



基于切削理论的砂土土质特性与挖掘生产率关系

李艳玲^{1,2}, 郭喜亮^{1,2}, 尹崧宇^{1,2}

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要: 挖泥船施工效率预估是保障工程效益的重要基础。针对绞吸船产量预测困难的问题, 基于切削比能理论模型, 建立绞吸船挖掘砂土生产率预测模型, 确定挖掘砂土主要影响因素, 并结合工程实例进行验证。结果表明: 标准贯入击数是影响砂土切削理论比能的关键因素。通过实际工程建立的砂土标准贯入击数与挖掘生产率数学模型, 能够较好地对砂土挖掘生产率进行预测。研究成果对绞吸船挖掘砂土理论研究或现场施工具有一定指导和借鉴意义。

关键词: 疏浚工程; 砂土; 生产率; 切削理论; 比能

中图分类号: U 616

文献标识码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S2-0011-04

Relationship between sandy soil properties and excavation productivity based on cutting theory

LI Yan-ling^{1,2}, GUO Xi-liang^{1,2}, YIN Song-yu^{1,2}

(1.CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2.Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

Abstract: Operating efficiency prediction of the dredger is an important basis to ensure engineering benefits. Regarding the difficulty in predicting the cutter suction dredger's output, based on the theoretical model of specific cutting energy, this paper establishes a productivity prediction model of sand excavation by cutter suction dredger, determines the main influencing factors of sand excavation, and verifies results in combination with engineering cases. The results show that the standard penetration number is the key factor affecting the theoretical specific cutting energy. Through the mathematical model of sand standard penetration number and excavation productivity established by actual engineering, this paper better predicts the sand excavation productivity. The research results can guide and provide a reference for theoretical research on sand excavation by cutter suction dredger or on-site construction.

Keywords: dredging engineering; sand; productivity; cutting theory; specific energy

挖泥船施工生产率直接决定工程效益, 同时也是评价挖泥船性能的重要指标。绞刀功率、挖掘深度和横移速度等参数均影响挖泥船的生产效率; 疏浚土作为疏挖对象, 对挖泥船施工生产率具有决定性作用^[1]。研究疏浚土与挖掘生产率之间的关系, 对于确定影响生产率关键因素、优化施工工艺、保障施工效益具有重要意义。

目前, 有很多关于疏浚土土质特性与挖掘生产率关系的研究。Yue 等^[2]基于模糊集理论和条件熵建立新的疏浚土定量分级方法, 通过分析土质分级情况与挖泥船耙头水下环境因素之间的关系, 实现耙吸挖泥船施工效率的预测。张更生等^[3]通过采用岩体基本质量指标修正值分析岩体开挖难易程度, 并探讨其与疏浚生产率之间的关系。郭

博臻等^[4]采用主成分分析方法对影响挖掘生产率的主要因素进行判断,然后采用粒子群优化的正则化极限学习机(PSO-RELM)对挖泥船瞬时产量预测进行研究。高腾等^[5]利用 Relief 权重算法识别影响挖泥船产量的主要工艺参数,并在此基础上采用偏最小二乘回归,建立主要施工参数与产量之间的数学方程。以上研究均是在大量挖泥船现场施工数据基础上,采用特定的数理统计方法对疏浚岩土关键参数进行研究,然后进行关键指标与疏浚生产率之间的关系分析,对于疏浚土在挖掘过程中,通过分析其与刀齿之间的受力,采用切削理论模型与工程数据相结合的研究相对较少。

本文在分析绞刀切削砂土的理论模型基础上,引入比能对饱和砂土切削关键影响参数进行分析,构建理论比能预测模型,并结合实际工程数据,通过线性回归分析建立砂土土质参数与挖掘生产率之间的关系,为预测挖泥船的产量提供理论依据。

1 砂土切削比能理论分析

1.1 切削理论

Miedema 等^[6-7]基于二维平面切削理论,建立刀齿切削力与破裂面平面力系,并结合刀齿运动规律构建了功率、生产率与标准贯入击数之间的关系。

为便于对刀齿在砂土切削过程中的受力进行分析,可将黏性力、重力、惯性力和内聚力等影响较小的力暂时忽略,利用二维切削理论分析刀齿受力情况,见图 1,将切削时作用在刀齿上的力分为沿切削速度方向的分力 F_h 和垂直于切削速度方向的分力 F_v ,根据力学平衡方程,确定饱和砂土切削水平力和垂直力分别为:

$$\begin{cases} F_h = -W_2 \sin \alpha + K_2 \sin(\alpha + \delta) \\ F_v = -W_2 \cos \alpha + K_2 \cos(\alpha + \delta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: W_2 为作用在切削刀齿上的水下压力引起的力; α 为切削角; δ 为外摩擦角; K_2 为土体对切削刀齿的反作用力,切削砂土时 K_2 大小为:

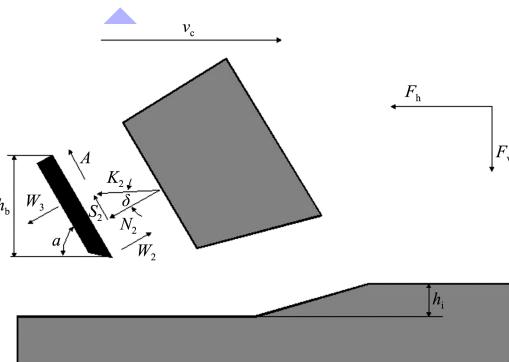
$$K_2 = \frac{W_2 \sin(\alpha + \beta + \varphi) + W_1 \sin \varphi}{\sin(\alpha + \beta + \delta + \varphi)} \quad (2)$$

式中: φ 为内摩擦角; β 为剪切角; W_1 为作用在剪切区域的由水压力引起的力。

气蚀情况下切削饱和砂土时,利用比例系数 d_1 、 d_2 对方程进行简化,则作用在刀齿上的水平力和垂直力分别为:

$$\begin{cases} F_h = d_1 \rho g (z + 10) h_i w \\ F_v = d_2 \rho g (z + 10) h_i w \end{cases} \quad (3)$$

式中: d_1 、 d_2 分别代表水平力、垂直力系数,系数大小与切削角 α 、内摩擦角 φ 、外摩擦角 δ 、刀齿高度与切削厚度的比值 h_b/h_i 有关^[8]; z 为水深; w 为切削宽度; ρ 为水体密度; h_i 为切削厚度。



注: N_2 为作用在刀齿上的法向力; S_2 为砂土与刀齿间的摩擦力(包含剪切力 $N_2 \tan \delta$ 和砂土与刀齿间的黏附力 A); K_2 为法向力 N_2 与摩擦力 S_2 的合力; W_2 为作用在刀齿上的水下压力引起的力; W_3 为刀齿后面水下压力引起的力。

图 1 刀齿受力分析

1.2 比能理论

比能是指挖泥船挖掘单位岩土所需的能量,可以用来表征岩土挖掘难易程度。船舶施工时,挖掘生产率和绞刀功率的比值即为比能。因此,挖泥船挖掘砂土时,比能 E_{sp} 公式为:

$$E_{sp} = \frac{P}{Q} = \frac{F_h v_c}{h_i w v_c} = \frac{F_h}{h_i w} \quad (4)$$

式中: P 为绞刀功率; Q 为挖掘生产率; v_c 为切削速度。

将式(4)代入式(3),则得出气蚀情况下砂土的比能公式为:

$$E_{sp} = d_1 \rho g (z + 10) \quad (5)$$

依据 Miedema 研究结果,在给定切削角 α 条件下,可以求得剪切角 β ,此时 d_1 转变成:

$$\begin{cases} d_1 = -0.185 + 0.666e^{0.0444\varphi} & (\alpha = 30^\circ) \\ d_1 = 0.304 + 0.333e^{0.0597\varphi} & (\alpha = 45^\circ) \\ d_1 = 0.894 + 0.154e^{0.0818\varphi} & (\alpha = 60^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

内摩擦角 φ 与砂土的标准贯入击数 SPT 有关, 计算公式为:

$$\varphi = 54.5 - 25.9e^{-0.01753SPT_{10}} \quad (7)$$

$$SPT_{10} = \frac{1}{(0.646 + 0.0354z)} SPT \quad (8)$$

式中: SPT_{10} 为将标准贯入击数 SPT 换算到 10 m 水深的计算值。

综合式(5)(7)和(8), 在给定切削角和挖掘深度条件下, 可以计算得到砂土比能与标准贯入击数之间呈线性关系。

2 工程应用与验证

2.1 土质参数与比能关系

基于唐山港京唐港区第四港池 25 万吨级航道工程所用“天杉”绞吸船挖掘砂土条件下, 选取正常施工的 44 组数据进行标准贯入击数与比能之间的关系研究。

随机选取数据的 70%, 对砂土标准贯入击数与比能进行线性回归分析, 构建关系曲线, 分析结果见图 2。

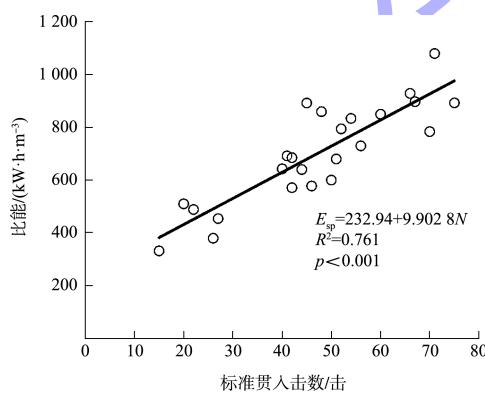


图 2 标准贯入击数与比能关系曲线

由图 2 可以看出, 挖掘砂土时, 砂土标准贯入击数与绞刀比能之间呈现良好的线性关系, 可按式(9)换算:

$$E_{sp} = 232.94 + 9.9028N \quad (9)$$

式中: E_{sp} 为绞吸船挖掘砂土切削比能 ($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$);

N 为砂土原位测试标准贯入击数(击), $5 \leq N \leq 75$ 击。

2.2 生产率预测

将式(9)代入式(4), 则绞吸船绞刀挖掘砂土的生产率可按式(10)计算:

$$P = \frac{P}{232.94 + 9.9028N} \quad (10)$$

基于式(10), 在挖掘标准贯入击数为 5~75 击的砂土时, “天杉”船绞刀消耗功率分别为 200、400、600、800 kW 条件下, 标准贯入击数、绞刀消耗功率和挖掘生产率之间的关系见图 3。

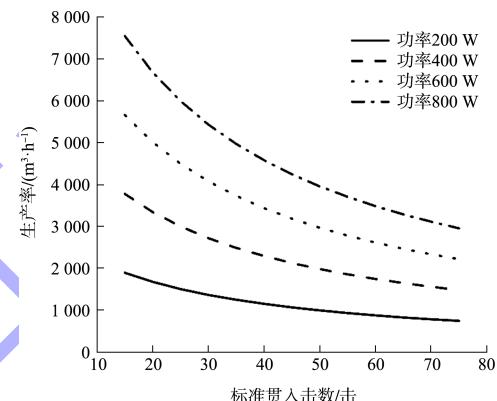


图 3 标准贯入击数、绞刀功率和挖掘生产率关系

2.3 模型验证

选取剩余的 30% 土质特性指标和绞刀消耗功率数据, 利用生产率预测模型式(10)对挖掘砂土的生产率进行预测, 将预测结果与生产率实测值对比分析, 见图 4。

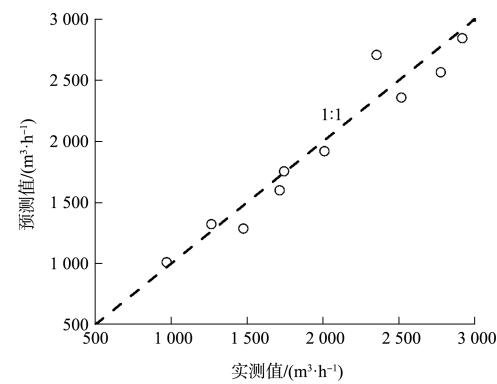


图 4 挖掘生产率预测值与实测值对比

可以看出, 绝大多数的生产率预测值和测量值均分布在 1:1 线附近, 相对偏差区间为 -7.55%~21.2%, 说明推导的生产率公式在一定程度上可

以较好地预测绞吸船挖掘砂土的生产率。

3 砂土切削理论与实际比能对比分析

切削角为 45° 时, 将船舶实际施工比能、理论比能与标准贯入击数关系进行对比, 见图 5。考虑到理论计算时砂土挖掘的气蚀效应, 挖掘水深 z 值通常取 $10\sim20\text{ m}$ 。

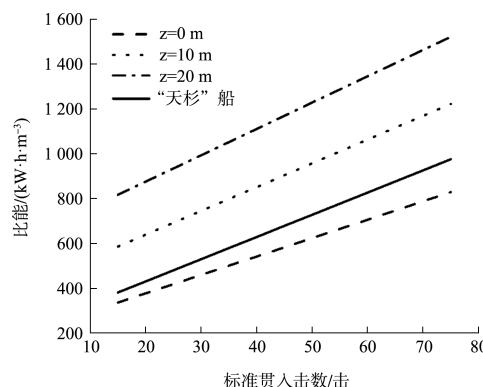


图 5 船舶实际施工比能、理论比能与标准贯入击数关系

由图 5 可以看出, 砂土理论切削比能与实际比能均有截距, 说明切削饱和砂土时, 需消耗一定的阈值才能完成初始切削。实际比能截距在水深 0 m 和 10 m 的理论比能截距之间, “天杉” 船实际施工区域在水下 $0.58\sim7.41\text{ m}$, 与理论比能对应的深度较为接近, 说明切削比能理论模型具有很好的适用性, 且比能截距受水深因素影响较大。随着标准贯入击数的增加, 砂土理论比能与实际比能值均逐渐增加, 标准贯入击数与绞刀比能呈良好的正相关性。从理论比能曲线可以看出, 随着挖掘深度的增加, 理论比能也随之增大, 说明挖掘深度越深, 挖掘单位体积砂土所需的能耗越大, 分析原因可能是由于水深直接影响砂土的内摩擦力, 进而影响刀齿与砂土之间的摩擦力。水平力系数 d_1 决定理论比能的斜率, d_1 值越大, 直线倾斜度越大, 由图可以看出, “天杉” 船实际比能斜率大于 0 m 水深的理论比能斜率, 小于 10 m 和 20 m 水深的理论比能斜率, 可能受实际切削角 α 、内摩擦角 φ 等因素的影响。

综上分析, 砂土标贯击数与挖掘比能间呈现良好的线性关系。在理论比能基础上构建的生产

率预测方程可以较好地对挖掘生产率进行预测, 为指导挖掘生产提供理论依据。

4 结论

1) 基于理论比能确定砂土标准贯入击数是绞刀比能的关键影响因素。通过线性回归分析建立砂土标准贯入击数与比能之间的数学模型, 并对模型的拟合效果进行模型验证, 该方法建立的数学模型能够较好地对挖掘生产率进行预测。

2) 理论与实际比能分析结果表明, 切削饱和砂土时, 需消耗一定的阈值才能完成初始切削。砂土切削比能除受砂土的标准贯入击数影响较大外, 也受水深、切削角等因素的影响。

3) 基于切削比能建立的挖掘生产率预测模型具有较好的准确性和适用性, 不仅可用于对挖掘砂土的产量进行预测, 同时也可指导施工参数的选择, 优化挖泥船施工工艺, 提高施工效率。

参考文献:

- [1] 陈晓华. 大型绞吸挖泥船挖岩绞刀切削力计算分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [2] YUE P, ZHONG D H, MIAO Z T, et al. Prediction of dredging productivity using a rock and soil classification model [J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2015, 141(4): 06015001.
- [3] 张更生, 程瑾, 马永刚. 广西防城港岩石性能对疏浚生产率影响分析 [J]. 水运工程, 2014(3): 57-61.
- [4] 郭博臻, 白一鸣, 赵永生. 基于 PSO-RELM 的绞吸挖泥船产量预测及其可视化辅助决策 [J]. 水运工程, 2021(9): 147-151, 193.
- [5] 高腾, 许焕敏. 基于偏最小二乘回归的疏浚产量预测方法 [J]. 水运工程, 2020(4): 175-179.
- [6] MIEDEMA S. Production estimation based on cutting theories for cutting water saturated sand[C]//Proceedings of World Dredging Congress IV. Amsterdam: [s.n.], 1995.
- [7] MIEDEMA S A. The delft sand, clay & rock cutting model[M]. Amsterdam: IOS Press BV, 2019.
- [8] MIEDEMA S A. Mathematical modelling of the cutting of densely compacted sand under water[J]. Dredging and port construction, 1985(7): 22-26. (本文编辑 王传瑜)