

基于安全性和经济性多目标优化的 岩质边坡锚固计算方法

彭普, 李泽, 张小艳, 胡政, 陈瑜, 刘诚
(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 以节理岩质边坡为研究对象, 基于塑性力学的极值理论, 将滑动面的安全系数和锚固造价共同作为目标函数, 将锚固力方向、锚杆长度、结构面的剪力和法向力作为决策变量, 结合岩块的平衡方程约束条件、结构面的屈服条件和锚杆的附加约束条件, 建立安全性和经济性多目标的岩质边坡锚固非线性数学规划模型, 最后采用线性加权法和求解多目标规划模型得到安全系数、锚固造价的最优值以及最优锚固角, 该方法具有概念明确、计算精度高等特点。

关键词: 岩质边坡; 锚固计算; 多目标优化; 安全性; 经济性; 安全系数; 非线性数学规划模型

中图分类号: TV223.3; U213.1⁺58

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0220-08

Rock slope anchoring calculation method based on safety and economy multi-objective optimization

PENG Pu, LI Ze, ZHANG Xiaoyan, HU Zheng, CHEN Yu, LIU Cheng

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Taking the jointed rock slope as the research object, the multi-objectives of safety and economy nonlinear mathematical programming model of rock slope anchorage is established based on the extreme value theory of plastic mechanics. This model uses safety coefficient of the sliding surface and the anchor cost as the objective functions, and the direction of the anchoring force, the length of the anchors, the shearing force and normal force of the structural plane as the decision variables. It combines the equilibrium equation constraint of the rock blocks, the yield condition of the structural plane and the additional constraints of the anchors. According to this model, the safety coefficient, optimal anchor cost and optimal anchoring angle are obtained using the linear weighted sum method. This method has the merits of clear concept and high calculation accuracy.

Key words: rock slope; anchoring calculation; multi-objective optimization; safety; economy; safety coefficient; nonlinear mathematical programming model

1 研究背景

近年来,岩质边坡稳定性问题受到广泛的关注,岩质边坡中的节理和断层通常是促使岩质边坡失稳破坏的主要原因,工程实践中通常采用预应力锚杆进行加固^[1-6]。预应力锚杆是通过内锚固段固定后,在外锚头进行张拉,将预应力线材的张拉应力施加于岩体或结构物上的一种加固措施^[7-9]。国内外

众多学者对岩质边坡锚固机理进行了不断的探索,取得了一定的成果,如王秒等^[10]对顺层节理岩质边坡在地震作用下的加固机理进行了探索;陈晓裕等^[11]对岩质边坡的稳定性进行了分析并对岩质边坡加固效应进行了研究;刘建华等^[12]对简谐振动下采用锚杆加固的边坡受力进行了探索;张晓悦等^[13]采用商业软件 ABAQUS 对采用群锚加固的岩质边坡进行评价;郑筱彦^[14]、夏元友等^[15]分别采用数值

收稿日期:2019-12-12; 修回日期:2019-12-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51564026);昆明理工大学人才培养项目(KKSY201904006)

作者简介:彭普(1995-),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要从事岩土塑性极限分析数值方法的研究工作。

通讯作者:李泽(1981-),男,云南丽江人,博士,教授,主要从事岩土工程领域的研究工作。

模拟和数值实验的方法对岩质边坡的锚固进行了分析;卢坤林等^[16]基于极限平衡分析法提出三维滑体锚固力计算方法;窦灿等^[17]采用极限平衡分析方法对加固和未加固的高边坡进行稳定性分析。

在实际工程中,为保证工程安全,通常采用较为保守的锚固设计,安全性虽然得到了保证,但由此导致工程造价有所提高。《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086-2015)给出最优锚固角的经验计算公式为:

$$\beta_{\text{优}} = \theta - (45^\circ + \varphi/2) \quad (1)$$

式中: θ 为滑动面与水平面的夹角,逆时针方向为正, ($^\circ$); φ 为结构面的摩擦角, ($^\circ$); $\beta_{\text{优}}$ 为锚杆与水平面的夹角,逆时针方向为正, ($^\circ$)。

规范所给公式(1)主要是通过调整锚杆安装角度,使滑动方向的分力和滑面法向分力乘以滑面摩擦系数产生的摩擦阻力之和达到最大。图1为边坡锚杆锚固角示意图,图1表明,当 $\alpha = \beta$ 时,可得最大抗力为 $P_{\text{抗max}} = P/\cos\varphi$, 此时锚杆最长,锚固造价最高,不经济。经过综合比较,规范给出最优锚固角的计算公式,即公式(1)。但该计算公式是一个经验公式,并不能保证锚固效果和锚固造价同时达到最优,不能达到既安全又经济的目的。对此,众多学者进行了研究,吕庆等^[18]对边坡锚固合理间距进行了研究,实际生产中可以极大地降低工程造价,但并未考虑锚固方向的影响,因而锚固并不一定最安全;刘佳龙等^[19]对岩质高边坡采用优化锚杆参数的方法对边坡稳定性进行研究,得出随着锚固角度的增大,边坡安全系数先增大后减小,该方法虽然可以找到最大安全系数对应的锚固角度,但锚固造价可能较高;李泽等^[20]对楔形体边坡进行研究,通过最优化原理计算得到楔形体的最优锚固角,该计算方法虽然也可以得到安全系数最大的锚固角度,但锚固造价仍可能较高。锚固效果一般取决于锚固力的大小与方向,当锚固力的大小确定时,锚固力的方向发生改变也会导致锚固效果随之发生改变。锚固造价一般取决于锚杆长度,锚杆长度越长锚固造价越高,反之亦然。

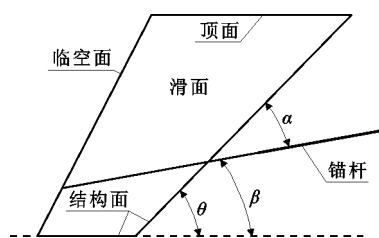


图1 边坡锚杆锚固角示意图

当前岩质边坡锚固设计主要存在以下问题:工程实践中,通常安全性得到了保证但经济性存在较大的不足;采用规范给定最优锚固角的计算方法,安全性和经济性均未能保证最优。

基于这种现状,本文以节理岩质边坡为研究对象,基于塑性力学的极值理论,假设滑动岩体为刚性块体、假设结构面上的法向力与剪力满足 Mohr - Coulomb 屈服条件,以岩质边坡安全系数为安全性目标函数、以岩质边坡锚固造价为经济性目标函数,并以锚固力方向、锚杆长度、结构面的剪力和法向力为决策变量,构建岩块的平衡方程约束条件、结构面的屈服条件和锚杆的附加约束条件,建立安全性和经济性多目标的岩质边坡锚固非线性数学规划模型,最后采用线性加权和法构造评价函数,将求解多目标优化问题转化为求解单目标优化问题,获得同时满足安全性和经济性最优的安全系数和锚固造价,以及最优锚固角。

2 基于安全性和经济性多目标优化的岩质边坡锚固计算模型的建立

根据岩质边坡的实际情况拟定计算参数,包括岩质边坡的高度、岩质边坡几何关键点的位置坐标、锚固点的位置坐标、岩体的容重、结构面的数量、每个结构面的倾角、每个结构面的黏聚力及摩擦角和锚杆锚固力的大小。

2.1 岩质边坡的受力分析

图2为岩块受力分析示意图。如图2所示,定义坐标系 (x, y) , 假设该岩块的形心 O 上作用沿 x 方向的外力为 f_x , 沿 y 方向的外力为 f_y , 沿锚杆方向的锚固力为 F_a , F_a 与坐标轴 x 的夹角为 θ_x , θ_x 以逆时针方向为正, S_i 为第 i 个结构面上的剪力, S_i 以逆时针转动为正, i 为结构面的个数, N_i 为第 i 个结构面上的法向力, N_i 以受压为正, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$, n 为结构面的数量。

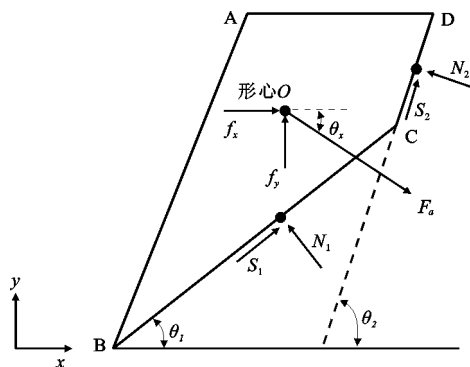


图2 岩块受力分析示意图

2.2 建立岩质边坡安全性和经济性的双目标函数

2.2.1 建立安全性目标函数 对于岩质边坡稳定性问题,通常通过强度折减法使其达到极限状态,此时强度储备系数即为安全系数,安全系数越大岩质边坡安全性越高。

本文定义安全系数为:

$$K = \tan \varphi / \tan \varphi' = c / c' \quad (2)$$

式中: K 为安全系数; c 、 φ 分别为结构面原始的黏聚力(kPa)和摩擦角($^\circ$); c' 、 φ' 分别为结构面进行强度折减以后的黏聚力(kPa)和摩擦角($^\circ$)。

将岩质边坡的安全系数作为安全性目标函数,并寻求岩质边坡安全系数的最大值,建立如下安全性目标函数:

$$\text{Maximize: } K \quad (3)$$

式中: Maximize 为“求最大”函数。

2.2.2 建立经济性目标函数 岩质边坡采用锚杆加固,经济性以锚固造价体现,锚固造价越小经济性越高,将锚固造价作为经济性目标函数,并寻求锚固造价的最小值,建立如下经济性目标函数:

$$\text{Minimize: } P \quad (4)$$

式中: Minimize 为“求最小”函数; P 为锚杆造价,元。

锚杆造价仅是锚杆总长度的函数,锚杆的造价可表示为:

$$P = F(l) \quad (5)$$

式中: F 为价格函数; l 为锚杆总长度, m。

锚杆总长度应为锚固段、自由段和外锚段的长度之和,即:

$$l = l_a + l_f + l_o \quad (6)$$

式中: l_a 为锚固段长度, m; l_f 为锚杆自由段长度, m; l_o 为外锚段长度。

2.3 建立岩质边坡安全性和经济性多目标优化的非线性数学规划模型的约束条件

约束条件包括:岩块平衡方程约束条件、结构面的屈服条件、锚杆的附加约束条件。

2.3.1 岩块平衡方程约束条件 如图2所示,对岩块进行受力分析,其形心上受到外力、结构面上的剪力、结构面上的法向力以及锚固力的作用而保持平衡。其平衡方程可写为:

$$\begin{cases} F_a \cos \theta_x + f_x + \sum_1^n S_i \cos \theta_i - \sum_1^n N_i \sin \theta_i = 0 \\ F_a \sin \theta_x + f_y + \sum_1^n S_i \sin \theta_i + \sum_1^n N_i \cos \theta_i = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: F_a 为锚固力大小, kN; θ_x 为锚固力方向与 x

轴正向夹角,以逆时针方向为正, ($^\circ$); θ_i 为第 i 个结构面与 x 轴正向夹角, ($^\circ$); f_x 为作用在岩块沿 x 方向的外力, kN; f_y 为作用在岩块沿 y 方向的外力, kN; S_i 为第 i 个结构面上的剪力,以逆时针转动为正, kN, $i = 1, 2, \dots, n$; n 为结构面的个数; N_i 为第 i 个结构面上的法向力, kN, 以受压为正, $i = 1, 2, \dots, n$; n 为结构面的个数。

2.3.2 结构面的屈服条件 在外荷载作用下,当荷载达到或超过极限荷载时,结构面就会产生破坏,假定岩体为刚性块体,其不会产生任何破坏,故岩质边坡的破坏只发生在岩块的结构面上,结构面需满足 Mohr - Coulomb 屈服条件式,第 i 个结构面上的屈服条件写为:

$$|S_i| - N_i \tan \varphi_i / K - c_i l_i / k \leq 0 \quad (8)$$

式中: l_i 为第 i 个结构面的长度, m; c_i 、 φ_i 分别为第 i 个结构面的黏聚力(kPa)和摩擦角($^\circ$); $i = 1, 2, \dots, n$ 。

2.3.3 锚杆的附加约束条件 根据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330 - 2017),锚杆长度应满足:

$$l_a \geq \frac{\xi N_{ak}}{\pi \cdot D \cdot f_{rbk}} \quad (9)$$

式中: l_a 为锚固段长度, m; ξ 为锚杆锚固体抗拔安全系数; N_{ak} 为锚杆轴向拉力标准值, kPa; f_{rbk} 为岩土层与锚固体极限粘结强度标准值, kPa; D 为锚杆锚固段钻孔直径, m。

根据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330 - 2017) 构造设计要求,锚杆自由段长度按外锚头到潜在滑裂面的长度计算;预应力锚杆自由段应不小于 5 m,即锚杆自由段长度需满足:

$$l_f \geq ((x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2)^{1/2} \quad (10)$$

$$l_f \geq 5 \quad (11)$$

式中: l_f 为锚杆自由段长度, m; x_a 为锚杆与潜在滑裂面交点的横坐标值, m; y_a 为锚杆与潜在滑裂面交点的纵坐标值, m; x_0 为锚杆与临空面交点的横坐标值,即外锚头的横坐标值, m; y_0 为锚杆与临空面交点的纵坐标值,即外锚头的纵坐标值, m。

锚固造价的附加约束条件:对于锚杆而言,每段的造价只是长度的函数,故函数式(5)可写为:

$$P = F(l) = k_1 l_a + k_2 l_f + k_3 l_o \quad (12)$$

式中: k_1 为锚固段价格系数; k_2 为锚杆自由段价格系数; k_3 为外锚段价格系数。

2.3.4 建立岩质边坡安全性和经济性多目标优化的非线性数学规划模型 建立以岩质边坡的安全系数和锚固造价为双目标函数,同时满足岩块平衡方

程约束条件、结构面屈服条件和锚杆的附加约束条件的岩质边坡安全性和经济性多目标优化的非线性数学规划模型为:

$$\left. \begin{aligned} & \text{Maximize: } K \\ & \text{Minimize: } P \\ & \text{Subject to:} \\ & F_a \cos \theta_x + f_x + \sum_1^n S_i \cos \theta_i - \sum_1^n N_i \sin \theta_i = 0 \\ & F_a \sin \theta_x + f_y + \sum_1^n S_i \sin \theta_i + \sum_1^n N_i \cos \theta_i = 0 \\ & |S_i| - N_i \tan \varphi_i / K - c_i l_i / K \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ & l_a \geq \frac{\xi N_{ak}}{\pi \cdot D \cdot f_{rbk}} \\ & l_f \geq ((x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2)^{1/2} \\ & l_f \geq 5 \\ & P = F(l) = k_1 l_a + k_2 l_f + k_3 l_0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

3 多目标优化的非线性数学规划模型的求解策略

公式(13)为一个考虑了岩质边坡安全性及经济性的多目标非线性数学规划模型,对于拥有多个目标函数的问题通常采用评价函数法进行求解;通过构造评价函数,将求解多目标规划问题转化为求解单目标规划问题。具体求解步骤分述如下。

3.1 建立安全性最优的非线性数学规划模型

根据安全性目标函数式(3)与约束条件式(7)~(12),建立岩质边坡安全性最优的非线性数学规划模型为:

$$\left. \begin{aligned} & \text{Maximize: } K \\ & \text{Subject to:} \\ & F_a \cos \theta_x + f_x + \sum_1^n S_i \cos \theta_i - \sum_1^n N_i \sin \theta_i = 0 \\ & F_a \sin \theta_x + f_y + \sum_1^n S_i \sin \theta_i + \sum_1^n N_i \cos \theta_i = 0 \\ & |S_i| - N_i \tan \varphi_i / K - c_i l_i / K \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ & l_a \geq \frac{\xi N_{ak}}{\pi \cdot D \cdot f_{rbk}} \\ & l_f \geq ((x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2)^{1/2} \\ & l_f \geq 5 \\ & P = F(l) = k_1 l_a + k_2 l_f + k_3 l_0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中:安全系数 K 为目标函数,其决策变量为 θ_x 、 S_i 、

N_i 、 l_a 、 l_f 、 l_0 。本文采用罚函数法求解得到安全系数 K 的最大值为 $K_{\max}^1$ 。

3.2 建立经济性最优的非线性数学规划模型

根据目标函数式(4)与约束条件公式(7)~(12),建立岩质边坡经济性最优的非线性数学规划模型为:

$$\left. \begin{aligned} & \text{Minimize: } P \\ & \text{Subject to:} \\ & F_a \cos \theta_x + f_x + \sum_1^n S_i \cos \theta_i - \sum_1^n N_i \sin \theta_i = 0 \\ & F_a \sin \theta_x + f_y + \sum_1^n S_i \sin \theta_i + \sum_1^n N_i \cos \theta_i = 0 \\ & |S_i| - N_i \tan \varphi_i / K - c_i l_i / K \leq 0 \quad i = (1, 2, \dots, n) \\ & l_a \geq \frac{\xi N_{ak}}{\pi \cdot D \cdot f_{rbk}} \\ & l_f \geq ((x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2)^{1/2} \\ & l_f \geq 5 \\ & P = F(l) = k_1 l_a + k_2 l_f + k_3 l_0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中:锚固造价 P 为目标函数,其决策变量为 θ_x 、 S_i 、 N_i 、 l_a 、 l_f 、 l_0 。本文采用罚函数法求解得到锚固造价 P 的最小值 $P_{\min}^2$ 。

3.3 采用线性加权和法构造评价函数

线性加权和法的基本思想为:根据各个目标函数在问题中的重要程度,分别赋予一个权系数,再将带权系数的目标函数相加而构成评价函数,安全性和经济性多目标优化的评价函数按下式计算:

$$Z = \omega K / K_{\max}^1 + (1 - \omega) P_{\min}^2 / P \quad (16)$$

式中: Z 为评价函数; $K_{\max}^1$ 为安全性最优时的安全系数; $P_{\min}^2$ 为经济性最优时的锚固造价; ω 为安全系数的权系数, ω 值介于 0 至 1 之间。

3.4 将评价函数作为目标函数

将采用线性加权和法构造的评价函数作为目标函数,则目标函数写为:

$$\text{Maximize: } Z = \omega K / K_{\max}^1 + (1 - \omega) P_{\min}^2 / P \quad (17)$$

3.5 建立岩质边坡经济性和安全性最优的线性加权和法的非线性数学规划模型

根据目标函数式(17)和约束条件式(7)~(12),岩质边坡安全性和经济性多目标优化的非线性数学规划模型转化为用公式(18)表示的单目标最优化的非线性数学规划模型。

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize: } Z = \omega K/K_{\max}^1 + (1 - \omega) P_{\min}^2 / P \\
 & \text{Subject to:} \\
 & F_a \cos \theta_x + f_x + \sum_1^n S_i \cos \theta_i - \sum_1^n N_i \sin \theta_i = 0 \\
 & F_a \sin \theta_x + f_y + \sum_1^n S_i \sin \theta_i + \sum_1^n N_i \cos \theta_i = 0 \\
 & |S_i| - N_i \tan \varphi_i / K - c_i l_i / K \leq 0 \quad i = (1, 2, \dots, n) \\
 & l_a \geq \frac{\xi N_{ak}}{\pi \cdot D \cdot f_{rbk}} \\
 & l_f \geq ((x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2)^{1/2} \\
 & l_f \geq 5 \\
 & P = F(l) = k_1 l_a + k_2 l_f + k_3 l_0
 \end{aligned} \quad (18)$$

式中: Z 为目标函数; 决策变量为 θ_x 、 S_i 、 N_i 、 l_a 、 l_f 、 l_0 、 K 、 P 。

本文采用罚函数法求解该目标函数, 计算结果包括安全系数最优值 K_{opt} 、锚固造价最优值 P_{opt} 以及锚杆的最优锚固方向角 $\theta_{x\ opt}$ 。

当前对于非线性问题的求解, 一般采用可行性方法、罚函数法、拉格朗日塑性乘子法和序列二次规划法等。本文采用罚函数法对岩质边坡安全性和经济性线性加权和法的非线性规划问题公式(18)进行求解, 得到安全系数最优值 K_{opt} 、锚固造价最优值 P_{opt} 以及锚杆的最优锚固方向角 $\theta_{x\ opt}$ 。计算流程见图3。

4 实例工程计算与分析

为验证本文计算方法的正确性, 选取云南省某水电工程岩质边坡实例进行计算分析, 实例岩质边坡示意图见图4。

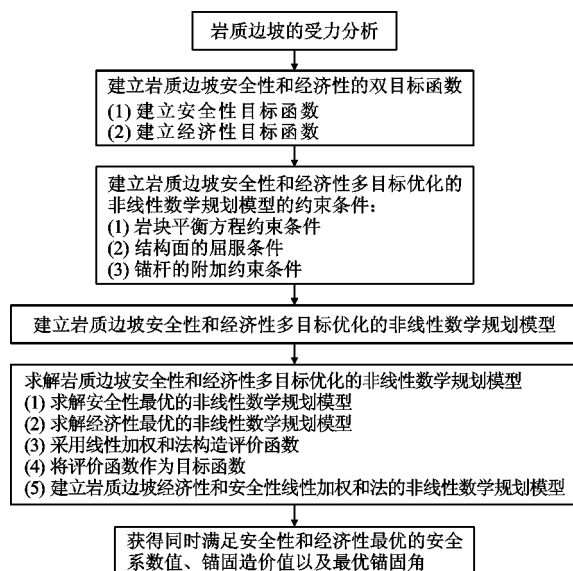


图3 岩质边坡安全性和经济性计算方法程序框图

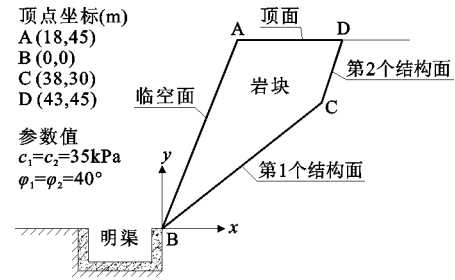


图4 实例工程岩质边坡示意图

该边坡高度为45 m; 边坡几何关键点的位置坐标为: A(18 m, 45 m)、B(0, 0)、C(38 m, 30 m)、D(43 m, 45 m); 锚杆锚固位置坐标为(10 m, 25 m); 岩体的容重为20 kN/m³, 结构面的数量为2个; 结构面BC的倾角为38°、结构面CD的倾角为72°; 两个结构面的黏聚力均为35 kPa、内摩擦角均为40°; 锚杆锚固力分别取500、1 000、1 500、2 000 kN 4种情况进行计算。锚固段价格系数 k_1 取2 000 元/m; 锚杆自由段价格系数 k_2 取2 500 元/m, 锚杆锚固体抗拔安全系数 ξ 取2.4, 岩土层与锚固体极限粘结强度标准值 f_{rbk} 取180 kPa, 锚杆锚固段钻孔直径 D 取90 mm。

首先进行岩质边坡安全性最优或经济性最优的锚固计算, 结果如表1所示。由表1可见, 随着锚固力的增大, 安全系数和锚固造价均增大; 当安全性最优时所得锚固造价相较于经济性最优时有所增大, 当经济性最优时所得安全系数相较于安全性最优时有所降低。计算表明采用安全性最优或经济性最优的方法, 不能同时保证安全系数和锚固造价均达到最优, 不能达到既安全又经济的目的。在实际工程中需同时考虑工程的安全性和经济性。本文通过式(17)目标函数中的 ω 来表征安全性和经济性的重要性权重, ω 值越大安全性所占重要程度越大, 经济性所占重要程度越小; $\omega = 0.5$ 时, 安全性和经济性的重要程度相同。 $\omega = 0.5$ 时, 岩质边坡在不同锚固力作用下安全性和经济性最优时计算结果如表2所示。由表2可见, 随着锚固力的增大, 最优安全系数和最优锚固造价均增大, 且最优安全系数相较经济性最优时均有所提高, 最优锚固造价相较安全性最优时均有所降低。在锚固力为2 000 kN时, 最优安全系数相较单独考虑经济性最优时提高了9.06%, 最优锚固造价相较单独考虑安全性最优时降低了9.96%。

图5为 $F_a = 1\ 000$ kN时的 $\omega K/K_{\max}$ 、 $(1 - \omega) P_{\min}/P$ 、 Z 的计算结果曲线。由图5可看出, 随着 ω 的增大, 安全系数 K 对 Z 的影响逐渐增大而锚固造

价 P 对 Z 的影响逐渐减小,当 $\omega = 0.5$ 时,安全系数和锚固造价对 Z 的影响相当,即安全系数和锚固造价对目标函数式(17)中 Z 的贡献相同,安全性和经济性所占重要程度相同;工程中若对安全性考虑较多,建议 ω 取 $0.5 \sim 0.7$,若对经济性考虑较多,建议 ω 取 $0.3 \sim 0.5$ 。

表 1 实例工程安全性最优或经济性最优时的计算结果

锚固力/ kN	安全性最优		经济性最优		$\frac{K_{\max}^1 - K^2}{K_{\max}^1} / \%$	$\frac{P^1 - P_{\min}^2}{P_{\min}^2} / \%$
	$K_{\max}^1$	$P^1 / \text{元}$	K^2	$P_{\min}^2 / \text{元}$		
0	1.267					
500	1.351	102279.6	1.287	89697.2	4.71	12.30
1000	1.444	154956.5	1.389	144744.2	3.81	6.59
1500	1.547	213008.9	1.490	203953.1	3.64	4.25
2000	1.629	292671.0	1.465	263371.7	10.07	10.01

表 2 实例工程 $\omega = 0.5$ 时安全性和经济性均最优的计算结果

锚固力/kN	K_{opt}	$P_{\text{opt}} / \text{元}$	$\theta_{x\text{opt}} / (^\circ)$	$\frac{K_{\text{opt}} - K^2}{K_{\text{opt}}} / \%$	$\frac{P^1 - P_{\text{opt}}}{P_{\text{opt}}} / \%$
0	1.267				
500	1.319	89921.8	-57.21	2.43	12.08
1000	1.415	146627.8	-30.84	1.84	5.37
1500	1.502	204267.0	-39.94	0.80	4.10
2000	1.611	263507.8	-37.31	9.06	9.96

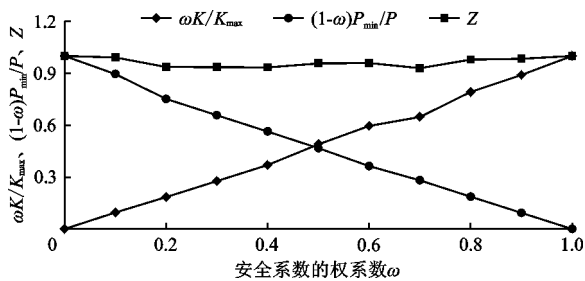


图 5 安全系数的权系数 ω 对计算结果的影响 ($F_a = 1000 \text{ kN}$)

图 6 为 $\omega = 0.5$ 、黏聚力 $c = 35 \text{ kPa}$ 时,不同内摩擦角情况下锚固力 F_a 与安全系数 K 的关系曲线;图 7 为 $\omega = 0.5$ 、黏聚力为 35 kPa 时,不同锚固力情况下内摩擦角 φ 与安全系数 K 的关系曲线。对图 6、7 进行分析得出:(1)在结构面黏聚力和内摩擦角一定的情况下,安全系数随锚固力的增大而增大;在

结构面黏聚力和锚固力一定的情况下,安全系数随结构面内摩擦角的增大而增大。(2)在岩质边坡节理面参数相同条件下,锚固力越大,岩质边坡越安全,符合锚杆锚固的一般规律。这是因为锚杆支护作为边坡主动支护措施的一种,一方面可以降低岩体的下滑力,另一方面可以增大岩体的抗滑力,从而使得岩质边坡的安全系数大大提高。(3)在岩质边坡结构面黏聚力锚固力相同条件下,结构面内摩擦角越大,岩质边坡越安全,这是因为增大结构面内摩擦角可以增大结构面的抗滑力从而增大岩体安全系数。

图 8 为 $\omega = 0.5$ 、黏聚力 $c = 35 \text{ kPa}$ 时,不同内摩擦角情况下锚固力 F_a 与锚固造价 P 的关系曲线;图 9 为 $\omega = 0.5$ 、黏聚力 $c = 35 \text{ kPa}$ 时,不同锚固力情况下内摩擦角 φ 与锚固造价 P 的关系曲线。

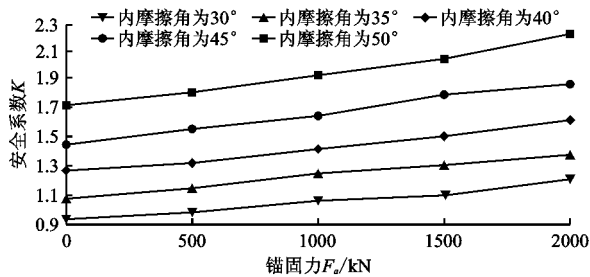


图 6 不同内摩擦角情况下锚固力 F_a 与安全系数 K 的关系曲线 ($\omega = 0.5$, 黏聚力 $c = 35 \text{ kPa}$)

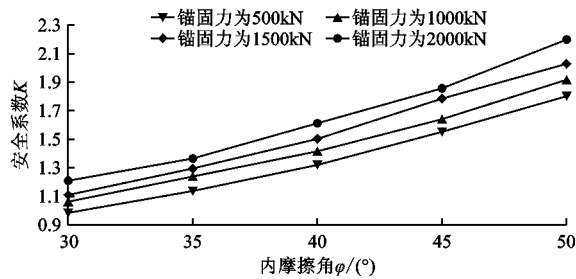


图 7 不同锚固力情况下内摩擦角 φ 与安全系数 K 的关系曲线 ($\omega = 0.5$, 黏聚力 $c = 35 \text{ kPa}$)

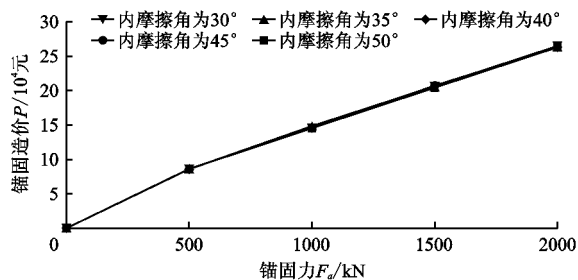


图8 不同内摩擦角情况下锚固力 F_a 与锚固造价的关系曲线
($\omega = 0.5$, 黏聚力 $c = 35$ kPa)

由图8可看出,在结构面黏聚力和内摩擦角一定的情况下,锚固造价随锚固力的增大而增大。这是因为在岩质边坡节理面参数相同条件下,锚固造价由外锚段、自由段和锚固段造价所组成。外锚段造价通常为一确定值;自由段造价与自由段长度有关,在优化计算过程中,由于自由段长度变化幅度较小,所以自由段造价变化幅度较小;锚固造价主要与锚固段长度有关,锚固力越大锚固段长度越长,锚固造价越高。

由图9可看出,在结构面黏聚力和锚固力一定的情况下,锚固造价趋于相对稳定。这是因为锚杆的外锚段和锚固段长度均为确定值,而自由段长度在优化计算的过程中变化也较小,所以锚固造价变化幅度较小。

图10为 $\omega = 0.5$ 、内摩擦角 $\varphi = 40^\circ$ 时,不同黏聚力情况下锚固力 F_a 与安全系数 K 的关系曲线;图

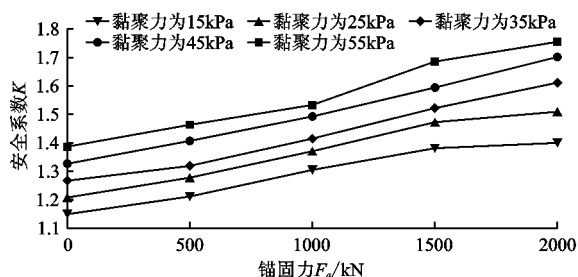


图10 不同黏聚力情况下锚固力 F_a 与安全系数 K 的关系曲线($\omega = 0.5$, 内摩擦角 $\varphi = 40^\circ$)

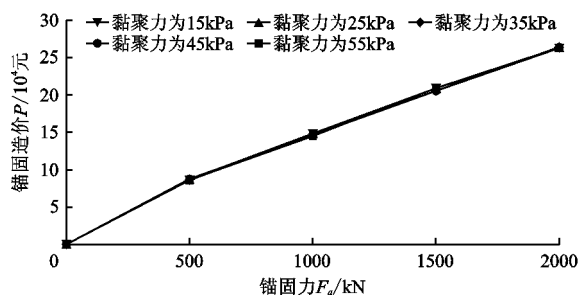


图12 不同黏聚力情况下锚固力 F_a 与锚固造价 P 的关系曲线($\omega = 0.5$, 内摩擦角 $\varphi = 40^\circ$)

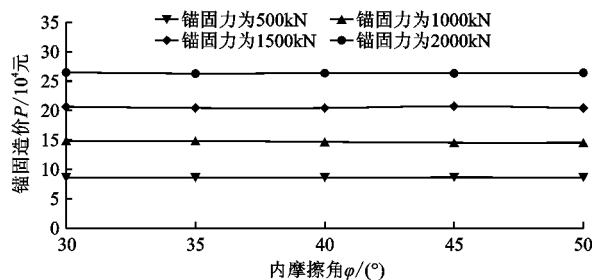


图9 不同锚固力情况下内摩擦角 φ 与锚固造价的关系曲线
($\omega = 0.5$, 黏聚力 $c = 35$ kPa)

11为 $\omega = 0.5$ 、内摩擦角 $\varphi = 40^\circ$ 时,不同锚固力情况下黏聚力 c 与安全系数 K 的关系曲线。对图10、11进行分析得出:(1)在结构面黏聚力和内摩擦角一定的情况下,安全系数随锚固力的增大而增大;在结构面内摩擦角和锚固力一定的情况下,安全系数随结构面黏聚力的增大而增大。(2)在岩质边坡节理面参数相同条件下,增大锚固力可以从降低岩体的下滑力以及增大岩体的抗滑力两方面来提高岩质边坡的安全性。(3)在岩质边坡结构面内摩擦角和锚固力相同条件下,结构面黏聚力越大,岩质边坡安全性越高,这是因为增大结构面的黏聚力可以增大结构面的抗滑力从而提高岩体安全系数。

图12为 $\omega = 0.5$ 、内摩擦角 $\varphi = 40^\circ$ 时,不同黏聚力情况下锚固力 F_a 与锚固造价 P 的关系曲线。图13为 $\omega = 0.5$ 、内摩擦角 $\varphi = 40^\circ$ 时,不同锚固力情况下黏聚力 c 与锚固造价 P 的关系曲线。

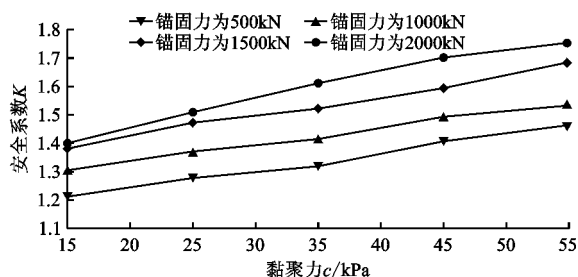


图11 不同锚固力情况下黏聚力 c 与安全系数 K 的关系曲线($\omega = 0.5$, 内摩擦角 $\varphi = 40^\circ$)

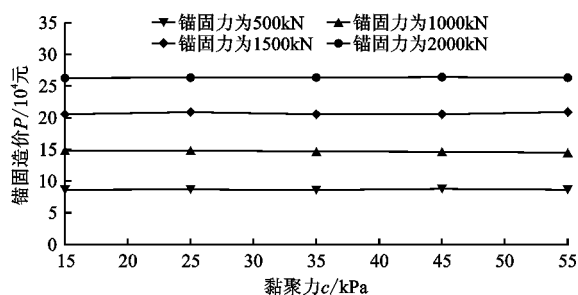


图13 不同锚固力情况下黏聚力 c 与锚固造价 P 的关系曲线($\omega = 0.5$, 内摩擦角 $\varphi = 40^\circ$)

由图12可看出,在结构面黏聚力和内摩擦角一定的情况下,锚固造价随锚固力的增大而升高,这是因为在岩质边坡节理面参数相同条件下,外锚段为一确定值,而自由段长度在优化计算过程中变化较小,锚固造价主要与锚固段的造价相关,锚固力越大,锚固段长度也就越长,故锚固造价也就越高。由图13可看出,在结构面内摩擦角和锚固力一定的情况下,锚固造价趋于相对稳定。这是因为锚杆的外锚段和锚固段长度不变,而自由段长度变化较小,所以锚固造价变化也较小。

5 结 论

(1)在传统的岩质边坡锚固计算中,当安全性最优时岩质边坡锚固造价通常较高,而经济性最优时岩质边坡安全系数通常较低,不能很好地平衡二者之间的关系。岩质边坡锚固计算本质上是寻求使得锚固造价和安全系数均最优的计算结果,目前工程实践中并未做到全面考虑。

(2)本文提出了基于安全性和经济性多目标优化的岩质边坡锚固计算方法,可以同时得到安全性和经济性均最优的岩质边坡锚固角度、安全系数及锚固造价。

(3)本文提出的计算方法相比安全性最优时锚固造价大大降低,相比经济性最优时安全系数大大提高,很好地协调了工程实践中安全性和经济性不统一的问题,为实际工程提供了新的切实可行的计算方法。

参考文献:

- [1] 康红普,王金华,林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 649-664.
- [2] 王贵华,李长冬,陈文强,等. 复合多层滑床条件下锚索抗滑桩受力特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2219-2230.
- [3] LIN Peng, LIU Xiaoli, ZHOU Weiyan. et al. Cracking, stability and slope reinforcement analysis relating to the Jinping dam based on a geomechanical model test [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 8(7): 4393-4410.
- [4] TIWARI G, LATHA G M. Design of rock slope reinforcement: An Himalayan Case study [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(6): 2075-2097.
- [5] WANG Enhua, WANG Zhide, JIANG Limin. Reinforcement and characteristic analysis of bolt technology applied in bedding rock slope [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 580-583: 445-449.
- [6] 杨逾,郭锐. 多台阶岩质边坡的稳定性分析及加固效应[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(6): 607-612.
- [7] 母传伟,何方维,裴恒. 三维有限元法强度折减法在某岩质边坡加固中的应用[J]. 中国矿业, 2015, 24(9): 137-140.
- [8] 敬静,饶秋华,刘利松. 节理岩质边坡桩基加固的稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(8): 2774-2780.
- [9] 廖峻,李江腾,郝瑞卿,等. 顺层岩质边坡稳定性及预应力锚杆加固研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(1): 231-236.
- [10] 王秒,李海波,刘亚群,等. 顺层岩质边坡预应力锚索抗震加固机制研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3555-3560.
- [11] 陈晓裕,林永贵. 岩质边坡的稳定性分析及加固效应研究[J]. 中外公路, 2012, 32(5): 24-29.
- [12] 刘建华,汪优,付康林,等. 简谐振动荷载下锚杆加固岩质边坡的受力分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(S1): 85-90.
- [13] 张晓悦,胡凯,乐豪峰,等. 基于 ABAQUS 的群锚加固岩质边坡效果评价方法研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(4): 83-85.
- [14] 郑筱彦. 预应力锚索对岩质边坡加固效应的数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 118-122.
- [15] 夏元友,李奇敏,张亮亮,等. 群锚加固岩质边坡锚索受力特点数值试验[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(11): 79-83.
- [16] 卢坤林,王运敏,朱大勇. 三维滑体锚固力计算方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 501-506+516.
- [17] 窦灿,商开卫,张伯涛. 杨房沟水电站高边坡块体极限平衡稳定性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(1): 50-54.
- [18] 吕庆,孙红月,尚岳全,等. 预应力锚索框格梁体系加固破碎岩质边坡合理间距研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 136-140.
- [19] 刘佳龙,贺雷,冯自霞,等. 岩质高挖方边坡锚杆参数优化设计研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 375-380+396.
- [20] 李泽,张立翔,曾云. 岩质边坡楔形体最优锚固角的计算方法: 中国, 201310206747.8[P]. 2013-08-28.