

基于欧美及中国规范 计算境外疏浚工程航道深度的探讨

吕威, 吕世昌, 杨海

(中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要:近年来境外航道疏浚工程增多, 航道底高程设计中的计算标准差异造成了航道设计水深不同, 带来了投标成本或EPC项目中实施成本差异。介绍了境外航道工程底高程设计的影响因素, 对比分析目前欧美主流规范及中国规范中各因素的考虑角度、取值方法及优缺点论证, 得出了各规范体系优缺点、适用性以及中国规范“走出去”的修订建议和方向。通过两个工程案例论证, 建议在航道底高程设计时可通过多规范计算进行对比分析, 结合港口资料和条件选用适用的主流规范进行设计后, 通过船舶操纵模拟试验进行优化论证。

关键词:航道工程; 航道深度; 欧美规范; 中国规范

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0158-07

Discussion on calculating the channel depth of overseas dredging projects based on European, American and Chinese codes

LYU Wei, LYU Shi-chang, YANG Hai

(China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: In recent years, the number of overseas channel dredging projects has increased. Different calculation standards of the design of the channel bottom elevation brought different bidding costs or implementation costs in EPC projects due to different water depths in channel design. This article describes in detail the influence factors on the design of the channel bottom elevation in overseas channel projects, and makes a comparative analysis of the current European, American mainstream codes and Chinese codes in terms of consideration aspects, value-taking method and the advantages and disadvantages so as to summarize the relative merits and applicability of each code, and also propound advice and direction for Chinese code to “go globally”. According to the demonstrations of the two projects, it is recommended to conduct a comparative analysis through calculations under different codes in designing the channel bottom elevation. After the applicable mainstream code is selected with the design based on port information and conditions, the optimal demonstration should be conducted through the simulation test of ship manipulation.

Keywords: channel project; channel depth; European and American codes; Chinese codes

近年来, 随着国际贸易及国际海运市场的蓬勃发展, 船舶大型化趋势明显, 亚非拉等欠发达地区落后的港口条件已难以满足市场需求, 亟需升级改造, 相应带来了诸多航道浚深拓宽工程。目前国内关于航道的研究主要以中国、日本及西

班牙等规范为主, 对比各规范的不同考虑因素, 或提出基于概率论等航道设计方法^[1-6], 并未有详细针对欧美主流规范的适用性研究。同时, 受地区经济条件限制的原因, 项目融资渠道多为世界银行等国际金融组织, 因此对此类项目的规范通

常明确为欧美规范。但关于港口航道工程航道水深, 欧美规范与中国标准出入较大, 且各国规范规定亦不尽相同^[7-8]。在境外工程投标或者实施过程中, 因标准选用问题造成了航道建设成本和运营风险增加, 为指导中资企业选用欧美规范及帮助中国规范“走出去”, 本文选取了境外工程中最常用的PIANC规范、英标、加拿大及美国标准进行详细的对比分析, 通过案例计算印证了各规范的计算结果, 论证在不同设计阶段及港口资料情况下如何更为合理地选取适当规范进行航道底高程计算, 说明了中国规范走向国际化可考虑完善的方向, 为企业在境外开展此类工程提供参考和借鉴。

1 欧美规范航道水深计算方法及与中国规范对比

1.1 航道水深计算构成及示意图

欧美主流规范对航道水深通用规定由3部分组成, 即水位因素参数、船舶相关参数及航道底质相关参数, 但各部分的具体考虑因素及计算方法规定不同。

1.1.1 PIANC

水位因素为航行中潮位变化(tidal)、不利天气潮位富余(weather)。船舶因素为船舶纵倾在内的满载吃水(draught plus trim)、满载吃水富余(uncertainties)、海水密度变化(density)、船舶航行下沉值(squat)、风及转弯影响富余(dynamic heel)、波浪富余(wave)、龙骨富余水深(net UKC)。底质因素为测量误差、备淤深度和疏浚超深。见图1。

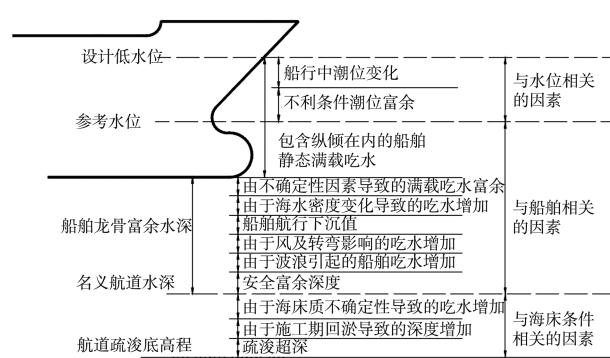


图1 PIANC关于航道水深计算图示及构成

1.1.2 英标

设计实际水深因素为设计船型最大满载吃水(draught)、潮位变化(tidal)、波浪引起的船舶运动(wave)、船舶装卸引起的纵倾(trim)、船舶航行下沉(squat)、大气压力引起的船舶下沉(atmospheric pressure)、龙骨富余深度(net UKC)、测量及疏浚误差、备淤深度等。见图2。

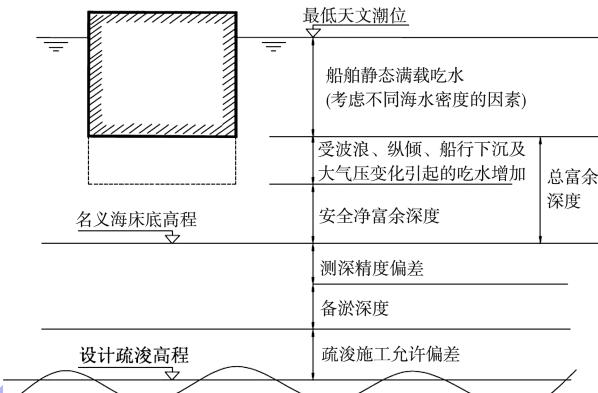


图2 英标关于航道水深计算图示

1.1.3 加拿大标准

设计实际水深因素为设计船型满载吃水(draught)、船舶纵倾(trim*)、船舶航行下沉(squat)、掩护条件富余(exposure)、海水密度(fresh)、龙骨富余(net UKC)、超深富余(over depth)、水深变化(depth transition)、潮位高(tidal)。见图3。

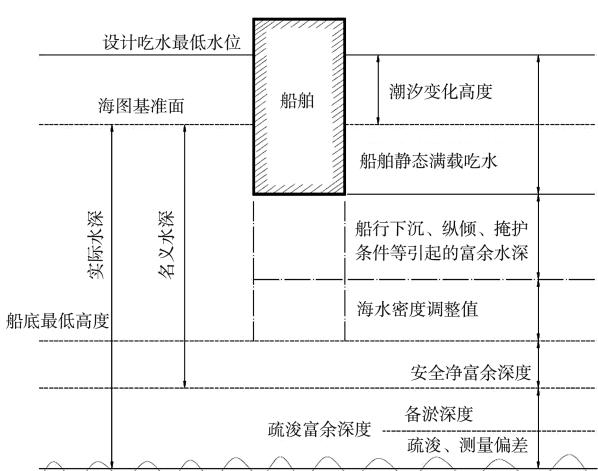


图3 加拿大标准关于航道水深计算图示

1.1.4 美国标准

设计实际水深因素为设计船型满载吃水(draught)、淡水密度变化(fresh)、波浪引起下沉

(wave)、船舶航行下沉 (squat)、龙骨富余 (net UKC)、超深富余 (advance maintenance)、疏浚超深 (dredging tolerance)。见图 4。

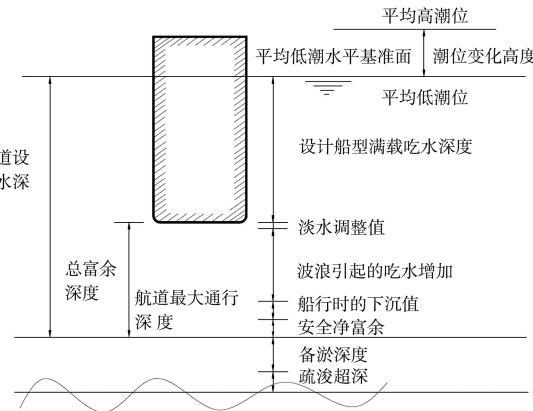


图 4 美国标准关于航道水深计算图示

1.1.5 中国规范

航道通航水深及设计水深的计算，按下列公式计算：

$$D_0 = T + Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (1)$$

$$D = D_0 + Z_4 \quad (2)$$

式中： D_0 为航道通航水深 (m)； T 为设计船型满载吃水 (m)； Z_0 为船舶航行时船体下沉值 (m)； Z_1 为航行时龙骨下最小富余深度 (m)； Z_2 为波浪富余深度 (m)； Z_3 为船舶装载纵倾富余深度 (m)； D 为航道设计水深 (m)； Z_4 为备淤深度 (m)。

1.2 欧美规范航道水深构成取值标准

基于上述航道水深计算图示，对比分析欧美主流规范关于航道水深的计算，见表 1。

表 1 欧美主流规范的航道水深取值及计算方法对比

规范	潮位变化		潮位富余		满载吃水		满载误差富余		海水密度	
PIANC 规范	潮位选取		根据经验取值				根据经验取值		(2%~3%)T	
英国规范	x		x				x		x	
加拿大规范	潮位选取		x		设计船型 满载吃水		x		(2%~3%)T	
美国规范	x		x				x		0.15~0.3 m 或 (1.3%~2.6%)T	
中国规范	x		x				x		适当考虑, 未列入公式	
规范	船舶 纵倾	掩护 条件	船行 下沉	风及转弯 影响富余		波浪 富余	龙骨下 富余	测量 误差	备淤 深度	疏浚 超深
PIANC 规范	包含于 squat 计算	x	详见 下文 公式 $Z_{WR} = F_k \left(\frac{B}{2} \sin \phi_{WR} \right)$ $\phi_{WR} = \phi_w (\text{风}) + \phi_r (\text{转向})$	已包含于掩护条件中 参考西班牙规范 ROM 算法	$Z_{Max,1} = 1.2 (H_{max})_p \approx 2H_s$ $Z_{Max,1} = 0.044B + 0.0087L_{pp}$	$\geq 0.5 \text{ m}$, 岩基时取 1.0 m	$\geq 0.1 \text{ m}$	$\geq 0.2 \text{ m}$ 或 $1\%T$	$0.2\text{--}0.5 \text{ m}$	
英国规范	开敞式航道: 0.3T; 无掩护航道: 0.25T; 有掩护航道: 0.15T, 其中 Net UKC 砂质软土取 0.5 m, 岩基取 1.0 m									根据经验取值
加拿大规范	0.25 m/ (100 m 船长)	0 m; 0.15 m; 0.3 m 全掩 护, 中, 无掩护	详见 下文 公式	x	已包含于掩护条件中	0.25 软土, 0.6 m 砂土, 0.9 m 硬土		0.3 左右		
美国规范	x	x		x	参考 PIANC	0.6 m 软土, 0.9 m 硬质土	x	0.6~0.9	0.3~0.9	
中国规范	杂货及集装箱 船不计, 油船 及散货船取 0.15 m, 滚装船 参照图表	x	根据船 舶吨级 及航速 查经验 图取值	x	根据船浪夹角及波高 查经验表格	根据土质及船 舶吨级查经验 表格取值 0.2~ 0.8 m	x	淤积港口, $\geq 0.4 \text{ m}$		

注：x 表示不予考虑因素， $Z_{max,1}$ 为波浪富余深度 (m)， H_s 有效波高 (m)， B 为船宽 (m)， L_{pp} 为船舶垂线间型长 (m)， F_k 为船底龙骨系数，取值为 0.76~0.90， ϕ_{WR} 为侧倾角度， ϕ_w 为风向侧倾角度， ϕ_r 为转弯侧倾角度， T 为设计船型吃水 (m)。

对加拿大规范而言，大型船舶通行时，龙骨下富余与掩护条件之和应取值大于 1.0 m；且航道水深变化时，由深水区向浅水区变化时，船行下沉值应扩大 15%~20%。

英标规范规定航道水深在 6 kn 航速以下应大于 1.3 倍船舶吃水，航速更高时应提高至 1.5 倍船舶吃水。

对比可知，中国规范对于航道水深取值以经

验图标为主, 未列明详细计算, 船舶纵倾、波浪富余及船行下沉值未考虑设计船型具体尺寸等, 在境外工程应用时应结合其他欧美规范予以适当修正。

1.3 各规范船行下沉量计算公式(squat)

规范中各航道深度参数的计算中, 船舶航行下沉量最为复杂, 影响也较大。常根据航道形式采用不同的经验公式计算, 其中航道形式根据岸坡边界条件划分为3种类型: 运河型(canal)、渠型(trench)和通敞型(fairway), 见图5。

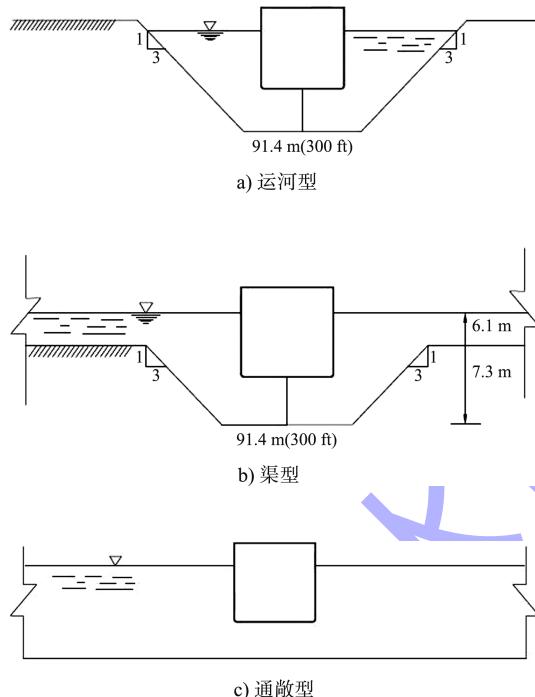


图5 航道形式

1.3.1 美国规范船行下沉值 squat 的计算

通敞型航道, 船行下沉值为:

$$Z=0.01888 C_B \cdot \frac{B}{L} \cdot \frac{T}{h} v^2 \quad (3)$$

式中: Z 为船行最大下沉值(m); B 为船宽(m); T 为船舶吃水(m); L 为船长(m); h 航道水深(m); C_B 为船舶的方形系数; v 为船行速度(km/h)。

运河型航道, 船行下沉值为:

$$Z_L = h \left[\frac{F_L^2}{2} (F_L^{1/3} - 1) \right] \quad (4)$$

其中

$$F_L = \frac{v_L}{\sqrt{gh}} \quad (5)$$

式中: F_L 为弗劳得系数; g 为重力加速度 9.8 m/s^2 ; h 为航道水深(m); v_L 为船行速度(km/h)。

渠型航道, 船行下沉值基于通敞型航道及运河型航道的平均值计算:

$$Z_T = \left(\frac{h_1 + h_2}{2h} \right) Z + \left(1 - \frac{h_1 + h_2}{2h} \right) Z_L \quad (6)$$

式中: h_1 、 h_2 分别为两侧水深(m); h 为渠型航道水深(m); Z 为通敞型航道船行下沉值(m); Z_L 为运河型航道船行下沉值(m)。

1.3.2 PIANC 船行下沉值 squat 的计算

船舶航行下沉值为 S_{\max} (m), 通过 Barrass、Yoshimura、Icorels 等9个经验公式计算确定, 因9个公式适用情况不尽相同, 通常全部计算后取平均值使用, 见表2。

表2 PIANC 关于船行下沉值的计算公式及适用条件

公式名称	适用航道类型			适用限制条件							
	通敞型	渠型	运河型	F_{nh}	C_B	S	B/T	h/T	h_1/h	L/B	L/T
Tuck (1966)				F_{nh}^{2+}							
Huuska/Guliev				≤ 0.7	$0.6 \sim 0.8$		$2.19 \sim 3.5$	$1.1 \sim 2.0$	$0.22 \sim 0.81$	$5.5 \sim 8.5$	$16.1 \sim 20.2$
Icorels	(x)	x		≤ 0.7	$0.6 \sim 0.8$		$2.19 \sim 3.5$	$1.1 \sim 2.0$	$0.22 \sim 0.81$	$5.5 \sim 8.5$	$16.1 \sim 20.2$
Barrass3				v^2	$0.5 \sim 0.85$	$0.1 \sim 0.25$			$1.1 \sim 1.4$		
Eryuzlu2		x		F_{nh}^{2+}	≥ 0.8		$2.4 \sim 2.9$	$1.1 \sim 2.5$			$6.7 \sim 6.8$
Romisch				v^{2+} , v_{cr}			2.6	$1.19 \sim 2.25$		8.7	22.9
Yoshimura				v^2	$0.55 \sim 0.8$		$2.5 \sim 5.5$	≥ 1.2			$3.7 \sim 6.0$

注: F_{nh} 为弗劳得系数; F_{nh}^{2+} 为稍大于弗劳得系数的平方; v_{cr} 为船行临界速度(m/s); S 为船行阻水系数, $S = A_s/A_c$, A_c 为航道横断面面积(m^2), A_s 为船舶水下截面面积(m^2); h_1 为疏浚水深深度(m)。

1.3.3 加拿大规范船行下沉值 squat 的计算

计算公式推荐为：

$$Z(d/D^2) = a(v_s/\sqrt{gd})^b(D/d)^c F_w \quad (7)$$

式中： Z 为航行下沉量 (m)； d 为船舶吃水 (m)； D 为航道深度 (m)； v_s 为船舶速度 (m/s)； g 为重力加速度 9.8 m/s^2 ； W 为航道宽度 (m)； B 为船宽 (m)；系数 a 、 b 、 c 分别为 0.298 、 2.289 、 -2.972 ； F_w 为航道宽度系数， $W > 9.61B$ 时， $F_w = 1$ ， $W < 9.61B$ 时， $F_w = \frac{3.1}{\sqrt{W/B}}$ 。

2 境外航道工程底高程计算依据及适用性

2.1 欧美规范计算因素特征

对比各规范的具体考虑因素及计算过程可知，PIANC 规范于欧美主流规范中考虑因素最为

全面，且各因素均规定有取值范围或经验公式计算，将掩护条件细化为风、浪及转弯因素等，见表 3。英标规范相对规定最为宽泛，仅描述了航道水深设计需要考虑的因素，通过对比设计船型吃水的放大系数进行计算。美国标准及加拿大比较相近，不同的是美标认为船舶纵倾可与船行下沉相抵消，因此不予考虑船舶纵倾；加拿大标准将风、浪及转弯等外部影响因素通过掩护条件等级进行了量化，未有计算，而美国标准将波浪的影响参考了 PIANC 计算，风向的因素未予考虑，因此若设计航道受强横风影响时，使用美国规范应注意该影响因素。在龙骨富余深度及底质富余（涵盖测量误差、疏浚超深及备淤深度）等各规范均给出了相应的参考值，其中美国标准该数值偏大。

表 3 PIANC 概念设计阶段航道水深的取值

考虑因素	取值范围	F_s 取值	
		航道底质	内航道
航行速度	$\leq 10 \text{ kn}$		1.10T
	$10 \sim 15 \text{ kn}$		1.12T
	$> 15 \text{ kn}$		1.15T
波浪条件	低涌浪 ($H_s < 1 \text{ m}$)		1.15T~1.2T
	中度涌浪 ($1 \text{ m} < H_s < 2 \text{ m}$)		1.2T~1.3T
	高 ($H_s > 2 \text{ m}$)		1.3T~1.4T
底质因素		淤泥	0
		砂或黏土	0.4 m
		岩石或珊瑚礁	0.6 m
			1.0 m

注： F_s 为船舶因素航道深度 (m)， H_s 为涌浪波高 (m)， T 为船舶吃水 (m)。

2.2 适用性分析

PIANC 规范将航道设计水深划分为概念设计及详细设计两个阶段，上述图表因素及公式针对详细设计阶段规定，而在概念设计阶段，PIANC 提出了简化公式估算，即为

$$H_{cd} = F_s + S_k \quad (8)$$

式中： H_{cd} 为航道设计水深； F_s 为船舶因素航道深度 (m)，根据表 3 取值； S_k 为横摇下沉深度：

$$S_k = F_k \left(\frac{B}{2} \sin \phi_{WR} \right) \quad (9)$$

式(9)仅适用于集装箱及滚装车辆船舶时考虑并使用，其中 F_k 为船底龙骨系数，取值 $0.76 \sim 0.90$ ，

ϕ_{WR} 为侧倾角度，取值 $1^\circ \sim 2^\circ$ 。

境外航道疏浚工程通常划分为 3 个阶段，由浅入深分别为概念设计、可行性研究设计及详细设计阶段。结合上述典型规范的计算特征，PIANC 概念设计公式及其它主流规范均可使用，但受限于前期气象资料限制等，美标及加拿大标准无法准确计算船行下沉值等；在详细设计阶段，适用 PIANC 详细设计计算规范、美标和加拿大标准。常见欧美咨询针对境外工程的航道设计较多使用 PIANC 及加拿大规范，且两者相互计算对比并校正，最后通过船舶操纵模拟试验进行验证和优化。

3 工程案例

3.1 案例 1—坦桑尼亚达雷斯萨拉姆港

案例 1 港口位于非洲东海岸某泻湖湾内, 风浪掩护条件好, 因升级改造, 需要对现有航道进行浚深, 并延长加宽。经市场分析研究, 设计船型确定

为超巴拿马集装箱船, 船长为 267 m、垂线间长尾 253.7 m、船宽 37.4 m、最大吃水 13.5 m, 设计船型为 6.5 万 DWT 集装箱船, 方形系数为 0.65, 外航道船行速度设计为 9 kn, 以该项目的外海航道为例进行计算对比, 船行下沉量结果见表 4、5。

表 4 案例 1 船行下沉值对比计算

规范公式	条件判断	采用公式	Squat 计算数值/m
PIANC 计算公式	$0.5 \leq C_B \leq 0.9; 1.1 \leq h/T \leq 1.5$ $S = A_s/A_w = 0.14; v_s = 4.0$	Barras I(1979)	0.49
	$0.5 \leq C_B \leq 0.9; 1.1 \leq h/T \leq 1.5$ $F_{nh} \approx 0.35 < 0.7$	Barras II(1981)	0.44
	$0.5 \leq C_B \leq 0.85; 1.1 \leq h/T \leq 1.4$ $0.1 \leq S \leq 0.25$	Barras III(2004)	0.49
	$F_{nh} \approx 0.35 < 0.7; 1.1 \leq h/T \leq 2$	Huuska(1976)	0.38
	$F_{nh} \approx 0.35 < 0.7; 1.1 \leq h/T \leq 2$	Huuska/Guliev(ICORELS 1980)	0.36
美国规范计算公式	$h_1, h_2 = 8 \text{ m}; h = 15.5$	$Z_T = (\frac{h_1+h_2}{2h})Z + (1 - \frac{h_1+h_2}{2h})Z_L$	0.50
加拿大规范	$W < 9.61B$	$Z(d/D^2) = a(V_s/\sqrt{gd})^b(D/d)^c F_w$	0.40
中国规范	非限制性航道根据航速及船舶吨级查经验图	6.5 万吨级, 9 kn 航速	0.60

表 5 案例 1 设计水深各规范对比

规范	潮位变化	潮位富余	满载吃水	满载误差	海水密度	船舶纵倾	掩护条件	船行下沉	风及转弯影响富余	波浪富余	龙骨下富余	测量误差	备淤深度	疏浚超深	合计	
PIANC 规范	-	0.1	13.5	0.2	-	-	-	0.4	0.5	0.9	0.6	0.1	0.3	0.3	16.9	
英国规范	-	-	13.5	-	-	-	-	2.8	-	-	-	0.5	-	0.3	0.3	17.4
加拿大规范	-	-	13.5	-	0.3	0.7	0.3	0.3	-	-	0.6	-	0.3	0.3	16.4	
美国规范	-	-	13.5	-	-	-	-	-	0.5	-	0.9	0.9	-	0.6	0.5	16.9
中国规范	-	-	13.5	-	-	-	-	-	0.6	-	1.02	0.5	-	0.4	-	16.0

3.2 案例 2—坦桑尼亚坦噶港

案例 2 港口位于坦桑尼亚北部海湾内, 因港口常年失修, 航道水深仅为 3 m 左右, 远洋船舶无法进港, 通过水上过驳作业装卸货物, 现政府提出重新改扩建该港口并浚深航道。经市场分析

研究, 设计船型确定为 3.5 万 DWT 集装箱船, 船长为 222 m、垂线间长尾 211 m、船宽 32.2 m、最大吃水 11.1 m, 方形系数为 0.61, 外航道船行速度设计为 6 kn, 以其外航道设计水深计算为例, 对比计算船行下沉量结果见表 6、7。

表 6 案例 2 船行下沉值对比计算

规范公式	条件判断	采用公式	squat 计算数值/m
PIANC 计算公式	$0.5 \leq C_B \leq 0.9; 1.1 \leq h/T \leq 1.5$ $S = A_s/A_w = 0.12;$	Barras I(1979)	0.22
	$0.5 \leq C_B \leq 0.9; 1.1 \leq h/T \leq 1.5$ $F_{nh} \approx 0.27 < 0.7$	Barras II(1981)	0.21
	$0.5 \leq C_B \leq 0.85; 1.1 \leq h/T \leq 1.4$ $0.1 \leq S(\approx 0.2) \leq 0.25$	Barras III(2004)	0.22
	$F_{nh} \approx 0.27 < 0.7; 1.1 \leq h/T \leq 2$	Huuska(1976)	0.16
	$F_{nh} \approx 0.27 < 0.7; 1.1 \leq h/T \leq 2$	Huusa/Guliev(ICORELS 1980)	0.14

续表6

规范公式	条件判断	采用公式	squat 计算数值/m
美国规范计算公式	$h_1, h_2 = 5 \text{ m}; h = 13$	$Z_T = \left(\frac{h_1+h_2}{2h}\right) Z + \left(1 - \frac{h_1+h_2}{2h}\right) Z_L$	0.24
加拿大规范	$W > 9.61B$	$Z(d/D^2) = a(v_s/\sqrt{gd})^b (D/d)^c F_w$	0.17
中国规范	非限制性航道根据航速及船舶吨级查经验图	3.5 万吨级, 6 kts(11.11 km/h)航速	0.30

表 7 案例 2 设计水深各规范对比

规范	潮位变化	潮位富余	满载吃水	满载误差富余	海水密度	船舶纵倾	掩护条件	船行下沉	风及转弯影响富余	波浪富余	龙骨下富余	测量误差	备淤深度	疏浚超深	合计
PIANC 规范	-	0.1	11.1	-	-	-	-	0.19	0.38	0.4	0.50	0.1	0.3	0.3	13.4
英国规范	-	-	11.1	-	-	-	1.70	-	-	-	0.50	-	0.2	0.2	13.7
加拿大规范	-	-	11.1	-	0.22	0.55	0.15	0.19	-	-	0.25	-	0.3	0.3	13.1
美国规范	-	-	11.1	-	0.15	-	-	0.24	-	0.4	0.60	-	0.6	0.3	13.4
中国规范	-	-	11.1	-	-	-	-	0.30	-	0.4	0.30	-	0.4	-	12.5

由计算结果对比可见, PIANC 规范对影响水深的各因素考虑比较全面且有具体计算的依据, 而美国规范较多参考了 PIANC 的计算, 且两者考虑因素相近, 两者总体结果相近且偏保守; 英国规范以总体测算为主, 水深计算结果偏大; 加拿大规范将风浪因素等通过掩护条件量化, 结果较上述规范偏小; 中国规范以经验取值为主, 未考虑航道外部掩护条件, 船行下沉取值仅考虑船舶吨级及航速, 未考虑不同货种船舶的尺寸在航行中的影响, 亦未考虑风的影响等, 计算结果偏小, 假如在境外工程中应用中国规范时, 应结合境外规范适当补充未考虑的因素。

总体来看, 在境外工程设计时, 规范的选取及应用, 可结合本文分析根据项目的具体特征及阶段进行判断适用。

4 结语

1) 因考虑因素及计算方法不同, 欧美主流规范针对航道水深计算结果不同, 造成工程报价出入, 因此投标报价时应重视规范选取, 可根据各规范进行计算对比最终确定。

2) 船行下沉值对航道水深影响较大, 欧美主流规范对船行下沉值计算方法出入较大、公式繁多, 计算时可统一计算做对比分析。

3) 针对不同设计阶段, 各规范适用性不同, 其中 PIANC 的航道水深计算偏重理论计算, 更具通用性, 加拿大及美国规范计算相对简便。

4) 中国规范以经验取值为主, 境外工程推出中国规范时可适当对比欧美规范补充航道掩护条件、风及船舶尺寸在航行中引起的下沉值计算。

5) 细致设计阶段, 建议根据各规范计算设计后, 通过船舶操纵模拟试验进行优化论证。

参考文献:

- [1] PIANC. Harbor approach channels-design guidelines, report of working group 49[S]. Brussels: PIANC, 2014.
- [2] BSI. Maritime works-part 1-1: General-code of practice for planning and design for operations: BS 6349[S]. London: BSI, 2013.
- [3] Canadian Coast Guard, Fisheries and Oceans Canada. Guidelines for the Safe design of commercial shipping channels[S]. Vancouver: Canadian Coast Guard, Fisheries and Oceans Canada, 2001.
- [4] U.S.Army Corps of Engineers. Coastal engineering manual[M]. Washington: U.S. Army Corps of Engineers, 2002.
- [5] 中交水运规划设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [6] 交通部天津水运工程科学研究所. 淤泥质海港适航水深应用技术规范: JTJ/T 325—2006 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [7] 王烽, 宋伟华, 谷文强. 航道底高程设计方法研究[J]. 港工技术, 2019, 56(2): 29-34.
- [8] 崔江浩. 航道深度设计的国内外标准规范差异性分析[J]. 港工技术, 2018, 55(1): 14-18.