

文章编号: 0451-0712(2006)01-0053-05

中图分类号: U417.9

文献标识码: A

锚杆抗滑桩系统可靠性设计分项系数研究

刘英朴¹, 门玉明²

(1. 陕西省公路勘察设计院 西安市 710068; 2. 长安大学地质工程与测绘工程学院 西安市 710054)

摘 要: 研究了锚杆抗滑桩系统可靠性设计的分项系数方法, 讨论了系统随机变量的选取, 将系统的失效模式分为桩身的剪切破坏、锚杆的拉断或拔出和地基承载力不够引起的系统失稳, 提出将锚杆抗滑桩作为串联系统, 分别推导了锚杆和抗滑桩的分项系数表达式, 建立了锚杆抗滑桩系统的可靠性设计理论。通过实例, 验证了方法的合理性和实用性。

关键词: 锚杆抗滑桩; 可靠性; 失效模式; 分项系数

可靠性分析方法是当前国内外公认的先进的结构设计方法, 已成为结构设计理论发展的一个重要方向。将可靠性分析原理应用于滑坡灾害治理设计中, 将在很大程度上改善以往的传统设计方法存在的不足, 使得设计对象既有足够的安全度, 又有适当的经济性。到目前为止, 人们对桥梁上部结构的可靠性分析方面以及对竖向受荷桩的可靠性分析方面, 已做了大量的研究工作, 并有很多成果问世, 但对横向受荷桩尤其是锚杆抗滑桩系统的可靠度分析研究很少。本文对锚杆抗滑桩系统可靠性设计中的随机变量的选取、系统的失效模式和分项系数法进行了研究。

1 随机变量的选取

锚杆抗滑桩系统是由锚杆和抗滑桩共同组成的受力体系, 两者之间存在着相互作用和协调变形的关系。另外, 整个系统又与滑坡体之间相互作用。因此, 在进行可靠性分析时, 要把以上关系都考虑进去。在锚杆抗滑桩系统可靠性分析中, 作用于桩上的滑坡推力、锚杆上的锚固力、桩锚的几何尺寸、极限弯矩、剪力和变形、弹性模量、材料的屈服强度、地基系数等在不同程度上都存在着变异, 如果在锚杆抗滑桩系统可靠性分析中, 将这些参数都作为随机变量, 其工作量将是巨大的。为此, 在实际计算中, 对于一些变异性较小或对可靠性计算结果影响不大的参

数, 一般可简化为确定性量值处理; 而对于变异性较大且对可靠性计算结果影响较大的参数则作为随机变量处理。

对于锚杆抗滑桩系统来说, 桩锚的几何尺寸、弹性模量等对整个系统的可靠性分析结果影响较小, 因此都可作为定值来考虑。而土性参数 c 、 φ 、 γ 对系统可靠性分析结果的影响较大, 应作为随机变量处理。这是因为滑坡推力的大小是由上述土性参数值决定的, 而它们的真值是未知的, 它们的大小只能通过有限的原位测试或室内的土工试验量测和观察得到, 并且离散性很大, 具有很强的不确定性。

2 系统的失效模式

结构系统可靠性分析不同于单个构件的可靠性分析, 其主要原因在于结构系统的失效常常不止一种模式, 结构越复杂, 其失效模式就越多。对于锚杆抗滑桩系统来说, 常见的失效模式主要有以下几种: (1) 桩身的剪切破坏; (2) 锚杆被拉断或拔出; (3) 地基承载力不够引起的系统失稳等。在工程中, 无论是桩锚破坏或地基失效都可以引起整个系统的失效, 因此, 这一系统实际上可以看作桩锚组成的串联系统, 桩和锚分别为这个串联系统中的组件, 系统的失效由每个组件的失效引起, 或者由 2 个组件同时失效引起, 换句话说, 桩锚系统的安全在于桩和锚都不失效。

3 锚杆抗滑桩系统(单桩单锚)的分项系数法

首先对锚杆进行可靠度分析,图1为计算简图。

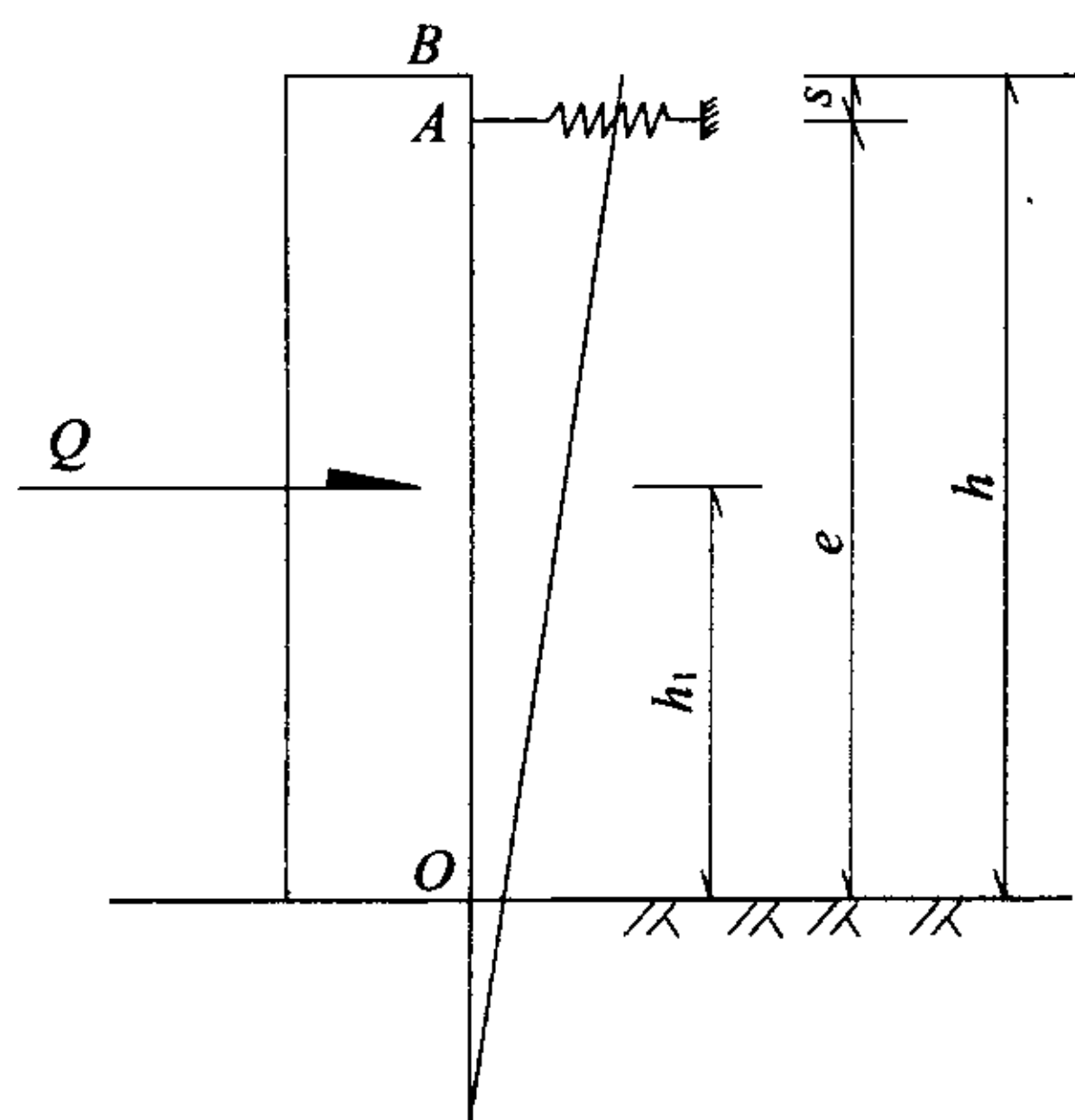


图1 单桩单锚计算简图

锚杆的失效模式是由于锚杆的锚固力不够而引起的。在地层中,锚杆的极限抗拔力为^[1]:

$$T_{\mu} = \pi D L_e \tau \quad (1)$$

式中: T_{μ} 为锚杆极限抗拔力; D 为锚杆的直径; L_e 为锚固段长度; τ 为锚固段周边砂浆与孔壁间的平均抗剪强度。

在土中的 τ 值可由下式确定:

$$\tau = c_0 + K_0 \gamma h \tan \varphi_0 \quad (2)$$

式中: K_0 为锚固段孔壁土压力系数,在一般情况下, $K_0 \leq 1$,若用高压灌浆工艺,则 $K_0 > 1$; c_0 为土的内聚力; φ_0 为土的内摩擦角; γ 为土的容重; h 为锚固段土层以上的厚度。

由文献[2]的计算方法可得出,在不加预应力的情况下,锚杆的拉力可由下式确定:

$$F_i = b_i - a_{i1} \times N_1 - a_{i2} \times N_2 - \dots - a_{in} \times N_n \quad (3)$$

式中: F_i 为桩上第 i 根锚索作用点的水平位移。

其中:

$$a_{ij} = (\delta_{HM} + \delta_{MM} \times e_i) [h - s - (j-1) \times m] + (\delta_{HH} + \delta_{MH} \times e_i) + \delta_{ij}$$

$$b_i = (\delta_{HM} + \delta_{MM} \times e_i) \times M_q + (\delta_{HH} + \delta_{MH} \times e_i) \times Q + d_{1i} - d_{2i}$$

于是可得到:

$$F_1 = b_1 - a_{11} \times N_1 \quad (4)$$

其中:

$$a_{11} = (\delta_{HM} + \delta_{MM} \times e) e + (\delta_{HH} + \delta_{MH} \times e)$$

$$b_1 = (\delta_{HM} + \delta_{MM} \times e) \times M_q + (\delta_{HH} + \delta_{MH} \times e) \times Q + d_{11} - d_{21}$$

假定土压力为矩形,则有:

$$d_{11} = \frac{Q(h^4 - s^4)}{8hEI}$$

$$d_{21} = \frac{Qs(h^3 - s^3)}{6hEI}$$

式中: δ_{HM} 、 δ_{HH} 分别为 O 点处作用有单位弯矩和剪力时,在 O 点产生的水平位移; δ_{MM} 、 δ_{MH} 分别为 O 点处作用有单位弯矩和剪力时,在 O 点产生的转角;具体的表达式见参考文献[7]。

M_q 为土压力 Q 对 O 点的弯矩,具体表达式为:

$$M_q = Q \times h_1$$

式中: Q 为土压力的值,可由传递系数法确定。

由变形协调方程可知:

$$\Delta_i = F_i \quad (5)$$

式中: F_i 为桩上第 i 根锚索作用点的水平位移; Δ_i 为桩上第 i 根锚索的水平伸长量。

由此可知:

$$\Delta_1 = F_1$$

而:

$$\Delta_1 = b_1 - a_{11} N_1 \quad (6)$$

式中: b_1 与式(4)中 b_1 的意义相同; a_{11} 与式(4)中 a_{11} 的意义相同。

由材料力学可得:

$$\Delta_1 = \frac{N_1 l_1}{E_g A_1} \quad (7)$$

式中: l_1 为锚杆的长度; A_1 为锚杆的截面面积; E_g 为锚杆的弹性模量。

联立方程式(6)和式(7)可得:

$$N_1 = \frac{b_1}{a_{11} + \frac{l_1}{E_g A_1}} \quad (8)$$

这样,对于锚杆来说,极限状态方程为:

$$Z_1 = R - S = g(c, \varphi) = T_{\mu} - N_1 = \pi D L_e \tau - \frac{b_1}{a_{11} + \frac{l_1}{E_g A_1}} = 0 \quad (9)$$

式(9)中, τ 和 b_1 都是关于 c 、 φ 的函数。

对式(9)求偏导有:

$$\begin{cases} \frac{\partial Z_1}{\partial c} = \pi D L_e \frac{\partial \tau}{\partial c} \\ \frac{\partial Z_1}{\partial \varphi} = \pi D L_e \frac{\partial \tau}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial Z_1}{\partial c} = -\frac{1}{a_{11} + \frac{l_1}{E_g A_1}} \frac{\partial b_1}{\partial c} \\ \frac{\partial Z_1}{\partial \varphi} = -\frac{1}{a_{11} + \frac{l_1}{E_g A_1}} \frac{\partial b_1}{\partial \varphi} \end{cases} \quad (10)$$

分离系数为:

$$\alpha_{c_0} = \frac{-\frac{\partial Z_1}{\partial c_0} \sigma_{c_0}}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z_1}{\partial c_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_1}{\partial \varphi_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_1}{\partial c_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_1}{\partial \varphi_1}\right)^2}}$$

$$\alpha_{\varphi_0} = \frac{-\frac{\partial Z_1}{\partial \varphi_0} \sigma_{\varphi_0}}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z_1}{\partial c_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_1}{\partial \varphi_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_1}{\partial c_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_1}{\partial \varphi_1}\right)^2}}$$

$$\alpha_{c_1} = \frac{-\frac{\partial Z_1}{\partial c_1} \sigma_{c_1}}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z_1}{\partial c_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_1}{\partial \varphi_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_1}{\partial c_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_1}{\partial \varphi_1}\right)^2}}$$

$$\alpha_{\varphi_1} = \frac{-\frac{\partial Z_1}{\partial \varphi_1} \sigma_{\varphi_1}}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z_1}{\partial c_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_1}{\partial \varphi_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_1}{\partial c_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_1}{\partial \varphi_1}\right)^2}} \quad (11)$$

分项系数为:

$$\gamma_{c_0} = \frac{1}{1 + \alpha_{c_0} \delta_{c_0} \beta}$$

$$\gamma_{\varphi_0} = \frac{1}{1 + \alpha_{\varphi_0} \delta_{\varphi_0} \beta}$$

$$\gamma_{c_1} = 1 + \alpha_{c_1} \delta_{c_1} \beta$$

$$\gamma_{\varphi_1} = 1 + \alpha_{\varphi_1} \delta_{\varphi_1} \beta \quad (12)$$

则锚杆的概率极限状态设计式为:

$$Z_1 = R - S = g(c, \varphi) = T_\mu - N_1 = \pi D L_e \tau -$$

$$\frac{b_1}{a_1 + \frac{l_1}{E_g A_1}} = 0 \quad (13)$$

令:

$$b_1 = f(c_1) + g(\varphi_1) + c$$

若已知目标可靠度指标 β , 将式(1)和式(13)代入, 可得:

$$\pi D L_e \left(\frac{c_0}{\gamma_{c_0}} + \frac{K_0 \gamma h \tan \varphi_0}{\gamma_{\varphi_0}} \right) \geq \frac{\gamma_{c_1}}{a_1 + \frac{l_1}{E_g A_1}} f(c_1) +$$

$$\frac{\gamma_{\varphi_1}}{a_1 + \frac{l_1}{E_g A_1}} g(\varphi_1) + \frac{c}{a_1 + \frac{l_1}{E_g A_1}} \quad (14)$$

式中: b_1 是 c_1 和 φ_1 的函数;

若目标可靠度未知, 则可利用式(14)求得目标可靠度指标 β_1 , 只需将式(14)中的不等号变为等号即可。

下面对抗滑桩进行分析。对桩的可靠性分析可分为受荷段和锚固段分别进行分析, 在这里由于篇幅的关系, 只以锚固段为例进行可靠性分析。

锚固段的弯矩方程可由地基系数法确定, 即:

$$M_y = \beta^2 EI \left(-4x_A C_{1z} - \frac{4\varphi_A}{\beta} D_{1z} + \frac{M_A}{\beta^2 EI} A_{1z} + \frac{Q_A}{\beta^3 EI} B_{1z} \right)$$

设桩底为铰支撑, 则有:

$$\begin{cases} x_A = \frac{M_A}{\beta^2 EI} \cdot \frac{4\varphi_3 \varphi_4 + \varphi_1 \varphi_2}{4\varphi_2 \varphi_3 - 4\varphi_1 \varphi_4} + \frac{Q_A}{\beta^2 EI} \cdot \frac{4\varphi_4^2 + \varphi_2^2}{4\varphi_2 \varphi_3 - 4\varphi_1 \varphi_4} \\ \varphi_A = \frac{M_A}{\beta EI} \cdot \frac{\varphi_1^2 + 4\varphi_3^2}{4\varphi_2 \varphi_3 - 4\varphi_1 \varphi_4} - \frac{Q_A}{\beta^2 EI} \cdot \frac{4\varphi_3 \varphi_4 + \varphi_1 \varphi_2}{4\varphi_2 \varphi_3 - 4\varphi_1 \varphi_4} \end{cases} \quad (15)$$

式中: A_{1z} 、 B_{1z} 、 C_{1z} 和 D_{1z} 为 K 法影响函数值, 可以查表得到; φ_1 、 φ_2 、 φ_3 和 φ_4 分别为 A_{1z} 、 B_{1z} 、 C_{1z} 、 D_{1z} 在 $y=h_2$ (h_2 为锚固段桩长) 时的值。

设当 $y=y_0$ 时, 锚固段的弯矩达到最大值 M_{y_0} , 对于单筋矩形截面梁的极限弯矩值为:

$$M_{\mu \max} = \alpha_{s \max} f_{cm} b h_0^2 \quad (16)$$

则可得到极限状态方程为:

$$Z_4 = M_{\mu \max} - M_{y_0} = \alpha_{s \max} f_{cm} b h_0^2 - M_{y_0} = 0 \quad (17)$$

令 $M_{y_0} = m(c_1) + n(\varphi_1)$, 则式(17)变为:

$$Z_4 = M_{\mu \max} - M_{y_0} = \alpha_{s \max} f_{cm} b h_0^2 - m(c_1) + n(\varphi_1) = 0 \quad (18)$$

对式(18)求偏导为:

$$\frac{\partial Z_4}{\partial c_1} = -\frac{\partial m}{\partial c_1}$$

$$\frac{\partial Z_4}{\partial \varphi_1} = -\frac{\partial n}{\partial \varphi_1} \quad (19)$$

分离系数为:

$$\alpha_{c_1}^* = \frac{-\frac{\partial Z_4}{\partial c_1} \sigma_{c_1}}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z_4}{\partial c_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_4}{\partial \varphi_1}\right)^2}}$$

$$\alpha_{\varphi_1}^* = \frac{-\frac{\partial Z_4}{\partial \varphi_1} \sigma_{\varphi_1}}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z_4}{\partial c_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_4}{\partial \varphi_1}\right)^2}} \quad (20)$$

分项系数为:

$$\gamma_{c_1}^* = 1 + \alpha_{c_1}^* \delta_{c_1} \beta$$

$$\gamma_{\varphi_1}^* = 1 + \alpha_{\varphi_1}^* \delta_{\varphi_1} \beta \quad (21)$$

若已知目标可靠度指标 β_2 , 则结构极限状态设计式可写为:

$$\alpha_{s \max} f_{cm} b h_0^2 \geq \gamma_{c_1}^* m(c_1) + \gamma_{\varphi_1}^* n(\varphi_1) \quad (22)$$

同理, 若目标可靠度指标未知, 将式(22)中的不等号变为等号, 即可求出目标可靠度指标 β_2 的值。同理, 可对桩的受荷段进行分项系数分析, 得到受荷段 OA 和 AB 的目标可靠度指标 β_3 、 β_4 的值。这样, 就可以对锚杆抗滑桩系统进行可靠性分析。

桩身的可靠性指标 $\beta_5 = \min(\beta_2, \beta_3, \beta_4)$ 。

由于系统中的 2 个单元(桩和锚杆)相互独立, 则整个系统的可靠度为:

$$P_r = \prod_{i=1}^n P_{ri} = P_{r1} \cdot P_{r2} \quad (23)$$

式中: P_{r1} 为锚杆的可靠度; P_{r2} 为桩的可靠度。

于是有:

$$P_r = P_{r1} \cdot P_{r2} = \varphi(\beta_1) \cdot \varphi(\beta_5) \quad (24)$$

式(24)就是锚杆抗滑桩系统的可靠度计算公式。

4 算例

某滑坡东西长 85 m, 南北宽 95 m, 主滑方向为 NW65°。滑坡体的后缘高程为 1 040 m, 剪出口高程为 974 m, 坡高 66 m。滑体的岩性为粉质粘土, 容重 $\gamma = 16.9 \text{ kN/m}^3$, 其抗剪强度指标如表 1 所列。

表 1 岩土参数选取

项目		平均值	标准差	变异系数
粉质粘土	c/MPa	18	18.77	0.47
	$\varphi/(\circ)$	28.1	5.92	0.47

据此算出滑坡推力为 982.4 kN/m。本滑坡治理方案采用锚索桩方案, 桩与桩之间的间距取 6 m, 桩截面尺寸为 2 m × 1.5 m, 桩身采用 C30 混凝土, 其弹性模量 $E = 3.0 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, 弯曲抗压强度为 16.5 N/mm²。滑面以下砂岩的地基系数为 $K = 3.0 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 且沿深度不变。桩长为 21 m, 其中基岩以上为 16 m, 基岩以下锚固段长为 5 m。由上述条件可得桩的计算宽度 $B_p = b + 1 = 2.5 \text{ m}$, 惯性矩为 $I = ba^3/12 = 1.0 \text{ m}^4$, 抗弯刚度 $EI = 3 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, 桩的变形系数为 $\beta = \sqrt[4]{KB_p/(4EI)} = 0.281 \text{ 1}$, 计算宽度 $\beta h = 0.281 \text{ 1} \times 5 = 1.41 > 1$ 。所以, 按弹性桩进行设计, 桩底按铰支端考虑。锚索沿桩顶设置, 每桩设一束, 距桩顶 1 m, 锚索与水平面夹角为 30°, 锚索的弹性模量为 $1.8 \times 10^8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, 自由段长度为 30 m。本治理方案根据文献[3], 取目标可靠度指标为 3.2。

根据给定的参数, 采用 C 语言进行程序设计, 系统中锚杆(索)拉力的计算流程如图 2 所示。

同理可进行桩的可靠性设计。

对于锚杆(索)抗滑桩系统来说, 将参数输入计算程序以后, 经过迭代运算可得: 锚杆(索)的拉力为 1 696 kN, 锚固段的长度为 6.5 m, 滑面处的剪力和弯矩分别为 $Q_A = 4 \text{ 196 kN}$ 、 $M_A = 21 \text{ 696 kN} \cdot \text{m}$; 滑动面处的水平位移和转角分别为 0.008 613 992、

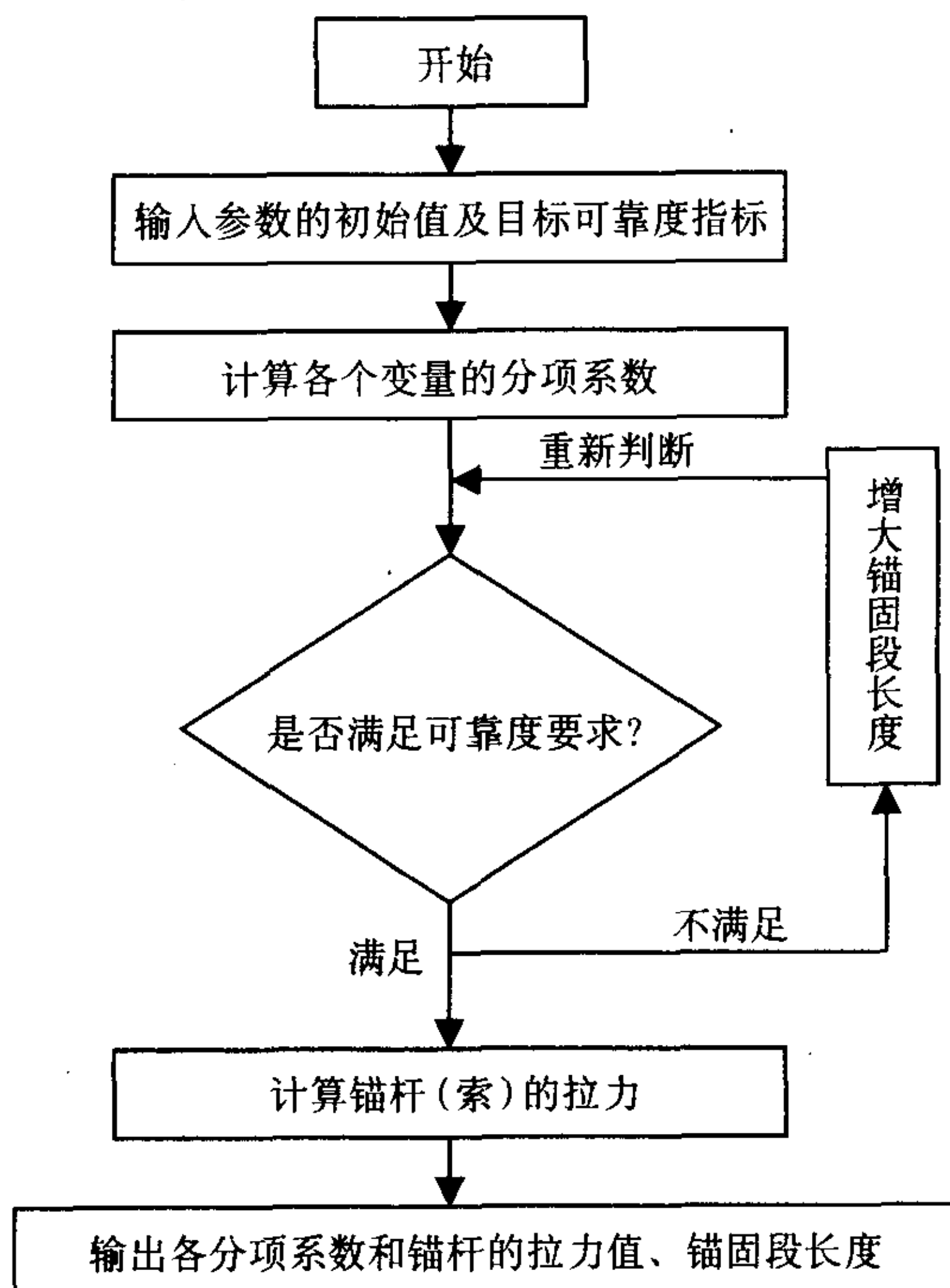


图 2 锚杆抗滑桩系统锚杆的分项系数法计算流程

—0.003 45。其内力计算结果如图 3 所示。

5 结语

虽然概率极限状态设计的分项系数法表达式与定值设计法中安全系数表达式在形式上是相似的, 但分项系数反映了结构可靠性的要求, 显得更为科学。将分项系数原理应用于锚杆抗滑桩系统设计中, 在很大程度上改善了传统设计方法的不足, 使得设计对象既有足够的安全度, 又有适当的经济性。通过实例说明, 将分项系数法应用于滑坡治理设计中是合理和可行的。

参考文献:

- [1] 吴家惠. 公路支挡构造物[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1996.
- [2] 邹兴普. 锚索抗滑桩的设计计算[J]. 路基工程, 2000, (2).
- [3] GB 50068—2001, 建筑结构可靠度设计统一标准[S].
- [4] 门玉明, 李寻昌, 刘英朴. 地质灾害防治工程全局优化设计理论研究[A]. 全国岩土与工程学术大会论文集(上)[C]. 北京:人民交通出版社, 2003.
- [5] 何水清, 王善. 结构可靠性分析与设计[M]. 北京:国防工业出版社, 1993.
- [6] 李清富, 等. 工程结构可靠性原理[M]. 郑州:黄河水利出版社, 1999.
- [7] 铁道部第二勘察设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京:中国铁道出版社.

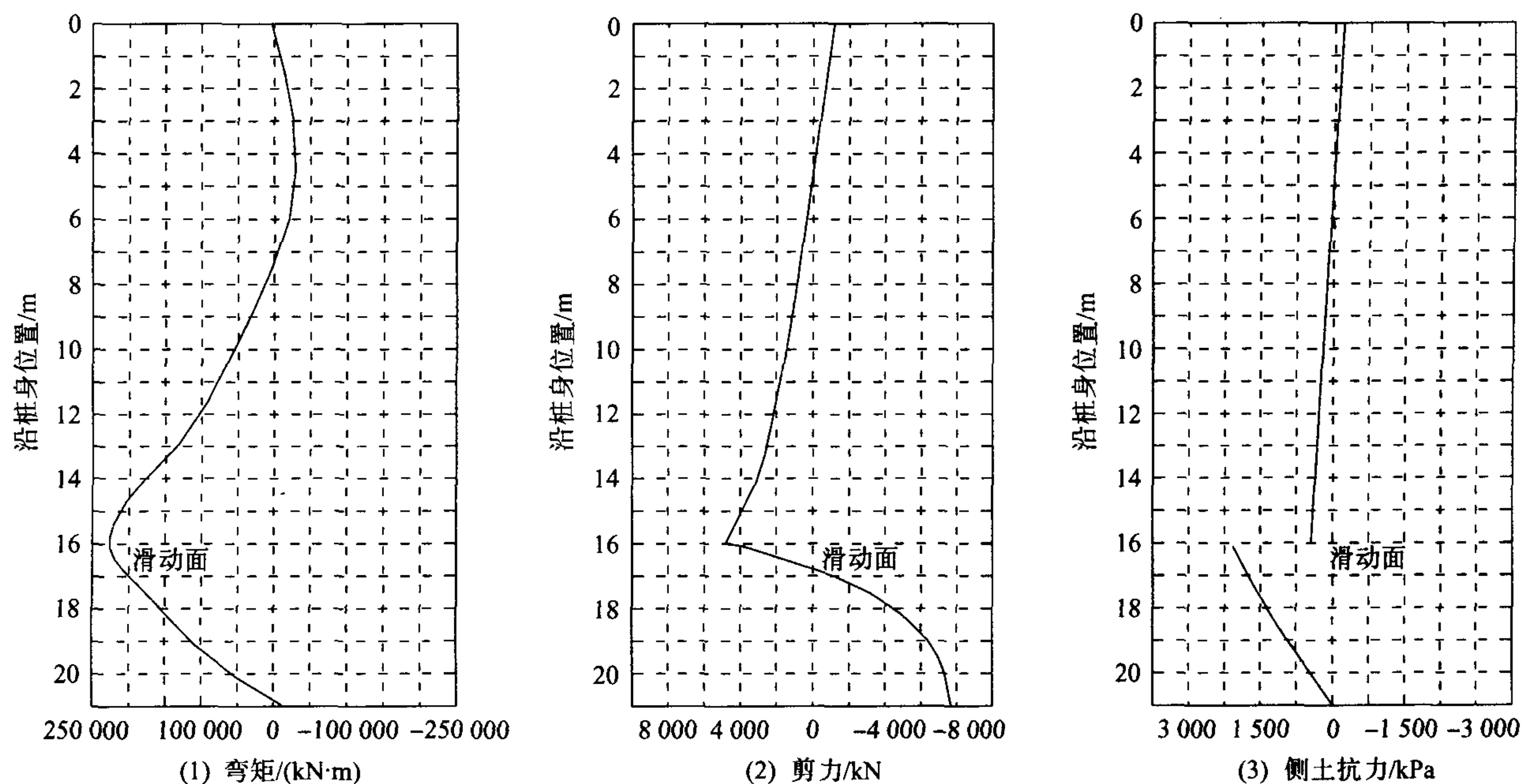


图3 锚杆抗滑桩内力和抗力

[8] 周德培,王建松. 预应力锚索桩内力的一种计算方法

[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2).

[9] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, (4).

[10] 戴自航,沈蒲生,彭振斌. 弹性抗滑桩内力计算新模式

及其有限差分解法[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4).

[11] 戴自航,沈蒲生,彭振斌. 预应力锚固抗滑桩内力计算有限差分法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3).

[12] 刘英朴. 锚索抗滑桩系统可靠性分析[D]. 长安大学, 2004.

A Study on Partial Coefficient of Reliability Design of Anchor Anti-Slide Piles System

LIU Ying-pu¹, MEN Yu-ming²

(1. Highway Survey and Design Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China;

2. Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The partial coefficient method on reliability design of the anti-slide piles system is studied in the paper, at the same time, how to select the random variability is also discussed. As a result, the efficiency mode of the system is divided into the shear destruction of piles, the pulling out or the break of the anchor and the foundation destruction caused by the strength inefficiency. Making the anchor anti-slide piles as contact system is also put forward. In the following, the partial coefficient method expression formulas of anchor and anti-slide piles are derived dividedly. In the end, the reliability design theory of anchor anti-slide piles is built. Through an example, the rationality and practicality of this method are tested.

Key words: anchor anti-slide piles; reliability; efficiency mode; partial coefficient