

某地下厂房施工过程中突发性破坏的分析及对策*

李仲奎 王爱民 李送成
(清华大学水利水电工程系, 北京, 100084)

文 摘 对某水电站地下厂房洞室群施工过程中的一次突发性塌方, 作了简介和分析。采用节理裂隙岩体非线性有限元法对洞群施工过程进行了跟踪模拟仿真计算, 并与现场监测资料对比进行反馈分析。同时对高地应力裂隙岩体中大型洞群各洞室间的相互关系、变形规律、破坏特征及原因, 以及相应工程对策提出了新的见解和建议。

关键词 地下厂房, 节理岩体, 高地应力, 变形, 破坏。

1 某水电站地下厂房简况

该水电站是目前世界第四位、亚洲第一位的一个大型水电站工程。其双曲拱坝高 240m, 库容 58 亿 m^3 ; 引用流量 $374m^3/s$, 设计水头 189m, 年发电量 170 亿度^[1, 2]。发电厂房全部布置在左岸坝肩岩体内, 埋深 250~ 300m, 距岸坡水平距离约 300m, 山坡坡度 $25^\circ \sim 40^\circ$ 。厂房枢纽布置见图 1。主厂房(长 \times 高 \times 宽: $246.0m \times 65.4m \times 30.7m$)、主变压器室($215.0m \times 25.0m \times 18.3m$)、尾水调压室($203.0m \times 70.3m \times 19.8m$)等三个洞室, 以及 6 个塔式进水口和压力管道、母线道、尾水管、两条尾水洞、交通洞、通风出线洞等其它洞室共同构成了非常复杂、规模宏大的洞室群(见图 2)^[3]。

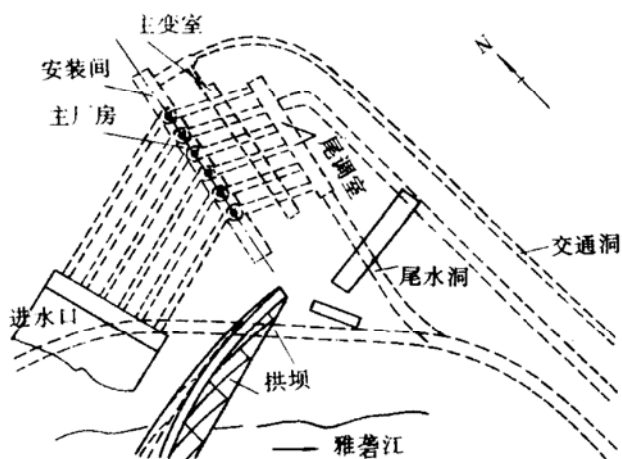


图 1 二滩水电站平面布置

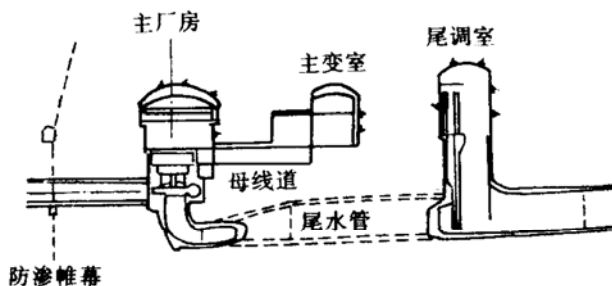


图 2 地下厂房洞群剖面图

2 厂区地质条件和高地应力

水电站地下厂房主要位于正长岩中, 局部为辉长岩和玄武岩, 在 6 号机组断面及第一副厂

* 到稿日期: 1996- 04- 26.

房上游顶拱部位, 有绿泥石化蚀变玄武岩出露。前三种岩石强度高, 整体性好, 裂隙连通率约为 50%, 平均抗压强度正长岩与辉长岩为 176MPa, 玄武岩为 176~ 215MPa, 有较高的蓄能条件和高地应力值, 在厂房附近的实测地应力值如下表所示:

表 1 地下厂房岩体应力实测值

编 号	位 置	σ_1			σ_2			σ_3		
		量值(MPa)	方位	倾角	量值(MPa)	方位	倾角	量值(MPa)	方位	倾角
σ_{4-4}	靠近 2 号机组	29.5	18°	40°	22.1	155°	42°	18.7	87°	- 24°
σ_{4-3}	靠近 6 号机组	24.4	38°	- 6°	23.1	135°	- 47°	9.8	123°	42°
σ_{4-2}	靠近 6 号机组	38.4	22°	26°	17.3	111°	- 3°	10.4	195°	63°

岩体中主要有以下 4 组裂隙:

- I 走向 NE30°~ 50°, 倾向 NW, 倾角 60°~ 80°;
- II 走向 NW40°~ 60°, 倾向 NE, 倾角 60°~ 70°;
- III 走向 NE50°~ 70°, 倾向 SE, 倾角 45°~ 75°;
- IV 走向 EW, 倾向 S, 倾角 25°~ 30°。

在厂区内计算范围中 I、II、IV 组裂隙较发育。主厂房的轴线方向为 NW6°, 与最大主应力方向呈 24°~ 40°角, 与主要裂隙面夹角为 50°~ 80°。这种布置方向对主厂房、主变室、尾调室三个主要洞室围岩稳定性来说, 无疑是有利的, 但是并非没有其它隐患。

3 塌方的情况和特点

1995 年 9 月 8 日下午 6 时许, 一声巨响之后地下厂房施工现场值班人员发现, 在母线道桩号 0+ 000~ 0+ 015 洞段, 1 号母线道南边墙, 2 号母线道北边墙及部分顶拱, 以及 1 号尾水管 0+ 040~ 0+ 080 洞段南边墙及拱座, 2 号尾水管 0+ 060~ 0+ 075 洞段北边墙, 同时发生了较大规模的塌方。2 号母线道北侧拱座附近形成约 1.5m 的深坑; 1 号尾水管南边墙塌方量约 140m³; 2 号尾水管北边墙塌方量约 70m³。在此之前, 2 号机组段部位曾多次发生喷层开裂、岩石剥落等轻度岩爆现象, 但未发生过较大规模塌方。塌方部位示意图如图 3 所示。与此同时, 1 号 2 号 3 号母线道中均发现有程度不同的裂缝, 以 2 号最为严重, 缝宽达 40~ 45mm, 底板裂缝最宽处达 80mm, 如图 4 所示。

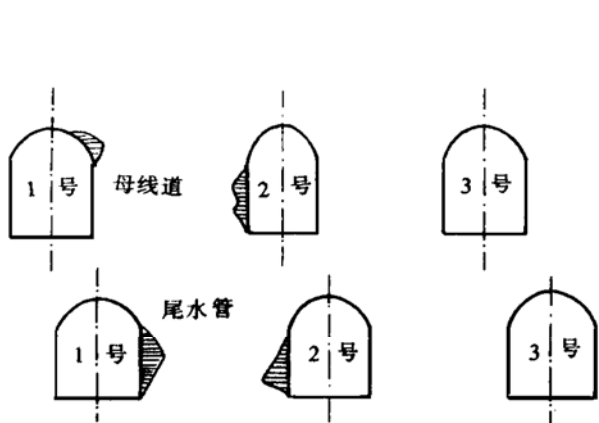


图 3 1, 2 号母线道尾水管塌方部位示意图

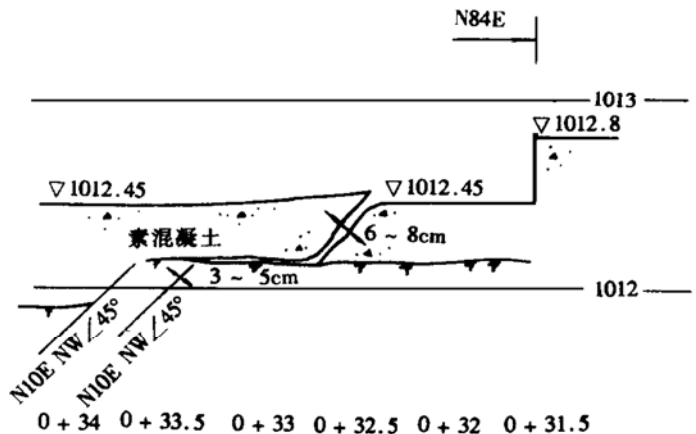


图 4 母线道底板裂缝形态图

在该水电站地下厂房枢纽中布置了 12 个监测断面, 埋设了多点位移计及锚杆应力计等监

测仪器。9月8日发生塌方之时,位于主厂房1号,2号母线道之间岩柱部位的多点位移计 PHM11 和 PHM12 监测到的位移值突然升高,其中 PHM12 位移由 27.7mm 突增到 62.7mm。图 5 和图 6 分别表示了这两支位移计的位置和位移时间关系曲线。

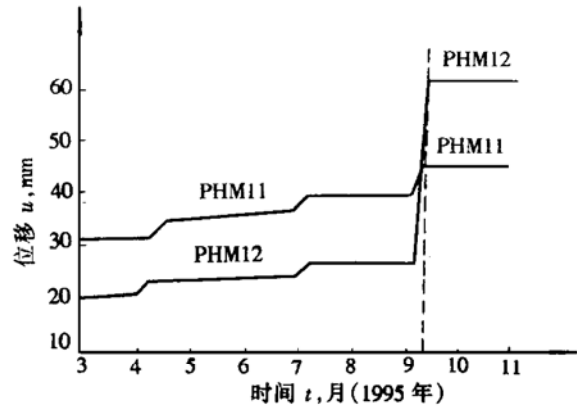
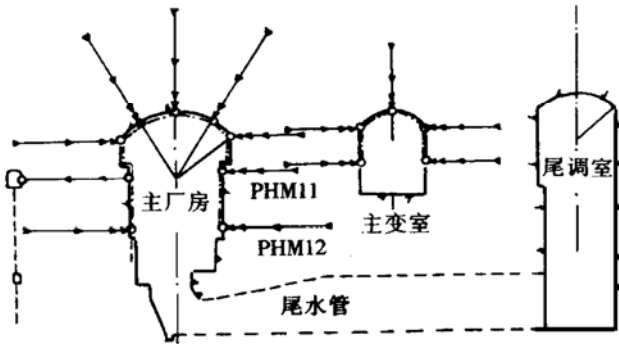


图 5 多点位移计 PHM11 和 PHM12 的位置示意图

图 6 两支多点位移计位移时间曲线的突变

这一塌方有几个特点: ①塌方规模较大, 发生突然; ②塌方发生时没有任何开挖爆破活动; ③塌方没有发生在跨度大、边墙高的主要洞室, 而是发生在断面尺寸小得多的次要洞室; ④地下厂房有 6 个机组段, 塌方发生在岩体材料均匀单一强度较高的 2 号机组段附近, 而没有发生在地质条件较差些的 5 号, 6 号机组段。下面将对这些问题加以分析。

4 产生塌方的基本因素和诱发因素

这次突发性塌方的产生, 笔者认为是多方面因素的组合造成的, 有内在的外在的, 有长期作用的和直接诱发的因素等等。经调查研究和计算分析, 有如下几点值得提出来供讨论。

4.1 母线道、尾水管的布置与高地应力的相对关系

在地下厂房布置方面, 洞室轴线与地应力的关系至关重要^[4]。原则上说洞室长轴与第一主应力方向应尽可能平行, 这样有利于围岩的稳定。厂区第一主应力方向约在 NE20°左右。在布置地下厂房时, 三个主要洞室轴线相互平行, 方向为 NW6°, 与第一主应力呈小角度相交, 与厂区岩体中几组主要节理方向呈大角度相交(见图 7 所示), 这无疑是正确的。但是这样一来就不可避免地将母线道和尾水管布置在一个从地应力角度和节理方向考虑都最为不利的位置上。母线道与主厂房垂直, 其轴线与主应力方向呈 66°夹角; 而尾水管轴线又向河岸侧偏了 15°, 与第一主应力呈 81°角, 近乎正交, 而与第二组节理方向夹角过小, 对尾水管洞周围岩稳定更为不利。这是在上述两个部位容易产生失稳的内在不利原因, 也回答了上一节中提到的第三个问题。

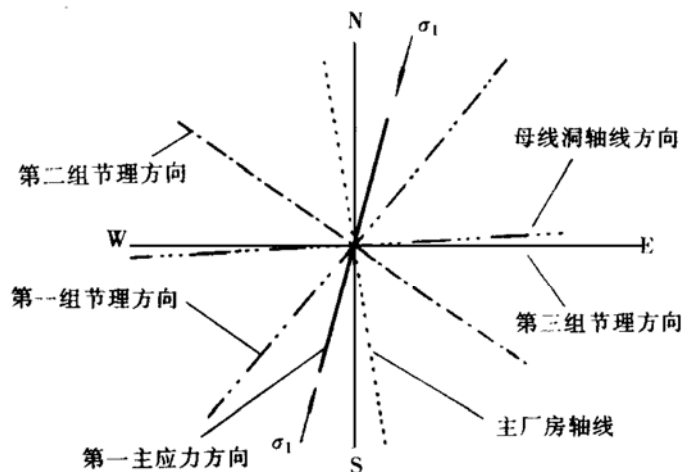


图 7 洞群轴线与地应力及节理方向的关系

图 7 洞群轴线与地应力及节理方向的关系

4.2 洞间岩柱的侧向卸载及垂向应力

为了进一步分析塌方的原因, 我们认为应把着眼点由洞室(母线道和尾水管)转移到由于洞室开挖而造成的四面临空的岩柱上来, 实际上塌方体正是位于岩柱的两侧。以 1 号, 2 号母线道之间的岩柱为例, 由于母线道以及主厂房和主变室的开挖, 中间保留的岩体已成为四面临空的岩柱(如图 8 所示)。由于尾水管断面较大, 尾管之间的保留岩柱断面会更小一些。如果粗略地折算一下, 图中 *a*, *b*, *c*, *d* 4 点包围的面积上的全部应力在开挖之后要由中间的岩柱来承担, 若再考虑不当的开挖造成超挖和破坏使岩柱的有效断面减少, 岩柱垂直应力会达到原应力值的 5~6 倍以上, 完全可能超过原岩体单轴抗压强度 176MPa 而发生破坏。开挖过程对岩柱体来说, 侧向是卸载过程, 垂向是加载过程, 侧压的降低会显著降低岩体的强度。这两个逆向过程同时发生在洞间的岩柱上, 加大了岩柱的破坏可能性。对于 6 号机组断面来说, 垂向地应力值仅为 2 号机组断面的 60%, 水平地应力与 2 号差不多, 虽然开挖条件、岩柱断面尺寸都相同, 开挖也会引起侧向的卸载和垂向的应力集中, 但由于垂向应力较低, 应力集中水平也较低, 因而没有发生破坏塌方。这一点从有限元分析结果中也得到了证明。

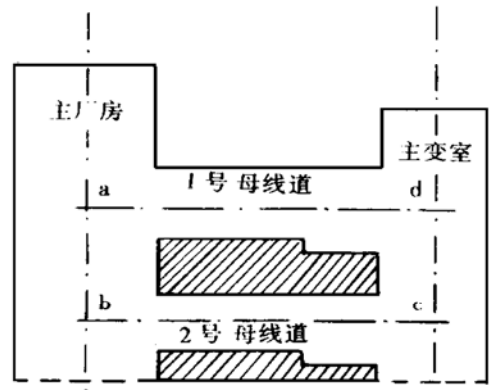


图 8 洞群开挖造成的四面临空的岩柱示意图

4.3 有限元分析

在塌方发生之前我们曾分别对 2 号机组断面和 6 号机组断面进行了高地应力节理岩体洞群的非线性有限元分析, 使用程序为 NAPARM95^[5,6]。计算结果表明, 2 号机组断面中母线道附近的岩体为一个贯通性低安全度区域, 大多数单元处于临界破坏状态, 有些单元安全系数已小于 1.0。由于计算中未考虑超挖、爆破松动区以及岩柱部位裂隙贯通等因素, 上述区域的范围会比计算的更大一些。而由于地应力情况不同, 6 号机组断面的计算结果就没有这种情况。

塌方之后为了深入分析洞群发生这次破坏的原因和机理, 我们又进行了横切水流方向的母线道和尾水管断面的有限元分析。这个断面横切 6 个母线道和尾水管, 初始地应力场由多个实测点应力反分析生成, 不同的机组位置具有不同的地应力值。计算结果清楚地反映出, 母线道和尾水管之间岩柱的破坏情况由 1 号~ 6 号机组逐步减轻、消失, 破坏规律性明显, 与实际发生的情况很相似。这一情况如图 9 所示。

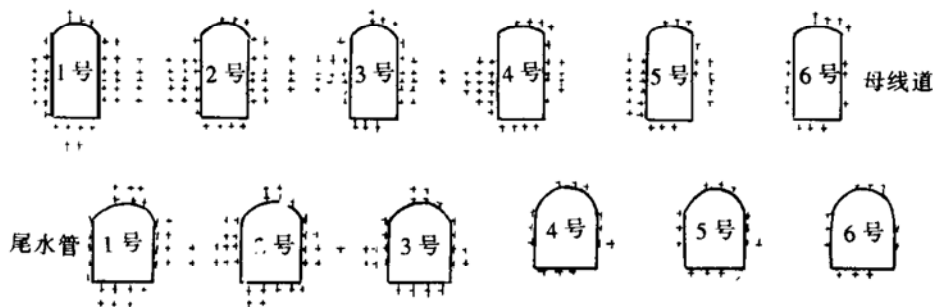


图 9 母线道尾水管断面松弛破坏区分布特征图

4.4 锚索失效产生的冲击荷载

在地下厂房开挖过程中, 每次喷层开裂、表层岩石掉块以及多点位移计量测值突然增加,

总是与较大规模的爆破开挖活动密切相关的。一次开挖方量越多,能量释放越大,冲击性卸载和加载量级越大,上述现象就越明显。但在9月8日塌方发生时,地下厂房附近区域均无开挖爆破进行,是什么原因诱发这次较大规模的洞室破坏呢?

笔者在现场观察到一个奇怪的现象(见图10),即在2号母线道附近的位于主厂房下游边墙高程1014处的锚索保护罩,有向外鼓出的现象,且有许多向外凸起的小鼓包,小鼓包的大小与锚索中每根钢丝束的直径相近。这些鼓包显然是锚索钢丝由内向外冲击保护罩而形成的,产生如此明显的变形说明冲击力是相当大的。一种合理的解释应该是,由于锚索锚固端失效,200t以上的锚固力(初始张力175t),突然释放出来,使钢束向外弹出撞击在保护罩上形成一片凸点。附近还有五六根锚索有这种现象。可以推断,9月8日在没有任何开挖爆破情况下发生的1号、2号母线道和其下面的1号、2号尾水管的塌方,以及洞室监测断面内多点位移计明显增值和锚杆应力计突变,其直接诱发因素就是来自这些锚索突然失效而产生的冲击性荷载(卸荷)。

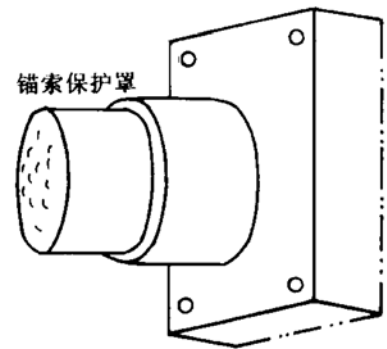


图10 锚索保护罩变形示意图

5 塌方对主要洞室的影响

母线道、尾水管等与主厂房等相比较,在整个地下厂房洞群中占次要地位。但次要并非不重要,次要洞室的不稳定同样会危及到主要洞室的安全。从布置原则来看,次要洞室总是处于洞群中最不利的位置和恶劣的条件之下,因此它们的稳定性就显得更为重要,次要洞室的稳定在某种意义上说就是主要洞室稳定的必要条件。9月8日的塌方产生于这些次要洞室之间岩柱的松弛破坏,同时也引起了主厂房顶拱位移的增大,主厂房下游侧高边墙向厂内的突然变形、开裂。主厂房下游侧的岩台吊车梁也设置在这些岩柱上,岩柱的不稳定势必会影响到吊车将来的安全运行。母线道和尾水管之间的岩柱实际是起到支撑主厂房顶拱下游拱座和主变室顶拱上游拱座的作用,这些岩柱的松弛会直接影响这两大洞室的稳定。

6 结论、对策和建议

(1) 1995年9月8日地下厂房塌方是由于高地应力、洞室(次要洞室)不利布置、开挖引起的卸载和应力集中,洞室之间岩柱内节理裂隙贯穿引起岩体弱化等内在因素和工程因素,以及局部锚索突然失效引起冲击性荷载等诱发因素共同作用而造成的。

(2) 地下厂房洞室群是复杂的空间系统结构。为了保证主要洞室的安全,往往把次要洞室置于最不利的地位,但次要洞室与主要洞室是密切相关的,是主要洞室稳定的前提和必要条件。因此次要洞室的安全要引起特别重视,并且要用较强的支护措施进行保护。可以总结出这样一条原则:在布置上要着重考虑主要洞室的稳定,在施工支护上要更加重视次要洞室的稳定。

(3) 实测资料表明,洞室周围因爆破开挖引起的松动区约有6~7m深,半松动区约为7~13m,因此母线道之间和尾水管之间的岩柱部位松动区已贯通,锚索的锚固段在松动区中很容易失效,因此应采用对穿锚索进行锚固。

(4) 在高地应力、坚硬节理裂隙岩体中开挖洞室,洞周围岩的变形规律是台阶形的,位移的

增加与爆破开挖活动密切相关, 位移的产生除弹性变形外主要是由于裂隙的突然扩展和贯通造成。为了增加裂隙面强度, 提高岩体整体性, 保持洞室长期稳定, 对洞周岩体特别是岩柱部位的松弛岩体, 除用锚杆锚索支护之外, 进行固结灌浆应是更有效的方案。这种灌浆可与锚固钻孔结合进行, 灌浆时机和压力应进行研究, 但肯定是可行的和必要的。

(5) 地下厂房结构复杂、规模巨大、不确定因素很多, 大多数参数无法事先准确定出, 因此施工监测至关重要。根据监测资料进行反馈分析和反馈设计是地下工程施工中必不可少的重要环节, 应予充分重视^[4]。

本文工作得到二滩水电开发公司、电力部成都勘测设计研究院有关领导和同志的支持和帮助, 特表示诚挚的感谢。

参 考 文 献

- 1 二滩水电站初步设计综合说明书. 电力工业部成都勘测设计研究院. 1985.
- 2 二滩水电开发公司. Ertan Hydropower Project Progress Report to the World Bank. No. 8. EHDC, Ertan, Sichuan, China, 1994. 3
- 3 李沃钊. 二滩水电站地下厂房洞室设计简介[研究报告]. 成都勘测设计研究院. 1986.
- 4 谷兆祺, 彭守拙, 李仲奎. 地下洞室工程. 北京: 清华大学出版社, 1994. 72~ 79, 167~ 178.
- 5 裴觉民. 复杂岩体非线性有限元程序. 清华大学学报, 1988, 28(增1): 70~ 81.
- 6 裴觉民, 李仲奎. NAPARM 94 岩体工程非线性有限元分析程序用户手册. 北京: 清华大学水利水电工程系, 1994.

Analysis for a Triggered Collapse in Construction of a Underground Powerhouse

Li Zhongkui Wang Aimin Li Songcheng
(Dept. of Hydraulic Eng. Tsinghua Univ., Beijing, 100084)

Abstract Ertan Hydropower Project is located on Yalong River in Southwest China, Sichuan Province. It is the largest underground hydropower station in Asia. Six Francis units are installed in the powerhouse, which is located in the rock mass of the left-side bank of the river. At the site of underground powerhouse intact syenite and basalts with mainly three sets of joints and very high initial stress are predominant. Reasons of triggering collapse in busbar galleries and tail pipes and large deformation in powerhouse happened last year are analysed by different means. Results are compared with the observation data obtained insitu. Some new opinions on the stability of the underground complex are presented.

Key words underground powerhouse, jointed rock mass, high initial stress, deformation, breakdown.