



水上抛石挤淤深度计算的能量平衡方法

姜勇¹, 乔伟¹, 王增航¹, 刘凌云²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200125;

2. 中交上海三航科学研究所有限公司, 上海 200032)

摘要: 抛石挤淤是港口或航道的护岸中处理淤泥软土地基的常用方法, 但国内关于抛石挤淤深度的3个计算方法中, 均未考虑水深对挤淤深度的影响, 而国外则完全没有相关的研究, 所以工程应用时只能估算或通过钻孔检测判断挤淤深度。针对此问题, 通过调研陆上静态压载挤淤深度的计算理论, 引用块石质量、落距、水深、淤泥土的黏聚力和内摩擦角等常见参数, 建立块石势能与阻力做功之间的能量平衡方程, 以此可以计算抛石挤淤深度, 且结合工程实际的钻孔检测结果验证方法的可靠性, 并分析计算式中几个能量组成部分和计算参数对挤淤深度结果的影响程度。结果表明, 块石侧面阻力做功额占总功的70%, 下部土楔体阻力做功占25%; 同时块石质量和落距增加一倍, 挤淤深度分别增加26.2%和23.3%, 淤泥土黏聚力和内摩擦角减少一半, 挤淤深度约增加10%。利用该计算方法可以在方案设计阶段准确获知可能实现的抛石挤淤深度, 提高方案选择的可靠性, 也可以在施工阶段帮助优化施工方案。

关键词: 水上抛石挤淤; 淤泥土处理; 能量平衡; 挤淤深度

中图分类号: U655.54; TU46

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0213-08

Energy balanced calculation method for depth of stone-pitching on water

JIANG Yong¹, QIAO Wei¹, WANG Zenghang¹, LIU Lingyun²

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200125, China;

2. CCCC Shanghai Harbor Engineering Design and Research Institute, Shanghai 200032, China)

Abstract: Stone-pitching is a common method for treating soft muddy foundations in revetments for ports and waterways. However, none of the three domestic calculation methods for the stone-pitching depth considers the influence of water depth, and no relevant research exists abroad. Consequently, estimation or post-construction borehole detection is carried out to decide the stone-pitching depth. To solve this problem, we investigate the calculation theory of the depth of static ballast siltation on land, introduce key parameters such as stone mass, drop height, water depth, and the cohesion and internal friction angle of the soft soil, and build an energy balance equation between the potential energy of the stone and the work done by resistance to calculate the stone-pitching depth. Then we verify the reliability of this method by borehole detection data from a practical project, and analyze effect degree of several energy components and calculation parameters in the formula on the result of stone-pitching depth. The results indicate that the work done by the stone lateral resistance accounts for approximately 70% of the total work, and the resistance work of the lower soil wedge accounts for 25%. Doubling the stone mass or the drop height increases the stone-pitching depth by 26.2% and 23.3%, respectively, while halving the soil's cohesion or internal friction angle increases the stone-pitching depth by about 10%. This calculation method can accurately predict the achievable stone-pitching depth during the design stage, thereby improving the reliability of scheme selection, and can also help optimize construction schemes.

Keywords: stone-pitching on water; silt soil treatment; energy balanced method; depth of stone-pitching

收稿日期: 2025-06-19 录用日期: 2025-07-25

作者简介: 姜勇(1983—), 男, 高级工程师, 从事水运工程施工管理。

凭借施工技术简单和效果明显的优点,抛石挤淤技术很早就被应用于淤泥质土地基的承载力和稳定性提升加固工程中。宋朝时期就已开始“于海水、溪水(木兰溪)交汇处向下深挖一丈,又投巨石其中,形成石质地基”^[1]。21世纪以来,随着沿海地区经济的快速发展,很多沿海淤泥质地基工程中采用抛石挤淤作为地基处理的方法。连云港地区针对深厚软基抛石挤淤法技术开展了研究,应用结果表明抛石挤淤有明显的人工硬壳层和排水固结效应^[2]。在南京江北新区七里河片区道路工程的淤泥处理中也成功应用了泥水平衡的抛石挤淤换填施工技术^[3]。经过应用和实践后,工程技术人员认识到抛填石的落底深度成为评判地基处理效果的重要指标^[4]。但在抛石挤淤深度的计算和预估方面,目前国内外尚未形成统一的意见。

国内关于抛石挤淤深度的计算方法主要有3种:第1种方法是杨光煦提出的基于地基极限承载力的平衡公式^[5-6],该方法将抛石地基视为刚性基础,且仅考虑抛石基床的整体重力静态作用下进入到淤泥的深度;第2种方法是在第1种方法的基础上进行调整,并考虑了泥面隆起在内的土体作用力对抛石体的力矩平衡公式^[7],同样也是静态的挤淤深度计算方法;第3种方法^[8]是针对向矿坑中抛石时,考虑了抛石的落距对挤淤深度的影响,通过能量和功的平衡方程建立挤淤深度计算公式,但公式中引用了桩基承载力计算中的端阻力和侧阻力这两个参数,另外该方法也未考虑水深的影响。需要说明的是,目前尚未发现国外有类似的抛石挤淤深度计算方法,仅有抛石体对挡土墙稳定影响的研究结果^[9]。总之,目前国内的3种计算方法中,前两种方法未考虑水深和抛

填能量对抛石挤淤深度的影响,第3种方法虽然考虑了抛填能量的因素,但也未考虑水深的影响。所以可认为在水上抛石挤淤深度计算领域的研究成果几乎为空白,工程中只能凭借经验或工后的检测判断挤淤深度能否满足设计要求,这大幅增加了水上抛石挤淤设计和施工的盲目性。因此针对水上抛石挤淤深度计算的研究,具有重要的工程价值。

本文基于能量平衡理论,综合落距、水深、块石质量、淤泥土对黏聚力和内摩擦角等关键参数对抛石挤淤过程的影响,构建块石的下落势能与挤淤过程中外力做功的平衡方程,并以上海洋山港某工程的抛石挤淤设计与施工实践为基础,通过工程实测数据验证本文计算式的可靠性,进一步分析方程各组成部分以及各参数对挤淤深度的影响程度。

1 工程概况

本文依托的洋山港某护岸工程场地内广泛分布着③_{1,2}灰色淤泥质黏土和③₂灰色淤泥质粉质黏土,厚度4.5~16.7 m。这种土层具有高含水量、高压缩性以及中到高灵敏度,力学强度较低,工程性质差。如果直接在此软土地基上建设护岸,容易产生较大的工后沉降和不均匀沉降,甚至可能导致结构失稳。针对该工程的地质条件,设计人员最终采用一种综合的方案,见图1。先在外围坡脚处开挖到-2.0 m,采用600~800 kg的块石进行挤淤护脚处理,再在结构下部抛填120~250 kg的护底石和100~200 kg的堤心块石。整个抛石挤淤的工程量预计为6万m³。在挤淤层之上,设置有抛石补填层,其顶高程设定为2.44 m,补填层中250~400 kg的堤心石的工程量约为10万m³。

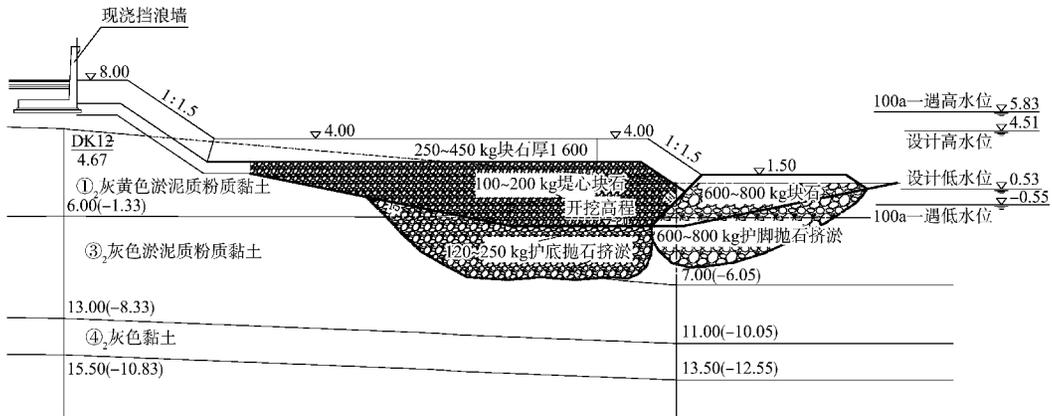


图 1 抛石挤淤分布 (单位: m)

Fig. 1 Layout of stone-pitching in project (unit: m)

水上抛填块石施工, 需要充分考虑水深、水流和波浪等自然条件对块石漂流的影响, 进而确定抛石船的最佳驻位。平板驳船利用全球定位系统(global position system, GPS)定位, 并通过锚缆牵引移动至指定的抛石区域。船上配置的装载机及液压反铲设备挖机对称取料, 准确将块石抛向预定区域, 见图 2。

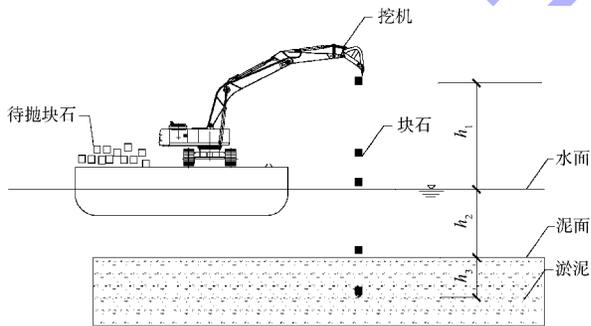


图 2 水上抛填块石

Fig. 2 Stone-pitching on water

2 能量平衡的抛石挤淤深度分析

2.1 水上抛石挤淤过程分析

水上抛石挤淤施工过过程分解为: 1) 利用液压反铲挖机将块石提升至指定高度, 块石获得势能。2) 翻转挖斗, 块石开始自由落体运动并下落至水面。在这个过程中, 块石受到水的阻力和浮力作用, 导致其加速度逐渐减小, 直至最终到达泥面。块石在水中下沉的阻力与速度有关, 速度越快阻力越大。3) 当块石接触到泥面后继续下落的过程中, 其势能逐渐被淤泥做功所抵消耗, 直

至完全消耗, 块石到达最深处。块石进入淤泥中的深度, 即本文研究对象的抛石挤淤深度。

块石接触到泥面时的动能, 在进入淤泥后被淤泥的作用力做功消耗。单个块石在淤泥中下沉时, 块石的侧面受到淤泥的剪应力作用, 端部受到淤泥的正应力作用。上述作用力对块石做的功, 等于作用力在下沉方向分力与下沉距离的乘积。淤泥对块石做功逐渐累积直至与块石的初始势能能达到平衡。最终, 块石达到最深, 悬浮于淤泥中或着底(淤泥较浅时)。淤泥对块石的正应力大小与深度相关, 所以不同深度的作用力大小不同, 计算式需要对其沿深度方向积分以求得最终值。

多个块石连续抛填时, 最终抛石挤淤深度会继续增加并达到极限值, 后续的块石下沉沿线的淤泥被前个块石扰动, 作用力减小。后续块石到达前块石的深度时, 依然保持有一定的残余动能。残余的动能在多个块石同时受到的淤泥的作用力做功, 促使其整体到达更深的高程。值得注意的是, 后续块石下沉中, 由于淤泥受到严重扰动, 侧面的剪应力大幅降低甚至可以忽略。所以在计算时, 只能计算第 1 个块石的侧面剪应力。本文仅考虑单个块石的挤淤深度计算。

为了便于分析和计算方法推导, 做如下简化和假定: 1) 不考虑块石在下沉过程中能量的热损失。2) 假定块石为立方体且下沉中不翻转, 底平面始终保持水平。不考虑块石形状和表面光滑程度造成的能量损失。3) 忽略反铲挖斗反转时对块

石施加的初始速度。4) 由于抛填过程中淤泥的工程性质极弱，淤泥可视为流态，因此计算深度处淤泥的主应力可以近似用总应力进行计算。

2.2 能量平衡方程推导

在水上抛石挤淤施工中，单个块石从挖斗高度自由落体获得的势能，最终在水和淤泥的阻力作用下被消耗。块石从初始面 L_1 开始，经过空中的下落距离 h_1 到达水面 L_2 ，然后穿过水深 h_2 ，到达泥面 L_3 ，最终下沉至 L_4 ，淤泥深度为 h_3 。由此可知，块石的下沉总距离为 $h_1+h_2+h_3$ ，以此作为势能计算的高度。块石在挤淤下沉中，其底面下的土楔体会与块石形成一个组合体同步下沉。根据正立方体块石的假定，土楔体可视为四棱锥形。土楔的下沉深度同样为 h_3 。块石下沉过程中受到的外力见图 3。矩形 $ABCD$ 为块石， $\triangle BCE$ 为土楔体。

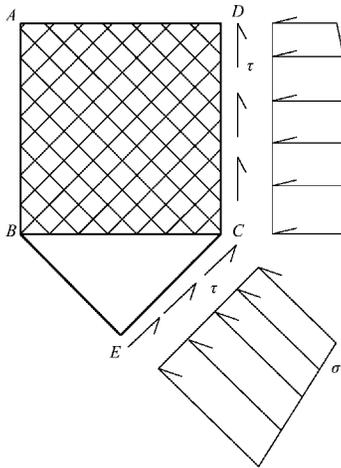


图 3 块石下沉受力分析
Fig. 3 Force analysis for stone sinking

1) 计算块石的势能。根据前文，组合体在的重力势能包括高度 $h_1+h_2+h_3$ 的块石的势能和高度为 h_3 的土楔的势能，故总势能 W_1 为：

$$W_1 = \rho_r g V_r (h_1 + h_2 + h_3) + \rho_s g V_s h_3 \quad (1)$$

式中： ρ_r 为块石密度； V_r 为块石体积； ρ_s 为淤泥密度； V_s 为土楔体体积。

2) 求解淤泥土作用力做功。淤泥土对组合体的做功，包括淤泥土对块石侧面的剪应力作用，对土楔体的正应力作用和剪应力做功。

由于淤泥接近于各向同性的流态土体，且块

石侧面直立，所以可以用块石侧面的静止土压力作为某个深度的正应力 σ ，所以泥面下 z 深度处的正应力公式见式(2)；再根据土的抗剪强度准则，此深度处淤泥土的剪应力计算见式(3)。

$$\sigma = \rho_s g k_0 z \quad (2)$$

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (3)$$

式中： k_0 为淤泥的静止土压力系数； c 为淤泥土的黏聚力； φ 为淤泥土的内摩擦角。

所以块石侧面的平均剪应力 $\bar{\tau}$ 的公式为：

$$\bar{\tau} = c + \rho_s g k_0 (z - \frac{b}{2}) \tan \varphi \quad (4)$$

式中： b 为块石的边长。

因为块石侧面积 $A_r = 4b^2$ ，所以在 h_3 深度内的淤泥土对块石侧面剪应力做功 W_2 的公式为：

$$\begin{aligned} W_2 &= \int_0^{h_3} A_r [c + \rho_s g k_0 (z - b/2) \tan \varphi] dz \\ &= 2b^2 [ch_3 - \rho_s g k_0 (b - h_3^2) \tan \varphi] \quad (5) \end{aligned}$$

3) 求解淤泥土对土楔体正应力而做功。取土楔体与块石底面的夹角为 45° ，所以土楔的高度为 b 的一半。土楔的表面在下沉过程中分别受到外部淤泥对它的正应力和剪切摩阻力。参照式(5)的推导过程可以得到在深度 z 处淤泥对土楔的正应力(被动土压力)做功 W_3 公式为：

$$\begin{aligned} W_3 &= \int_0^{h_3} \int_z^{z+b/2} (h_3 - z) dx dz \\ &= \int_0^{h_3} \frac{\sqrt{2}}{2} \rho_s g k_p (h_3 - z) dx \int_z^{z+\frac{b}{2}} (z+x)(b-2x) dz \\ &= \frac{\sqrt{2}}{48} \rho_s g k_p b^2 h_3^2 (0.5b + h_3) \quad (6) \end{aligned}$$

式中： k_p 为淤泥的被动土压力系数； x 为土楔体在 z 深度处的宽度。

同理，块石下沉过程中土楔体的剪切摩阻力做功 W_4 公式为：

$$\begin{aligned} W_4 &= \int_0^{h_3} d\tau = \int_0^{h_3} \frac{\sqrt{2}}{2} \{c + \rho_s g k_p z [b - 2(z-b)] \tan \varphi\} dz \\ &= \frac{\sqrt{2}}{4} b c h_3 + \frac{\sqrt{2}}{96} \rho_s g k_p b^2 h_3^2 (b + 7h_3) \tan \varphi \quad (7) \end{aligned}$$

4) 分析块石在水中所受的阻力的做功，块石在水中所受的浮力和阻力做功 W_5 公式为：

$$W_5 = f_w A_1 h_2 \quad (8)$$

式中: f_w 为水的阻力, 其值为 $\rho_w c_d v^2/2$, 其中 v 为块石在水中下沉的速度, ρ_w 为水的密度, c_d 为水对块石的阻力系数, 受水的黏稠度、块石表面光滑度等影响, 本文取 0.5; A_1 为块石下沉时的迎水面积, 本文取块石的底面积 b^2 。

5) 块石进入水中后, 其浮力等于排开水的重力, 所以块石在水中下沉 h_2 距离所受到的浮力做功 W_6 公式为:

$$W_6 = \rho_w b^3 h_2 \quad (9)$$

6) 块石在下沉过程中的势能做功等于阻力做功的总和, 可以得到能量平衡方程:

$$W_1 = W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 \quad (10)$$

将式(5)~(9)代入式(10), 可得抛石挤淤的能量平衡方程:

$$\rho_s g V(h_1 + h_2 + h_3) + \rho_s g h_3 = 2b^2 [ch_3 - \rho_s g k_0 (b - h_3^2) \cdot \tan\varphi] + \frac{\sqrt{2}}{48} \rho_s g k_p b^2 h_3^2 (0.5b + h_3) + \left[\frac{\sqrt{2}}{4} b c h_3 + \frac{\sqrt{2}}{96} \rho_s g k_p b^2 h_3^2 (b + 7h_3) \tan\varphi \right] + f_w A_1 h_2 + \rho_w b^3 h_2 \quad (11)$$

7) 根据式(11)可以计算已知工况下(如块石落距 h_1 和水深条件 h_2) 的挤淤深度 h_3 , 有助于提高方案设计质量和效率。也可以根据设计的挤淤深度 h_3 反算施工工艺中的块石落距 h_1 , 从而优化施工方案, 提高施工效率。

2.3 工程案例

钻孔取样是目前检测水下抛石挤淤深度最有效的方法。在本文所依托项目的抛石挤淤施工完成后, 沿护岸长度方向选取 5 个断面进行钻孔取芯检测。每个断面 3 个孔, 其中 1#孔位于陆域侧, 2#孔居中, 3#孔位于海侧。根据设计方案 2#孔的位置清淤至 -2.0 m 后抛石, 而 1#和 3#孔则需要根据放坡的角度分别计算泥面线。从泥面线到抛石底部的深度, 即为抛石挤淤深度。检测数据^[10]见表 1。

表 1 实测 5 个断面 15 个钻孔的抛石挤淤深度
Tab. 1 Real stone-pitching depth of 15 boring holes of 5 sections m

位置	断面 1	断面 2	断面 3	断面 4	断面 5	平均
1#孔位	1.29	1.56	3.11	1.17	3.65	2.16
2#孔位	1.86	2.47	1.39	2.58	1.17	1.89
3#孔位	3.16	2.92	-	4.07	-	3.05

由表 1 可以看出, 抛石挤淤深度基本为 1~4 m。共 13 个钻孔中, 挤淤深度为 1~2 m 的点有 6 个, 2~3 m 的点有 3 个, 3~4 m 的点有 3 个, 超过 4 m 的只有 1 个。总平均挤淤深度为 2.34 m, 中位数为 2.47 m, 说明淤积深度数据围绕 2.34~2.47 m 分布较多, 有右偏分布特征。均方差为 0.92 m, 说明数据的离散型处于正常水平, 相对还算稳定, 其结果对于分析抛石挤淤深度有一定的价值。

最小值 1.17 m 出现在 1#和 2#孔位, 抛石质量为 100~200 kg。最大值 4.07 m 出现在 3#孔位, 抛石质量为 600~800 kg。另外, 3#孔位的挤淤深度明显增大, 说明块石质量对于抛石挤淤深度有较大的影响。此外, 抛石深度还会受到如施工时的水深、块石的尺寸、挖斗的提升高度以及清淤后淤泥土的力学特性等多个因素的影响。值得注意的是, 淤泥回淤和泥面隆起均会对抛石挤淤深度产生影响。因此, 在施工过程中需要对这些因素进行综合考虑, 以确保施工质量和工程的稳定性。

3 各因素影响程度分析

3.1 各组成部分的影响分析

本文方法综合考虑块石的质量、水深、挖斗提升高度、淤泥的内摩擦角和黏聚力等因素, 且经过与实际工程中的挤淤深度相比其结果基本一致。为进一步了解各因素对挤淤深度的影响, 模拟真实工况参数取值为: 块石质量为 200 kg、落距 2 m、水深 2 m, 淤泥内摩擦角为 5°、黏聚力为 4 kPa、密度为 1 400 kg/m³。经计算可知在此工况下挤淤深度为 2.522 m。各部分计算结果见表 2。

表 2 案例计算结果及各部分占比

Tab. 2 Analysis results and ratios of each part

类型	分解	结果/kJ	占比/%
势能 W_1	块石势能	12 785	96.8
	土楔势能	427	3.2
外力做功	块石侧剪应力 W_2	9 166	69.4
	土楔正应力 W_3	1 472	11.1
	土楔剪应力 W_4	1 924	14.6
	水阻力 W_5	500	3.8
	水浮力 W_6	148	1.1

总体而言，钻孔检测结果表明本文计算方法是可靠的。按照工程实际工况计算的抛石挤淤深度为 2.522 m，与实测结果的非常接近，仅比平均值 2.34 m 大 7.8%，比中位数 2.47 m 大 2.1%。这说明本文方法在计算水上抛石挤淤深度时是可行的。

经进一步分析可知，具体公式中各部分对结果的影响程度差别很大。抛石势能部分，块石几乎提供了全部的势能，为 96.8%，而土楔体由于质量小、高度小，所以占比仅为 3.2%。外力做功部分，块石侧剪应力做功贡献最大，几乎占 70%；作用于土楔体的外力总做功接近 25%，而在水中的阻力和浮力做功仅消耗了 5% 的势能。所以在初步估算抛石挤淤深度时，可以省略土楔体的势能、水阻力和浮力的部分，以简化计算过程。

3.2 公式中各参数的影响

以计算案例的参数为基准，分别单独调整公式中的关键参数，包括块石质量、落距、水深、淤泥土的黏聚力和内摩擦角。

1) 块石质量越大时挤淤深度越大，见图 4。当块石为 100 kg 时挤淤深度为 1.91 m，而当块石质量为 800 kg 时挤淤深度达到 3.94 m。这个区间范围与本文案例中的深度范围基本一致。另外，随着块石质量的增加，挤淤深度也会随之增加，但其曲线逐渐趋于平缓。这说明块石质量的增加会影响挤淤深度，但影响程度逐渐减小。

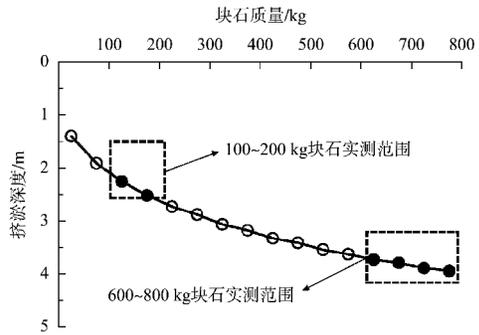


图 4 挤淤深度随块石质量变化曲线

Fig. 4 Depth of stone-pitching with varies stone mass

2) 随水深增加，挤淤深度也相应增加，见图 5。水深从 1 m 逐渐增加至 10 m，挤淤深度从 1.78 m 逐渐增加至 3.99 m。水深增加后，块石在到达淤泥前获得的势能也同步增加，而总势能的提升会增加挤淤深度。然而，水深增加后，块石下沉速度也会逐渐增加，但速度增大又会增大水阻力做功。水阻力做功在总阻力做功中所占的比例，从 1 m 水深时的 0.68% 显著增加至 10 m 水深时的 14.9%。这个变化趋势表明，水深的增加并不会无限地增加挤淤深度。相反，随着水深的增加，挤淤深度的增长将收敛于某个特定值。实际上，当水深超过一定范围，采用抛石挤淤方法处理软土地基可能已不是最优解，所以无需考虑太大的水深。

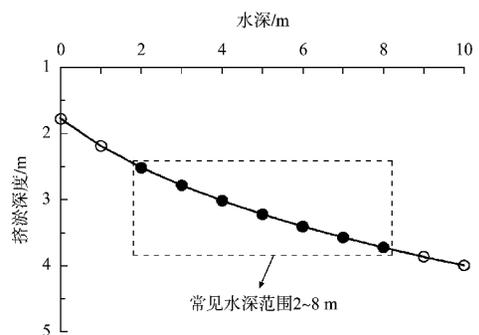


图 5 挤淤深度随水深的变化曲线

Fig. 5 Stone-pitching depth with different water depth

3) 块石落距与挤淤深度几乎是线性增长的关系，见图 6。当落距从 1 m 增加至 5 m，挤淤深度从 2.15 m 增加至 3.55 m。因此可认为，块石的落体高度能够直接影响挤淤深度。而且，这种影响

的程度和规律性是清晰且易把握和预测的, 可以为优化施工方案提供有力的支撑。由此可以更加精确地估计所需提升的高度, 以达到设计预期的挤淤深度, 从而提升工程的质量和效率。

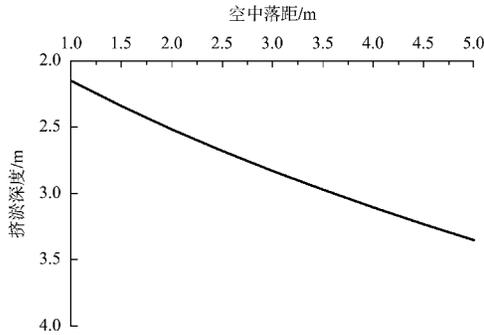
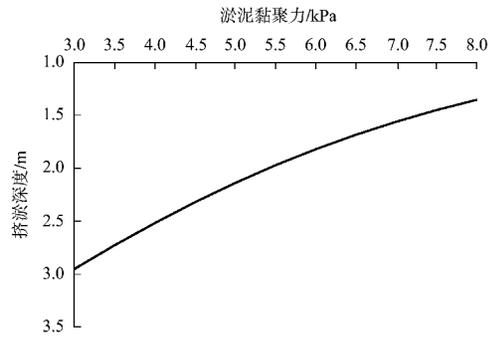


图 6 块石落距与挤淤深度的关系

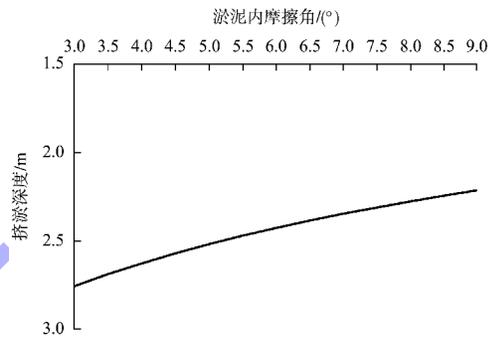
Fig. 6 Relationship between drop height and stone-pitching depth

4) 淤泥土的内摩擦角和黏聚力的增加都会减小挤淤深度, 见图 7。内摩擦角从 3° 增加至 9° , 挤淤深度会从 2.75 m 减小至 2.21 m, 而如果黏聚力从 3 kPa 增加至 8 kPa, 挤淤深度会从 2.95 m 减小到 1.35 m。这是因为土体内摩擦角和黏聚力的增加, 说明土体力学性质的强化。而力学性质更强的土体就能对块石提供更大的阻力。因此, 当阻力做功增大时, 挤淤深度便相应减小。同样, 内摩擦角和黏聚力再增加, 土体更接近于黏土或粉土的性质, 抛石挤淤方法的优势已不再明显。

5) 将块石质量、水深、落距增加 1 倍后(土体黏聚力和内摩擦角降至 50%), 挤淤深度增减量有较大差别, 见表 3。可以看出, 当块石质量增加 1 倍, 挤淤深度增加幅度最大, 为 26.2%; 其次是落距, 为 23.3%; 而黏土本身性质的调整对挤淤深度影响最小, 均为 10% 左右。当抛石挤淤深度无法达到设计深度时, 除了调整前 3 个工艺参数, 还可以通过外力搅拌扰动淤泥土, 使其参数降低, 也有助于增加挤淤深度。



a) 黏聚力的影响



b) 内摩擦角的影响

图 7 淤泥土内摩擦角和黏聚力对挤淤深度的影响

Fig. 7 Influence of stone-pitching depth from cohesion and internal friction angle of silt soil

表 3 参数增加 1 倍后(或降至 50%)的挤淤深度变化
Tab. 3 Stone-pitching depth variation after double (half) parameters

参数	基准参数值	挤淤深度/m	增加 1 倍(或降至 50%)	调整后深度/m	深度增加比例/%
块石质量	200 kg	2.52	400 kg	3.18	26.2
水深	2 m	2.52	4 m	3.02	19.8
落距	2 m	2.52	4 m	3.11	23.3
内摩擦角	5°	2.52	2.5°	2.81	11.5
黏聚力	4 kPa	2.52	2 kPa	2.78	10.3

4 结语

1) 本文建立块石下落的势能和进入淤泥后各阻力做功总量之间的能量平衡方程, 填补了已有陆上推填抛石挤淤深度计算方法在水上抛填计算方面的研究空白。

2) 本文计算结果比实测数据的平均值大 7.8%, 比实测中位数大 2.1%, 说明本文计算方法的可靠性。

3) 通过分析能量平衡各组成部分对结果的影响有助于后期进一步优化和完善本计算方法。分析结果认为,块石侧面作用力做功占比最大,淤泥土楔体次之,水阻力和浮力做功最小。

4) 为了提高方案设计的速度,本文探讨块石质量、落距、水深、淤泥黏聚力和内摩擦角等关键参数变化与对抛石挤淤深度变化之间的规律。结果认为,当参数增加1倍(或降至50%)时,块石质量和落距对挤淤深度影响幅度较大,淤泥土性质参数影响次之,水深影响最小。

5) 下一步研究将讨论多个块石、块石下落的姿态、块石形状等对挤淤深度计算理论,以补充和完善抛石挤淤的理论研究体系。

参考文献:

- [1] 谢智飞. 宋代东南地区水利工程的石工技术[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2020, 12(6): 598-607.
XIE Z F. Masonry technology of water conservancy projects in Southeastern China in Song Dynasty [J]. Journal of engineering studies, 2020, 12(6): 598-607.
- [2] 程兴. 《深厚软基抛石挤淤法技术应用研究》达国际先进水平[J]. 现代交通技术, 2012, 9(2): 58.
CHENG X. *Research on application of deep soft foundation stone throwing and silt removal technology reaches the advanced international level* [J]. Modern transportation technology, 2012, 9(2): 58.
- [3] 林军, 吴钢. 泥水平衡抛石挤淤换填施工技术研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(10): 81-83.
LIN J, WU G. Research on the slurry balanced stone throwing and silt squeezing replacement construction technology [J]. Engineering and technological research, 2023, 8(10): 81-83.
- [4] 肖广锋, 杨善翩, 秦伟, 等. 潮间带爆破挤淤法地基处理长期效果研究[J]. 地基处理, 2023, 5(4): 332-338.
XIAO G F, YANG S P, QIN W, et al. Study on long-term effect of ground treatment by explosive replacement method in intertidal zone [J]. Journal of ground improvement, 2023, 5(4): 332-338.
- [5] 杨光照. 挤淤[J]. 水利学报, 1992, 1(5): 59-64.
YANG G X. Stone-pitching [J]. Journal of hydraulic engineering, 1992, 1(5): 59-64.
- [6] 杨光照. 压载挤淤研究[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(2): 72-76.
YANG G X. Research on silt and silt removal [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1992, 14(2): 72-76.
- [7] 闫澍旺, 陈静, 孙立强, 等. 抛石挤淤深度的计算方法和模型试验[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 43-48.
YAN S W, CHEN J, SUN L Q, et al. Calculation method and model test on penetration depth of squeezing soft clay (with stone) method [J]. Rock and soil mechanics, 2015, 36(S1): 43-48.
- [8] 王俊, 王大尉, 张建平. 抛石挤淤法在排土场基底处理中的应用[J]. 煤炭工程, 2014, 46(9): 55-57, 60.
WANG J, WANG D W, ZHANG J P. Application of backfilling rocks to squeeze out ooze in mine dump foundation treatment [J]. Coal engineering, 2014, 46(9): 55-57, 60.
- [9] CAISIP M C P, BARIN J M M, BARRERA X P A, et al. A proposal design of stone-pitched retaining wall as a countermeasure for soil erosion in San Agustin Creek, San Agustin, San Fernando, Pampanga [J]. International journal of scientific research and engineering development, 2024, 7(3): 2036-2047.
- [10] 上海航源检测科技有限公司. 上海 LNG 站线扩建项目护岸与码头工程交竣工检测及护岸工程检测报告[R]. 上海: 上海航源检测科技有限公司, 2024
Shanghai Hangyuan Testing Technology Co., Ltd. The completion inspection report and the inspection report of the revetment and wharf project of the Shanghai LNG station and line expansion project [R]. Shanghai: Shanghai Hangyuan Testing Technology Co., Ltd., 2024.

(本文编辑 王璁)