

文章编号:0559-9350(2012)11-1271-08

乌东德水电站右岸引水洞进口边坡稳定性研究

王吉亮^{1,2}, 李会中^{1,3}, 杨 静¹, 李 琳⁴

(1. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010; 2. 上海交通大学, 上海 200240;

3. 三峡大学, 湖北 宜昌 443002; 4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:以工程地质条件详细调查为基础,采用宏观地质分析与极限平衡法、数值模拟法相结合的研究手段,分层次对乌东德水电站右岸引水洞进口边坡整体稳定和局部稳定性进行了系统研究。结果表明:乌东德水电站右岸引水洞进口边坡整体稳定性较好,三维离散元数值模拟结果显示,人工边坡变形以少量回弹变形为主,变形特征不突出。在分析边坡开挖后可能形成的块体边界条件基础上,提出了人工边坡可能出现的块体失稳模式,从块体稳定性影响因素分析入手,建立块体稳定性工程地质评价标准,对块体稳定性进行了宏观地质分析,并采用三维刚体极限平衡方法对可能产生的块体模型进行了计算分析,得到块体开挖后的稳定系数。结果表明,人工边坡可能出现的块体多处于基本稳定状态。综合整体稳定性和局部稳定性研究成果,提出人工边坡加固方案建议。研究成果为工程设计与施工可提供重要依据,并对类似工程提供可以借鉴的经验。

关键词:岩质高边坡;工程地质评价;三维离散元;失稳模式分析;三维极限平衡法

中图分类号: TU413.6

文献标识码: A

我国水能资源丰富,理论蕴藏量6.9万kW,技术可开发量5.7万kW,居世界第一位。随着西部大开发战略的实施和“西电东送”的需求,我国西部水电资源开发进入迅猛发展的阶段。一系列在建或拟建大型水利水电枢纽工程规模越来越大,涉及到的工程边坡也越来越高。在此期间,众多学者采用包括现场工程地质条件的系统调研及室内综合分析^[1-2]、变形机制的理论研究^[3-6]、大型三维数值计算^[7-8]、以及人工智能方法^[9-10]等研究方法,针对高边坡稳定问题开展了一系列深入的研究,取得了丰富的成果,推动了人们对该地区岩石高边坡稳定性的认识。在众多的边坡稳定性研究方法中应用最为广泛并得到工程界和学术界较大幅度认可的当属极限平衡法和数值模拟法。

本文以金沙江乌东德水电站右岸引水洞进口边坡为工程背景,以现场工程地质条件的系统调研为基础,以宏观地质分析与极限平衡法、数值模拟法相结合的研究方法,分层次对人工边坡整体稳定与局部稳定问题进行了系统分析与评价。

1 工程概况

拟建乌东德水电站是金沙江下游河段4个水电梯级中的最上游梯级,以发电为主,兼顾防洪、航运、拦沙等综合利用效益,是西电东送骨干电源点之一,大坝采用抛物线混凝土双曲拱坝,坝顶高程988m,坝高265m,枢纽工程主要由大坝、泄洪消能、引水发电系统等建筑物组成(图1),为一等大(I)型工程,设计正常蓄水位975m,相应库容58.63亿m³,装机容量为10200MW。

收稿日期:2012-06-27

基金项目:国家“973”计划项目(2011CB013500);水利部公益性行业科研专项项目(201001008);国家大坝安全工程技术研究中心研发课题(2011NDS010)

作者简介:王吉亮(1982-),男,山东莱州人,高级工程师,主要从事水利水电工程地质勘察、岩土工程设计研究。

E-mail: 39128518@qq.com

右岸引水洞进口边坡所处自然边坡高约830m；人工边坡开口线高程995~1055m，开口线以下自然边坡高约255m，以上边坡高约575m。按走向人工边坡可分为3段，分别为洞脸边坡、上游侧边坡和下游侧边坡(图2)。

人工边坡由前震旦系会理群(Pt_{2H})落雪组(Pt_{2L})地层构成，岩性为灰色厚层灰岩(Pt_{2L}^{3-1})、灰白色薄层和极薄层大理岩化白云岩(Pt_{2L}^{2-3})和灰色厚层夹互层和薄层灰岩(Pt_{2L}^{1-1}) (图2—4)。岩层走向 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ，倾向SE，与金沙江大角度相交，倾角 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。

研究区边坡发育两条断层为 F_{14} 和 f_{42} 。 F_{14} 走向 73° ，倾SE，倾角 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ，构造岩主要为岩粉夹岩屑、碎裂岩，岩粉夹岩屑厚3~8cm，碎裂岩、角砾岩厚1~1.5m，断面上可见擦痕； F_{14} 与上游侧边坡大角度相交，视倾坡外。 f_{42} 走向 $343^{\circ}\sim 0^{\circ}$ ，倾SW，倾角 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ，断层带主要为0.2~0.3m的碎裂岩； f_{42} 与洞脸边坡走向大角度相交，视倾坡内。

主要发育一组优势裂隙，产状为 $260^{\circ}\sim 280^{\circ}\angle 50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ，即顺河向、中倾坡内裂隙。裂隙面一般平直粗糙，多闭合或微张，少数张开2mm左右；多为硬性结构面，充填方解石和钙质等，少数见泥钙质薄膜，极少数见碎屑夹泥或泥夹碎屑。裂隙多短小，一般在5m以内，少数较长大裂隙延伸可达30m左右。右岸引水洞进口边坡出露的主要结构面性状见表1。

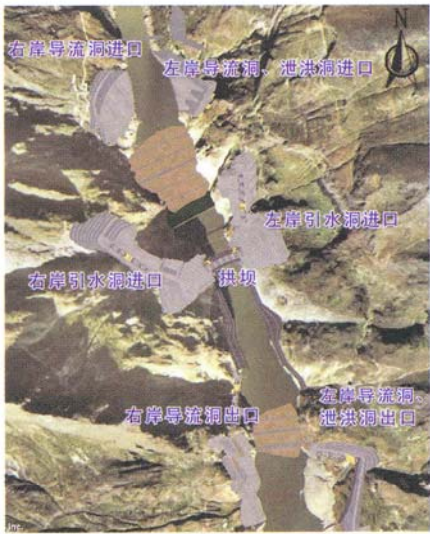


图1 枢纽布置

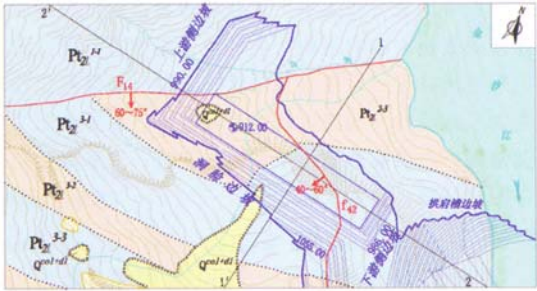


图2 右岸引水洞进口边坡工程地质平面

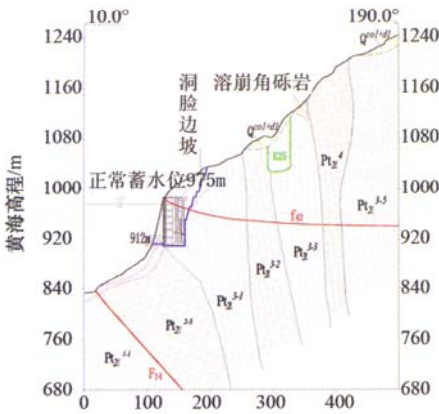


图3 引水洞进口洞脸边坡1-1'剖面

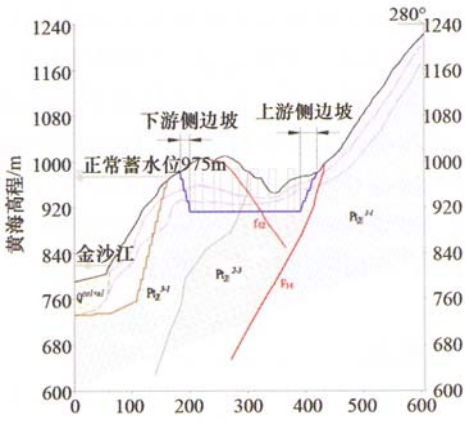


图4 引水洞进口两侧边坡2-2'剖面

2 设计开挖坡比与物理力学参数

2.1 设计开挖坡比 结合类似水电工程人工边坡设计坡比^[11-13]、《水利水电工程地质手册》^[14]建议的岩石边坡开挖坡比及乌东德坝址区自然边坡稳定坡比调查结果，设计右岸引水洞进口边坡开挖坡比见表2。

2.2 物理力学参数 根据室内试验成果，根据水力发电工程地质勘察规范(GB50287-2006)附录D岩土物理力学性质参数取值，岩石的密度和饱和单轴抗压强度采用试验成果的算术平均值作为标准

表1 主要的结构面性状

结构面	倾向/(°)	倾角/(°)	性状	
层面	140~160	70~80	一般为方解石充填或无充填的硬性结构面	
断层	F ₁₄	163	60~75	构造岩主要为岩粉夹岩屑或岩屑夹岩粉、碎裂岩、角砾岩，岩粉夹岩屑或岩屑夹岩粉厚 3~8cm，碎裂岩、角砾岩厚 1~1.5m，局部断面上可见擦痕。
	f ₄₂	253~270	40~60	断层带内物质呈明显的分带性，上断面处为灰白色白云岩为主的角砾岩，宽 0.3~1.2m，胶结紧密，下断面为灰白色白云岩碎屑构成的碎裂岩，宽 20~30cm，碎屑大小一般 2~10mm。断面见倾向为 0°，倾伏角 5°的擦痕。
	优势裂隙	260~280	50~60	裂隙面一般平直粗糙，多闭合或微张，少数张开 2mm 左右，多为硬性结构面，充填方解石和钙质等，少数见泥钙质薄膜，极少数见碎屑夹泥或泥夹碎屑。

值; 以现场刚性承压板法试验值的平均值作为标准值, 参考类似工程经验, 确定岩体变形模量、弹性模量参数; 以抗剪断峰值强度小值平均值作为标准值, 参考国标、同类工程经验, 综合考虑坝址区地质条件, 以标准值作为上限值, 对标准值做适当折减作为下限值, 确定岩体抗剪强度。右岸引水洞进口边坡主要岩体物理力学参数取值见表3。

表2 设计开挖坡比

坡段	坡比	备注
洞脸边坡	1:0.25	每20m设一级3m宽马道
上游侧边坡	1:0.25	
下游侧边坡	1:0.1	

表3 岩体物理力学参数

地质材料	容重 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	饱和抗压 强度/MPa	变形模量 E_0/GPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	抗剪断强度	
						c/MPa	$\varphi/(\text{°})$
Pt ₂₁ ¹⁻¹	26.9	80	18	25	0.23	1.4	50
Pt ₂₁ ²⁻³	27.3	60	5	7	0.28	0.7	38
Pt ₂₁ ³⁻¹	26.9	90	25	35	0.20	1.8	54

以结构面原位直剪试验、原位中剪试验成果为基础, 其中F₁₄(白沟断层)为泥夹岩屑型结构面, 呈塑性破坏, 取屈服强度作为标准值, 其余结构面取峰值强度的小值平均值作为标准值。基于标准值, 考虑结构面性状, 参考工程经验, 取结构面物理力学参数见表4。

表4 结构面抗剪断强度参数

结构面	强度参数	
	c/MPa	$\varphi/(\text{°})$
层面	0.1	35
F ₁₄	0.01	14
f ₄₂	0.05	19
优势裂隙	0.3	38

3 稳定性评价标准与计算方法

3.1 块体稳定性评价标准 块体的稳定性主要取决于3个方面的因素: (1)组成块体的结构面几何特征, 如产状和连通性等; (2)组成块体的结构面性状, 如粗糙起伏程度、张开度、充填物等; (3)组成块体的结构面卸荷松弛张开特征。结合乌东德水电站坝址区右岸引水洞进口边坡实际情况, 制定块体稳定性评价标准如表5。

3.2 三维刚体极限平衡法 本文采用三维刚体极限平衡法按单面滑动型和双面滑动型分别计算块体的稳定性系数^[11]。

(1)单滑面块体稳定性系数的计算方法。对于单滑面块体, 假设块体所受的净合力矢量 $\vec{r}$ 与滑移线矢量 $\vec{S}$ 之间夹角为 θ , 块体的稳定性系数可表示为:

$$K_c = \frac{|\vec{r}| \cos \theta \cdot \tan \varphi + CS_V}{|\vec{r} \sin \theta|} \quad (1)$$

式中: φ 、 C 、 S_V 分别为滑动面的内摩擦角、内聚力和面积。

表5 块体稳定性定性评价标准

稳定性评价	结构面特征
差	滑面或交棱线与临空面倾向一致,陡倾、张开,泥及碎屑充填,卸荷松弛强烈。
较差	滑面或交棱线与临空面倾向夹角小,中-陡倾、张开,泥及碎屑或泥钙质充填,卸荷松弛较强烈。
基本稳定	滑面或交棱线与临空面倾向夹角较小,中-缓倾、局部张开,泥及碎屑或泥钙质充填,卸荷松弛不强烈。
稳定	滑面或交棱线与临空面倾向夹角较大,缓倾、局部微张。

(2)双滑面块体稳定性系数的计算方法。对于双滑面块体,设滑移矢量为 $\vec{S}$,块体所受的净滑力为 $\vec{r}$,净合力矢量与滑移矢量之间的夹角为 θ (图5)。首先将净合力 $\vec{r}$ 分解为平行于和垂直于滑移线的作用力 H 和 N ,则有:

$$H = |\vec{r}| \sin \theta; N = |\vec{r}| \cos \theta \quad (2)$$

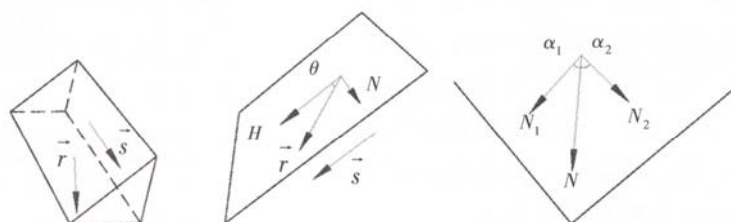


图5 双滑面块体滑动受力示意

然后,再将垂向力沿两滑移面的法矢量方向进行分解,求得作用在两滑移面上的法向力。

$$N_1 = \frac{N \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}; N_2 = \frac{N \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (3)$$

在上述基础上,可求得双滑面块体的稳定性系数为:

$$K_c = \frac{\sum_{i=1}^2 N_i \tan \varphi_i + C_i S_{vi}}{|\vec{r}| \sin \theta} \quad (4)$$

式中: i 代表主滑面的编号; C_i 、 φ_i 、 S_{vi} 分别为主滑面的内聚力、内摩擦角和滑面面积。

3.3 三维离散元法 离散单元法是分析离散介质变形和运动趋势的有力工具,自从1970年Cundall^[15-16]首次提出离散单元DEM(Distinct Element Method)模型以来,这一方法已在数值模拟理论与工程应用方面取得了长足的进展^[17-18]。离散单元法的研究对象被认为是各种离散块体的堆砌,块体之间的相互作用力根据位移和力的关系式来求解。离散元块体之间不存在变形协调的约束,因为块体之间是彼此互不约束的,需要满足的是物理方程和运动方程。

离散单元法的主要特征是:(1)它能反映块体之间接触面的滑移、分离和翻转等不连续变形,还能计算块体内部的变形和应力分布状态;(2)可以用于求解非线性大位移和动力稳定问题。

4 整体稳定性分析与评价

4.1 宏观地质分析与评价 右岸引水洞进口所处自然边坡岩质坚硬,边坡结构为陡倾横向坡,断层 F_{14} 、 f_{42} 与自然边坡大角度相交,整体稳定性好。

人工边坡结构为反向坡(洞脸边坡)、斜向坡(上游侧边坡)、横向坡(下游侧边坡),主要为非卸荷与弱卸荷岩体,局部即顶部或山外侧存在强卸荷岩体(图6中黄色区域);岩体质量主要为Ⅱ₁—Ⅱ₂级,少量Ⅲ₁级(图6)。人工边坡结构有利、卸荷不发育、岩体质量优良,整体稳定性较好。

4.2 数值模拟计算

(1)模型的建立。3DEC为美国ITASCA公司所发展的应用性程序,用离散单元法(Distinct Ele-

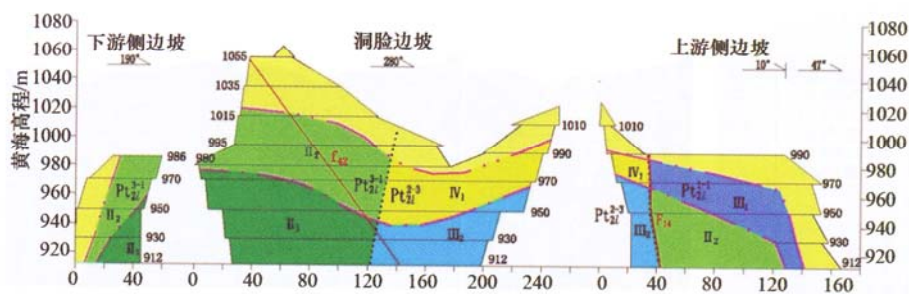


图6 各坡段立视图

ment Method)写成的数值分析程式,可模拟三维节理岩体的力学行为。本文采用3DEC程序对右岸引水洞进口边坡稳定性进行模拟研究。岩石材料选用莫尔-库伦本构模型,节理的剪切强度遵循库伦滑动准则。计算模型如图7所示,模型横河长460m,顺河长600m,高程范围720~1352m,不同的颜色表示不同地质单元,淡黄色、浅灰色、及绿色区域为强卸荷岩体,模型中开挖步设置与设计马道一致,共分24个开挖步。

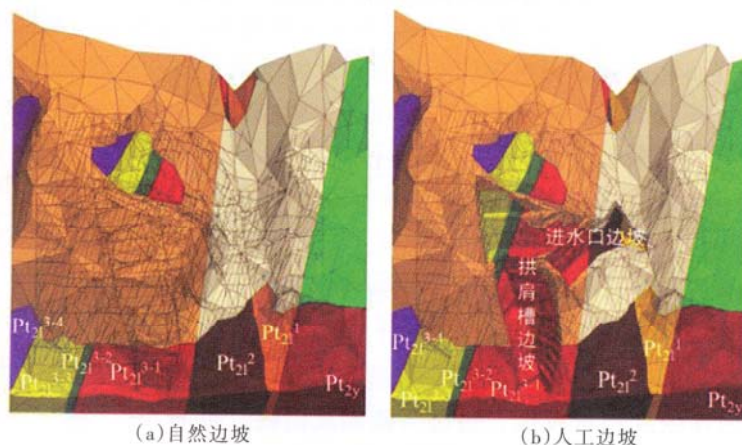


图7 计算模型

计算模型采用的右手坐标系,规定顺河向为Y轴负向,Z轴垂直向上为正,X轴向边坡外侧为正。由于引水洞进口边坡与拱肩槽边坡联合开挖,故将拱肩槽边坡一并建模。

在计算模型中考虑了结构面对边坡稳定性的影响,主要结构面(见图8)包括。(1)层面。产状为 $150^{\circ}\angle 75^{\circ}$; (2)确定性结构面。主要包括模型范围内的断层及主要长大裂隙,如: F_{14} 、 f_{42} 等; (3)卸荷裂隙。除考虑上述层面和确定性结构面外,还充分体现卸荷构造对边坡稳定性的影响,依据地质勘查成果,卸荷裂隙为顺河向、倾向对岸、中-陡倾结构面,在以上原则基础上,倾向、倾角满足随机分布特征,本文采用直接法^[19]来生成随机数,并进一步假定裂隙间距为30m;考虑强卸荷带作用的另一个要素即为卸荷裂隙的发育深度,模型中卸荷裂隙止于强卸荷带下界。

(2)计算结果分析。主要计算参数见表3、表4,计算成果见图9,由计算结果可以看出,边坡总体变形特征以少量的回弹变形为主,坡体在开挖剥离作用下,仍呈现较好的稳定状态。从岩体变形随强度折减系数的变化规律来看,当强度折减系数为1.5时,坡体出现失稳特征,判断

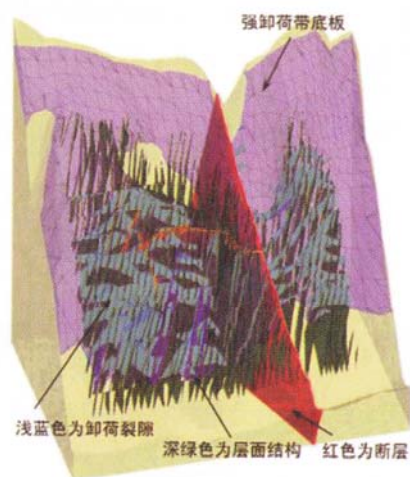


图8 模型中结构面分布

该边坡稳定系数为1.5。

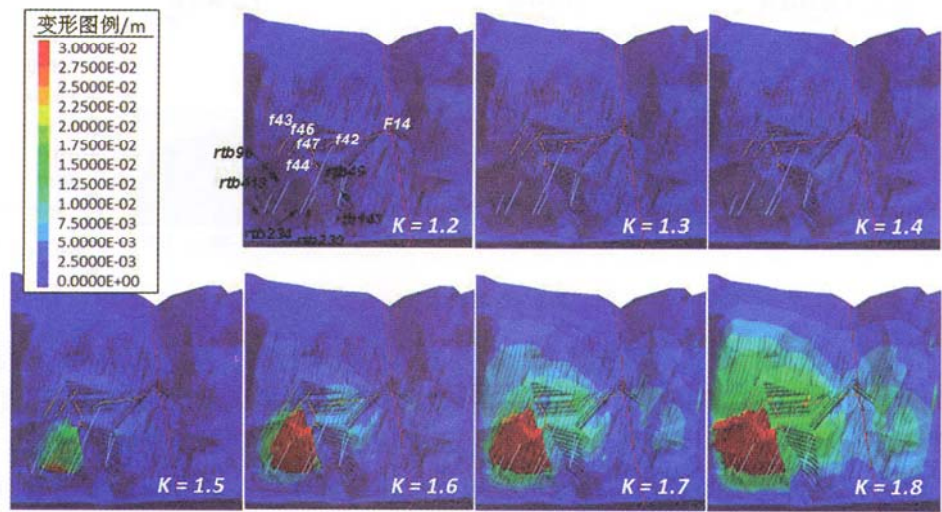


图9 开挖边坡在不同强度折减条件下的变形

5 局部稳定性分析与评价

5.1 局部稳定性分析 右岸引水洞进口边坡部位主要结构面见表1，人工边坡倾向及坡角见表6。

洞脸边坡，优势裂隙（产状 $260^{\circ}\sim 280^{\circ}\angle 50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ）与层面（产状 $140^{\circ}\sim 160^{\circ}\angle 70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ）、 f_{42} （产状 $253^{\circ}\sim 270^{\circ}\angle 40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ）不具备组合块体条件（图10），边坡上部为 Pt_{21}^{3-1} 厚层灰岩，下部为 Pt_{21}^{2-3} 薄层、极薄层大理岩化白云岩且岩体强度相对较低，边坡为陡倾反向坡，可能产生倾倒变形；局部可能出现薄层、极薄层大理岩化白云岩松弛剥落，及不利裂隙组合形成块体。

表6 人工边坡倾向及坡角

坡段	倾向/ $^{\circ}$	坡角/ $^{\circ}$
洞脸边坡	10	76
上游侧边坡	100	76
下游侧边坡	280	84

上游侧边坡，优势裂隙（产状 $260^{\circ}\sim 280^{\circ}\angle 50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ）与层面（产状 $140^{\circ}\sim 160^{\circ}\angle 70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ）、 F_{14} （产状 $163^{\circ}\angle 60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ）不具备组合块体条件（图11），但仍存在不利裂隙组合形成块体的可能，块体问题仍然是该段边坡的主要局部稳定问题。白沟断层下游 Pt_{21}^{2-3} 薄层、极薄层大理岩化白云岩可能产生局部松弛剥落问题。

下游侧边坡，未发现断层穿过该边坡，不具备组合形成定位、半定位块体的边界条件。最可能出现随机块体模式为以优势裂隙（产状 $260^{\circ}\sim 280^{\circ}\angle 50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ）为底滑面，层面为侧滑面，马道作为顶面组合形成的双滑面型随机块体（图12）。

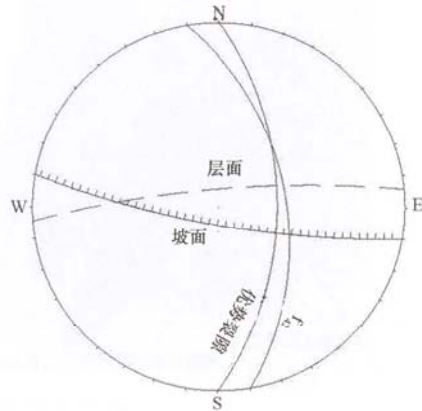


图10 洞脸边坡赤平投影图

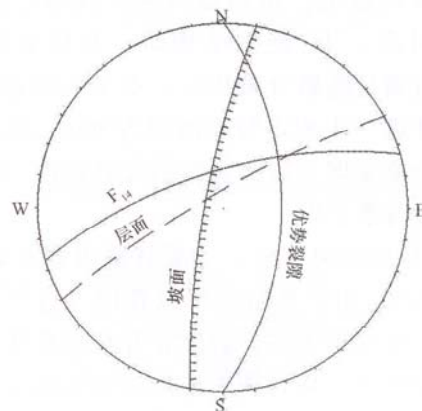


图11 上游侧边坡赤平投影图

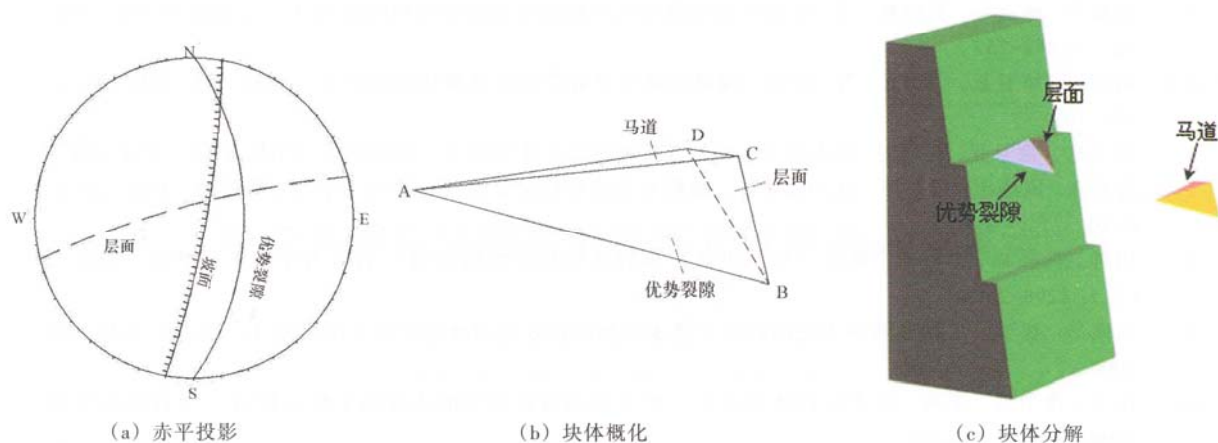


图 12 下游侧边坡块体特征

5.2 块体规模与埋深分析 对坝址区右岸坡面裂隙长度统计分析发现,裂隙长度分布区间大体可分为 3 个,主要为 30~60m、10~30m、5~10m,所占比例分别为 5.4%、23.7%、70.9%,以 5~30m 裂隙为主,累计占 94.6%。因此,块体边界面延伸长度中,出于工程安全考虑,优势裂隙长度按 30m 计,马道宽 3m,以空间几何方法可计算出下游侧边坡可能出现的块体的规模约 56m^3 ,埋深 3m。

5.3 块体稳定性宏观地质分析 下游侧边坡可能形成的块体滑面为优势裂隙,倾向 $260^\circ\sim 280^\circ$,与坡面一致,倾角较陡, $50^\circ\sim 60^\circ$,裂面平直粗糙,多闭合或微张,一般充填方解石、泥钙质等,少量溶蚀充填碎屑夹泥,按表 5 稳定性评价标准,稳定性评价为较差。

5.4 块体稳定性计算 除对块体的稳定性进行了地质宏观判断外,本文还采用三维刚体极限平衡方法对块体稳定性进行了定量计算。层面和优势裂隙延性一般较好,结构面抗剪强度参数按表 4 取值,下游侧边坡岩体为 Pt_2^{1-3} 厚层灰岩,计算取容重为 26.9kN/m^3 。利用三维极限平衡法计算下游侧边坡可能形成的块体稳定性系数为 1.10。

6 结语

(1)乌东德水电站右岸引水洞进口边坡岩质坚硬、边坡结构有利、卸荷不发育、岩体质量优良;数值模拟结果显示边坡开挖过程中坡体变形场稳定,稳定系数为 1.5。宏观地质评价及数值模拟皆表明边坡整体稳定性较好。(2)通过分析,确定了各坡段开挖后可能出现局部稳定问题,分析了可能出现块体的模式、方量、埋深等特征,以工程地质分析和三维刚体极限平衡法对块体稳定性进行了分析,分析结果表明,人工边坡开挖后,最可能出现的随机块体方量最大约 56m^3 ,最大水平埋深约 3m,稳定性较差,稳定性系数为 1.10。(3)基于稳定性分析的结论,建议在设计中采用系统喷锚加固,辅以截、排水的综合处理方案,施工过程中可能出现的块体需以全面、系统的施工地质工作为基础进一步明确其具体位置及稳定性,并及时锚固或清除。施工程序上,单级边坡开挖完成后应及时支护,支护完成后方可开挖下一级边坡。

参 考 文 献:

- [1] 冯文凯,石豫川,刘汉超.西南某水电站闸址区高边坡特征及其工程效应研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(8):1388-1393.
- [2] 祁生文,伍法权,兰恒星.锦屏一级水电站普斯罗沟左岸深部裂缝成因的工程地质分析[J].岩土工程学报,2002,24(5):596-598.
- [3] 石安池,赵明华,薛果夫.三峡工程永久船闸高边坡岩体变形特征与机制分析[J].岩石力学与工程学报,2001,20(5):638-642.

- [4] 徐佩华, 陈剑平, 黄润秋, 等. 锦屏水电站解放沟反倾高边坡变形机制的探讨[J]. 工程地质学报, 2004, 12(3): 247-252.
- [5] 刘造保, 徐卫亚, 金海元, 等. 锦屏一级水电站左岸岩质边坡预警判据初探[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 101-107.
- [6] 谈小龙, 徐卫亚, 刘大文. 高边坡变形的组合预测模型及其应用[J]. 水利学报, 2010, 41(3): 294-299.
- [7] 寇晓东, 周维垣, 杨若琼. FLAC^{3D}进行三峡船闸高边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 6-10.
- [8] 周钟, 巩满福, 雷承第. 锦屏一级水电站左坝肩边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2298-2304.
- [9] 徐佩华. 基于人工神经网络方法的锦屏一级水电站枢纽区高边坡稳定性分区研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2006.
- [10] 徐飞, 徐卫亚, 王珂. 基于蚁群优化最小二乘支持向量机模型的边坡稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 253-257.
- [11] 张进林. 大渡河长河坝水电站坝肩边坡稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- [12] 刘先行, 廖柏华, 张小妹, 等. 彭水水电站船闸高边坡开挖过程的有限元仿真分析[J]. 水力发电, 2005, 31(7): 55-58.
- [13] 杜丽惠, 张小妹, 廖柏华, 等. 水布垭地下厂房开挖施工过程的数值仿真分析[J]. 水力发电, 2004, 30(2): 26-29.
- [14] 水利电力部水利水电规划设计院. 水利水电工程地质手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [15] Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems[C]//Nancy. Proceeding Symposium International Society Rock Mechanics. Rotterdam: A. A. Balkema, 1971: 8-11.
- [16] 王泳嘉, 刑纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1992.
- [17] Strack O D L, Cundall P A. The distinct element method as a tool for research in granular media, Part I [R]. Minnesota: University of Minnesota, 1978.
- [18] Cundall P A, Strack O D L. The distinct element method as a tool for research in granular media, Part II [R]. Minnesota: University of Minnesota, 1979.
- [19] 王涛, 盛谦, 陈晓玲. 基于直接法节理网络模拟的三维离散单元法计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(10): 1649-1653.

Research on stability of slope at right inlet diversion tunnel of Wudongde Hydropower Station

WANG Ji-liang^{1, 2}, LI Hui-zhong^{1, 3}, YANG Jing¹, LI Lin⁴

(1. Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Wuhan 430010, China;

2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

3. China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on detailed study on engineering geological conditions, a combined research method of engineering geological analysis evaluation method, limit equilibrium method and numerical calculation method on global is applied to analyse the local stability of the slope at right inlet diversion tunnel of Wudongde Hydropower Station. The results show that global stability is well, 3D distinct element simulation results show that, artificial slope deformation dominated by a small amount of rebound deformation and deformation characteristics without highlighting. Based on the boundary condition analysis of block may be formed after excavation, block instability mode was proposed. Starting with block stability influencing factors, block stability engineering geological evaluation standards has been established. Block stability was evaluated by these standard, 3D rigid limit equilibrium method was used to analyze the stability of the potential failure block in inlet slope, results show that most block was basically stable. Based on global and local stability research result, reinforcement measures were put forward for the slope.

Key words: high rock slope; engineering geology evaluation; 3D distinct element method; instability mode analysis; 3D limit equilibrium analysis method

(责任编辑: 李 琳)