



基于响应面法的重力式船坞边坡 稳定性可靠度分析*

孙东辉¹, 赵庆喜^{2,3}, 殷骏^{2,3}, 朱艳^{2,3}

(1. 舟山中远海运重工有限公司, 浙江 舟山 316000; 2. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200090;
3. 上海市海洋工程和船厂水工特种工程技术研究中心, 上海 200090)

摘要: 土体参数变异性较大时, 船坞边坡的整体稳定性常具有较大的不确定性。为了准确地分析船坞边坡的整体稳定性, 降低稳定性分析中的不确定性, 考虑土体黏聚力和内摩擦角的变异性对船坞边坡进行可靠度分析。通过边坡稳定数值模拟软件 Slide 基于刚体极限平衡分析得出确定性安全系数, 再基于实测船坞边坡土体参数分布采用响应面法和一次二阶矩法对船坞边坡可靠度进行计算。结果表明, 基于土体参数标准值的确定性分析得出的安全系数对船坞边坡稳定性的评估较为片面, 并不能真实反映边坡的稳定性, 基于可靠度分析的边坡稳定性更接近实际情况。实际工程设计、施工中, 应当综合考虑边坡安全系数和可靠度。

关键词: 响应面法; 重力式船坞; 可靠度; 稳定性

中图分类号: U656.3; U656.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0184-07

Stability and reliability analysis of gravity-type dry dock slope based on response surface method

SUN Donghui¹, ZHAO Qingxi^{2,3}, YIN Jun^{2,3}, ZHU Yan^{2,3}

(1. Cosco Shipping Heavy Industry (Zhoushan) Co., Ltd., Zhoushan 316000, China;

2. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200090, China;

3. Shanghai Research Center of Ocean & Shipbuilding Engineering, Shanghai 200090, China)

Abstract: The large variability of soil parameter causes that the overall stability of dock slope often has large uncertainty. The reliability analysis of a dock slope is carried out considering the variability of the soil cohesive force and internal friction angle in order to analyze the overall stability of the dock slope more accurately and reduce the uncertainty in the stability analysis. The slope stability numerical simulation software Slide is used to obtain the deterministic safety factor on the basis of the rigid body limit equilibrium analysis. Then according to the measured soil parameter distribution of the dock slope, the response surface method and the first-order second moment method are used to calculate the reliability of the dock slope. The results show that the safety factor based on the deterministic analysis of the standard value of soil parameters is one-sided to the reliability evaluation of the dock slope, and the stability of slope based on the reliability analysis is closer to the actual situation. In the actual engineering design and construction, the safety factor and reliability of the slope should be considered comprehensively.

Keywords: response surface method; gravity-type dry dock; reliability; stability

收稿日期: 2024-05-27

*基金项目: 上海市优秀学术/技术带头人项目 (23XD1434800)

作者简介: 孙东辉 (1979—), 男, 高级工程师, 从事工程技术及管理。

重力式船坞是为修造船而提供干作业场所的池状建筑物,一般建在海岸较为坚硬的地基上,利用坞体自身重力抵御渗透上浮力,要求其具有很好的稳定性和密实性。重力式船坞因其使用功能要求及场地条件,采用放坡开挖的方案通常会成为设计者的首选。由于船坞开挖面积大、基坑深度大、使用周期长,因此在使用过程中必须保证边坡的整体稳定、抗渗流稳定、抗滑移稳定等安全要求,其边坡防护及防渗体系设计就成为重力式船坞结构稳定性的重要一环。

边坡稳定性分析方面的研究大致可分为2类,即由极限平衡法和数值计算方法所组成的确定性分析方法,以及考虑参数随机性、变异性的可靠性分析方法。目前船坞边坡稳定性分析的方法主要为第1类基于极限平衡的确定性分析方法,如张志勇等^[1]采用简化 Bishop 法对干坞边坡各阶段的稳定性进行计算分析,探讨稳定系数 F_s 在船坞施工及各使用阶段的变化规律,并分析坡顶水平位移在使用阶段和施工阶段的差异;张伟等^[2]通过对南昌临江环境的边坡支护及坞内抽水进行模拟分析,探讨富水砂层船坞边坡支护及防渗体系的防护效果;顾宽海等^[3]探讨船坞结构所处周边环境条件和地质条件恶劣情况下进行设计风险管理的必要性;张诚厚^[4]基于广东文冲船厂一、二号船坞所积累的工程经验,对井点降水及卸荷作用下边坡变形及强度变化的规律进行总结,探讨有效应力法的必要性;江安南等^[5]通过基于有限元的边坡稳定可靠度改进一次二阶矩法探究岩质边坡岩体参数变化时的稳定性;王艳宁等^[6]采用简单条分法和简化毕肖普法对干坞边坡稳定性在开挖、充水和排水工况下的稳定性进行分析;关秦川等^[7]建立预测模型分析影响干坞边坡变形的因素包括土地强度、放坡坡率等;唐雨耕^[8]通过对黏土层基坑工程隆起的可靠度评估,发现工程破坏风险和安全系数的关系并不完全一致,而需要同时考虑土层的不确定性。

现有关于船坞边坡稳定性的研究往往基于使用确定土体参数的极限平衡分析和工程经验,较

少考虑土体参数的随机性和变异性,而大量的工程经验表明船坞边坡失稳的风险和安全系数的关系并不完全一致,相比于确定性分析,可靠性分析方法考虑了参数不确定性对边坡稳定性的影响,更接近实际工程结果。基于此,本文提出一种基于 Slide 极限平衡分析的船坞边坡稳定性可靠度分析方法,定义船坞边坡极限状态函数,考虑黏聚力和内摩擦角作为随机变量并且服从独立对数正态分布,基于一次二阶矩法和响应面法编写求解边坡失稳概率和可靠度指标的计算程序。通过算例验证所提方法的适用性,并基于船坞边坡现场数据进行可靠性分析。研究成果旨在为项目设计、施工提供风险判别依据。

1 可靠度指标及一次二阶矩法

1.1 可靠度指标

可靠度指标 β 是衡量结构可靠程度的一个参数。当极限状态函数 $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为正态分布时,可靠度指标可表示为:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (1)$$

式中: μ_g 为均值, σ_g 为标准差。

结构的失效概率 p_f 与可靠度指标 β 满足正态分布关系,即:

$$p_f = \phi(-\beta) \quad (2)$$

当基本变量不是正态分布时,可以将其转换成等效的正态分布后,用式(1)求取可靠度指标。

1.2 一次二阶矩法

一次二阶矩法是将非线性功能函数的线性化点选为均值点 X^* ,并据此计算可靠指标,在可靠性分析和设计中得到了广泛应用。对任意1组极限状态函数 $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$,相应的设计验算点为 $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$,将极限状态函数在点处取泰勒级数展开,则有:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n \left[(x_i - x_i^*) \cdot \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right) \right] + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) (x_j - x_j^*) \left(\frac{\partial^2 g}{\partial x_i \partial x_j} \right) + \dots \quad (3)$$

其中点 $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 使得 $g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0$ 。
令：

$$x'_i = \frac{x_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)并取一次项，再分别取极限状态函数 $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 均值和方差：

$$\mu_g = -\sum_{i=1}^n x'_i \left(\frac{\partial g}{\partial x'_i} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_g^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x'_i} \right)^2 \quad (6)$$

若随机变量不服从正态分布时，应首先按照 JC 法的当量正态化公式将非正态变量当量正态化，获取验算点处的概率分布函数和概率密度函数，公式为：

$$F_{x'_i}(x_i^*) = \Phi\left(\frac{x_i^* - \mu_{x'_i}}{\sigma_{x'_i}}\right) = F_{x_i}(x_i^*) \quad (7)$$

$$f_{x'_i}(x_i^*) = \frac{1}{\sigma_{x'_i}} \phi\left(\frac{x_i^* - \mu_{x'_i}}{\sigma_{x'_i}}\right) = f_{x_i}(x_i^*) \quad (8)$$

联立可得到当量正态分布的均值和标准差，从而可以由式(1)得到可靠度指标 β 。该方法计算可靠

度指标时，由于点 $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 需要迭代计算才能获得，因此计算量比较大。Low et al.^[9] 提出计算可靠度指标的矩阵计算公式：

$$\beta = \min \sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{m})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{m})} \quad (9)$$

式中： \mathbf{x} 为随机变量组成的行向量， \mathbf{m} 为随机变量均值组成的行向量， \mathbf{C} 为随机变量协方差矩阵。该可靠度指标值可以通过 Excel 中的方程求解器获得。

2 案例分析

2.1 工程概况

舟山某船坞位于丘陵滨海岛屿区，微地貌位于低矮山丘的坡脚前缘及山间洪冲地带，使得拟建场地的地层起伏较大。根据地质勘察结果，该船坞边坡主要为沉积淤泥质土、粉质黏土及含砂砾黏性土等，下覆基岩主要为中风化凝灰岩及微风化角砾凝灰岩，地质土层参数见表 1，其中土体强度参数以标准值计。船坞的坞室区域基坑开挖边坡一般为 1:3，在高程 -8、-4、0 m 处设 4 m 宽平台，在底部含砂砾粉质黏土层可调整为 1:2。船坞边坡典型断面见图 1。

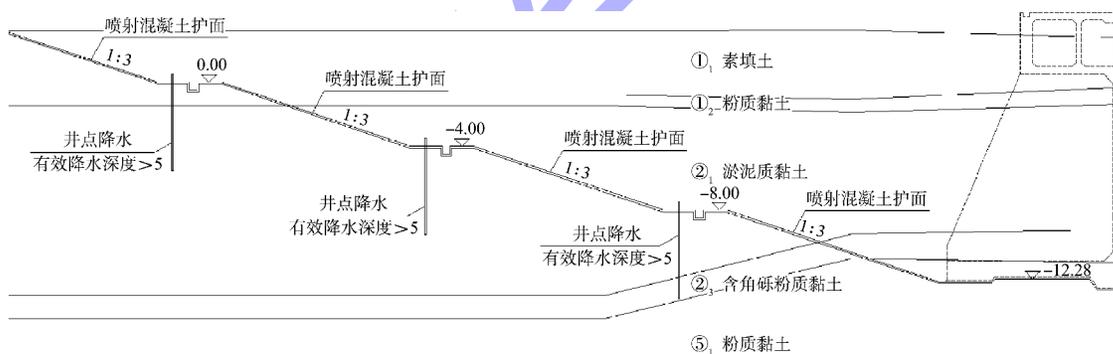


图 1 船坞边坡典型断面 (单位: m)

Fig. 1 Typical cross-section of dry dock slope (unit: m)

表 1 土层参数

Tab. 1 Soil layer parameters

土层编号	层厚/m	重力密度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
① ₁	0.8~5.7	18.0	5.0	28.0
① ₂	0.5~3.0	19.9	26.2	17.4
② ₁	1.0~31.7	17.0	11.3	10.1
② ₃	0.8~5.5	18.0	19.7	16.8
⑤ ₁	1.4~14.8	19.0	29.2	17.7
⑤ ₂	0.5~26.0	18.0	27.2	17.1

2.2 土体参数不确定性

相比土层厚度、重力密度等其他参数，土体的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 在空间分布和测试结果都具有较大的不确定性。本文将讨论这两个参数不确定性对船坞边坡稳定性的影响。船坞边坡范围内岩土体参数来自工程现场物理学指标，各层岩土体的黏聚力及内摩擦角参数分布见表 2。

表 2 各土层黏聚力和内摩擦角参数分布
Tab. 2 Distribution of cohesion and internal friction angle parameters of each soil layer

土层 编号	黏聚力 /kPa			内摩擦角/(°)		
	均值	标准差	变异系数	均值	标准差	变异系数
① ₁	5.0	-	-	28.0	-	-
① ₂	26.2	1.9	0.07	17.4	1.3	0.08
② ₁	11.3	2.4	0.20	10.1	4.4	0.40
② ₃	19.7	5.2	0.27	16.8	2.1	0.13
⑤ ₁	29.2	5.1	0.17	17.7	1.7	0.09
⑤ ₂	27.2	0.4	0.01	17.1	1.3	0.07

2.3 船坞边坡整体稳定计算模型

本文选取船坞边坡 W₁₁-W₁₁ 地质剖面, 底部全长 67.8 m, 高差 24.3 m, 通过边坡稳定性计算软件 Slide 建立 1 组整体稳定分析模型和 4 组验算点模型, 对船坞边坡进行基于极限平衡的整体稳定性计算分析, 按平面问题采用圆弧滑动面计算, 计算方法采用总应力法; 根据船坞边坡的工作性质, 计算施工期最危险工况, 即在设计高水位下放坡开挖至设计高程时的圆弧滑动安全系数。采用瑞典条分法计算边坡整体稳定性。

采用基于极限平衡分析的 Slide 进行稳定性计算, 边坡数值模型长 173.1 m、高 45.8 m, 包含 ①₁ 素填土, ①₂ 粉质黏土, ②₁ 淤泥质粉质黏土, ②₃ 含角砾粉质黏土, ⑤₁ 粉质黏土等土层。取土体参数为物理力学试验得出土体参数的标准值作为基准组, 将船坞边坡沿滑动面分成 200 份, 计算简图见图 2。根据以标准值计算的标准组船坞边坡极限平衡分析的稳定性计算结果, 得到直接用工程数据不考虑可靠度的整体稳定性安全系数 F_s 为 1.209。

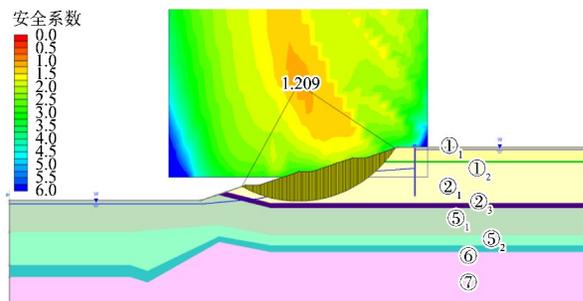


图 2 基于确定性分析的船坞边坡安全系数
Fig. 2 Safety factor of dry dock slope based on deterministic analysis

同时为方便后续进行基于瑞典条分法极限平衡状态方程函数的可靠度分析, 设置对照组, 对照组将船坞边坡土体沿滑动面分为 10 份, 计算简图见图 3, 根据极限平衡分析稳定性计算结果, 此时 F_s 为 1.229, 误差为 1.6%, 即在本工况中, 船坞边坡基于极限平衡分析的整体稳定性对条分法的密度不敏感。后续进行可靠度分析时, 极限状态方程函数取将船坞边坡按 10 份条分时各土条安全系数的累加。

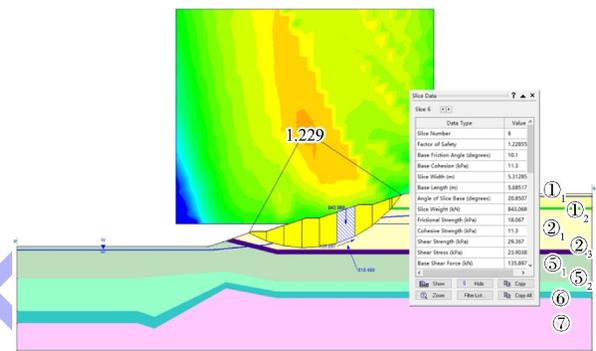


图 3 极限状态函数条分图
Fig. 3 Slice-method graph for limit state function

3 船坞边坡可靠度分析

3.1 基于响应面法的船坞边坡可靠度分析方法

根据基于极限平衡分析的标准组船坞边坡稳定性计算分析结果, 滑动面范围主要为 ②₁ 淤泥质粉质黏土层, 且该土层土体参数的变异性较大, 而滑动面经过的 ①₂ 粉质黏土层土体厚度对边坡稳定性影响较小, ①₁ 素填土的土体参数变异性较小, 因此可靠度分析时重点关注 ②₁ 淤泥质粉质黏土层土体参数变异性对边坡稳定可靠度的影响。

首先通过确定性的分析方法研究随机变量的改变对边坡稳定性的影响。选取边坡岩体内摩擦角 φ 、内聚力 c 为标准值的工况作为基准工况, 通过改变摩擦角 φ 、内聚力 c 的参数生成新的工况作为验算点。对于复杂的岩土工程问题, 常常难以获得功能函数的显示表达式, 为此一些研究学者提出响应面法确定相应的功能函数。响应面法通过一定的方法选取一系列取样点, 采用确定性的分析获得功能函数的响应, 进而拟合一个响应面逼近真正的状态曲面。

采用有限元分析方法建立与边坡黏聚力 c 、岩体内摩擦角 φ 相关的二次响应面函数 $g(\varphi, c)$ ：

$$g(c, \varphi) = \sum_{i=1}^r a_{2,i} x_i^2 + \sum_{i=1}^r b_{1,i} x_i^2 + d_0 \quad (10)$$

式中, x_i 为随机变量, $a_{2,i}$ 、 $b_{1,i}$ 和 d_0 分别为反映变量的线性、非线性敏感度和基准值。 c 、 φ 响应面公式为：

$$F_s(c, \varphi) = \sum_{i=1}^r a_{2,i} x_i^2 + \sum_{i=1}^r b_{1,i} x_i^2 + d_0 \quad (11)$$

按照式(7)和(8)将随机变量土体参数进行当量正态化, 得到其当量参数 λ 与 ξ ：

$$\lambda = \ln \mu - \frac{1}{2} \xi^2 \quad (12)$$

$$\xi^2 = \ln \left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2} \right) \quad (13)$$

将各参数按照 μ 、 $\mu \pm \sigma$ 取值并进行正交组合(μ 和 σ 分别为边坡黏聚力 c 、岩体内摩擦角 φ 的均值与标准差)。利用 Slide 计算边坡稳定性系数, 依据构造的响应面函数, 求解各随机变量对应的响应面系数, 得到功能函数的显示表达式：

$$g(x) = f(X) = F_s(c, \varphi) - 1 \quad (14)$$

当 $g(x) < 0$ 时, 边坡处于失稳状态。

利用 Excel 编写程序对基于响应面法构造出的极限状态函数进行规划求解。

按照上述方法求得船坞边坡的稳定性分析结果见图 4a), 船坞边坡失稳概率为 12.3%。将刚体极限平衡分析的临界状态作为极限状态函数, 对可靠度分析结果进行校验, 此时极限状态函数为：

$$g(c, \varphi) = \sum_{i=1}^n [(q_i b_i + W_i) \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i] - \sum_{i=1}^n [(q_i b_i + W_i) \sin \alpha_i] = 0 \quad (15)$$

式中: q_i 为地表荷载, b_i 为土条宽度, α_i 为圆弧切线水平角, W_i 为土条重力, φ_i 为内摩擦角, c_i 为黏聚力, l_i 为土条圆弧长度。荷载考虑边坡自身重力, 采用非线性有限元计算滑动面上单元切向力、法向力, 将条分方程作为边坡滑动面的显示极限状态函数, 结果见图 4b), 船坞边坡失稳概率为 13.8%。

c/kPa		$\varphi/(\text{°})$		R相关性矩阵		
μ_x	11.3		10.1	1		0
σ_x	2.4		4.4		0	1
n	-0.909 7		0.687 924			
x	9.090 135		12.334 71			
正态化随机变量				功能函数 $g(x)$	可靠度指标 β	失稳概率 P_f
ξ	0.210 051		0.416 861	3.34×10^{-7}	1.157 563 78	0.123 521
λ	2.402 742		2.225 649			

系数矩阵	
B	
	0.051 496
	0.046 586
	0.064 904
	-0.000 06
	-0.000 14

注: n 为求解 β 的中间参数。

a) 基于响应面法的可靠度分析

c/kPa		$\varphi/(\text{°})$		R相关性矩阵		
μ_x	11.3		10.1	1		0
σ_x	2.4		4.4		0	1
n	-0.85		-0.682 3			
x	9.246 079		6.967 273			
正态化随机变量				功能函数 $g(x)$	可靠度指标 β	失稳概率 P_f
ξ	0.210 051		0.416 861	4.25×10^{-8}	1.089 967 43	0.137 864
λ	2.402 742		2.225 649			

b) 基于一次二阶矩法的可靠度分析

图 4 基于响应面法和一次二阶矩法的可靠度分析结果
Fig. 4 Reliability analysis results based on response surface method and first-order second moment method

结果表明, 基于一次二阶矩法以及基于响应面法对船坞边坡进行可靠度分析结果都表明船坞边坡具有较大的失稳概率, 而基于极限平衡分析的确定性船坞边坡安全系数为 1.209, 高于 GB 50330—2013《建筑边坡工程技术规范》^[10] 对于临时边坡, 边坡高差小于 30 m 时破坏后果为严重的二级边坡抗滑稳定安全系数控制值 1.2, 边坡处于稳定状态。

3.2 土体参数不确定性研究

实际工程设计和施工中, 基于刚体极限平衡的确定性分析较可靠度分析更为广泛, 为充分考虑确定性分析的实用性和可靠度分析的真实性, 本文在工程实测资料的取值范围内进行不同土体参数变异性的可靠度分析, 根据分析结果讨论不影响稳定性结论的土体参数可控变化阈值, 对实际工程设计施工提出指导建议。

根据工程实测资料中土体黏聚力和内摩擦角的分布空间, 基于 Python 编写程序将土体参数的标准差进行离散, 离散步长依赖于各土体参数的实际标准差, 并计算不同土体参数分布空间下的可靠度指标见图 5, 其中平面为临界可靠度指标, 本工程根据 GB 50068—2018《建筑结构可靠度设计

统一标准》^[11]见表 3, 参照安全等级为二级的延性破坏, 临界可靠性指标为 3.2。

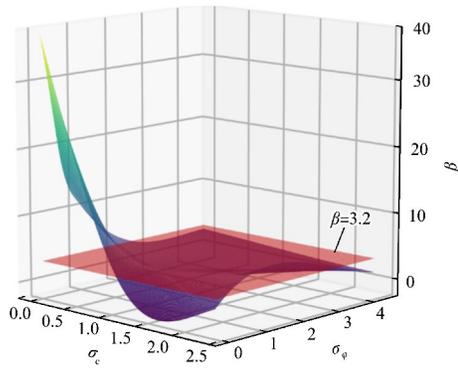


图 5 不同土体参数空间的可靠度指标

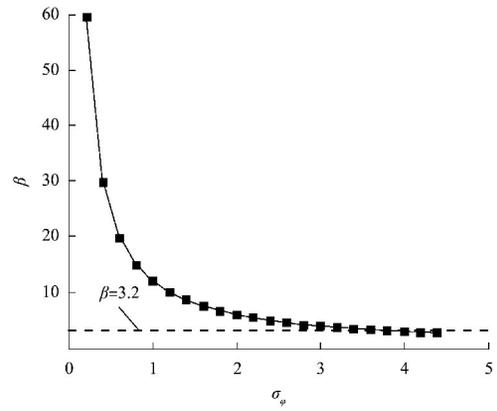
Fig. 5 Reliability indicators in different soil parameter spaces

表 3 结构构件承载能力极限状态的可靠性指标
Tab. 3 Reliability index for ultimate limit state of structural member bearing capacity

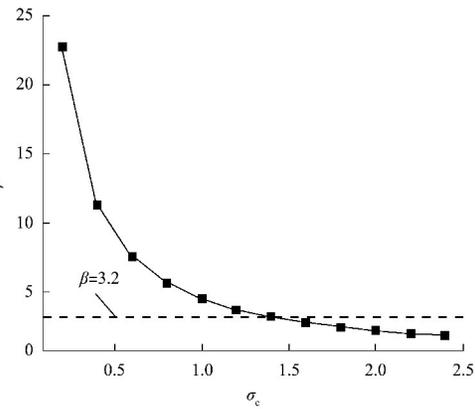
破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	3.7	3.2	2.7
脆性破坏	4.2	3.7	3.2

注: 安全等级一级为破坏后果很严重的重要建筑结构物, 二级为破坏后果严重的一般建筑结构物, 三级为破坏后果不严重的次要建筑结构物。

计算结果表明, 当黏聚力和内摩擦角变异性较小时, 土体参数的变异性不会影响稳定性计算结果, 随着黏聚力或内摩擦角变异性的增加, 按照确定性分析得出的稳定性结论将不再可靠。为探究不影响稳定性结论的黏聚力和内摩擦角的可控变化阈值, 将可靠度指标曲面及临界可靠度指标平面映射到黏聚力和内摩擦角变异性为 0 的平面上, 见图 6。结果表明对于本工程, 土体黏聚力标准差的可控变化阈值为 1.4, 当黏聚力变异性大于该阈值时, 任意内摩擦角的变异性都将改变稳定性结论, 此时仅基于极限平衡分析进行确定性安全系数计算将不再适用; 同理, 土体内摩擦角标准差的可控变化阈值为 3.6, 当内摩擦角变异性大于该阈值时, 任意黏聚力的变异性都将改变稳定性结论, 即单纯的确定性分析此时都将不再适用。



a) 不同内摩擦角参数空间



b) 不同黏聚力参数空间

图 6 不同内摩擦角和黏聚力参数空间的可靠度指标

Fig. 6 Reliability index for different parameter spaces of internal friction angle and cohesion

4 结论

1) 基于极限平衡分析的船坞边坡安全系数为 $1.209 > 1.2$ (二级边坡), 船坞边坡处于稳定状态。而可靠度分析中可靠度指标为 1.15, 低于规范要求, 船坞边坡具有较大的失稳概率 12.3%, 整体稳定具有较大的不确定性。传统的安全系数法在本工程中将不再适用, 可靠度分析可以更准确地表示船坞边坡的整体稳定性, 降低稳定性分析中的不确定性。

2) 本工程中依据实际测量土体参数分布空间所计算出的可靠度指标大部分均位于临界可靠度指标平面之下, 基于极限平衡的确定性分析方法在本工程中不适用; 土体黏聚力标准差的可控变化阈值为 1.4, 土体内摩擦角标准差的可控变化阈值为 3.6, 当土体参数变异性大于该阈值时, 任意另一土体参数的变异性都将改变稳定性结论, 此

时仅基于极限平衡分析进行确定性安全系数计算都将不再适用。

参考文献:

[1] 张志勇, 傅德明, 杨国祥. 干坞边坡稳定性计算及边坡变形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003 (9): 1505-1509.
ZHANG Z Y, FU D M, YANG G X. Research on stability and deformation of dry-dock slope[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2003 (9): 1505-1509.

[2] 张伟, 李海霞, 赵忠仁. 富水砂层干坞边坡支护及防渗体系设计[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37 (11): 1449-1454.
ZHANG W, LI H X, ZHAO Z R. Design of support and anti-seepage system of dry dock slope in water-rich sandy stratum [J]. Tunnel construction, 2017, 37 (11): 1449-1454.

[3] 顾宽海, 朱忠余. 风险管理技术在某船坞工程设计中的应用[J]. 港工技术, 2014, 51(2): 37-39.
GU K H, ZHU Z Y. Application of risk management technique to dock engineering design[J]. Port engineering technology, 2014, 51(2): 37-39.

[4] 张诚厚. 广东文冲船厂一、二号船坞基坑边坡稳定研究[J]. 水利水运科技情报, 1977(2): 26-46.
ZHANG C H. Research on the slope stability of the No. 1 and No. 2 dock foundation pits of Guangdong Wenchong Shipyard [J]. Water conservancy and water transport science and technology information, 1977(2): 26-46.

[5] 汪安南, 林潮宁, 李同春, 等. 基于有限元的边坡稳定可靠度改进一次二阶矩法研究[J]. 水力发电, 2023, 49(3): 23-28.
WANG A N, LIN C N, LI T C, et al. An AFOSM-FEM-

based approach for evaluating the reliability of slope stability[J]. Hydropower, 2023, 49(3): 23-28.

[6] 王艳宁, 刘克瑾, 闫澍旺, 等. 海河隧道干坞边坡的稳定性[J]. 交通科学与工程, 2009, 25(4): 51-56, 85.
WANG Y N, LIU K J, YAN S W, et al. Dry dock slope stability of constructing a tunnel crossing Haihe River[J]. Transportation science and engineering, 2009, 25 (4): 51-56, 85.

[7] 关秦川, 张志勇, 冯浩. 大型干坞边坡变形及其神经网络预测模型[J]. 西南交通大学学报, 2004 (2): 157-161.
GUAN Q C, ZHANG Z Y, FENG H. Artificial neural network forecast model for slope deformation of large-scale dry-dock [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004 (2): 157-161.

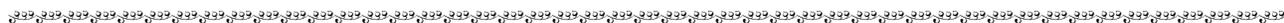
[8] 唐雨耕. 黏土层基坑工程隆起分析之可靠度评估[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 586-589.
TANG Y G. Reliability assessment of basal-heave for excavations in clay [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2010, 32(S2): 586-589.

[9] LOW B K, TANG W H. Efficient reliability evaluation using spreadsheet [J]. Journal of engineering mechanics, 1997, 123(7): 749-752.

[10] 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Technical code for building slope engineering: GB 50330-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

[11] 建筑结构可靠度设计统一标准: GB 50068—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Unified standard for reliability design of building structures: GB 50068-2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.

(本文编辑 王璁)



(上接第 163 页)

[8] 樊金甲, 孟成成, 潘国华. BIM 技术在船闸工程投资管理中的应用[J]. 水运工程, 2021(3): 168-173.
FAN J J, MENG C C, PAN G H. Application of BIM in investment management of lock engineering [J]. Port & waterway engineering, 2021(3): 168-173.

[9] 李超军, 叶雅思, 刘志敏. BIM 技术在船闸金属结构设计中的应用优势[J]. 水运工程, 2024(4): 145-149, 161.
LI C J, YE Y S, LIU Z M. Application advantages of BIM

technology in metal structure design of ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2024 (4): 145-149, 161.

[10] 丘仕能, 黄鹏嘉. 基于 BIM 的大藤峡水利枢纽工程施工进度管理[J]. 人民珠江, 2023, 44(S1): 42-46, 57.
QIU S N, HUANG P J. Construction progress management of Datengxia water control project based on BIM [J]. Pearl River, 2023, 44 (S1): 42-46, 57.

(本文编辑 王璁)