

· 综合 ·



淹没式开孔半圆堤波浪力数值模拟研究*

谢宇轩¹, 王广生², 鱼童², 管大为¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210024;

2. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要: 新式的海岸防护系统对防波堤的堤顶高程、透水生态性提出了更高要求。基于雷诺平均纳维-斯托克斯方程建立三维波浪水槽, 研究淹没状态下开孔半圆形防波堤在浅水波作用下的受力表现。结果表明: 淹没在水下的半圆堤堤身受到的水平力和垂向力存在相位差, 结构滑移危险时刻基本对应最大向岸水平力出现时刻。随着开孔率从0%增大至25%, 水下半圆堤受到的向岸和离岸方向无因次水平力峰值分别减小了27.8%和39.8%。随着波浪周期减小和淹没水深增大时, 淹没式半圆堤离岸滑移受力显著增大。经验公式对于长周期、极端淹没条件下的不开孔半圆堤总力做出了保守估计, 并会进一步高估壁面开孔后的水下半圆堤所受的波浪力。

关键词: 半圆形防波堤; 潜堤; 数值模拟; 波浪力; 浅水波

中图分类号: U653.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0017-10

Numerical study on wave force of perforated submerged semi-circular breakwaters

XIE Yuxuan¹, WANG Guangsheng², YU Tong², GUAN Dawei¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: The modern coastal protection systems place higher demands on the crest elevation and permeable of breakwaters. A three-dimensional numerical wave flume based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations is established to investigate the wave force of submerged perforated semi-circular breakwaters under the action of shallow water waves. The results indicate that there is a phase difference between the horizontal and vertical forces acting on the submerged semi-circular breakwater, with the critical sliding moment generally corresponding to the moment of maximum shoreward horizontal force. As the perforation rate increases from 0% to 25%, the dimensionless maximum shoreward and seaward horizontal forces on the submerged semi-circular breakwater decrease by 27.8% and 39.8%, respectively. With decreasing wave period and increasing submergence depth, the seaward sliding force on the submerged semi-circular breakwater increases. Empirical formulas provide conservative estimates for the total force on unperforated semi-circular breakwaters under long-period waves and extreme submergence conditions, and further overestimate the wave forces on submerged perforated semi-circular breakwaters.

Keywords: semi-circular breakwater; submerged breakwater; numerical simulation; wave force; shallow water waves

收稿日期: 2024-05-13

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFE0126300); 国家优秀青年科学基金项目(52122109)

作者简介: 谢宇轩(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为波浪海工建筑物相互作用。

通信作者: 管大为(1987—), 男, 教授, 研究方向为港口海岸与近海工程。E-mail: david.guan@hhu.edu.cn

在重要海岸工程前增设二级水下防护建筑物,如离岸潜堤,是目前生态海岸的新发展思路^[1]。这类潜堤促淤保滩、削减波浪,不仅具有良好的观赏性,而且造价更低,有利于水体交换^[2]。目前一种可开孔透水、景观美观的半圆形防波堤具有作为水下离岸防护的潜质。

半圆堤具有受力性能优秀、基础压力均匀等特点,在现有的港口防护工程中,通常在拱圈表面开设透水孔来降低结构波浪力。半圆堤通常设计为完全出水或交替出水,其结构稳定性和水动力表现已得到广泛研究。完全淹没在水下的防波堤所受波动荷载与出水堤显著不同,例如长江口深水航道治理工程的半圆形导堤在寒潮期间的淹没状态下发生转移失稳。谢世楞^[7]注意到合田良实公式对于淹没式半圆堤波浪力的过高估计,提出了适用于完全淹没状态下的波浪力修正公式;边峰等^[8]利用水槽试验研究半圆形、矩形等不同形式潜堤的波浪透射系数;胡宝琳等^[9]利用数值模型模拟实心半圆形潜堤表面的波压力分布规律,统计了表面压力最大值出现位置和概率;Young et al.^[10]研究半圆形结构物在水下工作时和直立堤相比的消浪特性差异,提出了波反射系数的预测方法;Jiang et al.^[11]通过波浪水槽试验,观测不规则波作用下,不开孔的水下半圆堤和四分之一圆堤压力的分布特征;蒋学炼等^[12]使用 RANS 数值模型研究水下不透水半圆堤的受力和流程紊动特性。

目前的研究主要通过物理模型试验,且对淹没状态下半圆堤开孔后的受力表现研究较少,限制了向生态防护的发展。此外,在海外建设中人们注意到近岸建筑物在中长周期波浪下发生损坏^[13],因此研究该动力环境下防波堤稳定性更为重要。本文主要使用数值模拟方法,研究近岸椭圆余弦波作用下淹没式开孔半圆堤受力表现,对该结构向生态海堤发展具有一定参考意义。

1 数值模拟方法

1.1 防波堤模型

半圆形防波堤一般由半圆形拱圈和底板组成。

设计长期处于淹没状态的水下半圆堤,其拱圈半径为 3 000 mm,拱圈厚度 500 mm,底板厚度 750 mm,底板前后趾向外延伸 750 mm,以增强稳定性。共设计 0%、5%、10%、15%、20%、25% 6 种不同开孔率的模型。模型开孔位置、形状不变,只改变孔洞大小调整透水面积,孔距 1 m,开孔夹角为 22.5°。其中开孔率 $\varepsilon=5\%$ 原型尺寸如图 1 所示。

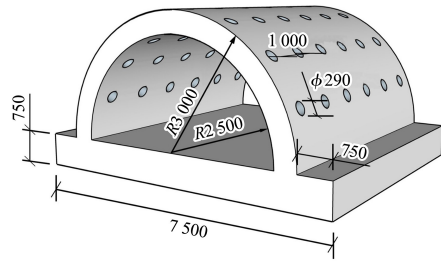


图 1 开孔率 5% 半圆形防波堤原型尺寸 (单位: mm)
Fig. 1 Prototype dimensions of semi-circular breakwater with perforated rate of 5% (unit: mm)

1.2 数值模型建立

数值模型基于不可压缩黏性流体运动的 Navier-Stokes 方程和连续性方程,采用基于重整化群方法湍流模型($k-\varepsilon$ RNG)封闭紊动应力项,流体体积法(volume of fluid, VOF)追踪自由表面。在结构物周围使用局部加密网格,直接刻画壁面孔洞。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: t 为时间; u_i 、 u_j 为速度分量; x_i 、 x_j 为方向分量; p 为压力; ρ 为流体密度; g_i 为重力加速度; $\tau_{i,j}$ 为应力张量。

建立的波浪数值水槽计算域如图 2 所示,总长 11.0 m、高 0.5 m、宽 0.4 m。左侧为造波边界,通过傅里叶级数方法生成椭圆余弦波^[14],右侧为开放出流边界,底部为壁面边界,两侧为对称边界,半圆堤前端距离造波边界为 5.0 m。为了减小波浪反射的影响,在数值水槽尾部设置长为

4.0 m 的消波段, 其长度超过 1 倍波长。使用局部加密的矩形网格, 结构物周围的加密网格尺寸为 1.5 mm, 小于开孔半圆堤模型的孔洞直径一个量级, 经处理检验可以刻画出模型孔洞特征, 加密网格数量为 120 万个。其余网格尺寸为 5.0~10.0 mm, 在接近嵌套网格边界位置以及波面高程附近加密, 此部分网格数量为 152 万个。模拟时长为 24 s。

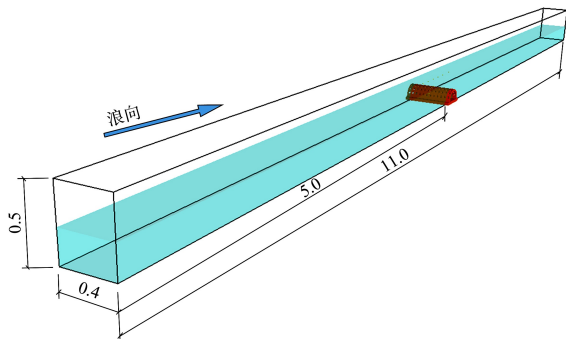


图 2 计算区域 (单位: m)

Fig. 2 Computational domain (unit: m)

1.3 数值模型结果验证

在河海大学港口航道工程与海岸海洋科学实验中心的波浪水槽中进行物理模型试验, 如图 3 所示。水槽总长 50.0 m、宽 1.0 m、高 1.5 m。测量半圆堤周围波高和表面的点压力分布, 验证数值模型的波浪和压力结果。两者的几何比尺均为 1:25, 使用亚克力制作相同的 10% 开孔率半圆堤模型, 具体测点位置如图 4 所示, 点压力受压为正, 反之为负。图 5 和 6 分别为在水深 $d=22.8$ cm、波高 $H=8.8$ cm、周期 $T=1.9$ s 的水动力条件下, 试验测量和数值计算的波高和点压力历时结果。在波浪初期到达防波堤时出现一较高冲击峰, 此后波态稳定, 时程变化曲线基本吻合。其中堤顶附近的测点数据在波谷位置附近过程线略有差异, 但所得的波谷最小值与测量值接近, 说明数值模型模拟的波浪、受力结果可靠。均选取稳定后的数据段进行结果分析。

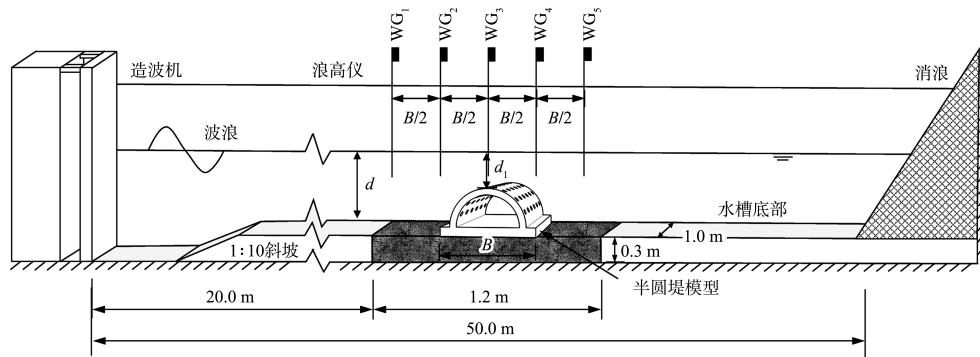


图 3 试验模型

Fig. 3 Experiment model

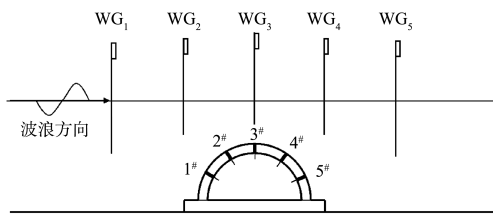
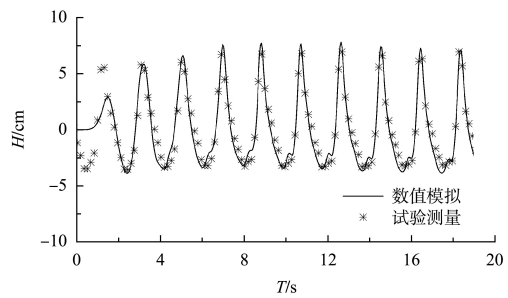
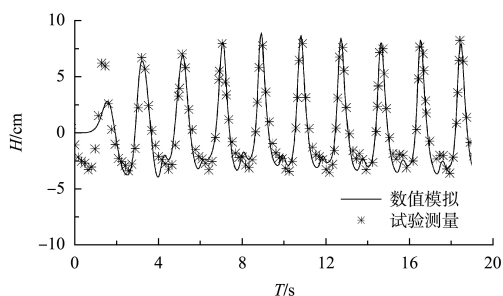


图 4 测点布置位置

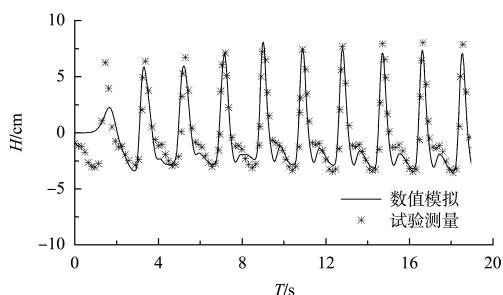
Fig. 4 Layout sensors



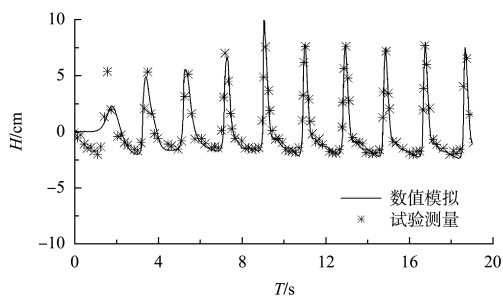
a) WG₁



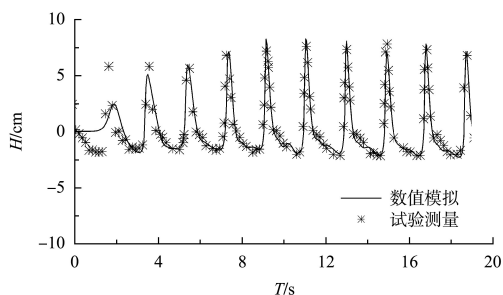
b) WG₂



c) WG₃



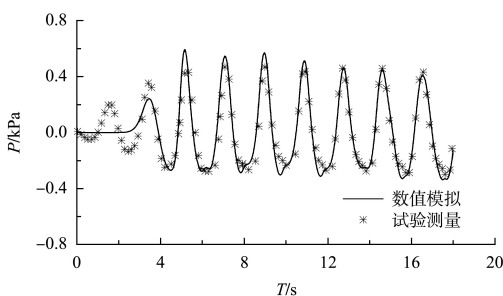
d) WG₄



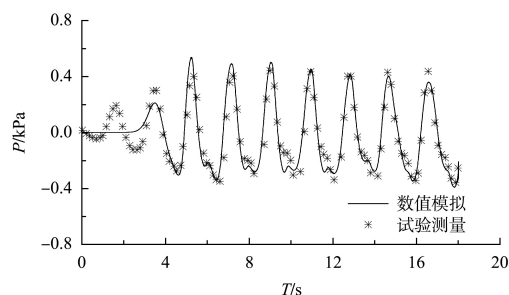
e) WG₅

图5 数值模拟波浪验证

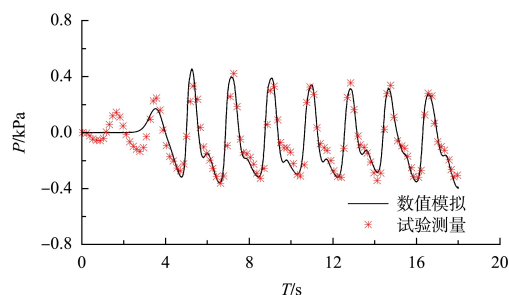
Fig. 5 Wave verification based on numerical simulation



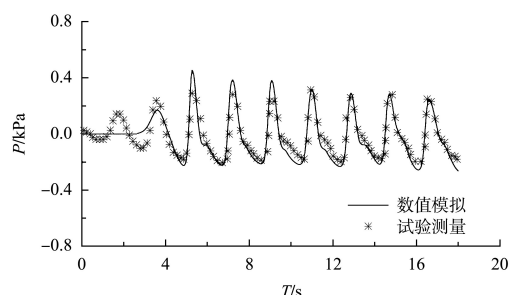
a) 1#



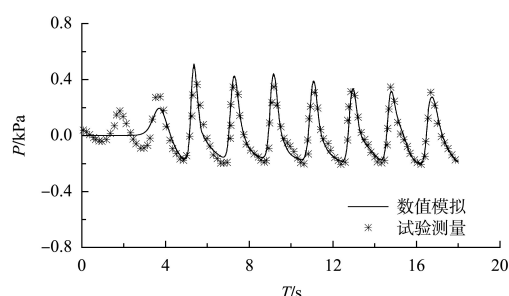
b) 2#



c) 3#



d) 4#



e) 5#

图6 数值模拟结构点压力验证

Fig. 6 Pressure verification on structure based on numerical simulation

1.4 影响因素分析与模拟组次

研究主要考虑无量纲量波陡 d/L 、相对波高 H/d 、相对淹没水深 d_1/d 和结构开孔率 ε 的影响, 其中 d 为提前水深、 L 为波长、 H 为波高、 d_1 为

堤顶淹没水深。记单位长度的防波堤模型所受的水平波浪总力为 F_h , 向岸方向的总力为 F_{h+} , 其峰值为向岸最大水平力 $F_{h+,max}$, 反之为离岸方向总力 F_{h-} 和离岸最大水平力 $F_{h-,max}$, 无因次水平波浪力为 $F_h/\rho g H d$ 。表 1 为模拟计算组次。计算防波堤抗滑移稳定系数分析水下半圆堤的抗滑移稳定特性为:

$$K_s = f(\gamma_c G + \gamma_v F_v) / \gamma_h F_h \quad (3)$$

式中: G 为静水中单位长度半圆堤的重度(水下重力密度取 14.5 kN/m^3); f 为摩擦系数, 取混凝土和抛石基地之间的摩擦系数 0.6 ; $\gamma_c = 1.0$; γ_v 、 γ_h 为不确定系数, 均取 1.25 。

表 1 数值模拟试验组次
Tab. 1 Numerical simulation sequence

试验组次	水深 h/cm	波高 H/cm	周期 T/s	结构物开孔率 $\varepsilon/\%$
1~6	22.8	8.8	1.9	0、5、10、15、20、25
7~10	26.0、29.2	8.8	1.9	0、10
11~16	22.8	8.8	1.2、1.6、2.4	0、10
17~22	22.8	4、6、10	1.9	0、10

2 试验结果分析

2.1 波浪力特征时刻

图 7 为 $d=22.8 \text{ cm}$, $T=1.9 \text{ s}$, $H=8.8 \text{ cm}$ 的规则波浪作用时, 常规不透水半圆堤堤顶波面过程线、结构所受波浪力和结构抗滑移稳定系数 K_s 的历时变化。淹没在水下的半堤受到的水平力和垂向力呈现较好的周期性, 但两者存在约 35° 的相位差。总体来说, 结构有利稳定的竖向下压力较大, 加之表面压力指向堤心, 后续能注浆抛石增加结构自重, 在完全淹没状态下的稳定性表现仍然良好。图 7 中虚线标注位置为 $K_{s,min}$ 时刻, 可以发现淹没状态下, 淹没式半圆堤滑移最不利时刻 $K_{s,min}$ 基本对应向岸方向最大水平力 $F_{h+,max}$ 出现时刻。由图 7a) 可见此时刻波峰尚未抵达堤顶, 最大波压力并不受波峰控制。淹没状态下的半圆堤结构稳定主要受水平波浪力主导, 而且未对浮托力进行模拟计算, 因此后续仅分析不同因素对水平波浪总力的影响。

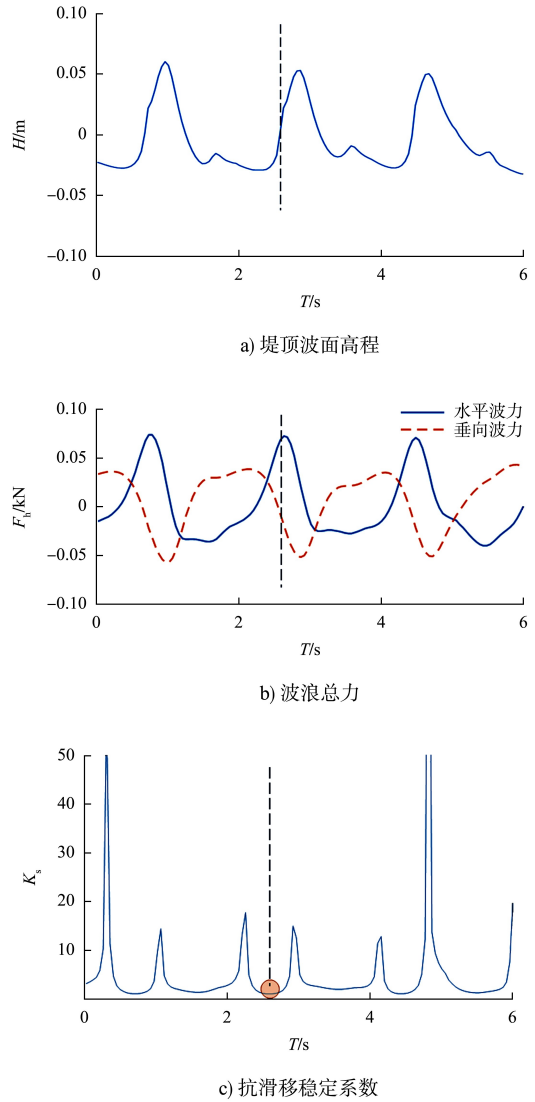


图 7 淹没式半圆堤参数历时变化
($d=22.8 \text{ cm}$, $T=1.9 \text{ s}$, $H=8.8 \text{ cm}$)

Fig. 7 Temporal variation of semi-circular breakwater parameters ($d=22.8 \text{ cm}$, $T=1.9 \text{ s}$, $H=8.8 \text{ cm}$)

图 8 为半圆堤受到 $F_{h+,max}$ 、 $F_{h-,max}$ 时刻下半圆堤堤周波面情况。可见在水下防波堤受到最大水平波浪力时, 波峰尚未抵达半圆堤结构, 迎浪面一侧的水体受到防波堤结构的阻碍壅高显著, 而半圆堤堤顶和堤后侧水体较为平稳。此时半圆堤前后水头差较大。加之由于半圆堤迎浪侧对波浪的阻碍, 水体流速急剧降低导致迎浪面受到正向波压力, 此时水下结构物的水平总力最大, 此刻也基本接近滑移稳定最不利时刻。当波浪到达结构物后, 由于堤前后波浪势能差距降低, 垂向向下的波浪力增加, 抗滑移系数显著增大。在波谷到达堤顶稍前时刻, 半圆堤出现向海的最大水平

力。此时刻的堤后水体回流受阻，半圆堤前后出现明显逆水头差，易出现向海岸的滑移破坏。

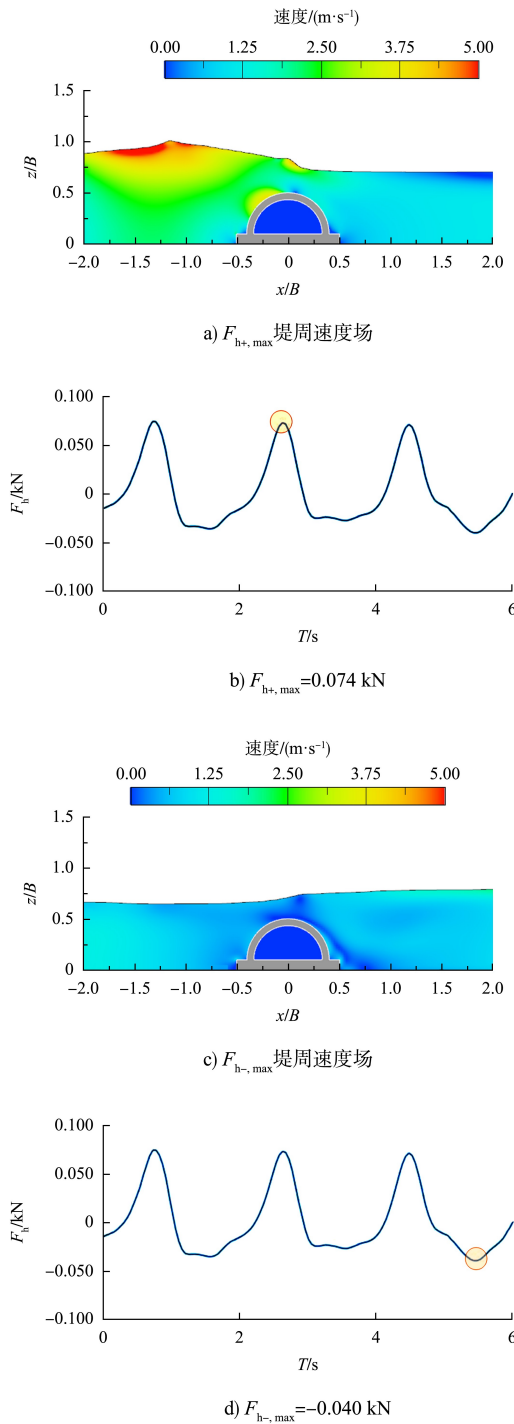


图 8 特征相位时刻下半圆堤堤周速度场
($d=22.8 \text{ cm}, T=1.9 \text{ s}, H=8.8 \text{ cm}$)

Fig. 8 Velocity field around semi-circular breakwater at characteristic moments ($d=22.8 \text{ cm}, T=1.9 \text{ s}, H=8.8 \text{ cm}$)

2.2 结构开孔率对波浪力的影响

图 9 为不同开孔率的淹没式半圆堤所受的总水平力历时变化情况。可以发现，壁面开孔的半圆堤所受波浪力仍具有较好的周期性。随着结构开孔率的增加， F_h 幅值减小，且不同开孔率结构所受水平力存在相位差，每增大 5% 开孔率，相位提前约 1.8° 。当结构物开孔率进一步增大 ($\varepsilon > 15\%$)， F_h 波谷位置的历时曲线更加平坦，次生峰的平台段丧失，这说明水下结构物具有足够高的透水性后，将显著改善波谷时刻半圆堤附近水体回流特性。

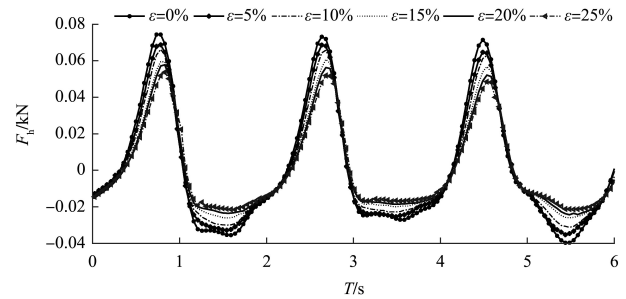


图 9 不同开孔率下淹没式半圆堤总水平力历时变化
($d=22.8 \text{ cm}, T=1.9 \text{ s}, H=8.8 \text{ cm}$)

Fig. 9 F_h variation around semi-circular submerged breakwater under different ε
($d=22.8 \text{ cm}, T=1.9 \text{ s}, H=8.8 \text{ cm}$)

图 10 为开孔率 ε 对最大无因次水平波浪力的影响。防波堤结构所受最大水平波浪力随开孔率增大而减小，随着半圆堤表面的开孔率从 0% 增大到 25%，单位宽度半圆堤受到的向岸方向的无因次最大水平力降幅为 27.8%，离岸方向降幅则为 39.8%。向岸方向最大水平力数值的减小幅度略大于开孔带来的结构表面积降低幅度，说明开孔对水下开孔半圆堤总力产生的影响主要在于受力面积的改变。同时离岸波浪力较高的数值降幅，也说明半圆堤开孔后对结构抗滑移有益，即表面的孔洞加强了港内外水体交换，减小了堤前反射波和堤周水体势能差异，使得结构离岸总力进一步降低。

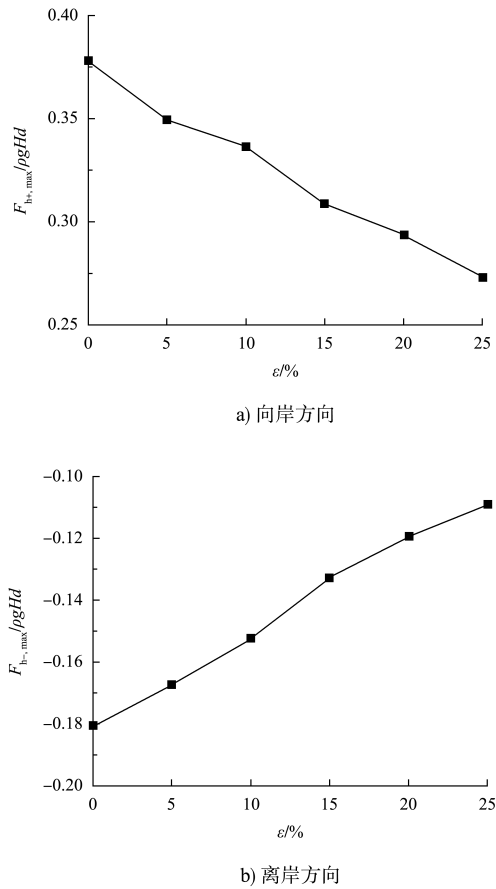


图 10 半圆堤开孔率对无因次最大水平力的影响
 ($d=22.8\text{ cm}, T=1.9\text{ s}, H=8.8\text{ cm}$)
 Fig. 10 Influence of ε on $F_{h,max}/\rho g H d$
 ($d=22.8\text{ cm}, T=1.9\text{ s}, H=8.8\text{ cm}$)

2.3 相对波高对波浪力的影响

图 11 为结构不开孔和开孔率为 10% 的半圆堤最大无因次水平力随相对波高改变的变化情况。随着相对波高的增加, 防波堤受到的无因次水平力呈下降趋势。在 $H/d = 0.175 \sim 0.386$ 的范围内, $F_{h+,max}/\rho g H d$ 基本随着相对波高保持线性变化。对于不开孔的防波堤而言, 当相对波高 H/d 从 0.175 增大至 0.386 时, 最大无因次水平力降低了 19.5%, 而在结构开孔后, 这一降幅减小为 10.1%。随着相对波高的进一步增大, 半圆堤堤身受到的 $F_{h+,max}$ 随相对波高的变幅均变缓, 这与较高波高波浪经过结构物后, 直接在水下半圆堤堤顶上方破碎有关, 水汽掺混带来了额外的能量耗散。半圆堤的开孔构造同样削弱了结构受到的离岸方向水平力峰值。随着波高增大, 堤身所受的 $F_{h-,max}$ 随 H/d 的变幅略有减小。对于有量纲数

值而言, 随着波高增大, 离岸方向的最大水平力增大幅度放缓, 这与波浪透射特性相关: 当水深固定而波浪波高增大时, 淹没式半圆堤发挥的消浪能力增强, 传递到堤后的波能比例发生改变, 结构离岸水平力随相对波高的增长幅度减缓。

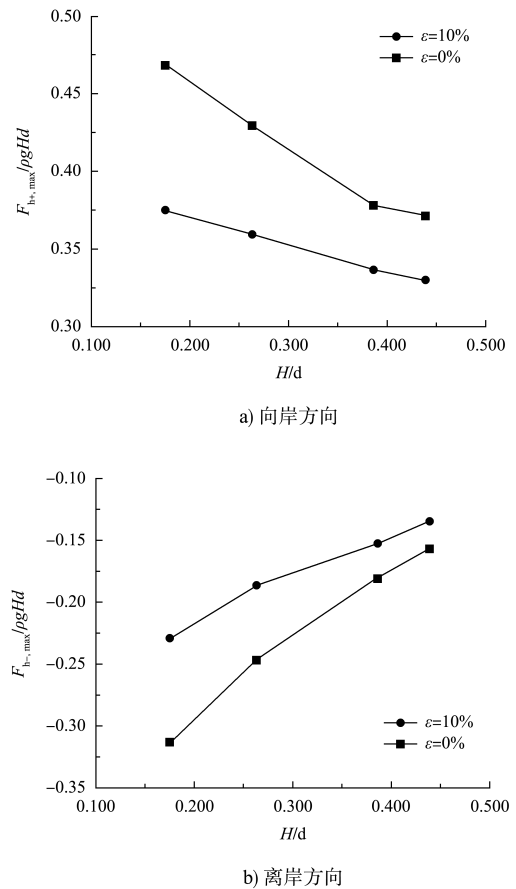


图 11 相对波高对无因次水平力的影响
 ($d=22.8\text{ cm}, T=1.9\text{ s}, d_1/d=0.34$)
 Fig. 11 Influence of H/d on $F_{h,max}/\rho g H d$
 ($d=22.8\text{ cm}, T=1.9\text{ s}, d_1/d=0.34$)

2.4 相对水深对波浪力的影响

固定水深 $d=22.8\text{ cm}$ 波高 $H=8.8\text{ cm}$, 仅改变波浪周期 $T=1.2, 1.6, 1.9, 2.4\text{ s}$, 图 12 为结构所受无因次最大水平力随相对水深 d/L 的变化情况。在试验范围内, 随着相对水深的增加, 向岸方向的无因次最大水平总力呈下降趋势, 而离岸方向的无因次最大水平总力在持续增大。当相对水深 d/L 从 0.142 降低至 0.065, 不开孔和开孔防波堤的向岸最大无因次水平力降幅为 6.2% 和 12.6%, 对于离岸方向, 增幅分别为 28.8% 和 36.7%。对于开孔的半圆堤而言, 2 个方向的水平

力差异在于当作用波浪的波长较长 ($d/L > 0.084$) 时, 离岸方向总力的降幅随着波陡的变化呈相对线性。而图 12a) $d/L = 0.142$ 工况中, 此时波浪周期为 1.2 s, 在短周期波浪作用下, 开孔结构能在波峰经过时透水紊动消能, 显著降低向岸无因次水平总力。在图 12b) 中, 离岸方向的无因次最大水平总力在持续增大, 即随着波浪周期的增加, 离岸方向的水平总力略有减小。相较于短周期波浪, 在较长周期波浪作用下, 图 8 所示特征时刻下堤前后波面势能差异更小, 导致离岸受力程度减弱。

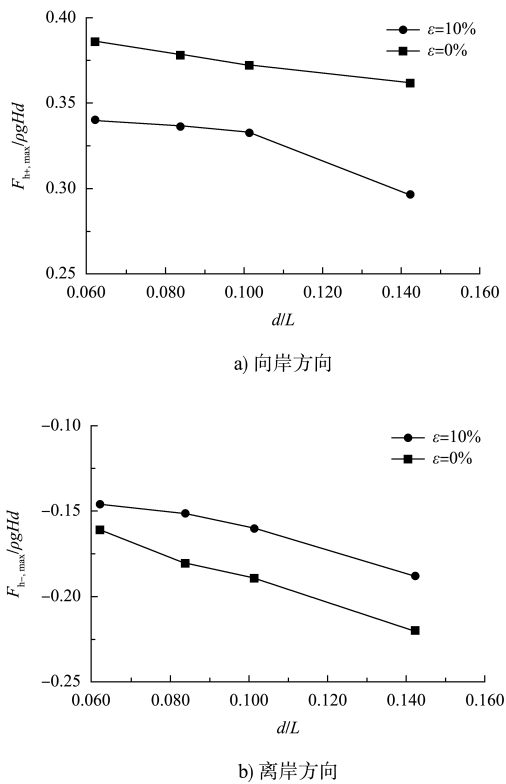


图 12 相对水深对半圆堤无因次水平力的影响 ($d = 22.8 \text{ cm}, H = 8.8 \text{ cm}$)

Fig. 12 Influence of d/L on $F_{h,max}/\rho g H d$ ($d = 22.8 \text{ cm}, H = 8.8 \text{ cm}$)

2.5 淹没程度对波浪力的影响

固定波浪高度 $H = 8.8 \text{ cm}$, 波浪周期 $T = 1.9 \text{ s}$, 改变水深研究淹没程度对半圆堤最大水平总力的影响。图 13a) 为相对水深对半圆堤所受向岸方向最大水平力的影响。随着相对淹没水深从 0.342 增大到 0.486, 不透水半圆堤受到的向岸无因次最大水平力下降了 16.4%, 开孔的半圆堤最大受力

下降了 10.7%。且半圆堤离岸方向的无因次水平力在持续增大, 不透水和开孔半圆堤的受力增幅分别为 21.6% 和 26.0%。水深增大后, 淹没式半圆堤消浪效果减弱, 主要带来影响包括: 1) 水深增大后, 淹没式半圆堤受到的向岸冲击力降低; 2) 透射到背浪面的波浪能量更大, 由于同步波压力分布特征的改变, 极端淹没情况下的淹没式半圆堤离岸滑移的危险程度迅速上升。

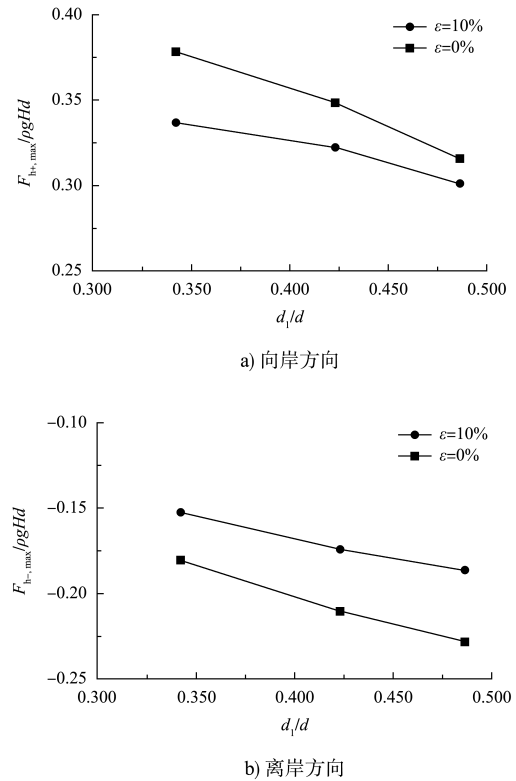


图 13 相对淹没水深对半圆堤无因次水平力的影响 ($T = 1.9 \text{ s}, H = 8.8 \text{ cm}$)

Fig. 13 Influence of d_1/d on $F_{h,max}/\rho g H d$ ($T = 1.9 \text{ s}, H = 8.8 \text{ cm}$)

2.6 波浪总力结果对比

Tanimoto et al. [15] 修正了适用直立堤的合田良实公式, 用以计算半圆堤的波浪力。谢世楞发现此公式主要适合出水堤情况, 为满足淹没水深较大的半圆堤受力计算要求, 在此基础加入了相位修正系数, 计算过程如图 14 所示。通过沿弧面积分的方法, 即可得到半圆堤水平向的最大波浪力。表 2 总结了本研究的模拟计算值与谢世楞公式计算值, 得到不开孔透水半圆堤水平总力的对比结果。在较小淹没水深下, 模拟计算较短周期的结

构波浪力略大于经验公式预测, 周期增大后, 模拟数值则均小于预测值。此种淹没程度下, 2种方法得出的结果较为接近。但对于淹没水深较大时, 尤其对于较长周期的波浪作用, 经验公式做出了较明显的保守估计, 尤其在半圆堤开孔后, 经验公式将进一步高估结构受到的水平总力。

表2 不开孔半圆堤水平总力结果对比 (1:25 模型尺度)
Tab.2 Comparison of F_h for non-perforated semi-circular breakwater (1:25 model scale)

d/cm	H/cm	T/s	模拟计算值 $F_h/(N \cdot m^{-1})$	谢世楞公式计算值 $F_h/(N \cdot m^{-1})$
22.8	4.0	1.9	41.9	48.9
22.8	6.0	1.9	57.6	59.4
22.8	8.8	1.9	74.4	89.0
22.8	10.0	1.9	83.0	91.4
22.8	8.8	1.2	71.2	60.7
22.8	8.8	1.6	73.2	80.9
22.8	8.8	2.4	78.0	118.9
26.0	8.8	1.9	68.6	86.0
29.2	8.8	1.9	62.1	82.9

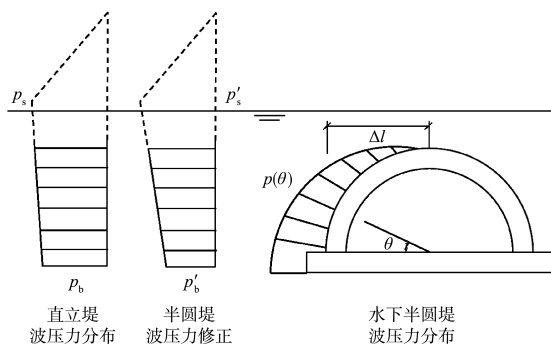


图14 谢世楞公式计算示意 (淹没式半圆堤波压力)
Fig.14 Calculation schematic of Xie shileug formula (wave force on submerged semi-circular breakwater)

3 结论

1) 在较长周期浅水波作用下, $d_1/d=0.34$ 时, 水下半圆堤结构受到的水平总力和垂向总力约存在 35° 的相位差, $F_{h^+,max}$ 出现时刻基本对应结构滑移危险 $K_{s,min}$ 时刻。

2) 随着 ε 从 0% 增大到 25%, 水下半圆堤结构受到的向岸和离岸方向无因次水平力峰值分别减小了 27.8% 和 39.8%, 且在开孔范围内随开孔率的变化基本呈线性。

3) 波浪周期减小和淹没水深增大时, 淹没式半

圆堤离岸滑移可能性增大, 滑移方向易发生改变。

4) 经验公式对于长周期、极端淹没条件下的不开孔半圆堤总力做出了保守估计, 并将进一步高估壁面开孔后的水下半圆堤所受的波浪力。

参考文献:

- [1] 国家海洋信息中心. 2017 年中国海平面公报[R]. 天津: 国家海洋信息中心, 2017.
National Marine Data and Information Service. China Sea Level Bulletin 2017[R]. Tianjing: National Marine Data and Information Service, 2017.
- [2] EVANS P, RANASINGHE R. Artificial Surfing Reefs: A New Paradigm in Coastal Protection?[C]//Coasts & Ports 2001: Proceedings of the 15th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference, the 8th Australasian Port and Harbour Conference, Canberra: Institution of Engineers, Australia: [s. n.], 2001: 128.
- [3] DHINAKARAN G, SUNDAR V, SUNDARADIVELU R, et al. Dynamic pressures and forces exerted on impermeable and seaside perforated semicircular breakwaters due to regular waves [J]. Ocean engineering, 2002, 29 (15): 1981-2004.
- [4] DHINAKARAN G, SUNDAR V, SUNDARADIVELU R, et al. Hydrodynamic characteristics of seaside perforated semicircular breakwaters due to random waves[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2008, 134(4): 237-251.
- [5] DHINAKARAN G, SUNDAR V, SUNDARADIVELU R, et al. Effect of perforations and rubble mound height on wave transformation characteristics of surface piercing semicircular breakwaters[J]. Ocean engineering, 2009, 36 (15/16): 1182-1198.
- [6] 范期锦, 李乃扬. 长江口二期工程北导堤局部破坏的原因及对策[J]. 中国港湾建设, 2004(2): 1-8.
FANG Q J, LI N Y. The reasons & countermeasures for North Bank's part failure in the second phase regulation project of Yangtze Estuary[J]. China harbour engineering, 2004(2): 1-8.
- [7] 谢世楞. 淹没情况下半圆型导堤上的波浪力[J]. 港工技术, 1998(2): 1-5.
XIE S L. Wave force acting on a submerged semi-circular

- jetty[J]. Port engineering technology, 1998(2): 1-5.
- [8] 边峰, 黄哲, 琚烈红. 不同结构形式潜堤消浪性能物理模型试验研究[J]. 水运工程, 2020 (8): 36-41, 58.
BIAN F, HUANG Z, JU L H. Physical model test study on wave resistance performance of submerged breakwaters with different structure forms [J]. Port & waterway engineering, 2020(8): 36-41, 58.
- [9] 胡宝琳, 姚文娟, 刘逸敏, 等. 波浪荷载对半圆型潜堤作用的数值分析[J]. 水利水运工程学报, 2013(3): 38-44.
HU B L, YAO W J, LIU Y M, et al. Numerical analysis of wave load on a submerged semi-circular breakwater[J]. Hydro-science and engineering, 2013 (3): 38-44.
- [10] YOUNG D M, TESTIK F Y. Wave reflection by submerged vertical and semicircular breakwaters [J]. Ocean engineering, 2011, 38(10): 1269-1276.
- [11] JIANG X L, ZOU Q P, ZHANG N. Wave load on submerged quarter-circular and semicircular breakwaters under irregular waves [J]. Coastal engineering, 2017, 121: 265-277.
- [12] 蒋学炼, 郝敏霞, 杨天, 等. 波浪场中弧面潜堤与矩形潜堤的涡流结构[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(3): 614-622.
JIANG X L, HAO M X, YANG T, et al. Vortex evolution around submerged quartercircular and rectangular breakwaters due to water waves [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(3): 614-622.
- [13] 厉泽逸, 刘均卫. 长周期波大输沙量条件下海港平面布置方案[J]. 水运工程, 2023(2): 58-64.
LI Z Y, LIU J W. General layout scheme of harbor under condition of long-period wave and large sediment discharge[J]. Port & waterway engineering, 2023 (2): 58-64.
- [14] LIU P L. Advances in coastal and ocean engineering[M]. 5th ed. World scientific, 1999.
- [15] TANIMOTO K, TAKAHASHI S. Design and construction of caisson breakwaters: the Japanese experience [J]. Coastal engineering, 1994, 22(1/2): 57-77.
- (本文编辑 赵娟)

(上接第 16 页)

- [6] 王少渤, 逯跃锋, 闻俏, 等. 遥感技术在内河航运中的应用与发展分析[J]. 地理空间信息. 2022, 20(9): 98-101.
WANG S B, LU Y F, WENQ, et al. Application and development analysis of remote sensing technology in inland river shipping [J]. Geospatial information. 2022, 20(9): 98-101.
- [7] 张俊杰, 孟俊. 北斗卫星导航系统在内河航运监管服务中的应用与展望[J]. 卫星应用, 2022(7): 57-61.
ZHANG JJ, MENG J. Application and prospect of Beidou satellite navigation system in inland river shipping supervision services [J]. Satellite applications, 2022 (7): 57-61.
- [8] 王新田, 马慧卿, 万军, 等. 流域船闸群一体化调度系统设计与实践[J]. 水运工程, 2024(7): 210-216.
WANG X T, MA H Q, WAN J, et al. Design and practice of integrated scheduling system for ship lock group in river basin [J]. Port & waterway engineering, 2024 (7): 210-216.
- [9] 陈德山, 范腾泽, 元海文, 等. 内河航运系统监管技术现状与展望[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6): 1-14.
CHEN D S, FAN T Z, YUAN H W, et al. Review and prospect system operation supervision technology of inland river navigation system [J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2022, 22(6): 1-14.
- [10] 王鹤翔. 江苏内河航道信息化服务研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2019.
WANG H X. The research on the information service of inland waterway in Jiangsu Province [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2019.
- [11] 赵建豪, 秦斌, 邬德宇. BIM 技术与智慧工地在内河航道整治工程中的综合应用[J]. 水运工程, 2022 (3): 139-145.
ZHAO J H, QIN B, WU D Y. Comprehensive application of BIM technology and intelligent construction sites in inland waterway regulation works [J]. Port & waterway engineering, 2022 (3): 139-145.
- (本文编辑 王传瑜)