

上海软土基坑板式支护结构稳定性可靠度分析

秦高峰¹, 李镜培¹, 刘陕南², 侯胜男²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海现代建筑设计(集团)有限公司, 上海 200041)

摘要: 在现行上海基坑规范规定的验算模式下, 对基坑板式支护结构分别建立了整体稳定、抗隆起稳定、抗倾覆稳定极限状态方程。采用结构可靠度理论来研究板式支护结构的稳定可靠度问题, 考虑了影响支护结构稳定性的主要随机变量(黏聚力 c , 内摩擦角 ϕ)的变异性, 用概率来度量支护结构的稳定可靠度。通过一次二阶矩法(JC 法)对上海 6 个基坑工程进行可靠性分析计算, 得到规范要求安全系数下, 各种失稳模式所对应的可靠性指标值及其变化范围和变化趋势, 并确定了各验算模式的目标可靠性指标; 研究结果为基坑工程的可靠性评价提供一定的理论依据, 并为进一步确定基坑工程的设计分项系数提供必备的基础。

关键词: 板式支护; 基坑工程; 极限状态方程; 可靠性指标

中图分类号: TU476.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0532-05

作者简介: 秦高峰(1988-), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事基坑工程可靠度方面的学习与研究工作。E-mail: qingaofeng1618@163.com。

Reliability of flexible retaining structure of excavations in Shanghai soft soils

QIN Gao-feng¹, LI Jing-pei¹, LIU Shan-nan², HOU Sheng-nan²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Xian Dai Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200041, China)

Abstract: Under the design methods recommended by Shanghai standard code for design of excavation engineering, the ultimate state equations for the overall stability, basal heave stability and overturning stability of flexible retaining structure of excavations are established. Considering the variability of variables (mainly c and ϕ), the reliability of the supporting structure of the excavations are calculated. By applying this method (FOSM method or JC method) to six excavation cases of Shanghai soft soils, the range of the stable reliability index of an excavation pit and the variation tendency of the reliability index are concluded. The target reliability index of the excavation cases in Shanghai soft soils are proposed. The results may provide a theoretical basis for the reliability evaluation of practical excavations and a basis for the determination of partial factor of the excavation.

Key words: flexible retaining structure; excavation engineering; limit state equation; reliability index

0 引言

关于基坑支护结构稳定性的分析, 目前基本采用常规的定值设计法, 即用抗力效应与荷载效应的比值作为安全系数来评价基坑支护结构的稳定性^[1]。由于该法忽略了计算所用参数(黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ)的变异性^[2-3], 加上计算模式的不确定性, 其计算所得的安全系数本身也具有不确定性, 不能真实反映支护结构的稳定与安全程度^[4]。与定值设计法不同, 结构可靠度分析法是建立在概率统计的基础上, 充分考虑计算参数的随机性和变异性, 并用结构抗力大于荷载效应的概率来定量地确定结构安全与否, 因而该方法比常规的定值法更符合工程实际, 也更为合理。

本文在《上海市基坑工程技术规范》(DG/TJ08-

61—2010) 规定的基坑稳定验算模式下, 引入可靠度分析理论对基坑整体稳定性、抗隆起稳定性和抗倾覆稳定性可靠度进行了研究, 得到了各种失稳模式所对应的可靠性指标值及其变化规律, 并确定了各验算模式的目标可靠性指标, 获得一些指导工程实践的有益结论。

1 可靠指标计算原理

土木工程可靠度理论发展至今, 计算方法有多种, 如 JC 法^[5]、响应面法^[6]、映射变换法^[7-8]、各种数值计

基金项目: 上海现代建筑设计(集团)有限公司科研项目(11-1类-0024-基)

收稿日期: 2013-07-19

算方法(如 Monte Carlo 模拟法^[6])等, 但是工程界应用最为广泛的是 JC 法。该方法由于具有较好的工程实用性已被国际结构安全度联合委员会(JCSS)推荐使用^[9]。我国工程结构可靠度设计统一标准(GB50153—2008)关于可靠度的计算方法也是采用 JC 法。

JC 法^[6]与其他求解方法相比有明显的优势: 可以考虑随机变量的分布类型对土木工程可靠度的影响; 在符合一般工程精度要求的前提下, 计算较简单, 同时可以得到设计验算点的值; 整个迭代计算过程可以编程实现, 提高计算效率。

2 板式支护结构稳定的可靠度分析

2.1 支护结构的失稳模式

基坑支护结构的失稳破坏模式主要有: 整体稳定破坏、抗隆起破坏、抗倾覆破坏等^[10]。只要其中一种验算模式处于失稳状态, 则整个基坑即破坏, 为此需要对每一种失稳破坏模式采用结构可靠度理论进行分析, 得出相应的失稳模式下的可靠指标, 用以评价基坑支护结构的稳定可靠度^[10]。

2.2 基本假定

(1) 随机变量的选择

在支护结构的稳定分析中, 重度 γ 、土层厚度 h 、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 等土性指标都是很重要的参数, 考虑到重度 γ 和厚度 h 的变异性比较小, 并且 c 和 φ 的随机性明显影响支护结构的稳定可靠度, 所以仅将 c 和 φ 当作随机变量, 假定其服从对数正态分布且相互独立。基坑抗力和荷载的概率统计参数按照一阶泰勒展开求解^[9], 抗力 M_R 和荷载 M_S 均符合对数正态分布且相互独立。

(2) 基坑工程工况的假定

因部分工程是变形控制, 在较高安全系数下得到的可靠指标其实际意义并不大, 故本文在基坑周围其他条件不变的情况下以及工程允许的插入比范围内, 仅调整板式支护结构的插入深度, 使计算的工程安全系数在规范规定的安全系数附近, 得到规范规定安全系数条件下对应的可靠指标变化规律。

2.3 整体稳定可靠度分析

基坑整体稳定分析实际上是对具有支撑结构的直立土坡的分析(见图 1), 本文采用瑞典条分法验算最危险滑裂面的稳定性, 按照常规定值法设计时, 支护结构的整体稳定安全系数

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n c_{ki} l_i + \sum_{i=1}^n (q_{ki} b_i + W_{ki}) \cos \alpha_i \tan \varphi_i}{\sum_{i=1}^n (q_{ki} b_i + W_{ki}) \sin \alpha_i} \quad (1)$$

按照结构可靠度理论, 板式支护结构整体破坏稳定可靠性的极限状态方程为

$$g(R, S) = M_R - M_S \quad , \quad (2)$$

其中

$$M_R = \sum_{i=1}^n c_{ki} l_i + \sum_{i=1}^n (q_{ki} b_i + W_{ki}) \cos \theta_i \tan \varphi_i \quad , \quad (3)$$

$$M_S = \sum_{i=1}^n (q_{ki} b_i + W_{ki}) \sin \theta_i \quad , \quad (4)$$

$$l_i = b_i / \cos \theta_i \quad . \quad (5)$$

式中 n 为总土条数; W_{ki} 为第 i 土条的重量; q_{ki} 为超载; b_i 为第 i 土条的宽度; θ_i 为第 i 土条圆弧中点法线与铅垂线的夹角(°); M_R 和 M_S 分别为基坑整体稳定性的抗力项和荷载项。

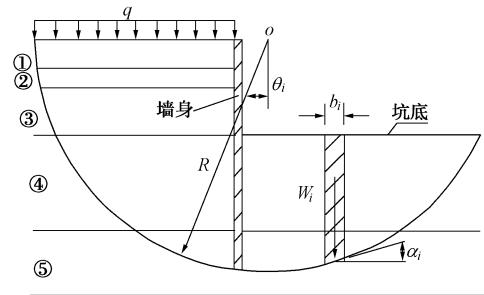


图 1 基坑整体稳定分析简图

Fig. 1 Overall stability of an excavation

2.4 抗隆起稳定可靠度分析

对于板式支护结构体系, 墙底抗隆起验算模式不起控制作用, 而按圆弧滑动模式验算绕最下道内支撑(或锚拉)点的抗隆起稳定起控制作用, 计算分析简图如图 2 所示, 其对应的极限状态方程如下:

$$g(R, S) = M_{RLK} - M_{SLK} \quad , \quad (6)$$

$$M_{RLK} = M_{ak} + \sum_{j=1}^{n_2} M_{RLKj} + \sum_{m=1}^{n_3} M_{RLKn} \quad , \quad (7)$$

$$M_{SLK} = M_{SLKq} + \sum_{i=1}^{n_1} M_{SLKi} + \sum_{j=1}^{n_4} M_{SLKj} \quad , \quad (8)$$

$$M_{SLKq} = \frac{1}{2} q_k D^2 \quad , \quad (9)$$

$$M_{SLKi} = \frac{1}{2} \gamma D^2 (H_B - H_A) \quad , \quad (10)$$

$$M_{SLKn} = \frac{1}{2} \gamma D^3 [(\sin \alpha_B - \sin^3 \alpha_B / 3) - (\sin \alpha_A - \sin^3 \alpha_A / 3)] \quad , \quad (11)$$

$$M_{RLKj} = \int_{\alpha_A}^{\alpha_B} [(q_{1fk} + \gamma D' \sin \alpha - \gamma H_A + \gamma h'_0) \cdot (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha K_a) \tan \varphi_k + c_k] D'^2 d\alpha \quad , \quad (12)$$

$$M_{RLKn} = \int_{\alpha_A}^{\alpha_B} [(q_{2fk} + \gamma D' \sin \alpha - \gamma H_A + \gamma h'_0) \cdot (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha K_a) \tan \varphi_k + c_k] D'^2 d\alpha \quad . \quad (13)$$

式中 M_{RLK} 、 M_{SLK} 分别为抗隆起力矩标准值和隆起力矩标准值; M_{SLKq} 、 M_{SLKi} 和 M_{SLKn} 分别为超载引起的隆起力矩标准值、坑外隆起力矩标准值和坑内隆起力矩标准值; M_{ak} 、 M_{RLKj} 和 M_{RLKn} 分别为围护墙的容许

力矩标准值、坑外抗隆起力矩标准值和坑内抗隆起力矩标准值; D' 为围护墙在最下道支撑以下部分的深度 (m); 各力矩单位为 (kN·m/m)。

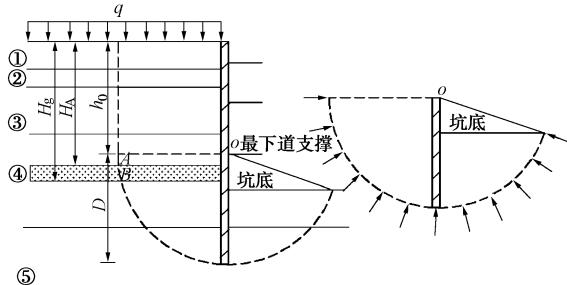


图 2 基坑抗隆起稳定分析简图

Fig. 2 Basal-heave stability of an excavation

2.5 抗倾覆稳定可靠度分析

板式支护结构围护墙应按照下列公式验算最下道支撑或者拉锚点的抗倾覆稳定性, 计算图示见图 3。

$$g(R, S) = M_{Rk} - M_{Sk} \quad (14)$$

$$M_{Sk} = F_{ak} z_a + F_{wk} z_w, \quad M_{Rk} = F_{pk} z_p \quad (15)$$

式中 M_{Rk} 和 M_{Sk} 分别为绕支撑点 O 的抗倾覆力矩标准值 (kN·m/m) 和倾覆力矩标准值 (kN·m/m); z_a 、 z_p 和 z_w 分别为主动土压力作用点、被动土压力作用点和水压力作用点至最下道支撑点的距离; F_{ak} 、 F_{pk} 和 F_{wk} 分别为墙前、墙后的主动土压力、被动土压力和水压力标准值。

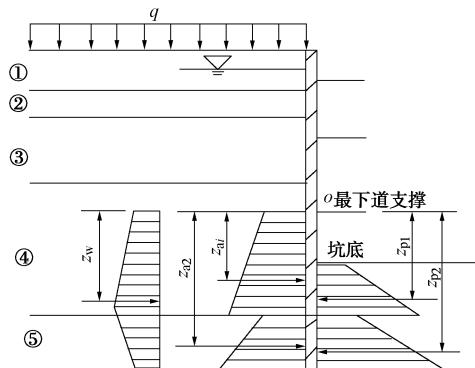


图 3 抗倾覆稳定分析简图

Fig. 3 Overturning stability of an excavation

3 工程实例可靠度计算与分析

3.1 目标可靠指标的确定

目标可靠指标 β , 即设计所预期的可靠指标, 理论上应该根据各种结构的重要性、失效后果、破坏性质、经济指标等因素以优化方法分析确定, 比如风险水平类比法、最佳经济效益法等。我国现行规范采用平均可靠指标来确定今后设计时所采用的可靠指标, 各类工程的安全度可以通过 β 进行比较。

根据不同工程求得的基坑板式支护结构稳定可靠指标 β_i , 采用加权平均的方法求平均可靠指标 $\bar{\beta}$, 本

文假定不同地质条件下的权数相等, $\bar{\beta}$ 按照下式计算:

$$\bar{\beta} = \frac{\sum \beta_i}{N} \quad (16)$$

由于 $\bar{\beta}$ 能基本反映上海地区基坑板式支护结构稳定所具有的总体可靠度水准, 本文将其作为上海地区设计基坑板式支护结构稳定的目标可靠指标, 即

$$[\beta] = \bar{\beta} \quad (17)$$

根据上述理论基础, 结合上海地区 6 个典型的板式支护结构基坑工程 (2 个灌注桩围护结构, 4 个地下连续墙围护结构; 基坑土层属于滨海平原地貌, 都包含上海地区典型淤泥质黏土), 分别对每个工程的多个剖面进行可靠指标的计算, 得到规范规定的各级基坑安全系数下整体稳定、抗隆起、抗倾覆稳定验算模式的可靠指标的均值和变异系数如表 1 所示。 β_1 是按照岩土工程勘察报告取样得到的均值和变异系数得到结果; 考虑到土性的空间变异性^[11], 采用土性随机场模型可以将求得的点均值和方差过渡到空间均值和空间方差, β_2 为按土性空间平均化后 ($\delta_c = 0.3$, $\delta_\phi = 0.15$) 得到的可靠指标。其中, 表 1 中抗倾覆分算和抗倾覆合算指的是进行抗倾覆稳定验算时土压力的计算方法是水土分算还是水土合算。

由表 1 可知: 每一种工况所对应的 β_1 均比 β_2 偏大, 这恰体现了随机场模型的优势, 得到的结果更加符合实际工程情况。 δ_{β_2} 基本维持在 0.21 左右, 比较稳定。而 δ_{β_1} 变化较大 (0.16~0.73), 故本文采用 β_2 的大小来确定各工况的目标可靠度指标。

整体稳定失效模式, 目标可靠度指标取各工程可靠指标的均值 $\beta = 1.99$; 抗倾覆稳定失效模式, 分算与合算的可靠指标差别不大, 二级基坑安全系数对应的目标可靠指标 $\beta = 1.02$, 一级基坑安全系数对应的目标可靠指标 $\beta = 1.75$; 抗隆起稳定, 三级基坑安全系数对应的目标可靠指标 $\beta = 5.13$, 二级基坑安全系数对应的目标可靠指标 $\beta = 6.08$, 一级基坑安全系数对应的目标可靠指标 $\beta = 7.78$ 。

表 1 各验算模式下可靠指标及安全系数关系

Table 1 Correlation between β and K under various checking patterns

可靠指标及 安全系数	整体 稳定		抗隆起		抗倾覆分算		抗倾覆合 算	
	安全系数 K	1.25	1.70	1.90	2.20	1.10	1.20	1.10
工程数 n	5	6	6	4	6	6	4	4
β_1 均值 μ	2.70	5.51	6.28	9.94	1.24	1.81	0.94	1.81
变异系数 δ	0.36	0.25	0.23	0.27	0.58	0.36	0.73	0.48
工程数 n	5	6	6	4	6	6	4	4
β_2 均值 μ	1.99	5.13	6.08	7.78	1.02	1.75	0.71	1.55
变异系数 δ	0.19	0.10	0.11	0.19	0.25	0.21	0.21	0.30

3.2 可靠度指标的变化规律

本文根据上海地区具有代表性的基坑土层参数(见表2), 讨论基坑可靠指标的变化趋势及变化规律。

表2 基坑土层的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soils

土层名称	厚度 /m	重度 $\gamma/(kN\cdot m^3)$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(^\circ)$
杂填土	1.7	18	0	20
粉质黏土	1.6	18.6	20	16.5
淤泥质粉质黏土	4.2	17.4	11	17
淤泥质粉质黏土	8.2	16.7	13	11.5
粉质黏土	9.3	17.8	14	13.5

(1) 整体稳定可靠指标和抗倾覆可靠指标随着 δ_c 和 δ_φ 的变化关系见图4和图5, 由图4、5可知, 在黏聚力变异系数和内摩擦角变异系数变化范围内整体稳定可靠指标 β 在1.50~2.50范围内波动, 并且随着 δ_c 和 δ_φ 的增加而降低。

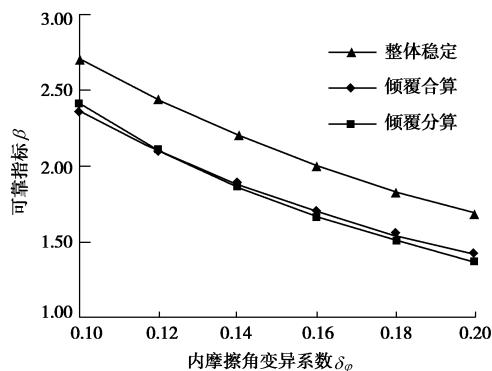


图4 β 与 δ_φ 的关系($\delta_c=0.3$)

Fig. 4 Relationship between β and δ_φ ($\delta_c=0.3$)

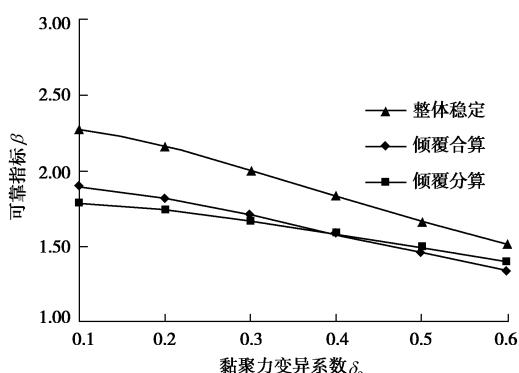


图5 β 与 δ_c 的关系($\delta_\varphi=0.16$)

Fig. 5 Relationship between β and δ_c ($\delta_\varphi=0.16$)

(2) 由于抗隆起安全系数要求较高, 并且安全系数对可靠指标的影响比较大(见图6和图7所示), 因而得到的可靠指标与整体稳定和抗倾覆稳定可靠指标不在同一水平, β 值比较大, 而且随着 δ_φ 的增加大幅度降低, 而 δ_c 的变化对其影响相对较小。说明黏聚力的变异性对抗隆起可靠指标影响较小, 影响抗隆起可靠指标的因素主要是安全系数 K 和 δ_φ 。

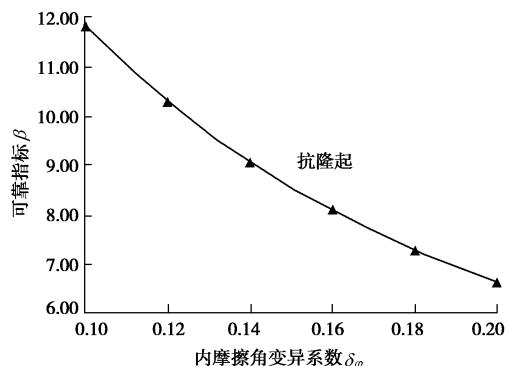


图6 β 与 δ_φ 的关系($\delta_c=0.3$)

Fig. 6 Relationship between β and δ_φ ($\delta_c=0.3$)

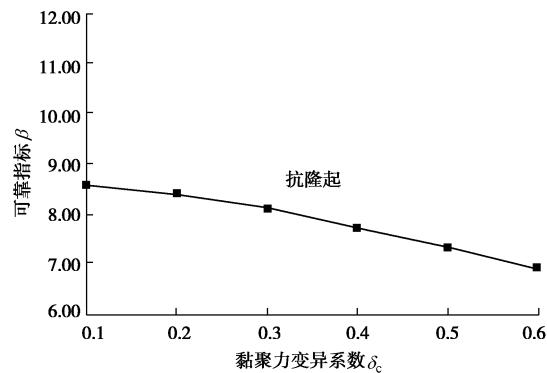


图7 β 与 δ_c 的关系($\delta_\varphi=0.16$)

Fig. 7 Relationship between β and δ_c ($\delta_\varphi=0.16$)

(3) 鉴于上海地区土层的特殊性, 大多数基坑均涉及到第④层淤泥质黏土, 该土层性质较差, 工程设计人员在抗倾覆计算时采用上海规范—2002基坑规范的水土合算模式。本文针对抗倾覆验算比较了水土分算和水土合算的区别, 供工程设计人员参考。如图8所示, 在黏聚力变异系数 δ_c 变化时, 水土分算和水土合算得到的可靠指标差别较小, 但是水土分算的插入比要比水土合算的插入比大。

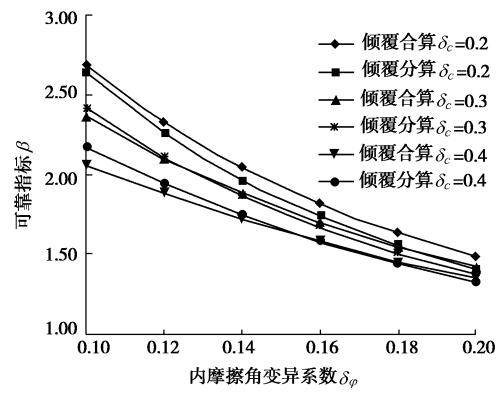


图8 β 与 δ_φ 的关系($\delta_c=0.2$)

Fig. 8 Relationship between β and δ_φ ($\delta_c=0.2$)

(4) 本文在极限状态方程 $g=M_R-M_S$ 的基础上, 讨论分析了极限状态方程 $g=M_R/M_S-1$, 分析结果表明两种极限状态方程的可靠指标一样。这是因为基坑支护结构的特殊性, 荷载项 M_s 是 γ 、 h 和几何参数的函

数, 与黏聚力 c 和内摩擦角 φ 无关, 在上述假定的基础上荷载项相当于一个常数, 因而二者计算的结果一样, 为减少计算量, 本文建议极限状态方程取 $g=M_R-M_S$ 。

4 结语

本文建立了基坑板式支护结构的三种验算模式极限状态方程; 用可靠度理论对上海地区实际基坑工程进行可靠性分析计算, 探讨了规范要求安全系数下, 各种失稳模式所对应的可靠性指标值及其变化范围和趋势, 并确定了各验算模式的目标可靠性指标; 研究结果为基坑工程的可靠性度评价和工程设计分项系数的确定提供一定的依据, 并为将可靠度理论引入基坑工程提供必备的理论基础。笔者在计算的过程中发现, 在基坑的设计过程中, 很难使得各个验算模式均达到较理想的状态, 而且抗倾覆验算模式是比较难满足的, 此时可以对坑底进行加固, 加固效果对抗倾覆稳定可靠指标的增加是比较明显的, 但是对抗隆起和整体稳定性可靠指标的增加效果则不明显。

由于基坑支护工程一般都是临时性工程, 因此设计人员可以通过可靠度理论使得工程设计在可靠性与经济性之间达到一个合理的平衡。

参考文献:

- [1] 周东, 吴恒, 王业田. 深基坑支护稳定概率分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 630–632. (ZHOU Dong, WU Heng, WANG Ye-tian. The Probability analysis of stability in bracing system in foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 630–632. (in Chinese))
- [2] LUMB P. Soil variability and engineering design[C]// Soil Mechanics Recent Developments—Proc of the General Session of the Symposium Held at the University of New South Wales. VALLIAPPAN S, HAIN S, LEE I K, eds. Australia, 1975: 383–397.
- [3] ANG A H S, CORNELL C A. Reliability bases of structural safety and design[J]. Journal of Structural Division, 1974, 100(ST9): 1755–1769.
- [4] 廖英. 基坑支护结构的稳定可靠度研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(1): 54–56. (LIAO Ying. The reliability study on stability of bracing structure for excavation[J]. Industrial Construction, 2000, 34(1): 54–56. (in Chinese))
- [5] 霍达, 王志忠. 模糊随机可靠度计算的验算点法[J]. 建筑结构学报, 1993, 14(6): 33–39. (HUO Da, WANG Zhi-zhong. A design point method for random fuzzy reliability of structures[J]. Journal of Building Structures, 1993, 14(6): 33–39. (in Chinese))
- [6] 张璐璐, 张洁, 徐耀, 等. 岩土工程可靠度理论[M]. 上海: 同济大学出版社, 2011. (ZHANG Lu-lu, ZHANG Jie, XU Yao, et al. Reliability theory of geotechnical engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2011. (in Chinese))
- [7] FREUDENHAL A M. Safety and probability of structural failure[J]. American Society of Civil Engineers Transactions, 1956, 121(Paper No 2843): 1337–1397.
- [8] ZHAO Yan-gang, ALFREDO H-S Ang. On the first-order third-moment reliability method[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2012, 8(5): 517–527.
- [9] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (ZHAO Guo-fan, JIN Wei-liang, GONG Jin-xin. Structural reliability theory[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000. (in Chinese))
- [10] 牟秋杰. 悬臂式支护结构稳定问题的可靠度分析[J]. 土工基础, 2006, 20(4): 49–52. ((MOU Qiu-jie. Reliability analysis of the stability of cantilever bracing structures[J]. Soil Engineering and Foundation, 2006, 20(4): 49–52. (in Chinese))
- [11] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103(11): 1227–1246.

(本文责编 明经平)