

· 疏浚工程 ·

钦州港东航道扩建工程挖掘砂岩比能

张更生^{1,2}, 曹凯¹, 殷瑞林¹, 张勇¹, 李能¹

(1. 中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202;

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

摘要: 依托广西钦州港东航道扩建工程, 基于重型绞吸船“天鲲号”疏浚典型砂岩时挖掘困难、刀齿和管线等磨损严重且输送时易堵管问题, 分析疏浚砂岩特性指标。从风化砂岩挖掘比能与船舶施工参数相关性角度, 基于挖掘施工参数及比能理论, 推导出钦州砂岩的特性指标单轴饱和抗压强度、绞刀消耗功率与挖掘产量的计算公式。利用该公式, 可预测重型绞吸船挖掘风化岩石的挖掘产量, 为疏浚工程经营生产提供技术支持。

关键词: 疏浚工程; 风化砂岩; 比能; 疏浚生产率; 产量预测

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S2-0053-05

Specific energy of excavated sandstone in east channel expansion project of Qinzhou Port

ZHANG Geng-sheng^{1,2}, CAO Kai¹, YIN Rui-lin¹, ZHANG Yong¹, LI Neng¹

(1. CCCC(Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300202, China;

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

Abstract: Relying on the east channel expansion project of Qinzhou Port in Guangxi, this paper investigates the problems, such as difficult excavation, serious wear of cutter teeth and pipes, and easy blockage of pipes during transportation, encountered in the dredging of typical sandstone by the heavy-duty cutter suction dredger “Tiankun” and analyzes the property indexes of dredged sandstone. From the perspective of the correlation of the excavation specific energy of weathered sandstone with the ship construction parameters, the paper derives the calculation formulas for the property indexes, such as saturated uniaxial compressive strength, power consumption of the reamer, and excavation production, of the sandstone in Qinzhou according to excavation construction parameters and the theory of specific energy. These formulas can be used to forecast excavation production during the excavation of weathered rock by a heavy-duty cutter suction dredger and provide technical support for the operation and production of dredging projects.

Keywords: dredging project; weathered sandstone; specific energy; dredging productivity; production forecast

广西钦州港东航道扩建工程疏浚土质为砂岩, 在水力、压力和温度等作用下, 由砂土颗粒与钙质胶结沉积而成。砂岩具有不均匀性, 软硬交替, 强度较大, 可挖性相对较差。在挖掘过程中, 对接触刀齿、水下泵和管线等磨损严重, 给疏浚施工造成重大隐患, 从而影响绞吸船挖掘效率, 使施工挖掘产量难确定、施工成本难以准确估算, 增大疏浚管理和运作风险。针对此类典型风化砂

岩, 基于比能理论和船舶施工参数, 找出疏浚岩石、绞吸船挖掘产量和船舶功率消耗的内在关系, 进行产量预估, 为疏浚岩石进行施工指导, 是钦州港东航道扩建工程亟待解决的问题。

目前, 国内外对于疏浚岩土特性与挖掘产量关系的研究取得了系列成果。张更生等^[1]以防城港 20 万吨级航道疏浚工程为例, 针对疏浚砂岩和泥质粉砂岩工程特性, 建立了疏浚岩体基本质量指

收稿日期: 2022-07-11

作者简介: 张更生(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程勘察设计和疏浚土质研究工作。

标修正值 $[BQ]_{TH}$ 和疏浚生产率的经验关系,对疏浚生产率进行预测,得到了良好的效果;Miedema^[2-3]进行了疏浚岩石破坏机理研究,建立了岩石单轴抗压强度和比能的关系曲线,利用比能、挖掘产量和绞刀消耗功率的关系,预测疏浚岩石施工的产量,他还进行了饱和砂土切削机理研究,建立了砂土破坏时受力与砂土内摩擦角、外摩擦角、刀齿切削角和剪切角相互关系,为疏浚机具的设计提供技术支持;Zhao等^[4]基于有限元原理,对饱和密实砂土切削进行数值模拟研究,指出饱和密实砂土的切削力受剪切膨胀影响严重,在疏浚船舶挖掘施工时要考虑此种现象对挖掘产量的影响。综上,国内外关于疏浚岩土对疏浚效率影响的研究,主要集中在密实砂土和岩石等土质切削过程中受力和切削比能研究,采用理论推导和室内试验的方法,对疏浚技术的应用达到了良好的效果。

本文借鉴国外疏浚土质与疏浚效率研究成果,依托广西钦州港东航道扩建工程,基于风化砂岩疏浚特性,建立了风化砂岩特性指标、绞刀功率和疏浚挖掘产量之间的相关关系,预测挖掘产量、优化疏浚施工工艺,提升该类土质疏浚工程施工的时效性、经济性和可靠性,为典型土质疏浚施工提供技术支撑,具有重要的实际应用价值。

1 疏浚砂岩特性

依据《广西钦州港东航道扩建工程》地勘资料,疏浚区域底高程-16.3 m,疏浚深度分布着砂岩和上部覆盖层,砂岩主要为细砂,局部含泥岩夹层;上部覆盖层主要为黏性土和砂土层。土质特性为:1)上部覆盖层。黏性土呈灰褐色-灰黄色、流塑-可塑状态,标准贯入击数2~10击,土质不均,软硬交替,含较多砂土颗粒。砂土层以中粗砂为主,松散-中密状态,标准贯入击数2~29击,平均值约为11击,局部夹杂角砾和风化残积土。2)砂岩。覆盖层下为强风化-中风化的细颗粒砂岩,强风化岩的单轴饱和抗压强度在5 MPa以下,中风化岩的强度指标一般在5 MPa以上。见表1^[5]。

表1 砂岩特性指标及疏浚级别

| 岩性 | 天然密度/ ($g \cdot cm^{-3}$) | 单轴饱和 抗压强度/ MPa | 岩石质 量指标/ % | 软化 系数 | 疏浚岩土 工程特性 分级 |
|-------|--------------------------------|----------------------|------------------|----------|--------------------|
| 强风化砂岩 | 2.35 | 0~5.0 | 0~26 | 0.55 | 11 |
| 中风化砂岩 | 2.55 | 5.0~36.9 | 35~85 | 0.70 | 12~13 |

依据疏浚区域的地质勘察资料和水深测图,计算出广西钦州港东航道扩建工程覆盖层、强风化砂岩和微风化砂岩的疏浚工程量,见表2。

表2 疏浚工程量

| 岩土类别 | 覆盖层 | 强风化砂岩 | 微风化砂岩 | 合计 |
|---------------|-----------|----------|----------|-----------|
| 疏浚工程量/万 m^3 | 109.217 8 | 31.396 7 | 43.829 1 | 184.443 6 |

由表1、2可以看出,钦州港东航道扩建工程强风化砂岩工程量为313.967万 m^3 ,占疏浚工程总量的17%;强风化砂岩裂隙发育强烈,岩体破碎,完整性很差,单轴饱和抗压强度在5 MPa以下,为极软岩,且遇水软化,重型绞吸船“天鲲号”挖掘容易;强风化砂岩经过绞刀破坏、水力作用和管线输送撞击,到达泥塘后呈角砾和卵石混合物。微风化砂岩疏浚工程量为43.829 1万 m^3 ,占疏浚工程总量的23.8%,疏浚厚度0~2.4 m,厚度不均,平均厚度为0.47 m,是影响疏浚效率的关键土质;单轴饱和抗压强度为5.0~36.9 MPa,为较软岩-较硬岩,裂隙发育不强烈,岩体完整性较好,较破碎-完整,软化系数为0.7,岩石经水浸泡后强度下降有限,特别是单轴饱和抗压强度25 MPa以上的为完整性较好的砂岩,重型绞吸船“天鲲号”挖掘不容易,施工时绞刀刀臂和刀齿磨损断裂问题突出,最严重时刀齿磨损为185个/万 m^3 ,使得挖掘效率难以控制,给疏浚生产造成极大风险。为了解决疏浚生产率计算问题,引入疏浚风化岩挖掘比能概念,进一步研究具体工况条件下疏浚挖掘产量预测问题,尽量减小疏浚施工风险。

2 “天鲲号”挖掘生产率、单轴饱和抗压强度和比能的相互关系

2.1 单轴饱和抗压强度与生产率关系

广西钦州港东航道扩建工程的施工船舶为“天鲲号”,3泵(1个水下泵和2个舱内泵)施工,

管线总长度 2 700~3 700 m, 流速 5.3~7.0 m/s, 绞刀消耗功率为 1~5 MW, 疏浚厚度普遍在 3 m 以下, 一次性挖掘到设计疏浚深度。

基于疏浚区域勘察成果、现场施工日志、项目部报表和船舶存储数据, 对具体工况下风化砂岩挖掘的数据进行统计分析, 选取正常施工的 68 组数据建立联系, 从而进行数据拟合, 单轴饱和抗压强度与疏浚挖掘生产率存在对数函数关系, 见图 1。

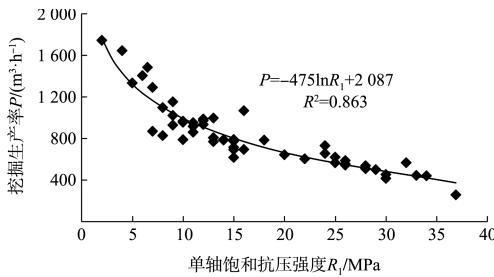


图 1 疏浚挖掘生产率与单轴饱和抗压强度相关关系

挖掘风化砂岩, 疏浚挖掘生产率与单轴饱和抗压强度存在对数函数关系:

$$P = -475 \ln R_1 + 2\ 087 \quad (1)$$

式中: R_1 为风化砂岩单轴饱和抗压强度 (MPa), $0 \leq R_1 \leq 36.9$ MPa; P 为风化砂岩的疏浚挖掘生产率 (m^3/h)。

2.2 砂岩单轴饱和抗压强度与比能关系

疏浚风化岩石挖掘比能即为开挖单位体积岩石消耗的能量, 由于疏浚岩石开挖过程都是通过绞刀向疏浚岩石输入一定的能量, 从而挖掘产生相应数量的岩石体积。疏浚挖掘比能既是物理量又是效率指标, 该指标可以衡量不同特性疏浚岩石开挖的难易程度, 利用疏浚岩石切削比能计算在不同功率消耗下风化岩石的挖掘生产率, 为疏浚岩石工程投标决策、施工管理提供技术支持, 见图 2。

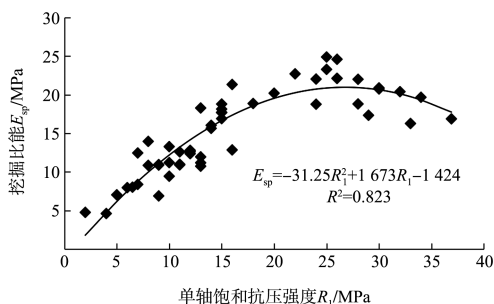


图 2 挖掘比能与单轴饱和抗压强度相关关系

对于风化砂岩, “天鲲号” 挖掘比能与单轴饱和抗压强度存在二次多项式关系:

$$E_{sp} = -31.25R_1^2 + 1\ 673R_1 - 1\ 424 \quad (2)$$

式中: R_1 为风化砂岩单轴饱和抗压强度 (MPa), $0 \leq R_1 \leq 36.9$ MPa; E_{sp} 为 “天鲲号” 挖掘风化砂岩挖掘比能 (MPa)。

从图 2 可以看出, 风化砂岩单轴饱和抗压强度 25 MPa 为 “天鲲号” 挖掘比能的分界线, 当单轴饱和抗压强度 $R_1 \leq 25$ MPa 时, 在绞刀、重型桥架和横移缆作用下, 重型绞吸船 “天鲲号” 绞刀刀齿较容易嵌入岩石, 并顺利切削岩石, 挖掘比能随着单轴饱和抗压强度增加而增加; 单轴饱和抗压强度在 25 MPa 附近时, 切削比能达到最大值 24.89 MPa; 当单轴饱和抗压强度 $R_1 > 25$ MPa 时, 在绞刀、重型桥架和横移缆作用下, 重型绞吸船 “天鲲号” 绞刀刀齿嵌入岩石变得困难, 随着岩石强度增加, 挖掘过程中绞刀刀齿切削厚度逐渐变小, 使得重型绞吸船的绞刀功率不能很好地发挥出来, 导致挖掘生产率降低, 出现挖掘比能随着单轴饱和抗压强度增加而逐渐降低的现象。

2.3 单轴饱和抗压强度、绞刀功率和挖掘生产率关系

在挖掘单轴饱和抗压强度 0~36.9 MPa 的风化砂岩时, 依据施工的基础数据, 已知挖掘风化砂岩绞刀消耗功率和挖掘生产率, 绞吸船 “天鲲号” 绞刀挖掘比能 E_{sp} 为:

$$E_{sp} = \frac{\eta Q_c}{P} \quad (3)$$

式中: Q_c 为绞刀额定功率, 取 6 600 kW; η 为绞刀挖掘效率发挥系数, 表示挖掘绞刀实际功率占额定功率的比值, 本工程经验系数为 0.2~0.6; P 为绞吸船 “天鲲号” 疏浚挖掘生产率 (m^3/h)。

将式(1)(2)代入式(3), 绞刀挖掘风化砂岩生产率可按下式计算:

$$E_{sp} = \frac{\eta Q_c}{-475 \ln R_1 + 2\ 087} \quad (4)$$

$$P = \frac{\eta Q_c}{-31.25 R_1^2 + 1\ 673 R_1 - 1\ 424} \quad (5)$$

3 “天鲲号” 挖掘砂岩生产率估算

在疏浚行业，挖掘比能定义为：挖掘单位土质(例如砂土、黏性土或岩石)所消耗的能量。挖掘比能的单位分别为：砂土和黏性土 kN/m^2 、 kPa 或 kJ/m^3 ，岩石通常使用 MN/m^2 、 MPa 或 MJ/m^3 。挖掘单轴饱和抗压强度 $0\sim 36.9\text{ MPa}$ 的风化砂岩时，挖掘生产率随着绞刀消耗功率和挖掘比能发生有规律变化，“天鲲号”绞吸船绞刀额定功率为 $6\ 600\text{ kW}$ ，经过统计发现，绞刀各种挖掘效率发挥系数(η 为 $0.2\sim 0.6$)的挖掘产量见表 3。

表 3 绞吸船“天鲲号”挖掘效率

| 单轴饱和抗压强度 R_1/MPa | 比能 E_{sp}/MPa | 生产率/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$ | | | | |
|---------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | | $\eta=0.2$ | $\eta=0.3$ | $\eta=0.4$ | $\eta=0.5$ | $\eta=0.6$ |
| 2 | 1.797 | 2 644 | 3 967 | 5 289 | 6 611 | 7 933 |
| 4 | 4.768 | 997 | 1 495 | 1 993 | 2 492 | 2 990 |
| 6 | 7.489 | 635 | 952 | 1 269 | 1 586 | 1 904 |
| 8 | 9.960 | 477 | 716 | 954 | 1 193 | 1 431 |
| 10 | 12.181 | 390 | 585 | 780 | 975 | 1 170 |
| 12 | 14.152 | 336 | 504 | 672 | 839 | 1 007 |
| 14 | 15.873 | 299 | 449 | 599 | 748 | 898 |
| 16 | 17.344 | 274 | 411 | 548 | 685 | 822 |
| 18 | 18.565 | 256 | 384 | 512 | 640 | 768 |
| 20 | 19.536 | 243 | 365 | 486 | 608 | 730 |
| 22 | 20.257 | 235 | 352 | 469 | 586 | 704 |
| 24 | 20.728 | 229 | 344 | 459 | 573 | 688 |
| 26 | 20.949 | 227 | 340 | 454 | 567 | 681 |
| 28 | 20.920 | 227 | 341 | 454 | 568 | 681 |
| 30 | 20.641 | 230 | 345 | 460 | 576 | 691 |
| 32 | 20.112 | 236 | 354 | 473 | 591 | 709 |
| 34 | 19.333 | 246 | 369 | 492 | 614 | 737 |
| 36 | 18.304 | 260 | 389 | 519 | 649 | 779 |
| 38 | 17.025 | 279 | 419 | 558 | 698 | 837 |

由表 3 的数据可知，在绞刀消耗功率相同条件下，随着风化岩单轴饱和抗压强度的增大，重型绞吸船的挖掘效率逐渐减小；在风化砂岩单轴饱和抗压强度相同条件下，随着绞刀消耗功率增大，重型绞吸船挖掘效率逐渐增大。挖掘单轴饱和抗压强度 $0\sim 36.9\text{ MPa}$ 的风化砂岩时，单轴饱和抗压强度、绞刀消耗功率和挖掘生产率之间的关系见图 3。

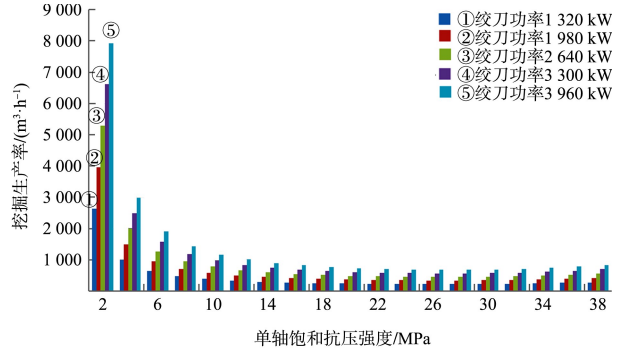


图 3 风化砂岩单轴饱和抗压强度、绞刀功率和挖掘生产率关系

基于“天鲲号”绞吸挖泥船挖掘风化砂岩的统计数据，可将数据整理为每消耗绞刀功率 100 kW 时单轴饱和抗压强度和挖掘生产率的关系，见图 4。

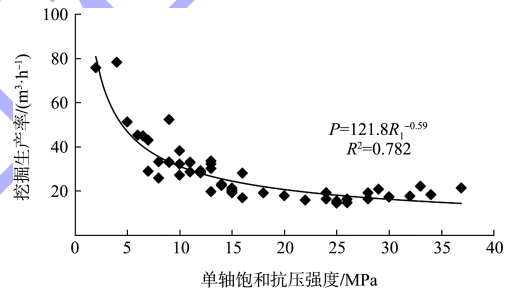


图 4 挖掘风化砂岩每消耗 100 kW 绞刀功率挖掘产量

疏浚广西钦州港东航道扩建工程时，实测了挖掘单轴饱和抗压强度为 $10、23\text{ MPa}$ 风化砂岩的生产率，挖掘生产率预测值和实测值对比见表 4。

表 4 挖掘生产率预测值和实测值对比

| 单轴饱和抗压强度 R_1/MPa | 绞刀功率/ kW | 预测生产率/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$ | 实测生产率/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$ | 相对偏差/ $\%$ |
|---------------------------|-------------------|---|---|------------|
| 10 | 2 000 | 591 | 531 | 11.3 |
| | 2 500 | 739 | 668 | 10.6 |
| | 3 000 | 887 | 830 | 6.8 |
| | 3 500 | 1 034 | 1 201 | -13.9 |
| 23 | 2 800 | 491 | 436 | 12.6 |
| | 3 200 | 561 | 512 | 9.6 |
| | 3 500 | 614 | 705 | -12.9 |
| | 4 000 | 702 | 860 | -18.4 |

注：相对偏差 = (预测生产率 - 实测生产率) / 实测生产率 $\times 100\%$ 。

基于表 4 的数据, 单轴饱和抗压强度为 10、23 MPa 时生产率预测值与实测值对比见图 5。

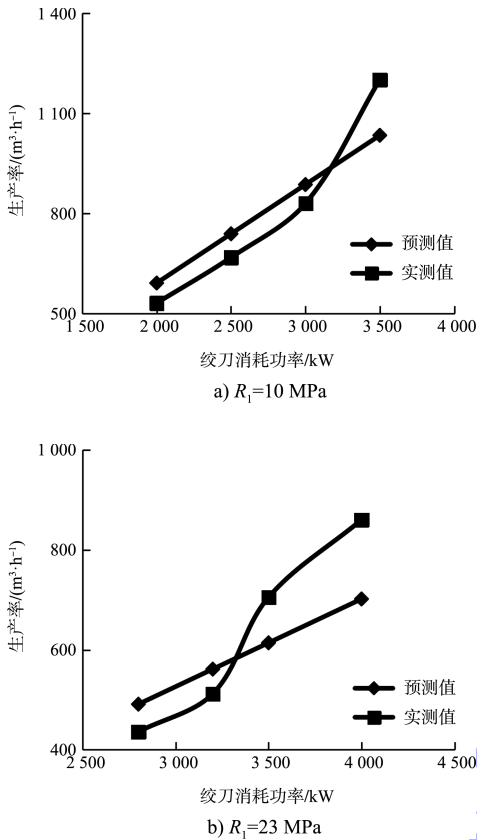


图 5 生产率预测值与实测值对比

从图 5 可看出,“天鲲号”重型绞吸船在挖掘风化砂岩时,利用推导公式计算和图表查找得到的疏浚生产率,与实际监测疏浚生产率相对偏差值区间为 $-18.4\% \sim 12.6\%$ 。从曲线的形态可知,挖掘相同风化强度砂岩,随着绞刀消耗功率增大,疏浚生产率的实测值和预测值均在变大,趋势一致。绞刀消耗功率 3 300 kW 为挖掘生产率预测值与实测值相对偏差分界线,当绞刀消耗功率小于 3 300 kW 时,预测值大于实测值,相对偏差为 $6.8\% \sim 12.6\%$;当绞刀消耗功率大于 3 300 kW 时,预测值小于实测值,相对偏差为 $-18.4\% \sim -12.9\%$;随着绞刀功率越大,挖掘生产率预测值和实测值的相对偏差越大,挖掘生产率预测值的相对偏差绝对值在 18.4% 以下。在指定工况条件下应用该生产率公式预测生产率,可靠性好;并可在以后的施工生产中,利用风化砂岩生产率公

式和相关图表预测此类土质施工效率,为疏浚施工投标决策、施工过程的管理控制提供技术支持,具有重要实际应用价值。

4 结论

1) 钦州港东航道扩建工程覆盖层、强风化砂岩和中风化砂岩相互交织,单轴饱和抗压强度为 $0 \sim 36.9 \text{ MPa}$,软硬交替,尤其单轴饱和抗压强度 25 MPa 以上完整性较好的中风化砂岩,重型绞吸船“天鲲号”挖掘不容易,施工时绞刀刀臂和刀齿磨损断裂问题突出,最严重时刀齿磨耗为 185 个/万 m^3 ,使得挖掘效率难以控制,给疏浚生产造成极大风险。

2) 基于比能理论和施工参数,推导出单轴饱和抗压强度、绞刀消耗功率与挖掘生产率的计算公式。

3) 基于推导出的公式和图表预测“天鲲号”绞吸船挖掘风化细颗粒砂岩的生产率,与实测值对比,其相对偏差在 18.4% 以下,可靠性好,可为类似工程生产经营提供借鉴。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] MIEDEMA S A. New developments of cutting theories with respect to dredging, the cutting of clay & rock[C]//WEDA XXIX & Texas A&M 40. Brussels: WEDA, 2009.
- [3] MIEDEMA S A. The cutting of water saturated sand, the solution [C]//The 2nd China Dredging Association International Conference & Exhibition.Beijing: CHIDA, 2006.
- [4] ZHAO Y, MIEDEMA S A. Finite element calculations to determine the pore pressures when cutting water saturated sand at large cutting angles [C]//CEDA Dredging Day 2001.Delft: CEDA, 2001.
- [5] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司,中交天津港航勘察设计研究院有限公司.疏浚与吹填工程设计规范: JTS 181-5—2012[S].北京:人民交通出版社,2012.