

两层非静压高效波浪模型在缓坡前滩上的验证

谢玉婷

四川大学水利水电学院, 成都 610207, 四川, 中国

摘要: 在海岸工程问题的物理模型试验中, 人们借助前滩与过渡坡, 在指定位置获得所需的波浪条件——既包括谱参数, 也包括波高分布。数值模型可用于预测: 在给定的物理模型布置与波浪驱动条件下, 目标波浪条件能否达到。XBeach 非静压两层模型是一个计算高效的数值模型, 已针对谱波浪参数完成验证, 却缺少对波高分布的验证; 而当所关注的过程涉及波浪力或波浪爬高时, 波高分布十分重要。本文利用缓坡前滩上空间密度很高的波浪水槽实测资料, 验证该数值模型同时再现谱波浪参数与波高分布的能力。所用资料涵盖波陡为 1.0%、2.5% 与 5.0% 的深水波浪条件。研究导出了数值模型中波浪破碎的最优参数设置, 建议 $\maxbrsteep$ 与 $reformsteep$ 分别取 0.40 与 0.20。由验证结果可以得出: 该数值模型无法再现深水波陡为 5.0% 的验证试验, 其原因可能在于这类工况在造波边界上对应的 kpd 数偏高; 因此不推荐在模型边界处 $kpd \geq 2$ 的条件下使用该数值模型。对于深水波陡为 1.0% 与 2.5% 的试验, XBeach 非静压两层模型的表现要好得多, 谱波浪参数得到了很好的表征; 在相对水深变得很小之前, 相应的波高分布也表征得较为理想。对更浅的水, 预期该模型会低估较高的波浪。此外, 研究还表明, 该数值模型对波高分布的再现优于一个常用的经验公式。

关键词: 数值模拟; XBeach; 物理模型试验; 波高分布; 验证

Validation of an Efficient Two-Layer Non-Hydrostatic Wave Model on a Sloping Foreshore

YuTing Xie

College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610207, Sichuan, China

Abstract: In the physical modelling of coastal engineering problems, use is made of foreshores and transition slopes to obtain the desired wave conditions - both spectral parameters and wave height distribution - at a given location. Numerical models can be used to predict whether the target wave conditions are met for a given physical model layout and wave forcing. The XBeach non-hydrostatic two-layer model is a computationally efficient numerical model that has been validated for spectral wave parameters, but lacks validation of wave height distributions which are important when processes such as wave forces or wave run-up are of interest. In this work, wave flume data with high spatial density over a sloping foreshore is used to validate the ability of this numerical model to reproduce both spectral wave parameters and wave height distributions. This data contains offshore wave conditions with 1.0%, 2.5%, and 5.0% wave

steepness. Optimal settings have been derived for the wave breaking in the numerical model, resulting in recommended values for $\max_{br}$ steep and $\max_{re}$ steep of 0.40 and 0.20 respectively. From the results of the validation it is concluded that the numerical model is unsuccessful in reproducing the validation tests with 5.0% offshore wave steepness, potentially due to the associated higher k_{pd} numbers on the generating model boundary. Hence, using the numerical model with values of k_{pd} not smaller than 2 on the model boundary is not recommended. The XBeach non-hydrostatic two-layer model performs much better for the 1.0% and 2.5% offshore wave steepness tests, where the spectral wave parameters are represented well. The corresponding wave height distributions are represented reasonably well up to the point that the relative water depth gets very shallow. For shallower water, the model is expected to underestimate the higher waves. Additionally, the numerical model is shown to reproduce the wave height distribution better than a commonly used empirical formulation.

Keywords: Numerical modelling; XBeach; Physical modelling; Wave height distribution; Validation

一、引言

在海岸工程物理模型试验的设计中,为了在指定位置——通常是被测结构附近——获得所需的波浪条件,并使造波板处的水深足够大、以落在造波所用波浪理论的适用范围之内,往往需要修筑一段前滩。除了通常用来描述目标波浪条件的谱波浪参数之外,波高分布及其相关参数(如 $H_{\max}$ 与 $H_{2\%}$)、波浪周期与低频重力波往往也需要被恰当地再现。对于关注波浪爬高或波浪力的试验而言,波高分布尤为重要,因为此时结构的响应更多地由个别极端波浪、而非波谱的平均特征所支配[1]。

关于前滩设计的若干指导性意见见于 Frostick 等[2],其中给出了(部分基于经验的)过渡坡坡度与过渡坡之后前滩长度的准则。更晚近地, Eldrup 与 Lykke Andersen[3]利用数值模型结果,导出了过渡坡之后水深的取值准则:该水深必须足够大,以免产生不希望出现的自由波。由于修筑前滩与过渡坡耗费大量人工(因而造价高昂),若能在既有准则之外事先核算给定的前滩设计能否满足目标波浪条件、所选过渡坡是否会显著影响波浪条件,将很有价值。使用数值波浪模型正是实现这一目的途径之一。

要使数值模型成为物理模型布置的有效设计工具,它对(前滩上)波浪变形的预测必须足够准确。一种做法是采用布辛涅斯克模型、乃至十分精细的 CFD 波浪模型这类计算量很大的模型。以 OpenFOAM 为代表的 CFD 模型已被证明能够准确再现波浪变形[4-5],但其计算需求通常很高,在实践中往往意味着 2DV 模拟的机时以「天」计;对于完整的三维模拟,计算需求更大,因而这类模拟在实践中几乎不可行。在设计物理模型试验的语境下,这是一个显著的缺陷——试验布置的确定往往是一个迭代过程,过长的机时会严重拖累这一过程。另一方面,以 SWAN[6]为代表的谱波浪模型速度快得多,但它并不模拟每一个单独的波浪,因而无法给出波高分布。针对波高分布的经验公式——如 Battjes 与 Groenendijk[7]给出的缓坡公式——评估起来更快,但如 Caires 与 van Gent[8]所指出的,它们只对非常简单地形有效,而且需要以当地的谱波高作为输入参数。晚近的研究提出改变分布的尾部[9-12]或拟合一个新的分布,但都没有改变上述局限。作为一种折中, XBeach 模型在其两层非静压(XBeach-NH+)模式下运行,或者 SWASH 这类已被证明能够成功模拟波浪破碎行为的非静压模型,似乎能在计算时间与波浪变形的准确表征之间取得一个可行的平衡。de Ridder 等已针对双色波、复杂沙坝海滩地形与裙礁,就总体波浪参数与谱特性对 XBeach-NH+ 模型进行了验证。

在既有验证工作的基础上,本文利用高分辨率的波浪水槽实测资料,验证 XBeach-NH+ 模型再现缓坡前滩上波高分布的能力。全文结构如下:第二节介绍作为验证资料的物理模型试验;第三节讨论数值模拟;第四节展开其结果;第五节为讨论;第六节给出本文的结论。

二、物理模型试验

(一) 物理模型布置

缓坡前滩 (Sloping Foreshore, 简称 SloFor) 试验的物理模型, 在一座长 110 m、宽 1.0 m、高 1.2 m 的波浪水槽设施中开展。该水槽的造波板配备主动反射补偿与二阶造波功能。如图 1 所示, 模型布置包含一段 1:15 的过渡坡与一级距槽底 43.4 cm 的水平台阶, 其后接一段很长的 1:60 缓坡, 一直升到距槽底 71.7 cm 的高度。1:60 坡上布置了 15 支波高仪 (自行研制), 以很高的空间分辨率捕捉波浪的变形过程 (见表 1)。

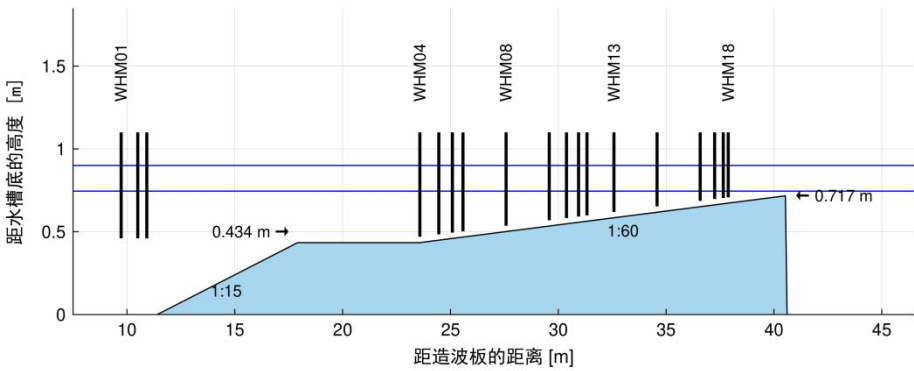


Figure 1 Setup of the SloFor Physical Model

图 1 SloFor 物理模型的布置

注. 竖线标示波高仪的位置, 横线标示试验方案中所用的不同水位 (见表 2), 浅蓝色区域为不透水前滩。本图按源稿 Figure 1 的几何、比例与配色重绘为中文, 槽底折线、水位线与 18 支波高仪的位置分别取自正文与表 1。

Table 1 Wave Gauge Locations in the Physical Model Setup

表 1 物理模型布置中波高仪的位置

波高仪	位置 [m]
WHM01	9.73
WHM02	10.50
WHM03	10.92
WHM04	23.58
WHM05	24.46
WHM06	25.09
WHM07	25.58
WHM08	27.58
WHM09	29.58
WHM10	30.38
WHM11	30.94

(二) 试验方案

在试验方案中, 深水波高仪阵列处的波陡 ($s_{0,p}$) 在 1% 与 5% 之间变化, 水平台阶以上的相对水深 ($d_{\text{step}}/H_{m0,\text{In},\text{deep}}$) 在 3.1 与 4.7 之间变化, 试验以两种不同的水深进行。入射波浪参数在深水波高仪阵列处确定, 所用方法为 de Ridder 等对 Eldrup 与 Lykke Andersen 非线性波浪分离法的改进。试验时长按约 1 000 个

波浪设定，以保证波谱得到恰当的表征。波高仪的采样频率为 40 Hz。

Table 2 SloFor Test Programme with Measured Wave Spectral Parameters at the Offshore Wave Gauge Array

表 2 SloFor 试验方案及深水波高仪阵列处实测的谱波浪参数

试验	d [m]	Hm0,In,deep [m]	Tp,In,deep [s]	s0,p [%]	谱型	kpd [-]	dstep/Hm0,In,deep
D101	0.900	0.15	3.07	1.0	JONSWAP	0.7	3.1
D102	0.900	0.15	1.95	2.5	JONSWAP	1.2	3.1
D103	0.900	0.15	1.38	5.0	JONSWAP	2.0	3.1
D111	0.900	0.15	3.04	1.0	PM	0.7	3.1
D112	0.900	0.15	1.95	2.5	PM	1.2	3.1
D113	0.900	0.15	1.39	4.9	PM	2.0	3.1
D201	0.900	0.10	2.52	1.0	JONSWAP	0.8	4.7
D202	0.900	0.10	1.59	2.5	JONSWAP	1.6	4.7
D203	0.900	0.10	1.12	4.9	JONSWAP	2.9	4.7
D211	0.900	0.10	2.52	1.0	PM	0.8	4.7
D212	0.900	0.10	1.59	2.5	PM	1.6	4.7
D213	0.900	0.10	1.14	4.6	PM	2.8	4.7
L201	0.745	0.10	2.52	1.0	JONSWAP	0.7	3.1
L202	0.745	0.10	1.59	2.5	JONSWAP	1.4	3.1
L203	0.745	0.10	1.12	4.9	JONSWAP	2.4	3.1
L211	0.745	0.10	2.52	1.0	PM	0.7	3.1
L212	0.745	0.10	1.59	2.5	PM	1.4	3.1
L213	0.745	0.10	1.14	4.7	PM	2.4	3.1

三、数值模拟

(一) XBeach 非静压两层数值模型

XBeach 非静压两层 (XBeach-NH+) 模型由 de Ridder 等提出，是在既有 XBeach 框架内实现的一个相位解析非线性模型。它采用两层近似——而非更早的单层实现——以便在较高的 kd 数下 (约至 $kd = 4$, 其中 k 为波数、 d 为水深) 获得更好的频散特性。所实现的两层近似含两个垂向分层，非静压压力只计入底层。相对于完整的两层非静压实现，这一处理的计算需求更低。本文的模型模拟采用 XBeach 的「BOI-phase3」版本 (v1.24.5956)。

在 XBeach-NH+ 模型中，波浪破碎以所谓静压前锋近似作参数化处理：该方法把水面的上升速度限制为波速的某一分数 (即 $maxbrsteep$ 参数)。当该判据被突破时，波浪即开始破碎，相应网格被置为静压。对于相邻网格，适用 $reformsteep$ 判据 (同样表示为波速的一个分数，且 $reformsteep < maxbrsteep$)。两种情形下，只要自由水面重新向下运动，网格即恢复为非静压。因此，XBeach-NH+ 模型中的波浪破碎由 $maxbrsteep$ 与 $reformsteep$ 两个参数控制。

(二) 数值模型概化

数值模型概化采用 0.02 m 的等距水平离散，视波浪周期不同，相当于每个波长 100 至 750 个网格点 (以 $L_{0,p}$ 为准)。由于假定沿水槽宽度方向无显著变化，波浪水槽按一维建模。造波边界设在最靠近造波板的波高仪处，采用 $nonh_1d$ 边界类型。模型以 JONSWAP 谱或皮尔逊-莫斯科维奇谱的谱参数 (H_{m0} 与 T_p) 驱动，视试验而定。模型借助线性波理论，把波谱转换为 XBeach-NH+ 求解器所需的深水边界处流速与水面高程时间

序列。在模型的另一端采用一维吸收边界（边界类型 `abs_1d`）。模拟中 CFL 条件取 0.55。

（三）验证方法

验证的总体思路是：以物理模型中相同的波谱与水位驱动数值模型；随后需要率定的数值模型参数即为 3.1 节所述的 `maxbrsteep` 与 `reformsteep`。这两个参数实质上控制着 XBeach-NH+ 中参数化波浪破碎过程的起止，因而预期对谱波浪参数与波高分布均有显著影响。文献中这两个参数的取值为：`maxbrsteep` 取 0.4 与 0.6（默认值），`reformsteep` 取 0.25。如 3.1 节所述，这些数值表示的是波速的一个分数。改变这两个参数取值的典型效果见图 2 与图 3。由图可见，改变 `maxbrsteep` 值主要影响最高的那部分波浪的波高衰减量，与预期一致；这一效果在 WHM15 处更为明显，该处已发生了更多的波浪破碎。而改变 `reformsteep` 值在本例中似乎影响甚微。

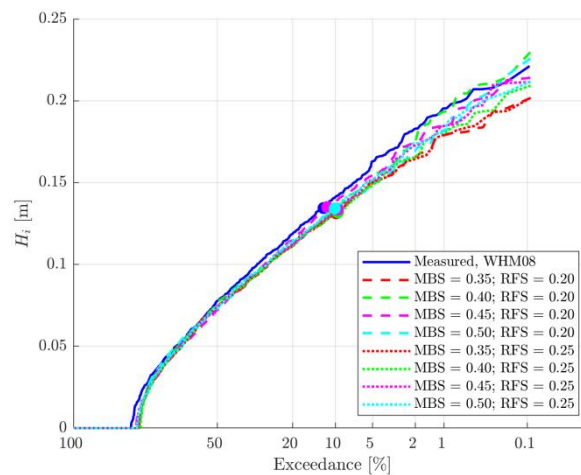


Figure 2 Wave Height Exceedance Distribution for WHM08 in Test D103

图 2 试验 D103 中 WHM08 处的波高超越概率分布

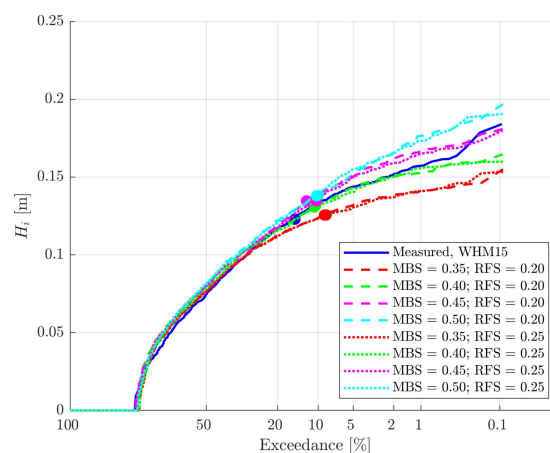


Figure 3 Wave Height Exceedance Distribution for WHM15 in Test D103

图 3 试验 D103 中 WHM15 处的波高超越概率分布

在数值模型中，波浪按随机 JONSWAP 谱或随机皮尔逊-莫斯科维奇谱给定，视试验而定，而不是以物理模型中实际生成的波列来驱动模型。作此选择是着眼于其预期用途——在（可能开展的）物理模型试验之前作预测性模拟，此时物理模型中波列的具体实现方式尚属未知。

从 XBeach-NH+ 模型的结果可以清楚看到，在许多试验中，谱波高在靠近深水模型边界处会突然略有下降，

一个例子见图 4 左上面板的左侧。这似乎是造波边界引起的问题，因为该现象在空间上被局限于边界附近。这一表现类似于物理模型造波板处常见的情形：当造波所依据的波浪理论假定对某些波浪条件不（完全）成立时便会出现。XBeach-NH+ 中所用 nonh_1d 边界条件背后的假定，很可能出现了类似的问题。由图可见，该问题影响最初的一两支波高仪，而 WHM03 未受影响。因此本文选择在 WHM03 处率定数值模型的波浪驱动，使该处的 H_{m0} 在物理模型与数值模型之间相互吻合。这实际上意味着以总谱波高、而非仅以入射谱波高来率定数值模型。由此带来的误差预期很小，因为波浪反射量很小——该物理模型布置采用了一段一直升到很小水深的长缓坡，波能耗散很大。

四、结果

（一）数值模型的表现

如 3.3 节所述，XBeach-NH+ 数值模型的表现，以其再现谱波浪参数（ H_{m0} 与 $T_{m-1,0}$ ）与波高分布（以 $H_{10\%}$ 与 $H_{2\%}$ 表征）的能力来评价。此外还给出了最大波高的比较。不过，再现 H_{max} 的能力并未纳入 XBeach-NH+ 推荐参数设置的选取依据，因为该参数对模型边界处波列的具体形态极为敏感（这一点在图 2、图 3 中蓝线的右端同样可见）。由于 XBeach-NH+ 是以波谱的一个随机实现来驱动的， H_{max} 出现偏差是意料之中的。

Table 3 Mean Absolute Errors of the H_{m0} , $H_{10\%}$, $H_{2\%}$ and H_{max} for WHM04-WHM18

表 3 WHM04—WHM18 处 H_{m0} 、 $H_{10\%}$ 、 $H_{2\%}$ 与 H_{max} 的平均绝对误差

maxbrsteep	reformsteep	H_{m0} 的 MAE [%]	$H_{10\%}$ 的 MAE [%]	$H_{2\%}$ 的 MAE [%]	H_{max} 的 MAE [%]
0.35	0.20	2.5 (3.1)	5.1 (6.2)	9.2 (10.0)	14.8 (14.4)
0.35	0.25	2.5 (3.1)	5.2 (6.3)	9.3 (10.1)	14.9 (14.4)
0.40	0.20	2.7 (3.3)	3.7 (4.8)	6.3 (7.3)	10.7 (10.8)
0.40	0.25	2.7 (3.3)	3.7 (4.9)	6.4 (7.5)	10.4 (10.5)
0.45	0.20	3.7 (4.0)	3.2 (4.3)	4.6 (5.7)	7.5 (7.8)
0.45	0.25	3.7 (4.1)	3.4 (4.6)	4.2 (5.6)	8.0 (8.4)
0.50	0.20	5.0 (5.2)	3.8 (4.9)	3.6 (5.3)	6.8 (7.6)
0.50	0.25	5.1 (5.2)	3.9 (4.9)	3.5 (5.2)	6.8 (7.5)

Table 4 Relative Bias of the H_{m0} , $H_{10\%}$, $H_{2\%}$ and H_{max} for WHM04-WHM18

表 4 WHM04—WHM18 处 H_{m0} 、 $H_{10\%}$ 、 $H_{2\%}$ 与 H_{max} 的相对偏差

maxbrsteep	reformsteep	H_{m0} 的偏差 [%]	$H_{10\%}$ 的偏差 [%]	$H_{2\%}$ 的偏差 [%]	H_{max} 的偏差 [%]
0.35	0.20	-0.1 (-1.4)	-3.7 (-5.3)	-9.2 (-10.0)	-14.0 (-13.8)
0.35	0.25	-0.2 (-1.5)	-3.8 (-5.4)	-9.2 (-10.1)	-14.0 (-13.9)
0.40	0.20	1.9 (0.5)	-1.1 (-2.9)	-6.0 (-7.0)	-9.4 (-9.6)
0.40	0.25	3.4 (1.9)	0.6 (-1.5)	-2.0 (-3.7)	-4.9 (-5.6)
0.45	0.20	4.9 (3.2)	2.3 (-0.2)	-1.1 (-3.1)	-1.4 (-2.5)
0.45	0.25	1.8 (0.4)	-1.3 (-3.3)	-6.1 (-7.3)	-9.1 (-9.6)
0.50	0.20	3.6 (2.0)	1.0 (-1.4)	-3.2 (-4.8)	-4.5 (-5.6)
0.50	0.25	5.0 (3.3)	2.7 (0.1)	-1.0 (-2.9)	-1.6 (-2.8)

表 3 与表 4 分别列出上述参数在波浪破碎相关的不同数值模型设置组合下的平均绝对误差（MAE，注意

其中包含偏差)与偏差。注意其中同时列出了全部试验与仅 $k_{pd} < 2$ 的试验的评分,最终采用的是后者,其理由在 4.2 节说明。表 3 显示出的第一个规律是: reformsteep 取 0.20 与 0.25 时 MAE 的差别很小,这与 3.3 节的观察一致。尽管误差的量级相近,偏差的差别(表 4)却更大:前者更为一致地低估,后者有时也会高估。

其次,表 3 表明 maxbrsteep 的最优取值在 H_{m0} (0.35)、 $H_{10\%}$ (0.45) 与 $H_{2\%}$ (0.50) 三者之间并不相同。从图 4 与表 4 可以看出其中的原因。图 4 给出了波高相关参数在数值模型与物理模型中的空间发展过程。对图 4 所示的试验而言, H_{m0} 在整个水槽内吻合得相当好, $H_{10\%}$ 略被低估,而 $H_{2\%}$ 的低估更为明显(对应 $\text{maxbrsteep} = 0.40$ 的结果)。这一规律与表 4 所列的偏差一致:波高分布中越高的波浪,越倾向于被低估。 maxbrsteep 取值越大,实际上会推迟破碎点,把 H_{m0} 的下降推向岸侧(图 4 中向右)。在较小的水深中,这会导致 H_{m0} 被高估;相应地,这也抬高了 $H_{10\%}$ 与 $H_{2\%}$ 的取值,在一定程度上补偿了它们最初的低估,从而带来更低的误差评分。验证的重点在于波高分布中较高的那部分波浪,因为它们对海岸工程最为相关。然而,随着 maxbrsteep 取值增大而出现高估,模拟出的波能过多,波高分布作为整体反而变差。

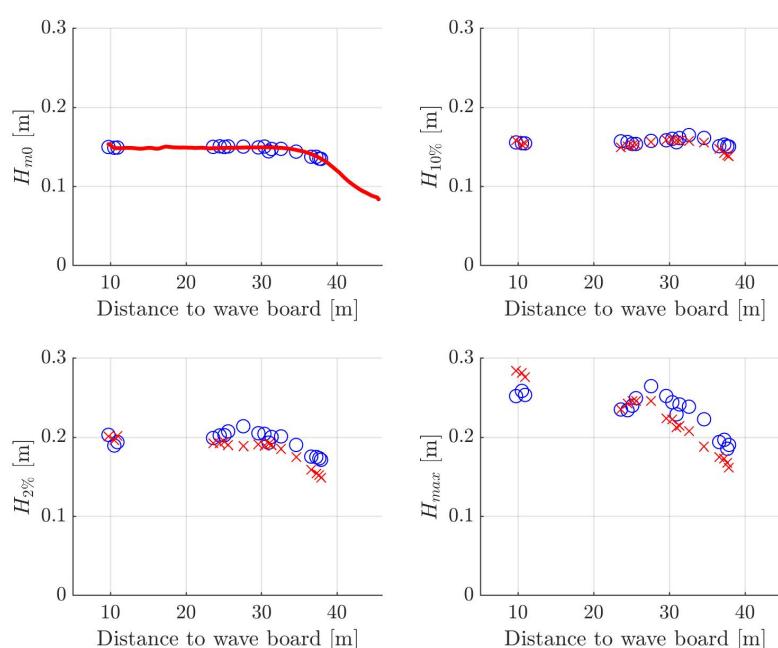


Figure 4 Spatial Comparison of Wave Parameters between the Physical and Numerical Models for Test D102

图 4 试验 D102 中波浪参数在物理模型与数值模型之间的空间对比

简言之,尽管 maxbrsteep 取较大值(0.45 与 0.50)时 $H_{10\%}$ 与 $H_{2\%}$ 的误差评分更低,这些取值仍不宜推荐,因为它们实际上高估了波能总量。反之, maxbrsteep 取较小值(0.35 与 0.40)时 H_{m0} 的误差最小,而 $H_{10\%}$ 与 $H_{2\%}$ 的误差较大(二者一般被低估)。据此,本文推荐 maxbrsteep 取 0.4: 此时 H_{m0} 的误差仅略大于取 0.35 时,而 $H_{10\%}$ 与 $H_{2\%}$ 的误差却显著更小。这一推荐基于「除波高分布之外,准确再现 H_{m0} 同样重要」的假定,而这在实践中往往成立。对于只关心波高分布中小超越概率部分的应用, maxbrsteep 取 0.45 或 0.50 可能得到更好的结果。如前所述,结果并未显示 reformsteep 取 0.20 与 0.25 在 MAE 上有令人信服的差别。本文以下部分一律取 0.20。

除了物理模型与数值模型之间波高分布的比较之外,还将二者与 Battjes 与 Groenendijk[7]导出的经验波高分布作了比较。做法是:以物理模型实测的 H_{m0} 为输入,用该经验公式对全部试验预测 WHM04—WHM18 处的 $H_{10\%}$ 与 $H_{2\%}$,随后相对于实测的 $H_{10\%}$ 与 $H_{2\%}$ 计算 MAE,以便与表 3 比较。注意这一做法假定 H_{m0} 能

被完全准确地预测,但正因如此,该评估纯粹只考察 Battjes-Groenendijk 波高分布本身的准确性。所得 MAE 为: $H_{10\%}$ 6.8%、 $H_{2\%}$ 7.3%。与 XBeach-NH+ 的结果相比可见,数值模型的表现更好,对应的 MAE 分别为 3.7% 与 6.3%。经验波高分布表现较差的一个可能原因在于其形状: Battjes 与 Groenendijk[7]给出的是一个在过渡波高处发生突变的复合分布,而在实践中,波高分布是更为平滑地过渡到更小的梯度(如图 2、图 3 中的蓝色实线所示)。据推测,这一点造成了该经验波高分布表现略差。

(二) 相对水深的影响

图 5 把谱波浪参数与波高分布相关参数的误差,对相对水深作图;相对水深定义为当地水深除以入射的深水波高($d/H_{m0,ln,deep}$)。图中最突出的一点是高波陡工况(红点)总体表现不佳,在较大的水深中即已如此。注意在率定中, H_{m0} 被调整为与 WHM03(深水波高仪,未在图中显示)处的实测值非常接近。因此,即便对较高波陡的试验,波浪也是正确地进入了数值模型的,但显然波高在到达前滩坡起点之前就被削减得过多。据推测,3.1 节所述的适用范围(至 $kd = 4$)适用于规则波,而对不规则波,该判据在实践中应当更为严格:即便(以谱峰周期计的) $k_p d < 4$,不规则波谱中较高频率的部分也可能并不完全满足 $kd = 4$ (就高频所对应的 k 值而言),从而在模型的频散特性与波浪传播上出现问题。目前的初步结论是:对于造波边界处 $k_p d \geq 2$ 的波浪条件,XBeach-NH+ 模型并不适用。因此,表 3 中的误差同时按全部试验与剔除 $k_p d \geq 2$ 的试验两种口径给出。

至于波陡较低的工况,可以看出,模型再现实测数据的准确度随相对水深减小而总体下降。这一趋势在波高分布相关的变量($H_{10\%}$ 与 $H_{2\%}$)上比在谱波浪参数上更为明显。举例而言,若取 10% 的绝对误差限,则 H_{m0} 的误差在整个水深范围内(直至 $d/H_{m0,ln,deep} = 0.7$)都低于 10%; $T_{m-1,0}$ 同样如此,只有图中左上方的两个数据点例外。对 $H_{10\%}$ 而言,误差在 $d/H_{m0,ln,deep} \geq 2.0$ 时低于 10%;对 $H_{2\%}$,水深则需更大($d/H_{m0,ln,deep} \geq 2.6$)。这也说明最高的那部分波浪更难预测,而且从趋势上看,在相对水深较小时它们总体上被模型低估。注意,以上结果所对应的参数范围为:波陡($s_{0,p}$)介于 1.0% 与 2.5% 之间,缓坡前滩上的相对水深($d/H_{m0,ln,deep}$)介于 0.7 与 4.7 之间。

五、讨论

4.2 节提出的推测是:XBeach-NH+ 在高波陡试验($s_{0,p}$ 约 5.0%)中表现不佳,源于这类工况所对应的 $k_p d$ 值偏高。理想的做法是以更多验证资料来检验这一推测——波陡同样高、但造波板处 $k_p d$ 值更小(就作者所知,目前尚无此类验证资料)。若 XBeach-NH+ 在这类条件下表现良好,即可支持上述推测。

在考察 XBeach-NH+ 模拟出的 H_{m0} 空间分布形态时,可以观察到造波边界附近始终存在 H_{m0} 的突然下降(如 3.3 节所述)。虽然这一现象在 $k_p d$ 与 $s_{0,p}$ 较高的验证试验中更为明显,但它在全部试验中都存在。一种解释是,这源于两层近似本身的简化性质:该近似并不能完全吻合造波边界处的自然流速剖面,而该剖面会在一个相当小的空间尺度上被「校正」。无论其成因如何,由于该现象被限制在模型边界附近,一个相当简便的应对办法就是在离模型边界一段距离处(即 H_{m0} 突降位置的稍岸侧)率定所需的波浪条件——本文正是采用了这一做法(3.3 节)。值得注意的是,Vasarmidis 等在 SWASH 模型中遇到了非常相似的波高突降现象,他们随后以一个新导出的造波边界条件解决了该问题。类似的方案或许在 XBeach-NH+ 中同样可行。

验证结果(4.2 节)表明,当相对水深($d/H_{m0,ln,deep}$)变小时,模型再现物理模型试验的能力随之下降。这一效应对最高的那部分波浪比对较低的波浪或总体波高更为明显,即:最大的误差出现在 $H_{2\%}$,其次是 $H_{10\%}$,而 H_{m0} 的误差最小。前两者在相对较浅的水中一般被低估,而 H_{m0} 的误差则无明显趋势。比较浅水中模拟与实测的波高分布可以看出,较小的波浪往往被略微高估;在计算 H_{m0} 时,这(部分地)补偿了较高波浪的低估,

从而使该参数的误差更小。造成这一现象的原因可能在于 XBeach-NH+ 参数化处理波浪破碎的方式存在不足，而在相对较浅的水中，由于发生了更多的波浪破碎，这些影响自然更为突出。此外，物理模型与数值模型之间还存在一个已知的根本差异：物理模型中因波生增水与水体体积守恒而产生的减水，在数值模型中并不存在。就本文所作的模拟而言，这一效应量级约为 1 mm，预期不会显著影响本文的结论。

鉴于上述结果，物理模型中的前滩与过渡坡可以借助 XBeach-NH+ 加以优化。对于符合本文适用范围的波浪条件，可以在设计阶段模拟多种可能的前滩方案——同时兼顾前滩设计的既有准则——与多种水动力驱动条件，以评估在所需位置（通常是被测结构的坡脚附近）能否达到目标波浪条件。在解读结果时，应当注意前述 $H_{10\%}$ 与 $H_{2\%}$ 被低估的倾向，以及 4.2 节所述模型在（很）浅水中准确度下降的问题。当目标波浪条件所在的位置处于相对较浅的水中（ $d/H_{m0,ln,deep} \leq 2.0-2.6$ ）时， $H_{10\%}$ 与 $H_{2\%}$ 被低估 10% 以上并不罕见。此外，建议在最优前滩方案建成之后，仍在物理模型中核验目标波浪条件是否达到。

六、结论

本文验证了 XBeach 非静压两层数值模型再现物理模型实测结果的能力，该物理模型含一段（很）浅的缓坡前滩，验证对象同时包括谱波浪参数与波高分布。为此导出了模型中参数化波浪破碎公式的最优设置： $maxbrsteep$ 参数推荐取 0.40， $reformsteep$ 参数推荐取 0.20（不过也应指出，它与文献中 0.25 一值在表现上的差别非常小）。在不要求准确再现 H_{m0} 、只关注波高分布中小超越概率部分的应用中， $maxbrsteep$ 取 0.45 或 0.50 可能得到更好的结果。

该数值模型在深水边界波陡较高（5.0%）的算例中表现不佳，即便对谱波浪参数亦然。据推测，这源于这些验证试验在造波模型边界上对应的 $k_p d$ 数偏高（2.0—2.9）。在这一表现不佳的成因得到进一步澄清之前，建议不要把该模型用于此类高波陡工况和 / 或 $k_p d \geq 2$ 的条件。

对于波陡为 1.0% 与 2.5% 的试验，该数值模型的表现要好得多，谱波浪参数得到了很好的表征；在相对水深变得很小之前，相应的波高分布也表征得较为理想。当相对水深（ $d/H_{m0,ln,deep}$ ）分别大于 2.0 与 2.6 时， $H_{10\%}$ 与 $H_{2\%}$ 的平均绝对误差低于 10%；对更浅的水，预期该模型会低估这些波高。就本文所用的简单 1:60 验证坡而言，该模型给出的 $H_{10\%}$ 与 $H_{2\%}$ 误差小于以实测波高为输入的 Battjes 与 Groenendijk 经验公式，同时它还能够模拟更为复杂的近岸地形。

参考文献

- [1] 肖立业. 超导输电线路工程化关键问题. 电工电能新技术, 2024, 41(02): 1-10.
- [2] Jacobsen N G, Van Gent M R A, Capel A, et al. Numerical prediction of integrated wave loads on crest walls on top of rubble mound structures. Coastal Engineering, 2018, 142: 110-124.
- [3] 朱合华. 城市地下管网数字孪生建模. 地下空间与工程学报, 2022, 18(02): 369-378.
- [4] 李元昊. 数控机床热误差补偿技术. 中国机械工程, 2022, 33(08): 905-912.
- [5] 陈发虎. 高寒冻土路基稳定控制技术. 冰川冻土, 2022, 44(02): 478-486.
- [6] Eldrup M R, Lykke Andersen T. Generation of highly nonlinear waves in a short wave flume. Proceedings of CoastLab 2024: Physical Modelling in Coastal Engineering and Science. Delft: TU Delft OPEN Publishing, 2024.
- [7] 吴一戎. 合成孔径雷达成像优化算法. 雷达学报, 2021, 11(02): 201-212.
- [8] 黄维和. 天然气管网动态调度优化. 油气储运, 2022, 41(04): 361-368.
- [9] 叶列平. 再生混凝土高性能化改性技术. 建筑材料学报, 2022, 25(02): 305-314.

- [10] 李清泉. 车载激光雷达高精度定位技术. 测绘学报, 2024, 51(04): 437-446.
- [11] 赵金洲. 页岩油体积压裂增产技术. 石油学报, 2022, 43(04): 511-520.
- [12] Frostick L E, McLelland S J, Mercer T G. Users guide to physical modelling and experimentation: experience of the HYDRALAB network. Leiden: CRC Press/Balkema, 2011.