

武汉理工大学研究生教材建设基金资助出版
普通高等学校土木工程专业研究生系列教材

桥梁抗震设计

Seismic Design of Bridges ■

主 编 邓育林 雷 凡

主 审 何雄君



武汉理工大学出版社

武汉理工大学研究生教材建设基金资助出版
普通高等学校土木工程专业研究生系列教材

桥梁抗震设计

Seismic Design of Bridges

主 编 邓育林 雷 凡

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 提 要

本书充分吸收近十几年来桥梁抗震设计理论与方法的最新研究成果,紧密结合我国最新桥梁结构抗震设计规范,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、桥梁结构地震反应分析方法以及桥梁抗震设计方法与具体过程,是学习桥梁抗震设计的入门用书。内容包括:地震基本知识;场地、地基和基础;桥梁震害特征与分析;桥梁结构地震反应分析方法;桥梁工程抗震设计;桥梁延性抗震设计;桥梁减隔震设计;基于性能的抗震设计思想;国内外桥梁抗震规范比较。

本书可作为高等院校与桥梁工程相关的各专业研究生以及高年级本科生的教学参考用书,也可供从事桥梁抗震工程的设计、研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁抗震设计/邓育林,雷凡主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2016.10
ISBN 978-7-5629-5195-7

I. ①桥… II. ①邓… ②雷… III. ①桥梁设计-防震设计 IV. ①U442.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 152273 号

项目负责人:张淑芳

责任编辑:余晓亮

责任校对:雷红娟

封面设计:一 尘

出版发行:武汉理工大学出版社

地 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:湖北丰盈印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:15.5

字 数:387 千字

版 次:2016 年 10 月第 1 版

印 次:2016 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1000 册

定 价:38.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

前 言

地震是困扰人类的一大自然灾害,近几年来,国内外地震频发,地震损失惨重。我国的抗震形势十分严峻,近年相继发生的四川汶川大地震(2008年,8.0级)、青海玉树大地震(2010年,7.1级)以及四川雅安大地震(2010年,7.0级),造成了非常重大的人员伤亡与经济损失。桥梁工程,作为震区交通线的生命线工程,其抗震性能关系到抗震救灾工作的大局,受到社会极大的关注。震后,桥梁工程师和学者对桥梁震害进行了系统深入的调查与分析,总结出了不少宝贵经验。

桥梁震害的分析与经验启示,促进了桥梁抗震设计理论与方法的发展,我国相继修订《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)以及《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)、《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)等规范。同时,最新《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)已经颁布,并于2016年6月1日正式实施,这些都要求广大桥梁工程师必须具备更多的与抗震设计相关的知识。

全书共分9章:第1章简要地介绍了一些关于地震的基本知识;第2章简要地介绍了场地、地基和基础;第3章详细介绍了桥梁震害特征与分析;第4章系统介绍了桥梁结构地震反应分析方法;第5章介绍了桥梁工程抗震设计;第6章系统介绍了桥梁延性抗震设计;第7章介绍了桥梁减隔震设计;第8章简要介绍了基于性能的抗震设计思想;第9章简要地介绍了国内外桥梁抗震规范比较。

本书由邓育林、雷凡担任主编,其中第1、2、3、6、7章由雷凡编写;第4、5、8、9章由邓育林编写。武汉理工大学道路与桥梁工程系硕士研究生方玉成、刘琼莲、卞钰、黄轲、熊博文和许燊参与了本书算例、部分插图绘制和文字校对工作。

本书由武汉理工大学何雄君教授主审,他对本书的编写提出了许多宝贵的意见。

本书在编写过程中,参考和引用了近年来国内正式出版的有关桥梁抗震设计的规范、教材等,在此谨向有关作者表示感谢。

由于编写者水平有限,书中难免存在不妥或疏漏之处,敬请读者批评指正。

编 者

2016年5月

目 录

1 地震基本知识	(1)
1.1 地震成因与地震类型	(1)
1.1.1 地球构造	(1)
1.1.2 地震的成因与类型	(2)
1.2 地震波及其传播	(3)
1.2.1 体波	(4)
1.2.2 面波	(5)
1.2.3 地震波的主要特性及其在工程中的应用	(6)
1.3 地震震级与地震烈度	(7)
1.3.1 地震震级	(7)
1.3.2 地震烈度	(8)
1.3.3 震级与震中烈度的关系	(10)
1.4 地震分布	(10)
1.4.1 世界地震分布	(11)
1.4.2 我国地震分布	(11)
1.5 地震灾害	(12)
1.5.1 直接灾害	(13)
1.5.2 次生灾害	(15)
本章参考文献	(17)
2 场地、地基和基础	(18)
2.1 建筑场地	(18)
2.1.1 建筑地段的选择	(18)
2.1.2 场地类别	(20)
2.1.3 建筑场地类别	(22)
2.2 抗震验算	(24)
2.2.1 天然地基的抗震能力	(24)
2.2.2 天然地基的抗震验算	(24)
2.2.3 桩基的抗震验算	(25)
2.3 液化地基的判别与处理	(26)
2.3.1 地基土的液化现象	(26)
2.3.2 地基土的液化判别	(27)
2.3.3 地基抗液化措施	(33)
2.3.4 液化地基上低承台桩基的抗震验算	(34)
2.3.5 桩基的其他要求	(35)
2.4 地基基础的抗震加固	(35)
本章参考文献	(37)
3 桥梁震害特征与分析	(38)
3.1 典型地震及桥梁震害	(38)
3.1.1 1971年美国圣·费尔南多地震	(38)
3.1.2 1976年唐山地震	(39)

3.1.3	1989年美国洛马·普里埃塔地震	(40)
3.1.4	1994年美国北岭地震	(42)
3.1.5	1995年日本阪神大地震	(46)
3.1.6	2008年汶川地震中的桥梁震害	(48)
3.2	桥梁震害分析	(55)
3.2.1	上部结构的震害	(56)
3.2.2	支座的震害	(61)
3.2.3	下部结构和基础的震害	(63)
3.2.4	桥梁震害的教训及启示	(68)
	本章参考文献	(69)
4	桥梁结构地震反应分析方法	(70)
4.1	结构抗震动力学基本概念	(70)
4.1.1	运动方程	(70)
4.1.2	结构动力特性	(71)
4.2	桥梁结构地震反应分析方法	(72)
4.2.1	静力阶段	(72)
4.2.2	反应谱法	(74)
4.2.3	动态时程分析法	(79)
4.2.4	随机振动方法	(84)
4.2.5	分析和设计方法总结	(85)
4.3	非线性静力弹塑性分析	(86)
4.3.1	能力谱方法	(86)
4.3.2	位移影响系数法	(88)
4.3.3	适应谱 Pushover 方法	(89)
4.3.4	模态 Pushover 分析方法	(91)
	本章参考文献	(93)
5	桥梁工程抗震设计	(95)
5.1	桥梁工程抗震设计流程	(95)
5.2	桥梁结构的抗震设防标准	(96)
5.2.1	有关工程抗震设防的基本概念	(97)
5.2.2	多级设防的抗震设计思想	(98)
5.2.3	桥梁工程抗震设防标准的确定	(100)
5.3	地震动输入的选择	(103)
5.3.1	中国地震动参数区划图	(103)
5.3.2	桥梁场地地震安全性评价	(105)
5.3.3	设计地震动参数选择	(106)
5.3.4	地震动输入模式	(109)
5.3.5	地震作用组合	(110)
5.4	桥梁结构抗震概念设计	(110)
5.4.1	桥梁结构合理的抗震选型	(110)
5.4.2	桥梁结构抗震体系选择	(112)
5.5	桥梁结构的地震反应分析	(113)
5.5.1	桥梁结构地震振动方程	(113)

5.5.2	桥梁结构动力计算模型	(115)
5.5.3	桥梁地震反应计算要点	(124)
5.6	规则桥梁的地震反应简化分析	(126)
5.6.1	规则桥梁的定义	(126)
5.6.2	规则桥梁的地震反应简化分析方法	(126)
	本章参考文献	(130)
6	桥梁延性抗震设计	(132)
6.1	延性的基本概念	(132)
6.1.1	延性的定义	(132)
6.1.2	延性指标	(133)
6.1.3	延性、位移延性系数与变形能力	(134)
6.1.4	曲率延性系数与位移延性系数的关系	(134)
6.1.5	桥梁结构的整体延性与构件局部延性的关系	(136)
6.2	桥梁延性抗震设计基本理论	(137)
6.2.1	能力设计方法	(137)
6.2.2	延性构件与能力保护构件的选择	(139)
6.2.3	潜在塑性铰位置的选择	(139)
6.3	延性构件的强度设计与验算	(140)
6.3.1	一水准抗震设防	(140)
6.3.2	两水准抗震设防	(142)
6.4	延性构件的延性设计与验算	(143)
6.4.1	横向箍筋对混凝土的约束作用	(143)
6.4.2	钢筋混凝土墩柱的延性指标计算	(145)
6.4.3	钢筋混凝土墩柱的构造设计	(148)
6.5	能力保护构件的强度设计与验算	(149)
6.5.1	塑性铰区超强弯矩	(149)
6.5.2	延性构件的抗剪强度	(151)
6.5.3	其他能力保护构件	(152)
6.6	单桩墩桥延性抗震设计实例	(153)
6.6.1	计算模型	(154)
6.6.2	纵向地震作用下的地震反应分析及抗震验算	(155)
6.6.3	横向地震输入	(159)
6.6.4	防落梁构造设计	(160)
6.7	双柱墩桥梁延性抗震设计实例	(161)
6.7.1	计算模型	(163)
6.7.2	纵向地震作用下地震反应分析和抗震验算	(164)
6.7.3	横向地震作用下地震反应分析和抗震验算	(167)
6.7.4	防落梁构造设计	(171)
	本章参考文献	(171)
7	桥梁减隔震设计	(172)
7.1	减隔震技术的原理	(172)
7.1.1	减隔震技术的工作机理	(172)
7.1.2	减隔震技术与延性抗震设计的比较	(173)

7.2	减隔震系统和装置	(174)
7.2.1	减隔震系统的组成	(174)
7.2.2	常用减隔震装置简介	(175)
7.3	减隔震技术的应用	(181)
7.3.1	减隔震技术在国外桥梁工程中的应用	(181)
7.3.2	减隔震技术在我国桥梁工程中的应用	(183)
7.3.3	减隔震桥梁的震害教训	(184)
7.4	桥梁减隔震设计原则	(185)
7.4.1	减隔震设计的一般原则	(185)
7.4.2	减隔震装置的布置	(186)
7.4.3	减隔震桥梁的地震反应分析	(186)
7.4.4	减隔震体系的抗震验算	(188)
7.4.5	其他构件和细部构造的设计	(188)
7.5	减隔震桥梁设计实例	(189)
7.5.1	工程概况	(189)
7.5.2	基于单自由度反应谱的结构地震反应分析与验算	(191)
7.5.3	基于非线性时程分析的结构地震反应分析与验算	(192)
7.5.4	抗震验算	(193)
7.5.5	防落梁构造设计	(195)
	本章参考文献	(195)
8	基于性能的抗震设计思想	(196)
8.1	基于性能的抗震设计基本概念	(196)
8.1.1	定义	(196)
8.1.2	研究内容	(197)
8.2	基于性能的抗震设防标准	(199)
8.2.1	国外抗震设防标准	(199)
8.2.2	国内抗震设防标准	(200)
8.3	基于性能的抗震设计方法	(201)
8.3.1	基于位移的抗震设计方法(DBSD)	(201)
8.3.2	综合设计方法	(207)
8.3.3	基于可靠度的设计方法	(208)
	本章参考文献	(208)
9	国内外桥梁抗震规范比较	(211)
9.1	抗震性能设防目标	(211)
9.2	设计地震动	(215)
9.2.1	地震动区划	(215)
9.2.2	场地分类	(216)
9.2.3	地震设计谱	(216)
9.2.4	阻尼修正	(223)
9.3	地震反应分析和计算方法	(225)
9.4	延性设计	(230)
9.5	约束和减震、耗能设计	(238)
	本章参考文献	(239)

1 地震基本知识

1.1 地震成因与地震类型

地震是一种自然现象。据统计,全世界每年发生的地震约达 500 万次,绝大多数地震由于发生在地球深处或者它所释放的能量小而使人们难以感觉到。人们能感觉到的地震叫有感地震,占地震总数的 1% 左右。造成灾害的强烈地震则为数更少,平均每年发生十几次。强烈地震会引起地震区地面的剧烈摇晃和颠簸,并会危及人们的生命财产安全和造成工程建筑物的破坏。地震还可能引起火灾、水灾、山崩、滑坡以及海啸。这些现象都会给人类造成灾难。

1.1.1 地球构造

为了初步了解地震的发生和地震发展的规律,首先需要对地球的构造有所了解。

地球是一个外形略呈梨形的椭球体,平均半径约 6400km。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,厚度约 2900km,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;最里面的部分叫作地核,半径约 3470km。

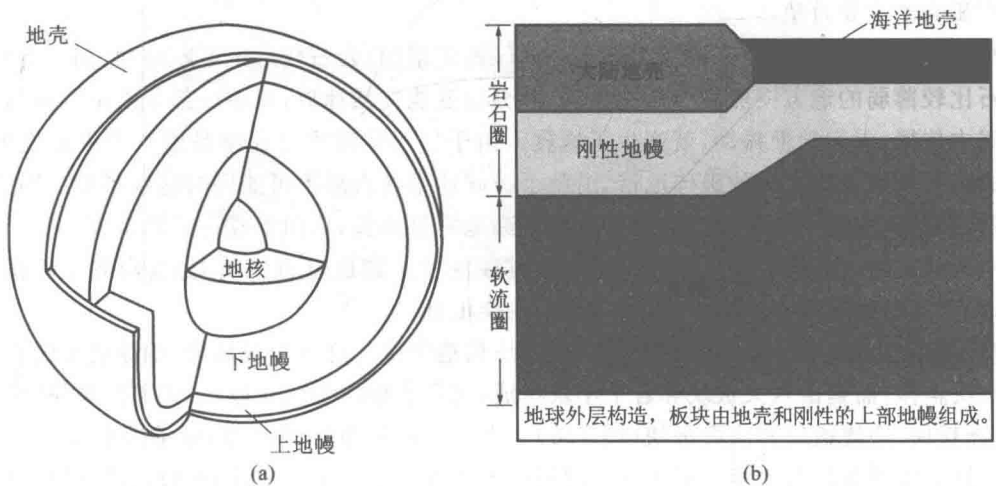


图 1.1 地球构造示意图

(a) 地球内部构造; (b) 地球外层构造

(1) 地壳

地壳是地球外表面的一层很薄的外壳,它由各种不均匀的岩石组成。地壳的下界称为莫霍界面,或称莫霍不连续面。地壳的厚度在全球变化很大,大陆内一般厚度为 16~40km,高山地区厚度更大,中国西藏高原及天山地区厚度达 70km。海洋下面厚度最小,一般为 10~

15km,最薄的约5km,世界上绝大部分地震都发生在这一层薄薄的地壳内。地壳表面为沉积层,陆地下面主要有花岗岩层和玄武岩层,海洋下面的地壳一般只有玄武岩层。

(2)地幔

地壳以下到深度约2895km的古登堡界面为止的部分为地幔,占地球体积的5/6。地幔由密度较大的黑色橄榄岩等超基性岩石组成,其中上幔物质结构不均匀,中、下地幔部分是比较均匀的。由于地幔能传播横波(剪切波),所以根据推算,地幔应为固体。

(3)地核

古登堡界面以下直到地心的部分为地核,地核半径约为3500km,又可分为外核和内核。据推测,地核的物质成分主要为镍和铁。由于至今还没有发现有地震横波通过外核,故推断外核处于液态,而内核可能是固态。

地球各部分的密度随深度增加而增大,地球内部的温度随深度增加而升高。地球内部的压力在地幔上部约为883 MPa,地核中心的压力达362840 MPa。

1.1.2 地震的成因与类型

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。诱发地震主要是由地下核爆炸、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。构造地震则是由于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(约占全球地震总数的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达到平衡。因此,在一次强烈地震(主震)之后,岩层的变形还会不断地零星调整,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。

对于地应力产生的说法,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,该处就叫震源。震源正上方的地面位置叫震中。震中与震源之间的距离叫作震源深度。建筑物与震中的距离叫作震中距。建筑物与震源的距离叫震源距。震中附近振动最剧烈的,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。

按震源的深浅,地震又可分为浅源地震(震源深度小于60 km)、中源地震(震源深度为60

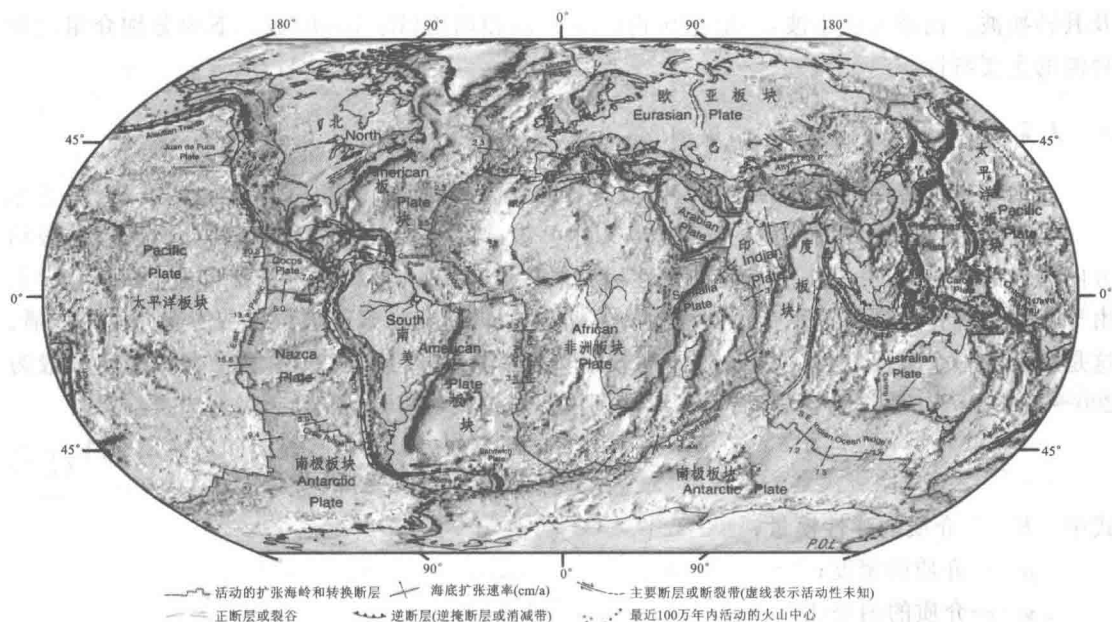


图 1.2 全球数字化模块构造运动图

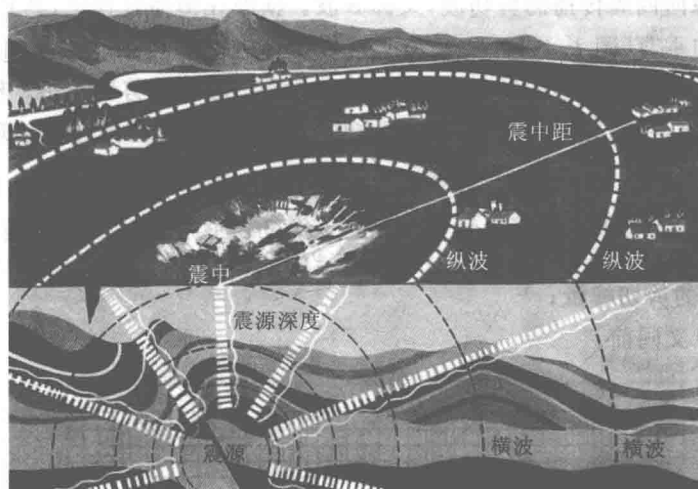


图 1.3 常用地震术语示意图

~300 km)和深源地震(震源深度大于300 km)。其中,浅源地震造成的危害最大,当震源深度超过100 km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10~20 km。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100 km)、近震(震中距为100~1000 km)和远震(震中距大于1000 km)。

1.2 地震波及其传播

地震引起的振动以波的形式从震源向各个方向传播,这就是地震波。地震波是震源辐射的弹性波,一般分为体波和面波。体波是纵波和横波的总称,包括原生体波和各种折射、反射

及其转换波。面波为次生波,一般指乐甫(Love)波和瑞雷(Rayleigh)波。下面分别介绍这两种波的主要特性。

1.2.1 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1.4(a)]。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200~1400 m/s。根据弹性波动理论,纵波的波速可按式(1.1)计算。

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1.1)$$

式中 E ——介质的弹性模量;

ρ ——介质的密度;

ν ——介质的泊松比。

纵波引起地面竖向振动。

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1.4(b)]。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100~800 m/s。根据弹性波动理论,横波的波速可按式(1.2)计算。

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.2)$$

式中 G ——介质的剪切模量;

其余符号意义同前。

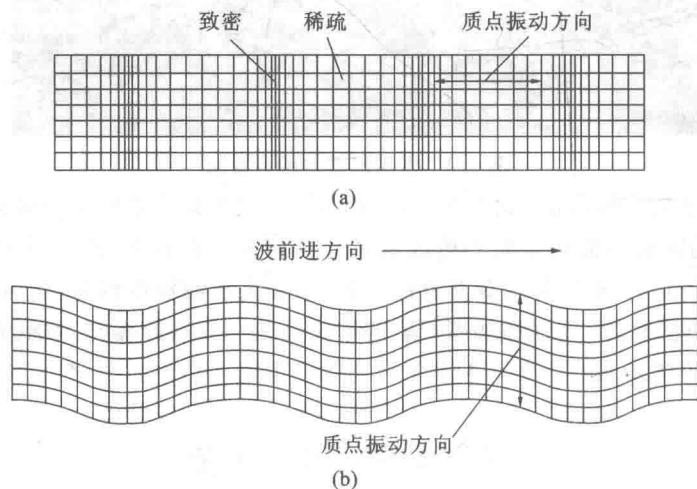


图 1.4 体波运动特征示意图

(a)纵波(压缩波);(b)横波(剪切波)

横波引起地面水平方向的振动。

在一般情况下,当 $\nu=0.22$ 时有:

$$V_P = 1.67V_S$$

由此可知,纵波的传播速度比横波的传播速度要快,所以当某地发生地震时,在地震仪上首先记录到的地震波是纵波,随后才记录到横波。

1.2.2 面波

面波是指沿介质表面(或地球地面)及其附近传播的波,一般可以认为是体波经地层界面多次反射形成的次生波,它包含瑞雷波和乐甫波两种。

地震瑞雷波是纵波(P波)和横波(S波)在固体层中沿界面传播相互叠加的结果。瑞雷波传播时,质点在波的传播方向与地表面法向组成的平面内做逆进椭圆运动,如图 1.5 所示。瑞雷波在震中附近并不出现,要离开震中一段距离才形成,而且其振幅沿径向按指数规律衰减。

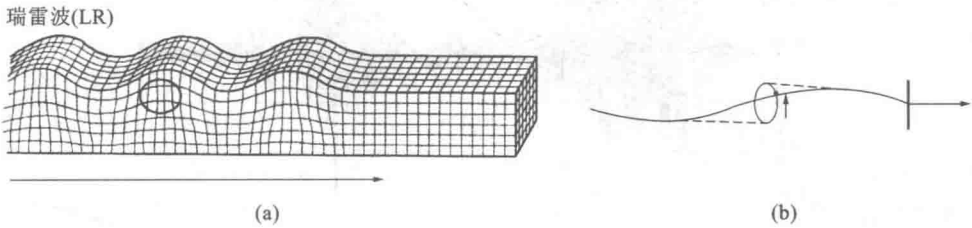


图 1.5 瑞雷波振动轨迹剖面 and 射线

(a) 振动轨迹剖面; (b) 射线

乐甫波的形成与波在自由表面的反射和波在两种不同介质界面上的反射折射有关。乐甫波的传播,类似于蛇行运动,质点在与波传播方向相垂直的水平方向做剪切运动,如图 1.6 所示。质点在水平向的振动与波行进方向耦合后会产生水平扭转分量,这是乐甫波的一个重要特点。

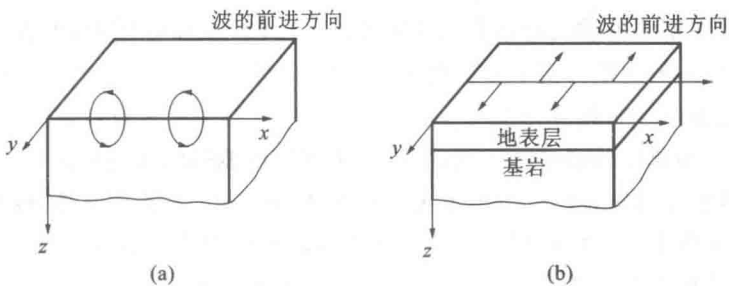


图 1.6 面波质点振动示意图

(a) 瑞雷波质点振动; (b) 乐甫波质点振动

地震波的传播以纵波最快,横波次之,面波最慢。所以在地震记录上,纵波最先到达,横波到达较迟,面波在体波之后到达。一般当横波或面波到达时,地面震动最为强烈。地震记录是确定地震发生的时间、震级和震源位置的重要依据,也是研究工程结构物在地震作用下的实际反应的重要资料。

1.2.3 地震波的主要特性及其在工程中的应用

由震源释放出来的地震波传到地面后引起地面运动,这种地面运动可以用地面上质点的加速度、速度或位移的时间函数来表示,用地震仪记录到的这些物理量的时程曲线习惯上又称为地震加速度波形、速度波形和位移波形。我国在2008年5月12日汶川地震中记录到的加速度时程曲线如图1.7所示,这是我国近年来记录到的最有价值的地震地面运动记录之一。在目前的结构抗震设计中,常用到的则是地震加速度记录,以下就地震加速度记录的一些特性做简单的介绍。

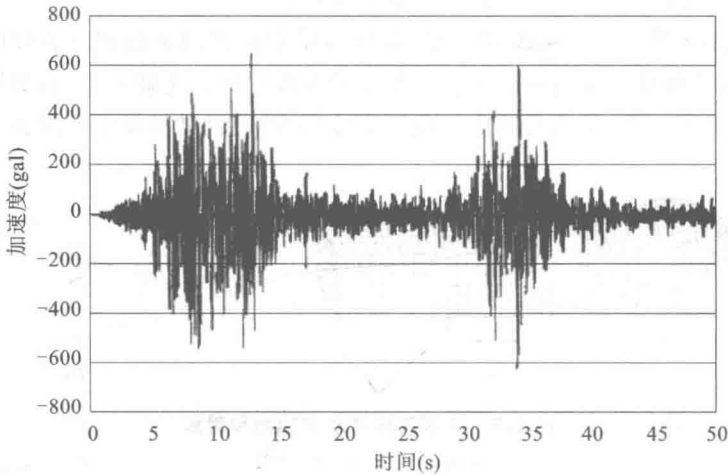


图 1.7 汶川地震中记录到的加速度时程曲线

(1) 地震加速度记录的最大幅值

最大幅值是描述地震地面运动强烈程度的最直观的参数,尽管用它来描述地震波的特性还存在一些问题,但在工程实际中得到了最普遍的认可与应用。在抗震设计中,对结构进行时程反应分析时,往往要给出输入的最大加速度峰值,在设计用反应谱中,地震影响系数的最大值也与地面运动最大加速度峰值有直接的关系(见第3章)。

(2) 地震加速度记录的频谱特性

对时域的地震加速度波形进行变换,就可以了解这种波形的频谱特性,频谱特性可以用功率谱、反应谱和傅里叶谱来表示。本书不再说明这些谱的有关理论和方法,仅对一些研究结果做介绍。图1.8和图1.9是根据日本一批强地震记录求得的功率谱,它们是同一地震、震中距近似相同而地基类型不同的情况,显示出硬土、软土的功率谱成分有很大不同,即软土地基上地震加速度波形中长周期分量比较显著;而硬土地基上地震加速度波形则包含多种频谱成分,一般情况下,短周期的分量比较显著。利用这一概念,在设计结构物时,人们就可以根据地基土的特性,采取刚柔不同的体系,以减少地震引起结构物共振的可能性,减少地震造成的破坏。

(3) 地震加速度记录的持续时间

人们很早就从震害经验中认识到强震持续时间对结构物破坏的重要影响,并且认识到这种影响主要表现在结构物开裂以后的阶段。在地震地面运动的作用下,一个结构物从开裂到全部倒塌一般是有一个过程的,如果结构物在开裂后又遇到了一个加速度峰值很大的地震脉

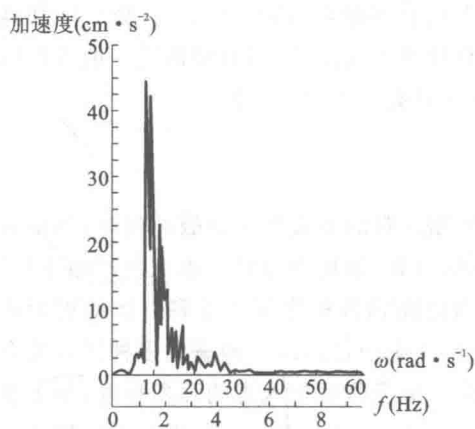


图 1.8 软土地基功率谱示意图

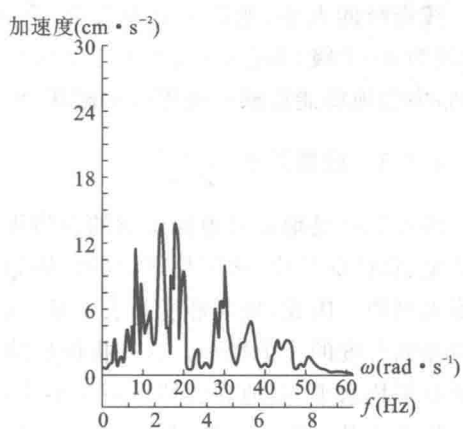


图 1.9 硬土地基功率谱示意图

冲,并且结构物产生了很大的变形,那么结构的倒塌与一般的静力试验中的现象比较相似,即倒塌取决于最大变形反应。另一种情况是结构物从开裂到倒塌,往往要经历几次、几十次甚至几百次的反复振动过程,在某一振动过程中,即使结构最大变形反应没有达到静力试验条件下的最大变形,结构也可能由于长时间的振动和反复变形而发生倒塌破坏。很明显,在结构已发生开裂时,连续振动的时间越长,结构倒塌的可能性就越大。因此,地震地面运动的持续时间成为人们研究结构物抗倒塌性能的一个重要参数。在抗震设计中,对结构物进行非线性时程反应分析时,往往也要给出一个输入加速度记录的持续时间。

1.3 地震震级与地震烈度

1.3.1 地震震级

地震震级是表征地震强弱的指标,是地震释放能量的尺度,它是地震的基本参数之一,是地震预报和其他有关地震工程学研究中的一个重要参数。

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(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2800倍)所记录到的最大水平地动位移(即振幅 A ,以微米计, $1\mu\text{m}=1\times 10^{-6}\text{m}$)的常用对数值,即

$$M_L = \lg A$$

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”,符号 erg, $1\text{erg}=1\times 10^{-7}\text{J}$) 之间有如下关系:

$$\lg E = 11.8 + 1.5M$$

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(震级为 2~5 级)、中强地震(震级为 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。

1.3.2 地震烈度

地震烈度是地震对地面影响的强烈程度,主要依据宏观的地震影响和破坏现象,如从人们的感受、物体的反应、房屋建筑物的破坏和地面现象的改观(如地形、地质、水文条件的变化)等方面来判断。因此,地震烈度是表示某一区域范围内地面和各种建筑物受到一次地震影响的平均强弱程度的一个指标。这一指标反映了在一次地震中一定地区内地震动多种因素综合强度的总平均水平,是地震破坏作用大小的一个总评价。地震烈度把地震的强烈程度,从无感到建筑物毁灭及山河改观等划分为若干等级,列成表格,以统一的尺度衡量地震的强烈程度。表 1.1 是 2008 年颁布的中国地震烈度表。

表 1.1 中国地震烈度(2008 年)

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 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	峰值速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
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、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	室内绝大多数人、室外少数人有感觉,少数人梦中惊醒	—	门窗、屋顶、屋架颤动作响,灰土掉落,个别房屋墙体抹灰出现细微裂缝,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			

续表 1.1

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 ($m \cdot s^{-2}$)	峰值速度 ($m \cdot s^{-1}$)
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,松软土地上裂缝较多;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	少数破坏,多数严重和/或中等破坏	0.29~0.51	干硬土地上出现裂缝,饱和砂层绝大多数喷水冒水;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	0.20~0.4			
Ⅸ	行动的人摔倒	A	多数严重破坏和/或破坏	0.49~0.71	干硬土地上多处出现裂缝,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,处于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			
Ⅺ	—	A	绝大多数毁坏	0.89~1.00	地震断裂延续很大,大量山崩滑坡	—	—
		B					
		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:①表中房屋包括以下三种类型:

A类—木构架和土、石、砖墙建造的旧式房屋;B类—未经抗震设防的单层或多层砖砌体房屋;C类—按照Ⅶ度抗震设防的单层或多层砖砌体房屋。

②表中给出的“峰值加速度”和“峰值速度”是参考值,括号内给出的是变动范围。