

地震工程学

EARTHQUAKE ENGINEERING

(第二版)

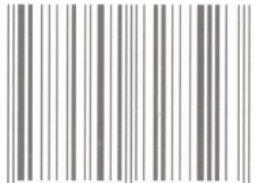
胡聿贤 著



地震出版社

责任编辑 / 蒋乃芳 李 玲
封面设计 / 邢秀芬

ISBN 7-5028-2852-4



9 787502 828523 >

ISBN 7-5028-2852-4/P · 1264
(3271) 定价: 128.00 元

地震工程学

(第二版)

胡聿贤 著

地震出版社

2006

图书在版编目 (CIP) 数据

地震工程学/胡聿贤著. —2 版. —北京: 地震出版社, 2006. 1
ISBN 7-5028-2852-4

I. 地... II. 胡... III. 地震工程—理论 IV. P315.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 005786 号

地震版 XT200400051

地震工程学 (第二版)

胡聿贤 著

责任编辑: 蒋乃芳 李玲

责任校对: 王花芝

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

版 (印) 次: 2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 941 千字

印张: 36.75

印数: 0001~2000

书号: ISBN 7-5028-2852-4/P·1264 (3271)

定价: 128.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

再版前言

地震工程是一门专业性较强的学科。二十多年前，我在中国地震局工程力学研究所为地震工程专业的研究生讲课，在此基础上，1988年出版了本书的第一版。蒙一些有关大专院校将该书用作这一专业的参考教材，目前，此书已脱销。因相似的专著不多，故出版此修订本。

二十多年来，这一领域的主要发展有二。第一是消能与控制理论的应用。国内外都在研究与工程两方面取得了可喜的成绩，并制定了相应的抗震设计规范。为此，本书再版增补了第十一章，包括被动消能与主动控制两部分，分别请同事好友周锡元与张敏政撰写，合为一章。第二是提出了考虑破坏后果的抗震设计原则（consequence-based design criterion），强调要考虑所设计工程的重要性，包括其破坏可能引起的直接和间接损失（Hu, 2003）。几年后，美国中部 MAE（地震工程中心）Illinois 大学的 Abrams 教授大力开展了这一研究，相信他们会取得好结果。

作者

2005年9月于北京

前 言

本书以地震工程或结构抗震专业研究生和从事此专业的教学、科研、设计人员为对象，全面阐述工程地震学和结构抗震两方面的内容，特别重视两者的联系。

作者从 1982 年起在中国科学院工程力学研究所（后改属国家地震局）对地震工程和结构动力学专业研究生讲授地震工程学，1983 年在南京力学学会和地震学会合办的短期讨论班讲过一次，本书以此教材为基础修改而成。

作者年轻时学习土木工程系结构专业，在工程力学研究所工作近三十年，主要从事工程地震与结构抗震研究。二十余年来，深感国内外地震工程界存在着一个严重缺陷，即地震学与结构抗震两者之间缺乏联系。负责地震活动性与地震区划工作的大多是地质、地震部门，从事这一工作的地质、地震学家以为结构抗震对地震的要求就是地震烈度；负责结构抗震工作的是建设部门，从事这一工作的结构工程师不大了解地震活动性和地震区划。国内外的共同之处是，地震学家们无法考虑工程师们不断提高的要求，只提供自己熟悉的地震烈度；工程师们不满足于烈度，只好按自己了解的地震活动性去估计地震动物理量的变化。结果是两方面相互不能配合好，地震工程学的发展受到阻碍。

目前国际上关于地震工程学的书籍至少有几十本，绝大部分以结构抗震为主要目标，只对工程地震作简单介绍；少数专著则专门介绍工程地震，虽亦涉及结构抗震，但不深入，如日本的金井清与苏联的默德韦杰夫的书；另有少数专著涉及面广，工程地震与结构抗震两部分都有详细论述，但属多人合写，未能互相渗透、合为一体，如金井清、田治见宏、大沢胖、小林启美四人合著的《地震工程学》，或威格尔主编、十五人合写的《地震工程》。在现有书籍中，纽马克与罗森布卢思的《地震工程原理》是一本好书，惜出版于十余年前，需要补充新资料。

为此，作者不揣冒昧，谨以本书补此空白，若能为沟通工程地震与结构抗震两方面尽一点力量，实属万幸。

本书主要由工程地震和结构抗震两部分组成，共分四篇十四章。第一篇是概论与基础。第一章概论是作者关于地震工程学范畴的个人见解。结构动力学是本书的主要基础知识，属地震工程专业研究生必修课，另有讲授，国内又已有不少较好书籍，故本书从略，而只介绍地震学基础和随机振动必备知识。第二篇是工程地震，重点是第六章地震动；第四章关于地震烈度部分是结合我国具体需要写的。这一篇的主要目的是想说明，在结构抗震中，现在是从烈度过渡到直接采用地震动的时候了。第三篇是结构抗震理论，重点和基础是第七章结构地震反应分析，由于国内已有的抗震专著对此均有详细论述，故本书仅就必要的基础、重要的概念和最新的进展作详细介绍。本篇力图贯彻作者的一个基本信念，即地震工程学的基础是实际震害经验、强震观测资料 and 现场与室内试验结果，因此，本书将结构物实际地震反应和试验扩大为独立的第九、十两章。第四篇是地震工程理论的应用，包括地震危险性分析与区划和抗震设计。

总之，作者力图贯彻全书的中心思想是在工程地震与结构抗震的实际工程应用中，将两部分融汇在一起，使地震工程学得以迅速而健康的发展。除此基本目的之外，本书着重介绍

国际新进展，而不拘泥于定论，使读者不但能了解本学科的现有定论，又能了解当前存在的主要问题及不同意见的论据。这一特点多见于论文而少见于书籍，请读者注意，勿为一家之言或作者偏见所左右。古语说，尽信书不如无书，可能有些过分，但在科研中实属必要。本书主要读者对象已有独立思考能力和很多经验，当不致造成恶果。将这些散见于期刊中的文献，系统地加以分析介绍，若能使读者迅速了解国际新情况，作者就满足了。

个别图中仍有英制单位，故在卷首附有单位换算表。另外，作者深感索引的方便作用，故在书末附有中英人名、地名、名词对照表且兼作索引之用。

由于作者学识有限，偏见在所难免，疏忽谬误之处，敬希读者不吝指正。

最后，感谢对本书出版作出各种帮助的同志，特别是作技术校对的王孝信、王前信同志，及博士研究生张敏政。

单位换算表

1 英寸=2.54 厘米

1 英尺=0.3048 米

1 英里=1.609 公里

1 磅=0.4536 公斤

1 磅力·英尺=1.356 牛顿·米

1 磅力/英寸²=0.689 牛顿/厘米²

1 磅力/英尺²=47.9 牛顿/米²

1 公斤力=9.8 牛顿

1 吨力=9800 牛顿

1 达因=10⁻⁵ 牛顿

1 巴=10⁵ 帕

1 伽=10⁻² 米/秒²

1 公斤力/厘米²=9.8×10⁴ 帕

1 吨力/米²=0.98×10⁴ 帕

常用符号

A	面积；加速度最大值；或地震动其他参数	E	弹性模量
\underline{A}	地震动参数矢量，有时省去下面一横	$E[\]$	期望值；集系平均
A_a	有效峰值加速度	EPA	有效峰加速度
A_v	有效峰值速度相应的加速度	EPV	有效峰速度
A_n	第 n 层的层间剪力分布系数	e	偏心距
a	加速度；常数	e_s	静力偏心距
\underline{a}	初始条件与参数矢量	e_D	偶然偏心系数
a_{\max}	最大加速度	F	外力
B	宽度；结构修复费	F_t	房屋顶部的地震力
b	长度量；常数	F_p	局部地震力
C	结构系数；构造特性系数；常数；函数；荷载效应系数	$F(\omega)$	傅里叶复谱
C_ζ	阻尼构造系数	$F(x)$	随机变量不超过 x 的概率
C_μ	延性构造系数	$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$	概率密度函数； x 的函数
C_i	常数或系数	$f(x A)$	事件 A 出现后， x 出现的概率密度
C_e	偏心修正系数	$f = \frac{\omega}{2\pi}$	工程频率（赫）
C_s	刚度均匀系数	G	剪切模量；静载；常数；恢复力
$C_{es} = C_e C_s$	偏心刚度系数	$G(\omega)$	（单侧）功率谱密度
C_d	结构位移放大系数	g	重力加速度（ $1g=980$ 厘米/秒 ² ）
C_D	顶部附加集中力系数	$g(x)$	x 的函数
$C_V = \sigma/m$	离散系数	H	水平力；高度；房屋总高度；地下深度
C_R	反应修正系数	$H_n = \sum_{j=1}^n h_j$	第 n 层顶高程， n 由下向上计算
C_T	自振周期计算系数	\bar{H}	结构重心高度
C	阻尼系数；常数	$H(i\omega)$	传递函数
C_{cr}	临界阻尼系数	$H\{ \cdot \}$	哈密尔顿函数
COV	变异系数	h	震源深度（公里）；土层厚度（米）；房屋层高（米）；高度
D	断层距（公里）；损坏度；自重荷载；位移最大值；阻尼力；积累疲劳损伤度	h_n	第 n 层层高
d	位移（厘米）；长度量	$h(t)$	脉冲反应函数
d_s	砂层埋深（米）	I	地震烈度；重要性系数；惯性矩；震害指数；液化指数
d_{\max}	最大位移		
d_w	地下水埋深（米）		

I_0	震中烈度; 功率		底层, $n=N$ 为顶层; 钢筋与混凝土弹性模量之比
I	单位矩阵, 对角线为 1, 其他元均为零	$P(x)$	$P(x)=1-F(x)$ 表示随机变量超过 x 的概率
$\text{Im}[]$	量[]的虚部	$P[S]$	事件 S 发生的概率
$i = \sqrt{-1}$		$P[S A]$	在事件 A 出现后, 事件 S 发生的条件概率
i	震害指数; 整变数	PI	塑性指数
J	极惯性矩; 误差目标函数; 倾覆力矩; 折减系数	P_c	粘粒含量 (%)
j	整数变量	p	概率; 配筋率; 外力
j_s	场地变量	$p(x)$	概率密度函数
j_v	竖向分量变量	PSV	准速度反应谱
J^*	泛函	PGA	有效峰值加速度
K	刚度; 侧应力系数; 常数; 反馈增益矩阵	PGV	有效峰值速度
k	刚度; $k=a_{\max}/g$ 震度或地震力系数; 系数	Q	恢复力; 品质因数; 结构反应
k_1	第一次设计用的地震力系数	Q_u	保有水平抗力
k_2	第二次设计用的地震力系数	Q_y	屈服剪力
L	断层破裂长度 (公里); 长度; 外部荷载	Q_{un}	第 n 层层间保有水平抗力
l	长度; 波长	q	等效剪力系数; 振型反应
M	震级; 质量; 弯矩; 力矩	R	震源距 (公里); 能中距; 半径; 结构反应折减系数; 结构抗力、强度或反应容许值
M_1	足以引起场地危险地震动的最小震级	$R_{xy}(t_1, t_2)$	相关函数
M_2	潜在震源区带内断层最大长度对应的最大震级	$R_t = \beta/\beta_{\max}$	反应谱形系数
M_L	地方震级	$\text{Re}[]$	量[]的实部
M_S	面波震级	r	半径; 震源距 (公里); 比值
M_u	震级上限	r_s	刚度比, 层间转角倒数与各层间转角倒数平均值之比
M_N	矩震级	$r_e = e/r_i$	偏心率, 为偏心 e 与回转半径 r_i 之比
M_0	地震矩; 震级下限; 基底变矩	$r(t)$	包线过程
m	质量; 震级; 平均值; 次数; 常指数; 等效弯曲系数	S	谱密度; 结构反应状态; 场地土壤系数; 场地土壤分类
m_b	体波震级	$S(T)$ 或 $S(T, \zeta)$	反应谱, 一般取 $\zeta=0.05$
N	次数; 地震次数; 循环次数; 轴向内力; 房屋总层数; 标贯锤击数	$S_a(T)$	(绝对) 加速度反应谱
N_C	砂土液化临界标贯锤击数	$S_v(T)$	(相对) 速度反应谱
n	次数; 由下向上的楼层数, $n=1$ 为	$S_d(T)$	(相对) 位移反应谱
		s	断层长度 (公里)
		T	周期 (秒); 地震动时段长 (秒);

	结构寿命 (年)	β_w	剪力墙承受的荷载与该层层间总剪力之比
T_0	反应谱拐点周期 (秒)	Γ	伽玛函数
T_d	地震动持时 (秒)	γ	剪切变形; γ_j 为第 j 振型参与系数;
T_g	地震卓越周期		荷载分项安全系数
T_S	场地自振周期 (秒)	Δ	震中距 (公里); 变位; 增量符号
T_j	结构第 j 振型自振周期 (秒)	Δ_y	屈服极限变位
t	时间变量	δ	对数衰减率; 层间变位; 系数
u	相对位移; 位错	ε	轴向变形
V_0	底部剪力, 基底剪力	ε_b	弯曲变形
V	底部剪力; 竖向力; 速度最大值;	$\zeta=C/C_{cr}$	阻尼比; 屈服强度系数
	波速	η	烟囱基底剪力修正系数; 常系数;
V_{e0}	弹性底部剪力		地震波辐射效率
V_n	第 n 层层间剪力	Θ	$\alpha(t)$ 的傅里叶变换
V_{en}	弹性第 n 层层间剪力	θ	角度, 稳定系数; 系数
V_{n2}	第二级设计第 n 层层间剪力	λ	拉梅常数; 波长
$V_{ar}[]$	方差	λ_j	谱矩; 拉格朗日乘子向量
v	质点速度; 波速; 位移	μ	拉梅常数 $\mu=G$; 延性系数 $\mu=\Delta_{max}/\Delta_y$;
v_{max}	最大速度		中心矩
v_P	纵波波速 (公里/秒)	ν	泊松比; 地震年平均发生率
v_S	横波波速 (公里/秒)	ρ	质量密度
v_f	断层破裂速度	σ	应力; 均方差
W	重量; 功; 能量	$\alpha(\bullet)$	最大奇异值
$W_n=\sum_{j=n}^N w_j$	第 n 层及更高层的总重量	$\alpha(\tau)=R(\tau)/R(0)$	相关函数
w	位移	τ	剪应力; 时间变量; 时间差变量;
w_j	第 j 层重量; 权函数		时滞
X, Y, Z	坐标; 位置变量	Φ	振型矩阵
x, y, z	坐标; 变量或函数	ϕ	振型矢量; 任意函数; 相位角; 系
y	反应量		数; 反应谱放大系数; 相位谱
y^0	初始条件矢量	Ψ	荷载组合系数; 反应谱放大系数
Y	函数		$\Psi_\mu=\phi_\mu \phi_e$
Z	地震分区系数	$\omega=2\pi f$	圆频率 (弧度)
$\underline{\alpha}$	参数矢量	ω_0	单自由度自振频率
α	角度; 曲率; 底部 (基底) 剪力系	ω_D	有阻尼自振频率 $\omega_D=\omega\sqrt{1-\zeta^2}$
	数, $\alpha=k\beta(T)$; 系数; 纵波速	ω_j	第 j 振型自振频率; $\omega_1=\lambda_1/\lambda_0$,
α_n	第 n 层剪力系数		$\omega_2=\sqrt{\lambda_2/\lambda_0}$ 为谱参数
β	系数; 角度; 横波速	Ω	频率变量; $\Omega=\omega_2$ 为谱参数
$\beta=\beta(T)=S_d(T)/\alpha_{max}$	加速度 (反应) 放大谱	lg	常用对数

ln 自然对数
 上标或下标:
 b 弯曲
 d 动力
 D 阻尼
 e 弹性; 等效
 E 地震
 f 下标, 破坏
 g 地面; 场地; 土壤; 地震动
 G 静载
 h 水平方向
 i, j, k 整数顺序变量
 l 荷载
 L 活载
 M 震级
 m 最大值
 n 由下向上的楼层号, 顺序号
 P 概率
 s 结构; 场地; 雪载; 静力
 t 总和
 T 上标表示矩阵的转置

u 极限值
 v 竖直方向
 W 风载; 墙
 y 屈服极限; 反应
 μ 延数
 cr 临界值
 $\dot{\bullet} = \frac{\partial}{\partial t}$ 置于变量之顶表示求导数
 $\bar{\bullet}$ 置于变量之顶表示平均
 $\underline{\bullet}$ 置于变量之底表矢量或矩阵, 如 \underline{M}
 \sim 置于变量之顶表示土结相互作用
 0 底部变量; 基本变量; 初始量
 * 上标, 共轭复数
 ' 上标, 另一(变)量
 $\hat{\bullet}$ 置于矢量之顶表示最佳估计; 置于
 矢量之顶表示已知输出
 $|\dots|$ 行列式
 sgn(\bullet) 符号函数
 $\|\bullet\|$ 范数
 $\mathcal{L}\{\bullet\}$ 拉普拉斯变换

目 录

第一篇 概论与基础知识

第一章 概论	(1)
1.1 前言	(1)
1.2 地震工程学研究的内容	(4)
1.3 地震工程学与地震学	(6)
1.4 地震工程学与社会经济的关系	(7)
第二章 地震学基础	(8)
2.1 地球内部构造.....	(8)
2.2 板块构造运动.....	(9)
2.3 板内构造活动与板内地震.....	(9)
2.4 震源机制.....	(13)
2.5 地震活动性.....	(14)
2.6 地震波.....	(16)
2.7 地震的仪器观测与震级.....	(24)
第三章 随机振动基础	(29)
3.1 随机过程的基本概念.....	(29)
3.2 谱参数及其物理意义.....	(38)
3.3 最大值分布.....	(40)
3.4 地震动的随机过程描述.....	(41)

第二篇 工程地震

第四章 震害与地震烈度	(44)
4.1 地震的宏观现象.....	(44)
4.2 地震烈度与地震烈度表.....	(45)
4.3 震害及几次地震实例.....	(48)
4.4 地震烈度的性质及其适用性.....	(50)

4.5	地震烈度分布	(53)
4.6	地震烈度的衰减规律	(56)
4.7	场地条件对地震烈度的影响	(63)
第五章	中国的地震	(67)
5.1	中国的地震区和地震带	(67)
5.2	中国的地震历史	(69)
5.3	中国的地震活动性	(70)
5.4	中国的大地震与震害	(72)
第六章	地震动	(84)
6.1	地震动的量测	(84)
6.2	强地震动特性	(91)
6.3	影响地震动特性的因素	(104)
6.4	地震烈度与地震动	(109)
6.5	地震动的估计	(114)
6.6	人造地震动	(124)

第三篇 结构抗震理论

第七章	结构地震反应分析	(129)
7.1	地震反应分析的发展过程	(129)
7.2	单自由度体系的地震反应与反应谱	(132)
7.3	多自由度体系的地震反应	(138)
7.4	频域分析	(143)
7.5	结构随机地震反应	(147)
7.6	振型组合	(158)
7.7	竖向地震反应与 $P-\Delta$ 效应	(163)
7.8	阻尼理论	(166)
7.9	结构非线性地震反应	(170)
7.10	多维多点输入的地震反应	(180)
7.11	土结相互作用	(187)
7.12	地震反应分析的实用性	(200)

第八章 土体地震反应与地基抗震	(202)
8.1 地基震害经验	(202)
8.2 土动力性能	(206)
8.3 砂土液化	(213)
8.4 地基地震反应	(222)
8.5 土坝与边坡的地震稳定性	(227)
8.6 桩基地震反应	(232)
第九章 结构与地基实际地震反应及其观测	(245)
9.1 几次近代大地震中结构反应的宏观经验	(245)
9.2 结构或地基地震反应记录及其分析	(249)
9.3 结构强震观测结果的重要作用	(262)
第十章 结构振动试验与结构动力性能	(266)
10.1 结构试验的目的	(266)
10.2 结构振动实验与抗震理论的关系	(266)
10.3 结构试验方法	(270)
10.4 材料动力性能	(275)
10.5 构件动力性能	(278)
10.6 结构动力性能	(282)
10.7 环境振动	(287)
10.8 结构破坏试验	(293)
10.9 结构识别	(296)
第十一章 基础隔震和能量耗散技术及结构振动控制概论	(303)
11.1 基础隔震技术的发展概况	(303)
11.2 规则型隔震房屋和桥梁的简化分析	(304)
11.3 叠层钢板橡胶支座的简化计算模型	(307)
11.4 结构减震消能技术概述	(310)
11.5 阻尼器的基本特性	(315)
11.6 装置附加阻尼器的结构抗震设计	(318)
11.7 调谐质量阻尼器的原理和简化设计方法	(320)
11.8 主动控制概述	(323)
11.9 主动控制算法	(326)
11.10 半主动控制和混合控制	(340)

11.11 主动控制装置和工程应用	(343)
-------------------------	-------

第四篇 工程抗震

第十二章 地震危险性、危害性分析和地震区划	(354)
12.1 地震危险性、危害性分析	(354)
12.2 地震活动性分析	(356)
12.3 地震危险性分析	(361)
12.4 结构易损性与地震危害性分析	(380)
12.5 地震区划	(392)
12.6 地震小区划	(400)
第十三章 抗震设计原则和构造措施	(407)
13.1 结构抗震理论的发展历史	(407)
13.2 抗震设防标准	(412)
13.3 抗震设计原则	(413)
13.4 各类工程抗震设计特点	(414)
13.5 抗震构造措施	(460)
第十四章 结构抗震设计规范	(469)
14.1 抗震设计规范的一般情况	(469)
14.2 中、日、美三国抗震规范的沿革与现状	(473)
14.3 抗震设计规范一览表	(497)
14.4 现有抗震规范的对比分析	(507)
14.5 抗震规范的发展趋势	(521)
附录一 参考文献	(524)
附录二 人名译名表	(542)
附录三 地名及单位译名表	(548)
附录四 中英名词对照表及索引	(552)

CONTENTS

PART I GENERALS AND FUNDAMENTALS

CHAPTER 1 GENERALS

- 1.1 Introduction
- 1.2 Scope of Earthquake Engineering
- 1.3 Earthquake Engineering and Seismology
- 1.4 Earthquake Engineering and Socio-economical Problems

CHAPTER 2 RELATED FUNDAMENTALS OF SEISMOLOGY

- 2.1 Inner Structure of Earth
- 2.2 Plate-Tectonics
- 2.3 Inter-Plate and Intra-Plate Earthquakes
- 2.4 Source Mechanism
- 2.5 Seismicity
- 2.6 Seismic Wave
- 2.7 Instrumental Measurement of Earthquake and Magnitude

CHAPTER 3 RELATED FUNDAMENTALS OF RANDOM VIBRATION

- 3.1 Fundamental Concept of Random Process
- 3.2 Spectral Parameters and Their Physical Meaning
- 3.3 Distribution of Maxima
- 3.4 Stochastic Representation of Earthquake Ground Motion

PART II ENGINEERING SEISMOLOGY

CHAPTER 4 EARTHQUAKE DAMAGE AND INTENSITY

- 4.1 Macroseismic Phenomena of Earthquake
- 4.2 Earthquake Intensity and Intensity Scale
- 4.3 Earthquake Damage and Examples from Some Typical Earthquakes
- 4.4 Characters of Earthquake Intensity and Its Applicability
- 4.5 Intensity Distribution of an Earthquake
- 4.6 Earthquake Intensity Attenuation
- 4.7 Effect of Site Conditions on Earthquake Intensity

CHAPTER 5 EARTHQUAKE IN CHINA

- 5.1 Seismic Regions and Earthquake-Active Belts in China
- 5.2 Earthquake History in China
- 5.3 Seismicity over China