

波浪对海上建筑物的作用

李玉成 编著

海洋出版社

波浪对海上建筑物的作用

李玉成 编著

海洋出版社

1990年·北京

内 容 简 介

本书是关于波浪对海上工程设施作用的专著。书中总结了国内外和作者的新近研究成果，内容新、实用性较强。系统的分析评述有助于读者对内容的理解。

全书分五章。第一、二章为波浪对防波堤和海堤的作用；第三章为波浪传递过程中的能耗计算和波浪遇障碍时反射量的分离计算方法；第四章为波浪对桩柱结构的作用；第五章为波、流联合作用问题。

本书适于海洋工程、技术人员使用。

责任编辑 赵士青

责任校对 刘兴昌

波浪对海上建筑物的作用

李玉成 编著

*

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街1号）

新华书店北京发行所发行 科仪印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：11.25 字数：280千字

1990年12月第一版 1990年12月第一次印刷

印数：1—2000

*

ISBN 7-5027-0494-9/Z·103 ¥：7.50元

序 言

近几十年以来，港口、海岸及海洋工程的发展极为迅速。波浪是海上建筑物所经受的最主要的动力荷载，是设计海上工程时所需考虑的关键因素。随着海上工程技术的发展，这方面的科学研究工作也得到了很大发展。然而迄今国内外，特别是国内，还很少有论著专门阐述波浪对海上建筑物的作用。

本书的目的旨在比较系统地介绍国内外学者在这方面的的工作，特别是近期的新成果以及它们的实际应用。一方面将就所论述问题的历史沿革、各国的研究成果作一个综合论述，以利读者对其有一个历史的全面了解，另一方面也着重叙述它们在工程上的实际应用方法。作者希望此书将有助于读者在了解已有成果的基础上进行新的研究和探索，并有助于读者在工程实际中正确地理解和应用现有的研究成果。

防波堤、开敞式码头、海堤及海上平台是目前国内最常见的海上建筑物，就其结构型式而言，它们分别属于直立堤、混成堤、斜坡堤，以及各种布置型式的柱状结构。由于结构型式的不同，建筑物前的波浪形态和波浪对建筑物的作用也各异。在本书的第一、二和四章中讨论了波浪对直立堤（包括混成堤）、斜坡堤和柱状结构的作用。此外，波浪在传播过程中的能量损失问题，波浪与水流的相互作用问题也是在海上工程问题中经常遇到而在文献中却尚少系统论述。在本书第三章中对波浪传播过程中的能量损耗及遇障碍的反射量问题进行了论述。在第五章中对波浪与水流共同作用下的诸问题作了分析。同时，为了便于读者的理解和应用，在每章的最后部分均附有典型算例。

在本书的编写过程中得到了大连工学院土木系和海洋工程研究所的大力支持。书稿承国家海洋局梁其荀总工程师在百忙中予以认真和细致的审校，在此一并深致谢意。

作 者

1985年12月25日

目 录

第一章 直立堤前的波浪形态和波浪力	(1)
§ 1.1 直立堤及混成堤前的波浪形态	(1)
1.1.1 浅滩上的波浪变形与有堤时的差别	(1)
1.1.2 直立堤前波浪破碎的类型及其成因	(2)
1.1.3 直立堤前的波态及其界限	(4)
§ 1.2 立波波浪力	(5)
1.2.1 Rundgren 方法	(6)
1.2.2 Загрядская 方法	(7)
1.2.3 合田良实方法	(10)
§ 1.3 破波波浪力	(18)
1.3.1 概述	(18)
1.3.2 我国交通部海港工程技术规范所采用的方法	(19)
1.3.3 国外几种常用的破波波压力计算方法	(23)
1.3.4 日本港湾设计基准 1979 年采用的新方法	(27)
§ 1.4 直立堤不规则波波浪力的计算	(29)
1.4.1 直立堤不规则波波浪力的确定方法	(29)
1.4.2 堤前不规则波波要素的确定方法	(30)
§ 1.5 直立堤堤顶越波量的计算	(34)
1.5.1 越堤水体所产生的波动的估计	(34)
1.5.2 越波量计算	(35)
§ 1.6 透空消浪结构	(37)
例题	(45)
参考文献	(48)
第二章 斜坡堤上的波浪作用	(51)
§ 2.1 概述	(51)
§ 2.2 护面块体重量的确定	(52)
§ 2.3 斜坡堤的爬高计算	(56)
§ 2.4 斜坡堤越波量的估算	(61)
§ 2.5 斜坡面上波压力分析	(64)
§ 2.6 混成堤基础块石稳定重量的计算	(66)
例题	(70)
参考文献	(71)
第三章 波浪传播过程中的能量损耗及遇障碍的反射计算	(73)
§ 3.1 紊动损失的计算	(73)
§ 3.2 底摩阻损失的计算	(73)

§ 3.3	底部渗透所造成的能量损失	(75)
§ 3.4	障碍物的反射波的分离计算法	(76)
例题	.....	(82)
参考文献	.....	(83)
第四章	波浪对柱状结构物的作用	(84)
§ 4.1	概述	(84)
§ 4.2	柱体的绕流现象	(85)
§ 4.3	作用于小直径柱体上的波浪力——莫里森方程	(87)
§ 4.4	速度力系数 C_d 及惯性力系数 C_m 的确定	(89)
4.4.1	分析计算 C_d 及 C_m 值的几种方法	(89)
4.4.2	影响 C_d 及 C_m 值的诸因素	(91)
4.4.3	将 C_d 及 C_m 值视为相角 θ 的函数	(97)
4.4.4	工程实用上建议采用的 C_d 及 C_m 值	(98)
4.4.5	对莫里森方程的评价	(102)
§ 4.5	实体墙对柱体受力系数的影响	(103)
§ 4.6	作用于柱体上的横向力及 Strauhl 数 (St)	(106)
§ 4.7	小直径柱群上所受的波浪力	(108)
§ 4.8	作用于大直径柱体上的波浪力	(109)
§ 4.9	作用于柱体上的不规则波波浪力	(112)
4.9.1	特征波法	(112)
4.9.2	谱分析法	(113)
4.9.3	概率分析法	(115)
例题	.....	(117)
参考文献	.....	(120)
第五章	波浪与水流的共同作用	(121)
§ 5.1	概述	(121)
§ 5.2	二元问题的规则波变形	(121)
§ 5.3	二元问题规则波的速度场	(128)
§ 5.4	波与流斜交时规则波的变形	(131)
§ 5.5	平缓海底上规则波变形的二元问题	(138)
§ 5.6	平直海岸上波与流共同作用下的规则波变形	(142)
§ 5.7	水流影响下的波浪谱变形	(149)
5.7.1	波浪谱变形的一维问题	(150)
5.7.2	斜向流作用下的波浪谱变形	(154)
5.7.3	波能方向分布对波浪谱在水流中变形的影响	(155)
§ 5.8	平直海岸上波浪频率谱在水流作用下的变形	(157)
§ 5.9	波与流共同作用下桩柱的受力	(165)
例题	.....	(168)
参考文献	.....	(170)
中外文人名对照表	.....	(172)

第一章 直立堤前的波浪形态和波浪力

直立堤是港口及海岸防护工程中最常用的一种结构型式。在海上建造此类建筑物，将改变其前方海域上所出现的波浪形态，从而影响波浪对建筑物的作用力，并改变它对海岸演变所产生的影响。在本章中就将直立堤前可能出现的各种波浪形态、它的特性和出现的条件以及波浪力等问题进行阐述。

§ 1.1 直立堤及混成堤前的波浪形态

1.1.1 浅滩上的波浪变形与有堤时的差别

当波浪由深水正向行近岸滩时，由于水深的减小，波速与波长均减小，波能传递速度则增大，从而波高将发生较复杂的变化过程。开始时波高略减，而后增大，因此总的趋势波陡将逐渐增大。另外，由于浅水区波峰处的波速将大于波谷处的波速，波形在传播过程中将逐渐趋于不对称，波前陡而波背缓，因而最终波浪将在临界水深处破碎。如果沿程的岸滩相当平缓或者海底的渗透性较强，则同时还产生底部的摩擦损耗或渗透损耗。在整个波浪传播过程中，人们往往特别关心临界水深的确定及其影响因素的分析。

根据波浪理论关于浅水变形的分析，不同深水波陡的临界水深是不等的，如图 1.1 所示。陡波由于其波形较陡，变形后将较快地达到极限值，因而易于破碎。由图 1.2 可见海

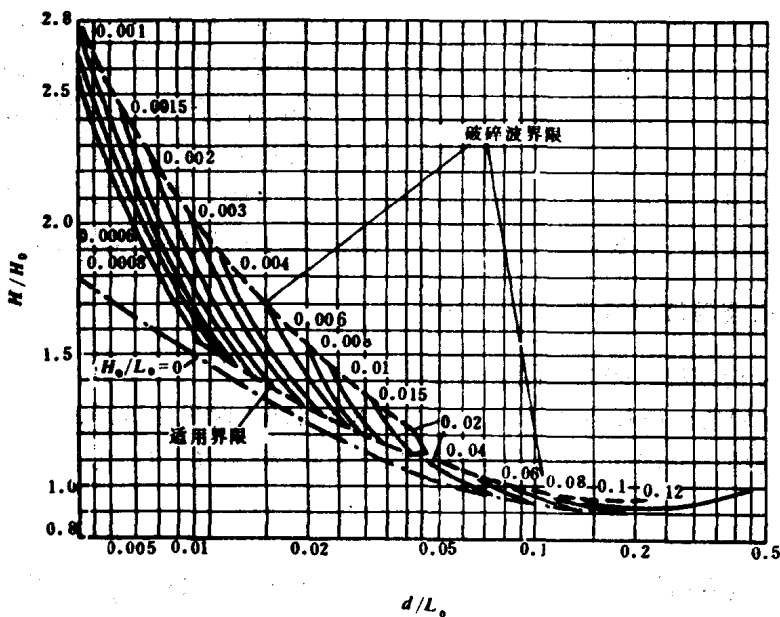


图 1.1 岸滩上的波浪变形

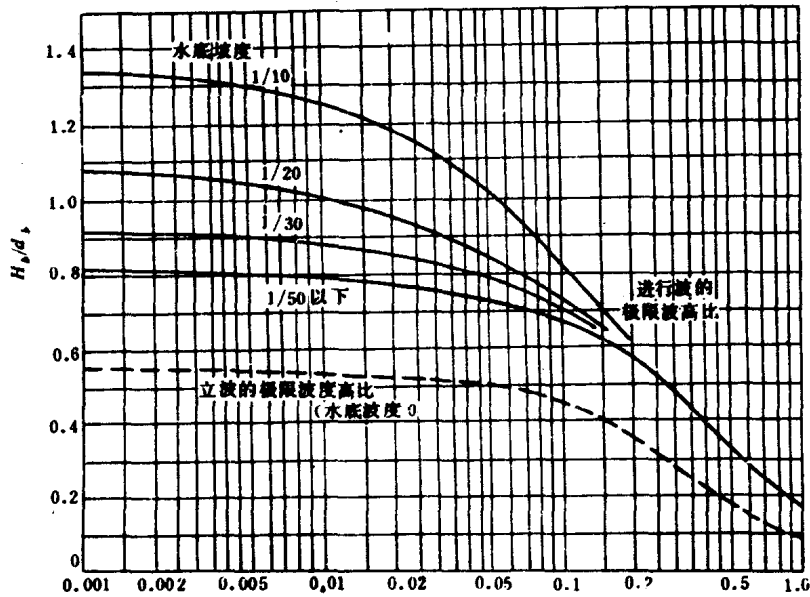


图 1.2 岸滩上的极限波高

底底坡较陡时波浪能量的损失较少，破碎时所达的极限波高较大。由该图可见在不同条件下极限波高与临界水深之比 H_b/d_b 的变幅约为 0.7—1.3，或 $d_b = (0.78—1.43) H_b$ 。传统上由孤立波理论可得 $H_b = 0.78d_b$ ，亦即在天然岸滩上陡波易于破碎，通常可约取 H_b 为 $0.8d_b$ 。

当在天然岸滩上建造直立堤之后，波浪遇堤即发生反射，在堤前形成入射波与反射波的叠加，从而发生二组波系的能量叠加。能量叠加后堤前破碎的条件就与无堤时不同。由于堤前波能及波高的增大，波浪将更易于发生破碎，即破碎时的 H/d 值将减小或 d/H 值将增大。此外一个波长内所含波能按线性理论为 $1/8\gamma H^2 L$ ，即波长 L 愈长，所含波能愈大，则从能量观点看长波由于所含波能较大将易于发生破碎。因而可知有堤后波浪破碎的特点即为：破碎水深加大和长波易于破碎，与天然岸滩上的破碎有明显差别。

1.1.2 直立堤前波浪破碎的类型及其成因

在天然岸滩上分析波浪破碎的成因大体有：

1. 波顶角达到极限值：斯托克斯指出，波顶角等于 120° 时发生破碎。
2. 波陡达到极限值：Michell 指出深水极限波陡为 0.142 即 $1/7$ ，浅水时为 $0.142 \tanh \frac{2\pi d}{L}$ 。
3. 波峰顶水质点速度达到极限——等于波速：按孤立波理论可得 $H_b = 0.78d_b$ 。
4. 波前倾角达到极限——近于垂直静水面。

以上这些分析方法对于分析直立堤前波浪的破碎可作为借鉴。根据我们的研究①，可将直立堤建筑前波浪的破碎区分为如下几种状况：

一、深水情况，直立堤光滑全反射时

此时可利用极限波陡及极限波顶角的概念来进行分析。堤面为全反射时波高加倍，波长不变则波陡加倍，我们的实验证明深水立波的极限波陡仍为 0.142 即 $1/7$ ，相应的推进波陡为 $1/14$ ，大于该波陡的推进波传至直立堤后其立波将破碎。我们的观测也证明这时立波的波顶角也近于 120° 。此时波峰特别尖突，峰顶处波形不保持连续而上溅。这种破碎称为立波破碎。

二、水深较浅，海底坡度较平缓，建筑物全部为直立堤结构——工程上称之为“暗基床”情况⁽¹⁾

设直立堤光滑而形成全反射，因海底平缓而不计其对波浪反射的影响。堤的反射增加了堤前的波浪能量，当堤前水深不断减小时，波能密度将不断增大而最终将不能维持以致破碎，通过破碎而消耗其能量。波浪发生反射后，堤前有腹点（离堤面距离为 $n \cdot \frac{L}{2}$ ）和节点（离堤面距离为 $(2n+1) \frac{L}{4}$ ）。腹点处振幅最大，瞬时位能的极值与变化最大。因此，当水深减小时，波浪破碎的位置即发生于此，即破碎点离堤至少为半波长，或为其倍数。这种破波定义为远堤破波，简称远破波。如果海底坡度平缓，水深变化缓慢，则第一个破碎点将远离堤面；如海底坡度较陡，水深变化快，则第一个破碎点可移至堤前半波长处。可见海底陡度对远破波具有显著影响。

形成远破波的条件可见图 1.3。由图可见随着波陡的减小，破碎水深将增大。计算表明此分界线恰为一等波能线。平均而言，破碎水深近于 $2H$ 。所以作为工程应用，可近似地取 $2H$ 为远破波的破碎水深。

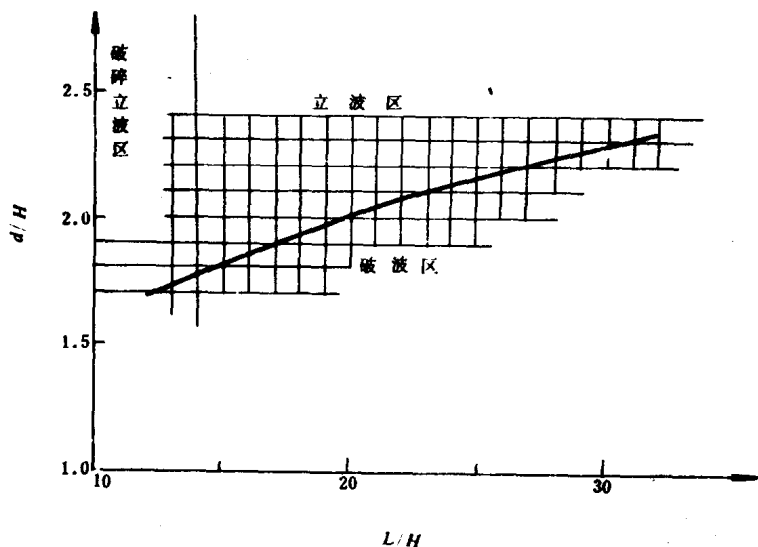


图 1.3 远破波形成条件

①大连工学院水利系海港水文规范小组：直立堤前波浪界限和破碎水深，台风波浪对海岸工程的作用技术讨论会技术报告汇编，1973年。

三、建筑物为混成堤时——上部为直立堤结构，下部为突出海底的抛石基础，工程上称为“明基床”情况

(一) 当抛石基础较薄 ($d_1/d > 2/3$, d_1 为基床上水深, d 为建筑物前水深, 通称为低基床) 时, 基础对波浪的影响较小, 与全直墙式建筑无明显差别, 此时堤前波浪形态可按暗基床情况考虑。

(二) 当抛石基床厚度较大时 ($d_1/d < 2/3$), 基床对波浪的传播发生明显的影响。这个影响表现为: 基床对波浪产生不规则和不完全的反射, 基床糙度及渗透所产生的波能损耗, 基床上水深迅速减小所造成的波浪急剧变形和波能密度的迅速增加。与暗基床和低基床相比, 波浪的反射率将随 d_1/d 值的减小而减小, 而波浪变形及能量密度增加的程度则迅速增大, 因而一般地波浪将在基床上破碎。由于基床的尺度通常都远小于波长, 波浪破碎点距直立堤的位置一般均小于半波长。这种破碎波称之为近堤破波, 简称近破波。明基床的高度对近破波的形成及其作用力有着明显影响, 因而其形成条件还可按基床高度的不同区分为以下两种情况:

(一) 中基床时 ($1/3 > d_1/d > 2/3$), $d_1 > 1.8H$ 时为立波, $d_1 < 1.8H$ 时为近破波;

(二) 高基床时 ($d_1/d < 1/3$), $d_1 > 1.5H$ 为立波; $d_1 < 1.5H$ 时为近破波。

实际上当基床很高时, 波浪的破碎将接近于斜坡上的波浪破碎。

综上所述, 直立堤前波浪破碎的形态与成因可归结为以下几种情况:

(一) 堤前水深甚大时, 由于入射波波陡过大, 立波波形不能维持, 波峰水体上溅而形成破碎立波。

(二) 堤前水深不足, 堤身反射造成堤前波能密度过大而形成波浪在腹点破碎的远破波。

(三) 混成堤基床与堤身反射形成波浪在基床上变形与破碎, 则形成破碎点离堤很近的近破波。

(四) 建筑物位于天然海滩的破波线近岸侧, 建筑物将受破后波的打击。

1.1.3 直立堤前的波态及其界限

根据前述我们的分析⁽¹⁾, 直立堤前的波态及其界限可概括如下, 交通部 1978 年颁布试行的海港水文规范采用了这一结果。

堤前波态划分为

1. 立波;

2. 远破波 (指在堤前半波长或指远处破碎的波浪);

3. 近破波 (指在堤面或其附近破碎的波浪)。

其出现条件如表 1.1 所示。

表 1.1 直立堤前波态分类及形成条件

基床类型	生成条件	波态
暗基床及低基床 $(\frac{d_1}{d} > \frac{2}{3})$	$d > 2H$	立波
	$d < 2H$ 且 $i'' > \frac{1}{10}$	远破波
中基床 $(\frac{2}{3} > \frac{d_1}{d} > \frac{1}{3})$	$d_1 > 1.8H$	立波
	$d_1 < 1.8H$	近破波
高基床 $(\frac{d_1}{d} \leq \frac{1}{3})$	$d_1 > 1.5H$	立波
	$d_1 < 1.5H$	近破波

注: 1) i 为海底坡度。

§ 1.2 立波波浪力

当直立堤有足够长度, 堤前水深较大, 波浪正向行近堤身并在堤前发生全反射时将形成立波。对于立波, 人类从理论与实验上已进行了长期的研究, 较早的有 Boussinesq 的微幅波理论解及深水有限振幅波的一次近似解。1928 年法国工程师 Sainflou 应用拉格朗日坐标系求得了浅水有限振幅波的一次近似解。由于过去直墙式防波堤多数建于浅水区, 且该方法简单易用, 所以几十年来一直为各国工程界所沿用。实践表明, 该方法在一定范围内具有相当好的精度, 其适用范围大体上是相对水深 $\frac{d}{L} = 0.135 - 0.20$, 波陡 $\frac{H}{L} > 0.035$ 。当 $\frac{d}{L}$ 较大时, 该方法往往给出过大的计算波浪力, 反之当 $\frac{d}{L}$ 很小时, 它又给出偏小的波浪力。因此目前在我国海港工程规范中限定 Sainflou 方法仅在 $\frac{d}{L} = 0.1 - 0.2$ 及波陡 $\frac{H}{L} > \frac{1}{30}$ 的范围内应用, 当 $\frac{d}{L} < 0.135$ 时应乘以一个大于 1 的修正系数。该方法所得波面高度为

$$\eta = +Z_0 + \frac{H \sinh k(d+z_0)}{\sinh kd} \sin \omega t \sin kx_0 + \frac{\pi H^2 \cosh k(d+z_0) \sinh k(d+z_0)}{L \sinh^2 kd} \sin^2 \omega t \cos 2kx_0 \quad (1.1)$$

波压力计算式为

$$\frac{p}{\rho g} = -z_0 + H \left[\frac{\cosh k(d+z_0)}{\cosh kd} - \frac{\sinh k(d+z_0)}{\sinh kd} \right] \sin \omega t \sin kx_0 \quad (1.2)$$

式中 $k = 2\pi/L$, $\omega = 2\pi/T$, x_0 及 z_0 为静止时水质点坐标, 坐标轴向上, 原点位于静水面, 在直墙面处 $\sin kx_0 = 1$ 。Sainflou 方法因其简便而乐于为人们所应用, 但它却有一些重要缺点: 第一, 如式(1.2), 该法计算的压强变化周期与波周期相同, 波峰时最大而波谷时最小, 而实际上当波陡较大时, 波峰区的压力过程线可呈马鞍形变化, 波峰顶时正压力并非极值; 第二, 在任意水深处, 该法所得波峰压强必然为正, 而实际上在深水区由于压

力的马鞍形分布有可能出现负值。这些现象都是波浪的非线性高阶项的影响所造成的。所以近二、三十年来各国学者分别在寻求更高阶的近似解。其中主要有 Miche⁽²²⁾ (采用拉格朗日坐标)、Biesel⁽²³⁾ (采用欧拉坐标)、Rundgren⁽²⁴⁾ (非全反射)和苏联 Кузнецов 的二次近似解, Tadjbakhsh and Keller⁽²⁵⁾ 和苏联 Загрядская⁽³⁸⁾ 的三次近似解, 日本合田良实⁽²⁶⁾ 的四次近似解, 国内的洪广文⁽³⁾ 及邱大洪⁽⁴⁾ 也曾对高阶近似解做过工作。日前在美国海岸防护手册⁽²⁷⁾ 中采用的是 Miche-Biesel 的二次近似解, 苏联 1975 年颁布的建筑标准与规范⁽³⁸⁾ (СНИП II-57-75) 中采用的是 Загрядская 三次近似解的图表, 日本规范⁽¹⁵⁾ 中采用了合田良实的统一波压力计算公式而非合田良实的四阶立波压力计算方法。以下就其中几种典型的非线性波方法予以概述。

1.2.1 Rundgren 方法⁽²⁴⁾

在拉格朗日坐标系中, 水面方程为

$$\begin{aligned} \eta = & -z_0 + \frac{H \sinh k(d+z_0)}{2 \sinh kd} [(1+\chi) \sin \omega t \sin kx_0 \\ & + (1-\chi) \cos \omega t \cos kx_0] + \frac{kH^2 \sinh 2k(d+z_0)}{16 \sinh^2 kd} \{ (1+\chi)^2 [\sin^2 \omega t \\ & + \frac{\cos 2kx_0}{4 \sinh^2 kd} (3 \cos 2\omega t + \tanh^2 kd)] \\ & + (1-\chi)^2 [\cos^2 \omega t + \frac{\cos 2kx_0}{4 \sin^2 kd} (3 \cos 2\omega t - \tanh^2 kd)] \\ & + (1-\chi)^2 \cdot \frac{3}{2} \sin 2\omega t \frac{\sin 2kx_0}{\sinh^2 kd} \} \end{aligned} \quad (1.3)$$

在堤面处

$$\begin{aligned} \eta = & \frac{H}{2} (1+\chi) \sin \omega t + \frac{kH^2}{8} \coth kd [(1+\chi)^2 (\sin^2 \omega t \\ & - \frac{3 \cos 2\omega t + \tanh^2 kd}{4 \sinh^2 kd}) + (1-\chi)^2 (\cos^2 \omega t - \frac{3 \cos 2\omega t - \tanh^2 kd}{4 \sinh^2 kd})] \end{aligned} \quad (1.4)$$

波浪中线对静水面的最大超高值 h_s 为

$$h_s = \frac{kH^2}{8} \coth kd [(1+\chi)^2 (\frac{3 - \tanh^2 kd}{4 \sinh^2 kd}) + (1-\chi)^2 (\frac{3 + \tanh^2 kd}{4 \sinh^2 kd})] \quad (1.5)$$

式中 χ 表示波浪反射系数, 当全反射时 $\chi = 1$, 无反射时 $\chi = 0$ 。

在欧拉坐标系中波压力计算式为

$$\begin{aligned} \frac{p}{\rho g} = & -z + \frac{H \cosh k(d+z)}{2 \cosh kd} [(1+\chi) \sin \omega t \sin kx + (1-\chi) \cos \omega t \cos kx] \\ & - \frac{kH^2}{16 \sinh kd \cosh kd} \{ (1+\chi)^2 \cos^2 \omega t [\cosh 2k(d+z) \\ & + \cos 2kx - 1] + (1-\chi)^2 \sin^2 \omega t [\cosh 2k(d+z) - \cos 2kx - 1] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (1-x^2)\sin 2\omega t \sin 2kx \} \\
& + \frac{3kH^2}{16} \frac{\cosh 2k(d+z)}{\sinh^3 kd \cosh kd} [(1+\chi^2)\cos 2\omega t \cos 2kx \\
& + (1-\chi^2)\sin 2\omega t \sin 2kx + \frac{\chi kH^2}{2} \tanh kd \cos 2\omega t
\end{aligned} \tag{1.6}$$

当取 $\chi = 1$ 即全反射时

$$\begin{aligned}
\frac{p}{\rho g} = & -z + H \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \sin \omega t \sin kx - \frac{1}{4} kH^2 \frac{\cos^2 \omega t}{\sinh kd \cosh kd} [\cosh 2k(d+z) \\
& + \cos 2kx - 1] + \frac{3}{8} kH^2 \frac{\cosh 2k(d+z)}{\sinh^3 kd \cosh kd} \cos 2\omega t \cos 2kx \\
& + \frac{1}{2} kH^2 \tanh kd \cos 2\omega t
\end{aligned} \tag{1.7}$$

式(1.7)即为 Biesel 的结果^[23]。

当采用拉格朗日坐标系统且取 $\chi = 1$ 时,波压力为

$$\begin{aligned}
\frac{p}{\rho g} = & -z_0 + H \frac{\sinh kz_0}{\sinh kd \cosh kd} \sin \omega t \sin kx_0 \\
& - \frac{kH^2}{8} \frac{\sinh kz_0}{\sinh^2 kd} \left\{ \cosh k(2d+z_0) (4\sin^2 \omega t + \frac{\cos 2kx_0}{\cosh^2 kd}) \right. \\
& + 4 \tanh kd \sinh k(2d+z_0) (1-3\sin^2 \omega t) \\
& \left. + 3 \cos 2\omega t \cos 2kx_0 \left[\frac{\cosh kz_0}{\sinh^2 kd} - \frac{2 \cosh k(d+z_0)}{\cosh kd} \right] \right\}
\end{aligned} \tag{1.8}$$

式(1.8)即为 Miche 的结果^[22]。如对它仅取一次近似,则式(1.8)即转化为 Sainflou 的压力公式(式 1.2)。

1.2.2 Загрядская 方法

该方法是对苏联 Сокерев — Зенькович 工作的发展,给出了全反射条件下立波波压力的三次近似算法。由于公式繁复,作者制作了实用图表,这一方法在苏联 1975 年颁布的建筑标准与规范^[38]中得到应用。

一、深水情况

$$\begin{aligned}
\text{波压 } \frac{p}{\rho g} = & H e^{-kz} \cos \omega t - \frac{kH^2}{2} e^{-2kz} \cos^2 \omega t - \frac{kH^2}{2} (1 - e^{-2kz}) \cos 2\omega t \\
& - \frac{k^2 H^3}{2} e^{-3kz} \cos 2\omega t \cos \omega t
\end{aligned} \tag{1.9}$$

波面离静水位

$$\eta = H \cos \omega t + \frac{kH^2}{2} \coth kd \cos^2 \omega t \tag{1.10}$$

当 $z = -\eta_{\max}$ 时,必需令该处波压强 $p = 0$ 。

式(1.9)及式(1.10)中时间的取值为

自由水面最高时 $\cos\omega t = 1.0$;

自由水面最低时 $\cos\omega t = -1.0$;

波压强最大时 $1 > \cos\omega t > 0$ 及

$$\cos\omega t = \frac{L}{\pi H(8\pi \frac{d}{L} - 3)} \quad (1.11)$$

上述各式中的水深 d 系指计算水深, 需按式(1.12)计算

$$d = d_1 + k'(d_w - d_1) \quad (1.12)$$

式中 d_w 为堤前水深, d_1 为直墙基床上水深, k' 由图 1-4 查取, 它取决于基肩宽与波长

之比 $\frac{b}{L}$ 及基床相对高度 (可以 $\frac{d_1}{d_w}$ 参数表示)。

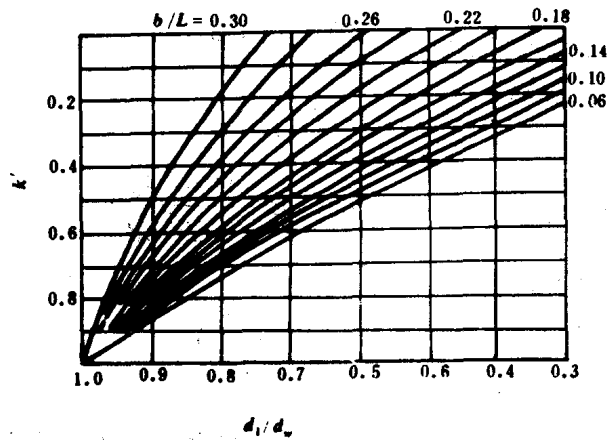


图 1.4 k' 相对 d/L 及 d_1/d_w 关系

二、浅水情况

可由表 1.2 及图 1.5 至图 1.7 决定。坐标原点在静水面, 向下为正。

表 1.2 蔡氏方法浅水条件波压值

计算点号		计算点位置	波压强 $p(T/m^2)$
波 峰	1	$-\eta_{max}$	0
	2	0	$k_2\gamma H$
	3	$0.25d$	$k_3\gamma H$
	4	$0.5d$	$k_4\gamma H$
	5	d	$k_5\gamma H$
波 谷	6	0	0
	7	η_{min}	$-\eta_{min}$
	8	$0.5d$	$-k_8\gamma H$
	9	d	$-k_9\gamma H$

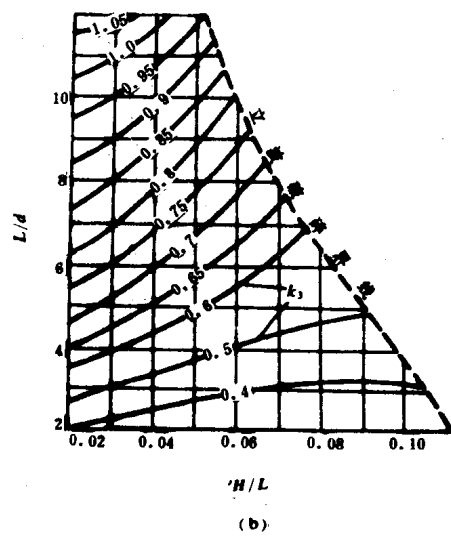
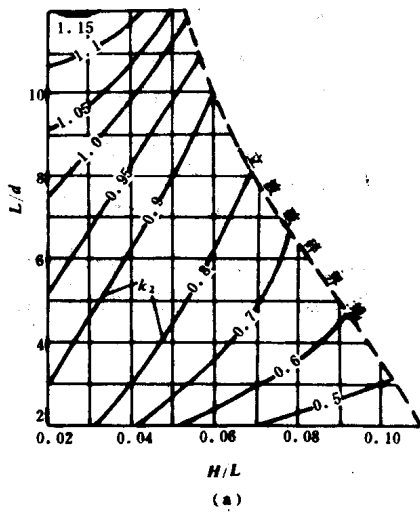


图 1.5
(a) k_2 系数; (b) k_3 系数

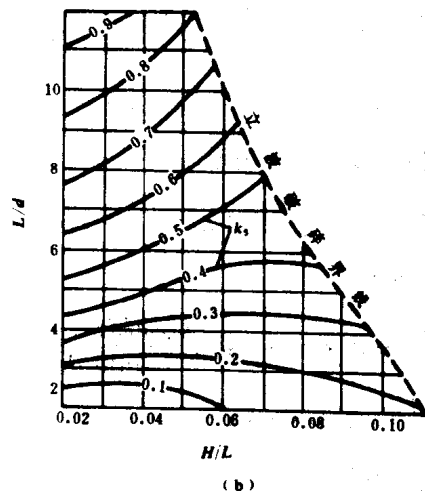
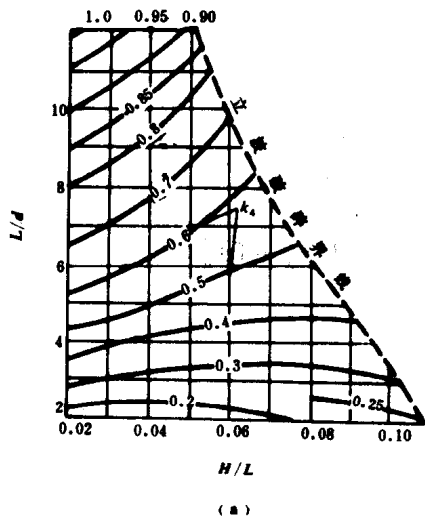


图 1.6
(a) k_4 系数; (b) k_5 系数

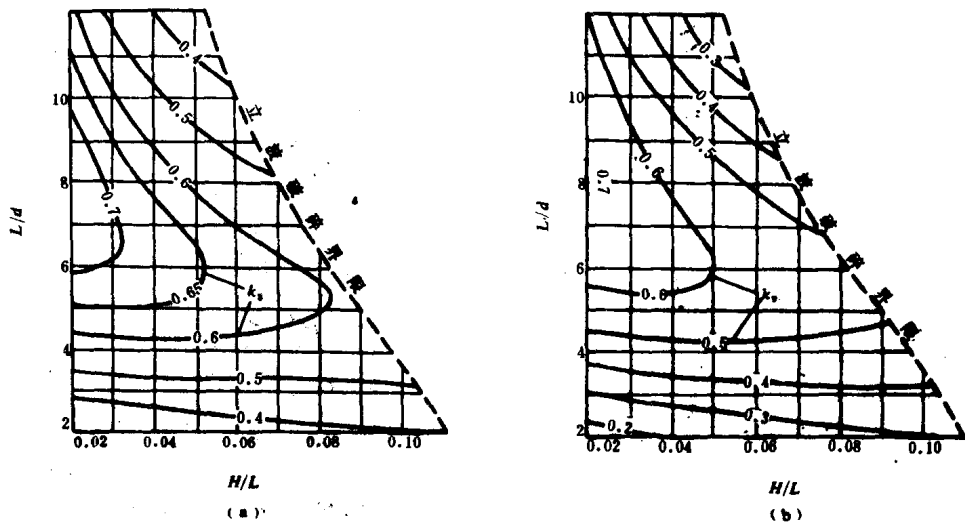


图 1.7

(a) k_0 系数; (b) k_1 系数

1.2.3 合田良实方法⁽²⁶⁾

该方法是对 Tadjbakhsh 及 Keller 所提出的立波三次近似解的发展, 系利用小参数的摄动法求解。速度势 φ , 波面值 η 及无量纲频率 $\sigma = \omega / \sqrt{kg}$ 分别可由小参数 ε 表述如下:

$$k\sqrt{\frac{k}{g}}\varphi = \varepsilon\varphi^{(0)} + \varepsilon^2\varphi^{(1)} + \frac{1}{2}\varepsilon^3\varphi^{(2)} + \frac{1}{6}\varepsilon^4\varphi^{(3)} + \dots \quad (1.13)$$

$$k\eta = \varepsilon\eta^{(0)} + \varepsilon^2\eta^{(1)} + \frac{1}{2}\varepsilon^3\eta^{(2)} + \frac{1}{6}\varepsilon^4\eta^{(3)} + \dots \quad (1.14)$$

$$\sigma = \sigma_0 + \varepsilon\sigma_1 + \frac{1}{2}\varepsilon^2\sigma_2 + \frac{1}{6}\varepsilon^3\sigma_3 + \dots \quad (1.15)$$

小参数 ε 由式(1.16)决定。

$$kH = \varepsilon + \frac{1}{256}\varepsilon^3 [27\sigma_0^{-12} + 27\sigma_0^{-8} + 96\sigma_0^{-4} - 63 + 11\sigma_0^4 + 6\sigma_0^8] \quad (1.16)$$

其一阶项为

$$\varphi^{(0)} = \sigma_0 \sin \omega t \cos kx \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \quad (1.17)$$

$$\eta^{(0)} = \cos \omega t \cos kx \quad (1.18)$$

$$\sigma_0^2 = \tanh kd \quad (1.19)$$

二阶项为

$$\begin{aligned} \varphi^{(1)} = & \beta_0 - \frac{1}{8}(\sigma_0^{-3} - \sigma_0)\omega t + \frac{1}{16}(\sigma_0^{-3} + 3\sigma_0)\sin 2\omega t - \frac{3}{16}(\sigma_0^{-7} \\ & - \sigma_0)\sin 2\omega t \cos 2kx \frac{\cosh 2k(z+d)}{\cosh 2kd} \end{aligned} \quad (1.20)$$

$$\eta^{(1)} = \frac{1}{8} [(\sigma_0^{-2} + \sigma_0^2) - (3\sigma_0^{-6} - \sigma_0^{-2})\cos 2\omega t] \cos 2kx \quad (1.21)$$

$$\sigma_1 = 0 \quad (1.22)$$

三阶项为

$$\begin{aligned} \varphi^{(2)} = & \beta_2 - \beta_{13} \sin \omega t \cos 3kx \cosh 3k(z+d) - \beta_{31} \sin 3\omega t \cdot \cos kx \cosh k(z+d) \\ & - \beta_{33} \sin 3\omega t \cos^3 kx \cosh 3k(z+d) \end{aligned} \quad (1.23)$$

$$\eta^{(2)} = b_{11} \sin \omega t \cos kx + b_{13} \sin \omega t \cos 3kx + b_{31} \sin 3\omega t \cos kx + b_{33} \sin 3\omega t \cos 3kx \quad (1.24)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{32} [9\sigma_0^{-7} - 12\sigma_0^{-3} - 3\sigma_0 - 2\sigma_0^5] \quad (1.25)$$

$$\text{式中 } \beta_{13} = \frac{1}{128 \cosh 3kd} (1 + 3\sigma_0^4)(3\sigma_0^{-9} - 5\sigma_0^{-1} + 2\sigma_0^3) \quad (1.26)$$

$$\beta_{31} = \frac{1}{128 \cosh kd} (-9\sigma_0^{-9} - 62\sigma_0^{-5} + 31\sigma_0^{-1}) \quad (1.27)$$

$$\beta_{33} = \frac{1}{128 \cosh 3kd} (1 + 3\sigma_0^4)(9\sigma_0^{-13} - 22\sigma_0^{-9} + 13\sigma_0^{-5}) \quad (1.28)$$

$$b_{11} = \frac{1}{32} (3\sigma_0^{-8} + 6\sigma_0^{-4} - 5 + 2\sigma_0^4) \quad (1.29)$$

$$b_{13} = \frac{1}{128} (9\sigma_0^{-8} + 27\sigma_0^{-4} - 15 + \sigma_0^4 + 2\sigma_0^8) \quad (1.30)$$

$$b_{31} = \frac{1}{128} (-3\sigma_0^{-8} - 18\sigma_0^{-4} + 5) \quad (1.31)$$

$$b_{33} = \frac{3}{128} (9\sigma_0^{-12} - 3\sigma_0^{-8} + 3\sigma_0^{-4} - 1) \quad (1.32)$$

四阶项为

$$\varphi^{(3)} = -\alpha_0 \omega t - \sum_{m=1}^2 \sum_{n=0}^2 \beta_{2m,2n} \sin 2m\omega t \cos 2nkx \cosh 2nk(z+d) \quad (1.33)$$

$$\begin{aligned} \eta^{(3)} = & (b_{02} + b_{22} \cos 2\omega t + b_{42} \cos 4\omega t) \cos 2kx \\ & + (b_{04} + b_{24} \cos 2\omega t + b_{44} \cos 4\omega t) \cos 4kx \end{aligned} \quad (1.34)$$

$$\omega_3 = 0$$

$$\text{式中 } a_0 = \frac{1}{256} (27\sigma_0^{-15} - 135\sigma_0^{-11} + 225\sigma_0^{-7} - 135\sigma_0^{-3} + 24\sigma_0 - 6\sigma_0^5) \quad (1.35)$$

$$\beta_{20} = \frac{1}{1024} (27\sigma_0^{-11} - 897\sigma_0^{-7} + 357\sigma_0^{-3} + 261\sigma_0 - 36\sigma_0^5) \quad (1.36)$$

$$\beta_{40} = \frac{1}{2048} (-54\sigma_0^{-15} - 621\sigma_0^{-11} + 555\sigma_0^{-7} + 705\sigma_0^{-3} - 201\sigma_0) \quad (1.37)$$

$$\begin{aligned} \beta_{22} = & \frac{1}{1024 \cosh 2kd} (1 + \sigma_0^4) (-81\sigma_0^{-19} - 54\sigma_0^{-15} + 171\sigma_0^{-11} - 469\sigma_0^{-7} + 184\sigma_0^{-3} \\ & - 81\sigma_0 - 54\sigma_0^5) \end{aligned} \quad (1.38)$$