

羊曲水电站泄洪洞围岩稳定性有限元分析

任喜平

(黄河水电公司工程建设分公司, 青海 西宁 810003)

摘 要: 隧洞施工过程中的围岩的稳定性分析是工程地质和岩体力学非常重要的研究课题, 依据地下结构设计理论和岩石屈服 $\text{Druck} - \text{Prager}$ 准则, 考虑到了围岩的自身承载能力, 采用非线性有限元的方法对羊曲水电站泄洪洞开挖施工过程中围岩的稳定性进行分析, 对隧洞围岩开挖支护施工过程进行模拟, 分析隧洞围岩位移变形及应力分布规律, 为隧洞开挖施工过程中围岩和结构稳定性分析提供依据。

关键词: 隧洞; 围岩稳定性; 位移变形; 应力分布; 有限元分析

中图分类号: TV732

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0211-04

Finite element analysis of stability for spillway tunnel of Yangqu hydropower station

REN Xiping

(Electricity Engineering Construction Company of Yellow River Water Company, Xining 810003, China)

Abstract: The stability analysis of surrounding rock in the tunnel process of construction is a very important research subject of engineering geology and rock mechanics. According to the theory of underground structure design and $\text{Druck} - \text{Prager}$ yield criterion of rock, Considering the bearing capacity of wall rock itself, the paper analyzed the stability of Yangqu hydropower station spillway tunnel in process of rock excavation construction by use of the method of nonlinear finite element. It also simulated the process of tunnel excavation construction and analyzed the displacement deformation and stress distribution of tunnel surrounding rock. The method can provide the basis for the stability analysis of surrounding rock and structure in the construction of tunnel excavation.

Key words: tunnel; stability analysis of surrounding rock; displacement deformation; stress distribution; finite element analysis

地下隧洞在开挖施工过程中产生围岩卸载和地应力的释放, 使应力重新分布而影响围岩的稳定性。隧洞施工过程中的围岩的稳定性分析是工程地质和岩体力学非常重要的研究课题, 对于不良地质洞段的隧洞开挖施工过程中及时的喷锚支护衬砌对隧洞围岩的稳定性起着重要的作用。本文通过有限元法选取羊曲水电站泄洪洞典型断面 $K0 + 124 \text{ m}$ 进行非线性有限元法, 模拟了隧洞在开挖支护施工过程中围岩的变形及应力分布规律, 为围岩和结构的稳定性分析提供依据。

1 工程概况

羊曲水电站是以发电为主的一等大(1)型水利枢纽, 电站装机容量 $1\,200 \text{ MW}$, 泄洪洞布置在左岸溢

洪道与导流洞之间, 洞身长 467.06 m , 开挖断面形式为圆形, 断面半径尺寸为 6 m 。洞身段围岩类型以Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类岩性为主, 本文选取不良地质洞段 $K0 + 124 \text{ m}$ 断面进行非线性有限元法分析, 其围岩类别为Ⅴ类围岩。喷混凝土初期挂网支护采用 C20 混凝土, 厚度 0.2 m , 锚杆布置上半圆内, Ⅴ类围岩断面共布置 7 根, 等距布置, 锚杆单根长 4.5 m , 直径 22 mm , 后期支护采用 C25 钢筋混凝土, 厚度 0.5 m 。

2 计算原理

2.1 有限元的基本原理

有限元法在现今的土木工程界得到了广泛的应用, 它的基本流程是首先把连续介质系统进行网格划分分隔成有限个单元, 使之能够在计算机上计算

大型且地质条件特别复杂的工程,这些问题很难用传统的方法进行计算分析,但是有限元法却很容易解决。在计算机技术飞速发展的当今世界,有限元法在不良地质洞段水工隧洞复杂的地质结构分析中广泛的应用。

2.2 钢筋混凝土结构的有限元模型

本文钢筋混凝土结构的有限元模型采用分离模型,离式模型是把混凝土和钢筋各自划分为足够的小单元作为不同的单元来处理,在平面问题中,混凝土和钢筋都可以划分为三角形或四边形单元,在实际工程的有限元计算中,由于钢筋是一种细长的材料,通常情况下可以忽略其横向抗剪强度,从而把钢筋作为线性单元来处理。通过这样处理,单元数目可以大大减少,且能够避免因钢筋单元划分太细而在钢筋和混凝土的交界处使用很多的过渡单元。

在分离式模型的有限元分析中,钢筋和混凝土之间能够插入联结单元,模拟钢筋和混凝土之间的粘结和位移,这是组合式或整体式有限元模型所不能办到的。当钢筋和混凝土之间的粘结很好且没有相对滑移时,这种情况下可视为刚性联结,这时也可以不用联结单元。分离式单元的刚度矩阵除了联结单元外,和一般的线性单元、平面单元或立体单元完全一样。

2.3 施工过程有限元计算与分析

隧道施工的连续性是利用 ANSYS 程序的荷载步功能进行模拟。在施加一个荷载步计算结束后不退出求解器,直接从模型上执行下一步的操作,如开挖、支护等。在整个操作过程到位后,继续进行求解计算,如此循环,直到整个施工过程结束。其中每一个荷载步都会对应着一个施工步骤,不良地质洞段水工隧洞开挖和支护的过程利用 ANSYS 程序提供的单元生死功能进行模拟。在计算模型中对需要开挖的部分选择并且将这一部分单元杀死 (KILL), ANSYS 程序就会用这部分单元的刚度矩阵乘以一个接近零的数 (ESTIF),并从总的质量矩阵中消去单元的质量。从而使死掉的单元的部分荷载为零,并且不能使荷载向量生效。在对毛洞进行支护时,先选择模型中衬砌结构相应的单元将其激活 (ALIVE),使其变为相应的水工隧洞衬砌结构的材料即可。激活的衬砌结构单元的刚度、质量、单元荷载等将恢复其原始数值,同时激活的这些单元没有应变记录以及有热量存储等,如果打开大变形选项 (NL GEOM)会使激活的单元自动修改自身几何性质(长度、积等),从而协调当前的位移变形。在不

良地质洞段的水工隧洞开挖过程中围岩荷载对应每一步操作(挖、支护等)释放多少很难给出一个定量的结论。

3 计算条件

3.1 计算模型

根据羊曲水电站泄洪洞围岩的物理力学性质,有限元模型的计算范围水平和垂直方向取洞径的 5 倍,在 ANSYS 有限元模拟计算中围岩和衬砌混凝土均采用符合 Drucker – Prager 屈服条件的 (D – P) 材料来模拟,围岩、喷射混凝土采用 ANSYS 程序中的 Plane42 加以模拟,对于锚杆采用 Link1 单元进行模拟,围岩单元总数 2 500,节点总数 4 512;钢筋混凝土衬砌结构的单元数 540,锚杆单元数 365。

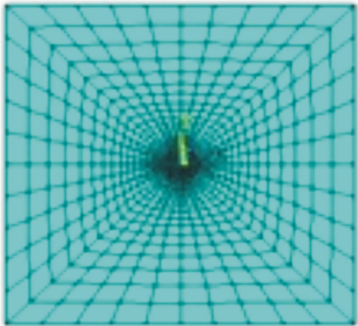


图1 计算模型

3.2 计算参数

有限元分析采用的计算参数如表 1 所示。

表 1 参数取值表				MPa, t/m ³ , (°)		
类型	弹性模量	泊松比	容重	凝聚力	摩擦角	膨胀角
V 类围岩	0.3×10^4	0.25	2.75	0.15	35	/
C20 混凝土	2.55×10^4	0.167	2.4	0.2	50	0.8
C25 混凝土	2.85×10^4	0.20	2.4	/	/	/
Φ22 锚杆	2.1×10^5	0.35	7.85	/	/	/

3.3 工况及荷载组合

羊曲水电站导流洞工程施工过程中的主要荷载包括岩体自重、洞内外水压力以及顶拱处的灌浆压力 0.35 MPa。洞外水压力从底板过水面算起高 1 m,本文的计算分毛洞、初期支护、二次支护 3 种工况进行,各工况下的荷载组合为:初始自重应力场 + 地下水压力(0.01 MPa) + 开挖荷载。

4 计算结果及分析

围岩和衬砌采用实体单元,本构模型采用非线性 D – P 模型。围岩与衬砌之间设置面 – 面接触,

采用 TARGE169 和 CONTA171 单元模拟接触对,视围岩面为目标面是刚性的,衬砌面作为接触面是柔性的,构成刚体 - 柔体的接触。锚杆与衬砌和围岩之间设置点 - 面接触,采用 TARGE169 和 CONTA175 模拟接触单元,钢筋与衬砌砼之间设置点 - 面接触,采用 TARGE169 和 CONTA175 单元模拟接触单元。钢筋网与衬砌混凝土采用分离式模型。开

挖支护施工过程中各工况下的应力和位移值见表 2。

表 2 开挖支护过程中应力和位移值							mm, MPa
工况	X 向	Y 向	顶拱塑	侧向塑	径向	切向	
	位移	位移	性高度	性宽度	应力	应力	
毛洞	0.026	0.209	0	0.576	-2.231	1.320	
初期支护	0.019	0.174	0	0.399	-2.228	1.051	
二次支护工况	0.017	0.145	0	0.339	-2.224	0.872	

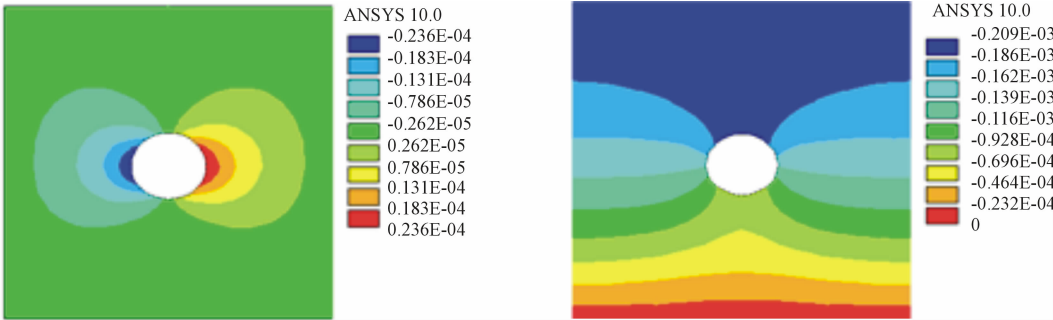


图 2 开挖后围岩 X、Y 向位移 (m)

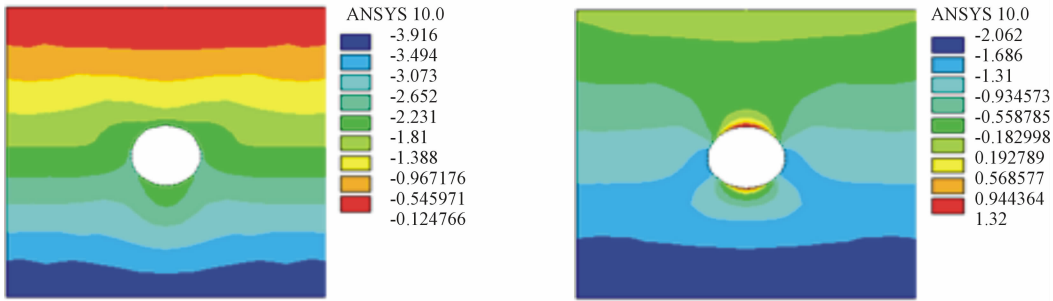


图 3 开挖后围岩径向、切向正应力 (MPa)

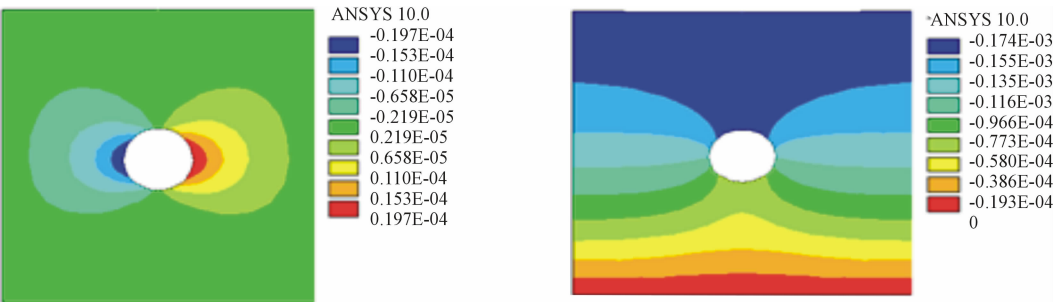


图 4 初期支护后围岩 X、Y 向位移 (m)

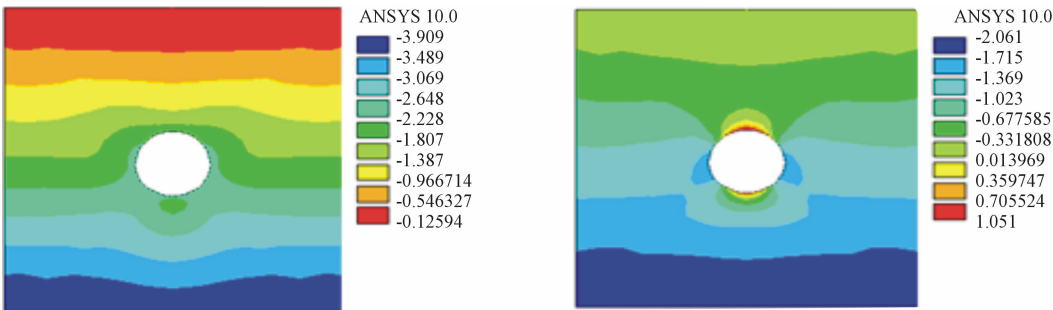


图 5 初期支护后围岩径向、切向正应力 (MPa)

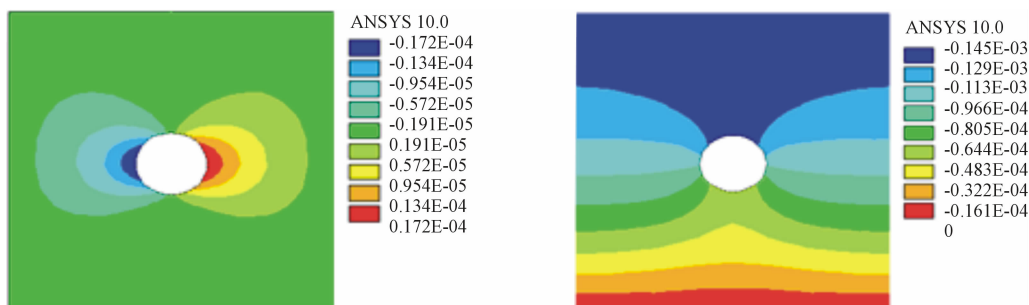


图6 二次支护后围岩 X、Y 向位移(m)

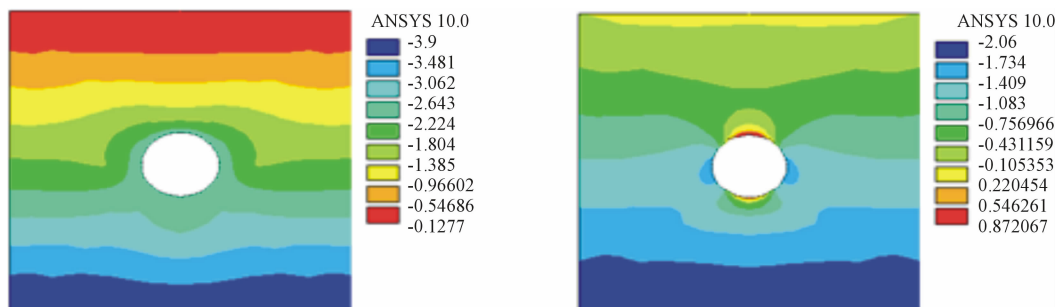


图7 二次支护后围岩径向、切向正应力(MPa)

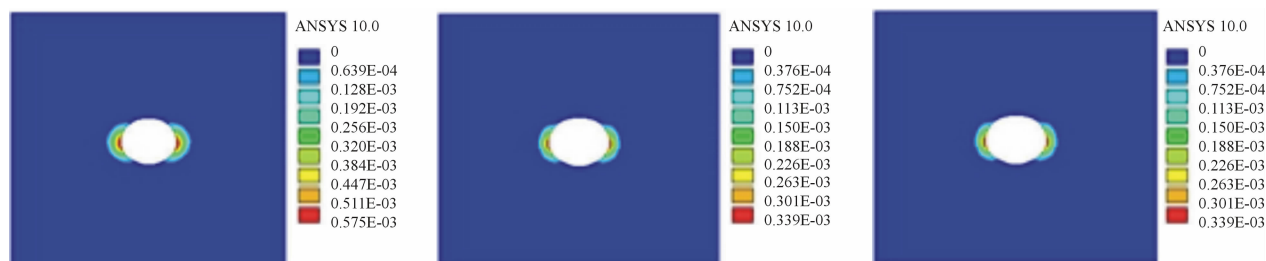


图8 开挖、初期支护后围的塑性变形(mm)

结果分析:

(1)位移分析:由图2、4、6可知,开挖后的瞬间洞周围岩侧墙X向和顶拱Y向的最大位移变形分别是0.026 mm和0.209 mm;初期挂网喷混凝土加锚杆衬砌支护后洞周的侧墙X向和顶拱Y向的最大位移变形分别是0.019 mm和0.174 mm;二次钢筋混凝土衬砌支护后围岩侧墙X向和顶拱Y向的最大位移变形分别是0.017 mm和0.145 mm。可以看出二次钢筋混凝土衬砌支护后洞周围岩的沉降量逐渐减小,侧墙的位移因此也减小。

(2)应力分析:由图3、5、7可知,开挖后的瞬间洞周围岩的最大径向压应力分布在侧向中心位置以下 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 范围内其值为0.057 MPa,切向拉应力分布在顶拱中心位置 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 范围内其值为0.132 MPa;初期挂网喷混凝土加锚杆衬砌、二次钢筋混凝土衬砌支护后的最大径向应力分别是2.228 MPa和2.224 MPa,最大切向应力为1.051 MPa和0.872

MPa,其分布范围与开挖后应力大小相比有所减小。隧洞周围围岩应力已压应力为主,拉应力主要分布在洞的拱脚区域,洞底局部产生拉应力。

(3)塑性分析:由图8可知,施工过程中开挖和衬砌后顶拱塑性高度都是0 mm,而开挖、初期挂网喷混凝土加锚杆衬砌、二次钢筋混凝土衬砌支护后侧向塑性变形分别是0.575、0.399、0.339 mm。说明衬砌支护后洞周的侧向塑性宽度变小。

对C25的衬砌混凝土,其轴心抗拉强度为1.75 MPa。根据《水工隧洞设计规范》(SL279-2004)的规定,对于Ⅲ级隧洞,基本荷载组合工况下取衬砌混凝土的抗拉安全系数的1.8,可以推算衬砌混凝土的容许拉应力为0.972 MPa。因此,本计算剖面衬砌混凝土的应力未超过其容许拉应力。

(4)本计算剖面的围岩稳定,现有支护参数能保证施工安全。

(下转第218页)

而造成回灌能力的减小,但当加压回灌所施加压力达到一定程度时,将打通回灌通道,提高回灌能力;

(2)此次回灌用水为地下潜水,由于回灌水的温度与热储层的温度不同,从而导致热水中的化学成分发生变化,在冷水和热水或热储层接触处生成一些新的物质,导致热储层的生物堵塞和化学堵塞,同时回灌水水中的某些溶解物质也能使含水介质发生水岩作用,产生堵塞。

上述原因会导致局部热储层的阻塞和渗透性的降低。因此回灌时会在回灌井周围产生一个低渗透带,该地带成圆柱状包围在回灌井外面,渗透系数比原来的渗透系数显著变小,且不是常量。在时间上表现为,随回灌时间的推移,同一位置处的阻塞程度越来越大,渗透系数值越小;在空间上表现为随着距井轴而变化,距井轴越近,阻塞程度越大,渗透系数值越小,如图 11 所示。

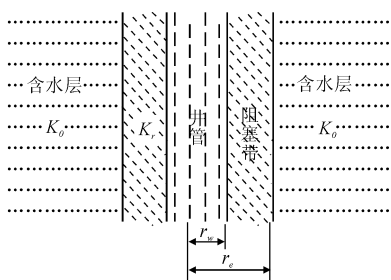


图 11 回灌井周围阻塞模式图

根据此次加压回灌试验结果表明,回灌时施加压力会减缓堵塞造成的回灌能力的降低,且压力越

大,回灌能力的提高幅度越大,即通过施加压力可以打通回灌通道、提高渗透率,增加回灌量。

3 结 语

(1)加压回灌可以有效提高回灌能力,大幅增加回灌量,为切实解决地热水回灌量小的问题提供了有效途径。

(2)回灌过程中所施加压力越大,单位回灌量也就越大,说明加压回灌在一定程度上可以疏通渗流通道,提高回灌(渗水)能力。

(3)回灌过程中当回灌井内全部充满水后,回灌压力逐渐稳定,地热水稳定渗流场逐渐形成,瞬时回灌量趋于相对稳定,但随着回灌时间的延长,回灌井周围会产生物理阻塞和化学阻塞,回灌能力缓慢降低,停灌回扬或提高回灌压力,可减少回灌井管及周围热储的物理化学阻塞,提高回灌能力。

参考文献:

- [1] 王 兴. 渭河盆地地热资源赋存与开发[M]. 西安:陕西科技出版社,2005.
- [2] 何满潮,刘 斌,姚磊华,等. 地热水对井回灌渗流场理论研究[J]. 中国矿业大学学报. 2004,33(3):245-248.
- [3] 周世海,杨询昌,梁 伟,等. 德州市城区地热水人工回灌试验研究[J]. 山东国土资源. 2007,23(9):11-14.
- [4] 贾旭兵. 关中盆地地下热水的可更新性与回灌问题研究[D]. 西安:长安大学. 2009.
- [5] 蔡义汉. 地热直接利用[M]. 天津:天津大学出版社,2004.

(上接第 214 页)

4 结 语

有限元方法考虑围岩和衬砌材料的非线性及衬砌结构与围岩联合承载作用,模拟隧洞的开挖施工过程,能方便地模拟隧洞开挖支护各阶段施工过程中围岩的应力场、位移场,定量的分析围岩隧洞的稳定性,对支护结构进行优化设计,其成果可作为设计和施工时参考。

参考文献:

- [1] 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院. 黄河羊曲水电站工程施工规划设计报告[R]. 西安:中国水电顾问集

团西北勘测设计研究院,2011.

- [2] 吴家冠,段亚辉. 江坪河水电站溢洪洞围岩稳定性仿真分析[J],岩土力学,2009,30(8):2431-2435+2441.
- [3] 樊有望,徐光黎,吴张中. 基于 Mohr-Coulomb 准则的排水隧洞围岩稳定性有限元分析[J]. 探讨与分析,2008,12(1):34-36.
- [4] 张 波,盛和太. ANSYS 有限元数值分析原理与工程应用[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [5] 吕西林,金国芳,吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
- [6] 中华人民共和国国家电力行业标准. DL/T5195-2004 水工隧洞设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2004.