

深埋断层节理段导流隧洞围岩稳定性分析

刘 强, 吴文兵, 段隆臣

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:西南某水电站导流隧洞 K1 + 350 ~ 400 桩号发育 F_{13} 断层等多条节理, 埋深大, 地应力较高, 地质条件复杂。运用三维离散单元软件 3DEC 对其进行数值模拟, 并结合现场监测数据对其围岩稳定性进行分析。结果表明, 该段围岩稳定性主要受结构面控制, F_{13} 断层下盘右拱肩掉块较多, 位移较大, 支护后导流隧洞围岩稳定性得到加强, 支护效果较好。

关键词:导流隧洞; 断层; 开挖支护; 围岩稳定; 3DEC

中图分类号:TV554 **文献标识码:**A **文章编号:**1672 - 7428(2014)11 - 0077 - 04

Analysis on Surrounding Rock Stability of Diversion Tunnel in Joint Section of Deep-buried Fault/LIU Qiang, WU Wen-bing, DUAN Long-chen (Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Multiple joints such as fault F_{13} developed in K1 + 350 ~ 400 of a diversion tunnel of hydropower station in the southwest, which was deep-buried with high crustal stress and complex geological conditions. Using three-dimensional discrete element software 3DEC, the numerical simulation on the diversion tunnel is conducted combining with field monitoring data to analyze the stability of surrounding rock. The results show that the stability of surrounding rock is mainly controlled by the structural plane. There are many fall-blocks at the lower right spandrel with larger displacement. After being supported, the surrounding rock stability of the diversion tunnel is strengthened.

Key words: diversion tunnel; fault; excavation and support; stability of surrounding rock; 3DEC

0 引言

断层等复杂地质条件对特大断面导流洞的稳定性影响相当大。在隧洞稳定性分析中, 比较常用数值方法有: 有限差分法、有限元法、离散单元法等。对岩体较完整的地下工程采用有限差分法和有限单元法均可达到较精确的结果, 但对复杂结构面的地下工程则常采用离散元法^[1]。黄志鹏等^[2]通过离散单元法模拟节理对导流隧洞塌方的影响; 刘刚等^[3]通过模型试验研究了节理密度对围岩破坏和变形的影响; 梁自强等^[4]对导流隧洞考虑节理岩体进行了离散元分析; 王振等^[5]对深埋节理岩体隧洞围岩稳定性进行离散元分析; 赵景彭等^[6]分析了节理倾角对层状岩体大断面隧道的稳定性影响。对于地下洞室群的围岩稳定也经常采用离散元分析; 向欣^[7]等采用工程地质分析与离散元软件 3DEC 相结合的方法, 探讨了圆筒形尾调室围岩应力集中范围、程度和高应力破坏风险等情况; 荣冠^[8]应用 3DEC 软件对彭水地下厂房开挖支护全过程进行了分析, 得出其围岩稳定主要受层面、软弱夹层及贯通节理特性及其切割块体在开挖临空面的位置控制。

本文以西南某水电站为例, 在基本工程地质条

件的基础上, 采用 ITASCA 公司开发的 3DEC 离散元软件模拟导流隧洞开挖和支护过程, 结合施工过程中的监测资料, 分析隧洞围岩变形及稳定性情况和支护效果。在此基础上, 评价影响该段导流隧洞围岩稳定性的主要地质及工程因素, 为类似工程的设计及施工提供参考, 为离散元方法在特大导流隧洞稳定性分析中的应用积累经验。

1 工程概况

西南某水电站 3 号导流洞断面采用城门洞形, 断面尺寸 17.5 m × 22.0 m (宽 × 高), 洞身长 1791.32 m, 进、出口底板高程分别为 585.00 和 574.00 m。在 K1 + 520 ~ 600 桩号有断层 F_{13} 出露, 洞身方向为 $N43^\circ E$ 垂直埋深 276 ~ 283 m, 水平埋深 300 m。 F_{13} 断层出露洞段为 $P^2\beta_{23}$ 层(含)杏仁状玄武岩, 岩体呈微新、无卸荷状态。 F_{13} 断层产状 $N63^\circ W, SW \angle 70^\circ \sim 85^\circ$, 主带宽 20 ~ 30 cm, 带内为蚀变的构造角砾岩, 局部见 1 ~ 2 cm 岩屑夹泥条带, 断层上盘影响带宽 80 ~ 90 cm, 下盘影响带宽 40 ~ 50 cm, 影响带内为节理化构造岩。 F_{13} 断层影响带范围呈碎裂结构, 为 IV 类围岩, 其余洞段围岩呈次块状结

收稿日期: 2014 - 05 - 19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51309207); 中国博士后科学基金特别资助项目(2013T60759)

作者简介: 刘强(1988 -), 男(汉族), 江西人, 中国地质大学(武汉)硕士研究生, 地质工程专业, 主要从事基础工程方面的研究工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号, 635621689@qq.com。

构,属Ⅲ₁类围岩。根据地应力测试成果及数值模拟分析,研究部位属于中等~高应力区,最大主应力大小为 14.2~22.4 MPa,方向为 136°,近水平,隧洞轴

线与最大主应力近垂直,夹角为 70°~90°,且地应力值高,地应力状态差,极易产生岩爆及片帮,对围岩稳定影响大。该段工程地质剖面见图 1。

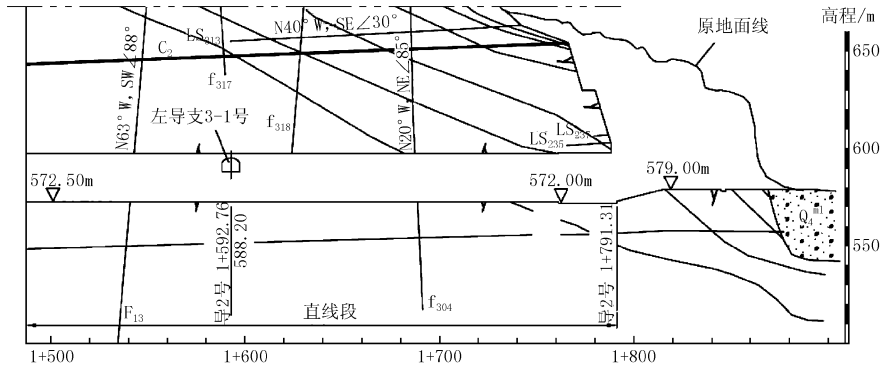


图 1 工程地质剖面图

2 离散元模型和计算参数

2.1 离散单元法与 3DEC 软件

地下工程实践已经揭示了工程围岩破坏可以概括地分为 2 大类:一类是应力控制型破坏;另一类是结构面控制型破坏。二者各有其发生条件,但 2 种破坏类型是具有耦合性和转化性的^[9]。对于深埋节理断层段,地应力较高,结构面软弱,各结构面的互相切割可以产生块体。随着隧洞的开挖,围岩应力的重新调整,这些块体可以塌落,或者沿着开挖面滑落。这些开挖引起的稳定性分析,很大程度上依赖于对优势的节理组的正确认识。

离散单元法是 Cundall P. A. 于 1971 年提出来的,其主要用于研究岩体类非连续介质的变形及稳定性等问题。离散元方法可对由不同块体构成的整体进行应力、应变及运动的分析计算。不同块体之间通过接触互相连接在一起。块体之间的相互作用力根据位移和力的关系式来求解,单个块体的运动根据该块体所受的不平衡力或不平衡力矩按牛顿运动定律确定。块体之间不存在变形协调约束,只需

满足物理方程和运动方程。离散元在计算块体间变形的同时,可在块体内部进行差分网格,采用连续介质本构关系计算块体内部的变形及应力等。

3DEC 是一款基于离散单元法作为基本理论以描述离散介质力学行为的三维计算分析软件,能很好地结合离散单元法和节理网络的模拟,为我们进行块体识别和稳定分析提供了很好的基础。内嵌于 3DEC 程序中的 FISH 语言能极大地方便用户进行复杂的建模、计算以及二次开发等操作。本文建模及锚杆支护就是采用 FISH 语言编写的,能大大方便模拟的真实性和准确性。是目前解决岩土工程中不连续问题的较为成熟的软件。

2.2 计算参数

根据地质情况,模拟计算范围以洞室断面拱肩水平线和垂直中心线交点为坐标原点,边界范围为 120 m(长)×80 m(宽)×120 m(高)。根据现场地质情况,考虑两组主要节理和断层带:第一组节理 J1, N45°W, SW ∠ 85°,节理间距 6 m;第二组节理 J2, N30°E, SE ∠ 10°,节理间距 4 m;断层带 F₁₃, N63°W, SW ∠ 70°。岩体和结构面参数见表 1。

表 1 岩体力学参数^[10]

参数	密度 ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	体积模量 K /GPa	剪切模量 G /GPa	泊松比 μ	内摩擦角 ψ /(°)	抗拉强度 σ_t /MPa	粘聚力 c /MPa	法向刚度 K_n /($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	剪切刚度 K_s /($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)
玄武岩	2800	28.6	20.5	0.22	45	0.5	1.5		
节理 J1					38	0.3	0.7	10.80	9.2
节理 J2					35	0.4	0.8	10.20	8.6
断层 F ₁₃					26	0	0.04	0.14	0.05

岩体材料采用理想弹塑性模型,屈服准则为 Mohr - Coulomb 强度准则,断层节理采用弹性模型,屈服准则为库仑滑动准则。模型底部边界限制垂直位移,四侧边界限制水平位移。根据现场试验和计

算选取, X 方向地应力为 13.1 MPa, Y 方向地应力为 8.9 MPa, Z 方向地应力为 3.7 MPa。其计算及支护模型见图 2。

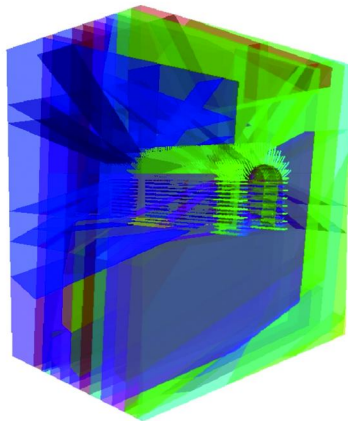


图2 计算支护模型

3 计算结果及分析

3.1 隧洞开挖后静力响应分析

导流隧洞开挖后,并受到节理和断层的影响,隧洞的应力会重新调整,位移也会发生明显变化。先仅对导流隧洞开挖进行模拟,隧洞围岩位移云图见图3。由图可知在断层 F₁₃ 下盘,顶拱位移最大,底板受明显挤压上翘,在缓倾角节理的切割下,右拱肩部位掉块明显,边墙中部受节理影响水平位移较大。开挖后应及时清除松动岩块,加密锚杆,并上钢拱架,进行挂网处理,保证施工安全。

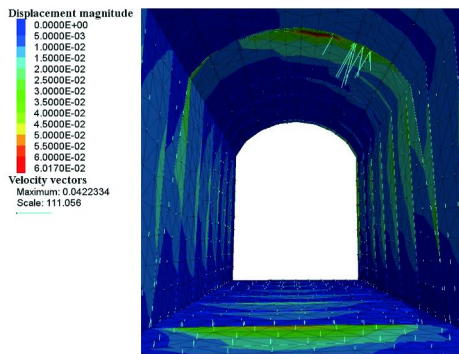


图3 支护前位移云图

图4是导流隧洞开挖未支护的围岩塑性区分布情况。图中显示的主要是岩石的塑性状态,浅色表示先前已处于剪切或拉裂屈服状态,深色表示当前进入塑性状态。可以发现先前已处于剪切或拉裂屈服状态的地方多受节理控制;断层出露的顶拱附近,还不同程度地存在当前拉裂或剪切屈服区,范围比较大。根据现场施工反映该段掉块严重,岩体呈碎裂结构。可见断层 F₁₃ 是影响该段导流隧洞围岩稳定的最重要因素。

3.2 隧洞支护后模拟结果和监测结果

根据设计资料,导流隧洞喷锚支护方案如下:

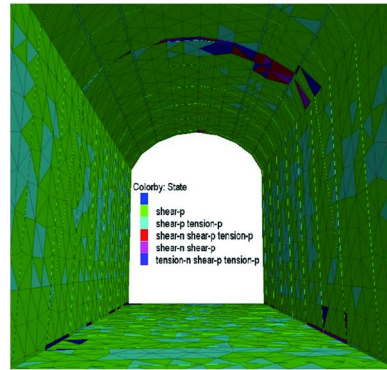


图4 支护前塑性区分布图

初喷 28 mm 厚 C25 混凝土;顶拱采用 9 m 长 Ø32 mm 预应力锚杆与 6 m 长 Ø28 mm 砂浆锚杆,每隔 1.2 m 交替布置;拱角分别布置 4 根 9 m 长 Ø32 mm 砂浆锚杆;边墙采用 6 m 长 Ø28 mm 砂浆锚杆与 4.5 m 长 Ø25 mm 砂浆锚杆间隔 1.2 m 交替对称布置。钢拱架布置在断层出露的部位,顶拱采用 Ø6.5 mm 挂网钢筋。

根据模拟结果和现场情况,在桩号 K1 + 575 的拱顶和边墙中部布置三点式位移计和锚杆应力计用来监测断层 F₁₃ 对导流隧洞围岩稳定性的影响。对导流隧洞进行分层开挖支护模拟,采用数值计算结果和监测结果进行对比分析。表2为导流隧洞开挖支护后稳定时的实测位移与计算位移的对比,由于位移监测的滞后性及多点位移计监测的相对性,计算值比实测值有所偏大,这符合实际规律,总体上说明了本文的模型及参数选择合适,计算结果可信。从数据上看导流隧洞顶拱和边墙位移处于合理范围,围岩变形较小。

表2 实测与模拟结果对比

监测部位	实测值/mm	计算值/mm	
顶拱	孔口位移	6.5	8.2
	距孔口 2 m	5.7	8.1
	距孔口 9 m	2.2	6.4
右边墙	孔口位移	4.7	6.1
	距孔口 2 m	4.2	6.0
	距孔口 9 m	1.6	3.9

图5为现场锚杆应力的监测数据。以上监测结果表明,在隧洞分层开挖的过程中,在不同的测点,围岩应力有一定的变化,但随着时间的推移,应力值变化很小并趋于稳定,各部位的应力值都不大,反映出该段导流隧洞围岩稳定。右边墙的应力比左边墙的应力略微偏大,可见断层不仅与节理切割影响块体的稳定,还对应力分布产生一定的影响。

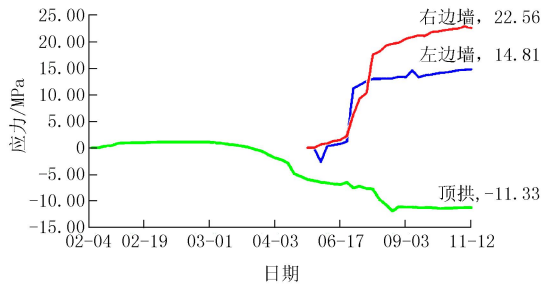


图5 锚杆监测数据曲线

图6为支护后的塑性区分布图。由图可以看出,支护后导流隧洞整体处于弹性状态,对比未支护时塑性区明显减少,仅断层拱顶处和左边墙局部小块体处于剪切状态,因为数值模拟过程中未考虑钢拱架和挂网等的效果。综合考虑,可见支护方案比较合理。

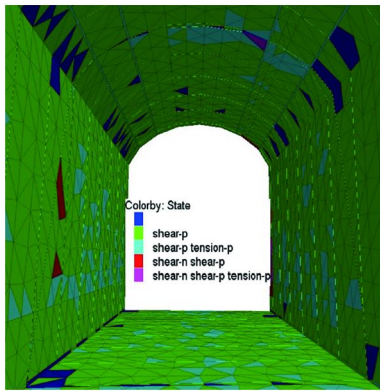


图6 支护后塑性区分布图

于现场实测资料的研究分析得出:

(1)在对导流隧洞开挖静力响应分析过程中,发现断层下盘顶拱位移最大,底板垂直位移明显,在断层和缓倾角节理的切割下,右拱肩掉块较多,断层带塑性区范围较大。可见该段围岩稳定性主要受断层结构面的影响。

(2)对导流隧洞进行分层开挖支护模拟,结合现场监测资料,发现模拟结果和监测结果比较接近,模型及参数选择合适,计算结果可信。

(3)通过现场监测和数值分析,发现围岩变形较小,锚杆应力变化不大,开挖支护后趋于稳定,支护后塑性区明显减少。支护效果较好。

参考文献:

- [1] 王泳嘉,邢纪波. 离散元法及其在岩土力学中的应用[M]. 辽宁沈阳:东北工学院出版社,1991.
- [2] 黄志鹏,周洪波,周江平. 复杂地质条件下导流洞塌方的离散元法模拟研究[J]. 土木建筑与环境工程,2012,34(6):58-61.
- [3] 刘刚,赵坚,宋宏伟,等. 节理密度对围岩变形及破坏影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(11):1737-1741.
- [4] 梁自强,邓稀肥,陈寿根. 偏桥水电站引水隧洞施工全过程离散单元法仿真模拟研究[J]. 隧道建设,2009,29(1):45-49.
- [5] 王振,韩春,贾超,等. 深埋节理岩体隧洞开挖与支护的3DEC模拟[J]. 水电能源科学,2013,31(6):150-152.
- [6] 赵景彭. 节理倾角对层状岩体大断面隧道稳定性研究[J]. 隧道建设,2011,(9):58-61.
- [7] 向欣,王义锋,孟国涛,等. 大跨度地下洞室顶拱稳定性及支护措施研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(9):3643-3649.
- [8] 荣冠. 彭水地下电站围岩稳定性分析[J]. 岩土力学,2007,28(10):479-484.
- [9] 王涛,陈晓玲,于利宏. 地下洞室群围岩稳定的离散元计算[J]. 岩土力学,2005,26(12):1936-1940.
- [10] 刘佑荣,唐辉明. 岩石力学[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社,1999.

4 结论

通过采用3DEC软件对西南某水电站导流隧洞深埋断层节理段进行开挖和支护数值模拟分析和基

“南海九号”深水首秀:首口千米水深井成功完钻

新华网消息(2014-11-06) 5日,记者从中国海洋石油总公司获悉,“南海九号”承钻的首口千米水深井在我国南海顺利完钻,“南海九号”也成为继“海洋石油981”后第二个成功进入“千米水深钻探俱乐部”的钻井平台。

“南海九号”深水首秀成功,标志着我国深水钻井迈上一个新的台阶,深水钻井技术、装备梯队建设进一步完善,这为将来深水大规模勘探、开发奠定了坚实的基础。

此次完钻的陵水25-1-1井作业水深975m,完钻深度3930m,位于琼东南盆地深水区的陵水凹陷东部,距附近的崖城气田34km。该井不仅为“南海九号”作业的第一口深水井,也是中国海油采用锚泊式定位方式进行钻井作业的水深最深的一口井。

据了解,“南海九号”是除“海洋石油981”外,中国海油作业水深最大的半潜式钻井平台,属于第四代钻井平台,设计作业水深1524m,最大钻井深度7620m。此次锚泊定位作业面

临诸多挑战,“一分深、一分险”是深水钻井的一个重要特征。

中国海油南海九号钻井平台负责人告诉记者,为了确保深水“首秀”成功,中国海油锚泊定位专家与平台方面密切配合、精心操作,在严控风险的前提下采用多条拖轮同时抛锚的方式,最终安全顺利实现了平台的精确定位。

“8个单重为18t的锚头带着钢缆,被分别投放在距平台平均3000m的位置上,像‘八爪章鱼’般紧扣海底以维持平台稳定。与此同时,每条‘章鱼触须’都维持着130t的拉力。如果将八个方向上的锚头连起来,所覆盖的面积近30km²,相当于4200个标准足球场的总面积。”中国海油南海九号钻井平台总监吴志明说。

此次钻井作业由中国海油控股的中海油田服务股份有限公司完成。中海油服CEO兼总裁李勇表示,今后公司将按照建设国际一流的战略定位,持续加大深水装备能力建设和科技研发投入,为我国开发深水油气资源提供坚实保障。