

某水电站窑洞式安装间围岩稳定分析

高 炼

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122

[摘要]某水电站为降低左岸边坡开挖边坡高度,减小边坡开挖工程量,安装间设置为窑洞式结构,为掌握该水电站左岸坝肩边坡和厂房窑洞式安装间开挖过程中,厂房窑洞式安装间围岩的变形、应力分布规律以及可能的围岩失稳破坏模式及部位等围岩开挖响应特征,通过数值分析,对左岸坝肩边坡和安装间进行分层开挖模拟,分析和总结开挖过程中安装间围岩的位移场、应力场、塑性区的分布特征和演化规律,对窑洞式安装间围岩稳定进行评价。

[关键词]窑洞式安装间;本构模型;围岩稳定

DOI: 10.33142/ec.v3i11.2751

中图分类号: TV511

文献标识码: A

Analysis of Surrounding Rock Stability of a Hydropower Station

GAO Lian

Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang, 311122, China

Abstract: In order to reduce the height of left bank slope excavation and reduce the amount of slope excavation, the installation bay is set up as a cave structure. In order to grasp the deformation and stress distribution of surrounding rock of the powerhouse cavern type installation bay during the excavation of the left bank dam abutment slope and powerhouse cave type installation bay, the surrounding rock excavation response characteristics such as the surrounding rock deformation, stress distribution, possible instability failure mode and location of surrounding rock are studied through numerical analysis, the layered excavation simulation of left bank abutment slope and installation bay is carried out. The distribution characteristics and evolution laws of displacement field, stress field and plastic zone of surrounding rock in the excavation process are analyzed and summarized and the surrounding rock stability of cave type installation room is evaluated.

Keywords: cave type installation room; constitutive model; surrounding rock stability

引言

某水电站安装间布置在左岸岸边,若全部采用明挖方案,左侧边坡开挖约 114m 高。为降低左岸边坡开挖边坡高度,减小边坡开挖工程量,安装间采用窑洞式布置,边坡开挖高度为 86m。

为掌握该水电站左岸坝肩边坡和厂房窑洞式安装间开挖过程中,厂房窑洞式安装间围岩的变形、应力分布规律以及可能的围岩失稳破坏模式及部位等围岩开挖响应特征,建立左岸坝肩边坡和窑洞式安装间三维数值模型,通过数值分析,对左岸坝肩边坡和安装间进行分层开挖模拟,分析和总结开挖过程中安装间围岩的位移场、应力场、塑性区的分布特征和演化规律,模拟系统支护及地震荷载作用,进行窑洞式安装间围岩稳定评价和支护结构受力分析。

1 工程概况

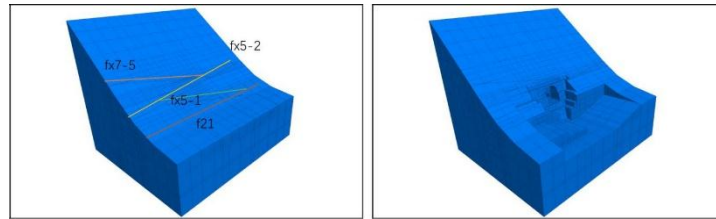
本工程枢纽主要建筑物由挡水建筑物、泄洪消能建筑物及左岸坝后式地面发电厂房等组成,挡水建筑物采用混凝土重力坝,最大坝高 116.00m;厂引坝段布置于河床左侧,发电厂房为左岸坝后式地面厂房。引水系统为单管单机布置,由坝式进水口和坝后浅埋管组成;厂区建筑物主要由主厂房(包括主机间及安装间)、副厂房(包括上游副厂房、下游副厂房、中控楼)、升压站、屋顶出线场、尾水渠及进厂交通洞等组成,窑洞式安装间布置在主厂房的左端,长 59.00m,其中洞外 32.40m,洞内 26.60m,洞内净跨下部 28.50m,上部 29.90m,最大开挖跨度 31.90m,采用全断面钢筋混凝土衬砌结构。

2 计算条件

2.1 模型与本构

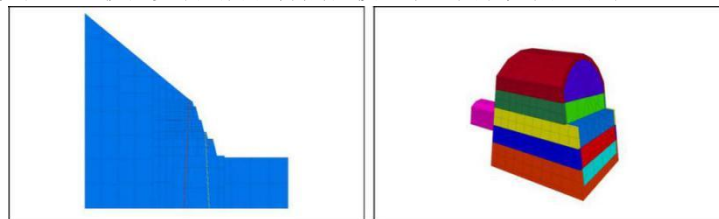
计算模型范围:上游边界为坝上 0~050m,距安装间轴线 153.5m,下游边界坝下 0~300m,距安装间轴线 196.5m;河谷侧边界坝左右 0~000m,距右岸开挖边坡脚约 125m,山内侧边界坝左 0~300m,距右岸开挖边坡顶约 150m;模型下边界为高程 3200m,上边界至地表。计算过程中模拟了与安装间相关的结构面 f21、fx5-1、fx5-2、fx7-5,计算三维模型见图 1。

岩体的本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型。地应力场采用自重应力场。


图 1 地下厂房洞室群与结构面空间位置关系

2.2 计算方案

根据边坡分级，窑洞式安装间开挖分序，及施工组织设计需要，坝肩边坡和河床分为 5 个开挖步进行模拟，窑洞式安装间分为 5 个开挖步进行模拟，边坡第 3 级边坡开挖完成后，模拟安装间开挖，安装间开挖完成后，继续边坡开挖至整个边坡和河床开挖完成。边坡及安装间开挖分层及模型示意图见图 2 和表 1。


图 2 坝肩边坡及厂房窑洞式安装间开挖分层模型示意图
表 1 开挖步序一览表

开挖步	开挖部位	开挖步	开挖部位
1	高程 3330m 以上边坡	6	安装间第三层开挖、支护
2	高程 3312~3330m 边坡	7	安装间第四层开挖、支护
3	进厂交通洞开挖	8	安装间第五层开挖、支护、衬砌
4	安装间第一层开挖、支护	9	高程 3302~3312m 边坡及河床
5	安装间第二层开挖、支护	10	高程 3275~3302m 边坡及河床

2.3 支护模拟

窑洞式安装间主要支护形式为柔性的系统喷锚支护，主要洞室支护参数见表 2。边坡为系统喷锚支护，数值计算中模拟了靠近窑洞范围内的边坡支护，采用 Cable 杆单元模拟普通砂浆锚杆和预应力锚杆支护，同时模拟了窑洞式安装间围岩衬砌，模拟时机为窑洞开挖支护完成后实施衬砌。

表 2 数值分析采用的窑洞式安装间及边坡支护参数表

部位		支护型式
窑洞式 安装间	顶拱	系统普通砂浆锚杆 $\Phi 28/\Phi 32$, $L=6000/L=9000$, $@1500 \times 1500$, 间隔布置
	边墙	系统普通砂浆锚杆 $\Phi 28/\Phi 32$, $L=6000/L=9000$, $@1500 \times 1500$, 间隔布置
		混凝土衬砌, C30, 厚 1.7m
边坡		无粘结预应力锚索 $T=1000kN$, $L=30m$

3 支护条件下围岩稳定分析

通过有效模拟安装间系统锚杆支护措施，并考虑安装间的分层开挖和支护施加时机，分析围岩变形、应力及塑性区分布特征，评价窑洞式安装间系统支护后的围岩稳定及支护效果。

3.1 围岩变形分布特征

图 3.1-1 和图 3.1-2 为安装间在无支护及系统支护后围岩变形分布图，支护前后各特征点的变形和减小量列于表 3。比较支护前后围岩变形规律，可以看出：

支护情况下围岩变形规律与无支护情况一致，围岩变形仍主要受边坡开挖卸荷变形主导。施加系统支护措施后，

顶拱围岩变形量值减小明显，减小约 1.7mm，其他部位围岩变形也略有减小。

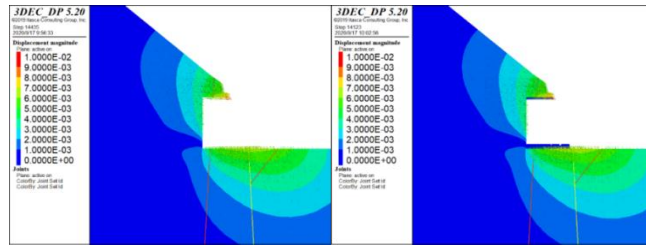


图 3.1-1 安装间开挖后（第 8 步）无支护（左）及支护（右）围岩变形

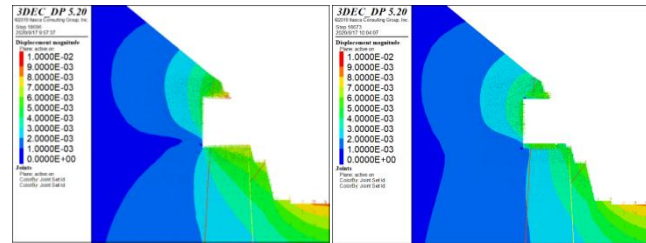


图 3.1-2 边坡和河床开挖完成后无支护（左）及支护（右）围岩变形

表 3 洞室各特征点位移统计一览表

部位	工况	X 向变形	Y 向变形	Z 向变形	总变形
		顺水流向	指向坡外	竖直向上	
顶拱	无支护	-0.1	-4.6	-5.0	6.9
	有支护	-0.1	-4.7	-2.1	5.2
	减小量	0.0	-0.1	2.9	1.7
上游边墙中部	无支护	0.6	-1.9	0.2	2.0
	有支护	0.3	-1.9	-0.2	1.9
	减小量	0.3	0.0	-0.0	0.1
下游边墙中部	无支护	-0.7	-2.3	-0.0	2.4
	有支护	-0.5	-2.2	-0.4	2.3
	减小量	0.2	0.1	-0.3	0.1
山内侧端墙	无支护	-0.0	-3.5	-2.7	4.4
	有支护	-0.0	-3.6	-2.6	4.4
	减小量	0.0	-0.1	0.1	-0.0

3.2 围岩应力分布特征

图 3.2-1 和 3.2-2 分别为支护前后安装间围岩最大主应力及最小主应力分布图，由图可见，支护前后洞室顶拱应力松弛区应力略有增高，边墙应力集中区应力变化不明显，应力松弛范围有所减小，说明支护作用改善了围岩最小主应力分布，为围岩提供了有效的支护围压，提高了围岩稳定性。

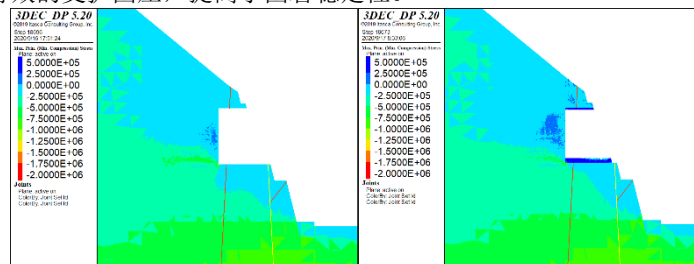


图 3.2-1 无支护（左）及系统支护后（右）围岩最小主应力分布图

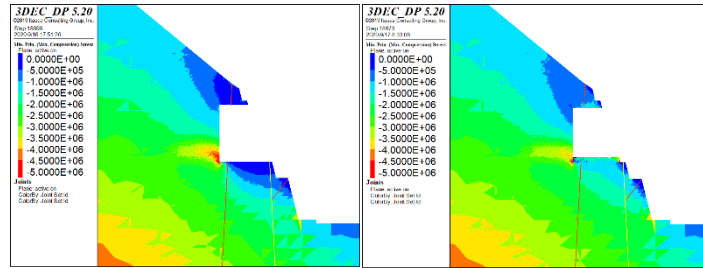


图 3.2-2 无支护（左）及系统支护后（右）围岩最大主应力分布图

3.3 围岩塑性区分布特征

图 3.3-1 和图 3.3-2 分别为系统支护前后安装间围岩塑性区分布图。由图可见，支护前后围岩塑性区略有减小。

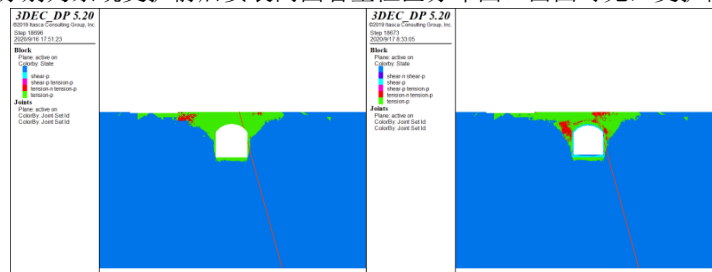


图 3.3-1 无支护（左）及系统支护后（右）围岩塑性区分布图

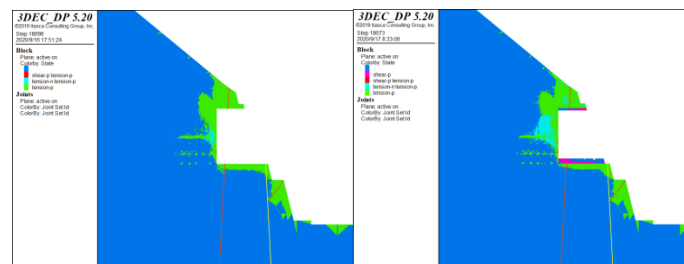


图 3.3-2 无支护（左）及系统支护后（右）围岩塑性区分布图

3.4 支护结构受力特征

支护后洞室围岩与支护系统相互协调，最终达到围岩变形稳定与支护结构受力之间一种相对平衡状态。图 3.4-1 为安装间系统锚杆受力分布图，表 4 为锚杆受力统计。

窑洞式安装间围岩变形受边坡开挖卸荷变形影响，主要为指向坡外的变形，安装间开挖后，围岩顶拱向下的变形及边墙向洞内的变形均较小，围岩锚杆支护后，顶拱及边墙锚杆受力较小。由图表可知，顶拱锚杆应力都在 100MPa 以下，边墙、端墙锚杆受力在 50MPa 以下的占 98%，在 50MPa~100MPa 的占 2%，主要分布于安装间端墙。总体上，洞室的锚杆支护结构是安全的。

图 3.4-2 和图 3.4-3 为安装间衬砌的变形和应力分布图，衬砌变形总体在 2~3mm，顶拱和底板局部变形在 4~5mm，变形方向为朝向洞内。衬砌在拱肩和边墙墙角等局部部位表现出受拉状态，总体上衬砌处于受压状态，偏应力在 10MPa 以内。

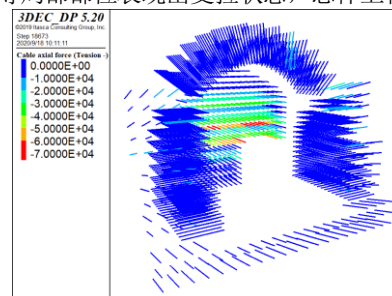


图 3.4-1 边坡及及河床开挖完成后安装间锚杆轴力分布图

表 4 安装间锚杆受力统计

锚杆受力比例	锚杆应力范围 (MPa)						
	0~50	50~100	100~150	150~200	200~250	250~300	>300
	98.0%	2.0%	0%	0%	0%	0%	0%

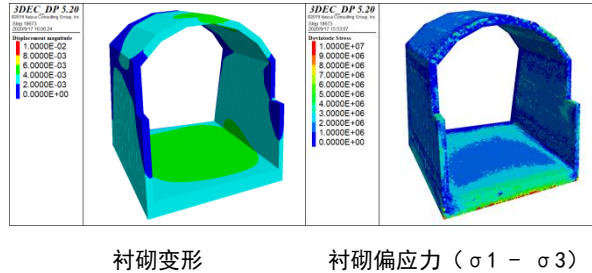


图 3.4-2 衬砌变形和衬砌偏应力云图

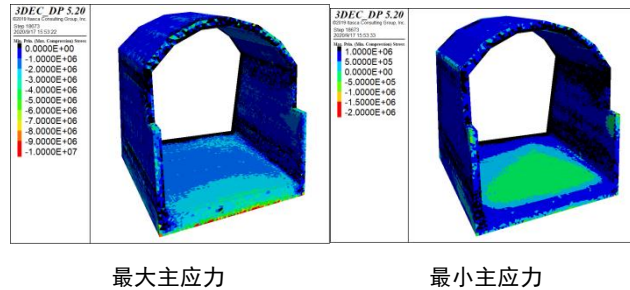


图 3.4-3 衬砌最大和最小主应力云图

4 结论

根据地应力实测资料、地质资料及结构布置等资料对某水电站的左岸坝肩边坡厂房窑洞式安装间的围岩稳定进行了分析, 主要结论如下:

1. 窑洞式安装间围岩变形受边坡开挖卸荷变形影响较大, 变形方向为指向坡外偏下, 安装间开挖后, 围岩向洞内的变形量值较小, 围岩应力集中程度不高, 围岩应力松弛及塑性区深度均在可控范围内。总体而言, 窑洞式安装间围岩整体稳定, 具备成洞条件, 由于受边坡开挖影响, 洞室与边坡交叉口的卸荷相对严重, 围岩塑性区相对较大, 但影响范围较小, 可采用合适长度的锁口锚杆支护措施处理。

2. 采取系统支护后, 围岩变形, 边墙应力松弛区及塑性区深度较小, 支护结构受力情况较好, 围岩稳定性较好。

3. 在窑洞式安装间上方边坡受 f_{x7-5} 影响的部位, 建议做好边坡局部加强支护。

通过模拟系统支护措施, 计算结果表明, 采取系统支护后, 围岩变形, 边墙应力松弛区及塑性区深度减小; 衬砌总体处于受压状态, 偏应力较小。总体上, 系统支护后洞室围岩变形较小, 围岩塑性区深度较小, 支护结构受力情况较好, 围岩稳定性较好。

[参考文献]

[1] 吴庆辉. 深溪沟水电站窑洞式安装间开挖及支护设计[J]. 人民长江, 2010, 41(18): 40-43.
[2] 黄健, 龙恩胜. 善泥坡水电站窑洞式开挖施工技术[C]. 中国大坝协会. 高坝建设与运行管理的技术进展——中国大坝协会 2014 学术年会论文集. 中国大坝协会: 中国大坝协会, 2014.

作者简介: 高炼 (1982-), 男, 湖北黄冈市人, 汉族, 硕士学历, 高级工程师, 研究方向水工结构。