



潜堤掩护港域波浪传播数值模拟

季小强¹, 冯卫兵², 翟剑峰¹, 东培华¹

(1. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210014;

2. 河海大学 港口工程与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用基于 Boussinesq 方程的平面二维波浪数学模型, 将潜堤作为动边界处理, 对潜堤掩护港域的波浪传播变形进行数值模拟研究。首先, 采用 Ohyama 等的潜堤试验数据, 就数学模型对人工潜堤上波浪传播变形问题的适用性进行验证探讨; 其次, 针对某渔港外部潜堤防护工程, 采用数学模型进行波浪场推算, 分析潜堤的消浪过程, 同时将模拟得出的波浪透射系数与国内外经验公式计算值进行对比, 结果表明该数值模拟方法是有效的。

关键词: 波浪; 潜堤; 数值模拟; 动边界

中图分类号: P 731.22

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0035-05

Numerical simulation on wave transmission in harbor area protected by submerged breakwater

Ji Xiao-qiang¹, FENG Wei-bing², ZHAI Jian-feng¹, DONG Pei-hua¹

(1. Jiangsu Province Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

2. College of Harbor Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A horizontal 2D numerical model of wave based on the Boussinesq equation is used to study the simulation of wave transformation in the harbor area protected by submerged breakwaters, which the submerged breakwaters are handled as the moving boundaries. The numerical model is first tested to prove its applicability in the simulation of wave transformation over submerged breakwater by the experimental data proposed by Ohyama, et al. Then, the numerical model is used in the water area outside a fishing port which is protected by a submerged breakwater. The processes of wave dissipation are analyzed, and the wave transmission coefficients obtained by simulation are compared with the calculated values of the empirical formulas at home and abroad. The results show that the present simulation method can effectively simulate the wave transformation over the submerged breakwater.

Keywords: wave; submerged breakwater; numerical simulation; moving boundary

潜堤是一种常用的水工建筑物, 港口工程中主要用于防波、挡沙和导流, 在达到掩护效果的前提下, 潜堤相较于出水堤而言可有效降低工程投资, 同时减少对海岸景观的影响。潜堤作用下的波浪传播过程相当复杂, 波浪传播通过潜堤时将产生较强的非线性变形, 堤顶高程较高时, 还将发生破碎、越浪等复杂现象。自 20 世纪 70 年代以来, 潜堤对波浪传播的影响一直是国内外学

者研究的热点, 杨正已等^[1]、谢世楞等^[2]、Van der Meer 等^[3-4]和冯卫兵等^[5-6]先后采用水槽物理模型试验对潜堤的消浪效果进行了研究, 提出波浪透射系数的影响因素, 并给出相应的经验关系表达式; Dean 等^[7]和 Nobuoka 等^[8]则分别采用港池物理模型试验对潜堤掩护条件下的波浪场等进行了研究。近年来, 随着数值模拟技术的发展, 不少学者采用垂向二维数学模型^[9-10]对潜堤断面上的

收稿日期: 2015-10-29

作者简介: 季小强 (1982—), 男, 博士, 工程师, 从事海洋、海岸工程研究。

波浪变形进行模拟研究，但就目前而言，仍少有研究采用平面二维波浪数学模型对潜堤掩护下的港域波浪运动进行模拟，因此，在实际工程中，潜堤掩护港域的波浪大小通常需采用港池物理模型试验确定，人力、物力花费较大。张娜等^[11]曾通过断面物理模型试验和数值模拟相结合的方法，由断面物理模型试验得出潜堤的透射和反射系数，采用设置了透射、反射系数的虚拟孔隙层替代实际潜堤，计算得出潜堤掩护港域的波浪场，但未对潜堤上的实际波浪传播变形进行模拟。本文采用基于 Boussinesq 方程的平面二维波浪传播数学模型，将潜堤作为动边界处理，对潜堤掩护港域的波浪运动进行数值模拟，取得了较好的效果。

1 数值方法介绍

1.1 Boussinesq 方程

采用丹麦水利研究院 (DHI) 开发的 MIKE21 BW 模型作为技术手段，该模型的基本控制方程为 Boussinesq 方程，其表达式为：

连续方程：

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x 方向动量方程：

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} + F_x n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left(\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right) + \frac{gP}{h^2 C^2} \sqrt{P^2 + Q^2} + m\psi_1 = 0 \quad (2)$$

y 方向动量方程：

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} + F_y n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2 Q \left(\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right) + \frac{gQ}{h^2 C^2} \sqrt{P^2 + Q^2} + m\psi_2 = 0 \quad (3)$$

式中： ψ_1 和 ψ_2 为 Boussinesq 色散项，定义为：

$$\psi_1 \equiv - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xxt} + Q_{xyt}) - nBg d^3 (\xi_{xxx} + \xi_{xyy}) - dd_x \left(\frac{1}{6} Q_{xt} + nBg d \xi_{xy} \right) - dd_x \left[\frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + nBg d (2\xi_{xx} + \xi_{yy}) \right] \quad (4)$$

$$\psi_2 \equiv - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (Q_{yyt} + P_{xyt}) - nBg d^3 (\xi_{yyy} + \xi_{xxy}) - dd_x \left(\frac{1}{6} P_{yt} + nBg d \xi_{xy} \right) - dd_y \left[\frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + nBg d (2\xi_{yy} + \xi_{xx}) \right] \quad (5)$$

式中： P 、 Q 为 x 方向与 y 方向的通量； B 为 Boussinesq 色散系数； h 为总水深 ($h = d + \xi$)； d 为静水深； ξ 为波面高度； g 为重力加速度； n 为孔隙率； C 为谢才阻力系数； α 、 β 为层流与紊流孔隙介质中的阻尼系数； δ 为水滚厚度； c_x 、 c_y 为 x 方向与 y 方向的水滚速度分量。

模型采用 ADI 法对方程进行数值求解，由于 Boussinesq 项与修正项的存在，增加了方程的未知量，给全隐式求解带来一定难度，因此 Boussinesq 项及修正项中的系数，采用 Madsen 提出的预估法计算得到。

1.2 动边界处理

模型的边界条件处理中，造波边界采用内域造波法；固壁反射边界采用边界前设置孔隙层的方法，通过设置不同的孔隙率实现不同反射率的反射边界模拟；而透射边界则采用消波层以消除伪反射对计算域波浪场的影响。在此，重点对模型动边界的处理方法——“窄缝法”进行介绍。

“窄缝法”最早由陶建华^[12]提出，用于模拟岸滩波浪爬高，其基本思想是假设岸滩在每个空间步长内存在一很窄的细缝，缝内的水体和岸滩前的水域相连，相当于把计算域延伸到整个区域。在潜堤的模拟中，当堤顶高于波谷，波浪经过潜堤时，堤顶会有一段时间裸露在外，此时潜堤处应属于动边界。使用“窄缝法”可使波谷通过潜堤时，潜堤处因窄缝的存在而与周边水域相联通，避免因堤顶裸露而出现所谓的“负水深”现象。

Madsen 等^[15]最早将“窄缝法”引入到 Boussinesq 方程的数值模拟中 (图 1)，单位宽度海滩上窄缝宽度可以定义为：

$$\gamma(z) = \begin{cases} 1 & z \geq Z_L \\ \varepsilon + (1 - \varepsilon) e^{\beta(Z - Z_L)/(Z_L - Z_B)} & Z_B \leq z \leq Z_L \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\gamma(z)$ 为单位宽度内的窄缝宽度; ε 为窄缝参数, 即窄缝无限深时的宽度; β 为窄缝的形状系数, 控制窄缝宽度从 1.0 m 光滑变化到 ε ; Z_L 为断面处的岸滩高程; Z_B 为静水面以下的参考水深, 通常要低于波浪的下冲带, 可取为岸坡前静水深; η 为自由波面。

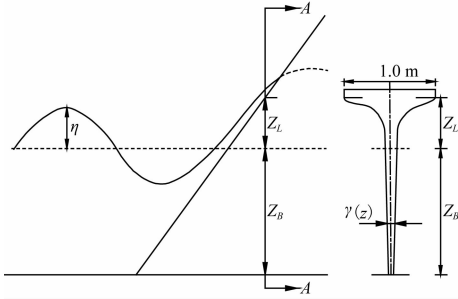


图1 窄缝法示意

2 模型适用性探讨

MIKE21 BW 模型作为被广泛使用的波浪计算软件之一, 对各种波浪传播问题的适用性已经过多方验证^[13-14], Madsen 等^[15] 也曾在研究中对“窄缝法”以及该模型对潜堤上波浪传播问题的适用性进行了验证计算, 结果良好, 但由于 Madsen 等用于验证的潜堤试验中, 潜堤迎浪面坡度较缓, 为 1:20, 而人工潜堤一般坡度较陡, 因此, 本文采用 Ohyama 等^[16] 的潜堤 (坡度 1:2) 试验数据, 就模型对人工潜堤上波浪变形模拟的适用性进行验证探讨。

Ohyama 等采用水槽试验对前后坡度均为 1:2 的潜堤上的波浪传播变形进行了研究, 试验所用水槽长 65 m、宽 1.0 m、高 1.6 m, 潜堤中心距离造波板 28.3 m, 试验水深为 0.5 m, 具体试验布置及测点位置见图 2。Ohyama 等共进行了 6 组试验, 包括 2 种入射波高和 3 种波周期, 本文选取其中入射波高较大的 3 组试验进行验证计算, 入射波浪要素见表 1。

表1 Ohyama 等试验入射波浪要素

工况	周期 T/s	波高 H_0/m	入射相对水深 kh_0	U_r
1	1.34	0.05	1.299	2.3
2	2.01	0.05	0.769	6.6
3	2.68	0.05	0.555	12.9

计算网格空间步长取为 0.05 m, 时间步长取为 $T/100$ 。Ohyama 等给出了 5 个测点中 $St3$ 和 $St5$ (图 2) 的波面实测结果, 图 3~5 分别给出了工况 1~3 在测点 $St3$ 和 $St5$ 的波面过程计算值与试验数据的比较, 从验证结果看, 3 个算例在两个测点的波面形态与实测数据吻合基本良好, 其中, 堤后 $St5$ 点的波面过程略有误差, 但在波高值方面差别不大, 由此可见, MIKE21 BW 模型可以较好地反映人工潜堤后的透射波浪情况。

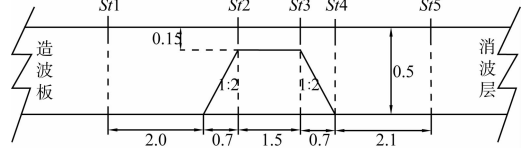


图2 Ohyama 等试验布置及测点位置 (单位: m)

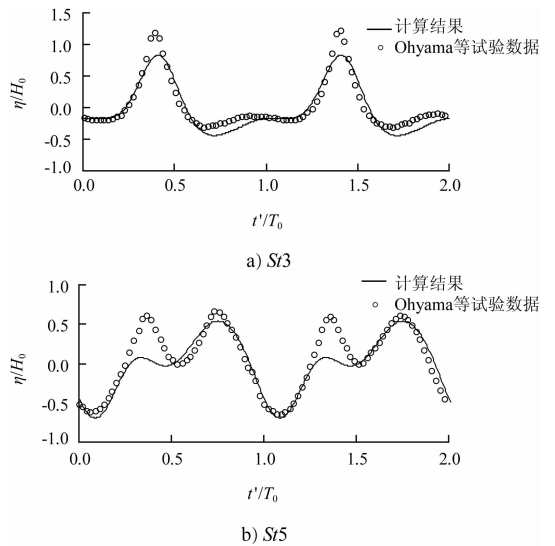


图3 工况 1 波面过程对比

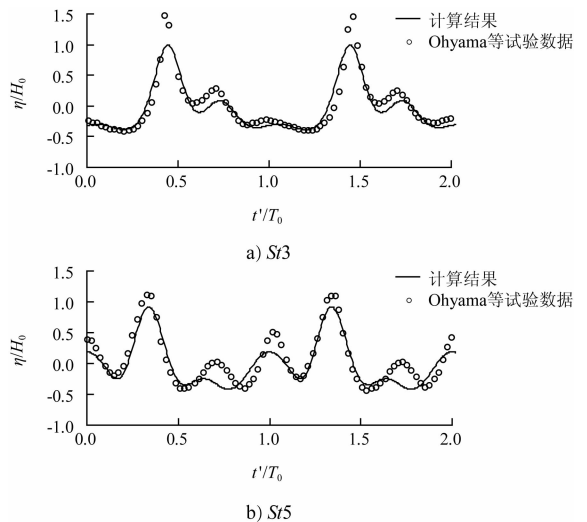


图4 工况 2 波面过程对比

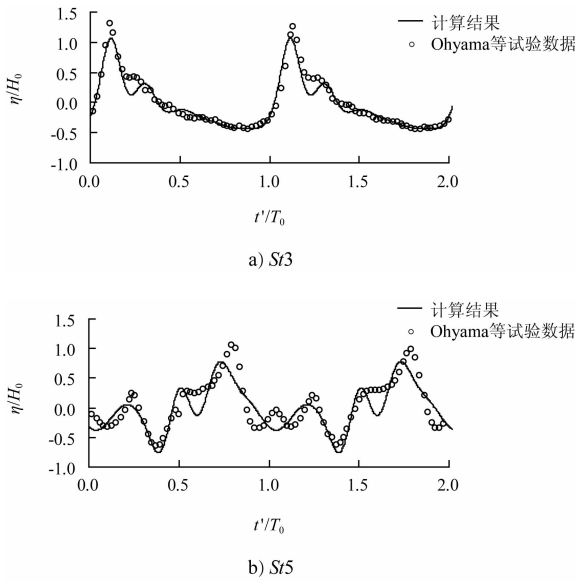


图5 工况3波面过程对比

3 工程实例计算

3.1 模型范围与计算参数

图6为某渔港外部潜堤防护工程平面布置, AB段为潜堤, 其用途为一定程度上削减波能, 对后方船闸和水闸形成掩护, 同时兼具导流和挡沙的作用。潜堤顶宽为6 m, 计算水位取极端高水位, 在该水位条件下, 堤顶位于水面以下1.03 m, 堤前水深约7.5 m。为了确定潜堤掩护区海堤以及船闸和水闸闸门位置的设计波浪要素, 需要对潜堤掩护情况下工程区域的波浪场进行推算。

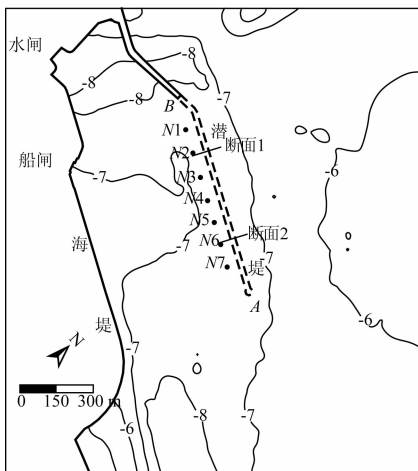


图6 模型范围及计算点(单位:m)

如图6所示, 计算区域x方向长1.7 km、y方向长1.9 km, 右侧为入射边界, 在本文算例中,

入射有效波高 $H_{13\%} = 3\text{ m}$, 平均波周期 $T = 7.5\text{ s}$, 模型计算时, 网格空间步长取为2 m, 时间步长取为0.05 s, 在极端高水位条件下, 计算区域水深在6~8 m。而动边界处理中, 窄缝参数 ε 取为0.05 m, 由于潜堤坡度较陡, 窄缝形状系数 β 取为10。

3.2 结果讨论

图7为潜堤掩护情况下工程海域 $H_{13\%}$ 波高等值线, 由图7可以看出, 潜堤对波浪具有一定的削弱作用, 但与出水堤不同, 潜堤对波浪的削弱作用主要体现在堤前反射和越过堤顶时的破碎作用。波浪传播至潜堤后, 部分波能在堤前形成反射, 另一部分越过潜堤传至堤后掩护区, 如图8所示的断面沿程 $H_{13\%}$ 波高分布(左侧为潜堤后方), 波浪传至潜堤前方, 首先因水深变浅波高有所抬升, 随后因波浪破碎而迅速衰减, 越过堤顶平台后, 波高逐渐趋于平稳。从这一物理过程也不难定性得出, 潜堤后透射波高的大小应与潜堤的堤顶高程、堤顶平台宽度以及坡度等息息相关, 这一点在已有相关研究中也得到了证实。

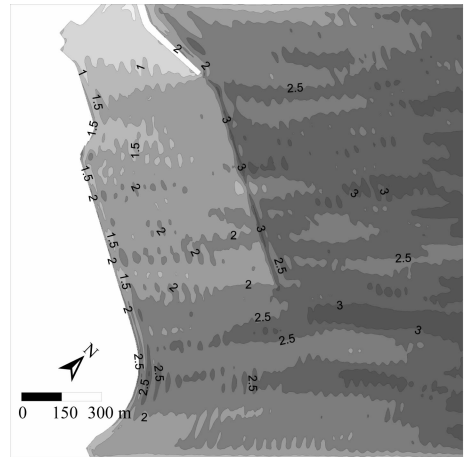
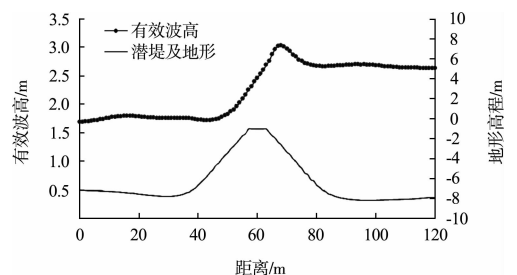


图7 潜堤掩护港域 $H_{13\%}$ 波高等值线分布(单位:m)



a) 断面1

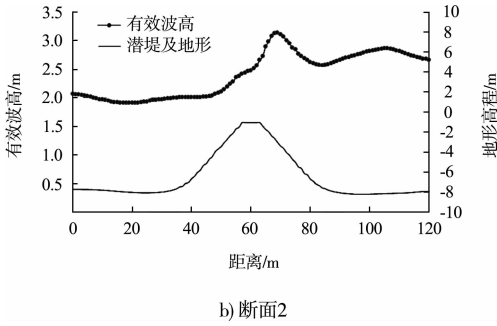


图8 断面沿程 $H_{13\%}$ 波高分布

为了验证模拟得出的透射波浪大小的可靠性, 选择杨正已等^[1]和 Van der Meer 等^[3]通过大量物理模型试验得出的波浪透射系数经验关系表达式进行计算比较, 表达式如下:

1) 杨正已等公式。

$$\frac{H_t}{H_i} = \tanh \left[0.8 \left(\left| \frac{R_c}{H_i} \right| + \frac{0.038L}{H_i} K_B \right) \right] K_d \quad (7)$$

$$K_B = 1.5 e^{-0.4(\frac{B}{H_i})} \quad (8)$$

$$K_d = 1.04 - \frac{0.02d}{H} \quad (9)$$

2) Van der Meer 等公式。

$$\frac{H_t}{H_i} = [-0.3(R_c/H_i) + 0.75(1 - e^{-0.5\xi})] \cos^{2/3} \beta \quad (10)$$

$$1 < \xi < 3, 0^\circ \leq \beta \leq 70^\circ, 1 \leq B/H_i \leq 4$$

式中: H_t 为透射波高; H_i 为入射波高; L 为入射波长; R_c 为堤顶至水面的距离 (潜堤为负); B 为堤顶宽度; ξ 为破波参数, $\xi = \tan\alpha / (H_i/L)^{1/2}$; α 为坡度; β 为入射角度。

表2 各计算点透射系数与经验公式对比

点位	入射波高 H_i/m	透射波高 H_t/m	透射系数		
			模型计算	杨正已公式	van de Meer 公式
N1	2.54	1.68	0.66	0.62	0.65
N2	2.61	1.72	0.66	0.61	0.64
N3	2.73	1.86	0.68	0.6	0.63
N4	2.42	1.62	0.67	0.62	0.66
N5	2.58	1.82	0.71	0.61	0.64
N6	2.78	2.01	0.72	0.6	0.62
N7	2.62	1.88	0.72	0.61	0.64

表2 给出了各计算点(图6)透射系数模拟结果与经验公式计算值的对比结果, 可以看出, 模

拟得出的堤后波浪透射系数略大于杨正已等和 Van der Meer 等经验公式的计算结果, 其主要原因在于, 平面状态下, 掩护区波浪不仅包含越过潜堤的部分波浪, 还包括绕射进入堤后的部分波浪, 这也从侧面反映了本文数值模拟计算结果的可靠性。

4 结论

1) 利用 Ohyama 等的人工潜堤试验数据进一步验证表明, 本文选用的基于 Boussinesq 方程的波浪传播数学模型可适用于人工潜堤上的波浪变形数值模拟。

2) 针对实际工程算例, 通过对潜堤作用下波浪传播过程的模拟研究得出, 潜堤对波浪的削弱作用主要体现在堤前反射和越过堤顶时的破碎作用, 堤后透射波浪大小与潜堤的堤顶高程、堤顶宽度以及坡度等息息相关。

3) 波浪透射系数模拟值与国内外经验公式计算值的对比结果表明, 采用基于 Boussinesq 方程的波浪传播数学模型, 利用“窄缝法”将潜堤作为动边界处理, 可较好地模拟潜堤掩护港域的波浪传播变形, 从而较合理地确定潜堤掩护区的波高大小。

参考文献:

- [1] 杨正已, 贺辉华, 潘少华. 波浪作用下抛石堤的稳定性及消浪特性[J]. 水利水运科学研究, 1981(3): 1-9.
- [2] 谢世楞, 蔡艳君. 半圆型潜堤后的波高分析[J]. 港工技术, 1999(4): 1-3.
- [3] Van der Meer J W, Wang B, Wolters A, et al. Oblique wave transmission over low - crested structures[G] // Proceedings of Coastal Structures. USA: ASCE, 2003: 567-579.
- [4] Van der Meer J W, Briganti R, Zanuttigh B, et al. Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change [J]. Coastal Engineering, 2005, 52(S1): 915-929.
- [5] 冯卫兵, 王明明, 崔川川. 潜堤透浪系数的试验研究[J]. 水运工程, 2012(9): 35-40.
- [6] 冯卫兵, 陈凯华, 薛波, 等. 不同护面块体潜堤的消浪特性试验研究[J]. 水运工程, 2014(3): 35-40.