

· 施 工 ·



密实粉土单耙齿及三耙齿水下切削试验及 耙齿切削阻力计算

李章超¹, 郭志勇¹, 张更生², 徐继涛¹

(1. 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;

2. 中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300461)

摘要: 滨州港分布的回淤性密实粉土含水量低、标贯击数大、坚硬难挖, 给疏浚施工带来很大的麻烦, 特别是对耙吸船的挖掘提出挑战, 影响了施工效率。为了研究密实粉土的切削机理, 进行了密实粉土的切削试验研究。对3种含水量的密实粉土在不同切削角、不同切削深度和不同切削速度的工况下进行了单耙齿和三耙齿水下切削试验, 并进行了高压冲水条件下的切削试验研究。试验过程中, 通过刀具上布置的切削力传感器监测切削力。通过密实粉土切削试验得到了密实粉土的破坏特性, 总结了密实粉土切削的特点, 并根据试验数据建立密实粉土耙齿切削阻力计算经验公式。

关键词: 单耙齿及三耙齿; 水下切削试验; 密实粉土; 切削阻力计算

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0204-05

Underwater cutting experiment and cutting resistance calculation of single draghead tooth and three draghead teeth in dense silt

LI Zhang-chao¹, GUO Zhi-yong¹, ZHANG Geng-sheng², XU Ji-tao¹

(1. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China;

2. CCCC Tianjin Ecological & Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: The silting dense silt distributed in Binzhou Port has low water content and large SPT(N), and is hard and difficult to dig, which brings great trouble to the dredging construction, especially challenges to the digging of trailing suction hopper dredgers, and affects the construction efficiency. In order to study the cutting mechanism of dense silt, the cutting experiment of dense silt has been carried out. Under the conditions of different cutting angles, different cutting depths and different cutting speeds, single draghead tooth and three draghead teeth underwater cutting experiments are carried out for three kinds of dense silt with water content, and the cutting experiments under high-pressure flushing are been carried out. During the experiment, the cutting force is monitored by the cutting force sensor arranged on the cutting tool. Through the cutting experiment of dense silt, the damage characteristics of dense silt are obtained, and the cutting characteristics of dense silt are summarized. According to the experimental data, the empirical formula for calculating the cutting resistance of dense silt rake is established.

Keywords: single draghead tooth and three draghead teeth; underwater cutting experiment; dense silt; cutting resistance calculation

滨州港港区建设项目外航道疏浚施工中遇到了坚硬难挖的回淤土。这种土质含水量低、标贯击数大、坚硬难挖, 给疏浚施工带来很大的麻烦, 特别是对耙吸船的挖掘提出挑战, 影响了施工效

率, 因此有必要研究这类坚硬的回淤粉土的挖掘机理, 为制定合理的施工方案以及设计挖泥机具提供理论指导。

很早就有学者对土体破坏机理进行了试验研

收稿日期: 2021-02-22

作者简介: 李章超(1980—), 女, 博士, 高级工程师, 从事疏浚工程技术研究及挖泥机具研发工作。

究,1972 年,美国学者 R. D. Wismer 等^[1]在室内土槽对平板刀具切削土体进行了试验研究,分析了刀具的受力情况,但对土体破坏的研究多集中在农耕领域。近年来,国内学者对土的切削进行了研究,应用在盾构机研制过程中^[2]。在疏浚行业,土体的破坏更加复杂,一是由于疏浚土质更加复杂,二是疏浚土体的破坏在水下发生。中交上海航道局做过一些关于密实粉土的切削研究^[3],取得了一些成果。需要进行更多的试验来研究疏浚土破坏机理,建立相对完整的疏浚土切削破坏理论体系。

天津市疏浚工程技术企业重点实验室拥有设施先进的挖掘试验台,曾进行了硬质黏土切削机理试验研究^[4]。采用室内试验的方法研究回淤性

密实粉土的挖掘性能,具有效率高、投入少、可实施性强的优势。本文采取理论分析和室内试验相结合的方法,对回淤性密实粉土的挖掘性能进行研究。

1 试验粉土及试验装置

1.1 试验粉土的制备

依据疏浚区域的地质资料,研究回淤性密实粉土颗粒分布、级配、含水量、标准贯入击数及密实度,将从吹填区采取的松散粉土,依据沉淀自密实和粉土动液化的性能,采用搅拌密实、振动液化、夯击和排水等系列物理方法,制作标准贯入击数达到 20 击以上、孔隙比小于 0.75、达到密实状态的试验粉土^[5],参数见表 1。

表 1 密实粉土参数

箱号	含水率 W/%	湿密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	颗粒组成/%			标贯击数 n/击
							细砂	粉粒	黏粒	
							0.25~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm	
1	14.8	2.01	6.2	-0.08	4.6	29.6	14	81.8	4.2	23
2	16.3	2.02	6.2	0.16	5.5	26.3	14	81.8	4.2	19
3	13.8	2.06	6.2	-0.24	4.2	28.8	14	81.8	4.2	22

1.2 切削刀具与传感器

回淤粉土切削试验的切削刀具由刀臂、刀架、力传感器及刀齿组成,需要实测并记录不同切削条件下的切削力。传感器的形式为电阻应变片式传感器,通过电阻应变片测出贴片部位的应变来获知外力的大小,量程为 0~30 kN,采样频率 200 Hz。数据采集界面见图 1,刀具及传感器布置见图 2。

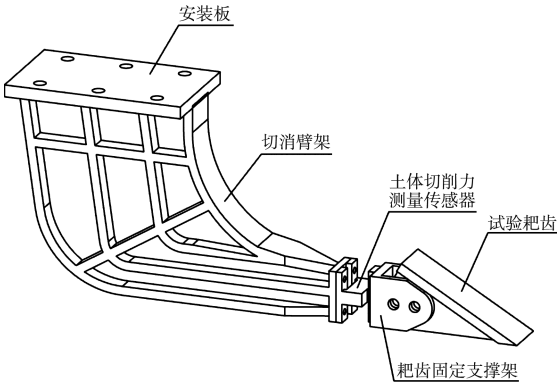


图 2 刀臂结构

2 密实粉土切削试验

2.1 单耙齿切削试验

为了研究耙齿挖掘密封粉土的特性,研究不同切削角度、不同切削深度、不同切削速度、无水及水下切削对切削力的影响,进行了单耙齿的切削试验研究。切削刀齿分为 30°、45°和 60°,切削刀齿的尺寸为 200 mm×75 mm(长×宽),切削总长度 5 m,试验刀齿见图 3a)。疏浚工程中

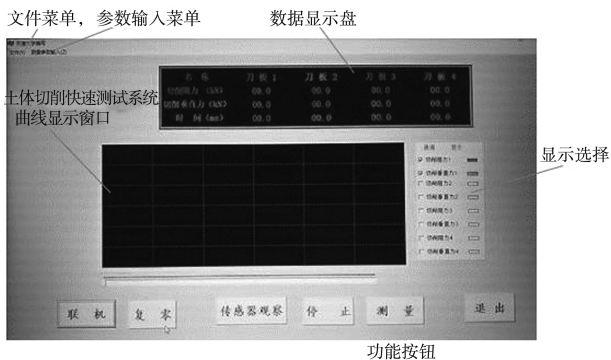
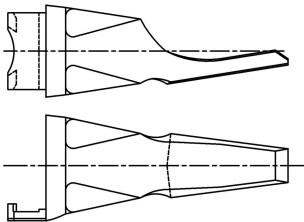


图 1 数据采集专用软件界面

所用密实粉土耙头所用耙齿型号为 38DS，其中
凿齿尺寸入土长度约 200 mm、齿宽平均 75 mm，
见图 3b)。



a) 试验单耙齿



凿齿
b) 耙头凿齿

图 3 试验刀齿及耙头原刀齿

2.1.1 水下切削对耙齿切削力的影响

疏浚工程中，挖泥船需要进行水下挖掘作业，
耙齿在水下切削，对切削力会产生影响。为了分
析水下切削对切削力的影响，进行了单耙齿水下
切削试验研究。

对标贯击数分别为 19 击和 23 击的两种密实
粉土进行了无水和下水单耙齿切削试验研究，切
削角度为 45°，切削深度为 90 mm，切削速度为
0.8 m/s，研究水下切削条件对耙齿切削力的影响。
水下切削对单耙齿水平切削力的影响见图 4，可以
看出，水下切削耙齿的水平切削力会有所增加，
并且标贯击数越大水的影响效果越大。标贯击数
为 19 时，水下切削相较于无水切削，水平切削力
因水下切削影响增大系数约为 1.14；而标贯击数
为 23 时，水下切削相较于无水切削，水平切削力
因水下切削影响增大系数约为 1.22。

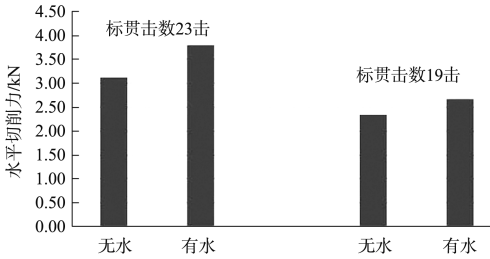


图 4 水下切削对单耙齿水平切削力的影响

2.1.2 切削速度对耙齿切削力的影响

挖泥船不同的航行速度对耙齿的切削力会产
生影响。耙吸式挖泥船在进行挖泥作业时航行速
度在 1~3 kn，为了研究切削速度对耙齿切削力的
影响进行了不同标贯击数密实粉土在不同切削速
度下的单耙齿水下切削试验研究，密实粉土标贯
击数分别为 19、22、23 击，切削速度分别为 0.5、
0.8、1.3 m/s，切削角度为 45°，切削深度为
90 mm。切削速度对单耙齿水平切削力的影响见
图 5，可以看出，切削速度增大则水平切削力会有
所增加，并且速度越大这种增加趋势会加大。当
切削速度由 0.8 m/s 增加到 1.3 m/s 时，水平切削
力因速度影响增大系数约为 1.12；当切削速度由
0.5 m/s 增加到 0.8 m/s 时，水平切削力因速度影
响增大系数约为 1.02。

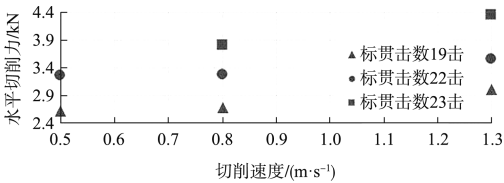


图 5 切削速度对单耙齿水平切削力的影响

2.1.3 切削角度对耙齿切削力的影响

耙吸挖泥船在进行挖泥作业时，耙头切削刀
齿即耙齿与土体表面成不同的角度，不同的切削角
度会对耙齿的切削力产生影响。进行了不同切削角
度(30°、45°和 60°)、90 mm 切削深度、0.8 m/s 切
削速度条件下的密实粉土水下切削试验，研究分
析切削角度对耙齿切削力的影响。切削角度对单
耙齿水平切削力的影响见图 6，可以看出，切削角
度增大则水平切削力有所增加。

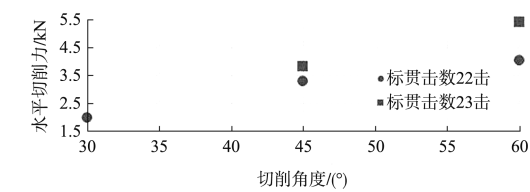


图 6 切削角度对单耙齿水平切削力的影响

2.1.4 切削深度对耙齿切削力的影响

耙吸挖泥船在进行挖泥作业时, 耙头切削刀齿的切削深度不同对耙齿的切削力产生较大影响。进行了不同标贯击数、不同切削深度(60、90、120、150 mm)、45°切削角度 0.8 m/s 切削速度条件下的密实粉土水下切削试验, 研究分析切削深度对耙齿切削力的影响。不同标贯击数密实粉土、不同切削深度对单耙齿水平切削力的影响见图 7, 可以看出, 切削深度增大, 水平切削力增加, 同时随着密实粉土标贯击数的增加, 水平切削力增加。

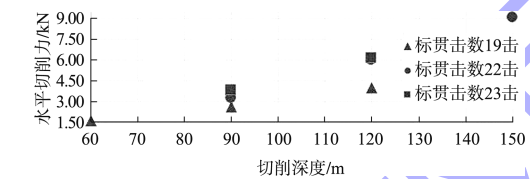


图 7 切削深度对单耙齿水平切削力的影响

2.2 三耙齿切削试验

耙吸挖泥船耙头装有多耙齿, 在耙头切削土体时多个耙齿同时受力, 此时相邻的两个耙齿间破坏的土体会产生相互作用, 该作用将影响到单个耙齿的切削刀。因此, 进行了 45°切削角、0.8 m/s 切削速度条件下的三耙齿密实粉土水下切削试验, 将 3 个耙齿的受力分别与单耙齿切削力进行对比, 研究分析多个耙齿参与切削土体时对耙齿切削力的影响。每个耙齿尺寸为 75 mm×200 mm, 相邻两耙齿间齿间距为 100 mm, 该间距布置参考耙头原耙齿, 见图 8。



图 8 三耙齿切削刀

三耙齿切削密实粉土时两侧耙齿、中间耙齿、三耙齿平均及单耙齿的水平切削力对比见图 9, 可以看出, 当进行三耙齿切削时, 由于相邻耙齿间的作用, 使得两侧齿及中间齿的切削力相比于单耙齿的切削力都有所减小。其中, 中间齿切削力减小最为明显, 中间齿的切削力相比于单齿切削力的系数约为 0.88, 两侧齿的切削力相比于单齿切削力的系数约为 0.97。即进行多耙齿切削力计算时, 中间齿乘以系数 0.88, 两侧齿乘以系数 0.97。

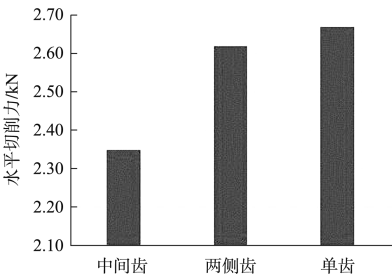


图 9 多齿切削对水平切削力的影响

2.3 高压冲水切削试验

耙吸挖泥船进行挖掘作业时, 开启高压冲水装置可以减小耙齿的切削力、提高工作效率。为了研究高压冲水对密实粉土切削力的影响, 进行了不同切削速度和不同切削深度条件下的密实粉土水下切削试验。其中, 高压冲水喷嘴直径 18 mm, 喷嘴处速度 25 m/s, 高压冲水喷嘴见图 10。



图 10 高压冲水喷嘴

不同切削速度和不同切削深度条件下，密实粉土水下切削的水平切削力见图 11，可以看出，在开启高压冲水时，耙齿的切削力有明显的减小。图 11a) 为切削角度为 45°、切削深度为 90 mm、切削速度分别为 0.8 和 1.3 m/s 条件下，开启和关闭高压冲水时耙齿的水平切削力，当开启高压冲水装置后，耙齿的水平切削力分别下降到原来的 77% 和 76%。图 11b) 为切削角度为 45°，切削速度为 0.8 m/s，切削深度分别为 90、120 mm 条件下，开启和关闭高压冲水时耙齿的水平切削力。当开启高压冲水装置后，耙齿的水平切削力均下降到原来的 77%。

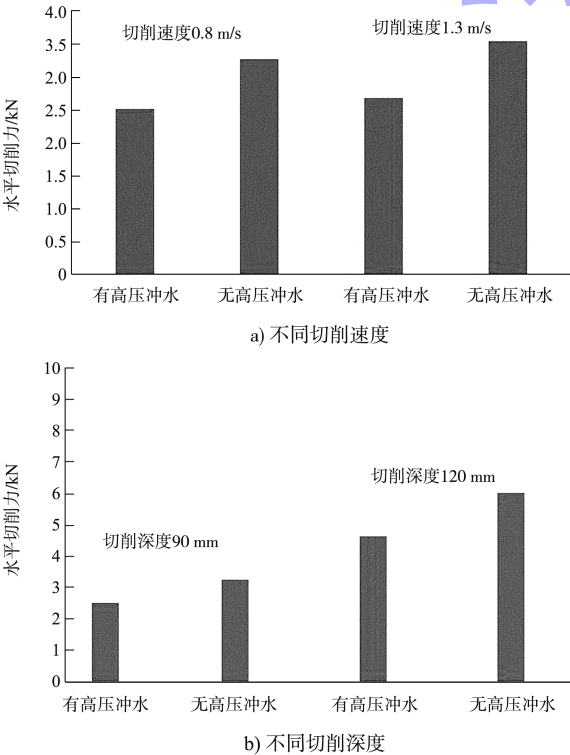


图 11 高压冲水对单耙齿水平切削力的影响

3 耙齿切削阻力的计算

耙齿在切削密实粉土时将产生切削阻力，该阻

力的计算对耙头的设计以及密实粉土挖掘施工工艺的制定都有重要的意义。以往采用的切削阻力计算模型多参考陆地机械切削阻力计算的经验公式：

$$P_x = 10^6 B_g h k_b \tag{1}$$

式中： P_x 为切削阻力 (N)； B_g 为切削刃总宽度 (m)； h 为切削深度 (m)； k_b 为切削比阻力 (MPa)。

该经验公式多用于陆地机械如推土机切削阻力的计算，但是陆地机械在挖掘土体过程中的切削角度、速度变化不大，施工土质相对单一。而在疏浚工程中，挖泥船施工时航速在 1~3 kn，受到水下切削的影响，疏浚的土质也更加复杂，需要建立新的经验公式。影响耙头等挖泥机具的切削力的主要参数包括刀具的宽度、切削深度、切削角度、切削速度以及土质参数等，根据密实粉土水下切削试验建立耙齿切削阻力经验公式如下：

$$P_x = f(B_g, h, \alpha, v, n) \tag{2}$$

式中： P_x 为切削阻力 (N)； B_g 为切削刃总宽度 (m)； h 为切削深度 (m)； α 为切削角度 (°)； v 为切削速度 (m/s)； n 为标贯击数 (击)。经验公式的计算切削阻力与试验值的对比见图 12。

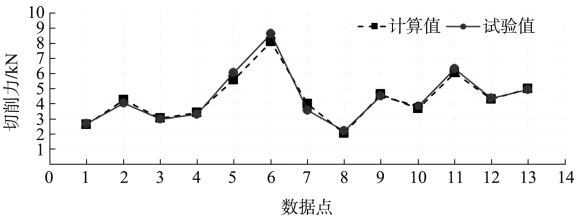
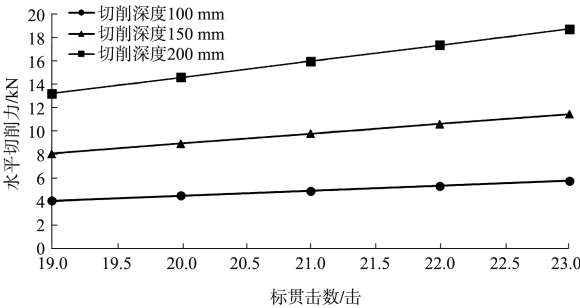


图 12 耙齿切削阻力经验公式计算值与试验值对比

根据密实粉土切削力计算经验公式，预测不同标贯击数的密实粉土在不同的切削工况下的切削力，为挖泥机具的设计及施工工艺的制定提供指导，见图 13。



注：切削角度 50° 时切削速度为 2.5 kn。

图 13 不同标贯击数密实粉土耙齿切削阻力计算

(下转第 228 页)