

注册结构工程师 专业考试专题精讲 建筑抗震设计

住房和城乡建设部执业资格注册中心 组编

施岚青 主编
朱炳寅 娄宇 主审

2013



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

注册结构工程师专业 考试专题精讲 ——建筑抗震设计

住房和城乡建设部执业资格注册中心 组 编
施岚青 主 编
朱炳寅 娄 宇 主 审



机械工业出版社

本书是由住房和城乡建设部注册考试中心组织,由施岚青教授担任主编,根据注册结构工程师专业考试大纲的要求,为指导考生理解应用《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)而撰写的考试辅导用书。全书共分5章,以建筑抗震设计规范为依据,以考试大纲中对考点的要求为主线,设置历年考试考题精选、规范规定解析、典型算例详解、模拟训练四个模块,按照考试大纲要求的考试深度和广度,紧密结合工程设计的实际状况和设计人员的需要,从如下几个方面进行了阐述:抗震设防,抗震概念设计的基本原则,场地、地基和基础,地震作用和结构抗震验算,烟囱的水平地震作用。

图书在版编目(CIP)数据

注册结构工程师专业考试专题精讲——建筑抗震设计/施岚青主编.
—3版.—北京:机械工业出版社,2013.3
ISBN 978-7-111-41281-6

I. ①注… II. ①施… III. ①建筑结构—工程师—资格考试—题解②
建筑结构—防震设计—工程师—资格考试—题解 IV. ①TU3-44

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第016662号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:薛俊高 责任编辑:薛俊高

版式设计:张薇 责任校对:张媛

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013年3月第3版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·434千字

标准书号:ISBN 978-7-111-41281-6

定价:58.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

目 录

前言

《考试大纲》对“建筑抗震设计”的 有关规定 1

第一章 抗震设防 2

第一节 地震波 2

第二节 大震、中震、小震 4

第三节 三水准设防、二阶段设计 9

第四节 概念设计、计算设计（抗震计算）、 构造设计（构造措施） 15

第五节 抗震设防标准 17

第二章 抗震概念设计的基本原则 28

第一节 场地与地基 28

第二节 建筑形体的规则性 30

第三节 抗震结构体系 68

第四节 结构分析 75

第五节 非结构构件 79

第六节 隔震和消能减震设计 81

第七节 结构材料与施工 84

第八节 建筑抗震性能化设计 92

第三章 场地、地基和基础 96

第一节 场地 96

第二节 天然地基和基础 108

第三节 液化土 117

第四节 桩基 132

第四章 地震作用和结构抗震验算 139

第一节 地震反应谱和地震影响系数曲线 ... 139

第二节 振型分解反应谱法 162

第三节 扭转耦联振型分解法 178

第四节 底部剪力法 186

第五节 水平地震作用的调整 201

第六节 时程分析法 217

第七节 竖向地震作用 227

第八节 结构抗震承载力验算 234

第九节 抗震变形验算 245

第五章 烟囱的水平地震作用 264

后记 274

《考试大纲》对“建筑抗震设计”的有关规定

1. 掌握

掌握地震作用的取值标准和计算方法

掌握一般钢筋混凝土结构构件的抗震设计计算要点及构造措施。

掌握砌体结构的抗震设计方法。

掌握底层框架砖房的设计方法。

掌握砌体结构的构造要求和抗震构造措施。

2. 熟悉

熟悉地基抗液化的设计方法及技术措施。

熟悉概念设计的内容及原则，并能运用于高层建筑结构的体系选择、结构布置和抗震设计。

熟悉桥梁结构抗震设计方法及其抗震构造措施。

3. 了解

了解地震作用对高层建筑结构和高耸结构的影响。

第一章 抗震设防

《考试大纲》的要求：

掌握	地震作用的取值标准和计算方法
熟悉	概念设计的内容及原则，并能运用于抗震设计
了解	地震作用对建筑结构的影响

第一节 地震波

地震波——地震发生时，震源岩石断裂错动，其能量以波动形式向各方向传播，这种波就是地震波（图 1.1.1）。

地震波按其传播的途径不同，分为体波和面波两类。

在地球内部传播的波称为体波。体波又分为纵波和横波两类。

纵波，或称 P 波，是由震源通过介质的质点以疏密相间的方式向四周传播的压缩波（图 1.1.2），其质点的振动方向与波的传播方向一致。声音在空气中的传播即是一种纵波。纵波的周期短、振幅小、波速快，在地壳内一般以 $V_p = 500 \sim 600\text{m/s}$ 的速度传播，能引起地面上下颠簸（竖向振动）。

横波，或称 S 波，它通过介质的质点在垂直于传播方向以蛇形振动的形式传播（图 1.1.3）。横波传播时，物体的体积不变，但形状改变，即发生剪切变形，故又称为剪切波。横波介质质点的振动方向与波的传播方向垂直。与纵波相比，横波的周期长、振幅大、波速慢，在地壳内一般以 $V_s = 300 \sim 400\text{m/s}$ 的速度传播，能引起地面摇晃（水平振动）。

可见，纵波比横波传播速度要快。

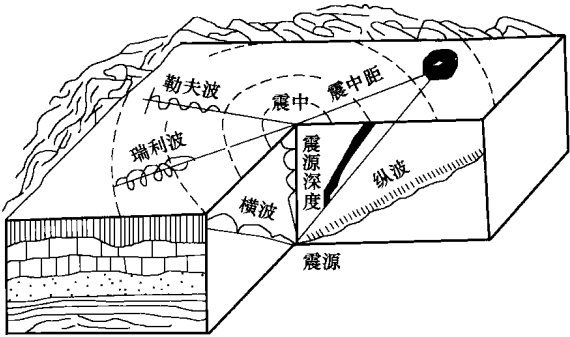


图 1.1.1 地震波的传播

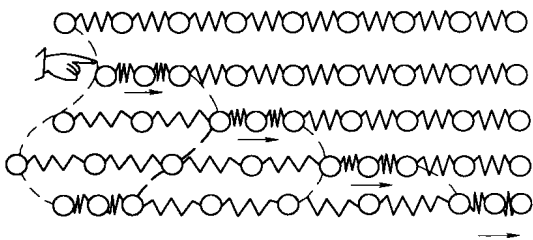


图 1.1.2 纵波（P 波）

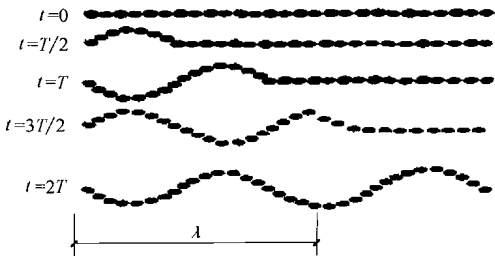


图 1.1.3 横波（S 波）

在地面（自由表面）或地壳表层各不同地质层界面处传播的波称为面波，又称 L 波。它是体波经地层界面反射形成的次生波。由于地壳表层物质形成的年代不同等地质原因，地壳成层状结构，很容易产生面波，所以面波是地震波研究的主要内容之一。在地面上一般存在两种面波的运动，即瑞利波（R 波）和勒夫波（Q 波）。

瑞利波传播时，质点在波的传播方向与地面法线所确定的铅垂平面内，以滚动形式作逆椭圆运动（图 1.1.4）。

勒夫波传播时，质点在地面上作垂直于波传播方向的振动，以蛇形方式前进（图 1.1.5）。

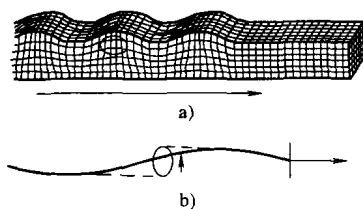


图 1.1.4 瑞利波

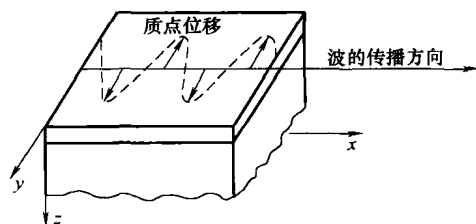


图 1.1.5 勒夫波

面波振幅大、周期长，只在地表附近传播，振幅随深度的增加迅速减小，速度约为横波的 90%，面波比体波衰减慢，能传播到很远的地方。

图 1.1.6 列出了体波传播途径的示意，图 1.1.7 列出了不同震中距地震波的示意图。瑞利波一般在震中区并不出现。近震时横波和面波尚是叠合的。

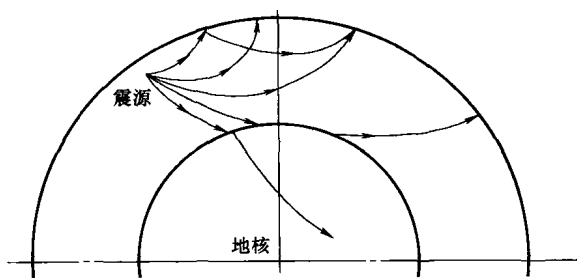


图 1.1.6 体波传播途径示意图

图 1.1.8 列出了震中距很大时的地震波，最先达到的是纵波（P），表现出周期短、振幅小的特点。其次到达的是横波（S），表

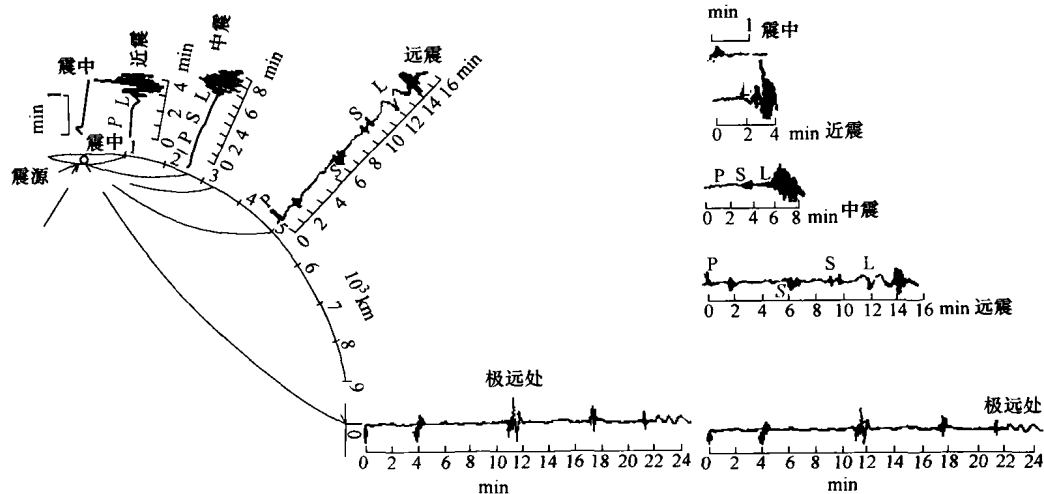


图 1.1.7 不同震中距的地震波

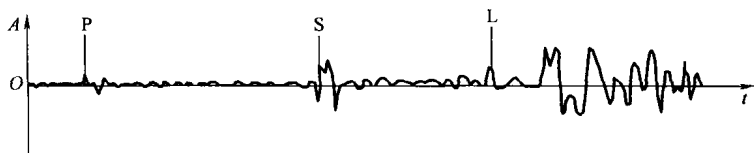


图 1.1.8

现出周期长、振幅较大的特点。接着是面波 (L) 中的勒夫波 (Q) 和瑞利波 (R)。

地震现象表明,纵波使建筑物产生上下颠簸,剪切波使建筑物产生水平方向摇晃,而面波则使建筑物既产生上下颠簸又产生左右摇晃。一般当剪切波和面波都同时到达时质点运动最为强烈。由于面波的能量比体波要大,所以造成建筑物和地表的破坏是以面波为主的。

在地震时,震中区人们的感受常是先上下颠簸,而后才左右摇晃。这可由不同波的传播速度不同来解释。纵波传播速度快,先到达地表,其质点运动方向与波前进方向一致,故而首先引起地表垂直振动,当横波到达时则引起水平振动。

由于地壳构造及质点振动类型复杂,所以地震时地表振动是多方位多形式的随机振动。大量震害调查表明,水平地震作用通常是最主要的地震作用。因此《建筑抗震设计规范》规定一般情况下可在建筑结构的两个主轴方向分别考虑水平地震作用,仅对于设防烈度为 8 度和 9 度的大跨度结构、长悬臂结构、烟囱和类似的高耸结构,9 度的高层建筑,才应考虑竖向地震作用。

理论分析和震害表明,不同大小的地震(震级或震中烈度)对某一地区所引起的烈度可能相同,但不同动力特性的结构的破坏作用不同。一般来说,震级较大、震中距较远的地震对长周期的高柔结构的破坏,比同样烈度而震级较小、震中距较近的地震造成的破坏要重。而对周期较短的刚性结构则有相反的趋势。造成这种现象的原因是,地震波中的高频(短周期)分量随着传播距离的加大而迅速衰减,低频(长周期)分量衰减得慢,因而震级大、震中距长的地震波主要为低频分量,且长周期地震波在软土地基中又比短周期地震波放大得多,加之类共振现象的存在,致使在远离震中区的软土地基上的高柔建筑物遭到较严重的破坏。而震级较小、震中距较近的地震波,高频分量没有衰减或衰减较少,则对短周期的刚性结构的地震影响就要大些。为了区别同样烈度下不同震级和震中距的地震对不同动力特性的建筑物的破坏作用,在抗震设防烈度相同的情况下,一个地区所受的地震影响应按震级和震中距的远近不同而划分为不同的设计地震分组,此即《建筑抗震设计规范》3.2.3 条的规定。

3.2.3 本规范的设计地震共分为三组。

第二节 大震、中震、小震

一、震级

震级是表示地震本身大小的尺度,是按一次地震本身强弱程度而定的等级。震级表示一次地震释放能量的多少,所以一次地震只有一个震级。

目前,国际上比较通用的是里氏震级。一般认为,小于 2 级的地震,人们感觉不到,只有仪器才能记录下来,称为微震;2~4 级地震,人可以感觉到,称为有感地震;5 级以上地

震能引起不同程度的破坏，称为破坏性地震；7 级以上的地震，则称为强烈地震或大震；8 级以上的地震，称为特大地震。目前世界上已记录到的最大地震震级为 9 级。

二、地震烈度

早期在没有仪器观测的年代，只能由地震宏观现象，如人的感觉、器物的反应、地表和建筑物的影响和破坏程度等，总结出的宏观烈度表来评定地震烈度。现将 1999 年颁布的《中国地震烈度表》中有关 6 度~9 度时的地震宏观现象摘引部分内容列于表 1.2.1。

表 1.2.1 6 度~9 度时的地震宏观现象

烈度	在地面上人的感觉	器物的反应	地表和建筑物的影响和破坏程度
6	多数人站立不稳，少数人惊逃户外	损坏——墙体出现裂缝，檐瓦掉落，少数屋顶烟囱裂缝、掉落	河岸和松软土出现裂缝，饱和砂层出现喷砂冒水，有的独立砖烟囱出现轻度裂缝
7	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	轻度破坏——局部破坏，开裂，小修或不需要修理可继续使用	河岸出现塌方；饱和砂层常见喷砂冒水，松软土地裂缝较多；大多数独立砖烟囱中等破坏
8	多数人摇晃颠簸，行走困难	中等破坏——结构破坏，需要修复才能使用	干硬土上亦出现裂缝；大多数独立砖烟囱严重破坏；树梢折断；房屋破坏导致人畜伤亡
9	行动的人摔倒	严重破坏——结构严重破坏，局部倒塌，修复困难	干硬土上许多地方出现裂缝；基岩可能出现裂缝，错动；滑坡塌方常见；独立砖烟囱有许多倒塌

《中国地震烈度表》实施以来，在地震烈度评定中发挥了重要作用。由于定量检测手段的进步，进入仪器观测的年代，由中国地震局对《中国地震烈度表》（GB/T 17742—1999）进行了修订，并由国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会联合发布了新的《中国地震烈度表》（GB/T 17742—2008），见表 1.2.2。

（1）用于评定烈度的房屋，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。

表 1.2.2 中国地震烈度表（GB/T 17742—2008）

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/s ²)	峰值速度 / (m/s ²)
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；个别独立砖烟囱出现轻度裂缝	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)

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/s^2)	峰值速度 / (m/s^2)
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 ~	物体从架子上掉 落; 河岸出现塌方, 饱和砂层常见喷砂 冒水, 松软土地土 地裂缝较多; 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	0.31			
		C	少数中等和/或轻微破 坏, 多数基本完好	0.07 ~ 0.22			

(2) 房屋破坏等级及其对应的震害指数

房屋破坏等级分为: 基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏五类, 其定义和对应的震害指数见表 1.2.3。

表 1.2.3 建筑破坏级别与震害指数

破坏等级	震害程度	震害指数 d
基本完好	承重和非承重构件完好, 或个别非承重构件轻微损坏, 不加修理可继续使用	$0.00 \leq d < 0.10$
轻微破坏	个别承重构件出现可见裂缝, 非承重构件有明显裂缝, 不需要修理或稍加修理即可继续使用	$0.10 \leq d < 0.30$
中等破坏	多数承重构件出现轻微裂缝, 部分有明显裂缝, 个别非承重构件破坏严重, 需要一般修理后可使用	$0.30 \leq d < 0.55$
严重破坏	多数承重构件破坏较严重, 非承重构件局部倒塌, 房屋修复困难	$0.55 \leq d < 0.85$
毁坏	多数承重构件严重破坏, 房屋结构濒临崩溃或已倒毁, 已无修理可能	$0.85 \leq d < 1.00$

三、抗震设防烈度——地震基本烈度

强烈地震是一种破坏性很大的自然灾害, 它的发生具有很大的随机性, 采用概率方法预测某地区未来一定时间内可能发生的最大烈度是具有实际意义的。因此, 国家有关部门提出了“抗震设防烈度”的概念。

《建筑抗震设计规范》规定:

2.1.1 抗震设防烈度

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。一般情况, 取 50 年内超越概率 10% 的地震烈度。

“抗震设防烈度”可由《地震动参数区划图》来确定。

《建筑抗震设计规范》2.1.3 条指出《地震动参数区划图》规定了全国各地区以加速度表示地震作用的强弱程度。

2.1.3 地震动参数区划图

以地震动参数 (以加速度表示地震作用强弱程度) 为指标, 将全国划分为不同抗震设防要求区域的图件。

《建筑抗震设计规范》3.2.2 条给出了定量的“抗震设防烈度和设计基本地震加速度取值的对应关系”。

3.2.2 抗震设防烈度和设计基本地震加速度取值的对应关系,应符合表 3.2.2 的规定。设计基本地震加速度为 $0.15g$ 和 $0.30g$ 地区内的建筑,除本规范另有规定外,应分别按抗震设防烈度 7 度和 8 度的要求进行抗震设计。

表 3.2.2 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。

根据“设计基本地震加速度值所对应的烈度值”即能确定每一区域的地震基本烈度,此即为《建筑抗震设计规范》1.0.5 条的规定。

1.0.5 一般情况下,建筑的抗震设防烈度应采用根据中国地震动参数区划图确定的地震基本烈度(本规范设计基本地震加速度值所对应的烈度值)。

四、我国主要城镇的抗震设防烈度、设计基本地震加速度值和设计地震分组

《建筑抗震设计规范》附录 A 给出了这组基本设计参数。现摘录如下:

3.2.4 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、设计基本地震加速度值和所属的设计地震分组,可按本规范附录 A 采用。

附录 A 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

本附录仅提供我国抗震设防区各县级及县级以上城镇的中心地区建筑工程抗震设计时所采用的抗震设防烈度、设计基本地震加速度值和所属的设计地震分组。

注:本附录一般把“设计地震第一、二、三组”简称为“第一组、第二组、第三组”。

A.0.1 首都和直辖市

1 抗震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度值为 $0.20g$:

第一组:北京(东城、西城、朝阳、丰台、石景山、海淀、房山、通州、顺义、大兴、平谷),延庆,天津(汉沽),宁河。

2 抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度值为 $0.15g$:

第二组:北京(昌平、门头沟、怀柔),密云;天津(和平、河东、河西、南开、河北、红桥、塘沽、东丽、西青、津南、北辰、武清、宝坻),蓟县,静海。

3 抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度值为 $0.10g$:

第一组:上海(黄浦、卢湾、徐汇、长宁、静安、普陀、闸北、虹口、杨浦、闵行、宝山、嘉定、浦东、松江、青浦、南汇、奉贤)。

第二组:天津(大港)。

4 抗震设防烈度为 6 度,设计基本地震加速度值为 $0.05g$:

第一组:上海(金山),崇明;重庆(渝中、大渡口、江北、沙坪坝、九龙坡、南岸、北碚、万盛、双桥、渝北、巴南、万州、涪陵、黔江、长寿、江津、合川、永川、南川),巫山,奉节,云阳,忠县,丰都,璧山,铜梁,大足,荣昌,綦江,石柱,巫溪*。

注:上标*指该城镇的中心位于本设防区和较低设防区的分界线,下同。

五、小震、中震、大震的概率指标

小震（称多遇地震）和大震（称罕遇地震），系以设防烈度（即基本烈度亦称中震）为基准，相对于设防烈度的地震（中震）而言的，此处所提的“小”与“大”是相对指标，而不是绝对数值。

根据对我国一些主要地震区的地震危险性分析结果，我国地震烈度的概率分布基本上符合极值Ⅱ型分布，其概率密度函数曲线的基本形状如图 1.2.1 所示。

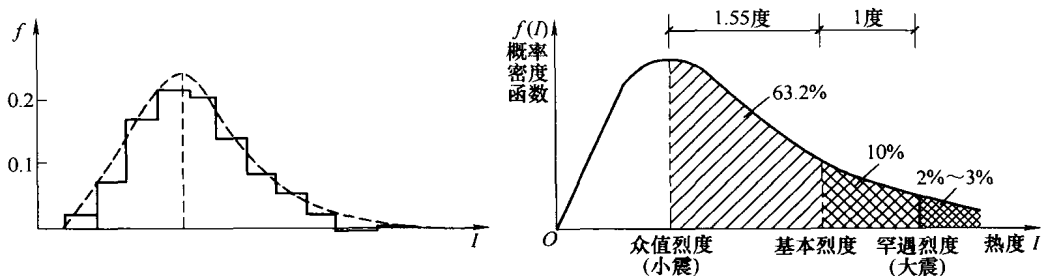


图 1.2.1 三种烈度关系示意图

三个烈度水准之间的关系见表 1.2.4。

表 1.2.4 三种烈度水准比较

烈度水准	地震水准	50 年超越概率	烈度关系
众值烈度	多遇地震（小震）	63.2%	$I_0 - 1.55$ 度
基本烈度	设防烈度地震（中震）	10%	I_0
罕遇烈度	罕遇地震（大震）	2% ~ 3%	$I_0 + 1$ 度

《建筑抗震设计规范》1.0.1 条的“条文说明”对小、中震、大震的概率指标说明如下：

50 年内超越概率约为 63% 的地震烈度为对应于统计“众值”的烈度，比基本烈度约低一度半，本规范取为第一水准烈度，称为“多遇地震”。

50 年超越概率约 10% 的地震烈度，即 1990 中国地震区划图规定的“地震基本烈度”或中国地震动参数区划图规定的峰值加速度所对应的烈度，本规范取为第二水准烈度，称为“设防地震”。

50 年超越概率 2% ~ 3% 的地震烈度，本规范取为第三水准烈度，称为“罕遇地震”，当基本烈度 6 度时为 7 度强，7 度时为 8 度强，8 度时为 9 度弱，9 度时为 9 度强。

六、抗震设计的范围

《建筑抗震设计规范》明确规定：

1.0.2 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。

1.0.3 本规范适用于抗震设防烈度为 6 度、7 度、8 度和 9 度地区建筑工程的抗震设计以及隔震、消能减震设计。建筑的抗震性能化设计，可采用本规范规定的基本方法。

抗震设防烈度大于 9 度地区的建筑及行业有特殊要求的工业建筑，其抗震设计应按有关专门规定执行。

注：本规范“6 度、7 度、8 度、9 度”即“抗震设防烈度为 6 度、7 度、8 度、9 度”的简称。

震害表明：多起地震发生在设防烈度为6度的地区。有的原为6度设防地区，却发生了大大超过6度的地震，如1966年河北宁晋地震（10度），1959年广东阳江地震（8度），1975年辽宁海城地震（9度），1976年河北唐山地震（11度）等。所以6度地区必须进行抗震设计。

【例1.2.1】按照我国现行抗震设计规范的规定，位于（ ）抗震设防烈度地区内的建筑物应考虑抗震设防。

- (A) 抗震设防烈度为5~9度 (B) 抗震设防烈度为5~8度
(C) 抗震设防烈度为5~10度 (D) 抗震设防烈度为6~9度

正答：(D)

根据《建筑抗震设计规范》第1.0.2和1.0.3条，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。抗震设防烈度为6度、7度、8度和9度的可按《建筑抗震设计规范》进行，抗震设防烈度大于9度地区的建筑和行业有特殊要求的工业建筑，其抗震设计应按有关专门规定执行。

【例1.2.2】《建筑抗震设计规范》的适用范围是（ ）。

- (A) 抗震设防烈度为6~9度地区的建筑抗震设计
(B) 抗震设防烈度为7~9度地区的建筑抗震设计
(C) 抗震设防震级为6~9级地区的建筑抗震设计
(D) 抗震设防震级为7~9级地区的建筑抗震设计

正答：(A)

根据《建筑抗震设计规范》第1.0.3条规定，《建筑抗震设计规范》适用于抗震设防烈度为6度、7度、8度和9度地区建筑工程的抗震设计及隔震、消能减震设计。对抗震设防烈度大于9度地区的建筑和行业有特殊要求的工业建筑，其抗震设计应按有关专门规定执行。

第三节 三水准设防、二阶段设计

一、结构抗震设计的特点

在地震工程中，人们研究的对象有三个：即地震动（输入）、结构（分析体系）、结构反应（输出）。只有在了解结构的地震反应之后，才可能进行科学的设计。为了了解结构的地震反应，必须了解地震动和结构本身的动力特性，两者缺一不可。

1. 结构的动力特性对结构抗震设计的影响

(1) 地震作用是一种间接作用，与结构的质量（可以用自重来体现）密切相关。

地震时地震波使地面发生强烈振动，导致地面上原来静止的建筑物发生强迫振动。

(2) 地震作用就是结构在振动过程中，结构各部分的质量受到地面加速度的激发以及结构相对加速度的作用而形成的惯性力。

(3) 地震作用与结构的动力特性有关。

建筑结构受到的地震作用与结构本身的动力特性（自振周期、阻尼等）密切相关。如果设计过程中改变了结构布置，引起了结构质量分布或者大小的变化，结构的自振周期就会相应发生改变，结构的加速度反应也会发生变化，以致结构上受到的地震作用也发生变化，可能增大也可能减小。

强震过程中结构上的地震作用是不断随时间变化的，是一种动态的可变作用，且与结构的承载力有关。随着结构的开裂或屈服，建筑结构出现内力的塑性重新分布而进入塑性状态，必然引起刚度的不断变化，整个结构受到的地震作用也在地震全过程中不断变化。地震中结构进入弹塑性状态后，只能依靠变形吸收能量以维持结构的“安全”。所以，结构抗震设计的根本验算应是强震下结构的变形验算，并须满足《建筑抗震设计规范》规定的变形要求。

2. 地震的动力特性对结构抗震设计的影响

地震动时地面运动是一种相当复杂、十分强大的瞬间作用，且具有很大程度的随机性。目前，我们对地震作用发生的过程和机制都还不很清楚。一方面，事先无法通过试验和计算来预测某一地区在某一时期内可能出现的最大地震烈度；另一方面，烈度不同时，结构上的弹性地震作用会发生成倍的变化。因而地面运动的特性（如地震时的最大振幅、持续时间、频谱特性）亦了解得不大清楚，故要把地震作用下的结构像非抗震结构那样都设计成处于弹性状态工作，是不可能的；同时，强震的发生更是一种罕见的自然现象，要求在强震下结构也处于弹性状态，不仅在经济上不合理，在技术上也无必要。无论是发生地点、时间和强度，地震都具有很大的不确定性。以目前的科学发展水平，要做到准确预测建筑物将遭遇到的地震特性和参数几乎是不可能的。试验手段和研究技术更不能确切地模拟地震对建筑结构的破坏作用。

二、建筑抗震设防的基本思想和原则

面临一项工程设计任务，首先要把握的是设计的总原则。

当进行结构的静力设计时，要求结构在规定的荷载作用下处于弹性阶段工作，既有承载能力（强度）的安全储备，也使变形及裂缝处于使用许可的范围内，使之在使用上、外观上均能满足要求，亦即满足两类极限状态的要求。所以，结构抵御静力荷载时，设计者必须遵循的指导思想，是使结构在预期荷载作用下保持或基本上保持在弹性范围内工作。这样的结构如若没有遇到异常的意想不到的情况，在预期荷载下是不可能出现严重破坏、过度变形等不正常状况的。

当进行结构的抗震设计时，要同静力设计一样把不同烈度地震作用下的结构都设计成处于弹性状态工作，实际上是不可能的，因为强震的发生是一种罕见的自然现象，要求在强震下结构也处于弹性状态是不可行的，也无必要。地震这种自然作用既复杂又十分强大，它的发生时间、地点、强度大小、次数等都具有随机性，而设计时又必须予以合理量化，所以抗震设计中的首要问题是要求确定结构在使用期间，对不同频度和强度的地震，结构应具有的抵抗能力，确定以多大的烈度作为设防烈度。同时，结构的设计方法既要客观地反映地震对结构的作用，在概念上又要清晰明确，并能采用与结构静力设计相协调的方法，力求简易可行，便于设计人员掌握。《建筑抗震设计规范》的 1.0.1 条对这个重要问题做出了明确的规定，提出了“建筑抗震设防的基本思想和原则：以‘三个水准’为抗震设防目标”。

《建筑抗震设计规范》1.0.1 条规定：

1.0.1 按本规范进行抗震设计的建筑，其基本的抗震设防目标是：

当遭受低于本地区抗震设防烈度的多遇地震影响时，主体结构不受损坏或不需进行修理可继续使用；

当遭受相当于本地区抗震设防烈度的设防地震影响时,可能发生损坏、但经一般性修理仍可继续使用;

当遭受高于本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。

《建筑抗震设计规范》1.0.1 条的“条文说明”从两个方面对 1.0.1 条的规定作了明确的说明。

(1) 对“抗震设防目标”的说明

遭遇第一水准烈度——众值烈度(多遇地震)影响时,建筑处于正常使用状态,从结构抗震分析角度,可以视为弹性体系,采用弹性反应谱进行弹性分析;

遭遇第二水准烈度——基本烈度(设防地震)影响时,结构进入非弹性工作阶段,但非弹性变形或结构体系的损坏控制在可修复的范围;

遭遇第三水准烈度——最大预估烈度(罕遇地震)影响时,结构有较大的非弹性变形,但应控制在规定的范围内,以免倒塌。

第一水准烈度为众值烈度(I_m)。此一水准的设计目标是“小震不坏”。

第二水准烈度为设防烈度(I_0)。此一水准的设计目标是“中震可修”。

第三水准烈度为预估的罕遇地震烈度(I_n)。此一水准的设计目标是“大震不倒”。

“小震不坏,中震可修,大震不倒”实际上就是“多遇地震下不坏,设防烈度下可修,罕遇地震下不倒”的简便说法。这样,小、中、大震的三个概率水准就明确了,量化了。然而,衡量整个结构损坏的程度却仍是相对的,“不坏”指的是建筑物经地震后的破坏程度在日常维修的范围内;“可修”指的是“小坏”或“中坏”,是泛指有修复价值的损坏;与“不倒”相应的是建筑结构主体的严重破坏,虽已无修复价值,但是只要不倒,生命和财产的损失就可得以大大减轻。总之,要强调指出,结构抗震设计的总原则不是避免结构的损坏,而是竭力从各方面提高其整体变形能力,防止倒塌。

(2) 对“二阶段设计”的说明

第一阶段设计是承载力验算,取第一水准的地震动参数计算结构的弹性地震作用标准值和相应的地震作用效应,继续采用《建筑结构可靠度设计统一标准》GB50068 规定的分项系数设计表达式进行结构构件的截面承载力抗震验算,这样,既满足了在第一水准下具有必要的承载力可靠度,又满足第二水准的损坏可修的目标。对大多数的结构,可只进行第一阶段设计,而通过概念设计和抗震构造措施来满足第三水准的设计要求。

第二阶段设计是弹塑性变形验算,对地震时易倒塌的结构、有明显薄弱层的不规则结构以及有专门要求的建筑,除进行第一阶段设计外,还要进行结构薄弱部位的弹塑性层间变形验算并采取相应的抗震构造措施,实现第三水准的设防要求。

为了实现上述三水准抗震设防目标,《建筑抗震设计规范》采用了简化的两阶段设计方法。

(1) 第一阶段设计为“小震”作用下的构件截面抗震承载力验算和相应的构造措施。具体地说,是以多遇地震(第一水准)下的弹性地震作用作为设计指标,进行构件内力分析。然后用与设防烈度(第二水准)相应的多系数表达的抗震承载力验算公式验算结构构件(这一

多系数表达式的形式与静力设计中的实用设计表达式很相似), 此时各构件的材料强度采用设计值。与静力设计的一个重要不同是引入了承载力抗震调整系数 (γ_{RE}), 以反映不同材料和不同受力状态下所具有的不同可靠度。这样, 就同时满足了第一、第二水准的要求。但对于较柔的结构 (例如框架结构), 还要进行正常使用状态下的弹性层间位移验算。

在这一设计阶段中, 要根据概念设计采取有效的抗震构造措施, 从而使大多数结构可以定性地满足第三水准的要求。

强烈地震震害表明, 对于大多数建筑结构只需进行第一阶段设计即可做到“大震不倒”, 其中包括多层砌体房屋结构。

(2) 第二阶段设计为“大震”作用下的弹塑性变形验算, 并采取提高结构变形能力的构造措施, 目的是防倒塌。此时首先要寻找结构的薄弱层 (层间位移相对较大的楼层), 然后计算并控制其在大震作用下的弹塑性层间变形, 使之不超过规范的规定值。例如对于多层砌体房屋结构中的底层框架-抗震墙砌体结构, 需进行此阶段设计, 因为这类结构的底层是明显的薄弱层。对大多数结构, 则无需进行第二阶段设计。

现以钢筋混凝土柱从开始受力到结构破坏全过程的柱顶水平力 P 与柱顶水平侧移 Δ 的 $P-\Delta$ 曲线为基础, 用图示方法来讨论“三水准设防、两阶段设计”中结构的受力和变形之间的状态和关系, 分成单根柱、单层柱群、多层框架三种情况来讨论。

1) 单柱的 $P-\Delta$ 曲线。对于图 1.3.1a 所示单独悬臂柱, 当柱上端作用水平剪力 P 时, 柱端产生水平侧移为 Δ 。

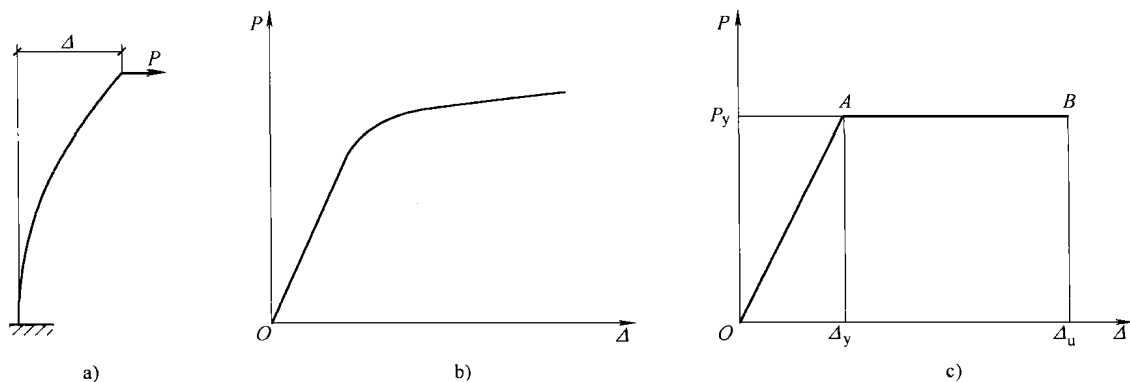


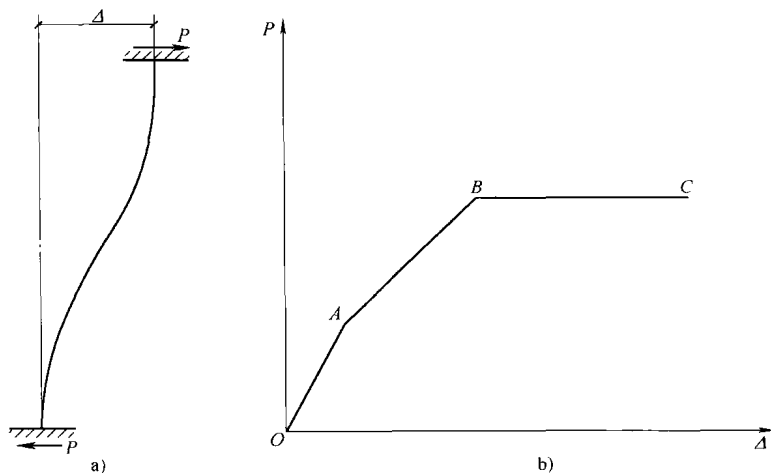
图 1.3.1 单悬臂柱的 $P-\Delta$ 曲线

a) 悬臂柱 b) $P-\Delta$ 曲线 c) 简化的 $P-\Delta$ 曲线

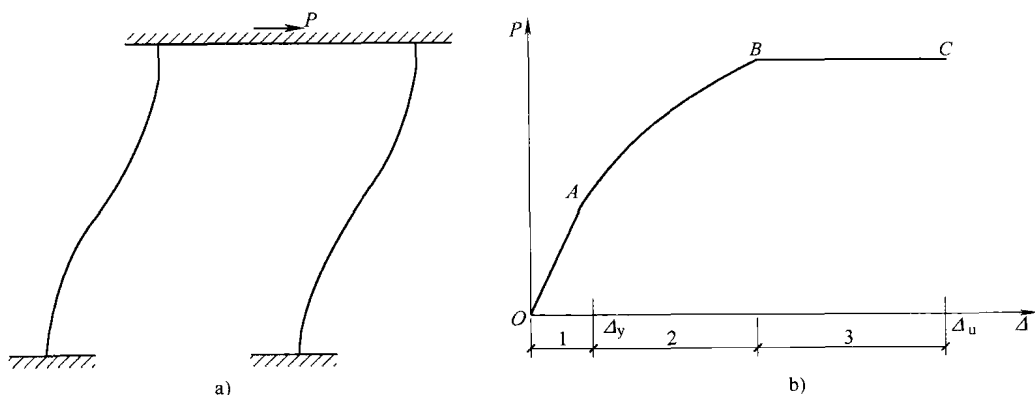
试验所得的 $P-\Delta$ 关系可以用图 1.3.1b 表示。如进一步简化, $P-\Delta$ 关系也可用图 1.3.1c 中的 OAB 折线表示, A 点对应于柱根开始屈服, 其荷载值为 P_y , A 点对应的水平侧移为 Δ_y ; OAB 为柱根的屈服过程, B 点对应于柱根的破坏, 其水平侧移为 Δ_u , OAB 折线所覆盖的面积表示所吸收的变形能。

图 1.3.2a 所示为一两端嵌固柱受层间剪力作用, 简化的 $P-\Delta$ 关系如图 1.3.2b 所示。其中 A 点表示某一柱端开始屈服, 但另一端尚未屈服, 这时整个柱子不算完全屈服, 荷载仍能沿 AB 上升, 直到 B 点, 另一端也开始屈服, 整个柱子完全屈服, 并沿 BC 发展侧移, 到 C 点整个柱子宣告破坏。

2) 单层楼层柱群的 $P-\Delta$ 曲线。图 1.3.3a 表示有若干根柱所组成的单层楼层, 柱的两端

图 1.3.2 两端嵌固柱的 $P-\Delta$ 曲线a) 两端嵌固柱 b) $P-\Delta$ 关系

均为嵌固端，在受楼层层间剪力 P 作用时，其 $P-\Delta$ 曲线如图 1.3.3b 所示。当楼层中某柱的某一端首先达到塑性变形时，即到达 A 坐标点，相应的楼层侧移为 Δ_y ；而后，随着各个柱端逐个屈服， $P-\Delta$ 曲线将沿 AB 多边折线发展，直到 B 点，全部柱端屈服，形成“机构”，楼层沿 BC 发展塑性变形，直到 C 点整个楼层破坏，相应的楼层侧移为 Δ_u 。由此，整个楼层 $P-\Delta$ 关系可以分为三个范围（见图 1.3.3b），范围 1 为弹性未屈服范围，范围 2 为有约束屈服范围，范围 3 为无约束屈服范围。

图 1.3.3 楼层柱群 $P-\Delta$ 曲线a) 楼层间剪力 P 作用 b) $P-\Delta$ 曲线

根据理论分析及实际震害情况，钢筋混凝土结构在使用阶段或是在多遇烈度地震作用时，结构处在范围 1 的工作阶段，结构可以用弹性理论分析内力。当作用消失后，变形也就自然地作弹性恢复。

在基本烈度地震作用时，结构已进入范围 2 的弹塑性阶段工作，实际上已无强度安全储备可言，而是依靠结构的弹塑性变形耗能能力抵抗地震作用。结构抗震设计就是把结构的工作状态限制在范围 2 内，保证“坏而可修”。抗震设计就是要设法延长这一阶段，以提高结