

· 施 工 ·



## 船行波对近距沉管隧道管节 安装施工的影响分析

曲俐俐, 冯海暴, 付大伟

(中交一航局第二工程有限公司, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 目前国内规范尚未规定船行波对临近岸坡和船舶的作用, 得出船行波对海上作业船舶的影响规律尤为重要。为了能够分析清楚船行波对港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道管节安装过程中的影响, 提前采取防范措施, 避免因船行波的影响对工程造成损失, 对国内、外学者发表的相关文献及国外相关的规范进行了研究, 修订了一些文献中的笔误, 推荐了适用于港珠澳大桥沉管隧道管节安装中船行波的计算公式。通过现场实际条件计算, 结合已有的物理模型试验、现场实测等成果, 给出了船行波的主要影响因素和随距离衰减的规律, 从而得出了沉管安装的船舶航行限速条件。

**关键词:** 船行波; 波高计算; 衰减趋势; 沉管; 近距安装; 限定; 规律

中图分类号: U 661.32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0185-08

### Effect of ship wave on low-coverage immersed tunnel tube in installation construction

QU Li-li, FENG Hai-bao, FU Da-wei

(The Second Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The effect of ship wave on the approach bank slope and ship is not stipulated yet in Chinese code. It is particularly important to grasp the influencing rule of ship wave on offshore operation ship. In order to analyze the effect of ship wave on the Hong Kong-Zhuhai-Macao island tunnel bridge project in the process of installation of immersed tunnel tube, we take preventive measures. We also research related literatures published by domestic and overseas scholars and domestic and overseas related codes, revise the clerical errors in some literatures and recommend available calculation formulae of ship wave for the installation of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge immersed tunnel tube. The attenuation is deduced through field actual conditions calculation, physical model test, and field actual measurement, etc. The speed restricted conditions of ship navigation for immersed tube installation is also deduced.

**Key words:** ship wave; wave height calculation; attenuation trend; immersed tube; near installation; restriction; law

#### 1 工程概况

港珠澳大桥沉管隧道隧址位于珠江口伶仃洋海域, 是连接香港特别行政区、广东省珠海市、澳门特别行政区的大型跨海通道的关键性工程, 隧道基槽全长5 990 m (不含桥隧过渡段, 两岛之间的沉管段长5 664 m), 分别联于东西2个人工

岛。伶仃西航道横穿隧址, 大濠水道、铜鼓航道和榕树头航道与伶仃航道对接, 隧址附近船舶通行频繁。2008年的统计数据显示通航量为: 铜鼓航道120艘次/d, 伶仃西航道700艘次/d, 大濠水道300艘次/d, 榕树头航道200艘次/d, 粤港澳之间穿梭航行的高速客船500艘次/d, 还有大量在航道水

收稿日期: 2011-12-22

作者简介: 曲俐俐(1967—), 男, 高级工程师, 主要从事船行波、港口工程结构的研究工作。

域外航行的中小型船舶和渔船。

沉管隧道管节安装中, 要保证沉管安装的安全施工, 必须对船行波的影响情况进行深入分析研

究, 为工程施工做到预控, 提前采取防范措施。

港珠澳大桥项目工程总平面见图1, 沉管隧道与航道平面位置关系见图2。

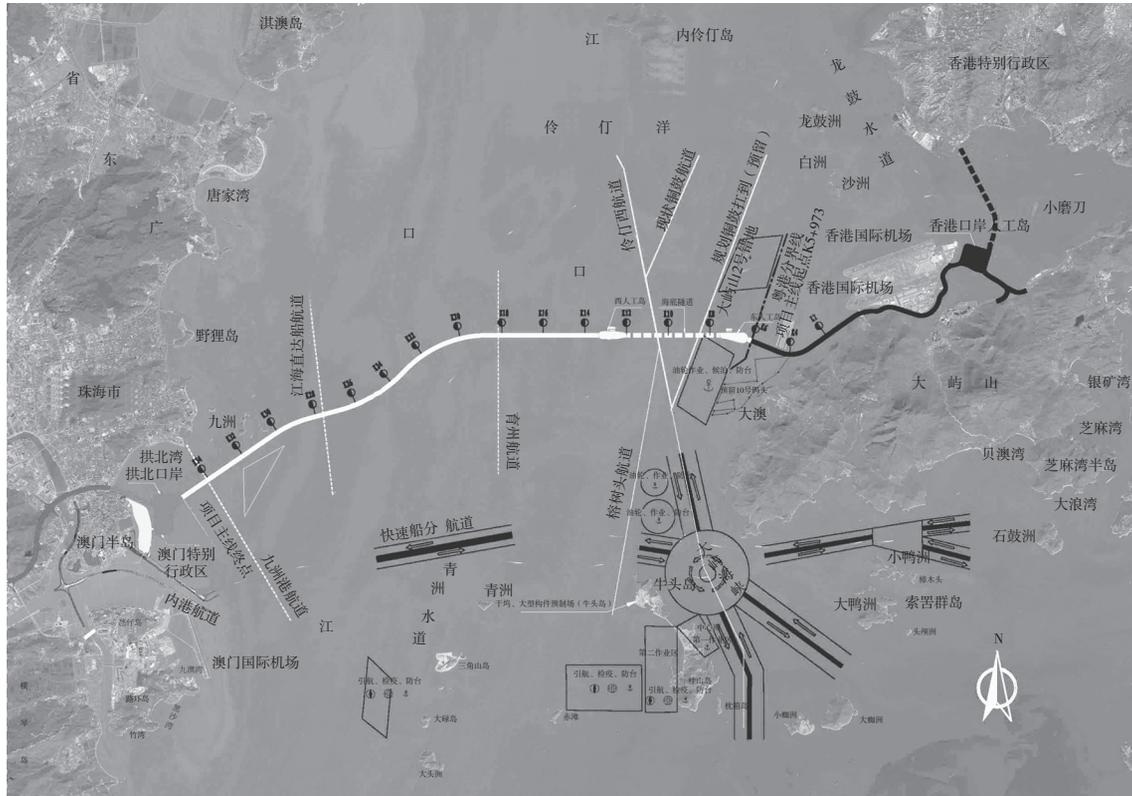


图1 港珠澳大桥项目总平面布置

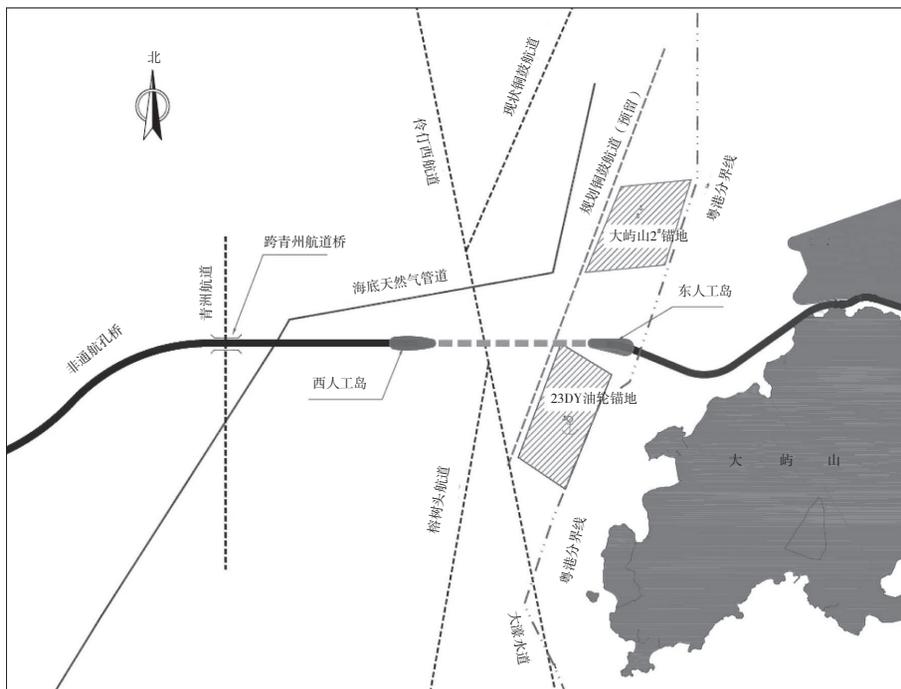


图2 沉管隧道与航道平面位置关系

沉管隧道施工期间,跨越岛隧工程的主要航道通行等级见表1。

根据广州VTS中心交通流量统计资料,2009年珠江口水域船舶交通流量中,广州港和深圳西部港

区进出工程施工区的大部分为中小型船舶和渔船,万吨以上30~50艘次/d,10万吨级3艘次/d。由于隧道沉管安装考虑最不利因素,故考虑按照10万吨级船舶进行计算对比,便于采取预控措施。

表1 岛隧工程航道现状

航道(水道)	通航等级/万吨级	航道底宽/m	航道底高程/m	说明
伶仃西航道	5	250	-15.0	人工航道
铜鼓航道	10	210	-15.8	人工航道
榕树头航道	2.5	160	-12.5	天然航道
大濠水道	30	500	-21.2	天然航道

## 2 船行波计算公式

### 2.1 国外文献、规范

#### 2.1.1 文献

1) 前苏联学者鲍世契教授<sup>[1]</sup>根据在莫斯科运河进行的实船试验和实验室进行的模型试验所获得的成果,认为船行波的形态与航速 $v$ 和临界航速之比有关,建议船首扩散波的最大波高和紧靠船舶的船尾横波波高 $H_{CB}$ 按下列公式计算:

$$H_{CB} = \frac{v^2}{2g} (0.65 + 3.2 \frac{bT}{B_0 H})^2 \quad (1)$$

$v=10 \sim 20 \text{ km/h}$

$$H_{CB} = \frac{v^2}{2g} (0.83 + 3.1 \frac{bT}{B_0 H})^2 \quad (2)$$

$\sqrt{gH} > v > 20 \text{ km/h}$

式中:  $b$ 为船舶中剖面上的船宽(m);  $T$ 为船舶满载时的吃水深度(m);  $B_0$ 为当船舶沿运河轴线航行时船舶吃水处的河宽,当船舶偏航时,  $B_0$ 为自船轴至欲确定波高一岸的水边线距离的两倍;  $H$ 为航道水深(m);  $g$ 为重力加速度。

2) 前苏联学者向金教授<sup>[1]</sup>研究了前人的成果,认为鲍世契公式局限性较大,特别在断面系数较小和较大的情况下,按照鲍氏公式计算船行波将出现明显的偏差。最后提出 $v < \sqrt{gH}$ 且 $n > 4$ ,时计算船边扩散波及船后横波波高 $H_{CB}$ 按下式计算:

$$H_{CB} = \frac{3.1}{\sqrt{n}} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

向金教授又对临近岸坡的波高进行了分析,得出临近岸坡波高 $H_{AB}$ 公式

$$H_{AB} = \frac{2 + \sqrt{\frac{B_0}{L}}}{1 + \sqrt{\frac{B_0}{L}}} \frac{3.1}{\sqrt{n}} \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

式中:  $n = \frac{A}{S}$ ,为断面系数;  $A$ 为航道的过水断面( $\text{m}^2$ );  $S$ 为船舶中剖面水下部分的断面( $\text{m}^2$ );  $L$ 为船长(m)。向金公式已为前苏联“决定波浪对海、河建筑物及岸坡作用的技术规范”所采用。

3) 荷兰Delft水工试验所泼赖和费厄<sup>[2]</sup>在船模资料和原体实测资料分析基础上提出了以下计算公式。

$$H_x = aH \left( \frac{x}{H} \right)^{-0.33} \left( \frac{v}{\sqrt{gH}} \right)^{2.67} \quad (5)$$

式中:  $H_x$ 为船边到计算点 $x$ 的波高(m);  $x$ 为船舷到河道岸边的距离(m);  $a$ 为船型修正系数,巡逻艇、满载内河马达船取1.0,欧洲空载货驳取0.5,空载马达船和拖牵轮0.35;该公式属于衰减公式。

4) 日本航海学会论文集83<sup>[3]</sup>中介绍的经验公式,适用条件为相对水深 $H/T > 6$ ,海船在深水水域情况下

$$H_{CB} = av^3 \quad (6)$$

式中:  $a$ 为与船型、船舶吃水和航速有关的系数,通过船模试验与原体观测值确定。 $a=0.013$ 时,适用于杂货船;  $a=0.015$ 时,适用于补给船;  $a=0.020$ 时,适用于油轮;  $a=0.012$ 时,适用于班轮(集装箱船)。

#### 2.1.2 国外规范

1) 前苏联水工建筑物荷载ellull II -57-75规范<sup>[4]</sup>中,给出了船行波波高计算公式

$$H_{CB} = B_1 \frac{v_{ck}^2}{g} \sqrt{\frac{C_b T}{L}} \quad (7)$$

式中:  $v_{ck}$ 为按运行要求的容许船舶速度(m/s);  $C_b$ 为船舶方形系数;  $B_1$ 为与容许航速和航道水深

有关的参数，

$$B_1 = 2.5 \exp \left( - \frac{gH}{4v_{ck}^2} \right) \quad (8)$$

前苏联建筑规范与规程c11ull II 2.06.04-82<sup>[4]</sup>中对式中的 $v_{ck}$ ，给出了计算式：

$$v_{ck} = 0.9 \sqrt{\left\{ 6 \cos \left[ \frac{\pi + \arccos(1 - K_a)}{3} \right] - 2(1 - K_a) \right\} g \frac{A}{B_0}} \quad (9)$$

式中： $K_a$ 为船舶水下横剖面面积 $S$ 与航道过水断面面积 $A$ 之比，即 $K_a = \frac{S}{A}$ 。式(9)对航速做了限定，适用于航速小于临界速度的条件，即适用于亚临界速度区。

蒋宗燕等引用前苏联水工建筑物荷载规范<sup>[2]</sup>

$$H_{CB} = 2 \frac{v_{ck}^2}{g} \sqrt{\frac{C_b T}{L}} \quad (10)$$

式(10)和式(7)基本相同，只是将式(7)的 $B_1$ 更换成了2，下一步将进行验证。

## 2.2 国内规范、文献

### 2.2.1 规范

对于船行波波高衰减和对岸坡的作用，没有发现规范对船行波方面的明确规定，在文献[6]中，也提到规范尚未将船行波列入其中。

### 2.2.2 文献

国内文献中对船行波进行研究的主要有河海大学海工所项菁<sup>[5]</sup>、南京水利科学研究所李润琛<sup>[7]</sup>等学者，项菁主要对快速双体船的船行波和衰减要素进行了研究<sup>[5]</sup>，李润琛则是对船舶船行波进行了实船试验，并对衰减情况进行了观测<sup>[7]</sup>。

另外对船行波研究的还有国际航运协会<sup>[3]</sup>、南科所余广明教授<sup>[1]</sup>、美国学者约翰逊教授、苏联学者柏拉宁和泊柯夫、库斯科夫、Gokhsteyn和美国陆军工程团、日本等国内外学者<sup>[3]</sup>。文献[1]中还提到加拿大勃莱纳学者、索伦森、加拿大学者邓肯海，也对船行波进行了研究。

## 3 本工程计算公式选择

根据上述经验公式，港珠澳大桥沉管隧道所处海域属于珠江口水域。本文主要研究的是沉管隧道管节安装过程中，横穿伶仃航道的船舶产生的船行波对沉放驳的影响情况，由于伶仃西航道有航速、船舶类型、船舶吨级等参数限定，所以

对于计算公式的选取主要从这几方面考虑。

### 3.1 边界条件

#### 3.1.1 航速

根据广东海事局关于印发《珠江口水域船舶安全航行规定》的通知(2010修订)第11条规定，船舶进入主航道应使用港内速度，在马友石灯船至南沙港区之间水域航行时，航速应控制在15 kn以下，所以在过伶仃航道内的船舶航速应不超过15 kn。

#### 3.1.2 船舶类型

航道内通行船舶主要为杂货船、散货船、集装箱和油轮等船舶，文献[3]中提到，对以上4种船型进行比较，在相同航速下散货船产生的波高最大，油轮次之，杂货船和集装箱船产生的船行波波高相对较小。为此，本工程为考虑最不利因素，选取10万吨级散货船作为本课题的研究主体。

### 3.2 航道参数

根据钢珠澳大桥现场资料，主要影响沉管安装的有伶仃西航道和临时航道，两者距离最近处约为600 m，按照施工区域分析，临时航道影响施工区域最近距离为250 m，在250 m距离范围内，伶仃西航道和临时航道之间可以互相转换，确保航行距离施工现场距离 $L \geq 250$  m。

#### 3.2.1 伶仃西航道

伶仃西航道横跨隧道，底口宽度250 m；航道底高程-15.0 m，取零水位时作为计算取值，则水深15 m。

#### 3.2.2 临时航道

临时航道需要和伶仃西航道宽度相同。

#### 3.2.3 10万吨级船舶尺寸

10万吨级船舶中，散货船设计船型总长 $L=250$  m，型宽 $B=43$  m，型深 $H=20.3$  m，满载吃水 $T=14.5$  m；油船设计船型总长 $L=246$  m，型宽 $B=43$  m，型深 $H=21.4$  m，满载吃水 $T=14.8$  m；杂货船船型设计中，没有10万吨级的相关参数；10万吨级的巴拿马籍集装箱船「MSCRANIA」(地中海兰尼亚)轮船型总长 $L=332$  m，型宽 $B=43.2$  m，满载吃水 $T=11.75$  m。

#### 3.2.4 航速

港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道所处的海域中

$h/d < 2$ ; 航速限制在  $v = 15 \text{ kn} \times 0.514 = 7.71 \text{ m/s}$   
 $= 27.75 \text{ km/h}$ 。

#### 4 船舶航行产生的船行波影响计算

##### 4.1 通用参数取值

在计算公式中, 所有的参数意义统一, 参数的取值主要结合港珠澳大桥岛隧工程的现场实际情况, 船舶取值按 10 万吨级散货船满载工况下取值。

船舶航速  $v = 7.71 \text{ m/s}$ , 船舶中剖面上的船宽  $b = 43 \text{ m}$ , 船舶满载吃水深度  $T = 14.5 \text{ m}$ , 船舶长度  $L = 250 \text{ m}$ , 河面宽度  $B_0 = 460 \text{ m}$  (航道水深  $15 \text{ m}$ ,

边坡系数取 7, 根据文献[8]得, 顶面有效宽度  $B_0 = 2Hm + B_b = 460 \text{ m}$ 。 $B_b$  底宽), 航道水深为  $15 \text{ m}$ , 航道过水断面  $A = 5325 \text{ m}^2$ , 船舶水下部分的断面  $S = 623.5 \text{ m}^2$  (近似值), 航道过水断面系数  $n = 8.54$ , 船型修正系数  $a$  随不同船舶取值不同, 系数  $K_a = 0.12$ , 重力加速度  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ , 船舶方形系数  $C_b = 0.74^{[9]}$ 。

##### 4.2 船舷处船行波波高计算

###### 4.2.1 不同航速船行波影响情况

在计算中, 苏联荷载规范公式中的  $v_{ck}$  计算结果小于  $v$ , 为考虑不利组合, 留有一定的安全储备, 本文按照  $v$  计算。不同航速和计算公式结果见表 2。

表 2 航行船舶船边波高  $H_{cb}$  参数取值

公式	航速/kn				
	5	10	15	20	25
鲍世契公式 (2)	0.42	1.66	3.74	6.64	10.38
向金公式 (3)	0.36	1.43	3.22	5.72	8.94
姜忠燕、潘宝雄校核苏联规范公式 (10)	0.28	1.12	2.51	4.47	6.98
苏联 75 规范公式 (7)	0.05	0.35	1.69	3.94	6.99
荷兰公式 (5)	属于衰减公式, 不适用				
日本公式 (6)	公式适用深海, 不适应本工程				

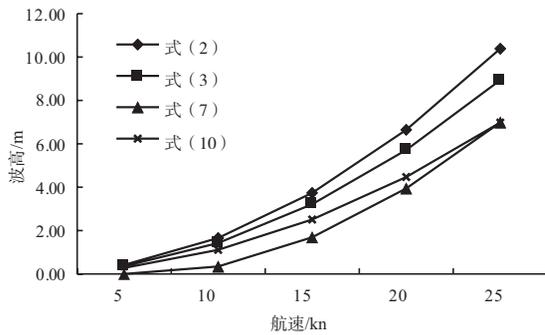


图 3 10 万吨级散货船随航速变化趋势

图 3 中给出了 10 万吨级散货船随航速变化趋势, 可以看出, 船行波的船舷处波高受航速影响明显。

###### 4.2.2 不同吨位级船行波影响情况

为验证船舷处船行波其他影响因素, 现对不同吨位级散货船在航速一定的情况下船舷处船行波情况, 不同吨级散货船设计尺寸见表 3, 计算结果见表 4。

表 3 散货船设计船型尺度

船舶等级/万吨级	设计船型尺度/m			
	总长 $L$	型宽 $b$	型深 $H_1$	满载吃水 $T$
1	135	20.5	11.4	8.5
5	223	32.3	17.9	12.8
10	250	43.0	20.3	14.5
20	312	50.0	25.5	18.5
30	339	58.0	30.0	23.0

表 4 航行船舶船边波高  $H_{cb}$  计算参数取值

公式	航速船舶等级/万 t				
	1	5	10	20	30
鲍世契公式 (2)	2.50	3.13	3.74	4.71	6.20
向金公式 (3)	1.70	2.62	3.22	3.92	4.71
姜忠燕、潘宝雄校核苏联规范公式 (10)	2.62	3.21	3.42	3.86	4.31
苏联 75 规范公式 (7)	1.76	2.16	2.30	2.60	2.90
荷兰公式 (5)	属于衰减公式, 不适用				
日本公式 (6)	公式适用深海, 不适应本工程				

15 kn航速散货船不同吨级产生的船行波计算结果变化趋势见图4。

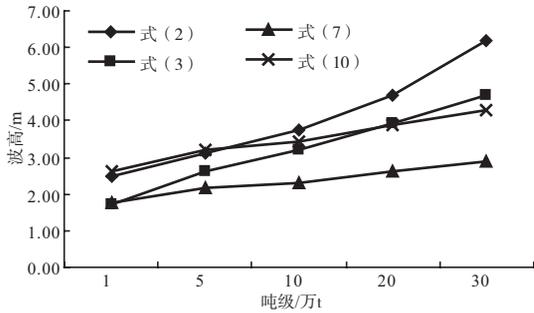


图4 航速15 kn散货船随吨级变化趋势

通过图4中可以看出，船舶航行时产生的船舷处船行波波高和吨级变化影响较大，但鲍世契教授<sup>[1]</sup>的公式中，船行波对船舶的型宽和吃水的增加而存在变大的趋势，主要是没有考虑船舶长度变化影响，显然该因素应该不可忽视，所以该公式不能作为反映船行波随吨级变化的公式，向金公式、苏联荷载规范<sup>[3]</sup>等公式可以反映船行波随吨级变化的规律。

4.2.3 不同船型船行波影响情况

为验证船型对船行波的影响情况，现取10万吨级航速15 kn的散货船、油船、化学品船对比。不同型号船舶设计尺寸见表5。根据表5中的船舶尺寸，对船舷处船行波波高进行计算对比，结果见表6。

表5 10万吨级船舶设计船型尺度

船型	设计船型尺度/m			
	总长L	型宽b	型深H <sub>1</sub>	满载吃水T
散货船	250	43.0	20.3	14.5
油船	246	43.0	21.4	14.8
化学品船	244	42.0	21.0	14.9

表6 航行船舶船边波高H<sub>CB</sub> m

项目	散货船	油船	化学品船
鲍世契公式(2)	3.74	3.74	3.73
向金公式(3)	3.22	3.21	3.21
姜忠燕、潘宝雄校核 苏联规范公式(10)	2.51	2.50	2.49
苏联75规范公式(7)	1.69	1.69	1.68
荷兰公式(5)	属于衰减公式，不适用		
日本公式(6)	公式适用深海，不适应本工程		

15 kn航速航速不同型号船舶产生的船舷处船行波计算结果变化趋势见图5。

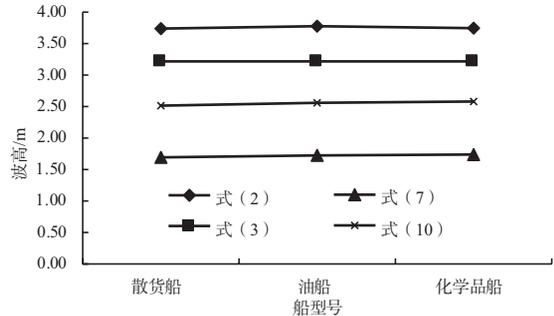


图5 船舶(航速15 kn)船行波随船型变化趋势

通过图5可以知道，船舶的型号对船行波的影响较小，几乎可以忽略不计。

通过对航行船舶船舷处波高计算分析，由上述4个公式计算可知，船行波的主要影响因素是船舶航行速度和吨级。通过对港珠澳大桥施工现场长期观测中，也发现了该情况。所以说，影响船行波最大波高的主要因素是航速和吨级，船型的影响不大。但是如何找出适合于本工程的计算公式，经过对现场进行初步测定，发现向金公式和姜忠燕、潘宝雄校核苏联规范公式(10)与实际相符合，由于向金公式也编入了规范，故拟选取向金教授的计算公式作为本工程船行波的计算校核公式。

4.2.4 船行波衰减分析

1) 河海大学海工所项菁等室内模型试验<sup>[5]</sup>中得出

$$\frac{H_x}{H_{CB}} = 0.72 \exp \left[ \frac{(0.086F_d - 0.211)(x - 6.9)}{T} \right] + 0.28 \quad (11)$$

本公式适用于高速双体船，并不适用于本工程。

2) 文献[3]中波高衰减公式

$$H_x = H_{CB} \exp(-0.11 \frac{x}{\lambda}) \quad (12)$$

式中： $\lambda$ 为船行波波长(m)。式(12)适用于水深傅汝德数 $F_d < 1$ ，且相对水深 $h/d > 2$ ( $h$ 为航道水深， $d$ 为船舶吃水)，适用于深水环境中，不适用于本工程。

3) 文献[3]中的波高衰减公式

$$H_x = H_{CB} \left(\frac{C_b}{b/L}\right)^{-0.015x} \quad (13)$$

式(13)适用于运河或内河水域, 或相对水深 $h/d < 2$ 的海港航道, 可作为本工程计算校核。

4) 1987年国际航运协会常设技术委员会秘书处57号公告<sup>[3]</sup>推荐经验公式。

$$H_x = T \left(\frac{x}{T}\right)^{-0.33} \left(\frac{v}{\sqrt{gH}}\right)^4 \quad (14)$$

5) 南京水利科学研究所李润琛等<sup>[7]</sup>于1959年对京杭大运河问题进行过试验研究, 通过对波高衰减过程的观测, 发现波高的衰减过程近于直线。

6) 本工程拟选定式(13)和(14)进行计算核对, 计算选取航速15 kn散货船, 向金公式计算的船艏处波高 $H_{CB}=3.22$  m, 随距离的衰减情况, 计算参数见表7。

表7 波高计算参数取值

项目	x (距离船舶) /m					
	10	50	100	150	200	250
公式(13)	2.59	1.08	0.36	0.12	0.04	0.01
国际航运协会公式(14)	2.67	1.57	1.25	1.09	1.00	0.92

15 kn航速航速散货船, 使用向金公式计算船艏处波高, 通过式(13)和(14)计算波高随距离衰减趋势见图6。

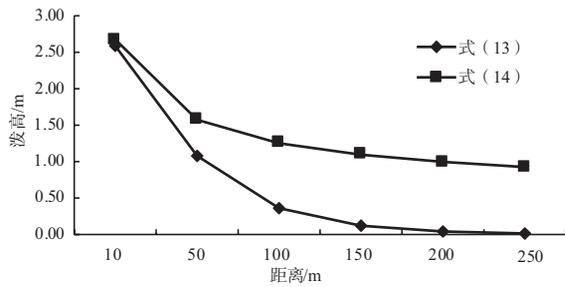


图6 散货船(航速15 kn)船行波随距离衰减趋势

7) 为了验证波高的衰减情况, 笔者于2011年12月对港珠澳大桥伶仃西航道通行的船舶进行了现场观测, 发现波高随距离衰减的趋势, 在离开船舶时, 波高衰减速度较快, 慢慢地衰减速度降低, 与李润琛教授<sup>[7]</sup>和国际航运协会<sup>[3]</sup>推荐的衰减

公式计算的结果基本吻合。

8) 物理模型试验。

李焱等<sup>[10-11]</sup>对船行波也进行了物理模型, 物理模型和船模比尺均取为1:60, 模型按重力相似准则设计。对于船模, 除几何尺度、形状、吃水和排水量都应与实船相似外, 其运动速度及时间也应与实船相似。船模主要技术参数见表8。

表8 3万级船模型主要技术参数

总长/m	宽度/m	满载吃水/m	满载排水量/m <sup>3</sup>	压载吃水/m	压载排水量/m <sup>3</sup>
3.02	0.46	0.18	0.26	0.10	0.14

试验通过对大船进行牵引, 在满载和压载2种情况下, 对不同航速兴起的船行波进行观测, 船行波测点位置见图7, 船行波物理模型试验结果见表9。

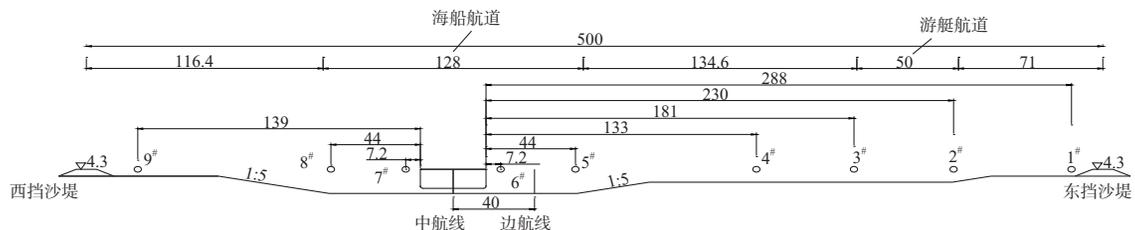


图7 测试点布置(单位:m)

通过物模试验得出船行波随距离变化趋势见图8。

通过对港珠澳大桥岛隧工程沉管安装现场的实际工况分析, 结合国内外船行波公式计算、物

表9 水位为2.5 m时各测点船行波波高 m

航速/kn	6 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	1 <sup>#</sup>
6	0.38	0.24	0.23	0.20	0.09
8	0.94	0.57	0.45	0.42	0.35
10	1.36	0.98	0.91	0.89	0.92
12	2.08	1.89	1.82	1.76	1.54

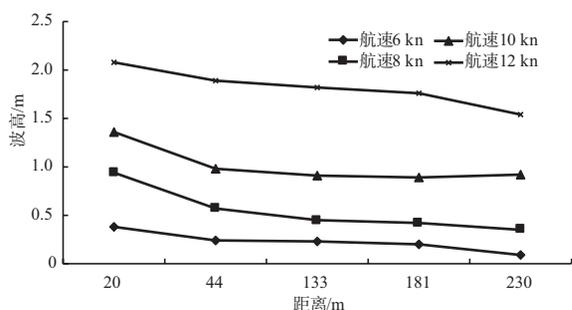


图8 3万吨级船模物理模型试验波高衰减趋势

理模型试验、现场实测结果分析，船行波的波高衰减趋势符合1987年国际航运协会常设技术委员会秘书处57号公告和文献[12]中推荐的波高衰减经验公式计算的结果，故选取该公式作为港珠澳大桥沉管隧道安装时的船行波波高衰减计算公式，作为该工程的波高衰减计算公式。

## 5 结论

针对港珠澳大桥大桥岛隧工程施工现场的实际条件，对工程现场的航道通行船舶进行计算分析，得出了在满足工程现场船行波波高小于0.8 m的工况下，管节沉放可正常施工的条件。

本文得出了影响船行波波要素的主要因素是航速和吨级，航速影响更为严重，控制好通过施工现场船舶的通行航速尤为重要，从计算结果可以看出航行船和沉管安装距离在0~50 m的范围内，随着距离的增加，船行波的波高衰减明显，可以得出船行波衰减随距离趋于线性。经过计算，船行波的波高衰减在距离港珠澳大桥沉管隧道施工现场250 m时，按照国际航运协会波高衰减公式，计算的波高仍为0.92 m，不满足施工工况（限制波高0.8 m）的要求，需要采取降低通行船

航速的措施，来满足沉管安装的工况要求。

经过二次核算，在10万吨级散货船通过距离沉管施工现场250 m时，航速控制在14 kn，衰减后的波高为0.7 m。可以满足施工工况要求。

综上所述，如果将作用波高0.8 m作为施工限定波高，则伶仃西航道可通航10万吨级船舶，经过沉管施工现场时，需要对航速进行限定，不得超过14 kn。

## 参考文献:

- [1] 王水田. 关于船行波问题的研究(二)[J]. 水道港口, 1981(1): 9-16.
- [2] 蒋宗燕, 潘宝雄. 船行波的研究和研究趋势[J]. 中国港湾建设, 2000(6): 34-38.
- [3] 刘洋. 船行波对港口航道周边工作船舶的影响及应用[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
- [4] 苏联部长会议国家建设委员会. 波浪、冰凌和船舶对水工建筑物的荷载和作用[M]. 潘少华, 译. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [5] 项菁, 石根娣. 天然航道船行波波高计算方法[J]. 河海大学学报, 1994(2): 45-49.
- [6] 王亥索, 杨兴晏. 船行波对系泊船的影响[J]. 港工技术, 2010(5): 9-10, 35.
- [7] 李润琛. 船行波试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 1959.
- [8] GB 50139—2004 内河通航标准[S].
- [9] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理(上册)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
- [10] 李焱, 马隽, 赵杨. 海船船行波对游艇航行安全影响试验[J]. 水道港口, 2010, 31(1): 45-50.
- [11] 王亥索. 船行波对大型船舶与游艇组成的复式航道船舶间富裕宽度的影响[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [12] Dupont B. Bone marrow transplantation in sever combined immunodeficiency with an unrelated MLC compatible donor[G]// White H J, Smith R. Proceedings of the Third Annual Meeting of the International Society for Experimental Hematology. Houston: International Society for Experimental Hematology, 1997: 44-46.

(本文编辑 武亚庆)