

高等学校交通运输与工程类专业规划教材

Seismic Design of Bridges

桥梁抗震

| 第三版 |

叶爱君 管仲国 编著
范立础 主审



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

高等学校交通运输与工程类专业规划教材

桥梁抗震

Seismic Design of Bridges

(第三版)

叶爱君 管仲国 编著
范立础 主审



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书为高等学校交通运输与工程类专业规划教材。全书以通俗易懂的语言,并借助大量的插图,系统地介绍了桥梁抗震的基础知识、桥梁抗震设计方法和具体过程,是桥梁抗震的入门用书。本书既有实用性,又有先进性。内容包括:地震概述、桥梁震害、桥梁抗震概论、桥梁结构地震反应分析、桥梁延性抗震设计,以及桥梁减隔震设计。

本书除作为高等学校道路桥梁与渡河工程专业和土木工程专业桥梁工程方向教学用书外,也可供桥梁工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁抗震 / 叶爱君, 管仲国编著. — 3 版. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017. 2
高等学校交通运输与工程类专业规划教材 ISBN 978-7-114-12468-6

I. ①桥… II. ①叶… ②管… III. ①桥梁工程—防震设计—高等学校—教材 IV. ①U442.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 034193 号

高等学校交通运输与工程类专业规划教材

书 名: 桥梁抗震(第三版)

著 作 者: 叶爱君 管仲国

责任编辑: 李 喆

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 12

字 数: 288 千

版 次: 2002 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 2 版 2017 年 3 月第 3 版

印 次: 2017 年 3 月 第 1 次印刷 总第 11 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12468-6

定 价: 26.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

高等学校交通运输与工程(道路、桥梁、隧道 与交通工程)教材建设委员会

主任委员:沙爱民 (长安大学)

副主任委员:梁乃兴 (重庆交通大学)

陈艾荣 (同济大学)

徐岳 (长安大学)

黄晓明 (东南大学)

韩敏 (人民交通出版社股份有限公司)

委员:(按姓氏笔画排序)

马松林 (哈尔滨工业大学)

王云鹏 (北京航空航天大学)

石京 (清华大学)

申爱琴 (长安大学)

朱合华 (同济大学)

任伟新 (合肥工业大学)

向中富 (重庆交通大学)

刘扬 (长沙理工大学)

刘朝晖 (长沙理工大学)

刘寒冰 (吉林大学)

关宏志 (北京工业大学)

李亚东 (西南交通大学)

杨晓光 (同济大学)

吴卫国 (武汉理工大学)

吴瑞麟 (华中科技大学)

何民 (昆明理工大学)

何东坡 (东北林业大学)

张顶立 (北京交通大学)

张金喜 (北京工业大学)

陈红 (长安大学)

陈峻 (东南大学)

陈宝春 (福州大学)

陈静云 (大连理工大学)

邵旭东 (湖南大学)

项贻强 (浙江大学)

郭忠印 (同济大学)

黄侨 (东南大学)

黄立葵 (湖南大学)

黄亚新 (解放军理工大学)

符铎砂 (华南理工大学)

葛耀君 (同济大学)

裴玉龙 (东北林业大学)

戴公连 (中南大学)

秘书长:孙玺 (人民交通出版社股份有限公司)

第三版前言

我国是地震多发国家。2008 年汶川地震以来,我国进入新的地震活跃期,地震频发,抗震形势严峻。而随着我国经济社会的发展,全社会对建设工程地震安全性提出了更高的要求,抗震减灾工作日益受到重视。2015 年 5 月 15 日,最新规范《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)发布,并于 2016 年 6 月 1 日起正式实施。新一代区划图对全国设防参数整体上进行了适当的提高,意味着对建设工程的抗震设防能力与水平提出了更高的要求。

桥梁工程作为交通网络的枢纽工程,其抗震性能关系到整个交通生命线的畅通与否,进而直接影响抗震救灾和灾后重建工作的大局。因此,桥梁工程的抗震水平也需要不断提高。我国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)和《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)分别于 2008 年和 2011 年编制出版,目前已相继开始修订。2014 年编制出版的《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)也给出了城市轨道交通桥梁的抗震设计规定。这些抗震设计规范的编制或修订,对广大桥梁工程师的抗震设计相关知识和水平提出了更高的要求。

在这样的背景下,为了保持教材的先进性,对本教材进行了修订。在这次修订中,没有改变教材的总体框架结构,除了反映最新研究成果和规范的新内容外,更加注重强化教材的实用性。全书共分 6 章。第 1 章简要介绍了一些关于地震

的基本知识;第2章详细介绍并分析了桥梁的震害,总结了震害教训,本次修订中特别将大跨度桥梁的震害归为一类进行了介绍分析;第3章论述了桥梁的抗震设防标准和设计流程,阐明地震动输入的选择和抗震概念设计,本次修订的重点是地震动输入和结构抗震体系部分;第4章系统介绍了桥梁结构地震反应分析的理论 and 实用方法,本次修订的重点是动力计算模型和反应谱分析部分;第5章详细阐述了桥梁延性抗震设计的基本原理和方法,并通过实例详细介绍设计与分析的全过程,本次修订的重点是加强和完善算例部分;第6章介绍了减隔震技术的原理、装置、应用和设计原则,并通过实例展示其设计全过程,本次修订的重点是钢阻尼器和算例部分。

全书由叶爱君、管仲国编著,范立础主审。在这次修订中,同济大学桥梁抗震研究室的硕士研究生周连绪、王泽罡参与了本书部分算例及图文编写工作。在此,编者特别表示感谢。

由于编写者水平有限,教材中不可避免有谬误之处,敬请读者批评指正。

编 者
同济大学桥梁工程系
2016 年 10 月

第二版前言

近几年来,国内外地震频发,地震损失惨重。我国的地震形势亦十分严峻,2008年5月12日发生的汶川大地震,造成了非常巨大的人员伤亡和经济损失,举世震惊。桥梁工程,作为震区交通线的枢纽工程,其抗震性能关系到抗震救灾工作的大局,受到极大的关注。震后,工程师和学者们纷纷对桥梁震害进行了认真系统的调查分析,得到了不少宝贵资料。

另一方面,我国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)和《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)相继制定,与《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004—89)相比,这两本规范在设计理念和设计方法上有非常大的进步,要求广大桥梁工程师必须具备更多的抗震设计相关知识。

作为桥梁抗震设计的入门用书,理应反映相关研究的最新成果,保持其先进性特点。因此,在人民交通出版社的大力支持下,对本教材进行了修订。在这次修订中,除了纳入一些新的桥梁震害资料外,着重结合新颁布的两本规范,详细阐述了桥梁抗震设计方法和具体过程,并提供了三座桥梁的抗震设计实例。

全书共有6章。第1章简要地介绍一些关于地震的基本知识;第2章详细介绍并分析桥梁的震害,总结震害教训;第3章论述桥梁的抗震设防标准和设计流程,并介绍了地震动输入的选择和抗震概念设计;第4章系统介绍了桥梁结构地震反应分析的理论和实用方法;第5章介绍了桥梁延性抗震设计的基本原理和方

法,并通过两个实例介绍其详细设计过程;第6章介绍了减隔震技术的原理、装置、应用和设计原则,并以实际桥梁为例介绍其设计过程。

全书由叶爱君、管仲国编写,范立础主审。桥梁抗震研究室的硕士研究生何健和汤虎参与了本书算例的编写工作,博士研究生赫中营,硕士研究生王晓伟、沈星参与了本书部分插图绘制和文字校对工作。江苏省地震工程研究院杨伟林院长、上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司袁建兵教授级高工对书稿的编写提出了很好的建议。对这些帮助,编者在此特别表示感谢。

由于编写者水平有限,教材中不可避免有谬误之处,敬请读者批评指正。

作 者
同济大学桥梁工程系
2011年6月

第一版前言

最近 20 余年的地震灾害表明,现代化城市随着人口的大量聚集和经济的高速发展,对交通线的依赖性将越来越强,一旦地震使交通线遭到破坏,可能导致的生命财产以及间接经济损失也将会越来越巨大。多次破坏性地震一再显示了桥梁工程遭到破坏的严重后果,也一再显示了对桥梁工程进行正确抗震设计的重要性。

自 1976 年唐山地震以后,桥梁抗震工作在我国也日益受到重视。近几年,又相继颁布并开始实施《防震减灾法》和《中国地震动参数区划图》,更是将一般建设工程的抗震设防纳入了法制化、标准化管理的轨道。目前,我国的铁路工程和公路工程抗震设计规范正在重新修订,而城市桥梁抗震设计规范也正在编制。这些规范相继修订或编制之后,我国的桥梁抗震设计水平将会上一个台阶,当然,对广大桥梁工程师也会提出更高的要求。

本书作为桥梁抗震的入门用书,就是为顺应这一形势而编的。全书本着循序渐进的学习方法,以通俗易懂的语言,并借助大量的插图,系统地介绍桥梁抗震的基础知识、桥梁抗震设计方法和具体过程。本书注重实用性,同时也力求反映桥梁抗震研究的最新成果。

全书共有七章。第一章简要地介绍一些关于地震的基本知识;第二章详细介绍并分析桥梁的震害;第三章概括论述桥梁抗震的原则、计算理论和一般要求;第

四章介绍桥梁抗震设计的具体流程;第五章系统地介绍桥梁延性抗震设计的基本原理和方法;第六章简单介绍减隔震技术的原理、装置、应用和设计原则;第七章为一座四跨连续梁桥的抗震设计实例。最后,简单介绍桥梁抗震设计方法的发展趋势,包括基于性能的抗震设计思想和基于位移的抗震设计方法。

全书由叶爱君编写,范立础审定。同济大学桥梁抗震研究室的胡世德教授、李建中教授、王君杰教授和王志强博士,福州大学的卓卫东副教授,以及上海市政设计研究院的袁建兵、黄虹两位国家一级注册结构工程师等对本书的编写提供了很多帮助,特此致谢。

由于编写者水平有限,书中不可避免有谬误之处,敬请读者批评指正。

编 者

同济大学桥梁工程系

2002 年 5 月

目录

CONTENTS

第1章 地震概述	1
1.1 地震的基本知识	1
1.2 地震震级与地震烈度	4
1.3 地震波与地震动	6
1.4 地震分布	9
1.5 地震灾害	11
本章参考文献	15
第2章 桥梁震害	16
2.1 桥梁震害分类	16
2.2 桥梁上部结构的震害	18
2.3 桥梁支座的震害	23
2.4 桥梁下部结构和基础的震害	25
2.5 大跨度桥梁震害	31
2.6 桥梁震害的教训及对策	33
本章参考文献	37
第3章 桥梁抗震概论	38
3.1 桥梁结构的抗震设防标准	39
3.2 桥梁工程抗震设计流程	45
3.3 地震动输入的选择	46
3.4 桥梁结构抗震概念设计	57
本章参考文献	61

第4章 桥梁结构地震反应分析	62
4.1 结构动力学初步概念	63
4.2 桥梁结构地震反应分析方法	65
4.3 一般桥梁结构的地震反应分析	80
4.4 规则桥梁的地震反应简化分析	95
本章参考文献	99
第5章 桥梁延性抗震设计	101
5.1 延性的基本概念	102
5.2 桥梁延性抗震设计基本理论	106
5.3 延性构件的强度设计与验算	110
5.4 延性构件的延性设计与验算	113
5.5 能力保护构件的强度设计与验算	122
5.6 单柱墩桥梁延性抗震设计实例	125
5.7 双柱墩桥梁延性抗震设计实例	135
5.8 不同形式双柱墩桥梁的延性抗震设计实例	147
本章参考文献	152
第6章 桥梁减隔震设计	154
6.1 减隔震技术的原理	155
6.2 减隔震装置与系统	156
6.3 减隔震技术的应用	164
6.4 桥梁减隔震设计	168
6.5 减隔震桥梁设计实例	172
本章参考文献	179

第 1 章

地震概述

地球表面无时无刻不在振动,就像人的脉搏一样,只要人活着,脉搏就永远跳动。地球也有像脉搏那样连续不断的振动,称为脉动。脉动以周期相近、振幅变化不大的波动形式出现。然而有时地球表面会突然发生快速的颤动,这就是地震。强烈的地震会引起山崩地裂,河川倒流,房屋倒塌,电力中断,给人类带来巨大的灾难。

因此,地震是威胁人类的一种突如其来的自然灾害,人类必须和这种自然灾害进行斗争,即抗震。为了有效地进行抗震,工程技术人员就有必要对地震有一定的了解。为此,本章先简要介绍一些关于地震的基本知识。

1.1 地震的基本知识

地震是地壳运动的一种表现,与地质构造有密切的关系。实际上,地球上每天都在发生地震。据统计,全世界每年大约发生 500 万次地震,但绝大多数是小地震,只有 1% 的地震是人们可以感觉到的,至于能造成破坏性灾害的地震则为数更少,平均每年十几次。

1.1.1 地球构造

为了初步了解地震发生和发展的规律,首先需要了解地球的构造。

地球是一个外形略呈梨形的椭球体,平均半径约 6 400km。地球的内部构造,与鸡蛋十分相似,由地表至核心可分为性质不同的三层,如图 1.1 所示。最外层是相当薄的地壳,平均厚度为 30km,只占地球体积的 0.5%;其下为地幔,厚约 2 900km,约占地球总体积的 83.3%;地壳与地幔的分界面称为莫霍面,是一个地震波传播速度急剧变化的不连续面;最里面的部分称为地核,半径约 3 470km。

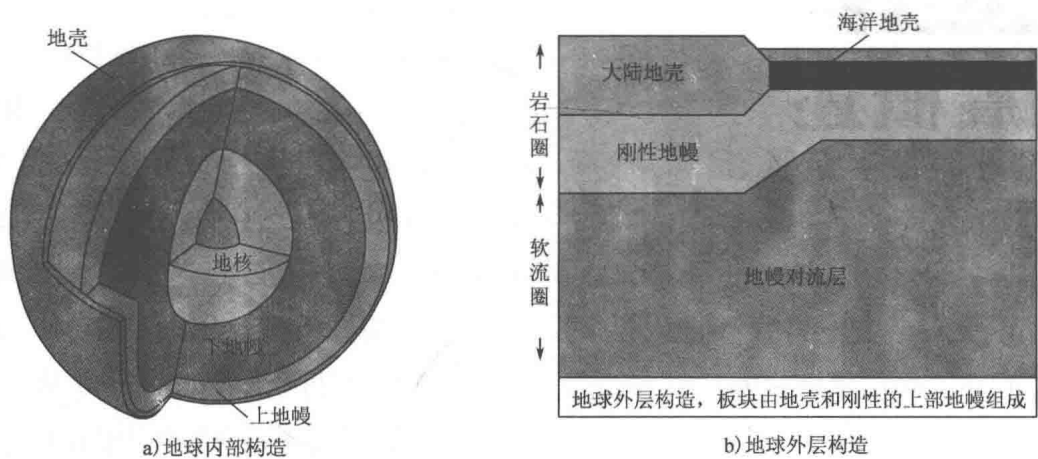


图 1.1 地球构造示意图

地壳由物理力学性质很不均匀的岩石组成,其厚度也很不均匀,高山或高原处厚度可达 60 ~ 80km,而在深海底只有 5 ~ 8km。世界上绝大多数的地震都发生在地壳这一层内。

一般认为,地幔主要由质地非常坚硬、比重较大的黑色橄榄岩组成,但其上部的几百公里内,情况比较复杂。从莫霍面以下 40 ~ 70km 内是刚性的岩石层,它与地壳共同组成所谓的岩石圈。岩石圈以下存在着一个厚约几百公里的软流层,称为软流圈。软流层内波速明显低于内外的岩层,可能是由于该层因高温高压而具有黏弹或流变性质之故。岩石圈与软流圈合称为上地幔,上地幔之下为下地幔。

地核是地球的核心,体积占整个地球的 16.2%,但总质量却占到整个地球的 31.5%。地核分为外核、过渡层和内核三个层次,外核可能处于液态,过渡层处于由液态向固态过渡的状态,而内核可能是固态。据推测,地核主要由铁、镍等物质组成,内核的压力高达 360 万个大气压力,温度高达 4 000 ~ 5 000℃。

1.1.2 地震成因和类型

地震按其成因,可分为火山地震、陷落地震、构造地震和诱发地震。

火山地震是由于火山活动而引起的地震,一般影响范围较小,发生的次数也较少,约占全球地震总数的 7%。陷落地震是由于地层陷落引起的地震,发生的次数更少,约占全球地震总数的 3%,引起的破坏也较小。诱发地震主要是地下核爆炸、水库蓄水、油田抽水和注水、矿山开采等活动引起的地震,一般都不太强烈,仅有个别情况(如水库地震)会造成较大破坏。构造地震则是地球内部岩层构造活动在某些阶段发生急剧变化时引起的。构造地震发生的次数最多(约为全球地震总数的 90%),涉及的范围最广,释放的能量最大,造成的危害也最大,是地震工程研究的主要对象。

构造地震的成因是:由于地应力在某一地区逐渐增加,岩石变形也不断增加,达到一定程

度时,在岩石比较薄弱的地方突然发生断裂错动,部分应变能突然释放,其中一部分能量以波的形式在地层中传播,引起地面振动,就产生了地震。由于岩层的破裂往往不是沿一个平面发展,而是形成由一系列裂缝组成的破碎地带,沿整个破碎地带的岩层不可能同时到达平衡。因此,在一次强烈地震(主震)之后,岩层的变形还有不断的零星调整,从而形成一系列余震。

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、不同断层的交汇处。

对于地应力的产生,较为公认的是板块构造学说。这一学说认为,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块组成,这六大板块是欧亚板块、太平洋板块、美洲板块、非洲板块、印澳板块和南极板块(图 1.2)。由于地幔软流层的对流,带动着软流层上的这些板块异常缓慢而持久地相互运动着。但板块的边界是相互制约的,因而板块之间处于拉伸、挤压和剪切状态,从而产生了地应力。地球上的主要地震带就在这些大板块的交界地区。

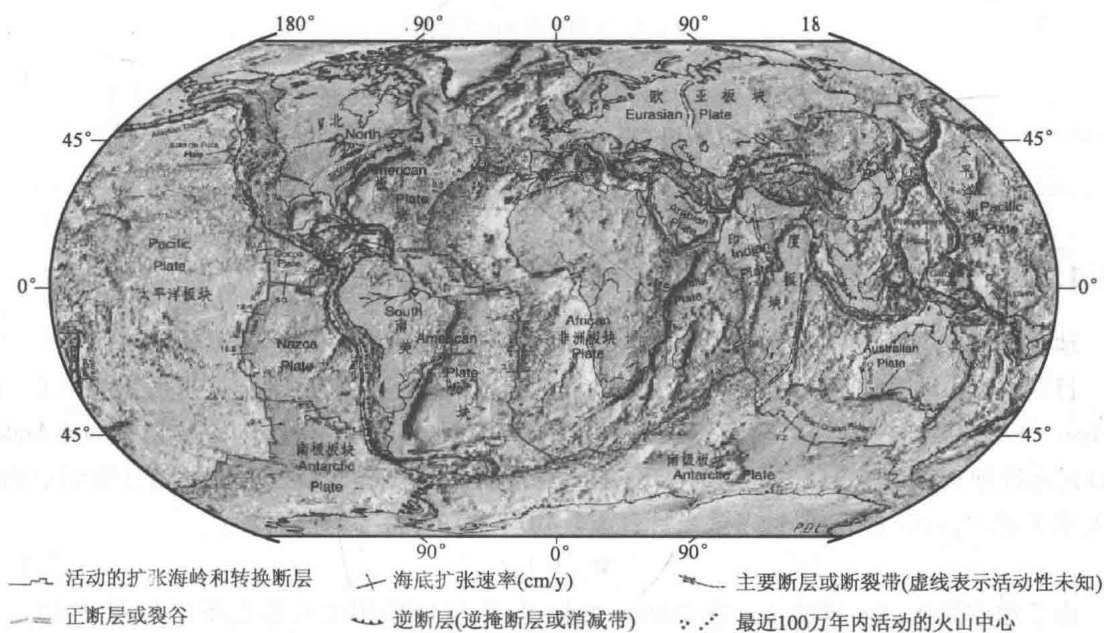


图 1.2 全球数字化板块构造运动图

地层构造运动中,在断层形成的地方大量释放能量,产生剧烈振动,此处称为震源。震源正上方的地面位置称为震中。震中与震源之间的距离称为震源深度。建筑物与震中的距离称为震中距。建筑物与震源的距离称为震源距。震中附近振动最剧烈,一般也就是破坏最严重的地区称为极震区。图 1.3 为震源、震源深度、震中和震中距的示意图。

按震源的深浅,地震可分为浅源地震(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,浅源地震造成的危害最大,当震源深度超过 100km 时,通常就不会在地面上造成震害。我国发生的地震,绝大多数是浅源地震,震源深度在 10 ~ 20km。目前世界上观测到的地震中,最大震源深度约为 720km。

按震中距的远近,地震可分为地方震(震中距小于 100km)、近震(震中距为 100 ~ 1 000km)和远震(震中距大于 1 000km)。

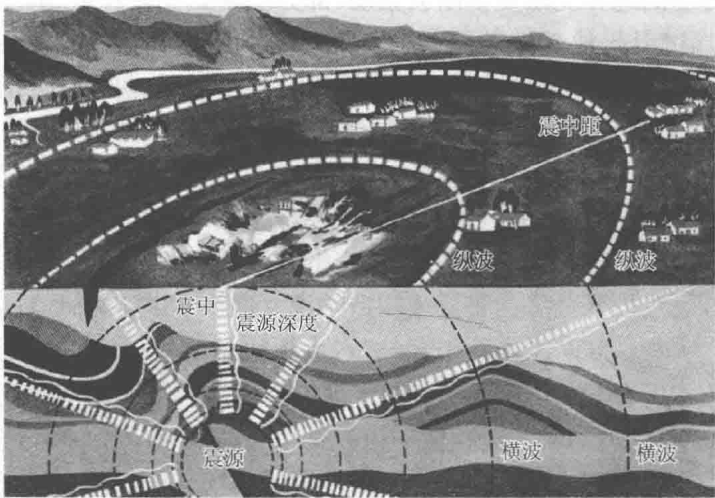


图 1.3 常用地震术语示意图

1.2 地震震级与地震烈度

1.2.1 地震震级

地震的震级是衡量一次地震大小的等级,用符号 M 表示。

目前,国际上比较通用的是里氏震级(常用 M_L 表示),其原始定义是里克特(C. F. Richter)于 1935 年提出的。它的定义是:在离震中 100km 处用伍德—安德生(Wood-Anderson)式标准地震仪(摆的自振周期为 0.8s,阻尼系数为 0.8,放大倍数为 2 800 倍)所记录到的最大水平地动位移(即振幅 A ,以微米计, $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$)的常用对数值,即:

$$M_L = \lg A \tag{1.1}$$

由于地震发生时不可能正好在 100km 处记录,而且所使用的仪器也不尽相同,所以一般需要根据震中距和使用的仪器对实测的震级进行适当的修正。

震级的大小直接与震源释放的能量有关。震级 M 与地震释放能量 E (单位为“尔格”, 1 尔格 = 10^{-7} 焦耳)之间有如下关系:

$$\lg E = 11.8 + 1.5M \tag{1.2}$$

由此可知,震级每差一级,地震释放的能量就相差 32 倍之多。据测算,一次 7 级地震释放的能量与 4 000 万吨级的 TNT 炸弹爆炸释放的能量相当。

按震级的大小,地震可分为微震(震级小于 2 级)、有感地震(震级 2~5 级)、中强地震(震级 5~7 级)和强震(震级大于 7 级)。微震只有仪器才能记录到,有感地震一般人可以感觉到,中强地震能造成不同程度的破坏,而强震则往往具有巨大的破坏性。

1.2.2 地震烈度

地震烈度是用来衡量地震破坏作用大小的一个指标,它表示某一地区的地面和各类建筑

物遭受某一次地震影响的强弱程度。对于一次地震来说,震级只有一个,烈度则随着地点的变化而有若干个。一般来说,震中的烈度最高,距震中越远,地震影响就越小,烈度就越低。但是,在某一烈度区里,有时会因局部场地的地形、地质条件等因素的影响,出现局部烈度较高或较低的“烈度异常区”。

为评定地震烈度,就需要建立一个标准,这个标准称为地震烈度表。它是以描述震害宏观现象为主的,即根据建筑物的破坏程度、地貌变化特征、地震时人的感觉、家具器物的反应等方面进行区分。目前,世界上绝大多数国家包括我国都采用 1~12 等级划分的地震烈度表。表 1.1 是我国 1980 年修订的地震烈度表中关于 6、7、8、9 度部分。

中国地震烈度表(1980 年)(节选) 表 1.1

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 震害程度	平均震害 指数		加速度 (cm/s ²) (水平向)	速度 (cm/s) (水平向)
6	惊慌失措,仓惶逃出	损坏——个别砖瓦掉落、墙体细微裂缝	0~0.1	河岸和松软土上出现裂缝。饱和沙层出现喷沙冒水。地面上有的烟囱轻度裂缝、掉头	63 (45~89)	6 (5~9)
7	大多数人仓皇逃出	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。饱和沙层常见喷沙冒水、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	干硬土也有裂缝。大多数砖烟囱严重破坏	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、塌方常见。砖烟囱出现倒塌	500 (354~707)	50 (36~71)

以往,一个地区的抗震设防一般情况下采用基本烈度。基本烈度是指该地区今后一个时期内,在一般场地条件下可能遭遇到的最大地震烈度,即《中国地震烈度区划图》规定的烈度。地震区划是地震区域划分的简称,是指在地图上按地震情况的差异,划分出的不同区域。地震烈度区划是地震动区划的早期形式,以地震烈度为指标。现在《中国地震动参数区划图》已取代《中国地震烈度区划图》,成为一般建设工程的抗震设防依据。

1.2.3 震级与震中烈度的关系

地震震级与地震烈度是完全不同的两个概念,这两者的关系可用炸弹爆炸来比喻。震级好比炸弹的装药量,烈度则是炸弹爆炸时所造成的破坏程度。尽管如此,从数学上震中烈度却可以表示为震级和震源深度的函数。在环境条件基本相同的情况下,震级越大,震源深度越浅,则震中烈度越高。对于发生频度最高的浅源地震来说,根据我国的地震资料,可以由下面经验公式估计震中烈度 I_0 与震级 M 之间的关系:

$$M = 1.5 + 0.58I_0$$

(1.3)