

基于风险分析—可靠度混合法的基坑失稳风险评估

车 纳^{1,2}, 廖 瑛¹

(1. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011; 2. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘要: 基坑失稳风险评价对于基坑工程至关重要。首先研究失稳风险事件及其相关因素, 建立风险分析模型和评判准则; 然后考虑不同失稳形式的力学机理并基于可靠性理论确定基坑的风险概率; 最后通过具体事例分析表明该方法的合理性和可行性。

关键词: 基坑工程; 风险分析; 可靠度

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5322(2018)01-0049-03

据相关资料统计^[1], 我国深基坑工程的事故发生率约为 20%, 且部分城市的事故发生率高达 30%。类似的工程事故不仅会造成财产的巨大损失乃至危害人们的生命安全, 工程滞后还会引起恶劣的社会反应^[2-3]。因此, 针对基坑工程的风险评估具有重要研究意义。目前, 风险分析方法大致分为定量分析、定性分析、定量定性综合分析等几类分析。由于岩土工程的随机性以及现代工程结构的复杂化, 单一的分析方法往往不能满足风险评估的要求, 因而出现一系列的混合法来降低不足之处, 如层次分析与模糊综合评判相结合对支护方案进行优选^[4]、贝叶斯与模糊理论相结合评估工程风险^[5]; 基于一次二阶矩法的自适线性加权响应面法对预应力箱梁铁路桥的失效评估^[6]等。本文采用考虑随机变量的可靠度理论与风险分析相结合的方法来评估基坑的安全, 使评估更为科学全面^[7]。

针对基坑失稳的风险评估, 本文以某重力式支护结构为例, 利用蒙特卡罗法和 MATLAB 编写相应计算程序, 并把基坑体系可靠度和风险分析理论相结合对基坑失稳进行风险评估, 为类似基坑工程的风险评估提供参考。

1 基坑失稳风险分析

1.1 基坑失稳风险综合分析模型

对重力式支护结构的基坑失稳风险分析首先

要进行风险识别, 即基坑可能出现的失稳模式及其风险因素、风险事件发生后果的影响。此外, 施工单位、监理单位和业主多方面的因素也会影响其评价, 故而本文不予考虑, 主要考虑土体参数的随机性对基坑失稳的影响, 具体事件及风险因素如表 1 所示。

表 1 基坑失稳风险事件及风险因素
Table 1 Risk events and risk factors of foundation pit instability

风险事件	风险因素
滑移稳定性	土体黏聚力、 土体内摩擦角
倾覆稳定性	
坑底隆起稳定性	
坑底渗流稳定性	
坑底突涌稳定性	
整体稳定性	

目前, 工程领域的风险模型主要采用事故发生的概率与其对应的风险事故后果的乘积来表示, 如式 1 所示。

$$R = \sum_{i=1}^n P_i \times C_i \tag{1}$$

式中, R 表示系统总风险; P_i 表示第 i 个事故发生的概率; C_i 表示第 i 个事故产生的后果。

由于基坑失稳的概率标准目前尚无规定, 因此本文结合现有相关研究, 对基坑失稳风险按照统一标准进行等级划分、评分及相应风险决策, 具体如表 2 所示。

收稿日期: 2017-06-21
作者简介: 车纳(1995—), 男, 江苏苏州人, 硕士生, 主要研究方向为离散元在地下工程的应用。
通讯作者: 廖瑛(1973—), 女, 四川蓬溪人, 副教授, 硕士, 主要研究方向为结构理论与计算方法。

表 2 风险评判标准及决策

Table 2 Criteria and decisions for risk assessment

失效概率 $P_f/\%$	风险状况	风险评分	风险决策
0 ~ 1	低度	100	风险可忽略,不需采取风险处理措施和监测
1 ~ 10	中度	80 ~ 90	风险可接受,需进行监测,可能要采取预防措施
10 ~ 20	高度	60 ~ 80	风险处于不期望状态,必须采取风险处理措施降低风险并加强监测
20 ~ 50	极高	0 ~ 60	风险不可接受,需高度重视并规避,要不惜代价将风险降至不期望的程度

1.2 基坑失稳风险概率计算方法

由于基坑失稳存在多种模式,所以某一失效模式安全的情况下不表示整个结构体系的安全。因此需要求出结构整体的可靠性,并根据基坑实际情况采取串联系统分析,表达式如下:

$$P_t = P_1 \times P_2 \times \cdots \times P_n = \prod_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式中: P_t 为系统可靠度; P_i 为第 i 个子系统可靠度; n 为子系统个数。

根据表 1 所示的控制参数在不同失稳模式下建立相应的功能函数 Z (式 2 为一般式),并根据 Z 的值判断结构的可靠性。

$$Z = g(X_1, X_2, \cdots X_n) = R - S \begin{cases} < 0 \text{ 失效状态} \\ = 0 \text{ 极限状态} \\ > 0 \text{ 可靠状态} \end{cases} \quad (3)$$

下面就以重力式支护结构为例,建立表 1 所示基坑失稳的功能函数。

1.2.1 滑移稳定性极限状态函数

$$g(R, S) = E_{pk} + (G - u_m) \tan \varphi_b + c_b B - E_{ak} \quad (4)$$

式中: E_{ak} 、 E_{pk} 分别为重力式支护结构上的主动土压力、被动土压力; G 为重力式支护结构即混凝土的自重; φ_b 、 c_b 为混凝土土墙底部土体的内摩擦角、黏聚力; u_m 为混凝土土墙底面上的水压力(混凝土土墙位于地下水位以上时, $u_m = 0$);

1.2.2 倾覆稳定性极限状态函数

$$g(R, S) = E_{pk} a_p + (G - u_m) a_G - E_{ak} a_a \quad (5)$$

式中: a_p 为混凝土土墙内侧被动土压力合力作用点至墙趾的竖向距离; a_G 为混凝土土墙自重与墙底水压力合力作用点至墙趾的水平距离; a_a 为混凝土土墙外侧主动土压力合力作用点至墙趾的竖向距离;其他符号同前。

1.2.3 坑底隆起稳定性极限状态函数

$$g(R, S) = \gamma_{m2} l_d \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) e^{\pi \tan \varphi} +$$

$$\frac{c \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) e^{\pi \tan \varphi}}{\tan \varphi} - \gamma_{m1} (h + l_d) + q_0 \quad (6)$$

式中: γ_{m2} 、 γ_{m1} 分别为基坑内、外挡土构件底面以上土的天然重度; l_d 为挡土构件的嵌固深度; h 为基坑深度; q_0 为地面均布荷载;本式中的 c 、 φ 分别为挡土构件底面以下土的黏聚力和内摩擦角;其他符号同前。

1.2.4 坑底渗流稳定性极限状态函数

$$g(R, S) = D r - h_w r_w \quad (7)$$

式中: D 为承压含水层顶面与坑底的土层厚度; r 为土的天然重度; h_w 为基坑内外的水头差; r_w 为水的重度。

1.2.5 坑底突涌稳定性极限状态函数

$$g(R, S) = (2 l_d + 0.8 D_1) r' - \Delta h \gamma_w \quad (8)$$

式中: D_1 为潜水水面或承压水含水层顶面至基坑底面的土层厚度; Δh 为基坑内外水头差; r' 为土的浮重度;其他符号同前。

1.2.6 整体稳定性极限状态函数

$$g(R, S) = \sum \{ c_j l_j + [(q_j b_j + \Delta G_j) \cos \theta_j - u_j l_j] \tan \varphi_j - (q_j b_j + \Delta G_j) \sin \theta_j \} \quad (9)$$

式中: c_j 、 φ_j 分别为第 j 个土条滑弧面处土的黏聚力、内摩擦角; b_i 、 ΔG_j 、 q_j 分别为第 j 个土条的宽度、自重、顶面上的竖向压力; l_j 、 u_j 分别为第 j 个土条的滑弧长度、滑弧面上的孔隙水压力; θ_j 为第 j 土条滑弧面中点处法线与竖直方向的夹角。

2 工程实例

上海新世纪商厦工程^[8]采用无支撑混凝土搅拌桩,其桩长为 19 m,墙体宽度为 8.7 m,地面超载 10 kN/m²。

开挖影响范围内涉及的土层有 7 层,其基本参数如表 3。

由于缺少详细的水文资料、勘察报告,因此计算时不考虑墙底的水压力,有关渗透稳定性的验算这里就暂不作考虑,后文不再赘述。同时由于

无法准确获得土体的变异性,可根据经验和相关文献值如表 4^[9-10]。

表 3 土层基本参数
Table 3 Basic parameters of soil layer

层号	土性	厚度/m	重度/(kg·m ⁻³)
1	素填土	2.4	18.78
2	淤泥	2.6	17.00
3	粘土	1.0	19.73
4	粉质粘土夹粉土	3.0	19.41
5	粉质粘土夹粉土	5.5	18.85
6	粉质粘土	4.0	19.30
7	粉质粘土夹粉土	5.2	19.21

表 4 各层土体参数的均值和标准差
Table 4 Mean and standard deviations of soil parameters at different levels

层号	μ_c/kPa	δ_c	$\mu_\varphi/(\text{^\circ})$	δ_φ
1	13	0.20	15°45′	0.35
2	7	0.25	18°30′	0.40
3	4	0.10	28°15′	0.50
4	7	0.15	18°30′	0.45
5	7	0.15	6°45′	0.20
6	11	0.32	5°45′	0.15
7	15	0.30	9°45′	0.25

根据上述参数,利用 MATLAB 编制的基于蒙特卡罗法的可靠性程序,计算该基坑支护结构的滑移、倾覆、坑底隆起、整体稳定性的失效概率,如表 5 所示。

即得到该基坑稳定系统的失效概率为:

表 5 不同稳定性下的失效概率
Table 5 Probability of failure under different stability

失稳模式	失效概率 $P_f/\%$
滑移	15.15
倾覆	0.001
坑底隆起	1.16
整体	19.56

$$P_{\text{系统}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_f) = 32.54\%$$

由表 2 风险评判标准可知,该工程属于极高风险状况,并通过线性插值计算得到相应的风险评分为 32.94。因此,根据表 2 可知:该险情不可接受,需要予以高度重视并做好规避措施,要不惜代价将风险至少降至不期望的范畴,这与实际工程中遭遇的险情相一致。

3 结论

- (1)基于风险分析的方法,识别基坑失稳可能存在的失稳形式及其因素,并建立失稳风险等级划分、评分及相应风险决策,为风险管理提供重要依据。
- (2)考虑基坑失稳力学机理,对各个失稳形式进行可靠度分析,并结合各失稳形式的关系,对基坑系统的失稳风险进行定量评估。
- (3)基于风险分析—可靠度混合法得出的基坑系统失稳的失效概率,能对工程进行安全评估,反应工程实际安全情况。分析方法方便可行,为类似基坑失稳的安全评估提供参考。

参考文献:

[1] 刘立兵,徐平,付强,等.深基坑支护设计理论与实例[M].郑州:黄河水利出版社,2013.

[2] 高珏.泰勒级数法在基坑稳定性验算中的应用研究[D].广州:华南理工大学,2013.

[3] 刘磊.长春市工会大厦深基坑支护设计与数值模拟研究[D].长春:吉林大学,2012.

[4] 廖瑛,夏海力.层次分析、模糊综合评判法在深基坑支护方案优选中的应用[J].工业建筑,2004,34(9):26-29.

[5] 周红波.基于贝叶斯网络的深基坑风险模糊综合评估方法[J].上海交通大学学报,2009(9):1473-1479.

[6] CHO T J,LEE J B,KIM S S. Probabilistic risk assessment for the construction phases of a PSC box girder railway bridge system with six sigma methodology[J]KSCE Journal of Civil Engineering,2011,15(1):119-130.

[7] 向绿林.基于风险分析——可靠度混合法预制梁板运、架施工安全评估[J].铁道科学与工程学报,2016,13(9):1872-1878.

[8] 赵锡宏,陈志明,胡中雄,等.高层建筑深基坑围护工程实践与分析[M].上海:同济大学出版社,1996.

[9] 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.

[10] 高大钊.土力学可靠性原理[M].北京:中国建筑工业出版社,1990.