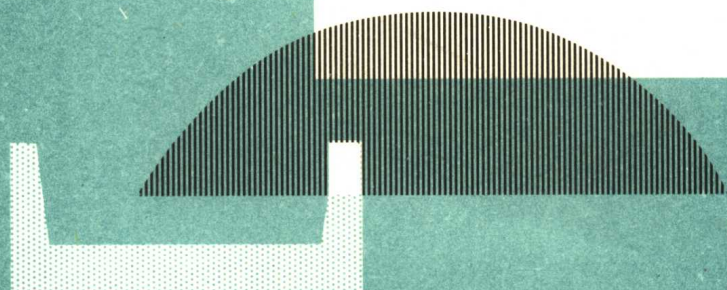


高等学校推荐教材



建筑结构抗震设计

东南大学 编著
清华大学 主审

● 中国建筑工业出版社

高等学校推荐教材

建筑结构抗震设计

东南大学 编著
清华大学 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑结构抗震设计/东南大学编著.-北京:中国建筑工程
出版社, 1998
高等学校推荐教材
ISBN 7-112-03545-7

I. 建… I. 东… III. 抗震结构-结构设计-高等学校-
教材 IV. TU234

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 06449 号

本书根据全国建筑工程学科专业指导委员会建议的工民建专业本科《建筑抗震设计》课程基本要求,按照《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89)以及1993年局部修订进行编写。经过评审,1996年3月全国建筑工程学科专业指导委员会推荐本书为《建筑抗震设计》课程的全国通用教材。

书中首先介绍抗震设计的基本知识与基本要求、地基与基础的抗震设计问题,进而对以地震反应谱为基础的抗震计算理论,以及多层混合结构房屋、单层厂房、多高层钢筋混凝土结构房屋等建筑物和烟囱、水塔等构筑物的抗震设计方法,并对时程分析法、抗震计算中常用的电算分析、常见建筑物的抗震措施等作了详细介绍,最后还附有常见建筑物的抗震验算实例和各种抗震计算方法的相应计算例题。

本书也可供结构设计、施工技术人员参考使用。

高等学校推荐教材

建筑结构抗震设计

东南大学 编著

清华大学 主审

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京富生印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21¹/₂ 字数: 519 千字

1999年6月第一版 2000年12月第二次印刷

印数: 8001—14000册 定价: 21.90元

ISBN 7-112-03545-7

TU·2736(8785)

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)

前 言

以原《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ11—78)(以下简称原抗震规范)为依据编写的高等学校试用教材《建筑结构抗震设计》(地震出版社,1981年出版)(以下简称原抗震教材),曾为高等院校普遍使用。经重新修订的《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89)(以下简称抗震规范),已于1991年1月颁布施行,1993年7月又对此规范进行了局部修订。故很多院校建议对原抗震教材进行重新编写,以满足教学需要。作者曾经是原抗震教材的主要编者之一,正因为这样,我们根据中国建筑工业出版社的建议,以抗震规范和全国建筑工程学科专业指导委员会建议的工民建专业本科《建筑抗震设计》课程基本要求为依据,并结合作者多年教学、科研的经验,考虑了原抗震教材的基本体系与内容安排,编写了《建筑结构抗震设计》(中国建筑工业出版社,1995年1月出版)。经过评审,1996年3月全国建筑工程学科专业指导委员会推荐该书为《建筑抗震设计》课程的全国通用教材。这次出版,我们又根据教材评审和审查意见,以及在使用中发现的不足之处,对全书进行了修改和补充,以便更好地满足教学需要。

本书在内容选择上,注意了教材体系中的系统性和全面性,理论的系统性和先进性,以及理论与实际相结合;在叙述上,力求文字简练、概念清楚,深入浅出,便于学生自学。在具体安排上,首先介绍了抗震设计的基本知识与基本要求和地基与基础的抗震设计问题;进而对以地震反应谱为基础的一般抗震计算理论以及多层混合结构房屋、单层厂房、多高层钢筋混凝土结构房屋等常见建筑物和烟囱、水塔等常见构筑物的抗震设计方法,对时程分析法等先进而成熟的抗震设计理论和设计方法进行了系统阐述;还对抗震计算中常用的电算分析方法作了介绍,对抗震规范中针对各类常见建筑物所提出的各项抗震措施也进行了必要的说明;最后还附有各类常见房屋的抗震计算实例和各种抗震计算方法的相应计算例题,以帮助初学者掌握各章内容。

本书由东南大学编著。具体分工如下:第一、二、四、五、七章由高振世执笔,第三章由朱继澄、梁书亭执笔,第六章由唐九如、李爱群执笔,第八章由何达执笔;全书由高振世主编、李爱群副主编。本书由清华大学主审,具体分工如下:第一章至第六章和第八章由张良铎审查,第七章由陈聘审查。

审查和评审时对本书初稿所提出的诸多宝贵意见,编著者表示衷心的感谢。

本书在编写和出版过程中,得到东南大学土木工程学院蒋永生院长的很多帮助,在此也表示衷心感谢。

由于我们水平所限,加之时间较为仓促,难免有不妥和疏忽之处,敬请各位读者批评指正。

高振世

目 录

| | |
|---|----|
| 第一章 抗震设计的基本知识与基本要求 | 1 |
| 1-1 地震的类型和成因 | 1 |
| 1-2 震源、震中和地震波 | 3 |
| 1-3 地震震级、烈度和近震与远震 | 5 |
| 1-4 地震地面运动的一般特征 | 9 |
| 1-5 抗震设防 | 10 |
| 1-6 抗震设计的基本要求 | 14 |
| 参考文献 | 18 |
| 附录 1-1 中国地震烈度表 (1980) | 18 |
| 附录 1-2 中国地震烈度区划图 (1990) 中主要城市的基本烈度和全国 重点抗震城市 | 20 |
| 第二章 场地、地基和基础 | 21 |
| 2-1 建筑场地的选择 | 21 |
| 2-2 建筑场地类别的划分 | 22 |
| 2-3 天然地基的震害特点及其抗震措施 | 28 |
| 2-4 地基基础抗震验算 | 29 |
| 2-5 场地土的液化与抗液化措施 | 31 |
| 参考文献 | 40 |
| 第三章 地震作用和结构抗震验算 | 41 |
| 3-1 概述 | 41 |
| 3-2 单自由度弹性体系的地震反应分析 | 43 |
| 3-3 单自由度弹性体系的水平地震作用与抗震设计反应谱 | 50 |
| 3-4 多自由度弹性体系的地震反应分析——振型分解反应谱法 | 55 |
| 3-5 计算水平地震作用的底部剪力法 | 67 |
| 3-6 结构自振周期和振型的计算 | 70 |
| 3-7 建筑结构的扭转地震效应 | 83 |
| 3-8 地基与上部结构相互作用的影响 | 86 |
| 3-9 结构竖向地震作用 | 87 |
| 3-10 截面抗震验算 | 89 |
| 3-11 结构抗震变形验算 | 92 |
| 参考文献 | 96 |

| | |
|--------------------------------------|------------|
| 附录 3-1 用振型分解反应谱法求解多质点弹性体系的计算机程序—— | |
| RST 程序 | 96 |
| 附录 3-2 求解多质点弹性体系自振周期和振型的雅可比 (JACOBI) | |
| 法子程序 | 105 |
| 第四章 多层混合结构房屋 | 108 |
| 4-1 多层砌体房屋的震害及其分析 | 108 |
| 4-2 多层砌体房屋的抗震措施 | 111 |
| 4-3 多层砌体房屋的抗震计算 | 120 |
| 4-4 多层砖房抗震验算实例 | 129 |
| 4-5 底层框架和多层内框架砖房的震害及其分析 | 137 |
| 4-6 底层框架和多层内框架砖房的抗震计算 | 139 |
| 4-7 底层框架和多层内框架砖房的抗震措施 | 144 |
| 参考文献 | 147 |
| 第五章 单层厂房 | 148 |
| 5-1 震害及其分析 | 148 |
| 5-2 厂房结构的抗震措施 | 152 |
| 5-3 横向抗震计算 | 161 |
| 5-4 单层厂房考虑空间工作与扭转影响的振动分析 | 169 |
| 5-5 纵向抗震计算 | 177 |
| 5-6 构件和节点的抗震设计 | 189 |
| 5-7 单层厂房抗震计算实例 | 191 |
| 参考文献 | 206 |
| 第六章 多层和高层钢筋混凝土结构房屋 | 207 |
| 6-1 震害及其分析 | 207 |
| 6-2 抗震设计的一般要求 | 210 |
| 6-3 框架内力与位移计算 | 217 |
| 6-4 框架柱、梁、节点抗震设计 | 234 |
| 6-5 框架结构抗震验算实例 | 252 |
| 6-6 砖填充墙框架结构抗震设计 | 263 |
| 6-7 框架—抗震墙结构的抗震计算与构造 | 267 |
| 6-8 抗震墙结构的抗震设计 | 277 |
| 参考文献 | 285 |
| 第七章 结构地震反应的时程分析 | 286 |
| 7-1 概述 | 286 |
| 7-2 钢筋混凝土结构构件的恢复力特性 | 288 |
| 7-3 地震波的选用 | 295 |
| 7-4 单质点体系地震反应的时程分析 | 297 |

| | |
|------------------------------|------------|
| 7-5 按层间剪切模型进行地震反应的时程分析 | 303 |
| 7-6 按杆系模型进行地震反应的时程分析 | 307 |
| 参考文献 | 315 |
| 附录 7-1 地震加速度记录 | 315 |
| 第八章 烟囱与水塔 | 319 |
| 8-1 烟囱 | 319 |
| 8-2 水塔 | 330 |
| 参考文献 | 335 |

第一章 抗震设计的基本知识与基本要求

地震是一种突发的自然灾害。它主要是由于地下某处薄弱岩层突然破裂，在原有累积弹性应力作用下断层两侧发生回跳引起振动，或者地球板块相互挤压、顶撞致使板块边缘岩层脆性破裂引起振动，从而以波的形式将岩层振动传至地表引起地面的剧烈颠簸和振晃，这种形成剧烈颠簸和振晃的地面运动就叫做地震。由于这种地震是地壳构造变动而引起的，故又称为构造地震。我国是世界上多地震国家之一。自本世纪以来的 90 多年内，共发生破坏性地震 2600 余次，其中 6 级以上破坏性地震 500 余次，平均每年 5.4 次，8 级以上的地震 9 次。在 60~70 年代，我国河北邢台、云南通海、四川甘孜、辽宁海城和河北唐山地区所发生的几次地震都属于能造成严重破坏的强烈地震。这些地震给人民生命财产和国民经济造成了十分严重的损失，这是必须深刻记取的教训。

鉴于 1976 年以来，我国的地震活动在经历了 10 多年相对平静的阶段之后，又进入了一个新的活跃期，近两年内 5 级以上地震的次数已大大高于本世纪以来年平均发震次数。预计这个新的地震活跃期可能持续到本世纪末。为了最大限度地减轻地震灾害，搞好新建工程的抗震设计，是一项重要的根本性的减灾措施。

1-1 地震的类型和成因

地震通常按其成因可划分为四种类型：构造地震、火山地震、陷落地震和诱发地震。由于地球内部岩层的构造变动引起的地震叫构造地震。构造地震分布最广，危害最大。由于火山爆发，岩浆猛烈冲出地面引起的地面震动叫做火山地震。火山地震在我国很少见。由于地表或地下的岩层如石灰岩地区较大的地下溶洞或古旧矿坑等突然发生大规模的陷落和崩塌时引起小范围内的地面震动叫陷落地震。这种地震很少造成破坏，其震级也很小。由于水库蓄水或深井注水等引起的地面震动叫诱发地震。考虑到构造地震破坏性大、影响面广，下面再介绍一下构造地震的发生与发展过程。有关构造地震的成因有多种学说，本章仅介绍断层说和板块构造说。

地壳是由各种岩层构成的。大量事实说明，地壳并不是静止不动的，地壳是在很长的地质年代中连续地变动着的，大片地区或在上升，或在下沉，或在倾斜。由于地球在它运动和发展过程中内部存在着大量的能量，地壳中的岩层在这些能量所产生的巨大力的作用下使原始水平状态的岩层（图 1-1a）发生变形，产生地应力。当作用力只能使岩层产生形变，地应力尚较小时，岩层尚未丧失其连续完整性，而仅发生褶皱（图 1-1b）。当作用力不断加强，地壳岩层中的应力不断增加，地应力引起的应变超过某处岩层的极限应变时，则使岩层产生断裂和错动（图 1-1c）。而承受应变的岩层在其自身的弹性应力作用下发生回跳，迅速弹回到新的平衡位置。大多数情况下，断层两侧弹性回跳的方向是相反的。岩层中原来构造变动过程中积累起来的应变能，在回弹过程中得以释放，并以弹性波的形式传至地

面，地面随之产生强烈振动，这就是地震。以上是按断层说解释构造地震的成因。

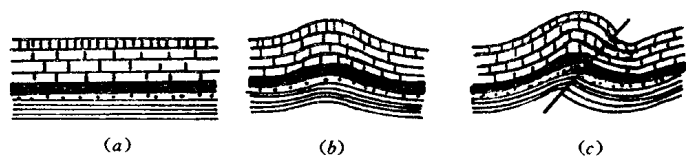


图 1-1 构造变动形成地震示意图^[1-1]

(a) 岩层原始状态；(b) 受力后发生变形；(c) 岩层断裂产生振动

按板块构造学说，地球表面的最上层是由强度较大的岩石组成，叫做岩石层，厚度约为 70~100km；岩石层的下面为强度较低并带有塑性的岩流层。一般认为，地球表面的岩石层是由美洲板块、非洲板块、欧亚板块、印澳板块、太平洋板块和南极洲板块等若干个大板块所组成。这些板块由于下面岩流层的对流运动而作刚体运动，从而引起板块之间互相的挤压和顶撞作用致使其边缘附近岩石层脆性破裂而产生地震。本节后面提到的地球上两个主要地震带都处于这些大板块的交界地区。因此，板块构造学说的提出，有助于解释上述地震带的成因。

地下岩层断裂时，往往不是沿着一个平面发生，而是形成一个由一系列裂缝组成的破碎地带。岩层发生断裂、错动时，整个破碎地带的岩层不可能同时达到新的平衡状态。因此，每次大地震的发生一般都不是孤立的，大地震前后，在发震地区，总有很多次中小地震发生。在一定时间内（一般是几十天至数月）相继发生在相近地区的一系列大小地震称为地震序列。在某一地震序列中，其中最大的一次地震叫做主震。主震之前发生的地震叫做前震，之后发生的地震叫做余震。在一个地震序列中，若主震震级很突出，其释放的能量占全序列的绝大部分叫做主震型，这是破坏地震中常见的一种类型。若主震震级不突出，主要能量由多个震级相近的地震释放出来，叫做震群型或多发型。若前震和余震都很稀少，甚至没有，大部分能量基本上通过主震一次释放出来，叫做孤立型或单发型。地震序列的认识和判别对预报地震和防御地震都是极其重要的。

在上述三种类型地震中，据统计主震型地震约占 60%，震群型地震约占 30%，而单发型地震约占 10%。

地震的发生与地质构造密切相关。一般说来，岩层中原来已有断裂存在，致使岩石的强度较低，容易发生错动或产生新的断裂，也就容易发生地震。特别在活动性较大的断裂带的两端和拐弯部位，两条活动断层的交汇处，以及现代断裂差异运动变化剧烈的大型隆起或凹陷的转换地带，地应力比较集中，构造比较脆弱，往往易于发生地震。

从世界范围对地震进行历史性的研究，可以得出历史上地震的分布规律。世界上地震主要集中在下列两个地震带：一是环太平洋地震带，它从南美洲西部海岸起，经北美洲西部海岸、阿拉斯加南岸、阿留申群岛，转向西南至日本列岛，再经我国台湾省，而达菲律宾、新几内亚和新西兰，上述环形地带的地震活动性最强，全球约 80%~90% 的地震都集中在这一地带；二是地中海南亚地震带，它西起大西洋的亚速岛，后经意大利、土耳其、伊朗、印度北部、我国西部和西南地区，再经缅甸、印尼的苏门答腊与爪哇，最后与上述环太平洋地震带相联接。

此外，在大西洋、太平洋、印度洋中也有呈条形分布的地震带。

我国地处两大地震带的中间，地震分布相当广泛。除台湾省和西藏南部分别属于上述环太平洋地震带和地中海南亚地震带之外，其他地区的地震主要集中在下列两个地带：南北地震带，北起贺兰山，向南经六盘山，穿越秦岭沿川西直至云南东部，形成贯穿我国南

北的条带；东西地震带，西起帕米尔高原，向东经昆仑山、秦岭，然后一支向北沿陕西、山西、河北北部向东延伸，直至辽宁北部，另一支向南向东延伸至大别山等地。

1-2 震源、震中和地震波

一、震源和震中

造成地震发生的地方叫震源。构造地震的震源是指地下岩层产生剧烈地相对运动的部位。这个部位不是一个点，而是有一定深度和范围的体。震源正上方的地面位置，或者说震源在地表的投影，叫震中。震中附近地面震动最厉害，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）。

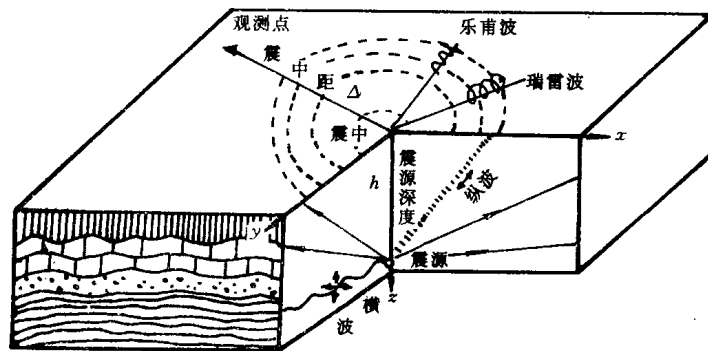


图 1-2 地震波传播示意图

通常把震源深度在 60km 以内的地震叫浅源地震，深度在 60~300km 范围的叫中源地震，在 300km 以上的叫深源地震。到目前为止，所观测到的最深地震是 700km。世界上绝大部分地震是浅源地震，震源深度集中在 5~20km 左右；中源地震较少，深源地震更少。一般说来，对于同样大小的地震，当震源深度较浅时，则波及的范围较小而破坏的程度较重；当震源深度较大时，波及的范围也较大，而破坏的程度相对较轻。例如 1960 年 2 月 29 日摩洛哥艾加迪尔城 5.8 级地震，震源深度为 3km，震中区破坏极为严重，震中烈度竟达 9 度，破坏仅局限在震中附近 8km 范围内；1974 年 4 月 22 日江苏溧阳发生了与上述震级相近的 5.5 级地震，而震源深度为 18km，震中烈度仅 7 度强，在离震中 20km 范围内有所破坏。比较两次地震可见，后者震中破坏比前者要轻得多，前者是一个震源浅、破坏重、影响范围小的典型震例。

二、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，这就是地震波。在地球内部传播的行波称为体波；仅限于在地球表面传播的行波称为面波。地震波是一种弹性波。

体波中包括纵波和横波两种。纵波是由震源向外传播的疏密波，质点的振动方向与波的前进方向一致，使介质不断地压缩和疏松。所以纵波又称压缩波、疏密波。如在空气中传播的声波就是一种纵波。纵波的周期较短，振幅较小。横波是由震源向外传播的剪切波，质点的振动方向与波的前进方向相垂直，亦称剪切波。横波的周期较长，振幅较大。还应指出，横波只能在固体内传播，而纵波在固体和液体内都能传播。

根据弹性理论，纵波速度 v_p 与剪切波速度 v_s 可分别按下列公式计算

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1-1)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1-2)$$

式中 E ——介质的弹性模量；
 ρ ——介质的密度；
 μ ——介质的泊松比；
 G ——介质的剪切模量。

在一般情况下，当令 $\mu=0.22$ 时，从式 (1-1) 和式 (1-2) 可得

$$v_p = 1.67v_s \quad (1-3)$$

由此可见，纵波的传播速度比剪切波的传播速度要快，故从震中传播出的地震波中，纵波先于剪切波到达地表。因此，通常又把纵波叫 P 波（即初波），把剪切波叫 S 波（即次波），表 1-1 列出剪切波在一些土层介质中的传播速度范围（适用于深度小于 10m 的情况）。

剪切波的传播速度

表 1-1

| 土层类别 | v_s (m/s) | 土层类别 | v_s (m/s) |
|-------------|-------------|----------|-------------|
| 填土（包括杂填土） | 90~270 | 砾石、卵石、碎石 | 200~500 |
| 粘性土（包括亚粘土等） | 100~450 | 风化岩 | 350~500 |
| 砂土（粉、中、粗） | 150~500 | 岩石 | >500 |

由表中可见，土层土质由软至硬，在其中传播的剪切波速由小到大。剪切波速度不仅与地基的强度、变形特性等因素有密切关系，而且可采用较简便的仪器测得，故在地基土动力性质评价中占有重要地位。抗震规范正是根据剪切波速对场地土进行分类的（见第二章）。

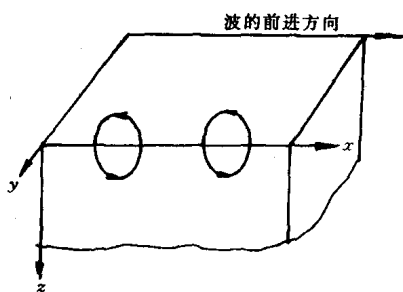


图 1-3 瑞雷波表面质点运动轨迹

由于地球的层状构造特点，体波通过分层介质时，将会在界面上反复发生反射和折射。当体波经过地层界面多次反射、折射后，投射到地面时，又激起两种仅沿地面传播的面波，它们是瑞雷波和乐甫波。瑞雷波传播时，质点在波的传播方向和地表面法向所组成的平面内作与波前进方向相反的椭圆运动（图 1-3），而与该平面垂直的水平方向没有振动。故瑞雷波在地面上呈滚动形式。瑞雷波具有随着距地面深度增加而振幅急剧减小的特性，这可能就是在地震时地下建筑物比地上建筑物受害较轻的一个原因。

乐甫波传播时使质点在地平面内作与波前进方向相垂直的运动，即在地面上呈现蛇形运动。乐甫波也随深度而衰减。面波的传播速度约为剪切波传播速度的 90%，面波振幅大

而周期长，只在地表附近传播，比体波衰减慢，故能传播到很远的地方。

综上所述，地震波的传播以纵波最快，剪切波次之，面波最慢。所以在任意一地震波记录图(图 1-4)上，纵波最先到达，剪切波次之，面波到达最晚，然而就振幅而言，后者最大。从图中还可看出，在这三种波到达之间有一相对稳定区段，稳定区段的时间间隔，随着由观测

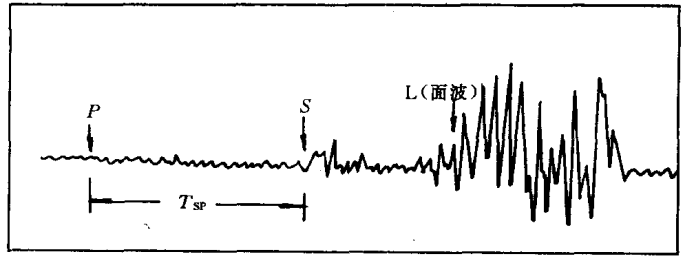


图 1-4 地震波记录图

点至震源之间距离的减小而缩短。在震中区，鉴于震源机制和地面扰动的复杂性，三种波的波列几乎是难以区分的。

地震现象表明，纵波使建筑物产生上下颠簸，剪切波使建筑物产生水平方向摇晃，而面波则使建筑物既产生上下颠簸又产生左右摇晃。一般是在剪切波和面波都到达时振动最为激烈。由于面波的能量比体波要大，所以造成建筑物和地表的破坏是以面波为主的。

1-3 地震震级、烈度和近震与远震

一、震级

震级是按着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，其定义是 1935 年里希特 (C. F. Richter) 给出的。地震的震级是用伍德—安德生 (Wood—Anderson) 式标准地震仪 (指摆的自振周期为 0.8s，阻尼系数为 0.8，放大倍数为 2800 倍的地震仪) 所记录到的距震中 100km 处最大水平地动位移 (即振幅 A ，以 μm 计) 以常用对数值表示的。所以，震级 M 可用下式表达

$$M = \log A \quad (1-4)$$

实际上，地震时距震中恰好 100km 处不一定设置了地震仪，且观测点也不一定采用上述标准地震仪。因此，对于距震中的距离不是 100km，且采用非标准地震仪所确定的震级，尚需进行适当修正才是所求的震级。

震级表示一次地震释放能量的多少，也是表示地震规模的指标，所以一次地震只有一个震级。各种不同的震级 M 与地震释放能量 E (尔格) 之间有如下的关系

$$\log E = 11.8 + 1.5M \quad (1-5)$$

根据式 (1-5)，将各级地震所释放的能量列于表 1-2。从该表可见，震级差一级，能量就要差 32 倍之多。一个 6 级地震所释放的能量，相当于一个 2 万吨级的原子弹。

一般地说，小于 2 级的地震，人们感觉不到，只有仪器才能记录下来，称做微震；2~4 级地震人就能感觉到，一般叫有感地震；5 级以上的地震就要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。本世纪以来，由仪器记录到的最大震级是 8.9 级，共出现两次，一次是 1906 年 1 月 31 日在哥伦比亚的厄瓜多尔西海地震，另一次是 1933 年 3 月 2 日在日本的三陆近海地震。

震级及其相应的能量

表 1-2

| 震 级 | 能量 (尔格) | 震 级 | 能量 (尔格) |
|-----|-----------------------|-----|-----------------------|
| 1 | 2.00×10^{13} | 6 | 6.31×10^{20} |
| 2 | 6.31×10^{14} | 7 | 2.00×10^{22} |
| 3 | 2.00×10^{16} | 8 | 6.31×10^{23} |
| 4 | 6.31×10^{17} | 8.5 | 3.55×10^{24} |
| 5 | 2.00×10^{19} | 8.9 | 1.41×10^{25} |

注: 1 尔格 = 10^{-7} J。

二、地震烈度

地震烈度是地震时一定地点地面震动强弱程度的尺度。一个同样大小的地震,若震源深度、离震中的距离和土质条件等因素不同,则对地面和建筑物的破坏就有所不同。若仅用地震震级来标志地震动强度,还不足以区别地面和建筑物破坏轻重的程度。所以,在地震工程中还需用地震烈度来表示地震对地面影响的强弱程度。因此,一次地震只能有一个震级,但距离震中不同的地点,却有不同地震烈度。一般来说,离震中越近,地震影响越大,地震烈度越高;离震中越远,地震烈度越低。表 1-3 示震源深度为 10~30km 时,震级 M 与震中烈度 I 的大致对应关系。

震级 M 与震中烈度 I 的关系

表 1-3

| 震 级 M | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 8 以上 |
|----------|-----|---|-----|-----|-----|------|----|------|
| 震中烈度 I | 1~2 | 3 | 4~5 | 6~7 | 7~8 | 9~10 | 11 | 12 |

1. 地震烈度表

地震烈度表是评定烈度大小的标准和尺度,它是根据人的感觉、器物反应、建筑物的破损程度和自然现象等宏观现象加以判定的。

1957 年公布的《新的中国地震烈度表》(以下简称原烈度表)是中国科学院地球物理研究所根据我国地震调查的经验、建筑特点和地震历史资料,并参照国外的烈度表编制的。该表采用 12 度分度法。

但是,经过 20 多年,我国发生了许多次破坏性地震,这些地震提供了丰富的经验,有必要加以总结;由于时代的进展,原烈度表有些地方已不能适应今天的情况,例如摆式时钟已经少见,古建筑和旧式民房日益减少,而新式建筑日见增多;原烈度表中没有物理指标,缺乏客观的数量标准,使按烈度设防的工程设计缺乏统一的设计数据以便遵循。鉴于上述原因,对原烈度表进行了修订,公布了修订后的《中国地震烈度表(1980)》(以下称烈度表,见本章附录 1-1 附表 1-1)。

与原烈度表相比,烈度表具有以下特点:

(1) 把人对地震的感觉发展为从低烈度至高烈度的连续尺度,即从 1 度时无感觉到 10 度时令人摔跌或被抛掷。近年来大地震的经验表明,一般 8 度时,人尚可站住,只有到 9 度、10 度时,人才会摔跤打滚。在地震烈度表中,1 度至 5 度以人的感觉为主要标志。

(2) 简化了物体反应的描述,仅把它作为低烈度的标志。对于钟停摆、家俱移动、水从容器溢出、器物坠落等不常见或受许多因素影响的标志不予列入,而突出了最常见的悬物摆动的现象。

(3) 房屋不分类,简化了房屋破坏程度的描述,并采用平均震害指数作为房屋破坏程

度的综合指标。木构架和土、石、砖墙构造的旧式房屋以及单层或多层的新式砖石房屋不再分类，把各种构造的房屋合为一类，看起来似不合理。实际上，各类房屋建筑质量差异所造成的影响不亚于建筑类别差异的影响，而采用不分类的混合统计，应用起来更方便。平均震害指数的计算方法见本章附录 1-1 附表 1-1 之注 3。

(4) 简化了各类构筑物和地表破坏现象的描述。由于牌坊、城墙等构筑物现已不多见，故无必要描述其震害现象。近年地震的经验表明，地表现象受地质、地形的影响极大，很难用作准确的烈度标志，只可以用作一定烈度的界限。

(5) 采用地面加速度峰值和速度峰值作为烈度的参考物理指标。补充物理尺度以便于工程应用并作为地区性宏观烈度标志的共同校正标准，还可为进一步用仪器测定烈度开辟道路。

2. 基本烈度和烈度区划图

原抗震规范中规定，一个地区的基本烈度，是指该地区未来 100 年内一般场地条件下可能遭遇的最大地震烈度。中国国家地震局，于 1972 年开始组织编制并于 1978 年颁布过的原《中国地震烈度区划图（1977）》，曾经是确定一个地区基本烈度的依据。该图的编制是，先进行地震的危险区划，然后完成地震烈度区划。其编制的原则如下：根据区域地震活动和地震地质条件的特征，对地震区进行划分，作为进一步研究的基本单元；分析各地震区地震活动的发展过程，对各区未来百年内的地震活动趋势、最大震级和各级地震的次数作出评估；分析地震区域内发生不同强度地震的地质构造条件，总结出发震的构造标志；综合地震活动性和地震地质条件的研究结果，判定各区域内未来百年内可能发震的地点，勾划出各级地震危险区；依据历史地震震级与震中烈度的关系，将危险区的震级换算为相应的震中烈度；根据所在地震区的烈度衰减规律圈定地震影响的烈度及其分布范围。

根据上述地震烈度区划图，全国地震烈度分布的面积数量情况如表 1-4 所示。由表 1-4 可见，不低于 7 度区的面积占全国总面积的 32.5%，而不低于 6 度区的面积约占全国总面积的 60%。该图反映了 70 年代我国地震烈度区划的科学水平。

全国地震烈度分布的面积数量 表 1-4

| 地震基本烈度分布 | 面积 (10 ⁴ km ²) | 百分比 (%) |
|-------------|---------------------------------------|---------|
| 5 度及其以下地区 | 384.5 | 40.1 |
| 6 度区 | 263.5 | 27.4 |
| 7 度区 | 206.5 | 21.55 |
| 8 度区 | 71.3 | 7.37 |
| 9 度区 | 23.6 | 2.46 |
| 10 度区及其以上地区 | 10.7 | 1.12 |
| 小 计 | 960.0 | 100.0 |

近十年来，我国的地震烈度区划的研究工作取得了明显的进步，积累了大量的新资料和研究成果。现有的观测事实和研究结果均表明，地震的发生和地震动的特性都具有一定的随机因素。因此，地震烈度区划图的编制须采用地震危险性分析概率方法，并对烈度赋予有限时间区限和概率水平的含义。我国新的《中国地震烈度区划图（1990）》（以下简称新地震烈度区划图）已经国务院批准，由国家地震局和建设部于 1992 年 5 月 22 日正式发布施行。新地震烈度区划图上所标示的地震烈度，系指在 50 年期限内，一般场地条件下可能遭遇超越概率为 10% 的地震烈度值。该烈度称为地震基本烈度。

编制新地震烈度区划图时，考虑我国地震活动强度高、分布广、复发周期长、地震构造复杂、区域性差异大的特点，充分吸收以前地震烈度区划工作的经验和近十余年来中长期地震预测方面的成果，并采用地震危险性分析的概率方法。为了正确地反映地震活动强

度、频度的空间非均匀性，首先，根据我国大区域地震活动和地质构造特点，先划分为东北、华北、华南、新疆、青藏高原、台湾和南海等 7 个地震区。在此基础上进一步依据构造活动性和地震活动性地区间的差异，将我国及其相邻区域再划分为 27 个地震带，作为统计单元。其次，又以地震带为基础，依据构造类比和地震活动的空间分布特征，确定出 733 个潜在震源区。然后，以地震带为基础，统计大小地震的震级—频度关系，分析未来 100 年的地震活动趋势，确定出该地震带的地震年平均发生率；再以强震发生的地质标志和地震活动图象为依据，进一步确定各潜在震源区的不同震级上限（即指可能发生的最大地震震级）；考虑各种预测因素，按震级间隔分档的方法，将地震带内的地震年平均发生率分配于各潜在震源区。考虑到地震波衰减的地区性特点，新地震烈度区划图采用椭圆或共轭椭圆衰减模型，按各地区衰减的方向性，计算各场点的地震危险性。最后，按统一年限和概率水平的地震烈度值编制出新地震烈度区划图。全国一些主要城市的地震基本烈度列于本章的附录 1-2，供参考。

三、近震与远震

震害调查查明，虽然不同地区的宏观地震烈度相同，但由于其与震中距离的远近不同，建筑物的刚度不同，则震害程度明显不同。处在大震级远震中距的柔性建筑物，其震害要比中、小震级近震中距的情况重得多。例如，1957 年 7 月 28 日墨西哥地震时，远离震中 407km 的墨西哥城，许多的软土上的高建筑物遭到重大破坏，而低矮的旧建筑物，却很少破坏。1957 年海城地震时，出现了类似的震害现象。距离震中约 110km 处于 6 度区的红阳煤矿，地面上已建成的高大建筑物均受到不同程度的震害，而高度较低、刚度较大的建筑物基本上无损坏。造成上述现象的原因，是由于地震波由震源向外传播时，短周期分量衰减得快，长周期分量衰减得慢，且长周期地震波在软土地基中又比短周期地震波放大得多，加之类共振现象的存在，从而使在远离震中区软土地基上柔性建筑物遭到较重的破坏。总之，同等烈度、不同震中距时的不同建筑，其震害是有差异的。为了反映上述宏观现象，显然将同等烈度粗略地按照震中距划分为若干区域，以示区别，这是必要的。因此，抗震规范提出了区分近震与远震的要求。

从上述全国地震烈度区划图的编制方法可以看出，烈度区划图上所标明的某一地方的烈度，事实上总是相应于一定震源的，当然也包括几个不同震源所造成同等烈度的影响。为了由烈度区划图给出粗略的震中距划分，抗震规范中规定采用下列简化方法：首先从烈度区划图上查出建设区域的基本烈度，当此基本烈度是受震中烈度与该基本烈度相等或比它高一度的地震影响时，则该区称为近震；当此基本烈度是受震中烈度比该基本烈度高二度或二度以上时，则该区称为远震（图 1-5）。

按地震烈度区划图，绝大多数区域只考虑近震影响，需要考虑远震影响的城市列于本章附录 1-2。

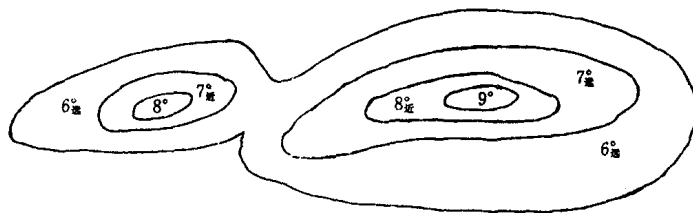


图 1-5 设计近震和远震的规范划分法

1-4 地震地面运动的一般特征

地震地面运动的一般特征，可用强震时地面运动加速度记录曲线来说明。图 1-6 表示 1940 年 5 月 18 日美国加利福尼亚州帝谷 (Imperial Valley) 7.1 级地震在震中距为 9km 埃尔森特罗 (El centro) 测得的 N-S 方向地面运动加速度记录。一条地震地面运动加速度记录曲线，初看起来似乎是极不规则的，是由一系列非周期性的加速度脉冲所组成。从曲线

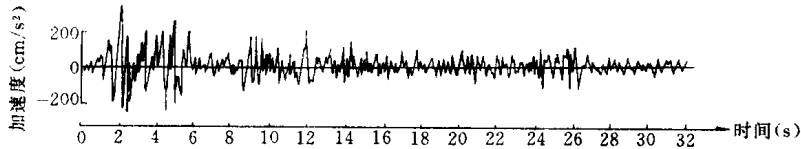


图 1-6 埃尔森特罗地震加速度

外形来看，所有强震记录都具有从开始震动，逐步增强，然后再衰减而趋于零的特点。地面加速度运动的强度在时间上的分布是不均匀的，有时还发现这种上升与衰减的过程可能不只一次。一般可将这一现象称为地震的不平稳性，它取决于震级、震源特性、震中距和地震波传播介质的特性等因素。研究表明，就建筑结构抗震设计而言，地震地面运动的一般特征可概括为：地面运动最大加速度、地面运动周期特性和强震的持续时间等三个参数。

应当指出，描述地面运动特征的不仅可用地面运动加速度，也还可用地面运动速度和位移，有时研究长周期柔性建筑物的震害时还要考虑地面运动速度和位移的影响，本节不拟详述。

一、地面运动最大加速度

初时，人们用静力学观点处理结构抗震设计问题时认为，强震时作用于结构的地震力是一种惯性力，其值主要取决于地面运动的最大加速度，所以地面运动最大加速度是地震地面运动的重要特征参数。另外，地面加速度也可视为地面震动强弱程度的量。实测与研究表明，地震烈度与地面运动最大加速度之间一般存在某种对应关系，所以我国地震烈度表已采用地面运动最大加速度作为地震烈度的参考物理指标。例如，埃尔森特罗地震加速度记录 (图 1-6) 中的最大值为 341.7 cm/s^2 ，由附表 1-1 可知，该地区的地震烈度应为 8 度。

地面运动最大加速度无疑与震害有密切关系。一般来说，地面运动最大加速度值增大，则地面建筑震害加重。还必须指出，对于一次地震所造成的震害，仅依据上述一个地面运动特征参数值来评价，而不同时考虑地面运动周期特性和强震持续时间等其他特征参数的影响，则所得到的震害评价是不全面的，有时是不正确的。

二、地面运动的周期特性

地震地面运动的周期特性对结构地震反应具有重要的影响。人们已知任意建筑物都有其自振周期，假若地震地面运动周期以长周期为主，则它将引起长周期柔性建筑物的强烈地震反应；反之，若地震地面运动周期特性以短周期为主，则它对短周期刚性建筑物的危害大。这就是所谓的共振效应。地震地面运动的周期特性，一般可用地震加速度反应谱峰点周期 (关于加速度反应谱的详细说明见第三章) 来表示。一般认为，加速度反应谱曲线最高峰点所对应的周期为地震卓越周期；有时也将相对较高的几个峰点所对应的周期都

称为地震卓越周期。例如埃尔森特罗地震加速度反应谱中两个峰点对应的卓越周期分别约为 0.3s 和 0.5s (图 3-8c), 则埃尔森特罗地震的周期特性属于中等周期^[1-2]。

地震地面运动的周期特性, 也可采用下列方法进行粗略的估计。地面运动加速度记录中两个相邻的零点之间的时间间隔作为半周期, 并把相应的峰值加速度看作为振幅。加速度记录中最大峰值的波和相对应的周期对结构反应的影响较大, 有时该周期与相应加速度反应谱的峰点周期大致相对应。因此, 地震地面运动加速度记录中最大峰值所对应周期也可反映该地震地面运动的周期特性。

一般来讲, 震级大, 断层错位的冲击时间长, 震中距离远, 场地土层松软、厚度大的地方, 其地面运动加速度反应谱的主要峰点偏于较长的周期; 相反, 震级较小, 断层错位的冲击时间短, 震中距离近, 场地土层坚硬、厚度薄的地方, 其地面运动加速度反应谱的主要峰点则一般偏于较短的周期。

三、强震的持续时间

地震地面运动的强震持续时间对建筑物的破坏程度有较大的影响。地面运动特征参数与震害的对比研究表明^[1-2], 在同等地面运动最大加速度的情况下, 当强震的持续时间短, 则该地点的地震烈度低, 建筑物的地震破坏轻; 反之, 当强震的持续时间长, 则该地点的地震烈度高, 建筑物的地震破坏重。例如, 埃尔森特罗地震的强震持续时间为 30s, 则该地的地震烈度为 8 度, 地震破坏较严重; 而另一次日本松代地震 (发生于 1966 年 4 月 5 日), 其地面运动最大加速度略高于埃尔森特罗地震, 但其强震持续时间比埃尔森特罗地震短很多, 仅有 4s, 则该地的地震烈度仅为 5 度, 未发现明显的地震破坏。

持续时间长的强烈地震将导致较重的结构破坏, 可用结构的积累破坏来说明。建筑物从微小的局部破裂到全部倒塌, 一般都需要一个过程, 完成这个过程的反复振动需要一段时间; 而振动过程过短, 则不能完成破坏过程。在地震地面运动作用下, 当结构反应超过其弹性阶段后, 建筑物将产生局部破坏, 可能发生一些肉眼不能观察到的微裂缝, 在这些微裂缝处, 应力状态极其复杂, 容易产生应力集中, 在振动过程的下一个反复中, 即使振动不再加强, 微裂缝还可能继续发展; 当建筑物的局部破坏严重时, 结构体系将改变, 在尔后的振动过程中各局部之间可能发生碰撞而产生进一步的破裂或很大的错位、移动或局部的倒塌, 亦即建筑物在振动的前一阶段开裂破坏, 而在振动的后期倒塌。只有当震动强度特别大时, 可能在一刹那间摧毁一栋建筑物, 过程极短; 假若震动强度略小, 一次持续时间短的振动可以使这个破坏过程开始, 但不能使整个破坏过程完成。

在震源中的发震断层长度、错位的大小和震源冲击次数等对强震持续时间有较大影响。一个高级别的地震往往伴随着很大的断层活动和多次连续震源冲击, 因此不仅导致强震持续时间长, 而且在一个很长的地震加速度曲线记录中出现多个峰点。另外, 在离开震中比较远的地区或场地覆盖层很厚的地区, 由于地震波在不同传播介质的多次反射和折射, 也可能使强震持续时间增长。

1-5 抗 震 设 防

一、抗震设防的一般目标

抗震设防是指对建筑物进行抗震设计和采取抗震构造措施, 达到抗震的效果。抗震设