

文章编号: 0559-9342(2005)05-0030-03

# 糯扎渡水电站左岸厂房区地下洞室群围岩稳定性研究

王文远, 张四和

(中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

关键词: 地下洞室群; 围岩分类; 块体稳定分析; 三维有限元分析; 塑性破坏区; 糯扎渡水电站

摘要: 糯扎渡水电站的地下厂房位于左岸, 工程规模巨大, 地质条件复杂。通过对厂房区地下洞室群的工程地质条件进行分析, 以确定地下洞室群的围岩类别, 预测洞室开挖后的应力应变情况, 评价洞室群围岩稳定性, 从而为洞室群的位置选定及支护形式设计提供依据, 并为确定施工程序和施工方法提供参考。

## Study on the stability of surrounding rocks of the underground chamber group for the left-bank powerhouse of Nuozhadu Hydropower Station

Wang Wen-yuan, Zhang Si-he

(Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Kunming Yunnan 650051)

**Key Words:** underground chamber group; surrounding rock classification; block stability analysis; three-dimensional finite element analysis; plastic failure area; Nuozhadu Hydropower Station

**Abstract:** The underground powerhouse of Nuozhadu hydropower project is located in the left bank, with huge underground chambers and complex geological conditions. It is important to adequately analyze and evaluate the stability of surrounding rock of the underground chamber group, and to provide the basis for the selection of their locations and the design of support types, and make reference for the solution of construction procedures and methods. This paper tries to analyze the engineering geological conditions of the underground chamber group, determines the surrounding rock classifications, and forecasts the stress variation after excavation, and evaluates the stability of surrounding rock of the chamber group.

中图分类号: P642 Q74)

文献标识码: A

## 1 工程概况

糯扎渡水电站枢纽工程位于澜沧江上, 装机容量为 5 850 MW, 心墙堆石坝的最大坝高 261.5 m, 正常蓄水位 812 m, 总库容 237.03 亿  $m^3$ 。主要建筑物有心墙堆石坝、左岸溢洪道和左岸地下厂房等。地下厂房区位于左岸平台山体内, 主要包括主副厂房、主变开关室、尾水闸门室、尾水调压井等四大洞室, 自上游至下游依次平行排列 (见图 1)。以主、副厂房规模最大, 轴线方向  $N76^\circ E$ , 长 418 m, 最大开挖跨度 29 m, 最大高度 77.77 m, 顶拱高程 642 m。

## 2 地下厂房区基本地质条件

地下厂房区四洞室部位均为花岗岩。厂房区构造发育, III级以上断层有  $F_1$ 、 $F_3$ 、 $F_{21}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{23}$  等, 总体上分为两组: ①  $N10^\circ \sim 30^\circ E$ ,  $NW \angle 60^\circ \sim 80^\circ$ ; ②  $N10^\circ \sim 40^\circ W$ ,  $SW \angle 50^\circ \sim 70^\circ$ 。第①组断层规模最大, 但数量较少, 以  $F_1$ 、 $F_3$  等 II 级断层为代表, 破碎带及影响带宽度大, 构造岩多为角砾岩、糜棱岩、断层泥等。第

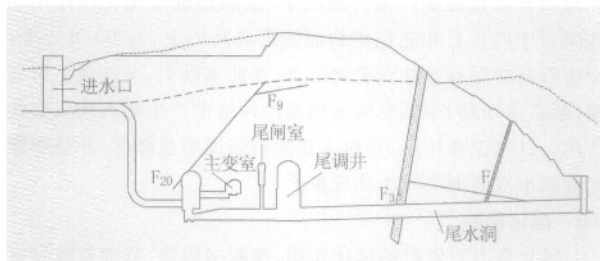


图 1 地下厂房区建筑物布置示意

②组断层较为发育, 以  $F_{21}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{23}$  等 III 级断层为代表, 断层规模比第①组小, 但数量较第①组多, 破碎带宽度 0.5~2.0 m, 主

收稿日期: 2005-04-12

作者简介: 王文远 (1962—), 男, 云南宾川人, 教授级高工, 昆明勘测设计研究院副总工程师, 主要从事水利水电工程地质专业工作; 张四和 (1962—), 男, 湖南岳阳人, 高级工程师, 主要从事水利水电工程地质专业工作。

要由角砾岩、糜棱岩和少量断层泥组成。属Ⅳ、Ⅴ级结构面的挤压面和节理发育的优势方向与断层相同。地下厂房洞室部位均为微风化~新鲜花岗岩体。地下厂房洞室均位于地下水以下,岩体透水率均小于 $1\text{Lu}$ ,属微透水岩体。

### 3 影响地下厂房区洞室群围岩稳定性的因素

#### 3.1 地形条件

厂房区的四大洞室垂直埋深为 $160\sim 230\text{m}$ ,水平埋深大于 $230\text{m}$ ,垂直方向上洞室埋深适中,上覆岩体厚度足以保持洞室顶拱围岩的稳定,且不至于因过大的自重应力而使围岩产生塑性变形或岩爆。

#### 3.2 地层岩性

该电站地下厂房洞室群位于微风化~新鲜花岗岩体内,岩石强度高,岩体完整,围岩稳定性较好。

#### 3.3 结构面

结构面对地下洞室围岩稳定性的影响,主要取决于结构面对围岩完整性的破坏程度、结构面的不利组合情况及结构面的走向与洞室轴线夹角的大小。

① 结构面对岩体完整性的影响。枢纽区的Ⅱ级结构面破碎带宽度大于 $5\text{m}$ ,影响带宽度可达数十米,其破碎带多为散体结构岩体,影响带多为碎裂结构岩体,岩体稳定性很差,因此地下厂房洞室群应尽量避免Ⅱ级结构面。根据枢纽区的地质条件,目前设计的地下洞室群已避开了 $F_1$ 、 $F_3$ 和 $F_{35}$ 等Ⅱ级结构面。Ⅲ级结构面对围岩完整性的影响仅限于断层两侧数米范围,影响程度有限。Ⅳ、Ⅴ级结构面则主要由于其发育的频度不同而影响围岩的岩体结构类型。

② 结构面的组合关系。对于厂房区地下洞室群,Ⅲ、Ⅳ级结构面组成的特定不利块体一般规模较大,但由于其发育间距较大,这种块体的数量较少。Ⅴ级结构面则形成随机分布的不确定块体,对洞室围岩稳定性的影响是局部性的。

③ 结构面方向与洞轴线方向的关系。Ⅲ、Ⅳ级结构面的分布方向对洞室围岩稳定性影响较大,因此水工建筑物设计时应尽量使洞室轴线与Ⅲ、Ⅳ级结构面走向有较大夹角。目前

选定的主要洞室轴线方向与厂区Ⅲ、Ⅳ级结构面的主要发育方向(NNW向)近于垂直,与次要发育方向(NNE)的夹角大于 $45^\circ$ ,总体上对洞室围岩稳定较有利。

#### 3.4 风化及卸荷

厂房区的地下洞室群均位于微风化至新鲜花岗岩体内,风化作用对洞室围岩稳定性的影响较小。强卸荷深度一般不超过 $40\text{m}$ ,厂区地下洞室群的垂直埋深和水平埋深均大于 $160\text{m}$ ,已避开岸坡卸荷带,对围岩稳定性的影响极小。

#### 3.5 地下水

地下水对围岩稳定性的影响与围岩特性有关,一般坚硬完整的岩石受地下水的影响较小,而软弱破碎的岩体受地下水的影响较强烈。厂房区地下洞室群围岩多新鲜完整,地下水的水头高度小于 $130\text{m}$ ,地下水对围岩稳定性影响是局部性的,主要是对Ⅲ级结构面的软化、泥化、冲刷、淘蚀作用及对Ⅳ级结构面和Ⅳ、Ⅴ类围岩的软化、泥化作用。

#### 3.6 地应力

厂房区地下洞室群实测地应力场量为 $6.55\sim 8.28\text{MPa}$ ,属中等偏低应力场,对地下洞室围岩稳定有利。厂区实测最大主应力方向为NE向,与厂房轴线夹角为 $20^\circ\sim 40^\circ$ ,根据三维有限元回归分析,最大主应力方向与厂房轴线夹角小于 $20^\circ$ ,所以厂区地应力分布对围岩稳定有利。

## 4 地下洞室围岩分类

### 4.1 围岩分类标准

目前国际国内的围岩分类方法较多,本工程以《水利水电工程地质勘察规范》规定的围岩分类法为主,并用Q系统围岩分类法和RMR分类方法进行对照。根据《水利水电工程地质勘察规范》规定的围岩分类方法,为本工程制定的分类标准详见表1,并根据试验成果,结合宏观经验判断和工程类比,给出了各类岩体的物理力学参数建议值。

### 4.2 地下厂房洞室群围岩类别

对整个厂房来说,其岩性、岩体风化程度和地下水情况无太大差异,影响厂房边墙及顶拱不同部位围岩稳定性的主要

表1 坝址区地下洞室围岩分类

围岩类别	岩体特征	围岩总分	Q系统	RMR	岩体抗剪断强度		变形模量 $E_0/\text{GPa}$	$K_0/(\text{MPa/m})$	围岩稳定性
					$f'$	$C'/\text{MPa}$			
I	微风化~新鲜花岗岩,岩石抗压强度 $>100\text{MPa}$ 。1组节理或1组加紊乱节理,间距 $>1\text{m}$ 。地下水活动性弱。整体结构。RQD $\geq 91$	$>85$	$>40$	$>80$	1.4~1.6	2	$>25$	10 000~15 000	稳定
II	微风化~新鲜花岗岩,岩石抗压强度 $>80\text{MPa}$ 。2组节理,间距 $0.5\sim 1\text{m}$ 。地下水活动性弱。块状结构。RQD为81~90	65~85	10~40	80~61	1.25~1.4	1.5~2.0	15~25	6 000~10 000	基本稳定
III	弱风化下部、弱风化上部及少量微风化~新鲜花岗岩,岩石抗压强度 $45\sim 80\text{MPa}$ 。2组加紊乱节理或3组节理,间距 $0.3\sim 0.5\text{m}$ 。地下水活动性较强。次块状结构或镶嵌碎裂结构。RQD为51~80	45~65	1~10	60~41	1.0~1.20	0.8~1.1	4~12	2 000~6 000	局部稳定性差
IV	强风化及部分弱风化上部花岗岩、构造影响带,岩石抗压强度 $15\sim 45\text{MPa}$ 。3组节理,间距 $0.1\sim 0.3\text{m}$ 。地下水活动性强。碎裂结构、部分镶嵌碎裂结构。RQD为26~50	25~45	0.1~1	40~21	0.7~1.0	0.1~0.4	2~4	500~2 000	不稳定
V	构造破碎带、全风化或部分强风化花岗岩,岩石抗压强度 $<15\text{MPa}$ 。节理密集发育或碎块状、土状。地下水活动性强。散体结构,部分碎裂结构。RQD $\leq 25$	$<25$	$<0.1$	$<21$	0.3~0.6	0.05~0.1	0.1~0.4	$<500$	极不稳定

因素是各级结构面的发育情况及规模和性状。一般情况下,地下厂房部位分布的Ⅲ级结构面的破碎带及其影响带多为Ⅳ类或Ⅴ类围岩,稳定性差;Ⅲ级结构面之间的岩体一般为Ⅱ类或Ⅲ类围岩,其中Ⅳ、Ⅴ级结构面较发育的部位划为Ⅲ类围岩,Ⅳ级结构面不发育、Ⅴ级结构面较发育的划为Ⅱ类围岩,Ⅱ、Ⅲ类围岩的稳定性较好。据初步预测,厂房区各类围岩所占比例为:Ⅱ类约占37%,Ⅲ类约占47%,Ⅳ类约占9%,Ⅴ类约占7%。

## 5 地下厂房洞室群围岩稳定性评价

### 5.1 地下洞室群围岩稳定性三维有限元分析

根据地下厂房区围岩分级、岩性差异及构造情况建立地质模型,进行三维弹塑性有限元( $3D-\sigma$ )计算。弹塑性计算采用Drucker-Prager屈服准则。

#### 5.1.1 左岸地下厂房区初始应力场特征

根据计算模型和边界条件,对地下厂房区的初始地应力场进行三维拟合反演分析,结果表明:

(1)地下厂房区三向应力状态总体表现为中间主应力近于垂直,最大和最小主应力近于水平。

(2)厂房部位最大主应力 $\sigma_1$ 的方向与厂房轴线方向夹角小于 $20^\circ$ ,且地应力值不大。

(3)在地下洞室群所在的范围内(高程550~650m),原始地应力的变化范围约为:水平平行厂房轴线方向主应力 $\sigma_1$ 为6.4~8.8 MPa;水平垂直厂房轴线方向主应力 $\sigma_3$ 为2.4~3.6 MPa;垂直应力 $\sigma_2$ 为4~7 MPa。

(4)厂房区初始应力场剪应力的量级较低,主厂房部位剪应力值小于1 MPa。

#### 5.1.2 地下洞室群全断面开挖后围岩应力场特征

通过逐级模拟施工过程,获得最终洞室施工完成后的应力场计算成果。

(1)洞室开挖后,围岩主应力方向发生了明显偏转,总体上,最大主应力 $\sigma_1$ 表现为与洞室周边相切(顶拱部位)或平行(边墙部位),应力方向在洞室的各个角点偏转最为明显。洞室开挖后,围岩二次应力场形成的主要范围距边墙60~90m。

(2)最大主应力 $\sigma_1$ 的变化范围为18.7~21.2 MPa,集中区域在洞室的左右两个拱角及左右两个下角点。其中主厂房左右两个拱角压应力最大值分别达12.82 MPa和13.13 MPa,左右两个下角点压应力最大值分别达14.82 MPa和15.97 MPa,顶拱中点压应力最大值为12.02 MPa。各洞室两侧边墙最大主应力相对较低,没有出现拉应力。

(3)中间主应力 $\sigma_2$ 在围岩应力场中的变化范围为11.79~1.03 MPa,重分布规律与最大主应力 $\sigma_1$ 很相似,没有出现拉应力。

(4)最小主应力 $\sigma_3$ 的变化范围为6.69~-3.26 MPa,重分布规律与 $\sigma_1$ 类似。各洞室两侧边墙最小主应力相对降低,局部出现拉应力。对洞室围岩稳定性最为不利的是 $\sigma_3$ 在洞室底板中部产生拉应力的集中,主厂房、主变开关室、尾水调压室的底板中部的拉应力集中分别达-0.77、-2.76 MPa和-1.76 MPa。

(5)垂直厂房轴线剖面的剪应力 $\tau_{yz}$ 的分布规律为:洞室开挖后在各洞室的4个角点处产生明显的剪应力集中区,在

左下角点和右上拱角偏上部位是张剪,在右下角点和左上拱角偏上部位是压剪。其中主厂房剪应力集中区最大量值分别为:左上拱角偏上部位4.85 MPa,右上拱角偏上部位4.71 MPa,左下角点5.31 MPa,右下角点5.45 MPa。

#### 5.1.3 地下洞室群开挖后围岩变形特征

地下洞室开挖完成后,围岩向临空面方向发生回弹变形,变形量值不大,一般在数毫米至20 mm之间,总体上表现为顶拱下落和底板拱起的位移较大,边墙水平向内的位移较小。

主厂房上游边墙向洞内最大水平位移为12.2 mm,下游边墙向洞内最大水平位移为15.2 mm,均出现在 $F_{23}$ 断层带附近;主厂房顶拱向洞内最大垂直位移为15.9 mm,底板向洞内最大垂直位移为18.2 mm,均出现在 $F_{22}$ 断层带附近;平行厂房轴线方向上最大水平位移为16.8 mm,出现在右端墙附近。

主变开关室变形与主厂房相似,仅数值稍小而已。

#### 5.1.4 围岩塑性破坏区分析

对地下洞室开挖造成的围岩塑性破坏区分析表明,洞室开挖完成后围岩塑性破坏区分布有如下规律:

(1)围岩的塑性破坏区主要出现在洞室的上、下游边墙的断层 $F_{21}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{23}$ 分布部位。破坏形式以拉张破坏为主。

(2)塑性区范围的最大影响深度可达30~40 m(距边墙水平距离)。

(3)在边墙出现的拉张破坏区范围大于压应力集中区产生的剪切破坏区。破坏区的范围随开挖施工的进行呈现出动态的变化。

### 5.2 地下洞室块体稳定性分析

所谓结构面组合块体是指由临空面、滑动面和切割面围限而成的块体。根据切割块体的结构面规模和切割面的连通性,将块体定义为确定性块体、半确定性块体和随机块体。确定性块体是由Ⅳ级以上结构面与临空面完全包围的块体,这种块体的具体位置、规模等均具确定性;半确定性块体是指被Ⅳ级以上结构面切割,但未完全包围的块体,这种块体的位置可大致确定,但规模不能完全确定;随机块体是指结构面之间的组合可能产生的块体,这种块体仅为一种组合趋势,一般不能准确定位。

根据厂区结构面发育情况,不存在由Ⅲ级及Ⅲ级以上结构面构成的不利组合块体。根据PD204平洞揭露的Ⅳ级及Ⅳ级以上结构面,对其可能组合情况进行了分析。结构面组合块体以半确定性块体和随机块体占绝大部分,确定性块体极少。因此,总体上稳定性较好,对局部不稳定块体,需在系统锚杆的基础上进行随机支护。

## 6 结论

(1)通过对地下厂房区的大量勘探和试验研究工作,选定的厂房位置是工程区工程地质条件最好的位置。

(2)地下厂房区主要为微风化~新鲜花岗岩,岩性均一,对洞室围岩类别影响较大的因素主要为结构面的规模和性状。

(3)根据对地下厂房区应力应变分析,初始应力值较小。洞室开挖后,围岩主应力方向发生了明显偏转,主要洞室底板中部产生了拉应力。地下洞室开挖完成后,(下转第39页)

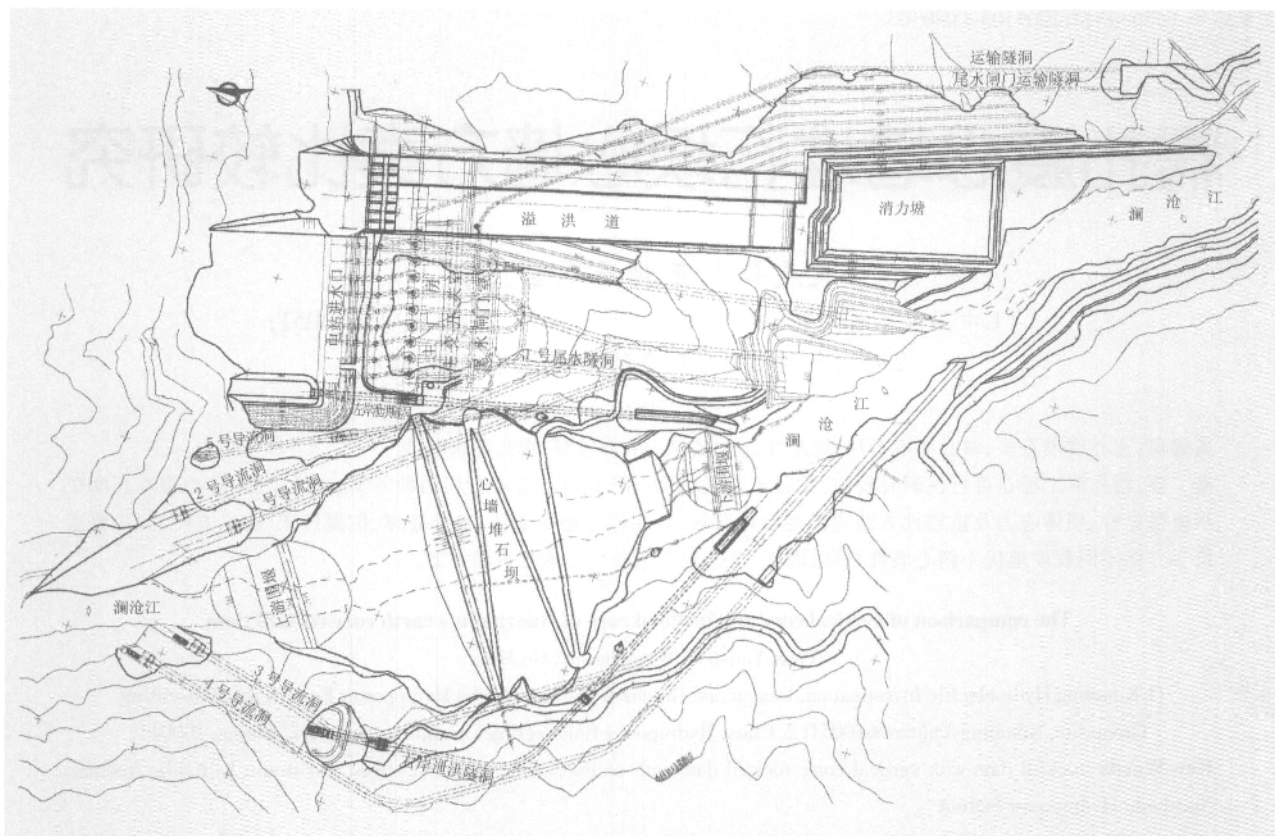


图1 心墙堆石坝枢纽平面布置示意

枢纽投资较低。

综上所述,从枢纽建筑物布置、泄洪消能安全性、大坝应力与稳定条件、地基及边坡处理措施的可靠性和工程量、投资等方面的综合比较,选择心墙堆石坝坝型以及左岸布置开敞式溢洪道与地下引水发电系统、岸边布置泄洪隧洞的枢纽布置格局是适宜的。

### 3.4 枢纽总布置

根据选定的枢纽布置格局,又进行了直、斜心墙堆石坝两种坝型比选,经过对堆石坝坝基工程地质条件、枢纽布置、基础处理、坝体计算分析、施工组织设计和投资估算等综合比较,最终选择直心墙堆石坝坝型。其枢纽布置格局由直心墙堆石坝,左岸开敞式溢洪道,左岸泄洪隧洞,右岸泄洪隧洞,左岸引水发电系统,地面副厂房及500 kV GIS开关站,左岸1、2、5号导流隧洞,右岸3、4号导流隧洞等建筑物组成。枢纽总布置详见图1。

## 4 结语

糯扎渡水电站是澜沧江中下游梯级中装机规模最大,水库调节性能好,经济指标优越的工程。在各设计阶段大量勘测设计和科研工作的基础上,结合工程的地形地质条件、建筑物特点和关键技术问题研究成果,经多方案研究比较,优选了心墙堆石坝枢纽布置格局,并对各枢纽建筑物的设计进行了综合研究和优化,提出了经济合理的枢纽布置和坝型选择方案。

由于工程规模巨大,地形地质条件相对复杂,工程的许多技术问题均超过目前已经颁布的规程规范的范围,特别是对于右岸构造软弱岩带的地质特性,高心墙堆石坝的坝料特性和抗震设计,高水头、大流量泄洪建筑物的消能与防冲设计,大型地下洞室的开挖及支护设计,枢纽区高边坡防护设计,高心墙堆石坝快速施工措施研究,以及高心墙堆石坝监测设计等关键技术难题,尚需借鉴国内外工程建设的经验进行深入研究,以保证工程建设和运行安全可靠。



(上接第32页) 围岩向临空面方向发生回弹变形,但变形量值不大。围岩的塑性破坏区范围一般较小,破坏形式以拉张破坏为主。

(4) 地下厂房顶拱及边墙的结构面组合块体虽有发育,但多为半确定性和随机性块体,稳定性较好。

### 参考文献:

- [1] 魏植生,张四和,等.糯扎渡水电站可行性研究报告[R].国家电力公司昆明勘测设计研究院,2003.
- [2] 魏植生,许模,等.云南省糯扎渡水电站左岸地下洞室及左岸系统工程地质研究[R].国家电力公司昆明勘测设计研究院,成都理工大学,2003.
- [3] 张四和,张进,等.糯扎渡水电站左岸溢洪道及地下厂房区工程地质专题报告[R].国家电力公司昆明勘测设计研究院,2003.