

鲁布革水电站溢洪道边坡稳定问题

钟克勤

(水利电力部昆明勘测设计院)

鲁布革水电站为混合式开发的水电站,采用风化料心墙堆石坝。最大坝高101.5m;发电引水隧洞内径8m,长9382m;地下厂房总装机容量60万kW;溢洪道布置在左岸坝肩,净宽30m,全长约510m,最大泄洪量4740~6459m³/s,占首部枢纽总泄洪量的55~62%。该电站是我国第一个引用外资、正在兴建的大型水电站之一。

傍山开挖的溢洪道是首部枢纽的主要泄洪建筑物,对保坝有十分重要的意义。其边坡若按1:0.5的坡度设计,最大开挖高度154m,高逾百米的边坡段长200m,开挖总量114万m³;若选用1:0.3的坡度,最大开挖高度105m,高度百米左右的边坡段长约150m,开挖总量88万m³;即使采用垂直边坡开挖,最大开挖高度仍达78m,高70m左右的边坡段长120m许,开挖总量约59万m³。所以,溢洪道人工开挖的高陡边坡的稳定是首部枢纽突出的工程地质问题。

一、溢洪道边坡的工程地质研究

(一) 地形地质概况

溢洪道布置地段地形完整,山坡陡峻,自然地形坡度36°~47°,基岩裸露,60°~73°的陡崖沿线顺河展布;自然山坡基本稳定。岩层为三迭系中统下部关岭阶的厚层块状白云岩、石灰岩,呈单斜状,产状为:N20°~47°W, SW∠30°~44°;其走向与溢洪道边坡的夹角为50°~70°,层面向边坡下游倾斜,并偏向坡外。边坡地段内的主要断层与节理均属陡倾角,展布方向有:①北东~北东东向;②北西西~近东西向;③北西向;④北北东~近南北向(见表1)。其中,仅斜穿溢洪道引渠的F₃、F₂₁断层规模较大;所有断层的角砾岩胶结均较好。

溢洪道边坡岩体岩溶作用不强烈,有溶沟、溶槽、溶蚀裂隙等;地下水水位低于溢洪道的建基高程(1107m)约30~60m,仅雨季时沿F₃断层带与层面夹泥裂隙等有暂时性脉状地下水渗流。

(二) 边坡岩体结构特征

溢洪道边坡岩体结构特征的研究,首先从全面调查岩体中不同成因类型的结构面的规律、性态、展布情况及主要结构面的力学特性入手,按其规模及对边坡稳定的影响程度进行分级(表2),基本上查明了边坡地段Ⅲ级以上各类结构面的展布与组合规律。同时,根据中三迭统关岭阶下部的边坡岩体—白云岩、石灰岩的构造破碎程度、风化

状态、结构面与结构体发育特征、地下水活动规律等，划分为块状、层状、碎裂状、镶嵌状与碎块状等五种结构岩体（表3）。溢洪道最高边坡段就布置在块状结构的岩体中。

表1 溢洪道地段主要结构面特征

结 构 面		结 构 面 主 要 特 征	出 露 位 置
编号	产 状		
1	N30°W, SW, $\angle 35^\circ$	顺层错动面，较平整，粘土充填，厚0.01~0.05m，延伸长350m以上	溢洪道缓坡段的边坡与基础
2	N30°W, SW, $\angle 32^\circ$	顺层错动面，较平整，溶蚀空隙宽0.01~0.05m，充填粘土等，雨季时有地下水渗流，延伸长200m以上	溢洪道缓坡段的边坡与基础
4	N30°W, SW, $\angle 29^\circ$	顺层错动面，较平整，充填粘土，厚0.06~0.2m，延伸长150m以上	溢洪道引渠段边坡与堰基
F ₃	N60°~70°E, NW, $\angle 70^\circ\sim 85^\circ$	断层角砾岩、糜棱岩，厚2~4m，最厚超过15m，断面平整光滑，多镜面，有透镜状挤压岩块，属压扭性，沿断层带有溶蚀裂隙，雨季有地下水渗流	斜跨溢洪道引渠的基础与边坡
F ₇₁	N75°~85°W, NE, $\angle 83^\circ\sim 86^\circ$	断层角砾岩，胶结良好，充填方解石，宽0.5~1m，属张扭性，雨季时有地下水渗流	横跨溢洪道缓坡段的边坡与基础
F ₇₂	N84°E, NW, $\angle 65^\circ\sim 67^\circ$	顺断层有角砾岩和方解石分布，断面波折，宽0.05~0.1m	横跨引渠段边坡与基础
F ₇₃	N70°~80°E, SE, $\angle 76^\circ\sim 80^\circ$	断层角砾岩、糜棱岩宽0.4m，压扭性	斜跨缓坡段基础与边坡
F ₇₆	N25°W, NE, $\angle 82^\circ$	断层角砾岩，胶结良好，宽0.05~0.25m	陡槽段内侧边坡
101	N25°E, SE, $\angle 70^\circ$	溶蚀裂隙，宽0.1~0.2m，有粘土充填	缓坡段内边坡上部

表2 结构面分级表

等级	规 模	对边坡稳定性的影响程度	成因类型及例证
I	长500m以上，破碎带宽度1m以上	影响边坡的整体稳定性，危及工程方案的成立	构造和沉积两种结构面，如F ₃ 断层
II	长100~500m，破碎带宽0.1~1m	影响一定范围的边坡稳定性	构造、沉积、次生三种结构面，如2、4、1、101、108号裂隙，F ₇₁ 、F ₇₂ 、F ₇₃ 断层
III	长数十m		
IV	长数m	破坏了岩体的完整性，降低了岩体强度，有时也形成小的不稳定岩块	构造、沉积，次生三种结构面
V	长不超过1m		

(三) 边坡稳定性分析

溢洪道边坡的可能破坏情况大体可确定为三种基本模式，即块体滑移，单滑面滑移与小型岩块滑坍。单滑面滑移主要由F₃断层派生的一组倾角50°~60°的顺坡结构面控制，分布在F₃断层南东盘近旁。经勘探与边坡开挖揭露，该组裂隙数量少，延伸不长，对边坡稳定的影响是局部的。小型岩块滑坍以剪切破坏形式随机出现，可在开挖中随机处理。块体滑移分布在整个溢洪道地段，规模较大，是边坡稳定的主要威胁，一般以层面、特别是层面夹泥裂隙为主要滑移面，北东东~北西西向结构面构成其下游切割面（当其向

表 3 渣洪道边城岩体结构类型及主要特征

结构类型与编号	地质特征	结构面特征	岩体结构	边坡稳定性	分布的工程部位
I 块状	白云岩, 岩性均一, 构造简单, 节理裂隙不发育, 岩体完整, 地下水活动微弱	以IV、V级为主的硬性结构面, 少量属II、III级, 夹块状、棱形状、锥形四面体	结构面不发育, 结构体呈块状、棱形状、锥形四面体	无块体地带边坡稳定条件良好	缓坡段至陡槽上段的基础与边坡
I 层状	石灰岩, 中厚层~厚层, 构造较简单, 岩体较完整, 节理裂隙均较短小, 雨季有渗流	以IV、V级为主的硬性结构面, 夹少量小断层	岩体呈块裂~碎裂介质, 结构体呈块状、板状、片状	无块体部位, 稳定性较好	陡槽下段的基础与边坡
II 碎裂状	白云岩, 完整性较差, 节理裂隙较发育, 钙质充填, 有夹泥, 雨季裂隙水活动较频繁	以III、IV级硬性结构面为主, 小断层较发育	岩体呈碎裂介质, 结构体呈块状、棱形、锥形等	结构面倾度较高, 边坡整体稳定性低于I、II类岩体	F ₃ 北西盘引渠段的基础与边坡顶部卸荷裂隙带发育部分
IV 镶嵌状	F ₃ 断层带与影响带, 角砾岩胶结良好; 影响带裂隙较发育, 雨季有渗流	以I、II、III、IV级硬性结构面为主, 多为钙质充填	裂隙发育, 完整性差, 结构体呈碎块状、锥形等	结构面倾度较高, 边坡整体稳定性低于I、II类岩体	斜跨引渠段的边坡与基础
V 碎块状	白云岩, 风化强烈, 完整性差, 局部呈砂状, 地下水活动频繁	以软性结构面为主, 有泥质或风化砂充填	裂隙发育, 结构松散	边坡稳定性差	F ₃ 北西盘引渠段浅部的边坡与基础

表4 溢洪道边坡块体边界条件汇总

块体 编号	结 构 面		结合交线产状	结构面 级别	结 构 面 特 征	可能滑移方向	所处的工程部位
	编 号	产 状					
8	13	N55°W, SW, <25°	S78°W <19°	IV	层面裂隙, 顺面有0.02~0.03m厚的风化砂充填	S78°W	F ₃ 断层北西盘 引渠段边坡
	F ₃	N72°E, NW, <75°	S78°W <19°	I	F ₃ 断层, 特征见表1		
	洞56-f6	SN, E, <68°		II	断层角砾岩, 胶结较松散, 宽0.1~0.5m		
4	4	N30°SW, W, <29°	N84°W <24°	I	顺层错动面, 特征见表1	N84°W	F ₃ 断层南东盘 引渠段边坡上部
	F ₇₂	N84°E, NW, <65°	N84°W <24°	I	F ₇₂ 断层, 特征见表1		
	108	SN, E, <75°		IV	裂隙, 较平整, 粘土充填, 宽0.02m		
5	2	N30°W, SW, <32°	N84°W <27°	I	顺层错动面, 特征见表1	N84°W	缓坡段边坡上部
	F ₇₁	N88°W, NE, <82°	N84°W <27°	I	F ₇₁ 断层, 特征见表1		
	101	N25°E, SE, <70°		II	溶蚀裂隙, 宽0.1~0.2m, 粘土充填		
9	11	N37°W, SW, <31°	W <24°	II	层间错动面	W	缓坡段下部边坡
	F ₇₁	N85°E, NW, <80°	W <24°	I	F ₇₁ 断层		
10	9	N30°W, SW, <33°		II	层面夹泥裂隙		溢洪道转弯段上 部边坡
	109	N70°E, NW, <76°		II	溶蚀裂隙, 有粘土充填		
		N15°E, SE, <80°		IV	延伸较长的节理		
11	1	N30°W, SW, <35°	S83°W <33°	I	顺层错动面, 特征见表1	S83°W	陡槽段下部边坡
	110	N75°E, NW, <78°	S83°W <33°	II	溶蚀夹泥裂隙		
	F ₃₂	N23°E, SE, <60°		II	F ₃₂ 断层, 溶蚀张开, 充填碎石、岩屑及泥质		
	8	N32°W, SW, <34°	N52°W <13°	I	顺层错动面	N52°W	陡槽段上部边坡
	112	N55°W, NE, <78°	N52°W <13°	IV	节理面, 延伸较长		
	F ₇₆	N25°W, NE, <82°		II	F ₇₆ 断层, 特征见表1		

表5 溢洪道边坡开挖前后块体稳定概算表

块体编号	块体体积 (万 m ³)		容重 (t/m ³)	总正应力 N (万 t)		下滑力 P (万 t)		结构面正压力 (万 t)		结构面面积 (m ²)		凝聚力 (t/m ²)	摩擦系数	稳定系数 K	
	开挖前	开挖后		开挖前	开挖后	开挖前	开挖后	开挖前	开挖后	开挖前	开挖后			开挖前	开挖后
4	3.8	1.17	2.78	9.95	2.86	4.30	1.32	9.06	N ₁ 2.7 N ₂	1415	S ₁ 760 S ₂	1.0	0.3	1.22	1.25
								3.01	0.92			1938	716	3.0	0.6
5	14.43	2.73	2.78	35.75	6.77	18.22	3.45	36.32	N ₁ 6.88 N ₂	7584	S ₁ 2321 S ₂	1.0	0.3	1.05	1.15
								13.15	2.49			4235	2094	2.0	0.5
8	0.54	2.78	2.78		1.43		0.49		N ₁ 1.38 N ₂ 0.56		S ₁ 272 S ₂ 377		0.4		1.72
9	1.43	2.78	2.78		3.64		1.62		N ₁ 3.64 N ₂ 1.27		S ₁ 1027 S ₂ 813	1.0	0.3		1.24
11	1.25	2.78	2.78		2.90		1.89		N ₁ 2.79 N ₂ 0.76		S ₁ 864 S ₂ 822	1.0	0.3		<1
12	2.3	0.85	2.78	6.22	2.31	1.44	0.53	6.35	N ₁ 2.36 N ₂	1022	S ₁ 379 S ₂	1.0	0.3	3.16	3.31
								3.48	1.30			2688	1190	3.0	0.5

北倾斜时，也是滑移面之一），近南北向~北北东向结构面为块体的后缘分离面。

溢洪道边坡地段按不同结构面的组合，共有七个较大的可能滑移块体（见表4）。其中有的在自然条件下已经完全分离，例如4、5号块体；有的随溢洪道开挖而完成分离，如8、9、10、11、12号块体；或者分布在溢洪道左侧边坡上，如8、4、10、12号块体；或者位于溢洪道基础下与右侧边坡上，如9、11号块体；5号块体则被溢洪道从中截断，大部分留在左侧边坡上，小部份残留在基础下及右侧边坡上（见图1）。各块体的稳定安全度估算见表5。

二、边坡的开挖坡度

开挖坡度的选取不但直接影响边坡的稳定性，而且是一个极为敏感的技术经济问题。鲁布革水电站溢洪道边坡开挖坡度的确定，主要考虑了以下因素。

（一）岩体结构与开挖坡度的关系

按不同的结构类型，地质方面建议的边坡开挖坡度分别为：

块状与层状结构岩体：1:0.3~1:0.5；

碎裂状与镶嵌状结构岩体：1:0.5~1:0.6；

碎块状结构岩体：不陡于1:0.7。

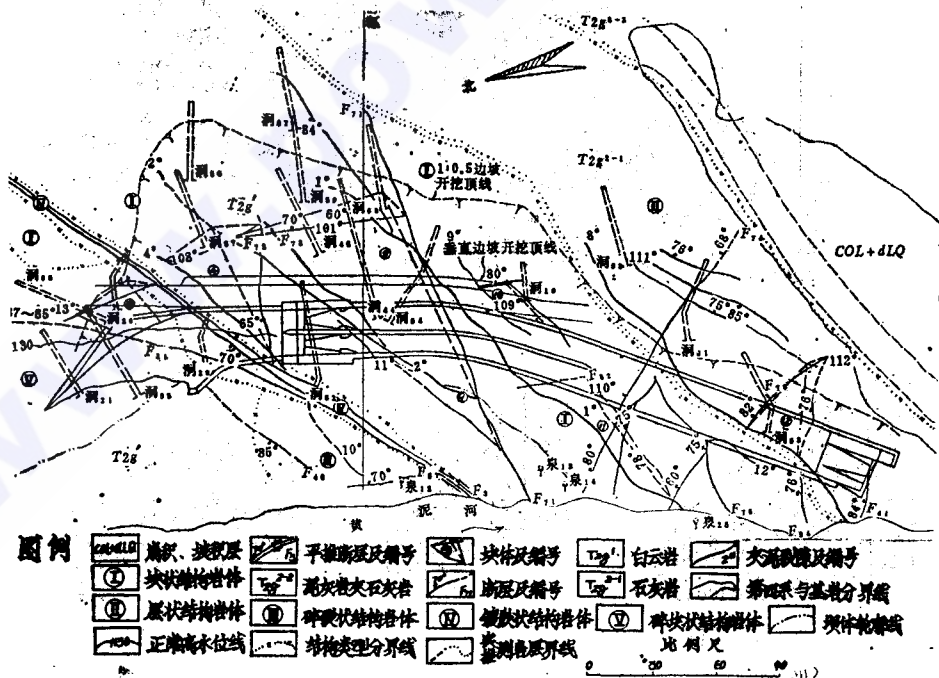


图1 首部枢纽溢洪道工程地质图

就块状结构岩体而言，类比工程区自然地形特点，还可以更陡一些；对碎裂状，镶嵌状与碎块状岩体而言，与非碳酸盐岩类岩体比较，可能显得陡了一些，这是考虑到碳酸

盐岩类的特点提出的。碳酸盐各类岩体是可溶岩,它一方面被含CO₂的水溶解,形成溶蚀空隙,并往往因地下水的运动,在结构面中充填次生夹泥而恶化边坡岩体的稳定性;另一方面,又由于地下水运动时CO₂气的逸出,使已溶于水中的CaCO₃沉淀下来,对结构面形成自我胶结,从而提高了结构面的抗剪强度;同时,由于岩溶通道的存在,大大地改善了地下水的排泄条件,减缓了地下水对边坡稳定的不利影响,从而改善了边坡岩体的稳定条件。

溢洪道边坡的最高段布置在坚硬的厚层块状白云岩岩层中,岩体受构造影响轻微,完整性好,除边坡顶部因卸荷裂隙发育属碎裂状结构岩体外(这显然是不可避免的),其余均处于块状结构的岩体中(见图2)。这就为提高开挖边坡的坡度提供了可靠的地质基础。

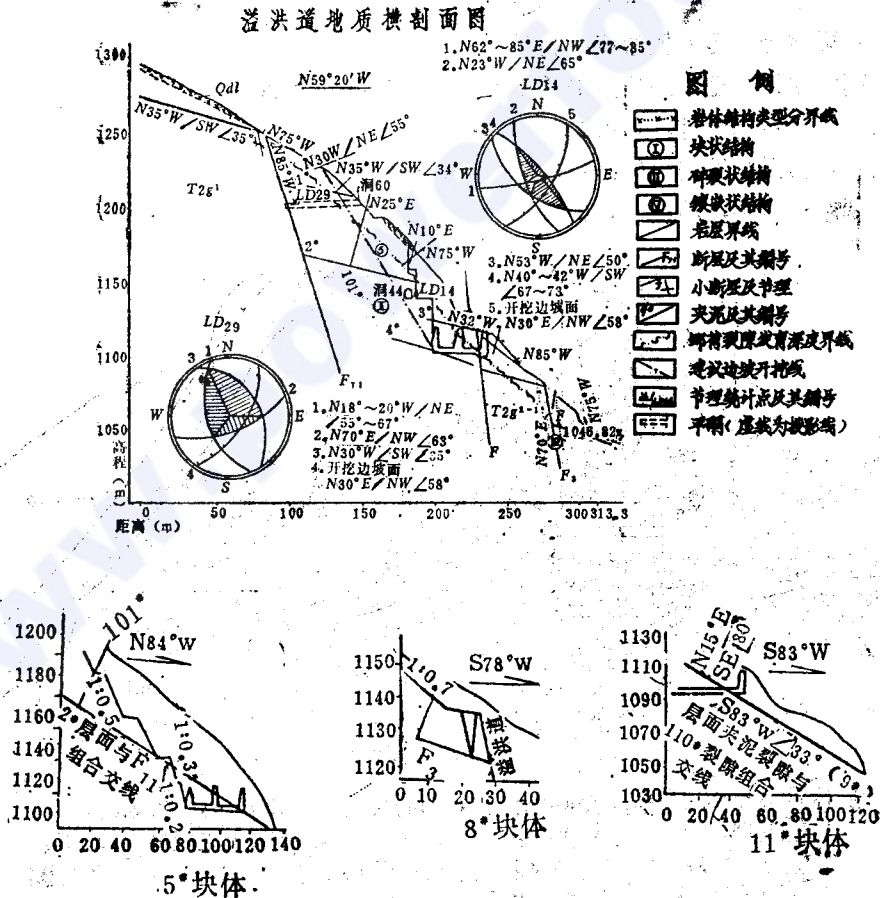


图2 溢洪道地质横剖面

(二) 开挖高度与开挖坡度的关系

边坡开挖坡度的设计历来有陡、缓之争。主要应根据边坡岩体的结构特征、水的作

用、地形条件、地震、开挖工艺等各因素来决定。

鲁布革的溢洪道边坡由于自然地形限制,山高谷深,山坡陡峻,若放缓边坡的开挖坡度,不仅将增大边坡的高度和开挖量,延误工期,增加投资,而且,随着开挖的增加势必严重加剧对山坡自然稳定状态的破坏。如果开挖坡度变陡,则开挖对稳定的自然边坡与开挖边坡的破坏就小些。其次,随着开挖坡度的增陡,边坡上可能滑移块体的剩余体积也会增加。因为块体的主要抗滑力是摩擦力。其结果是既加大了下滑力,也增加了摩擦力。对比计算表明,剩余体积的增加并不会导致块体稳定安全系数有明显的变化,而技术经济效益则十分显著。

因此,对坚硬的岩质边坡而言,开挖坡度在保证可能滑移块体稳定可靠的前提下,可以陡一些,甚至直坡。

(三) 施工技术与开挖坡度的关系

施工技术的好坏,实质上是人为因素对边坡岩体结构的破坏程度。现在,预裂爆破技术已臻成熟,喷锚支护技术也有长足的进展,加上先进的施工机械(如液压凿岩台车、履带式潜孔钻、轻型地质钻机等)的引进与使用,完全可以保证任何开挖坡度的实现。

鲁布革水电站溢洪道边坡的开挖坡度在充分研究了上述情况后,采用了水电部特别咨询团的建议,将原设计1:0.3改为直立边坡,并在1158m、1138m高度分设两台马道。实践证明,这一方案是可行的。

三、边坡处理

(一) 排水

主要工程有:

1. 地表排水沟 在溢洪道边坡顶部山坡上修建了一条排水能力为 $1\text{m}^3/\text{s}$ 的连续地表排水沟。

2. 排水洞 在1185m高程附近沿 108° 、 101° 裂隙修建一条排水洞,并从洞中向地表打排水孔幕,以截引后缘切割面的地下水。

3. 排水孔幕 在1122~1127m高程的公路交通洞内按 60° 孔斜向上打一排水孔幕,共45个孔,孔深40m,以引排边坡较高地段岩体内的地下水。

(二) 锚固

1. 抗滑键 在1158m高程,分别沿 4° 、 2° 层面夹泥裂隙布置了两个剪力键(沿层面夹泥裂隙开挖 $2 \times 2.8\text{m}$ 断面的平洞,回填钢筋混凝土),以提高其抗剪强度。共增加抗滑力12000t。

2. 长砂浆锚杆 在1168、1158、1148、1138m高程上,共设置长砂浆锚杆245根,总长4059m,单根长8~35m,由 $\varnothing 32$ 螺纹钢注浆形成,经现场拉拔试验,单根抗拉拔力达30t以上。锚杆尽量沿结构面张力方向布置,并按不同方向、不同角度以扩大锚固范围,分别锚固1、2、4、13号层面夹泥裂隙与 F_{71} 、 F_{72} 、 F_{73} 、109号裂隙。

3. 预应力锚索 在排水洞顺坡裂隙的部位,于1168m高程上设置了306型60t预应

力锚索4根, 每根长20m。

(三) 边坡的表面处理

1138m高度以上的溢洪道边坡表面全部布设了系统锚杆, 喷射了厚8~10cm的混凝土层。锚杆长3m, 间排距 2×2 m; 在局部裂隙发育部位, 风化强烈处与边坡顶部卸荷裂隙发育部位还增设了随机锚杆, 增挂了钢筋网。这种表部处理, 实质上将边坡表层岩体连成了一个整体, 较人工挡墙更为有效。

(四) 边坡监测

在边坡上部排水洞中及1158与1138m平台上, 分别安装了YDW-82型多点位移计、SY-C₂型收敛计与CF-5型测缝计, 监测1、2、4号层面及 $F_{7,2}$ 断层和101、108号裂隙等的变形与位移。经过近一年的观测, 未发现异常。

四、几点体会

总结鲁布革水电站溢洪道边坡地质勘探、设计与施工以来的工作, 有以下几点主要的体会。

(一) 边坡的岩体结构特征是边坡稳定的决定因素, 不同的边坡岩体结构具有不同的稳定特征。一般地说, 岩质边坡可分为均质边坡与非均质边坡。均质边坡又有坚硬岩均质边坡与软弱岩均质边坡之分, 非均质边坡也可分为软硬相间(互层)边坡与上硬下软、上软下硬边坡。这些不同类型的边坡岩体, 由于受构造变动、风化程度、地下水的影响的差异等多种因素的制约而具有不同的稳定条件。又由于边坡岩体中结构面产状与边坡面之间又有各种不同的组合关系, 等等。这些因素的综合, 形成了边坡岩体结构特征的千差万别, 从而决定了不同结构特征的边坡的稳定条件与变形破坏机制。研究边坡的岩体结构特征, 就为研究边坡的稳定条件, 确定其开挖坡度与工程处理方案提供了可靠的地质基础。

鲁布革水电站溢洪道边坡属坚硬均质的岩质边坡, 边坡稳定性研究采用岩体结构分析法, 从研究对稳定起控制作用的主要结构面的规模、性态、力学特性、分布与组合规律入手, 进而研究边坡岩体的结构特征, 研究不同结构类型的岩体稳定条件的差别; 并着重研究可能滑移块体的稳定性与必要的工程处理措施, 以达到边坡稳定的目的。

(二) 边坡的开挖坡度是由边坡的岩体结构特征、施工工艺等因素控制的。坚硬均质的块状结构的岩质边坡在对控制性结构面及它们组合形成的可能滑移的块体进行锚固以确保其稳定的情况下, 可以采取陡坡开挖, 直至采取垂直边坡。鲁布革工程实践证明了一点。

(三) 先进的施工工艺—预裂光面爆破技术、喷锚技术、从上而下谨慎地分层开挖、边挖边锚等, 是高陡边坡实施的保证。

边坡稳定是水利水电工程中经常遇到的三大主要工程地质问题之一, 象溢洪道边坡这样关键的部位是不允许有重大失误的。国内高边坡实施垂直边坡的工程实例很少, 我们也是第一次遇到, 理论与经验都很缺乏。目前, 工程尚未完全竣工, 更没有经历足够的运行检验。因此, 本文只能是一些不成熟的简单叙述, 不妥之处, 恭请指正。