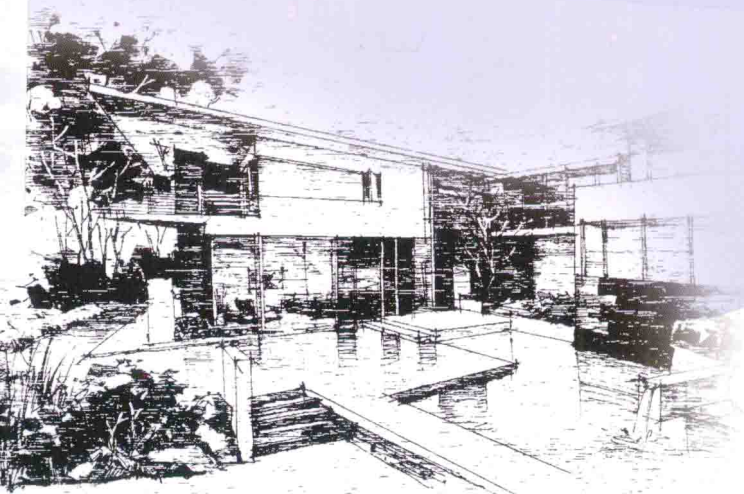




普通高等教育“十二五”规划教材

工程结构抗震

谭 皓 张电吉 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

014059374

TU352.104-43
26



普通高等教育“十二五”规划教材

工程结构抗震

编 著 谭 皓 张电吉
主 审 刘 幸 王天稳



TU352.104-43
26



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



北航

C1745812

014028334

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十二五”规划教材。全书共分8章,主要内容包括地震概述、场地与地基、结构地震反应分析与抗震验算、多层砌体结构和底部框架砌体房屋的抗震设计、多层及高层钢筋混凝土房屋抗震设计、桥梁结构抗震设计、钢结构房屋抗震设计、单层厂房抗震设计。每章后均配有相应练习题。

本书既可作为普通高等院校土木工程及相关专业的教材,也可作为大中专院校教材,还可供从事土木工程研究、设计和施工等工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程结构抗震/谭皓,张电吉编著. —北京:中国电力出版社,2014.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-5931-4

I. ①工… II. ①谭… ②张… 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(2014)第103237号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014年8月第一版 2014年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 14印张 338千字

定价 30.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

地震灾害具有突发性和毁灭性，特大地震在瞬时就能对工程结构造成十分严重的破坏，使人民生命财产蒙受巨大的损失。我国是一个地震多发的国家，大部分城镇和村庄均位于设防烈度在 6 度以上的抗震设防区，在目前无法准确预报地震的前提下，对工程结构进行必要的抗震设计是减轻地震灾害积极有效的措施。

工程结构抗震是高等院校土木工程专业的一门主干专业课程。本书以《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 为依据，吸收了近年来抗震领域的成果，并结合作者多年的工程、教学、科研实践经验进行编写。为便于学生掌握书中的基本理论和计算方法，书中各章均附有典型例题、练习题。

本书由谭皓、张电吉编著，刘幸教授、王天稳教授审阅了全书。

在本书的编写过程中我们还参考和引用了有关文献，在此，对这些文献的作者表示衷心的感谢！

本书的不足之处，恳请专家和读者批评指正。

编 者

2014 年 2 月

目 录

前言

第1章 地震概述	1
1.1 地震的基本知识	1
1.2 地震波、地震等级和地震烈度	3
1.3 地震震害	6
1.4 工程抗震设防要求	8
1.5 抗震设计的总体要求	10
1.6 地震应急和救生措施	12
习题	14
第2章 场地与地基	15
2.1 场地	15
2.2 天然地基与基础的抗震验算	18
2.3 液化土与软土地基	19
习题	23
第3章 结构地震反应分析与抗震验算	25
3.1 概述	25
3.2 单自由度弹性体系的水平地震反应	25
3.3 单自由度弹性体系的水平地震作用及加速度反应谱	28
3.4 多自由度弹性体系的水平地震反应	34
3.5 多自由度弹性体系的最大地震反应与水平地震作用	46
3.6 结构的地震扭转效应	53
3.7 竖向地震作用	55
3.8 建筑结构抗震验算	56
习题	62
第4章 多层砌体结构和底部框架砌体房屋的抗震设计	64
4.1 概述	64
4.2 震害现象及其分析	64
4.3 砌体结构房屋抗震设计的一般规定	68
4.4 多层砌体房屋抗震设计	70
4.5 多层砌体房屋抗震构造措施	76
4.6 底部框架砌体结构房屋抗震设计的一般规定	80
4.7 底部框架砌体结构房屋的抗震计算	81
4.8 底部框架砌体结构房屋的抗震构造措施	84

习题	85
第 5 章 多层及高层钢筋混凝土房屋抗震设计	87
5.1 震害特征及其分析	87
5.2 钢筋混凝土房屋抗震设计的一般规定	90
5.3 框架结构的抗震计算与抗震构造措施	96
5.4 抗震墙结构的抗震设计	113
5.5 框架—抗震墙结构的抗震设计	123
习题	133
第 6 章 桥梁结构抗震设计	135
6.1 桥梁结构震害现象及其分析	135
6.2 桥梁结构抗震设计的一般规定	137
6.3 桥梁结构抗震计算分析	140
6.4 桥梁结构抗震延性设计	148
6.5 桥梁结构抗震构造措施	151
习题	153
第 7 章 钢结构房屋抗震设计	154
7.1 钢结构房屋震害现象及其分析	154
7.2 高层钢结构房屋抗震设计	156
习题	171
第 8 章 单层厂房抗震设计	173
8.1 单层厂房的震害及其分析	173
8.2 单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计	175
8.3 单层钢结构厂房抗震设计	190
习题	192
附录 1 中国地震烈度表 (2008)	194
附录 2 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	196
附录 3 D 值法计算用表	210
参考文献	215

第1章 地震概述

地震是世界上最严重的自然灾害之一，它在极短的时间内给人类的生命财产造成了巨大的损失。据统计，全球每年大约发生 500 万次地震，其中人类可以感觉到的约有 5 万次，可能造成严重破坏的地震将近 20 次，毁灭性地震 2 次。为了防御和减轻地震灾害所造成的损失，世界各国的专家、学者进行了大量的探索和研究，而对在地震区的工程进行抗震设防，被公认为是目前最有效减轻地震灾害的措施。

为了弄清地震成因，就需要了解人类所生活的星球——地球，如图 1.1 所示，有必要探究地球的内部构造。



图 1.1 地球

1.1 地震的基本知识

1.1.1 地球的构造

地球的外形像一个倒扣的鸭梨（见图 1.2），平均半径约为 6400km，由性质不同的三部分组成（见图 1.3）。

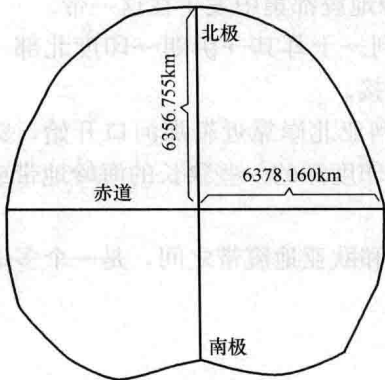


图 1.2 地球的形状

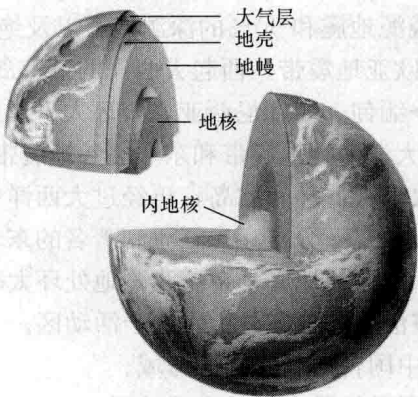


图 1.3 地球的内部构造

- (1) 地壳。地球最外部的一层硬壳，地壳表面为沉积层，陆地下面的地壳主要由上部的花岗岩层和下部的玄武岩层构成，海洋下面的地壳只有玄武岩层。地壳厚度为 5~70km，平均厚度为 30km。
- (2) 地幔。地壳以下到深度约为 2900km 的部分。地幔主要由质地坚硬的橄榄岩组成，从地下 20~700km，温度由 600~2000℃。地幔在这一范围内存在一个厚度约为几百千米的软流层，由于温度分布不均匀，就发生了地幔内部物质的对流运动。
- (3) 地核。地球的核心部分，平均半径约为 3500km，主要的构成物质可能是铁和镍。

1.1.2 地震的成因与类型

地震是自然灾害中的一种,主要由地下某处薄弱岩层突然破裂,在原有积累应力作用下断层两侧发生回跳而引起振动,或者地球板块相互挤压、冲撞引起振动,并以波的形式将岩层振动传到地表引起地面的剧烈振动。

(1) 构造地震。地球内部岩层构造活动在某些阶段发生剧烈变化时引起的。地球在运动和发展过程中的能量作用(如地幔对流、转速的变化等)使地壳和地幔上部的岩层在这些巨大能量的作用下产生很大的应力,日积月累。当地应力积累超过某处岩层的强度极限(此时应变超过 $2 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$)时,岩层遭到破坏,产生错动,将所积累的应变能转化为波动能,当这种振动传到地面时就是构造地震。

(2) 火山地震。火山活动(爆发)而引起的地震。

(3) 陷落地震。地下岩洞突然塌陷而引起的地震。

(4) 诱发地震。水库蓄水、深井注水或抽水等引起的地震。

(5) 人工地震。地下核爆炸、炸药爆破等人为引起的地面振动。

1.1.3 地震的分布

(1) 世界上有三个主要地震带。板块构造学说可以解释地应力的成因。地球表面的岩石层可以划分成六大板块,即欧亚板块、美洲板块、非洲板块、太平洋板块、澳洲板块和南极板块。板块之间在地幔物质对流运动以及地球自转等动力因素作用下,不停地互相摩擦、挤压、插入,从而产生了地应力。世界上绝大多数地震发生在板块边界上,根据历史资料统计绘出世界大地震震中分布图。世界上有两大地震带——环太平洋地震带和欧亚地震带。

1) 环太平洋地震带。它沿南美洲西部海岸起,经北美洲西部海岸→阿留申群岛→千岛群岛→日本列岛→我国的台湾省→菲律宾→印度尼西亚→新几内亚→新西兰。全球约有80%的浅源地震和90%的深源地震以及绝大部分中源地震都集中发生在这一带。

2) 欧亚地震带。西起大西洋的亚速岛,经意大利→土耳其→伊朗→印度北部→喜马拉雅山脉→缅甸→印度尼西亚,与环太平洋地震带相衔接。

3) 大洋海岭地震带和东非裂谷地震带。从西伯利亚北岸靠近勒那河口开始,穿过北极经斯匹次卑根群岛和冰岛,再经过大西洋中部海岭到印度洋的一些狭长的海岭地带或海底隆起地带,并有一分支穿入红海和著名的东非裂谷区。

(2) 我国的地震分布。我国地处环太平洋地震带和欧亚地震带之间,是一个多地震的国家。地震活动的分布分为六大个活动区。

1) 中国台湾及其附近海域。

2) 喜马拉雅山脉地震活动区。

3) 南北地震带。北起贺兰山,向南经六盘山,穿越秦岭沿川西直至云南省东部,纵贯南北,延伸长达2000多千米。因综观大致呈南北走向,故名南北地震带。

4) 天山地震活动区。

5) 华北地震活动区。

6) 东南沿海地震活动区。

总的来说,西部地区地壳活动性大,新构造运动现象非常明显,所以我国西部地震活动比东部强。

1.1.4 地震序列

每次大地震的发生都不是孤立的,大地震前后在震源附近,总有与其相关的一系列小地震发生,把它们按发生时间先后顺序排列起来,就叫做地震序列。在一个地震序列中,其中最大的一次地震,称为主震;主震前发生的地震,称为前震;主震后发生的地震,称为余震。根据地震能量释放和活动的特点,地震序列有三种基本类型:

(1) 主震余震型地震(60%)。这一类型的地震,前震较少,主震震级突出,释放能量一般占全序列能量的80%以上,而余震较多,往往数日不绝。

(2) 震群型地震(占30%)。这一类型地震没有突出的主震,前震和余震都较多,主要能量是通过多次震级相近的地震释放出来。

(3) 单发型地震(占10%)。这类地震也称孤立型地震,前震和余震都很少很小,主震的能量占全部地震能量的99%以上。主震的震级比最大的余震大得多。

1.2 地震波、地震等级和地震烈度

1.2.1 地震术语

- (1) 震源。地壳深处发生岩层断裂、错动的地方。
- (2) 震中。震源在地面上的垂直投影。
- (3) 震源深度。震源到震中的垂直距离。
- (4) 极震区。地面上受破坏最严重的地区,称为宏观震中。
- (5) 震中区。震中附近地区。
- (6) 震中距。地面上某点到震中的距离。
- (7) 震源距。地面上某点到震源的距离。
- (8) 浅源地震。震源深度小于60km。
- (9) 中源地震。震源深度为60~300km。
- (10) 深源地震。震源深度大于300km。
- (11) 等震线。把地面上破坏程度相近的点连成的曲线。

常用地震术语示意图如图1.4所示。



图1.4 常用地震术语示意图

1.2.2 地震波

当震源岩层发生断裂、错动时,岩层所积累的变形能突然释放,并以波的形式从震源向四周传播,这种波就称为地震波。

地震波分为体波(在地球内部传播的地震波)和面波(在地球表面传播的地震波),体波又分为纵波和横波(见图1.5)。

(1) 纵波。震源向外传播的疏密波、压缩波、P波,介质质点的振动方向与波的传播方向一致,引起地面垂直方向振动。

(2) 横波。震源向外传播的剪切波、S波,介质质点的振动方向与波的传播方向垂直,引起地面水平方向振动。

(3) 面波。在地球表面传播的地震波。它是体波经地层界面多次反射、折射形成的次生

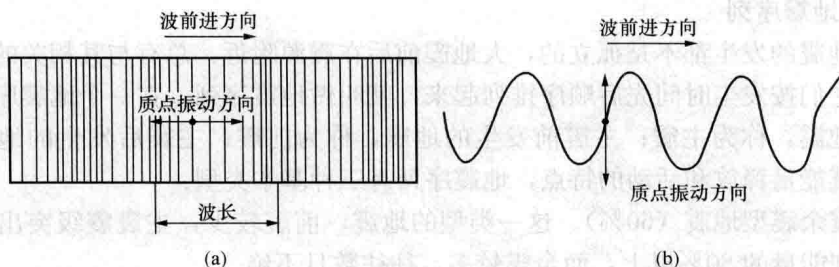


图 1.5 体波质点振动方式

(a) 压缩波; (b) 剪切波

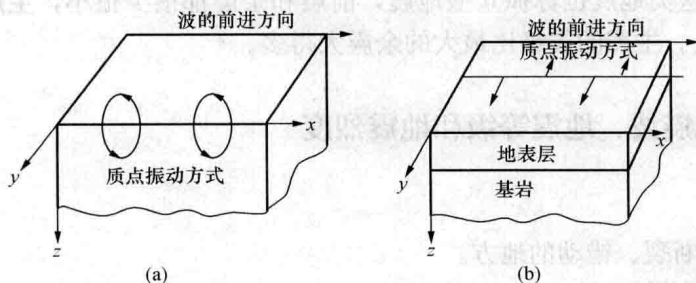


图 1.6 面波质点振动方式

(a) 瑞利波质点振动; (b) 勒夫波质点振动

波。面波可以使地面既垂直振动又水平振动。面波包含两种形式的波,即瑞利波(R波)和勒夫波(L波)。瑞利波传播时,质点在波的传播方向与地面法向所组成的平面内做与波前进方向相反的椭圆运动,在地面上表现为滚动形式[见图 1.6 (a)]。勒夫波传播时,质点在地面内产生与波前进方向相垂直的运动,在地面上表现为蛇形运动[见图 1.6 (b)]。面波传播速度慢,其周期长、振幅大、衰减慢,所以可以传播到很远的地方。

地震波的传播速度以纵波最快,剪切波次之,面波最慢。因此,在一般地震波记录图上(见图 1.7),纵波最先到达,剪切波次之,面波最后到达,从振幅来看,面波最大。由于面波携带的能量比体波大,因此造成建筑物和地表的破坏主要以面波为主。

波速:纵波→横波→面波,由快→慢。

振幅:纵波→横波→面波,由小→大。

1.2.3 地震震级

国际上比较通用的是里氏震级,其原始定义是在 1935 年由美国学者里克特(C. F. Richter)给出。震级是衡量地震大小的一种度量,每次地震只有一个震级,它是根据地震时释放能量的多少来划分的。地震震级计算公式为

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

式中 M ——里氏震级;

A ——标准地震仪(Wood-Anderson 式地震仪:指摆的自振周期为 0.8s,阻尼系数为 0.8,放大系数为 2800 倍)在距震中 100km 处记录的以微米($1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$)为单位的最大水平地动位移(单振幅)。

当震中距不足 100km 时,需要按修正公式进行计算



图 1.7 地震波记录示意图

$$\lg E = \lg A - \lg A_0 \tag{1.2}$$

式中 $\lg A_0$ ——依据震中距变化的起算函数，当震中距为 100km 时， $A_0=1\mu\text{m}$ ， $\lg A_0=0$ ；
 E ——地震释放的能量，单位是尔格（erg）， $1\text{erg}=10^{-7}\text{J}$ 。

根据上述关系，地震震级每增加 1 级，地震释放的能量大约增大 32 倍。6 级地震释放的能量为 $6.31\times10^{20}\text{erg}$ ，相当于一个 2 万 t 级的原子弹所释放的能量。

不同的震级 M 与地震释放能量 E （erg）之间有如下关系

$$\lg E = 1.5M + 11.8 \tag{1.3}$$

$M<2$ 级的地震，人们感觉不到，称为微震； $M=2\sim4$ 级的地震，人有感觉，称为有感地震； $M\geq5$ 级的地震，建筑物会出现不同程度的破坏，称为破坏性地震； $7\leq M<8$ 级的地震，称为强烈地震； $M\geq8$ 级地震，称为特大地震。

1.2.4 地震烈度

（1）地震烈度。地震烈度是指某一地区的地面震动和各类建筑物遭受一次地震影响的强弱程度，是衡量地震引起后果的一种度量。地震烈度与震级、震中距、震源深度、地质构造、建筑物和构筑物的地基条件有关。烈度的大小是根据人的感觉、器物的反应、建筑物受破坏的程度和地貌变化特征等宏观现象综合判定划分的。我国根据房屋建筑震害指数，地表破坏程度以及地面运动加速度指标将地震烈度分为 12 度，制定了《中国地震烈度表》，见附录 1。

地震震级和地震烈度是描述地震现象的两个参数。对应于一次地震，表示地震大小的震级只有一个，然而各地区由于距震中远近不同，地质情况和建筑物状况不同，所受到的地震影响程度不一样，因而地震烈度不同。一般地说，震中区烈度最高；距震中越远，地震烈度越小；震源深度越浅，地震烈度越高。

我国根据 153 个等震线资料统计的地震烈度（ I ）、地震震级（ M ）、震中距（ R ）的经验公式为

$$I = 1.63M - 3.49\lg R + 0.92 \tag{1.4}$$

（2）基本烈度。指某地区在一定时期（我国取 50 年）内在一般场地条件下按一定概率（我国取 10%）可能遭遇到的最大地震烈度。我国根据 45 个城镇的历史震灾记录进行统计并依据烈度递减规律进行预估，得到 50 年内超越概率为 10% 的烈度。

（3）抗震设防烈度。按照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，根据建筑物的重要性，在基本烈度的基础上，按区别对待的原则进行调整确定的。但一般情况下取基本烈度，对于特别重要的建筑物，经国家批准，设防烈度可以按照基本烈度提高一度取值。

《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）规定，抗震设防烈度应该根据《中国地震动参数区划图（2001）》确定地震基本烈度。抗震设防烈度和设计基本地震加速度值之间的对应关系见表 1.1。

表 1.1 抗震设防烈度和设计基本地震加速度值之间的对应关系

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

注 g 为重力加速度。

进行某地区抗震设计时,需要明确该地区的场地类别和设计地震分组,来确定相关的设计参数,如场地特征周期。我国主要城镇(县级及县级以上城镇)中心地区的抗震设防烈度、设计地震分组和设计基本地震加速度值,见附录2。

1.3 地震震害

1.3.1 地表的破坏

地震造成地表的破坏主要有地裂缝、喷水冒砂、地面下沉、河岸及陡坡滑坡等。

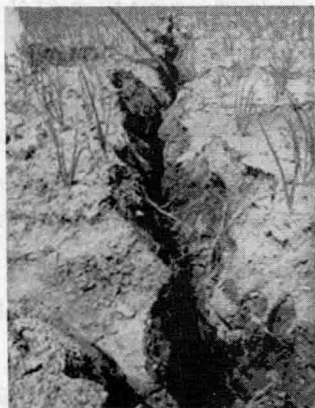


图 1.8 中国台湾省南投地震中长达 1 km 的地裂缝

(1) 地裂缝。地裂缝分为构造性地裂缝和重力式地裂缝两类。构造性地裂缝是地震断层错动和地面运动的结果,常常在地面上产生裂缝现象,如图 1.8 所示。地裂缝长度可以延伸几千米到几十千米,带宽达数十厘米到数十米。重力式地裂缝是由于地表土质不匀及受地貌影响所致,其规模较小。当构造性地裂缝穿过建筑物时,会造成建筑物开裂直至倒塌。

(2) 喷水冒砂。在地下水位较高、砂层埋深较浅的平原地区,地震时地震波的强烈震动使地下水压力急剧增高,地下水经地裂缝或土质松软的地方冒出地面,当地表土层为砂层或粉土层时,则夹带着砂土或粉土一起喷出地表,形成喷水冒砂现象,是砂土液化的表现。汶川地震后岷江岸上出现砂土液化,如图 1.9 所示。喷水冒砂一般持续很长时间,严重的地方可造成房屋不均匀下沉或者上部结构开裂。

(3) 地面下沉(震陷)。在罕遇地震作用下,有地下溶洞或者矿业采空区,地面土体往往会发生下沉,出现大面积震陷。汶川地震后地面出现震陷,如图 1.10 所示。

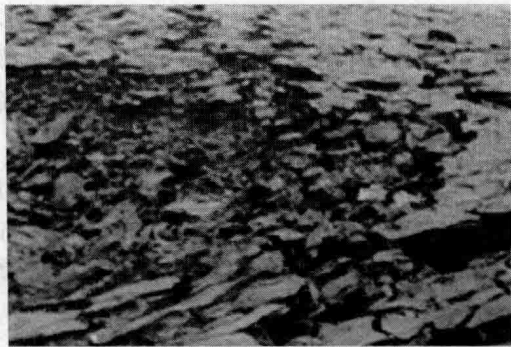


图 1.9 汶川地震后砂土出现液化



图 1.10 汶川地震后地面出现震陷

(4) 河岸及陡坡滑坡。在山崖、丘陵、河岸地区,大地震时常引发滑坡。大规模滑坡会冲毁建筑物、切断道路和桥梁,还会堵塞河流形成堰塞湖。如图 1.11~图 1.14 所示。

1.3.2 建筑物的破坏

(1) 结构丧失整体性。房屋建筑或其他建筑物都是由许多构件组成的,在罕遇地震作用下,构件连接不牢,支承长度不够和支撑失效都会使结构丧失整体性而出现倒塌破坏。汶川地震造成映秀镇漩口中学框架结构教学楼倒塌,如图 1.15 所示。

(2) 承重结构承载力不足引起破坏。任何承重构件都有各自的特定功能,以承受一定的外力作用。对于设计时没有考虑地震影响或者设防不足的结构,在地震作用下,不仅构件所承受的内力将突然加大许多倍,而且往往还要改变其受力方式,致使构件因强度不足或者变形过大而破坏,在玉树地震中结古镇某框架民房角柱上端剪坏、混凝土压碎、钢筋压曲,如图 1.16 所示。



图 1.11 汶川地震时引发滑坡冲毁建筑物

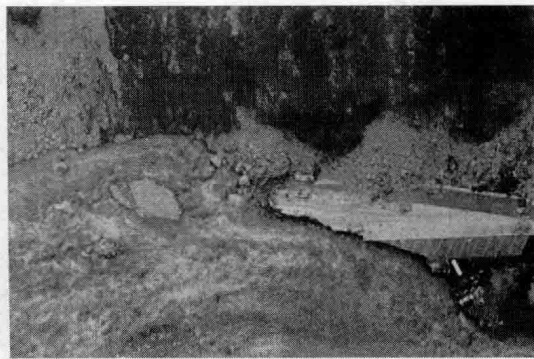


图 1.12 汶川地震时引发滑坡切断道路



图 1.13 汶川地震时引发滑坡冲毁桥梁



图 1.14 汶川地震引发滑坡堵塞河流形成的堰塞湖

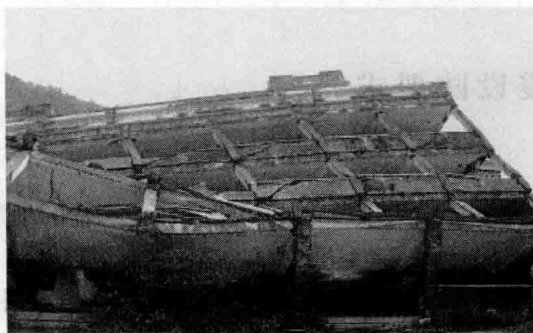


图 1.15 汶川地震造成框架结构
教学楼倒塌



图 1.16 在玉树地震中某框架民房角
柱上端剪坏、混凝土压碎、纵筋压曲

(3) 地基失效。在强烈地震作用下,地基承载力可能下降,以至丧失。另外,由于地基饱和砂层液化还会造成建筑物倾斜甚至倒塌。汶川地震时地震断裂带上地基失效,断裂带左

侧抬高 2m, 断裂带上的房屋发生垮塌, 如图 1.17 所示。

1.3.3 地震次生灾害

地震除了直接造成建筑物的破坏以外, 还可能引起火灾、水灾、毒气污染、滑坡、泥石流、海啸等严重的次生灾害, 见图 1.18 和图 1.19。这种由地震引起的次生灾害, 有时比地震直接造成的损失还大, 尤其在大城市或者大工业区, 这个问题越来越引起人们的关注。



图 1.17 汶川地震时地震
断裂带上地基失效



图 1.18 “3·11”日本宫城县海域
9.0 级地震引发的火灾



图 1.19 “3·11”日本宫城县海域 9.0 级地震引发的海啸灾害

1.4 工程抗震设防要求

1.4.1 三水准设防目标

工程抗震设防的基本目的是在一定的经济条件下, 最大限度地限制和减轻建筑物的地震破坏, 保障人民生命财产安全。

《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 中抗震设防的目标可以概括为“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”。具体表述如下:

(1) 当遭受低于该地区抗震设防烈度(基本烈度)的多遇地震影响时, 主体结构不受损坏或不需修理可继续使用(第一水准)。

(2) 当遭受相当于该地区抗震设防烈度的设防地震影响时, 主体结构可能发生损坏, 但经一般性修理仍可继续使用(第二水准)。

(3) 当遭受高于该地区抗震设防烈度的罕遇地震影响时, 不致倒塌或发生危及生命的严重破坏 (第三水准)。

界定所遭遇的地震是大烈度地震还是小烈度地震是抗震设计的前提, 由于地震发生的地点及震级是随机事件, 因此应该计算出该地区不同震级地震发生的概率。

根据我国 45 个城镇地震危险性分析, 地震烈度的概率分布符合概率论中的极值 II 型, 其分布函数为

$$f(I) = \frac{k(\omega - I)^{k-1}}{(\omega - \epsilon)^k} e^{-\frac{(\omega - I)}{\omega - \epsilon} k} \quad (1.5)$$

式中 k ——形状参数, 以 50 年中超越概率为 10% 的地震烈度作为设计标准而确定;

I ——地震烈度;

ω ——地震烈度上限值, 取 $\omega = 12$;

ϵ ——地震烈度概率密度曲线上峰值烈度 (众值烈度)。

规范取超越概率为 10% 的地震烈度为该地区的基本烈度, 超越概率为 63.2% 的地震烈度为该地区的小震烈度 (概率密度曲线上峰值烈度所对应的被超越的概率), 取超越概率为 2% 的地震烈度为该地区的大震烈度。地震烈度概率密度曲线上三种烈度之间的关系如图 1.20 所示。

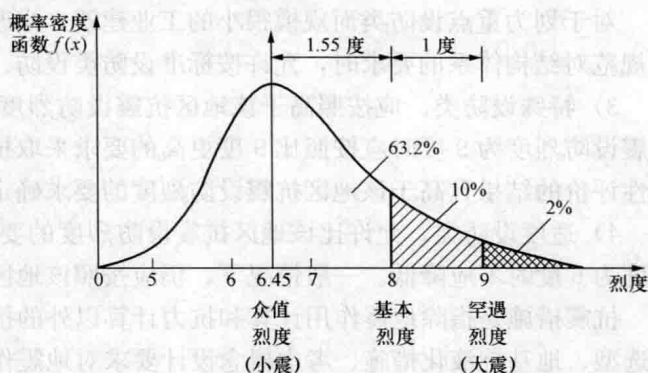


图 1.20 地震烈度概率密度曲线上三种烈度之间的关系

小震烈度 = 基本烈度 - 1.55 度;

大震烈度 = 基本烈度 + 1.00 度。

1.4.2 抗震设计方法

为满足上述抗震要求, 结构抗震设计是通过两阶段设计来实现的:

第一阶段设计: 按多遇地震烈度对应的地震作用效应和其他荷载效应的组合验算结构构件承载能力和结构弹性变形。

第二阶段设计: 按罕遇地震烈度对应的地震作用效应验算结构弹塑性变形。

(1) 在小烈度地震作用下, 结构整体和构件的承载力、变形满足规范要求。

(2) 在大烈度地震作用下, 保证结构不致产生倒塌的结构变形。

(3) 通过采用良好的抗震构造措施来实现第二水准的设计目标。

1.4.3 抗震设防类别与设防标准

(1) 抗震设防类别。《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223—2008) 规定, 建筑工程应该分为以下四个抗震设防类别:

1) 特殊设防类。指使用上有特殊设施, 涉及国家公共安全的重大建筑工程和地震时可能发生严重次生灾害等特别重大灾害后果, 需要进行特殊设防的建筑, 简称甲类。

2) 重点设防类。指地震时使用功能不能中断或需尽快恢复的生命线相关建筑, 以及地震时可能导致大量人员伤亡等重大灾害后果, 需要提高设防标准的建筑, 简称乙类。

3) 标准设防类。指大量的除 1)、2)、4) 款以外按标准要求进行设防的建筑, 简称丙类。

4) 适度设防类。指使用上人员稀少且震损不致产生次生灾害,允许在一定条件下适度降低要求的建筑,简称丁类。

所谓严重次生灾害,是指地震破坏引发放射性污染、火灾、水灾、爆炸、剧毒或强腐蚀物质大量泄漏,高危险传染病病毒扩散等灾难性灾害。

(2) 抗震设防标准。《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223—2008)规定,各抗震设防类别建筑的抗震设防标准,应该符合下列要求:

1) 标准设防类。应按该地区抗震设防烈度确定其抗震措施和地震作用,达到在遭遇高于当地抗震设防烈度的预估罕遇地震影响时不致倒塌或发生危及生命安全的严重破坏的抗震设防目标。

2) 重点设防类。应按高于该地区抗震设防烈度一度的要求加强其抗震措施;但抗震设防烈度为9度时应按比9度更高的要求采取抗震措施;地基基础的抗震措施,应符合有关规定。同时,应按该地区抗震设防烈度确定其地震作用。

对于划为重点设防类而规模很小的工业建筑,当改用抗震性能较好的材料且符合抗震设计规范对结构体系的要求时,允许按标准设防类设防。

3) 特殊设防类。应按照高于该地区抗震设防烈度提高一度的要求加强其抗震措施;但抗震设防烈度为9度时应按照比9度更高的要求采取抗震措施。同时,应按照批准的地震安全性评价的结果且高于该地区抗震设防烈度的要求确定其地震作用。

4) 适度设防类。允许比该地区抗震设防烈度的要求适当降低其抗震措施,但抗震设防烈度为6度时不应降低。一般情况下,仍应按照该地区抗震设防烈度确定其地震作用。

抗震措施是指除地震作用计算和抗力计算以外的抗震设计内容,包括建筑总体布置、结构选型、地基抗液化措施、考虑概念设计要求对地震作用效应进行的调整,以及各种抗震构造措施。抗震构造措施是指根据抗震概念设计的原则,一般不需计算而对结构和非结构各部分所采取的各种细部要求。

1.5 抗震设计的总体要求

建筑抗震设计包括概念设计、抗震计算与构造措施三个层次的内容。下面着重介绍概念设计。

建筑抗震设计在总体上需要把握的基本原则(概念设计),可以概括为场地选择、把握建筑体形、利用结构延性、设置多道防线、重视非结构因素。

1.5.1 场地选择

选择有利于建筑物抗震的场地;避开不利于建筑物抗震的场地;尽可能避开软弱的、易液化的、分布不均匀的场地,无法避开时,应该采用合理的措施来保证建筑物的整体性和刚性;保证建筑物安全。

1.5.2 把握建筑体形

建筑物平、立面布置的基本原则是对称、规则、质量与刚度变化均匀。结构对称有利于减轻结构的地震扭转效应;而形状规则的建筑物,在地震时结构各部分的震动易于协调一致,应力集中现象比较少,因而有利于抗震,计算分析时比较容易得到符合实际情况的结构地震反应及结构内力,也方便采用抗震构造措施。质量与刚度变化均匀有两方面的含义:

①在结构平面方向应该尽量使结构刚度中心与质量中心相一致；否则，刚度与质量分布的不对称，会造成结构薄弱环节（如应力及变形集中、平面扭转），增加结构受力的复杂性，使建筑物容易破坏。②沿结构高度方向结构质量与刚度不宜有悬殊的变化，竖向抗侧力构件的截面尺寸和材料强度宜自下而上逐渐减小。地震震害实例和大量理论分析均表明：结构刚度有突然削弱的薄弱层，在地震中会造成变形集中，从而加速结构倒塌的破坏过程。而在结构上部刚度比较小时，会出现变形在结构顶部集中的“鞭梢效应”现象。

平面不规则和竖向不规则的建筑类型见表 1.2 和表 1.3。对于因为建筑或工艺要求形成的体形复杂的结构物，可以设置抗震缝，将不规则建筑物分成规则建筑物。对于高层建筑，要注意使设缝之后形成的结构单元的自振周期避开场地土的卓越周期。应该尽可能准确计算结构的应力、变形集中程度，找出结构的薄弱环节，有针对性地加强其抗震承载能力。抗震缝的设置增加了结构设计、施工的难度及工程造价；在可能的情况下，尽量不设抗震缝。

表 1.2 平面不规则的建筑类型

不规则类型	定 义
扭转不规则	楼层的最大弹性水平位移（或层间位移）大于该楼层两端弹性水平位移（或层间位移）平均值的 1.2 倍
凹凸不规则	结构平面凹进的一侧尺寸大于相应投影方向总尺寸的 30%
楼板局部不连续	楼板的尺寸和平面刚度急剧变化，例如有效楼板宽度小于该层楼板典型宽度的 50%，或开洞面积大于该层楼面面积的 30%，或较大的楼层错层

表 1.3 竖向不规则的建筑类型

不规则类型	定 义
侧向刚度不规则	该层的侧向刚度小于相邻上一层的 70%，或小于其上相邻三个楼层侧向刚度平均值的 80%；除顶层外，局部收进的水平向尺寸大于相邻下一层的 25%
竖向抗侧力构件不连续	竖向抗侧力构件（柱、抗震墙、抗震支撑）的内力由水平转换构件（梁、桁架等）向下传递
楼层承载力突变	抗侧力结构的层间受剪承载力小于相邻上一楼层的 80%

1.5.3 利用结构延性

利用结构能产生弹塑性变形的特点，通过结构一定程度的弹塑性变形耗散地震能量，从而降低结构承受的地震能量，减轻结构破坏程度。结构产生弹塑性变形后将产生过大的变形，有可能造成结构的倒塌，因此也需要限制结构弹塑性变形大小。

容许结构产生一定的弹塑性变形，可以减小截面尺寸，降低造价；同时可以避免发生结构的倒塌。

1.5.4 设置多道防线

抗震体系应该由多个有延性的承载体系构成，避免抗震体系的突然溃散；可以利用前面抗震防线破坏时的耗能作用，减轻后面抗震防线上的地震作用，从而达到主体结构不遭受大破坏的目的。

设置多道防线的原则如下：

- (1) 不同防线的结构体系应该有不同结构自振周期。
- (2) 最后防线的结构体系应该有足够的承载力和变形能力。