

基于可靠度分析的锚杆抗拔安全系数取值标准研究

王玉杰¹, 徐佳成¹, 汪小刚¹, 曾庆义²

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控重点实验室, 北京 100048; 2. 深圳钜联锚杆技术有限公司, 广东 深圳 518034)

摘要: 现行规范中关于锚杆抗拔安全设计标准, 通常是从锚杆杆体的抗拉强度、注浆体与杆体的黏结强度以及注浆体与周围岩土体的黏结强度这3方面来定义抗拔安全系数, 并建议采用统一的取值标准。实际上由于力学机理、材料性质等方面的不同, 这3种定义下的安全系数取值标准应有所不同。基于这一背景, 应用可靠度分析理论, 探讨锚杆抗拔在同一可靠度(失效概率)条件下, 这3种定义的安全系数的差别, 并为相关规程的修订工作中的锚杆抗拔安全系数取值标准的确定提供科学依据。

关键词: 抗拔安全系数; 可靠度分析; 锚杆

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)02-0303-06

作者简介: 王玉杰(1974-), 男, 博士, 教授级高工, 从事边坡稳定、岩土工程风险分析等方面的科研与咨询工作。

E-mail: wangyj@iwhr.com.

Criteria for determining factor of safety of anchor against pull-out by using reliability analysis

WANG Yu-jie¹, XU Jia-cheng¹, WANG Xiao-gang¹, ZENG Qing-yi²

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower

Research, Beijing 100048, China; 2. Shenzhen Julian Anchor Technology Co., Ltd., Shenzhen 518034, China)

Abstract: In the existing specifications and codes, the factor of safety of anchor against pull-out is generally defined by considering tensile strength of steel bar/strand, bond strength of grout and the steel bar/strand, and bond strength of grout and surrounding rock/soil. It results in three different types of factors of safety, which are being applied in practice. The current China's specifications and codes suggest the same allowable value for the above three different types of factors of safety. Actually, there is quite difference among them due to different pull-out failure mechanisms of tendon. In view of this limitation, the difference among them is studied and discussed under the same reliability (or failure probability) by using the reliability analysis, and the criteria for determining the factor of safety of anchor against pull-out are proposed.

Key words: factor of safety of anchor against pull-out; reliability analysis; anchor

0 引言

锚杆加固作为一种有效的岩土体加固技术, 现已在工程抗滑、抗倾和抗浮等工程问题的处理上得到广泛的应用^[1-3]。为保证锚杆的工程质量, 众多国家和专业学会分别推出了各自的规范规程^[4-6]。中国也先后出台了《锚杆喷射混凝土支护技术规范》、《水电水利工程预应力锚索施工规范》和《岩土锚杆(索)技术规程》等国家和行业标准^[7-9]。

在锚杆抗拔安全设计中, 目前国内外大多还是采用单一安全系数法。该方法定义明确, 计算简单, 但难以很好地考虑到结构设计中的各种不确定性因素, 且参数值的选取受人为主观因素的影响较大, 容易导致工程安全系数偏低或盲目保守^[10]。在现行的规范中, 锚杆的抗拔安全性主要从锚杆杆体的抗拉强度、

注浆体与杆体的黏结强度和注浆体与土层的黏结强度3个方面进行评价, 并采用统一的安全系数标准。由于力学机理、材料性质和载力体所处环境的不同, 从这3个方面计算所得到的锚杆抗拔安全系数是否应该采用相同的评判标准值得深入研究。

可靠度设计理论是从概率论和数理统计的角度出发, 将工程结构设计中的参数视为随机变量, 考虑到了各参数的变异性和平散性对工程安全度的影响^[11-12]。本文将以锚杆抗拔安全系数3种不同安全系数出发, 应用可靠度分析理论的方法, 探讨对在同一可靠度(或失效概率)取值条件下这3种不同安全系数取值标准,

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划专题项目(2008BAB29B01-5); 水利部公益性行业专项经费项目(200801005); 973项目(2011CB013502)

收稿日期: 2011-01-10

并为《高压喷射扩大头锚杆(索)技术规程》^[13]修订工作中锚杆抗拔安全系数取值标准的制定提供科学依据。

1 可靠度分析方法和判据

1.1 功能函数及可靠度的物理意义

假设在结构状态设计时, 其结构的极限状态方程可表达为多个随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 的方程,

$$Z(X) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad , \quad (1)$$

则结构的功能函数为

$$Z(X) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad . \quad (2)$$

式(1)在几何空间上是 n 维空间坐标系 $OX_1X_2\dots X_n$ 上的一个曲面, 这个曲面即为结构的屈服面, 将 n 维空间划分成安全区和失效区两部分。引入无量纲的标准化正态随机变量, 令

$$\bar{X}_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad . \quad (3)$$

把式(3)代入式(1)得

$$Z(\bar{X}) = g(\bar{x}_1\sigma_{x_1} + \mu_{x_1}, \bar{x}_2\sigma_{x_2} + \mu_{x_2}, \dots, \bar{x}_n\sigma_{x_n} + \mu_{x_n}) = 0 \quad . \quad (4)$$

根据可靠指标的定义

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad , \quad (5)$$

结构的可靠指标 β 可表示为标准正态空间 $\bar{O}\bar{X}_1\bar{X}_2\dots\bar{X}_n$ 中坐标原点 \bar{O} 到极限状态曲面上的最短距离, 该距离直线段与曲面的交点 P^* 称为“设计验算点”, 如图 1 所示(三维状态)。

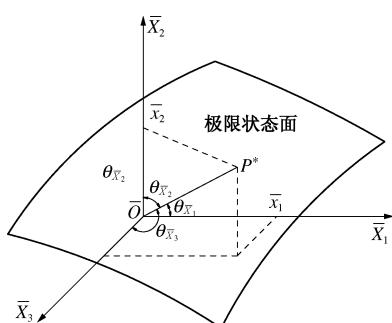


图 1 可靠指标 β 的几何意义

Fig. 1 Physical meaning of reliability index β

1.2 可靠指标的计算

如果已知功能函数 $Z(X)$ 的分布形式, 当 $Z(X)$ 服从正态分布时, 可靠指标 β 可表达为式(5); 当 $Z(X)$ 服从对数正态分布时, 可靠指标 β 的计算表达式为

$$\beta_Z = \frac{\ln(\frac{\mu_z}{\sqrt{1+V_z^2}})}{\sqrt{\ln(1+V_z^2)}} \quad , \quad (6)$$

式中, V_z 为 Z 的变异系数。

2 锚杆抗拔安全系数及可靠指标

2.1 抗拔安全系数的定义

在核算锚杆的抗拔安全性时, 通常会从锚杆杆体的抗拉强度、锚固体与杆体的黏结强度和锚固体与土层的黏结强度这 3 个方面进行评价。因此, 锚杆的抗拔安全系数 K 实际上有 3 种定义: ①按锚杆杆体的抗拉强度核算的安全系数 K_1 ; ②按注浆体与杆体的黏结强度核算的安全系数 K_2 ; ③按注浆体与土层的黏结强度核算的安全系数 K_3 。

2.2 锚杆抗拔安全系数 K_1 与可靠指标 β

根据文献[13]的规定, 锚杆杆体的抗拉强度需要满足:

$$f_{pt} \cdot A_s - K_1 \cdot T \geq 0 \quad , \quad (7)$$

式中, f_{pt} , A_s 分别为锚杆杆体的抗拉强度设计值(kPa)和截面面积, K_1 为锚杆杆体的抗拉安全系数, T 为锚杆的拉拔力设计值(kN)。

由式(7), 当按杆体的抗拉强度核算锚杆的抗拔强度时的功能函数可表示为

$$Z(X) = f_{pt} \cdot A_s - T \quad , \quad (8)$$

这里将式(8)中的 f_{pt} 和 T 视为随机变量, 且都服从正态分布。根据式(5), 可得

$$\beta_1 = \frac{A_s \cdot \mu_{f_{pt}} - \mu_T}{\sqrt{(A_s \sigma_{f_{pt}})^2 + (\sigma_T)^2}} \quad . \quad (9)$$

同时, 锚杆杆体的抗拉安全系数 K_1 可表示为

$$K_1 = \frac{A_s f_{pt}}{T} \quad . \quad (10)$$

根据《建筑物结构可靠度设计统一标准》^[14], 材料强度的标准值可取其概率分布的 0.05 分位值来确定, 即材料的强度标准值应具有不小于 95% 的保证率。则本文中锚杆杆体的抗拉强度的均值为

$$\mu_{f_{pt}} = f_{pt} / (1 - 1.645 \delta_{f_{pt}}) \quad . \quad (11)$$

将式(10)、(11)代入式(9)可得

$$\beta_1 = \frac{(K_1 - (1 - 1.645 \delta_{f_{pt}})) \cdot \mu_T \cdot \mu_{f_{pt}}}{\sqrt{(K_1 \cdot \mu_T \cdot \sigma_{f_{pt}})^2 + ((1 - 1.645 \delta_{f_{pt}}) \cdot \mu_{f_{pt}} \cdot \sigma_T)^2}} \quad . \quad (12)$$

由式(12)可见, 可靠指标 β_1 可表示为 K_1 , μ_T , $\delta_{f_{pt}}$ 和 $\mu_{f_{pt}}$ 的函数, 在 T 和 f_{pt} 的统计参数(均值和标准差)已知时, β_1 为 K_1 的单值函数。

将式(12)稍作变换, 可得

$$\beta_1 = \frac{\mu_T}{\sqrt{(A_s \sigma_{f_{pt}})^2 + (\sigma_T)^2}} K_1 - \frac{\mu_T (1 - 1.645 \delta_{f_{pt}})}{\sqrt{(A_s \sigma_{f_{pt}})^2 + (\sigma_T)^2}} \quad . \quad (13)$$

由式(13)可见, 当 A_s , μ_T , σ_T 和 $\delta_{f_{pt}}$ 已定时,

β_1 与 K_1 呈一一对应关系。

2.3 锚杆抗拔安全系数 K_2 与可靠指标 β_2

根据文献[13]中的规定, 锚杆注浆体与杆体间的黏结强度要满足:

$$L_D \cdot n \cdot \pi \cdot d \cdot \xi \cdot f_{ms} \cdot \psi - K_2 T > 0 \quad , \quad (14)$$

式中, L_D 为锚杆扩大头的长度, K_2 为抗拔安全系数, f_{ms} 为注浆体与杆体间的黏结强度标准值, d 为杆体钢筋或钢绞线的直径, ξ 为黏结强度降低系数, ψ 为扩大头长度对黏结强度的影响系数, n 为钢筋或钢绞线的根数。

由式(14), 当按注浆体与杆体间黏结强度核算锚杆的抗拔强度时的功能函数为

$$Z(X) = L_D \cdot n \cdot \pi \cdot d \cdot \xi \cdot f_{ms} \cdot \psi - T \quad , \quad (15)$$

这里将式(15)中的 f_{ms} 和 T 视为随机变量, 且都服从正态分布。根据式(5), 可得

$$\beta = \frac{L_D \cdot n \cdot \pi \cdot d \cdot \xi \cdot \psi \cdot \mu_f - \mu_T}{\sqrt{(L_D \cdot n \cdot \pi \cdot d \cdot \xi \cdot \psi \cdot \sigma_f)^2 + (\sigma_T)^2}} \quad . \quad (16)$$

另根据式(14), 安全系数 K_2 为

$$K_2 = \frac{L_D \cdot n \cdot \pi \cdot d \cdot \xi \cdot f_{ms} \cdot \psi}{T} \quad . \quad (17)$$

将式(17)代入式(16), 其它参数处理方式同2.2节, 可得

$$\beta_2 = \frac{(K_2 - (1 - 1.645\delta_{f_{ms}})) \cdot \mu_{T_{ms}} \cdot \mu_{f_{ms}}}{\sqrt{(K_2 \cdot \mu_{T_{ms}} \cdot \sigma_{f_{ms}})^2 + ((1 - 1.645\delta_{f_{ms}}) \cdot \mu_{f_{ms}} \cdot \sigma_{T_{ms}})^2}} \quad . \quad (18)$$

如2.2节, 式(16)可转换为

$$\beta_2 = \frac{\mu_T}{\sqrt{(\lambda\sigma_{f_{ms}})^2 + (\sigma_T)^2}} \cdot K_2 - \frac{\mu_T(1 - 1.645\delta_{f_{ms}})}{\sqrt{(\lambda\sigma_{f_{ms}})^2 + (\sigma_T)^2}} \quad , \quad (19)$$

$$\lambda = L_D \cdot n \cdot \pi \cdot d \cdot \xi \cdot \psi \quad . \quad (20)$$

由式(18)、(19)可见, 在 T 和 f_{ms} 的统计参数已知的条件下, β_2 也为 K_2 的单值函数, 即在 λ , μ_T , σ_T 和 $\delta_{f_{ms}}$ 已知的条件下, β_2 与 K_2 呈线性关系。

2.4 锚杆抗拔安全系数 K_3 与可靠指标 β_3

根据文献[13]中的规定, 锚杆注浆体与土层间的黏结强度要满足:

$$T_{uk} - K_3 T \geq 0 \quad , \quad (21)$$

$$T_{uk} = \pi D_1 L_d f_{mg1} + \pi D_2 L_D f_{mg2} + \lambda_2 \quad , \quad (22)$$

式中, D_1 为非扩大头注浆体的直径, L_d 为非扩大头注浆体的长度, f_{mg1} 非扩大头注浆体与岩土体的黏结强度系数, D_2 为扩大头注浆体的直径, L_D 为扩大头注浆体的长度, f_{mg2} 扩大头注浆体与岩土体的黏结强度系数; 其它符号的意义详见文献[13]。

根据式(21)、(22), 当按注浆体与土层间黏结强度核算锚杆的抗拔强度时功能函数为

$$Z(X) = \pi D_1 L_d f_{mg1} + \pi D_2 L_D f_{mg2} + \lambda_2 - T \quad . \quad (23)$$

在锚杆设计中, 式(23)中的变量 D_1 , L_d , D_2 , L_D 以及 P_D 表达式中的 γ , h , α 可以得到较精确的值, 在可靠度分析中可以作为常数来处理。这里仅考虑注浆体与土层黏结强度的变异性对安全系数和可靠度的影响, 将 f_{mg1} , f_{mg2} 和 T 视为随机变量, 且假设都服从正态分布, 暂不考虑土层参数的变异性的影响, 将 P_D 作为常数处理。由式(5)可得

$$\beta_3 = \frac{\lambda_2 + \pi D_1 L_d \mu_{f_{mg1}} + \pi D_2 L_D \mu_{f_{mg2}} - \mu_T}{\lambda_3} \quad . \quad (24)$$

根据式(14), 安全系数 K_3 为

$$K_3 = \frac{\pi D_1 L_d f_{mg1} + \pi D_2 L_D f_{mg2} + \lambda_2}{T} \quad . \quad (25)$$

设 $\omega = \mu_{f_{mg2}} / \mu_{f_{mg1}}$, 并将式(25)代入式(24)得

$$\beta_3 = \frac{\lambda_1 \cdot \mu_T}{\lambda_3 \cdot \lambda_4} \cdot K_3 - \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_3 \cdot \lambda_4} + \frac{\lambda_2 - \mu_T}{\lambda_3} \quad . \quad (26)$$

式(21)~(26)中, $\lambda_1 = D_1 L_d + D_2 L_D \omega$, $\lambda_2 = \frac{\pi}{4}$

$$(D_2^2 - D_1^2)P_D, \quad \lambda_3 = \sqrt{(\pi D_1 L_d \sigma_{f_{mg1}})^2 + (\pi D_2 L_D \sigma_{f_{mg2}})^2 + (\sigma_T)^2}, \\ \lambda_4 = D_1 L_d (1 - 1.645\delta_{f_{mg1}}) + D_2 L_D \omega (1 - 1.645\delta_{f_{mg2}})$$

由式(26)可见当锚杆的设计参数及土层强度参数已知的条件下, β_3 也为 K_3 的单值函数, 二者在参数已知条件足够的情况下呈一一对应关系。

3 算例设计及分析

为探讨锚杆抗拔安全系数与可靠指标之间的关系, 以及在不同定义方式下锚杆抗拔安全系数的差异性, 给实际工程中锚杆抗拔安全系数取值提供理论上的支撑, 本文选用了在水利工程和工民建中常用的设计抗拔力设计值为600, 1000, 2000 kN级的锚杆为算例进行可靠度分析。

3.1 基本参数

对以上3种级别的锚杆, 其设计参数依据工程经验选取, 见表1。

此外, 在本文中为突出主要问题、简化计算, 假设锚杆杆体的抗拉强度 f_{pt} 注浆体与杆体间的黏结强度 f_{ms} 、非扩大头锚固段注浆体与地层间的黏结强度 f_{mg1} 、扩大头锚固段注浆体与地层间的黏结强度 f_{mg2} 以及锚杆的设计抗拔强度 T 为服从正态分布的随机变量。锚杆的设计抗拔强度 T 的变异系数定为 $\delta_T = 0.05$ 。

3.2 锚杆安全系数及可靠指标的计算

(1) 定义一核算锚杆的抗拔安全系数与可靠指标根据文献[15], 锚杆杆体抗拉强度的变异系数为 $\delta_f = 0.072$ 。由式(9)、(10)计算所得锚杆的安全系数 K_1 和可靠指标 β_1 见表2。

表 1 永久性锚杆(钢绞线)设计参数

Table 1 Design parameters for permanent steel-strand anchors

锚杆抗拔力设计值 T/kN	钻孔直径 D/mm	钢绞线根数 n	钢绞线公称直径 d/mm	钢绞线抗拉强度设计值 f_{pt}/kPa	钢绞线抗拉强度均值 μ_f/kPa
600	≥75	4	15.2 mm	1.860×10 ⁶	2.109×10 ⁶
1000	≥115	7	15.2 mm	1.860×10 ⁶	2.109×10 ⁶
2000	≥140	13	15.2 mm	1.860×10 ⁶	2.109×10 ⁶

表 2 定义下的安全系数 K_1 和可靠指标 β_1 Table 2 Relationship between K_1 and β_1

锚杆抗拔力设计值/kN	安全系数 K_1	可靠指标 β_1
600	1.736	6.487
1000	1.823	6.842
2000	1.693	6.296

若改变表 1 中设计钢绞线的根数 n 的值, 以 1000 kN 级锚杆为例, 安全系数 K_1 与可靠指标 β_1 的变化如图 2 所示。锚杆杆体抗拉强度的变异系数 δ_f 取不同值时, 安全系数 K_1 与可靠指标 β_1 的相关关系如图 3 所示。根据《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》^[16]的规定, 对于结构构件按照一类破坏的一级、二级、三级划分时, 其承载能力极限状态的可靠指标分别对应为 3.7, 3.2, 2.7。当 β_1 为 2.7, 3.2, 3.7 时, K_1 为 1.112~1.171, 1.154~1.260, 1.197~1.363, 见图 3。

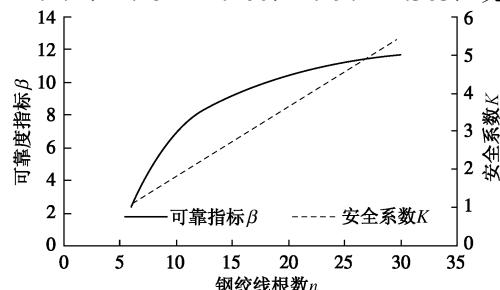


图 2 钢绞线根数 n 与抗拔安全系数 K_1 和可靠指标 β_1 的关系 ($\mu_T = 1000$ kN)

Fig. 2 Diagram of number of strands n and factor of safety K_1 versus reliability index β_1 ($\mu_T = 1000$ kN)

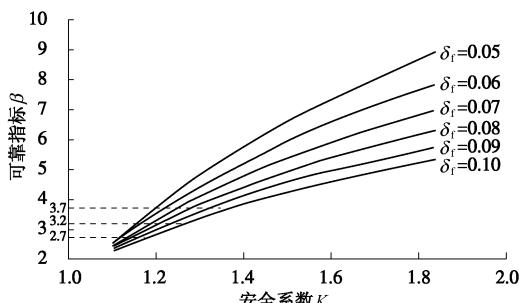


图 3 安全系数 K_1 和可靠指标 β_1 的相关关系

Fig. 3 Relationship between K_1 and β_1

(2) 定义二核算锚杆的抗拔安全系数与可靠指标

在式 (16)、(17) 中, 本文取 $\xi=1.0$, $\psi=1.0$; 根据施工经验, 取 $L_D=5$ m; 其它参数值见表 1。以 1000 kN 级锚杆为例, 安全系数 K_2 与可靠指标 β_2 随钢绞线根数 n 的变化如图 4 所示。锚杆杆体与注浆体黏结强

度的变异系数 $\delta_{f_{ms}}$ 取不同值时, 安全系数 K_2 与可靠指标 β_2 的变化关系如图 5 所示。当 β_2 为 2.7, 3.2, 3.7 时, K_2 的取值范围见图 5 和表 3。

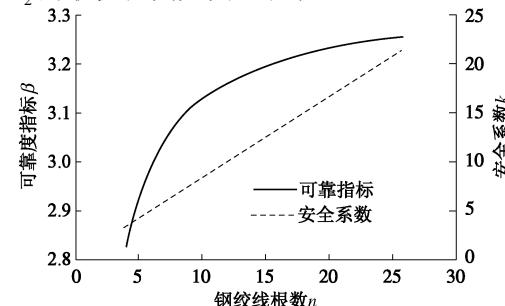


图 4 钢绞线根数 n 与安全系数 K_2 和可靠指标 β_2 的关系 ($\delta_{f_{ms}}=0.3$, $\mu_T=1000$ kN)

Fig. 4 Diagram of number of strands n and factor of safety K_2 versus reliability index β_2 ($\delta_{f_{ms}}=0.3$, $\mu_T=1000$ kN)

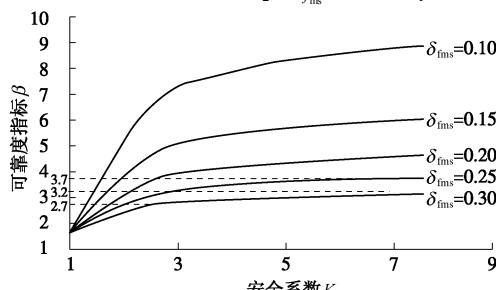


图 5 安全系数 K_2 和可靠指标 β_2 的相关关系

Fig. 5 Relationship between K_2 and β_2

表 3 安全系数 K_2 取值范围

Table 3 Range of factor of safety K_2

可靠指标 β_2	变异系数 $\delta_{f_{ms}}$	安全系数 K_2	K_2 值范围
2.7	0.1	1.171	1.171~2.671
	0.2	1.470	(δ_f : 0.1~0.3)
	0.3	2.671	
3.2	0.1	1.260	1.260~12.669
	0.2	1.877	(δ_f : 0.1~0.3)
	0.3	12.669	
3.7	0.1	1.363	1.363~2.596
	0.2	2.596	(δ_f : 0.1~0.2)
	0.3	发散	

(3) 定义三核算锚杆的抗拔安全系数与可靠指标
与前述两中定义的计算方式相同, 对式(24)、(25)
中的参数, 依据规范规定和为简化计算起见, 本文取
 $D_2=0.6$ m, $h=10$ m, $\alpha=10^\circ$, P_D 根据设计参数为
3148.47 kN。对于非扩大头注浆体与土层的黏结强度的
变异系数 $\delta_{f_{mgl}}$ 与扩大头注浆体与土层的黏结强度的

变异系数 $\delta_{f_{mg2}}$, 本文该设计算例中设 $\delta_{f_{mg}} = \delta_{f_{mg1}} = \delta_{f_{mg2}}$ 。以 1000 kN 级锚杆为例, 安全系数 K_3 与可靠指标 β_3 随钻孔直径 d 的变化如图 6 所示。 $\delta_{f_{mg}}$ 取不同值时, 安全系数 K_3 与可靠指标 β_3 的变化关系如图 7 所示。当 β_3 为 2.7, 3.2, 3.7 时, K_3 的取值范围见图 7 和表 4。

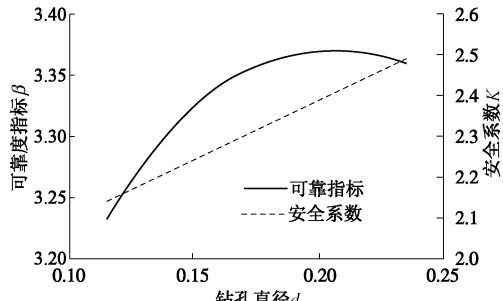


图 6 钻孔直径 d 与安全系数 K_3 和可靠指标 β_3 的关系
($\delta_{f_{mg}} = 0.4$, $\mu_T = 1000$ kN)

Fig. 6 Diagram of the diameter of bore hole d versus factor of safety K_3 and reliability index β_3 ($\delta_{f_{mg}} = 0.4$, $\mu_T = 1000$ kN)

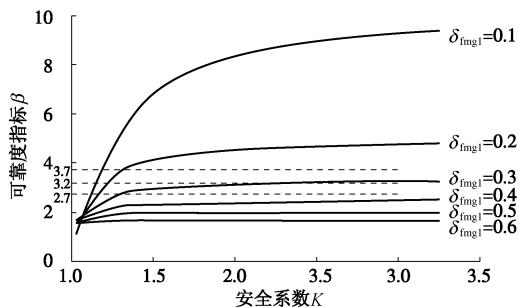


图 7 安全系数 K_3 和可靠指标 β_3 关系

Fig. 7 Relationship between K_3 and β_3

表 4 安全系数 K_3 的取值范围

Table 4 Range of factor of safety K_3

可靠指标 β_3	变异系数 $\delta_{f_{mg}}$	安全系数 K_3	K_3 值范围
2.7	0.1	1.108	$(\delta_{f_{mg}} : 0.1 \sim 0.3)$
	0.2	1.123	
	0.3	1.278	
	0.4	发散	
3.2	0.1	1.137	$(\delta_{f_{mg}} : 0.1 \sim 0.3)$
	0.2	1.195	
	0.3	2.694	
	0.4	发散	
3.7	0.1	1.17	$(\delta_{f_{mg}} : 0.1 \sim 0.2)$
	0.2	1.309	
	0.3	发散	
	0.4	发散	

3.3 计算成果分析

图 2, 4 是 1000 kN 级的锚杆按定义一和定义二的计算结果, 实际上通过对 600 kN 和 2000 kN 算例的计算发现它们具有相同的特点: ①锚杆的抗拔安全系数 K 和可靠指标 β 都随着锚杆设计参数(钢绞线根数或钢绞线总截面积)的增大而增大; ②安全系数 K 显现出随着设计参数增大而无限增大的趋势, 而可靠指标 β 的增长幅度逐渐减小直至趋于一个固定值; ③随着

钻孔直径的增大(或注浆体周长的增大), 可靠指标 β_3 有明显的峰值。

从图 3, 5, 7 可见, 锚杆的抗拔安全系数 K 和可靠指标 β 的相关关系对材料强度的变异系数比较敏感。①锚杆杆体的抗拉强度变异性小, 则锚杆的抗拔安全系数 K 和可靠指标 β 随着钢绞线根数 n 的增加二者线性关系比较明显; ②对于锚杆杆体与注浆体的黏结强度以及注浆体与土层的黏结强度的变异性较大时, 锚杆的抗拔可靠指标 β 的增大, 所对应的安全系数 K 取值范围越来越发散, 如表 3, 4 所示。

当 β 按《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》^[16]的规定取 2.7, 3.2 和 3.7 时, 所对应的安全系数取值范围与材料强度的变异系数的关系如前所示。根据工程经验及以往的相关统计资料, 若取 $\delta_f = 0.072$, $\delta_{f_{ms}} = 0.1$, $\delta_{f_{mg}} = \delta_{f_{mg1}} = \delta_{f_{mg2}} = 0.3$, 从表 2~5 中可得出对应于 β 为 2.7, 3.2 和 3.7 的安全系数 K 值见表 5。

表 5 β 为 2.7, 3.2 和 3.7 的安全系数 K 值

Table 5 Values of factor of safety for $\beta = 2.7, 3.2, 3.7$

可靠指标 β	安全系数 K		
	定义一 $\delta_f = 0.072$	定义二 $\delta_{f_{ms}} = 0.1$	定义三 $\delta_{f_{mg}} = 0.3$
2.7	1.132	1.171	1.278
3.2	1.190	1.260	2.694
3.7	1.253	1.363	∞

从表 5 可见, 对于相同的可靠指标 β 值, 按 3 种定义核算的锚杆抗拔安全系数 K 值中定义三最大、定义二其次、定义一最小。也就是说, 在这 3 种定义下由于各自的材料强度的变异性不同, 要达到相同的结构可靠指标值, 在锚杆的抗拔安全设计中要求 $K_3 > K_2 > K_1$ 。

4 讨论

在锚杆的抗拔安全设计中, 以往的做法是用单一安全系数法进行“一刀切”, 即不考虑锚杆抗拔失稳的类型, 采用一样的安全系数标准。这种做法不但掩盖了不同破坏类型的差异性, 也会给工程安全控制中带来不确定因素, 增加了工程的风险。

从本文将可靠度理论引入到锚杆的抗拔安全性评价的计算结果中来看, 可靠指标值随着设计参数尺度的增大会逐渐趋于一个稳定值或达到一个峰值后减小, 这一现象符合在结构设计中结构的安全性达到一定程度之后, 随着结构设计参数尺度的增大, 结构的安全性的增加幅度会越来越小直至不再增加, 甚至减小的规律, 也能体现出结构优化设计的概念。在锚杆的抗拔安全性设计中, 需要考虑到好几方面的因素, 但显然一味的增加设计尺度的大小不可能无限的增大

锚杆抗拔的安全性，甚至有可能影响到锚杆的抗拔安全性。本文从可靠论理论上证明了在锚杆的抗拔安全设计中，按不同定义方式进行抗拔安全系数核算时，所要求的安全系数值的大小是不一样的，这与在工程实践中的认识也是一致的。

5 结 论

(1) 锚杆的抗拔安全系数 K 和可靠指标 β 都随着锚杆设计尺度(钢绞线根数、钢绞线总截面积、钻孔孔径、注浆体长度)的增大而增大，安全系数 K 显现出随着设计尺度无限增大而无限增大的趋势，而可靠指标 β 的增长幅度越来越小直至稳定或减小。

(2) 安全系数 K 与可靠指标 β 之间在相关变量变异系数一定的条件下存在着一一对应的关系，在锚杆结构尺度已定的条件下，二者随着材料强度(杆体的抗拉强度、杆体与注浆体的黏结强度和注浆体与土层的黏结强度)的变化呈一一对应关系。

(3) 在锚杆抗拔安全系数 3 种不同的定义下由于各自的材料强度的变异性不同，要达到相同的结构可靠指标值，要求 $K_3 > K_2 > K_1$ 。

(4) 材料强度变异性的大小是影响锚杆安全系数与可靠指标相互关系的主要因素，准确合理的给出材料强度的变异系数的大小对锚杆抗拔安全可靠度分析有重要意义。

参 考 文 献：

- [1] 程良奎, 范景伦, 韩军, 等. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (CHENG Liang-kui, FAN Jing-lun, HAN Jun, et al. Ground anchorage[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 吴世伟. 结构可靠度分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988. (WU Shi-wei. Reliability analysis of structures[M]. Beijing: China Communications Press, 1988. (in Chinese))
- [3] 金亚兵, 周志雄. 软土层深基坑边坡支护工程实例分析与设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 250–257. (JIN Ya-bing, ZHOU Zhi-xiong. Case study of support to deep foundation pit slope in soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 250–257. (in Chinese))
- [4] British Standard Institution. DD81: 1982 Code of practice for ground anchorages: draft for development[S]. 1982.
- [5] 土质工学会. 日本地层锚杆设计施工基准[S]. 东京: 新日本印刷株式会社, 1990. (Geotechnical Engineering Institute. Specification for design and construction of ground anchors of Japan[S]. Tokyo: Shinnnihon Printing Co., Ltd., 1990. (in Japanese))
- [6] Post Tensioning Institute. American code PTI recommendations for prestressed rock and soil anchors[S]. 1986.
- [7] GB50086—2001 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S]. 2001. (GB50086—2001 Specification for bolt-shotcrete support[S]. 2001. (in Chinese))
- [8] DL-T 5083—2004 水电水利工程预应力锚索施工规范[S]. 2004. (DL-T 5083—2004 Specification of pre-stressing tendon construction for hydropower and water conservancy project[S]. 2004. (in Chinese))
- [9] CECS22: 2005 岩土锚杆(索)技术规程[S]. 2005. (CECS22: 2005 specification for design and construction of ground anchors[S]. 2005. (in Chinese))
- [10] 陈晓平, 孙慕群, 吴起星. 软基上复杂土坡稳定可靠度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 925–929. (CHEN Xiao-ping, SUN Mu-qun, WU Qi-xing. Reliability study on complex slope stability on soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 925–929. (in Chinese))
- [11] PALLE Thoft-Christensen, MUROTSU Y. Application of structure systems reliability theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1986.
- [12] 董 聪. 现代结构系统可靠性理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (DONG Cong. Modern structural system reliability theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [13] 苏 JG/T 033—2009 高压喷射扩大头锚杆(索)技术规程[S]. 2009. (Su JG/T 033—2009 Technical specification for high pressure jet expanding head anchor[S]. 2009. (in Chinese))
- [14] GB50068—2001 建筑物结构可靠度设计统一标准[S]. 2001. (GB50068—2001 Unified standard for reliability design of building structures[S]. 2001. (in Chinese))
- [14] 李扬海, 鲍卫刚, 等. 公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997. (LI Yang-hai, BAO Wei-gang, et al. Structural reliability and probabilistic limit state design of highway and bridge structure[M]. Beijing: China Communications Press, 1997. (in Chinese))
- [16] GB50199—94 水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S]. 1994. (GB50199—94 Unified design standard for reliability of hydraulic engineering structures[S]. 1994. (in Chinese))