

· 综 合 ·

风暴潮与波浪动态耦合三维港池模拟研究*

孙天霆¹, 潘军宁¹, 王登婷¹, 王树鹏², 李岩汀¹, 刘清君¹, 黄 哲¹

(1. 南京水利科学研究院, 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210024;

2. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250013)

摘要: 风暴潮是发生在海洋沿岸的一种严重的自然灾害, 通常会伴有大浪, 二者的耦合作用极大地威胁着沿岸地区的安全。以往对近岸承灾体海洋动力灾害的研究大多集中于单一致灾因子的影响, 多采用恒定水位和定常波浪要素, 对风暴潮与波浪耦合效应及其对海堤承灾体动力响应的研究不足。采用 9711 号台风在宁波北仑海域引起的风暴潮潮位及波浪过程, 通过将连续的风暴潮水位变化过程与波浪过程进行叠加, 模拟真实的动态潮位过程, 在三维港池实验室中实现风暴潮和波浪的动态耦合模拟, 为相关模型试验的开展提供参考。

关键词: 风暴潮; 波浪; 耦合模拟; 物理模型试验

中图分类号: U 652; TV 139.2+5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)02-0017-06

Simulation study on dynamic coupling of storm surge and wave in three-dimensional harbor basin

SUN Tian-ting¹, PAN Jun-ning¹, WANG Deng-ting¹, WANG Shu-peng², LI Yan-ting¹, LIU Qing-jun¹, HUANG Zhe¹

(1.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic

Research Institute, Nanjing 210029, China; 2.Shuifa Planning and Design Co., Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: Storm surge is a kind of serious natural disaster that occurring along the ocean coast, which is usually accompanied by large waves. The coupling of storm surges and waves is a great threat to the security of coastal areas. The previous researches on marine dynamic disasters of offshore disaster-bearing bodies are mostly focused on the influence of a single disaster-causing factor, and constant water levels and wave elements are mostly used. The research on the coupling effect of storm surges and waves and its dynamic response to seawall disaster-bearing body is still insufficient. In this paper, the storm surge tide level and wave process caused by typhoon 9711 in Beilun sea area of Ningbo are used to simulate the real dynamic tide level process by superimposing the continuous storm surge water level variation process with the wave process. The dynamic coupling simulation of storm surge and wave is realized in the three-dimensional wave basin, which provides a reference for the development of related model tests.

Keywords: storm surges; waves; coupling simulation; physical model test

近年来, 在全球气候变化背景下, 群发性海洋动力灾害对近岸地区带来的影响愈加强烈。台风风

暴潮是发生在海洋沿岸的一种严重的自然灾害, 是一种由强烈气象扰动, 如强风和气压骤降所造成的

收稿日期: 2022-05-26

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600702); 江苏省水利科技项目(2022027); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y222004); 船舶总体性能创新研究开放基金项目(31422118)

作者简介: 孙天霆(1992—), 男, 博士, 工程师, 从事波浪及其与建筑物相互作用方面研究。

通讯作者: 王登婷(1976—), 男, 正高级工程师, 研究方向为波浪与建筑物相互作用。E-mail: dtwang@nhri.cn

海面异常升高现象,往往造成非常严重的人员伤亡和经济损失。从水动力的角度分析,这种灾害由高潮位和大浪的共同作用引起,波浪增水和爬高使得越堤的海水厚度增加,海堤在持续的波浪作用下发生破坏,进而形成海岸洪水。因此,关于风暴潮和波浪对海岸堤防结构作用的研究与日俱增。

海堤越浪是海岸工程的经典问题之一,学者们已经进行了大量的研究。在考察越浪流对海堤的破坏机理方面已有不少物理模型试验成果,如 Briganti 等^[1], Pullen 等^[2]。Möller 等^[3]认为海堤的破坏失稳与越浪及海堤的土壤性质密不可分,通过大比尺物理模型试验探究了越浪过程对海堤的渗透和侵蚀作用,给出了越浪流特征参数的空间分布。van der Meer 等^[4]总结了大量试验结果,认为越浪流流速是决定海堤是否会发生冲刷性破坏的重要参数,风暴潮对海堤的破坏作用主要是由于漫堤造成的堤顶及后坡破坏。王登婷等^[5]、陈伟秋等^[6-7]对海堤后坡分别采用混凝土板、干砌块石及抛石等护面形式进行了系列二维物理模型试验,阐述了越浪作用下海堤后坡的破坏进程,分别给出了不规则波作用下海堤后坡不同护面类型的稳定厚度计算公式。

然而,上述物理模型试验的开展采用的是在不同静水位上叠加波浪的试验方法,并未考虑风暴潮的水位变化过程,与实际风暴潮过程中水位与波浪的连续变化情况并不相符。以往的研究中常取极端水位作为研究条件,但高水位在整个风暴潮过程中持续时间较短,越浪量被过分高估,使得海堤的设计过于保守。在涉及到海堤破坏过程的研究中,采用恒定水位也难反映实际情况下的动态风暴潮对海堤破坏的影响机制,以及风暴潮条件下水位、波浪要素、越浪量以及海岸洪水过程的时变特征。因此,只有全面地考虑风暴潮、天文潮与波浪之间的相互作用机制,才有可能准确地模拟出真实的水动力条件和波浪条件,为其他研究提供基础。

van Gent 等^[8]在二维水槽中探究了风暴潮变化水位与波浪共同作用下抛石堤内部沙质斜坡的侵蚀破坏机理,相比于其 2015 年^[9]进行的物理模型

试验,考虑了风暴潮过程中水位变化的影响。试验中水位过程线呈现不连续的 3 级阶梯状,与实际风暴潮水位过程尚有出入。结果表明,风暴潮的水位变化对冲刷和淤积起着重要作用,变水位情况下冲刷范围更大,冲刷坑剖面更宽。van Gent 和 Wolters^[10]在后续的三维试验中也得到了相似的结论。Kerpen 等^[11]通过物理模型试验研究了动态潮位和变化波陡条件下 1:6 斜坡海岸结构的越浪量,在其单个试验中水位被设计为光滑的线性变化,即线性增加或线性降低,也没有完全反映出风暴潮过程中潮位的复杂变化特点。陈茂雯等^[12]通过改造传统波浪水槽,在水槽末端设置可转动的尾门来调节水位的变动,首次实现了风暴潮与波浪动态耦合的二维水槽实验室模拟。Pan 等^[13-14]基于该模拟技术开展风暴潮与波浪耦合效应对海堤破坏的影响规律研究,观测了波、潮动态耦合情况下海堤的破坏过程,比较其与传统固定水位叠加波浪试验结果的差异,认为传统试验方法对于防浪墙、堤顶、后坡的破坏以及越浪量的评估偏于保守。

本研究对实验室波浪水池进行改造,增设生潮系统,使水池具备同步造波和生潮的功能。通过将连续的风暴潮水位变化过程与波浪过程进行叠加,模拟真实的动态潮位过程,在三维港池实验室中实现风暴潮和波浪的动态耦合模拟,为相关模型试验的开展提供参考。

1 试验设备及仪器

为了在三维港池实验室中复演真实的风暴潮水位与波浪耦合过程,须对现有的波浪港池进行改造,增设生潮系统,由造波系统和生潮系统分别对波浪和潮位过程进行控制。采用的波浪港池位于南京水利科学研究院港口航道泥沙工程交通行业重点实验室,水池长 50 m、宽 17.5 m、深 1.2 m,配置有摇板式造波机,可根据需要生成规则波和不规则波,港池四壁均设置有网孔消浪栅以减少反射波。

波浪水池改造见图 1。风暴潮潮位变化过程由新增设的生潮系统进行控制。生潮系统由连通蓄水池、试验区的进/出水口、输水管道和控制系统

组成。控制系统包括水位监测仪、工控计算机、变频器、电机、双向泵以及水位控制软件。在模拟风暴潮水位过程时, 水位监测仪追踪试验区水面并显示实时水位, 工控计算机根据测量水位和目标水位的差值计算流量差, 并将其转变为电信

号作为水位调节指令, 发送至变频器以控制双向泵电机的转速和转向, 通过两端进出水口将试验区域内的水抽排至蓄水池, 或将蓄水池内的水补充到试验区域, 使试验区的水位达到目标值, 实现风暴潮水位的精确、动态连续变化。

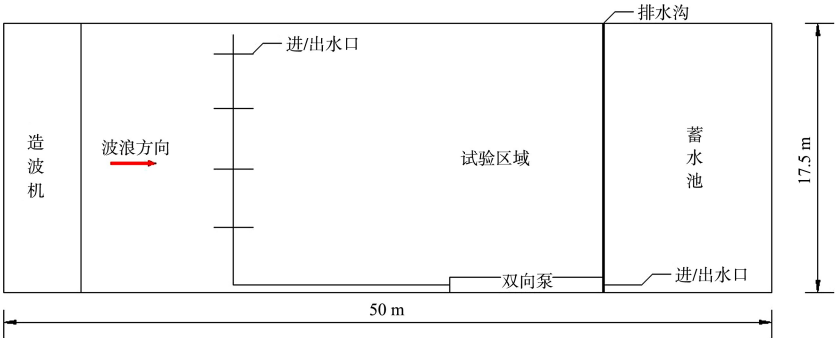


图 1 波浪水池改造

2 风暴潮与波浪耦合模拟方法

模拟选取的风暴潮过程为对工程设计影响较大的典型时段, 其特点为水位较高、波高较大或波周期较长。风暴潮水位过程模拟采用变频器控制双向泵抽排水的方式实现水位的精确动态连续变化。潮位模拟误差可控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内(模型值)。

1) 模拟波浪过程时, 首先将选取的持续时间为 t 的风暴潮模拟全过程以时间间隔 Δt 离散为 n 个时间分段, 将每一分段对应的平均水位作为波浪率定时水位控制值, 对应的平均有效波高和周期作为波浪率定目标值, 得到离散的 n 个造波文件。 Δt 的大小由潮位的变化速率和波浪的特征周期共同确定。为避免单个子时间段内较大的水位差对波浪率定产生影响, Δt 不宜过大; 考虑到单个时间分段内波浪个数不宜太少, 需满足波浪特征分析的要求, 则 Δt 不宜过小。

2) 对离散的 n 个造波文件进行拼接, 得到全时段 t 内水位连续变化条件下的造波文件, 造波机根据拼接后的造波文件进行造波, 使试验区域达到设定波高和周期。率定过程中, 对波高及周期的模拟结果分别与目标值进行比对, 平均误差需在 $\pm 5\%$ 以内, 波能谱总能量的偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内, 峰频模拟误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。

3) 将拼接后的造波文件发送至造波控制系统, 潮位过程目标曲线发送至潮位控制系统, 确保波、

潮模拟同步进行。模拟过程中实时采集水面过程数据, 分析水位过程和波浪过程是否满足各自的误差要求。若不满足则需重新率定波浪要素并修改造波文件, 再次耦合模拟和分析, 直至水位和波浪模拟误差均满足要求, 最终在港池实验室中实现风暴潮和波浪的动态耦合模拟。

3 模拟实例

中国科学院海洋研究所采用数值模式计算了 1997 年 8 月 10 日登陆我国东部沿海的 9711 号台风 Winnie 在宁波市北仑区梅山岛海域引起的波浪和风暴潮过程(图 2), 这是浙江宁波百年来最严重的风暴潮。截取台风期间动力较强的典型时段(图 2 中框选范围, 时长 t 为 8 h)进行港池试验模拟, 并采用 $\Delta t = 20\text{ min}$ 的时间间隔将该风暴潮过程分为 $n = 23$ 个子段, 作为 23 个目标波要素。图 3 给出了动态变化的风暴潮水位过程和波浪要素(有效波高、平均周期)以及离散的时间段划分。试验模型按照几何比尺 $\lambda = 1:40$ 设计, 试验总模拟时长 $t = 4\,363.94\text{ s}$, 且 $\Delta t = 189.74\text{ s}$ 。造波和潮位控制同步进行, 波浪按重力相似准则模拟。在每个子段内产生符合指定波浪要素的 JONSWAP 谱的不规则波序列, 谱密度函数见式(1):

$$S(f) = \alpha H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25 (T_p f)^{-4}] \cdot \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]}$$

(1)

式中： f 为频率； α 由经验公式确定， $\alpha = \frac{0.062\ 4}{0.230+0.033\ 6\gamma-0.185\ (1.9+\gamma)^{-1}}$ ； $H_{1/3}$ 为有效波高； γ 为谱峰升高因子，取 3.3； T_p 为谱峰周期， $f_p=1/T_p$ 为谱峰频率； σ 为峰形参数，当 $f\leq f_p$ 时， $\sigma=0.07$ ，当 $f>f_p$ 时， $\sigma=0.09$ 。

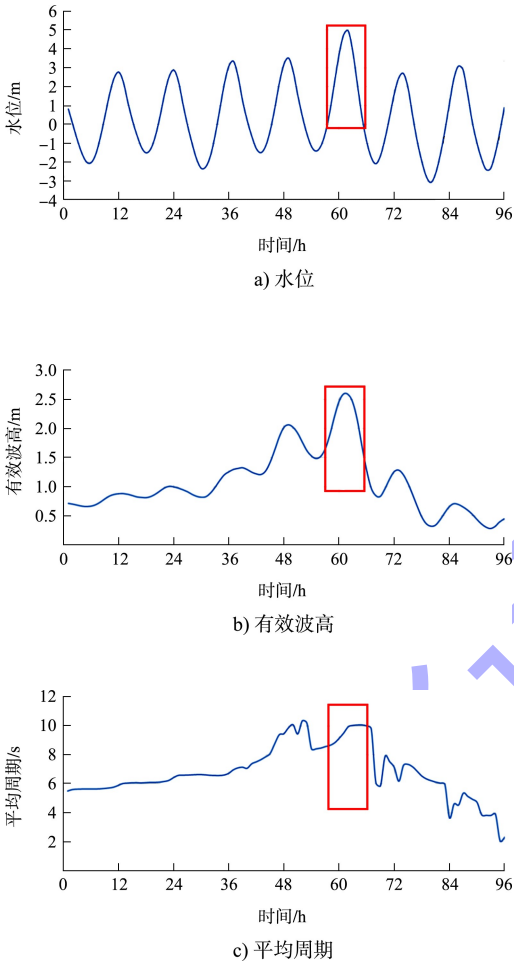


图 2 9711 台风期间波浪和风暴潮过程

表 1 各时间分段的潮位与波浪要素的目标序列

时间分段	水深/m	有效波高/m	平均周期/s	时间分段	水深/m	有效波高/m	平均周期/s	时间分段	水深/m	有效波高/m	平均周期/s
BL 1	0.27	1.79	8.60	BL 9	4.11	2.52	9.24	BL 17	3.83	2.45	10.03
BL 2	0.71	1.89	8.65	BL 10	4.46	2.56	9.36	BL 18	3.28	2.37	10.03
BL 3	1.19	1.98	8.70	BL 11	4.74	2.59	9.50	BL 19	2.70	2.27	10.04
BL 4	1.69	2.09	8.75	BL 12	4.93	2.60	9.66	BL 20	2.10	2.15	10.06
BL 5	2.21	2.19	8.82	BL 13	5.01	2.60	9.81	BL 21	1.51	2.01	10.08
BL 6	2.73	2.29	8.91	BL 14	4.94	2.58	9.93	BL 22	0.94	1.86	10.09
BL 7	3.23	2.38	9.02	BL 15	4.70	2.55	10.00	BL 23	0.40	1.71	10.06
BL 8	3.70	2.46	9.13	BL 16	4.31	2.51	10.02				

图 4a) 为风暴潮与波浪耦合过程的试验模拟结果。对耦合过程进行低通滤波处理得到平滑的潮位过程，见图 4b)。将实验室模拟的水位过程与

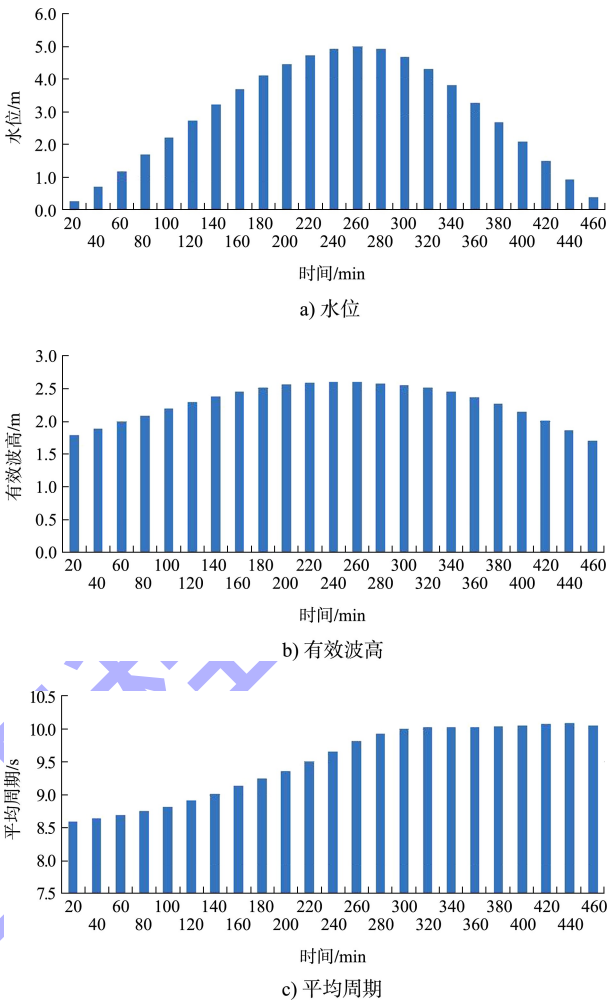
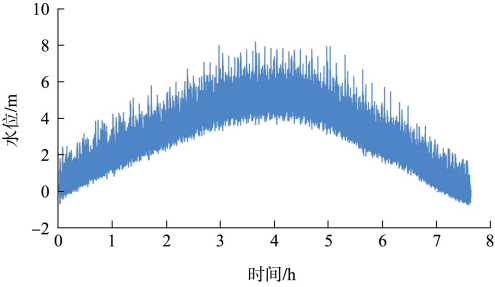


图 3 风暴潮-波浪过程离散序列

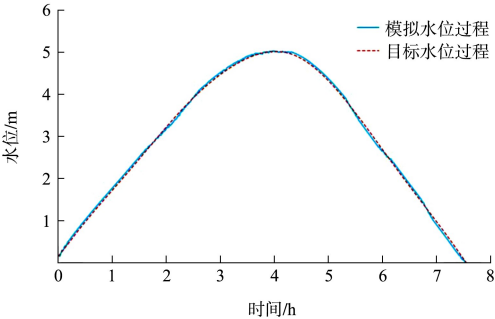
各时间分段的水位及波浪要素目标值见表 1。相邻两个时间分段之间最大水位差模型值小于 1.5 cm，水位变动对波浪要素的影响不显著。在单个时间分段内，平均波浪个数均大于 110 个，满足波浪特征值分析的需要。

连续的目标潮位过程进行对比，模拟结果(模型值)与目标值的平均误差为 0.77 mm，最大绝对误差为 0.16 cm(模型值)，满足精度要求，本文提

出的耦合模拟方法较好地重现了潮位的连续变化。



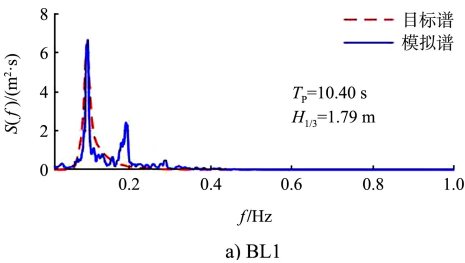
a) 风暴潮-波浪耦合过程模拟



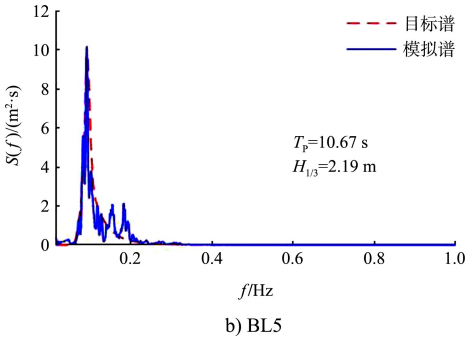
b) 水位过程

图 4 风暴潮-波浪耦合过程的模拟结果

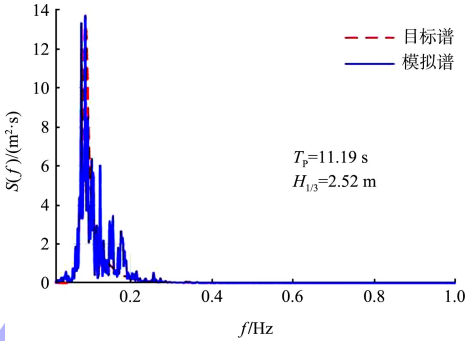
为分析动态潮位下波浪的模拟效果，将波浪序列从耦合过程中进行分离，应用快速 Fourier 变换法 (FFT) 对实测波浪过程的谱密度进行分析。图 5 对比了几个典型分段的波浪过程的目标谱和实验室模拟谱。可以看出，模拟谱与目标谱的形状基本一致，由于波浪二次反射和水位微小变动因素，模拟结果中引入了一些低频和低频成分。表 2 给出了各子过程的模拟谱与目标谱的谱峰值、谱峰周期和波能谱总能量的相对误差统计结果，谱峰值和谱峰周期模拟值与目标值的最大相对误差均在 5% 以内，波能谱总能量模拟值与目标值的最大相对误差均在 10% 以内，均能够达到现行 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》中对定常水位试验波谱模拟的精度要求。



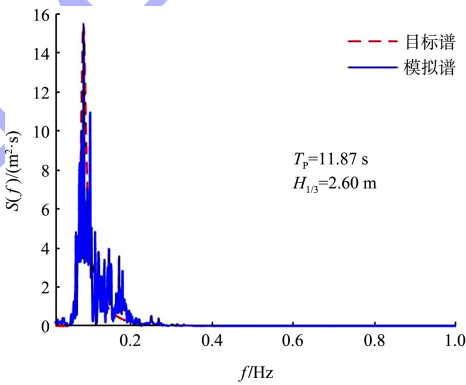
a) BL1



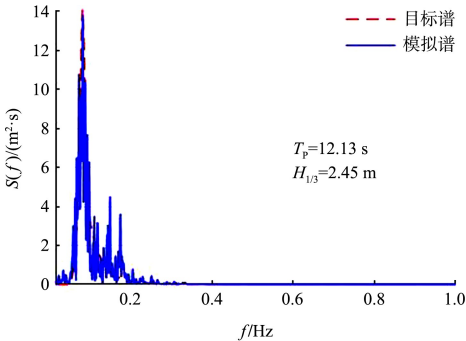
b) BL5



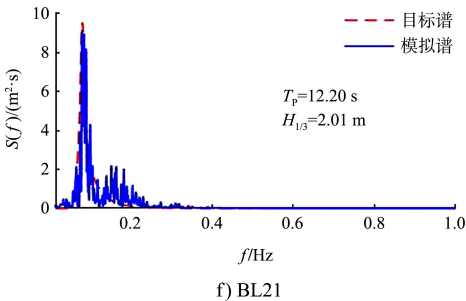
c) BL9



d) BL13



e) BL17



f) BL21

图 5 典型时刻模拟谱与目标谱对比

表 2 不同时间分段的波谱模拟误差

时间分段	谱峰值/(m ² ·s)		相对误差/%	谱峰周期/s		相对误差/%	波能谱总能量/m ²		相对误差/%
	模拟值	目标值		模拟值	目标值		模拟值	目标值	
BL1	6.669	6.436	3.62	10.13	10.40	-2.58	0.205	0.200	2.71
BL5	10.178	9.885	2.97	10.75	10.67	0.72	0.277	0.299	-7.31
BL9	13.679	13.726	-0.34	11.25	11.19	0.61	0.399	0.396	0.93
BL13	15.357	15.499	-0.92	11.85	11.86	-0.06	0.389	0.421	-7.74
BL17	13.819	14.064	-1.74	12.14	12.14	0.06	0.370	0.374	-1.00
BL21	9.141	9.521	-3.99	12.45	12.20	2.10	0.234	0.252	-7.17

图 6 为风暴潮、波浪耦合叠加后，有效波高 H_s 和平均周期 T_m 的模拟结果，试验过程中不同时刻测得两者与目标值之间的误差均在 5% 以内，最大误差分别为 4.78% 和 -4.06%，平均误差分别为 0.60% 和 -0.86%，均满足现行 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》中对定常水位试验有效波高和平均周期的模拟精度要求。

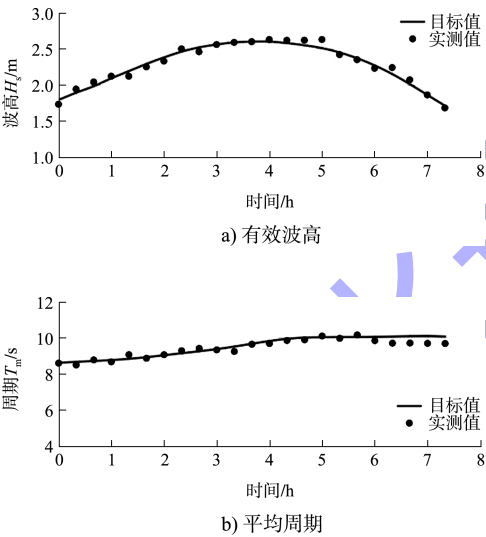


图 6 耦合后有效波高及平均周期模拟结果对比

4 结语

1) 水位过程模拟结果(模型值)与目标潮位过程的平均误差为 0.77 mm，最大绝对误差为 0.16 cm (模型值)，满足精度要求，本文提出的耦合模拟方法较好地重现了潮位的连续变化。

2) 不同时段有效波高 H_s 和平均周期 T_m 模拟结果与目标波要素之间的平均误差分别为 0.60% 和 -0.86%，最大误差分别为 4.78% 和 -4.06%，谱峰值和谱峰周期模拟最大相对误差均在 5% 以内，波能谱总能量模拟最大相对误差均在 10% 以内，均满足现行规范中对定常水位试验波浪模拟的精

度要求。

3) 与以往的恒定水位叠加定常波浪要素的试验方法相比，本方法更适合模拟实际风暴潮条件下的波浪过程，可为相关模型试验的开展提供参考。

参考文献：

[1] BRIGANTI R, BELLOTTI G, FRANCO L, et al. Field measurements of wave overtopping at the rubble mound breakwater of Rome-Ostia yacht harbour [J]. Coastal engineering, 2005, 52(12) : 1155-1174.

[2] PULLEN T, ALLSOP W, BRUCE T, et al. Field and laboratory measurements of mean overtopping discharges and spatial distributions at vertical seawalls[J]. Coastal engineering, 2009, 56(2) : 121-140.

[3] MÖLLER J, WEISSMANN R, SCHÜTTRUPF H, et al. Interaction of wave overtopping and clay properties for seadikes [C]//Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering (ICCE). Cardiff: ASCE, 2002: 2105-2115.

[4] VAN DER MEER J, HARDEMAN B, STEENDAM G J, et al. Flow depths and velocities at crest and landward slope of a dike, in theory and with the wave overtopping simulator [J]. Knowledge, technology & policy, 2011, 32(1) : 1-14.

[5] 王登婷, 陈伟秋, 陈茂雯, 等. 斜坡式海堤后坡防护问题研究[C]//海洋工程学会.第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集.北京: 海洋出版社, 2017: 1028-1036.

[6] 陈伟秋. 海堤越浪量及内坡护面稳定问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2017.

[7] 陈伟秋, 王登婷, 孙天霆, 等. 海堤后坡混凝土板护面稳定厚度的模型试验研究[J]. 水运工程, 2017(3) : 65-70.