

锚锭系统抗拉能力与回填土强度 恢复系数定量关系计算方法

张春华, 李才志

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 对于埋设在海底泥面下的锚锭系统, 其抗拉能力是随着回填土强度的提高而逐渐提高的, 为了船舶系统的安全性, 有必要确定基坑回填后锚锭系统的抗拉能力增长情况。采用ABAQUS有限元软件研究两者之间定量关系的计算方法, 结合工程实例进行计算分析。采用温控参数折减法和“三步走”的计算思路, 可以得出两者之间的公式关系, 结合回填土和原状土的实际强度, 可以计算某一时期锚锭系统的抗拉能力值。

关键词: 抗拉能力; 强度恢复系数; ABAQUS; 温控参数折减法

中图分类号: U 656.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)08-0026-05

Calculation method of quantitative relationship between tensile strength of anchoring system and restitution coefficient of backfill strength

ZHANG Chun-hua, LI Cai-zhi

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: The tensile strength of an anchor system buried under the surface of the seabed mud increases gradually with the increase of backfill strength. In order to guarantee the safety of ship's mooring, it is necessary to determine the tensile capacity growth of anchor system in the pit backfill. Using the calculating method of ABAQUS finite element software, we study the quantitative relationships between them combining with engineering examples. Adopting the temperature-controlling parameters' reduction method and "three-step calculation" thinking, we obtain the formulae for the relationship between the two. With the actual strength of the backfill and undisturbed soil, we can calculate the tensile strength of the anchor system in a given period.

Key words: tensile strength; strength coefficient of restitution; ABAQUS; temperature controlling parameters' reduction

锚锭系统通常是单点或多点系泊系统的一部分, 其通过水下锚链与浮筒相连, 船舶系缆时, 船舶锚链(缆绳)直接与水下锚链顶端的末端卸扣相连, 浮筒仅限制末端卸扣向下的自由度, 系泊力直接通过水下锚链传递至锚锭系统。因此锚锭系统抗拉能力直接决定了船舶系缆的安全性。

如锚锭系统用于大中型无动力船舶防台系泊使用, 锚锭系统一般是埋设在海底泥面下一定

深度, 使土层参与锚锭作用。当锚锭块埋设后, 基坑的回填土强度在回填初期是很差的, 随着时间的延长, 会逐渐恢复到接近于原状土的强度, 因此锚锭系统的抗拉能力与回填土强度恢复程度(相对于原状土而言, 下同)有直接关系, 为了确保船舶系缆的安全性, 有必要计算锚锭系统在回填土强度恢复过程中抗拉能力的变化。回填土强度恢复程度与时间的关系, 不在本文研究范围内。

收稿日期: 2012-03-31

作者简介: 张春华(1978—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事港口与航道工程及岩土工程的设计与研究。

目前没有相应的公式计算两者之间关系, 但可以通过“静力法”, 假想破坏面, 运用极限平衡的原理进行计算, 但这种方法具体操作起来比较繁琐, 也不能考虑锚链与土相互作用以及土的变形。本文将采用ABAQUS有限元软件, 利用温控参数折减有限元法^[1]研究锚链系统抗拉能力与回填土强度恢复系数之间的定量关系, 并结合工程实例进行计算分析, 为相关工程投入使用提供参考。

1 温控参数折减有限元法基本原理

强度折减有限元分析法^[2]最早由Griffiths等提出, 在我国, 郑颖人等将其称为“强度折减法”。这种方法一般用于边坡稳定性问题, 其基本思想与传统的极限平衡方法一致, 均可称之为强度储备安全系数法。基于强度折减理论的有限元分析边坡稳定性的基本原理, 是将边坡土体的实际强度参数粘聚力 c' 和内摩擦角 φ' 同时除以一个折减系数 F_s (大于1的系数), 得到一组折减后新的粘聚力 c'_f 和内摩擦角 φ'_f , 即

$$\begin{cases} c'_f = \frac{c'}{F_s} \\ \varphi'_f = \arctan\left|\frac{1}{F_s} \tan \varphi'\right| \end{cases} \quad (1)$$

上述公式表明了土强度的折减方法, 可以应用于回填土强度恢复计算——回填土强度恢复系数 k 可以通过原状土强度折减系数 F_s (对原状土而言可以理解为安全系数) 反算得来。

在传统的数值离散试验算法中, 土强度参数不随时步变化, 每一组试验参数都要进行一个完整的加载计算; 即原状土强度每折减一次, 就要重新设置强度参数计算一次, 直到试算出一个使锚链系统刚好达到极限状态的安全系数 F_s , 很显然, 这种折减计算方法是很繁琐的, 不利于实际设计研究工作。温控参数折减有限元法可以解决这个问题, 一次计算就可以得到某一拉力 T 下的锚链系统安全系数 F_s 值。

在ABAQUS 程序中, 可以利用其现成的材料参数随温度场变量的变化而变化的功能, 定义材

料强度指标随着温度场的变化而变化。此温度场只是一个变量场, 不代表真实温度, 只起到带动材料参数变化的作用。如果给定其热膨胀系数为0, 那么温度变化不会给结构带来应力和变形上的变化。

对于安全系数 F_s 为1.0~10.0的情况, 当温度场变量 θ 由0增加到100时, 定义 c'_f 和 $\tan \varphi'_f$ 随着 θ 线性折减到 $0.1c'$ 和 $0.1\tan \varphi'$, 即 $1/F_s$ 由1.0折减到0.1。其数学关系式为

$$\frac{c'_f}{c'} = \frac{\tan \varphi'_f}{\tan \varphi'} = \frac{1}{F_s} = 1 - \frac{\theta}{100} \times 0.9 \quad (2)$$

静力分析中的时步 t 不代表真实时间, 只代表“载荷”的变化过程。当 t 由0增加到1.0时, 定义温度场 θ 随时步 t 由0线性增加到100, 即

$$\theta = 100t \quad (3)$$

把式(3)代入式(2), 从而得出安全系数和时步 t 之间关系为

$$F_s = \frac{1}{1 - 0.9t} \quad (4)$$

这样, 通过递推, 实现了材料强度参数 F_s 与时步 t 的一一对应, 并随着 t 的增加而线性折减。对于安全系数小于1.0的情况也可以采用同样的方法, 只要增大 $1/F_s$ 的值即可。

回填土强度恢复系数 k 与安全系数 F_s 的关系为

$$k = \frac{1}{F_s} \quad (5)$$

通过上述公式的换算, 即可得到回填土强度恢复系数 k 。

2 有限元计算思路

有限元计算采用3个分析步, 计算目的分别如下:

第1个分析步: 地应力平衡。一般来说, 岩土计算均需地应力平衡, 让土体位移接近于零。

第2个分析步: 在原状土体强度不变的情况下进行计算, 在这一步中水下锚链上端拉力 T 线性增加到最大。

第3个分析步: 在原状土体强度不断折减的情况下继续计算, 直至计算不收敛, 通过式(4)和式(5)的换算, 可以得出锚链系统的拉力 T 与回填土强度恢复系数 k 的定量关系; 在这一步中拉力

T 通过水下锚链完全施加到锚链沉块上且保持不变,其中土体强度折减采用温控参数折减有限元法。

上述3个分析步缺一不可,每一个分析步都是为下一个分析步服务的。在第3步中,控制温度场随时步 t 的增加而变化,从而带动强度参数不断折减。在每一时步 t ,考察该时刻对应的强度参数下每一点的应力状态,与破坏准则相比较,如果某一点上的应力位于屈服面内,则认为该点处于弹性响应,如果应力位于屈服面上,则按照弹塑性理论,将屈服应力在单元中重分配;若计算收敛,则时步自动增加一个 Δt ,强度参数折减到 $t+\Delta t$ 时刻对应的值,继续计算该时刻的应力和变形,若计算不收敛则减少增量步再次迭代;当足够多的高斯点发生屈服使机制发生变化时,迭代停止。这个求解过程,都是由ABAQUS自动完成的,无需重新编制程序或人为干预计算过程。

只需将锚链系统失效时的 t 直接代入式(4)就可确定安全系数 F_s ,进而由式(5)得出回填土的强度恢复系数 k 。通过一次计算,可以得出每一个拉力 F 对应的回填土强度恢复系数 k ,即回填土强度恢复到原状土强度的某一比例时,对应的锚链系统能承受的最大抗拉能力。

基于上述思路和技术方法,可以解决埋设在海底泥面下锚链系统的抗拉能力与回填土强度恢复系数的定量关系。

3 算例

3.1 计算资料

如图1所示,锚链沉块底边长9.5 m,顶边长5.3 m,高2.5 m,埋深8 m。海床土体组成如图2所示,钻孔范围内土体主要包括①淤泥质粉质黏土和②淤泥质黏土,土体强度指标见表1。锚链沉块强度指标弹性模量32.5 GPa,泊松比0.167。

表1 原状土体强度指标

地层编号	变形模量/ Pa	泊松比	密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
①	299 106	0.47	1.755	8.1	5.8
②	468 626	0.46	1.687	10.1	8.5

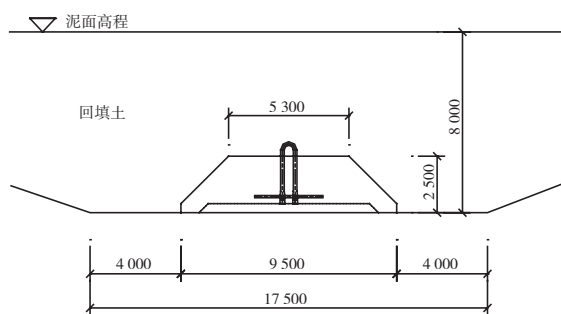


图1 锚链系统

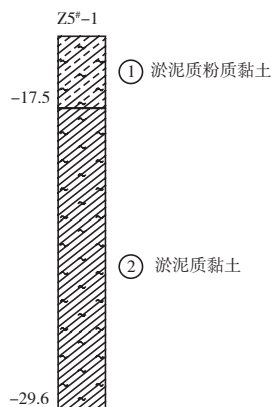


图2 土体组成

3.2 有限元模型及参数

锚链沉块和土体的计算参数见图1和表1。为保守起见,土体计算参数统一取自第1层土。考虑到土体边界对锚链系统有限元计算的影响,土体计算宽度为沉块最大边长的10倍,即95 m,土体计算厚度取20 m。锚链系统的有限元模型见图3。

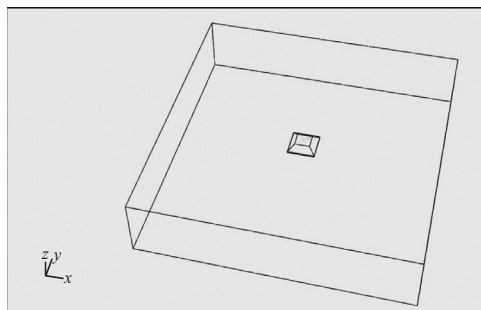


图3 锚链系统的有限元模型

3.3 计算工况

假定锚链上端拉力 T 分别为500 kN, 1 000 kN, 1 500 kN, 2 000 ~ 13 000 kN, 分别对锚链系统进行计算, 2 000 ~ 13 000 kN的间隔为1 000 kN。

其中, 锚链下端拉力的大小、方向采用悬链线方程^[3]进行计算。由《海港工程设计手册(中)》中“趸船的锚系和支撑设施”中相关公式可知, 锚链悬线是采用二次抛物线来代替的, 实用上足够准确。在锚链无拖地的情况下(图4), 锚链曲线方程式为:

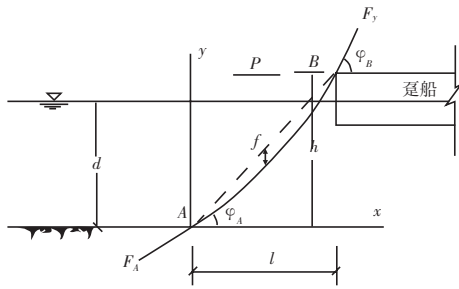


图4 锚链受力

$$y = x \tan \alpha - \frac{4f}{l^2} x(l-x) \quad (6)$$

锚链曲线长度为:

$$S = l \left(1 + \frac{h^2}{2l^2} + \frac{8f^2}{3l^2} \right) \quad (7)$$

上列两式中 $\tan \alpha = \frac{h}{l}$, f 为曲线的中矢:

$$f = \frac{wl^2}{80P} \quad (8)$$

A点锚链与水平线夹角:

$$\varphi_A = \frac{h}{l} - \frac{wl}{20P} \quad (9)$$

B点锚链与水平线夹角:

$$\varphi_B = \frac{h}{l} + \frac{wl}{20P} \quad (10)$$

该两点的锚链拉力及其垂直分力均可由下两式求出:

$$\begin{cases} F = \frac{P}{\cos \varphi} \\ V = P \tan \varphi \end{cases} \quad (11)$$

最大锚链拉力发生在B点:

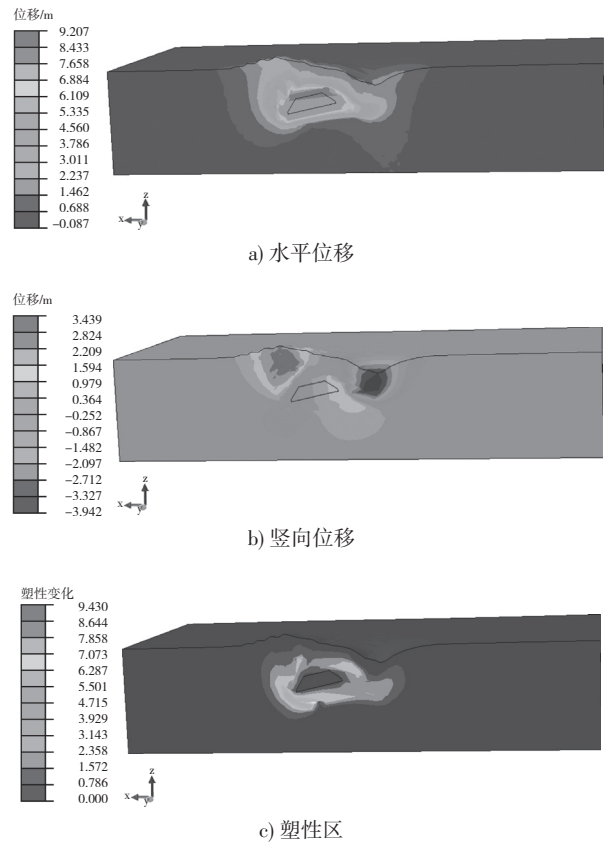
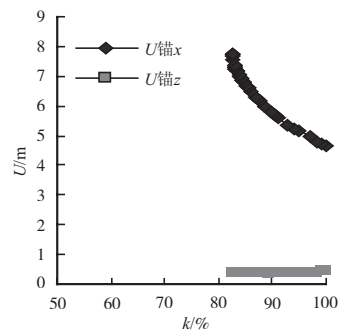
$$F_B = P \sqrt{1 + \left(\frac{h}{l} + \frac{wl}{20P} \right)^2} \quad (12)$$

式中: h 为锚链在趸船上悬挂点的高度 (m); P 为水平力 (kN); w 为锚链在水中的单位长度质量 (t)。

3.4 计算结果

水下锚链上端不同拉力 F 对应不同的回填土

强度恢复系数 k , 其中 $F = 1.3 \times 10^4$ kN 时锚链系统部分计算结果见图5。

图5 $F = 1.3 \times 10^4$ kN 时锚链系统云图图6 $F = 1.3 \times 10^4$ kN 时锚链沉块顶面中心点位移 U 与回填土强度恢复系数 k 关系曲线

由有限元计算过程可知, 当锚链沉块上作用 500 kN, 1 000 kN 拉力时, 计算顺利完成, 这时回填土强度恢复 10% (相对于原状土而言), 锚链系统还未破坏。当锚链沉块上作用 1 500 kN 拉力时, 计算未顺利完成, 这时对应的回填土强度恢复系数 k 为 12.5%, 即说明当回填土强度恢复 12.5% 时, 锚链系统能承受的最大拉力为 1 500 kN。

锚链系统的最大抗拉力 T 与回填土强度恢复系

数 k 的定量关系见图9, 其中 k 最小值为12.5%, 最大值为100%。

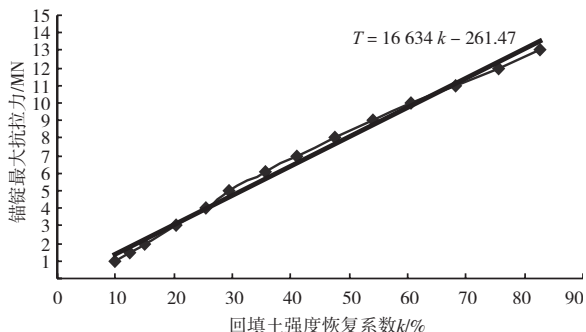


图7 锚锭系统的最大抗拉力 T 与回填土强度恢复系数 k 的关系曲线

由图9可知, 该锚锭系统的最大抗拉能力 T 与回填土强度恢复系数 k 的函数关系如下:

$$T = 16.634k - 261.47 \quad (13)$$

如考虑最大抗拉力 T 是设计抗拉力 F 的2倍, 则锚锭系统的设计抗拉力 F 与回填土强度恢复系数 k 的定量关系如图10所示。

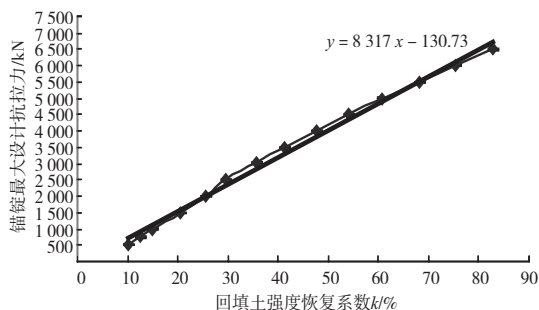


图8 锚锭系统的设计抗拉力 F 与回填土强度恢复系数 k 的关系曲线

由图10可知, 该锚锭系统的设计抗拉能力 F 与回填土强度恢复系数 k 的函数关系如下:

$$F = 8.317k - 130.73 \quad (14)$$

由上述公式, 结合回填土的实际强度和原状土的强度, 就可以计算这时锚锭系统的设计抗

拉能力。回填土的实际强度可以通过地质勘探工作获得。

4 结论

锚锭系统是单点或多点系泊系统的一个重要组成部分, 它的安全直接决定了船舶停泊系统的安全。锚锭系统在使用的初期, 由于回填土强度还在恢复的过程中, 所以锚锭系统的抗拉能力存在不确定性, 因此有必要对其抗拉能力进行计算, 以便于实际船舶停泊系统时参考。

本文简述了锚锭系统抗拉能力与回填土强度恢复系数之间的定量关系计算方法的研究过程。通过上述研究分析和算例计算可知:

1) 相对于传统的数值离散试验算法, 温控参数折减有限元法可以解决一次计算中土强度参数不断折减的问题。

2) 结合温控参数折减有限元法技术, 采取“三步走”的计算思路, 通过ABAQUS有限元软件就可以计算得出锚锭系统的抗拉能力和回填土强度恢复系数的定量关系。

3) 结合回填土的实际强度和原状土的强度, 通过锚锭系统的抗拉能力和回填土强度恢复系数的定量关系计算公式, 可以计算这时锚锭系统的设计抗拉能力。

参考文献:

- [1] 曹先锋, 徐千军. 边坡稳定分析的温控参数折减有限元法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 2039-2042.
- [2] 廖公云, 黄晓明. ABAQUS有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- [3] 顾民权. 海洋工程设计手册(中册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.

(本文编辑 武亚庆)