

基于强度折减理论的海底斜坡稳定性分析

杨林青¹,王忠涛¹,李家钢²,刘乐军³,胡光海³

(1.大连理工大学 建设工程学部,辽宁 大连 116024; 2.中海石油研究中心工程设计部,北京 100027;
3.国家海洋局第一海洋研究所,山东 青岛 266100)

摘要:为加强强度折减有限元法在海底斜坡稳定性研究中的应用,以“荔湾3-1气田不良地质的风险评价”项目为工程背景,运用有限元软件 ABAQUS 二次开发得到的边坡稳定性分析模型对海底斜坡稳定性进行评价,并在此基础上探讨了各土体性质参数对海底斜坡稳定性的影响。该二次开发模块操作简便、计算准确,自动搜索安全系数精度高。计算结果表明海底斜坡坡度、土体不排水强度、摩擦角对海底稳定性影响较大,土体密度影响不大。

关键词:强度折减有限元法; ABAQUS; 海底斜坡稳定性; 土体参数

中图分类号: TU441+.35 文献标识码: A 文章编号: 1672-1144(2012)06-0026-05

Submarine Slope Stability Analysis Based on Strength Reduction Theory

YANG Lin-qing¹, WANG Zhong-tao¹, LI Jia-gang², LIU Le-jun³, HU Guang-hai³

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;
2. Engineering Design Department, Zhonghai Oil Research Centre, Beijing 100027, China;
3. First Institute of Oceanography, National Bureau of Oceanography, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: In order to strengthen the application of strength reduction method in submarine landslide analysis, the finite element model from the secondary development of software ABAQUS is used to analyze and evaluated the stability of submarine slopes based on the project of “Liwang 3-1 gas field’s adverse geology risk evaluation”, and then on this basis, a lot of changes on the parameters are made to search the nature of seabed slope stability and impact of soil properties on seabed slope stability. This secondary development module is simple in operation, accurate in calculation and precise in safety factor. The calculation results show that the submarine slope gradient, soil friction angle and undrained shear strength would play a decisive role in the stability of submarine slope, but the soil density would have little effect in that.

Keywords: strength reduction finite element method; ABAQUS; submarine slope stability; soil parameter

21世纪是全面开发利用和保护海洋的世纪。中国具有丰富的油气储量,海洋油气资源已成为我国能源开发的一个重要方向。海底油气输送管道是海上油气田开发中油气输送的主要方式^[1]。然而随着沿海地区经济迅速发展,海洋灾害造成的经济损失日益增多。海底滑坡是一种常见的海洋灾害,应当对海底滑坡的机理研究和灾害预防引起足够的重视^[2]。我国正逐步加大对海洋科学的投入,1996年与法国合作开展东海陆坡的稳定性研究项目^[3],近年将南海作为“十二五”期间深海研究的重点海域。然而由于客观条件的限制,对海底滑坡的认识定性

描述多,定量研究少且不够准确。今后应着重针对滑坡土体性质、失稳区影响范围预测以及斜坡失稳机理等方面进行研究。

强度折减有限元法^[4]是一种数值分析方法,以描述滑坡体体内应力、应变特征的本构模型为基础分析边坡的变形和稳定问题。众多学者针对这种方法做出各类探索^[4-7],研究表明,强度折减有限元法可有效分析边坡的稳定性^[6]。但是这些研究多是对陆地边坡,很少涉及海底斜坡不稳定性。本文运用 ABAQUS 二次开发稳定性分析模块,应用强度折减技术探讨海底斜坡坡度、土体不排水强度、土体密

度、摩擦角等参数对海底斜坡稳定性的影响。本模块并不试图追踪海底滑坡的完整过程,而是将强度折减有限元法应用到海底边坡稳定评价,为将来的海底滑坡模拟储备先期技术。

1 强度折减理论

强度折减法基本过程是不断对岩土体抗剪强度参数粘聚力 c 和内摩擦角 φ 进行折减: $c^* = c/F$, $\tan\varphi^* = \tan\varphi/F$,直到边坡处于失稳极限破坏状态,此时对应的折减系数 F 为边坡稳定的强度储备安全系数^[7]。安全系数搜索列表中前一个折减系数一般作为边坡稳定安全系数。

失稳判据的选择在强度折减法中存在争议,现有的边坡失稳判据大致可以分为四类:① 折减后的土体强度参数使得有限元计算在规定的迭代次数内不能收敛^[8-9];② 塑性区从坡脚贯通至坡顶^[10];③ 超过某一幅值的广义剪应变或等效塑性应变形成贯通带^[11]。④ 以边坡坡面特征点位移陡增作为失稳判据^[12]。本文强度折减计算中,采用数值迭代不收敛作为边坡失稳判据。

2 基于强度折减理论 ABAQUS 二次开发实现自动搜索安全系数

2.1 ABAQUS

本文所研究的深海滑坡塑性区开展的过程中会产生非常强烈的非线性并伴随土体弱化,因此采用该有限元软件是合理的。同时 ABAQUS 携带有功能强大的用户二次开发接口,并内置了脚本语言 Python^[13],ABAQUS 可以通过编写 Python 脚本直接操纵 ABAQUS 内核,实现 ABAQUS 自动前处理过程。基于此优势发展具备安全系数自动搜索功能的边坡稳定性分析模型,计算海底二维边坡的安全系数,并输出边坡失稳破坏模式,为辅助决策系统提供相关技术支持。

2.2 模块组织结构

模块调用有限元软件 ABAQUS(Version 6.5)进行数值模拟,整体框架由 Fortran 主程序和 Python 用户程序两部分组成,体系架构如图 1 所示。

2.3 Fortran 主程序

本模块采用两分法自动搜索安全系数,搜索流程如图 2 所示,针对每一折减系数,主控制程序调用其他 3 个子模块进行计算,以判断是否在规定的迭代次数内满足收敛条件和精度要求。

2.4 Python 用户程序

开发的 Python 用户程序为 Slope.py,实际是 ABAQUS/CAE 建模流程的程序化实现,用户只需要修改几何外形、土体本构和网络剖分密度等少数参数,便可自动创建有限元模型。将修改好的用户程序文件放置到主程序 SSFEA3.exe 所在的文件夹里,双击 SSFEA3.exe 运行,运动期间不需要任何干预便可自动完成计算。

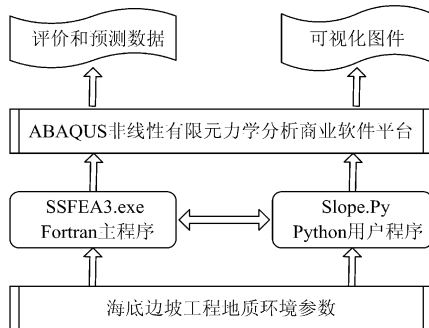


图 1 模块的体系架构

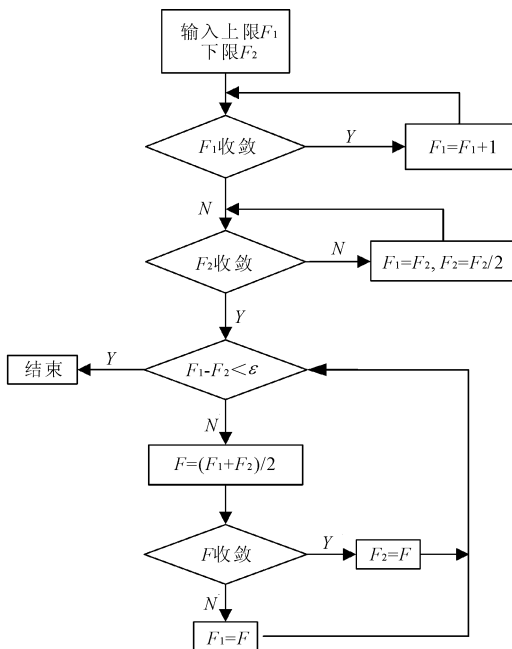


图 2 两分法自动搜索安全系数流程

3 算例验证

取有代表性的土坡^[9]为算例 1。均质土坡如图 3 所示(以 $\beta = 40^\circ$ 为例),坡高 $H = 20$ m,土的重度 $\gamma = 20$ kN/m³,弹性模量 $E = 100$ MPa,泊松比 $\nu = 0.3$,粘聚力 $c = 42$ kPa,内摩擦角 $\varphi = 17^\circ$ 。求坡角 $\beta = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ 时边坡的稳定安全系数。

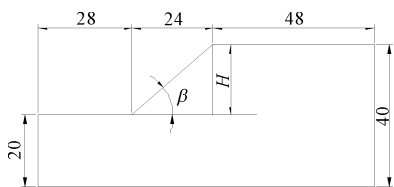


图3 算例1边坡几何外形(m)

3.1 有限元模型建立

按照平面应变建立模型,边坡体左右边界为水平约束,底面为水平及垂直约束,其他为自由约束。土的本构模型均选用基于 Mohr - Coulomb 屈服准则和非关联流动法则(剪胀角 $\psi = 0$)的理想弹性塑性模型。采用二阶缩减积分单元剖分网格,整个计算区域划分为四边形单元。一次性施加重力荷载,即荷载分析步设置为 1。折减系数 F 的精度要求达到 0.001,最大迭代次数为 500 次。

3.2 安全系数计算结果

表 1 为各屈服准则采用非关联流动法则(膨胀角 $\psi = 0$)时的安全系数结果^[9],表 1 中,DP1 是外接圆 DP 准则,DP2 是摩尔 - 库仑等面积圆 DP 准则,DP3 是摩尔 - 库仑匹配 DP 准则(平面应变条件下),S 是 Spencer 法。

表 1 用不同方法求得的稳定安全系数

方法	不同坡度下稳定安全系数				
	30°	35°	40°	45°	50°
FEM(DP1)	1.91	1.74	1.62	1.50	1.41
FEM(DP2)	1.64	1.49	1.38	1.27	1.19
FEM(DP3)	1.56	1.42	1.31	1.21	1.12
Spencer 法	1.55	1.41	1.30	1.20	1.12
本法(M-C)	1.56	1.42	1.29	1.20	1.13

从表 1 可以看出,采用平面应变条件下自动搜索程序计算的安全系数与传统 Spencer 法、摩尔 - 库仑匹配 DP 准则(DP3)求得的安全系数非常接近,误差在 1% 左右,而采用其他方法的计算结果误差较大,摩尔 - 库仑等面积圆 DP 准则(DP2)的计算结果比 Spencer 法计算的结果大约 6%。外接圆 DP 准则条件(DP1)下的安全系数比传统极限平衡法大约 25%,结果证明,在各种坡度下,本方法的计算结果都是符合实际的,是一种有效的计算方法。

4 海底斜坡算例及计算结果

基于工程实例,建立算例 2。均质土坡坡长 $L = 100$ m,坡角为 5°,材料参数为饱和密度 $\rho = 1521$ kg/m³,不排水强度 $c = 8.5$ kPa,弹性模量 $E = 3$

MPa,泊松比 $\nu = 0.49$,内摩擦角忽略不计,外荷载为重力荷载。边坡几何尺寸及有限元模型如图 4(a)所示。边界约束条件、本构模型、单元类型同算例 1,图 4(b)为有限元网格图。折减系数 F 的精度达到 0.001,表 2 给出了安全系数自动搜索过程,最终确定斜坡安全系数为 0.995。

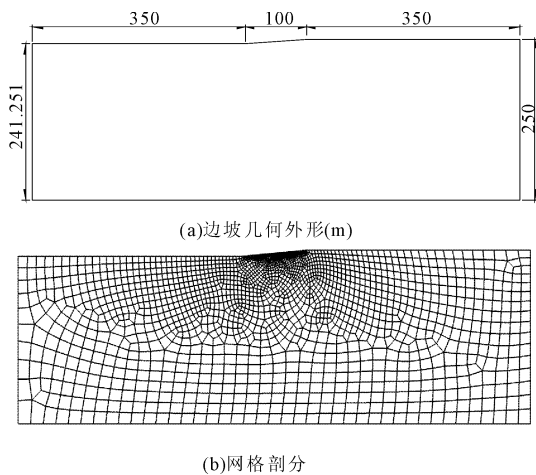


图 4 边坡几何外形尺寸及网格剖分

表 2 安全系数范围搜索过程

搜索次数	1	2	3	4
F 下限	0.700	0.700	0.875	0.963
F 上限	1.400	1.050	1.050	1.050
搜索次数	5	6	7	8
F 下限	0.963	0.984	0.995	0.995
F 上限	1.006	1.006	1.006	1.001

从图 5 可以清楚看到随着分析步的增加,荷载逐步施加,土体中塑性应变从坡顶向坡角逐步发展,当达到临界破坏状态时,塑性区已发展到基坑顶面,形成经典的圆弧状贯通区域,此滑裂面的形状与极限平衡法中的圆弧是一致的。

本文建立了大量计算模型,探讨各海底斜坡土体参数对海床稳定性的影响。上述算例中其他土体材料参数不变,分别计算斜坡坡度为 2.0°、2.5°、3.0°、3.2°、3.3°、3.4°、3.5°、4.0°、5.0°时的安全系数,计算结果见表 3。从表 3 中可以看出,随着坡角增加安全系数减小,土坡首先局部发生破坏,随着土体应力的转移,土坡逐渐破坏,直至最后达到失稳临界状态。土体坡角为 2.00°时该区段海底斜坡是稳定的,如果坡角增加 5.00°,斜坡处于临界状态。

4.1 强度参数的影响

取用算例 2,泊松比 $\nu = 0.3$,分别取摩擦角 8°,膨胀角 4°和摩擦角 2°,膨胀角 1°这两种情况进行计

算。图 6 显示了斜坡临界坡度与土体摩擦角的关系,定义安全系数约为 1 时的斜坡坡角为临界坡度。从图 6 中可以看出,摩擦角对安全系数影响较大,同样的工况条件下摩擦角越大,对应的安全系数越大。同时安全系数随着坡度增大而变小,即斜坡坡度越大,其稳定性越差,这是符合常规规律的。

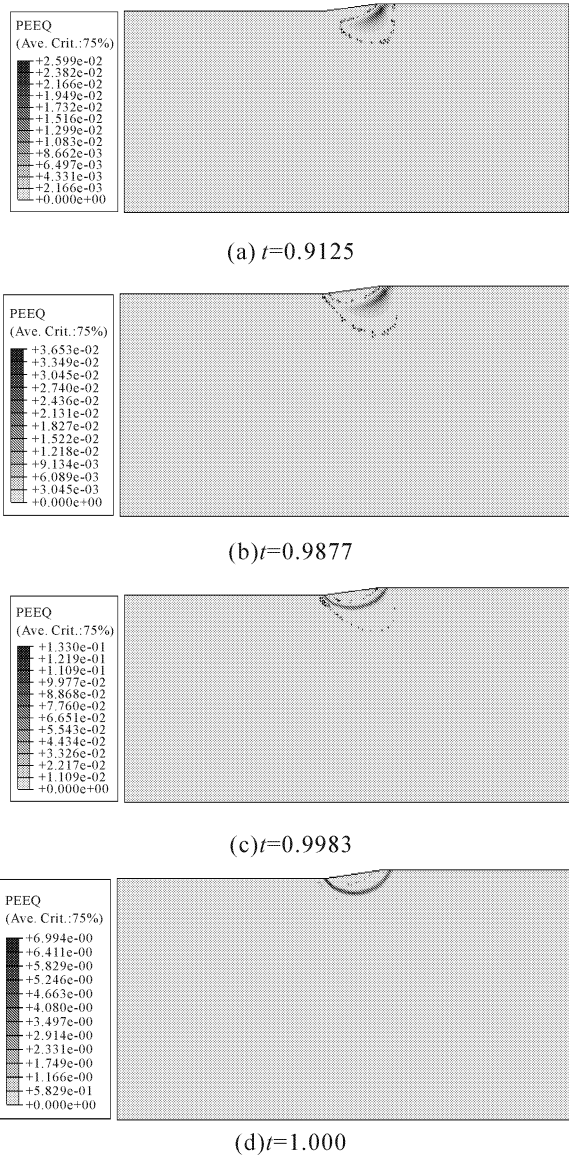


图 5 塑性应变分布随分析步的变化

表 3 土体不排水强度为 $C = 8.5 \text{ kPa}$ 时的坡角与安全系数关系

坡角 $\varphi(^{\circ})$	2.00	2.50	3.00	3.20	3.30
安全系数	2.506	2.006	1.670	1.563	1.519
坡角 $\varphi(^{\circ})$	3.40	3.50	4.00	5.00	
安全系数	1.475	1.431	1.252	0.995	

图 7 显示了在两种摩擦角取值情况下,斜坡临界坡度与土体不排水强度的关系,可以看出土体不

排水强度越大,斜坡达到临界破坏状态的临界坡度越大,不排水强度是斜坡稳定的有利因素。

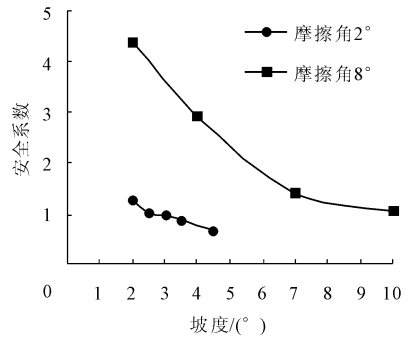


图 6 临界坡度与摩擦角的关系

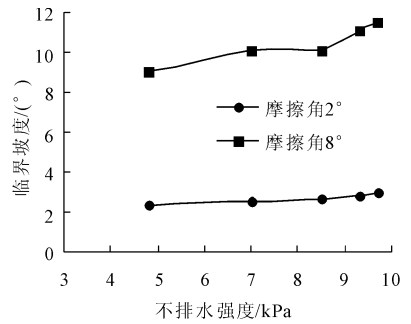


图 7 临界坡度与不排水强度的关系

图 8 显示了在两种摩擦角取值情况下,斜坡临界坡度与土体密度的关系,可以看出,土体密度大小对斜坡体稳定性影响不大。土体密度对边坡稳定性的影响是一分为二的。土体密度越大即土体容重越大,一方面沿滑面切向的下滑力增加,这会诱发滑坡,另一方面,垂直于滑面方向的正应力也随之增加,即增加了滑面上的抗滑力,有利于边坡稳定。因而不能简单的评价土体密度大小对边坡稳定性的利弊,而应根据具体的工程地质条件和边坡形状(坡度、坡高等)进行综合评判。

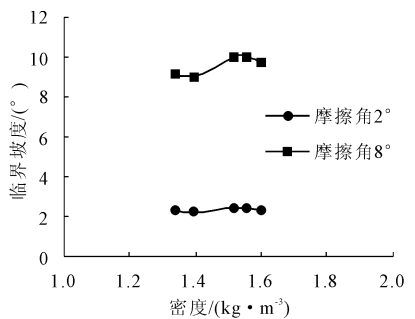


图 8 临界坡度与土体密度的关系图

4.2 海底斜坡的稳定性定量估计方法

对于海底土体,摩擦角几乎可以忽略不计,土体不排水强度以及斜坡坡角就成了海底斜坡稳定性的

决定因素,经过大量模拟计算,得到土体在不同不排水强度下坡角与安全系数的关系图 9。本文为判断海底斜坡的稳定性提供了一种定量估计方法,只要获取海底某段土体的不排水强度、斜坡坡度,便可以根据图 9 初步估计该段海底坡段的稳定性情况。

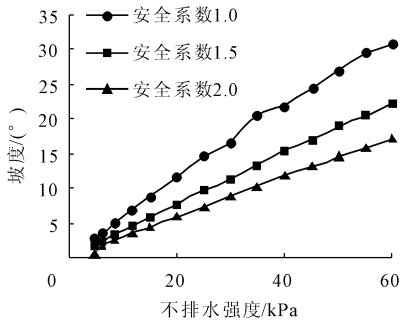


图 9 不排水强度和临界坡度组合

通过图 9 的分析,可以得出如下规律:

(1) 当不排水强度固定时,坡角越小,边坡稳定安全系数越大,符合边坡稳定的常规规律;如不排水强度为 25 kPa 时,安全系数取 1.0 时,坡角为 14.7°,要使安全系数达到 2.0 以上,坡角需为 7.3°以下。

(2) 对应固定的安全系数,土体不排水强度越大,所对应的临界坡角就越大。如取安全系数为 1.0,不排水强度为 15 kPa 时,斜坡坡角大于 8.8°才能稳定;当不排水强度为 35 kPa 时,临界坡角达到 20.5°。

(3) 对应固定的安全系数,土体不排水强度与稳定坡角基本呈线性对应关系。同时安全系数越大,稳定坡角与不排水强度的比值(斜率)越小。如不排水强度从 25 kPa 增大到 45 kPa:安全系数为 1 时,关系曲线斜率约为 0.49,安全系数为 1.5 时,关系曲线斜率约为 0.36;安全系数为 2 时,关系曲线斜率约为 0.285。

5 结 论

通过以上分析,可以得出如下的结论:

(1) 运用基于 ABAQUS 的二次开发模块分析海底斜坡稳定性,实现了强度折减法的自动搜索安全系数功能,极大地免去了手工操作的麻烦。

(2) 坡体的 c, φ 值对边坡稳定性影响显著,不论对陆地边坡还是海底斜坡都是敏感性因素。土体强度越大、摩擦角越大,边坡越稳定。对海底斜坡稳定性研究中,往往视摩擦角为零,土体不排水强度起

着决定性作用,影响最大。土体密度对海底斜坡的稳定性影响不大。

(3) 对于同一安全系数,土体不排水强度与对应坡角基本呈线性对应关系。同时安全系数越大,临界状态对应坡角与不排水强度的比值(斜率)越小。

(4) 可以根据图 9 初步估计该段海底坡段的稳定性情况,其结果与工程实践是相符合的。

参考文献:

- [1] 周延东,刘日柱.我国海底管道的发展状况与前景[J].中国海上油气(工程),1998,10(4):1-5.
- [2] 吴时国,陈珊珊,王志君,等.大陆边缘深水海底滑坡及其不稳定性风险评估[J].现代地质,2008,22(3):430-437.
- [3] YIN P, BERNE B, VA GNER P, et al. Mud volcanoes at the shelf margin of the East China Sea[J]. Marine Geology, 2003,194(3-4):135-149.
- [4] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等.边坡与滑坡工程治理[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [5] 秦帆,王正中.基于有限元强度折减理论的边坡稳定分析方法探讨与改进[J].水利与建筑工程学报,2012,10(1):43-47.
- [6] 万少石,年廷凯,蒋景彩,等.边坡稳定强度折减有限元分析中的若干问题讨论[J].岩土力学,2010,31(7):2283-2288.
- [7] 郑颖人,赵尚毅,王恭先,等.边(滑)坡工程设计中安全系数的讨论[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1937-1940.
- [8] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Geotechnique, 1975,25(4):671-689.
- [9] 赵尚毅,郑颖人,张玉芳.极限分析有限元法讲座 - II 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J].岩土力学,2005,26(2):332-336.
- [10] Matsui T, San K-C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. Soils and Foundations, 1992,32(1):59-70.
- [11] 郑宏,李春光,李焯芬,等.求解安全系数的有限元法[J].岩土工程学报,2002,24(5):626-628.
- [12] 迟世春,关立军.基于强度折减的拉格朗日差分方法分析土坡稳定[J].岩土工程学报,2004,26(1):42-46.
- [13] 钟同圣,卫丰,王鸢,等.Python 语言和 ABAQUS 前处理二次开发[J].郑州大学学报,2006,38(1):60-64.