



梁系平面刚度偏心分布高桩平台结构地震响应

李 亚¹, 吴 兵²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

2. 中国矿产资源集团舟山发展有限公司, 浙江 舟山 316021)

摘要: 基于工程实例, 采用反应谱方法、时程分析法对梁系平面刚度偏心分布高桩平台结构地震响应规律进行分析研究。结果发现: 横向地震作用下, 反应谱法和人工波时程分析法计算结果较为接近, 天然波时程分析法结果则因选波呈现差异; 桩基二维、三维模型计算结果较为接近, 横梁二维、三维模型剪力峰值计算结果接近, 弯矩峰值结果差异大。纵向地震作用下, 三维反应谱法和人工波时程分析法计算结果接近。不同计算模式对比表明三维反应谱法适应性较好。抗震设防烈度大于 7 度时, 该类型平台结构桩基不宜选用 PHC 桩。对梁-板连接刚性系数 λ 进行参数分析表明: λ 变化对横梁、纵梁内力的影响大于对桩基的影响, 对纵横梁弯矩的影响大于对剪力的影响, 且纵向地震作用下影响程度大于横向地震。说明板、梁之间的约束状态改变了结构的刚度分配情况, 进而对结构的地震效应产生规律性影响。

关键词: 高桩平台; 平面刚度偏心; 地震响应; 反应谱法; 时程分析法; 连接刚性系数

中图分类号: U656.1+13; TU352

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0022-06

Seismic response of high piled platform structure with eccentrically distributed plane stiffness of beam system

LI Ya¹, WU Bing²

(1. CCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. CMRC Zhoushan Development Co., Ltd., Zhoushan 316021, China)

Abstract: Based on an engineering example, the seismic response characteristic of high piled platform structure with eccentrically distributed plane stiffness of beam system is studied by response spectrum method and time history analysis. It shows that results of response spectrum method and artificial wave time history analysis are close under transverse earthquake action, while the result of natural wave is different due to wave selection. The calculation results of piles are close for 2D and 3D model, and the peak shear force of transverse beam model are close for 2D and 3D mode, while the peak bending moment of which differ greatly. The results of 3D response spectrum method and artificial wave time history analysis are close under longitudinal earthquake. The comparison of different calculation modes shows that the 3D response spectrum method has good adaptability. If the seismic precautionary intensity is greater than 7-degree, PHC pile is not suitable for this type of platform. Parametric analysis of the beam-plate connection rigidity coefficient λ shows that the effect of λ change on the internal forces of transverse or longitudinal beam is greater than that on the pile, the effect on the bending moment of transverse or longitudinal beam is greater than that on the shear force, and the influence degree under the longitudinal earthquake is greater than that under the transverse earthquake, which indicates that the constraint state between plate and beam changes the structural stiffness distribution, and then has regular influence on the seismic effect.

Keywords: high piled platform; eccentrically distributed plane stiffness; seismic response; response spectrum method; time history analysis; connection rigidity coefficient

收稿日期: 2023-08-22

作者简介: 李亚 (1983—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事近海工程、交通土木工程结构设计与研究。

沿海某大型码头工程拟建设 2 个 10 万吨级集装箱泊位, 水工结构主要包括前方码头以及平台结构, 均采用高桩梁板结构, 码头桩基采用大直径钢管桩, 平台结构桩基采用 PHC 桩。因工程平台结构的梁系布置不对称、平面刚度呈现偏心分布(即梁系刚度中心偏离平台结构的几何中心), 地震荷载作用下可能存在传力路径不均匀、结构扭转等问题^[1-2], 对结构抗震不利; 且满堂式布置平台因工艺要求需考虑堆箱、舱盖板等附加质量, 大面积分布的工艺荷载也会加大地震不利效应; 另外, 相比前方码头采用的钢管桩基础, 平台结构基础采用的 PHC 桩(全直桩)对地震作用也相对敏感^[3]。根据省级交通、防震减灾主管部门对重大基础设施工程抗震设防、抗震安全的要求, 有必要对该类型结构地震响应特性进行深入分析研究。目前水工结构设计中, 对于高桩梁板结构的地震作用通常采用二维排架结构模型进行等效静力计算, 难以应用于复杂结构, 也无法反映对空间结构不同方向地震输入的影响。工程实例中平台结构梁系平面分布不均匀、梁系平面刚度偏心分布, 需评估对结构地震响应的影响程度, 对比分析不同计算方法地震作用效应的差异性^[4-5]。另外, 工程平台结构面板采用叠合板结构, 叠合板和横梁之间的连接刚性程度对结构地震作用的影响亦有待研究。本文基于该实际工程案例, 拟采用反应谱法、时程分析法, 对梁系平面刚度偏心分布高桩平台结构地震作用效应进行计算, 并研究相关参数影响, 分析该类型结构地震响应特性。

1 工程概况

工程平台结构与陆域衔接位于码头后方, 为满堂式布置, 平台结构宽 19.0 m, 采用高桩梁板式结构, 排架间距 6.0 m(前方码头排架间距 12.0 m), 每榀排架布置 4 根 $\phi 800$ mm PHC 桩(间距约 5.2 m), 均为桩长约 40 m 的直桩, 上部结构采用现浇横梁(截面尺寸 1.50 m \times 1.85 m)、预制板加现浇层叠合面板,

仅在后沿通长设置 1 根搁置纵梁(截面尺寸 1.50 m \times 1.90 m), 用于搁置平台与驳岸挡墙之间的简支板, 见图 1。由于后沿布置搁置纵梁, 因此平台梁系刚度平面分布呈现不对称、偏心分布特点。

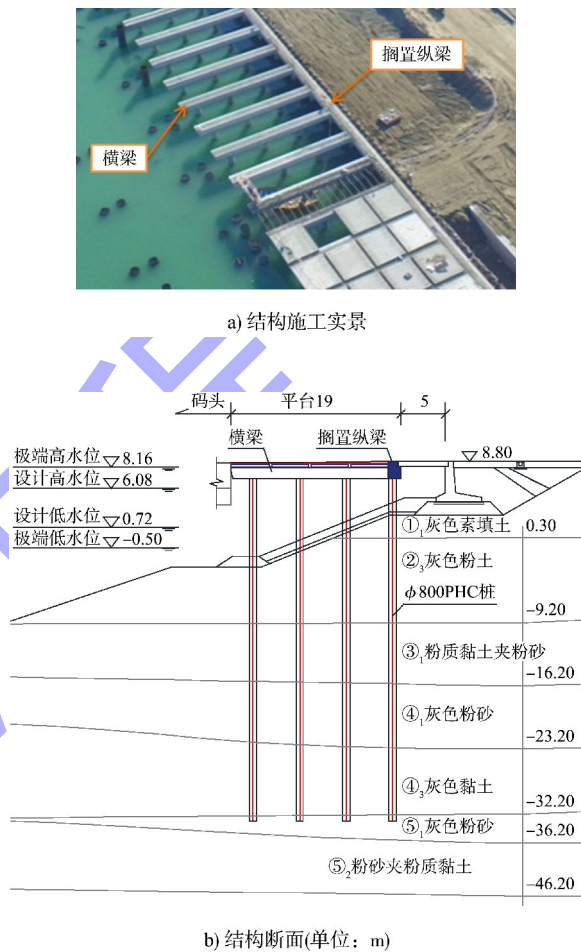


图 1 平台结构

2 不同地震作用计算方法对比

2.1 反应谱法

反应谱法是一种伪动力、拟静力方法, 将地震作用转化为等效荷载叠加, 反应谱法计算量小, 参数意义相对明确, 设计应用较为简便。选取设计反应谱是反应谱法的关键, 根据工程场地地震安全性评价, 工程场地抗震设防烈度按 7 度考虑, 设计基本地震动峰值加速度为 0.10g, 设计地震反应谱特征周期为 0.90 s, 得到设计反应谱见图 2, 其中 T 为结构自振周期, 谱值 β 为动力放大系数。

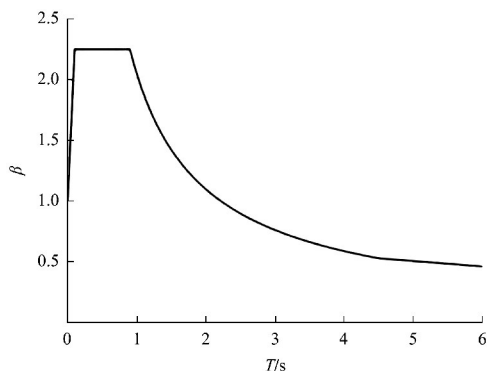


图2 设计反应谱

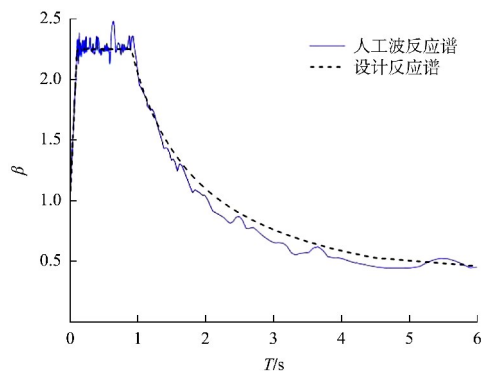


图4 人工地震波反应谱

2.2 时程分析法

反应谱法能考虑不同频率峰值响应和频谱特性,但无法体现地震持时特性;时程分析法可对结构运动微分方程直接求解,得到各求解节点物理量动态变化过程,时程分析法的基础条件是获取合适的输入地震波。

2.2.1 人工波模拟

人工地震波基于特定目标频谱特性生成,可解决天然地震记录数量限制及频谱性质匹配性问题。人工地震波可基于随机理论进行合成,地震动加速度时程 $a(t)$ 可表示为:

$$a(t) = s(t)a_0(t) \quad (1)$$

式中: $a_0(t)$ 为频率平稳的高斯随机过程, $s(t)$ 为地震动时程强度包络函数。根据工程基本地震动参数和地质条件,模拟得到加速度时程见图3,人工地震波反应谱见图4,与设计目标反应谱相比,模拟波反应谱曲线吻合度较好。

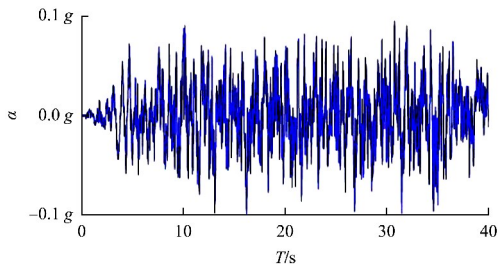


图3 人工地震波加速度

2.2.2 天然地震波

根据工程场地特性,选择 Hyougoken (South, 1995) 地震加速度记录作为天然地震波输入结构计算,地震波加速度时程见图5。

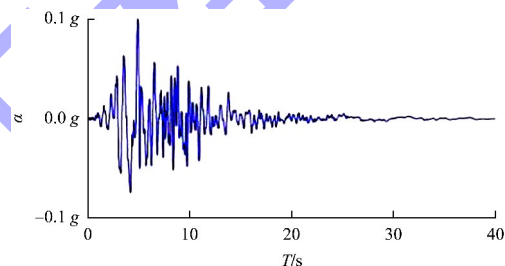


图5 天然地震波加速度

2.3 计算结果对比

分别采用二维、三维结构模型(图6)进行结构地震响应对比,计算采用有限单元法(FEM),横纵梁、面板分别采用 Beam 单元、Shell 单元进行离散,Beam 单元和 Shell 单元采用节点耦合约束方式连接(考虑形心位置的偏差),桩底采用嵌固法^[6],且考虑上部使用期荷载的等效质量对地震作用的附加效应。

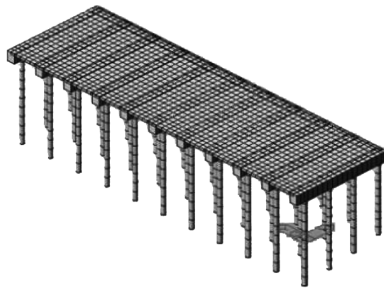


图6 三维结构 FEM 模型

计算得到 X 向(横向)地震作用内力效应见表 1, 其中 N_p 、 M_p 、 V_p 分别表示桩基轴力、弯矩、剪力, M_{TB} 、 V_{TB} 分别表示横梁弯矩、剪力。分析计算结果发现: 对于二维和三维模型, 反应谱法和人工波时程分析法计算结果较为接近, 天然波时程分析法结果稍大, 主要由于地震的随机性, 选波对于地震响应有直接影响。对于桩基地震内力效应, 3 种不同计算方法二维、三维模型计算得到的结果较为接近, 基本在 5% 以内; 对于横梁地震内力效应, 3 种不同计算方法二维、三维模型计算得到剪力结果较为接近, 但弯矩数值差别较大, 二维模型结果偏大 20%~30%。可见, 虽然高桩平台结构刚度平面分布偏心、不均匀, 但是在横向地震作用下, 二维、三维模型计算方法对桩基地震内力效应影响不大, 主要因为工程桩基水平、轴向刚度分布对于纵向不同榀排架具有一致规则性, 相应地二维、三维模型得到的横梁剪力差别不大, 但由于未考虑实际结构的形态、刚度分布影响以及板的荷载分担效应等因素, 二维模型计算得到的横梁弯矩结果偏大, 说明本文所研究结构横梁内力对空间效应因素更为敏感, 同时因为弯矩量纲中长度幂次相对剪力量纲高一次, 二维、三维模型计算得到横梁弯矩差异则最大, 表现出与基本力学原理相一致的受力特性。

表 1 X 向地震结构内力峰值计算结果

计算方法		$N_p /$ kN	$M_p /$ (kN·m)	$V_p /$ kN	$M_{TB} /$ (kN·m)	$V_{TB} /$ kN
反应谱法	三维模型	101.7	442.4	66.6	344.4	107.7
	二维模型	106.7	458.0	68.9	448.7	106.5
	相对差值/%	5.0	3.5	3.3	30.3	-1.2
时程分析法 (人工波)	三维模型	100.5	437.2	65.8	340.5	106.5
	二维模型	98.9	425.8	64.1	416.8	98.9
	相对差值/%	-1.6	-2.6	-2.6	22.4	-7.2
时程分析法 (天然波)	三维模型	116.6	506.6	76.2	394.9	123.5
	二维模型	116.2	498.7	75.0	488.6	115.9
	相对差值/%	-0.3	-1.6	-1.7	23.7	-6.2

对于 Y 向(纵向)地震作用结构内力效应, 主要采用三维反应谱法或人工波时程方法计算, 结果见表 2, 其中 M_{LB} 、 V_{LB} 分别表示纵梁弯矩、剪力, 发现反应谱法和人工波时程分析法计算结果

较为接近, 进一步说明三维反应谱法的良好适用性。

表 2 Y 向地震结构内力峰值计算结果

计算方法	$N_p /$ kN	$M_p /$ (kN·m)	$V_p /$ kN	$M_{LB} /$ (kN·m)	$V_{LB} /$ kN
三维反应谱法	157.0	407.3	61.5	507.6	147.5
三维时程分析法 (人工波)	145.8	394.9	59.8	486.9	141.4

考虑地震作用、自重力、均布荷载效应组合, 桩基计算弯矩设计值为 515 kN·m(包络值), 工程实例平台结构选用的 PHC 桩(C 型)抗裂弯矩约 610 kN·m, 安全富余量小于 20%。若抗震设防烈度大于 7 度, 本平台结构所选用 PHC 桩承载性能则难以满足要求, 因此对于 7 度以上高烈度地区, 该类型平台桩基不宜选用 PHC 桩, 可考虑采用钢管桩、钢管混凝土桩等高性能桩型; 其余地区选用 PHC 桩通常可满足结构抗震计算要求, 但考虑到地震作用的复杂不确定性, 也应采取加强桩芯连接等抗震构造措施, 避免桩基出现开裂损伤, 以提高桩基抗震性能, 保证结构抗震安全。

3 梁-板连接刚性系数对地震效应影响分析

由于结构构造、塑性变形等原因, 板、梁之间连接难以确保完全刚性连接, 连接性能的降低对结构刚度及地震响应均有影响, 为此对连接刚性相关参数进行分析研究, 评估其对本结构地震作用的影响情况, 计算采用三维反应谱法(或人工地震波时程分析法)。

3.1 模态分析结果

定义板、梁之间连接刚性系数为 λ , 完全刚性连接时 λ 为 1.0。对不同连接刚性系数结构进行模态分析, 结果见表 3, 发现随着 λ 降低, T_1 、 T_2 、 T_3 均呈现一定增加趋势, 另外基本振型的扭转成分显著性增加。平台结构前 3 阶振型见图 7, 前两阶振型为平动形式, 其中第 1 振型有一定扭转特性(因结构平面刚度分布不均匀), 第 3 振型为扭转形式。

表 3 结构自振周期计算结果

λ	自振周期/s		
	T_1	T_2	T_3
1.000	1.541 9	1.501 5	1.375 4
0.750	1.561 9	1.501 7	1.375 9
0.500	1.591 6	1.502 0	1.376 4
0.250	1.617 0	1.503 1	1.377 6
0.125	1.625 5	1.509 9	1.384 3

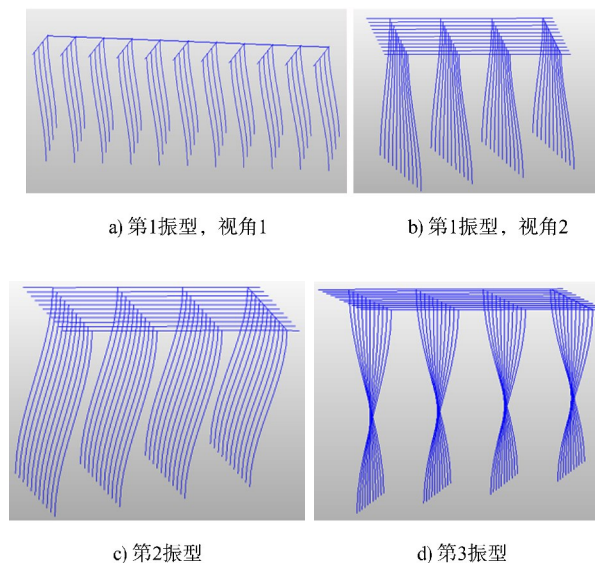
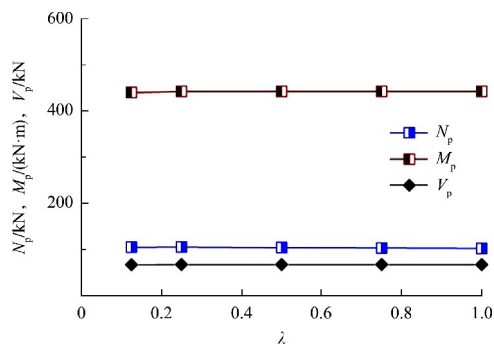


图 7 结构前 3 阶振型

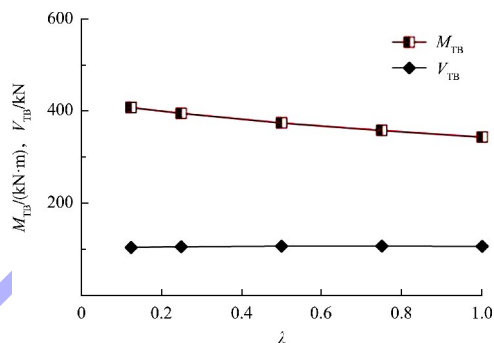
3.2 计算结果

对于不同板梁连接刚性系数 λ , 通过反应谱法计算得到 X 向地震作用下结构内力变化见图 8, Y 向地震作用下结构内力变化见图 9。分析发现: 随着连接刚性系数 λ 减小, 横向地震作用下桩基轴力、弯矩、剪力峰值变化较小, 横梁剪力峰值也变化不大, 但是横梁弯矩峰值呈增加趋势; 另外, 随着 λ 减小, 纵向地震作用下桩基弯矩、剪力峰值变化不大, 桩基轴力峰值呈非线性增加趋势, 纵梁剪力峰值有一定增加, 纵梁弯矩峰值增加明显; 连接刚性系数 λ 对 Y 向地震作用影响程度大于 X 地震作用效应。

计算结果表明: 板、梁之间的约束情况变化改变了结构的刚度分配, 从而影响结构地震效应, 也进一步说明刚度和地震作用的密切关联性。另外, 采用人工波时程分析法可以得到相近的计算结论。

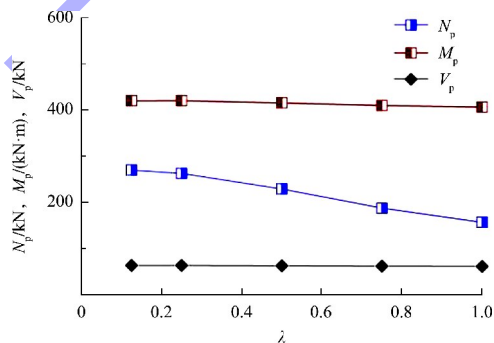


a) 桩基内力峰值随 λ 变化

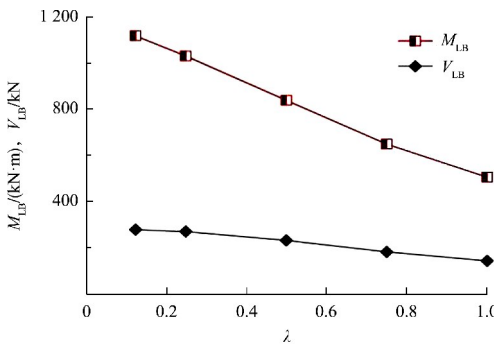


b) 横梁内力峰值随 λ 变化

图 8 X 向地震作用下结构内力变化



a) 桩基内力峰值随 λ 变化



b) 纵梁内力峰值随 λ 变化

图 9 Y 向地震作用下结构内力变化

4 结论

1) 在横向地震作用下, 反应谱法和人工波时程分析法计算结果较为接近, 天然波时程分析法则

因选波呈现差异;虽然平台结构刚度平面分布不均匀,但因桩基刚度分布对于纵向不同榀排架呈现一致规则性,二维、三维模型计算得到桩基地震内力差别不大,相应的横梁剪力差别同样较小,但由于未考虑空间效应影响,二维模型计算得到横梁弯矩结果偏大。纵向地震作用下,三维反应谱法和人工波时程分析法计算结果较为接近。三维反应谱法可较好地适应复杂高桩平台结构抗震计算,且相对时程分析法计算量较小,与水工领域基本抗震设计理念契合,是一种较好的地震作用计算方法。

2) 抗震设防烈度为7度以上的高烈度地区,该类型平台桩基不宜选用PHC桩;其余地区选用PHC桩通常可满足抗震计算要求,但考虑到地震作用的复杂不确定性,也应采取加强桩芯连接等抗震构造措施,以保证桩基抗震性能。

3) 梁-板连接刚性系数 λ 变化对横梁、纵梁内力的影响大于对桩基的影响,对纵横梁弯矩的影响大于对剪力的影响,且纵向地震作用下影响程度大于横向地震作用。板、梁之间的不同约束

状况因结构的刚度分配因素的差异,可对结构地震作用效应产生规律性影响。

参考文献:

- [1] 夏玲涛,刘世美,徐汉勇.平面不规则结构的实用多维反应谱计算方法[J].防灾减灾工程学报,2014,34(3):389-394.
- [2] 陈爱军,吴美茹,南丽萍.基于ANSYS的平面不规则结构地震响应分析[J].水利与建筑工程学报,2008,6(2):25-27,34.
- [3] 向上.桩基础抗震储备对桥梁结构抗震安全影响[J].水运工程,2011(9):50-54.
- [4] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程抗震设计规范:JTS 146—2012[S].北京:人民交通出版社,2012.
- [5] 中国建筑科学研究院.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010(2016年版)[S].北京:中国工业出版社,2016.
- [6] CASTELLI F, MAUGERI M. Simplified approach for the seismic response of a pile foundation [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2009, 135(10): 1440-1451.

(本文编辑 赵娟)

(上接第14页)

参考文献:

- [1] HEINS A E. Water waves over a channel of finite depth with a submerged plane barrier[J]. Canadian journal of mathematics, 1950, 2: 210-222.
- [2] STOKER J J. Water waves: The mathematical theory with applications[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1992.
- [3] CARMIGNIANI R, LEROY A, VIOLEAU D. A simple SPH model of a free surface water wave pump: waves above a submerged plate[J]. Coastal engineering journal, 2019, 61(1): 96-108.
- [4] 高俊亮,张一兆,何志伟,等.孤立波作用下水平板的水动力特性数值研究[J].哈尔滨工程大学学报,2021,42(9): 1287-1294.
- [5] 卢超,郑龙板式开孔防波堤水动力特性及受力研究综述[J].中国水运(下半月),2018,18(7): 159-160, 162.
- [6] 李雪艳,王庆,朱小松,等.不同板式透空堤消浪性能的数值研究[J].船舶力学,2019,23(10): 1198-1209.
- [7] WANG G, REN B, WANG Y. Experimental study on hydrodynamic performance of arc plate breakwater [J]. Ocean engineering, 2016, 111: 593-601.
- [8] KETABDARI M J, VARJAVAND I. Reflected energy spectrum from slotted breakwaters due to irregular waves[J]. Journal of coastal research, 2008, 24(6): 1529-1535.
- [9] TABET-AOUL E H, LAMBERT E. Tentative new formula for maximum horizontal wave forces acting on perforated caisson[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2003, 129(1): 34-40.
- [10] 施晓迪,琚烈红,冯卫兵,等.开孔沉箱消浪性能试验研究[J].水运工程,2011(3): 16-20.
- [11] 姚卓琳.新型半潜式开孔防波堤水动力特性的研究[D].青岛:中国海洋大学,2014.
- [12] HUANG Z H, GHIDAOUI M S. A model for the scattering of long waves by slotted breakwaters in the presence of currents[J]. Acta mechanica sinica, 2007, 23(1): 1-9.
- [13] 郭传胜,张宁川.双层开孔水平板防波堤上的波浪力试验研究[C]//中国海洋工程学会.第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册).北京:海洋出版社,2013: 665-671.

(本文编辑 王璁)