

文章编号: 1000-7598-(2005) 07-1132-04

Rosenblueth 方法在深基坑抗隆起可靠度分析中的应用

彭海铭¹, 常为华², 彭孝扬³, 胡春华⁴

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083;
3. 湖北工建三公司, 武汉 430070; 4. 湖北省环境科学研究院, 武汉 430072)

摘要: 由于岩土参数具有很大的不确定性, 在深基坑抗隆起稳定性分析中高安全系数并不一定安全。为此, 提出了深基坑抗隆起稳定性可靠度分析方法, 基于 Rosenblueth 方法开发了相应计算程序, 研究了土性参数 c , ϕ 变异性对可靠指标的影响, 并通过实例分别运用可靠度和安全系数分析方法分析深基坑抗隆起稳定性。结果表明: 可靠度分析方法具有科学性和合理性, 同时体现了 Rosenblueth 方法在复杂功能函数中进行可靠指标计算的优越性。

关键词: 深基坑; 抗隆起; 稳定性; 可靠度
中图分类号: TU 433 **文献标识码:** A

Application of Rosenblueth method to reliability analysis of deep excavation against heave stability

PENG Hai-ming¹, CHANG Wei-hua², PENG Xiao-yang³, HU Chun-hua⁴

(1. School of Civil Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Hubei Industrial NO.3 Construction Co., Wuhan 430070, China; 4. Hubei Environment Science Research Academy, Wuhan 430072, China)

Abstract: Due to uncertainty geotechnical parameters, the higher security coefficient is not always stable in the analysis of deep excavation against heave stability. Therefore, this paper puts forward a reliability analysis method for deep excavation against heave stability, and develops corresponding computer programs based on the Rosenblueth method to research the influences of soil property parameters c and ϕ variation on reliability indices. In addition, the paper analyzes by instances deep excavation against heave stability using the reliability analysis method and security coefficient analysis method. The results show that the reliability analysis method is scientific and reasonable; for complex equations, the Rosenblueth method has an advantage over others in calculating reliability indices.

Key words: deep excavation; against heave; stability; reliability

1 引言

对有支护结构的基坑稳定性分析方法主要有: 整体稳定性分析、围护结构的抗倾覆稳定性或踢脚稳定性分析、基坑底部土体抗隆起稳定性分析等。其中, 基坑的抗隆起稳定性分析具有保证基坑稳定和控制变形的重要意义^[1]。为此应对其进行重点研究。

传统的稳定分析方法是采用安全系数来表征整个基坑支撑体系的稳定性。然而深基坑开挖中存在着大量的不确定性因素^[2], 如材料参数的随机性

和相关性、孔隙水压力及外荷载的波动性、计算模式的不确定性等, 因而其计算所得的安全系数本身也具有随机性和不确定性, 它并不能真正反映支护结构的稳定与安全程度。因此, 有必要把概率分析方法引入到基坑稳定性评价中来。使得基坑的稳定性评价更科学、更精确。由于基坑支护结构抗隆起稳定性表达的极限方程不易求导, 采用最常用的 JC 法并不方便。而 Rosenblueth 方法是对一组随机变量有目的地选定或设计一些特殊值组成的点, 逐点求出功能函数的响应, 由此拟合功能函数的各阶矩。对于复杂不易求导甚至是隐函数表达的极限状态方

程的可靠度分析使用该方法十分简便。因此,对于一般基坑稳定性评价,Rosenblueth 法是一个非常实用的方法。

2 Rosenblueth 方法的基本原理

Rosenblueth 方法^[3, 4]又称统计矩的点估计方法,是由罗森布鲁斯(Rosenblueth)于 1975 年提出的一种矩估计的近似方法。

设功能函数为 $z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 在状态变量 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的分布函数未知的情况下,不需考虑其变化形态,只在区间 $(x_{i\min}, x_{i\max})$ 上分别对称地择其 2 个取值点,例如,通常忽略偏度的影响,取均值 μ_{xi} 的正负一个标准差 σ_{xi} , 即

$$\begin{aligned} x_{i1} &= \mu_{xi} + \sigma_{xi} \\ x_{i2} &= \mu_{xi} - \sigma_{xi} \end{aligned} \quad (1)$$

对于 n 个状态变量,则有 $2n$ 个取值点,取值点的所有可能组合有 2^n 个。在 2^n 个组合下,可根据状态方程,求得 2^n 个状态函数 $z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。可以导出它的 1~4 阶矩 M_1, M_2, M_3, M_4 的点估计分别为

$$M_1 = E[F_S] = \mu_{F_S} = \int_{-\infty}^{\infty} F_S f(F_S) dF_S \approx \sum_{j=1}^{2^n} P_j F_{Sj} \quad (2)$$

$$M_2 = E[(F_S - \mu_{F_S})^2] = \sigma_{F_S}^2 \approx \sum_{j=1}^{2^n} P_j F_{Sj}^2 - \mu_{F_S}^2 \quad (3)$$

$$M_3 = E[(F_S - \mu_{F_S})^3] \approx \sum_{j=1}^{2^n} P_j F_{Sj}^3 - 3\mu_{F_S} \sum_{j=1}^{2^n} P_j F_{Sj}^2 + 2\mu_{F_S}^3 \quad (4)$$

$$M_4 = E[(F_S - \mu_{F_S})^4] \approx \sum_{j=1}^{2^n} P_j F_{Sj}^4 - 4\mu_{F_S} \sum_{j=1}^{2^n} P_j F_{Sj}^3 + 6\mu_{F_S}^2 \sum_{j=1}^{2^n} P_j F_{Sj}^2 - \mu_{F_S}^4 \quad (5)$$

$$\text{式中 } P_j = \frac{1}{2^n} (1 + e_1 e_2 r_{12} + e_2 e_3 r_{23} + \dots + e_{n-1} e_n r_{n-1,n}),$$

$e_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的取值为: 当 x_i 取 x_{i1} 时, $e_i = 1$; 当 x_i 取 x_{i2} 时, $e_i = -1$, $r_{n-1,n}$ 为随机变量 x_{n-1} 与 x_n 之间的相关系数。若 x_{n-1} 与 x_n 不相关,则取 $r_{n-1,n} = 0$ 。

由安全系数 F_S 的一阶矩 M_1 和二阶矩 M_2 可以求得可靠度指标 β 。

$$\beta = \frac{M_1}{\sqrt{M_2}} \quad (6)$$

如果 F_S 服从正态分布,则可求得失效概率 $P_f = 1 - \Phi(\beta)$ 。

3 深基坑抗隆起稳定性极限状态方程

研究表明,基坑隆起破坏的根本原因是土体应

力强度的破坏。基坑开挖,打破了天然土体原始的应力平衡状态,使土体中的应力重新分布,形成二次应力场。当土体中某点的应力水平超过其强度极限时,该处土体将发生塑性流动。在一定的条件下,这个局部的塑性流动区将不断扩大,土体向压力较小的基坑内流动,导致基坑底部的隆起和坑壁的坍塌。这是基坑隆起破坏的力学机制。也是隆起破坏区别于坑壁土体滑坡失稳的本质所在。

国内外对基坑隆起稳定问题做了许多研究,发表了很多计算公式和计算方法^[5]。这些计算公式,大多是按坑壁土体的滑坡失稳或地基承载力验算的思路推导出来的。有的为了简化还假设土体的内摩擦角为 0 (纯粘性土) 或粘聚力为 0 (纯砂性土)。由于这些公式推导的前提条件、思路、考虑的侧重点不同,它们不仅形式差别很大,计算结果往往也相差很大。本文参照 Ptandtl 和 Terzaghi 的地基承载力公式^[5],并将墙底面的平面作为求极限承载力的基准面,其滑动线形状如图 1 所示。

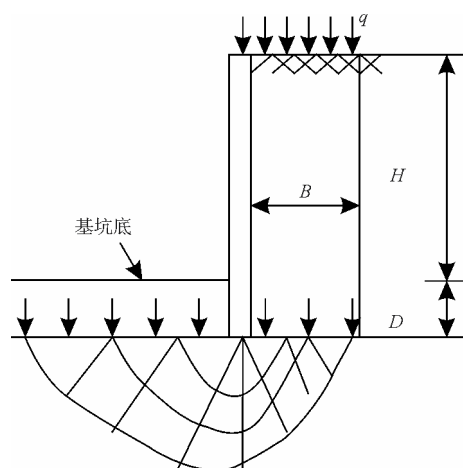


图1 基坑的抗隆起稳定计算简图
Fig.1 Excavation against heave stability calculation diagram

设安全系数为 F_S , 则

$$F_S = \frac{\gamma_2 D N_q + c N_c}{\gamma_1 (H + D) + q} \quad (7)$$

在基坑稳定性分析中则功能函数常取为

$$Z = F_S - 1 = \frac{\gamma_2 D N_q + c N_c}{\gamma_1 (H + D) + q} - 1 \quad (8)$$

式中 D 为墙体入土深度 (m); H 为基坑开挖深度 (m); γ_1, γ_2 分别为墙体外侧及坑底土体重度 (kN/m^3); N_c, N_q 均为地基承载力系数。

用 Prandtl 公式, N_c, N_q 分别为

$$\left. \begin{aligned} N_q &= \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) e^{\pi \tan \varphi} \\ N_c &= (N_q - 1) \frac{1}{\tan \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

用 Terzaghi 公式, N_c, N_q 分别为

$$\left. \begin{aligned} N_q &= \frac{1}{2} \left[\frac{e^{\frac{3}{4}\pi - \frac{\varphi}{2} \tan \varphi}}{\cos(45^\circ + \frac{\varphi}{2})} \right]^2 \\ N_c &= (N_q - 1) \frac{1}{\tan \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

表 1 土的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soils

实例	H/m	D/m	$\gamma_1 / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	$\gamma_2 / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	q/kPa	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	F_{S1}	F_{S2}
1	13.55	10.45	19.50	19.80	20	15	30	8.728	10.66
2	15.7	14.8	17.58	18.24	20	13	26	6.274	7.530

说明: F_{S1}, F_{S2} 分别为用 Prandtl、Terzaghi 公式计算的安全系数。

计算结果表明, 运用安全系数法忽略了计算所用参数的随机性、计算模式的不确定性等, 得到的例 1 的安全系数为 8.728, 而且比例 2 用相同公式计算的安全系数 6.274 大, 而在实际工程中例 1 是不安全的, 这充分反映了安全系数法的局限性。若在概率统计的基础上, 运用可靠度理论充分考虑工程参数的随机性和变异性, 可以得到下面结论: 粘聚力和内摩擦角的变异性 δ 越大可靠度指标 β 越小 (如图 2); 粘聚力的变异性 δ_c 对可靠度指标影响相对较小 (如图 3); 内摩擦角的变异性 δ_φ 对可靠度指标影响较大 (如图 4), 另外, 从图 2~4 中都可以看到, 在参数变异系数相同情况下, 例 2 的可靠指标明显大于例 1 可靠指标。这一点同工程实际稳定性相符。上述结论是用 Ptandtl 公式分析计算得出, 笔者还运用 Terzaghi 公式分析得出结论基本一致。

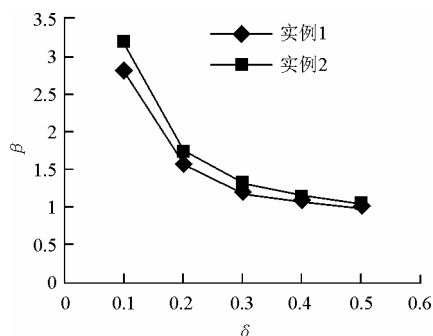


图 2 $\delta - \beta$ 关系曲线图 ($\delta = \delta_c = \delta_\varphi$)

Fig.2 Relation curves between $\delta - \beta$ ($\delta = \delta_c = \delta_\varphi$)

4 算例

根据上述论述, 选用文献[6]中 2 个实例对深基坑进行抗隆起稳定性可靠度分析。其中例 1 是实际工程抗隆起不稳定的代表, 例 2 是实际工程抗隆起稳定的代表, 应用式(7)计算他们的安全系数 F_s 见表 1。一般而言, 抗剪强度参数 c, φ 的变异性非常显著, 其变异系数约为 0.1~0.5^[7], 偏于保守的分析是将他们视为正态随机变量^[8], 其他参数变异性较小, 按常量处理。运用 Rosenblueth 方法并用 FORTRAN 编制程序计算分析可靠指标与变异系数的关系。

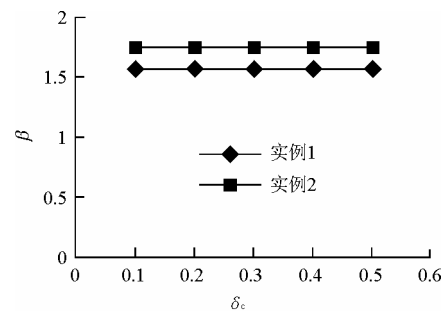


图 3 $\delta_c - \beta$ 关系曲线图 ($\delta_\varphi = 0.2$)

Fig.3 Relation curves between $\delta_c - \beta$ ($\delta_\varphi = 0.2$)

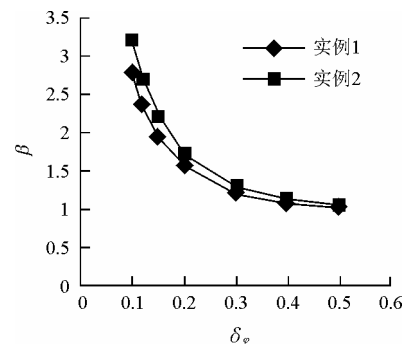


图 4 $\delta_\varphi - \beta$ 关系曲线图 ($\delta_c = 0.2$)

Fig.4 Relation curves between $\delta_\varphi - \beta$ ($\delta_c = 0.2$)

5 结论

采用结构可靠度理论研究深基坑支护结构的抗隆起稳定性, 并用可靠指标来度量支护结构的稳定性, 能够更真实地体现各参数的随机性和变异性,

因而比常规地定值设计法更符合工程实际,也更为合理。说明用可靠指标评价基坑抗隆起稳定性有现实意义,尤其是运用 Rosenblueth 方法计算基坑抗隆起稳定性可靠指标相对其它可靠度计算方法也更具优越性。

参 考 文 献

- [1] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. 126—132.
- [2] 高大钊. 土力学可靠性原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989. 5—7.
- [3] 苏永华, 何满朝, 高谦. Rosenblueth 方法在软破围岩锚喷支护系统评价中的应用[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 378—382.
- SU Yong-hua, HE Man-chao, GAO Qian. Application of Rosenblueth method in evaluating stability reliability of anchor-shotcrete net support system for soft-fracture surrounding rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 378—382.
- [4] Rosenblueth E. Point estimate for probability moment[J]. **Proc. Nat. Acad. Sci.**, 1975, 72: 3 812—3 814.
- [5] 冶金工业部建筑研究总院. 基坑开挖与支护技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 127—135.
- [6] 黄强, 惠永宁. 深基坑支护工程实例集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [7] 松尾稔(日). 地基工程学[M]. 万国朝译. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [8] 廖 璞. 深基坑支护结构抗倾覆破坏稳定可靠性分析[J]. 工程勘察, 2003(6): 37—40.

《岩土力学》2005 年第 4 期被 EI 收录论文 (共 34 篇, 收录率 97.1 %)

序号	论文题名	作者	页码
1	改进的有自由面渗流问题的 Bathe 算法	郑 宏, 戴会超, 刘德富	505—512
2	岩土破损演化理论(I): 破损空间	党发宁	513—519
3	地下圆形衬砌隧道对沿线地震动的影响(I): 级数解	梁建文, 纪晓东, Vincent W Lee	520—524
4	矩形壁板桩群桩垂直承载特性的理论分析	雷国辉, 洪 鑫, 施建勇	525—530
5	绿片岩三轴流变力学特性的研究(I): 试验结果	徐卫亚, 杨圣奇, 杨松林等	531—537
6	土工合成材料与土工合成材料加筋砂土的相关特性	吴景海	538—541
7	基于动态 CT 识别的冻土单轴压缩损伤本构模型	刘增利, 张小鹏, 李洪升	542—546
8	基于神经网络和演化算法的土石坝位移反演分析	张丙印, 袁会娜, 李全明	547—552
9	岩土工程加固分析的弹塑性力学基础	杨 强, 陈 新, 周维垣	553—557
10	边坡稳定及加固分析的有限元强度折减法	刘祚秋, 周翠英, 董立国等	558—561
11	堆石粗粒料颗粒破碎试验研究	刘汉龙, 秦红玉, 高玉峰等	562—566
12	考虑井阻和涂抹的砂井地基平面应变等效方法分析	陈小丹, 赵维炳	567—571
13	不等幅值循环荷载下冻土残余应变研究及其 CT 分析	徐春华, 徐学燕, 沈晓东	572—576
14	土钉墙基坑支护中疏排桩抗滑效应研究	金钢锋, 屠毓敏, 阮长青	577—579, 590
15	低饱和度非饱和土的抗剪强度理论及其应用	贾其军, 赵成刚, 韩子东	580—585
16	钻孔灌注桩施工过程中垃圾渗滤液对地下水的污染分析	杨明亮, 姚海林, 冯其林等	586—590
17	固结问题有限元法时步自适应研究	阮光雄, 傅少君, 陈胜宏	591—595, 599
18	岩石巷道二向压力的估测方法	李德忠, 李 冲	596—599
19	环境侵蚀下水泥土的力学效应试验研究	宁宝宽, 陈四利, 刘 斌等	600—603
20	高速公路工程中粉喷桩复合地基最大侧向变形研究	邓永锋, 刘松玉, 洪振舜	604—607
21	酸性环境下类砂岩材料波速特性分析	霍润科, 李 宁, 刘汉东	608—611
22	连拱隧道施工引起的地层位移分析	何 川, 李永林, 林 刚等	612—616
23	基于 CGP 模型的岩土材料应力-应变曲线拟合	易 达, 葛修润	617—620
24	修正的威布尔模型在沉降预测中的应用研究	涂许杭, 王志亮, 梁振森等	621—623, 628
25	全风化花岗岩抗剪强度影响因素分析	赵建军, 王思敬, 尚彦军等	624—628
26	电渗的电荷累积理论	庄艳峰, 王 钊	629—632, 649
27	水泥土桩与土工格栅联合加固沟谷软基机理研究	闫澍旺, 周宏杰, 崔 激等	633—637
28	糯扎渡水利枢纽左岸山体三维渗流有限元分析	李新强, 陈祖煜	638—641, 654
29	岩爆分类的支持向量机方法	赵洪波	642—644
30	用似水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测	储诚富, 洪振舜, 刘松玉等	645—649
31	SH 固沙机理的微观探讨	王银梅, 谌文武, 韩文峰	650—654
32	对环境岩土工程几个问题的探讨	方江华, 张志红, 姜玉松	655—659
33	非饱和原状黄土强度特性的试验研究	扈胜霞, 周云东, 陈正汉	660—663, 672
34	Hoek-Brown 岩石破坏经验判据确定岩石地基承载力的修正	李培勇, 杨 庆, 栾茂田	664—672