



当代
杰出青年
科学文库

结构多维抗震理论

李宏男 著



科学出版社

www.sciencep.com

当代杰出青年科学文库

结构多维抗震理论

李宏男 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地论述了工程结构在多维地震动作用下的分析方法和抗震设计问题,主要包括:多维地震动理论,非对称结构在多维地震动作用下的弹性扭转振动,非对称框架结构和框架-剪力墙结构弹塑性地震反应分析,多维性能设计方法,多维随机地震反应,高层建筑与高耸结构在水平与摇摆地震动作用下的反应,结构多维抗震设计的反应谱方法,以及大跨度结构考虑多维多点输入的抗震计算方法。

本书可作为从事土木、水利工程专业的研究和设计人员,以及高等院校的教师、研究生和高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构多维抗震理论/李宏男著. —北京:科学出版社,2006

(当代杰出青年科学文库)

ISBN 7-03-017046-6

I. 结… II. 李 III. 建筑结构-抗震设计 IV. TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 023836 号

责任编辑:王志欣 贾瑞娜/责任校对:包志虹

责任印制:安春生/封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 7 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2006 年 7 月第一次印刷 印张:29 3/4

印数:1—2 000 字数:578 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

1998年由“国家科学技术学术著作出版基金”资助,作者曾在科学出版社出版了《结构多维抗震理论与设计方法》一书,该书出版7年来深受读者的欢迎,得到了大量的引用,不断有读者来信索取。在此期间,作者获得了“国家杰出青年科学基金(批准号:50025823)”的资助,在这方面又做了更深入的研究工作,取得了新的研究成果。

随着抗震经验的不断积累和理论研究的不断深入,无论是结构研究人员,还是设计人员均认识到地震动和结构反应多维的重要性,在实际结构的抗震计算时应该考虑多维地震动的影响和结构的扭转耦联振动效应,如果不考虑这些因素,设计的结构将是无法保证安全的。但直到2001年我国新修订的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)中,才用很粗略的方法考虑了双向地震动对结构的作用,即不考虑多维地震动的相关性,采用平方和开平方的方法时一个方向的地震效应取100%,另一方向的地震效应取85%来进行组合,这种方法根据不足。

作者从事结构多维抗震理论研究多年,发表有关研究论文百余篇,因此有了将研究成果及散现在各种文献中的论文重新系统整理成书的想法。全书内容共分九章。第一章论述了多维地震动理论,首先阐述了地震动是多维的观点,然后介绍了目前关于地震动转动分量的研究现状,给出了作者提出的推算地震动转动分量(包括扭转分量和摇摆分量)时程方法和转动分量的功率谱统一数学模型,并得到实验验证。第二章论述了偏心结构在多维地震动作用下的弹性扭转振动问题,介绍了不同种类偏心结构的计算模型、振动方程的推演以及多维地震反应计算方法。第三章论述了钢筋混凝土框架结构弹塑性扭转振动问题,介绍了目前应用的主要两种方法:塑性理论方法和柱端假设弹簧模型,给出了相应的计算方法,最后给出了数值计算中的若干问题。第四章论述了钢筋混凝土框架-剪力墙结构多维弹塑性扭转振动问题,介绍了目前应用的主要模型,以及我们通过实验提出的改进的多维弹簧模型,并进行了地震模拟震动台试验,给出了整体结构的计算方法。第五章论述了近年来新发展起来的基于性能的结构抗震设计方法,以及我们提出的空间结构静力推覆分析方法和多维能力谱方法。第六章论述了结构多维随机地震反应分析问题,首先介绍描述随机过程的某些数字特征,然后给出了当前常用的地震动平动随机模型和作者提出的转动随机模型,在结构多维随机反应分析方法中,重点论述了作者提出的“结构多维随机振动的振型加速度法”计算中的若干问题,以及结构动力可靠度的分析方法。第七章论述了高层建筑与高耸结构在水平与摇摆地震

动作用下的反应分析,重点介绍可连续化模型的高层建筑与高耸结构在水平与摇摆地震动联合作用下的随机地震反应的分析方法。第八章论述了结构多维抗震设计方法,重点介绍了不同场地下的双向地震动弹塑性反应谱,然后给出了各种多维组合方法,最后在几种近似方法的基础上,建议了建筑结构考虑多维地震动影响的抗震设计实用方法。第九章论述了大跨度结构考虑多维多点输入的抗震计算方法,包括反应谱方法、随机振动分析方法和时程分析方法,以及三种抗震计算方法比较和需要进一步研究的问题。

本书各章内容相互联系,相互贯通,初步形成了结构多维抗震理论和设计方法的理论框架。

本书是作者及合作者 20 多年来研究工作的结晶。他们是博士后王东升、肖诗云;博士生霍林生、李兵、孙丽、李钢、王丰、张景玮、全伟、岳茂光;硕士生孙立晔、何浩祥等。是他们的辛勤劳动才使得这项研究工作逐步深入,也使得本书内容丰富、翔实。在此作者表示衷心感谢!

作者还要深深地感谢我的夫人王苏岩女士,她不仅多年来在生活上对我无微不至的关怀和照料,而且在本书完稿时进行了全面细致的校对和修改。

由于作者水平所限,书中必有疏漏和错误之处,衷心希望读者不吝赐教。

李宏男

2006 年 5 月于大连

《当代杰出青年科学文库》编委会

主 编 白春礼

副主编 (按汉语拼音排序)

程津培 李家洋 谢和平 赵沁平 朱道本

编 委 (按汉语拼音排序)

柴玉成 崔一平 傅伯杰 高 抒 龚健雅

郭 雷 郝吉明 何鸣鸿 洪友士 胡海岩

康 乐 李晋闽 罗 毅 南策文 彭练矛

沈 岩 万立骏 王 牧 魏于全 邬江兴

袁亚湘 张 杰 张 荣 张伟平 张先恩

张亚平 张玉奎 郑兰荪

目 录

前言

第一章 多维地震动	1
1.1 地震成因	1
1.1.1 地震内部构造	1
1.1.2 地震类型	2
1.1.3 地震成因	2
1.2 地震名词解释	3
1.3 等高线和烈度区划图	6
1.4 地震的破坏现象	8
1.5 中国地震特点	10
1.5.1 中国的地震灾害	10
1.5.2 中国的地震分布	12
1.6 地震动概说	13
1.6.1 体波	13
1.6.2 面波	14
1.7 地震动特性	16
1.7.1 地震动幅值特性	16
1.7.2 地震动频谱特性	18
1.7.3 地震动持时特性	19
1.8 地震动转动分量的研究现状	21
1.8.1 引言	21
1.8.2 转动分量的弹性波动理论法	21
1.8.3 转动分量的两点差法	27
1.8.4 转动分量的强震观测	27
1.8.5 小结	28
1.9 地震动转动分量的时程	28
1.9.1 体波情况	28
1.9.2 面波情况	35
1.9.3 地震动分量的坐标变换	45
1.10 地震动转动分量的试验验证	46

1.10.1 试验方案	46
1.10.2 试验过程	49
1.10.3 试验数据采集与分析	50
1.11 地震转动分量的随机模型	51
1.11.1 体波情况	51
1.11.2 面波情况	55
参考文献	57
第二章 多维地震动作用下的偏心结构弹性扭转振动	60
2.1 引言	60
2.2 具有刚性楼盖结构的平扭耦联振动	60
2.2.1 单层结构体系	60
2.2.2 多层结构体系	68
2.2.3 振型和振型参与系数	76
2.3 弹性楼盖简单体型结构的平扭耦联振动	78
2.3.1 结构振动模型	78
2.3.2 振动方程	79
2.3.3 振型和振型参与系数	81
2.4 弹性楼盖复杂体型结构的平扭耦联振动	82
2.4.1 结构振动模型	82
2.4.2 振动方程	83
2.4.3 振型和振型参与系数	85
2.5 自由振动的近似计算	86
2.5.1 瑞利法(能量法)	86
2.5.2 瑞利-里兹法	94
2.5.3 矩阵迭代法	98
2.5.4 雅可比迭代法	106
2.5.5 子空间迭代法	109
2.6 地震反应计算	110
2.6.1 振型分解法	110
2.6.2 逐步积分法	110
2.7 偏心结构的数值计算	122
参考文献	124
第三章 钢筋混凝土框架结构多维弹塑性地震反应	125
3.1 引言	125
3.2 构件分析的塑性力学模型——微观有限元方法	125

3.2.1 本构关系的建立	125
3.2.2 数值计算中的若干问题	131
3.2.3 数值算例	133
3.3 构件分析的柱端弹簧模型——宏观有限元方法	134
3.4 改进的柱端弹簧模型	139
3.4.1 试验研究	139
3.4.2 改进的多弹簧模型	147
3.4.3 杆件单元的弹塑性刚度矩阵	150
3.4.4 模型的试验验证	154
3.5 整体结构的动力分析	155
3.5.1 杆件单元坐标的转换	155
3.5.2 考虑楼板平面内无限刚性的结构振动方程	157
3.5.3 单位位移函数	157
3.5.4 程序的编制	159
3.5.5 结构的弹塑性地震反应分析	162
参考文献	164
第四章 钢筋混凝土框架-剪力墙结构多维弹塑性地震反应	166
4.1 引言	166
4.2 现有混凝土剪力墙的弹塑性分析方法	166
4.2.1 微观方法的分析模型	166
4.2.2 宏观方法的分析模型	169
4.2.3 几点讨论	172
4.3 混凝土剪力墙拟静力试验	173
4.3.1 试验概况	173
4.3.2 试件破坏过程及分析	176
4.3.3 试件的滞回特性分析	179
4.3.4 剪力墙的受力性能及规律	182
4.4 改进的混凝土剪力墙宏观力学模型	183
4.4.1 改进的宏观力学模型	183
4.4.2 模型的验证	188
4.4.3 混凝土剪力墙恢复力模型的选取	192
4.5 斜支撑钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验及计算公式	194
4.5.1 研究背景	194
4.5.2 试验内容	195
4.5.3 试验加载装置与测试系统	199

4.5.4 试验结果与分析	200
4.5.5 剪力墙承载力计算方法及变形性能分析	216
4.5.6 小结	221
4.6 框-剪结构模型的振动台试验	221
4.6.1 模型试验理论基础	222
4.6.2 模型设计	226
4.6.3 模型振动台试验	228
4.6.4 框-剪结构理论计算与实验结果比较	233
4.7 整体结构多维弹塑性地震反应分析	236
4.7.1 多维地震动输入下对称结构的弹塑性反应	237
4.7.2 双向地震动输入下非对称结构的弹塑性反应	243
4.7.3 关于影响结构地震反应的主要参数研究	246
参考文献	253
第五章 多维地震动作用下基于性能的结构设计方法	256
5.1 引言	256
5.2 性能设计理论的基本框架	257
5.2.1 地震设防水准	258
5.2.2 结构抗震性能水准	258
5.2.3 基于结构性能的抗震设计方法和流程	260
5.2.4 基于性能抗震设计理论的特点	260
5.3 单向地震作用的能力谱方法	261
5.3.1 性能设计的能力谱方法分析步骤	261
5.3.2 关于静力推覆分析方法的讨论	263
5.3.3 利用规范反应谱建立需求谱的方法	264
5.3.4 利用能力谱方法对结构地震损伤评估的简化方法	269
5.4 基于地震作用最不利方向的双向能力谱方法	275
5.4.1 双向地震作用下的结构推覆分析	275
5.4.2 双向能力谱方法的损伤评估方法	276
5.4.3 计算实例与分析	277
5.5 多维能力谱方法	283
5.5.1 多维能力谱法的特点	283
5.5.2 多维能力谱法的基本步骤	285
5.5.3 计算实例与分析	286
参考文献	291

第六章 结构多维随机地震反应	293
6.1 引言	293
6.2 随机振动的基础知识	293
6.2.1 随机过程	293
6.2.2 随机过程的概率结构	294
6.2.3 随机过程的数值特征	294
6.2.4 常用的数字特征运算规则	300
6.2.5 谱参数及其物理意义	302
6.2.6 几种重要的随机过程	304
6.3 几种主要的地震动随机过程模型	307
6.4 多维地震动作用下结构的随机反应	312
6.4.1 多维随机振动的振型分解法	313
6.4.2 多维随机振动的振型加速度法	314
6.5 地震动各分量间的谱矩阵	317
6.6 结构动力可靠性分析	321
参考文献	322
第七章 高层建筑与高耸结构在水平与摇摆地震动作用下的随机反应	324
7.1 引言	324
7.2 可连续化的高层建筑与高耸结构	324
7.2.1 结构振动方程	324
7.2.2 振动方程的解耦	325
7.2.3 结构均方反应	326
7.2.4 例子	327
7.3 输电塔高耸结构	328
7.3.1 纵向地震动作用情形	329
7.3.2 侧向地震动作用情形	332
参考文献	333
第八章 结构多维抗震设计的反应谱方法	334
8.1 问题的提出	334
8.2 地震反应谱和设计反应谱	334
8.2.1 地震反应谱	334
8.2.2 设计反应谱	340
8.3 双向地震作用的弹塑性反应谱	344
8.3.1 单向地震作用的弹塑性反应谱	344
8.3.2 双向地震作用弹塑性反应谱	366

8.4 单分量输入下的振型分解反应谱法	380
8.4.1 忽略各振型间相关性的方法	380
8.4.2 考虑各振型相关性的方法	381
8.5 多分量输入下的反应谱法	385
8.5.1 一般组合公式	385
8.5.2 仅考虑双向水平与扭转输入的公式	387
8.5.3 多维振型分解反应谱法的解析表达	392
参考文献	414
第九章 大跨度结构考虑多维多点输入的抗震计算方法	417
9.1 多维多点激励的反应谱法	417
9.1.1 运动方程及其解答	417
9.1.2 既有的反应谱分析方法	420
9.2 多维多点激励的时程分析法	424
9.3 多维多点激励的随机振动分析法	424
9.3.1 虚拟激励法原理简介	425
9.3.2 地震动空间相关模型	426
9.3.3 虚拟激励法用于多点平稳随机激励	431
9.4 三种抗震计算方法比较	433
9.5 需要进一步研究的问题	434
参考文献	435
附录 A 试件图集	437
附录 B 相关函数的傅里叶变换	448
附录 C 公式(6.117)中 Q_i、P_i、Q_j 和 P_j 的求法	449
附录 D 反应谱的数字算法——精确法	450
附录 E 相关系数公式推导	453

第一章 多维地震动

1.1 地震成因

1.1.1 地震内部构造

地球是一个一端微扁的球体,平均半径约为 6400km。研究表明,地球从地表至核心由三种性质不同的物质构成:最外层是很薄的地壳,平均厚度约为 30km;中间一层是地幔,厚度约为 2900km;最里面的部分叫地核,半径约为 3500km,如图 1.1 所示。

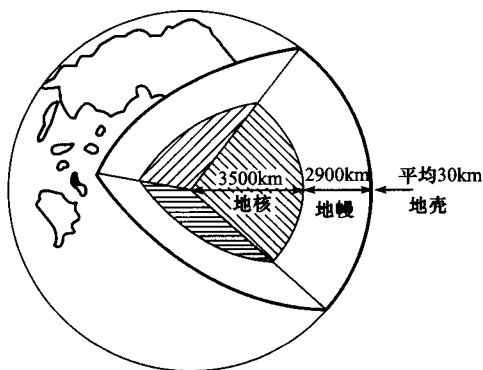


图 1.1 地球的构造

(1) 地壳 地壳由各种不均匀的岩石组成。地表覆盖一层薄薄的沉积岩、风化土以及疏松沉积物等。陆地下面的地壳主要为:上部是花岗岩层,下部是玄武岩层;海洋下面的地壳性质较单一,一般为玄武岩层。地壳厚度变化很大,在海洋下面,一般仅有几千米;而在大陆下面,平均厚度为 30~40km。世界上大部分地震都发生在地壳内。

(2) 地幔 地幔主要由质地坚硬、密度较大的黑色橄榄岩组成。据推测,它占地球全部体积的 5/6。从地下 20~700km,其温度由约 600℃ 上升到 2000℃。在这一范围内,存在一个厚度约几百千米的软流层。由于温度分布不均匀,发生了地幔内部物质的对流;此外,地球内部的压力也是不均匀的。因此,地幔内部物质在这样的热状态下和不均衡压力作用下缓慢地运动着。这可能是地壳运动的根源。到目前为止,所观测到的最深地震发生在地下约 700km 处,可见地震仅发生在地

壳内和地幔上部。

(3) 地核 地核可分为外核和内核,其主要构成物质是镍和铁。据推测,外核可能处于液态,厚度约为 2100km;内核可能处于固态,半径约为 1400km。

1.1.2 地震类型

地震是由于某种原因引起的地面强烈振动,属于一种自然现象。按其成因,地震可以分为三种主要类型:

(1) 火山地震 由于火山爆发,地下岩浆猛烈冲击地面时引起的地面振动,称为火山地震。由于这种地震释放能量小,相对来说影响范围和造成的破坏程度均比较小。

(2) 塌陷地震 由于地表或地下岩层因某种原因突然造成大规模陷落和崩塌时引起的地面振动,称为塌陷地震,如石灰岩地区较大的地下溶洞的塌陷或古旧矿坑的塌陷等。此类地震不仅能量小,数量也少。我国四十余年来的多次大地震中,仅 1954 年和 1965 年四川自贡发生的两次地震,属塌陷地震,震源极浅,波及范围很小。

(3) 构造地震 由于地壳运动产生的自然力推挤地壳岩层,使其薄弱部位突然发生断裂错动,这种在构造中引起的地震称为构造地震。此类地震破坏性大,发生频繁,影响面广,约占破坏性地震总量的 95% 以上。因此,在建筑抗震设计中,仅讨论构造地震作用下建筑的设防问题。构造地震,简称为地震。

1.1.3 地震成因

地球内部总是在不停地运动着,在它的运动过程中,始终存在着巨大的能量,地壳中的岩层在这些能量引发的巨大的力的作用下,使处在原始水平状态的岩层(图 1.2(a))发生变形。当作用力仅能使岩层产生弯曲变形而没有丧失其连续性时,岩层只产生褶皱(图 1.2(b));但当作用力超过岩层所能承受的程度时,岩层产生断裂和错动(图 1.2(c))。在这种地壳岩层构造状态的变化过程中,岩层处在复杂的地应力作用状态之下。随着地壳运动的不断变化,地应力的作用超过某处岩层的强度极限时,岩层就会发生突然的断裂和错动,从而引起振动,并以弹性波的形式传到地面,形成了地震。由于岩层的破裂往往是由一系列裂缝组成的破碎地



图 1.2 构造变动与地震形成示意图

带,整个破碎地带的岩层不可能同时达到平衡,因此,在一次强烈地震(主震)之后,岩层的变形还将继续进行调整,进而形成一系列余震。

1.2 地震名词解释

1) 震源

地壳深处岩层发生断裂、错动的地方称为震源。震源至地面的垂直距离称为震源深度,如图 1.3 所示。震源深度小于 70km 的地震称为浅源地震;70~700km 的地震称为中源地震;大于 700km 的地震称为深源地震。世界上绝大多数破坏性地震都属于浅源地震,一般深度为 5~40km。

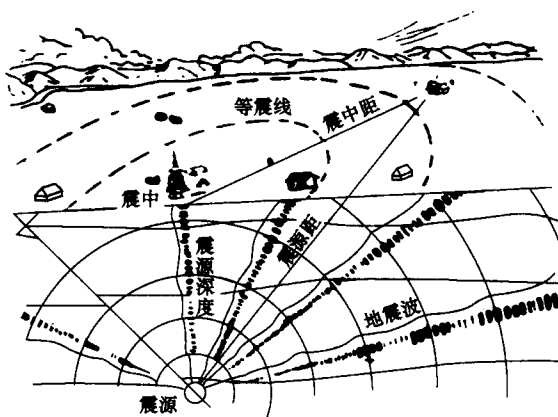


图 1.3 几个常用地震术语示意图

2) 震中

震源在地表面上的垂直投影点,称为震中。震中周围地区称为震中区。地震灾害最严重的地区,称为极震区。一般情况下,极震区与震中区大体上是一致的。

3) 震级

震级是表示地震本身大小的一种度量,其数值是根据地震仪记录到的地震波来确定。目前,世界上比较通用的是里氏震级。其最初定义为里克特(Richter)于 1935 年提出的,即震级大小是指用标准地震仪(指周期为 0.8s,阻尼为 0.8,放大倍数为 2800 的地震仪)在距震中 100km 处记录的以微米($\mu\text{m} = 10^{-3}\text{mm}$)为单位的最大水平地面位移 A 的常用对数,即

$$M = \log A \quad (1.1)$$

式中, M 为地震震级(里氏震级); A 为地震时程曲线的最大振幅(单位为 μm)。

实际上,地震时距震中 100km 处不一定恰好有地震仪,且现今一般都不用上

述标准地震仪。因此,对于震中距不是 100km 的地震台和采用非标准地震仪时,要按修正后的计算公式计算震级。

根据我国现有仪器,测定震级方法一般采用体波法和面波法。当震中距小于 1000km 时,体波震级按下式计算,即

$$M_L = \log A_\mu + R(\Delta) \quad (1.2)$$

式中, M_L 为近震体波震级; A_μ 为地震曲线上水平向最大振幅(单位为 μm); $R(\Delta)$ 为随震中距 Δ 变化的起算函数。

当震中距大于 1000km 时,采用的面波震级,按下式计算,即

$$M_S = \log \left(\frac{A_\mu}{T} \right)_{\max} + \sigma(\Delta) \quad (1.3)$$

式中, M_S 为远震面波震级; T 为与 A_μ 相应的周期; $\sigma(\Delta)$ 为面波震级的量规函数。

然而,不论采用什么震级,由于地震波传播介质的差异,同一次地震在不同地点确定的震级常常不同,差别常达 0.3~0.5,有时甚至超过 1.0。

震级 M 与震源释放的能量 E (以尔格^① 计)之间有如下对应关系:

$$\log E = 1.5M + 11.8 \quad (1.4)$$

由式(1.1)和式(1.4)可知,当震级增大一级时,地面振动幅值增加 10 倍,而能量增加约 32 倍。一个 7 级破坏性地震释放的能量,相当于近 30 个 2 万吨级的原子弹所具有的能量。

通常将震级划分为若干等级: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,称为有感地震;5 级以上地震,会对建筑物造成不同程度的破坏,称为破坏性地震;7 级以上地震,称为强烈地震或大地震;大于 8 级的地震,称为特大地震。目前世界上已记录到的最大地震震级为 8.9 级。

4) 地震烈度与基本烈度

地震烈度是指地震时某一地区的地面和各类工程结构遭受地震影响的平均强弱程度,是衡量地震引起的后果的一种标准。

基本烈度是指一个地区今后一定时期(如 150 年)内在一般场地条件下可能遭遇的最大地震烈度,即现行全国地震烈度区划图规定的烈度,带有中长期地震预报的性质。

对应于一次地震,震级只有一个,而地震烈度在不同的地点却是不同的。一般来说,距震中越远,地震影响越小,烈度就越低;反之,烈度就越高。地震烈度还与地震大小、震源深度、地震波传播介质、表土性质、建筑物特性、施工质量等许多因素有关。震中区的烈度称为震中烈度。迄今为止,我国发生的大多数地震属于浅源地震,地震震级 M 与震中烈度 I_0 的大致对应关系如表 1.1 所示。

^① 1 尔格(erg) = 10^{-7} 焦(J),后同。

表 1.1 我国浅源地震的震级与震中烈度的对应关系

震级 M	$4\frac{1}{4} \sim 5\frac{1}{4}$	$5\frac{1}{2} \sim 5\frac{3}{4}$	$6 \sim 6\frac{1}{2}$	$6\frac{3}{4} \sim 7$	$7\frac{1}{4} \sim 7\frac{3}{4}$	$8 \sim 8\frac{1}{8}$	$8\frac{1}{2}$
烈度 I_0	6	7	8	9	10	11	12

5) 地震烈度表

地震烈度表的使用已有四百多年的历史。早期的烈度表由于没有地震观测仪器,只能根据地震宏观现象来制定,如人的感觉、物体的反应、地表和建筑的影响和破坏程度等。由于宏观烈度表没有提供定量的数据,因此不能直接应用于工程抗震设计。强震观测仪器的出现,人们才有可能用记录到的地面运动的某些参数,如用加速度峰值、速度峰值等来定义烈度,从而出现了将地震宏观烈度与地面运动参数建立起联系的地震烈度表。我国曾先后编制了三代地震烈度表,和世界大多数国家一样都采用了 12 等级的地震烈度划分。1999 年重新颁布实施的国家标准《中国地震烈度表》(GB/T 17742—1999)就属于这种烈度表(表 1.2)。值得指出的是,现已有足够资料证明,同一烈度区可以有相差几十倍甚至上百倍的加速度峰值或速度峰值与之相对应,故表 1.2 中的水平向峰值加速度和峰值速度不能作为烈度评定指标,而只能作为参考指标。

表 1.2 中国地震烈度表(1999)

烈度	在地面上人的感觉	房屋震害程度		其他现象	水平向地面运动	
		震害现象	平均震害指数		峰值加速度 $/(m/s^2)$	峰值速度 $/(m/s)$
1	无感					
2	室内个别静止中人有感觉					
3	室内少数静止中人有感觉	门、窗轻微作响		悬挂物微动		
4	室内多数人、室外少数人有感觉,少数人梦中惊醒	门、窗作响		悬挂物明显摆动,器皿作响		
5	室内普遍、室外多数人有感觉,多数人梦中惊醒	门窗、屋顶、屋架颤动作响,灰土掉落,抹灰出现微细裂缝。有檐瓦掉落,个别屋顶烟囱掉砖		不稳定器物摇动或翻倒	0.31 (0.22~0.44)	0.03(0.02~0.04)
6	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	0~0.1	河岸和松软土上出现裂缝,饱和砂层出现喷砂冒水,有的独立砖烟囱轻度裂缝	0.63 (0.45~0.89)	0.06(0.05~0.09)