

文章编号:1671-8879(2011)04-0068-05

# 岩体扰动深度估算的应力场方法

晏长根<sup>1,2</sup>, 林 峰<sup>2</sup>, 伍法权<sup>3</sup>, 杨晓华<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家  
重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 中国科学院 工程地质重点实验室, 北京 100029)

**摘 要:**针对开挖导致岩体应力场改变、扰动深度估算这一岩体力学的难题,从岩体应力场的变化出发,结合岩体结构面力学特点,推导出岩体卸荷破坏导致岩体破坏的判别公式,为岩体强开挖扰动带深度的确定推导出理论估算公式。以小湾坝基岩体开挖为例,结合判别公式和数值分析结果,对坝基岩体的强开挖扰动带、弱开挖扰动带及应力调整带进行了分析。结果表明,在坝基底底部,强开挖扰动带深度为 3~5 m,弱开挖扰动带深度为 4~10 m,应力调整带深度为 10~25 m,其结果与现场钻孔电视探测结果基本吻合。

**关键词:**岩土工程;应力场;开挖扰动带;应力调整带;小湾坝基

**中图分类号:**O 319.56 **文献标志码:**A

## Evaluating rock masses excavation disturbed zone with method of stress redistribution

YAN Chang-gen<sup>1</sup>, LIN Feng<sup>2</sup>, WU Fa-quan<sup>3</sup>, YANG Xiao-hua<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Key Laboratory of Engineering Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The stress will be redistributed in the rock mass after excavation, and the deformation of rock mass will be produced to balance the stress adjustment, then the mechanics properties of the rock mass near to the excavation surface will be deteriorated greatly. The formula for evaluating the excavation disturbed zone is derived with the method of rock stress redistribution and combined the characteristics of the structural surface of rock masses. Taking Xiaowan dam base excavation as an example, the heavy excavation disturbed zone and the weak excavation disturbed zone are calculated combined with the evaluating formula and numerical simulation. The numerical analysis results show that the heavy excavation disturbed zone is about 3~5 m, the weaken excavation disturbed zone is about 4~10 m, and the stress readjusted zone is about 10~25 m. The evaluating results are very close to the detection ones. 1 tab, 4 figs, 19 refs.

**Key words:** geotechnical engineering; stress field; excavation disturbed zone; stress readjusted

收稿日期:2010-08-10

基金项目:地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLG2010K016);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2009JC007)

作者简介:晏长根(1975-),男,江西萍乡人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:yanchanggen@163.com.

zone; Xiaowan dam base

## 0 引言

自1982年以来,加拿大原子能研究有限公司地下空间研究实验室就对类似竖井开挖的位移、应力和微振动等响应特性进行了一系列的研究,并对埋深分别为240 m和420 m的洞室开挖响应特性进行了详细的测试研究,取得了包括开挖损伤和热-力相互作用关系的很多成果<sup>[1]</sup>。在坝基和边坡开挖方面的研究是随着中国大型水电站的兴起和矿产开采而开始的,具代表性的有金川矿的开采和三峡大坝的修建<sup>[2-4]</sup>。在金川矿的开采研究中,许多专家从工程地质学、开挖形状等对矿山边坡稳定性的影响做了详细研究;三峡大坝的兴建吸引了中国大批学者对岩质边坡开挖损伤特点等方面开展研究,例如:哈秋龄第一次提出“卸荷岩体力学”的概念;刘国霖、李建林等结合三峡船闸开挖卸荷对岩体卸荷特性和力学机制进行了较详尽的分析;应该说大家已经清楚地意识到开挖卸荷与一般的加载条件下岩体力学性能的差异,并对差异的原因做了较详细的分析<sup>[5-15]</sup>。坝基岩体卸荷后沿卸荷方向出现强烈的扩容,其破坏以拉伸破裂为主,并存有张剪性或剪性破坏,伴随着大量的卸荷裂隙,使岩体的力学、水力学特性明显劣化<sup>[16-18]</sup>。但开挖对坝基岩体影响的深度总是有限的,故估算岩体开挖扰动的深度对科学、合理地确定岩体参数和治理深度十分重要。为此,本文在推导岩体破坏公式的基础上,提出相对简单实用的方法,以供参考。

## 1 岩体扰动深度的计算原理

岩体扰动影响深度主要依据声波测试、钻孔电视和监测等资料,而对开挖扰动影响深度的理论计算和预测尚没有具体的方法。本文试图对坝基岩体扰动影响深度提出理论预测的计算公式,并结合声波测试、钻孔电视和监测资料对坝基开挖岩体进行分带。陈德基等依据波速将岩体卸荷分为3个带:强卸荷带、弱卸荷带和应力调整带,本文也采用类似的方法,分为强扰动带、弱扰动带和应力调整带<sup>[7]</sup>。

当工程研究区域没有大型的断层和软弱带时,局部范围的节理对总体的应力分布作用较小,甚至可以忽略,考虑到这一特点,本文在总体应力场分布时,除了大型断层,一般岩体作为均质体对待;在判断局部破坏时,则结合现场的节理统计结果进行分

析。开挖扰动导致岩体破坏往往存在以下2种方式:一是剪切破坏;二是拉剪破坏。下面就这2种情况分别进行计算推导。

应力状态改变对于岩体卸荷起到关键的作用,而扰动深度在岩体中起决定作用的是相对软弱的裂隙。也就是说,存在中缓倾角裂隙的情况下破坏总是沿着缓倾角裂隙产生一定程度的破坏,因此只需计算出岩体的应力改变的深度就足可让中缓倾角裂隙破坏,就可大致估计出岩体弱扰动的最大深度。

### 1.1 剪切破坏

依据莫尔-库仑准则,结构面破坏的条件为

$$\tau_j \geq \sigma_j \tan(\varphi_p) + c_p \quad (1)$$

式中: $\tau_j$ 、 $\sigma_j$ 分别为结构面上的剪应力和正应力; $\varphi_p$ 、 $c_p$ 分别为结构面的峰值摩擦角和峰值内聚力。

将式(1)中结构面上的 $\tau_j$ 、 $\sigma_j$ 用单元体上的应力来表示(下页图1(a)),假定结构面与X轴的夹角为 $\alpha$ ,依据力的平衡(下页图1(b)),假定图1(b)中ABC的面积为S,则可得

$$\sigma_j S - \sigma_X S \sin^2(\alpha) - \sigma_Y S \cos^2(\alpha) + \tau_{XY} S \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) + \tau_{XY} S \sin(\alpha) \cos(\alpha) = 0 \quad (2)$$

$$\tau_j S - \sigma_X S \sin(\alpha) \cos(\alpha) + \sigma_Y S \cos(\alpha) \sin(\alpha) - \tau_{XY} S \sin^2(\alpha) + \tau_{XY} S \cos^2(\alpha) = 0 \quad (3)$$

将式(2)、式(3)简化为

$$\sigma_j = \frac{\sigma_X + \sigma_Y}{2} + \frac{\sigma_X - \sigma_Y}{2} \cos(2\alpha) - \tau_{XY} \sin(2\alpha) \quad (4)$$

$$\tau_j = \frac{\sigma_X - \sigma_Y}{2} \sin(2\alpha) + \tau_{XY} \cos(2\alpha) \quad (5)$$

将式(4)、式(5)代入式(1)中,则有

$$\frac{\sigma_X - \sigma_Y}{2} \sin(2\alpha) + \tau_{XY} \cos(2\alpha) \geq \left( \frac{\sigma_X + \sigma_Y}{2} + \frac{\sigma_X - \sigma_Y}{2} \cos(2\alpha) - \tau_{XY} \sin(2\alpha) \right) \tan(\varphi_p) + C_p \quad (6)$$

式中: $\alpha$ 为中缓结构面的倾角; $\sigma_X$ 、 $\sigma_Y$ 、 $\tau_{XY}$ 见下页图1所示。

如果式(6)中等号左边大于右边,也就是说式(6)成立,则岩体在该处的结构面遭到破坏,产生扰动破坏。

可将式(6)改为最大主应力 $\sigma_1$ 和最小主应力 $\sigma_3$ 表示的方程。由于结构面与X轴的夹角是 $\alpha$ ,则最大主应力平面与X轴的夹角 $\beta$ 可通过下式给出

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-2\tau_{XY}}{\sigma_X - \sigma_Y}\right) \quad (7)$$

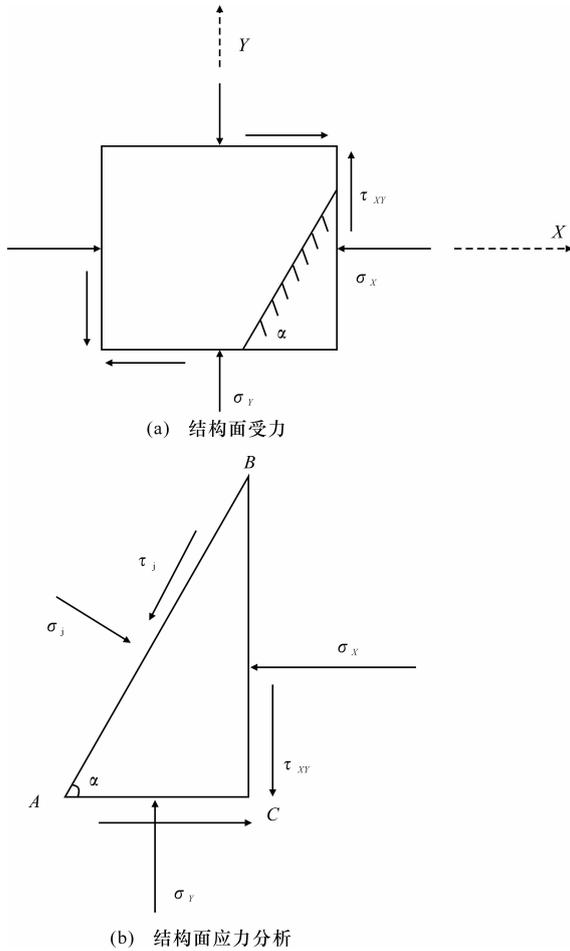


图1 结构面上一点的应力

故结构面上的法向应力和切向应力用主应力表示为

$$\sigma_j = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2 - (\alpha - \beta)) \quad (8)$$

$$\tau_j = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2 - (\alpha - \beta)) \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2 - (\alpha - \beta)) \geq \left[ \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2 - (\alpha - \beta)) \right] \cdot \tan(\varphi_p) + c_p \quad (10)$$

考虑开挖的影响,也就是说某一点的应力将会随着开挖而变化,此时应力中的最大、最小主应力将会改变。对于坝基来说,考虑岩体应力调整的时效作用,开挖瞬间,垂直坡面的应力由于卸荷回弹,可以认为瞬间完成调整;对于坡体表面的力来说,立即变为0或者接近0<sup>[16]</sup>。平行坡面的最大主应力由于调整时间较长,认为开挖后瞬间不变,出现应力差迅速增加,故式(10)中最小主应力改变为 $\sigma'_3$ (开挖后的最小主应力),而最大主应力不变。具体的应力大小

值可以通过数值分析得到。则式(10)变为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma'_3}{2} \sin(2 - (\alpha - \beta)) \geq \left[ \frac{\sigma_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma'_3}{2} \cos(2 - (\alpha - \beta)) \right] \cdot \tan(\varphi_p) + c_p \quad (11)$$

如果式(11)等号的左边大于右边,则岩体在该点处的结构面扰动破坏。利用式(11)可以估算开挖瞬间岩体的扰动破坏深度。

## 1.2 拉剪破坏

当结构面法向应力 $\sigma_n$ 较小时,随着剪应力的增加,主应力轴发生偏转,由剪应力引起的最小主应力 $\sigma_3$ 首先达到结构面的抗拉强度而发生拉剪破坏,此时可用Lajtai提出的公式进行预测

$$\tau_i = [\sigma_t(\sigma_t + \sigma_j)]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

式中: $\sigma_t$ 为结构面的抗拉强度,可以用结构面的内聚力 $c_p$ 代入; $\tau_i$ 为沿着剪切方向的抗剪强度。

将式(8)、式(9)代入式(12)中,可得

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2 - (\alpha - \beta)) \geq \left[ c_p \left( c_p + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2 - (\alpha - \beta)) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

同理,将最小主应力变为开挖卸荷后的最小主应力,则有

$$\frac{\sigma_1 - \sigma'_3}{2} \sin(2 - (\alpha - \beta)) \geq \left[ c_p \left( c_p + \frac{\sigma_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma'_3}{2} \cos(2 - (\alpha - \beta)) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

通过式(11)或式(14),就可以判断该点处是否开挖扰动破坏,查询该点的空间信息,就可以确定扰动破坏的深度。

对于天然岩体卸荷来说,可以通过模拟河谷演化过程,得到岩体演化后的应力场,再通过式(11)或式(14)预测岩体的弱扰动带最大深度。需要说明的是,对于天然卸荷来说,由于存在卸荷加剧岩体裂隙的发育,而在水流等因素的作用下往往会加速岩体结构面的风化,从而使岩体卸荷由表及里缓慢加深。故一般天然边坡的扰动带最大深度往往很大,这除了与应力场改变有关外,还与时间作用下岩体力学性能的劣化有关。

利用式(11)、式(14),通过平面数值模拟,得到小湾坝基开挖前后的应力场,通过分析每个坝段中线上局部的应力场,根据实测坝段的缓倾结构面的

倾角,对其开挖扰动带深度进行了预测,具体结果见表1。由于参数采用的是结构面的强度,预测结果其实是弱扰动带的最大深度,与一般的声波测试、钻孔电视观测到的强扰动带深度要大。数值模拟时边坡表面构造应力较小,没有考虑构造应力的影响,预测结果在坝基底部预测的结果相对偏小,原因是坝基底部往往构造应力比较集中。预测值与后面的监测结果总体上较为一致,说明理论预测计算公式具有较好的实际工程意义。

表1 理论预测的各项段弱扰动带深度

坝段编号	深度/m	坝段编号	深度/m	坝段编号	深度/m	坝段编号	深度/m
L43	15.60	L32	11.44	R1	16.40	R12	5.20
L42	15.30	L31	11.05	R2	15.30	R13	5.46
L41	14.80	L30	10.14	R3	14.70	R14	5.46
L40	13.20	L29	9.23	R4	13.20	R15	5.46
L39	10.80	L28	9.10	R5	12.30	R16	5.46
L38	9.90	L27	7.54	R6	10.50	R17	5.85
L37	8.06	L26	5.67	R7	9.80	R18	5.59
L36	10.01	L25	4.79	R8	7.42	R19	5.46
L35	10.14	L24	5.25	R9	6.43	R20	4.42
L34	10.53	L23	4.10	R10	4.16	R21	4.55
L33	11.31			R11	5.07	R22	5.00

## 2 应力调整底界分析

扰动带影响深度公式通过式(11)或式(14)可以得出,那么对于扰动应力调整带的底界来说,也可以通过数值模拟的方式得出。一般来说,对于同样的岩体,岩体应力中起主要作用的是最大、最小主应力差值,也就是偏应力的大小,当偏应力值增大时,表示岩体趋向破坏。

定义开挖前后岩体偏应力差值的比值为扰动偏应力系数 $k$ ,计算式为

$$k = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (15)$$

式中: $\sigma'_1$ 、 $\sigma'_3$ 分别为开挖后的最大、最小主应力。

当扰动偏应力系数 $k$ 大于1时,表示该点岩体应力受卸荷的影响;数值越大,受卸荷影响越强烈。

图2是坝底953 m高程处开挖后岩体偏应力和开挖前岩体偏应力的比值,即 $k$ 随深度的变化图。从图2可以看出,影响范围最大的是946~953 m高程,尤其是在950 m以上;在928 m高程以下, $k$ 值基本上没有影响。

应力场的影响深度与裂隙产生拉张的深度是成正相关的,当应力场的影响比较剧烈时,就表现为裂

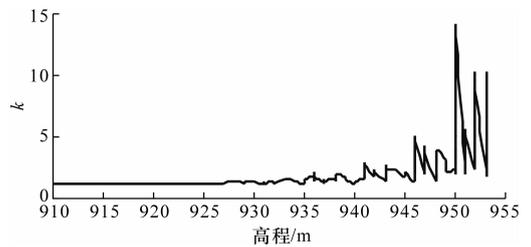


图2 坝底953 m处由于开挖导致的岩体应力变化

隙的拉张或者新裂隙的产生,从而产生明显的卸荷回弹和卸荷裂隙。从图2也可以看出,应力的影响深度大致为负指数分布形式,也就是说,随着深度的增加,应力前后差的比值迅速减少,卸荷裂隙也迅速减少。

扰动偏应力系数 $k$ 显示坝底处强扰动带的深度为3~5 m,弱扰动深度为4~10 m,应力影响深度为10~25 m。这一结果与钻孔电视统计结果及测微计的监测结果很接近,如图3、图4所示<sup>[19]</sup>。

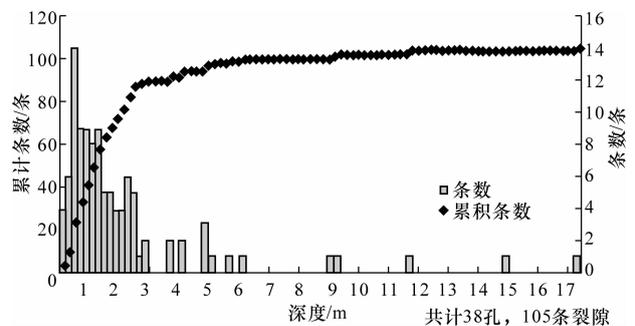


图3 钻孔电视统计裂隙结果

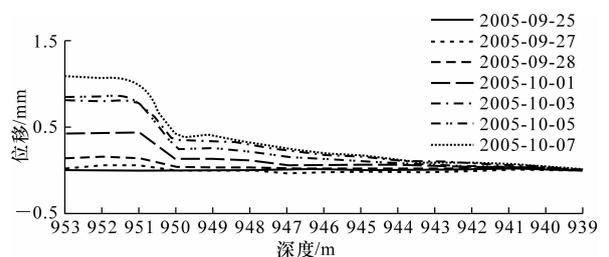


图4 测微计位移深度(时间)曲线

## 3 结语

(1)岩体开挖扰动影响深度是一个十分复杂的问题,受岩石、结构面、岩体经受的应力历史、应力场、水等环境、开挖几何形状及开挖方式等多方面的因素影响,但最终表现在应力改变上。

(2)影响开挖扰动深度的本质因素是应力的改变,尤其是偏应力的改变,而岩体结构面的存在则是扰动破坏的主要外因。

(3)使用本文推导的剪切破坏及拉剪破坏公式

能比较合理地确定岩体开挖扰动的破坏深度;利用扰动偏应力系数可以较好地估算岩体扰动深度和应力调整深度,这为开挖扰动提供了一种简便的方法。

### 参考文献:

### References:

- [1] Read R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(8):1251-1275.
- [2] 王思敬. 坝基岩体稳定分析[M]. 北京:科学出版社,1988.
- [3] 徐嘉谟. 金川矿山边坡岩体工程地质力学[M]. 北京,地震出版社,1998.
- [4] 中国科学院地质研究所. 岩体工程地质力学问题(六):金川露天矿工程地质专辑[M]. 北京,科学出版社,1985.
- [5] 哈秋龄,刘国霖. 岩石边坡卸荷工程地质研究[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [6] 哈秋龄. 三峡工程永久船闸陡高边坡各向异性卸荷岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(5):603-618.  
HA Qiu-ling. Study on the anisotropic unloading rock mass mechanics for the steep-high rock slope of the Three Gorges project permanent ship-locks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(5):603-618.
- [7] 陈德基,王军怀,余永志,等. 三峡永久船闸高边坡稳定性几个问题的分析[J]. 人民长江,2002,33(6):5-7,13.  
CHEN De-ji, WANG Jun-huai, YU Yong-zhi, et al. Stability analysis on the high slope of the Three Gorges project permanent ship-locks[J]. Yangtze River, 2002,33(6):5-7,13.
- [8] 孙钧,凌建明. 三峡船闸高边坡岩体的细观损伤及长期稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(1):1-7.  
SUN Jun, LING Jian-ming. On meso damage behaviour and long-term stability of high slope rock of the Three Gorges ship-locks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1997,16(1):1-7.
- [9] 刘国霖. 节理岩体的卸荷岩体力学理论要点[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2002,24(3):193-197.  
LIU Guo-lin. Theoretical essentials of unloading rock mass mechanics for joint rock mass[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Science, 2002,24(3):193-197.
- [10] 张有天,周维垣. 岩石高边坡的变形与稳定[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [11] 董学晟,田野,邬爱清. 水工岩石力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [12] 董学晟,夏熙伦. 三峡工程船闸高边坡历年岩体力学试验成果综合分析[J]. 长江科学院院报,1999,16(3):29-33.  
DONG Xue-sheng, XIA Xi-lun. A comprehensive analysis of rock mechanics test results on high rock slope of TGP's lock[J]. Journal of Yangtze River Scientific Reserch Institute,1999,16(3):29-33.
- [13] 董学晟,夏熙伦. 三峡工程船闸高边坡岩体力学试验研究的历史回顾[J]. 长江科学院院报,1999,16(2):26-30.  
DONG Xue-cheng, XIA Xi-lun. A review on research of rock mechanics of high rock slope for TGP's permanent lock[J]. Journal of Yangtze River Scientific Reserch Institute,1999,16(2):26-30.
- [14] 董学晟. 工程岩体分级标准的研究[J]. 长江科学院院报,1992,9(4):26-30.  
DONG Xue-sheng. The standard for engineering classification of rock mass[J]. Journal of Yangtze River Scientific Reserch Institute,1999,16(2):26-30.
- [15] 李建林. 卸荷岩体力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [16] 刘彤. 小湾电站坝基岩体卸荷工程地质力学研究[D]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所,2006.
- [17] 周小平. 节理裂隙岩体卸荷本构理论研究及应用[D]. 重庆:重庆建筑大学,2000.
- [18] 晏长根,伍法权,祁生文,等. 随机节理岩体变形及强度参数及其尺寸效应的数值模拟研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(6):879-885.  
YAN Chang-gen, WU Fa-quan, QI Sheng-wen, et al. Deformation and strength parameters and size effect of random jointed rock mass by numerical simulation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009,31(6):879-885.
- [19] 国家电力公司昆明勘察设计研究院. 小湾坝基21~27坝段物探孔内钻孔电视成果[R]. 昆明:国家电力公司昆明勘察设计研究院,2005.