

龙滩水电站地下洞室群围岩变形与稳定性的二维弹塑性分析

梅松华^{1,2}, 盛 谦², 邓建辉²

(1. 河北大学 机械与建筑工程学院, 河北 保定 071002; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 龙滩水电站是红水河上的关键工程, 其主要特点是地下建筑洞群结构复杂, 规模巨大, 且岩层为陡倾角层状结构岩体; 两者的耦合作用, 使洞室群围岩的稳定性, 特别是主厂房与调压井的高边墙、洞室交叉口部位的变形稳定性尤显复杂, 倍受关注. 本文通过对龙滩工程厂房区地质调查, 结合洞群结构分析, 建立了工程地质概化模型, 采用二维弹塑性有限元对地下厂房洞室群的施工开挖进行模拟, 对比分析了多种不同条件下的洞室群开挖变形、应力以及屈服区的分布特征, 获得了一些有益于指导施工的结果.

关键词: 龙滩工程; 地下厂房洞室群; 岩体变形; 弹塑性分析

中图分类号: TU 91 文献标识码: A 文章编号: 1000-1565(2004)04-0357-05

龙滩水电站是红水河上以发电为主, 兼顾防洪和航运的关键工程. 主要地下建筑洞群结构复杂, 包括9条引水洞、主厂房、主变室、9条母线洞、9条尾水支洞、3个调压井、3条尾水洞、进厂交通洞和其他辅助洞室. 其中: 主厂房尺寸为 $388.5\text{ m} \times 30.3\text{ m} \times 74.5\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)^[1]; 主变室位于主厂房的下游侧, 平行主厂房布置, 两洞室之间的岩壁厚约43 m; 调压井位于主变室下游, 平行于主变室布置, 2者之间岩壁厚约27 m.

由于洞室纵横交错, 跨度大, 边墙高, 围岩为陡倾角层状结构岩体, 且层间错动较发育, 因此, 洞室围岩稳定性分析, 特别是主厂房与调压井的高边墙以及各洞室之间岩墙(柱)的稳定性分析、洞室交叉口的稳定性分析, 以及施工开挖、支护和监控设计是工程建设的关键技术问题.

1 地下洞室群地质条件^[2]

坝址区出露地层为三迭系下统罗楼组(T_{1L})和中统板纳组(T_{2b})地层; 罗楼组为薄—中厚层泥板岩、泥质灰岩夹少量粉砂岩构成, 总厚度259.19 m. 板纳组地层(T_{2b}^{1-52})总层厚约1 219.07 m, 由薄至厚层砂岩、粉砂岩和泥板岩夹少量层凝灰岩、灰岩组成. 地下建筑物主要布置在板纳组地层中.

厂址位于近南北向的八奈背作法东翼, 龙滩向作法西翼, 为一单斜构造, 正常岩层产状: $345^\circ \sim 355^\circ / NE/57^\circ \sim 62^\circ$; 发育的主要断层有5组; 对输水发电系统布置影响较大的有 F_1, F_5, F_{12}, F_{18} 和 F_{63} 等断层, 其破碎带宽0.1~1.5 m.

2 计算条件

2.1 地质概化模型与计算域

针对龙滩水电站地下洞室群工程地质特征和结构形式, 建立地质概化模型, 计算区域内包含了以下地

收稿日期: 2003-11-18

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)资金资助项目(2002CB412708); 中国科学院武汉岩土力学研究所前沿领域基金资助项目(Q 000216)

作者简介: 梅松华(1974—), 男, 江西九江人, 河北大学讲师, 中国科学院武汉岩土力学研究所在职博士研究生.

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

层:砂岩组: T_{2b}^{25} , T_{2b}^{28-30} , T_{2b}^{38-47} . 砂岩、泥板岩互层组: T_{2b}^{19-24} , T_{2b}^{26-27} , T_{2b}^{31-37} , T_{2b}^{48} , T_{2b}^{50} . 选取典型断面—1 #机

组段剖面(桩号: HL0+000.250)进行分析.
 计算模型的 x 向范围为 600 m, y 向范围为地表至高程 450 m, 其中 x 轴与厂房轴线垂直, 指向下游方向为正; y 轴为铅直方向, 向上为正.

计算域的位移边界条件如下: 底部采用固定铰支座, 两侧为法向约束, 如图 1.

2.2 初始地应力场^[2-3]

1)垂直方向应力为重力(y 向);

2)水平方向应力按侧压力系数方法施加: x 向, $\lambda = 1.7$; z 向(厂房轴线方向), $\lambda = 2.2$; 风化层仅考虑自重应力场, 无构造应力场作用.

2.3 本构模型及参数弱化

采用 Mohr-Coulomb 和 Drucker-Prager 准则.

弹性模型: 线弹性和横观各向同性, 线弹性使用斜交层面弹性模量和泊松比; 弹塑性模型: 考虑材料弱化和不考虑材料弱化. 考虑母线洞、引水洞和尾水洞等开挖引起的材料弱化时, 弹性模量取相应弹模值的 0.5 倍, 泊松比增加 0.05.

2.4 断层模拟

考虑对地下洞室群的变形和稳定性影响较大的断层, 包括 F1, F2, F4, F5, F12, F18, F63, F69 等; 计算中使用 Goodman 单元对其进行模拟.

2.5 计算参数

计算参数见表 1, 表 2, 表 3.

表 1 岩层各向同性计算参数

Tab. 1 Isotropic parameter of rock mass

岩 层	重度/ ($kN \cdot m^{-3}$)	变形模量/ GPa	泊松比 μ	抗拉强度 R_t / MPa	岩体抗剪断强度(峰值)		岩体抗剪强度(残值)	
					粘结强度	内摩擦系数与内	粘结强度	内摩擦系数与内
					c / MPa	摩擦角的比 f / φ	c / MPa	摩擦角的比 f / φ
砂岩组	27.3	22	0.24	2.45	1.3	1.5/56.3	1.2	1.48/56
砂岩、泥板	27.3	20	0.25	1.96	1.15	1.35/53.5	0.9	1.28/52
泥板岩组	27.0	16	0.26	1.48	1.0	1.10/47.7	0.7	0.98/44.4
罗楼组	27.0	15	0.27	1.18	0.9	1.10/47.7	0.5	0.78/38
强风化层	26.5	1	0.35	0.3	0.1	0.58/30.0	0	0.47/25
弱风化层	26.8	5	0.33	0.5	0.3	0.78/38.0	0	0.58/30

表 2 断层计算参数

Tab. 2 Parameter of fault

断 层	厚度/ m	法向刚度 $K_n /$ ($GPa \cdot m^{-1}$)	切向刚度 $K_s /$ ($GPa \cdot m^{-1}$)	岩体抗剪断强度(峰值)		岩体抗剪强度(残值)	
				粘结强度	内摩擦系数与内	粘结强度	内摩擦系数与内
				c / MPa	摩擦角的比 f / φ	c / MPa	摩擦角的比 f / φ
一般断层, 层间错动		3.5	1.5	0.08	0.4/21.8	0.05	0.36/1.98
F ₃₀ , F ₆₀ , F ₆₃ , F ₈₉		2.5	1.0	0.05	0.35/19.3	0.03	0.3/16.7
所有断层, 层间错动	0.5~1.5	2.5	1.0	0.05	0.35/19.3	0.03	0.25/14
F ₁ , F ₅	0.5~1.5	2.5	1.0	0.05	0.35/19.3	0.03	0.25/14
F ₁₈	0.3~1.2	2.5	1.0	0.05	0.35/19.3	0.03	0.25/14

表 3 岩层横观各向同性计算参数

Tab. 3 Transversely isotropic parameter of rock mass

岩层	重 度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	模量/ GPa			泊松比 μ	
		E_1	E_2	G_{1z}	ν_1	ν_{1z}
砂岩组	27.3	24	20	9	0.23	0.25
砂岩, 泥板	27.3	23	18	8	0.24	0.26
泥板岩组	27.0	20	14	6	0.25	0.27
罗楼组	27.0	19	13	6	0.26	0.28

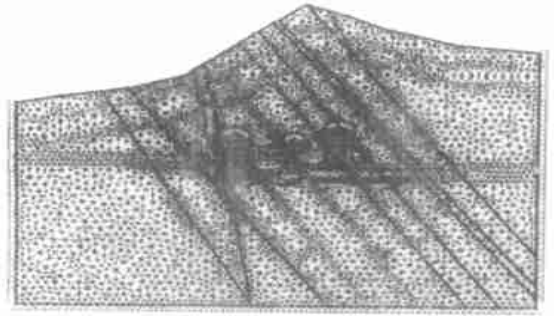


图 1 计算网格(单元数: 18 553, 节点数: 10 521)

Fig. 1 Computing mesh(element 18 553 node 10 521)

2.6 计算方案

剖面的地层、构造及网格剖分如图 1 所示。

3 结果分析

3.1 变形分析

计算结果中应力约定为: 拉负压正, 单位 MPa; 位移的正负号约定为与坐标轴方向一致, 单位 mm。

根据计算结果, 3 个主要地下洞室开挖完成后(图 2)其总体变形趋势是: 顶拱下沉, 底板回弹, 两侧墙内倾, 形态基本正常; 其中, 主厂房上游侧墙和调压井下游侧墙水平位移较大, 因此调压井上部向主变室倾斜, 地层和构造对洞周变形特征影响显著。上游侧墙的变形表现为沿层面或顺层断层的剪切滑移, 下游侧墙变形则表现为倾倒。竖直方向下沉量最大值出现在主变室顶拱中部; 只有主变室上游侧墙向外侧挤出, 但位移量较小。考虑母线洞、引水洞和尾水洞开挖引起的围岩弱化后, 大部分关键点位移明显增大, 调压井上部向主变室倾斜也更加明显(图 3)。

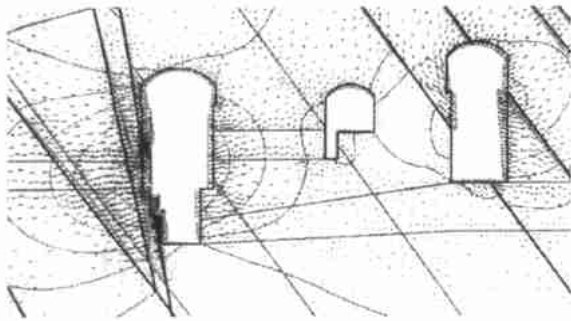


图 2 开挖完成后边界变形矢量图(变形放大倍数 150)

Fig. 2 Deformation vector of boundary after excavating without weakening(magnify 150 times)

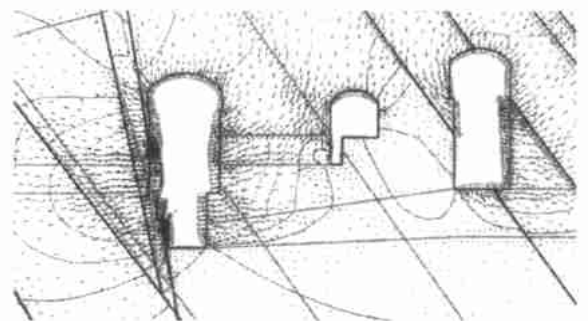


图 3 弱化后边界变形矢量图(变形放大倍数 150)

Fig. 3 Deformation vector of boundary after excavating and weakening(magnify 150 times)

3.2 应力分析

3.2.1 开挖应力场 开挖引起的地应力场的重分布有 2 个显著特点: 其一、侧墙与顶拱和底板的交接处出现较为严重的应力集中; 其二、洞室之间岩墙的第一主应力总体有一定程度的增加, 而第 3 主应力减小(图 4, 图 5)。考虑母线洞、引水洞和尾水洞开挖引起的岩体弱化后, 上述特点更加明显。

3.2.2 拉应力区 各建筑物边界的最大拉应力见图 6。主变室的拉应力区出现在底板, 主要是排水沟开挖造成的, 主厂房和主变室的拉应力区主要出现在侧墙部位, 虽然拉应力量级不是很大, 但是这种拉应力的出现与不利的层面、节理的组合, 可能会诱发侧墙失稳。考虑弱化后, 拉应力区显著扩大, 主变室上游侧墙亦出现拉应力区。

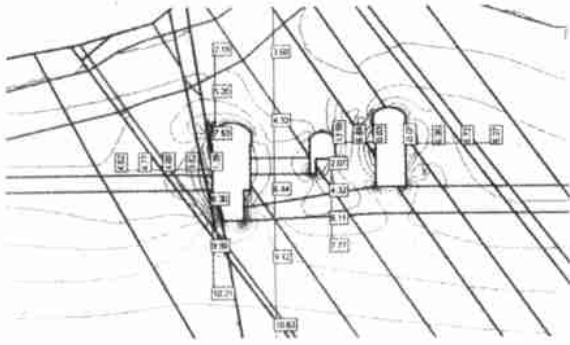


图 4 开挖完成后第一主应力等值线图

Fig.4 Contour of the max stress after excavating

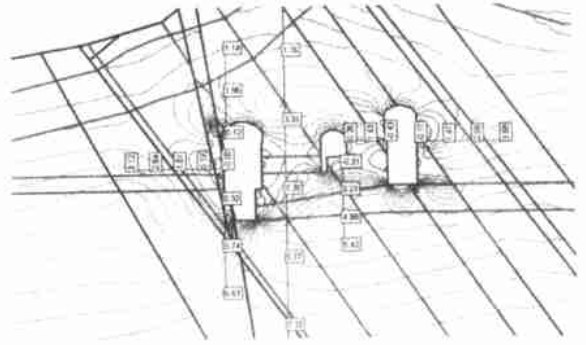


图 5 开挖完成后第三主应力等值线图

Fig.5 Contour of the min stress after excavating

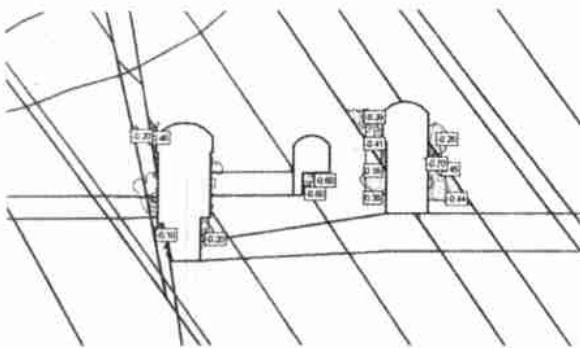


图 6 开挖完成后拉应力区等值线图

Fig.6 Contour of the tension stress after excavating

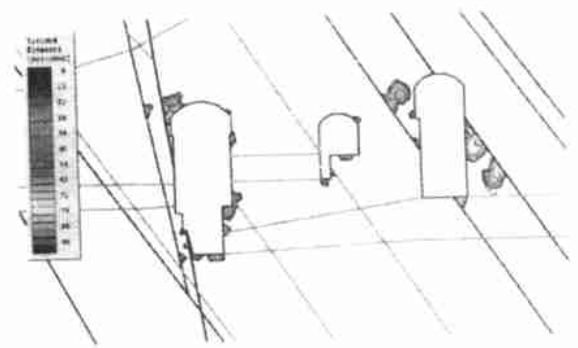


图 7 开挖完成后屈服区分布

Fig.7 Yield area after excavating

3.3 屈服区

屈服区的分布与应力集中区关系密切,同时受诸多因素控制.对洞室群安全影响较大的是位于侧墙和顶拱的塑性区(图7).从图8来看,考虑开挖引起的材料弱化后,这部分塑性区范围显著扩大,对厂房侧墙和顶拱安全存在不利影响.

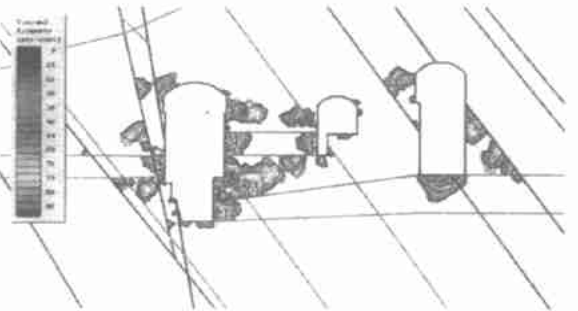


图 8 弱化后屈服区分布

Fig.8 Yield area after excavating and weakening

4 结语

在龙滩工程厂房区地质调查基础上,建立地质概化模型,采用二维有限元对地下厂房洞室群的施工开挖进行模拟,比较分析了多种方案,取得初步结论如下:

- 1)地下洞室开挖形成后,其总体变形趋势是:顶拱下沉,底板回弹,两侧墙内倾.其中,主厂房上游侧墙和调压井下游侧墙水平位移较大,主变室的变形主要表现为顶板的下沉.
- 2)地层和构造对洞周变形特征影响显著,上游侧墙的变形表现为沿层面或顺层断层的剪切滑移,下游侧墙变形则表现为倾倒.
- 3)主变室的拉应力区出现在底板.主厂房和主变室的拉应力区主要出现在侧墙部位,该部位塑性区也相对集中,若与不利的层面、顺层断层和节理组合,可能会诱发侧墙失稳.

以上分析只是初步的,因为龙滩地下厂房洞室群规模巨大,结构复杂加之地质条件特殊,因此,需要进行三维数值模拟,才能更加清楚地了解洞室群开挖后的围岩稳定性和变形特征.

参 考 文 献:

- [1] 冯树荣. 龙滩水电站设计及技术特点[J]. 红水河, 2001, 20(2): 16—20.
- [2] 中南勘测设计研究院. 龙滩水电站地下厂房洞室群及输水系统工程地质报告[R]. 长沙: 中南勘测设计研究院, 1994.
- [3] 龚光伟. 龙滩水电站地下厂房区岩体底应力场的试验研究[J]. 红水河, 1994, 13(3): 11—18.

2-D Elas-plastic Analysis on Deformation and Stability of Rock Mass in Powerhouse Area of Longtan Hydropower Station

MEI Song-hua^{1,2}, SHENG Qian², DENG Jian-hui²

(1. College of Mechanism and Civil Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The Longtan hydroelectric station is a key project over the Hongshui River. One important feature of the project is the numerous and jumbled underground opening, and the rock mass is steep-obliquity geologic-structure body. Therefore, the stability of the rock mass around the powerhouse because of excavation under the coupling of rock mass and powerhouse cavern, especially near the high border-wall and across part of cavern, is more complicated and catches much of attention of many people. In this paper, we set up a geologic simplified-model after investigating engineering geological characterization of powerhouse area of the project and analyzing the construction of the underground powerhouse, apply the 2-D FEM to simulate the courses of excavation of the powerhouse. We design many schemes to contrast and analyze the deformation, stress and plastic area under different conditions and obtain the distribution of their characterization. In the end we result some valuable conclusion which is benefit for excavation.

Key words: Long-tan Project; underground powerhouse; rock mass deformation; elastic-plastic analysis
(责任编辑: 李洪建)