

# 澜沧江某水电站右坝肩岩体倾倒变形的数值模拟

谢 莉<sup>1</sup> 李渝生<sup>1</sup> 曹建军<sup>2</sup> 刘根亮<sup>1</sup>

(1. 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;  
2. 煤炭科学研究总院西安研究院, 陕西 西安 710054)

**摘要:**对该水电站坝址区陡立反倾板状结构岩体而言,纵向河谷的地形特征,使坝址两岸边坡大范围发育倾倒变形。针对该水电站倾倒变形问题,在掌握坝址区工程地质条件背景的基础上,通过对岩体倾倒变形基本特征及破裂程度分级等分析,建立边坡离散元的工程开挖和破坏机理的数值计算模型,得出了工程开挖边坡岩体倾倒变形特征和变形破坏机理发展过程为:初期弱倾倒变形岩体的层内剪切错动、强倾倒变形岩体的层内拉张变形、强倾倒变形岩体的切层张-剪破裂及极强倾倒破裂岩体的折断张裂(坠覆)破裂。研究结果为倾滑体的稳定性评价及工程开挖施工提供一定科学依据。

**关键词:**工程开挖边坡;破坏机理模型;倾倒变形;离散单元法

**中图分类号:**P554      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-3657(2009)04-0907-08

在西南地区的水电建设工程中,发生于板状反倾岩体中的倾倒变形是一个极其重要的工程地质问题。倾倒变形不仅削弱了边坡岩体的稳定性,对工程影响表现在边坡浅表部位的次生改造及潜在滑移面的孕育,而且边坡开挖过程中卸荷作用可能使倾倒变形的加剧或者出现新的倾倒变形现象,直接影响大坝及水工建筑物的布置。本文通过离散单元法,分析边坡开挖后岩体倾倒变化的变化特征,并且通过破坏机理模型,来反演倾倒变形的破坏机制。

## 1 工程地质概况

澜沧江某水电站坝址地处横断山脉澜沧江纵谷地区,是澜沧江上游规划河段的最下游一个梯级。拟建坝型初拟为堆石坝,坝高 138 m,坝顶高程 1422 m,正常蓄水位 1408 m,库容 7.01 亿 m<sup>3</sup>,总装机容量 1200 MW。坝址区两岸为高陡边坡,冲沟发育。边坡高度大于 250 m,平均坡角约 50°,岸坡岩体为侏罗系千枚状绢云板岩、变质石英砂岩,构成反倾板状地质结构,总体产状为 N5°~20°W, SW ∠ 35°~75°,与河流走向近平行。现场地质调查表明,两岸倾倒变

形、卸荷松弛明显,均分布有向河床倾倒的变形岩体,两岸岩体倾倒变形现象均有不同程度的发育。同时倾倒变形影响范围较大,水平影响深度一般大于 50 m,且有随高程的增加而逐渐加深的趋势。岩体物理力学指标因倾倒变形程度不同而差异较大,对工程边坡稳定性及建基面选择影响较大。

## 2 岩体倾倒变形的基本特征

### 2.1 岩体倾倒变形的主要类型

坝肩岩体倾倒破裂现象极为复杂,在工程地质条件和岩体结构特征的地质研究基础上,对坝址区进行了系统的地质编录与调研分析。研究成果表明,右坝肩边坡岩体复杂的倾倒变形可归纳为倾倒变形、倾倒-弯曲及倾倒-折断等 3 种基本类型。

### 2.2 岩体倾倒变形主要类型的特征

岸坡陡倾薄层岩体在重力弯矩作用下,坡体前缘向临空方向发生重力倾倒,并逐渐向坡内连续发展,表现为连续倾倒变形,从硐口向内岩层倾角逐渐变大。薄层岩体内部沿早期构造成因的层内错动带发生薄层之间的相互错动(图 1);倾倒-弯曲表现为

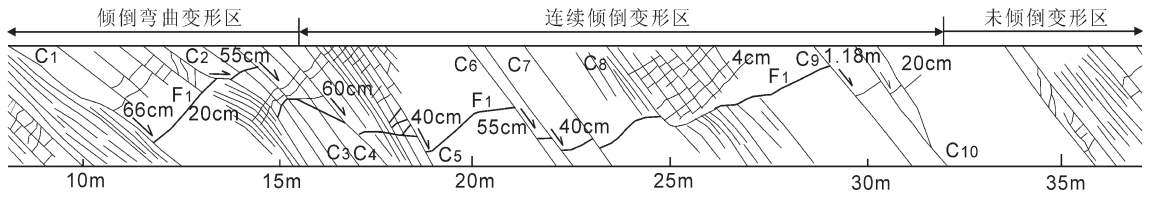


图 1 PD6 倾倒变形总体图(倾倒弯曲变形区、连续倾倒变形区、未倾倒变形区)

Fig.1 Overall map of overthrown deformation in PD6 (area of overthrowing-bending deformation, that of contiguous overthrown deformation and that not suffering from overthrown deformation)

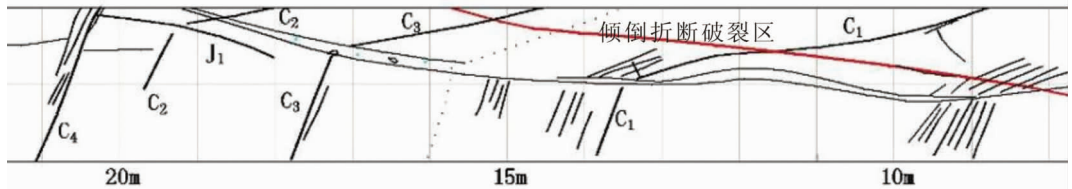


图 2 PD29 平硐 10~20m 段典型倾倒折断破裂特征

Fig.2 Typical characteristics of fracturing rupture in PD29 from 10 m to 20 m

岸坡陡倾薄层岩体在自重弯矩作用下, 向临空方向发生悬臂梁式弯曲, 岩体内部薄层之间的相互错动亦随之进一步发展(图 1); 倾倒-折断则表现为在较大的重力弯矩作用下, 弯曲部位出现拉张破裂并产生横切弯曲“梁板”的悬臂梁式折断破裂, 形成倾向坡外、断续延展的张性或张剪性折断带, 岩层倾角发生突变(图 2)。

### 2.3 岩体倾倒变形程度的工程地质分级

根据变形破裂的发展情况及其工程地质性状, 将岩体倾倒变形的强烈程度分为极强倾倒折断破裂、强倾倒变形破裂(进一步分为上、下段)和弱倾倒过渡变形等 3 种不同级别。

## 3 岩体倾倒变形的离散元模拟

通过上述岩体倾倒变形的基本特征、倾倒岩体的倾倒破裂程度分级等的分析, 建立工程开挖边坡离散元模型, 确定岩体倾倒变形特征, 然后建立破坏机理离散元模型, 来反演边坡倾倒变形破坏的发展过程, 进一步分析倾倒变形的形成机制。

### 3.1 离散单元法模型及介质参数

#### 3.1.1 离散单元法原理

针对坝肩倾倒岩体的位移突变和大位移变形问题, 采用离散单元法分析。

离散模拟是基于任意多边形的刚性块体模型假

设。对于多个分立的 多边形刚性块体单元, 单元之间可以是角-角接触、角-边接触和边-边接触。随着单元的平移和转动, 允许调整单元之间的接触关系。最终块体单元既可能达到平衡状态, 也可能持续运动下去。

#### 3.1.2 计算模型及边界条件

根据平硐编录、相关钻孔资料、岩体力学测试及地质调查等研究资料, 将右岸坝肩工程边坡复杂的地质原型(图 3)概化为岩体力学数值模型, 分别建立坝肩工程开挖边坡(图 4 左)和边坡破坏机理(图 4 右)两个数值计算模型。模型在左、右边界采用 X 方

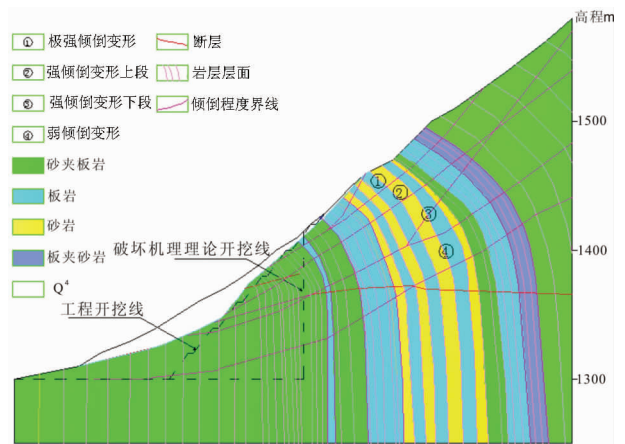


图 3 右坝肩边坡工程地质剖面图

Fig.3 Engineering geological profile of the right abutment slope

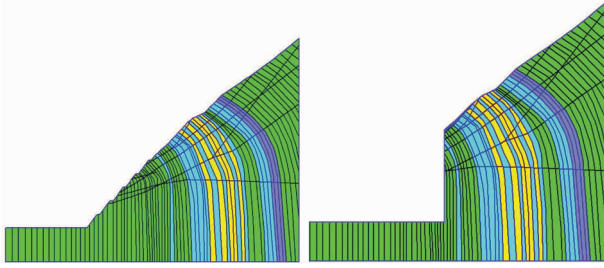


图 4 边坡模型

(左图-边坡开挖计算模型;右图-边坡破坏机理模型)

Fig.4 Slope models

(Left-slope models of excavated slope; Right-slope models of failure mechanism)

向面约束、下边界采用 Y 方向面约束,约束边界上位移为零,应力场只考虑重力作用。

### 3.1.3 模型介质参数

根据现场实测及室内剪切流变试验结果,并参考已有工程类似岩体的经验指标,确定模型介质参数(表 1)。

### 3.2 工程开挖边坡倾倒变形的离散元模拟

通过对工程开挖边坡离散模拟分析,其数值计算成果显示(图 5~7),边坡岩体的位移及变形特征主要表现在以下几点:

(1)大致以 1515 m 高程为界,边坡下部岩体的水平位移大于垂直位移、上部岩体的垂直位移大于水平位移,且差值较大。这种情况显示,边坡下部岩体的变形形式以近水平剪切作用为主,上部岩体的变形形式则以垂向变形为主。

(2)图 6 计算成果显示,工程边坡的位移变形与岩体倾倒变形程度有着极为明显的相关性。受极强

倾倒岩体底界破裂面控制的边坡浅层岩体,位移变形最为强烈;强倾倒上段岩体的位移变形有所减弱,但仍保持一定的量值;强倾倒下段岩体仅有微弱的位移变形,而弱倾倒岩体基本上不发生位移变形。

(3)岩体变形全过程的离散元数值模拟分析显示,沿缓倾角断层的剪切滑移,主要发生在迭代计算的初期,随迭代时步增加而逐渐趋于停止。

(4)在同一高程上,以 1436 m 高程为例,随着水平深度的增加,块体位移和角速度有稳定的趋势,其变化幅度是和现场倾倒程度分级是一致的(图 7)。

### 3.3 岩体倾倒变形破坏机理的离散元模拟

#### 3.3.1 岩体倾倒变形的发展阶段

根据坝址区特定的岸坡地质结构类型,通过上述工程开挖边坡数值分析,为进一步研究倾倒变形的破坏机理,从而建立破坏机理离散元模型(图 8 左)。通过对岩体倾倒变形-破裂全过程的反演模拟,较为清楚地展现了倾倒变形发展的 4 个基本阶段。

(1)初期倾倒变形发展阶段:在河流强烈下切侵蚀的初期,陡立板状岩体的前缘开始向临空方向倾倒变形(图 8 右)。坡体前部变形具有卸荷回弹性质,后缘发展拉裂变形,内部岩板之间发生相互错动蠕滑变形。

(2)倾倒-弯曲变形发展阶段:随着岩体倾倒变形的进一步发展,已经发生倾倒变形的板状岩体在重力弯矩的作用下,岩板的根部发生强烈的悬臂梁式弯曲变形,坡体前缘表层崩落掉块、后缘拉裂,内部岩板间的蠕变错动进一步持续发展(图 9 左)。

(3)弯曲-折断破裂发展阶段:由于弯曲变形的持续发展,必将导致作用于岩板的力矩随之增大。当作用于岩板根部的力矩超过该部位的抗弯折强度

表 1 模型介质参数

Table 1 Parameters of model media

岩性	C (MPa)	$\phi(^{\circ})$	$\gamma$ ( $g/cm^3$ )	泊松比 $\mu$	结构面 类型	C (MPa)	$\phi(^{\circ})$	法向刚度 (MPa/m)	切向刚度 (MPa/m)	$\gamma$ ( $g/cm^3$ )
板岩	0.8	44	2.65	0.3	层错	0	22	8000	17000	2.1
砂岩	0.85	47	2.57	0.26	缓断层	0	16.7	6500	15000	2.25
板岩夹砂岩	0.81	44.7	2.63	0.29	陡断层	0	21	9000	18000	2.3
砂岩夹板岩	0.84	46.2	2.59	0.28	层面	0.6	31	15000	30000	
砂岩板岩互层	0.83	45.5	2.61	0.27	节理	0	24	9500	19000	2.5
第四系	0	32	2.25	0.35	第四系与基岩	0	18	5000	11000	

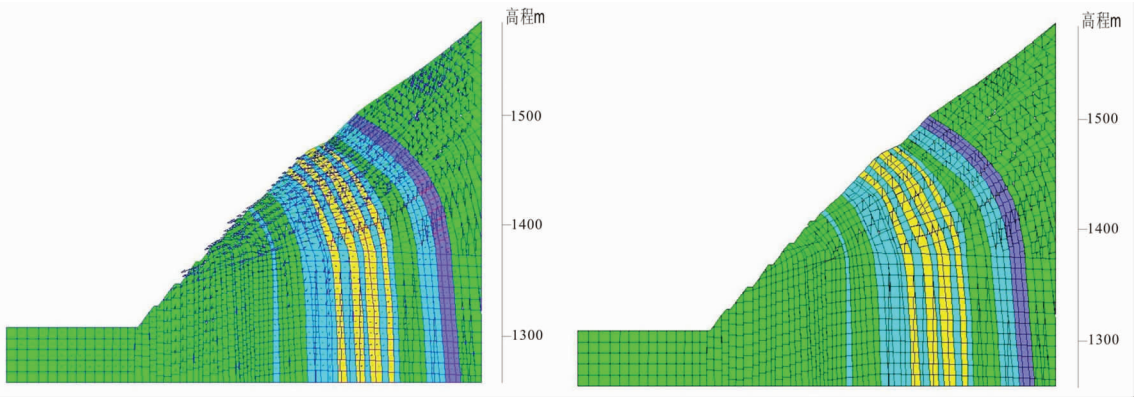


图5 坝肩边坡离散元分析成果

(左图-初始开挖状态;右图-最终变形及位移矢量图)

Fig.5 Analytic results of discrete elements on the abutment slope

(Left-Initial state of excavation; Right-Diagram of ultimate deformation and displacement vector)

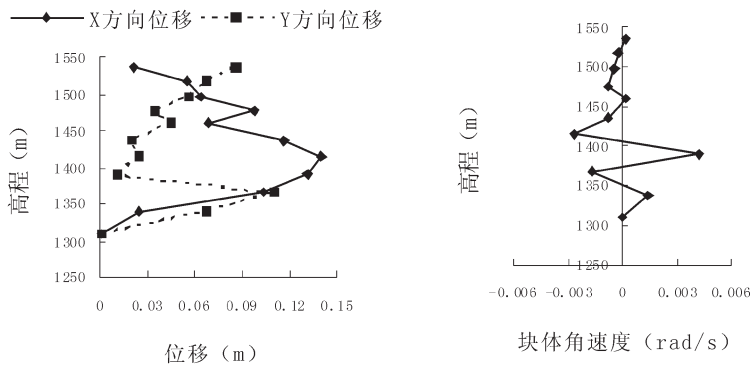


图6 坡面块体位移随高程的变化特征

(左图-水平、垂直位移分量;右图-位移角速度)

Fig.6 Characteristics of block displacement varying with the elevation

(Left-Horizontal and vertical displacement components; Right-Displacement angular velocity)

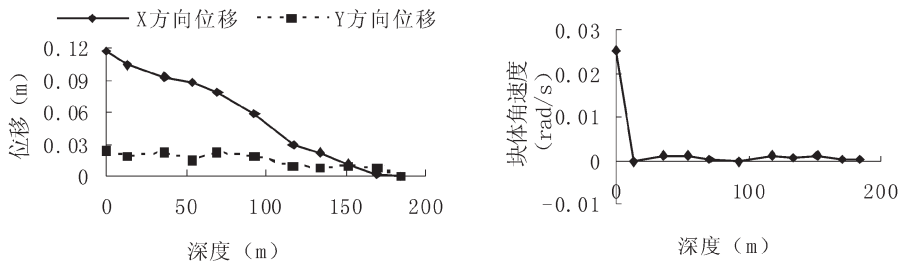


图7 1436 m 高程块体位移沿水平深度变化特征

(左图-水平、垂直位移分量;右图-位移角速度)

Fig.7 Characteristics of block displacement varying with elevation

(Left-Horizontal and vertical displacement components; Right-Displacement angular velocity)

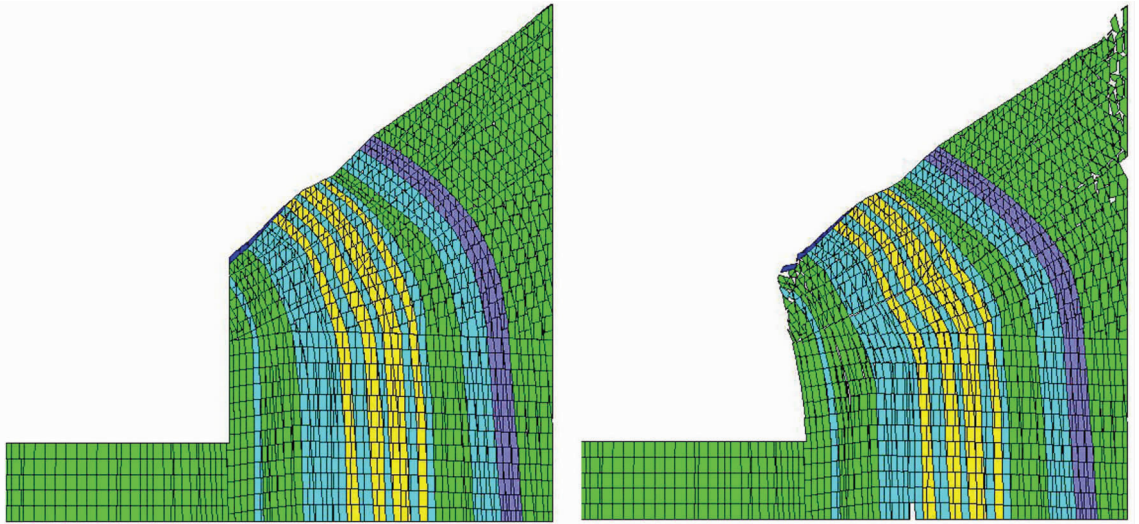


图 8 初期倾倒变形发展阶段  
(左图-初始模型;右图-倾倒变形阶段)

Fig.8 Early stages of development of overturned deformation  
(Left-Initial model; Right-Stage of overturned deformation)

时,沿最大弯折带形成倾向坡外断续的破裂面(图 9 右)。实质上就力学机理而言,这类破裂面具有拉张和剪切性质,即沿该破裂面已经开始发展成为控制坡体稳定的张-剪应力集中带,并有向坡体后缘拉应力集中区发展的趋势。

(4) 折断面贯通、坡体失稳破坏阶段:经过弯

曲-折断破裂发展阶段后,岩板根部的折断破裂面将持续发展并与后缘拉裂贯通(图 10 左),形成统一的张剪性破坏面。此阶段,受这类倾向坡外的破裂面控制的持续倾倒变形,实际上已转为滑移-拉裂型变形-破坏(或崩溃)。

对于坝址区特殊的岸坡岩体结构,倾倒变形的

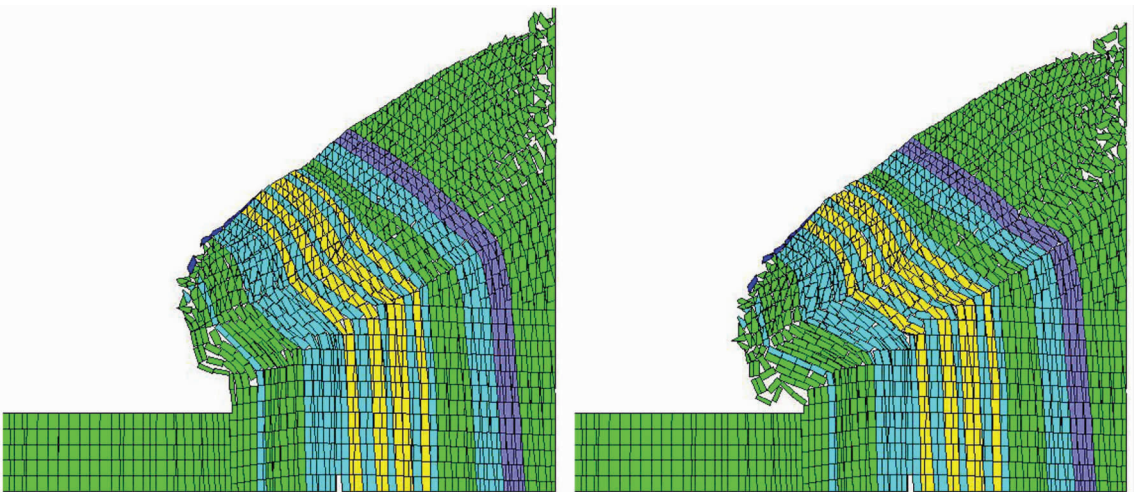


图 9 倾倒-弯曲变形和弯曲-折断破裂发展阶段  
(左图-倾倒-弯曲变形发展阶段;右图-弯曲-折断破裂发展阶段)

Fig.9 Development stages of overthrowing-bending deformation and bending-fracturing rupture  
(Left-Development stage of overthrowing-bending deformation; Right-Development stage of bending-fracturing rupture)

最终发展阶段具有双重破裂面特征(图 10 右),将分别发展为浅表层滑塌和深部张剪滑移破坏。

上述破坏机理模型的反演分析表明:通过假定理论上的开挖边界,从而加剧岩体倾倒变形的发展并且节省计算迭代时间,得出倾倒变形岩体的破坏过程可依次概括为初期倾倒变形发展阶段、倾倒-弯曲变形发展阶段、弯曲-折断破裂发展阶段及折断面贯通、坡体失稳破坏阶段,其中第四阶段为岩体倾倒变形破坏的最终阶段。在岩体倾倒变形的 4 个阶段不断演化的过程中,随着潜在滑移面的不断孕育,边坡岩体的稳定系数也随之降低,当倾倒变形发展到第四阶段,潜在滑移面已形成贯通面,岩体也随之发生失稳破坏。因此,通过破坏过程的反演分析,在指导工程边坡开挖的施工中,应对边坡变形进行实时监测,严格将倾倒变形控制在第二阶段以内。

### 3.3.2 倾倒变形-破裂发展过程中的岩体变形破坏机制

上述理论开挖边坡离散模拟的 4 个发展阶段中,伴随着倾倒变形强烈程度的不同,岩体内部表现出不同的破裂形式、力学机制和特征变形现象:初期表现为近直立的薄层或板状反倾岩体在卸荷及自重作用下,沿层内错动带发生层内错动(图 11-a);随着倾倒变形继续发展,重力产生的弯矩作用加强,错动带间的岩板所承受的弯曲拉应力也随之增加,当拉应力积累到超过岩板的抗拉强度时,同时在层内错动继续发展的影响下,岩板将会产生张拉裂隙,表现为层间张拉变形(图 11-b);在倾倒变形进一步作用下,张拉变形的不断加强。同时在重力的作用下,将会沿着张拉裂隙产生剪切错动,表现为切层张剪破裂或倾滑剪切位移(图 11-c);当倾倒变形发展到极为强烈时,由于岩层弯曲变形角度很大,作用于岩

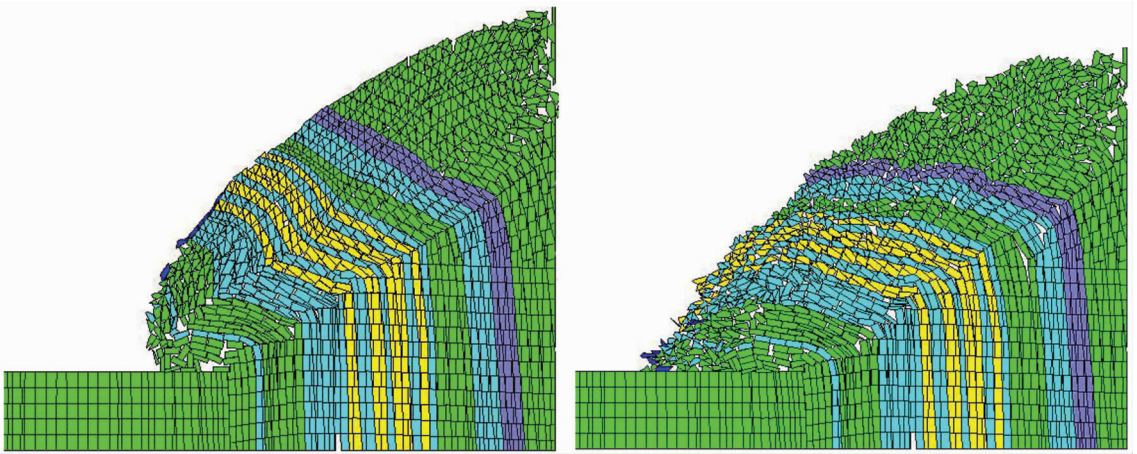


图 10 折断面贯通、坡体失稳破坏阶段  
(左图—折断面贯通;右图—坡体破坏、双重滑面形成)

Fig.10 Stages of breakthrough fracture surfaces and slope instability  
(Left—Stage of breakthrough fracture surfaces; Right—Stage of slope instability)

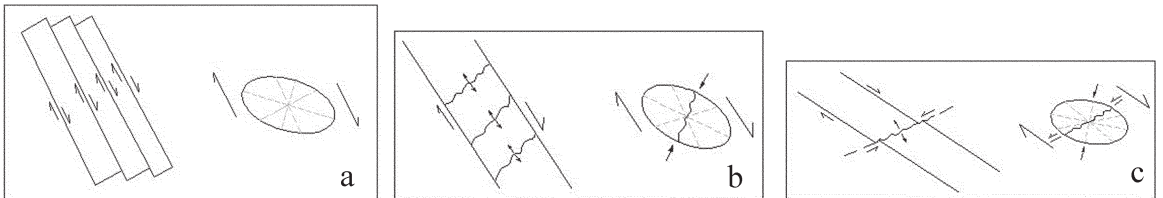


图 11 不同倾倒变形程度岩体的破裂形式及力学机制  
a—弱倾倒层内剪切错动;b—强倾倒层间张拉变形;c—强倾倒切层张性剪切破裂

Fig.11 Rupture forms and mechanics mechanisms of varying degrees of overthrown rock mass deformation  
a—Shear dislocation on weakly overturned layers; b—Tensile deformation on strongly overturned layers; c—Strain-shear rupture through strongly overturned layers)

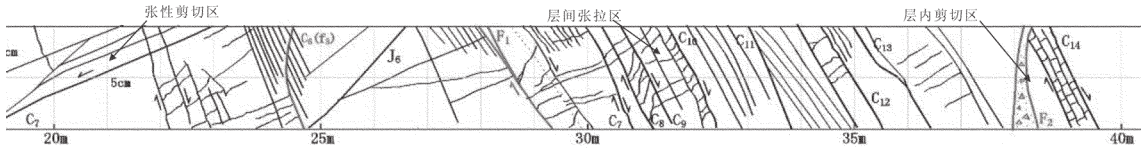


图 12 PD14 平硐 20~40 m 地质素描图

Fig.12 Geological sketch map of PD14 from 20 m to 40 m

板的倾倒弯矩进一步积累增大,一旦达到岩板的抗弯折强度,岩体发生横切岩板、倾向坡外的折断破裂,当这些破裂面贯通后,继而发展为塌滑坠覆体。

通过 PD14 所揭露的地质剖面资料,可以清楚地观察到倾倒变形破坏机制在时间上的发展变化,沿深度的增加,依次表现为张性剪切、层间张拉、层内剪切(图 12)。

#### 4 结论及建议

(1)通过对岩体倾倒破坏机理离散元的分析,岩体倾倒变形的发展阶段可分为初期倾倒变形发展阶段;倾倒-弯曲变形发展阶段;弯曲-折断破裂发展阶段;折断面贯通、坡体失稳破坏阶段。随着高程的增加,倾倒变形的影响也随之增加,并且在坡度越大处影响越大。根据坝址区的平硐所揭示的地质剖面资料,划分出各倾倒变形阶段的范围,为工程开挖和工程加固提供了依据。

(2)受复杂的岩体结构控制,右坝肩岩体应力分异现象较为明显。工程边坡的开挖将导致岩体应力的分异作用明显加剧,边坡浅表层岩体出现较大范围的拉应力分布,深部岩体受缓倾角断层控制出现剪应力集中现象。在工程边坡开挖时,应采取相应的加固措施,并加强监测。

(3)工程边坡的变形与岩体倾倒变形程度有着极为明显的相关性。受极强倾倒岩体底界破裂面控制的边坡浅层岩体,位移变形最为强烈,可采取清方措施;强倾向上段岩体的位移变形有所减弱,但仍保持一定的量值,岩体重点进行锚固;强倾倒下段深部岩体仅有微量的位移变形,岩体可进行适当加固处理;弱倾倒岩体基本上不发生位移变形。

#### 参考文献(References):

[1] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社, 1994.

Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Principles of

Engineering Geology [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1994(in Chinese).

[2] 王兰生, 张倬元. 斜坡变形破坏的地质力学模式[C]//水文地质工程地质论丛(1). 北京:地质出版社, 1993.

Wang Lansheng, Zhang Zhuoyuan. The geological mechanism model of slope rock deformation and destruction[C]//Hydrogeology and Engineering Geology Essays. Beijing:Geological Publishing House, 1993(in Chinese).

[3] 王士天. 复杂环境中地质工程问题分析的理论与实践[M]. 成都:四川大学出版社, 2002.

Wang Shitian. The Theory and the Fulfillment of the Geology Engineering Problem Analysis in the Complicated Environment[M]. Chengdu:Sichuan University Press, 2002(in Chinese).

[4] 王来贵, 黄润秋, 张倬元, 等. 含有结构面的边坡力学系统的变形滑动全过程分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(1):17-22.

Wang Laigui, Huang Runqiu, Zhang Zhuoyuan, et al. The analysis on whole procedure of the deformation and sliding of slope mechanical system which contains structural areas [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1997, 8 (1)17-22 (in Chinese with English abstract).

[5] 王泳嘉, 那纪波. 离散元法及其与边界元的耦合[C]//边界元法在岩石力学和工程中应用会议论文集. 1987.

Wang Yongjia, Xing Jipo. Discrete model and the coupling of boundary element [C]//Boundary Element Method Applies the Conference Collection in the Rock Mechanics and the Project. 1987 (in Chinese with English abstract).

[6] 韩贝传, 王思敬. 边坡倾倒变形的形成机制与影响因素分析[J]. 工程地质学报, 1999, 7(3):213-217.

Han Beichuan, Wang Sijing. Mechanism for toppling deformation of Slope and analysis of influencing factors on it [J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(3):213-217(in Chinese with English abstract).

[7] 常祖峰, 谢阳, 梁海华. 小浪底工程库区岸坡倾倒变形研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(1):28-31.

Chang Zufeng, Xieyang, Liang Haihua. Study on the Deformation of Rock Bankslope in the Reservoir Region of Xiaolangdi Project [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 10(1):28-31(in Chinese with English abstract).

[8] 黄润秋, 唐世强. 某倾倒边坡开挖下的变形特征及加固措施分析[J]. 水文地质工程地质, 2007, 06:44-54.

Huang Runqiu, Tang shiqiang. On the deformation characteristics and reinforcement measures of a toppling slope under excavation[J].

- Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 06:44-54(in Chinese withn English abstract).
- [9]任光明, 聂德新, 刘高. 反倾向岩质斜坡变形破坏特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊):2707-2710.
- Ren Guangming, Nie Dexing, Liu gao. Studies on deformation and failure properties of anti-dip rockmass slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (supp.2):2707-2710(in Chinese).
- [10] 马福祥, 王林维, 陈奇珠. 倾倒变形体底滑面综合强度参数的选取[J]. 西北水电, 2002, 02(2):22-24.
- Ma Fuxiang, Wang Linwei, Cheng Qizhu. Selection of synthetic strength parameters for deformable landslide slipping surface [J]. Northwest Water Power, 2002, 02 (2):22-24 (in Chinese with English abstract)..

## Numerical simulation of toppling rock mass deformation in the right dam abutment of a hydropower station on the Lancang River

XIE Li<sup>1</sup>, LI Yu-sheng<sup>1</sup>, CAO Jian-jun<sup>2</sup>, LIU Gen-liang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Xi'an Branch of China Coal Research Institute, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Steep and antithetic platy structure of rock mass and geomorphology of the longitudinal valley in the dam site area cause wide-range toppling deformation on the cross-strait slope. Aimed at solving problems of toppling deformation, the authors, in the light of regional engineering geological conditions, analyzed characteristics of toppling rock mass deformation, made degree classification of toppling ruptures, established discrete element slope models for excavation and failure mechanism, and detected characteristics of the excavated slope and four developing processes of failure mechanism. There exist shear dislocation in weak toppling rock deformation, tensile deformation on layers in strong toppling rock deformation, strain-shear rupture through layers in strong toppling rock deformation and tensile fracture on very strong toppling rock rupture. The results provide a scientific basis for stability evaluation of the dip-slip body and the excavation work.

**Key words:** excavated slope; failure mechanism model; toppling deformation; discrete element method

**About the first author:** XIE Li, female, born in 1983, postgraduate, majors in geological engineering and engages in the study of regional geological evaluation and protection; E-mail: xielily83@163.com.