



石浦港区主航道一期工程航道尺度设计

陈 琦¹，潘金霞²

(1. 宁波港建设开发有限公司, 浙江 宁波 315040; 2. 宁波中交水运设计研究有限公司, 浙江 宁波 315040)

摘要：以宁波-舟山港石浦港区主航道一期工程设计为例，分析了复杂自然条件下的航道设计不利因素。针对航道水深、通航宽度以及转弯半径等主要航道设计尺度，在按现行国内规范计算的基础上，参考了以《进港航道设计导则》为代表的国外主要航道设计规范，对计算结果进行对比分析，归纳比较了国内外规范在相关参数取值上的异同点，最终推荐航道设计尺度。通过操船模拟试验论证，相关结论可供航道工程设计参考。

关键词：航道水深；航道宽度；转弯半径；操船模拟

中图分类号：U 652.3 **文献标志码：**A **文章编号：**1002-4972(2015)12-0113-05

Scale design of phase I Shipu navigational channel project in Ningbo-Zhoushan port

CHEN Qi¹, PAN Jin-xia²

(1. Ningbo Port Construction and Development Co. Ltd., Ningbo 315040, China;
2. CCCC Ningbo Water Transport Design and Research Co., Ltd., Ningbo 315040, China)

Abstract: Taking the phase I Shipu navigational channel project in Ningbo-Zhoushan port for example, we analyze the unfavorable factors for channel designing under complicated geologic conditions. Furthermore, a series of main scale parameters of channel designing, such as depth, width and turning radius, are calculated based on the formulas given by the specification in operation referring to the *Guide for Design of Approach Channels* (PIANC). The recommended results are proved by ship maneuvering simulator experiment. The conclusions may serve as reference for the channel engineering design.

Keywords: channel depth; channel width; channel turning radius; ship maneuvering simulator

石浦港区位于象山半岛南端和三门湾北翼，是集客货运输、临港工业、海洋渔业和旅游为一体的综合性港区，现有各类码头 207 座。

石浦港区现有铜瓦门、东门等 5 条出港水道，但基本处于自然状态，最大通航能力仅为 5 000 t，亟需建设万吨级以上航道以适应港区建设发展。石浦港区主航道一期工程建设规模为^[1]：1 万吨级乘潮通航的单向航道，其中口门段按 3.5 万吨级船舶通航要求炸礁，口外段兼顾 5 000 吨级船舶乘潮双向通航要求，分为港内段、进出口段与口外段，航道全长约 23.6 km。预留二期、三期工程扩建为 3.5 万吨级和 5 万吨级乘潮单向航道。航道

起自石浦港内三门口大桥，经打鼓峙与中界山所夹航路向东北，过汰网屿，转向东南，沿下湾门水道，过金龙礁出海，后转向向东，沿檀头山南侧通向外海，共 8 段 7 处折点（图 1）。

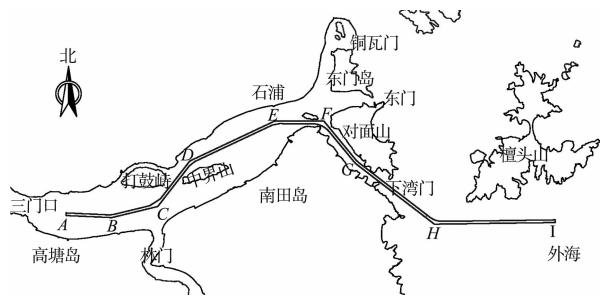


图 1 工程地理位置

1 自然条件分析

1.1 潮流

受附近多通道地形影响,工程水域潮流动力强劲、流态复杂。特别是下湾门水道南口,受突嘴挑流等影响,存在环流现象。航道沿程最大横流位于港外段转弯处,约为 0.87 m/s。

1.2 水深及泥沙淤积

石浦港内段及港外段水深均在 6 m 以上;下湾门水道水深可达 19~60 m。受下洋涂围垦等因素的影响,石浦港内淤积呈加速状态,部分区域年淤积强度达 0.21 m/a。

1.3 地质

港内(外)疏浚土基本为淤泥质土,适于航道开挖。炸礁岩性基本为中风化凝灰质砂岩。

总体分析,石浦港区岸线曲折、地形复杂、天然水深一般,且存在回淤现象。口门段基岩裸露,礁石密布,航道轴线折角较多,设计难度较

大。考虑到各段航道自然条件差异较大,航道尺度须分段计算。

2 航道水深计算

2.1 现行国内规范

根据 JTS 165—2013《海港总体设计规范》(简称规范)^[2]6.4.6.1 条,航道设计水深按下列公式计算:

$$D_0 = T + Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 \tag{1}$$

$$D = D_0 + Z_4 \tag{2}$$

式中: D_0 为航道通航水深(m); D 为航道设计水深(m); T 为设计船型满载吃水(m); Z_0 为船舶航行时船体下沉增加的富裕水深(m); Z_1 为船舶航行时龙骨下最小富裕水深(m); Z_2 为波浪富裕水深(m); Z_3 为船舶装载纵倾富裕水深(m); Z_4 为备淤深度(m)。本工程分段航道设计水深见表 1。

表 1 分段航道设计水深计算(中国规范)

大段	小段	船舶	T/m	Z_0/m	Z_1/m	Z_2/m	Z_3/m	Z_4/m	取值 D/m
港内段		1 万 DWT 杂货船	8.7	0.35	0.3	0.29	0	0.4	10.1
进出口段	非炸礁段	1 万 DWT 杂货船	8.7	0.35	0.3	0.48	0	0.4	10.3
	金龙礁炸礁段	3.5 万 DWT 散货船	11.2	0.40	0.6	0.96	0.15	0.4	13.8
	其余炸礁段	3.5 万 DWT 散货船	11.2	0.40	0.6	0.48	0.15	0.4	13.3
口外段	I 段	1 万 DWT 杂货船	8.7	0.35	0.3	0.96	0	0.4	10.8
	II 段	1 万 DWT 杂货船	8.7	0.35	0.3	0.90	0	0.4	10.7

注:1. 船速取 8 kn (14.82 km/h)。2. 港内设计通航作业波高 1.2 m,进出口及口外段取 2 m。3. 其余炸礁段指园山、眼睛山嘴、下布袋、上布袋炸礁段。4. 口外段 I 段、II 段分别指出金龙礁口门外海航道转弯转弯段与檀头山南侧段。

2.2 国外规范对比分析

根据国际航运协会《进港航道设计导则》^[3](简称导则)以及其他国外规范,对上述参数取值进行对比分析:

1) 航行下沉量 Z_0 。

《导则》给出 Huuska/Guliev 公式、Barrass II 公式和 Eryuzlu 等 3 种计算公式。中国规范只考虑了船舶吨级和航速两个因素,据此取值与《导则》中的非限制性航道航行下沉量相当,在限制性航道中中国规范取值偏低(表 2)。

2) 龙骨下最小富裕深度 Z_1 。

美国规范^[4]指出在船底与泥面之间还应留有 0.6~0.9 m 的富裕水深。加拿大规范^[5]视底质软、

中、硬不同,分为 0.25、0.60、0.90 m 共 3 等。对于 Z_1 ,《规范》与美、加规定基本相当。

表 2 航行下沉值 Z_0 比较 m

规范	计算方法	港内段	进出口段		口外段
			非炸礁段	炸礁段	
中国规范		0.350	0.350	0.400	0.350
导则	Huuska/Guliev 公式	0.359	0.359	0.469	0.359
	Barrass II 公式	0.284	0	0.494	0.223
	Eryuzlu 公式	0.564	0.548	0.476	0.414

注:Huuska/Guliev 公式与 Eryuzlu 公式一般分别用于非限制性航道与限制性航道。

3) 波浪富裕深度 Z_2 。

《导则》中对于 Z_2 计算,通常采用“RAO”法。

根据相关研究结论^[6], 当 $\overline{T} \leq 8$ s 时, 中国规范是偏于安全的。

4) 船舶装载纵倾富裕深度 Z_3 。

美国规范^[4]指出, 是否考虑 Z_3 可由引航员根据港口条件在营运时决策; 加拿大规范^[5]建议 Z_3 取为 0.002 5 船长。因此, 《规范》对船舶装载纵倾的取值适中。

5) 备淤富裕深度 Z_4 。

美国规范^[4]指出, 备淤深度应根据水深可靠性要求和减少疏浚频次的经济性确定, 一般可取 0.6 m 或 0.9 m。加拿大规范^[7]指出, 备淤深度可取两次疏浚之间的回淤深度。根据相关研究^[4], 石浦港内、外疏浚段年淤积强度分别为 0.35 ~ 0.4 m/a、0.34 ~ 0.58 m/a, 且不存在形成阻碍航行的骤淤可能, 因此, 本设计中 Z_4 值取 0.4 m 安全合理。

2.3 最终取值

根据以上对比分析, 国内外规范的取值除限

制性航道中船舶航行下沉量 Z_0 具有一定差别外, 其余各值取值均相当。对于 Z_0 , 一般情况下可在多个计算结果中选择居中值。综上, 航道设计水深及底高程均采用国内规范取值, 且基本满足《导则》及其他国外规范。

3 航道宽度计算

3.1 现行国内规范

根据《规范》^[2] 6.4.2 条, 航道通航水深按下列公式计算:

单线航道 $W = A + 2c$ (3)

双线航道 $W = 2A + b + 2c$ (4)

$A = n(L\sin\gamma + B)$ (5)

式中: W 为航道通航宽度(m); A 为航迹带宽度(m); n 为船舶漂移倍数; γ 为风、流偏压角($^\circ$); b 为船舶间富裕宽度(m); c 为船舶与航道底边间的富裕宽度(m)。本工程分段航道通航宽度(中国规范)见表 3。

表 3 分段航道通航宽度计算 (中国规范)

大段	小段	单双线	船舶	n	$\gamma/(^\circ)$	A/m	b/m	C/m	W/m
港内段	非炸礁段	单线	5 000 DWT 油船	1.59	10	62.3		26.3	115
		单线	5 000 DWT 油船	1.69	7	55.3		26.3	108
		单线	3.5 万 DWT 散货船	1.59	10	100.8		42.6 ^①	186
进出口段	金龙礁炸礁段	单线	3.5 万 DWT 散货船	1.69	7	90.6		30.4/42.6 ^①	165
	I 段	双线	5 000 DWT 散货船	1.45	14	67.6	18.8	18.8	192
		单线	5 000 DWT 油船	1.45	14	69.2		26.3	122
口外段	II 段	双线	5 000 DWT 散货船	1.69	7	55.5	18.8	18.8	168
		单线	5 000 DWT 油船	1.69	7	55.3		26.3	108

注: 1. 单线航道通航宽度计算控制船型为 5 000 DWT 油船; 双向航道仅考虑 5 000 DWT 散(杂)货船交汇通过。
2. 根据《规范》^[2] 6.4.2 条, 对于坚硬黏性土、密实砂土及岩石底质等硬质底质和边坡坡度大于 1:2 的情况, c 值应适当增大, 即本工程炸礁段 c 取 $1.4B$, 非炸礁侧 c 值取 B , 其中金龙礁段为双侧炸礁, 其余炸礁段均为单侧炸礁。

3.2 国外规范对比分析

其他各国规范和设计手册中通常将航道宽度表示为设计船宽(船长)倍数。对于条件较差区域的航道设计, 国外普遍建议采用船舶模拟器进行试验论证。以下根据《导则》推荐的航迹带宽度计算方法, 对航道通航宽度进行对比分析:

单线航道 $W = W_{\text{BM}} + \sum_{i=1}^n W_i + W_{\text{Br}} + W_{\text{Bg}}$ (6)

双线航道 $W = 2W_{\text{BM}} + 2\sum_{i=1}^n W_i + W_{\text{Br}} + W_{\text{Bg}} + \sum W_p$ (7)

式中: W_{BM} 为基本操纵带; W_{Br} 、 W_{Bg} 为航道“红”侧及“绿”侧的船-岸间距; $\sum W_i$ 为航道附加宽度系数之和; $\sum W_p$ 为考虑两船交会的附加宽度系数之和。本工程分段航道通航宽度(导则)见表 4。

表 4 分段航道通航宽度计算（导则）

大段	小段	单双线	船舶	W_{BM}/m	W_{Bt}/m	W_{Bg}/m	$\sum W_i/m$	$\sum W_p/m$	W/B	W/m
港内段		单线	1 万 DWT 杂货船	1.5	1.0	1.0	1.6		5.1	112
	非炸礁段	单线	1 万 DWT 杂货船	1.5	1.0	1.0	1.2		4.7	104
	进出口段 金龙礁炸礁段	单线	3.5 万 DWT 散货船	1.5	1.0	1.0	2.6		6.1	186
	其余炸礁段	单线	3.5 万 DWT 散货船	1.5	1.0	1.0	2.1		5.6	170
口外段	Ⅰ 段	双线	5 000 DWT 散货船	1.5	0.5	0.5	2.8	1.8	11.4	215
		单线	1 万 DWT 杂货船	1.5	0.5	0.5	2.8		5.3	117
	Ⅱ 段	双线	5 000 DWT 散货船	1.5	0.5	0.5	2.3	1.8	10.4	196
		单线	1 万 DWT 杂货船	1.5	0.5	0.5	2.3		4.8	106

注：单线航道通航宽度计算控制船型为 1 万 DWT 杂货船；双向航道控制船型同表 3。

3.3 取值比较分析

1) 港内段。《导则》中考虑的波浪附加宽度较小，偏于安全取《规范》计算值 115 m。

2) 进出口段。航道通航宽度取值为 115 m；金龙礁炸礁段，依照中国规范考虑该段为限制性航道，同样《导则》也建议船岸间距应适当增大，二者计算结果均为 186 m；其余炸礁段均为单侧炸礁，《导则》与《规范》计算值分别为 170 m 与 165 m，为减少炸礁工程量取值为 165 m。

3) 港外段。《导则》考虑的波浪附加宽度较大，同时考虑了 5 000 DWT 船舶双向通航时船舶交会引起的船速和密度附加宽度，计算结果较大。该段航道及其附近水域的天然水深能满足 5 000 DWT 船舶通航要求，即只需要疏浚 1 万 DWT 单线乘潮航道即可。从减少工程造价的角度考虑，考虑设置 3 线航道（图 2）：即在现有 1 万 DWT 主航道基础上向两侧拓宽，拓宽部分供 5 000 DWT 船舶乘潮双向通航。

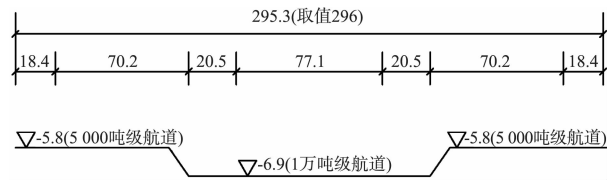


图 2 港外段（Ⅰ段）3 线航道设计断面（单位：m）

3.4 最终取值

分段航道通航宽度最终取值见表 5。

表 5 分段航道通航宽度最终取值

大段	小段	航道等级	最终取值/m
港内段		1 万 DWT 单线航道	115
	非炸礁段	1 万 DWT 单线航道	115
	进出口段 金龙礁炸礁段	3.5 万 DWT 单线航道	186
	其余炸礁段	3.5 万 DWT 单线航道	165
口外段	Ⅰ 段	1 万 DWT 单线航道	122
		1 万 + 5 000 DWT 3 线航道	296
	Ⅱ 段	1 万 DWT 单线航道	115
		1 万 + 5 000 DWT 3 线航道	254

4 航道转弯半径计算

由于本工程拟建区域为岛礁地形，受其限制，天然转弯段较多，且部分拐点位于炸礁区附近，转弯半径取值直接影响航道轴线布置及工程量计算。为保证一期工程的顺利实施，并适当考虑后期工程的可拓展性，航道转弯半径 R 采用《规范》进行计算，并参考《导则》对比分析。

4.1 中国规范

根据《规范》6.3.7 条文解释，转弯半径 R 与船速、船长和转向角之间关系为：

$$R = \frac{0.5v_s L}{1 - \sin \frac{\phi}{2}} \tag{6}$$

式中： v_s 为船速(kn)； L 为船长(m)。据此，本工程航道各转弯段转弯半径取值见表 6。

根据拟建工程区域地形条件，上述各转弯处 1 万 DWT 航道转弯半径的要求均能满足。在二期及三期扩建航道建设时，除 F 点处因转角较大导致三期扩建航道内侧切角受到一定限制外，其余各转弯点处经处理均可满足船舶转弯要求。

表 6 分段航道转弯半径取值 (中国规范)

转弯点	转角/(°)	转弯半径 R 与船长 L 的比值	半径取值/m			二期、三期 可拓展性
			1 万 DWT	3.5 万 DWT(二期拓展)	5 万 DWT(三期拓展)	
H	38.29	6.0	880	1 130	1 330	较好
G	12.96	4.5	660	860	1 005	较好
F	50.25	7.0	1 015	1 325	1 550	较差
E	25.48	5.0	730	950	1 115	较好
D	26.89	5.0	730	950	1 115	较好
C	38.49	6.0	880	1 130	1 330	较好
B	16.20	4.7	680	890	1 040	较好

4.2 国外规范对比分析

《导则》认为船舶驾驶员在转弯时喜欢使用 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 的舵角。本工程拟建航道转弯段水深吃水较小处约为 $1.25T \sim 1.5T$, 此时, 当采用 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 的舵角转弯时, 转弯半径宜取 4 ~ 6 倍设计船长, 对应船宽的航迹带宽度增加系数为 1.3 ~ 1.4, 小于《规范》中船舶漂移倍数最小值 1.45。

因此, 表 6 所示 R 值均能满足《导则》概念设计阶段要求, 但工程拟建区域地形、流况复杂, 为满足后期实际实施需要, 建议适时进行船舶操船模拟试验以验证。

5 操船模拟试验验证

鉴于本工程设计条件复杂, 通过操船模拟试验验证主要航道尺度设计的合理性。试验^[8]选用 1 万 DWT 杂货船作为代表船型, 模拟风流及操船较极限工况: NE 风 7 级, 涨急流进港、落急流出港。结果证明, 能安全操作 (图 3)。

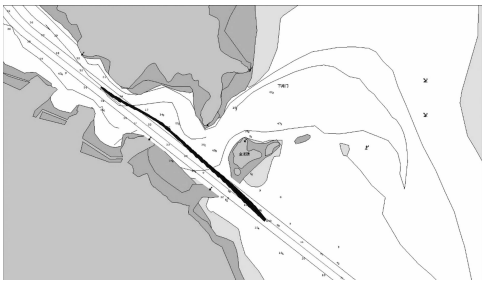


图 3 试验船型涨急流进港模拟航迹线 (口门)

6 结语

- 1) 沿海岛礁区域航道岸线曲折、流态紊乱, 港内外自然条件差异较大, 航道尺度须进行分段计算。
- 2) 《规范》与《导则》中的航道设计水深计算, 除限制性航道 Z_0 有一定差别外, 其余各值取

值均相当。对于 Z_0 , 建议选择各公式计算结果居中值作为设计参数。

3) 对于硬质底质和边坡坡度大于 1:2 的情况, 《规范》未给出航道通航宽度 c 值的定量取值, 建议可根据《导则》进行计算。本工程炸礁段 c 取 $1.4B$, 单、双侧炸礁分别计算, 以控制炸礁工程量。

4) 对于岛礁地形, 航道转弯半径取值直接影响航道轴线布置及工程量, 特别是分期实施项目, 建议在先期方案基础上统筹考虑后期工程的可拓展性。

5) 对于复杂条件下的航道尺度设计, 推荐采用操船模拟试验进行验证。

参考文献:

[1] 中交水运规划设计院有限公司. 宁波-舟山港石浦港区主航道一期工程初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2014.

[2] JTS 165—2013 海港总体设计规范[S].

[3] PIANC, Approach Channels A Guide for Design, Supplement to bulletin no. 95, first report of the joint Working Group PIANC and IAPH, in cooperation with IMPA and IALA, 1997[S].

[4] EM 1110-2-1613, USACE Hydraulic Design of Deep Draft Navigation Project, 2006[S].

[5] Canadian Waterways National Maneuvering Guidelines: Channel Design Parameter, 1999[S].

[6] 中交水运规划设计院有限公司. 沿海港口深水航道选线及设计主要参数研究总报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2010.

[7] 交通部天津水运工程科学研究所. 石浦港区主航道工程潮流泥沙数学模型试验研究报告[R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究所, 2012.

[8] 大连海事大学. 宁波-舟山港石浦港区主航道一期工程船舶操纵仿真模拟试验报告[R]. 大连: 大连海事大学, 2015.

(本文编辑 武亚庆)