计算	52
3.7.2 大跨度结构和长悬臂结构的竖向 地震作用计算	52
3.8 结构地震反应的时程分析 方法	53
3.8.1 基本计算方法	53
3.8.2 设计地震动时程	57
3.8.3 结构弹性地震反应分析	58
3.8.4 结构弹塑性地震反应分析	58
3.9 基于性态的抗震计算方法	59
3.9.1 《建筑工程抗震性态设计通则 (试用)》中的底部剪力法	59
3.9.2 静力弹塑性分析方法 (Push- over)	61
3.10 建筑结构抗震验算	68
3.10.1 一般规定	68
3.10.2 截面抗震验算	69
3.10.3 抗震变形验算	70
小结及学习指导	74
思考题与习题	75

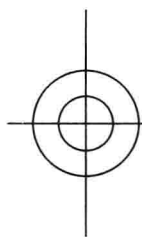
第4章 钢筋混凝土多高层房屋抗震设计

本章知识点	76
4.1 概述	76
4.2 震害现象	77
4.2.1 结构平面不对称产生的震害 ...	77
4.2.2 结构竖向刚度、强度不均匀产生 的震害	77
4.2.3 防震缝的震害现象比较普遍 ...	78
4.2.4 框架梁、柱及节点的震害	79
4.2.5 填充墙的震害	82

4.2.6 抗震墙的连接和墙肢底部的 震害	82
4.3 抗震设计的一般规定	83
4.3.1 抗震等级的划分	83
4.3.2 房屋最大适用高度	84
4.3.3 平、立面要求	85
4.3.4 防震缝	86
4.3.5 结构布置的一般原则	86
4.4 钢筋混凝土框架结构的抗震 设计	87
4.4.1 框架结构的内力和位移计算 ...	88
4.4.2 框架结构构件的截面设计	104
4.4.3 框架结构的抗震构造措施	112
4.5 抗震墙结构的抗震设计	116
4.5.1 抗震墙的分类及计算的基本 原则	116
4.5.2 等效截面刚度的计算	117
4.5.3 整体抗震墙结构内力及位移的 计算	119
4.5.4 整体小开口抗震墙内力和侧移的 计算	120
4.5.5 联肢墙内力及位移的计算	124
4.5.6 壁式框架内力及位移的计算 ...	125
4.5.7 抗震墙结构的截面设计	126
4.5.8 抗震墙结构的构造措施	130
4.6 框架-抗震墙结构的抗震设计 ...	134
4.6.1 计算的基本假定及计算简图 ...	134
4.6.2 框架-抗震墙结构铰接体系的 计算分析	135
4.6.3 框架-抗震墙结构刚接体系的 计算分析	142
4.6.4 框架-抗震墙结构的协同工作 性能	143
4.6.5 框架-抗震墙结构的截面 设计	145
4.6.6 框架-抗震墙结构构造措施	145
4.7 钢筋混凝土框架结构设计 实例	145
小结及学习指导	159

思考题与习题	159	6.1.1 屋盖系统	200
第5章 砌体房屋和底部框架砌体房屋		6.1.2 柱	202
抗震设计	161	6.1.3 墙体	203
本章知识点	161	6.2 抗震设计一般规定	203
5.1 概述	161	6.3 抗震计算	204
5.2 震害现象	162	6.3.1 横向计算	204
5.2.1 多层砌体房屋的震害	162	6.3.2 纵向计算	210
5.2.2 底层框架房屋的震害	165	6.4 抗震构造措施	220
5.3 抗震设计的一般规定	166	6.4.1 厂房屋盖的连接及支撑布置	220
5.3.1 建筑布置和结构体系	166	6.4.2 柱与柱列	222
5.3.2 房屋高度和层数的限制	167	6.4.3 围护墙	224
5.3.3 房屋最大高宽比	168	6.5 单层厂房抗震设计实例	225
5.3.4 房屋抗震横墙的间距	168	小结及学习指导	230
5.3.5 多层砌体房屋中砌体墙段的局部		思考题与习题	231
尺寸限值	168	第7章 多高层建筑钢结构抗震	
5.4 多层砌体房屋抗震验算	169	设计	232
5.4.1 计算简图	169	本章知识点	232
5.4.2 水平地震作用及楼层地震剪力		7.1 震害现象	232
计算	170	7.1.1 节点连接破坏	233
5.4.3 楼层地震剪力在墙体中的		7.1.2 构件破坏	236
分配	171	7.1.3 结构倒塌	237
5.4.4 墙体抗震承载力验算	177	7.2 抗震设计的一般规定	238
5.5 多层砌体房屋抗震构造措施	179	7.2.1 结构选型	238
5.5.1 多层砖砌体房屋抗震构造		7.2.2 结构布置	241
措施	179	7.2.3 抗震的一般要求	243
5.5.2 多层砌块房屋抗震构造措施	184	7.3 抗震计算	248
5.6 砖砌体结构房屋抗震设计		7.3.1 计算模型	248
实例	186	7.3.2 地震影响	250
5.7 底部框架-抗震墙砌体房屋抗震		7.3.3 中心支撑框架构件的抗震承载力	
设计	193	验算	250
5.7.1 结构布置原则	193	7.3.4 偏心支撑框架构件的抗震承载力	
5.7.2 抗震计算要求	194	验算	251
5.7.3 抗震构造措施	196	7.3.5 钢结构抗侧力构件的连接	
小结及学习指导	199	计算	252
思考题与习题	199	7.4 抗震构造要求	252
第6章 单层钢筋混凝土厂房抗震		7.4.1 钢框架结构的抗震构造措施	252
设计	200	7.4.2 钢框架-中心支撑结构的抗震	
本章知识点	200	构造措施	254
6.1 震害现象	200	7.4.3 钢框架-偏心支撑结构的抗震	

构造措施	255	A. 0. 6 吉林省	287
小结及学习指导	257	A. 0. 7 黑龙江省	288
思考题与习题	258	A. 0. 8 江苏省	288
第 8 章 结构减震控制技术	259	A. 0. 9 浙江省	289
本章知识点	259	A. 0. 10 安徽省	289
8. 1 概述	259	A. 0. 11 福建省	289
8. 2 被动控制	260	A. 0. 12 江西省	290
8. 2. 1 基础隔震体系	260	A. 0. 13 山东省	290
8. 2. 2 吸振减震结构体系	266	A. 0. 14 河南省	291
8. 2. 3 耗能减震结构体系	268	A. 0. 15 湖北省	292
8. 3 主动控制	274	A. 0. 16 湖南省	292
8. 4 混合控制、半主动控制及智能 控制	276	A. 0. 17 广东省	293
8. 4. 1 混合控制	276	A. 0. 18 广西壮族自治区	293
8. 4. 2 半主动控制	276	A. 0. 19 海南省	294
8. 4. 3 智能控制	277	A. 0. 20 四川省	294
小结及学习指导	283	A. 0. 21 贵州省	295
思考题与习题	283	A. 0. 22 云南省	295
附录 我国主要城镇抗震设防烈度、 设计基本地震加速度和设计 地震分组	284	A. 0. 23 西藏自治区	296
A. 0. 1 首都和直辖市	284	A. 0. 24 陕西省	297
A. 0. 2 河北省	284	A. 0. 25 甘肃省	297
A. 0. 3 山西省	285	A. 0. 26 青海省	298
A. 0. 4 内蒙古自治区	286	A. 0. 27 宁夏回族自治区	298
A. 0. 5 辽宁省	287	A. 0. 28 新疆维吾尔自治区	299
		A. 0. 29 港澳特区和台湾省	299
		参考文献	301



第1章

地震概论及抗震设计的基本原则

本章知识点

【知识点】地震产生的机理，与工程抗震有关的术语，工程抗震设防标准，工程抗震设计的方法，工程抗震设计的总体原则。

【重点】掌握工程抗震有关的基本理论和术语，区分地震震级和地震烈度，理解三水准抗震设防要求和两阶段设计的理论，把握抗震概念设计的思想。

【难点】震级与烈度的区别，三水准设防目标及两阶段设计理论含义。

1.1 地震成因

1.1.1 地球内部构造

地球是一个一端微扁的球体，平均半径 6400km。研究表明，地球从地表至核心由三种性质不同的物质构成：最外层是很薄的地壳，平均厚度约为 30km；中间一层是地幔，厚度约为 2900km；最里面部分叫地核，半径约为 3500km（图 1-1）。

1. 地壳

地壳由各种不均匀的岩石组成。地表覆盖一层薄薄的沉积岩、风化土以及疏松沉积物等。陆地下面的地壳上部主要是花岗岩层，下部主要为玄武岩层；海洋下面的地壳性质较单一，一般只有玄武岩层。地壳厚度变化很大，在海洋下面，一般仅有几千米；而在大陆下面，平均厚度为 30~40km。世界上绝大部分地震都发生在地壳内。

2. 地幔

地幔主要由质地坚硬、密度较大的黑色橄榄岩组成。据推测，它占地球

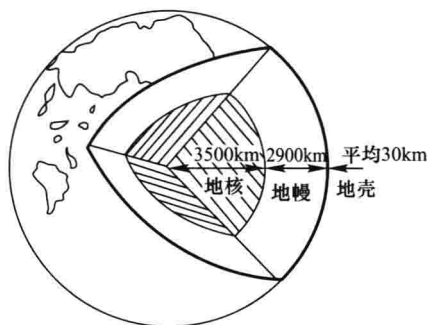


图 1-1 地球的构造

全部体积的 $5/6$ 。从地下 $20\sim 700\text{km}$ ，其温度由约为 600°C 上升到 2000°C 。在这一范围内，存在一个厚几百千米的软流层。由于温度分布不均匀，发生了地幔内部物质的对流；此外，地球内部的压力也是不均匀的。因此，地幔内部物质在这样的热状态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，所观测到的最深地震发生在地下约 700km 处，可见地震仅发生在地壳内和地幔上部。

3. 地核

地核可分为外核与内核，其主要构成物质是镍和铁。据推测，外核可能处于液态，厚度约为 2100km ；内核可能处于固态，半径约为 1400km 。

1.1.2 地震类型

地震是由于某种原因引起的地面强烈振动，属于一种自然现象。按其成因，地震可以分为以下三种主要类型：

1. 火山地震

由于火山爆发，地下岩浆猛烈冲击地面时引起的地面振动，称为火山地震。由于这种地震释放能量小，相对来说影响范围和造成的破坏程度均比较小。

2. 塌陷地震

由于地表或地下岩层因某种原因突然造成大规模陷落和崩塌时引起的地面振动，称为塌陷地震，如石灰岩地区较大的地下溶洞的塌陷或古旧矿坑的塌陷等。此类地震不仅能量小，数量也少。我国 40 余年来发生的多次大地震中，仅 1954 年和 1965 年四川自贡发生的两次地震，属塌陷地震，震源极浅，波及范围很小。

3. 构造地震

由于地壳运动产生的自然力推挤地壳岩层，使其薄弱部位突然发生断裂错动，这种在构造变动中引起的地震称为构造地震。此类地震破坏性大、发生频繁、影响面广，占破坏性地震总量的 95% 以上。因此，在建筑抗震设计中，仅讨论构造地震作用下建筑的设防问题。构造地震，简称地震。

1.1.3 地震成因

地球内部总是在不停地运动着，在它的运动过程中，始终存在着巨大的能量，地壳中的岩层在这些能量引发的巨大的力的作用下，使处在原始水平状态的岩层发生变形（图 1-2a）。当作用力仅能使岩层产生弯曲变形而没有丧失其连续性时，岩层只产生褶皱；但当作用力超过岩层所能承受的程度时，岩层产生断裂和错动。在这种地壳岩层构造状态的变化过程中，岩层处在复杂的地应力作用状态之下。随着地壳运动的不断变化，地应力的作用超过某处岩层的强度极限时，岩层就会发生突然的断裂和错动，从而引起振动，并以弹性波的形式传到地面，形成了地震。由于岩层的破裂往往是由一系列裂缝组成的破碎地带，整个破碎地带的岩层不可能同时达到平衡，因此，在一次强烈地震（主震）之

后，岩层的变形还将继续进行调整，进而形成一系列余震。

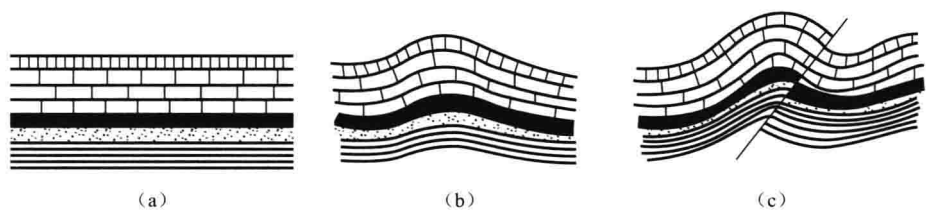


图 1-2 构造变动与地震形成示意图
(a) 岩层原始状态；(b) 受力后发生褶皱变形；(c) 引起岩层断裂产生振动

1.2 地震名词解释

1.2.1 震源

地壳深处岩层发生断裂、错动的地方称为震源。震源至地面的距离称为震源深度，如图 1-3 所示。震源深度小于 70km 的地震称为浅源地震；70～700km 的地震称为中源地震；大于 700km 的地震称为深源地震。世界上绝大多数破坏性地震都属于浅源地震，一般深度为 5～40km。

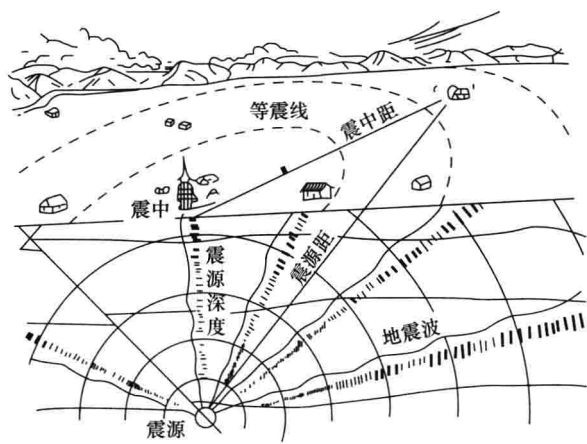


图 1-3 几个常用的地震术语示意图

1.2.2 震中

震源在地表面上的垂直投影点，称为震中。震中周围地区称为震中区。地震灾害最严重的地区，称为极震区。一般情况下，极震区与震中区大体上是一致的。

1.2.3 震级

震级是表示地震本身大小的一种度量，其数值是根据地震仪记录到的地

震波来确定的。目前,世界上比较通用的是里氏震级。其最初定义为里克特(Richter)于1935年提出的,即:震级大小是指用标准地震仪(指周期为0.8s,阻尼为0.8,放大倍数为2800的地震仪)在距震中处记录的以微米($1\mu\text{m}=10^{-3}\text{mm}$)为单位的最大水平地面位移 A 的常用对数:

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

式中 M ——地震震级(里氏震级);

A ——地震时程曲线图上的最大振幅(μm)。

实际上,地震时距震中100km处不一定恰好有地震仪,且现今一般都不用上述标准地震仪。因此,对于震中距不是100km的地震台站和采用非标准地震仪时,要按修正后的计算公式计算震级。

根据我国现用仪器,计算近震(指震中距小于1000km)震级按下式计算:

$$M_L = \log A_\mu + R(\Delta) \quad (1-2)$$

式中 M_L ——近震体波震级;

A_μ ——地震曲线上水平向最大振幅(μm);

$R(\Delta)$ ——随震中距 Δ 变化的起算函数。

远震(指震中距大于1000km)测定震级的方法,一般采用体波法和面波法。我国采用的面波震级的经验公式为:

$$M_s = \log \left(\frac{A_\mu}{T} \right)_{\max} + \sigma(\Delta) \quad (1-3)$$

式中 M_s ——近震体波震级;

A_μ ——地震曲线上水平向最大振幅(μm);

T ——与 A_μ 相应的周期;

$\sigma(\Delta)$ ——面波震级的量规函数。

然而,不论采用什么震级,由于地震波传播介质的差异,同一次地震在不同地点确定的震级常常不同,差别常达0.3~0.5,有时甚至超过1.0。

震级 M 与震源释放的能量 E (以尔格计)之间有如下对应关系:

$$\log E = 1.5M + 11.8 \quad (1-4)$$

由式(1-1)和式(1-4)可知,当震级增大一级时,地面振动幅值增加10倍,而能量增加32倍。一个七级破坏性地震释放的能量,相当于近30个2万吨级的原子弹所具有的能量。

通常将震级划分为若干等级:小于2级的地震,人们通常感觉不到,只有仪器才能记录下来,称为微震;2~4级地震,称为有感地震;5级以上地震,会对建筑物造成不同程度的破坏,称为破坏性地震;7级以上地震,称为强烈地震或大地震;大于8级的地震,称为特大地震。目前世界上已记录到的最大地震震级为8.9级。

1.2.4 地震烈度与基本烈度

地震烈度是指地震时某一地区的地面和各类工程结构遭受地震影响的平均强弱程度,是衡量地震引起的后果的一种标度。

基本烈度是指一个地区今后一定时期（如 100 年）内在一般场地条件下可能遭遇的最大地震烈度，即现行全国地震烈度区划图规定的烈度，带有中长期地震预报的性质。

对应于一次地震，震级只有一个，而地震烈度在不同的地点却是不同的。一般说来，距震中愈远，地震影响愈小，烈度就愈低；反之，烈度就愈高。地震烈度还与地震大小、震源深度、地震波传播介质、表土性质、建筑物特性和施工质量等许多因素有关。震中区的烈度称为震中烈度。迄今为止，我国发生的大多数地震属于浅源地震，地震震级 M 与震中距烈度 I_0 大致的对应关系如关系表 1-1 所示。

我国浅源地震的震级与震中烈度的对应关系 表 1-1

M	$4\frac{3}{4}\sim5\frac{1}{4}$	$5\frac{1}{2}\sim5\frac{3}{4}$	$6\sim6\frac{1}{2}$	$6\frac{3}{4}\sim7$	$7\frac{1}{4}\sim7\frac{3}{4}$	$8\sim8\frac{1}{8}$	$8\frac{1}{2}$
I_0	6	7	8	9	10	11	12

1.2.5 地震烈度表

地震烈度表的使用已有 400 多年的历史。早期的烈度表由于没有地震观测仪器，只能根据地震宏观现象来制定，人的感觉、物体的反应、地表和建筑的影响和破坏程度等。由于宏观烈度表没有提供定量的数据，因而不能直接应用于工程抗震设计。强震观测仪器的出现，人们才有可能用记录到的地面运动的某些参数，如加速度峰值、速度峰值等来定义烈度，从而出现了将地震宏观烈度与地面运动参数建立起联系的地震烈度表，表 1-2 所示为由国家地震局于 2008 年颁布实施的中国地震烈度表。值得指出的是，现已有足够资料证明，同一烈度区可以有相差几十倍甚至上百倍的加速度值或速度值与之相对应，故表 1-2 中的水平向加速度和速度不能作为烈度评定指标，而只能作为参考指标。

中国地震烈度表 表 1-2

地震烈度	人的感觉	房屋震害			其他震害现象	水平向地面运动	
		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	室内个别静止中人有感觉	—	—	—	—	—	—
III	室内少数静止中人有感觉	—	门、窗轻微作响	—	悬挂物微动	—	—
IV	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	—	—

续表

地震烈度	人的感觉	房屋震害			其他震害现象	水平向地面运动	
		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
V	室内绝大多数、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，个别房屋抹灰出现细微裂缝，个别有檐瓦掉落，个别屋顶烟囱掉砖	—	悬挂物大幅度晃动，不稳定器物摇动或翻倒	0.31 (0.22~0.44)	0.03 (0.02~0.04)
VI	多数人站立不稳，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	家具和物品移动；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，饱和砂层常见喷水冒砂，松软土地地裂缝较多；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	少数毁坏，多数严重和/或中等破坏				
		C	个别毁坏，少数严重破坏，多数中等和/或轻微破坏	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/或毁坏	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			
X	骑自行车的人会摔倒，处不稳状态的人会摔离原地，有抛起感	A	绝大多数毁坏	0.69~0.91	山崩和地震断裂出现；基岩上拱桥破坏；大多数独立砖烟囱从根部破坏或倒毁	10.00 (7.08~14.14)	1.00 (0.72~1.41)
		B	大多数毁坏				
		C	多数毁坏和/或严重破坏	0.58~0.80			

续表

地震烈度	人的感觉	房屋震害			其他震害现象	水平向地面运动	
		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
Ⅺ		A	绝大多数毁坏	0.89~	地震断裂延续很大,大量山崩滑坡	—	—
		B		1.00			
		C		0.78~1.00			
Ⅻ	—	A	几乎全部毁坏	1.00	地面剧烈变化,山河改观	—	—
		B					
		C					

注：表中给出的“峰值加速度”和“峰值速度”是参考值，括弧内给出的是变动范围。

1. 表中的数量词，“个别”为10%以下；“少数”为10%~50%；“多数”为50%~70%；“大多数”为60%~90%；“绝大多数”为80%以上。

2. 评定地震烈度时，Ⅰ~Ⅴ度应以地面上以及底层房屋中的人的感觉和其他震害现象为主；Ⅵ~Ⅹ度应以房屋震害为主，参照其他震害现象，当用房屋震害程度与平均震害指数评定结果不同时，应以震害程度评定结果为主，并综合考虑不同类型房屋的平均震害指数；Ⅺ度和Ⅻ度应综合房屋震害和地表震害现象。

3. 以下三种情况的地震烈度评定结果，应作适当调整：

（1）当采用高楼上人的感觉和器物反应评定地震烈度时，适当降低评定值；

（2）当采用低于或高于Ⅶ度抗震设计房屋的震害程度和平均震害指数评定地震烈度时，适当降低或提高评定值；

（3）当采用建筑质量特别差或特别好房屋的震害程度和平均震害指数评定地震烈度时，适当降低或提高评定值。

4. 当计算的平均震害指数值位于表 1-2 中地震烈度对应的平均震害指数重叠搭接区间时，可参照其他判别指标和震害现象综合判定地震烈度。

从实际应用的情况来看，使用最经常的烈度是Ⅵ~Ⅹ度。它们大多是根据低层房屋的震害评定的，这也是工程抗震中最关心的烈度范围。因为更小的烈度对工程无影响，更高的烈度既少见而又超过人们可以经济地防御范围。

由地震烈度表可知，房屋破坏等级分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏五类，其定义和对应的震害指数 d 如下：

（1）基本完好：承重和非承重构件完好，或个别非承重构件轻微损坏，不加修理可继续使用。对应的震害指数范围为 $0.00 \leq d < 0.10$ 。

（2）轻微破坏：个别承重构件出现可见裂缝，非承重构件有明显裂缝，不需要修理或稍加修理即可继续使用。对应的震害指数范围为 $0.10 \leq d < 0.30$ 。

（3）中等破坏：多数承重构件出现轻微裂缝，部分有明显裂缝，个别非承重构件破坏严重，需要一般修理后可使用。对应的震害指数范围为 $0.30 \leq d < 0.55$ 。

（4）严重破坏：多数承重构件破坏较严重，非承重构件局部倒塌，房屋修复困难。对应的震害指数范围为 $0.55 \leq d < 0.85$ 。

（5）毁坏：多数承重构件严重破坏，房屋结构濒于崩溃或已倒毁，已无修复可能。对应的震害指数范围为 $0.85 \leq d \leq 1.00$ 。