

龙江水电站坝后厂房高边坡锚杆应力分析

李宏恩^{1 2} 李 铮^{1 2} 范光亚^{1 2} 孙庚宁³ 杨理润³

(1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029 ;

2. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029 ; 3. 云南龙江水利枢纽开发有限公司, 云南 潞西 678400)

摘要 :为监测龙江水电站坝后厂房高边坡施工期及运行初期岩体锚固效果 ,在重点断面安装了锚杆应力计 ,同时建立各锚杆应力测点的多元线性回归统计模型 ,定量分析了边坡开挖高程、温度、时效等因子对高边坡锚杆应力的影响效应 ,可快速分析锚杆应力的主要成因 ,有效判断边坡稳定状态。分析结果表明 ,龙江水电站坝后厂房高边坡安全性态基本正常 ,但局部岩体存在轻微滑移趋势 ,建议加强对这些部位的监测。

关键词 :高边坡 ;锚杆应力 ;安全监测 ;回归分析 ;坝后厂房 ;龙江水电站

中图分类号 :TV698.1+1

文献标志码 :A

文章编号 :1006-7647(2012)04-0059-04

Analysis of anchor bar stress for high slopes of powerhouse at dam toe of Longjiang hydropower plant//LI Hong-en^{1 2} , LI Zheng^{1 2} , FANG Guang-ya^{1 2} , SUN Geng-ning³ , YANG Li-run³ (1. Dam Safety Management Department , Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029 , China ; 2. Dam safety Management Center of Ministry of Water Resources , Nanjing 210029 , China ; 3. Yunnan Longjiang Water Conservancy Development Co. , Ltd , Luxi 678400 , China)

Abstract : In order to monitor the anchoring effect of a powerhouse at the dam toe of the Longjiang hydropower plant during the construction and initial operation periods , anchor bar stress meters were installed in several high slope sections. Multiple linear regression statistical models were established to quantitatively analyze the effects of slope excavation elevation , temperature , aging and other factors. The models is able to rapidly reveal the major causes of anchor bar stress and effectively judge the high slope stability conditions. The analysis indicates that the safety performance of high slopes of the powerhouse at the dam toe of the Longjiang hydropower plant is essentially normal , and there exist a slight slip trend of local rock. The authors therefore suggest that the safety monitoring should be strengthened in these locations.

Key words : high slope ; anchor bar stress ; safety monitoring ; regression analysis ; powerhouse at dam toe ; Longjiang hydropower plant

水电站坝后厂房高边坡的稳定性直接关系到电站厂房的安全。近年来 ,随着国内外对高边坡安全稳定问题研究的不断深入 ,各种基于岩土力学及滑坡动力学理论的有限元等数值分析方法在工程实践中得到广泛应用^[1-7]。然而受到岩土力学理论及勘测技术的限制 ,目前几乎不可能在设计阶段就能准确预测和评估在高边坡开挖及加固过程中的基本物理力学性状及其在施工运行过程中的动态响应^[8] ,因此 ,基于实际安全监测数据的高边坡稳定分析与评价受到越来越多的重视^[9]。

龙江水电站枢纽工程位于云南省德宏傣族景颇族自治州潞西县境内的龙江干流上 ,是以发电、防洪为主 ,兼顾灌溉的综合性水利枢纽工程。龙江水电

站库区地质情况复杂 ,坝址区出露的地层主要为寒武系的片麻岩 ,地表覆盖有第 4 系松散堆积层 ,主要分布于河谷及两岸山坡。库区河谷地形高险 ,岸坡陡峻 ,断裂构造发育 ,已发现的断层多达 27 条 ;另外 ,受当地气候、地质及环境影响 ,枢纽区片麻岩风化剧烈。龙江水电站库区均存在着不同程度的边坡稳定问题 ,其中位于左岸的坝后厂房高边坡高达 80 m ,且边坡中部有一道宽约 20 m 的冲沟 ,长期以来其应力状况及安全稳定性一直受到相关专家及各级部门的关注和重视^[10-12] ,故加强对龙江水电站坝后厂房高边坡的各项安全监测 ,并对相关监测数据进行及时处理与分析就成为关乎整个枢纽工程安全的关键问题。

本文通过对龙江水电站坝后厂房高边坡在施工期及运行期锚杆应力计的应力状态和受力原因进行系统深入的分析,建立了锚杆应力测值的统计模型,并定量分析了温度、时效、开挖高程等因素对锚杆应力影响的规律,进而对坝后厂房高边坡的安全稳定性进行全面的评估及预测,以确保工程安全。

1 高边坡支护措施及锚杆应力计布置

1.1 坝后厂房高边坡地质条件

龙江水电站枢纽工程坝后厂房高边坡主要为低液限黏土,厚 0.5~2.0 m,基岩为寒武系片麻岩,其中强风化片麻岩为灰黄色,厚 1.5~15.0 m,岩质较坚硬,节理发育,间距 10~30 cm,岩体完整性差,呈镶嵌碎裂结构;弱风化片麻岩为深灰色,岩质坚硬,节理较为发育,间距 10~50 cm;微风化片麻岩为灰黑色,岩质坚硬,岩体隐节理发育,完整性差,以镶嵌碎裂结构为主。厂房高边坡主要发育断层 6 条(F_1 , F_{40} , F_{41} , F_{47} , F_{48} , F_{49}),其中 F_{41} 断层对边坡影响最大,走向 $N70^\circ\sim 85^\circ E$,出露长度 65~70 m,宽度 0.1~0.3 m,倾向 SE,倾角 $24^\circ\sim 35^\circ$,断层波状起伏,局部产状变化较大,主要由碎裂岩和灰黄色断层泥组成,断层泥厚 3~5 cm,分布连续。

1.2 边坡支护措施及锚杆应力计布置

根据坝后厂房高边坡的地质条件采取了不同的开挖方式和支护措施。边坡共分 5 级开挖,坡比 1:1~1:0.3 不等,每级边坡高度 15 m。高程 845.00 m 以上边坡开挖坡比 1:1,高程 845.00~815.00 m 边坡开挖坡比 1:0.6,高程 815.00~799.30 m 边坡开挖坡比 1:0.3。为保证开挖边坡岩体稳定,对边坡进行系统喷锚支护处理,喷锚混凝土厚 10 cm,混凝土强度等级 C20,全长锚固锚杆共 2 种, $\varnothing 25$ 入岩深度 4 m, $\varnothing 28$ 入岩深度 6 m,在喷锚混凝土面布置系统排水孔。针对局部全风化边坡采用挂网混凝土及混凝土面板两种处理措施,其中混凝土厚 15 cm,强度等级 C20,同时为防止混凝土面开裂,在混凝土中掺聚丙烯纤维。素混凝土面板护面防护处理的混凝土厚 20 cm,强度等级 C20,采用锚钉锚固,布置表层排水孔,为防止全风化边坡排水孔失效,在排水孔内埋入软式透水管。厂房后边坡中部冲沟采用砂石料回填,在混凝土面板支护后设置锚索、网格梁及混凝土联系梁进行加固。

为监测锚杆锚固效果,在各级马道上下约 1 m 处的锚杆上共埋设 10 支锚杆应力计以观测坝后厂房高边坡的稳定情况,边坡开挖后锚杆应力计随喷锚支护同时进行埋设,共选取 2 个剖面。

2 锚杆应力计受力状态分析

2.1 锚杆应力计测值特征分析

截至 2010 年 9 月,在坝后厂房高边坡上埋设的 10 支锚杆应力计均正常工作,其中拉应力大于 30 MPa 的有 5 支,最大值为 51.413 MPa,埋设在高程 846.69 m;压应力大于 30 MPa 的有 1 支,最大绝对值为 57.187 MPa,埋设在高程 817.62 m,其余锚杆应力计受压测值绝对值均小于 10 MPa。从表 1 可见,锚杆应力计的受拉测值普遍偏高,因此有必要对锚杆应力计的受力成因、变化过程及发展趋势作进一步的探讨。

表 1 锚杆应力计测值特征

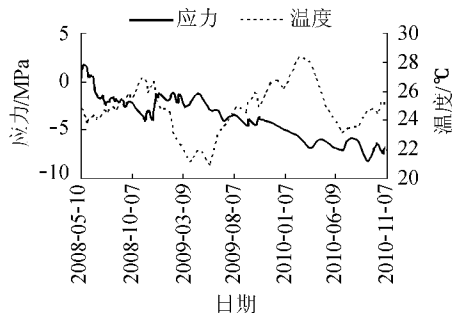
编号	埋设 高程/m	埋设日期	受力 状态	锚杆应力 最大值/MPa	最大值 发生时间
PRC1	858.72	2008-04-28	受拉	37.290	2009-08-30
PRC2	842.00	2008-05-09	受压	8.257	2010-03-12
PRC3	828.74	2008-05-23	受拉	45.317	2010-09-12
PRC4	813.67	2008-07-28	受拉	24.637	2008-08-30
PRC5	846.69	2008-03-08	受拉	51.413	2009-06-22
PRC6	843.70	2008-04-02	受压	8.554	2010-08-22
PRC7	828.72	2008-06-10	受压	6.480	2010-03-29
PRC8	813.67	2008-08-10	受拉	49.896	2009-08-28
PRC9	817.98	2008-07-28	受拉	49.631	2010-09-12
PRC10	817.62	2008-06-10	受压	57.187	2009-01-23

2.2 锚杆应力状态分析

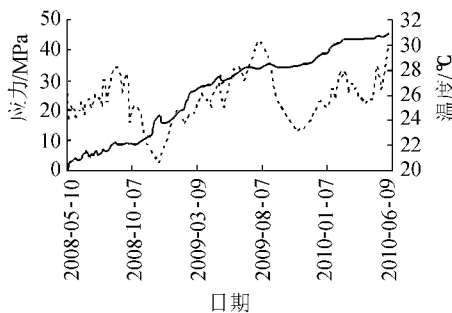
根据实际监测资料,龙江水电站坝后厂房高边坡的锚杆应力计测值若以受力状态为参考可划分为受拉型和受压型,而若以受力成因为参考,则可以划分为变形应力为主型、温度应力为主型^[13]及变形与温度共同作用型 3 类。各种受力状态下锚杆应力计应力-温度实测过程线见图 1~3,其中实测温度为锚杆应力计埋设位置岩体温度。

变形应力为主型的锚杆应力计(PRC2, PRC3 和 PRC6)其测值绝对值随时间持续增加,这说明锚杆部位岩体还未完全稳定,在边坡开挖及绕坝渗流等因素的影响下存在继续变形的趋势。对于持续受拉的情况,其原因在于锚杆在埋设后边坡持续向临空面位移或岩体内部应力持续调整,使锚杆被动持续受拉,从实测过程线上看,锚杆应力的增长速率已逐步衰减,说明锚杆埋设部位边坡有逐渐稳定的趋势。对于持续受压的情况,由于锚杆埋设部位可能存在裂隙或局部全风化岩层弹性模量较低,边坡后缘向开挖临空面位移导致裂隙闭合,全风化岩层压缩,使锚杆持续被动受压,从实际测值看,该类锚杆应力绝对值不大且增加趋势较为缓慢。

温度为主型的锚杆应力计(PRC1, PRC4, PRC5, PRC8 和 PRC10)其测值在埋设初期受开挖后边坡向临空面位移的影响,产生一定的拉(压)应力,之后在温度荷载的作用下,测值在一定范围内平稳波动,与温度

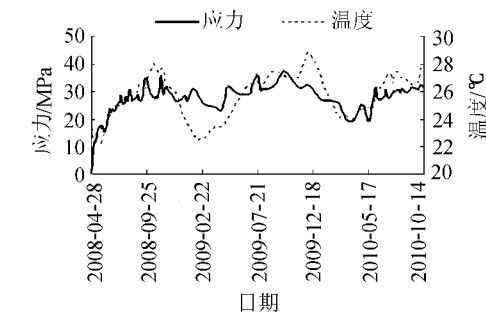


(a) PRC2

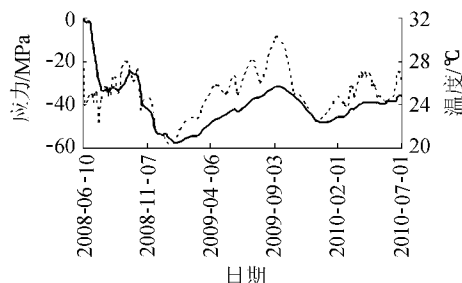


(b) PRC3

图1 变形应力为主型锚杆应力计
应力-温度实测过程线



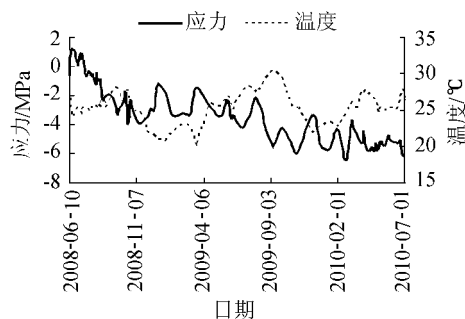
(a) PRC1



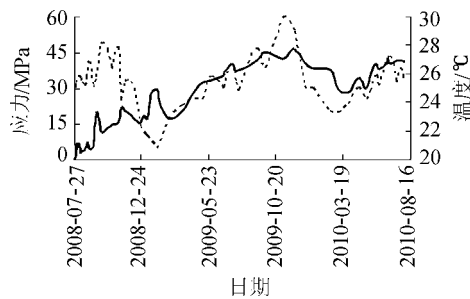
(b) PRC10

图2 温度应力为主型锚杆应力计应力-温度实测过程线
变化呈负相关关系,这与已有的研究成果相符^[13],说明
锚杆应力计埋设部位边坡岩体稳定性良好。

变形与温度共同作用型的锚杆应力计(PRC7 , PRC9),锚杆同时受到变形应力和温度荷载的影响 ,其测值在随温度变化呈周期性波动的同时 ,应力绝对值不断变大。如图3所示 ,虽然锚杆的被动受拉或被动受压具有持续性 ,但其近1年来的测值变化已明显逐步收敛 ,说明该部位边坡正向趋于稳定的方向发展。



(a) PRC7



(b) PRC9

图3 变形与温度共同作用型锚杆应力计
应力-温度实测过程线

3 锚杆应力计测值的统计模型及成果分析

3.1 模型因子选择

前文仅对龙江水电站坝后厂房高边坡锚杆应力计的应力状态及受力成因进行了定性分析。为了更好地分析锚杆应力计的应力状态变化趋势及受温度、开挖高程和时效等因素的影响程度 ,分别选取变形应力为主型 PRC2 和 PRC3、温度应力为主型 PRC1 和 PRC10 以及变形与温度共同作用型 PRC7 和 PRC9 作为代表性的锚杆应力计建立多元线性回归统计模型^[14]。根据前述分析 ,实测锚杆应力 σ 主要由开挖高程分量 σ_E 、温度分量 σ_T 及时效分量 σ_θ 组成 ,为此采用最小二乘法^[15]建立锚杆应力计的多元线性回归模型 :

$$\sigma = a_0 + a_1(H_0 - H_t) + a_2 \ln(H_0 - H_t) + b_1 T_t + c_1 \theta + c_2 \ln \theta \quad (1)$$

其中

$$\theta = t/100$$

式中 : a_0 为常数项 ; a_1 、 a_2 为开挖高程因子的回归系数 ; b_1 为温度因子的回归系数 ; c_1 、 c_2 为时效因子的回归系数 ; t 为观测日至观测基准日的累计天数 ; H_0 、 H_t 分别为首测日、第 t 日仪器埋设断面的开挖高程 ; T_t 为第 t 日的实测温度。

3.2 回归模型成果分析

根据式(1)采用多元线性回归分析方法分别对6支坝后厂房高边坡锚杆应力计的测值进行回归分析 ,表2显示了各测值的模型回归系数及复相关系数。从回归分析的结果看 ,所有测值模型的复相关

系数 R 均高于 0.9 ,可以认为所建立的模型精度总体较高。此外,利用各支锚杆应力计的回归模型,将预测值按照影响因子的不同进行分离,并将各类锚杆应力计预测值与应力分量过程线绘制于图 4~6 中,用以定量分析开挖高程分量、温度分量、时效分量等对锚杆应力的影响。

表 2 锚杆应力计统计模型回归系数

编号	回归系数						复相 关系 数 R
	a_0	a_1	a_2	b_1	c_1	c_2	
PRC2	0.254	-0.275	4.498	-0.261	-0.785	0.208	0.969
PRC3	17.835	0.023	-6.575	0.309	4.756	1.895	0.989
PRC1	-63.155	-0.490	20.860	1.390	-1.486	5.111	0.911
PRC10	-131.930	1.872	0.011	2.755	2.691	-11.739	0.927
PRC7	-2.270	-0.008	1.054	-0.097	-0.261	-0.917	0.926
PRC9	13.081	-0.686	-0.098	0.991	1.173	8.148	0.947

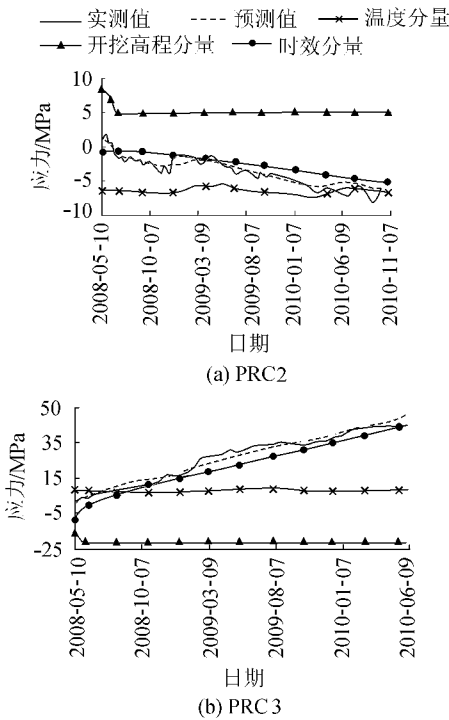


图 4 变形应力为主型锚杆应力计预测值与因子分量过程线

a. 开挖高程分量影响效应分析。开挖高程分量的变化仅发生在锚杆应力计埋设初期(埋设后 1~2 个月),即锚杆应力计测值绝对值在埋设初期的迅速增大主要由于开挖高程分量的变化。随着边坡开挖结束,边坡开挖高程分量的数值逐渐收敛并稳定,同时其影响程度与锚杆应力计的埋设高程有关,埋设于较高位置的锚杆应力计受开挖高程分量的影响较大,如图 5(a)中 PRC1 的开挖高程分量幅值达到了 56.2 MPa,因此边坡开挖高程分量对锚杆应力的影响主要反映在锚杆应力计埋设初期,与前述定性分析及实际情况一致。

b. 温度分量影响效应分析。对于变形应力为

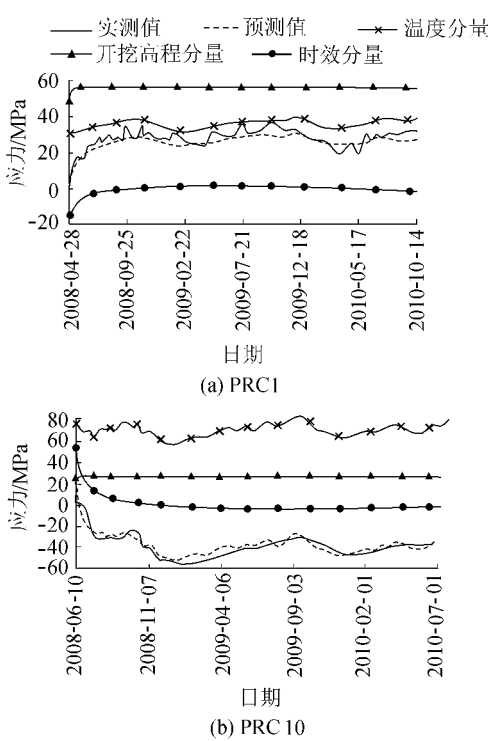


图 5 温度应力为主型锚杆应力计预测值与因子分量过程线

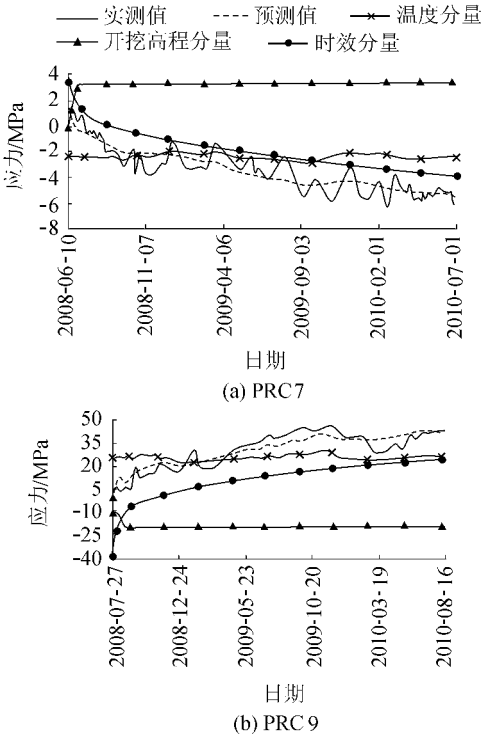


图 6 变形与温度共同作用型锚杆应力计预测值与因子分量过程线

主型的锚杆应力计,温度分量的幅值及变化幅度很小,其中温度分量对 PRC2 的影响幅度仅为 -7.4 ~ -5.4 MPa。对于温度应力为主型的锚杆应力计,温度分量的幅值及变化幅度较大,其中温度分量对 PRC10 的影响幅度达到了 56.2 ~ 82.9 MPa。而对于变形与温度共同作用型的锚杆应力计(下转第 94 页)

(6/7) 385-392.

[41] 王明,李庶林.声发射技术在结构安全监测中的研究与应用概述[C]//梁益,陆新征,缪志伟,等.第六届全国工程结构安全防护学术会议论文集.洛阳:中国力学学会,2007:201-207.

[42] 陈炳瑞,冯夏庭,肖亚勋,等.深埋隧洞TBM施工过程围岩损伤演化声发射试验[J].岩石力学与工程学报,2010,29(8):1562-1569.

[43] 严明,苗放,王士天,等.岩体声发射监测在马步坎高边坡岩体稳定研究中的应用[J].地质灾害与环境保护,1998,9(1):29-33.

[44] 李金河,玉国进.永久船闸边坡稳定性声发射监测[J].岩土力学,2001,22(4):478-480.

[45] 尹贤刚,李庶林.声发射技术在岩土工程中的应用[J].采矿技术,2002,2(4):39-42.

[46] 蔡美峰,来兴平.声发射在复合材料支护采空区非线性

动力失稳监测中的应用[C]//奚林名,刘祖典,李银平等.中国岩石力学与工程学会第7次学术大会论文集.西安:中国岩石力学与工程学会,2002:672-675.

[47] CARPINTERI A, LACIDOGNA G, PUGNO N. Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 74(1/2):273-289.

[48] TRAVERS F A. Acoustic monitoring of prestressed concrete pipe[J]. Construction and Building Materials, 1997, 11(3):175-187.

[49] 陈祥森.混凝土缺陷无损检测技术发展现状综述[J].福建建材,2007,2(1):36-37.

[50] SHINOMIYA T, NAKANISHI Y, MORISHIMA H, et al. Damage diagnosis technique for brick structures using acoustic emission[J]. Journal of Acoustic Emission, 2003, 20:145-152.

(收稿日期:2012-12-01 编辑:骆超)

(上接第62页)

的温度分量影响程度介于上述两种类型之间,其中温度分量对PRC9的影响幅度为20.6~29.6 MPa。可见温度分量对各锚杆应力计均产生不同程度的影响,且定量分析的结果与前述定性分析一致。

c. 时效分量影响分析。时效分量在各锚杆应力回归模型中所占比例均相对较高,但时效分量的变化趋势随锚杆应力计的类型不同而有所不同。在温度应力为主型的锚杆应力计埋设初期,时效分量有所增长,但其随时间推移逐渐稳定并收敛,且不断衰减。而对于变形应力为主型和变形与温度共同作用型的锚杆应力计,时效分量逐月增大,其中锚杆应力计PRC7及PRC9的时效分量已开始表现出收敛趋势,而锚杆应力计PRC2及PRC3的时效分量仍处在不断增大状态,说明其岩体有轻微滑移趋势,尚未稳定,因此建议加强这些测点部位岩体的监测。

4 结 语

坝后厂房高边坡的稳定与否直接关系到电站厂房的安全,采用多元线性回归方法对高边坡锚杆应力进行分析,是对常用边坡数值分析方法的有效补充,可以在资料分析初期快速查找锚杆应力主要成因,有效判断边坡岩体稳定状态,及时发现和排除隐患。分析结果表明,龙江水电站坝后厂房高边坡总体趋于稳定,但部分以变形应力为主型锚杆应力计所在岩体存在轻微滑移趋势,建议加强监测,且着重关注锚杆应力变化是否逐渐减弱或趋于收敛稳定。

参考文献:

[1] 梁茂田,黎勇.非连续变形计算力学模型在岩体边坡稳定性分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2000,19

(3):289-294.

[2] 王庚荪.边坡的渐进破坏及稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(1):29-33.

[3] 张季如.边坡开挖的有限元模拟和稳定性评价[J].岩石力学与工程学报,2002,21(6):843-847.

[4] 赵尚毅,邓卫东.用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(2):254-260.

[5] 朱维申,程峰.能量耗散本构模型及其在三峡船闸高边坡稳定性分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2000,19(3):261-264.

[6] 黄润秋.岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J].岩石力学与工程学报,2008,27(8):1525-1544.

[7] 庄晓莹,蔡永昌,朱合华.锚固边坡稳定性分析有限元模型及锚固效应的探讨[J].岩土工程学报,2008,30(7):1099-1104.

[8] 夏元友,李梅.边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):1087-1091.

[9] 高大水,曾勇.三峡永久船闸高边坡锚索预应力状态监测分析[J].岩石力学与工程学报,2001,20(5):653-656.

[10] 云南龙江水电站枢纽工程第一次阶段性蓄水安全鉴定报告[R].南京:南京水利科学研究院,2009.

[11] 云南龙江水电站枢纽工程第二次阶段性蓄水安全鉴定报告[R].南京:南京水利科学研究院,2010.

[12] 龙江水电站枢纽工程大坝安全监测设施及监测资料分析报告[R].南京:南京水利科学研究院,2010.

[13] 刘祖强,廖勇龙,朱全平.三峡永久船闸一期高边坡监测锚杆应力分析[J].长江科学院院报,2004,21(1):40-42.

[14] 何晓群,刘文卿.应用回归分析[M].北京:中国人民大学出版社,2001.

[15] 吴中如.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].北京:高等教育出版社,2003.

(收稿日期:2011-11-28 编辑:周红梅)