

# 大型地下洞室围岩完整性有效控制方法与应用效果

陈俊涛

(中国水利水电第五工程局有限公司,四川成都 610066)

**摘要:**对仙居抽水蓄能电站地下洞室开挖过程中围岩完整性有效控制方法进行了简述,通过对围岩松弛圈进行测试以及对围岩地震波检测数据进行分析以确定岩体的完整性,为开挖爆破参数的调整及支护形式的确定提供了评判依据,确保了开挖过程中的安全性。

**关键词:**地下洞室;围岩松弛圈;围岩地震波;控制方法;应用效果;仙居抽水蓄能电站

**中图分类号:**TV7;TV554;TV52;TV51;TV743

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2017)03-0032-05

## 1 概述

仙居抽水蓄能电站位于浙江省仙居县湫山乡境内,为日调节纯抽水蓄能电站,安装4台单机容量为375 MW的立轴单级混流可逆式水轮发电机组(国内单机最大),总装机容量为1500 MW,年平均发电量为25.125亿kW·h,年平均抽水电量为32.63亿kW·h。

该电站主要地下洞室为主副厂房洞、主变洞等,其中主副厂房洞总长为176 m,下部开挖宽度为25 m,上部开挖宽度为26.5 m,最大开挖高度为55 m。副厂房、主厂房、安装场从左到右呈“一”字型布置于主副厂房洞内,其中主厂房长113 m;安装场长44.5 m,开挖高度为25.7 m;副厂房长18.5 m,宽度上下相同,为25 m,最大开挖高度为51.5 m。主变洞工程位于主副厂房洞下游,两洞净距38.3 m;主变洞开挖尺寸为169.7 m×19.5 m×22.5 m(长×宽×高),与主副厂房通过交通电缆洞、主变运输洞及4条母线洞相连,与尾闸洞通过尾闸交通洞相连。

厂房顶拱出露岩性为角砾凝灰岩,岩体完整~较完整,部分受节理、岩脉切割的影响,完整性差~较破碎。断层有f(48)和F(49),其中,f(48)规模较小,F(49)虽有一定规模且性状较差,但其倾角较陡,与洞轴线交角达75°~85°,对洞室整体稳定不会有太大的影响,故厂房围岩稳定主要受结构面组合控制。f(48)和βμ-⑤交角大,与其它陡倾角节理形成的组合为倒四棱锥体,对顶拱围岩无大的不利影响,但两者交接部位

(断层局部、岩脉的下盘岩体)可能会出现掉块现象,需加强支护处理。根据结构面组合分析,断层或节理①或②与④、⑤互相组合可形成楔形体,从钻孔揭示的地质条件看,在顶拱高程附近有少量缓倾角节理发育,因此,在地下厂房顶拱局部可能存在陡、缓倾角节理不利组合产生的不稳定楔体。其它主要节理(优势结构面)组合对顶拱围岩基本无影响,仅有局部随机节理与上述主要节理构成随机块体。

边墙部位围岩稳定性主要受结构面组合控制,推测厂房区④、⑤组节理发育,与①或②组节理组合可在边墙形成不稳定块体。另外,③组节理在PD10平洞内密集发育,间距3~5 cm,节理面充填钙膜,出露于主厂房上游边墙上游50 m外且与边墙近平行,若该组节理发育范围在深部向下游扩大,则边墙岩体可能较破碎并影响边墙围岩的稳定,尤其是上游边墙。主副厂房右端墙出露断层f(48)和βμ-⑤岩脉,两者交于右端墙,由于岩脉在平硐性状较差,与围岩接触面有挤压现象,故该部位围岩稳定性差;①组节理与厂房左端墙呈小交角相交,受开挖卸荷影响可沿节理产生卸荷拉裂或形成片帮。总之,地下厂房无大的不利结构面组合,围岩稳定性好。

主变洞平行布置于厂房下游,围岩为新鲜、坚硬的角砾凝灰岩和少量的凝灰质砂岩,岩体完整~较完整,工程地质条件与厂房类似,围岩稳定性总体较好,其顶拱亦存在节理①或②与④、⑤互相组合,形成局部不稳定楔体;花岗闪长斑岩脉γδπ-(14)斜切上下游边墙,与断层F(49)及节理①

收稿日期:2017-04-23

和④组合,在上游边墙可形成里小外大的不稳定楔体。另外,该岩脉与边墙交角小,其上游边墙的上盘和下游边墙的下盘岩体受节理切割的影响,稳定性差。

## 2 对围岩完整性采取的有效控制方法

在仙居抽水蓄能电站地下洞室中,对围岩实施完整性有效检测和控制的手段有两个:一个是围岩松弛圈测试,另一个是围岩地震波检测。

### 2.1 围岩松弛圈测试方法

地下洞室开挖后,由于侧面应力的消失,洞壁表面的岩体将发生缺荷回弹而使洞周岩体内部引起应力重新分布,在洞室周围形成三个不同的应力区域:即应力松弛带、应力增加带和初始应力带,应力松弛带内的围岩声波速度将有所降低;另外,由于洞室开挖爆破,使洞壁围岩的完整性受到一定程度的破坏,形成结构松弛带而降低围岩的声波速度。因此,通过洞壁钻孔测试洞周径向岩体的声波速度变化及趋势可以确定洞室围岩松弛圈的范围。

测定地下洞室松弛圈的范围采用单孔声波法。在测孔位置钻一个直径不小于50 mm的钻孔,把一发双收声波换能器放入孔中,利用其中一只换能器发射声波,另两只换能器接收声波,读取两只接收换能器声波初至的时间差,将两只接收换能器的间距除以时间差即为接收换能器所在位置孔壁岩体的声波速度。将钻孔深度各测点的声波速度绘制成孔深~声速曲线图,根据钻孔声波速度的变化及趋势,确定松弛岩体的位置及深度。

### 2.2 围岩弹性波测试方法

由于岩体的岩性、完整程度、风化程度、结构面特征等地质因素直接决定着岩体的力学性质和弹性波在岩体中的传播速度,利用实测的岩体纵、横波速度及由其计算的动弹性模量、动剪切模量、泊松比和完整性系数等岩体力学参数可以评价岩体的质量,并将其作为划分岩体类别的重要依据。

在主厂房和主变洞每层开挖完成或引水洞、尾水洞各测段开挖完成,在喷锚支护前的裸岩上立即进行弹性波测试。在主厂房洞、主变洞的每层上下游边墙或引水洞、尾水洞上下游边墙布置测线,沿测线布置弹性波相遇观测系统,每个观测系统(排列)长度为11 m,将12只水平检波器用

石膏固定在测线上,各检波器间距为1 m,在排列两端1~3 m处用大锤沿测线方向锤击,以最大程度地激发弹性波纵波信号,选择初至清晰的纵波记录并保存下来,得到2张地震波纵波记录。然后在排列两端3~5 m用大锤在垂直测线的两个相反方向分别锤击岩壁,以最大程度地激发上下两个方向的横波信号,选择同相轴清晰的横波记录并予以保存,得到4张横波波形记录。在纵波记录上读取各点的纵波初至时间,在横波记录上读取各点的横波同相轴相位时刻,分别绘制纵波和横波时距曲线,利用差数时距曲线法分别求取围岩的纵波速度和横波速度,进而计算围岩的动弹性模量、动剪切模量、泊松比、完整性系数和风化波速比等物理力学参数。围岩弹性波纵波记录情况见图1,横波记录情况见图2。

## 3 有效控制松弛圈施工技术的实施

### 3.1 有效控制松弛圈的检测内容及技术要求

#### 3.1.1 有效控制松弛圈的检测内容

在主副厂房洞布置了4个松弛圈声波检测断面,其中厂房布置3个断面,每个断面布置了13个钻孔,顶拱3个,每层上、下游边墙各5个;安装场布置1个断面,9个钻孔,顶拱3个,每层上、下游边墙各3个。各检测孔深度为6 m,孔径不小于50 mm。各断面按主副厂房洞分层开挖进度逐层检测。

在主变洞布置了3个松弛圈声波检测断面,每个断面布置9个钻孔,其中顶拱3个,每层上、下游边墙各3个。各检测孔深度为6 m,孔径不小于50 mm。各断面按主变洞分层开挖进度逐层检测。

#### 3.1.2 有效控制松弛圈的检测技术要求

(1)断面松弛圈声波检测点距为10 cm,测试前必须通孔并注满清水,上斜孔宜使用干孔换能器。

(2)围岩弹性波检测点距为1 m,同时测试洞壁围岩的纵波速度和横波速度,应在洞室喷锚或衬砌前完成检测工作;根据围岩的纵波速度和横波速度计算围岩动弹性模量、动剪切模量、泊松比和完整性系数等岩体力学参数,以评价围岩的质量并划分岩体类别。

(3)应及时掌握现场洞室开挖进度,适时进点开展检测工作,根据现场实际情况分次分批按

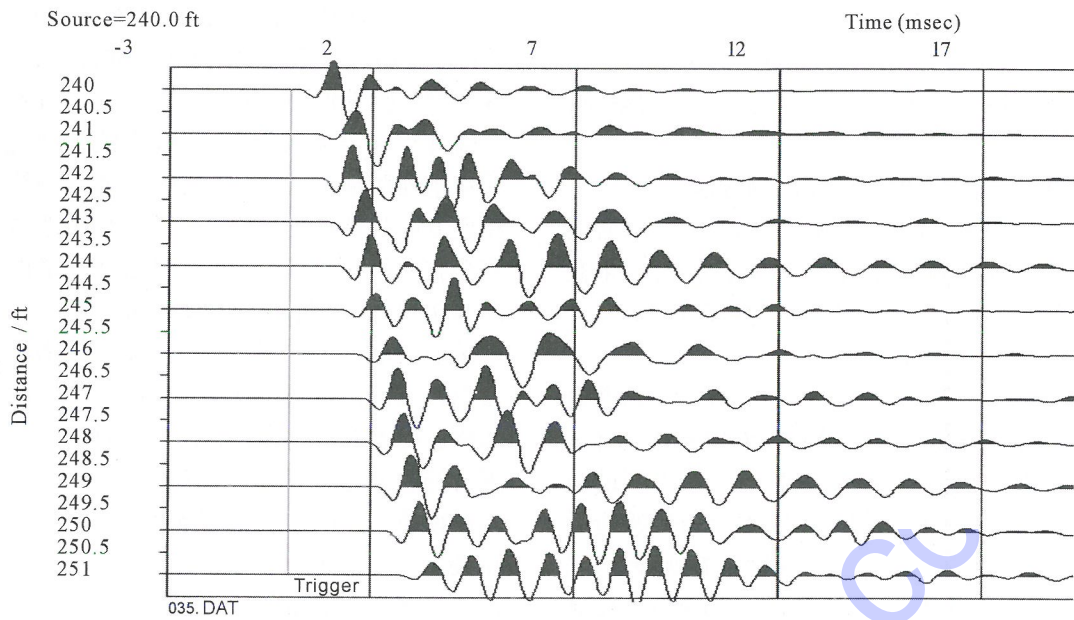


图 1 围岩弹性波纵波测试记录图

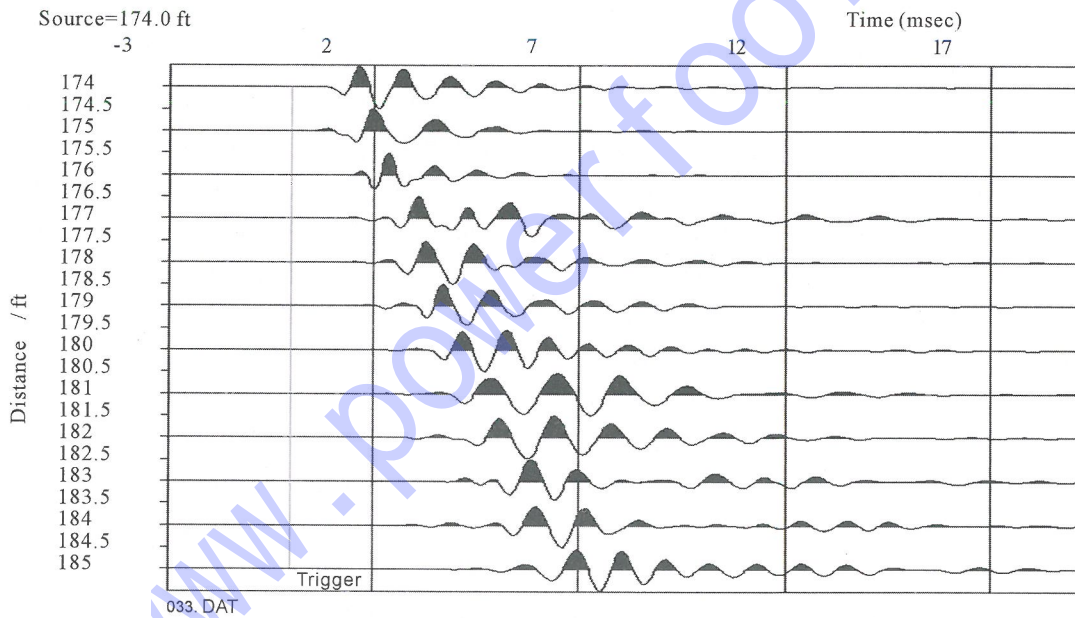


图 2 围岩弹性波横波记录图

期完成。

(4) 断面松弛圈声波检测孔造孔时, 应注意避开隐蔽埋件(含锚杆)。

### 3.2 松弛圈检测的原理及方法

#### 3.2.1 检测原理

松弛层检测原理: 利用单孔声波检测技术, 把一发双收声波换能器放入孔中, 利用一只换能器发射声波, 另外两只换能器接收声波, 读取两只接收换能器超声波初至时间差, 将两只接收换能器的间距除以时间差即为接收换能器所在位置孔壁

岩体的声波速度。根据规范要求, 测试点距一般为 10 cm, 自孔口向孔底测试, 发现波速异常时加密测试, 绘制声速 ~ 深度曲线。

#### 3.2.2 资料整理的方法

(1) 岩体完整性资料的整理方法: 读取两只接收换能器声波初至的时间差, 把两只接收换能器的间距(一般为 20 cm)除以时间差即为该深度岩体的超声波速度。根据实测声波速度, 计算岩体完整性系数。

具体的完整性系数  $k_v$  计算公式为:

$$k_v = \left( \frac{v_p}{v_{pr}} \right)^2$$

式中  $k_v$  为完整性系数;  $v_p$  为纵波速度;  $v_{pr}$  为测区完整、新鲜岩块的地震波纵波速度。

岩体的完整性和岩体的波速具有紧密的联系,同一岩性的岩体波速越高,其完整性越好。本

测区岩性为凝灰岩,新鲜、完整凝灰岩块的声波速度  $v_{pr}$  取 6 300 m/s。

根据《水电水利工程物探规程》(DL/T5010-2005),可用岩体完整性系数评价岩体的完整性,其完整性分类标准见表 1。

表 1 岩体完整程度分类表

项 目	岩体完整程度				
	完整	较完整	完整性差	较破碎	破碎
完整性系数 $k_v$	$k_v > 0.75$	$0.75 \geq k_v > 0.55$	$0.55 \geq k_v > 0.35$	$0.35 \geq k_v > 0.15$	$k_v \leq 0.15$
声波波速 $v_p/m \cdot s^{-1}$	$v_p > 5 456$	$5 456 \geq v_p > 4 672$	$4 672 \geq v_p > 3 727$	$3 727 \geq v_p > 2 440$	$v_p \leq 2 440$

(2) 松弛层界线的确定方法:根据岩体的完整性及其岩体的声速和变化趋势确定围岩的松弛层厚度。考虑不同部位岩体完整程度的差异可能对松弛层深度判断的影响,一般取钻孔深部岩体声速的平均值作为岩体松弛层的临界声速,结合声速随深度的变化情况以及岩体完整性系数综合确定围岩松弛层厚度。

### 3.3 松弛圈检测的实施成果

仙居抽水蓄能电站地下厂房松弛圈检测共分四个批次进行,钻孔声波测试使用武汉岩海工程技术开发公司生产的 RS-ST01C 智能型岩体声波测试仪,设备性能指标均超过《水电水利工程物探规程》(DL/T5010-2005)的要求,经过法定机构的检定且在有效期内。通过检测,可有效判定检测断面岩体的松弛厚度范围和松弛段、非松弛段的岩体完整性。

### 3.4 松弛圈有效控制检测的其他要求

断面松弛圈声波检测必须紧跟开挖施工进度,适时进场,及时完成并做好与现场土建施工的协调、配合工作。具体为以下几方面:

(1) 应在钻孔前通知检测单位,检测单位应及时进场准备声波检测工作。

(2) 施工时应依据检测单的孔位及要求施工,孔径、孔深、孔斜应符合检测单的要求,钻孔应平直,孔底岩粉应冲洗干净。

(3) 在现场检测期间,应局部调整施工安排,减少振动和噪音干扰,保证检测现场周围 30 m 范围内相对安静。

(4) 顶拱等部位钻孔检测时,施工单位应全程提供登高配合,登高设备应满足 2 人登高接近孔口的要求。

(5) 厂房洞、主变洞顶拱开挖完成后,应尽快钻孔并完成检测,避免因高度过大而造成登高作业困难。

(6) 厂房洞、主变洞每层开挖到位后,应及时钻孔并完成检测工作。

## 4 围岩地震波检测施工技术的实施

### 4.1 围岩地震波检测原理及方法

#### 4.1.1 围岩地震波检测原理

由于岩体的岩性、完整程度、风化程度、结构面特征等地质因素直接决定着岩体的力学性质和地震波在岩体中的传播速度,反之,通过分析地震波在岩体中的传播速度、振幅、频率等地震波参数的相对变化,可以了解岩体的性质、内部结构特征和相关的岩体力学参数。

地震波理论和大量的实践表明:对于同一种介质,其地震波速度与强度之间有着密切的正相关关系。也就是说,对于同类型的固体材料,地震波速度越高,材料的强度越高;反之,地震波速度越低,材料的强度越低。因此,利用实测的岩体纵横波速度及其计算出来的动弹性模量、动剪切模量、泊松比、完整性系数和风化波速比等岩体力学参数,可以评价岩体的质量,并将其作为划分岩体类别的重要依据。

地震波检测是利用先进的电子仪器设备,应用地球物理手段以获取岩体物理力学参数为目的。首先,在岩体测段内布置接收检波器,采用相遇观测系统,在排列两端进行锤击激发,分别获取该排列岩体的纵、横波速度,进而计算岩体动弹性模量、动剪切模量、泊松比、完整性系数和风化波速比等物理力学参数。

#### 4.1.2 资料整理方法

根据野外数据记录,读出每道记录的纵横波初至时间,根据初至时间和传播距离的关系画出时距曲线,利用时距曲线求取岩体的纵横波速度,进而计算岩体动弹性模量、动剪切模量、泊松比、完整性系数和风化波速比等物理力学参数。具体的计算公式为:

- ① 泊松比  $\mu$ :  $\mu = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)}$
- ② 动弹性模量  $E_d$ :  $E_d = v_p^2 \gamma \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{g(1 - \mu)}$
- ③ 动剪切模量  $D_d$ :  $D_d = v_s^2 \gamma / g$
- ④ 完整性系数  $k_v$ :  $k_v = (\frac{v_p}{v_{pr}})^2$
- ⑤ 风化波速比  $k_w$ :  $k_w = \frac{v_p}{v_{pr}}$

式中  $v_s$  为横波速度; $\gamma$  为重度(根据测区前期地质资料,弱风化~新鲜凝灰岩采用  $25.2 \text{ kN/m}^3$ ); $g$  为重力加速度。

4.1.3 岩体完整性评价

岩体的完整性和岩体的波速具有紧密的联系,同一岩性的岩体波速越高,其完整性越好。根据本次检测成果及浙江仙居抽水蓄能电站华东院设代处提供的资料,该测区新鲜、完整凝灰岩岩块的地震波纵波速度  $v_{pr}$  取  $5700 \text{ m/s}$ 。

根据《水电水利工程物探规程》(DL/T5010-2005),可用岩体完整性系数评价岩体的完整性,其完整性分类标准见表 2,围岩风化分带情况见表 3。

表 2 岩体完整程度分类表

项 目	$k_v$				
	$k_v > 0.75$	$0.75 \geq k_v > 0.55$	$0.55 \geq k_v > 0.35$	$0.35 \geq k_v > 0.15$	$k_v \leq 0.15$
花岗斑岩	$v_p > 4900$	$4900 \geq v_p > 4200$	$4200 \geq v_p > 3400$	$3400 \geq v_p > 2200$	$v_p \leq 2200$
凝灰熔岩	$v_p > 4900$	$4900 \geq v_p > 4200$	$4200 \geq v_p > 3400$	$3400 \geq v_p > 2200$	$v_p \leq 2200$
岩体评价	完整	较完整	完整性差	较破碎	破碎

表 3 围岩风化分带表

项 目	风 化 带				
	新鲜	微风化	中等(弱)风化	强风化	全风化
风化波速比	$K_w = 1$	$1 > K_w \geq 0.8$	$0.8 > K_w \geq 0.6$	$0.6 > K_w \geq 0.4$	$K_w < 0.4$

4.2 围岩地震波检测实施成果

仙居抽水蓄能电站地下厂房围岩地震波检测共分四个批次进行,弹性波法测试使用美国 GEOMETRIC 公司生产的 SE12 地震仪,该设备性能指标均超过《水电水利工程物探规程》(DL/T5010-2005)的要求,经过法定机构的检定且在有效期内。地震波检测通过所测岩体纵波速度范围判定完整性岩体、较完整性岩体和完整性差的岩体占所测段的百分比,继而分析得出岩体的完整性评价。

4.3 围岩地震波检测的其他要求

围岩地震波检测必须紧跟开挖施工进度,适时进场,及时完成并做好与现场土建施工的协调、配合工作。具体为以下几方面:

(1) 厂房洞、主变洞每层开挖完成后,沿上下游边墙进行弹性波测试,应在锚喷施工前及时通知检测单位完成检测。

(2) 将测试洞段的矿渣清理干净,洞壁标注桩号。

(3) 在现场检测期间,应局部调整施工安排,减少现场振动和噪音干扰,保证检测现场周围 50 m 范围内相对安静。

5 结 语

在仙居抽水蓄能电站施工过程中,通过采用松弛圈检测和围岩地震波检测等手段,对爆破开挖后得到的数据进行检测分析、判定岩体的性质、内部结构特征和相关的岩体力学参数,并确定洞室围岩松弛圈的范围。对洞室开挖过程中的安全性分析、爆破参数调整 and 支护形式的确定富有较强的科学依据和指导意义。

作者简介:

陈俊涛(1983-),男,河南三门峡人,项目经理助理,工程师,学士,从事水电工程施工技术与质量管理工作。

(责任编辑:李燕辉)