

急倾斜层状岩体中巨型地下洞室群开挖施工理论与优化研究*

陈卫忠¹ 李术才^{1,2} 朱维申^{1,2} 杨典森¹ 杨为民² 林 晖³

(¹中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室 武汉 430071)

(²山东大学岩土与结构工程中心 济南 250061) (³厦门市路桥建设投资总公司 厦门 361009)

摘要 洞室群的开挖顺序和支护是影响洞室稳定性的重要因素。应用三维断裂损伤有限元法和施工过程力学的基本原理,研究龙滩电站急倾斜岩层中开挖大型地下洞室群的稳定性及最优的施工方案,根据围岩的破损区及位移场的变化规律,提出了较优的开挖施工方案。其计算方法和一些结论可为国内的相关工程设计和建设提供借鉴。

关键词 地下工程,急倾斜,层状岩体,巨型地下洞室,施工优化

分类号 TD 823.21⁺3

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)19-3281-07

EXCAVATION AND OPTIMIZATION THEORY FOR GIANT UNDERGROUND CAVERNS CONSTRUCTED IN HIGH DIPPING LAMINAR STRATA

Chen Weizhong¹, Li Shucui^{1,2}, Zhu Weishen^{1,2}, Yang Diansen¹, Yang Weimin², Lin Hui³

(¹Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

(²Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061 China)

(³Xiamen Road and Bridge Investment Company, Xiamen 361009 China)

Abstract Construction sequences and support parameters have strong influence on stability of giant underground caverns. Based on 3D fracture and damage FEM and fundamental principles of dynamic construction mechanics, numerical simulations are conducted to obtain the optimal construction sequences for the caverns constructed in high dipping laminar strata of Longtan hydropower station, China. The size of the powerhouse caverns is the largest in the world. The optimal construction sequences of the caverns are obtained by comparing the damaged zone of surrounding rock mass with displacements of key points around the caverns. The numerical methods and some conclusions from the research work are useful for the design and construction of analogous rock engineering.

Key words underground engineering, high dipping, laminar strata, giant underground cavern, optimization of construction sequence

2003年3月13日收到初稿,2003年6月6日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(50379052)和中国科学院重大创新方向性项目(KGCX2-SW-302)及国家自然科学基金杰出青年(B类)(50229901)资助课题。

作者 陈卫忠 简介:男,36岁,博士,1990年毕业于山东科技大学采矿系,现任研究员、博士生导师,主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn.

1 引言

我国已建设了大量的地下工程,如铁路、公路隧道,水电站地下厂房,冶金矿山及煤矿巷道,地下铁道及人防工程等。据不完全统计,目前,我国铁路部门已建成的隧道超过5 000座,水电站在导流洞、引水洞、泄洪洞、进出场交通洞、大型地下厂房等方面的建设规模都非常大。对于水电站的地下厂房,洞室群的布局对改善洞室围岩的稳定性十分重要,现在设计中已经非常重视洞室纵轴线的方位及洞室间距的选择。目前在建和设计阶段的大型地下洞室群的主厂房和调压井,高度都为80~90 m,宽度为20~30 m,轴线的长度为300 m,其宽度和跨度之大可以列入世界水平。这样的巨型洞室对高边墙的围岩稳定性十分不利,在高边墙上将会产生大片的塑性区和拉损区。因此,巨型地下洞室群的合理开挖过程、支护时机及支护强度的研究及相关的设计理论已成为当前水电开发中亟待研究解决的重大课题。

从力学观点看,地下工程围岩的稳定性是指在一定的地应力和工程荷载的作用下,围岩中不产生破坏性的剪切滑移。比较好的设计方案应该保持洞室处于稳定状态并保证规定的安全系数。在地下工程中,主要以边墙测点的相对收敛变形、收敛变形速率、塑性区范围大小和拱顶是否发生较大塌落等标准判断洞室围岩的稳定性。对于浅埋大跨度地下工程,结构所受荷载以浅层岩体的自重为主,洞室的破坏形态主要表现为以拱脚部位的塑性区发展,从而导致拱部较大下沉变形,失去稳定,以及拱部拉裂破坏并导致洞室的塌方。因此,可以选择塑性区面积、最大塑性区半径、拉裂破坏区面积以及顶部的相对下沉量作为标准来判定洞室的稳定状态。对埋深大、围岩完好的地下洞室,研究重点一般放在对围岩承载能力的研究上,以围岩实际的应力水平来作为围岩稳定的判据。日本的土屋敬认为,深埋隧道塑性区厚度不宜大于洞室半径的40%。文[1]认为对于浅埋隧道,塑性区半径不应大于1倍的洞室跨度,同时拱顶的拉应力面积为 $2\sim 4\text{ m}^2/\text{m}$,顶拱下沉小于 $2bL/100EC_m$ (E 为岩体弹模, C_m 为龟裂系数, L 为洞室跨度); b 为系数,当单轴抗压强度 R_c 小于30 MPa时, b 为0.02~0.04;当 R_c 大于30 MPa时, b 为0.01~0.02。文[2]提出应用极限

张应变来判断硬岩中洞室围岩的稳定性。对于地下洞室结构体系的失稳判定标准,目前国内外还没有一套统一的准则,因为影响稳定性的因素较多且不定因素也很多^[3]。因此,在工程的设计过程中,通过数值计算来定性地反映工程开挖过程中的围岩内应力和位移随开挖的变化规律显得尤为重要。本文结合国内在建的规模最大的龙滩大型电站厂房,运用数值计算方法,探讨急倾斜岩层中巨型地下洞室群的围岩稳定性及施工优化方法的分析方法,提出了一些可供工程设计和施工单位参考的方案和建议。

2 工程概况

龙滩大型水电站由碾压混凝土重力坝、泄水建筑物、通航建筑物及地下发电厂房等组成。其拦河大坝、左岸全地下厂房、全地下式发电厂房布置在左岸,主要建筑物包括:进水口、引水隧洞、主厂房、母线洞、主变室、调压井、尾水隧洞、交通洞、排水廊道、送风廊道、出线平台、GIS开关站、中控楼、电缆竖井等。主要地下工程在初期建设时,一次性开挖完成。水电站输水发电系统规模巨大,地下洞室群纵横交错,总开挖量约 $380\times 10^4\text{ m}^3$ 。3条尾水管共用1个调压井和1条尾水洞,尾水洞为3个圆形隧洞,9条母线洞垂直厂房轴线平行布置,连通厂房和主变室,它们在地下将构成复杂的地下洞室群。其主厂房的尺寸为 $388.5\text{ m}\times 28.5(31.3)\text{ m}\times 74.5\text{ m}$;主变洞为 $405\text{ m}\times 19.5\text{ m}\times (32.2\sim 34.2)\text{ m}$;调压井为 $(67\sim 95.3)\text{ m}\times 21.575\text{ m}\times 89.71\text{ m}$ 。

厂房区内为三叠系中统板纳组(T_{2b}^{1-52}),岩层走向 $340^\circ\sim 356^\circ$,与河谷夹角 70° ,倾向NE,倾角为 $55^\circ\sim 63^\circ$ 的急倾斜岩层。岩性为厚层砂岩粉砂岩(占68.2%)和泥质板岩砂岩互层(30.8%),新鲜砂岩单轴饱和抗压强度为130 MPa,泥板岩为40~80 MPa。 T_{2b}^{18} 泥板岩在压应力方向与泥板岩劈理面呈 $25^\circ\sim 30^\circ$ 夹角时,单轴饱和抗压强度仅13.4~23.4 MPa。主洞室布置区,顶拱上覆岩体的厚度为100~280 m,围岩新鲜完整,90%以上为 α_2, α_1 类围岩。有8组陡倾角节理,对地下洞室稳定性影响较大的有2组,其产状为: $345^\circ\sim 355^\circ\text{NE } 60^\circ$ 和 $40^\circ\sim 55^\circ\text{NE } 52^\circ\sim 55^\circ$,迹长3.0 m。整个厂房区域内影响洞室稳定性的主要断层如表1所示,主厂房区域的岩层分布及其结构模型如图1所示。

表 1 主厂房区域分布的几组主要断层
Table 1 Main faults around main powerhouse caverns

断层分类	断层性质	断层编号	破碎带宽/m	胶结状态
第 1 组	层间断层、层间错动走向 340°~355° /NE 55°~65°	F ₅ , F ₁₂ , F ₁₈ , F ₂₂ , F ₇₅	0.1~1.5	未胶结, 压碎岩充填石英脉夹泥厚 3~8 cm
第 2 组	层间断层、层间错动走向 30°~60°NW 60°~65°	F ₆₃ , F ₆₉ , F ₅₆ , F ₅₆₋₁	0.5~3.6	充填破碎糜棱岩断层泥厚 30~60 cm
第 3 组	层间断层、层间错动走向 N70°~90° W/NE 或 SW 70°~85°	F ₁ , F ₄	0.1~1.5	破碎糜棱岩, 断层泥厚 2~10 cm
第 4 组	层间断层、层间错动走向 N65°~85° E/NW 或 SE 75°~85°	F ₆₀ , F ₈₉ , F ₁₈₉	影响带宽 1~12 m 0.3~0.4	未胶结破碎岩夹大量断层泥, 富含地下水

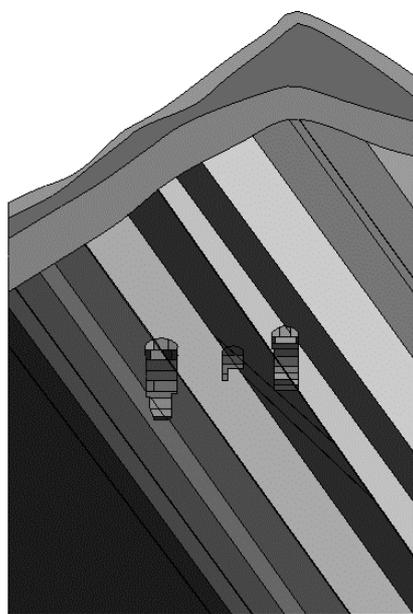


图 1 地下洞室群岩层分布及主厂房洞室群的三维模型

Fig.1 Distribution of rock mass and 3D numerical model of main powerhouse caverns

3 巨型地下洞室群施工顺序优化

3.1 开挖施工方案

在空间结构上的地下洞室群洞室相互交叉, 洞室群的周围遇到的断层一般为三维走向。洞室群的三维空间结构关系随着洞室的开挖而发生变化, 不同的开挖施工顺序对应不同的应力调整过程和支护工作量。优化洞室群的开挖施工顺序, 加快施工进度是优化工作的重点内容。根据龙滩地下洞室群的结构以及围岩的分布特征, 在设计院的推荐方案、承包商的推荐方案的基础上, 应用动态施工过程力学的基本原理^[4]和国内外其他大型洞室群的施工经

验^[5-8], 结合龙滩工程厂房的实际状况提出了另外 3 种推荐开挖方案。按照设计院初步设计, 主厂房、调压井各分 9 个开挖层, 主变室分 4 个开挖层, 3 大洞室从上到下分层开挖示意图 2 所示。本文所考虑的 5 种开挖方案如表 2 所示。

3.2 计算方法和原理

裂隙岩体内包含了从微观到细观以至宏观的各种尺度的地质缺陷, 而且岩体从原始状态到最终破坏的整个变形过程中, 同时存在分布缺陷和奇异缺陷, 且相互作用和转化。工程岩体的开挖将使岩体在开挖面附近的荷载发生变化, 并使应力重分布, 应力的释放和集中将使原有的裂隙张开和扩展, 并产生新的裂隙。岩体内微裂隙的扩展和演化到一定

式中: K_{klrs} 为裂隙岩体的弹塑性损伤刚度矩阵, 其值为

$$K_{klrs} = E_{klrs}^{e-d} - \frac{E_{uvkl}^{e-d} \frac{\partial f}{\partial s_{uv}} \frac{\partial f}{\partial s_{ij}} (E_{opmn}^e \frac{\partial C_{ijop}^{ad}}{\partial s_{fg}} s_{mn} + E_{opfg}^e C_{ijop}^{e-d}) E_{rsfg}^{e-d}}{\frac{\partial f}{\partial s_{ij}} (E_{opmn}^e \frac{\partial C_{ijop}^{ad}}{\partial s_{kl}} s_{mn} + E_{opkl}^e C_{ijop}^{e-d}) E_{rskl}^{e-d} \frac{\partial f}{\partial s_{rs}} - \frac{\partial f}{\partial q} h} \quad (3)$$

3.3 初始地应力场和岩体力学参数

龙滩地下洞室群(厂房、主变洞、调压井等)90%以上为质量中等或较好的, Ⅱ类围岩, 岩体大部分为微风化~新鲜完整岩体, 是以水平地应力为主导的中等量级的地应力场。根据现场地应力的实测结果, 在数值计算时垂直主厂房边墙方向的侧压系数为 $I = 1.7$, 垂直主厂房端墙的侧压力系数 $I = 2.2$ 。数值分析时采用的岩体基本力学参数如表3所示。

3.4 计算结果

3.4.1 位移场的特点

主厂房、主变室和调压井随着工程的开挖和高边墙的形成, 岩体的变形总体呈逐渐增加的趋势, 但顶拱部位的岩体具有先下沉后抬升再下沉的特点。主厂房和调压井的高边墙位移呈现近水平倾倒性的特点, 这个变形特点与岩体内高水平地应力密切相关。主变室的下游边墙在开挖结束时发生偏向调压井的位移。以剖面 HL0+258.0 为例, 设计院开挖方案在主厂房洞室群开挖结束时, 洞室边墙的位移矢量如图3所示。从5个开挖方案的计算结果来看, 方案2的顶拱沉降位移最小, 主厂房顶拱下沉在高边墙开挖和形成过程中, 共产生约3 mm的上抬。HL0+51.0, Hlo+150.0, HL0+258.0 剖面顶拱的下沉随开挖步的变化如图4~6所示。该剖面5个开挖方案各关键点的位移见表4。

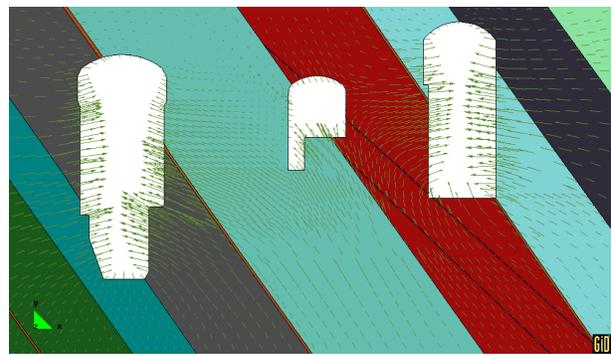


图3 HL0+258.0 剖面洞室边墙的位移矢量(设计院方案)

Fig.3 Displacement vectors of walls on profile HL0+258.0 (design institute scheme)

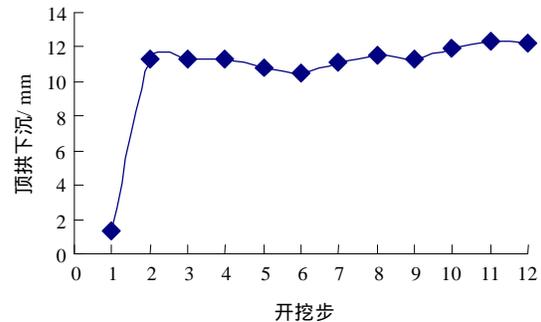


图4 HL0+51.0 剖面主厂房顶拱下沉随开挖步的变化规律(设计院方案)

Fig.4 Variation of arch top settlement of the main powerhouse with excavation steps at section of HL0+51.0 (design institute scheme)

3.4.2 岩体损伤演化特征

工程岩体的开挖将使岩体在开挖面附近的荷载发生变化, 并使应力重分布, 应力的释放和集中将使原有的裂隙发生张开和扩展并产生新的裂隙, 岩体内微裂隙的扩展和演化到一定的程度就会使得洞室围岩产生宏观破坏现象, 甚至出现张裂缝。从几

表3 主厂房区域岩体基本力学参数

Table 3 Mechanical parameters of rock mass

岩层	变形模量/GPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦系数	抗拉强度/MPa	容重/ $kN \cdot m^{-3}$
微风化-新鲜砂岩	15.0	0.25	2.40	1.30	1.30	27.3
微风化-新鲜泥板岩	10.0	0.27	1.48	1.10	1.00	27.4
微风化-新鲜互层(砂岩70%)	13.0	0.26	1.28	1.10	1.00	27.4
弱风化砂岩	6.0	0.28	1.48	1.00	1.00	27.0
弱风化砂岩泥板岩互层	5.0	0.28	1.18	0.80	0.80	26.8
强风化砂岩	1.5	0.34	0.50	0.75	0.08	25.5
强风化泥板岩	0.7	0.34	0.29	0.55	0.08	25.5
断层	0.5	0.34	0.05	0.30	0.00	20.0
层理	1.0	0.34	0.05	0.30	0.00	20.0