

· 施 工 ·



砂性土粒径与水力式疏浚施工输送产量的关系

肖云丰¹, 秦 亮¹, 杨正军², 田会静²

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

摘要: 砂性土输送生产率计算需要较为复杂的过程, 其涉及泥泵特性、管路布置信息、驱动功率、天然土密度、沉降流速等数据, 且往往其中部分量难以准确获取。为此, 专门针对砂性土粒径对输送的影响进行研究, 依据浆体管路输送原理, 对疏浚施工水力式挖泥船砂性土输送生产率限制条件进行分析, 得到简化的砂性土生产率计算方法, 在已知某种砂性土粒径的情况下, 可直接求出输送生产率, 而不必经过泥泵特性曲线、管路曲线求取等复杂过程, 该方法可为疏浚工程生产预测提供参考。

关键词: 浆体管路输送; 水力式挖泥船; 砂性土; 粒径; 生产率

中图分类号: U 616⁺ 21

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0163-04

Effect of sandy soil particle size on hydraulic dredging transportation production

XIAO Yun-feng¹, QIN Liang¹, YANG Zheng-jun², TIAN Hui-jing²

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

2. CCCC Tianjin Port & Waterway Prospection & Design Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: Sandy soil productivity calculations require more complex delivery process, which involves the characteristics of pumps, piping layout information, driving power, natural soil density, settling velocity of flow, and often difficult to accurately obtain some amount. Based on the transportation principle of slurry pipeline, we analyze the restrictions of hydraulic dredger medium sand dredging productivity, and obtain the specific relationship between the particle size and productivity of hydraulic dredgers transportation under the system's limitations of load and discharge pressure. According to the quantitative relationship, in cases of some sandy soil particle known, the productivity of other sand particle size can be obtained directly without needing complex calculations. This method can provide a reference for the forecast of the dredging project's production and revision of the dredging norm.

Keywords: slurry pipeline transportation; hydraulic dredger; sandy soil; particle size; productivity

疏浚生产率的计算是施工企业投标报价、施工组织计划编制等工作的基础。水力式挖泥船的疏浚生产率限制条件主要分为挖掘限制与输送限制两大类, 对应施工综合生产率为两者之中的小值。我国交通运输部《疏浚工程预算定额》中, 按照土级进行划分, 给出其各种船型对应艘班。现行疏浚规范中岩土分级主要依据挖掘的难易程度进行划分, 不适宜用来进行输送难易程度评级。

国内一些先进疏浚企业施工定额体系对于砂性土采用挖掘生产率按照岩土分级确定, 输送生产率按照粉、细、中和粗 4 种砂性土类别来划分的方式进行确定, 相对来说更为体系化且更为科学。但依据实际生产数据显示, 砂性土粒径对生产率的影响很大, 理论计算方法也显示粒径为生产影响的明显因素, 输送阻力、临界流速对粒径指标十分敏感, 但这些理论仅给出输送阻力、临界流

收稿日期: 2014-02-04

作者简介: 肖云丰 (1965—), 男, 高级工程师, 从事港口航道施工技术工作。

速与粒径的关系,没有直接反映输送生产率与粒径的关系。鉴于此,本文对疏浚施工中砂性土粒径对输送生产率的影响进行研究,得出水力式挖泥船输送系统负荷及排压限制条件下的土颗粒粒径与生产率的具体关系。

1 输送系统运行限制因素及粒径产生的影响

水力式挖泥船挖吹施工时,输送介质流动要克服管道的阻力,克服这些阻力的能量由泥泵提供。因此,由能量观点知系统的实际工作点就是泥泵流量 Q -扬程 H 特性曲线与排泥管路流量 Q -耗用水头 H 特性曲线之交点。

该交点处的流量与浓度就决定了施工的产量,获得最大产量的方法就是选择大流量高浓度的工况运行。

然而由输送系统特性匹配的原理可知,浓度的提高和流量的提高往往并不能同时达成,并且流量与浓度的提高还受到各种物理条件的限制,比如泵的原动机功率、吸入真空、临界流速、设备承压等。因此,要获得最大的产量就必须调整泥泵或管路特性使系统在满足各种限制条件的工况下,达到流量与浓度的乘积最大。

表征或决定挖泥船输送系统运行状态的参量包括流量、浓度、吸入真空、排出压力、管径、粒径、功率、流速、管长、产量、排高、挖深、转速、磨阻系数、临界流速等。

整个系统主要受到的限制有^[1]: 1) 泵机负荷限制 $N < N_0$: 主要是限制泵运行工况点处的功率不能超过泵机对应转速下所能提供的最大功率,否则原动机无法提供足够的能量; 2) 输送流速限制 $v > v_c$: 输送流速必须大于临界流速,否则颗粒将产生沉积无法起动输送; 3) 系统最大压力限制 $P < P_0$: 系统所能提供的最大压力有限,否则,泵或管线将产生破坏,施工的安全性不能得到满足; 4) 真空限制 $p_c < NPSH_r$: 主要是限制泥泵吸入真空不能过大,否则将产生汽蚀,甚至断流,危及

设备安全,本文主要考虑挖泥船的输送排出问题,所以有关吸入方面的真空限制不在此进行讨论。

几种限制因素相互关联,现代大型水力式挖泥船一般吸入管路远短于排出管路,并且在挖深不大的情况下,由于其往往具有水下泵系统,吸入浓度限值不会成为生产的限制因素,因此本文不考虑泵前挖掘吸入浓度及吸入管路的限制,将粒径对生产的影响分为两种情况进行研究: 1) 在满足临界流速的情况下,排压受限时粒径与生产率的关系; 2) 在满足临界流速的情况下,负荷受限时粒径与生产率的关系。

2 排压受限条件下砂性土粒径与生产率的关系

忽略排高及局部水力损失的影响,管路水头损失计算公式为^[2]:

$$H_f = \lambda_m \frac{l}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = K\lambda_w \frac{l}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

式中: H_f 为浆体管路水头损失 (m); λ_m 为泥浆摩阻系数; λ_w 为清水摩阻系数; l 为管线长度 (m); v 为管平均流速 (m/s); D 为管子内径 (m); g 为重力加速度 (9.81 m/s^2); K 为泥浆阻力系数与清水阻力系数之比值。 K 计算公式如下:

$$K = 1 + CK_D \left[\frac{v^2}{gD(S_s - 1)} \sqrt{\frac{gd_s(\rho_s - 1)}{v_{ss}^2}} \right]^{-3/2} \quad (2)$$

式中: K_D 为试验系数,取值 121; C 为泥浆土壤颗粒体积浓度 (%); v_{ss} 为土壤颗粒在静水中的沉降速度 (m/s); d_s 为砂粒直径 (mm); ρ_s 为土颗粒密度。

输送系统达到最大生产率的时候,浆体浓度一般为对应流速下的最大值,也即此时的流速为该浓度下的临界流速。施工中,为了安全起见实用流速需高于临界流速,因为如果完全按照临界流速施工,只要略有波动将发生颗粒沉降,面临堵管风险。实用流速是在临界流速的基础上乘以一个大于 1 的系数获得。由于本文讨论的是系统稳定状态下的输送能力问题,所以为了更清楚地

分析输送产量最大时的限制,以下分析中假定施工流速为临界流速。对于砂性土临界流速计算公式为^[3]:

$$v_c = (90C)^{1/3} g^{1/4} D^{1/2} v_{ss}^{1/2} d_s^{-1/4} \quad (3)$$

式中: v_c 为临界流速 (m/s)。

临界流速为施工流速,将式(3)代入式(2),简化得:

$$K = 1 + K_D \frac{(90)^{-1}}{(S_s - 1)^{-3/4}} \quad (4)$$

因此,输送水头损失为:

$$H_m = \lambda_m \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = \lambda_w [1 + 90^{-1} K_D (S_s - 1)^{\frac{3}{4}}] \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

在输送系统中排压等于管线水头损失,因此根据式(5)可知在系统所能达到的最大压力一定时,能达到的泥浆最高流速就是确定的。

也即临界流速为一恒量,在流速确定的条件下,根据式(3)确定不同粒径土质能输送的最大浓度值,然后根据流速和浓度计算最高产量。

3 负荷受限情况下砂性土粒径与生产率的关系

负荷受限将使输送系统在浓度保持不变的情况下流速有所增加,或流速保持不变的时候浓度有所增加,因此生产率也将不再增加。

负荷限制条件对应为:

$$N = \rho_m g Q H = Q p \quad (6)$$

式中: N 为泥泵的轴功率 (kW); ρ_m 为泥浆密度 (t/m^3); 即泥泵流量与压头乘积为定值,泵前管路水力损失远小于泵后排出管路,因此,式(5)可以代入式(6)得:

$$N = \lambda_w [1 + 90^{-1} K_D (S_s - 1)^{\frac{3}{4}}] \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{v \pi D^2}{4} \quad (7)$$

由式(7)可以看出,在负荷为一限定值的情况下,达到最大产量时,与上面排压限定情况相同,流速也为一定值,即临界流速为一恒量,根据式(3)可确定不同粒径土质能输送的生产率。

4 工程应用

由式(3)可以看到,土质粒径和浓度并不是简单的线性关系,而是一个联系了沉降速度的复杂函数关系。改写式(3)可得颗粒体积浓度为:

$$C = \frac{1}{90} \left(\frac{v_c}{g^{1/4} D^{1/2}} \right)^3 \left(\frac{d_s}{v_{ss}^2} \right)^{3/4} \quad (8)$$

天然土体积浓度与颗粒体积浓度关系式:

$$P = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho - \rho_w} \cdot C \quad (9)$$

式中: P 为天然土体积浓度 (t/m^3); ρ_w 为海水密度; ρ 为天然土密度。

由式(9)可得产量:

$$W = QP = \frac{Q}{90} \left(\frac{v_c}{g^{1/4} D^{1/2}} \right)^3 \left(\frac{d_s}{v_{ss}^2} \right)^{3/4} \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho - \rho_s} \quad (10)$$

最大输送产量与粒径有式(10)的关系,要建立土质粒径与最大输送产量的关系,就是要建立土质粒径与 $\left(\frac{d_s}{v_{ss}^2} \right)^{3/4}$ 的关系。

根据土质沉降速度可以拟合粒径与 $\left(\frac{d_s}{v_{ss}^2} \right)^{3/4}$ 的函数关系 (图1)。因此可以将最大输送产量 W 与土质粒径写为下列表示形式:

$$W = A \cdot \left(0.6522 + \frac{0.06391}{d_s - 0.04705} \right) \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho - \rho_w} \quad (11)$$

式中: A 为系数,指代 $\frac{Q}{90} \left(\frac{v_c}{g^{1/4} D^{1/2}} \right)^3$, 与管径有关。

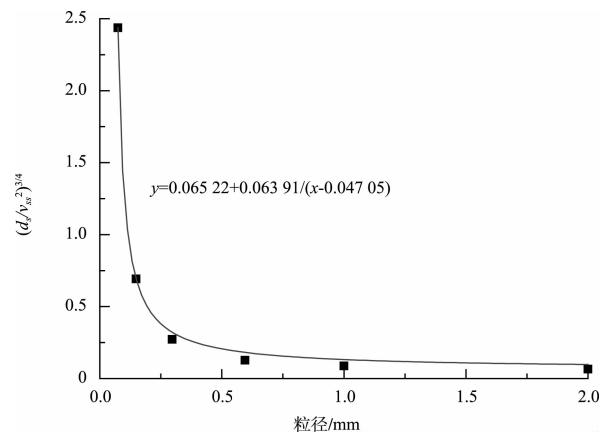


图1 砂性土粒径拟合曲线

举例如下,某港池疏浚工程,勘察报告显示:土质上层为细砂,中值粒径 0.23 mm,土质密度 1.8 t/m^3 ;下层为中砂,粒径 0.35 mm,土质密度 1.9 t/m^3 ;选用大型绞吸船施工,上层土质输送生产率为 $2\,500 \text{ m}^3/\text{h}$,在系统已经达到最大承压,吹距、排高等其他工况条件基本不变的前提下,对下层土质输送生产率进行预测如下:

通过已知上层土质输送生产率 $W=2\,500 \text{ m}^3/\text{h}$, $d_s=0.23 \text{ mm}$, $\rho_s=2.7 \text{ t/m}^3$, $\rho=1.8 \text{ t/m}^3$, $\rho_w=1.025 \text{ t/m}^3$,可求得系数 A 为 2 790.3;因此当输送下层中砂时,粒径 $d_s=0.35 \text{ mm}$, $\rho=1.9 \text{ t/m}^3$,下层土质输送生产率 $W=1\,475 \text{ m}^3/\text{h}$,实际显示施工生产率约在 $1\,450 \text{ m}^3/\text{h}$,与预测结果接近。

5 结论

1) 在两类限制条件下,不同粒径的砂性土输

送达到最大理论生产率时流速为一定值;2) 考虑颗粒密度、天然土密度、沉降流速等物理量与临界流速的关系,得出仅与粒径有关的输送产量的计算表达式;3) 实例表明应用该式快速简单准确,可为疏浚工程生产预测提供参考。

参考文献:

- [1] Qin Liang, Tian Huijing. Study on output optimization of hydraulic dredger transportation[C]. World Organization of Dredging Associations. Beijing: 19th World Dredging Congress, 2010: 87-93.
- [2] Durand. Basic relationships of the transportation of solids in pipes-experimental research[C]. USA: Proc Minnesota International Hydraulics Convention, 1953: 89-103.
- [3] JTS 181-5—2012 疏浚与吹填工程设计规范[S].

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 162 页)

6 结语

对建筑物基底扬压力的计算,如果引入平面有效空隙率的概念,可以在安全的前提下有效地节省工程投资。这一点对今后地下建筑物的设计具有很大意义。本文试图从扬压力的理论分析计算、实验验证等方面来探讨地下建筑物不同地质条件下基底扬压力的定量计算方法,但尚处于起步阶段,目前不能给出量化指标。关于地下建筑物基底扬压力的定量计算方法,还有待于今后工程资料的不断积累、研究的进一步深化及实验手段的逐步提高,也期待与各位同行及专家进行进一步探讨。

参考文献:

- [1] 北京市注册工程师管理委员会. 注册岩土工程师执业资格考试基础考试复习教程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 1 271-1 272.
- [2] 李广信, 吴剑敏. 浮力计算与黏土中的有效应力原理[J]. 岩土工程技术, 2003(2): 63-66.
- [3] 黄志伦. 关于地下建筑物的地下水扬力问题分析[J]. 岩土工程技术, 2002(5): 273-275.
- [4] JTG D63—2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)