

班多水电站左岸 I 号倾倒体破坏机制分析

宋彦辉¹, 黄民奇², 陈新建¹

(1. 长安大学地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054;
2. 中国水电顾问集团西北水电设计院工程地质研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 分析黄河班多水电站左岸 I 号倾倒体发育的地质环境和倾倒变形体的主要特征: 岩层倾角自岸坡水平向里由缓变陡, 倾倒、弯曲、拉裂变形显著, 弹性波速较低等。根据这些特征, 运用地质-力学分析法阐述倾倒体的变形机制, 用离散元方法对地质原型进行模拟。分析表明倾倒体的失稳破坏方式主要以沿潜在折断面的剪切蠕滑为主, 并伴以沿板理面发生错动、倾倒, 最终将以滑坡形式结束整个变形过程。

关键词: 水电站岸坡; 倾倒体; 变形机制; 离散元方法; 班多水电站

中图分类号: P642.2; TV7 文献标识码: B 文章编号: 1006-7647(2007)05-0050-03

Failure mechanism of No. 1 toppling rock mass at left bank of Banduo Hydropower Station//SONG Yan-hui¹, HUANG Min-qi², CHEN Xin-jian¹(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Department of Geology, Northwest Hydroelectric Investigation & Design Institute of China Hydropower Consulting Group, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The geologic conditions and main deformation behaviors of No. 1 toppling rock mass at the left bank of Banduo Hydropower Station were analyzed, including the obliquity of rock stratum developing from gentle to steep in horizontal direction from the bank slope toward the inside of the toppling rock mass, obvious toppling, bending and tensile deformation, and low speed of elastic waves. According to the above characteristics, the deformation mechanism of the toppling rock mass was described by use of the geology-mechanics analytic method, and a failure model of the toppling rock mass was obtained by DEM based on the investigation of geologic prototype. Analysis shows that the instability and failure of the toppling rock mass will occur mainly in the form of shear-creep in the potential plane of rupture and also in the form of displacement and toppling of rock mass along the foliation. The whole deformation process will end in the form of landslide.

Key words: bank slope of hydropower station; toppling rock mass; deformation mechanism; DEM; Banduo Hydropower Station

1 研究区地质条件

黄河班多水电站 I 号倾倒体位于左岸岸坡, 发育规模较大, 沿河谷长 2 km, 发育高程上至坡顶, 下部接近坡脚, 相对高差约 400 m, 总方量 4 000 万 m³。倾倒体发育河段黄河总体流向为 N63°E, 河谷形态呈“V”字形, 两岸基本对称, 冲沟不甚发育, 平均坡度约 42°。

倾倒体发育岸坡出露的地层主要为三叠系板岩、砂岩, 印支期中酸性侵入岩脉(γ₅)、第三系泥岩及第四系冲洪积、坡积覆盖物。坡体主体(中部)由三叠系中统(T₂-Sl)薄~极薄层板岩局部夹砂岩组成, 下部至坡脚部位主要由灰绿色砂岩夹灰色板岩(T₂-Ss+Sl)组成, 坡体上部的岩性构成除岸坡上游地段出露 T₂-Sl+ Ss 岩组外(灰色板岩夹砂岩), 大

部分地段该岩组发育较少, 主要由第三系上新统泥岩及第四系冲洪积卵石、粉土组成。典型河谷岸坡剖面如图 1 所示。

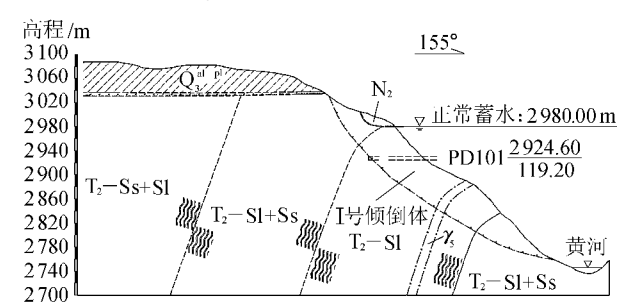


图 1 I 号倾倒体典型断面

研究区内的地质构造主要为层间挤压错动带(产状同板理面, 一般为 320°~350°∠60°~80°)及个别中陡倾角小断层, 无区域性大断层或较大规模断

层通过。总体上除层间错动带对岩体的弯曲倾倒起一定作用外,不对边坡的整体稳定产生影响。

除上述发育的断裂构造外,岸坡岩体尚发育较多的构造裂隙。野外节理裂隙统计表明,I号倾倒体不同部位均发育1组倾向岸外的中~缓倾角组裂隙,该组裂隙倾向一般 $130^{\circ}\sim 160^{\circ}$,倾角 $22^{\circ}\sim 38^{\circ}$,是该岸坡段的优势裂隙。其他部位则有倾向下游或上游的节理组存在。

2 I号倾倒体工程地质特征及形成机理

I号倾倒体基岩正常产状一般为 $320^{\circ}\sim 350^{\circ}\angle 60^{\circ}\sim 80^{\circ}$,倾向坡内。边坡浅表部岩体均发生了明显的弯曲倾倒,根据地表测绘及勘探平硐工程地质调查,倾倒岩体的变形破坏主要以岩层的弯曲倾倒及其伴随的破裂为主,具体表现为如下几个方面:

a. 岩层倾角变化。在水平方向上自浅至深倾倒程度不同,总体上岩层倾角随水平深度的增大有逐渐增大的趋势,但变化规律不甚明显,而是呈波状跳跃变化(图2)。至一定深度后开始转变为正常岩层产状。这些变化表明岸坡岩体的倾倒变形随深度的增大有逐渐减弱的趋势,靠近坡体浅表部倾倒变形最为强烈。

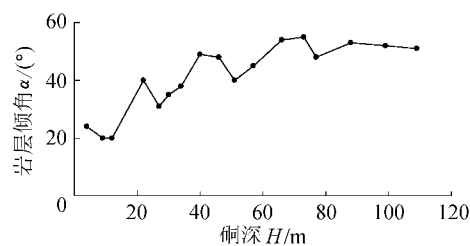


图2 岩层倾角随硐深的变化规律(PD101平硐)

b. 岩层弯曲拉裂变形。由于岩层弯曲倾倒,导致岩层沿板理面或层间软弱带、层间断层产生拉张错动,形成楔形张裂缝,局部尚有岩体的折断现象。由于板岩为薄层~极薄层构造,岩质软弱,易风化;砂岩为层状构造,岩质坚硬,性脆。在板岩与砂岩接触部位由于应力作用及岩体性质的差异,均形成拉裂带,且砂岩段岩体因其性脆不易产生弯曲变形,一般均严重折断或沿结构面产生拉裂、松动而呈现碎裂结构。

c. 倾倒体岩体弹性波速较低。岩体弹性纵波波速 V_p 是反映岩体结构和岩体质量的一个重要指标,图3是勘探平硐弹性纵波波速随硐深的变化曲线。从图3中可以看出,整硐弹性纵波波速值均较低,变化范围为 $1120\sim 2340\text{ m/s}$,仅硐段 $62\sim 77\text{ m}$ 波速值稍高,超过 2000 m/s ,主要是由于该段岩层单层厚度稍大(约 $3\sim 10\text{ cm}$),且挤压紧密所致。岩体波速的这种特征表明岸坡岩体发生了明显的松动变

形,但波速值的变化与上述岩体弯曲倾倒的程度对应关系不甚明显,主要是由于硐内层间软弱错动带及拉裂缝较发育,而波速值是某一硐段波速的平均值,因此,在某一测段内即使岩体质量较好,如果发育1条或2条拉裂缝或层间软弱错动带都会对该段测得的平均纵波波速产生较大影响。

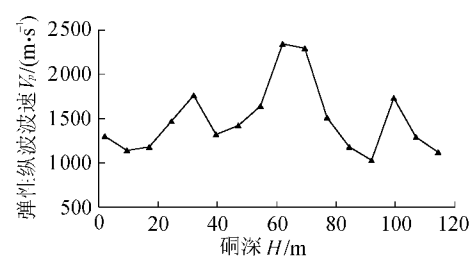


图3 PD101平硐弹性纵波速度随硐深变化曲线

由于组成I号倾倒体的物质主要为薄~极薄层的板岩,从其变形特征上可明显看出,坡体的变形破坏过程大致为岩层弯曲~岩板在最大弯折部位折断~折断面贯通^[1-2]。随着时间的推移,折断面及其以上岩体不断接受自身应力调整,内部结构松弛,裂隙发育,风化加速,尤其是地面水的入渗,使岩体软化,从而可能加速倾倒岩体的变形或诱发坍塌^[3],当潜在折断面强度下降到某一值时,便不足以支撑上部岩体,从而沿该面产生滑动破坏。

3 I号倾倒体破坏机制的离散元模拟

离散元计算的地质剖面以坝址轴线附近倾倒体的地质剖面为依据(见图1),坡体结构主要考虑板理面(反倾坡内,主要指已经发生弯曲倾倒的板理面)及1组缓倾坡外的裂隙,由于计算剖面中潜在折断面以下部分岩体不参与变形及运动,因此在计算中全部设为固定块体,即折断面以下块体单元既无水平向位移,也无竖直向位移。而对潜在折断面以上的所有块体单元则均不加约束,允许块体大规模运动(包括转动及块体间完全脱离接触而解体)。潜在折断面以上岩体按实际坡体结构赋予节理裂隙。其产状按野外调查结果赋值,裂隙间距由于受计算条件的限制,计算取值大于实际间距,整个坡体完全按自重应力发生变形、破坏。潜在折断面以阶梯状形态反映,以便更接近于实际状况。计算模型见图4。

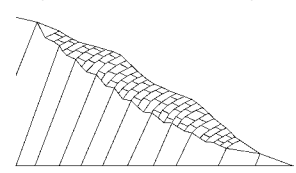


图4 离散元计算模型示意图

数值模拟计算中,采用离散单元法的刚性块体模型,运动过程中单元之间的位移增量等完全由单

元的几何尺寸、质心平移和单元绕其质心转角大小来决定。在接触关系上,选用标准弹塑性无张力角一边接触模型及其本构关系。

3.1 计算参数

计算模型中,坡体岩性主要考虑了板岩这一单一岩性,结构面包括板理面和缓倾坡外结构面两种,各自所需计算参数主要按工程地质类比法、岩石物理力学参数试验值获得^[2,4-5],并据Ⅰ号倾倒体的实际情况进行适当调整,计算参数取值如表1所示。

表1 离散元模拟计算参数

结构面类型	摩擦系数		法向刚度/ (MN·m ⁻¹)		切向刚度/ (MN·m ⁻¹)		块体 联结力/ MPa
	接触面	节理面	接触面	节理面	接触面	节理面	
板理面	0.60	0.57	6.0×10 ⁶	1000	2000	100	0.0
缓倾坡外结构面	0.60	0.70	6.0×10 ⁶	1500	2000	150	0.0

3.2 离散元模拟结果及分析

根据以上离散元的概括模型和计算参数对Ⅰ号倾倒体的变形破坏过程进行模拟,模型共划分为94个单元,176个节点,模拟计算共迭代了18万个时步,其结果以块体的几何图形表示为图5。

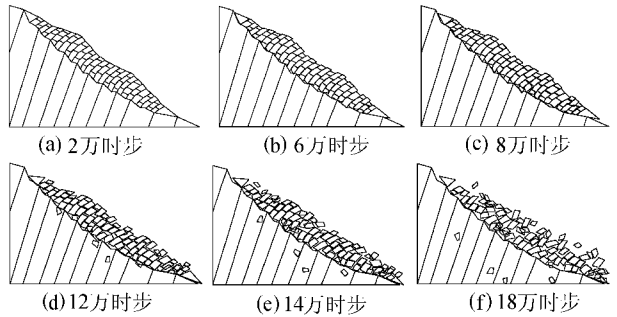


图5 循环不同步时坡体的变形特征

上述离散元模拟结果清楚地反映了Ⅰ号倾倒体一旦失稳时其变形破坏的形式及发生过程。从图5中可以看出,Ⅰ号倾倒体的变形失稳是同时沿潜在折断面及坡体中的节理裂隙进行的,其中以沿潜在折断面的整体变形破坏为主,具有倾倒与滑动的复合变形特征,具体变形过程如下:

- a. 坡体在自重应力作用下沿潜在折断面及坡体内的结构面产生向临空方向的错滑、蠕动(循环1~2万时步)。
- b. 沿潜在折断面向下产生整体滑移,坡脚块体沿缓倾结构面剪出,同时倾倒岩体进一步发生倾倒变形,坡体上可能出现反向台坎,局部可能产生垮塌掉块(循环3~6万时步)。
- c. 沿潜在折断面继续产生滑移破坏的同时,坡体沿板理面及缓倾结构面的倾倒变形进一步加剧,且在该阶段的变形过程中与整体下滑同等显著,甚至以倾倒垮塌破坏为主(循环6~12万时步)。

d. 整体沿折断面发生滑动并最终失稳。该阶段坡体沿结构面的倾倒变形已经完成,潜在折断面已完全贯通,形成滑面,倾倒破裂岩体沿滑面产生运动,以滑坡方式完成坡体的变形破坏过程(13~18万时步)。

模拟结果表明,Ⅰ号倾倒体的失稳形式最终将以沿潜在折断面的整体滑动而告终。由于Ⅰ号倾倒体目前已经发生了显著的倾倒变形,进一步的倾倒变形将会按照上述模拟结果发生,也即当沿潜在折断面发生剪切滑移时倾倒变形会贯穿于其中,但已不是坡体失稳的主要表征。

对于Ⅰ号倾倒体来说,岩体的倾倒变形已经发生,其目前及今后稳定状况如何主要取决于现今坡体的状态及今后的变形发展趋势。由于该倾倒体主要由反倾薄~极薄层板岩组成,岩层刚度相对较低,能够产生较大的挠曲变形,故其变形特征不仅具有倾倒、弯曲拉裂特征,而且具有蠕滑~拉裂的变形特征,整个坡体的发展趋势伴随变形的模式转换,即最初坡体的变形以弯曲~拉裂为主,随拉裂面的形成和弯曲变形向深部扩展,其下缓倾坡外的结构面上产生应力集中,从而造成缓倾面不连续段局部剪断,加之缓倾结构面错裂段弯曲变形岩体的根部折断,最终将形成微具阶状的潜在滑移面,此时以弯曲倾倒变形为主的变形过程几近结束,变形过程主要转化为沿潜在滑面的蠕滑~拉裂,这一点在上述离散元模拟中得到了清楚的显现。

4 结 论

对Ⅰ号倾倒体的研究表明,该地质体主要由刚度较低的薄层板岩组成,变形破坏特征为弯曲~倾倒,造成目前坡体浅表部岩体松动,完整性较差。离散元模拟结果表明,倾倒体后期的变形趋势主要以沿潜在折断面的剪切蠕滑为主,并伴以沿板理面发生的错动、倾倒现象,最终以滑坡的形式结束整个变形过程。

参考文献:

[1] 张倬元,王兰生,王士天. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1994.
[2] 王士天,黄润秋,李渝生. 雅砻江锦屏水电站重大工程地质问题研究[M]. 成都:成都科技大学出版社,1998.
[3] 权七一. 干枚岩倾倒体对沥水沟渡槽的危害[J]. 水利水电科技进展,2001,21(7):73-74.
[4] 宋彦辉,聂德新. 黄河上游某电站Ⅰ号滑坡运动特征分析[J]. 水利水电技术,2005,25(3):19-22.
[5] 吴勇,李自停. 四川省溪口滑坡运动特征的离散元模拟[J]. 山地研究,1997,15(3):197-200.

(收稿日期 2006-05-15 编辑 高建群)