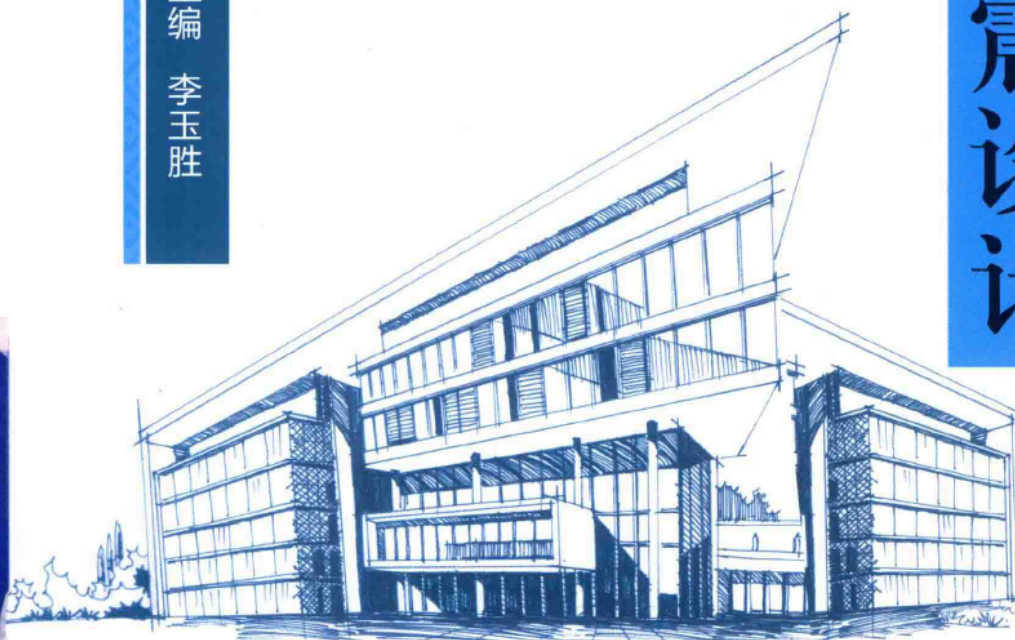


建筑结构抗震设计

主编 李玉胜



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

非外借

建筑结构抗震设计

主 编 李玉胜

副主编 韩少男 袁胜佳



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书较系统地介绍了地震基本知识、土木工程的结构抗震基本原理和方法,重点突出,注重实用,注重基本概念、基本原理和抗震设计规范的应用。

本书按照国家标准《建筑抗震设计规范(2016年版)》(GB 50011—2010)、《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223—2008)编写,主要介绍了建筑结构在地震作用下动力反应的新的计算方法,以及建筑结构抗震设计原理及相关规定。本书主要内容包括:地震的基本知识与抗震设计的基本要求,场地、地基和基础处理,结构地震反应分析与结构抗震计算,多层和高层钢筋混凝土结构抗震设计,砌体结构房屋抗震设计,多层和高层钢结构房屋抗震设计,单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计。

本书可作为高等院校土木工程专业的教材,也可作为建筑结构设计、施工、监理等工程技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构抗震设计 / 李玉胜主编. —北京:北京理工大学出版社,2019.5

ISBN 978-7-5682-7025-0

I. ①建… II. ①李… III. ①建筑结构-防震设计-高等学校-教材 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 088843 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市天利华印刷装订有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 14

字 数 / 329 千字

版 次 / 2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷

定 价 / 58.00 元

责任编辑 / 陆世立

文案编辑 / 赵 轩

责任校对 / 杜 枝

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

Preface

随着极端环境破坏的不断出现,以及经过局部修订的《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)、《建筑抗震设计规范(2016年版)》(GB 50011—2010)的颁布,对土木工程抗震有了新的要求,我国土木工程抗震设计与施工水平等有了很大提高,但与世界先进水平相比还有一定差距。随着国家经济水平的不断提高,这种差距将会逐步缩小。

我国是地震灾害较频繁的国家,因而在建筑结构设计中的抗震能力。建筑抗震的实践表明,地震区的建筑物,缺乏良好的抗震设计、没有良好的总体布置方案,仅仅依靠结构抗震计算、采取抗震构造措施是远远不够的,不能达到良好的抗震效果。“建筑结构设计”是原“建筑工程”“交通土建工程”“桥梁工程”“城市地下空间工程”等多个专业合并的土木工程专业核心课程之一。由于建筑结构的复杂性和地震作用的严重后果,随着对建筑结构抗震设计多年的研究和探索,我国逐渐形成了一整套行之有效的、设计方法,并且日渐成熟,在建筑结构设计中的运用越来越广泛,并发挥着很大的实际作用。然而,现有的建筑结构抗震设计仍然有很多不完善之处,在很多的方面仍然欠缺考虑,这是我们在今后工作中需要加以完善的。在未来的建筑工程施工中,要保证建筑结构抗震设计的高效和完善,今后在建筑设计施工中,需要遵循相关规范的要求,严格按照设计的原则进行施工,对建筑结构进行科学合理的抗震设计,保证建筑物具有可靠的抗震性能,使建筑物在较小的地震中不会发生任何损坏,在一般的地震中只需要稍微修补,在大地震中不会发生倒塌。随着抗震设计水平的不断提高、实践经验的不断积累,建筑结构抗震设计将会取得更大的进步。本书是在吸取国内外建筑结构抗震方面的相关教材和文献的基础上,为适应国家产业政策和法律法规而编写的。

本书结合《建筑抗震设计规范(2016年版)》(GB 50011—2010),阐述了建筑结构抗震设计的原理与方法,对常见结构的抗震设计方法进行了详细介绍,给出了具体的设计实例,并概述了基于性能抗震设计方法的一般思想。

本书由李玉胜担任主编,由韩少男、袁胜佳担任副主编。具体编写分工为:李玉胜(第一、四章)、韩少男(第三、六章)、袁胜佳(第二、五、七章)。全书由袁胜佳统稿。书中绘图与例题校对工作由相关教师完成,在此深表感谢。

由于编写时间仓促,书中可能存在疏漏和不妥之处,恳请广大读者和专家批评指正。

编者

第 1 章 地震的基本知识与抗震设计的基本要求	(1)
1.1 地震的基本知识	(1)
1.1.1 地震	(1)
1.1.2 地震波	(2)
1.1.3 地震动的特性	(3)
1.1.4 地震震害	(4)
1.1.5 地震震级和地震烈度	(5)
1.2 建筑工程抗震设防	(8)
1.2.1 抗震设防的目标	(8)
1.2.2 两阶段设计方法	(8)
1.2.3 建筑抗震设防分类和设防标准	(9)
1.3 建筑抗震设计要求	(9)
1.3.1 场地和地基	(10)
1.3.2 建筑结构的规则性	(10)
1.3.3 抗震结构体系	(11)
1.3.4 非结构构件	(12)
1.3.5 结构材料与施工	(12)
第 2 章 场地、地基和基础处理	(15)
2.1 建筑场地划分	(15)
2.1.1 建筑地段的划分和选择	(15)
2.1.2 建筑场地类别划分	(16)
2.2 地基抗震验算和地基土液化及其防治措施	(18)
2.2.1 一般原则	(18)
2.2.2 天然地基的抗震验算	(19)
2.2.3 天然地基抗震承载力验算	(19)
2.3 液化土地基判别和处理	(20)
2.3.1 液化的概念	(20)
2.3.2 液化的判别	(21)

2.3.3	液化地基的评价	(22)
2.3.4	地基抗液化措施	(23)
第3章	结构地震反应分析与结构抗震计算	(25)
3.1	结构地震概述	(25)
3.2	单自由度弹性体系的地震反应	(26)
3.3	单自由度弹性体系地震作用计算的反应谱法	(28)
3.3.1	单自由度弹性体系的水平地震作用	(28)
3.3.2	地震系数、动力系数	(28)
3.3.3	地震影响系数和抗震设计反应谱	(30)
3.3.4	建筑物的重力荷载代表值	(32)
3.3.5	利用反应谱确定地震作用	(32)
3.4	多自由度弹性体系的水平地震反应	(34)
3.4.1	多自由度弹性体系的运动方程	(34)
3.4.2	多自由度弹性体系的自振频率与振型分析	(35)
3.4.3	频率、振型特点	(38)
3.4.4	地震反应分析的振型分解法	(39)
3.5	振型分解反应谱法	(41)
3.5.1	多自由度体系的水平地震作用	(41)
3.5.2	地震作用效应的组合	(42)
3.6	底部剪力法	(45)
3.6.1	底部剪力法的基本公式	(45)
3.6.2	底部剪力法的修正	(46)
3.7	结构基本周期的近似计算	(49)
3.7.1	能量法	(49)
3.7.2	顶点位移法	(50)
3.7.3	基本周期的修正	(51)
3.8	平动扭转耦联振动时结构的地震反应	(51)
3.9	竖向地震作用	(54)
3.9.1	高层建筑的竖向地震作用计算	(54)
3.9.2	大跨度结构的竖向地震作用计算	(55)
3.10	结构抗震验算	(56)
3.10.1	结构抗震检算的一般原则	(56)
3.10.2	截面抗震验算	(57)
3.10.3	多遇地震作用下结构的弹性变形验算	(59)
3.10.4	罕遇地震作用下结构的弹塑性变形验算	(59)
第4章	多层和高层钢筋混凝土结构抗震设计	(63)
4.1	钢筋混凝土结构抗震设计概述	(63)
4.2	钢筋混凝土结构抗震设计特点与概念设计	(64)

• 3 •

5.3.4	墙体抗震承载力验算	(116)
5.4	砌体房屋抗震构造措施	(118)
5.4.1	多层砖房抗震构造措施	(118)
5.4.2	多层砌块房屋的抗震构造措施	(122)
5.5	底部框架—抗震墙房屋的抗震设计	(124)
5.5.1	底部框架—抗震墙房屋抗震设计的一般规定	(124)
5.5.2	底部框架—抗震墙房屋抗震计算的有关规定及其特殊要求	(125)
5.5.3	底部框架—抗震墙房屋抗震构造要求	(128)
第6章	多层和高层钢结构房屋抗震设计	(132)
6.1	多层和高层钢结构房屋的主要震害	(132)
6.1.1	多层钢结构底层或中间某层整层的坍塌	(133)
6.1.2	梁、柱、支撑等构件的破坏	(133)
6.1.3	节点域的破坏形式	(134)
6.1.4	节点的破坏形式	(135)
6.1.5	震害原因分析	(135)
6.2	多层和高层钢结构房屋的抗震性能	(135)
6.2.1	纯钢框架结构的抗震性能	(135)
6.2.2	钢框架—支撑(抗震墙板)结构的抗震性能	(136)
6.2.3	筒体结构的抗震性能	(137)
6.2.4	巨型框架结构的抗震性能	(138)
6.3	多层和高层钢结构房屋抗震设计的结构布置及形式	(138)
6.3.1	结构平、立面布置以及防震缝的设置	(138)
6.3.2	各种不同结构体系的多层和高层钢结构房屋适用的高度和最大 高宽比	(139)
6.3.3	框架—支撑结构的支撑布置原则	(140)
6.3.4	多层和高层钢结构房屋中的楼盖形式	(141)
6.3.5	多层和高层钢结构房屋的地下室	(142)
6.4	多层和高层钢结构房屋的抗震计算要求	(142)
6.4.1	地震作用	(142)
6.4.2	抗震设计的验算内容以及作用效应的组合方法	(143)
6.4.3	钢结构节点域对侧移的影响以及结构在地震作用下的变形验算	(143)
6.4.4	钢结构在地震作用下的内力调整	(144)
6.4.5	钢结构构件的承载力验算	(145)
6.4.6	钢结构构件连接的弹性设计和极限承载力验算	(149)
6.4.7	不同连接材料的承载力计算方法、全塑性受弯承载力计算公式	(151)
6.5	多层和高层钢框架结构抗震构造措施	(153)
6.5.1	框架柱的构造措施	(153)
6.5.2	框架梁的构造措施	(154)

6.5.3	梁柱连接的构造	(154)
6.5.4	节点域的构造措施	(155)
6.5.5	刚接柱脚的构造措施	(156)
6.6	多层和高层钢框架—支撑结构抗震构造措施	(158)
6.6.1	钢框架—中心支撑结构抗震构造措施	(158)
6.6.2	钢框架—偏心支撑框架结构抗震构造措施	(159)
章	单层钢筋混凝土柱厂房	(168)
7.1	震害及其分析	(168)
7.1.1	屋盖系统	(168)
7.1.2	柱	(169)
7.1.3	墙体	(169)
7.1.4	支撑	(169)
7.2	单层厂房结构抗震设计要求	(170)
7.2.1	场地选择	(170)
7.2.2	地基与基础	(170)
7.2.3	结构布置	(170)
7.2.4	天窗架布置	(171)
7.2.5	屋架设置	(171)
7.2.6	柱的设置	(171)
7.2.7	围护墙体	(172)
7.3	单层厂房的横向抗震验算	(172)
7.3.1	计算简图	(172)
7.3.2	集中柱顶处的质点重力荷载 G_i 的计算	(172)
7.3.3	横向基本周期计算	(174)
7.3.4	横向水平地震作用计算	(175)
7.3.5	排架的内力分析	(177)
7.3.6	排架内力组合	(178)
7.3.7	厂房结构构件的抗震验算	(179)
7.4	单层厂房的纵向抗震验算	(179)
7.4.1	纵向结构构件的刚度计算	(179)
7.4.2	柱列法	(184)
7.4.3	修正刚度法	(187)
7.4.4	拟能量法	(189)
7.4.5	突出屋面天窗架的纵向抗震计算	(192)
7.5	单层厂房结构抗震构造措施	(201)
7.5.1	有檩屋盖构件的连接与支撑布置	(201)
7.5.2	无檩屋盖构件的连接与支撑布置	(201)
7.5.3	屋架	(203)

7.5.4 柱	(204)
7.5.5 柱间支撑	(205)
7.5.6 连接节点	(206)
参考文献	(207)

第 1 章

地震的基本知识与抗震设计的基本要求

地震是一种突发性的自然灾害,是地球内部发生的急剧破裂产生的震波,在一定范围内引起地面震动的现象。地震是极其频繁的,全球每年发生地震约 550 万次。其中,5 级以上地震约 1 000 次,造成严重破坏的大地震,全世界平均每年大约发生 18 次。强烈地震通常给人类带来巨大的生命和财产损失,其产生的影响是长久的。目前,科学技术还不能准确预测并控制地震的发生,但是完全可以运用现代科学技术手段来减轻和预防地震灾害。例如对建筑结构进行抗震设计就是减轻地震灾害的一种积极有效的方法。

我国地处世界上两个最活跃的地震带中间,东部处于环太平洋地震带,西部和西南部处于欧亚地震带,是世界上多地震国家之一。根据统计,全国 450 个城市中有 70% 以上处于地震区,而其中 80% 以上的大中城市均在地震区。由于城市人口与设施集中,地震灾害会带来严重的生命危险和财产损失。因此,为了抗御和减轻地震灾害,有必要进行建筑结构的抗震分析与设计。我国《建筑抗震设计规范(2016 年版)》(GB 50011—2010)中明确规定:抗震设防烈度为 6 度及以上地区的建筑,必须进行抗震设计。本书的编写目的是介绍建筑结构抗震设计的原理、方法与要求,培养学生建筑结构抗震设计的能力,使其能够从事一般建筑物的抗震设计。

1.1 地震的基本知识

1.1.1 地震

地震是地球内某处岩层突然破裂,或因局部岩层塌陷、火山爆发等发生振动,并以波的形式传到地表,从而引起地面的运动。地震按其成因主要分为构造地震、火山地震、陷落地震和诱发地震四种类型。

构造地震是地壳运动,推挤地壳岩层,使其薄弱部位发生断裂错动所引起的地震。火山地震是指火山爆发,岩浆猛烈冲出地面所引起的地震。陷落地震是地表或地下岩层,如石灰岩地区较大的地下溶洞或旧矿坑等,突然发生大规模的陷落和崩塌所引起的小范围内的地面震动。诱发地震是工业爆破、核爆破、水库蓄水或深井注水等引起的地面震动。

在上述四种类型的地震中,构造地震分布最广,危害最大,发生次数最多(约占发生地震的90%)。其他三类地震发生的概率很小,且受灾影响面也较小。因此,在地震工程学中主要的研究对象是构造地震。在建筑抗震设防中所指的地震就是构造地震,通常简称为地震。

地球内部岩层破裂引起震动的地方称为震源。震源是有一定大小的区域,又称震源区或震源体,是地震能量积聚和释放的地方。但在地震学中,通常都把它简化成一个点来处理。震源正上方的地面位置,或震源在地表的投影叫作震中。震中附近地面运动最剧烈,也是破坏最严重的地区,叫作震中区或极震区。地面上被地震波及的某一地区称为场地。由场地到震中的水平距离叫作震中距。由场地到震源的距离叫作震源距。震源深度是从震源到地面(震中)的垂直距离。

根据震源深度,将构造地震分为浅源地震(0~60 km)、中源地震(60~300 km)和深源地震(300 km以上)。浅源地震距地面近,在震中区附近造成的危害最大,但相对而言,其所波及的范围较小。深源地震波及的范围较大,但由于地震释放的能量在长距离传播中大部分被耗散掉,因此,它对地面上建筑物的破坏程度较轻。破坏性地震一般是浅源地震。

1.1.2 地震波

地震波是从震源处向四外发射的弹性波。由于地球内部物质不均一,地震波的传播途径是一条很复杂的曲线,其传播速度与地球内部物质的密度和弹性有关,一般随深度的增大而增大。地震波按传播方式可分为纵波(P波)、横波(S波)和面波(L波)三种类型(纵波和横波均属于体波)。地震发生时,震源区的介质发生急速的破裂和运动,这种扰动构成一个波源。由于地球介质的连续性,这种波动向地球内部及表层各处传播开去,形成了连续介质中的弹性波。地震引起的震动以波的形式从震源向各个方向传播并释放能量,这就是地震波。根据在地壳中传播的路径不同,地震波可分为体波和面波,下面分别介绍这两种波的特点。

1. 体波

在地球内部传播的地震波称为体波。根据介质质点振动方向与波传播方向的不同,体波又可分为纵波和横波,或称P波和S波。

当质点的振动方向与波的传播方向一致时称为纵波。在纵波由震源向外传播的过程中,介质质点不断地被压缩与拉伸,所以纵波又称为压缩波,它可以在固体和液体里传播。纵波在震中区主要引起地面垂直方向的振动。纵波的特点是周期短、振幅小。

横波是指质点的振动方向与波的前进方向垂直的地震波。横波又称为剪切波,由于横波的传播过程是介质质点不断受剪变形的过程,因此,横波只能在固体介质中传播。横波在震中区主要引起地面水平方向的振动。横波一般周期较长、振幅较大。

根据弹性理论,纵波传播速度 v_p 和横波传播速度 v_s 可分别按下列公式计算:

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

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1-2)$$

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\left(1 + \frac{1}{1 - 2\mu}\right)} \quad (1-3)$$

式中 E ——介质的弹性模量；

G ——介质的剪切模量， $G = \frac{E}{2 + (1 + \mu)}$ ；

ρ ——介质的密度；

μ ——介质的泊松比。

从式(1-3)可以看出，一般情况下，纵波的传播速度比横波的传播速度快。当泊松比 $\mu = 0.25$ 时， $v_p = 1.73v_s$ 。由于纵波和横波的传播速度不同，纵波的传播速度快，先到达地面，其质点振动方向与波的前进方向一致，首先引起地表垂直振动，当横波到达时才引起水平振动，所以在地震时，人们先感觉到上下颠簸，然后才感觉到左右摇摆。

2. 面波

面波是沿地表或地壳不同地质层界面传播的波。一般认为，面波是体波经地层界面多次反射、折射所形成的次生波。

面波包括瑞利波(R波)和勒夫波(L波)。瑞利波传播时，质点在波的传播方向和地表面法向所组成的平面内作与波前进的方向相反的椭圆运动，在地面上表现为滚动形式。勒夫波传播时，质点在地平面内产生与波前进的方向垂直的运动，在地面上表现为蛇形运动。面波的传播速度较慢，面波周期长、振幅大、衰减慢，故能传播到很远的地方。面波使地面既产生垂直振动又产生水平振动。

地震波的传播速度以纵波最快，横波次之，面波最慢。因此，在一般地震波记录图上，纵波最先到达，横波次之，面波到达最晚；振幅则恰好相反，纵波的振幅最小，横波的振幅较大，面波的振幅最大。

1.1.3 地震动的特性

地震动是由震源释放出来的地震波引起的地面运动。它是不同频率、不同振幅(或强度)在一个有限时间范围内的集合。因此，通常以振幅、频谱和持时三个参数来表达地震动的特点。地震动可以用地面上质点的加速度、速度和位移的时间函数来表示，这些函数关系构成地震动的时程曲线。地震动的位移、速度和加速度时程曲线可以用地震仪记录下来。地震动时程曲线是地震工程的重要资料。建筑抗震设计采用直接动力法计算地震时程反应时，需要用到强震地震动时程曲线，绘制地震反应谱曲线(仅作抗震设计之用)时，更需要大量的强震地震动时程曲线。人们一般通过记录地震动的加速度时程曲线来了解地震动的特征，对加速度时程曲线进行积分，可进一步得到地震动的速度时程曲线和位移时程曲线，下面就以加速度时程曲线来分析地震动的特性。

1. 振幅

地震动的振幅是地震动的加速度时程曲线的峰值。振幅是描述地震动强烈程度的最直观的参数。在抗震设计中，对结构进行时程分析时，往往要给出输入的最大加速峰值，在设计用反应谱中，地震影响系数的最大值也与地震动最大加速度峰值有着直接的关系。

2. 频谱

地震动不是简单的谐和震动,而是振幅和频率都在变化的无规则振动。但是对于给定的地震动时程,总可以把它看作由不同频率的简谐波组合而成,这就说明地震动是由不同频谱组成的,在一次地震中不同的房屋破坏程度是不同的。例如,1957年、1962年和1985年三次墨西哥地震,距震中很远的墨西哥城,高层建筑的破坏程度高于低层建筑。频谱是用地震动中振幅与频率关系的曲线来表示的。在地震工程中常用傅里叶谱、反应谱和功率谱来表示地震动的频谱特性。

3. 持时

持时是指地震动持续的时间。人们从震害经验总结中认识到强震持续的时间对结构破坏的重要性,有一些结构破坏不是在一次大的地震脉冲下发生倒塌破坏,而是从开裂到倒塌经过了几次、几十次甚至几百次的反复震动过程,在一次的震动过程中结构不一定发生破坏,但在每一次的反复震动中结构都发生了一定损伤,当损伤积累到一定程度的时候,结构就发生了破坏。很显然,在结构已发生开裂时,连续震动的时间越长,则结构倒塌的可能性越大。由此,人们可以看出地震动的持时是地震动的重要参数。

地震动的振幅、频谱和持时,通常被称为地震动的三要素。工程结构的地震破坏与地震动的三要素密切相关。

1.1.4 地震震害

全世界每年发生地震几百万次,其中破坏性地震近千次,7级以上的大地震近十几次,地震造成的灾害是毁灭性的。例如1976年发生在中国河北唐山的大地震,震级为7.8级,震中烈度为11度。该次地震中死亡24万多人,伤残16万多人,倒塌房屋320万间,直接经济损失近百亿元人民币,是20世纪一次地震中死亡人数最多的地震。又如1995年1月17日发生在日本神户的地震,死亡人数近5438人,但经济损失超过1000亿美元,是20世纪一次地震中造成经济损失最大的地震。

2008年5月12日发生了汶川地震,根据中国地震局的数据,此次地震的面波震级达8.0级,地震烈度达到11度。地震波及大半个中国及亚洲多个国家和地区,北至辽宁,东至上海,南至中国香港、中国澳门、泰国、越南,西至巴基斯坦均有震感。

“5·12”汶川地震严重破坏地区超过10万平方千米,共造成69227人死亡、374643人受伤、17923人失踪,是中华人民共和国成立以来破坏力最大的地震,也是唐山大地震后伤亡最严重的一次地震。

地震灾害主要表现在三个方面:地表破坏、建筑物破坏以及由地震引起的各种次生灾害。

1. 地表破坏

地震造成的地表破坏一般有地裂缝、地陷、地面喷水冒砂及滑坡、塌方等。地震引起的地裂缝主要有两种:构造地裂缝和重力地裂缝。构造地裂缝,是地壳深部断层错动延伸至地面的裂缝,裂缝比较长,可达几千米到几十千米;裂缝也比较宽,可以达到几米甚至几十米。重力地裂缝是由于土质软硬不均及微地貌重力影响,在地震作用下形成的。重力地裂缝在

地震区的规模较构造地裂缝小,缝长比较短,一般为几米到几十米;宽度比较小;深度较浅,一般为1~2m。地裂缝穿过的地方可引起房屋开裂和道路、桥梁、水坝等工程设施的破坏。

由地震引起的地面的震动,使土颗粒间的摩擦力大大降低或使链状结构破坏,土层变密实,造成地面下沉,致使建筑物破坏。另外,地震时在岩溶洞和采空(采掘的土下坑道)地区也可能发生地陷。

地震时,地面的喷水冒砂现象多发生在地下水位较高、砂层埋藏较浅的平原及沿海地区。地震的强烈震动使地下水压力急剧增高,使饱和的砂土或粉土层液化,地下水夹带着砂土颗粒,从地裂缝或土质较松软的地方冒出,形成喷水冒砂现象。喷水冒砂严重的地方会造成房屋下沉、倾斜、开裂和倒塌。

强烈地震作用还常引起河岸、边坡滑坡,山崖的山石崩裂、塌方等现象。滑坡、塌方会导致公路阻塞,交通中断,冲毁房屋和桥梁,堵塞河流,淹没村庄等震害。

2. 建筑物破坏

强地震引起的建筑物破坏有两类:一类是建筑物的震动破坏。这类破坏是由于地震时,地面运动引起建筑物震动,产生惯性力,不仅使结构构件内力增大很多,而且往往其受力性质也发生改变,导致结构承载力不足而破坏;在强烈地震作用下产生的惯性力,还可能使结构构件连接不牢、节点破坏、支撑系统失效,而导致结构丧失整体性从而破坏或倒塌;也可能使结构产生过大震动变形,有时主体结构并未达到强度破坏,但围护墙、隔墙、雨篷、各种装修等非结构构件往往由于变形过大而发生脱落或倒塌等震害。另一类是地基失效引起的破坏。这类破坏是由于强烈地震引起地裂缝、地陷、滑坡和地基土液化等而导致地基开裂、滑动或不均匀沉降,使地基失效,丧失稳定性,降低或丧失承载力,最终造成建筑物整体倾斜、拉裂或倒塌而破坏。

3. 次生灾害

地震不仅直接造成建筑物的破坏,还间接引起火灾、水灾、毒气泄漏、疫病蔓延、海啸等,这称为地震的次生灾害。例如地震时电器短路引燃煤气、汽油等会引发火灾;水库大坝、江河堤岸倒塌或震裂会引起水灾;公路、铁路、机场被地震摧毁会造成交通中断;通信设施、互联网络被地震破坏会造成信息灾难;化工厂管道、贮存设备遭到破坏会导致有毒物质泄漏、蔓延,危及人们的生命和健康;城市中与人们生活密切相关的电厂、水厂、煤气厂的各种管线被地震破坏会造成大面积停水、停电、停气;卫生状况的恶化还能造成疫病流行等。例如“5·12”汶川地震震级高,强度大,造成人民生命财产的损失巨大。地震的次生灾害特别严重,频繁发生,以坡面地质灾害(如崩塌、滑坡、泥石流)和地面地质灾害(如地裂缝、地面塌陷、道路滑塌以及堰塞湖)和社会灾祸最为常见。这些次生灾害以活动断裂为地质构造基础,地表大量松散的固体物质为物质来源,强烈频繁的余震、坡面流水和沟谷洪流为动力条件,暴雨、洪水、持续的高温为诱发和触发因素。

1.1.5 地震震级和地震烈度

1. 地震震级

地震震级是通过仪器给出地震大小的一种量度,考虑到地震波在传播过程中的衰减,震

级的测定需要考虑地震深度和震中距。现在测定地震是依靠仪器记录的地震波。取不同的地震波震相可以求得不同的地震震级。通常所说的里氏震级是一种近震震级。我国现在使用的是统一震级,最后的结果是取多台仪器记录结果的平均值。

地震震级是衡量地震本身大小的尺度,由地震所释放出来的能量大小决定。地震释放的能量越大,则震级越大。地震释放的能量大小,是通过地震仪记录的震波最大振幅来确定的。由于仪器性能和震中距不同,记录到的振幅也不同,所以必须以标准地震仪和标准震中距的记录为准。

目前,国际上比较通用的是里氏震级,它最早是由美国学者里克特(C. F. Richter)于1935年提出的,用符号 M_L 表示。里氏震级计算公式为

$$M_L = \lg A - \lg A_0 \quad (1-4)$$

式中 A ——地震记录图上量得的以微米(μm)为单位的最大水平位移;

$\lg A_0$ ——依震中距而变化的起算函数;当震中距为100 km时, $A_0 = 1 \mu\text{m}$,即 $\lg A_0 = 0$ 。

里氏震级具有一定的适用条件,如必须使用标准的地震仪(周期为0.8 s,阻尼系数为0.8,放大倍率为2 800)来记录。后来,人们在里氏震级的基础上,又提出了一些其他震级表示法,如面波震级、体波震级和矩震级等,此处不做详细介绍。利用震级可以估计出一次地震所释放的能量,震级与地震释放的能量之间有如下关系:

$$\lg E = 1.5 M_L + 11.8 \quad (1-5)$$

式中 E ——地震释放的能量,单位为尔格(erg), $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$ 。

地震震级分为九级,一般小于2.5级的地震人无感觉;2.5级以上的地震人有感觉;5级以上的地震会造成破坏。

(1)一般将小于1级的地震称为超微震。

(2) $1 \leq M < 3$ 的称为弱震或微震。如果震源不是很浅,这种地震人们一般不易觉察。

(3) $3 < M < 4.5$ 的称为有感地震。这种地震人们能够感觉到,但一般不会造成破坏。

(4) $4.5 \leq M < 6$ 的称为中强震(如“9·7”彝良地震)。属于可造成破坏的地震,但破坏轻重还与震源深度、震中距等多种因素有关。

(5) $6 \leq M \leq 7$ 的称为强震(如“8·3”鲁甸地震、“2·6”高雄地震)。

(6) $7 \leq M < 8$ 的称为大地震(如“8·8”九寨沟地震、“4·14”玉树地震、“4·20”雅安地震、“7·18”俄罗斯堪察加半岛地震)。

(7)8级以及8级以上的称为巨大地震(如“5·12”汶川地震、“3·11”日本地震)。

发震时刻、震级、震中统称为地震三要素。

2. 地震烈度

地震烈度是指某一地区的地面和各类建筑物遭受一次地震影响的强弱程度,是对地震引起的后果的一种度量。目前,主要是根据地震时人的感觉、器物的反应、建筑物破损程度和地貌变化特征等宏观现象综合判定。地震烈度将地震的强烈程度,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,即地震烈度表。地震烈度表是评定地震烈度大小的尺度和标准,目前我国和世界上绝大多数国家采用的是划分为12度的地震烈度表,欧洲一些国家采用划分为10度的地震烈度表,日本则采用划分为8度的地震烈度表。对于一次地震来说,震级只有一个,但相应这次地震的不同地区则有不同地震烈度。一般地说,震

中区的地震影响最大,烈度最高;距震中越远,地震影响越小,烈度越低。

我国把烈度划分为 12 度,不同烈度的地震,其影响和破坏大体如下:

- (1) I 度:无感,仅仪器能记录到。
- (2) II 度:个别敏感的人在完全静止中有感。
- (3) III 度:室内少数人在静止中有感,悬挂物轻微摆动。
- (4) IV 度:室内大多数人、室外少数人有感,悬挂物摆动,不稳器皿作响。
- (5) V 度:室外大多数人有感,家畜不宁,门窗作响,墙壁表面出现裂纹。
- (6) VI 度:人站立不稳,家畜外逃,器皿翻落,简陋棚舍损坏,陡坎滑坡。
- (7) VII 度:房屋轻微损坏,牌坊、烟囱损坏,地表出现裂缝及喷砂冒水。
- (8) VIII 度:房屋多有损坏,少数路基破坏塌方,地下管道破裂。
- (9) IX 度:房屋大多数破坏,少数倾倒,牌坊、烟囱等崩塌,铁轨弯曲。
- (10) X 度:房屋倾倒,道路毁坏,山石大量崩塌,水面大浪扑岸。
- (11) XI 度:房屋大量倒塌,路基堤岸大段崩毁,地表产生很大变化。
- (12) XII 度:一切建筑物普遍毁坏,地形剧烈变化,动植物遭毁灭。

3. 地震区划图与设防烈度

地震区划是地震区域的划分,地震区划图是指在地图上按地震情况的差异划分不同的区域。地震区划根据其目的和指标分为地震活动区划、震害区划和地震动区划。我国在总结按地震烈度来划分的四代地震区划图的基础上,提出了直接以地震动参数表示的第五代新区划图,即《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015),其已于 2016 年 6 月 1 日起实施。该图根据地震危险性分析方法,提供了 II 类场地土、50 年超越概率为 10% 的地震动参数,共给出两张图:地震动峰值加速度分区图、地震动反应谱特征周期分区图。

抗震设防烈度是按国家规定的权限批准作为一个地区抗震设防依据的地震烈度。我国国家标准《建筑抗震设计规范(2016 年版)》(GB 50011—2010)规定,一般情况下,抗震设防烈度可采用《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)的地震基本烈度,或与《建筑抗震设计规范(2016 年版)》(GB 50011—2010)中设计基本地震加速度对应的烈度值。对已编制抗震设防区划的城市,可按批准的抗震设防烈度或设计地震动参数进行抗震设计。抗震设防烈度和设计基本地震加速度值的对应关系应符合表 1-1 的规定。设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.30g 地区内的建筑,除《建筑抗震设计规范(2016 年版)》(GB 50011—2010)另有规定外,应分别按抗震设防烈度为 7 度和 8 度的要求进行抗震设计。

表 1-1 抗震设防烈度和设计基本地震加速度值的对应关系

抗震设防烈度	6	7	8	9
设计基本地震加速度值	0.05g	0.10(0.15)g	0.20(0.30)g	0.40g
注:g 为重力加速度				