

抗震结构设计

丰定国 王清敏 钱国芳 编

地震出版社

1990

抗震结构设计

丰定国 王清敏 钱国芳 编

地震出版社

1990

内 容 提 要

本书根据高等工业学校工业与民用建筑专业“建筑结构抗震设计”教学大纲及我国新修订的《建筑抗震设计规范(GBJ11—89)》编写。内容包括：地震基本知识，地基基础抗震设计，结构地震反应分析，钢筋混凝土结构、砌体结构以及钢结构房屋的抗震设计方法，并附有计算实例。

本书可供大专院校学生、教师教学使用，亦可供从事建筑结构抗震设计、科研、施工的技术人员参考。

抗 震 结 构 设 计

丰定国 王清敏 钱国芳 编

责任编辑：蒋乃芳

责任校对：王花芝

*

北 京 民 族 出 版 社 出 版

北京民族学院南路9号

北京朝阳展望印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 14 印张 355千字

1990年9月第一版 1990年9月第一次印刷

印数 00001—10000

ISBN 7-5028-0391-2/TU·24

(780)定价：7.50元

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 地震基本知识	(1)
§ 1-2 地震震害	(6)
§ 1-3 工程结构的抗震设防	(13)
第二章 场地、地基和基础	(17)
§ 2-1 工程地质条件对震害的影响	(17)
§ 2-2 场地	(18)
§ 2-3 地基及基础的抗震验算	(20)
§ 2-4 地基土的液化	(22)
§ 2-5 地基抗震措施及处理	(27)
第三章 结构地震反应分析与抗震验算	(30)
§ 3-1 概述	(30)
§ 3-2 单自由度弹性体系的地震反应分析	(30)
§ 3-3 单自由度弹性体系的水平地震作用及其反应谱	(34)
§ 3-4 多自由度弹性体系地震反应分析的振型分解法	(39)
§ 3-5 多自由度体系的水平地震作用	(56)
§ 3-6 结构的地震扭转效应	(61)
§ 3-7 地基与结构的相互作用	(69)
§ 3-8 竖向地震作用	(70)
§ 3-9 结构地震反应的时程分析法	(71)
§ 3-10 建筑结构抗震验算	(80)
第四章 多层混合结构房屋抗震设计	(85)
§ 4-1 震害分析	(85)
§ 4-2 建筑布置与结构选型	(87)
§ 4-3 多层混合结构房屋抗震计算	(90)
§ 4-4 多层混合结构房屋抗震构造措施	(98)
第五章 单层钢筋混凝土厂房抗震设计	(108)
§ 5-1 震害及其分析	(108)
§ 5-2 厂房的抗震措施	(111)
§ 5-3 单层厂房的横向抗震计算	(118)
§ 5-4 单层厂房的纵向抗震计算	(126)
第六章 钢筋混凝土框架结构房屋抗震设计	(151)
§ 6-1 震害及其分析	(151)

§ 6-2	结构选型与结构布置	(154)
§ 6-3	框架结构的抗震计算	(157)
§ 6-4	实心砖填充墙框架的实用抗震算法	(168)
§ 6-5	框架结构抗震构造措施	(172)
§ 6-6	内框架及底层框架房屋抗震设计要点	(177)
第七章	钢结构抗震设计	(197)
§ 7-1	概述	(197)
§ 7-2	钢结构的震害	(197)
§ 7-3	钢结构的延性设计	(198)
§ 7-4	钢梁	(198)
§ 7-5	钢柱	(200)
§ 7-6	支撑构件	(204)
§ 7-7	梁与柱的连接	(206)
§ 7-8	钢框架抗震设计	(209)
附录		(215)
参考文献		(216)

第一章 绪 论

§ 1-1 地震基本知识

地震是一种自然现象。全世界每年大约发生 500 万次地震，这些地震绝大多数很小，不用灵敏的仪器测量不到，这样的小地震约占一年中地震总数的 99%，剩下的 1% 才是人们可以感觉到的。其中，能造成严重破坏的大地震，平均每年大约发生 18 次。

地震给人类带来灾难，给人类社会造成不同程度的伤亡事故及经济损失。人们为了和地震这种现象作斗争，就需要对它有较深入的了解。土建技术人员为防止、减少建筑物和构筑物由于地震而造成的破坏，就需要研究建筑物及构筑物的抗震问题。本节主要就地震的基本知识做一简单介绍。

一、地球的构造

地球是一个平均半径约 6400km 的椭圆球体，它由不同的三层物质构成。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，最里面的叫地核，其半径约为 3500km(图 1-1)。

地壳由各种不均匀的岩石组成，除地面的沉积层外，陆地下面的地壳主要为：上部是花岗岩层，下部为玄武岩层；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，这种物质具有粘弹性。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，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。

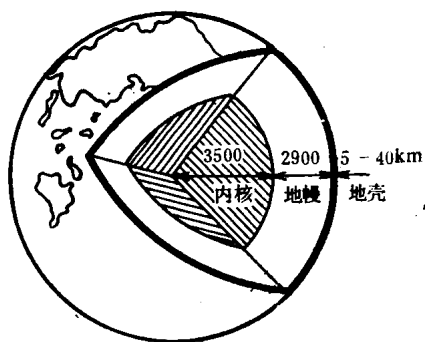


图 1-1 地球的构造

二、地震的类型与原因

地震按其成因可分为：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。前二种地震的影响范围和破坏程度相对较小，而后一种地震的破坏力大，影响范围也广，通常在研究工程抗震时，将其做为重点。

构造地震的成因是：地球内部是不停运动着的，在它的运动过程中，始终存在巨大的能量，而组成地壳的岩层在巨大的能量作用下，也不停地连续变动，不断地发生形变而发生褶皱、断裂和错动(图1-2)，这种地壳的构造状态变动，使岩层处于复杂的地应力作用状态之下。

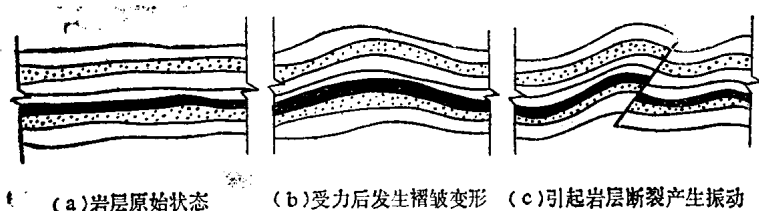
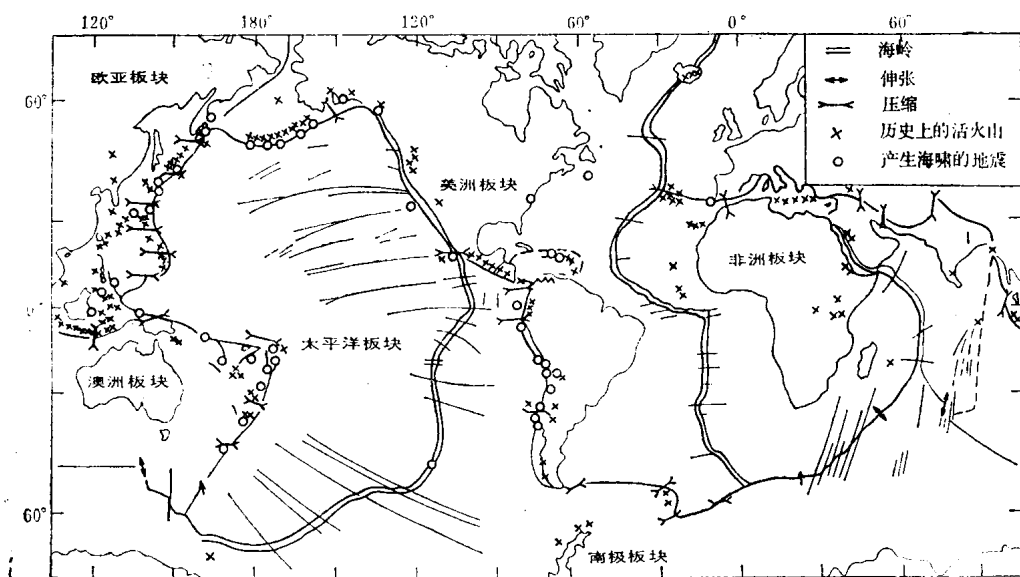


图1-2 地壳构造变动与地震形成示意图

地壳运动使地应力不断加强，当弹性应力的积聚超过岩石的强度极限时，岩层就会发生突然断裂和猛烈错动，从而引起振动，并以波的形式传到地面，形成地震。由于岩层的破裂往往不是沿一个平面发展，而是形成由一系列裂缝组成的破碎地带，沿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(即主震)之后，岩层的变形还有不断的零星调整，从而形成一系列余震。

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。

对于地应力的产生较为公认的是板块构造说，它的大意是：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(图1-3)。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，因而板块之间处于张伸、挤压和剪切状态，地球上的主要地震带就发生在这些大板块的交界地区。

地层构造运动中，在断层形成的地方，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。

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，一年中全世界所有地震释放能量的约85%来自浅源地震；②中源地震，震源深度为70—300km，一年中全世界所有地震释放能量的约12%来自中源地震；③深源地震，震源深度超过300km，一年中全世界所有地震释放能量的约3%来自深源地震。

三、地震波、震级及地震烈度

1. 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。它包含在地球内部传播的体波和只限于在地面附近传播的面波。

体波又包括两种形式的波，即纵波与横波。

在纵波的传递过程中，其介质质点的振动方向与波的前进方向一致，可称为压缩波或疏密波。如在空气里传播的声波就是一种纵波。纵波的特点是周期短、振幅小。

横波的传递过程中，其介质质点的振动方向与波的前进方向垂直，可称为剪切波。横波的周期较长、振幅较大。

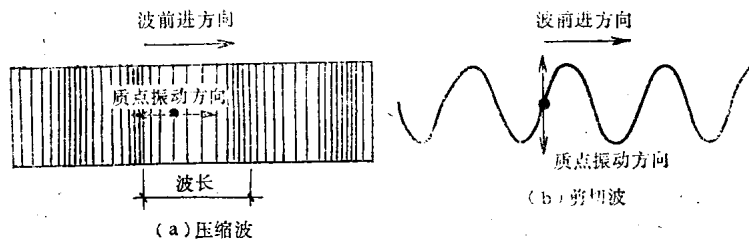


图1-4 体波质点振动形式

纵波与横波的传播速度根据弹性理论可分别用下列公式计算：

$$\text{纵波速度 } V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1-1)$$

$$\text{横波速度 } V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1-2)$$

式中 E ——介质的弹性模量；

G ——介质的剪切模量；

ρ ——介质的密度；

ν ——介质的泊松比。

在一般情况下，当 $\nu=0.22$ 时，

$$V_P = 1.67V_S \quad (1-3)$$

由此可知，纵波比横波传播速度快。在仪器的观测记录纸上，纵波先于横波到达，故也可把纵波叫“初波”(或称 P 波)，把横波叫“次波”(或称 S 波)。

体波在地球内部的传播速度随深度的增加而增大，如图1-5所示。

面波是体波经地层界面多次反射形成的次生波，它包括两种形式的波，即瑞雷波(R 波)和洛夫波(L 波)。瑞雷波传播时，质点在波的传播方向和地面法线组成的平面内(XZ 平面)做椭圆运动，而与该平面垂直的水平方向(y 方向)没有振动，质点在地面上呈滚动形式(图1-6a)。洛夫波传播时，质点只是在与传播方向相垂直的水平方向(y 方向)运动，在地面上呈蛇形运动形式(图1-6b)。

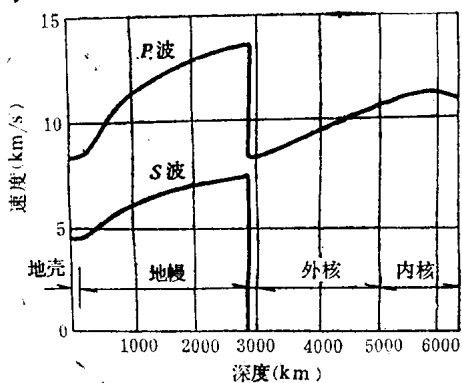


图1-5 体波在地球内传播速度的变化

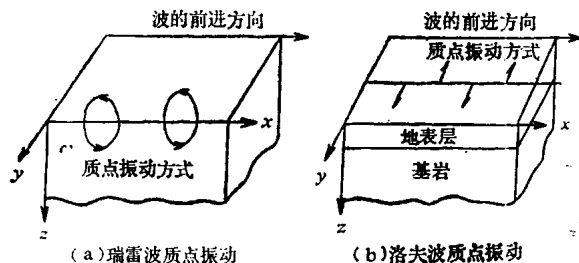


图1-6 面波质点振动形式

面波振幅大、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。

图1-7为某次地震所记录到的地震波示意图。首先到达的是 P 波，继而 S 波，面波到达最晚。一般情况是，当横波或面波到达时，其振幅大，地面振动最猛烈，造成的危害也最大。

2. 震级

震级是表示地震本身大小的尺度。目前，国际上比较通用的是里氏震级，其原始定义为1935年由里克特(Richter)给出，即地震震级 M 为

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

A 是标准地震仪(指周期为0.8s、阻尼系数0.8、放大倍数为2800倍的地震仪)在距震中100km处记录的以微米($\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$)为单位的最大水平地动位移(单振幅)。例如，在距震中

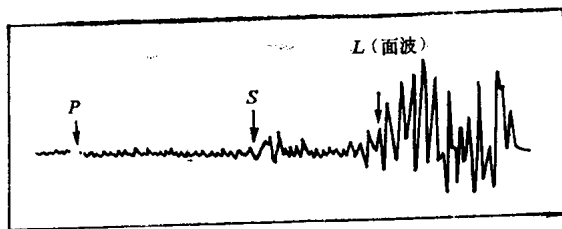


图1-7 地震记录示意图

100km处地震仪记录的振幅是1mm, 即1000 μ m, 其对数为3, 根据定义, 这次地震就是3级。

震级与震源释放能量的大小有关, 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, 称做微震; 2-4级地震, 人就感觉到了, 叫做有感地震; 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。1960年5月发生在智利的8.5级地震, 是到目前为止记录到的世界最大地震。

3. 地震烈度

地震烈度是指某一地区的地面和各类建筑物遭受到一次地震影响的强弱程度。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、施工质量等许多因素有关。

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。它是以描述震害宏观现象为主的, 即根据建筑物的损坏程度、地貌变化特征、地震时人的感觉、家具动作反应等方面进行区分。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也就不同。现在, 除了日本采用从0到7度分成8等的烈度表, 少数国家(如欧洲一些国家)用10度划分的地震烈度表外, 绝大多数国家包括我国都采用分成12度的地震烈度表。我国1980年公布的地震烈度表见附表1-1。

作为一个地区抗震设防依据的地震烈度一般情况下取基本烈度, 它是指该地区今后一定时期内, 在一般场地土条件下, 可能遭受的最大地震烈度, 也就是由国家地震局制定的全国地震烈度区划图规定的烈度。对做过地震小区划的地区, 也可按有关抗震主管部门批准的地动参数考虑抗震设防。

4. 震中烈度与震级的关系

一般说, 震中烈度是地震大小和震源深度两者的函数, 但是, 对人民生命财产影响最大的、发生最多的地震的震源深度一般在10—30km, 所以, 我们可以近似认为震源深度不变, 来进行震中烈度 I_0 与震级 M 之间关系研究。根据全国范围内既有宏观资料, 又有仪器测定震级的35次地震的资料, 《中国地震目录》(1983年版)给出了根据宏观资料估定震级的经验公式:

$$M = 0.58I_0 + 1.5 \quad (1-5)$$

必要时可参考地震影响面积的大小作适当调整。其大致的对应关系如表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以上
震 中 烈 度 I_0	1—2	3	4—5	6—7	7—8	9—10	11	12

四、常用术语

震源深度: 震中到震源的距离, 称为震源深度。

震中距: 建筑物到震中之间的距离叫震中距。

震源距: 建筑物到震源的距离叫震源距。

设计近震: 当建筑物所在地区遭受的地震影响来自本设防烈度区或比该地区设防烈度大一度地区的地震时, 称为设计近震, 简称近震。

设计远震: 当建筑物所在地区遭受的地震影响来自设防烈度比该地区设防烈度大两度或两度以上地区的地震时, 称为设计远震, 简称远震。

极震区: 在震中附近, 振动最剧烈、破坏最严重的地区叫极震区。

等震线: 一次地震中, 在其所波及的地区内, 用烈度表可以对每一个地点评估出一个烈度, 烈度相同点的外包连线叫等震线(图1-8)。

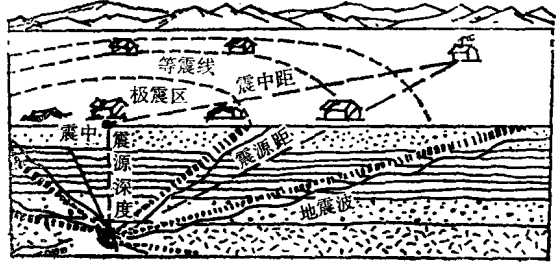


图1-8 术语解释示意图

§ 1-2 地震震害

一、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, 通常地震台上仪器能够记录到的至少在100万次以上, 用高灵敏度地震仪才能记录下来的微弱振动更是数不胜数。小地震几乎到处都有, 大地震则发生在某些地区。这些以地震波形式释放出来的能量估计每年达 $9 \times 10^{17} \text{J}$, 它主要是由少数大地震释放出来的, 其中约85%是浅源地震释放的。

本世纪初, 科学家们在遍访各大洲、进行宏观地震资料调查的基础上, 编制了世界地震活动图, 以后, 又根据地震台的观测数据编出了较精确的世界地震分布图, 从这些图中可以清楚看到, 地球上有下列四组主要地震带:

(1) 环太平洋地震带: 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。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、新几内亚和新西兰。

(2) 欧亚地震带: 除分布在环太平洋地震活动带的中深源地震以外, 几乎所有其它中深源地震和一些大的浅源地震都发生在这一活动带, 这一活动带内的震中分布大致与山脉走向一致。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。

(3) 沿北冰洋、大西洋和印度洋中主要山脉的狭窄浅震活动带: 北冰洋、大西洋带是从

勒拿河口地震较稀少的地区开始，经过一系列海底山脉和冰岛，然后顺着将大西洋底分成两部的隆起带延伸。印度洋地震带始于阿拉伯之南，沿海底隆起延伸，以后朝南走向南极。

(4) 地震相当活动的断裂谷：如东非洲和夏威夷群岛等(图1-9)。

前二者为世界地震的主要活动地带。

二、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，地震区分布很广。图1-10给出了我国境内

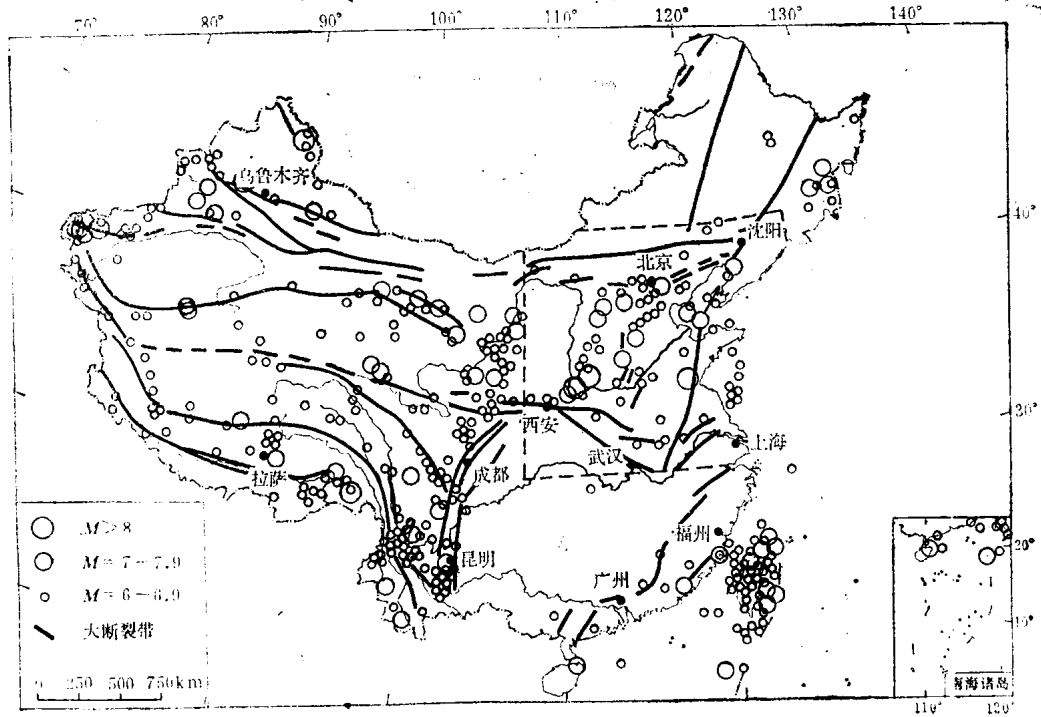


图1-10 我国境内震级 ≥ 6 的强震震中分布图

6级以及6级以上地震震中分布及主要的地震带。我国主要地震带有两条：

(1) 南北地震带。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。地震带宽度各处不一，大致在数十至百余公里左右，分界线是由一系列规模很大的断裂带及断陷盆地组成，构造相当复杂。

(2) 东西地震带。主要的东西构造带有两条，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，自帕米尔起经昆仑山、秦岭，直到大别山区。

据此，我国大致可划分成六个地震活动区：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。

综上所述，由于我国所处的地理环境，使得地震情况比较复杂。从历史地震状况来看，全国除个别省份外(例如浙江、江西)，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。

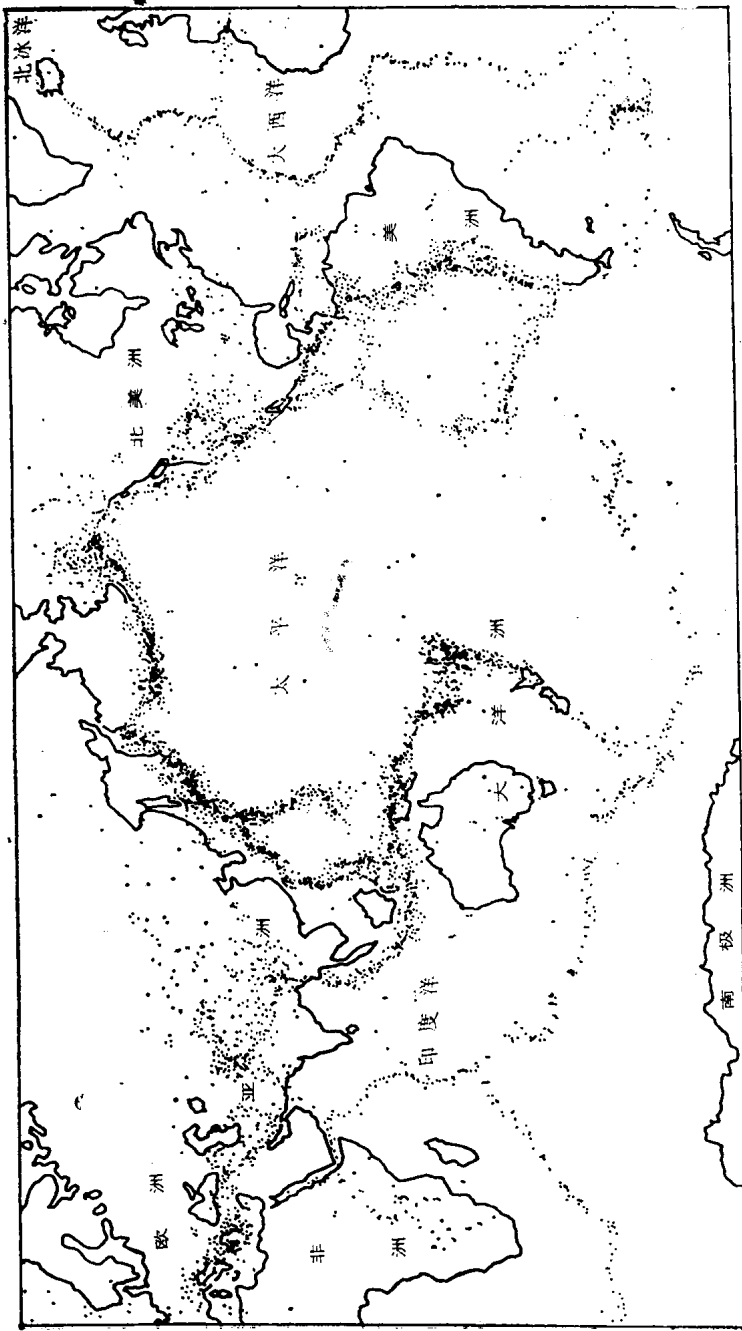


图1-9 世界地震震中分布略图

三、近期世界地震活动

近年来国内外发生的著名大地震如表1-2所示。

近期世界地震情况

表1-2

时 间	地 点	震 级	震 中 烈 度
1960.5.22	智利南部	8.5	11
1964.3.27	美国阿拉斯加	8.4	10
1964.6.27	日本新潟	7.5	8
1968.5.16	日本十胜冲	7.5—8	
1970.1.5	中国通海	7.7	10
1970.5.31	秘鲁北部	7.6	
1973.2.6	中国甘孜	7.9	
1975.2.4	中国海城	7.3	9
1976.7.28	中国唐山	7.8	11
1985.9.19	墨西哥城	8.1	
1988.12.7	苏联亚美尼亚	7.1	9

这些大地震不但造成了大量的人员伤亡，还使大量建筑遭到破坏，交通、生产中断，水、火、疾病等次生灾害发生，给人类带来了不可估量的损失。

四、地震所造成的破坏

1. 地表破坏

地震造成的地表破坏有山石崩裂、滑坡、地面裂缝、地陷及喷水冒砂等。

地震造成的山石崩裂的塌方量可达近百万方，石块最大的能超过房屋体积，崩塌的石块可阻塞公路，中断交通。在陡坡附近还会发生滑坡。

地陷大多发生在岩溶洞和采空(采掘的地下坑道)地区。在喷水冒砂地段，也可能发生下陷。

地裂缝的数量、长短、深浅等与地震的强烈程度、地表情况、受力特征等因素有关，按成因可分成以下两种：①不受地形地貌影响的构造裂缝，这种裂缝是地震断裂带在地表的反映，其走向与地下断裂带一致，规模较大，裂缝带长可达几公里到几十公里，带宽几米到几十米。②受地形、地貌、土质条件等限制的非构造裂缝，大多沿河岸边，陡坡边缘、沟坑四周和埋藏的古河道分布，往往和喷水冒砂现象伴生，裂缝中往往有水存在，大小形状不一，规模也较前一种小。地裂缝往往都是地表受到挤压、伸张、旋扭等力作用的结果(图1-11)。地裂缝穿过房屋会造成墙和基础的断裂或错动，严重时会造成房屋的倒塌。

在地下水位较高的地区，地震时的强烈振动下会使含水粉细砂层液化，地下水夹着砂子往往经裂缝或其它通道喷出地面，形成喷水冒砂现象(图1-12)。

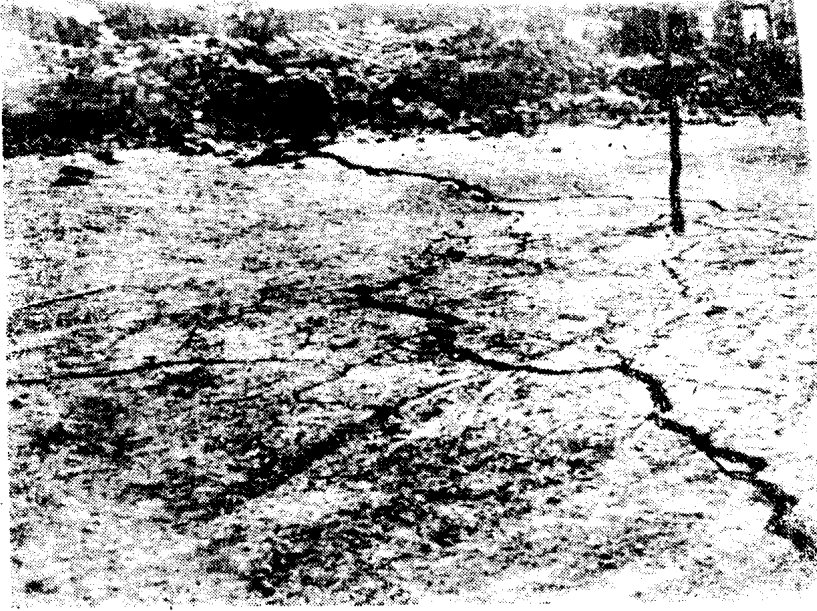


图1-11 地裂缝



图1-12 地面喷水冒砂

2. 工程结构的破坏现象

工程结构在地震时所遭遇的破坏是造成人民生命财产损失的主要原因。其破坏情况与结

构类型抗震措施有关。结构破坏的主要类型有以下几种：

(1) 承重结构强度不足而造成的破坏。地震时，地震作用附加于建筑物或构筑物上，使其内力增加较多，而且往往改变其受力方式，导致建筑物或构筑物的强度不足而破坏。如墙体出现裂缝，钢筋混凝土柱剪断或混凝土被压酥裂，房屋倒塌(图1-13、图1-14)；砖烟囱折断和错位，砖砌水塔筒身严重裂缝，桥面塌落等(图1-15、图1-16)。

(2) 结构丧失整体性而造成的破坏。结



图1-13 墙体斜裂缝



图1-14 建筑物倒塌



图1-15 烟囱折断、错位

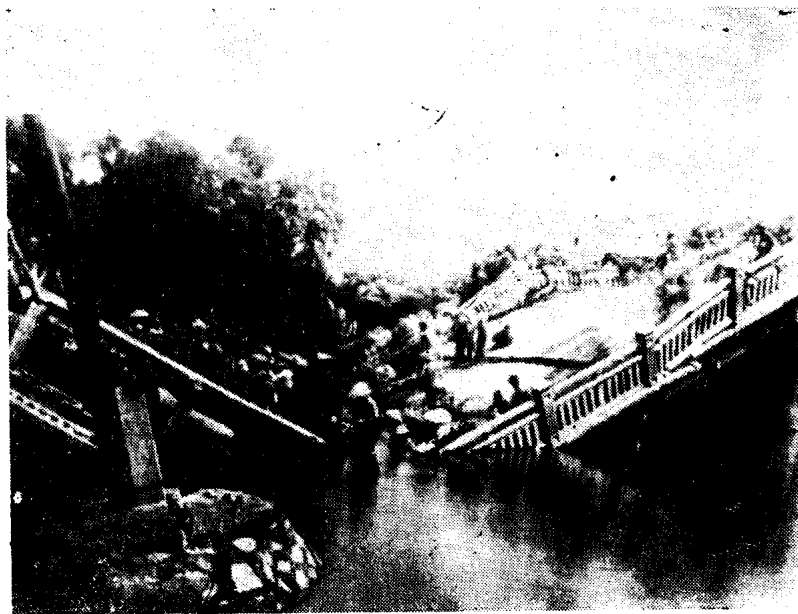


图1-16 桥梁坍塌