

# 港口 工程结构物抗震

GANGKOU GONGCHENG JIEGOUWU KANGZHEN

姚熊亮 戴绍仕 编

哈尔滨工程大学出版社

556  
371

## 图书在版编目(CIP)数据

港口工程结构物抗震/姚熊亮,戴绍仕编. —哈尔滨:  
哈尔滨工程大学出版社, 2004  
ISBN 7-81073-563-2

I. 港… II. ①姚…②戴… III. 港口工程-抗震结构  
IV. U65

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 011943 号

---

### 内 容 简 介

本书紧密结合工程实际及设计规范,综合了许多工程经验及实验成果,详尽地介绍了港口工程结构物的抗震原理、计算方法和抗震措施等方面的知识。本书在阐述理论和计算方法的过程中力求概念清晰,计算简洁明确,同时引用了一些工程算例及参考数据,以方便读者使用。

本书可供港口工程、水利工程、路桥工程等相关专业的高等学校师生使用,也可供相关专业的工程技术人员参考。

---

哈尔滨工程大学出版社出版发行  
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼  
发行部电话:(0451)82519328 邮编:150001  
新华书店经销  
哈尔滨工程大学印刷厂印刷

\*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 8.75 字数 215 千字

2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷

印数:1—1 000 册

定价:13.00 元

## 前 言

中国是多地震的国家之一,中国的许多港口也都位于地震区。经国内外历次地震灾害调查结果表明,未经抗震设计的港口水工结构物在地震中极易受到破坏,使人民生命和国家财产在不同程度上遭受损失。为了认识和了解地震,防御和减轻地震灾害,人类已经做出了巨大的努力并在地震工程的研究中取得了很大成绩。因此,为满足工程建设的要求,港口工程技术人员除了应熟悉专业知识外,还必须具有工程地震学和地震工程方面的知识,才能做出经济合理的抗震设计。

目前我国在“港口及航道工程”专业的课程设置中有关港口水工结构物抗震设计的知识尚有欠缺,有鉴于此,我们结合自己的教学经验,并吸收国内外抗震方面的研究成果编写了这本书。

本书以《工程结构抗震设计原理》(1981,上海科学技术出版社)和我国现行的《水运工程水工结构物抗震设计规范 JTJ225 - 98》为基础,按照我国高等教育拓宽专业知识的要求,同时还参考了《建筑抗震设计规范 GBJ11 - 89》等有关书籍的部分内容。为了使读者对港口水工结构物抗震有比较系统地了解和掌握,本书详细地从有关地震的基本概念开始介绍,逐步深入到港口工程中常用的几种类型的水工结构物的抗震计算中,并具体地介绍它们的抗震计算方法和所应采取的抗震措施。本书的主要内容包括地震的基本知识,场地、地基及各种类型水运工程结构物抗震计算方法及抗液化的措施。

本书的主要特点是:紧密结合现行水工建筑物抗震规范编写,对于学习、理解和运用规范有重要的指导意义;针对不同形式的水工结构物附有计算实例,便于读者掌握其计算方法;注重理论与实践相结合。本书内容涉及地震与工程抗震的基本知识,结构动力学与地震反应计算的基础理论、土力学动力分析方法和非线性分析方法的观念及实验室结构动力模型试验方法等。

本书第一章、第三章、第五章由姚熊亮编写;其余各章由戴绍仕编写;全篇由姚熊亮统稿。哈尔滨工程大学船舶工程学院王晓天、耿敬同志审阅了全部书稿,并提出了宝贵意见,特此致谢。

本书在编写过程中,参考并引用了国内有关学者和有关单位公开出版物的某些资料,谨向这些作者和单位致以诚挚的谢意。由于编者学识有限,书中若有疏漏和错误之处,敬请各位同行和读者给予批评指正。

编 者

2003 年 12 月

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第一章 地震与工程抗震 .....          | 1  |
| 第一节 地震的初步知识 .....          | 1  |
| 第二节 地震灾害和地震预测 .....        | 6  |
| 第三节 工程结构抗震 .....           | 7  |
| 第二章 场地与地基 .....            | 10 |
| 第一节 场地 .....               | 10 |
| 第二节 地基基础抗震验算 .....         | 12 |
| 第三节 地基土及液化 .....           | 14 |
| 第三章 结构的弹性地震反应分析 .....      | 22 |
| 第一节 地震动和地震反应 .....         | 22 |
| 第二节 单自由度体系的弹性地震反应 .....    | 24 |
| 第三节 反应谱理论 .....            | 34 |
| 第四节 多自由度体系的弹性地震反应 .....    | 38 |
| 第五节 非线性地震反应 .....          | 55 |
| 第四章 地震动土压力和地震动水压力 .....    | 61 |
| 第一节 挡土结构物的震害及性状 .....      | 61 |
| 第二节 地震动土压力的计算 .....        | 63 |
| 第三节 地震土压力试验研究 .....        | 68 |
| 第四节 地震动土压力的非线性分布计算方法 ..... | 70 |
| 第五节 地震动水压力 .....           | 71 |
| 第五章 港口工程重力式结构物的抗震 .....    | 74 |
| 第一节 港口工程重力式结构物的震害 .....    | 74 |
| 第二节 港口工程重力式结构物抗震原理 .....   | 74 |
| 第三节 港口工程重力式结构物的地震惯性力 ..... | 76 |
| 第四节 重力式结构物的抗震措施 .....      | 80 |
| 第六章 桩式结构物的抗震 .....         | 81 |
| 第一节 桩式结构物的震害 .....         | 81 |
| 第二节 桩基的地震反应 .....          | 82 |
| 第三节 桩基的地震惯性力 .....         | 86 |
| 第四节 板桩码头的抗震计算方法 .....      | 90 |
| 第五节 桩式结构物的抗震措施 .....       | 91 |
| 第七章 岸坡的抗震计算 .....          | 93 |
| 第一节 岸坡的震害 .....            | 93 |
| 第二节 岸坡的抗震稳定性计算 .....       | 93 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第八章 各种类型结构抗震计算例题 ..... | 96  |
| 第一节 岸坡抗震计算及液化计算 .....  | 96  |
| 第二节 重力式结构物的抗震计算 .....  | 101 |
| 第三节 板桩码头的抗震计算 .....    | 111 |
| 附录:地震动土压力系数表 .....     | 123 |
| 参考文献 .....             | 131 |

# 第一章 地震与工程抗震

地震是地壳运动在某些阶段发生急剧变化时的一种自然现象,它往往给人类社会造成不同程度的伤亡事故和经济损失。据统计,地球上每年要发生数以万次的地震,人类一直以来都与地震灾害进行着斗争。港口工程结构物的震害也屡见不鲜,我国的天津海港和河港,以及美国的沃克兰港等都曾在地震中遭受重大破坏和损失。本章主要是在学习港口工程结构物抗震设计之前,先扼要地介绍一些关于地震和工程抗震的基本知识及要求。

## 第一节 地震的初步知识

### 一、地球的构造

地球是一个很大的实心球体,它的平均半径为 6 400 km。地球内部构造可以分为性质不同的三层。地壳是地球最表面的一层,平均厚度为 30 km,地壳下面约 2 900 km 厚的一层叫做地幔,最里面的部分叫地核,其半径约 3 470 km。地壳由各种不均匀的岩石组成,其厚度也不是均匀的,高山或高原处厚度可达 60 km,而在深海底只有 3 km ~ 5 km。世界上绝大多数的地震都发生在地壳这一层;地幔主要由质地非常坚硬、比重较大的黑色橄榄岩组成。由于这一部分压力大、温度高,因此一般推测地幔的地质可能具有粘弹性,其顶部存在缓慢地运动着的软流层;地壳与地幔的分界面称为莫霍诺维奇间断面,它是一个地震波传播速度急剧变化的不连续面;据推测,地核主要由铁、镍等物质组成,这里压力大于 300 万个大气压,温度高达 4 000 °C ~ 5 000 °C。根据地震传播分析,外核可能处于液态,而内核可能是固态。

### 二、地震的成因

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,地球内部的作用使板块发生相对移动引起板块边缘附近的地壳和岩石层破裂而发生地震。按发生地震的原因主要可分为火山地震、陷落地震和构造地震,除此以外还有水库地震、注水地震、抽水地震、爆发地震和山崩地震等。由于火山活动而引起的地震称为火山地震;由于地下岩洞突然塌陷而引起的地震称为陷落地震;构造地震是因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,而组成地壳的岩石在巨大的能量作用下,也不停地连续变动,不断地由于形变而发生褶皱、断裂和错动。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。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。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、不同断层的交汇处。构造地震影响面广,破坏性大,发生频率高,约占破坏性地震的 90%。在结构抗震设计中,仅限于考虑构造地



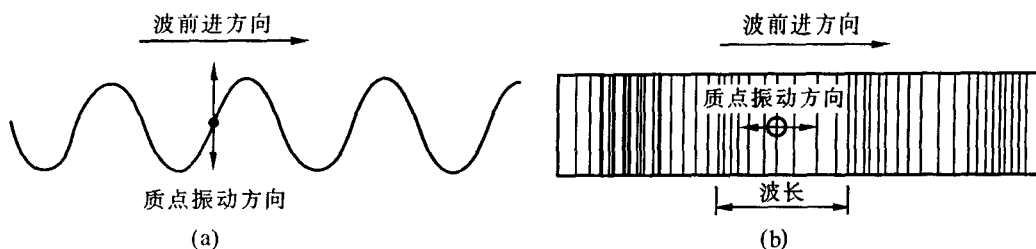


图 1-2 体波传递示意图  
(a) 横波(剪切波); (b) 纵波(压缩波)

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

横波的波速计算公式:

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

式中  $E$ ——介质的弹性模量;  
 $u$ ——介质的泊松比;  
 $\rho$ ——介质密度;  
 $G$ ——介质的剪切模量。

当  $u = 1/4$  时, 式(1-1) 和式(1-2) 可得:  $v_p = \sqrt{3}v_s$ 。

所以 P 波比 S 波传播速度快。

面波是在地球表面传播的波, 又称 L 波。它是体波经地层界面多次反射、折射形成的次生波。其波速较慢, 约为 S 波波速的 0.9 倍。所以它在体波之后到达地面。横波和面波的速度相差不多, 有同时到达的可能, 面波与横波比较, 具有更不易阻尼的性质, 它们衰减得慢传播远, 对震中以外地区影响大。在震中以外一般横波和纵波不会同时出现, 在工程设计时一般不会对同时考虑竖向和横向地震力存在。因为竖向地震力本身不大, 而且对结构物的破坏作用较小, 所以设计时一般不考虑竖向地震力, 但对于震中及附近地区即在高烈度地区, 纵向及横向地震力应同时考虑。

## (二) 地震震级和烈度

震级是衡量一次地震“大小”的等级, 它是用每次地震释放的能量多少而定出的。常用符号  $M$  表示。一次地震的震级由地震学家用专门的地震仪测定。震级原始定义是在离震中 100km 处用伍德-安德生式标准地震仪(摆的自振周期为 0.8 s, 阻尼系数为 0.8, 放大倍数为 2 800 倍) 所记录到的最大水平位移(即振幅  $A$ , 以微米  $\mu\text{m}$  计) 的常用对数值

$$M = \lg A \quad (1-3)$$

例如, 在距震中 100 km 处标准地震仪记录到的最大振幅  $A = 100 \text{ mm} = 100\,000 \mu\text{m}$ , 则  $M = \lg A = \lg 10^5 = 5$ , 即这次地震为 5 级。这个震级的定义是 1935 年里克特所给出的, 故称为里氏震级。

由于地震发生时不可能正好在 100 km 处记录, 以及所用的仪器不尽相同, 所以需要对其所在震中距和适用的仪器对实测的震级进行适当的修正。古登堡和里希提出震级  $M$  与地震

释放能量  $E$  之间的经验关系式

$$\lg E = 11.8 + 1.5M \quad (1-4)$$

其中能量  $E$  的单位为焦耳。由此可知震级每差一级,地震释放的能量相差 32 倍之多。一个 7 级地震释放相当于近 30 个 20 000 t TNT 原子弹所具有的能量。震级是根据地震记录—地震波图由国家地震部门确定的。一般小于 2 级地震人们感觉不到,称微震;2 ~ 5 级地震人可以感觉到叫有感地震;大于等于 5 级可引起不同程度的破坏称破坏性地震;大于等于 7 级地震破坏性很大称强烈地震。

地震烈度是用来衡量地震后果的一种度量,它表示受影响的地区遭受某一次地震影响的强弱程度。对一次地震而言,只有一个震级,但随着距震中距离的远近及当地地质构造的不同,震区各地的烈度是不同的。一般而言,距震中越远,地震影响越小,烈度越低;反之,距震中越近,地震影响越大,烈度越高。但在某一烈度区可能会因局部场地的地形、地质条件等因素的影响,会出现局部烈度较高或较低的“烈度异常区”。

一百多年来世界各国曾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 度划分法外,全世界普遍使用的是 1 至 12 度的划分法。我国采用现行的“1980 年中国地震烈度表”将地震烈度分 12 等级。下面列出关于烈度为 VI ~ IX 的定量描述。

VI: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。

VII: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: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。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,塌方常见,砖烟囱出现倒塌。

IX:人坐立不稳,行动的人可以摔跤。

以宏观现象作为评定烈度的依据其特点是简单方便,因此过去人们一直用结构物的宏观破坏现象来划分。但现在随着科学技术日新月异的发展,人们意识到这些标准的判断和量度还不够准确,我们可以用更为准确的实际的物理量来划分烈度。中国科学院工程力学研究所根据对大量资料的综合分析,提出地震烈度为 7° ~ 9° 时可用地面加速度当量来衡量地震烈度值。地面加速度当量见表 1-1。

表 1-1

| 地震烈度 | 7°  | 8°  | 9°  |
|------|-----|-----|-----|
| K    | 0.1 | 0.2 | 0.4 |

注:加速度当量是地震时地面最大加速度的统计平均值与重力加速度的比值,或称为以重力加速度为单位的地面最大加速度。

### (三) 基本烈度、设计烈度

我们在设计结构物时应考虑抗震设防要求,需确定所在地区今后一定期限内可能遭受的最大地震烈度,此烈度称为该地区的基本烈度。规定基本烈度的地区是一个范围较大的地

区,可以是一个城市,一个县,几个县或一个地区,不是指某具体工程地点。全国各地区的基本烈度由国家地震局根据各地区的构造和地震的历史资料规定。例如,天津地区的基本烈度为 8 度,其含义是在今后 100 年内天津地区所能遇到的最大地震烈度为 8 度。如果某工程场地的地质地貌比较特殊,此地的烈度可以不同于该地区的基本烈度,称它为场地烈度或小区烈度,它需要由有关部门分析商定。

在工程抗震设计中采用的地震烈度称为设计烈度。抗震规范中一般采用基本烈度为设计烈度,在特殊情况下,设计烈度可比基本烈度高一度或低一度。

#### (四) 烈度分布图及烈度区划

地震烈度评定是进行地震区划分的基础资料工作。地震工作者在一次强震后会立即赶往现场了解震害和评定烈度,然后绘制烈度分布图。对应一次地震,将各地点的烈度标在一张地图上,再用曲线将所有不同烈度区分隔开,使相邻两曲线间区域内的烈度相同,见图 1-3。

图 1-3 为唐山地震等震线图(烈度分布),在烈度分布图上我们可以看出在一个烈度区内有局部的小区域其烈度会高于或低于周围的大部分区域,这个小区域就是前面所说的“烈度异常区”,对于这种区域其烈度单独标出。

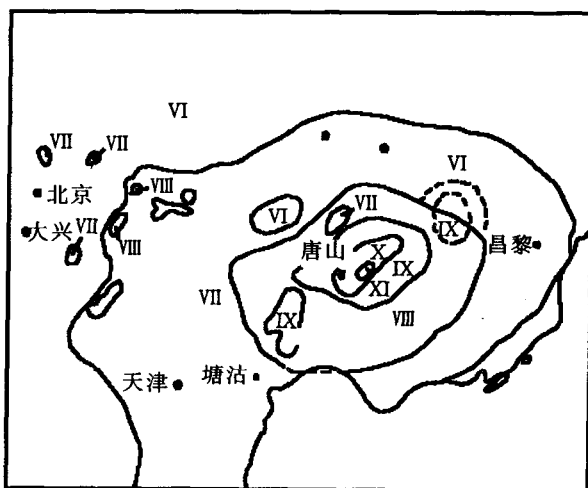


图 1-3 唐山地震等震线图

我国的地震区划经历了两个阶段,50 年代我国编制过地震基本烈度区划图。该图首次反映了我国地震烈度分布的基本面貌,但未有明确的时间概念。70 年代国家地震局编制了第二代地震烈度区划图,该图对未来百年内遭遇的最大烈度分布进行预测。近 10 年来通过对地震预测及研究表明地震的发生具有一定的随机性,对地震的预测的较合理的方法应基于概率分析的方法。所以 1990 年我国编制了第三代地震区划图——《中国地震烈度区划图》。图上所示的地震烈度值指在 50 年内,一般场地条件下,可能遭遇超越概率为 10% 的烈度值。该烈度值称为地震基本烈度。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结构物抗震设防标准。但在使用中须注意两点:在图上标示的地震基本烈度已经考虑了地震动衰减关系,给出的是场地地震动的超越概率预测;地震设防要求高于本区划设防标准的工程、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差的边远地区或占地范围较大,跨着不同工程地质条件的区域应在本区划图的基础就进行专门地震安全评价工作。

## 第二节 地震灾害和地震预测

### 一、地震灾害

地震灾害是我国最大的自然灾害之一。从我国现行的烈度区划图上可知,地震基本烈度为6度及其以上的地震区面积占全国面积的60%,7度以上地震区面积占全国面积的 $\frac{1}{3}$ 。据统计较强烈度的地震(5级以上)会给人类带来不同程度的灾害性破坏。从实际上看地震造成的破坏主要来自三个方面:地表破坏、工程结构的破坏和次生灾害。

(一) 地表破坏中包括地裂缝、喷砂冒水、滑坡和地面下沉等。

#### 1. 地裂缝

地震时地裂缝是较普遍的现象。地裂缝有构造地裂缝和重力地裂缝。构造地裂缝是因地震引起岩层断层错移形成地面断裂,它与地下断裂带的走向一致,切割较深、规模较大时呈带状出现,断续可延伸几公里甚至几十公里。重力地裂缝是因河道、河堤岸边、陡坡等土质松软地方产生交错裂缝,大小形状不一,其规模与构造地裂缝相比较小。当地裂缝穿过公路、房屋时,常使它们遭到破坏。

#### 2. 喷砂冒水

在地下水位较高的地区,当地震波产生强烈振动时,含水层受到挤压,地下水常常从地裂缝或土质松软的地方冒出地面,若地层内含有砂层,砂子会被夹带喷出,形成喷砂冒水现象。

#### 3. 滑坡

在陡峻的山区或丘陵地区因强震的摇动常引起山坡、岸坡滑移,大规模的滑坡有时会导致山路阻塞,甚至阻塞河流积水成湖的情形。

### (二) 工程结构的破坏

#### 1. 地基失效而引起的破坏

当发生强烈地震时,虽然结构物本身无损坏,但会因地基失效而倾倒。地裂缝、滑坡、喷砂冒水等可使地基产生开裂、滑动、不均匀沉降等,从而丧失承载力,最终使其上的结构物遭到破坏。对于这种破坏应当采取必要的地基抗震措施来解决。

#### 2. 结构强度不足而造成的破坏

强烈地震时,地裂缝、滑坡、砂土液化等可使地基开裂滑动、不均匀沉降等,从而丧失稳定性,丧失承载力,使建造在地基上的结构物受到破坏。它主要表现为结构物呈整体性倾斜、拉裂以至倒塌。另一方面地面运动引起房屋的振动,从而产生地震惯性力,使结构物的内力迅速增加,这类破坏主要是结构构件强度不足、各构件之间连接不牢或结构不合理所致。

### (三) 次生灾害

地震时,水坝、给排水管网、煤气管道、供电线路以及易爆、有毒物质容器的破坏,可造成水灾、火灾、空气污染等灾害,这种灾害称为次生灾害。

### 二、地震预报

地震预报是预报“什么时候,在什么地方,将有多大的地震发生”,如果不能较准确地指

出地震发生的时间和地点,那是没有实际意义的。地震预报主要有地形变的观测、地震活动的调查、地震波传播速度的调查测量等方法。地震预报的目地是为了减轻地震灾害而及时采取的一些临时性的紧急措施。按地震预报的有效时间及作用可分为长期预报、中短期预报及临时预报。目前世界上许多国家正在探索地震预报的新途径和新方法,努力用高新技术提高预报精度。

### 第三节 工程结构抗震

#### 一、工程结构抗震设计原则

抗震设计是对地震区的工程结构物所进行的一种专项设计。它一般包括抗震计算和抗震措施两个方面。

工程抗震设防首先要进行地震危险性分析,合理估计不同地区可能遭受的地震破坏作用,也就是说首先确定地区的地震基本烈度或地震动参数,以此作为抗震设防的依据。设防标准一般应该是,结构物经设防后,在遇到地震烈度相当于设计烈度时,允许受到一定的损坏,但不危害人的生命和主要生产设备,结构物基本上不需要修理或经一般性修理仍可能继续使用。也就是说对不同强度、频率的地震,所要求结构物具有不同的抵抗能力,概括地说为“小震不坏,中震可修,大震不倒”,这是近年来世界各国广泛采用的抗震设防标准。因为强烈的地震不是经常发生的,虽然地震时可能受到一些损失,但与把设计烈度提高而增加的造价相比较在经济上可能还是合适的。

抗震设计中的抗震设防烈度,系指国家批准权限审定作为一个地区抗震设防依据的地震烈度,一般情况下可采用地震基本烈度。经震害调查表明烈度6°地区的港口中小型水工结构物损坏轻微,到7°则比较显著,因此把抗震设防的起点定为7°,即小于7°的地区的水工结构物设计时一般不需要抗震设防。高于9°的地区,地震影响非常大,对结构物的抗震应进行专门研究。

#### 二、工程抗震设计的基本要求

(一) 工程设计要求工程结构物的场地选择应根据需要进行工程地质、水文地质地震活动的调查研究和勘测工作,按照场地土、地质构造和地形地貌条件作综合评价。适宜选择对结构物抗震相对有利的地段,尽量避开不利的地段,未经过充分论证,不得在危险地段进行建设。

1. 对抗震相对有利地段一般是指:建设地区及其邻近无晚近期活动性断裂、地质构造相对稳定,同时地基为比较完整的岩体和密实土层,岸坡稳定条件较好。

对抗震相对不利地段一般是指:建设地区地质构造复杂,有晚近期活动性断裂,有可能伴随强震产生地震断裂,地震时可能产生大滑坡、崩塌及地陷等,威胁结构物安全而又难以进行有效处理地区。

2. 若地基主要持力层范围有可液化土层、软土层或严重不均匀土层时应该考虑其对结构的不利影响,并采取必要的措施。

3. 结构的平面和立面布置宜规则和对称,质量和刚度分布宜均匀,应尽量降低结构物重

心位置。

(二) 抗震结构体系应符合下列要求:

1. 应具有明确的计算简图和简捷、合理的地震作用传递路线。
2. 钢筋砼构件应合理选择尺寸,配置钢筋,增加延性,避免剪切先于弯曲破坏和钢筋牢固粘结先于构件破坏。
3. 结构各构件之间的连接节点,其承载力不应低于连接构件的承载力。
4. 在结构物的端部、转角及其薄弱部位应采取措施提高其抗震能力。
5. 装配式结构应采取加强筋整体连接的措施。

### 三、工程抗震设计的计算原则

水运工程结构物抗震设计属偶然状况,因此对设防的港口水工结构物都应进行抗震强度和抗震稳定性的验算,不应进行正常使用极限状态验算。作用在码头结构物上的地震荷载包括地震惯性力、动土压力和动水压力。地震荷载属于特殊荷载,与它组合而成的荷载组合为特殊荷载组合,在进行荷载组合时应遵守交通部《水运工程水工结构物抗震设计规范》(简称《抗震规范》)。

在抗震设计中进行作用组合时各种作用的标准值为静力计算时的数量,即现行行业标准《港口工程荷载规范》(JTJ215)有关规定值乘以地震时各作用组合数 $\psi$ , $\psi$ 可按如下规定采用:

- (1) 结构物自重和固定设备的重量按 1.0 考虑。
- (2) 起重机械荷载只考虑机械自重,计算引桥和斜坡上栈桥时其上的流动机械荷载取设计荷载的 0.5 倍。
- (3) 码头上的堆货荷载按《荷载规范》中整体计算荷载值考虑,然后乘折减系数 $\xi$ 。计算高桩码头时,件杂货取 $\psi = 1/3$ ;散货取 $\psi = 2/3$ ;计算重力式和板桩码头时,件杂货取 $\psi = 1/2$ ,散货取 $\psi = 1$ 。
- (4) 只考虑船舶系缆力或挤靠力,取设计荷载的 0.5 倍,不考虑船舶撞击力。
- (5) 只考虑设计高水位和设计低水位的计算情况,不考虑校核高水位和校核低水位。河港地震时的设计高水位采用多年历时保证率 10% 的水位。
- (6) 其它规定见《抗震规范》。

抗震稳定的安全系数按相关规范中特殊荷载组合情况采用。在进行抗震强度计算时,对于钢结构,其允许应力可提高 50%,对于钢筋混凝土结构,其安全系数取 0.8 倍设计荷载组合安全系数。对于抗水平地震力的验算,根据结构物的结构型式,需分别对横向和纵向或仅对其中一个方向进行验算。

对于设有前后方桩台的高桩码头,当宽度小于 50 m 时,可把前后方桩台作为一个整体结构进行横向地震惯性力验算。

## 思 考 题

1. 什么是地震震级与地震烈度?
2. 基本烈度与设计烈度的区别是什么?

3. 结构物的地震破坏分几类?具体有哪些破坏现象?
4. 什么是抗震设计?抗震设计的基本要求是什么?
5. 抗震设防的标准是什么?
6. 地震荷载包括哪些?

## 第二章 场地与地基

近年来国内外发生的许多强烈地震给一些水运工程结构物造成了不同程度的破坏。其破坏程度与所在地区的地质构造活动性、场地及地形地貌密切相关,经震害的宏观考察发现场地的选择是十分重要的,它直接影响地震动的主要参数,地基和地形对结构物震害也有直接影响,因此本章将学习场地和地基与抗震设计关系的知识。

### 第一节 场 地

场地是指结构物的所在地,地基是指结构物范围内的那部分场地。场地的类别是场地条件的表征,也是反应谱曲线的主要参数。地基和上部结构是上下连接的,地震时地面运动通过地基影响结构,如果在结构上安装传感器把地震时的信息(加速度、速度及位移等)记录下来,就是结构的地震反应。

在岩层中传播的地震波具有多种频率成分,地震波通过覆盖层传向地表的过程中,若传来的谐波中某一频率分量的周期与覆盖层的固有周期相近,由于共振作用,该分量的幅值将得到明显放大,这一周期被称为地面的“卓越周期”。若结构物的固有周期与地面运动的卓越周期相近,则由于共振作用而大大增强其地震反应。宏观震害经验得到的一般结论是在卓越周期较短的浅薄坚硬地层上,刚性结构物的震害有所加重,而在卓越周期较长的深厚软弱土层上,柔性结构物的地震反应特别强烈,往往导致严重的破坏。因此建在软弱深厚的覆盖土层上的结构物震害往往较重。其原因是:地震波的幅值被放大了,自振周期较长的高层结构与地面运动的卓越周期产生共振现象,经常出现砂土液化、软地震陷、地基不均匀沉降等地基失效现象。某特定土层的周期  $T$  可用下列公式计算:

$$T = \frac{4dov}{v_s} \quad (2-1)$$

式中  $dov$ ——土的覆盖层厚度(m);  
 $v_s$ ——土层的剪切波速(m/s)。

在地基不失效的条件下如何反映场地的地震效应,《抗震规范》采用将场地分成若干类,按场地类别确定反应谱有关参数的方法。《水运工程结构物抗震设计规范 JTJ - 87》将场地土分为三类:Ⅰ类为未经风化,微化和中等风化的基岩,Ⅱ类为除Ⅰ,Ⅲ类场地土外的一般稳定土,Ⅲ类为饱和松砂,软土(包括淤泥,淤泥质土以及天然强度低,压缩性高的一般粘性土),吹填土,杂填土等。近些年根据国内外震害资料和层状土理论分析结果,并参照了国家标准《建筑抗震设计规范》(GBJ11 - 89),修改了原规范仅考虑表层土软硬的单因素划分法,规定结构场地类别的划分,主要由覆盖层厚度和土质岩性两个主要因素来确定。

#### 一、场地土类型

场地土的类型是表层土软硬程度的表征,即反映土的刚度特征。一般说来与坚硬地基相

比,软弱地基的地面运动振幅大,周期长,持续时间长,震害严重。

场地土类型可根据工程地质的勘察资料按剪切波速划分。地表土层的组成通常较为复杂。只有单一性质场地土的情况是很少见的,所以一般取表层土(地面以下 15 m,且小于 15 m 场地覆盖层厚度)范围内各土层的剪切波速,按土层厚度加权的平均值  $V_m$  来划分。

表 2-1 场地土的类型划分

| 场地土类型 | 土层的剪切波速(m/s)         | 场地土类型 | 土层的剪切波速(m/s)         |
|-------|----------------------|-------|----------------------|
| 坚硬场地土 | $V_i > 500$          | 中软场地土 | $140 < V_m \leq 250$ |
| 中硬场地土 | $250 < V_m \leq 500$ | 软弱场地土 | $V_m \leq 140$       |

注:场地覆盖层厚度应按地面至剪切波速大于 500 m/s 的土层或坚硬土顶面的距离确定。 $V_i$  为土层的剪切波速; $V_m$  为土层厚度加权的平均剪切波速。

$$V_m = \sum \frac{v_i d_i}{d} \quad (2-2)$$

式中  $V_i$ ——土层的剪切波速(m/s);

$d_i$ ——该土层的厚度(m);

$d$ ——土层计算厚度(m)。

## 二、场地土覆盖层厚度

国内外地震震害资料表明,房屋的破坏率大致随覆盖层厚度的增加而加重。一般场地覆盖层厚度是指从地面到坚硬土顶面的距离。其中坚硬土包括岩石和剪切波速大于 500 m/s 的其它坚硬土。当无实测剪切波速资料时,可按表 2-2 划分土的类型。当场地土为单一土层时,土的类型即为场地土类型;当为多层土时,场地土的类型可根据地面下 15 m 且不深于场地覆盖层厚度范围内各土层类型和厚度综合评定。

表 2-2 土的类型划分

| 土的类型 | 岩土名称和性状                                                         |
|------|-----------------------------------------------------------------|
| 坚硬土  | 岩石、密实的碎石土                                                       |
| 中硬土  | 中密、稍密的碎石土,密实、中密的砾、粗、中砂, $f_k > 200$ 的粘性土和粉土                     |
| 中软土  | 稍密的砾、粗、中砂,除松散外的细、粉砂, $f_k \leq 200$ 的粘性土和粉土, $f_k \geq 130$ 的填土 |
| 软弱土  | 淤泥和淤泥质土,松散的砂,新近沉积的粘性土和粉土, $f_k < 130$ 的填土                       |

注: $f_k$  为地基土静承载力标准值(kPa)

### 三、场地类别的划分

场地条件如何直接影响着结构的地震反应,目前世界各国对场地类别的划分并不一致。我国《抗震规范》在总结国内外经验的基础上根据场地土类型和场地覆盖层厚度将场地分为 I ~ IV。当有充分依据时可适当调整。

表 2-3 场地类别划分

| 场地土类型 | 场地覆盖层厚度(m)   |                     |                     |                      |               |
|-------|--------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------|
|       | $d_{ov} = 0$ | $0 < d_{ov} \leq 3$ | $3 < d_{ov} \leq 9$ | $9 < d_{ov} \leq 80$ | $d_{ov} > 80$ |
| 坚硬场地土 | I            | -                   |                     |                      |               |
| 中硬场地土 | -            | I                   |                     | II                   |               |
| 中软场地土 |              | I                   | II                  |                      | III           |
| 软弱场地土 |              | I                   | II                  | III                  | IV            |

## 第二节 地基基础抗震验算

### 一、土体动力性质

任何工程结构都是建造在地基上的,在地震中地基一方面将地震波传给工程结构,影响工程结构的地震反应,另一方面地基本身的强度和稳定性可能遭到破坏,造成地基失效,从而引起上部结构的破坏。

土体在循环荷载作用下的性状与土体当时所受的应变大小有关。经几十年的研究表明:小应变时( $10^{-6} \sim 10^{-5}$ )土体呈弹性;中应变时( $10^{-5} \sim 10^{-3}$ )土体呈弹塑性;大应变时( $10^{-3} \sim 10^{-2}$ )土体呈塑性。因地震荷载是一个复杂的循环荷载,所以土体经强震后其应变也不断发生变化,土体性质也不断变化。如何正确反映不断变化的土体的性质是我们解决问题的关键。我们常用动剪切模量和阻尼比两个参数来描述土体的动力变形特性。

哈丁(Hardin)用扭转仪和共柱法对砂土、夯实土和原状土做出了大量实验,对影响土动剪切模量和阻尼比的各个因素进行研究,建议采用方程和图表来确定土的动力参数。他应用应力、应变的关系曲线来确定土体的动力剪切模量和阻尼比。

此图中  $abcdef$  曲线是描绘循环加载过程的闭合曲线,此闭合曲线称滞回圈。滞回曲线端点直线斜率即直线  $oa$  的斜率  $G$  作为动剪切模量,  $G = \frac{\tau_a}{\gamma_a}$ ,但它只用于小应变时。由粘弹性理论可知,滞回曲线所包围的面积表示能量耗散,近似的阻尼比  $\xi = \frac{A_L}{4\pi A_T}$ 。

论可知,滞回曲线所包围的面积表示能量耗散,近似的阻尼比  $\xi = \frac{A_L}{4\pi A_T}$ 。

式中  $A_L$ ——曲线所包围的面积;

$A_T$ ——图中阴影所示的面积。

哈丁通过实验研究表明: