

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.02.023

溪洛渡水电站超大型地下厂房围岩监测资料 分析和稳定性评价

伍文锋

(长江勘测规划设计研究院长江空间公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:水电站大型地下厂房具有规模大、结构复杂、交叉开挖率高等特点,开挖期围岩稳定控制难度大。为保证洞室群施工期围岩稳定,需建立有效的监测资料分析方法,对洞室围岩稳定进行评判。从监测分析内容、方法、分析思路出发,通过对位移和应力量级、分布特征、变化规律、影响因素进行分析,对地下厂房洞室群施工期围岩的稳定性进行评价。开挖完成后,围岩最大位移为60.14 mm,锚杆最大应力为242 MPa,围岩稳定性较好;围岩松动圈基本在3 m以内,支护参数合理有效。溪洛渡地下厂房洞室群规模为我国已建和在建工程之首,总结其监测资料分析和围岩稳定评价,对类似工程具有指导和借鉴作用。

关键词:溪洛渡水电站;地下厂房;监测;分析;稳定性

中图分类号:TV731+.6

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2014)02-0112-05

Monitoring Data Analysis and Stability Evaluation for Surrounding Rock of Super-large Underground Powerhouse in Xiluodu Hydropower Station

WU Wen-feng

(Spatial Information Technology Co., Ltd. of Changjiang Survey-planning and Design Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: The large underground powerhouse of hydropower station has the characteristics such as huge scale, complex structure, high rate of crossover excavation etc., and it is difficult to control the stability of the surrounding rock in the excavation. In order to ensure the stability of the surrounding rock during the construction of underground caverns, it is necessary to establish the effective analysis method of monitoring data, so as to evaluate the stability of the surrounding rock. Here, from the monitoring analysis content and method and thinking, the magnitude, distribution characteristics, change regulation and influence factor of surrounding rock displacement and supporting stress are analyzed to monitor the deformation of surrounding rock and evaluate the tunnel stability. The results show that after the completion of excavation, the maximum displacement of surrounding rock is 60.14 mm, and the maximum stress of bolt is 242 MPa, having a good stability of surrounding rock. The surrounding rock's loose circle is smaller than 3 m, and the support parameters are reasonable and effective. The scale of Xiluodu Hydropower Station's underground powerhouse caverns is the first in China, the summary from the monitoring data analysis and stability evaluation of surrounding rock could provide some references for similar projects.

Keywords: Xiluodu Hydropower Station; underground powerhouse; monitoring; analysis; stability

1 引言

地下厂房洞室群围岩稳定直接影响着该地下厂房的设计和施工安全。做好施工期监测资料分析和围岩稳定性评价,是保障洞室围岩稳定的重要措施。

溪洛渡水电站地下厂房洞室群规模居国内已建和在建之首,具有尺寸大、结构复杂、交叉开挖率高等特点。虽然溪洛渡地下厂房位于中等地应力区,地质条件相对较好,且工程布置已尽量避免断层破碎带和软弱带等不良地带,但是地质结构物质组成的不

均一性和结构上的不连续性使洞体不可避免地存在次一级的断层,再加上地质勘探的空间不完全性,使得围岩的发展态势还存在一定未知性^[1];况且洞室规模巨大,洞室施工相互影响,洞室围岩稳定问题突出。在施工过程中,通过系统的布设仪器监测围岩变形及支护设施应力状况,尤其是围岩内部存在明显结构面的部位进行更加频繁的监测,为控制变形突变甚至失稳破坏提供更有力的资料^[2]。分阶段评估地下洞室的围岩稳定状态,指导洞室施工,反馈设计,及时调整支护参数,是洞室整体稳定的重要保障。

2 工程概况

溪洛渡水电站双曲拱坝最大坝高为 285.5 m;泄洪建筑物由 4 条泄洪洞、7 个深孔和 8 个表孔组成;导流建筑物由 6 条导流洞组成;引水发电建筑物包括压力管道、三大洞室、尾水系统组成。地下厂房对称布置在左右岸山体,共 18 台机组,装机容量为 13 860 MW(770 MW × 18 台)。

两岸地下厂房三大洞室中心线间隔距离在 73 m ~ 76 m,其中主变室与主厂房中心线间隔 76 m,主变室与尾水调压室为 73 m。三大洞室设计开挖尺寸(长 × 宽 × 高)为:主厂房 439.74 m × 75.6 m × 28.4 m,主变室 349.29 m × 33.32 m × 19.8 m,尾水调压室 317 m × 95 m × 25 m;引水洞 $\Phi 11.8$ m;尾水洞(宽 × 高)15 m × 20 m。地下厂房洞室群分布见图 1。

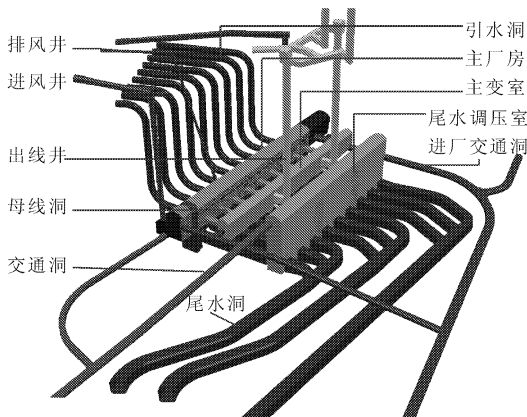


图 1 溪洛渡水电站地下厂房洞室群分布图

3 地质条件

溪洛渡地下厂区分布在大坝上游山体内部,埋深在 300 m ~ 480 m 之间,其中水平向最小埋深为 300 m,垂直向最小埋深为 340 m。厂区围岩新鲜完整,由 $P_2\beta_4 \sim P_2\beta_6$ 玄武岩和层间角砾集块熔岩组成。

节理裂隙及层间、层内错动带为主要结构面。

厂区应力:左岸厂区第一主应力最大值为 18 MPa,与厂房轴线夹角相对较大,为 $36^\circ \sim 46^\circ$;右岸厂区第一主应力最大值为 20 MPa,与厂房轴线夹角较小,为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 。

岩体透水性较弱,含水极少,为裂隙和脉状含水,洪枯水位变化幅度约 15 m,地下水位高程 375 (枯) ~ 390 (洪) m^[3]。

4 监测资料分析和围岩稳定性评价

溪洛渡地下厂房采用“新奥法”分层施工,主厂房分 10 层开挖,主变室分 4 层开挖,尾调室分 15 层开挖^[4]。每完成一层开挖支护,均结合开挖进程和围岩地质条件开展监测数据分析,对围岩位移、锚杆应力、锚索荷载量级、分布情况、变化规律、影响因素进行分析,评价洞室稳定与支护效果。

4.1 监测资料分析方法

(1) 量级、分布和变化规律分析。监测分析均以变形为主,其它为辅,准确把握变形的发展规律能有效地预测围岩的发展趋势,为反馈、预警做好准备^[5]。从整体上分析位移和应力量级和变化规律,与设计计算值进行对比,把握洞室的整体稳定;再分析局部地质条件较差部位的围岩位移和支护设施应力量级、分布和变化规律,评判洞室的局部稳定。通过位移和应力量级和变化规律调整施工方法和支护参数,控制围岩变形,使的位移量级及屈服区深度控制在允许范围内。

(2) 变形和应力增长原因分析。通过变化规律找出产生位移和应力的各个因素,对各因素进行分析,找出主要影响因素,从而有针对性的控制。通过对影响因素的分析,找出变形和应力的变化趋势,从而准确把握围岩动态的发展趋势。

(3) 屈服区分析。结合声波资料,分析围岩松动圈范围。松动圈范围按测点间平均应变小于 0.2% 进行控制,若测点间平均应变大于 0.2%,则测点间的平均深度作为松动圈范围;若各测点间平均应变均小于 0.2%,则围岩变形视为弹性变形。

(4) 围岩稳定分析。国内《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB50086 - 2001),对于 II 类和 III 类、埋深大于 300 m 的地下洞室围岩,允许位移相对值在 0.40% ~ 1.20% 之间,以围岩周边水平位移收敛速率小于 0.20 mm/d,顶拱或底板垂直位移速率小于 0.10 mm/d 作为围岩稳定的标准之一。法国新奥法施工标准规定:当月累计收敛量小于 7 mm,即每天

平均变形速率小于 0.23 mm, 可认为围岩达到基本稳定。当位移急剧增长即位移速率明显增大、实测位移相对值又接近极限数值时, 必须预警并采取紧急措施^[5], 比如优化爆破设计和施工方法, 调整支护参数等以避免工程事故。

4.2 监测仪器布置

通过在地下厂房围岩埋设多点位移计、锚杆应力计、锚索测力计等仪器, 布设围岩收敛观测断面及监测点, 建立完整的洞室围岩稳定监测系统, 并在施工过程中实时测量和分析, 为施工程序、施工方法的

决策提供科学可靠的依据^[6]。溪洛渡地下厂房根据地质条件和机组布置情况, 针对主厂房围岩稳定和支护系统安全, 左岸地下厂房主要在安装间、1 号机~9 号机共布设有 6 个监测断面。每个断面均布置有多点位移计、锚锁测力器、锚杆应力计等。右岸监测仪器与左岸呈对称布置。监测仪器平面布置见图 2(与表面测点位移平面布置图为同一图)。根据规范和设计要求, 施工期, 观测频次为 1~2 次/周, 爆破影响区, 在爆前爆后加密观测。

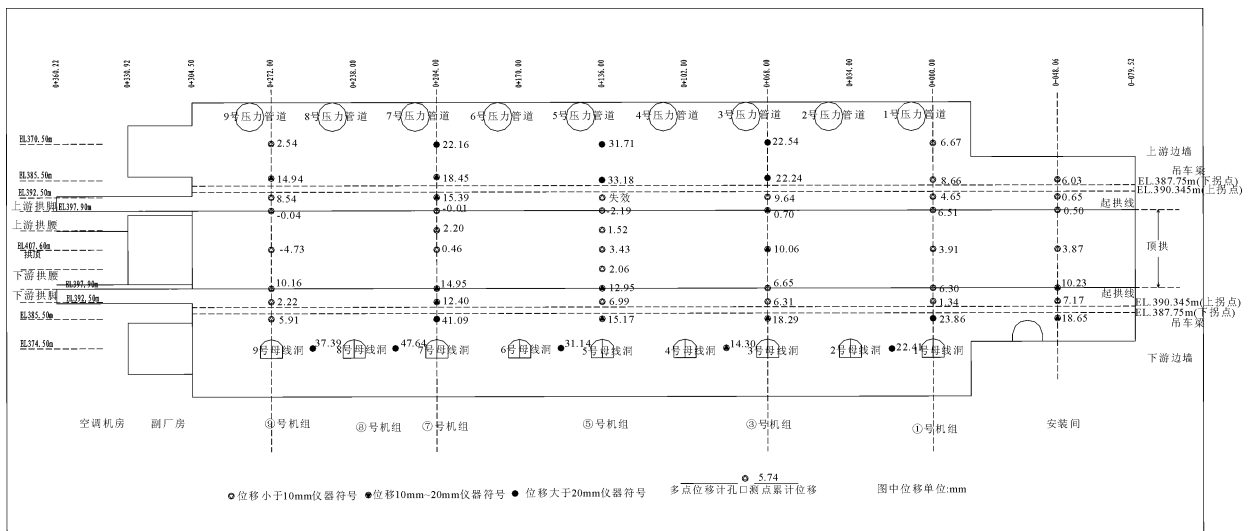


图 2 左岸主厂房仪器布置平面图(围岩表面位移平面布置图)

4.3 监测资料成果分析

溪洛渡左、右岸地下厂房结构布置基本相同, 监测仪器布置基本相同, 地质条件基本相当, 施工方法和支护参数整体一致。右岸监测位移及应力略小于左岸, 现以左岸地厂为例进行监测资料分析。

4.3.1 位移和应力量级分析

开挖结束后, 左岸地厂围岩松弛位移最大值为 60.14 mm, 其中 89.2% 监测位移小于 20 mm; 支护锚杆最大监测拉应力为 242.25 MPa, 其中 89.7% 监测应力小于 100 MPa; 监测锚索锁定后最大荷载增长率为 20.56%, 有 90.7% 监测锚索锁定后荷载增长率小于 10%。监测量分布见表 1。

4.3.2 分布规律

洞周围岩基本向临空面方向发生变形, 拱顶与底板变形小于侧墙中部。对于不同监测仪器来说, 位移较大(大于 20 mm)的测点分布在洞室侧墙中部(高程 370 m~386 m 段), 大致在边墙 1/3~2/3 高程部位; 对于同一监测仪器来说, 多点位移计测点距临空面越近, 则监测位移值越大^[7]。围岩表面位移平

面布置见图 2。

表 1 各监测量分布情况表

监测类型	监测量分布情况				
	≤ 0	0~20	20~30	≥ 30	总数
多点位移计位移/mm	≤ 0	0~20	20~30	≥ 30	总数
占总数百分比(左岸)	6.67%	81.67%	6.67%	5.00%	120
监测锚杆应力/MPa	≤ 0	0~100	100~150	≥ 150	总数
占总数百分比(左岸)	25.64%	62.82%	5.13%	6.41%	156
锚索锁定后荷载增长率/%	≤ 0	0~10	10~20	≥ 20	总数
占总数百分比(左岸)	54.64%	36.08%	8.25%	1.03%	97

4.3.3 变化规律

地下厂房围岩变形曲线大致呈台阶状, 存在突变点, 与周围岩体开挖爆破关系密切, 累计变形绝大部分由开挖爆破引起, 开挖间歇时变形缓慢增长, 岩体卸荷量值很小^[8]。洞周围岩随下部洞室开挖, 变形增长明显, 但变形增长基本在监测断面附近爆破开挖时发生, 开挖工作面远离监测断面时变形逐渐趋于稳定, 符合地下洞室开挖的一般规律^[9]。位移变化趋势与开挖关系见图 3。

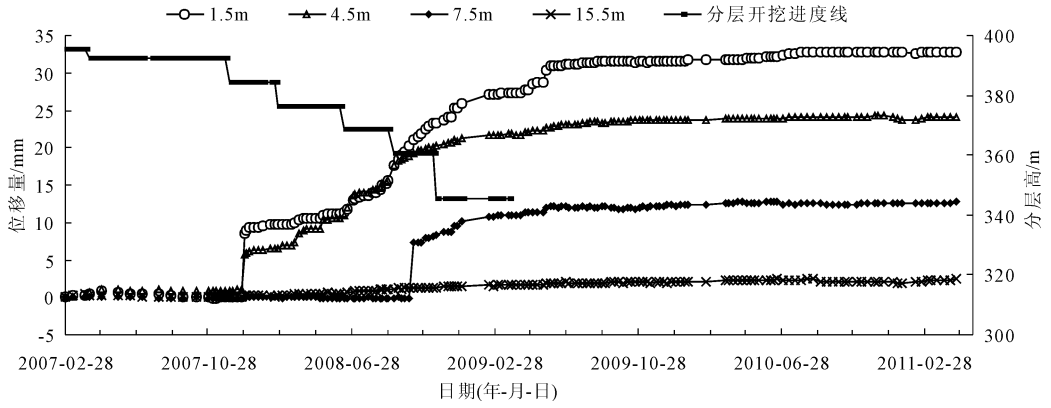


图 3 位移变化趋势与开挖关系曲线图

4.3.4 影响因素分析

影响围岩位移的因素包括岩体的地质结构,地应力大小、岩性,开挖爆破扰动,支护参数、支护跟进速度,地下水发育程度等。溪洛渡地下厂房地下水不发育;施工方法科学合理;洞室部位已确定,地质条件也相应确定;爆破开挖和支护参数就成为影响围岩变形的的主要因素。围岩位移主要取决于开挖爆

破引起的应力二次调整,而地质条件的好坏直接影响到位移的大小和位移增长持续时间。

左岸地厂共 14 套多点位移计监测位移大于 20 mm,其中有 11 套开挖期间位移量占总位移量 80% 以上,其它 3 套开挖期间位移量占总位移量 65% 以上。围岩变形与开挖的对应关系明显,在施工开挖间歇期,围岩变形发展缓慢^[10]。典型位移速率变化见图 4。

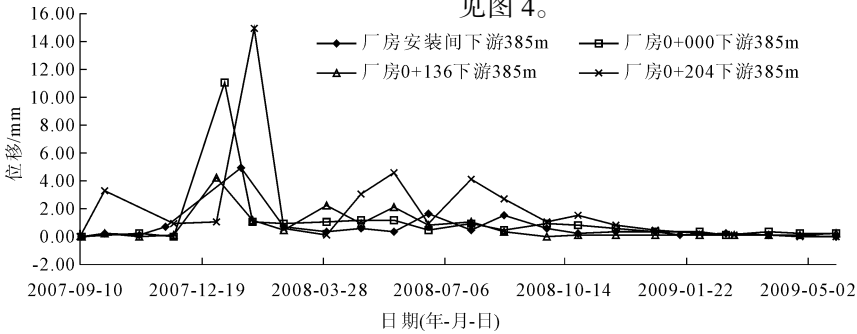


图 4 典型位移速率变化图

围岩位移受洞室开挖影响明显;同时地下厂房局部地质条件较差,层间错动带、层内错动带、节理裂隙发育的部位,监测位移量相对较大^[11]。地质条件较差部位围岩位移明显大于其它部位。如左岸主厂房测点位移普遍在 20 mm 以内,而 7 号机组断面下游侧墙中部地质条件较差,位移量达到 47.64 mm,明显高于其它部位。左岸主厂房 7 号机断面地质剖面见图 5,左岸 7 号机断面围岩变形分布见图 6。

4.3.5 声波测试

左岸地厂在 K0 - 30、K0 + 50、K0 + 170、K0 + 250、K0 + 350 处布设 5 个声波测试断面。左岸主厂房边墙声波监测成果见表 2。

平均声波速度值在 4 997 m/s ~ 4 881 m/s 之间,声波速度主要分布在 5 000 m/s ~ 6 500 m/s 之间。

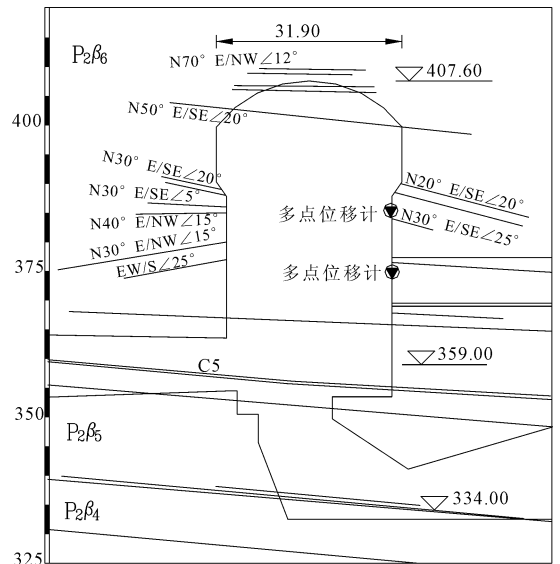


图 5 左岸主厂房 7 号机地质剖面图(单位:m)

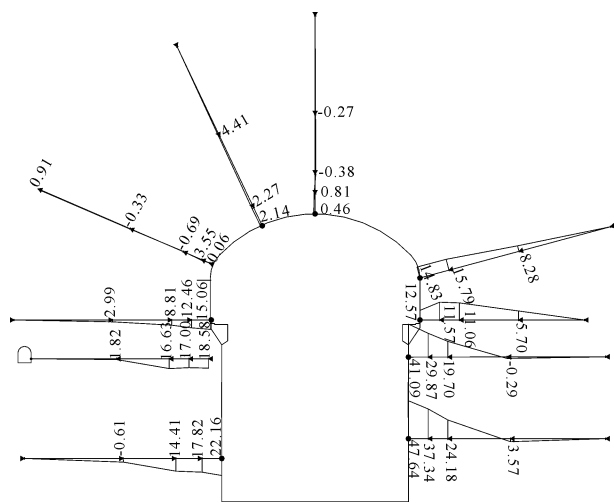


图 6 7号机断面围岩变形分布监测成果(单位:mm)

表 2 左地厂边墙声波成果表

工程部位	深度段	波速/(m·s ⁻¹)		波速分布/%		
		平均	离差	≤4500	4500~5000	≥5000
上游边墙	全孔段	4997	1202	25.4	8.9	65.7
	松弛段	3510	1194	76.4	6.0	17.6
	完整段	5299	954	15.0	9.5	75.5
下游边墙	全段	4881	1236	28.7	10.5	60.8
	松弛段	3244	1112	83.5	5.5	11.0
	完整段	5269	900	15.6	11.7	72.7

声波测量和位移测量得到三大洞室围岩屈服区范围分别为:主厂房上游边墙为 2.0 m~8.0 m,下游边墙为 5.0 m,顶拱为 4.0 m~5.0 m,主厂房最大塑性区发生在上游边墙中部偏上;主变室下游边墙为 2.0 m,顶拱为 2.5 m~3.5 m;尾调室上游边墙为 6.0 m~7.0 m,下游边墙为 3.0 m~10.0 m,顶拱为 8.0 m~9.0 m,尾调室最大塑性区发生在下游边墙中部偏上^[12]。锚固支护有效地抑制了洞周破坏区的发展,减少了围岩应力扰动,限制了洞周边墙的变形^[13]。洞室群采用的系统锚杆深度达到 9 m,局部地质条件较差部位采用 12 m 的锁口锚杆进行加强支护,锚索支护深度达到 20 m。支护深度能满足洞室围岩稳定要求。

4.4 围岩稳定性评价

洞室开挖完成后,监测位移最大值为 60.1 mm(个别),锚杆最大应力为 242.25 MPa,锚索锁定后荷载最大值增长率为 20.6%,松动圈在支护深度范围内,监测成果总量级较小。

随着洞室下挖,顶拱围岩变形逐渐减小趋向稳定,说明顶拱围岩绝大部分变形发生于顶拱层开挖

期间^[14];之后随开挖面高程下降,部分测点位移呈反弹趋势。边墙位移主要发生在附近洞室开挖期间,开挖面远离后,位移基本不发展。位移变化规律有利于洞室围岩稳定。

开挖结束后,洞室围岩变位、塑性区分布、锚杆锚索应力等指标与可研阶段计算值基本吻合^[15]。监测成果和可研阶段计算值对比见表 3。

表 3 监测成果和可研阶段计算值对比表

阶段	主应力/MPa		最大变位值/mm	最大锚杆应力/MPa	塑性区深度/m
	最大	最小			
3D 弹塑性损伤有限元	-38	1.5	38.0	260	4.0~7.0
可研 FLAC3D 拉格朗日元	-32	0.5	59.9	250	10.0
监测	—	—	60.1	242	10.5

洞室施工期,围岩位移和支护设施应力量级可控、分布合理、变化规律正常;洞室开挖完成后,位移应力总量级和变化速率均较小,松动圈范围小于支护深度和前期预测范围。溪洛渡地下厂房支护参数合理,围岩稳定性较好。

5 结 论

(1) 溪洛渡水电站地下厂房洞室群围岩最大位移为 60.1 mm(个别);锚杆、锚索受力处于正常状态,部分预应力锚索、锚杆出现松弛,锚杆最大拉应力为 242.25 MPa,监测锚索锁定后荷载增长率最大值为 20.56%。围岩和支护设施应力量级较小,均在设计预期值内。

(2) 洞室开挖过程中,洞周围岩均向临空面方向发生变位,拱顶与底板变位小于侧墙中部变位。最大位移发生在洞室群侧墙中部 385 m 高程。

(3) 洞室拱顶围岩位移主要发生在拱顶层开挖期间,之后随开挖高程下降,拱效应出现,逐渐产生少量回弹位移,其变化特征符合一般变化规律。边墙位移受开挖影响明显,位移变化曲线大致呈台阶状,开挖间歇期基本不发展。说明开挖爆破是围岩位移发展的主要因素。

(4) 监测成果和声波测试结果反映,大部分属于浅表层变形,岩体变形接近弹性变形,个别部位变形深度在 10 m 以上。松动圈范围在锚杆、锚索控制范围之内。支护锚杆和锚索对围岩变形的控制作用显著,支护参数合理。

(下转第 124 页)