



绞吸船在软土地质下横移锚抓地力计算方法

李 晟, 郑剑飞

(中交上海航道局有限公司, 上海 200002)

摘要:大型绞吸船采用三角宽鳍锚作为横移挖掘的定位锚, 针对横移锚在软土地质条件下锚抓力受限的问题, 采用土体的极限平衡原理进行横移锚受力分析, 建立三角宽鳍横移锚抓地力计算方法。经计算分析, 在软土地质条件下, 影响横移锚抓地力的主要因素为锚冠入土深度、土楔破坏角和锚杆角度。结果表明, 锚冠入土越深, 锚抓地力越大; 锚杆与水平面夹角越小, 锚抓地力越大; 随土楔破坏角逐步增加, 锚抓地力呈先减小、后变大的趋势; 土楔破坏角在 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 时, 横移锚抓地力最小, 锚抓力系数为14左右。

关键词:大型绞吸船; 软土地质; 横移锚; 锚抓力

中图分类号: U 616⁺.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0015-05

Calculation method of sideway anchor grasping force of cutter suction dredger in soft soil

LI Sheng, ZHENG Jian-Fei

(CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: The cutter suction dredger uses a triangle broad fin anchor as the positioning anchor for sideway dredging. Aiming at the problem that the grasping force of the sideway anchor is limited under the soft soil, we carry out the force analysis of the sideway anchor by using the limit equilibrium principle of soil and establish the calculation method of the grasping force of the sideway anchor. Based on the calculation, the main factors affecting the grasping force of sideway anchor are the depth of anchor crown into the soil, the failure angle of soil wedge, and the angle of anchor rod. The results show that the deeper the anchor crown goes into the soil, the greater the anchor grasping force. The smaller the angle between the anchor rod and the horizontal plane, the greater the anchor grasping force. With the gradual increase of the failure angle of the soil wedge, the anchor grasping force first decreases and then increases. When the soil wedge failure angle is between 20° and 25° , the anchor grasping force is the smallest, and the anchor grasping force coefficient is about 14.

Keywords: large cutter suction dredger; soft soil; sideway anchor; anchor grasping force

大型绞吸船在施工中由船尾钢桩固定船位, 挖槽两侧抛设横移锚, 由横移钢缆与桥架上横移绞车连接。在挖泥施工时, 通过横移绞车收放横移钢缆, 由横移锚提供拉力, 使船体绕钢桩转动, 实现绞刀横移切削^[1]。

绞吸船在挖掘施工时, 横移锚所提供的抓地力直接影响挖掘施工参数, 主要为分层厚度、绞刀前移距、横移速度, 从而对绞刀挖掘效率产生

直接影响。

一般情况下, 横移锚所提供抓地力可满足绞刀正常横移挖掘的要求; 但在软土地质工况下, 为提高生产效率, 采用较快的横移速度时, 易出现“走锚”现象; 或受施工区地形、地质所限, 开挖区域为硬质黏土、珊瑚礁等坚硬土质, 横移锚抛设区域为软土地质时, 横移锚所提供的抓地力则很难满足施工要求。

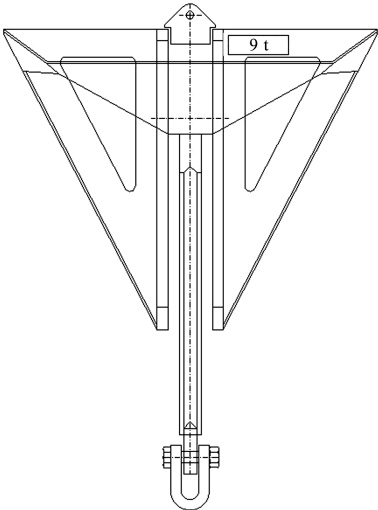
在关于锚抓地力计算的研究文献中，闫澍旺等^[2]得出霍尔锚在拖动过程中的锚的形态变化、运动轨迹及锚抓力等数据；蒋治强等^[3]得出 AC-14 型和 DA-1 型大抓力锚在不同底质上的抓力系数。但上述文献所分析的锚类型与绞吸船所用的横移锚均有较大区别，霍尔锚等大抓力锚在抛锚后均允许有一定拖动移位，可由锚体与底床的摩擦力提供抓地力；而横移锚在抛设后扎入底床内，在船体横移时不允许发生移位现象，故受力情况与霍尔锚等大抓力锚存在明显区别。

Lievre 等^[4]提出了关于平板锚在砂中受力的极限平衡理论，认为拖锚时平板锚的锚爪会引起前方呈楔形的土体沿一定的滑移面破坏，该研究所描述的锚爪前方土体的破坏形态与绞吸船横移锚走锚时的情况较为相似。

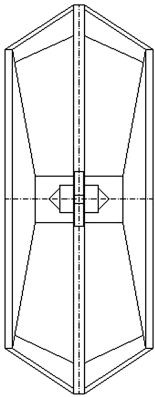
本文对绞吸船横移锚的形态和抓地特点进行分析，根据锚前土楔处于极限平衡状态时的受力平衡条件，建立横移锚抓地力的计算方法，确定横移锚在软土地质条件下的抓地力情况，为合理确定挖掘施工参数提供依据。

1 绞吸船横移锚

大型绞吸船横移锚为三角宽鳍锚，锚爪呈三角形，在锚钢缆收紧时可插入泥层内，提供极大的锚固力。常用的三角宽鳍锚质量为 7 和 9 t，本文以 4 500 m³/h 大型绞吸船所用的 9 t 锚为例进行分析。三角宽鳍锚如图 1 所示。



a) 侧视图



b) 俯视图

图 1 9 t 三角宽鳍横移锚

2 横移锚受力分析

横移锚在钢缆拉力作用下，锚爪以大角度插入泥土，在软土底质下，锚冠与锚爪全部入泥。钢缆拉力越大，则锚入土深度越大，直至下切力与摩擦阻力、黏附力等阻力平衡。三角宽鳍锚入土过程中的姿态见图 2。

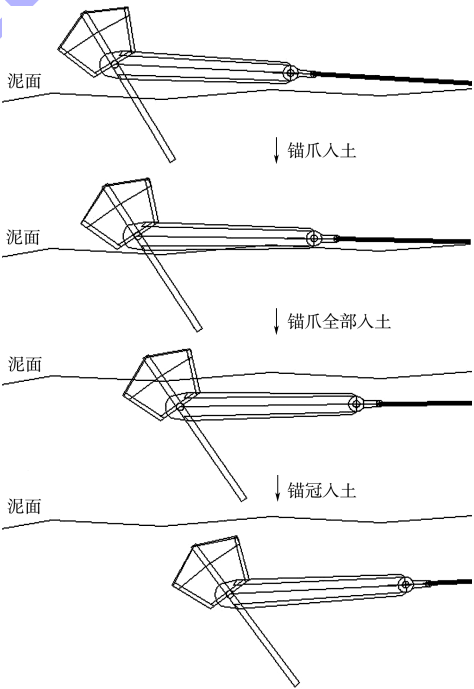


图 2 三角宽鳍锚入土姿态

横移锚入土后受钢缆拉力作用，引起锚前方一定范围内的土体有滑动趋势，该具有滑动趋势的土体呈楔状；因三角宽鳍锚锚冠与锚爪为整体，且锚冠、锚爪间距相对较小，考虑土体剪胀角作用，可认为滑动土楔由锚冠与锚爪整体作用形成，

可不必单独分析计算。土楔前方滑动面与水平方向的夹角称为土楔破坏角, 设为 λ ; 锚切入泥土角度设为 θ 。土楔在临界状态时, 主要受力为自身重力 G 、锚体施加在土楔上的推力(锚缆拉力) T 、土楔侧滑动面的抗剪切力 τ_1 、下滑动面上的抗剪切力 τ_2 、滑动面对土楔的支撑力 F , 5 种力组成了受力多边形闭合, 即土楔受力平衡。

锚前土楔的简化模型见图 3, 土楔受力简图及受力多边形见图 4, 受力平衡计算见图 5。

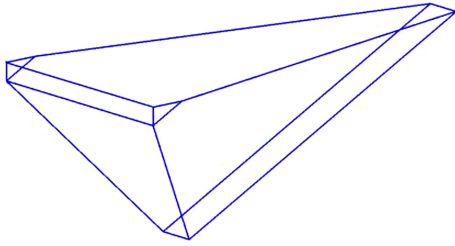
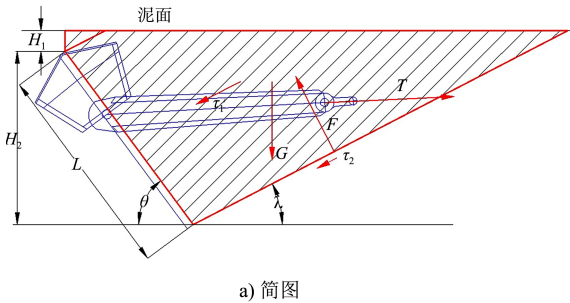
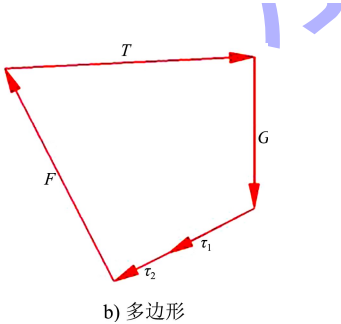


图3 土楔的简化模型



a) 简图



b) 多边形

图4 土楔受力简图及受力多边形

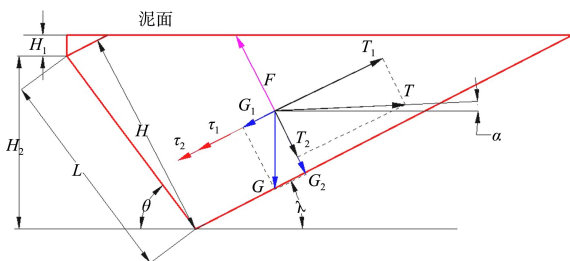


图5 锚前土楔受力平衡计算

根据图 5, 土楔在滑动面方向和垂直于滑动面方向受力平衡, 即锚缆拉力的分力 T_1 与土楔重力的分力 G_1 、土楔侧滑动面及下滑动面的抗剪切力 τ_1 和 τ_2 平衡; 滑动面对土楔的支撑力 F 与锚缆拉力的分力 T_2 、土楔重力的分力 G_2 平衡。在该汇交力系下, 沿滑动面方向受力平衡是决定土楔稳定性(即锚抓地力)的主要条件, 可得方程组:

$$T_1 = G_1 + \tau_1 + \tau_2 \quad (1)$$

$$G_1 = G \sin \lambda \quad (2)$$

$$\tau_1 = 2 A_1 (\sigma_1 \tan \varphi + c) \quad (3)$$

$$\tau_2 = A_2 (\sigma_2 \tan \varphi + c) \quad (4)$$

式中: A_1 为土楔侧滑动面积 (m^2); A_2 为土楔下滑动面积 (m^2); σ_1 、 σ_2 为土体所受轴向应力 (kPa); c 为土黏聚力 (kPa); φ 为土体内摩擦角 ($^\circ$)。

根据图 3 的土楔简化模型及图 5, 可计算土楔侧滑动面面积 A_1 及下滑动面面积 A_2 , 计算公式为:

$$A_1 = \frac{1}{2} H \left(\frac{2 H_1 + H_2}{\sin \lambda} \right) \frac{1}{\cos \beta} + \frac{1}{2} H_1^2 \cot \lambda \quad (5)$$

$$H_2 = L \sin \theta \quad (6)$$

$$H = L \sin (\theta + \lambda) \quad (7)$$

$$A_2 = \frac{H_1 + H_2}{\sin \lambda} B_1 \quad (8)$$

式中: H_1 为锚冠入土深度 (m); H_2 为锚垂直投影高度 (m); H 为锚前土楔长方截椎体高度 (m); L 为锚长度, 取 3.225 m; θ 、 λ 为土楔底面与水平面夹角 ($^\circ$); β 为锚爪爪尖角度, 取 28° ; B_1 为锚爪爪尖之间距离, 取 0.71 m。

设抛锚区域软土天然密度为 ρ , 土楔侧面近似为三角形, 取形心位置轴向应力:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{3} (H_1 + H_2) \left(\rho g + \frac{T_2}{V} \right) \\ &= \frac{1}{3} (H_1 + H_2) \left(\rho g + \frac{T_1 \tan (\lambda - \alpha)}{V} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

土楔底面为长方形, 取形心位置轴向应力:

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= \frac{1}{2} (H_1 + H_2) \left(\rho g + \frac{T_2}{V} \right) \\ &= \frac{1}{2} (H_1 + H_2) \left(\rho g + \frac{T_1 \tan (\lambda - \alpha)}{V} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

式中： V 为土楔体积(m^3)； T_1 、 T_2 为锚缆拉力的分力(kN)； α 为锚缆与水平面夹角($^\circ$)。

对于土楔重力 G ，须得出土楔体积 V 后求解，可分解为上部三角柱体 V_1 和下部梯形体 V_2 分别求解，见图 6。

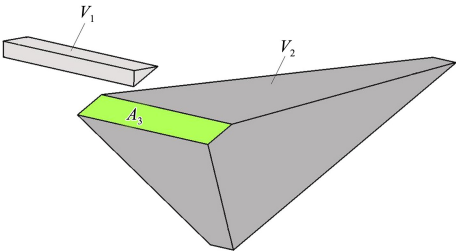


图 6 土楔体积分解

V_1 、 V_2 、 A_3 、 G 的计算公式为：

$$V_1 = \frac{1}{2} H_1^2 B_2 \tan \lambda \tag{11}$$

$$V_2 = \left[A_2 + A_3 + (B_1 + B_2) \left(\frac{H_1 + H_2}{\sin \lambda} + \frac{H_1}{\sin \lambda} \right) \right] \frac{H}{6} \tag{12}$$

$$A_3 = \frac{H_1}{\sin \lambda} B_2 \tag{13}$$

$$G = (V_1 + V_2) \rho g \tag{14}$$

式中： A_3 为上部三角柱体的底面积(m^2)； B_2 为横移锚宽度，取 4m； H 为锚前土楔长方截椎体高度(m)，

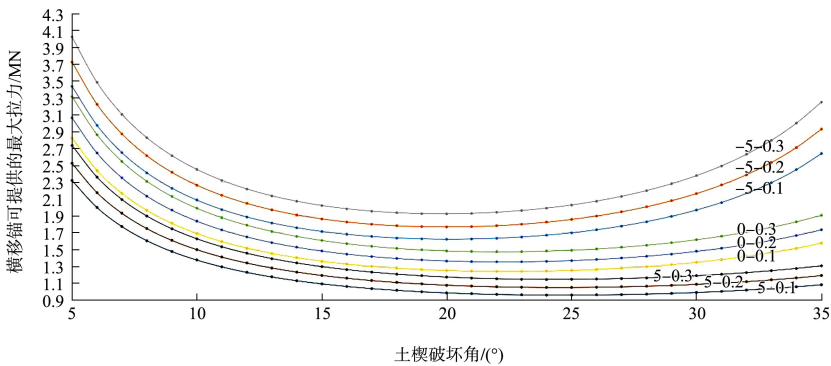
计算公式见式(7)； A_2 为土楔下滑动面积(m^2)，计算公式见式(8)。

根据式(1)~(14)，可计算在不同的土楔滑动面与水平面夹角 λ 条件下，横移锚可提供的最大拉力(锚抓力)，计算公式为：

$$T = \left[G \sin \lambda + \frac{2}{3} A_1 (H_1 + H_2) \rho g \tan \varphi + \frac{1}{2} A_2 (H_1 + H_2) \rho g \tan \varphi + (2 A_1 + A_2) c \right] / \left[1 - \frac{2}{3} A_1 (H_1 + H_2) \frac{\tan(\lambda - \alpha)}{V} \tan \varphi - \frac{1}{2} A_2 (H_1 + H_2) \frac{\tan(\lambda - \alpha)}{V} \tan \varphi \right] \times \frac{1}{\cos(\lambda - \alpha)} \tag{15}$$

3 横移锚抓地力计算

横移锚在扎入泥土后，锚杆与锚爪最大角度为 60° ，即 $\theta + \alpha = 60^\circ$ 。根据式(15)，可计算 α 为 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 时、不同土楔破坏角(滑动面角度) λ 下的横移锚抓地力 T 。根据大型绞吸船“新海豚 2”参建的典型软土底质工程地勘资料(东帝汶帝巴湾新集装箱码头疏浚回填工程)，天然土密度 ρ 为 1.76 t/m^3 ，土黏聚力 c 为 5 kPa ，土体内摩擦角 φ 为 18° ，锚冠入土深度 H_1 取 $0.1 \sim 0.3 \text{ m}$ 。计算结果见图 7。



注：-5-0.3 表示锚杆与水平面夹角 -5° ，锚冠入土深度 0.3 m。

图 7 9 t 横移锚在软土底质下的抓地力计算结果

不同锚冠入土深度、锚杆对地角度下的横移锚最小抓地力见表 1。

表 1 横移锚最小抓地力		
锚杆对地角度/(°)	锚冠入土深度/m	最小抓地力/MN
-5	0.1	1.625
-5	0.2	1.771
-5	0.3	1.926
-4	0.1	1.538
-4	0.2	1.677
-4	0.3	1.823
-3	0.1	1.456
-3	0.2	1.588
-3	0.3	1.728
-2	0.1	1.381
-2	0.2	1.506
-2	0.3	1.638
-1	0.1	1.309
-1	0.2	1.428
-1	0.3	1.554
0	0.1	1.242
0	0.2	1.356
0	0.3	1.475
1	0.1	1.179
1	0.2	1.288
1	0.3	1.402
2	0.1	1.120
2	0.2	1.223
2	0.3	1.332
3	0.1	1.064
3	0.2	1.163
3	0.3	1.267
4	0.1	1.011
4	0.2	1.106
4	0.3	1.205
5	0.1	0.962
5	0.2	1.053
5	0.3	1.148

根据图 7 和表 1, 在土楔破坏角为 24°~26°、锚冠入土深度为 0.1 m、锚杆与水平面夹角为 5°时, 横移锚抓地力最小, 为 0.962 MN。

4 横移锚的抓力系数分析

大型绞吸船在正常施工时, 横移锚抛设至挖槽两侧, 当土质为软土时, 横移锚锚齿、锚冠均插入泥层, 锚冠入土深度通常不小于 0.1 m。因横

移锚抛设在绞吸船挖槽两侧, 通常情况下抛锚区水深小于挖槽内水深, 故在挖掘施工时, 受横移钢缆牵引, 横移锚锚杆与水平面夹角 α 为负值, 其值根据抛锚距离、挖槽宽度、挖槽内外侧水深不同有所变化, 总体保持在-35°~0°。根据表 1 的计算结果, 当横移锚锚杆与水平面夹角 α 越小, 横移锚抓地力越大; 锚冠入土深度越大, 横移锚抓地力越大。故在软土工况下, 绞吸船在不同横移角度、挖宽和挖深条件下, 按最不利情况(横移锚锚杆与水平面夹角 α 为 0°、锚冠入土深度为 0.1 m), 9 t 横移锚抓地力不小于 1.242 MN, 横移锚抓地力与锚重力的比值约为 14。

4 000 m³/h 大型绞吸船“新海豚 2”横移绞车可提供的额定拉力为 875 kN^[5], 根据横移锚抓力系数分析结果, 为确保正常横移挖掘过程中横移锚不发生“走锚”现象, 所匹配的横移锚最小锚重力 G 为 62.5 kN, 即锚的最小质量为 6.37 t。目前常用的三角宽鳍横移锚质量为 7 和 9 t, 考虑 20%安全余量, 故该轮所配横移锚质量为 9 t, 满足最小锚重力的要求。

综上, 对于典型的软土工况, 4 000 m³/h 大型绞吸船采用 9 t 三角宽鳍横移锚, 可在横移挖掘过程中为船舶提供足够的牵引力, 且在横移绞车额定拉力下不发生“走锚”现象。

5 结论

1) 本文提出的三角宽鳍横移锚抓地力计算方法, 适用于横移锚抓地力受限的 2~4 级土(淤泥质软土、软塑及可塑黏土)。

2) 三角宽鳍横移锚抓地力主要影响因素为锚冠入土深度、锚杆与水平面夹角和土楔破坏角, 其中锚冠入土深度、土楔破坏角主要受土质影响, 锚杆与水平面夹角主要受船舶横移角度、挖槽宽度和挖深影响。

3) 对于软土地质, 三角宽鳍横移锚的锚冠入土越深, 锚抓地力越大; 锚杆与水平面夹角越小, 锚抓地力越大; 随土楔破坏角逐步增加, 锚抓地力呈先减小、后变大的趋势。