



# 大连港大窑湾北防波堤 基床淘刷与治理试验研究

李文彬<sup>1</sup>, 孙云鹏<sup>1</sup>, 张成刚<sup>2</sup>

(1. 大连港集团有限公司, 辽宁大连 116004; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 大窑湾港区是大连港集装箱核心港区, 北防波堤直立段采用改进的梳式沉箱结构, 受台风影响, 空腔内栅栏板移位、基床被淘刷。为了认知基床淘刷原因, 使用非线性波浪水槽进行模型试验研究。研究确认波浪传播至空腔内剧烈紊动、导致基床浮托力增大是栅栏板失稳、基床淘刷的主要原因。采用翼板开孔可有效减小基床浮托力, 但增大了透过波浪和流速。综合考虑基础稳定性、透过波浪、施工条件等因素, 确定了翼板开孔 3 m、将栅栏板厚度由原来的 0.5 m 加大至 1 m 的治理方案。试验验证了该方案的可行性。

**关键词:** 大窑湾; 梳式沉箱; 基床淘刷; 模型试验

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0070-05

## Experimental study on bed scour and treatment of Dayaowan north breakwater in Dalian port

LI Wen-bin<sup>1</sup>, SUN Yun-peng<sup>1</sup>, ZHANG Cheng-gang<sup>2</sup>

(1. Dalian Port Co., Ltd., Dalian 116004, China; 2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** Dayaowan port area is the main area of Dalian container port, of which the comb-type caisson structure was adopted for the north breakwater. Affected by typhoon, barrier boards inside the cavity were tilted and pushed, and the rubble filled bed was scoured. In order to acquire the causes of bed scour, we carry out a model test with the nonlinear wave flume. The analysis indicates that severe wave turbulence inside the cavity leads to significant buoyancy stress in bed, which is the the main cause of barrier board instability and bed scour. The wing plate trepanning scheme can effectively reduce the buoyancy stress in the bed, while there will be increased wave and velocity to some extent. Considering comprehensively the factors such as bed stability, wave penetration and construction conditions, we determine to open a 3 meters hole in the wing plate and increase the thickness of barrier boards from 0.5 m to 1.0 m. The model test demonstrates the feasibility of the plan.

**Keywords:** Dayaowan; comb-type caisson; bed scour; model test

### 1 工程概况

大窑湾港区位于大连市大连湾东侧, 地理位置坐标为 E121°54'、N39°00'。大窑湾港区是大连港集装箱泊位核心港区, 对港内水域平稳度要求较高。北防波堤与岛堤、南防波堤一起构成全港区防波体系。大窑湾北防波堤工程全长 691.61 m,

其中直立段长度为 271.85 m。直立段采用沉箱重力式结构(图 1), 共由 17 个沉箱(A 型 1 个, B 型 13 个, C、D 和 E 型各 1 个)组成, 堤顶高程为 +9.0 m, 沉箱底高程为 -11.5 m, 沉箱宽度为 16 m。A、B 两种型号的沉箱共 14 个, 均带 3 m 长的翼板(翼板顶高程与沉箱顶高程相同, 底高

收稿日期: 2014-04-30

作者简介: 李文彬(1981—), 男, 工程师, 一级建造师, 从事港口工程项目管理工作。

程比沉箱底高程高出 0.3 m), A、B 型沉箱安装后形成了 13 个空腔, 每个空腔顶宽 6 m, 底宽 3 m (空腔左右两沉箱各有 1.5 m 宽的趾), 腔内铺设 6 块栅栏板, 基床抛石基础为 10 ~ 100 kg 块石。基础抛石厚度 0.5 ~ 5.8 m 不等, 堤头处的基础较厚, 采用爆破夯实工艺。由于防波堤的直立段在

一定时间内长期处于岛式防波堤状态, 并受到台风梅花的影响, 基床部分有一定程度的受损情况。为了充分把握基础淘刷的原因, 并针对实际情况提出切实可行的根治措施, 确保北防波堤安全并保障其功能的全面发挥, 采用物理模型试验方法对该问题进行研究。

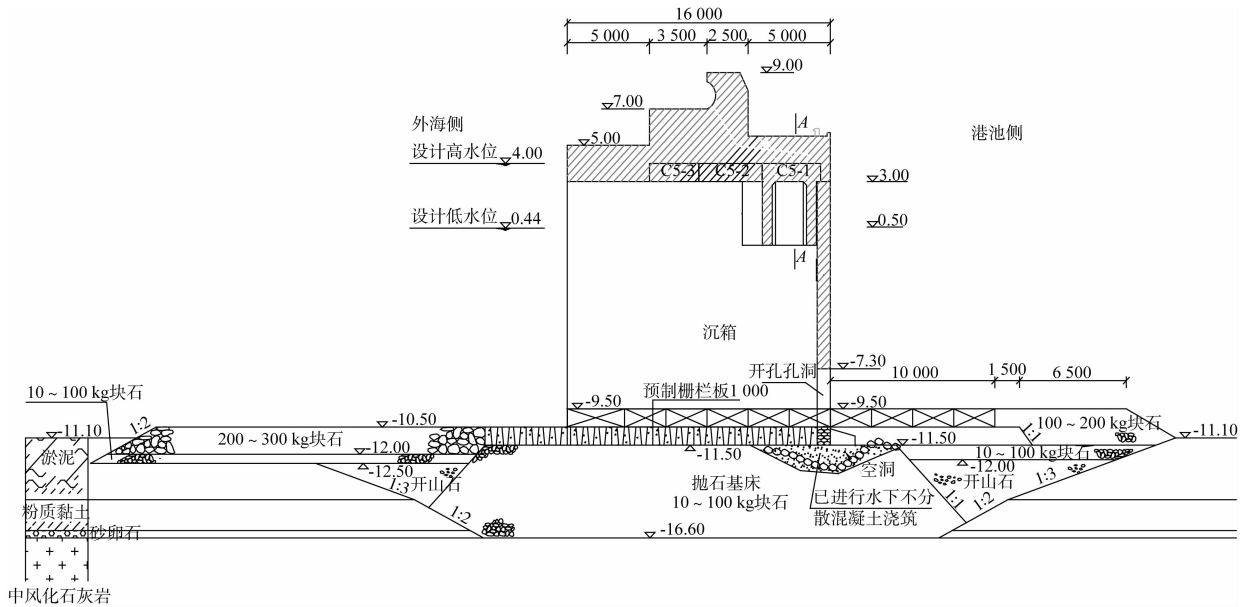


图1 大窑湾北防波堤直立段断面

## 2 模型试验方法

本试验采用重力相似准则。试验遵照《波浪模型试验规程》相关规定, 采用正态模型。为了提高试验精度, 选取较大模型比尺, 模型比尺确定为 1:18。

### 2.1 试验设备

试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的非线性波浪水槽系统中开展。水槽尺寸为长 60.0 m, 宽 4.0 m, 工作水深 0.2 ~ 2.0 m。水槽的一端配有液压伺服不规则波造波系统, 可模拟生成周期在 0.5 ~ 5 s 之间的规则波、不规则波等多种波浪。水槽尾部安装了架空斜坡碎石消能设备, 以避免波浪的反射。

波高及波动点压力测量采用北京水科院研制的 DG800 型浪高、压力测量系统。测量该系统可同步测量多点波面及压力过程并进行数据分析, 标定线性度大于 0.999。

### 2.2 波浪及结构断面模拟

波浪模拟分别采用规则波和不规则波 (目标谱采用 JONSWAP 谱) 进行。在模型安装之前, 在预布置模型处的中心位置布置浪高仪, 将按模型比尺换算后的特征波要素输入计算机, 产生造波信号, 控制造波机产生相应的规则波或不规则波序列。试验波浪数据采集时间间隔为 0.02 s, 连续采集的波浪个数为 100 ~ 120。经数次迭代修正后得到模型设计确定的波浪要素。为避免水槽中波浪多重反射的影响, 不规则波浪采用分段造波, 每次造波、采样完成后停机, 待水面平静后再进行接续造波。试验中虽有一定波浪反射影响, 但试验结果略偏安全。

在不规则波试验时, 考虑冲击压力受大波控制, 故选取  $H_{1\%}$ 、有效波高  $H_s$  和有效波周期进行模拟控制, 同时保证模拟波浪谱与目标谱 (J 谱) 较好地吻合。

水工结构物断面模拟包括胸墙、沉箱结构、护底栅栏板和基础抛石等。物理模型试验中，除整个断面与原型保持几何相似外，还需要保证沉箱的整体稳定和刚度。此外，护底栅栏板和基础抛石等部分模拟均应考虑质量、重心位置等相似。

断面结构的安装首先抛填基床块石分层压实和理坡。然后摆放沉箱并按计算好的质量填入块石。完成后，再将抛填的护底脚块石整平压实(图2)。为了尽量减小防波堤对波浪反射影响，试验时将模型放置在距离造波板约50 m处。

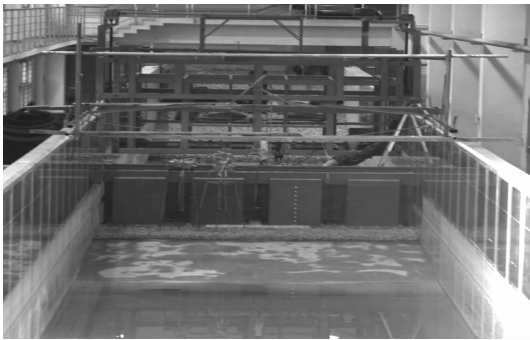


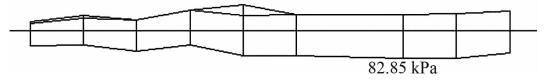
图2 断面安放模型

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 断面点压力

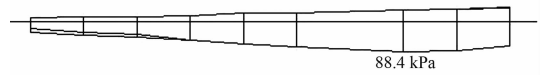
图3给出了翼板插至基床顶面，设计低水位 $H_{1\%} = 8.5\text{ m}$ 工况条件下防波堤各部分点压力分布(图上标注的数值为该组点压力的最大值)。图4给出了不同翼板开孔高度条件下基床浮托力压力分布示例。翼板插至基床顶面，设计低水位 $H_{1\%} = 8.5\text{ m}$ ， $T_s = 12.4\text{ s}$ 时，空腔内翼板上的最大冲击压力为245.6 kPa，胸墙下表面的最大冲击压力为253.64 kPa； $H_{1\%} = 7.5\text{ m}$ ， $T_s = 11.2\text{ s}$ 时，空腔内翼板上的最大冲击压力为211.29 kPa，胸墙下表面的最大冲击压力为288.75 kPa；设计高水位， $H_{1\%} = 8.5\text{ m}$ ， $T_s = 12.4\text{ s}$ 时，空腔内翼板上的最大冲击压力为207.57 kPa；胸墙下表面的最大冲击压力为212.2 kPa； $H_{1\%} = 7.5\text{ m}$ ， $T_s = 11.2\text{ s}$ 时，空腔内翼板上的最大冲击压力为184.57 kPa，胸墙下表面的最大冲击压力为198.39 kPa。设计

低水位条件下，空腔内翼板和胸墙下表面的最大冲击压力与设计高水位相比较大。上述结果表明，翼板插至基床顶面，空腔内结构受到非常大的波浪冲击作用，基床浮托力可达80 kPa以上。

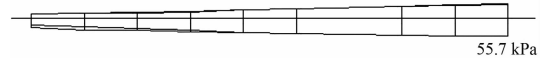


注：设计低水位 $H_{1\%} = 8.5\text{ m}$ ， $T_s = 12.4\text{ s}$ 。

图3 翼板插至基床顶面时各点压力分布



a) 翼板开孔高度0.3 m



b) 翼板开孔高度2 m



c) 翼板开孔高度3 m

注：设计低水位 $H_{1\%} = 8.5\text{ m}$ ， $T_s = 12.4\text{ s}$ 。

图4 不同翼板开孔高度时，底板各点压力分布

从图4可见，翼板开孔高度在0.3~3 m范围内变化时，底板浮托力随开孔高度增大逐渐减小，翼板开孔高度在2~3 m范围内变化时，底板压力没有明显的减少。

沉箱空腔内基床浮托力80 kPa以上，足以导致压低栅栏板掀动并移位，故可以认定栅栏板失稳是空腔内基床浮托力过大造成的。

#### 3.2 开孔区流速和堤后波高

表1给出了设计低水位条件下，开孔高度 $D$ 分别等于0、0.3、2、3 m时空腔下部流速最大值。翼板开孔高度相同的情况下，随着入射波高的增加，空腔下部最大流速值增大。入射波高相同的情况下，随着开孔高度的增加，空腔下部最大流速值增大。当翼板开孔高度为0.3 m时，空腔下部最大流速为50 cm/s，当翼板开孔高度为2 m时，空腔下部最大流速为200 cm/s，当翼板开孔高度为3 m时，空腔下部最大流速值为300 cm/s。

表 1 空腔下部流速最大值

$H_s/m$	流速仪 编号	流速最大值/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )			
		$D=0\text{ m}$	$D=0.3\text{ m}$	$D=2\text{ m}$	$D=3\text{ m}$
0.7	1#	0	2	20	30
	2#	0	2	10	16
	3#	0	2	2	8
	4#	0	2	20	40
	5#	0	2	20	24
2.0	1#	0	30	126	140
	2#	0	12	40	60
	3#	0	8	20	30
	4#	0	30	126	160
	5#	0	30	100	120
2.6	1#	0	40	160	200
	2#	0	8	80	100
	3#	0	8	30	40
	4#	0	40	160	240
	5#	0	40	140	200
3.0	1#	0	50	200	250
	2#	0	12	90	140
	3#	0	10	40	60
	4#	0	50	200	300
	5#	0	50	160	210

表 2 给出了设计低水位条件下, 开孔高度  $D$  分别等于 0、0.3、2、3 m 时堤后有效波高分布。翼板开孔高度相同的情况下, 随着入射波高的增加,

堤后浪高值增大。入射波高相同的情况下, 随着开孔高度的增加, 堤后浪高值增大。当翼板开孔高度为 0.3 m 时, 堤后浪高最大值为 0.18 m, 当翼板开孔高度为 2 m 时, 堤后浪高最大值为 0.63, 当翼板开孔高度为 3 m 时, 堤后浪高最大值为 0.80 m。

### 3.3 基础冲刷坑

以波要素分别为  $H_s=0.7\text{ m}$ ,  $T_s=5.4\text{ s}$ ;  $H_s=0.9\text{ m}$ ,  $T_s=5.7\text{ s}$ ;  $H_s=1.2\text{ m}$ ,  $T_s=6.2\text{ s}$ ;  $H_s=1.7\text{ m}$ ,  $T_s=6.4\text{ s}$ ;  $H_s=2.0\text{ m}$ ,  $T_s=7.3\text{ s}$ ;  $H_s=2.3\text{ m}$ ,  $T_s=7.7\text{ s}$ ;  $H_s=2.6\text{ m}$ ,  $T_s=8.4\text{ s}$ ;  $H_s=3.0\text{ m}$ ,  $T_s=9.3\text{ s}$  的 8 组波浪间断作用防波堤, 累积 6 h, 放水后观察抛石基床冲刷情况。发现栅栏板失稳、抛石基床严重受损, 沉箱前趾底部形成深坑(冲刷坑, 图 5)。按照图 6 定义的冲刷坑参数, 表 3 为翼板不同开孔条件下冲刷坑特征参数。从上述实验结果可知, 在相同波浪要素作用同样时间的情况下, 翼板开孔 2 m 和 3 m 时, 基床的冲刷程度相差不多, 与翼板开孔 0.3 m 相比, 基床冲刷程度较为严重。另应注意到, 即使尚未达到设计波浪, 基础依然可被淘刷。

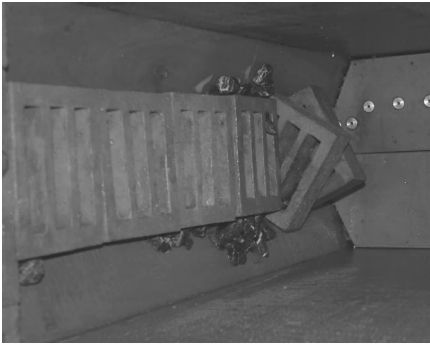
表 2 堤后波高

$H_s$	浪高仪 编号	m							
		$D=0\text{ m}$		$D=0.3\text{ m}$		$D=2\text{ m}$		$D=3\text{ m}$	
		$H_{bs}$	$H_{b1/10}$	$H_{bs}$	$H_{b1/10}$	$H_{bs}$	$H_{b1/10}$	$H_{bs}$	$H_{b1/10}$
1.2	1#	0	0	0.07	0.09	0.14	0.18	0.27	0.32
	2#	0	0	0.07	0.08	0.13	0.17	0.27	0.31
	3#	0	0	0.06	0.08	0.12	0.16	0.22	0.27
	4#	0	0	0.06	0.08	0.12	0.16	0.20	0.23
	5#	0	0	0.06	0.08	0.12	0.16	0.20	0.23
	6#	0	0	0.06	0.08	0.11	0.16	0.16	0.19
	7#	0	0	0.06	0.07	0.11	0.16	0.16	0.18
	8#	0	0	0.05	0.07	0.11	0.16	0.16	0.18
2.0	1#	0	0	0.14	0.16	0.34	0.43	0.50	0.64
	2#	0	0	0.12	0.15	0.34	0.39	0.49	0.60
	3#	0	0	0.11	0.15	0.31	0.39	0.44	0.54
	4#	0	0	0.11	0.14	0.30	0.35	0.43	0.48
	5#	0	0	0.10	0.13	0.30	0.37	0.41	0.47
	6#	0	0	0.10	0.13	0.27	0.35	0.34	0.40
	7#	0	0	0.10	0.13	0.24	0.29	0.34	0.47
	8#	0	0	0.10	0.13	0.22	0.25	0.29	0.35
3.0	1#	0	0	0.24	0.27	0.53	0.60	0.66	0.77
	2#	0	0	0.23	0.25	0.52	0.57	0.66	0.72
	3#	0	0	0.22	0.24	0.51	0.55	0.65	0.74
	4#	0	0	0.22	0.24	0.50	0.59	0.64	0.72
	5#	0	0	0.21	0.24	0.49	0.55	0.63	0.68
	6#	0	0	0.20	0.26	0.49	0.55	0.62	0.71
	7#	0	0	0.19	0.22	0.47	0.53	0.60	0.65
	8#	0	0	0.17	0.20	0.46	0.50	0.59	0.68

注:  $H_{bs}$  表示堤后波序列的有效波高,  $H_{b1/10}$  表示堤后波序列的 1/10 大波。



a) 波浪作用前



b) 波浪作用后

图5 抛石基床冲刷情况

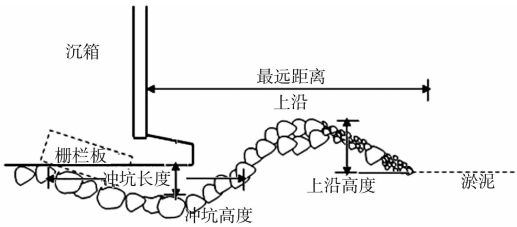


图6 冲刷坑参数

表3 翼板不同开孔条件下冲刷坑特征参数 m

开孔高度	冲刷坑长度	冲刷坑高度	冲刷坑宽度	上沿高度	最远距离
0	10.80	2.70	21.6	2.70	7.20
0.3	5.40	1.08	10.8	1.62	4.32
2.0	10.80	1.80	12.6	3.60	10.80
3.0	9.00	1.80	10.8	2.70	10.80

### 3.4 基础整治方案

2个沉箱中间的空腔内的流场紊动比较剧烈,使得空腔位置港池侧和外海侧底部存在较大的压力差,这个压力差产生的渗流造成了抛石基床的冲刷。考虑通过反压栅栏板来阻止渗流对基床的冲刷。在开孔高度3m的工况下,安放4.05m×3.24m×0.54m,重11.7t的反压栅栏板2排,对于非翼板等不重要位置处的第2排反压栅栏板

用2排3.15m×2.52m×0.54m,重6.9t的栅栏板代替。翼板处的凹槽使用与空腔内同样尺寸的栅栏板填堵,该凹槽的填堵对保护基床不被冲刷起到至关重要的作用。摆放好栅栏板,在水槽中加水至设计低水位,以波要素分别为 $H_s=0.7m$ ,  $T_s=5.4s$ ;  $H_s=0.9m$ ,  $T_s=5.7s$ ;  $H_s=1.2m$ ,  $T_s=6.2s$ ;  $H_s=1.7m$ ,  $T_s=6.4s$ ;  $H_s=2.0m$ ,  $T_s=7.3s$ ;  $H_s=2.3m$ ,  $T_s=7.7s$ ;  $H_s=2.6m$ ,  $T_s=8.4s$ ;  $H_s=3.0m$ ,  $T_s=9.3s$ 的8组波浪间断作用防波堤,累积6h,放水后观察抛石基床冲刷情况。发现栅栏板基本没有位移,抛石基床完好没有冲刷。

重新向水槽中加水至设计低水位,以 $H_s=5.0m$ ,  $T_s=11.2s$ 和 $H_s=5.7m$ ,  $T_s=12.4s$ 的波要素交替间断作用3h,放水后发现大量反压栅栏板具有较大位移,基床被严重冲刷。

现将反压栅栏板的质量加倍,将2块4.05m×3.24m×0.54m,重11.7t的栅栏板固定在一起,在港池侧的抛石基床上摆放2排。栅栏板布置见图7。重新向水槽中加水至设计低水位,以 $H_s=5.0m$ ,  $T_s=11.2s$ 和 $H_s=5.7m$ ,  $T_s=12.4s$ 的波要素交替间断作用3h,放水后发现反压栅栏板基本无位移,抛石基床完好没有被冲刷。

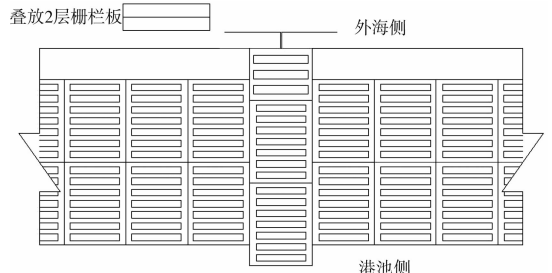


图7 质量11.7t反压栅栏板的布置

### 4 结论

1) 翼板插至基床顶面后,波浪传播至空腔内剧烈紊动导致基床浮托力显著增大,设计波浪作用下基础浮托力可达80kPa以上,是栅栏板失稳、基础淘刷的主要原因。

2) 翼板插至基床顶面(不开孔)时,即使尚未达到设计波浪,基础依然可被淘刷。