



工程结构弹塑性地震反应

GONGCHENG JIEGOU
TANSUXING DIZHENG FANYING

贺国京 阎奇武 袁锦根 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

工程结构弹塑性地震反应

贺国京 阎奇武 袁锦根 主编

中 国 铁 道 出 版 社

2005年·北京

内 容 简 介

本书主要包括:钢筋混凝土材料和构件的抗震性能,结构弹性体系的地震反应,框架结构、剪力墙结构、筒体结构的弹塑性地震反应,桥梁结构地震反应,结构动力学中的各种变分原理。

本书除作为桥梁工程、结构工程、防灾工程及工程力学专业的本科生和研究生教材外,还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程结构弹塑性地震反应/贺国京,阎奇武,袁锦根主编.
北京:中国铁道出版社,2005.7
ISBN 7-113-06514-7

I.工… II.①贺…②阎…③袁… III.工程结构-地震
反应分析 IV.TU311.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 066460 号

书 名:工程结构弹塑性地震反应

作 者:贺国京 阎奇武 袁锦根 主编

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:程东海

印 刷:北京市彩桥印刷有限责任公司

开 本:787×1092 1/16 印张:18.25 字数:456千

版 本:2005年9月第1版 2005年9月第1次印刷

印 数:1~1000册

书 号:ISBN 7-113-06514-7/TU·808

定 价:29.50元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话(010)51873135 发行部电话(010)63545969



前

言

本书是根据中南大学桥梁工程、结构工程、防灾工程及工程力学专业开设的工程结构弹塑性地震反应和钢筋混凝土非线性分析课程的内容而编写的。本书在注重一些基本理论叙述的同时,也反映了近几年该领域的进展情况。该书不但可作为研究生学习有关课程的教材,也可作为土木工程专业本科生学习抗震设计概论的教材。

本书由中南大学和同济大学合编。同济大学周建民编写第一章、第二章,马坤全编写第七章第一节、第五节,中南大学袁锦根编写第三章、第四章,阎奇武编写第五章、第六章,贺国京编写第七章第二节、第三节、第四节及第八章,全书由贺国京教授、阎奇武副教授、袁锦根教授主编,西南交通大学周本宽教授、潘亦苏教授主审。

该书在出版过程中,伍志平、张毅奇、易大可、杨静等研究生为本书作了校对、绘图等工作。

由于作者水平有限,书中有不妥之处,甚至错误,请读者批评指正。

编者

2005年8月



目

录

第一章 结构抗震概论	1
第一节 地震的基本知识	1
第二节 地震的破坏现象和评价方法	7
第三节 地震动、反应谱和场地	10
第四节 抗震设防的基本原理	19
第五节 结构地震反应计算方法	22
第二章 钢筋混凝土材料和构件的抗震性能	29
第一节 结构抗震实验方法的简述	29
第二节 钢筋混凝土材料的抗震性能	32
第三节 构件的抗震性能	36
第三章 结构弹性体系的地震反应	41
第一节 单自由度弹性体系的地震反应	41
第二节 单自由度弹性体系地震反应数值分析	44
第三节 多自由度弹性体系的地震反应	48
第四节 多自由度弹性体系地震反应数值分析	53
第四章 框架结构弹塑性地震反应	56
第一节 概 述	56
第二节 钢筋混凝土构件的恢复力模型	57
第三节 按层间剪切模型计算平面框架的弹塑性地震反应	59
第四节 按杆系模型计算平面框架的弹塑性地震反应	69
第五节 建筑抗震设计规范介绍(GB 50011—2001)	87
第五章 剪力墙结构、框架—剪力墙结构弹塑性地震反应	101
第一节 概 述	101



第二节	钢筋混凝土剪力墙弹塑性地震反应分析的平面有限元方法·····	102
第三节	钢筋混凝土剪力墙弹塑性地震反应分析的平面墙单元模型分析方法·····	116
第四节	钢筋混凝土框架—剪力墙结构弹塑性地震反应分析·····	127
第六章	筒体结构弹塑性地震反应·····	141
第一节	概 述·····	141
第二节	构件空间滞回曲线分析·····	142
第三节	钢筋混凝土部分楼板空间线性变形分析·····	174
第四节	钢筋混凝土框筒结构在多维地震波作用下的弹塑性时程分析·····	181
第五节	算 例·····	191
第七章	桥梁结构地震反应·····	195
第一节	桥梁抗震概述·····	195
第二节	桥梁抗震设计规范介绍·····	216
第三节	桥梁结构弹性地震反应分析·····	221
第四节	轨道交通高架桥地震反应分析·····	239
第八章	结构动力学中的各种变分原理·····	261
第一节	引言·····	261
第二节	结构动力学中的各种 Hamilton 型变分原理 ·····	262
第三节	几何非线性结构动力学中的各种 Hamilton 型变分原理 ·····	268
第四节	Gurtin 型变分原理 ·····	275
附录	中国地震烈度表(1999)·····	284
参考文献 ·····		285



第一章

结构抗震概论

地震是人类社会面临的一种自然灾害,目前,科学技术还不能控制地震的发生,而且地震还是一个难以预测的自然灾害,地震对结构物的破坏作用也没有被人们充分地认识,所以地震往往给人类社会造成不同程度的伤亡事故和经济损失。抗御地震灾害是人类征服自然的艰巨斗争,长期实践证明了地震并不可怕,完全可以运用现代科学技术来减轻和防止地震灾害。为了更有效地和地震这种自然灾害进行斗争,在学习结构物本身动力特性和工程结构弹塑性地震反应之前,必须先扼要地了解关于地震的初步知识。

第一节 地震的基本知识

一、地震的成因和分类

1. 地球的构造

众所周知,地球是一个南北极稍扁、赤道稍长、平均半径为 6 371 km 的椭圆球体,迄今已有 45 亿年的历史,其组成可分为性质不同的三层(图 1-1)。最外面的为地壳,中间厚的为地幔,最里面的为地核。地壳的上部除地表覆盖一层沉积岩、风化土及海水外,其主要是花岗岩,下面为玄武岩,厚度为 5~40 km;地幔主要由质地坚硬的橄榄岩组成,深度在地壳以下,厚度约为 2 900 km,地幔顶部一般为熔融状,称为软流层,是岩浆的发源地。地壳与地幔之间的分解面在地质学上称为莫氏面。一般地,我们将地壳和地幔上部称为地表。地核是地球的核心部分,其球体的平均半径为 3 500 km,科学家现推测地核表面可能为液体,内部可能是铁镍组成的固体。

2. 地震的成因

按其成因不同将地震分为四类:构造地震、火山地震、陷落地震和诱发地震。构造地震是指由于运动的地球使地表岩层构造发生变动而引起的地震,这种地震破坏性大、分布广。由火山爆发引起的地面震动称为火山地震,其破坏性较小。由地表突然大规模陷落和崩塌,如地下大溶洞的塌陷,引起的地面震动称为陷落地震,其破坏性通常较小。有时水库蓄水或深井注水也会引起地面的震动,这种地震称为诱发地震。据统计,全球发生的 90% 以上破坏性地震属于构造地震。所以,人

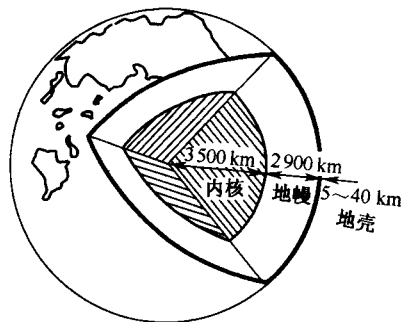


图 1-1 地球构造示意图

们的抗震设防实际上主要抵御构造地震,本书以后提及的地震这个名词除特别说明外,均指构造地震。下面我们简要分析地震的成因。多年来对地球的观测证明,地壳长期处于缓慢连续运动状态,大批地区或在上升,或在下降,或在倾斜。这种运动在地质学上称为地球的构造运动。地球的构造运动是发生地震的主要原因。构造运动产生的原因在历史上有很多解释。



1852 年最先提出地球收缩假设,后来又有人陆续提出脉冲学说、大陆漂移学说和板块构造理论。板块构造理论是目前比较公认的学说。根据板块构造理论,地球表面的最上层是由强度较大的岩石组成,称为岩石层,厚度 $70 \sim 100 \text{ km}$,岩石层的下层为强度较低并带有塑性的岩流层。地表的岩石层不是一个整体,它由图 1-2 所示的六大板块和若干小板块组成。这六大板块分别为欧亚板块、太平洋板块、美洲板块、非洲板块、澳洲板块和南极板块。岩流层的对流运动导致上述板块作缓慢而持久的刚体运动,使板块互相之间产生拉张、挤压和剪切,在地表造成带有巨大能量的构造运动,使地壳不断发生褶皱、断裂和错动,最终使岩石层处于复杂地应力作用的状态。可以设想,若在某些部位地应力积聚超过岩石的强度极限时,岩石就会发生突然断裂和猛烈错动,从而产生振动,然后这种振动又以波形式传到地面,造成地震的自然现象。岩层的断裂处称为震源,震源的正上方地面位置称为震中。世界上不少地震活动带确实都位于板块的交界处附近区域,这在某种程度上也支持了板块学说的成立。

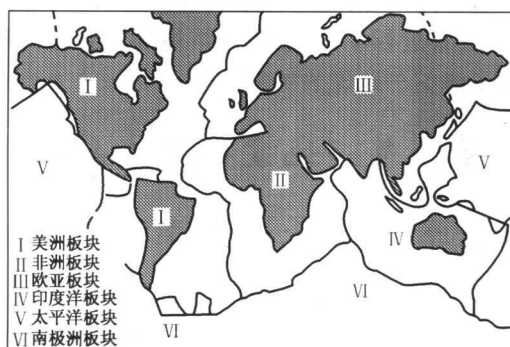


图 1-2 地球板块分布示意图

3. 地震分类

由于岩层断裂通常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。由于岩层断裂和错动时,破碎地带不可能同时达到新的平衡,故每次大地震发生前后,在发震区总伴随很多次中小地震的发生。在地震学中将一定时间内相继发生在相近区域的一系列地震称为地震序列。在一个地震序列中的最大地震定义为主震,发生在主震之前的地震称为前震,发生在主震之后的地震称为余震。在一个地震序列中如果主震震级明显突出,也就是说主震释放了该地震序列地震能量的大部分,那么这种地震称为主震型。反之,如果主震震级不明显,地震能量主要依靠多个震级相近的地震来释放,那么这种地震称为震群型或多发型。有时前震和余震都很少,地震能量基本上是通过主震一次性释放出来,这种地震就称为孤立型或单发型的地震。据目前发震资料统计,主震型地震约占 60% ,震群型地震约占 30% ,孤立型地震约占 10% 。地震也可按震源深度不同进行分类,按这种分类方法,地震分为三种:(1)浅源地震,其震源深度在 70 km 以内;(2)中源地震,其震源深度在 $70 \sim 300 \text{ km}$ 以内;(3)深源地震,其震源深度超过 300 km 。

二、常用地震术语

图 1-3 给出了几个常用的地震术语示意图。震

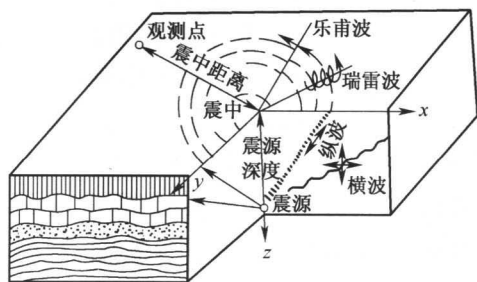


图 1-3 地震术语示意图

源是指地震发源地,也就是地震释放能量的中心,从理论上它不可能是一个点,而是对应一定的区域。震源到地面的垂直距离称为震源深度,而震源在地面上的投影位置称为震中。地面上某点到震中的距离称为震中距,到震源的距离称为震源距。在震中附近,振动最猛烈、破坏最严重的地区称为极震区。

三、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,这种波就是地震波。它包括在地球内部传播的体波和只限于在地面附近传播的面波。

1. 体波

体波又包括两种形式的波,即纵波与横波。

(1) 纵波

纵波是由震源向外传递的压缩波(又简称为 P 波)。在纵波的传播过程中,其介质质点的振动方向与波的前进方向一致,在空气里传播的声波就是一种纵波[图 1-4(a)]。地震纵波的特点是周期短、振幅小、波速快,引起地面竖向振动。根据弹性理论纵波波速的计算公式为

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

式中 v_p ——纵波速度;

E ——介质的弹性模量;

ρ ——介质的密度;

ν ——介质的泊松比。

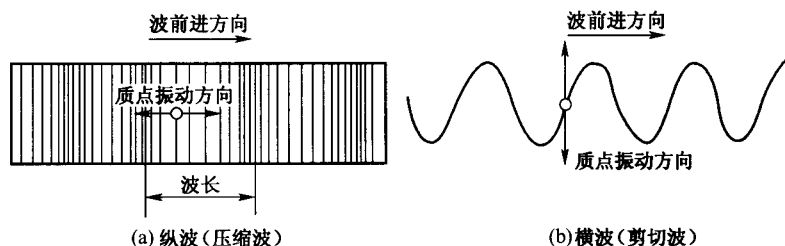


图 1-4 体波传播示意图

(2) 横波

在横波的传播过程中,其介质质点的振动方向与波的前进方向垂直,故又称为剪切波[图 1-4(b)]。横波的特点是周期长、振幅小、波速慢,地震横波引起地面的水平振动。根据弹性理论,横波的传播速度 v_s 可用下列公式计算:

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

式中, G 为介质的剪切模量。若用式(1-1)除以式(1-2),并考虑通常情况 ν 等于 0.22, 则有

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

上式表明,纵波比横波传播速度快 1.67 倍。所以有时又可把纵波称为“初波”(或称 P 波),将横波称为“次波”(或称 S 波)。

2. 面波

面波是指在地球表面传播的波,它是由体波经地层界面多次反射形成的次生波。面波包



括两种形式的波,即瑞雷波(R波)和洛夫波(L波)。在瑞雷波传播时,质点在波的传播方向和地表面内做椭圆运动,但在与该平面垂直的水平方向没有振动,因而瑞雷波质点运动轨迹在地面上是呈滚动形态[图 1-5(a)]。在洛夫波传播时,质点仅在与传播方向相垂直的水平方向运动,在地面上呈蛇形运动形式[图 1-5(b)]。面波具有随着距地面深度增加而衰减的特征,这一特征通常被用于解释在地震时地下结构物比地上结构物的震害轻的原因。据实测分析,面波的传播速度约为横波的 90%,但面波振幅大、周期长,在地面传播时衰减慢,其影响范围较广。地震面波既会引起结构物上下颠簸又会产生左右摇晃。

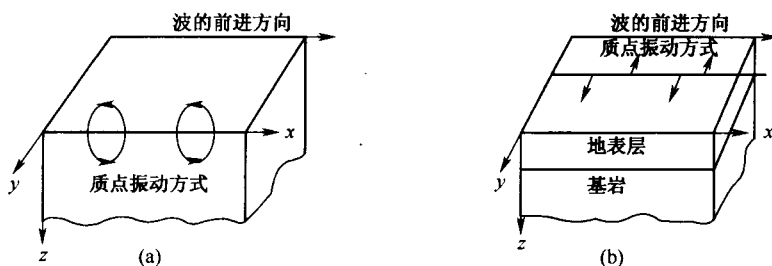


图 1-5 面波传播示意图

图 1-6 为某次地震所记录到的地震波示意图。由前述知,首先到达的是 P 波,继而 S 波,面波到达最晚,但其振幅最大。在地震时,一般当横波或面波到达时,地面振动最猛烈,造成的地震危害也最大。

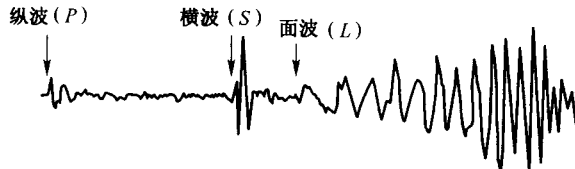


图 1-6 地震波示意图

四、地震震级和烈度

1. 地震震级

震级是衡量一次地震所释放能量大小的尺度。国际上通用的是里氏震级,其原始定义是美国加州理工学院教授里希德(Richter)在 1935 年给出的,即地震震级 M 为

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

式中, A 是标准地震仪(指周期 0.8 s, 阻尼系数 0.8, 放大倍数 2 800 倍的地震仪)在距震中 100 km 处记录的以微米为单位的最大水平地动位移(振幅)。若在距震中 100 km 处地震仪记录的振幅是 10 mm, 即 $10^5 \mu\text{m}$, 其对数就是 5, 根据上述定义, 这次地震震级 M 就是 5 级。当然对于非标准地震仪或在距震中不等于 100 km 时记录的最大水平地动位移通过一定的修正也可以计算地震震级 M 。1956 年古登堡和里希德提出震级 M 与地震波辐射能量 E 存在以下直接关系:

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

上式表明:震级每差一级,地震释放的能量将差 32 倍左右。一个 7 级地震释放的能量大致相当 30 个 2 万 t TNT 原子弹所拥有的能量。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 级的地震,人就感觉到,称为有感地震;5 级以上的地震能引起不同程度的破坏,称为破坏性地震;8 级以上的地震,称为特大地震。目前人类通过仪器



记录到的最大震级是 8、9 级,它们分别发生在 1906 年 1 月 31 日在哥伦比亚的厄瓜多尔西海地震和 1933 年 3 月 2 日在日本的三陆近海地震。

2. 地震烈度

地震烈度是指某一地区的地面和各种结构物遭受到一次地震影响的强弱程度。地震工程中烈度既用于描述或评定结构在遭受地震以后的破坏情况和程度,同时也是结构抗震设防的基本依据。现在世界各国采用都是按烈度进行抗震设防,直观概念最早是日本人佐野利器博士在 1916 年发表的《房屋抗震结构论》中提出的,当时他认为结构的水平地震力可以取结构物重量的某一百分比,即烈度设计法。在关东大地震后 1924 年,烈度的概念正式被“市区建筑法”采纳,并取 $0.1g$ 为水平设计烈度。这种烈度设计方法后来在世界各国得到全面推广。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,也即地震烈度是不同的。一般来说,随距离震中的远近不同,烈度是有差别的,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,地震烈度还与地震震级、震源深度、地震传播介质、表土性质、结构物动力特性、施工质量等许多因素有关。“震中”处的烈度与震级存在一定联系,在震源距相等情况下震级愈大,“震中”的烈度肯定愈高。古登堡和里希德最早给出的“震中”的烈度与震级之间关系可用下式描述:

$$M = \frac{2}{3} I_0 + 1 \quad (1-6)$$

中国地震学家给出的“震中”的烈度与震级之间关系为

$$M = 0.58 I_0 + 1.5 \quad (1-7)$$

3. 地震烈度表

既然地震烈度是表示地震影响程度的一个尺度,烈度的确定就需要建立一个标准,这个标准就是地震烈度表。它的制定一开始主要依据对震害宏观现象描述,即结构物的损坏程度,地貌变化特征,地震时人的感觉,家俱动作反应等方面的定性指标。后来随着地震观测和记录技术水平提高,在地震烈度表中引入了实测的地面运动物理量定量指标(主要是地面运动最大加速度),使烈度评定变得更为合理。1564 年加斯太尔第等提出了 5 级烈度表,这是世界上第一张地震烈度表。麦加利 1902 年提出了按震害宏观现象描述的 10 级烈度表,后来坎坎尼和西伯格将其修正为 12 级烈度表,并给出了相应的加速度。1931 年伍德-纽曼又对麦加利-坎坎尼-西伯格烈度表进行了进一步的修正,建立了目前在美国和其他国家使用的,称为修订的麦加利烈度表(或简称为 MM 烈度表)。由于对烈度影响轻重的分段不同,以及在宏观现象和定量指标确定方面有差异,加之各国建筑情况及地表条件的不同,各国所制定的烈度表互不一致。为了建立全球都能通用的地震烈度表,前苏联地震学家麦德维捷夫、德国地震学家施蓬怀尔和捷克科学家卡尼克等人在 1964 年世界地震工程大会上提出了试验性的国际烈度表(MSK)。这种通用烈度表中有不少问题存在争议,因此在当时仅在部分东欧国家得到使用。目前国际上使用的地震烈度表除了日本气象厅烈度表采用 8 度烈度表和少数国家(如欧洲一些国家)用 10 度划分的地震烈度表外,大多数国家采用 12 等级的地震烈度表。我国目前采用的地震烈度表是 1999 年修订的 GB/T 17742—1999《中国地震烈度表》(附录)。地震烈度与地震物理指标之间的联系目前主要从地面运动最大加速度、最大速度和地震反应谱三方面来考虑。地震作用通常被认为是一种惯性力,因而人们很自然想到用加速度指标来衡量地震烈度的大小。大量实测记录也表明烈度与加速度确实存在某种联系,烈度每增加 1 度,最大地面运动加速度大致增加 1 倍。但后来研究又发现:在相同加速度情况下地震破坏的程度同时还明



显受地面运动周期的影响,而在相同速度下地面运动周期这种影响就变得很弱。所以有人又提出采用地面最大速度作为地震烈度的定量标准。有的研究者认为地面运动的周期特性是影响地震破坏程度的主要因素,应该用地震反应谱来反映烈度的变化。美国科学家认为建筑物的自振周期一般在 0.1~2.5 s,故建议采用速度反应谱中在这一范围内的面积作为烈度标准,称为谱烈度。而前苏联科学家认为大多数建筑物的自振周期在 0.25 s 左右,故可在位移反应谱在周期 0.25 s 时的值作为烈度标准。我国抗震规范采用地震动加速度作为烈度的物理定量指标。

4. 烈度衰减规律和等震线

(1) 衰减规律

随距震中位置加大,地震烈度显然将不断减小。烈度 I 、震级 M 和震中距 R 关系式

$$I = 0.92 + 1.63M - 3.49 \lg R \quad (1-8)$$

(2) 等震线

将烈度相同的区域视为平面上的点并用线相连的一族曲线称为等震线。完全理想条件下的等震线应为同心圆,但实际上受地质分布不均匀的影响,它一般为不规则的封闭曲线。

五、基本烈度、设防烈度、烈度区划图、近震、远震

1. 基本烈度、设防烈度

基本烈度是指该地区今后一定时间内(通常 50 年),在一般场地条件下可能超越烈度为 10% 的烈度值。而烈度区划图则给出了全国各地基本烈度的分布情况,供全国建设规划及中小型工程设计时利用。编制该图是在应用地震、地质、地球物理和地壳形变等多方面资料,然后用各种方法进行预测,通过综合分析后得到。设防烈度是结构抗震设计时采用的烈度,一般等于基本烈度,但有特殊要求时也可在基本烈度基础上进行适当调整后采用。

2. 地震区划

众所周知地震预报是指对地震发生的时间、地点和强度等的预报,而地震区域的划分则是指用地质、地震和历史地震资料等方法对地震发生的地区和强度的预报。其依据通常是地震危险性分析结果。地震区域可以全球划分,也可按某一特定区域来划分。地震多发的国家一般都制定地震区划图。地震区划给出的地震预报情况虽然不能指出地震发生的确切时间,但能使我们知道所建筑地区的结构物在使用期限内可能遭遇的最大地震是多大,使抗震设计有一个基本的设计依据。地震区划开展比较早的国家是前苏联,当时其制定依据主要有如下两条:(1)在曾经发生过地震的地区,相同等级的地震极可能再次发生;(2)地质条件相似的地区,地震活动性规律也相近。1992 年颁布的我国第三代地震区划图——“中国地震烈度区划图(1990)”,在比例尺为 1:400 万图上用等震线表示了设计基准期 50 年内各地区在一般场地条件下可能遭遇超越概率为 10% 的地震烈度值。区划图编制步骤大致可归结为以下几条:首先进行各地区大地震发生的地区构造及地震活动性分析,找出地震发生的构造背景,然后分析在一个地震构造带中破坏性地震的发生条件;其次按历史地震与现时地震之间的规律,如地震活跃期与相对平静期的关系,地震的重复性、填空性、震中迁移性等确定未来地震的震中位置;最后根据地震烈度随距离衰减规律绘出地震等震线。在地震宏观震害调查中,人们发现,不同场地上建筑的震害结果存在明显差异,也就是说,在不同场地上结构物遭受同样震级地震时其地震效应是不同的。考虑这种场地局部地质条件对地面运动影响的研究工作称为地震小区划。关于小区划的定义,目前尚无统一的说法。克拉夫在 1978 年曾将其定义为:“地震小区划就是将一个地区细分成许多小区域地带。这些小区域地带面临各种地震效应的威胁(诸如地表错



动、地面震动、地面破坏),相对来说是相同的。小区划的目的是估计一个地区未来地震事件的位置,再现期及相对严重程度,因此可以预计可能发生的灾害,并可以减轻或避免灾害的影响”。舍利夫在1980年曾将其定义为:“小区划是在特定地区中识别场地在地质构造、地形、水文地质以及土工方面的特征,并把这些特征应用于土地利用规划和减轻地震引起的人类生命和财产损失而进行的安全结构的设计中”。上述两种有代表性的定义,尽管并不完全一样,但总的来说都是基于某些条件勾划出具有相等或相似灾害威胁的地区的详细区划过程,以达到减轻灾害的目的。从解决小区划方法来看可分为确定法和概率法。确定法是用单一的数字描写每一个独立变量,或对于一个不独立变量,用一特定值来构成关系式的方法。概率法是用概率模型来表示不确定性,通常以超越概率来表示。为了使小区划结果能够在实际中运用,提出了若干方法,包括烈度调整法、地基分类法、计算分析法、震害预测综合法、平均剪切模量法和地震易损性分析。

第二节 地震的破坏现象和评价方法

一、地震的破坏现象

地震的破坏现象可以归纳为地表的破坏、工程结构的破坏和次生灾害三大类。

1. 地表的破坏

(1) 断层

断层是指地面的不连续位移,有的断层直接用肉眼就可以看到,而有的在厚层冲积土下的断层则需根据水准测量结果进行推测。美国加州的圣安德列斯大断层是世界上最著名的地震断层。该断层向加利福尼亚海岸延伸并进入太平洋,长约440 km,最大水平位移为6.4 m。断层运动通常十分缓慢。断层引起地面上的结构物破坏的报道比较少,对地下结构影响比较大一些,在圣安德列斯大断层南端附近有一条隧道被水平错断1.2 m。

(2) 地壳形变

地震通常会使得地壳产生竖向和水平的地面形变。若震源在海底,海底产生的较大的形变将引发海啸的产生。在2004年12月26日印度洋地震海啸中,遇难者总人数已经超过29.2万人。陆地的抬升或沉陷也会促使震害的加重,如1964年南海地震,地面沉陷使一些城市大面积被淹,而有的地方发生数十厘米的抬升使一些沿岸城市暂时失去港口的功能。水准测量发现台湾岛在1999年我国台湾大地震后也发生了地壳形变。

(3) 山崩

由于地震引起土壤和砂从陡处向下急速流动的现象称为山崩,大范围的山崩又称为“陆啸”。在关东大地震时发生过“陆啸”,这次“陆啸”将一个山坡冲走1/9,并以20m/s速度向下流动,“冲”走了一个村庄,随后还“冲”倒了一列火车。

(4) 地裂缝

地震在地面产生的裂缝是一种普遍的现象。地裂缝产生一般认为是地表受到挤压、伸长等力的作用的结果,它对上面的线路、构筑物 and 建筑物等都会造成严重影响,震害调查表明地裂缝引起的损坏是非常惊人的。

(5) 喷砂冒水

在地下水位较高、砂层埋深较浅的平原地区,由于地震产生的强烈振动使含水层受到挤压,地下水通常会从地裂缝或土质松软的地方冒出地面,在有砂层的地区则会夹带砂土一起喷出,形成喷砂冒水的现象。



2. 工程结构的破坏

(1) 主要承重结构强度破坏

由于设计不当或现行抗震规范本身问题,使结构抗震能力不足。在多向地震力作用下结构内力可能提高,而且受力方式、破坏模式都会发生改变,导致结构物的承载力不足或变形过大而发生破坏。这种破坏常见的有:墙体斜向严重开裂,钢筋混凝土柱子的“钢花型”破坏,房屋倒塌,桥面塌落等。图 1-7、图 1-8、图 1-9、图 1-10 是历次大地震中所拍摄到上述破坏形式的情况。



图 1-7 大地震中墙体斜向严重开裂

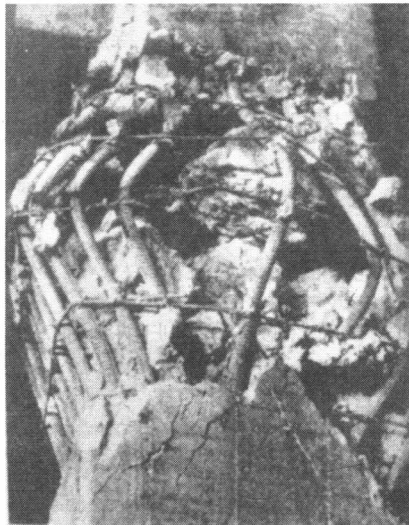


图 1-8 大地震中柱子“钢花型”破坏

(2) 结构整体性破坏

承重结构虽然没有破坏,但连接件或局部节点强度不足,或锚固不足,导致整体建筑物的倒塌(图 1-11)。

(3) 非承重构件破坏

这些构件包括附属构件(女儿墙、雨篷)、装饰物(贴面、装饰)和墙体(围护墙、隔墙)三种。抗震规范除了女儿墙和围护墙有些构造给定外,其他并没有明确要求。在强烈地震作用下结构将产生较大的振动变形,使非承重构件破坏。这些构件破坏会造成伤人。现代建筑中装饰造价甚至超过土建,所以非承重构件的抗震应引起高度重视。



图 1-9 大地震中建筑物倒塌

(4) 地基失效

在地震作用下地基承载力可能降低,甚至丧失。例如饱和砂土层的地基会产生地基液化,导致建筑物倾斜,严重的还会倒塌。

3. 次生灾害

由地震引起的火灾、水灾、海啸、陆啸、污染等间接损失称为次生灾害。国际上把地震损失分为一次灾害、二次灾害和三次灾害。一次灾害、二次灾害是结构直接损失和间接损失,三次灾害是指由地震引起停工、瘟疫和其他社会损失。次生灾害有时比直接损失更严重。1923 年



日本关东大地震在整个灾区引发了严重的火灾,震后调查结果表明:因地震直接倒塌的房屋为 13 万栋,而烧毁的房屋却高达 45 栋;死亡人数 10 万余人,其中房屋倒塌压死约几千人,其余均为被火烧死的。1995 日本 7.2 级神户大地震和 1999 年我国台湾南投县 7.6 级大地震都引起了不同形式的次生灾害,间接损失十分严重。

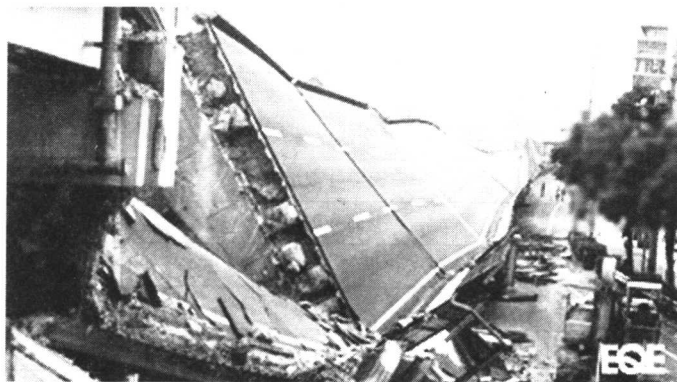


图 1-10 大地震中桥面塌落

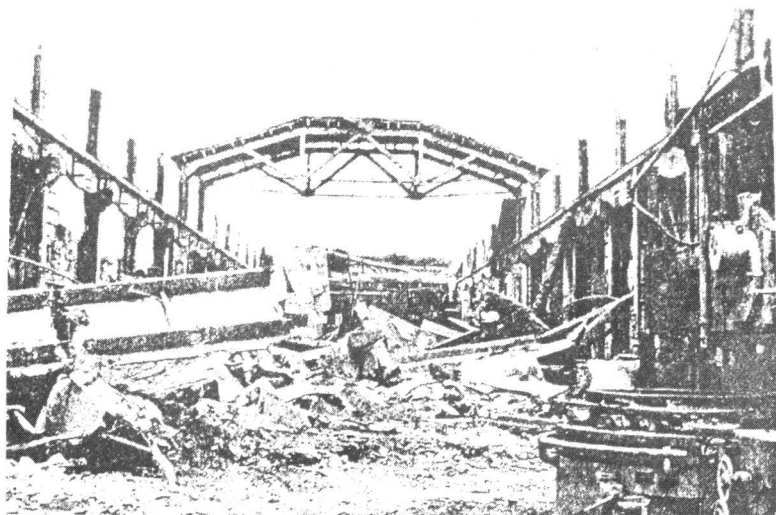


图 1-11 唐山大地震中因连接破坏引起的整体倒塌

二、破坏程度的评价方法

通常一个地区的建筑种类繁多,结构类型也不同,所以在同一次地震中震害肯定是各不相同的。为了对地震区建筑的宏观破坏程度在总体上有一个客观的了解,需要建立或规定破坏程度的评价方法。平均震害指数法是其中应用较广的一种。计算平均震害指数,首先将建筑物破坏程度由完整到全部倒塌之间分成若干级,每级用震害级数表示,如表 1-1 所示。

第 j 类房屋震害程度可用震害指数 I_j 表示:

$$I_j = \frac{\sum_{k=1}^m (in_i, i)_k}{N_j} \quad (1-9)$$



式中 n_i ——被统计的某类房屋(如住房)在 i 级破坏的栋数;

k, m ——不同震害等级序号和数量;

i ——震害等级;

N_j ——被统计的该类房屋总数, $N_j = \sum_{k=1}^m (n_i)_k$ 。

表 1-1 建筑物破坏级别与震害等级 i

破坏程度级别	破坏程度	震害等级 i
1	全部倒塌	1
2	大部分倒塌	0.8
3	少部分倒塌	0.6
4	局部倒塌	0.4
5	裂缝	0.2
6	基本完好	0

显然, I_j 愈大, 表明此类建筑抗震性愈差。评价某地区房屋平均震害情况, 应求出该地区各类房屋(有代表性结构)平均震害指数 I_m

$$I_m = \frac{\sum I_j}{N} \quad (1-10)$$

式中 $\sum I_j$ ——各类房屋震害指数之和;

N ——不同类型房屋的类别数。

当然, 对抗震能力相差很大的结构, 还应考虑加权问题, 或事先换算到同一标准上加以统计。

第三节 地震动、反应谱和场地

一、地震动

1. 地震地面运动

地震引起的地面运动的过程可以用强震仪予以记录。从实际得到的记录波形图一般是一个频带较宽的随机过程。波形特征为开始部分上升, 然后达到最大, 且在某一持续时间内具有相对均匀震相, 而后衰减的过程。当地震波由传播速度大的地层向传播速度小的地层行进时, 由于波的周期要保持不变, 则一个周期内波的前进距离则将缩短。特别是为了使每个波中所含的能量保持不变, 短波长的波要传输同样的能量, 则必须增大振幅。即地震波由传播速度快的地层进入到速度低的地层时幅度将增大。接近于地表的地层, 一般地质年代较轻, 地震波速低。因此, 由硬、深的地层向软地层传播的地震波, 在到达地表时, 其幅度将增大很多。这一现象已为国外的地下、地表强震观测对比所证实。从工程应用上来说, 地震地面运动表现为 4 种类型: 地震引起的滑坡或类似的局部地表滑动; 地震引起的地基土大范围固结与下沉, 即所谓的地基土液化; 在地表产生断层位移; 地面加速度使结构产生的惯性力。地面运动可表达为

$$S(\omega) = G(\omega) [P(\omega) \cdot O(\omega)] \quad (1-11)$$

式中 S ——观测点的地震动特性;

G ——观测点的地表层地基的振动特性;

场地

考虑

吸收
述传

场地

波速

地震

的影

象称

要考

速度

式中

a, b

地面

加速

速度

位移

然除



P ——波传播途径上岩石固有振动特性；

O ——震源处所产生的地震动特性。

在地震工程中描述地面运动特征的主要参数有地震动强度、谱分量和持续时间等。

2. 影响因素

从地震引起的地震作用来分析,影响地面运动加速度的主要因素有震源因素、传播环境和场地条件。

(1) 震源因素

指震源处的应力状态、破裂尺度、震源深度、破裂滑移特征、方向等,现行的震源因素影响考虑比较常用的指标为震级。

(2) 传播途径

这些因素包括几何扩散、吸收、非均质性等。几何扩散也就是波在传播过程中的减弱和被吸收,这种现象也意味从震源出发的波的幅度随着距离的加大将不断地减小。因而距离是描述传播途径影响的参数。在地震工程中通常采用的参数是震中距和震源距。

(3) 场地条件

场地条件包括地表层状况、地形特征、土和结构相互作用。地表层状况可以用划分不同的场地来考虑。在这里采用的评定参数有土层岩石性质、覆盖层厚度、标贯击数、地下水位、剪切波速度等。地质构造分析主要在地震区探明有没有断层的存在。现有研究表明,多数的浅源地震与所谓的活断层有关。局部地形条件中岩质和非岩质地形对地震动也有差别,岩质地形的影响一般较小。在地震作用下结构物发生振动,其一部分振动能量又返回到地基中去的现象称为土和结构相互作用。这种相互作用同上部结构和地基土的动力特征密切相关。

3. 地面运动的幅值

地面运动幅值的表述通常用加速度、速度、位移的峰值来表示。地面运动参数衰减规律主要考虑震源机制、传播途径和场地条件三者的影响。中国建筑科学院工程抗震研究所根据加速度峰值超过 500 cm/s^2 的 59 次地震 133 个强震记录得到的地面运动参数衰减公式为

$$\lg A = a + bM + c \lg(R + 30) + d \cdot T \quad (1-12)$$

式中 A ——地面运动的幅值,或加速度,或速度,或位移等的最大峰值;

M ——地震震级;

R ——震中距(km);

T ——场地土的卓越周期(s);

a, b, c, d, r ——由统计得到的回归系数,按表 1-2 取值。

表 1-2 公式(1-12)各系数取值

地面运动强度幅值 A	回 归 系 数					
	a	b	c	d	s	r
加速度幅值 $a_{\max}$	-1.422	0.600	-1.054	0.329	0.386	0.805
速度峰值 $v_{\max}$	1.049	0.386	-1.386	0.263	0.279	0.748
位移幅值 $a_{\max}$	3.226	0.219	-1.377	0.100	0.218	0.645

4. 强震持续时间

土和结构在强震作用下处于非线性工作状态,地震破坏实际上是一个累积破坏的过程,显然除了上述地面运动的强度、地面运动的频谱特征外,强震作用的持续时间也是一个很重要因