

基于贝叶斯方法的船坞双排钢板桩围堰 整体稳定性可靠度分析

朱 艳¹, 顾倩燕¹, 江 杰^{1,2}, 彭 铭^{3,4}, 肖炳辉¹

(1. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004;
3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 4. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 双排钢板桩围堰的整体稳定性具有较大的不确定性, 同样安全系数情况下对应的失稳概率可能不同。为了更准确地分析双排钢板桩围堰的整体稳定性, 降低稳定性分析中的不确定性, 采用贝叶斯方法对船坞双排钢板桩围堰的整体稳定性进行可靠度分析。首先通过统计数据获取土体参数的先验分布, 然后基于实测数据采用贝叶斯方法更新参数以得到后验分布, 最后根据参数的后验分布采用一次二阶矩计算围堰结构的可靠度。贝叶斯方法从理论的角度解决了已有工程经验和实际案例数据两方面信息有效综合的问题, 能在更接近实际情况的前提下进行可靠度分析。

关 键 词: 贝叶斯方法; 双排钢板桩围堰; 整体稳定性; 船坞; 可靠度

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 增 1-0609-07

Reliability analysis for overall stability of large-span double-row steel sheet-piled dock cofferdam based on Bayesian method

ZHU Yan¹, GU Qian-yan¹, JIANG Jie^{1,2}, PENG Ming^{3,4}, XIAO Bin-hui¹

(1. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: There are large uncertainties in the overall stability of supporting structure of large-span double-row sheet-piled cofferdam. The projects with the same values of factor of safety may have different failure probabilities. It is found in practice that some projects with large factor of safety failed and vice versa. In order to improve the evaluation and reduce the uncertainties of stability analysis, Bayesian method is applied for reliability analysis. First, the prior probabilities of soil parameters are obtained based on statistic data. Then, the posterior probabilities are achieved by updating the prior with measured data based on Bayesian method. Finally, the method of “first order second moment” is applied to conduct reliability analysis of the supporting structure stability of deep excavation. Bayesian method theoretically solves the problem of integrating the information from both experience and measurements. The reliability analysis with Bayesian method may be closer to real cases.

Keywords: Bayesian method; double steel sheet-pile cofferdam; stability; dock; reliability

1 引 言

船坞双排钢板桩围堰是近年来在建造船坞时广泛采用的一种支护结构形式, 双排钢板桩围堰虽是临时支护结构, 但却是控制临岸主体工程建设周期以及施工安全的关键, 评价双排钢板桩围堰安全

性的重要指标就是其稳定性, 因此其稳定性分析结果与工程实际情况一致有非常重要的现实意义。围堰的稳定性分析包括施工期(围堰合拢后基坑内施工加固体期间)和使用期(基坑开挖至最深处理)两个阶段, 稳定性分析内容包括整体稳定性、滑移稳定性和倾覆稳定性等。限于篇幅, 本文仅介绍整

收稿日期: 2015-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(No.41402257); 上海市浦江人才计划(No.14PJ1408200); 上海市普陀区高层次人才科研创新项目(No.2014-A-13)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41402257), the Shanghai Pujiang Program (14PJ1408200), and the High-level Personnel Innovation Program of Shanghai Putuo District (2014-A-13).

第一作者简介: 朱艳, 女, 1986.1, 硕士, 工程师, 主要从事水工、地下工程、BIM 相关设计研究工作。E-mail: zy_tmge@163.com

通讯作者: 彭铭, 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 主要从事地质灾害风险及可靠度研究。E-mail: pengming@tongji.edu.cn

体稳定性的可靠度分析方法。

现行规范及工程设计采用安全系数指标来评估双排钢板桩围堰的整体稳定性,工程实践却发现有些出于保守采用了较大安全系数的工程却发生危险,而有些考虑经济性选择较小安全系数的工程却安然无恙,造成这种现象的主要原因是工程因素的不确定性。如图 1 所示,假设两个案例的安全系数分别为正态分布 $N(1.2, 0.2)$ 和 $N(1.5, 0.6)$, 尽管案例 1 中计算的安全系数为 1.2 要小于案例 2 的 1.5,但是由于案例 1 的标准差比案例 2 小,案例 1 的失效概率 ($P_f = 0.159$) 小于案例 2 ($P_f = 0.266$),因此需要在安全系数的基础上再用不确定性的可靠度方法综合评估双排钢板桩围堰整体稳定的安全性能。

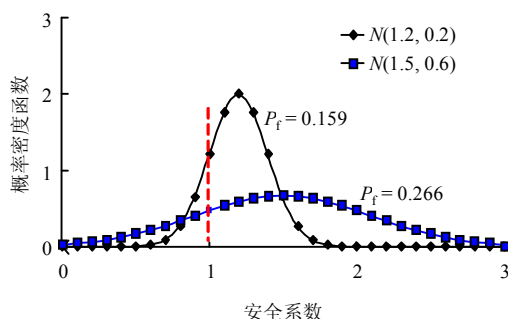


图 1 安全系数的可靠性分析

Fig.1 Reliability analysis of safety factor

船坞双排钢板桩围堰的设计方法尚不统一,关于其可靠度方面的研究尚未见到,由于船坞双排钢板桩围堰和基坑工程类似,以下搜集了诸学者在基坑工程可靠度方面的研究。刘国彬等^[1]研究了深基坑支护结构的可靠度分析,采用 Monte-Carlo 方法探讨了土性参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 变异性对支护结构破坏概率。况龙川等^[2]分析了上海软土基坑水泥土挡墙的可靠度指标,基于 6 种失效模式建立极限状态方程。熊启东等^[3]以上海地区 20 多个不同地段的地质资料为基础,采用 JC 法对汉森极限承载力公式进行了可靠度分析。彭海铭等^[4]基于 Rosenbluth 方法提出了基坑抗隆起稳定性可靠度分析方法。朱剑峰等^[5]基于响应面重构法,分析了土钉墙边坡可靠性分析方法。唐雨耕^[6]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,需要同时考虑土层的不确定性。

现有文献的可靠度方法对土体参数的不确定性往往基于经验或者统计数据。由于每个工程具有独特的地层条件,以往的经验或者其他区域的统计数据并不一定适合特定的工程,会存在一个悖论:

如果仅使用某工程的勘察数据,由于样本有限而很难评估其不确定性,如果只用经验统计数据,虽然可以进行不确定性分析,但得出的结果不一定适合该工程。

为了解决上述问题,本研究采用贝叶斯方法对船坞双排钢板桩围堰的整体稳定性进行可靠度分析,通过统计分析得到设计参数的先验分布,基于工程勘察数据更新先验数据分布,得到了更符合工程实际的后验分布以用于可靠度分析。

2 可靠度方法和贝叶斯原理

贝叶斯网络具备很强的描述能力,能够有效地将专家经验、历史数据以及各种不完整、不确定性信息综合而提高建模效率和可信度。

2.1 可靠度方法

进行可靠度分析时首先要确定极限状态方程及其基本变量,基坑工程中通常采用承载力等于荷载作为极限状态条件:

$$R - S = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1)$$

式中: R 为承载力; S 为总荷载效应; $g()$ 为极限状态方程; x_i 为随机变量,如土体的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、重度 γ 等。

通过考虑各参数的系统不确定性来获得失效概率 $P(R - S < 0)$,可靠度分析往往包含参数不确定性分析和结构不确定性分析两部分内容。

2.2 贝叶斯原理

贝叶斯原理^[7]提供了一种利用新证据更新已有估计的工具,对于以 θ 为参数(如均值、标准差等)的随机变量 x ,贝叶斯方法表示为

$$f''(\theta) = kL(\theta)f'(\theta) \quad (2)$$

式中: $f'(\theta)$ 、 $f''(\theta)$ 分别为参数 θ 的先验和后验分布; $L(\theta)$ 为参数 θ 似然函数。对于独立的试验或统计取样分析中, $L(\theta)$ 可以表示为

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i | \theta) \quad (3)$$

式(2)中 k 为常数,由下式计算得到

$$k = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} L(\theta)f(\theta)d\theta \right]^{-1} \quad (4)$$

2.3 正态分布的贝叶斯更新算法

工程应用中正态分布和对数正态分布被广泛地使用于参数的不确定性分析。由于对数正态分布的随机变量取对数函数后即转化为正态分布,本节仅讨论正态分布的贝叶斯更新算法。对于正态分布

$N(\theta, \sigma)$ 的随机变量 x , 其中 σ 已知而 θ 未知。假设根据经验或者统计数据, 可知 θ 为正态分布:

$$f'(\theta) = N(\mu_1, \sigma_1) \quad (5)$$

考虑参数 θ 先验分布时 x 的密度函数为

$$f_X(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x|\theta) f'(\theta) d\theta = N(\mu_1, \sqrt{\sigma^2 + \sigma_1^2}) \quad (6)$$

实际工程中通常需要根据实际测得的数据信息更新先验分布, 以便得到符合实际工程的后验分布值。假设测得 x 的 n 个样本数据分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。根据式 (3) 可以得到似然函数:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n N(x_i, \sigma) = N\left(\bar{x}, \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \quad (7)$$

得到先验分布和似然函数后, 将式 (5)、(7) 代入式 (2) 可得 θ 的后验密度函数:

$$f''(\theta) = kN\left(\bar{x}, \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) N(\mu_1, \sigma_1) = N(\mu_2, \sigma_2) \quad (8)$$

式中:

$$\mu_2 = \frac{\bar{x}\sigma_1^2 + \mu_1(\sigma^2/n)}{\sigma_1^2 + \sigma^2/n} \quad (9)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2\sigma^2/n}{\sigma_1^2 + \sigma^2/n}} \quad (10)$$

考虑 θ 后验分布时 x 的密度函数为

$$f_X(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x|\theta) f''(\theta) d\theta = N\left(\mu_2, \sqrt{\sigma^2 + \sigma_2^2}\right) \quad (11)$$

此时的随机变量 x 结合了先验的经验统计数据以及工程现场的实测数据。由式 (9) 可见, 当 n 较大时, x 的后验均值趋向于实测数据的平均值 $\bar{x}$, 说明如果实测数据比较丰富的时候, 通常可以用平均值代替变量真实值, 当实测数据较小时, 要充分考虑已有经验和实测数据两部分信息。得到参数更新后的分布函数后下一步就是用该参数进行可靠度分析, 本文介绍一种采用 Microsoft excel 进行一次二阶矩法可靠度分析的方法。

3 一次二阶矩法求可靠度指标

3.1 可靠度指标

可靠度指标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, 可靠度指标可以表示为

$$\beta = \mu_g / \sigma_g \quad (12)$$

式中: μ_g 为均值; σ_g 为标准差。

结构的失效概率与可靠度指标关系:

$$p_f = \phi(-\beta) \quad (13)$$

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 (12) 求取可靠度指标。

3.2 一次二阶矩法

将极限状态函数 $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 在点 $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 处取泰勒级数展开

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)(x_j - x_j^*) / \left(\frac{\partial^2 g}{\partial x_i \partial x_j} \right) + \dots \quad (14)$$

式中: 点 $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 使得 $g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0$ 。

令

$$x'_i = \frac{x_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}}, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (14) 并取一次项, 可以分别取极限状态函数 $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 均值和方程:

$$\mu_g = - \sum_{i=1}^n x'_i \left(\frac{\partial g}{\partial x'_i} \right)^* \quad (16)$$

$$\sigma_g^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x'_i} \right)^2 \quad (17)$$

从而可以由式 (12) 得到可靠度指标 β 。此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, 计算量比较大。Low 等^[8]提出计算可靠度指标的矩阵计算公式:

$$\beta = \min \sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{m})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{m})} \quad (18)$$

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 Microsoft excel 中的方程求解器获得。

4 案例分析

4.1 工程概况

上海某船坞采用大围堰包干建造方法, 围堰平面直线段长达 282 m, 双排钢板桩围堰典型断面如图 2 所示。围堰宽 15 m, 外排 AU23 型, 内排 PU32 型, 长度均为 31 m, 拉杆采用圆钢 $\phi 60@1500$ mm, 基坑开挖深度为 18 m, 设计高水位为 4.13 m, 设计低水位为 0.56 m, 地质土层参数见表 1。

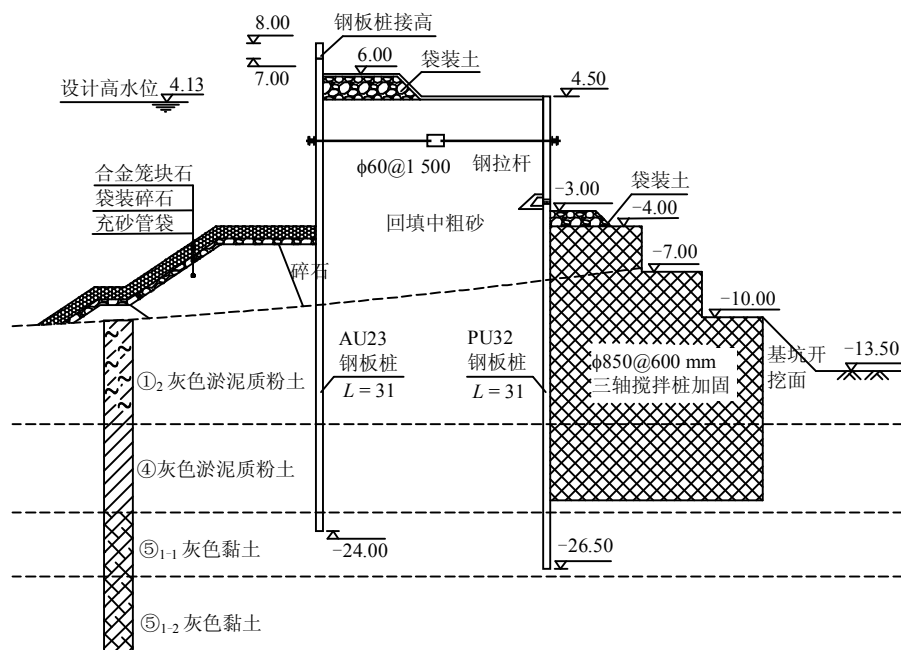


图2 船坞双排钢板桩围堰典型断面 (单位: m)

Fig.2 Typical cross-section of double steel sheet-piled dock cofferdam (unit: m)

表1 土层参数
Table 1 Parameters of soil layers

土层号	层厚 /m	重度 /(kN/m ³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	含水率 /%
① ₂	5~12	18.0	13.0	15.0	34.9
④	5.8	16.9	19.0	10.5	49.5
⑤ ₁₋₁	4.2	18.0	15.0	13.5	35.6
⑤ ₁₋₂	5.0	18.0	15.0	18.5	30.0
回填砂	13.0	18.0	0.0	28.0	
加固土	17.5	19.0	0.0	20.0	

4.2 基于贝叶斯方法的土体参数不确定性分析

相比土层厚度、重度等其他土体参数,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,本节讨论这两个参数不确定性对围堰结构可靠度的影响。首先获取这两个参数的先验分布,然后基于贝叶斯方法采用实测数据更新先验分布,以得到更接近真实条件的后验分布。岩土工程勘察规范^[9]收集了 100 多项具有代表性工程的地质勘察报告,共计土试样约 42 000 个,通过统计分析得到了各土层的均值和置信区间(正负 2 倍均方差)。同时,Phoon 等^[10]通过统计分析提出土体参数的均值的估计存在不确定性,并建议了不同土体类型中土体参数均值的变异系数。参考上述文献,整理本工程各土层的黏聚力和内摩擦角的先验分布,见表 2。考虑到 Phoon 等的分析结果,将这两个参数设为标准差为已知常数,均值为随机变量的正态分布,见表 2 中第 2、4 列。根据文献[7-8]的统计资料得到了两个参数均值的先验分布,见表 2

中第 3、5 列。得到黏聚力和内摩擦角的先验分布后,根据贝叶斯方法分别计算出不同土层黏聚力和内摩擦角的后验分布,分别见表 3、4。表 3 中,第 5 列为黏聚力 c 的后验分布,通过式(8)~(10)计算的到。通过综合考虑均值的先验分布和后验分布,按照式(6)、(11)分别算出黏聚力的更新前后的分布函数,见表 3 中第 6、7 列。同样可以计算出相应的内摩擦角分布函数,见表 4。

表2 各土层黏聚力和内摩擦角先验分布
Table 2 Prior distribution of cohesion and friction angles in each soil layer

土层号	黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
	初始估计 ^[8]	均值 c 的先验分布 ^[9]	分布 ^[8]	均值 ϕ 的先验分布 ^[9]
① ₂	$N(c, 1.4)$	$N(11.4, 3.6)$	$N(\phi, 4.0)$	$N(20.1, 2.0)$
④	$N(c, 1.1)$	$N(13.6, 4.4)$	$N(\phi, 2.1)$	$N(12.7, 1.3)$
⑤ ₁₋₁	$N(c, 2.1)$	$N(15.8, 5.0)$	$N(\phi, 3.7)$	$N(20.1, 2.0)$
⑤ ₁₋₂	$N(c, 2.1)$	$N(15.8, 5.0)$	$N(\phi, 3.4)$	$N(20.1, 2.0)$

4.3 基于贝叶斯方法的围堰整体稳定可靠度分析

本节以圆弧滑动整体稳定性为例,分别用边坡设计软件理正 6.0 分析安全系数法,用 Microsoft excel 进行双排钢板桩围堰支护结构的可靠度方法分析,并将分析结果进行比较。

按平面问题采用圆弧滑动面计算,计算方法采用总应力法。由于双排钢板桩结构的特殊性,只计算滑动面通过桩尖时的稳定性。根据围堰的工作状况,计算使用期最危险工况,即在设计高水位下坞

表 3 各土层黏聚力的贝叶斯更新估计

Table 3 Updated evaluation of cohesion in each soil layer based on Bayesian method

土层号	黏聚力的初始估计	均值 c 的先验分布	考虑 c 先验分布的黏聚力分布 ^b	黏聚力实测值 /kPa	均值 c 的后验分布 ^a	考虑 c 后验分布的黏聚力分布 ^c
① ₂	$N(c, 1.4)$	$N(11.4, 3.6)$	$N(11.4, 3.9)$	13.0	$N(12.8, 1.3)$	$N(12.8, 1.3)$
④	$N(c, 1.1)$	$N(13.6, 4.4)$	$N(13.6, 4.5)$	19.0	$N(18.7, 1.1)$	$N(18.7, 1.5)$
⑤ ₁₋₁	$N(c, 2.1)$	$N(15.8, 5.0)$	$N(15.8, 5.4)$	15.0	$N(15.1, 1.9)$	$N(15.1, 2.9)$
⑤ ₁₋₂	$N(c, 2.1)$	$N(15.8, 5.0)$	$N(15.8, 5.4)$	15.0	$N(15.1, 1.9)$	$N(15.1, 2.9)$

备注：上标 a 通过式 (8)~(10) 计算得到均值；方差，上标 b 通过式 (6) 计算得到均值；上标 c 通过式 (11) 计算得到均值和方差。

表 4 各土层内摩擦角的贝叶斯更新估计

Table 4 Updated evaluation of friction angles in each soil layer based on Bayesian method

土层号	内摩擦角的初始估计	均值 φ 的先验分布	考虑 φ 先验分布的内摩擦角分布	内摩擦角实测值 /($^{\circ}$)	均值 φ 的后验分布	考虑 φ 后验分布的内摩擦角分布
① ₂	$N(\varphi, 4.0)$	$N(20.1, 2.0)$	$N(20.1, 4.5)$	15.0	$N(19.1, 1.8)$	$N(19.1, 4.4)$
④	$N(\varphi, 2.1)$	$N(12.7, 1.3)$	$N(12.7, 2.5)$	10.5	$N(12.1, 1.1)$	$N(12.1, 2.4)$
⑤ ₁₋₁	$N(\varphi, 3.7)$	$N(20.1, 2.0)$	$N(20.1, 4.2)$	13.5	$N(18.6, 1.8)$	$N(18.8, 4.1)$
⑤ ₁₋₂	$N(\varphi, 3.7)$	$N(20.1, 2.0)$	$N(20.1, 4.2)$	18.5	$N(19.7, 1.8)$	$N(19.7, 4.1)$

口基坑开挖至设计标高时的圆弧滑动安全系数。采用瑞典条分法计算基坑整体稳定性，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：

将土体按每条 0.4 m 条分为 185 条，计算简图如图 3 所示。

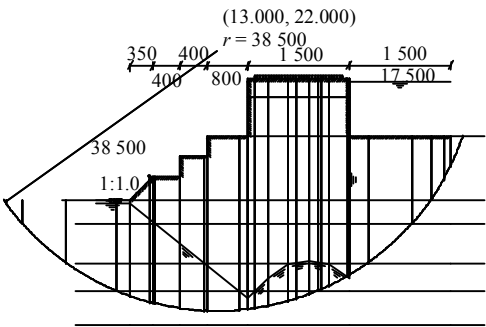


图 3 稳定性计算简图 (单位: m)
Fig.3 Stability calculation diagram(unit: m)

理正软件计算结果：滑动圆心为 (13.000, 22.000) m，滑动半径为 38.500 m，滑动安全系数为 3.083。

根据瑞典法可得极限状态方程函数：

$$g(\bar{c}, \bar{\varphi}) = \sum_{i=1}^n [(q_i b_i + W_i) \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i] - \sum_{i=1}^n [(q_i b_i + W_i) \sin \alpha_i] = 0 \quad (19)$$

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。

使用 Microsoft excel 求解一次二阶矩的可靠度包括 3 个步骤，如图 4 所示。步骤：① 建立极限状

态函数求解。本例中的极限状态函数 $g(x)$ 为按照式 (19) 的 168 个土条的累加。② 建立土体参数矩阵。本例中考虑了黏聚力和内摩擦角两个土体参数的相关矩阵，包括均值向量、标准差向量和协方差均值。这里假设两个参数独立。③ 求解可靠度指标。本例中按照式 (18) 采用方程求解器 (Solver) 求取方程的最小值，其中设定极限条件 $g(x) = 0$ ，本例中可靠度指标为 3.68，失稳概率为 1.18×10^{-4} 。

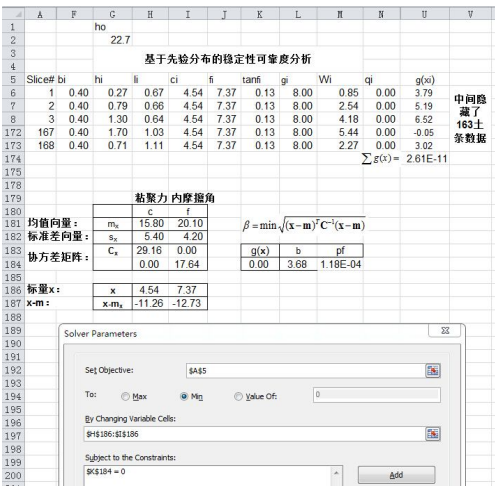


图 4 基于 Microsoft excel 的一次二阶矩可靠度分析
Fig.4 Reliability analysis with method of first order second moment based on microsoft excel

按照上述方法可以求得基坑的稳定性分析结果，见表 5。基于先验分布的安全系数等效均值为 2.99，标准差为 0.81，可靠度指标为 3.68，失稳概率为 1.18×10^{-4} 。基于先验分布的安全系数只考虑了统计数据信息，反映了类似土体的一般工程特性。

基于后验分布的安全系数等效均值为 2.78, 标准差为 0.72, 可靠度指标为 3.85, 失稳概率为 5.79×10^{-5} 。后验分布既包含了已有统计数据信息, 又包含了本工程的实测数据, 更具有参考价值。虽然后验分布的安全系数均值较小, 但由于考虑了勘查信息而降低了不确定性(标准差), 反而可靠度指标 β 更大, 失稳概率降低。

表 5 围堰结构稳定性的可靠度分析
Table 5 Reliability analysis of cofferdam stability

信息来源	安全系数		指标	
	等效均值	等效标准差	β	P_f
先验分布	2.99	0.81	3.68	1.18×10^{-4}
后验分布	2.78	0.72	3.85	5.79×10^{-5}

根据港口工程结构可靠度设计统一标准^[12], 设计使用年限内港口工程结构持久状况承载能力极限状态情况下结构的最小目标可靠度指标见表 6。表中, 安全等级定义为: 一级, 失效后果很严重, 有特殊安全要求的结构。二级, 失效后果严重, 一般港口工程结构。三级, 失效后果不严重, 临时性港口工程结构。

表 6 不同安全等级结构的最小目标可靠性指标
Table 6 Standard for reliability index in structures

结构	安全等级		
	一级	二级	三级
港口工程结构	4.0	3.5	3.0

本工程双排钢板桩围堰结构尽管是临时工程, 但失效后果严重, 参照安全等级为二级的最小目标可靠性指标为 3.5。根据前面分析, 基于先验分布的可靠度指标 $3.68 > 3.5$, 基于后验分布的可靠度指标 $3.85 > 3.5$, 因此, 可以判断考虑以往统计数据 and 勘查信息的围堰稳定性评估为能够满足安全需求。

根据安全系数法, 建筑基坑技术规程^[13]中安全等级为一级的双排桩支护结构应满足的整体稳定性圆弧滑动安全系数为 1.35。理正软件、自编程序分别采用先验分布和后验分布计算结果分别为 3.08、2.99、2.78, 远大于 1.35, 而采用可靠度方法仅为能够满足安全需求。

5 结 论

(1) 贝叶斯方法适用于双排钢板桩围堰工程的可靠度分析, 有效地综合了已有工程经验和实际案例数据两方面信息。通过统计数据获取土体参数的

先验分布, 基于实测数据采用贝叶斯方法更新参数以得到后验分布, 采用自编程序求解, 进而分析双排钢板桩围堰结构的可靠度。

(2) 结合具体工程案例, 分析并评价双排钢板桩围堰的整体稳定性, 基于贝叶斯方法的后验分布更符合工程实际。

(3) 双排钢板桩围堰的整体稳定性具有较大的不确定性, 综合应用贝叶斯方法和安全系数法, 对船坞双排钢板桩围堰的整体稳定性进行可靠度分析, 可以更准确地分析双排钢板桩围堰的整体稳定性, 降低稳定性分析中的不确定性。

参 考 文 献

- [1] 刘国彬, 沈建明, 侯学渊. 深基坑支护结构的可靠度分析[J]. 同济大学学报, 1998, 26(3): 260—264.
LIU Guo-bin, SHEN Jian-ming, HOU Xue-yuan. Reliability analysis of braced structures of deep-excavation[J]. *Journal of Tongji University*, 1998, 26(3): 260—264.
- [2] 况龙川, 高大钊. 上海软土基坑水泥土挡墙的可靠度指标研究[J]. 同济大学学报, 1998, 26(6): 640—643.
KUANG Long-chuan, GAO Da-zhao. Research of reliability indices on cement-soil retaining wall of excavation in Shanghai soft soil[J]. *Journal of Tongji University*, 1998, 26(6): 640—643.
- [3] 熊启东, 高大钊. 上海地区地基承载力的可靠度分析[J]. 岩土力学, 1997, 18(1): 73—75.
XIONG Qi-dong, GAO Da-zhao. Reliability analysis of bearing capacity of foundation in Shanghai region[J]. *Rock and soil Mechanics*, 1997, 18(1): 73—75.
- [4] 彭海铭, 常为华, 彭孝扬, 等. Rosenblueth 方法在深基坑抗隆起可靠度分析中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1132—1135.
PENG Hai-ming, CHANG Wei-hua, PENG Xiao-yang, et al. Application of Rosenblueth method to reliability analysis of deep excavation against heave stability[J]. *Rock and soil Mechanics*, 2005, 26(7): 1132—1135.
- [5] 朱剑锋, 陈昌富, 徐日庆. 基坑土钉支护可靠性分析优化算法[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2336—2341.
ZHU Jian-feng, CHEN Chang-fu, XU Ri-qin. An optimization method of reliability analysis of foundation pit reinforced with soil nailing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(7): 2336—2341.
- [6] 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(增刊 2): 586—589.
TANG Yu-geng. Reliability assessment of basal-heave for

- excavations in clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Supp.2): 586—589.
 - [7] ANG A H-S, TANG W H. Probability concepts in engineering planning and design (vol. I)[M]. New York: John Wiley, 1975.
 - [8] LOW B K, TANG W H. Efficient reliability evaluation using spreadsheet[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1997, 123(7): 749—752.
 - [9] 上海岩土工程勘察设计院有限公司. DGJ 08-37-2012 岩土工程勘察规范[S]. 上海: 同济大学出版社, 2012. Shanghai Geotechnical Investigations & Design Institute Co., Ltd. DGJ 08-37-2012 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2012.
 - [10] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1999, 36(4): 612—624.
 - [11] 中国交通建设股份有限公司. GB 50158-2010 港口工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010. China Communications Construction Company Limited. GB 50158-2010 Unified standard of reliability of structural design for harbor engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
 - [12] 中国建筑科学研究院. JGJ 120-2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. China Academy of Building Research. JGJ 120-2012 Technical specification of retaining and protecting for building foundation excavation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

交通基础设施重大工程建设三年行动启动

日前，国家发展改革委、交通运输部联合印发《交通基础设施重大工程建设三年行动计划》（简称《行动计划》）。《行动计划》指出，在2016年至2018年的三年间，将重点推进铁路、公路、水路、机场、城市轨道交通项目303项，涉及项目总投资约4.7万亿元，以完善快速交通网、基础交通网、城际城市交通网为重点，推动形成国内国际通道联通、区域城乡覆盖广泛、枢纽节点功能完善、一体衔接便捷高效的综合交通网络，更好发挥组合优势和网络效益。

狱警济社会发展需求相比，我国交通基础设施在网络密度、覆盖范围、质量水平等方面还存在较大差异。《行动计划》指出，在当前和今后一个时期，亟须加快实施一批现实需求紧迫、基础条件成熟、有利于长远发展的交通重大工程，提升网络整体能力，保持较高建设强度和投资增速。

《行动计划》强调，推进交通基础设施重大工程建设要坚持全面统筹，突出重点，有序推进，注重效率，坚持新建与扩能同步，通达与通畅并重，通道与枢纽并举，国内与对外并进，补短板、疏瓶颈、强骨干、优衔接、提质量，完善层次明晰、衔接高效、功能完备的综合交通运输体系，为“三大战略”实施和全面建成小康社会提供有力支撑。

《行动计划》明确，要加快前期工作，加强资金保障，强化规划衔接，细化落实方案，打造高品质的快速交通网络，完善广覆盖的基础交通网络，发展高效率的城际城市交通。未来三年，将在五方面加大投资力度，重点推进。铁路方面，结合中长期铁路网规划修编和铁路“十三五”发展规划编制，完善国家高速铁路网络，提升中西部铁路通达通畅水平，加快推进城市群城际铁路建设。公路方面，以“三大战略”区域通道内高速公路为重点，实施国家高速公路网剩余路段建设和繁忙路段改扩建，推进普通国道提质升级和未贯通路段建设。

水路方面，建设长江黄金水道，加强长江等内河航道整治；提升沿海港口的现代化水平，完善航运中心功能，支撑海上丝绸之路建设。机场方面，结合全国民用运输机场布局规划修编，推进干线机场改扩建工程，提升枢纽机场保障能力；加快支线机场建设，完善机场布局。城市轨道交通方面，加强规划建设管理，有序推进城市轨道交通建设，逐步优化大城市轨道交通结构。

(信息来源: 河海岩土网)