



船行波对系泊船的影响分析

汪舟红¹, 韩国松²

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230;
2. 中船黄埔文冲船舶有限公司, 广东 广州 510715)

摘要: 介绍船行波两种算法, 着重运用 Flory-Remery 算法通过 OPTIMOOR 系泊软件, 结合巴基斯坦某港 7.5 万吨级煤码头, 分析临近进港航道建设码头泊位时船行波荷载对码头泊位上系泊船的影响, 并提出不影响系泊船正常作业的临界航速, 供类似工程参考。

关键词: 船行波; 系缆力; OPTIMOOR

中图分类号: U 661.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)09-0028-07

Effect of ship wave on moored ship

WANG Zhou-hong¹, HAN Guo-song²

(1. The Fourth Harbor Engineering Investigation and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. CSSC Huangpu Wenchong Shipbuilding Co., Ltd., Guangzhou 510715, China)

Abstract: Two methods for calculating the ship wave's effect on the moored ship are introduced. Combining with a 75 000 DWT coal terminal in Pakistan and adopting the Flory-Remery method using OPTIMOOR software, we analyze the effect of the ship wave load on the ship moored on the jetty which is near to fairway, and give the critical speed of the passing ship when the normal operation of the moored ship is not affected.

Keywords: ship wave; mooring force; OPTIMOOR

巴基斯坦某 7.5 万吨级煤码头靠近航道而建, 处于微弯河段, 码头前沿距离航道边线 80 m, 航道宽度 200 m, 为单向航道, 西侧连接外海, 航运繁忙。

按照港务局规定所有大船进港均需拖轮引航, 航速要求不超过 2 m/s。但是实际操作没有严格执行, 很多船舶都是在没有拖轮引航情况下进港, 航速较规定有所增加。

业主及国外咨工非常重视航道中航行船只产生的船行波对本码头系泊船只的影响, 因码头前沿距航道边线的距离较近, 系泊于该泊位上的船舶易受到船行波的影响, 引发系泊船只的激烈摇摆运动, 影响正常作业, 严重时还可能发生断缆或系泊船只

船体受损等事故。本文基于这一出发点展开了研究, 欲获取系泊船只还能正常工作的航速。

1 输入条件

本文采用 OPTIMOOR 软件开展系泊分析。

1.1 平面布置和布缆方式

码头两个泊位, 港池底高程 -15.5 m, 总长 565 m, 码头主体为连片式高桩梁板结构, 顶高程 5.5 m, 每间隔 27 m 布置一座 1 500 kN 的系船柱; 东西两侧均设有系缆墩, 顶高程 5.9 m, 每个系缆墩上各配备一座 1 500 kN 的系船柱, 系缆墩较主体结构后退 8.5 m (图 1)。本文仅取一侧作为研究对象, 即船舶系靠在西侧。

收稿日期: 2014-12-23

作者简介: 汪舟红 (1983—), 女, 硕士, 工程师, 从事港口航道研究。

缆绳布置采用 4-2-2 的方式 (图 2), 即船艏缆各 4 根, 横缆各 2 根, 倒缆各 2 根, 共 16 条缆。缆绳为直径 75 mm 的尼龙缆, 破断力 (MBL) 981 kN, 预张力 100 kN, 绞盘破断力 600 kN。

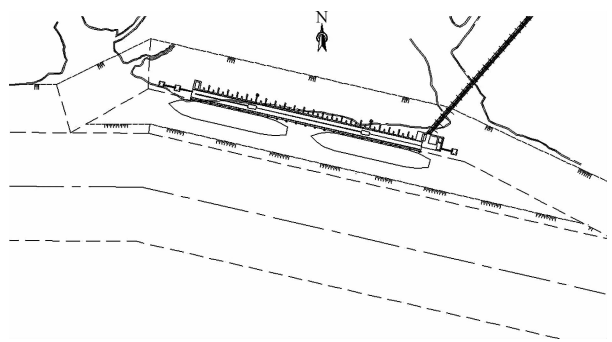


图 1 码头平面布置

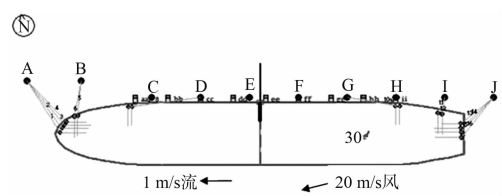


图 2 缆绳布置

1.2 设计船型

设计船型为 75 000 DWT 散货船, 总长 225 m, 柱间距 215 m, 型宽 32.3 m, 满载吃水 14 m, 干舷高度 5 m, 排水量 85 000 m³。横向受风面积: 满载时 2 110 m², 压载时 3 690 m²; 纵向受风面积: 满载时 586 m², 压载时 846 m²。

1.3 环境参数

结合当地已有自然条件资料及业主提供的标书, 拟定环境参数 (表 1)。

表 1 外部环境参数

环境要素	风/(m·s ⁻¹)	浪	船行波	流
有船行波工况	15.0	无	考虑船行波	1 m/s 落潮流
无船行波工况	20.5	无	不考虑船行波	(平行于码头走向)

本项目临近 Kadiro 河, 该河受两岸广袤的红树林掩护, 阻挡了来自阿拉伯海的风浪, 因缺少充分的开阔水域, 极难形成大的风浪。当地风速较少超过 10 m/s, 风暴可能达到 13 m/s, 也有超过 20.5 m/s 的记载。风速超过 15 m/s 引航工作受限, 故考虑船行波时, 组合的风速定为 15 m/s。

当地最大流速 1 m/s, 平均 0.5 m/s。

2 船行波的计算方法

船行波问题是造船学家和流体力学研究者最为关注的问题之一, 国内外文献对船行波的研究已有不少成果。但将船行波的影响反映在港工设计中的相关研究并不多, 我国港工设计规范尚未引入船行波的不利影响, 日本规范 OCDI 和德国规范 EAU 中都有对船行波的计算介绍, 均基于凯尔文理论。

另一种实用又简便的估算方法是 Flory-Remery 算法, 将船行波的影响转化成为力和力矩作用在系泊船上。

2.1 OCDI 经验公式^[1,6]

凯尔文理论将船行波分成散波和横波, 横波的扩散方向与船舶航行方向一致, 横波的波长和周期均比散波大, 横波可视为一组典型的规则波, 即使在水深相同的水体中, 波高都将与传播距离的平方根成反比趋势衰减。

如图 2 所示, 散波与航线呈约 19° 的夹角 (横波与散波波峰交会点的连线与航线的夹角约 19°) 从船首扩散, 散波波峰方向与扩散方向的夹角约为 35°, 在深水情况下散波的扩散方向不受航速影响, 散波在相当长的扩散距离内很少衰减, 且其移动方向总是垂直于散波波峰线^[1], 它们是干扰系泊船只的主要动力。

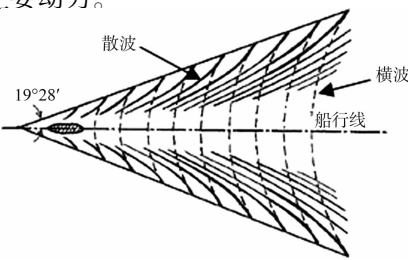


图 3 船行波

OCDI 推荐的经验公式如下:

横波:

当 $v < \sqrt{gh}$ 时, $\frac{gL_t}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L_t} = v^2$ (1)

$T_t = \sqrt{\frac{2\pi L_t \coth(\frac{2\pi h}{L_t})}{g}} = T_0 \coth(\frac{2\pi h}{L_t})$ (2)

深水情况下: $L_0 = \frac{2\pi v^2}{g}$ (3)

$$T_0 = \frac{2\pi}{g}v \quad (4)$$

如满足 $v \leq 0.7 \sqrt{gh}$, 则船行波可视为深水波。

式中: v 为行驶船舶与水的相对速度 (m/s); h 为水深 (m); L_t 为横波波长 (m); L_0 为深水横波波长 (m); T_t 为横波周期 (s); T_0 为深水横波周期 (s)。

散波:

$$\begin{cases} L_d = L_t \cos^2 \theta \\ T_d = T_t \cos^2 \theta \end{cases} \quad (5)$$

$$(6)$$

式中: L_d 为散波波长 (m); T_d 为散波周期 (s); θ 为凯尔文角 ($^\circ$)。

当船速较低时, 船行波对目标船的影响主要是散波造成的。

$$H_{\max} = \left(\frac{L_s}{S_a} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{E_{HPW}}{1620 L_s v_K} \left(\frac{v_a}{v_K} \right)^3} \quad (7)$$

$$E_{HPW} = 0.6 S_{HPm} - 1.25 \rho v_0^3 C_F \sqrt{L_s \bar{V}} \quad (8)$$

$$C_F = 0.075 \left(\lg \frac{v_0 L_s}{\nu} - 2 \right)^2 \quad (9)$$

式中: $H_{\max}$ 为船行波最大波高 (m); L_s 为航行船舶船舶垂线间长 (m); S_a 为目标船与航线距离 (m), 最小不能小于 $\min(L_s, 100)$; v_K 为船舶的额定船速 (m/s); v_a 为实际船舶的行驶速度 (m/s); S_{HPm} 为连绕最大轴功率 (主机功率) (W); v_0 为船舶的额定船速 (m/s), $v_0 = 0.514 v_K$; $\bar{V}$ 为航行船舶满载排水量 (m^3); $\nu = 1.2 \times 10^{-6} m^2/s$; $\rho = 1030 kg/m^3$ 。

根据上述公式, 船行波波高随距离衰减, 与距离的立方根成反比关系, 同时也跟实际航速与额定航速比值的立方成正比, 由此可见其衰减幅度很大, 如实际航速不大, 则传递到目标船上的船行波高不会很大。

2.2 Flory-Remery 算法^[2,4]

Remery 在前人研究成果的基础上, 结合大量的模型试验, 总结绘制出不同航速及间距条件下, 船行波对系泊船只的作用力和力矩曲线图, 描述了不同船位情况下, 船行波对系泊船只的影响演变过程, Flory 提出了能简便计算船行波对系泊船只的最大作用力和最大力矩的经验公式, 并考虑

了流速的影响作用 (图 4), 通过两者的结合而构成了 Flory-Remery 算法^[2]。

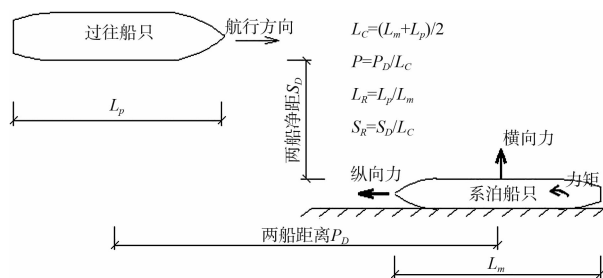


图4 Flory-Remery 经验公式参数

船行波对系泊船所产生的最大作用力和力矩的经验公式表达式为:

$$F_{x_{\max}} = 10 S_F C_x v^2 \{ 0.171 + 0.134 \ln(DR) - [0.71 + 0.28 \ln(DR)] \ln(SR - 0.06) \} \quad (10)$$

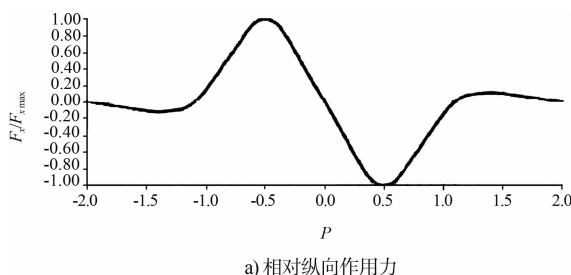
$$F_{y_{\max}} = 10 S_F C_y v^2 \{ e^{(1.168DR - 2.25)} - [4.41 + 1.93 \ln(DR)] \ln(SR) \} \quad (11)$$

$$M_{\max} = 10 S_M C_m v^2 \{ e^{(-0.47DR + 2.651)} - [171.9 + 51.4 \ln(DR)] \ln(SR - 0.06) \} \quad (12)$$

$$\begin{cases} S_F = 1.5 \times 10^{-5} L_m^2 \\ S_M = 5.88 \times 10^{-8} L_m^3 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} C_x = e^{(0.0955 - 0.6367 UKCDR)} \\ C_y = e^{(0.5157 - 3.438 UKCDR)} \\ C_m = e^{(0.343 - 2.288 UKCDR)} \\ UKCDR = 1 - 1/WDDR \end{cases} \quad (14)$$

式中: $F_{x_{\max}}$ 为最大纵向力 (kN); $F_{y_{\max}}$ 为最大横向力 (kN); $M_{\max}$ 为最大力矩 (kN·m); L_m 、 L_p 分别为系泊船、过往船舶垂线间长 (m); DR 为过往船与系泊船的排水量比值; $WDDR$ 为水深与船舶吃水比, 在航行船与系泊船中取吃水的大值。过往船只的船行波对系泊船的力和力矩随其相对于系泊船位置的变化而变化, 见图 5。



a) 相对纵向作用力

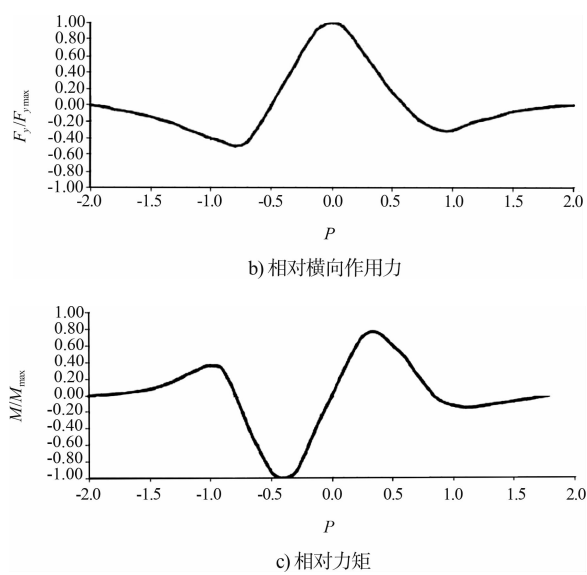


图 5 不同船位下相对纵向力、横向力、力矩曲线

6 个典型船位下船行波荷载作用在系泊船上的方向见图 6。

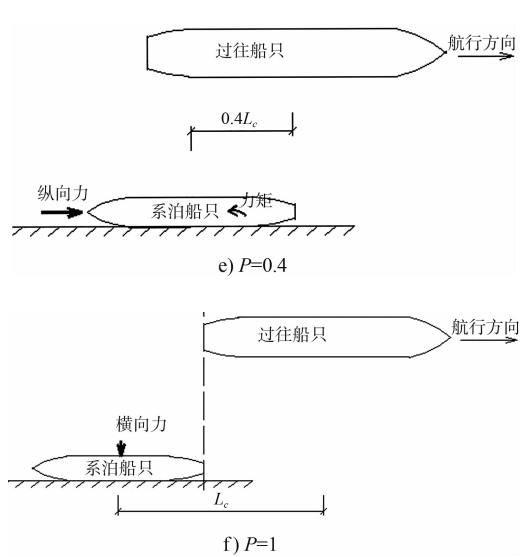
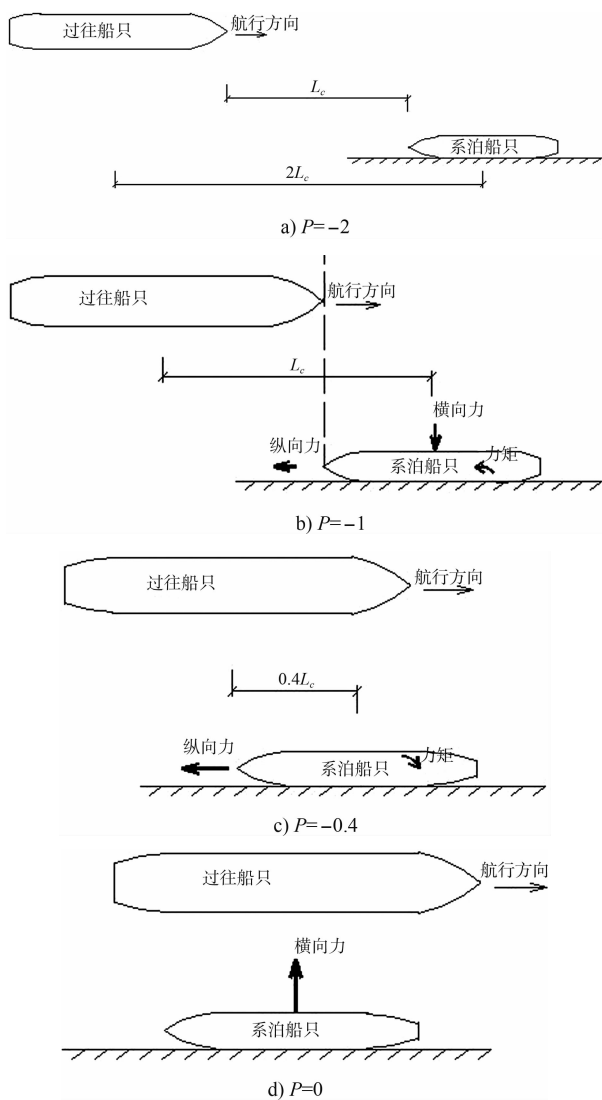


图 6 6 种船位下船行波荷载作用方向

$P = -2$ 时, 系泊船只开始感知航行船只的船行波。 $P = -1$ 时, 两船头对头, 纵向力很小, 横向力呈负值, 即对系泊船产生挤压力, 力矩使系泊船产生船头远离航行船的趋势。 $P = -0.4$ 时, 纵向力达到最大正值, 方向与航行方向相反, 几乎没有横向力, 力矩达到负值最大, 即, 使系泊船船头靠近行驶船。 $P = 0$ 时, 两船肩并肩, 此时系泊船受到的横向拉力最大, 纵向力和弯矩都为 0, 这一瞬间对系泊船的缆绳张力作用最明显。 $P = 0.4$ 时, 纵向力方向同航行方向, 并达到最大值, 横向力很小, 力矩使系泊船船尾靠近航行船。 $P = 1$ 时, 纵向力消失, 船行波对系泊船产生挤压力, 值较小, 力矩也很小, 几乎可以忽略。

3 系泊分析及计算结果

3.1 过往船只参数

根据业主提供的通航船型资料统计, 本码头前通航最大船型为 10 万吨级, 有集装箱船、散货船、油船, 以 10 万吨级集装箱船为例, 分析该种类型的船只航行时对码头上系泊船只的影响, 船型资料见表 2。

表 2 过往船只船型尺度				
船型参数单位	总长/m	型宽/m	满载吃水/m	排水量/m ³
10 万 DWT 集装箱船	346	45.6	14.5	115 000

注: 经查阅相关资料, 额定船速 12.5 m/s, 主机功率 62 000 kW。

本码头前航道处在微弯河段上，在没有拖轮引航情况下，航线可能会偏离航道中心线，故考虑过往船只的航线处于航道 1/3 处是合理的，即过往船只与系泊船的净距

$$SD=200/3+80-B_p/2-B_m$$

(15)

式中： B_p 为过往船只型宽； B_m 为系泊船只型宽。计算得净距约为 92 m。

通常船舶航速指绝对航速，即对地航速；结合水流则产生相对航速，即对水航速。使用 OCDI 经验公式和 Flory-Remery 算法用到的都是对水航速。

3.2 工况组合

本文分别选取 3.5、4 m/s 对水航速进行船行波计算，计算结果见表 3 和表 4，对于根据 OCDI 经验公式获得的船行波波高和周期，直接作为环境参数输入到 OPTIMOOR 软件环境界面中，而对于根据 Flory-Remery 算法得到的作用力和力矩当做外力输入到 OPTIMOOR 软件环境界面中。

表 3 根据 OCDI 经验公式计算船行波

航速(对水)/(m·s ⁻¹)	系泊船处船行波波高/m	船行波周期/s
4.0	0.05	3.0
3.5	0.03	2.3

表 4 根据 Flory-Remery 算法计算船行波

航速(对水)/(m·s ⁻¹)	过往船只相对系泊船的位置	纵向力 F _x /kN	横向力 F _y /kN	力矩 M/(kN·m)
4.0	P = -2	0	0	0
	P = -1	99	-1 100	36 260
	P = -0.4	496	605	-95 422
	P = 0	0	2 750	0
	P = 0.4	-540	963	71 566
	P = 1	-110	-825	-14 313
3.5	P = -2	0	0	0
	P = -1	76	-842	27 762
	P = -0.4	380	463	-73 057
	P = 0	0	2 106	0
	P = 0.4	-413	737	54 793
	P = 1	-84	-632	-10 959

注：对于 P = -2 及 P = 1 作用力和力矩明显小于其他位置情况，故为了简化计算，下面的表 6 工况组合不考虑这两个船位。

根据 OCDI 经验公式算得的船行波波高很小，原因是对比额定航速 12.5 m/s，实际航速小得多，实际航速与额定航速比值很小，而波高与该比值的立方成正比，故波高削减很厉害，同时经过一

定距离的传播，船行波消散的幅度很大，影响很微弱。根据工程经验这种短周期的小波对系泊缆绳及船舶运动影响很微小。该公式将系泊船当作一个目标点，并没有考虑系泊船的尺度影响，这显然与实际情况不符。最后跟业主和咨工沟通后不采用该方法。

实际航行船只与系泊船只可能处在满载、压载、低水位、高水位不同状态(表 5)，根据 2.2 节的公式，水深越深，作用力和力矩也越小，故低水位相对于高水位更不利，因此只需考虑低水位工况。满载状态下船舶吃水比压载大，即 UKCDR(龙骨下富裕水深系数)较小，作用力和力矩变大，但是满载状态下排水量比压载情况下大，结合 2.2 节公式，无法通过定性分析得出哪种状态更为不利，只能通过具体计算来判定，计算结果见表 7。经比较当本项目系泊船处在满载低水位状态时，过往船只对其作用的力和力矩最大，故下面的工况组合都基于这种状态下开展对比。

表 5 满载状态与压载状态对比

水位	航速/(m·s ⁻¹)	最大横向力/kN	最大纵向力/kN	最大力矩/(kN·m)
满载低水位	4	2 750	540	95 422
压载低水位	4	2 625	490	92 502

表 6 工况组合

工况	风(全风向 360°扫略)/(m·s ⁻¹)	流速/(m·s ⁻¹)	船行波	说明
1	15	0.5	v = 3.5 m/s P = -1	Flory-Remery 算法
2			v = 3.5 m/s P = -0.4	
3			v = 3.5 m/s P = 0	
4			v = 3.5 m/s P = 0.4	
5			v = 4 m/s P = -1	
6			v = 4 m/s P = -0.4	
7			v = 4 m/s P = 0	
8			v = 4 m/s P = 0.4	
9	20	1	v = 0 m/s	
10	15	0.5	v = 4 m/s P = 0	布缆方式 3-3-2， 其他同工况 7

3.3 计算结果

根据表 7 和表 8, 最大单根缆绳力和最大系船柱受力均出现在艤横缆, 并且都是在船位 $P=0$ 时出现最大, 这是因为两船肩并肩时船行波产生的

横向拉力最大, 而横缆承担绝大多数的横向力, 缆绳越短所受张力越大, 所以码头的平面布置也尽可能考虑了这一因素, 将泊位两端的系缆墩后移。

表 7 各缆绳受力情况

缆绳	航速 3.5 m/s				航速 4 m/s								航速 0 m/s	
	工况 1	工况 2	工况 3		工况 4	工况 5	工况 6	工况 7		工况 8	工况 10		工况 9	
	张力/kN	张力/kN	张力/kN	强度比/%	张力/kN	张力/kN	张力/kN	张力/kN	强度比/%	张力/kN	张力/kN	强度比/%	张力/kN	强度比/%
1-A	98	126	219	22	126	99	148	278	28	128	254	26	109	11
2-A	99	125	223	23	131	99	147	286	29	135	260	27	110	11
3-A	99	122	226	23	137	100	143	290	30	143	263	27	112	11
4-A	101	119	238	24	148	102	141	311	32	159	358	37	115	12
5-B	97	213	324	33	73	95	291	456	46	57	413	42	101	10
6-B	97	212	306	31	70	95	287	426	43	53	383	39	101	10
7-D	107	166	113	17	51	105	188	118	19	42	118	12	105	11
8-D	108	164	112	17	53	105	185	117	19	44	117	12	105	11
9-G	109	58	151	24	231	113	48	174	29	286	152	16	127	13
10-G	108	60	144	22	220	111	49	165	28	270	145	15	125	13
11-I	108	88	453	46	313	109	88	640	65	453	502	51	103	10
12-I	113	67	468	48	386	116	59	640	65	563	514	52	116	12
13-J	107	144	173	18	87	104	156	206	21	88	473	48	101	10
14-J	107	134	172	18	96	105	142	203	21	100	179	18	103	10
15-J	107	129	176	18	103	106	135	208	21	110	183	19	103	10
16-J	107	123	179	18	111	106	127	212	22	120	186	19	103	10

注: 强度比为缆绳张力与缆绳破断力之比。

表 8 系船柱受力情况

系船柱	航速 3.5 m/s				航速 4 m/s					kN
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8	工况 10	工况 9
	航速 0 m/s									
A	400	490	900	540	400	580	1 160	560	780	450
B	190	420	630	140	190	580	880	110	1 150	200
D	220	330	230	110	210	370	240	90	240	210
G	220	120	300	450	220	100	340	560	300	250
I	220	150	910	690	220	140	1 270	1 000	1 450	210
J	430	530	700	400	420	560	830	420	550	410

尽管考虑船行波时风速限制至 15 m/s, 对比无船行波风速 20 m/s 的工况, 各缆绳受力和系船柱受力均有增加。同一航速下, 不同船位对系泊船的影响不同, 横向力对系泊船的影响最剧烈。

对无船行波工况下, 4-2-2 的布缆方式缆绳受力最为均匀, 但是航速在 4 m/s 情况下 4-2-2 的布缆方式艤横缆严重超标, OCIMF 建议尼龙缆缆绳张力不超过 45% MBL^[5], 布缆方式调整成 3-3-2

(见工况 10), 各调配一根艤横缆至横缆, 让更多的横缆抵御横向力, 最大缆绳张力得以缓解, 但仍不满足要求。

尽管在实际的操船过程中可以通过张紧和放松缆绳, 使缆绳系统受力重分布来达到限制船舶位移的目的, 但船行波的影响只是一瞬间, 如船速 4 m/s, 从船位 $P=-0.4$ 至 $P=0.4$, 即作用时间 54 s 内, 缆绳受力突然增至最大, 船舶横移突

然变大，实际可能来不及调节缆绳，船舶作业受到影响，故从安全考虑，限制行驶船速是最好的方法。

根据计算，在 3.5 m/s 航速下，局部横缆略超出规范推荐值，认为是可以接受的，因为软件计算考虑了极端情况，在实际情况下，遭遇船行波的最大横向力同时自然环境的风向也达到横向风几率不高。所以该航道上的船只对水航速控制在 3.5 m/s 以下，系泊于码头上的船只仍能正常作业。

4 结语

- 1) 采用将船行波转换成波高的算法没有考虑系泊船只的尺度，用该公式评估类似水工项目偏危险。
- 2) 尽管 Flory-Remery 的经验公式也有一定的局限性，比如假定航行船的航线始终平行于系泊船，两船处的水深基本相同，不考虑两岸波浪反射，但并不影响船行波对系泊船安全的影响问题评估。
- 3) 当航行船与系泊船肩并肩时，产生的最大横向力对系泊船造成的影响最为巨大，横缆所受的张力最大，在码头平面布置时尽可能考虑这个因素，尽量增加横缆长度。当某一时段航道航运繁忙时，增加横缆数量来抵御船行波荷载也不失

为一种选择，但同时要保证系船柱受力不能超出额定能力，故该措施还需通过相关计算来论证其可行性。

4) 尽管船行波影响作用时间不长，但出现这种瞬间的大荷载，可能来不及调节缆绳，船舶作业受到影响，故从安全考虑，限制行驶船速是最有效的方法。

参考文献：

[1] OCDI 2009, Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan[S].

[2] Flory J F. A Method for Estimating Passing Ship Forces[C]. Washington: ASCE 2001, Ports 2001 Conference Proceedings, 2001.

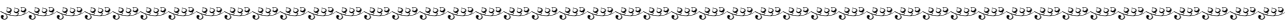
[3] Flory J.F. The Effect of Passing Ships on Moored Ships[C]. Virginia: ASCE 2001, Ports 2001 Conference Proceedings, 2001.

[4] Seeling W N. Passing ship effects on moored ships[R]. Washington: Naval Facilities Engineering Command, East Coast Detachment, 2001.

[5] Mooring Equipment Guidelines. Oil Companies International Marine Forum[R]. London: Witherby Seamanship Ltd., 2008.

[6] EAU 2004, Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways[S].

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

中国港湾中标巴基斯坦国际散货码头项目

近日，中国交建所属中国港湾成功中标巴基斯坦国际散货码头公司（PIBT）煤、熟料及水泥散货码头电厂设备项目，中标额约 1 100 万美元，工期 11 个月。

该项目是 PIBT 煤、熟料及水泥散货码头项目的配套工程，主要内容包括采购、安装和调试 5 台 2.68 MW、1 台 1.2 MW 和 1 台 200 kW 柴油发电机组及其配套设施。

该项目的中标，是中国港湾对在建项目进行二次市场开发的成果，有利于进一步深化与项目业主的合作关系，对推动后续项目实施具有积极作用。

(摘编自 《中国交通建设网》)