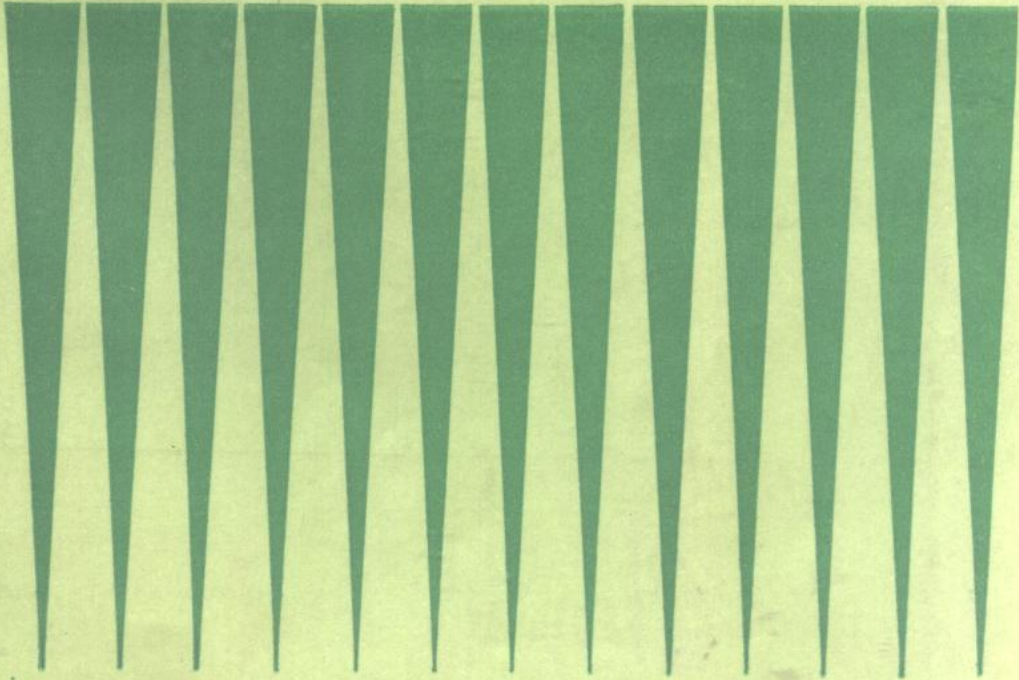


堤
坝
防
浪
护
坡
设
计

余广明

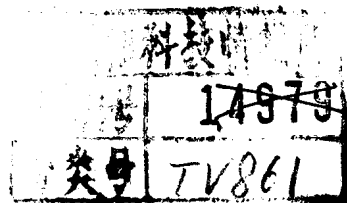
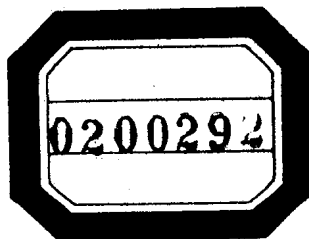


堤坝防浪 护坡设计



292

水利电力出版社



005853 水利部信息所

堤坝防浪护坡设计

余 广 明

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是系统地、全面地探讨堤坝防浪护坡设计问题的专著。全书共分两篇。第一篇讨论如何确定堤前的设计波浪要素,包括:一般风浪和台风浪,研究深海、浅海、海湾、水库、湖泊和河流等各种水域中多年一遇设计波浪的确定问题。本篇内容不仅适用于堤坝的防浪护坡设计,对于各种类型的防浪、护岸和承受波浪作用的建筑物设计亦普遍适用。第二篇讨论堤坝的防浪护坡,包括:波浪对堤坝的作用,堤坝前的消浪促淤措施,各种护坡类型的设计计算方法,坡脚防护措施以及现场波浪观测和室内试验研究技术等。取材系根据国内外最新的、有代表性的科研成果,包括作者个人的研究心得。同时考虑到便于工程实用,避免作过于繁复的数理推导,对问题作了尽可能简洁的概括说明。本书可供水库、湖泊、河流的防浪工程、海岸及海洋工程、港湾建设、运河通航、滨海区开发、海涂围垦、滨水区铁路路基建设、海上石油开采等方面设计和科研工作者参考应用,并可供高等院校有关专业师生参阅。

EW74/12

堤坝防浪护坡设计

余 广 明

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 15.75印张 355千字

1987年9月第一版 1987年9月北京第一次印刷

印数0001—2910册 定价4.10元

书号 15143·6428

前 言

堤坝防浪护坡问题，是国民经济建设许多部门经常遇到的一个重要工程技术问题，也是各国学者不断进行研究的一个重大科技专题。一方面它以波浪理论为主要科学依据，涉及到气象学、流体力学、波浪动力学、概率论与数理统计、随机过程理论等多门学科；另一方面它又以实践经验的累积与总结为丰富源泉，并随时吸收新材料和新工艺。随着感性和理性认识的逐步深化，设计标准不断更新。就工程分支而言，诸如水利工程、海岸和海洋工程、运河工程、滨海区开发和海涂围垦工程以及滨水区铁路路基建设工程等，均与之密切相关。上述各类工程，面广量大，护坡的投资，其累计数极为可观。鉴于问题的复杂性和条件的多样性，本专题的正确解决途径，必须理论与实践相结合。安全、经济的合理设计方案，要求在理论上有科学的根据，在实践上能行之有效，在工艺上是先进的，在施工上是可行的。由于波浪理论的不完善，现场经验的逐步累积，新材料新工艺的相继涌现，自本世纪四十年代以来，本专题无论在理论方面或实践方面，均有较显著的进展。各国学者与工程技术专家所提出的科学论文与经验总结报告，篇幅浩繁，文种不一，且往往散见于各类科技文献。读者每苦于难窥全豹，而国内又缺乏有关本问题的专门著作。作者根据多年来的工作体会和生产实践上提出的问题以及与国内外科科技、工程界人士接触所了解的情况，广泛参阅了许多种文献资料，斟酌取舍，综合概括，有时附以简略评论，就本专题的各个方面，系统论述，编纂成书。在编写过程中，特别着重于各国现行规范的参考与比较，并注意吸收最新的科研成就，书中亦反映了作者本人的部分科研成果。

本书原稿系作者为国外留学生培训班讲课时所编写的讲稿。后根据各方面的需要，曾由南京水利科学研究院以单行本方式作为内部资料发行。本书对原稿作了全面的修订，篇幅增加甚多，内容推陈出新，力求能反映本专题当前的水平。鉴于本书以实用为目的，凡涉及理论性的章节，一般只扼要介绍其立论的主要依据与最终成果，避免作繁复的数理推导，并尽量利用图表与公式，供读者参考应用。由于问题所涉及的理论比较复杂，各家学说难免互有分歧；工程所在地点的具体条件千差万别，各地所总结的经验难望系统全面。本书在取材上，不可能不反映作者的主观倾向。尚希读者批评指正，匡我不逮，以便再版时修订补充，使之趋于完善。

本书插图由郭舜华、黄克源两同志描绘，在此一并致谢。

作 者

1984年6月于金陵

目 录

前 言

绪 论	1
-----	---

第一篇 堤前设计波浪要素的确定

第一章 水面波动现象的基本概念	4
第一节 概说	4
第二节 常用术语的定义和涵义	7
第三节 规则波的常用公式	10
第四节 不规则波和波谱	21
第二章 堤坝设计波浪要素的计算方法	30
第一节 深海的波浪要素计算	30
第二节 浅海的波浪要素计算	38
第三节 海湾、水库、湖泊、河流中的波浪要素计算	41
第四节 台风区域内的波浪要素计算	46
第五节 水深渐减、波能损耗和波形破碎所引起的波浪要素变化	57
第六节 波浪折射	68
第七节 波浪绕射	76
第三章 波浪要素的分布规律	86
第一节 波高与波周期的短期联合分布	86
第二节 波高、波周期与波长的短期单独分布	87
第三节 多年一遇设计波浪要素的确定	97
第四节 设计波浪标准, 重现期和遭遇概率	109

第二篇 堤坝的防浪护坡

第四章 波浪对堤坝的作用	115
第一节 波浪对堤坝的作用机理	115
第二节 风和浪的堤前增水	116
第三节 波浪在堤坡上的爬高	119
第四节 越堤的波动流量	124
第五节 斜坡坡面上的波流速和波压力分布	126
第六节 坡面、堤脚和基础的防护要求	131
第七节 船行波对堤坡的作用	133

第五章 堤坝前的消浪促淤措施	135
第一节 植物消浪	135
第二节 顺坝及潜堤促淤消浪	136
第三节 浮堤消浪	139
第四节 气压及水力防波堤消浪	147
第六章 块石护坡	152
第一节 概说	152
第二节 面层设计	154
第三节 垫层设计	161
第四节 合成纤维网眼布在海岸工程中的应用	167
第七章 混凝土、土-水泥与沥青护坡	172
第一节 混凝土异型块体护坡	172
第二节 混凝土与钢筋混凝土板护坡	182
第三节 土-水泥护坡	186
第四节 沥青混凝土和沥青砂护坡	189
第八章 其他类型的护坡和坡脚防护措施	195
第一节 无护面的天然缓坡	195
第二节 多种类型的护坡方案	196
第三节 坡脚防护措施	198
第九章 波浪观测和试验研究	202
第一节 波浪观测和数据处理	202
第二节 波浪模型试验	208
第三节 防浪护坡模型试验的比尺效应	215
附录I 椭圆积分及椭圆函数 ^[217,218,219]	218
附录II d/L 、 $c/c_0=L/L_0=\tanh\frac{2\pi d}{L}$ 、 k_0 与 d/L_0 的对应数值表*	225
附录III 皮尔逊III型频率曲线的离均系数 Φ 值表*	231
参考文献	234

绪 论

堤坝等防浪工程,经常承受着波浪的冲击。土堤、堆石坝等的护坡设计是否妥善可靠,既影响工程的安全和寿命,又因护坡费用,在整个工程投资中所占的比重较高,工程量往往十分巨大,因而护坡设计是否先进合理,又影响所需的经费,其经济效果极为显著。基于上述原因,有关部门和工程技术界人士,对于本专题的科研成果及其在生产上的应用,经常给以高度的重视和关注。

在水利工程建设中,水库中的土、石坝,以千百座为计量单位;湖泊、平原水库、河流中的土堤,以千百公里为计量单位。这些堤坝工程,抗御着风浪的袭击,捍卫着下游、两岸和周围千百万人民的生命财产安全。堤坝的护坡,影响着工程的安危。工程一旦失事,其后果极为严重。护坡所花费的大量劳力和巨额投资,亦使问题的妥善解决,在经济上有十分迫切的需要。

在海岸工程建设中,海塘、海堤合理断面的设计,是一个牵涉到多门学科的重要科学技术问题。特别在我国东南沿海一带,夏秋之际,经常出现台风暴潮。因台风巨浪而倒塌的海堤,动辄以千百公里计。由于特大台风在沿岸登陆,海堤溃决而造成的巨大灾害,史不绝书。我国海岸线绵长,沿海一带多为富庶的渔米之乡,人口密集,工农业发达。海塘工程的兴建,历代都极为重视。如何应用现代科学技术,使海堤的防浪护坡问题,以比较理想的方法获得解决,是海堤合理断面设计中的一个重要方面。

我国沿海一带资源丰富,岛屿港湾众多,滩涂辽阔。在滨海区开发和海涂的工农业围垦事业中,往往需要兴建新的围堤。某些滨海地区,随着滩涂淤涨,围堤不断外迁,形成多道堤网。此外,在近岸带修建的一些重要工业企业,例如核电站等设施,亦需要构筑高标准的永久性围堤,防御风浪袭击。在水库库区周围、海滨、湖滨等滨水地区修建铁路路基,同样需考虑风浪淘刷的因素。在上述各类工程中,防浪护坡问题均甚突出。

在交通运输事业中,运河通航是重要的大动脉之一。我国自古即有兴建运河的光辉史迹。举世闻名的京杭大运河,纵贯南北,沟通海河、黄河、淮河、长江、钱塘江五大水系。其他各类运河,纵横交错,遍布全国。随着现代造船工业的日益发展,船舶的排水量增加,航速加大。船舶高速航行时所产生的船行波,对于运河两岸堤坡,有剧烈的冲刷作用。运河护坡工程,面广量大,在一个城市的范围内,即可长达数百公里。而运河两岸,往往为粮棉等作物高产地区,寸土必争,不容侵蚀。如何因地制宜,使护坡设计既有科学根据,又力求降低造价,其经济效益十分显著。

以上仅略举某些与防浪护坡有密切关系的工程实际问题,以说明本专题在国民经济建设中的重要性。在设计防浪护坡工程时,首先需确定建筑物前的设计波浪要素。此一问题,系本书第一篇所讨论的中心内容。本篇内容,不仅适用于堤坝工程,其他诸如军港、商港、渔港设计,海上石油、天然气开采所需的平台设计,河口整治,波能利用等,均必

需首先确定工程或设备所在地点的设计波浪要素。因此，第一篇的内容，对于各种类型的防浪、护岸和承受波浪作用的建筑物设计，均普遍适用。

设计波浪要素的确定，是一个复杂而困难的问题。它牵涉到气象学、流体力学、波浪动力学、概率论与数理统计、随机过程理论等多门学科，并与现场波浪观测技术，室内波浪试验研究紧密联系，亦与工程的重要性有关。近数十年来，在近岸带波浪要素计算的问题上发展迅速，百家争鸣。提出的理论日趋精深，考虑的因素日益完备，计算步骤有时极为繁复，名词术语相当专门化。各派学说纷陈，往往使非本专业的人士无所适从，工程界未必乐于采用。考虑到广大读者的需要，在第一章中扼要地介绍了水面波动现象的基本概念，使读者在阅读本书其他章节之前，对于水面波动现象及其有关的名词术语，有一个概括的了解。

根据不同的自然条件和生产上的实际需要，在本书第二章中分别就深海波、浅海波、水库、湖泊、河流等水域和吹程有限的水体中的波浪以及台风浪的计算方法，举其有代表性的、比较完善的，择要加以介绍。波浪在向浅水地区传播过程中以及当边界条件发生突变时，因折射、绕射、浅水变形、波能损耗和波形破碎等物理作用的影响，波浪要素不断发生变化。在确定堤前设计波浪要素时，必须考虑上述各种因素。第二章针对以上各个环节，分节予以说明，以便实际应用。

在确定堤坝的设计波浪要素时，除上述章节外，尚必须考虑波浪要素的短期和长期分布规律以及波高和波周期的联合分布，以计算多年一遇的或不同重现期的各种超值概率的波高和波周期。在本书第三章前三节中，对于这方面的内容，有相应的论述。与此相联系的，在第三章第四节中又就设计波浪标准以及重现期和遭遇概率的问题，作了专门阐述。

第二篇所讨论的内容，系在波要素已确定的波浪作用下，如何设计堤坝的护坡。为此，首先必须了解波浪对堤坝的作用机理。在第四章第一节中，对此有所剖析，使读者能获得一总的概念。然后在该章其余各节中，分别讨论波浪对护坡作用的各个具体问题，诸如波浪在堤坡上的爬高，越堤的波动流量，斜坡坡面上的波压力和波流速分布以及坡面的防护范围，堤脚和基础的防护要求等。鉴于风和浪的堤前增水，对于工程设计有重要的影响，故在第四章中专列一节，说明其计算方法。船行波对堤坡的作用，包括船行波的波高和爬高，作用在护坡坡面上的船行波波压力，有其独特的计算公式，亦在本章中另列一节加以说明。

在堤坝前采取消浪促淤措施，有利于减轻护坡所承受的波浪荷载，使建筑物的顶高可以降低，断面可以减小，安全更有保障，护坡可以轻型化。在一定条件下，能达到降低造价，节约投资的目的。在堤前滩地宽广，滩面高程较高的地区，利用植物消浪，值得优先考虑。此种消浪措施，不仅投资低，且每年在经济上可以有所收益，防浪效果亦较显著，可谓一举数得。关于作物品种，要因地制宜，我国各地区有各自的丰富经验。但如何计算植物的消浪效果，就作者所知，仅有粗略的估算方法，需要进一步量化。本书第五章第一节中介绍的计算方法，可供参考应用。利用顺坝或岛堤及潜堤消浪，除能削减波浪能量、降低波高以外，在一定条件下，如设计得当，往往能拦截泥砂，促进滩涂淤涨，从而起到保滩护堤的作用。浮堤、气堤和水力防波堤，消波作用显著，但在实际应用时亦存

在一定问题，各有其使用条件。浮堤类型繁多，某些类型尚可利用废旧材料，作为临时性、军事上、防汛抢险或保护面积不大的重点工程的防浪措施，有极为有利的一面。上述各类消浪设施，在第五章中有详细的论述。

第六章至第八章分别介绍各类护坡工程的设计计算方法，亦涉及无护面的天然缓坡和坡脚的防护措施。在具体选定护坡形式时，除必需有充分的科学依据外，尚需考虑材料来源，施工工艺，运输条件等因素，要在能就地取材，发挥当地优势，从多种设计方案中权衡利弊，择优选用。上述三章中所提供的护坡类型及其详细的计算公式和图表，将有助于制订多种方案，进行技术经济比较。

波浪要素的现场观测和数据处理，是获取设计原始资料，验证波浪要素计算方法的不可或缺的手段；在某些情况下，甚至将成为决定工程成败的关键。重要的防浪护坡工程，除应用现有的先进科研成果，进行缜密的技术设计外，往往尚需开展相应的室内试验研究。一则以检验所采用的或规范上规定的护坡设计计算方法是否合乎客观实际，所考虑的因素是否完备；再则具体工程的边界条件千差万别，其细节往往非一般性的公式所能概括。对于重要工程，特别对于终结布置方案，模型试验在所必需。第九章分别就上述两个方面的有关问题作了专门阐述，可供设计和试验工作者的参考。

第一篇 堤前设计波浪要素的确定

第一章 水面波动现象的基本概念

第一节 概 说

水面的起伏运动称为波浪。波浪可按各种标准加以区分。如按成因分类, 则有因风而引起的风浪, 包括因台风及其中心低气压而产生的台风浪; 因船舶航行而激起的船行波; 因海底火山爆发、断层滑移而出现的海啸; 因日、月引力而发生的潮波等。从对堤坝等建筑物的作用来说, 其中以风浪为最频繁和最重要。在运河中则两岸堤坡的淘刷, 主要系船行波的作用。

波浪亦可按水面恢复平衡力的性质来区分。波长极短的波, 由于水面曲率很大, 表面张力为恢复平衡的主要作用力, 称为表面张力波或毛细波; 波长较长的波, 重力为主要的恢复力, 称为重力波; 波长极大的波, 伴随着波浪运动, 水体本身的质量流也很大, 柯氏力为主要恢复力, 称为柯氏力波。以上各类波浪的分界线之间有交叉, 即有时两种恢复力均起显著作用。

波浪尚可按波周期来分类, 表1-1为一种分类法^[1]。

表 1-1 按 周 期 划 分 的 波 浪 类 别

类 别	周 期	类 别	周 期
毛 细 波	0~0.1s	次 重 力 波	30s~5min
超 重 力 波	0.1~1s	长 周 期 波	5min~24h
重 力 波	1~30s	超 潮 波	24h~∞

根据观测资料, 当风速甚小时, 在平静的水面上首先出现皱纹, 外形呈规则的菱形, 波高不过数mm, 波长不过数cm, 受制于表面张力, 属于毛细波。风速逐渐增加并持续作用时, 毛细波的波长逐渐加大, 当波长约超过1.73cm, 波速约超过24cm/s时, 即由毛细波转变为重力波。毛细波与重力波的风速分界线略大于2 kn或2 n mile/h。

当波速小于风速时, 风通过对波浪迎风面的直接推力以及海面上气流的切应力将能量传递至水体。即使波速大于风速, 由于水质点的运动速度远小于波速, 通过水质点的作用, 风能仍可借切应力传递至水体。此外, 通过波面上空气的压力差, 波浪亦能自风中获取能量。

波浪一方面自风获得能量, 另一方面又主要通过波动水体的紊动和波形破碎以及次要

地通过水的粘滞性，而在浅水中又通过底摩擦和渗流损耗能量。当能量的输入大于输出时，波长和波高均不断加大，波长增加得更快。如波高达于极限，则主要加大波长。

在风的作用下，波长不同的各个波浪以不同波速传播，大小、长短不等方向不同的波浪相互干涉重叠，波形混乱而不规则。任一波峰线出现后不久又趋于消失。在一个波系中，前后各波的波高差别很大，而且是随机性的，相邻两个波高间的差别，并无规律可循。大波和小波又常成群出现，但波群的规模也是不规则的。

风浪的大小主要取决于风速、吹程和风的延时。1933年2月7日在北太平洋中部，曾出现波高达34米左右的大波。

风浪传播至风力作用区域以外，或当风转向或停止后继续传播着的波浪称为余波，亦称涌浪。余波的外形和风浪不同，波形呈光滑的流线形。余波的波长可比风浪的波长大得多。

波高与波长之比称为波浪陡度，简称波陡。对于船舶航行来说，波陡比波高更为重要。在陡波中航行比较困难，感觉更不舒适。在风作用的初期，风浪的陡度较其后期为大。根据观测，波陡的变化范围，虽可自1/7~1/125，但海洋中的风浪陡度，大多变化于1/10~1/25之间，有时可达1/50或更坦。水库中的风浪陡度，一般变化在1/10~1/15之间。余波的波陡较风浪的波陡为小。

波周期与风速有关。对于充分成长的风浪而言，Pierson, Neumann, James认为当风速为10~40kn时，平均波周期约为2.9~11.4 s^[2]。

波浪的传播方向与波峰线成正交，主波向与风向一致。风转向后，在新的方向产生新的风浪，原有的波浪仍循原方向沿地球的大圆传播。

波浪的传播速度 c 可按下式计算：

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \tag{1-1}$$

式中 T ——波周期；

d ——水深；

L ——波长。

当 $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$ 时， $\tanh \frac{2\pi d}{L} \approx 1$ ， $c \approx \frac{gT}{2\pi}$ ；当 $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$ 时， $\tanh \frac{2\pi d}{L} \approx \frac{2\pi d}{L}$ ， $c \approx \sqrt{gd}$ 。

因此习惯上将重力波按相对水深 $\frac{d}{L}$ 区分为深水区、过渡区、浅水区三大类，如表1-2所示。

表 1-2 重 力 波 的 分 类

类 别	d/L	$2\pi d/L$	$\tanh \frac{2\pi d}{L}$	c
深 水 区	$> \frac{1}{2}$	$> \pi$	≈ 1	$\approx \frac{gT}{2\pi}$
过 渡 区	$\frac{1}{25} \sim \frac{1}{2}$	$\frac{1}{4} \sim \pi$	$\tanh \frac{2\pi d}{L}$	$\frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}$
浅 水 区	$< \frac{1}{25}$	$< \frac{1}{4}$	$\approx \frac{2\pi d}{L}$	$\approx \sqrt{gd}$

在深水区中, 自水面向下波动按指数关系急剧减弱。例如, 波高为 5m, 波长为 150m 的波浪, 在水面下 50m 深度处, 水质点的运动轨迹为一圆, 其直径约为 60cm。水面水质点的运动速率约为 1.6m/s, 而在水面下 50m 深度处则仅为 0.2m/s。故在水面下深度大于一个波长的区域, 水面波动的影响可以略而不计。在浅水区中, 则从水面至水底, 因水面波动而产生的水质点运动速度基本相同。

波浪遇障碍物后将产生反射和绕射。进入过渡区和浅水区时则产生折射。波浪传播方向及波浪要素, 均将发生变化。

水流对波浪有一定的作用。在考虑水流所起的作用时, 只需考虑与波向相同的顺向流或与波向相反的逆向流。因斜向水流的两个垂直分量中, 仅与波向平行的分量起作用。逆向水流使波长减小, 波高增加, 因而使波陡加大, 而波周期保持不变; 顺向水流使波长增加, 波高减小, 因而使波陡减小, 波周期亦不变。流速愈大, 对波浪的影响亦愈大。流速一定的水流, 逆向流所引起的波形变化比顺向流显著。在河口地区, 落潮流与向岸波相遇时, 由于波浪陡度增加, 波形破碎, 水体紊动剧烈, 对于船舶特别是小船的航行极为有害。

风所引起的漂流通常流速很小, 对波形的影响可以略而不计。大洋中的潮流对波浪的影响通常亦可忽略。但近岸带、岸滩、海峡、港湾中的水流流速, 可使波形发生显著变化。当波浪越出水流作用区后, 其波高、波长又恢复原状。

波浪向岸传播, 最终将在破波带内破碎, 能量大量损耗, 波涛汹涌澎湃, 气势极为壮观。海洋中波浪表面的白花与破波带内的破波性质迥异。前者系因风将波顶吹离波浪而引起的局部现象, 波浪性质基本不变; 后者破碎的原因不在于风, 虽然风对破波的形态有一定的影响。在破波带内破碎的波浪被整个打乱, 波形消失。有时波浪在第一次破碎时波形并不完全破坏, 在此种情况下, 将重新形成新的波浪, 继续向前传播, 波陡逐渐增加并再次破碎。在波形彻底破坏前, 有时可能破碎 3~4 次。

当波浪自深水区向浅水区传播时, 开始波高略有减小, 然后波高显著加大。在多数海岸, 破波波高比其原始深水波高为大。波浪在濒于破碎之前不仅波高加大, 而且由于进入浅水时波速降低, 波长减小, 因而波浪陡度比在外海时要大得多。

根据 Galvin 的试验研究, 破波形态可以分为下列四类^[3]:

(1) 崩波 (*Spilling breaker*) —— 气泡与紊动水质点溅落在波浪前部表面, 波峰处有白花。在破碎之前, 波浪前表面上部 25% 可能成为壁立。波浪是逐渐破碎的, 历经相当长一段距离。崩波常发生在滩坡非常平缓, 波陡较大, 特别是有向岸风的场合。

(2) 卷波 (*plunging breaker*) —— 波浪在波峰处卷曲, 下有气囊。波形前面凹入, 背面丰满。破碎时水体向前猛冲, 在几秒钟内变为粉碎, 发出轰隆巨响, 通常并有水花上溅。波陡较小的余波在较陡的滩坡上易产生卷波, 离岸风有助于卷波的形成。

(3) 坍波 (*collapsing breaker*) —— 系卷波与涌波的中间形态。破碎发生在波浪下半部。气囊极小, 通常无水花飞溅, 有气泡及泡沫。

(4) 涌波 (*surging breaker*) —— 波浪沿坡上溯, 在波峰欲向前冲时, 底部水体已先涌上滩坡, 使波峰不致卷曲。基本上不产生气泡。水面大体上保持为一平面, 滩坡一

般极陡。

实际上自一种破波形态过渡到另一种形态是一个渐变过程，并无明确的分界线。

根据试验结果，Galvin给出表1-3，以参数 $\frac{H_0 m^2}{L_0}$ 来确定破波类型，可供参考。 H_0 为深水波高， L_0 为深水波长， $m = \cot \alpha$ ， α 为滩坡与水平面的交角。

表 1-3 破 波 类 型			
参 数	涌 波	卷 波	崩 波
$\frac{H_0 m^2}{L_0}$	<0.09	0.09~4.80	>4.80

亦有学者提出以破波相似数 ξ 来鉴别破波形态^[4,5]：

表 1-4 ξ 与破波形态的关系			
波 波 形 态	光 滑 斜 坡	块 石 斜 坡	
涌 波	$\xi < 0.5$	—	
卷 波	$0.5 < \xi < 3.3$	$\xi < 2$	
坍 波	$3.3 < \xi$	$2 < \xi < 3$	
崩 波	—	$3 < \xi$	

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \quad (1-2)$$

式中 L_0 ——深水波长；
 H ——建筑物所在地点的波高；
 α ——堤坡与水平面的交角。
 ξ 与破波形态的关系见表1-4。

第二节 常用术语的定义和涵义

(1) 风浪——水体在风力作用下，自风中获得能量而形成与发展的波浪。风浪的外形极不规则，波面曲线的前坡与后坡亦不对称，波形比较紊乱。任一波峰线出现后不久又趋于消失。与余波相比，风浪的周期较小，波长较短，波陡较大。

(2) 余波——风浪传播至风力作用区域以外，或当风停止或转向后继续传播着的波浪，亦称涌浪。余波的波面曲线光滑，前坡与后坡基本对称，波形规则。

(3) 规则波——古典流体力学上所讨论的波浪。波面为一光滑曲线。当水深一定时，波形周期性地重复，波高与波长分别保持常值不变(图1-1)。例如正弦波、摆线波、斯托克斯波、椭圆余弦波等均是。余波的波形接近于规则波。

(4) 不规则波——波形极不规则，亦不周期性地重复，波面紊乱，前后各波的波高和波长不断发生变化的波浪，亦称随机波(图1-2)。风浪是一种不规则波。

(5) 上跨零点、下跨零点——图1-2为不规则波的定点记录曲线，亦即于固定点测取的水位(纵座标)对于时间(横座标)的过程线。水位由低到高与记录平均线或静水位线相交各点称为上跨零点；水位由高到低与记录平均线或静水位线相交各点称为下跨零点。

(6) 波峰——对规则波而言，波面曲线上的最高各点称为波峰(图1-1中A、C等

点)；对不规则波而言，定点记录曲线上相邻上跨(或下跨)零点间的最高水位点称为波峰(图1-2)。

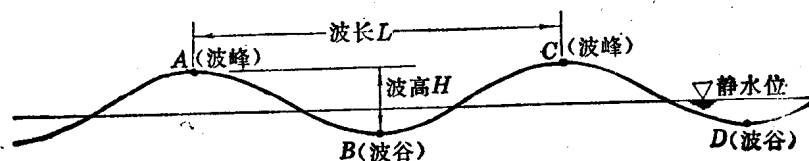


图 1-1 规则波的波面曲线

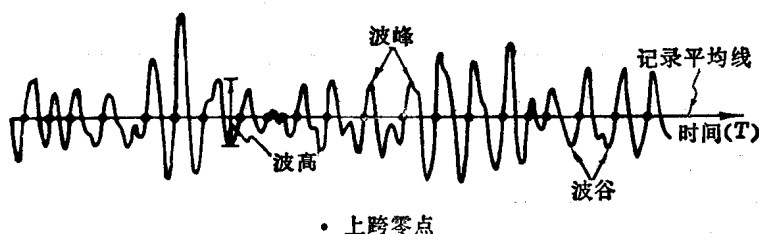


图 1-2 不规则波的定点记录曲线

(7) 波峰线——由表面水质点连成的一系列直线或光滑曲线，线上处处为波峰。

(8) 波向线——与波峰线处处垂直的一系列直线或光滑曲线，表示波浪的传播方向。

(9) 波谷——对规则波而言，波面曲线上的最低各点称为波谷(图1-1中B、D等点)；对不规则波而言，定点记录曲线上相邻上跨(或下跨)零点间的最低水位点称为波谷(图1-2)。

(10) 波高 H ——对规则波而言，波高是波峰与波谷间的垂直距离(图1-1)；对不规则波而言，相邻两上跨(或下跨)零点之间波峰与波谷间的垂直距离称为定点波高(图1-2)。

(11) 波长 L ——对规则波而言，波长是相邻两波峰或相邻两波谷之间的水平距离(图1-1)；对不规则波而言，在固定时刻 t ，沿波浪传播主方向测取波面曲线，其图形与图1-2所示的曲线相仿，但横轴为距离。如对波面曲线仿定点记录曲线定义上跨零点、波峰与波谷，则波长的定义同上。而相邻波峰(或波谷)或相邻上跨(或下跨)零点间水平距离的平均值可定义为平均波长。

(12) 波周期 T ——对规则波而言，波周期为波峰沿波浪传播方向移动一个波长距离所经历的时间间隔，或相邻两波峰经过同一固定观测点所经历的时间间隔；对不规则波而言，波周期为定点记录曲线上相邻两波峰(或波谷)或相邻两上跨(或下跨)零点之间的时间间隔，而相邻波峰(或波谷)间时间间隔的平均值或相邻上跨(或下跨)零点间时间间隔的平均值可定义为平均波周期。

(13) 波速 c ——波面形态在表观上的移动速度，称为波浪传播速度，简称波速。

$$c = \frac{L}{T}.$$

(14) 波浪要素——波高、波长、波周期或波速综称为波浪要素或波要素。

(15) 波群——波高大于某一规定值的若干个连续的波浪。

(16) 波浪陡度、波浪坦度——波高对波长的比值称为波浪陡度，简称波陡；波陡的倒数，即波长对波高的比值称为波浪坦度，简称波坦。

(17) 波龄——波速对风速的比值称为波龄。

(18) 风区——在风力作用下的水域，其中各点的风速风向大致不变。

(19) 风时——风区内风吹的延续时间，一般以h计。

(20) 吹程 F ——风区上下沿之间的距离。如观测点位于风区之内，则吹程为沿风吹方向自风区的上风边界至观测点的距离。当整个水域均在风区内时，吹程为沿风吹方向自对岸至观测点的距离。

(21) 非恒定波——某点的风浪要素尚未稳定，随时间继续增长时，则该点的波动称为非恒定波。在一定风速下，非恒定波波要素的大小，取决于吹程和风时。

(22) 定常波——某点的风浪要素已臻稳定，不随时间继续增长时，则该点的波动称为定常波。在一定风速下，定常波波要素的大小取决于吹程。由于定常波对工程建筑物的作用较非恒定波为强烈，重要的工程，在确定波浪要素时，常以定常波作为研究对象，以确保工程建筑物的安全。

(23) 最小风时——风速一定的风，在给定的吹程下产生定常波所需的最短风时。

(24) 最短吹程——风速一定的风，吹给定的风时产生最大尺寸的波所需的最小吹程。

(25) 充分成长波——当吹程和风时均足够大，在一定风速下所能达到的尺度最大的波浪称为充分成长波。产生充分成长波所需的最短吹程和最小风时取决于风速。例如，设风速为40kn，则风浪充分成长所需要的最小风时约为42h。

(26) 深水波——水深大于一半波长的水域内的波浪。

(27) 浅水波——水深小于一半波长的水域（包括过渡区及浅水区）内的波浪。

(28) 推进波——波形相对于介质作前进运动的波浪。波浪运动的方向称为波浪的传播方向，简称波向。

(29) 立波——水面在被称为节点的固定点之间作垂直振动的波浪。相对于介质，波形并不前进。水面升降幅度最大各点称为反节点或腹点。在节点、水质点的水平运动振幅最大，但无垂直运动。在反节点、水质点的垂直运动振幅最大，但无水平运动。立波亦称驻波。

(30) 振动波——水质点基本上只就地作振动，其平均位置并不改变或极缓慢地改变的波浪。水点的运动轨迹为一封闭曲线或近乎封闭的曲线。

(31) 移动波——水质点沿波浪传播方向一直向前作显著移动，并不回到其原来位置的波浪。

(32) 质量输送——振幅并非无限小的振动波，水质点的运动轨迹虽近乎封闭，但仍沿波浪传播方向缓慢前进。由此而产生的水体沿波向的非周期性净输送量称为质量输送。

(33) 孤立波——整个波面全在静水位以上的单独一个波浪。孤立波系一种移动波。

(34) 有效波周期——在一定时段中，天然波系内1/3个最大波浪的平均周期。通常

系就一定时段中较大而明显的各波的周期取平均值求得。

(35) 有效波高——在一定时段中, 天然波系内 $1/3$ 个最大波浪的平均波高。在确定有效波高时用以取平均值的波数, 通常系由一定时段除以有效波周期再除以 3 求得。

(36) 有效波——天然的风浪为一不规则的波系。即使于短时间内在固定观测点所得的波高与波周期, 亦随时间不断发生变化。但观测资料的统计分析和理论分析表明, 波高与波周期的变化, 具有一定的分布规律。就工程问题而言, 往往可采用某种规则波系, 使其对建筑物的作用, 与天然不规则波系相近似, 如此可使问题得到简化而便于实际应用。有效波即系经常采用的一种假想的规则波系。有效波的波高和波周期分别等于有效波高和有效波周期。经验表明, 目测较大波的观测人员所记录的波高和波周期, 与有效波的相应值大体相当。

(37) 表面波——上层流体的密度与下层流体的密度相比可以略而不计时, 在两层流体交界面上的波浪称为表面波。

(38) 内波——上层流体的密度与下层流体的密度相比不能略而不计时, 在两层流体交界面上的波浪称为内波。两层流体可以为同一种流体, 例如温度或含盐量不同的水体。

(39) 自由波——由瞬时作用后随即消失的扰动力产生, 并在介质中自由传播的波浪。其性质取决于介质的特性, 而与扰动力的特征无关。余波的性质类似于自由波。

(40) 强制波——在扰动力连续作用下的波浪。其性质取决于扰动力的特征, 并受传播介质的影响。潮波为一种强制波, 但同时受水的惯性和地形的影响。风浪既非完全的强制波, 亦非完全的自由波, 而是自由波和强制波的复杂的综合体。

(41) 海啸——海啸是地震活动(例如海底火山爆发、断层滑移等)而引起的长周期表面波。由于波长极大, 其波速远较风浪为大。例如, 来自阿留申群岛于1946年4月1日到达夏威夷的海啸, 以 $4\text{ h } 32\text{ min}$ 历经 1950 n mile 的路程, 其波速约为 215 m/s , 波长约为 100 n mile 。通常在海洋中, 海啸的波高不过 $1、2\text{ m}$ 。由于波陡极小, 不易为人觉察。只在浅水中由于波浪变形才成为破坏性的壁立水体, 以与波形相同的速度前进。

第三节 规则波的常用公式

在设计波浪作用下的工程建筑物时, 常需根据不同的波浪理论, 进行有关波形、波要素、水质点的速度和加速度、水质点的运动轨迹、波压力以及波浪的能量和功率等方面的运算。本节汇列规则波的某些常用公式, 以便参考应用。

在本节所列公式中, 除特别说明者外, 座标轴选取如下: 水平座标 x 轴沿波浪传播方向, 并与静水位相重合。 $+z$ 轴垂直向上。并令时间 $t=0$ 时在座标 $x=0$ 处出现波峰。

一、线性波理论

线性波理论亦称微幅波理论、正弦波理论或Airy波浪理论^[6], 是最常用的和最基本的振动波理论。这一理论, 虽以振幅无限小的波动为研究对象, 但能解决波陡较小时深水区及过渡区的大多数工程实际问题。经验表明, 即使水深较浅, 波高较大, 应用线性波

理论亦往往能获得具有一定精度的解答。此外，实际的风浪可作为波向和周期（或频率）不同、大小有别、相位随机的无数微幅波的叠加来处理。因此，对于不规则波而言，线性波理论亦是一种基础理论。

线性波理论的基本假设是流体系均质的、不可压缩的和无粘性的；自由面压力为常值，水底为水平的、固定的和不透水的；波幅和波陡均极小；流体在重力作用下作无涡的或无旋的运动。

对于堤坝防浪护坡而言，主要涉及的为推进波。下面以介绍推进波理论为限，立波理论从略。

（一）波形

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \right] \quad (1-3)$$

式中 η —— 相对于静水位的波面高程；

H —— 波高；

L —— 波长；

t —— 时间；

T —— 波周期。

（二）波长和波速

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (1-4)$$

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (1-5)$$

$$L = cT \quad (1-6)$$

式中 c —— 波速；

d —— 水深；

g —— 重力加速度；

其余各符号的意义与式（1-3）同。

在深水区，式（1-4）和（1-5）分别简化为：

$$L_o = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (1-7)$$

$$c_o = \sqrt{\frac{gL_o}{2\pi}} = \frac{gT}{2\pi} \quad (1-8)$$

上列两式中各符号右下角标记“o”表示深水，以下仿此。

（三）水质点速度及加速度

$$u = \frac{\pi H}{T} \times \frac{\cosh \frac{2\pi(z+d)}{L}}{\sinh \frac{2\pi d}{L}} \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \right] \quad (1-9)$$