

高等学校试用教材

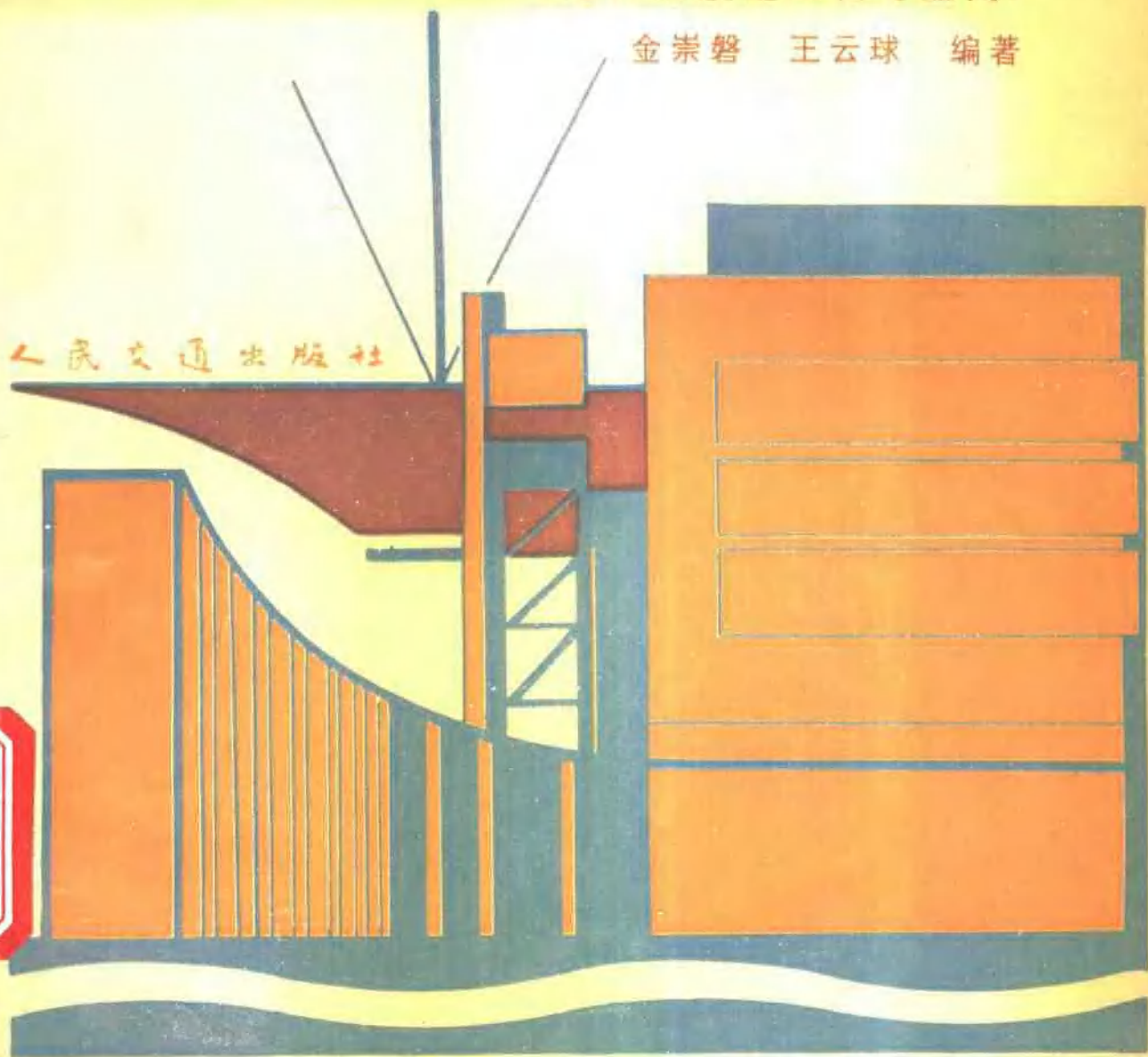
港口水工

建筑物抗震

(港口及航道工程专业用)

金崇磐 王云球 编著

人民交通出版社



高等学校试用教材

Gangkou Shuigong Jianzhuwu Kangzhen

港口水工建筑物抗震

(港口及航道工程专业用)

金崇磐 王云球 编著

人民交通出版社

(京)新登字 091 号

内 容 提 要

本书系高等学校“港口及航道工程”专业教材。共分八章, 主要介绍工程抗震, 地震荷载, 结构地震反应分析方法, 挡土结构的抗震和动土压力, 地基和土坡、桩式建筑物、重力式建筑物的抗震, 以及相应的抗震设计规范等内容。

高等学校试用教材

港口水工建筑物抗震

(港口及航道工程专业用)

金崇磐 王云球 编著

插图设计: 佘文利 正文设计: 周 圆 责任校对: 刘素燕

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京市顺义牛栏山印刷厂印刷

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 7 字数: 179 千

1995 年 12 月 第 1 版

1995 年 12 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001 - 3150 册 定价: 3.50 元

ISBN 7-114-02119-4

U·01441

前 言

我国许多港口都位于地震区。国内外历次地震灾害调查表明,未经抗震设计的港口水工建筑物在地震中容易受到损害。港口工程师除了专业知识外,还必须有相当的工程地震学和地震工程方面的知识,必须熟悉和正确应用有关的国家和部门规范和规定,方能做出合格的抗震设计。目前我国“港口及航道工程”专业的课程安排中,对于这方面的知识尚有较大的欠缺,编写本书的主要目的是补足这方面的欠缺。

本书主要依据是我国现行的《水运工程水工建筑物抗震设计规范 JTJ201-87》,同时,按照我国工科高等教育“拓宽专业”的要求和实际工作的需要,还重点参考和吸收了《建筑抗震设计规范 GBJ11-89》的部分内容。本书为港口及航道工程专业的本科学生提供了应用上述两种规范所必需的基础理论知识,并将其系统化。这些内容主要包含在前三章中。后面几章则对港口工程中常用的几种类型的水工建筑物和地基、边坡,具体地介绍它们抗震设计和计算的方法。

近年来国内外在地震工程的理论和分析方法方面都有了很快的发展,并且必然地将逐步应用到港口水工建筑物的抗震设计中。面对这种趋势,本书内容中注意了介绍这些新观念和新方法,如抗震设防的不同水准和分阶段设计,结构动力学和土动力学的动力分析方法和非线性分析方法的观念,以及现代的原型测试和实验室结构动力模型试验方法等,希望学生的思想不为现行抗震设计规范所限制,能够跟上现代技术发展的步伐,具备进一步研究的最初步基础。

本书第四章、第六章第三节、第七章由王云球执笔,其余各章、节由金崇磐执笔。河海大学夏颂佑教授审阅了全部书稿,并提出宝贵意见,使本书内容有所改进,特此致谢。

本书内容有不妥或错误之处,请读者随时指正!

目 录

第一章 地震与工程抗震	1
第一节 地震	1
第二节 地震烈度和烈度区划	3
第三节 震害和抗震	5
第二章 地震动和地震荷载	8
第一节 地震动	8
第二节 单自由度体系的地震反应和反应谱	10
第三节 地震荷载和设计地震动	13
第三章 结构地震反应分析方法	18
第一节 多质点体系地震反应的振型分解法	18
第二节 求多质点体系水平地震力的反应谱方法	25
第三节 地震反应的动力分析方法	29
第四节 非线性地震反应	36
第四章 挡土结构的抗震和动土压力	40
第一节 挡土结构的震害概况	40
第二节 挡土结构的抗震分析方法	42
第三节 地震时挡土墙的性状	43
第四节 地震时土压力的计算	44
第五节 地震土压力的试验研究	49
第六节 地震土压力的非线性分布计算方法	50
第七节 板桩码头抗震设计要点	52
第五章 地基和土坡的抗震	54
第一节 场地、地基和岸坡与抗震设计的关系	54
第二节 土体在循环荷载作用下的动力性质	55
第三节 砂土液化现象	59
第四节 砂土液化的预测	61
第五节 地基抗液化措施	65
第六节 土坡的抗震稳定性	67
第七节 地基和土坡的地震反应分析	70
第六章 桩式建筑物的抗震	74
第一节 桩基及桩式建筑物的震害	74
第二节 桩基的地震反应	75
第三节 港口桩基建筑物的抗震设计	79
第七章 重力式建筑物的抗震	88

第一节	重力式港口水工建筑物的震害	88
第二节	港口重力式建筑物抗震分析原理和方法	88
第三节	地震动水压力	90
第四节	重力式建筑物的地震惯性力	92
第五节	港口重力式建筑物的抗震计算及抗震措施	96
第八章	强地震考察和结构振动试验	98
第一节	结构抗震理论的发展	98
第二节	强地震考察	99
第三节	结构振动试验	101
参考文献	105

第一章 地震与工程抗震

第一节 地 震

一、地震及其成因学说

地震是地球上的一种自然现象。当地下某处岩层发生某种变动而产生振动并传播到地面，引起颠簸和摇晃时，就称为发生了地震。据统计，地球上每年要发生数以百万次计的地震，其中绝大多数是轻微的振动，只有用仪器才能观测到。人们能感觉到的称为有感地震，每年约有数万次，其中对人民生命财产和工程建设造成巨大损害的，则称为破坏性地震。它同洪水、干旱、台风等一样，是一种自然灾害。

地震造成的灾害往往是巨大的。以本世纪的几次主要地震为例，1906年美国旧金山地震死亡7万余人，1923年日本关东地震死亡10余万人，1976年我国唐山地震死亡人数达24万。地震还造成房屋倒塌，交通、生产中断，以及火灾、疫病等次生灾害，对一个地区以至全国的社会经济和政治产生不良影响。港口建筑物的震害记录也不少，日本的许多海港，我国的天津海港和河港，以及美国的屋克兰港等都曾在地震中蒙受重大破坏和损失。

地震的成因曾有过各种不同的学说和假设。近年来以海底扩张学说为基础的板块构造运动学说已为人们所普遍接受。这一学说认为地壳可以划分为欧亚、太平洋、美洲、非洲、印澳和南极六大板块，各大板块内部还可划分为许多较小的板块。地球内部的作用使板块发生相对移动，引起大小板块边缘附近的地壳和岩石层破裂而发生地震。这种地震称为构造性地震，约占所有地震的99%。此外还有由火山爆发而引起的火山地震和由地壳中空穴顶板陷落而引起的陷落地震，其数量都极少。因此构造性地震是研究的主要对象。

二、地震波及其传播

板块间的挤压冲撞使地壳岩石积累应变能，当变形超过容许值时，岩层破裂，破裂面上的应力突然下降，原来积累的应变能转化为动能而释放出来，以波的形式向各处传播。这种波统称为地震波。岩层中的这种大型破裂面称为断层，绝大多数断层形成时都有大地震发生。初始破裂点常可用仪器测到，称为仪器震源，或简称震源。从震源到地表的垂直距离为震源深度。大陆地震的震源深度一般约为几公里至几十公里。地下的震源在地表上的投影点为仪器震中。但实际上一次地震释放能量的中心位置往往不在推定的震源，而在接近破裂面的几何中心处。这个能量释放中心在地表的投影点称为宏观震中，也就是一次地震对地表的破坏中心。仪器震中与宏观震中可以相距几公里至几十公里。

地震传播的波动理论现在已为地震学家们普遍接受。这一理论将岩石看作弹性体，并用能量损耗的概念加以修正，以计入粘滞作用的影响，这样便可应用弹性波动方程来描述地震波的传播和介质的运动过程。可以将传播的地震波分为两大类，一类是体波，通过地球本体传播；另

一类是面波,只在地表附近传播。体波又包含纵波和横波两种。纵波也叫 P 波,是由震源向外传播的压缩(拉伸)波,介质质点的振动方向同波的前进方向一致。横波也叫 S 波,是由震源向外传播的剪切波,介质质点的振动方向与波的前进方向相垂直。其中,如果质点振动方向与波的前进方向均在水平面内,则这种 S 波称为 SH 波;若他们均在竖直平面内,就称为 SV 波。纵波的波速总是大于横波的波速。在地壳中, P 波速度约为 $7\sim 8\text{km/s}$, S 波速度约为 $4\sim 5\text{km/s}$ 。地震观测站用仪器测得一次地震的 P 波和 S 波到达的时间差,就可大致估算出这次地震震源离测站的距离。

面波是体波在介质的表面或层间界面经多次反射产生的,包含瑞雷波(R 波)和洛夫波(Q 波)两种。瑞雷波沿自由表面前进,介质质点在波传播方向同竖直线组成的平面内作逆时针的椭圆运动。瑞雷波在震中附近不出现,出现在离震中一定距离处,其振幅沿竖向衰减很快。瑞雷波的波速略小于 S 波速。洛夫波是一种 SH 波,只在半无限空间(均匀而坚硬的岩层)上有一松软水平覆盖层时才出现。洛夫波的波速与频率或波长有关,介乎最上层介质和最下层介质的 S 波速之间。

体波在传播过程中会发生反射和折射,这是由于介质发生变化,产生了界面的缘故。地面也是一种界面。因此离震源距离相等的各处传播来的地震波振幅大小也就不一定相同,这和地震传播途中不尽相同的地质条件有关。地震波在介质中传播时,部分能量转变为热能而损失。这种阻尼作用使地震波的振幅随着离震源的距离增大而减小,即发生衰减,从而使一次地震在地面的影响大小从震中向外逐渐减弱以至消失。

三、地震的震级

一次地震的“大小”,可以从两个方面去衡量。一个方面是从人的感觉、工程结构的反应和破坏程度,和自然状态的变化等震后现象出发,定出这次地震的烈度。另一个方面则是从地震本身,即一次地震释放的能量多少出发,定出这次地震的震级。

一次地震的震级由地震学家用专门的地震仪测定。世界上最早的地震仪是我国古代科学家张衡于公元 138 年制造的。近代的地震仪有多种型式,其基本原理都是根据测得的最大振幅和推测的震中距(仪器所在处与震中的距离)来计算震级。由于仪器构造原理和特性的差异,所定义的地震震级也就不同。目前常用的有下列三种:(1)地方震级 M_L ,也即所谓里氏震级。所根据的是周期为 $0.1\sim 0.5\text{s}$ 的地震动。(2)面波震级 M_S ,根据周期 $3\sim 20\text{s}$ 的地震动。(3)体波震级 m_b ,根据周期 1s 左右的体波地震动。按照我国通用的地震仪特性,常用的 M_S 与 M_L 间的换算关系为 $M_S = 1.13M_L - 1.08$ 。为统一起见,我国地震部门规定都应用面波震级 M_S 上报。

由于仪器构造和定义上的差异以及仪器精度的限制,还由于震源到各地震台站之间途中地质上的差异,虽然一次地震只可能有一个震级,不同台站对这次地震报出的震级却常常不同,差别可达 0.5 左右,有时甚至可能超过 1.0 。

古登堡和里希特曾提出震级 M 与地震释放能量之间的经验关系式

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

其中能量 E 的单位为焦耳。按照这一关系式可知震级每增大一级,释放能量增大约 30 倍。一个 1 级地震释放能量约 $2 \times 10^6 \text{J}$ 。一个 7 级地震释放相当于近 30 个 20000 吨 TNT 级原子弹所具有的能量。据记载,20 世纪中世界上记录到的震级最高的地震为 1933 年日本三陆近海地震,为 8.9 级。我国 1976 年唐山地震的震级为 7.8 级。通常将震级 5 级以上的地震称为破坏性地震, 7 级以上的地震称为强烈地震。

一个地区的地震活动性是指这一地区各种大小的地震在时间上的分布规律。研究这一规律现在主要靠经验的统计方法。首先根据地质构造和过去发生地震的情况,确定属于同一类型的地震区或地震带的范围,收集历史上发生在这一区或带的地震次数及其震级,然后统计获得其规律。古登堡和里希特经研究发现一般地震次数 N 与震级 M 之间存在下面的关系:

$$\log N = a + bM \quad (1-2)$$

式中 a 和 b 为统计常数。作为示例,图 1-1 上画出了我国郟城-营口地震带的 $\log N \sim M$ 关系,通常称为震级-频度关系。图上的点是根据地震记录和历史地震资料画出的。可以看出,它们大致符合式(1-2)的关系。

地震活动规律是一切地震工作和抗震工作的基础。无论是地震预报,还是抗震防震措施的规划和实施,都首先要从研究本地区的地震活动性开始。

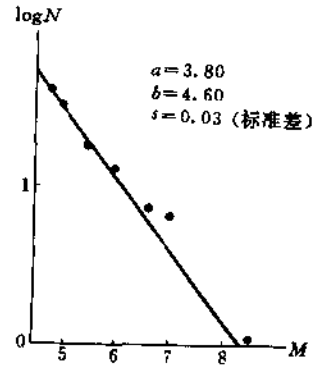


图 1-1 震级-频度关系

第二节 地震烈度和烈度区划

一、地震的宏观现象和地震烈度

地震的宏观现象通常指地震发生后的现象,可以概括为人的感觉,人工结构物的损坏或变形,物体的反应,以及自然状态的变化。人对地震的感觉从无感直至站立不稳和倒地,通常可以作为衡量地震大小的一种尺度。人工结构物如房屋、构筑物、堤坝等在地震时受损以至倒塌是造成人身伤亡和财产损失的直接原因,物体的反应如室内某些用具的移动、坠落或翻倒,户外石碑的扭转或移位等在某种程度上表示它们在地震时受到过的力的作用。强烈地震时自然现象的变化如地面喷砂冒水,地裂和滑坡等,在一定条件下海中地震还会伴生海啸。这些现象有时是强烈和大规模的。人们在认识地震的过程中,自然会将上面所说的地震宏观现象同地震的强弱程度联系起来,地震烈度这一用宏观震害定义的量,就被用来表达某一地区的地面和各种人工结构物遭受一次地震影响的强弱程度。

一百多年来世界各国曾经提出过各种各样的地震烈度定量标准和等级划分。目前除日本仍沿用其 0 至 7 度(共 8 个烈度等级)划分法外,全世界普遍使用的都是 1 至 12 度的划分法。曾流传很广的默卡利烈度表(MM 烈度表)、我国现行的“1980 年中国地震烈度表”都划分为 12 个等级。下面列出“1980 年中国地震烈度表”关于烈度 VI 至 IX 度的定量描述。

VI 度。人的感觉:惊慌失措,仓惶逃出。一般房屋损坏——个别砖瓦掉落,墙体微细裂缝。其他现象,河岸和松软土上出现裂缝,饱和砂层出现喷砂冒水,地面上有的砖烟囱轻度裂缝、掉头。

VII 度。大多数人仓惶逃出。一般房屋轻度破坏——局部破坏、开裂,但不妨碍使用。河岸出现坍方,饱和砂层常见喷砂冒水,松软土上地裂缝较多,大多数砖烟囱中等破坏。

VIII 度。人的感觉为摇晃颠簸,行走困难。一般房屋中等破坏——结构受损,需要修理。干硬土上亦有裂缝,大多数砖烟囱严重破坏。

IX度。人坐立不稳,行动的人可能摔跤。一般房屋严重破坏——墙体龟裂,局部倒塌,复修困难。干硬土上有许多地方出现裂缝,基岩上可能出现裂缝,滑坡、坍方常见,砖烟囱出现倒塌。

将宏观现象作为评定烈度的依据,其突出优点是简单方便。但是这些标准的判断和量度还是比较模糊的,评定一个地区在一次地震中的烈度难免带有一定的主观因素。此外,宏观现象是地震的后果,用后果来评价造成这些后果的原因——地震(或地震力)的大小,毕竟是间接的,因此对于如何应用地震烈度存在不同看法。把地震烈度用作衡量地震后果强弱的量,以便进行救灾、部署抗震或预测震害,对此是没有多少异议的。将地震烈度同地震力紧密联系起来,据以给出确定的量(加速度、速度、位移等)作为抗震工程设计的依据,则是有争议的。由于种种原因,我国现行的许多抗震设计、鉴定技术标准中绝大部分是以地震烈度为依据的。因此各地区的地震烈度划定工作就显得非常重要。

二、烈度分布图,烈度衰减关系

实际地震的烈度评定是进行地震区划分的基础资料工作,又是抗震救灾和地震预报等工作的重要依据。通常在一次比较强烈的地震后,地震工作者和地震工程工作者迅即赶赴现场,进行实地调查以了解震害和评定烈度。其工作成果之一就是绘制烈度分布图。即先将调查所得各地点的烈度标在一张地图上,再用曲线将不同烈度区分隔开,使得在位于相邻两曲线之间的区域内的烈度都相同。这样绘制的图也称为等震线图。图 1-2 上表示的是我国 1976 年 7 月 28 日唐山地震的烈度分布图。从图上可以看到在一个烈度分区内有局部的小区域其烈度高于或低于周围的大部分区域,这个小区域就构成烈度异常区,其烈度单独标出。

通常在一次比较强烈的地震后,地震工作者和地震工程工作者迅即赶赴现场,进行实地调查以了解震害和评定烈度。其工作成果之一就是绘制烈度分布图。即先将调查所得各地点的烈度标在一张地图上,再用曲线将不同烈度区分隔开,使得在位于相邻两曲线之间的区域内的烈度都相同。这样绘制的图也称为等震线图。图 1-2 上表示的是我国 1976 年 7 月 28 日唐山地震的烈度分布图。从图上可以看到在一个烈度分区内有局部的小区域其烈度高于或低于周围的大部分区域,这个小区域就构成烈度异常区,其烈度单独标出。

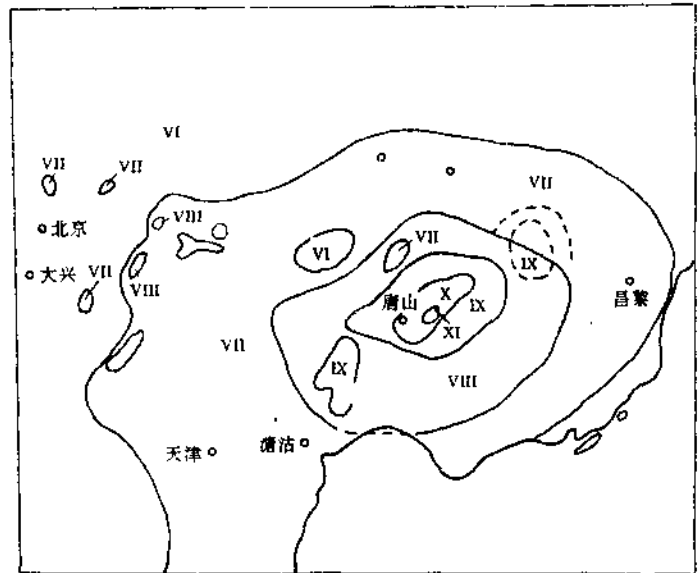


图 1-2 唐山地震等震线图(烈度分布)

地震烈度大小与震源释放出来的能量多少直接有关。地震震中附近区域的烈度称为震中烈度。震中烈度与震级有密切关系,根据我国自 1900 年以来的 152 次地震资料求得的关系式为

$$M = 0.66I_0 + 0.98 \quad (\text{标准差为 } 0.33) \quad (1-3)$$

式中: M ——震级;

I_0 ——震中烈度。

这一经验式适用于震源深度为 14~45km 的地震,也即最常发生而且对人民生命财产影响最大的地震。

地面一点离震中的距离称为震中距。一次地震的烈度以震中烈度为最高,随着震中距的增

大,烈度逐渐降低。描述这一规律的称为烈度衰减关系。各国的不同地区都有其特有的衰减关系,并且是地震学家研究的主要课题之一。目前常用的推求方法是从历史地震的烈度分布图中统计各次地震的烈度与震中距资料,再用回归分析求得经验关系式。我国东部、西部、台湾、华南、华北、川滇和新疆等地区都已推求出自己的烈度衰减关系。烈度衰减关系是进行地震区划的一项重要依据。

场地条件主要是指地基性质和地形条件,对烈度也有影响。许多烈度异常区的出现常和当地特殊的地基和地形条件有关。

三、烈度区划

中国位于欧亚板块的东南端,东面为太平洋板块,南面为印度洋板块,这两个板块都挤向中国,中国就成为一个多地震的国家。我国悠久的历史记载中保存有不少地震的历史资料,这在世界上是绝无仅有的,并为现代的地震研究提供了宝贵的依据和参考。这些资料大都已收集整理编在《中国地震目录》中。

目前我国已制订了《中国地震烈度区划图》作为国家经济建设中地震设防的法规附件。《区划图》根据新的地震资料和理论进展而将不断更新,最新一版为1992年发布的《中国地震烈度区划图(1990)》。编制这版《区划图》时,根据我国大区域地震活动和地质构造的特点,划分为东北、华北、华南、新疆、青藏高原、台湾和南海7个地震区,并将中国及其邻区划分为27个地震带。《区划图》上标示的地震烈度值是指在50年期限内,一般场地条件下可能遭遇超越概率为10%的烈度值。这一烈度值称为地震基本烈度。这样定义的地震烈度是采用地震危险性分析概率方法,已赋予了有效时间区限和概率水平的含义。这个地震烈度值所规定的风险水平是目前国际上普遍采用的一般建筑物抗震设防标准。《区划图》规定的使用范围为:(1)国家经济建设和国土利用规划的基础资料;(2)一般工业与民用建筑的地震设防依据;(3)制定减轻和防御地震灾害的依据。在其适用范围内,建设项目的抗震设计和已建项目的抗震加固均应遵照执行。

在《中国地震烈度区划图(1990)》上共划分出五类烈度区; $<VI$ 、 VI 、 VII 、 $VIII$ 和 $\geq IX$ 。我国大部分沿海地区位于 VI 和 VII 度区;许多重要的沿海城市和港口位于 VII 度区。

使用《中国地震烈度区划图(1990)》时须注意下面两点:(1)图上标示的地震基本烈度已经考虑了地震动衰减关系,给出的是场点地震动的超越概率预测,而不是一个地区或区域的地震预测。这二者是有不同含义的。(2)本图《使用说明》规定:地震设防要求高于本区划图设防标准的重大工程、特殊工程、可能产生严重次生灾害的工程;位于地震烈度区分界线附近的新建工程;某些地震研究程度和资料详细程度较差的边远地区;占地范围较大,跨着不同工程地质条件区域的大城市和大型厂矿企业,以及新建开发区,这些工程和地区在本区划图的基础上应进行专门地震安全性评价工作。为此而进行的工作如专门的地震危险性分析、地震烈度复核、地震小区划等,其结果应经国家地震烈度评定委员会审定通过方属有效。

第三节 震害和抗震

一、震害和地震预报

震害常被划分为直接震害和间接震害。直接震害指地震中直接由于地震而造成的人身伤

亡和财产损失,包括人工结构物的损坏、失效和自然环境如农田、河流、地下水的破坏。间接震害又称次生灾害,是由于地震引起的诸如火灾、水电系统停止工作、堤坝震塌后发生的水灾以及海啸等造成的生命财产损失以及社会影响。此外,地震灾区还常易发生瘟疫流行。

一次大地震常有大量人员伤亡。1556年我国陕西关中大地震仅官方记录即“压死82万名”,次生灾害有时比直接震害更大,如1923年日本关东大地震直接震倒房屋13万栋,引发火灾烧毁房屋达45万栋,这次地震中死亡、失踪的10余万人中有相当一部分死于火灾。地震对人工建筑物的破坏也是严重的,特别是发生在人口稠密和工业发达地区的地震。1976年我国唐山地震烈度IX度区的多层居民房屋无一完好,其中倒塌和严重破坏的达60%。住房倒塌常是居民伤亡的主要原因之一。

港口水工建筑物和其他设备大多座落在比较软弱的地基上,容易受到地震损害。日本是个多地震的岛国,其众多港口的震害记录较多,几乎各种类型的码头都有。例如1923年关东大地震中,横滨港长2000m的方块岸壁只有20%稍保持原形,其余全部倒坏。长490m的大栈桥大部分塌折,新填筑的用地平均下沉20cm,仓库和起重机械大部不堪使用。1939年男鹿半岛地震中土崎港的钢板桩岸壁有300m长一段向前滑出,最远达1m,L形挡土墙最大向前滑动1.5m。1964年新潟地震中新潟港各部分码头的沉箱、块体堆砌、混凝土壁、混凝土板桩壁和混凝土桩栈桥等下沉很多,相当部分沉到水面以下,港口几乎全面受损。1952年十胜近海地震中钏路港的8m岸壁沉箱滑向前方5.3m,不能再使用。1968年十胜近海地震中八户新港由于海啸而流失沉箱共达339m,函馆港的斜锚桩式板桩330m长的坡而鼓出60cm,顶部和前方都发生下沉。

我国1976年唐山地震时天津地区位于VII度烈度区,海港和海河各码头也都遭受震害,以高桩码头的承台下基桩损坏较为普遍而严重,其中河港的个别码头因整体变形而倒塌。1989年美国加州洛马普里塔地震(震级7.1)时,沿旧金山湾的屋克兰港的高桩码头又桩顶部严重损坏,土坡和地基变形使许多设施停用而造成巨大损失。

为了减轻地震灾害,必须把地震预报和工程抗震两方面的工作坚持不懈地做好。地震预报大致可分为长期预报和中短期及临震预报。长期预报主要供城市和工业区选址及发展规划作参考,并为抗震规范、设计等提供选择地震动参数的依据。中期预报是对今后1、2年至几年内的地震趋势进行分析,以指明进一步监视地震的方向。短期预报和临震预报是几个月至几小时的预报,主要目的是使政府和居民为减轻地震灾害面及时采取一些临时性的紧急措施。目前世界上许多国家都在努力探索地震预报的途径和方法,但迄今都尚未能成功地预报所有的地震,甚至尚未掌握其普遍的规律。例如我国地震部门曾在1975年根据大震前一系列明确的小地震异常规律而成功地预报了海城地震,但在1976年却因震前无此规律而未对唐山地震作出预报。因此还必须积累更多经验与资料,更多了解震源区的地质构造,吸收更多的高新技术,才能进一步提高预报的精度。

二、工程抗震

震害调查和分析表明:在同一烈度区内甚或在同一地点,是否进行抗震设防的工程结构所受震害是不同的。许多发生严重震害的工程建筑,绝大多数已运行多年,当时未曾按抗震要求进行设计。人们逐渐认识到,在目前的科学水平,人类尚不可能阻止一场地震的发生,但可以根据“地震工作以预防为主”的方针,使工程建筑经抗震设防后,减轻地震破坏,避免伤亡,减少损失。

工程抗震包含许多方面的工作,直接与工程的抗震设防有关的如:

1. 正确选用地震动参数。根据工程的性质和重要性,按发生概率确定地震动参数作为设防依据,也即需要通过地震危险性分析来定出。工程地震学认为,一定概率的地震动参数可以按区域划分其大小,我国现行的地震烈度区划图就是一例。上述区划图不能满足要求时,目前已逐步开展的地震小区划工作填补了区划图同抗震设计要求之间的空缺。地震小区划属于地震长期预报范围,是比区划图更为具体的地震危险性评定。其目的是估计场区范围内可能遭遇的地震破坏作用的分布,为场区内的工程抗震设计提供依据,给出相应的地震动参数,并为震害预测和制定抗震防灾规划提供基础资料。应当认为,地震小区划是一项综合性的工作,从比较全面的角度提供工程抗震设计要求的地震动参数。

2. 遵守有关的指导抗震设计、鉴定的技术法规。自1974年以来,我国已初步形成从国家标准、专业标准、部颁标准到地区标准的工程抗震设计、鉴定技术法规。抗震设计规范规定了各种新建工程的抗震原则,抗震设计方法和抗震措施,具有法定的约束力。这些原则、方法和措施是在国家政策指导下总结了一个时期以来的震害调查分析得到的经验教训和抗震研究成果后制订的,代表一个时期在某一方面的发展水平。随着实践经验的积累和科学水平的提高,抗震规范也在不断修改和更新。如我国应用很广的《建筑抗震设计规范 GBJ11—89》是1989年由我国建设部发布的国家标准,适用于抗震设防烈度为6~9度地区的一般建筑抗震设计,经几年使用后于1993年发布了对若干条文的《局部修订》。交通部颁发的《水运工程水工建筑物抗震设计规范 JTJ201—87》已编入交通部《港口工程技术规范(1987)》,作为该规范的第八篇,并且正在修订中。这本抗震设计规范包括一般规定,场地、地基和岸坡,抗震计算和抗震措施等章,适用于设计烈度为7、8、9度的码头和船闸的抗震设计。

除了适用于不同行业的各种专门抗震设计规范外,还颁布了许多抗震鉴定、加固的标准,以及抗震施工、测试和验收的规程和规定。

3. 积极进行抗震研究工作。抗震研究工作内容是多方面的,从抗震防灾对策、城市和工业企业抗震防灾规划以及抗震设计原则等涉及社会、经济和技术的重大问题,直至某一工程结构的抗震设计理论、分析计算方法和抗震试验。抗震研究的成果,和震害调查总结的经验教训,是推进抗震规范更新和趋于完善的主要依据。许多规范中未有明确规定的课题和内容,也需要专门的抗震研究来解决。只有通过长期的震害调查分析,进行大量的、有效的抗震研究,才能达到以最少的代价获得最大程度减轻或免除地震灾害的抗震目的。

第二章 地震动和地震荷载

第一节 地震动

一、地震动的特性

地震动,或称地面运动,是地震工程学中的一个专用名词。它专指地震引起的地表附近地层的振动。地震动的特性可通过其振幅、频谱和持续时间来描述。

地震动的振幅通常指地震动加速度、速度和位移的最大值。从最简单的静力学观点,加速度可用作度量“力”的因素,速度和位移分别可用作度量“动能”和“势能”的因素。因此人们很容易接受它们作为衡量地震强弱的指标。地震工作者用来记录地震动的地震仪记录的是位移值;抗震工作者使用的强震加速度仪则记录加速度值。

随着强震记录的积累,地震震害调查的增多和对震害分析的深入,人们逐渐认识到对地震动这样复杂的振动现象只用某一个简单的物理量来描述是不够的,还必须有地震动的频谱特性。由于共振效应,一定频率的振动对某一类建筑物产生特强的振动效果,如高频振动对自振周期短的刚性结构物造成较大危害,低频振动则会引起自振周期长的结构物产生巨大反应。

以前在以弹性分析为主的振动分析中,地震动的持续时间并不被看作一项重要参数。但实际震害调查却表明,持续时间长的地震造成的建筑结构破坏比持续时间短的地震严重。在理论上累积破坏和低周疲劳理论也可用来解释这种现象,因此越来越多的人已经接受将地震动的持续时间作为其特性之一。

二、地震动的量测和记录

用于地震动量测的有两类仪器。一类是地震工作者使用最多的地震仪,它是连续不停地昼夜运转的,通过位移将各种波的到达时间和初动方向记录下来,可以用很高的放大倍数记录弱震。另一类是强震加速度仪,它是自动触发式的、记录一次强地震动的加速度全过程。国际上都把触发启动的下限定为 $0.01g$ (g 为重力加速度)。无地震或加速度达不到 $0.01g$ 的地震时,它是处于停止状态的。一台强震加速度仪可以记录一次地震动的加速度的相互垂直的三个分量,其中一个为竖向分量,另两个为水平分量。图2-1上是由强震加速度仪于1940年5月18日在美国加州埃尔森特罗(Elcentro)记录的水平加速度南北分量时程的一部分。这次地震的震级为7.1级,记录点(测站)位于密实而深厚的冲积层上,离发展断层约6km,当地烈度VII-VIII度。记录的最大加速度为 $0.32g$,持续时间30s。图中加速度的单位为gal(等于 cm/s^2)。根据记录到的地震动加速度时程,可以推算得到地震动速度和位移时程。

强震加速度仪记录的加速度时程是连续的曲线,但在实际应用时需要按一定的时间间隔整理成数字系列。如果按等时距采值,则很可能将正、负方向的峰值越过而不包含在数字记录中。此外,强震加速度仪本身有高频失真的缺点。上述这些误差现在还很难避免,在使用地震

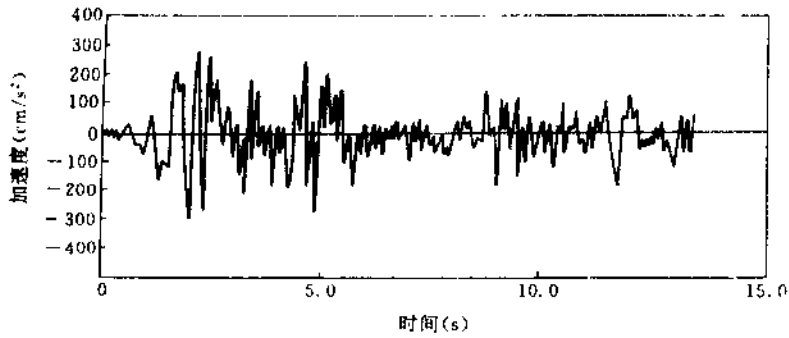


图 2-1 埃尔森特罗地震动水加速度时程

动记录时应当注意。

三、地震动的频谱

观察地震动的加速度记录,可以看到地震动的振幅和频率是随时间无规律地变动着的,即地震动是随机振动。为抗震分析应用的需要,人们总希望用某种数学方法描述一次地震动中振幅与频率的关系。很显然,这种关系不会是简单的谐和关系。目前常用的方法是将一个给定的地震动过程 $a(t)$ 分解为许多不相同的简谐波,这些简谐波的总和就组合成 $a(t)$ 。不论采用何种方法,通常把描述地震动过程中振幅与频率关系的曲线或表达式统称为地震动的频谱。

地震动的频谱可以从不同的出发点以不同的形式构成。地震工程中最常用的有两种,即傅里叶谱和反应谱。

傅里叶谱来源于数学上应用很广的傅里叶变换。傅里叶变换可以看作是时间函数在频率域上的表示,傅里叶变换频率域所包含的信息与原函数(时间域)所包含的完全相同,不同的仅是信息的表示法。由傅里叶变换的定义可知,当时间域的 $a(t)$ 与频率域的 $A(i\omega)$ 组成一个傅里叶对时,有

$$\left. \begin{aligned} a(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(i\omega) e^{i\omega t} d\omega \\ A(i\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-i\omega t} dt \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中 $i = \sqrt{-1}$ 。复函数 $A(i\omega)$ 就是傅里叶谱,它的模 $|A(i\omega)|$ 称为谱幅。写成离散形式时有

$$a(t) = \sum_{j=1}^N A(i\omega_j) e^{i\omega_j t} \quad (j=1, 2, 3, \dots, N) \quad (2-2)$$

即把 $a(t)$ 看作由有限个频率 ω_j 的振动组合而成。 N 的数值取得越大,组合成的振动越接近 $a(t)$ 。式(2-2)可以更直观的写成

$$a(t) = \sum_{j=1}^N A_j \sin(\omega_j t + \theta_j) \quad (2-3)$$

式中 A_j 和 θ_j 分别是频率为 ω_j 的振动分量的振幅和相角。 $A(\omega)$ 称为傅里叶幅谱, $\theta(\omega)$ 称为傅里叶相位谱,二者合称傅里叶谱。式(2-2)和式(2-3)是完全等价的。

傅里叶谱直接描述了地震动振幅与频率的关系,是一次地震动过程在频率域上的再现。反应谱则是从另外一个角度,即通过理想的单质点体系对一次地震动的反应来描述这个地震动的特性。本章第二节将结合单质点体系的振动反应特性来介绍反应谱。反应谱在地震工程中应用得非常广泛。

除此之外,有时还用到地震动的功率谱,又称功率谱密度函数。它的定义与震动过程 $a(t)$

的傅里叶谱 $A(\omega)$ 的平方平均值有关,即

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi T_d} \cdot E[A^2(\omega)] \quad (2-4)$$

式中 $S(\omega)$ 为功率谱, T_d 为地震动持续时间, E 表示期望值。功率谱有明确的统计意义,是随机过程在频率域中描述过程特性的物理量,因而广泛应用在随机振动分析中。

反应谱和功率谱由于失去了相位信息,因而都不能返回变换到原来的时间过程 $a(t)$ 。这是它们与傅里叶谱不同之处。

四、地震烈度与地震动参数的关系

我国已经正式颁发了《地震烈度区划图》,作为一般工业与民用建筑地震设防的依据。但许多重大工程和特殊工程的抗震设计和抗震分析需要定量的地震动参数作为地震“输入”量,因此需要在地震烈度与地震动参数之间建立定量的对应关系。多年来许多学者对此作了许多努力,但至今尚未有统一的做法和看法。多数意见认为建立地震烈度与地震动的单个参数如地震动最大加速度之间的确定的对应关系是不妥的,因为现有的强震动观测资料表明,凡已建立的这种公式或曲线,其所依据的原始资料数据都与之有很大的离散。已有一些研究者主要根据美国西部和日本的强震动记录,统计整理出地震动参数与震级和距离的经验关系式。但这些经验关系式能否移用至别的地区尚缺乏论证和经验。

为应付当前抗震设计中动力分析的需要,我国有关的工程部门曾引用《中国地震烈度表(1980)》中的“参考物理指标”中的水平加速度平均值,将烈度 VII、VIII、IX 度所对应的最大水平加速度分别取为 125、250、500 cm/s²。实际上《烈度表》中也已指出其变差和离散性,如 VII 度烈度区实际测到的最大水平加速度为 90~177 cm/s²,最低与最高相差达一倍之多。由于依据不足,我国一些抗震规范、标准和规定对烈度与最大水平加速度间的对应关系规定得不统一。为避免混乱,建设部于 1993 年曾发文要求在各种抗震规范中统一应用下列对应关系:VII 度—0.1g (cm/s²), VIII 度—0.2g (cm/s²), IX 度—0.4g (cm/s²)。

目前我国已有若干城市和工矿企业地区由地震部门通过地震小区划工作给出了较为有依据的地震动参数分布。在积累资料和经验的基础上,将来也会象《烈度区划图》那样,由地震部门发布“地震动主要参数区划图”。

第二节 单自由度体系的地震反应和反应谱

一、单自由度体系的地震反应

为了说明结构的地震反应和反应谱,首先复习动力学中关于单自由度体系振动的一些基本原理和运动方程的建立。

为确定结构的运动状态所必须考虑的独立参数(通常是某个方向的位移分量)的数目,称为结构的动力自由度,一般常简称之为自由度。如果将结构体系理想化地简化成一个质点,而且只考虑一个方向的变位时,这个体系就成为单自由度体系。在研究结构的地震反应时,通常考虑的是水平方向的位移。

考察图 2-2 所示的一个理想的单自由度体系,参与振动的全部结构的质量 m 假想集中在一点,由它构成的弹性体系的力学性质可以由两个元件来代表,即表示弹性性质的弹簧和表示

运动时能量耗散的阻尼器, 弹簧常数为 k , 阻尼常数为 c 。这个弹性体系座落在假定为刚性平面的地基上。当发生一个由地震动而产生的地面位移 u_g 时, 质点发生位移 $(u_g + u)$, 其中 u 为质点相对于地面的位移即相对位移, $(u_g + u)$ 则称为绝对位移。当质点处在运动状态时, 受到惯性力 $F = -m(\ddot{u}_g + \ddot{u})$, \ddot{u}_g 和 \ddot{u} 分别为 u_g 和 u 对时间的二次导数, 表示加速度, \ddot{u} 为质点对地面的相对加速度, 而 $(\ddot{u}_g + \ddot{u})$ 则为质点的绝对加速度。体系的弹性恢复力为 $G = -ku$, 阻尼力为 $D = -c\dot{u}$, 其中 \dot{u} 表示 u 对时间的一次导数。这些力的作用方向都同质点运动方向相反, 因而都带负号。在没有外力作用下可以写出质点 m 在地震动作用下的运动方程

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \quad (2-5)$$

在结构动力学中已经推导出单自由度体系的无阻尼自由振动圆频率 $\omega = \sqrt{k/m}$, 并且定义阻尼比 $D = \frac{c}{2\omega m}$ 。于是式(2-5)可以写成

$$\ddot{u} + 2D\omega\dot{u} + \omega^2 u = -\ddot{u}_g \quad (2-6)$$

这就是常用的单自由度体系运动方程。我们还记得圆频率 ω 与常用频率 f 之间的关系为 $\omega = 2\pi f$, 结构动力学中还已推导出当体系存在阻尼时的自振圆频率为 $\omega_D = \omega \sqrt{1 - D^2}$, 通常结构体系的阻尼比 D 值远小于 1.0, 所以 ω_D 与 ω 的值也相差不大。

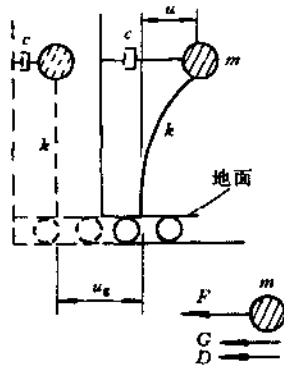


图 2-2 单自由度体系

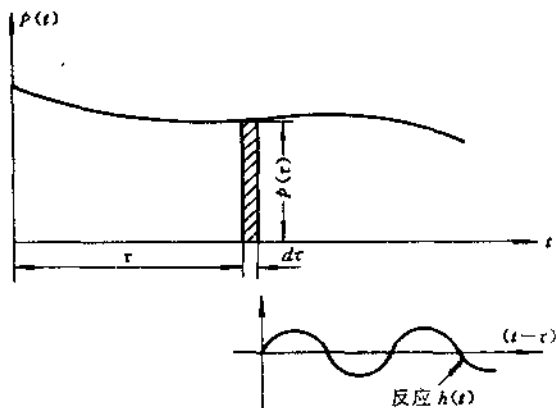


图 2-3 杜哈美积分的时间关系

地震动过程是极不规则的振动, 通常不可能用数学解析式表达地震动加速度的时程 $\ddot{u}_g(t)$, 式(2-6)只能通过数值计算方法求解。对线性体系可按叠加原理用杜哈美积分方法。按照这一方法, 当 $t = \tau$ 时结构受一脉冲荷载作用, 结构对此脉冲荷载的位移反应存在于整个 $(t - \tau)$ 时间内, 如图 2-3 所示。结构动力学中已经推导出单位脉冲对单自由度体系作用反应函数为

$$h(t) = -\frac{1}{\omega_D} e^{-D\omega t} \sin \omega_D t \quad (2-7)$$

应用这一解答, 则在任一时刻 t 由于荷载增量 $p(\tau)d\tau$ 而引起的位移增量为 $du = p(\tau)d\tau h(t)$ 。于是在整个地震动过程中, 结构因 $\ddot{u}_g(t)$ 所产生的位移反应 $u(t)$ 就可将 $\ddot{u}_g(t)$ 时程图上宽度为 $d\tau$ 的各窄条所产生的位移反应叠加而求得, 即将 $\ddot{u}_g(t)$ 看作许多连续作用的冲击荷载, 由此求得表示位移的下式:

$$\begin{aligned} u(t) &= - \sum \ddot{u}_g(\tau) d\tau \cdot h(t) \\ &= - \sum \frac{1}{\omega_D} e^{-D\omega(t-\tau)} \ddot{u}_g(\tau) \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \end{aligned}$$

式中的负号是由式(2-5)中保留下来的。当 $d\tau$ 趋于零时, 取极限后上式就成为杜哈美积分

$$u(t) = - \frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-D\omega(t-\tau)} \cdot \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (2-8)$$