

590725

5512
4060

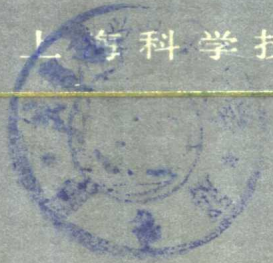
李国豪主编

工程结构抗震动力学

GONGCHENG JIEGOU

KANGZHEN DONGLIXUE

上海科学技术出版社



成都科学技术大学图书馆

基本馆藏

工程结构抗震动力学

李国豪 主编

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书主要论述工程结构在地震地面运动作用下反应的分析方法。全书共分十章。第一章介绍工程结构抗震动力学的概貌及结构地震振动分析方法的轮廓。第二章简要介绍地震成因及特性,地震波理论及其在抗震设计中的应用。第三、四章介绍有限元法分析线性结构固有振动的原理及确定性地震反应分析。第五、六、七章论述地基基础、房屋、桥梁等结构地震振动分析,地基液化以及地基与上部结构的共同工作。第八、九章介绍概率论基础及概率性地震反应分析。最后一章论述房屋结构非线性地震振动分析。

本书可供从事抗震工程的设计、研究人员参考,也可作为高等院校土建专业研究生的教学参考书。

本书由同济大学李国豪主编,并由李国豪编写第一、八章,徐植信编写第二、九章,俞载道编写第三、四章,郑大同编写第五章,朱伯龙编写第六、十章,项海帆编写第七章。

工程结构抗震动力学

李国豪 主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海新华印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 10.25 插页 4 字数 252,000

1980年2月第1版 1980年2月第1次印刷

印数 1-7,000

书号: 15119·2038 定价: 2.00 元

前 言

我国是多地震的国家之一,近年来曾多次发生过强烈地震,尤其是一九七六年七月唐山丰南地区大地震造成的人民生命财产损失最为严重;而我国的许多重要城市、厂矿和工程又地处地震区,因此,如何做好地震预测、预报和工程抗震,以减少或避免地震对人民生命财产的损失,是我国社会主义建设中十分重要的课题之一。

有鉴于此,我们结合自己的专业着手对工程抗震原理和方法的学习与探讨,同时也参加工程抗震的生产实践与科学试验,并开设有关讲座,企图在这方面为国家社会主义建设尽一份力量。在工作过程中,我们深感亟需在我国普及与提高工程抗震的科学技术知识。由于工程抗震涉及的学科范围广泛和问题复杂,在这方面,虽然文献浩瀚,厚著累累,但是缺乏既结合工程对象而又系统简要地阐述现代工程抗震原理与实用分析方法的专著,因此,一九七七年夏笔者作桥梁抗震分析讲座时,不得不仓促草写一个简要的讲稿。事后各方面纷纷要求复印,这是对笔者的鼓励和鞭策。由于个人的时间精力和业务水平都有限,于是组织同济大学结构理论研究所的几位有关同事,分工执笔重新编写。这就是本书的由来。

本书的主要工程对象是房屋与桥梁,取材力求少而精,兼顾原理与实用,并适当介绍一些文献,以供进一步的深入阅读。由于工程抗震这门学科的复杂性,许多重要问题,如地震地面运动和结构物破坏过程等,尚待研究解决,故本书只能反映目前这门学科的发展水平,还不可能完全满足工程抗震生产实践的要求,而这正是今

后长期科学研究的任务。由于我们从事工程抗震工作的时间尚短,业务水平有限,相信书中对于各个问题的阐述必有欠缺甚或错误之处,而笔者的主编工作更难免有疏忽不周的地方,敬希各方面的同行和读者批评指正。

李国豪 1979年5月

目 录

第1章 工程结构抗震动力学概貌	1
第一节 结构地震振动方程的形式	1
第二节 线性振动和非线性振动	3
第三节 结构物振动特征	4
第四节 结构地震振动分析方法的轮廓	6
第2章 地震动概述	9
第一节 地震的一些特性	9
第二节 弹性波基本概念	17
第三节 地震面波特性	20
第四节 覆盖层地震运动分析	28
第3章 有限元法的固有振动分析	36
第一节 有限元法分析结构固有振动的原理	36
第二节 固有振型特性	44
第三节 受弯平面梁单元的挠曲刚度矩阵	45
第四节 受弯平面梁单元的质量矩阵	48
第五节 总体矩阵和边界条件处理 单元矩阵的转换	51
第六节 空间梁单元的刚度矩阵	58
第七节 空间梁单元的质量矩阵	60
第4章 确定性的结构线性地震反应分析	64
第一节 一般多自由度体系振动方程的建立	64
第二节 关于质量矩阵的处理	66
第三节 关于阻尼矩阵的处理	68
第四节 地面运动的激振和地震力质量矩阵	73
第五节 线性结构的地震振动方程处理 振型分析法	76
第六节 线性强迫振动的基本特征	79
第七节 地震反应谱及按反应谱计算地震力的原理	90

第八节	线性结构体系地震反应的计算方法	96
第九节	结构地震反应计算 振型组(遇)合	112
第十节	对点多相位地震输入的结构反应计算方法	114
第5章	地基基础抗震分析	116
第一节	地基的震害概述	116
第二节	地基地震反应分析方法	118
第三节	地基的非线性性质	133
第四节	地基的液化	143
第五节	桥墩台振动中土和水的作用	158
第六节	桩与土的共同作用	171
第6章	房屋结构线性地震振动分析	190
第一节	钢筋混凝土多层框架的线性地震振动分析	191
第二节	钢筋混凝土单层工业厂房的线性地震振动分析	195
第三节	砖混结构房屋的线性地震振动分析	204
第四节	高层建筑结构的线性地震振动分析	207
第五节	上部结构与地基的共同作用	209
第7章	桥梁地震振动分析	216
第一节	桥梁的主要地震振动及其力学图式	216
第二节	梁式桥的地震振动方程	225
第三节	拱桥的地震振动方程及简化分析方法	232
第四节	长、大桥梁的地震反应分析问题	242
第五节	梁式桥及单孔拱桥的计算实例	244
第8章	随机过程概要	254
第一节	随机过程	254
第二节	概率分布一般性质	256
第三节	常用的两种概率分布特征	258
第四节	富里埃变换	260
第五节	功率谱密度函数	262
第六节	随机过程的联合特征	264
第9章	概率性的结构线性地震反应分析	268
第一节	单自由度体系线性随机地震反应	268
第二节	地震地面运动输入	280

第三节	结构物的随机地震反应分析	284
第 10 章	房屋结构非线性地震振动分析	298
第一节	结构构件的非线性性质	299
第二节	钢筋混凝土多层框架的非线性地震振动分析	307
第三节	钢筋混凝土单层工业厂房的非线性地震振动分析	314
第四节	砖混结构房屋的非线性地震振动分析	316
第五节	概率性的结构非线性地震振动分析	319

第 1 章

工程结构抗震动力学概貌

为了便于由全局到局部了解本书的内容, 本章试图简要介绍一下工程结构抗震动力学的概貌, 而在以后各章再分别阐述它的各部分细节。本章第一节至第三节, 结合地震介绍结构振动的基本原理和概念, 第四节则粗略绘出结构地震振动分析方法的轮廓。

第一节 结构地震振动方程的形式

以图 1-1 所示的烟囱为例来作说明。设地震时有水平地面运动 $u_g(t)$, 它使烟囱产生挠曲振动 $u(z, t)$, 即沿烟囱截面高度 z 和随时间 t 变化的挠度 u 。

振动时有三种力作用于上述烟囱的微元 dz (暂且忽略轴向力的作用):

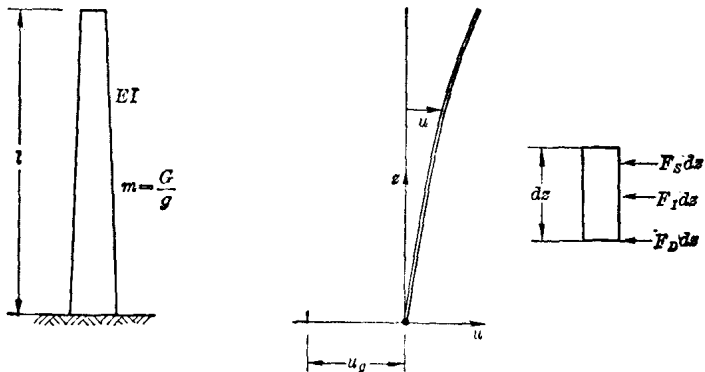


图 1-1 烟囱的地震水平挠曲振动示意

- (1) 挠曲变形产生的弹性力 $= -[EIu'']'' = F_R$;
- (2) 惯性力 $= -(\text{质量乘加速度}) = -m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) = F_I$;
- (3) 阻尼力 $\approx -(\text{阻尼系数乘变形速度}) = -C\dot{u} = F_D$ 。

式中 E 是弹性模量; I 是截面抗弯惯性矩; m 是单位长度的质量 $= G/g$, $g = \text{重力加速度} = 981 \text{ 厘米/秒}^2 = 981 \text{ 伽}$ 。用撇“'”和点“.”分别表示对坐标 z 和对时间 t 的微商。负号表示弹性力、惯性力、阻尼力分别与挠度 u 及其加速度 $\ddot{u} + \ddot{u}_g$ 和速度 $\dot{u}$ 的方向相反。

按照达朗贝(D'Alembert)原理, 这三种力应保持平衡, 即

$$F_R + F_D + F_I = 0$$

由此得出

$$[EIu'']'' + C\dot{u} + m\ddot{u} = -m\ddot{u}_g \quad (1-1)$$

上式右边项表示地震时地面加速度 $\ddot{u}_g(t)$ 引起结构振动的这个外因。图 1-2 表示一个实际的地震加速度时程曲线。

如果引起振动的外因是其他动力 $p(z, t)$, 则上式右边项为 $p(z, t)$ 。

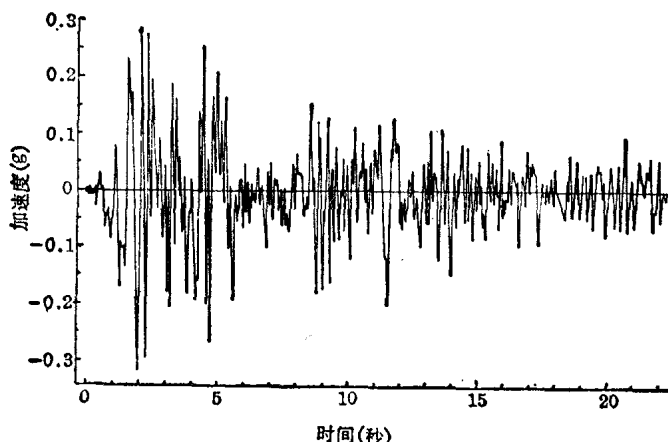


图 1-2 埃尔森特罗地震水平加速度(北-南, 1940)时程曲线

第二节 线性振动和非线性振动

图 1-3 略示地震时例如图 1-1 的烟囱顶端位移 $u(t)$ 可能出现的时程曲线。每次振动的最大位移 $\max|u|$ 叫做振幅, 往返振动一次的时间叫做振动周期。如果结构物不遭受破坏, 地震时振幅总是由小到大, 然后又逐渐衰减而至于零。

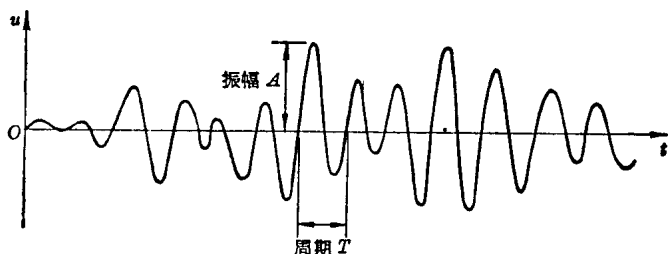


图 1-3 地震时挠曲振动时程曲线示意

在位移振幅微小的情形下, 结构(包括共同作用的地基)的弹性模量基本不变, 混凝土材料不出现裂缝, 因而结构的所有截面刚度(例如 EI) 保持不变, 阻尼系数 C 也不变。这种小振幅振动叫做线性振动。振幅的大小与地震强度成直线比例, 如式(1-1)线性微分方程所显示。对线性振动适用迭加原理。因此, 为了适应计算简便的要求, 可以把地震引起的振动分解成为一个或几个主要振型分量来分别处理, 然后迭加起来。

对于预期的强地震, 在工程结构抗震设计中, 为了经济的目的, 容许在结构局部出现不大影响使用和易于修复的塑性变形、裂缝或损伤; 为了安全的目的, 甚至力求使建筑物即令遭受严重损坏而不致倒塌, 以减少生命财产的损失。也就是说, 容许出现大振幅位移的弹塑性非线性振动。在这种情况下, 地基和结构的刚度甚至结构体系随着振幅在振动过程中的增减而变化, 迭加原理也失效, 因此给振动分析带来很大困难。一般采用的解决办法是, 把振

• • •

动过程分成一连串短的时间间隔 Δt , 在每个 Δt 时间内当作线性振动来处理。这时振型分析法就失去了它简化计算的优点。

第三节 结构物振动特征

结构受到动力干扰产生振动之后, 不会立即静止下来。例如图 1-1 所示的烟囱, 如果偶然被撞了一下, 就会振动一段时间, 比如几秒钟。这个振动, 特别是在后面的阶段, 叫做固有振动或自由振动, 因为这时并无外加的动力作用, 即式(1-1)的右边项为零, 它叫做齐次方程。所以, 固有振动可以从解这种齐次方程来求出。

小振幅的固有振动是线性振动分析的基础, 它可以表达如下:

$$u(z, t) = u(z)f(t) \quad (1-2)$$

其中 $f(t) = e^{-\zeta\omega_d t} [C_1 \cos \omega_d t + C_2 \sin \omega_d t]$

式中 ζ ——阻尼比, $\zeta = \frac{C}{C_{cr}} = \frac{C}{2m\omega}$;

C_{cr} ——临界阻尼;

ω_d ——有阻尼自振圆频率, $\omega_d = \omega \sqrt{1 - \zeta^2} = 2\pi f_d$;

f_d ——有阻尼自振频率(赫兹), $\frac{1}{f_d} = \frac{2\pi}{\omega_d} = T_d$, T_d 叫做有阻尼自振周期(秒);

A —— $\sqrt{C_1^2 + C_2^2} = A$, 叫做振幅。

图 1-1 所示的烟囱有许多自振频率。例如在常截面的情形下, 它的无阻尼自振圆频率 ω 为(底脚当作完全箱固)

$$\omega_n = \alpha_n^2 \frac{1}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (1-3)$$

其中

n	1	2	3 ...
α_n	1.875	4.694	7.855...

$n=1$ 的 ω_1 最小, 叫做基频。

式(1-2)中的 $u(z)$ 显示自振挠曲线的形状, 叫做振型。各个自振频率所属的振型是不相同的。图 1-4 略示 $n=1, 2, 3$ 的振型。

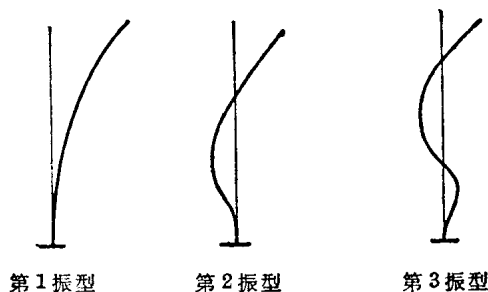


图 1-4 烟囱的水平挠曲固有振型

式(1-2)中的 $f(t)$ 表示固有振动时程曲线, 例如顶端位移 u 的时程曲线, 见图 1-5。图中虚线表明振幅按照 $Ae^{-\zeta\omega t}$ 逐渐衰减。

ω 越大, 衰减越快, 所以高频的自振比低频的衰减得快些。其次, 阻尼比 ζ 越大, 衰减越快。当 $\zeta=1$ 时, 即阻尼系数 C 等于临界阻尼 C_{cr} 时, 有阻尼的自振圆频率 $\omega_d=0$ 。如式(1-2)所示, 在这种情形下不出现自由振动了。但实

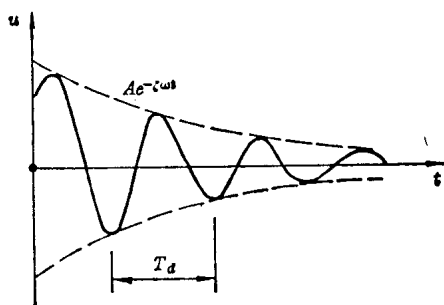


图 1-5 振幅衰减示意

际上工程结构的阻尼比 $\zeta=0.01\sim 0.05$ 左右, 所以总是出现自由振动, 而且阻尼对结构自振频率的影响微不足道, 即 $\omega_d\approx\omega$, 以后就将取 ω 作为 ω_d , 取 T 作为 T_d (T 为无阻尼自振周期), 但是地基的阻尼比 ζ 可能比上述的要大许多倍。

对于大振幅的情形, 严格说不存在如上所述的固定的自振频率和振型, 因为在自振过程中结构的刚度甚至结构体系随着振幅

的增减而不断变化着。

结构物的自振周期和地震波的卓越(主要)周期越接近, 它的振型接受到地震力的影响(振型参与系数)越大, 它的阻尼比越小, 则结构物所受的震害越大。分析和认识结构物的自振周期、振型和阻尼比这些振动特征的重要意义就在于此。

第四节 结构地震振动分析方法的轮廓

工程结构物的地震振动(常称地震反应)的科学分析须以地震的地面运动为依据, 已在第一节作了简略说明, 见式(1-1)和图1-2。一个十分关键的问题是: 对地震区新建工程作抗震设计计算应当取怎样的强震地面运动作为依据? 可惜由于实际强震地面运动记录资料的不足, 这个关键问题还未能解决, 因此它仍然是工程结构抗震设计计算中最薄弱的环节。目前的解决办法是, 根据该地区地质构造情况、地震历史资料、工地的场地情况, 并参考一些地面运动的记录来确定作为设计依据的地震参数。由于一方面地震动过程本身带有随机过程的性质, 另一方面设计计算中用的地震参数具有不确定性, 所以发展了两种地震反应分析方法。一种是以地震运动为确定过程的确定性地震反应分析, 另一种是以地震运动为随机过程的概率性地震反应分析。

工程结构地震反应分析的另一特点和困难在于地震时是地基将地震动传递于上部建筑, 前者首先振动, 然后二者共同振动, 相互影响。地基破坏(例如液化造成的震害)以及坚实地基和松软地基造成的建筑物震害轻重不同的大量事实表明, 必须分析地基的地震反应, 以及地基和上部建筑在地震反应中的共同作用和相互影响。可惜由于问题的复杂性, 各方面的研究结果达到实用和成熟程度的尚不多。

图1-6和图1-7分别略示线性和非线性的结构地震反应分析

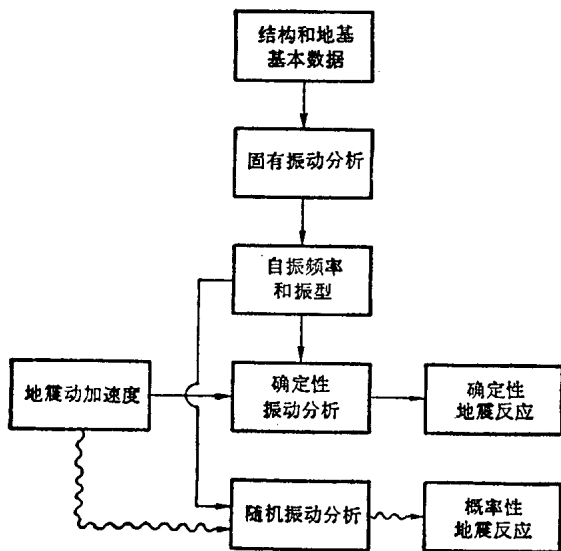


图 1-6 线性地震反应分析

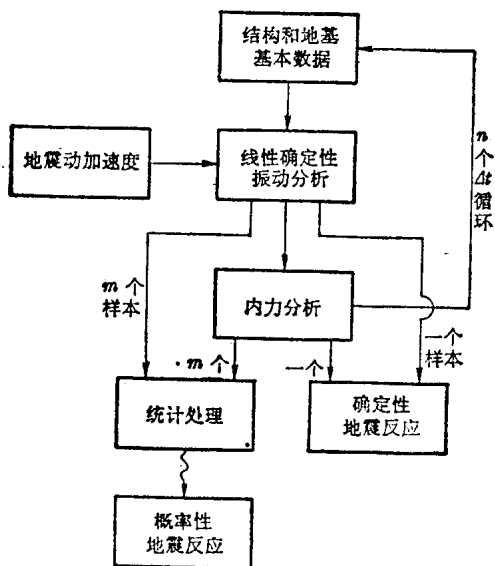


图 1-7 非线性地震反应分析

的途径。线性地震反应通常采用振型分析法，即分析一个或几个主要振型的地震反应，然后加以组合。每个振型等于一个自由度体系，计算比较简便。非线性地震反应分析虽然在每个时间间隔 Δt 当作线性体系来处理，但是采用振型分析法并不比直接解振动联立方程省事，所以一般采用后法。在非线性的概率性地震反应分析中，不是取一个而是取 m 个地震波输入分别作确定性反应分析，然后对 m 个结果作统计处理，从而得出概率性地震反应。

参 考 文 献

- [1] 《地震工程概论》编写组：地震工程概论，1977。
- [2] 中国科学院工程力学研究所：地震工程研究报告集，第一集，1962，第二集，1965。
- [3] 武藤清：构造物の动的解析(耐震设计シリーズ4)，1976。
- [4] 星谷胜：确率论手法による振動解析，1974。(常宝琦译，王松樵校：随机振动分析，1977)
- [5] 日本土木学会：地震応答解析と实例，1973。
- [6] R. W. Clough and J. Penzien: Dynamics of Structures, 1975.
- [7] N. M. Newmark and E. Rosenblueth: Fundamentals of Earthquake Engineering, 1971.
- [8] R. L. Wiegel (ed.): Earthquake Engineering, 1970. (中国科学院工程力学研究所译：地震工程学，1978)

第 2 章

地震动概述

第一节 地震的一些特性

2.1.1 地震的种类和成因

地震是一种自然现象。全世界每年发生的地震约达五百万次，绝大多数地震由于发生在地球深处或它所释放的能量小而不被人们察觉。人们能够察觉到的地震叫有感地震，约占地震总数的百分之一左右。造成灾害的强烈地震则为数更少，平均每年发生十几次。强烈地震发生时，在地震区地面剧烈摇晃、颠簸；地面振动在很大范围内都能感到，全世界都能用仪器测到。在震中附近，除了造成建筑物破坏外，还会出现地面变形，隆起、下陷和水平位移等；还会造成断裂，在断裂带的两侧地层中可见到上下错动和水平位移。在这地区的铁轨会弯曲，管道会弯曲或断裂。在地下水位较高、覆土较薄的砂土地区，还常出现涌砂冒水现象。在山区往往引起大规模的山崩、滑坡和泥石流等现象，破坏道路，堵塞河谷，甚至毁坏村庄。在海底发生地震时，还会引起海啸。这些现象都会给人类造成灾害。

为了说明地震发生的原因和一些特性，我们简单地介绍一下地球的构造。

地球是一个近于球体的椭球体。平均半径为 6370 公里，赤道半径为 6378 公里，两极半径为 6357 公里。从物质成分和构造特征来划分，地球可分为三大部分：

• • •