

· 地基与基础 ·

基于强度折减法的海底边坡三维稳定性分析*



张恒¹, 来向华¹, 廖林燕², 黄潘阳¹

(1. 国家海洋局第二海洋研究所, 工程海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012;

2. 上海石油天然气有限公司, 上海 200041)

摘要: 为了分析波浪荷载作用下海底边坡的稳定性, 通过 Visual C#语言平台开发数值接口程序, 实现了地质三维建模程序 Gocad 和有限元分析程序 Abaqus 的数据转换, 即有限元程序在海底复杂的地貌和地形条件下三维建模。同时开发了 Abaqus 力学场数据处理程序, 可以实现 Abaqus 在强度折减法下的边坡稳定性分析。通过分析波浪作用下舟山朱家尖岛海域海底边坡稳定性, 评判该边坡的稳定性。计算结果表明, 波浪荷载对海底边坡稳定性会产生一定的影响, 朱家尖岛附近海域海底边坡有滑坡的风险。

关键词: 有限元分析; 强度折减法; 数值应用程序接口; 场处理程序; 海底边坡稳定性

中图分类号: P 753; TU 44

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0148-06

Analysis of 3-D modeling subsea-slope stability based on strength reduction methods

ZHANG Heng¹, LAI Xiang-hua¹, LIAO Lin-yan², HUANG Pan-yan¹

(1. Laboratory of Ocean Engineering, the Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China;

2. Shanghai Petroleum Corporation, Shanghai 200041, China)

Abstract: To analyze the subsea-slope stability affect by the wave load, we use Visual C# software language platform to develop an application programming interface and realize the data transfer between the Gocad and Abaqus. With the basic contour map, the complex seabed topography could be 3-D modeled in Abaqus. We also develop a program to treat the mechanics field in Abaqus and realize the stability analysis of subsea-slope by the strength reduction method. Based on the analysis of the subsea slope stability of Zhujiajian island in Zhoushan, we adjust the the stability of the side slope. The calculation result shows that wave load will exert certain impact on the subsea-slope, and the subsea-slop near Zhujiajian island faces landslide risk.

Keywords: finite element analysis; strength reduction method; application programming interface; program of mechanics field treatment; subsea slope stability

随着我国近海海域工程开发, 海底潜在地质灾害尤其是海底边坡失稳日益成为威胁近海工程的重要因素。海底滑坡是指: 海底斜坡上未固结的松软沉积物或有软弱结构面的岩石, 在外力作用下沿斜坡中的软弱结构面发生滑动。海底边坡稳定性的研究目前仍然处于发展阶段^[1-7]。随着有限元的产生和发展, 应用严格的应力应变方法分

析结构的稳定和变形成为可能, 逐渐应用到岩土工程边坡稳定分析当中。

目前大多数的 Abaqus 有限元边坡稳定性研究都是基于传统的二维及三维有限元模型^[8-13], 得出的结果已经不能满足研究及工程精度的需求, 需要一种可以具体体现海底地貌的有限元建模来完成海底边坡稳定前期的数值计算工作。

收稿日期: 2015-10-20

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (51179169); 上海市科学技术委员会科研计划项目 (14DZ1204600); 国家海洋局第二海洋研究所科研业务费专项 (JG1307)

作者简介: 张恒 (1991—), 男, 硕士研究生, 从事海洋岩土工程与海底勘察技术方面的研究。

本文通过开发应用程序接口, 实现了地质三维建模程序 Gocad 和有限元分析程序的数据转换, 即通过基本的 CAD 等高线图即可实现极复杂的地貌和地形条件下的 Abaqus 有限元程序的高水平半智能化建模。同时开发了 Abaqus 场数据处理程序, 通过数据处理程序可以实现边坡稳定性分析。结合强度折减有限单元法对舟山朱家尖岛海域海底边坡稳定性进行分析, 评判波浪荷载作用下朱家尖岛海底边坡的稳定性。

1 应用程序接口

Abaqus 程序模型构造能力不强, 尤其是处理复杂的海底表面更是力不从心, Gocad 程序可以满足这一要求。Gocad 可以通过 CAD 快速生成地形面, 如果经过 Surfer 程序将地形用有限差分法进行克里格插值处理后, 三维地貌将更为平滑。Gocad 所生成的网格与 Abaqus 所要求网格形状一致 (六面体网格) 且可用 Excel 文件导出, 这就为接口的实现提供了可能。

基于上述论述, 稳定性分析技术路线如下:

- 1) 将原始的 CAD 等高线图导入 Gocad 中进行前处理, 形成基本的等高线点位;
- 2) 将生成的等高线导入 Surfer 中利用克里格插值法进行数据插值, 再导回 Gocad 程序中形成海底表面;
- 3) 把处理后的等高线进行三维地质建模, 导出建模网格数据;
- 4) 将网格数据导入应用程序接口进行数据处理, 并生成新的 Abaqus 计算输入文件 .inp, 导入 Abaqus 中进行运算。其技术路线见图 1。

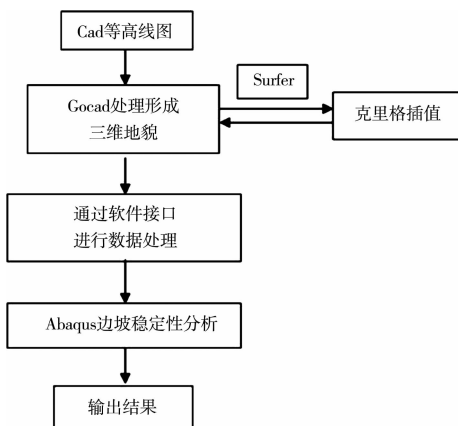


图 1 海底稳定性分析技术路线

王长海^[14]的研究使 Gocad 和 Abaqus 之间的接口得以实现, 但由于他的网格解译顺序出现问题, 导致可以建立模型但不能运算, 程序报错。笔者基于 Visual C#语言平台, 编写了相关的应用程序接口。该程序只需导入经 Gocad 和 Surfer 两个程序处理后导出的 Excel 格式的网格数据文件, 自动解译数据, 即可完成 Abaqus 新网格以及附带的边界条件的生成。本接口程序不仅模型能够导入 Abaqus 中, 而且能够进行正确的运算并得出相应的研究结果。该程序的模型转换控制技术路线见图 2。

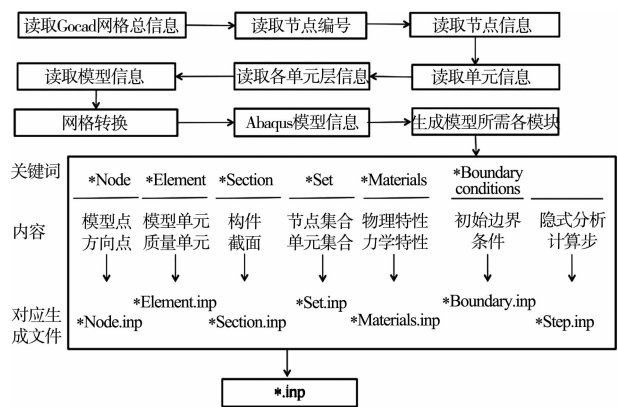


图 2 模型转换控制技术路线

2 强度折减法在 Abaqus 程序中的应用

强度折减法是 Zienkiewicz 等^[15]在 1975 年首次提出的, 他们提出了一个抗剪强度折减系数 (SSRF: Shear Strength Reduction Factor) 的概念。其基本原理^[16]是将岩土体强度指标值同时除以强度折减系数 F_m , 得到维持平衡所需要的或实际土体发挥的粘聚力和内摩擦角。在整个计算中不断增大 F_m , 当到达临界破坏时, 此时的 F_m 被称为最小安全系数。由式(1)、(2)求得:

$$c_m = \frac{c}{F_m} \tag{1}$$

$$\varphi_m = \tan^{-1}(\tan\varphi/F_m) \tag{2}$$

式中: c 、 φ 为维持平衡所需要的或实际土体发挥的粘聚力和内摩擦角; F_m 为强度折减系数。

3 海底边坡失稳的判别依据

判别海底边坡是否达到临界破坏, 主要遵循如下的判别标准: 首先, 有限元计算的结果是否

能够收敛，对 c 和 φ 进行强度折减后，计算结果不能满足收敛性要求；其次，将海底边坡的特征点位移或应变拐点作为判断是否失稳的依据；最后，将是否形成连续的塑性贯通区域作为边坡失稳的判据。

4 工程实例分析

4.1 工程概况

朱家尖岛西南侧凉帽头至钓鱼礁之间的福利门围填海工程已经实施，围填海面积 113.4 hm² (约合 1 700 亩)，包括金海湾围填海工程、朱家尖岛福利门围填海工程北区块和朱家尖岛福利门围填海工程南区块。

4.2 物探调查

根据物探剖面解释，朱家尖岛西南岸(图 3)，滑坡上部位于滩地与边坡间的坡折带，边坡坡度 7.9°左右，滑坡长度 500 m 左右；两处滑坡均可见明显的滑坡体、滑坡面及两级滑动台阶，属于整体性滑塌，这两处滑坡距离规划围填海的围堤距离分别是 250 m 和 1 066 m；从这两处滑坡所处的地貌类型来看，属于潮汐通道深槽边坡及水下高地边缘，与此毗邻的边滩地区往往加速沉积，且面积相对较大，下部相对其它部位来讲水动力作用较强，是水道发生横向和纵向调整的部位，属于冲刷侵蚀地段，这种强烈的冲淤反差，极易形成窄而陡的岸坡，在外力诱发下发生滑坡。

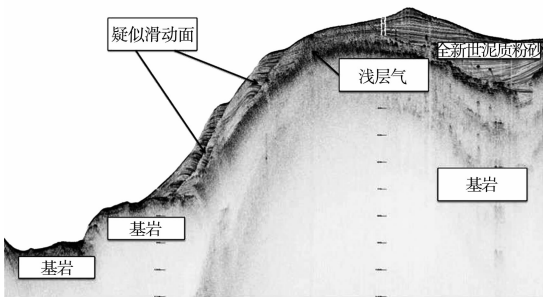


图 3 浅剖探测显示的朱家尖岛西南岸水下多级滑坡

调查区内除通过浅剖可以明显看出的两处滑坡外，还存在一些潜在滑坡易发区。由于大部分的滑坡发生在非常平缓的斜坡上，3°~4°斜坡上的滑坡最多，滑坡土类中细粒黏土所占

比例最大。所以将这个区域划分为海底滑坡易发区(图 4)。

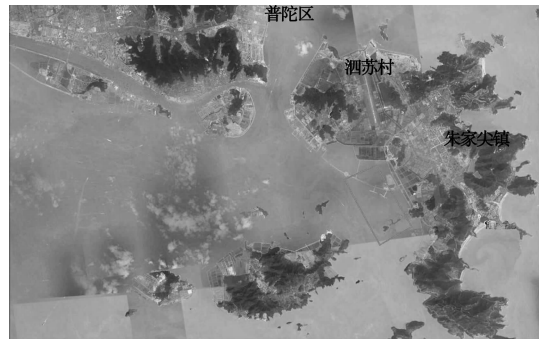


图 4 海底滑坡易发区分布

根据现场钻探资料，选取最软弱的海洋粉质黏土参数作为朱家尖岛西南海底边坡的土力学基本参数进行分析(表 1)。

表 1 土体参数

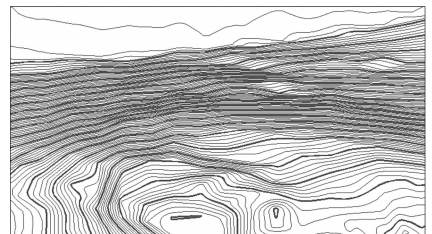
类别	密度 $\rho/$ ($t \cdot m^{-3}$)	弹性模量 $E/$ MPa	泊松比	粘聚力 $c/$ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
淤泥质粉质黏土	1.8	1.99	0.33	16.8	12.7

研究区域的水文波浪条件为：波长 36.5 m，周期 $T=5$ s，波高 $H=4$ m。

4.3 数值分析

4.3.1 前处理

首先，以海底滑坡的易发区为基础，选定研究区域，截取该滑坡区的水下地形图，该模型长 1 610 m、宽 890 m，导入 Gocad 中形成三维地貌。然后经过插值后形成海底表面，导回 Gocad 中，通过由点-线-面-体的顺序形成网格组成不规则的上表面条件下的三维海底地形(图 5)，其中坡顶最高处至模型底部深 635 m。将 Gocad 三维模型数据导出到 excel 中，通过 Abaqus 数值接口程序生成 Abaqus 导入文件 .inp，转化为可以使用的网格形式。



a) 选取的 cad 水下地形

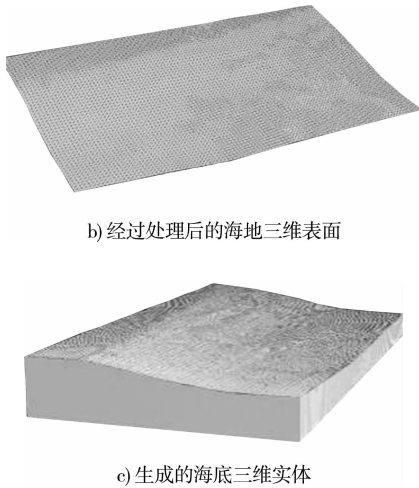


图5 朱家尖岛海底地形建模

4.3.2 构建自重应力场

编写 inp 数据文件,边界条件为限制前后两面的 x 方向位移、左右两面的 y 方向位移,底面限制 xy 两面的位移。荷载只有重力荷载。编写完成后,导入 Abaqus 中生成模型(图6)。

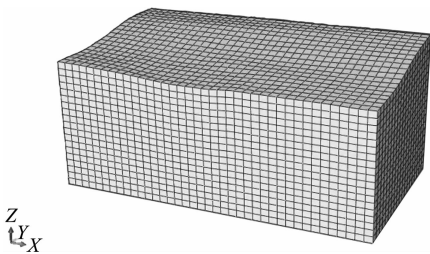


图6 Abaqus 海底三维模型

4.3.3 场处理数据的开发

Abaqus 导出的场数据不能被 Abaqus/CAE 直接读取,必须通过处理后通过 Abaqus/command 模块读取。由于海底面复杂、网格平面不规则,同时数据量极大,必须再次经过处理。所以基于 Visual C#语言平台又开发了 Abaqus 场输出文件转换程序,经过该文件转换后的场数据文件完全符合导入要求。

4.4 数值计算

在目前的海洋工程中,考虑海底边坡稳定时常认为最小安全系数出现在最低潮位^[17]。所以基于重力场的条件下,根据最低潮位,在模型顶部生成 surface,以便于在表面施加静水压力以及波浪荷载。并定义相关的分析步长,然后对粘聚力

和内摩擦角进行折减运算。

4.4.1 应力

如图7所示,海底土体本身承受的是自重应力、上覆海水给予的静水压力以及波浪荷载。通过 Abaqus 数据接口程序处理后的模型同时能够反映出,不同水深条件下海底表面承受的应力随着水深的增加而逐渐增大,这与实际情况接近,比较好地反映了土层所受的上覆应力。

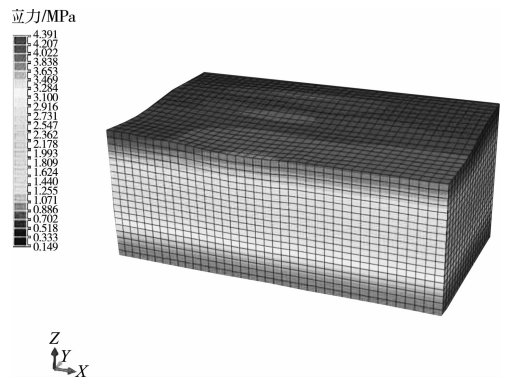


图7 海底模型受力

分析波浪荷载在同一周期 $T = 5$ s 内的 $t = 0$ 、1.25、2.5、3.75 s 时刻,分别在海底表面 y 方向施加波浪压力,根据微幅波理论,水体的动压力可以由式(3)表示(为简单起见,采用拟静力的方法,增加海面波压力公式,按水平海底近似计算,不考虑动力效应对土体力学参数的影响):

$$P_z = \rho g \frac{H \cosh[k(z+h)] \cos(kx - \sigma t)}{2 \cosh(kh)} - \rho g z \quad (3)$$

式中: z 为波面相对高度; H 为波高; σ 为波动圆频率; ρ 为液体密度; k 为波数; h 为静水面至海底的垂直距离。当 $z = -h$ 时, P_z 为海底面压力,即

$$P_0(x, t) = \frac{\rho g H}{2 \cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t) + \rho g h \quad (4)$$

4.4.2 滑动面

图8是不同时刻计算终止时的缩减积分单元位移等值线,由图8可以判断出不同时刻滑动面的位置。计算结果很好地模拟了海底边坡的滑动趋势,整个滑动面呈现了两端圆弧中间直线的复合状,与一般规律相似。从最危险滑动面的缩减积分单元位移等值线剖面图(图9)可以看出,滑

动面呈大致的圆弧状，而且通过坡脚点。同时也可以发现，随着不同时刻波形的推移，滑动面呈现不同的滑动形式，出现了从多个滑动面向单圆弧滑动面演变、再由单一滑动面向多个滑动面分离的趋势，这主要是由于波浪荷载的循环动力特性以及不同时刻波浪压力位置与海底面水深共同影响所产生的。这同陆上边坡的失稳有较大的不同。实际上符合波浪荷载在海底作用的实际情况。

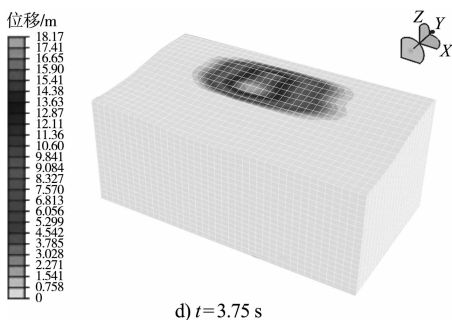
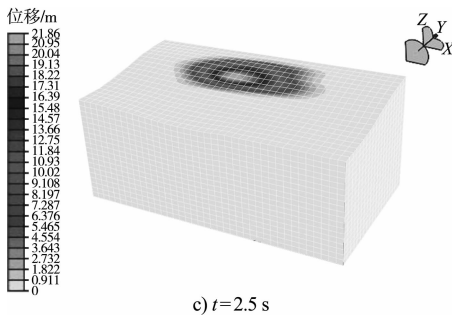
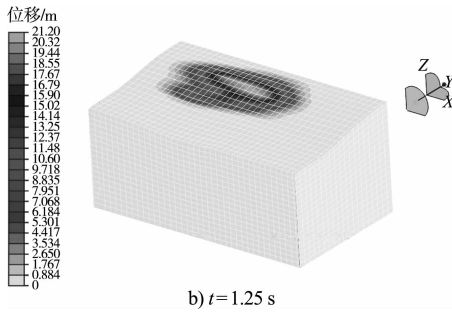
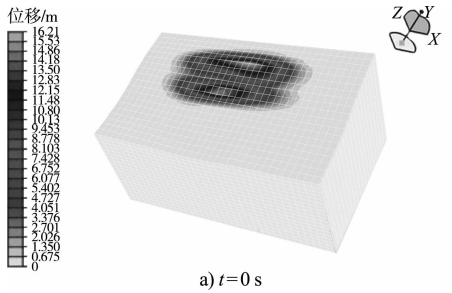


图8 缩减积分单元位移等值线

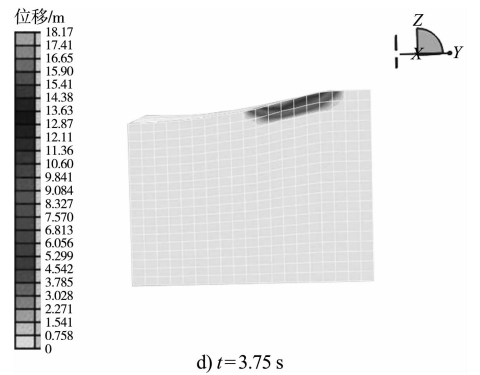
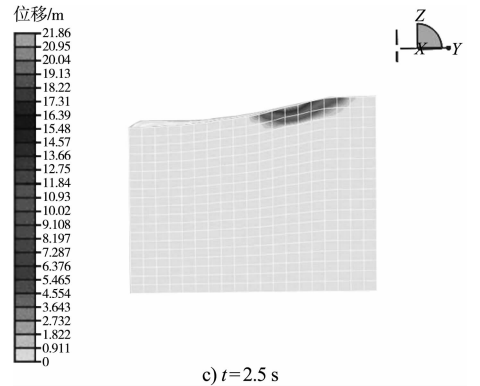
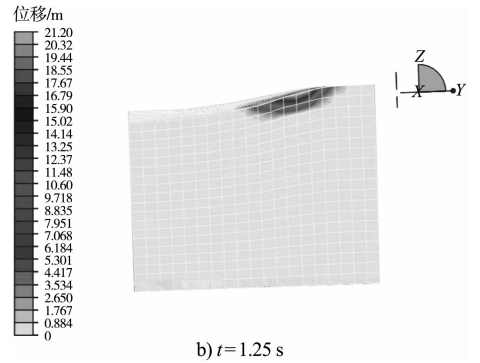
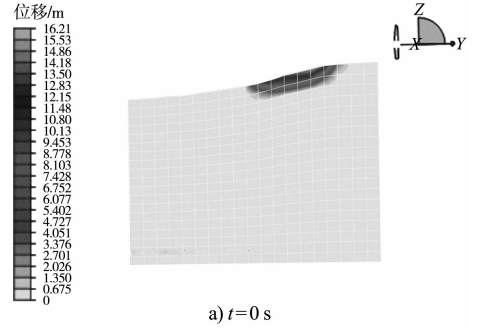


图9 最危险滑动面的缩减积分单元位移等值线剖面

4.4.3 安全系数

将安全系数 F_s 与海底面选取点的位移作为输出变量，利用 Abaqus 提供的 Combine 函数，将不同时刻的安全系数 F_s 随位移 distance 的变化关系

绘制在图 10 中。由图 10 可以发现, 若以数值不收敛作为土坡稳定的评价标准, 安全系数见表 2。通过安全系数的变化可知, 安全系数随着波浪相位的变化呈现出周期性的变化规律(图 11), 也与滑动面的变化情况相一致。说明在波浪荷载作用下, 波浪荷载对海底边坡稳定性会产生一定的影响。

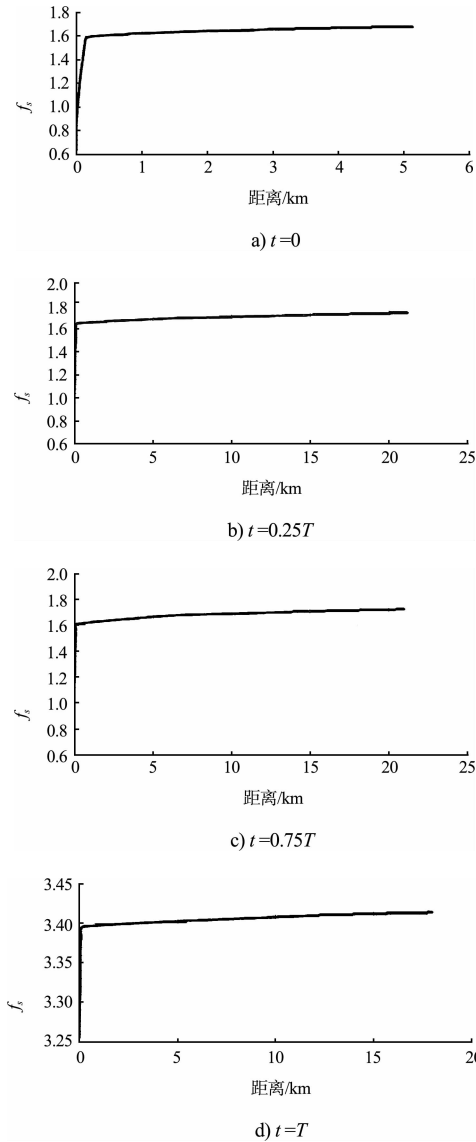


图 10 安全系数随位移的变化关系

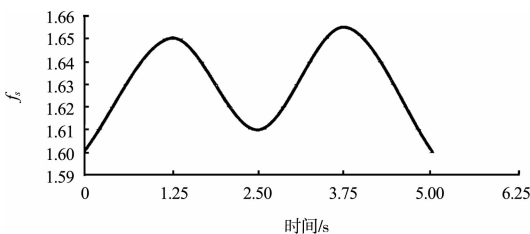


图 11 不同时间的安全系数

表 2 不同时刻安全系数

时刻 t	0	0.25T	0.5T	0.75T
安全系数 F_s	1.600 4	1.650 25	1.609 97	1.655 07

不同时刻的安全系数接近于 1.6, 均大于 1, 表现出了一定的稳定性, 由于本分析是基于正常周期性波浪荷载作用下的软土边坡分析, 所以在极端条件的作用下, 如某些外部条件诱发, 比如地震、海浪、人工活动等使边坡所受外部荷载的条件或土体性质发生一定的扰动, 就会急剧降低边坡的安全系数, 使海底边坡发生失稳破坏。同时, 前期物探工作也佐证了朱家尖岛海底边坡失稳的实际情况(图 3)。所以, 虽然安全系数略大于 1, 朱家尖岛海域存在着一定滑坡的风险。

5 结语

1) 研发“Abaqus 建模应用程序接口”, 通过基本的 CAD 地形图即可实现极复杂的地貌和地形条件下的 Abaqus 有限元程序的建模。

2) 开发了 Abaqus 场数据处理程序, 通过数据处理程序将大量的数据处理后可以实现边坡稳定性分析。

3) 运用强度折减法分析了在波浪荷载作用下, 不同时刻的舟山朱家尖岛海域海底边坡的稳定性, 并将不同时刻的波浪荷载安全系数进行比较, 在强度折减法模拟下的朱家尖岛海域有滑坡的风险, 同时物探数据也佐证了部分滑坡的出现。

4) 波浪荷载对海底边坡的稳定性有一定的影响, 其安全系数不是固定值, 在一个波浪周期内震荡变化。因波浪荷载的循环特性, 在土体边坡中可能同时产生多个滑动面, 这同陆上边坡的失稳有较大的不同。

5) 本文仅采用拟静力的方法, 未考虑波浪作用还可能导致土体力学性质的改变, 需要对此进行深入研究, 再结合有限元动力学分析, 得到更全面的结论。

(下转第 159 页)