

深基坑土钉支护的模糊可靠度分析

赵平 惠波

(西安建筑科技大学, 陕西西安 710055)

【摘要】 介绍了土钉支护体各种破坏模式下失效隶属函数的建立方法, 并用模糊可靠度理论对实际基坑边坡工程的土钉支护体进行了可靠度分析, 计算过程中部分数据采用了计算机仿真的方法, 分析结果与实际相符, 表明模糊可靠度理论对基坑土钉支护体进行分析具有一定现实意义。

【关键词】 土钉支护; 模糊可靠度; 失效隶属函数

【中图分类号】 TU 942

Fuzzy Reliability Analysis to Soil Slope Engineering

Zhao Ping Hui Bo

(Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055 China)

【Abstract】 The way to build membership function detailedly of soil nailing supporting invalidated model is introduced, and a fuzzy reliability analysis to soil slope engineering which protected by soil nailing. The outcome shows that apply fuzzy reliability theory to soil nailing is credible, and the analysis is help for the research about fuzzy reliability.

【Key Words】 soil nailing supporting; fuzzy reliability; membership function of failure

0 引言

土钉支护是 20 世纪 90 年代中期在我国发展起来的一项基坑边坡支护新技术, 因其施工速度快、工程造价低, 近年来在工程中应用较多, 但是目前在理论上对土钉支护的机理研究一直滞后于实践, 而在实际设计中, 工程界普遍遵循的是《土钉支护基坑工程设计施工规范》(CECS96:97)。这一规范提供的设计方法是以传统的安全系数为基础, 对于各种形式的破坏状态均以临界面为控制点, 即当结构受到的外界作用力超过了临界值后即认为土钉这一复合支护体破坏了。而实际工程中, 破坏这一事件本身是一个复杂渐变的过程, 尤其是在岩土工程中, 由于岩土材料本身的变异性较大, 各种形式的破坏一般都是先出现一定的征兆, 先在局部发生一些变形或破坏, 然后整体逐渐破坏^[1]。

因此, 实际土钉支护体的破坏过程用模糊理论的观点去考查更为合适。所谓模糊理论的观点就是把破坏过程作为一个连续的过程去考察, 不同的破坏过程阶段达到了一个不同的破坏程度, 这一破坏程度在数学上用结构破坏或称为结构失效的隶属函数表示。本文的主旨就是用模糊理论的观点, 对土钉支护体的可靠度进行分析, 以推动模糊理论在该领域的应用。

1 结构的模糊可靠度

1.1 传统的可靠度及算法

系统的可靠度现行定义为一个系统在规定的使用期间, 在预定的工作条件下保持正常工作的概率, 一般可记为: $P_r = P(\Omega)$, Ω 代表结构作用期间在预定条件下正常工作这一随机事件。与 P_r 相对应的是结构的失效状态, 其概率 $P_f = 1 - P_r$, 可用结构的极限状态来描述。在传统可靠性分析中, 结构的极限状态是由其功能函数来表示的, 对于某一种破坏模型而言, 其功能函数可写为:

$$Z = R - S \quad (1)$$

式中: R 为结构抗力, 即结构抵抗失效的能力, 如极限内力、极限变形、抗倾覆力矩等; S 为荷载效应, 即荷载引起的最大反应, 如最大内力、最大变形、倾覆力矩等。

结构的失效与否用下式来判断:

$$Z = \begin{cases} R - S < 0 & \text{失效状态} \\ R - S = 0 & \text{临界状态} \\ R - S > 0 & \text{正常工作状态} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 结构的模糊可靠度

如引言所述, 结构在极限状态下趋于破坏是一个渐近的过程, 因此“结构安全”这一事件被认为是

一模糊事件,这一事件发生的概率还可与前面类似的方法表示: $\tilde{P}_r = P(\Omega)$,不过所不同的是 Ω 表示“结构安全”这一模糊事件。

根据模糊效应的理论,结构失效发生的概率为^[2]:

$$\tilde{P}_f = \int_{-\infty}^{\infty} f(Z) \mu_A(Z) dZ \quad (3)$$

式中: $f(Z)$ 为结构功能函数的概率密度; Z 为结构的功能函数; $\mu_A(Z)$ 为“结构失效”这一事件的隶属函数,为表示方便,在后面的叙述中 Z 用 Z 表示,均表示具有模糊性。与之对应的结构模糊可靠度为^[2]:

$$\tilde{P}_r = 1 - \tilde{P}_f = \Phi(\beta) \quad (4)$$

β 是衡量系统可靠度的一个重要指标。

可见,模糊可靠度求解的关键就是要求得出结构功能函数概率密度和建立一个与工程实际相符合的隶属函数。一般的,结构的功能函数 $Z = \bar{R} - S$, \bar{R} 和 S 都可近似的看作为服从正态分布,因而 Z 也服从正态分布,由此 $f(Z)$ 得以建立;失效隶属函数的形式通常可用模糊统计试验的方法确定,或从工程实际出发,凭借经验选取某一理论隶属函数,函数值 μ_A 近似于0时表示结构安全,失效可能性小, μ_A 近于1时,失效可能性大,当 $\mu_A = 0.5$ 时结构处于最模糊状态,一般与传统的临界状态相对应。工程中常用的隶属函数有半梯形分布、半正态分布、岭形分布等。对于半梯形分布失效隶属函数可建立如下^[3-4]:

$$\mu_A(Z) = \begin{cases} 1 & Z < -dr \\ \frac{ds - Z}{dr + ds} & -dr < Z < ds \\ 0 & Z > ds \end{cases} \quad (5)$$

式中: dr 为结构抗力的容差最大值; ds 为结构效应的容差最大值; $dr + ds$ 为破坏容差,是结构从安全到破坏的过渡区域,即模糊区。对于 R 、 S 可看为近似服从正态分布, dr 、 ds 可取破坏功能函数均方差的整数倍。在下面的可靠度分析中将按如下方程建立失效隶属函数^[5]:

$$\mu_A(Z) = \begin{cases} 1 & Z < -a\sigma(Z) \\ \frac{b\sigma(Z) - Z}{(a+b)\sigma(Z)} & -a\sigma(Z) < Z < b\sigma(Z) \\ 0 & Z > b\sigma(Z) \end{cases} \quad (6)$$

2 工程简介

某土钉支护工程位于西安市高新区甘家寨南侧,总体规划为四栋30层高层建筑及相关附属设施,主楼基坑设计开挖深度为9.0 m,具体地质情况见表1。设计根据该处岩土资料对基坑做了如下支护设计:支护方案采取土钉支护,土钉竖向间距1.8 m,横向间距1.5 m,梅花形布置,自上而下长度为9 000、9 000、9 000、7 500、7 500 mm,首层标高-1.000 m。土钉钢筋采用 $\phi 20$ 螺纹钢,直径120 mm,倾角 15° ,面层采用双向 $\phi 8$ 网筋,喷射混凝土,强度C20,设计边坡最大荷载20 kPa。

表1 基坑土质情况

地层编号	土质	地质年代	深度范围/m	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$		粘聚力 c / kPa		内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$		湿陷系数 $\Delta_s^{2.0}$	地基承载力 /kPa
				均值	方差	均值	变异系数	均值	变异系数		
③	黄土	$Q_3^{2\text{col}}$	-0.5~-8.4	16.1	0.745	56.7	0.201	21.2	0.178	0.016	160
④	古土壤	Q_3^{sl}	-8.4~-12.7	18.0	0.708	84.2	0.286	24.5	0.148	0.005	190
⑤	粉质粘土	Q_3^{sl}	-12.7~-20.9	18.1	0.886	73.7	0.363	23.3	0.197		200

3 土钉各破坏模式下模糊可靠度计算方法

3.1 土钉破坏模式的确立

土钉的破坏模式各文献有所不同,《土钉支护设计与施工手册》^[6]中对土钉支护岩土边坡的破坏模式认为有以下几种:①内部破坏,包括土钉抗拉断破坏、注浆锚钉包裹体锚固破坏;②体外破坏,包括支护体整体滑动破坏、支护体倾覆破坏、基底隆起破坏、在粉土层内做坑槽护壁挡土截水时,基底的管涌破坏。除基底管涌破坏外,其他几种破坏类型在诸多文献中均有提及。但随着近年来理论研究的深入,有关文献提出了新的观点,认为对于复合土钉支护的基坑边坡破坏其主要形式为体外破坏。而在实

际破坏工程发生较多且常见的是支护体体外基底隆起破坏,而其它体外形式的破坏较为少见,目前尚未见到体内破坏的相关报道。鉴于此,本文将主要对复合土钉支护体的体外破坏进行模糊可靠度分析。

3.2 各破坏形态下的模糊可靠度计算

以下将对土钉的三种体外破坏模式进行模糊可靠度分析。大量土工实验表明,岩土工程中,材料的各项参数比较符合对数正态分布。结合实际情况,在下面的文章中取 γ 服从正态分布,具有随机性; c 、 φ 服从对数正态分布,具有随机模糊性^[5]。同时考虑涉及到大量的数值计算,文中简化了功能函数,将不影响 \bar{R}/S 比值的项进行约简。由于模糊可靠

度的计算结果仅与 Z 值的均值、方差有关,这一约简并不影响最终计算结果,而此时 \bar{R} 、 \bar{S} 都可视为无量纲量。

3.2.1 整体平移稳定性可靠度计算

该状态下功能函数建立如下^[7]:

$$Z = \bar{R} - \bar{S} = b [(\gamma H + q) \tan \varphi + \tilde{c}] - [(\frac{\gamma H^2}{2} + qH) K_a - \tilde{c}H \sqrt{K_a}]$$

式中: b 可取 $\frac{11}{12} L \cos \theta$; L 为土钉的平均长度; θ 为土钉倾角,取 15° 。

$$K_a = \tan^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$$

式中: H ——基坑的开挖深度, m ;

γ ——土的重度, kN/m^3 ;

φ ——土的内摩擦角, $(^\circ)$;

\tilde{c} ——土的粘聚力, kPa ;

q ——外部超荷载,取 $20 kPa$ 。

采用计算机仿真模拟^[8](模拟次数不少于 10 万次),代入本工程相关数据,得到以下结果:

结构抗力 R 的期望 $\mu_R = 901.59$; 效应 S 的期望 $\mu_S = 44.15$; 破坏功能函数 Z 的期望 $\mu = 857.43$; Z 方差 $\sigma_z^2 = 210.86^2$; 近似的 Z 服从分布 $N(857.43, 210.86^2)$

失效隶属函数建立如下:

$$\mu_A(Z) = \begin{cases} 1 & Z < -3 \times 210.86 \\ \frac{3 \times 210.86 - Z}{6 \times 210.86} & -3 \times 210.86 < Z < 3 \times 210.86 \\ 0 & Z > 3 \times 210.86 \end{cases}$$

对于以上隶属函数分析如下:

对于正态分布有 $P\{|Z - \mu_z| \leq 3\sigma_z\} \approx 99.7\%$, 即 Z 值会以 99.7% 的概率在 $3\sigma_z$ 之内浮动,因此,在该范围内建立失效隶属函数是可信的。由此取 $d_s = d_r = 3\sigma_z$ 。对于 $Z < -3\sigma_z = -3 \times 210.86$ 时,认为支护体基本完全失效; $Z > 3\sigma_z = 3 \times 210.86$, 支护体几乎不会失效,而当 $Z = 0$ 时支护体处于最模糊状态。

依据以上可得到该破坏状态下的模糊失效概率:

$$\bar{P}_f = \int_{-\infty}^{-632.58} \frac{1}{210.86 \sqrt{2\pi}} \exp$$

$$[-\frac{1}{2}(\frac{Z - 857.43}{210.86})^2] dZ + \int_{-632.58}^{632.68} \frac{632.58 - Z}{2 \times 632.58} \times \frac{1}{210.86 \sqrt{2\pi}} \exp[-\frac{1}{2}(\frac{Z - 857.43}{210.86})^2] dZ = 0.0122$$

模糊可靠度 $\bar{P}_r = 1 - \bar{P}_f = 1 - 0.0122 = 0.9878$

可靠度指标 $\beta = \Phi^{-1}(P_r) = \Phi^{-1}(0.9878) = 2.25$

3.2.2 抗倾覆稳定性可靠度计算

结构功能函数建立如下:

$$Z = \bar{R} - \bar{S} = \frac{b^2}{2} (\gamma H + q) -$$

$$\frac{1}{2} [(\frac{\gamma H^3}{2} + qH^2) K_a - \tilde{c}H^2 \sqrt{K_a}]$$

其中, $K_a = \tan^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$

计算机仿真结果得到以下数据:

结构抗力 R 的期望 $\mu_R = 5273.18$; 效应 S 的期望 $\mu_S = 194.21$; 功能函数 Z 的期望 $\mu_Z = 5078.97$; 方差 $\sigma_z^2 = 383.80^2$; 近似的 Z 服从分布 $N(5078.79, 383.80^2)$ 。

同 3.2.1 建立失效隶属函数并计算该破坏状态下的模糊失效概率得:

模糊可靠度 $\bar{P}_r = 1 - \bar{P}_f = 1 - 1.215 \times 10^{-24}$

可靠度指标 $\beta = \Phi^{-1}(P_r) = \Phi^{-1}(1 - 1.215 \times 10^{-24}) > 3.90$

3.2.3 抗基底隆起可靠度计算

功能函数建立如下:

$$Z = \bar{R} - \bar{S} = \pi \tau - \frac{q + \gamma H}{2}$$

式中: τ 为地基土不排水抗剪强度,不利情况下可考虑取 $\tau = c$ 。

计算机仿真结果得到以下数据:

结构抗力 R 的期望 $\mu_R = 178.28$; 效应 S 的期望 $\mu_S = 82.44$; 破坏功能函数 Z 的期望 $\mu_Z = 95.83$, 方差 $\sigma_z^2 = 36.1^2$; 近似的 Z 服从分布 $N(95.83, 36.1^2)$ 。

建立失效隶属函数并计算该破坏状态下的模糊失效概率得:

模糊可靠度 $\bar{P}_r = 1 - \bar{P}_f = 1 - 0.0992 = 0.9008$

可靠度指标 $\beta = \Phi^{-1}(P_r) = \Phi^{-1}(0.9008) = 1.29$

4 结论

1) 模糊可靠度分析表明,该支护体在抗整体滑动和倾覆破坏形态上均具有很高的可靠性,而抗基底隆起破坏可靠性低一些,但仍可满足工程需要。整体来讲,该支护方案为基坑边坡提供了较高的安全保证。事实上,该工程在土钉支护施工完毕后,曾经历了两次较大过程降雨(2005年10月至11月

间),而距基坑边约 1.5 m 的一处位置上,堆有塔吊、模板等重物(限于场地不足的临时堆放),长度约 12 m,经粗略计算,荷载最大处约 12 kPa,但基坑整体未出现任何不良情况。可见,该支护体的模糊可靠度分析结果是与实际相符合的。

2)该模糊可靠度分析中,计算结果表明,三种破坏模式下,抗基底隆起的破坏形态可靠度最低,而在实际工程破坏中,因地基承载力不足引起的破坏也最为常见。2005 年,西安地区就曾出现过几次该类型的破坏,造成了较大的人员伤亡,因此该类型的破坏应予以高度重视。

5 展望

模糊可靠度的研究目前尚处于初步阶段,是一个有待完善的理论,而应用于实际工程设计尚需时日。2005 年,由科学出版社出版,刘玉彬、王光远合著的《工程结构广义可靠性理论》是该领域较为系统的一本专著,对这一领域的发展具有重要影响。目前,越来越多的科研、工程技术人员投入了对这一领域的研究,相信该方法应用于工程实际的时日已不

远了。

参 考 文 献

- [1] 周前祥. 边坡二维渐进破坏的随机可靠性[J]. 中国矿业大学学报, 1996, 25(2): 105-109.
- [2] 刘玉彬, 王光远. 工程结构广义可靠性理论[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 66-95.
- [3] 涂文戈, 林丽川. 结构的模糊可靠度分析[J]. 中南工业大学学报, 2000, 31(4): 371-374.
- [4] 柴贺军, 黄润秋. 粘性土边坡破坏的随机模糊可靠度分析模型[J]. 水文地质工程地质, 1998(3): 35-37.
- [5] 李胡生. 岩土参数随机-模糊统计中的隶属函数形式[J]. 同济大学学报, 1993, 21(3): 316-369.
- [6] 曾宪明, 黄久松. 土钉支护设计与施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 130-155.
- [7] 刘健, 王广月. 岩质滑动边坡模糊可靠度置信区间的计算[J]. 山东大学学报(工学版), 2005, 35(1): 106-109.
- [8] 崔自治. 基坑工程施工过程的仿真模拟分析. 工程力学, 1999(增刊 1): 865-869.

收稿日期: 2006-09-04

《岩土工程技术》杂志社论文著作权转让书

《岩土工程技术》杂志社:

全体作者同意将本文(题目:)著作权中的汇编权、发行权、印刷版和电子版的复制权、翻译权、信息网络传播权在全世界范围内转让给《岩土工程技术》杂志社。未经《岩土工程技术》杂志社书面许可,我(们)不会授权他人以任何形式汇编、转载、出版本文的任何部分。

我(们)保证本论文为原创作品、无一稿两投,并且不涉及保密及其他与著作权有关的侵权问题。若发生一稿两投、侵权、泄密等问题,一切责任由我(们)负责。

本转让书自本文全体作者签字之日起生效。若从《岩土工程技术》杂志社(编辑部)收到本转让书起 90 日之内我(们)没有收到本文的修改意见或录用通知,则本转让书自动失效。

作者按排名顺序签名:

年 月 日于 (地点)

说明:1)此授权书填写后,请务必寄到《岩土工程技术》杂志社。接到此授权书后,《岩土工程技术》杂志社才考虑对稿件进行评审。

2)该授权书应该是在作者投稿的同时签署。某作者因故无法亲自签名时,可以请人代签,但应有证据证明作者的授权。