



21世纪交通版高等学校教材

桥梁抗震

Seismic Design of Bridges

(第二版)

叶爱君 管仲国 编 著
范立础 主 审



人民交通出版社
China Communications Press

21 世纪交通版高等学校教材

Seismic Design of Bridges

桥梁抗震

(第二版)

叶爱君 管仲国 编著
范立础 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书为 21 世纪交通版高等学校教材。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。

本书除作为高等院校道路桥梁与渡河工程专业和土木工程专业桥梁工程专业方向教学用书外,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. —2 版. —北京:
人民交通出版社,2011.9
ISBN 978-7-114-09384-5

I. ①桥… II. ①叶…②管… III. ①桥梁结构-防震设计 IV. ①U442.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 182174 号

21 世纪交通版高等学校教材

书 名: 桥梁抗震(第二版)
著 者: 叶爱君 管仲国
责任编辑: 曲 乐 王文华
出版发行: 人民交通出版社
地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号
网 址: <http://www.cpress.com.cn>
销售电话: (010)59757969,59757973
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: 10
字 数: 228 千
版 次: 2002 年 9 月 第 1 版 2011 年 9 月 第 2 版
印 次: 2011 年 9 月 第 1 次印刷 总第 6 次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-09384-5
定 价: 20.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



21 世纪交通版
高等学校教材(公路与交通工程)编审委员会

顾问:王秉纲 (长安大学)

主任委员:沙爱民 (长安大学)

副主任委员:(按姓氏笔画排序)

王 炜 (东南大学)

陈艾荣 (同济大学)

徐 岳 (长安大学)

梁乃兴 (重庆交通大学)

韩 敏 (人民交通出版社)

委 员:(按姓氏笔画排序)

马松林 (哈尔滨工业大学)

王殿海 (吉林大学)

叶见曙 (东南大学)

石 京 (清华大学)

向中富 (重庆交通大学)

关宏志 (北京工业大学)

何东坡 (东北林业大学)

陈 红 (长安大学)

邵旭东 (湖南大学)

陈宝春 (福州大学)

杨晓光 (同济大学)

吴瑞麟 (华中科技大学)

陈静云 (大连理工大学)

赵明华 (湖南大学)

项贻强 (浙江大学)

郭忠印 (同济大学)

袁剑波 (长沙理工大学)

黄晓明 (东南大学)

符铎砂 (华南理工大学)

裴玉龙 (哈尔滨工业大学)

颜东煌 (长沙理工大学)

秘 书 长:沈鸿雁 (人民交通出版社)

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,全球经济一体化趋势进一步加强,科技对于经济增长的作用日益显著,教育在国家经济与社会发展中所处的地位日益重要。进入新世纪,面对国际国内经济与社会发展所出现的新特点,我国的高等教育迎来了良好的发展机遇,同时也面临着巨大的挑战,高等教育的发展处在一个前所未有的重要时期。其一,加入WTO,中国经济已融入到世界经济的发展进程之中,国家间的竞争更趋激烈,竞争的焦点已更多地体现在高素质人才的竞争上,因此,高等教育所面临的是全球化条件下的综合竞争。其二,我国正处在由计划经济向社会主义市场经济过渡的重要历史时期,这一时期,我国经济结构调整将进一步深化,对外开放将进一步扩大,改革与实践必将提出许多过去不曾遇到的新问题,高等教育面临加速改革以适应国民经济进一步发展的需要。面对这样的形势与要求,党中央国务院提出扩大高等教育规模,着力提高高等教育的水平与质量。这是为中华民族自立于世界民族之林而采取的极其重大的战略步骤,同时,也是为国家未来的发展提供基础性的保证。

为适应高等教育改革与发展的需要,早在1998年7月,教育部就对高等学校本科专业目录进行了第四次全面修订。在新的专业目录中,土木工程专业扩大了涵盖面,原先的公路与城市道路工程,桥梁工程,隧道与地下工程等专业均纳入土木工程专业。本科专业目录的调整是为满足培养“宽口径”复合型人才的要求,对原有相关专业本科教学产生了积极的影响。这一调整是着眼于培养21世纪社会主义现代化建设人才的需要而进行的,面对新的变化,要求我们对人才的培养规格、培养模式、课程体系和内容都应作出适时调整,以适应要求。

根据形势的变化与高等教育所提出的新的要求,同时,也考虑到近些年来公路交通大发展所引发的需求,人民交通出版社通过对“八五”、“九五”期间的路桥及交通工程专业高校教材体系的分析,提出了组织编写一套21世纪的具有鲜明交通特色的高等学校教材的设想。这一设想,得到了原路桥教学指导委员会几乎所有成员学校的广泛响应与支持。2000年6月,由人民交通出版社发起组织全国面向交通办学的12所高校的专家学者组成21世纪交通版高等学校教材(公路类)编审委员会,并召开第一次会议,会议决定着手组织编写土木工程专业具有交通特色的道路专业方向、桥梁专业方向以及交通工程专业教材。会议经过充分研讨,确定了包括基本知识技能培养层次、知识技能拓宽与提高层次以及教学辅助层次在内的约130种教材,范围涵盖本科与研究生用教材。会后,人民交通出版社开始了细致的教材编写组织工作,经过自由申报及专家推荐的方式,近20所高校的百余名教授承担约130种教材的主编工作。2001年6月,教材编委会召开第二次会议,全面审定了各门教材主编院校提交的教学大纲,之后,编写工作全面展开。

21世纪交通版高等学校教材编写工作是在本科专业目录调整及交通大发展的背景下展开的。教材编写的基本思路是:(1)顺应高等教育改革的形势,专业基础课教学内容实现与土木工程专业打通,同时保留原专业的主干课程,既顺应向土木工程专业过渡的需要,又保持服务公路交通的特色,适应宽口径复合型人才的需要。(2)注重学生基本素质、基本能力的

培养,为学生知识、能力、素质的综合协调发展创造条件。基于这样的考虑,将教材区分为二个主层次与一个辅助层次,即基本知识技能培养层次与知识技能拓宽与提高层次,辅助层次为教学参考用书。工作的着力点放在基本知识技能培养层次教材的编写上。(3)目前,中国的经济发展存在地区间的不平衡,各高校之间的发展也不平衡,因此,教材的编写要充分考虑各校人才培养规格及教学需求多样性的要求,尽可能为各校教学的开展提供一个多层次、系统而全面的教材供给平台。(4)教材的编写在总结“八五”、“九五”工作经验的基础上,注意体现原创性内容,把握好技术发展与教学需要的关系,努力体现教育面向现代化、面向世界、面向未来的要求,着力提高学生的创新思维能力,使所编教材达到先进性与实用性兼备。(5)配合现代化教学手段的发展,积极配套相应的教学辅件,便利教学。

教材建设是教学改革的重要环节之一,全面做好教材建设工作,是提高教学质量的重要保证。本套教材是由人民交通出版社组织,由原全国高等学校路桥与交通工程教学指导委员会成员学校相互协作编写的一套具有交通出版社品牌的教材,教材力求反映交通科技发展的先进水平,力求符合高等教育的基本规律。各门教材的主编均通过自由申报与专家推荐相结合的方式确定,他们都是各校相关学科的骨干,在长期的教学与科研实践中积累了丰富的经验。由他们担纲主编,能够充分体现教材的先进性与实用性。本套教材预计在二年内完全出齐,随后,将根据情况的变化而适时更新。相信这批教材的出版,对于土木工程框架下道路工程、桥梁工程专业方向与交通工程专业教材的建设将起到有力的促进作用,同时,也使各校在教材选用方面具有更大的空间。需要指出的是,该批教材中研究生教材占有较大比例,研究生教材多具有较高的理论水平,因此,该套教材不仅对在校学生,同时对于在职学习人员及工程技术人员也具有很好的参考价值。

21世纪初叶,是我国社会经济发展的重要时期,同时也是我国公路交通从紧张和制约状况实现全面改善的关键时期,公路基础设施的建设仍是今后一项重要而艰巨的任务,希望通过各相关院校及所有参编人员的共同努力,尽快使全套21世纪交通版高等学校教材(公路类)尽早面世,为我国交通事业的发展做出贡献。

21世纪交通版
高等学校教材(公路类)编审委员会
人民交通出版社
2001年12月

第二版前言

近几年来,国内外地震频发,地震损失惨重。我国的抗震形势亦十分严峻,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 and 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

2011.6

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

| | |
|------------------|----|
| 第1章 地震概述 | 1 |
| 1.1 地震的初步知识 | 1 |
| 1.1.1 地球的构造 | 1 |
| 1.1.2 地震的成因和类型 | 2 |
| 1.2 地震震级与地震烈度 | 3 |
| 1.2.1 地震震级 | 3 |
| 1.2.2 地震烈度 | 4 |
| 1.2.3 震级与震中烈度的关系 | 5 |
| 1.3 地震波与地震动 | 5 |
| 1.3.1 地震波 | 5 |
| 1.3.2 地震动 | 6 |
| 1.4 地震分布 | 8 |
| 1.4.1 世界地震分布 | 8 |
| 1.4.2 我国地震分布 | 8 |
| 1.5 地震灾害 | 9 |
| 1.5.1 直接灾害 | 10 |
| 1.5.2 次生灾害 | 12 |
| 本章参考文献 | 13 |
| 第2章 桥梁震害 | 14 |
| 2.1 上部结构的震害 | 14 |
| 2.1.1 上部结构自身的震害 | 14 |
| 2.1.2 上部结构的移位震害 | 15 |
| 2.1.3 上部结构的碰撞震害 | 19 |
| 2.2 支座的震害 | 20 |
| 2.3 下部结构和基础的震害 | 22 |
| 2.3.1 桥梁墩柱的震害 | 22 |
| 2.3.2 框架墩的震害 | 26 |
| 2.3.3 桥台的震害 | 27 |
| 2.4 基础的震害 | 27 |
| 2.5 桥梁震害的教训及对策 | 28 |
| 2.5.1 支承连接部件失效 | 29 |
| 2.5.2 碰撞引起的破坏 | 30 |
| 2.5.3 桥墩、桥台破坏 | 31 |
| 2.5.4 基础破坏 | 31 |
| 本章参考文献 | 32 |

| | |
|---------------------------|----|
| 第3章 桥梁抗震概论 | 33 |
| 3.1 桥梁结构的抗震设防标准 | 33 |
| 3.1.1 有关工程抗震设防的基本概念 | 33 |
| 3.1.2 多级设防的抗震设计思想 | 34 |
| 3.1.3 桥梁工程抗震设防标准的确定 | 36 |
| 3.2 桥梁工程抗震设计流程 | 39 |
| 3.3 地震动输入的选择 | 40 |
| 3.3.1 中国地震动参数区划图 | 40 |
| 3.3.2 桥梁场地地震安全性评价 | 41 |
| 3.3.3 设计地震动参数选择 | 42 |
| 3.3.4 地震动输入模式 | 46 |
| 3.3.5 地震作用组合 | 48 |
| 3.4 桥梁结构抗震概念设计 | 48 |
| 3.4.1 桥梁结构合理抗震选型 | 48 |
| 3.4.2 桥梁结构抗震体系选择 | 50 |
| 本章参考文献 | 51 |
| 第4章 桥梁结构地震反应分析 | 52 |
| 4.1 结构动力学初步概念 | 52 |
| 4.1.1 结构地震振动方程 | 52 |
| 4.1.2 结构动力特性 | 53 |
| 4.2 桥梁结构地震反应分析方法 | 54 |
| 4.2.1 静力法 | 54 |
| 4.2.2 动力反应谱法 | 55 |
| 4.2.3 动态时程分析法 | 61 |
| 4.3 一般桥梁结构的地震反应分析 | 66 |
| 4.3.1 桥梁结构地震振动方程 | 66 |
| 4.3.2 桥梁结构动力计算模型 | 67 |
| 4.3.3 桥梁地震反应计算要点 | 76 |
| 4.4 规则桥梁的地震反应简化分析 | 78 |
| 4.4.1 规则桥梁的定义 | 78 |
| 4.4.2 规则桥梁的地震反应简化分析方法 | 78 |
| 本章参考文献 | 82 |
| 第5章 桥梁延性抗震设计 | 83 |
| 5.1 延性的基本概念 | 83 |
| 5.1.1 延性的定义 | 83 |
| 5.1.2 延性指标 | 84 |
| 5.1.3 延性、位移延性系数与变形能力 | 85 |
| 5.1.4 曲率延性系数与位移延性系数的关系 | 85 |
| 5.1.5 桥梁结构的整体延性与构件局部延性的关系 | 86 |
| 5.2 桥梁延性抗震设计基本理论 | 87 |

| | | |
|------------|--------------------|------------|
| 5.2.1 | 能力设计方法 | 88 |
| 5.2.2 | 延性构件与能力保护构件的选择 | 89 |
| 5.2.3 | 潜在塑性铰位置的选择 | 90 |
| 5.3 | 延性构件的强度设计与验算 | 90 |
| 5.4 | 延性构件的延性设计与验算 | 93 |
| 5.4.1 | 横向箍筋对混凝土的约束作用 | 93 |
| 5.4.2 | 钢筋混凝土墩柱的延性验算 | 95 |
| 5.4.3 | 钢筋混凝土墩柱的延性构造设计 | 97 |
| 5.5 | 能力保护构件的强度设计与验算 | 99 |
| 5.5.1 | 塑性铰区超强弯矩 | 99 |
| 5.5.2 | 延性构件的抗剪强度 | 100 |
| 5.5.3 | 其他能力保护构件 | 101 |
| 5.6 | 单柱墩桥梁延性抗震设计实例 | 101 |
| 5.6.1 | 工程概况 | 102 |
| 5.6.2 | 计算模型 | 103 |
| 5.6.3 | 纵向地震作用下地震反应分析及抗震验算 | 104 |
| 5.6.4 | 横向地震输入 | 107 |
| 5.6.5 | 防落梁构造设计 | 109 |
| 5.6.6 | 小结 | 109 |
| 5.7 | 双柱墩桥梁延性抗震设计实例 | 109 |
| 5.7.1 | 工程概况 | 109 |
| 5.7.2 | 计算模型 | 111 |
| 5.7.3 | 纵向地震作用下地震反应分析和抗震验算 | 113 |
| 5.7.4 | 横向地震作用下地震反应分析和抗震验算 | 116 |
| 5.7.5 | 防落梁构造设计 | 120 |
| 5.7.6 | 小结 | 120 |
| | 本章参考文献 | 120 |
| 第6章 | 桥梁减隔震设计 | 121 |
| 6.1 | 减隔震技术的原理 | 121 |
| 6.1.1 | 减隔震技术的工作机理 | 121 |
| 6.1.2 | 减隔震技术与延性抗震设计的比较 | 122 |
| 6.2 | 减隔震装置与系统 | 123 |
| 6.2.1 | 减隔震系统的组成 | 123 |
| 6.2.2 | 常用减隔震装置简介 | 124 |
| 6.3 | 减隔震技术的应用 | 129 |
| 6.3.1 | 减隔震技术在国外桥梁工程中的应用 | 129 |
| 6.3.2 | 减隔震技术在我国桥梁工程中的应用 | 131 |
| 6.3.3 | 减隔震桥梁的震害表现 | 132 |
| 6.4 | 桥梁减隔震设计 | 133 |
| 6.4.1 | 减隔震设计的一般原则 | 133 |

| | | |
|-------|-------------------------------|-----|
| 6.4.2 | 减隔震装置的布置 | 134 |
| 6.4.3 | 减隔震桥梁的地震反应分析 | 134 |
| 6.4.4 | 减隔震体系的抗震验算 | 136 |
| 6.4.5 | 其他构件和细部构造的设计 | 137 |
| 6.5 | 减隔震桥梁设计实例 | 137 |
| 6.5.1 | 工程概况 | 137 |
| 6.5.2 | 基于单自由度反应谱方法的结构地震反应分析与验算 | 139 |
| 6.5.3 | 基于非线性时程分析的结构地震反应分析与验算 | 140 |
| 6.5.4 | 抗震验算 | 141 |
| 6.5.5 | 防落梁构造设计 | 143 |
| | 本章参考文献 | 143 |

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的连续不断的振动,叫做脉动。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,本章先简要地介绍一些关于地震的基本知识。

1.1 地震的初步知识

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 地球的构造

为了初步了解地震发生和发展的规律,首先需要对地球的构造有个了解。

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;最里面的部分叫做地核,半径约 3 470km。

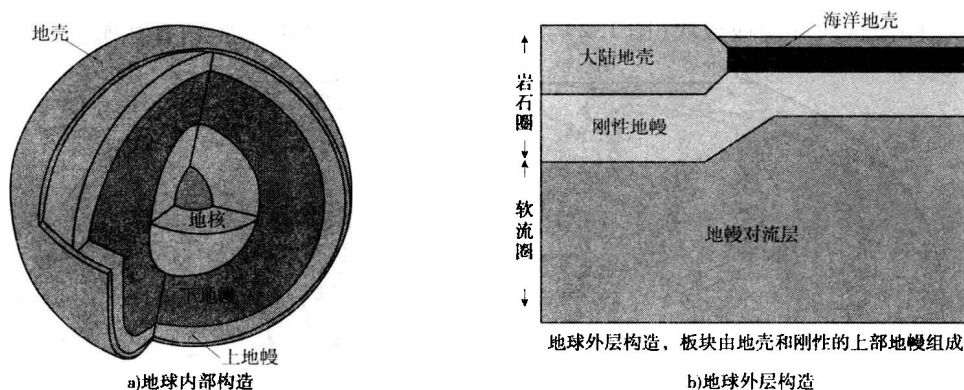


图 1.1 地球构造示意图

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。从莫霍面以下约 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 地震的成因和类型

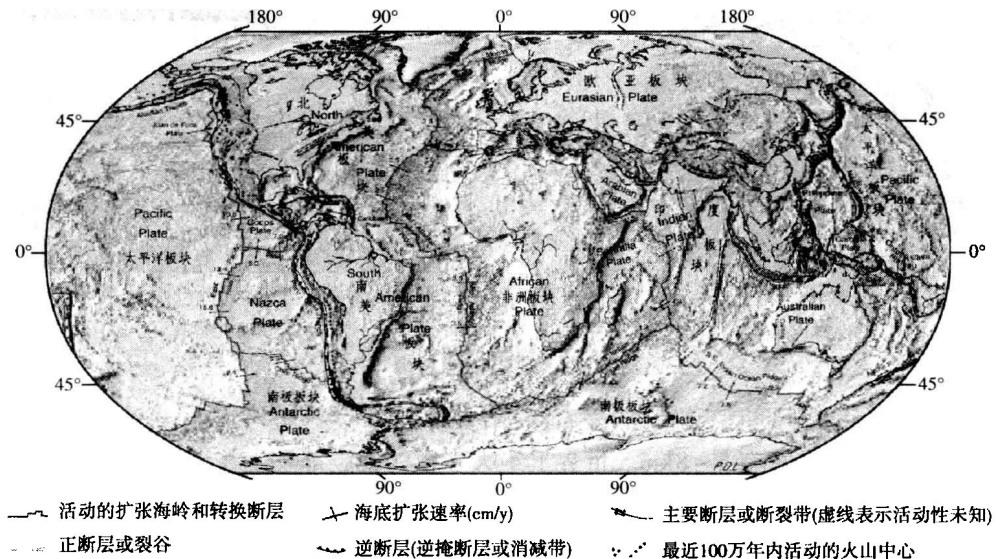
地震按其成因可分为:火山地震、陷落地震、构造地震和诱发地震。

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,到一定时候,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。

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,此处就叫震源。震源正上方的地面位置叫震中。震中与震源之间的距离叫做震源深度。建筑物与震中的距离叫做震中距。建筑物与震源的距离叫震源距。震中附近振动最剧烈,一般也就是破坏最严重的地区叫极震区。图 1.3 为震源、震源深度、震中和震中距的示意图。

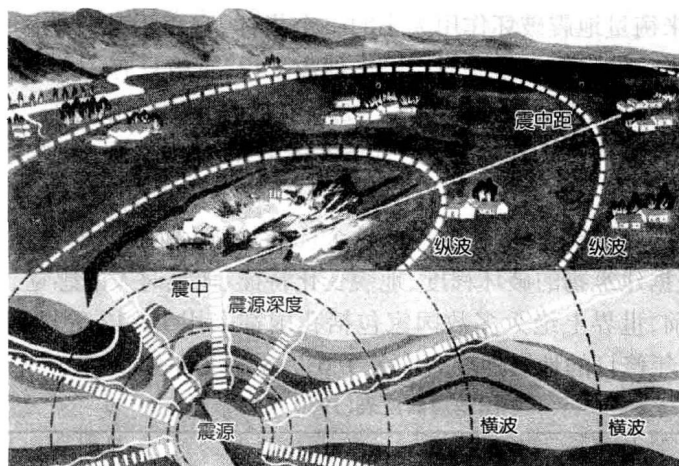


图 1.3 常用地震术语示意图

按震源的深浅,地震又可分为浅源地震(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 720 km。

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)。

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(振幅 A ,以微米计, $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$)的常用对数值,即

$$M_L = \lg A \quad (1.1)$$

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:

$$\lg E = 11.8 + 1.5M \quad (1.2)$$

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四千万吨级的 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。一般说来,震中的烈度最高,距震中越远,地震影响越小,烈度越低。但是,在某一烈度区里,有时会因局部场地地形、地质条件等的影响,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 皇逃出 | 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。饱和砂层出现喷砂冒 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。饱和砂 层常见喷砂冒水,松软土 上地裂缝较多。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 | 干硬土亦有裂缝。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,指的是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:

$$M = 1.5 + 0.58I_0 \quad (1.3)$$

其大致对应关系如表 1.2 所示。

震中烈度与震级对照表

表 1.2

| | | | | | | | | | |
|---------------|---|-----|---|-----|-----|------|------|----|-----|
| 震中烈度(I_0) | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 震级(M) | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6.5 | 6.75 | 7.25 | 8 | 8.5 |

1.3 地震波与地震动

1.3.1 地震波

当震源岩层发生断裂、错动时,岩层所积聚的变形能突然释放,引起剧烈的振动,振动以弹性波的形式从震源向各个方向传播并释放能量。这种波就称为地震波。

地震波按其在地壳传播的位置的不同,分为体波和面波。

1) 体波

在地球内部传播的波称为体波。体波又分为纵波和横波。

纵波是由震源向四周传播的压缩波,又称 P 波。纵波在传播过程中,其介质质点的振动方向与波的前进方向一致,质点间的弹性相对位移疏密相间,所以也称为疏密波[图 1.4a]。由于任何一种介质都可以承受不同程度的压缩与拉伸变形,所以纵波可以在所有介质中传播,这是纵波的一个重要特性。纵波的周期较短,振幅较小,波速较快,在地壳内的速度一般为 200~1400m/s。根据弹性波动理论,纵波的波速可按下式计算:

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1.4)$$

式中, E 为介质的弹性模量; ρ 为介质的密度; ν 为介质的泊松比。

纵波引起地面竖向振动。

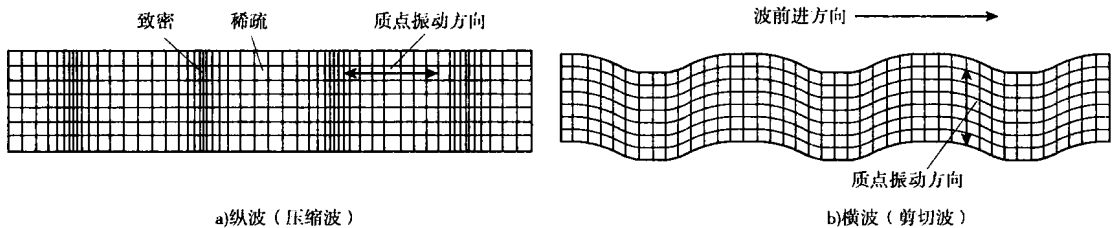


图 1.4 体波运动特征示意图

横波是由震源向四周传播的剪切波,又称 S 波。横波在传播过程中,其介质质点的振动方向与波的前进方向垂直[图 1.4b]。横波只能在固体介质中传播。这是因为横波的传播过程是介质质点不断受剪切变形的过程,液态和气态介质不能承受剪切作用。横波的周期较长,振幅较大,波速较慢,在地壳内的波速一般为 100~800m/s。根据弹性波动理论,横波的波速可