



三棱柱人工鱼礁着底冲击动力学 数值模拟研究

李 军¹, 林妙丽², 万 宇³, 何 勇¹, 薛 洁²

(1. 长江重庆航道工程局, 重庆 400010; 2. 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430040;
3. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 人工鱼礁布放过程中与河床发生碰撞会造成一定程度的礁体结构损坏及沉降淤积。基于 LS-DYNA 软件, 研究静水条件下三棱柱人工鱼礁布放过程中的动力学响应, 分析不同入水角度(0° 、 30° 、 45° 和 60°)和河床底质(黏土、沙砾土和基岩)下人工鱼礁的终端稳定速度、碰撞冲击力、应力及河床沉降变形, 并进行理论分析以验证数值模拟结果。研究结果表明: 随着入水角度的增加, 人工鱼礁终端稳定速度和碰撞冲击力呈先降低后增加的趋势, 0° 时的稳定速度和冲击力分别为 45° 时的1.36倍和2倍。碰撞冲击力随河床底质强度的增加而增加, 基岩底质的冲击力是黏土底质的5~8倍。人工鱼礁最大 Mises 应力与河床沉降变形呈负相关, 底质越硬, 沉降变形越小, 应力越大。基岩和沙砾土区域的有效可用体积减少率较低, 而黏土底质有效可用体积减少率最大可达37.41%。研究结果可为实际工程中人工鱼礁的布放选址及投放姿态提供理论依据。

关键词: 三棱柱人工鱼礁; 碰撞冲击力; 沉降变形; 应力分析

中图分类号: U61; S953.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0181-09

Numerical simulation of bottom impact dynamics of triangular prism artificial reef

LI Jun¹, LIN Miaoli², WAN Yu³, HE Yong¹, XUE Jie²

(1. Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400010, China;
2. Changjiang Waterway Survey Design and Research Institute(Wuhan), Wuhan 430040, China;
3. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: During the deployment of artificial reefs, collisions with the riverbed can cause a certain degree of structural damage and sedimentation of the reef. Based on LS-DYNA software, this paper investigates the dynamic characteristics of triangular prism artificial reefs during deployment under static water conditions. It analyzes the terminal stable velocity, collision impact force, stress, and riverbed sedimentation deformation of the artificial reefs under different entry angles (0° , 30° , 45° , and 60°) and riverbed substrates (clay, gravel soil, and bedrock), and conducts theoretical analysis to validate the numerical simulation results. The research results show that with the increase of entry angle, the stable velocity and collision impact force of the artificial reef terminal show a trend of first decreasing and then increasing. The stable velocity and impact force at 0° are 1.36 times and 2 times those at 45° , respectively. The collision impact force increases with the strength of the riverbed substrate, and the impact force of bedrock substrate is 5–8 times that of clay substrate. The maximum Mises stress of the artificial reefs is negatively correlated with riverbed settlement deformation. The harder the substrate, the smaller the settlement deformation and the greater the stress. The effective available volume reduction rate in bedrock and gravel soil areas is relatively low, while the maximum effective available volume reduction rate of clay substrates can reach 37.41%. The research results can provide theoretical basis for the selection and placement posture of artificial reefs in practical engineering.

Keywords: triangular prism artificial reef; collision impact force; settlement deformation; stress analysis

收稿日期: 2025-01-01

作者简介: 李军 (1976—), 男, 工程师, 研究方向为长江航道建设管理。

长江上游处于四大家鱼国家级水产种质资源保护区,拟通过广泛投放人工鱼礁营造局部水域的生态环境,改善水生生物的生长环境。人工鱼礁作为一种被布置在河床上的外源投放物,通过产生流场效应和饵料效应,促进营养物质的交换和水生生物的聚集,进而对河床生态环境进行修复^[1]。

目前对人工鱼礁的研究主要集中于礁体流场效应^[2-3]和饵料生物群落形成^[4-5]等,对人工鱼礁布放过程中的动力学响应研究相对较少。实际上,大部分人工鱼礁经由船只吊运至水面后释放,通过礁体自身重力下沉至河底^[6],该过程积累了大量的动能,使得礁体与河床接触时产生碰撞冲击力,同时也造成一定程度的沉降和淤积,可能对后续人工鱼礁生态功能的发挥产生不利影响。隋吉盛等^[7]在现有研究的基础上采用理论方法,提出人工鱼礁下落速度和着底冲击力的计算式;王磊等^[8]对船型混凝土鱼礁沉降过程进行了理论分析,结果表明礁体在 30 m 海域投放时终端稳定速度为 2.49 m/s,碰撞冲击力为 150 kN; Van Chau 等^[9]开展了立方体型人工鱼礁自由落体室内试验,分析了软土地基的初始沉降量,结果表明沉降量随冲击速度和鱼礁质量的增加而增加,随土壤密度的增加而减小,相应沉降范围为 2.12~11.56 mm; Han 等^[10]基于 ANSYS 软件,模拟了立方体型人工鱼礁以不同入射角度(0°、15°、30°和 45°)布放至不同海底(饱和砂、饱和砂和砾石、饱和砂和黏土)时的沉降与碰撞冲击力,研究结果表明饱和砂和黏土成分的河床会引起较高的沉降,有效可利用体积损失率也较高,入射角度为 45°时损失率可达 25.5%; Wang 等^[11-12]基于 ABAQUS 软件,分析不同开孔比、质量及入射角度下立方体形人工鱼礁的碰撞冲击力与河床沉降,结果表明人工鱼礁的沉降与入射角度的增加呈正相关,入射角度为 45°时最大沉降量达 0.392 m,体积比和材料密度越大的人工鱼礁沉降变形较大,有效可用体积率

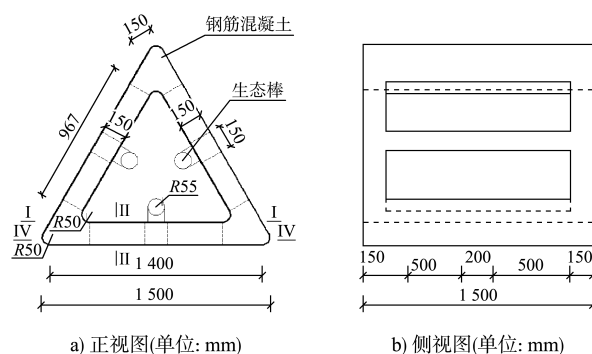
最大降低至 79.1%;张李唯^[13]基于 LS-DYNA 软件,对框架性混凝土人工鱼礁的着底撞击过程进行数值模拟,分析了开口比、体积比、入水角度等对碰撞冲击力的影响,结果表明人工鱼礁着底撞击力与终端稳定速度、入水角度等密切相关,人工鱼礁投放应选择黏土底质。

综上,现阶段对于人工鱼礁布放过程中的动力学研究大多集中于海洋区域,而内河航道尤其是长江上游的河床底质与海洋完全不同,其研究目前还处于探索阶段。三棱柱人工鱼礁作为一种新型的人工鱼礁结构,在长江上游已广泛使用,其在水中布放时的运动状态与立方体型人工鱼礁有较大差异,需要进一步的系统研究。

基于此,本文对静水条件下三棱柱人工鱼礁布放过程中的动力学响应进行研究,通过统计终端稳定速度、碰撞冲击力、鱼礁应力、河床沉降及礁体有效可用体积的变化,定量分析入水角度和河床底质对人工鱼礁着底冲击动力的影响,研究结果旨在为长江上游人工鱼礁的布放施工提供理论支撑。

1 三棱柱人工鱼礁着底冲击动力学理论

本文采用长江上游广泛投放的三棱柱镂空式人工鱼礁模型开展研究,见图 1,其外形结构尺寸为 1.5 m×1.5 m×1.31 m,密度 σ 为 2 400 kg/m³,体积 V 为 0.442 m³,鱼礁入水迎流面的面积 A 为 1.11 m²。



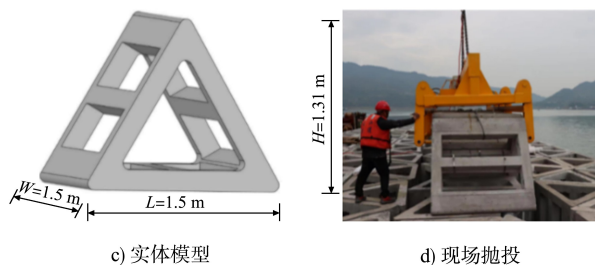


图1 三棱柱人工鱼礁模型

Fig. 1 Triangular prism artificial reef model

1.1 人工鱼礁下落过程中的受力分析

人工鱼礁投放后受重力、浮力、水动力及鱼礁与河床的碰撞力。鱼礁所受整体动力学方程为:

$$\sigma V \frac{du}{dt} = (\sigma - \rho) g V - \delta_1 \left(C_D A \frac{\rho u^2}{2} + C_{MA} \rho V \frac{du}{dt} \right) - \delta_2 R \quad (1)$$

式中: u 为人工鱼礁下落速度; ρ 为水体密度; σ 为人工鱼礁密度; V 为人工鱼礁体积; C_D 和 C_{MA} 分别为人工鱼礁阻力系数和人工鱼礁附加质量系数, 根据文献[7]取为 1.0; A 为人工鱼礁落水迎水面面积; R 为碰撞力; g 为重力加速度; t 为下落时间; δ 为修正系数。人工鱼礁触底前不受碰撞力, $\delta_1=1$ 、 $\delta_2=0$; 人工鱼礁触底时, 仅受碰撞力 R , $\delta_1=0$ 、 $\delta_2=1$ 。

1.2 人工鱼礁触底前的运动分析

人工鱼礁投放后在水中下落时 $\delta_1=1$ 、 $\delta_2=0$, 此时的运动方程由式(1)整理得:

$$\sigma V \frac{du}{dt} = (\sigma - \rho) g V - C_D A \frac{\rho u^2}{2} - C_{MA} \rho V \frac{du}{dt} \quad (2)$$

根据三棱柱人工鱼礁的参数, 编写 Matlab 程序进行求解, 得到人工鱼礁触底前的运动响应, 见图2。由图2可知, 人工鱼礁在初始下落阶段重力起主要作用, 做加速度逐渐降低的加速运动; 重力与水阻力相等时, 变为匀速运动。三棱柱人工鱼礁下落 2 s 时水阻力和重力相平衡达到稳定速度 2.32 m/s, 人工鱼礁下落位移为 5.0 m。长江上游人工鱼礁布设于洛碛段采砂坑内, 最大水深大于 20 m^[14], 因此三棱柱人工鱼礁在触底前能够达到稳定速度。

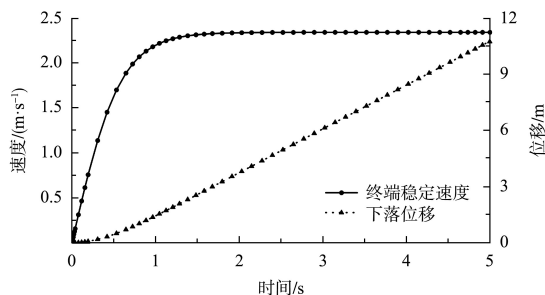


图2 三棱柱人工鱼礁触底前的下落运动响应

Fig. 2 Falling motion response of triangular prism artificial reef before touching bottom

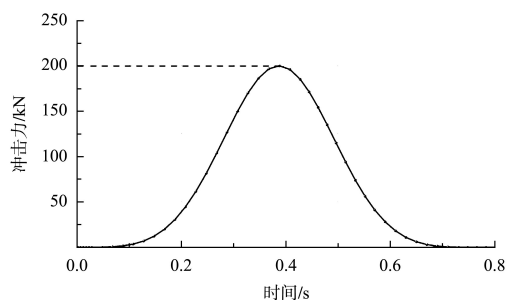
1.3 人工鱼礁触底时的运动分析

人工鱼礁触底时 $\delta_1=0$ 、 $\delta_2=1$, 此时的运动方程由式(1)整理得:

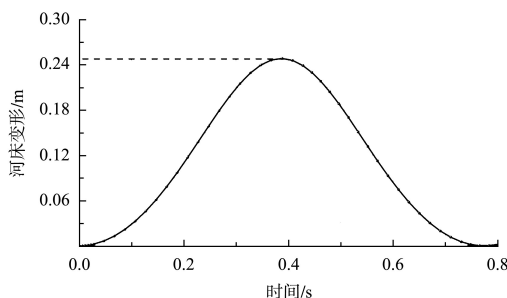
$$\sigma V \frac{du}{dt} = (\sigma - \rho) g V - K_R g \varepsilon^n - c \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3)$$

式中: K_R 为河床基底反力弹性系数, 根据相关调查长江上游河床底质为黏土时, $K_R=3 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$; ε 为河床基底的变形; c 为阻尼系数; n 根据文献[7]取为 2。

通过编写 Matlab 程序进行求解, 得到人工鱼礁碰撞冲击力及河床变形历程曲线, 见图3。由图可知, 最大冲击力约 200 kN, 河床变形约 0.248 m, 整个碰撞冲击过程持续时间小于 1 s。



a) 着底冲击力曲线



b) 河床变形曲线

图3 人工鱼礁着底冲击变形历程曲线

Fig. 3 Impact deformation curve of artificial reef bottoming

2 三棱柱人工鱼礁着底冲击动力学数值模拟

2.1 数值模型构建

2.1.1 模型尺寸及网格划分

本文基于 LS-DYNA 软件采用拉格朗日-欧拉法(ALE)模拟人工鱼礁着底冲击过程,数值模型包含人工鱼礁几何体、空气域、河水域和河床域4部分,其中空气域为 20 m×20 m×2 m(长×宽×高),河水域及河床域的长、宽均与空气域相同,河水域高度为 20 m,河床域高度为 1 m。人工鱼礁结构与流体的网格大小设置为 0.4 m,网格设置为六面体,其结构尺寸及网格划分见图 4。

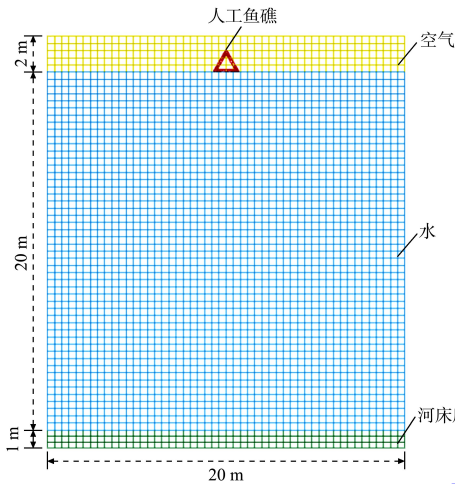


图 4 模型尺寸及网格划分
Fig. 4 Model dimensions and mesh division

2.1.2 模型参数

空气和水的本构模型采用 *MAT_NULL 材料模型^[15],具体参数见表 1。混凝土参考相关文献^[16-17]选用 HJC 模型本构,能够考虑应变及损伤累计对强度的影响,具体参数见表 2。河床土体材料通过查阅相关文献^[18]选用黏土、沙砾和基岩 3 种模型,具体参数见表 3。

表 1 空气与水体参数

Tab. 1 Air and water parameters

项目	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	截距 C	斜率系数 S_1	斜率系数 S_2	GRUNEISEN 系数 γ_0
空气	1.25	1 480	1.192	-0.096	0.35
水	1 000	343.7	0	0	1.40

表 2 人工鱼礁结构参数

Tab. 2 Structure parameters of artificial reefs

密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E_0/MPa	泊松比
2 400	30 000	0.22

表 3 河床底质参数

Tab. 3 Riverbed sediment parameters

河床底质	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E_0/MPa	泊松比	黏聚力/ kPa
黏土	1 740	10	0.40	15.5
沙砾	1 800	20	0.30	27.0
岩石	2 300	1 000	0.23	1 430.0

2.1.3 接触及约束条件

为准确监测人工鱼礁与河床间的碰撞力、碰撞时间以及河床沉降,数值模型中将空气域和水域设置为欧拉部件,人工鱼礁与河床设置为拉格朗日部件,人工鱼礁与河床间的接触采用罚函数,将其碰撞接触设置为有摩擦的接触,并设置主面与从面。此外,人工鱼礁着底撞击中河床为固定支撑,需要约束其各个方向上的位移,并定义河床模型无反射边界;为保证人工鱼礁下落过程中内部水体不会流出,需对水域各方向施加约束使其边界位移为 0;人工鱼礁模型和河床模型与流体区域的接触截面设置为 ALE 控制,以确保流固耦合的正常传输。为保证人工鱼礁与河床能够发生碰撞,整体计算时间设置为 20 s。本数值模拟在静水条件下进行,不考虑来流流速的影响,重点关注竖直方向上的运动与变形,人工鱼礁初始投放速度为 0 m/s,对鱼礁施加竖直向下的重力加速度。

2.2 敏感性分析与数值模型验证

为保证计算精度且实现计算效率最大化,避免后续计算过程中由于网格尺度和时间步长带来的系统误差,本文分别采取 3 种网格数量(2.8×10^5 、 1.4×10^5 、 0.7×10^5 个)和 3 种时间步长(0.002 5、0.005 0、0.001 0 s)进行无关性验证,结果见图 5。由图 5 可知,网格数增加时终端稳定速度增加,当网格数增加至 2.8×10^5 个时速度基本保持约 2.15 m/s,与网格数量为 1.4×10^5 个的计算结果相差不大;时间步长越小计算精度越高,时间步长为 0.005 0 与 0.002 5 s 的计算结果相近,表明改变时间步长对精度提高影响较小。综合考虑计算精度与成本,本文选择网格数量为 1.4×10^5 个,时间步长为 0.005 s。

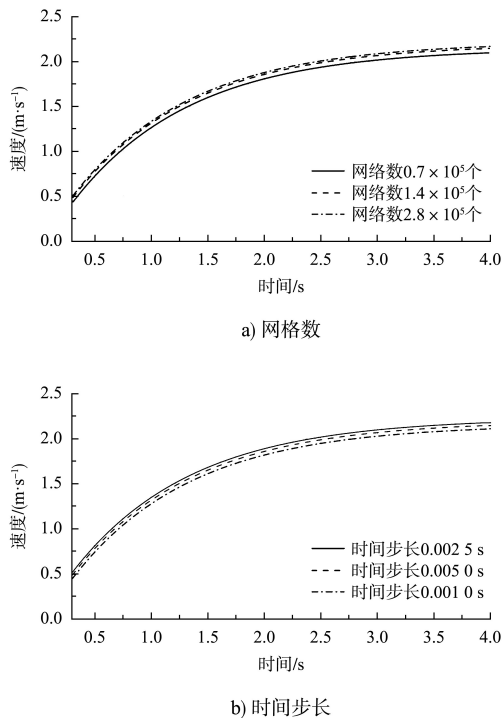


图5 网格数与时间步长敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of mesh number and time step

基于上述对人工鱼礁自由下落过程计算的理论公式,与数值模拟得到的结果进行对比,见表4。由表4可知,0°抛投的人工鱼礁终端速度数值模拟结果为2.14 m/s,式(2)计算结果为2.32 m/s,两者间的误差为7.76%;人工鱼礁着底冲击力数值模拟结果为180 kN,理论公式计算结果为200 kN,误差为10%;人工鱼礁着底冲击变形数值模拟结果为0.230 m,理论公式计算结果为0.248 m,误差为7.26%。综上分析发现由于理论计算中对人工鱼礁阻力系数和附加质量系数的估算略有偏差,使得理论计算结果偏高,但两者间的误差均在允许范围内,表明本文人工鱼礁着底冲击数值模拟结果可靠。

表4 数值模型验证

Tab. 4 Numerical model verification

项目	终端稳定速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	碰撞冲击力/ kN	河床变形量/ m
理论值	2.32	200	0.248
模拟值	2.14	180	0.230
误差值	0.18	20	0.018
误差率/%	7.76	10.00	7.26

2.3 模拟工况

为深入探索不同影响因素下人工鱼礁布放过程中的动力学响应,本文设置如下计算工况:

1) 为研究人工鱼礁投放下落过程中偏转角度对鱼礁水下运动着底冲击的影响,采用人工鱼礁与水平面偏转角度分别为0°、30°、45°和60°为研究对象。

2) 为研究人工鱼礁投放下落过程中河床底质对着底撞击的影响,采用3种长江常见的河床底质(黏土、沙砾和岩石)进行研究。

3 结果与讨论

3.1 终端稳定速度与着底碰撞力分析

人工鱼礁以不同入水角度布放时的速度历程曲线见图6,由图6可知,人工鱼礁抛投下落过程中速度呈先增加后稳定的变化趋势,入水角度为0°、30°、45°和60°时终端稳定速度分别为2.14、1.72、1.57和2.00 m/s,随入水角度的增加呈先降低后增加趋势,其中入水角度为30°、45°和60°时的终端稳定速度均小于0°的原因可能是以一定偏转角抛投时,人工鱼礁为达到稳定的下落姿态而产生弯矩,使其进入水体后发生不稳定翻转,增加了与水体的接触摩擦力导致最终达到的稳定速度下降,最大降低约27%,同时增加了人工鱼礁达到终端稳定速度的时间,约为理论方法下落时间的2倍,实际上数值模拟能够更全面地考虑流体黏性与礁体表面粗糙度及两者间的相互作用。

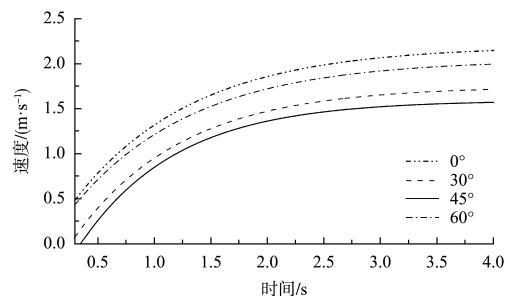


图6 不同入水角度下稳定速度历时变化

Fig. 6 Stable velocity changes under different entry angles

不同入水角度和河床底质下人工鱼礁着底冲击力见图7,由图7a)可知,入水角度为0°、30°、45°和60°时人工鱼礁最大碰撞冲击力分别为180、120、96和140 kN,碰撞冲击力呈先降低后增加的

变化趋势,碰撞持续时间约 1 s。由图 7b)可知,碰撞冲击力随入水角度的增加呈先降低后增加的趋势,由图 6 也可得到类似变化规律,这是由于速度越大碰撞冲击力也越大,0°时的碰撞冲击力约为 45°时的 2 倍;随河床底质强度的增加而增加,基岩土体碰撞冲击力约为黏土体的 5~8 倍。综上所述,从碰撞冲击方面考虑人工鱼礁应尽可能抛投至土体强度相对较小的区域,且控制入水角度约为 30°~45°,以减小因碰撞冲击造成的人工鱼礁结构损坏。

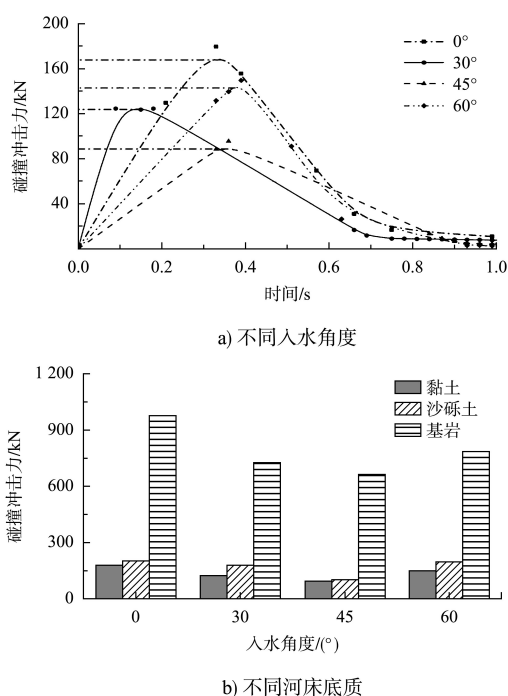
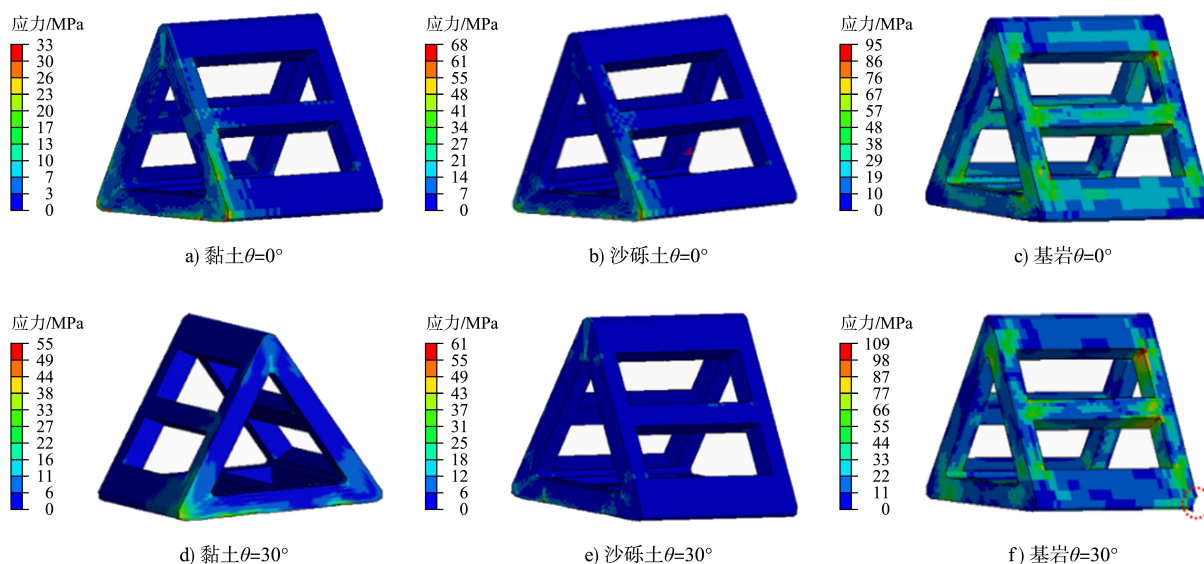


图 7 不同入水角度和河床底质下人工鱼礁着底碰撞冲击力变化
Fig. 7 Collision impact force change of artificial reef bottoming under different water entry angles and riverbed sediments

3.2 鱼礁应力与河床沉降变形分析

三棱柱人工鱼礁在不同河床底质中以不同入水角度布放时产生的最大应力云图见图 8。由图 8a)、b)、c)可知,入水角度为 0°时,最大 Mises 应力分别为 33 MPa(黏土)、68 MPa(沙砾土)和 95 MPa(基岩),最大应力分布于左侧棱交汇点和右侧棱中部,需对人工鱼礁棱交汇点和中部采用倒角等方式处理以避免应力集中;由图 8d)、e)、f)可知,入水角度为 30°时,最大 Mises 应力分别为 55 MPa(黏土)、61 MPa(沙砾土)和 109 MPa(基岩),河床为基岩时发生破坏;由图 8g)、h)、i)可知,入水角度为 45°时,最大 Mises 应力分别为 55 MPa(黏土)、72 MPa(沙砾土)和 128 MPa(基岩);由图 8j)、k)、l)可知,入水角度为 60°时,最大 Mises 应力分别为 40 MPa(黏土)、76 MPa(沙砾土)和 82 MPa(基岩)。河床为基岩时三棱柱人工鱼礁产生的 Mises 应力较大,由 82~128 MPa,其次是沙砾土(61~76 MPa)和黏土(33~55 MPa),河床底质越硬,碰撞时沉降变形越小,人工鱼礁的最大 Mises 应力越大。随入水角度的增加,人工鱼礁最大 Mises 应力、河床沉降变形呈先增加后降低趋势,与隋吉盛等对框架式人工鱼礁研究得到的变化规律相同,与 Wang 等的研究结果不同,可能受河床土体材料及三棱柱人工鱼礁不稳定下落姿态的影响。



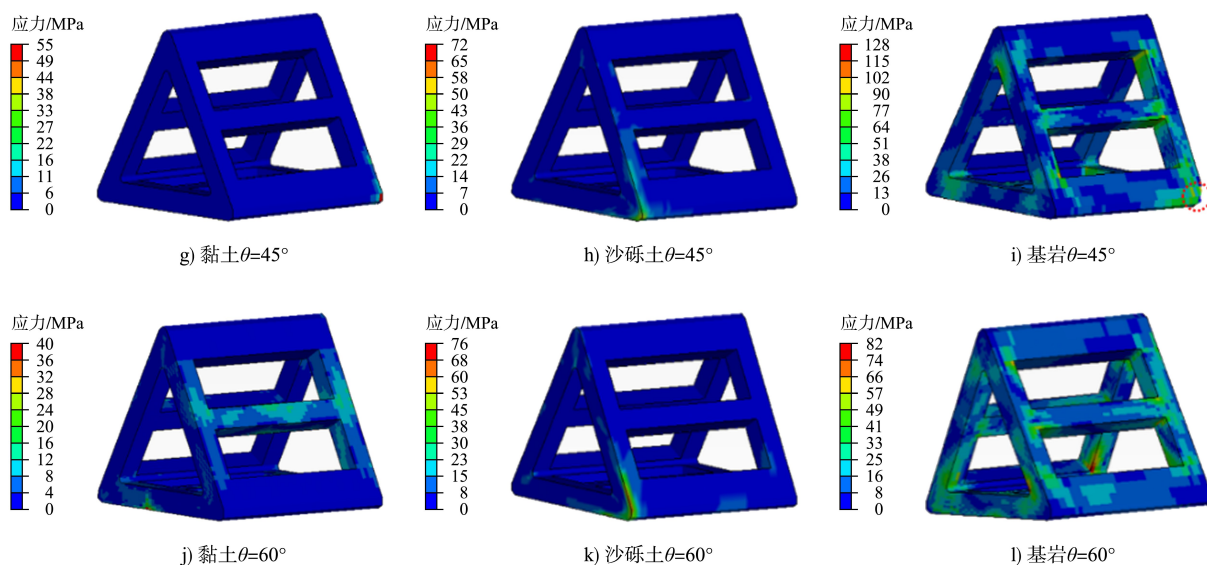


图 8 不同入水角度和河床底质下人工鱼礁最大应力云图

Fig. 8 Maximum stress cloud diagram of artificial reefs under different entry angles and riverbed sediments

3.3 有效可用体积减少率分析

人工鱼礁下落过程中, 由于河床的沉降变形作用, 使得可供鱼类等水生生物活动的区域减小, 见图 9, 即有效可用体积降低^[19]。不同入水角度下人工鱼礁抛投至不同河床底质时的有效可用体积减少率见图 10, 当入水角度为 0° 时, 人工鱼礁有效可用体积减少率分别为 0.82% (基岩)、14.12% (沙砾土) 和 29.98% (黏土); 入水角度为 30° 时, 人工鱼礁有效可用体积减少率分别为 1.25% (基岩)、24.19% (沙砾土) 和 37.41% (黏土); 入水角度为 45° 时, 人工鱼礁有效可用体积减少率分别为 1.13% (基岩)、22.27% (沙砾土) 和 35.56% (黏土); 入水角度为 60° 时, 人工鱼礁有效可用体积减少率分别为 0.90% (基岩)、18.23% (沙砾土) 和 34.49% (黏土)。黏土河床底质时由于土体强度较小使得人工鱼礁的有效可利用体积减少率最大, 平均减少 34.36%, 而其他成分底质减少率相对较小, 均小于 25%。随入水角度的增加有效可用体积减少率先增加后降低, 最大相差 8.2%, 表明入水角度对人工鱼礁有效可用体积的影响较小。因此

从人工鱼礁遮蔽效应和结构损坏方面综合考虑, 应尽可能选择土质稍硬的沙砾土进行抛投, 以保证水生生物避敌和栖息空间。

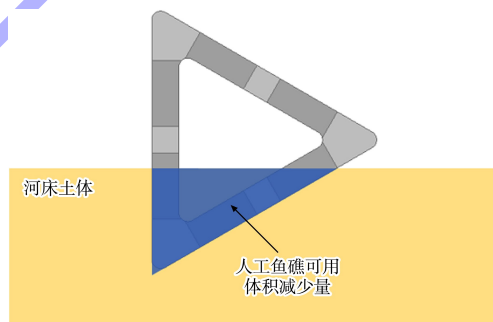


图 9 人工鱼礁有效可用体积减少量

Fig. 9 Available volume reduction of artificial reefs

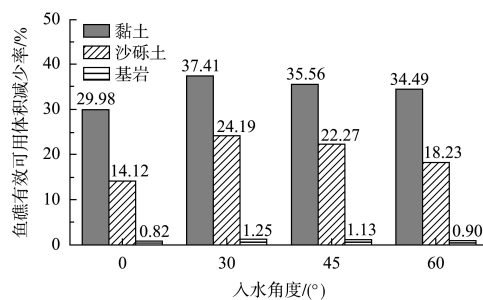


图 10 不同入水角度下人工鱼礁有效可用体积减少率

Fig. 10 Available volume reduction rate of artificial reefs under different entry angles

4 结论

1) 随入水角度的增加, 稳定速度和冲击力先降低后增加, 0° 时的稳定速度约为 45° 时的 1.36 倍, 冲击力约为 2 倍; 冲击力随河床底质强度的增加而增加, 基岩底质冲击力是黏土底质的 5~8 倍。

2) 人工鱼礁最大 Mises 应力与沉降变形呈负相关, 河床底质越硬, 碰撞时沉降变形越小, 人工鱼礁最大 Mises 应力越大; 随入水角度增加, 人工鱼礁最大 Mises 应力、沉降变形先增加后降低。

3) 基岩时人工鱼礁有效可用体积减少率为 0.82%~1.25%, 沙砾土时减少率为 14.12%~24.19%, 黏土时礁体发生淤积, 深度约 0.18~0.29 m, 使得有效可用体积显著减少, 减少率为 29.98%~37.41%。

4) 长江上游三棱柱人工鱼礁布设区域建议选在以沙砾土为主的水域, 同时控制入水角度范围在 30° ~ 45° , 既能够避免碰撞造成礁体结构损坏, 又能够保证鱼类等水生生物充足的栖息和避敌空间。

参考文献:

- [1] 唐衍力, 龙翔宇, 王欣欣, 等. 中国常用人工鱼礁流场效应的比较分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 97-103.
TANG Y L, LONG X Y, WANG X X, et al. Comparative analysis on flow field effect of general artificial reefs in China [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(8): 97-103.
- [2] 白一冰, 张成刚, 罗小峰. 吕泗渔场人工鱼礁群流场效应及稳定性研究[J]. 人民长江, 2018, 49(8): 25-30.
BAI Y B, ZHANG C G, LUO X F. Research on flow field effect and stability of artificial reefs in Lusi fishing ground[J]. Yangtze River, 2018, 49(8): 25-30.
- [3] 赵云鹏, 王晓鹏, 董国海. 波浪作用下三角型人工鱼礁水动力特性数值模拟与实验验证[J]. 海洋工程, 2015, 33(6): 52-61.
ZHAO Y P, WANG X P, DONG G H. Numerical simulation and experimental validation of hydrodynamic characteristics of submerged artificial reef in waves [J]. The ocean engineering, 2015, 33(6): 52-61.
- [4] 李文杰, 彭志豪, 万宇, 等. 长江上游新型人工鱼礁的浮游生物富集效果[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(12): 1613-1623.
LI W J, PENG Z H, WAN Y, et al. Plankton enrichment effects of novel artificial reefs in the upper Yangtze River [J]. Journal of ecology and rural environment, 2024, 40(12): 1613-1623.
- [5] 刘鸿雁, 孙彤彤, 曾晓起, 等. 崂山湾人工鱼礁区星康吉鳗摄食生态及食物网结构[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1339-1351.
LIU H Y, SUN T T, ZENG X Q, et al. Feeding ecology of Conger myriaster and structure of the food webs in artificial reef zone, Laoshan Bay, China [J]. Chinese journal of applied ecology, 2018, 29(4): 1339-1351.
- [6] LI J J, LI J, GONG P H, et al. Effects of the artificial reef and flow field environment on the habitat selection behavior of *Sebastes schlegelii* juveniles [J]. Applied animal behaviour science, 2021, 245: 105492.
- [7] 隋吉盛, 郑中强, 常宗瑜, 等. 框架型人工鱼礁布放过程的动力学分析[J]. 渔业现代化, 2016, 43(3): 74-79.
SUI J S, ZHENG Z Q, CHANG Z Y, et al. Dynamics analysis on the deployment of a frame-type artificial reef[J]. Fishery modernization, 2016, 43(3): 74-79.
- [8] 王磊, 唐衍力, 陈晓蕾, 等. 混凝土船形鱼礁的礁体设计与沉降计算[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(7): 43-46, 92.
WANG L, TANG Y L, CHEN X L, et al. Reef design and subsidence calculation for concrete boat reef [J]. Periodical of Ocean University of China (nature science edition), 2010, 40(7): 43-46, 92.
- [9] VAN CHAU T, JUNG S, NA W B. Measurement and prediction of the initial settlement of cube-type artificial reefs caused by free-fall installation using a laboratory-scale experiment, regression analysis, and numerical collision analysis [J]. Ocean engineering, 2021, 223: 108643.
- [10] HAN S, JUNG S, NA W B. Estimation of seabed settlement during initial installation of a box-type

- artificial reef considering different seabed soil compositions and incident angles[J]. Ocean engineering, 2020, 218: 108269.
- [11] WANG J H, NIE Z Y, ZHANG J T, et al. Numerical simulation study on the influence of artificial reefs on the instantaneous collision with seabed based on the explicit finite element method[J]. Ocean engineering, 2022, 261: 112169.
- [12] 王佳浩. 基于 ABAQUS 的人工鱼礁在海床中的瞬时沉降影响因素研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- WANG J H. Study on the influencing factors of instantaneous subsidence of artificial reefs in the seabed based on ABAQU [D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [13] 张李唯. 框架型混凝土人工鱼礁着底撞击的动力学分析[D]. 大连: 大连海洋大学, 2024.
- ZHANG L W. Dynamic analysis of the bottom impact of a frame-type concrete artificial reef [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2024.
- [14] 徐观兵, 杨胜发, 王丽, 等. 长江上游洛碛河段采砂后鱼类生境现状研究[J]. 中国环境监测, 2022, 38(1): 104-113.
- XU G B, YANG S F, WANG L, et al. Status of fish habitat after sand mining in Luoqi reach of the Upper Yangtze River[J]. Environmental monitoring in China, 2022, 38(1): 104-113.
- [15] SABADIN G, GAIOTTI M, RIZZO C M, et al. Development and validation of a numerical model for the simulation of high-velocity impacts on advanced composite armor systems [J]. Nonlinear dynamics, 2018, 91 (3): 1791-1816.
- [16] 常永奎, 常凯, 许超. 对 LS-DYNA 中混凝土 HJC 模型的探讨[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2013, 30(2): 27-29.
- CHANG Y K, CHANG K, XU C. The discuss of concrete HJC model in LS-DYNA[J]. Journal of Jilin Institute of Architecture & Civil Engineering, 2013, 30(2): 27-29.
- [17] 焦楚杰, 李祯, 高乐. 混凝土 SHPB 试验的数值模拟[J]. 工程力学, 2010, 27(S2): 196-200.
- JIAO C J, LI Z, GAO L. Numerical simulation of SHPB test of concrete [J]. Engineering mechanics, 2010, 27(S2): 196-200.
- [18] 周莉. 变幅水位下高填方岸坡: 框架码头结构相互作用机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- ZHOU L. Study on interaction mechanism of high-filled bank slope and Truss-framed wharf under variable amplitude water level [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [19] YOON H S, KIM D, NA W B. Estimation of effective usable and burial volumes of artificial reefs and the prediction of cost-effective management [J]. Ocean & coastal management, 2016, 120: 135-147.

(本文编辑 赵娟)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部