

水土作用对基坑支护结构可靠度分析的影响^{*}

王 洋¹, 高全臣¹, 汤连生²

(1. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 北京 100083)

(2. 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

摘 要: 对土体抗剪强度指标因水土作用产生的影响进行了研究, 指出变异后的土体抗剪强度 φ 值具有概率分布和隶属函数的不确知性, 并简要探讨了获取水土作用下土体抗剪强度指标的试验模拟和经验公式推导两种办法。以悬臂式基坑支护结构的两种控制性失稳模式为例, 分析水土作用对失稳极限状态函数的影响。针对水土作用下的抗剪强度指标概率分布和隶属函数的不确知性, 基于非概率可靠度理论, 探讨了适合水土作用状况下基于区间分析的基坑支护结构非概率可靠度模型, 这种模型能分析基坑支护结构的稳定性, 该方法计算简便易行, 并能合理地考虑基坑工程的不确定因素。

关键词: 水土作用; 基坑; 可靠度; 区间分析

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579 (2006) 02-0109-05

基坑支护结构在服役阶段, 可能会受到地下水的直接或间接作用, 从而导致基坑支护结构变形过大, 甚至出现失稳坍塌的事故。从统计资料显示, 基坑事故有 21% 是由水引起的^[1], 这类事故被认为是地下水与土体之间产生了物理、化学作用造成的。这种作用常被称之为“水土作用”, 从力学效应上表现为土体抗剪强度变化, 改变了基坑变形和稳定的极限状态, 进而导致支护结构变形过大或失稳。

目前, 基于可靠度的基坑支护结构设计, 较少考虑地下水对基坑支护结构可靠度的影响, 主要是因为基坑工程属于临时性结构, 在设计中如果过分考虑水土作用, 容易导致设计过于保守, 造成基坑工程投资过大。但是, 需要指出的是, 如果在水土作用可能对土体抗剪强度和极限状态产生较大影响的时候, 仍然采用概率可靠度的分析方法, 会造成设计过于冒险。对于安全等级较高的基坑支护结构, 进行可靠度分析时考虑水土作用的影响非常必要。

可靠度分析的关键在于基本参量和极限状态函数的确定, 本文重点就水土作用对这两个方面造成的影响进行分析, 并对如何解决相应的问题进行了探讨。

1 应考虑水土作用的前提条件

1.1 存在外部诱因

暴雨或长时间的降雨、地下水管的渗漏等是造

成水土作用的重要条件, 这也是为何基坑事故多发生在降雨之后的原因。

1.2 水土作用下土体物性具有可 variability

水土作用下土体物性的可 variability 主要取决于土的透水性和水物理化学反应特性两个方面。

其一, 不同种类的土体渗透系数相差悬殊, 从粗砂到粘土, 其渗透性相差 10 倍, 而从轻亚粘土到粘土渗透性相差 100 倍以上, 具有一定透水性的土体才有可能发生水土作用^[2]。

其二, 各类土体的水物理化学反应特性也是不一致的, 如华南红土具有较强的水物理化学反应特性, 土体遇水情况下物理力学性质会发生较大的变化。

1.3 考虑基坑安全等级

一旦发生事故可能造成严重后果的基坑工程, 其安全等级较高, 因此有必要对水土作用下的基坑支护结构可靠度进行分析。如根据《广州地区建筑基坑支护技术规定》(GB02-98), 下列基坑安全等级为一级: 开挖深度大于或等于 14m 且在三倍开挖范围内有重要建(构)筑物、重要管线和道路等市政设施, 或在一倍开挖深度范围内有非嵌岩桩基础埋深小于坑深的建(构)筑物; 基坑位于地铁、隧道等大型地下设施安全保护区范围内。

1.4 考虑基坑支护结构的形式

不同类型的基坑支护结构对水土作用的敏感程

* 收稿日期: 2005-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50279056); 广东省自然科学基金资助项目 (031601) 和广东省科技计划重点基金资助项目 (2003C33301 2004B320801002)。

作者简介: 王洋 (1977 年生) 男, 博士研究生, 高级工程师; E-mail: gzwangyang@126.com

度不同,如土钉、锚杆(索)支护结构的稳定性一般被认为容易受到水土作用的影响。对于这类基坑支护形式,应考虑水土作用对可靠度的影响。

2 水土作用对土体抗剪强度的影响

在水土作用状况下,土体的物理力学性质会发生变化,尤以抗剪强度指标变化最为明显,这方面已做了大量的研究^[3]。Rutledge(1947)指出:影响非饱和土强度的参数主要有以下四个:①小主应力;②干密度;③含水量;④饱和度。Seed(1960)发现非饱和土的强度很大程度上取决于土体结构、含水量和密度。Da Cruz(1963)根据试验得到孔隙比 e 与饱和度平方根 $\sqrt{S}$ 的乘积与剪切强度呈直线相关关系,参量 $e\sqrt{S}$ 可以用来描述土体结构和强度。

Pandian(1992)用大量的试验结果验证了 $(e\sqrt{S})\sqrt{S}$ 是可以用来描述土体状态的通用状态参量,并得到了 $(e\sqrt{S})\sqrt{S}$ 与无侧限抗剪强度 q 的关系^[4]

$$(e\sqrt{S})\sqrt{S} = a - b \lg q \quad (1)$$

S 为饱和度, e 为实际状态的孔隙比, e_L 为液限状态的孔隙比, q 为无侧限抗剪强度, a 、 b 为经验常量(根据各地的试验结果,可以近似认为 $a=1.0$ 、 $b=0.20$)。

从公式(1)可以看出,土体随着水土作用的加强,表现为饱和度(或含水量)的增加,结果是导致抗剪强度降低。

在传统的可靠度分析中,是用概率论和模糊理论处理不确定性,概率可靠度和模糊可靠度模型都需要较多的数据,用以定义基本参量的概率分布或隶属函数。但是,水土作用后土体抗剪强度指标 c 和 φ 都发生了变化,其概率分布或隶属函数必须通过试验手段重新进行分析。特别是近年来的有关研究^[5]表明,概率可靠度对概率模型参数很敏感,尤其是 φ 值。概率数据的小误差可导致结构可靠度计算出现较大误差。目前国内外还没有学者就水土作用后的土体抗剪强度指标的概率分布或隶属函数进行研究。那么,在没有足够的信息描述概率模型时,在主观的假设下,概率可靠性计算的结果是不可靠的。

目前,水土作用后土体抗剪强度指标是不能确切知道的,但在工程实践中,要获得水土作用后 c 和 φ 值有限的试验数据是具有实际意义的。要获得这方面的数据,主要有以下两种途径。

一是试验方法,即通过实验室的模拟试验来获

取不同含水量状态下的土体 c 和 φ ,并与天然状态下的 c 和 φ 进行对比,对水土作用的程度进行定性分析,并进行近似定量的计算。但是,这种方法只能获得有限的数据库。

二是经验公式推导的办法。将公式(1)和体积含水率公式 $\theta_w = S\varphi(1 + \varphi)$ 联立,可以近似求得在不同含水量情况下的土体抗剪强度。

根据以上的论述,可以得知:在水土作用的情况下,土体抗剪强度指标 c 和 φ 具有不确定性,不易得到可靠度分析中不确定参量的精确概率数据。但是,通过有限的试验或近似的经验公式推导可以获得水土作用情况下 c 和 φ 值不确定性的幅度或界限。

3 水土作用对基坑失稳模式的影响

基坑支护结构的破坏模式是多元的,既有基坑的各类稳定性破坏,又有支护结构强度或刚度不足导致的破坏。对于基坑悬臂式支护结构,在不考虑自身结构强度验算的前提下,可能的失稳模式主要有整体失稳、倾覆、水平滑移、地基承载力丧失、隆起和坑内管涌等,其中倾覆破坏模式和整体失稳模式是控制性失稳模式^[6]。本文以悬臂式支护结构这两种控制性失稳模式为例分析水土作用下的失稳模式的极限状态函数。

考虑土体分层进行计算时,第 n 层土层底面对支护结构的主动土压力为^[7]:

$$e_{an} = \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i (h_i - h_{i-1}) + q \right) \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi_n}{2} \right) - 2 c_n \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2} \right) \quad (2)$$

被动土压力为:

$$e_{pn} = \left(\sum_{j=m+1}^n \gamma_j (h_j - h_{j-1}) \right) \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi_n}{2} \right) + 2 c_n \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi_n}{2} \right) \quad (3)$$

式中, q 为地面附加荷载传递到第 n 层土底面的垂直荷载; m 为基坑坑底至地面的土层层数。

当进一步考虑地下水产生的水压力时,需在式(2)和(3)的右边加上水压力:

$$P_w = \sum_{i=1}^n \gamma_w (h_i - h) \quad (4)$$

式中, P_w 为水压力, γ 为地下水重度, h 为地下水水位标高,而土体重度取浮重度。

悬臂式支护结构的主要破坏(或失稳)模式是支护结构绕脚端的转动。因此,悬臂式支护结构抗倾覆破坏模式的极限状态函数:

$$g(R, S) = M_R - M_S = 0 \tag{5}$$

式中, R, S 分别表示强度和应力参量, 主动土压力绕端部所产生的弯矩:

$$M_S = \frac{1}{6} H^3 / 3 \tag{6}$$

被动土压力绕端部所产生的弯矩:

$$M_R = \frac{1}{6} \gamma D^3 / 3 \tag{7}$$

式中, H 为悬臂桩的桩长; D 为悬臂桩嵌入基坑底面以下的长度。

采用简化 Bishop条分法进行稳定可靠性分析, 抗整体失稳破坏模式的极限状态函数为:

$$g(R, S) = \sum (q_i b_i + w_i) \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i b_i \sec \alpha_i - \sum (q_i b_i + w_i) \sin \alpha_i \tag{8}$$

式中, c, φ_i 为第 i 土条所在土层的抗剪强度指标; b_i, α_i 为土条划分的几何参数, b_i 是第 i 土条的宽度, α_i 是第 i 土条圆弧中点法线与铅直线的夹角; w_i, q_i 为第 i 土条自重及其上超载。

从 (2)、(3) 和 (8) 式可以看出, c 和 φ 的变化对破坏模式的极限状态函数均产生较大的影响, 荷载项和抗力项两方均因水土作用发生了较大变化。如果水土作用程度进一步加强, 也就是除了水土作用带来土体含水量的变化之外, 还有可能导致地下水位的变化。那么, 地下水位的这种变化还要反映在对基坑支护结构上水压力的变化, 对上述两式来讲, 荷载项还要增加由于水位变化引起的水压力增量。

从上述分析可知, 在水土作用下失稳模式的极限状态函数中基本参量 c 和 φ 发生了变化, 而且在水位变化的情况下荷载项还要增加相应的水压力增量。对于水土作用下的失稳模式, 直接采用正常状态下的极限状态函数进行可靠度计算, 显然是不合理的。

4 基于区间分析的可靠度模型

由于土体抗剪强度指标 c 和 φ 的不确知性, 水土作用情况下进行可靠度分析时不能得到不确定参量 c 和 φ 的精确概率数据, 可以得到 c 和 φ 值不确定性的幅度或界限。对于这种条件, 可以选择基于区间分析的非概率模型进行可靠度分析。这种非概率可靠度模型将结构性能的变化范围与要求的变化范围相比较, 以确定结构的安全程度, 认为若系统能容许不确定参量在一定范围内的波动, 则系统是可靠的。它只要求知道不确定参量的界限, 而不要求其具体的分布形式。因而, 可大大降低对原始数据的要求。且不涉及概率的概念, 可克服概率可靠性所存在的缺陷^[8-12]。这种方法用于结构的可靠

性设计, 不但计算方便, 且可明确给出设计参数和不确定参量的许可变异界限, 易于实施质量控制^[13]。

4.1 非概率可靠度的度量

非概率可靠度模型中, 设向量 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示与结构有关的基本区间变量的集合。其中, $x_i \in X_i^I (i = 1, 2, \dots, n)$ 。同概率可靠性问题一样, 取

$$M = g(x) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{9}$$

为由结构的失效准则确定的功能函数。当 $g(\cdot)$ 为 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的连续函数时, M 也为一个区间变量。设其均值和离差分别为 $\bar{M}$ 和 M^r , 并令

$$\eta = \bar{M} / M^r \tag{10}$$

按照一般的结构可靠性理论, 超曲面 $g(x) = 0$ 称为失效面, 它将结构的基本参量空间分为失效域和安全域两部分。 $g(x) > 0$ 和 $g(x) < 0$ 分别表示结构处于安全和失效状态。根据 (10) 式, 只要 $\eta > 1$, 则对 $\forall x \in X^I (i = 1, 2, \dots, n)$ 均有 $g(x) > 0$ 此时结构安全可靠。而且, 无量纲量 η 的值越大, 结构的安全程度越高。因而, 可用 η 作为结构安全可靠程度的度量。以下对不同形式的功能函数分别说明。

4.2 只含两个区间变量的功能方程

取功能方程

$$M = r - s = 0 \tag{11}$$

其中, $r \in R^I, s \in S^I$ 分别表示强度和应力区间变量。

对 r 和 s 作如下标准化变换, $\hat{r}, \hat{s}$ 为标准化区间变量:

$$r = R^c + R^r \hat{r}, s = S^c + S^r \hat{s}$$

代入功能方程 (11) 可得

$$M = R^r \hat{r} - S^r \hat{s} + (R^c - S^c) = 0 \tag{12}$$

显然, 有

$$\bar{M} = R^c - S^c, M^r = R^r + S^r$$

从而, 其非概率可靠性指标 η 可定义为: 当 $R^c > S^c$ 时, $\eta = \frac{R^c - S^c}{R^r + S^r}$; 否则, $\eta = 0$ 。对线性功能函数, η 为标准化区间变量的扩展空间中, 按无穷范数 $\|\cdot\|_\infty$ 度量的从坐标原点到失效面的最短距离。

4.3 功能函数为多区间变量的线性函数

考虑功能方程

$$M = \sum_{i=1}^m a_i r_i - \sum_{j=m+1}^m b_j s_j = 0 \tag{13}$$

其中, $r_i \in R_i^I, s_j \in S_j^I$ 为不相关区间变量, a_i, b_j 为常数。 r 和 s 作如下变换

$$\begin{aligned} r_i &= R_i^c + R_i^f \delta_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ S_j &= S_j^c + S_j^f \delta_j \quad (j = m+1, \dots, n) \end{aligned}$$

则功能方程 (13) 可标准化为

$$\begin{aligned} M &= \sum_{i=1}^m a_i R_i^c \delta_i - \sum_{j=m+1}^n b_j S_j^c \delta_j + \\ &\quad \left(\sum_{i=1}^m a_i R_i^f - \sum_{j=m+1}^n b_j S_j^f \right) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

显然, 功能函数在标准化区间变量 δ_i, δ_j ($i = 1, \dots, m, j = m+1, \dots, n$) 组成的新空间保持线性特性。

根据上述推导, 其可靠性指标可定义为: 当

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m a_i R_i^c \delta_i - \sum_{j=m+1}^n b_j S_j^c > 0 \text{ 时,} \\ \eta = \frac{\sum_{i=1}^m a_i R_i^c \delta_i - \sum_{j=m+1}^n b_j S_j^c}{\sum_{i=1}^m |a_i| R_i^f - \sum_{j=m+1}^n |b_j| S_j^f}; \text{ 否则, } \eta = 0 \end{aligned}$$

这种非概率可靠度的度量及分析方法, 只需要知道不确定参量的界限, 不要求其具体的分布形式, 适合水土作用下对基坑支护结构可靠度的分析, 有效解决了水土作用下 φ 值由于其不确定性导致难以用常规可靠度方法进行分析的问题。

5 结 论

(1) 水土作用下土体 φ 值具有不确定性, 难以定义其概率分布或隶属函数。水土作用情况下利用概率和模糊理论对基坑支护结构进行可靠度分析缺乏理论依据。

(2) 水土作用状况下, 基坑支护结构失稳模式的极限状态函数与正常状况下是不一致的, 要根据水土作用的程度来进行具体分析和调整。

(3) 对于水土作用下土体 φ 值的获取可以采用室内试验和经验公式推导两种方式, 但以此获得的 φ 值只是经验和近似值, 无法对其概率分布和隶属函数进行定义。

(4) 由于通过有限的试验或近似的经验公式推导可以获得水土作用下 φ 值不确定性的幅度或界限, 在计算可靠度时应用基于区间分析的非概率可靠度模型是一种比较理想的选择。

(5) 地下水渗流的出现对基坑支护结构的失稳模式会产生更为复杂的多元影响, 这种情况下计算可靠度时还必须考虑应力场和渗流场的耦合作用对基坑支护结构可靠度的影响^[3, 14]。本文不考虑地下水渗流的影响, 渗流耦合另文进行探讨。

(6) 由于土体介质的复杂性及水土作用等不

确定性因素的影响, 采用确定性和概率可靠度分析方法很难保证较好地反映实际情况。本文基于非概率可靠度理论, 分析了深基坑系统的稳定性, 该方法计算简便易行, 并能合理地考虑基坑工程的不确定因素。

参考文献:

- [1] 王国光, 严平, 龚晓南, 等. 采取止水措施的基坑渗流场研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(4): 36—39.
- [2] 王洋, 汤连生, 杜赢中. 地下水渗流对基坑支护结构上水土压力的影响分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(2): 108—110.
- [3] 徐永福, 刘松玉. 非饱和土强度理论及其工程应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999.
- [4] PANDIAN N, NAGARAJ T. Generalized state parameter for strength behaviour of partially saturated soils[J]. Indian Geotechnical, 1992, 2(2): 196—207.
- [5] ELLISHAKOFF J. Essay on uncertainties in elastic and viscoelastic structures from A M Freudenthal's criticism to modern convex modeling[J]. Computers & Structures, 1995, 56(6): 871—895.
- [6] 廖瑛. 多元失稳模式下深基坑支护结构的稳定可靠度分析[J]. 苏州科技学院学报(自然科学版), 2003, 16(3): 56—60.
- [7] 许梦国, 姜永忠. 深基坑支护系统稳定性可靠度分析[J]. 工业安全与环保, 2004, 30(8): 14—15.
- [8] BEN-HAM Y. Convex models of uncertainty in radial pulse buckling of shells[J]. Journal of Applied Mechanics, 1993, 60(3): 683.
- [9] ELLISHAKOFF J, ELISSEFF P. Non-probabilistic convex theoretic modeling of scatter in material properties[J]. AIAA Journal, 1994, 32: 843—849.
- [10] BEN-HAM Y. A non-probabilistic concept of reliability[J]. Structural Safety, 1994, 14(4): 227—245.
- [11] ELLISHAKOFF J. Discussion on a non-probabilistic concept of reliability[J]. Structural Safety, 1995, 17(3): 195—199.
- [12] BEN-HAM Y. A non-probabilistic measure of reliability of linear systems based on expansion of convex models[J]. Structural Safety, 1995, 17(2): 91—109.
- [13] 郭书祥, 吕震宙, 冯元生. 基于区间分析的结构非概率可靠性模型[J]. 计算力学学报, 2001, 18(1): 56—60.
- [14] 汤连生, 黄国怡, 杜赢中, 等. 考虑地下水渗流的基坑水土压力计算新图式[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 565—568.

Effect of Water-soil Interaction on Reliability Analysis of Braced Structures of Excavation

WANG Yang, GAO Quan-chen, TANG Lan-sheng

- (1. School of Mechanics & Civil Engineering, CUMT, Beijing 100083, China;
2. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The shortage of the probability of reliability analysis to braced structures of excavation without considering water-soil interaction is pointed out, and the preconditions to considering water-soil interaction are given in this paper. After researching the influence of water-soil interaction on intensity of soil, it is suggested that the distribution parameters and fuzzy number of values of changed c and ϕ cannot be recognized. Two methods based on experimental process simulation and empirical formula deduction used to obtain the values of changed c and ϕ are briefly discussed. By taking cantilever braced structures as an example, the influence of water-soil interaction on two dominating failure margin functions is analyzed. A nonprobabilistic model based on interval analysis is proposed in order to solve the uncertainty of distribution parameters and fuzzy number of values of excavation braced structures.

Key words: water-soil interaction; excavation; reliability; interval analysis

(上接第 104 页)

The Uncertainty Analysis for Exploration and Extraction of Nonrenewable Resources

YANG Hai-sheng, ZHOU Yong-zhang, ZHOU Wen-jian

(Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A stochastic dynamic planning model with jump processes is presented for nonrenewable resources under two kinds of uncertainties. One source of uncertainty is in the reserve level and the other is in the economic environment which affects resource supply and demand respectively. Moreover, although the reserve uncertainty will accelerate the rate at which price increases, exploratory activity will have a reverse effect. Therefore, the producers have to balance the loss caused by demand fluctuations against the proceeds from reserve fluctuations.

Key words: stochastic dynamic planning; nonrenewable resource; uncertainty; jump