

复杂洞群地下水渗流效应的数值模拟

孙爱花¹, 张强勇², 朱维申²

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 济南 250101; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘 要: 采用三维有限差分 FLAC^{3D} 程序, 以二滩工程地下洞群的结构形式为背景, 考虑与不考虑节理岩体静水渗流对围岩稳定性进行了大量计算工况的准三维数值模拟。对毛洞开挖时主厂房边墙关键点的位移和主厂房的塑性区进行了系统分析, 得到相应的结论, 可供大型地下洞室群稳定分析时作为参考。

关 键 词: 系统分析; 位移; 塑性区; 节理; 渗流

中图分类号: U 451

文献标识码: A

Numerical simulation of groundwater seepage effect in complicated cavern groups

SUN Ai-hua¹, ZHANG Qiang-yong², ZHU Wei-shen²

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Research Center of Geotechnical and Structure Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The authors use FLAC^{3D} to carry out simulation analysis in underground power house of Ertan Project. FLAC^{3D} is a three dimensional explicit finite-difference program. The authors consider the seepage factor which influence the stability of wall rocks and do lots of numerical simulation analysis with approximate three dimension. Systematical analysis of displacements of key points of side wall and systematical analysis of the plastic zone of the main cavern are carried out. The authors draw some disciplinarian conclusions from the systematical analysis. These conclusions will provide some useful reference for the study of large-scale underground cavern groups.

Key words: systematical analysis; displacement; plastic zone; joint; seepage

1 引 言

裂隙岩体不同于土体, 水在其中的运动有其特殊的性质, 并引起一系列与岩体渗流相关的工程地质问题, 裂隙岩体的渗流问题一直为工程界所关注。

作彦卿^[1~4]等对国内外裂隙岩体渗流数学模型进行了系统的总结、归纳, 指出裂隙岩体数学模型可以分为(等效)连续介质模型、不连续介质模型、(广义和狭义)双重介质渗流模型。Wilson 和 Witherspoon^[5]把裂隙岩体分别当作连续介质和不连续介质进行计算比较。Dershowitz 和 Einstein^[6]认为, 对石油开采、道路、核废料以及水资源工程, 裂隙岩体不能采用连续渗透介质模型。Tsang^[7]认为, 即使是平行板模型也不能用于裂隙岩体渗流分析。

张有天^[8]则认为, 对于大型水电工程进行岩体渗流分析, 用连续介质模型, 并辅以主要断层或裂隙即可满足工程精度要求。Snow, Romm 假定裂隙岩体无限延伸, 根据裂隙组数、间距、隙宽及产状要素, 推导了三维裂隙岩体的渗透张量。Oda^[9]采用统计理论确定岩体的渗透张量, Oda 公式没有考虑不连续面分组情况, 采用的参数亦较少, 与实际情况有时差别较大。陈胜宏等^[10]推导了含 3 组及 3 组以上节理岩体的渗透张量表达式。其特点是通过 3 套不同的坐标系统, 分析渗透张量与节理发育密度以及沿节理面错动量之间的关系。由于裂隙分布的不均匀性及几何参数的随机性, 此方法只能作为粗略估计, 本文以二滩工程为背景, 采用 Interface 模型模拟岩体中的裂隙, 对比分析了静水和渗流对岩体稳定性的影响。

2 节理效应的 Interface 模型

在二滩工程中存在两陡一缓的节理, 考虑到 interface 的复杂性, 本文仅考虑两条平行的节理, 节理的倾角为 45° , 节理的法向刚度 k_n 和 k_s 切向刚度采用式 (1) 和式 (2) 表示, 采用节理的具体参数如表 1 所示, 节理与洞周的位置关系如图 1 所示。在考虑节理对围岩变形的影响时, 为了能全面地反映出洞周边界点的位移变化情况, 本文取主厂房 6 个点作为重点分析对象, 具体位置如图 2 所示。

$$k_n = \frac{E}{b_m(1+\mu)(1-\mu)} \exp\left(\frac{\sigma_z(1+\mu)(1-\mu)}{E}\right) \quad (1)$$

$$k_s = \frac{E}{2b_m(1+\mu)} \exp\left(\frac{\sigma_z(1+\mu)(1-\mu)}{E}\right) \quad (2)$$

式中 b_m 为隙宽; μ 为泊松比; E 为弹性模量。

表 1 节理的参数表

Table 1 Mechanical parameters of the joints				
节理的数目/条	迹长/m	连通率/%	倾角/(°)	摩擦角/(°)
2	6	50	45	30

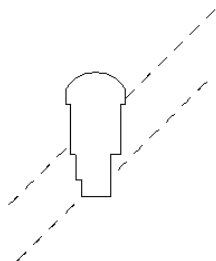


图 1 主厂房与节理分布情况
Fig.1 The layout of joints of cavern of ertan project

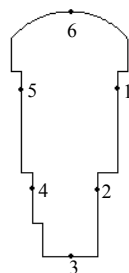


图 2 洞周 6 个分布图
Fig.2 The key points the main cavern

3 工程应用

3.1 计算概化模型

针对二滩工程地下厂房洞室的工程结构形式建立计算概化模型。模型包括了主厂房、主变室、尾水调压室、尾水洞、引水洞等。建模时取厂房横断面水平方向为 X 轴, 铅垂方向为 Y 轴, 纵轴线为 Z 轴。计算范围: X 方向, $-333.05 \sim 482.35$ m; Y 方向, 从标高为 -408.85 m 处至地表。洞室顶部到地表的埋深分别是 100, 200, 300, 400 m。采用 8 节点的平面应变单元和 2 节点的杆单元。准三维的计算模型是在二维模型的基础上往 Z 向拖了 1 m 形成。

3.2 材料参数和地应力场

(1) 材料参数

岩性则暂假定为均质的 (重度为 26.5 kN/m^3 , 泊松比取 0.25), 考虑到围岩坚硬程度不同, 选取变形模量为 20 GPa 岩类, 摩擦角是 50° , 凝聚力是 1.2 MPa, 岩石按砂岩考虑。本文从三种不同的情况 (见表 2) 计算了静水对岩石力学特性的影响。

表 2 计算情况分类表及相关参数

Table 2 Mechanical parameters for computation			
计算类型	1	2	3
渗透系数 $k/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	10^{-5}	10^{-6}	10^{-6}
孔隙比 e	0.2	0.2	0.05

(2) 地应力场

计算时地应力侧压系数取 $\lambda=1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ 共 4 种, 分别考虑了 4 种埋深 H_0 进行计算, H_0 为从厂房洞顶至地面的高度。

3.3 施工开挖顺序

系统分析过程中主洞室围岩从上到下分 8 层^[1], 具体开挖顺序和开挖步见图 3。

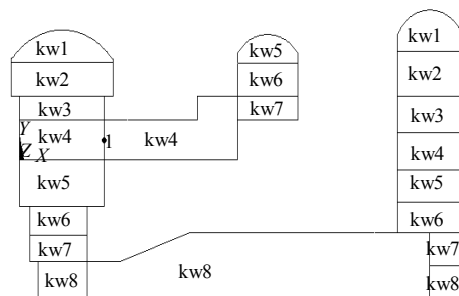


图 3 二滩三大洞室的布置图
Fig.3 The layout of underground houses

3.4 计算结果分析

3.4.1 位移场特征

洞室开挖后总体的位移趋势是相似的。洞室群开挖后, 围岩向临空面方向发生了回弹变形, 顶拱 (点 6) 下沉, 上、下游侧墙向临空面卸荷回弹, 底板轻微向上回弹。边墙是总位移量相对大的工程部位。在不考虑静水渗流作用的节理岩体中的位移分布是下游边墙位移值最大, 主要由垂直洞轴线方向的位移组成; 其次是上游边墙 (X 轴方向) 的位移; 顶拱的位移, 主要由垂直向下方向的位移组成; 底板的位移相对较小, 主要是由垂直向上的位移组成; 节理岩体考虑静水渗流作用与不考虑静水渗流作用的围岩位移矢量方向大致相同。

表3 不同渗透系数条件下的洞周位移对比

Table 3 The comparison of displacements with different seepage parameters

点号	侧压系数	位移 1/mm	位移 2/mm	增加幅度/%	点号	侧压系数	位移 1/mm	位移 2/mm	增加幅度/%
1	1.0	15.8	21.6	36.7	5	1.0	15.5	21.4	38.1
	1.5	21.5	26.2	21.9		1.5	20.9	25.7	23.0
	2.0	27.8	31.6	13.7		2.0	27.0	30.7	13.7
	2.5	35.7	39.1	9.5		2.5	34.9	38.2	9.5
2	1.0	18.1	24.2	33.7	4	1.0	15.8	20.9	32.3
	1.5	25.2	30.1	19.4		1.5	21.9	25.9	18.3
	2.0	32.6	36.4	11.7		2.0	28.6	31.6	10.5
	2.5	41.5	44.9	8.2		2.5	36.2	38.9	7.5
3	1.0	4.5	6.4	42.2	6	1.0	16.0	21.0	31.3
	1.5	3.4	5.1	50.0		1.5	15.8	19.7	24.7
	2.0	2.5	3.9	56.0		2.0	15.8	19.2	21.5
	2.5	1.7	3.0	76.5		2.5	17.5	20.6	17.7

注：埋深为 200 m，在 $e=0.2(k=1.0\times10^{-6}\text{ m/s}, k=1.0\times10^{-5}\text{ m/s})$ 的条件下，含节理岩体考虑静水的位移比较，其中位移 1 表示节理岩体考虑静水作用 $k=10^{-6}\text{ m/s}$ 后的位移，位移 2 表示节理岩体考虑静水作用 $k=10^{-5}\text{ m/s}$ 后的位移，位移包括弹性位移和塑性位移两部分。

表4 不同孔隙率的位移对比

Table 4 The comparison of displacements with different void ratio parameters

点号	侧压系数	位移 1/mm	位移 2/mm	增加幅度/%	点号	侧压系数	位移 1/mm	位移 2/mm	增加幅度/%
1	1.0	13.6	15.8	16.2	5	1.0	13.2	15.5	17.4
	1.5	19.4	21.5	10.8		1.5	18.7	20.9	11.2
	2.0	26.4	27.8	5.3		2.0	25.5	27.0	5.9
	2.5	34.3	35.7	4.1		2.5	33.4	34.9	4.5
2	1.0	15.6	18.1	16.0	4	1.0	13.7	15.8	15.3
	1.5	23.0	25.2	9.6		1.5	20.0	21.9	9.5
	2.0	30.9	32.6	5.5		2.0	27.1	28.6	5.5
	2.5	39.6	41.5	4.8		2.5	34.6	36.2	4.6
3	1.0	4.3	4.5	4.7	6	1.0	12.2	16.0	32.2
	1.5	3.2	3.4	6.3		1.5	11.8	15.8	33.9
	2.0	2.3	2.5	8.0		2.0	12.9	15.8	22.5
	2.5	1.4	1.7	21.4		2.5	15.0	17.5	16.7

注：埋深为 200 m，在 $k=1.0\times10^{-6}\text{ m/s}(e=0.05, e=0.2)$ 的条件下，含节理岩体考虑静水和不考虑静水的位移比较，其中位移 1 表示节理岩体考虑静水作用 $e=0.05$ 后的位移，位移 2 表示节理岩体考虑静水作用 $e=0.2$ 后的位移，位移包括弹性位移和塑性位移两部分。

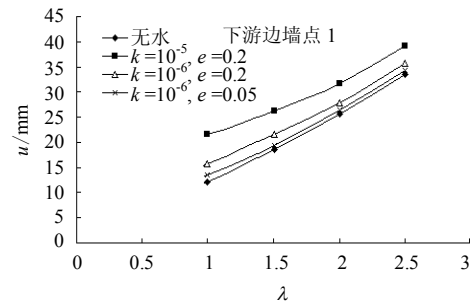


图4 位移变化曲线

Fig.4 The curve of displacements

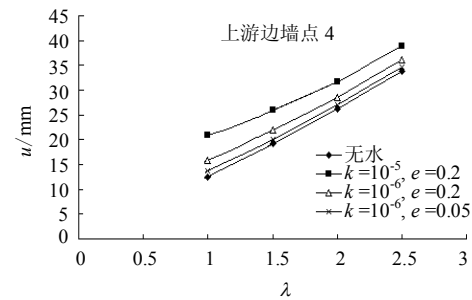


图5 位移变化曲线

Fig.5 The curve of displacements

由于下游边墙点 1 和点 2，上游边墙点 4 和点 5 的变化趋势相同，故本文只给出下游边墙点 1 和上游边墙点 4 的位移曲线。从表 3、表 4 和图 4、图 5 来看，无论岩体（均考虑节理的作用）是否考虑静水渗流作用，无论岩体的渗透系数是大还是小，洞室下游边墙的位移总是随着侧压系数的增大而逐渐变大。

在同一孔隙率、同一渗透系数 ($k=1.0\times10^{-6}\text{ m/s}$) 的条件下，岩体考虑静水渗流和节理作用的位移要比不考虑水只考虑节理的位移大。从图 4、图 5 可以看出，考虑静水渗流作用以后的位移曲线始终在未考虑静水渗流的位移曲线的上方。从位移增加的和位移增加的幅度来看，随着侧压系数的增大，位移增加的幅度和增加的量逐渐减少，这是因为随着围岩地应力的增加，围岩中节理在较高围岩下有较大的压密作用，导致围岩因有裂隙面和孔隙水而位移增加的幅度和增加的量降低。从具体值来看，下游边墙点 1 在 $e=0.2, k=1.0\times10^{-6}\text{ m/s}$ 时，随着

侧压系数的增加, 位移增加的幅度是由 29.5 % 降低到 6.6 %, 位移增加的量由 3.6 mm 降低到 2.2 mm; 在 $e=0.2$, $k=1.0 \times 10^{-5}$ m/s 时, 随着侧压系数的增加, 位移增加的幅度由 77.0 % 降低到 16.7 %, 位移增加量由 9.4 mm 降低到 5.6 mm; 上游边墙点 4 在 $e=0.2$, $k=1.0 \times 10^{-6}$ m/s 时, 随着侧压系数的增加, 位移增加的幅度是由 26.4 % 降低到 7.4 %, 位移增加量由 3.3 mm 降低到 2.5 mm; 在 $e=0.2$, $k=1.0 \times 10^{-5}$ m/s 时, 随着侧压系数的增加, 位移增加的幅度由 67.2 % 降低到 15.4 %, 位移增加量由 8.4 mm 降低到 5.2 mm。可见, 渗透系数越大, 对岩石变形影响越大。

对于同一孔隙率, 当岩体均考虑静水渗流作用时, 由表 3 和图 4、图 5 可以看出, 渗透系数越大, 位移越大, 在图中, 渗透系数大的位移曲线始终在渗透系数小的上方。随着侧压系数的增大, 两种位移之间的差越来越小, 由表 3 可以看出, 下游边墙点 1 位移差由 5.8 mm 降低到 3.4 mm; 位移增加的幅度也是逐渐减少的, 由 36.7 % 降低到 9.5 %; 上游边墙点 4 位移差由 5.1 mm 降低到 2.7 mm; 位移增加的幅度也是逐渐减少的, 由 32.3 % 降低到 7.5 %。可见, 对于下游边墙来说, 在同一孔隙率的情况下, 渗透系数的大小对下游边墙的位移变化影响还是比较大的, 是不容忽视的。

对于同一渗透系数、不同孔隙率, 当岩体均考虑静水渗流作用时, 由表 4 和图 4 可以看出, 孔隙率越大, 位移越大, 孔隙率大的位移曲线总是在孔隙率小的位移曲线的上方。随着侧压系数的增大, 两种位移之间的差越来越小, 由表 4 可以看出, 下游边墙点 1 位移差由 1.8 mm 降低到 1.4 mm; 上游边墙点 4 的位移差由 2.1 mm 降低到 1.6 mm。可见在同一渗透系数、孔隙率不同的情况下, 孔隙率的大小对位移的影响不是很大。

从表 3、表 4 的增加的幅度可以看出, 渗透系数对位移的影响大于孔隙率对位移的影响。

3.4.2 塑性区特征

塑性区主要分布在洞室的周围, 顶拱的塑性区较小, 随着洞室的开挖, 岩体中的塑性区逐渐加大。

洞室群开挖后, 各洞室周边围岩均出现了塑性破坏区, 而且都是以剪切破坏为主。比较而言, 主厂房边墙的破坏区明显大于其他工程部位。顶拱和底板的塑性区相对来说要小得多, 塑性区一般分布在中间部位, 从塑性区的面积来看, 计算时是否考虑静水渗流作用的节理岩体塑性区相差很大。

4 结 论

(1) 本文采用 Interface 面来模拟岩体中的节理, 其计算模型的法向刚度和切向刚度摆脱了传统的做法, 考虑了几何参数与节理刚度的作用关系, 建立一个公式并运用到模型中去。

(2) 当岩体存在节理考虑到静水渗流作用时, 水的存在使洞周关键点的位移变大。当岩体在渗透系数相同、孔隙率不同的情况下, 孔隙率越小, 静水渗流作用使洞周发生位移变形的幅度越小; 当岩体在孔隙率相同、渗透系数不同的情况下, 渗透系数越小, 静水渗流作用使洞周发生位移变形的幅度越小。

(3) 从本文的比较结果来看, 在岩体考虑静水渗流作用的情况下, 孔隙率的大小对洞周围岩变形的影响小于渗透系数对洞周围岩变形的影响。在计算工作量大的情况下, 可优先考虑渗透系数对洞周围岩变形的影响。

(4) 洞室群开挖后, 顶拱和底板的塑性区相对来说要小得多, 塑性区一般分布在中间部位, 从塑性区的面积来看, 计算时是否考虑静水渗流作用的节理岩体塑性区相差很大。

参 考 文 献

- [1] 作彦卿, 张倬元. 岩体渗流场与应力场耦合的集中参数数学模型研究[J]. 工程地质学报, 1994, 2(1): 9-14.
- [2] 作彦卿. 裂隙岩体应力与裂隙关系研究[J]. 水文地质工程地质, 1995, 22(6): 30-35.
- [3] 作彦卿. 岩体裂隙系统渗流场与应力场耦合模型[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(1): 31-34.
- [4] 作彦卿, 张倬元. 岩体系统渗流场与应力场耦合的广义双重介质模型的应用研究[J]. 工程地质学报, 1996, 4(3): 40-46.
- [5] Withspoon P A, Wilson C R. Steady state flow in rigid networks of fracture[J]. **Water Resources Research**, 1974, 10(2): 76-82.
- [6] Dershowitz W S, Einstein H H. Three dimension flow modeling in jointed rock masses[A]. **6th International Congress on Rock Mechanics**[C]. Montreal: [s. n.], 1987. 87-92.
- [7] Tsang Y W, Tsang C F. Channel model of ow through fractured media[J]. **Water Resources Research**, 1987, 23(3): 467-479.
- [8] 张有天. 裂隙岩体渗流的理论和实践[A]. 第二届全国岩石力学数值计算和模型实验学术研讨会论集[C]. 上海: 同济大学出版社, 1990.
- [9] Oda M. An equivalent model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses[J]. **Water Resources Research**, 1986, 22(13): 1 845-1 856.
- [10] 陈胜宏. 节理面渗流特性的探讨[J]. 武汉水利电力学院学报, 1989, 22(1): 53-60.
- [11] 孙爱花, 朱维申, 隋斌. 两种计算软件对清江水布垭工程的数值分析比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增 2): 4 952-4 955.