

建筑结构抗震分析

阎盛海 / 著

中国建材工业出版社

建筑结构抗震分析

阎盛海 著

中国建材工业出版社

内 容 提 要

本书是在地震学和结构动力学基础上,分别对地上建筑结构、地下建筑结构的抗震分析方法进行了探讨,其主要内容系作者多年来的横向科研课题和科学研究内容的总结。

全书共分三篇共6章。第一篇:基础篇,它包括地震学基础和结构动力学基础及对工程结构实用近似计算方法。第二篇:地上结构抗震分析(第4.5章)它包括用Hamilton变分原理研究箱形空间结构振动,及用有限元法对工业与民用建筑结构抗震分析及弹塑性分析。第三篇:桥隧篇,实际上以隧道为主,分别用弹性动力学波函数法,有限单元法分别对岩基和土基隧道进行抗震研究,提供了较好的分析方法。

本书可作为高等学校研究生参考教材。可供有关从事结构设计,科研及工程技术人员使用,也可作为相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构抗震分析/阎盛海著. —北京:中国建材工业出版社, 1999
ISBN 7-80090-913-1

I. 建… II. 阎… III. 建筑结构:抗震结构-结构分析
IV. TU352.1

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第22400号

建筑结构抗震分析

阎盛海 著

*

中国建材工业出版社出版(北京海淀区三里河路11号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京密云红光印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 10.75 字数: 275千字

1999年6月第1版 1999年6月第1次印刷

印数: 1—4000册 定价: 19.00元

ISBN 7-80090-913-1/TU·222

前 言

我国在地理位置上处于世界两大地震带之间，是世界大陆内一个最宽广的浅源强震活动地区。本世纪以来，我国大约平均每三年就发生两次7级以上的地震，而每次大震中，差不多就有一次酿成重灾。从1966年至1976年就我国发生的地震来看，有9次超过7级强震，9次地震中共死亡人数达30多万人之多^[1]

在地震活动频繁地区，不仅需要考虑地上建筑物的抗震，而且应考虑地下建筑物的抗震，尤其是地下“水、核电站”，地下铁道过江隧道，及大型石油天然气输送管道，以及城市里供水、供电、供气等被称为生命线工程的抗震，也不得不考虑地下结构抗震。

本书通过对地上、地下建筑结构抗震的叙述，希望能对读者有所帮助，但限于作者水平所限，错误和缺点难免，望批评指正。

(作者 1998年8月18日于大连白云山庄)

目 录

第一篇 基础篇	1
第一章 地震学基础	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 构造地震和地震波	1
§ 1.3 震级与地震烈度	2
§ 1.4 基本烈度和烈度区划图	6
§ 1.5 建筑分类与建筑设防标准	7
第二章 结构动力学基础	10
§ 2.1 基本概念和方法.....	10
1. 荷载	10
2. 动静法	11
§ 2.2 运动方程的建立.....	14
§ 2.3 用 Rayleigh 法进行振动分析	17
§ 2.4 有阻尼的单自由度体系的自由振动.....	20
§ 2.5 有阻尼单自由度体系的强迫振动.....	22
§ 2.6 振动中各种能量的变化.....	23
§ 2.7 单质点弹性体系的地震反应.....	26
§ 2.8 单质点弹性体系受水平地震作用—反应谱法.....	29
§ 2.9 多质点弹性体系的地震反应.....	32
第三章 建筑结构基本频率的近似计算	36
§ 3.1 概述.....	36
§ 3.2 高耸柔性结构自振频率的近似计算.....	36
§ 3.3 不考虑横梁变形时多层框架基本频率近似计算.....	37
§ 3.4 细高多层建筑基本频率的近似计算.....	38
§ 3.5 利用位能和动能等效原则对结构进行简化计算.....	40
§ 3.6 利用振型正交概念和最小能量法对结构进行简化计算.....	41
§ 3.7 多自由度振型关于质量刚度的正交性的力学概念及应用.....	43
§ 3.8 多质点体系受水平地震作用分析—振型分解反应谱法.....	43
§ 3.9 多质点体系受水平地震作用近似分析—底部剪力法.....	45
第二篇 地上建筑结构抗震分析	48
第四章 用 Hamilton 变分原理研究箱形空间结构振动	48
§ 4.1 箱形空间结构自由振动.....	48
§ 4.2 一面开口盒式结构的自振特性.....	53
§ 4.3 两端固定的双跨盒式厂房的自由振动.....	58
§ 4.4 多层封闭盒式结构的地震反应.....	61

§ 4.5	一面开口的多层盒式结构的自振特性·····	67
第五章	用有限单元法对工民建筑结构作抗震分析·····	73
§ 5.1	某大型水电站厂房抗震(振)分析·····	73
§ 5.2	带抗震墙的多层框架在地震作用下的分析·····	78
§ 5.3	剪切型串联多自由度体系弹塑性地震反应分析·····	86
§ 5.4	剪力墙结构的动力有限元分析·····	98
§ 5.5	单层厂房及框架结构在地震作用下弹塑性动力反应分析·····	102
§ 5.6	坝上附属结构物——拦污栅空间框架结构抗震分析·····	110
第三篇	桥隧篇·····	119
第六章	岩、土体隧道·····	119
§ 6.1	(引言)横断海峡的跨世纪工程·····	119
§ 6.2	均匀各向同性介质中的弹性波·····	121
§ 6.3	平面波在界面上产生的位移场和应力场·····	123
§ 6.4	圆形隧洞多层衬砌在 p 波作用下的动力反应·····	126
§ 6.5	圆形多层衬砌隧洞在 S 波作用下的动力反应·····	132
§ 6.6	地震作用下圆形隧洞多层衬砌的动力计算·····	135
§ 6.7	软土中隧洞的地震反应分析·····	139
§ 6.8	岩基隧洞的地震反应分析·····	151
§ 6.9	单孔拱桥实用地震分析·····	157
推荐书目	·····	165

第一篇 基础篇

第一章 地震学基础

§ 1.1 引言

作用在结构体系上的动荷载产生的机制是各种各样的，它包括风或波浪的作用及各种车辆运动等，但对结构工程师来说，地震是重要的动力输入形式，地震问题的重要性，当然是由于大地震在人口稠密地区造成可怕的后果，如我国营口海城、唐山大地震就是一个的例证^[1]。设计经济而有效的结构，使之能成功地经受强烈地面运动所产生的荷载，需要结构工程中最好的技术和科学。然而，地震问题的重要性已超出地震区抗震结构的直接需要，世界各国，尤其是环太平洋各国，都制订了严格的抗震准则，特别是在重要的水、核电站建筑结构和桥梁结构中都必须严格地按抗震规范执行。

结构工程师主要关心大地震的局部影响，关心地面运动的强烈程度对结构造成的破坏，以及如何采取措施防止结构物遭受地震破坏。

§ 1.2 构造地震和地震波

在结构抗震中，所谓的地震是由于地壳的构造运动，即地球不断地在其表面上造山和沉海的过程，地壳板块移动就表征了这种过程，这种构造运动，使岩层发生断裂，错动而引起的地面运动，此种地震称之为构造地震，简称地震。

强烈构造地震影响面广，破坏性大，出现机率高，约占破坏性地震总数的90%以上。因此，建筑结构抗震，只限于讨论在构造地震作用下建筑物的设防问题。

地壳深处发生岩层断裂、错动的地方称为震源。震源至地表面的距离称为震源深度。通常把震源深度小于60km的地震称之为浅源地震，浅源地震深度一般为5~40km。我国深源地震分布较少，其深度一般为400~600km；中源地震深度一般为60~300km。深源地震对地面上建筑物影响很小，因其地震时释放的能量，通过长距离传播中大部分能量被损失掉。

震源正上方的地面称为震中。震中邻近地区称为震中区，地面上某点至震中的距离称之为震中距。

地震波^[2]

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，它以波的形式从震源向四周传播，这种波称之为地震波。古典的地震学是研究通过地球传播的弹性波。地震波按其在地壳中传播的位置不同，分为体波和面波。

一、体波

在地球内部传播的波称为体波。体波分为纵波和横波。

纵波是由震源向四周传播的压缩波，(又称 p 波，是最初的，即初波)，介质的质点的振动方向与波的传播方向一致。这种波周期短，振幅小速度快，在地壳内它的速度一般为 $200 \sim 1400\text{m/s}$ 。纵波波速可按下式计算：

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1.2.1)$$

式中 E ——介质的弹性模量；

μ ——介质的泊松比；

ρ ——介质密度；

纵波引起地面垂直方向振动。

横波是由震源向四周传播的剪切波(也称 S 波，是二次的，即次波)。介质的质点振动方向与波的传播方向垂直。这种波周期长，波速慢，在地壳内它的波速一般为 $100 \sim 800\text{m/s}$ 。横波的波速按下式计算：

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.2.2)$$

式中 G ——介质的剪切模量；

μ ——介质泊松比；

ρ ——介质密度。

横波引起地面水平方向振动。

当取 $\mu=1/4$ 时，由式 (1.2.1) (1.2.2) 可得：

$$v_p = \sqrt{3}V_s \quad (1.2.3)$$

由此可见， p 波比 s 波传播速度快。

二、面波

在地球表面传播的波称为面波，又称 L 波。它是体波经地层界面多次反射、折射形成的次生波。其波速较慢，约为横波速度的 0.9 倍，所以这种波在体波之后到达地面。这种波的介质质点振动方向复杂，振幅比体波大，对建筑物的影响也比较大。

§ 1.3 震级、地震烈度

一、震级

对于一个地震工程师来说，地震地面运动的最重要方面是对结构的影响，即引起结构的应力和应变或结构产生的破坏程度，这种破坏能力至少部分地决定于地震的“大小”，出于不同的目的用不同的地震大小的度量。从地震学角度来看，度量地震大小主要是震源所释放出来的应变能数量，该应变能数量就是震级的定量以符号 M 表示，由于人们所能观测到的只是传播到地表的振动，也正是对我们有直接影响的那一部分地震能量所引起的地面振动，所以自然地用地面振动振幅大小来度量地震震级。1935 年里希特(Richter)首先提出了震级的定义，即：震级大小是利用标准地震仪(周期 0.8s 阻尼系数为 0.8，放大倍数 2800 的地震仪)在距震中 100km 处记录的以微米($\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$)为单位的最大水平地面位移(振幅) A 的常用对数值：

$$M = \lg A \quad (1.3.1)$$

式中 M ——地震震级，通常称里氏震级；

A ——由地震曲线图上量得的最大振幅 (μm)

总之，地震震级是衡量一次地震大小的等级。

例如，在距震中 100km 处，用标准地震仪记录到地震曲线图的最大振幅 $A=10\text{mm}$ ，（即 $10^4\mu\text{m}$ ），于是该次地震震级为：

$$M = \lg A = \lg 10^4 = 4$$

实际工程上，地震时距震中 100km 处不一定恰好有地震台站，而且地震台站不一定有标准的地震仪。因此，对于距震中不是 100km 地震台站采用非标准地震仪时，需用修正后的震级计算公式确定震级。

震级与地震释放能量有如下关系：

$$\lg E = 1.5M + 11.8 \quad (1.3.2)$$

式中 E ——地震释放能量（尔格）。

按照此公式，当震级每增加一级则能量将近似增加 32 倍，地面振动振幅增加约 10 倍。

一般说来， $M < 2$ 的地震，人们感觉不到，称为微振， $M = 2 \sim 4$ 的地震称为有感地震； $M > 5$ 的地震，对建筑物要引起不同程度破坏，称为破坏性地震； $M > 7$ 的地震称为强烈地震或大地震； $M > 8$ 的地震称为特大地震。

二、地震烈度、烈度表和平均震害指数

（一）地震烈度和烈度表

在任一点所观察到的地面运动的剧烈程度称为地震烈度，相对震源而言，地震烈度可把它理解为地震场的强度。一般来说，地震烈度是随着离开震源的距离而降低的，但由于局部地质条件，异常情况也是常有的，最古老的烈度是根据地面运动对自然物体和人造物体影响的观察结果来度量的。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。由于宏观烈度未能提供定量的数据，因此不能直接用于工程抗震设计。随着科学技术的发展，强震仪的问世，使人们有可能记录到的地面运动参数，如地面运动加速度峰值，速度峰值来定义烈度，从而出现了含有物理指标的定量烈度表。由于地震不可能随处取得仪器记录，故用定量烈度表评定地震现场烈度还有一定的困难。最好的办法是将两种烈度表结合起来，使其兼有两者的功能，便于工程应用。

1980 年由国家地震局颁布实施的《中国地震烈度表（1980）》，即为把宏观烈度与地面运动参数建立起联系的地震烈度表。故，新烈度表既有定性的宏观标志，又有定量的物理标志，兼有宏观烈度和定量烈度两者的功能。《中国地震烈度表（1980）》参见表 1-1。

中国地震烈度表（1980）

表 1-1

烈度	人的感觉	一般房屋		其它现象	参考物理指标	
		大多数房屋震害程度	平均震害指数		水平加速度 (cm/s ²)	水平速度 (cm/s)
1	无感					
2	室内个别静止中的人感觉					
3	室内少数静止中的感觉	门窗轻微作响		悬挂物微动		
4	室内多数人感觉 室外少数人感觉 少数人梦中惊醒	门窗作响		不稳固物翻倒		

续表

烈度	人的感觉	一般房屋		其它现象	参考物理指标	
		大多数房屋 震害程度	平均震害指数		水平加速度 (cm/s ²)	水平速度 (cm/s)
5	室内普通感觉室外 多数人感觉多数人梦 中惊醒	门窗、屋顶、屋架 颤动作响、灰土掉落、 抹灰出现微裂缝			31 (22~44)	3 (2~4)
6	惊慌失措, 仓惶逃 出	损坏——个别瓦掉 落、墙体微细裂缝	0~0.1	河岸和松软土出现 裂缝。饱和砂层出现 喷砂冒水。地面上有 的砖烟囱轻度裂缝, 掉头	63 (45~89)	6 (5~9)
7	大多数人仓惶逃出	轻度破坏——局部 破坏, 开裂、但不妨 碍使用	0.11~0.30	河岸出现坍方。饱 和砂层常见喷砂、冒 水。松软土地裂缝 较多, 大多数砖烟囱 中等破坏	125 (90~77)	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	干硬土上亦有裂 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, 局部倒坍修复 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、滑破、 坍方常见。砖烟囱出 现倒坍	500 (354~707)	50 (36~71)
10	骑自行车的人会摔 倒。处不稳状态的人 会摔出几尺远。有抛 起感。	大多数倒坍, 倒坍 不堪修复	0.71~0.90	山崩和地震断裂出 现。基层上的拱桥破 坏, 大多数砖烟囱从 根部破坏或倒毁。	1000 (708~1414)	100 (72~141)
11		毁灭	0.91~1.00	地震断裂延续很 长。山崩常见, 基岩 上拱桥毁坏		
12				地面剧裂变化, 山 河改观。		

注 ①烈度 1~5 以地面上人的感觉为主, 6~10 度以房屋震害为主, 人的感觉仅供参考, 11~12 度以地表现象为主。

11, 12 度的评定要专门研究。

②一般房屋包括用木构架和土、石、砖墙构造的旧式房屋和单层或数层的未经抗震设计的新式砖房。对于质量较差和特好的房屋, 可根据具体情况, 对表各烈度的震害程度和震害指数予以提高或降低。

③震害指数以房屋“完好”为 0, 毁灭为 1, 中间按表列震害程度分级。平均震害指数指所有房屋的震害指数的平均值而言, 可用普查或抽查方法确定之。

④使用本表时, 可根据地区具体情况, 作出临时补充规定。

⑤在农村可以自然村为单位, 在城市可分区进行烈度评定, 但面积以 1km² 左右为宜。

⑥烟囱指工业或取暖用的锅炉烟囱。

⑦表中数量词说明: 个别: 10% 以下; 少数: 10%~50%; 多数: 50%~70%; 大多数: 70%~90%; 普遍: 90% 以上。

(二) 平均震害指数

鉴于建筑种类繁多，结构类型各异，如何划分震害程度，作出符合实际的数字统计，以便正确地应用“烈度表”评定宏观烈度是一个非常重要的问题。

《中国地震烈度表（1980）》采用的平均震害指数法是解决建筑物破坏情况量化的一种有效方法。这个方法把建筑物破坏程度由完好到全部倒塌之间，分成若干等级，每级用震害等级 i 表示；如表 1-2 所示。

建筑物破坏级别与震害等级

表 1-2

破坏程度级别	破坏程度	震害等级	破坏程度级别	破坏程度	震害等级
I	全部倒塌	1.0	IV	局部倒塌	0.4
II	大部倒塌	0.8	V	裂缝	0.2
III	少部倒塌	0.6	VI	基本完好	0

某类如第 j 类房屋震害程度，用震害指数表示：

$$I_i = \frac{\sum_{k=1}^m (n_i \cdot n_i)_k}{N_i} \quad (1.3.3)$$

式中 n_i ——被统计的某类房屋 i 级破坏栋数；

$k \cdot m$ ——不同震害等级序号和数量；

i ——震害等级；

N_i ——被统计该类房屋总栋数。

$$N_i = \sum_{k=1}^m (n_i)_k$$

(1.3.3) 式的物理意义是表示该类房屋的平均震害程度。通过各类房屋不同震害指数的计算，可比较各类房屋之间抗震性能的优劣，若某类房屋震害指数 I 愈大，说明该类房屋愈不抗震。即

$$I_m = \frac{\sum_i I_i}{N} \quad (1.3.4)$$

式中 $\sum_i I_i$ ——各类房屋震害指数之和；

N ——不同类别房屋的类别数。

求得某一地区的平均震害数，可作为评定该地区地震烈度的依据。《中国地震烈度表（1980）》给出了平均震害指数与地震烈度之间的对应关系。可供查用。

顺便指出，只有当抗震能力相差不大的一般房屋才可用平均震害指数按表 1-2 来确定地震烈度。

烈度衰减规律和等震线

对于一次地震，在其波及的地区内，根据烈度表可以对该地区内每一地点评定出一个烈度。把烈度相同的区域的外包线，称为等烈度线或等震线。理想化的等震线应该是一个规则的同心圆。但由于建筑物的差异，地质、地形的影响，实际上等震线多是一些不规则的封闭线。等震线一般地震烈度级差 1 度。一般来说，等震线的度数随震中距的增加而递减。但由于局部地形、地质的影响，会在某烈度区内出现一小块高于或低于 1 度的异常区。图 (1.3.1) ~ 图 (1.3.2) 分别为营口海城和唐山地震的等烈度线。

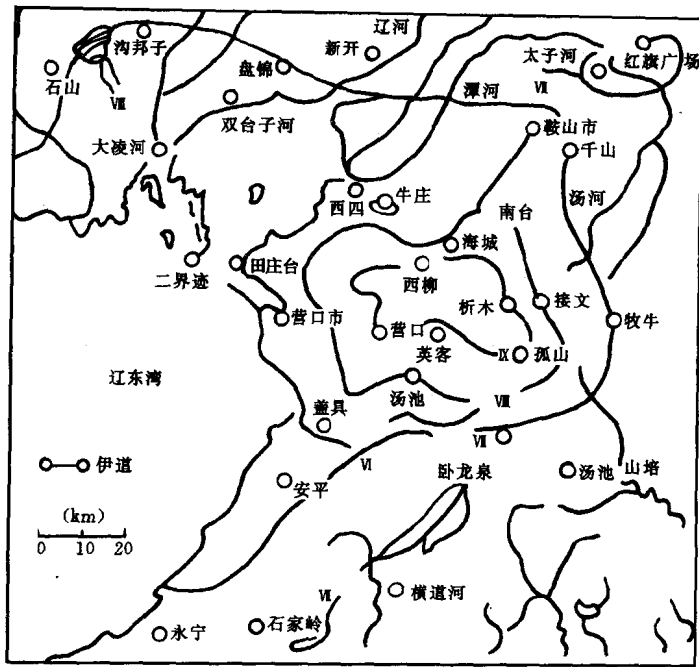


图 1.3.1 营口海城地震等烈度线

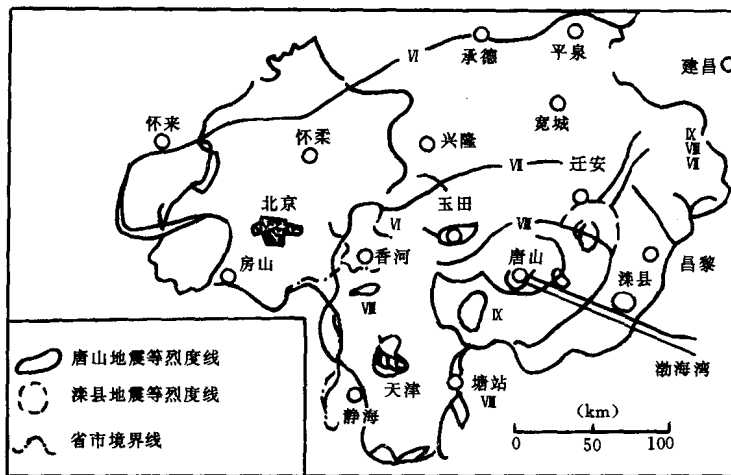


图 1.3.2 唐山地震等烈度线

§ 1.4 基本烈度和烈度区划图

一、基本烈度和烈度区划图

强烈地震是一种破坏作用很大的自然灾害，给人民的生命财产带来巨大灾难，如唐山地震^[3]1976年7月28日3时43分，唐山发生了 $M=7.8$ 级地震，这次地震在历史上也是悲惨的，死亡者达24.2万人，重伤者16.4万人，几乎所有建筑倒塌，原来高楼林立的唐山转瞬间被夷为平地。

强烈地震的发生具有很大的随机性。因而,采用概率方法预测某地区,在未来一定时间内发生最大烈度具有重大工程意义的,为此,《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89)提出了基本烈度的概念。一个地区的烈度是指该地区今后一定时间内(通常指100年),在一般场地条件下可能遭遇的最大烈度。

国家地震局在1977年颁布了《中国地震烈度区划图》该图给出了全国各地的基本烈度的分布。

二、近震和远震

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相同烈度,对不同动力特性的结构作用是不同的。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,较同样烈度的震级较小震中距较近的破坏要重。对周期较短的刚性结构则相反。

在同样烈度下、震级、震中距不同的地震,对不同周期的结构所造成的破坏差异的主要原因是,地震波频谱特性不同所致。地震观测表明,地震波中的高频分量随传播距离的衰减比低频分量要快些,即震级大,震中距长的地震波主要为低频分量。故,对长周期的高柔结构的地震影响就大。而震级较小,震中距较短的地震波,高频分量没有被衰减或衰减较少。故,对短周期的刚性结构的地震反应就要大些。为区分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,《规范》将烈度为7度和8度区的地震影响分为近震和远震两种情况:震中距小于或等于50km的称为近震;震中距大于50km的称为远震;烈度为9度和10度区,震中距一般不太大,均属于近震。如图(1.4.1)所示,若把7度和8度区划分近震和远震的震中距以50km为界的条件改为以烈度来表示,则可重新定义近震和远震。

近震:当某地区遭受的烈度比震中烈度低1度或相等时的地震;

远震:当某地区所遭受的烈度比震中烈度低二度或二度以上时的地震。

大部分地区只需考虑近震影响,需要考虑远震影响的城镇大致有独山子等近50个城镇《建筑抗震设计规范(GBJ11—89)》

我国有关单位根据153个等震线资料,经过数理统计分析,给出了烈度 I 、震级 M 和震中距 R 之间的关系式:

$$I = 0.92 + 1.63M - 3.49\lg R \quad (1.4.1)$$

及震中烈度 I_0 与震级 M 之间的关系式:

$$I_0 = 0.24 + 1.29M \quad (1.4.2)$$

根据式(1.4.1)和式(1.4.2),可在 M - $\lg R$ 坐标系之间给出等烈度区图1.4.1。实际上,它是烈度衰减规律的另一表达形式,有助于了解不同震级 M 和震中距 R 对烈度 I 的衰减的影响。

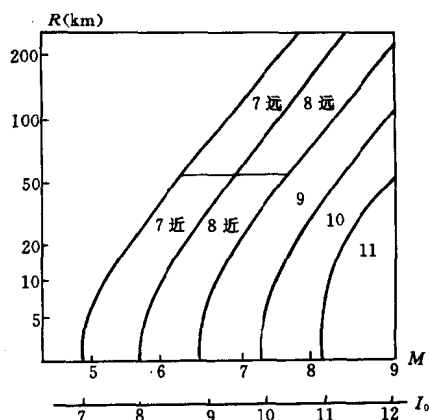


图 1.4.1 等烈度区及近震远震划分

§ 1.5 建筑分类与建筑设防标准

一、建筑重要性分类

在进行建筑结构设计时,应根据建筑的重要性不同,采用不同的抗震设防标准。《建筑抗

震设计规范 (GBJ11—89)》将建筑按其重要程度不同,分为四类:

甲类建筑——特殊要求的建筑,若遇地震破坏导致严重后果(如放射性物质的污染、剧毒气体的扩散和爆炸等)和经济上重大损失的建筑(如大型水、核电站);政治上有特殊要求的建筑或其它特别重要的建筑等。

乙类建筑——国家重点抗震城市的生命线工程的建筑(如消防、供水、供电、供煤气、急救等)或其它重要建筑。

丙类建筑——甲、乙、丁类以外的建筑。(如一般工业与民用建筑,公共建筑、住宅、旅馆、厂房等)。

丁类建筑——次要建筑。若遇地震破坏不易造成人员伤亡和较大经济损失的建筑(如仓库、人员较少的辅助性建筑)。

二、抗震设防标准

抗震设防是对建筑结构进行抗震设计,包括地震作用、抗震承载力计算和采取抗震措施以达到抗震的效果。

抗震设防标准的依据是设防烈度。在一般情况下采用基本烈度。

各类建筑抗震应符合下列要求:

(1) 甲类建筑的地震作用,按专门研究的地震动参数计算;其它各类建筑的地震作用,应按本地区的设防烈度计算,但设防烈度为6度时,除《规范》有具体规定外,可不进行抗震作用计算。

(2) 甲类建筑应采取特殊的抗震措施;乙类建筑除《规范》有具体规定外,可按本地区设防烈度提高一度采取抗震措施,设防烈度为9度时,可适当提高;丙类建筑应按本地区设防烈度采取抗震措施;丁类建筑可按本地区设防烈度低一度采取抗震措施,设防烈度为6度时可不降低。

三、地震设防目标“小震”和“大震”

(一) 抗震设防目标

近几年来,不少国家抗震设计规范的抗震设防目标都采取了新的设计思想。总的趋势是:在建筑使用寿命期间,对不同强度和频度的地震,要求建筑物具有不同的抵抗能力。即对一般较小地震,其发生的可能性大,要求遭遇到这种多遇地震时,结构不受损坏。这在技术上和经济上都可以做到;而对于罕遇的强烈地震,由于发生的可能性小,当遭遇到这种强烈地震时,要求做到结构完全不损坏,这在经济上不合算。较为合理的做法是,应允许损坏,但在任何情况下,建筑物不致于倒塌。

根据我国的具体情况,紧跟国际发展趋势,《规范》提出“三水准”的抗震设防目标;

第一水准:当遭受到多遇的低于本地区设防烈度的地震(简称“小震”)影响时,建筑一般应不受损坏或不需修理仍能继续使用。

第二水准:当遭受到本地区设防烈度影响时,建筑可能有一定的损坏,经一般修理或不经修理仍能继续使用。

第三水准:当遭受到高于本地区设防烈度的罕遇地震(简称“大震”)时,建筑物不致倒塌或发生危及生命的严重破坏。

“三水准”的抗震设防目标概括起来为:“小震不坏,大震不倒”。

(二) 小震和大震

按“三水准”抗震设防时,如何定义小震和大震,以及在各基本烈度区小震和大震的强

烈如何取值，这是首先遇到的问题。

根据地震危险性分析，一般认为我国烈度的概率密度函数符合极值 II 型分布 (图 1.5.1)

$$f_I(I) = \frac{k(\omega - I)^{k-1}}{(\omega - \epsilon)^k} \quad (1.5.1)$$

其分布函数

$$F_I(I) = e^{-\left(\frac{\omega-I}{\omega-\epsilon}\right)^k} \quad (1.5.2)$$

式中 ω ——地震烈度上限值，取 $\omega=12$ ；

ϵ ——众值烈度，即烈度概率密度曲线

上所对应的烈度，由各地震区在设计基准期内统计而定。如北京地区， $\epsilon=6.19$ ；

I ——地震烈度；

e ——无理数， $e=2.718$ ；

k ——形状参数。

式 (1.5.2) 中参数 ω 和 ϵ 有明确意义。现仅讨论参数 k 的确定方法。

因不少国家以 50 年内超越概率为 10% 的地震强度作为设计标准，为简化计算，可统一按这个概率水平来确定形状参数 k 。

以北京地区为例，说明确定形状参数 k 的方法：

已知北京地区 $\epsilon=6.19$ 度，在 50 年内超越概率为 10% 的烈度 $I=7.82$ 度，而 $\omega=12$ 度，这时 $F_I(I) = 0.90$ 。将上列数据代入式 (1.5.2)，得 $k=6.834$ 。

从概率意义上讲，小震应是发生频率度最大的地震。即概率密度分布曲线上的峰值所对应的烈度 (众值烈度)。因此，采用众值烈度作为小震烈度是适宜的。

不超越众值烈度的概率，可由式 (1.5.2) 计算：

$$F_I(I) = e^{-1} = 0.368 = 36.8\%$$

而超越概率

$$1 - F_I(I) = 1 - 0.368 = 0.632 = 63.2\%$$

基本烈度是抗震设防的依据。因此，小震和大震烈度应与基本烈度相联系从中找出其关系。

根据我国有关单位对华北、西南、西北 45 个城镇的地震烈度概率分析，基本烈度大体为在设计基准期内超越概率为 10% 的地震烈度，并计算出这 45 个城镇在设计基准期内超越概率为 10% 的地震烈度与众值烈度的平均差值为 1.55 度。可以认为，基本烈度与众值烈度差的平均值为 1.55 度。如，对于基本烈度为 8 度的地区，其众值烈度，即小震烈度可取 6.45 度。

地震的发生无论在时间、地点和强度方面都有很大的随机性、强烈地震作用给人们生命财产将造成极其严重的损失。对于确定在设计基准期内防止建筑物倒塌的大震作用，从概率上讲应为小概率事件，在设计基准期内，相应大震烈度的超越概率应小于 5%。

《规范》取 2%~3% 的超概率作为大震烈度的概率水准，由式 (1.5.2) 可得，相应于基本烈度为 6、7、8、9 度的大震烈度分别约为 7 度强，8 度，9 度弱和 9 度强。即大震烈度比基本烈度高一度左右。

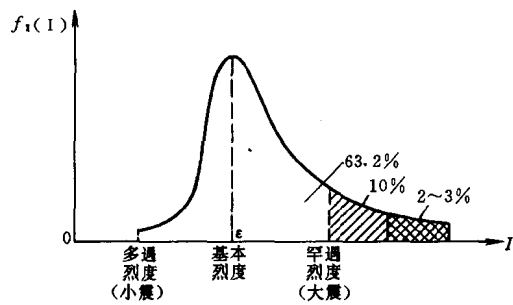


图 1.5.1 烈度概率密度函数

第二章 结构动力学基础

§ 2.1 基本概念和方法

一、荷载

任何一个结构在荷载作用下都要引起变形和内力。荷载分为永久荷载、可变荷载和偶然荷载。永久荷载即恒荷载。凡是大小、方向和位置不随时间变化，或变化非常缓慢的荷载，称为恒载（通常称为静力荷载）。它不会使结构产生显著的运动状态的改变。即，在恒载作用下，结构处于相对静止的平衡状态。计算平衡状态下结构内力和变形的问题叫做静力计算。

凡是随时间迅速变化的荷载称为可变荷载（或称为动力荷载）。在结构动力计算中常见的动力荷载有以下几种：

1. 惯性力荷载：随着机器的运转不均衡质量将产生随着时间不断变化的惯性力，这种惯性力形成对结构的动力荷载称为惯性力荷载。

2. 波浪荷载：波浪对水利工程、港口工程和海洋工程中各种建筑物的脉动压力，称为波浪荷载。

3. 地震荷载：地震时，地面的剧烈运动对结构物的影响称为地震荷载 [新规范称地震作用 (GBJ—89)]。

地震作用与一般荷载不同，它不仅取决于地震烈度大小，而且与建筑物的动力特性（结构的自振周期，阻尼）有密切关系，而一般荷载与结构的动力特性无关，可以独立的确定。如，屋面的雪荷载只与当地的气候条件有关；楼面的使用荷载只取决于房间的用途等等。因此确定地震作用比确定一般荷载要复杂得多。目前，我国和其他许多国家的抗震设计规范都采用反应谱理论确定地震作用。

动力荷载也叫干扰力，它迫使结构产生变形，此时结构的位移和内力都在随时间变化着，叫做动位移和动内力。计算动力荷载作用下的结构的动位移和动内力的问题，称为动力计算（或动力分析）。

和静力计算相比，结构动力计算有以下两个特点：

1. 在静力计算中，荷载引起结构上各个部位的位移和内力虽不相同，但它们都不随时间变化的。但在可变荷载作用下，结构的位移和内力都是随时间变化的。不仅各个部位的位移和内力不同，而且结构上同一部位的位移和内力在不同时刻也不同。可见，动位移和动内力既是位置坐标函数又是时间的函数。研究结构的动位移和动内力的变化规律及其量值的计算方法是结构动力计算的主要任务。

2. 静力计算中，结构的位移和内力主要依赖于结构的弹性。但在动力问题中，一旦结构产生了位移，偏离了它的平衡位置，即使没有外力干扰，但由于结构本身具有弹性，此时弹性内力便企图使它恢复到平衡位置上去。当结构回到平衡位置时，具有一定的速度。由于结构本身具有惯性，则又冲到平衡位置的另一边，产生了相反方向的位移，于是弹性内力又将使结构回到它的平衡位置上去。在动荷载（可变荷载）作用下，结构将发生以平衡位置为中心的往复，周而复始的周期运动，称为结构振动。若没有弹性，结构偏离其平衡位置后，不

会有弹性力促使它返回平衡位置。若结构没有质量则不具备惯性，那么回到平衡后没有弹性恢复力，便不能再运动下去，因而不能发生振动现象。可见，结构本身的弹性和惯性是产生振动的根据，是内因，而外力的干扰则是产生振动的条件，是外因。因此，工程结构中的种种振动现象，都是通过结构本身的弹性与惯性表现出来的运动形式。在振动中，结构的质量具有不容忽视的加速度，对结构的位移和内力具有重要影响。这种影响通过结构的动力性能表现出来，称为动力反应，因此，研究结构的动力性能是结构动力学的主要任务。

偶然荷载，是一种特殊荷载。它包括冲击荷载；爆炸力荷载和撞击力荷载等。其特点是：在极其短促时间间隔内骤然作用后立即消失的荷载。这种荷载是由各部门依其专业本身特点，按经验采用，并在相应规范中作出规定。目前对偶然荷载尚未总结出比较成熟的确定方法，因此荷载规范《GBJ9—87》仍未对各种偶然荷载给出具体规定。

二、动静法

在解决静力学问题时，需要列出和解算体系的平衡方程式，与此类似，在解决动力问题时，需要列出和解算体系的运动方程，列运动方程的方法较多，但在结构动力学中常用的是所谓“动静法”，它利用静力学中列平衡方程的方法来列体系的运动方程。

惯性力的概念是“动静法”的核心。

1. 惯性力与动静法

任何一个质量为 M 的质点，当它受到不平衡力系作用时，必然发生显著的状态改变，即具有加速度。质点的惯性，表现出一种反抗改变其运动状态的效应，我们把这种惯性效应形象地用力表示，叫做该质点的惯性力，用符号 P_1 表示质点的惯性力。

惯性力的大小等于质点的质量 M 和质点加速度 a 的乘积与加速度 a 的方向相反，即 $P_1 = -Ma$ 。负号“—”表示惯性力 P_1 与 a 二者始终反向。质点的惯性力不是实际作用在质点本身上的力。如某建筑物（以 AB 杆表示）的顶上有一个集中质量 M （如图 2.1.1a 示），地震时地面产生水平移动 $y_0(t)$ ，此时质量 M 的绝对位移为 $y(t)$ ，绝对加速度为 $\ddot{y}(t)$ ，质量的惯性力为 $P_1 = -M\ddot{y}(t)$ 。“—”表示惯性力的实际方向与加速度 $\ddot{y}(t)$ 的方向相反，此时加速度方向指向左方（即与座标 y 的方向相反）是负值。则质量 M 的惯性力是正值，其方向与图 2.1.1 上箭头所示方向相同（即指向右方）。当加速度的大小和方向随着时间变化时，则惯性力的大小和方向也相应变化。图 2.1.1 (b) 表示某瞬间质量 M 和 AB 杆上 B 端的受力情况。 W 是质量的重力； N_x 、 N_y 是 AB 杆对 M 的作用力。 M 作用于杆 B 端的力 N'_x 、 N'_y 是 N_x 、 N_y 的反作用力。其中 $N'_x = -M\ddot{y}(t)$ ，即质量 M 的惯性力。所以质量 M 的惯性力不是实际作用在 M 上的力，而是质量 M 作用在结构（ AB ）杆上的力。

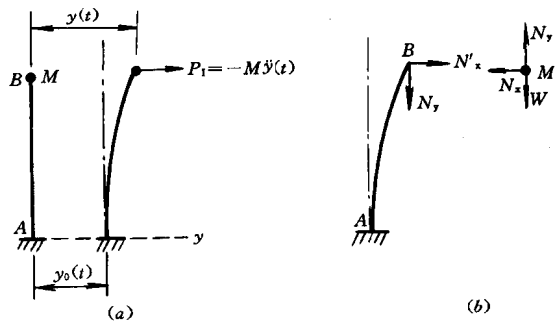


图 2.1.1

设 C 为刚度系数（反力系数），即质点产生单位位移所需之力， M 为质点的质量，质点 M 受到荷载 $P(t)$ 而作微幅振动，对质点 M ， $P(t)$ 是主动力， $cy(t)$ 是支承杆给它的约束反力，在二者作用下质点有加速度 $\ddot{y}(t)$ ，根据牛顿第二定律列运动方程：

$$P(t) - cy(t) = M\ddot{y}(t) \quad (2.1.1)$$