



上海市越江隧道吴淞导堤加固工程 波浪要素数值推算

黄海龙, 王红川, 王 驰, 方 辰
(南京水利科学研究院, 江苏南京 210024)

摘要: 对长江黄浦江吴淞口周边气象站的风速资料进行分析, 确定上海市沿江通道吴淞导堤加固工程段水域的设计风速; 利用2013年长江口深水航道沿程的最新水内地形测量资料, 依据设计风速采用考虑风能输入的非线性抛物型缓坡方程建立波浪数学模型推算波浪场, 得出波浪要素。

关键词: 长江; 导堤; 波浪

中图分类号: TV 139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0035-05

Numerical calculation of wave elements for consolidation project of Wusong jetty of Huangpu river tunnel in Shanghai

HUANG Hai-long, WANG Hong-chuan, WANG Chi, FANG Chen
(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: This paper analyzes the wind velocity data from the peripheral weather stations at Wusong estuary of the Huangpu river, a tributary of the Yangtze River. The designed wind velocity is also determined for the waters of the leading dike consolidation project along the river. Based on the latest measurement data in 2013 concerning the deepwater navigation channels at the Yangtze River estuary in Shanghai, together with the aid of the designed wind velocity, and also according to a non-linear parabolic mild slope equation which takes the wind energy input into consideration, this study establishes a wave numerical model, calculates the wave field and wave elements.

Key words: the Yangtze River; leading dike; wave

拟建的上海市沿江通道越江隧道工程将横穿吴淞导堤, 可能会对导堤安全带来影响。为避免隧道穿越对吴淞导堤的不利影响, 需要对隧道穿越段先期实施加固, 以确保其安全。

本文依据工程附近沿江宝山、崇明、南通气象站多年的风速资料分析、统计确定长江水域的设计风速, 建立考虑风能输入的考虑波浪传播的波浪数学模型推算50 a一遇风速和设计高水位4.01 m (以吴淞零点为基面) 组合情况下工程水域的波高分布, 确定不同方向来波对导堤的影响, 得出导堤堤头和堤中部两个控制点的设计波浪要

素^[1-2] (图1, 2)。

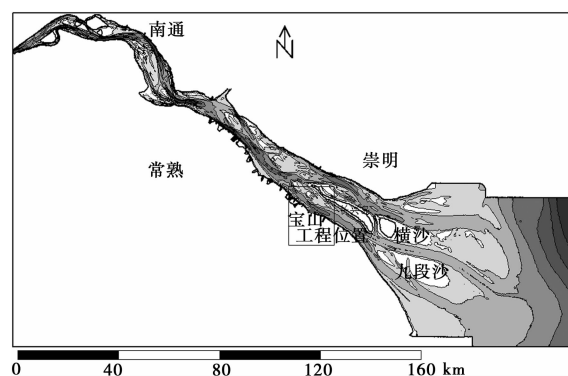


图1 导堤加固工程位置

收稿日期: 2013-07-17

作者简介: 黄海龙 (1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道工程。

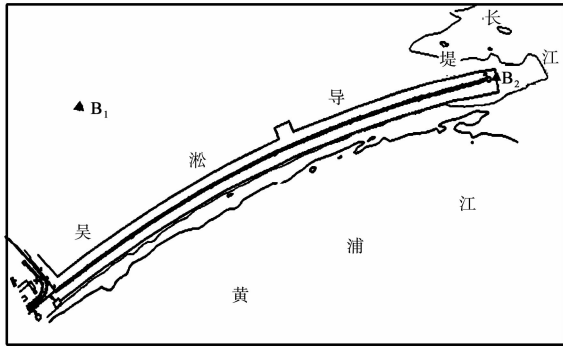


图2 B₁, B₂ 波浪推算点位置

1 波浪场计算方法

考虑波浪折射绕射联合运算的非线性缓坡方程可用下式表示:

$$(CC_g \phi_x)_x + K^2 CC_g \phi + M\phi = 0 \quad (1)$$

其中

$$M\phi = (-\omega^2 k^2 D |A|^2 + i\omega F)\phi + (CC_g \phi_y)_y \quad (2)$$

式中: ϕ 为波势; k 为波数; C 为波速; C_g 为群速; ω 为相速度; A 为波幅; D 为考虑波浪非线性参数; F 为考虑波能损耗的参数, 可表示为 $F = F_r + F_w + F_b$, F_r , F_w , F_b 分别为考虑底摩阻损耗、风能输入、波浪破碎等的参数, 具体表达式如下:

$$(kCC_g)(\phi_u - \beta\phi_v) + \left[\frac{1}{2}(kCC_g)_x - ik^2 CC_g + \frac{i}{2}\omega^2 k^2 D |A|^2 + \frac{\omega}{2} W \right] \phi - (P_1 B + iP_2) \cdot \alpha^2 (CC_g \phi_v)_v + \frac{P_1}{k} [(\alpha^2)_u (CC_g \phi_v)_v + \alpha^2 (CC_g \phi_v)_{vu} - \alpha^2 \beta (CC_g \phi_v)_{vv}] = 0 \quad (11)$$

令

$$R = \frac{P_1}{k} (\alpha^2)_u - (P_1 B + iP_2) \alpha^2 = -\frac{P_1 2\alpha^3}{ky_b} (\tan\theta_2 - \tan\theta_1) - (P_1 B + iP_2) \alpha^2 \quad (12)$$

$$S = \frac{1}{2} (kCC_g)_x - ik^2 CC_g + \frac{i}{2} \omega^2 k^2 D |A|^2 + \frac{\omega}{2} W \quad (13)$$

$$T = \alpha^2 \frac{P_1}{k} \quad (14)$$

则式(11)简写为:

$$kP(\phi_u - \beta\phi_v) + S\phi + R(CC_g \phi_v)_v + T[(CC_g \phi_v)_{vu} - \beta(CC_g \phi_v)_{vv}] = 0 \quad (15)$$

采用 Crank-Nicolson 格式进行数值计算。

$$F_r = \alpha_f C_g \frac{a_0}{1 + \alpha_f a_0 x/2} \quad (3)$$

$$\alpha_f = \frac{64}{3} \cdot \frac{f\pi}{gC_g [Tsh(kh)]^3} \quad (4)$$

$$F_w = -0.7gC_g \left(\frac{5.5 \times 10^{-3} v^{1.3}}{gH} \right) \frac{1}{0.35} \quad (5)$$

式(1)可改写为:

$$\phi_{xx} + \frac{(CC_g)_x}{CC_g} \phi_x + K^2 \left(1 + \frac{M}{K^2 CC_g} \right) \phi = 0 \quad (6)$$

$$D = \frac{ch^4(kh) + 8 - 2th^2(kh)}{8sh^4(kh)} \quad (7)$$

按 Booij 推导出抛物型方程高阶近似形式, 一般方程可简写成:

$$(kCC_g)\phi_x + \left[\frac{1}{2}(kCC_g)_x - ik^2 CC_g + \frac{i}{2}\omega^2 k^2 D |A|^2 + \frac{\omega}{2} F \right] \cdot$$

$$\phi - (P_1 B + iP_2) M' \phi + \frac{P_1}{k} (M' \phi)_x = 0 \quad (8)$$

$$\text{其中 } B = \frac{k_x}{k^2} + \frac{(kCC_g)_x}{2k^2 CC_g} \quad (9)$$

$$M' \phi = (CC_g \phi_y)_y \quad (10)$$

式中: $P_1 = \frac{1}{4}$, $P_2 = P_1 + \frac{1}{2}$ 。

作扇形坐标变换, 则有

边界条件为:

$$-\phi_x \sin\theta + \phi_y \cos\theta + ikA\phi = 0 \quad (16)$$

略去某些小项, 得:

$$\phi_y - \left[ik_0 \tan\theta + \frac{ikA}{\cos\theta} \right] \phi = 0 \quad (17)$$

坐标变换后, 得:

$$\phi_v - \frac{1}{\alpha} \left[ik_0 \tan\theta + \frac{ikA}{\cos\theta} \right] \phi = 0 \quad (18)$$

该模型是在波浪折射和绕射传播基础上考虑风能输入的参数, 适用于大范围水域由风产生的局部风成浪及其传播变形^[3-4]。该模型已在长江口整治工程建筑物设计波要素推算、长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程波浪推算等多个项目中得到应用^[5-6]。

2 风速资料分析

吴淞导堤位于黄浦江口门与长江交汇处,长江南岸,基本不受长江口外的外海波浪影响,工程水域的波浪主要是长江内宽阔水面由大风引起的局部风成浪。因此推算本工程水域的设计波浪要素,首先需分析工程水域的水面设计风速。文献[7-8]在研究苏通长江大桥以及长江南京以下12.5 m深水航道工程水域波浪问题时对该水域附近的一些气象站资料作过分析研究,以下对沿江工程附近这些气象台站的风速资料进行分析。

1) 南通、常熟气象站风速。

南通市气象站位于通州沙北岸,地理位置 $120^{\circ}51'E$, $32^{\circ}01'N$,分方向的年极值风速资料年限为1952—1998年;常熟气象站位于通州沙南岸,地理位置 $120^{\circ}44'E$, $31^{\circ}39'N$,风速资料年限为1974—1998年。对两站的风速资料对比分析后发现,南通市气象站各方向的风速均大于常熟气

象站的对应方向风速。另外,鉴于南通市气象站与常熟气象站相比,南通气象站位置更靠近通州沙,因此认为由南通气象站风速推算通州沙江面的不同重现期风速更为合理。利用南通市气象站1952—1998年共47 a的分方向年极值风速分析得出8个方位的重现期风速值(表1)。

2) 宝山气象站风速。

宝山气象站位于上海西郊长江南岸,是距离吴淞黄浦江口最近的气象站,该站分方向的年极值风速资料年限为1959—1980年;实测资料中,各方向最大风速为24 m/s,风向为N—NNE方向。对宝山气象站分方向年极值风速分析得出8个方位的重现期风速值(表1)。

3) 崇明气象站风速。

崇明气象站位于崇明岛南侧,工程对岸,对该站1960—1980年21 a的分方向年极值风速统计分析,得出的不同方向重现期风速(表1)。

表1 气象站重现期风速

气象站	重现期/a	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
南通	50	19.7	23.1	19.9	20.0	19.7	17.3	23.1	23.8
	25	18.4	20.9	18.1	18.5	18.2	16.3	21.0	21.5
	5	14.5	14.8	13.8	14.4	13.8	13.3	15.5	16.1
宝山	50	24.9	26.7	19.9	19.2	17.8	15.7	17.5	20.8
	25	22.4	23.6	18.5	17.9	16.7	14.8	16.7	19.6
	5	12.8	12.2	12.3	12.0	11.5	10.2	12.5	13.7
崇明	50	16.3	15.4	18.9	18.5	16.4	12.2	15.0	16.1
	25	15.5	14.4	17.3	17.2	15.4	11.5	14.3	15.4
	5	13.4	11.8	13.3	13.9	12.6	9.7	12.5	13.6

4) 规范推荐站风速。

根据上海市工程建设规范DG/TJ 08-2111—2012《滩涂促淤圈围造地工程设计规范》,宝山(吴淞口以西)、浦东(吴淞口至中港)各方向特征风速列于表2。

通过对上述一些气象站的风速资料分析,南通市气象站和宝山气象站的风速均比其他气象站的风

速大,南通市气象站的风速总体上比宝山气象站的风速值大。从表2可以看出,以吴淞口为界东西两侧的风速相差也较大,吴淞口以东靠近长江口方向风速比吴淞口以西的风速大,工程位置处于吴淞口,为工程安全起见,确定工程水域的设计风速主要以表2中浦东(吴淞口至中港)各方向特征风速作为推算工程水域设计波浪的风速依据。

表2 规范推荐站各方向特征风速

气象站	重现期/a	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
宝山 (吴淞口以西)	50	27.5	27.1	26.7	23.7	22.1	23.3	25.1	25.5
浦东 (吴淞口至中港)	50	30.6	31.5	28.0	26.4	26.6	25.5	30.1	31.1

3 工程水域波浪计算

利用前面介绍的考虑风能输入的波浪数学模型进行工程水域的波浪推算，分别计算对工程水域设计波浪有影响的不同方位的波高分布。计算网格为沿波浪传播方向计算步长取为 10 m，垂直于波浪传播方向的计算步长为 20 m。底摩阻系数取 0.01。计算区域的范围包括上游自南通徐六泾，下游至长江口的整个水域。数模计算的初始边界赋一小的波高值，模型中风能输入项中的值采用

表 2 中对应方向的风速。

影响吴淞导堤加固工程水域的主要波浪方向为 NW, NNW, N, NNE, NE, ENE, E, ESE 等方向；波浪控制点的波浪要素计算成果主要给出这些方向的波要素。

吴淞导堤波浪控制点位置在不同方向组合时 50 a 一遇的波浪要素计算成果见表 3，其中 NW, NNW 波浪方向的工程水域的有效波高分布见图 3。

表 3 50 a 一遇波浪要素成果

波向	位置	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{5\%}/m$	H_s/m	\bar{H}/m	\bar{T}/s	L/m
NW	B_1	0.93	0.79	0.76	0.63	0.39	5.5	45.3
	B_2	2.99	2.55	2.47	2.08	1.33	5.5	45.3
NNW	B_1	1.76	1.49	1.44	1.20	0.76	5.4	43.9
	B_2	2.90	2.47	2.39	2.01	1.29	5.4	43.9
N	B_1	2.20	1.86	1.80	1.51	0.96	4.9	36.9
	B_2	2.37	2.01	1.94	1.63	1.04	4.9	36.9
NNE	B_1	2.17	1.84	1.78	1.49	0.95	4.7	34.1
	B_2	2.21	1.88	1.81	1.52	0.96	4.7	34.1
NE	B_1	2.31	1.96	1.90	1.59	1.01	4.9	36.9
	B_2	2.40	2.03	1.97	1.65	1.05	4.9	36.9
ENE	B_1	2.06	1.74	1.69	1.41	0.89	4.5	31.4
	B_2	2.06	1.74	1.69	1.41	0.89	4.5	31.4
E	B_1	1.99	1.68	1.63	1.36	0.86	4.6	32.7
	B_2	2.17	1.84	1.78	1.49	0.95	4.6	32.7
ESE	B_2	1.74	1.47	1.43	1.19	0.75	4.1	26.2

从控制点波浪计算成果可见，吴淞导堤水域的大浪主要出现在 NW—NNW 方向的大风浪，50 a 一遇最大波高 $H_{1\%}$ 为 2.99 m，出现在堤头 B_2 位置（图 2），风浪方向为 NW 向；堤中部 B_2 位置主要受 N—NE 方向的风浪影响，50 a 一遇各方向中波高 $H_{1\%}$ 最大值为 2.31 m。

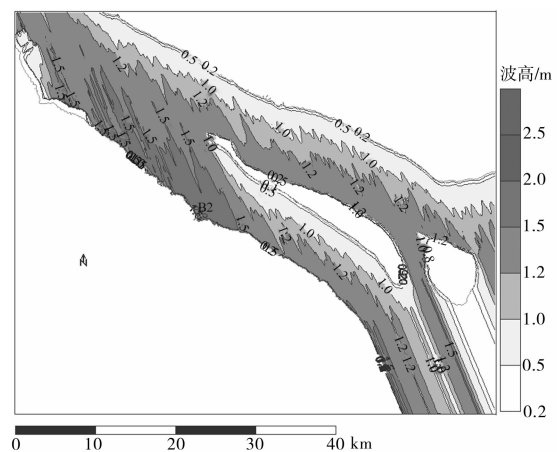
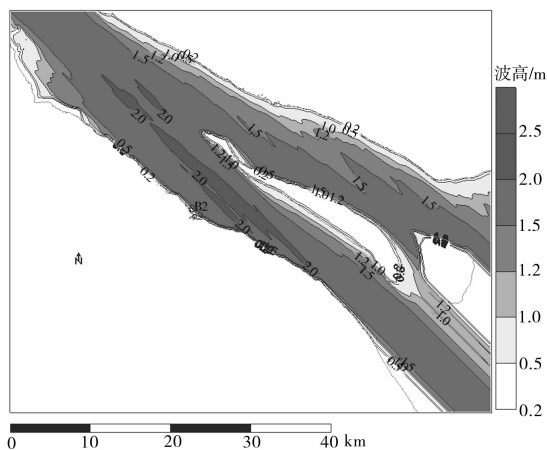


图 3 50a 一遇有效波高分布



4 结语

本文分析、统计了工程附近沿江宝山、崇明、南通气象站多年的风速资料，确定了该区域的 50 a 一遇的计算风速；建立考虑风能输入的考虑波浪

传播的波浪数学模型,推算设计高水位 50 a 一遇风速情况下工程水域的波高分布;确定不同方向来波对导堤的影响,得出导堤堤头和堤中部两个控制点的设计波浪要素。波浪计算结果表明,导堤工程沿线 50 a 一遇堤头最大波高 $H_{1\%}$ 为 2.99 m,受 NW 方向的风浪作用,堤中部的最大波高 $H_{1\%}$ 为 2.31 m,波浪方向为 NE 向。

参考文献:

- [1] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].
 [2] JTJ 234—2001 波浪模型试验规程[S].
 [3] 王红川,潘军宁,姚国权.不规则折射绕射联合数值计算[J].水运工程,1997(6):1-6.

- [4] 王红川,潘军宁,左其华.考虑风能输入的抛物型缓坡方程[J].海洋工程,2004(2):13-16.
 [5] 王红川,左其华,潘军宁.波浪传播数值模型波向角计算[J].水动力学研究与进展,2006(1):143-148.
 [6] 南京水利科学研究所.长江通州沙—北槽上口段深水航道整治工程方案研究设计波浪要素推算[R].南京:南京水利科学研究所,2009.
 [7] 南京水利科学研究所.苏通长江公路大桥工程水域波浪数模计算报告[R].南京:南京水利科学研究所,2000.
 [8] 南京水利科学研究所.长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程初步设计波浪推算研究报告[R].南京:南京水利科学研究所,2012.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 15 页)

需要强调的是,上述 2 组试验的 32 g 块体安全度计算所用的稳定波高 0.160 m 是按主护面块体质量 160 g 通过式(1)反算得到的,也就是说是以次护面块体质量为主护面块体质量的 1/5 为前提的。试验得出的安全度均大于 2.2,满足稳定要求。试验说明,在 $\bar{H}/d=0.3$ 邻近范围内,原防波堤规范关于“外坡在设计低水位以下 1~1.5 倍设计波高之间的护面块体质量,取计算水位上下 1 倍波高间护面块体计算质量的 1/5”的规定是合理的。联系到本文开始提到的例子中, $\bar{H}/d=0.16$ 时按上述规定确定的次护面块体不稳定,可以合

理得出结论:原防波堤的这一规定有其适用范围,至少在 $\bar{H}/d \geq 0.3$ 时是合理的。

参考文献:

- [1] JTT 298—1998 防波堤设计与施工规范[S].
 [2] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
 [3] 李贺青,柳玉良.斜坡堤护面块体的安全度[J].水运工程,2014(3):13-17.
 [4] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 34 页)

- [4] 解晓鸣,张玮.连云港港口门防波堤建设对航道回淤影响数值研究[J].泥沙研究,2008(5):15-21.
 [5] 张存勇.连云港近岸海域潮流垂直结构及其季节变化[J].海洋通报,2012(2):391-396.
 [6] 黄卫明,王维华,章卫胜,等.连云港附近海域潮汐与潮流特征分析[J].浙江水利科技,2012(3):1-14.

- [7] 黄志扬.连云港淤泥质海岸深水航道泥沙淤积数值研究[D].南京:河海大学,2007.
 [8] 河海大学.连云港旗台作业区防波堤建成后港区水域水文观测研究报告[R].南京:河海大学,2012.
 [9] JTS/T 231-2—2010 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程[S].

(本文编辑 武亚庆)