

港口扩建影响下近岸沙滩稳定防护 三维水动力模型试验研究

高峰^{1,2,3}, 唐友刚^{1,3}, 彭程^{2,3}, 赵旭^{2,3}, 张慈珩^{2,3}, 耿宝磊^{2,3}

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 交通运输部 天津水运工程科学研究所, 天津 300456;
3. 港口水工建筑技术国家工程实验室 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘 要:面向日本海的韩国东海港(Donghae)位于朝鲜半岛东部的江原道海岸,该港在原有基础上扩建新港区,为了降低该工程对邻近沙滩稳定性影响,拟建用于进行岸滩防护的突堤与离岸堤群。本文主要研究了工程实施前后沙滩剖面变化以及工程对岸线的影响。试验结果表明,当波浪持续作用达到沙滩剖面基本稳定时,不同角度布置的离岸堤群和突堤所共同构成的防护措施可以对沙滩岸段进行有效防护,根据波浪作用下的泥沙动床试验结果,入射波在传至离岸堤后能量有所衰减,对于削弱波浪侵蚀力的改善效果是非常明显的,结合试验现象和测试结果可见,离岸堤在减少附近海滩的侵蚀和侵蚀海滩上起到了一定的作用。

关键词:模型试验;波浪;侵蚀;稳定性;泥沙;动床

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2018)03-0014-11

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2018.03.002

东海港(Donghae)位于朝鲜半岛东部的韩国江原道海岸,作为该国北方重要贸易枢纽,与位于南部的釜山港同等重要,并且位于环东海地区中心,具有无限的增长潜力^[1]。该港规划在原有基础上扩建新陆域及护岸,拆除并加固港内已有防波堤,还包含岸滩防护设施,如挡沙堤、潜堤和离岸堤。项目的位置和项目的平面布置如图 1 所示。由于该港址面向日本海,为西太平洋边缘海,其近岸水深条件优越,口门处底高程可至-35~-25 m,相应的波浪动力条件也较强,存在对近岸工程的破坏风险。同时,其邻近的海水浴场以形态多样的岩石、海滨绝壁及 150 m 长沙滩构成的风景而闻名,该港口扩建工程的实施若引起对该浴场近岸沙滩影响,特别是一旦发生严重沙滩侵蚀将对东海港扩建工程设计方案的确定将极为不利。因此,东海港扩建是否对海岸形成侵蚀以及相应防护措施的方案确定都是相关设计与建设前予以重视的问题。

基于上述因素,对于新建工程开展近岸沙滩剖面稳定性与海岸防护措施的模型试验研究论证是十分必要的^[2-4],研究目的主要是验证由于港区波浪传播受到新建防波堤影响导致近岸沙滩侵蚀趋势存在的可能性,从而开展以突堤与离岸堤群等组成的防护工程措施对沙滩侵蚀的防护效果验证研究。

1 模型设计与试验条件

1.1 模型概况

物理模型试验在交通运输部天津水运工程科学研究所(TIWTE)位于临港工业区的大型水动力试验基地进行,该模型试验水池长度 90 m,宽度 45 m,池深 1.0 m,如图 2 所示。依据《波浪模型试验规程》^[5](JTJ/T

收稿日期:2018-03-10

资助项目:国家自然科学基金项目——斜坡堤越浪标准和比尺效应研究(51409135);天津市应用基础与前沿技术研究计划项目——港口护岸越浪模拟与越浪标准初探(15JCQNJC07300)

作者简介:高峰(1978-),男,高级工程师,硕士,主要从事海岸与海洋工程方面研究。E-mail: seal326@163.com

(王佳实 编辑)

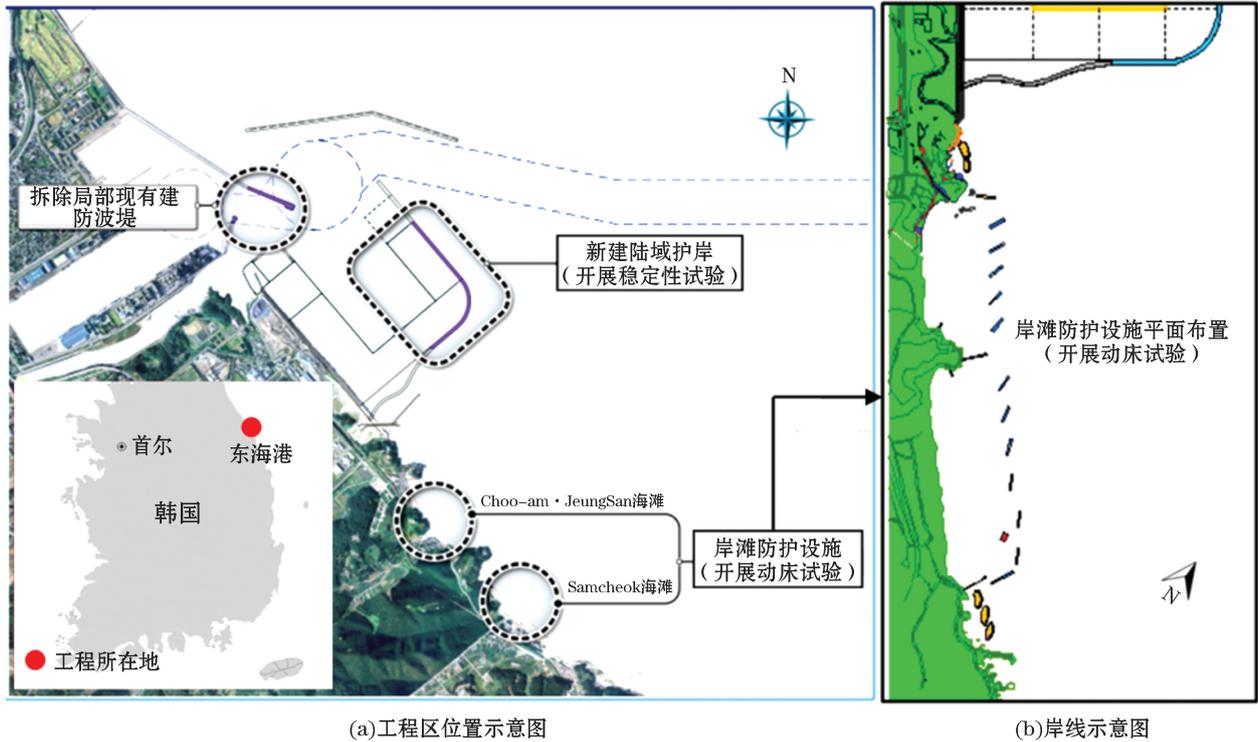
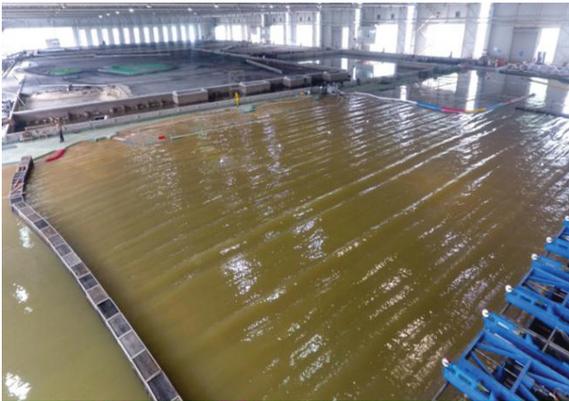


图 1 工程区位置及平面布置示意图

Fig.1 Location and plane layout of the project area

234—2001)与《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》^[6](JTS/T 231-2—2010)相关规定,并结合具体试验要求与测试区域范围,选取正态模型比尺 $\lambda=80$,整个模型实际范围长75 m、宽45 m,相当于覆盖原型范围大约6.0 km长、3.6 km宽水域。该模型包括现有东海(Donghae)港区扩建工程陆域、护岸及防波堤、相邻的Choo-am·JeungSan海滩和Samcheok海滩,还包括用于进行沙滩防护措施方案验证的挡沙突堤和离岸堤群等。



(a)波浪试验水池



(b)造波机

图 2 TIWTE 的大型港口与河流综合水动力试验室

Fig.2 A comprehensive hydrodynamic laboratory for large ports and rivers in TIWTE

1.2 研究内容与方案

1.2.1 主要试验内容

试验主要对 Choo-am·JeungSan 和 Samcheok 两处海滩开展泥沙动床试验,研究受邻近东海港南侧港

区扩建影响而导致的侵蚀情况,并根据防护措施布置方案进行沙滩稳定性验证。与国内进行岸滩稳定试验中往往采用海域代表波向不同,根据韩方设计咨询公司(SEKWANG E&C)要求,考虑到本项目前期研究中扩建工程后对周边近岸波浪场影响较大的波向分析,本次试验确定分别在 ENE,NE,NNE 三种波向下进行试验,测试内容包括沙滩剖面、水陆交界线等。其中,模型中所涉及各个主要部分的结构布局和断面如图 3 所示。

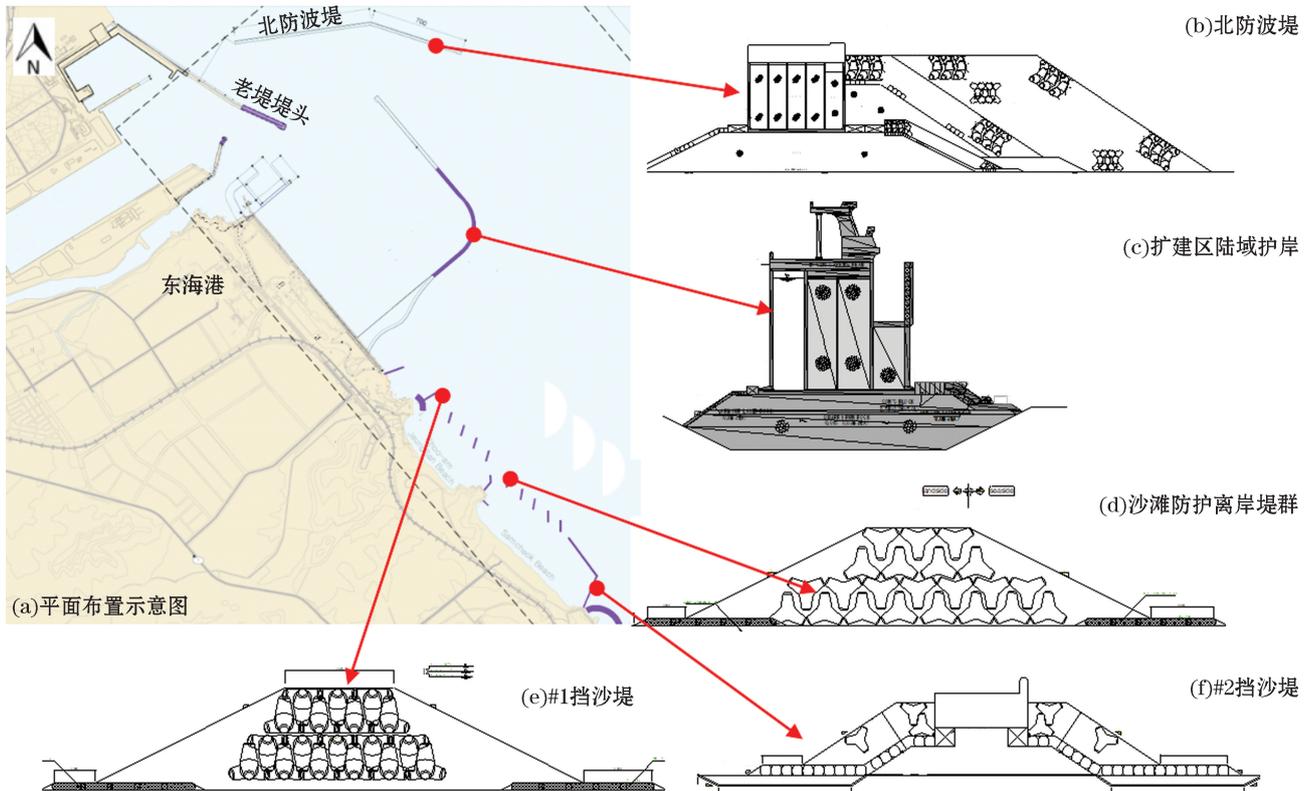


图 3 平面布置与断面结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of plane layout and section structure in the model

1.2.2 研究方案

试验主要根据 SEKWANG E&C 公司提供的工程方案进行研究,目前工程界对于沙滩防护则主要结合岸滩类型及冲淤性质确定。根据韩方提供的相关资料,本区岸滩主要以沙滩、基岩和礁石组成,两处海滨浴场所在海滩地表覆盖的松散沉积物主要是砂,粒径分布在 $0.2\sim 2.0\text{ mm}$,本区海域动力上也以波浪作用为主,符合砂质海岸特征。因此,设计上初步确定了以离岸堤群为主、配合突堤(丁坝)和利用弧形岬湾地形的综合防护措施。其中,工程主体为离岸堤,该结构在海岸工程中常用于海岸侵蚀控制,其遮蔽区内由于波浪增水、波生流、潮流共存会导致复杂的沉积物输移和水流循环模式。因此,本次防护工程方案布置主要研究集中于离岸堤遮蔽区后的泥沙淤积形态,即离岸堤群对岸线侵蚀变化的防护效果及堤后冲淤近似平衡后的剖面形态,上述结果将直接影响工程区域的防护效果,也是本研究重点。结合国内外已有的关于离岸堤几何尺度、离岸距离、单堤长以及堤群口门宽度等主要影响因素所产生不同的岸线响应经验关系^[7-9],确定防护措施的整体平面布置方案(图 1)。

1.3 试验水位

根据 SEKWANG E&C 公司提供的资料,沙滩动床试验中,试验水位取值 MSL: DL (+) 0.171 m,为基于当地理论深度基准面的平均海平面。

1.4 波浪条件

SEKWANG E&C 前期进行了波浪要素的数学模型推算,根据其计算结果,本次物理模型中的试验波浪要素依据该波浪数模试验结果提取自其 -20 m 等深线附近的数值,其包括波高、波周期和波向。根据 SK 公司要求,在沙滩动床模型中选择了对本区域影响较大的 ENE, NE, NNE 向浪进行试验,表 1 所示为试验所采用的试验波浪要素,图 4 为对应波浪场数模计算结果提取作为物模用的验证点位置。模型中每个方向的造波机的布局都是根据数值模型结果的以满足传至近岸工程区水域局部波向进行的,充分考虑了近岸地形的折射特性,保持与数值模拟结果的一致性。

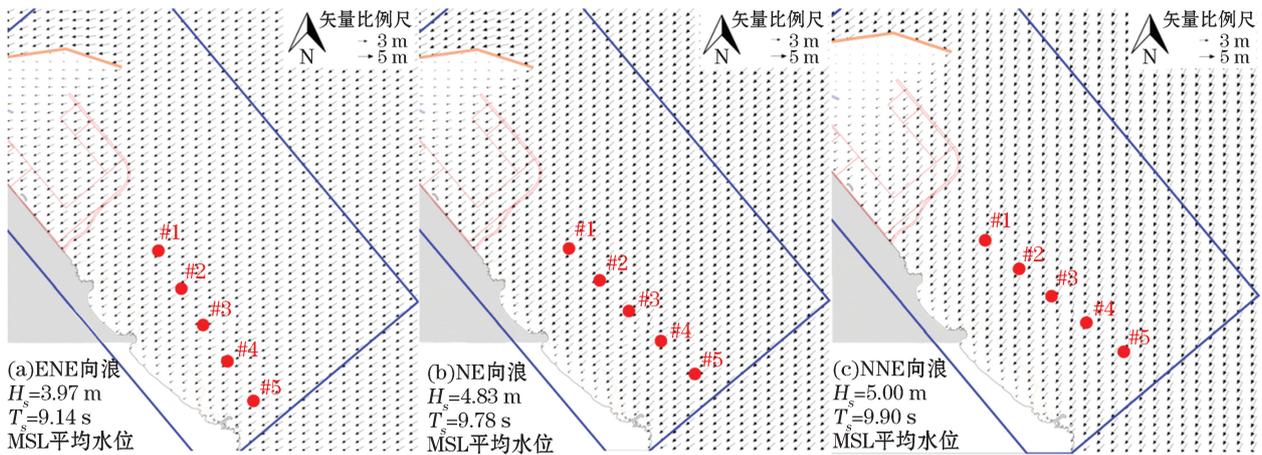


图 4 波浪场数模计算结果及提取物模波要素验证点位置

Fig.4 The numerical simulation results of wave field and the location of the extract mode wave element verification points

表 1 模型试验波浪条件

Table 1 Wave conditions in the model tests

波 向	试验水位	重现期	H_s/m					T_s/s
			# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	
ENE	MSL 平均水位	平均波高	3.76	3.82	3.77	3.50	3.92	9.14
NE			4.42	4.49	4.60	4.41	4.72	9.78
NNE			4.08	4.35	4.41	4.37	4.39	9.90

2 试验方法与仪器设备

2.1 模型设计与建造

根据前期研究资料分析,研究区为典型岬湾一砂质海岸,波浪是本区近岸的主要动力因素,也是泥沙运动的主导动力,本研究应用物理模型试验的主要目的是验证沙滩受邻近港区扩建影响导致的侵蚀情况,预测沙滩

剖面变形及岸线变化趋势,并结合沙滩防护措施布置方案进行测试,为防护工程设计方案的确定提供科学依据。根据本区沙滩冲淤性质和水动力特点,模型设计需要满足波浪运动相似和波浪作用下泥沙运动相似等要求。基于上述分析,依据重力相似准则开展模型设计。结合场地与测试精度要求,模型几何比尺为 $\lambda=80$,平面比尺、水深比尺和波高比例尺也均为 $1:80$,波浪周期比尺为 $1:(80)^{1/2}$,模型比尺关系如表2所示。

表2 模型比尺关系($\lambda=80$)
Table 2 Model scales($\lambda=80$)

项目	符号	比尺	原型值/m	模型值/m
长度/m	λ_L	1:80	800	10
深度/m	λ_h	1:80	24	0.30
波高/m	λ_H	1:80	7.85	0.10
波长/m	λ_l	1:80	80	1.00
波周期/s	λ_T	$1:(80)^{1/2}$	14.13	1.58

2.2 动床地形

根据现场现有沙滩实际布置情况,可见海滩向海侧延伸长度与其深度变化的关系(图5)。结合该海岸滩沙的粒径特性以及委托方动床试验的具体要求,经过反复测试,模型沙采用与现场起动相似的原型沙,以确保复演沙滩侵蚀过程中的泥沙运动特性,模型中动床试验需要布置床沙如下:

- 1) 模型滩沙粒径: $D_{50}=0.100\sim 0.125$ mm;
- 2) 试验水池中滩沙覆盖沿岸线长度: 40 m;
- 3) 试验水池中滩沙覆盖向海延伸宽度: 12 m;
- 4) 试验水池中滩沙铺设厚度: 10 cm。

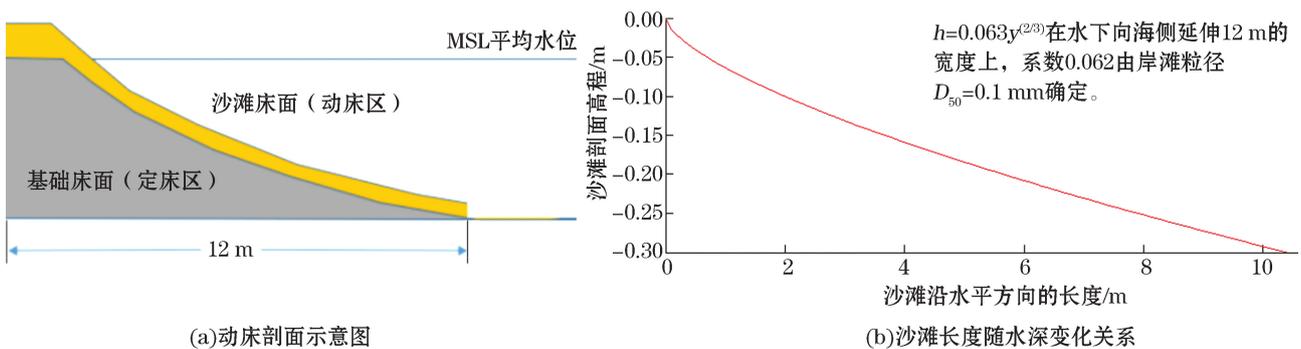


图5 动床试验铺沙剖面示意图与沙滩长度随水深变化关系

Fig.5 Sand section in the moving bed tests and the variations of the beach length with the water depth

2.3 模型建造

模型建设涉及2个阶段:第1个阶段是基于设计方所提供的平面布置图、结构断面图,包括东海港扩建区域陆域、护岸以及防护措施方案中的挡沙堤(突堤)与离岸堤(包括护面、护底块体)等物理模型的建造制作,均按照几何比尺缩至相应尺寸规格;第2阶段将涉及到模型的整体布置和造波机、传感器等仪器设备的安装。其中,模型地形建设,地形的构造采用桩点法,精度应满足标准,水平误差不应大于 ± 1.0 cm和高程误差模截面 pile-point 不应大于 ± 1.0 mm。根据设计方案断面结构图,摆放护面块石和人工块体等。在检查所有部件的高度并将水准测量仪及其偏差应控制在 ± 1.0 mm后,进行仪器设备的安装、运行和调试。模型构建步骤如图6所示。

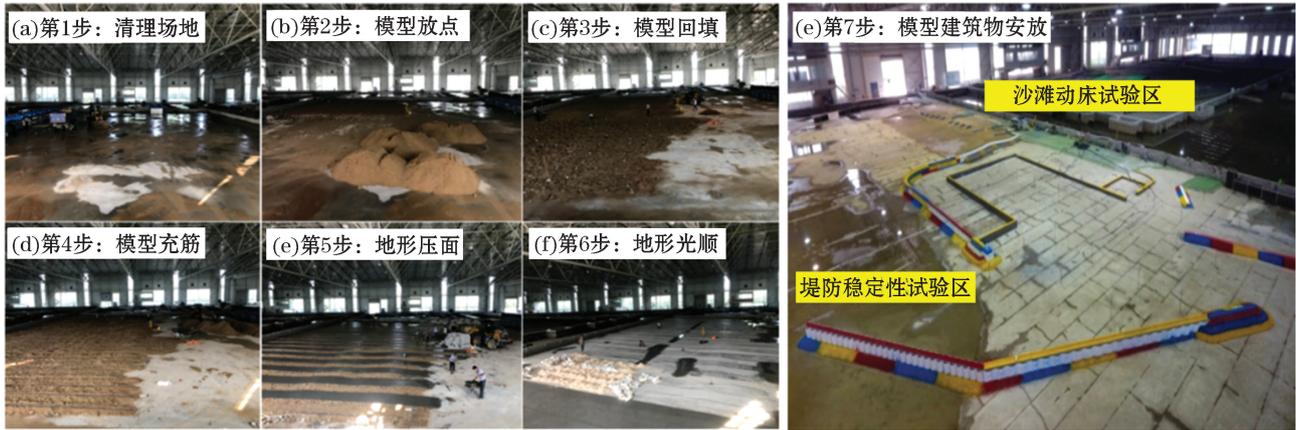


图6 模型建造主要过程的照片

Fig.6 Photos of modeling processes

2.4 试验造波与测试设备

模型波浪条件由 RBM123 型推板式不规则波造波机实现,其主要由造波板、伺服电机、服务器和控制计算机等组成。该造波机的功能:最大工作水深为 1.0 m,波高范围为 0~50 cm,造波周期范围为 0.5~5.0 s。其中,每个推板单元板尺寸:4 000 mm×1 500 mm,板单元共计 10 个,总长度为 40 m,最大试验水深 1 000 mm,最大试验波高 500 mm;适应工作环境温度:5~40 ℃。在造波机操作运行过程中,通过客户端输入需要的造波参数并由网络传送,客户端计算波形控制信号,并通过接口循环将其发送给伺服驱动。控制驱动控制伺服电机转动,电气缸由伺服电机带动轴向运动输出,形成电动圆柱的推杆直线运动。然后运动将被传送到推波板,并使板块摆动产生目标波型。

采用 TK2008 水动力试验数据采集系统测量波浪参数,该系统可以自动收集、分析波浪高度、波浪周期,并自行进行温度修正。测波仪设置在机架上,置于试验所关心的区域,可测试波高范围为 0.1~40 cm,波周期范围为 0.5~5.0 s。精度准确性为测量值的±0.5%,采样频率(输出)是 1~200 Hz。另外,美国 Trimble CX 扫描仪是一种先进的三维激光测量仪器,在本试验中用于测量模型动床区的侵蚀和淤积变化,该扫描仪是一个灵活的解决方案,在地形扫描应用中可收集高质量的数据,波脉冲技术允许用户在整个操作范围内保持较高的精度,从而减少了现场工作时间,在本次试验中代替以往所采用的传统断面地形仪,提高了试验测试效率。

2.5 波浪模拟与分析

模型试验中采用不规则波,能量谱为 Bretschneider-Mitsuyasu (B-M)谱,其分析公式为

$$S(f) = 0.257 \left(\frac{H_{1/3}}{T^2 H_{1/3}} \right)^2 \frac{1}{f^5} \exp \left[-1.03 \left(\frac{1}{TH_{1/3} f} \right)^4 \right], \quad (5)$$

式中, $S(f)$ 能量谱密度($\text{m}^2 \cdot \text{s}$), $H_{1/3}$ 是有效波高(m), $TH_{1/3}$ 是有效波高周期(s), f 为频率(s^{-1})。

当进行不规则波验证试验时,给定的有效波高和周期被输入计算机,产生入射波频谱。在纠正入射波谱后,得到最终可满足谱密度峰值频率、频谱能量和有效波高等要求的目标波谱,即:波能谱总能量的容许偏差为±10%、谱峰频率的模拟容许偏差值是±5%、如果谱密度超过或等于0.5倍谱密度范围时,谱密度分布的容许偏差为±15%、有效波高的容许偏差、有效波期和峰值周期容许偏差为±5%。其中,波谱是基于控制有效波高(H_s)和有效周期(T_s)实现的,以ENE向浪的验证结果为例,其波谱图结果如图7所示。

2.6 动床模拟作用时间的确定

在沙滩动床试验期间,波浪作用时间取决于岸线的最终变形程度。在动床试验之初,选择了ENE方向来测试最终岸滩达到冲淤平衡的持续时间。在初步测试中,布置6个剖面作为模型中的测量断面。7 h后,

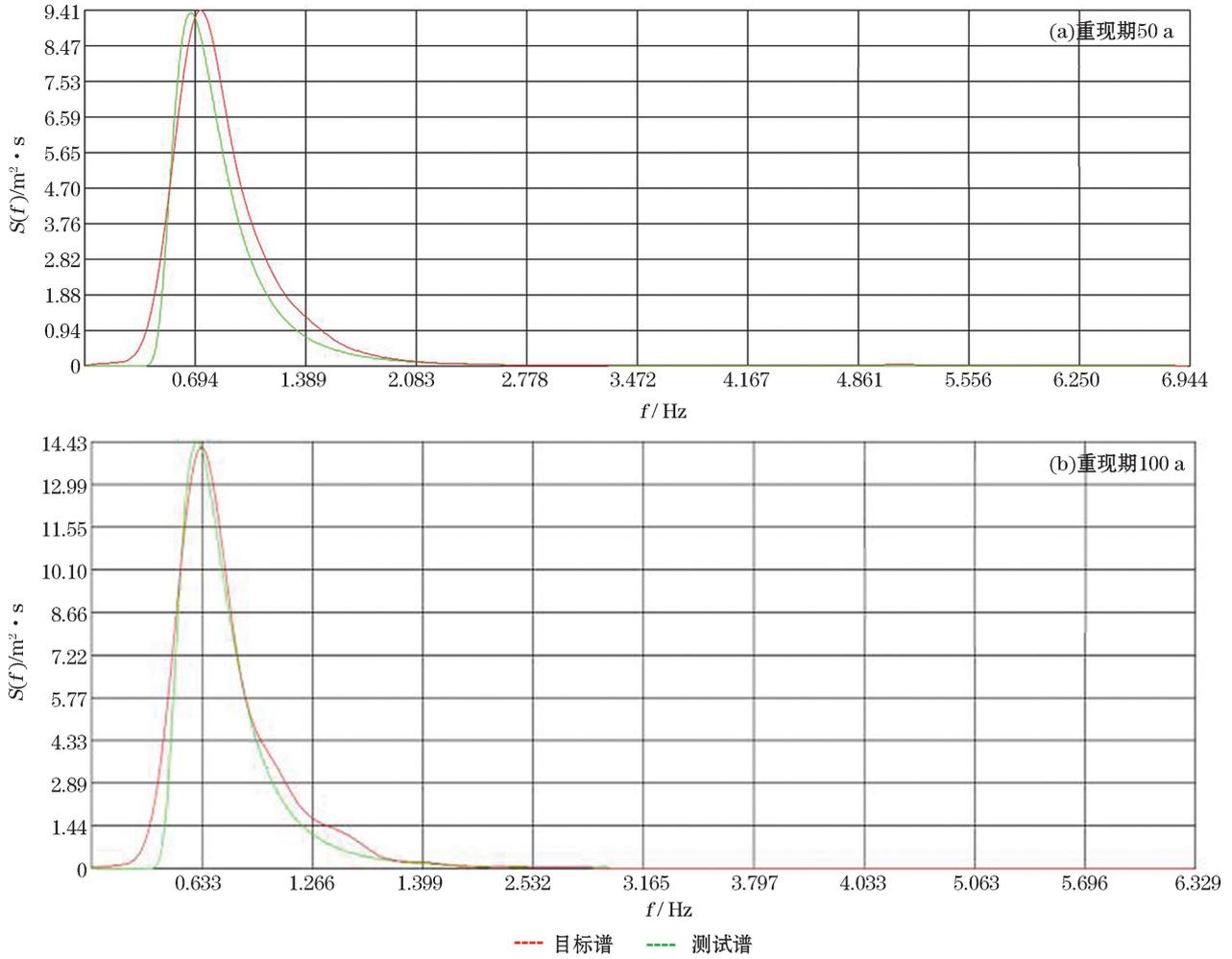


图 7 波谱验证试验结果

Fig.7 The results of spectrum verification tests

6 个剖面相继达到最后的平衡状态。因此,试验波浪持续作用时间可确定为 8 h。在正式测试中,则布置了总计 26 个剖面(剖面1~剖面26)用以测量海岸线的变化,剖面分布如图 8 所示。

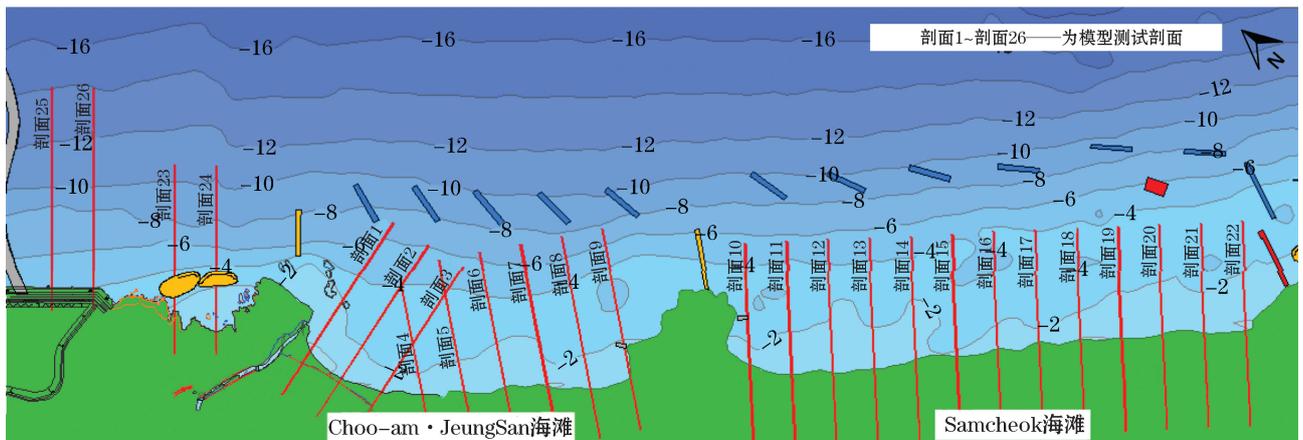


图 8 动床试验测试剖面分布图

Fig.8 The distribution of test profiles in the moving bed tests

3 试验结果分析

近岸离岸堤、挡沙堤等布置的主要目的是保护现有的沙滩,减少由于东海港区扩建工程形成的陆域凸出陆域对其相邻东南侧海岸沙滩造成侵蚀影响,从而保持岸线稳定。试验波向包括 ENE、NE 和 NNE 三个主要影响波向,经过前期定床试验率波后,铺设动床区的初始状态为现状近岸地形条件下的海床形态,然后在模型上布置东海港新建陆域及护岸堤防,试验时分别模拟不同波向连续作用,由于波浪受新建陆域反射、绕射等影响,邻近波浪场发生变化,导致局部波浪增强,对近岸岸滩形成一定冲击。

经过三维扫描实测,此时近岸地形与港口扩建前的现状海床地形值相比较,得到东海港扩建工程实施前、后岸滩水陆交界线变化的对比结果如图 9 所示。试验中连续波浪作用至沙滩剖面基本平衡后随着水下地形的冲淤变化,岸滩的水陆交界线也将与东海港扩建工程实施前的现状有所差异,表 3 为 Choo-am · JeungSan 和 Samcheok 两处沙滩岸线侵蚀后退的距离换算为原型值统计结果,表中所示的侵蚀后退距离为试验中经波浪连续作用至沙滩剖面基本平衡后的岸线与现状初始岸线的间距。

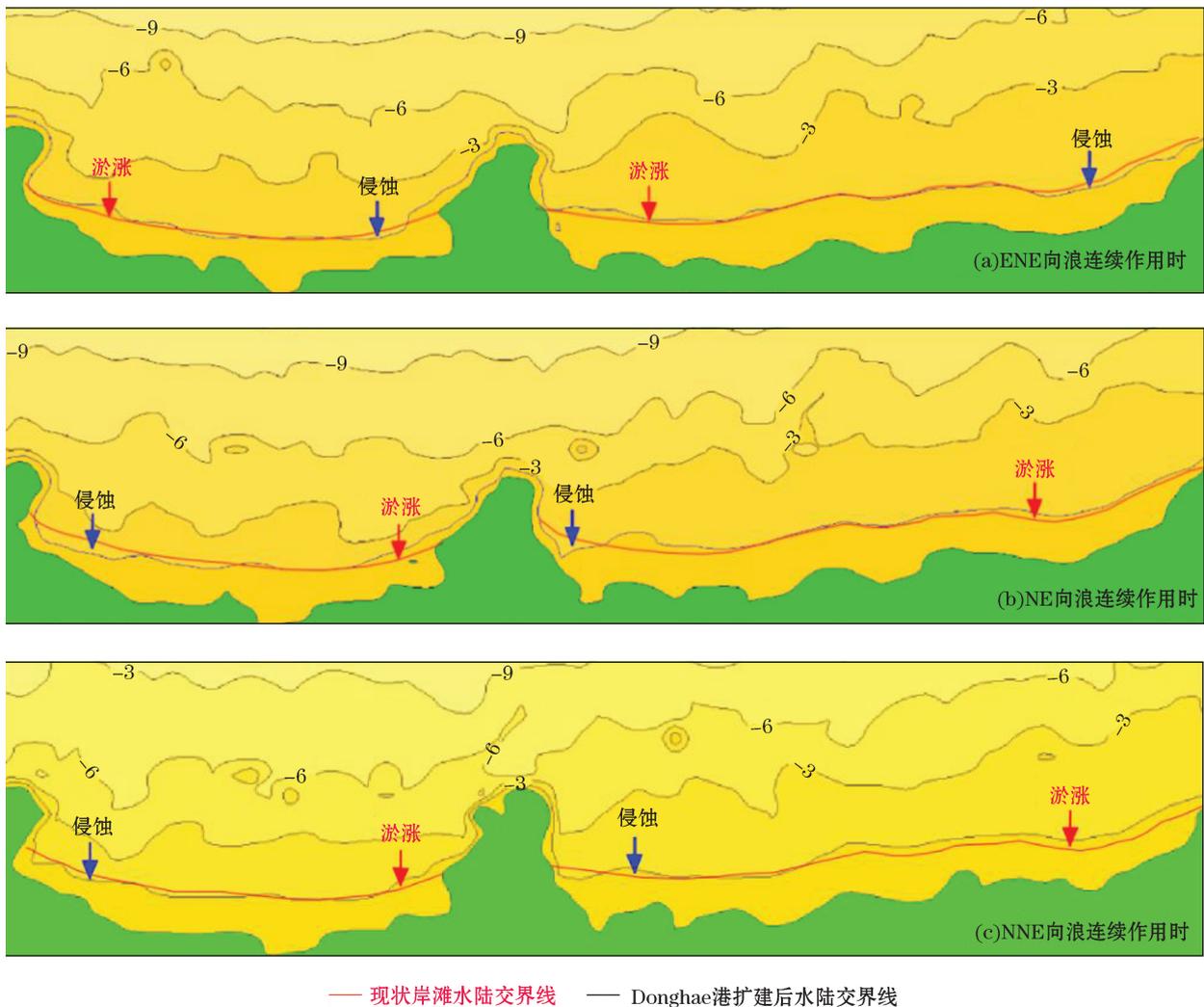


图 9 受东海港区扩建工程影响后的海岸线分布对比

Fig.9 Contrast of coastline distributions after the influence of Dongghae Port expansion

表 3 沙滩岸线侵蚀后退距离(m)

Table 3 The retreated distance of the beach shoreline caused by erosion (m)

观测沙滩岸段 侵蚀后退距离	Choo-am · JeungSan 海滨浴场沙滩			Samcheok 海滨浴场沙滩		
	剖面1~3	剖面4~7	剖面8~9	剖面10~12	剖面13~19	剖面20~22
最大值	177.0	136.4	183.8	200.2	222.4	285.3
平均值	170.2	134.9	178.4	196.1	220.7	280.6

注:观测沙滩岸段侵蚀后退距离为试验中经波浪连续作用至沙滩剖面基本平衡后的岸线与现状初始岸线的间距

结果表明,港区扩建后,由于其凸出陆域的影响,不同浪向下表现的趋势有所不同,如在 ENE 向浪作用下相邻的 Choo-am · JeungSan 海滩和 Samcheok 海滩水陆交界岸线均呈现北侧淤涨、南侧侵蚀后退的发展趋势,而在 NE 和 NNE 向浪作用下则呈现相反的泥沙运动趋势和演变状态,且侵蚀程度要显著强于淤涨,并随着波浪连续作用这一趋势会进一步加剧,且越靠近扩建工程区越显著,即 Choo-am · JeungSan 海滩要略强于 Samcheok 海滩。直至近似平衡状态时,选取典型剖面对比结果,如图 10a 为波浪连续作用后 Choo-am · JeungSan 和 Samcheok 两处海滩的典型剖面(剖面2 和剖面16),图中可显示出现状的沙滩剖面已严重变形,侵蚀范围和强度均较显著,这对原有用于休闲旅游目的的海岸影响较大,这些变化趋势与港区扩建后陆域削弱近岸输沙能力及改变水动力条件有关,其结果与 Donghae 港区扩建方案设计时所预期的基本一致。

基于上述情况,根据该海域使用的具体需求,按照沙质海岸防护中常用的离岸堤、突堤等建筑物进行布置,以期实现对岸线滩沙的有效保护。模型试验中,在恢复地形至初始状态后,铺设离岸堤与突堤构筑物模型,采用相同的波浪条件连续作用,同样模拟至剖面基本平衡后的剖面对比情况如图 10b 所示,对应动床模型海床现象如图 11 所示。

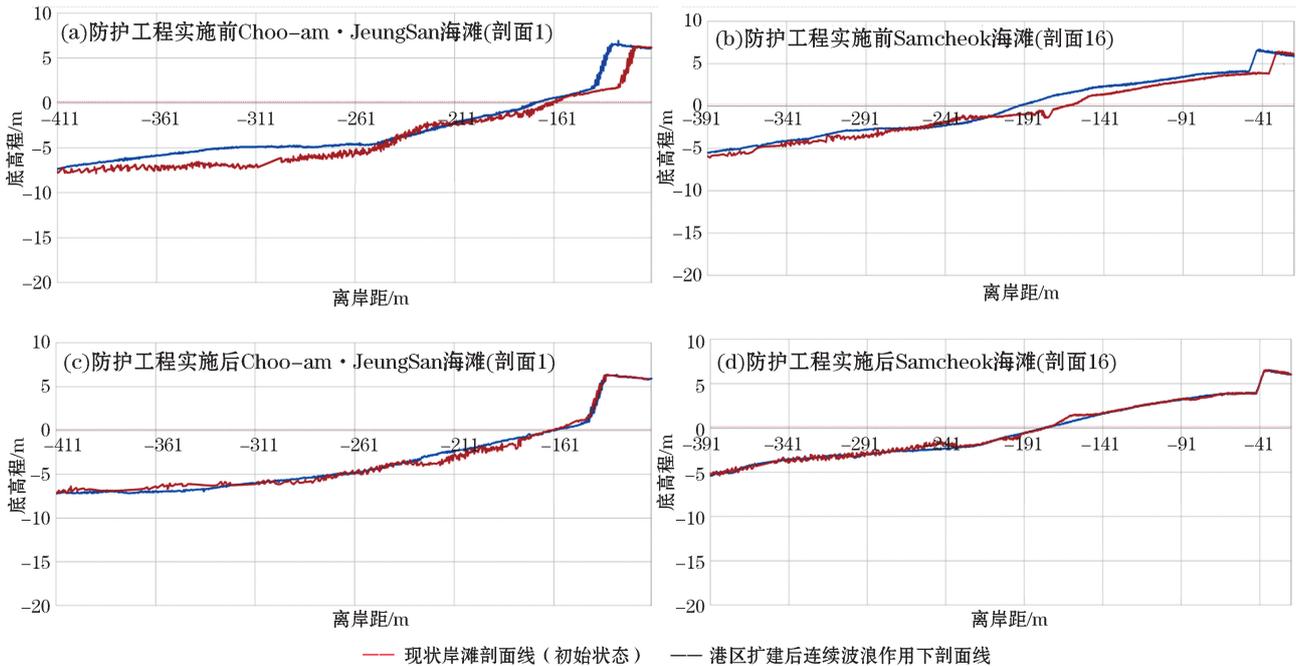


图 10 防护实施前、后波浪连续作用后两处海滩的典型剖面

Fig.10 Two typical beach profiles after the continuous action of wave

试验结果表明,离岸堤等防护措施能够对近岸沙滩形成一定程度的掩护,堤后波浪强度有所降低,防护构筑物在减少海滩侵蚀及维持沙滩剖面稳定方面发挥了作用,有效减缓或者削弱了周边港区扩建工程导致的海岸地形变化趋势。同时,间隔分布的离岸堤也能够维持一定的近岸水动力强度,从而能避免引起局部的淤积,对近岸水体交换也是有利的。

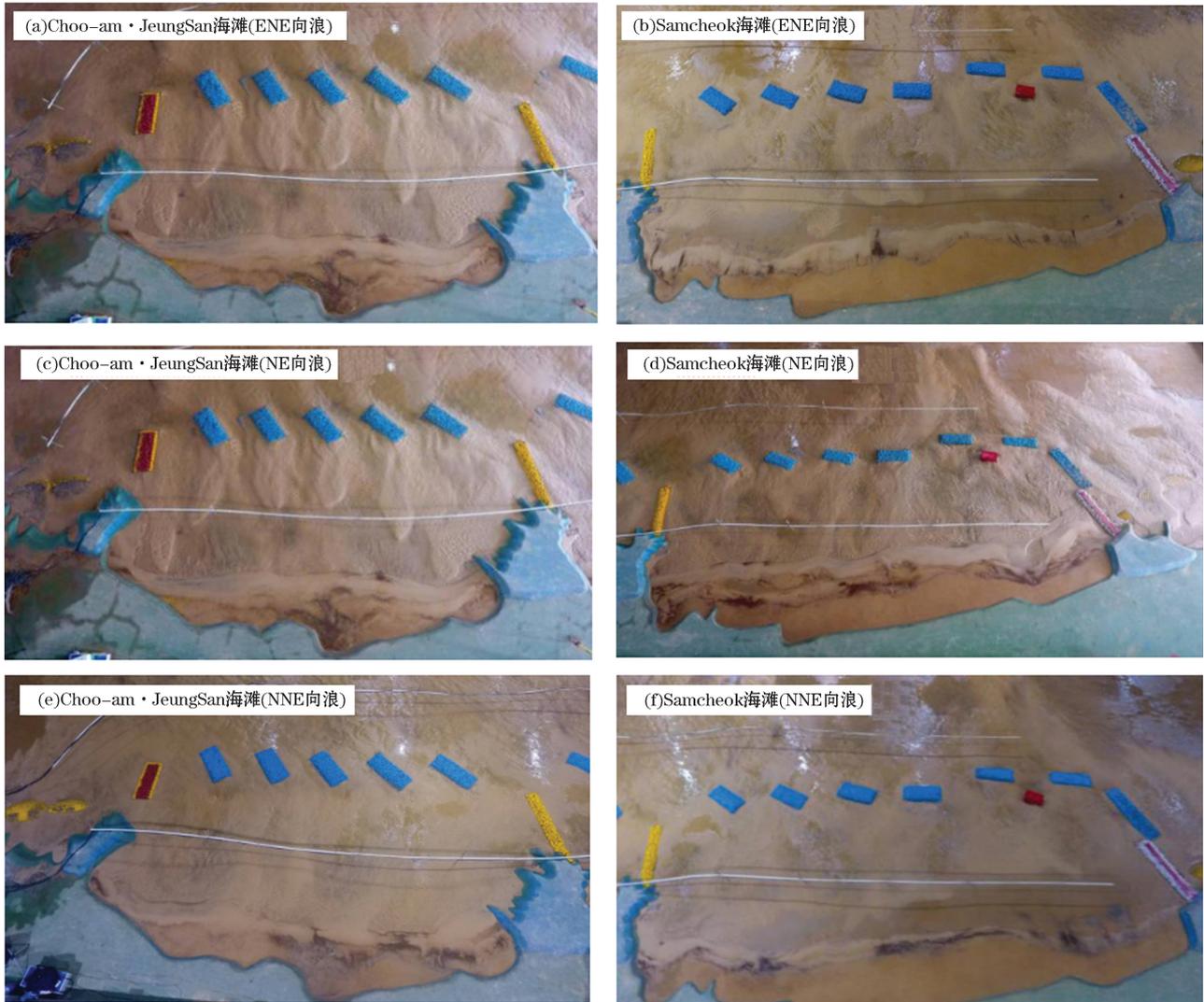


图 11 模型海床地形变化情况

Fig.11 Changes of the seabed topography in the model

4 结 语

由于港口扩建陆域改变了周边水域波浪动力条件,致使邻近沙滩形成侵蚀流失,采取合理布局的近岸离岸堤群和挡沙突堤的组合可以起到防护效果,维持原有沙滩剖面的稳定。根据模型试验中不同影响波向下的波浪连续作用,结合沙滩剖面与水下岸线地形冲淤形态的对比,波浪强度在离岸堤后的强度有所降低、进而削弱了横向输沙强度,同时突堤阻挡了沿岸输沙的流失,沿岸布设的各个沙滩剖面变幅有限,总体上均能维持原有的稳定性,可见由多个间隔布置的离岸堤及突堤所构成的综合防护措施在改善海岸侵蚀状况上发挥了积极作用。

参考文献 (References):

- [1] PARK J B. A study on economic cooperation between 3 provinces of Northeast China and eastern coastal regions of South Korea[D]. Changchun: Jilin University, 2011. PARK J B. 中国东北 3 省与韩国东海岸地区的经济合作研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.

- [2] TANG X N, WANG L Q, YANG J L. Revetment construction and beach erosion[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 34(2): 33-39. 唐筱宁, 王绿卿, 杨锦凌. 护岸工程与沙滩流失[J]. *海岸工程*, 2015, 34(2): 33-39.
- [3] GAO F, LEI H, ZHANG C H, et al. Three-dimensional stability and overtopping test of breakwater under random wave action[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2015, 10(508): 50-56. 高峰, 雷华, 张慈珩, 等. 随机波浪作用下的防波堤三维稳定性及越浪量试验研究[J]. *水运工程*, 2015, 10(508): 50-56.
- [4] ZHAO D C. Study on the sandy beach erosion and protection technology of the offshore artificial sand bar[D]. Qigndao: Ocean University of China, 2014. 赵多苍. 沙质海滩侵蚀与近岸人工沙坝防护技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [5] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Wave model test regulation: JTJ/7234-2001[S]. Beijing: People's Communications Press, 2001. 中华人民共和国交通运输部. 波浪模型试验规程: JTJ/7234-2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [6] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical regulation of modelling for tidal current and sediment on coast and estuary: JTS/T 231-2-2010[S]. Beijing: People's Communications Press, 2010. 中华人民共和国交通运输部. 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规范: JTS/T 231-2-2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [7] HARRIS M M, HERBICH J B. Effects of breakwater spacing on sand entrapment[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1986, 24(5): 347-357.
- [8] SUH K, DALRYMPLE R A. Offshore breakwaters in laboratory and field[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1987, 113(2): 105-121.
- [9] MUSATO S, TAKA AKI U, SHIGENOBU T. Statistical study on the effect and stability of detached breakwaters[J]. *Coastal Engineering*, 1987, 30(1): 131-141.

Hydrodynamic Experimental Study on Stability Protection of Nearshore Beach Under Influence of Port Expansion

GAO Feng^{1,2,3}, TANG You-gang^{1,3}, PENG Cheng^{2,3}, ZHAO Xu^{2,3}, ZHANG Ci-heng^{2,3}, GENG Bao-lei^{2,3}

(1. *School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

2. *Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., Tianjin 300456, China;*

3. *National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology, Key Laboratory of Engineering Sediment of the Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)*

Abstract: The Donghae Port facing to the Japan Sea and lying at the Gangwon-do coast in the east of Korean Peninsula has expanded the new port area on the basis of its original. To reduce the impact of the project on the stability of adjacent beaches, jetties and offshore breakwaters used for shore protection are to be constructed. In this paper the changes of beach profile before and after the implementation of the project and the influence of the project on the shoreline are studied. The results from the experiments show that when the continuous action of waves makes the beach profile basically stable, the protective measures constituted by the jetties and offshore breakwaters with different angle arrangement can protect the beach shore effectively. According to the sediment moving bed tests under the wave action, the incident wave can attenuate its energy after reaching the offshore breakwaters. Obviously, the wave erosivity can be weakened. It can be seen from the experimental phenomenon and the testing results that the offshore breakwaters can play a certain role in reducing the eroded beaches and the erosion of the nearby beaches.

Key words: model experiment; wave; erosion; stability; sediment; moving bed

Received: March 10, 2018