

防波堤局部冲刷问题研究综述

孙波^{1,2}, 俞舒展^{2*}, 唐磊², 张磊³

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 南京水利科学研究院河流海岸研究所, 江苏 南京 210029; 3. 保利国际控股有限公司, 北京 100010)

摘要: 防波堤在抵御波浪、保护岸线和维持港内水域稳定方面具有至关重要作用。在水流和波浪等动力因素作用下, 防波堤堤身和堤头附近的泥沙易发生起动或悬浮, 进而在防波堤周围形成冲刷坑。冲刷坑的存在可能引发护面块体脱落、堤身整体倾覆等问题, 严重威胁防波堤的完整性和结构稳定性, 最终导致其功能丧失。对直立堤与斜坡堤的局部冲刷机理、影响因素、冲刷坑发展过程及冲刷形态、冲刷深度预测方法和冲刷防护措施进行了综述, 归纳当前防波堤局部冲刷研究存在的问题, 并展望未来的研究方向。

关键词: 防波堤; 局部冲刷; 冲刷坑; 冲刷深度预测方法; 局部冲刷防护措施

中图分类号: U656.2; TV148 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2025)02-0001-09

doi: 10.7640/zggwjs202502001

Research review on local scour problems of breakwaters

SUN Bo^{1,2}, YU Shu-zhan^{2*}, TANG Lei², ZHANG Lei³

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China; 2. River and Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China; 3. Poly International Holding Co. Ltd., Beijing 100010, China)

Abstract: Breakwaters play a critical role in resisting wave forces, protecting shorelines, and maintaining the stability of harbour waters. Under the action of dynamic factors such as currents and waves, the sediment around the trunk and head of the breakwater is prone to mobilization or suspension, leading to the formation of scour holes around the breakwater. The existence of scour holes may cause problems such as dislodgment of protective stones or blocks and the potential overturning of the breakwater trunk. Such damage compromises the structure integrity and stability of the breakwater, potentially resulting in its loss of function. The mechanisms of local scour, the influencing factors, development process and morphology of scour pits, prediction method of scour depth, and scour countermeasures of vertical and sloping breakwaters are reviewed. The problems existing in the study of local scour of breakwater are summarized, and future research directions are prospected.

Key words: breakwaters; local scour; scour holes; prediction methods of scour depth; countermeasure of local scour

0 引言

局部冲刷通常是指在水流、波浪或其组合动力作用下, 由于地形变化或结构物的存在, 导致结构物附近底床泥沙发生起动并输移, 形成冲刷坑的现象。海岸工程中的局部冲刷主要出现在桩

基、桥墩、防波堤和海底管线等结构物周边区域。防波堤作为常规港口建筑物, 规模一般长几百米至数公里, 对流体运动的阻碍范围和影响程度大, 同时海洋环境中潮流与波浪动力复杂, 导致堤身和堤头附近海床泥沙极易发生冲刷。

收稿日期: 2024-10-10 修回日期: 2024-11-24

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (52101310); 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 (Y222005, Y223007); 南京水利科学研究院学位论文基金 (Yy224013)

作者简介: 孙波 (1974—), 男, 湖北监利人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事涉海工程水动力和工程泥沙研究。

*通讯作者: 俞舒展, E-mail: 867315089@qq.com

国内外防波堤因局部冲刷导致堤身结构失稳的案例时有发生。日本学者对 128 例防波堤受灾特性分析,指出因堤前海床冲刷导致防波堤失稳占比高达 24.6%^[1]。1995 年,美国文图拉港某分离式防波堤堤前形成深 9.5 m 的冲刷坑^[2]。2011—2013 年,为保护历史名城威尼斯新建的防波堤周围出现了巨大的冲刷坑,截至 2016 年,泥沙冲刷量达到约 17 万 m³^[3]。我国大量防波堤也面临着同样的挑战。黄河三角洲斜坡式结构的孤东海堤,因黄河来水来沙减少,在潮流长期冲刷和暴风浪侵袭下多次发生失稳毁堤事故^[4]。2012 年,我国台湾麦寮港混合式防波堤前的粉沙质海床出现长约 500 m、宽约 100 m、深达 26 m 的巨大冲刷坑^[5]。此外,江苏沿海的大丰港、射阳港和滨海港的防波堤在潮流与波浪的共同作用下,堤头附近均存在不同程度的冲刷,严重危及防波堤结构安全。目前我国大量在役各式防波堤正面临日益加剧的局部冲刷问题,针对此问题开展深入研究显得尤为重要。

本文对防波堤局部冲刷的机理、影响因素、冲刷坑的发展过程及冲刷形态、冲刷深度预测方法和防护措施进行综述,总结现有研究中的经验与不足,探讨该领域研究的发展趋势并提出未来研究的展望。

1 防波堤局部冲刷机理和影响因素

1.1 局部冲刷机理

1.1.1 水流作用

水流作用下,当来流遭遇堤身阻挡,流速相应减缓,堤面压力增加并向堤底减小,形成向下

的压力梯度,出现类似垂直射流的下潜水流。堤前区域产生回旋和马蹄涡流等高速水流,达到泥沙起动流速且挟沙上扬通量超过上游水流携沙向下通量时,局部将发生冲刷,如图 1 所示。

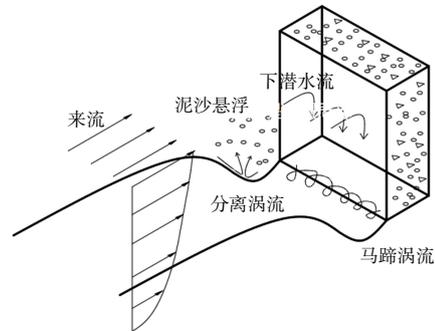


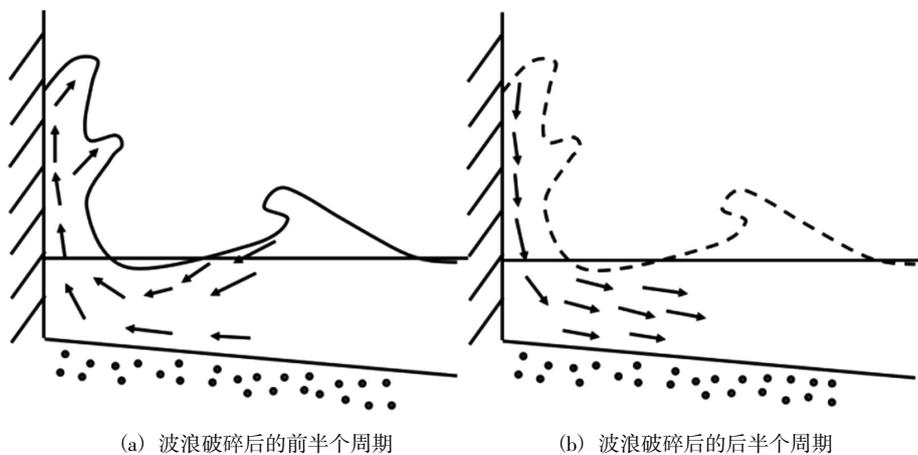
图 1 直立堤前的冲刷示意图

Fig. 1 Schematic of scour before vertical breakwater

堤头绕流促使单宽流量增大而诱发的高速水流达到泥沙起动流速,产生的速度梯度与堤前形成的马蹄涡显著增强床面剪切力。马蹄涡向下游传播和发展,从而持续冲刷床面造成输沙不平衡^[6]。

1.1.2 波浪作用

波浪作用下的防波堤局部冲刷与水流有着显著不同。波浪在堤前反射,进入浅水区后还会发生变形甚至破碎,对海床造成冲击^[7],引起底部剪切力增大,构成了泥沙运动的直接驱动力。如图 2 所示,波浪在堤前约半个波长时破碎后向堤面冲击,随后的半个周期内水体下落并做离堤运动^[8],带走被掀动的泥沙。在海床面以上波浪边界层形成的马蹄涡^[9]能迅速扬起泥沙,尤其在波浪破碎或驻波条件下,会导致泥沙大量悬浮。



(a) 波浪破碎后的前半周期

(b) 波浪破碎后的后半周期

图 2 防波堤前波浪破碎后一个周期内的水流运动

Fig. 2 Wave motion after wave breaking in front of breakwater within one wave period

防波堤堤头附近, 冲刷受涡流结构与波浪破碎同时影响。波浪在堤头绕射后, 每半个周期会在堤头后侧形成尾流涡, 将泥沙卷入并搬运, 随后在远处沉积, 导致堤头周围产生净冲刷^[10], 如图 3 所示。

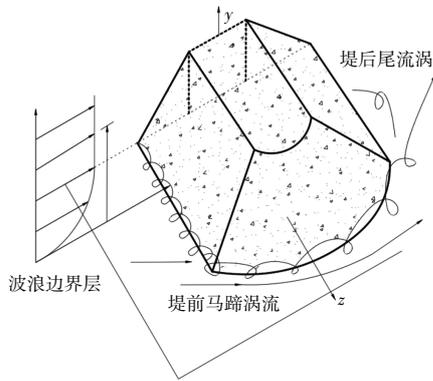


图 3 斜坡堤周围的马蹄涡及尾流涡

Fig. 3 Horseshoe vortices and wake vortices adjacent to sloping breakwater

1.1.3 波流共同作用

波流共同作用下, 两者叠加效应增强了流体对海床的剪切力和压力, 水流受到波浪干扰, 其自由面发生倾斜和波动, 影响水质点运动速度和轨迹, 从而促进泥沙的起动。Sumer 等^[11]发现波流共同作用下, 波浪显著改变涡流结构, 增强马蹄涡的强度和持续时间, 这一过程随着 $U_{cw}=U_c/(U_c+U_M)$ 的增大而加强 (U_{cw} 为波流相对速度, 范围为 0~1; U_c 为水流流速; U_M 为波浪底部最大轨迹速度), 此时流场、涡流结构与泥沙运动模式均发生变化, 在波浪破碎时尤为明显。

Sumer 的水槽试验结果显示, 不同水动力作用下的冲刷深度关系为: 纯水流>波流共同作用>纯波浪, 波浪仅起到加速冲刷平衡的作用^[12]。而另一些试验研究发现, 波流共同作用下的冲深为最大^[7,13]。这些试验研究结果的差异, 可能受波浪引起的回淤或水流与波浪传播同向异向叠加等多种因素影响。鉴于此, 波流共同作用下的局部冲刷机理尚需开展更为深入的研究。

1.2 影响因素

在众多影响防波堤局部冲刷的因素中, 现有研究主要集中探讨了防波堤设计参数、海床泥沙特性和水动力变化。多重因素的综合考量对于深入理解防波堤的冲刷机制至关重要, 表 1 对主要影响因素及其相关性进行了归纳。

表 1 影响防波堤冲刷深度的主要因素

Table 1 Main factors influencing the depth of scour around breakwaters

影响因素	相关性	
防波堤设计参数	堤身坡度	正相关
	孔隙率	负相关
	平面布置角度	固定范围内相关
	堤头形状	尖锐的形状冲深更大
	堤头宽度	负相关
泥沙参数	黏性沙与无黏性沙	与黏性、粒径、沙床密实程度等相关
	粒径	负相关(存在争议)
	不均匀系数	负相关
水动力参数	水深	小水深正相关且存在阈值
	流速	正相关
	规则波、不规则波	规则波作用冲深更大
	波浪是否破碎	破碎波作用冲深更大
	波高	正相关(存在阈值)
	波周期	正相关
	波长	正相关
	反射系数	正相关

1.2.1 防波堤设计参数

同种条件下斜坡堤的冲刷深度小于直立堤, 且冲刷深度随着坡度变缓而减小, Sumer 指出边坡角度由 45° 减小到 30° 可使冲深减半^[14]。Sumer 进行了 60° 、 90° 和 120° 入射波对冲深的影响试验, 显示冲深随着角度的增大而减小。存在孔隙率的防波堤, 孔隙透流会影响水流结构和波浪能量传递^[15], 有助于减轻堤前冲刷, 但同时也可能加剧堤后冲刷。堤头形状会影响冲刷深度及最大冲深出现的位置, 尖锐形状相较于圆形堤头易导致更深的冲刷^[14,16]。堤头宽度对冲刷深度亦有重要影响, 如图 4 所示(Sumer 等^[14]), S 为冲刷深度, 随着堤宽的减小, KC 数^[17] ($KC=U_M T_p/B$, T_p 为波浪谱峰周期; B 为堤头宽度) 增大, 相对冲深明显增加^[14,18]。

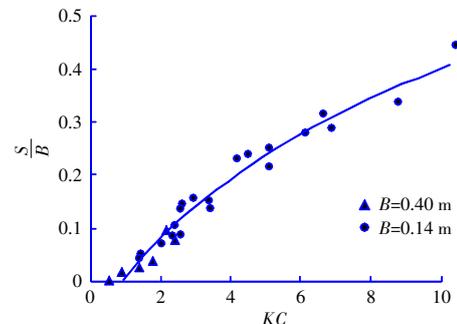


图 4 直立堤堤头与 KC 数相关的局部冲深曲线

Fig. 4 Local scour depth curve related to KC of vertical breakwater

1.2.2 泥沙参数

冲刷发生的直接原因在于泥沙的起动与运输。泥沙类型、粒径、不均匀性等都是影响冲深的因素。黏性沙颗粒存在范德华力和静电力等黏结力作用^[19]，泥沙起动需要相对较强水动力，故同等条件下无黏性沙更易发生冲刷，Chen等^[20]发现桩基周围的固结粉沙比松散粉沙的冲深减少40%。Escarameia等^[21]的潮流冲刷与赵明^[22]的波浪冲刷试验分别采用0.44 mm、0.75 mm与0.1~0.4 mm的均质沙，发现同种泥沙类型下粒径对于冲刷形态和深度的影响较小；但Temel等^[23]的数模结果显示，1.85 mm粒径的堤前泥沙冲深小于0.55 mm。波浪作用下泥沙粒径对冲刷产生的影响与泥沙悬浮特性及传质速度的分布密切相关^[24]。泥沙不均匀系数反映了泥沙颗粒大小的分散程度，同等条件下冲刷深度随不均匀系数的增加而减小^[25]。

1.2.3 水动力参数

防波堤堤前水深、流速，波浪类型、波要素、反射系数对冲刷均有不同影响。Gislason等^[26]建立三维冲刷数学模型，发现平衡冲深随水深波高比增加而减小，但水深超过某阈值时则不再相关。水流达到泥沙起动流速是引发冲刷的根本原因，流速与临界起动流速比值越大，冲深越大，达到平衡冲深时间也越长^[27]。波浪作用增加局部冲刷机理的复杂性，不规则波作用下的冲深相较于规则波有所减少^[28]；邹俊飞^[29]定性分析了波要素对冲深的影响，波周期的影响大于波高，周期增加使得冲深变大。堤前的波浪反射对于冲刷的影响不可忽视，Yeganeh-bakhtiary等^[30]、Pourzangbar等^[31]指出冲深随着波浪反射系数的增加而变大。此外，堤前有驻波形成、波浪发生破碎都会导致冲刷加深。在研究波流共同作用对防波堤局部冲刷影响时，还必须综合考虑水流、防波堤类型及局部地形对入射波浪带来的变化。

1.2.4 其他因素

除上述因素外，防波堤周边陡峭的局部海底地形^[32]，海床坡度^[8]、软土地基^[33]、分层泥沙^[34]，波浪越浪都会影响冲刷坑的发展^[35]。特别指出，有些海床在长期地质演变下具有泥沙分层现象，目前对于分层泥沙冲刷的研究相对较少，防波堤附近分层泥沙冲刷机理及其工程防治措施需要关注。

2 局部冲刷发展过程及冲刷形态

局部冲刷过程根据冲刷坑的变化可分为3个

主要阶段：冲刷起始阶段，泥沙刚刚起动，涡流尺度较小且数量少，但冲刷能力最强；主要冲刷阶段，随着冲深增加，涡流输沙变弱，冲刷发展速度逐渐减慢；冲刷平衡阶段，冲坑中输入与流出的泥沙颗粒数量相等，或冲坑底部流体剪切力与临界切应力相等，达到动态平衡状态，冲刷发展较为缓慢^[36-37]。冲刷坑在水平与垂直方向的几何尺寸虽随时间变化，但边坡基本保持不变^[38]。

波浪作用下的堤后冲刷位置一般位于堤头后侧与堤身主干交界处。堤头前最大冲深位置受 KC 数影响^[10]， KC 数较小时冲刷范围小，最大冲深紧靠堤头内侧。

冲刷坑形态可按照波浪破碎位置、水体含沙量、泥沙重力特性和入射波强度进行划分。近破波、远破波和驻波一般对应不规则、扇形和垂直于波浪传播方向平行沙纹的不同冲刷形态。在驻波作用时，冲刷坑离堤脚有一定距离，且冲刷在波节位置、沉积在波腹。Xie^[39]、Sumer等^[11]指出堤前悬移质和推移质输沙的冲刷地形分别呈现L形和N形冲刷，且直立堤与斜坡堤前的冲刷沉积模式相似^[28]，高学平等^[8]、陈国平等^[40]也依据泥沙类型将沙质床面的冲刷形态分为相对细沙型、相对粗沙型和粗沙型。海洋环境下堤前泥沙在远处悬扬形成的浑水冲刷，其与堤前清水冲刷的区别也值得深入探究。

3 防波堤局部冲刷研究方法

3.1 现场观测

对防波堤周围的水流、波浪、泥沙输运过程和海底地形变化进行现场观测，获取原型尺度下的数据，对于研究防波堤局部冲刷机理非常重要。依赖声呐、超声波等测量技术，能够直接获取冲刷地形的详细信息。采用无人机与无人船搭载扫描设备，结合水下成像技术，对防波堤周围出现的塌陷深度进行精确观察，近年来正蓬勃发展^[41]开展为期多年的气象、海况、水文及地形调查有助于研究冲刷坑的形成机理及长期发展过程。

3.2 物理模型

物理模型作为研究复杂动力条件下泥沙运动的重要技术手段，研究者们针对建筑物局部冲刷开展了大量室内试验。一般采用局部正态模型试验或比尺延伸的系列模型方法，其中适当的比尺关系和模型沙的选取是试验研究的关键技术。

Xie^[39]、高学平等^[8]、Fredsoe等^[10]、Sumer等^[14]

和 Temel 等^[23]对波浪和水流作用下防波堤周围的冲刷进行了波浪水槽经典模型试验,试验相关信息及关键参数如表 2 所示。Xie、Sumer 等和 Temel 等在试验中发现波浪作用下斜坡堤与直立堤的冲刷机理与单桩结构相似。以上经典模型试

验表明,波浪水槽试验能基本满足冲刷机理、影响因素和冲淤形态的理论研究。对于工程尺度的防波堤局部冲刷机理及其防治措施研究,往往需要通过大范围小比尺的三维港池试验,为解决相关工程问题提供思路和方法。

表 2 防波堤局部冲刷波浪作用下经典试验及关键参数
Table 2 Classical experiments and key parameters for local scour of breakwaters under wave action

作者	结构类型	水动力类型	关键参数	水槽参数(长×宽×高)
Xie	直立堤	立波、少数不规则波	水深 0.45 m、0.55 m、0.65 m; D_{50} 为 0.106 mm、0.150 mm、0.200 mm、0.780 mm; 波高 0.050~0.090 m	38.0 m×0.8 m×0.6 m 46.0 m×0.8 m×1.0 m
高学平等	直立堤	立波	水深 0.25 m、0.30 m、0.35 m; D_{50} 为 0.350 mm、0.450 mm、0.550 mm、1.140 mm; 波高 0.07~0.102 m	35.0 m×0.5 m×0.75 m
Fredsøe 等	直立堤	规则波、波流联合	水深 0.40 m; D_{50} 为 0.170 mm; 堤长宽比 0.71、1.4、3.6、0.4; 水流流速 0.1 m/s	26.5 m×0.8 m×0.6 m 28.0 m×4.0 m×1.0 m
Sumer 等	抛石堤	不规则波	水深 0.4 m; D_{50} 为 0.19 mm; 波高 0.139 m、0.145 m、0.161 m、0.176 m; 堤坡度 1:1.5、1:1	26.5 m×0.8 m×0.6 m 28.0 m×4.0 m×1.0 m
Temel 等	抛石堤	规则波、随机波、立波	水深 0.55 m; D_{50} 为 0.550 mm、1.850 mm; 堤坡度 1:1.50、1:1.75	33.0 m×1.6 m×1.2 m

3.3 数值模拟

计算流体力学(CFD)模拟是研究防波堤局部冲刷的另一重要手段,具有可重复性好、便于敏感参数分析等优点。学者们采用不同湍流模型模拟防波堤局部冲刷。

Tseng 等^[32]、Acharya^[42]构建了三维湍流数值模型,选择 RNG k- ϵ 进行湍流闭合,模拟了防波堤底部的冲刷机制,定量分析堤周围的纵向、横向和垂直平面的湍流场,后者发现不同模型的湍流特性具有显著差异。Gislason 等^[26]、Karagiannis 等^[18]选择 SST k- ω 湍流模型研究斜坡堤与直立堤前的冲深。Hajivalie 等^[43]建立二维欧拉-拉格朗日两相流模型, Yeganeh-bakhtiary 等^[44]采用亚粒子尺度(SPS)湍流模型,研究了直立堤前的冲刷。以上数值研究表明,湍流模型的选取会直接影响冲刷计算的结果。其中潮流主导下不同湍流模型对冲刷结果的影响较小;波浪作用下, SST k- ω 湍流模型更为适用,因其能精确模拟近壁区域的流动,并且在射流和混合层中的模拟效果更佳。

工程研究中常用 k- ϵ 湍流模型或 RNG k- ϵ 模型,一般结合现场监测资料或水槽、港池试验成果,采用平面二维水沙模型计算分析防波堤局部冲淤状况。大涡模拟(LES)能更好地捕捉非定常流动^[45],但研究防波堤等大型工程需极高的计算资源。其他数值模拟方法如浸没边界法通过细化局部网格的最佳尺寸以捕捉湍流特性,若能同时

考虑复杂泥沙边界的处理,在未来研究中存在应用前景^[46-47]。

4 最大冲刷深度计算公式

4.1 冲刷深度经验公式

冲刷深度的准确预测对于防波堤结构稳定性、使用寿命等方面具有重要作用。冲刷深度预测方法包括经验公式法、量纲分析与回归分析、假验证法、机器学习法、神经网络模型等,其中经验公式法在预测防波堤局部冲刷深度中被广泛应用。

仅考虑水流对堤前冲深的影响,此类公式类似于丁坝前的冲深,与水流的各项参数紧密相关,已存在大量研究。Pandey 等^[48]总结了水流作用下丁坝的冲深公式并提出以弗劳德数为关键参数的坝前冲深公式: $S_c/l=5.686F_e^{0.276}(h/l)^{0.248}(l/D_{50})^{-0.163}$, 其中 S_c 为坝前平衡冲深; l 为坝长; h 为坝前水深。弗劳德数 $F_e=(V-\alpha V_c)/\sqrt{gl}$, V 为水流行进流速; V_c 为泥沙临界起动流速; α 为丁坝形状系数,直墙式取 0.5; g 为重力加速度。

学者们在不同试验条件下提出了波浪作用的堤前和堤头冲深经验公式,汇总于表 3。其中堤头冲深公式以 Sumer 的成果最具代表性,表中堤头冲深公式分别适用于波浪作用的直立堤、卷破波作用下的斜坡堤,水流或波浪作用的直立桩式防波堤。对堤头冲深的研究,后续研究者一般都基于 Sumer 的经验公式,通过添加不同参数进行改进。

表3 防波堤冲刷深度经验公式
Table 3 Empirical formulae for scour depth of breakwater

冲深位置	防波堤类型	适用范围	公式	作者
堤前冲深	直立堤	立波, 泥沙粒径相对较小(相对细沙)	$Z_m = \frac{C_s H}{(\sinh \frac{2\pi h}{L})^{1.35}}$	Xie ^[39] (1985)
	直立堤	立波, 泥沙为 $D_{50}=0.20\sim 1.14$ mm 的均质沙	$Z_m = 0.065H \frac{L}{h} - 0.25H_{crit}$	高学平等 ^[8] (1994)
	直立堤	不规则波, 泥沙粒径相对较粗(相对粗沙)	$Z_m = \frac{0.026H_{1/3} L_p}{h} - 0.16$	赵子丹等 ^[49] (1998)
	斜坡式抛石堤	规则波与不规则波, 泥沙粒径相对较粗(相对粗沙)	$\frac{Z_m}{H} = \frac{0.3 - 1.77 \exp(-\frac{\alpha}{15})}{[\sinh(\frac{2\pi h}{L})]^{1.35}}$	Sumer 等 ^[28] (2000)
	斜坡堤	立波, 泥沙类型为相对细沙、相对粗沙及其过渡	$Z_m = \frac{0.2H}{[\sinh(\frac{2\pi h}{L})]^{1.35}}$	严恺 ^[50] (2002)
	直立堤、斜坡堤	规则波与不规则波, 适用于粉沙海床	$Z_m = \frac{0.12aH}{[\sinh(\frac{2\pi h}{L})]^{0.8}}$ $Z_m = \frac{0.245aH}{[\sinh(\frac{2\pi h}{L})]^{0.8}}$	吴世强 ^[4] (2005)
	直立式潜堤	规则波, 泥沙为 $D_{50}=0.2$ mm 均质沙	$\frac{Z_m}{H} = \frac{0.06}{(1-C_r)[\sinh(\frac{2\pi h}{L})]^{2.04}}$	Lee 等 ^[51] (2008)
离岸堤	规则波, 沙质海岸	$\frac{Z_m}{B} = 0.001(\frac{D}{L})^{0.385}(\frac{H}{d_{50}}) \ln(\frac{d_w}{h}) + 0.426$	Jiang 等 ^[52] (2016)	
堤头冲深	直立堤	规则波, 无黏性沙	$\frac{S}{B} = 0.5[1 - \exp\{-0.175(KC-1)\}]$	Sumer 等 ^[14] (1997)
	斜坡式抛石堤	规则波, 泥沙为 $D_{50}=0.19$ mm 的无黏性沙	$\frac{S}{B} = 0.04[1 - \exp\{-4(KC-0.05)\}]$	Fredsøe 等 ^[10] (1997)
	斜坡式抛石堤	卷破波, 泥沙为 $D_{50}=0.16$ mm 的无黏性沙	$\frac{S}{H_s} = 0.01(T\sqrt{gH_s}/h)^{1.5}$	Fredsøe 等 ^[10] (1997)
	紧密排列的桩式防波堤	孤立波, $D_{50}=0.25$ mm 无黏性沙	$\frac{S_c}{B} = 1.3[1 - \exp\{-0.738(KC-5.63)\}]$	Xu 等 ^[53] (2019)

注: 1) 堤前冲深公式中, C_s 为泥沙粒度系数, 细沙取 0.3, 粗沙取 0.4; Z_m 为最大冲刷深度函数; H 为驻波波腹波高; $H_{1/3}$ 为有效波高; H_{crit} 为泥沙起动波高; h 为水深; L 为波长; L_p 为谱峰波长; α 为斜坡堤坡度 ($30^\circ\sim 90^\circ$); C_r 为波浪反射系数; D 为防波堤离岸距离; d_w 为防波堤高度; B 为结构物宽度。非变量 $a=2$ 为经验系数。sinh 为双曲正弦函数。
2) 堤头冲深公式中, S 为冲刷深度; S_c 为平衡冲刷深度; H_s 为破碎波高; T 为波浪周期。

4.2 冲深公式分析

上述 Xie 公式在国内外得到广泛应用, 已纳入我国 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[54]。Sumer 在 Xie 的基础上以堤身坡度、泥沙粒径作为关键参数对预测公式进行了拓展, 可用于不同防波堤结构与不同海床粒径等应用场景。图 5 对比了二人的预测公式, 以相对粒径 $((u_{max}-u_{crit})/\omega) \geq 16.5$ 为相对细沙。其中 u_{max} 为水流最大流速; u_{crit} 为泥沙临界起动流速; ω 为泥沙沉降速度) 划分, 相对冲深随水深波长比的增大而减小, 与防波堤坡度正相关, 与泥沙相对粒径负相关。

针对堤前冲深公式, 高学平引入了起动波高概念, 提出适用于驻波作用下的公式; 赵子丹和吴世强分别对不规则波作用和粉沙质海床堤前的

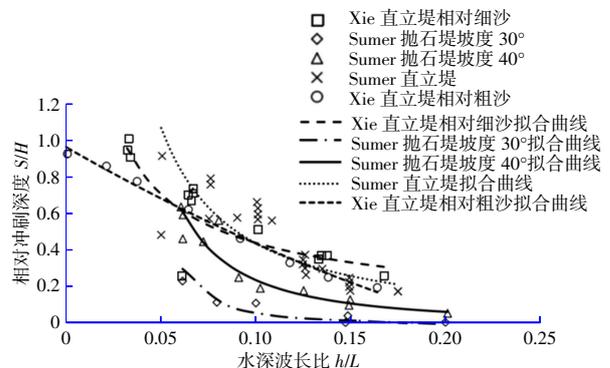


图5 Xie 与 Sumer 直立堤与抛石堤冲深公式对比
Fig. 5 Comparison of scour depth formulae by Xie and Sumer for vertical and the rubble-mound breakwaters

冲深进行预测。Lee 等认为波浪反射系数对潜堤

前冲深的影响最大。Chen 等考虑了泥沙粒径和离岸距离对离岸堤堤前冲深的影响。利用吴世强^[4]关于孤东海堤粉沙质海岸冲刷试验资料,图 6 对比了各公式的预测情况,各式计算的冲刷深度均有随水深波长比先增加后减少的特征。Xie 和高学平公式吻合度较高、计算结果适中,《海岸工程》中斜坡堤公式预测深度偏大,吴世强公式预测结果整体比其他方法偏高且变化区间较大。

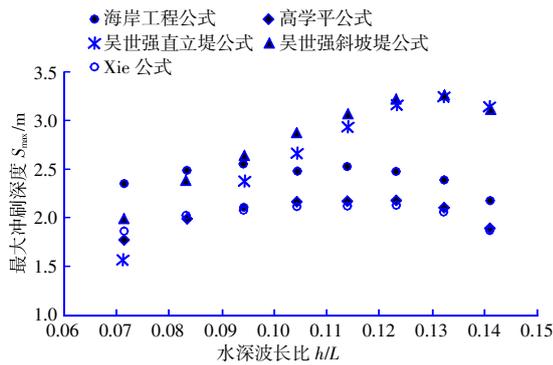


图 6 堤前冲深公式对比(吴世强试验数据)

Fig. 6 Comparison of scour depth formulae using experimental data from Wu shi qiang

波浪作用下堤头冲深公式多以 KC 数为主要参数。Sumer 基于 KC 数提出的公式被后续研究者引用论证^[55]并应用到实际工程^[56]。总的来说,堤头冲深预测公式较少,尚需进一步探讨与扩展研究。

除常规经验分析方法外, Samadi 认为机器学习法(ML)与人工神经网络(ANN)作为人工智能领域核心技术之一,用来预测冲深相比经验方法更为准确^[57]。Pourzangbar 采用向量回归法(SVR)和模型树法(M5')预测了非破碎波下防波堤前的冲刷^[31]。Sharafati 等^[58]采用软计算方法(SC)分析了结构前冲刷深度的经验公式。这些新兴的预测方法在与实际工程情况结合的前提下,值得开展其应用研究。

5 冲刷防护措施

防波堤的冲刷防护可分为主动防护与被动防护。前者旨在减少水流和马蹄涡强度,以削弱作用于海床局部的水动力荷载。被动防护相当于对海床表面泥沙提供物理屏障,以抵抗水力剪切和提高防冲刷能力^[59]。表 4 对比分析了常用的冲刷防护措施。

表 4 冲刷防护措施对比

Table 4 Comparison of scour countermeasures

分类	方法	优点	缺点	经济性	有效性	稳定性
被动防护	块石	易于取材和施工	不环保且需定期修复	好	好	差
	浆砌块石	更加稳定	施工复杂	好	极好	好
	砂肋软体排	造价低且施工方便	自重轻,易被掀起	好	好	一般
	混凝土铰链联锁板	适应地形变化,整体性好	造价高,金属构件易被腐蚀,施工慢	差	好	一般
主动防护	牺牲桩	防冲效果好	造价高,易引起二次冲刷	差	极好	好
	珊瑚礁	有珊瑚礁的海域形成天然防护,易再生	并非所有海域都适用	好	好	好
	海藻等水生植物	生态性好,且成本低	对于强水动力海域不易生存	好	好	一般

防护措施中对抛石防护方法的研究居多。Chiew^[60]分析了抛石防护的失效机理,划分为剪切失效、分选失效和边坡失效。对防波堤进行有效防护, Sumer 认为抛石防护宽度需大于涡流范围^[10],可与无防护时冲刷坑的宽度一致^[28],并指出抛石防护层数的增加会减小冲深,但在一定层数后效能减弱。Lagasse^[61]对抛石防护进行改良,采用浆砌块石和混凝土块进行防护,获得了更好的防护效果。

Johnson 等^[62]、Yu 等^[63]分析了不同防护措施对防波堤周围海床的防护效果。卢中一等^[64]、李雅婷等^[65]进行工程模拟试验,结果表明防护措施能

有效减少堤身和堤头的冲深。Den Bieman 等^[66]认为防护方法的透水性对冲刷有较大影响,采用非透水与透水结构结合的布置形式能有效减少冲刷。

6 结语

目前对于水流作用下防波堤的局部冲刷机理得到了充分研究,波浪尤其是破碎波作用以及波浪共同作用的冲刷机理还需深入探讨。从泥沙类型及粒径对于冲深的影响分析中可知,针对黏性沙海岸、粉沙质海岸的防波堤冲刷研究较少。

现有根据试验资料总结的直立堤和斜坡堤堤前冲深经验公式可基本满足工程设计的预测需求。新兴的人工智能技术与具体工程结合是未来发展

的研究方向。

数值模拟和物理模型试验仍将是重要的技术手段,防波堤局部冲刷数值模拟的研究成果相对较多,大尺度物理模型试验研究较少。对于直立堤和斜坡堤的局部冲刷研究,可将以下方面作为未来展望:

1) 波浪耦合作用下防波堤堤头水流结构、水动力与海床泥沙运动的内在耦合机制,仍需精细的数值模拟与物理试验相结合来提升理论水平和工程应用的模拟精度。

2) 对于地质条件复杂的实际工程,如表层较薄淤泥层、下层为粉沙的分层泥沙冲刷模拟研究较少,可根据江苏废黄河口海域、台湾麦寮港防波堤等典型案例开展深入研究。

参考文献:

- [1] 李炎保,吴永强,蒋学炼.国内外防波堤损坏研究进展评述[J].中国港湾建设,2004,24(6):53-56.
LI Yan-bao, WU Yong-qiang, JIANG Xue-lian. A review of the development of research on breakwater failures at home and abroad [J]. China Harbour Engineering, 2004, 24(6): 53-56.
- [2] HUGHES S A, SCHWICHTENBERG B R. Current-induced scour along a breakwater at Ventura Harbor, CA: experimental study[J]. Coastal Engineering, 1998, 34(1-2): 1-22.
- [3] TOSO C, MADRICARDO F, MOLINAROLI E, et al. Tidal inlet seafloor changes induced by recently built hard structures[J]. PLOS One, 2019, 14(10): e0223240.
- [4] 吴世强.黄河三角洲防波堤(孤东海堤)堤前海域最大冲刷深度研究[D].青岛:中国海洋大学,2005.
WU Shi-qiang. Study of maximum depth of scouring in front of Gu Dong Breakwater of the Yellow River Delta[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [5] LIN I F, TSENG I F, LEE C P, et al. Seabed scour around a breakwater a case study in Mailiao harbor[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 23(6): 846-854.
- [6] VAN RIJN L C. Local scour near structures[EB/OL]. 2013.[2024-10-10].www. Leovanrijn-sediment.com.
- [7] 黎蔚杰,张琪,廖晨聪,等.孤立波和海流作用下单桩基础局部冲刷及保护的数值分析[J].上海交通大学学报,2021,55(6): 631-637.
LI Wei-jie, ZHANG Qi, LIAO Chen-cong, et al. Numerical analysis of local scour and protection of a single pile around a seabed under solitary wave and currents[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(6): 631-637.
- [8] 高学平,赵子丹.直立堤前海床的冲刷[J].水利学报,1994(6): 43-49.
GAO Xue-ping, ZHAO Zi-dan. The scours of a sand bed in front of a vertical breakwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(6): 43-49.
- [9] SUMER B M, FREDSØE J. The mechanics of scour in the marine environment[M]. New York: World Scientific Publishing House, 2002: 540-550.
- [10] FREDSØE J, SUMER B M. Scour at the round head of a rubble-mound breakwater[J]. Coastal Engineering, 1997, 29(3-4): 231-262.
- [11] SUMER B M, WHITEHOUSE R J S, TØRUM A. Scour around coastal structures: A summary of recent research[J]. Coastal Engineering, 2001, 44(2): 153-190.
- [12] SUMER B M, FREDSØE J. Scour around pile in combined waves and current[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(5): 403-411.
- [13] 陈海鹰.波浪共同作用下海床上直立大直径圆柱建筑物周围的局部冲刷研究[D].大连:大连理工大学,2002.
CHEN Hai-ou. Study on local scour around large-diameter vertical and cylindrical buildings on the seabed under the combined action of waves and currents[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.
- [14] SUMER B M, FREDSØE J. Scour at the head of a vertical-wall breakwater[J]. Coastal Engineering, 1997, 29(3-4): 201-230.
- [15] BAQUERIZO A, LOSADA M A. Sediment transport around a mound breakwater: The toe erosion problem[C]//Coastal Engineering 1998. 1999: 1720-1729.
- [16] DEGHANI A A, AZAMATHULLA H M, HASHEMI NAJAFI S A, et al. Local scouring around L-head groynes[J]. Journal of Hydrology, 2013, 504: 125-131.
- [17] KEULEGAN G H, CARPENTER L. Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid[J]. Journal of Research of National Bureau of Standards, 1958, 60(5): 423-440.
- [18] KARAGIANNIS N, KARAMBAS T, KOUTITAS C. Numerical simulation of scour depth and scour patterns in front of vertical-wall breakwaters using OpenFOAM[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(11): 836.
- [19] BRIAUD J L, TING F C K, CHEN H C, et al. SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(4): 237-246.
- [20] CHEN X, ZHANG X, LIU X, et al. Experimental study of scour characteristics and scour hole dimensions in consolidated silt sediment under a current[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112801.
- [21] ESCARAMEIA M, MAY R W P. Scour around structures in tidal flows[Z]. Wallingford: HR Wallingford, 1999.
- [22] 赵明.波浪作用下建筑物周围的泥沙冲刷及海床演变[D].大连:大连理工大学,2002.
ZHAO Ming. Sediment scours and seabed evolution around buildings under wave action[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.
- [23] TEMEL A, DOGAN M. Time dependent investigation of the wave induced scour at the trunk section of a rubble mound breakwater[J]. Ocean Engineering, 2021, 221: 108564.
- [24] 周益人,陈国平.不规则波作用下墩柱周围局部冲刷研究[J].泥沙研究,2007(5): 17-23.
ZHOU Yi-ren, CHEN Guo-ping. Study on local scour around pier

- columns under irregular wave action[J]. *Sedimentation Research*, 2007(5): 17-23.
- [25] 马晓东. 群桩布置形式及非均匀沙对局部冲刷影响的研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
MA Xiao-dong. Study on the influence of pile group arrangement and non-uniform sediment on local scour around piles[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [26] GISLASON K, FREDSØE J, SUMER B M. Flow under standing waves: Part 2. Scour and deposition in front of breakwaters[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(3): 363-370.
- [27] MELVILLE B W, CHIEW Y M. Time scale for local scour at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(1): 56-65.
- [28] SUMER B M, FREDSØE J. Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater[J]. *Coastal Engineering*, 2000, 40(1): 59-87.
- [29] 邹俊飞. 波浪作用下反弧面直墙防波堤堤前冲刷试验及数值模拟研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2018.
ZOU Jun-fei. Experimental and numerical simulation study on scour under waves in front of the anti-arc wall breakwater[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2018.
- [30] YEGANEH-BAKHTIARY A, GHORBANI M A, POURZANGBAR A. Determination of the most important parameters on scour at coastal structures[J]. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 2012, 2(2): 68-71.
- [31] POURZANGBAR A, BROCCCHINI M, SABER A, et al. Prediction of scour depth at breakwaters due to non-breaking waves using machine learning approaches[J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 63: 120-128.
- [32] TSENG I F, HSU C H, YEH P H, et al. Physical mechanism for seabed scouring around a breakwater—a case study in Mailiao port [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(10): 1386.
- [33] OUMERACI H. Review and analysis of vertical breakwater failures—lessons learned[J]. *Coastal Engineering*, 1994, 22(1-2): 3-29.
- [34] QU K, CHEN K, ZHENG J, et al. Scour characteristics and dynamic mechanisms of the breakwater head in the abandoned Yellow River Delta on the northern Jiangsu coast, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2023, 292: 108-484.
- [35] DU Y, PAN S, CHEN Y. Modelling the effect of wave overtopping on nearshore hydrodynamics and morphodynamics around shore-parallel breakwaters[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(9): 812-826.
- [36] MELVILLE B M. Local scour at bridge sites[D]. Auckland: University of Auckland, 1975.
- [37] ETTEMA R. Scour at bridge piers[D]. Auckland: University of Auckland, 1980.
- [38] RAJARATNAM N, NWCHUKWU B A. Erosion near groyne-like structures[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1983, 21(4): 277-287.
- [39] XIE Shi-leng. Scouring patterns in front of vertical breakwaters[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1985(1): 153-164.
- [40] 陈国平,左其华,黄海龙. 波浪作用下大尺径圆柱周围局部冲刷[J]. *海洋工程*, 2004, 22(1): 46-58.
- CHEN Guo-ping, ZUO Qi-hua, HUANG Hai-long. Local scour around large-scale cylinder under wave action[J]. *Ocean Engineering*, 2004, 22(1): 46-58.
- [41] 雷尚彬,刘良志,程林,等. 多传感器信息融合技术在防波堤状态检测中的应用[J]. *中国港湾建设*, 2024, 44(3): 1-5.
LEI Shang-bin, LIU Liang-zhi, CHENG Lin, et al. Application of multi-sensor information fusion technology in breakwater condition detection[J]. *China Harbour Engineering*, 2024, 44(3): 1-5.
- [42] ACHARYA A. Experimental study and numerical simulation of flow and sediment transport around a series of spur dikes[D]. Arizona: The University of Arizona, 2011.
- [43] HAJIVALIE F, YEGANEH-BAKHTIARY A, HOUSHANGHI H, et al. Euler-Lagrange model for scour in front of vertical breakwater[J]. *Applied Ocean Research*, 2012, 34: 96-106.
- [44] YEGANEH-BAKHTIARY A, HOUSHANGI H, ABOLFATHI S. Lagrangian two-phase flow modeling of scour in front of vertical breakwater[J]. *Coastal Engineering*, 2020, 62(2): 252-266.
- [45] ALEMI M, PÊgo J P, MAIA R. Numerical simulation of the turbulent flow around a complex bridge pier on the scoured bed[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2019, 76: 316-331.
- [46] PAPANICOLAOU A T N, ELHAKHEEM M, KRALLIS G, et al. Sediment transport modeling review—current and future developments [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(1): 1-14.
- [47] KHOSRONEJAD A, KANG S, SOTIROPOULOS F. Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers [J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 37: 73-85.
- [48] PANDEY M, AHMAD Z, SHARMA P K. Scour around impermeable spur dikes: A review[J]. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 24(1): 25-44.
- [49] 赵子丹,薛晓春. 直立堤前海床的局部冲刷[J]. *海洋学报(中文版)*, 1998(5): 136-141.
ZHAO Zi-dan, XUE Xiao-chun. Scour in front of vertical breakwater by irregular waves[J]. *Chinese Journal of Oceanography*, 1998(5): 136-141.
- [50] 严恺. 海岸工程[M]. 北京:海洋出版社,2002.
YAN Kai. Coastal engineering[M]. Beijing: Ocean Press, 2002.
- [51] LEE K H, MIZUTANI N. Experimental study on scour occurring at a vertical impermeable submerged breakwater[J]. *Applied Ocean Research*, 2008, 30(2): 92-99.
- [52] JIANG C, YANG W, et al. Laboratory study on protection of tsunami-induced scour by offshore breakwaters[J]. *Natural Hazards*, 2016, 81: 1229-1247.
- [53] XU C, HUANG Z, YAO Y. A wave-flume study of scour at a pile breakwater: Solitary waves[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 82: 89-108.
- [54] JTS 154—2018,防波堤与护岸设计规范[S].
JTS 154—2018, Code of design for breakwaters and revetments[S].
- [55] MYRHAUG D, RUE H, TØRUM A. Tentative engineering approach to scour around breakwaters in random waves[J]. *Coastal Engineering*, 2004, 51(10): 1051-1065.