

基于敏感性分析的加锚岩质边坡锚固参数优化设计

柏俊磊, 王乐华, 王瑞红

(三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 某水电站泄洪洞进口边坡拟采用预应力锚索进行加固。锚固参数的合理选取将直接影响到工程加固的可靠性以及经济性。因此, 首先对该加锚边坡的预应力锚索的4个参数(锚固角度 Φ 、锚固力 T 、锚固间距 H 以及锚索长度 L) 进行敏感性分析, 确定了这些参数的敏感性大小。然后再利用有限元法进行参数优化设计, 得到了预应力锚索加固的最佳锚固参数。研究结果为提高开挖边坡的加固效果、降低工程的设计施工成本, 起到了积极的作用。

关键词: 边坡; 预应力锚索; 均匀设计; 敏感性; 有限元

中图分类号: TV 223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2013) 04 0200-06

Optimization Design of Anchorage Parameters of an Anchor Slope Based on Sensitivity Analysis

BAI Jun lei, WANG Le hua, WANG Rui hong

(China Three Gorges University, Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China)

Abstract: The inlet slope of Spillway tunnel at a hydropower station is reinforced with the prestressed anchor cable. The reasonable selection of anchor parameters affects the reliability and economy of engineering reinforcement directly. In this paper, sensitivity analysis was performed on four anchor parameters (anchor angle Φ , anchoring force T , anchor spacing H , and anchor cable length L) of the anchor slope, and the finite element method was used for parameter optimization design based on the results of sensitivity analysis to obtain the best anchor parameters for reinforcement of prestressed anchor cable. The results can offer valuable references to improve the reinforcement effects of excavation slope and reduce the cost of project design and construction.

Key words: slope; prestressed anchor cable; uniform design; sensitivity; finite element

在岩石边坡工程中, 特别是高陡岩质边坡的施工过程中, 大量的自然边坡和人工边坡由于不满足稳定性或者安全系数的要求需要进行加固处理, 预应力锚索加固作为一种灵活、高效、经济的锚固方法在边坡工程中得到广泛应用^[1-2]。预应力锚索是一种可承受拉力的结构系统, 它能充分调用工程地质体或构筑物自身潜在的稳定性并改善其内部应力状态^[3]。但是预应力锚索锚固作用机理十分复杂, 影响预应力锚索锚固效果的因素众多^[4], 因此在实际设计研究中确定影响预应力锚索锚固效果的敏感因素显得尤为重要。目前的敏感性分析方法可以归纳为两种: 单因素分析法^[5-6]和多因素分析法^[7]。其中多因素分析法包括正交设计^[8-9]、均匀设计^[10]、基于正交设计的 RBF 人工神经网络^[11]等多种方法。本文以某水电站泄洪洞进口预应力锚索锚固边坡为背景, 首先基于均匀设计法对影响预应力锚索锚固效果的锚固角度、锚固力、锚索间距以及锚索长度等锚固参数进行敏感性分

析, 然后根据敏感性分析结果针对敏感参数进行优化设计, 为工程施工设计提供有效的参考依据。

1 工程概况

某水电站工程以发电为主, 开挖边坡位于右岸坝线上游 400~450 m 处的一小山梁下部, 正处于材料力学参数较弱的变形体(Bx12)上, 变形体厚度为 30~50 m 不等。开挖边坡上部高程 2 327 m, 岸坡高差达 200 m, 岸坡整体坡度 50°左右。按照边坡岩体分类结果, 进口边坡岩体为 0 级。开挖边坡地质图和 4-4 剖面图见图 1 和图 2。边坡岩体的设计计算参数采用值见表 1。

2 锚固参数敏感性分析

锚固参数敏感性分析在锚索锚固位置和数量相同的前提下, 主要对锚固角度 Φ 、锚固力 T 、锚固间距 H 、锚索长度 L

收稿日期: 2013-01-30 修回日期: 2013-06-03 网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1309.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(50909052, 51109120); 三峡大学研究生科研创新基金(2012CX019); 三峡大学硕士学位论文培优基金(2013PY015)

作者简介: 柏俊磊(1988-), 男, 湖北十堰人, 硕士研究生, 主要从事岩石边坡工程方面研究。E-mail: bjl8810@126.com

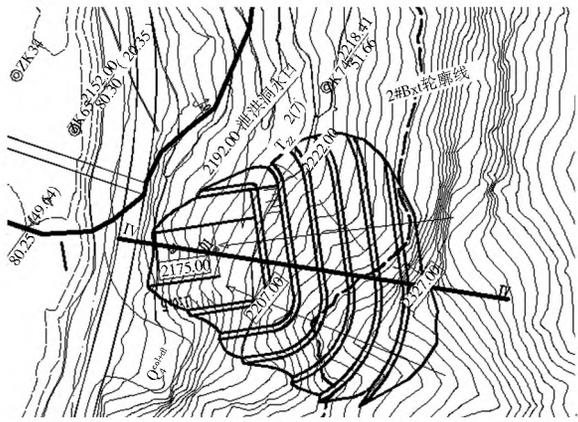


图1 开挖边坡工程地质图

Fig. 1 Geological map of the excavation slope

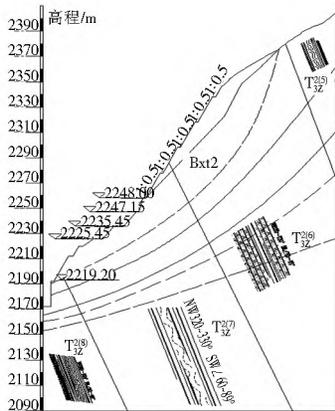


图2 4-4剖面地质图

Fig. 2 Geological map of cross section 4-4

表1 岩体的物理力学参数

Table 1 The physical and mechanical parameters of the rock mass

岩组	风化程度	容重 / (kN · m ⁻³)	变形模量 / GPa	泊松比	c / MPa	φ (°)
T3Z2(7)、T3Z2(6)岩组	覆盖层	27	2	0.34	0.24	26.6
	强风化	27	2.25	0.33	0.3	27.7
	弱风化	27	2.5	0.33	0.35	28.8
	微新	27	3.5	0.33	0.55	33
T3Z2(5)、T3Z2(8)岩组	覆盖层	27	3	0.33	0.45	31
	强风化	27	3.25	0.33	0.5	32
	弱风化	27	3.5	0.33	0.55	33
	微新	27	6.5	0.28	0.8	40.4
变形体	浅层	24	1.5	0.35	0.15	24.2
	深层	25	2	0.33	0.3	33

这4个参数进行敏感性分析。在进行敏感性分析时,首先设定这些参数的取值范围见表2,然后选择U^{*}7(7⁶)均匀设计表,按照其对应的使用表,选用U^{*}7(7⁴)中的1、2、3、6列^[12]。根据设计的7组锚固参数设定锚固方式,利用极限平衡法计算不同锚固方式下的边坡稳定性系数。试验设计组合见表3。

表2 分析参数取值范围

Table 2 The value range of parameters

锚固角 Φ(°)	锚固力 T/kN	锚固间距 H/m	锚索长度 L/m
0~35	800~1500	3~6	30~60

表3 均匀设计实验方案

Table 3 The experiment scheme of uniform design

试验编号	锚固角 Φ(°)	锚固力 T/kN	锚固间距 H/m	锚索长度 L/m	安全系数 K
1	0	1000	4	45	1.346
2	5	1200	5.5	30	1.337
3	10	1400	3.5	50	1.356
4	15	900	5	35	1.313
5	20	1100	3	55	1.332
6	25	1300	4.5	40	1.327
7	30	1500	6	60	1.347

采用后退法进行线性回归分析^[13-14],取显著性水平 α=0.05,建立回归方程:

$$Y = b_0 + b_1\Phi + b_2T + b_3H + b_4L \quad (1)$$

求得回归系数如下: $b_0 = 1.25$; $b_1 = -1.23 \times 10^{-3}$; $b_2 = 5.14 \times 10^{-5}$; $b_3 = 6.67 \times 10^{-3}$; $b_4 = 8.10 \times 10^{-4}$ 。回归方程显著性检验:样本容量 $N = 7$,显著性水平为 $\alpha = 0.05$,检验值 $F = 116.018$,临界值 $F_{0.05}(4, 2) = 19.25$, $F > F_{0.05}(4, 2) = 19.25$,回归方程显著。

进行回归系数检验,得出: t 检验, $|t_1| > |t_2| > |t_4| > |t_3|$; F 检验, $F(1) > F(2) > F(4) > F(3)$;各方程项对回归的贡献从大到小依次为 Φ, T, L, H 。方程项 H 对回归的贡献最小,对其进行显著性检验,查相关 F 分布表^[15],知临界值 $F(0.05, 1, 5) = 6.61$, $F(3) = 0.766 > F(0.05, 1, 5)$,此方程项不显著,需要剔除。重建回归方程:

$$Y = b_0 + b_1\Phi + b_2T + b_4L \quad (2)$$

求得回归系数如下: $b_0 = 1.26$; $b_1 = -1.2 \times 10^{-3}$; $b_2 = 5.27 \times 10^{-5}$; $b_4 = 7.68 \times 10^{-4}$ 。回归方程显著性检验结果为:样本容量 $N = 7$,显著性水平为 $\alpha = 0.05$,检验值 $F = 167.523$,临界值 $F_{0.05}(3, 3) = 9.28$, $F > F_{0.05}(4, 2) = 9.28$,回归方程显著。

经回归系数检验有,得出: t 检验, $|t_1| > |t_2| > |t_4|$; F 检验, $F(1) > F(2) > F(4)$;各方程项对回归的贡献从大到小依次为 Φ, T, L 。方程项 L 对回归的贡献最小,对其进行显著性检验,查相关 F 分布表知临界值 $F(0.05, 1, 5) = 6.61$, $F(4) = 111.925 > F(0.05, 1, 5)$,此方程项显著。

综上,由回归分析结果可知:锚固力 T 、锚索长度 L 、锚固角度 Φ 均为显著因素(显著性水平 $\alpha = 0.05$);参数敏感性大小依次为: $\Phi > T > L$;锚固间距 H 为不敏感因素。

3 有限元计算模型

根据开挖边坡的工程地质,以 A dina 有限元计算程序为平台,建立二维有限元模型(Y 负向为顺坡向),对锚固方式的模拟计算。有限元计算模型差分网格图和计算模型分别见图3和图4。

在 A dina 有限元程序中,利用 Truss 单元,输入锚索截面积和初始应变,可以模拟锚索。表4给出了锚索计算参数。按 ASTM A416-97 的规定,单根钢绞线直径 $\Phi = 15.24$ mm,单根钢绞线面积 $A_y = 140$ mm²,钢绞线标准强度 $R_{yb} =$

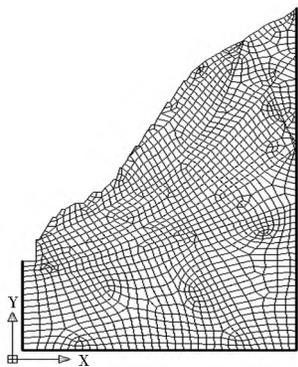


图 3 有限元计算模型网格
Fig. 3 Finite element model grid

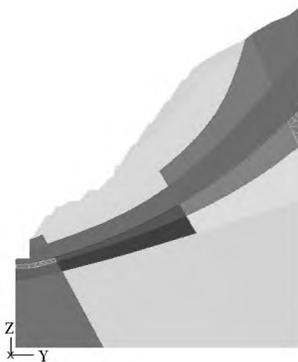


图 4 有限元计算模型
Fig. 4 Finite element model

1 860 MPa, 钢绞线弹性模量 $E_s = 1.95 \times 10^5$ MPa。表 4 中的参数为初始参数, 计算初始应变时预应力需除以锚索的间距。

研究得出利用有限元法计算的开挖边坡位移、应力分布以及塑性区结果, 对其综合分析, 可以有效地克服利用极限平衡法确定边坡稳定性时的不足, 即无法分析边坡破坏的发生和发展过程以及必须假定滑裂面形状为折线、圆弧或螺旋曲线等形式^[16]。因此本研究能为开挖边坡预应力锚索加固的优化设计提供了准确的依据。

4 锚固参数优化设计

根据敏感性分析的结果, 由于锚索间距 H 为不敏感参数, 故只需重点对锚固力 T 、锚索长度 L 以及锚固角 ϕ 这些参数进行参数优化设计。按照敏感性参数大小的顺序依次对锚固角、锚固力以及锚索长度进行有限元优化分析, 能够有效减小在优化过程中各敏感参数之间的相互影响, 使各锚固参数最优化。预应力锚索加固位置及数量见图 5。

4.1 锚索间排距

由地质资料可知, 预应力锚索几乎全部锚固在碎裂岩质边坡上。该种岩质边坡的变形模量较小, 为减小相邻锚索张拉的影响, 锚索间距不宜太小, 而为避免锚索之间出现应力跌落, 锚索间距也不宜太大^[17]。水电水利工程边坡设计规范^[18]中规定, 预应力锚索的间距可设定锚索间距为 4~6 m, 据此分析确定, 锚索间距可设置为 4 m。

4.2 锚固角优化

锚固角即锚索与水平面的夹角, 研究发现锚索锚固角与锚索的锚固效应、材料成本等都有较大的关系, 而且锚固角

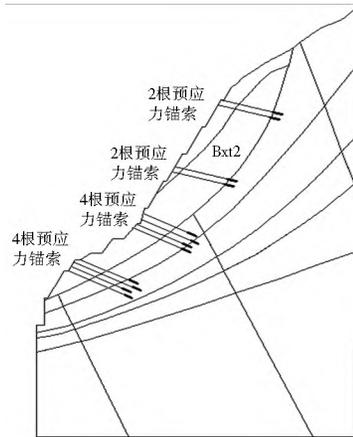


图 5 预应力锚索加固示意图

Fig. 5 Schematic diagram of reinforcement of prestressed anchor

表 4 预应力锚索计算参数

Table 4 The parameters of prestressed anchor

锚索预应力/kN	钢绞线根数	锚索截面积/m ²	初始应变
1 500	10	0.001 4	0.005 1
1 000	7	0.000 98	0.004 9
800	6	0.000 84	0.004 5
600	4	0.000 56	0.004 1

的选取如不合理可能导致锚索的抵抗力迅速下降, 因此锚固角的优化设计在锚固参数优化设计中非常重要^[19]。

在锚固力为 1 000 kN、锚索长度为 50 m、锚索间距为 4 m 以及其他初始条件均相同的情况下, 分别计算不同的锚固角下开挖边坡加固工况下的向坡外最大位移以及最大拉应力与锚固角度的关系, 结果见图 6 和图 7。可以看出, 当锚固角度在 5° 左右时, 开挖边坡加固工况下向坡外最大位移以及最大拉应力值均最小。此时可以确定预应力锚索加固的最佳锚固角度可设为 5°。

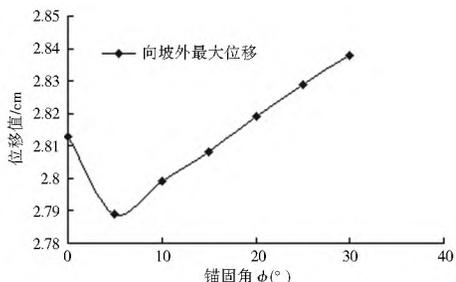


图 6 锚固角度与最大位移关系

Fig. 6 Relationship between anchor angle and maximum displacement

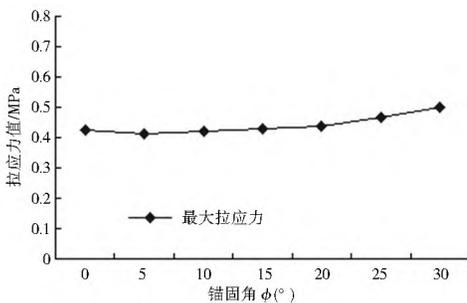


图 7 锚固角度与最大拉应力关系

Fig. 7 Relationship between anchor angle and maximum tensile stress

4.3 锚固力优化

在锚索长度为 50 m、锚索间距为 4 m、锚固角度为 5° 以及其他初始条件均相同的情况下,分别计算锚索取 600 kN、800 kN、1 000 kN、1 500 kN 时向坡外最大位移、最大拉应力以及塑性区,结果见图 8- 图 10。可以发现,随着锚固力的增大,边坡向坡外的最大位移以及最大拉应力均随之不断减小;在锚固力增加到 1 000 kN 之后虽然最大位移以及最大拉应力仍在随着锚固力的增大不断减小,但曲线已经放缓,减小速度减小。通过图 7 不同锚固力下塑性区图的变化趋势还可以发现,在锚固力增加到 1 000 kN 之后塑性区面积变化也不太明显。综合分析安全、经济、合理等方面因素后,可以确定锚索的锚固力可设置为 1 000 kN 级。

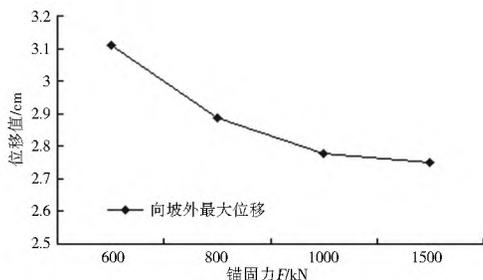


图 8 锚固力与最大位移关系

Fig. 8 Relationship between anchoring force and maximum displacement

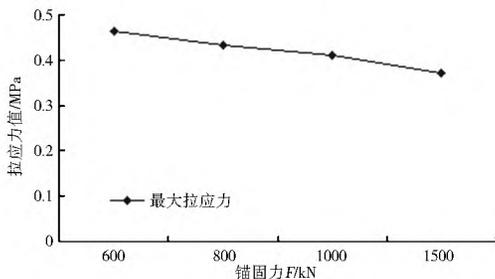


图 9 锚固力与拉应力关系

Fig. 9 Relationship between anchoring force and tensile stress

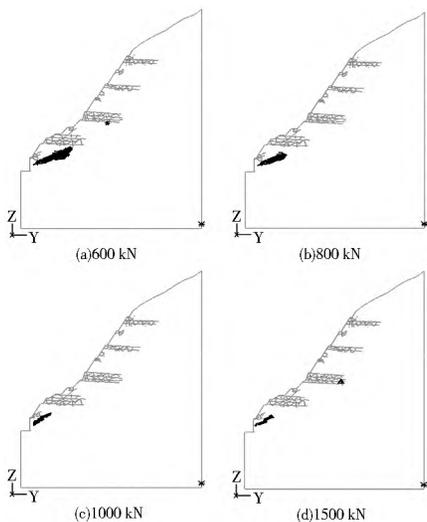


图 10 不同锚固力下塑性区图

Fig. 10 The plastic zone maps under different anchoring forces

4.4 锚索长度优化

在已知锚固力为 1 000 kN、锚索间距为 4 m、锚固角度为 5° 且其他初始条件不变的条件下,分别计算锚索取 30 m、35 m、40 m、45 m、50 m、55 m 和 60 m 长度时的边坡向坡外最大位移、最大拉应力以及塑性区,并对其进行比较分析,结果见图 11- 图 13。可以看出,随着中下部锚索长度的增加,向坡外最大位移以及最大拉应力值均逐渐减小,但是减小趋势在锚索长度为 45~ 50 m 时有所放缓。同时通过图 13 所示的不同锚索长度下塑性区分布图可以看出,随着锚索长度的增加,塑性区的范围均逐渐减小,但减小趋势在锚索长度为 50 m 之后几乎不变。综合考虑安全、经济、合理等方面因素后,可以设定锚索的锚索长度可设置为 50 m。

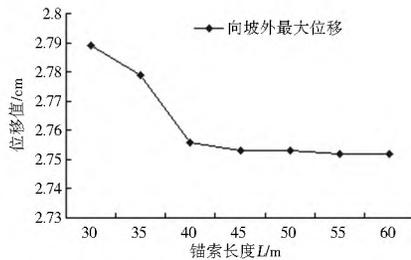


图 11 锚索长度与最大位移关系

Fig. 11 Relationship between cable length and maximum displacement

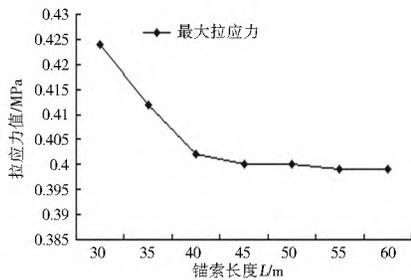


图 12 锚索长度与最大拉应力关系

Fig. 12 Relationship between cable length and maximum tensile stress

4.5 优化结果分析

根据以上优化计算结果,采用优化的预应力锚索锚固参数(锚索间距 4 m、锚固角度为 5°、锚固力为 1 000 kN、锚索长度为 50 m),对该水电工程开挖边坡进行加固,有限元模拟计算结果见图 14 和图 15。

从优化加固后的边坡应力以及应变计算结果可以看出,优化加固后的最大位移为 2.729 cm,最大拉应力为 0.402 MPa。从图 13(e) 可以看出,优化加固后在开挖边坡上只有少量零星的塑性区出现,且塑性区之间均没有连通,加固后的边坡处于稳定状态,说明上述优化加固方案是可行的。

5 结论

通过以上基于敏感性分析和有限元分析的方法,对加锚开挖边坡的预应力锚索锚固参数(锚固力 T 、锚索长度 L 、锚固角度 Φ 以及锚固间距 H) 进行的优化设计,可以得到如下结论。

(1) 在该水电工程中,在锚固位置及锚索数量已知的情

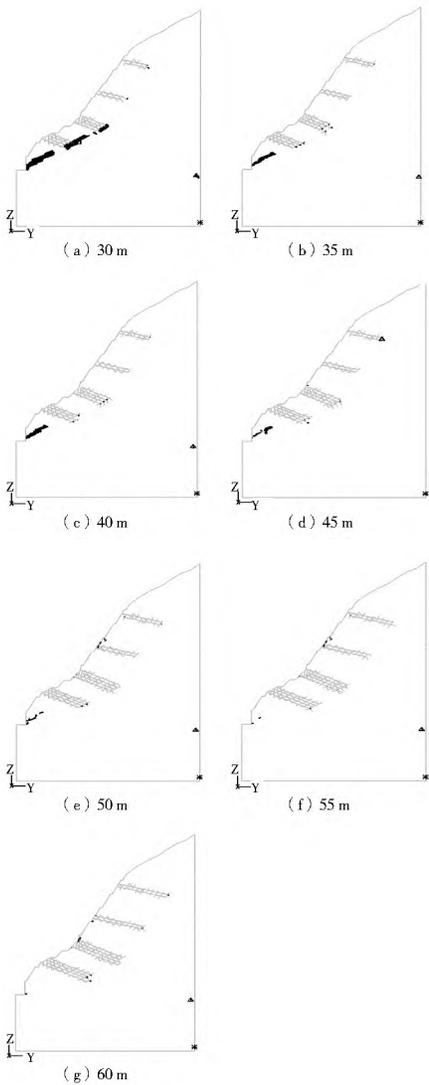


图 13 不同长度预应力锚索下塑性区分布

Fig. 13 The plastic zone distributions for the prestressed anchor cable with different lengths

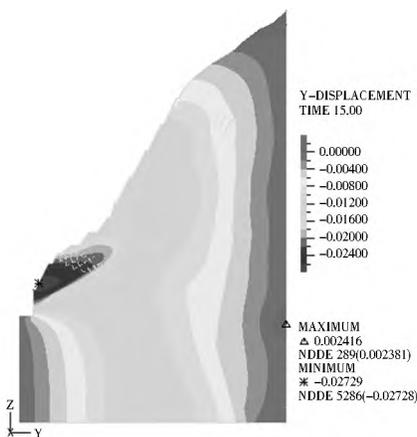


图 14 边坡 Y 向位移

Fig. 14 The displacement of slope in the Y direction

况下, 锚固力 T 、锚索长度 L 、锚固角度 Φ 均为显著因素(显著性水平 $\alpha = 0.05$), 其中锚固角度是最敏感因素, 其次是锚固力和锚索长度, 锚固间距为不敏感因素。

(2) 该水电工程加锚岩质边坡中, 最终优化的预应力锚索锚固参数可确定为: 锚固角度为 5° 、锚固力为 1000 kN、锚

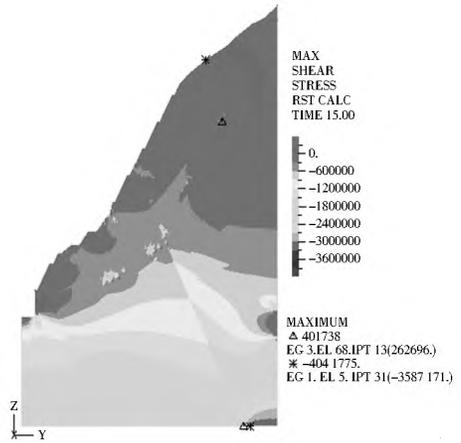


图 15 边坡主应力

Fig. 15 The principal stress of slope

索长度为 50 m。经优化加固后的边坡处于稳定状态, 满足工程要求。

参考文献(References):

[1] 徐青, 徐寅, 陈胜宏, 等. 复杂岩质边坡预应力锚索优化设计[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(2): 32-37. (XU Qing, XU Yin, CHEN Sheng-hong, et al. Optimization Design of Prestressed Anchorage Cables in Complicated Rock Slope[J]. Yangtze River Academy of Sciences, 2011, 28(2): 32-37. (in Chinese))

[2] 侯岩森, 罗国浩. 预应力锚索在水利水电工程中的应用研究[J]. 中国水运, 2011, 9(9): 151-152. (HOU Yair-sen, LU O Guo-hao. Research for Prestressed Cable in Water Resources and Hydropower Engineering [J]. China Water Transport, 2011, 9(9): 151-152. (in Chinese))

[3] 李建林, 王乐华, 刘杰, 等. 岩石边坡工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (LI Jiarr-lin, WANG Le-hua, LIU Jie, et al. Rockslope Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))

[4] 丁秀丽, 盛谦. 预应力锚索锚固机理的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 980-988. (Ding Xiu-li, SHENG Qian. Numerical Simulation Testing Study on Reir-fortment Mechanism of Prestressed Anchor Age Cable [J]. 2002, 21(7): 980-988. (in Chinese))

[5] 时卫民, 郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2004, (3): 76-80. (SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren. Analysis on Stability of Landslide During Reservoir Drawdown [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (3): 76-80. (in Chinese))

[6] 钱波. 基于单因素试验的三级配 RCC 施工配合比研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11): 110-112. (QIAN Bo. Research on Construction Mixing Proportion for Roll Compacted Concrete of Three Gradations Based on Single Factor Experiment [J]. Water Resources and Power, 2010, 29(11): 110-112. (in Chinese))

[7] 陈高峰, 程圣国. 基于均匀设计的边坡稳定性敏感性分析[J]. 水利学报, 2007, (11): 1397-1401. (CHEN Gao-feng, CHENG Sheng-guo. Sensitivity Analysis of Slope Stability Based on Uniform Design [J]. 2007, (11): 1397-1401. (in Chinese))

[8] 张旭辉, 龚晓南, 徐日庆. 边坡稳定影响因素敏感性的正交法计

- 算分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 36-39. (ZHANG Xurhui, GONG Xiaonan, XU Riqing. Orthogonality Analysis Method of Sensibility on Factor of Slope Stability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 36-39. (in Chinese))
- [9] 倪恒, 刘佑荣, 龙治国. 正交设计在滑坡敏感性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 989-992. (NI Heng, LIU Yourong, LONG Zhiguo. Applications of Orthogonal Design to Sensitivity Analysis of Landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 989-992. (in Chinese))
- [10] 梅松华, 盛谦, 冯夏庭. 均匀设计在岩土工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2694-2697. (MEI Songhua, SHENG Qian, FENG Xiating. Application of Uniform Design to Geotechnical Engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2694-2697. (in Chinese))
- [11] 夏元友, 熊海丰. 边坡稳定性影响因素敏感性人工神经网络分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2703-2707. (XIA Yuanyou, XIONG Haifeng. Sensibility Analysis of Slope Stability Based on Artificial Neural Network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2703-2707. (in Chinese))
- [12] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学技术出版社, 1994. (FANG Kaitai. Uniform Design and Uniform Design Table[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1994. (in Chinese))
- [13] 邓祖新. SAS 系统和数据分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. (DENG Zuxin. SAS Systems and Data Analysis[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [14] 燕乔, 吴长斌, 张岩. 基于均匀设计的邓肯 E-B 模型参数敏感性分析[J]. 中国农村水利水电, 2010, (7): 82-85. (YAN Qiao, WU Changbin, ZHANG Yan. Analysis of Parameter Sensitivity of Duncan E-B Model Based on Uniform Design[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010, (7): 82-85. (in Chinese))
- [15] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. (SHENG Zhou, XIE Shiqian, PAN Chengyi. Probability Theory and Mathematical Statistics[M] Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese))
- [16] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346. (ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, WANG Jinglin. Analysis on Safety Factor of Slope by Strength Reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343-346. (in Chinese))
- [17] 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): 135-140. (LU Qing, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Study on Proper Interval of Prestressed Cables in Reinforcing Crush Rock Slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 135-140. (in Chinese))
- [18] DL/T 5353-2006. 水电水利工程边坡设计规范[S]. (DL/T 5353-2006, Hydropower and Water Conservancy Slope Design Specification[S]. (in Chinese))
- [19] 罗强. 岩质边坡稳定性分析理论与锚固设计优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010. (LUO Qiang. Rock Slope Stability Analysis Theory and Anchoring Design Optimization Studies[D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese))

(上接第 165 页)

- [16] 姜翠玲, 崔广柏. 湿地对农业非点源污染的去污效应[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 471-473, 476. (JIANG Cuiling, CUI Guangbo. Effectiveness of Wetlands in Removal of Non Point Pollutants from Agricultural Source[J]. Agricultural Environmental Protection, 2002, 21(5): 471-473, 476. (in Chinese))
- [17] 王景和. 我国农村水环境污染现状及原因[J]. 现代农业科技, 2010, (11): 279. (WANG Jinghe. China Rural Water Environment Pollution and its Cause[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2010, (11): 279. (in Chinese))
- [18] 颜志俊, 沈爱春, 孙金华, 等. 平原河网区水稻节水减污技术研究[M]. 南京: 河海大学出版社, 2012: 84-88. (YAN Zhijun, SHEN Aichun, SUN Jinhua, et al. Research on Water Saving and Pollution Remediation Technology for Rice Field in Plain River-net Area[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2012: 84-88. (in Chinese))