



疏浚绞刀挖掘粉土的产能与切削比能分析

郭喜亮^{1,2}, 王力威^{1,2}, 李艳玲^{1,2}, 沈普³

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300457; 2. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457;
3. 中交(天津)疏浚工程有限公司, 天津 300450)

摘要: 不同的疏浚土质会影响绞吸挖泥船的绞刀产能, 特别是密实度高、砂性较大、局部夹粉质黏土团块、混砂粒和黏粒的粉土, 会造成绞刀挖掘困难。根据“天麒号”绞吸船挖掘稍密-密实粉土数据, 进行挖掘产能与切削比能分析, 建立了典型疏浚粉土特性指标、挖掘产能与切削比能的相关关系。结果表明, 挖掘产能与粉土标准贯入击数存在二次多项式相关关系; 切削比能与标准贯入击数存在指数关系。得出的生产率公式与实际工程监测数据吻合度较高, 可为挖掘类似土质提供借鉴和参考。

关键词: 密实粉土; 切削比能; 挖掘产能; 标准贯入击数

中图分类号: U616; U615.35+1.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0225-05

Productivity and specific cutting energy of cutter suction dredger in silt dredging

GUO Xiliang^{1,2}, WANG Liwei^{1,2}, LI Yanling^{1,2}, SHEN Pu³

(1. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300457, China;
2. Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China;
3. Tianjin International Marine Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: Different dredged soil will affect the productivity of cutter suction dredgers, especially the silt with high density, large sand, local silty clay mass, mixed sand, and clay particles, which will cause difficult dredging of cutter suction dredgers. Based on the data of slightly dense-dense silt excavated by *Tianqi* cutter suction dredger, this paper analyzes the productivity and specific cutting energy and establishes the relationship among the characteristic index of typical dredged silt, productivity, and specific cutting energy. The result shows that there is a quadratic polynomial relationship between productivity and silt standard penetration number, and there is an exponential relationship between specific cutting energy and the standard penetration number. The productivity formula obtained is in good agreement with the actual engineering data, which can provide a reference for dredging similar soil.

Keywords: dense silt; specific cutting energy; productivity; standard penetration number

在疏浚工程施工前, 需要对绞吸船挖掘能力和能耗量进行估算, 以评估挖掘效能, 为工程决策和投标报价提供技术依据。国外对于疏浚岩土特性与挖掘产量关系的研究取得了一系列成果。

Miedema^[1-2]进行了疏浚饱和砂土的切削机理研究, 通过对饱和砂土不同切削角度的对比, 得出饱和砂土切削力的计算理论; 并进行了切削黏土、岩石的研究, 提出其破坏过程不同于饱和砂, 而是

收稿日期: 2022-09-06

作者简介: 郭喜亮 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事疏浚岩土研究。

根据不同的切削对象分为 4 种破坏机制, 如砂土为剪切型, 黏土为卷曲型、流动型和撕裂型, 岩石为流动型和撕裂型。流动型破坏又称韧性破坏; 撕裂型破坏又称脆性破坏, 所导出的切削方程可以预测失效机制和所涉及的切削力。以往的研究大多针对砂土、黏土和岩石土质, 对粉土的研究较少。粉土粒径处于砂土和黏土之间, 具有自身的物理力学特点。

本研究依托江苏滨海液化天然气码头与航道疏浚工程, 以“天麒号”绞吸船疏浚粉土时的实时挖掘产能和能耗量为研究对象, 采用统计分析、归纳总结、数据拟合等方法建立项目土质和关键指标关系, 确定疏浚绞刀挖掘粉土定量指标, 得出生产率、能耗量和土质参数经验公式。

1 典型疏浚粉土特性指标

依据《江苏滨海 LNG 航道疏浚工程》地勘资料, 港池疏浚区域广泛分布密实粉土, 土体特性指标: 1) ①₁ 粉土: 灰黄色, 灰褐色, 稍密状, 局部中密状, 土质不均, 局部夹粉质黏土薄层, 混多量砂粒。该层分布连续, 层位较稳定, 层厚

2.0~6.8 m, 层底高程在-7.79~-0.32 m 之间, 标准贯入击数为 1~15 击, 平均 6.8 击。2) ①₂ 粉土: 灰黄色, 灰褐色, 中密-密实状, 局部稍密状, 土质不均, 混多量砂粒及少量黏粒。该层分布连续, 层位较稳定, 层厚 6.6~12.7 m, 层底高程在-15.05~-13.54 m 之间, 标准贯入击数为 15~36 击, 平均 25.6 击。

本工程典型疏浚土质为粉土, 土体呈灰黄色, 湿、密实。标准贯入击数为 6~36 击, 平均 20 击以上。疏浚工程中, 密实度高、砂性较大、含贝壳碎片, 局部夹粉质黏土团块、混砂粒和黏粒的粉土会造成现场疏挖困难。通过对原状土的物理力学指标分析, 得出其特性代表值: 含水率 24.5%, 密度 1.98 g/cm³, 天然孔隙比 0.65, 塑性指数 5.0~9.9, 液性指数 0~0.62, 标准贯入击数 6~36 击。可以看出, 该粉土土质具有密实度高、液性指数低、标准贯入击数高的特点, 且较普通粉土砂粒含量高、局部夹粉质黏土团块和薄层。

依据 JTS 181-5—2012《疏浚与吹填工程设计规范》对粉土的疏浚特性进行分级, 见表 1。

表 1 疏浚粉土指标及疏浚级别

土层编号	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	含水率/%	液性指数	平均标贯击数/击	状态	疏浚级别
① ₁	1.92~2.05	0.55~0.75	19.6~29.1	0.03~0.62	6.8	稍密	8~9
① ₂	1.88~2.06	0.53~0.81	18.2~28.6	0~0.58	25.6	密实	9~10

2 三维疏浚土质模型建立

2.1 插值方法

三维疏浚土质模型能够表示和描述工程区的土层分布及地层特点, 可为地质分析提供直观准确的模型基础。

根据地勘报告中钻孔位置及土质物理力学指标, 采取适当方法内插数据以得到完整的三维疏浚土质模型。国内外对各种插值方法进行了研究, 大多数都以空间统计学为基础进行空间内插, 常见的内插法包括移动平均插值方法(距离倒数插值法)、样条函数插值法、空间自协方差插值方法(Kring 法)等。Kring 法^[3]是一

种地质统计学插值方法, 该方法认为, 由于空间参数的变化具有不规则性, 应采用随机表面函数而非平滑函数进行插值。其基本原理为根据工程区域内已有的钻孔数据, 将所有钻孔内某土层顶面高程乘以本钻孔权系数之和, 插值公式为:

$$P(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i P(X_i) \quad (1)$$

式中: λ_i 为权系数; $P(X_i)$ 为钻孔内 i 土层顶面高程; $P(X_0)$ 为钻孔土层顶面插值高程。空间自协方差插值方法的关键在于权重系数的确定, 确定权重系数后可利用公式(2)(3)进行插值:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(X_i, X_j) + \mu = \gamma(X_i, X_0) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (3)$$

式中: $\gamma(X_i, X_j)$ 为 X_i 与 X_j 处高程值的方差; $\gamma(X_i, X_0)$ 为 X_i 与 X_0 处高程值的方差。 n 为测点个数; μ 为各点高程均值。

三维疏浚土质模型的建立需要采用形函数插值法得到工程区任意点的土层力学指标^[4], 首先建立方形网格, 假设网格角端指标分别为 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$, 则网格中心点指标 $P(x, y, z)$ 可由各网格角端 P_i 内插:

$$P(x, y, z) = \sum_{i=1}^8 N_i(x, y, z) P_i(x_i, y_i, z_i) \quad (4)$$

式中: N_i 为 P_i 对应的插值函数, 且对于 $i=1 \sim 8$ 均有:

$$N_i(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) = \frac{1}{8}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta) \quad (5)$$

式中: ξ_i, η_i, ζ_i 分别为网格角端对应坐标。

2.2 三维疏浚土质建模

根据疏浚区 23 个钻孔位置及土质情况绘制疏浚区等高线(图 1)并建立三维疏浚土质模型(放大 40 倍, 图 2)。由图 1 可知, 港池疏浚区水深由西至东逐渐加深。由图 2 可知, 疏浚底高程以上主要土质为①₁ 粉土、①₂ 粉土和少量黏土。

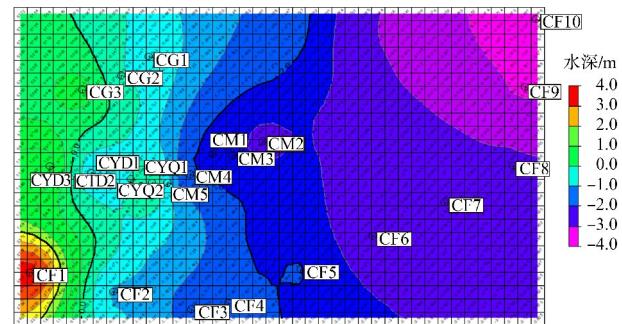


图 1 港池疏浚区浚前等高线及钻孔位置

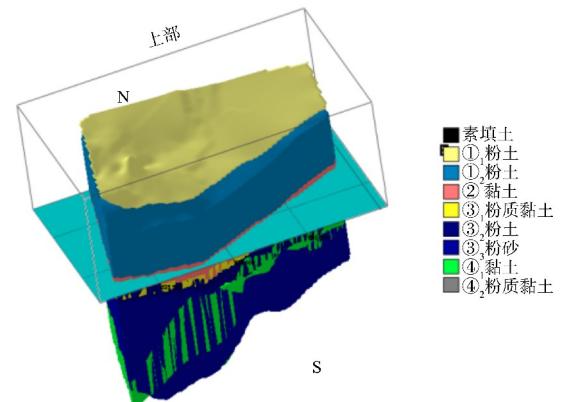


图 2 港池疏浚区土质三维模型

利用建立的三维土质模型, 根据需要截取不同位置的土质模型剖面(图 3), 利用插值后的土层物理力学指标读取不同坐标点、不同挖掘深度处的土质信息, 同时与绞吸船记录系统的挖掘实时功率、产能等进行匹配。

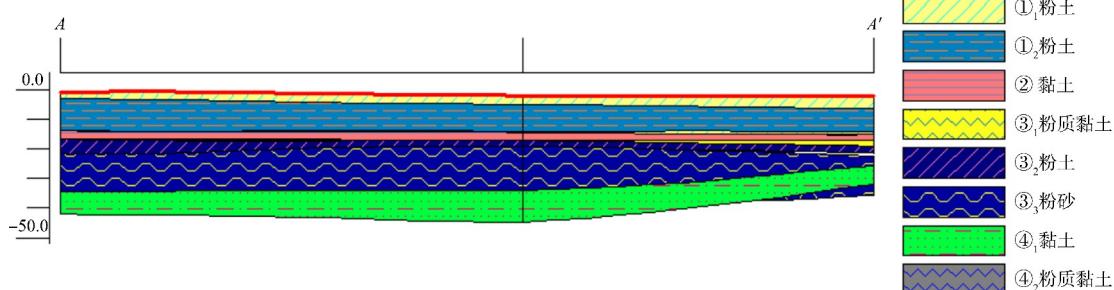


图 3 土质模型截面

3 挖掘生产率、粉土土质指标和比能的相互关系

3.1 疏浚粉土参数与生产率关系

依托江苏滨海 LNG 项目疏浚工程, 施工船舶

为“天麒号”, 吹填管线由水上管、水下管和陆地管组成, 总长度 12.5~13.0 km, 平均流速 5 m/s。由水下泵和一、二号舱内泵 3 泵施工。

采用 2000SC-SE30 六臂绞刀, 平均转速 22 r/min, 平均横移速度 10.3 m/min, 挖厚 4 m, 进尺 1.2 m。根据施工区域潮流较大的特点, 绞吸船挖条方向整体顺航道轴线方向布设, 以最大限度降低潮流对绞吸船施工的影响, 摆宽为 120 m。

基于绞吸船记录系统的存储数据分析船舶施工工况, 将施工时绞刀的实时坐标点与建立的三维土质模型进行统一, 提取绞刀施工对应的土层参数, 进而得出绞刀坐标、对应土质、小时生产率、输出功率的一系列相关数据。筛选出代表各密实度粉土的土质, 对施工数据进行分析, 得出粉土标准贯入击数与疏浚挖掘生产率存在二次多项式数学关系(图 4):

$$P = -0.898N^2 - 47.335N + 3650.3 \quad (6)$$

式中: P 为挖掘粉土生产率, m^3/h ; N 为粉土的标准贯入击数, 击, $6 \leq N \leq 36$ 。

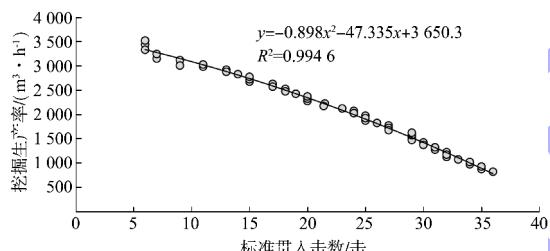


图 4 挖掘粉土生产率与标准贯入击数关系曲线

3.2 疏浚粉土参数与比能关系

疏浚挖掘比能定义为开挖单位体积土质所消耗的能量^[5-6]。经过数据分析和拟合, 得出标准贯入击数与粉土切削比能存在指数关系, 见图 5。

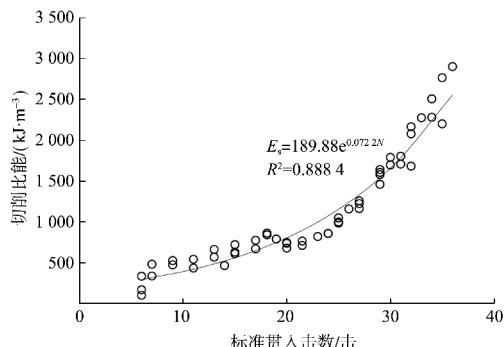


图 5 切削比能与标准贯入击数关系曲线

3.3 典型粉土指标、绞刀功率和挖掘生产率关系

“天麒号”挖掘标准贯入击数为 6~36 击的粉土时, 依据施工基本数据, 绞刀挖掘比能 E_s 可按式(7)计算:

$$E_s = \frac{3600\eta N_c}{P} \quad (7)$$

式中: N_c 为绞刀额定功率, $2 \times 1000 \text{ kW}$; η 为绞刀挖掘效率发挥系数, 根据经验系数取 $0 \sim 0.3$ 。

结合以上公式, 可得绞刀挖掘生产率:

$$P = \frac{3600\eta N_c}{189.88e^{0.0722N}} \quad (8)$$

3.4 挖掘粉土生产率估算

考虑到自然影响时间和船舶避让、停电待工等产生的不能施工时间, 绞吸船施工的时间利用率为二级工况取 0.65; 绞刀挖掘效率发挥系数取 0.1~0.3。挖掘粉土产能估算见表 2。

表 2 “天麒号”挖掘粉土产能估算

标准贯入 击数/击	切削比能 E_s / ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	挖掘产能 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)		
		$\eta = 0.1$	$\eta = 0.2$	$\eta = 0.3$
6	293	1 598	3 196	4 795
8	338	1 383	2 767	4 150
10	391	1 197	2 395	3 592
12	452	1 036	2 073	3 109
14	522	897	1 794	2 691
16	603	776	1 553	2 329
18	696	672	1 344	2 016
20	805	582	1 163	1 745
22	930	503	1 007	1 510
24	1 074	436	871	1 307
26	1 241	377	754	1 131
28	1 434	326	653	979
30	1 656	283	565	848
32	1 914	245	489	734
34	2 211	212	423	635
36	2 554	183	366	550

江苏滨海 LNG 项目疏浚工程中, “天麒号”挖掘粉土的实测生产率和预估值对比见表 3。由表可知, 预估值和实测生产率的相对偏差在 $\pm 16\%$ 以内。

表3 挖掘生产率预估值相对偏差

标准贯入 击数/击	绞刀 功率/kW	生产率预估值/ (m ³ ·h ⁻¹)	生产率实测值/ (m ³ ·h ⁻¹)	相对 偏差/%
16	150	896	787	13.85
	300	1 791	1 872	-4.33
	450	2 687	2 399	15.87
32	400	752	668	12.57
	600	1 129	1 023	10.36
	800	1 505	1 647	-8.62

4 结论

- 1) 江苏滨海 LNG 项目疏浚粉土密实度高、砂性较大、含贝壳碎片, 现场疏挖困难。
- 2) 基于比能理论建立了 $N=6\sim 36$ 击、稍密-密实粉土的标准贯入击数、绞刀功率与挖掘产能的计算公式。
- 3) “天麒号”绞吸船挖掘粉土的预估生产率与实测值的相对偏差在 $\pm 16\%$ 以内。
- 4) 为提高挖掘稍密-密实粉土生产效率、降低挖掘耗能, 对于稍密实粉土应当增加转速和横移速度; 对于密实粉土则应降低转速和横移速度。即当绞刀功率较小时宜快速增加横移速度, 绞刀

功率较大时快速降低横移速度。

参考文献:

- [1] MIEDEMA S A. The cutting mechanisms of water saturated sand at small and large cutting angles [C]// International Conference on Coastal Infrastructure Development-ChalLenges in the 21st Century. Hong Kong: [s. n.], 2004.
- [2] MIEDEMA S A. New developments of cutting theories with respect to dredging, the cutting of clay [C]//World Dredging Conference XIII. Delft: Delft University of Technology, 1992.
- [3] 徐超, 杨林德. 岩土参数的空间变异性分析[J]. 上海地质, 1996(4): 16-19.
- [4] 张建芳, 范柱国. 基于 ArcGIS 的钻孔三维可视化展示及地质体的建模过程[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(4): 35-36.
- [5] 张德新. 基于二维切削理论的绞刀切削载荷计算及绞刀应力状态的 ANSYS 分析[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [6] 姚建伟, 杨启. 基于岩石切削理论的超大型绞吸挖泥船绞刀动载荷分析[J]. 中国港湾建设, 2011(1): 5-10.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 204 页)

- [5] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [6] British Standards Institution. Structural use of concrete—Part 1: Code of practice for design and construction (BS 8110-1: 1997) [S]. London: British Standards Institution, 1997.
- [7] British Standards Institution. Concrete—part 2: methods for specifying concrete mixes (BS 5328-2: 1997) [S]. London: British Standards Institution, 1997.
- [8] British Standards Institution. Code of practice for Foundations (BS 8004: 1986) [S]. London: British Standards Institution, 2004.
- [9] European Committee for Standardization. Eurocode 2: Design of concrete structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings (BS EN 1992-1-1: 2004) [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [10] British Standards Institution. Testing hardened concrete -

Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds (BS EN 12390-1: 2021) [S]. London: British Standards Institution, 2021.

- [11] European Committee for Standardization. Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens (EN 12390-3: 2019) [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2019.
- [12] Japanese Industrial Standards. Method of test for compressive strength of concrete (JIS A1108: 2006) [S]. Tokyo: Japanese Standards Association, 2006.
- [13] Japan Society of Civil Engineers. Standards Specification for Concrete Structure—“Design”(JSCE Guidelines for Concrete No. 15) [S]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2008.
- [14] 日本工业标准调查会. 预制预应力混凝土制品(中文版): JIS A 5373—2004[S]. 东京: 日本工业标准调查会, 2004.

(本文编辑 王传瑜)