



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高校土木工程
专业指导委员会规划推荐教材

工程结构抗震 设计

(第二版)

东南大学 李爱群 丁幼亮 高振世 编著

中国建筑工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

工程结构抗震设计 (第二版)

东南大学 李爱群 丁幼亮 高振世 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程结构抗震设计/李爱群等编著. —2 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2010. 6

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材, 高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材)

ISBN 978-7-112-12213-4

I. ①工… II. ①李… III. ①工程结构-抗震设计-高等学校-教材 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 125391 号

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
工程结构抗震设计
(第二版)

东南大学 李爱群 丁幼亮 高振世 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 16 $\frac{3}{4}$ 字数: 364 千字

2010 年 9 月第二版 2010 年 9 月第十次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-12213-4

(19477)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书根据土木工程本科专业教学要求,并结合《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)等国家新规范进行编写。

本书主要包括:地震基本知识,地震作用计算,结构抗震计算,结构抗震概念设计,混凝土结构房屋抗震设计,砌体结构房屋抗震设计,钢结构房屋抗震设计,桥梁结构抗震设计,建筑结构隔震设计,建筑结构消能减震设计。

本书可用作土木工程专业本科教材或教学参考书,也可供研究生和有关技术人员参考使用。

* * *

责任编辑:朱首明 吉万旺

责任设计:张 虹

责任校对:赵 颖

第 二 版 前 言

本书是在我校编著的普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材、全国高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材《工程结构抗震设计》(2005年版,中国建筑工程出版社)和近几年教学改革实践的基础上,为适应土木工程本科专业的教学要求而组织编写的。本书的编写突出了以下特点:第一,本书内容涵盖了结构抗震计算、钢筋混凝土房屋抗震设计、砌体结构房屋抗震设计、钢结构房屋抗震设计、桥梁结构抗震设计、建筑结构隔震设计、建筑结构消能减震设计等内容,更好地满足了土木工程本科专业的教学需要;第二,将原教材“结构抗震计算”一章扩充为“地震作用”和“结构抗震计算”两章,重新编写了“钢筋混凝土房屋抗震设计”和“建筑结构隔震设计”两章,并补充了大量计算例题,以期对教学内容进行融会贯通的梳理,适应教学新形势的发展;第三,按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)等国家新规范进行了修订;第四,注重基本概念、基本理论和基本方法,注重内容的系统性和先进性,注重理论和工程实践的结合,注重学生启发性和创造性思维的培养与训练。

本书由李爱群教授、丁幼亮副教授、高振世教授主编,梁书亭教授、王修信教授、叶继红教授、刘钊教授、耿方方老师参与了本书的编写工作。研究生孙鹏和林日长绘制了部分插图,在此深表谢意。

本书在编写过程中,学习和参考了国内外已出版的大量教材和论著,谨向原编著者致以诚挚的谢意。

限于时间和水平,书中的疏漏与不妥之处,敬请广大同行及读者批评指正。

编者于东南大学土木工程学院

2010年3月

第一版前言

本书是在我校编著的高等学校推荐教材《建筑结构抗震设计》(1999年版,中国建筑工程出版社)基础上,为适应土木工程本科专业的教学要求而组织编写的。本书的编写突出了以下特点:第一,由通常的“建筑结构抗震设计”拓展至“工程结构抗震设计”,新增了钢结构房屋抗震设计、桥梁结构抗震设计、建筑结构基础隔震设计、建筑结构消能减震设计等内容,较大程度地拓宽了知识的广度和深度,以更好地满足土木工程本科专业的教学需要;第二,按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)等国家新规范进行编写;第三,注重基本概念、基本理论和基本方法,注重内容的系统性和先进性,注重理论和工程实践的结合,注重学生启发性和创造性思维的培养与训练。

本书在编写过程中,学习和参考了大量兄弟院校和科研院所出版的教材和论著,在此谨向原编著者致以诚挚的谢意。

本书由李爱群、高振世教授主编,李爱群教授、高振世教授、梁书亭教授、王修信教授、叶继红教授、刘钊教授等共同编著。具体分工如下:

第1章、第2章、第5章、第9章、第10章由李爱群编写,第3章、第6章由高振世编写,第4章(除§4.6)由梁书亭编写,第4章§4.6由王修信编写,第7章由叶继红编写,第8章由刘钊编写。全书由李爱群、高振世负责统稿。

编写过程中,博士生叶正强、毛利军、丁幼亮等协助做了大量工作,在此深表谢意。

限于时间和水平,书中的疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者于东南大学土木工程学院

2004年5月

目 录

第1章 地震概述	1
1.1 地震基本知识	1
1.1.1 地球的构造	1
1.1.2 地震的类型与成因	1
1.1.3 世界的地震活动	2
1.1.4 我国的地震活动	2
1.2 地震基本术语	3
1.2.1 震源和震中	3
1.2.2 地震波	3
1.2.3 震级	5
1.2.4 地震烈度	5
1.3 地震动	8
1.3.1 地震动的量测	8
1.3.2 强地震动特性	9
思考题	13
第2章 地震作用	14
2.1 单自由度体系的地震作用	14
2.1.1 单自由度体系的地震反应	14
2.1.2 地震反应谱	22
2.1.3 地震作用与作用效应	27
2.2 多自由度体系的地震作用	31
2.2.1 多自由度体系的地震反应	31
2.2.2 振型分解反应谱法	44
思考题与习题	48
第3章 结构抗震计算	50
3.1 结构抗震计算原则	50
3.1.1 建筑抗震设防分类和设防标准	50
3.1.2 三水准抗震设防目标	51

3.1.3 两阶段抗震设计方法	52
3.1.4 结构抗震计算的一般规定	52
3.2 设计地震动	56
3.2.1 地震影响	56
3.2.2 设计反应谱	61
3.2.3 设计地震波	65
3.3 水平地震作用计算	67
3.3.1 振型分解反应谱法	67
3.3.2 底部剪力法	77
3.3.3 时程分析法	82
3.4 竖向地震作用计算	84
3.5 结构抗震验算	87
3.5.1 截面抗震验算	87
3.5.2 抗震变形验算	90
思考题与习题	95
第4章 结构抗震概念设计	96
4.1 选择抗震有利的建筑场地、地段和地基	100
4.1.1 选择抗震有利地段	100
4.1.2 选择抗震有利的建筑场地和地基	100
4.2 设计有利的房屋抗震体型、进行合理的结构布置	105
4.2.1 设计有利的房屋抗震体型	105
4.2.2 合理的抗震结构布置	108
4.3 选择合适的结构材料	108
4.4 提高结构抗震性能的措施	110
4.5 控制结构变形,确保结构的整体性	113
4.6 减轻房屋自重和妥善处理非结构部件	113
4.6.1 减轻房屋自重	113
4.6.2 妥善处理非结构部件	114
思考题	115
第5章 混凝土结构房屋抗震设计	116
5.1 抗震设计的一般要求	116

5.1.1 震害及其分析	116
5.1.2 抗震设计的一般要求	118
5.2 框架结构的抗震计算	124
5.2.1 水平地震作用下框架内力的计算	124
5.2.2 水平地震作用下框架变形的计算	125
5.2.3 框架结构的抗震验算	128
5.3 框架结构的抗震设计	130
5.3.1 框架结构的抗震性能	130
5.3.2 框架梁的抗震设计	130
5.3.3 框架柱的抗震设计	138
5.3.4 框架梁柱节点的抗震设计	148
5.4 抗震墙结构的抗震设计	155
5.4.1 悬臂抗震墙的抗震性能	155
5.4.2 联肢抗震墙的抗震性能	157
5.4.3 墙肢的抗震概念设计	158
5.4.4 连梁的抗震概念设计	165
5.4.5 抗震墙结构的截面抗震验算	167
5.5 框架—抗震墙结构的抗震设计	175
5.5.1 框架—抗震墙结构的抗震性能	175
5.5.2 框架—抗震墙结构的抗震设计	176
思考题与习题	177
第6章 砌体结构房屋抗震设计	180
6.1 砌体房屋抗震设计的一般规定	180
6.1.1 多层砌体房屋的结构体系	182
6.1.2 房屋的层数和高度的限制	182
6.1.3 多层砌体房屋的最大高宽比	183
6.1.4 抗震横墙的最大间距	184
6.1.5 房屋局部尺寸的限制	184
6.2 多层砌体房屋的抗震验算	185
6.2.1 水平地震作用和层间剪力的计算	185
6.2.2 楼层水平地震剪力在各抗侧力墙体间的分配	186
6.2.3 墙体截面的抗震承载力验算	191
6.3 砌体结构房屋的抗震构造措施	194

6.3.1 多层黏土砖房抗震构造措施	194
6.3.2 多层砌块房屋抗震构造措施	199
思考题	200
第7章 钢结构房屋抗震设计	202
7.1 钢结构房屋的震害	202
7.2 高层钢结构房屋抗震设计	203
7.2.1 高层钢结构体系	203
7.2.2 高层钢结构抗震设计	205
7.3 钢构件及其连接的抗震设计	208
7.3.1 钢梁	209
7.3.2 钢柱	210
7.3.3 支撑构件	211
7.3.4 梁与柱的连接	215
思考题	218
第8章 桥梁结构抗震设计	220
8.1 桥梁震害及其分析	220
8.2 桥梁结构的抗震计算	221
8.2.1 桥梁设计反应谱	221
8.2.2 梁桥地震作用的计算	222
8.2.3 拱桥地震作用的计算	228
8.2.4 地震作用效应组合	229
8.3 桥梁结构的抗震设计	231
思考题	232
第9章 建筑结构隔震设计	233
9.1 隔震结构概述	233
9.1.1 隔震结构的基本原理	233
9.1.2 隔震结构的性能和效果	234
9.1.3 隔震结构的适用性	235
9.2 隔震支座	235
9.2.1 叠层橡胶支座	235
9.2.2 弹性滑移支座	237

9.3 隔震设计	239
9.3.1 分析模型	239
9.3.2 隔震层的力学特性	240
9.3.3 隔震结构设计	240
思考题	242
第10章 建筑结构消能减震设计	243
10.1 结构消能减震概述	243
10.1.1 结构振动控制	243
10.1.2 结构消能减震	244
10.2 结构消能减震设计	248
10.2.1 结构消能减震设计的一般规定	248
10.2.2 消能减震结构计算	249
10.2.3 消能减震结构设计	253
思考题	254
参考文献	255

第1章 地震概述

1.1 地震基本知识

1.1.1 地球的构造

地球是一个平均半径约 6400km 的椭圆球体。由外到内可分为 3 层：最表面的一层是很薄的地壳，平均厚度约为 30km；中间很厚的一层是地幔，厚度约为 2900km；最里面的为地核，其半径约为 3500km。

地壳由各种岩层构成。除地面的沉积层外，陆地下面的地壳通常由上部的花岗岩层和下部的玄武岩层构成；海洋下面的地壳一般只有玄武岩层。地壳各处厚薄不一，约为 5~40km。世界上绝大部分地震都发生在这一薄薄的地壳内。

地幔主要由质地坚硬的橄榄岩组成。由于地球内部放射性物质不断释放热量，地球内部的温度也随深度的增加而升高。从地下 20km 到地下 700km，其温度由大约 600℃ 上升到 2000℃。在这一范围内的地幔中存在着一个厚约几百公里的软流层。由于温度分布不均匀，就发生了地幔内部物质的对流。另外，地球内部的压力也是不均衡的，在地幔上部约为 900MPa，地幔中间则达 370000MPa，地幔内部物质就是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，所观测到的最深的地震发生在地下 700km 左右处，可见地震仅发生在地球的地壳和地幔上部。

地核是地球的核心部分，可分为外核（厚 2100km）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，而内核可能是固态。

1.1.2 地震的类型与成因

地震按其成因主要分为火山地震、陷落地震和构造地震。

由于火山爆发而引起的地震叫火山地震；由于地表或地下岩层突然大规模陷落和崩塌而造成的地震叫陷落地震；由于地壳运动，推挤地壳岩层使其薄弱部位发生断裂错动而引起的地震叫构造地震。火山地震和陷落地震的影响范围和破坏程度相对较小，而构造地震的分布范围广、破坏作用大，因而对构造地震应予以重点考虑。

构造地震的成因是，在地球内部不断运动的过程中，始终存在着巨大的能量，造成地壳岩层不停地连续变动，不断地发生变形，产生地应力，当地应力产

生的应变超过某处岩层的极限应变时,岩层就会发生突然断裂和错动,从而引起振动。振动以波的形式传到地面,便形成地震(图 1-1)。构造地震与地质构造密切相关,这种地震往往发生在地应力比较集中、构造比较脆弱的地段,即原有断层的端点或转折处、不同断层的交会处。

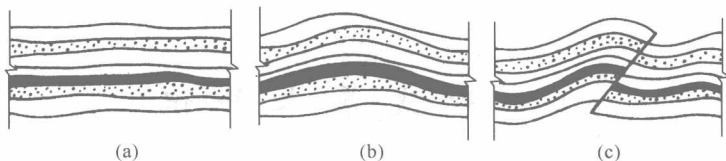


图 1-1 构造地震的形成

(a) 岩层原始状态; (b) 受力后发生褶皱变形; (c) 岩层断裂, 产生振动

对于地应力的产生,较为公认的板块构造学说认为,地球表面的岩石层不是一块整体,而由六大板块和若干小板块组成,这六大板块即欧亚板块、美洲板块、非洲板块、太平洋板块、澳洲板块和南极板块。由于地幔的对流,这些板块在地幔软流层上异常缓慢而又持久地相互运动着。由于它们的边界是相互制约的,因而板块之间处于拉张、挤压和剪切状态,从而产生了地应力。地球上的主要地震带就位于这些大板块的交界地区。

1.1.3 世界的地震活动

据统计,地球上平均每年发生震级为 8 级以上、震中烈度 11 度以上的毁灭性地震 2 次;震级为 7 级以上、震中烈度在 9 度以上的大地震不到 20 次;震级在 2.5 级以上的有感地震在 15 万次以上。

在宏观地震资料调查和地震台观测数据研究基础上,可以得到世界范围内的两个主要地震带:一是环太平洋地震带,它沿南、北美洲西海岸、阿留申群岛,转向西南到日本列岛,再经我国台湾省,达菲律宾、巴布亚、新几内亚和新西兰;全球约 80% 浅源地震和 90% 的中、深源地震,以及几乎所有的深源地震都集中在这一地带。二是欧亚地震带,它西起大西洋的亚速岛,经意大利、土耳其、伊朗、印度北部、我国西部和西南地区,过缅甸至印度尼西亚与上述环太平洋带相衔接;除分布在环太平洋地震活动带的中、深源地震以外,几乎所有其他中、深源地震和一些大的浅源地震都发生在这一活动带上。

此外,在大西洋、太平洋和印度洋中也有呈条形分布的地震带。

1.1.4 我国的地震活动

我国东临环太平洋地震带,南接欧亚地震带,地震分布相当广泛。我国主要地震带有两条:一是南北地震带,它北起贺兰山,向南经六盘山,穿越秦岭沿川西至云南省东北,纵贯南北。二是东西地震带,主要的东西构造带两条,北面

的一条沿陕西、山西、河北北部向东延伸，直至辽宁北部的千山一带；南面的一条，自帕米尔高原起经昆仑山、秦岭，直到大别山区。

据此，我国大致可划分成6个地震活动区：①台湾及其附近海域；②喜马拉雅山脉活动区；③南北地震带；④天山地震活动区；⑤华北地震活动区；⑥东南沿海地震活动区。

据统计，全国除个别省份（例如浙江、江西）外，绝大部分地区都发生过较强的破坏性地震，有不少地区现代地震活动还相当强烈，如我国台湾省大地震最多，新疆、西藏次之，西南、西北、华北和东南沿海地区也是破坏性地震较多的地区。

1.2 地震基本术语

1.2.1 震源和震中

地层构造运动中，在地下岩层产生剧烈相对运动的部位大量释放能量，产生剧烈振动，此处就叫做震源，震源正上方的地面位置叫震中（图1-2）。震中附近的地面振动最剧烈，也是破坏最严重的地区，叫震中区或极震区。地面某处至震中的水平距离叫做震中距。把地面上破坏程度相同或相近的点连成的曲线叫做等震线。震源至地面的垂直距离叫做震源深度。

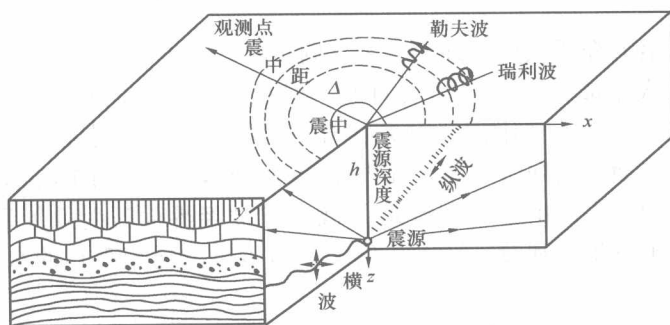


图 1-2 地震波传播示意图

按震源的深浅，地震又可分为：①浅源地震，震源深度在70km以内；②中源地震，震源深度在70~300km范围；③深源地震，震源深度超过300km。浅源、中源和深源地震所释放能量分别约占有所有地震释放能量的85%、12%和3%。

1.2.2 地震波

地震引起的振动以波的形式从震源向各个方向传播并释放能量，这就是地震

波。由于断层机制、震源特点、传播途径等因素的不确定性，地震波具有强烈的随机性。地震波可以看作是一种弹性波，它主要包含可以通过地球本体的两种“体波”和只限于在地面附近传播的两种“面波”。

1. 体波

体波是指通过介质体内传播的波。介质质点振动方向与波的传播方向一致的波称为纵波；质点振动方向与波的传播方向正交的波称为横波（图 1-3）。纵波比横波的传播速度要快，因此，通常把纵波叫“P 波”（即初波），把横波叫“S 波”（即次波）。由于地球是层状构造，体波通过分层介质时，在界面上将产生折射，并且在地表附近地震波的进程近于铅直方向。因此在地表面，对纵波感觉上是上下动，而对横波感觉是水平动。

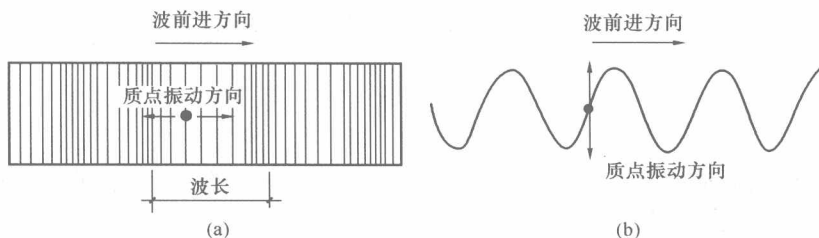


图 1-3 体波质点振动形式

(a) 压缩波；(b) 剪切波

2. 面波

面波是指沿着介质表面（地面）及其附近传播的波。它是体波经地层界面多次反射形成的次生波。在半空间表面上一般存在两种波的运动，即瑞利波（R 波）和勒夫波（L 波），如图 1-4 所示。瑞利波传播时，质点在波的传播方向和自由面（即地表面）法向组成的平面内作椭圆运动，瑞利波的特点是振幅大，在地表以垂直运动为主。由于瑞利波是 P 波和 S 波经界面折射叠加后形成，因而在震中附近并不发生瑞利波。勒夫波只是在与传播方向相垂直的水平方向运动，

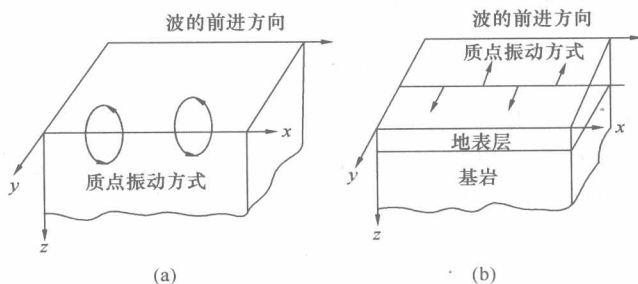


图 1-4 面波质点振动形式

(a) 瑞利波质点振动；(b) 勒夫波质点振动

即地面水平运动或者说在地面上呈蛇形运动形式。质点在水平向的振动与波行进方向耦合后会产生水平扭矩分量，这是勒夫波的重要特点之一。勒夫波的另一个重要特点是其波速取决于波动频率，因而勒夫波具有频散性。

综上所述，地震波的传播以纵波最快，横波次之，面波最慢。所以在地震记录图（图 1-5）上，纵波最先到达。横波到达较迟，面波在体波之后到达。当横波或面波到达时地面振动才趋于强烈。一般认为，地震动在地表面引起的破坏力主要是 S 波和面波的水平 and 竖向振动。

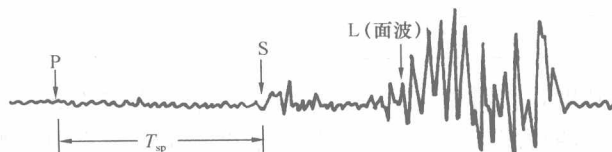


图 1-5 地震波记录图

1.2.3 震级

震级是表示地震本身大小的尺度，是按一次地震本身强弱程度而定的等级。目前，国际上比较通用的是里氏震级，其原始定义是在 1935 年由 C. F. Richter 给出，即地震震级 M 为：

$$M = \log A \quad (1-1)$$

式中 A ——标准地震仪（指摆的自振周期 0.8s，阻尼系数 0.8，放大倍数 2800 倍的地震仪）在距震中 100km 处记录的以微米（ $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$ ）为单位的最大水平地动位移（即振幅）。例如，在距震中 100km 处地震仪记录的振幅是 100mm，即 100000 μm ，则 $M=\log 100000=5$ 。

震级表示一次地震释放能量的多少，所以一次地震只有一个震级。震级 M 与震源释放的能量 E 之间有如下对应关系：

$$\log E = 1.5M + 11.8 \quad (1-2)$$

由上式可知，震级每差一级，地震释放的能量将差 32 倍。

一般认为，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，人可以感觉到，称为有感地震；5 级以上地震能引起不同程度的破坏，称为破坏性地震；7 级以上的地震，则称为强烈地震或大震；8 级以上的地震，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。

1.2.4 地震烈度

地震烈度表示地震时一定地点地面振动强弱程度的尺度。对于一次地震，表示地震大小的震级只有一个，但它对不同地点的影响是不一样的。一般说，随距

离震中的远近不同,烈度就有差异,距震中愈远,地震影响愈小,烈度就愈低;反之,距震中愈近,烈度就愈高。此外,地震烈度还与地震大小、震源深度、地震传播介质、表土性质、建筑物动力特性等许多因素有关。震中区的烈度称为震中烈度。对于大量的震源深度在10~30km的浅源地震,其震中烈度 I_0 与震级 M 的对应关系见表1-1。

震中烈度与震级的大致对应关系

表 1-1

震级 M	2	3	4	5	6	7	8	>8
震中烈度 I_0	1~2	3	4~5	6~7	7~8	9~10	11	12

为评定地震烈度,就需要建立一个标准,这个标准就称为地震烈度表。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等级的地震烈度表(表1-2)。

中国地震烈度表(1999)

表 1-2

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到	0.22~0.44	0.02~0.04