

文章编号: 1002-0446(2002)01-0076-05

## 蠕动爬行攻泥机构工作特性的有限元分析

王建华<sup>1</sup> 冯士伦<sup>1</sup> 林杨<sup>2</sup> 孙斌<sup>2</sup>

(1. 天津大学岩土工程研究所 天津 300072; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016)

**摘要:** 针对水下攻泥机器人蠕动爬行攻泥机构的结构与工作机理,建立了适当的有限元计算模型,进而通过弹塑性有限元计算,分析了攻泥机构直行攻泥时与土相互作用的工作特性,阐明了攻泥机构在前进过程中限位块导致的土体局部弱化区对其工作特性的影响程度.综合分析计算与模型试验结果,建议了攻泥机构直行攻泥所必须的条件.

**关键词:** 水下机器人;攻泥机构;结构与土的相互作用

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

## THE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF WORKING BEHAVIOR OF THE MOVE-IN-SOIL MANIPULATOR

WANG Jian-hua<sup>1</sup> FENG Shi-lun<sup>1</sup> LIN Yang<sup>2</sup> SUI Bin<sup>2</sup>

(1. Geotechnical Engineering Institute of Tianjin University; 2. Automation Institute, Chinese Academy of Sciences Shenyang)

**Abstract:** According to the structure and working principle of the move-in-soil manipulator of the underwater robot, the finite element model has been set up. The straight working behavior of the manipulator in soil is analyzed by means of elastoplastic finite element method. The effect of the degradation area disturbed by the manipulator's arms in soil on the working behavior is studied. Combining analysis and test results, the conditions under which the manipulator can go forward constantly in soil are proposed.

**Keywords:** underwater robot, move-in-mud manipulator, interaction between structure and soil

### 1 引言(Introduction)

水下攻泥机器人是中国科学院沈阳自动化研究所正在开发的一种新型水下机器人,主要用于沉船的打捞作业.攻泥机构是水下攻泥机器人的关键部位,通过它在海底土中的蠕动式直行攻泥和转向攻泥,完成沉船打捞过程中攻打千斤洞并带缆的作业.因此,研究攻泥机构在土中作业时的工作特性,对成功地开发出水下攻泥机器人系统至关重要.

图1为蠕动爬行式攻泥机构示意图.它分为头部和尾部两部分,它们之间通过液压系统连接.当攻泥机构直行攻泥时,其尾部的四个限位块在液压系统的驱动下扎入土中,并借助其后的土体提供钎头前进时所需的支承反力;同时,前部液压推进装置提供攻泥机构向前运动所需的动力.当攻泥机构达到前进液压装置的规定行程时,尾部的四个限位块缩

进机构,然后借助机构前部的限位块和尾部的后推力,将尾部拉向前进,从而完成攻泥机构一次蠕动爬

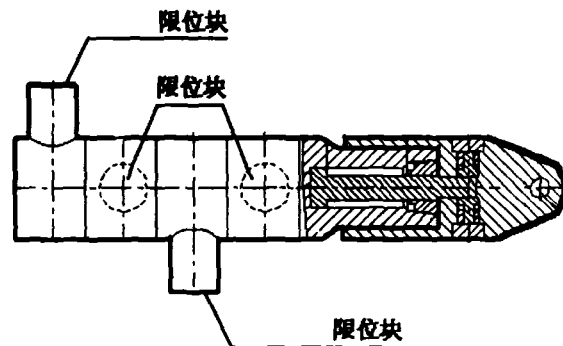


图1 攻泥机构示意图  
Fig. 1 The move-in-soil manipulator

行攻泥的行程. 由于机构的攻泥过程是一个对土体不断破坏从而实现连续前进的过程, 因此, 在怎样的条件下限位块才能提供连续前进过程中攻泥机构所需的支承反力, 就成为攻泥机构能否正常工作的一个关键问题. 由于攻泥机构的结构以及直行攻泥时的工作特点, 很难依据已有的土力学承载力理论解决这一问题<sup>[1~3]</sup>, 于是, 本文通过增量弹塑性有限元计算<sup>[4~7]</sup>, 考察攻泥机构直行攻泥时的特征工作参数及其变化规律, 阐明蠕动爬行式攻泥机构直行攻泥时的正常工作条件.

## 2 有限元计算模型与相关参数的确定(The finite element model and relative parameters)

严格讲, 攻泥机构的攻泥过程是三维结构物与土的相互作用问题<sup>[8,9]</sup>, 应采用三维有限元计算模型进行模拟计算. 但是, 攻泥机构后部的四个限位块分别处于两个相互垂直的平面上, 每个限位块之间沿攻泥机构轴向又间隔一定的距离, 这些结构特点要求必须利用精密的有限元网格, 才能得到合理的结

果. 而目前的三维弹塑性有限元计算能力尚不能达到如此的精密度, 也就很难得到合理的计算结果. 为此, 本文将采用二维有限元模型, 考察攻泥机构的直行攻泥特性.

在构造二维有限元模型时, 为了考虑攻泥机构的空间结构特性对其工作性态的影响, 对于不在同一平面上的限位块作用, 将按照等面积的原则简化到计算平面上, 即计算模型两限位块的长度为实际限位块长度的两倍. 在确定有限元模型的计算尺寸时, 参考已有的研究成果<sup>[10]</sup>, 并通过计算比较, 将水平方向取为限位块外边界水平距离  $d$  的 12.5 倍, 攻泥机构顶端竖直方向上下各取  $d$  的 7.5 倍, 如图 2 所示. 计算模型的边界约束条件取为: 竖直边界为水平向约束, 底部边界为竖直向约束. 图 3 是攻泥机构计算模型示意图, 为了模拟实际攻泥机构工作时的相对运动特性, 攻泥机构的活塞与液压缸壁之间采用了接触单元边界<sup>[11]</sup>, 在活塞顶端与液压缸体底端施加大小相等、方向相反的均布压力.

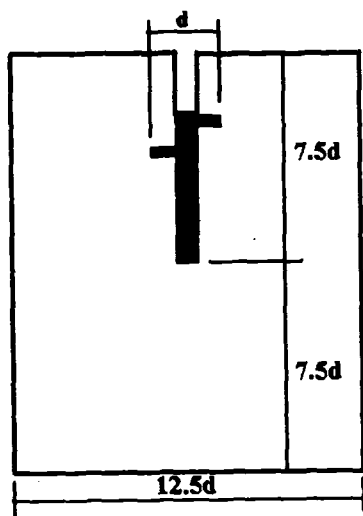


图 2 整体计算模型示意图  
Fig. 2 The finite element model as a whole

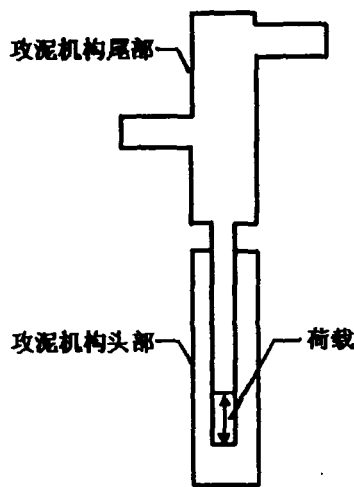


图 3 攻泥机构工作机理计算模型的模拟  
Fig. 3 The finite element model of the move-in-soil manipulator

注意到, 攻泥机构工作时, 土的变形很大, 而攻泥机构的变形可以忽略不计. 所以, 计算中把攻泥机构处理为刚体, 将土视为理想弹塑性体, 并采用 Drucker-Prager 模型描述土的大变形与破坏. 计算中将涉及 4 个土性参数, 弹性模量  $E$ , 波桑比  $\mu$ , 土的粘聚力  $C$  以及内摩擦角  $\varphi$ . 取  $E=2000\text{kPa}$ , 波桑比  $\mu$

$=0.4, C=15\text{kPa}, \varphi=20^\circ$ , 这相当于一种海洋粉土的土性参数.

在攻泥机构攻泥过程中, 限位块所在位置处的土体将受到扰动, 强度降低, 甚至于当限位块回收后, 可能在该处形成孔穴, 这将对下一步攻泥产生影响. 由于很难准确估计前进限位块对土体扰动的程

度与范围,在下面的计算中,按两种扰动后的土性参数考虑限位块回收后、该处土体对攻泥机构下一步直行工作特性的影响.第1种:将原状土性参数折减50%.第2种:将原状土性参数折减80%.对于限位块的扰动范围,暂且按计算模型中限位块的大小确定.另外,随着攻泥机构的前进,限位块造成的弱化区增多.为了模拟攻泥机构前进过程中的这种特性,计算中,以没有限位块弱化区的计算模型为基准,每前进一步,按攻泥机构蠕动一次的行程增加计算模型上部土层的厚度.

### 3 攻泥机构直行攻泥时的工作特性(The straight working behavior of the manipulator)

下面将按照攻泥机构在一次行程中前进10cm与20cm两种情况,分析限位块导致的弱化区对攻泥机构直行攻泥特性的影响.为清楚起见,用 $V_1$ 表示

攻泥机构在一次行程中的前进位移, $V_2$ 表示攻泥机构尾部的回退位移, $V_T$ 表示 $V_1$ 与 $V_2$ 之和, $N$ 表示土中存在的限位块回退后产生的弱化区对数.

#### 3.1 攻泥机构前进10cm时的工作特性

根据计算结果,表1与表2分别给出了与第1种、第2种扰动土性参数对应的攻泥机构直行前进位移、尾部回退位移以及总位移随弱化区增加时的变化情况.这些结果表明,随 $N$ 的增加, $V_1$ 达到10cm时,相应的 $V_2$ 也增大,但是,当 $N > 4$ 时, $V_1/V_T$ 、 $V_2/V_T$ 的变化逐渐趋于稳定.这就是说,影响攻泥机构工作性态的主要因素是距离钎头较近的几对弱化区,攻泥机构的回退位移量并不是无限增加的,而是有一个稳定值.当 $N$ 相同时,按第1种扰动土性参数计算出的 $V_1/V_T$ 大于按第2种扰动土性参数计算出的 $V_1/V_T$ .也就是说土体受扰动后,土性参数降低的越多,攻泥机构的工作性态就越差.

表1 按第1种扰动土性参数的计算结果

Table 1 Numerical results according to the first kind of parameters of disturbed soil

| N          | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $V_1$ (cm) | 10.0  | 10.0  | 10.0  | 10.0  | 10.0  | 10.0  | 10.0  |
| $V_2$ (cm) | 3.6   | 4.2   | 5.0   | 5.9   | 6.1   | 6.2   | 6.2   |
| $V_T$ (cm) | 13.6  | 14.2  | 15.0  | 15.9  | 16.1  | 16.2  | 16.2  |
| $V_1/V_T$  | 73.5% | 70.4% | 66.7% | 62.9% | 62.1% | 61.7% | 61.7% |
| $V_2/V_T$  | 26.5% | 29.6% | 33.3% | 37.1% | 37.9% | 38.3% | 38.3% |

表2 按第2种扰动土性参数的计算结果

Table 2 Numerical results according to the second kind of parameters of disturbed soil

| N          | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $V_1$ (cm) | 10.0  | 10.0  | 10.0  | 10.0  | 10.0  | 10.0  | 10.0  |
| $V_2$ (cm) | 3.6   | 5.4   | 7.0   | 8.8   | 9.3   | 9.5   | 9.5   |
| $V_T$ (cm) | 13.6  | 15.4  | 17.0  | 18.8  | 19.3  | 19.5  | 19.5  |
| $V_1/V_T$  | 73.5% | 64.9% | 58.8% | 53.2% | 51.8% | 51.3% | 51.3% |
| $V_2/V_T$  | 26.5% | 35.1% | 41.2% | 46.8% | 48.2% | 48.7% | 48.7% |

#### 3.2 攻泥机构前进20cm时的工作特性

表3与表4又分别给出了攻泥机构前进20cm时的计算结果.这些结果表明,当攻泥机构每次前进达到20cm时,虽然相同情况下的回退位移量减小,但是各特征工作参数的变化规律与上述计算结果的变化规律基本一致.

综合分析上述计算结果可知,攻泥机构前进

20cm和10cm的情况下, $V_1/V_T$ 随 $N$ 增加而减小, $V_2/V_T$ 随 $N$ 增加而加大,这说明随着攻泥机构的前进,攻泥机构的工作性态越来越差;另外,当 $N$ 相同时,前进限位块形成的弱化区内土体强度降低越多, $V_1/V_T$ 的值就越小,即攻泥机构的前进工作性态就越差.计算结果还表明攻泥机构附近的弱化区对其工作特性影响最显著,它们受扰动越严重,强度降低

的越多,对攻泥机构工作的不利影响就越大.另外,相同条件下,攻泥机构前进 20cm 时较 10cm 时的  $V_1/V_T$  有所增大,这表明加大步距能够改善攻泥机

构的工作性态.从上述计算结果还可知,在一次行程中,攻泥机构尾部肯定会有回退,且随着前进步数的增多回退所占比例会越来越大,但最终趋于稳定.

表 3 第 1 种扰动土性参数的计算结果

Table 3 Numerical results according to the third kind of parameters of disturbed soil

| N          | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $V_1$ (cm) | 20.0  | 20.0  | 20.0  | 20.0  | 20.0  | 20.0  | 20.0  |
| $V_2$ (cm) | 5.8   | 9.2   | 9.9   | 10.1  | 10.1  | 10.1  | 10.1  |
| $V_T$ (cm) | 25.8  | 29.2  | 29.9  | 30.1  | 30.1  | 30.1  | 30.1  |
| $V_1/V_T$  | 77.5% | 68.5% | 66.9% | 66.4% | 66.4% | 66.4% | 66.4% |
| $V_2/V_T$  | 22.5% | 31.5% | 33.1% | 33.6% | 33.6% | 33.6% | 33.6% |

表 4 第 2 种扰动土性参数的计算结果

Table 4 Numerical results according to the fourth kind of parameters of disturbed soil

| N          | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $V_1$ (cm) | 20.0  | 20.0  | 20.0  | 20.0  | 20.0  | 20.0  | 20.0  |
| $V_2$ (cm) | 5.8   | 9.9   | 10.5  | 10.9  | 10.9  | 10.9  | 10.9  |
| $V_T$ (cm) | 25.8  | 29.9  | 30.5  | 30.9  | 30.9  | 30.9  | 30.9  |
| $V_1/V_T$  | 77.5% | 66.9% | 65.6% | 64.7% | 64.7% | 64.7% | 64.7% |
| $V_2/V_T$  | 22.5% | 33.1% | 34.4% | 35.3% | 35.3% | 35.3% | 35.3% |

#### 4 模型试验 (Model test)

模型试验是在沈阳自动化研究所实验室里进行的.攻泥机构模型如图 1 所示,用  $1.8\text{m} \times 1.2\text{m} \times 0.8\text{m}$  木箱装满均质粉土模拟实际工作环境.试验时,将攻泥机构埋入试验土壤中,具体埋入的位置为:机构尾部距木箱入口处 0.4m,底部距箱底 0.2m,埋入后将箱内的土壤夯实,然后开动液压装置进行直行攻泥试验,攻泥机构只借助四个扎入土中的前进限位块提供的支承反力向前蠕动.攻泥机构的试验行程为 10cm 与 20cm 两种.

在 10cm 行程的试验中发现,在攻泥机构蠕动爬行的前 2~3 个运动周期中,它能够完成直线前进.可是随着蠕动次数的增加,攻泥机构尾部的回退量也逐渐增加.即攻泥机构在第一个运动周期中的前进量就小于 10cm,且随蠕动次数的增加,前进量逐渐减小,直至机构无法继续向前爬行.

在 20cm 行程的试验中发现,攻泥机构的工作性态有明显改善,但在一个蠕动周期中仍然存在回退现象,而且最终机构也停止了前进.依据以上分析结果,对机构停止前进的现象做如下分析:

此次试验的攻泥机构是靠扎入土体的限位块提供攻泥机构前进所需的支承反力,当限位块回收后,将在土体中形成具有一定范围的弱化区(对于软土)或者洞穴(对于硬土).前面的有限元计算结果是在攻泥机构头部每个运动周期都能前进 10cm 或 20cm 的条件下得到的,而在实际工作条件下,由于在每个运动周期中,攻泥机构尾部存在明显回退,头部前进量并不能达到最大行程.如果一个运动周期的最大行程为 10cm,依据上述计算结果,在攻泥机构向前运动的第一个周期,头部前进量占总行程的 73.5%,即攻泥机构头部前进了 7.35cm;于是在第二个前进周期,尾部限位块与上次前进限位块造成的土体弱化区之间的距离为 7.35cm,同时考虑到限位块宽 6cm,所以限位块与土体弱化区最近处只有 1.35cm,从而使攻泥机构尾部回退量比相距 10cm 时要大的多,即  $V_2/V_T$  肯定要大于 29.6%,此时钎头尾部回退量必然大于 3cm.于是,在第二个前进周期中,尾部限位块就可能回退到上一次形成的土体弱化区中,从而使攻泥机构头部前进量小于 5cm.这样,在第三个前进周期中,攻泥机构尾部限位块就位于前两次形成的土体弱化区中,这时攻泥机构尾部回退

量进一步增大,头部前进量进一步减少,最终导致三个前进周期后攻泥机构无法继续前进.这样,从计算和试验两个方面都说明,单纯依靠攻泥机构尾部前进限位块的支承作用,不能使攻泥机构连续地前进.

为了改善攻泥机构的直行工作特性,一方面是增加一个前进周期内的最大行程,但更重要的是在攻泥机构尾部提供附加的支承反力防止尾部回退.实际上,作为一个水下机器人整体机构,是能够提供这个附加支承反力的.由于攻泥机构尾部带有附加短节并与载体相连,通过这些短节后面土体的支承以及载体提供的推进力,就可以对攻泥机构尾部提供附加支承反力.另外,本文的计算结果显示,随着攻泥机构前进,其尾部回退量并不是无限增大,而是存在一个极限值,即攻泥机构限位块在最不利的工作条件时,也还是能够提供一部分反力的.

## 5 结论(Conclusion)

本文运用弹塑性有限元方法,对攻泥机构在土体中的直行攻泥工作特性进行了计算分析,阐明了攻泥过程中、攻泥机构前进限位块导致的弱化区对其直行工作特性的影响程度,并依据计算结果对模型试验结果进行了分析,得到以下结论:

在没有尾部附加支承力的条件下,攻泥机构附近土体受其尾部前进限位块扰动后,强度降低越少,扰动弱化区距攻泥机构越远,攻泥机构的工作性态就越好,即攻泥机构头部前进量在一次前进运动周期中所占的比例就越大.但是,攻泥机构尾部前进限位块肯定是有回退的,并且随着前进步数的增多回退量也有所增加,但最终将趋于稳定.就目前的攻泥机构而言,单纯依靠限位块后的土体提供前进所需的支承力,随蠕动次数增加,攻泥机构的直行工作

性态将逐渐蜕化,直至不能工作.因此,为了使攻泥机构能够正常的前进攻泥,一方面通过攻泥机构尾部提供附加的支承力,消除机构在前进过程中的回退量;另一方面通过机构本身的优化设计,在相同的限位支承力条件下,通过降低机构的前进阻力保证在每一步蠕动过程中攻泥机构能够达到最大前进行程.

## 参考文献 (References)

- 1 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算.水利电力出版社,1994
- 2 天津大学主编.土力学与地基.人民交通出版社,1983
- 3 郑大同编.地基极限承载力的计算.中国建筑工业出版社,1979
- 4 朱百里,沈珠江.计算土力学.上海科学技术出版社,1990
- 5 王勖成,邵敏.有限单元法基本原理与数值方法.清华大学出版社,1988
- 6 郑颖人,龚晓南编著.岩土塑性力学基础.中国建筑工业出版社,1989
- 7 张学言编著.岩土塑性力学.人民交通出版社,1993
- 8 高俊合,赵维炳,周成.考虑固结、土-结构相互作用的基坑开挖有限元分析.岩土工程学报,1999,21(5):628-630
- 9 李峰亮.刚体和土体的相互作用原理.岩土工程学报,1998,20(1):60-63
- 10 Chen W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. New York : Elsevier Scientific Publishing Company,1975. 22-23;179-181
- 11 Desai C S, Zaman M M, et al. Thin-layer Element for Interfaces and Joints. Int J Num Anal Meth Geomech, 1984(8):19-43

## 作者简介:

- 王建华 (1955-),男,博士,天津大学岩土工程研究所教授.研究领域:海洋土力学与岩土工程的研究.
- 冯士伦 (1976-),男,天津大学岩土工程研究所研究生.研究领域:岩土工程与海洋土力学等.
- 林 梅 (1962-),男,硕士,中科院沈阳自动化研究所副研究员.研究领域:水下机器人机械设计与液压传动的研究.