



游艇码头拉簧锚碇式浮桥结构应力与运动响应分析

张瑞玉，冯海波

(中交四航局港湾工程设计院有限公司，广东 广州 510290)

摘要：波浪条件是游艇码头浮桥结构设计的控制性因素。针对拉簧锚碇式混凝土浮桥结构在波浪作用下运动和受力情况复杂的问题，依托实际工程，归纳游艇码头浮箱和锚碇结构选型的一般思路和原则，找出拉簧锚碇式混凝土浮桥的适用情况和结构设计要点，并通过有限元分析拉簧锚碇式混凝土浮桥在波浪作用下的运动响应及结构应力特点。结果表明，波浪超过0.5 m时，宜采用三维有限元数值分析手段重点分析浮桥结构的波浪响应特性，并在浮桥平面设计和结构详细设计时充分考虑。

关键词：游艇码头；拉簧锚碇式；混凝土浮桥；运动响应；结构应力

中图分类号：U 656.1

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)05-0038-06

Structural stress and motion response analysis of spring anchorage pontoon in yacht wharf

ZHANG Rui-yu, FENG Hai-bo

(CCCC FHEC Harbor Engineering Design Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Wave is the controlling factor in the structural design of a pontoon for a yacht wharf. Given the complex motion and stress conditions of a spring anchorage concrete pontoon in waves, we focus on an actual project to summarize the general ideas and principles of selecting buoyancy tanks and anchorage structures for the yacht wharf. Then, we investigate the application conditions of the spring anchorage concrete pontoon and the main points in the structural design of such a concrete pontoon and use the finite-element method to analyze the motion response and structural stress characteristics of the concrete pontoon in waves. The results show that three-dimensional finite-element numerical analysis can be performed to analyze the wave response characteristics of such pontoons when the wave height exceeds 0.5 m and that this issue should be given due consideration in the general layout and detailed structural design of this type of pontoons.

Keywords: yacht wharf; spring anchorage; concrete pontoon; motion response; structural stress

近年来，随着我国游艇产业的快速发展，游艇码头的设计与建造技术也呈现出跨越式的发展态势。由于游艇船型及靠泊作业要求特殊，游艇码头一般采用浮桥结构，波浪条件是浮桥结构设计的控制性因素。针对浮桥结构与波浪相互作用问题，国内外学者从不同角度开展了一系列理论

计算分析和模型试验研究，其中对定位桩结构的研究成果较为丰富^[1-3]，但对波浪力作用下浮桥结构自身的运动响应及结构应力分析则相对较少。我国游艇码头的设计建设起步相对较晚^[4]，相应的规范标准体系尚不成熟、不完善，工程经验积累还不够丰富。目前，浮桥结构荷载分析和构件

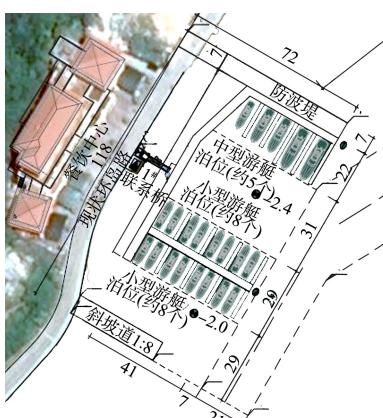
设计多参照港口工程结构设计类规范和标准, 实际工程采用最多的塑料浮箱及其配件大多依托生产厂家直接采购成品而缺乏依托工程环境特点的针对性系统分析。对于混凝土浮箱, 尚无定型化产品, 需要根据工程海区波浪作用下的运动响应及受力特点进行结构分析与设计。初步分析表明, 在波浪作用下, 作为沉块锚拉类型的拉簧锚碇式浮桥结构会同时产生多种运动响应, 其受力相对更复杂。本文依托工程实例, 综合归纳游艇码头结构选型的一般思路和原则, 利用 Ansys 有限元软件, 着重分析拉簧锚碇式混凝土浮箱结构在波浪力作用下的运动响应和结构应力特点。

1 工程概况

某海岛游艇码头工程位于珠海市万山群岛某海岛海湾内, 工程位置及平面布置见图 1, 拟建 21 个游艇泊位, 包括 16 个 12 m 游艇泊位和 5 个 18 m 游艇泊位。总体上风浪掩护条件较好, 主要受来自湾口的 NE 向波浪影响, 设计波浪要素见表 1。



a) 工程位置



b) 平面位置(单位: m)

图 1 工程位置及平面布置

表 1 50 a 一遇强浪向(NE)设计波浪要素

水位	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{4\%}/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	平均周期 T_{m}/s
极端高水位	1.19	1.02	0.98	0.82	4.2
设计高水位	1.10	0.93	0.90	0.76	4.2

2 结构选型

2.1 浮体结构选型

游艇码头一般选址在风浪掩护条件较好的天然水域或通过采取工程措施营造出满足游艇码头建设和使用条件的水域环境。对于采用浮式结构的游艇码头, 浮体结构大多采用塑料浮箱或混凝土浮箱, 浮箱形式一般依据工程水域的水流和波浪情况确定, 浮箱通过上部骨架连接形成浮桥。以塑料浮箱作为浮体的浮桥结构抗横浪能力, 设计上一般按 0.5 m 波高等效波浪荷载控制, 最大不超过 1.0 m 等效波高, 混凝土浮箱则一般可按抵抗大于 1.0 m 波高等效波浪荷载作用考虑。

依托工程海区波浪条件不满足《游艇码头设计规范》^[5]对塑料浮箱式浮桥结构及游艇系泊要求, 需要考虑防护性工程措施。鉴于工程规模不大、泊位数量少, 配套建设实体式防波堤不经济, 本文结合工程水域环境及游艇泊位总体布置, 考虑迎浪向设置一道兼作游艇浮桥的浮式防波堤, 以改善游艇泊位区的掩护条件。同时, 浮式防波堤和泊位区浮桥的浮体结构均选用混凝土浮箱, 上部采用轻型钢结构骨架, 以进一步提高浮桥结构整体抗浪能力。

2.2 浮桥锚碇结构选型

浮桥锚碇结构选型主要取决于工程地质条件。依托工程所在海岛属花岗岩丘陵山地, 勘察揭露地层从上而下分布砾砂、强风化花岗岩及中风化花岗岩, 地层分布较简单, 基岩面覆盖层薄, 2~5 m 砾砂层以下即可见硬质花岗岩层。根据过往类似工程经验, 浮桥锚碇结构可采用定位桩或沉块锚拉式驻留系统, 如采用打入式定位桩, 则打桩难度大、施工质量难以保证; 如采用灌注型嵌岩桩, 则工序复杂、工期长、环保性差、工程造价高; 如采用常规沉块锚链系泊系统, 浮桥运动幅度控

制性较差, 游艇系靠作业安全及人员上下行走舒适度较差; 如采用拉簧锚碇式驻留系统, 则对浮

桥运动幅度控制性相对较好, 实施难度相对较低。锚碇方式的综合比较见表 2。

表 2 游艇码头浮桥锚碇方式

锚碇方式	地质适应性	结构特点	使用舒适性
预制打入式定位桩	地质有中等至较厚可打性良好的覆盖土层	定位桩结构受力明确, 可靠度高, 结构整体性好。但由于桩基上部自由, 在风、浪、流条件较差的情况下, 桩身弯矩较大, 一般选择钢管桩, 在设计时应采用一定重现期标准的风、浪、流条件进行验算, 以控制使用过程中环境超载的概率	浮桥运动控制性好, 使用舒适度最高, 高度契合游艇码头的作业特点
灌注或嵌岩式定位桩	岩面以上覆盖土层薄, 无法提供足够的土体侧限时	此种方式的桩基工程造价较高, 但嵌固情况好, 与预制打入桩具有相同的结构优点	与预制打入桩方式相同
沉块锚链系统	土层较难打入, 海(河)床底质能够提供一定承载力	浮体靠多根不同方向的锚链维系, 锚链无弹性, 平时为松弛状态, 仅限制浮体的最大位移, 到达限位之前, 浮体均能自由飘移。也可配合卷扬机, 需要根据水位经常调整。锚链数量较多, 受力不明确	浮桥运动具有不确定性, 使用舒适度较差, 多用于趸船等自身重力较大的浮体结构驻留
拉簧锚碇系统	岩面以上覆盖层薄甚至无覆盖层时	锚块和浮桥共同抵抗水流、波浪的冲击, 拉簧伸缩性强, 安装时有一定预留, 抗风浪能力强, 对环境超载的适应性强。对海床生态破坏小, 上部无桩式浮码头自然景观好	浮桥运动控制性较好, 对混凝土浮桥适应性及使用舒适度相对较好; 特殊风浪条件下可能产生较大位移

综合以上分析, 拉簧锚碇式混凝土浮桥结构较适合依托工程海区的风浪条件和地质条件, 结构设计的重点在于波浪作用下拉簧锚碇式混凝土浮桥的结构应力和运动响应分析。

3 波浪荷载

根据《游艇码头设计规范》, 对作用于浮箱的波浪力可参照行业标准《港口与航道水文规范》^[6] 计算, 资料不足时, 水平波浪荷载可取 2 kPa。一般而言, 掩护情况良好, 波高小于 0.5 m 时, 水平波浪荷载取 2 kPa 是符合要求的。但本工程处于外海岛屿, 波浪条件较差, 即使经过浮式防波堤的削减, 波高仍然超过了 0.5 m, 此时, 作用于浮桥上的波浪荷载仍按 2 kPa 考虑不尽合理, 需要对波浪力进行重点分析。

浮桥在水上漂浮时, 可近似于方形船体计算。参考波浪横向作用于趸船的情况^[7], 混凝土浮桥会引起波浪的局部反射, 相较于作用在直墙式建筑物, 浮桥结构正面的合成波高将既大于入射波高, 又小于波浪遇直立墙发生完全反射时的立波波高, 更加符合实际情况。浮桥前方局部反射系

数 K_r 公式为:

$$K_r = \sqrt{1 - \frac{\operatorname{sh} \left[\frac{2\pi}{L} (d-T) \right] \operatorname{sh} \left[\frac{2\pi}{L} (2d-T) \right]}{\operatorname{sh} \left[\frac{2\pi}{L} (\eta+d) \right] \operatorname{sh} \left[\frac{2\pi}{L} (\eta+2d) \right]}} \quad (1)$$

浮桥结构吃水范围内局部反射波高 H_r 公式为:

$$H_r = K_r H \quad (2)$$

反射波与入射波合成后波高 H_d 公式为:

$$H_d = H + H_r \quad (3)$$

在计算波压力时, 将合成波看成由假想入射波完全反射形成, 即 $H_d = 2H'$ 。水底处波压强 p_d 公式为:

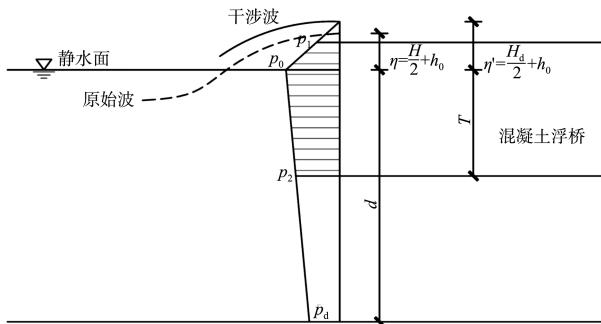
$$p_d = \frac{\rho g H'}{2 \operatorname{ch} \frac{2\pi d}{L}} \quad (4)$$

水面处波压强 p_0 公式为:

$$p_0 = (p_d + \rho g d) \frac{H' + h'_0}{H' + h'_0 + d} \quad (5)$$

式中: L 为波长(m); d 为水深(m); T 为水位到浮桥底部的距离(m); η 为入射波波峰在静水面以上的高度(m); H 为实际入射波波高(m); H' 为假想入射波波高(m); ρ 为水的密度(t/m^3); h'_0 为假想立波波浪中心线对静水面的超高值(m)。

由干涉波和对静水面超高值的情况， H' 与 h'_0 之和大于浮桥结构干舷高度时，波浪会发生部分越顶，只考虑结构高度范围内的波浪荷载，则浮桥结构受波浪力情况如图 2 所示。



注: p_1 为浮桥侧面顶面处波压强; p_0 为静水面处波压强; p_2 为浮桥侧面底部波压强; p_d 为水底处波压强; η' 为合成波波峰在静水面以上的高度; H 为原始入射波波高; H_d 为原始入射波与反射波的合成波波高; h_0 为波浪中心线对静水面的超高值。

图 2 浮桥结构受水平向波浪力

根据计算结果可知，作用于混凝土浮桥结构上的波浪力按结构高度简化为平均波压强为 11.53 kPa。实际情况中，由于浮桥在波浪冲击下会发生一定水平位移，而计算中没有考虑水平位移对波浪的缓冲削弱，故计算结果是偏保守安全的，可以用

此波浪荷载进行拉簧锚碇系统的设计。当波浪条件较差时(波高超过 0.5 m)，计算所得的波浪荷载超过《游艇码头设计规范》中水平波浪荷载参考值 2 kPa 数倍，直接用规范中的参考值来进行工程设计将存在安全隐患。

4 波浪作用下的拉簧锚碇式混凝土浮桥结构应力分析

在对混凝土浮桥结构进行设计时，应对结构自身的内力进行分析，根据应力情况进行配筋设计。本文基于 Ansys 软件建立混凝土浮桥结构模型，利用 ANSTOASAS 命令输出 ASAS 文件，通过 AQWA-WAVE 模块生成波浪荷载，施加在结构模型中。

取一个典型结构段进行建模，浮桥结构尺寸见图3，结构段长10 m、宽3 m、高1.21 m，隔板及侧壁厚度为0.12 m，端板厚度0.15 m，结构段端部四角设有连接井，用于结构段相连和穿孔设置拉簧。结构建模和网格划分见图4，混凝土浮桥箱体材料为C50混凝土，内部填充材料为聚苯乙烯泡沫块体，密度 17 kg/m^3 ，吸水率≤5%。

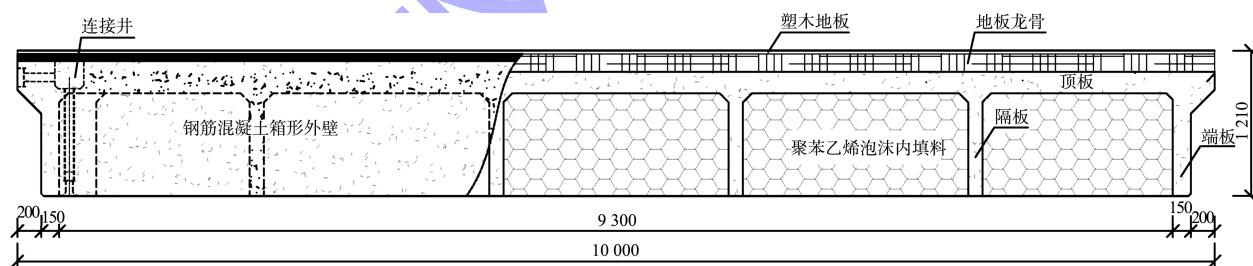


图 3 混凝土浮桥结构纵断面 (单位: mm)

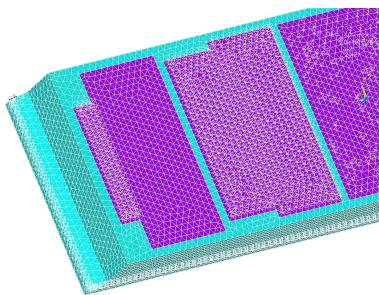


图 4 混凝土浮桥结构模型及网格划分

数学模型的计算中主要考虑 50 a 一遇波浪荷载作用的工况，采用表 1 中极端高水位 $H_{1\%}$ 设计波浪进行计算，得到结构受波浪荷载弯矩云图见图 5。可以看出，对于无底结构，拉簧并位于结构段四角，故结构四角附近的内力和变形均较小，最大弯矩发生在结构段中间的侧壁底部，即三边支承的自由边，最大弯矩为 $6.62 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

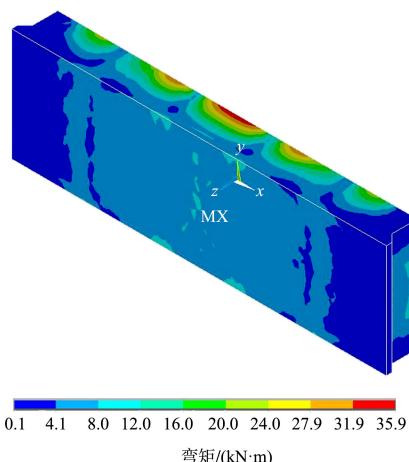


图 5 混凝土浮桥模型受波浪荷载弯矩云图

5 波浪作用下的拉簧锚碇式混凝土浮桥运动响应分析

以拉簧作为锚碇方式的浮桥在波浪作用下的运动幅度是较大的^[8](与定位桩式游艇码头相比),可能会同时发生横荡、纵荡、横摇、纵摇及升沉运动等,而游艇码头一般通过活动联系桥搭接的方式与陆域连通,过大的位移会影响搭接的安全性和使用舒适性。因此,需要对极端波浪条件下的浮桥运动响应进行分析。

本工程采用 6 股/组的超高分子量聚乙烯高弹性拉簧对浮桥结构进行锚拉,每股最小破断力为 15 kN,每组拉簧长度 5 m,锚拉垂直角度为 10°(设计低水位)~25°(设计高水位),水平投影线与浮桥结构轴线夹角 40°~45°。利用 ANSYS-AQWA 软件建立水动力分析模型,通过限制结构横向位移来模拟结构段四角的张紧式锚拉,直线结构段之间铰接,主支浮桥连接“T”形部位固接,环境荷载考虑表 1 中的极端高水位波浪荷载。混凝土浮桥锚碇连接模型见图 6,波浪冲击过程中浮桥的主要运动量见图 7,重点关注稳态阶段的运动情况。

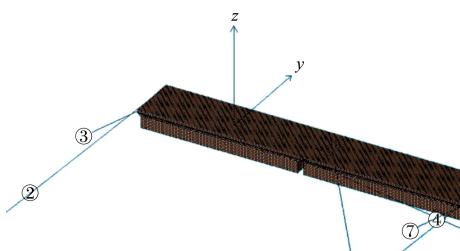


图 6 混凝土浮桥锚碇连接模型

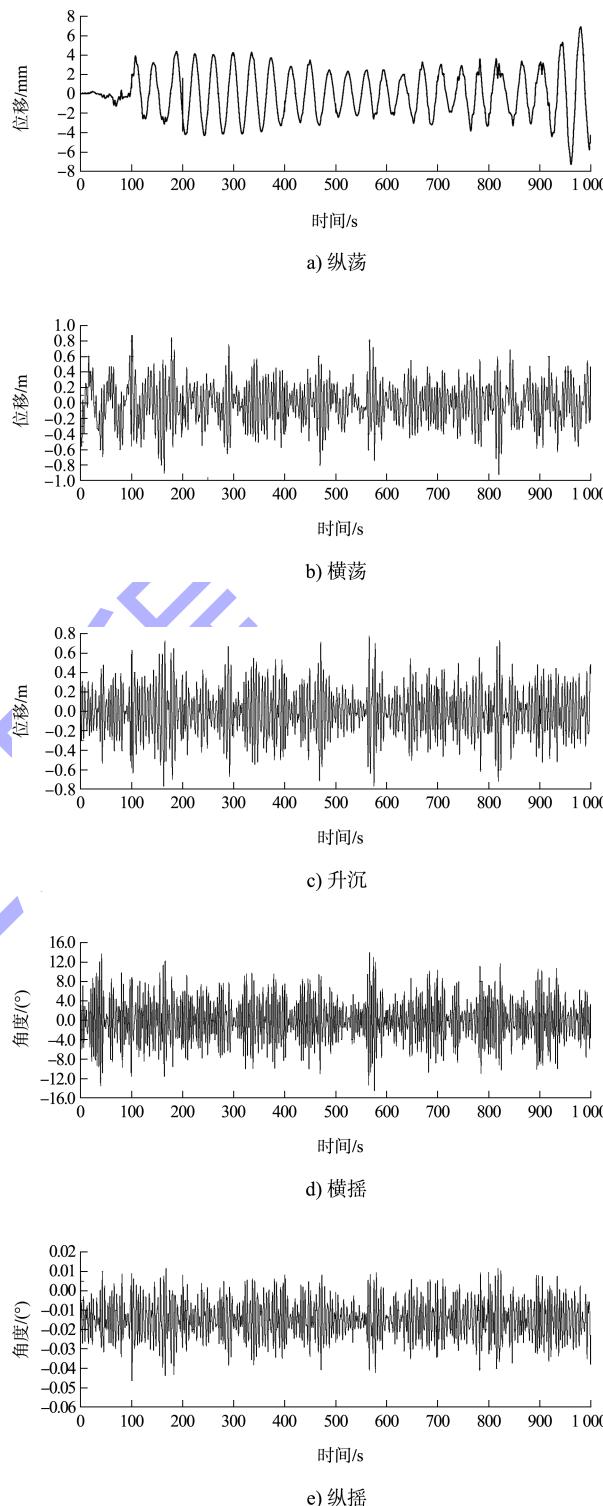


图 7 浮桥运动量随时间变化过程

将各维度各历时的运动幅值进行总结能够发现,波浪横向入射时主要引起浮桥横荡、横摇、升沉 3 个自由度的运动。各维度运动极值见表 3。其中以横荡运动最为剧烈,最大横向位移幅值达到 0.702 m,在设计过程中应予以充分关注;其

次, 升沉运动幅值也较为明显, 但此项应与定位桩等其他锚碇方式的游艇码头相似; 另外, 横向波浪并未激起浮桥纵荡、纵摇和首摇3个自由度的强烈运动响应, 这与常规分析结果一致, 说明模拟结果具有较高可信度。

表3 极端波浪荷载作用下浮桥结构运动量最大值

纵荡位移/mm	横荡位移/m	升沉位移/m	横摇角度/(°)	纵摇角度/(°)
6	0.702	0.621	11.19	0.01

6 结论

1) 游艇码头浮桥结构应根据不同工程环境选择适合的浮箱形式, 风浪条件较差时宜选择混凝土浮箱。

2) 对于地质岩面以上覆盖层很薄甚至无覆盖层时, 浮桥的定位驻留采用拉簧锚碇系统方式, 使用性和经济性综合效果相对较好。

3) 波浪超过0.5 m时则宜采用三维有限元数值分析手段重点分析浮桥结构的波浪响应特性, 不宜直接采用《游艇码头设计规范》中推荐的水平波浪荷载值2 kPa进行设计。

4) 作为薄壁型钢筋混凝土结构的混凝土浮箱不宜直接套用现行港口工程结构方面的设计规范进行设计, 宜结合工程建设环境特点采用三维有限元数值法进行针对性的结构应力分析。

5) 本文分析结果表明, 本工程的浮桥驻留方式选用拉簧锚碇式, 使用舒适度上优于常规沉块

锚链式, 建造难度和造价上优于定位桩式。但波浪作用仍可能引起浮桥结构较大幅度的运动响应, 在平面设计时应进行充分考虑, 同时, 接岸联系桥与浮桥搭接处应预留足够空间, 确保极端情况下不会因浮桥过大的位移引起联系桥滑落。

参考文献:

- [1] 沈印.定位桩式游艇码头在波浪及靠泊作用下的动力响应[J].水运工程, 2015(9): 84-89.
- [2] 樊亮亮, 吴国鑫.游艇码头结构荷载设计[J].水运工程, 2018(11): 64-67.
- [3] 卢笙.无掩护状态下的游艇码头波浪力研究[J].中国水运, 2018(7): 42-44.
- [4] 刘耘东.薄壁高性能混凝土浮体施工技术研究[D].广州: 华南理工大学, 2017.
- [5] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司.重庆市交通规划勘察设计院.游艇码头设计规范: JTS 165-7—2014[S].北京: 人民交通出版社, 2014.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [7] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.海港工程设计手册[M].2版.北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [8] 叶前云, 林凯健.游艇码头锚碇方法的分析[J].中国水运(下半月), 2014, 14(6): 297-298.

(本文编辑 王璁)

- [7] MASE H, TAMADA T, YASUDA T, et al. Wave runup and overtopping at seawalls built on land and in very shallow water[J]. Journal of waterway port coastal & ocean engineering, 2013, 139(5): 346-357.
- [8] TROCH P, GEERAERTS J, WALLE B, et al. Full-scale wave overtopping measurements on the Zeebrugge rubble mound breakwater[J]. Coastal engineering, 2004, 51(7): 609-628.
- [9] AMIR E S, JAFARI E. New formulae for prediction of wave overtopping at inclined structures with smooth impermeable surface[J]. Ocean engineering, 2014, 84(6): 124-132.
- [10] ORIMOLOYE S, HORRILLO-CARABALLO J, KARUNARATHNA H, et al. Wave overtopping of smooth impermeable seawalls under unidirectional bimodal sea conditions[J]. Coastal

engineering, 2020, 165(4): 103792.

- [11] 钟杰, 王文飞, 沈雨生.涌浪条件下斜坡式防波堤越浪量的对比分析[J].水运工程, 2020(9): 50-55, 131.
- [12] 倪琦, 范红霞, 刘涛, 等.海堤越浪量的物理模型试验及人工智能算法模型预测[J].水运工程, 2020(10): 28-33.
- [13] 舒叶华, 徐宇航, 谢先坤.复式海堤结构越浪量计算方法比较[J].水运工程, 2019(5): 27-31, 36.
- [14] 陈国平, 周益人, 严士常.不规则波作用下海堤越浪量试验研究[J].水运工程, 2010(3): 1-6.
- [15] 孙鹏, 陈海英, 周益人, 等.长江口横沙东滩典型海堤越浪量现场和试验研究[J].海洋工程, 2019, 37(4): 27-34.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第13页)