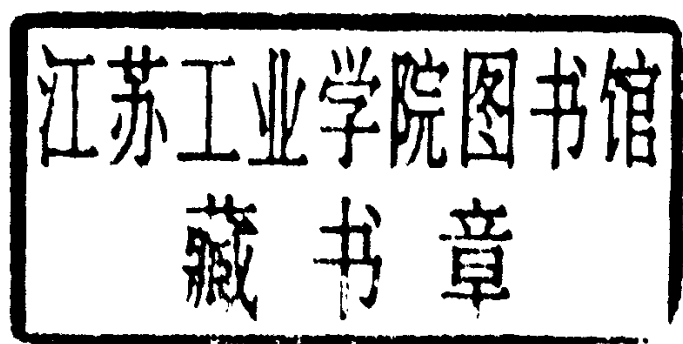


高等学校教材

结构地震反应分析

徐植信 胡再龙 编



高等教育出版社

前 言

中国是一个多地震的国家。中国历史上有记载的造成灾害最大的三次地震为:1556年华县地震,1920年海原地震和1976年唐山地震。自1966年邢台地震以来,中国政府十分重视努力减轻地震造成的损失,采取了多种对策,力求使地震造成的灾害降低到最低限度。在各项对策中,使各类建筑和结构具有抗震能力是最现实、最有效的措施。

结构抗震设计所需的知识涉及很广的学科领域。从事抗震设计的工程技术人员需要具有地震地运动、材料性质、结构有利选型和布置、结构地震反应分析和结构节点构造等多方面的知识。正确决定作为设计依据的设计地震动还需要地震学、地震危险性分析、地震波传播和场地条件对地震动的影响等多方面的知识。目前在高等学校土木、建筑、水利等类专业本科课程设置中,这些方面的教学内容显得不足。为了适应抗震设计的需要,在高等学校高年级中增设有关这方面的教学内容十分必要。

本书是为了这一需要而编写的。主要介绍结构地震反应分析的原理和方法,同时也涉及地震地运动的特性。对于现行的建筑抗震设计规范,不限于叙述和解释条文,而更着重于说明编制规范的依据和原理。作者深信这对于正确应用规范和适应将来规范的修改都是有利的。

本书承赵光恒教授认真审阅并提出了宝贵的意见,使本书质量有了改进,作者深为感谢。在编写过程中得到了蒋通、翁大根等的帮助,在此谨致谢忱。

(京)112号

内 容 提 要

本书内容包括地震地运动特性和结构地震反应分析。

第一章着重介绍对工程抗震重要的一些地震动参数和决定设计用地震动的依据,目的是使读者对结构地震反应分析的原始依据有较深的了解,从而更好地理解和分析计算的结果。

第二章至第四章介绍结构动力学的基本内容,着重叙述在地震反应分析中的应用。

第五章介绍用反应谱分析结构反应的方法,论述了这一方法的优点及其局限性。

第六章较详细地介绍了用于重要结构的时程分析法。除了工程上常用的几种算法外,还介绍了在科研中发展的一种高精度积分格式。

第七章介绍了线性结构随机反应分析的基础,重点放在介绍基本概念上。对什么是随机过程作了确切而简要的说明,并举例使读者有较深刻的印象。

第八章介绍了结构非线性地震反应、地基与结构的相互作用以及液体与结构的相互作用。这些内容对解决近代各种重要工程的复杂的抗震问题是十分重要的。

本书可用作高等学校土木、建筑、水利等类专业高年级学生选修课程或研究生课程的教材,也可供工程技术人员参考用。

高等学校教材

结构地震反应分析

徐植信 胡再龙 编

*

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张6.625 字数160 000

1993年4月第1版 1993年4月第1次印刷

印数0001—1 600

ISBN 7-04-004107-3/TB·213

定价2.65元

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 地震的成因.....	1
§ 1-2 地震震级和烈度.....	3
§ 1-3 我国地震活动的分布.....	5
§ 1-4 地震地面运动的特性、参数及对结构的影响.....	8
§ 1-5 工程抗震的设计要点.....	14
第二章 有限自由度体系的弹性振动	18
§ 2-1 单自由度体系的振动.....	18
§ 2-2 多自由度体系的自由振动.....	21
§ 2-3 自振频率和主振型的近似计算.....	29
§ 2-4 多自由度体系的强迫振动.....	33
§ 2-5 支座运动引起的结构反应.....	36
第三章 无限自由度体系的弹性振动	39
§ 3-1 梁的弯曲自由振动.....	39
§ 3-2 杆的纵向自由振动.....	42
§ 3-3 杆的扭转和剪切自由振动.....	44
§ 3-4 转动惯量效应和剪切变形效应.....	46
§ 3-5 自振频率的近似计算.....	50
§ 3-6 梁的弯曲强迫振动.....	53
§ 3-7 支座运动引起的结构反应.....	56
第四章 结构振动分析的有限元法	61
§ 4-1 有限元法振动分析的基本概念.....	61
§ 4-2 平面杆单元的刚度矩阵和质量矩阵.....	62
§ 4-3 空间杆单元的刚度矩阵和质量矩阵.....	71
§ 4-4 总体坐标系中的单元刚度矩阵和质量矩阵.....	74
§ 4-5 总体矩阵和边界条件处理.....	77
§ 4-6 计算特征值及特征向量的子空间迭代法.....	80
§ 4-7 地震力质量矩阵.....	84

第五章 反应谱理论	89
§ 5-1 地震反应谱.....	89
§ 5-2 设计反应谱.....	93
§ 5-3 结构地震反应的计算方法.....	99
§ 5-4 多分量地震激发的结构反应.....	108
习题.....	110
第六章 结构地震反应的时程分析	111
§ 6-1 结构反应数值计算的几种常用方法.....	112
§ 6-2 阻尼矩阵.....	124
§ 6-3 一种高精度的逐步积分格式.....	126
§ 6-4 多支点多相位地震激发的结构反应.....	139
习题.....	141
第七章 线性体系随机地震反应	142
§ 7-1 随机过程的一般性质.....	142
§ 7-2 功率谱密度函数.....	148
§ 7-3 单自由度体系的随机地震反应及安全性.....	152
§ 7-4 结构的随机地震反应及安全性.....	159
§ 7-5 随机性地震地面运动.....	163
§ 7-6 人造地震动.....	165
习题.....	171
第八章 结构地震反应的一些其它问题	172
§ 8-1 结构非线性地震反应.....	172
§ 8-2 地基土的地震反应.....	179
§ 8-3 地基与结构的相互作用.....	184
§ 8-4 液体与结构的相互作用.....	189
参考文献	206

第一章 绪 论

地震是一种自然现象，强烈地震常危害人民生命财产。我国历史上曾有多次造成严重损失的地震，有记载的8级以上地震共16次，其中8.5级以上的有3次：1668年7月25日山东莒县—郯城间8.5级，1920年12月16日宁夏海原8.5级，1950年8月15日西藏察隅8.6级。自1966年以来发生的大地震，7级以上的有15次，其中造成损失最大的为1976年7月28日唐山地震。

地震造成的灾害是可以防止和减轻的。防止和减轻地震灾害最有效和最可靠的办法是工程抗震，就是把各种房屋、桥梁、水坝、管道、塔桅等等建造成能够抗震的。世界上已有不少按照抗震要求设计和建造的房屋经受了地震的考验而安全无损。在同一地区未按抗震要求设计建造的房屋则遭到严重破坏。

工程抗震涉及的问题广泛而又复杂，本书主要讲述结构抗震设计中的一个重要部分——抗震理论。为了使读者对结构抗震原理有较深的理解，从而能更好地掌握结构地震反应的分析方法，在这一章里扼要介绍一下地震的成因和地震地面运动的特性和工程抗震设计的要点。

§ 1-1 地震的成因

为了说明地震的成因和特性，我们先简单地介绍一下地球的构造。地球最外一层叫地壳，它的厚度不等。高山下地壳厚度大，我国西藏高原及天山地区地壳厚度达70公里。一般大陆上的地壳厚度为16—40公里。大洋地区地壳厚度较薄，一般为10—15公里，最薄处约5公里。地壳表层由各种沉积岩、岩浆岩、变质岩

组成,厚约 0—5 公里。地壳的上表层为花岗岩层,下表层为玄武岩层。

地壳以下直到约 2895 公 里 深度部分为地幔。地幔是由比重较大的黑色橄榄岩等超基性岩石组成。在高温高压下地幔物质有粘性,因为能传播剪切波,所以是固体。地幔之下直到地心是地核。地核是液态的镍和铁所组成,但地球中心半径 1255 公里内的内核可能是固态的。图 1-1 为地球内部构造示意图。

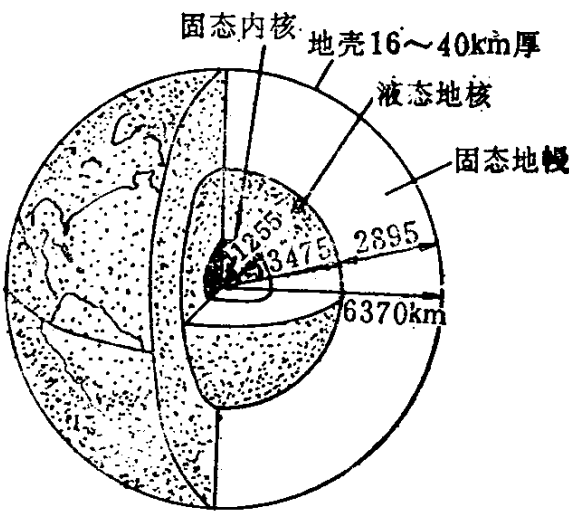


图 1-1 地球内部构造示意图

过去地震学家认为地震是在地下深处较小的岩体内发生的,这个岩体的中心叫做震源。实际上地震发生的断层是一个较大的面,而从地震仪记录定出的震源是断层滑动的起点。震源多在地壳内,少数可能发生在上地幔内。震源在地表的投影叫震中。地震的成因有多种,如由于地质构造活动而形成的地震叫构造地震,由于火山爆发而引起的地震叫火山地震,局部地层塌陷也会造成地震,称塌陷地震。一般造成较大灾害的地震都为构造地震。震源浅的地震在地表造成的地面运动较震源深的地震造成的地面运动要强烈,灾害更严重。因此,从工程抗震角度出发,我们主要讨论浅源构造地震。

构造地震的孕震过程是某一区域地应力逐渐增加，岩石变形也不断增加。待岩石的应变超过了岩石所能承受的极限，就在某处突然发生断裂错动。这时在岩石中发生断裂错动的地方形成断层，积累的应变能突然释放，其中一部分以波的形式在地层中传播，在附近地层中及地表面有不规则的剧烈的运动，这就是地震。

地应力的积累是一个很长的过程，短则几十年，数百年，长则数千年，上万年。在断层发生大的错动之前常先有小的错动，这时表现为大震之前的一些小震，称为预震。大的错动之后还常有较小的错动，称为余震。有的地区，一次地震之后隔若干年后再发生地震，这个间隔时间的长短不等，它的期望值称为回归周期。

§ 1-2 地震震级和烈度

一次地震的“大小”用震级来衡量。震级有好几种定义。李希特 (C. F. Richter) 在 1935 年研究美国南加利福尼亚州的近地震时 (地震学里近地震是指地球中心角 10° 即大约 1000 公里以内的地震。为了与之区别，地震工程里称靠近震中的地方的地面运动为近场地面运动) 定义了近震震级 M_L 。近震震级原来的定义是在震中距为 100 公里处用伍德-安德生 (Wood-Anderson) 标准地震仪^① 记录的最大振幅的两个水平向分量的算术平均值为 1 微米时的震级为零。如在震中距为 100 公里处记录的振幅为 A 微米，则

$$M_L = \lg A \quad (1-1)$$

实际上无法恰好测到震中距为 100 公里处的振幅，可以用 1000 公

^① 伍德-安德生标准地震仪的放大倍数为 2800，摆的自振周期为 0.8 秒，阻尼比 $\xi = 0.8$ 。

里以内的震中距处的面波最大振幅的两个水平方向分量的算术平均值，取对数再加上一个与震中距有关的起算函数，即得近震震级。面波是指沿着地球表面传播的波，在距离震中较远处占优势。在 § 1-4 中还要对它的性质作一些介绍。

1939 年 古 登 堡 将 震 级 测 定 方 法 推 广 到 远 震。计算方法与近震相似，只是起算函数不同，且取最大振幅的两个水平方向分量的矢量和的对数加上起算函数。因为在远距离处面波占优势，所以由远震定的震级称为面波震级，记作 M_s 。

地震震源深度越大，面波迅速减弱，故深源地震常难以用面波测定震级。用体波的最大振幅定的震级称为体波震级，记作 m 。体波是指在物体内部传递的波，这里是指地球内部传播的波，到达表面后有反射，折向内部。在 § 1-4 中也将再作一些介绍。

我国学者李善邦在 1959 年将近震震级的确定改为采用一般的近震记录，并且建议了一个确定震级的公式。我国规定的确定面波震级的方法也和美国的略有不同，确定体波震级的公式则和美国的相同。

对同一地震，这三种震级略有不同。我国规定的与美国的也有不同。因此虽然我国和各国同样在报地震震级时用的是面波震级，但有 0.2~0.3 的差别是正常的。

地震震级原来是用作一次地震大小的指标，也确实在总体上反映出地震的大小。地震震级是由地震记录中的最大位移幅值决定的，因而大体上决定于最大位移幅值的频率范围内的能量。如果该频率范围内的能量和总的能量之比大致不变，则地震震级就和地震总的能量有一定关系。

一次地震引起的地面运动以及各种建筑物遭受的破坏轻重，在不同的地区是不同的。总的趋势是离震中越近，地面运动越强烈，建筑物破坏越严重。离震中越远，则地面运动越弱，建筑物破

坏也越轻。但也会有一些地区由于地形及地质构造等原因而有所不同。地震烈度是表示某一地区地面运动强烈程度的一个指标。从它原来的定义看是描述性的,根据某一地区的自然现象、房屋建筑的破坏程度和人的感觉而定。我国的烈度表分为 12 度,与联合国教科文组织建议暂时使用的 1964 年发表的 MSK 烈度表以及美国通用的修订的麦卡里烈度表(MMI)中的相同烈度相当。

我国新的《建筑抗震设计规范(GBJ 11-89)》规定了 6 度至 9 度地震烈度时的抗震设计标准。前一个规范《工业与民用建筑抗震设计规范(TJ 11-78)》只规定 7, 8, 9 度地震烈度时的抗震设计标准。6 度区的建筑规定也须考虑抗震设防是因为 6 度区虽然地震动比较地不太强烈,但设计不好,构造不良或施工不注意质量的房屋也会有较严重的损坏;何况烈度区划并不一定很严格,为了防止发生超过划定烈度的地震时房屋大量倒塌,所以规定 6 度区也应考虑抗震设防。10 度及以上烈度普通建筑将遭受严重的破坏或倒塌,在这样高烈度地区最好避免建造房屋,如果必须建造,就需要特殊设计,不能只按规范规定设计。

§ 1-3 我国地震活动的分布

世界上的地震常集中发生在某些地区内,这些特定的地区称为地震带。世界上两个主要地震带是:

(1) 环太平洋地震带 从南美洲西部海岸起,经北美洲西部海岸,经阿拉斯加、千岛群岛、日本、我国台湾省、菲律宾、印度尼西亚直到新西兰。全世界约 80% 的浅源地震都发生在这一带内。还有许多中源地震和绝大部分的深源地震也发生在这一带内。

(2) 地中海南亚地震带 从伊比利亚半岛,经意大利、巴尔干半岛、土耳其、中亚细亚、伊朗、喜马拉雅山脉、缅甸、苏门答腊、

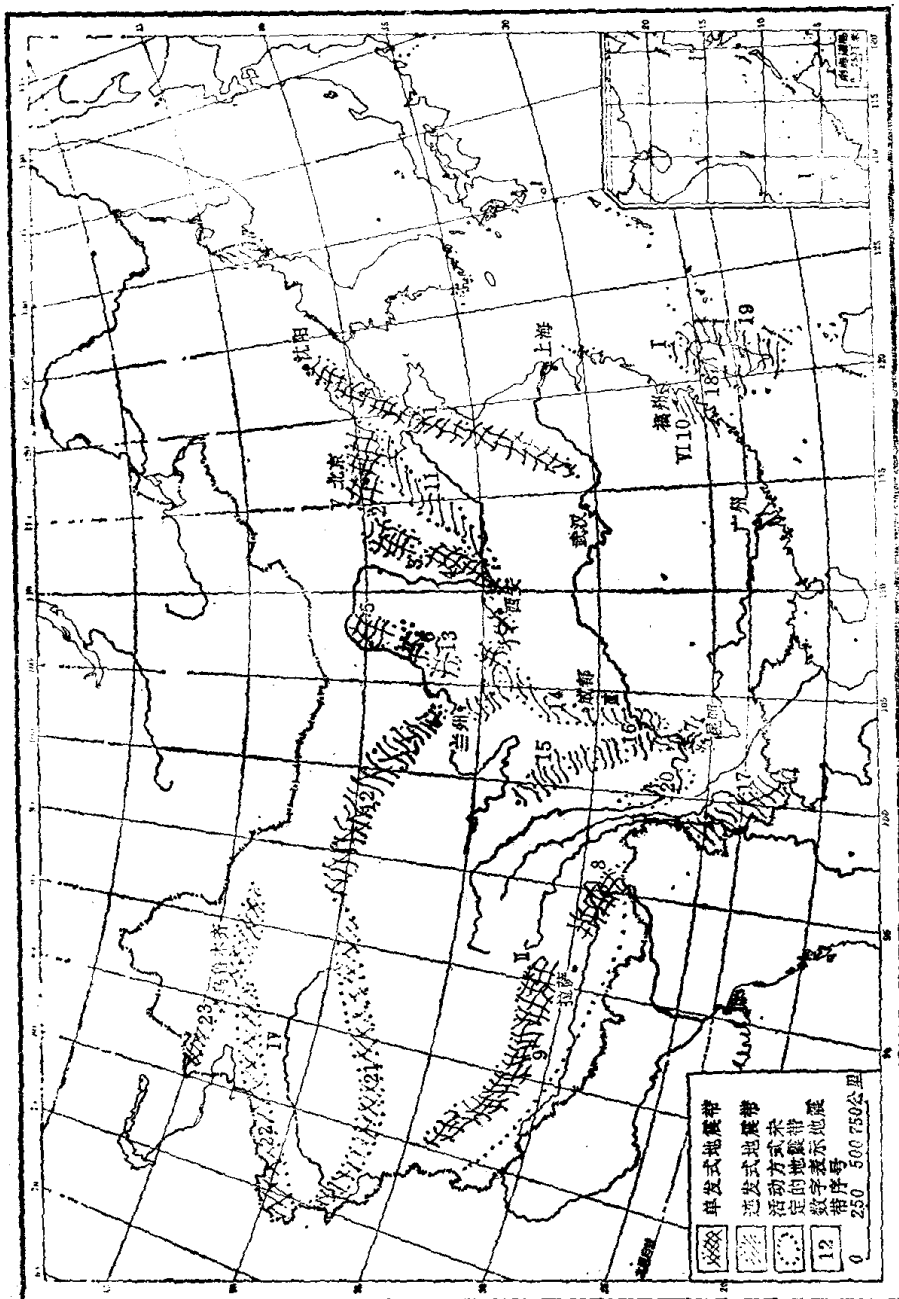
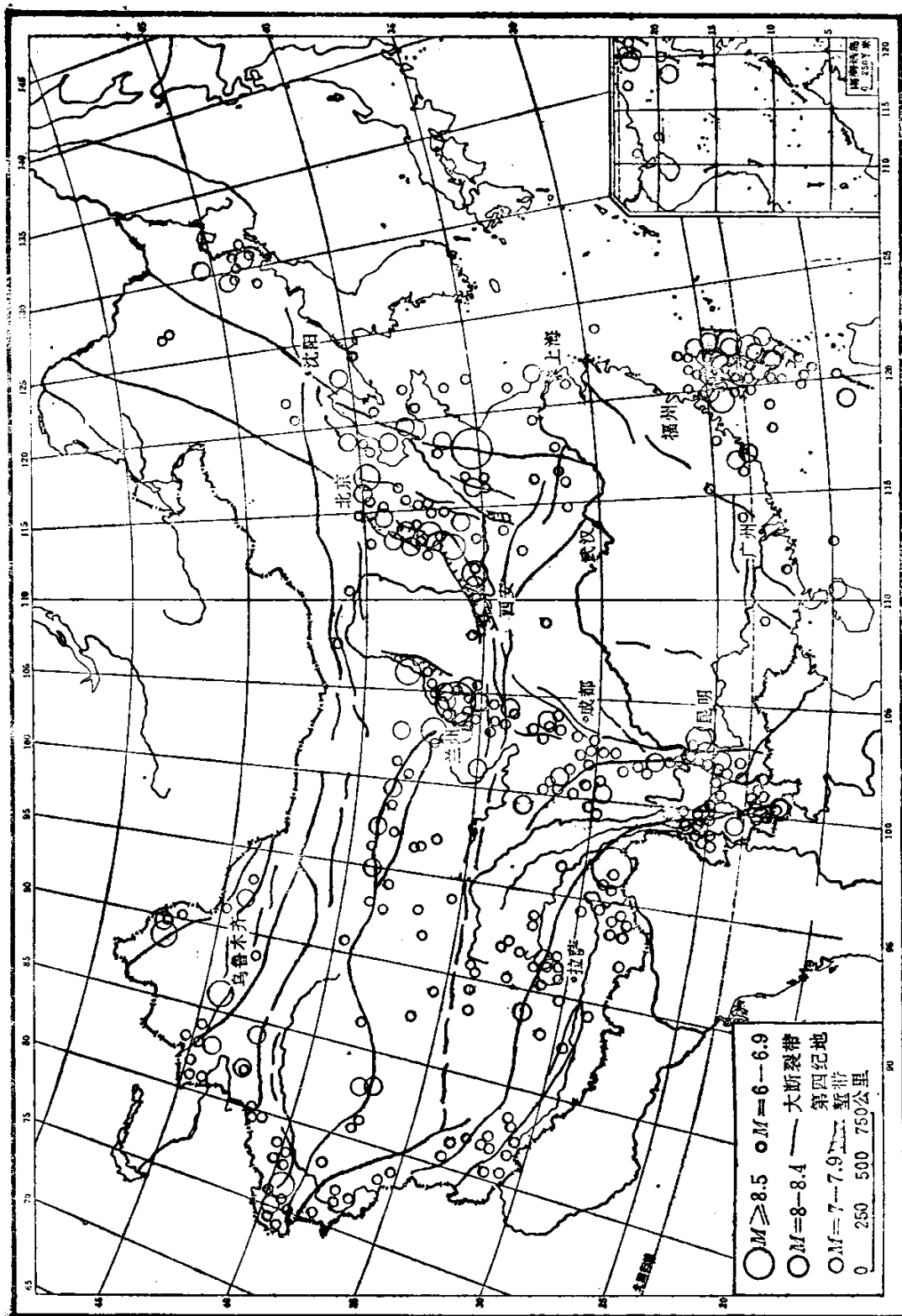


图 1-2 中国地震活动带分布示意图



本图是根据中国地震台网中心提供的资料，按1980年
比例尺：1:400万（中华人民共和国地质部编）

图 1-3 中国地震震中分布图(公元前 780 年至公元 1980 年, $M \geq 6$)

爪哇与环太平洋地震带相接。

此外还有北极一大西洋海岭地震带、东太平洋海岭地震带、西印度洋地震带、东非地堑等。

我国大致可以划分成 6 个地震活动区，见图 1-2。I 台湾及其附近海域，II 喜马拉雅山脉地震活动区，III 南北地震带，IV 天山地震活动区，V 华北地震活动区，VI 东南沿海地震活动区。

图 1-3 为中国地震震中分布图，图上画出我国自公元前 780 年至 1980 年发生过的震级大于 6 级的地震。从这两张图中可以看出，我国地震的发生与地震活动区的划分是一致的。

以行政区划来看，我国的地震活动按多少顺序排列的前 13 个省(自治区)为：台湾、西藏、云南、新疆、四川、甘肃、河北（北京市、天津市同此）、青海、山西、福建、宁夏、陕西、山东。这 13 个省（自治区）中除四川、青海外，都发生过 8 级以上的大地震。

§ 1-4 地震地面运动的特性、参数 及对结构的影响

地震时地运动以波的形式从震源处在弹性介质中向各个方向传播，运动波在介质中的传播符合波动方程，故叫做波的传播。为了了解地震地面运动的特性，我们先简单地讲一下波在弹性介质中传播的一些基本性质。

在各向同性弹性均匀介质中，波可以分为纵波及横波两种。质点振动方向和波的传播方向一致的波称为纵波，记作 P 波，

以波速 $V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}$ 传播。质点运动方向和波的传播

方向相垂直的波称为横波，横波也称剪切波，记作 S 波，传播速度

为 $V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 。以上 E 为介质的弹性模量, ν 为介质的泊松比, G 为介质的剪变模量, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, ρ 为介质的密度。横波又可分为在传播方向的铅垂平面内运动的 SV 波和在水平方向内运动的 SH 波。一般而言 P 波和 SV 波都有铅垂和水平两个方向的运动, H 波则只有水平方向的运动。以上这些波都是在弹性体内传播的, 所以也叫体波。

波碰到自由表面会反射, 当波传播方向与自由表面垂直时, 自由表面上的位移会增加一倍。此外, 还有沿着自由表面传播的表面波。一种叫瑞利波, 运动轨迹是在铅垂平面内倒退的椭圆形, 传播速度比剪切波略慢一些。另一种叫乐甫波, 只在表面一层水平层下面有波速更高的介质存在时才有, 乐甫波是 SH 波, 质点在水平方向内运动且和波传播方向垂直。乐甫波速度介于上层剪切波速度 and 下层剪切波速度之间。这两种表面波随着深度增加, 很快就减小。所以一般随着在地下深度的增加, 地运动则迅速减小。唐山地震时地下坑道破坏很小, 主要是这个原因。

在地面某一点的运动是无数个上述各种波的组合, 运动非常不规则, 三个方向的运动都有。抗震规范规定一般房屋只考虑水平方向的地震作用, 这是因为普通房屋水平方向受力容易遭到破坏, 离震中较远处水平向的地面运动较竖向的大。但在震中附近竖向的地面运动就可能较水平方向的大, 已经记录到的加速度最大的地面运动记录是竖向的。竖向的地面运动也会对某些结构造成较严重的破坏。在这些情况下, 竖向的地面运动的影响就不能忽视。

在地面上不同的地点, 运动是不同的。在抗震规范中常假定整个建筑物基础遭受相同的运动而忽视地运动的空间变化。当建

筑平面尺寸远较地震波波长小时,这样近似处理是可以的。大跨度桥梁的各个桥墩遭受的地运动可有显著的不同,故必须考虑地运动空间变化的影响。当基础为刚性整体基础时还会遭受绕竖向轴的扭转和绕水平轴的摇摆。前者对平面外形较复杂且不闭合的建筑常有较大的影响,后者在设计高层建筑或高耸结构时不容忽视。

现在我们来看一下在某一场地的强震记录,强震记录是用强

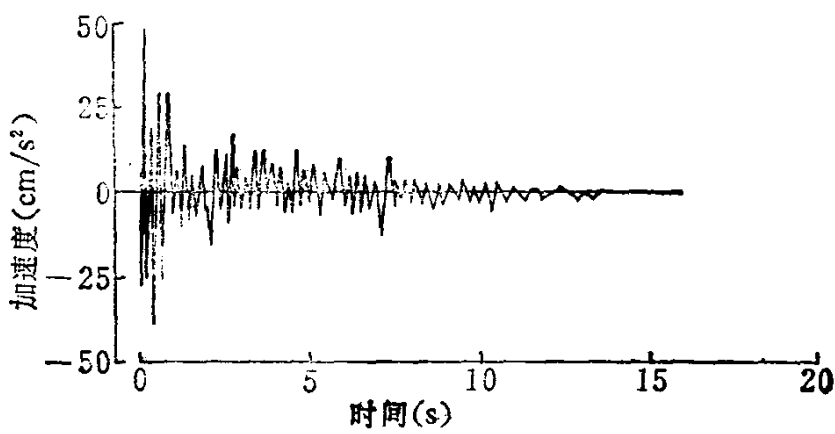


图 1-4 校正后的加速度曲线

(1976 年 8 月 8 日唐山余震,迁安滦河桥台站,南北分量)

注:该加速度曲线前面部分丢失。

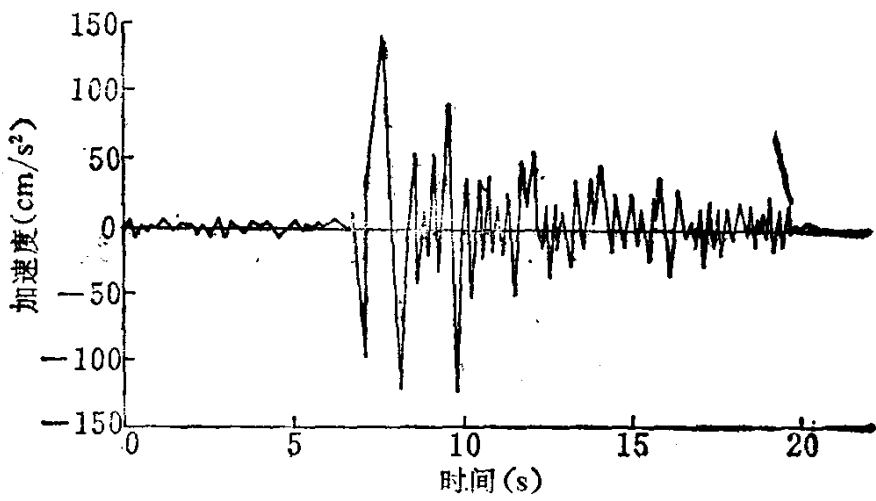


图 1-5 校正后的加速度曲线

(1976 年 11 月 15 日唐山余震,天津医院台站,南北分量)

震仪记录的加速度时程，一般的频率范围为接近0至30赫。得到的记录要进行修正，纠正各种来自仪器的误差，经过修正后的记录称校正记录。这里举四条校正加速度记录来看看其特点，见图1-4~图1-7。

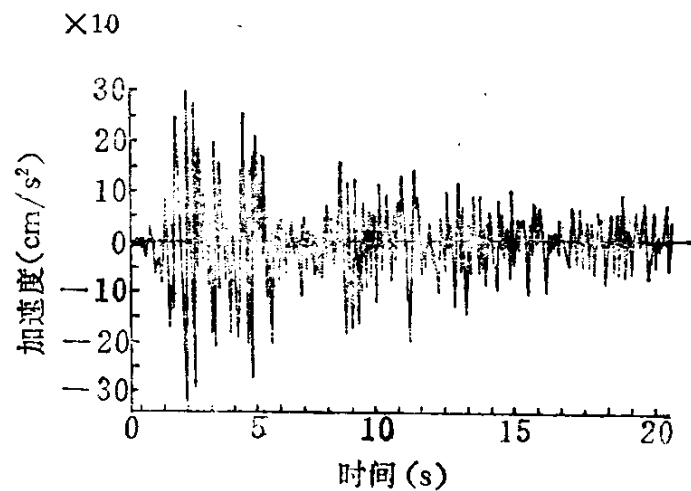


图 1-6 校正后的加速度曲线

(1940年5月18日美国 Imperial Valley 地震, El Centro 站, 南北分量)

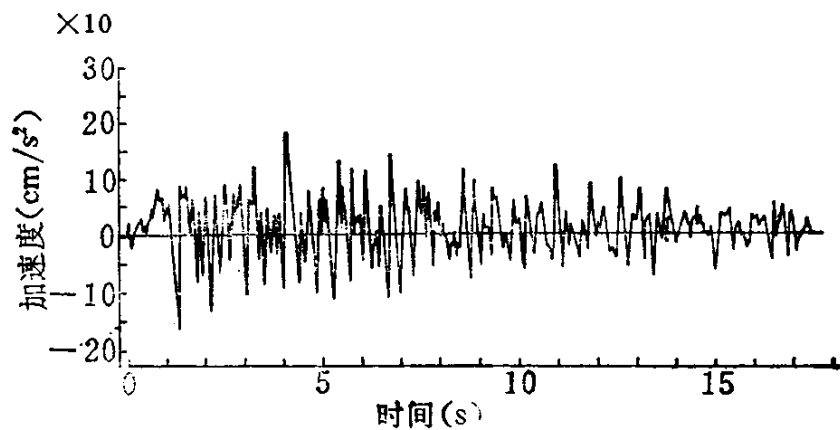


图 1-7 校正后的加速度曲线

(1952年7月21日美国 Kern County 地震, Taft 站, 北偏东 20°分量)

这些记录的共同特点是加速度随时间变化很不规则。在开始阶段的几个往复，极大值和极小值的绝对值较小，在记录中间达到最大值，称之为最大加速度或加速度峰值。以后经过一些不规则的变化，可能再出现一些比加速度峰值小些的较大的加速度值。最后逐渐减小以至于静止。