

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 1-0348-07

基于有限元强度折减法的抗滑桩滑坡推力及 抗滑桩内力可靠性分析

吴应祥^{1,2}, 刘东升³, 宋强辉^{1,4}, 欧益宏¹

(1. 后勤工程学院 军事土木工程系, 重庆 401311; 2. 后勤工程学院 岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室, 重庆 401311;
3. 重庆市地质矿产勘查开发局, 重庆 400071; 4. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 现行的抗滑桩滑坡推力以及抗滑桩内力计算方法本质上属于定值方法, 由于该方法未考虑边坡岩土体材料参数的变异性等不确定性因素, 存在着抗滑桩支护不足或过度支护等问题, 因此提出基于有限元强度折减法(SRFEM)的抗滑桩滑坡推力及抗滑桩内力可靠性分析方法。将极限分析法、有限元方法和可靠性分析法三者耦合, 用 2 结点梁单元模拟抗滑桩受力状态, 采用拉丁超立方抽样法(LHS)进行可靠度计算, 分析求解边坡抗滑桩可靠性问题, 并将该过程在数值计算程序中得以实现。对抗滑桩滑坡推力以及抗滑桩内力进行概率统计, 得出函数分布关系, 并根据已给定的失效概率控制值, 反算出滑坡推力以及抗滑桩内力设计值。结合典型算例分析结果表明该法显著区别于一般方法, 能较全面地反映出边坡整体现状特征和岩土体材料强度参数的变异性, 相对更加合理, 且更符合工程实际。

关 键 词: 有限元; 强度折减法; 抗滑桩; 可靠性分析

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Reliability analysis of landslide-thrust and internal forces of anti-slide pile based on strength reduction finite element method

WU Ying-xiang^{1,2}, LIU Dong-sheng³, SONG Qiang-hui^{1,4}, OU Yi-hong¹

(1. Department of Architecture & Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Geomechanics & Geoenvironmental Protection, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China;

3. Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400071, China;

4. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Currently, the calculation method of landslide-thrust and internal forces of anti-slide pile in essence belongs to the fixed value method. However, for the lack of considering geotechnical uncertainties, inadequate and excessive support problems for the anti-slide piles cannot be ignored. Thus, based on strength reduction of finite element method, the reliability analysis method of landslide-thrust and internal forces of anti-slide pile is proposed. In this method, the limit analysis, finite element analysis as well as reliability analysis are included. In the calculation process, 2-node beam element is used to simulate the stress condition of anti-slide pile; and the Latin hypercube sampling(LHS) method is used for reliability calculation; and above process is realized in the numerical calculation program. Landslide-thrust and internal forces of anti-slide pile are statistically analyzed; and function distributions can be achieved. With the control values of a given failure probability, the design values of landslide-thrust and internal forces can be accurately determined. Typical example analysis shows that the proposed method is significantly different from the general methods; it can reflect the slope present situation, overall characteristics and the variability of material parameters; and the results are closer to the reality.

Key words: finite elements; strength reduction method; anti-slide pile; reliability analysis

1 引 言

抗滑桩是滑坡惯用的支护形式之一, 由于其具

有经济实用、可靠方便等特点, 在国内被广泛采用。研究资料表明, 抗滑桩在提高边坡抗震能力及保持边坡稳定性方面同样具有非常明显的作用。但是,

收稿日期: 2013-03-11

基金项目: 中科院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金资助(No.IMHE200803); 成都理工大学国家重点实验室开放基金资助(No.GZ2007-04); 西部灾害与环境力学教育部重点实验室(兰州大学)开放基金资助(No.Klmwde201003); 后勤工程学院青年科研基金资助(No.YQ11-43206)。

第一作者简介: 吴应祥, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程可靠度方面的研究。E-mail: yawen-6368@163.com

通讯作者: 刘东升, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程不确定性分析方面的研究。E-mail: dshliu@vip.sina.com

同样也不能忽视的是, 由于抗滑桩参数设计不足等问题, 一部分抗滑桩在支护过程中破坏失效, 无法继续维持边坡稳定性, 这就使抗滑桩的设计面临严峻的考验。

抗滑桩的设计一般包括滑坡推力计算和抗滑桩内力计算。由大量的文献资料可以发现, 目前抗滑桩的设计是以锚固段桩侧岩土体受压的检算作为控制条件, 检算方法采用容许应力法, 其本质属于定值法。定值法将相关参数视为确定的数值, 忽略了这些数值在时间和空间上的变异性, 这与实际情况往往不符。用定值法进行抗滑桩设计的后果分为两类: 一类是设计值过大, 造成大量工程上不必要的浪费; 另一类则是支护结构设计值不足, 失效概率过大, 存在严重安全隐患。

目前抗滑桩可靠度计算方面研究还比较少, 主要集中在以下几方面: (1) 基于体系可靠度的抗滑桩可靠性分析。这类方法属于整个支护系统的宏观分析, 并不能真正反映岩土体强度参数变化对抗滑桩设计值的影响, 如赵文斌等^[1]提出的抗滑桩整体极限设计方法; 陈富坚等^[2]提出的抗滑桩体系可靠度的概念及其计算模型; 刘英朴等^[3]建立的锚杆抗滑桩系统的可靠性设计理论。(2) 基于抗滑桩本身物理参数的可靠度分析。这类方法仅反映了抗滑桩自身几何物理参数对抗滑桩稳定性的影响, 如唐芬^[4]从分析抗滑桩的破坏模式入手, 计算出抗滑桩的失效概率; 李强等^[5]基于可靠度理论的分项系数法, 针对抗滑桩受弯破坏、受剪破坏及锚固段桩侧土体破坏 3 种主要失效模式, 分别建立了极限状态方程; 高凌霄等^[6]利用蒙特卡洛方法对锚杆抗滑桩可靠度进行数值模拟; 黄伟等^[7]建立的抗滑桩锚固段内桩侧土体受压稳定性的功能函数; 焦赞^[8]建立的地震作用下的抗滑桩侧应力计算模型。(3) 对抗滑桩锚固深度及设计间距的可靠度分析。吴坤铭等^[9]通过位移迭代有限元模型对抗滑桩锚固深度进行可靠度分析。胡晓军等^[10]运用 JC 法分析了参数变异性对抗滑桩锚固深度可靠度的影响。胡晓军等^[11]建立了抗滑桩合理间距可靠性设计的数学模型。张文居等^[12]以抗滑桩锚固深度确定的原则为基础, 针对不同的锚固段地层及不同的地基系数形式, 建立了锚固深度可靠性设计的数学模型。

本文在极限分析法和有限元法的基础上, 考虑岩土体物理力学参数和岩体荷载的随机性, 对抗滑桩滑坡推力以及抗滑桩内力进行概率统计, 得出函数分布关系, 并根据已给定的失效概率控制值, 反算出滑坡推力以及抗滑桩内力设计值。

2 强度折减法与 D-P 准则概率化

2.1 强度折减法

有限元强度折减法 (strength reduction of finite element method, 缩写为 SRFEM) 的基本原理^[13]是将材料的强度参数黏聚力 c 和 $\tan \varphi$ (φ 为内摩擦角) 值同时除以一个折减系数 ω , 得到一组新 c' 和 $\tan \varphi'$, 然后作为新的材料参数进行试算, 通过不断增加折减系数 ω , 反复分析研究对象, 直到达到临界状态, 此时得到的折减系数即为安全系数 F_s 。其分析方程为

$$\left. \begin{aligned} c &= c' / \omega \\ \tan \varphi &= \tan \varphi' / \omega \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

2.2 岩体 D-P 屈服准则的概率化

SRFEM 中岩土材料本构模型采用理想弹塑性模型, 岩土屈服准则采用 D-P 准则。据弹塑性力学理论, 单元进入塑性的极限状态方程^[14]为

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (2)$$

式中, I_1 、 J_2 分别为应力张量的第一不变量和第二不变量; α 、 k 分别为与岩土材料内摩擦角 φ 和黏聚力 c 有关的常数, 公式为

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ J_2 &= \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] \\ \alpha &= \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}; \quad k = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为大、中、小主应力。

实际工程中, 岩土体材料强度参数常常表现出固有的空间变异性和随机性, 这时屈服判断的依据不应是屈服函数本身的数值大小, 而是这一屈服函数达到屈服极限状态的可能性大小, 即屈服概率的大小。

极限状态方程为

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, c, \varphi) = 0 \quad (4)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 c 、 φ 均为基本随机变量。本文采用的有限元程序中, 若 c 、 φ 已知服从分布, 则 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 易于求解。此时, 为了提高计算精度并减少模拟次数, 可采用更为有效的拉丁超立方抽样法(LHS)进行可靠度计算, 并设定抽样值域^[15], 则可得岩体单元塑性概率 P_f 的估计值:

$$\hat{P}_f = \frac{n_f}{N} \quad (5)$$

式中: n_f 为 $F > 0$ (进入塑性状态)的次数。

由 Bernoulli 大数定律:

$$\lim P\left(\left|\frac{n_f}{N} - P_f\right| < \varepsilon\right) = 1 \quad (6)$$

可知 $\hat{P}_f$ 以概率 1 收敛于 P_f 。

当 N 足够大时, 可以近似拟合分布函数, 并估算其分布参数。

3 可靠性分析关键步骤

3.1 滑坡推力可靠性分析

假设边坡实际安全系数为 F^a , 则

$$F^a = \frac{\sum R}{\sum F_D} \quad (7)$$

式中: $\sum R$ 为整个滑面抗剪力之和; $\sum F_D$ 为滑面上的下滑力之和^[16]。

如果边坡的实际安全系数 F^a 小于设计值 F^T , 则抗滑桩必须承担一部分抗剪力 ΔR , 即

$$F^T = \frac{\sum R + \Delta R}{\sum F_D} \quad (8)$$

联立式 (7) 和式 (8), 有

$$\Delta R = \sum F_D (F^T - F^a) \quad (9)$$

因此, 如果 $\sum F_D$ 已知, 则抗滑桩所承受的滑坡推力设计值 ΔR 就可以求出来。

首先, 对原始边坡进行稳定性可靠度计算, 得到实际安全系数 F^a 。接着, 按照安全系数设计值 F^T 对边坡土体强度参数进行折减, 同时将整个抗滑桩分为若干单元, 当可靠度计算每一次迭代完成后, 对抗滑桩所有单元与岩土体接触面进行水平应力积分:

$$E = \int_0^s \sigma_x ds = \sum F_D (F^T - F^a) \quad (10)$$

式中: E 为抗滑桩滑坡推力值。本文有限元程序中, 当边坡几何模型一定的情况下, 土体单元水平应力 σ_x 是 c 、 φ 的函数, 若 c 、 φ 已知服从分布, 则 σ_x 是易于求解的。由此, 在可靠度分析中, 随着土体强度参数 c 、 φ 输入的不同, 滑坡推力 E 随之发生变化, 具有概率特性。

此时, 采用拉丁超立方抽样法(LHS)进行可靠度计算, 可得滑坡推力的统计样本 $E_1, E_2, \dots, E_n$ 。当样本数 N 足够大时, 可以比较精确地近似滑坡推力值的分布函数 $G(E)$, 并估计其分布参数:

$$\left. \begin{aligned} \mu_E &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \\ \sigma_E &= \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_i - \mu_E)^2 \right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

此时, 可以根据所计算出的数据点完整绘制累

计分布函数图。一旦给定失效概率设定值 p_f , 在累计分布函数图上可精确定位滑坡推力设计值 E 。

3.2 抗滑桩内力可靠性分析

有限元中抗滑桩采用 2 结点梁单元来模拟^[17], 每个结点由 2 个自由度分量: y 方向的挠度 v 及 $x-y$ 平面内的转角 θ , 即

$$u_i = [v_i \quad \theta_i]^T, (i=1,2) \quad (12)$$

每个结点有 2 个力分量: 横向集中力 Q 及弯矩 S , 即

$$f_i = [Q_i \quad S_i]^T, (i=1,2) \quad (13)$$

单元结点位移自由度向量为

$$u_e = [u_1 \quad u_2]^T = [v_1 \quad \theta_1 \quad v_2 \quad \theta_2]^T \quad (14)$$

单元结点力向量为

$$f_e = [f_1 \quad f_2]^T = [Q_1 \quad S_1 \quad Q_2 \quad S_2]^T \quad (15)$$

对于梁单元来说, 已知单元刚度矩阵 k_e , 则它的结点弯矩和剪力可通过式 (16) 计算。

$$f_e = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ S_1 \\ Q_2 \\ S_2 \end{Bmatrix} = k_e u_e = \frac{EI}{l_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_e & -12 & 6l_e \\ 6l_e & 4l_e^2 & -6l_e & 2l_e^2 \\ -12 & -6l_e & 12 & -6l_e \\ 6l_e & 2l_e^2 & -6l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (16)$$

式中: 结点位移 u_e 是由结点在水平方向的受力 σ_x 引起的。由前文知道, σ_x 是 c 、 φ 的函数, 所以 u_e 也是 c 、 φ 的函数, 那么不难知道, f_e 自然也是 c 、 φ 的函数, 可写为 $f_e(c, \varphi)$ 。在可靠度分析中, 随着土体强度参数 c 、 φ 输入的不同, 抗滑桩内力随之发生变化, 具有概率特性。

抗滑桩设计时的参考值为抗滑桩剪力和弯矩的最大值, 所以同样采用 LHS 法, 可求得抗滑桩最大剪力统计量的均值和标准差 $\mu_{Q_{\max}}$ 、 $\sigma_{Q_{\max}}$ 以及抗滑桩最大弯矩统计量的均值与标准差 $\mu_{S_{\max}}$ 、 $\sigma_{S_{\max}}$ 。

同样, 可以根据所计算出的数据点完整绘制累积分布函数图。在给定失效概率设定值 p_f 的前提下, 累积分布函数图上可精确定位抗滑桩最大剪力设计值 $Q_{\max}$ 和弯矩最大设计值 $S_{\max}$ 。

4 算例分析

4.1 概况

假定边坡为非线性弹塑性体, 采用 D-P 弹塑性模型。边坡支护模型如图 1 所示。图中, 坡高 5 m, 桩长 8 m, 桩埋深 3 m, 抗滑桩截面尺寸为 1.5 m × 1 m, 其基本物理力学参数取值见表 1。下面采用不同方法计算桩后推力以及抗滑桩内力。

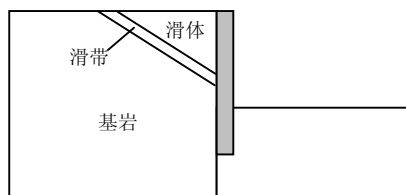


图 1 边坡模型
Fig.1 Slope model

表 1 边坡物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters

材料	重度 (kN/m ³)	弹性模量 (MPa)	泊松比	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
滑体	21	50	0.4	20	30
滑带	21	5	0.4	5	23
基岩	27	1×10 ³	0.2	1 800	37
桩	25	3×10 ⁴	0.2	线弹性材料处理	

4.2 传统方法计算

(1) 滑坡推力

这里采用工程中常用的传递系数法计算抗滑桩的桩后滑坡推力，由

$$E_i = K_s W_i \sin \alpha_i - W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i - c_i l_i + \psi_i E_{i-1} \quad (17)$$

式中： K_s 为储备安全系数； W_i 为滑块重量； α_i 为滑块倾角； φ_i 为内摩擦角； c_i 为黏聚力； l_i 为滑面长度； ψ_i 为传递系数； E_i 为剩余下滑力。

算例比较简单，整个滑体看作一块，所以有

$$\psi_i E_{i-1} = 0 \quad (18)$$

则

$$E = K_s W \sin \alpha - W \cos \alpha \tan \varphi - cl = 108.6 \text{ kN/m} \quad (19)$$

式中：储备安全系数 K_s 取 1.2。

(2) 抗滑桩内力

抗滑桩内力采用传统的弹性地基梁法，即“m”法。

计算过程不再赘述，计算结果： $Q_{\max} = 515 \text{ kN}$ ， $S_{\max} = 838 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

4.3 本文方法计算

将滑体和滑带的岩土强度参数看作随机变量，其概率分布形式都为正态分布，见表 2。

表 2 初始变量输入参数
Table 2 Initial variable parameters

变量名	参数	初始均值	分布形式	变异系数
滑体	黏聚力/kPa	20	正态分布	0.1
滑体	内摩擦角/(°)	30	正态分布	0.1
滑带	黏聚力/kPa	5	正态分布	0.1
滑带	内摩擦角/(°)	23	正态分布	0.1

(1) 滑坡推力

依照前文提供的方法，经 LHS 法模拟迭代计算 1 000 次后，如图 2、3 所示。

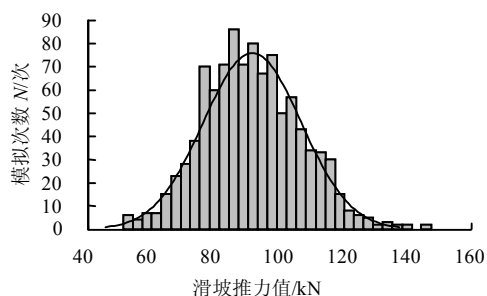


图 2 滑坡推力值直方图

Fig.2 Frequency histogram of landslide-thrusts

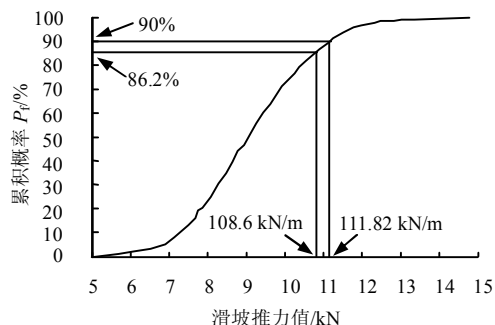


图 3 滑坡推力值累积分布函数图

Fig.3 Cumulative distribution function graph of landslide-thrusts

由图 2 可以看出，对计算得出的统计量采用 Jarque-Bera 法进行总体分布的正态性假设检验，检验结果显示此统计量服从正态分布。由此，利用极大似然估计法可计算得到，在置信度为 0.95 的情况下滑坡推力均值为 94 kN/m。

此时，假设失效概率设定值 p_f 为 10%，所有滑坡推力值的统计量中小于滑坡推力设计值 E 的统计量应占据 90%以上。图 3 显示，滑坡推力小于 108.6 kN/m 的统计量占有统计量的 86.2%，也就是说，如果用 108.6 kN/m 来作为该滑坡推力的设计值，则实际滑坡推力超出该值的概率为 13.8%，有些偏大。所以，无论是传统方法计算所得的 108.6 kN/m，还是可靠度方法计算所得的滑坡推力均值 94 kN/m 都不能满足设计需要，于是在图 3 上精确定位累积概率 90%所对应的滑坡推力值为 111.82 kN/m，以此作为设计值是合理的。

(2) 抗滑桩最大剪力

图 4 显示，计算所得数据经 Jarque-Bera 法检验，服从正态分布，抗滑桩最大剪力均值为 427 kN。同样，假设失效概率设定值 p_f 为 10%，则由图 5 可

知,无论是传统方法计算所得的 515 kN,还是可靠度方法计算所得的最大剪力均值 427 kN 都不能满足设计需要,于是在图 5 上精确定位累积概率 90%所对应的最大剪力值为 534 kN,以此作为设计值是合理的。

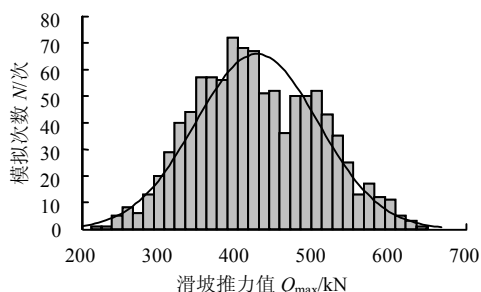


图 4 抗滑桩最大剪力值直方图

Fig.4 Frequency histogram of maximum shear force

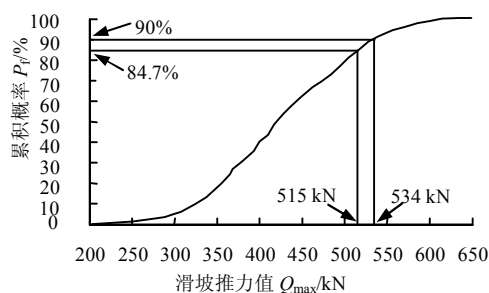


图 5 抗滑桩最大剪力值累积分布函数图

Fig.5 Cumulative distribution function graph of maximum shear force

(3) 抗滑桩最大弯矩

图 6 显示,计算所得数据经 Jarque-Bera 法检验,服从正态分布,抗滑桩最大弯矩均值为 753 kN/m。同样,假设失效概率设定值 p_f 为 10%,则由图 7 可知,无论是传统方法计算所得的 838.2 kN/m,还是可靠度方法计算所得的最大弯矩均值 753 kN/m 都不能满足设计需要,于是在图 7 上精确定位累积概率 90%所对应的最大弯矩值为 896.76 kN/m,以此作为设计值是合理的。

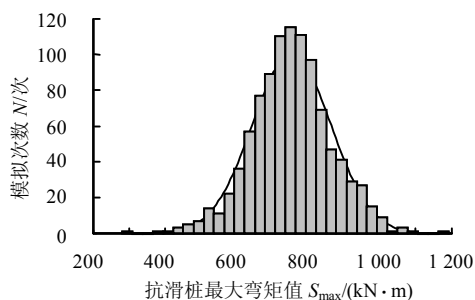


图 6 抗滑桩最大弯矩值直方图

Fig.6 Frequency histogram of maximum bending moment

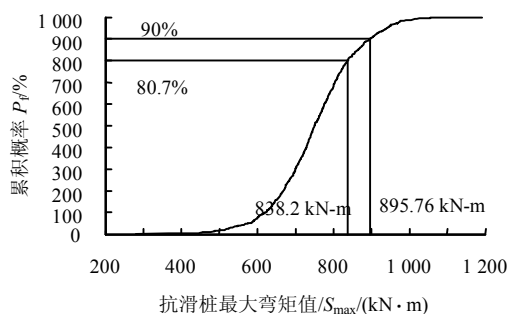


图 7 抗滑桩最大弯矩值累积分布函数图

Fig.7 Cumulative distribution function graph of maximum bending moment

(4) 支护后边坡稳定性可靠度验证

按照文中提出的方法对该边坡进行抗滑桩支护,对支护后边坡再进行稳定性可靠度分析。方法不变,经 LHS 法模拟迭代计算 1 000 次后,结果如图 8、9 所示。图 8 显示,对计算得出的统计量采用 Jarque-Bera 法进行总体分布的正态性假设检验,服从正态分布,边坡安全系数的均值为 1.37。图 9 显示,安全系数小于 1 的统计量占 3.7%,也就是说,抗滑桩支护后的边坡失效概率为 3.7%,在可接受范围内,因此设计方案是符合要求且合理的。

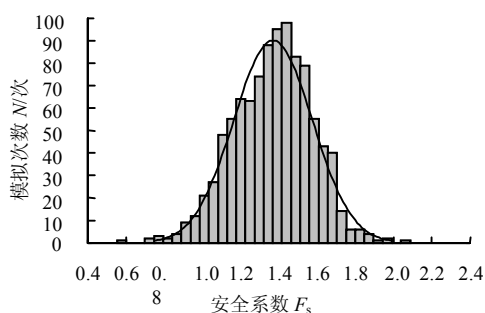


图 8 安全系数直方图

Fig.8 Frequency histogram of safety factors

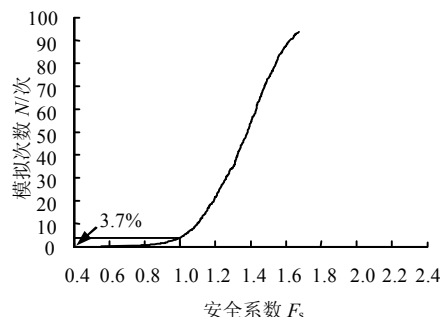


图 9 安全系数累积分布函数图($N-F_s$)

Fig.9 Cumulative distribution function graph of safety factors($N-F_s$)

表 3 中,可靠度均值是指采用本文可靠度方法计算后,将其统计量均值作为设计值。

表 3 不同方法计算结果比较
Table 3 Results of calculated by different methods

参数	方法		
	传统方法	可靠度均值	本文方法
滑坡推力设计值/(kN/m)	108.6	94	111.82
最大剪力设计值/kN	515	427	534
最大弯矩设计值/(kN/m)	838.2	753	896.76
失效概率/%		50	10

4.4 比较与讨论

由本例可以看出，将边坡滑体和滑带的土体强度参数(黏聚力 c 和内摩擦角 φ)以正态分布数值输入时，计算结果显示抗滑桩滑坡推力、抗滑桩最大弯矩，以及抗滑桩最大剪力最终也呈现正态分布状态，可见工程实际中上述 3 值并非都能以定值代替。

本例中，对同一抗滑桩支护边坡分别采用传统方法和本文提供方法计算滑坡推力和抗滑桩内力设计值，结果显示，在给定失效概率控制值的情况下，本文方法计算结果明显大于传统方法计算结果，表明本文方法更具安全性。

本例中，失效概率控制值 p_f 设定为 10%，但对其他边坡未必适用，而应该根据边坡重要程度区别对待。对于不同重要等级的边坡应采用不同的失效概率控制值，对应计算其相应的设计值。

5 结 语

边坡岩土体强度参数的随机性和变异性对抗滑桩滑坡推力和抗滑桩内力有着重要影响。随着强度参数随机分布状态以及变异性的变化，抗滑桩滑坡推力和抗滑桩内力随之发生相应规律性的变化，因此，单凭滑坡推力和抗滑桩内力定值作为抗滑桩设计值的传统做法有时与工程实际不符，应与可靠性分析方法结合进行综合判断。

将极限分析法、有限元方法和可靠性分析法三者耦合，用于边坡抗滑桩滑坡推力及抗滑桩内力可靠度分析，既能较全面地反映边坡岩土体材料强度参数的变异性，又能准确地确定抗滑桩滑坡推力和抗滑桩内力设计值，避免不必要的设计浪费和不足，为边坡抗滑桩支护设计和研究提供了一条新的有效途径。

本文方法仅选取简单均质土坡进行算例分析，但其方法对于复杂边坡及考虑三维状态下的情况同样适用，将在后续工作中进一步发展完善。

参 考 文 献

- [1] 赵文斌, 罗文强, 冯永. 基于可靠性理论抗滑桩设计体系的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊): 952—957.
- [2] 陈富坚, 黄世斌, 包惠明. 抗滑桩加固工程的体系可靠度及其计算模型[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(6): 15—18.
- [3] 刘英朴, 门玉明. 锚杆抗滑桩系统可靠性设计分项系数研究[J]. 公路, 2006, 31(1): 53—57.
- [4] 唐芬. 抗滑桩的可靠性分析[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(6): 108—111.
- [5] 李强, 罗书学, 彭雄志. 抗滑桩可靠度分析与计算[J]. 路基工程, 2006, 24(4): 63—66.
- [6] 高凌霄, 杨向军, 门玉明等. 锚杆-抗滑桩系统的可靠性分析[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(6): 36—39.
- [7] 黄伟, 肖尊群, 李志平. 刚性抗滑桩随机可靠性分析[J]. 矿冶工程, 2009, 29(6): 29—32.
- [8] 焦赞. 高烈度地震区抗滑桩锚固深度可靠度分析[J]. 路基工程, 2012, 30(5): 5—8.
- [9] 吴坤铭, 王建国, 谭晓慧. 基于强度折减的边坡抗滑桩可靠性分析[J]. 工业建筑, 2011, 41(5): 99—103.
- [10] ZHAO Wen-bin, LUO Wen-qiang, FENG Yong. Study on designing system of anti-slide piles based on reliability theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(Supp.): 952—957.
- [11] CHEN Fu-jian, HUANG Shi-bin, BAO Hui-ming. The system reliability of anti-slide pile and their calculating models[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2009, 31(6): 15—18.
- [12] LIU Yin-pu, MEN Yu-ming. A study on partial coefficient of reliability design of anchor anti-slide piles system[J]. *Highway*, 2006, 31(1): 53—57.
- [13] TANG Fen. Analysis on reliability of piles for resisting slide[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2005, 24(6): 108—111.
- [14] LI Qiang, LUO Shu-xue, PENG Xiong-zhi. Reliability analysis and calculation of anti-sliding pile[J]. *Subgrade Engineering*, 2006, 24(4): 63—66.
- [15] GAO Ling-xia, YANG Xian-jun, MEN Yu-ming. Reliability study on anti-sliding pile with anchored bolt[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2006, 33(6): 36—39.
- [16] HUANG Wei, XIAO Zun-qun, LI Zhi-ping. Random reliability analysis of rigid anti-sliding pile[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2009, 29(6): 29—32.
- [17] JIAO Yun. Analysis on reliability of anchoring depth of anti-sliding pile in high-intensity earthquake region[J]. *Subgrade Engineering*, 2012, 30(5): 5—8.
- [18] WU Ming-kun, WANG Jian-guo, TAN Xiao-hui. Reliability analysis of slope with anti-slide piles by

- displacement iterative FEM based on strength reduction method[J]. **Industrial Building**, 2011, 41(5): 99—103.
- [10] 胡晓军, 吴延枝. 抗滑桩锚固深度的可靠度与参数敏感性[J]. 河海大学学报, 2011, 39(1): 49—53.
HU Xiao-jun, WU Yan-zhi. Reliability and parametric sensitivity of anchorage depth of anti-slide piles[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2011, 39(1): 49—53.
- [11] 胡晓军, 吴延枝. 抗滑桩间距的可靠性设计[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 141—143.
HU Xiao-jun, WU Yan-zhi. Reliability design of anti-slide pile spacing[J]. **South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology**, 2010, 8(5): 141—143.
- [12] 张文居, 赵其华, 刘晶晶. 参数变异性对抗滑桩锚固深度可靠度的影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(3): 61—63.
ZHANG Wen-ju, ZHAO Qi-hua, LIU Jing-jing. On effect of variability of parameters on anchoring depth reliability of anti-sliding pile[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2006, 33(3): 61—63.
- [13] 郑颖人, 赵尚毅, 宋雅坤. 有限元强度折减法研究进展[J]. 后勤工程学院学报, 2005, 21(3): 1—6.
ZHENG Yin-ren, ZHAO Shang-yi, SONG Ya-kun. Advance of study on the strength reduction finite element method[J]. **Journal of Logistical Engineering University**, 2005, 21(3): 1—6.
- [14] 郑颖人, 孔亮. 岩土塑形力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] 马建全, 李广杰, 徐佩华等. 基于拉丁方抽样及 K-S 检验的边坡可靠性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2153—2156.
MA Jian-quan, LI Guang-jie, XU Pei-hua. Reliability analysis of slope with Latin hypercube sampling and K-S test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 2153—2156.
- [16] 陈祖煜. 土质边坡稳定性分析—原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [17] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [18] CARRO M, AMICIS M De, LUZI L, et al. The application of predictive modeling techniques to landslides induced by earthquakes: The case study of the 26 September 1997, Umbria-Marche earthquake(Italy)[J]. **Engineering Geology**, 2003, 69(1/2): 139—159.
- [19] ANG A H-S, TANG W H. Probability concepts in engineering: Emphasis on applications to civil and environmental engineering (2nd ed.)[M]. New York: Wiley, 2007.
- [20] EI-RAMLY H, MORGENSTERN N R, CRUDEN D M. Probabilistic assessment of stability of a cut slope in residual soil[J]. **Geotechnique**, 2005, 55(1): 77—84.
- [21] EI-RAMLY H, MORGENSTERN N R, CRUDEN D M. Probabilistic slope stability analysis for practice[J]. **Can. Geotech. J.**, 2002, 39(3): 665—683.
- [22] 谭晓慧, 王建国. 边坡的弹塑性有限元可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 44—50.
TAN Xiao-hui, WANG Jian-guo. Slope reliability analysis using elasto-plastic finite element method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(1): 44—50.
- [23] LUZI L L, PERGLANIA F, TERLIENB M T J. Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems[J]. **Engineering Geology**, 2000, 58(3-4): 313—336.
- [24] 康海贵, 李炜. 边坡稳定安全系数及其与土性参数及失效概率关系研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(6): 856—862.
KANG Hai-gui, LI Wei. Research on slope safety factor and its relationship with shear strength parameters and failure probability[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2008, 48(6): 856—862.