

杭州湾设计波浪要素的推算

严其芳¹, 王志平²

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江广川工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310020)

摘要 基于第三代浅水波浪数值模型(SWAN), 采用三角形网格技术, 对杭州湾内 N ~ NNE 向 50 年一遇设计波浪要素进行数值模拟, 并将数模计算结果与海洋站实测值和莆田公式计算值进行比较分析, 说明了数值解的合理性。相关方法和结果可为今后杭州湾内工程波浪要素的推算提供借鉴。

关键词 SWAN; 波浪要素; 数值模拟; 杭州湾

中图分类号: TV139.2+4 文献标识码: A 文章编号: 1006-764X(2011)S1-0014-03

杭州湾位于中国浙江东北部, 西起澉浦—西三闸, 东至扬子角—镇海角连线, 湾外为舟山群岛, 有钱塘江注入, 是一个喇叭形海湾。湾口宽约 95 km, 自口外向口内变窄, 到澉浦为 20 km。杭州湾底形态自湾口至乍浦地势平坦, 从乍浦起以 0.01% ~ 0.2% 的坡度向西抬升, 在钱塘江河口段形成巨大的沙坎。杭州湾北岸为长江三角洲南缘, 沿岸深槽发育, 南岸为宁绍平原, 沿岸滩地宽广。湾底的地貌形态和海湾的喇叭形特征, 使该区域内波浪要素的确定尤其复杂。

杭州湾由于有舟山群岛的阻挡, 外海涌浪难以进入湾口内, 从对杭州湾内大戢山、滩浒、大游山 3 个海洋站(图 1)资料分析可知杭州湾内海域波向的季节变化十分明显, 从 11 月到翌年 3 月, 波向主要集中在 NNW ~ NE 向, SE ~ WNW 向很少出现; 从 4 月到 10 月, 波向主要集中在 NNE ~ S 向, SSW ~ S 向很少出现。崎岖列岛北侧的大戢山站涌浪出现的年频率为 32%, 而位于杭州湾中部的滩浒站则不足 1%; 大戢山 1/10 大波的平均波高 $H_{1/10} > 1.5\text{m}$ 的天数全年平均为 45.8 d, 滩浒站仅为 2.0 d; 大戢山站实测最大波高为 7.0 m(NNE), 滩浒站为 3.8 m(N), 大游山站为 5.4 m(NW ~ NNW), 最大波高主要发生在 N ~ NNE 向和 NW ~ NNW 向。NW ~ NNW 向波浪主要是由湾口内风场形成, 但 N ~ NNE 向外海涌浪能通过大戢山传进杭州湾内, 同时, 杭州湾水域开阔, 区域内风浪充分成长, 使得湾内南岸 N ~ NNE 向的工程设计波浪要素确定复杂。笔者针对杭州湾南岸

典型工程镇海泥螺山围垦工程对 N ~ NNE 向 50 年一遇设计波浪要素进行了数值模拟计算^[1]。



图 1 波浪站及数模计算范围示意图

数学模型是推算工程波浪要素的一种可行方法。目前, 国内外用于波浪推算的数学模型主要有新型混合型海浪数值模型、第三代浅水波浪数值模型(SWAN)、缓变水流水深中波浪绕射折射数学模型。每种模型都有自身的优缺点: 新型混合型海浪数值模型未考虑波-波非线性相互作用; 第三代浅水波浪数值模型虽然适用于较大范围波浪场的推算, 但难以较好地考虑波浪绕射的影响; 缓变水流水深中波浪绕射折射数学模型虽然考虑了波浪绕射, 但仅适用于空间范围相对较小的情况。鉴于杭州湾水域开阔, 计算范围相对较大, 且波浪绕射作用对所研究工程区域的影响相对较小, 所以笔者采用第三代浅水波浪数值模型进行工程波浪要素的推算。

1 第三代浅水波浪数值模型

1.1 模型简介

Booij 等^[2]总结历年来波浪能量输入、损耗及转换的研究成果,提出并发展了适用于海岸、湖泊及河口地区的第三代浅水波浪数值模型,该模型全面合理地考虑了波浪的浅化、折射、底摩擦、破碎、白浪、风能输入及波浪非线性效应。Booij 等^[2]以波浪线性理论及现场观测资料对第三代浅水谱波浪模型进行验证,结果表明该模型能准确合理地模拟复杂地形、风场环境下的波浪场。

1.2 动谱能量平衡方程

第三代浅水波浪数值模型的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}C_xN + \frac{\partial}{\partial y}C_yN + \frac{\partial}{\partial \sigma}C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}C_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$
(1)

其中 $S = S_{in} + S_n + S_d + S_f$
式中: N 为动谱密度; θ 为波向角; σ 为相对频率;
 C_x, C_y, C_σ 和 C_θ 分别为 x, y, σ 和 θ 空间的波浪传播速度; S_{in}, S_n, S_d 和 S_f 分别为由风产生的能量输入、波-波间非线性相互作用、破波耗散和床底损失。

C_x, C_y, C_σ 和 C_θ 的表达式和式(1)的数值离散可参见文献[3],各源汇项的具体表达式参阅文献[2,4]。

1.3 源项的处理

第三代浅水波浪数值模型对能量输入、消耗和非线性波-波间相互作用的物理过程处理为:风能输入项根据 Cavaleri 等^[5]、Komen 等^[6]的研究成果可以分为线性增长项和指数增长项两部分,模型中输入风速为距水面 10 m 处的风速 U_{10} 。Collins^[7]和 Madsen 等^[8]分别由 JONSWAP(联合北海波浪项目研究)实验、拖曳理论和涡黏理论得到底摩擦模型,可由波浪的发展状态(成长或充分发展)、波浪类型(风浪、涌浪和混合浪)选择相应模型。根据湾口内地形、风区长度,底摩擦项选用 JONSWAP 试验得到的底摩擦模型进行处理。波浪在向浅水域行进时,由于水深变浅导致破碎,基于 Miche 准则 Battjes 等^[9]根据大量试验数据及现场资料认为,在浅水域不同类型的地貌随机波的最大破碎波高 H_m 与水深 d 的关系可表示为 $H_m = rd$,其中 r 为破碎系数。白浪损耗根据文献[6]提出的脉动平均模型进行处理。不同频率的成分波之间因非线性相互作用而发生能量交换,三相波非线性相互作用引起的能量交换采用文献[2]的研究成果,四相波相互作用的处理根据文献[10]的离散迭代近似法。

2 杭州湾波浪的数值模拟

2.1 计算范围

本海区属以风浪为主的混合浪区,模型计算范围应尽可能把杭州湾及其中的海洋站、工程位置等包括进来,本次模型范围北至大戢山,南至金塘岛,西至金山卫、东至嵎泗列岛,计算区域如图1所示。

2.2 网格划分

数模计算网格采用三角形网格,考虑到计算效率和精度,外海采用较大步长的网格,在工程区域附近进行网格加密。

2.3 设计水深和设计风速

杭州湾内水深和风速对本工程设计波要素影响大,模型计算水深取实测地形水深叠加 50 年一遇设计潮位。本工程区域地形平坦,主要是南北潮位差异大,杭州湾 50 年一遇设计潮位北边取 4.73 m,南边取 3.43 m(1985 高程基准)。

杭州湾设计风速参考当地实测风速资料与《浙江省海塘工程技术规定》^[11]中的年设计风速,从工程安全考虑取最大值,确定 N~NNE 向 50 年一遇潮位设计风速为 30.34m/s。

2.4 边界条件和计算结果的验证

本模型以大戢山站波浪要素的分析值作为入射边界条件,以大游山海洋站的波浪要素分析值作为验证。对大戢山和大游山站 N~NNE 方向波高 $H_{1/10}$ 和平均波周期 T 的年极大值系列进行 P~Ⅲ型曲线分析,推算各自 50 年一遇潮位的设计波浪要素,结果如表1所示。表1表明第三代浅水波浪数值模型的数值推算结果与海洋站波浪资料的分析值相吻合,说明该模型关于波浪的推算具有一定的数值精度。

表1 大戢山和大游山 N~NNE 向 50 年一遇波高和平均波周期

海洋站	$H_{1/10}$				T			
	实测 值/m	计算 值/m	绝对 误差/m	相对 误差/%	实测 值/m	计算 值/m	绝对 误差/m	相对 误差/%
大戢山	8.18	8.02	-0.16	1.95	11.00	10.17	-0.83	7.5
大游山	5.70	5.82	0.12	2.10	8.80	8.20	-0.60	6.8

图2是纯涌浪情况下杭州湾内 $H_{1/10}$ 的波场,该图表明外海波浪明显大于杭州湾内,这是波浪在传播过程中海底摩擦所造成的波能衰减所致。图3是仅在 N~NNE 向风场形成风浪的工况下杭州湾内 $H_{1/10}$ 的波场,该图表明南岸的波浪大于北岸,南岸风区长度长、水深大的地方波浪最大。图4是在考虑外海涌浪和湾内风浪共同作用形成混合浪的工况下杭州湾内 $H_{1/10}$ 的波场,该图表明由于风能量的输入,使得南岸大游山附近波浪增大,中间滩浒附近反而减弱。计算结果如表2所示,大戢山波高最高,其次是大游山,最小是滩浒,这与实测成果一致。

表 3 工程区 N~NNE 向 50 年一遇设计波要素

方法	波高/m					周期/s	波长/m	破碎波高/m	堤前水深/m
	$\bar{H}$	$H_{1\%}$	$H_{2\%}$	$H_{4\%}$	$H_{13\%}$				
数模(混合浪)	2.21	4.35	4.10	3.82	3.24	7.38	67.87	4.80	8.00
数模(风浪)	2.03	4.07	3.83	3.56	3.00	7.23	67.41	4.80	8.00
莆田公式	1.97	3.97	3.62	3.47	2.92	6.23	60.57	4.80	8.00

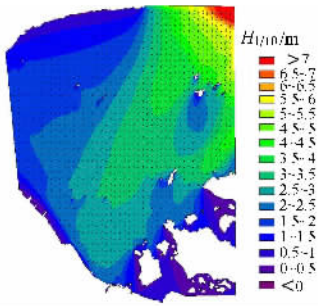


图 2 N~NNE 向 50 年一遇 $H_{1/10}$ 波场(涌浪)

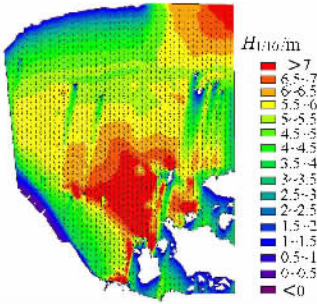


图 3 N~NNE 向 50 年一遇 $H_{1/10}$ 波场(风浪)

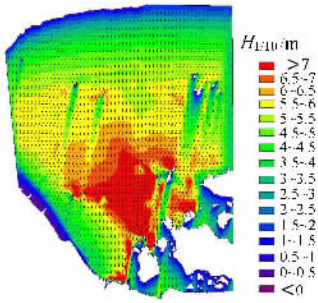


图 4 N~NNE 向 50 年一遇 $H_{1/10}$ 波场(混合浪)

表 2 杭州湾内各处 N~NNE 向 50 年一遇波高和平均波周期

位 置	$H_{1/10}/\text{m}$	T/s
大戢山	8.06	11.00
滩 浒	4.00	7.46
大游山	5.82	8.20
镇海泥螺山围垦工程	3.82	7.38

2.5 与莆田公式计算结果的比较

采用《浙江省海塘技术规定》^[11]推荐的莆田公式对工程位置附近的波浪要素进行推算,并将其与数模计算结果进行比较,如表 3 所示。由表 3 可见数模(风浪)的计算结果比莆田公式计算结果略大,主要是由于莆田公式采用莆田湾海堤试验站资料统计推导得出,但是杭州湾的实际尺寸比莆田湾大,从湾口至湾顶超过 100 km,所以莆田公式计算结果不完全与杭州湾实际情况吻合。另外考虑外海涌浪的

进入,数模(混合浪)的计算结果又比数模(风浪)的计算结果大。从工程设计安全角度考虑,应用数模(混合浪)计算结果更加合理。

3 结 论

- a. 数模(风浪)计算结果比莆田公式计算结果大,主要是因为杭州湾的实际尺寸比莆田湾的大。
- b. 通过 SWAN 模型计算分析并与实测站资料对比分析得出,从工程安全考虑该模型计算杭州湾内复杂波浪工况是合适的。
- c. 杭州湾内 N~NNE 向波浪以大戢山附近波高最高,其次是大游山和滩浒。
- d. 提出了合理确定设计波要素的计算方法,即 SWAN 模型的推算方法。

参考文献:

[1] 严其芳,王志平.镇海泥螺山北侧围垦工程初步设计报告[R].杭州:浙江广川工程咨询有限公司,2010.

[2] BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions: model description and validation[J]. J Geophys Res, 1999, 104(C4): 7649-7666.

[3] 徐福敏,张长宽,茅丽华,等.一种浅水波浪数值模型的应用研究[J].水动力学研究与进展:A 辑,2000, 5(4): 429-434.

[4] 陈希,闵锦忠,沙文钰,等.近岸海浪模式在中国东海台风浪模拟中的应用[J].海洋通报,2003, 22(2): 9-16.

[5] CAVALERI L, MALANOTTE-RIZZOLI P. Wind wave prediction in shallow water: theory and applications[J]. J Geophys Res, 1981, 86(C11): 10961-10973.

[6] KOMEN G J, HASSELMANN S, HASSELMANN K. On the existence of a fully developed wind sea spectrum[J]. J Phys Oceanogr, 1984, 14: 1271-1285.

[7] COLLINS J I. Prediction of shallow water spectra[J]. J Geophys Res, 1972, 77(15): 2693-2707.

[8] MADSEN O S, POON Y K, GRABER H C. Spectral wave attenuation by bottom friction: theory[C]//Proc 21th Int Conf: Coastal Engineering, Malaga: ASCE, 1988: 492-504.

[9] BATTJES J, STIVE M J F. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves[J]. J Geophys Res, 1985, 90(C5): 9159-9167.

[10] HASSELMANN S K, HASSELMANN J H, ALLENDER J H, et al. Computations and parameterizations of the linear energy transfer in a gravity wave spectrum[J]. J Phys Oceanogr, 1985, 15: 1378-1391.

[11] 浙江省水利厅.浙江省海塘工程技术规定[R].杭州:浙江省水利厅,1999.

(收稿日期 2011-03-17 编辑 骆超)