

# 海港工程 设计和施工

人民交通出版社

# 海港工程 设计和施工

[美]·奎因 著 刘宅仁 译  
范加仑

人 民 交 通 出 版 社

1980年·北京

## 内 容 提 要

本书译自美国 Quinn 所著 Design and Construction of Ports and Marine Structures 一书1972年第二次增订版。

全书较全面地论述了海港及其建筑物的设计和施工方法。内容共分十一章，主要有港口的发展和管理，风、潮汐和波浪的形成，港口规划，各种水工建筑物（防波堤、码头、驳岸、系靠船设备、灯标、灯塔和导航装置）及件货、散货和集装箱的装卸站、仓库房屋等。本书译文除第一章港口的发展和管理及第十一章小艇港口两章予以删略外，其余都已译出。全部译稿曾由钱伯幸同志加以校核。

可供港工设计施工人员及大专院校师生参考。

海港工程设计和施工

[美]·奎因 著

刘宝仁 译

范加仑

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 006 号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/32 印张：24.75 字数：542千

1980年9月第1版

1980年9月第1版第1次印刷

印数：0001—3,000册 定价：3.10元

## 再版序言

海港及其建筑物一书是在十年前出版的。十年以来，港工方面有了很多的重要发展，影响到本书的主要内容。因此，有必要进行再版。

在编著原书时，集装箱运输尚在萌芽时期，而现在已发展到有150余家航运公司从事于集装箱货运，专业化港口也已遍及全世界。显然，本书增加“集装箱装卸站”一章是必要的。本书在初稿时，橡胶防冲设备还限于少数几种，而现在已发展到很多型式，其中有些品种在性能上能量高、反作用低，可供巨型油轮靠泊。在此次修订版中，对于这方面内容提供了详尽的资料。同样，过去十年间，用于防波堤的新型混凝土护面块体也有了很大的发展。当前在许多国家中，通过水工实验研究，已经发明、试验和应用了许多新型块体，用于修复为风暴所破坏的防波堤或新建的防波堤。为此，在防波堤一章中增加了有关异形块体的设计资料和物理性能方面的内容。至于全书的其他部分，也都力求包含最新的资料。由于全书已在世界各地获得读者的热情支持，著者在再版中还是保留了初版原文的大部分。

查因

# 目 录

|      |                         |     |
|------|-------------------------|-----|
| 第一章  | 港口的发展和管理 (删略)           | 1   |
| 第二章  | 风、潮汐和波浪                 | 1   |
| 2-1  | 风                       | 1   |
| 2-2  | 潮汐                      | 2   |
| 2-3  | 波浪                      | 4   |
| 第三章  | 港口的布置和建造                | 33  |
| 3-1  | 概述                      | 33  |
| 3-2  | 与港口布置有关的船舶特性            | 40  |
| 3-3  | 港口及航道边界线                | 41  |
| 3-4  | 港口规划                    | 41  |
| 3-5  | 港址查勘                    | 56  |
| 3-6  | 水工模型试验研究                | 67  |
| 3-7  | 几个港口的简介                 | 74  |
| 第四章  | 防波堤                     | 97  |
| 4-1  | 防波堤的类型及其选用              | 97  |
| 4-2  | 堆石防波堤                   | 98  |
| 4-3  | 堆石防波堤的实例                | 109 |
| 4-4  | 混凝土方块和块石堆筑防波堤           | 115 |
| 4-5  | 混凝土方块和块石堆筑防波堤的实例        | 116 |
| 4-6  | 混凝土异形块体护面层的防波堤          | 123 |
| 4-7  | 四脚锥体和三柱体的工程实例           | 133 |
| 4-8  | 堆石防波堤的试验设计研究            | 135 |
| 4-9  | 防波堤模型试验述例               | 135 |
| 4-10 | 直墙式防波堤                  | 141 |
| 4-11 | 直墙式防波堤的实例               | 143 |
| 4-12 | 气力式和水力式防波堤              | 152 |
| 4-13 | 浮式防波堤                   | 155 |
| 第五章  | 顺岸码头、突岸码头、驳岸、系靠船桩墩和系船浮筒 | 157 |
| 5-1  | 概述                      | 157 |
| 5-2  | 码头选型的控制因素               | 158 |
| 5-3  | 结构型式和建筑材料               | 159 |
| 5-4  | 设计问题                    | 167 |
| 5-5  | 码头桩基和管柱基础的设计            | 171 |
| 5-6  | 码头防冲设备                  | 206 |

|            |               |            |
|------------|---------------|------------|
| 5-7        | 码头设计的典型算例     | 256        |
| 5-8        | 特殊码头结构        | 275        |
| 5-9        | 系靠船桩墩         | 283        |
| 5-10       | 突堤、栈桥和联桥      | 289        |
| 5-11       | 外海系泊          | 293        |
| 5-12       | 系泊附属设备        | 300        |
| 5-13       | 航运站公用设施       | 301        |
| 5-14       | 阴极保护          | 308        |
| <b>第六章</b> | <b>港口房屋建筑</b> | <b>312</b> |
| 6-1        | 概述            | 312        |
| 6-2        | 前方仓库和后方仓库     | 312        |
| 6-3        | 现代化前方仓库建筑实例   | 318        |
| 6-4        | 冷藏库           | 332        |
| 6-5        | 港口管理用房        | 334        |
| <b>第七章</b> | <b>件货装卸设备</b> | <b>336</b> |
| 7-1        | 概述            | 336        |
| 7-2        | 装船和卸船         | 336        |
| 7-3        | 岸上作业          | 338        |
| 7-4        | 船舱作业          | 341        |
| 7-5        | 货板            | 341        |
| <b>第八章</b> | <b>散货装卸站</b>  | <b>343</b> |
| 8-1        | 概述            | 343        |
| 8-2        | 储货设施          | 343        |
| 8-3        | 装卸设备          | 343        |
| 8-4        | 自卸船           | 347        |
| 8-5        | 装卸站设施         | 348        |
| 8-6        | 石油装卸站         | 348        |
| 8-7        | 几个现代化散货装卸站    | 352        |
| <b>第九章</b> | <b>集装箱装卸站</b> | <b>362</b> |
| 9-1        | 概述            | 362        |
| 9-2        | 集装箱装卸站规划      | 362        |
| 9-3        | 集装箱装卸作业方式     | 366        |
| 9-4        | 集装箱装卸站吊装作业系统  | 367        |
| 9-5        | 集装箱           | 369        |
| 9-6        | 集装箱装卸设备       | 369        |
| 9-7        | 典型的集装箱装卸站     | 374        |
| 9-8        | 载驳货船          | 377        |
| <b>第十章</b> | <b>航标</b>     | <b>378</b> |
| 10-1       | 概述            | 378        |
| 10-2       | 航标的作用         | 378        |

|                       |              |            |
|-----------------------|--------------|------------|
| 10-3                  | 浮标           | 378        |
| 10-4                  | 航道上的固定标      | 381        |
| 10-5                  | 码头和系船桩墩上的灯标  | 381        |
| 10-6                  | 防波堤和海岸上的固定灯标 | 382        |
| 10-7                  | 灯塔           | 382        |
| 10-8                  | 灯船           | 383        |
| 10-9                  | 导向灯标装置       | 383        |
| 10-10                 | 雷达反射器        | 385        |
| 10-11                 | 灯标上的灯        | 385        |
| 10-12                 | 锚系设备         | 387        |
| <b>第十一章 小艇港口 (删略)</b> |              | <b>388</b> |

# 第一章 港口的发展和管理

(删 略)

## 第二章 风、潮汐和波浪

### 2-1 风

大量空气近似地平行流动于地表，习称之为风。空气运动是由于大气温度变化所致。当空气变暖时，密度减小，因而上升，由较冷的空气流入其下以代替之。大气温度的变化是由于陆地与水面相比、高山与谷地相比，其表面的吸热不同，以及由于昼夜的变化，结果就产生了地区性的风。白天在海滨的凉风，和夜间从山上吹来的凉风取代山谷内的暖风，就是这种现象的例证。除此类地区性的风以外，还有普遍性的空气流动，其发生是由于赤道上的较暖空气被北方和南方流入的较冷空气所代替，它还由于地球的自转而产生偏斜所致。

几乎任何地点都有盛行风，这种风在一年的大部分时间里大致都从某一定的方向吹来。季节风是季节性的盛行风，它在一年之中的部分时间里从某一个方向吹来，而在其余的时间里则来自相反的方向。季节风在西部太平洋上甚为普遍。盛行风不一定是最强的风。强度较大而发生的频率较小的风常是来自另外的方向。风向是按罗盘方位、指吹向观察者的方向而言。建筑物面向风所自来的方向的一面称为向风面，其相反的一面称为背风面。

在一定地点一定时期中的风向、频率和风的强度，可用风玫瑰图来表示，见图2-1。

风力按照蒲福所提出的尺度分级，称为蒲福风级 (Beaufort wind scale)，风的强度共分13级，即0级至12级，每一风级各代表一个近似的风速和一个对风的强度描述性的名称。表2-1为蒲福风级表。

风的压力随风速的平方而变化，可用公式  $p = cv^2$  表示，式中  $c$  为一常数，当  $v$  以英里/小时计和  $p$  以磅/平方英尺计时， $c$  值通常取 0.00256。作用于建筑物上的总风力与建筑物的形状有关，所以，压力  $p$  应乘以1.3至1.6的系数，对于高度较低和表面平整的船舶和码头，可采用较小的系数值。在码头设计工作中，对于作用于船舶的风力和码头上的工作机具（如移动式装卸塔和起重机等）的风荷载，必须慎重选用设计风速。通常认为，当风速大于每小时15英里时，工作机具如装卸塔之类停止操作，所以，在正常操作情况下，采用风压等于5磅/平方英尺应是足够的。同样，在暴风和飓风的严重情况下，船舶不会仍然停靠于码头，因此设计风压的采用值一般不大于20磅/平方英尺。



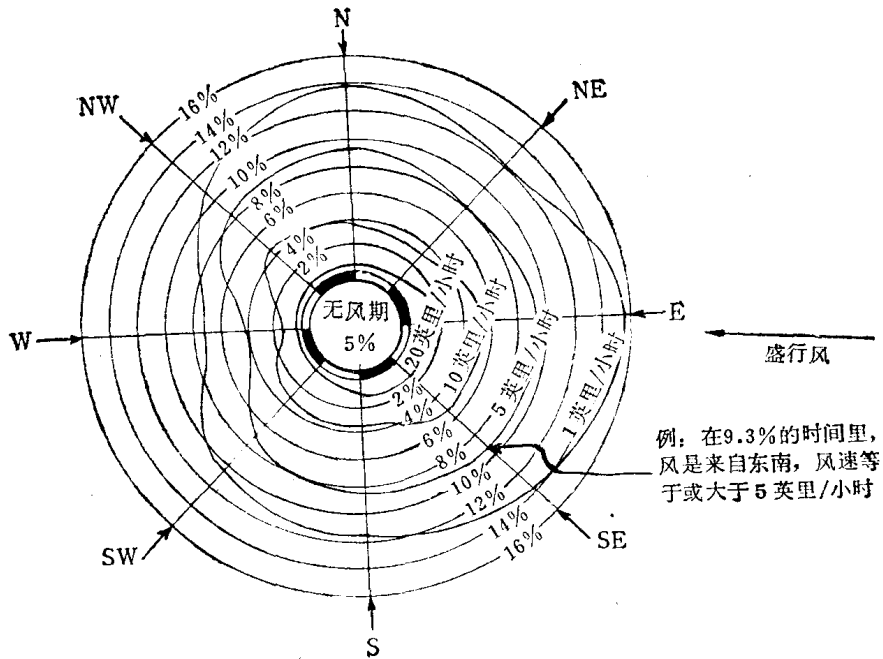


图2-1 风玫瑰图

蒲福风级表

表2-1

| 蒲福风级 | 名称 | 风速,英里/小时 | 蒲福风级 | 名称 | 风速,英里/小时 |
|------|----|----------|------|----|----------|
| 0    | 无风 | 0—1      | 7    | 疾风 | 32—38    |
| 1    | 软风 | 1—3      | 8    | 大风 | 39—46    |
| 2    | 轻风 | 4—7      | 9    | 烈风 | 47—54    |
| 3    | 微风 | 8—12     | 10   | 狂风 | 55—63    |
| 4    | 和风 | 13—18    | 11   | 暴风 | 64—75    |
| 5    | 清风 | 19—24    | 12   | 飓风 | 75以上     |
| 6    | 强风 | 25—31    |      |    |          |

## 2-2 潮 汐

潮汐是由于月球和太阳的引力而使海洋水面产生的周期性升降。如高低潮水位之间的海边滩地开敞广阔而又坡度平缓，这一水面升降运动则十分显著。一般说来，前后相继的两次涨潮之间的时间间隔是12小时25分，它等于月球前后两次经过当地子午线的时间之半。月球对于潮汐的影响比太阳大。这种引力影响是与质量成正比而与距离之三次方成反比的，因此月球与太阳引力影响之比约为7：3。

每隔半个太阴月发生的一次最高潮称为大潮。大潮发生在朔、望日或在与之相近的时期，这时太阳、月球和地球位在一直线上，因而其引潮力为太阳和月球二者之和。当地球与太阳和月球的连线成直角时，即当月球的上、下弦日，月球与太阳作用于地球的力相减，其所发生的这个月的最低潮，称为小潮。

由于海洋潮波受到摩擦力的阻滞作用，由于地球的自转和潮水的涨落是随着月球的方向而转移的，每一地区的最高潮位的发生时间不是与月球在朔、望日经过上中天的时间相合，

而是比朔、望时间要迟到一定时间之后。这一时间间隙称为潮候或月潮间隙，潮候的时间可能长达两天半。

沿海岸各地发生的潮差有很大差异，这是由于主潮波（即环绕地球的巨大水体的运动）产生着若干副潮波；而且它们还受到浅滩海水深度和海岸地形的影响。世界上最高潮发生在芬地湾（Bay of Fundy），在那里曾有水面升高达100英尺的记录。内海或陆地所环绕的海面，如地中海和波罗的海潮高小于1英尺，在北美大湖区几乎觉察不到潮汐的影响。

每一个太阴日发生两次涨潮的潮型称为半日潮，因为一太阴日比一太阳日约长50分钟，即月球环绕地球运行一周的时间约为24小时50分钟，故在后一天的相应高潮时间要比前一天

若干重要港口的平均潮差和大潮潮差

表2-2

|                    | 平均潮差 | 大潮潮差  |
|--------------------|------|-------|
| 安科雷季，(美国)          | 26.7 | 29.6° |
| 安特卫普，(比利时)         | 15.7 | 17.8  |
| 毕尔巴鄂，(西班牙)         | 9.0  | 11.8  |
| 孟买，(印度)            | 8.7  | 11.8  |
| 波士顿，(美国)           | 9.5  | 11.0  |
| 布宜诺斯艾利斯，(阿根廷)      | 2.2  | 2.4   |
| 卡亚俄，(秘鲁)           | 1.8  | 2.4   |
| 巴拿马运河区，大西洋岸        | 0.7  | 1.1°  |
| 巴拿马运河区，太平洋岸        | 12.  | 16.4  |
| 开普敦，(南非)           | 3.8  | 5.2   |
| 瑟堡，(法国)            | 13.0 | 18.0  |
| 达喀尔，(塞内加尔)         | 3.3  | 4.4   |
| 加尔沃斯顿，(美国)         | 1.0  | 1.4°  |
| 热那亚，(意大利)          | 0.6  | 0.8   |
| 汉堡，(德国)            | 7.6  | 8.1   |
| 哈瓦那，(古巴)           | 1.0  | 1.2   |
| 香港，(中国)            | 3.1  | 5.3°  |
| 火奴鲁鲁又名檀香山 (美国)     | 1.2  | 1.9°  |
| 拉瓜伊拉(委内瑞拉)         | —    | 1.0°  |
| 里斯本，(葡萄牙)          | 8.1  | 10.8  |
| 利物浦，(英国)           | 21.2 | 27.1  |
| 马尼拉，(菲律宾)          | —    | 3.3°  |
| 摩尔曼斯克 (苏联)         | 7.9  | 9.9   |
| 纽约，(美国)            | 4.4  | 5.3   |
| 奥斯陆，(挪威)           | 1.0  | 1.1   |
| 魁北克，(加拿大)          | 13.7 | 15.5  |
| 里约热内卢，(巴西)         | 2.5  | 3.5   |
| 鹿特丹，(荷兰)           | 5.0  | 5.4   |
| 圣弗兰西斯科，又名旧金山，(美国)  | 4.0  | 5.7°  |
| 圣胡安，(波多黎各)         | 1.1  | 1.3   |
| 西雅图，(美国)           | 7.6  | 11.3° |
| 南安普敦，(英国)          | 10.0 | 13.6  |
| 悉尼，(澳大利亚)          | 3.6  | 4.5   |
| 瓦尔帕莱索，(智利)         | 3.0  | 3.9   |
| 符拉迪沃斯托克，(海参崴) (苏联) | 0.6  | 0.7   |
| 横滨，(日本)            | 3.5  | 4.7   |

注有°者为日周期的潮差。

迟50分钟。在有些地方，如美国佛罗里达州的彭萨科拉 (Pensacola)，一天只发生一次高潮，这一类型的潮汐称为**全日潮**。如果一天的两次潮汐中有一次是不完全的，即它所达到的高度不及前一次的高潮，例如在加利福尼亚州的旧金山，这一类型的潮汐称为**混合潮**。此外还有其他的特殊潮汐现象。例如在英国南安普敦一天有四次高潮位，成对发生，每一对之间只有极短暂的间隔时间。在朴次茅斯 (Portsmouth) 每天有两套各为三个的潮峰。

世界上大多数地区都有潮汐表公布发行。英国《海军部潮汐表》(Admiralty Tide Tables) 内容包括英属各主要港口以及一些其他地点。美国海岸及大地测量局 (U.S. Coast and Geodetic Survey) 把美国以及世界各地重要港口的潮汐状况汇列成表。表2-2所列为一一些重要港口的平均潮差和大潮潮差。

在使用美国海岸及大地测量局的潮汐表时应注意，表中所给出的高、低潮位的时间和高度不是涨潮或平潮的时间。对于海岸线上的测站来说，高、低水位的时间与落潮流和涨潮流的开始时间，两者之间通常没有什么差别；但是在狭窄的海峡、在为陆地所环围的港口、和在潮汐河口段中，平潮时间与高、低水位时间可能相差到几个小时。美国海岸和大地测量局所刊布的潮汐表中还列有平潮时间和潮流速度的预报，其一是关于北美大西洋海岸的，另一是北美及亚洲太平洋海岸的。

潮升是从海图基准面起算的，而世界各地的基准面不同。《英国海军部海图》(The British Admiralty charts) 用大潮平均低水位，美国用平均低水位，法国和西班牙用最低低水位作为基准面。**平均高水位** (mean high water) 是十九年以上周期中的高水位平均值，**平均低水位** (mean low water) 是十九年以上周期中的低水位平均值。**较高高水位** (higher high water) 是任何一日周期中两个高潮水位中的较高者，**较低低水位** (lower low water) 是任何一日周期中两个低潮水位中的较低者。**平均较高高水位** (mean higher high water) 是在十九年的周期中各较高高水位的平均值，**平均较低低水位** (mean lower low water) 是十九年的周期中较低低水位的平均值。**最高高水位** (highest high water) 和**最低低水位** (lowest low water) 分别是记录上的大潮最高水位和最低水位。**平均潮差** (mean range) 是平均高水位高于平均低水位的高度。这一高度的平均值一般即称之为**平均海平面** (mean sea level)。**日周期潮差** (diurnal range) 是平均较高高水位和平均较低低水位之间的高差。

## 2-3 波 浪

波浪的作用是最引人兴趣、同时又可能是为人们了解得最少的自然现象之一。波浪可能由于人为的扰动而发生，如船舶航行或爆破等；它也可以由地震、潮汐或风而生成。风所产生的波浪，最为工程人员所关注，它对于海上建筑物的影响最大。因为潮汐涨落缓慢，除涌潮波 (tidal bores) 外，一般说来，潮汐对于波浪的形成影响甚小。涌潮波通常是定期地发生在某些个别地点，它是由于涨潮流沿河涌进一个单独的波峰，或称为孤立型的波，例如在亚马孙河，或如在芬地湾潮流相遇的情况。

### 波浪的形状和生成

波浪恒表现为周期性的曲线状的水面起伏运动，但前移波和孤立波除外，在这两种波浪运动中，静水面以下不发生凹陷。

波浪向下运动要达到相当大的深度，因此，水深对于波浪的性质是有影响的。在水深大于半个波长 ( $d > L/2$ ) 的深水中所发生的波浪，称为深水波；在这样的深度，水底质点几乎

不受任何重大影响。如水深小于半个波长 ( $d < L/2$ )，则称为浅水波；由于水底的影响，水质点的轨道运动是从圆形变为椭圆形或近似于椭圆形。当波峰水质点的前进速度超过波浪本身的传播速度时，波浪于是破碎。在深水中，波浪破碎正常发生在波高超过  $1/7$  波长时，当波浪到达浅水时，波浪一般在水深约等于  $1.25$  倍波高处破碎，但也可能在较深之处业已破碎，这决定于风的强度和水底的情况。图 2-2 中的曲线表示以水深为函数的最大波高。

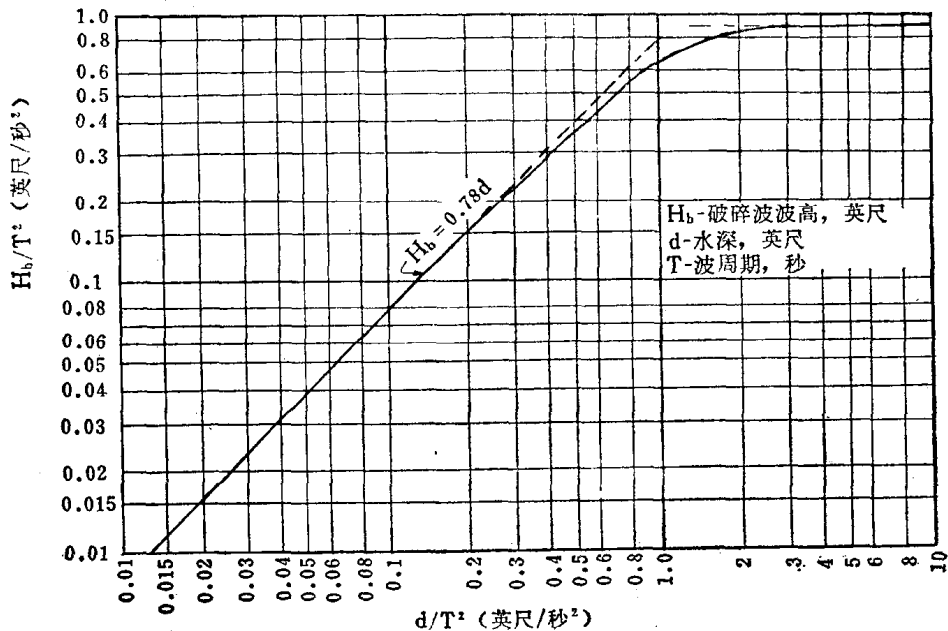


图2-2 波浪破碎指数曲线

不破碎波是一种振荡波，它甚至在深水中破碎后，仍将重新形成波高减少的振荡波。只有当波浪进入到浅水，破碎后不能再形成振荡波时，它才变为前移波，这是沿岸边破碎波的形成中所常见的现象。唯一的纯粹的前移波是孤立波，它是在静水面上上的一个单独的波峰，以常速向前行进，而形状不变，它是在波浪行进方向上的净位移。它的另一特征是与波长无关。

图 2-3 表示振荡波的形状及其特征。在深水，波浪表面的每一水质点的运动轨迹为圆，半径等于波高之半，圆心位在波峰顶和波谷底的中线上。圆心线在静水面以上的高度为  $h_0$ ，这是由于波峰顶到静水面的距离大于波谷底到静水面的距离。这一差别因波陡不同而异；如

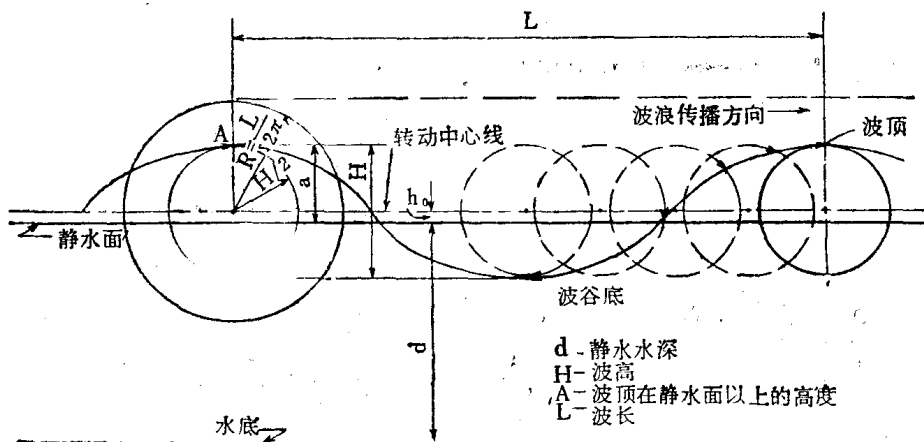


图2-3 深水波的特征值及波形

为很陡的波,其在静水面以上的部分约占 2/3, 在以下部分约占 1/3。在图2-3中,虚线圆形运动途径上的小箭头是用来表示某一瞬间水质点的相对位置及其在形成波浪中的运动方向。联接各小箭头的粗线即为此一特定瞬间在水面的波形, 相邻的两波峰之间的距离为波长  $L$ , 自波谷底至波峰顶的高度为波高  $H$ 。波形在水面上行进, 前后两波峰经过同一点的时间为波周期  $T$ 。波形的速度称为波速或波浪的传播速度。这些特征值之间的关系可用如下公式来表示:

$$v = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} = \frac{gT}{2\pi}$$

$$L = \frac{2\pi v^2}{g} = \frac{gT^2}{2\pi}$$

$$T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g}} = \frac{2\pi v}{g}$$

式中:  $v$ ——波浪的传播速度, 英尺/秒;

$L$ ——波长, 英尺;

$T$ ——波周期, 秒。

若其中有一特征值为已知, 则其他的值可以算出。现将常数  $\pi$  和  $g$  (重力加速度) 的数值代入上列各式, 则得

$$v = 2.26\sqrt{L} = 5.12 T$$

$$L = 0.195 v^2 = 5.12 T^2$$

$$T = 0.442\sqrt{L} = 0.195 v$$

对于以上关系式, 参阅图 2-3 将有利于理解。该图所示为一理想的深水振荡波, 其表面外形是余摆线, 是由水质点作圆形轨道运动而形成的。在直径等于波高的圆周上的一点  $A$ , 该圆与另一较大的而其圆周等于波长的滚动着的圆同心, 于是  $A$  点的运动轨迹即为余摆线。过去曾有人认为波形是一摆线 (或称旋轮线), 亦即水质点在其圆周轨道上的运动是直径等于波高的圆周上的点的轨迹。然而, 波长常变化在 12 至 40 倍波高之间或者更大一些, 所以很显然, 水面质点的轨道运动的圆周只能是波长的一部分, 而波形必须是在一个较大圆 (该圆的圆周等于波长) 内旋转着的圆形轨道运动所形成。这样, 在圆内一个定点所绘出的轨迹曲线称为余摆线。半径为  $R$  的滚动大圆的前进速度为  $v$ ,  $v = \sqrt{gR}$ , 以  $R = \frac{L}{2\pi}$  代入, 即得  $v =$

$$\sqrt{\frac{gL}{2\pi}} = 2.26\sqrt{L}。$$

简单地看来, 可能以为波形的传播或行进, 特别是波峰的行进, 似乎是由于水体在波浪行进方向上的净移动。但这不符合事实, 可用深水中的漂浮物来证明, 除非是风或水流使之移动外, 漂浮物只随着波浪的起伏而上下运动, 并不作水平运动, 只是由于水质点的轨道运动使它略有小量的前后往复。

表面水质点的轨道运动的结果, 是波形在水面上前进而不是水体在前进, 水质点是前后往复振荡的, 而不是前进的。关于这一点现在再用图 2-4 来予以说明。当波峰在  $A$  点、波谷在半个波长的前方  $F$  点时,  $A$  处的表面水质点是正在顺着时针方向和朝着波形的传播方向运动着, 并已达到其最高位置; 这时在  $F$  处的水质点也是正在作顺时针方向运动, 并已达到其最低位置, 但它的运动方向则与波浪行进的方向相反。此外, 沿波浪表面在  $C$  点处的水质点是向上运动着的, 并且当波峰进达  $D$  时, 亦即在一瞬间之后,  $C$  处的水质点也已向上运动达到

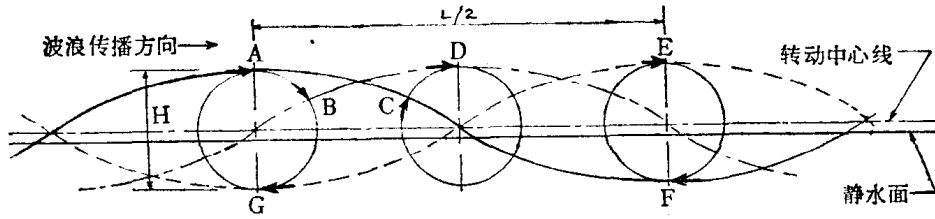


图2-4 轨道运动和波浪的传播

$D$ 点,这时 $A$ 点处的水质点则已在前进的波面上降落到 $B$ 。当波峰到达 $E$ 时, $F$ 处的水质点已环绕其轨道运动途径而到达 $E$ ,同时 $B$ 处的水质点则到达波谷 $G$ 处的最低位置。这表明,在前进着的波峰后面的水面是在降落着,如图中 $B$ 处的箭头所示;而在波峰前面的水面是在升起,如 $C$ 处的箭头所示。在波峰和波谷,轨道运动是水平的,且两者的运动方向相反,在波峰的两侧等于波长的 $1/4$ 处,水质点的运动方向是垂直的,在波峰之后向下,在波峰之前则向上。

以上我们仅讨论了波浪的表面。波浪在深水中的振幅是随水深而急剧减小,但波长不变,如图2-5所示。按照波浪理论,母圆(generating circles,也称生成圆)的半径随水

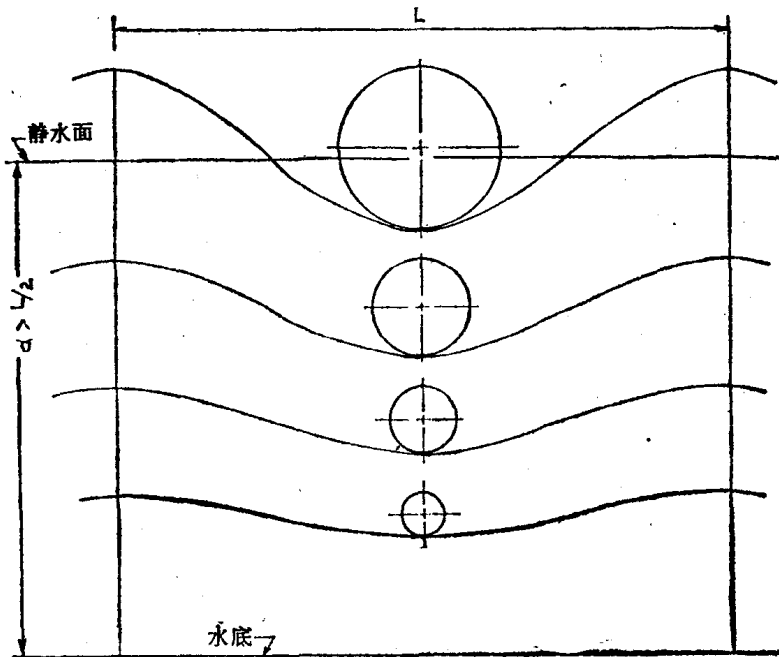


图2-5 波浪振幅和轨道半径随深度的增加而减小

面以下的深度按公比为 $1/\sqrt{e}$ 的几何级数而减小, $e$ 为自然对数之底。对于一个波的波长等于 $15H$ ,在水深等于限度水深即 $L/2$ 或 $7.5H$ 处,该处的轨道半径将仅为水面轨道半径之 $1/23$ 。由此可见,在此深处的水底对于波形的影响很小。轨道速度是与轨道半径的大小成正比的,故在水表面的轨道速度为最大,随水深而锐减,至水深为 $L/2$ (或 $2T^2$ )处,乃成为可忽略不计的微小数值。

在浅水( $d < L/2$ )中的波浪运动受到底部的影响。水质点的圆周运动变成近于椭圆运动,长轴是水平的。水深愈向下,椭圆长轴与短轴之比值愈大,直到接近于水底,轨道运动就几乎变成完全水平的往复运动。不同于深水中的圆周轨道运动,即水平速度和垂直速度相等,浅水中的轨道速度是水平方向大于垂直方向。浅水中的波浪传播速度 $v$ 等于深水中的速度( $v = 2.26\sqrt{L}$ )乘以 $c$ , $c = \sqrt{b/a}$ , $b/a$ 是椭圆轨道运动的垂直轴和水平轴之比,该

值列于表 2-3。应当指出，当水深等于  $L/2$  时，这一比值接近于 1，此时的速度实质上即等于深水波的速度。

波浪传播速度系数  $C$  和浅水中的轨道速度系数  $\mu$

表 2-3

| $d/L$ | $c$   | $\mu$ | $d/L$ | $c$   | $\mu$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.05  | 0.552 | 1.814 | 0.30  | 0.977 | 1.023 |
| 0.10  | 0.746 | 1.340 | 0.35  | 0.988 | 1.013 |
| 0.15  | 0.858 | 1.165 | 0.40  | 0.994 | 1.007 |
| 0.20  | 0.922 | 1.085 | 0.45  | 0.997 | 1.004 |
| 0.25  | 0.958 | 1.044 | 0.50  | 0.998 | 1.002 |

深水波和浅水波的运动在整个深度中是保持一定程度的对称性的，如图 2-5 所示。破碎波则无此特征，它的波峰迅速向前，波的下部则朝着相反方向而缓慢地向海移动，在破碎着的波峰后面有一个相对静止的长而平的波谷。从形状上来看，破碎波的行进也与深水波和浅水波不同，由于其表面的轨道速度已超过了波的行进速度，近岸的破碎波具有一股向前冲移的水体。

以上关于波形和生成的简略描述是为了使读者对这些现象能有个一般的了解。本书无意对各种不同的波浪理论作更详尽的阐述，也不拟将各种波浪理论一一列举，现仅将几个较为重要的理论简介于下：

格斯特勒 (F.V. Gerstner) 在 1802 年奠定了现代波浪理论的基础。他提出的几何关系式是第一个关于波浪运动的理论公式。他假定圆形轨道运动的直径随深度之向下增加而减小，这在深水波是符合事实的。他还认为：全体水质点的角速度均为常数，水面及一切等压线均为余摆线，即滚轮沿直线滚动时轮辐上的点所描绘的曲线。

艾里 (G.B. Airy) 在 1845 年采取了十分相似的方法，但超过了纯几何的研讨。在必要条件下，他采用了椭圆轨道，但他假定波峰在静水面上的高度等于波谷低于静水面之值。这一假定仅对极微小的波浪是确切的，换言之，艾里理论虽对于任何水深均为有效，但它仅适用于微波。

斯托克斯 (G.G. Stokes) 于 1880 年指出了格斯特勒推理中的矛盾，为了消除这些矛盾，他在推导公式时注意到这一事实，即波峰在静水面以上的升高值大于波谷在静水面以下的降落值。艾里理论是斯托克斯理论在微波情况下的一个特殊形式。

1888 年圣维南 (Saint-Venant) 和弗拉曼 (Flamant) 按照轨道运动为椭圆的假定，把格斯特勒理论应用于浅水波。

所有以上的理论都是关于振荡波的。在 1838 年拉塞尔 (J. Scott Russell) 首先指出了前移孤立波的存在，在孤立波的前移运动中于静水面以下是没有任何凹陷的。拉塞尔研究了孤立波的特性，但当时未能对于这一类型的波浪作出有意义的应用。其后，研究人员才了解到振荡波，在接近或达到最大的波陡时，如涌潮波、地震波等等，最好是用孤立波的公式来描述，这才使孤立波理论渐成为重要。所有这些适用情况相对说来都是在浅水区，可以看作是一种单纯的扰动。孤立波理论的特殊重要性在于这一事实，即工程上所最重视者主要是最大波浪，这种最大波浪往往是可按孤立波来处理且具有足够的精确度。

工程人员在海港和港工建筑物的设计中，一般常会遇到以下一些涉及波浪的问题，除另

作注明者外，这些问题将包括于本章以后各段中。

波高和波长的预报

波浪在堆石堤上的作用（见第四章）

波浪在斜坡上的爬高（见第四章）

波浪在直立墙（特别是直墙式防波堤）上的作用波浪对桩、柱及沉箱的作用

波高和波长的预报

任一地点的波浪大小取决于风速、风的延时、风向、受风的最大距离和水深。

为任一指定地点设计建筑物，须确定选用多么大的波浪，仅在很少的例外情况下，设计者才会有有一套充分的长时期观测资料作为依据。当然，一般的观测资料业已具备，对于巨大水域中的最大有效波高的级序一般均已测得，例如大西洋（45英尺），太平洋（60英尺），地中海（20英尺），黑海（30英尺），北美大湖区（25英尺），墨西哥湾（40英尺）和马拉开波湖（Lake Maracaibo，在委内瑞拉）（10英尺）等等。应当指出，在大洋的广阔水面所产生的波浪并不一定按水体大小的比例而大于较小的水体，如墨西哥湾和北美大湖区中的波浪。大洋上的风暴通常或多或少是局部的，洋面的极大距离并不是一个决定性的因素。

史蒂文森（Thomas Stevenson）于1864年建立了波高（ $H$ ，英尺）与风区长度（ $F$ ，海里）的第一个关系式：

在大风区情况下（ $F > 30$ 海里），

$$H = 1.5\sqrt{F}$$

在小风区情况下（ $F < 30$ 海里），

$$H = 1.5\sqrt{F} + 2.5 - \sqrt{F}$$

以上公式是从湖上的观测资料导得的，但曾用北海海岸的波浪资料对它进行过校核。公式中没有包含风速作为一个变数，所以，公式所给出的波高值，仅符合于在观测地区的风速为最大的情况。

盖拉德（D.D. Gaillard）在1904年提出的报告中，广泛地收集了许多海洋波高观测资料。莫利特（D.A. Molitor）在1934年发表的一篇论文<sup>①</sup>中，以史蒂文森公式为基础给出如下的公式，用以确定内陆湖上的波高，并引进风速作为一个变数，采用英里以代替海里：

当  $F > 20$ 英里时，

$$H = 0.17\sqrt{UF}$$

当  $F < 20$ 英里时，

$$H = 0.17\sqrt{UF} + 2.5 - \sqrt{F}$$

式中：  $U$ ——风速，英里/小时；

$F$ ——风区长度（吹程）英里；

$H$ ——波高，英尺。

波长与波高的比值决定于风速，暴风的延时、水深以及水底性质。根据盖拉德的观测，在内陆湖中，即在水深较浅的水域， $L/H$  值在9至15之间；而海洋波浪的  $L/H$  值则为17至33。这一比值约与风的强度成反比，风的强度愈大，则此比值愈小。

自第二次世界大战以来，从气象、海洋和地理的资料来作潮汐和波浪的预报方面，曾作了大量的工作。这方面的先驱是来自战争时期，当时由于军事登陆需要预测海岸的波浪情况，促进了预报的研究。战后，海上油井和雷达站的外海建筑物出现，继续推动着研究工作的进行。为了设计目的而作波高观测时，必须记取，在一个波列中的个别波浪的波高是不相

<sup>①</sup> 见 D.A. Molitor, "Wave Pressure on Sea-walls and Breakwaters", the Proceedings of the American Society of Civil Engineers, May, 1934.



同的。凡是曾对波浪作过观察的人，或曾在海上经历过风暴的人，都知道在若干个波以后常会有一个较其他的波为大的波到来。在一定的时段内，把三分之一的最大波高的平均值称为有效波高，最大波高约为有效波高的1.87倍。现将常用的波高参数与有效波高的比值列举于下<sup>①</sup>：

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 有效波高                 | 1.0 |
| 平均波高                 | 0.6 |
| 最大的10%的波高的平均值        | 1.3 |
| 与实际波列含有相等能量的简单正弦波的波高 | 0.8 |
| 在时间上不超过20%的波高        | 0.9 |
| 在时间上不超过10%的波高        | 1.1 |
| 在时间上不超过5%的波高         | 1.2 |
| 在时间上不超过3%的波高         | 1.3 |
| 在时间上不超过1%的波高         | 1.6 |
| 最大的1%的波高的平均值         | 1.7 |

现将波浪成长和衰减的影响因素分述于下，这些因素的资料对于设计波浪的预报是必需的。

**风区长度** 暴风总是局限于一定地区，而波浪的成长也仅限制在此区域之内。波浪成长水域范围按风的方向上的水平距离称为风区长度，也称为吹程。对于某一指定地点，欲确定其波浪成长区域和风区长度可借助于天气概要图（见图2-6）。在海岸地点的风区常为岛屿和海角等地理障碍所限制，应按每个不同方向来确定风区长度。

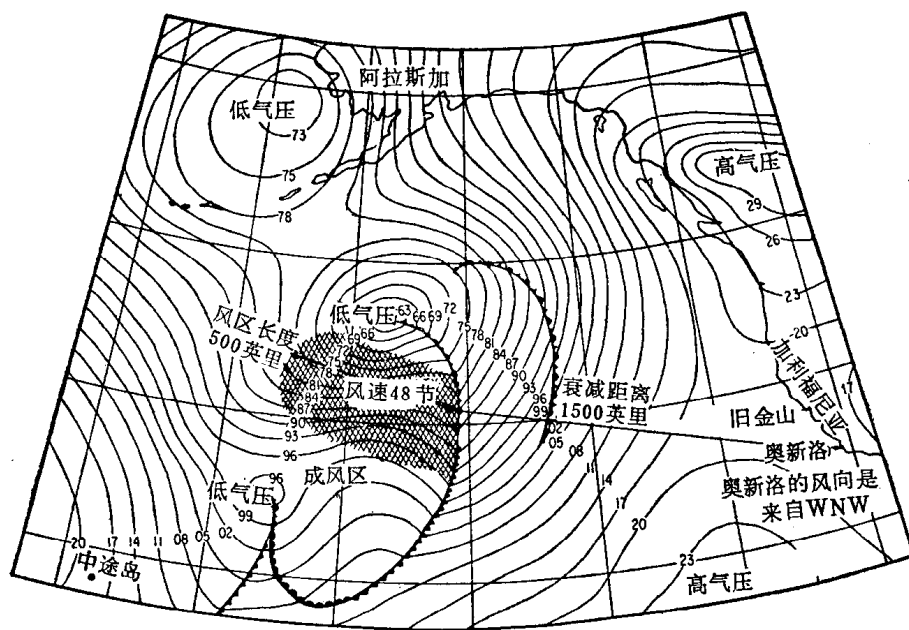


图2-6 天气形势图，图示波浪成长区域、风区长度和衰减距离

**风速和风向** 波浪是由运动于水面上的空气的能量传递而生成的。其传递有两个有效途径：  
(1) 水面受到运动着的空气所具有的微小压力差异的影响，于是在水面上产生首次的变化。

<sup>①</sup> 录自 Engineer Manual EM1110-2-2904, Design of Breakwaters and Jetties, Headquarters, Department of the Army, Office of the Chief of Engineers, April 30, 1963.