

参数变异性对围护结构稳定性影响分析

黄广龙¹, 卫敏², 李娟¹

(1.南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009; 2.中交广州航道局有限公司, 广州 510221)

摘要: 利用可靠度分析方法代替传统的安全系数法来分析基坑围护结构的整体稳定性, 考虑岩土参数的不确定性和空间变异性, 对土性参数进行空间折减可显著提高可靠度分析的精度。结合工程实例, 分析了参数均值和变异系数对基坑整体稳定性可靠度指标的影响。分析表明, 可靠度指标 β 对土体黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、地面超载 q 及支护桩嵌固深度 h_d 的均值变化的敏感性较安全系数 K 对上述参数的敏感性强; c 、 φ 及 h_d 值的变异性对 β 值影响较大, 地面超载较大时, 其变异性对 β 影响较为显著; 采用可靠度指标 β 评价基坑整体稳定性较安全系数 K 更加合理。

关键词: 基坑工程; 稳定性分析; 参数变异性; 安全系数; 可靠度指标

中图分类号: TU 0213.2

文献标识码: A

Analysis of influence of parameters variability on retaining structure stability

HUANG Guang-long¹, WEI Min², LI Juan¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2. CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510221, China)

Abstract: Considering uncertainties and spatial variability of soil parameters, the reliability analysis method can reflect objectively the real safety character of retaining structure for foundation pit engineering instead of the safety factor method. The reliability index increased and the variability of soil parameters decreased after being reduced by the random field theory. Compiled with project example, this paper provided the detailed analysis of the mean value and the variability of the design parameters which affected the stability of soil foundation pit. The results show that, the sensitivity of the parameters of cohesion c , angle of internal friction φ and the embedded depth h_d which affected the reliability index β was much more than those affected the safety factor K . The reliability index β was affected significantly by the coefficients of variation δ_c , δ_φ , and δ_{h_d} . The δ_q affected the reliability index β obviously when μ_q was large. It's reasonable to appraise the overall stability of retaining structure of foundation pit by reliability analysis method than by the safety factor method.

Key words: foundation pit project; stability analysis; variability of parameters; safety factor; reliability index

1 引言

在深基坑设计中, 现行的规范建议对水混凝土墙、多支点排桩及多层支点地下连续墙嵌固深度计算值按整体稳定性条件采用圆弧滑动简单条分法确定, 也即上述支护结构嵌固深度应满足整体稳定性要求^[1-2]。事实上, 对任何一种支护结构都必须满足整体稳定性要求。目前在设计中, 稳定性分析多采用安全系数法, 即采用结构抗力效应与荷载效应的比值作为衡量支护结构的稳定性的指标。其计算所用的土性参数(如重度 γ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ)、计算模式等均被视为确定的, 而实际上上述参数和

计算模式均存在不确定性^[3-4]。尽管安全系数法在长期的工程实践中积累了丰富的经验, 但这种方法实质上是用确定性模型处理不确定性问题, 并未考虑设计参数内在的变异性, 不能科学、定量地反映工程的安全度^[5-7]。因此, 很多学者尝试用可靠度指标分析基坑稳定性。可靠度分析方法与安全系数不同, 其考虑了岩土参数的离散性及参数之间的相关性, 用概率方法定量考虑实际存在的不确定性因素, 使得在概率统计分析的基础上得出的可靠度指标更符合工程实际情况, 从而更为客观地反映基坑的实际安全状态。

本文基于可靠度理论, 针对均质土地基研究了

土性参数、支护桩嵌固深度以及坑外超载等因素对支护结构整体稳定性可靠度的影响, 为支护结构设计提供有益的参考。

2 土性参数的变异性

岩土体性质及其工程性状具有较大的变异性。这就需要对试验观测到的数据进行尽可能详细地统计分析, 得到能正确反映岩土体特征的数值, 它是岩土工程可靠性评价的基础^[8]。

2.1 土性参数的空间变异性

土是一种变异性很大的工程材料, 在其漫长的形成过程中, 经历了自然和人为因素的作用, 其性质十分复杂。虽然其在某一点的性质是确定的, 但是经过勘察、取样、试验得到的土体参数却是十分离散和不确定的。同一土层的不同地点, 其性质也随位置的不同而不同。土体具有空间变异性。

对岩土工程而言, 通过室内试验或现场试验所得到的试验参数, 经原始概率统计后所得的土性参数的均值和方差称为“点均值”和“点方差”。而岩土工程的性状绝大多数取决于相应范围(长度、面积、体积)内的土性空间平均值, 如土坡稳定取决于滑动面上的平均抗剪强度而不是某点的极限抗剪强度; 摩擦桩的极限承载力取决于桩侧平均摩阻力, 即使是渐进性的破坏, 同样是取决于小范围内土性指标的平均值, 因此在可靠度分析中需要计算土性参数空间平均值的变异性(方差), 按空间平均方差所计算出的可靠性指标, 才是真正反映岩土可靠性程度的指标。

2.2 土性参数方差折减公式

表示土体参数空间变异性较好的方法是 Vanmarcke^[9]提出的描述土体空间自相关特性的随机场模型。随机场理论用方差折减系数把土性的“点”变异性性和空间变异性联系在一起。对于统计均匀土层, 设 Z 为土层中某一点, 则土性指标表达式为

$$u(Z) = \mu + \varepsilon(Z) \quad (1)$$

式中: $u(Z)$ 为该点的土性指标; μ 为计算点平均值; $\varepsilon(Z)$ 为一随机变量。

根据 Vanmarcke 的定义, 可得

$$Var[u_{\Delta Z}] = Var[\tilde{\varepsilon}] = \sigma^2 \Gamma^2(\Delta Z) \quad (2)$$

式中: σ 为 $u(Z)$ 的点方差; $\Gamma^2(\Delta Z)$ 为方差折减系数; ΔZ 为取样间距。

而 $\Gamma^2(\Delta Z)$ 又可以近似表示为

$$\Gamma^2(\Delta Z) = \begin{cases} 1 & (0 < \Delta Z < \Delta L) \\ \frac{\Delta L}{\Delta Z} & \end{cases} \quad (3)$$

式中: ΔL 为土性相关距离。

由式(3)可见, 方差折减系数取决于土性的相关距离 ΔL 。Vanmarcke 认为, 在 ΔL 范围内, 土性是强烈相关的, 在 ΔL 范围外则不相关。在实际工程中, 获得土层参数折减系数 $\Gamma^2(\Delta Z)$ 的方法有多种, 通过土层静力触探曲线进行取样, 利用空间递推平均法求解方差折减系数较为方便, 本文即采用该方法得到方差折减系数。

对基坑支护设计影响甚大的土性参数主要是土体重度 γ 以及抗剪强度指标 c, φ 值, c, φ 的取值是否合理直接决定着基坑设计的成败。考虑土性参数空间变异性对提高基坑整体稳定性分析精度无疑是重要的。

3 整体稳定性可靠度计算方法

3.1 优化算法

目前岩土工程中可靠度分析方法种类较多, 其中的优化算法应用较为普遍。

在标准正态坐标系中, 如图 1 原点到极限状态曲面的最短距离就是可靠度指标, 所以可靠度指标的计算可以转化成求原点到极限状态曲面的最短距离, 即用优化算法进行可靠度的计算。

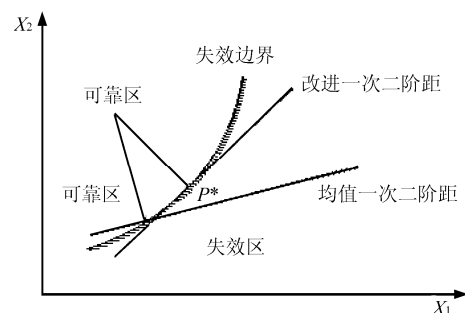


图 1 变量的失效边界

Fig.1 Boundary of variable failure

对于任意分布的随机变量可以通过 JC 法进行等效正态分布代换, 得到等效正态分布的均值和方差。等效正态分布标准化后, 在设计验算点 P^* 处 $\bar{X}_i = (X_i - \mu_{X_i}) / \sigma_{X_i}$, 则可靠度指标可表示为

$$\beta = \min \left(\sum_{i=1}^n \bar{X}_i^2 \right)^{1/2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

约束条件为

$$Z = g(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

这样就将求解可靠度指标 β 的问题转化为求解有约束条件的极小值问题。采用序列二次规划法并调用 Matlab 优化函数^[10], 即可求出可靠度指标。

3.2 基坑围护结构中最危险滑动面的确定

对于基坑围护结构整体稳定性验算采用圆弧滑动简单条分法, 应用最优化方法来搜索最危险滑动面。假定桩端以下不存在软弱下卧层, 采用瑞典条分法分析基坑围护结构整体稳定性时, 由于支护桩对土体的嵌固作用, 最危险滑动面理论上不能穿越支护桩, 一般认为, 最危险滑动面可近似简化为通过如图 2 中墙趾 B 点的圆弧。

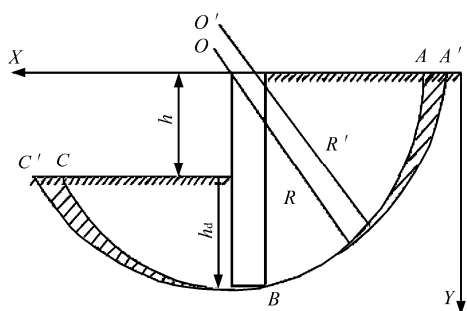


图 2 基坑整体稳定分析示意图

Fig. 2 Diagram of the overall stability of foundation

由图 2 可见, 圆弧滑动面分别与基坑开挖面及坑外土体表面相交于 A 点和 C 点, B 点纵坐标可以通过挖深加支护桩嵌固深度来确定, 在图示的坐标系中, 横坐标可选取大于 3 倍基坑挖深影响范围。A 点和 C 点的纵坐标 y_a 和 y_c 分别为挖深 0 和 h 。这样, 3 个坐标点有 4 个坐标参量已知, 仅 A 点和 C 点的横坐标 x_a 和 x_c 未知。如此一来, 不断改变 x_a 和 x_c 的大小, 即可搜索出安全系数最小的滑动面, 即为最危险滑动面。

4 整体稳定性可靠度影响分析

某工程基坑挖深 10 m, 采用钻孔桩加两道内支撑的支护形式, 其支护桩嵌固深度为 12 m。地面超载取 20 kPa, 基坑支护简图如图 3 所示。

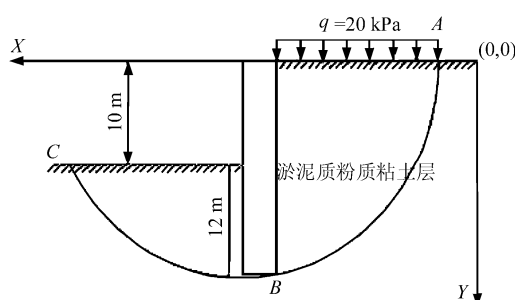


图 3 基坑支护简图

Fig.3 Diagram of foundation pit support

以上工程为均质土地基, 基坑影响范围内土层为淤泥质粉质黏土。根据岩土工程勘察报告中钻孔勘探取土资料, 利用上述土体空间自相关特性的随机场理论对土层参数进行折减, 折减前后的计算参数见表 1。

表 1 折减前后的土层计算参数

Table 1 Unreduced and reduced calculated parameters of soil

折减情况	参数	重 度 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	黏聚力 $c/(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
折减前	均 值 μ	18.1	10.5	18.2
	标准差 σ	0.30	2.17	2.82
	折减系数 $\Gamma^2(\Delta Z)$	0.70	0.78	0.85
折减后	均 值 μ	18.1	10.5	18.2
	标准差 σ	0.20	1.7	2.4
	变异系数 δ	0.01	0.19	0.13

4.1 考虑参数空间变异性

考虑参数空间变异性, 利用折减后的土层参数计算出相应的可靠度指标, 并与未折减土层参数的计算结果进行比较 (见表 2)。

表 2 设计参数经折减与未折减计算结果

Table 2 Results of reduced parameters vs. unreduced parameters of soil

参数名称	参数未经折减 计算结果	参数经折减 计算结果	增减幅度/%
可靠度指标 β	2.89	3.5	+21
破坏概率 $P_f/\%$	0.2	0.023	-88
安全系数 K	1.68	/	/

从表 2 可看出, 采用经过空间折减的参数进行可靠度分析, 可靠度指标 β 有显著提高, 增幅达到 21%; 破坏概率更是降低了 88%。而安全系数值则无法考虑参数的变异性。

4.2 可靠度指标影响分析

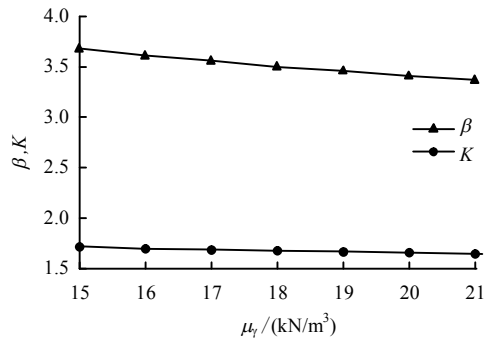
4.2.1 各参数均值对可靠度指标的影响

分别对土体重度 γ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、地面超载 q 及嵌固深度 h_d 均值对可靠度指标 β 和安全系数 K 产生的影响进行分析。对任一参数进行可靠度敏感性分析时, 其他参数的均值和方差保持不变。

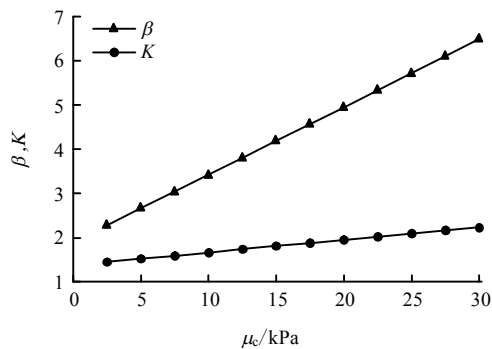
从图 4(a)可知, β 和 K 值随着 μ_γ 的增大而减小, 但变化不大, 且对 β 影响很小, 表明在可靠度分析时, 可以不考虑重度 γ 均值变化的影响。

从图 4(b)~(d)可知, 可靠度指标 β 和安全系数 K 都随 μ_c 、 μ_φ 及 μ_{h_d} 增大而增大, 且变化显著。而 β 和 K 值随着 μ_{h_d} 的增大而增大, 则说明 h_d 增大可显著提高基坑整体稳定性, 但值得注意的是, K 曲线

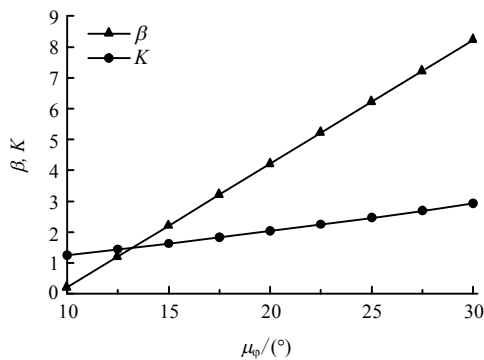
较 β 曲线平缓得多,说明 K 值对 h_d 的增加不敏感,在实际工程中,支护结构设计时会存在为提高整体稳定性系数而盲目加长嵌固深度的现象,这样势必会过度浪费,是不可取的,采用可靠度或破坏概率为评价指标则更加合理。



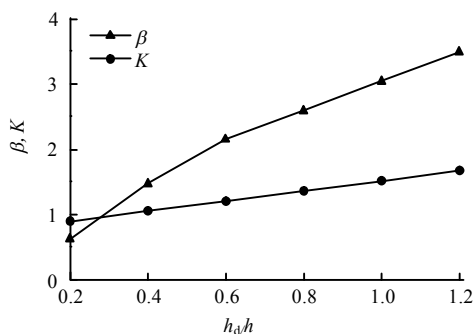
(a) β, K 与 μ_γ 关系曲线



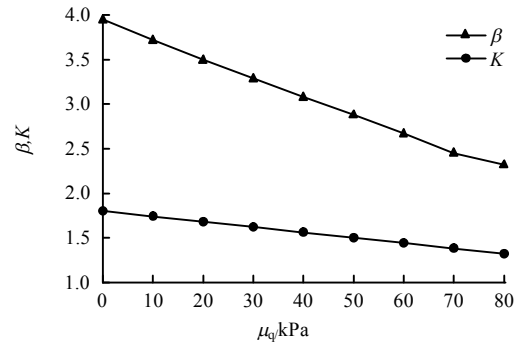
(b) β, K 与 μ_c 关系曲线



(c) β, K 与 μ_ϕ 关系曲线



(d) β, K 与 h_d/h 关系曲线



(e) β, K 与 μ_q 关系曲线

图4 β 和 K 与参数均值 μ 的关系曲线

Fig.4 Curves of β, K versus μ

从图4(b)~(e)各曲线的整体情况可看出:(1) 各参数均值变化对 β 和 K 值的影响程度不同。在 c 、 ϕ 、 q 及 h_d 4个变量中, μ_ϕ 变化对可靠度指标 β 影响最为显著,其次为 μ_c 、 μ_{hd} 及 μ_q 。(2) 可靠度指标 β 对各参数均值的变化较安全系数 K 敏感。当 c 、 ϕ 及 h_d 过小时,分别采用 β 和 K 评价基坑安全将导致不同结果,例如图4(c)所示,当参数 ϕ 取 12.5° 时,安全系数 K 为1.43,基坑是安全的,而可靠度指标 β 值只有1.21,破坏概率为11.3%,基坑将出现险情。

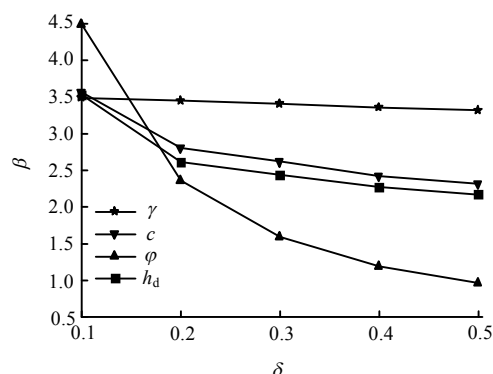
从图4(e)可知, β 和 K 值随着 μ_q 增大而减小,则表明 q 的大小对基坑稳定性有较大的影响,在基坑设计时应考虑施工时 q 的变化。

4.2.2 各参数变异系数对可靠度指标的影响

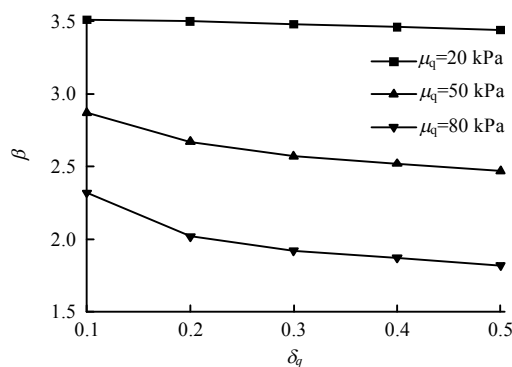
从图5(a)可知, β 随各参数的变异性增大而减小,其中 c 、 ϕ 和 h_d 的变异性对 β 的影响明显,影响大小依次为 δ_ϕ 、 δ_{hd} 、 δ_c ,图中,这3者对可靠度指标的影响趋势是一致的:即变异性越大,可靠度指标越小,相应的破坏概率越大,变异系数在0.1~0.2范围时,可靠度指标最敏感,呈陡降趋势。重度 γ 的变异性 δ_γ 对 β 基本上无影响。从图5(b)可知,当地面超载均值 μ_q 较小时,其变异性对 β 影响不明显;当 μ_q 较大时,其变异性对 β 影响较为显著,对 β 影响趋势与参数 δ_{hd} 、 δ_c 相似。当地面超载过大时,亦应考虑 q 的变异性。

值得注意的是,因传统安全系数 K 无法考虑参数的内在变异性,当土体参数变异性较大时,采用 β 和 K 评价基坑安全将导致不同结果。如图5所示,当 h_d 变异系数为0.2或 ϕ 变异系数为0.2时, β 为 $2.36 < 3.0$,未达到目标可靠度要求;而采用 K 评价结果为1.68,满足安全系数 >1.30 的要求。但由于

其未考虑参数的变异性,不能真正反映支护结构的安全性。因此,采用可靠度指标 β 评价基坑稳定性更为合理。



(a) β 与各参数 δ 关系曲线



(b) β 与 δ_q 关系曲线

图5 β 和各参数 δ 关系曲线

Fig.5 Curves of β versus δ

5 结论

(1) 对水泥土墙、多支点排桩(地下连续墙)等嵌固深度按整体稳定性控制是合理的,但传统的安全系数法由于无法考虑参数的变异性而使嵌固深度的计算存在较大的随意性,易给工程带来隐患或浪费。

(2) 在对支护结构进行整体稳定性可靠度分析时,需要考虑土体参数的空间变异性,即对土性参数的变异性进行折减可显著提高可靠度分析的精度。

(3) 土体重度 γ 的均值对 K 和 β 值的影响程度不大。安全系数 K 对设计参数 c 、 ϕ 、 q 及 h_a 的均值变化的敏感性较 β 值对上述参数的敏感性要差。当以安全系数 K 为指标进行嵌固深度 h_a 设计时,存在为提高整体稳定性安全系数而盲目加长嵌固深度的不合理现象。 c 、 ϕ 、 q 及 h_a 均值变化时对 β 值的影

响较大,因而采用可靠度指标 β 评价围护结构整体稳定性更为合理。

(4) c 、 ϕ 及 h_a 值的变异性对 β 值影响较大, β 随这3者的变异性增大而减小,其相应的破坏概率就越大,而重度 γ 的变异系数对 β 值的影响程度则不大。当地面超载均值 μ_q 较大时,其变异性对 β 影响较为显著,因此,当地面超载过大时,亦应考虑超载 q 的变异性。

参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部. JGJ120-99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1999.
- [2] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50007-2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.
- [3] 黄广龙, 龚晓南, 肖溟. 土性参数的随机场模型及桩体沉降变异特性分析[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 311—315.
- [4] HUANG Guang-long, GONG Xiao-nan, XIAO Ming. Random field model of soil property and analysis of variability of pile-settlement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(4): 311—315.
- [5] 黄广龙, 龚晓南. 单桩承载力计算模型的不确定性分析[J]. 工程勘察, 1999, (06): 9—12.
- [6] 松尾稔(日). 地基工程学[M]. 万国朝译. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [7] ROBERT Whitman V. Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, (7):583—593.
- [8] DUNCAN J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(4):307—316.
- [9] 张贵金, 徐卫亚. 岩土工程风险分析及应用综述[J]. 岩土力学, 2005, 26(9):1508—1516.
- [10] ZHANG Gui-jin, XU Wei-ya. Summary about risk analysis of geotechnical engineering and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(9):1508—1516.
- [11] Vanmarcke E H. Probabilistic modeling of profiles [J]. *Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 1977, 103 (11):1227—1246.