

# 500 m 级超高边坡时效变形特征及长期稳定性研究<sup>\*</sup>

张公平<sup>1</sup>, 周钟<sup>1</sup>, 姜清辉<sup>2</sup>, 位韦<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团 成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:**水电站坝前工程边坡的变形稳定问题是近年来水电工程界关注的热点话题。相关监测成果表明, 自开挖期完成, 工程边坡将先后经历开挖卸荷变形期、蓄水边坡变形调整期和长期变形收敛期3个阶段。本文以西部地区某巨型水电工程左岸500 m级超高坝前工程边坡为例, 从边坡基本工程地质条件和边坡变形监测资料入手, 在对各阶段边坡变形影响因素深入分析的基础上, 通过工程岩体流变试验确定了边坡岩体的流变力学模型, 采用人工神经网络监测反馈分析方法开展了边坡岩体流变变形的监测反馈分析, 获得了边坡岩体的流变参数, 并以此为基础开展了边坡长期变形趋势的预测研究, 成果可为边坡长期稳定性安全评价提供依据。

**关键词:**工程边坡; 蓄水期; 岩体流变; 监测反馈分析; 长期稳定性

中图分类号: O319.56

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)06-1688-07

## Study on Time-dependent Deformation Behavior and Long-term Stability of a 500 m-level Super High Slope

Zhang Gongping<sup>1</sup>, Zhou Zhong<sup>1</sup>, Jiang Qinghui<sup>2</sup>, Wei Wei<sup>2</sup>

(1. Chengdu Engineering Corporation Ltd. China Power Construction Corporation, Chengdu 610072, P.R. China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R. China)

**Abstract:** Slope deformation stability of upstream engineering slope has been one of the hottest topics in hydropower engineering. Relevant monitoring results show that, from the end of the excavation period, the engineering slope will go through excavation unloading deformation period, impounding deformation adjusting period, and long-term deformation convergent period. In this paper, the left bank 500 m-height upstream engineering slope of a huge hydropower project in western part of China was set to be a project case. This paper began with analysis of the basic geological condition and the basic monitoring data, deeply researched the influence factors of the slope deformation in different period, confirmed the rock mass rheological mechanical model by rheological test of engineering slope rock mass, performed monitoring feedback analysis of the rock mass rheological deformation with artificial neural network monitoring and feedback analysis method, obtained the rheological parameter of slope rock mass. On this basis, this paper carried out the prediction research of long-term deformation tendency of the engineering slope, which can be used as the basis of long-term safety evaluation of the engineering slope.

**Keywords:** engineering slope; impounding period; rock mass rheological; monitoring feedback analysis; long-term stability

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-06-06(修改稿)

作者简介: 张公平(1981-), 男, 成都人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工设计、岩土工程设计等工作。

E-mail: zgongping@chidi.com.cn

0 引言

近年来,随着我国西部地区一大批巨型水电工程的开工建设,坝前工程边坡长期运行期变形特征及变形稳定问题已经逐渐成为了水电工程界备受关注的热门话题。本文以我国西部地区某巨型水电工程左岸500 m级超高坝前工程边坡为例,从边坡基本工程地质条件和基本变形监测资料入手,在对不同阶段边坡变形影响因素深入分析的基础上,通过工程岩体流变试验确定了边坡岩体的流变力学模型,采用人工神经网络监测反馈分析方法获得了边坡岩体的流变参数,并以此为基础开展了边坡长期变形趋势的预测研究和边坡长期变形稳定性安全评价。其研究过程和分析方法可为类似工程边坡提供参考和借鉴。

1 工程概况及边坡工程地质条件

1.1 工程概况

某水电站位于四川省雅砻江干流上,以发电为主,兼有防洪、拦沙等作用。水库正常蓄水位1 880.00 m,总库容77.6亿m<sup>3</sup>,调节库容49.1亿m<sup>3</sup>,为年调节水库。电站装机容量3 600 MW,为一等大(I)型工程,枢纽由挡水、泄水及消能、引水发电等永久性建筑物组成,挡水建筑物采用混凝土抛物线双曲拱坝,最大坝高305 m,坝顶高程1 885.00 m。

1.2 左岸坝前边坡工程地质条件

某水电站坝址区河谷狭窄、地形高陡,岩体卸荷松弛、变形拉裂严重。左岸坝前边坡最大开挖高度约530 m,从上至下可分为1 960 m以上缆机平台边坡,1 885~1 960 m坝肩边坡及1 885 m以下拱肩槽边坡等3部分。边坡1 800 m高程以上为杂谷脑组第3段厚~巨厚层变质砂岩夹薄层板岩,1 800 m高程以下主要为中厚层和厚层的大理岩。根据地勘揭示,左岸坝前工程边坡中发育有多种不良地质现象,包括断层及节理裂隙、岩体卸荷拉裂、岩体倾倒变形(如图1)和深部裂缝等<sup>[1]</sup>。

从左岸边坡所处地质环境和变形破裂迹象分析,边坡整体稳定问题主要包括1 960 m高程以上倾倒变形岩体和由f<sub>42-9</sub>断层、煌斑岩脉和SL<sub>44-1</sub>拉裂带相互切割形成的拉裂变形岩体<sup>[2-4]</sup>(如图2)。

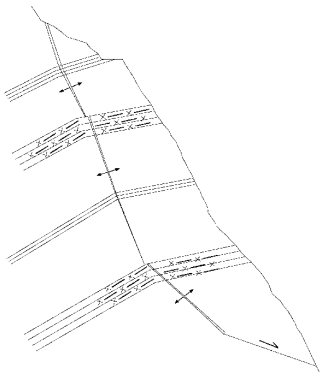


图1 左岸坝前边坡倾倒变形岩体示意图  
Fig. 1 Toppling deformation of rock mass diagram of the left bank upstream slope

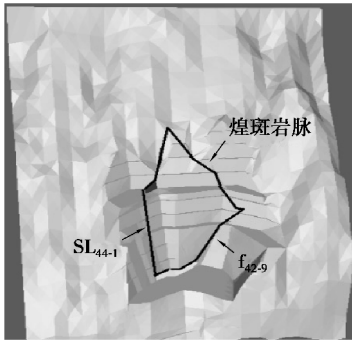


图2 左岸坝前工程边坡拉裂变形岩体示意图  
Fig. 2 Tension crack deformation of rock mass diagram of the left bank upstream engineering slope

2 边坡主要监测成果分析

左岸坝前工程边坡布设了包括外观墩、多点位移计、锚索测力计、石埋杆收敛计、谷幅等表部、浅部和深部监测仪器。

2.1 边坡总体变形情况

多种监测仪器边坡变形监测成果<sup>[5-6]</sup>表明:  
(1)自边坡开挖期以来,左岸坝前工程边坡外观变形整体呈现上部变形大、下部变形小的特征,变形方向以偏上游、倾河床、下沉变形为主(如图3),主要变形均发生于施工期。

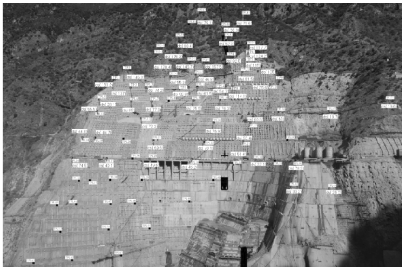


图3 左岸坝前工程边坡外观变形水平位移矢量图  
Fig.3 Surface horizontal displacement vector diagram of the left bank upstream engineering slope

(2)多点位移计监测到的浅部变形以及锚索测力计所测得的锚固力变化多发生于开挖期,开挖结束后及蓄水期,浅部变形和锚固力变化很小,说明蓄水期边坡浅部变形很小。

(3)石埋杆收敛计监测到的深部变形主要发生在深部拉裂缝、 $f_{42-9}$  断层和煌斑岩脉通过的部位(如图 4);深部变形主要发生在施工期,开挖结束后深部变形速率有所减缓,但并未完全收敛(如图 5)。

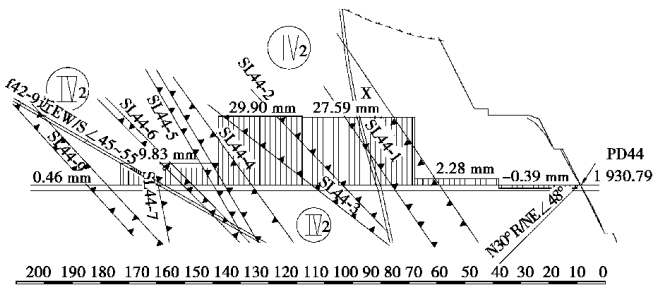


图 4 左岸坝前工程边坡深部变形分布图

Fig.4 Deep deformation distribution diagram of the left bank upstream engineering slope

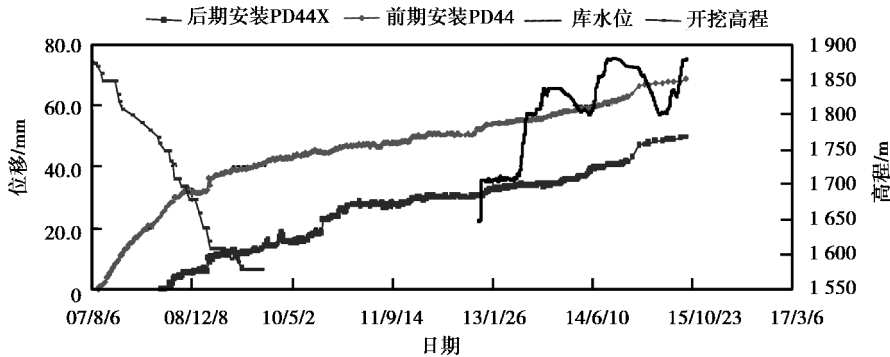


图 5 左岸坝前工程边坡深部变形历时曲线

Fig.5 Deep deformation duration diagram of the left bank upstream engineering slope

(4)左岸拉裂变形岩体外观变形主要受其内部的深部拉裂松弛带控制,开挖施工结束后,左岸拉裂变形体内部的变形量值很小,无明显错动迹象,说明其总体稳定。

2.2 边坡分区及变形分析

监测成果表明,左岸坝前边坡大部分的变形均发生在开挖期。边坡开挖结束后,边坡变形速率显

著降低,但各部位所处位置、地质条件和受力特性的不同,变形存在差异,主要体现在:

(1)1 960 m 以上缆机平台边坡岩体松弛破碎,变形主要由倾倒变形岩体引起,受蓄水影响较小,开挖期变形速率较大,开挖结束后变形速率显著降低,蓄水期变形速率无明显变化,呈缓慢增长状态(如图 6)。

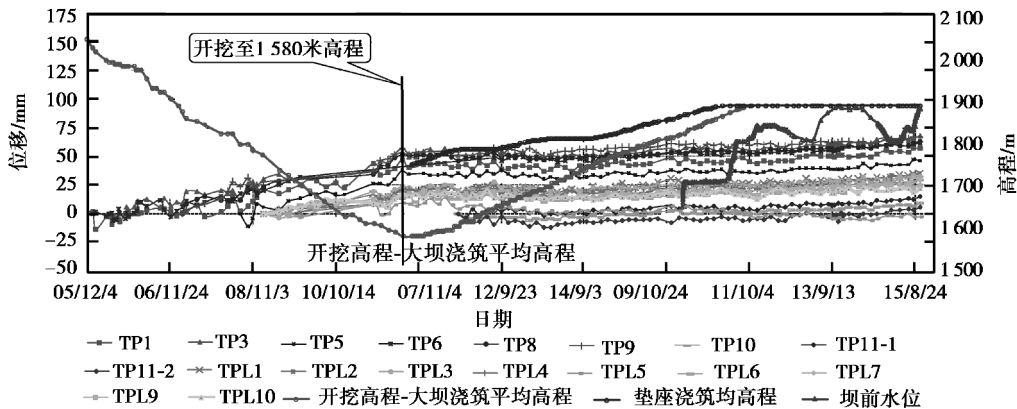


图 6 1 960 m 以上缆机平台边坡外观变形历时曲线

Fig.6 Surface deformation duration diagram of the cable car platform slope

(2)1 885~1 960 m 坝肩边坡深部岩体松弛拉裂,蓄水前,边坡变形主要受深部拉裂松弛带控制,开挖期至蓄水前,边坡变形速率较为稳定;蓄水后,

受水库蓄水的影响,边坡变形速率有所增加;蓄水至最高水位以后,边坡变形速率明显降低,并逐渐趋于稳定(如图 7)。

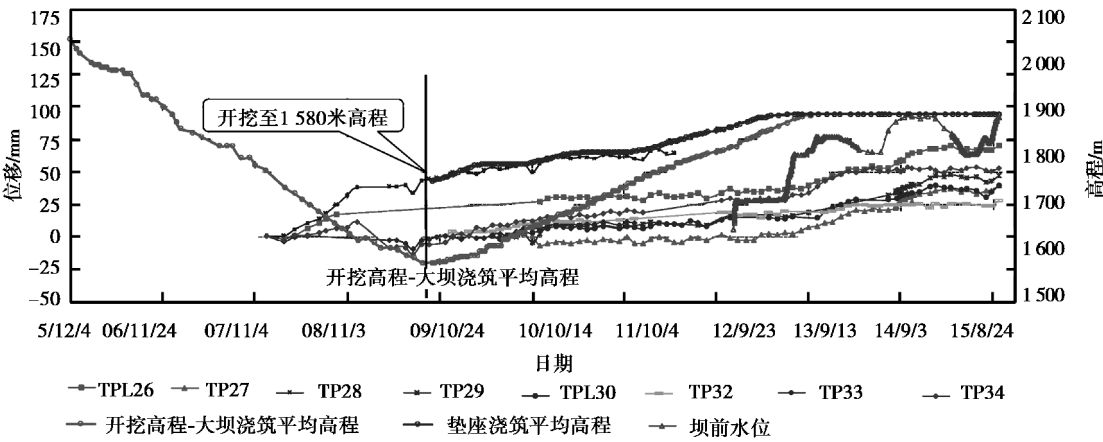


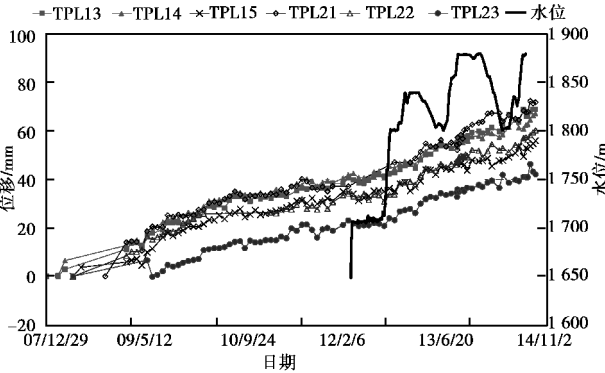
图 7 1 885~1 960 m 坝肩边坡外观变形历时曲线

Fig.7 Surface deformation duration diagram of the dam abutment slope

(3)1 885 m 以下拱肩槽边坡岩体较为完整,开挖期受开挖扰动影响,边坡变形速率较大;开挖结束后,受岩体流变的影响,仍有一定变形量值,但变形速率明显减小;蓄水后,受水库蓄水的影响,边坡变形速率有所增加;蓄水至最高水位后,边坡变形速率显著降低,变形随水位小幅波动,并逐渐趋于稳定(如图 8)。

水软化和有效应力降低导致的边坡变形调整结束后,边坡变形将趋缓,并逐渐进入长期变形收敛期,边坡岩体的流变又将成为边坡变形的主要影响因素,随着边坡岩体流变的收敛,边坡变形也将进一步趋于稳定。

3 开挖卸荷变形期边坡岩体流变监测反馈分析



边坡开挖结束后,岩体流变是边坡变形的重要因素,要实现边坡长期变形的预测,就必须获得较为准确的岩体流变参数。

在开挖卸荷变形期,边坡变形主要由岩体流变引起,可通过岩体流变试验获得岩体流变本构模型和基本流变参数,再建立起边坡开挖后数值计算模型,根据边坡变形监测成果,采用神经网络监测反馈分析方法,反演获得相对准确的边坡岩体流变参数<sup>[7]</sup>。

3.1 边坡软弱岩体流变本构模型

为了获得边坡岩体的流变特性,开展了边坡软弱岩体压缩原位蠕变现场试验<sup>[8-9]</sup>。试验结果表明,三参数(H-K)模型更适用于反映左岸坝前边坡软弱岩体的蠕变行为。由此,确定左岸坝前边坡岩体流变的本构模型如图 9 所示,同时采用摩尔-库伦判断岩体发生塑性屈服。

3.2 计算方法及计算模型

计算采用三维有限差分法计算软件 FLAC<sup>3D</sup>,计算范围顺河向取 1 200 m,横河向取 3 100 m,垂直向取 2 120 m,数值计算模型如图 10 所示。

3.3 监测反馈分析目标及反馈分析参数

计算选取了左岸坝前边坡具有代表性的 15 个外观墩自开挖结束至蓄水前某一时间点的横河向

图 8 1 885 m 以下拱肩槽边坡外观变形历时曲线

Fig.8 Surface deformation duration diagram of the spandrel groove slope

2.3 边坡变形的趋势特征

边坡监测成果表明:对于地质条件较为复杂的左岸坝前工程边坡,自开挖结束后,边坡先后经历了开挖卸荷变形期、蓄水边坡变形调整期及变形长期变形收敛期 3 个阶段。

在开挖卸荷变形期,随着开挖施工的结束,边坡变形主要由边坡岩体的时效变形(即流变)产生,呈现出随时间而缓慢增加的趋势;水库蓄水后,边坡进入蓄水边坡变形调整期,在库水软化、岩体有效应力降低和岩体流变等多因素的综合作用下,边坡呈现出加速变形的趋势;当由于库



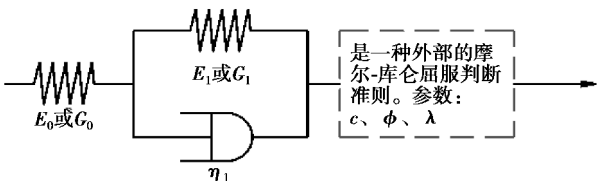


图 9 左岸坝前边坡岩体流量本构模型

Fig.9 Constitutive model of rock mass rheology of the left bank upstream engineering slope

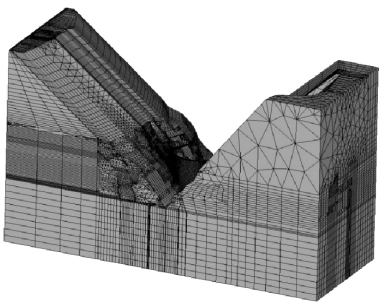


图 10 边坡三维有限差分法计算模型

Fig.10 Finite difference 3D calculation model

位移监测成果作为监测反馈分析目标。

根据各岩类岩体的流变特性,计算对 III<sub>1</sub>、III<sub>2</sub>、IV<sub>1</sub>、IV<sub>2</sub>砂板岩流变参数进行了反演,大理岩、断层等变形强度参数则未进行反演。反馈分析获得的岩体流变参数如图 1 所示。

表 1 反馈分析获得的岩体流变参数表

Table 1 Rock mass rheological parameters from monitoring feedback analysis

岩体类别	粘弹性模量 /GPa	粘滞系数 /(10 <sup>8</sup> GPa·s)
III <sub>1</sub> 类砂板岩	13.4	10.0
III <sub>2</sub> 类砂板岩	7.6	7.0
IV <sub>1</sub> 类砂板岩	5.0	4.0
IV <sub>1</sub> 类砂板岩	1.2	1.0

3.4 监测反馈分析成果

为了复核反馈分析获得的岩体流变参数的合理性,采用上述参数对选定时间点至蓄水前边坡外观横河向位移进行了计算,并与同时间点边坡监测变形值进行了对比(代表性测点横河向位移计算值和监测值对比如图 11 所示)。由对比成果可知,各外观测点横河向位移监测值与计算值过程线变化趋势一致、变形量值接近,说明反馈分析获得的岩体流变参数是可信的。

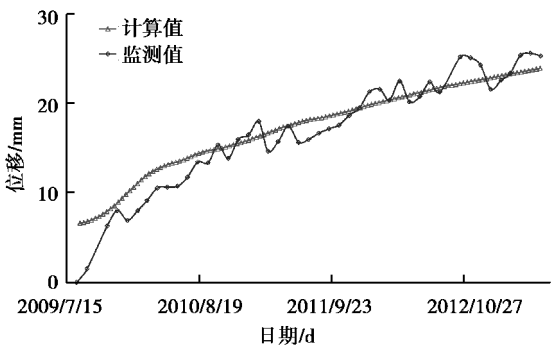


图 11 外观测点横河向位移计算值与监测值对比图

Fig. 11 Comparison on calculation and monitoring surface displacement

4 蓄水变形调整期边坡变形分析

4.1 蓄水变形调整期边坡变形影响因素分析

进入蓄水边坡变形调整期后,边坡变形影响因素主要包括:

- (1)库水软化作用。库水位以下岩体及结构面由蓄水前的天然状态变为饱水状态,其抗压强度及变形模量随之降低。
- (2)有效应力降低。水库蓄水导致边坡内孔隙水压力增高,使得岩体内部有效应力降低,导致软弱岩体发生屈服破坏。
- (3)岩体流变。在蓄水期,边坡岩体时效变形仍将持续。

在上述因素的综合影响下,蓄水期边坡可能会呈现加速变形的趋势。

4.2 计算方法

为了解蓄水变形调整期各因素对于边坡变形的影响程度,选取了代表性地质剖面,采用二维有限差分计算软件 FLAC<sup>2D</sup>对各因素作用下边坡横河向位移值进行了分析计算。

4.3 边坡变形影响因素的计算考虑

4.3.1 库水软化作用

根据该工程主要结构面及软弱岩体高应力、强渗水作用下弱化试验成果,获得了相应库水位压力作用下各岩体、断层及软弱结构面的平均弱化率。以此为依据,对蓄水位以下岩体、断层及软弱结构面的变形参数进行了折减。

4.3.2 有效应力降低

对于完整性较好的 III 类岩体,其内部孔隙连通性较差,不考虑孔隙水压力作用,计算中仅对蓄水位以下 IV 类及以下岩体考虑孔隙水压力作用。

4.3.3 岩体流变

在蓄水变形调整期,岩体流变参数在开挖卸荷期监测反馈分析成果的基础上,按照弱化试验获得的弱化率进行了弱化。

4.4 边坡变形影响因素的作用分析

依据上述计算考虑,计算获得水库蓄水至1 880 m时,各因素对于边坡变形的贡献值如图12所示。由图12可知:①由库水软化作用和有效应力降低导致的变形呈高高程小、底高程大的特点;②由岩体流变导致的变形则呈高高程大、低高程下的特点;③在水库蓄水过程中,岩体及结构面软化是蓄水变形调整期导致边坡变形的主要因素。

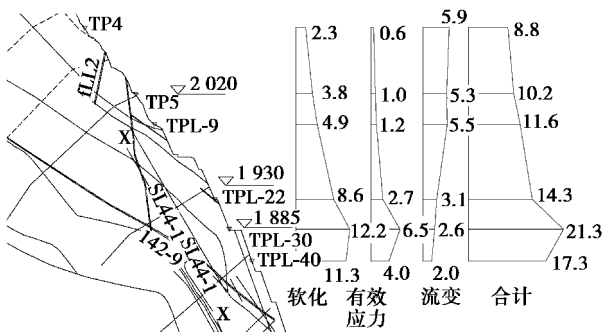


图 12 各因素对边坡变形的贡献值  
(蓄水至 1 880 m) (单位:mm)

Fig. 12 Calculation displacement values of different factors (impounding to 1 880 m) (unit: mm)

为验证蓄水变形期各变形影响因素计算考虑的合理性,对蓄水至1 880 m时各外观测点横河向位移计算值和监测值进行了对比。计算成果表明:计算位移与监测位移过程变化趋势一致、变形量值接近,说明各边坡变形因素的考虑是合适的。

5 边坡长期变形分析及稳定性评价

蓄水一定时间后,由库水软化作用及有效应力降低导致的边坡变形调整基本完成,边坡将逐渐进入长期变形收敛期,此时边坡的变形主要由岩体流变产生,变形速率将进一步趋缓。

在长期变形收敛期,可采用开挖卸荷变形期的边坡三维有限差分法计算模型,采用经岩体流变试验和监测反馈分析获得的、并经蓄水弱化后的岩体流变参数计算边坡后续变形,即可实现对边坡长期变形特征的预测<sup>[10-11]</sup>。

5.1 边坡变形收敛及变形稳定判定指标

根据相关研究成果<sup>[12]</sup>,计算中拟定边坡变形速率小于0.005 mm/d时为变形开始收敛时间,

边坡变形速率小于0.001 m/d时为变形稳定的时间。

5.2 边坡长期变形趋势分析

左岸坝前边坡长期变形趋势计算成果表明:  
(1)由于岩体较为完整,1 885 m以下拱肩槽边坡岩体流变变形将最先收敛和趋于稳定,随后是1 885~1 960 m坝肩边坡和1 960 m以上缆机平台边坡。  
(2)从水库蓄水完成至边坡整体趋于稳定,左岸坝前边坡横河向新增位移将呈高高程大、低高程小的特点。

5.3 边坡长期稳定性评价

三维有限差分法计算成果表明,左岸坝前边坡整体趋于稳定时:边坡大部分区域仍为压应力区,仅在边坡坡表、断层f<sub>42-9</sub>区域及深部拉裂缝区域存在零星拉应力区分布;边坡塑性区主要分布在局部坡表区域、坡脚区域、断层f<sub>42-9</sub>区域和深部拉裂缝区域(如图13),这些区域并未贯通,说明边坡仍处于整体稳定状态。

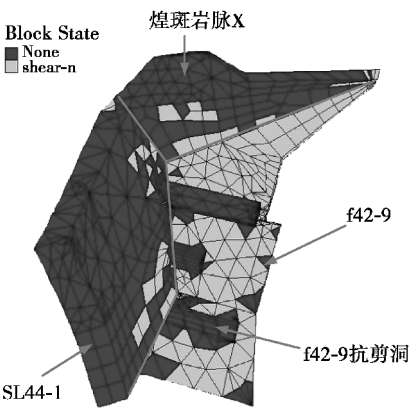


图 13 边坡变形稳定时主要结构面屈服区分布图

Fig. 13 Distribution diagram of inter structural plane yield zone when slope is at deformation stable

6 结论

水电工程坝前边坡蓄水期边坡变形的影响因素较多,变形机理复杂,边坡长期变形特征和长期稳定性的预测难度较大。本文以我国西部某巨型水电站左坝前500 m级超高工程边坡为例,采用了岩体流变试验与数值分析相结合的方法,开展了蓄水期边坡变形特征及长期变形趋势的分析,取得了以下研究结论,希望能为类似工程提供借鉴和参考:

(1)对于地质条件较为复杂的坝前工程边坡,自开挖结束后,边坡将先后经历开挖卸荷变形期、蓄水变形调整期及变形长期收敛期。

(2)在开挖卸荷变形期,边坡变形主要由岩体时效变形(即流变)产生,可根据边坡开挖期变形监测资料,通过岩体流变试验及边坡数值反馈分析取得较为准确的岩体流变参数。

(3)在蓄水变形调整期,边坡变形主要由库水软化、有效应力降低及岩体流变产生。其中,岩体及结构面软化是蓄水变形调整期导致边坡变形的主要因素。

(4)在长期变形收敛期,随着库水软化及有效应力降低导致的边坡变形结束,岩体流变又将成为边坡变形的主要影响因素,边坡变形将逐渐趋缓。随着岩体流变变形的收敛,边坡变形将进一步趋于稳定。

#### 参考文献(References)

- [1] 宋胜武,向柏宇,杨静熙,等.锦屏一级水电站复杂地质条件下坝肩高陡边坡稳定性分析及其加固设计[J].岩石力学工程学报,2010,29(3):442-458. (Song Shengwu, Xiang Baiyu, Yang Jingxi, et al. Stability analysis and reinforcement design of high and steep slopes with complex geology in abutment of Jinping I Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 442-458. (in Chinese))
- [2] 周钟,饶宏玲.锦屏深切河谷高边坡稳定性分析及加固措施[J].人民长江,2009,40(18):31-36. (Zhou Zhong, Rao Hongling. Stability analysis on deep-incised river valley slope of Jinping Project reinforcement measures [J]. Yangtze River, 2009, 40(18):31-36. (in Chinese))
- [3] 漆祖芳,姜清辉,唐志丹,等.锦屏一级水电站左岸坝肩边坡施工期稳定分析[J].岩土力学,2012,33(2):531-538. (Qi Zufang, Jiang Qinghui, Tang Zhidan, et al. Stability analysis of abutment slope at left bank of Jinping-I Hydropower Project during construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2):531-538. (in Chinese))
- [4] 朱焕春.锦屏一级水电站左岸坝肩边坡变形机理与稳定性研究报告[R].Itasca(武汉)咨询有限公司,2010. (Zhu Huanchun. Research report on deformation mechanism and stability of the left bank of Jinping 1<sup>st</sup> Hydropower Station [R]. ITASCA Consulting China, Ltd, 2010. (in Chinese))
- [5] 黄志鹏,董燕军,廖年春,等.锦屏一级水电站左岸开挖高边坡变形监测分析[J].岩土力学,2012,33(增2):235-242. (Huang Zhipeng, Dong Yanjun, Liao Nianchun, et al. Deformation monitoring and analysis of left bank high slope at Jinping 1<sup>st</sup> Hydropower Station [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Supp.2): 235-242. (in Chinese))
- [6] 赵搏,徐卫亚.锦屏一级水电站左岸边坡深部变形安全监测分析[J].人民长江,2011,42(z2):101-103. (Zhao Bo, Xu Weiya. Analysis of deformation deep safety monitoring of left bank high slope at Jinping 1<sup>st</sup> Hydropower station [J]. Yangtze River, 2011, 42(Z2):101-103. (in Chinese))
- [7] 朱焕春,王思敬.深切河谷岩石力学问题与分析方法[A]//全国岩石力学与工程学术大会[C].2006:24-30. (Zhu Huanchun, Wang Sijing. Deep valley rock mechanics problem and analysis method [A]//National conference on rock mechanics and engineering [C]. 2006: 24-30. (in Chinese))
- [8] 周钟,饶宏玲,巩满福,等.岩石高边坡稳定性反馈分析和预警系统关键技术研究研究成果报告[R].中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,2010. (Zhou Zhong, Rao Hongling, Gong Manfu, et al. Research report on the stability of rock slope stability feedback analysis and the key technology of the pre-warning system [R]. Hydrochina Chengdu Engineering Corporation, 2010. (in Chinese))
- [9] 张明,毕忠伟,杨强,等.锦屏一级水电站大理岩蠕变试验与流变模型选择[J].岩石力学与工程学报,2010,29(8):1530-1537. (Zhang Ming, Bi Zhongwei, Yang Qiang, et al. Creep test and rheological model selection of marble of Jinping I Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 29(8):1530-1537. (in Chinese))
- [10] 周创兵,姜清辉,位韦,等.雅砻江锦屏一级水电站左岸边坡变形特征及运行期长期稳定性分析与预测[R].武汉大学,2015. (Zhou Chuangbin, Jiang Qinghui, Wei Wei, et al. Analysis and prediction of the left bank slope deformation characteristics and long-term stability of Jinping 1<sup>st</sup> Hydropower Station in Yalong River[R]. Wuhan University, 2015. (in Chinese))
- [11] 王如宾,徐卫亚,孟永东,等.锦屏一级水电站左岸坝肩高边坡长期稳定性数值分析[R].岩石力学与工程学报,2014,33(增1):3105-3113. (Wang Rubin, Xu Weiya, Meng Yongdong, et al. Numerical analysis of long-term stability of left bank abutment high slope at Jinping I Hydropower Station [R]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Supp.1): 3105-3113. (in Chinese))
- [12] 周创兵,姜清辉.锦屏一级水电站枢纽区左岸边坡基于多源信息的预警方法与预警指标研究[R].武汉大学,2009. (Zhou Chuangbin, Jiang Qinghui. Analysis of the left bank slope pre-warning method and index based on multi-source information of Jinping 1<sup>st</sup> Hydropower Station [R]. Wuhan University, 2009. (in Chinese))