

文章编号:0559-9342(2003)10-0044-03

龙滩水电站地下厂房主要洞室围岩锚喷支护设计

罗俊军,张孝松

(中南勘测设计研究院,湖南 长沙 410014)

关键词:锚喷支护;围岩;陡倾层状岩体;地下厂房;龙滩水电站**摘 要:**龙滩水电站地下厂房洞室群支护采取工程类比、理论计算及现场监控的多种方法进行设计。针对中陡倾角层状岩体上、下游边墙的变形特征不同、潜在不稳定体出现部位的区别,提出了上、下游边墙预应力锚索重点加强部位有所区别的支护设计方案。**Design of the shotcrete support for the underground powerhouse of Longtan Hydropower Station**

LUO Jun-jun, ZHANG Xiao-song

(Mid-south Investigation and Design Institute for Hydroelectric Projects, Changsha Hunan 410014)

Key Words:shotcrete support, surrounding rocks, steep dip stratified rock masses, underground powerhouse, Longtan Hydropower Station**Abstract:**The methods such as project analogue, theoretical calculation, and on-the-spot monitoring have been adopted in the support design of the surrounding rock masses of the underground powerhouse of Longtan Hydropower Station. The different prestressed anchorage support schemes for different key positions in the upstream and downstream sidewalls have been put forward, in accordance with the conditions that the stratified surrounding rocks with medium and steep dip angles, different deformation characteristics, and the locations of different potential unstable bodies.

中图分类号:TV223.34(267)

文献标识码:B

1 地下厂房引水发电洞室群布置及地质条件

龙滩水电站引水发电系统布置在坝址左岸。其中,引水隧洞、发电主厂房、母线洞、主变洞、尾水调压井等洞室群布置在左岸山体内部,发电主厂房洞室右端距河岸约 160 m,上覆岩体厚度 120~240 m。

主厂房、主变洞和尾水调压井三大洞室依次平行布置,主厂房、主变洞及尾水调压井之间岩墙厚度分别为 43 m、27.46 m。主厂房上部(高程 206 m 以上)开挖尺寸 398.5 m × 28.9 m × 55.7 m(长 × 宽 × 高、以下同),岩锚梁以上开挖跨度 30.7 m,主厂房拱顶高程 261.7 m,厂房最大开挖高度为 76.4 m。主变洞开挖基本尺寸为 400.0 m × 19.8 m × 20.7 m,主变洞拱顶高程 253.9 m。尾水调压井采用“三机一井”的长廊式调压井,共 3 个,1 号尾水调压井开挖尺寸为 68.3 m × 20.05 m × 84.31 m,2 号(3 号)尾水调压井开挖尺寸为 76.7 m (95.85 m) × 22.73 m × 63.35 m,调压井拱顶高程均为 272.7 m,1 号、2 号尾水井间岩柱厚 61 m,2 号、3 号尾水井间岩柱厚 26.4 m。

主厂房、主变室和尾水调压井布置区是坝区地质条件相

对较好的地段之一。三大主洞室置于中陡倾角层状结构的、类围岩、局部类围岩内。主要岩性为砂岩、粉砂岩、泥板岩夹少量灰岩。厂区地层为三叠系中统板纳组(T_{2b}),三大洞室穿越的 T_{2b}^{18} 层 ~ T_{2b}^{41} 层多为中厚层互层状软硬相间的层状结构岩体,岩层为单斜构造并倾向厂房下游侧,岩层产状为 $345^\circ \sim 350^\circ \text{NE}$ $55^\circ \sim 62^\circ$ 。主洞室布置区围岩强度较高,砂岩饱和抗压强度为 130 MPa,泥板岩为 40~80 MPa;变形模量为 13~20 GPa。水文地质条件较简单,多为裂隙水,表现为沿断层、层间错动(层面节理)或结构面交会处渗(滴)水,岩体透水性较小。

选定的厂房轴线方向为 $N50^\circ W$,与岩层走向夹角 $35^\circ \sim 40^\circ$ 。 F_1 断层从主厂房安装间斜穿,与厂房轴线呈 $30^\circ \sim 35^\circ$ 夹角。洞室布置区内对洞室围岩影响较大的主要是层间错动或层间断层,以及 F_1 、 F_{56} 、 F_{56-1} 、 F_7 、 F_{13} 等断层。层面和层间错

收稿日期:2003-09-22

作者简介:罗俊军(1965—),男,湖南泸溪人,高级工程师,主要从事水电站枢纽布置及输水发电系统设计;张孝松(1964—),男,湖南安乡人,高级工程师,主要从事水电工程水工结构设计。

动的发育及中陡的岩层倾向,对主厂房和调压井的上下游高边墙稳定不利,表现为层状岩体在上游边墙顺层剪切滑移,在下游边墙倾侧蠕变的形态。

地下厂房布置区实测地应力的最大主应力平均值为 12 MPa,方向为 $N20^{\circ} \sim 80^{\circ}W$,属中等量级以水平应力为主的构造应力场。选定厂房轴线与地应力最大主应力方向夹角 30° 左右,垂直边墙方向的水平应力为 5.8 ~ 10.5 MPa,垂直主厂房上下游边墙方向的侧压力系数为 1.5 ~ 1.9。

2 主要洞室的支护设计及参数综合选择

2.1 主要支护设计方法

龙滩地下洞室支护设计以“利用围岩为承载主体,充分发挥围岩的自承作用”为设计准则,确定了洞室以锚喷支护为主,并遵循新奥法理论,采用动态化监控、信息化设计。

锚喷支护参数设计以工程类比法为主,采用该法初步选择支护参数;采用极限平衡理论算法进行局部稳定和支护承载力验算,调整支护参数;采用有限元算法评价支护整体加固效果,提出加强支护的重点部位;坚持现场监控法,及时完善支护参数。

2.1.1 工程类比法

工程类比法采用了直接对比法和间接类比法。直接对比法依据收集已建和在建国内外规模相近工程的锚喷支护参数以资对比。间接类比法包括按规程规范依围岩类别确定支护参数法、Q 系统分类推荐参数法和锚杆长度与洞室跨度、高度关系的统计分析法。其中,龙滩引水洞、尾水洞、交通洞和通风洞等尺寸相对较小,受三大主洞室及洞室间开挖的影响也小一些,可按规程规范确定锚喷支护参数;主厂房、调压井洞室跨度大、边墙高,依据岩体综合质量指标 Q 值和开挖当量尺寸计算围岩压力,查表选择支护分类,提出初步支护参数。

2.1.2 理论计算法

(1) 围岩塑性松弛区极限平衡分析。洞室开挖后围岩塑性松弛区内的山岩压力由围岩的形变压力和极限平衡圈内围岩自重形成的松动压力构成,需要由锚喷支护提供足够的支护抗力维持其平衡。龙滩地应力场为水平构造应力场,侧压系数大于 1,剪切楔形滑移体在洞室顶、底部出现,松动压力在顶拱为塑性圈内的自重压力。设计时采用解极值办法计算最小山岩压力和塑性松弛区的深度。

(2) 块体极限平衡分析。块体稳定计算表明:由三组随机节理构成的节理块体在洞周出现的几率最大,出现频率约 3 ~ 5 个/100 m^2 ,规模普遍较小,块体体积小小于 1.7 m^3 ,采取喷混凝土支护应能维持其稳定。由断层或层间错动面和少数延伸较长的缓倾角节理或裂隙性错动面构成的楔体出现的随机性较大,在每条断层与洞壁交汇处都有可能发生,该类楔体在洞轴线上沿洞顶或洞壁发生的频率约 30 ~ 50 m 一个,节理长度为 5 m 时,最大楔体高度为 3.9 m,山岩压力 0.01 ~ 0.26 MPa,确定的系统支护锚杆参数应能维持其稳定要求。由三条断层或两条断层和层间错动(层面)构成的特

定楔体,多出现在 F_1 断层两侧,对于大的特定楔体,采用锚杆和预应力锚索局部加强支护。

(3) 有限元计算分析。由于龙滩水电站地下厂房系统经历了多次布置调整和结构优化设计,各阶段都进行了有限元计算分析,计算分析结论宏观上基本一致。在最终布置方案的大三维有限元计算中,模拟锚杆、锚索和施工投标批准的施工开挖顺序,考虑主要断层和模拟陡倾角层面,分别采用 Marc 程序、FLAC3D 有限差分法和三维断裂损伤有限元法等进行计算。计算结果表明,与水平层状岩层中的洞室开挖相比较,位于陡倾角层状岩体中的龙滩水电站地下洞室群围岩的变形具有明显的非对称特征,围岩在开挖过程中明显沿层面错动。主洞室上下游边墙的变形机理不同,上游侧边墙的岩体在沿层面滑动的同时,在垂直层面的方向上略有张开;下游侧边墙的岩体则在向洞内倾倒的同时顺层上移。变形量大小及最大值出现的部位也不一致,三种计算方法的顶拱下沉变位、边墙水平变位列于表 1。围岩的最大压应力为 34.5 MPa,发生在调压井下部的尾水管附近。计算塑性区范围较 1994 年计算结果有较大的改善。FLAC3D 法计算结果表明:支护后洞室的塑性区,在三大洞室顶拱部位基本控制在 1 ~ 2 m 内,主厂房上游边墙的塑性区小于下游边墙,下游边墙最大深度为 8 ~ 12 m,主厂房和主变洞之间的岩体稳定性相对较好,两者之间没有塑性贯通区域。在主变洞与调压井间受断层控制的区域形成局部的(厚度 6 m 左右)塑性连通区域,而在没有断层控制的区域,岩体中间还将保留一段弹性岩体。调压井上下游边墙塑性区最大,为 10 m 深。支护锚杆应力主厂房最大为 227.6 MPa,调压井最大为 239.6 MPa。

表 1 三维计算主洞室的最大变位 mm

计算方法	主厂房			调压井		
	顶拱	上游边墙	下游边墙	顶拱	上游边墙	下游边墙
Marc 法	21.1	48.6	68.4	18.4	37.1	61.2
FLAC3D 法	26.5	66.7	53.3	32.2	62.3	67.3
断裂损伤有限元法	12.1	58.5	60.9	17.2	59.4	77.9

2.1.3 现场监控法

龙滩地下岩体构造复杂,洞室的跨度、高度、与相邻洞室关系、交叉洞室位置等都不相同,加之开挖爆破方式的变化等因素,使得支护设计必须在已实施支护的基础上,及时根据监测反馈成果分析应力和变位情况,评估支护参数,修改完善支护设计。

2.2 支护参数综合选择

2.2.1 锚喷参数选择基本原则

锚杆直径的选择应充分发挥其材料特性,使锚杆应力在具备一定安全度的情况下尽量接近其抗拉强度。锚杆长度应大于松动区厚度,且应有一定贮备,但不宜超过塑性区深度,一般取塑性区深度的 0.7 倍。系统锚杆在Ⅰ、Ⅱ类围岩中采用间、排距 1.5 m,在Ⅲ类围岩中及需要加强支护的部位,间、排距可增密到 1.2 ~ 1.0 m。

喷混凝土厚度一般取洞室开挖跨度的 1/100 ~ 1/120,大型洞室喷混凝土厚度取 150 ~ 200 mm。

2.2.2 支护参数综合选择

在上述设计方法和参数选择原则指导下,结合龙滩三大洞室围岩为典型中陡倾角层状岩体、上游边墙及左端墙岩体顺层剪切滑移变形、下游边墙及右端墙岩体倾倒蠕变等具体情况;考虑喷射混凝土根据不同部位采用钢纤维混凝土、聚丙烯微纤维混凝土或素混凝土,洞室交叉部位要求超前锁口支护等具体措施,以及锚索施工对地下洞室施工进度影响等因素,龙滩水电站主要洞室选择的锚喷支护综合参数见表 2。对特定的大块体,在开挖过程中及时判定,在通过稳定计算分析后,用锚索锚固不稳定的块体。如主厂房上游边墙 F_1 、 F_{56} 、 F_{56-1} 断层与层面和复合缓倾角节理组合楔体体积约为 730~3 000 m³,楔体高 10~16 m,考虑吊车梁荷载不利影响,计及部分结构面的 c 、 ϕ 值,采用预应力锚索和预应力长锚杆进行稳

定锚固。综合分析考虑,提出龙滩水电站三大洞室施工详图支护参数见表 2。

3 施工过程中支护设计参数的动态调整

施工过程中的支护设计,重点强调动态监控。如龙滩主厂房第二层开挖过程中和第三层开挖初期,曾出现下游拱角附近边墙多处顺层开裂(多系浅层开裂)及主厂房桩号 HL 0+0~0+50 段下游边墙拱脚段部分锚杆应力超过设计值的现象,且此两种现象多出现在泥板岩与砂岩互层岩体内下游边墙的拱脚段。经分析,该段岩性软硬相间,在顶拱开挖后,由于受应力集中、围岩松弛和爆破振动等多重影响,下游边墙向临空面产生倾倒变形,又因为层面光滑,抗剪强度较低,层间产生剪切变形,导致互层岩体接触面开裂,此时若锚

表 2 三大洞室支护参数

支护部位		围岩分类	支 护 参 数
主 厂 房	顶拱		锚杆 $\phi 28/\phi 32$ @1.5 m, $L=6$ m/8 m, 交错布置; 喷钢纤维混凝土厚 200 mm。 锚杆 $\phi 28/\phi 32$ @1.5 m, $L=6$ m/8 m, 交错布置, 其中长锚杆为预应力锚杆; 喷钢纤维混凝土厚 200 mm。 锚杆 $\phi 28/\phi 32$ @1.5 m $\times$ 1.2 m, $L=6$ m/9.35 m, 交错布置, 其中长锚杆为预应力锚杆; 喷钢纤维混凝土厚 200 mm。
	上游边墙	高程 221.70 m 以上	、 、 锚杆 $\phi 28/\phi 32$ @1.5 m (@1.2 m, 类围岩), $L=6$ m/9.5 m, 交错布置, 其中长锚杆为预应力锚杆, 另设 5 排 $L=20$ m、间距排 4.5 m $\times$ 6/4.5 m 的预应力锚索与锚杆交错布置, 喷钢纤维混凝土厚 200 mm。
	下游边墙	高程 221.70 m 以上	、 锚杆 $\phi 28/\phi 32$ @1.5 m $\times$ 1.5 m, $L=6$ m/9.5 m, 交错布置, 其中 类围岩长锚杆为预应力锚杆, 另下游边墙中上部设 3 排 $L=20$ m、间距排 4.5 m/6 $\times$ 6/4.5 m 的预应力锚索与锚杆交错布置, 喷钢纤维混凝土厚 200 mm。
	上游边墙	高程 221.70 m 以下	、 上游边墙: 锚杆 $\phi 28/\phi 32$ @1.5 m, $L=5.5$ m/8 m, 交错布置, 喷聚丙烯微纤维混凝土厚 200 mm。
	下游边墙		下游边墙: 锚杆 $\phi 28$ @1.5 m, $L=5.5$ m, 方形布置, 喷聚丙烯微纤维混凝土厚 200 mm。
主 变 洞	顶拱	、	锚杆 $\phi 25/28$ @1.5 m, $L=5$ m/7 m, 交错布置; 喷钢纤维混凝土厚 150 mm。
	上游边墙	、	锚杆 $\phi 28$ @1.5 m, $L=7$ m, 矩形布置; 挂 $\phi 6$ @250 $\times$ 250 钢筋网, 喷聚丙烯微纤维混凝土厚 150 mm。
	下游边墙	、	锚杆 $\phi 25/\phi 28$ @1.5 m, $L=4.5$ m/8 m, 交错布置; 与 3 个尾水调压井上游边墙间用 $L=32$ m、间距排 3 m $\times$ 4.5 m 共 4 排预应力锚索对穿, 挂 $\phi 6$ @250 $\times$ 250 钢筋网, 喷聚丙烯微纤维混凝土厚 150 mm。
尾 水 调 压 井	顶拱	、	锚杆 $\phi 28/\phi 32$ @1.5 m, $L=6$ m/8 m, 交错布置; 挂 $\phi 8$ @150 $\times$ 150 钢筋网, 喷聚丙烯微纤维混凝土厚 150 mm。
	上游边墙	高程 250.50 m 以上	、 锚杆 $\phi 28/\phi 32$ @1.5 m, $L=6$ m/8 m, 交错布置; 3 个尾水调压井上游边墙与主变洞下游边墙间用 $L=32$ m、间距排 3 m $\times$ 4.5 m 共 4 排预应力锚索对穿; 挂 $\phi 8$ @150 $\times$ 150 钢筋网; 喷聚丙烯微纤维混凝土厚 150 mm。
		高程 250.50~230 m	、 锚杆 $\phi 32$ @1.5 m, $L=9$ m, 喷聚丙烯微纤维混凝土厚 150 mm。
		高程 230 m 以下	、 锚杆 $\phi 32$ @1.5 m, $L=8$ m, 预应力端头锚固锚索 $L=20$ m、间距排 4.5 m $\times$ 4.5 m 共 5 排(1 号井)、4 排(2 号、3 号井), 喷聚丙烯微纤维混凝土厚 150 mm。
	下游边墙	高程 250.50 m 以上	、 锚杆 $\phi 28/\phi 32$ @1.5 m, $L=6$ m/9.5 m, 交错布置, 其中长锚杆为预应力锚杆; 挂 $\phi 8$ @150 $\times$ 150 钢筋网, 喷聚丙烯微纤维混凝土厚 150 mm。
		高程 250.50 m 以下	、 锚杆 $\phi 32$ @1.5 m, $L=8$ m, 与预应力端头锚固锚索 $L=25/20$ m, 间距排 4.5 m $\times$ 6 m, 共 6 排交错布置; 挂 $\phi 8$ @150 $\times$ 150 钢筋网, 喷聚丙烯微纤维混凝土厚 150 mm。
	端墙、隔墙	高程 250.50 m 以上	、 锚杆 $\phi 28/\phi 32$ @1.5 m, $L=6$ m/9.5 m, 交错布置, 其中 $L=9.5$ m 锚杆为预应力锚杆; 喷聚丙烯微纤维混凝土厚 150 mm。
		高程 250.50 m 以下	、 锚杆 $\phi 32$ @1.5 m, $L=8$ m(7.5 m), 与预应力锚索 $L=20$ m(、 井对穿锚索 $L=27$ m、9 排; 其它左端墙仅中下部设置 4 排、右端墙仅中上部设置 4 排)、间距排均 4.5 m $\times$ 4.5 m 交错布置, 喷聚丙烯微纤维混凝土厚 150 mm。

(下转第 68 页)

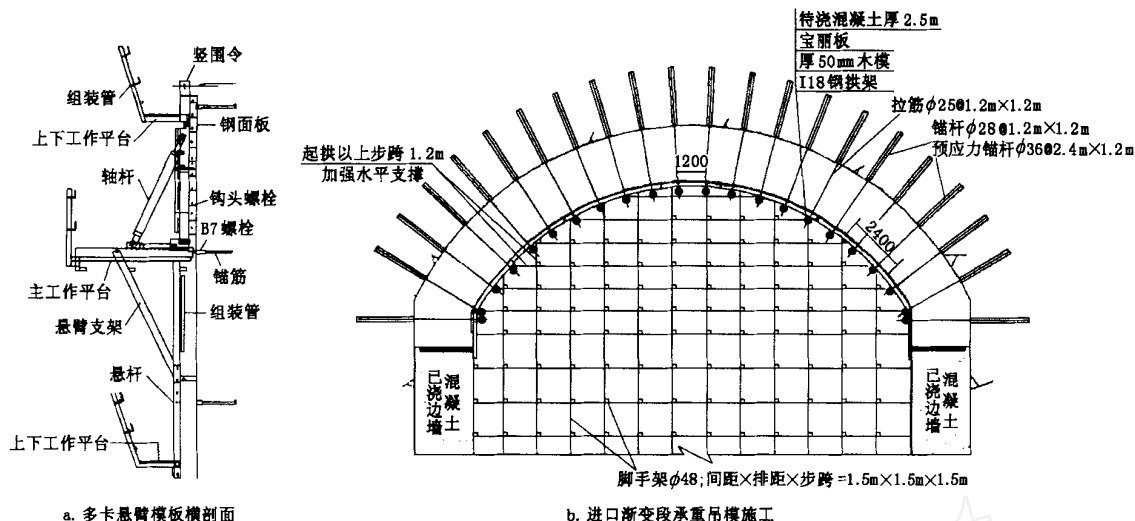


图 1 导流洞吊模及多卡悬臂模板示意

别运至洞内 ER 0 + 802 和 ER 0 + 030 桩号进行安装、调试。为防止台车上部变形张开,要用型钢对台车进行再加固处理;同时在混凝土浇筑过程中,要加强观察,发现有张开变形现象时,必须立即采取相应措施进行处理。钢筋帮扎前用棉纱适量地涂抹脱模剂,以易脱模和不污染表面为标准。

(2) 浇筑速度。为保证混凝土的振捣质量,控制温度上升速度,浇筑要分层进行,层厚不大于 40 cm,上升速度不大于 0.7 m/h。两侧边墙部位浇筑时,要保证两侧均匀上升。

(3) 钢筋绑扎。先用手风钻钻 50 cm 深的插筋孔,再组立架立钢筋;经测量检查合格后再帮扎结构钢筋。弯曲钢筋在加工厂加工,水平分布钢筋在现场加工。成形的钢筋运至施工现场后,人工按施工图纸和技术规范要求绑扎和焊接。钢筋表面应洁净无损伤,在使用前应清除油漆污染和铁锈等。钢筋绑扎完后,由质检工程师进行检查,合格后申请监理工程师验收。

(4) 止水安装。严格按施工图纸规定的型式、尺寸、位置 and 材料品种安装止水设施,安装好的止水片应加以固定和保护,混凝土浇筑过程中,在止水片附近应由人工用钢钎捣实混凝土,避免损伤止水片。损伤的止水片,必须修补或更换。

(5) 仓面验收。仓内所有项目完成并经自检合格后,将验收资料提交监理工程师验收。监理工程师签发开仓证后开仓浇筑混凝土。

(6) 混凝土浇筑。混凝土用 5 m³ 混凝土搅拌运输车从拌和站运至施工现场,泵送入仓。利用预留的浇筑窗口采用插入式振捣器振捣,并随浇筑的上升将浇筑窗口封闭,然后启动附着式振动进行表面振捣。不合格的混凝土严禁入仓,严禁向仓内加水。如发现混凝土和易性较差,应采取加强振捣等措施,以保证混凝土质量。为防止钢模台车变形,两侧混凝土应平行上升,上升速度应控制在 0.4 ~ 0.8 m/h,边墙应控制在 0.7 ~ 1.0 m/h,两台混凝土泵同时作业。

(7) 脱模、拆模及养护。钢模台车的脱模时间根据以前

工程的施工经验,通过合理的调整混凝土配合比可以比规范提前。第一块 48 h 后脱模,然后根据脱模情况再调整,一般采用浇完后 36 h 拆模。挡头模板在收仓混凝土终凝后即可拆模。在混凝土终凝后用草袋洒水覆盖养护。

(8) 缺陷处理、质量评定、竣工验收。混凝土浇筑完后,应立即对混凝土表面的局部缺陷进行处理直至达到设计要求。待所有的试验资料成果出来后,对每块混凝土进行评定,所有分块混凝土评定合格后,进行现场清理,满足合同要求后即进行分项工程验收。验收合格后方可进入下一工序。

龙滩水电站右岸导流洞于 2003 年 8 月 30 日以优良的质量提前竣工。2003 年 9 月 14 日经龙滩水电开发有限公司验收委员会一次性验收通过,荣获单位项目优良工程。

龙滩水电站右岸导流洞工程完成分部工程 9 个,全部评定为优良,单元工程验收 2 159 个,合格率 100%,优良率 88.7%,混凝土强度保证率 97%,强度标准差为 3.1 MPa,混凝土外观质量很好,表面平整,整个导流洞混凝土浇筑 15 万 m³,只有 5 条小于 0.02 mm 的不规则裂缝。

(上接第 46 页) 杆应力计布置在层面上,则必然产生较大的局部应力。针对上述情况,设计在相应部位采取了如下主要措施: 补充了部分长(预应力)锚杆以提高互层岩体的整体承载能力,此外还适当降低了预应力锚杆初始张拉值,以增强其对应力变化的适应能力; 将原来 6 m 长的普通砂浆锚杆直径增加到 32 mm。目前龙滩工程的主洞室已开始中下部开挖与支护,观测结果表明,上述部位变位及锚杆应力基本趋于稳定,主洞室其他部位设置的多点位移计测值一般较小,洞室处于稳定状态。

随着龙滩地下工程洞室的继续施工,其锚杆、锚索应力及围岩变位还会出现调整 and 变化,我们将及时收集各方面的反馈信息不断完善支护设计。