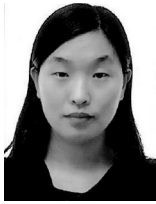


· 施 工 ·



重型自航绞吸船天鲸号岩石输送分析*

田会静¹, 秦亮², 高伟²

(1. 中交天津港航勘察设计院有限公司, 天津 300461; 2. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461)

摘要: 针对国内外疏浚业缺乏关于岩石输送分析资料的现状, 立足于泥泵及管路输送系统原理, 以亚洲第一大重型自航绞吸船天鲸号输送岩石的施工数据为基础, 对泥泵泥浆扬程换算系数和管路沿程摩阻系数分别进行反分析。对于风化较为严重且混有大量细颗粒成分的岩石与风化程度较弱几乎全部由岩块构成的两种岩石的泥泵泥浆扬程计算方法进行研究, 验证经验公式的适用性, 同时反分析得出输送两种岩石时的管路沿程摩阻系数。由于岩石的单轴饱和抗压强度不同, 沿程摩阻系数差距很大, 建议针对性地对项目的土质进行反分析得出沿程摩阻系数。

关键词: 自航绞吸船; 天鲸号; 岩石送特性; 管路特性; 沿程摩阻系数

中图分类号: U 616^{+.21}

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0179-05

Rock transport of heavy-duty self-propelled cutter suction dredger Tian Jing Hao

TIAN Hui-jing¹, QIN Liang², GAO Wei²

(1. CCCC Tianjin Port & Waterway Prospection & Design Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: In view of the lack of rock transport information at home and abroad, this article performs a back analysis on the slurry pump head and pipe coefficient of friction resistance based on delivery system principle and operational data of Asia's first heavy-duty self-propelled cutter suction dredger Tian Jing Hao. On this basis, the paper verifies the applicability of the empirical formulas and gets the pipe coefficient of friction resistance of two kinds of rock, one is weathered and mixed with a lot of fine-grained component, and the other is weakly-weathered rock which is almost totally blocks. Considering the pipe coefficient of friction resistance varyend from the hard of uniaxial compressive strength, it is recommended to calculate the pipe coefficient of friction resistance by performing a back analysis on the rock conditions.

Key words: self-propelled cutter suction dredger; Tian Jing Hao; rock transport characteristics; pipe characteristics; coefficient of friction resistance

在疏浚工程逐步繁荣的局面下, 疏浚行业对于挖岩疏浚施工已经极为重视, 世界上大的疏浚公司都在技术上和设备上做了较为充分的准备。就礁岩疏浚而言, 目前所采用的主要疏浚设备为绞吸式挖泥船。“天鲸号”是天航局为适应复杂挖岩工程, 追赶国际疏浚船舶发展水平而自行设计建造的重型挖岩绞吸船, “天鲸号”船长127.5 m, 宽23.0 m, 吃水5.5 m, 最大挖深30 m, 配备多种当前

国际最先进的疏浚设备, 绞刀功率达到4 200 kW, 生产能力4 500 m³/h, 是亚洲当前最大功率的绞吸式挖泥船, 并且具有无限航区的航行能力和装驳功能, 灵活机动, 适用于各种海况的大型疏浚工程。

“天鲸号”不仅可以疏浚黏土、密实沙、碎石, 还可以开挖耐压强度达40 MPa的岩石。“天鲸号”的建造改变了人们清除海底岩石的方式, 可大大减少海底爆破工程的数量, 增大工程安全系数, 也

收稿日期: 2012-04-20

作者简介: 田会静(1982—), 女, 硕士, 工程师, 从事疏浚技术工作。

可减少对海洋的污染。

对于岩石的输送，国内外这方面的计算资料甚为少见，目前尚无可用的计算方法。本文立足于传统的绞吸船输送系统原理，以天鲸号输送岩石的施工数据为基础，对岩石输送进行初步的分析研究。

1 绞吸船输送系统原理

1.1 泥泵特性参数的计算公式^[1]

1) 泥浆流量计算公式。

$$Q_r = Q_w \quad (1)$$

式中： Q_r 为泥浆流量（ m^3/s ）； Q_w 为清水流量（ m^3/s ）。

2) 泥浆扬程计算公式。

泥泵泵送泥浆时的水力特性受土质、土壤颗粒、泥浆浓度、密度及流态等因素影响较大，至今实验数据较少，目前所见到的表示泥泵泵送泥浆特性的公式，基本形式均为 $H_r = H_w f$ ，现列举两个泥浆扬程经验计算公式如下：

$$H_r = H_w [K_H(\gamma - 1) + 1] \quad (2)$$

式中： H_r 为泥浆扬程（ m ）； H_w 为清水扬程（ m ）； K_H 为与土质有关的系数； γ 为泥浆比重。

$$H_r = \gamma(1 - KP)H_w \quad (3)$$

式中： H_r 泥浆扬程（ m ）； H_w 为清水扬程（ m ）； γ 为泥浆比重； K 为与土质有关的系数， P 为泥浆的天然土体积浓度（%）。

3) 天然土体积浓度计算公式。

$$P = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_t - \rho_w} \quad (4)$$

式中： P 为泥浆的天然土体积浓度（%）； ρ_m 为泥浆密度（ t/m^3 ）； ρ_w 为海水密度（ t/m^3 ），取值 $1.025 t/m^3$ ； ρ_t 为天然土密度（ t/m^3 ）。

1.2 管路特性曲线计算公式

1) 管路清水损失总水头计算公式。

$$H_w = \zeta_1 \frac{v_s^2}{2g} + \lambda_{w_1} \frac{l_s}{D_s} \frac{v_s^2}{2g} + \sum \zeta_2 \frac{v_s^2}{2g} + \lambda_{w_2} \frac{l_d}{D_d} \frac{v_d^2}{2g} + \sum \zeta_3 \frac{v_d^2}{2g} + \lambda_{w_2} \frac{l}{D_d} \frac{v_d^2}{2g} + \sum \zeta_4 \frac{v_d^2}{2g} + \gamma \frac{v_d^2}{2g} + Z\gamma \quad (5)$$

式中： H_w 为管路清水损失总水头（ m ）； ζ_1 为吸泥口损失水头系数； v_s 为吸泥管平均流速（ m/s ）； g 为

重力加速度（ m/s^2 ）； λ_{w_1} 为吸泥管清水摩阻系数； D_s 为吸泥管内径（ m ）； l_s 为吸泥管长度（ m ）； ζ_2 为吸泥管局部（附件）清水阻力系数总和； λ_{w_2} 为船上排泥管摩阻系数； D_d 为排泥管内径（ m ）； v_d 为排泥管平均流速（ m/s ）； $\sum \zeta_3$ 为船上排泥管局部（附件）清水阻力系数总和； l_d 为船上排泥管长度（ m ）； l 为排泥管总长度（ m ）； $\sum \zeta_4$ 为排泥管局部（附件）清水阻力系数总和； γ 为海水比重； Z 为排高（ m ）。

2) 管路输送泥浆局部水头损失计算公式。

$$H_m = \gamma \zeta_w \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

式中： H_m 为管路泥浆局部损失水头（ m ）； γ 为泥浆比重； ζ_w 为清水局部损失系数； v 为管平均流速（ m/s ）； g 为重力加速度（ m/s^2 ）。

3) 管路输送泥浆沿程水头损失计算公式。

$$H_m = \lambda_m \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

式中： H_m 为管路泥浆沿程损失水头（ m ）； λ_m 为沿程摩阻系数； l 为管线长度（ m ）； D 为管内径（ m ）。

1.3 输送系统能量方程

将压力传感器的安装位置作为基准面即断面1，管路出口处的断面作为断面2，两个断面间的能量损失包括管路的沿程阻力损失和局部阻力损失，出口处排压为零，建立两个断面的能量方程如下：

$$\frac{P}{\rho_m g} + \gamma \frac{v_1^2}{2g} = \lambda_m \frac{l}{D} \frac{v_2^2}{2g} + \gamma \zeta_w \frac{v_2^2}{2g} + \gamma \frac{v_2^2}{2g} + \gamma Z \quad (8)$$

式中： P 为断面1压力（ kPa ）； ρ_m 为泥浆密度（ kg/m^3 ）； v_1 为断面1管平均流速（ m/s ）； λ_m 为管线沿程摩阻系数； l 为管线长度（ m ）； D 为管内径（ m ）； v_2 为断面2管平均流速（ m/s ）； ζ_w 为清水局部损失系数； Z 为排高（ m ）； g 为重力加速度（ m/s^2 ）； γ 为泥浆比重。

2 泥泵特性曲线分析

2.1 防城港施工参数反分析

2011年3月天鲸号在防城港进行施工，土质为中风化泥质粉砂岩，单轴饱和极限抗压强度为 $22 \sim 44 MPa$ ，部分岩石属于硬质岩石^[2]。施工工况

为水下泵装驳, 水下泵转速为159 r/min, 选取不同泥浆密度的施工数据作为样本进行分析计算, 结果见图1。

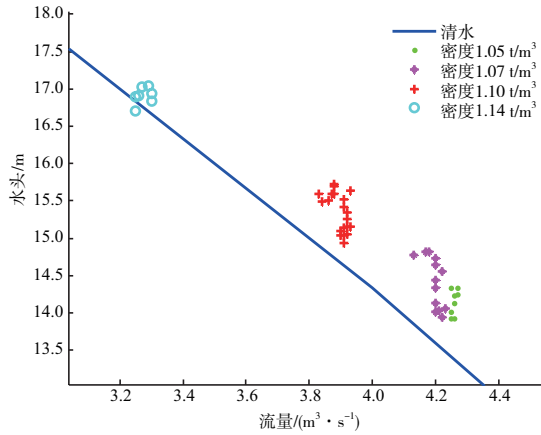


图1 天鲸号水下泵泥浆特性施工数据

根据施工数据和泥泵的清水数据, 可以反分析出泥泵泥浆扬程土质换算系数。下面分别采用式(2)和式(3)两种方法进行计算, 计算结果分别见表1和图2, 3。

表1 防城港泥泵泥浆扬程土质换算系数

密度/(t·m ⁻³)	K _H	K
1.05	1.031	0.55
1.07	0.808	0.74
1.10	0.439	0.87
1.13	0.053	
经验参数	0.250	0.75

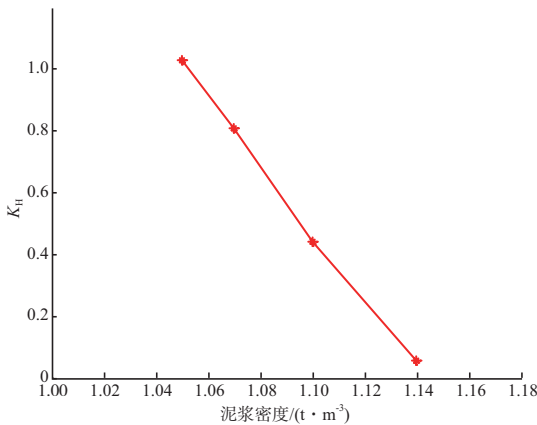


图2 防城港换算系数K_H曲线

可以看出, 输送岩石时, 泥浆密度不同, K_H和K系数是变化的, K_H随密度的增大而减小, K随泥浆密度的增大而增大。传统经验推荐的K_H和K分别是0.25和0.75, 相比可以看出, 根据式(2)

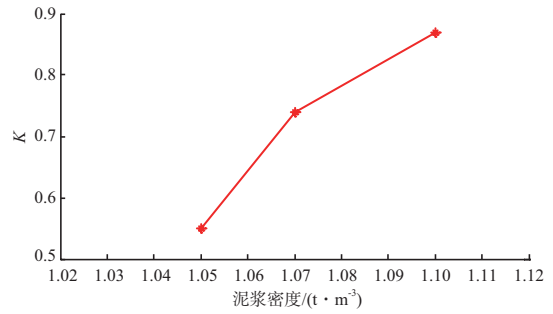


图3 防城港换算系数K曲线

反分析出来的K_H与已知的传统经验提供的参数相差很大, 而根据式(3)反分析出的系数K与传统经验推荐的0.75值基本吻合, 故推荐在计算抗压强度较大的岩石的泥泵泥浆沿程计算中采用式(3)更加合理。

2.2 东莞施工参数反分析

2011年10月天鲸号在防城港施工, 土质为粉质黏土+中风化页岩, 岩石饱和抗压强度5~12 MPa, 属于软质岩石^[2]。施工工况为水下泵+2[#]泵吹填, 水下泵转速为200 r/min, 2[#]泵转速为278 r/min, 取不同泥浆密度的数据作为样本进行分析计算(图4)。

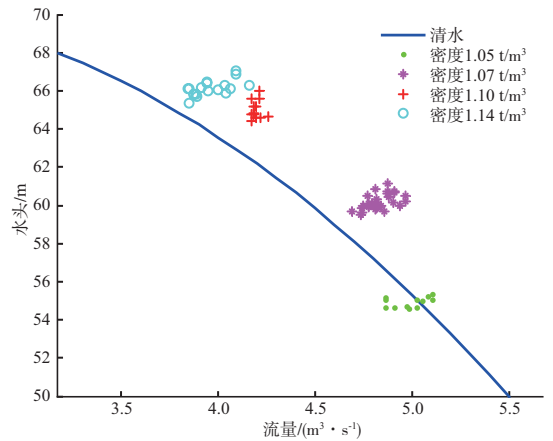


图4 天鲸号2[#]泵泥浆特性施工数据

根据施工数据和泥泵的清水数据, 反分析出泥泵泥浆扬程土质换算系数。下面分别采用式(2)和式(3)两种方法进行计算。计算结果分别见表2和图5, 6。

表2 东莞泥泵泥浆扬程土质换算系数

密度/(t·m ⁻³)	K _H	K
1.07	0.818 0	0.595 8
1.10	0.452 5	0.846 1
1.14	0.265 3	1.000 0
经验参数	0.250 0	0.750 0

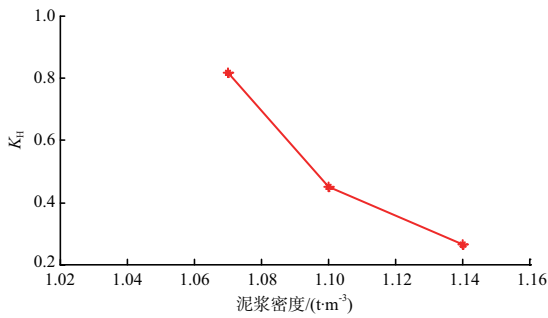


图5 东莞换算系数 K_H 曲线

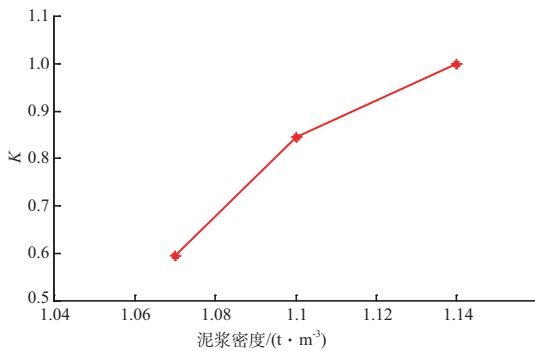


图6 东莞换算系数 K 曲线

由于东莞输送的主要是粉质黏土+风化岩，岩石较软，故 K_H 比防城港输送岩石的参数偏小，且 K_H 和 K 与传统经验值相差不大，故当输送抗压强度较小的岩石时，两种计算方法都可采用。

3 管路特性曲线分析

3.1 防城港装驳管装驳施工数据分析

3.1.1 施工数据采集

2011年3月天鲸号在防城港施工，施工土质为风化岩，选取不同泥浆密度的数据作为样本进行分析计算，统计结果见表3。

表3 东莞施工数据

泥浆密度/ $t \cdot m^{-3}$	排压/bar	流速/ $m \cdot s^{-1}$
1.05	1.10	6.01
1.07	1.09	5.93
1.10	1.11	5.53
1.14	1.23	4.82

3.1.2 管线布置情况

天鲸号于2011年3月采取的是装驳施工，故将此工况下的管线长度、弯头等附件的数量及局部损失情况统计如表4，其中，工况1指前装驳管装驳，工况2指水下泵左后舷装驳管装驳，工况3指水下泵右后舷装驳管装驳。

表4 船上管线计算参数

工况	λ_{ws}	λ_{wd}	ζ_1	ζ_2	ζ_3	Z/m	l_j/m	l_d/m	D_j/m	D_d/m
1	0.011 8	0.012 1	0.8	4.48	3.93	1	35.42	35.70	0.95	0.9
2	0.011 8	0.012 1	0.8	4.48	4.92	1	35.40	63.20	0.95	0.9
3	0.011 8	0.012 1	0.8	4.48	4.60	1	64.25	35.42	0.95	0.9

3.1.3 沿程摩阻系数分析结果

根据该施工工况的管线布置情况，计算输送的管线长度和局部阻力损失系数，统计施工数据，根据式(8)反分析出输送岩石的管路沿程阻力系数 λ_m ，计算结果见表5。沿程摩阻系数随密度的变化情况见图7。

表5 防城港沿程摩阻系数

泥浆密度/ $t \cdot m^{-3}$	λ_m
1.05	0.048 4
1.07	0.051 0
1.10	0.078 7
1.14	0.167 3

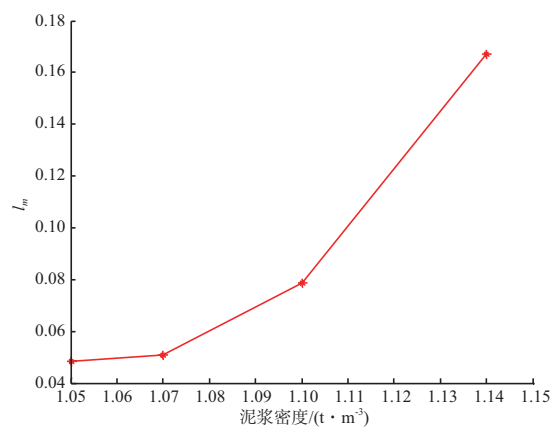


图7 防城港沿程摩阻系数变化曲线

3.2 东莞吹填施工数据分析

3.2.1 施工数据采集

2011年10月天鲸号在防城港施工，施工土质为粉质黏土+风化岩，选取不同泥浆密度的数据作为样本进行分析计算，统计结果见表6。

表6 东莞施工数据

泥浆密度/ $t \cdot m^{-3}$	排压/bar	流速/ $m \cdot s^{-1}$
1.06	5.87	6.18
1.10	7.78	5.79
1.15	8.93	5.85
1.19	9.41	5.14

3.2.2 管线布置情况

天鲸号于2011年10月采取的是双泵吹填施

工, 将此工况下的管线长度、弯头等附件的数量及局部损失情况统计如表7, 8。

表7 船上管线计算参数

λ_{ws}	λ_{wd}	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4	Z/m	l_i/m	l_d/m	D_i/m	D_d/m
0.0118	0.0121	0.8	6.30	4.13	8.1	5	43.26	48.76	0.95	0.9

表8 吹填管线布置情况

项目	管径/mm	钢管长/m	胶皮套/(个·m ⁻¹)	自浮管/(个·m ⁻¹)	变径/个
水上管线	$\phi 900$	360	31 × 2.9, 3 × 1.8	2 × 11.9	1
陆地管线	$\phi 800$	459			

3.2.3 沿程摩阻系数分析结果

根据该施工工况的管线布置情况, 计算输送的管线长度和局部阻力损失系数, 统计施工数据, 根据公式(8)反分析出输送岩石时的管路沿程阻力系数 λ_m , 计算结果见表9和图8。

表9 东莞沿程摩阻系数

泥浆密度/(t·m ⁻³)	λ_m
1.06	0.015 7
1.10	0.026 1
1.15	0.029 9
1.19	0.042 2

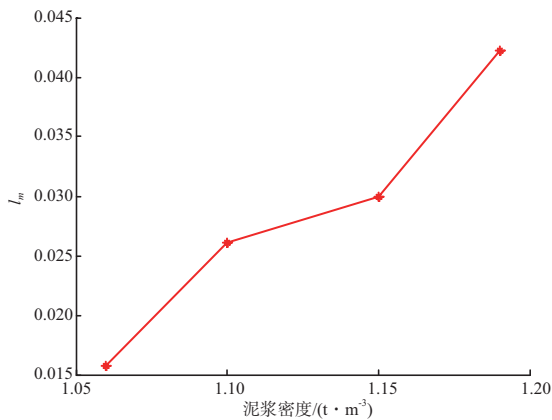


图8 东莞沿程摩阻系数变化曲线

对比防城港和东莞的管路沿程阻力系数计算结果可以看到, 防城港的阻力系数远大于东莞的

计算结果, 同一密度下的阻力系数相差3倍左右, 究其原因, 主要是两地的岩石硬度相差较大, 防城港的岩石风化程度较弱, 几乎全部由岩块构成, 而东莞的岩石风化严重, 且混有大量细颗粒成分。故在计算管路沿程阻力系数时, 建议针对性地对项目的土质进行反分析, 得出针对具体项目土质情况的沿程阻力系数。

4 结论

本文以天鲸号在防城港和东莞两个项目的输送岩石的施工数据为基础, 分别对泥泵泥浆扬程和管路的沿程摩阻系数进行反分析, 得知: 在输送单轴饱和抗压强度较小的岩石时, 泥泵泥浆扬程换算系数可以采用式(2)和式(3)进行计算, 反之, 则应采用式(3)进行计算。对于计算输送岩石的管路沿程摩阻系数, 由于岩石的抗压强度不同, 软硬程度不同, 沿程摩阻系数差距很大, 建议针对性地对项目的土质进行反分析, 得出针对具体项目土质情况的沿程阻力系数。

参考文献:

- [1] 天津市航浚科技服务有限公司. 绞吸挖泥船泥泵输泥计算手册[R]. 天津: 天津市航浚科技服务有限公司, 1996.
- [2] 上海航道局. 疏浚岩土分类标准[R]. 上海: 上海航道局, 1997.

(本文编辑 武亚庆)