

直立式码头越浪量及排水系统试验研究

李鑫丹¹, 王震¹, 王登婷², 刘建军²

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 通过断面及整体物理模型试验, 分别研究直立式码头的越浪量和排水系统, 并对有效波高、越浪量和排水系统进行对比分析, 结果表明断面模型试验具有局限性, 其测量结果普遍偏大, 整体模型试验结果更贴近实际情况。根据整体模型试验测量结果, 分析相对护轮坎顶超高及波浪入射方向对越浪量的影响, 以及排水系统对越浪的控制, 提出排水系统的优化方案, 为工程设计提供参考。

关键词: 有效波高; 越浪量; 排水系统; 直立式码头

中图分类号: TV 139.2⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0057-07

Test study on wave overtopping and drainage system of vertical wharf

LI Xin-dan¹, WANG Zhen¹, WANG Deng-ting², LIU Jian-jun²

(1. College of Harbor Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the sectional and overall model test, we carry out a research on the wave overtopping and drainage system of vertical wharf and make comparative analysis of the significant wave height, wave overtopping and drainage system, the results of which show that general measurement results of the sectional model test are larger than those of the overall model test, and the sectional model test has limitations while the overall model test tallies better with the actual situation. According to results of the overall model test, we analyze the influence of relative guard curbs freeboard and wave incident direction on the wave overtopping, and the control of wave overtopping on the drainage system, and propose the optimization scheme, which may serve as reference for the engineering design.

Keywords: significant wave height; wave overtopping; drainage system; vertical wharf

在港口建筑物的设计中, 供船舶停靠、装卸货物和上下旅客的码头, 广泛采用直立式结构, 直立式码头还具有装卸效率高、吞吐量大等优点。随着船舶大型化的发展, 深海码头将会成为未来码头发展的重点。我国对于码头面高程的确定一直采用不允许越浪作为标准, 一方面地基沉降导致码头面高程难以达到设计要求, 另一方面会导致码头结构设计时忽略越浪的排水措施, 在异常海况出现时会造成很大的灾害。对于集装箱码头、散货码头等, 装卸货物时吊具需要在舱内作业, 码头面高程若按不允许越浪作为标准将无

法满足机械作业的需求, 而对于邮轮码头等需要上下旅客的码头, 码头面高程过高会引起安全隐患。从20世纪50年代开始就有学者对越浪进行研究, 20世纪70年代日本合田良实^[1]建议按照允许越浪量作为控制条件确定护岸高程, 同时设置排水措施。

1 概述

越浪量可以定义为平均越浪量或者单波最大越浪量, 平均越浪量是指单位时间单位宽度上的越浪量, 由于其更适用于堤后的排水设计^[2], 因

收稿日期: 2014-01-10

作者简介: 李鑫丹 (1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为波浪及其与建筑物的相互作用。

此本文的研究主要针对平均越浪量。国内外关于平均越浪量的研究成果大部分针对斜坡式结构,深水直立式结构非常少见,尤其是在真实三维波浪条件下进行的研究。1953—1958 年 Saville 在二维规则波浪水槽内进行了一系列有关波浪爬高和越浪量的模型试验^[3-4];1977 年 Weggles 利用 Saville 的试验资料提出了规则波作用下的平均越浪量计算公式;1984 年 SPM^[5]采用此公式,并通过假设不规则波浪爬高服从瑞利分布,推求不规则波作用下的平均越浪量计算公式;1975 年 Goda 等^[6]根据二维不规则波模型试验及越浪计算成果,绘制了 12 幅越浪量推算表,考虑了两种结构形式(直立式护岸、消浪护岸)、两种海底坡度(1/10, 1/30)以及 3 种波陡(0.012、0.017、0.036),并于 1984 年最早提出了越浪海堤、护岸的受灾界限^[1];1994 年 Franco L. 等^[2]通过二维不规则波浪模型试验,研究沉箱式防波堤的越浪量,得到了直立式建筑物平均越浪量计算公式,该公式的系数与 van der Meer 等^[7]于 1994 年提出的关于斜坡式建筑物越浪量的计算公式吻合;1995 年, Franco C. 等^[8]通过三维波浪模型试验研究沉箱式防波堤的越浪量;1999 年, Franco C. 等^[9]重新分析二维尤其是三维模型试验结果,并综合 1994 年由意大利、丹麦和荷兰研究人员在 Delft 水力实验室中进行的三维模型试验结果,得到了包含波浪方向的减小因子和结构几何形状的校正因子在内的平均越浪量公式。

国内在此方面进行的研究很少。1985 年,卢无疆^[10]通过规则波作用下的断面模型试验,得到了直立堤堤前抛石时的越浪量估算公式;1992 年,俞聿修等^[11]在不规则波作用下的二维波浪水槽内,进行了直立堤和斜坡堤越浪量的试验研究,并提出了在 B-W 谱及 JONSWAP 谱作用下的不规则波越浪量与堤顶高的关系式;2007 年,俞聿修等^[12]专门针对直立堤做了整体不规则波浪模型试验,给出的平均越浪量公式考虑了相对堤顶高度、波向角、方向分布宽度、相对水深及深水波陡对平均越浪量的影响。

以上研究成果主要是基于室内物理模型试验,由于各公式考虑因素不同,计算结果也差别较大。

现行的 JTS 145-2—2013《海港水文规范》只给出了斜坡式建筑物平均越浪量计算公式,尚未给出直立式建筑物的有关公式。若按允许越浪量为标准确定码头面高程,一方面需要计算极端天气的越浪量,一方面需要在码头面设置越浪的排水设施,而在理论上实现对二者的研究是有困难的。我国对于码头面排水沟的应用也主要针对煤炭、矿石等散货码头对初期雨水的收集处理,因此通过物模试验对直立式码头的越浪量和排水系统做进一步研究是很有必要的。本文通过断面模型试验和整体模型试验,对比分析不规则波作用下断面及整体模型试验的波高、越浪量和排水情况,为工程设计提供参考依据。

2 模型试验

2.1 断面模型

试验依据 JTJ/T 234—2001《波浪模型试验规程》相关规定,采用正态模型,按照 Froude 数相似律设计,模型几何比尺取为 1:38。试验在波浪水槽中进行,水槽长 175 m,宽 1.2 m,深 1.8 m,可同时产生波浪、水流和风。水槽的工作段分割成 0.6 m 和 0.6 m 两部分,0.6 m 宽的部分用来安放模型断面和进行模型试验,另一部分用于扩散造波板的二次反射波。水槽的一端配有消浪缓坡,另一端配有推板式不规则波造波机,由计算机自动控制产生所要求模拟的波浪要素,本试验中采用的不规则波浪谱为 JONSWAP 谱。波浪要素采用电阻式波高仪测量,由计算机自动采集和处理。接水器宽度为 0.2 m,平均越浪量即为一个波列单位时间内越过单位宽度堤顶的波浪体积。每次试验重复 3 次,取 3 次平均值作为试验结果。

试验时在水槽内放置模型断面,断面采用直立式沉箱结构(图 1)。港池底高程为 -15.6 m,码头面顶高程为 4.80 m,码头前沿线位置设置护轮坎,其高程为 5.5 m。试验波要素采用数模计算结果^[13],港外设计波要素利用波浪折射绕射

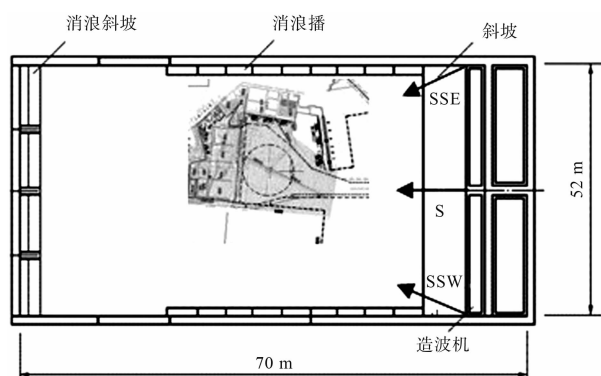


图3 整体模型试验平面布置

表2 整体模型试验组次

护轮坎顶 高程/m	水位/ m	波浪重 现期/a	SSE		S		SSW	
			H_s/m	$\bar{T}/s$	H_s/m	$\bar{T}/s$	H_s/m	$\bar{T}/s$
5.50	4.08	50	4.4	9.8	4.6	9.8	3.1	8.3
	3.38	10	3.7	8.8	3.9	8.8	2.6	7.2
	2.05	50	4.1	9.8	4.4	9.8	3.0	8.3

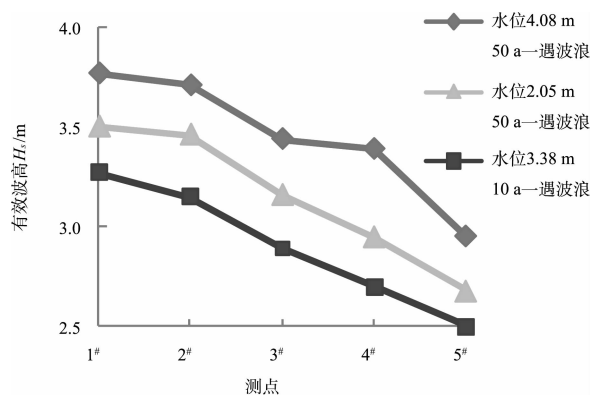
注：有效波高 H_s 为整体试验实测值。

3 试验结果对比与分析

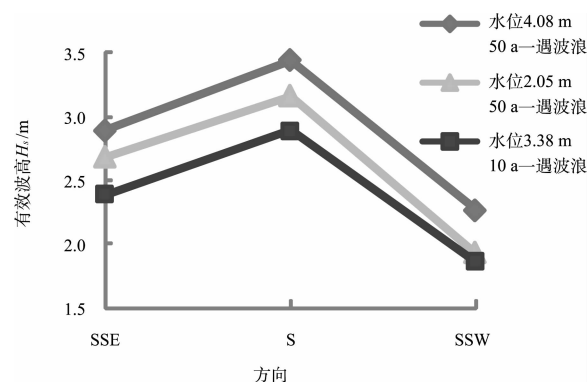
3.1 码头前沿波高测量结果对比与分析

相对护轮坎顶超高是越浪量及码头面排水情况的决定性影响因素，试验中护轮坎及码头面高程不变，水位变化，且波浪重现期不同，为了分析断面和整体试验越浪量以及排水情况，整体试验中对码头前沿的5个设计波要素测点进行了测量，测得的有效波高只能代表该点在某水位及波要素情况下的波高（图4）。

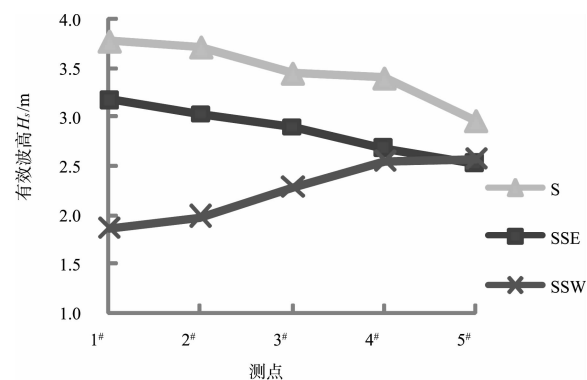
1) 断面试验有效波高与整体试验（S向）有效波高对比分析：由表1中6组断面试验波要素和图4a）中的3个系列可以看出，在东侧防波堤的掩护作用下，断面试验中面对口门的泊位A处的波高大于泊位B处的波高，整体试验中波浪重现期对有效波高影响较大，水位2.05 m时测得的有效波高大于同测点水位3.38 m的情况，码头前沿波高由西侧到东侧有减小的趋势。在波浪正向作用且无防浪设施的情况下，断面试验采用的数模计算结果与整体试验的实测结果相近，在有防波堤掩护的区域，整体试验中由于波浪在港区内发生了多次反射，实测波高大于断面试验的数模计算结果。



a) S向波浪作用下



b) 3#测点



c) 不同方向波浪作用下

图4 有效波高分布

2) 整体试验同一测点不同方向波高对比分析（选取3#测点）：由图4和图5中的3个系列可以看出，当波浪正向作用于港区时，入射波浪沿着中突堤的直立面向前传播，遇到码头面发生反射，并与入射波叠加，使得在S向波浪作用下码头前沿有效波高最大，其次是SSE向，入射波浪进入口门后首先在中突堤发生反射，继而在港内发生多次反射，波高叠加，SSW向波浪作用时，波浪传播到东侧码头时才在该处发生反射，传播距离

较远, 码头前沿测得的有效波高最小。图 4b) 中 3 个系列的对比可以看出水位 2.05 m 时测得的有效波高仍然大于同测点水位 3.38 m 的情况。

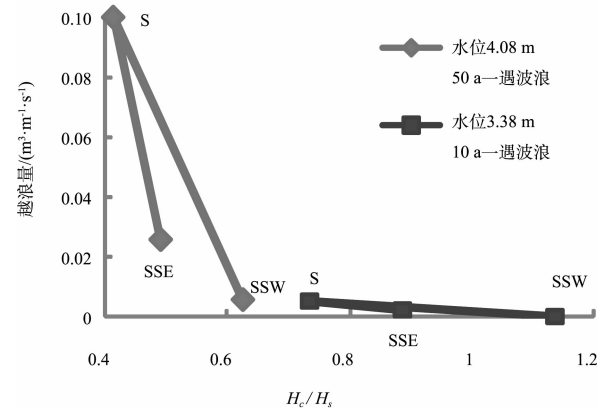
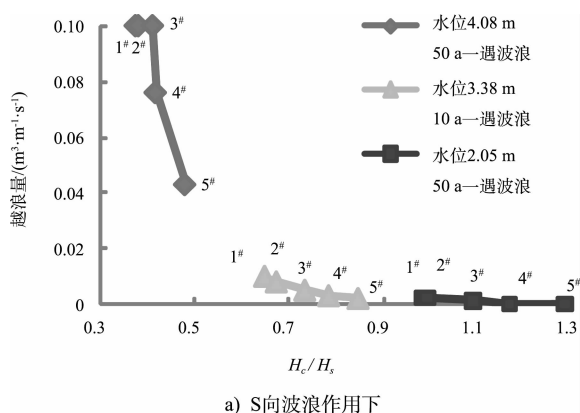
3) 整体试验不同方向波浪作用下直立式码头前沿波高分布 (选取水位 4.08 m): 由图 4c) 的 3 个系列可以看出, 在 S 向和 SSE 向波浪作用下, 由于防波堤的掩护作用, 码头前沿有效波高由西侧到东侧逐渐减小, 在 SSW 向波浪作用下, 由于波浪不受防波堤影响且中突堤对其影响较小, 波浪斜向进入港区, 传播过程中在东侧码头发生反射, 波高叠加, 因此码头前沿有效波高由西侧到东侧逐渐增加。表 2 中, 口门处 SSW 向有效波高明显小于另外两个方向, 即使有效波高在码头前沿的实测值呈增加趋势, 也小于同测点在另外两个方向波浪作用下的有效波高。

3.2 越浪量测量结果对比与分析

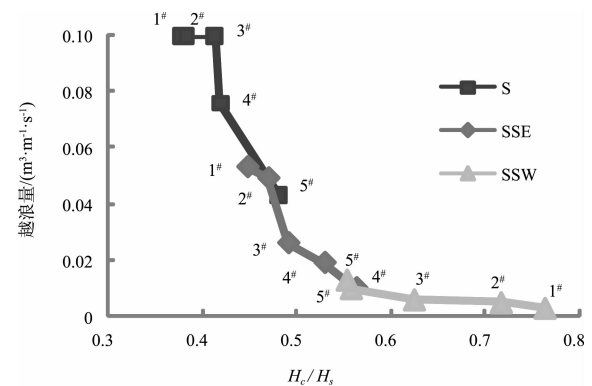
断面模型试验越浪量测量结果见表 3, 当越浪量大于 $0.1 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 时, 码头面的越浪足以对后方堆场构成严重影响, 需要对排水系统进行复核, 因此在图 5 中使用 $0.1 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 来代替所有大于该数值的越浪量。 H_c 为护轮坎顶在静水面以上的高度。

表 3 断面模型试验越浪量测量结果

水位/m	波浪重现期/a	泊位	H_s/m	越浪量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
4.08	50	A	3.9	>0.100
		B	2.8	0.090
3.38	10	A	3.2	0.015
		B	1.9	0.004
2.05	50	A	3.5	0.005
		B	2.3	0



b) 3#测点



c) 不同方向波浪作用下

注: 有效波高 H_s 为整体试验实测值, H_c/H_s 为相对护轮坎顶超高。

图 5 越浪量分布

1) 断面试验与整体试验 (S 向) 越浪量对比分析: 由表 3 中 6 组断面试验的越浪量和图 7 中的 3 个系列可以看出, 水位 2.05 m 时越浪量可以忽略不计, 因此不对此种情况做讨论, 在断面试验中有效波高较大的泊位 A 处越浪量大于 B 处, 在整体试验中越浪量随着相对护轮坎顶超高减小而显著增加。在断面试验中, 水位为 4.08 m 时, 泊位 B 处的 H_c/H_s 值为 0.51, 大于整体试验中 5# 点的数值, 按照 H_c/H_s 值越大越浪量越小的趋势, 其越浪量应该小于 $0.043 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$, 但其试验结果却为 $0.09 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$, 同样对于水位 3.38 m 时泊位 A 处、B 处的越浪量分别大于整体试验中的 1# 和 5# 测点。由于断面试验同步越浪并且无波能的扩散, 越浪量测量结果往往失真, 而整体试验中各测点的越浪量受波高影响较大, 与工程实际情况比较吻合。

波能无法扩散,其结果远大于整体试验,测量结果失真。由表5可以看出,整体试验某位置的排水情况受该处越浪量的影响较大,并且由于波能的扩散,排水槽同步排水,大部分情况满足码头面的排水要求,对于水位4.08 m时S向波浪作用的最不利情况淹没深度较大,需要在堆场前沿采取防护措施。

2) 整体试验码头西侧在不同方向波浪作用下的排水情况对比:与越浪量情况相同,S向波浪作用时水体对后方堆场影响最大,无法及时排出,且在水位4.08 m时淹没深度达到50 cm,其次是SSE向波浪,水位4.08 m时淹没深度达到20 cm,水位3.38 m时几乎没有水体越过排水槽与堆场之间的区域,对堆场影响最小的是SSW向波浪,水体都能及时从排水槽排出。

3) 整体试验不同方向波浪作用下码头西侧与东侧排水情况对比(选取水位4.08 m):由表5可以看出,与越浪量情况相同,SSE向和S向波浪作用时码头东侧排水情况优于码头西侧,但此时由于越浪量较大,码头面设置的排水槽无法将越浪水体及时排出,码头面上有成片的水体,SSW向波浪作用时码头西侧排水情况优于码头东侧,东侧的越浪水体没有对后方堆场产生严重影响。

针对排水槽无法将越浪水体及时排出的情况,在排水槽尺寸不变的情况下,对排水系统提出优化方案,可以在堆场前沿处加设一道临时挡墙,挡墙高度大于最大淹没深度50 cm,在挡墙高度为70 cm时,原淹没深度为50 cm的情况在连续大波作用下上水水体仍然不能及时从排水槽排掉,且有局部水体越过挡墙顶部,在排水槽至护轮坎之间有水体堆积,由于其向整个码头面扩散,因此淹没深度变为45 cm,此时后方堆场没有受到越浪影响,且在波浪作用结束3 min内该区域的水体可以基本排光,其他情况下码头沿线上水体大都可以及时排掉,基本无水体越过挡墙顶部。由整体试验现象可以看出,各向波浪传播时波能在中突

堤处波能集中现象明显,因此考虑不建中突堤的情况,在水位为4.08 m,正向波浪作用时,码头西侧最大越浪量为 $0.096 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$,远小于原方案,在堆场前沿同时设置70 cm高挡墙的情况下,几乎没有水体越过挡墙,且码头面上水总量也大大减小,因此在码头规划时若能避免发生波能集中的情况,则会大大减小越浪对码头的影响。

4 结论

本文首先通过断面模型试验研究直立式码头的越浪量和水舌厚度,然后通过整体模型试验研究不同方向波浪作用下直立式码头的越浪量和码头面的排水情况。并对断面和整体模型试验的有效波高、越浪量和排水系统做对比分析。结果表明断面模型试验具有局限性,无法模拟复杂的波浪条件,其测量结果普遍偏大,整体模型试验结果更贴近实际情况。

有效波高 H_s 不能直接反映越浪量的变化规律,相对护轮坎顶超高 H_c/H_s 和波浪入射方向是影响越浪量的两个主要因子,越浪量随相对护轮坎顶超高的减小呈指数增加,波浪从口门斜向入射时,若遇到防波堤等挡浪建筑物,波高会有明显减小,越浪量也随之减小。

码头面的排水情况与越浪量密切相关,当越浪量大于 $0.05 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时,码头沿线均有上水现象且后方堆场淹没较为严重,而当波能集中时,该现象更加明显。为了防止此类现象发生,对排水系统提出优化方案,在堆场前方加设临时挡墙,或港口规划时尽量避免使主波向与码头周围挡浪直立式建筑物垂直,以上两种方法均可作为工程设计提供参考。

由于越浪量的影响因素众多,理论研究不能将所有因素考虑进去,而断面试验测量结果往往失真,并且对于码头面排水的研究也无法用以上两种方法解决,因此建议对越浪和排水系统要求较高的码头采用整体模型试验的方法予以解决。

(下转第70页)