

文章编号: 1000-7709(2010)11-0106-04

## 边坡锚索加固及优化分析

朱 涛<sup>1</sup> 孙晓鸽<sup>2</sup> 范瑞朋<sup>1</sup> 叶渊杰<sup>3</sup>

(1. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222; 2. 云南龙江水利枢纽开发有限公司, 云南 路西 687400; 3. 中国水电顾问集团 中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014)

**摘要:** 以某发电站出水口处的边坡锚索加固为例, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件分析计算了锚固前后边坡稳定性的差异, 并比较了两种不同的锚索加固方案。结果表明, 选择在断层处加锚索的方案安全、可靠, 具有显著的经济和社会效益。

**关键词:** 锚固; 锚索参数; FLAC<sup>3D</sup>; 边坡; 稳定

**中图分类号:** TV554<sup>+</sup>.12; TV223.3

**文献标志码:** A

锚固防护作为一种原位岩土体加固方法已成为应用广泛的直接防护方法之一。在岩土中采用锚固技术可充分发挥岩土自身的能量、积极调用岩土体自身强度和自稳能力、提高施工过程的安全性和时效性、有效控制岩土体的变形及显著降低工程造价等诸多优点<sup>[1]</sup>, 然而边坡工程加固或加固设计失误而造成边坡失稳的重大事故也时有发生, 因此作为改良岩土体重要手段的锚固方法有待深入研究<sup>[2]</sup>。本文以 FLAC<sup>3D</sup> 软件为计算平台, 分析了边坡的稳定状态、影响岩锚设计参数的因素及锚索的分布区域, 提出了岩锚加固的优化方法。实例分析结果表明, 本文提出的设计方法安全可靠, 可节约大量工程投资。

泥质物质。其破碎带宽 0.2~0.3 m, 影响带宽 0.8~1.1 m。

根据初步分析研究, 模型范围拟定于发电站引水发电隧洞出水口, 沿发电站输水隧洞走向, 至第一个山谷的断面。所取断面位于山脊, 坡度较陡, 包含主要断层, 位于边坡潜在滑动体内且潜在滑动体方量最大<sup>[3]</sup>, 能初步确定为边坡最不利断面。

边坡自上而下依次为板岩、灰岩、白云岩, 按风化程度板岩分为层①、层②(微风化层缺失), 灰岩分为层③、层④、层⑤, 白云岩分为层⑥、层⑦、层⑧。F<sub>51</sub> 分为层⑨、层⑩(微风化层缺失), F<sub>61</sub> 分为层⑨、层⑩、层⑪, F<sub>141</sub> 分为层⑫、层⑬、层⑭, 详见图 1。

### 1 边坡概况及地质条件

发电引水隧洞出口边坡岩层产状基本呈近水平状, 倾向 315°~342°, 倾角 7°~14°, 开挖量较小, 且主要开挖区域距高陡边坡尚有一段距离。边坡高 185 m, 最大坡度达 74.3°(对应边坡高为 127 m), 被 F<sub>141</sub>、F<sub>51</sub>、F<sub>61</sub> 三条断层切割。其中 F<sub>141</sub> 为较大断层, 层内充填碎裂岩、糜棱岩、方解石, 沿破碎带方解石脉有溶蚀现象, 形成 0~2 cm 宽的小溶缝, 断面有铁锈渲染, 有倾伏角不一的擦痕, 断层面较平直, 沿断层带渗出大量滴水。破碎带宽 0.3~0.4 m, 影响带宽 1~2 m。F<sub>51</sub>、F<sub>61</sub> 两条断层虽较小, 但位于边坡顶部, 对边坡稳定有重要影响, 断层内填充碎裂岩及方解石, 局部有断层角砾岩, 断层面上有擦痕, 面弯曲、粗糙, 充填黄色

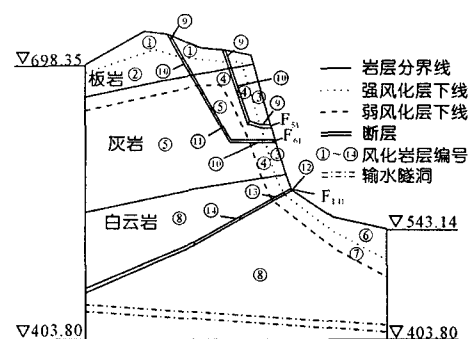


图 1 边坡模型及地层分层(单位: m)

Fig. 1 Side slop model and grouping

### 2 自重下的边坡稳定分析

以 FLAC<sup>3D</sup> 软件为计算平台, 采用摩尔-库仑模型作为本构模型, 利用强度折减法计算边坡稳定所需的岩石参数, 结果见表 1。

收稿日期: 2010-06-20, 修回日期: 2010-07-17

作者简介: 朱涛(1985-), 男, 助理工程师, 研究方向为高边坡稳定, E-mail: zhutao686@163.com

表 1 岩石参数  
Tab.1 Rock parameters

| 岩层类型            | 岩体风化程度 | 密度 $\rho$<br>/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | $\epsilon$<br>/( $^{\circ}$ ) | $F$<br>/MPa | 变形模量<br>$E/\text{GPa}$ | 泊松比<br>$\mu$ |
|-----------------|--------|---|-------------------------------|-------------|------------------------|--------------|
| 板岩              | 强风化    | 2.70  | 26.6                          | 0.50        | 11.02                  | 0.31         |
|                 | 弱风化    | 2.70  | 35.0                          | 0.55        | 22.13                  | 0.26         |
| 灰岩              | 强风化    | 2.74  | 35.0                          | 0.50        | 9.65                   | 0.29         |
|                 | 弱风化    | 2.74  | 42.0                          | 0.55        | 20.88                  | 0.25         |
| 白云岩             | 微~新    | 2.74  | 50.2                          | 0.60        | 29.02                  | 0.23         |
|                 | 强风化    | 2.72  | 26.7                          | 0.50        | 7.58                   | 0.30         |
|                 | 弱风化    | 2.72  | 31.0                          | 0.55        | 20.06                  | 0.23         |
| $F_{51}$ 断层破碎带  | 微~新    | 2.72  | 45.0                          | 0.60        | 25.64                  | 0.23         |
|                 | 强风化    | 2.20  | 15.7                          | 0.05        | 0.50                   | 0.35         |
| $F_{61}$ 断层破碎带  | 弱风化    | 2.20  | 15.7                          | 0.05        | 0.50                   | 0.35         |
|                 | 强风化    | 2.20  | 15.7                          | 0.05        | 0.50                   | 0.35         |
|                 | 弱风化    | 2.20  | 15.7                          | 0.05        | 0.50                   | 0.35         |
| $F_{141}$ 断层破碎带 | 微~新    | 2.20  | 20.6                          | 0.07        | 1.00                   | 0.35         |
|                 | 强风化    | 2.10  | 14.9                          | 0.05        | 0.50                   | 0.36         |
|                 | 弱风化    | 2.10  | 19.7                          | 0.05        | 0.50                   | 0.36         |
|                 | 微~新    | 2.10  | 21.5                          | 0.07        | 1.00                   | 0.36         |

采用强度折减法计算得到的边坡安全系数为 1.10,图 2 为边坡在自重工况下计算的最大主应力、总位移、剪应变增量和速度矢量图。由图可看出:①边坡断层处的应力集中明显;②边坡在  $F_{51}$  和  $F_{61}$  断层处的位移较大;③边坡的塑性贯通区已形成,且滑动面外侧节点的速度矢量明显大于其他区域,可见边坡已出现明显滑动,边坡可能失稳。

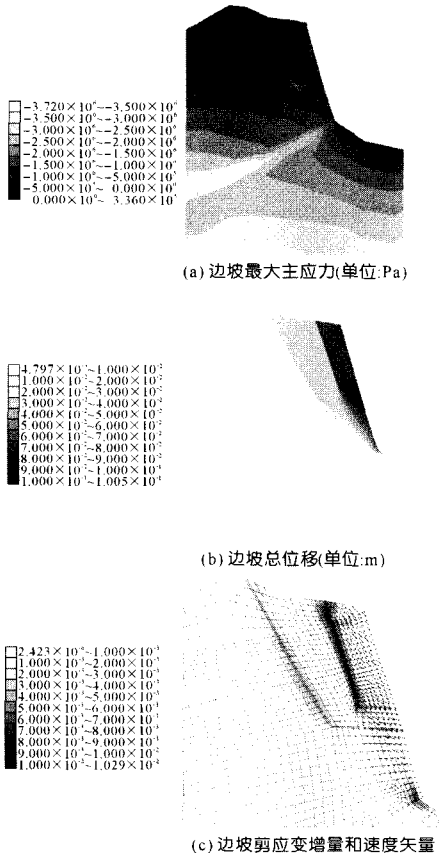


图 2 边坡最大主应力、总位移、剪应变增量和速度矢量图  
Fig.2 The maximum main stress,total displacement, shear strain increment and velocity vector of side slope

3 边坡加固方案

因边坡有失稳趋势,为确保边坡下面发电厂房的安全,需加固边坡。经对比分析本文计算的边坡主要滑动带包括  $F_{51}$ 、 $F_{61}$  断层,其厚度均较大,已不适用锚杆,所以本文采用预应力锚索加固<sup>[4,5]</sup>。

3.1 锚索参数的确定

(1)锚索倾角的确定。锚索提供的抗滑力为:

$$T'_{抗} = T' \sin \alpha \tan \varphi + T' \cos \alpha \tag{1}$$

式中, $T'$ 为锚固力; $\alpha$ 为锚索与水平面的夹角; $\varphi$ 为滑动面的内摩擦角。

对  $\alpha$  求导,并令  $\alpha' = 0$ ,得  $\alpha = \varphi$ ,此时锚索达最大抗滑力  $T'_{抗max}$ ,且有:

$$T'_{抗max} = T' / \cos \varphi \tag{2}$$

由式(2)可知,当  $\alpha = \varphi$  时,可获得最大的抗滑力。本文边坡断层处的内摩擦角为  $9.4^{\circ}$ ,所以锚索与水平面的最优夹角为  $9.4^{\circ}$ 。

(2)锚索长度的确定。锚索长度由内锚固段、自由段、外锚固段三部分组成。①内锚固段。预应力锚索的失效通常由锚固体与岩体间的粘结力不足而引起。内锚固段长度为:

$$L = kp / (\pi D \tau) \tag{3}$$

式中, $k$ 为锚索安全系数,一般取  $k = 2.0$ ;  $p$ 为锚索设计拉力,取  $p = 2\,000\text{ kN}$ ;  $D$ 为内锚段钻孔直径,取  $D = 0.30\text{ m}$ ;  $\tau$ 为锚固体与孔壁岩体的粘结强度,取  $\tau = 1\,000\text{ kPa}$ 。经计算得锚固段长度  $L = 4.24\text{ m}$ 。②自由段。指从坡面到内锚固段外端间的距离,主要由被加固边坡可能滑动面的产状、埋深及锚索设计位置确定。③外锚固段。由外锚头厚度确定,一般为  $0.5\text{ m}$ <sup>[6]</sup>。

(3)锚索位置的确定。从边坡正常状态下的剪应变增量图可看出,潜在滑动面主要在  $F_{51}$  断层处,但从图 2 可看出,锚索一定要穿过  $F_{61}$  断层至微风化的灰岩中,才能确保边坡稳定。边坡拐点处亦有一部分剪应变增量区,一定程度上影响边坡稳定,也要考虑在边坡拐点上部加锚杆,以确保整个边坡的稳定。锚索竖向间距取  $8.0\text{ m}$ ,由于本文计算的模型为单宽模型, $y$ 轴方向固定,所以不考虑  $y$ 轴方向上的锚杆间距。

(4)锚索的物理力学性质参数。采用全长注浆锚索,安全可靠、施工简单、成本较低。锚杆加固边根据上述的计算和工程资料, #1~#6 锚索的物理力学性质参数为:水泥浆外圈周长  $0.188\text{ m}$ 、锚索截面面积  $0.001\,1\text{ m}^2$ 、锚固段长度  $4.24$

m、钻孔倾角  $9.4^\circ$ 。

### 3.2 锚索加固方案

根据边坡的破坏形式,本文采用如下两种锚索加固方案。

#### 3.2.1 方案1(从边坡拐点向上至边坡顶加锚索)

为防止发生蠕滑—拉裂破坏和滑移—拉裂破坏,需对边坡拐点至边坡顶部进行锚固,共布设锚索16根,锚索编号从上往下依次为#1~#16,按锚索拟定间距、长度、倾角和锚索锚固段必须在微风化层上的原则布置锚索位置。

基于锚索的物理力学性质参数及锚索的长度(表2),锚索自由段长度应穿过塑性贯通区,考虑边坡应力和位移的分布,尤其是塑性贯通区的分布情况,确定了边坡锚索的位置见图3。

表2 锚索长度参数

Tab.2 Anchor length parameters m

| 锚索编号 | 长度   | 锚索编号 | 长度   |
|------|------|------|------|
| #1   | 70.9 | #9   | 55.4 |
| #2   | 69.0 | #10  | 53.6 |
| #3   | 67.1 | #11  | 38.0 |
| #4   | 65.1 | #12  | 36.9 |
| #5   | 63.2 | #13  | 35.7 |
| #6   | 61.2 | #14  | 34.6 |
| #7   | 59.3 | #15  | 33.7 |
| #8   | 57.4 | #16  | 32.9 |

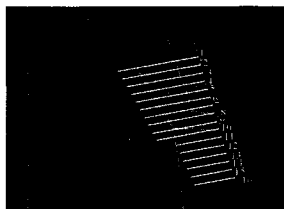


图3 方案1下锚索的位置图

Fig.3 Anchor location diagram under program 1

图4为边坡加固方案1工况下计算的应力、位移、剪应变增量、节点速度矢量及锚索受力图。由图可知:①最大主应力值基本不变,拉应力的值和区域均明显减小,表明锚索能明显减小边坡 $x$ 轴向上的拉应力,且在锚索的锚固段可明显看到因锚索预应力作用而产生的应力集中。②加固后边坡位移量明显减小,表明锚索对边坡的位移控制作用明显。③断层处的速度矢量明显减小且滑动区外侧节点的速度矢量大小与内部基本吻合,表明边坡滑动趋势减小,锚索对断层处的加固作用明显。④#1~#6锚索受力明显,最大轴力在#1锚索上,为 $2.09 \times 10^6$  N。#7~#16锚索受力很小,在图上不能显示。

结合图3和图4(c)可看出,锚索的锚固段位于稳定的微风化岩体中,符合锚固段的要求; $F_{51}$ 断层处的剪应变增量明显减小,表明锚索加固作

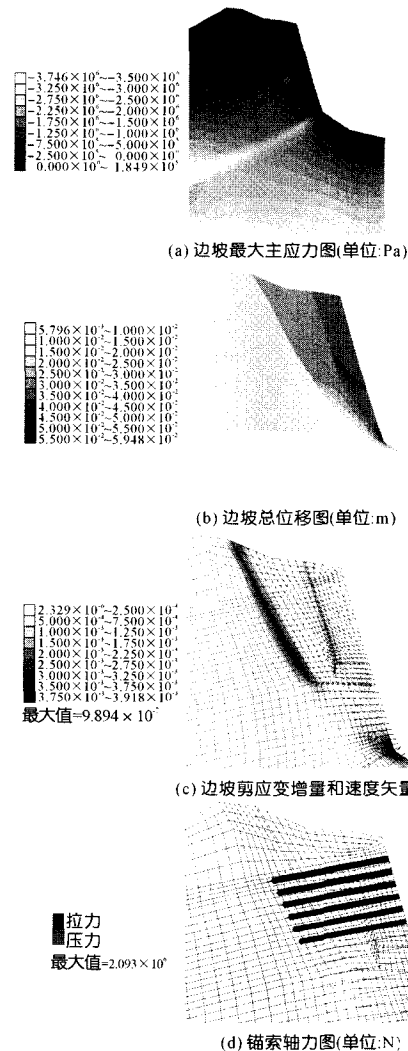


图4 方案1工况下边坡的最大主应力、总位移、剪应变增量和速度矢量图及锚索轴力图

Fig.4 The maximum main stress, total displacement, shear strain increment, velocity vector of side slope and axial force of anchor under program 1 用明显。

加固前后各计算结果的数值比较见表3。

表3 加固前后各计算结果的比较

Tab.3 Comparison of computation results before and after reinforcement

| 工况  | 安全系数 | 最大位移<br>/cm | 剪应变增量                 | 最大拉应力<br>/N        |
|-----|------|-------------|-----------------------|--------------------|
| 加固前 | 1.10 | 10.10       | $8.39 \times 10^{-3}$ | $3.46 \times 10^5$ |
| 加固后 | 1.33 | 5.95        | $3.92 \times 10^{-3}$ | $1.85 \times 10^5$ |

综上可知,锚索加固方案1效果明显,有效控制了边坡的滑动,但锚索根数过多,其中#7~#16锚索作用不明显。

#### 3.2.2 方案2(在断层处加锚索)

为防止边坡在 $F_{51}$ 、 $F_{61}$ 断层处发生滑移—拉裂破坏,需对断层进行锚固,按拟定的锚索间距、长度、倾角和锚索锚固段要在微风化岩层内的原

则分布。锚索根数应考虑方案 1 下的锚索受力工况来判断,确定为 6 根,锚索编号从上往下依次为 #1~#6,与方案 1 的 #1~#6 锚索相同。

边坡锚索加固方案 2 采用的计算方法仍为 FLAC<sup>3D</sup> 的强度折减法,锚索的参数与方案 1 相同。图 5 为边坡加固方案 2 工况下计算的应力、

位移、剪应变增量和节点速度矢量及锚索轴力图。

### 3.2.3 加固方案的比较结果

①两方案的  $z$  向、 $x$  向上的应力及总位移均无明显变化;②两方案的剪应变增量与速度矢量也无变化;③加固方案 2 工况下边坡的安全系数 (1.32) 较方案 1 工况下的安全系数小 0.01;④两种方案中的 #1~#6 锚索受力状况无变化。

比较两种方案,最终确定锚索加固方案 2 为最优方案。同时,为防止锚索预应力损失和坡面风化,建议采用锚喷混凝土进行坡面防护,并增加防渗和排水措施,预防地表水的渗漏影响断层强度。在锚索安装过程中宜采用二次张拉,张拉值较原设计值提高 15%,以确保加固边坡的长期稳定。在加固施工前需对锚索进行拉拔试验,以便进行动态优化设计,节约工程投资。

## 4 结语

在分析边坡地质条件基础上,对天然边坡的稳定性进行了计算,结果表明边坡有失稳的趋势。为此,提供了两种锚索加固方案。推荐方案 2 为最佳方案。

### 参考文献:

- [1] 程良奎. 中国岩土锚固技术的应用与发展[M]. 北京:中国学术出版社,1996.
- [2] 张发明,刘宁,赵维炳,等. 岩质边坡预应力锚索加固的优化设计方法[J]. 岩土力学,2002,23(2):187-190.
- [3] 吴党中,王茂荣. 洪石岩水电站厂房后边坡稳定性分析[J]. 水利水电技术,2006,37(10):17-20.
- [4] 曾祥勇,邓安福. 锚索与锚杆联合锚固支护岩坡的有限元分析[J]. 岩土力学,2007,28(4):790-794.
- [5] 蒋良维. 松散斜坡体锚、桩加固作用机理与工程应用研究[D]. 成都:成都理工大学,2006.
- [6] 张发明,刘汉龙,赵维炳. 预应力锚索加固岩质边坡的设计实例[J]. 岩土力学,2000,21(6):177-179.

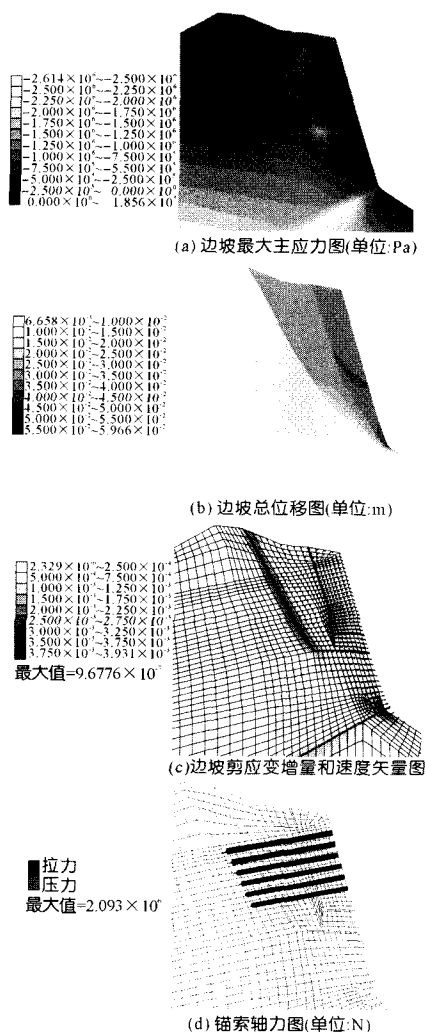


图 5 方案 2 工况下边坡的最大主应力、总位移、剪应变增量和速度矢量图及锚索轴力图

Fig.5 The maximum main stress, total displacement, shear strain increment, velocity vector of side slope and axial force of anchor under program 2

## Anchor Reinforcement and Optimization Analysis of Slope

ZHU Tao<sup>1</sup> SUN Xiaoge<sup>2</sup> FAN Ruipeng<sup>1</sup> YE Yuanjie<sup>3</sup>

- (1. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Corporation Limited, Tianjin 300222, China; 2. Yunnan Longjiang Hydropower Project Development Corporation Limited, Luxi 687400, China; 3. Mid-South Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Corporation, Changsha 410014, China)

**Abstract:** Taking the anchor reinforcement of slope in water outlet of hydropower station for an example, FLAC<sup>3D</sup> software is applied to obtain the anchor cable parameters of slope stability calculation and analyze the difference of slope stability between before and after anchoring. And then two different programs of anchor cable reinforcement are compared. The results show that the anchor cable reinforcement scheme in fault area is reliable and safe, which has remarkable economic and social benefits.

**Key words:** anchor reinforcement; anchor parameter; FLAC<sup>3D</sup>; slope; stability