

· 施 工 ·



管道输送硬塑性黏土水力计算

刘少丞¹, 秦学明²

(1. 中交上海航道局有限公司, 上海 200002;

2. 中交上海航道局有限公司东方疏浚工程分公司, 上海 200136)

摘要: 在连云港港30万吨级航道先导试挖工程疏浚工程H1.1标段, 施工区土质以黏性土为主, 部分区域为硬塑性黏土并夹含有一定量的钙化质石块。由于施工区硬塑性黏土土质的级配不均匀、黏性力强、易沉淀等因素的影响, 使得利用管道介质均匀质流理论计算方法得到的水力计算结果与实际施工参数值相差很大。根据新海豚轮挖泥船在该工程实际施工情况, 讨论符合该类土质的水力输送模拟计算, 调整水力计算中相关参数值, 使理论计算值和挖泥船实际施工情况相符, 可供在建工程及后续工程参考。

关键词: 硬塑性黏土; 水力输送; 模拟计算

中图分类号: U 674.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0179-05

Hydraulic calculation for pipeline transportation of hard plastic clay

LIU Shao-cheng¹, QIN Xue-ming²

(1. CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China;

2. SDC Orient Dredging Engineering Branch, Shanghai 200136, China)

Abstract: For Lianyungang port 300,000-ton waterway pilot trial dredging project section H1.1, there mainly contains clayey soil in the construction regions, also there contains hard plastic clay with a certain amount of calcified stones in some regions. Due to the uneven gradation, great cohesiveness and easy precipitation of the hard plastic clay, the hydraulic calculation results by pipeline medium uniform mass flow theoretical calculation differs greatly from actual construction parameters. Based on the construction of the cutter suction dredger (CSD) "Xinhaitun", we discuss the hydraulic transportation simulation calculation method which suits for such soil. By adjusting some parameters in the formula, the theoretical calculation results are consistent with the practical results of the CSD "Xinhaitun".

Key words: hard plastic clay; hydraulic transportation; simulation calculation

连云港港30万吨级航道先导试挖工程疏浚工程H1.1标段是中交上海航道局有限公司承接的一项较为复杂的工程项目, 施工土质多为硬塑性黏土, 为5,6级土。绞吸船挖掘和输送该级别土质施工难度较大, 泥土在输送过程中易在管道内黏结成球, 管道流态为非均匀质流, 管道泥浆输送流态不稳定且无法预测。有关排泥管线出口及吹填区土质情况见图1。

为有效提高挖泥船施工适应能力, 该工程主要选用最先进的绞吸挖泥船(新海豚轮)组织施工, 该轮装备了一台电机驱动、功率为2 200 kW的绞刀, 完全能够满足挖掘该类土质的功率要求。但在施工过程中, 由于硬塑性黏土的特性, 在施工过程中无法很好确定管道的流态, 仅靠经验施工, 一定程度上影响了大型绞吸船施工效率的有效发挥。

收稿日期: 2012-09-28

作者简介: 刘少丞(1984—), 男, 助理工程师, 从事港口航道与海岸工程工作。



图1 排泥管线出口

根据新海豚轮3 500 m³/h绞吸船在连云港港30万吨级航道先导试挖工程疏浚工程H1.1标段中的实际施工情况，通过理论与实践相结合，调整硬塑性黏土管道输送水力计算中相关参数，使理论计算值和本船舶当地实际施工情况相符。

1 泥泵泥浆特性计算

管道泥浆水力输送计算是根据所选泥泵机组特性，在一定的土质和一定施工工况条件下（主要是排泥管选型及排泥管线铺设情况），合理确定管道泥浆输送施工工况区，即在各种泥浆浓度

状态下泥泵泥浆特性与管道泥浆特性曲线的交点，以最大程度上满足船舶安全、高效和低耗施工要求。

根据疏浚技术相关理论，泥泵泥浆特性方程式为：

$$H_m = H_w [K_H (\rho_m - 1) + 1] \quad (1)$$

式中： H_m 为泥泵泥浆扬程（m水柱）； H_w 为泥泵清水扬程（m水柱）； ρ_m 为泥浆密度（t/m³）； K_H 为土质换算系数。

在实际工程施工中，由于施工区硬塑性黏土土质的级配不均匀、黏性强、易沉淀等因素的影响，改变了管道介质均匀质流理论计算方法，水力计算结果与实际施工参数值相差很大。

根据新海豚轮2011年5月14日在连云港港30万吨级航道先导试挖工程疏浚工程H1.1标段正常施工两台车运行情况，通过拟合计算修正适应于此种工况条件下的理论计算方法，有关5月14日新海豚轮施工设备运行参数和施工参数分析情况见表1。

表1 5月14日新海豚轮施工设备运行参数和施工参数

施工台车	施工分层	水下泵			舱内泵			挖深/m	平均施工流速/(m·s ⁻¹)	平均施工泥浆浓度/%	平均施工泥浆密度/(t·m ⁻³)
		柴油机转速/(r·min ⁻¹)	真空/bar	排压/bar	柴油机转速/(r·min ⁻¹)	排压/bar	最大负荷/%				
第1台车	上层	993	-0.39	2.92	977	9.73	90.0	14.55	5.12	15.81	1.16
	中层	993	-0.41	2.95	978	9.94	86.4	16.57	5.03	15.58	1.15
	下层	993	-0.47	2.85	975	9.83	95.3	18.04	5.21	18.04	1.17
第2台车	上层	993	-0.38	2.92	978	9.74	91.0	14.52	5.22	13.12	1.13
	中层	993	-0.43	2.89	978	9.75	89.2	16.52	5.25	17.52	1.17
	下层	993	-0.41	2.91	978	9.80	98.0	18.55	5.25	14.72	1.15

注：5月14日新海豚轮管路布置情况为：浮管543 m，沉管3 322 m，岸管764 m，管径为850 mm；排泥管线总长度为4 629.0m，采用两泵串联施工。

根据泥泵输送泥浆时的特性，即输送细颗粒泥浆时压头提高，并且随着泥沙颗粒粒径的减少压头提高得更多，输送粗颗粒泥浆时压头只略有提高，而且随着泥浆粒径的增大压头提高量下降，甚至会下降到清水压头的下方^[1]。由表3数据可以看出，泥泵产生的实际泥浆扬程要低于泥泵产生的清水扬程，表现为一种输送大粒径泥浆的特性。因此，根据新海豚轮的实际施工情况，针对式（1）引入泥泵泥浆特性修正系数 η_1 ，再拟合泥泵泥浆产生的有效扬程：

$$H_m = H_w [K_H (\rho_m - 1) + 1] \eta_1 \quad (2)$$

根据表1所提供的相关参数及式（2）可反推 η_1 值，计算过程见表2。

从表2计算结果分析， η_1 平均取值为0.82。

2 管路泥浆特性计算

根据疏浚工程技术规范关于管路特性的计算方法以及3 500 m³/h绞吸船新海豚轮与管径850 mm配合施工时的实际情况，对泥浆管路特性公式简化后得到方程式：

表2 修正系数 η_1 计算值

平均泥浆密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	平均施工流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	水下泵产生的 清水扬程/bar	舱内泵产生的 清水扬程/bar	二泵产生的 清水扬程/bar	二泵产生的实际 泥浆扬程/bar	$H_m=H_w[K_H(\rho_m-1)+1]$	η_1
1.16	5.12	3.72	7.48	11.20	10.12	12.54	0.81
1.15	5.03	3.73	7.49	11.22	10.35	12.45	0.83
1.17	5.21	3.71	7.47	11.17	10.30	12.62	0.82
1.13	5.22	3.70	7.47	11.17	10.12	12.29	0.83
1.17	5.25	3.70	7.46	11.16	10.18	12.61	0.81
1.15	5.25	3.70	7.46	11.16	10.21	12.39	0.82

注: 对于黏土类土质, $K_H=0.75$ 。

$$h_m = K(a_1 + 0.000\ 719\ 6L + 0.050\ 9 \sum \xi)v^2 + 0.050\ 97\rho_m v^2 + \rho_m(Z + Y) - 1.025Y \quad (3)$$

式中: h_m 为管路泥浆总水头; K 为泥浆阻力系数与清水阻力系数之比值; L 为水上、水下、陆上钢质排泥管长度; $\sum \xi$ 为排泥管线局部阻力水头系数总和。其中弯管、三通、橡胶管等均作管路附件, 不计沿程水头损失; v 为排泥管平均流速 (m/s); Z 为排泥管出口中心距水面的垂直距离 (m); Y 为挖深 (m); a_1 为新海豚轮采用不同泥泵串联方式时的船上吸、排泥管 (附件) 局部阻力取值, 当新海豚轮采用两泵串联施工时, 水下泵与左舱内泵串联时 a_1 取1.037 8, 水下泵与右舱内泵串联时 a_1 取0.773 4, 新海豚轮采用三泵串联施工时 a_1 取1.324 1。

对于黏土类土质而言:

$$K = 1 + \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_w}(\rho_s - 1) \quad (4)$$

式中: ρ_s 为土颗粒密度 (t/m^3); ρ_w 为水密度, 海水取1.025 t/m^3 , 清水取1.00 t/m^3 。根据式 (3) 及新海豚轮5月14日施工管线布置情况可简化成:

$$h_m = K(0.773\ 4 + 3.612\ 5)v^2 + 0.050\ 97\rho_m v^2 + \rho_m(Z + Y) - 1.025Y \quad (5)$$

根据实际施工情况统计和式 (5) 推算出 K 值, 有关推算情况见表3。

根据新海豚轮的实际施工情况, 对泥浆阻力系数与清水阻力系数之比值 K 进行修正, 引入修正系数 K_1 (表4)。

$$K = K_1 + \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_w}(\rho_s - 1) \quad (6)$$

由此可见, K 值按 $K = 0.60 + \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_w}(\rho_s - 1)$ 计

表3 根据实际施工情况推算 K 值情况

平均施工流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	平均泥浆密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	总排出 压力/bar	挖深/m	K
5.12	1.16	10.12	14.55	0.74
5.03	1.15	10.35	16.57	0.79
5.21	1.17	10.3	18.04	0.73
5.22	1.13	10.12	14.52	0.72
5.25	1.17	10.18	16.52	0.71
5.25	1.15	10.21	18.55	0.71

注: a_1 取1.037 8, 排高取6.0 m。

表4 K_1 修正情况

K 值	平均泥浆密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	海水密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	土颗粒密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	K_1 值
0.74	1.16			0.60
0.79	1.15			0.66
0.73	1.17	1.025	2.70	0.58
0.72	1.13			0.61
0.71	1.17			0.56
0.71	1.15			0.58

算, 能较为精准地计算新海豚轮在输送该类土质时的管道阻力消耗。

综上所述, 新海豚轮与管径850 mm配合施工时, 在连云港港30万吨级航道先导试挖工程H1.1标段输送硬塑性黏土时, 其管道泥浆水力输送计算按下式推算:

$$H_m = 0.82H_w[0.75(\rho_m - 1) + 1] \quad (7)$$

$$h_m = K(a_1 + 0.000\ 719\ 6L + 0.050\ 97 \sum \xi)v^2 + 0.050\ 97\rho_m v^2 + \rho_m(Z + Y) - 1.025Y \quad (8)$$

其中:

$$K = 0.60 + \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_w}(\rho_s - 1) \quad (9)$$

根据式 (7) ~ (9), 借助计算机VB软件操作程序, 可以建立新海豚轮与管径850 mm配合施

工。在连云港港30万吨级航道先导试挖工程H1.1标段输送硬塑性黏土时，对于不同泥浆浓度状态下的工况点，能合理确定不同施工工况条件下的工况区，较好地满足船舶安全、高效和低耗施工要求。

3 工程施工验证

根据新海豚轮在2011年4月19日采用三泵串联施工情况对上述优化方法进行验证，有关新海豚轮4月19日正常施工2台车施工参数见表5。

根据新海豚轮在4月19日的挖深、平均施工浓度、各台泥泵转速情况，验算平均施工流速和总有效扬程情况，并与实际的施工参数进行比对，以验证上述模拟计算是否合理可行，有关理论模拟计算和实际施工参数比对情况见表6。

根据计算结果可以得出以下结论：1) 根据表6，当采用 $\eta_1=0.82$ ， $K_1=0.60$ 进行理论计算时结果与实际施工参数比较接近，说明所采用的修正参数能满足当前工况条件下管道泥浆水力模拟计算。2) 从表6中可以看出，在泥泵机组转速和泥

表5 4月19日新海豚轮施工设备运行参数和施工参数

施工车	施工时间/min	总施工时间/min	潮位/m	绞刀平均下放深度/m	水下泵				1#舱内泵			2#舱内泵			平均施工流速/(m·s ⁻¹)	平均施工泥浆浓度/%	平均施工效率/(m ³ ·h ⁻¹)
					泥泵转速/(r·min ⁻¹)	柴油机转速/(r·min ⁻¹)	真空/bar	排压/bar	泥泵转速/(r·min ⁻¹)	柴油机转速/(r·min ⁻¹)	排压/bar	泥泵转速/(r·min ⁻¹)	柴油机转速/(r·min ⁻¹)	排压/bar			
第1台车	28		1.25	14.92	242	985	0.42	2.79	231	910	8.68	229	910	14.98	5.56	16.79	1 614
	30	92	1.73	17.04	243	985	0.43	2.82	231	910	8.72	229	910	14.99	5.54	16.87	1 615
	34		1.41	19.07	243	985	0.42	2.99	231	910	8.83	229	910	15.19	5.55	20.30	1 948
第2台车	22		0.75	15.18	243	985	0.47	2.79	231	910	8.62	229	910	14.83	5.56	19.29	1 854
	33	82	0.57	17.06	243	985	0.43	2.78	231	910	8.61	229	910	14.80	5.51	18.54	1 766
	27		0.52	18.64	243	985	0.43	2.87	231	910	8.81	230	910	15.18	5.53	19.89	1 901

注：4月19日新海豚轮管路布置情况：浮管543 m，沉管4 522 m，岸管716 m，管径为850 mm，排泥管线总长度为5 782.0 m。

表6 理论模拟计算与实际施工参数比对

施工车	分层	绞刀平均下放深度/m	平均泥浆浓度/%	水下泵转速/(r·min ⁻¹)	1#舱内泵转速/(r·min ⁻¹)	2#舱内泵转速/(r·min ⁻¹)	实际值		计算值		差值	
							流速/(m·s ⁻¹)	排压/bar	流速/(m·s ⁻¹)	排压/bar	流速/(m·s ⁻¹)	排压/bar
第1台车	第1层	14.92	16.79	242	231	229	5.56	14.89	5.37	14.80	-0.19	-0.18
	第2层	17.04	16.87	243	231	229	5.54	14.99	5.37	14.84	-0.17	-0.15
	第3层	19.07	20.30	243	231	229	5.55	15.19	5.32	15.13	-0.23	-0.06
第2台车	第1层	15.18	19.29	243	231	229	5.56	14.83	5.35	15.06	-0.21	0.23
	第2层	17.06	18.54	243	231	229	5.51	14.80	5.36	15.02	-0.15	0.22
	第3层	18.64	19.89	243	231	230	5.53	15.18	5.34	15.16	-0.19	-0.02

浆浓度一定条件下，理论计算平均施工流速比实际平均施工流速约低0.19 m/s，可能是由仪器误差造成的，但不影响模拟计算结果。

4 新海豚轮施工能力情况分析

根据上述新海豚轮在连云港港30万吨级航道先导试挖工程H1.1标段输送硬塑性黏土时管道泥浆水力输送的探讨，可以较为精准地测算出新海豚轮在当前施工工况条件下施工能力。有关测算结果见表7和表8。

根据表7和表8理论计算分析，为了有效防止

施工中堵管现象的发生，按平均施工流速4.80 m/s控制，同时考虑在施工过程中管道流态存在一定程度上的不稳定性，因此新海豚轮在该工况条件下，两泵串联有效施工排距约为4.5 km，三泵串联施工的有效施工排距约为7.5 km，这与实际施工情况相接近。

5 结论

泥泵输送硬塑性黏土等较大颗粒的泥浆所产生的泥泵压头和管道水力消耗规律十分复杂，没有成熟的经验公式进行水力模拟计算。而通过利

表7 新海豚轮二泵串联时施工能力测算

泥浆浓度/%	流速/($m \cdot s^{-1}$)	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	排距/km	水下泵扬程/(m水柱)	舱内泵扬程/(m水柱)	总扬程/(m水柱)	施工效率/($m^3 \cdot h^{-1}$)
清水	6.55	13 380		36.1	68.6	104.7	
10	6.09	12 441		32.5	61.4	93.9	1 244
20	5.90	12 053	3.0	34.6	65.3	99.9	2 411
30	5.74	11 726		36.7	69.1	105.8	3 518
40	5.61	11 460		38.9	72.9	111.8	4 584
清水	5.96	12 175		36.8	69.4	106.2	
10	5.54	11 317		33.1	62.0	95.1	1 132
20	5.37	10 970	4.0	35.2	65.9	101.1	2 194
30	5.23	10 684		37.4	67.8	105.2	3 205
40	5.10	10 418		39.5	73.6	113.1	4 167
清水	5.70	11 644		37.1	69.7	106.8	
10	5.32	10 868		33.3	62.3	95.6	1 087
20	5.16	10 541		35.5	66.2	101.7	2 108
25	5.08	10 378	4.5	36.5	68.1	104.6	2 594
30	5.02	10 255		37.6	70.0	107.6	3 076
35	4.98	10 173		38.7	71.9	110.6	3 561
40	4.90	10 010		39.7	73.9	113.6	4 004
清水	5.44	11 113		37.4	70.0	107.4	
10	5.10	10 418		33.5	62.6	96.1	1 042
20	4.95	10 112	5.0	36.8	68.4	105.2	2 022
30	4.81	9 826		38.9	73.1	112.0	2 948
40	4.69	9 581		39.9	74.2	114.1	3 832

注: 排泥管线浮管和沉江管总长为3.0 km, 挖深按15.0 m计; 水下泵转速按为额定转速, 舱内泵转速为额定转速的95%。

表8 新海豚轮三泵串联时施工能力测算

泥浆浓度/%	流速/($m \cdot s^{-1}$)	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	排距/km	水下泵扬程/(m水柱)	舱内泵扬程/(m水柱)	总扬程/(m水柱)	施工效率/($m^3 \cdot h^{-1}$)
清水	6.11	12 482		34.9	133.5	168.4	
10	5.79	11 828		31.1	119.5	150.6	1 183
20	5.62	11 481	6.0	33.2	127.2	160.4	2 296
30	5.48	11 195		35.3	134.9	170.2	3 358
40	5.35	10 929		37.4	142.5	179.9	4 372
清水	5.79	11 828		35.3	135.1	170.4	
10	5.41	11 052		31.5	120.4	151.9	1 105
20	5.25	10 725	7.0	33.6	128.1	161.7	2 145
30	5.12	10 459		35.7	135.8	171.5	3 138
40	5.01	10 235		37.8	143.4	181.2	4 094
清水	5.52	11 276		35.6	136.5	172.1	
10	5.15	10 521		31.7	121.0	152.7	1 052
20	5.00	10 214		33.9	128.7	162.6	2 043
25	4.93	10 071	8.0	34.9	132.6	167.5	2 518
30	4.87	9 949		36.0	136.4	172.4	2 985
35	4.81	9 826		37.0	140.3	177.3	3 439
40	4.76	9 724		38.1	144.1	182.2	3 890

注: 排泥管线浮管和沉江管总长为6.0 km, 挖深按15.0 m计; 水下泵转速按为额定转速, 舱内泵转速为额定转速的95%。

用管道介质均匀质流理论计算的基本方法, 针对某一特定工程, 通过施工过程中的实际参数对比分析, 调整水力计算中相关参数值, 使理论计算值和挖泥船实际施工情况相符, 可作为一种有效的计算手段, 为项目施工和项目管理提供可靠的参考依据。

参考文献:

- [1] 中交上海航道局有限公司. 疏浚技术培训教材(上)[R]. 上海: 中交上海航道局有限公司, 2005: 44-47.
- [2] JTJ 319—1999 疏浚工程技术规范[S].
- [3] 中交上海航道局有限公司. 新海豚施工工艺[R]. 上海: 中交上海航道局有限公司, 2011.

(本文编辑 武亚庆)