

文章编号: 1000-7598-(2009) 07-2173-06

非预应力格构锚固机制与优化设计研究

祝启坤¹, 覃 雯¹, 盛建豪²

(1. 武汉工程大学 环境与城市建设学院, 武汉 430073; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要: 非预应力格构锚固是集坡面生态防护、浅表层与深层加固于一体的新型边坡加固技术, 但目前无论就其加固力学机制, 还是工程设计计算方法而言, 学术界尚未达成共识。在分析边坡开挖失稳破坏力学过程与稳定性工况的基础上, 依据应力扩散原理与 Mohr-Coulomb 强度理论, 探讨了非预应力全长黏结格构锚固通过自主调动稳定区岩土体的力学强度来有效改善不稳定区边坡的受力状态和主动约束边坡不稳定变形持续发展的综合加固机制, 包括双向挤密效应、锚拉效应、销钉效应、框箍效应与土拱效应; 依照优化设计的基本原理与有关规范, 构建了格构框架的优化设计数学模型与相关约束方程; 利用 Matlab7.0 编写了该结构优化模型的自动寻优程序; 通过在三峡库区某边坡治理工程中的应用, 详细地介绍了其优化设计的计算过程; 与基于工程类比法的原设计相比, 可达到节省工程造价和优化设计结果的目的。

关 键 词: 边坡治理; 非预应力; 格构锚固; 机制; 优化设计

中图分类号: U 416.1

文献标识码: A

Study of mechanism and optimization design of non-prestressing frame anchor

ZHU Qi-kun¹, QIN Wen¹, SHENG Jian-hao²

(1. School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Non-prestressing frame anchor is a new slope prevention technology which sets surface ecological protection, shallow and deep reinforcement in one, but regardless of its reinforcing mechanism, or engineering design method, academia has not yet reached a consensus. On the basis of analysis of failure mechanism and stability operating during slope excavation, according to stress dispersion principle and Mohr-Coulomb strength theory, the reinforcing mechanism of non-prestressing frame anchor is discussed, including two-way compaction effect, anchor-pull effect, pin effect, skeleton-hoop effect and soil arching effect. These comprehensive effects can effectively improve the loading states of slope and actively constrain the deformation of slope in unsteady zone by initiatively transferring the mechanical strength of steady zone. According to the general principles of optimization design and relevant codes, the optimization design model of frame structure and associated constraint equations are constructed. The automatic optimizing programs of the model are compiled in Matlab7.0. The processes of optimization calculation are detailedly introduced by the practical application of a slope treatment project in the Three Gorges Area. The optimization design method can achieve savings in project cost and the purpose of optimization design results comparing with original design based on analogue method.

Key words: slope treatment; non-prestressing; frame anchor; mechanism; optimization design

1 前 言

近年来, 随着我国水利、交通、城市建设的高速发展, 特别是三峡工程、高等级公路工程的修建以及人们对边坡治理工程生态环境的重视, 非预应力格构锚固在我国各类人工和自然边坡的整治工程中得到了日益广泛的应用, 并逐步成为一种主要的新型边坡加固与防护技术, 然而, 目前无论对其加

固力学机制, 还是工程设计计算方法学术界尚未达成共识, 工程设计主要依赖工程类比与经验^[1-4]。

为此, 本文探讨了非预应力格构锚固的机制, 并依据优化设计的基本原理提出了其结构优化设计的方法与计算过程。

2 锚固机制分析

如图 1 所示, 以某均质路堑垂直开挖边坡为例,

随着边坡开挖水平应力 σ_x 卸除与开挖高度 H 不断增大等原因,坡体内部应力必将产生不断调整与重分布^[5],当 H 不大时,开挖边坡宏观上则表现为以弹性能释放为主的坡体卸荷变形,该变形将随时间的增长而渐趋稳定,同时在坡体内部会形成一个安全系数 K 为最小的优势潜滑面,此时该潜滑面上的最小安全系数 $K_{\min}$ 将大于规范要求的安全系数 $[K]$,边坡处于稳定状态(见工况1);随着 H 持续增大,优势潜滑面将不断向坡体内部转移与发展,且 $K_{\min}$ 也将渐小,当其满足 $[K] \geq K_{\min} > 1$ 时,可认为在优势潜滑面上的一些薄弱点已开始出现若干相互不连通的局部剪损塑性变形区,坡体将由原来稳定的弹塑性变形逐渐向不稳定的塑性变形过渡,边坡处于基本稳定状态(见工况2);当 H 达到某一临界高度 H_{cr} 后,则位于优势潜滑面上若干局部剪损塑性区已基本连续贯通,边坡处于极限平衡状态,即 $K_{\min} = 1$ (见工况3);当 $H > H_{cr}$ 后,边坡将发生滑动破坏而处于不稳定状态,即 $K_{\min} < 1$ (见工况4)。

由此可见,边坡开挖失稳破坏实质上是因对坡体水平应力的卸除以及开挖高度的不断增加而导致其内部剪应力逐渐增大与岩土体力学强度逐渐剪损下降的2个力学作用过程,同时也是边坡由稳定的弹塑性变形逐渐向不稳定塑性变形的发生与发展过程。土工现场试验和模型试验均表明:边坡的失稳与塑性区的扩展或剪切破坏带的形成密切相关^[6]。为预防因边坡开挖卸载对岩土体内部的损伤破坏和力学强度的持续下降,当边坡进入工况2前,应事先适时地对开挖坡体实施加固处理。

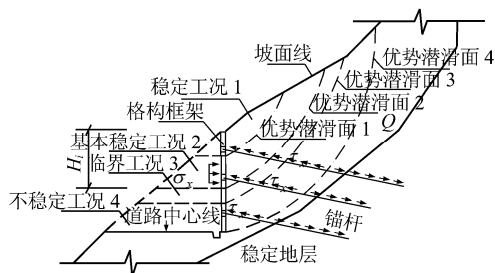


图1 边坡开挖稳定工况

Fig.1 Stability condition of slope excavation

如图2所示,当边坡采用非预应力全长黏结格构锚固后,因岩土体黏聚力、内摩擦角以及坡体主动变形作用,必定在非稳定变形区内的砂浆锚固体周围与格构框架上分别产生与坡体变形方向一致的负摩阻力 τ_x 和形变压力 p_i ,且二者一起带动锚杆协同受力变形。与此同时, τ_x 和 p_i 也必将产生一个大

小相等但作用方向相反的 $-\tau_x$ 和 $-p_i$ 作用于被加固的岩土体上。根据应力扩散原理可知, $-\tau_x$ 和 $-p_i$ 在被加固的岩土体中将以一定的压力扩散角 θ_1 向坡体内部扩散,进而产生正向的压力扩散效应。同理,对潜滑面以外稳定区的岩土体而言,由于受锚拉力作用,同样会在其内部产生反向的压力扩散效应,这两种压力扩散效应在被加固岩土体内部叠加后,可在非稳定主动变形区特别是在优势潜滑面附近形成“双向挤密效应”。该效应实质上相当于对开挖边坡施加了一个水平向的应力增量 $-\Delta\sigma_x$,并弥补由于边坡开挖卸荷使得坡体内部水平应力 σ_x 的降低,减小了最大主应力与最小主应力差。

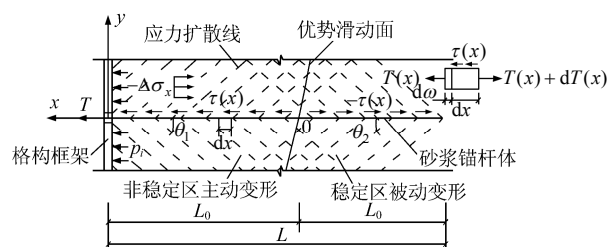


图2 双向挤密效应

Fig.2 Two-way compaction effect

非预应力格构锚固除在被加固岩土体中依靠坡体的主动变形自主形成“双向挤密效应”外,由于砂浆锚固体与面层格构梁在被加固坡体中组成了整体的空间框架结构体系,且该框架体系通过锚杆将非稳定区坡体的下滑荷载传递给潜滑面以外稳定区的岩土体,同时砂浆锚杆在潜滑面位置还起到了阻滑抗剪的作用,因此,对被加固坡体而言,非预应力格构锚固不仅可产生有效的“锚拉效应”与“销钉效应”^[7-8],而且还会产生空间骨架的“框箍效应”。此外,当锚杆间距适当时,由于钢筋混凝土框架梁及砂浆锚固体对非稳定区岩土体变形的自主约束作用,也会使得非稳定区岩土颗粒或块体在变形过程中因相互间产生“楔紧”作用,而在锚杆体骨架间形成卸荷变形时的“土拱效应”^[9-11]。这些效应的综合效能实质上相当于增大了被加固岩土体的黏聚力值 Δc ,进而弥补了在边坡开挖卸载时因内部剪损而导致的岩土体力学强度下降。

对正常应力状态下的垂直开挖边坡来讲,非预应力格构锚固对不稳定边坡的上述综合加固效应可用Mohr-Coulomb强度理论直观地反映出来,如图3所示。当边坡未开挖前,位于非稳定区坡体内部任意点 A 处于初始应力状态①,Mohr应力圆大小取决于最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 ,而与中间主

应力 σ_2 无关, 其强度包线为 τ_{f1} , 此时 A 点处于稳定状态; 当边坡开挖后且不进行加固处理时, 由于开挖卸载将使得 σ_3 降低至 σ'_3 , 若 τ_{f1} 不变, 则 A 点已超出其屈服强度而发生剪切破坏, 见应力状态②; 当边坡边开挖边进行加固时, 由于非预应力格构锚固的上述综合加固效应, 一方面可使 σ_3 的降低程度得到有效遏制, 即 $(\sigma'_3 < \sigma''_3 < \sigma_3)$, 另一方面还可使其强度包线提高至 τ_{f2} , 见应力状态③, 此时 A 点将处于稳定状态。

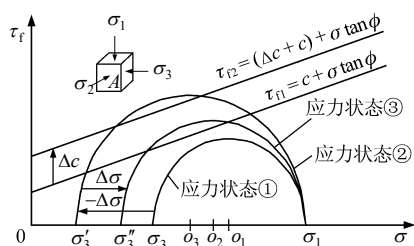


图3 加固前后受力特性变化

Fig.3 Mechanical characteristics before and after grouting

由此可见, 由砂浆锚杆、面层框架组成的非预应力格构锚固支护结构通过与被加固岩土体三者间的相互作用和协调受力变形, 不仅可有效降低被加固岩土体的内部剪应力强度, 而且还可提高其力学强度, 并通过充分调动和发挥稳定区岩土体的力学强度来改善不稳定区坡体的受力状态, 进而达到有效遏制和主动约束边坡不稳定变形的持续发展。

根据图2中锚固体受力平衡条件及材料力学公式, 可得锚固体轴向拉力 T 、浆土界面摩阻力 τ 以及轴向位移 S 随任意截面 x 的变化关系式。

$$T(x) = p_i S_x S_y + \pi D \int_0^x \tau(x) dx \quad (0 \leq x \leq L_0) \quad (1)$$

$$T(x) = p_i S_x S_y + \pi D \int_0^{L_0} \tau(x) dx - \pi D \int_{L_0}^x \tau(x) dx \quad (L_0 < x \leq L_a) \quad (2)$$

$$\tau(x) = \frac{1}{\pi D} \frac{dT(x)}{dx} \quad (2)$$

$$S(x) = S_0 - \frac{1}{AE} \int_0^x T(x) dx \quad (3)$$

式中: S_x 、 S_y 分别为格构梁纵、横向间距 (mm); D 为锚固体直径 (mm); S_0 为锚固体坡面位移 (mm); A 为锚固体截面积 (mm²); E 为锚固体弹性模量 (N/mm²)。

根据式(1)~(3), 并借鉴桩侧负摩阻力的分析方法^[12], 进一步分析可得锚固体轴向拉力、浆土界面摩阻力以及锚固体与被加固岩土体之间相对位

移沿锚杆全长上的变化特性, 见图4。

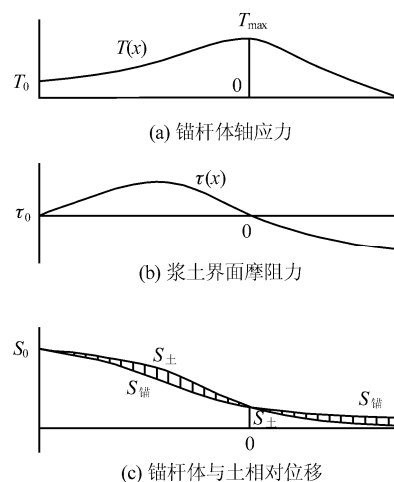


图4 锚固体受力与变形特性

Fig.4 Mechanical properties of anchoring body

3 结构优化设计原理

最优化设计方法是应用数学的一个分支, 其数学模型一般由设计变量、目标函数和约束条件三个要素构成。目标函数的最优值通常用最小值或最大值来表示^[13], 即:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \quad x \in U \subset E^n \\ \text{s.t.} \quad & h_i(x) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ & g_i(x) \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, p) \end{aligned} \quad (4)$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$$

式中: $\min$ 为极小化; “s. t.” 为满足的约束条件, $h_i(x)$ 、 $g_i(x)$ 分别为等式和不等式约束条件, x 为设计变量。

4 结构优化模型

根据优化设计原理, 格构锚固结构优化设计可表述为: 在满足相关约束条件下, 寻求一组设计变量和成本函数, 通过构建和解算数学模型, 使治理工程的总造价为最小。考虑当前锚杆设计已有相关规范可依^[14], 故选取设计变量和成本函数如下: 梁截面高度 x_1 (mm); 梁截面宽度 x_2 (mm); 梁下部纵向钢筋截面积 x_3 (mm²); 梁上部纵向钢筋截面积 x_4 (mm²); 混凝土成本 Z_c (元); 纵向钢筋成本 Z_{As} (元); 箍筋成本 Z_g (元)。由此可建立如下格构锚固结构优化模型 $f(x)$:

$$\begin{aligned} f(x) = f(x_1, x_2, x_3) = Z_c + Z_{As} + Z_g = C_c x_1 x_2 L + \\ \gamma L x_3 C_{As} + \gamma C_g (2x_1 + 2x_2 - 8a' + e) A_{sv1} \frac{L}{S} \rightarrow \min \end{aligned} \quad (5)$$

式中: C_c 为混凝土单价 (元/mm³); C_{As} 、 C_g 分别为纵向钢筋与箍筋单价 (元/kg); L 为梁长 (mm); γ 为钢筋密度 (kg/mm³); a' 为混凝土保护层厚度 (mm); e 为钢筋弯钩长度 (mm); A_{sv1} 为单根箍筋截面积 (mm²); S 为箍筋间距 (mm)。

依据相关规范^[15]分别建立如下约束方程:

(1) 正截面强度约束

$$\left. \begin{aligned} f_y x_3 \gamma_{s1} (x_1 - a') + f'_y x_4 (x_1 - 2a') &\geq 1.5 M_{\max 1} \\ f_y x_4 \gamma_{s1} (x_1 - a') + f'_y x_3 (x_1 - 2a') &\geq 1.5 M_{\max 2} \\ 0.5 f_y (x_3 + x_4) \gamma_{s2} (x_2 - a') + 0.5 f'_y (x_3 + x_4) \cdot \\ (x_2 - 2a') &\geq 1.5 M_{\max 3} \\ \gamma_{s1} &= 1 - 0.5 \frac{f_y (x_3 + x_4)}{f_c x_2 (x_2 - a')}, \quad \gamma_{s2} = 1 - 0.5 \frac{f_y (x_3 + x_4)}{f_c x_1 (x_2 - a')} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $M_{\max 1}$ 、 $M_{\max 2}$ 、 $M_{\max 3}$ 分别为格构梁在锚杆作用方向上下部和上部以及在顺坡方向上最大弯矩设计值 (N·mm); f_y 、 f'_y 为钢筋抗拉、抗压强度 (N/mm²); f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值 (N/mm²); A_{s1} 、 A'_{s1} 为受拉钢筋、受压钢筋截面积 (mm²); γ_s 为受拉区混凝土塑性影响系数; h_0 为截面有效高度 (mm)。

(2) 斜截面强度约束

$$\left. \begin{aligned} 0.7 f_t x_2 (x_1 - a') + 1.25 f_{yv} \frac{n A_{sv1}}{S} (x_1 - a') &\geq V_{\max 1} \\ 0.7 f_t x_1 (x_2 - a') + 1.25 f_{yv} \frac{n A_{sv1}}{S} (x_2 - a') &\geq V_{\max 2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $V_{\max}$ 为最大剪力设计值 (N); f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值 (N/mm²); b 为矩形截面宽度 (mm); f_{yv} 为箍筋抗拉强度设计值 (N/mm²); n 为箍筋肢数。

(3) 纵向配筋约束

$$\left. \begin{aligned} \max \left(0.45 \frac{f_t}{f_y}, 0.0015 \right) &\leq \frac{x_3}{x_2 (x_1 - a')} \leq 0.544 \frac{f_c}{f_y} \\ \max \left(0.45 \frac{f_t}{f_y}, 0.0015 \right) &\leq \frac{x_4}{x_2 (x_1 - a')} \leq 0.544 \frac{f_c}{f_y} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(4) 箍筋约束

$$\rho_{sv \min} = 0.24 \frac{f_t}{f_y} \leq \frac{n A_{sv1}}{x_2 S} \quad (9)$$

式中: $\rho_{sv \min}$ 为箍筋最小配筋率。

(5) 裂缝约束

$$\left. \begin{aligned} 1.21 \times 10^{-5} \varphi \frac{M_{\max}}{x_3 (x_1 - a')} \left(1.9 a' + 0.032 \frac{\sqrt{x_3}}{x_3} x_1 x_2 \right) &\leq \omega_{\lim} \\ \varphi &= 1.1 - 0.28 \frac{f_{tk} x_1 x_2 (x_1 - a')}{M_{\max}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: φ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数; f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值 (N/mm²); $\omega_{\lim}$ 为最大裂缝宽度限值 (mm)。

(6) 断面约束

$$\left. \begin{aligned} 300 &\leq x_1 \leq 500; \quad 250 \leq x_2 \leq 400 \\ 308 &\leq x_3; \quad 308 \leq x_4; \quad x_4 \leq x_3; \quad x_2 \leq x_1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

5 求解方法与步骤

由于格构锚固优化设计模型中含非线性函数, 故该优化设计为非线性规划问题, 本文采用 Matlab 7.0 软件编程计算, 该算法具有函数表达简洁及使用方便灵活的特点。

格构锚固结构优化计算框图如图 5 所示。

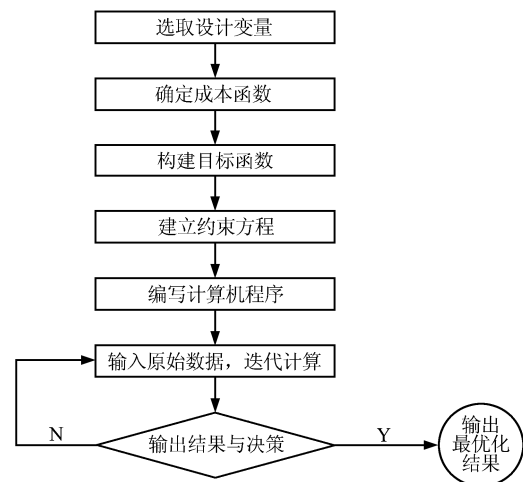


图 5 结构优化设计框图

Fig.5 Flow chart for structure optimization design

6 工程应用

(1) 工程概况

拟治理边坡位于三峡库区巴东县境内, 为三峡工程移民建房与道路开挖所致。治理区出露地层为第四系碎石土 (Q^{edl})、滑坡堆积体 (Q^{del}) 及三叠系泥质粉砂岩基岩 (T_2b^2)。边坡类型为强风化岩质顺向坡。边坡长 140 m, 坡高 6.0~26.7 m, 平均坡度 40°。由稳定性分析可知, 该边坡总体上处于基本稳定状态, 即当遇降雨、振动等不利外部因素作

用时, 有可能发生牵引式滑动失稳破坏。经方案论证, 采用非预应力全长黏结格构锚固治理方案。为达到节省工程造价之目的, 本文采用上述优化设计模型对治理工程方案进行结构优化设计。

依据岩土工程勘察报告, 经理正软件计算, 典型剖面共需布置锚杆 15 排, 间距 3 m×3 m, 其中 1~10 排锚杆长 14 m, 锚杆 1φ32HRB335, 11~15 排锚杆长 8 m, 锚杆 1φ28HRB335, 可满足边坡对锚固稳定性要求。

(2) 纵梁优化设计

根据工程类比, 初选构纵梁断面高×宽为 400 mm×300 mm, C25 混凝土, 采用 Winkler 地基梁法对梁的内力进行计算, 梁上、下部最大负弯矩为: $|M_{\max 1}| = 26.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $|M_{\max 2}| = 40.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$; 最大剪力为: $V_{\max} = 78.0 \text{ kN}$ 。

依据《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002) 等, 力学参数及相关指标取值为: C25 混凝土, $f_{\text{ck}} = 16.7 \text{ N/mm}^2$, $f_{\text{tk}} = 1.78 \text{ N/mm}^2$, $f_c = 11.9 \text{ N/mm}^2$, $f_t = 1.78 \text{ N/mm}^2$, $C_c = 167.35 \times 10^{-9} \text{ 元/mm}^3$; HRB335 钢筋, $f_{\text{yk}} = 335 \text{ N/mm}^2$, $f_y = f'_y = 300 \text{ N/mm}^2$, $C_{\text{As}} = 3.85 \text{ 元/kg}$; HPB235 钢筋, $f_{\text{yk}} = 235 \text{ N/mm}^2$, $f_y = f'_y = 210 \text{ N/mm}^2$, $C_g = 3.85 \text{ 元/kg}$; $\alpha' = 35 \text{ mm}$; $\gamma = 7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$; $A_{\text{sv1}} = 50.3 \text{ mm}^2$, $S = 150 \text{ mm}$; $L = 15 \times 10^3 \text{ mm}$; $\rho_{\text{svmin}} = 0.24 f_t / f_y$; $\omega_{\text{lim}} = 0.2 \text{ mm}$ 。

(3) 优化设计模型

将上述参数代入目标函数 $f(x)$ 及各个约束方程后可得:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) = f(x_1, x_2, x_3) = Z_c + Z_{\text{As}} + Z_g = \\ & 167.35 \times 10^{-9} \times 15 \times 10^3 x_1 x_2 + 7.68 \times 10^{-6} \times 15 \times \\ & 10^3 (x_3 + x_4) + 7.85 \times 10^{-6} \times 3.85 \times 50.3 \times \\ & \frac{15 \times 10^3}{150} (2x_1 + 2x_2 - 8 \times 35 + 100) \\ \text{s. t.} \quad & 1.5 \times 40.5 \times 10^6 - 300 x_3 \cdot \\ & \left(1 - 0.5 \times \frac{300(x_3 + x_4)}{11.9 x_2 (x_1 - 35)} \right) (x_1 - 35) - \\ & 300_y x_4 (x_1 - 2 \times 35) \leq 0 \quad (\text{下部正截面约束}) \\ & 1.5 \times 26.1 \times 10^6 - 300 x_4 \left(1 - 0.5 \times \frac{300(x_3 + x_4)}{11.9 x_2 (x_1 - 35)} \right) \cdot \\ & (x_1 - 35) - 300_y x_3 (x_1 - 2 \times 35) \leq 0 \\ & (\text{上部正截面约束}) \\ & 78 \times 10^3 - 0.7 \times 1.27 x_2 (x_1 - 35) - 1.25 \times 210 \times \\ & \frac{2 \times 50.3}{150} \cdot (x_1 - 35) \leq 0 \quad (\text{斜截面约束}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 1.21 \times 10^{-5} \left(1.1 - 0.28 \frac{1.78 x_1 x_2 (x_1 - 35)}{40.5 \times 10^6} \right) \frac{40.5 \times 10^6}{x_3 (x_1 - 35)} \times \\ & \left(1.9 \times 35 + 0.032 \frac{\sqrt{x_3}}{x_3} x_1 x_2 \right) - 0.2 \leq 0 \quad (\text{变形缝约束}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 0.45 \times \frac{1.27}{300} \leq \frac{x_3}{x_2 (x_1 - 35)} \leq 0.544 \times \frac{11.9}{300} \\ & 0.45 \times \frac{1.27}{300} \leq \frac{x_4}{x_2 (x_1 - 35)} \leq 0.544 \times \frac{11.9}{300} \\ & (\text{受力筋约束}) \end{aligned}$$

$$0.24 \times \frac{1.27}{210} - \frac{2 \times 50.3}{150 x_2} \leq 0 \quad (\text{箍筋约束})$$

$$300 \leq x_1 \leq 500; \quad 250 \leq x_2 \leq 400$$

$$308 - x_3 \leq 0; \quad 308 - x_4 \leq 0;$$

$$x_4 - x_3 \leq 0; \quad x_2 - x_1 \leq 0 \quad (\text{尺寸约束})$$

(4) 优化结果

运用 Matlab7.0 软件编程, 对上述目标函数进行自动寻优计算, 可得到单根纵梁的优化计算结果为: $h \times b = 373 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$; $A_{\text{s1}} = 345 \text{ mm}^2$; $A'_{\text{s1}} = 308 \text{ mm}^2$; $F(1) = 692 \text{ 元}$ 。为考察纵梁在上述约束条件下, 常规断面尺寸对目标函数(即造价)的影响, 同时又拟定了三种常用的断面方案代入程序进行寻优计算, 即 $F(2)$: $h \times b = 400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$; $F(3)$: $h \times b = 350 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$; $F(4)$: $h \times b = 350 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 计算结果见表 1。

表 1 优化计算结果

Table 1 Optimization calculation results

方案	H / mm	B / mm	A_{s1} / mm^2	A'_{s1} / mm^2	$f(x)$ / 元
F(1)	373	250	345	308	692.0
F(2)	400	300	308	308	765.7
F(3)	350	250	418	308	694.7
F(4)	350	300	427	308	736.0

对设计变量做标准化修正, 可得各方案结构优化设计的最终结果, 见表 2。

表 2 修正后优化计算结果

Table 2 Optimization calculation results after updating

方案	h / mm	b / mm	A_{s1} / mm^2	A'_{s1} / mm^2	$f(x)$ / 元
F(1)	400	250	2Φ16	2Φ14	743.9
F(2)	400	300	2Φ14	2Φ14	765.7
F(3)	350	250	2Φ18	2Φ14	744.0
F(4)	350	300	2Φ16	2Φ14	755.4

由表2可知： $F(1)$ 和 $F(3)$ 两方案造价的差值很小，可同视为优化方案，比较 $F(1)$ 和 $F(3)$ ， $F(3)$ 格构梁的高宽比更加合理，仅底部纵向受力筋截面略大于 $F(1)$ ，故选 $F(3)$ 作为本治理工程格构纵梁的最优结构设计断面。

(5) 格构横梁优化设计

同理，可对格构横梁的断面与配筋进行优化设计，优化计算结果为： $h \times b = 300 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ ； $A_{s1} = 308 \text{ mm}^2$ ； $A'_{s1} = 308 \text{ mm}^2$ ； $f(x) = 607.14$ 元。

对比本治理工程原设计方案可知：优化设计后框架梁的直接工程造价为71.95万元，比原设计方案可节省直接工程造价约10.1%。

7 结 语

本文通过对某路堑边坡开挖失稳破坏过程与稳定工况的分析，着重探讨了非预应力全长黏结格构锚固的变形受力机制与加固原理。阐明了边坡自主变形是非预应力格构锚固主动受力的前提，受力后的支护框架体系可在被加固岩土体内部产生双向挤压效应、锚拉效应、框箍效应、销钉效应以及土拱效应。其综合作用结果不仅可有效降低边坡因开挖卸载而导致的内部剪应力增大问题，而且还可提高加固岩土体的力学强度，进而达到主动遏止坡体不稳定塑性变形的持续发展与增强边坡自稳能力的目的。依据优化设计原理与现行有关规范，构建了格构框架通用的优化设计数学模型，给出了其求解方法与步骤，并编写了自动寻优程序。通过在三峡库区某边坡治理工程中的实际应用，可方便、快捷的得到优化设计计算结果，从而为该新型支护结构提供了一套经济合理的结构设计计算方法。

参 考 文 献

- [1] 殷跃平, 康宏达, 陈波. 三峡工程移民区滑坡防治与利用技术研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(2): 135—140.
YIN Yue-ping, KANG Hong-da, CHEN Bo. Landslide control and utilization of measurement in immigrant settlement region of Three Gorges Project[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2000, 11(2): 135—140.
- [2] 赖勇, 陈洪凯, 张永兴. 高切坡施工过程及现代防治技术[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版). 2007, 26(增10): 70—74.
LAI Yong, CHEN Hong-kai, ZHANG Yong-xing. Construction process and modern prevention control techniques for high cut slope[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2007, 26(Supp. 10): 70—74.
- [3] 祝启坤, 覃雯, 郭志明. 白杨树湾高边坡稳定性分析与综合防治对策[J]. 工程勘察, 2008, (11): 28—32.
ZHU Qi-kun, QIN Wen, GUO Zhi-ming. Stability analysis and comprehensive control of Baiyangshuwan high slope[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2008, (11): 28—32.
- [4] 刘永明, 傅旭东, 邹勇. 格构锚固技术及其在高切坡防治中的应用[J]. 勘察科学技术, 2006, (3): 24—27.
LIU Yong-ming, FU Xu-dong, ZOU Yong. Framed anchor and its application to controlling high cutting slope[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2006, (3): 24—27.
- [5] 曹兴松, 周德培. 边坡开挖影响范围和潜在滑面的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2882—2886.
CAO Xing-song, ZHOU De-pei. Study on slope cut-induced influence zone and potential slide surface[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(17): 2882—2886.
- [6] 连锁营, 韩国城, 吕凯歌. 土钉支护弹塑性数值分析及稳定性探讨[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 85—89.
LIAN Zhen-ying, HAN Guo-cheng, LÜ Kai-ge. Elastoplastic numerical analysis and stability study of soil-nailed wall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(1): 85—89.
- [7] 张乐文, 汪稔. 岩土锚固理论研究之现状[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 627—631.
ZHANG Le-wen, WANG Ren. Research on status quo of anchorage theory of rock and soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 627—631.
- [8] SPANG K, EGGRE P. Action of fully-grouted bolts in jointed rock and factors of influence[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1990, 23(3): 201—229.
- [9] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(3): 302—318.
- [10] CHEN L T, MARTIN G R. Soil-structure interaction for landslide stabilizing piles[J]. *Computers and Geotechnics*, 2002, 29(5): 363—386.
- [11] 邓祥明, 张凡. 土钉支护结构中土钉的作用机制分析[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(4): 74—75.
DENG Xiang-ming, ZHANG Fan. Analysis of mechanism of soil nailing wall[J]. *Sichuan Building Science*, 2004, 30(4): 74—75.
- [12] 周景星, 王洪瑾, 虞石民, 等. 基础工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [13] 阳明盛, 罗长童. 最优化原理、方法及求解软件[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] 重庆市设计院. GB50330—2002 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [15] 中国建筑科学研究院. GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.