

文章编号: 1000-7598-(2008)12-3393-08

糯扎渡水电站 1[#]导流隧洞三维非线性有限元开挖模拟分析

周家文¹, 徐卫亚¹, 童富果¹, 褚卫江¹, 张宗亮², 刘兴宁²

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098; 2. 国电昆明勘测设计研究院, 昆明)

摘 要:糯扎渡水电站 1[#]导流隧洞开挖经过 F3 断层, 开挖过程中, F3 断层影响带附近的岩体力学参数直接控制着围岩的变形和应力分布。为了评判后续 II, III 层开挖围岩的稳定性, 首先利用隧洞第 I 层开挖的位移监测数据反演出 F3 断层附近围岩的岩体力学参数和初始地应力场; 然后, 利用反演得到的初始地应力场和岩体力学参数进行 I, II, III 层开挖模拟分析, 得到了 F3 断层附近围岩的应力变形情况。计算结果表明: 随着开挖的不断进行, 隧洞 F3 断层周围岩体的约束逐渐解除, 围岩的应力逐渐增大, 隧洞周边的位移也不断增大, 并且隧洞周围应力变形在 F3 断层中心区域有明显的错动现象, 说明 F3 断层对隧洞的开挖影响比较大, 有必要对此区域后期变形加强观测和分析。

关 键 词: 导流隧洞; 非线性有限元; 位移反分析; 开挖模拟

中图分类号: U 451

文献标识码: A

Three-dimensional nonlinear finite element simulation of excavation of the diversion tunnel No.1 for Nuozhadu Hydropower Station

ZHOU Jia-wen¹, XU Wei-ya¹, TONG Fu-guo¹, CHU Wei-jiang¹, ZHANG Zong-liang², LIU Xing-ning²

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Kunming Investigation & Design Institute of China Hydropower Consulting Group, Kunming 650051, China)

Abstract: During the excavation of the diversion tunnel No.1 for Nuozhadu Hydropower Station passing through the fault, F3 in the process of excavation, the strain and stress distribution of wall rock is controlled by the rock mass mechanical parameters around the influence zone of fault F3. Aiming to evaluating the stability of wall rock because of the excavation of layers II and III; firstly, it needs back analysis of the rock mass mechanical parameters and the initial stress field of the wall rock around the fault F3 by using the displacement monitor data after the first layer excavation. Then, modeling of the first, second and third layers excavation used the rock mass mechanical parameters and the initial stress field which get through with back analysis method. The stress-strain situation of wall rock surrounds the fault F3 has got. The compute results show that the restriction of the tunnel rock mass surrounds the fault F3 is released gradually; the stress of the wall rock is increased gradually; and the displacements of the wall rock are also increased gradually with the uninterrupted excavation. And the stress-strain in the center zone of the fault F3 is unbalanced in evidence. It is shown that the excavation of the tunnel influenced by the fault F3 is obvious, monitor and analysis of later deformation in this zone need to be strengthened.

Key words: diversion tunnel; nonlinear finite element method; displacement back analysis; excavation simulation

1 引 言

糯扎渡水电站为澜沧江中下游河段两库 8 级 (功果桥、小湾、漫湾、大朝山、糯扎渡、景洪、

橄榄坝、勐松) 水电规划中的第 5 个梯级, 其上游与大朝山水电站衔接, 下游与景洪水电站衔接。糯扎渡水电站工程枢纽位于云南省思茅市翠云区和澜沧县境内, 坝型为心墙堆石坝, 坝顶高程为 821.5 m,

收稿日期: 2007-03-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (973) (No.2002CB412707) 和国家自然科学基金重点项目 (No.50539110) 联合资助课题。

作者简介: 周家文, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。E-mail: hhjzw@hhu.edu.cn

最大坝高为 261.5 m, 心墙堆石坝枢纽由拦河大坝、左岸开敞式溢洪道、左岸泄洪洞、右岸泄洪洞、下游护岸以及左岸地下引水发电系统等建筑物组成。由于工程施工需要, 在坝址两岸共布置了 5 条导流隧洞, 其中 1[#]导流隧洞的开挖断面在 20 m×24 m 左右, 导流隧洞开挖过程中, 洞室周围、边坡附近岩体的应力、变形受断层和不同地质条件影响明显。

对于岩体隧洞来说, 由于开挖爆破的扰动作用, 隧洞周围的岩体力学参数很难根据经验或者是试验来确定, 所以采用位移反分析方法来确定隧洞周围的岩体力学参数, 在隧洞开挖工程中得到了广泛的应用^[1-5], 并且在隧洞开挖期间, 经常监测隧洞周围的应力变形, 可以通过位移监测数据或者其他监测数据来研究隧洞开挖的稳定性^[6, 7]。在隧洞开挖过程中, 由于开挖扰动作用, 需对隧洞周围进行加固, 文献[8]对隧洞的支护措施进行了比较深入的研究。然而, 岩体工程设计是随着施工进度动态发展的, 需要及时进行动态反馈设计。在隧洞开挖进行时, 需要建立一个更符合实际的理论预测模型来求得更符合实际的物理力学参数, 然后模拟下一步开挖对隧洞周围岩体的影响, 隧洞开挖的模拟一般采用三维非线性有限元^[9-12], 以便能正确地反映或预测岩土介质的某些力学行为。

截至 2006 年 9 月 2 日, 1[#]导流洞 F3 断层第 I 层开挖支护已经结束, 正在进行第 II 层的开挖支护, 1[#]洞已经完成 0+830~0+919.6 段的左半幅 89.6 m 的开挖, 开挖洞身穿过 F3 断层, 为了解 F3 断层附近岩体的变形情况, 并且确保后期施工及其隧洞运行安全, 需对施工监测数据进行反演分析; 然后利用反演得到的初始地应力场和岩体力学参数进行开挖模拟分析, 以得到 F3 断层附近围岩的应力、变形情况, 探求 F3 断层附近岩体的变形规律。

2 1[#]导流洞开挖支护情况

2.1 工程地质条件

1[#]导流隧洞进口位于勘界河沟口下游, 底板高程为 600 m, 出口位于糯扎沟口上游侧, 底板高程为 594.76 m。隧洞轴线方向从进口至出口为 S60°E-S37°E-S11°E, 全长为 1 003.3 m, 隧洞断面为方圆形, 最大高度为 21 m, 宽度为 16 m。1[#]导流隧洞进口及大部分洞段布置于工程地质 A 区, 工程地质条件好; 其出口洞段及出口边坡布置于工程地质 F 区, 工程地质条件差, 前后段工程地质条件相差显著。该隧洞上覆岩体厚度较大, 除进、出口部位外, 隧洞埋深一般为 70~140 m, 最大为 150 m。

水平埋深为 130~170 m, 已避开岸坡卸荷带。隧洞围岩的岩性为花岗岩。除进、出口洞段下部分布有少量弱风化岩体外, 绝大部分洞段为微风化~新鲜岩体。隧洞(包括进、出口)部位分布的较大断层有: F438-1, F5, F24, F6, F15, F18, F20, F37, F9, F3, F1, IV 级结构面发育间距约为 20 m, 发育有 4 组节理。1[#]导流洞的地质剖面如图 1 所示。

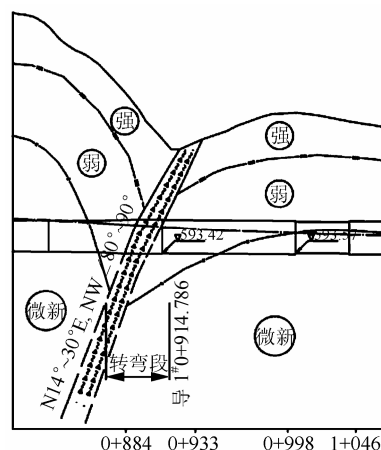


图 1 1[#]导流洞 F3 断层附近岩体工程地质剖面图
Fig.1 The engineering geology of rock masses around the fault F3 in No.1 diversion tunnel

2.2 隧洞开挖

2.2.1 开挖分层

F3 断层分为 3 层开挖, I 层开挖高度为 8.76 m, 按全断面一次开挖完成; II 层开挖高度为 9 m, 按 4.5 m 分为 2 分层开挖, 其中每分层又分为左右两半幅开挖; III 层开挖高度为 6.54 m, 分为两分层开挖, 1 分层开挖高度为 4.5 m, 2 分层为保护层开挖, 开挖高度为 2.04 m, III 层的各分层同样按半幅开挖。1[#]导流洞开挖分区如图 2 所示。F3 断层主断层位置

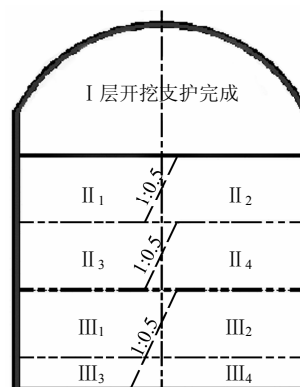


图 2 1[#]导流洞 F3 断层开挖分区
Fig.2 Excavation divisional zone of the fault F3 in No.1 diversion tunnel

预期进尺初拟为 1.5~2.0 m, 其余部分 D 型断面预期进尺为 3.0 m。

2.2.2 支护措施

F3 断层的顶拱支护采用自进式中空锚杆, 锚杆分为两种规格: (1) $\phi 28$ mm, $L=9$ m, 间距为 3.0 m, 排距为 0.75 m; (2) $\phi 25$ mm, $L=6$ m, 间距为 1.5 m, 排距为 0.75 m。

开挖前采用 $\phi 42$ mm, $L=4.5$ m 超前小导管支护, 间距为 0.3 m, 排距为 1.5 m。在顶拱起弧的部位采用 $\phi 25$ mm, $L=4.5$ m 的自进式中空注浆锚杆作为锁脚锚杆。边墙采用 $\phi 75$ mm 锚管, $L=9$ m, 间距为 4.5 m, 排距为 1.5 m, 插入 $\phi 32$ mm, $L=9$ cm 钢筋; 同时采用 $\phi 28$ mm, $L=9$ m 和 $\phi 25$ mm, $L=6$ m 自进式中空注浆锚杆, 梅花型布置, 间隔布置 @ 1.5 m, 排距为 0.75 m。底板采用 $\phi 25$ mm, $L=3.0$ m 锚杆支护, 间排距为 3.0 m $\times$ 3.0 m, 外露为 0.5 m。F3 断层顶拱及边墙均设置钢支撑, 采用 I20b 型工字钢加工, 间隔为 0.75 m。

在 F3 断层主断层带导流洞边墙布置 $\phi 75$ mm, $L=9.0$ m 锚管对围岩进行加固, 并在锚管内插入 $\phi 32$ mm, $L=9.0$ m 锚杆与钢支撑连接牢固。锚管材料为地质钻机钻杆, 锚管前段 6 m 为花管注浆 (花管孔采用电钻造孔, 排距为 15 cm, 每排 4 孔, 梅花形布置, 孔径取 8 mm), 注浆压力初设为 0.8 MPa, 锚管内插筋末端与系统钢支撑焊接牢固。1[#]导流洞 F3 断层的左半幅支护措施如图 3 所示, 并且右半幅的支护措施与左半幅对称布置。

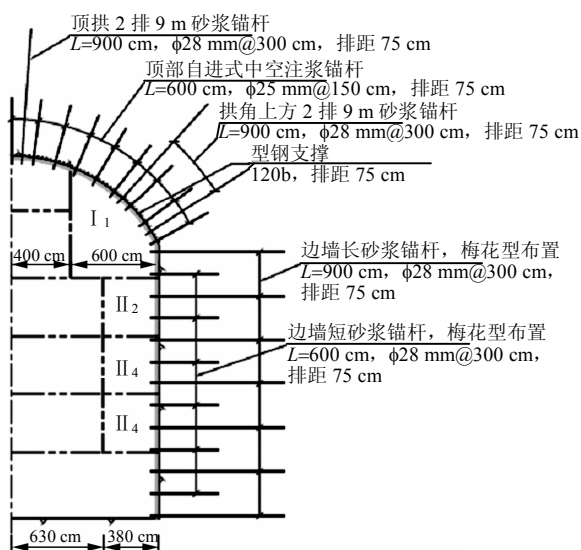


图 3 F3 断层的支护措施

Fig.3 Support measures of F3 faultage

3 岩体力学参数和初始地应力场

为了准确地分析 F3 断层附近围岩因开挖引起的应力变形情况, 开挖模拟计算分析的岩体力学参数和初始地应力场采用反分析计算得到的结果。

3.1 参数反演方法

F3 断层附近的岩体力学参数和初始地应力场的反分析方法采用三维非线性有限元反分析方法, 把参数反分析问题转化为一个目标函数的寻优问题, 直接利用正分析的过程, 通过迭代计算, 逐次修正反演参数的试算值, 最后获得最优解。在反分析计算过程中, 以隧洞开挖位移增量的均方误差作为目标函数, 在反演迭代过程中, 目标函数值随着参数的变化不断减小, 直到满足要求为止, 如图 4 所示。

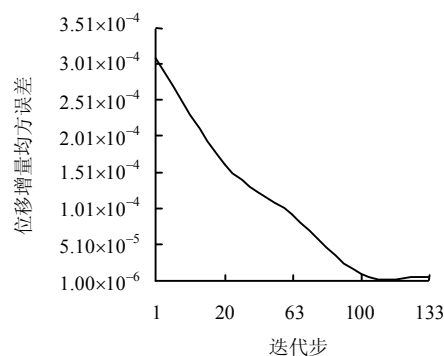


图 4 均方误差的变化过程

Fig.4 Variety process of average equation error

3.2 位移监测数据的整理

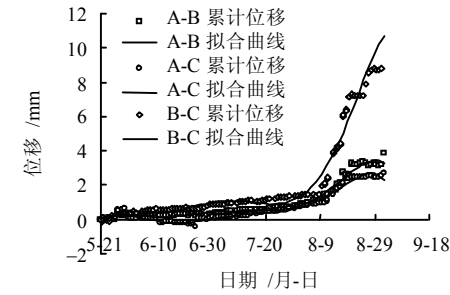
现场数据都有随机误差, 在运用这些观测数据进行计算时, 首先应对量测数据进行必要的数学处理以减少误差的影响, 改善其规律性, 提高分析结果的可靠度。这里采用多元线性回归模型对监测数据进行整理分析。以下给出 1[#]导流洞 F3 断层附近 0+901.00 和 0+917.00 断面的位移监测数据整理结果, 如图 5 所示, 图中 A, B, C 为监测点。

3.3 岩体力学参数和初始地应力场的反分析

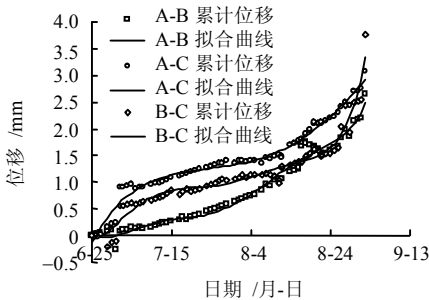
3.3.1 有限元计算模型

1[#]导流隧洞有限元网格的建模范围如下。

(1) 长度方向: 沿洞轴线方向选取 0+795.570~1+000.570 桩号区段; (2) 宽度方向: 取洞轴线向两侧延伸 40 m 范围; (3) 厚度方向: 取隧洞底部向下延伸 50 m 到自然边坡表面。模型直线长度为 205 m, 宽度为 80 m, 三维有限元计算模型如图 6 所示。



(a) 0+901 断面



(b) 0+917 断面

图 5 位移监测数据的整理
Fig.5 Coordinate of the displacement monitor data

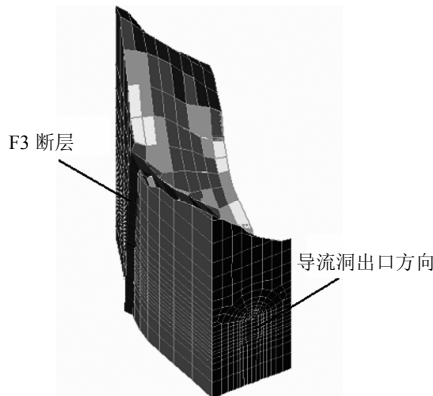


图 6 有限元计算模型
Fig.6 FEM compute model

3.3.2 反分析计算结果

(1) 岩体力学参数

在对岩体力学参数进行反演分析，岩体材料分为 4 种：微新岩体、弱风化岩体（包括弱风化上和弱风化下）、强风化岩体（包括全风化和强风化）和 F3 断层，反演的材料参数为变形模量 E 和泊松比 μ ，凝聚力 c 和内摩擦角 φ 等参数不参与反演，并且 F3 断层的泊松比不参与反演分析，假定泊松比为 0.3，变形模量的反演过程曲线如图 7 所示。

泊松比的反分析过程和变形模量的反分析过程是一样的。最后，得到 1[#]导流洞 F3 断层附近岩体的力学参数如表 1 所示。

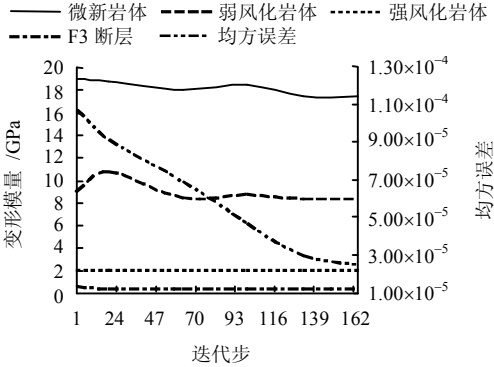


图 7 变形模量反分析过程曲线
Fig.7 Back analysis process of elastic modulus

表 1 岩体力学参数反分析结果
Table 1 Back analysis results of rock mechanical parameters

参数	微新岩体	弱风化岩体	强风化岩体	F3 断层
变形模量 /GPa	17.492	8.345	2.006	0.352
泊松比	0.213	0.243	0.278	0.300

(2) 初始地应力场

初始地应力场由两部分组成：构造应力场和重力场。反演出的构造应力场与重力场叠加就可以得到初始地应力场，构造应力的反分析结果如表 2 所示。

表 2 1[#]导流隧洞构造应力反演结果
Table 2 Back analysis results of tectonic stress of No.1 diversion tunnel

参数	x 方向	y 方向	z 方向
应力 /MPa	0.691	1.398	-0.096

注：压为正，拉为负。

最后，结合反分析结果和设计院提供的岩体力学参数建议值，得到了数字模拟计算的岩体力学参数，如表 3 所示。

表 3 岩体力学计算参数
Table 3 Compute rock mechanical parameters

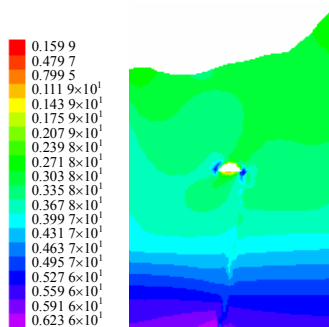
地层岩性	变形模量 /GPa	泊松比	重度 /kN·m ⁻³	摩擦角 / (°)	凝聚力 /MPa
强风化	17.492	0.214	23	35	0.18
弱风化	8.345	0.243	25	50	1.50
微新岩体	2.006	0.278	27	56	2.00
F3 断层	0.352	0.300	21	18	0.05

4 开挖模拟分析

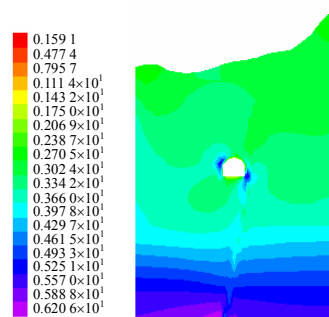
4.1 开挖应力分析

对 1[#]导流洞进行开挖模拟分析，取 5 个剖面，分别为 0+820，0+882，0+895，0+905，0+945 进行

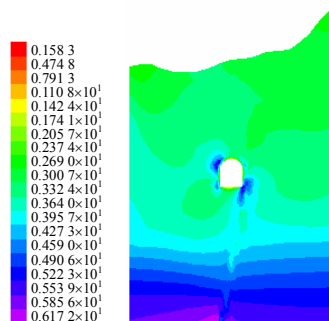
开挖应力分析, 并且在高程 607 m 取一水平截面。0+882 断面 1~3 期的开挖大主应力分布如图 8 所示。



(a) 第 1 期开挖



(b) 第 2 期开挖



(c) 第 3 期开挖

图 8 0+882 断面开挖大主应力分布 (单位: MPa)
Fig.8 Main maximum stress distribution in 0+882 section of excavation (unit: MPa)

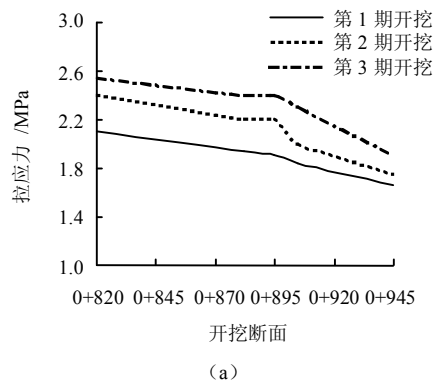
导流洞应力的分布受 F3 断层和开挖的影响十分明显。第 1 期开挖后, 导流洞周边最大压应力分布在开挖面附近的左右侧, 最大值约为 5.0~5.8 MPa。在开挖面附近的底部和顶部出现了拉应力, 最大值约为 1.7~2.0 MPa。第 2 期开挖后, 导流洞周边最大压应力分布在开挖面附近的左右侧, 约为 5.0~6.0 MPa。在开挖面附近的底部和顶部, 出现了一定的拉应力, 最大值约为 1.9~2.3 MPa。与 1 期开挖相比较, 最大拉应力都略有增加, 而最大压应力变化不大。第 3 期开挖后, 最大压应力约为

5.0~6.3 MPa, 数值与 1 期和 2 期时的相比变化很小, 但分布有了较大的变化, 主要分布于导流洞上下两个对角点处。最大拉应力仍然位于开挖面附近的底部和顶部, 最大值约为 1.9~2.5 MPa, 与 1 期和 2 期开挖相比较, 最大拉应力继续有所增加。

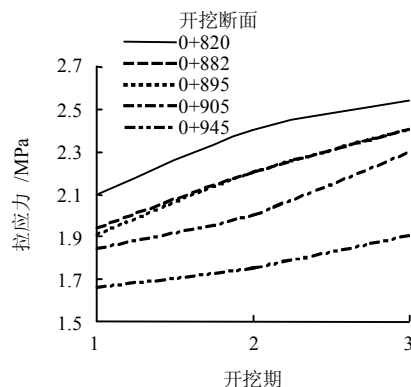
表 4 隧洞开挖后导流洞周边的应力峰值
Table 4 Maximum stress values surround the diversion tunnel after excavation

参数	开挖期	开挖断面				
		0+820	0+882	0+895	0+905	0+945
拉应力 /MPa	1	2.10	1.94	1.91	1.84	1.66
	2	2.40	2.20	2.20	2.00	1.75
	3	2.54	2.40	2.40	2.30	1.90
压应力 /MPa	1	5.02	5.30	5.20	5.70	5.80
	2	5.20	5.70	5.70	5.70	5.75
	3	5.20	5.20	6.30	6.40	6.30

5 个剖面的应力峰值如表 4 所示, 从表可以看出, 沿着隧洞开挖进行方向, 隧洞周围的拉应力在不断减小, 如图 9 (a) 所示; 随着开挖的不断进行, 隧洞 F3 断层附近岩体的约束逐渐解除, 围岩的拉应力在逐渐增大, 如图 9 (b) 所示。



(a)



(b)

图 9 F3 断层附近围岩拉应力随着开挖的变化情况
Fig.9 The tension stress of the wall rock surround the fault F3 changed with the excavation

高程为 607 m 水平截面随隧洞开挖的应力变化情况如图 10 所示。

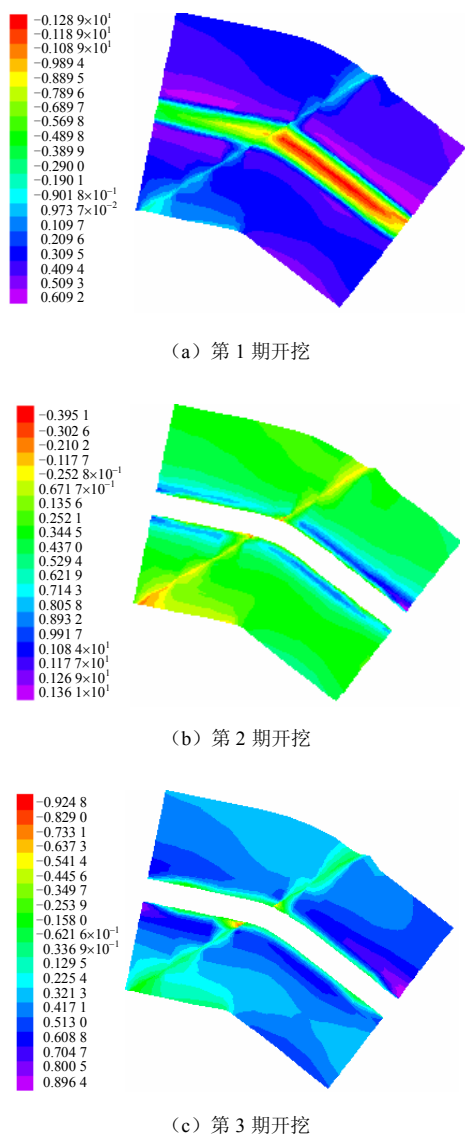


图 10 高程为 607 m 水平截面小主应力随开挖的变化情况 (单位: MPa)

Fig.10 The minimum stress of the $\nabla 607$ horizontal section changed with the excavation (unit: MPa)

从高程 607 m 水平截面的小主应力随着开挖的变化情况可知, 在第 1 期开挖过程中, 由于开挖还没有进行到 607 m, 从图 10 (a) 中可以看出, 最大拉应力出现在洞底; 进入到 2 期和 3 期开挖之后, 从图 10 (b) 和图 10 (c) 可以看出, 此时开挖已经超过了 607 m, 洞壁由 1 期开挖的拉应力转变为压应力, 而高程 607 m 水平截面上的最大拉应力集中在 F3 断层。从图中还可以看出, 在 F3 断层附近拉、压应力有突变现象, F3 断层中心区域有明显错动现象, 拉应力相对其他区域也较大, 说明 F3 断层对隧洞的开挖影响比较大, 有必要对此区域后期变形加强观测和分析。

4.2 开挖变形分析

对 1[#]导流洞进行开挖模拟分析, 取 5 个剖面,

分别为 0+820, 0+882, 0+895, 0+905, 0+945 进行开挖变形分析, 并且在高程 607 m 取一水平截面。0+882 断面 1~3 期的竖向开挖位移分布如图 11 所示。

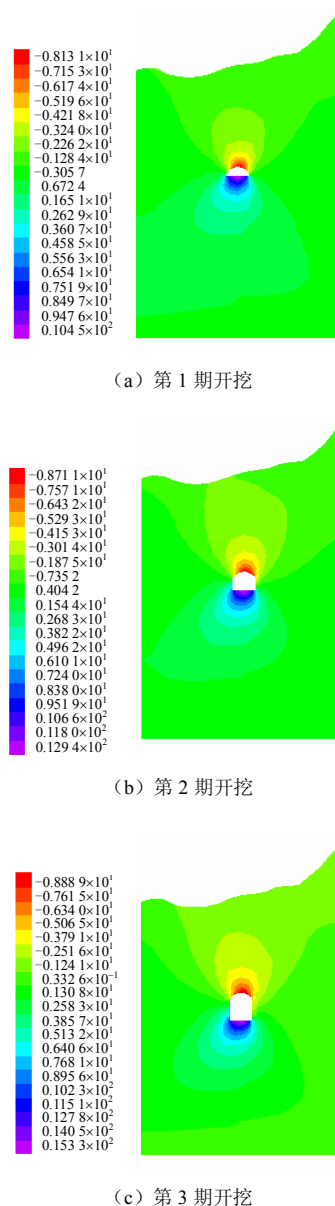


图 11 0+882 断面开挖竖向位移 (单位: mm)

Fig.11 Excavation displacements of 0+882 section (unit: mm)

第 1 期开挖后, 变形主要发生在洞开挖面附近, 径向水平位移最大值约为 4.2~4.5 mm, 竖向位移表现为洞顶向下沉降和洞底向上回弹, 最大竖向位移分布于洞顶和洞底, 最大值约为 8.1~10 mm。第 2 期开挖后, 变形主要发生在洞开挖面附近, 其数值较 1 期开挖后的位移有一定增加。径向水平位移最大值约为 6.5~7.3 mm, 位于洞壁两侧, 竖向位移约为 8.3~12.6 mm, 最大竖向位移分布于洞顶和洞底, 表现为洞顶向下沉降和洞底向上回弹。第 3

期开挖后,变形主要发生在洞开挖面附近。径向水平位移最大值约为 8.5~10 mm,位于洞壁两侧,表现为向洞内收敛方向的变形,其分布沿洞轴向有显著的变化。最大竖向位移分布于洞顶和洞底,表现为洞顶向下沉降和洞底向上回弹,最大值约为 9.1~15 mm,并且开挖变形在断层处有突变现象。

5 个剖面洞周边的位移峰值如表 5 所示。从表可以看出,随着隧洞开挖的进行,隧洞 F3 断层附近岩体的约束逐渐解除,围岩的应力逐渐增大,隧洞周边的位移也不断增大,图 12 (a) 为水平位移随着开挖的变化曲线,图 12 (b) 为洞顶位移随着开挖的变化曲线。

表 5 隧洞开挖后导流洞周边的位移峰值

Table 5 Maximum displacement values surround the diversion tunnel after excavation

参数	开挖期	开挖断面				
		0+820	0+882	0+895	0+905	0+945
水平位移 /mm	1	4.5	4.3	3.4	3.0	2.95
	2	6.5	7.3	3.9	3.2	2.7
	3	8.4	10.5	4.7	3.6	2.9
洞顶位移 /mm	1	7.6	8.1	8.0	7.8	8.4
	2	8.6	8.7	8.7	8.3	8.6
	3	9.1	8.9	9.9	8.5	8.7

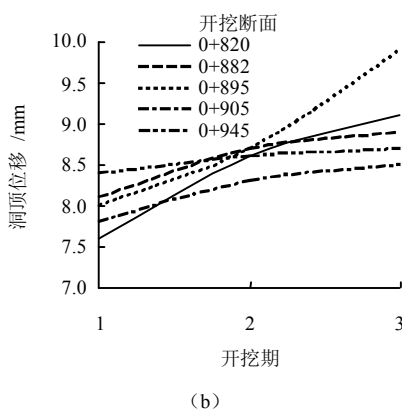
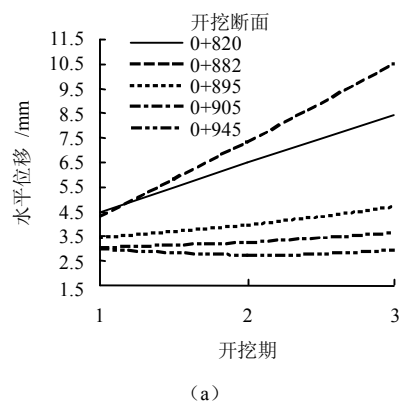
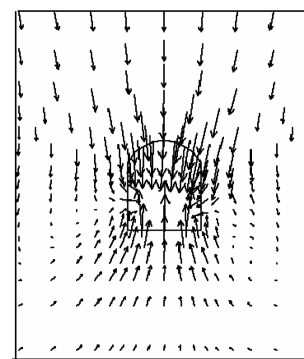


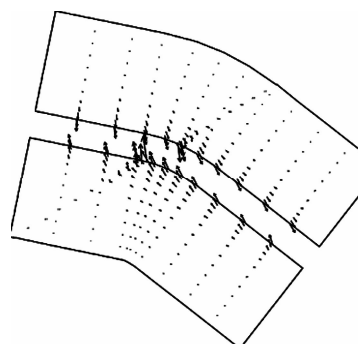
图 12 隧洞周边位移峰值随着开挖的变化情况

Fig.12 The maximum displacement values of the wall rock changed with the excavation

0+882 断面开挖隧洞周围和高程为 607 m 水平截面第 3 期开挖的位移矢量如图 13 所示。



(a) 0+882 断面洞周



(b) 高程为 607 m 水平截面

图 13 第 3 期开挖位移矢量图

Fig.13 Vector of displacements after the third layer excavation

从隧洞第 3 期开挖 0+882 断面的水平位移矢量图可以看出,水平位移在洞壁两侧呈对称分布,表现为向洞内收敛方向的变形,这是由于开挖卸荷引起的回弹所致。从高程为 607 m 水平截面的位移矢量图可以看出,F3 断层对位移的影响较大,在其附近变形明显不连续。3 期开挖后,水平变形沿洞轴心不再具有任何对称性,这与 F3 断层的切割关系密切。

5 结 论

(1) 反演分析表明,1[#]导流洞微新岩体的变形模量为 17.492 GPa,泊松比为 0.214;弱风化岩体的变形模量为 8.350 GPa,泊松比为 0.243;强风化岩体的变形模量为 2.006 GPa,泊松比为 0.278;F3 断层的变形模量为 0.352 GPa,泊松比为 0.300。

(2) 反演分析表明,1[#]导流洞沿洞轴向构造应力是压应力,大小为 0.691 MPa;洞径方向的水平构造应力是压应力,量值为 1.398 MPa,竖向构造应力是拉应力,量值为 0.096 MPa,将构造应力与

重力场叠加,得初始地应力。

(3) 1[#]导流洞开挖变形主要集中在开挖面附近,其变形随开挖而不断变大。开挖引起的最终径向水平位移约为 2.2~10.5 mm,表现为向洞内收敛方向的变形。最终竖向位移约为 8.5~15.0 mm,表现为洞顶向下沉降和洞底向上的变形。受 F3 断层的影响,开挖变形较大部位位于 0+882 断面附近。在 0+945 断面区域,横向水平变形朝向一侧,左右不再大致对称。除了 F3 断层区域外,沿洞轴线方向位移峰值变化不大。

(4) 1[#]导流洞开挖完成后,最大压应力分布在开挖面附近的左上和右下角点处。数值约为 5.2~6.4 MPa。在洞顶深 2.0~3.5 m 区域内和洞底深 3.0~4.5 m 区域内出现了一定的拉应力,数值大小约为 1.90~2.54 MPa。除了在 F3 断层区域应力略有突变现象外,沿洞轴线方向应力的大小和分布情况变化不大。

(5) 1[#]导流洞 3 期开挖完成后,导流洞底深 2~4.5 m 区域内也有一定的拉应力,虽然该数值在完整岩石的抗拉强度范围内,但在 F3 断层区域可能产生向上拱出的较大变形,进而对两侧洞壁的稳定不利。故对岩性不完好的区域,可适当对洞底进行加固,以确保洞壁的稳定性。

参考文献

- [1] SAKURAI S, TAKEUCHI K. Back analysis of measured displacements of tunnels[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1983, 16: 173—180.
- [2] SAKURAI S, AKUTAGAWA S, TAKEUCHI K, et al. Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2003, 18: 185—196.
- [3] 贾超,刘宁,肖树芳.洞室岩体参数的位移正演反分析[J]. **岩土力学**, 2003, 24(3): 450—454.
JIA Chao, LIU Ning, XIAO Shu-fang. Application of direct displacement inverse analysis to rock mass parameters of caverns[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 450—454.
- [4] ZHANG L Q, YUE Z Q, YANG Z F, et al. A displacement-based back-analysis method for rock mass modulus and horizontal in situ stress in tunneling—Illustrated with a case study[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2006, 21: 636—649.
- [5] 陈锋,林鲁生,白世伟,等.东深供水改造工程凤岗隧洞段岩体参数位移反分析[J]. **岩土力学**, 2002, 23(5): 657—660.
- [6] CHEN Feng, LIN Lu-sheng, BAI Shi-wei, et al. Back analysis of displacements in rock for Fenggang Tunnel of East River Shenzhen Water Supply Reconstructing Project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(5): 657—660.
- [7] 王于宝,王晓卫,颜新荣,等.大坂引水隧洞工程变形监测及稳定性分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(20): 3 783—3 787.
WANG Yu-bao, WANG Xiao-wei, YAN Xin-rong, et al. Deformation monitoring and stability analysis of Daban diversion tunnel project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(20): 3 783—3 787.
- [8] KASPER T, MESCKE G. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2006, 21: 160—171.
- [9] 吴世勇,任旭华,陈祥荣,等.锦屏二级水电站引水隧洞围岩稳定分析及支护设计[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(20): 3 777—3 782.
WU Shi-yong, REN Xu-hua, CHEN Xiang-rong, et al. Stability analysis and supporting design of surrounding rocks of diversion tunnel for Jinping Hydropower Station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(20): 3 777—3 782.
- [10] FARIAS M M, JUNIOR A H M, ASSIS A P. Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2004, 19: 283—293.
- [11] 白世伟,林鲁生,徐邦树.凤岗隧洞三维非线性仿真模拟[J]. **岩土力学**, 2002, 23(6): 673—677.
BAI Shi-wei, LIN Lu-sheng, XU Bang-shu. Three-dimensional nonlinear simulation for Fenggang tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(6): 673—677.
- [12] KASPER T, MESCHKE G. A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling[J]. **Computers and Geotechnics**, 2006, 33: 234—247.
- [13] 王钊,王俊奇,咸付生.万家寨引水隧洞成洞和运行的有限元分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(8): 1 257—1 262.
WANG Zhao, WANG Jun-qi, XIAN Fu-sheng. Finite element analysis of tunneling and working of Wanjiashai water transmission tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(8): 1 257—1 262.