

结构抗震设计

[墨西哥] E·罗森布卢斯 主编
滕家禄 奚毓堃 马兴文 等译

中国建筑工业出版社

结构抗震设计

[墨西哥] E·罗森布卢斯 主编
滕家禄 奚毓堃 马兴文 等译

中国建筑工业出版社

本书共八章。第一章地震特性，讲述结构抗震设计必须掌握的
的有关地震方面的知识。第二、三章分析、设计的一般原则，
讲述地震荷载作用下，结构动力分析方法及其适用的简化分析方
法，是结构抗震设计的重要理论基础。第四~八章是钢、钢筋混
凝土、砖石等结构以及基础、非结构构件等专题。

本书的作者都是国际上结构抗震工程领域里著名的学者、
专家。主要特点：取材广泛，概念明晰，理论密切联系实际，重
点是解决工程师“怎样进行工程抗震设计”的问题，从理论与实
践二方面正确理解、执行抗震设计规范。

本书可供抗震设计和研究人员、有关工程技术人员、研究生
及大学师生学习参考。

参加本书的译校者：滕家禄（译序言，第二、三、五章），奚
毓堃（译第四、八章，校序言，第二、三、五章），马兴文（译第
一、七章，校第六章），秦礼恭（译第六章），应达之（校第四、八
章），魏淳（校第一章），王开顺（校第七章），全书并由奚毓堃、滕
家禄统校。

Emilio Rosenblueth
DESIGN OF EARTHQUAKE RESISTANT
STRUCTURES

PENTECH PRESS, 1980, Plymouth.

• • •
结构抗震设计

滕家禄 奚毓堃 马兴文 等译

•
中国建筑工业出版社出版（北京西郊百万庄）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷（北京阜外南礼士路）

•
开本：850×1168毫米 1/32 印张：9³/₄ 字数：260千字

1989年12月第一版 1989年12月第一次印刷

印数：1—3,290册 定价：8.35元

ISBN7—112—00860—3/TU·613

(5945)

序 言

《结构抗震设计》主要为结构工程师编著的，既注意到目前，也考虑到未来。其宗旨，意在填补空隙。有些书阐述了观察、实验和理论方面等基础知识，有的给专家们提供了确定适用设计准则的工具，这些都是专家处理重大课题和编写规范时的优秀书籍，但是这些书都没有告诉工程师“怎样去设计”。在另一方面，工程师也会遇到有详细规定准则的建筑规范，这些规范同样也没有告诉“怎样去设计”。这是一个空隙，是为工程师提供丰富的背景材料，让工程师能够了解条款的依据，甚至让工程师能够知道什么时候可忽略某些条款以及为什么忽略它，是指导方面上的空隙。

抗震设计的最新趋势反映在，对设计活动中的各种现象的深刻了解，广泛使用计算机和有价值的计算程序。做为发展的后果，是以可靠的场地和实验室的实验为基础，真实地模拟其干扰和结构特性，与近似方法相结合的动力分析。目前，最完善的分析，包括：考虑非线性性能；以变分法通常结合有限元技巧处理连续介质问题；并同时考虑几个地面运动分量。精确分析的结果使致力于明确考虑最有效的参数和变量，尤其是延性性能的等效静力分析增加精度。这些近似方法还会开发成特别简化的程序，应用于面广、量大、造价低的住宅建筑上。

在迅速发展的规律中，每本书在出版过程中就可能过时。为了减少这种可能性，每章由一位或二位作者担任，因而能在一个短时间内完成；另外，要强调的是，多写些经得起推敲的结论，少写些有争论的观点。这本书就是以这种精神完成的。这本书并不是各类结构的设计指南，但还是想尽力做到在广大有兴趣的范

目 录

第一章 地震特征	1
1.1 地震的成因	1
1.2 构造运动的生成机理	1
1.3 地震波	2
1.4 加速度图	3
1.5 震级、地震矩和烈度	4
1.6 线性单质点体系的性质	6
1.7 各种类型的谱	7
1.8 坚实场地反应谱	9
1.9 局部影响	14
1.10 地面运动分量	18
1.11 模拟地震	19
1.12 非振动地震效应	22
附录1.1 修正的麦卡里烈度表	24
参考文献	26
第二章 分析	29
2.1 概述	29
2.2 分析方法综述	30
2.3 设计反应谱	32
2.4 分析中所考虑的结构特性和允许延性	35
2.5 振型分解法	38
2.6 等效侧向力法	43
2.7 特殊因素	47
2.8 等效侧向力法和振型分解法的局限性	51
2.9 等效侧向力法和振型分解法之间的选择	51
参考文献	54

第三章 设计的一般原则	55
3.1 抗震设计的实质和目标	55
3.2 结构反应和控制变量	56
3.3 设计原则	71
3.4 安全准则	83
参考文献	99
第四章 钢结构	102
4.1 引言	102
4.2 强烈地震作用下, 钢结构的性能	102
4.3 抗弯框架	104
4.4 结构构件的性能和设计	105
4.5 完全刚性框架的设计	133
4.6 偏移控制	135
4.7 支撑	136
4.8 隔板	138
4.9 其他结构型式	140
4.10 脆性断裂和层状裂缝	140
参考文献	142
第五章 钢筋混凝土结构	146
5.1 引言	146
5.2 强度和延性条款	147
5.3 混凝土和钢筋的应力-应变性能	148
5.4 钢筋混凝土构件	152
5.5 钢筋混凝土框架	170
5.6 钢筋混凝土剪力墙	180
5.7 钢筋混凝土桥墩	191
5.8 预应力混凝土框架	192
参考文献	202
第六章 砖石结构	204
6.1 引言	204
6.2 施工方法	206
6.3 各种组合材料的性能	207
6.4 砖石剪力墙的性能和设计	211

6.5 砌体填充框架	221
6.6 砖柱	231
参考文献	231
第七章 基础	233
7.1 概述	233
7.2 土-结构相互作用的动力表达式	234
7.3 运动相互作用	240
7.4 惯性相互作用	246
7.5 桩基础	251
7.6 分析方法比较	254
7.7 场地稳定性	259
7.8 设计依据	267
参考文献	269
第八章 非结构构件	273
8.1 非结构构件的类型	273
8.2 构件重要性的区分	274
8.3 刚性的非结构构件	277
8.4 柔性的非结构构件	283
8.5 一般设计准则	284
8.6 构件的相互作用	293
8.7 连接、锚固和细部构造	298
参考文献	302

第一章 地震特征

Emilio Rosenblueth

(国立墨西哥大学工程教授)

1.1 地震的成因

自然界和人类社会中的很多现象：如天然爆炸、人工爆破、陨星撞击、岩洞塌陷、火山活动、构造运动等，都会引起地球震颤，工程界最关注的是构造运动。陨星撞击，在一般的重现期内，对世界性地震活动没有明显的影响，然而，在 10^4 年的重现期内，其影响与构造地震属同一量级^{1,1}。其它类型的地震，对局部地区来说是重要的，但从世界范围来看，不值得考虑。

1.2 构造运动的生成机理

不能说是百分之百，但绝大多数的构造地震，都是地质断层的相对位移引起的。地壳由彼此作相对运动的若干个板块所组成，因而主要断层位于板块边界。一些板内的断层，也有产生巨大震动的相对运动。

现在要思考的主要问题，是驱动板块的力。一种假说^{1,2}认为我们的行星是由众多陨石集合而成的。质量加大，其放射性也增强，随之行星变热，其核也在地幔熔融过程中生长。由于熔融物质的起源不同，因而其成分和密度也各异，较重物质降落到地心形成固体内核，较轻物质漂移到表层成为熔岩。各种物质熔融时，由于密度不同形成流动，并推动板块以相同的方向运动。匀质地球中的温度差异，不足以解释观察到的现象。

一旦断层处的摩擦力被克服就发生地震的理论, 已得到充分的证实(但我们不能排除一些构造地震的其他发生机理^{1,3})。瑞德(Reid)的弹性回跳论^{1,4}开始使这一理论定型化。认为地壳承受着伴随有剪切应变的应力, 当它超过断层的强度时, 地壳要恢复到原来未变形前的形状, 这种回跳就引起地震。这一现象是粘-滑过程: 静力摩擦阻力超过动力作用下的阻力。因此, 地震时伴有应力降。由于应力和阻力的非均匀性, 运动必定是从一点开始, 然后向外传播。其速度相当于剪切波速度。当静力摩擦阻力没有超过动力值时, 其结果是发生蠕动, 而不是地震。

1.3 地震波

震源的扰动发射出体波。体波传播到地表时, 产生面波, 面波的传播与地表平行, 其振幅随深度增大趋向于零。体波有两种: P波(亦称初始波、纵波、压缩波或膨胀波)和S波(亦称次生波、横波、剪切波或等体积波)。面波有很多种, 与地震工程关系最大的是L波(乐夫(Love)波)和R波(瑞雷(Rayleigh)波)。L波只发生在层状介质中, 其质点运动与自由表面平行, 与波的传播方向垂直。因此, 在围绕竖直轴的转动分量和平移水平分量之间有相关性。一定频率的R波, 其质点运动是椭圆形的, 发生在与自由表面垂直的平面内。因此, 在竖直分量和水平分量之间存在相关性。

P波和S波在弹性体内的传播速度与频率无关, 其速度分别为:

$$v_p = \left[\frac{(1-\nu)E}{(1-\nu-2\nu^2)\rho} \right]^{1/2} \quad (1-1)$$

$$v_s = (G/\rho)^{1/2} \quad (1-2)$$

式中 E ——弹性模量;

G ——剪变模量, $G = E/2(1+\nu)$;

ρ ——介质密度;

ν ——泊松比。

在所有介质中 $v_s < v_p$ 。R波的速度 v_r 稍低于S波速度, 其速度比

v_r/v_s 取决于 ν ，除了弹性半空间外，与频率相关^{1.5, 1.6}。如 $\nu=0.25$ ，则 $v_p/v_s=\sqrt{3}$ ，在弹性半空间中 $v_r/v_s=0.92$ 。L波的速度 v_l ，一般是与频率相关的。在基岩半空间的覆盖层中， v_l 介于岩石速度 v_s （当波的频率为零时）与土中速度 v_s （当其波频趋于无穷大时）之间单调地变化。

在粘弹性介质中，所有波速都与频率相关。

1.4 加速度图

由于震源机理的复杂性，波列从一开始就是不规则的。地震波穿越各种地质构造时，介质界面的多次反射和折射，使波变得更不规则，而波速的频率相关性造成的频散，又使波进一步复杂化。因此，坚实地面的地震加速度图是极不规则的（图1-1a）。在松软层的表面，由于滤波以及波在岩-土界面和自由表面上的多重反射，使其记录类似于谐调运动（图1-2）

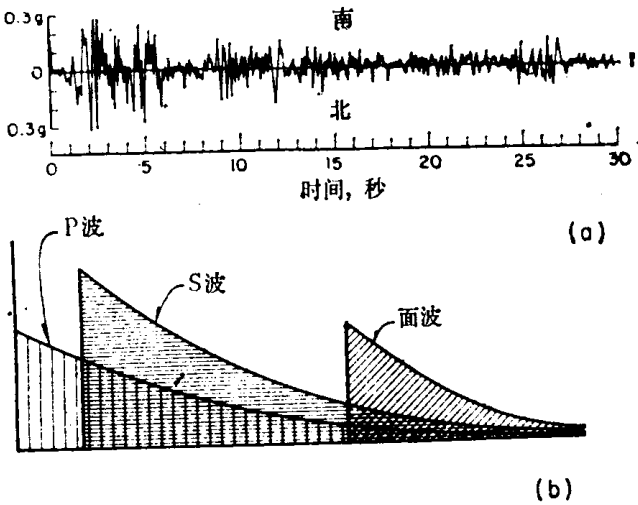


图 1-1 典型的地震加速度图

(a)1940年Elcentro地震加速度图NS分量；(b)记录中的波的类型

P波最先到达，其次是S波，最后为面波。加速度可分为三段（图1-1b），第一段只含有P波，第二段含有P和S波，第三

段含有少量的P波，大部分是S、L和R波。其卓越周期在加速度图中是有规律地增加的。

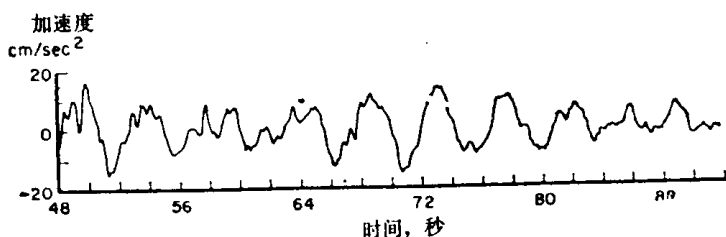


图 1-2 1973年8月28日墨西哥城体育宫附近,地震加速度图NS分量片段(据E.Faccioli)

光学的和机械的加速度记录仪,需要有启动装置,以免过分地耗费能源和记录纸。这些记录仪器都记录不到每个地震的初始部分。分析这些记录时会碰到其中含有的许多其他来源的误差。对于甚高频和甚低频的结构,其计算的反应误差可大于100%;从加速度图推算出的真实地面位移,其误差也与上述相同。对于中等周期(如0.5~3秒)的范围内的结构,其平均反应谱的纵坐标是比较可靠的,由于各种误差源,其变异系数大概为0.2。

在实际工作里,这种性质的误差,常通过调频磁带记录来消除,还借助于存储装置,把地震的初始阶段记录下来。

1.5 震级、地震矩和烈度

里希特(Richter)震级 M (或 M_s)是从地震波图的面波部分计算而得到的。它是一种能量释放的间接度量^{1,7}:

$$\log_{10} W = 11.4 + 1.5M \quad (1-3)$$

式中 W ——能量,单位为尔格(erg)①。

由于体波的能量与面波的能量没有固定的比例,所以上面的表达式是不精确的。震级 m (或 M_b)是从地震波图的体波部分推算出来的,它对震源深度没有 M 那么敏感。平均起来,二者之间有以下的关系:

$$M = 1.59m - 3.97 \quad (1-4)$$

① 1尔格 = 10^{-7} 焦耳——编者。

地震矩^{1.3}也用于度量地震的大小，它与滑动、应力降和断层滑动面积有直接关系。在地震矩和震级之间没有一一对应的关系（见图1-3）。

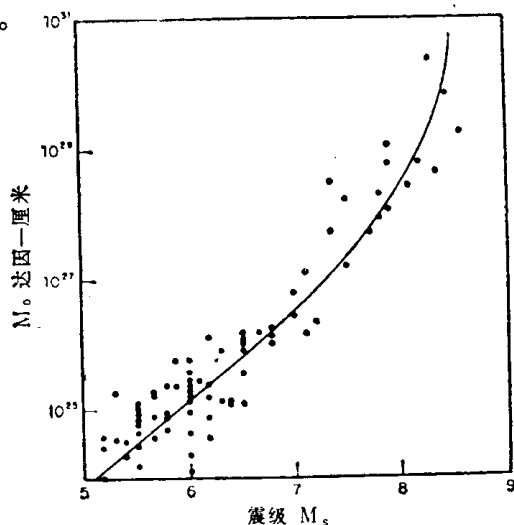


图 1-3 震级与地震矩之间的关系^{1.9}

烈度是用以度量一次地震在局部地区里可能造成的破坏。在没有启用强震仪的地区，需要有一个主观的标度（烈度表）。这意味着，在1930年以前，是全部地震的所有场地，在目前，则是大多数地震中的大多数场地，都需要这种标度。在欧洲最普遍使用的烈度标度是修订的麦加利（MM）烈度标度（见附录1-1）。一些社会主义国家使用的MSK烈度标度与MM烈度标度相似，但其中包含有地貌效应的描述^{1.10}。

烈度的仪器标度，是为了在评价地震破坏时，注意到广泛的个性变异，克服其主观成分。最常用的仪器标度中，有赫斯纳（Housner）标度和阿莱斯（Arias）标度。赫斯纳标度^{1.11}是以拟速度谱（单位为英尺/秒）取0.1~2.5秒周期范围内的面积定义烈度，一般阻尼比取0.2。阿莱斯标度是以 $\pi/2g$ 乘地面加速度平方和来定义烈度，其中 g 为重力加速度。仪器烈度标度在实用上有局限性，因为只有在人们取得了地面运动记录并能推断出对给定结构的效应时，才能计算出定量的仪器烈度。

地震参数的测定，并没有一般认为的那么精确。到目前为止，震源的坐标只能精确到几十公里之内，大多数含有震源坐标资料的图表是粗糙的。重新核算表明，震源坐标位置与构造性质有密切关系，而这些构造性质在原始图表上则是不明显的。

在一次强烈地震后，不同的台站，报告的震级常常是不一样的，有时相差超过一度，然后在48小时之内，将这些值统一到相差0.2度之内，这给人们一个非常精确的印象。由不同观测者推断的烈度展布情况差别则会更大。

1.6 线性单质点体系的性质

图1-4所示结构，为一线性的单自由度体系，根据达朗贝尔 (D'Alembert) 原理，可写出下式：

$$M\ddot{x} + C\dot{y} + Ky = -P \quad (1-5)$$

式中 M ——质量；

C ——阻尼常数；

K ——刚度（弹性系数）；

$P=P(t)$ ——作用力；

t ——时间

x ——绝对位移

$y=x-x_0$ ——变形（相对位移）；

x_0 ——地面位移；

$\cdot$ ——对时间的导数。

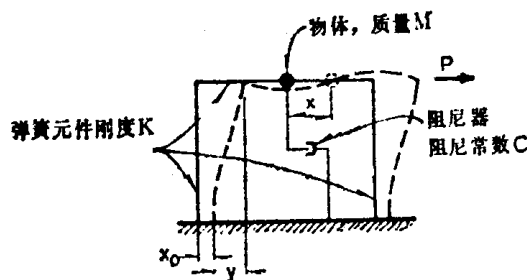


图 1-4 单质点体系

如结构与此相似，其中的阻尼力（ $C\dot{y}$ ）与变形速度成正比，则叫做具有线性或粘滞的阻尼。

自由运动时， P 和 x_0 为零，则 $y = x$ 。代入式1-5并除以 M ，得出下式：

$$\ddot{y} + 2\zeta\omega\dot{y} + \omega^2 y = 0 \quad (1-6)$$

式中 $\omega = (K/M)^{1/2}$ ——无阻尼自振圆频率（rad/s）；

$\zeta = C/C_{cr}$ ——阻尼比

$C_{cr} = 2\sqrt{KM}$ ——临界阻尼。

当 $\zeta < 1$ 时，说明结构处于小阻尼情况下，式1-6的一般解为：

$$y = y_1 e^{-\zeta\omega(t-t_1)} \sin \omega'(t-t_1) \quad (1-7)$$

式中 y_1, t_1 ——常数；

$\omega' = \omega\sqrt{1-\zeta^2}$ ——有阻尼的自振圆频率。

该结构为有阻尼的简谐振动，其频率 $f' = 2\pi\omega'$ 为有阻尼的自振频率（c/s或Hz），周期 $T' = f'^{-1}$ 为有阻尼的自振周期。无阻尼自振频率和周期分别为 $f = 2\pi\omega$ 和 $T = f^{-1}$ ，即对应于 $\zeta = 0$ 时，解式1-7的谐调振动。

当 $\zeta \geq 1$ 时， ω' 为虚数，结构不发生振动，并渐渐地趋于未变形时的状态。如 $\zeta > 1$ 称为过阻尼，在临界状态 $\zeta = 1$ 时，称为临界阻尼。

1.7 各种类型的谱

谱是以频率区域的函数表示。一般，在地震工程里，谱的类型有：

(1) 富里叶谱

$$F(\omega) = \int_0^{\cdot} e^{i\omega t} x_0(t) dt$$

式中 x_0 ——地面运动；

ω ——圆频率；

$i^2 = -1$ ；

t ——时间；

s ——运动的持续时间;

$F(\omega)$ ——包含振幅和相位信息的复函数。

(2) 富里叶振幅谱

$$|F(\omega)| = \left\{ \left[\int_0^s x_0(t) \sin \omega t dt \right]^2 + \left[\int_0^s x_0(t) \cos \omega t dt \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

(3) 反应谱

$$R = \max_t |r(t)|$$

式中 $r = r(t)$ ——结构反应

一般指的是频率为 ω 、阻尼比为 ξ 的线性单质点体系结构的反应。

结构反应可从下式中计算出来:

$$r(t) = \int_0^t x_0(\tau) \psi(t-\tau) d\tau \quad (1-8)$$

式中 ψ ——所讨论的反应类型的脉冲反应函数, 假若 r 是位移反应, 则

$$\psi(t) = -\omega'^{-1} \cdot \exp(-\xi \omega t) \cdot \sin \omega' t$$

一般 R 是通过体系的频率或周期绘出的, 对于每一选定的 ξ 值有一条曲线。反应谱的类型, 一般有: (绝对) 加速度反应谱 $r = \ddot{x}$; 拟加速度反应谱 $r = \omega^2 y$; 拟速度反应谱 (有时也叫速度反应谱) $r = \dot{y}$; 以及变形 (有时也叫位移) 反应谱, $r = y$ 。

拟速度反应谱常常是以对数坐标绘制的, 横坐标为周期或频率的对数, 纵坐标为拟速度值的对数。上倾和下斜 45° 的线即对应于拟加速度谱和位移谱纵坐标的对数。如此, 就可将三种类型的反应谱画在同一个图上。

由于反应谱直接给出线性单质点体系的最大反应数值, 所以它是可理想化为具有线性单质点体系结构的分析和设计基础。线性多质点体系的振动的每一振型的性能与单质点体系相同, 因此, 反应谱也可应用于多质点线性体系的振型反应。将各个振型反应按照一定的规则进行合成, 就可能计算出整个结构反应, 甚至可以获得非线性体系的反应 (见第 2 章)。

1.8 坚实场地反应谱

1.8.1 一般特性

图1-5示出坚实场地水平运动的典型反应谱, 该图表示出地面最大加速度、速度和位移。当周期趋于零时, 谱加速度和拟加速度接近于地面最大加速度, 因为当一个结构的自振周期为零时, 其结构刚度为无穷大或质量为零, 从而它会有和地面一样的运动。当周期趋于无穷大时, 谱位移接近于最大地面位移, 因为结构的质量接近于停留在半空中的状态。在中等周期范围内, 在已给定的最大地面速度下, 期望谱拟速度, 可粗略地视作与周期无关。

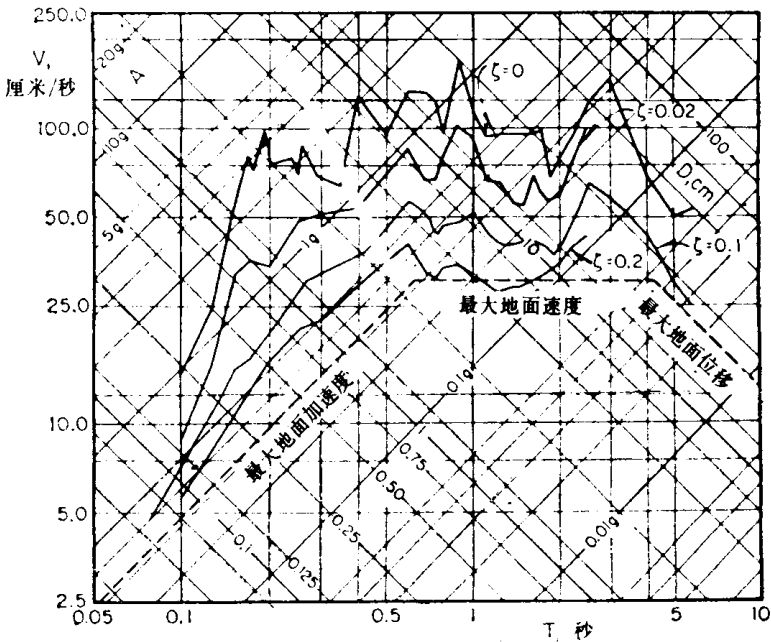


图 1-5 1910年El Centro地震记录的NS分量的反应谱^{1,13}

1.8.2 地面运动参数

地面运动参数, 可由以下的关系式估算, 这些关系式以震源特性和震源距给出某一测点的期望值。它们是为美国西部推导的, 而且在地质相似地区也可得出合理值。可以看得出, 随距离

增加的衰减，一般没有在秘鲁海岸附近^{1,14}，美国东部以及大陆地质那样显著。

在所有情况下，给定震级和震源距离的概率分布，近似为对数正态分布。

只要震级和震源坐标为已知，就可按下述公式计算出任意水平方向上的最大地面加速度 a 、速度 v 和位移 d ：

$$E(\ln Y) = \ln b_1 + b_2 M - b_3 \ln L' \tag{1-9}$$

式中 $E(\cdot)$ ——变量 $(\cdot)$ 的期望值；

Y ——代表 a 、 v 或 d ；

$b_{1,2,3}$ ——常数；

L' ——震源距 L 加上某一定量。

表1-1为不同学者提出的建议值，如 L 以 Km 为单位，则 a 、 v 和 d 分别为 cm/s^2 、 cm/s 和 cm 。

方 程 式 1-9 中 的 参 数 表 1-1

Y	b_1	b_2	b_3	$L'-L$	COV ①	参考文献
a	467	0.640	1.301	25	0.548	1.15
a	1059	0.500	1.320	25	0.805	1.16
a	5829	0.800	2.000	40	0.711	1.17
v	5.64	0.923	1.202	25	0.696	1.15
v	36	1.000	1.700	25	0.838	1.17
d	0.393	1.000	0.885	25	0.883	1.15
$\overline{A}$ ②	69600	0.800	2.000	70	0.869	1.17
$\overline{V}$ ③	0.155	0.880	0.587	25	0.699	1.15
$\overline{D}$ ④	265	1.000	1.700	60	0.708	1.17

注：① Y 的变异系数。

②阻尼为0时，最大平滑谱加速度。

③1Hz、2%阻尼比的平滑谱拟速度。

④阻尼为0时，最大平滑谱拟速度。

麦加利 (McGuire) 提出的建议值，是根据美国西海岸所获得的68个记录得出的。Estevea和 Villaverde 所提出的建议值，还考虑了墨西哥的一些记录。Donovan提出的则是根据678