

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2008. 06. 014

思林水电站船闸高边坡稳定安全分析与评价

徐力群¹ , 沈振中¹ , 吕 军² , 徐 林²

(1. 河海大学水利水电工程学院 , 江苏 南京 210098 ; 2. 中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院 , 贵州 贵阳 550002)

摘要 运用 ANSYS 有限元分析软件 , 对思林水电站通航建筑物下游引航道段左岸岩体高边坡剖面 P12 进行稳定性分析和安全评价。根据单元的应力状态定义其安全系数 , 计算边坡在施工期的安全系数分布、边坡沿潜在滑动面的整体稳定安全系数 , 分析断层连通率对边坡安全性的影响 , 并对运行期校核水位和水位骤降 2 种工况下边坡的稳定性进行分析。计算结果表明该边坡在施工期具有少量安全裕度 , 但由于断层的连通率不确定 , 建议至少采用 1 根锚索加固以提高其稳定安全性 ; 在运行期水位骤降情况下边坡稳定性有所降低 , 但仍可满足稳定性要求。

关键词 岩体高边坡 ; 安全系数 ; 锚索加固 ; 船闸 ; 思林水电站

中图分类号 : U641 ; TU43 文献标识码 : A 文章编号 : 1006-7647(2008) 06-0053-04

Stability analysis and safety evaluation for high rock slope of navigable lock of the Silin Hydropower Station//XU Li-qun¹ , SHEN Zhen-zhong¹ , LV Jun² , XU Lin² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ; 2. Guiyang Hydroelectric Investigation Design & Research Institute , CHECC , Guiyang 550002 , China)

Abstract : Using ANSYS software , the stability analysis of the high rock slope on the left bank in the approach channel of the navigable structure of the Silin Hydropower Station was conducted. According to the stress condition of the element , the safety factor was defined. Then the distribution of the safety factor of the slope and the safety factor of the slope along the potential slip surface were obtained and the effect of connectivity on the safety of the slope was analyzed. Moreover , the stability of the slope under the two operating modes of the check water level and rapid drawdown were analyzed. It was shown that the slope has a safety margin , but at least one anchor rope should be placed to improve the slope safety because of the uncertainty of connectivity on the fault. The slope safety under rapid drawdown in operation reduced but could still meet the stability demands.

Key words : high rock slope ; safety factor ; anchor rope reinforcement ; navigation lock ; Silin Hydropower Station

思林水电站位于贵州乌江中游段 , 是一个以发电为主 , 兼顾航运、防洪和灌溉综合效益的水利枢纽。思林水电站通航建筑物布置在左岸 , 设计采用单级垂直升船机系统 , 包括上游引航道、中间通航渠、升船机本体段和下游引航道等。剖面 P12 位于下游引航道段(0 + 315 ~ 0 + 450)。地层岩性为 : ①T₁y²⁻³⁻²(薄-中厚灰岩夹泥灰岩) ; ②T₁y²⁻³⁻¹(极薄层泥质灰岩、泥灰岩) ; ③T₁y²⁻²⁻²(中厚-厚层灰岩、白云质灰岩)。垂直开挖边坡 , 边坡高而陡 , 开挖会引起地应力释放 , 同时边坡中存在一顺坡向陡倾角断层 f₅ , 不利于边坡稳定。应用 ANSYS 有限元分析软件 , 孔位学等^[1]、郑颖人等^[2]、赵尚毅等^[3]对公路高边坡、桥墩地基等进行应力和位移分析研究 ; 郝方等^[4]对灰渣坝的稳定安全进行分析研究 ; 古拴成等^[5]对桥梁两侧高边坡加固前后的稳定性进行分析评价。笔者运用 ANSYS 有限元分析软件对思林水

电站通航建筑物下游引航道段左岸岩体高边坡剖面 P12 进行稳定安全性分析。

1 安全系数计算方法

1.1 点安全系数

点安全系数法分别求解边坡各单元积分点处的强度储备安全系数 , 并依据点安全系数的分布特性对边坡的稳定性进行评价分析。

岩体计算所采用的 Druker-Prager 模型所对应的点安全系数计算表达式为^[6-7]

$$F_s = \frac{k - \alpha I_1}{\sqrt{J_2}} \tag{1}$$

$$k = \frac{6cc\cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \tag{3}$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (4)$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (5)$$

式中： F_s 为点安全系数； c 为黏聚力； φ 为内摩擦角； σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为主应力。

1.2 整体稳定安全系数

整体稳定安全系数反映了边坡沿某可能滑动面的整体抗滑稳定性。求解整体稳定安全系数的方法有多种，其中降低强度有限元法是最常用的方法之一。该方法考虑到岩体边坡本身具有一定的强度储备能力，在保持设计正常荷载组合值不变的条件下，人为地将各可能滑动面上的抗剪强度（黏聚力和内摩擦角）按比例降低，直至滑动失稳。这时抗剪稳定安全系数以强度储备系数的形式出现。数值计算结果表明，降低强度有限元法能得到与极限平衡法几乎接近的安全系数和临界滑动面^[8]。

设断层实际的抗剪强度指标为摩擦因数 f 和黏聚力 c ，设岩体边坡达到临界稳定状态时的安全系数为 K ，此时的抗剪强度 f_2 和 c_2 分别为 f/K 、 c/K 。当边坡处于临界稳定状态时，滑动面上的每点要满足^[9]：

$$\tau_n = -\sigma_n f_2 + c_2 \quad (6)$$

式中： σ_n 、 τ_n 分别为滑动面上的法向应力和切向应力。

将式(6)转换成单元上的力，并对滑动面上的全部单元进行累加，可得

$$\sum_{i=1}^m |T_i| = \sum_{i=1}^m (N_i f_2 + c_2 A_i) \quad (7)$$

式中： m 为滑动面上单元的个数； N_i 和 T_i 为第 i 个单元上的法向力和剪应力； A_i 为第 i 个单元上扣除受拉区后的面积。

将 $f_2 = f/K$ 、 $c_2 = c/K$ 代入式(7)得

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m (N_i f + c A_i)}{\sum_{i=1}^m |T_i|} \quad (8)$$

2 计算模型

2.1 计算参数

根据开挖情况，断层 fb5 在高程 450 m 以下有部分岩体尚未连通，存在较大的阻滑作用。分段考虑结构面连通率，高程 495 ~ 450 m 为 95%，高程 450 m 以下为 50%。结构面力学参数考虑风化影响，采用加权平均法考虑不同连通率下的岩石力学综合参数。剖面 P12 的计算参数见表 1。

2.2 有限元模型

用 ANSYS 程序提供的以 Drucker-Prager 为屈服准则的材料性质来模拟岩体材料，采用接触单元对断层进行模拟，允许断层滑动，考虑层间摩擦，只抵抗抗压应力，不抵抗抗拉应力。

2.2.1 施工期

剖面 P12 的边坡开挖高度约为 55 m，其有限元计算范围如图 1 所示，计算模型的范围从 $X = 0$ m 到 $X = 137.93$ m，从 $Y = 0$ m 到 $Y = 293.02$ m。在开挖范围以外的自然边界由大坝开挖平面布置图算得。模型有限元网格如图 2 所示，其中单元结点数为 2 818，单元数为 2 623。计算工况包括：①工况 1：开挖至高程 450 m，不采取加固措施；②工况 2：开挖至高程 450 m 并考虑 1 根锚索的作用，锚索加固的效果以作用在锚索两端的集中力模拟，该集中力由锚索间距和设计张拉力转化求得。

2.2.2 运行期

运行期边坡已开挖完成，其有限元计算范围与施工期相同，计算网格略，单元结点数为 2 342，单元数为 2 185。计算工况包括：①工况 3：运行期下游水位为校核水位（408.82 m）；②工况 4：运行期下游水位由校核水位（408.82 m）骤降到正常水位（365.00 m）。

3 施工期安全评价

3.1 安全分析

工况 1 计算得到的断面安全系数等值线分布如图 3 所示。从图 3 可以看出：边坡岩体在绝大部分

表 1 剖面 P12 计算所用的参数

地层岩性	风化程度	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	吸水率/ %	自然抗拉强度/MPa	泊松比	f	c / MPa	弹性模量/ GPa
T ₁ y ²⁻³⁻²	弱风化	2.67			0.29	0.7	0.7	16
	微风化	2.68	0.78	4.0	0.27	1.0	1.0	20 ~ 22
	新鲜	2.68	0.78	4.0	0.27	1.0	1.0	20 ~ 22
T ₁ y ²⁻³⁻¹	弱风化	2.66			0.32	0.5	0.35	7
	微风化	2.67	0.32	4.0	0.30	0.6 ~ 0.65	0.45 ~ 0.5	10
	新鲜	2.67	0.32	4.0	0.30	0.6 ~ 0.65	0.45 ~ 0.5	10
T ₁ y ²⁻²⁻²	弱风化	2.67			0.27	0.9	0.9	20
	微风化	2.68	0.29	4.5	0.25	1.20	1.30	25 ~ 30
	新鲜	2.68	0.29	4.5	0.25	1.20	1.30	25 ~ 30

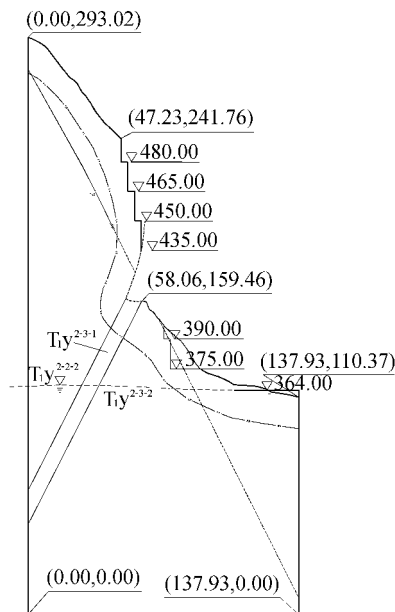


图1 施工期剖面截取范围



图2 施工期有限元网格

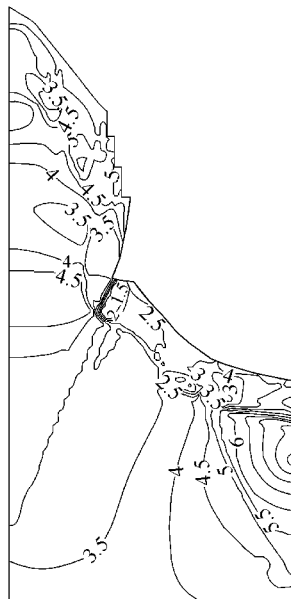


图3 工况1计算断面的安全系数等值线分布

区域的安全系数较高,在4.0以上;在断层fb5周边和 T_{iy}^{2-3-1} 岩质部位区域安全系数较小,说明这些部位的安全储备量较少,有发生滑动变形的可能,需要进行具体深入的稳定性验算。

断层fb5距边坡表面较近,坡度稍陡于边坡,断层下倾方向也延伸至边坡表层,具有相当的连通性,因此有必要将断层fb5作为滑动面,对边坡进行整体稳定性分析。该断面安全等级为一级,文献[10]规定一级边坡的整体稳定安全系数为1.350。通过计算得出边坡沿断层fb5的整体稳定安全系数为1.419,满足规范要求。

3.2 加固措施

通过有限元计算,剖面P12开挖至高程450m时,断层fb5在高程450~424m之间的连通率与边坡整体稳定安全系数的关系曲线如图4所示。由图4可以看出:断层fb5连通率从50%增加到65%时,安全系数基本呈线性平稳下降,由1.419降到1.351,满足安全要求;连通率从65%增加到68%时,安全系数陡然下降至1.322,不满足安全要求,必须采取一定的加固措施。由于断层与岩坡表面最近处的距离大于10m,宜采用锚索进行加固。

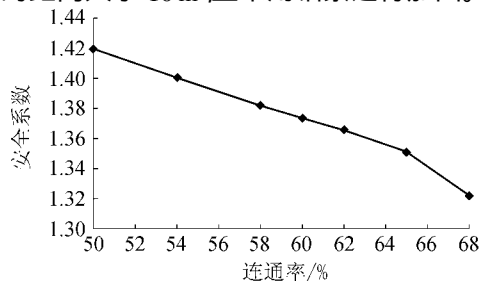


图4 连通率与边坡整体稳定安全系数的关系曲线

由于边坡在68%的连通率时已处于失稳状态,因此,以高程450m以下断层连通率为68%作为最不利情况,计算开挖至高程450m时的边坡整体稳定安全系数。当锚索根数为0根、1根、2根、3根时,边坡整体稳定安全系数分别为1.322、1.388、1.416、1.439。由此可知,采用锚索加固能明显提高边坡的整体稳定安全系数。规范规定一级边坡的整体稳定安全系数必须大于1.350,因此设计宜采用1根锚索的加固方案。

4 运行期安全评价

考虑运行期下游水位由校核水位骤降到正常水位的情况(工况4),当水位下降速度较快时,边坡坡体内孔隙水来不及排出,导致坡体内水位高于库水位,由此产生的渗流作用使边坡的抗滑能力降低,可能诱发边坡失稳。为了便于计算,分析时假设:①水面以下岩体是饱和的;②库水位骤降时弱风化层内的地下水可以及时排出,而基岩体内的地下水不能排出,即基岩体内的地下水位基本不变[11]。与实际情况相比,采用第②条假设条件将得到更安全的计算结果,因为计算得出地下水压力比实际大(水压力按分布荷载作用在弱风化岩层与微风化岩层的交界面上)。

剖面P12边坡存在不利于稳定的断层fb5。通过有限元计算得出:①校核水位下(工况3时)剖面的最小安全系数为1.58,出现在高程410m附近边坡外侧开挖区附近基岩。②与校核水位的情况(工况3)相比,水位从校核水位骤降到正常水位(工况4)时安全系数较小,安全系数最小值为1.36,出现在高程410m附近边坡外侧开挖区附近基岩,由

此可见水位骤降时边坡的稳定性有所下降。剖面 P12 在工况 3 和工况 4 下的安全系数等值线分布如图 5 所示。

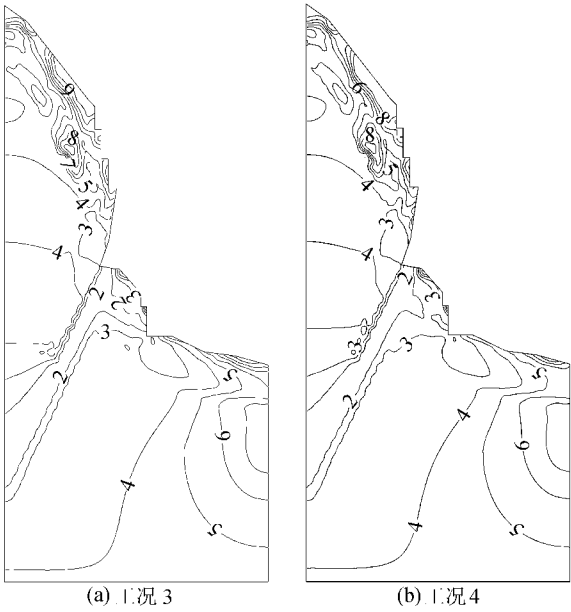


图 5 运行期计算断面的安全系数等值线分布

5 结 论

a. 由施工期边坡岩体安全系数分布可推断出断层 fb5 为边坡的潜在滑动面,边坡沿断层 fb5 的整体稳定安全系数为 1.419,可满足稳定要求。

b. 断层连通率的变化对边坡稳定性的影响较大,随着连通率的增大,边坡安全系数逐步减小;当断层连通率小于 65% 时,边坡的整体稳定安全系数满足稳定要求。

c. 考虑施工期最不利安全的连通率情况,为保证边坡的稳定性要求,建议最少采用 1 根锚索对已开挖边坡进行加固。

d. 运行期水位骤降时,边坡的稳定性有所降低,但仍可满足边坡的整体稳定性要求。

参考文献:

[1] 孔位学,郑颖人,赵尚毅,等.地基承载力的有限元计算及其在桥基中的应用[J].土木工程学报,2005,38(4):97-102.

[2] 郑颖人,张玉芳,赵尚毅,等.有限元强度折减法在元磨高速公路高边坡工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3812-3817.

[3] 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.

[4] 郝方,李维维,郭柏威.用 ANSYS 做边坡稳定分析[J].贵州水力发电,2005,19(2):54-56.

[5] 谷拴成,张士兵. ANSYS 在高边坡危岩稳定性分析中的

应用[J].西安科技学院学报,2003,23(4):375-378.

[6] 基于 D-P 准则的三维弹塑性有限元增量计算的有效算法[J].岩土工程学报,2004,24(1):16-20.

[7] 江涛,徐卫亚,陈宏,等.受断层切割影响的拱坝坝肩岩体三维稳定性数值分析及加固措施模拟[J].岩石力学与工程学报,2005,24(S2):5840-5844.

[8] 连镇营,韩国城,孔宪京.强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J].岩土工程学报,2001,23(4):407-411.

[9] 章杭惠.混凝土拱坝病险及加固仿真分析[D].南京:河海大学,2003.

[10] GB 50330—2002,建筑边坡工程技术规范[S].

[11] 沈振中,郑磊.基于数值流形方法的水库岩体边坡稳定分析[J].水电能源科学,2006,24(1):32-33,96.

(收稿日期 2008-01-14 编辑 骆超)

(上接第 39 页)

措施为主的生态河道建设,同时,必须加强污染的治疗,减少外水体的污染。

参考文献:

[1] 王云南.植物护岸技术在海宁市辛江塘整治中的应用[J].浙江省水利科技,2006,14(4):43-45.

[2] 杨文慧,严忠民,吴建华.河流健康评价的研究进展[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(6):607-611.

[3] 胡玲,韩玉玲,夏继红.浙江省河流健康诊断的思路与关键内容[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(3):322-325.

[4] 杨文慧,杨宇.河流健康的概念及诊断指标体系构建[J].水资源保护,2006,22(6):28-30.

[5] 蔡守秋,胡欣.河流健康概念及诊断指标体系构建[J].水利水电科技进展,2008,28(1):23-27.

[6] 夏继红,严忠民,蒋传丰,等.河岸带生态综合评价指标体系研究[J].水科学进展,2005,16(3):345-348.

[7] 夏继红,白传贞,严忠民,等.淮入江水道夹江左岸带生态综合评价[J].水利水电科技进展,2007,27(4):20-22,49.

[8] SUN Dong-po, LU Rui-li, SONG Yong-jun, et al. Impact of hydroelectric projects on river environment: analysis of water quality changes in Ningxia Resch of Yellow River[J]. Water Science and Engineering, 2008, 1(2):66-75.

[9] 王煜.河流健康因子选择和综合评判研究[J].人民黄河,2006,28(11):7-8,23.

[10] 王惠文.偏最小二乘回归方法及其应用[M].北京:国防工业出版社,1999.

(收稿日期 2008-06-11 编辑 骆超)

